

발 간 등 록 번 호

11-1543000-000779-01

**농림수산식품 기후변화 영향분석 및
영향평가 모델 구축**

(Impact Analysis of Climate Change of Agriculture,
Forestry, Fisheries and Food Sectors and
Establishing Model of Impact Assessment)

한국농촌경제연구원

농림축산식품부

제 출 문

농림축산식품부장관 귀하

본 보고서를 「농림수산물 기후변화 영향 분석 및 영향평가 모델 구축」의 최종연구보고서로 제출합니다.

2015년 2월

주관연구기관명 : 한국농촌경제연구원
주관연구책임자 : 김창길 선임연구위원
연 구 원 : 정학균, 이상민, 김종진, 문동현, 이문수, 박단비
협동연구기관명 : 전남대학교
협동연구책임자 : 김한용 교수
연 구 원 : 고종한, 조승현, 김미정, 최진실, 서성찬
협동연구기관명 : 고려대학교
협동연구책임자 : 이우균 교수
연 구 원 : 김문일, 윤미해, 유소민, 최솔이
협동연구기관명 : 한국해양수산개발원
협동연구책임자 : 정명생 연구위원
연 구 원 : 김봉태, 임경희, 이상건
협동연구기관명 : 한국보건사회연구원
협동연구책임자 : 김정선 연구위원
연 구 원 : 정진욱, 원종욱, 윤시몬, 조주연, 이서희
협동연구기관명 : 동국대학교
협동연구책임자 : 이영섭 교수
연 구 원 : 박주현, 김주성, 신덕하, 배규용

요 약

I. 제 목

농림수산물식품 기후변화 영향분석 및 영향평가 모델 구축

II. 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구개발의 목적

이 연구의 목적은 분야별 연구 성과의 과학적 분석을 통해 각 영향을 체계적으로 평가하고, 기후변화 대응 연구의 종합적인 비전과 연구개발 로드맵과 전략을 제시하는 데 있다. 특히 분야별 전문가 설문조사를 기초로 대안별 우선순위와 설득력 있고 실효성 있는 기술개발 전략을 제시토록 한다. 보다 구체적인 연구목표는 기후변화에 따른 경제적 영향분석 모형의 비교 및 최적 모형 선택, 신 기후변화 시나리오에 따른 농림수산물식품부문의 경제적 영향 분석, 신 기후변화 시나리오에 따른 농림수산물식품 부문의 취약성 평가, 경제적 영향 및 취약성 평가 결과를 바탕으로 기후변화 대응전략 수립 등을 담고 있다.

2. 연구개발의 필요성

기상청(2012)은 ‘한반도 미래기후변화 전망보고서’에서 21세기 후반(2071~2100) 한반도 기온은 현재(1981~2010) 보다 5.7℃ 상승하며 폭염과 열대야 등 기후관련 극한지수도 크게 악화될 것으로 전망하고 있다. 기후변화가 농업부문에 미치는 파급 영향은 다양한 데, 우선 기후변화가 농축산부문에 미치는 영향으로 작물의 개화·출수 등 생물학적 변화와 품질변화, 재배적지 이동 등을 들 수 있다. 기후변화는 농업 생태계에도 영향을 미쳐 병해충 발생과 개체군의 이동 및 생물다양성에 영향을 준다. 또한 축산부문에는 수정과 산란 등 생물학적 변화와 목초생산에 영향을 미친다.

기후변화에 효과적으로 대응하기 위해 농림수산물식품분야의 기후변화 영향분석에 관한 체계적이고 종합적인 연구가 필요하다. 우리나라의 경우 농림수산물식품 분야를 총괄하여 기후변화 영향, 특히 경제적 영향분석을 종합하고 향후 기술개발 전략을 제시하는 체계적인 연구가 미약하다. 기후변화에 보다 효과적이고 체계적으로 대응하기 위해 기후변화 영향분석에 관한 연구를 종합적으로 진단하고 평가하여 보다 신

뢰성 있고 적합한 분석모형 구축과 분야별 기술개발 전략을 도출하는 종합적인 연구 수행이 필요하다.

Ⅲ. 연구개발 내용 및 범위

1. 연구개발 내용

구 분	연구개발 내용
국내외 농림수산물식품 분야의 기후변화 영향평가 모델비교와 최적 모형 선정 및 적용	<ul style="list-style-type: none"> • 정책, 산업, 사회경제, 기술 기반 등 여건변화를 반영한 기후변화 영향분석 모형의 비교 분석 • 영향분석 최적모형을 활용한 농림수산물식품분야 기후변화 영향분석 모형(안) 제시 • 대표농도경로(RCP) 기반의 신 기후변화 시나리오에 따른 농림수산물식품분야 기후변화 영향 분석과 시사점 도출
기후변화에 따른 농수산물식품분야 영향 프로세스 분석	<ul style="list-style-type: none"> • 농림수산물식품 분야의 국내외 기후변화 영향분석 연구성과에 대한 DB 구축과 이를 기초로 데이터 마이닝 기반 정성적 분석을 통해 연구결과의 종합평가와 기술개발 전략 도출 • 국내 농림수산물식품분야 기후변화 대응 취약성 평가지표 개발 등 모니터링 체계 분석
신 기후변화 시나리오에 따른 농림수산물식품분야 대응 전략 수립	<ul style="list-style-type: none"> • 국가 총괄 및 분야별 정책방향과 목표, 목표값, 목표달성도 제시 • 기존 기후변화와 신 기후변화 비교분석 및 결과를 활용한 시나리오 및 대응전략 수립 필요 • 아열대성 기후로 변화 여부 판단 및 변화를 고려하여 중장기적인 관점에서 연구결과 제시 • RCP 기반 신 기후변화 시나리오하의 기후변화 영향분석 모델링 및 데이터 마이닝 결과를 활용한 기후변화 적응 정책 및 기술개발 전략 제시 • RCP 기반 신 기후변화 시나리오별 농업부문의 생산량 예측과 식량수급 분석, 농림수산물식품 산업에 미치는 영향분석, 관련정책 분석 등을 기초로 농림수산물식품 분야별 기후변화 적응 시나리오 개발 • 미래 기후변화에 대응한 핵심 적응 기술개발 및 단계별 정책추진 로드맵 제시

2. 연구개발 범위

이 연구는 농업, 산림, 수산, 식품 분야로 그 범위를 한정하였으며, 농업분야의 경

우 최근 구제역, AI 등 가축질병이 빈번해지고 기온 스트레스의 축산 생산량에 미치는 영향 등을 고려하여 축산부문을 포함하여 연구하였다. 또, 기후변화가 가속화에 됨에 따라 우리나라가 향후 물 부족 국가가 될 가능성도 배제할 수 없는 상황이므로 수자원 부문도 연구 범위에 포함시켰다. 뿐만 아니라 기상과 농작물 생산 및 유통과의 관계가 매우 밀접하다는 점을 고려하여 이와 관련된 실증적 분석결과를 제시하고자 농업기상이 포함되었다.

이 연구는 주로 농업분야를 대상으로 기후변화의 경제적인 영향평가를 연구에 포함시켰다. 그래서 생산성에 미치는 영향뿐만 아니라 재배면적, 생산량, 수출입량, 자급률에 미치는 영향까지 계측하였다. 그리고 지금까지 기후변화 연구에서 거의 시도되지 않은 데이터 마이닝 기법을 적용하여 기후변화가 농림수산식품분야에 미치는 영향을 계측한 기존의 선행연구들로부터 유의미한 결과를 도출하였다.

IV. 연구개발결과

기후변화가 식량공급에 미치는 영향을 모의실험하여 분석한 결과, RCP 8.5 기후변화 시나리오 상에서 생산량은 베이스라인에 비해 2050년에 26.1%p 더 감소하는 것으로 나타났다. 또, 쌀 자급률은 29.5%p 더 감소한 47.3%로 식량안보 문제가 발생할 것으로 전망된다. 이상기상이 쌀단수에 미치는 영향을 분석한 결과, 이상고온과 이상다우 현상이 동시에 발생할 경우 쌀 단수는 8.8~20.8% 감소하는 것으로 분석되었다. 리카디언 모델 분석 결과, 평균온도 변화에 대해서 논 및 밭의 가격이 각각 7%, 11% 정도 하락하는 것으로 나타났다. 농업부문의 작물생육모델 분석 결과, RCP 8.5 기후변화 시나리오 상에서 운광벼 품종의 경우 베이스라인(598.4kg/10a)에 비해 2065년에 4.0% 감소하는 것으로 전망되었다. 기후변화가 산림생장에 미치는 영향을 분석한 결과, 2050년 기준으로 평균적으로 ha당 -5.35m³의 재적 감소가 있을 것으로 추정되었다. 우리나라 식중독(장염) 발생을 예측 결과, 24.3℃ 이후 기온 1℃ 상승에 5.7건이 증가하는 것으로 나타났다.

국내산 열대/아열대 작목(망고) 소비의향 요인을 분석한 결과, 소득, 기온상승 인지, 안전성 수준 인식, 가격대비 품질만족도 인식 등이 소비의향에 유의한 양의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또, 우리나라 시군을 대상으로 기후변화에 따른 농업부문의 취약성을 평가한 결과, 제주시, 남양주시, 서귀포시, 천안시, 진주시 등이 취약성이 높은 것으로 나타났다. 이들 지역은 민감도가 매우 높거나 적응능력이 크게 낮은 지역들이다. 따라서 이들 지역을 중심으로 경제적 능력과 거버넌스를 보완하고

지역의 높은 기후노출과 민감도를 반영한 농업부문의 기후변화 대책을 수립할 필요가 있다. 산림부문의 취약성을 평가한 결과, 2050년 기준 기후변화 취약이 심각한 지역으로 남해안과 동해안인 것으로 나타났다. 또 수산부문의 취약성 평가 결과, 지역별로는 경남, 경북, 부산, 전남, 강원 등 동남해권이, 연근해 업종별로는 장어통발, 기선권현망 등이 취약성이 높은 것으로 분석되었다. 기후변화가 국내 쌀 생산량에 미치는 영향을 메타분석 방법론을 적용하여 분석한 결과, RCP 시나리오상 6.0이 쌀 생산량에 영향을 미치며, 적응방안 중 품종 변경보다 파종 시기 변경이 보다 효과적인 방안으로 분석되었다.

기후변화 적응 기술개발의 우선순위 결정을 위한 AHP 분석결과, 영향평가의 경우 ‘기상재해 발생 모니터링 및 농림수산식품 기상재해 DB 구축’이 가장 높게 계측되었다. 적응기술의 경우 ‘농림수산 돌발병해충 및 질병 조기진단 기술 개발’이, 피해방지 및 기반구축의 경우 ‘이상기상(폭염, 강풍, 폭설, 가뭄 등) 조기경보시스템 구축’이 가장 높게 계측되었다.

V. 연구성과 및 성과활용 계획

이 연구는 논문 12편 학술발표 18편의 성과를 도출하였고, 정책자료 1건, 교육지도 3건, 언론홍보 7건, 기타 3건의 성과활용이 있었다.

논문		학술발표		연구활용			
SCI	비 SCI	국제	국내	정책자료	교육지도	언론홍보	기타
3	9	5	13	1	3	7	3

이 연구개발의 결과는 우선적으로 중장기 국가 기후변화대응전략 수립의 기초자료로 활용될 수 있으며, 정부(지자체 포함)의 농업생산 체제 재편 및 기후변화 대응을 위한 중장기 농업발전계획 수립의 기초자료로 이용될 수 있을 것이다.

기후변화의 영향분석을 통해 에너지 위기, 환경오염 등 농림수산식품분야가 안고 있는 여러 가지 문제들을 선순환 구조로 해결하기 위한 기후변화 대응 지속가능성장 전략 구축을 위한 기초자료를 제공할 것이다. 특히 농림수산식품산업의 효율적 육성을 위한 실효성 있는 정책프로그램을 도출하는데 기여할 것이다. 뿐만 아니라 기후변화 심화와 인구증가의 추세 하에서 식량안보의 중요성이 커지고 있는데, 기후변화의 영향에 대한 실증적인 연구결과와 대응전략은 식량자급률이 낮은 우리나라의 식

량안보 시스템을 구축하는데 기여할 것이다.

기후변화 대응전략에 관한 우리나라의 연구 성과를 국제적으로 공유함으로써 다른 나라와의 협력적인 기후변화 대응 전략을 도출할 수 있을 것이다. 기후변화에 따른 농림수산식품부문 변화에 대한 국제적 정보 공유, 기후변화에 대한 농업부문의 공동 대응책 모색에 있어서 국가단위의 관련정보를 제공할 수 있을 것이다.

본 연구의 내용과 관련하여 발간되지는 않았으나 국내외 학회에 제출된 논문들이 다수 있다. 이 논문들이 국내외 유명 학회지에 발간될 수 있도록 세부과제와 각 협동과제의 연구자들이 지속적으로 연구내용을 응용할 계획이다. 또한 국내외 학회 및 세미나 등에서 본 연구의 내용을 발표함으로써 연구를 홍보 및 활용할 것이다.

SUMMARY

Research Backgrounds

As climate change has an adverse impact and world's population is growing, an emphasis is laid on the importance of food security to survive skyrocketing food prices and food used as a weapon. In particular, disasters in the agricultural sector and fluctuating agricultural product prices due to frequent unusual weather events have a great impact on farm household income. Because the agri-food, forestry and fishery sectors which are more weather-dependent than industry are sensitive to climate change, it is necessary to establish a systematic, gradual strategy based on scientific impact analysis of the impact of climate change. In Korea, no systematic studies have been done to generalize and analyze the impact of climate change and suggest a strategy for developing technology for the agri-food, forestry and fishery sectors. Therefore, an important emerging task is to comprehensively study the effect of new climate change scenarios. Effective and systematic adaptation to climate change in the agri-food, forestry and fishery sectors needs comprehensive diagnosis and assessment of the impact of climate change in the agri-food, forestry and fishery sectors. The strategy to establish a reliable and appropriate impact analysis model and develop technology for each sector is an important factor to develop a policy for adaptation to climate change and mitigation of the impact.

Research Methodologies

Prior studies about analysis of the impact of climate change in the agri-food, forestry and fishery sectors were reviewed to examine theories and methods of analyzing long-term prospects. This was followed by analyzing the simulation model for food supply analysis following climate change in connection with crop yield forecasting by means of the CERES-Rice model and the KASMO model in order to estimate yields of major grains and food supply and demand on a mid- and long-term basis. The panel analysis-random effect model was used to analyze the impact of unusual weather events on rice yields. The Ricardian model was used to examine changes in farmland prices following climate change. The crop growth models were used to analyze the impact of climate change on producing major crops. For the forestry sector, the model analysis method was used to analyze changes of geographical distribution of forest vegetation and the impact of climate change on forest growth. For the fishery sector, the method of socio-economic impact analysis by climate change was used. For the food sector, the method of predicting and analyzing food poisoning due to climate change was used. The quantitative analysis method was used to analyze the tropical/subtropical crop market adapted to climate change. The vulnerability assessment analysis method was used to assess vulnerability of agricultural, fishery and forestry sectors. The

meta analysis method was used to analyze the impact of climate change on Korea's rice production. The AHP analysis method was used to prioritize technology development to adapt to climate change.

Results and Implications

The analysis of food supply analysis simulation model following climate change reveals a production decrease by 26.1%p in 2050 in the RCP 8.5 climate change scenario in comparison with the baseline. Rice self-sufficiency decreases by 47.3% which is 29.5%p smaller than the baseline to suggest a food security issue. The analysis of impact by unusual weather events on rice yields reveals a rice yield decrease by 8.8~20.8% if unusual high temperature and unusual heavy rainfalls concurrently occur. The analysis with the Ricardian Model reveals paddy and field price drops of approximately 7% and 11%, respectively, in connection with average temperature changes. The analysis of crop growth model in the agriculture sector reveals an Unkwangbyeon decrease of 4.0% in 2065 in comparison with the baseline (598.4kg/10a) in the RCP 8.5 climate change scenario. The analysis of impact of climate change on forest growth reveals a decrease of -5.35m³ per ha on the average on the basis of 2050. Food poisoning (enteritis) outbreaks are predicted to increase by 5.7 as each 1°C rises above 24.3°C. The analysis of factors about consumption of tropical/subtropical crops (mango) produced in Korea reveals a significant positive effect on consumption by increased income, recognition of temperature rise, recognition of safety, and recognition of good quality relative to prices. The analysis of vulnerability of the agricultural sector following climate change reveals high vulnerability in Jeju, Namyangju, Seoupo, Cheonan and Jinju, Korea. These areas are highly sensitive or significantly low capacity of adaptation to climate change. Therefore, it is necessary to establish a strategy to adapt to climate change in agriculture, which reflects high exposure and sensitivity to unusual weather events in order to improve economic capacity and governance. The analysis of vulnerability in the forestry sector reveals the areas highly vulnerable to climate change include south coast and east coast. The analysis of vulnerability in the fishery sector reveals that the areas vulnerable to climate change include the southeastern sea of Georinam, Gyeongbuk, Busan, Jeonnam and Gangwon, and vulnerable fishing techniques in coastal and off-shore fishing include sea eel potting and powered anchovy dragnetting. The meta analysis method used to analyze the impact of climate change on rice production in Korea reveals 6.0 in the RCP scenario has an impact on rice production, and changing seeding period is more effective than changing varieties to adapt to climate change. The AHP analysis to prioritize technology development to adapt to climate change reveals the highest priority is for 'monitoring of weather disasters and building of DB on agri-food, forestry and fishery sectors' With respect to adaptation technology, the highest priority is for 'developing technology of diagnosing early of outbreaking pest and diseases' With respect to damage prevention and establishing a basis, the highest priority is for 'building of early warning system in response to extreme weather'.

CONTENTS

Chapter I. Outline of Research Development

1. Necessity of Research Development 1
2. Purpose of Research 2
3. Scope of Research 2

Chapter II. Current Status of Technical Development

1. Impacts of Climate Change on Agricultural Ecosystem 5
2. Impacts of Climate Change on Agricultural Production 6
3. Review of the Studies on Climate Change Vulnerabilities 8
4. Impacts of Climate Change on Forestry 8
5. Impacts of Climate Change on Fisheries 9
6. Impacts of Climate Change on Food 10
7. Trends of Overseas Research 11
8. Assessment of Domestic and Overseas Technical Development 13

Chapter III. Contents and Results of Research Development

Section 1. The Current Status and Projection of Climate Change 15

1. Diagnosis and Prediction of Global Climate Change 15
2. Diagnosis and Prediction of Domestic Climate Change 17

Section 2. Economic Impact Analysis of Climate Change on Agriculture and Climate Change Vulnerability Assessment 20

1. Approaches to Impact Analysis of Climate Change on Agriculture 20
2. Impacts of Climate Change on Crops and Livestock 21
3. Impacts of Climate Change on Agricultural Water 37
4. Economic Impact Analysis of Climate Change on Agriculture 43
5. Climate Change Vulnerability Assessment in Agriculture 95

Section 3. Impact Assessment of Climate Change on Crops and	
Establishing of Analysis Module	125
1. Theoretical and Experimental Approach	125
2. Research Contents	127
3. Analytical Results	131
4. Summary and Conclusions	149
Section 4. Establishing a Model of Climate Change Impacts	
Assessment in Forestry	151
1. Research Scope and Materials	151
2. Research Methodology	159
3. Analytical Results	169
4. Vulnerability of Climate Change in Forestry and Its Countermeasures	186
Section 5. Establishing a Model of Climate Change Impacts	
Assessment in Fisheries	191
1. Impacts of Climate Change on Fisheries Resources	191
2. Economic Impact Analysis of Climate Change on Fisheries	209
3. Climate Change Vulnerability Assessment in Fisheries	223
4. Analysis of Fishermen's Recognition and Case Study for Global Countermeasures to Climate Change	238
5. Counterstrategies of Climate Change in Fisheries	249
Section 6. Establishing a Model of Climate Change Impacts	
Assessment in Food	255
1. Impacts of Climate Change on Food	255
2. Developing Model of Climate Change Impacts on Food	274
3. Climate Change Vulnerability in Food and its Countermeasures ·	300
4. Conclusion, Implication and Policy Proposals	313
Section 7. Establishing a Model of Climate Change Impacts	
Assessment Using Data Mining	322

1. Concept and Methodology of Data Mining	332
2. Analysis of the Abstracts of Research Articles in Food Related to Climate Change Using a Text-mining Algorithm	344
3. Meta Analysis of Climate Change Impacts on Rice Production ..	358
 Section 8. Strategies for Agriculture, Forestry, Fisheries and Food Sectors against Climate Change	379
1. Basic Directions	379
2. Analysis of Priority for Climate Change Adaptation R&D	381
3. The R&D Roadmap in Response to Climate Change	389
4. Major R&D Tasks in Response to Climate Change	393
 Chapter IV. Goal Achievement and Contribution to the Related Fields	
1. Goal Achievement	405
2. Contribution	407
 Chapter V. Research Performance and Utilization Plan	
1. Research Performance	409
2. Utilization Plan	414
 Chapter VI. Overseas Technology Information Collected in the Process of Research Development	415
 References	419

목 차

제1장 연구개발 과제의 개요

- 1. 연구개발의 필요성 1
- 2. 연구목적 2
- 3. 연구 범위 2

제2장 국내외 기술개발 현황

- 1. 기후변화가 농업생태환경에 미치는 영향 5
- 2. 기후변화가 농업생산에 미치는 영향 분석 6
- 3. 기후변화 취약성 연구 8
- 4. 기후변화가 산림에 미치는 영향 분석 8
- 5. 기후변화가 수산에 미치는 영향 분석 9
- 6. 기후변화가 식품에 미치는 영향 분석 10
- 7. 해외연구 현황 11
- 8. 국내외 기술개발 평가 13

제3장 연구개발수행 내용 및 결과

제1절 국내외 기후변화 실태와 전망 15

- 1. 세계 기후변화 진단과 예측 15
- 2. 국내 기후변화 진단과 예측 17

제2절 농업부문의 경제적 영향분석 및 취약성 평가 (1세부과제) 20

- 1. 농업부문 기후변화 영향분석 접근방법 20
- 2. 기후변화가 작물 및 축산부문에 미치는 영향 21
- 3. 기후변화가 농업용수에 미치는 영향 37
- 4. 농업부문의 기후변화에 따른 경제적 영향분석 43
- 5. 기후변화에 따른 농업부문의 취약성 평가 95
- <부록 2-1> 국내산 열대·아열대 과일 소비실태 조사표 109
- <부록 2-2> 기후변화 취약성 평가지표 관련 전문가 조사표 117

제3절 기후변화가 농작물에 미치는 영향평가 및 분석 모델 구축	
(1협동과제)	125
1. 이론적 및 실험적 접근 방법	125
2. 연구 내용	127
3. 연구결과	131
4. 연구결과 요약 및 결론	149
제4절 산림분야 기후변화 영향평가 모델 구축 (2협동과제)	151
1. 연구대상지 및 재료	151
2. 연구방법	159
3. 연구결과	169
4. 산림분야 기후변화 취약성 및 대응전략	186
제5절 수산분야 기후변화 영향평가 모델 구축 (3협동과제)	191
1. 기후변화가 수산자원에 미치는 영향	191
2. 수산분야 기후변화의 경제적 영향 분석	209
3. 수산분야 기후변화 취약성 평가	223
4. 기후변화에 대한 어업인의 인식 및 수산분야 국외 대응 사례 ..	238
5. 수산분야 기후변화 대응 전략	249
제6절 식품분야 기후변화 영향평가 모델 구축 (4협동과제)	255
1. 기후변화로 인한 식품분야 영향 분석	255
2. 식품분야 기후변화 영향 모델 개발	274
3. 식품분야 기후변화 취약성 및 대응전략	300
5. 결론, 시사점 및 정책 제언	313
제7절 데이터마이닝 분야 기후변화 영향평가 모델 구축 (5협동과제) ...	322
1. 데이터마이닝의 개념과 방법론	322
2. 텍스트마이닝을 이용한 기후변화관련 식품분야 논문초록 분석 ·	344
3. 기후변화가 쌀 생산량에 미치는 영향 메타분석	358
제8절 농림수산식품 분야 기후변화 대응전략 수립	379
1. 전략수립의 기본방향	379

2. 농림수산식품 기후변화 적응 기술개발 우선순위 평가 381

3. 기후변화 대응 기술개발 로드맵 389

4. 기후변화 대응 기술개발 중점 과제 393

 <부록 8-1> 기후변화 적응 R&D 관련 전문가 조사표 395

제4장 목표달성도 및 관련분야 기여도

1. 목표달성도 405

2. 관련분야 기여도 407

제5장 연구개발 성과 및 성과활용 계획

1. 연구개발 성과 409

2. 성과활용 계획 414

제6장 연구개발과정에서 수집한 해외기술정보 415

참고문헌 419

표 목 차

제3장 1절

- 표 1- 1. 1986~2005년 대비 21세기 말(2081~2100년) 한반도 기후변화 전망 18

제2절

- 표 2- 1. 대상저수지 연도별 소비수량(총 필요수량) 비교 40
- 표 2- 2. 주요국의 영향분석 모형의 국내 적용가능성 검토 61
- 표 2- 3. 작물생육모형(CERES-Rice)에 의한 단수 추정결과 66
- 표 2- 4. 신기후변화 시나리오하의 쌀 생산량과 수입량 및 자급률 변화 예측 69
- 표 2- 5. 기후변수 통계 72
- 표 2- 6. 토양변수 통계 74
- 표 2- 7. 사회경제변수 통계 74
- 표 2- 8. 농지가격 통계 75
- 표 2- 9. 농지가격 분석결과 77
- 표 2-10. 논·밭가격 분석결과 78
- 표 2-11. 한계효과 계산을 위해 이용된 변수의 값 79
- 표 2-12. 기초통계량 83
- 표 2-13. 쌀 단수함수 추정결과(확률효과모형) 84
- 표 2-14. 쌀 단수함수 추정결과(확률효과모형) 84
- 표 2-15. 이상기상 시나리오별 쌀 단수 예측 85
- 표 2-16. 분석모형에 이용된 변수의 기술통계량 및 설명 90
- 표 2-17. 소비자들의 국내산 망고 소비의향 91
- 표 2-18. 국내산 망고의 소비의향 추정결과 92
- 표 2-19. 국내산 망고의 소비의향에 대한 설명변수별 한계효과 93
- 표 2-20. 농업부문 기후변화 취약성 지표를 구성하는 대리변수 100
- 표 2-21. 대리변수가 농업에 미치는 영향 102
- 표 2-22. 대리변수 기초통계량(시군별) 103
- 표 2-23. 도별 취약성 평가 결과 106
- 표 2-24. 시군별 상위 15개(스케일재조정기준) 취약성 평가 결과 107
- 표 2-25. 시군별 하위 15개(스케일재조정기준) 취약성 평가 결과 107

제3절

- 표 3- 1. RCP4.5 및 RCP8.5 기후변화 시나리오(IPCC, 2013)하에서
39개 GCM 모형으로 모의된 동아시아지역 현재 대비
평균 온도 및 강수량 변이 129
- 표 3- 2. 광주지역의 RCP8.5(IPCC, 2013)에 따른 현재 와 미래(2035,
2065 및 2100) 기후변화 시나리오(CO₂, 온도 및 강수량 복합)
하의 기후 변동(max, 75%, median, 25%, and min)에 따른
공시한 벼 품종의 수량 반응. 137
- 표 3- 3. 광주지역의 RCP4.5에 따른 현재 와 미래(2035, 2065 및 2100)
기후변화 시나리오(CO₂, 온도 및 강수량 복합) 하의 기후 변동
(max, 75%, median, 25%, and min)에 따른 공시한
벼 품종의 수량 반응. 137

제4절

- 표 4- 1. 수치임상도 속성 구조 157
- 표 4- 2. 임목의 흉고직경, 수고, 밀도를 추정하는데 사용된 회귀모형 163
- 표 4- 3. 수종별 임분 재적 추정 모형()에 적용된 계수(산림청, 2009) 163
- 표 4- 4. 수종별 성장모형의 계수 추정 169
- 표 4- 5. 수종별 SG 추정 함수식 171
- 표 4- 6. 기존 산림성장모형의 모수추정 및 관련 통계량(Byun et al. 2013) 171
- 표 4- 7. 보완된 산림성장모형의 모수추정 및 관련 통계량(식 6) 172
- 표 4- 8. Generalized Additive Models의 모수추정 및 관련 통계량(식 4-5) 174
- 표 4- 9. 임분의 임목축적 추정 성장모형의 수종별 계수 추정 결과 176

제5절

- 표 5- 1. 분석에 사용된 IPCC 모델 리스트 203
- 표 5- 2. 주요 해산어류의 사육수온, 사육최적수온 및 폐사수온 206
- 표 5- 3. 수산분야 기후변화 취약성 지표를 구성하는 대리변수 226
- 표 5- 4. 취약성 지수의 AHP 가중치 결과 232
- 표 5- 5. 지표별 지역별 취약성 평가 결과 234
- 표 5- 6. 지역별 취약성 평가 결과 234
- 표 5- 7. 지표별 업종별 취약성 평가 결과 235

표 5- 8.	업종별 취약성 평가 결과	236
표 5- 9.	응답자의 인구·사회적 및 어업 관련 특성	239
표 5-10.	어업인의 기후변화 경험 정도	240
표 5-11.	어업인의 기후변화 체감 정도의 추이	241
표 5-12.	기후변화에 따른 수산물 생산 영향	241
표 5-13.	기후변화 대응 노력 유무	243
표 5-14.	기후변화 관련 정부 정책 인지도 및 기후변화 대응 방안	244

제6절

표 6- 1.	기후변화가 신선농산물의 식품안전에 영향을 끼치는 위험요인 ...	257
표 6- 2.	농축수산 품목별 소비규모	258
표 6- 3.	기후변화에 따른 쌀 생산량 변화	262
표 6- 4.	기후변화와 식중독 관련 매개체의 영향	269
표 6- 5.	기후변화에 민감한 예상병원체	270
표 6- 6.	대표적인 곰팡이 종류와 독소	271
표 6- 7.	대표적인 유해해조류 독성 및 종류	272
표 6- 8.	장염 발생 예측 모형: Hierarchical Model(2004~2008)	278
표 6- 9.	식중독 발생 예측 결과	279
표 6-10.	식중독지수 비교	280
표 6-11.	식중독지수에 의한 2013년 식중독 발생 예측(건수)	281
표 6-12.	식중독 예측모형에 포함된 질병군	283
표 6-13.	식중독 발생 예측모형에 사용된 변수	284
표 6-14.	식중독발생예측 최종모형 분석결과(상대위험도)	285
표 6-15.	변곡점과 변곡점 전후의 기울기	287
표 6-16.	식중독 예측모형에 포함된 질병군	289
표 6-17.	식품매개질환 발생 예측모형에 사용된 변수	291
표 6-18.	식중독으로 인한 외래 의료기관 방문건수(주간)	293
표 6-19.	식중독으로 인한 입원건수(주간)	295
표 6-20.	기후변화와 식중독으로 인한 외래이용 양상 분석	296
표 6-21.	기후변화가 식중독 증상 외래이용에 미치는 영향	297
표 6-22.	16개 시·도별 주간 식중독 증상으로 인한 평균 외래이용 미래예측 ...	298

표 6-23.	21세기 말(2100년) 지구와 한반도의 평균기온 변화 및 식중독 발생 예측 전망	300
표 6-24.	식품안전관리제도의 관리영역 및 기후변화 대응 확대 필요 영역	315
표 6-25.	식품 이력추적제도 단계별 주요 관리 내용	318
표 6-26.	기후변화에 따른 푸드체인 단계별 잠재적 오염원과 식품안전관리제도의 적용	319
표 6-27.	기후변화 적응 식품 기술 개발 목록(안)	321

제7절

표 7- 1.	문서-단어 행렬 표	346
표 7- 2.	연도별 출현 단어의 빈도	351
표 7- 3.	68개 단어들의 군집	355
표 7- 4.	문서의 분류	356
표 7- 5.	선형회귀모형 적합 결과	361
표 7- 6.	수집된 연구의 목록	367
표 7- 7.	연도에 따른 온실가스 배출 시나리오별 CO ₂ 평균 농도	369
표 7- 8.	수집된 연구에서 사용된 변수 정보	370
표 7- 9.	데이터의 구조	371
표 7-10.	식 (7-8)으로부터 추정된 회귀계수	373
표 7-11.	식 (7-9)으로부터 추정된 회귀계수	374
표 7-12.	온실가스 배출 시나리오와 적응방안 별 쌀 생산량 변화율 예측값	376

제8절

표 8- 1.	농림수산식품 분야 기후변화 대응 관련 SWOT 분석	380
표 8- 2.	기후변화 적응 농림수산식품 기술개발 목록	381
표 8- 3.	제1계층의 쌍대비교 계측 결과	383
표 8- 4.	제1계층과 제2계층의 쌍대비교 계측 결과	385
표 8- 5.	영향평가 기술 개발 우선순위 평가 결과	386
표 8- 6.	적응 기술 개발 우선순위 평가 결과	387
표 8- 7.	피해방지 및 기반구축 기술 개발 우선순위 평가 결과	388

그림 목 차

제1장

- 그림 1. 연구과제 구성 및 수행 체계 4

제3장 1절

- 그림 1- 1. RCP시나리오별 IPCC의 세계 기후변화 전망 16
 그림 1- 2. RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오의 한반도 기후변화 전망치 비교 18
 그림 1- 3. 한반도의 아열대지역 변화 전망 19

제2절

- 그림 2- 1. 기후변화가 농업부문에 미치는 과급영향 체계 21
 그림 2- 2. 기온변화와 작물의 발육속도의 관계 22
 그림 2- 3. CERES-Rice 모형의 개념도 24
 그림 2- 4. 가축의 환경적 기온과 메타볼리즘의 관계 25
 그림 2- 5. 논에서의 물수지 개념도 39
 그림 2- 6. 논용수 수요량 산정 흐름도 39
 그림 2- 7. 모점저수지 연도별 필요수량 변화 41
 그림 2- 8. 안심저수지 연도별 필요수량 변화 41
 그림 2- 9. IMPACT 모형의 처리과정 및 구조 43
 그림 2-10. IFPRI의 농업기술의 영향 측정 모형 시스템 44
 그림 2-11. FASOM 모형 구조 45
 그림 2-12. FASOM 모형과 관련모형의 관계 46
 그림 2-13. GCAM 모형 구조 및 데이터 흐름 48
 그림 2-14. GCAM 인류 및 생지질화학, 지질물리학 지구시스템 48
 그림 2-15. AgMIP 구성요소와 기대 결과 50
 그림 2-16. AgMIP 연구의 두 가지 병행접근법(Two-track approach) 50
 그림 2-17. TOA-MD의 기본 구조 52
 그림 2-18. 적합성 및 잠재단수 테마 개요 54
 그림 2-19. GAEZ 모형의 구조 55
 그림 2-20. IIASA 통합모형 프레임워크 구조 56

그림 2-21.	IIASA 통합평가 프레임워크	57
그림 2-22.	REMIND-MAgPIE-LPJmL 통합평가 프레임워크	58
그림 2-23.	유럽의 기후변화와 식량안보 영향분석 모형 구조	59
그림 2-24.	일본의 농식품부문의 기후변화 경제적 영향모형 기본 구조	60
그림 2-25.	기후변화와 농업부문 연계 통합모형	62
그림 2-26.	KASMO 모형의 흐름도	63
그림 2-27.	기후변화에 따른 쌀 생산량 및 수입량	67
그림 2-28.	기후변화에 따른 쌀 자급률 변화 예측	68
그림 2-29.	최근 1년 이내 직접 구입하신 열대·아열대 과일(중복응답)	87
그림 2-30.	지구 온난화에 대한 인식	88
그림 2-31.	최근 1년 동안 망고 구매빈도	89
그림 2-32.	최근 1년 이내 구매하신 국내산 망고의 종류(중복응답)와 주 구입단위	
그림 2-33.	기후변화 취약성의 개념적 틀	96
그림 2-34.	제1계층의 가중치 계측결과	104
그림 2-35.	기후노출의 가중치 계측결과	104
그림 2-36.	민감도의 가중치 계측결과	105
그림 2-37.	적응능력의 가중치 계측결과	105

제3절

그림 3- 1.	작물생산성에 영향을 주는 생물리 요소들	125
그림 3- 2.	DSSAT 모형의 작물생육모의 과정 개념도	126
그림 3- 3.	연구 사이트(a) 및 온도구배온실(TGFC) 개략도(b).	127
그림 3- 4.	FACE 연구 사이트: 콩, 미국 일리노이 주(A) 및 수수, 미국 애리조나 주(B).	128
그림 3- 5.	기후변화 적응 및 대응 시스템 구축 개략도	130
그림 3- 6.	작물 생육 및 수량 2차원 공간변이 지도화 시스템 구축 개략도	130
그림 3- 7.	기후변화 영향평가를 위한 작물생산성 모델링 로드맵	131
그림 3- 8.	주요 처리(CO ₂ , 온도, 및 품종)에 따른 수량 모의치 및 실측치 비교: 모형 모수 추정(a) 및 신뢰도 검정(b).	132
그림 3- 9.	CO ₂ 농도 변이에 따른 CERES-Rice의 민감도: 수량(a), 증발산량 과 식물체 질소 흡수량(b), 및 물 및 질소 이용효율(c). 칼라 점선들은 각 기후변화 시나리오별(RCP4.5: 538ppm; A1B:	

- 750ppm; RCP8.5: 936ppm) 2100년 CO₂ 농도에 따른 반응 표시. ... 133
- 그림 3-10. 온도 변화에 따른 CERES-Rice의 민감도: 수량(a), 증발산량 과 식물체 질소 흡수량(b), 및 물 및 질소 이용효율(c). 칼라 점선들은 각 기후변화 시나리오별(RCP4.5: 2.4°C; A1B: 3.2°C; RCP8.5: 4.9°C) 2100년 현재(Baseline) 대비 온도 상승에 따른 반응 표시. 134
- 그림 3-11. 광주지역의 RCP8.5(IPCC, 2013)에 따른 현재 와 미래(2035, 2065 및 2100) 기후변화 시나리오(CO₂, 온도 및 강수량 복합) 하에서 남평벼(상: a, d, g), 새계화벼(중: b, e, h), 운광벼(하: c, f, i)의 수량, 증발산량 및 질소 흡수량에의 영향 135
- 그림 3-12. 광주지역의 RCP4.5(IPCC, 2013)에 따른 현재 와 미래(2035, 2065 및 2100) 기후변화 시나리오(CO₂, 온도 및 강수량 복합) 하에서 남평벼(상: a, d, g), 새계화벼(중: b, e, h), 운광벼(하: c, f, i)의 수량, 증발산량 및 질소 흡수량에의 영향 136
- 그림 3-13. 미래 기후조건[2050 (a), 2100 (b)]에서 주요 벼 재배 지역의 위도별 수량 영향. 138
- 그림 3-14. 미래 기후조건[2050 (a), 2100 (b)]에서 표고별(JB = 진부, HA = 해안, SR = 신림, SN = 신남) 수량 영향 평가. 138
- 그림 3-15. CO₂ 농도 변이에 따른 콩 생육 및 수량 모의치 와 실측치 비교: 모수화(상) 및 신뢰도(하) 평가concentrations. 139
- 그림 3-16. CROPGRO-Soybean 모형의 온도(a), 강수량(b), 및 CO₂(c) 변이에 대한 콩의 수량 민감도 140
- 그림 3-17. RCP4.5(A-C) 및 RCP8.5(D-F) 시나리오(IPCC, 2013)에 따른 현재 및 미래(2100년)에 각 기후변화 요소(CO₂, 온도, 강수량)가 콩의 수량에 미치는 영향 비교 141
- 그림 3-18. RCP4.5(A) 및 RCP8.5(B) 시나리오(IPCC, 2013)에 따른 현재 및 미래(2100년) 기후변화 복합요소(CO₂, 온도, 강수량)의 변이(Min, 25%, 50%, 75%, Max, Extreme)가 콩의 수량에 미치는 영향 비교 142
- 그림 3-19. CO₂ 농도 변이 및 관수 처리에 따른 수수의 수량 모의치 와 실측치 비교 143
- 그림 3-20. CERES-Sorghum 모형의 온도(a), 강수량(b), 및 CO₂(c) 변이에 대한 수수의 수량 민감도 143

그림 3-21.	RCP8.5(A, C, E) 및 RCP4.5(B, D, F) 시나리오(IPCC, 2013)에 따른 현재 및 미래(2100년)에 각 기후변화 요소(CO ₂ , 온도, 강수량)가 수수의 수량에 미치는 영향 비교	144
그림 3-22.	물 관리 조건별[건조(A) 및 습윤(B)] RCP8.5(IPCC, 2013)에 따른 현재 및 미래(2100년) 기후변화 복합요소 (CO ₂ , 온도, 강수량)의 변이(Min, 25%, 50%, 75%, Max, Extreme)가 수수의 수량에 미치는 영향 비교	145
그림 3-23.	물 관리 조건별[건조(A) 및 습윤(B)] RCP8.5(IPCC, 2013)에 따른 현재 및 미래(2100년) 기후변화 복합요소(CO ₂ , 온도, 강수량)의 변이(Min, 25%, 50%, 75%, Max, Extreme)가 수수의 물이용 효율에 미치는 영향 비교	145
그림 3-24.	남한지역에 대한 RCP4.5(IPCC, 2013)에 따른 현재(Baseline) 와 미래(2035, 2065, 2100) 기후변화 조건에서 벼의 생육기간 (5월~10월) 일평균 온도 및 강수량 2차원 공간변이 지도.	146
그림 3-25.	남한지역에 대한 RCP8.5(IPCC, 2013)에 따른 현재(Baseline) 와 미래(2035, 2065, 2100) 기후변화 조건에서 벼의 생육기간 (5월~10월) 일평균 온도 및 강수량 2차원 공간변이 지도.	147
그림 3-26.	남한지역에 대한 RCP8.5 및 RCP4.5(IPCC, 2013)에 따른 현재(Baseline) 와 미래(2035, 2065, 2100) 기후변화 조건에서 남평벼의 수량 2차원 공간변이 지도	148
그림 3-27.	남한지역에 대한 RCP8.5 및 RCP4.5(IPCC, 2013)에 따른 현재(Baseline) 와 미래(2035, 2065, 2100) 기후변화 조건에서 새계화벼의 수량 2차원 공간변이 지도	148
그림 3-28.	남한지역에 대한 RCP8.5 및 RCP4.5(IPCC, 2013)에 따른 현재(Baseline) 와 미래(2035, 2065, 2100) 기후변화 조건에서 운광벼의 수량 2차원 공간변이 지도	149

제4절

그림 4- 1.	국토이용 현황(산림청, 2014)	151
그림 4- 2.	연구 대상지의 지형(a)과 영급분포(b)	152
그림 4- 3.	제5차 국가산림자원조사 표본점 배치 및 형태	154
그림 4- 4.	국가산림자원조사 생장목편DB 구조 (산림청, 2013)	154
그림 4- 5.	생장목편 채위와 수집된 목편자료	155

그림 4- 6.	연륜측정장비(a)와 연륜촬영장비(b)	155
그림 4- 7.	목편을 획득된 국가산림자원조사 고정 조사구	156
그림 4- 8.	Shape 형태의 5차 임상도 원본과 공간 해상도 1km로 변형한 Raster 형태의 임상도	158
그림 4- 9.	현재와 미래의 우리나라 온량지수(Warmth index) 분포와 온량지수에 따른 소나무(<i>P. densiflora</i>)와 참나무류(<i>Q. spp</i>)의 표준성장량 분포(Byun et al. 2013)	162
그림 4-10.	NFI자료와 임상도를 이용한 임목축적 산출 모식도(Kwak et al., 2013) ..	163
그림 4-11.	꽃매미 알의 폐사율과 겨울철 평균기온 및 1월 최저기온의 관계 (Lee et al., 2010)	165
그림 4-12.	생태계 기능 취약성 평가 방법론 (Choi et al., 2010)	166
그림 4-13.	수종별 연령에 따른 반경 연년 성장량 분포와 모형을 통한 추정성장 곡선	170
그림 4-14.	각 성장모형에 따른 RCP8.5 시나리오에서 제주도 소나무림의 2050년 표준반경 성장량	173
그림 4-15.	수종별 임목축적 변화와 기후변화 영향 추정	177
그림 4-16.	우리나라 전국 산림의 임목축적 증가에 기후변화가 미치는 영향 추정 ...	178
그림 4-17.	우리나라 전국 산림의 임분재적(m ³ /ha) 변화 추정	180
그림 4-18.	행정구역별 산림의 임분재적(m ³ /ha) 변화 추정	181
그림 4-19.	기후변화 시나리오에 따른 산림성장 취약성 평가	182
그림 4-20.	기후변화 시나리오(RCP8.5)에 따른 겨울철 평균기온에 따른 꽃매미 알 폐사율 변화	182
그림 4-21.	산림병해충 취약성 평가 인자들의 변화 경향 분석	183
그림 4-22.	기후변화 시나리오(RCP8.5)에 따른 산림병해충 취약성 평가 결과 ...	184
그림 4-23.	행정구역별 산림병해충 취약성 값의 변화	184
그림 4-24.	기후변화 시나리오에 따른 산림 취약성 평가	185
그림 4-25.	시도별 산림 취약성 변화	185
그림 4-26.	국내 산사태 발생 통계	188

제5절

그림 5- 1.	최근 100년간(1911~2010년) 전 세계 표층수온 변동 추이	192
그림 5- 2.	1890~2000년대까지 각 대양별 표층수온 상승률 및 100년 환산 수온 상승률	193

그림 5- 3.	1995~2003년까지 0~300m, 0~500m, 0~3000m 수층의 열량 변동 양상	193
그림 5- 4.	일본 기이반도 외해역 해양표면에서의 pH의 감소 경향	194
그림 5- 5.	1875, 1995, 2050년 및 2100년의 해양의 10년 평균 pH 공간 분포 ..	195
그림 5- 6.	한반도 주변 해역 해수온 추이	196
그림 5- 7.	한반도 연평균 표층염분 변동 추이(1968~2006년)	197
그림 5- 8.	최근 37년간 동해(▲), 남해(○), 서해(●)의 표층 용존산소 장기변동	198
그림 5- 9.	최근 37년간 동해(▲), 남해(○), 서해(●)의 50m층 용존산소 장기변동	198
그림 5-10.	최근 37년간 동해(▲)의 200m층 용존산소 장기변동	198
그림 5-11.	한반도 주변 어획 어종 분포 변화	200
그림 5-12.	2011년 1~2월의 여수 및 거제의 연안수온 변동 경향	201
그림 5-13.	1990년대 후반 하계 동중국해 북부해역의 염분 분포	201
그림 5-14.	적조 발생으로 인한 경제적 피해 현황	202
그림 5-15.	IPCC 모델의 20세기와 21세기 계절별 표층수온 이상률 평균 ..	204
그림 5-16.	IPCC 모델의 20세기와 21세기 계절별 표층염분 이상률 평균 ..	204
그림 5-17.	MIROC 3.2 hires를 통한 표층 2000년 수온 분포(좌), 2050년(중) 및 2100년(우) 수온편차분포	205
그림 5-18.	CGCM 모델 결과를 통한 전국연안의 연평균 표층수온 예상	206
그림 5-19.	CGCM 모델 결과를 통한 전국연안의 2월 평균 표층수온 예상 ..	207
그림 5-20.	CGCM 모델 결과를 통한 전국연안의 8월 평균 표층수온 예상 ..	207
그림 5-21.	생물경제모델의 개념도	209
그림 5-22.	수산자원에 미치는 기후변화의 영향	210
그림 5-23.	생물경제모델의 구축 절차	211
그림 5-24.	고등어의 어획량 및 CPUE 추이	216
그림 5-25.	고등어의 균형 자원량 및 균형 어획량 추이	216
그림 5-26.	갈치의 어획량 및 CPUE 추이	217
그림 5-27.	갈치의 균형 자원량 및 균형 어획량 추이	217
그림 5-28.	멸치의 어획량 및 CPUE 추이	218
그림 5-29.	멸치의 균형 자원량 및 균형 어획량 추이	219
그림 5-30.	삼치의 어획량 및 CPUE 추이	219
그림 5-31.	삼치의 균형 자원량 및 균형 어획량 추이	220

그림 5-32.	참조기의 어획량 및 CPUE 추이	220
그림 5-33.	참조기의 균형 자원량 및 균형 어획량 추이	221
그림 5-34.	오징어의 어획량 및 CPUE 추이	222
그림 5-35.	오징어의 균형 자원량 및 균형 어획량 추이	222
그림 5-36.	기후변화의 영향에 따른 정책 및 대응 흐름도	224
그림 5-37.	어업별 기후변화 경험 비율	240
그림 5-38.	기후변화가 수산물 생산에 부정적인 영향을 미치는 측면	242
그림 5-39.	향후 기후변화가 수산물 생산에 미치는 영향 전망	242
그림 5-40.	어업인이 현재 하고 있는 기후변화 대응 노력 방법	243
그림 5-41.	어업인이 기후변화 대응 노력을 하지 않는 이유	243

제6절

그림 6- 1.	지구온난화가 농업부문에 미치는 영향	256
그림 6- 2.	Food-chain 내 농축수산물 원료 및 식품의 소비구조	264
그림 6- 3.	식품제조업 농축수산물의 소비 흐름도	265
그림 6- 4.	외식업 농축수산물의 소비 flow chart	265
그림 6- 5.	세계 식품가격지수	266
그림 6- 6.	식중독 세균을 결정하는데 활용 가능한 MRA 모델	274
그림 6- 7.	주간 평균 최고기온과 장염과의 관계	278
그림 6- 8.	주간 시·군·구별 강수량(2004~2008)	283
그림 6- 9.	시·군·구별 주(week)간 식중독으로 인한 의료기관 방문건수	284
그림 6-10.	식중독 발생예측 결과와 주간 최고온도와의 상관성	286
그림 6-11.	식중독 발생에서 노인과 비노인의 차이	286
그림 6-12.	식중독 발생예측에서 기온의 시간지연 효과	288
그림 6-13.	주간 시·군·구별 강수량(2004~2008)	291
그림 6-14.	시·도별 연도별 주간평균 식중독 외래이용 발생건수	292
그림 6-15.	연도별 식중독으로 인한 연간외래이용방문건수	294
그림 6-16.	시·도별 연도별 주간평균 식중독 입원이용 발생건수	294
그림 6-17.	주간 최고기온과 시·군·구 주간 식중독 의료이용 횟수 (회귀분석 추정 값)와의 관계	296
그림 6-18.	기후변화와 식중독으로 인한 외래이용의 3차원 (시간지연효과반영) 그래프	297

그림 6-19.	신 기후변화시나리오에 따른 우리나라 식중독 발생 예측	299
그림 6-20.	아플라톡신 예방을 위한 통합적 접근 전략	310
그림 6-21.	푸드시스템 산출물간의 상충관계	311
그림 6-22.	생산에서 소비까지 단계별 오염가능 위험요인 및 안전관리제도	314
그림 6-23.	제조에서 유통까지 단계별 오염 가능 위험요인 및 안전관리제도	314
그림 6-24.	식품안전관리제도별 관리영역	315
그림 6-25.	이력추적제도의 기본 원리	317

제7절

그림 7- 1.	데이터마이닝의 과정	327
그림 7- 2.	소비자의 구매여부에 관한 의사결정나무	328
그림 7- 3.	신경망 모형의 구조	331
그림 7- 4.	군집분석 과정	333
그림 7- 5.	SVM 알고리즘	336
그림 7- 6.	최적의 분리 초평면	337
그림 7- 7.	웹포인트의 의료정보 제공 체계	338
그림 7- 8.	구글 독감 동향	339
그림 7- 9.	구글 독감 동향 및 실제 확산의 비교 결과	339
그림 7-10.	RRP(Return Review Program) 시스템 구조	340
그림 7-11.	FBI에서 수집한 범죄자 DNA 샘플 수(2001. 6 ~ 2011. 5)	341
그림 7-12.	한국석유공사의 가격정보 및 유가예보 서비스	342
그림 7-13.	도쿄 도심부의 도로혼잡상태 추이 비교	343
그림 7-14.	텍스트 마이닝 과정	345
그림 7-15.	수집된 자료 목록	348
그림 7-16.	문서 및 단어 선별 작업	349
그림 7-17.	단어 빈도 그래프	350
그림 7-18.	Word Cloud	351
그림 7-19.	계층적 군집분석	353
그림 7-20.	연도별 군집간의 상대적 출현 빈도	356
그림 7-21.	의학 분야와 농업 분야의 메타분석 방법 비교	359
그림 7-22.	지역과 온도의 변화에 따른 옥수수, 밀, 쌀 생산량의 변화	360
그림 7-23.	온도와 강수량의 변화에 따른 적응 방안의 효과	362

그림 7-24.	적응방안의 종류별 이점	363
그림 7-25.	시간에 따른 모든 지역과 작물의 생산량 변화	364
그림 7-26.	DSSAT의 구조	365
그림 7-27.	GAZE 모형의 구조	366
그림 7-28.	ORYZA 모형의 구조	367
그림 7-29.	CO ₂ 농도에 따른 자료의 산점도	371
그림 7-30.	CO ₂ 농도별 쌀 생산량의 감소를 나타내는 자료의 비율	372
그림 7-31.	적합된 회귀직선	374
그림 7-32.	적응방안을 적용하지 않은 경우	375
그림 7-33.	파종시기 변경을 적용한 경우	375
그림 7-34.	품종 변경을 적용한 경우	375
그림 7-35.	모든 적응방안을 적용한 경우	375

제8절

그림 8- 1.	제1계층의 가중치 계측 결과	383
그림 8- 2.	제2계층의 가중치 계측 결과	384
그림 8- 3.	농림수산식품 영향평가 분야 기술개발 로드맵	390
그림 8- 4.	농림수산식품 적응기술 분야 기술개발 로드맵	391
그림 8- 5.	농림수산식품 피해방지 및 기반구축 분야 기술개발 로드맵	392

제 1 장

연구개발 과제의 개요

1. 연구개발의 필요성

현재 진행 중인 지구온난화는 자연적인 현상이 아닌, 인간 활동이 주요 원인이라는 점에서 과거와 다르다고 볼 수 있다. 이러한 지구온난화에 대한 체계적이고 신뢰성 있는 진단을 위해 세계 기후변화에 관한 과학적인 분석 작업이 1990년 이후 UN 산하기구인 정부간기후변화협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)를 통해 주기적으로 이루어지고 있다. IPCC 기후변화 평가보고서는 지금까지 1차(1990), 2차(1995), 3차(2001), 4차(2007) 보고서가 출간되었고, 2014년 4월에 제5차 평가보고서가 발표되었다. 이 보고서에 따르면 지난 133년간(1880~2012년) 지구의 평균기온이 0.85°C(0.65~1.06°C) 상승하였으며, 현재 추세대로 온실가스 배출이 지속된다면(RCP 8.5¹), 21세기 말(2081~2100년)에는 전 지구의 평균기온이 1986~2005년 대비 3.7°C(2.6~4.8°C), 해수면은 63cm 상승할 것으로 전망되고 있다. 특히 평균기온이 2°C 상승하면 2030년부터 밀, 쌀, 옥수수 등의 주요 식량작물의 생산이 크게 줄어들어 식량부족 문제가 심화될 것으로 예측된다. 또한 육상 및 담수 종의 멸종위험 증가, 연안홍수로 인한 토지유실 등 전 부문에 걸쳐 위험 수준이 심화되며, 세계경제의 총손실액이 소득의 0.2~2.0%(1천4백억~1조 4천억 달러)에 이를 것으로 제시되고 있다(IPCC, 2014).

기상청(2012)은 ‘한반도 미래기후변화 전망보고서’에서 21세기 후반(2071~2100) 한반도 기온은 현재(1981~2010) 보다 5.7°C 상승하며, 폭염과 열대야 등 기후관련

1 IPCC의 제5차 평가보고서의 기후변화 예측 시나리오는 인간 활동이 대기에 미치는 온실가스 농도인 복사강제력을 기초로 사회-경제 여건변화와 연계한 새로운 대표농도경로(Representative Concentration Pathway, RCP)로 설정하고 있다.

극한지수도 크게 악화될 것으로 전망하고 있다.

기후변화의 요인으로 작용하는 온실가스를 줄이기 위해 국제사회는 국제기구와 국제환경협약 등을 통해 다양한 노력을 경주하고 있다. 국제사회의 온실가스 감축의 노력이 실효성을 거두었다 하더라도 향후 수십년의 상당기간 동안 과거 배출된 온실가스로 인해 지구온난화가 지속될 것으로 예상된다. 이와 같이 기후변화는 국내외적으로 미래사회에서 피할 수 없는 현상으로 각 분야별로 체계적인 영향분석을 기초로 적절한 적응대책 모색은 중요한 당면과제이다.

기후변화가 농업부문에 미치는 과급영향으로는 우선 기후변화가 농축산부문에 미치는 영향으로 작물의 개화·출수 등 생물학적 변화와 품질변화, 재배적지 이동 등을 들 수 있다. 또한 기후변화는 농업생태계에 영향을 미쳐 병해충 발생과 개체군의 이동 및 생물다양성에 영향을 준다. 또한 축산부문에는 수정과 산란 등 생물학적 변화와 목초생산에 영향을 미친다.

기후변화에 효과적으로 대응하기 위해 농림수산식품분야의 기후변화 영향분석에 관한 체계적이고 종합적인 연구가 필요하다. 우리나라의 경우 농림수산식품 분야를 총괄하여 기후변화 영향, 특히 경제적 영향분석을 종합하고 향후 기술개발 전략을 제시하는 체계적인 연구가 미약하다. 기후변화에 보다 효과적이고 체계적으로 대응하기 위해 기후변화 영향분석에 관한 연구를 종합적으로 진단하고 평가하여 보다 신뢰성 있고 적절한 연구분석 모형 구축과 분야별 기술개발 전략을 도출하는 종합적인 연구수행이 필요하다.

2. 연구목적

이러한 맥락에서 이 연구의 목적은 분야별 연구 성과의 과학적 분석을 통해 각 영향을 체계적으로 평가하고, 기후변화 대응 연구의 종합적인 비전과 연구개발 로드맵과 전략을 제시하는데 있다. 특히 분야별 전문가 설문조사를 기초로 대안별 우선순위와 설득력 있고 실효성 있는 기술개발 전략을 제시토록 한다. 보다 구체적인 연구 목표는 기후변화에 따른 경제적 영향분석 모형의 비교 및 최적 모형 선택, 신 기후변화 시나리오에 따른 농림수산식품부문의 경제적 영향 분석, 신 기후변화 시나리오에 따른 농림수산식품부문의 취약성 평가, 경제적 영향 및 취약성 평가 결과를 바탕으로 한 기후변화 대응전략 수립 등을 담고 있다.

3. 연구 범위

이 연구는 농업, 산림, 수산, 식품 분야로 그 범위를 한정하였으며, 농업분야의 경우 최근 구제역, AI 등 가축질병이 빈번해지고 기온 스트레스의 축산 생산량에 미치는 영향 등을 고려하여 축산부문을 포함하였다. 또, 기후변화가 가속화됨에 따라 우리나라가 향후 물 부족 국가가 될 가능성도 배제할 수 없는 상황이므로 수자원 부문도 연구 범위에 포함하였다. 뿐만 아니라 기상과 농작물 생산 및 유통과의 관계가 매우 밀접하다는 점을 고려하여 이와 관련된 실증적 분석결과를 제시하고자 농업기상이 포함되었다.

이 연구는 주로 농업분야를 대상으로 기후변화의 경제적인 영향평가를 연구 대상에 포함시켰다. 그래서 생산성에 미치는 영향뿐만 아니라 재배면적, 생산량, 수출입량, 자급률에 미치는 영향까지 계측하였다. 그리고 지금까지 기후변화 연구에서 거의 시도되지 않은 데이터 마이닝 기법을 적용하여 기후변화가 농림수산식품분야에 미치는 영향을 계측한 기존의 선행연구들로부터 유의미한 결과를 도출하였다.

세부 분야별로 보면 농업부문의 경우 CERES-Rice에 대한 기후변화 영향 모의 활용성 평가 및 작물모형의 구동 범위 설정 및 모듈화 방법을 연구하였다. 산림부문의 경우 성장모형을 통해 임분재적 추정을 시도하였으며, 우리나라 주요 침엽수종인 소나무, 일본잎갈나무, 잣나무와 활엽수종인 신갈나무와 그 외 참나무류를 연구 대상으로 하였다. 수산부문의 경우 기후변화가 수산부문에 미치는 경제적 영향을 추정하기 위해 생물경제모형 중 하나인 CYP모형(Clarke, Yoshimoto and Pooley, 1992)을 적용하였으며, 분석 대상은 대표적 어종인 고등어, 갈치, 멸치, 삼치, 참조기, 오징어로 하였다. 식품부문의 경우 기후변화에 따른 식중독 발생모형 예측모형 개발은 전국 및 취약집단의 모형과 지자체의 시·군·구별 모형에 대하여 이루어졌다.

이 연구는 위의 연구 범위에 따라 총괄 및 경제, 농업, 산림, 수산, 식품, 데이터마이닝 등 총 6개 분야로 연구 과제를 구성하였다. 연구 책임자는 각 분야의 전문가로 구성하였다<그림 1-1>.

제1세부과제는 경제분석 및 연구총괄 분야로 과제책임자는 한국농촌경제연구원 김창길 박사가 담당하였다.

제1협동과제는 농업부문(특히 농작물 분야)의 기후변화 영향분석 및 영향평가 모형 구축 분야로 전남대학교 김한용 교수와 고종한 교수가 담당하였다.

제2협동과제는 산림부문 기후변화 영향분석 모형 구축 분야로 고려대학교 이우균 교수가 담당하였다.

제3협동과제는 수산부문 기후변화 영향분석 및 영향평가 모형 구축 분야로 한국 해양수산개발원 정명생 박사가 담당하였다.

제4협동과제는 식품부문 기후변화 영향분석 및 영향평가 모형 구축 분야로 한국 보건사회연구원 김정선 박사가 담당하였다.

제5협동과제는 데이터마이닝 분야로 동국대학교 이영섭 교수가 담당하였다.

그림 1. 연구과제 구성 및 수행 체계



제 2 장

국내외 기술개발 현황

1. 기후변화가 농업생태환경에 미치는 영향

윤성호 외 4인(2001)은 2001년 IPCC에서 밝힌 기후변화의 과정과 예측 시나리오를 중심으로 기후변화가 세계, 우리나라, 농업생태계에 미치는 영향을 분석하고 우리나라 농업부문의 기후변화에 대한 대책을 제시하였다.

심교문 외 3인(2003)은 지난 97년간(1904~2000) 우리나라에 영향을 준 기상재해의 유형과 이들의 발생 현황을 살펴보고 최근 10년간(1991~2000) 농작물에 피해를 준 기상재해의 유형별 발생횟수를 시·군 별로 정리·분석하여 기상재해의 지역성과 발생빈도를 파악하였다.

이상돈(2005)은 지구온난화로 인한 기후변화에 따른 생태계의 변화에 대해 농업생태계에 대한 영향, 육상생태계에 대한 영향, 생물다양성에 대한 영향, 해수면 상승에 의한 바다생물의 영향으로 구분하여 분석하였다. 기후변화가 식생에 미치는 영향에 대한 포괄적 해석과 예측을 통해 적응대책의 시사점을 도출하였다.

이양수(2005)는 기상청 한국기후표(1971~2000)를 이용하여 기후변화에 따른 작물계절 출현일 변화, 서리 기간 변화, 과수 만개기 변화 및 벼 적정 등숙 기온의 변동을 파악함으로써 기후변화가 농업환경과 기상환경에 미치는 영향을 분석하고 이에 따른 대책을 제시하였다.

김종일(2007)은 기후변화의 주요 영향 및 전망, 기후변화와 관련 있는 기상재해를 분석하였다. 연안지역, 폭풍우, 폭설, 폭염 측면에서 방지대책과 재해위험지도를 작성하여 재해위험지구주민의 이주 등 재해 대응체계를 제시하였다.

이정택(2007)은 기후변화가 농업에 미치는 영향을 농업생태계, 벼 등숙기온과 사과 재배적지 환경 변화 등의 농산물 생산환경 측면에서 분석하였다. 또한 기후변화 대응방안으로 농업기상 정보 활용과 재해 경감대책, 기후변화에 대응한 작물 육성 방안을 제시하였다.

2. 기후변화가 농업생산에 미치는 영향 분석

이변우 외 2인(1991)은 미국항공우주국(NASA) 고다드 우주연구소(Goddard institute for Space Studies: GISS)의 대기대순환모델(General Circulation Model: GCM)로 예측한 농도를 변동한 이산화탄소하에서의 월평균기온, 월강수량 자료에 근거하여 대기 중에 이산화탄소의 농도가 2배로 증가했을 때 우리나라의 기후 및 농업기후 자원에 미치는 영향을 평가하였다. 또한 지구온난화가 수도 생산량에 미치는 영향을 분석하기 위해 다중회귀분석을 실시하였고 기후변화 하에서 수도 생산 및 수량성을 구하기 위해 작물생장 모의실험모형(Modules of an Annual Crop Simulation: MACROS)을 이용하였다.

주영희(1994)는 선진국의 기후변화에 따른 작물수량조사 순환모형과 미국 환경보전국의 GISS(Goddard Institute for Space Studies) 모형, 영국기상청 모형 등을 인용하여 미국, 유럽, 호주, 일본, 러시아 등 주요국의 기후변화에 따른 작물생산량 변동을 분석하고 기후변동이 세계 농업 생산에 미치는 영향을 제시하였다.

김정호·이정환(1996)은 비선형모형을 이용한 로지스틱 함수를 추정하여 1965년 이후 일반계 논벼의 단수에 영향을 미치는 요인을 육종, 보급, 재배기술, 기상조건 측면에서 분석하였으며 1990년대 초의 단수 정체 요인을 규명하였다. 유사한 연구로 김정호(1998)는 SAS/ETS의 비선형모형을 이용한 로지스틱함수를 통해 평년 단수 및 전망을 추정하고 회귀분석을 통해 재배요인이 단수에 미치는 영향을 분석하였다.

서형호(2003)는 GIS를 이용하여 원예연구소에서 작성한 ‘사과의 기후적 적지 판정 모형’을 바탕으로 기온 상승정도별 적지변동을 예측하고, 적지변동 예측도를 작성하였다. 생육기온이 상승함에 따라 남쪽에서 북쪽으로, 해안에서 내륙으로, 평지에서 산지로, 도시 중심에서 외곽으로 재배적지가 축소되는 경향이 있는 것으로 제시하였다.

윤성탁(2005)은 여러 학자들에 의해 보고된 지구온난화와 이에 따른 기후변화 예측시나리오를 이용하여 지구온난화의 증거를 진단하고 온난화에 따른 우리나라 기

후변화에 대한 예측과 농업생산에 미치는 영향을 분석하고 이에 대한 전망과 대응 방안을 제시하였다.

한화진 외 12인(2007)은 기후변화의 영향과 취약성 평가, 적응조치 및 국가 기후변화 적응체계 구축방안을 제시하였다. 이 연구에서는 수자원, 생태계, 산업, 보건, 해양·수산 등 다양한 분야를 다루고 있고, 농업부문은 생태계에서 다루고 있고, 작물 기후통합모형(Crop Estimation through Resource and Environment Synthesis: CERES-Rice)을 이용하여 벼 부분의 취약성 평가도 시도하였다.

나영은 외 6인(2007)은 기후변화가 우리나라 농업부문에 미치는 영향 및 적응 방안을 모색하기 위해 국제기관, 각 나라의 연구기관, 정책기관 등의 자료를 수집·분석하였다. IPCC, UNDP, 일본, 영국, 호주, 캐나다가 기후변화에 대해 농업부문이 어떻게 대응하는지 제시하고 우리나라에 적용 방안 모색하였다.

전승중(2007)은 기후 온난화가 감귤의 생장과 품질에 미치는 영향을 분석하고 기후변화별 감귤재배지 분포도를 작성하기 위해 난지농업연구소에서 제작한 감귤의 기후적 생육적지판정모형을 바탕으로 GIS(지리정보시스템)를 이용하여 분석하였다.

농촌진흥청(2007b)은 기후온난화에 따른 농업환경의 영향평가 및 적응대책과 관련 농작물 재배지대 변화, 일동환경변화에 따른 작물별 병해충 발생 진단, 농업의 생산성 변화 예측, 기후변화 적응품종 개발 등을 제시하였다. 김건엽 외 4인(2008) 및 심교문 외 5인(2008)은 기후변화에 따른 농업환경영향평가, 생물계절 및 농업기후자원의 변화와 농업환경변화 등에 대한 분석결과를 체계적으로 제시하였다.

권오상·김창길(2008)은 기후변화가 농산물 생산에 미치는 영향과 관련하여 커널 회귀분석(Kernel Regression Analysis)을 적용하여 기온과 강수량의 변화가 수량에 미치는 영향을 비모수적 추정방식을 이용하여 분석하였다. 김창길 외 4인(2009)은 CERES-Rice 모형, ORYZA 모형, 리카디언(Ricardian Model) 모형 등의 적용을 통해 농업부문의 경제적 영향을 체계적으로 분석하고, 기후변화의 위험을 최소화하기 위한 종합적인 기후변화 적응 마스터플랜을 제시하였다.

김창길·정학균(2010)은 농산물 수량변동을 분석하는데 있어 기상의 영향력이 어느 정도 인지를 파악하기 위해 미곡을 사례로 기술요인과 기상요인을 고려하여 수량변동을 분석하였으며, 2002~2003년과 2006~2007년의 단수정체에는 기상요인이 매우 크게 작용하였다는 결론을 도출하여 제시하였다.

3. 기후변화 취약성 연구

유가영·김인애(2008)은 기후변화 취약성을 평가하기 위해 33개의 대리변수들을 선정하고, 표준화 과정을 거쳐 취약성-탄력성 지표를 계산하였다. 계산된 지역별 지표를 그룹화하여 지역별 취약성 구성요소를 분석함으로써 지역에 맞는 적응정책의 방향성을 제시하였다.

김성재 외 3인(2012)은 재해 취약성 평가를 위한 지표와 대리변수들을 조사하여 기후변화와 자연 생태계, 토지, 인구구성, 사회 간접자본 및 산업구조 등 농업생산기반에 영향을 미칠 것이라 판단되는 지표를 선정하고 각 지표를 평가할 수 있는 대리 변수 항목을 설정하였다.

환경부·국립환경과학원(2012)은 지자체 기후변화 적응 세부시행계획 수립 지원을 위해 기후변화 부문별 취약성 지도를 제시하였다. 이 보고서는 농업부문을 대상으로 농경지 토양침식, 재배·사육시설, 벼 생산성, 사과 생산성, 가축 생산성의 취약성을 각각 평가하였다.

김명현 외 6인(2013)은 기후의 영향과 민감도, 적응의 개념을 종합적으로 고려하여 벼의 주요 병해충 피해 취약성을 분석하였다. 분석결과 제주도, 경상남도, 전라남도 지역의 취약성이 높으며, 취약성지수에 대한 기여도는 적응능력변수가 가장 높은 것으로 나타났다.

김명현 외 6인(2014)은 신 기후변화 시나리오에 따른 지역별 농업부문의 취약성 평가 지표를 개발하였다. 이 연구는 농업부문 전체, 벼, 사과, 한육우 등에 대해 시군별 자료를 바탕으로 취약성을 평가하고 농업부문 취약성평가 프로그램을 개발하여 제시하였다.

이지혜 외 2인(2014)은 사과의 생산과 품질에 영향을 미치는 대리변수들을 선정하여 기후변화 취약성 평가 지표를 구성하고, 지역별 취약성지수를 평가하였다. 또 사과 부문 기후변화 취약성 지수를 이용한 지역별 유형화를 실시하여 유형별 특성을 파악하였다.

4. 기후변화가 산림에 미치는 영향 분석

변정연 외 7인(2012)은 산림생태계 분포 HyTAG모델(Hydrological and Thermal Analogy Group)과 기능 MC1 모델(MAPSS-CENTURY 1) 그리고 사회·환경적 지표를

이용하여 기후변화가 한반도 산림생태계에 미치는 영향을 파악하고, HyTAG의 식생 유형분포 변화 빈도와 방향으로부터 산림식생의 민감성과 적응성을 정량화하였다.

유성진 외 3인(2012)은 시공간 환경정보를 이용하여 VISIT(Vegetation Integrated Simulator for Trace gases)이라는 생태계 모형 구동하였고, 우리나라의 생태계 탄소 수지를 추정하고, 기후변화 완화를 위한 생태계 관리 전략을 수립을 위한 기초자료로 활용가치가 있다.

이상철 외 5인(2011)은 산림분포 취약성을 한국형 산림 생태계 분포 모델 Thermal Analogy Groups(TAG)의 산림분포예측 방법과 HyTAG에서 정의한 식생유형을 이용하여 기후 변화에 따른 잠재 식물상의 분포 변화를 기후변화 민감성과 적응성으로 나누어 평가하였다.

Choi et al.(2011)은 MC1 모형을 이용하여 한국의 산림생태계의 기후변화 취약성 평가에 적용하여, 기후변화 민감성과 적응성으로 나누어 평가하였다.

이민아 외 5인(2009)은 여러 분야의 기후 영향모델 활용이 증가하면서 모델의 입력자료 중 특히 기후자료의 구축 방법 및 한반도 기후의 특성 파악에 대한 연구가 절실히 요구되고 있다. 본 연구에서는 보건을 위하여 공간통계학방법 중 거리자승역산가중(Inverse Distance Squared Weighting: IDSW)를 적용하여 분석하였다.

이우균(2011)은 산림분야에 기후변화가 미치는 주요한 영향을 선정하고, 주요 영향별 취약성 평가 사례 및 평가방법을 제시하였다. 또, 조용성·이우균(2011)은 기후변화 대응 지표 개발 및 지수 산정을 통하여 지자체 기후변화 대응 정도를 평가하고 지자체 기후변화 대응 방안 도출하였다.

5. 기후변화가 수산에 미치는 영향 분석

황진환(2007)은 기후변화로 인한 해수면 상승 등에 따른 취약성 및 영향을 평가하고 피해 방지 대책 및 적응대책을 수립하고, 해양수산부문의 체계적인 기후변화 대응 업무의 수행을 위해 전담센터의 설치 등의 관리체계 정비 등을 제시함으로써 해양과학기술을 통한 기후변화에 대한 적극적 대응체제 구축을 주장하였다.

장창익·이재봉(2010)은 생태계 차원에서 기후변화가 어업에 미치는 영향을 평가하는 방법인 IFRAME을 소개하면서, 이 방법에 의해 기후변화의 영향을 평가하고, 예측하며 궁극적으로는 관리할 수 있는 방향을 모색하였다.

이버들·김봉태·조용성(2011)은 국내 수산부문에 한정하여 기후변화 취약성을 결

정하는 요소들을 종합한 취약성 지표를 개발하고 AHP 분석에 기초한 가중치를 적용하여 지역별 취약성 평가를 수행하여 정책적 시사점을 제시하였다.

국립수산과학원(2013)은 기후변화에 따른 어장환경 및 수산자원 변동 예측, 아열대에 따른 주요 어획어종의 회유와 가입에 대한 시공간 변동의 감시를 위한 생물상 변화 조사 등을 수행하고, 이상기상 등 기후변화 적응을 위한 기상자료 활용 방안, 어업인의 피해예방 체제 구축 등을 제안하였다.

Cheung et al.(2010)는 기후변화 시나리오에 따라 2005년에서 2055년 사이에 1,066 어종에 대해 잠재 어획량 변화를 예측하였다. 그에 따르면, 고위도 지역에서는 평균 30~70% 어획량이 증가하는 반면, 열대 지역에서는 40% 감소하는 것으로 나타나 수산분야 기후변화 적응정책의 필요성을 제기하였다.

Cheung et al.(2012)는 전 세계 600종 이상의 어종에 대한 통합적인 연구를 통해 기후변화가 어종의 분포, 풍도, 어체 크기에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과, high-emission 시나리오에서 2000년에서 2050년 사이에 어종의 평균적인 중량은 전 세계적으로 14~24% 감소하는 것으로 예상되었다. 특히 중·저위도 지역은 20% 이상 감소하여 그 영향이 큰 것으로 나타났다.

6. 기후변화가 식품에 미치는 영향 분석

정기혜(2009)는 기후변화의 영향에 대응하기 위한 전략으로 IPCC는 총 6가지 시나리오를 제시하고 있는데 그중 우리나라가 근간으로 하고 있는 A2 시나리오를 근거로 우리나라 식품안전에 관련하여 식중독 발생 현황을 예측하였다.

신호성 외 4인(2009)은 기후변화와 식중독 발생과의 관계를 조명하고 미래 기후변화 시나리오에 입각하여 식중독 발생 예측을 수행하기 위하여 기온 상승, 상대습도 변화에 따른 주간 식중독 발생 건수 및 환자 수의 변화에 주목하여 분석을 수행하였다. 이를 통해 기후변화에 따른 식중독 발생 영향을 추정하였다.

Miraglia et al.(2009)는 유럽에서 기후변화로 인해 영향을 받는 다양한 식품안전 문제(곰팡이 독소, 잔류농약, 식물의 미량원소 또는 중금속, 해양 생물 독소, 병원성 세균 등)를 파악하여 앞으로의 연구방향을 제시하였다.

7. 해외연구 현황

Vining(1989)은 기상의 개별요소인 일사량, 기온, 강수량, 습도, 풍속 등이 농작물과 축산물의 생리학 및 생산에 미치는 영향을 계량적으로 분석하였고, Francisco and Guise(1988)은 강수량이 곡물 단수에 미치는 영향을 분석하였다.

Rosenzweig and Parry(1994)는 지구온난화로 CO₂의 농도가 증가함에 따라 대기대순환모형(General Circulation Model)과 일반균형모형인 세계식량무역모형(World Food Trade Model)을 연계하여 2060년 세계 작물생산량 예측과 농가수준의 적응 정도를 고려하여 선진국과 개도국의 식량 식량의 교역량 변화를 분석하였다. 특히 기후변화 적응조치로 농가수준의 적응(과종일장 변경, 관개용수의 확대, 품종다양화 등)과 농업시스템의 변화(농업인프라 투자 확대, 관개시설 설치, 품종개발 등)가 이루어지는 곡물생산에 미치는 효과를 분석하였다.

Parry et al.(1999)는 IBSNAT-ICASA dynamic crop growth models과 World Food Trade Model을 이용하여 기후변화의 영향을 분석하였다. 영국 Hadley Center의 대기순환모형(GCM)을 기초로 한 HadCM2(Mitchell et al., 1995)와 HadCM3(Hulme et al., 1999)의 기후변화 시나리오를 적용하여 추정된 결과 HadCM2 하에서 곡물생산은 2080년 약 100백만 톤(2.1%) 감소하고 생산량 감소에 따라 가격은 17%(±4.5)까지 상승하며, 기아 인구는 기후변화가 발생하지 않을 경우 250만명보다 추가로 90백만 명이 발생할 것으로 전망하였다. 또한 HadCM3 하에서 생산량은 160백만 톤(4%) 감소하는 것으로 나타나며 가격은 45%까지 증가할 수 있을 것으로 예상되며, 기아 인구는 HadCM2보다 125백만명이 증가할 것으로 예측하였다.

Solomou and Wu(1999)와 Khatri et al.(1998) 등은 1867-1913년(영국), 1870-1913년(독일)의 기간 동안 유럽 국가들에 있어 전체 농업생산지수가 강수량 및 기온과 같은 기후변수에 의해 어떤 영향을 받는지를 준모수적 분석법을 이용해 분석하였다. 유럽농업에 있어 생산량 변화의 약 1/3~2/3를 기후변화 요인으로 설명하였다. 평균 기온 이하수준에서는 기온상승 시 생산량이 증가하나 어느 수준 이상의 고온에서는 추가적인 기온 상승은 오히려 산출을 감소시키는 분석결과를 제시하였다.

Chang(2002)은 2단계 접근방식을 적용하여 기후변화와 대만 농업의 잠재적 영향 추정을 시도하였다. 첫 번째 단계에서는 기후변화에 따른 주요작물의 단수반응함수를 추정하였고, 두 번째 단계에서는 추정된 함수를 기초로 가격내생 수리계획모형을 활용하였다.

Wang and Mauzerall(2004)은 한국, 중국, 일본 3개국을 대상으로 오존 및 관련 화

학적 추적자 모형을 적용하여 1990년과 2020년에 오존의 변화에 따른 곡물 생산량 변화와 단수 감소에 따른 경제적 피해 등을 계측하였다.

Burton and Lim(2005)는 기후변화에 직면하여 세계농업의 적응에 관한 전망을 검토하였는데, 세계적 생산은 불리하게 영향 받지 않을지라도 저위도 지역은 적응 능력이 적어 유리하지 않은 것으로 분석되었다. 또한 적응의 지속적 성공은 변화하는 기술과 세계무역자유화 속에서 국가수준의 행동들에 달려있음을 밝혔다. 변화하는 상황 속에서 적응을 이해하고 용이하게 할 적응정책 체제를 제시하였다.

Deschenes and Greenstone(2006)은 온도와 강수량 등 기후변화에 따라 농업수익에 미치는 영향을 분석하였다. 장기적으로 기후온난화에 따라 기온상승이 이루어지는 경우 미국 캘리포니아 지역의 농업수익에 미치는 영향을 추정하여 제시하였다. 특히 이 연구에서는 속성함수(hedonic function)를 이용하여 기후변화에 따른 농업부문의 경제 분석의 새로운 틀을 설정하였다.

Adger(2006)는 기후변화에 따른 농업부문 영향 및 적응 방안과 관련하여 IPCC의 분석자료를 이용하여 2100년의 기온변화 예측과 이를 기초로 한 대륙별 주요 작물(미곡, 옥수수, 소맥, 대두 등)의 단보당 수확량 전망치를 제시하였다.

Finger and Schmid(2007)는 생태 물리적 모형을 이용하여 기후변화의 위험을 고려한 기대효용함수를 이용하여 옥수수와 겨울밀의 작물생산에 미치는 영향을 분석하였다. 특히 이 연구에서는 생산농가의 기후변화 및 가격변화의 위험 반응을 고려한 단수분석도 함께 이루어졌다.

Tubiello and Fischer(2007)는 생태경제학적 모형을 이용하여 기후온난화로 기온상승이 이루어지는 경우 1990~2080년까지 매 10년마다 주요곡물(소맥, 쌀, 옥수수, 조곡 등)의 세계 지역별 생산량 변화를 전망하였다. 특히 기후변화 정도에 따라 지역별로 식량부족 문제가 심화될 수 있다는 점에서 특정 개도국의 경우 식량안보가 중요해질 수 있음을 강조하였다.

OECD(2013)는 농업부문의 기후변화 적응 방안 모색을 위해 IFPRI에서 개발한 IMPACT 모형을 이용하여 사회경제적 여건변화를 고려한 시나리오를 설정하고 기후변화가 세계 물가 및 농산물 수확량에 미치는 영향, 지역적 영향, 식량안보에 미치는 영향 등을 분석하였다. 또한 연구개발과 물 관리 등의 적응 시나리오를 기초로 2050년 OECD 회원국의 농업부문에 미치는 영향을 분석하였다.

8. 국내외 기술개발 평가

기존에 수행된 농림수산식품부문의 기후변화 영향분석에 관한 연구들은 주로 과학적인 분석에 치중되어 있고 부문별, 부처별로 산발적으로 연구가 진행되어 연구결과를 정책적으로 활용하기에는 한계가 있다. 이 연구에서는 농업, 산림, 수산, 식품부문의 종합적인 농림수산식품부문 영향분석 연구를 수행하되, 특히 경제적인 영향을 심층적으로 분석하였다. 기후변화 시나리오는 자연적, 경제적, 사회적 여건 변화를 반영함으로써 갱신되고 있다. 이러한 여건변화가 반영되지 않을 경우 추정 결과가 유의하지 않을 수도 있다. 이 연구는 최근에 제시된 기후변화의 신 시나리오를 도입하여 그 파급영향을 모형과 취약성평가 방법론을 활용하여 분석함으로써 최근의 여건변화를 반영하였다. 기존의 기후변화 영향평가 연구는 과학적인 연구와 경제적인 연구가 서로 연계되지 않아 정책대안을 제시하는데 한계가 있었다. 따라서 이 연구에서는 과학적 기반을 둔 생육모형과 경제적 기반을 둔 농업경제모형을 하나로 통합함으로써 보다 강력한 분석틀을 제공하였고, 그에 따른 실효성 있는 정책대안을 제시하였다.

기후변화 영향평가와 관련하여 모형을 활용한 선행연구들은 한두가지 정도의 모형을 고려하여 분석 및 추정을 하고 있는데 이는 과잉 혹은 과소 추정되었을 가능성을 배제할 수 없다. 따라서 이 연구에서는 분야별로 적용 가능한 다양한 모형을 모두 고려하고, 이용 가능성, 지역 적합성, 예측력 등을 종합적으로 분석하여 최적 모형을 선정하여 분석을 추진하였다.

데이터마이닝 분야가 농림수산식품부문의 기후변화 영향평가에 적용된 사례는 국내에 거의 없으며, 이 연구에서는 메타분석, 텍스트마이닝, 데이터마이닝 등을 기후변화 영향분석에 적용하는 등 새로운 접근방법을 시도하였다.

경제적 영향분석, 취약성 분석을 바탕으로 한 기후변화 대응전략 연구는 농업, 산림, 수산, 식품 등 각 부문별로 이루어져왔으며, 아직까지 많은 연구가 이루어지지 못한 못하고, 특히 수산 및 식품부문의 기후변화 연구는 초기 단계에 있다. 기후변화의 대응은 장기적인 전략 및 실천이 필요함에도 불구하고 선행연구는 대부분 단기간의 부분적인 대응전략 제시에 그치고 있다. 선행연구의 기후변화 적응전략은 농업분야를 제외하고는 정책의 우선순위 분석을 기초로 제시되지 않아 국가 예산 사용의 비효율성을 초래할 가능성이 있다. 이 연구에서는 분야별로 계층적 의사결정분석(AHP)을 활용하여 정책의 우선순위를 분석하여 제시하였다. 기존의 대응전략 정책 연구는 분야별로 이루어져 중복투자, 과잉투자의 문제가 나타날 수 있다. 이 연구는

농림수산식품부문의 종합적인 대응전략을 제시하고, 적절한 정책 조합 및 통합 전략을 통해 분야별 상호 시너지 효과를 창출하도록 유도하였다.

기후변화에 따른 경제적 영향평가 모델부분은 농업과 산림분야를 대상으로 제한적으로 이루어져 왔으며, 최근 들어, 수산과 식품 분야에서도 이루어지고 있다. 그러나 각 부문별로 연구시기에 있어 차이가 나기 때문에 사용한 시나리오와 자료가 달라 부문별로 비교하거나 통합하는데 있어 제한이 있다. 따라서 본 연구과제에서는 통일된 신 기후변화 시나리오를 적용하여 부문간 비교가능하도록 하였다.

영향평가를 위해서는 다양한 모델들이 적용될 수 있으나, 각 세부분야별 전문가 간담회 등을 통하여 각 세부분야별 특성이 충분히 반영되도록 의견을 수렴하고 모형을 수립하게 되었다. 또한 앞서 언급한 바와 같이 부문을 비교·통합 할 수 있도록 관련 연구결과를 데이터베이스화 하고 데이터마이닝을 적용하여 방법론을 도출하고 분석하게 되었다.

제 3 장

연구개발수행 내용 및 결과

제1절 국내외 기후변화 실태와 전망

1. 세계 기후변화 진단과 예측

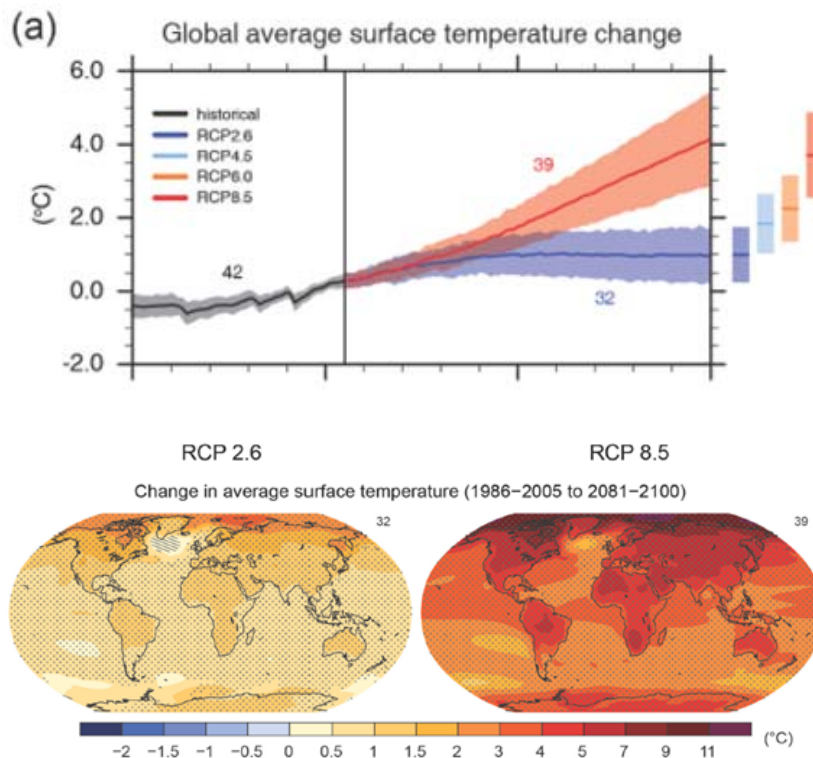
기후는 장기간에 걸친(통상적으로 약 30년 평균) 특정지역의 대기상태를 지칭하며, 기후변화는 기후특성의 평균이나 변동성의 변화를 통계분석 등을 통해 확인 가능하고 수십 년 혹은 그 이상 오래 지속되는 기후상태를 의미한다. 기후변화는 대기권, 수권, 생물권, 설빙권, 지권 등 기후시스템을 구성하는 각 요소의 변화 또는 요소간의 복잡한 상호작용에 의해 발생한다(김창길 외 4인, 2009, pp.17-18). 과거의 기후변화는 자연적인 원인에 의해 발생하였지만, 현재 진행 중인 지구온난화는 자연적인 원인이 아닌, 인간 활동이 주요 원인이라는 점에서 과거와 다르다고 볼 수 있다. 이러한 지구온난화에 대한 체계적이고 신뢰성 있는 진단을 위해 세계 기후변화에 관한 과학적인 분석 작업이 1990년 이후 UN산하기구인 정부간기후변화협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)를 통해 주기적으로 이루어지고 있다.² IPCC 기후변화 평가보고서는 지금까지 1차(1990), 2차(1995), 3차(2001), 4차(2007), 5차(2014) 보고서가 출간되었다. 최근에 발표된 IPCC 5차 평가보고서에 따르면 지구에너지의 불균형을 초래하는 모든 물질과 과정이 기후변화의 원인이 되고, 특히 대기 중의 이산

² IPCC는 세계기상기구(WMO)와 국제연합 환경프로그램(UNEP)이 공동으로 기후변화 문제에 대처하고자 1988년 설립한 정부간 협의체이다. IPCC는 1990년 이래 매 5~6년 간격으로 기후변화 추세 및 원인규명, 기후변화에 따른 사회경제적 영향, 대응 전략에 대한 과학적 정보를 담은 기후변화 평가보고서(Assessment Report, AR) 발간하고 있다.

화탄소 농도가 주요 원인임을 밝혔다. CO₂ 농도는 2011년 391ppm으로 산업화(1750년) 이후 인간활동에 의해 약 40% 증가한 것으로 분석하였다. 지구의 평균기온은 1850년 이래 지나나 30년(1983~2012년) 동안이 가장 더웠고, 21세기의 첫 10년은 더 더웠던 것으로 나타나 지구온난화가 지속되고 있음을 확인하였다. 또한 지구온난화로 인한 지구 평균기온은 지난 133년간(1880~2012년) 0.85°C(0.65~1.06°C) 상승한 것으로 나타났다. 평균강수량의 변화는 뚜렷하지 않으나 1901년 이후 북반구 중위도 육지에서 강수량이 증가했고, 지구의 평균 해수면은 110년간(1901~2010년) 19cm(17~21cm) 상승한 것으로 나타났다.

세계의 미래 기후변화 전망을 보면 현재 추세대로 온실가스 배출이 지속된다면 (CO₂ 농도가 2100년 936ppm에 도달하는 경우로 RCP 8.5),³ 21세기 말(2081~2100년)에는 전 지구의 평균기온이 1986~2005년 대비 3.7°C(2.6~4.8°C), 해수면은

그림 1-1. RCP시나리오별 IPCC의 세계 기후변화 전망



자료: IPCC(2014).

3 IPCC의 제5차 평가보고서의 기후변화 예측 시나리오는 인간 활동이 대기에 미치는 온실가스 농도인 복사강제력을 기초로 사회-경제 여건변화와 연계한 새로운 대표농도경로(Representative Concentration Pathway, RCP)로 설정하고 있다. RCP 시나리오는 최근 온실가스 농도 변화경향을 반영하였으며 최근 예측모델에 맞게 해상도 등을 업데이트 하였다. RCP에서 4가지 대표 온실가스 농도는 2.6, 4.5, 6.0, 8.5를 사용하였다.

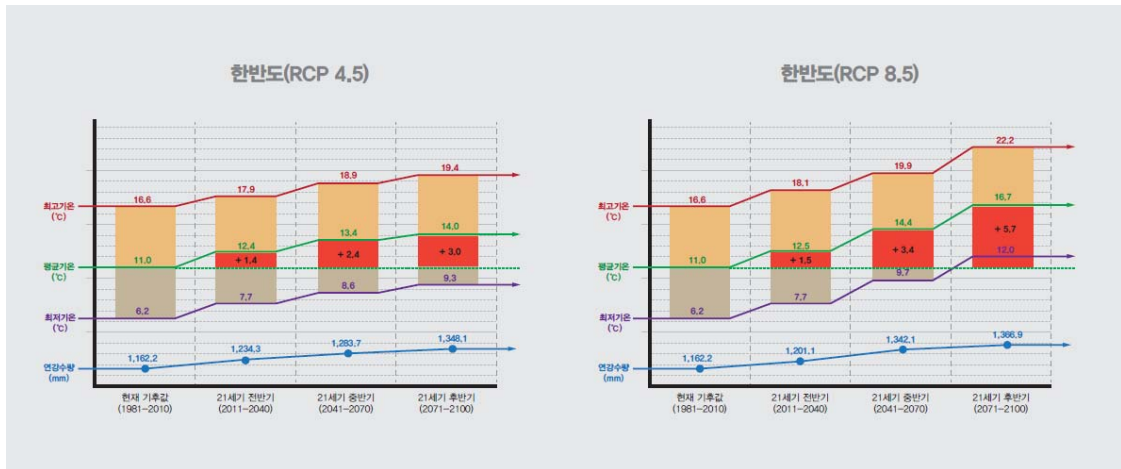
63cm 상승할 것으로 전망하고 있다. 한편 지구의 온실가스 감축이 상당히 실현되는 경우(CO₂ 농도가 2100년 538ppm에 도달하는 경우로 RCP 4.5), 평균기온은 1.8℃ 상승하고, 해수면은 47cm 정도로 상승 폭을 완화시킬 수 있는 것으로 전망하였다<그림 1-1>. 특히 2℃ 상승하면 2030년부터 밀, 쌀, 옥수수 등의 주요 식량작물의 생산이 크게 줄어들어 식량부족 문제가 심화될 것으로 예측하였다. 뿐만아니라 육상 및 담수 종의 멸종위험 증가, 연안홍수로 인한 토지유실 등 전 부문에 걸쳐 위험 수준이 심화되며, 세계경제의 총손실액이 소득의 0.2%~2.0%(1400억~1조 4천억 달러)에 이를 것으로 제시하고 있다(IPCC, 2014).

2. 국내 기후변화 진단과 예측

우리나라는 지리적으로 북반구의 극동지역에 위치한 온대성기후대에 속하고 있어 봄, 여름, 가을, 겨울의 사계절이 뚜렷하다. 연평균 기온은 전국적으로 보면 12.4℃이나 지역에 따라 편차가 커 대관령의 6.4℃부터 서귀포의 16.2℃까지 폭넓게 분포하고 있다. 연평균 기온의 경우 지역차가 큰 편이나 산악지대를 제외하면 대체로 10~16℃ 내외이다. 우리나라의 기후변화를 분석하기 위해 1912년 이후 장기간 관측자료가 있는 서울, 인천, 강릉, 대구, 부산, 목포 등 6개 지점 자료를 이용한 결과, 1912~2010년간 기온은 1.8℃ 상승하였고, 강수량은 200mm 이상 증가한 것으로 나타났다(권원태, 2012).

기상청(2012)은 한반도 미래기후변화 전망에서 온실가스 증가로 과거 30년간의 관측자료에서 나타나는 온난화 경향이 2100년까지 지속될 것으로 예상하고 있다. RCP 4.5 시나리오에서는 연평균 기온이 21세기 전반기에 +1.4℃, 중반기에 +2.4℃, 후반기에 +3.0℃ 상승으로 전망된다. 또한 RCP 8.5 시나리오에서는 현재 11.0℃ 수준에서 21세기 전반기에 +1.5℃, 중반기에 3.4℃, 후반기에는 5.7℃로 온난화가 더욱 가속화될 것으로 전망하고 있다. 21세기 후반기의 연평균 기온은 RCP 8.5에서 16.7℃ 정도로 전망하고 있으며, 이러한 기온은 현재 제주도 남단의 연평균 기온에 해당한다. 일최고 기온과 일최저 기온 또한 RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오 모두에서 뚜렷한 상승경향을 보이고 있다<표 1-1>. RCP 8.5 시나리오에서의 일최고 기온은 현재 기후값 16.6℃ 수준에서 21세기 전반기에 +1.5℃, 중반기에 +3.3℃, 후반기에 5.6℃ 증가할 것으로 전망되고 있다(기상청, 2012).

그림 1-2. RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오의 한반도 기후변화 전망치 비교



자료: 기상청(2012)

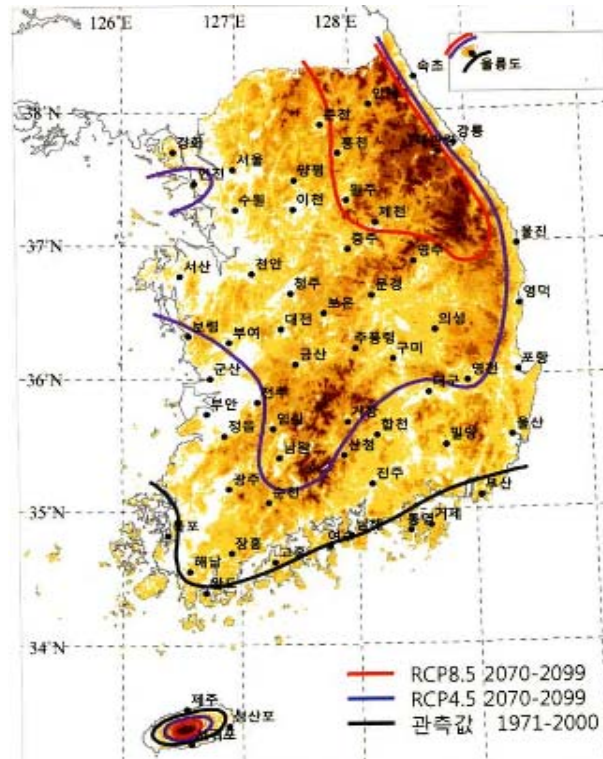
국립기상연구소(2011)에서 분석한 RCP4.5 시나리오에 따르면 21세기말에는 아열대 기후지역(평균기온 10도가 넘는 달이 1년 중 8개월을 넘는 지역)이 서해안지역인 보령까지 확대되고, 대도시 해안지역인 인천도 아열대 기후구에 포함될 것으로 제시하고 있다<그림 1-3>. RCP8.5 시나리오 아래에서는 대관령을 중심으로 인제, 홍천, 원주, 제천 등을 제외한 전지역이 아열대 기후지역에 포함될 것으로 전망된다.

표 1-1. 1986~2005년 대비 21세기 말(2081~2100년) 한반도 기후변화 전망

구분	현재 기후값 (1981-2010)	21세기 전반기 (2011-2040)		21세기 중반기 (2041-2070)		21세기 후반기 (2071-2100)		경향성 (10년당)	
평균기온	11.0	12.4	(12.5)	13.4	(14.4)	14.0	(16.7)	0.33	(0.63)
일최고기온	16.6	17.9	(18.1)	18.9	(19.9)	19.4	(22.2)	0.31	(0.62)
일최저기온	6.2	7.7	(7.7)	8.6	(9.7)	9.3	(12.0)	0.34	(0.64)
강수량	1,162.2	1,234.3	(1,201.1)	1,283.7	(1,342.1)	1,348.1	(1,366.9)	20.66	(22.74)
풍속	1.9	1.9	(1.9)	1.9	(1.9)	1.8	(1.9)	-0.01	(0.00)
상대습도	70.2	70.1	(70.0)	69.8	(70.4)	70.4	(70.3)	0.02	(0.01)
운량	5.2	5.2	(5.2)	5.2	(5.2)	5.2	(5.2)	0.00	(0.00)
폭염일수	7.3	8.8	(10.2)	11.1	(15.2)	13.1	(30.2)	0.64	(2.54)
열대야일수	2.8	4.1	(5.7)	9.0	(16.6)	13.6	(37.2)	1.20	(3.82)
호우일수	2.0	2.3	(2.1)	2.6	(2.8)	2.7	(2.8)	0.08	(0.09)

자료: 기상청

그림 1-3. 한반도의 아열대지역 변화 전망



자료: 국립기상연구소(2011), p.111.

제2절 농업부문의 경제적 영향분석 및 취약성 평가 (1세부과제)

1. 농업부문 기후변화 영향분석 접근방법

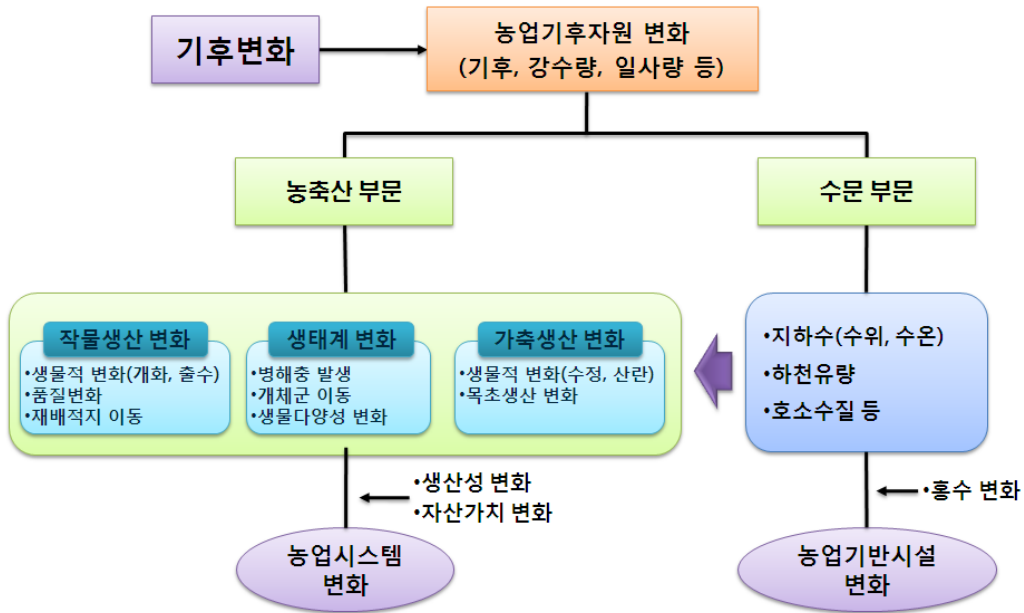
가. 기후변화가 농업부문에 미치는 파급영향 체계

기후는 어떤 지역에서 어떤 기상현상이 오랜 기간 동안에 되풀이 되어 나타나는 평균적인 기상현상을 말한다. 농업은 그 지역의 기후에 적합한 작물을 선택하고 영농방법을 적용하여 생산 활동이 이루어지므로 기후의존적인 산업으로 볼 수 있다. 지역특성이란 그 지역의 풍토에 따른 생태계의 특성을 말하며, 기후는 지역의 물리적 특성을 대표하는 것 가운데 하나이다. 기후변화는 안정되어 있던 농업생태계를 교란시켜 기온, 강수량, 일사량 등 농업기후요소의 변화를 통해 농축산부문과 수문 부문에 영향을 미친다. 기후변화가 농업부문에 미치는 파급영향을 보면 농축산부문의 생산에 미치는 영향으로 작물의 개화·출수 등 생물학적 변화와 품질변화, 재배적지 이동 등을 들 수 있다<그림 2-1>.⁴ 기후변화는 농업생태계에 영향을 미쳐 병해충 발생과 개체군의 이동 및 생물다양성에 영향을 준다.

또한 축산부문에는 수정과 산란 등 생물학적 변화와 목초생산에 영향을 미친다. 또한 기후변화는 강수량, 증발, 토양수분 등의 변화를 통한 지하수 수위와 수온, 하천 유량, 호소 수질 등 수문 분야에도 영향을 미친다. 특히 기후변화에 따른 강수의 증가는 유출의 증가로 연결되며, 온도의 상승은 증발산을 증가시켜 유출에는 감소의 요인으로 작용하게 된다.

4 기후변화가 농작물 생산에 미치는 영향은 1차적 영향으로 온실가스 증가에 따른 대기 조성성분의 변화로 작물생장 반응의 변화와 농경지 균락 내 에너지와 수분 수지변화를 들 수 있다. 다음으로 1차적 영향에 의한 농업기후자원의 변동으로 발생하는 2차적 영향은 재배적지 변동과 농업생태계의 변화, 농경지도양의 이화학적 변화 등을 들 수 있다(나영은 외 6인, 2007, p.94).

그림 2-1. 기후변화가 농업부문에 미치는 파급영향 체계



자료: 김창길 외 4인(2009), p.36.

2. 기후변화가 작물 및 축산부문에 미치는 영향

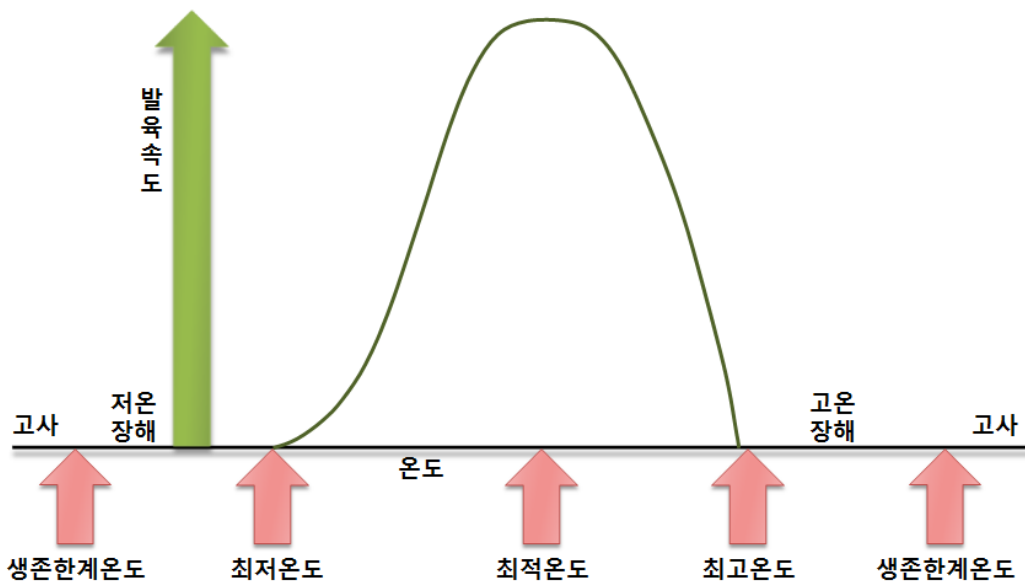
가. 기후변화가 작물에 미치는 영향

작물에는 곡물과 콩, 과일, 채소와 같이 열매를 먹는 것이나, 잎채소, 차, 목초 등 잎을 이용하는 것 등을 들 수 있다. 대부분의 작물이 초본성 1년생 작물이며, 과일이거나 차 등 목본성인 것도 있다. 기후변화가 작물에 미치는 영향과 관련하여 기본적인 반응에 대한 이해가 필요하다. 작물의 생육에는 대기 중의 이산화탄소농도, 기온, 강수, 일사량 모두가 크게 영향을 미친다. 이 중 이산화탄소농도, 기온, 일사량은 식물의 생육과 직접 관계되며, 강수는 다소 차이가 있다. 식물이 사용하는 물의 대부분은 빗물을 직접 이용하는 것이 아닌, 일단 토양에 스며든 물을 뿌리에서 흡수한 것이다.

작물의 생육에도 크게 두 가지 측면으로 나누어 볼 수 있다. 첫째는 중량의 증가나 높이의 연장이라는 양적인 성장이며, 다른 하나는 발아, 꽃눈의 분화, 벼의 성숙, 낙엽 등 발육상(발육 스테이지)의 진행에서 질적인 변화를 들 수 있다. 작물에서는 이러한 양적인 성장과 발육 단계의 진행은 대부분의 경우 병행하여 진행하기 때문에

혼동되는 것이 많고, 또 양자에 엄밀한 관계가 있기 때문에 엄밀하게 구별할 수 없는 면도 있다. 작물의 발육 단계의 진행은 수확기의 정도를 결정하는 중요한 요소 중 하나이다. 발육단계의 진행에 가장 중요한 영향을 미치는 것이 온도와 낮 길이이다. 온도 상승은 작물의 발육단계의 진행에도 양적인 성장에도 영향을 미친다. 발육단계가 진행되는 스피드를 전문용어로 발육속도라고 하며, 발육속도와 기온의 관계는 일반적으로 모식도 산의 모습으로 특징지어진다. 최저 온도는 그 이하로는 그 식물이 발육하지 않는 온도, 최적 온도는 발육이 가장 빨리 진행되는 온도, 최고 온도는 그 이상의 고온이 되면 발육이 진행하지 않는 온도이다. 최저온도, 최적온도, 최고온도는 식물에 따라 다르다. 예를 들면 벼는 최저온도 12~13℃, 최적온도는 30~32℃, 최고온도는 36~38℃이다<그림 2-2>. 이러한 최저온도, 최적온도, 최고온도는 같은 식물이라도 시기에 따라 다르다. 보다 극단적인 고온이나 저온에 달하게 되면 생존한계온도를 넘어 고사하게 된다. 대부분의 경우, 생존한계온도에 미치기 전에 고온장애나 저온장애가 발생하고, 과일 등의 먹는 부분에 장애가 발생하면 상품가치가 크게 저하된다. 최적온도를 넘는 고온이 되면 발육이 늦어져 극단적인 경우에는 고온 장애가 발생하게 된다.

그림 2-2. 기온변화와 작물의 발육속도의 관계



자료: 杉浦 俊彦(2009), p.59.

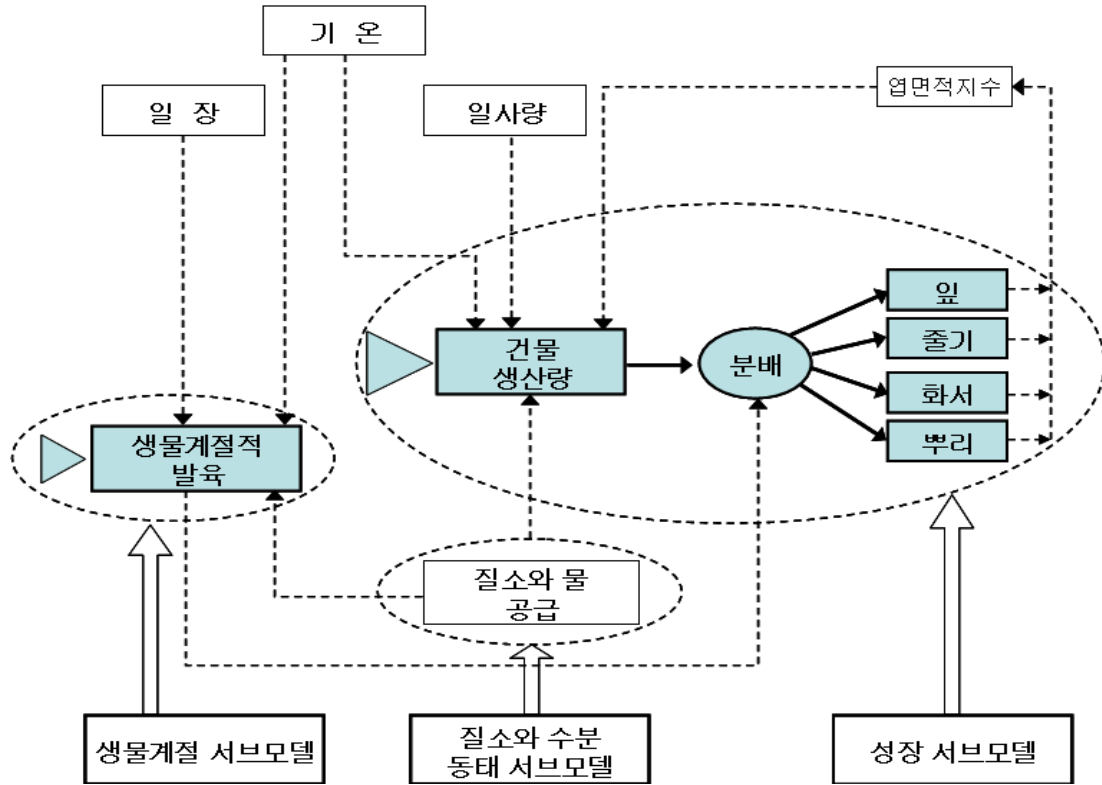
작물의 양적인 성장량은 작물의 수확량을 정하는 중요한 요소 중 하나이다. 양적 성장량은 특히 무게의 증가량은 기본적으로는 광합성량과 흡수량의 차이로 결정된다. 광합성량과 흡수량의 차이를 순광합성량이라고 한다. 광합성은 빛에너지를 사용

하여, 이산화탄소와 물에서 탄수화물과 산소를 합성하는 화학합성이며, 광합성으로 는 대기 중의 이산화탄소를 흡수, 질소를 방출하며, 흡수에서는 역으로 산소를 흡수, 이산화탄소를 방출한다.

기후변화가 작물에 미치는 영향은 기상환경과 작물생육을 연계한 CERES(Crop Estimation through Resource and Environment Synthesis) 모형을 이용하여 모의실험 이 가능하다. 예를 들어 CERES-Rice 모형은 기상, 토양, 품종특성 모수 및 재배관련 정보를 이용하여 벼의 발육과 수확을 예측하는 모형이다<그림 2-3>. 이 모형⁵은 크게 벼의 발육단계를 예측하는 생물계절 부문모형(phenology-sub model), 벼의 건물 생산 및 식물체 각 기관으로의 분배를 모의하는 성장 부문모형, 질소와 공급을 다루 는 질소-수분의 동태적 부문모형 등으로 나누어진다. 벼의 발육속도 및 성장속도에 영향을 미치는 가장 중요한 요인은 일사량, 온도 및 일장이다. 벼는 열대지방에서 온 단일성 작물로 품종 간 차이는 있으나 대부분의 경우 단일조건에서 출수가 빨라지고 장일조건에서는 출수가 늦어진다. 한편, 벼의 생육기간은 유수분화 개시기 이전의 영양생장기와 그 이후의 생식생장기로 나누어지고 영양생장기는 다시 발육속도가 일장에 민감하지 않은 기본영양생장기, 일장감응기로 나누어진다. 기본영양생장기에 벼의 발육속도는 온도에 의해서만 좌우되고, 일장감응기의 경우는 온도뿐만 아니라 일장도 발육속도에 영향을 미친다. 이때 일장이 한계일장보다 길어지게 되면 유수분 화기가 늦어진다. CERES-Rice 모델은 품종 유전계수를 이용하여 각 품종 발육단계를 모의한다. 일장감응기 이외의 발육단계에서 벼의 발육속도는 온도에 의해서만 좌 우된다. 벼의 건물생산량은 균락에 의해 흡수된 광합성 유효복사를 이용하여 계산하 며, 균락에 흡수된 광합성 유효복사는 엽면적 지수, 광이용효율 및 일사량으로 계산 된다. 이러한 방법으로 계산된 건물생산량은 잠재건물생산량이 된다. 실제건물생산 량은 잠재건물생산량에 미치지 못하는데, 이는 온도의 영향이나 수분 및 양분의 부 족에서 비롯된다. 수분 및 질소영양동태 서브모델에서는 토양수분의 변화와 토양 중 질소동태를 모의한다. 토양수분의 경우는 침투, 배수, 증발 및 벼의 증산 등의 과정 을 모의하며, 토양질소의 경우에는 유기태 질소의 무기화, 질산화, 탈질, 암모니아 위 산 및 용탈 등 토양 내의 질소 변화 과정 및 동태를 모의한다. 이와 같이 세 가지 부문모형으로 구성된 CERES-Rice 모형은 기후변화에 따른 쌀 작물생산의 중장기 예측모형으로 널리 활용되고 있다. CERES-Rice 모형을 이용한 쌀 생산 예측에 관해서 는 <제1협동과제>에서 상세히 다루게 된다.

5 모형에 대한 설명은 전반적인 설명은 한화진 외(2007)을 인용하였다.

그림 2-3. CERES-Rice 모형의 개념도



자료: 한화진 외 12인(2007), p.159.

나. 기후변화가 축산부문에 미치는 영향분석⁶

(1) 기후변화와 가축과의 관계

기후변화에 따른 높은 온도와 습도는 축산업의 생산성을 저하시키는 대표적인 요인 중에 하나로(Morrison, 1983), 각각의 가축은 종에 따른 적정 환경온도 범위(zones of thermal comfort: ZTC)를 가지며 동물의 생리적 특성, 습도, 대기의 속도와 태양복사 등의 요인에 영향을 받는다(NRC, 1981). 가축의 특성상 기후변화에 빠르게 적응하기 어려운 한계를 지니기 때문에 가축의 생산성을 높이기 위해서는 축종에 맞는 적정 환경온도 범위에 따라 사육환경을 유지하여야 하며 이를 위해 추가적인 비용이 소요된다. 특히, 공장식 사육이 주로 이루어지는 국가들에서는 고온에 따른 열스트레스(heat stress)에 따라 농장의 온도를 조절하기 위해 많은 에너지를 소비하는데 이

⁶ 기후변화가 축산부문에 미치는 영향 분석에 관한 부분은 충남대학교 서성원 교수에게 원고위탁으로 수행한 연구결과의 주요 내용을 요약한 것임을 밝혀둔다. 원고위탁의 상세한 내용은 김창길, 정학균, 문동현 편저(2013, pp.315-370) 별도 자료집에 제시되어 있다.

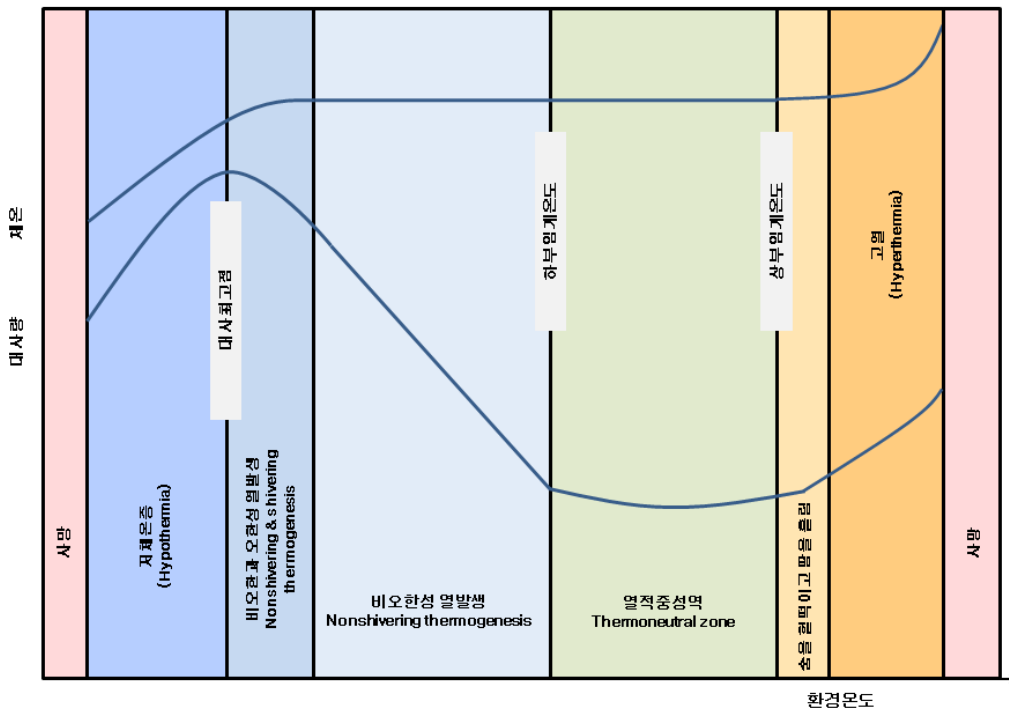
에 따라 생산비가 높아지는 문제점을 가지고 있다. 이와 같이, 축산업은 기후와 환경 요인에 강한 연계성과 의존성을 가지고 있다. 기후와 환경요인의 변화가 축산업에 미치는 영향은 미시적·거시적일 뿐만 아니라 사회·경제적으로 광범위하고 다양하다. 특히, 기후변화에 따라 하절기와 동절기가 길어지고 있는 우리나라에서 겨울철 저온 스트레스와 여름철 고온 스트레스에 의한 축산업의 생산성 저하는 지구 온난화와 기후변화에 따라 더욱 가속화 될 전망이다. 따라서 기후변화에 대응한 고온 및 저온 스트레스에 의한 생산성 저하를 최소화 할 수 있는 사양기술 개발 및 사양시스템의 구축이 시급하며 기후변화의 축산업에 미치는 영향 평가 및 적용 연구가 필요한 실정이다.

(2) 기후 변화가 가축의 생리 및 건강에 미치는 영향

기후변화와 가축의 건강과의 상관관계에 대해서는 아직 많은 연구가 진행되고 있지 않지만 기후변화 가축의 건강에 직간접적으로 영향을 미칠 것으로 예상된다. 포유류와 조류를 포함한 항온동물은 각 동물 축종에 따라 다른 적정온도 범위를 가지고 온도 범위 안에서 최적의 기능을 하도록 진화하고 발달되어 있다<그림 2-4>.

이런 동물의 특성상 환경의 변화에 따라 주변의 온도가 적정온도 범위를 넘어서게 되면 환경에 의한 스트레스를 받게 되며 변화된 환경에 적응하게 된다. 가축이 외부

그림 2-4. 가축의 환경적 기온과 대사율의 관계



환경변화 및 스트레스에 적응하는 단계를 순응(acclimation)이라고 한다. 기후변화, 특히 기온의 급격한 변화에 대해서도 동일하게 순응 단계를 거치면서 가축의 건강은 영향을 받고 이는 가축의 생산성에도 직·간접적인 영향을 주게 된다.

기후변화에 의한 직접적인 영향으로는 온도와 직접적으로 관련된 질병, 혹서기와 혹한기의 동물의 폐사, 기온의 변화에 적응하는 동안 발생하는 대사성 질병 등이 있다. 간접적인 영향으로는 가축의 기온변화 적응기에 발생하는 대사경로의 급격한 변화, 온도의 상승에 따른 병원성 미생물의 증가와 관련된 질병의 증가, 병원성 세균에 대한 내성 증가, 고온과 건조한 기후에 의해 발생하는 자연재해로 인한 가축의 사료와 물 부족, 고온에 의한 사료 부패에 따른 식중독 등을 들 수 있다. 특히, 가축이 고온에 적응하면서 가축의 사료섭취량은 감소하고 호흡과 음수량이 증가한다. 또 호르몬의 변화로 인해 생산성은 감소하고 번식능력이 떨어지게 된다.

(가) 축우

각 축종별 적정 생육온도 범위는 다르기 때문에 고온에 따른 민감성도 달라진다. Sharma et al.(1983)의 연구결과에 따르면 낙농우 중 저지종(Jersey)은 홀스타인종보다 열스트레스에 대해 덜 민감한 것으로 나타났다. 홀스타인의 적정 환경온도 범위는 5~25℃로 이 적정온도 범위 안에서 사육될 때 적은 에너지를 소비하며 최상의 생산성을 얻게 된다. 낙농우의 경우, 유생산의 증가에 따라 대사열의 발생도 증가하게 된다. 이에 따라 유생산량이 높은 고능력우는 저능력우에 비해 높은 온도와 습도에 더 민감하게 영향을 받는 것으로 나타났다. 외부온도의 증가는 소의 땀 증발량을 증가시키고 이로 인해 대사열 손실이 증가하지만, 외부온도와 체온의 차이가 작아지면 대사열 손실은 감소하게 되며 땀의 배출과 피부의 혈류의 증가는 양의 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 인공기후실에서 40℃에 노출된 숫소 실험에서, 14℃의 물 51ℓ를 섭취한 황소는 직장, 피부, 피하지방에서 온도가 1.7℃정도 감소된 것으로 보고되었다(Bianca, 1964).

젖소의 호흡수는 차가운 온도에서는 분당 20회 정도였지만 기온이 32℃이상인 경우에는 호흡수가 100회 이상이었다. 아열대 지방의 고능력우의 경우 분당 호흡수는 기온이 25℃이상일 때 분당 50~60회 정도이다. 호흡수는 상대습도와 관련이 있는데 상대습도가 증가하면 젖소의 호흡수가 감소하고 체표면의 증발이 감소하여 직장 온도가 증가하고 사료섭취량과 유생산은 감소하게 된다(Johnson and Vanjonack, 1976).

여러 연구를 통해 고온의 기후에서 젖소의 유방염의 발생률이 높은 것으로 나타났다. 여름철 유선의 감염에 대한 정확한 기작이 밝혀지진 않았지만 기온의 상승이 병

원성 미생물의 생존과 가축의 면역방어기작에 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Hogan et al., 1989; Chirico et al., 1997; Giesecke, 1985). 특히, 지구온난화에 따른 기온 상승은 가축뿐만 아니라 환경에 간접적으로 영향을 주는데 그 중 매개인자성감염(vector-borne infection)의 생물학적 특성과 분포에 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 예를 들어, 기온이 2°C 증가하면 블루텡바이러스(Blue tongue)의 매개체인 겨모기(Culicoides)종의 숫자가 증가되는 것으로 보고되고 있으며, 기후변화에 따른 고온다습한 환경은 다양한 가축질병의 원인인 마이코톡신(micotoxin)의 분비를 증가시킨다고 보고되고 있다. 여름철의 고온스트레스만큼 겨울철의 저온스트레스(cold stress) 또한 가축의 생산성에도 영향을 준다. 비육우의 일당 증체량 및 증체효율이 대략 5~10% 정도 감소하는 것으로 보고되었다(Hoelscher, 2001).

(나) 돼지

돼지의 피부는 지방층이 두껍고 땀샘이 퇴화되어 있어 고온의 환경에 민감하고 고온스트레스를 받게 된다. 이런 돼지는 땀을 통해 열을 방출하여 체온을 조절하는 능력이 제한적이므로 돼지의 생육 적정 온도이상으로 기온이 올라가면 돼지는 고온스트레스를 받게 되고 이에 따라 호흡수와 체온이 상승하고 사료섭취량이 감소된다.

육성돈과 비육돈이 스트레스를 받지 않고 최적의 생산성을 낼 수 있는 생육적정온도는 18~21°C이다(Ingram, 1965). 돼지의 생육적정온도는 돼지의 수분증발능력에 따라 두 부분으로 나뉘지는데 생육적정온도의 하부경계는 돼지가 자신의 수분증발능력을 정상적으로 계속 유지할 수 있는 온도 범위이고 40kg의 돼지의 경우 이 하부경계 범위는 19~20°C라고 보고되었다(Werstegen, Henken and vanderHel, 1987).

생육적정온도의 상부경계는 증발열의 손실이 증가하는 온도 범위로 많은 연구가 진행되지는 않았으나 Quiniou et al.(2000)의 연구에 따르면 30~90kg의 돼지는 23~25°C의 온도에서 사료 섭취량이 감소된 것으로 나타났다. 외부기온이 상부 발육한계 온도(upper temperature threshold) 이상으로 올라가 육성기와 비육기의 돼지가 생육적정온도 이상의 기온에 노출되면 돼지는 생육적정온도 이내의 돼지보다 사료의 섭취량이 각각 13%와 26% 정도 떨어지게 된다(Nienaber et al., 1993).

온도의 변화는 돼지의 사료섭취량에 영향을 미친다. 체중이 45~85kg인 돼지를 기온의 변화를 주어 사양한 결과, 기온이 20°C에서 30°C로 1°C씩 상승할 때 사료섭취량은 일당 65g에서 75g 감소하였다(Nienaber et al., 1993). 고온스트레스는 돼지의 사료섭취량뿐만 아니라 돼지의 호흡수에도 영향을 주는데 호흡수는 온도뿐만 아니라 습도에 의해서도 영향을 받게 된다. 기온의 상승은 돼지의 행동에도 영향을 주는데 고온스트레스를 받은 돼지의 경우 체내 열을 방출하고 적정 체온을 유지하게 위

해 체열을 낮추기 위한 행동 변화를 보인다. 생육적정온도 내의 비육돈은 하루 중 90%의 시간을 누워있게 된다. Geers(1986)의 연구결과에 따르면 고온에서 돼지는 누워있을 때의 자세를 배면을 바닥에 댄 자세에서 옆으로 눕는 자세로 바꾸며, 같은 팬에 있는 돼지들과 접촉을 피하려고 하는 것으로 나타났다. 기온의 변화와 돼지의 자세의 상관관계 대한 연구에 따르면 돼지의 자세는 기온이 1℃씩 상승할수록 돼지가 옆으로 눕는 비율이 1.8%씩 증가하며, 기온의 상승에 따라 다른 돼지와 접촉 비율이 3.7%씩 감소되는 것으로 조사되었다(Aarnink et al., 2001).

(다) 가금

조류는 고온스트레스에 의해 사료 섭취시간이 감소하고 숨을 헐떡거리는 시간과 음수 시간이 증가한다. 조류는 다른 동물과는 달리 체열을 교환할 수 있는 기낭(air sacs)이라는 추가적인 방법을 가지고 있는데, 새가 헐떡거리는 동안 기낭은 공기의 흐름을 증가시키고, 이를 통해 가스의 순환을 증가시켜 열을 방출하게 된다(Fedde, 1998). 그러나 고온에서 헐떡거리는 행동의 증가는 혈액 내 이산화탄소와 혈액의 pH를 증가시켜 난각의 형성에 필요한 중탄산염과 칼슘 농도의 감소가 일어나고 유기산의 농도가 증가되어 산란계의 난각의 질에 영향을 준다.

육계의 사료섭취량은 기온의 상승에 따라 떨어짐. 4~6주령의 육계는 기온이 22℃에서 32℃로 증가할 때 사료섭취량은 24% 감소되었다. 산란계의 경우 사료섭취량은 기온이 20~30℃사이에서는 기온이 1도 증가함에 따라 1~1.5% 감소하고 온도가 32~38℃ 사이에서는 1도 증가함에 따라 5% 감소되었다(Travel et al., 2010).

고온스트레스는 육계와 산란계의 면역기능을 저해시키는데 고온스트레스에 노출된 산란계에서는 상대적으로 더 작은 흉선(thymus)와 비장(spleen)이 발견되었으며(Ghazi et al., 2012), 고온스트레스를 받은 육계에서는 림프기관의 무게가 감소되었다. 고온스트레스를 받은 육계는 전제 체내에 순환하는 항체의 양이 감소되었으며, 특히 IgM과 IgG의 농도가 감소되었다(Bartlett and Smith, 2003). 고온스트레스에 의한 가금류의 면역저하는 바이러스 및 박테리아 감염, 기생병의 발생을 증가시키고 이에 따라 가금류의 생산성과 폐사율을 증가시킨다(Quinteiro-Filho et al., 2010).

(3) 기후 변화가 가축의 번식에 미치는 영향

(가) 젖소

고온의 환경은 가축의 번식에 영향을 주며 이로 인해 유생산 및 육류생산에 부정적인 영향을 준다. 특히, 여름철 기온이 적정환경온도 이상으로 증가하면 수태율이

급격하게 떨어지고 조기유산이 증가한다. Nobel et al.(1997)의 연구에 의하면 여름철 발정에 의한 승가횟수는 발정 당 4.5회였으나 겨울철 발정에 의한 승가횟수는 발정 당 8.6회로 조사되었다. 고온스트레스는 발정기 젖소의 프로게스트론(progesterone), 황체형성호르몬(luteinizing hormone), 난포자극호르몬(follicle-stimulating hormone) 분비의 변화를 주어 난포세포의 성장을 저해시키고, 심한 경우 배아의 형성 감소시키거나 배아의 사망을 증가시키는 것으로 나타났다(Bényei et al., 2001; Hansen, 2007). 특히, 여름철 고온스트레스로 젖소의 황체형성호르몬의 분비가 저하되고, 여포의 성숙에 영향을 주어 에스트라디올(estradiol)의 분비가 감소되어 발정 발현이 낮아지게 된다(DeRensis and Scaramuzzi, 2003).

기온의 상승은 가축의 정액의 질에도 영향을 준다. 수소의 경우는 겨울철과 봄철에 비해 여름철에는 정액의 농도와 정자의 숫자와 운동력이 감소한다. 고온스트레스로 인해 생식기관 내의 난자와 정자 및 초기 배성숙에 부정적인 영향을 주며 (Burfening and Ulberg, 1968), 어미의 호르몬 균형을 변화 시켜 줄 수 있다(Scott et al., 1972; Thatcher, 1974). 따라서, 고온스트레스로 인해 임신기의 태아는 성장이 저하되고 유산율이 높아질 수 있다. 특히, 육우의 경우 번식기의 기온이 일일평균 최저 온도가 16.7℃를 넘어가면 임신율이 낮아진다.

(나) 돼지

고온스트레스는 돼지에서 착상(implantation)과 배발육을 저해시킨다고 보고되고 있다. 미경산돈(gilt)의 경우에는 임신 후 15일까지가 수정 후 15~30일 동안보다 고온스트레스에 민감하다. 이것은 착상기가 임신기 동안에 고온스트레스에 가장 민감한 시기임을 보여준다. Omtvedt et al.(1971)의 연구에서 미경산돈의 배아의 수가 온도의 상승에 따라 감소하였는데 수정 후 8~16일 사이의 온도 상승이 수정 후 0~8일 사이의 온도 상승보다 더 많은 배아 수의 손실이 발견되었다. 또한 고온스트레스는 출산 전·후 모돈에게 큰 영향을 주는데, 모돈의 분만 시 온도가 33℃이상이면 모돈 폐사율이 5~6배 증가한 것으로 나타났다. 교배기에 고온의 환경을 경험한 경산과 미경산 돼지의 경우는 발정이 지연되거나 수정이 되지 않는 돼지의 수가 증가한다. 수유기의 모돈은 유생산을 위해서 더 높은 대사량을 가지고 있으며 육성기의 돼지에 비해 고온에 민감하다. 수유기 모돈의 대사에너지 섭취량은 온도 1℃가 증가할 때마다 일당 2.6MJ이 감소하고 이렇게 감소된 영양소와 에너지의 감소로 인해 자돈의 성장률도 1℃씩 증가함에 따라 일당 50g씩 감소되는 것으로 나타났다(Renaudeau, 2008).

(다) 가금

산란계의 달걀 생산성은 높은 기온과 고온스트레스에 노출된 시간에 따라 달라진다. 산란계의 최고산란기(laying peak)는 생육적정온도에서보다 30℃ 이상 기온이 올라가면 떨어진다(Balnave and Brake, 2005). 고온의 환경에서는 전체 영양소 섭취량은 정상적으로 산란을 하기에 부족하며, 이에 따라 달걀의 무게와 질이 떨어지게 된다. 달걀 무게의 감소는 달걀 알부민 무게의 감소와 노른자의 무게 감소와 관련이 있다. 달걀 무게의 감소는 고온스트레스를 받은 기간의 단백질과 에너지 섭취 감소와 관련이 있으며, 또한 고온스트레스에서 말초혈관의 혈류 증가에 따라 자궁의 혈류가 감소하여 달걀의 발달이 감소될 수 있다.

(4) 기후 변화가 가축의 생산성에 미치는 영향

열스트레스는 낙농업과 육우 산업에 손실을 주는 가장 큰 원인 중 하나이다. 지구상에 존재하는 전체 소의 50% 이상이 열대지역에서 존재하며 열대지역의 특성상 열스트레스로 인해 낙농업의 경우 60% 가량의 경제적인 손실이 다른 지역의 비해 발생하는 것으로 나타났다(Wolfenson et al., 2000).

2006년 캘리포니아에서 발생한 열파(heat wave)에 의해 경제적 피해가 발생하였다. 피해액은 낙농업과 육우산업에서 10억 달러에 달하며 1990년대의 네브라스카 주에서 발생한 열파에 의해 피해는 2천만 달러의 경제적 손실이 발생하였다. 기온상승에 의한 경제 손실에 대한 연구를 바탕으로 축산부분의 미래 손실을 직·간접적으로 예측할 수 있는데 2003년도에 실시한 예측에 따르면 미국 축산부분의 경제적 손실은 16억 9천만 달러에서 23억 6천만 달러에 달하며 낙농분야에서 58%, 육우 산업에서 15%, 양돈에서 15%이면 가금에서 7% 정도로 예측되었다. 이러한 고온에 의한 경제적 손실은 미국뿐만 아니라 유럽에서도 지속적으로 발생하고 있으며 동물의 폐사에 의한 경제적 손실 또한 증가하고 있다. 기온과 습도는 젖소의 유생산에 부정적인 영향을 주는 가장 주요한 요인으로 유전적으로 우수한 소에게 있어서도 고온에 의한 생산량 감소는 동일하게 나타났다. 특히 고온스트레스에 의해 유생산량은 35~40% 정도 감소하는 것으로 나타났다(West, 2003).

홀스타인 착유의 유생산량은 2일전의 온습도지수 단위가 증가함에 따라 0.88kg 감소하였으며, 건물섭취량은 기온이 1℃ 증가함에 따라 0.85kg 감소하는 것으로 분석되었다. 고온스트레스는 젖소의 여러 가지 생체 시스템에 영향을 주어 유생산을 감소시키는데 내분비측면에서 동화호르몬과 이화호르몬의 순환에 영향을 준다. 또한 고온스트레스는 유지, 번식, 및 생존에 관련된 세포 내의 신호체계에 큰 영향을 주어

유생산성을 감소시킨다(Collier et al., 2005).

육류 생산에 있어서 비육우는 환경의 변화와 극심한 환경에 쉽게 적응하지 못한다. 더 체중이 많이 나가는 비육우와 털이 많고 털색이 검거나 검붉은 소는 열스트레스에 매우 민감하다. 고온의 환경과 많은 일사량에 노출된 소는 일당 건물섭취량, 일당증체량, 도체중량, 지방이 두께가 감소하는 것으로 알려졌다. 지중해 지역의 연구에서도 고열의 환경에 노출된 비육우의 크기와 체중실지수(body condition score: BCS)의 점수가 더 낮은 것으로 보고되었다(Lacetera et al., 1994).

고온 날씨에는 돼지의 생산성에도 영향을 미침. 고온의 기후는 포유기간의 자돈에게 영향을 주어 생산성을 감소시킨다. 모돈의 사료섭취량은 기온이 25°C 이상일 때 기온이 18~25°C 일 때에 비해 5~6배 감소하였다. 감소한 사료섭취량에 따라 모돈의 유생산량이 감소하고 모유의 감소에 따라 자돈의 성장과 생존능력과 생존에 영향을 준다. 기온의 상승은 양계산업의 생산성에도 영향을 주며 최근의 연구에 따르면 고온의 기후에서는 42일령 육계의 사료섭취량이 감소하고(16.4%), 체중이 감소하며(32.6%), 사료요구율(25.6%)이 증가되었다(Sohail et al., 2012).

기온이 30°C 이상일 때 열스트레스는 낮은 성장률에 의해 양계산업에 중요한 요인이 된다. 고온의 환경에서는 생체중과 도체중량이 낮아지고 육계의 치사량이 높아지고 사료섭취량이 감소된다. 산란계의 경우 달걀 생산의 감소는 사료섭취량의 감소와 함께 생식호르몬의 혼란으로 인해 달걀 생산이 감소된다. 최근의 연구결과에 따르면, 12일 동안 고온스트레스에 노출된 산란계는 사료섭취량이 마리당 28.58g 감소하였고 계란의 생산은 28.8% 감소하였다(Deng et al., 2012). St-Pierre et al.(2003)는 열스트레스와 기온상승으로 미국 내의 경제적 손실을 산출하였다. 이 연구에 따르면 미국 내 축산부분의 전체 경제적 손실은 연간 24억 달러에 달하며, 축종별로는 낙농부분에서 8억9천7백만 달러, 비육우는 3억6천9백만 달러, 양돈과 양계는 각각 2억9천9백만 달러와 1억2천8백만 달러로 추산되고 있다.

(5) 기후변화가 착유우의 생산효율에 미치는 영향 평가: 모델 시뮬레이션을 이용한 접근

(가) 시뮬레이션 접근 개관

국내에서 젖소로 많이 이용되는 홀스타인 품종의 적정 환경온도는 5~25°C 이며, 적정 온도 범위 안에서 사육될 때 최상의 생산성을 보임과 동시에 적은 에너지를 소비하게 된다. 그러나 환경온도가 적정 온도 범위를 넘어서게 되면 환경온도에 의한 스트레스를 받게 되며 이에 따라 젖소의 건강과 생산성은 직·간접적으로 영향을 받게 된다. 또한 극심한 기온 변화를 장시간 겪게 될 때, 적절한 조치를 취하지 않는

것은 집단 폐사를 유발하기도 하는 것으로 보고되었다(West, 2003; Zimbelman, 2008). 아울러 고온 스트레스에서는 사료섭취량이 감소하고, 호흡과 음수량이 증가하며, 호르몬의 변화로 인해 번식능력과 생산성이 저감된다(Collier and Zimbelman, 2007). St-Pierre et al.(2003)은 기온상승으로 인한 고온 스트레스로 인해 미국 내 낙농부분에서 8억 9천7백만 달러의 경제적 손실이 있을 것으로 추산한 바 있다. 더욱이 젖소 생산성의 증가로 인해 대사에 따른 열발생량이 높아졌기 때문에 고온에 의한 스트레스는 가중될 수 있을 것으로 예상된다(Hansen, 2007). 겨울철의 저온 스트레스도 젖소의 생산성에 악영향을 미치는데, 겨울철 저온 스트레스에 의해 젖소의 일당 증체량 및 증체효율이 대략 5~10% 정도 감소하는 것으로 보고되었다(Hoelscher, 2001).

아직까지 국내에서 기후변화에 따른 축산분야의 영향분석에 대한 연구는 매우 미흡한 실정이며, 환경온도 및 기후변화가 젖소의 생산성에 미치는 영향에 대한 과학적 평가도 이루어진 바 없다. 따라서 본 연구는 국내 기후변화의 양상을 조사하고, 모델 시뮬레이션 기법을 이용하여 이러한 기후변화가 젖소 착유우의 생산성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 수행되었다. 이를 위해, 최근 개정된 한국젖소사양표준(2012)에 Cornell Net Carbohydrate and Protein System(CNCPS)의 환경에 따른 젖소의 영양소 요구량 및 공급량 변화 예측 모듈(Fox et al., 2004)을 융합한 모델을 구축하고, 기상청의 자료에 근거하여 시뮬레이션을 실시하였다.

(나) 접근방법

지구온난화에 의해 우리나라의 기후가 어떻게 변화되었는지를 조사하고, 기후변화에 따른 낙농 착유우의 생산효율 변화를 보고자 저온지역과 고온지역을 선정하여 두 지역의 과거 기후자료를 분석하고, 이를 바탕으로 모델 시뮬레이션을 실시하였다. 대표적인 저온, 고온 지역으로 각각 평균 기온이 낮은 대관령과 최고기온이 높은 대구를 선정하였고, 두 지역의 지난 25년간(1988년 1월부터 2012년 12월) 월평균 평균기온, 최저기온, 풍속, 상대습도의 관측치 자료를 기상청(<http://www.kma.go.kr>)으로부터 수집하여 변화 양상을 시계성 분석(time-series analysis)을 이용하였다. 통계분석은 SAS(SAS Institute, Inc., Carey, NC, USA)의 PROC GLM을 이용하여 실시하였고, 유의수준을 0.05%로 하여 통계적 유의성을 분석하였다.

기후변화를 고려한 젖소의 영양소 요구량 및 생산성 예측 모델은 한국 젖소 사양표준(2012)의 프로그램 개발에 이용된 Microsoft Excel을 기반으로 한 젖소의 영양소 요구량, 공급량 및 생산성 예측 시스템을 기본 모형로 이용하였다. 본 연구를 위해 기본 모형에 환경에 따른 영양소 요구량의 변화를 고려한 CNCPS의 환경 모듈을 용

합하여 기후변화에 따른 젖소의 영양소 요구량 및 생산성을 예측할 수 있는 모델 시스템을 구축하였다. CNCPS의 환경 모듈은 온도와 함께 습도, 풍속을 고려한 유효온도지수(effective temperature index)를 설정하고, 이에 따라 젖소의 건물섭취량과 유지를 위한 정미에너지 요구량을 보정하였다.

저온 환경에서 젖소의 섭취량이 증가하는 것을 고려하여 환경온도가 -20°C 미만인 경우에는 섭취량이 정상 대비 16%까지 증가하고, 고온의 경우 섭취량이 감소하되, 밤에 온도가 떨어지지 않는 열대야가 발생할 때, 정상치의 70% 이하까지 급격히 감소하는 것으로 예측되었다. 또한 젖소의 유지에너지 요구량을 예측함에 있어서도 CNCPS의 환경 모듈은 현재뿐만 아니라 지난달의 환경온도에 따라 젖소의 기초대사량을 변화시키는 것으로 설정하였다. 예를 들어 지난달의 평균온도가 -10°C , 5°C , 15°C 인 경우 기초대사량은 각각 28%, 11%, 3% 증가하며, 30°C 인 경우 기초대사량은 2~3% 감소하여 유지에너지 요구량은 11% 증가하는 것으로 예측하였다.

(다) 모델 시뮬레이션

비유 중기(90일)의 홀스타인 젖소 착유우(체중: 650kg, 증체량 : 0 kg, 경산우)가 1일 평균 30kg의 우유(유지방 4.1%, 유단백 3.2%)를 생산하고, 한국 젖소사양표준(2012)의 착유우 1일 영양소 요구량표 작성에 이용된 사료를 섭취하는 것으로 가정하여 모델 시뮬레이션을 실시하였다.

착유우에 반추동물용 섬유질배합사료(total mixed ration, TMR)를 급여한다고 가정하였다. TMR에 포함된 원료사료는 알팔파건초(CP: 17.0% 건물, NDF: 53.0% 건물), 클라인건초(CP: 13.1% 건물, NDF: 70.7% 건물), 티모시건초(CP: 10.8% 건물, NDF: 61.4% 건물), 연맥건초(CP: 9.5% 건물, NDF: 63.0% 건물), 옥수수사일리지(CP: 9.4% 건물, NDF: 70.4% 건물), 비트펄프(CP: 10.7% 건물, NDF: 44.6% 건물), 면실(CP: 21.7% 건물, NDF: 40.0% 건물), 옥수수(CP: 9.8% 건물, NDF: 10.0% 건물), 농축 배합사료(CP: 17.6% 건물, NDF: 28% 건물)로 설정하였다.

모델 시뮬레이션은 선정된 두 지역(대관령과 대구)에서 기후를 제외한 모든 조건이 동일한 상태에서 동물을 사육하는 것으로 가정하고 실시하였다. 모델을 이용해 지난 25년간의 월별 온도, 상대습도, 풍속, 해당 월 전월의 온도 및 상대습도를 기준으로 동물의 영양소 요구량 및 이용효율, 이에 따른 우유 생산량을 예측하였다. 열대야의 기준으로 해당월의 평균 최저기온을 선정하였는데, 만약 해당 월의 평균 최저기온이 20°C 이상인 경우에는 열대야인 것으로 가정하였다. 건물섭취량은 예측된 건물섭취량을 그대로 사용하였으며, 우유생산량은 대사에너지가능 유량과 대사단백질 가능 유량 중 최저치로 예측하였다. 또한 예측결과를 바탕으로 지역별, 월별 사료 효

을(사료 건물 1kg으로 생산할 수 있는 우유량(kg))을 계산하였다.

(라) 분석 결과 및 고찰

평균 기온이 낮은 대관령과 최고 기온이 높은 대구의 지난 25년간(1988년 1월부터 2012년 12월) 월평균 일평균기온, 최저기온, 풍속, 상대습도의 관측치 변화 양상을 보면, 지구온난화로 인해 국내 기후가 유의적으로 변화하였으며, 그 변화 양상은 대관령과 대구에서, 즉 기온이 낮은 지역과 높은 지역에서 차이가 있는 것으로 나타났다.

평균기온의 경우 대구는 매년 0.023°C 씩 온도가 증가하였으나 통계적으로 유의하지 않았고($P>0.05$), 대관령은 매년 0.042°C 씩 유의하게($P<0.01$) 증가한 것으로 나타났다. 연평균 최저기온의 경우 대구에서는 연 0.042°C 씩 유의적으로($P<0.01$) 증가하였고, 대관령에서는 증가하지 않았다. 평균온도 수치만을 살펴보면, 대구는 1988년과 2012년에 각각 13.4°C 와 14.1°C , 대관령은 같은 기간에 각각 5.8°C 와 6.5°C 로 소폭 상승하였다. 대관령은 상대습도에서 유의적인 변화양상이 나타나지 않은 반면, 대구는 지난 25년간 연평균 0.44% 씩 상대습도의 유의적($P<0.01$) 감소가 있었다. 풍속의 경우에는 대구와 대관령 모두에서 유의적인($P<0.01$) 감소가 있었는데, 대관령과 대구에서 각각 연평균 시속 0.217 , 0.142km 씩 감소하였다.

상대습도와 풍속이 동물의 생리에 미치는 영향은 동물이 체감하는 온도가 상대습도와 풍속에 따라 달라지는 것으로 나타났다(Furukawa et al., 1984; Baeta et al., 1987). 일반적으로 동물이 체감하는 온도에 따른 스트레스를 수치화하기 위해 가장 많이 이용되는 수치로 온도와 습도를 고려한 온습도지수(temperature-humidity index: THI)가 있다. 그러나 젖소의 온도스트레스를 수치화하기 위한 온습도지수의 적정성에 대한 계속된 논란이 있었으며, 온습도지수를 올바르게 계산하기 위해 원래 공식과는 별도로 다양한 공식들이 개발되었다(Dikmen and Hansen, 2009). CNCPS에서는 온도와 습도만이 아니라 풍속과 일광노출시간을 같이 고려하여 유효온도지수(effective temperature index)를 개발하고 동물이 실제로 체감하는 온도를 계산하였다(Fox and Tylutki, 1998). 유효온도지수에 따르면, 지난 25년간 대구와 대관령 지역에서 풍속의 감소는 젖소의 온도스트레스를 가중시킬 위험이 있는 것으로 나타났다. 풍속이 시속 20km 에서 13 , 6km 로 감소함에 따라 젖소가 체감하는 온도는 환경온도가 20°C 일 때까지는 변화가 없으나, 환경온도가 25 , 30 , 35°C 일 때, 풍속의 감소에 따라 각각 2°C , 2.5°C , 3°C 씩 유효온도지수가 증가하게 된다.

겨울철 풍속의 감소는 오히려 체감온도를 높이는 긍정적인 영향이 있지만, 여름철 풍속의 감소는 고온스트레스를 가중시키는 악영향을 끼칠 가능성이 높다. 한편, 대구지역의 상대습도의 감소는 다행히 고온스트레스를 줄여주는 작용을 할 수 있다.

Mader et al.(2006)은 상대습도가 소의 체감온도 및 고온스트레스에 미치는 영향에 대해 특히 강조하였는데, 상대습도가 높을수록 동물이 느끼는 체감온도와 고온스트레스는 가중된다. 상대습도 감소가 유효온도지수에 미치는 영향을 보면, 상대습도가 67%에서 52%로 감소됨에 따라 유효온도지수는 환경온도가 25, 30, 35℃일 때, 각각 2℃, 3℃, 5℃씩 감소한다. 따라서 대구지역의 상대습도 감소는 유효온도지수를 감소시켜 젖소가 받는 고온스트레스를 저감하는 효과가 있다. 온대 지방의 홀스타인 품종의 적정환경 온도는 5~15℃이고(Sirohi and Michaelowa, 2007), 젖소가 적응을 통해 온도스트레스를 받지 않고, 추가적인 생리변화 없이 생산 활동을 할 수 있는 온도는 5~25℃(McDowell, 1972)라는 점을 고려할 때, 평균기온만을 기준으로 생각한다면 문제가 없다고 생각할지 모르나 봄, 여름, 가을, 겨울의 사계절의 변화가 확실한 한반도에서 여름의 고온과 겨울의 저온은 낙농우의 생리적 적정온도의 범위를 벗어나게 되어 생산성의 악화가 예상된다.

따라서 각 지역별로 여름(6, 7, 8월)과 겨울(12, 1, 2월)을 구분하여 지난 25년간의 기후변화 특히 평균온도와 최저온도의 변화를 분석한 결과, 특이점은 동일 지역에서도 평균기온의 변화가 여름과 겨울에 다른 양상을 보인다는 것이다. 대관령의 여름(6, 7, 8월)의 평균기온은 지난 25년간 평균 0.088℃씩($P<0.01$) 증가한 반면, 겨울(12, 1, 2월)의 평균기온은 같은 기간에 유의적인 변화가 없었다. 이는 대관령의 경우 여름 기온 상승이 연평균 기온의 상승을 야기했음을 의미한다.

이러한 정보를 바탕으로 모델을 시뮬레이션을 실시한 결과, 온도에 따른 스트레스가 없을 때와 비교하여 건물섭취량과 유지 정미에너지 요구량은 각각 8.0%, 15.1% 증가하는 것으로 나타났다. 같은 시기에 섭취량과 환경조건에 근거한 착유우의 하부 임계온도는 12.2℃로 예측되었는데, 만약 환경온도가 최저기온인 -13.3℃로 내려가면, 섭취량과 유지 정미에너지 요구량은 추가적인 저온스트레스로 더욱 상승되어, 온도스트레스가 없을 때 대비 각각 12.0%, 18.8% 증가한 것으로 나타났다.

기후변화에 따른 사료효율의 변화를 보면 지난 25년간 지구 온난화에 따른 기후변화로 인한 낙농 착유우의 연 평균 사료효율(1 kg의 사료 건물로 생산되는 우유의 양 kg)의 변화는 대구의 경우 약간 감소하는 수치(-0.0002)를 보였으나 유의적이지 않았으며, 대관령은 유의적($P<0.01$)로 증가(0.0009)하는 것으로 나타났다. 저온지역인 대관령은 극심한 추위의 겨울을 제외하고는 기온의 상승으로 인해 저온에 따른 동물의 유지에너지 요구량 증가가 발생하는 빈도가 감소하였고, 여름철의 온도는 고온스트레스를 야기할 정도는 아니기 때문에 오히려 사료효율이 개선되었음을 의미한다. 반면, 고온지역인 대구의 경우 봄, 여름, 가을철에는 온도스트레스에 대한 영향이 없고, 여름의 기온상승으로 인해 고온스트레스에 노출되는 정도가 높아져 사료효율이 감

소하는 경향을 보이긴 하였으나 유의적이지는 않은 것으로 나타났다.

지역별 시뮬레이션을 통해 지난 25년간 각 월별 평균 사료효율을 계산한 결과를 보면, 지역에 따라 월별 사료효율의 변이와 환경온도에 따른 사양관리 전략이 달라야 함을 알 수 있다. 대관령의 경우 1월에 최저, 9월에 최고의 사료효율을 보인다. 이와는 반대로 대구의 경우 7, 8월에 최저, 10월에 최고의 사료효율을 보이며, 겨울에도 1.41 이상의 사료효율을 유지하는 것으로 나타났다. 따라서 낙농가의 생산성을 유지하기 위해서 대구와 같은 고온지역에서는 여름철의 고온스트레스를 막기 위한 방안을 마련하는 것이 필요하다. 스프링클러 등의 냉각 시설과 시원한 음수의 공급은 여름철 고온스트레스 저감에 효과적인 방법이 될 것이며(Armstrong, 1994; Collier et al., 2006), 우사의 통풍이 잘 되도록 유도하는 것도 중요하다. 이와는 반대로 대관령과 같은 저온지역에서는 겨울의 저온스트레스를 저감하기 위한 노력을 기울여야 한다. 사료 및 음수가 결빙되지 않도록 하여 동물이 충분히 사료를 섭취할 수 있도록 해야 하며, 특히 우사 바닥의 깔짚상태를 건조하게 유지하는 것이 중요하다. 또한 햇빛에 노출되는 시간을 늘리고(Bergen et al., 2007), 기온이 떨어지는 야간의 체온저하를 막기 위해 저녁에 사료의 섭취를 유도하는 것도 한 방법이다.

지난 25년간 지구온난화로 인한 국내 기후변화 양상은 지역 간에 차이가 있어 왔다. 고온지역은 평균온도의 증가를 보이지는 않았으나, 최저기온의 지속적인 상승과 그에 따른 열대야의 발생을 확인할 수 있었다. 또한 그로 인한 젖소의 고온스트레스 발생, 섭취량의 감소 및 생산성 저하가 예상된다. 저온지역의 경우에는 여름철 평균 온도 및 최저온도의 상승으로 인해 연평균기온이 유의적으로 상승한 반면, 겨울철에는 오히려 최저기온의 지속적인 하강이 관찰됨에 따라 동물의 저온스트레스가 가중될 것으로 예상된다. 착유우가 저온스트레스 상태에 있을 때는 에너지요구량과 건물 섭취량이 증가하여 생산 효율이 떨어지며, 사료효율의 감소로 경제성은 감소되고 우유 생산비는 증가한다. 특히, 극심한 저온스트레스 또는 사료, 음수 및 우사바닥의 결빙은 섭취량 감소를 야기하며 이에 따른 생산성의 저하는 더욱 가중될 것으로 예상된다. 결론적으로 지구온난화로 인한 기후변화에 따른 지역별 영향은 다르며, 온도 스트레스에 의한 낙농우의 생산성 저하를 최소화하고, 동물의 복지와 건강을 증진시키기 위해서는 지역별 기후변화 특성에 맞춘 사양기술의 개발이 필요하다.

3. 기후변화가 농업용수에 미치는 영향⁷

가. 기후변화와 농업용수와의 관계

지구온난화에 따른 기온상승, 강수량의 규모, 빈도 및 패턴의 변화는 수문순환과 유출량 변화 등 수자원의 변화에 직접적인 영향을 줄 것으로 판단. 기후변화에 따른 기온상승은 증발산량 증가의 원인이 되며, 강수량이 증가한다 할지라도 집중호우와 증발산량의 증가로 인하여 토양수분 및 유출량의 잦은 변화가 예상되어 총 용수 수요량의 47%를 차지하는 농업용수에도 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다. 즉, 홍수, 농업가뭄 등의 재해 증가로 인하여 관개기의 농업용수의 안정적 공급과 관리의 어려움이 예상되어 결과적으로 농업용수의 안정성을 위협받을 수도 있다. 즉, 기후변화에 따른 농업부분에 대한 영향 중에서 농작물의 수자원수요량 예측 및 분석은 농업용수의 약 82%를 차지하고 있는 수도작에 대한 지속가능한 경작을 위하여 매우 중요하다(유승환 외 4인, 2012).

나. 기후변화에 따른 농업용수 수요량 산정

(1) 농업용수 수요량 산정방법

(가) 기준작물증발산량 산정 방법

기준작물증발산량(Reference Crop Evapotranspiration)은 충분한 물의 공급이 있을 경우에 기준작물(알파파나 잔디)에 의하여 손실되는 증발산량을 말하며, 일반적으로 잠재 증발산량을 대신하여 사용된다. 1998년 국제식량농업기구에서는 기존의 연구에서 추천했던 FAO Modified Penman 공식이 과다 산정되는 점을 지적하고, 각 지역의 조건에 따른 적합한 방법을 비교, 검토하였다. 기존에 사용되던 20여 종류의 증발산량 공식을 검정하였는데, 그 중 Penman-Monteith 공식이 건조 및 습윤 기후에서 비교적 정확하고 일정한 경향을 가지는 것으로 확인되었다. 따라서 FAO에서는 Penman-Monteith 공식을 통일하여 사용하기로 결정하였다(Allen et al., 1998). 현재 이 공식은 세계관개배수위원회(ICID), 세계기상기구(WMO) 등에서 추천하고 여러

7 기후변화가 농업용수에 미치는 영향에 관한 부분은 수자원 분야 전문가에 원고위탁으로 의뢰한 ‘기후변화에 따른 논벼의 용수 수요량 변화 예측 및 분석’(퍼듀대학교 유승환 박사)과 “미래 기상자료를 이용한 미래 농업용수 수요량 산정”(건국대학교 김성준 교수) 등 두 과제의 연구결과를 요약한 내용임을 밝혀둔다. 원고위탁의 상세한 내용은 김창길, 정학균, 문동현 편저(2013, pp.1-111) 별도 자료집에 제시되어 있다.

연구에서 정확한 것으로 인정받고 있으며, 산정식은 다음과 같다.

$$ET_r = \frac{0.408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (2-1)$$

여기서, ET_r 은 기준작물증발산량(mm/day), Δ 는 증기압 곡선의 기울기(kPa/°C), Rn 은 지구(작물)표면에서 순수하게 축적되는 에너지(순일사량, MJm-2day-1), G 는 토양 열 유속 밀도(MJm-2day-1), γ 는 건습계⁸ 상수(kPa/°C), T 는 2m 높이에서 일평균기온(°C), u_2 는 2m 높이에서 풍속(m/s), e_s 는 포화증기압⁹(kPa), e_a 는 실제증기압(kPa) 등을 나타낸다.

(나) 순 용수량 산정

논물수지분석은 관개지역의 필요수량과 부족수량을 추정하기 위해 실시하며, 포장내로 공급되는 용수와 증발산¹⁰, 침투, 배수량의 대수적 관계로부터 일별 필요수량 및 담수심¹¹을 모의한다. 계측하기 어렵고 정의하기 힘든 지표유입량, 지하 횡유입량, 횡유출량 등을 제외하면 논물수지는 다음식과 같이 정리된다.

$$IR(t) + PP(t) = ET_c(t) + DP(t) + SFO(t) + \Delta D(t) \quad (2-2)$$

여기서, $IR(t)$ 는 t 일 관개량(mm/day), $PP(t)$ 는 t 일 강우량(mm/day), $ET_c(t)$ 는 t 일 작물증발산량(mm), $DP(t)$ 는 t 일 강하침투량(mm), $SFO(t)$ 는 지표유출량¹²(mm/day), $\Delta D(t)$ 는 t 일 담수심과 $(t-1)$ 일 담수심의 차이이다.

8 물의 증발하는 정도를 측정하여 공기 중의 습도를 측정하는 장치로 같은 모양의 수은 온도계를 나란히 놓고, 한 쪽 온도계의 구부(球割)를 물에 적신 형질으로 싸 두어 두 온도계의 온도의 차를 읽어 계산표에 의해서 습도를 알 수 있다.

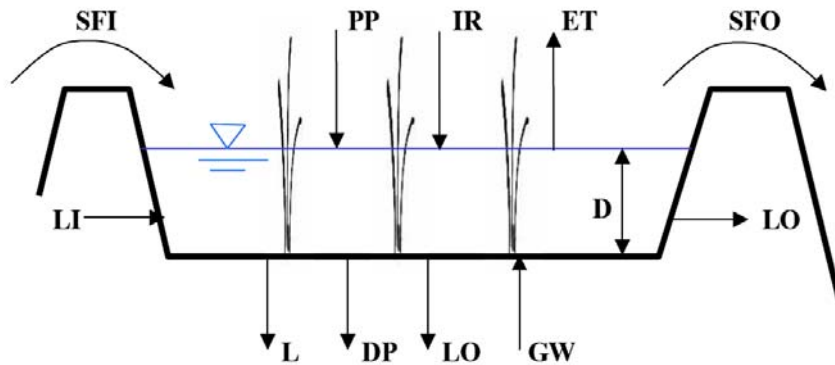
9 포화 상태의 수증기압을 말한다. 온도와 압력에 따라서 머금은 수증기압은 일정하며, 다른 기체가 있어도 거의 영향을 받지 않는다. 온도가 올라가면 포화증기압은 증가하고, 압력이 커지면 감소한다.

10 지면이나 수면으로부터 수분이 대기로 돌아가는 현상을 증발이라고 하며 특히 수목이나 초본류의 표면에서 일어나는 증발은 통산(通散) 혹은 증산(蒸散)이라고 하는데 이 둘을 합하여 증발산이라고 한다.

11 담수심은 논 물의 깊이를 말한다.

12 비온 뒤 빗물이 바로 증발하거나 골짜기로 흘러가는 양을 말한다.

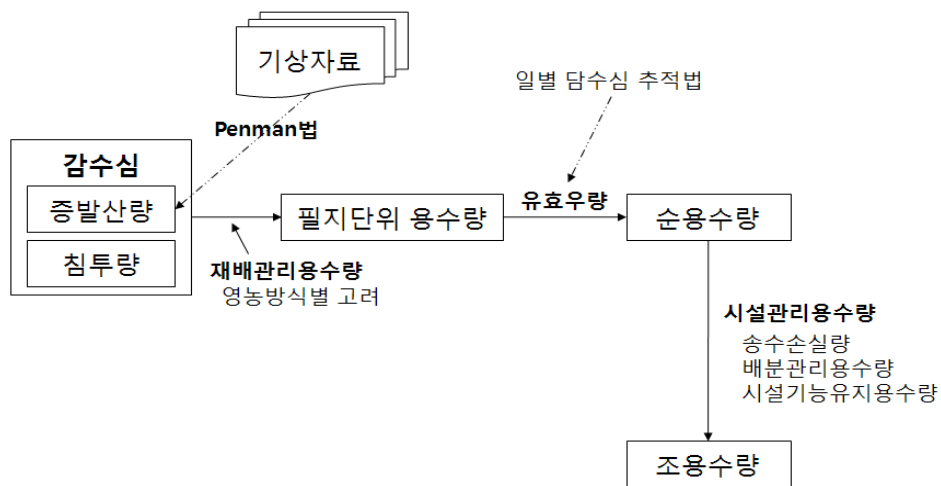
그림 2-5. 논에서의 물수지 개념도



(다) 논벼의 농업용수 수요량 산정

논 용수 관개수량을 발생시키는 주요 인자를 살펴보면 벼의 증발산량과 침투량 및 유효수량 등으로 구분할 수 있다. 여기서 침투량은 재배토양의 토성, 지하수위 등의 영향을 받으며 증발산량은 작물의 종류, 기상여건 등에 따라 변화하고 유효수량은 강수량에 따라 결정된다. 또한 논 용수 관개수량은 재배관리 용수량과 시설관리 용수량 등의 손실수량을 고려해야 한다. 논에서 필요한 용수 수요량의 산정과정을 요약하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

그림 2-6. 논용수 수요량 산정 흐름도



자료: 한국농어촌공사(2009).

논 벼의 필요수량은 증발산량과 침투량뿐 아니라 작물의 재배 방식 및 물관리 방법 등에 따른 재배관리 용수량, 용수 공급 측면에서 용수로 및 포장 조건에 따른 손실수량을 고려하고 있다. 논 벼의 재배는 크게 이앙재배, 담수직파재배, 건답직파재

배로 분류된다. 이앙재배는 작물의 생장에 따른 시기별로 용수 수요량이 다르며 이를 시기별로 살펴보면 묘대기, 이앙기, 본답기 등이 있다. 묘대기는 못자리에서 묘를 키우는 과정이며 이앙기는 못자리에서 본답으로 옮겨 심는 과정이고 이때 이앙일수는 벼의 재배체계, 씨레질 또는 이앙을 위한 작업의 능률 등에 따라 정하며 일반적으로 15~20일 정도이다(한국농어촌공사, 2009).

다. 미래 기상자료를 이용한 미래 농업용수 수요량 산정

농업수자원 수요변화 예측을 위해 기상연구소에서 제공하고 있는 HadGEM2-AO의 RCP4.5 시나리오의 미래 기상자료를 이용하여 국내 농업용저수지 중부지역과 남부지역의 농업용 저수지 수요변화를 예측하였으며, RCP8.5를 이용할 경우 농업용수 수요 더 증가할 것으로 예상된다.

표 2-1. 대상저수지 연도별 소비수량(총 필요수량) 비교

단위 : 만m³

년대(10년평균)	모점저수지	안심저수지	비 고
1975s	1,579.2	1,789.7	
1985s	1,482.6	1,791.6	
1995s	1,536.8	1,812.9	
2005s	1,503.9	1,706.9	
2015s	1,607.1	1,882.2	<모점저수지> 유효저수량 : 1,492.0
2025s	1,492.6	1,789.4	
2035s	1,519.7	1,907.4	
2045s	1,656.0	1,937.1	<안심저수지> 유효저수량 : 1,577.5
2055s	1,651.8	1,821.0	
2065s	1,596.4	1,761.1	
2075s	1,663.1	1,821.6	
2085s	1,595.8	1,781.5	
2095s	1,762.3	1,898.2	

RCP4.5에서 제공하고 있는 가상자료 중 강우량과 기온을 분석한 결과 지역별도 정도의 차이는 있으나 남부지역과 중부지역 모두 증가하는 경향을 보였다. 충주관측소의 미래 기상자료 중 강우량의 경우 2065s가 1,408.2mm로 가장 많은 강우량을 나타내었고, 기온은 2095s에서 13.7℃, 로 가장 높게 나타났다. 포항관측소의 경우 강우량의 경우 2045s가 1,258.2mm로 가장 많은 강우량을 나타내었고, 기온의 경우

2095s에서 14.3℃로 가장 높게 나타났다. 2개의 관측소 기상자료를 비교하면 충주관측소가 포항관측소보다 강우량이 150mm 더 많은 것으로 예측되었으며, 기온의 경우 포항관측소가 0.6℃높은 것으로 예측되었다. 논에서의 소비수량은 모점저수지의 경우 2095s에 필요수량이 1,762.3mm로 과거보다 약 15.9%증가하는 것으로 나타났으며, 안심저수지의 경우 2035s에 1,907.4mm로 과거보다 약 10.5% 증가하는 것으로 분석되었다.

그림 2-7. 모점저수지 연도별 필요수량 변화

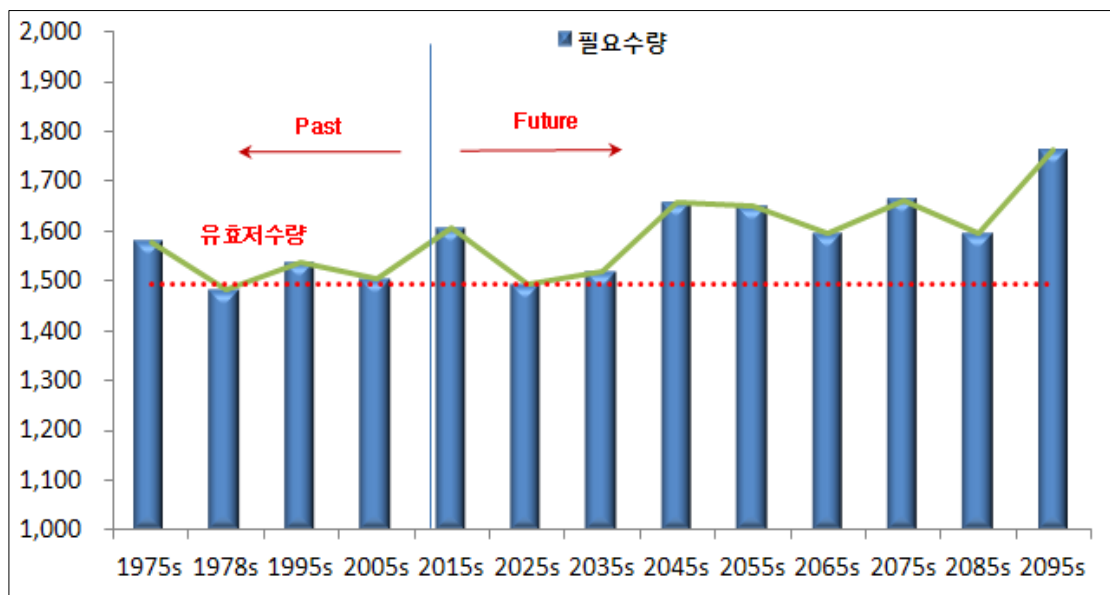
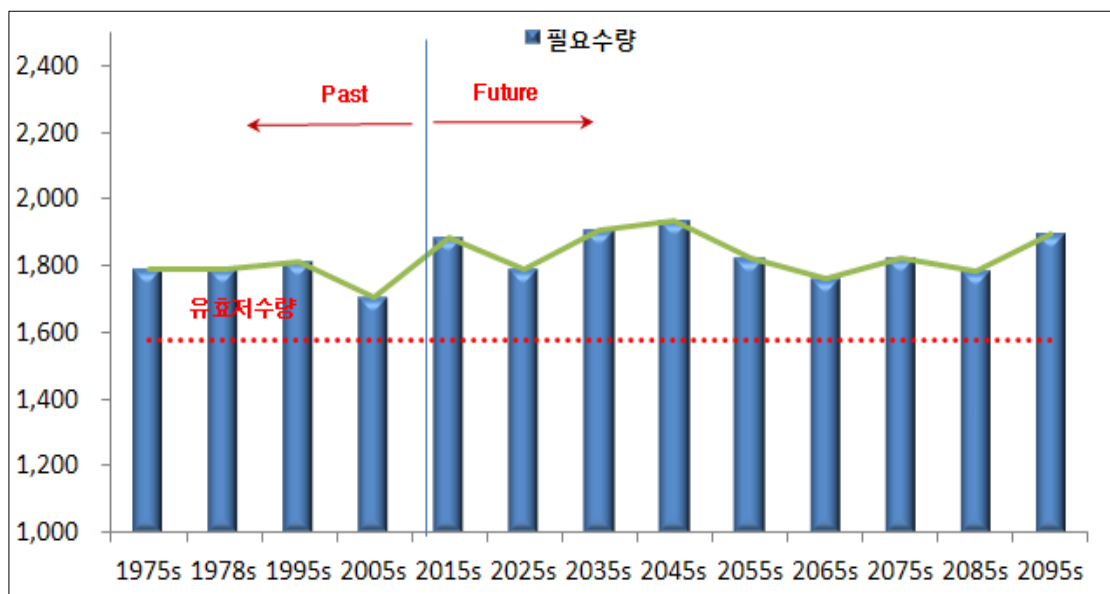


그림 2-8. 안심저수지 연도별 필요수량 변화



라. 기후변화에 따른 논벼의 용수 수요량 변화 예측 및 분석

CanESM2의 논용수 수요량의 경향을 살펴보면 historical 기간에는 최소 682 mm (춘천)부터 784mm (전주)의 범위를 나타낸다. RCP 4.5 시나리오의 2025s의 경우, 최소 -7.3%(진주)부터 최대 6.7%(청주)의 범위를, 2055s의 경우, 최소 -9.2%(광주)부터 최대 -1.6%(청주)의 범위를, 2085s의 경우, 최소 -9.9%(진주)부터 최대 1.0%(청주)의 범위로 증감을 나타낸다. 과거의 자료와 비교하여 세 기간 동안의 평균적인 증가 비율은 각각 2.1%(2025s), -4.8%(2055s) 및 -3.0%(2085s)이었다. 이는 순용수량의 증감 비율인 -1.8%(2025s), -7.2%(2055s), -2.2%(2085s)와 비교하여, 약 2025s에서는 증감 경향이 다르게 나타났고, 2055와 2085s에서는 약 3% 이내의 차이를 보였다.

RCP8.5 시나리오에서는 2025s의 경우, 최소 0.1%(수원)부터 최대 8.2%(전주)의 범위를, 2055s의 경우, 최소 -5.5%(진주)부터 최대 1.3%(전주)의 범위를, 2085s의 경우, 최소 -7.7%(진주)부터 최대 7.2%(청주)의 범위로 증감을 나타냈다. 과거와 비교하여 세 기간 동안의 평균적인 증가 비율은 각각 2.4%(2025s), -1.8%(2055s) 및 1.3%(2085s)이었다. 이는 순용수량의 증감 비율인 2.3%(2025s), -4.2%(2055s), -2.1%(2085s)와 비교하여, 약 2025s에서는 유사한 경향을, 2055s에서는 약 3%의 차이가 있지만 두 인자 모두 감소하는 경향을 보였지만, 2085s의 경우에는 증감 경향이 크지는 않지만 차이가 있는 것으로 나타났다.

두 시나리오간의 차이를 비교해보면, RCP4.5의 2025s 기간에는 중부지역 6.3%, 남부지역 -2.1%씩 증감하는 반면에 RCP8.5 경우에는 각각 0.6%, 4.3%씩 증가하는 것으로 나타났고, RCP8.5가 -5.7% 및 6.4%씩의 차이가 있었다. 2055s 기간의 RCP4.5 시나리오의 경우에 중부지역 2.4%, 남부지역 7.3%씩, RCP8.5에서는 각각 1.4%, 2.2%씩 감소하여 RCP4.5가 중부지역 1.0%, 남부지역 5.1%씩 더 크게 감소하는 것으로 분석되었다. 마지막으로 2085s 기간에는 RCP4.5의 중부지역은 0.2%, 남부지역은 5.9%씩 감소하는 경향을 보였고, RCP8.5에는 각각 6.6% 및 -4.0%씩 증감하여, RCP8.5 시나리오가 각각 6.7% 및 2.0% 차이가 나는 것으로 분석되었다.

4. 농업부문의 기후변화에 따른 경제적 영향분석

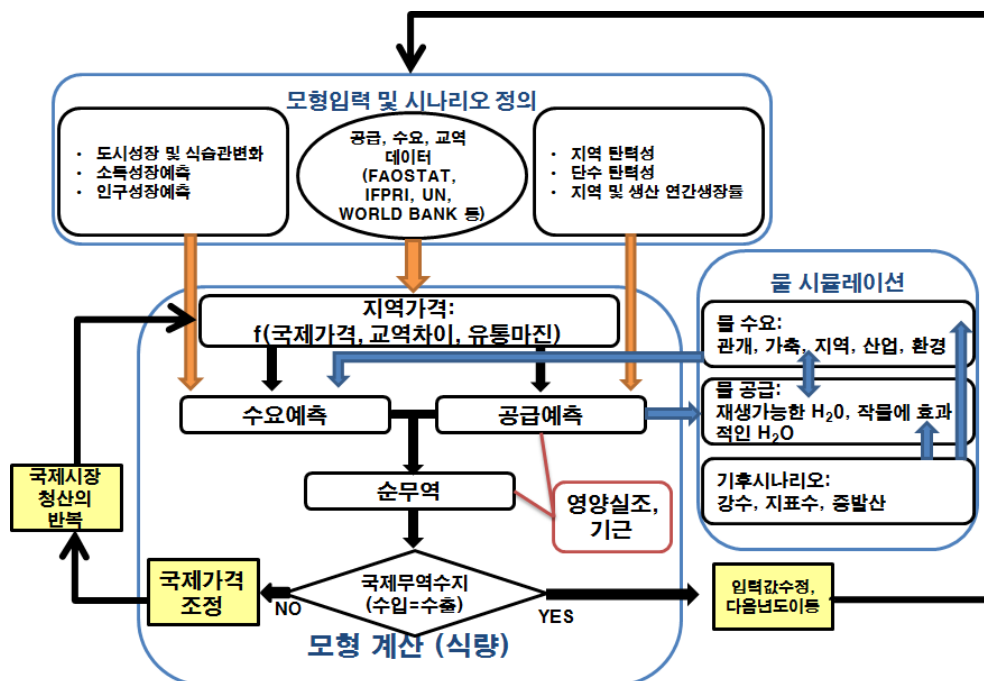
가. 주요국의 기후변화 영향분석 모형

(1) 미국

(가) IMPACT

농산물 및 무역 정책분석을 위한 국제모형(The International Model for Policy Analysis of Agricultural Commodities and Trade: IMPACT)은 국제식량정책연구소(IFPRI)¹³가 1990년대 개발한 경제모형의 특성을 가진 부분균형-최적화 모형이다. IMPACT는 정책 및 무역 시뮬레이션을 수행하기 위한 농업부문 부분균형모형으로써 중장기적 국제적 식품 공급 및 식량안보 등을 예측하고자 개발되었다. 또한 외생적으로 상세한 생태물리적 작물모형과 연계되어 작동한다<그림 2-9>. 수문모형과

그림 2-9. IMPACT 모형의 처리과정 및 구조



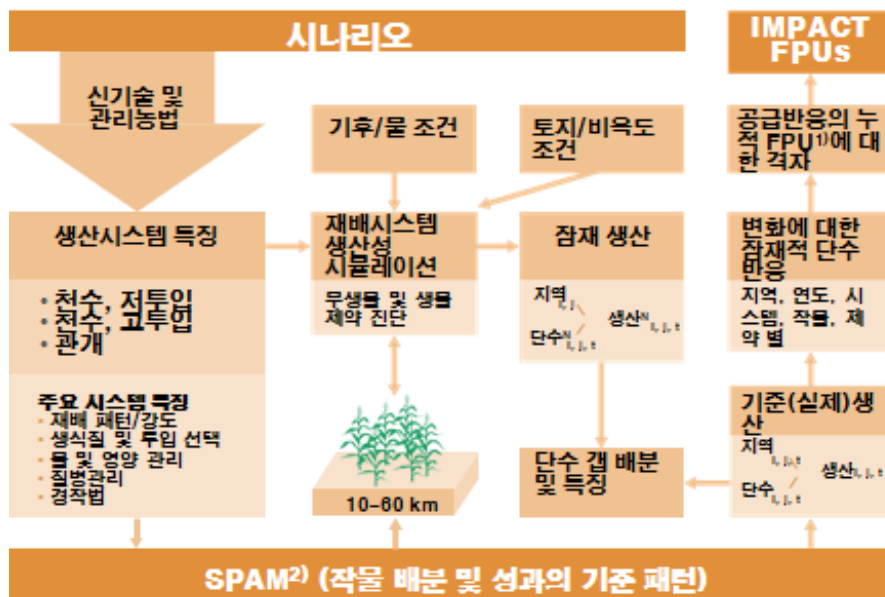
자료: Rosegrant et al. (2008), p.42 .

13 국제식량정책연구소(IFPRI)는 식량생산에 대한 정책평가와 분석, 농업 기술의 기술혁신수용을 촉진하기 위하여 1970년대 초에 설립된 연구기관이다.

함께 결합하여 물 시스템 및 요인 등도 모의실험하기 때문에, IMPACT-Water 모형으로 지칭하기도 한다.

IMPACT 모형은 작물생육모형(DSSAT, LPJmL)과 물 모듈이 연계하여 사회경제적, 농업생산 및 미래식량 가용에 대한 기후 예측의 종합된 효과를 분석하는 데에 초점을 둔다. IFPRI는 농업기술과 전지구적 농업경제 내 역할을 묘사하고자 프로세스기반 작물생육모형, DSSAT와 부분균형경제모형, IMPACT가 연계된 프레임워크를 개발하였다. 본 통합모형 프레임워크를 통해 농업 생산성 내 분열된 변화들이 국제적 및 지역적 생산, 국제적 식량가격, 교역흐름, 칼로리 가용성, 영양실조 수준 등에 어떻게 영향을 미치는지를 모의할 수 있다(Rosegrant et al., 2014).

그림 2-10. IFPRI의 농업기술의 영향 측정 모형 시스템



주1) FPU (Food Producing Unit)

2) SPAM (Spatial Production Allocation Model)

자료: Rosegrant et al.(2014), p.29.

Rosegrant, Agcaoili-Sombilla and Perez(1995)는 IMPACT 모형을 이용한 최초의 결과물로 2020년 세계식량 예측(Global Food Projection to 2020: Implication for Investment)을 발표하였다. 이 보고서는 개도국 내 식량안보 및 영양 상태 등과 관련하여 인구, 투자, 교역 시나리오의 효과 등을 분석하였다. 이후 Rosegrant, Leach and Gerpacio (1999)는 선진국 내 육류 중심의 식단 및 개도국 식량안보 간의 관계를 연구하였다. 또한 지역연구에도 IMPACT모형을 이용한 다양한 연구들이 수행되었

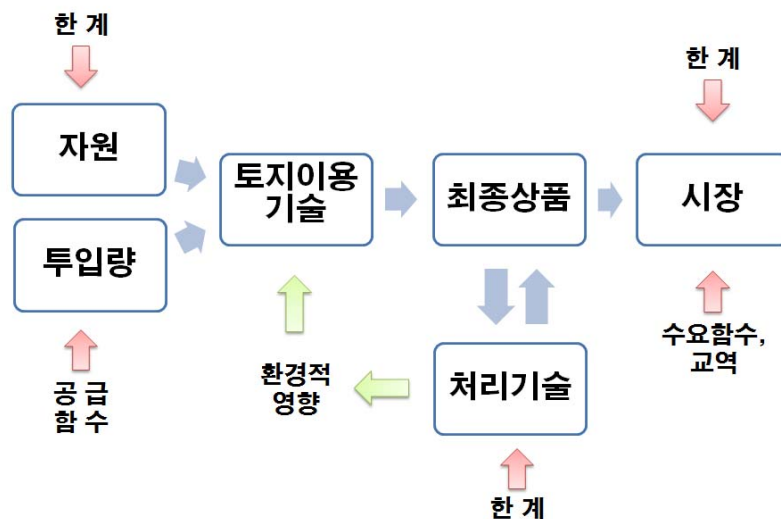
다. 최근 Rosegrant et al. (2014)는 IMPACT모형을 이용해 2050년까지 세계 주요 식량들의 가격과 기근 등을 전망한 바 있으며, 기후변화 시나리오인 MIROC A1B 시나리오와 RCP 8.5 및 Shared Socioeconomic Pathway 2 (SSP2) 시나리오 등을 이용해 보다 정밀한 분석 작업이 이루어졌다. 주요 주식작물인 쌀, 옥수수, 밀 등에 대한 식량공급, 수요, 가격, 안보 등을 위한 대안적 농업기술전략의 영향분석에 대한 연구가 이루어졌다.

(나) FASOM

임업 및 농업부문 최적화모형(Forestry and Agricultural Sector Optimization Model: FASOM)은 동태적 하향식(Dynamic bottom-up) 미시경제 모형이다. 미국 환경보전처(US Environmental Protection Agency: EPA) 에서 농업 분야 환경영향 평가로 시작되어 미국 농무부 자연자원보전청 (USDA Natural Resource Conservation Service: NRCS), 경제연구청(USDA Economic Research Service: ERS) 에서 환경영향 평가 및 농업정책 평가 모형으로 활용되고 있다. FASOM 모형은 농업과 산림 분야의 정책변화(농업 보조금, 무역 환경, 탄소세), 환경 변화(기후변화)에 대한 시장의 변화(후생변화, 토지이용변화) 등에 대한 분석이 가능하다.

FASOM 모형은 기본적으로 완전 동태모형(Fully dynamic model)과 완전한 예측(perfect foresight)을 가정하며, 생산기술은 일정한 투입-산출의 비율로 정해지는 레온티에프 함수(Leontief functions)로 표현되며, 기술 데이터, 생산비용과 가공비용,

그림 2-11. FASOM 모형 구조

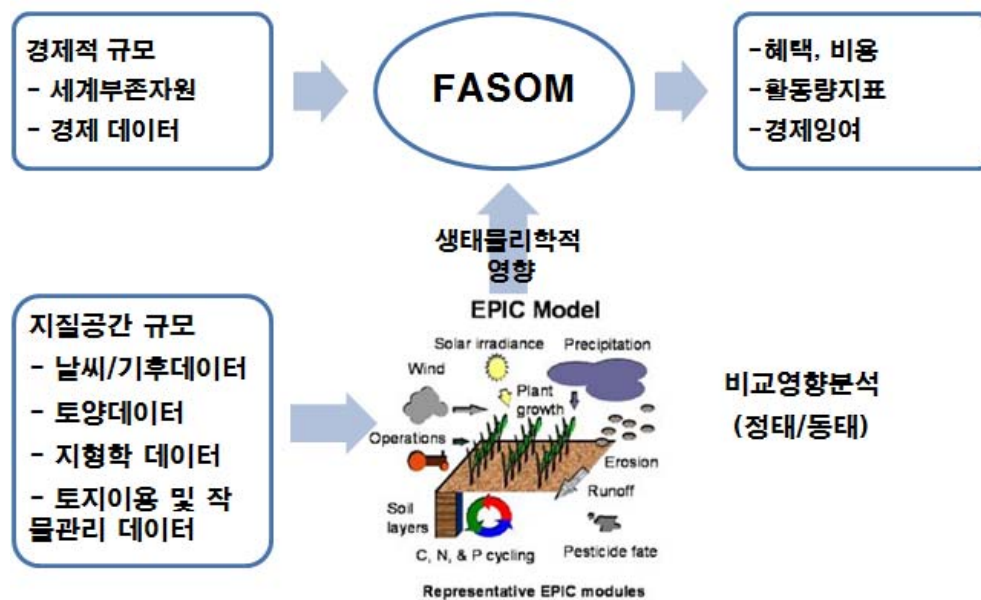


자료: Skalský et al. (2008) 에 제시된 내용을 기초로 작성한 것임.

환경에 미치는 영향에 대한 데이터는 결정적인 것으로 가정한다. FASOM 모형은 자원, 투입량, 토지 이용, 최종 상품, 시장 등의 관계가 설정되어 있다. 각 요소 별 한계가 설정되어 있으며 최적화를 통하여 시장의 흐름을 묘사한다. 외생적으로 자원의 변화, 시장 수요의 편화 등이 제한 조건으로 설정되며 토지이용, 가공 기술에 따른 환경 변화(온실가스 배출)의 영향도 고려할 수 있다<그림 2-11>.

FASOM의 작물 산출량, 재배방법에 따른 변화, 비료 사용량과 토양에 대한 영향 등 농업경제모형의 환경적 외부효과를 측정하게 위해 EPIC(Environmental Policy Integrated Climate) (Williams and Singh, 1995) 모형이 사용된다. EPIC은 다양한 입력 데이터가 필요하며 Simulation Unit (SimU) 개발을 통하여 EPIC 모형의 데이터와 FASOM 모형을 결합할 수 있다(Skalský et al., 2008). EPIC 모형은 SimU에 의해서 기후 데이터 정보를 이용한다. SimU는 보통 농가 단위의 작물 상태를 나타내며 작물 재배현황, 비용, 산출량 등의 정보를 EPIC 모형을 통하여 제공하고 SimU 단위를 기본으로 경제모형인 FASOM의 재배 방식, 농지 크기 등을 결정한다.

그림 2-12. FASOM 모형과 관련모형의 관계



자료: Skalský et al. (2008)에 제시된 내용을 기초로 작성한 것임.

유럽 국가들을 대상으로 구성된 EU-FASOM(The European Forest and Agricultural Sector Optimization Model)은 유럽지역의 농업 및 산림부문의 부분균형 모형으로써 정책, 기술, 자원 시장의 변화를 분석하는데 활용된다(Schneider and

Schwab, 2006). 또한, 토지이전 및 농업 및 산림부문 내 다른 자원배분을 묘사하는 지역적, 다중기간적, 시제간 모형이다. 모형 내 모든 대안적 농업 및 산림이용 상한 계이익에 따라 토지는 토지이용 부문 및 유형들 간 모형으로 이전된다. 특별히 EU-FASOM은 INRA가 개발한 AROPAJ모형, CIRAD가 개발한 AGRIPOL모형, IIASA의 토지이용모형 등에 입력 값을 제공하며 이들의 결과 값은 공간해상도를 높이고 범위를 증가시킬 수 있다.

Adams et al. (2003)는 GCM(CSIRO)과 RCM(Regional Climate model)을 사용하여 작물생육모형(CERES, CROPGRO, GOSSYM)과 FASOM을 결합하여 경제적 영향을 비교, 확률적 경제모형(Stochastic model)과 결정론적 경제모형(Deterministic model)을 비교한 연구를 수행하였다. 이 연구에서 RCM 기후자료를 이용한 상세한 스케일의 영향 평가가 기존의 GCM 결과와 차이를 보이며, 더 상세한 스케일의 RCM 데이터가 기후변화 영향을 더욱 잘 나타낼 수 있음이 확인되었다.

(다) GCAM

GCAM(Global Change Assessment Model)은 미국 에너지부 산하 북서태평양국립연구소(PNNL)¹⁴가 개발한 통합평가 모형으로 과거에 MiniCAM 으로 지칭한다. 글로벌 경제, 에너지시스템, 농업, 토지이용으로 구성된 본 모형은 육지와 해양 탄소순환을 포함한다. GCAM 에너지-경제-토지이용 프레임워크는 회귀적, 동적 부분균형 모형이며, 외생요인은 인구규모, 나이, 성별, 노동 생산성 등이다 .

GCAM 모형은 세계경제, 에너지시스템, 농업, 토지이용으로 구성되고 육지 및 해양에 관한 가스 사이클, 기후 및 얼음 용해 모형 등 상호동조화 된다. GCAM 에너지-경제-토지이용 프레임워크는 회귀적, 동태적 부분균형 모형으로써, 농업, 임업, 에너지, 토지 등의 공급과 수요는 가격기반 시장청산 메커니즘에 따라 균형을 이루게 된다. GCAM은 섹터별 경제적 결과와 가격, 토지이용 등에 더하여 15종의 온실가스과 에어로졸 뿐만 아니라 내륙 탄소축적량을 모형화한다. GCAM은 온실가스에 의한 기후변화 평가 모형(Model for the Assessment of Greenhouse Gas Induced Climate Change: MAGGIC)을 이용해 대기, 해양, 기후시스템의 축약된 형태로 묘사한다<그림 2-14>.

14 북서태평양국립연구소(Pacific Northwest National Laboratory, PNNL)는 미국 에너지부 (U.S. Department of Energy) 산하 국립 연구소 중의 하나이며, 미국 에너지부 및 기타 정부기관들로부터 연구비를 지원받아 환경&에너지, 국가보안, 생명과학, 재료, 촉매, 핵폐기물 분야 등에서 활발한 연구를 수행한다.

그림 2-13. GCAM 모형 구조 및 데이터 흐름

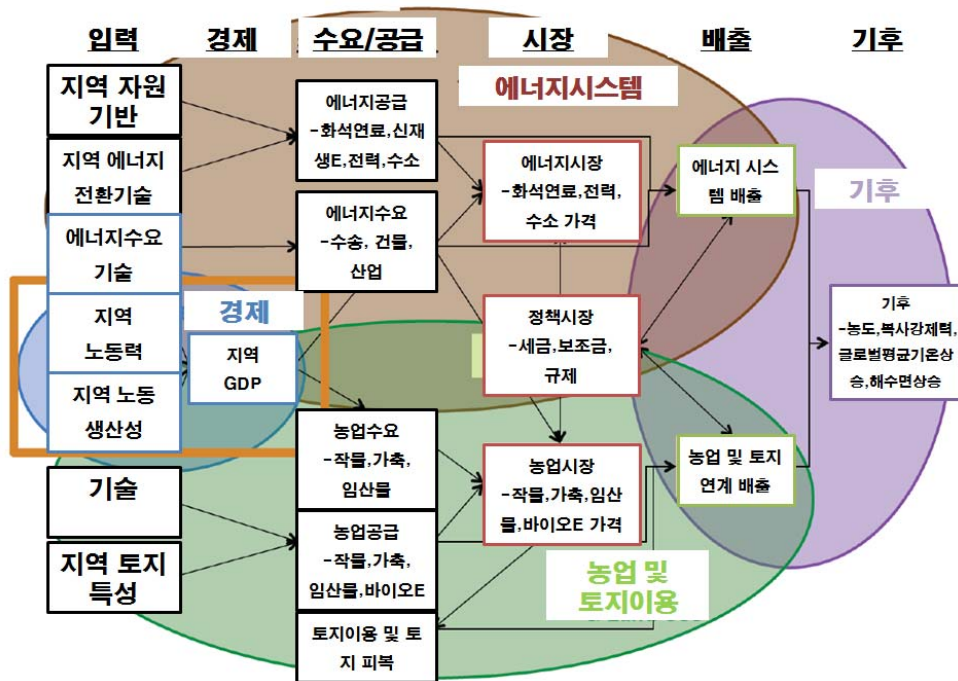
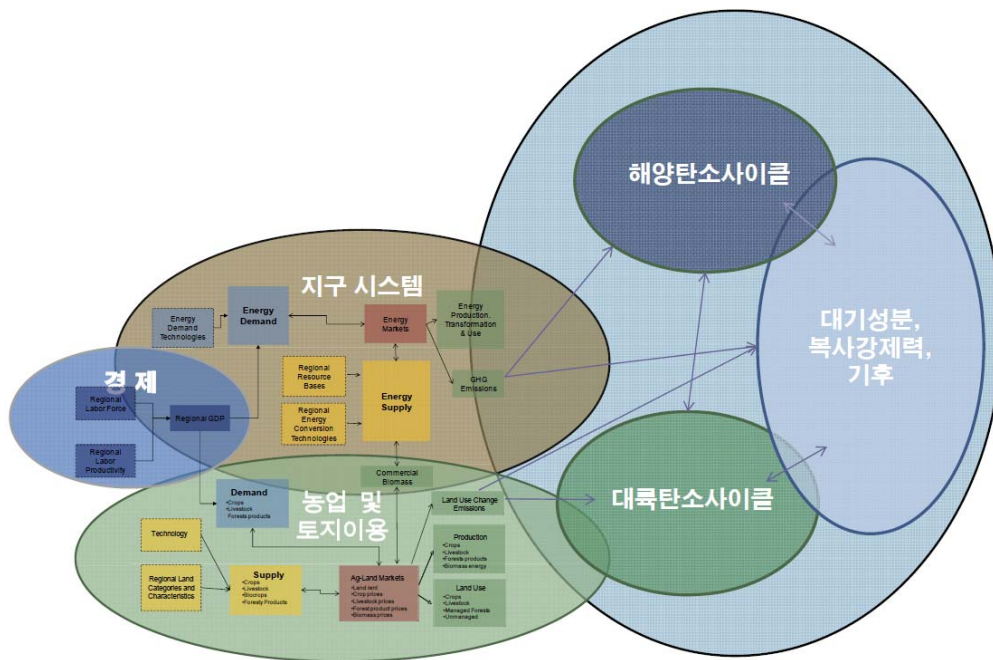


그림 2-14. GCAM 인류 및 생지질화학, 지질물리학 지구시스템



자료: Edmonds (2012), p.4.

GCAM은 재배 시 토지이용 변화는 토지임대가격에 의존한다. 토지수요의 증가는 높은 임대가격과 비관리된 생태계로 확장을 초래한다. 토지이용과 생산은 역사적 경작지, 목초, 잠재적 식품 등의 글로벌 맵에 기반한 14개의 GCAM 지역으로 지도화가 이루어진다. GCAM은 미국 Climate Change Technology Program의 주요 분석 틀로 이용되어 왔고 지난 20여 년간 Energy Modeling Forum(EMF), IPCC 보고서 등 주요 기후, 에너지, 경제학 분석에 핵심적인 역할을 담당해 왔다. IPCC 5차 보고서를 위한 대표농도경로를 산출하기 위한 4종의 모형 중 하나이며, CCCP(Community Climate Change Project)의 시나리오 분석을 위해 시나리오 산출에 이용되는 3종의 모형 중 하나로 이용될 만큼 검증된 모형이다.

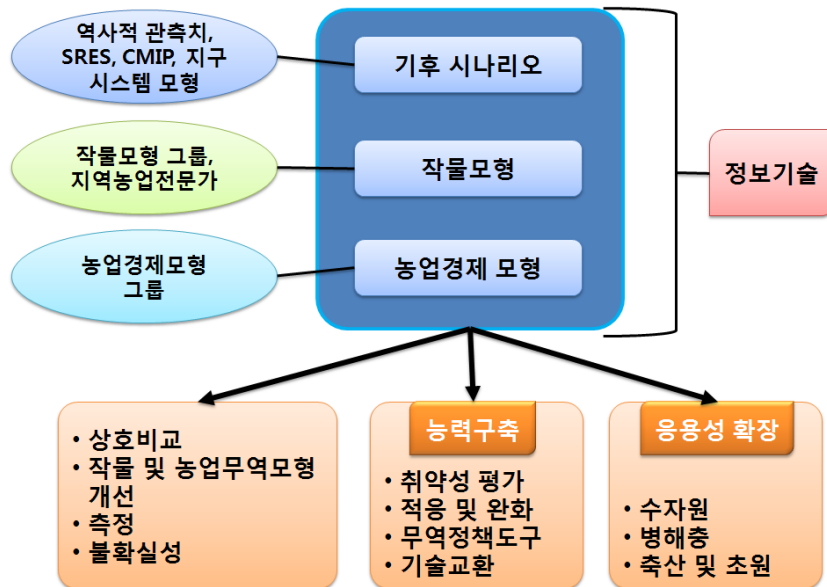
GCAM은 1990년부터 2095년까지 15년 주기로 잠재적 미래 개발을 분석하는데 이용된다. 농업, 임업, 에너지, 토지 등의 공급과 수요는 가격기반 시장청산 메커니즘에 따라 균형을 이루게 된다. 이러한 시장 결과물은 비관리된 생태계와 내륙 탄소사이클의 이용과 외생적으로 연결되며, 섹터별 경제적 결과와 가격, 토지이용 등에 더하여 GCAM은 15종의 온실가스과 에어로졸 뿐만 아니라 내륙 탄소축적량을 모델화 한다. GCAM 내 농업 및 토지이용 부문은 통합모형과 완전 연계(fully coupled)되어 있으며 다음의 이유에서 기후변화 대응 연구에 매우 중요하다.

(라) AgMIP

미국 오래전주립대 John Antle 교수팀이 총괄하여 추진하고 있는 농업모형비교 및 개선 프로젝트(Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project: AgMIP)는 모형비교, 다모작을 위한 미래 기후변화 여건 반영, 세계농산물 교역 모델링에 관한 기후변화 시나리오 작업이다. AgMIP는 기후변화로 인한 주요국의 농산물 수급영향 분석과 지역간 변화, 적응조치의 정책효과 등을 다루기기 위해 기후변화 시나리오와 작물모형 및 농업경제모형과 연계된 종합적 모델작업이다. 특히 이 모형 분석결과는 영향분석, 취약성평가와 적응수단의 효과분석 등 다양한 목적으로 개발되고 있다.

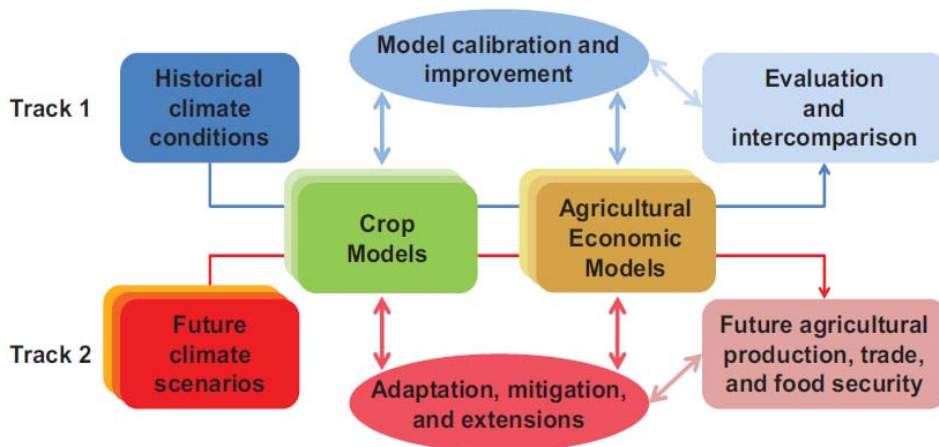
AgMIP의 주요 내용은 살펴보면, 우선 AgMIP은 국제지권생물권연구(International Geosphere-Biosphere Program: IGB; Walker and Steffen, 1996)의 글로벌 변화와 육생 생태계(Global Change and Terrestrial Ecosystems: GCTE) 프로젝트에 의한 작물 모형 상호비교와 농업시스템적용을 위한 국제 협력단(International Consortium for Agricultural Systems Applications: ICASA, Hunt et al., 2006)에 기반을 두고 있다. 다중 모형 기후, 농업경제, 경제 전망은 취약성, 영향, 적응의 요소를 기본으로 하는 AgMIP의 미래 농업전망과 경제적 결과는 지역단위 취약성 및 적응 연구, 국가단위

그림 2-15. AgMIP 구성요소와 기대 결과



자료: AgMIP(<http://www.agmip.org/>).

그림 2-16. AgMIP 연구의 두 가지 병행접근법(Two-track approach)



자료: Rosenzweig et al. (2013).

의 다양한 정책수단 개발을 위한 공급 시험 시나리오의 맥락에서 설정되며, 향후 토지이용변화 전망에도 기여할 것으로 기대된다.

AgMIP 프로토콜은 효율적이고 포괄적으로 일관성 있는 모형 비교와 다중모형 평가를 수행하기 위한 과정으로 구성된다. 각 팀별 프로토콜을 살펴보면 다음과 같다.

먼저 기후팀 프로토콜은 ① 기록과 표준화의 개선, 기후데이터 수집과 시나리오 자료 및 방법의 투명성 확보, ② 역사적 기후정보를 제공하여 협력적인 농업모형 비교, 베이스라인 기간 분석 지원, ③ 주요 기후현상에 대한 작물 모형 민감도 분석을 위한 시나리오 개발, ④ 주요 농업지역에 대하여 잠재적인 미래 기후 시나리오 개발, ⑤ 과거 기후 및 미래 조건에 대한 농업지역의 취약성을 파악하기 위하여 농업기상 분석 등을 수행한다.

다음으로 작물모형팀 프로토콜은 ① CO₂, 기온, 물에 대한 반응을 포함하여 생장 및 단수 데이터 결과를 비교하고, 다양한 작물과 지역에 대한 모형을 평가, ② 예측력을 높이기 위하여 모형 알고리즘과 파라미터를 개선, ③ 품종 차이를 고려한 유전적 계수를 분석, ④ 작물관리시스템 제시, ⑤ 토양탄소, 질소 비옥도, 용수량에 대한 모형을 계산, ⑥ 물과 질소 공급과 무관한 단수 차이 요소를 정의, ⑦ AgMIP 경제적 평가를 위한 투입요소 세트를 만들기 위하여 기후변화 시나리오를 이용하여 작물모형 시뮬레이션을 실시, ⑧ 모형 시뮬레이션 결과로 나타난 불확실성을 분석, ⑨ 관리 방법 변화와 유전적 개선 등 적응전략을 개발하고 평가 등을 수행한다.

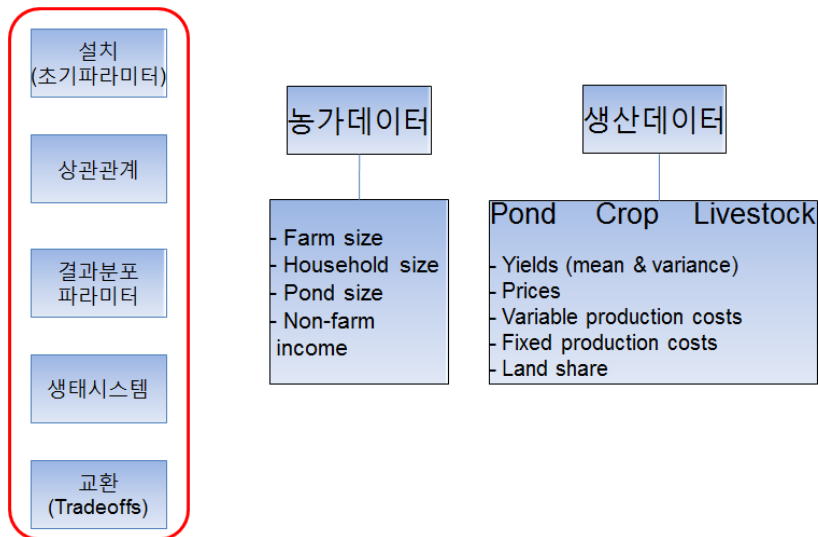
그리고 정보통신팀 프로토콜은 유용하고 혁신적인 해결책을 공급함으로써 모형 통합, 상호비교, 평가를 용이하게 한다. 구체적으로 AgMIP IT팀은 ① 모델의 변수, 파라미터, 투입요소, 산출물의 정의를 공유하게 함으로써 메타 데이터와 의미적 상호운용성으로 AgMIP 데이터베이스, 데이터 공유 체계를 개발, ② 데이터 변환장치와 AgMIP 데이터베이스를 연결, ③ 그래프, 도표, 지도, 표로 결과를 제시할 수 있도록 온라인 지리 뷰어를 제작하여 시행, ④ 여러 영역에서 작동할 수 있도록 다중모형을 심플화하는 모델링 체계를 개발 및 적용 등을 수행한다.

특히 AgMIP에서는 최소자료 또는 다차원적 상충분석(Tradeoff Analysis-Minimum Data or Multi-Dimensional, TOA-MD) 모형은 미국 오레곤주립대학교 John Antle 교수 연구팀에 의해 개발되어 다차원적 영향평가의 시뮬레이션 분석에 활용되고 있다. TOA-MD는 원래 농업과 환경정책분석, 정책의사결정을 위한 결정지원 수단으로 개발된 모형이다. 이 모형은 학제적 자료와 필드 자료의 모형을 통합하기 위해 고안되었고, 경제적 목표와 환경적 목표 간의 상충성(trade-off)을 계량화하기 위해 정책분석과 관련된 경제적 환경적 산출을 점수화하여 총계하는 접근방식을 적용하고 있다. 이 모형은 주로 의사결정자와 과학자가 참여하는 과정에 이용되며, 농업연구 프로그램에서 지속가능한 농업의 기준을 설정하고 이행하거나 연구의 우선순위를 설정하는데 필수적인 상충관계의 계량화를 위해 고안되었으며, 최근에는 기후변화에 따른 농업부문의 경제적 영향분석에 활용되고 있다.

TOA-MD의 효과적인 이용을 위해서는 세심한 설계가 요구되며, 이 중 가장 중요

한 요소는 계층화(Stratify)와 단순화(Simplify)이다. 계층화는 모형 내 추정의 질을 향상시키기 위해 일관성있는 하부 인구들로 인구를 계층화할 때 이용되며 지질적, 농장 규모 및 유형별로 구분하는 경우를 예로 들 수 있다. 단순화는 추정에 이용되는 파라미터의 숫자들을 최소화하기 위해 가능한 가장 단순한 특성들로 데이터를 통합하는 것을 의미한다. 이를 위해, 시스템 간에 변하지 않는 활동들을 축적하고, 순수익을 모형에 직접적으로 입력하며, 개별 농가단위 데이터를 입력하는 것 등을 포함한다. 이 모형의 데이터 구조는 각 시스템을 이용하는 농가그룹들의 대표성 있는 샘플을 구하는 것이 가장 이상적이지만, 데이터 획득의 문제를 고려해 실험 데이터, 모형의 결과값, 전문가 의견뿐만 아니라 이차 데이터를 활용한다.

그림 2-17. TOA-MD의 기본 구조



자료: Antle and Valdivia (2011), p.15.

TOA-MD를 이용하면 기후변화의 영향과 취약성 평가는 물론이고 적응효과 분석도 가능한 것으로 제시되고 있다. TOA-MD 모형은 민감도 분석을 통해 기후변화 영향평가와 관련한 불가피한 불확실성 분석을 용이하게 하도록 설계되었다. 기후영향 및 적응을 평가하기 위해서는 다섯 단계의 과정으로 진행된다. 우선 1단계에는 대표 농업경로(Representative Agriculture Pathway, RAP) 및 시나리오 설계가 이루어지고, 2단계에서는 기준시스템 및 적응시스템을 규명하고 특성화하며, 3단계에서는 기준 및 적응시스템에 대한 기후변화 영향을 정량화하고, 4단계에서는 비적응 시 영향을 시뮬레이션 하고, 끝으로 5단계에서는 적응 시 영향에 대한 시뮬레이션이 이루어진다. 1~3 단계에 있어서 우선적으로 RAP 스토리라인을 이용해 프레임워크를 구축하며, 이는 정량적 정보를 모형 파라미터에 반영하는 과정이다. 또한 기후데이터 및 모

형을 통해 농업생산성에 미치는 영향에 대한 시뮬레이션이 이루어지며, 농업인과 과학자들이 제시하는 적응대안의 평가도 이루어질 수 있다. 4단계에서는 비적응 시 기후변화 영향에 대한 시뮬레이션이 이루어지는데 적응투자에 대한 평가하기 위해서는 기후변화의 비용과 적응의 경제적 효과 등이 종합적으로 고려되어야 한다. 이 단계에서 기후영향 정량화를 위한 작물모형과의 연계가 필요하다. 마지막 5단계에서는 적응 시의 영향을 분석하는 단계로 4단계와 달리 적응기술의 도입률이 고려되며, 해당 지역의 작물별 농가들의 적응방안 도입 정도를 산정하고 도입률에 따른 개별 농가의 순수입(net return)을 추정한다. 다음으로 비도입 농가와 비교해 이익 및 손실(gain and loss)를 통해 상대적인 차이를 이용하여 경제적 효과에 대한 분석이 효과적으로 이루어질 수 있다(Antle and Valdivia, 2011)

(2) 유럽

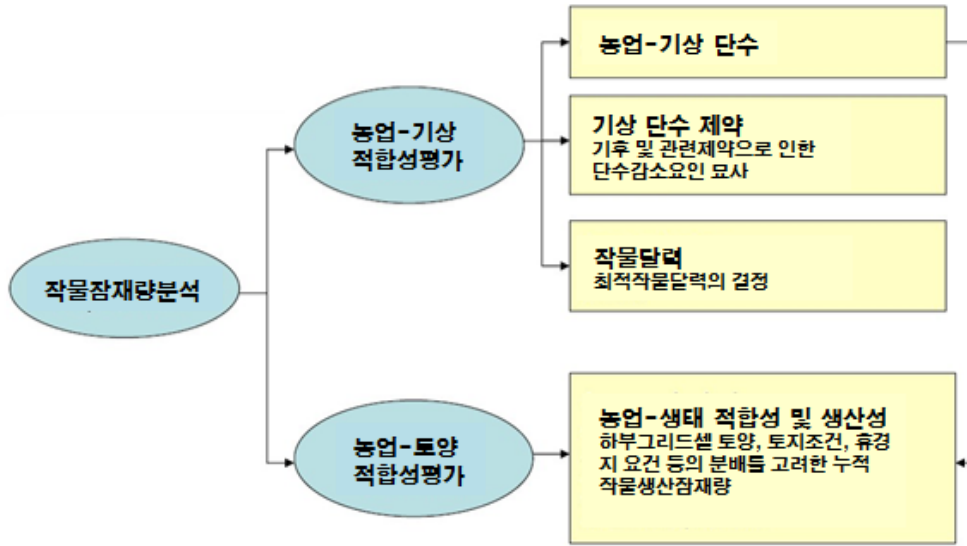
(가) GAEZ

전지구 농업생태지역모형(Global Agro-Ecological Zones: GAEZ)은 국제응용시스템분석연구소(IIASA)와 국제연합식량농업기구(FAO)가 공동으로 개발한 모형이다. 이 모형은 전략, 관리, 계획 등의 수립과 식량안보를 고려한 합리적 이용 및 지속가능한 개발 등을 위한 전지구 규모의 평가도구이다. GAEZ 모형은 토지자원의 인벤토리 및 토지의 생태물리학적 한계 및 생산잠재량 평가를 기반으로 합리적 토지이용 계획을 지원하기 위한 정보를 생산한다. 또한, 세계 농업 및 천연자원 잠재량 등에 대한 전지구적 분석을 통해 회원국에 데이터, 정보, 지식 등을 제공하며, 이를 통해 식량 및 농업부문에 대한 국제적, 국가적, 지역적 정책결정을 지원한다.

GAEZ는 전체 데이터베이스와 분석결과를 제공하고자 온라인 서버(GAEZ Portal)를 이용해 방대한 자료를 공개하고 있다. GAEZ 포털은 GAEZ 분석의 주요 결과 값에 주제에 따라 구조화된 접근을 가능하게 한다. 글로벌, 지역별, 국가별, 하위 행정단위별로 그리드 데이터의 누적된 5 acr-minute 해상도 지도와 표를 포함하고 있다. 이들은 토지생산성의 계량화 등 다양한 응용을 위한 농업관련 기초자료를 제공한다(IIASA/FAO, 2012).

작물 잠재성 평가를 위한 GAEZ 모형 프레임워크는 토지 적합성, 잠재적 단수, 상세농법 및 투입재 수준에 따른 잠재적 생산량을 분석하기 위한 상세한 작물학기반 지식을 이용한다. 본 도메인은 농업-기후 단수, 단수제약, 작물달력, 3단계 투입물 수준에 따른 잠재적 생산추정 등에 대한 지도 및 표 정보를 제공한다. 생산성 추정은 여러 가지 물공급 시스템에 따라 결정된다.

그림 2-18. 적합성 및 잠재단수 테마 개요



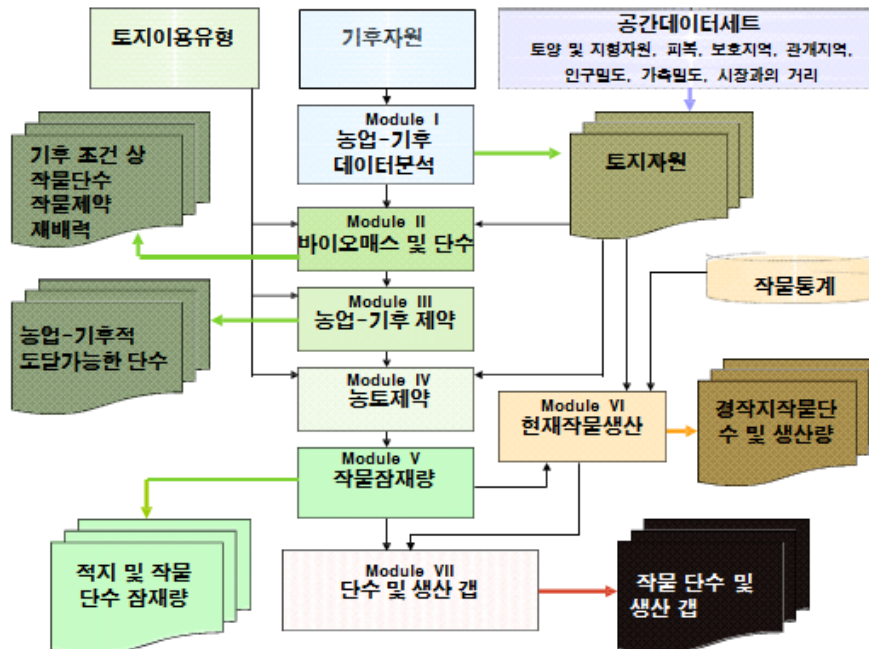
자료: IIASA/FAO(2012), p.10.

GAEZ 모형 구조는 모형 평가 내 정보의 흐름과 통합을 나타낸다. 주어진 작물 및 토지이용유형(LUT)¹⁵의 재배를 위한 토지 적합성은 지배적인 농업-기후 및 농업-토지 조건과 비교하여 작물이 가진 요구조건에 따라 다르다. 본 모형은 5개의 모듈(모듈 I~V)을 통해 데이터 처리과정을 거쳐 작물 적합성을 측정하며, 모듈 VI를 통해 지배적인 주요 작물의 단수 및 생산을 계산하고, 모듈 VII를 통해 기존 작물과 잠재적 획득가능한 작물 간의 단수를 비교한 차이를 계산하여 전지구적 인벤토리를 산출한다(IIASA/FAO, 2012).

AEZ 방법론에 기반한 GAEZ 모형은 토지자원의 축적 및 생물물리학적 제약, 토지의 잠재적 생산량 등에 기반하여 합리적인 토지이용계획을 지원할 목적으로 정보를 생산한다. 이 모형은 ① 토지 생산성 정량화, ② 식량, 사료, 직물, 바이오에너지 원료 생산 등을 위한 천수답 또는 수리답 재배 잠재량 추정, ③ 농업 생산량에 대한 환경적 제약의 규명, ④ 농업적 전환의 잠재적 분쟁지대(hot spot) 및 기후변화로 인한 농업 토지 잠재량 상 지리적 변화 등의 분석에 활용된다. AEZ 모형 프레임워크는 전지구적 규모뿐만 아니라, 지역이나 국가규모 등 다양한 규모에 활용된다. FAO(2011)은 SOLAW(State of the Worlds Land and Water Resources) 보고서에서, 5 arc-minute 해상도의 다양한 전지구 AEZ의 작물적합성 및 생산성평가를 이용해 토지, 물, 천연자원의 지속가능한 이용 및 관리와 관련한 핵심 메시지에 대한 분석이

15 토지이용유형(Land Utilization Type, LUT)은 사회경제적 설정 내에 기술적 특성들의 집합으로 이루어짐. 개별 토지이용유형에 관한 요인은 재배농법, 투입물 요구사항, 재배력, 주요생산의 이용, 작물잔류물, 그리고 부산물 등을 포함한다.

그림 2-19. GAEZ 모형의 구조



자료: IIASA/FAO(2012), p.3.

가능하다. 또한 IIASA (2009)는 바이오연료 및 식량안보를 주제로 한 연구에서, 전 지구 AEZ의 바이오연료용 원료 적합성 및 생산성 평가를 5 arc-minute 해상도 수준으로 수행한다.

(나) MESSAGE

MESSAGE(Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental impacts) 모형은 오스트리아 국제응용시스템분석연구원(International Institute for Applied System Analysis: IASA)¹⁶이 최초로 개발하여 풍부한 기술적 묘사가 국가 단위에서 에너지시스템의 최적화 모형이다. 주로 중장기 에너지 계획 수립, 에너지 정책 분석, 에너지와 환경문제의 상호작용을 분석하는 각종 시나리오 개발 등에 활용되며, 5-10년 단위로 최대 120년의 시뮬레이션이 가능하다.

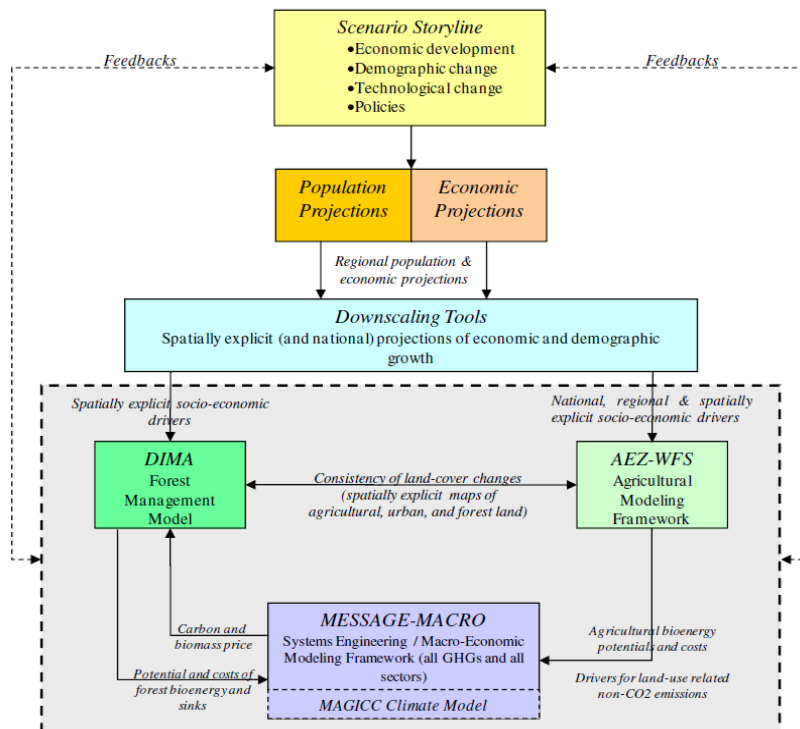
IIASA 통합모형 프레임워크는 IIASA가 개발한 개별 모형들 간의 상호작용에 의해 기후변화 시나리오의 모형화 및 분석에 이용된다. 기후변화에 의한 농업부문의 연구를 위해서는 <그림 2-20>과 같이 영향분석 모형과 연계가 요구된다. IIASA 통

16 국제응용분석시스템연구소(IIASA)는 1972년에 설립된 비정부 연구기관으로 오스트리아 비엔나 근교의 락센부르크에 있으며, 환경, 경제, 기술, 사회 분야에 상호 관련된 과학적 연구를 수행한다. 미국, 일본 등 14개 정회원국이 있고, 준회원 2개국, 제휴회원 1개국 등이 있다.

합모형 프레임워크는 MESSAGE - MACRO, AEZ - WFS¹⁷, DIMA¹⁸ 등이 통합된 형태로 지역 및 국가, 격자단위 등의 입력 값들이 일관성 있게 구성된다.

AEZ-WFS 모형은 농업부문의 대안 개발경로를 예측하며 다음의 세 가지 하부모형으로 구성된다. 공간적으로 상세화된 작물적합도 및 토지생산성을 평가하는 농작물 모형(AEZ 모형), 세계식량시스템의 응용일반균형모형(WFS 모형), 통합세계식량시스템의 생산수준과 농업 토지이용의 공간 생태물리학 자원의 분배를 위한 공간 다운스케일 모형 등으로 구성된다(Fischer et al., 2007). AEZ 모형은 토지자원 가용성, 작물 적합성, 농지레벨 관리설정, 작물생산 잠재량 등을 기후, 기술, 경제 생산성 및 여러 요소로써 시뮬레이션화 한다. WFS 모형은 농업경제모형으로써 지역 농업소비, 생산, 교역 및 토지이용 등을 분석한다. AEZ-WFS 모형을 통해 전지구적 수요를 충족하기 위한 식량 및 사료생산에 따른 토지의 이용 및 변화 결정되며, 이러한 수요는 세계 농산물수요, 토지자원의 가용성, 국가소득 및 소비자 생활유형 등과 일관되게 유지된다.

그림 2-20. IIASA 통합모형 프레임워크 구조



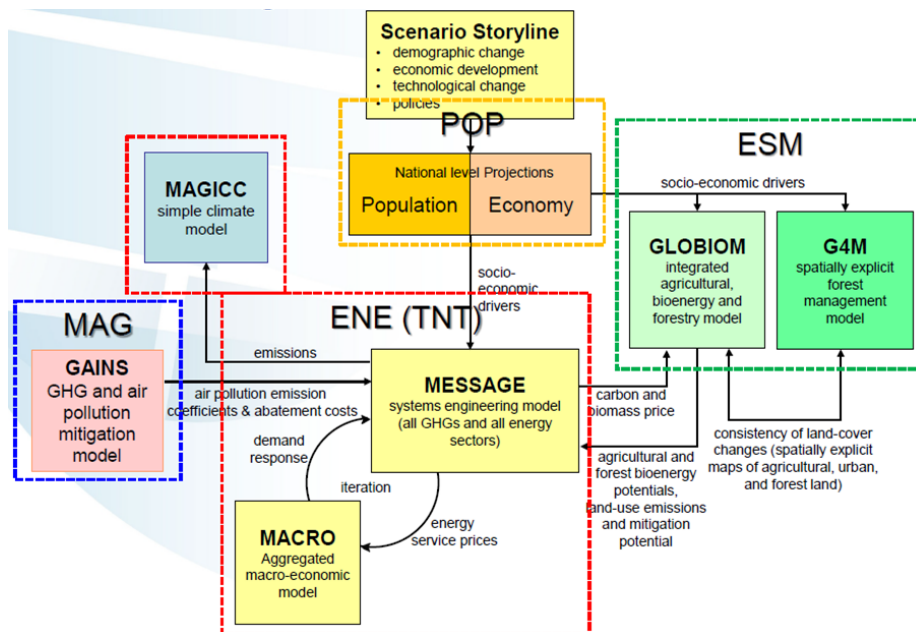
자료: Riahi et al. (2007), p.913.

17 AEZ - WFS (Agro-Ecological Zoning-World Food System)

18 DIMA (Dynamic Integrated Model of Forestry and Alternative Land Use)

또 다른 IIASA 통합모형 프레임워크는 <그림 2-21>과 같이 새롭게 변형된 형태로써, 최신 버전의 MESSAGE (에너지-경제), GAINS (오염물 배출), GLOBIOM (농업), G4M (임업) 등으로 구성되어, 개별 모형들 간의 상호작용에 의해 기후변화 시나리오의 모형화 및 분석 등에 이용된다.

그림 2-21. IIASA 통합평가 프레임워크



에너지시스템 공학기반 모형인 MESSAGE 모형은 동태적 선형모형으로, 자원 가용상태에서 최소비용의 공급구조를 계산한다. 거시경제학 개발 및 에너지이용 간의 관계를 추정하는 MACRO 모형은 MESSAGE 모형과 연계되어 시나리오의 일관성을 평가하고 각각 하향식, 상향식의 관점을 동시에 분석가능하게 한다. 농업부문의 바이오에너지 이용에 따른 영향분석이 효과적으로 이루어질 수 있다. MESSAGE는 주로 세계에너지협회와 더불어 전세계 에너지 전환경로 및 IPCC를 위한 온실가스 배출시나리오를 개발하는데 이용된다.

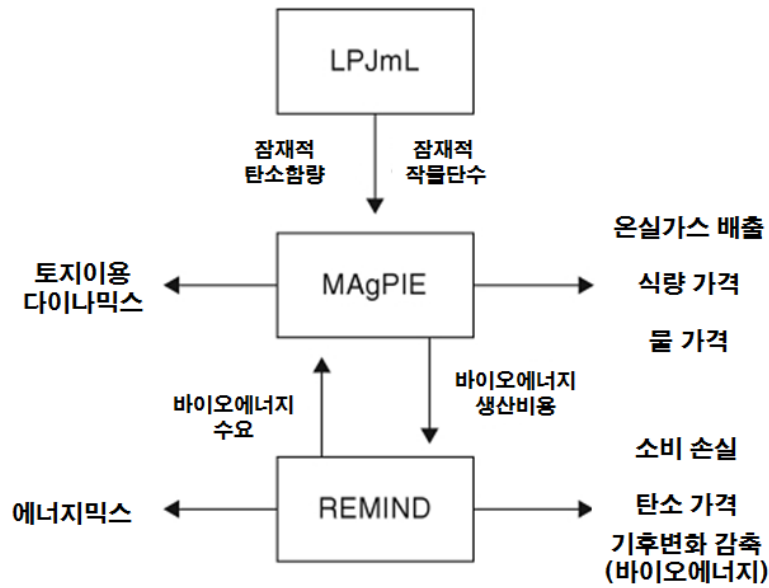
(다) REMIND

혁신 및 기술개발에 관한 지역화 에너지-경제-기후모형(Regionalized Energy-economy-climate Model on Innovation and Technological Development: REMIND)은 독일 포츠담기후영향연구소(PIK)¹⁹가 개발한 최적화 모형이다. 에너지시스템, 거시경제,

¹⁹ 포츠담기후영향연구소(PIK)는 1992년, 독일 통일 직후에 설립되어 현재 자연과학과 사회과학의

기후모듈 등으로 구성되며 11개 지역으로 구분된 글로벌 모형이다. 상세한 에너지시스템 모듈을 거시경제학 성장 모듈과 더불어, 온실가스 배출의 영향을 계산한 기후시스템 모형과 통합되어 있다. 연계성을 지니며, 동시에 동태적 최적화 과정 상 모든 상호작용을 고려해 세 모듈의 결과 값을 구한다.

그림 2-22. REMIND-MAgPIE-LPJmL 통합평가 프레임워크



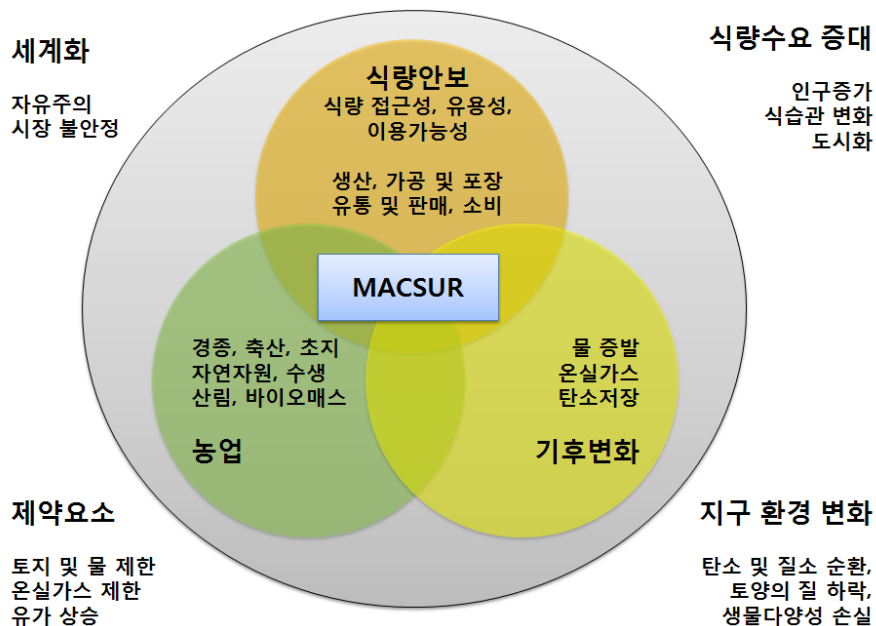
REMIND-MAgPIE-LPJmL은 통합평가모형 프레임워크로써, 서로 다른 기관에서 개발된 세 가지 종류의 독립적인 모형으로 구성된다. REMIND는 외생적으로 상세 에너지시스템 모듈과 거시경제적 투자 다이내믹스와 교역을 보다 발전적으로 묘사한다. MAgPIE(The global land-use optimization Model of Agriculture and its Impact on the Environment)는 내생적 기술변화 묘사와 공간적으로 명확한 농업 섹터모형과 결합한다. LPJmL(The Lund-Potsdam-Jena dynamic global vegetation and hydrology model with managed Land)는 탄소, 물, 농업생산물 간 프로세스 기반 상호작용을 제공한다. 상기 세 모형의 상이한 특징들이 결합되어 유연성 있는 소프트 커플링 접근법을 개발한다.

결합을 통한 종합적이고 기초과학 중심 기후변화를 분석하는 세계 정상급의 연구기관이다. 전세계 300여명의 자연과학 및 사회과학 분야의 학자들이 함께 모여 국제적 기후변화와 환경, 경제, 사회적 영향에 관하여 연구한다.

(라) MACSUR

유럽의 기후변화 식량안보 연계 유럽농업모델링(Modeling European Agriculture with Climate Change for Food Security: MACSUR)은 유럽 농업전반에 대한 기후변화의 영향파악과 위험관리를 위한 수단으로 활용할 수 있다. 작물, 축산, 무역 등 3개 부문과 유럽 16개 국가를 대상으로 농업경제와 무역을 다루고 있다. 특히 기후변화에 따른 식량안보와 농업발전을 다루기 위해 일반균형수단응용 모듈(Modular Applied General Equilibrium Tool: MAGNET)은 GTAP 모형에 기초한 모형으로 세계화, 식량수요, 제약요소, 환경변화요소가 종합적으로 고려되어 2030년까지 농업부문의 기후변화 영향을 심층적으로 분석한다.

그림 2-23. 유럽의 기후변화와 식량안보 영향분석 모형 구조



(3) 일본

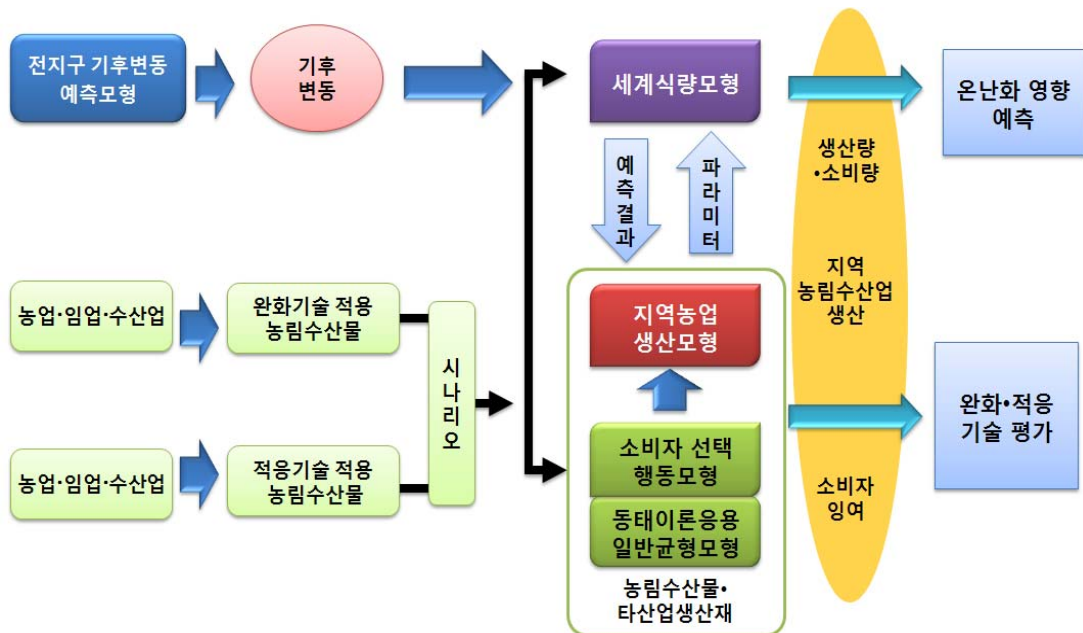
일본은 농업환경기술연구소 주관으로 연구기관과 학계가 참여하여 컨소시엄을 구성하여 2010~2014년까지 5개년 프로젝트로 「농림수산분야의 온난화 완화기술과 적응기술 개발」을 다루는 '온난화 2010' 과제에서 농업·수산·산림 부문의 경제적 영향평가에 관한 연구가 수행되었다.

농식품부문의 경제적 모형은 기후변동과 세계식량모형을 연계하고, 동태이론을

응용한 일반균형모형으로 소비자 선택 행동모형과 지역농업 생산모형을 연계하여 국내농업에 미치는 영향과 식량수급 분석 및 적응기술에 대한 경제적 효과분석이 이루어지고 있다. 2011년부터 신 기후변화 시나리오를 적용하여 경제적 영향에 대한 시뮬레이션 분석이 수행 중이다.

일본에서는 장기예측이 가능한 지구온난화의 영향 예측용 식량수급모델 개발에 상당한 비중을 두고 있고, 중장기적인 과제로 일본의 완화와 적응대책이 타국가의 산업에 미치는 영향 분석에 관한 연구도 추진하고 있다.

그림 2-24. 일본의 농식품부문의 기후변화 경제적 영향모형 기본 구조



자료: 일본 농림환경기술연구소(http://gpro.dc.affrc.go.jp/project2010_7.html).

나. 통합모형을 이용한 기후변화 영향분석

농업부문의 기후변화 영향분석 모형은 관련분야 파라미터의 적용성과 분석목적 등에 따라 다양한 모형이 개발되어 운용되고 있다. 미국, 유럽 및 일본 등에서 개발되어 운용되고 있는 농업부문 기후변화 영향분석에 대한 모형으로는 미국 오레곤주립대 연구팀에 의해 개발되어 운용되고 있는 AgMIP의 TOA-MD와 EU의 지원을 받아 운용되고 있는 MACSUR 프로젝트의 영향분석 모형을 벤치마킹할 수 있다. 지금까지 주요국에서 활용되고 있는 영향분석 모형을 종합적으로 고려할 때 IFPRI에서

개발된 IMPACT와 미국의 AgMIP에서 개발된 TOA-MD 등의 모형을 도입하여 이용하는 방안이 바람직하다. 이들 모형을 도입하여 운용하기 위해서는 모형을 개발하여 운용하고 있는 기관과의 MOU체결과 공동과제 추진 등의 선결요건이 제시되고 있어 향후 이 부문에 대한 적극적인 검토가 필요한 것으로 사료된다(김창길, 2014).

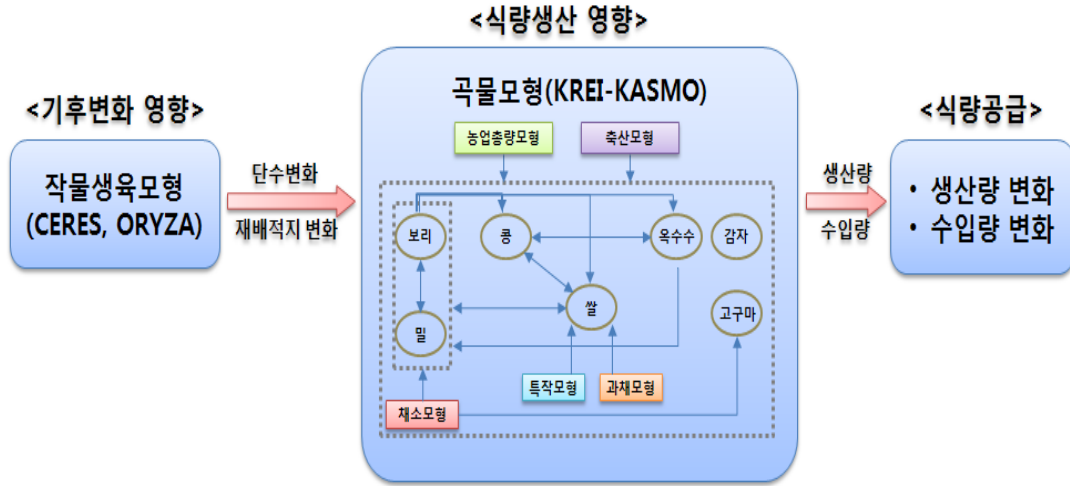
표 2-2. 주요국의 영향분석 모형의 국내 적용가능성 검토

모형명(개발처)	농업부문 통합정도	모형적용 운용성	국내적용 가능성
IMPACT(미국 IFPRI)	높음	높음	높음1)
FASOM(미국 EPA, ERS)	높음	보통	보통
GCAM(미국 PNNL)	보통	보통	낮음
AgMIP(미국 OSU 등)	높음	높음	높음1)
GAES(오스트리아 IIASA)	보통	보통	낮음
MESSAGE(오스트리아 IIASA)	보통	낮음	낮음
REMIND(독일 PIK)	보통	보통	낮음
MACSUR(EU)	높음	보통	보통
IFPSIM(일본 JIRCAS)	높음	높음	보통

주: 국내적용 가능성과 관련 높음의 경우 모형개발 또는 운용기관과의 MOU 체결을 전제로 가능함을 나타냄.

현재의 여건을 종합적으로 고려할 때 우리의 여건에 적합한 영향분석 모형은 기후변화에 따른 식량공급 분석을 위해 작물생육모형의 단수변화와 한국농촌경제연구원 농업시물레이션모형(KREI-KASMO, 이하 ‘KASMO’)을 연계하여 기후-농업연계 한국농업시물레이션모형(Korea Agriculture Simulation Model for Climate-Agriculture Relations: SIMCAR)이 최적의 모형으로 판단된다. IPCC의 기후변화 시나리오를 적용하여 예측된 단수 변화를 KASMO의 단수 추정치에 반영하여 농업부문에 미치는 경제적 영향에 대한 분석이 가능하다. 분석대상은 우리나라 주요곡물인 쌀을 대상으로 신기후변화 시나리오 하(RCP8.0, RCP4.5)에서 CERES-Rice의 분석이 가능한 쌀 품목으로 한정하였고, 분석대상 연도는 중장기로 2020년, 2030년으로 하였으며 최종 목표 연도를 2050년으로 설정하였다. 본 연구에서는 KASMO 모형 시물레이션을 이용하여 기후변화를 적용한 CERES의 단수 추정치를 외생적으로 KASMO에 투입하여 분석한 결과와 기후변화가 없는 KASMO의 베이스라인과 비교하였다.

그림 2-25. 기후변화와 농업부문 연계 통합모형



자료: 김창길 외 4인(2012).

(1) 분석자료 및 모형설정

(가) CERES 모형

단수를 추정하기 위한 자료로 기상요소는 기상청 자료를 이용하였다. 기상자료는 현재 평년기상(1971~2000년)을 기준년도로 하고, 기후 시나리오에서 예측한 미래의 기후조건을 단계별로 나누어 미래의 평년기상을 구축하였다. 56개 지역별 미래 기후조건에 해당하는 3가지의 미래 평년기상을 생성하기 위해서는 기상청에서 제공하는 한반도 기후시나리오의 기준년도 대비 월별 기상 평차자료를 추출하여 미래의 각각 해당기간의 30년 평균값을 계산한다. 대기 중 이산화탄소 농도 변화는 IPCC 제4차 평가보고서에서 제시한 탄소순환모형인 Integrated Science Assessment Model(ISAM)과 BERN의 평균을 이용하였다.

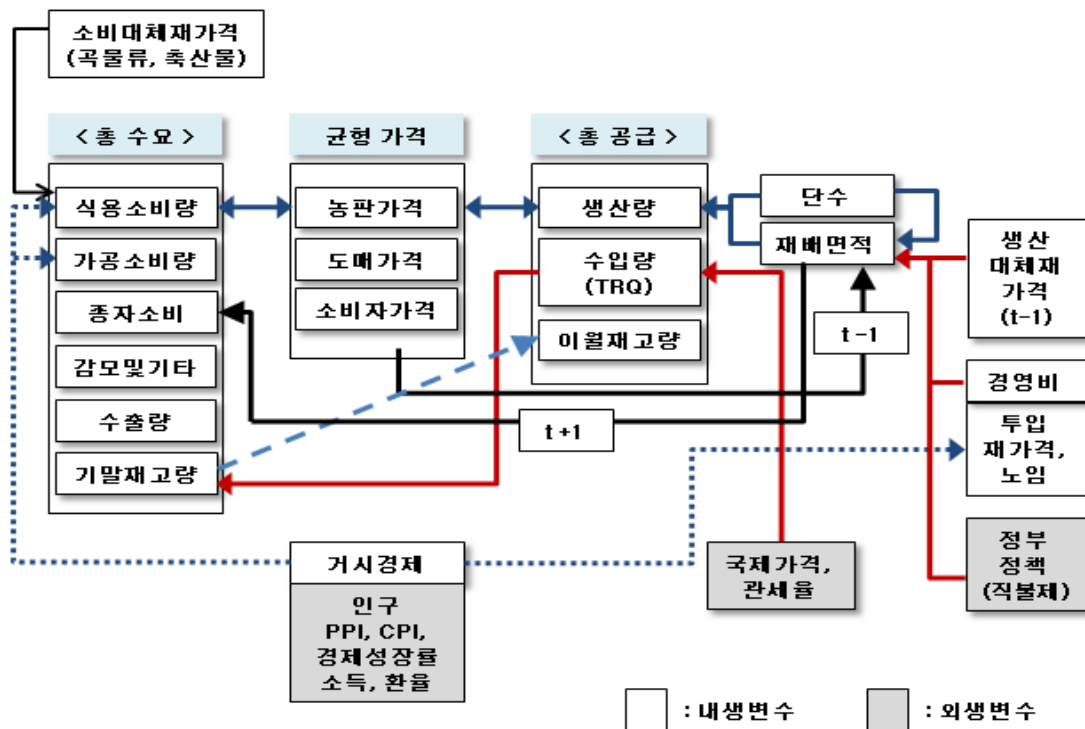
56개 생육 모의 지역의 토양자료의 생성에는 각 지역별 대표 토양정보의 추출과정과 추출된 각 지역의 토양의 세부적인 자료 조사과정 및 작물생육 모의에 알맞게 토양자료를 구축하는 과정이 있다. 생육단계 및 수량을 모의하기 위한 유전 모수 추정에는 모의하고자 하는 연도의 모형 구동용 입력파일의 구축과 모의 결과를 통계분석하기 위한 관측된 생육단계 및 수량구성요소 자료가 사용된다.

(나) KREI-KASMO 모형

KASMO는 주요 거시변수 전망부문, 투입재 가격 전망부문, 재배업부문 전망부문,

축산부문 전망부문, 농가인구 전망부문, 총량부문 전망부문으로 크게 6개 부문으로 구성되어 있고, 각 부문은 상호 연계되어 있다.

그림 2-26. KASMO 모형의 흐름도



자료: 한석호 외 5인(2011a).

주요 거시변수부문은 실질 GDP와 1인당 가처분소득을 전망하도록 구성되고, 이를 위해 필요한 경제성장률, 소비자물가상승률, 이자율, 환율, 소비자가격지수, 생산자가격지수 등은 한국은행, 통계청, OECD, Global Insight Inc. 등 관련기관 전망치를 이용하고 있으며, 국제유가는 미국의 EIA(Energy Information Administration)의 전망치(Annual Energy Outlook), 국내 총인구수는 통계청 추계인구전망치를 이용하였다. 또한 국제곡물가격 및 축산물 가격은 미국 농식품정책연구소(Food and Agricultural Policy Research Institute: FAPRI)의 전망치를 이용하였다. 투입재가격 전망부문은 농기구가격, 사료비, 영농광열비, 종자비, 비료비, 농약비, 제재료비, 농업노임, 농지임차료 등을 전망하도록 설정되어 있다. 이 중 농기구, 사료비, 영농광열비, 종자비, 비료비, 농약비, 제재료비는 앞서 전망된 거시변수를 이용하여 전망할 수 있도록 구성되고, 농업노임과 농지임차료는 거시변수 부문과 더불어 재배업부문과 연계되어 전망되도록 구성되어 있다.

재배업부문은 곡물, 채소, 과채, 과일, 특용작물로 구분되고 각 품목은 재배면적합

수, 단수함수, 수요함수, 수입수요함수, 수급균형 항등식 등으로 구성되어 품목별 수급전망 및 균형가격을 도출하도록 구성되어 있다. 또한 재배업 부문은 크게 하계 재배 작목, 과수작목, 동계 재배 작목으로 구분되는데 하계 재배 작목과 동계 재배 작목은 생산자의 재배 작목 선택의 상충(trade-off)관계가 반영되도록 연립방정식체계에 각각 구성되어 있다.

본 연구에서는 KASMO 모형의 부분모형을 기초로 연구목적에 부합되도록 일부 변형하고 이용하였다. 분석모형은 기본적으로 총수요와 총공급이 일치할 경우 균형가격을 구하는 연립방정식 모형형태이다.

총수요는 식용소비량, 가공소비량, 종자소비량, 감모 및 기타, 수출량, 기말재고량으로 구성된다. 식용 및 가공소비량은 거시경제변수들의 영향을 받으며, 종자소비는 t+1기의 재배면적, 기말재고량은 가격과 생산량, 수입량 등 당해연도 수급에 따라 달라진다.

총공급은 생산량과 수입량 이월재고량으로 구성된다. 생산량은 단수와 재배면적의 곱으로 표현할 수 있는데 재배면적은 t-1기의 생산대체재가격과 균형가격, 경영비, 정부정책 등의 영향을 받게 된다. 수입량은 국내가격, 국제가격과 관세율, TRQ에 영향을 받고, 이월재고량은 기말재고량에 따라 달라진다.

재배면적반응함수($ACR_{i,t}$)는 동태적 재배면적 반응함수형태로 Nerlove의 부분조정모형과 Koyck의 기하학적 분포시차모형을 기본으로 한 Cagan의 적응적 기대가설모형을 이용하여 설정할 수 있다. 모형에 사용된 주요 설명변수는 전기의 재배면적($ACR_{i,t-1}$), 기대순수익($\frac{\text{보조급}_i + \text{농판가격}_i \times \text{단수}_i}{\text{경영비}_i}$)과 생산대체재의 기대순수익($\frac{\text{농판가격}_j \times \text{단수}_j}{\text{경영비}_j}$)을 사용하였다. 기대순수익은 적응적 기대가설을 기본으로 하여 전기가격에 정책보조를 추가할 수 있으며, 여기에 기대단수를 곱하였고, 경영비를 포함하였다. 경영비는 농가의 생산의향결정 시 중요한 요소 중의 하나로 생산비는 작물의 재배의향면적 또는 축종의 입식의사결정에 영향을 준다. 연구에서 경영비함수형태는 각 품목의 경영비 중 각 요소별 투입재가 차지하는 비중을 계산하여 그 비율을 이용하여 함수식을 설정하였다. 비율은 과거 3개년의 각 요소별 투입재 비율을 이용하였다. 이 방법을 도입한 이유는 각 요소별 투입재를 설명변수로 하여 경영비함수를 개발하여야 하나, 회귀모형에서 설명변수가 많아 자유도가 크게 떨어지는 문제가 발생하였기 때문이다. 이 방법에 있어서 하나의 문제점이라면 투입재량과 투입재 가격 간에 상호영향이 존재한다. 그러나 과거 데이터를 비교하면 각 투입재 비율이 큰 변화가 없었다. 재배면적반응함수는 다음과 같다.

$$ACR_{i,t} = \beta_1 ACR_{i,t-1} + \beta_2 \left(\frac{\text{보조금}_i + \text{농판가격}_i \times \text{단수}_i}{\text{경영비}_i} \right) + \beta_3 \left(\frac{\text{농판가격}_j \times \text{단수}_j}{\text{경영비}_j} \right) + e_t \quad (2-3)$$

즉, 단수의 감소율보다 가격 상승률이 크다면 재배면적이 증가할 수 있고, 단수의 감소비율이 가격상승률보다 크다면 재배면적이 감소할 수 있다. 위에서 설명한 모형을 바탕으로 균형가격을 도출하는 수식은 다음과 같이 표현할 수 있다. 연립방정식 시스템 하에서 시장청산 균형가격 도출 계산방법은 초과공급(S-D) 또는 초과수요(D-S)가 0이 될 때, 즉 총공급량과 총수요량이 같아질 때(S=D) 시장청산 균형가격을 도출하게 된다. 예를 들어 이전가격(P_{i-1})이 높게 설정되었다면 공급은 증가하게 된다. 따라서 초과공급(S-D)은 양(+)의 값을 취하게 되고, 조정계수(equilibrator) 앞의 음(-)의 부호 때문에 새로운 가격(P_i)는 이전가격(P_{i-1})보다 낮게 되며 이 순환과정은 초과공급(S-D)이 0으로 수렴할 때 까지 반복(iteration)하게 된다.

$$P_i = P_{i-1} - \delta(TS_i - TD_i) \quad (2-4)$$

여기서 i = 반복횟수 $1 \sim \infty$, P 는 가격, δ 는 조정계수(equilibrator)이며, TS 는 총공급, TD 는 총수요를 의미한다.

(2) 시나리오 설정

IPCC 5차 평가 보고서에서는 인간 활동이 대기에 미치는 복사량으로 온실가스 농도를 정하였다. 하나의 대표적인 복사강제력에 대해 사회·경제 시나리오는 여러 가지가 될 수 있다는 의미에서 ‘대표(Representative)’라는 표현을 사용하였으며, 온실가스 배출 시나리오의 시간에 따른 변화를 강조하기 위해 ‘경로(Pathways)’라는 의미를 포함하였다. RCP 시나리오는 최근 온실가스 농도 변화경향을 반영하였으며, 최근 예측모델에 맞게 해상도 등을 갱신하였다. RCP에서 4가지 대표 온실가스 농도는 RCP4.5, RCP8.5를 사용하였다. 온실가스 농도 산출과정에서 사회경제적 가정을 미래사회 구조 기반에서 기후변화 대응정책 수행여부로 변경하였다. 여기에서 RCP8.5는 저감활동 없이 현재의 추세대로 온실가스가 배출되는 경우 즉, BAU(Business As Usual) 시나리오를 의미한다.

KASMO 모형 분석의 주요 시나리오 설정은 수급부문에서는 재배면적에 영향을 미치는 정부정책변수로 직접지불제를 반영하였다. 쌀의 경우 변동직불제와 고정직불제를 반영하였다. 수입에 영향을 미치는 정부정책변수로 FTA가 반영되어 이에 따른 관세율과 저율관세할당(TRQ)을 적용한다. 베이스라인으로 2004년 4월 발효된 한

-칠레 FTA, 2011년 7월 발효된 한-EU FTA, 2012년 3월 발효된 한-미 FTA가 포함되었다. 이는 수입수요함수에서 품목별·국가별 수입함수를 분리하여 추정하였기 때문에 가능하다.

(3) 분석결과

기후-농업연계 한국농업시물레이션모형 추정을 위한 단수는 본 연구 제 2세부과제의 광주지역 RCP8.5, RCP4.5에 따른 현재 와 미래(2035, 2065 및 2100) 기후변화 시나리오(CO₂, 온도 및 강수량 복합) 하의 기후 변동(max, 75%, median, 25%, and min)에 따른 공시한 벼 품종의 수량 반응 결과를 이용하였다. 세 가지 품종가운데 세계화를 제외하고, 남평벼와 운광벼의 2050년까지에 대해 변화율을 전국단수에 적용시켰다. 그리고 최근의 상황을 반영하기 위해 평년은 2010~2014년의 단수에서 최대값과 최소값을 제외한 평균치로 계산하였다. 최종적인 단수는 남평벼 85%, 운광벼 15%의 가중치로 평균하였다. 그런데 KASMO 모형의 경우 전국 단수 자료를 이용하므로 광주지역 단수를 이 분석에 이용하기 위해 광주지역 단수가 전국의 대표성이 있는지를 검토할 필요가 있다. 전문가들의 견해를 종합한 결과, 품종변이에 의한 단수변화는 크지 않으므로 남평벼와 운광벼를 이용한 것은 큰 문제 없고, 광주지역 단수가 전국 단수의 약 50%를 설명하고 있으며, 나머지 50%의 설명하지 못한 부분은 국지적 기상재해, 병충해, 재배시기, 재배방법 등이며, 이 가운데 기상재해, 병충해 등은 시물레이션 하는데 변이가 따로 없으며, 재배시기 및 재배 방법은 다른 지역을 모두 포함해서 시물레이션 하든, 광주(나주)지역만 시물레이션 하든 변이로 이용될 것이기 때문에 문제가 없는 것으로 나타났다. 결론적으로 전국 단수와 광주 단수가 절대값의 차이는 존재하지만 경향은 상당히 일치하는 것으로 결론 내릴 수 있다. 따라서 광주 단수의 경향을 전국 단수의 경향으로 이용하여도 되는 것으로 나타났다. 결론적으로 CERES-Rice 모형에 의한 쌀의 단수 추정결과를 보면, 평년대비 2020년 - 5.2%, 2030년 - 7.6%, 2050년 - 19.6%로 추정되었다. RCP4.5 시나리오를 적용할 경우는 평년대비 2020년 - 4.4%, 2030년 - 6.4%, 2050년 - 14.0%로 추정되었다.

표 2-3. 작물생육모형(CERES-Rice)에 의한 단수 추정결과

단위: kg/10a, %

구분	평년 단수	2020		2030		2050	
		단수	평년비	단수	평년비	단수	평년비
RCP8.5	498.0	469.9	-5.2	458.1	-7.6	398.5	-19.6
RCP4.5	498.0	473.9	-4.4	463.9	-6.4	426.5	-14.0

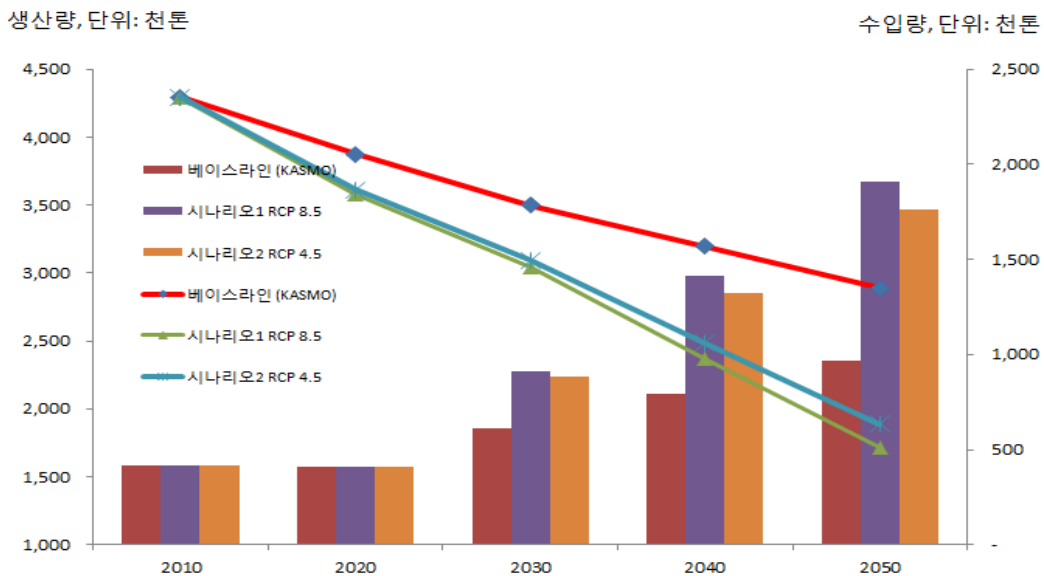
주: 이 자료는 제1협동과제의 작물생육 모형 시물레이션 결과를 이용하여 산정되었음.

베이스라인과 기후변화 시나리오에 따른 모의실험 결과에서 쌀 재배면적을 살펴 보면, 베이스라인과 두 가지 기후변화 시나리오 모두 지속적으로 감소하는 모습을 보인다. 2050년 재배면적은 베이스라인에서 557천ha로 평년의 917천ha 대비 39.3% 감소하는 것으로 나타났다. RCP8.5 시나리오에서 429천ha(53.2% 감소), RC48.5 시나리오에서는 443천ha(51.7% 감소)로 나타났다.

쌀 재배면적의 감소는 ‘쌀 가격상승으로 인한 소득증가의 효과’보다 ‘쌀 단수하락으로 인한 소득감소 효과’가 더 크기 때문으로 판단된다. 재배면적은 소득의 함수형태로 구성되어 있고, 소득의 변수는 농판가격과 단수의 곱으로 구성되며 이를 경영비로 나눈다. 따라서 재배면적은 소득의 함수로 쌀 재배면적의 감소는 가격상승분보다 단수하락요인이 커서 소득이 감소되므로 재배면적은 하락하게 된다. 쌀 재배면적의 변화를 살펴볼 때, 베이스라인에서의 면적보다 기후변화 시나리오에서의 면적이 더 감소하는 것으로 나타났다. 이는 기후변화를 고려하였을 때 단수 감소에 따른 소득감소로 인하여 재배면적이 줄어드는 것을 의미한다고 할 수 있다. 또한 베이스라인과 기후변화 시나리오 모의실험 결과의 차이가 점차 커지고 있는 것을 볼 수 있다. 여기서 가격의 비탄력성으로 공급량이 줄어들면 가격은 그보다 크게 증가하나, 재배면적은 소득의 함수이므로, 소득증감은 가격의 증감과 단수의 증감에 의해서 결정된다. 이러한 결과는 또한 기후변화가 재배면적 감소추세를 심화시킨다고 볼 수 있다.

쌀 생산량의 경우 2050년에 가서 베이스라인이 평년대비 36.0% 감소한데 비해 RCP8.5 62.1%, RCP4.5 58.2% 감소하는 것으로 분석되었다. 베이스라인에 비해 기

그림 2-27. 기후변화에 따른 쌀 생산량 및 수입량



후변화 시나리오가 단수와 면적이 감소하여 생산량은 베이스라인에 비해 26.1%p 더 감소하는 것으로 나타났다.

쌀 자급률은 기후변화에 따른 단수 감소로 생산량이 지속적으로 하락함에 따라 수입량은 증가하여 쌀 자급률은 베이스라인과 두 가지 기후변화 시나리오 모두 지속적으로 감소하는 모습을 보인다. 쌀 자급률은 2050년에 가서 베이스라인이 평년 94.0% 대비 20.2%p 감소한 75.0%인 것에 비해 RCP8.5 시나리오는 49.7%p 감소한 47.3%, RCP4.5 시나리오는 44.9%p 감소한 51.8%가 될 것으로 분석되었다. 따라서 쌀 자급률은 2050년에 RCP8.5 시나리오는 베이스라인에 비해 29.5%p 더 감소하는 것으로 나타났으며 기후변화로 쌀 자급률이 50% 이하로 떨어져 쌀 소비의 절반을 수입에 의존해야 하는 식량안보 문제가 발생할 것으로 전망된다.

쌀 수입량의 경우 2050년에 이르러 베이스라인이 평년대비 65만 3천 톤 증가한데 비하여 RCP8.5 시나리오는 159만 7천 톤 증가하는 것으로, RCP4.5 시나리오는 145만 톤 증가하는 것으로 분석되었다. 따라서 쌀 수입량은 2050년의 RCP8.5시나리오의 경우 베이스라인에 비해 94만 4천 톤 더 증가하는 것으로 나타났다.

그림 2-28. 기후변화에 따른 쌀 자급률 변화 예측



(4) 시사점

이 연구는 기후변화 시나리오 하에서 작물생육모형으로 추정된 단수를 농업 시뮬레이션 모형에 외생적으로 투입하여 쌀의 국내생산과 수입량 등 쌀 공급이 어느 정

도 변화하게 될 것인지를 예측하였다.

농업 시뮬레이션모형(KREI-KASMO)으로 쌀의 생산량을 분석한 결과, 2050년 기준 RCP8.5 시나리오의 단수와 재배면적이 베이스라인 대비 감소하여 쌀 생산량이 26.1%p 감소하는 것으로 나타났다. 2050년 쌀 자급률을 계산한 결과 기후변화 시나리오가 47.3%로 베이스라인에 비해 29.5%p 더 감소하는 것으로 나타났다. 기후변화로 이와 같이 쌀 자급률이 50% 미만으로 떨어져 쌀 소비의 절반을 수입에 의존해야 될 것으로 전망된다.

쌀 수입량 전망의 경우 현재 WTO/DDA에서 양허 제외로 1995년부터 2014년까지 매년 일정물량의 TRQ가 수입되고 있어, 2014년의 의무수입량 40만 9천 톤이 2015년 이후부터 고정되고 2015년에 쌀 시장개방이 이루어지는 것으로 가정하였다. 현재 해외기관(USDA, FAPRI, FAO)의 국제 쌀 가격 전망치와 KASMO의 우리나라 쌀 가격 전망치를 고려할 경우 향후 10년 내외에 의무수입량 이외 추가적인 수입은 없는 것으로 나타났다. 그러나 2015년 우리나라의 쌀 시장 개방 여부에 대해서는 불확실성이 존재한다. 또한 2015년에 쌀시장이 개방된다고 하더라도 쌀 관세율 설정에 따라 미래 전망치 차이가 발생되며 관세율 감축기간에 따라 차이가 발생할 수 있다. 따라서 이 연구에서는 향후 불확실한 통상여건을 고려하기보다는 수급조건상 부족분이 수입되는 것으로 2020년 이후의 쌀 전망 모듈을 수정하여 분석하였음을 밝혀둔다.

표 2-4. 신기후변화 시나리오하의 쌀 생산량과 수입량 및 자급률 변화 예측

시나리오	단위	2010	2020	2030	2040	2050
베이스라인 (KASMO)	재배배면적(천ha)	892	769	688	622	557
	단수(kg/10a)	482	504	509	514	519
	생산량(천톤)	4,295	3,873	3,499	3,198	2,890
	수입량(천톤)	419	409	611	794	965
	자급률(%)	83.1	90.1	84.7	80.1	75.0
시나리오1 RCP 8.5	재배배면적(천ha)	892	762	664	547	429
	단수(kg/10a)	482	470	458	433	399
	생산량(천톤)	4,295	3,579	3,043	2,370	1,712
	수입량(천톤)	419	409	910	1,413	1,909
	자급률(%)	83.1	89.1	77.0	62.6	47.3
시나리오2 RCP 4.5	재배배면적(천ha)	892	762	667	555	443
	단수(kg/10a)	482	474	464	448	426
	생산량(천톤)	4,295	3,613	3,094	2,486	1,890
	수입량(천톤)	419	409	885	1,326	1,761
	자급률(%)	83.1	89.1	77.8	65.2	51.8

이 연구는 기후변화 시나리오에 따른 쌀 공급량 분석을 시도하였다. 향후 작물생육모형과 패널모형을 통해 다양한 품목의 단수가 추정될 경우 다른 품목에 대해서도 미래 기후변화 시나리오에 따른 공급량 변화를 추정할 수 있을 것이며, 그에 따른 적절한 대응방안도 모색될 수 있을 것이다.

다. 리카디언 모형을 이용한 농업분야 기후변화의 경제적 영향분석

(1) 분석개요

기후변화에 대한 경제적인 영향을 분석하기 위해 우리가 쉽게 생각할 수 있는 방법으로는 기후변화와 생산량, 공급가격 등의 인과관계를 방정식의 형태로 연결하여 풀이하는 방법이 있다. 즉, 기후변화로 인한 온도나 강수량의 변화는 농작물의 생육환경에 영향을 미치게 되고, 그 결과 작물의 단위면적당 생산량이 줄어들거나 늘어나면서 시장의 공급이 변하게 된다. 이로 인해 가격이 변하게 되므로 기후변화에 따른 경제적 영향은 결국 생산량과 가격변화에 따른 공급자와 소비자의 후생을 계산하여 도출할 수 있다. 이러한 분석은 기후변화를 반영할 수 있는 작물생산모형을 바탕으로 구성되며, 현재의 환경뿐만 아니라 전망하고자 하는 미래의 기후환경과 생육환경, 그리고 사회경제적인 환경에 대한 정보가 있어야 가능하다.

이에 반해 여기서 다루고자 하는 리카디언 모델은 기후변화에 따른 농지가격의 변화를 살펴봄으로써 경제적인 영향을 분석하는 방법이다²⁰. 즉, 일정한 농지에서 생산되는 작물수익 최적화 문제의 비용함수에서 농지변수를 독립적으로 분리하여 접근하는 방법이다. 단위면적당 토지비용은 이윤과 토지를 제외한 비용의 함수로 표현할 수 있으며, 토지비용을 적분하여 미래 토지비용의 현재가치를 구할 수 있게 된다. 또한 주어진 사회후생(Social welfare) 함수를 이용하여 기후변화에 따른 사회후생의 변화를 계산하면 토지의 가치와 같게 된다.

분석모델 수립을 위해 우선 이익 극대화를 추구하는 경쟁시장을 가정한다. 따라서 모든 가격은 주어진 것으로 가정한다. 모든 농부는 투입요소와 생산요소가 연계된 생산함수를 직면하게 되는데, 투입요소의 경우 노동, 자본 등의 가변요소(K)와 기온, 강수량, 그리고 토양의 성질 등과 같은 외생변수(E) 등으로 구성된다.

$$Q_i = Q_i(K_i, E) \quad i = 1, \dots, n, \quad (2-5)$$

²⁰ 리카디언 모델은 1993년 Coeles Foundation Discussion Paper(No. 1045)에 처음 소개되었으며, 우리나라 기후변화 연구를 위해 김창길 외(2008)에서 처음 적용되었다.

여기서 i 는 품목을 나타낸다.

주어진 가격 하에서 이윤극대화 문제는 다음과 같이 표현된다.

$$\text{Max}_K \pi = P_Q Q(K, E) - P_K K \quad (2-6)$$

여기서 P_Q 와 P_K 는 생산요소와 투입요소의 가격을 나타낸다.

수익극대화를 추구하는 농부는 자신이 결정할 수 있는 가변요소(K)를 한계비용과 한계이윤이 일치하는 수준까지 투입할 것이다.

$$P_K = P_Q dQ(K, E)/dK \quad (2-7)$$

따라서 단위면적당 수익극대화를 추구하는 농부의 경우 위의 조건을 만족하는 가변요소 수준(K^*)을 투입하게 된다. 이 경우 미래 토지비용의 현재가치, 즉 미래의 단위면적 당 수익은 토지의 가치를 나타내며 다음과 같이 표현된다.

$$V_L = \int_0^{\infty} \pi e^{-rt} dt = \int_0^{\infty} \{ [P_Q Q^*(K^*, E) - P_K K^*] e^{-rt} dt \quad (2-8)$$

기후가 EA에서 EB로 바뀔 때 따라 변화하는 사회적 후생(social welfare)은 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\Delta W = \sum V(E^B) - \sum V(E^A) \quad (2-9)$$

합을 나타내는 부호(시그마)를 취함으로써 분석대상 토지 전체의 변화를 측정할 수 있다. 따라서 기후변화에 따른 영향은 토지가치의 총변화로 표현할 수 있는 것이다.

리카디언 모델의 경우 미래의 사회 환경과 생육환경 등을 예측하지 않고 기후변화만 반영하기 때문에 설득력이 떨어진다는 비판이 있다. 특히 우리나라의 경우 농업에 이용되는 토지가격이 완전경쟁 하에서 생산 활동을 통한 수익극대화에만 국한된 것이 아니라 개발에 따른 가격상승을 기대하는 투기적인 요소가 포함되었기 때문에 리카디언 모델을 적용하는 것이 적절하지 못하다는 비판도 있다. 그러나 모델구축이

간단하고 자료 또한 획득이 용이하기 때문에 미국을 비롯하여 이스라엘, 아프리카, 브라질 및 인도 등 많은 국가와 지역에서 이용하는 모델이다²¹. 위에서 지적한 우리나라의 문제점을 극복하기 위하여 본 연구에서는 “거리(distance)”변수를 도입하여 적용하였다.

(2) 분석자료

리카디언 분석을 위해 필요한 변수는 온도와 강수량과 같은 기후변수, 기후변수의 추정을 돕기 위해 추가적으로 분석되는 토양변수, 사회경제변수 등이 있다.

(가) 기후변수

멘델존의 연구(1994)²²에 따르면 기후는 위도, 경도, 고도, 해변과의 거리 등의 변수로 표현될 수 있는 것으로 나타났으나, 우리나라의 경우 이와 같은 방법을 적용한 결과 실제 기상청에서 제공하는 온도나 강수량과는 많은 차이가 있는 것으로 나타났다. 따라서 제공되는 기상관측소 자료를 이용하여 공간보간법으로 기후자료를 추정하였다. 1983년부터 2012년까지 30년간 각 시군의 일일 기온과 강수량을 측정하여

표 2-5. 기후변수 통계

구 분	평균기온(℃)	표준편차	월강수량(mm)	표준편차
1월	-1.5	0.92	29.3	3.24
2월	0.7	0.73	38.5	6.05
3월	5.5	0.51	56.9	8.22
4월	11.9	0.31	78.8	11.29
5월	17.0	0.19	100.4	10.37
6월	21.2	0.19	172.2	17.71
7월	24.4	0.25	302.2	12.67
8월	25.0	0.29	260.6	5.46
9월	20.3	0.42	152.9	5.41
10월	14.0	0.54	54.4	1.93
11월	7.3	0.68	45.2	1.57
12월	0.9	0.85	25.2	1.92
평균	12.2	9.55	109.7	93.09

21 이스라엘(Fleischer, Aliza, Lichtman Ivgenia, and Mendelsohn, R. (2007)), 아프리카 11개국(Kurukulasuriya, Pradeep, Mendelsohn R. (2008)), 브라질과 인도(Sanghi, Apurva, and Mendelsohn R.) 등을 들 수 있다.

22 Mendelsohn, R. Nordhaus, W. D., and Shaw, D.(1994).

평균값을 이용하였다. 2012년을 기준으로 한 162개 시군의 평년(30년) 월별 평균기온 및 총강수량은 아래의 표와 같다. 30년 평균한 월평균기온의 경우 1월에 -1.5°C 로 가장 낮으며, 8월에 25°C 로 가장 높게 올라가는 것으로 나타났다. 월간 표준편차는 5월과 6월에 0.19로 가장 낮으며, 1월에 0.92로 가장 높게 나타났다. 또한 월강수량의 경우 12월에 25.2mm로 가장 낮게 나타나고, 7월에 302.2mm로 가장 높은 것을 알 수 있다. 월강수량 표준편차의 경우 11월에 가장 낮고, 6월에 가장 높게 나타났다.

(나) 토양변수

토양에 대한 자료는 농업진흥청 토양통계²³와 농업진흥청 농업과학기술원(2005)²⁴에서 발행한 책자를 통하여 구축하였다. 함수추정을 위해 이용된 자료는 농경지의 화학성을 나타내는 pH, 유기물, 형태적 물리적 특성을 나타내는 경사, 배수등급, 표토의 침식정도 등이며, K라 불리는 토양침식성인자 등을 이용하였다. K를 제외한 대부분의 자료를 논과 밭으로 구분하였다. 전체 농지가격에 대한 분석을 위해서는 논과 밭에 해당하는 각각의 자료를 면적으로 가중 평균한 값을 이용하였다. pH의 경우 제공되는 자료가 4.5이하, 4.6~5.0, 5.1~5.5, 5.6~6.0, 6.1~6.5, 6.6이상 등 6구간으로 구분하여 표기되는데, 전체 범위를 0~7까지로 가정하고 각 구간의 중간값을 면적으로 가중하여 평균을 구하였다. 유기물의 경우에도 10이하, 11~20, 21~30, 31~40, 41~50, 51이상 등 6구간으로 구분하여 조사된 자료를 이용하였는데, 전체 범위를 1~70까지로 가정하고 각 구간의 중간값을 면적으로 가중하여 평균을 구하였다. 경사는 전체 범위 1~100%까지를 0~2%, 2~7%, 7~15%, 15~30%, 30~60%, 60~100% 등 6구간으로 나뉘어 표기하였는데, 각 구간의 중간값을 면적으로 가중 평균하여 보정하였다. 배수등급의 경우 정량적인 표기대신 매우양호, 양호, 약간양호, 약간불량, 불량, 매우불량 등 6개의 정성적 구간으로 나타나므로, 각각 92.5, 77.5, 62.5, 47.5, 32.5, 17.5의 정량적 수치를 부과하여 면적으로 가중한 후 평균하였다. 표토의 침식정도 역시 정성적 표기방식인 없음, 있음, 심함 등 3개의 구간으로 구분되는데, 전체 농경지 면적에 대한 있음과 심함 면적의 합의 비율로 나타낸다. 토양침식성 인자(Soil erodibility: K)는 토양 침식에 미치는 토양입자의 분포와 토양층위의 특성을 이용하여 토양의 종류에 따른 토양유실량의 차이를 반영하는 인자이다. 시군별로 표시된 구간값인 ~0.025, 0.025~0.03, 0.03~0.035, 0.035~0.04, 0.04~ (MT hr MJ-1 mm-1) 등의 중간값을 적용하였다. 단 최하위 구간과 최상위 구간에 대해서는 0.025, 0.0425 등을 적용하였다. 토양에 대한 자료가 제공되지 않는 시군의 경우 경

23 <http://soil.rda.go.kr/>.

24 곽한강 외(2005).

계선을 공유하는 인접 시군의 자료를 평균하여 설정하였다.

표 2-6. 토양변수 통계

	pH	유기물	경사(%)	배수등급	표토의 침식정도	K (MT hr MJ ⁻¹ mm ⁻¹)
평균	5.6	23.6	6.1	61.9	0.1	0.0317
표준편차	0.376	5.003	1.403	6.172	0.053	0.0054

(다) 사회경제변수

시군의 총면적, 경지면적, 인구, 인구밀도, GRDP(지역내총생산) 등에 대한 자료를 통계청 웹사이트를 통하여 구축하고, 투기적인 요소를 추정하는 거리변수의 경우 각 광역시의 최고 공시지가를 이용하여 계산한 값을 시군의 중앙지점에서 광역시의 중앙지점까지의 실제거리에 적용하여 계산하였다. 실제거리는 각 시군 중앙지점에서 가장 가까운 광역시의 중앙지점까지의 거리이며, 이 값을 서울 최고 공시지에 대한 부산, 대구, 인천, 광주, 대전, 울산 등의 최고 공시지가 비율로 환산한 값의 역수에 곱하여 거리변수 값을 산정하였다. 가장 가까운 광역시의 지가에 영향을 받는다는 가정 하에, 광역시의 공시지가가 서울의 지가에 비해 낮을 경우 시군까지의 실제거리 보다 더 멀리 있는 것으로 간주하여 토지에 대한 투기경향을 감소시킬 수 있게 설정하였다.

표 2-7. 사회경제변수 통계

구 분	평균	표준편차
면적(km ²)	592.8	339.0
농지면적(km ²)	합계	117.5
	논	70.7
	밭	46.7
인구(명)	172,426	206,328
인구밀도(명/km ²)	883	2,146
지역내총생산액(백만원)	3,928,454	5,278,553
일인당지역총생산액(백만원)	22.0	11.2
관개시설비율	0.58	0.18
거리(km)	244.8	242.8

(라) 농지가격변수

농지가격은 농어촌공사에서 제공되는 표준지 공시지가(2012년)를 이용하였다. 농지가격은 전체, 답, 전, 과수원, 농업진흥지역 안(답, 전, 과수원), 농업진흥지역 밖(답, 전, 과수원) 등으로 나뉘어 제공된다. 과수원 가격과 농업진흥지역안의 가격은 조사되지 않은 시군이 많아 실제로 적용하기 어려울 것으로 보인다. 농업진흥지역 밖의 경우 태백시의 논 가격을 제외하면 모두 조사된 것으로 나타났다. 태백시의 경우 논 비율이 매우 낮아 농업진흥지역 밖의 가격이 나타나지 않으므로, 주변지역인 삼척, 영월, 정선의 농업진흥지역 밖의 밭과 논 가격 차이를 평균하여 태백의 밭가격에 더하는 방식으로 계산하였다.

표 2-8. 농지가격 통계

단위: 원/m²

구 분	전체 농지	논	밭	농업진흥지역밖	
				논	밭
평균	45,659	43,839	46,908	46,574	47,774
표준편차	74,224	70,145	77,898	70,804	78,638

(3) 분석방법

리카디언 분석은 다음과 같은 방정식을 추정하여 기후변수인 온도와 강수량이 농지가격에 미치는 영향을 파악하는 것이다.

$$\text{농지가격} = f(\text{기후변수, 토양변수, 사회경제변수 등}) \quad (2-10)$$

추정하고자 하는 함수의 형태는 종속변수가 로그형태를 띠고 기후변수의 차수가 2차인 다항함수이다. 즉,

$$\log(\text{농지가격}) = a + b \times (\text{기온}) + c \times (\text{기온})^2 + d \times (\text{강수량}) + e \times (\text{강수량})^2 + f \times (\text{기타}) \quad (2-11)$$

토양변수와 사회경제변수는 기후변수의 정확한 추정을 위한 역할을 할 뿐이며, 본 방정식에서 특별한 의미를 가지는 것은 아니다. 따라서 공간분석법을 이용할 필요

없이 OLS를 적용하는 것이 효율적인 것으로 판단된다. 기후변수에 대한 한계값, 즉 단위 기후변화에 농지가격의 변화를 계산하기 위해서는 아래의 식을 통하여 계산된다.

$$\frac{\delta(\text{농지가격})}{\delta(\text{기온})} = \text{농지가격} \times (b + 2 \times c \times \text{기온}) \quad (2-12)$$

한계값을 계산하기 위한 공식에 필요한 농지가격과 기온에 전국 평균값을 적용하면 기후변화에 따른 전국 농지가격의 한계변화를 알 수 있다.

(4) 분석결과

(가) 농지가격

주어진 자료를 이용하여 경지면적가중모형 및 농작물수입가중모형 등 두 종류에 대해 추정된 결과가 아래와 같이 나타난다. 두 종류의 더미변수를 적용하였는데, 더미(제주도)는 제주시와 서귀포시를 나타내며, 더미(100)이라고 나타난 변수는 2007년과 2012년 농지가격의 변화율이 -100%이하 또는 100%이상인 시군을 나타낸다. 제주시와 서귀포시는 농업생산에 중요한 지역이지만, 내륙의 시군과는 다른 기후대에 포함되기 때문에 그 특성을 나타내기 위한 조치이다. 농지가격 변동이 심한 지역은 안성, 여주, 영월, 철원, 충주, 청원, 보은, 옥천, 보령, 당진, 장성 등 11개 시군이 포함된다.

추정결과를 살펴보면, 온도에 대한 계수는 모두 통계적인 유의성을 나타내지만 강수량에 대한 추정치는 통계적으로 유의하지 않은 결과를 나타낸다. 계수의 부호도 온도의 경우 2008년 결과²⁵와 같게 나타나지만, 강수량의 경우 경지면적가중모형은 다르게 나타나고, 농작물가중모형은 같게 나타났다.

이상의 결과는 연간 월평균 강수량이 전국에 걸쳐 비슷한 분포를 나타내기 때문에 농지가격에 미치는 영향은 크지 않다고 생각할 수 있다. 평균값이 109.8mm에 대한 지역별 편차는 4.3에 불과하기 때문이다. 따라서 농지가격 분석에서는 온도에 대한 영향만 고려하고, 강수량에 대한 영향은 제외하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

2012년의 농지가격과 평균기온 자료를 이용하여 한계효과를 계산하면, 경지가중모형의 경우 일평균기온에 대해 -66,755천원/°C로 평균농지가격 456,590천원/ha의 약 14.6% 정도가 감소하는 것으로 나타났다. 농작물수입가중모형의 경우에도 -68,126천원/°C로 평균농지가격의 14.9% 정도 감소하는 것으로 분석되었다. 2008년 모형을 적용할 경우 -37,949천원/°C로 평균농지가격의 8.3% 감소하는 것으로 나타났다.

25 김창길 외(2008).

표 2-9. 농지가격 분석결과

변수	경지면적가중모형 (2007)	경지면적가중모형 (2012)	농작물수입가중모형 (2012)
상수	16.585 ^{***} (3.529)	114.13 ^{***} (3.342)	69.27 [*] (1.914)
일평균기온	-1.684 [*] (-1.87)	-13.77 ^{**} (-2.261)	-12.1 ^{**} (-2.459)
(일평균기온) ²	0.066 [*] (1.796)	0.558 ^{**} (2.251)	0.490 ^{**} (2.472)
월강수량	0.131 ^{**} (2.004)	-0.263(-0.481)	0.3331(0.479)
(월강수량) ²	-6E-04 ^{**} (-2.01)	0.0009(0.375)	-0.0018(-0.567)
배수등급	0.024 [*] (1.628)	-0.022 ^{**} (-2.101)	
표토의 침식정도		-0.837(-1.145)	-2.125 ^{**} (-2.244)
유기물		0.031 ^{***} (2.813)	0.026 ^{**} (2.152)
일인당GRDP	0.023 [*] (1.751)		0.019 ^{***} (5.766)
GRDP		0.00000006 ^{***} (9.2)	
인구밀도		0.000398 ^{***} (3.748)	0.001 ^{***} (9.229)
거리		-0.0016 ^{***} (-6.71)	
습답의 비율	0.050 ^{***} (3.466)		
토양침식성인자	-39.03 ^{***} (-3.058)	-13.628 [*] (-1.639)	-11.086(-1.09)
인구증가율	0.121 ^{***} (4.625)		
경사도	-0.29 ^{***} (-4.643)		-0.180 ^{***} (-4.74)
상습홍수피해지비율	0.125 ^{***} (2.906)		
관개시설 수혜면적 비율			
더미(영암)	-2.841 ^{**} (-1.998)		
더미(제주도)		1.706 ^{***} (3.263)	
더미(100)		0.154(1.435)	0.066(0.475)
Adjusted R2	0.98	0.78	0.63

(나) 논과 밭 가격

위의 절에서 2008년 추정결과와 비교를 위해 전체 농지가격에 대한 온도와 강수량의 영향을 알아보았다. 그러나 논과 밭은 농업을 위해서 이용되는 토지이기 는 하나 재배방법, 대상 경작물 등 여러 가지 면에서 분명한 차이를 보인다고 말할 수 있다. 특히 물을 가두어 모내기하는 논농사 방법은 물부족에 대비하기 위한 기후변화 적응방법으로 생각할 수도 있다. 따라서 농지로 한꺼번에 묶어 기후에 따른 영향을 분석하기 보다는 따로 분리하여 그 영향을 살펴보는 것이 보다 합리적이라고 생각한다.

표 2-10. 논·밭가격 분석결과

변 수	논가격모형 (논면적가중)	밭가격모형 (밭면적가중)
상수	10.10(0.325)	87.74 ^{**} (2.327)
일평균기온	-14.167 ^{**} (-2.476)	-26.499 ^{***} (-5.324)
(일평균기온) ²	0.571 ^{**} (2.477)	1.069 ^{***} (5.225)
월강수량	1.541 ^{***} (3.038)	1.556 ^{***} (2.673)
(월강수량) ²	-0.0069 ^{***} (-3.054)	-0.007 ^{***} (-2.67)
표토의 침식정도	-2.953 ^{***} (-5.536)	0.697 ^{**} (2.357)
일인당GRDP	0.0087 ^{**} (2.487)	0.015 ^{***} (3.42)
인구밀도		0.0005 ^{***} (2.889)
인구	1.91e-06 ^{***} (4.26)	
거리	-9.95e-04 ^{***} (-4.49)	-0.001 ^{***} (-4.174)
토양침식성인자		-18.66 ^{**} (-2.085)
경사도		-0.237 ^{***} (-5.345)
관개시설 수혜면적 비율	0.595 ^{**} (2.43)	
더미(도시)	0.110(1.444)	0.3 ^{***} (3.503)
더미(농작물수입10)	0.235 ^{**} (2.262)	0.366 ^{***} (3.393)
Adjusted R ²	0.780	0.725

동일한 방법을 적용하여 논과 밭에 대한 함수를 추정한 결과가 위의 표와 같이 나타났다. 논과 밭의 가격이 지나치게 높게 형성되었으며, 농업의 비중이 크지 않은 경기도의 시군은 모두 분석 대상에서 제외하였다. 또한 충청남도의 경우 행정복합도시 개발 등으로 인해 농지가격이 과거자료와 일관성이 떨어진다고 판단하여 분석대상에서 제외하였다.

추정 결과에 따르면 기온과 강수량 모두 5% 또는 1% 범위 내에서 통계적 유의성을 나타내는 것으로 분석된다. 모형의 적합성을 나타내는 R²의 경우에도 논가격 모형 0.78, 밭가격모형 0.725 등으로 비교적 높게 나타났다.

각 모형에 적용한 더미변수는 다음과 같다. 더미(도시)는 각 시에 대해 적용하였고, 더미(농작물수입10)은 농작물수입이 해당 시군의 GRDP의 10% 미만인 경우를 나타낸다.

2012년의 논가격에 대한 일평균기온 한계효과를 계산하면 -11,312천원/℃로 평균 논가격 171,046천원/ha의 약 7% 정도가 감소하는 것으로 나타났다. 월평균강수량 변

화에 따른 한계효과는 2,815천원/mm로 약 1.7% 상승하는 것으로 분석되었다. 한편 밭가격에 대한 한계효과의 경우 -17,007천원/℃ 및 3,362천원/mm로 평균온도의 경우 평균밭가격 149,853천원/ha의 11% 정도가 감소하는 것으로 나타났으며, 평균강수량의 경우 2.1% 정도 증가하는 것으로 분석된다.

표 2-11. 한계효과 계산을 위해 이용된 변수의 값

구 분	논	밭
가격(천원/ha)	171,046	149,853
일평균온도(℃)	12.34	
월평균강수량(mm)	111.1	

(5) 요약 및 시사점

미래의 기후변화에 대한 경제적인 영향분석을 위해 우리나라 자료를 적용하여 기후변화에 따른 농지가격의 변화를 살펴봄으로써 경제적인 영향을 분석하는 방법인 리카디언 모델을 이용하였다. 리카디언 모델은 일정한 농지에서 생산되는 작물수익 최적화 문제의 비용함수에서 농지변수를 독립적으로 분리하여 접근하는 방법으로 단위면적당 토지비용은 이윤과 토지를 제외한 비용의 함수로 표현할 수 있으며, 토지비용을 적분하여 미래 토지비용의 현재가치를 구할 수 있게 된다.

2008년 연구결과와 비교하기 위하여 논과 밭을 통합한 농지가격 모형을 만들어 추정된 결과 온도에 대해서는 과거와 비슷한 결과를 도출하였으나 강수량에 대한 계측값은 통계적으로 유의하다고 판단하기 어려워 한계값을 계산할 수 없었다. 그러나 논과 밭을 분리하여 추정된 결과 온도 및 강수량에 대한 계수가 모두 5% 범위 내에서 통계적 유의성을 가지며, 한계값도 2008년과 유사한 결과를 도출하였다. 평균온도 변화에 대해서는 논 및 밭의 가격이 각각 7%, 11% 정도 하락하는 것으로 나타났으나, 평균강수량 변화에 대해서는 각각 1.7% 및 2.1% 정도 상승하는 것으로 나타났다. 2008년 결과를 위의 표에 나타난 변수 값을 적용하여 계산하면 농지가격의 변화율이 온도에 대해 6.5% 감소하고, 강수량에 대해서는 0.1% 증가하는 것으로 나타났다²⁶.

기온 및 강수량 변화에 대해 논보다 밭의 경우에 더 민감한 것으로 나타났다. 이는

26 앞서 제시한 2007년 농지가격 변화율과 다른 결과를 나타내는데, 그 이유는 한계값을 계산하기 위해 적용한 농지가격이 서로 다르기 때문이다.

물을 가두어 모내기하는 논농사 방법이 물 부족에 대비하기 위한 기후변화 적응방법으로 이미 적용되었기 때문인 것으로 해석할 수 있다. 이는 미래 기후변화에 대응하여 논농사보다는 밭농사를 위해 관개, 저수지 등 기반시설을 갖추는 것이 필요함을 시사한다.

라. 이상기상이 작물 단수에 미치는 영향

(1) 분석개요

국내외 기후변화는 향후에도 상당한 기간 동안 가속화될 것으로 예상되며(국립기상연구소, 2011), 이상기상 현상도 빈발하여 식량자급률(2010년 식량자급률 26.7%)이 낮은 우리나라의 안정적인 식량공급을 크게 저해할 수 있다. 태풍, 가뭄, 홍수, 고온현상 등 이상기상이 빈번해짐에 따라 기상변화에 매우 취약한 농산물의 생산이 크게 영향을 받을 것으로 예상된다. 따라서 이상기상이 곡물생산 능력에 어떠한 영향을 미치는 지를 체계적으로 분석할 필요가 있다. 이상기상이 주요 곡물의 생산능력에 미치는 영향을 분석하는 것은 적극적인 기후변화 적응대책을 강구하는 데 중요한 시사점을 제공할 수 있을 것이다.

지금까지의 선행연구들을 보면 기상요인이 농작물의 단수에 유의하게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 1993/95년 우리나라 쌀 단수의 정체요인을 분석한 결과를 보면, 기상변동에 의한 감수효과가 68%로 기술 요인에 의한 감수효과 32%보다 크게 나타났다(김정호·이정환, 1996). 기상요인 가운데 구체적으로 일사량이 쌀 단수에 영향을 미치는 것으로 나타났다(이기광, 고광근, 이중우, 2012). 배추와 무의 각 계절별 작형의 단수는 기온과 강수량 등의 기상요인이, 오이, 호박, 토마토 등 과채류의 단수는 기온과 일사량 등의 기상요인이 유의하게 영향을 미치는 것으로 분석되었다(이용선·정학균·심송보, 2005). 또, 양과의 경우 일조시간뿐만 아니라 습도, 풍속에 의해서도 영향을 받는 것으로 나타났다(이기광·고광근·이중우, 2012). 배추, 무의 경우에는 기온의 영향만을 받는다는 분석 결과도 제시되었다(김인검·박기준·김백조, 2013). 과실류의 경우 강수량이 생산량을 결정하는 데 중요한 변수인 것으로 나타났다(조덕래·조재환, 1992). 해외에 연구에서도 기상요인이 작물생산에 유의하게 영향을 미치는 것으로 나타났으며(今井鑛藏, 1983), 기상의 개별요소인 일사량, 기온, 강수량, 습도, 풍속 등이 작물의 생리 및 생산에 유의한 영향을 미쳤다(Vining, 1989).

기후변화도 농작물의 생산 및 수급에 유의하게 영향을 미치는데, 기후변화가 국제곡물시장의 수급과 가격에 영향을 주며(조영수·이용호, 2008), 기온 변화, 강수량 변화 등이 논벼, 감자, 양과, 배추, 무, 고추 등에 영향을 미치는 것으로 분석되었다(조

은영, 2008). 연 평균기온이 상승함에 따라 태풍, 돌풍, 설해에 의한 피해가 증가하고, 기온 차이가 커짐에 따라 해일, 돌풍, 폭풍, 설해에 의한 피해가 증가하며, 강수집중도가 높아짐에 따라 호우, 태풍에 의한 피해가 증가하는 것으로 분석되었다(김창길 등, 2009). 또, 7~9월의 기후변수와 쌀 단수가 인과관계가 있는 것으로 나타났으며(노재선 등, 2012), 기온과 강수량의 변수와 쌀 단수가 유의한 상관관계가 있는 것으로 분석되었다(권오상·김창길, 2008).

선행연구들은 농작물에 미치는 기상요소의 영향을 분석하는데 있어 지역별 특성을 고려하지 않아 실제적인 영향을 추정했다고 보기 어렵고, 함수 형태를 선형으로 정의하여 기상요소와 벼 생육간의 특징을 정확히 반영하지 못한 한계가 있다.

본 연구는 주요 곡물인 쌀을 분석대상으로 하며, 지역별 특성을 고려하기 위해 시계열 분석과 횡단면 분석을 동시에 수행할 수 있는 패널분석-확률효과모형을 이용하여 추정하였다. 쌀 단수를 분석함에 있어 이상기상의 대리변수를 설정하고, 쌀의 생육시기별 이상기상이 미치는 영향을 분석함으로써 쌀의 생육시기별 적절한 이상기상 대응방향을 도출하고자 하였다.

(2) 분석모형과 자료

(가) 분석모형²⁷

패널분석-확률효과모형을 이용하여 쌀 단수에 미치는 영향을 분석하였다. 패널분석모형은 시계열 과정에서 발생하는 추정오차와 지역단위의 자료에서 발생하는 추정오차를 통제할 수 있어 보다 현실적인 분석을 할 수 있는 장점이 있다. 분석모형을 일반적인 선형으로 표현하면 다음과 같다.

$$Y_{it} = X'_{it}\beta + u_{it} \quad (2-13)$$

$$u_{it} = a_i + \epsilon_i \sum_t$$

단, $i(\text{지역}) = 1, 2, \dots, N, t(\text{연도}) = 1, 2, \dots, T$

여기서 i 는 횡단면 관측치를 나타내며, t 는 시간변수를 나타냄. Y 는 종속변수를 의미하고 X 는 설명변수를 의미한다. u 는 교란항으로 관측 불가능한 횡단효과(a_i)와 나머지 교란항(ϵ)으로 구분된다.

²⁷ 분석모형에 대한 설명은 정학균 외 2명(2013)에 잘 나타나 있다.

(나) 분석형태

작물과 기상요인과의 상관관계 분석은 단순한 선형방정식이 아니라 비선형방정식을 이용하였다. 이차항을 방정식에 포함하여 아래와 같이 모형을 설정함으로써 최적 온도까지는 작물 생산량이 증가할 수 있지만, 이상고온의 경우 단수가 감소할 수 있다는 점을 고려하였다.

$$RY = \beta_0 + \beta_1 W_i - \beta_2 W_i^2 \quad (2-14)$$

$$\frac{\Delta RY}{\Delta W_i} = \beta_1 - 2\beta_2 W_i \quad (2-15)$$

여기에서 RY 는 단수를 W 는 기상변수를 나타낸다.

(다) 분석자료

이상기상이 쌀 단수에 미치는 영향을 분석하기 위해 이용된 자료를 살펴보면, 단수의 경우 통계청의 지역별 단수(정곡기준)를 이용하였고, 기상요소의 경우 기상청의 1977~2011의 지역별 평균기온, 최고기온, 최저기온, 강수량, 일조시간 등의 월별 자료를 이용하였다. 기상요소가 이용된 지역은 수원(경기), 춘천(강원), 청주(충북), 대전(충남), 전주(전북), 광주(전남), 대구(경북), 부산(경남) 등 8개 지역이다.

기상요소의 영향은 벼의 생육기와 밀접하게 관련되어 있으며, 중요하게 영향을 받는 생육기는 등숙기²⁸이므로 등숙기의 기온, 강수량 등의 기상요소 자료를 이용하였다. 이상기상이 쌀 단수에 미치는 영향을 분석하기 위해서는 이상기상의 변수를 설정하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 기온변동, 강수량변동, 호우발생빈도 등의 대리변수를 이용하였다. 기온 및 강수량 변동은 추정기간 평균치와 당해연도 기온 및 강수량과의 편차를 계산하여 이용하였다. 호우발생빈도는 기상청의 '1일 30mm 이상 비가 내린 날의 수' 자료를 이용하였다. 집중호우가 내리면 침관수, 수밭아 피해 등을 통해 각종 병해가 발생하고 품질 및 수량이 떨어지는 결과를 낳게 된다.

기술변화의 영향은 고품질 및 다수성 품종의 개발, 시비 등 재배기술의 발전, 농자재의 발달 등에 의해 단수에 영향을 미치는 정도를 말한다. 기술변수로 시간의 흐름에 따른 기술변화의 영향을 계측하기 위해 1977년을 1로 2011년을 35로 설정하였다. 기술지도 보급비를 기술변수로 이용할 수 있으나 기술지도 보급의 영향이 정확히 나타나는 시점을 산정하는데 어려움이 있기 때문에 본 연구에서는 고려하지 않았다.

28 등숙기(登熟期)는 '곡실이 여무는 시기'를 가리킨다.

표 2-12. 기초통계량

구 분		단수 (kg/10a)	8월 평균기온(℃)	9월 평균기온(℃)	8월 기온변동(℃)	8월 30mm 이상 강우일(일)
경기	평균	453.7	25.4	20.7	0.9	2.8
	표준편차	38.5	1.2	1.1	0.7	1.7
강원	평균	422.7	24.5	19.3	0.8	3.7
	표준편차	60.0	1.0	1.0	0.6	2.2
충북	평균	465.6	25.6	20.6	0.9	3.4
	표준편차	52.7	1.2	1.2	0.8	1.9
충남	평균	501.1	25.5	20.7	0.9	3.5
	표준편차	44.4	1.2	1.0	0.7	1.9
전북	평균	503.8	26.1	21.5	0.9	3.3
	표준편차	36.0	1.1	1.1	0.7	2.1
전남	평균	463.0	26.1	21.8	0.8	3.3
	표준편차	38.8	1.1	1.1	0.8	2.1
경북	평균	458.8	26.2	21.6	1.2	2.8
	표준편차	63.3	1.5	1.0	1.0	2.1
경남	평균	440.1	25.8	22.3	1.1	2.6
	표준편차	54.4	1.5	0.9	0.9	2.1

(라) 분석결과

① 추정결과

기후변화의 영향을 고려한 쌀 단수함수 추정 결과는 표 <2-13>과 같다. 쌀 단수함수는 기술변수, 등숙기의 평균기온, 평균기온의 제곱, 평균기온변동, 강수량 등을 설명변수로 설정하였다. 평균기온의 2차항 추정계수는 음의 부호가 나타났다. 이는 평균기온과 단수가 비선형 관계임을 의미한다. 또한 평균기온이 증가함에 따라 단수가 일정한 비율로 증가하는 것이 아니라 최적 온도까지는 단수가 증가하다가 평균기온이 최적점 이상으로 증가하는 경우 단수가 감소함을 의미한다.

등숙기(8~9월)의 평균기온이 높을수록, 8월의 강수량이 적을수록 쌀 단수가 높은 것으로 나타났다. 이는 평균기온이 최적 온도까지 상승할 때 단수가 증가하는 것을 설명한다. 그리고 평균기온의 2차항 추정계수가 음의 부호가 나타난 것은 등숙기의 고온이 수량에 부정적인 영향을 미치는 것을 설명한다. 그리고 8월 평균기온의 변동이 낮을수록, 8월 호우 빈도가 낮을수록 쌀 단수가 높은 것으로 예측되었다.

표 2-13. 쌀 단수함수 추정결과(확률효과모형)

변수명	계수	t값	R ² F값	추정방식(자료기간) 자료수
C	-3170.81***	-3.14144	Adj-R ² =0.54 F값=56.53 (0.0000)	Panel EGLS (1977-2011) n=280
TEC	1.611604***	6.710648		
TAUG	263.7489***	3.361002		
TAUG2	-4.98475***	-3.25227		
TSEP	7.011293***	3.04683		
TVAUG	-10.0026**	-1.99919		
RI30AUG	-3.13806***	-3.04195		

주: *, **, ***는 각각 10%, 5%, 1%의 유의수준에서 통계적으로 유의함을 나타냄.

② 이상기상의 시나리오 분석

시나리오 분석을 용이하게 하기 위해 기상의 영향을 가장 크게 받는 등숙기인 8월의 기온 및 강수량 변수만을 설정하여 추정하였다. 분석결과 8월의 평균기온이 높을수록, 8월의 강수량이 적을수록 쌀 단수가 높은 것으로 나타났다.

표 2-14. 쌀 단수함수 추정결과(확률효과모형)

변수명	계수	t값	R ² F값	추정방식 자료기간 자료수
C	-4946.93***	-9.34643	Adj-R ² =0.53 F값=78.74 (0.0000)	Panel EGLS (1977-2011) n=280
TEC	2.031041***	9.642346		
TAUG	412.5698***	9.906499		
TAUG2	-7.87423***	-9.6264		
RAUG	-0.05049***	-3.77946		

주: *, **, ***는 각각 10%, 5%, 1%의 유의수준에서 통계적으로 유의함을 나타냄.

이상기상 현상 시나리오를 설정하고 분석한 결과는 아래 표와 같다. 먼저 이상기온이 발생할 경우를 살펴보면 쌀 단수는 2000년대 단수 평균에 비해 5.8~16.3% 감소하고, 강수량이 이상적으로 증가할 경우(표준편차의 2배수 이상) 쌀 단수는 1.0~2.5% 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 이상저온과 이상다우 현상이 동시에 발생할 경우 쌀 단수는 10.5~12.1% 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 이상고온과 이상다우 현상이 동시에 발생할 경우 쌀 단수는 8.8~20.8% 감소하는 것으로 나타났다.

표 2-15. 이상기상 시나리오별 쌀 단수 예측

시나리오			기온 (°C)	강수량 (mm)	단수 (kg/10a)	증감률 (%)	
베이스라인			기온, 강수량 평균	26.1	305.5	468.5	0.0
이상 기온	고온	시나리오1	기온 2 σ 상승	28.4	305.5	441.4	-5.8
		시나리오2	기온 3 σ 상승	29.5	305.5	392.4	-16.3
	저온	시나리오3	기온 2 σ 하락	23.8	305.5	433.4	-7.5
이상강수량		시나리오4	강수량 2 σ 증가	26.1	588.1	464.0	-1.0
		시나리오5	강수량 3 σ 증가	26.1	729.4	456.8	-2.5
이상저온과 이상강수량		시나리오6	기온 2 σ × 강수량 2 σ	23.8	588.1	419.1	-10.5
		시나리오7	기온 2 σ × 강수량 3 σ	23.8	729.4	412.0	-12.1
이상고온과 이상강수량		시나리오8	기온 2 σ × 강수량 2 σ	23.8	588.1	427.2	-8.8
		시나리오9	기온 2 σ × 강수량 3 σ	23.8	729.4	420.0	-10.4
		시나리오10	기온 3 σ × 강수량 2 σ	22.7	588.1	378.1	-19.3
		시나리오11	기온 3 σ × 강수량 3 σ	22.7	729.4	371.0	-20.8

(마) 시사점

우리나라 이상기상 발생현황을 조사하고, 주요 곡물인 쌀을 대상으로 이상기상이 생산에 미치는 영향을 패널분석-확률효과모형을 이용하여 분석하였다. 쌀 단수 함수의 추정을 위한 변수로 기술변수, 등속기의 평균기온, 평균기온의 제곱, 평균기온변동, 강수량, 호우일수 등을 설정하였다. 8월 평균기온의 변동이 커지면 쌀 단수가 유의하게 감소하는 것으로 분석되었고, 8월 호우 빈도가 커지면 쌀 단수가 유의하게 감소하는 것으로 분석되었다.

이상기상이 쌀 단수에 미치는 영향을 이상기상 시나리오를 설정하여 분석한 결과, 이상고온이 발생할 경우 쌀 단수는 5.8~16.3% 감소하고, 강수량이 이상적으로 증가할 경우(표준편차의 2배수 이상) 쌀 단수는 1.0~2.5% 감소하는 것으로 나타났다. 이상고온과 이상다우 현상이 동시에 발생할 경우 쌀 단수는 8.8~20.8% 감소하는 것으로 분석되었다.

향후 이상기상 현상은 보다 빈번해지고 강도도 더 커질 것으로 전망됨에 따라(국립기상연구소, 2011) 그 피해를 최소화하기 위한 적절한 대응전략이 요구된다.

첫째, 이상기상의 피해를 최소화하기 위해 내고온성, 침관수 피해에 대응한 내병성, 수발아²⁹에 대응한 강한 휴면성 품종 등 기후변화에 적응할 수 있는 새로운 품종과 재배기술을 개발하여 보급하는 것이 유용할 것이다.

둘째, 집중호우와 가뭄에 대비하여 농업용 수리시설인 저·소류지, 양·배수장, 농업용 관정 등의 노후화되어 제 기능을 잘 하지 못하는 시설들에 대한 개보수 및 현대화가 필요하다.

셋째, 이상기상에 의한 피해는 분석결과에서 나타난 것처럼 작물 생산성을 떨어뜨려, 농가소득을 저하시킬 수 있고, 많은 농가에서 동시에 발생하는 경우 농업기반의 붕괴를 가져올 수 있으므로 정부가 적극적으로 개입하여 농가의 손실을 적절하게 보상해 주어야 한다. 이러한 위험은 사전적으로 예방조치를 강화하는 것이 중요하고 안정적 농가소득을 보장하는 재해보험과 같은 위험관리 프로그램을 운용할 필요가 있다.

본 연구는 기후변화 시나리오 분석의 편의를 위해 모형을 단순화함에 따라 쌀 단수변동의 요인을 모두 분석하지 못한 한계가 있으며, 쌀 하나의 품목을 분석하여 일반적인 결론을 도출하였는데 향후에는 보다 정교한 분석 연구가 필요하고, 품목을 보다 확대할 필요가 있다.

마. 기후변화 적응 신규작목의 시장분석

(1) 분석 개요

기후가 온난화 되면서 향후 기후변화에 대응하여 농가의 신소득 작목으로 열대·아열대 과일류 생산에 대한 관심이 고조되고 있다. 이에 대응하여 정부에서는 기후변화 신소득 작목 도입을 위해 1990년대 중반부터 열대·아열대 과일재배 연구를 활발하게 추진해 왔다.³⁰

이러한 신소득작목 도입에 따른 결과는 농가소득 창출 및 지역경제 발전에 이바지하며, 소비자들에게 고품질 열대·아열대 과일을 공급하는 효과가 있다. 한편 현재 열대·아열대 과일을 재배하고 있는 농가들이나 그러한 작목으로 전환하려는 농가들은 그들의 소득 안정을 위해 열대·아열대 과일 작목의 소비를 촉진시키기 위한 방안이나 소비의향에 대한 정보를 필요로 하고 있다. 시설재배의 경우 초기 투자비가 많이 소요되고 한번 투자하면 소위 자산의 고정성 때문에 다른 작목으로 전환하기 어려운 특성을 가지고 있기 때문이다.

29 휴면이 짧은 품종에서는 성숙할 무렵에 오랫동안 비를 맞으면 종실이 수분을 흡수한 채로 비교적 낮은 온도에 처하게 되고 발아억제물질이 씻겨 내려서 수확하기 전 포장에서 서 있는 채로 휴면이 끝나 발아하게 되는 현상이다.

30 농촌진흥청 온난화대응농업연구센터의 열대·아열대 작물 신품종 도입 연구는 망고, 아보카도, 패션프룻, 용과, 마카다미아, 아페모아, 체리모아, 구아바 등 8과종 12개 품종에 대한 적응성 평가가 이루어지고 있음.

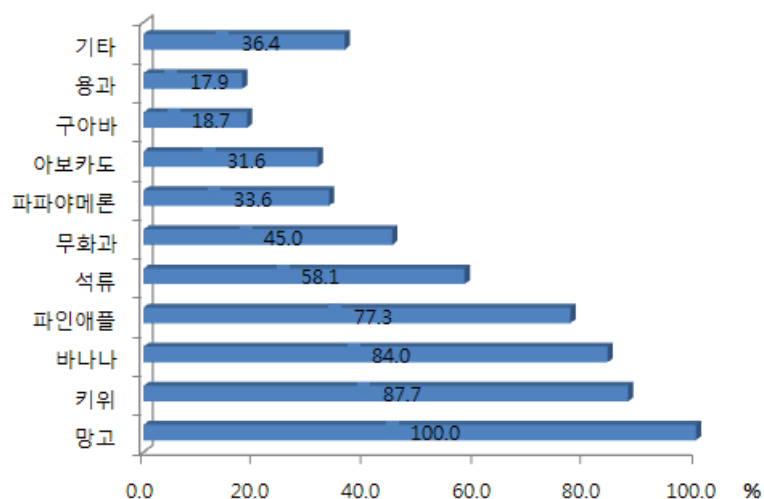
따라서 열대·아열대 과일 품목의 소비의향을 조사하고, 소비에 영향을 미치는 변수가 무엇인지를 분석함으로써 기후변화 대응작목으로써의 열대·아열대 과일을 안정적으로 보급할 수 있는 방안을 도출하는 연구가 필요하다. 이는 기후변화에 대응한 정부의 실효성 있는 적응전략을 도출하는데 이용될 수 있을 것이며, 농가들의 합리적인 의사결정을 도출하기 위한 기초자료를 제공할 수 있을 것이다.

이 연구의 목적은 열대·아열대 과일의 소비의향에 영향을 미치는 변수가 무엇인지를 분석함으로써 기후변화 대응 신소득 작목의 안정적 보급을 위한 정책적 시사점을 도출하는데 있다. 국내에서 재배되고 있는 열대·아열대 작목들 중 망고를 연구대상으로 하였다. 2012년 기준 국내 열대·아열대 작목 재배 규모는 망고(25.6ha), 용과(4.6ha), 아보카도(3.8ha), 구아바(3.6ha)의 순으로 망고가 가장 많이 재배되고 있다(제주통계연보, 2013).

국내산 열대·아열대 과일에 대한 구매특성에 대한 연구는 찾아보기 어렵지만 오렌지, 바나나 등 수입되는 열대·아열대 과일에 대한 수요와 관련된 연구들은 일부 제시되고 있다. 소비자들은 풍미와 호기심 때문에 오렌지와 바나나 등 수입 열대·아열대 과일을 찾고 있으며(임채일 외 3인, 2005), 수입되는 열대·아열대 과일의 선택 기준은 맛과 품질인 것으로 나타났다(김경필 외 2인, 2005). 그리고 수입 오렌지는 국산 감귤의 가격 및 산업에 영향을 미치며(강지용·고성보, 1998; 이정환·서진교, 2007), 국산 배와 대체관계에 있는 것으로 분석되었다(노수정 외 2인, 2012).

국내산 열대·아열대 과일의 생산 측면의 연구는 일부 이루어진 것으로 보인다. 제주가 가장 먼저 열대 과일의 재배지역이 되며, 육지부의 겨우 A1B 시나리오에서 구아바, 아보카도, 아페모아, 망고, 용과, 파파야 등의 순으로 재배가능지역 북상속도가

그림 2-29. 최근 1년 이내 직접 구입하신 열대·아열대 과일(중복응답)



빠를 것으로 예측되었다(김창길 외 4인, 2009). 그리고 현재 전북지역에서 아열대 과일을 도입하고자 한다면 난방비 과다로 수익 창출이 어렵지만 향후 기온이 더욱 상승하게 된다면 재배가 가능한 것으로 분석되었다(김창길 외 4인, 2010).

기후변화 대응 열대·아열대 작목에 대한 소비의향 연구는 국내에서 거의 이루어지지 않았으며, 여기에서는 국내산 망고를 대상으로 한 소비자조사를 바탕으로 열대·아열대 작목의 수요의향을 분석하고, 소비확대를 위한 정책적 시사점을 제시하고자 한다.

(2) 국내 망고 소비실태에 대한 조사결과 분석

(가) 조사개요

국내산 망고에 대한 소비의향과 구매행태를 살펴보기 위해 광역도시에 거주하는 주부를 대상으로 소비자 조사 전문기관에 의뢰하여 설문조사를 실시하였다(조사기간: 2013. 8. 1~10). 조사대상자는 만 20세 이상 기혼 주부 700명으로 하였다

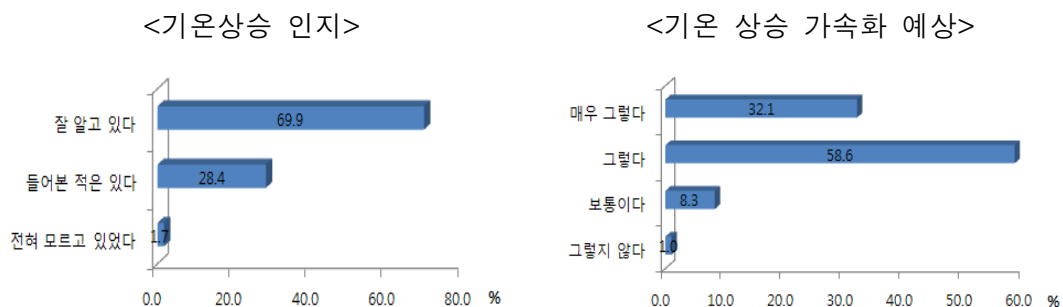
조사가구의 사회·경제적 특성을 살펴보면, 응답자 연령은 20대가 94명(13.4%), 30대가 238명(34.0%), 40대가 240명(34.3%), 50대 이상이 128명(18.3%)으로 30~40대가 68.3%로 대부분을 차지하는 것으로 나타났다. 거주 지역은 서울이 24.6%, 경인/강원 34.9%, 경남권 14.9%, 경북권 8.1%, 전라권 8.0%, 충청권 9.6%를 차지하였다.

(나) 분석결과

최근 1년 이내 망고를 구입한 경험이 있는 소비자에게 같은 기간 직접 구입한 열대·아열대 과일에 대해 질문한 결과 ‘키위’ 87.7%, ‘바나나’ 84.0%, ‘파인애플’ 77.3%, ‘석류’ 58.1% 등의 순으로 나타났다(중복응답).

지구온난화로 지구의 연평균 기온이 올라가고 있다는 것을 인지하고 있는지에 대해 ‘잘 알고 있다’ 69.9%, ‘들어본 적은 있다’ 28.4%, ‘전혀 모르고 있었다’ 1.7% 등으로 나타났다. 지구온난화로 인한 기온 상승이 가속화 될 것으로 보는지에 대해 ‘그

그림 2-30. 지구 온난화에 대한 인식

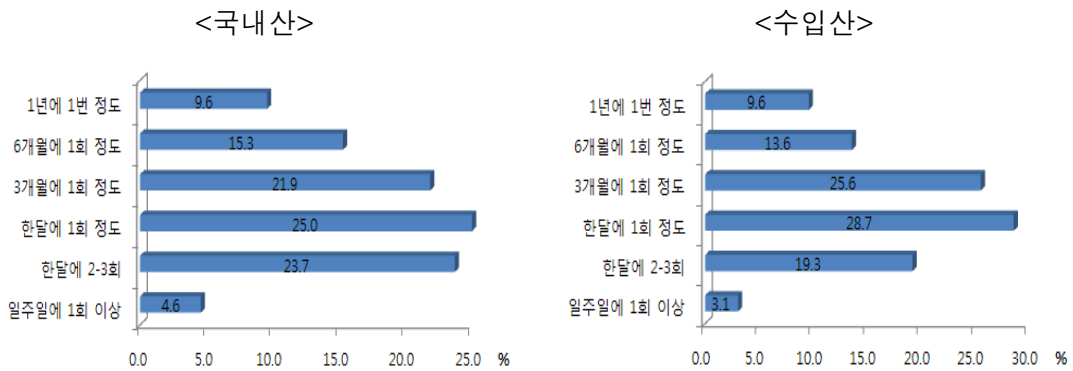


렇다’ 58.6%, ‘매우 그렇다’ 32.1% ‘보통이다’ 8.3% 등으로 나타나 대부분 지구온난화가 가속화될 것으로 보고 있었다.

최근 1년 동안 국내산 망고의 구매 빈도에 대해 ‘한 달에 1회 정도’ 25.0%, ‘한달에 2~3회 정도’ 23.7%, ‘3개월에 1회 정도’ 21.9% ‘6개월에 1회 정도’ 15.3% 등의 순으로 나타났다.

최근 1년 동안 수입산 망고의 구매 빈도에 대해 ‘한 달에 1회 정도’ 28.7%, ‘3개월에 1회 정도’ 25.6%, ‘한달에 2~3회 19.3%, ‘6개월에 1회 정도’ 13.6% 등의 순으로 나타났다.

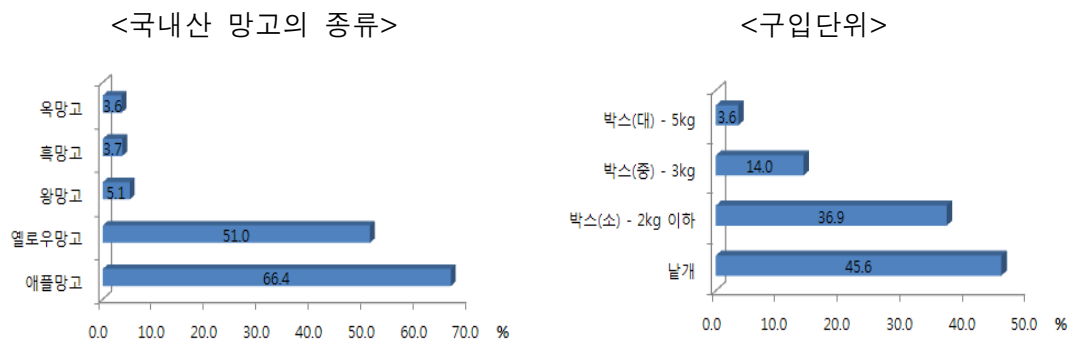
그림 2-31. 최근 1년 동안 망고 구매빈도



최근 1년 이내 구매한 국내산 망고의 종류에 관해 ‘애플망고’ 66.4%, ‘엘로우망고’ 51.0%, ‘왕망고’ 5.1% 등의 순으로 나타났다(중복응답).

구매한 국내산 망고의 주 구입단위는 ‘날개’ 45.6%, ‘박스(소) - 2kg 이하(크기에 따라 3~7개 정도)’ 36.9%, ‘박스(중) - 3kg(크기에 따라 5~12개 정도)’ 14.0%, ‘박스(대) - 5kg(크기에 따라 9~20개 정도)’ 3.6% 등의 순으로 나타났다.

그림 2-32. 최근 1년 이내 구매하신 국내산 망고의 종류(중복응답)와 주 구입단위



(3) 국내산 망고 소비의향 분석

(가) 분석모형³¹

국내산 망고의 구매 결정에 직면한 소비자들은 국내산 망고의 구매로 인한 효용(U_B)이 그렇지 않을 경우(U_{NB})에 비해 크다면 국내산 망고를 구매할 것이다. 소비자의 효용은 국내산 망고의 구매 혹은 구매의향여부($a = B, NB$)에 따라 달라지는데, 소비자 i 의 효용함수(U_{ai})를 함수형태로 나타내면 다음과 같다.

$$U_{ai} = V_{ai} + \epsilon_{ai} \quad (2-16)$$

여기서 V_{ai} 는 모형에 의해 설명가능한 부분이고, 반면 ϵ_{ai} 는 설명이 불가능한 확률적인 부분

표 2-16. 분석모형에 이용된 변수의 기술통계량 및 설명

변수명	변수설명	평균값
EDU	주부(응답자)의 학력(1=중졸이하, 2=고졸, 3=대재, 4=대졸, 5=대학원재, 6=대학원졸 이상)	3.670
METRO	주부(응답자)의 거주지(수도권=1, 그 외 지역=0)	0.579
OVERSEAS	외국에서 6개월 이상 거주한 경험이 있다(있다=1, 없다=0)	0.111
INC	가정의 한달 평균 총소득	3.761
RECOG_GR	국내에서 열대·아열대 과일이 재배되고 있는지 알고 있다(알고 있다=1, 모른다=0)	0.957
RECOG_CC	지구온난화로 지구의 연평균 기온이 올라가고 있다는 것을 알고 있다(전혀모름=1, 들어본적있음=2, 잘알고있음=3)	2.681
QUALITY	국내산 망고의 맛, 신선도, 외관 등 전반적인 품질에 대한 만족도(5점 리커드 스케일)	3.780
RSAFETY	수입산과 비교하여 국내산 망고의 안전성(농약, 방부제, 등 사용 관련) 수준에 대한 인식도(5점 리커드 스케일)	3.691
RPQUALITY	수입산과 비교하여 국내산 망고의 가격대비 품질(맛, 신선도, 외관 등) 만족도(5점 리커드 스케일)	3.601
샘플수	658	

주: 총소득의 경우 250만원 미만을 1, 250~350만원을 2, 350~450만원을 3, 450~550만원을 4, 550~700만원을 5, 700~800만원을 6, 800~1000만원을 7, 1000만원 이상을 8로 각각 나타냄.

31 국내산 망고의 구매의향 분석을 위한 모형은 김성용, 조성환(2006)에 잘 나타나 있다.

그러나 위의 소비자 선택문제에서 U_{ai} 는 실제로 연구자가 관측 가능한 변수가 아니기 때문에 실제로 관측이 가능한 변수를 사용하여 이를 다시 표현할 필요가 있다. 국내산 망고의 구매 혹은 구매의향 빈도를 Y_i 라 할 때, 구매빈도는 국내산 망고를 구매하지 않을 때 보다 국내산 망고 구매 빈도의 증가로부터 얻어지는 효용증가분에 따라 결정될 것이다. 이 추가적인 효용증가분을 Z_i 라 하면 국내산 망고의 구매빈도에 관한 소비자선택 문제는 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$Z_i = (V_{Bi} + \epsilon_{Bi}) - (V_{NBi} + \epsilon_{NBi}) \\ (\epsilon_{Bi} - \epsilon_{NBi}) - (V_{Bi} - V_{NBi}) \quad (2-17)$$

소비자 i 는 Z_i 의 크기에 따라 국내산 망고를 구매하게 될 것이다. 즉, Z_i 의 크기가 클수록 국내산 망고를 보다 더 자주 구매하게 될 것이다. 여기서 u_i 는 구매빈도에 대응하는 임계치(threshold parameter)로 국내산 망고의 구매빈도 증가로부터 얻어지는 효용의 증가분이 그로 인한 비용 증가분을 보상할 만큼 충분히 큰 값을 의미하며, 모형의 추정과정에서 다른 파라미터와 함께 추정된다.

(나) 분석자료

분석모형에 이용된 종속변수에 대한 설명과 응답수는 <표 2-17>와 같다. 소비의향 분석은 전체 700명의 응답자 중 소비의향에 대해 ‘잘 모르겠다’고 응답한 42명을 제외한 658명을 대상으로 하였다. 설명변수에 대한 설명과 이들 변수의 평균값은 <표 2-16>과 같다.

표 2-17. 소비자들의 국내산 망고 소비의향

향후 소비의향	응답수(비중)
구입비중 축소 혹은 향후 소비의향 없음=0	163 (24.8)
구입비중 현수준 유지=1	272 (41.3)
구입비중 확대=2	223 (33.9)
전체	658 (100.0)

(다) 분석결과

국내산 망고의 소비의향에 대한 순위화된 프로빗 모형의 추정결과는 <표 2-18>과 같다. <표 2-19>는 <표 2-18>의 계수 추정치를 바탕으로 하여 소비의향에 대한 설명 변수의 한계효과(marginal effects)를 추정한 것이다. 소비의향의 경우 소득, 기온상

승 인지, 안전성 수준 인식, 가격대비 품질 만족도 인식 등이 소비의향을 결정하는 유의한 변수인 것으로 나타났다.

표 2-18. 국내산 망고의 소비의향 추정결과

구 분	계수값	표준오차	t 값
ONE	-2.262***	0.431	-5.249
EDU	0.048	0.041	1.169
METRO	0.074	0.091	0.813
OVERSEAS	0.009	0.151	0.059
INC	0.056**	0.027	2.099
RECOG_GR	0.065	0.215	0.303
RECOG_CC	0.208**	0.092	2.265
QUALITY	0.100	0.081	1.226
RSAFETY	0.194***	0.073	2.658
RPQUALITY	0.229***	0.078	2.944
Mu(1)	1.166***	0.060	19.443
샘플수	658		
로그우도함수값	-677.171		
카이승값	63.734(0.0000)		

주 1) ***, **, *은 각 1%, 5%, 10% 수준에서 유의함.

2) 순위화된 프로빗모형의 경우, 계산을 위해 알아야할 값들 중 밝혀지지 않은 값은 μ 값(경계값)들임. μ 값은 범주의 개수가 J일 경우 J-2개만을 형성하므로 본 연구에서는 1개(3-2)의 경계값만을 새로이 형성하게 됨(이성우 등, 2005).

소비의향에 대한 한계효과를 소비의향별로 나타내면 <표 2-19>와 같다. 여기에서 국내산 망고 소비의향이 확대될 확률(Y=2)에 대해 유의하게 추정된 소득, 기온상승 인식, 안전성 인식, 가격대비 품질만족도 인식 등의 변수들을 중심으로 살펴보면, 소득이 높은 소비자일수록 그렇지 않은 소비자에 비해 국내산 망고 소비를 확대할 확률이 2.0%포인트 높았다. 또, 기온상승을 인식하고 있는 소비자가 그렇지 않은 소비자에 비해 국내산 망고 소비를 확대할 확률이 7.5%포인트 높았다. 뿐만 아니라 수입산과 비교하여 국내산 망고가 상대적으로 안전하다고 인식하는 소비자가 그렇지 않은 소비자에 비해 국내산 망고 소비를 확대할 확률이 7.0%포인트 높았다. 마지막으로 국내산 망고가 가격에 비해 품질이 만족스럽다고 인식하는 소비자가 그렇지 않은 소비자에 비해 국내산 망고 소비를 확대할 확률이 8.3%포인트 높았다.

표 2-19. 국내산 망고의 소비의향에 대한 설명변수별 한계효과

구 분	소비의향		
	Y=0	Y=1	Y=2
ONE	0.000	0.000	0.000
EDU	-0.015	-0.003	0.018
METRO	-0.023	-0.004	0.027
OVERSEAS	-0.003	-0.001	0.003
INC	-0.017	-0.003	0.020
RECOG_GR	-0.020	-0.003	0.023
RECOG_CC	-0.064	-0.011	0.075
QUALITY	-0.031	-0.005	0.036
RSAFETY	-0.060	-0.011	0.070
RPQUALITY	-0.070	-0.013	0.083

주1) Y=0: 구입비중 축소 혹은 향후 소비의향이 없음을 나타냄.

2) Y=1: 구입비중 현수준 유지를 나타냄.

3) Y=2: 구입비중 확대를 나타냄.

(4) 시사점

기후변화에 대응하여 신소득 작목으로 열대/아열대 과일을 도입하여 재배가 이루어지고 있다. 이러한 기후변화 대응책이 실효성을 거두기 위해서는 시장성 및 경제성이 확보되어야 할 것이다. 이를 위해서는 소비자들의 니즈를 정확히 파악하고 그에 따른 생산이 이루어질 때 가능할 것이다. 여기에서는 기후변화에 대응하여 국내산 망고에 대한 소비의향과 구매행태를 살펴보기 위해 광역도시에 거주하는 주부를 대상으로 소비자 설문조사를 실시하여 그 결과를 분석하였다. 조사가구의 사회·경제적 특성을 살펴보면, 설문응답자 연령은 30~40대(68.3%)가 대부분을 차지하였고, 거주 지역은 서울(24.6%), 경인/강원(34.9%) 등 골고루 분포하였다.

기후변화 대응작목인 국내산 망고에 대한 소비자들의 소비의향 요인을 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 소비자들은 신선도와 맛·풍미 때문에 국내산 망고를 찾고 있으며, ‘구입 비중을 현 수준으로 유지하겠다’는 응답이 41.3%로 나타난 가운데, ‘구입비중을 확대하겠다’는 비중(33.9%)이 ‘축소하겠다’는 비중(24.8%) 보다 높게 나타났다.

둘째, 국내산 망고를 구입할 때 주로 고려하는 사항은 ‘맛’(가정용 53.9%, 선물용 33.7%)과 ‘신선도’(가정용 28.9%, 선물용 31.0%)로 나타났다.

셋째, 국내산 망고를 수입산과 비교한 결과, 국내산 망고가 맛, 신선도, 외관 등 전반적인 ‘품질수준’과 ‘안전성(농약, 방부제 등 사용 관련)’ 수준이 높으며, 가격 수준도 높은 것으로 인식하고 있었다.

넷째, 국내산 망고 구입에 있어 애로사항이나 구입욕구를 저하시키는 요인으로는 ‘비싼 가격’(56.4%)과 ‘적당한 구입처를 찾기 어려움’(22.0%) 등을 꼽았으며, 지불의향 가격은 수입산 가격을 1로 볼 때, 국내산은 ‘1.5~2배 미만’(37.0%), ‘1.5배 미만’(30.0%), ‘2배~2.5배 미만’(15.0%) 등의 순으로 나타났다.

다섯째, 소비의향 요인 분석결과, 소득, 기온상승 인지, 안전성 수준 인식, 가격대비 품질만족도 인식 등이 소비의향에 유의한 양의 영향을 미치는 것으로 나타났다.

기후변화 대응작목인 국내산 망고에 대한 소비자들의 소비의향을 분석한 결과를 바탕으로 소비확대를 위해 다음과 같은 정책적 시사점을 도출하였다.

첫째, 국내산 망고 구입 비중을 확대하겠다는 응답 비중이 높은 가운데 기후변화에 따른 기온상승으로 공급량의 증가에 따른 기대가격 하락 및 지속적인 공급 등으로 온난화에 따른 국내산 망고의 소비가 확대될 것으로 기대할 수 있다. 따라서 기후변화 대응작목으로 망고의 재배를 유도함과 동시에 다양한 열대·아열대 과일의 신품종 적응성 연구가 필요하다. 망고 작물은 단기간 최고 온도 48℃ 까지 견딜 수 있고 추위에도 제한적인 내성을 갖고 있다. Mathur et al (2012)에 의한 다양한 작물들의 기후 적합성의 변화를 분석한 결과를 보면, 양파, 배추, 바나나 등의 재배적지는 감소하나 망고, 코코넛 등의 적지는 증가할 것으로 분석하였다. 7종의 GCM(Global Circulation Model)들을 활용해 기후변화 적합성을 분석한 결과, 망고의 경우, 세계적으로 생산량이 1.6% 상승하고, 망고 생산적지의 26%만이 부정적인 영향을 받을 것으로 예측하였다. 우리나라의 경우, 지구온난화로 아열대기후대가 확대되어 현재 제주 및 남해 일부에서 2070년에는 중부내륙까지 변동될 수 있으며, 2020년에는 경지면적의 17%가 아열대기후대에 포함될 것으로 예상된다(기상연구소, 2007). 미래에는 망고 생산적지가 점차 확대될 것으로 보인다. 따라서 망고를 기후변화 대응작목으로 적극적으로 육성할 필요가 있으며, 기후 및 토양의 적합성을 평가하고, 양분 관리기술, 병해충 방제기술, 수정 및 적과 기술 등 종합적 재배기술을 개발할 필요가 있다. 품종개량과 새로운 품종의 적응 등 품종개발에 관한 연구는 지역별 기후변화와 농업여건 등을 종합적으로 고려하는 실제적인 현장연구로 상당한 시간을 필요로 하므로 이를 정부나 지자체에서 지원해 줄 필요가 있다.

둘째, 국내산 망고 구입 시 주 고려 사항이 ‘맛’으로 나타난 가운데 가격대비 품질만족 인식의 정도가 높을수록 소비를 늘릴 계획인 것으로 나타났다. 따라서 소비를 촉진시키기 위해 품질(맛)을 제고시키기 위한 재배기술을 개발하여 보급할 필요가

있다. 아직 국내의 재배경력이 짧고 재배기술이 보급되지 않아 품질관리에 관한 기술이 미흡하다. 또한, 기존 재배농가들의 경우 시장가격의 하락을 우려해 재배기술을 공개하지 않는 경우가 많다. 그러므로 개발된 기술을 바탕으로 신규 재배농가를 대상으로 재배기술 컨설팅을 해 줄 필요도 있다.

셋째, 현재의 국내산 열대·아열대 과일의 가격이 높은 수준인데 반해 소비자들은 그들의 지불의향 가격을 ‘1.5~2배 미만’이나 ‘1.5배 미만’으로 응답한 비중이 67.0%로 높게 나타났다. 이는 향후 소비를 확대시키기 위해서는 가격을 인하하는 노력이 필요할 것으로 보인다. 즉 생산 단가를 낮추어 수입산과 가격경쟁에 대응하고 대중적으로 보급 가능하도록 정책적 지원이 뒷받침되어야 한다.

넷째, 소득이 소비의향에 유의한 양의 영향을 미치는 것으로 나타났으므로 소비를 확대시키기 위해 고소득층을 위한 타겟 마케팅(Target marketing) 전략이 요구된다. 대형 백화점, 호텔 등 고소득자를 대상으로 한 판매 전략을 개발함과 동시에 웰빙식품을 선호하는 계층을 대상으로 고급화된 국산 품종을 마케팅함으로써 국내 재배농가의 소득을 보장하고 추가적인 품질개발을 촉진할 수 있다.

다섯째, 수입산 대비 안전성 수준 인식의 정도가 높을수록 국내산 망고 소비를 확대할 가능성이 높은 것으로 나타났다. 따라서 소비자들의 안전성을 고려해 친환경적인 농법을 이용해 재배할 필요도 있다. 망고와 같은 생과실에는 병해충을 고려한 농약 과다 사용이 우려될 수 있으므로 위생 안전성에 대한 철저한 관리가 요구된다. 국산 과일의 강점인 신선도 유지 및 소비자들에 대한 신뢰 제고를 위해 친환경 농법을 통한 재배방식 도입이 필요하다.

5. 기후변화에 따른 농업부문의 취약성 평가

가. 기후변화 취약성의 정의 및 평가 방법

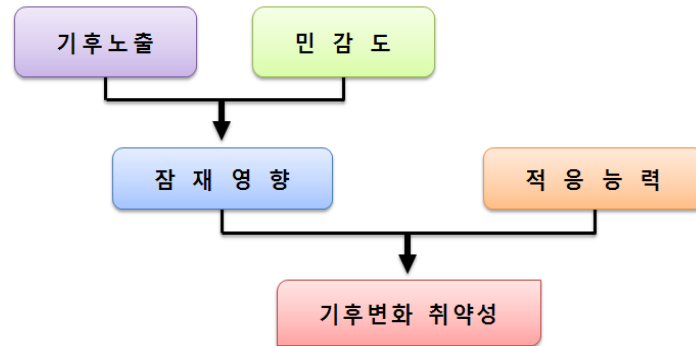
UNDP(United Nations Development Program, 2005)는 취약성을 어떤 시스템의 기후변화에 대한 민감도와 적응능력의 함수로 보고 다음과 같이 정의하였다.

$$\text{취약성} = f(\text{민감도}, \text{적응능력}) \quad (2-18)$$

기후변화에 대한 노출이 시스템의 민감도에 따라 잠재적 영향(potential impacts)으로 나타나게 되고, 이 시스템이 가지고 있는 적응능력에 따라 최종적인 시스템의 취

약성이 결정된다. 적응능력을 고려한 취약성 평가는 적절하고 적합한 적응수단의 채택에 기여한다.

그림 2-33. 기후변화 취약성의 개념적 틀



서로 단위가 다른 변수들 간의 연산을 위해서는 우선 자료의 표준화 과정이 필요하다. 자료의 표준화 과정은 Z-스코어 계산법과 Dimension index 방법을 적용한다. Z-스코어 방법이라고 불리는 표준화 방법은 가장 보편적으로 사용되고 있는 방법이다. 이는 모든 자료들을 평균은 0, 표준편차는 1이 되도록 만드는 방법으로써, 자료의 수치가 그 분포의 평균으로부터 표준편차의 몇 배 정도나 떨어져 있는지를 표준화된 확률변수인 Z값으로 나타낸다. Z-스코어 계산방법은 자료를 아래 식 <2-19>에 의해 변환하는 것이다. 이방법의 문제점은 자료가 정규분포를 하지 않을 경우 왜곡된 결과를 가져올 수 있다.

$$Z\text{-스코어} = \frac{\text{실제값} - \text{평균}}{\text{표준편차}} \quad (2-19)$$

Dimension Index 방법은 스케일 재조정(re-scaling) 방법 중 하나이며, 이는 자료를 전체 자료범위 내에서 등수에 따라 일렬로 줄 세우는 방법이다. 비교적 무리가 없지만 이상치(extreme value)가 자료구조를 왜곡시킬 수도 있다.

$$Dimension\ Index\ 지수 = \frac{\text{실제값} - \text{최소값}}{\text{최대값} - \text{최소값}} \times 100 \quad (2-20)$$

앞에서 설명한 바와 같이 적응능력 지수의 산정을 위해 지표별 자료를 수집한 후 Z-스코어 방법과 Dimension Index 방법을 적용하여 자료를 표준화한다. 변수의 값이 높을수록 적응능력이 높으며, 지표의 방향이 (-), 즉 적응능력을 줄이는 변수는 역으로 환산하여 계산한다. 1개 이상의 측정변수가 있는 지표는 측정변수를 각각 표준화

한 후 산술평균하여 지표의 표준화 값을 산정하였으며, 지표의 표준화 값을 평균하여 적응능력 지수를 산정한다. 즉, 적응능력 지수는 적응능력을 구성하는 경제적 능력, 물적 인프라, 사회적 자본, 제도적 역량을 나타내는 지표의 표준화 값을 각각 산술평균한 후 이결과를 다시 산술평균하여 산정한다.

$$\text{적응능력지수} = \frac{\text{경제적 능력} + \text{물적 인프라} + \text{사회적 자본} + \text{제도적 역량}}{4} \quad (2-21)$$

나. 취약성평가 지표개발

(1) 선행연구의 취약성 지표 검토

환경부·국립환경과학원(2012)은 벼 생산성의 취약성 지표를 구성하는 대리변수로 기후노출의 경우 4~6월 일최저기온이 13℃ 이하인 날의 횟수(회), 7~9월 일최저기온이 17℃이하인 날의 횟수(회), 9~10월 일최저기온이 14℃이하인 날의 횟수(회), 4~10월 일최고기온이 30℃ 이상인 날의 횟수(회), 4~10월 시간오존농도가 100ppb 이상인 날의 횟수(회), Log(4~10월 일사량 합), 일강수량이 160mm이상인 날의 횟수(회), 일최대풍속이 14m/s이상인 날의 횟수(회) 등을 이용하였다. 민감도의 경우 논면적(ha), 면적당 농작물 답작 피해면적, 병해충 피해 가능성 등을 이용하였다. 적응능력의 경우 재배면적당 논벼 생산량(톤/ha), 재배면적당 논벼 주종사자수(명/ha), 경지정리비율(%) 등을 이용하였다.

이버들 등(2011)은 수산부문 기후변화 취약성 지표를 구성하는 대리변수로 기후노출의 경우 해양의 물리적 특성 변화, 해수면 상승, 유해생물 출현율, 민감도의 경우 어업인구 특성, 수산업 생산 특성, 지역 수산업 특성 등을, 적응능력의 경우 경제적 능력과 거버넌스, 물적 인프라, 사회적 자본을 이용하였다. 특히 해양의 물리적 특성 변화의 요소로 표층수온 변화, 염도 변화, 용존산소 변화 등을 이용하였다. 또한 수산업 생산 특성으로 어로어업 생산액, 양식어업 생산액 자료를 이용하였다.

김명현 등(2013)은 농업부문 기후변화 취약성 지표를 구성하는 대리변수로 기후노출의 경우 일강수량이 80mm 이상인 날의 횟수, 일최대풍속, 적설량이 20cm 이상인 날의 횟수, 4-10월 일사량합, 7-9월 일최저기온이 17℃ 이하인 날의 횟수, 9-10월 일최저기온이 14℃ 이하인 날의 횟수, 연평균기온 7℃ 이하 또는 2℃ 이상 지역, 4-8월 일평균기온, 10월 일평균기온, 일최고기온 27℃ 이상인 날의 횟수, 온습도지수 72 이상인 날의 횟수를 이용하였다. 민감도의 경우 지역평균 경사도, 10m 이하 저지대 면적을 지표로 반영하였으며, 이외에도 농경지 면적 비율, 가축 사육두수, 병해충피

해 가능성, 기상재해 피해 가능성, 농업인 취약계층비율 등을 이용하였다. 적응능력의 경우 1인당 GRDP, 재정자립도, 농업비중, 1인당 농업예산, 농업인 비율, 농업인 연령, 농업인 학력, 공무원 비율 등을 이용하였다.

유가영·김인애(2008)는 모든 기후변화 취약성 평가지표를 구성하는 변수로 기후노출의 경우 호우, 가뭄, 폭서 등의 관련 요소를 이용하였고, 민감도의 경우 인간정주/기반시설, 생태계, 농업, 보건/복지 등의 관련 요소를 이용하였다. 특히 농업분야의 요소로 총인구 중 농작인구(%), 농작지당 곡물생산(M/T)을 이용하였다. 그리고 적응능력의 경우 경제능력, 거버넌스, 인력자원/교육, 환경 역량, 산업구조 등의 관련 요소를 이용하였다.

(2) 본 연구의 지표개발

(가) 기후노출

기후노출은 기후 특성, 기후 변동, 극한 기후의 빈도와 크기 등 기후와 관련된 자극에 현재 시스템이 노출되는 정도를 의미하며, 지리적인 위치와 기후변화의 정도에 따라 달라진다(이버들 등, 2011).

이 보고서에서 사용된 기후노출의 요소로 기상청 자료인 평균기온변화, 총강수량 변화 등 기온 및 강수량 변화이다. 평균기온 및 총강수량 변화는 농산물의 재배조건을 근본적으로 바꾸기 때문에 농업에 미치는 영향은 직접적이고 매우 크다고 할 수 있다. 특히 지난 30년 동안 평균기온은 상승해 왔는데, 이로 말미암아 사과, 복숭아 등의 재배지가 이동하고 벼줄무늬잎마름병, 벼물바구미 등 작물의 병해충이 빈발하는 것으로 나타나고 있다(김창길 등, 2009).

집중호우, 가뭄 등 이상기상은 농작물의 수량을 크게 감소시키는 요소이다. 이상기상이 쌀 단수에 미치는 영향을 이상기상 시나리오를 설정하여 분석한 결과, 이상고온이 발생할 경우 쌀 단수는 5.8~16.3% 감소하고, 강수량이 이상적으로 증가할 경우 쌀 단수는 1.0~2.5% 감소하는 것으로 분석되었으며, 이상고온과 이상다우 현상이 동시에 발생할 경우 쌀 단수는 8.8~20.8% 감소하는 것으로 분석되었다(정학균 등, 2013). 하지만 기존의 시·군별 자료를 이용한 취약성 평가 연구에서는 이러한 이상기상을 고려하는데 매우 제한적이었다.

이 연구에서는 기상청 자료인 일최고기온이 27도 이상인 날의 횟수(2000), 일강수량이 80mm 이상인 날의 횟수(2000), 평균기온변동, 총강수량변동을 기후노출의 요소로 이용하였다. 여기에서 기온 및 강수량 변동은 1983년에서 2012년까지의 평균치와 당해연도 기온 및 강수량과의 편차를 계산하여 이용하였다. 이들 요소들은 집중호우와 고온이 농작물 수량 및 품질에 미치는 영향을 나타내는 대리변수들이다.

(나) 민감도

민감도는 기후변화의 자극에 의해 해당 시스템이 영향을 받는 정도를 측정하는 것이다. 기후변화에 현재의 사회시스템이 얼마나 민감하게 반응하는가는 시스템의 지형적 요인뿐만 아니라 인구의 특성, 인프라 시설 등 사회경제적 요인의 특성에 따라 차이를 보이고 시스템의 민감도에 영향을 미치는 기반시설 등은 넓은 의미의 사회경제적 조건을 반영하기 때문에 이들 요인 중 일부는 적응능력을 결정하는 요인과 유사하게 해석될 수 있다(고재경 등, 2010).

이 연구에서는 기후노출에 의해 부정적인 영향이 커지는 변수를 민감도로 정의하고, 농업자원적특성, 지역농업적특성의 두 가지를 변수로 설정하였다. 민감도의 요소로 농업자원적특성과 관계된 요소로 농림어업총조사(2010)의 농업인구비중, 통계청(2009-2013)의 경지면적규모, 환경부(2009)의 지역평균경사도 등을 이용하였다.

농업인구비중은 해당 지역의 인구 가운데 농업인구가 차지하는 비중을 나타내며, 경지면적규모는 해당 지역의 경지면적 규모를, 지역평균경사도는 해당 지역의 평균 경사도를 각각 나타내며, 기후에 노출되었을 때 피해 규모를 보다 확대시키는 방향으로 작용을 하게 될 것이다. 다음으로 지역농업적특성과 관계된 요소로 농촌진흥청(1999-2008)의 병해충피해가능성, 통계청(2007-2011)의 농업의 부가가치비중, 재해연보(2009-2013)의 농업부문 재해피해 규모(경지면적 대비) 등을 이용하였다. 농업부문 재해피해 규모는 각 도별 ha당 피해액 자료를 이용하였다.

(다) 적응능력

이 연구에서는 적응능력을 기후노출의 부정적인 측면을 줄일 수 있는 능력으로 정의하며, 이러한 능력을 평가하기 위해서는 기후변화로 인한 피해의 저감이 인위적인 대응 노력으로 가능해진 것인지, 자연적인 현상인지를 구분해야 한다. 또한 향후 대응할 수 있는 잠재능력의 보유 여부도 중요하다. 적응능력은 현재 시스템이 기후 영향으로부터 얼마나 빨리 회복할 수 있는가를 나타내므로 사회·경제·환경적인 요소가 중요하게 고려된다(고재경 등, 2010)

적응능력의 대리변수로서 경제적능력과 거버넌스, 물적인프라, 사회적자본 등을 설정하였다. 경제적능력과 거버넌스는 지역의 전반적인 기후변화 대응 역량을 나타내는 것으로 통계청(2008-2012)의 농업예산비중, 통계청(2007-2011)의 1인당 GRDP, 안전행정부(2009-2013)의 재정자립도, 통계청(2010)의 공무원 비중, 겸업농가 비중 등을 이용하였다. 여기에서 겸업농가비중(%)은 겸업농가수/전체농가수×100으로 산정된다. 겸업농은 지난 1년간 농업이외의 일에 1개월 이상 종사한 가구원이 1명이라

표 2-20. 농업부문 기후변화 취약성 지표를 구성하는 대리변수

대분류	중분류	소분류	자료(기간)
기후 노출 ¹⁾	기온 및 강수량 변화	평균기온변화(℃) =2008~2012평균기온-1983~1987평균기온	기상청(1983-2012)
		총강수량변화(mm) =2008~2012총강수량평균-1983~1987총강수량평균	기상청(1983-2012)
	이상 기상	일최고기온이 27도 이상인 날의 횟수(회)	기상청(2000)
		일강수량이 80mm이상인 날의 횟수(회)	기상청(2000)
민감도	농업 자원적 특성	농업인구비중(%) =농가인구/전체인구*100	농림어업총조사(2010)
		경지면적규모(ha)	통계청(2009-2013)
		지역평균경사도(deg)	환경부(2009)
	지역 농업적 특성	병해충피해가능성(%) =주요병해충 피해면적/논면적*100	농촌진흥청 (1999-2008)
		농업의 부가가치비중(%) =농림어업부가가치/총부가가치*100	통계청(2007-2011)
		농업부문 재해피해 규모(천원/ha) ²⁾ =농경지 피해액/총경지면적	재해연보(2009-2013)
적응 능력	경제적 능력과 거버넌스	농업예산비중(%) =농림해양수산업예산/전체예산*100	통계청(2008-2012)
		1인당 GRDP(백만원) =지역내총생산/전체인구	통계청(2007-2011)
		재정자립도(%) =(지방세+세외수입)/일반회계예산*100	안전행정부 (2009-2013)
		공무원 비중(%) =공무원정원수/전체인구*100	통계청(2010)
		겸업농가비중(%) =겸업농가수/전체농가수*100	농림어업총조사 (2010-2013)
	물적 인프라	10년이상 한발빈도 관개면적비중 =10년이상 한발빈도관개면적/전체경지면적*100	한국농어촌공사(2013)
		농기계보유 농가구수비중(%) =농기계보유 농가구수/전체 농가가수*100	농림어업총조사(2010)
		컴퓨터 보유농가비중(%) ²⁾ =컴퓨터 보유농가/전체농가*100	농림어업조사(2013)
		컴퓨터 농림어업활용비중(%) ²⁾ =컴퓨터 활용농가/컴퓨터 보유농가*100	농림어업조사(2013)
	사회적 자본	30~60대 연령비중(%) =30~60대 연령인구/전체인구*100	농림어업총조사(2010)
4년제미만이상 교육비중(%)*100 =4년제미만이상 교육인구/전체인구*100		농림어업총조사(2010)	
생산자조직참여농가비중 =생산자조직참여농가/전체농가*100		농림어업총조사(2010)	

주1) 기상청에서 조사 되지 않는 시·군은 공간내삽법을 이용하여 추정된 자료임.

2)는 시군별 자료는 없으며, 도별 자료만 존재함을 나타냄.

도 있으면 겸업농으로 분류한다. 겸업농의 형태는 다양한데, 예를 들어, 가구원중 회사원이 있는 경우, 식당도 같이 경영하는 경우, 자기농사 뿐만 아니라 남의 농사일을 하고 품삯을 받는 경우 등이다. 2010 농림어업총조사에서는 전겸업 구분과 관련하여 농업 이외 임업, 어업, 제조업, 건설업, 도소매업, 숙박음식업, 기타산업 등의 수준정도로 조사를 하였고 그 이상 더 세부적인 형태에 대해서는 조사되지 않았다.

물적 인프라의 요소는 한국농어촌공사(2013)의 10년이상 한밭빈도 관개면적비중, 농림어업총조사(2010)의 농기계보유 농가구수비중, 농림어업조사(2013)의 컴퓨터 보유농가비중, 컴퓨터 농림어업활용비중 등을 이용하였다. 10년이상 한밭빈도 관개면적비중은 10년이상 한밭빈도 관개면적/전체경지면적 $\times 100$ 의 식으로 산정되며, 10년 이상 가뭄에도 관개 가능한 면적 비중을 의미한다. 농기계보유 농가구수비중은 농기계보유 농가구수/전체 농가가수 $\times 100$ 의 식으로 산정하였다. 즉, 전체 농가구중 경운기, 트랙터, 콤팩트, 관리기, 건조기, 이앙기, 과수원용SS분무기, 저온저장고 보유농가구수 합계 $\times 100$ 의 식으로 산정된다. 그리고 컴퓨터 보유농가비중(%)은 컴퓨터 보유농가/전체농가 $\times 100$ 의 식으로, 컴퓨터 농림어업활용비중(%)은 컴퓨터 활용농가/컴퓨터 보유농가 $\times 100$ 의 식으로 산정된다.

사회적자본의 요소는 농림어업총조사(2010)의 30~60대 연령비중과 4년제미만이상 교육비중, 생산자조직 참여농가 비중을 이용하였다. 여기에서 30~60대 연령비중(%)은 30~60대 연령인구/전체인구 $\times 100$ 의 식으로 산정하였다. 그리고 4년제미만이상 교육비중(%)은 4년제미만이상 교육인구/전체인구 $\times 100$ 의 식으로, 생산자조직참여농가비중은 생산자조직참여농가/전체농가 $\times 100$ 의 식으로 산정된다.

<표 2-21>은 대리변수가 농업에 미치는 영향을 나타낸다. 기후노출의 경우 기온 및 강수량변화는 농작물 재배에 부정적인 영향을 미침을 나타낸다. 일최고기온이 27도 이상인 날, 일강수량이 80mm이상인 날, 평균기온변동, 총강수량변동 등은 이상기상으로 또한 농작물 생산에 부정적인 영향을 미치게 된다. 민감도의 경우 농업자원적특성인 농업인구비중과 경지면적규모는 경제적 의존도를 나타내고, 농업자원적특성인 지역평균경사도는 집중호우 및 가뭄피해 증가를 나타낸다. 지역농업적특성인 병해충피해가능성은 병해충 피해 증가를, 농업의 부가가치비중은 농업에 대한 경제적 의존도를, 농업부문 재해피해 규모는 농업에 대한 재해피해 증가를 나타낸다. 적응능력의 경우 농업예산비중, 1인당 GRDP, 재정자립도, 공무원 비중, 겸업농가 비중 등은 경제적능력과 거버넌스 능력을 나타낸다. 물적인프라로 10년이상 한밭빈도 관개면적비중, 농기계 보유농가구수 비중, 컴퓨터 보유농가비중, 컴퓨터 농림어업활용비중 등은 적응을 위한 물적 능력을 나타낸다. 또 사회적자본의 30~60대 연령비중, 전문대학이상 교육 비중, 생산자조직 참여농가 비중 등은 전반적인 기후변화 대

응능력을 나타낸다.

표 2-21. 대리변수가 농업에 미치는 영향

대분류	중분류	소분류	농업에 미치는 영향
기후 노출	기온 및 강수량 변화	평균기온변화	농작물 재배 조건 변화 (부정적 영향)
		총강수량변화	농작물 재배 조건 변화 (부정적 영향)
	이상기상	일최고기온이 27도 이상인 날의 횟수	벼의 고온 한계 온도
		일강수량이 80mm이상인 날의 횟수	침수, 일조량 부족
		평균기온변동	이상 고온 및 저온 피해
		총강수량변동	집중호우 혹은 가뭄피해
	민감도	농업 자원적 특성	농업인구비중
경지면적규모			농업에 대한 경제적 의존도
지역평균경사도			집중호우 및 가뭄피해 증가
지역 농업적 특성		병해충피해가능성	병해충 피해 증가
		농업의 부가가치비중	농업에 대한 경제적 의존도
		농업부문 재해피해 규모	농업에 대한 재해피해 증가
적응 능력	경제적 능력과 거버넌스	농업예산비중	경제적 적응능력
		1인당 GRDP	
		재정자립도	
		공무원 비중	거버넌스에 의한 적응능력
		겸업농가 비중	경제적 적응능력
	물적 인프라	10년이상 한밭빈도 관개면적비중	가뭄, 홍수에 대한 적응능력
		농기계 보유농가구수 비중	농기계 활용능력
		컴퓨터 보유농가비중	전반적 정보습득 및 활용능력
		컴퓨터 농림어업활용비중	농업부문 정보습득 및 활용능력
	사회적 자본	30~60대 연령비중	전반적 기후변화 대응능력
		전문대학이상 교육 비중	
생산자조직 참여농가 비중			

다. 취약성평가 결과

(1) 대리변수의 기초통계량

표 2-22. 대리변수 기초통계량(시군별)

대분류	중분류	소분류	평균	표준편차	
기후 노출	기온 및 강수량변화	평균기온변화(℃)	0.5	0.0	
		총강수량변화(mm)	2.1	4.7	
	이상기상	일강수량이 80mm이상인 날의 횟수(회)	0.6	0.3	
		일최고기온이 27도 이상인 날의 횟수(회)	46.2	25.1	
		평균기온변동(℃)	0.4	0.0	
		총강수량변동(mm)	16.8	3.2	
민감도	농업자원적 특성	농업인구비중(%)	0.2	0.2	
		경지면적규모(ha)	10,592	7,296	
		지역평균경사도(deg)	13.1	4.9	
	지역농업적 특성	병해충피해가능성(%)	0.4	0.1	
		농업의 부가가치비중(%)	11.3	9.8	
		농업부문 재해피해 규모(천원/ha)*	-	-	
적응 능력	경제적 능력과 거버넌스	농업예산비중(%)	15.9	8.3	
		1인당 GRDP(백만원)	22.8	10.2	
		재정자립도(%)	25.0	15.1	
		공무원 비중(%)	1.0	0.6	
		겸업농가 비중(%)	47.6	12.9	
	물적인프라	10년이상 한발빈도 관개면적비중(%)	29.8	17.2	
		농기계 보유농가구수 비중(%)	152.9	46.5	
		컴퓨터 보유농가비중(%)*	-	-	
			컴퓨터 농림어업활용비중(%)*	-	-
	사회적자본	30~60대 연령비중(%)	69.6	7.1	
전문대학이상 교육 비중(%)		10.9	7.2		
생산자조직 참여농가 비중(%)		9.1	3.2		

주1) 기상청에서 조사 되지 않는 시·군은 공간내삽법을 이용하여 추정된 자료임.

2) *는 시군별 자료는 없으며, 도별 자료만 존재함을 나타냄.

(2) 대리변수의 가중치 분석에 AHP 적용

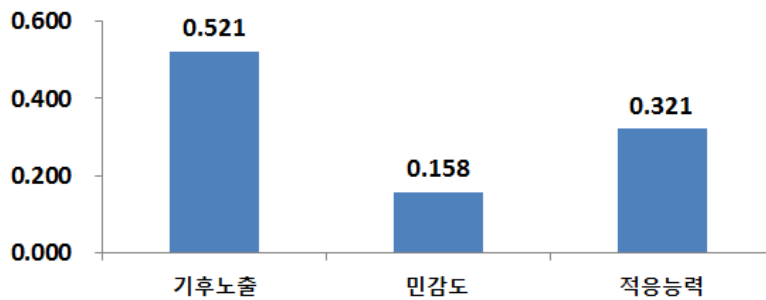
AHP분석을 이용하여 가중치를 도출하기 위해 다음과 같은 단계를 거쳤다. 기후변화가 농업부문에 미치는 취약성을 평가하기 위한 요소를 다단계 계층구조로 분류하였다. 선행연구들 검토를 기초로 취약성 평가 요소를 유형화하였다. 기후노출, 민감

도, 적응능력 등 3가지로 유형화하여 제1계층을 구성하였다. 다음으로 주요 요소를 묶어 2계층과 3계층의 세부 요소를 구성하였다. 이 과정을 통해 취약성 평가와 관련된 세부 요소를 총 24개로 구성하였다.

분석을 위하여 AHP 방식을 활용한 전문가 설문조사를 실시하였다. Satty(1994)에서 제안한 9점 척도를 적용하였으며, 쌍대비교 방식의 설문을 구성하였다. 설문조사는 2014년 12월 5일부터 12월 11일까지 관련 지속가능농업분야의 전문가와 정책담당자를 대상으로 조사대상으로 선정하여 전자우편 및 면담조사를 병행하였다. 정책연구자 3명, 농촌진흥청 연구자 7명 등 총 10개 응답을 회수하였다.

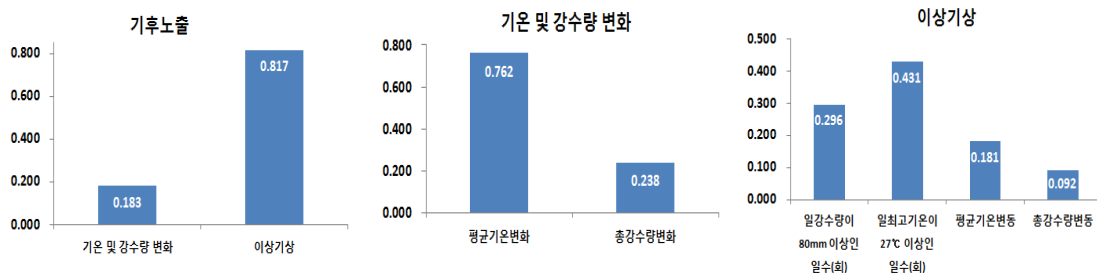
제1계층의 쌍대비교를 통한 가중치 계측결과를 보면, ‘기후노출’이 0.521로 가장 높았고, ‘적응능력(0.321)’, ‘민감도(0.158)’의 순으로 나타났다<그림 2-34 >.

그림 2-34. 제1계층의 가중치 계측결과



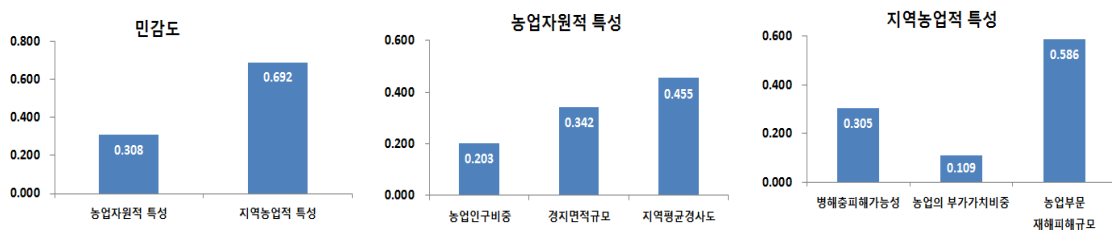
기후노출의 쌍대비교를 통한 가중치 계측결과를 보면, ‘이상기상’이 0.817로, ‘기온 및 강수량 변화(0.183)’보다 크게 높았다. 기온 및 강수량 변화의 경우 ‘평균기온 변화’가 0.762로, ‘총강수량 변화(0.238)’보다 크게 높았으며 이상기상의 경우 ‘일최고기온이 27℃ 이상인 일수’가 0.431로 가장 높았고, ‘일강수량이 80mm 이상인 일수(0.296)’, ‘평균기온변동(0.181)’, ‘총강수량변동(0.092)’의 순으로 높았다<그림 2-35>.

그림 2-35. 기후노출의 가중치 계측결과



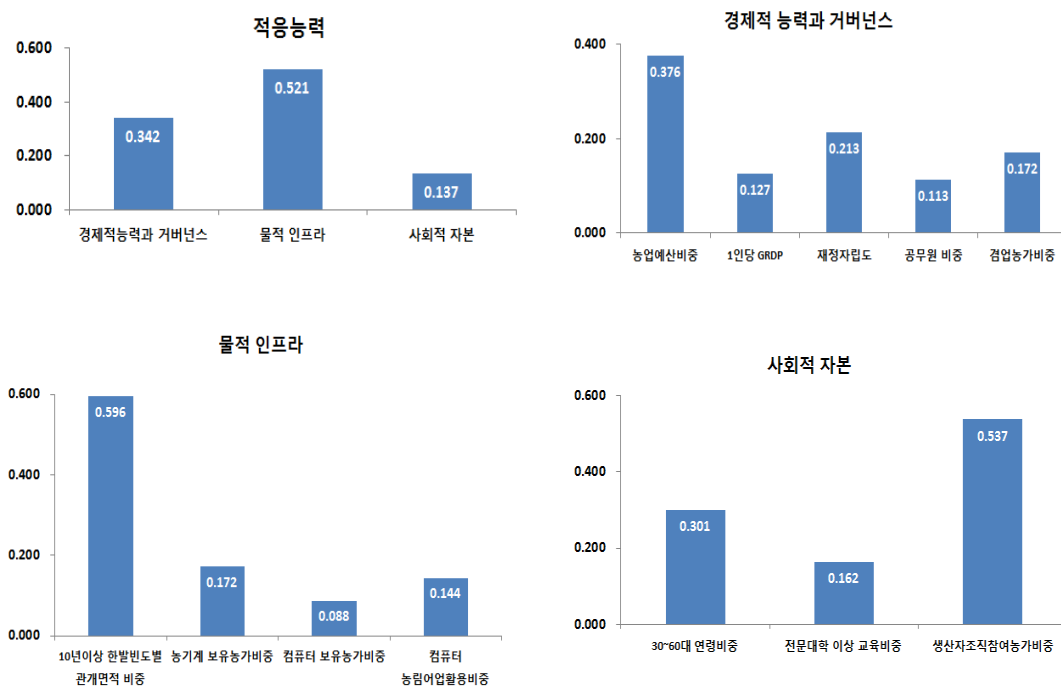
민감도의 쌍대비교를 통한 가중치 계측결과를 보면, ‘지역농업적특성’이 0.692로, ‘농업자원적 특성(0.308)’보다 크게 높았다. 지역농업적 특성 경우 ‘지역평균경사도’가 0.455로 가장 높았고, ‘경지면적규모(0.342)’, ‘농업인구비중(0.203)’의 순으로 높았다. 지역농업적 특성의 경우 ‘농업부문 재해피해규모’가 0.586으로 가장 높았고, ‘병해충피해가능성(0.305)’, ‘농업의 부가가치비중(0.109)’의 순으로 높았다<그림 2-36>.

그림 2-36. 민감도의 가중치 계측결과



적응능력의 쌍대비교를 통한 가중치 계측결과를 보면, ‘물적 인프라’가 0.521로 가장 높았고, ‘경제적능력과 거버넌스(0.342)’, ‘사회적 자본(0.137)’의 순으로 높았다. 경제적 능력과 거버넌스의 경우 ‘농업예산비중’이 0.376으로 가장 높았고, ‘재정자립도(0.213)’, ‘점업농가비중(0.172)’, ‘1인당 GRDP(0.127)’, ‘공무원 비중(0.113)’의 순으로 높았다. 물적 인프라의 경우 ‘10년이상 한밭빈도별 관개면적비중’이 0.596으로

그림 2-37. 적응능력의 가중치 계측결과



가장 높았고, ‘농기계 보유농가비중(0.172)’, ‘컴퓨터 농림어업활용비중(0.144)’, ‘컴퓨터 보유농가비중(0.088)’의 순으로 높았다. 사회적자본의 경우 ‘생산자조직 참여농가비중’이 0.537로 가장 높았고, ‘30~60대 연령비중(0.301)’, ‘전문대학 이상 교육비중(0.162)’의 순으로 높았다<그림 2-37>.

(2) 취약성 평가 결과

두 가지 표준화 방법에 따라 각 대리변수를 표준하고 하고 취약성 지표를 도출하였다. 스케일 재조정 방법과 Z-스코어 방법의 각각의 결과는 <표 2-23>와 같다.

스케일재조정 방법에 의한 도별 취약성 평가 결과를 살펴보면, 경기 -1.57, 제주 -0.68, 경남 0.00 등으로 나타나 이들 지역이 취약성이 높은 지역으로 분류된다. 반대로 취약성이 낮은 지역으로 평가된 지역은 전남 9.43, 충남 9.19, 전북 8.82 등이다. 취약성이 높은 지역의 대리변수를 살펴보면, 대부분 기후노출이 심한데 반해 적응능력이 낮은 것으로 보인다. 반대로 취약성이 낮은 지역들은 적응능력은 타 지역에 비해 크게 차이가 나지 않지만 기후노출과 민감도가 상대적으로 낮은 것으로 보인다.

스케일재조정 방법에 의한 시군별 취약성 평가 결과를 살펴보면, 제주시 -15.61, 남양주시 -12.29, 서귀포시 -12.05, 천안시 -9.59, 진주시 -9.55 등으로 나타나 이들 지역이 취약성이 높은 지역으로 분류된다. 반대로 취약성이 낮은 지역으로 평가된 지역은 당진시 15.59, 군산시 14.14, 서산시 13.31, 부안군 12.20, 장수군 11.54 등이다. 취약성이 높은 지역의 대리변수를 살펴보면, 대부분 기후노출이 심한데 반해 적응능력이 낮은 것으로 보인다. 반대로 취약성이 낮은 지역들은 기후노출과 민감도가 상대적으로 낮으나 적응능력은 높은 것으로 보인다.

표 2-23. 도별 취약성 평가 결과

지역	스케일 재조정				z-스코어			
	기후노출	민감도	적응능력	취약성	기후노출	민감도	적응능력	취약성
경기	60.76	52.04	50.34	-1.57	0.33	0.30	-0.07	-0.19
강원	35.94	54.31	46.07	5.61	-0.39	0.43	-0.20	0.01
충북	62.16	22.54	54.37	2.57	0.39	-0.59	0.09	-0.05
충남	48.07	42.43	59.87	9.19	-0.03	0.01	0.28	0.16
전북	46.87	35.82	57.19	8.82	-0.09	-0.19	0.23	0.17
전남	36.20	34.96	50.35	9.43	-0.44	-0.20	-0.01	0.18
경북	46.65	52.06	56.17	6.97	-0.07	0.34	0.16	0.08
경남	59.15	43.15	50.67	0.00	0.31	0.06	-0.01	-0.13
제주	47.68	34.51	39.50	-0.68	-0.01	-0.16	-0.46	-0.22

표 2-24. 시군별 상위 15개(스케일재조정기준) 취약성 평가 결과

지역	스케일 재조정				z-스코어			
	기후 노출	민감도	적응 능력	취약성	기후 노출	민감도	적응 능력	취약성
제주시	54.67	68.76	21.92	-15.61	0.42	2.63	-0.77	-0.80
남양주시	55.75	15.14	20.17	-12.29	0.27	-0.75	-0.84	-0.48
서귀포시	41.59	81.82	21.21	-12.05	-0.02	3.13	-0.79	-0.68
천안시	64.94	17.63	32.49	-9.59	0.67	-0.60	-0.23	-0.33
진주시	61.01	35.70	32.65	-9.55	0.51	0.45	-0.20	-0.34
공주시	59.26	26.45	30.91	-8.99	0.42	-0.27	-0.28	-0.29
김천시	57.70	39.30	33.08	-8.35	0.51	0.57	-0.16	-0.33
춘천시	50.31	30.56	27.02	-7.92	0.16	0.14	-0.45	-0.31
이천시	58.61	16.80	30.99	-7.85	0.37	-0.66	-0.30	-0.24
제천시	49.49	27.04	26.60	-7.52	0.15	-0.18	-0.50	-0.31
금산군	51.71	25.90	28.29	-7.39	0.16	-0.31	-0.42	-0.26
가평군	51.81	24.56	28.55	-7.18	0.19	-0.38	-0.41	-0.25
합천군	59.62	47.66	38.21	-7.12	0.49	0.90	0.07	-0.23
연기군	61.76	18.24	35.24	-6.96	0.53	-0.61	-0.08	-0.19
청도군	50.46	51.29	32.43	-6.93	0.13	1.02	-0.16	-0.22

표 2-25. 시군별 하위 15개(스케일재조정기준) 취약성 평가 결과

지역	스케일 재조정				z-스코어			
	기후 노출	민감도	적응 능력	취약성	기후 노출	민감도	적응 능력	취약성
당진시	33.34	20.80	57.62	15.59	-0.53	-0.47	0.98	0.76
군산시	44.70	6.96	60.94	14.14	-0.07	-1.20	1.17	0.75
서산시	26.06	21.22	47.98	13.31	-0.78	-0.45	0.55	0.63
부안군	35.94	26.22	53.97	12.20	-0.37	-0.45	0.79	0.60
장수군	31.59	31.63	50.41	11.54	-0.67	-0.27	0.64	0.62
김포시	40.95	11.61	53.92	11.50	-0.26	-0.89	0.79	0.59
해남군	20.90	46.33	44.60	11.35	-1.03	0.71	0.36	0.52
철원군	36.20	39.54	51.01	9.38	-0.48	0.49	0.67	0.50
영암군	40.94	30.32	51.09	8.39	-0.28	0.05	0.69	0.47
장흥군	29.64	40.29	43.99	8.17	-0.64	0.41	0.34	0.39
태안군	23.25	23.49	36.45	8.13	-0.89	-0.40	-0.05	0.35
서천군	45.58	23.29	52.71	8.05	-0.01	-0.41	0.73	0.42
진도군	22.06	40.73	38.22	8.03	-0.95	0.43	0.03	0.35
영덕군	26.20	43.23	40.89	7.61	-0.73	0.70	0.18	0.32
영광군	33.75	28.96	43.26	7.17	-0.47	-0.02	0.28	0.33

라. 시사점

UNDP의 기후변화에 대한 민감도와 적응능력의 함수로 정의되는 농업부문의 취약성을 평가하였다. 이 정의에 따르면 기후변화에 대한 노출이 시스템의 민감도에 따라 잠재적 영향으로 나타나게 되고, 이 시스템이 가지고 있는 적응능력에 따라 최종적인 시스템의 취약성이 결정되게 된다. 이와 같이 적응능력을 고려한 취약성 평가는 적절하고 적합한 적응수단의 채택에 기여한다.

이 연구에서는 스케일재조정과 z-스코어 방법을 이용하여 도별, 시군별로 기후변화의 농업에 미치는 취약성을 평가하였다. 대리변수 간 가중치를 적용하기 위해 AHP 분석을 시도하였다. AHP 분석을 위해 기후노출, 민감도, 적응능력 등 3가지로 유형화하였고, 취약성 평가와 관련된 세부 요소를 총 24개로 구성하여 전문가들을 대상으로 설문조사를 하였다. AHP 분석 결과는 대리변수간 가중치를 적용하는데 이용되었다.

도별 취약성 평가 결과를 살펴보면, 경기(-1.57), 제주(-0.68), 경남(0.00) 등이 취약성이 높은 지역으로 분류된다. 반대로 취약성이 낮은 지역으로 평가된 지역은 전남(9.43), 충남(9.19), 전북(8.82) 등이다. 취약성이 높은 지역은 기후노출이 심한데 반해 적응능력이 낮은 것으로 보인다. 반대로 취약성이 낮은 지역들은 기후노출과 민감도가 상대적으로 낮은 것으로 보인다.

시군별 취약성 평가 결과를 살펴보면, 제주시(-15.61), 남양주시(-12.29), 서귀포시(-12.05), 천안시(-9.59), 진주시(-9.55) 등이 취약성이 높은 지역으로 분류된다. 반대로 취약성이 낮은 지역으로 평가된 지역은 당진시(15.59), 군산시(14.14), 서산시(13.31), 부안군(12.20), 장수군(11.54) 등이다. 취약성이 높은 지역은 대부분 기후노출이 심한데 반해 적응능력이 낮은 것으로 보인다. 반대로 취약성이 낮은 지역들은 기후노출과 민감도가 상대적으로 낮으나 적응능력은 높은 것으로 보인다.

취약성이 높은 지역은 농업예산비중, 공무원비율, 10년이상 한밭빈도 관개면적비중, 재정자립도 등이 낮다. 따라서 이들 지역을 중심으로 경제적 능력과 거버넌스를 보완하고 지역의 높은 기후노출과 민감도를 반영한 농업부문의 기후변화 대책을 수립할 필요가 있다.

우선 농업 예산 비중을 확대시키고, 기후변화 영향에 대한 모니터링 강화, 기후변화에 적응하기 위한 농업 기술 개발, 신규 작목 도입, 저수지, 양수장, 관정 등 물적 인프라 확충에 재정지출을 확대할 필요가 있다. 종합적인 취약성 지표를 이용한 지역별 평가는 기후변화 적응을 위한 자원의 투입이 어느 지역에서 더욱 필요한지를 알려주는 근거를 제시한다. 세부 변수별 평가 결과를 통해 특정 지역에서 어떤 요소가 취약성을 높이는지를 확인하여 이에 대한 보완책 마련에 필요한 정보를 얻을 수 있다(이버들 등, 2011).

SQ5. 귀하는 국내에서 열대·아열대 과일이 재배되고 있는지 알고 있습니까?

- 1) 알고 있다 2) 모른다

SQ6. 다음 보기 중 귀하께서 최근 1년 이내 직접 구입하신 열대·아열대 과일은 무엇입니까?

모두 선택해 주십시오.

- (1) 망고 (2) 키위 (3) 파파야메론 (4) 바나나 (5) 파인애플
 (6) 아보카도 (7) 용과 (8) 그린파파야 (9) 패션프루트 (10) 구아바
 (11) 아테모야 (12) 계육 (13) 페이조아 (14) 무화과 (15) 석류
 (16) 보기 중 없음

▶'(1) 망고' 선택하지 않을 시 조사 중단

▶'(13) 보기 중 없음' 선택시 다른 보기 비활성화 처리

SQ7. 귀하께서 최근 1년 이내 직접 구입하신 열대·아열대 과일의 원산지는 어디였습니까?

구입 경험 열대·아열대 과일	원산지
(1) 망고	① 국내산 ② 수입산 ③ 국내산과 수입산 모두 구입
(2) 키위	① 국내산 ② 수입산 ③ 국내산과 수입산 모두 구입
(3) 파파야메론	① 국내산 ② 수입산 ③ 국내산과 수입산 모두 구입
(4) 바나나	① 국내산 ② 수입산 ③ 국내산과 수입산 모두 구입
(5) 파인애플	① 국내산 ② 수입산 ③ 국내산과 수입산 모두 구입
(6) 아보카도	① 국내산 ② 수입산 ③ 국내산과 수입산 모두 구입
(7) 용과	① 국내산 ② 수입산 ③ 국내산과 수입산 모두 구입
(8) 그린파파야	① 국내산 ② 수입산 ③ 국내산과 수입산 모두 구입
(9) 패션프루트	① 국내산 ② 수입산 ③ 국내산과 수입산 모두 구입
(10) 구아바	① 국내산 ② 수입산 ③ 국내산과 수입산 모두 구입
(11) 아테모야	① 국내산 ② 수입산 ③ 국내산과 수입산 모두 구입
(12) 계육	① 국내산 ② 수입산 ③ 국내산과 수입산 모두 구입
(13) 페이조아	① 국내산 ② 수입산 ③ 국내산과 수입산 모두 구입
(14) 무화과	① 국내산 ② 수입산 ③ 국내산과 수입산 모두 구입
(15) 석류	① 국내산 ② 수입산 ③ 국내산과 수입산 모두 구입

▶SQ6에서 응답된 보기만 제시

▶'(1) 망고'의 원산지가 '① 국내산', '③ 국내산과 수입산 모두 구입'이 아닌 경우 조사 중단

기후변화 인식과 국내산 망고 과일 구입

1. 귀하께서는 지구온난화로 지구의 연평균 기온이 올라가고 있다는 것을 알고 계십니까?
- (1) 전혀 모르고 있었다
 (2) 들어본 적은 있다
 (3) 잘 알고 있다

2. 귀하께서는 지구온난화로 인한 기온 상승이 가속화 될 것으로 보십니까?

전혀 그렇지 않다	그렇지 않다	보통이다	그렇다	매우 그렇다
①.....	②.....	③.....	④.....	⑤.....

3. 귀하는 열대·아열대 과일(바나나, 망고, 키위, 파인애플 등)이 후숙과일(덜 익은 과일을 거두어 들인 뒤에 시간을 두고 익혀먹는 과일) 이어서 오랜 시간이 지나면 까맣게 변색 되는지를 알고 계셨습니까?
- (1) 알고 있었다
 (2) 몰랐다

※ 지금부터 국내에서 재배되고 있는 열대·아열대 과일 가운데 가장 많이 재배되고 있는 **국내산 망고**에 대해 질문하겠습니다. ‘국내산 망고’는 국내에서 온도를 더하는 방법을 통해 생산된 과일을 말하며, 외국에서 재배되어 들어오는 수입과일과 구분됩니다.

4. 귀하께서는 최근 1년 동안 국내산 망고를 얼마나 자주 구매하셨습니까?
- (1) 일주일에 1회 이상 (2) 한달에 2~3회
 (3) 한달에 1회 정도 (4) 3개월에 1회 정도
 (4) 6개월에 1회 정도 (5) 1년에 1번 정도

- 4-1. **[SQ7의 망고 원산지에서 3번 응답자만]** 그렇다면, 귀하께서는 최근 1년 동안 수입산 망고를 얼마나 자주 구매하셨습니까?
- (1) 일주일에 1회 이상 (2) 한달에 2~3회
 (3) 한달에 1회 정도 (4) 3개월에 1회 정도
 (4) 6개월에 1회 정도 (5) 1년에 1번 정도

5. 귀하께서는 최근 1년 이내 구매하신 국내산 망고의 종류는 무엇입니까? 모두 선택해 주십시오.

- (1) 옐로우망고 (2) 애플망고 (3) 흑망고
 (4) 옥망고 (5) 왕망고 (6) 기타()

6. 귀하께서 구매하신 국내산 망고의 주 구입단위는 어떻게 되십니까?

- (1) 낱개
 (2) 박스(소) - 2kg 이하(크기에 따라 3~7개 정도)
 (3) 박스(중) - 3kg(크기에 따라 5~12개 정도)
 (4) 박스(대) - 5kg(크기에 따라 9~20개 정도)
 (5) 기타()

7. 귀하께서 구매하신 국내산 망고의 1회 평균 구입 금액은 얼마입니까?

- (1) 2만원 미만 (2) 2만~2만 5천원 미만 (3) 2만 5천~3만원 미만
 (4) 3만~3만 5천원 미만 (5) 3만 5천원~4만원 미만 (6) 4만~5만원 미만
 (7) 5만~7만원 미만 (8) 7만~10만원 미만 (9) 10만원 이상

8. 귀하께서 국내산 망고를 구매하시는 주된 이유는 무엇입니까?

- (1) 맛과 풍미가 좋아서
 (2) 국내산이 더 신선할 것 같아서
 (3) 가족의 건강을 위해서
 (4) 주변친지나 대중매체의 홍보와 추천 때문에
 (5) 선물을 하기 위해서
 (6) 기타()

9. 귀하께서 국내산 망고를 주로 구입하시는 장소는 어디입니까? 우선 순위로 2가지를 선택해 주십시오.

1순위		2순위	
-----	--	-----	--

- (1) 백화점(백화점 온라인 쇼핑몰 포함)
 (2) 대형할인점(대형할인점 온라인 쇼핑몰 포함)
 (3) 동네 과일 소매점 (4) 재래시장
 (5) 동네 슈퍼마켓 (6) 지역특산물 오프라인 판매점
 (7) 생협 등 친환경 농산물 판매점 (8) 인터넷 직거래 사이트/생산지역 특산물 사이트
 (9) 인터넷 쇼핑몰 (10) 기타()

▶1순위만 필수 응답

10. 국내산 망고를 [9번 1순위 장소 제시]에서 구입하시는 주된 이유는 무엇입니까?

- (1) 거리가 가까워서 (2) 주문 및 배송이 간편해서
- (3) 맛 등 품질이 좋아서 (4) 값이 싸서 (5) 포장 단위가 다양해서
- (6) 믿을 수 있어서
- (7) 기타()

▶문9번에서 1순위 1,2,8,9번 응답자의 경우만 2번 보기 활성화 처리

11. 국내산 망고를 구입할 때 고려사항은 무엇입니까? 가정소비용과 선물용 각각에 대해 우선 순위로 3가지를 선택해 주십시오.

11-1 가정소비용의 경우

1순위		2순위		3순위	
-----	--	-----	--	-----	--

- (1) 맛 (2) 신선도 (3) 가격
- (4) 안전성 (5) 크기 (6) 색깔 (7) 모양
- (8) 영양가 (9) 포장 상태 (10) 기타()

▶1순위만 필수 응답

11-2. 선물용의 경우

1순위		2순위		3순위	
-----	--	-----	--	-----	--

- (1) 맛 (2) 신선도 (3) 가격
- (4) 안전성 (5) 크기 (6) 색깔 (7) 모양
- (8) 영양가 (9) 포장 상태 (10) 기타()

▶1순위만 필수 응답

12. 국내산 망고의 맛, 신선도, 외관 등 전반적인 품질에 대해 어느 정도 만족하십니까?

매우 불만족	약간 불만족	보통	약간 만족	매우 만족
①.....	②.....	③.....	④.....	⑤.....

13. 국내산 망고의 품질 개선사항이 있다면 우선 순위로 2가지를 선택해 주십시오. 가격 부분을 제외한 품질 관련하여 응답해 주시기 바랍니다.

1순위		2순위	
-----	--	-----	--

- (1) 맛 (2) 안전성 (3) 외관
- (4) 균일한 품질 (5) 신선도 (6) 당도 (7) 재배지역 표시
- (8) 포장 단위의 세분화 (9) 기타()

▶1순위만 필수 응답

※ 다음은 국내산 망고와 수입산 망고를 비교 평가하는 문항입니다. 문항을 잘 읽어보시고, 응답해 주시기 바랍니다.

14. 수입산과 비교하여 국내산 망고의 가격수준에 대해서 어떻게 생각하시는지 해당란에 응답해 주십시오.

매우 낮다 (현재 가격보다 많이 높아야 한다)	낮은 편이다 (현재 가격보다 조금 더 높아야 한다)	적당하다	약간 높다	매우 높다
①.....	②.....	③.....	④.....	⑤.....

15. 수입산과 비교하여 국내산 망고의 맛, 신선도, 외관 등 전반적인 품질 수준에 대해서 어떻게 생각하십니까?

매우 낮다	낮은 편이다	수입산과 비슷하다	약간 높다	매우 높다
①.....	②.....	③.....	④.....	⑤.....

16. 수입산과 비교하여 국내산 망고의 안전성(농약, 방부제 등 사용 관련) 수준에 대해서 어떻게 생각하십니까?

매우 낮다 (전혀 안전하지 않다)	낮은 편이다 (안전하지 않다)	수입산과 비슷하다	약간 높다 (안전하다)	매우 높다 (매우 안전하다)
①.....	②.....	③.....	④.....	⑤.....

17. 귀하께서 구입하신 국내산 망고의 가격대비 품질(맛, 신선도, 외관 등) 만족도는 어떠 하셨습니까?

매우 불만족	약간 불만족	보통	약간 만족	매우 만족
①.....	②.....	③.....	④.....	⑤.....

국내산 망고 소비확대 방안

18. 귀하의 국내산 망고 구입에 있어 애로사항이나 구입욕구를 저하시키는 요인은 무엇입 니까? 우선 순위로 2가지를 선택해 주십시오.

1순위		2순위	
-----	--	-----	--

- (1) 비싼 가격
- (2) 적당한 구입처를 찾기 어려움
- (3) 맛 등 품질이 좋지 않음
- (4) 지속적인 공급이 되지 않음
- (5) 포장단위(용량)가 다양하지 않음
- (6) 모양, 색상 등 외관이 수입산에 비해 좋지 않음
- (7) 기타()

▶1순위만 필수 응답

19. 귀하의 **향후 국내산 망고의 소비의향**은 어떠하십니까?

- (1) 지속적으로 소비할 예정이며 여건이 허락된다면 구입비중도 확대할 것이다
- (2) 구입비중은 현수준을 유지하지만 지속적으로 구입할 것이다
- (3) 지속적으로 소비할 예정이지만 구입 비중을 축소할 것이다
- (4)향후에는 소비할 의향이 없다
- (5) 잘 모르겠다

20. 현재 국내산 망고는 수입산에 비해 2~3배 정도 높은 가격에 판매되고 있습니다.

귀하는 **수입산 가격을 1로 볼 때, 국내산 망고 구입 시 몇 배까지 지불하실 의향**이 있습니까?

※ 현재 시중에 판매되고 있는 필리핀, 태국 등 수입산 망고의 경우, 날개 중량(약 400g 기준) 1개 가격이 5,000원 내외입니다.

‘수입산’ 망고 과일 가격을 1로 볼 때 ‘국내산’ 망고 지불 의사 금액						
1.5배 미만	1.5배~2배 미만	2배~2.5배 미만	2.5배~3배 미만	3배~3.5배 미만	3.5배~4배 미만	4배 이상
①.....	②.....	③.....	④.....	⑤.....	⑥.....	⑦.....

21. 귀하의 **국내산 망고의 소비확대를 위해 가장 필요한 사항**은 무엇이라고 생각하십니까?

우선 순위로

1순위	2순위
-----	-----

2가지를 선택해 주십시오.

- (1) 적절한 가격수준의 공급
- (2) 맛 등 품질 개선
- (3) 포장·디자인 개선
- (4) 식품안전성 제고
- (5) 광고·홍보 확대
- (6) 브랜드화 강화
- (7) 다양한 가공제품 개발
- (8) 기타()

▶1순위만 필수 응답

배경 질문

DQ1. 귀하의 **최종 학력**은 어떻게 되십니까?

- (1) 중학교 졸업 이하
- (2) 고등학교 졸업
- (3) 대학교 재학
- (4) 대학교 졸업(전문대 포함)
- (5) 대학원 재학
- (6) 대학원졸 이상

DQ2. 귀하의 한달 평균 총소득(세금을 제외한 순수한 소득, 임대 및 이자소득 포함)은 얼마입니까?

- | | |
|-----------------------|----------------------|
| (1) 250만원 미만 | (2) 250만원 ~ 350만원 미만 |
| (3) 350만원 ~ 450만원 미만 | (4) 450만원 ~ 550만원 미만 |
| (5) 550만원 ~ 700만원 미만 | (6) 700만원 ~ 800만원 미만 |
| (7) 800만원 ~ 1000만원 미만 | (8) 1000만원 이상 |

DQ3. 귀하의 직업은 다음 중 어디에 해당되십니까?

- 1) 농/임/어업
- 2) 자영업(상업, 소규모 자영업, 중규모 이상사업, 개인택시기사 등)
- 3) 판매/서비스직(상점 점원, 판매직, 영업직, 사립 유치원 교사, 사설학원강사, 운전기사, 서비스업소 종업원, 보험설계사, 간호사 등)
- 4) 기능/숙련공(생산직, 숙련공, 기능공, 선반공, 목공 등)
- 5) 일반 작업직(청소원, 경비, 방범, 배달원, 일용직 등)
- 6) 사무/기술직(차장급 이하 사무직, 엔지니어, 6급 이하 공무원, 직업군인, 평교사 등)
- 7) 경영/관리직(5급 이상 공무원, 기업체 부장이상, 교장·교감 등)
- 8) 전문/자유직(변호사, 의사, 약사, 건축사, 대학교수 등)
- 9) 가정 주부(가사에만 종사하는 부인)
- 10) 학생
- 11) 무직
- 12) 기타()

DQ4. 귀하는 외국에서 6개월 이상 거주한 경험이 있으십니까?

- (1) 있다 → DQ4-1 (2) 없다 → **설문 종료**

DQ4-1. 귀하께서 6개월 이상 거주한 나라는 다음 중 어느 지역입니까?

- | | |
|------------------------|-----------------------|
| (1) 아메리카 | (2) 아프리카 |
| (3) 유럽 | (4) 오세아니아(호주, 뉴질랜드 등) |
| (5) 동아시아(중국, 일본 등) | (6) 동남아시아 |
| (7) 북부, 서남, 남부, 중앙 아시아 | |

장시간 수고 많으셨습니다.

수집된 자료는 소비자의 소중한 의견으로 활용하겠습니다. 감사합니다.

<부록 2-2> 기후변화 취약성 평가지표 관련 전문가 조사표

KREI 한국농촌경제연구원 (www.krei.re.kr)

「기후변화 취약성 평가 지표 관련 전문가 조사」

우리 연구원은 “농림수산물 기후변화 영향 분석 및 영향평가 모델 구축”에 관한 연구를 수행하면서 농업부문의 기후변화 취약성 평가를 위한 변수와 관련하여 관련 전문가 여러분을 대상으로 전문가 조사를 하고자 합니다. 본 조사결과는 연구자료로 활용되는 중요한 조사입니다. 따라서 조사 대상이신 전문가 여러분의 적극적인 협조를 부탁드립니다. 조사표에 관한 문의사항은 한국농촌경제연구원 자원환경연구부로 연락주시기 바랍니다.

조사기관: 한국농촌경제연구원 자원환경연구부

주소: (우)130-710, 서울시 동대문구 회기로 117-3

조사관련 문의: 김창길 선임연구위원 02-3299-4265, changgil@krei.re.kr

정학균 연구위원 02-3299-4248, hak8247@krei.re.kr

문동현 연구원 02-3299-4340, dhmoon0326@krei.re.kr

※ 응답자 정보

소 속		직 급	
성 명		전화번호	
이메일주소		계좌번호	

※ 본 설문서의 각 문항을 답변하는 요령은 다음과 같습니다.

만약 정책 방안을 결정함에 있어서 정책A의 중요성을 정책B의 중요성과 비교하여

“비슷하게” “약간” “매우” “확실히” “절대로”	중요하면	숫자 1 숫자 3 숫자 5 숫자 7 숫자 9	로 응답하여 주십시오.
--	------	--------------------------------------	--------------

참고로 “매우”와 “확실히”의 중간 정도로 생각되면 5와 7의 중간수인 6으로 응답할 수 있음.

- 응답사례: 농업부문 기후변화 취약성 평가를 위한 ”대리변수”의 중요도를 판단함에 있어 변수A(기후노출)와 변수B(민감도)를 비교하여 **변수A(기후노출)가 변수 B(민감도)보다 매우 중요할 경우**의 상대적인 중요도는 다음과 같이 $\sqrt{\quad}$ 로 표시하여 응답합니다.

기후변화 취약성 대리변수																		
변수A	A가 절대로 중요		A가 확실히 중요		A가 매우 중요		A가 약간 중요		서로 비슷한 정도		B가 약간 중요		B가 매우 중요		B가 확실히 중요		B가 절대로 중요	변수B
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
기후노출					√													민감도

○ 효과적인 설문응답을 위하여 전체적인 구조도와 각 대리변수가 어떤 의미인지 아래 표를 참고해 주십시오.

부표1. 대리변수가 농업에 미치는 영향

대분류	중분류	소분류	농업에 미치는 영향
기후 노출 ¹⁾	기온 및 강수량 변화	• 평균기온변화(℃) =2008~2012평균기온-1983~1987평균기온	농작물 재배 조건 변화 (부정적 영향)
		• 총강수량변화(mm) =2008~2012총강수량평균-1983~1987총강수량평균	농작물 재배 조건 변화 (부정적 영향)
	이상기상	• 일강수량이 80mm이상인 날의 횟수(회)	침수, 일조량 부족
		• 일최고기온이 27도 이상인 날의 횟수(회)	벼의 고온 한계 온도
		• 평균기온변동(℃) =AVE(ABS(각연도평균기온-1983~2012평균기온))	이상 고온 및 저온 피해
		• 총강수량변동(mm) =AVE(ABS(각연도평균강수량-1983~2012평균강수량))	집중호우 혹은 가뭄피해
민감도	농업 자원적 특성	• 농업인구비중(%) =농가인구/전체인구*100	농업농사자의 경제적 의존도
		• 경지면적규모(ha)	농업에 대한 경제적 의존도
		• 지역평균경사도(deg)	집중호우 및 가뭄피해 증가
지역 농업적 특성		• 병해충피해가능성(%) =주요병해충 피해면적/논면적*100	병해충 피해 증가
		• 농업의 부가가치비중(%) =농림어업부가가치/총부가가치*100	농업에 대한 경제적 의존 도
		• 농업부문 재해피해 규모(천원/ha) ²⁾ =농경지 피해액/총경지면적	농업에 대한 재해피해 증 가
경제적 능력과 거버넌스		• 농업예산비중(%) =농림해양수산예산/전체예산*100	경제적 적응능력
		• 1인당 GRDP(백만원) =지역내총생산/전체인구	
		• 재정자립도(%) =(지방세+세외수입)/일반회계예산*100	
		• 공무원 비중(%) =공무원정원수/전체인구*100	거버넌스에 의한 적응능력
		• 겸업농가비중(%) =겸업농가수/전체농가수*100	경제적 적응능력
적응 능력	물적 인프라	• 10년이상 한밭빈도별 관개면적비중 ³⁾ =10년이상 한밭빈도별관개면적/전체경지면적*100	가뭄, 홍수에 대한 적응능 력
		• 농기계보유농가가구수비중(%) =농기계보유 농가가구수/전체 농가가구수*100	농기계활용능력
		• 컴퓨터 보유농가비중(%) ²⁾ =컴퓨터 보유농가/전체농가*100	전반적 정보습득 및 활용 능력
		• 컴퓨터 농림어업활용비중(%) ²⁾ =컴퓨터 활용농가/컴퓨터 보유농가*100	농업부문 정보습득 및 활 용능력
사회적 자본		• 30~60대 연령비중(%) =30~60대 연령인구/전체인구*100	전반적 기후변화 대응능력
		• 전문대학 이상 교육비중(%)*100 =전문대학 이상 교육인구/전체인구	
		• 생산자조직참여농가비중 =생산자조직참여농가/전체농가*100	

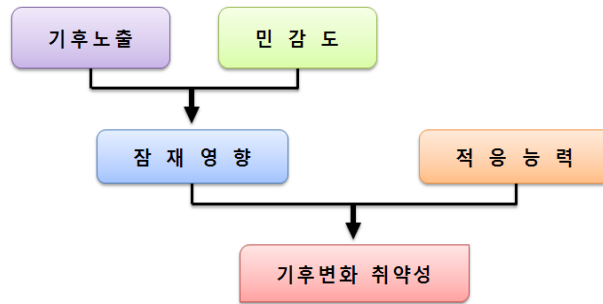
주1) 기상청에서 조사 되지 않는 시·군은 공간내삽법을 이용하여 추정된 자료임.

2) 시군별 자료는 없으며, 도별 자료만 존재함.

3) 10년 이상 가뭄에도 관개 가능한 면적 비중을 의미함.

※ 취약성은 어떤 시스템의 기후변화에 대한 민감도와 적응능력의 함수로 정의됩니다. 기후변화에 대한 노출이 시스템의 민감도에 따라 잠재적 영향(potential impacts)으로 나타나게 되고, 이 시스템이 가지고 있는 적응능력에 따라 아래 <그림>과 같이 최종적인 시스템의 취약성이 결정됩니다. 이와 같이 적응능력을 고려한 취약성 평가는 적절하고 적합한 기후변화 적응수단 채택에 기여하게 됩니다.

<그림> 기후변화 취약성의 개념적 틀



1. 기후변화 취약성 평가를 위한 3가지 항목의 상대적인 중요도를 평가하시고 해당 부분에 √ 표하여 주십시오.

기후변화 취약성 대리변수																			
변수A	A가 절대로중요		A가 확실히중요		A가 매우중요		A가 약간중요		서로비슷한정도		B가 약간중요		B가 매우중요		B가 확실히중요		B가 절대로중요		변수B
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
기후노출																			민감도
기후노출																			적응능력
민감도																			적응능력

- ※ 기후노출은 기후 특성, 기후 변동, 극한 기후의 빈도와 크기 등 기후와 관련된 자극에 현재 시스템이 노출되는 정도(부정적 영향)를 의미함.
- ※ 민감도는 기후변화의 자극에 의해 해당 시스템이 영향을 받는 정도(부정적 영향)를 측정하는 것임.
- ※ 적응능력은 기후노출의 부정적인 측면을 줄일 수 있는 능력(긍정적 영향)으로 정의됨.

4-2. **물적 인프라**의 세부 대리변수의 상대적인 중요도를 평가하시고 해당 부분에 √ 표하여 주십시오.

		적응능력 관련 변수																			
변수A	A가 절대로 중요	A가 확실히 중요	A가 매우 중요	A가 약간 중요	서로 비슷한 정도	B가 약간 중요	B가 매우 중요	B가 확실히 중요	B가 절대로 중요										변수B		
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9				
10년이상 한발빈도별 관개면 적비중																				농기계 보유 농가비중	
10년이상 한발빈도별 관개면 적비중																					컴퓨터 보유 농가비중
10년이상 한발빈도별 관개면 적비중																					컴퓨터 농림어업활용비중
농기계 보유 농가비중																					컴퓨터 보유 농가비중
농기계 보유 농가비중																					컴퓨터 농림어업활용비중
컴퓨터 보유 농가비중																					컴퓨터 농림어업활용비중

4-3. **사회적 자본**의 세부 대리변수의 상대적인 중요도를 평가하시고 해당 부분에 √ 표하여 주십시오.

		적응능력 관련 변수																			
변수A	A가 절대로 중요	A가 확실히 중요	A가 매우 중요	A가 약간 중요	서로 비슷한 정도	B가 약간 중요	B가 매우 중요	B가 확실히 중요	B가 절대로 중요										변수B		
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9				
30~60대 연령비중																					전문대학 이상 교육비중
30~60대 연령비중																					생산자조직참여 농가비중
전문대학 이상 교육비중																					생산자조직참여 농가비중

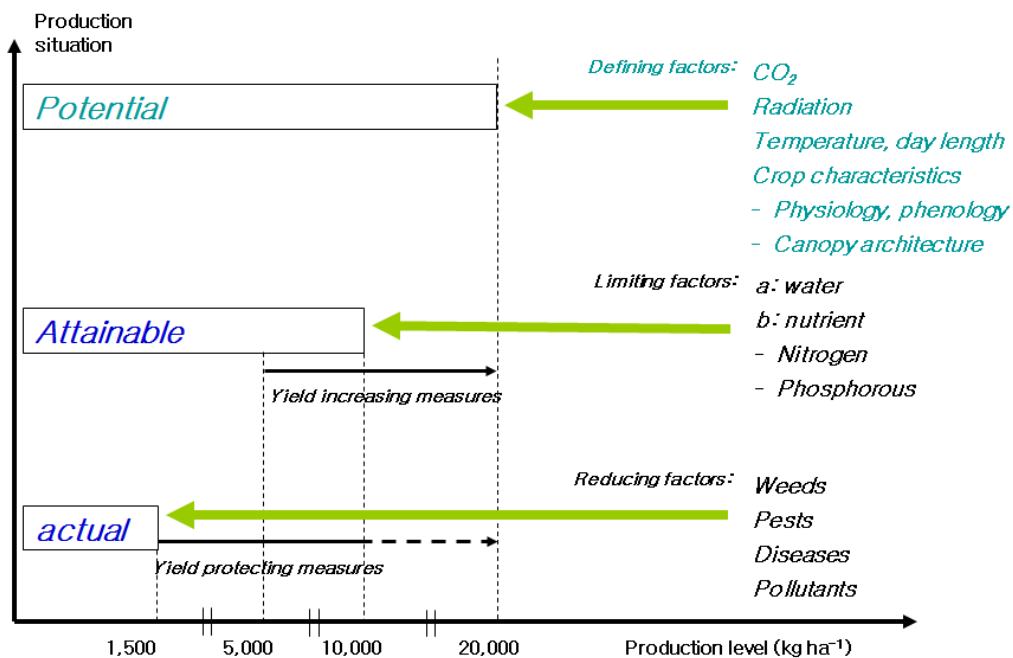
제3절 기후변화가 농작물에 미치는 영향평가 및 분석 모듈 구축 (1협동과제)

1. 이론적 및 실험적 접근 방법

가. 이론적 접근방법

기후변화가 농작물에 미치는 영향 평가 및 모듈 구축에 있어 작물생육 및 수량을 재현할 수 있는 시스템으로 작물생육모형이 채택되었다. 작물생육모형의 이론적 바탕은 첫째, 일사량, 이산화탄소, 온도, 작물의 유전적 특성 등에 의하여 잠재 생산량/수량이 결정되며, 둘째로 물 과 더불어 질소, 인산 등과 같은 작물 영양요소에 의하여 획득 가능한 생산량/수량이 결정되고, 마지막으로 잡초, 병해충, 기타 오염원 등에 의하여 실제 생산량/수량이 결정된다는 것이다(Lövenstein 등, 1992; 그림 3-1). 그러므로 이러한 이론적 바탕 하에 개발된 작물모형은 미래 기후변화 시나리오 하에서의 작물생육 및 생산량 영향의 재현이 가능할 것이라고 가정하였다.

그림 3-1. 작물생산성에 영향을 주는 생물리 요소들



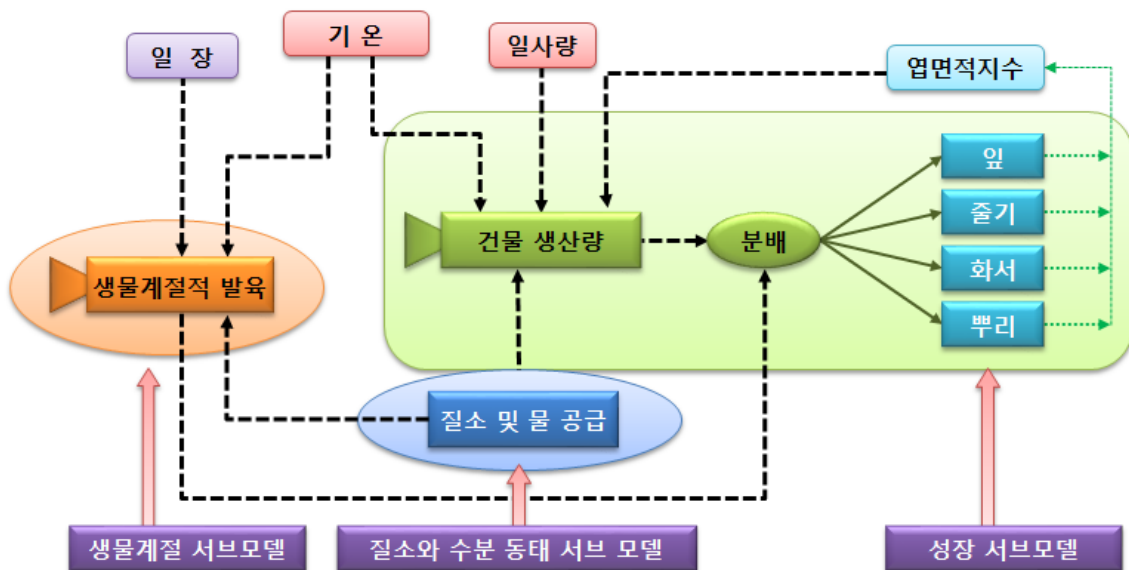
자료: Lövenstein 등(1992)

나. 실험적 접근 방법

본 연구 과제를 수행하기 위하여 국제 수준의 연구자들에 의하여 가장 많이 사용되어지는 신뢰할만한 작물모형들 중에 연구 진행을 위하여 가장 적합한 작물모형의 선정이 선행되었다. 몇 가지 후보군 중에서 농작물에 대한 기후변화 영향 연구에의 사용 빈도, 영향 평가를 위한 모형의 적절성 및 신뢰도, 국내 상황에의 적용성 등을 종합적으로 고려했을 때 농업기술이전 의사결정지원시스템(Decision Support System for Agrotechnology Transfer, DSSAT) 모형(Jones 등, 2003)이 가장 적합한 모형으로 판단되어 선정하였다. DSSAT 모형은 주요 농작물을 포함한 다양한 작물(22개)의 생육 특성 및 수량, 토양 수분 및 비옥도 특성, 증발산량 등의 모의가 가능할 뿐만 아니라 작물의 병해충 영향 모의 및 작물 생산성과 연계한 경제성 분석 모의에도 적용이 가능하다. DSSAT 모형의 공통적인 작물생육모의 과정은 아래 <그림 3-2>에 요약정리 되어 있다.

본 연구에서는 DSSAT모형이 작물의 기후변화 영향을 신뢰수준으로 모의 가능하다는 가정 하에 진행하였으며, DSSAT모형을 이용한 작물의 기후변화 영향 Field 실험 데이터의 재현 연구를 통한 모형의 모수(parameterization) 추정 및 그에 대한 신뢰도(validation)를 확보하였다. 그리고 validation 확보된 DSSAT 모형을 기후변화 영향 평가 및 분석 모듈 구축 연구에 사용하였다.

그림 3-2. DSSAT 모형의 작물생육모의 과정 개념도



자료: 김창길 등(2008); Jones 등(2003)

2. 연구 내용

가. 기후변화가 농작물에 미치는 영향 평가를 위한 작물생산성 모델링 로드맵 작성

작물 생산성 로드맵은 본 연구에서 사용될 작물모형(DSSAT)의 활용 방안, 모형의 개선 및 새로운 모형의 개발 등을 포함하는 기후변화가 농작물에 미치는 영향 평가, 적응 및 대응 방안 개발 연구의 단기 및 중장기 계획을 염두에 두어서 작성하였다. 그리고 작성된 로드맵은 기후변화가 농작물에 미치는 영향 평가 및 분석 모듈 구축 연구 진행에 있어 기본 가이드라인으로 사용하였다.

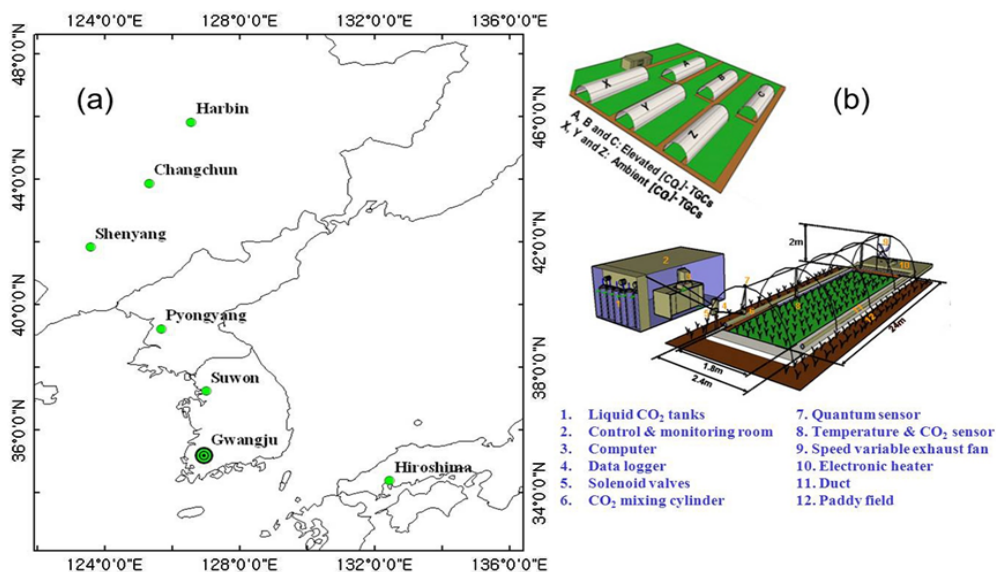
나. 작물에 대한 기후변화 영향평가 분석방법 및 대응 방안 제시:

작물모형(CERES-Rice)의 평가(parameterization 및 validation)와 기후변화 영향 분석 연구 수행

(1) 기후변화 연구 Field data 재현을 통한 작물모형의 평가

작물모형의 평가를 위한 기후변화 연구 field data로 벼는 전남대(광주)에서 2009~2010년에 획득한 온도구배온실(temperature gradient field chamber, TGFC) 데이터를 사용하였고 또한 각기 다른 위도 6개 지점을 추가하여 기후변화 영향평가 연구를 수행하였다<그림 3-3>. 콩은 미국의 University of Illinois (Urbana-Champaign)에서

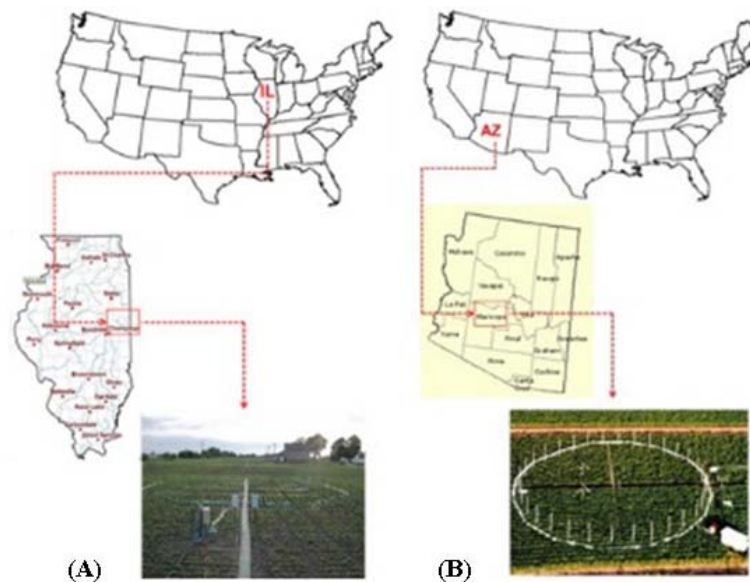
그림 3-3. 연구 사이트(a) 및 온도구배온실(TGFC) 개략도(b).



2002~2006년 그리고 수수는 University of Arizona (Maricopa)에서 1998~1999년 획득한 free air CO₂ enrichment (FACE)를 사용하였다 <그림 3-4>.

TGFC는 온도 구배처리 및 CO₂ 농도처리가 가능한 터널식 온실로 field에 설치된 대표적인 기후변화 연구 시설 중 하나이다<그림 3-3b>. 연구에서 사용된 데이터는 CO₂ 농도 2수준 (ACO₂ = Atmospheric CO₂, ECO₂ = Elevated CO₂), 온도 3수준 (T1 = Atmospheric temperature, T2 = T1 + 1.0°C, T3 = T1 + 2.0°C) 및 벼 품종 세 가지 (Nampyong, SaeKyewha, Unkwang)로 연구 수행되었다.

그림 3-4. FACE 연구 사이트: 콩, 미국 일리노이 주(A) 및 수수, 미국 애리조나 주(B).



개방계 대기 이산화탄소 증가실험(Free-Air CO₂ Enrichment Experiment, FACE)는 개방공간에서 CO₂ 농도처리가 가능하도록 설치한 기후변화 연구 시설로 closed chamber 시설 대비 상대적으로 농작물 재배 환경에 근접한 것으로 알려져 있다<그림 3-4>. 본 연구에서 사용된 FACE-Soybean 데이터는 CO₂ 농도 2수준(Atmospheric CO₂, Elevated CO₂)이었고, FACE-Sorghum 데이터는 CO₂ 농도 2수준(Atmospheric CO₂, Elevated CO₂) 및 관수 2수준(Dry, Wet)으로 연구 수행되었다.

본 연구에서는 상기의 field 데이터들을 대상으로 각각 해당 작물에 대하여 DSSAT package에 포함된 작물모형을 이용한 작물의 기후변화 영향 field 실험 데이터의 재현 연구를 통한 모형의 모수(parameterization) 추정 및 그에 대한 신뢰도(validation) 연구를 수행하였다. 그리고 validation 확보된 DSSAT 모형을 기후변화 영향 평가 및 분석 모듈 구축 연구에 사용하였다.

(2) 기후변화 영향 및 대응 방안 분석

기후변화 영향 및 대응 방안 분석 연구를 위하여, 먼저 validation된 DSSAT모형을 이용하여 기후변화 주요소에 대한 민감도 분석을 수행하고 기후변화 시나리오에 대응한 작물 생육 및 수량 영향 평가를 수행하였다. 연구에 사용된 기후변화 시나리오 데이터는 RCP8.5 및 RCP4.5 (IPCC, 2013) 신기후변화시나리오 하에서 각기 다른 39개의 GCM 모형으로 모의한 결과를 assemble한 것으로 동아시아 지역에 대하여 CO₂ 농도와 연계한 온도 및 강수량의 변이 정도를 baseline 기상자료에 가감하여 각각 2035년, 2065년, 2100년을 대표하는 기상자료로 사용하였다 <표 3-1>.

표 3-1. RCP4.5 및 RCP8.5 기후변화 시나리오(IPCC, 2013)하에서 39개 GCM 모형으로 모의된 동아시아지역 현재 대비 평균 온도 및 강수량 변이

시나리오	연도	CO ₂ 변화 (ppm)	온도변화 (°C)	강수량 변화 (%)
RCP4.5	2035	448	+0.9	+2
	2035	517	+1.9	+6
	2100	538	+2.4	+7
RCP8.5	2035	469	+1.1	+1
	2035	640	+2.7	+6
	2100	936	+4.9	+10

IPCC(2013)가 보고한 동아시아지역 미래 이산화탄소 농도는 RCP4.5 시나리오로 2035년 448ppm, 2065년에 517ppm, 2100년에 538ppm으로 예측되었고 RCP8.5 시나리오로 2035년 469ppm, 2065년에 640ppm, 2100년에 936ppm으로 예측되었다. 이러한 이산화탄소 농도변화와 연관하여 기상요소에 대한 미래 기후변화 예측을 위하여 39개 GCM 모형으로 모의하여 앙상블(평균)한 자료를 <표 3-1>에 나타내었다.

다. 작물에 대한 기후변화 영향평가 분석 방법 및 대응 방안 제시:

기후변화 대응 및 적응 시스템 구축

농작물 대상 기후변화 영향평가 분석 방법 및 대응 방안을 제시하기 위하여 기후변화 대응 및 적응 시스템의 구축을 시도하였으며 구축된 시스템의 요약 정보는 <그림 3-5>에 나타내었다. 본 시스템의 기본 구성은 기후변화 연구를 위하여 최적화 구동 준비된 작물모형 및 모의를 위한 입력 자료에 대한 DB이다. 현재, 입력 자료 중 공간변이 기후 변화 시나리오에 대한 자료 구축이 완료되었다. 작물 기후변화 시나

리오 자료는 부산대학교 안중배 교수 연구실에서 구축한 3km x 3km grid 기상자료 (2000~2011 WRF 모형 기상 값)를 baseline으로 사용하고 RCP4.5 및 RCP8.5 시나리오 하에서의 동아시아에 대한 2035년, 2065년, 2100년 변이 값 <표 3-1>을 가감하여 미래 기후변화 시나리오 DB를 구축하였다. 토양자료에 대한 DB는 현재 미 구축되어 있으나, 향후 농촌진흥청의 정밀토양도로부터 읍/면/동 단위의 대표 토양 통을 추

그림 3-5. 기후변화 적응 및 대응 시스템 구축 개략도

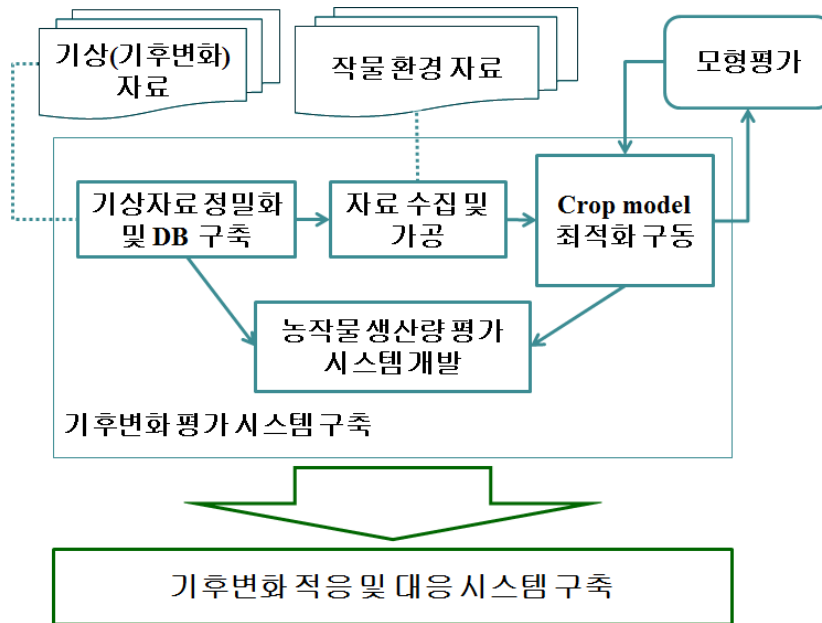
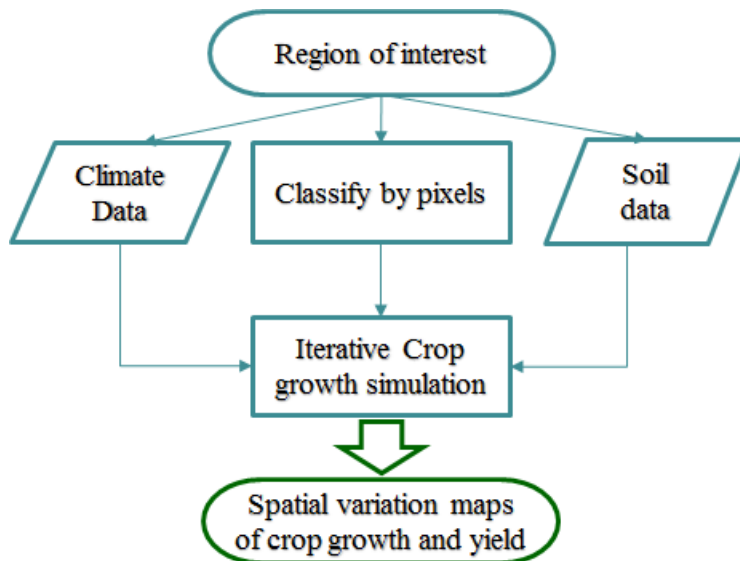


그림 3-6. 작물 생육 및 수량 2차원 공간변이 지도화 시스템 구축 개략도



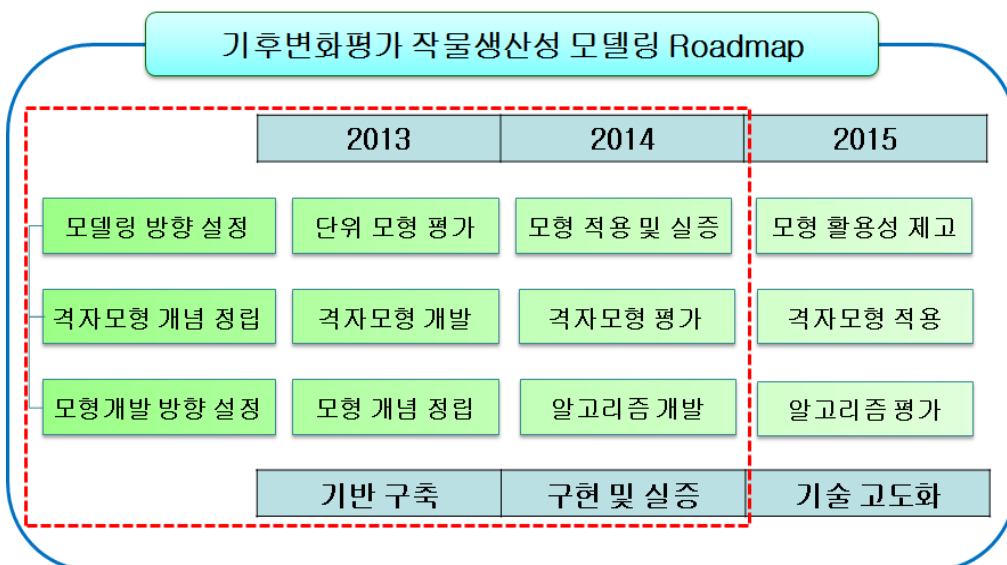
출하여 이 토양 통의 토양 속성 자료로부터 모델 입력 토양 파일을 작성할 예정이다. 기후변화 대응 및 적응 시스템의 구축에 있어서 핵심 요소는 작물모형으로 작물의 생육 및 환경 변수(예, 토양 수분)에 대한 시계열 패턴 모의 및 수량 예측 정보의 생산 및 전달 기능을 한다. 작물모형은 현장 자료의 재현 성능에 대한 신뢰 확보가 필수적으로 수행되어야 하며 이를 모형의 ‘최적화 구동’으로 정의하였다<그림 3-5>. 또한, 작물모형은 연구 지역 내 또는 대단위 지역의 작물 생육 및 수량 변이에 대한 모의가 가능하도록 LINUX system을 이용한 shell scripting 기반의 작물모의 시스템을 구축하여 격자 정보자료를 처리 가능하도록 하였다<그림 3-6>.

3. 연구결과

가. 기후변화가 농작물에 미치는 영향 평가를 위한 작물생산 모델링 로드맵 작성

기후변화 평가를 위한 작물생산성 모델링 로드맵으로 2013년은 기반 구축단계, 2014년은 구현 및 실증 단계, 2015년에 기술 고도화를 이루는 단계로 계획을 수립하였다(그림 3-7).

그림 3-7. 기후변화 영향평가를 위한 작물생산성 모델링 로드맵



단위 모형을 이용한 모델링 연구는 2013년 모형에 대한 평가, 2014년 모형의 적용 및 실증, 2015년 모형의 활용성을 제고하는 단계로 계획하였다. 대용량 처리 및 지역 내 작물 생육 및 생산량 변이 모의를 위한 격자모형의 개발 및 활용에 관하여는 2013년 격자모형의 개발, 2014년 격자모형의 평가, 2015년 격자모형의 적용 단계로 계획하였다. 모형의 개발에 관하여서는 2013년 모형 개념 정립, 2014년 알고리즘 개발, 2015년 알고리즘을 평가하는 단계로 계획하였다.

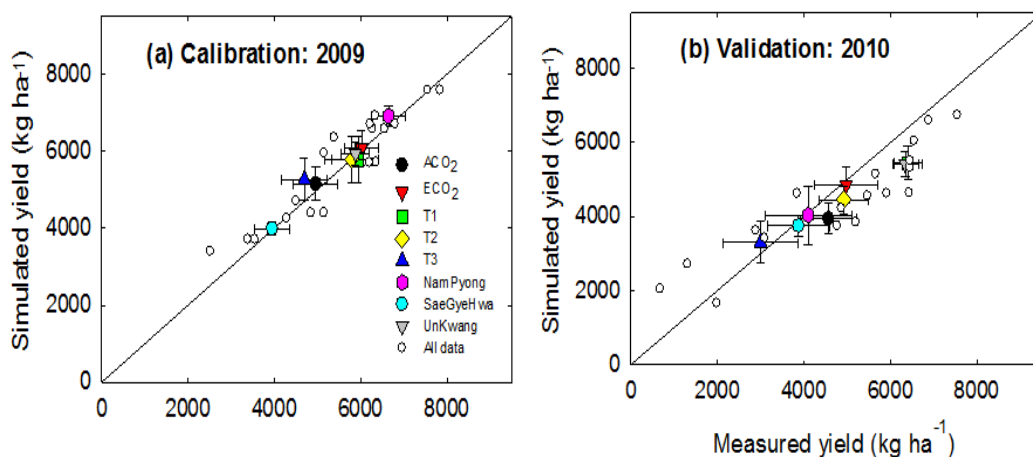
나. 작물에 대한 기후변화 영향 평가 분석 방법 및 대응 방안 제시:

작물모형의 평가(parameterization 및 validation)와 기후변화 영향 분석

(1) CERES-Rice 모형을 이용한 벼에 대한 기후변화 연구 Field data 모의/재현 및 기후변화 영향 평가

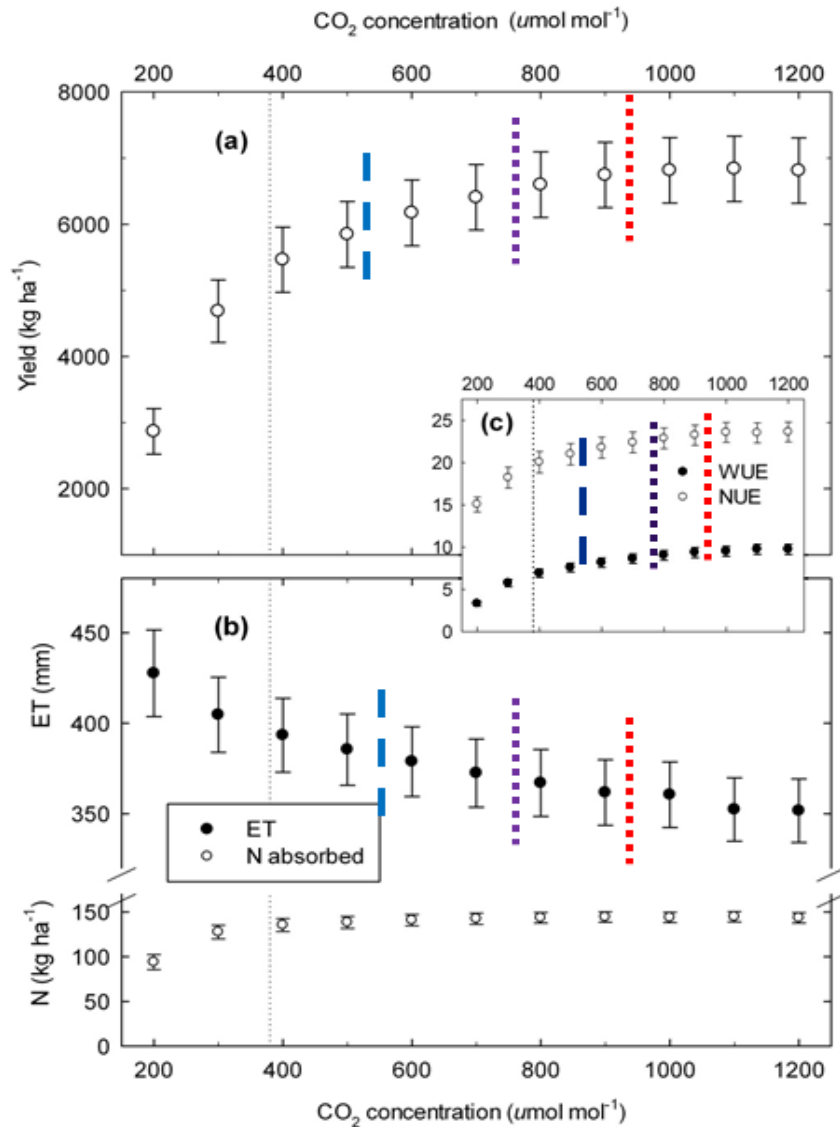
본 연구에서는 기후변화 field 시설인 TGFC에서 획득한 벼 생육 및 수량 데이터를 CERES-Rice 모형에 대한 모수(parameterization) 추정 및 그에 대한 신뢰도(validation)을 확보하였다(그림 3-8). 또한, 기후변화 영향에 관여하는 주요 기상변수에 대한 작물의 민감도를 분석연구를 하였으며(그림 3-9, 3-10), 광주를 포함한 다양한 벼 재배 지역에 대한 기후변화 영향 평가를 하였다(그림 3-11~3-14, 표 3-1, 3-2).

그림 3-8. 주요 처리(CO₂, 온도, 및 품종)에 따른 수량 모의치 및 실측치 비교: 모형 모수 추정(a) 및 신뢰도 검증(b).



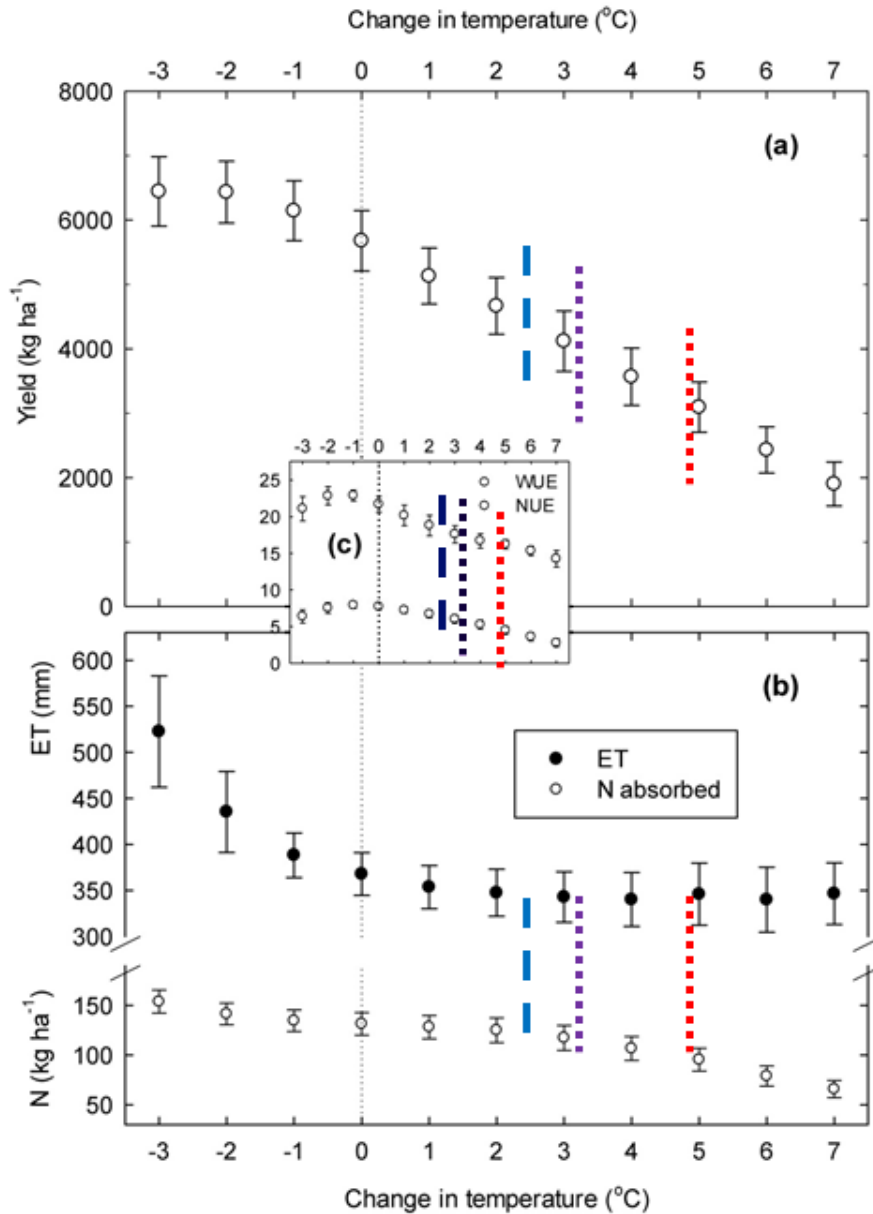
TGFC 조건에서의 CO₂ 농도 및 온도 처리 와 공시한 품종에 따른 수량변이를 CERES-Rice 모형의 모수화 및 신뢰도 평가 과정에서 공히 통계적 유의수준 내에서 재현 가능함을 확인하였다(그림 3-8).

그림 3-9. CO₂ 농도 변이에 따른 CERES-Rice의 민감도: 수량(a), 증발산량 과 식물체 질소 흡수량(b), 및 물 및 질소 이용효율(c). 칼라 점선들은 각 기후변화 시나리오별(RCP4.5: 538ppm; A1B: 750ppm; RCP8.5: 936ppm) 2100년 CO₂ 농도에 따른 반응 표시.



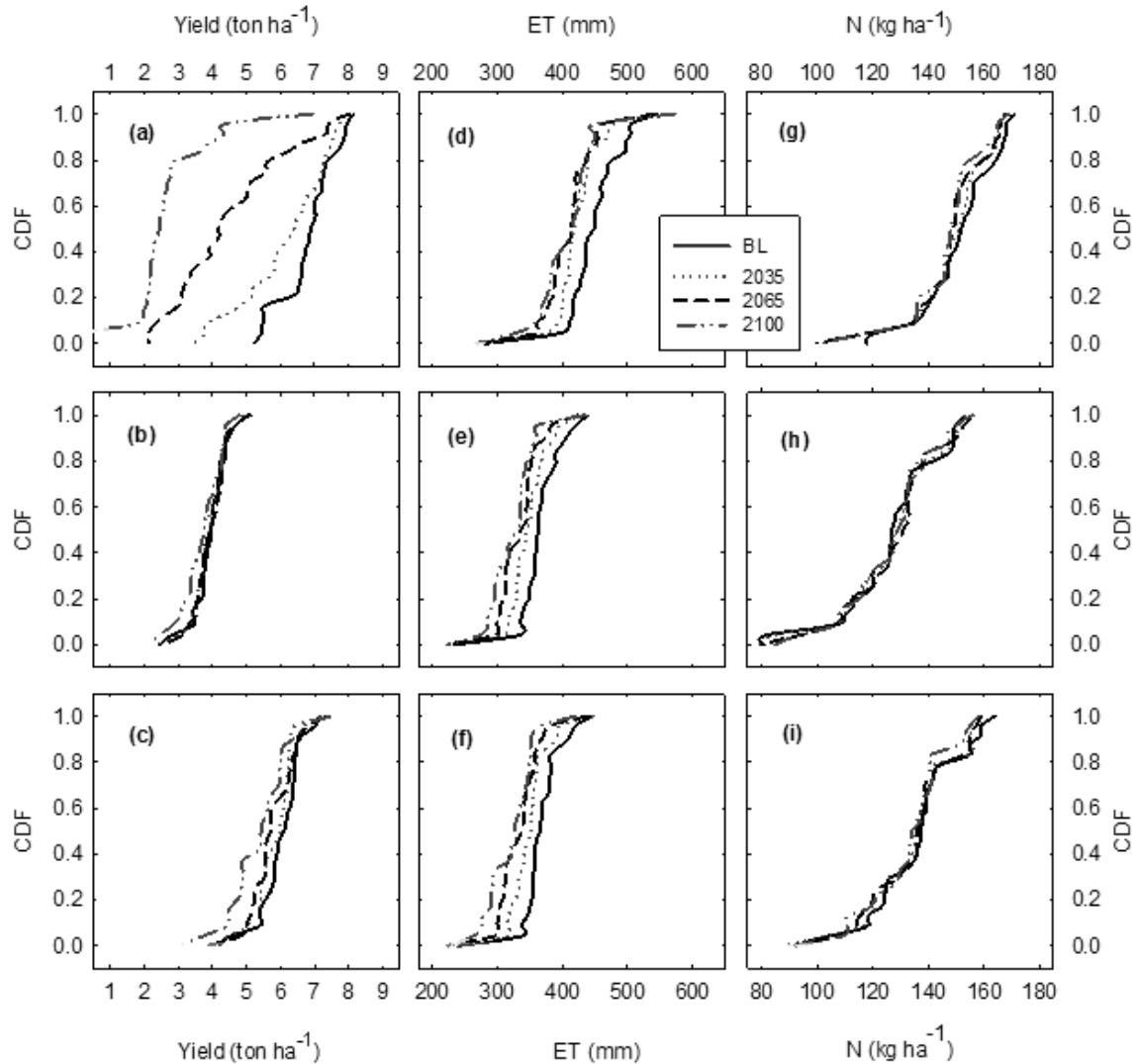
CO₂ 농도 변이에 따라 CERES-Rice의 수량 반응은 대기 중 CO₂ 농도가 약 600ppm 수준에서 포화에 근접하는 것으로 판단되며 CO₂ 농도 증가에 따라 증발산량은 완만한 감소가 지속되었고 물 및 질소 이용효율은 완만하게 증가하였다(그림 3-9). 또한, 현재(Baseline) 대비 대표적인 기후변화 시나리오(A1B, RCP4.5, RCP8.5)의 CO₂ 농도별 수량, 증발산량, 식물체질소흡수량, 물 및 질소 이용효율 반응 정도를 정량화하였다.

그림 3-10. 온도 변화에 따른 CERES-Rice의 민감도: 수량(a), 증발산량 과 식물체 질소 흡수량(b), 및 물 및 질소 이용효율(c). 칼라 점선들은 각 기후변화 시나리오별(RCP4.5: 2.4°C; A1B: 3.2°C; RCP8.5: 4.9°C) 2100년 현재(Baseline) 대비 온도 상승에 따른 반응 표시.



온도 변이에 따라 CERES-Rice의 수량 반응은 대기 온도 증가에 따라 수량은 큰 폭으로 감소되었고 증발산량 및 식물체질소흡수량은 반응 폭이 미미하였으며 물 및 질소 이용효율은 감소하였다(그림 3-10). 또한, 현재(Baseline) 대비 대표적인 기후변화 시나리오(A1B, RCP4.5, RCP8.5)의 온도별 수량, 증발산량, 식물체질소흡수량, 물 및 질소 이용효율 반응 정도를 정량화하였다.

그림 3-11. 광주지역의 RCP8.5(IPCC, 2013)에 따른 현재 와 미래(2035, 2065 및 2100) 기후변화 시나리오(CO₂, 온도 및 강수량 복합) 하에서 남평벼(상: a, d, g), 새계화벼(중: b, e, h), 운광벼(하: c, f, i)의 수량, 증발산량 및 질소 흡수량에의 영향



RCP8.5 기후변화 시나리오에 따른 광주지역에서 수량은 현재(Baseline) 대비 남평벼는 큰 폭의 감수가 예측되었고 운광벼는 다소 감수 폭이 적을 것으로 모의되었다(그림 3-11). 증발산량은 품종에 관계없이 감소가 예상되고 식물체질소흡수량은 현재와 같은 수준으로 유지될 것으로 모의되었다. RCP4.5 기후변화 시나리오 하에서도 이러한 경향은 유사할 것으로 예측되었다(그림 3-12).

그림 3-12. 광주지역의 RCP4.5(IPCC, 2013)에 따른 현재 와 미래(2035, 2065 및 2100) 기후변화 시나리오(CO_2 , 온도 및 강수량 복합) 하에서 남평벼(상: a, d, g), 새계화벼(중: b, e, h), 운광벼(하: c, f, i)의 수량, 증발산량 및 질소 흡수량에의 영향

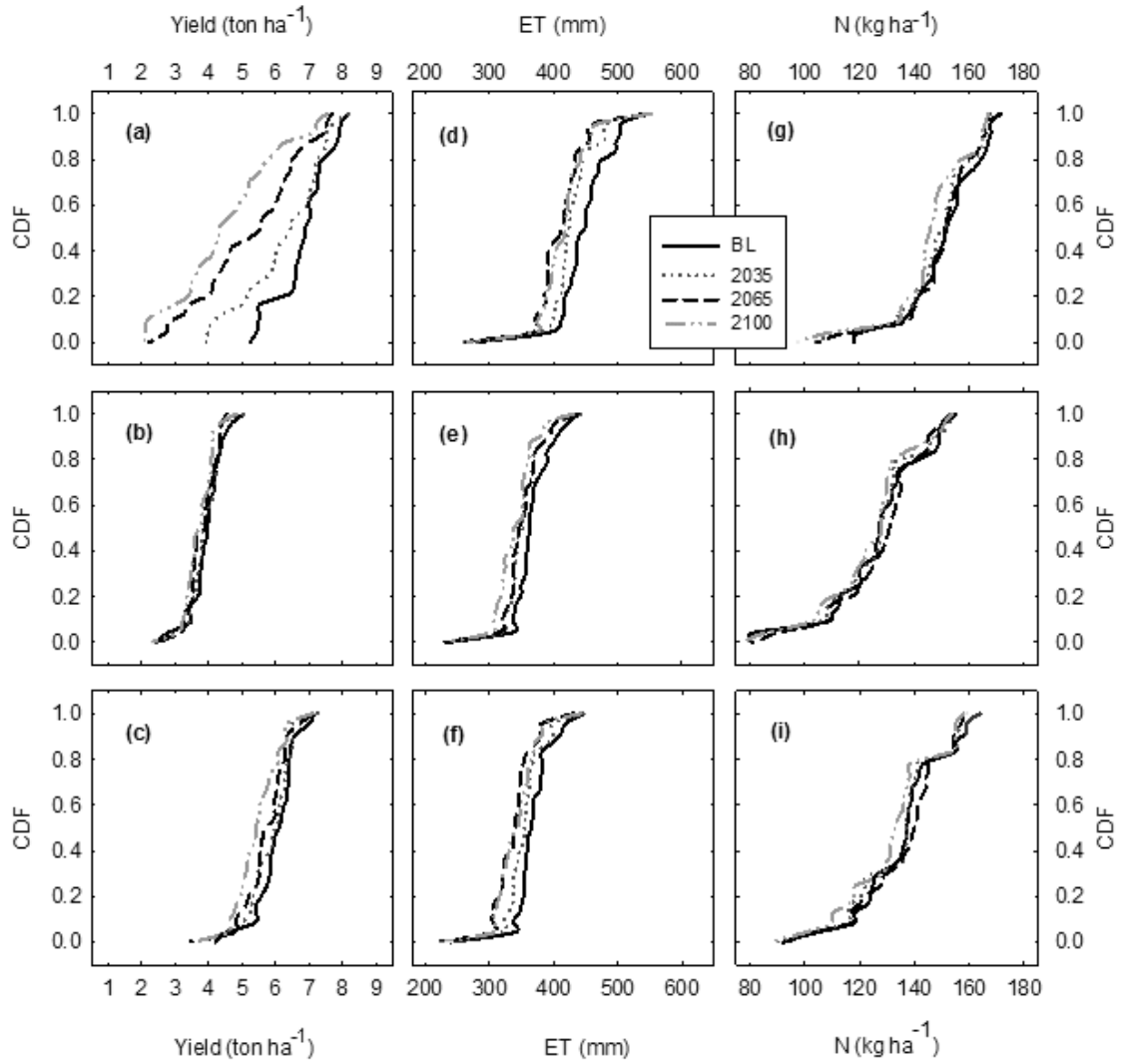


표 3-2. 광주지역의 RCP8.5(IPCC, 2013)에 따른 현재 와 미래(2035, 2065 및 2100) 기후변화 시나리오(CO₂, 온도 및 강수량 복합) 하의 기후 변동(max, 75%, median, 25%, and min)에 따른 공시한 벼 품종의 수량 반응.

Cultivar	Division	Baseline	Y2035	Y2065	Y2100
----- kg 10a ⁻¹ -----					
Nampyong	Max		499.2	275.7	80.1
	75%		587.6	398.0	192.8
	Median	680.8	613.3	449.0	261.5
	25%		632.2	503.0	341.1
	Min		669.7	598.1	427.6
SaeGyeHwa	Max		358.4	332.4	218.1
	75%		384.5	378.6	332.8
	Median	391.7	386.6	392.6	367.2
	25%		396.1	408.6	415.0
	Min		405.1	430.9	444.4
Unkwang	Max		535.8	476.8	322.9
	75%		560.0	548.9	476.2
	Median	598.4	577.1	574.7	535.1
	25%		595.1	597.1	588.4
	Min		605.3	633.6	631.6

표 3-3. 광주지역의 RCP4.5에 따른 현재 와 미래(2035, 2065 및 2100) 기후변화 시나리오(CO₂, 온도 및 강수량 복합) 하의 기후 변동(max, 75%, median, 25%, and min)에 따른 공시한 벼 품종의 수량 반응.

Cultivar	Division	Baseline	Y2035	Y2065	Y2100
----- kg 10a ⁻¹ -----					
Nampyong	Max		520.0	370.6	271.3
	75%		602.5	468.3	379.0
	Median	680.8	623.2	522.8	452.8
	25%		627.4	558.9	524.3
	Min		677.8	650.0	678.3
SaeGyeHwa	Max		359.9	336.6	310.0
	75%		378.5	367.5	346.8
	Median	391.7	387.0	379.5	370.0
	25%		387.5	388.8	383.7
	Min		402.2	414.1	426.5
Unkwang	Max		536.0	485.6	447.9
	75%		563.7	538.8	501.2
	Median	598.4	583.0	569.1	543.7
	25%		586.2	577.1	573.2
	Min		606.0	619.0	637.7

광주지역의 RCP8.5 및 RCP4.5(IPCC, 2013)에 따른 현재(Baseline) 와 미래(2035, 2065 및 2100) 기후변화 시나리오(CO₂, 온도 및 강수량 복합) 하의 기후 변동(max, 75%, median, 25%, and min)에 따른 공시한 벼 품종의 수량 반응을 <표 3-2> 및 <표 3-3>에 정량적으로 나타내었다.

그림 3-13. 미래 기후조건[2050 (a), 2100 (b)]에서 주요 벼 재배 지역의 위도별 수량 영향.

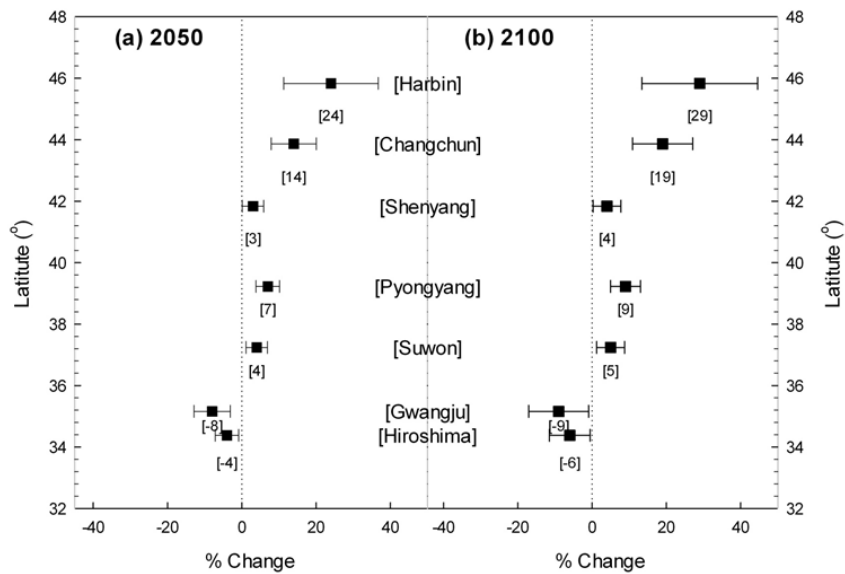
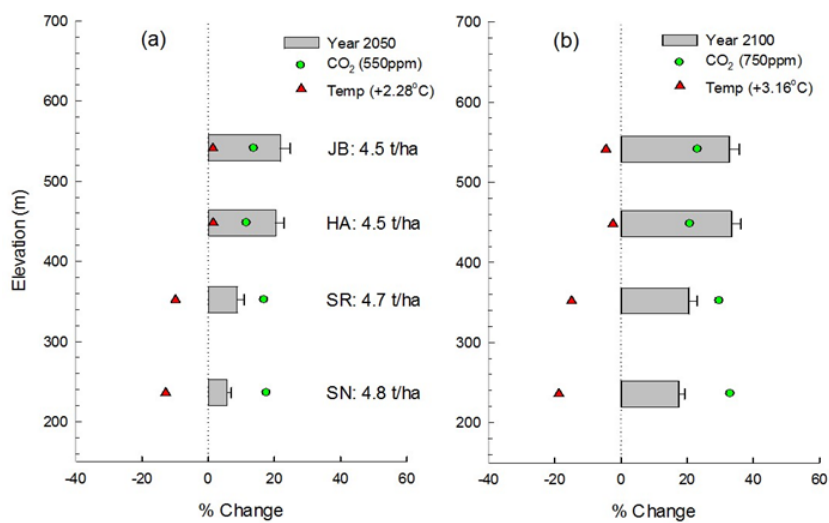


그림 3-14. 미래 기후조건[2050 (a), 2100 (b)]에서 표고별(JB = 진부, HA = 해안, SR = 신림, SN = 신남) 수량 영향 평가.



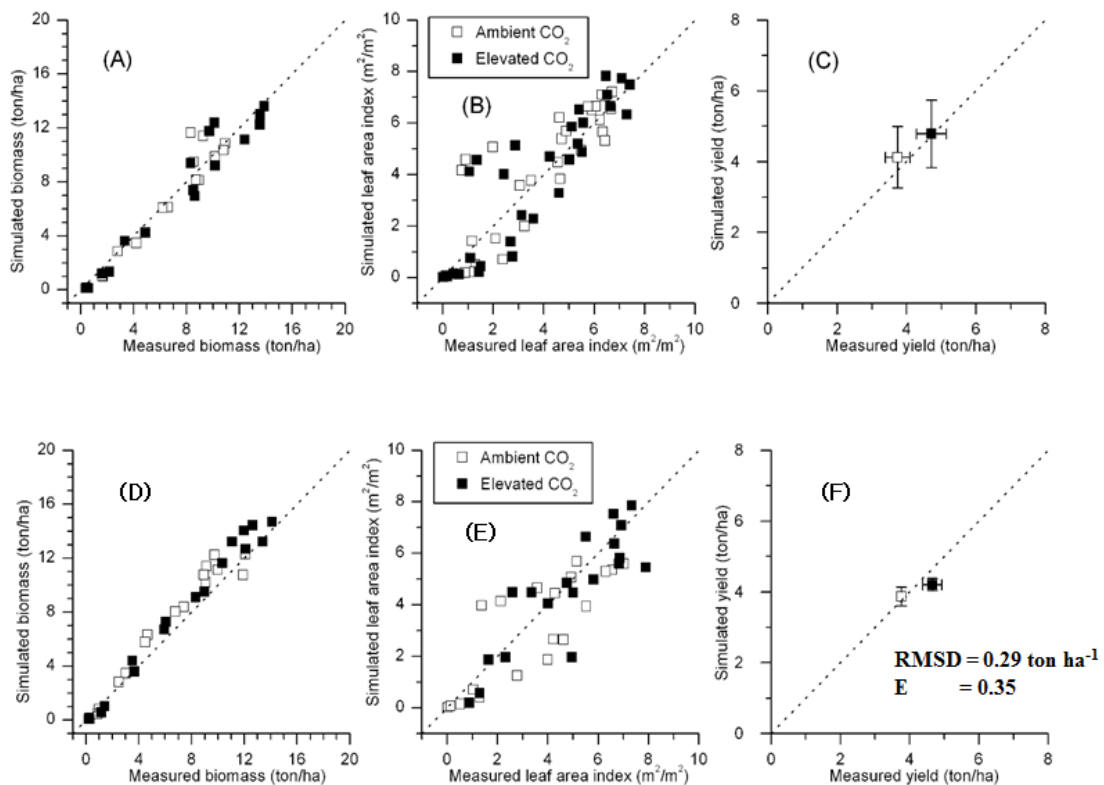
미래 기후 조건에서 주요 벼 재배 지역에서 위도별 수량은 중북부 지역인 수원 이 북 지역은 증수가 예상되지만 이남 지역에서는 감수가 될 것으로 예측되었다(그림

3-13). 또한, 미래 기후변화 조건에서는 표고가 높은 지역에서 증수될 것으로 예측되었다(그림 3-14).

(2) CROPGRO-Soybean 모형을 이용한 콩에 대한 기후변화 연구 Field data 모의/재현 및 기후변화 영향 평가

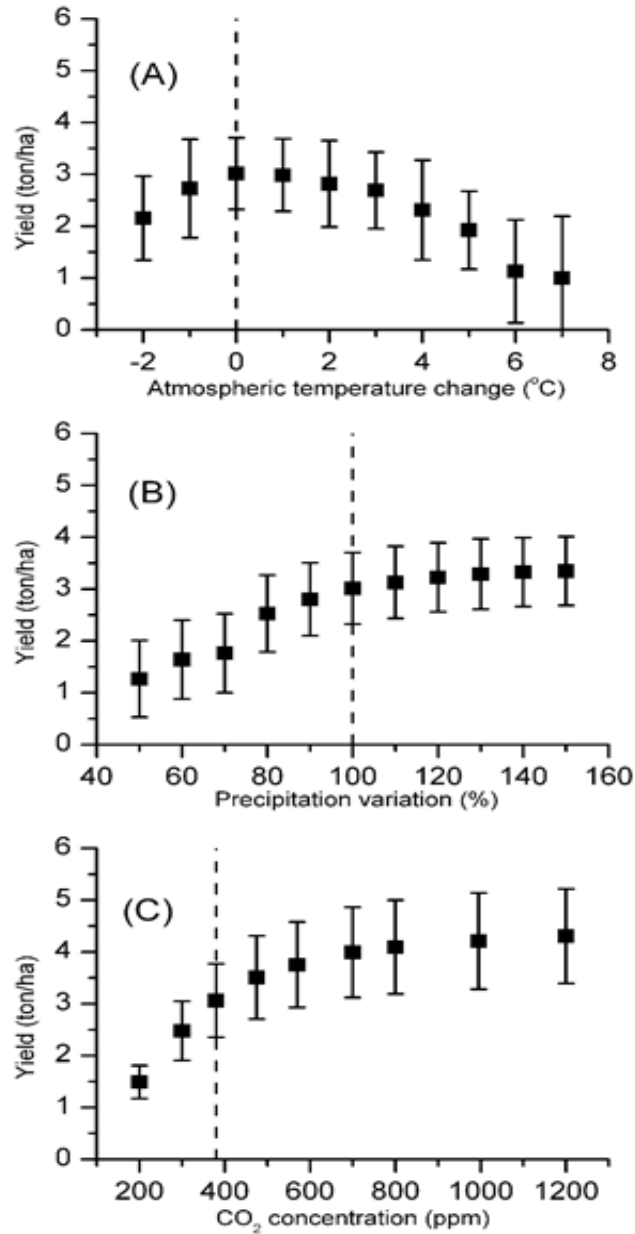
본 연구에서는 FACE 시설을 이용하여 획득한 콩에 대한 생육 및 수량 데이터를 사용하여 CROPGRO-Soybean 모형에 대한 모수(parameterization)를 추정하고 및 그에 대한 신뢰도(validation)를 확보하였다(그림 3-15). 그리고 기후변화 영향에 관여하는 주요 기상변수에 대한 작물의 민감도를 분석하고(그림 3-16), 기후변화 영향 평가 연구를 수행하였다(그림 3-17, 3-18).

그림 3-15. CO₂ 농도 변이에 따른 콩 생육 및 수량 모의치와 실측치 비교: 모수화(상) 및 신뢰도(하) 평가concentrations.



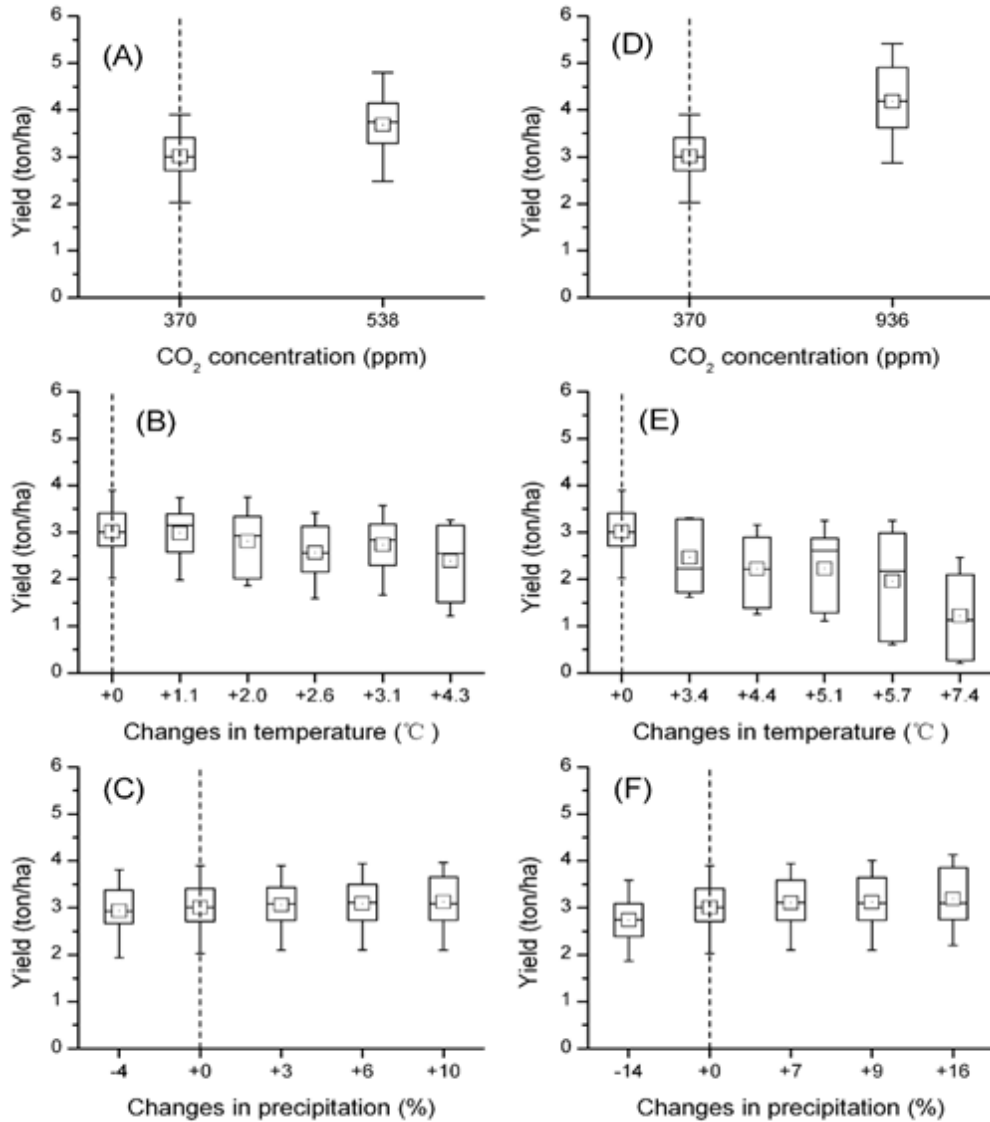
FACE 시설에서 획득한 콩에 대한 생육 및 수량 데이터를 사용하여 CROPGRO-Soybean 모형에 대한 모수 추정 및 신뢰도 평가 결과를 <그림 3-15>에 나타내었으며, 생육 및 수량 모의 값들이 측정된 값을 잘 추정하고 있음을 보여주고 있다.

그림 3-16. CROPGRO-Soybean 모형의 온도(a), 강수량(b), 및 CO₂(c) 변이에 대한 콩의 수량 민감도



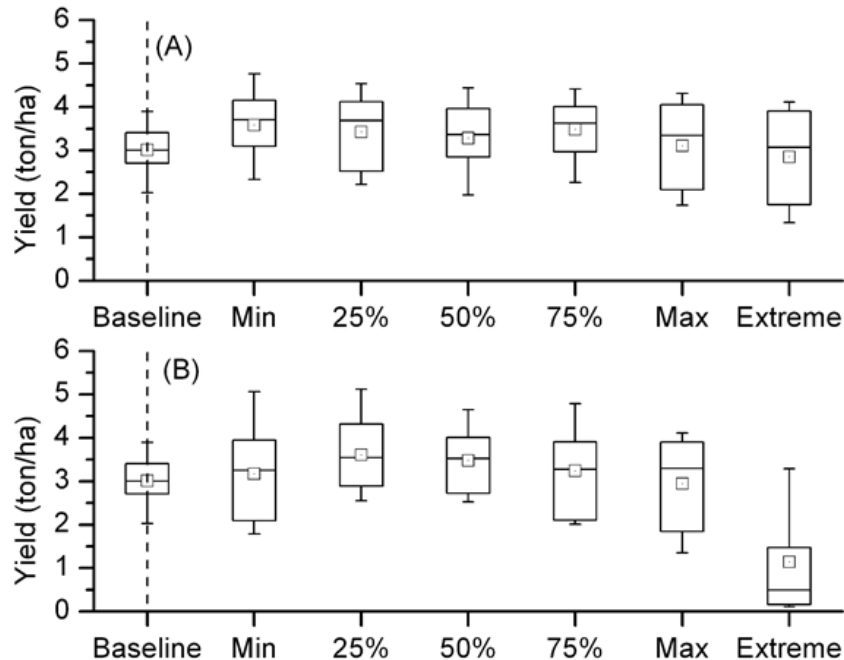
CROPGRO-Soybean 모형에 대한 기후변화 영향에 관여하는 주요 기상변수인 대기 온도, 강수량 및 대기 CO₂ 농도에 대한 콩의 민감도를 분석한 결과(그림 3-16), 수량 반응은 현재(Baseline)를 기점으로 온도 증가에 따라 감소하고 강수량 증가에 따라 약간의 증수될 것으로 모의되었다. 또한, CO₂ 농도 증가에 따라 증수될 것으로 모의되었으며 CO₂ 농도가 약 600ppm 수준에서 포화에 근접하는 것으로 판단되었다.

그림 3-17. RCP4.5(A-C) 및 RCP8.5(D-F) 시나리오(IPCC, 2013)에 따른 현재 및 미래(2100년)에 각 기후변화 요소(CO₂, 온도, 강수량)가 콩의 수량에 미치는 영향 비교



기후변화 시나리오(RCP4.5 및 RCP8.5) 각각에 대하여 기후변화 영향에 관여하는 주요 기상변수인 대기 온도, 강수량 및 대기 CO₂ 농도 각각에 반응한 2100년 콩의 수량 반응을 분석한 결과(그림 3-17), 수량 반응은 현재(Baseline)를 기점으로 CO₂ 농도 증가에 따라 증수될 것으로 모의되었고, 온도 증가 변이에 따라 감수될 것으로 모의되었으나 강수량 증가 변이에 따라서는 수량 변이 폭이 미미할 것으로 예측되었다.

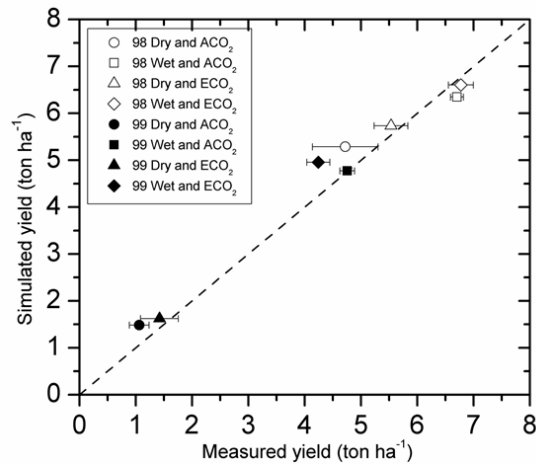
그림 3-18. RCP4.5(A) 및 RCP8.5(B) 시나리오(IPCC, 2013)에 따른 현재 및 미래(2100년) 기후변화 복합요소(CO₂, 온도, 강수량)의 변이(Min, 25%, 50%, 75%, Max, Extreme)가 콩의 수량에 미치는 영향 비교



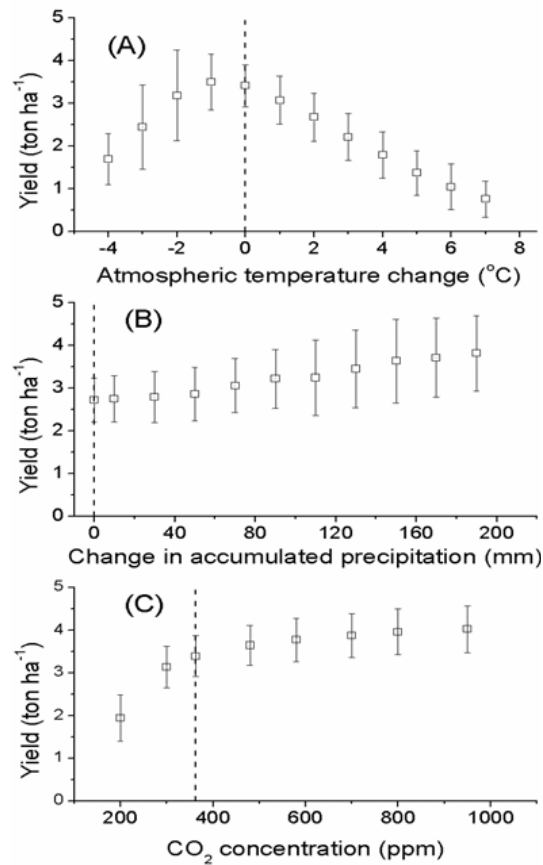
기후변화 시나리오(RCP4.5 및 RCP8.5) 각각에 대하여 기후변화 영향에 관여하는 주요 기상변수인 대기 온도, 강수량 및 대기 CO₂ 농도 복합요인에 반응한 2100년 콩의 수량 반응을 분석한 결과(그림 3-18), 현재(Baseline)를 기점으로 기후 변이 정도에 따라 다소간 차이가 있으나 두 시나리오에서 콩이 대체로 약간 증수될 것으로 모의되었으나 RCP8.5 시나리오의 Extreme 기후 조건에서는 감수될 것으로 예측되었다.

(3) CERES-Sorghum 모형을 이용한 수수에 대한 기후변화 연구 Field data 모의/재현 및 기후변화 영향 평가

본 연구에서는 FACE 연구시설을 이용하여 획득한 수수에 대한 생육 및 수량 데이터를 사용하여 CERES-Sorghum 모형에 대한 모수(parameterization)를 추정하고 그에 대한 신뢰도(validation)을 확보하였다(그림 3-19). 그리고 기후변화 영향에 관여하는 주요 기상변수에 대한 작물의 민감도를 분석하고(그림 3-20), 기후변화 영향 평가 연구를 수행하였다(그림 3-21, 3-22).

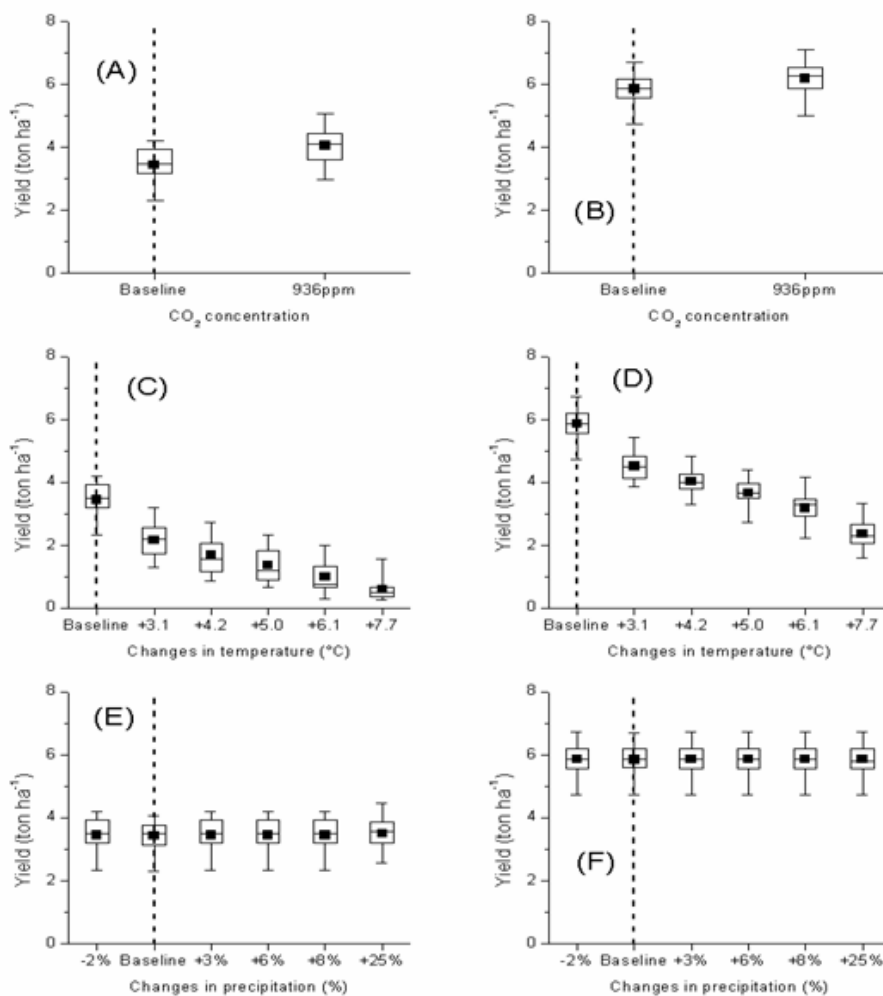
그림 3-19. CO₂ 농도 변이 및 관수 처리에 따른 수수의 수량 모의치와 실측치 비교

FACE 시설에서 획득한 수수에 대한 수량 데이터를 사용하여 CERES-Sorghum 모형에 대한 모수 추정 및 신뢰도 평가 결과를 <그림 3-19>에 나타내었으며, 수량 모의 값들이 측정된 값을 잘 추정하고 있음을 보여주고 있다.

그림 3-20. CERES-Sorghum 모형의 온도(a), 강수량(b), 및 CO₂(c) 변이에 대한 수수의 수량 민감도

CERES-Sorghum 모형에 대한 기후변화 영향에 관여하는 주요 기상변수인 대기 온도, 강수량 및 대기 CO₂ 농도에 대한 수수의 민감도를 분석한 결과(그림 3-20), 수량 반응은 현재(Baseline)를 기점으로 온도 증가에 따라 감소하고 강수량 증가에 따라 증수될 것으로 모의되었다. 하지만, CO₂ 농도 증가에 따른 증수 폭은 제한적일 것으로 모의되었으며 CO₂ 농도가 약 400ppm 수준에서 포화에 근접하는 것으로 판단되었다.

그림 3-21. RCP8.5(A, C, E) 및 RCP4.5(B, D, F) 시나리오(IPCC, 2013)에 따른 현재 및 미래(2100년)에 각 기후변화 요소(CO₂, 온도, 강수량)가 수수의 수량에 미치는 영향 비교



기후변화 시나리오(RCP4.5 및 RCP8.5) 각각에 대하여 기후변화 영향에 관여하는 주요 기상변수인 대기 온도, 강수량 및 대기 CO₂ 농도 각각에 반응한 2100년 수수의 수량 반응을 분석한 결과(그림 3-21), 수량 반응은 현재(Baseline)를 기점으로 온도 증가 변이에 따라 비교적 현저한 폭으로 감소될 것으로 모의되었으나 CO₂ 농도 및 강수량 증가 변이에 따라서는 수량 변이 폭이 미미할 것으로 예측되었다.

그림 3-22. 물 관리 조건별[건조(A) 및 습윤(B)] RCP8.5(IPCC, 2013)에 따른 현재 및 미래(2100년) 기후변화 복합요소(CO₂, 온도, 강수량)의 변이(Min, 25%, 50%, 75%, Max, Extreme)가 수수의 수량에 미치는 영향 비교

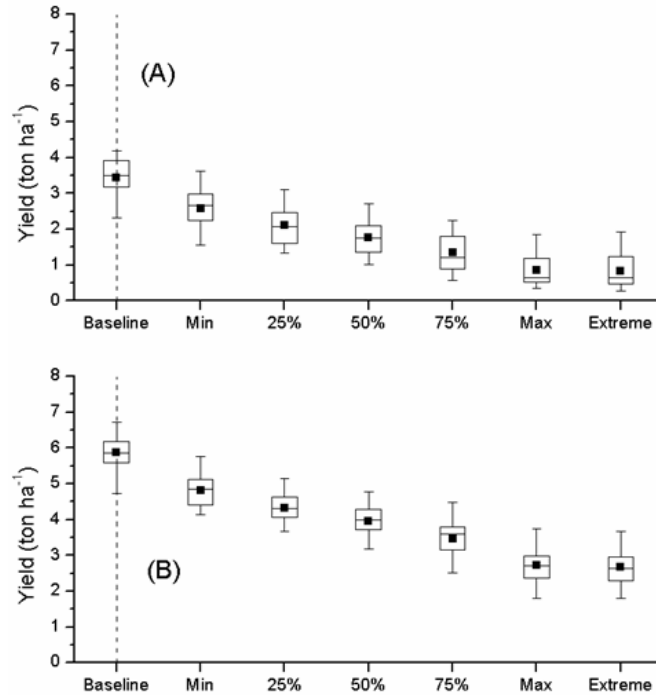
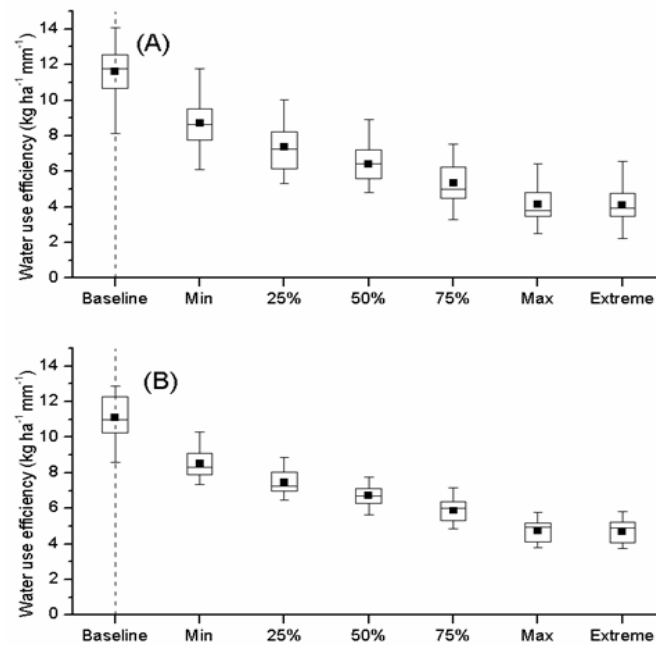


그림 3-23. 물 관리 조건별[건조(A) 및 습윤(B)] RCP8.5(IPCC, 2013)에 따른 현재 및 미래(2100년) 기후변화 복합요소(CO₂, 온도, 강수량)의 변이(Min, 25%, 50%, 75%, Max, Extreme)가 수수의 물이용 효율에 미치는 영향 비교



기후변화 시나리오(RCP4.5 및 RCP8.5) 각각에 대하여 기후변화 영향에 관여하는 주요 기상변수인 대기 온도, 강수량 및 대기 CO₂ 농도 복합요인에 반응한 2100년 수수의 수량(그림 3-22) 및 물이용 효율 반응(그림 3-23)을 분석한 결과, 현재(Baseline)를 기점으로 두 시나리오에서 공히 감소될 것으로 모의되었다. 특히, 기후변이 폭이 크면 클수록 감소 폭이 클 것으로 예측되었다.

다. 작물에 대한 기후변화 영향 평가 분석 방법 및 대응 방안 제시:

기후변화 대응 및 적응 시스템 구축

(1) 작물 생육기간 중 기상 인자 공간변이 가시화 구현

본 연구에서는 신 기후변화 시나리오 중 RCP8.5 및 RCP4.5 시나리오 영향 하에서 기상 인자에 대한 공간변이 가시화 구현 연구를 수행하였으며, 벼의 생육기간(5월~10월) 동안 남한지역에서의 각 시나리오별 기온 및 강수량에 대한 변이 지도를 <그림 3-24, 3-25>에 나타내었다. RCP4.5 시나리오 <그림 3-24> 보다 RCP8.5 시나리오 <그림 3-25>가 전반적으로 고온 및 강수량이 많을 뿐만 아니라 지역 간 변이도 더 많아 질 것으로 예측되었다. 또한, baseline(현재) 대비 2035년, 2065년, 2100년으로 갈수록 고온 및 강수량이 많아지는 것으로 모의되었다.

그림 3-24. 남한지역에 대한 RCP4.5(IPCC, 2013)에 따른 현재(Baseline) 와 미래(2035, 2065, 2100) 기후변화 조건에서 벼의 생육기간(5월~10월) 일평균 온도 및 강수량 2차원 공간변이 지도.

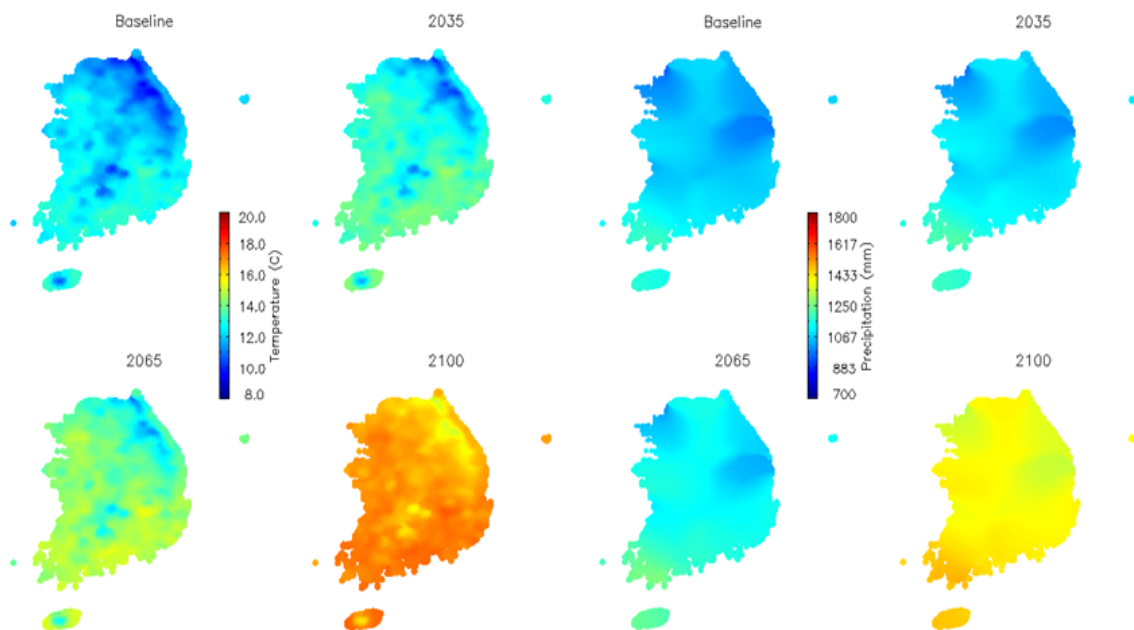
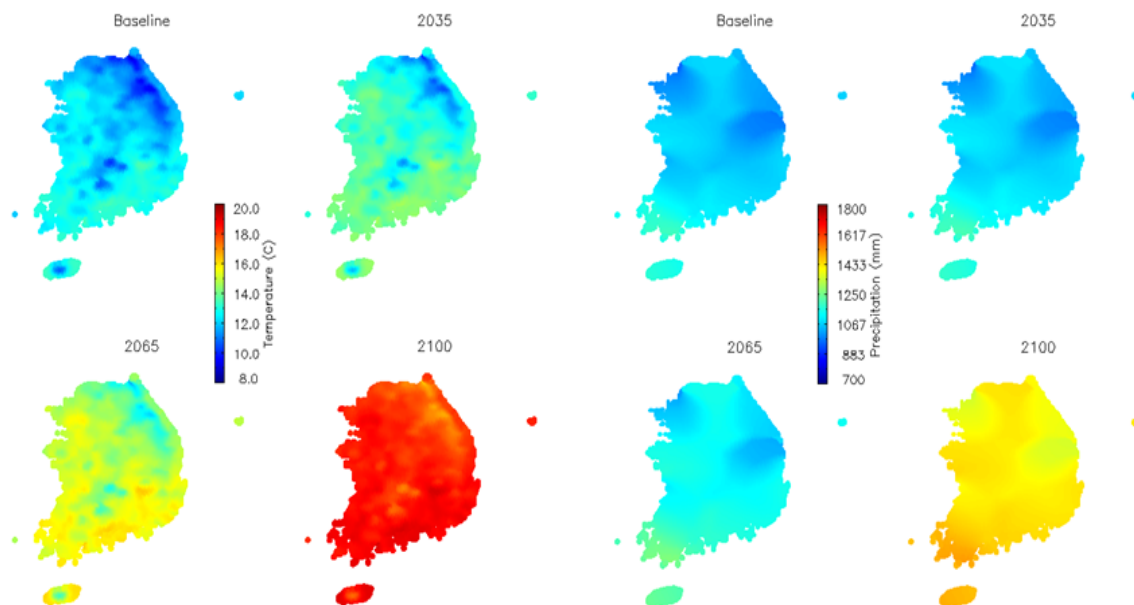


그림 3-25. 남한지역에 대한 RCP8.5(IPCC, 2013)에 따른 현재(Baseline) 와 미래(2035, 2065, 2100) 기후변화 조건에서 비의 생육기간(5월~10월) 일평균 온도 및 강수량 2차원 공간변이 지도.



(2) 작물 생산성 공간변이 모델링 체계 구현

본 연구에서는 신 기후변화 시나리오 중 RCP8.5 및 RCP4.5 시나리오 영향 하에서 작물 생산성 공간변이 가시화 구현 연구를 수행하였으며, 남한지역에서 각각의 시나리오 하에서 남평벼, 새계화벼, 운광벼에 대한 수량 변이 지도를 <그림 3-26(남평벼)>, <3-27(새계화벼)>, <3-28(운광벼)>에 나타내었다. 본 연구결과는 지역별 다른 토양조건이 고려되지 않았으므로 상세한 결과분석 및 연구결과 활용자료로서의 가치는 제한적이지만 현재만의 결과로 아래 사항에 대한 고찰 및 해석은 가능 할 것으로 판단된다.

중만생종인 남평벼는 중산간지대 이상에서는 재배가 불가능하지만 수량성은 가장 높은 품종으로 RCP8.5 및 RCP4.5 시나리오 baseline(현재) 수량변이 지도에서 이 특성이 잘 모의되어 재현되었음을 보여주고 있다(그림 3-26). 중생종이면서 간척지 적응품종인 새계화벼는 공시된 세 품종 중 비교적 수량이 적지만 지역 간 수량변이가 적게 모의 되었는데 이는 내재해품종으로 개발된 품종특성이 잘 재현되었다고 판단된다(그림 3-26). 조생종인 운광벼는 평야지에서 중만생종에 비하여 수량성은 떨어지지만 중산간지에서 수량성이 높으면서 안정성을 가지고 있는데 이 특성 또한 개발된 2차원 공간변이 모델링 시스템이 잘 재현하여 모의하고 있음을 확인할 수 있었다(그림 3-28).

그림 3-26. 남한지역에 대한 RCP8.5 및 RCP4.5(IPCC, 2013)에 따른 현재(Baseline) 와 미래(2035, 2065, 2100) 기후변화 조건에서 남평벼의 수량 2차원 공간변이 지도

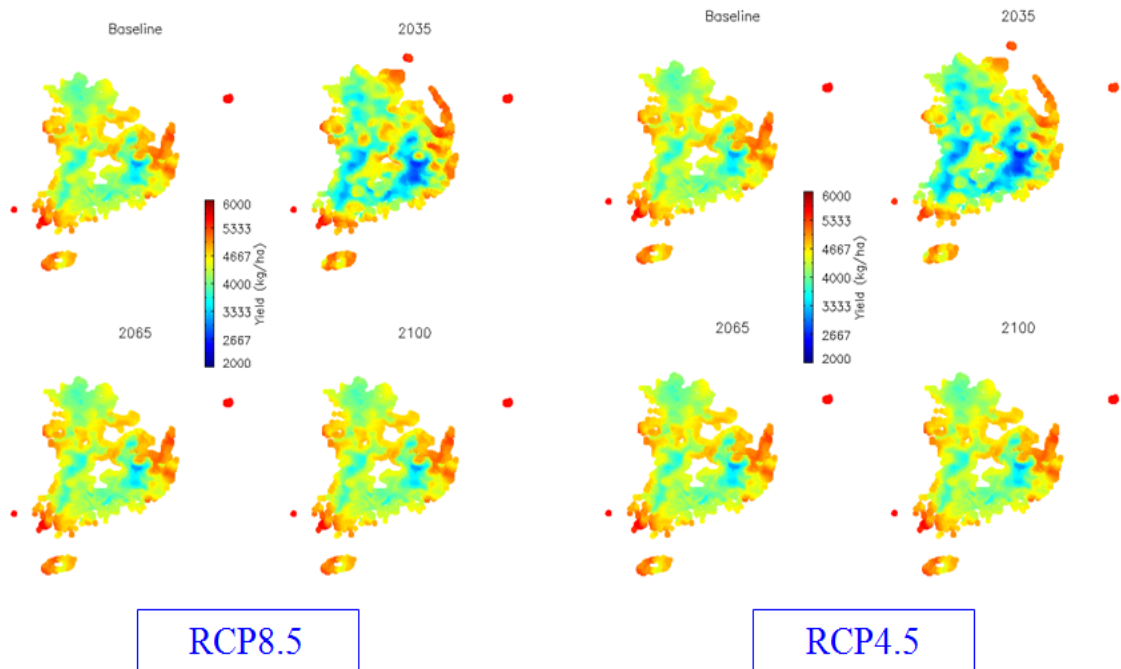


그림 3-27. 남한지역에 대한 RCP8.5 및 RCP4.5(IPCC, 2013)에 따른 현재(Baseline) 와 미래(2035, 2065, 2100) 기후변화 조건에서 세계화벼의 수량 2차원 공간변이 지도

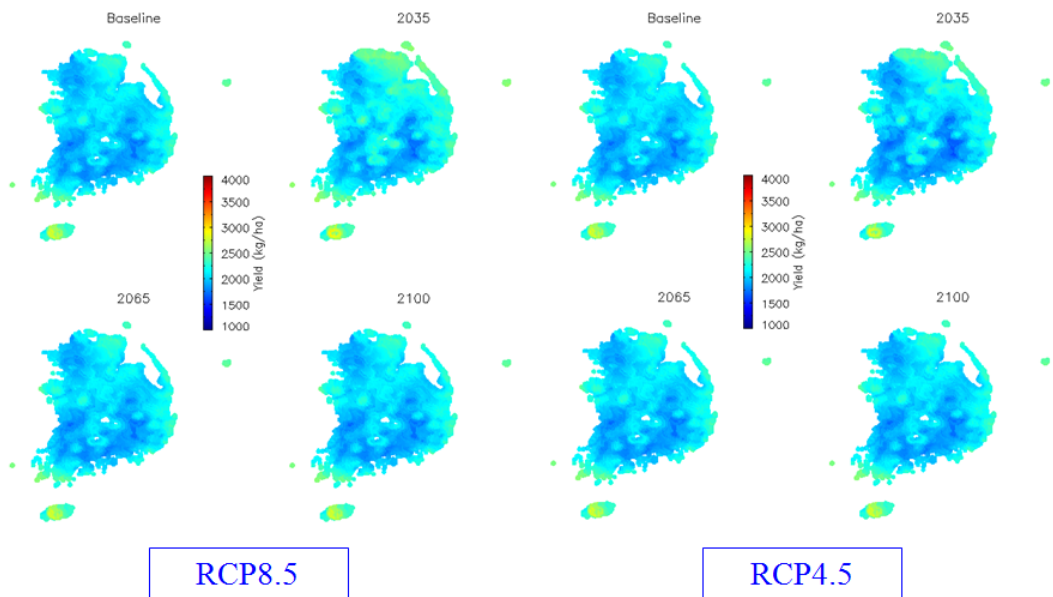
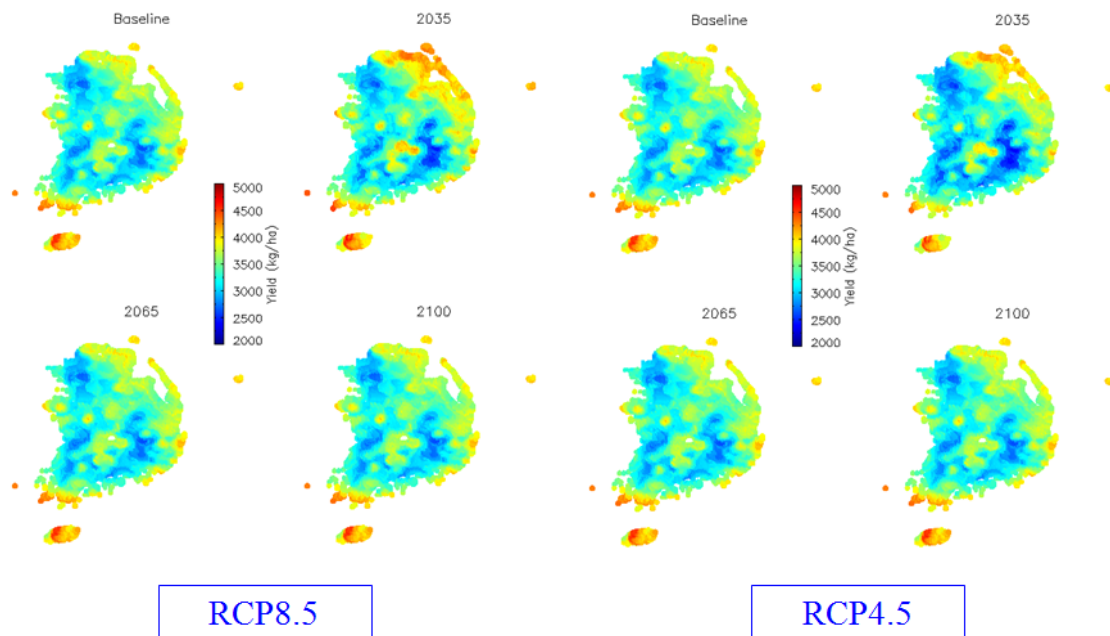


그림 3-28. 남한지역에 대한 RCP8.5 및 RCP4.5(IPCC, 2013)에 따른 현재(Baseline) 와 미래(2035, 2065, 2100) 기후변화 조건에서 운광벼의 수량 2차원 공간변이 지도



4. 연구결과 요약 및 결론

본 연구에서 도출한 주요 결과를 요약하면, 첫째 기후변화가 농작물에 미치는 영향 평가를 위한 작물생산 모델링 로드맵을 작성하였으며, 둘째 CERES-Rice, CROPGRO-Soybean, 및 CERES-Sorghum 작물모형들을 대상으로 각 작물별 모형의 평가(parameterization 및 validation)와 기후변화 영향분석 및 영향평가를 수행하였으며, 셋째 기후변화 대응 및 적응 시스템의 구축 실증 연구로 작물 생육기간 중 기상 인자 2차원 공간변이 가시화 구현 및 작물 생산성 2차원 공간변이 모델링 체계 구현 연구를 성공적으로 수행하였다.

이러한 핵심 연구결과가 의미하는 바는, 첫째 주요 농작물에 대한 기후변화 영향 분석 및 영향평가를 수행할 수 있는 도구로 작물모형이 필수불가결한 요소라는 점을 실증하였으며, 둘째 미래 기후변화에 대한 시계열 패턴뿐만 아니라 지역 간, 필지 간 및 필지 내 2차원 공간변이에 대한 기후변화 영향분석 및 영향평가가 가능하도록 작물생육 및 수량 모의 시스템을 구축하고 실증연구를 통하여 구현하였다는 것이다.

본 연구의 한계 점은 제한된 연구 기간 및 연구 여건 등으로, 첫째 보다 다양한 지역, 핵심 농작물 및 주요 품종을 대상으로 기후변화 영향분석 및 영향평가가 수행되지 못하였다는 것이고, 둘째 기후변화 대응 및 적응 시스템의 실증 연구로 구축된 작물 생산성 2차원 공간변이 모델링 체계의 실용적 구현을 위한 격자 입력(토양 및 기상)자료 체계의 구성/구축을 미완성으로 연구 과제를 마무리하였다는 것이다.

본 연구 성과가 기후변화 대응 및 적응 대책을 위한 정책수립을 위하여 유의미한 연구 결과물이 될 것으로 판단된다는 긍정적 가정 하에 향후 후속연구로 추진해야 할 과제는, 첫째 위에서 제시한 본 연구 결과의 두 분야에서의 한계점을 보완하는 과제가 수행되어야 할 것으로 생각되며, 둘째 기후변화 대응 및 적응 대책을 위한 시나리오 및 모의/구현/실증 연구과제가 수행되어야 할 것으로 판단된다. 이러한 연구과제에서 도출된 결과를 기반으로 하여 기후변화 대응 안정적 농작물 생산 및 수급 정책수립이 이루어져야 하며 또한 미래 기후변화 영향 하에서 각 지역에 적합한 작부체계, 지역별 적응하기에 용이한 작물 및 품종 개발 방향 등과 같은 기술개발 방안이 모색되어야만 할 것으로 판단된다.

제4절 산림분야 기후변화 영향평가 모델 구축(2협동과제)

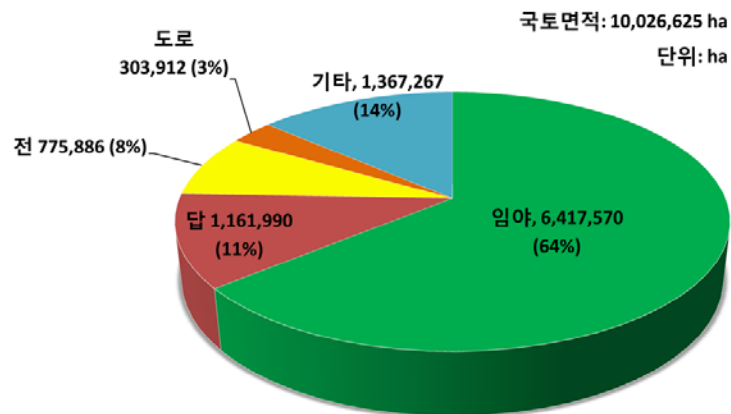
1. 연구대상지 및 자료

가. 연구범위

(1) 공간적 연구범위

본 과제의 공간적 연구범위는 남한지역만을 포함하는 경도 $124^{\circ} 54'$ ~ $131^{\circ} 6'$, 위도 $33^{\circ} 9'$ ~ $38^{\circ} 45'$ 로 한정하였으며, 5차 임상도를 기준으로 남한지역의 전체 산림을 대상으로 진행되었다. 본 과제에서는 GIS(Geographic Information System) 기반의 공간분석도 실시하였으며, 기본 공간해상도는 0.01° (약 1km)로 정하였다(그림 4-1).

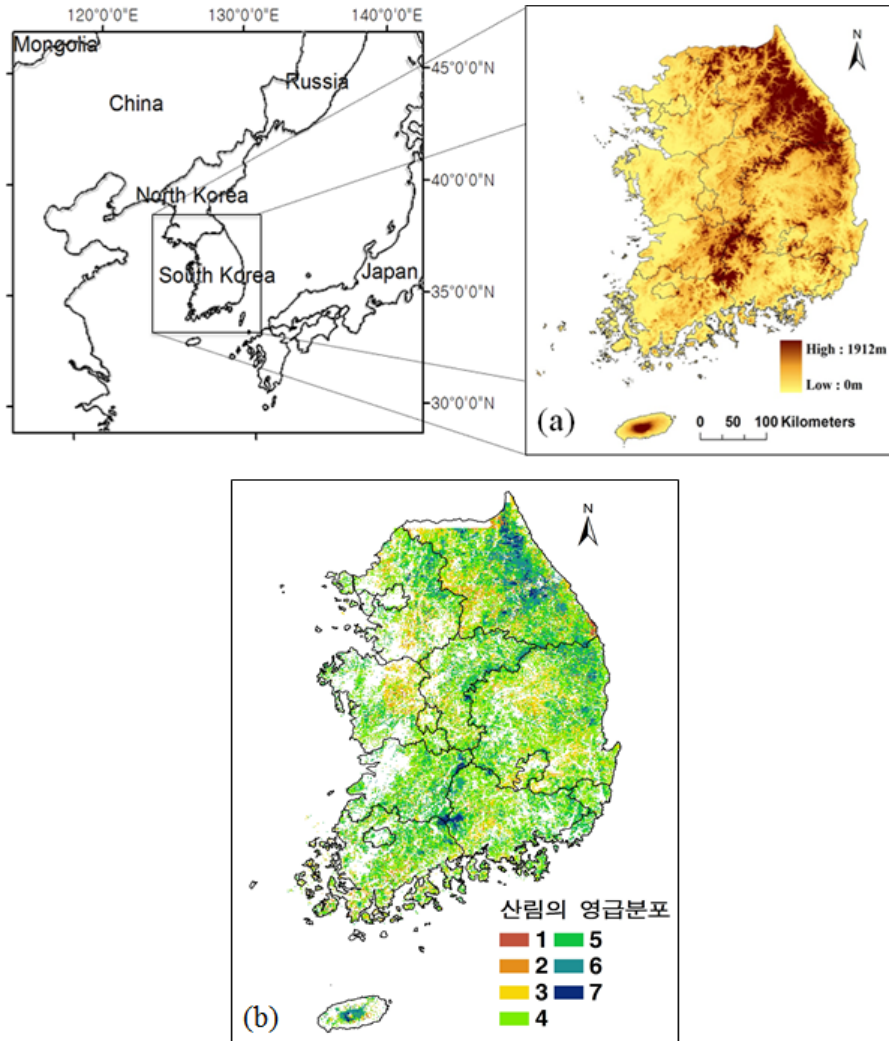
그림 4-1. 국토이용 현황(산림청, 2014)



우리나라의 국토면적은 2010년말 10,003천ha(국토교통부, 2010)이며 산림법상 실질적인 산림면적은 6,369천ha로서 국토의 63.7%를 차지하고 있다. 우리나라의 2010년 기준 산림율은 OECD 국가 중 핀란드, 스웨덴, 일본에 이어 네 번째로 높은 것으로 나타났다. 그러나 산림율은 1980년 66.3%에서 2.6% 감소하였으며, 이는 국토면적은 지속적으로 증가하는 반면 산림면적은 계속해서 감소하기 때문인 것으로 나타났다(산림청, 2014). 우리나라의 2010년 산림면적은 전년도 대비 1,461ha(0.02%)가 감소하였으며, 이는 최근 10년 평균 산림 감소 면적인 5,329ha/year에 비해 큰 폭으로 낮아졌다. 이는 2009년 경기도 연천군 등 일부지역의 지적복구 등으로 산림이 크

계 증가한데 기인한 것으로 나타났다. 산림의 감소면적은 도로, 대지, 공장용지, 농경지로의 전영 등으로, 2009년과 비슷한 수준인 5,593ha로 나타났다.

그림 4-2. 연구 대상지의 지형(a)과 영급분포(b)



우리나라 전국 산림의 임상분포는 침엽수림 2,581천ha(40.5%), 활엽수림 1,719천ha(27.0%), 혼효림 1,856천ha(29.4%), 죽림·무림목지 204천ha(3.1%)로서 침엽수림이 가장 많이 분포하는 것으로 나타났다. 그러나 최근 10년간의 임상별 산림면적 변동 추이를 보면 침엽수림은 점차 감소하고 있으며, 활엽수림 및 혼효림 면적이 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다(산림청, 2014). 특히, 국내 침엽수림의 주요 수종인 소나무림은 전체 산림의 약 23%를 차지하고 있으나, 기후변화로 인한 고온과 가뭄 스트레스, 산불·산사태 등의 산림재해와 소나무병충해(재선충, 솔껍질깍지벌레, 솔잎혹파리) 등 여러 요인으로 인해 지속적으로 큰 폭으로 감소하는 추세를 보이고

있다(산림청, 2012; 김찬수 등, 2011; 송국만 등, 2012). 전국산림자원조사 자료에 의하면 1974년에 우리나라 소나무 분포면적은 3,226천ha이었으나, 1999년에는 2,478천ha, 2012년에는 1,447천ha로 40년 만에 절반이하로 크게 감소하였다(산림청, 2012). 활엽수림은 강원도, 침엽수림은 경상북도에 가장 많이 분포하며, 특히 강원도 활엽수림은 면적 비율이 54.9%로 1995년 산림기본통계의 면적(32.38%)과 비교 시 증가하고 있는 것으로 나타났다(국립산림과학원, 2013). 면적 비율로 볼 때, 17개 광역시도 중 12개소에서 활엽수림이 침엽수림보다 많은 면적을 차지하고 있어 전국적으로 활엽수림 분포가 북상하고 있는 것으로 나타났다(국립산림과학원, 2013).

(2) 시간적 연구범위

본 과제의 시간적 연구범위는 현재(2010)년부터 40년 뒤인 2050년까지로 한정하였으며, 시간적 스케일은 년 단위로 정하였다. 전체 연구범위를 40년으로 제한한 이유는 너무 먼 미래까지 연구 범위로 포함할 경우, 불확실성이 높아져서 연구결과를 신뢰하기 어려우며, 그에 따라 국가적인 기후변화 관련 의사결정과 적응정책수립을 지원하기 어렵기 때문이다.

시간적인 스케일을 년 단위로 정한 것은 우리나라는 4계절이 뚜렷한 기후적 특징을 가지고 있으며, 이에 따라 임목의 생장과 산림재해 및 산림병해충의 발생이 1년 주기로 유사한 패턴을 가지기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 기상자료를 년 단위로 구축하여 적용하였으며, 임목의 연년 성장량을 예측할 수 있는 모형을 고안하여 미래 기후변화가 산림의 임목축적 변화에 미치는 영향을 분석하고, 이를 정량화하고자 하였다. 또한, 기후변화가 산림병해충 발생에 미치는 영향도 1년 단위로 평가하여 결과를 도출하였다.

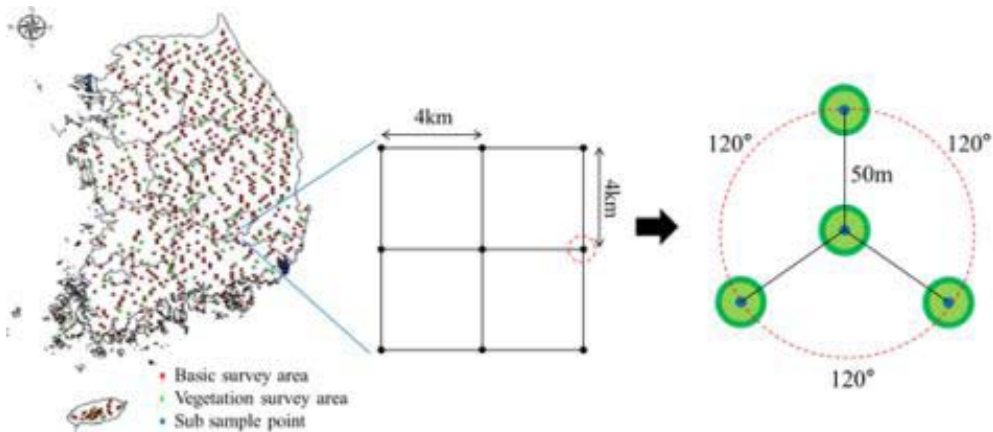
나. 연구 자료

(1) 목편 자료

전 세계 임업 선진국들은 정확한 임목자원량을 파악하고, 임목자원량 및 산림생태계의 변화를 감지할 수 있는 국가적 조사 및 모니터링 체계를 구축하고 있다. 우리나라의 경우 산림청에서 총괄하는 제5차 국가산림자원조사(5th National Forest Inventory)가 이에 해당된다. 제5차 국가산림자원조사는 전국 산림을 과학적인 방법으로 조사·평가하여 우리나라 산림기본계획 및 산림정책수립의 기본 자료를 제공하고, 국제사회로부터의 다양한 형태의 산림자원 및 산림환경통계 제출 요구에 대응하기 위해 설계되었다. 2006년부터 2010년까지 5년간 수행되었으며, 2011년부터는 매

년 지속적인 모니터링이 수행되고 있다. 제5차 국가산림자원조사는 전국 산림을 대상으로 계통추출법에 의해 배치된 약 4,000개의 고정표본점을 대상으로 조사하였다. 고정표본점은 집락표본점(Cluster plot) 구조로 우리나라 산지의 지형적 변이를 고려한 형태인 4개의 부표본점(Subplot)으로 구성되며, 각 부표본점의 면적은 0.08ha이다 (그림 4-3).

그림 4-3. 제5차 국가산림자원조사 표본점 배치 및 형태



자료: 산림청과 국립산림과학원(2008)

각 부표본점별 임분개황조사로부터 표본점 위치(좌표), 지황(해발고도, 경사 등), 임황(임상, 경급, 영급 등)을 조사하고, 기본조사원과 대경목조사원에서 임목을 조사하였다. 임목조사는 흉고지경 6cm이상의 개체목의 수종, 흉고직경, 수관급, 형질급

그림 4-4. 국가산림자원조사 생장목편DB 구조 (산림청, 2013)

일련 번호	집락 번호	표본점 번호	채취 연월일	채취장소 (시군)	수종 (국명)	수령	흉고직경 (cm)	수고 (cm)	지하고 (cm)	최근5년 생장량 (mm)								
0	364352	3643523	20100716	안동시	소나무	23	12	790	450	2								
연륜측정결과 데이터																		
No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
(mm/100)	202	185	225	257	318	314	379	341	235	179	189	220	258	377	376	342	342	517



등을 조사하고, 이 중 임분을 대표하는 표준목을 10본 이상 선정하여 수고, 지하고를 측정하였다(산림청과 국립산림과학원, 2008). 선정된 표준목 중 5본 이상에 대하여 성장목편(Core)을 추출하고 수령, 성장량, 수 길이 등 임목의 성장 정보를 얻었다. 취득한 임목 성장 정보는 ‘성장목편DB구축(2008~2013)’을 통해 별도로 구축·보관하였다(그림 4-4).

2006년부터 2010까지 이루어진 국가산림자원조사를 통해 전국에 4km간격으로 배치된 표본점에 대해 현지조사를 수행하고 목편시료(Tree ring)를 채취하였다<그림 4-5>. 목편은 표본점 내에 정상적으로 생육한 나무 중에서 수종과 직경이 고르게 포함되도록 선정된 10본의 표준목 중 5본 이상에 대하여 채취되었다. 채취된 이듬해에 연륜측정기(DTRS-2000)를 이용하여 1/100mm 단위까지 세밀하게 연륜폭을 측정하여 연륜성장 DB를 마련되었다(그림 4-6).

그림 4-5. 성장목편 채취와 수집된 목편자료



(a) 성장추를 이용한 성장목편 채취



(b) 목편

그림 4-6. 연륜측정장비(a)와 연륜촬영장비(b)



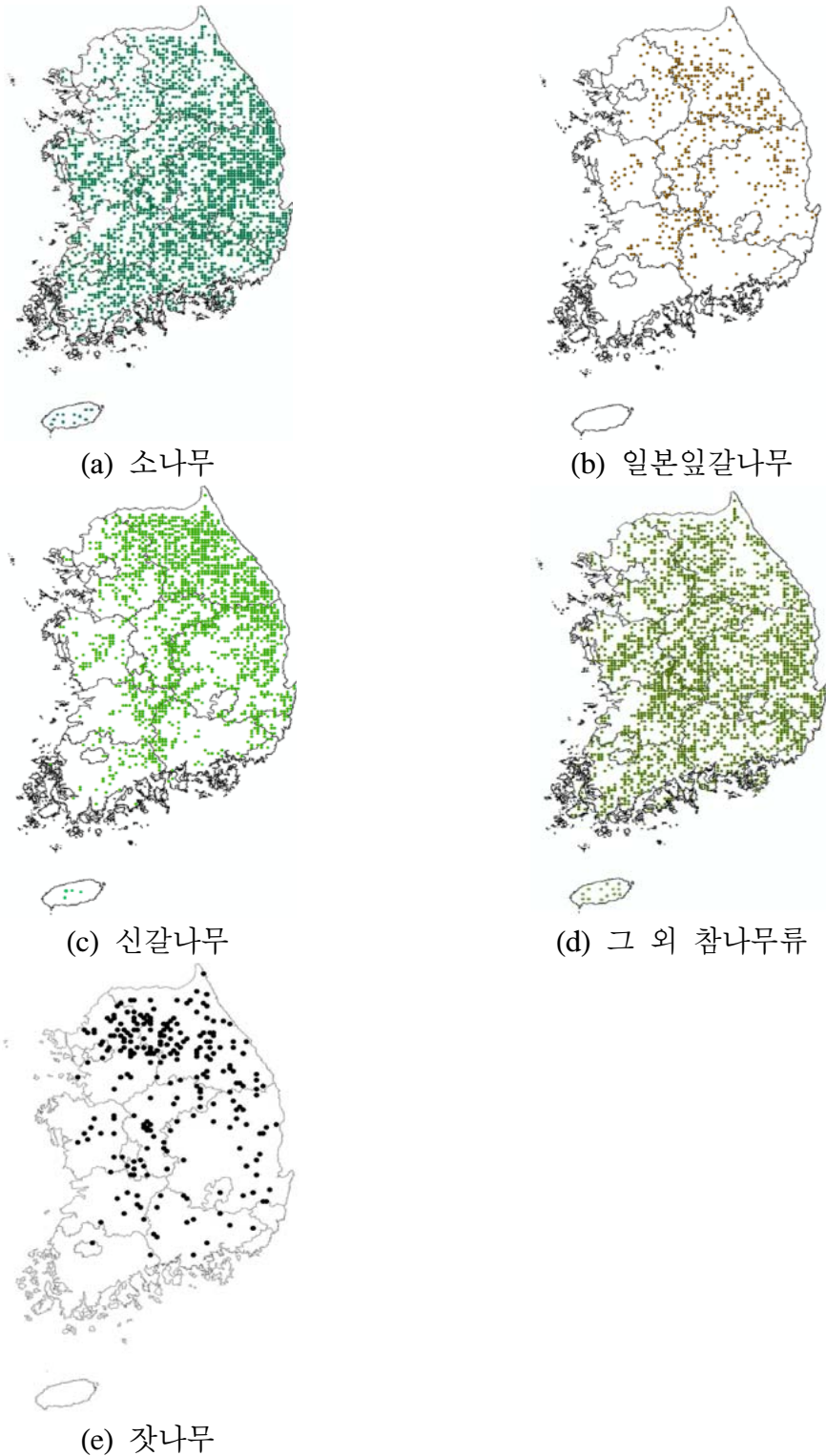
(a)



(b)

본 연구에서는 제5차 국가산림자원조사에서 채취한 목편의 측정정보로 구축된 연륜생장 데이터베이스의 강원지방소나무(3,572본), 중부지방소나무(13,955본), 일본잎갈나무(1,905본), 잣나무(1,327본), 신갈나무(8,800본), 그 외 참나무류(9,993본)에 대

그림 4-7. 목편을 획득된 국가산림자원조사 고정 조사구



한 연륜정보를 활용하였다. 또한, 기상 및 지형자료를 활용하기 위해 각 수종별 목편을 채취한 표본점의 위치 좌표를 활용하였다(그림 4-7).

(2) 임상도

임상도(Forest type map)는 항공사진을 통해 산림 지역을 판독하여 주요수종, 영급, 소밀도, 등 임황자료를 임지에 대한 소관별, 임종별로 지형도(1/25,000)에 도화 작성한 도면이다. 본 연구에서는 제5차 임상도를 활용하였다. 제5차 임상도는 2006~2010년에 제작되었으며, 1:25,000 지형도를 기준으로, 임상의 구분은 임층설에 근거하여 작성되었으며 면적이 0.5ha이하인 임상은 구분하지 않았다. 임상도는 전국의 산림을 임분단위로 구획하여 수종, 경급(Diameter class), 영급(Age class)에 대한 정보를 제공하며 GIS 기반의 공간자료로 구축이 되어 있다. 수종은 총 18개의 주요 수종으로 분류되어 있으며, 경급은 4개의 계급으로, 영급은 10년을 하나의 계급으로 나누어서 분류되어 있다. 임분 내 임목의 밀함에 대한 정보인 수관밀도(Crown density)는 소, 중, 밀의 상태로 나누어진다. 수치 임상도의 속성 구조는 <표 4-1>와 같다.

표 4-1. 수치임상도 속성 구조

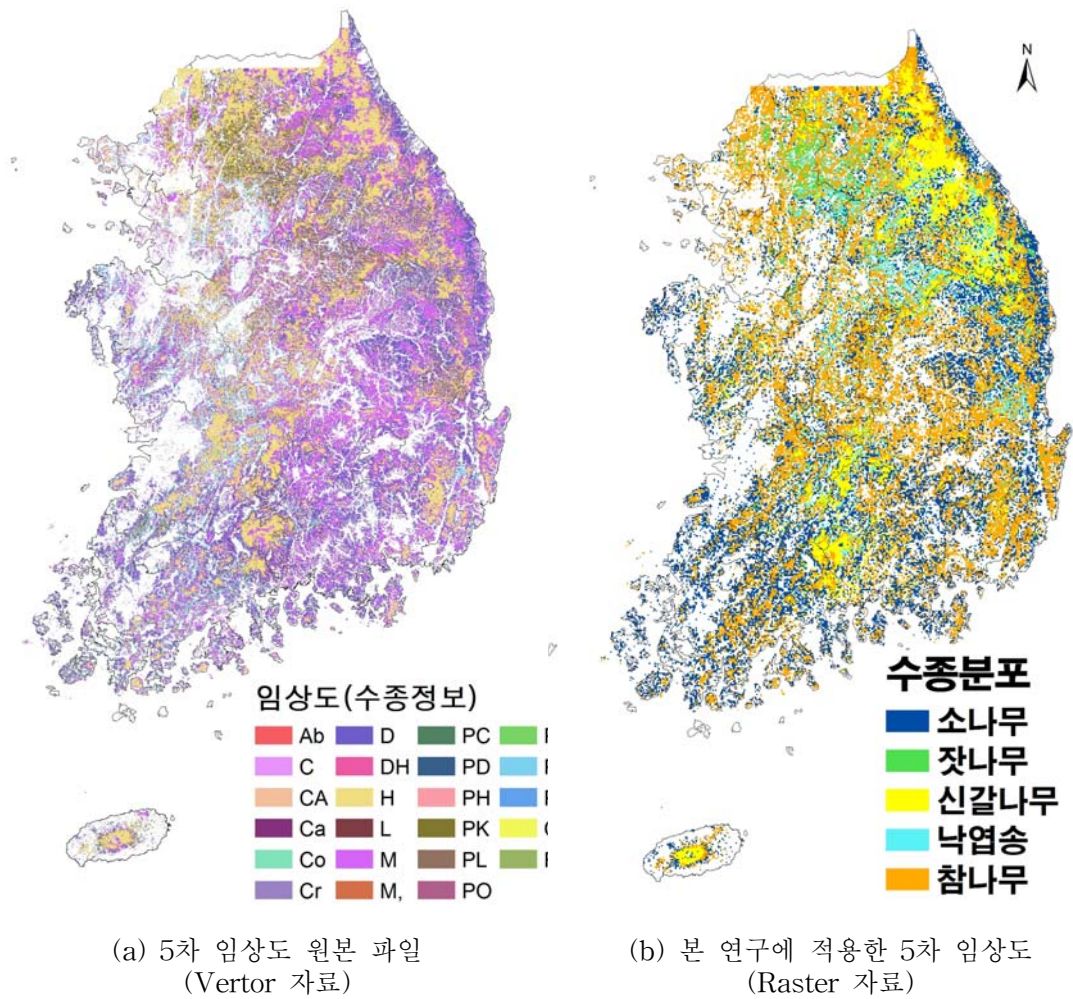
Attribute (Field name)	Field type	width	output width	Description
SANG	String	2	2	임상 정보
KUNG	Short Integer	2	2	경급 정보
YUNG	Short Integer	2	2	영급 정보
MILDO	String	2	2	소밀도 정보
YEAR	Short Integer	4	4	재해년도
SHAPE_LENGTH	Double	8	8 (소수점6)	Perimeter
SHAPE_AREA	Double	8	8 (소수점6)	면적

임상도는 공간분석에 불리한 Polygon 형태의 Vector 속성을 가진 공간자료로 구축되어 있기 때문에, 이를 다양한 공간분석과 자료 중첩에 적합한 격자형 형태의 Raster 속성 자료로 변환하여 사용하였다. Raster로 변환한 자료는 기상자료와 직접적으로 연계가 가능하도록 공간해상도를 1km X 1km로 설정하였다(그림 4-8).

본 연구에서는 우리나라 주요 침엽수종인 소나무, 일본잎갈나무, 잣나무를 연구대상으로 하였으며, 활엽수종은 신갈나무와 그 외 참나무류로 구분하여 연구를 진행하였다. 우리나라 임상도는 침엽수종의 구분은 잘 되어 있으나, 활엽수종은 상대적으로 덜 세분화되어 있다. 따라서 본 연구에서는 임상도에서 활엽수림으로 구분된 지

역을 전부 참나무림으로 가정하였으며, 이 중 해발고도가 700m 이상인 산림지역을 신갈나무 임분으로 정의하였다. 실제로 신갈나무는 우리나라 전 국토에 두루 분포되어 있으나, 특히 해발고도 700m 이상에서 지배적으로 분포하고 있는 것으로 조사되었기 때문이다.

그림 4-8. Shape 형태의 5차 임상도 원본과 공간 해상도 1km로 변형한 Raster 형태의 임상도



2. 연구방법

가. 산림생장 영향평가

(1) 산림 성장모형

(가) 표준성장량 구축

기후변화가 산림의 생장에 미치는 영향을 정량화하고, 그 영향을 고려하여 산림의 성장과 임목축적의 변화를 예측하기 위해서는 산림성장모형에 기상인자가 포함되어야 한다. 본 과제에서는 이를 위해 Byun et al.(2013)이 고안한 성장 표준화 방법을 적용하였다. Byun et al.(2013)은 제 5차 국가산림자원조사에서 획득된 수종별 목편(Tree core)자료로부터 구축된 연년반경성장량(Annual radial growth)과, 각 목편 자료를 획득한 위치정보를 통해 얻어진 기상 및 지형자료를 이용하여 성장모형을 개발하였다. 이 모형은 수령(Tree age), 크기(Size), 지형습윤지수(Topographic Wetness Index, TWI)를 통해 해당 임분의 환경 조건을 반영하고, 온도와 강수량을 변수로 포함하여 환경, 공간, 기후의 이질성에 따른 임목의 성장을 예측할 수 있는 성장모형이다.

국가산림자원조사를 통해 획득된 수종별 목편자료는 매우 다양한 수령(Tree age)을 가진 임목들로부터 획득되었기 때문에 각 연도별 기후가 임목의 연년성장(Annual growth)에 미치는 영향을 직접 분석하는 것이 어렵다³². 따라서 Byun et al.(2013)은 기후조건이 수종별 성장에 미치는 영향을 분석하기 위해 표준성장량(Standard Growth, SG)을 고안하였고, 이를 도출하는 방법은 아래와 같다.

Byun et al.(2013)은 개체목의 연년 반경 성장량은 기본적으로 수령(Tree age)에 영향을 받는다는 것으로 가정하여 식 (4-1)과 같이 비선형 회귀분석을 기초로 반경성장 모형을 구축하였다.

$$\Delta r_i = a \cdot age_i^b \quad (4-1)$$

Δr_i : 수령 i 일 때 반경연령성장량

또한, 기상, 지형, 임분밀도, 지위지수 등 다양한 환경 인자에 의해 영향을 받는 임목의 성장을 표준화 하고자, 수령 30년일 때의 반경성장량을 식 (4-2)와 같이 표준생

³² 임목의 연년 생장은 임령에 많은 영향을 받기 때문에 임령이 다른 임목은 성장량에 차이를 보이게 되며, 따라서 임령이 다른 임목의 성장량 자료를 통해 곧바로 기후와 환경 조건이 임목 성장에 미치는 영향을 정량적으로 도출하는 것은 어렵다.

장량(Standard Growth, SG)이라 정의 하여 수종별로 그 값을 산출하였다.

$$SG = a \cdot 30^b \quad (4-2)$$

식 (4-1, 2)에 대수차변형(Algebraic difference equation)을 적용하여 표준성장량 (SG)을 다음과 같이 수령과 반경성장량으로 추정하였다. 이를 이용하여 수령에 상관 없이 모든 임목의 성장량을 수령이 30년일 때의 표준성장량으로 변환시킬 수 있다 (식 4-3).

$$SG = \Delta r \cdot \left(\frac{30}{Age}\right)^b \quad (4-3)$$

표준생장은 수목의 성장 중 수령의 영향만을 설명하였으며 경쟁, 지위, 기상요소 등의 다른 조건의 영향은 포함하지 않았다. 수령은 나무 개개의 모델 구성요소인 반면, 경쟁관계와 지위는 임분단위의 요소로 고려되어 질수 있다. 그리고 기상인자는 넓은 지역의 성장 변이를 설명하기 위한 구성요소로 포함되어져야 한다. 표준생장은 단지 나무의 성장에 대한 수령의 영향을 제거한 것이며, 각 임목별 표준성장값의 차이는 다른 영향인자들에 의해 설명되어 질 수 있다.

(나) 수종별 기후영향 분석

본 연구에서는 Generalized Additive Model(GAM)을 이용하여 임목의 성장에 기후조건 및 지형조건이 미치는 영향을 분석하였다. GAM은 Generalized Linear Model (GLM)을 비선형으로 확장한 분석 방안이다(Guisan and Edwards, 2002; Hastie and Tibshirani, 1990). GLM은 모형의 계수에 대한 추정이 중점적으로 수행되는데 반면 GAM은 비선형의 데이터를 탐구하는데 초점을 두고 있다. GAM의 강점은 반응변수와 설명변수의 비선형적인 관계를 다룰 수 있다는 점이다. 이에 GAM은 모형의 형태보다는 데이터 자체에 더 무게를 두고 분석을 한다(Guisan and Edwards, 2002). 일반적으로 GAM은 식 (4-4)와 같이 표현된다.

$$Y = S_0 + \sum_{g=1}^p S_g(X_g) + \epsilon \quad (4-4)$$

S_0 : 절편값, $S_{g(X_g)}$: g 번째 독립변수에 대한 비선형 평활화 식

GAM은 일반적으로 매개변수의 적합성을 알아보거나 중요한 변수에 집중하고자 불필요한 변수의 영향을 제거하기 위해 사용된다(Trevor and Robert, 1986).

(다) 반경성장모형

본 과제에서는 Byun et al.(2013)이 고안한 성장모형(식 4-5)과 이를 보완한 성장모형(식 4-6) 두 가지를 통해 임목 수종별 기후영향을 평가하였다. 기존의 Byun et al.(2013)이 고안한 성장모형은 기후인자와 임목성장간의 관계를 선형적으로 모의하였다. 이는 각 기후인자가 수종별 임목 성장에 미치는 영향을 직접적으로 알 수 있다는 장점이 있으나, 역치를 고려하지 못했다는 한계가 존재한다. 즉 기존의 성장모형의 경우 특정 수종의 생장이 온도와 양의 상관관계를 가질 때, 온도가 증가함에 따라 성장량도 계속해서 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 일반적으로 각 임목 수종은 분포할 수 있는 온도 범위가 제한적이며, 생육 적정온도를 가지고 있다(Choi et al., 2012). 즉 각 수종은 특정 온도 이상, 혹은 이하에서는 성장과 생존에 불리하게 된다. <그림 4-9>는 산림의 이러한 특성을 잘 보여준다. <그림 4-9>는 현재와 미래의 우리나라 온량지수(Warmth index) 분포와 온량지수에 따른 소나무(*P. densiflora*)와 참나무류(*Q. spp*)의 표준성장량 분포를 나타낸다. 참나무의 경우 현재 우리나라의 온량지수 분포 범위 내에서, 온량지수가 증가함에 따라 계속해서 생장이 증가하는 것으로 나타났지만, 소나무의 경우 온량지수가 85℃ 이상인 지역에서는 성장량이 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 기존에 Byun et al.(2013)이 고안한 모형(식 4-5)을 보완하여, 2차형의 비선형적 모형을 적용하였다(식 4-6).

$$\text{Estimated SG} = f(T, P, \text{TWI}) = a + b \cdot \text{TWI} + c \cdot T + d \cdot P \quad (4-5)$$

$$\text{Estimated SG} = f(T, P) = a \cdot T^2 + b \cdot T + c \cdot P^2 + d \cdot P + e \quad (4-6)$$

T=연평균 온도, P=연 누적 강수량, TWI: Topographic Wetness Index

본 연구에서 고안한 성장모형은 연도별 기상조건에 따른 수종별 임목의 연년반경 성장량(Annul radial growth)을 추정할 수 있도록 고안되었다. 또한, 그 값은 표준화된 값으로 현재나 미래 임목의 수령 변화에 따른 영향을 받지 않기 때문에, 기후변화가 임목 성장에 미치는 영향 및 취약성을 평가하기에 적합하다고 사료된다.

(라) 산림재적 추정 모형

개체목의 재적을 산출하기 위해서는 직경과 수고 정보가 필요하며, 이를 공간적으로 확장하여 임분 규모에 적용하기 위해서는 임목의 임분 평균 크기, 면적, 밀도

(Stand density, n/ha) 정보가 필요하다. 본 연구에서는 5차 임상도정보를 통해 현재 산림의 현황을 파악하고, 이를 기반으로 미래 성장량을 예측하였다.

Kwak et al.(2012)은 국가산림자원 조사 자료를 기반으로 구축한 성장모형과, 임상도 자료를 융합하여 전국의 산림재적을 추정한 바 있다. Kwak et al.(2012)는 임분 평균직경과 수고, 밀도와와의 관계를 회귀분석을 통해 모형화하고, 이를 기반으로 직경생장을 통해 임분재적을 예측하는 성장모형을 개발하였다<그림 4-10, 표 4-2>. 본 연구에서는 Kwak et al.(2012)이 고안한 산림재적 평가 모형을 적용하되, 기후변화의 영향을 고려할 수 있도록 Byun et al.(2013) 개발한 성장모형과 본 연구에서 고안한 성장모형을 적용하였다. 다만, Byun et al.(2013)이 고안한 모형은 연년 반경성장모형임으로, 이를 연년 직경성장모형으로 전환하였다. 임목의 재적은 직경과 수고로부터 산출되며 식 (4-7), 수종별 계수는 <표 4-3>과 같다(산림청, 2009).

$$V = a \cdot DBH^b \cdot h^c \quad (4-7)$$

그림 4-9. 현재와 미래의 우리나라 온량지수(Warmth index) 분포와 온량지수에 따른 소나무(*P. densiflora*)와 참나무류(*Q. spp.*)의 표준성장량 분포(Byun et al. 2013)

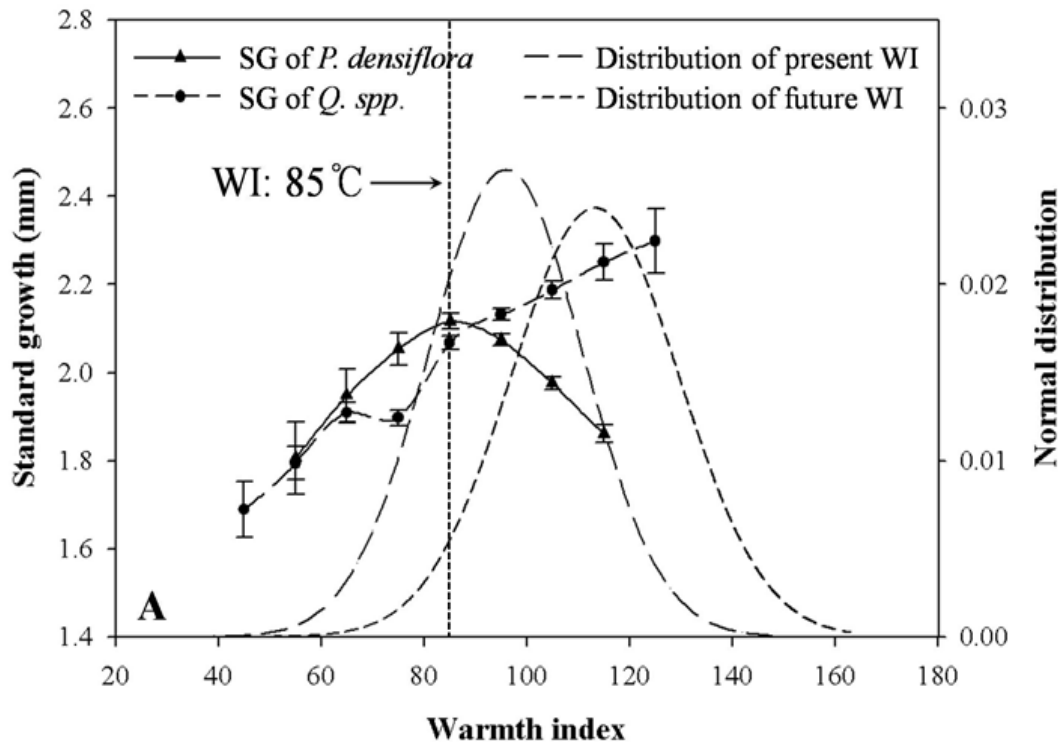


그림 4-10. NFI자료와 임상도를 이용한 임목축적 산출 모식도(Kwak et al., 2013)

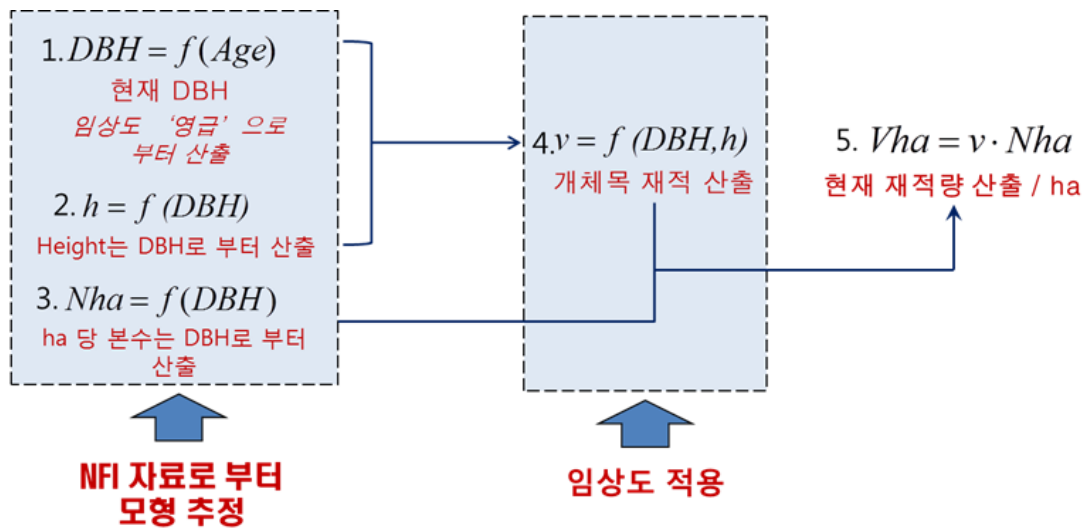


표 4-2. 임목의 흉고직경, 수고, 밀도를 추정하는데 사용된 회귀모형

번호	함수 이름	함수에 사용된 계수의 개수	함수 형태
1	Power	2	$DBH = a \cdot age^b$
2	Power	2	$Nha = a \cdot DBH^b$
3	Michailow	2	$h = 1.2 + a \cdot e^{b/DBH}$

표 4-3. 수종별 임분 재적 추정 모형($V = a \cdot DBH^b \cdot h^c$)에 적용된 계수(산림청, 2009)

계수	<i>Pinus densiflora</i>	<i>Pinus koraiensis</i>	<i>Pinus rigida</i>	<i>Larix kaempferi</i>	<i>Castanea crenata</i>	<i>Quercus spp.</i>
a	0.000201	0.000088	0.000015	0.000047	0.000344	0.000259
b	1.7593	1.7828	2.4239	1.8603	1.3639	1.7043
c	0.6583	0.9397	0.8651	1.0589	0.8790	0.6045

(2) 산림생장 취약성평가

본 연구에서는 위에서 고안한 성장모형을 사용하여 기후변화에 따른 산림생장 취약성을 다음과 같이 평가하였다(식 4-8).

$$VFG = 1 - \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \tag{4-8}$$

$$x = V_{\text{future}} - V_{\text{current}}$$

V_{future} : x_i 임분의 미래 임목 축적, $V_{current}$: x_i 임분의 현재 임목 축적

VFG : *Vulnerability of Forest Growth*

특정 임분이 어떤 지역에서 VFG 가 0에 가까운 값을 가지면, 이는 그 임분의 산림 생장이 꾸준하게 이루어지고 지속적으로 대기 중의 탄소를 흡수하여 기후변화 완화에 도움을 주는 건강한 산림이라는 것을 의미한다. 또한, 동시에 기후변화의 영향을 거의 받지 않거나, 임목생장에 긍정적인 영향을 받는다는 것을 나타내며, 이는 기후변화에 대한 적응성이 높고 취약성이 낮다고 해석할 수 있다. 반대로 1에 가까운 값을 가지면 산림의 성장률이 낮다는 것을 의미하며, 이는 미래의 기후가 임목의 성장과 생존에 현재 보다 불리한 영향을 미친다는 것을 나타낸다. 이는 적응성이 낮고 취약성이 높다고 해석할 수 있다.

나. 산림 병해충 영향평가

(1) 산림 병해충 취약성 평가 개요

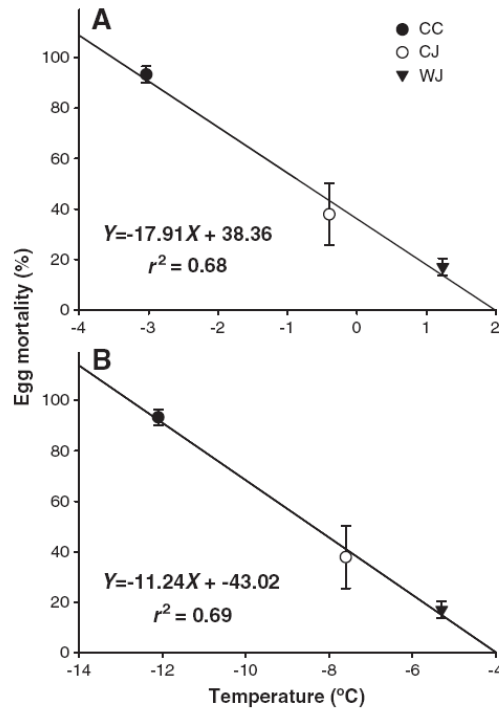
임종환(2009)은 기후변화로 인해 산림 병해충의 침입외래종의 유입과 돌발적 확산으로 산림교란이 우려된다고 하였다. 기후변화에 따른 해충발생 증가의 주요 원인으로 ① CO_2 농도 증가에 따른 식물방어능력 저하와 영양분 증가, ② 천적의 섭식량 감소, ③ 생물다양성의 감소, ④ 계절성 변화 등을 들 수 있다(Regniere, 2008). 우리나라도 아열대성 병해충이 새롭게 발생하거나 최근 급격히 증가하고 있다(임종환, 2009). 최근 창궐하고 있는 꽃매미(*Lycorma delicatula*)는 중국이 원산지로서 인도, 베트남, 일본 등에 분포하는 아열대성 해충이다. 1932년도에 국내에서 보고된 기록이 있었으나 발견 기록이 없다가 돌연 2006년 서울과 경기지역에서 발견된 이래 점차 창궐하고 기온이 보다 높은 정읍, 상주 방향으로 확대되었다. 이러한 사실들은 꽃매미의 창궐이 온난화와 직·간접적으로 연관되어 있을 가능성을 보여준다(산림과학원, 2008).

(2) 꽃매미 알 폐사율

기후변화에 따른 병해충 취약성 평가를 위해서는 수많은 종류의 병해충의 창궐과 기후변화와의 관계를 통합하여야 한다. 하지만, 본 연구에서는 자료 수집과 분석의 한계로 꽃매미를 병해충의 대표적인 예로 선택하여 취약성을 평가하였다. 병해충의 창궐에는 겨울철 기온이 중요한 요소이다. 꽃매미 알의 폐사율은 겨울철(12~2월)의 평균기온과 1월 평균 최저기온과 관련 있다(Lee et al., 2010; 그림 4-11). 본 연구에

서는 식 (4-9)와 식 (4-10)을 이용하여 우리나라 겨울철 평균기온의 변화에 따른 꽃매미의 알 폐사율의 변화를 알아보았다.

그림 4-11. 꽃매미 알의 폐사율과 겨울철 평균기온 및 1월 최저기온의 관계 (Lee et al., 2010)



$$The\ egg\ mortality = \frac{(Total\ number\ of\ egg - The\ number\ of\ eggs\ hatched)}{Total\ number\ of\ egg} \times 100 \quad (4-9)$$

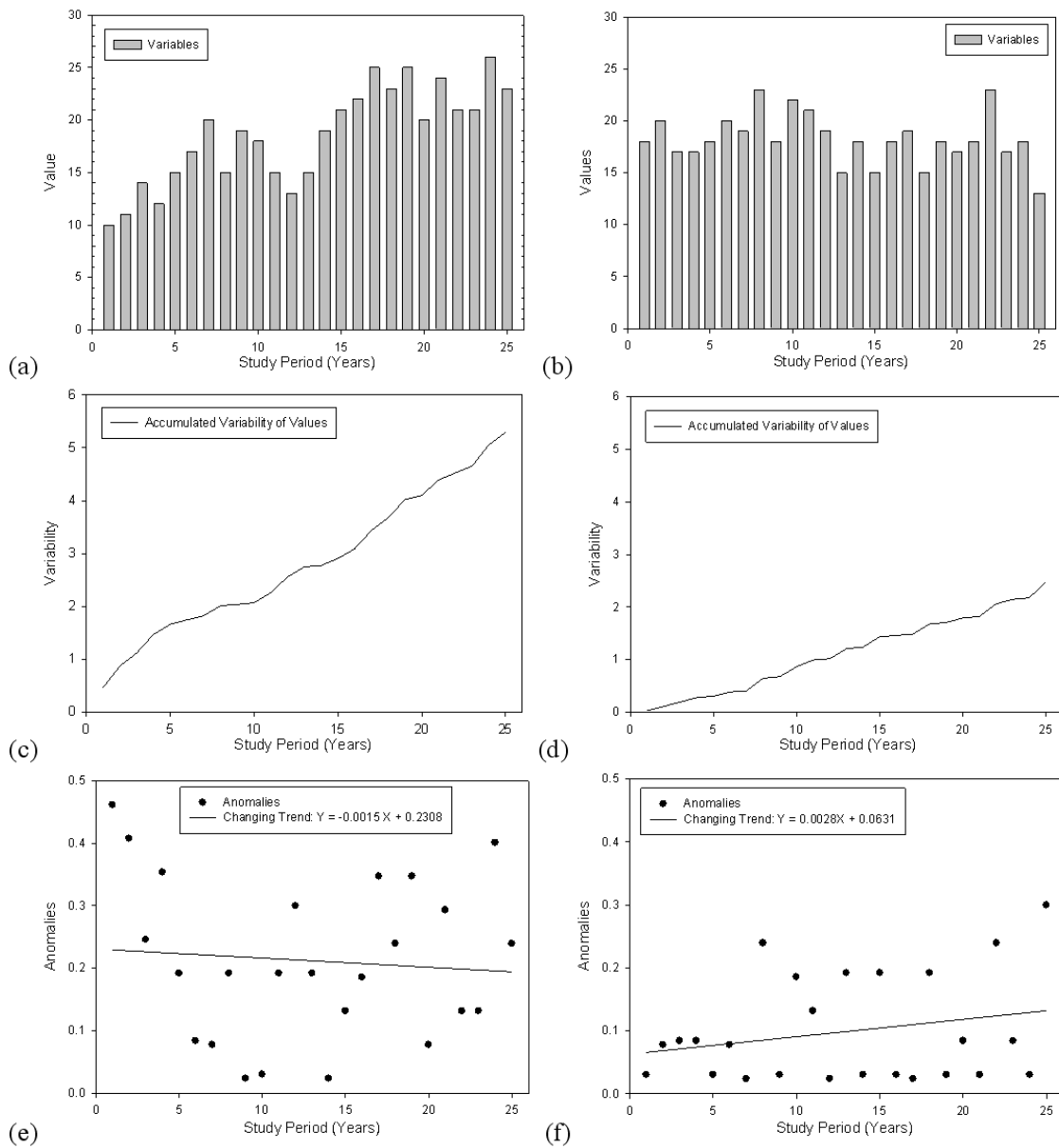
$$M_{winter} = -17.91 T_{winter} + 38.36 \quad (4-10)^{33}$$

(3) 산림병해충 취약성

본 연구에서는 Choi et al.(2010)이 사용한 생태계기능 취약성평가 방법을 응용하여, 꽃매미의 발생 가능성을 통해 산림병해충 취약성을 평가하였다(그림 4-12). 산림병해충 취약성의 민감성은 알 폐사율의 변화정도, 즉 변이성 (variability)으로 평가하고, 적응성은 변이성의 변화경향(changing trend)으로 평가하였다.

³³ 여기서, M_{winter}: 겨울철 (12월~2월) 평균기온에 따른 꽃매미 알 폐사율을 의미한다.

그림 4-12. 생태계 기능 취약성 평가 방법론 (Choi et al., 2010)



(가) 기후변화 민감성 도출

기후변화에 따른 산림병해충 발생 민감성은 기후변화에 따른 알 폐사율의 변화정도, 즉 변이성으로 평가한다.

$$\text{산림기능의 민감성} = \text{산림기능의 변이성}$$

민감성은 식 (4-11)과 같이 계산되며, 이 변이성의 값이 클수록 기후변화에 따른

민감성은 높은 것이며, 반대로 낮은 변이성 값은 상대적으로 민감성이 낮은 것을 의미한다.

$$D_n = \frac{\sum_{i=1}^j |V_{ni} - \bar{V}_n|}{\bar{V}_n} \quad (4-11)^{34}$$

(나) 기후변화 적응성 도출

기후변화에 따른 병해충 발생 취약성 평가에서 적응성은 산림기능의 연도별(또는 기간별) 변이가 보이는 변화경향으로 평가하였다. 즉, 산림기능의 연도별(또는 기간별) 변이가 감소하는 추세로 가면, 산림기능이 안정화되어 기후변화에 대해 적응성이 높은 것으로 보고, 반대로 연도별 변이가 증가하는 추세로 가면 산림기능이 불안정화되어 적응성이 낮은 것으로 볼 수 있다. 이와 같은 관계를 식 (4-12)로 나타낼 수 있다.

산림기능의 적응성 = 산림기능의 변이 변화경향

$$Y = aX + b$$

$$Y_i = \frac{|V_i - \bar{V}|}{\bar{V}} \quad (4-12)^{35}$$

위의 $Y = aX + b$ 식에서 기울기 a 는 알 폐사율의 변화경향을 나타내는데, 이것이 곧 기후변화에 따른 알 폐사율의 적응성을 의미한다. 이러한 점에서 기울기 a 는 적응성을 나타내는 지표로 활용될 수 있다. 즉, 기울기 a 가 음(-)의 값을 가지면 산림기능의 연도별(또는 기간별) 변이가 감소하는 경향을 의미하며, 이는 곧 적응성이 높은 것을 나타낸다. 반대로 기울기 a 가 양(+)의 값을 가지면 산림기능의 연도별(또는 기간별) 변이가 증가하는 경향을 의미하며, 이는 곧 적응성이 낮은 것을 나타낸다.

³⁴ 여기서, D : 전체 기간 동안의 산림기능 변이성; V_i : 기간 i 의 산림기능 값; i : 기간; \bar{V} : 전체 기간 동안의 산림기능의 평균값; n : n 지역을 의미한다.

³⁵ 여기서, X : 연도 (또는 기간); Y : X 년도 (또는 기간)에서의 산림기능의 변이; Y_i : i 년도 (또는 기간)의 산림기능의 변이; V_i : i 년도 (또는 기간)의 산림기능 값; i : 연도 (또는 기간); \bar{V} : 산림기능의 평균값을 의미한다.

(다) 산림병해충 취약성 평가

산림병해충 취약성은 산림병해충 발생의 변이성이 평가되는 민감성에서 병해충 발생의 연도별(또는 기간별) 변이의 변화경향으로 평가되는 적응성을 감하여 평가한다.

$$\text{산림기능 취약성} = \text{민감성 [변이성]} - \text{적응성 [변화경향]} \quad (4-13)$$

다. 산림 부문 취약성 평가 종합

산림생장과 산림병해충 취약성 평가를 기반으로 산림 부문의 기후변화 취약성을 평가하였다. 본 과제에서는 산림생장과 병해충취약성 결과에 동일한 가중치를 부여하여 종합적인 취약성 평가를 진행하였다. 이를 위해 각 취약성평가 결과를 0~1 사이의 값으로 표준화한 뒤, 식 (4-13)을 통해 종합적인 취약성 결과를 도출하였다.

$$\text{산림취약성평가} = \text{산림생장취약성 평가} + \text{산림병해충 취약성평가} \quad (4-14)$$

3. 연구결과

가. 산림생장 취약성

(1) 수종별 수령에 따른 반경 연년 성장량 분포

Gauss-Newton 반복 방법으로 SAS의 비선형회귀분석을 이용하여 아래와 같이 성장량과 수령의 관계식에 대한 계수의 각 통계 값들을 도출하고 성장추정곡선을 나타내었다(그림 4-13). <표 4-4>는 수종별 성장모형을 추정한 결과이다. 회귀식에 대한 t-검정 결과를 보면 모든 수종에서 각 인자들이 0.1%에서 고도의 유의성을 보인 것을 확인할 수 있다.

표 4-4. 수종별 성장모형의 계수 추정

Tress species		Coefficient	Std. Error	t-value	P-value
소나무	a	6.2916	0.2145	29.32	<0.001
	b	-0.3316	0.0107	-31.01	<0.001
참나무류	a	8.7940	0.28231	31.15	<0.001
	b	-0.4389	0.01045	-42.01	<0.001
신갈나무	a	8.4022	0.29167	28.81	<0.001
	b	-0.4538	0.01077	-42.13	<0.001
일본잎갈나무	a	16.6886	1.29666	12.87	<0.001
	b	-0.5839	0.02502	-23.34	<0.001
잣나무	a	11.6989	0.9588	12.2	<0.001
	b	-0.4588	0.0283	-16.21	<0.001

수종별 연령에 따른 반경 연년성장량 분포는 <그림 4-13>과 같다. 연령에 따른 반경성장량을 살펴보면 수종에 상관없이 수령이 낮을 때는 분포 범위가 넓고 수령이 증가할수록 범위가 좁아짐을 확인할 수 있다. 이는 임목의 성장 특성과 일치하는 경향이며, 수령이 낮을수록 기상, 토양, 임분밀도, 지위지수 등 성장에 영향을 미치는 다양한 인자들로부터 더 큰 영향을 받는다는 것을 의미한다.

각 수종에 대해 <표 4-4>의 추정된 계수를 이용하여 다음과 같은 표준성장량식을 유도하였다(표 4-5).

그림 4-13. 수종별 연령에 따른 반경 연년 성장량 분포와 모형을 통한 추정성장 곡선

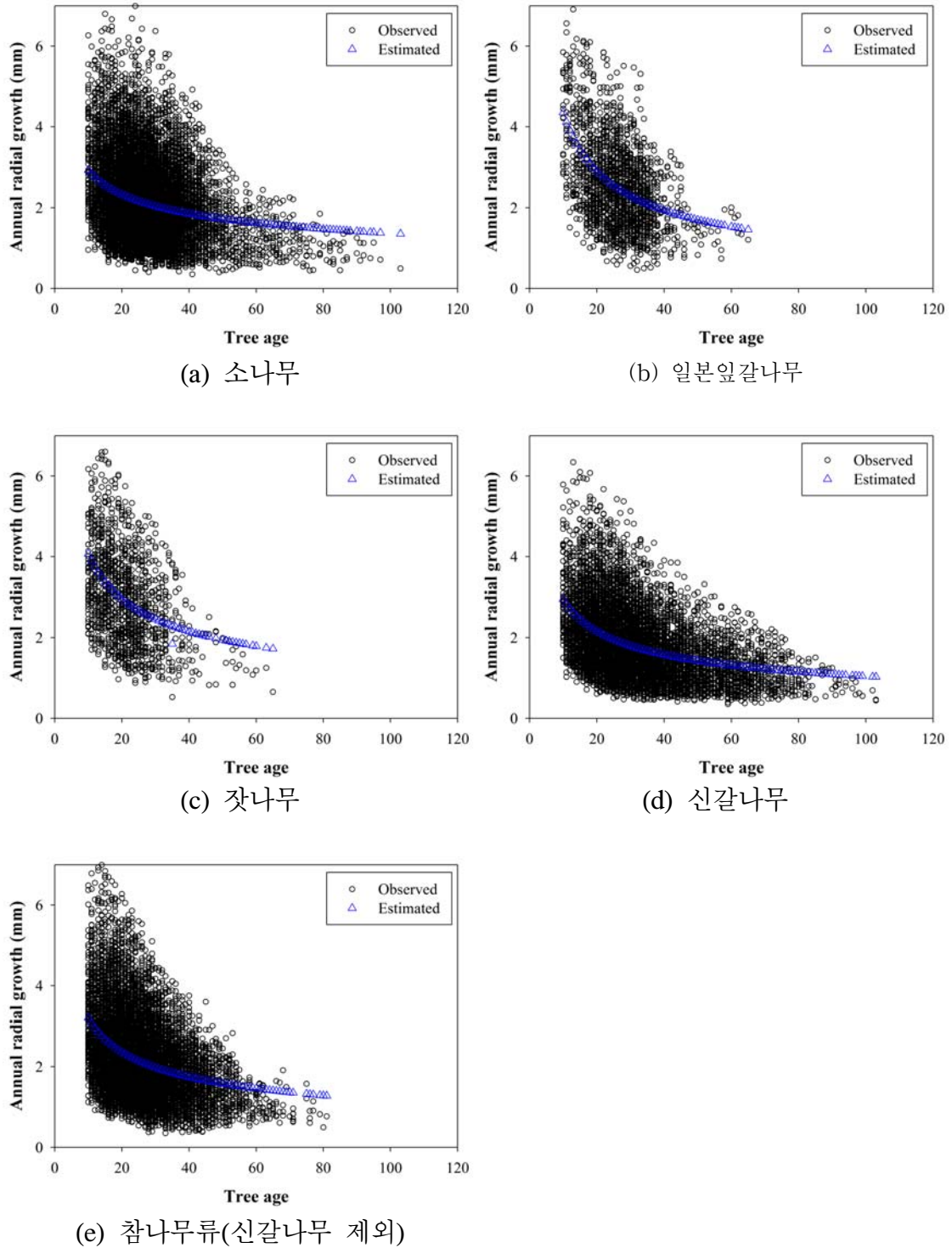


표 4-5. 수종별 SG 추정 함수식

수 종	표준 성장량 추정 함수식
소나무	$SG = \Delta r \cdot \left(\frac{30}{Age}\right)^{-0.3332}$
일본잎갈나무	$SG = \Delta r \cdot \left(\frac{30}{Age}\right)^{-0.4389}$
잣나무	$SG = \Delta r \cdot \left(\frac{30}{Age}\right)^{-0.4538}$
신갈나무	$SG = \Delta r \cdot \left(\frac{30}{Age}\right)^{-0.5839}$
참나무류(신갈나무 제외)	$SG = \Delta r \cdot \left(\frac{30}{Age}\right)^{-0.4588}$

(2) 기후인자 영향 분석

본 과제에서는 Byun et al.(2013)이 고안한 성장모형(식 4-5)과 그것을 보완한 성장모형(식 4-6)을 통해 결과를 도출하고, 그것을 비교하여 보다 적합한 성장모형을 통해 수종별 미래 임목축적을 추정해 보았다. 두 성장모형을 통해 우리나라 주요 침엽수종인 소나무의 표준성장량을 추정하고, 이를 통해 모형의 적합도를 평가하였다. 먼저 Byun et al.(2013)이 고안한 성장모형을 통해 소나무의 표준생장과 기온, 강수, TWI의 영향관계를 GAM을 통해 분석하여 표 13과 같은 결과를 얻었다. 회귀식에 대한 t-검정 결과를 보면 모든 수종에서 각 인자들이 0.05에서 고도의 유의성을 보인 것을 확인할 수 있다.

표 4-6. 기존 산림성장모형의 모수추정 및 관련 통계량(Byun et al. 2013)

Function name	Regression form	t-test		
		Parameter	Estimate	t-value
Climate factors	$eSG = a + b \cdot TWI + c \cdot T + d \cdot P$	<i>a</i>	1.7971	14.85
		<i>b</i>	0.0208	3.39
		<i>c</i>	-0.0376	-3.30
		<i>d</i>	0.0005	4.98

모형결과에 따르면 소나무의 생장은 TWI와 강수량과는 정의 상관관계를 가지고, 온도와는 부의 상관관계를 보이는 것으로 나타났다. 즉 이 결과는 기후변화의 영향으로 미래에 현재보다 기온이 상승하게 되면, 소나무림의 성장률이 현재보다 감소할

것이라는 것을 나타낸다. 또한, 성장률의 감소는 다른 수종과의 경쟁에서 불리하게 작용할 것이며, 이는 기후변화의 영향에 따라 소나무의 분포 지역이 현재에 비해 감소할 수 있다는 것을 의미한다. 이러한 결과는 기존에 우리나라의 기후변화에 따른 산림분포를 예측한 연구결과들과도 일치한다(Choi et al., 2012; 김재욱과 이동근, 2006; Lee et al., 2007).

보완한 성장모형을 통해 소나무의 표준생장과 기온, 강수의 영향관계를 GAM을 통해 분석하여 <표 4-7>과 같은 결과를 얻었다. 회귀식에 대한 t-검정 결과를 보면 모든 수종에서 각 인자들이 0.05에서 고도의 유의성을 보인 것을 확인할 수 있다.

표 4-7. 보완된 산림성장모형의 모수추정 및 관련 통계량(식 6)

수종	계수	값	Std. Error	t-value	P-value
소나무	a	-1.75E-02	4.27E-03	-4.085	<0.001
	b	3.32E-01	8.83E-02	3.760	<0.001
	c	-1.79E-06	5.11E-07	-3.507	<0.001
	d	5.27E-03	1.38E-04	3.812	<0.001
	e	-3.10E+00	1.02E+00	-3.023	0.00251

(3) 성장모형 결과 비교

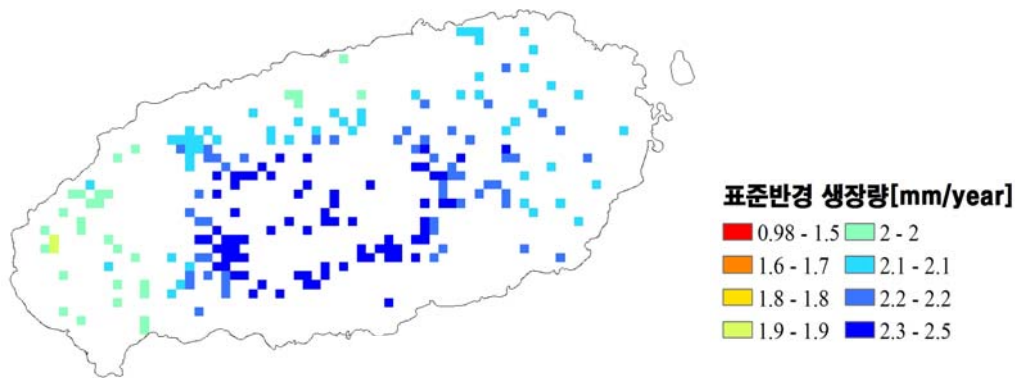
두 성장모형에서 추정된 계수들을 통해 RCP8.5 시나리오에 따른 2050년 소나무림의 표준반경성장량을 추정하여 비교해 보았다. 비교를 위한 연구대상지는 제주도 지역의 소나무림으로 한정하였다. 그 이유는 제주도 지역은 고도의 변이가 매우 크며, 이에 따라 각 소나무 임분의 기상조건의 차이가 크기 때문에 모형을 검증하기 용이하기 때문이다.

<그림 4-14>는 각 성장모형을 통해 예측된 제주도 소나무림의 2050년 표준반경성장량을 나타낸다. 먼저 기존의 모형 결과를 살펴보면, 실제로 소나무림의 생육과 성장에 적합하지 않은 매우 높은 고도 지역에서 표준성장량이 가장 높게 추정되었다. 이는 기존 성장모형에서 소나무림의 성장과 온도는 부의 상관관계를 갖는 것으로 분석되었고, 기존성장모형은 선형적 모형이기 때문에 온도가 낮은 지역일수록 소나무림의 성장량이 높은 것으로 모의되었기 때문이다.

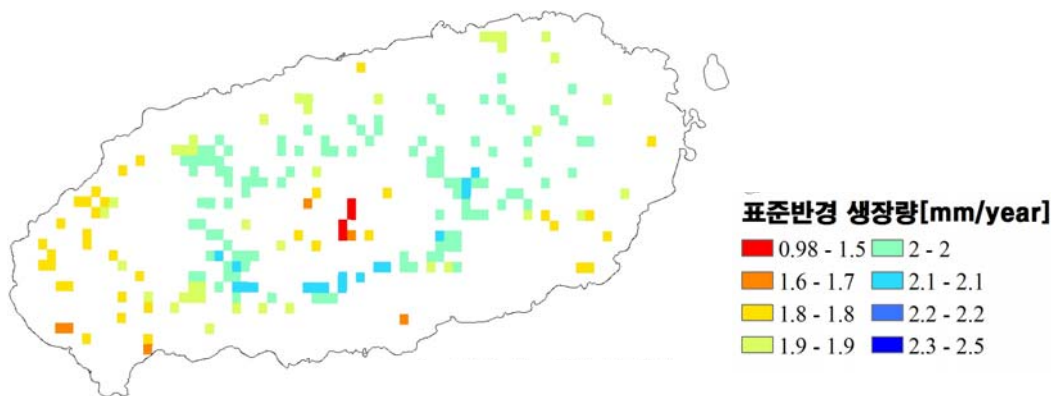
반면에 보완된 성장모형의 결과를 보면, 온도가 높은 저지대 지역과 소나무림 생육에 불리한 고산지대의 경우 표준성장량이 낮게 추정되었으며, 상대적으로 중고도

지역의 소나무림에서 소나무림의 표준성장량이 높게 추정되었다. 이는 소나무림의 현재 성장 패턴과도 매우 일치하는 합리적인 결과라고 사료된다. 따라서 본 연구에서는 보완된 성장모형을 통해 우리나라 산림의 미래 임분재적 추정 및 산림성장 취약성 평가를 진행하였다.

그림 4-14. 각 성장모형에 따른 RCP8.5 시나리오에서 제주도 소나무림의 2050년 표준반경 성장량



(a) RCP8.5 시나리오에서 제주도 소나무림의 2050년 표준반경 성장량 추정 (기존 성장모형 적용)



(b) RCP8.5 시나리오에서 제주도 소나무림의 2050년 표준반경 성장량 추정 (새로운 성장모형 적용)

(4) 수종별 기후인자 영향 분석

수종별 임목의 표준생장과 기온, 강수간의 영향관계를 GAM을 통해 분석하여 <표 4-8>과 같은 결과를 얻었다. 회귀식에 대한 t-검정 결과를 보면 모든 수종에서 각 인자들이 0.05에서 고도의 유의성을 보인 것을 확인할 수 있다.

표 4-8. Generalized Additive Models의 모수추정 및 관련 통계량(식 4-5)

수종	계수	값	Std. Error	t-value	P-value
소나무	a	-1.75E-02	4.27E-03	-4.085	<0.001
	b	3.32E-01	8.83E-02	3.760	<0.001
	c	-1.79E-06	5.11E-07	-3.507	<0.001
	d	5.27E-03	1.38E-04	3.812	<0.001
	e	-3.10E+00	1.02E+00	-3.023	0.00251
일본잎갈나무	a	-3.48E-02	7.33E-03	-4.752	<0.001
	b	5.52E-01	1.40E-01	3.955	<0.001
	c	-3.38E-06	1.31E-06	-2.572	0.01019
	d	8.96E-03	3.42E-03	2.622	0.00881
	e	-5.36E+00	2.23E+00	-2.4	0.01647
잣나무	a	-2.94E-02	8.62E-03	-3.414	<0.001
	b	5.67E-01	1.63E-01	3.477	<0.001
	c	-5.25E-06	2.10E-06	-2.493	0.012778
	d	1.32E-02	5.43E-03	2.438	0.01491
	e	-8.28E+00	3.37E+00	-2.457	0.014155
신갈나무	a	-4.58E-03	2.03E-03	-2.253	0.02429
	b	1.03E-01	3.72E-02	2.759	0.00581
	c	-2.57E-06	3.10E-07	-8.273	<0.001
	d	7.00E-03	8.32E-04	8.405	<0.001
	e	-3.32E+00	5.74E-01	-5.79	<0.001
참나무류 (신갈나무 제외)	a	-6.00E-03	2.79E-03	-2.151	0.031533
	b	1.83E-01	6.00E-02	3.053	0.002268
	c	-8.91E-07	2.47E-07	-3.603	0.000316
	d	2.49E-03	6.82E-04	3.647	0.000266
	e	-8.41E-01	1.02E-01	-8.214	<0.001

<표 4-8>의 결과는 온도와 강수량이 수종별 임목생장에 미치는 영향이 혼합되어 있어서 복잡해 보이지만, 온도와 강수량을 각각 이차 완전제곱식 형태로 변형하면 각 인자가 어느 값까지 수종별 생장에 긍정적인 영향을 미치고, 그 이상의 값에서는 부정적인 영향을 미치는지 알 수 있다. 즉 각 기후인자가 수종별 생장을 촉진하는 임계점을 알 수 있다.

수종별 온도가 임목의 생장에 긍정적인 영향을 미치는 임계값은 수종별로 많은 차이가 있는 것으로 나타났다. 일본잎갈나무의 온도에 대한 임계값은 7.93℃ 가장 낮은 것으로 나타났으며, 참나무류는 15.25℃로 가장 높은 임계값을 보이는 것으로 나타났다. 또한, 상대적으로 침엽수종의 임계값이 낮은 것으로 나타났다(소나무: 10.50℃, 일본잎갈나무: 7.93℃, 잣나무: 9.63℃).

참나무류의 임계값은 15.25℃인데 비해 신갈나무의 임계값은 11.21℃로, 4℃ 정도의 비교적 큰 차이가 있는 것으로 나타났다. 이는 신갈나무가 다른 참나무류와는 다르게 비교적 높은 고도에 분포하기 때문이기도 하지만, 본 연구에서 다양한 종류의 참나무 수종을 참나무류라는 하나의 카테고리 묶어서 분석을 진행했기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 추후 연구에서는 참나무류로 분석을 진행하는 것이 아니라, 개별 수종으로 구분하여 분석을 진행하는 것이 필요하다고 사료된다.

수종별 강수량이 임목의 생장에 긍정적인 영향을 미치는 임계값도 수종별로 많은 차이가 있는 것으로 나타났다. 잣나무의 임계값이 1,262mm로 가장 낮게 나타났으며, 소나무의 임계값이 1,469mm로 가장 높게 나타났다. 또한, 상대적으로 소나무의 임계값이 높게 나타났으며(소나무: 1,469mm), 참나무류의 임계값(신갈나무: 1,363mm, 참나무류: 1,395mm)은 중간 정도로 나타났고, 일본잎갈나무와 잣나무의 임계값이 각각 1,325, 1,262mm로 가장 낮은 것으로 확인되었다.

(5) 수종별 기후인자 영향 분석

수종별 임목의 표준생장과 기온, 강수량의 영향관계를 GAM을 통해 분석하여 <표 4-9>와 같은 결과를 얻었다. 회귀식에 대한 t-검정 결과를 보면 모든 수종에서 각 인자들이 0.05에서 고도의 유의성을 보인 것을 확인할 수 있다.

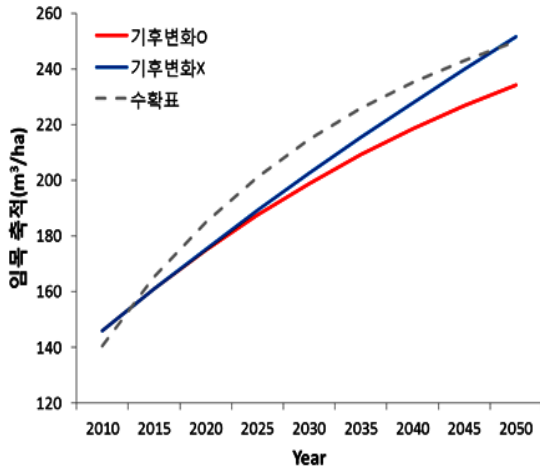
모형 결과를 통해 수종별 임목축적 변화와 기후변화의 영향을 정량적으로 추정해 보았다<그림 4-15>. <그림 4-15>는 각 수종별로 기후변화의 영향을 고려한 임목축적 변화량과 기후변화의 영향을 고려하지 않은 임분축적 변화량을 보여주며, 그리고 수확표(산림청, 2012)에서 제시하고 있는 각 수종별 평균 임분축적 변화를 나타낸다. 모든 수종의 임분축적은 시간의 흐름에 따라 증가하지만, 증가 패턴과 양은 수종별로 매우 다르게 나타났다.

표 4-9. 임분의 임목축적 추정 성장모형의 수종별 계수 추정 결과

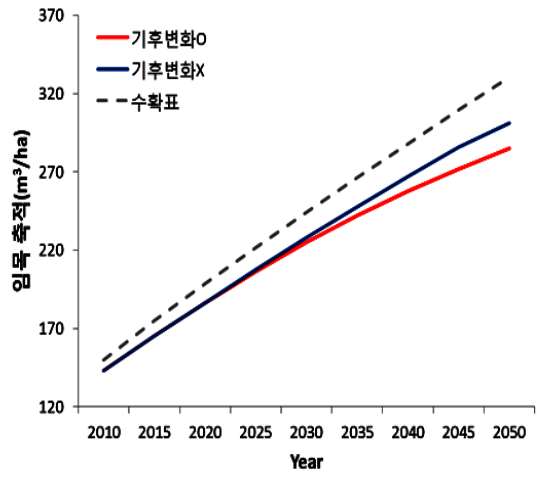
수종	성장인자	RMSE	PseudoR ²	t-test			
				parameter	estimate	t-value	P> t
소나무	Height(m)	1.92	0.55	a	20.65	33.53	0.0001
				b	-12.67	-26.94	0.0001
	DBH(cm)	4.00	0.31	a	1.12	23.10	0.0001
				b	0.75	18.03	0.0001
	Number of tree(N/ha)	502.59	0.61	a	19103.00	4.87	0.0001
				b	-1.05	-19.81	0.0001
잣나무	Height(m)	4.03	0.62	a	21.82	47.65	0.0001
				b	-12.53	-33.14	0.0001
	DBH(cm)	3.98	0.65	a	2.00	12.24	0.0001
				b	0.68	25.08	0.0001
	Number of tree(N/ha)	404.79	0.76	a	9390.50	2.98	0.0001
				b	-0.88	-5.14	0.0001
일본 잎갈나무	Height(m)	2.87	0.44	a	30.48	10.94	0.0001
				b	-13.92	-8.47	0.0001
	DBH(cm)	3.76	0.52	a	2.80	3.60	0.0001
				b	0.54	6.94	0.0001
	Number of tree(N/ha)	404.31	0.76	a	20428.50	2.29	0.0001
				b	-1.06	-6.68	0.0001
신갈나무 와 참나무류	Height(m)	1.52	0.54	a	26.78	30.23	0.0001
				b	-13.45	-17.56	0.0001
	DBH(cm)	3.56	0.76	a	1.15	25.79	0.0001
				b	0.78	140.59	0.0001
	Number of tree(N/ha)	441.96	0.74	a	16107.90	12.43	0.0001
				b	-1.01	-32.68	0.0001

먼저 기후변화의 영향을 고려하지 않았을 때 소나무, 일본잎갈나무, 잣나무는 단위면적당 임목축적이 각각 현재 145.9, 143.2, 149.2m³/ha에서 2050년에는 251.7, 301.2, 342.8m³/ha까지 증가할 것으로 나타났다. 기후변화의 영향을 고려할 경우에는 2050년의 단위면적당 임목축적은 234.3, 284.9, 329.2m³/ha로 예측되었다. 위의 결과에 따르면, 기후변화는 모든 침엽수종들의 성장에 부의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히 일본잎갈나무가 가장 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 일본잎갈나무는 기후변화의 영향으로 2050년에 단위면적당 임목축적량이 기후변화가 없다고 가정했을 때 보다 16.3m³/ha이나 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 소나무 감소량(7.4m³/ha)의 두 배 이상에 달한다. 잣나무의 감소량은 13.6m³/ha으로, 일본잎갈나무에 비해 상대적으로 감소량이 작지만, 소나무에 비해서는 매우 큰 것으로 나타났다.

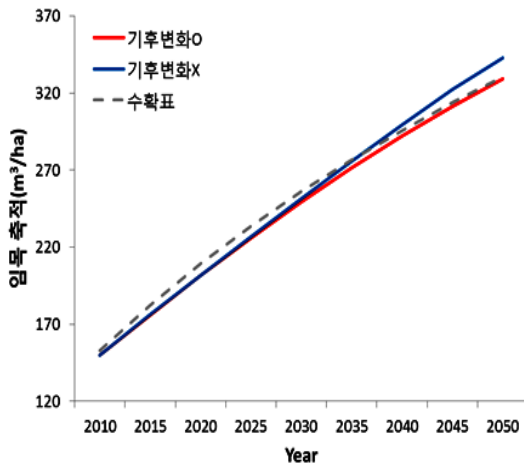
그림 4-15. 수종별 임목축적 변화와 기후변화 영향 추정



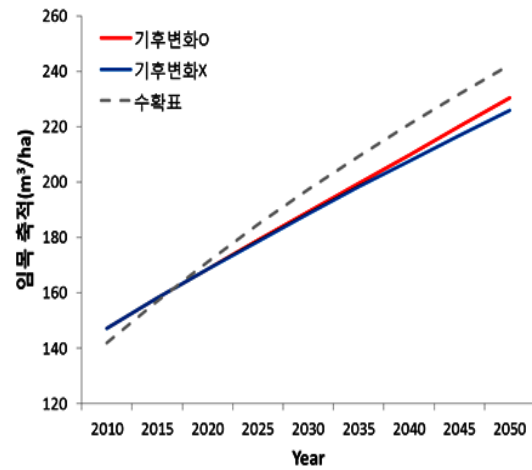
(a) 소나무



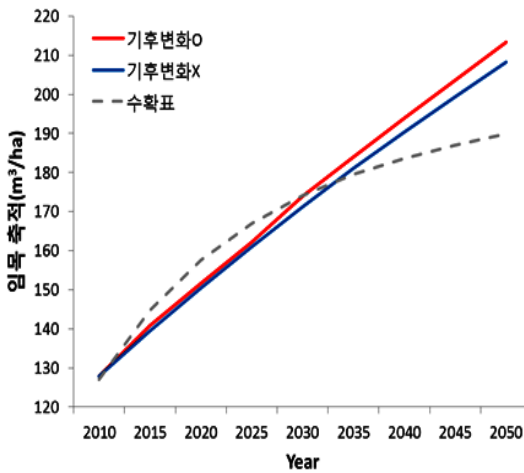
(b) 일본잎갈나무



(c) 잣나무



(d) 신갈나무

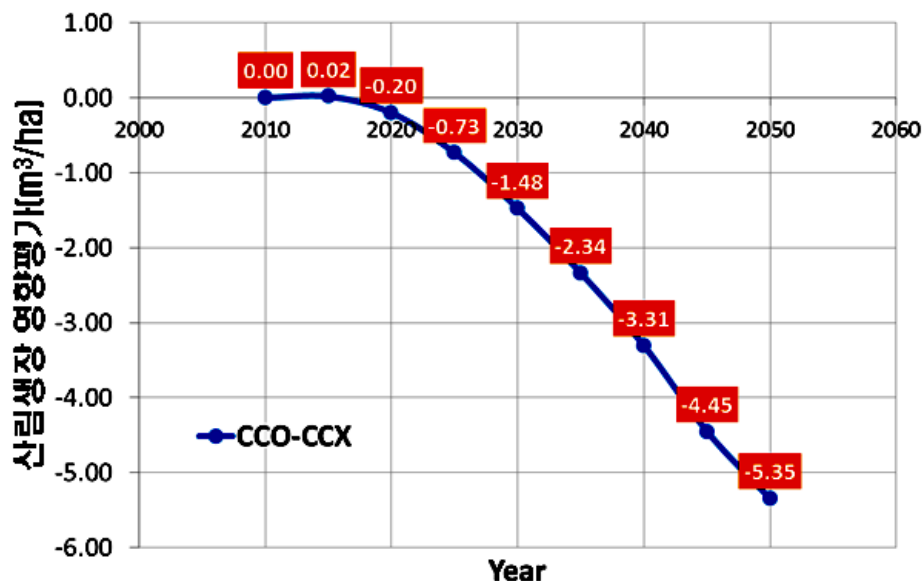


(e) 참나무류(신갈나무 제외)

참나무류는 침엽수와는 반대로 기후변화의 영향으로 생장이 보다 증대될 것으로 나타났다. 기후변화 기후변화의 영향을 고려하지 않았을 때 신갈나무와 그 외 참나무류는 단위면적당 임목축적이 각각 현재 147.3과 127.8m³/ha에서 2050년에는 226.0, 208.3m³/ha까지 증가할 것으로 나타났다. 기후변화의 영향을 고려할 경우에는 2050년의 단위면적당 임목축적은 230.6, 213.4m³/ha로 예측되었다. 위의 결과에 따르면, 기후변화는 모든 참나무류의 생장에 정의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 신갈나무는 기후변화의 영향으로 2050년에 단위면적당 임목축적량이 기후변화가 없다고 가정했을 때 보다 3.4m³/ha 증가하는 것으로 나타났으며, 그 외 참나무류의 증가량은 5.1m³/ha로 추정되었다.

본 과제에서는 국립산림과학원(2013)에서 구축한 수종별 수확표 자료와 본 과제에서 성장모형을 통해 예측한 수종별 임분재적변화량을 각 수종별로 비교해 보았다. 신갈나무를 제외한 참나무류의 경우, 한 수종의 자료를 통해 분석된 것이 아니라 갈참나무, 굴참나무, 졸참나무, 상수리나무 등 다양한 참나무류 수종의 자료를 통합하여 분석한 결과임으로, 임분수확표의 자료에서 직접 대응되는 수종은 없다. 따라서 현재까지 구축된 자료 중 가장 유사하다고 할 수 있는 굴참나무의 수확표 자료와 비교를 실시하였다(그림 4-15). <그림 4-15>를 보면 전반적으로 각 수종별 수확표 자료와 본 과제에서 추정한 수종별 임분재적 변화패턴이 유사한 것으로 나타났다. 그러나 참나무류의 경우 임령이 증가할수록 수확표 자료와 모형결과가 차이를 보이는 것으로 나타났으며, 추후 데이터와 성장모형 재검토를 통해 보완해야 될 것으로 사료된다.

그림 4-16. 우리나라 전국 산림의 임목축적 증가에 기후변화가 미치는 영향 추정



<그림 4-16>은 RCP8.5 시나리오가 우리나라 전체 산림에 평균적으로 미치는 기후변화 영향을 보여주며, 각 시기별 값은 기후변화 영향을 고려한 임분재적 추정 값에서 기후변화 영향을 고려하지 않은 임분재적 추정 값의 차이를 나타낸다. 본 과제의 연구결과에 따르면 기후변화는 우리나라 산림 수종에 따라 그 영향이 다르게 나타나기는 하지만, 전반적으로는 생장을 저해하는 것으로 나타났다. 기후변화의 영향은 매년 누적되어 2050년 기준으로 단위면적당 임목축적 증가량이 $5.35 \text{ m}^3/\text{ha}$ 가 감소하는 것으로 나타났다. 현재 산림 면적은 $6,417,570 \text{ ha}$ 이며 산림면적이 변하지 않는다고 가정하고 이를 전체 산림으로 확장하면 총 임목축적 감소량은 $34,334,000 \text{ m}^3$ 이다. 이는 우리나라 30년생 소나무 3.3억 그루³⁶에 해당되는 엄청난 양이다. 또한, 이를 CO_2 로 환산하면 약 $60,635,560 \text{ tCO}_2$ 이며, 이는 기후변화의 영향으로 우리나라 산림의 잠재적인 대기중 탄소흡수량이 감소됨을 의미하여 기후변화 완화에 부정적인 영향을 끼친다는 것을 의미한다. 따라서 기후변화 영향 완화와 적응능력 제고를 위한 중, 장기적인 산림관리 계획 수립이 필요할 것으로 사료된다. <그림 4-17>은 전국 산림의 임분재적 변화를 시·공간적으로 보여주며, 이는 산림관리 계획 수립과, 의사결정을 지원하는데 유용할 것으로 사료된다.

<그림 4-18>은 행정구역별 임분재적 변화를 나타낸다. 강원도($243.8 \text{ m}^3/\text{ha}$)와 경기도($243.7 \text{ m}^3/\text{ha}$)의 평균 임분재적이 가장 높은 것으로 나타났으며 서울($177.1 \text{ m}^3/\text{ha}$), 인천($203.9 \text{ m}^3/\text{ha}$), 부산($205.8 \text{ m}^3/\text{ha}$)이 상대적으로 작은 값을 갖는 것으로 나타났다. 임분 평균 재적의 연년 증가량을 비교해 보면, 2010년부터 2030년 사이에는 대전($2.82 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{year}$), 경기도($2.72 \text{ m}^3/\text{ha}$), 강원도($2.62 \text{ m}^3/\text{ha}$)가 상대적으로 높게 나타났으며 서울($1.73 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{year}$)과 부산($1.91 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{year}$)이 가장 작은 값을 보이는 것으로 나타났다. 2030년부터 2050년 사이에는 강원도($2.34 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{year}$), 대전($2.30 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{year}$), 경기도($2.15 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{year}$)가 상대적으로 높게 나타났다. 이는 기후변화의 영향이 시기별로 행정구역에 다른 영향을 미친다는 것을 의미한다. 광주, 전라남도, 대구는 2010~2030년의 평균 연년증가량($\text{m}^3/\text{ha}/\text{year}$)에 비해 2030~2050년의 평균 연년증가량 값이 크게 감소하는 것으로 나타났으며, 이에 대응하기 위한 산림관리계획과 정책수립이 필요할 것으로 사료된다.

³⁶ 산림과학원(2012)에서 제작한 소나무 임분수확표에 따르면 우리나라 30년생 소나무의 평균 크기는 직경 16cm에 수고 10m이다(지위지수 12 적용).

그림 4-17. 우리나라 전국 산림의 임분재적(m^3/ha) 변화 추정

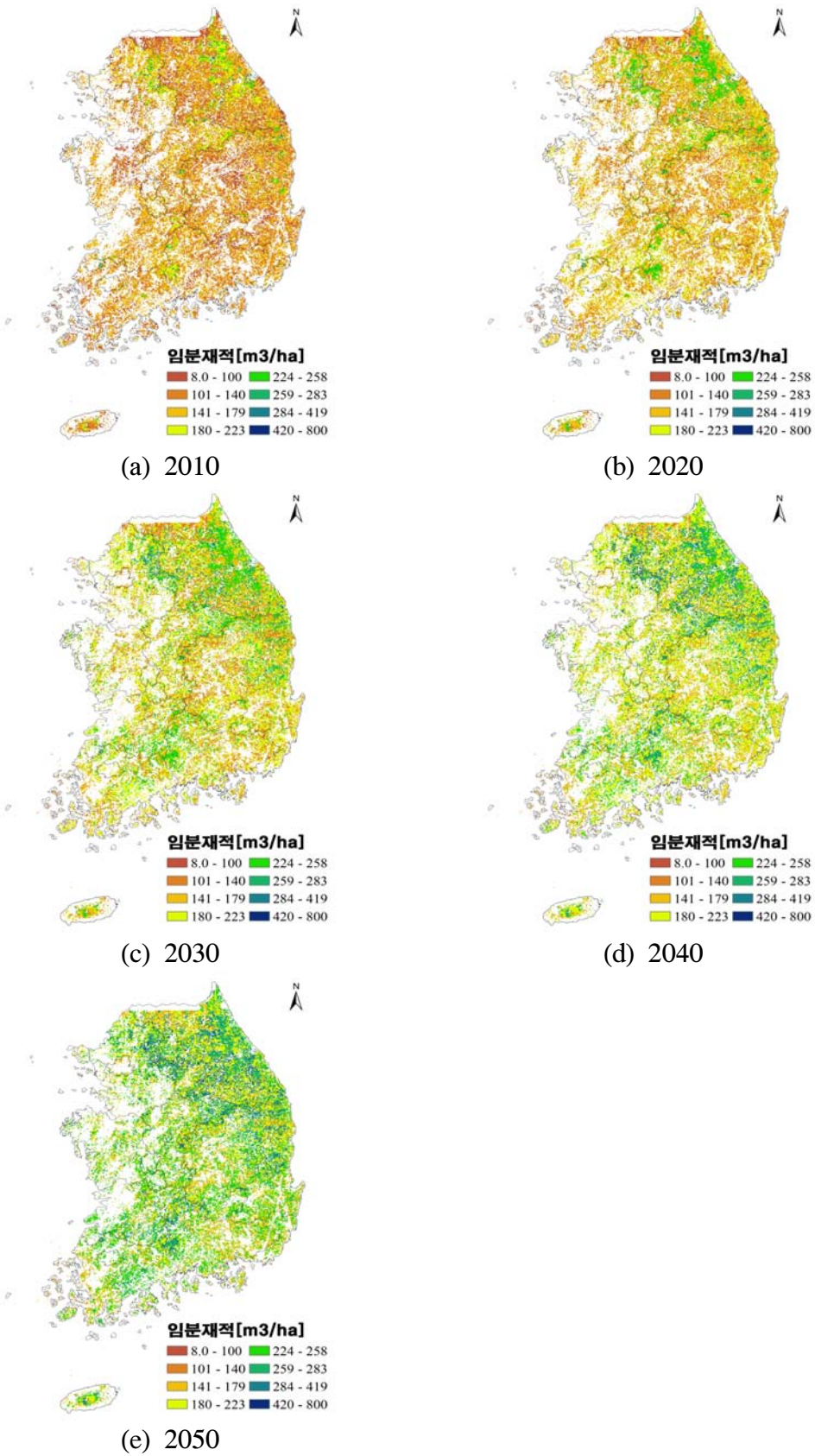
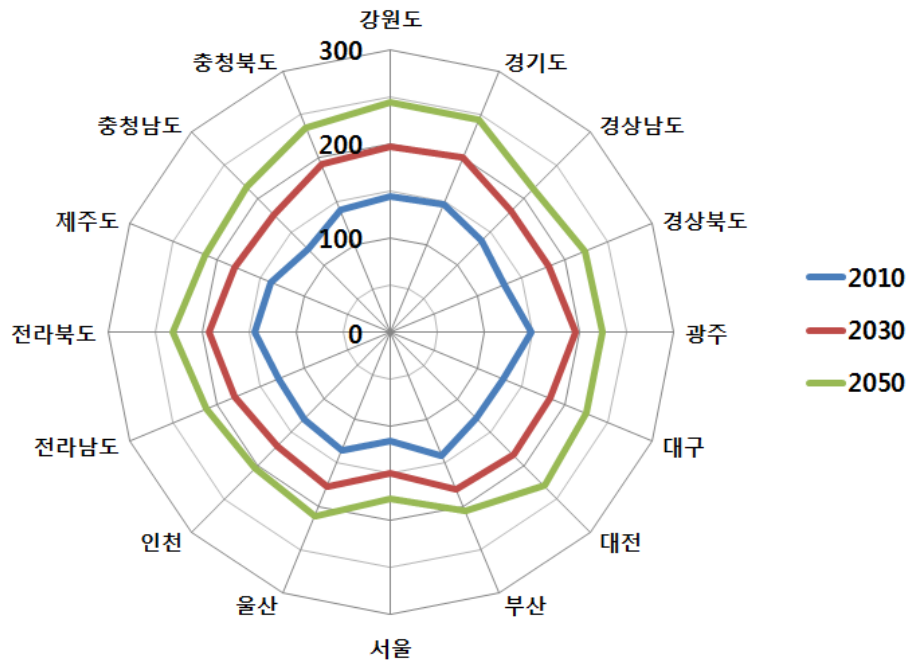


그림 4-18. 행정구역별 산림의 임분재적(m^3/ha) 변화 추정

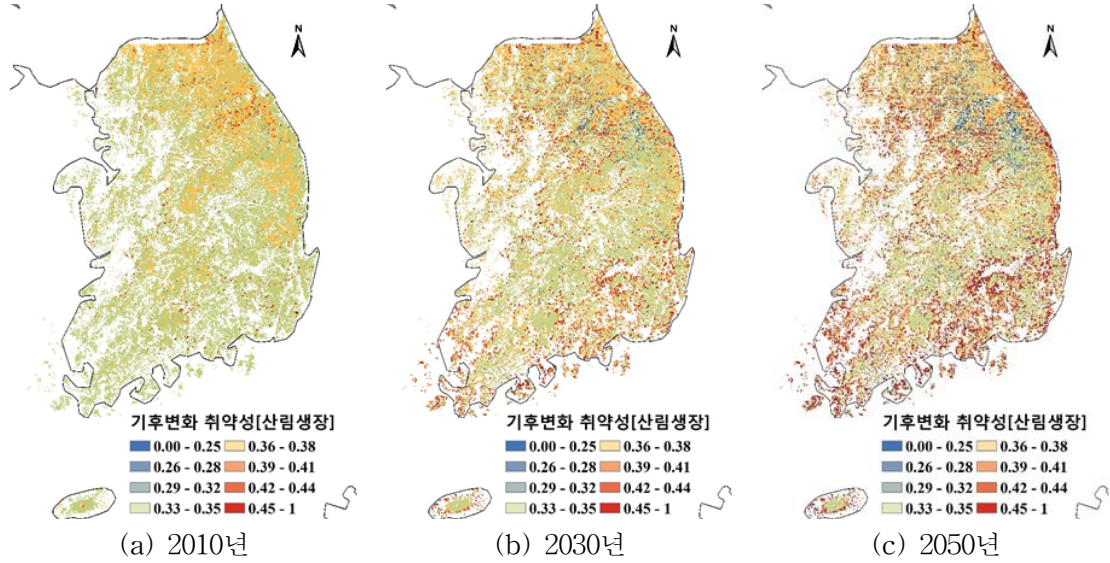
(6) 산림생장 취약성 평가

수종별 추정 반경성장량을 기반으로 기후변화에 따른 산림생장 취약성을 평가하였다. 먼저 임상도를 기반으로 전국 산림을 수종에 따라 구분하였다<그림 4-19>. 다음으로 각 수종별 분포도로 시기별 추정반경성장량을 마스킹(Masking)한 뒤 이를 하나로 합쳤다. 현재 구축된 임상도의 경우 신갈나무가 따로 구분되어 있지 않기 때문에, 참나무림 중 고도 700m 이상에 존재하는 임분을 신갈나무 임분으로 가정하여 분석을 진행하였다.

각 수종별로 고유한 성장패턴을 가지고 있기 때문에 이를 고려하지 않고, 성장취약성을 산출할 경우, 기본적인 성장량이 높은 수종의 취약성이 상대적으로 낮게 추정될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 수종별로 기후변화 취약성을 표준화하여 기후변화의 영향과 그에 따른 취약성을 보다 정확하게 평가하고자 하였다.

<그림 4-19>는 기후변화 시나리오에 따른 시기별 산림생장 취약성평가 값을 나타낸다. 수종에 따른 차이가 있지만 전반적으로 해안가 지역과 남부지역에서 취약성 값이 증가하는 것으로 나타났다. 반대로 강원도 고산지역은 미래보다 현재의 취약성 값이 더 높은 것으로 나타났다. 이는 고산지대의 경우, 현재는 평균기온이 너무 낮아 산림생장에 적합하지 않으나, 미래에는 기후변화의 영향으로 인해 기온이 증가하면서 보다 산림생장과 생육에 적합하게 변화되기 때문이라고 사료된다.

그림 4-19. 기후변화 시나리오에 따른 산림생장 취약성 평가

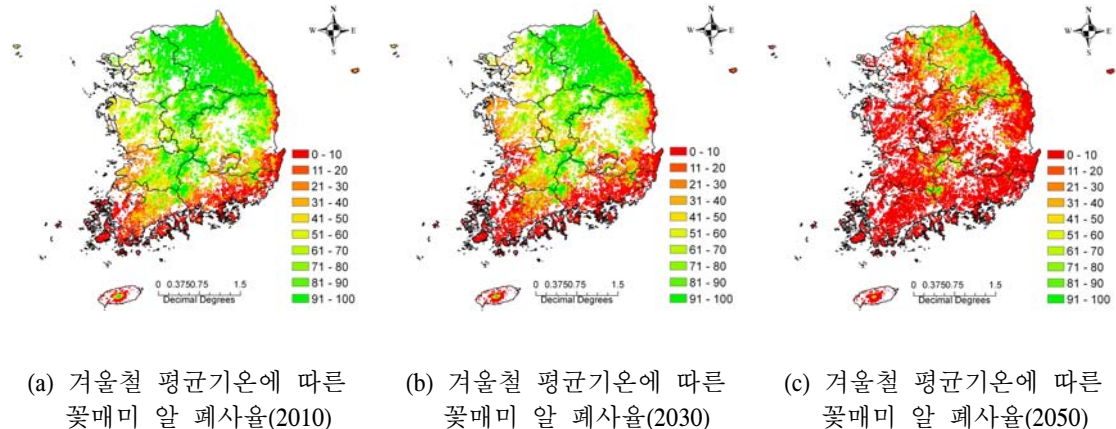


나. 산림병해충 취약성

(1) 알 폐사율 변화

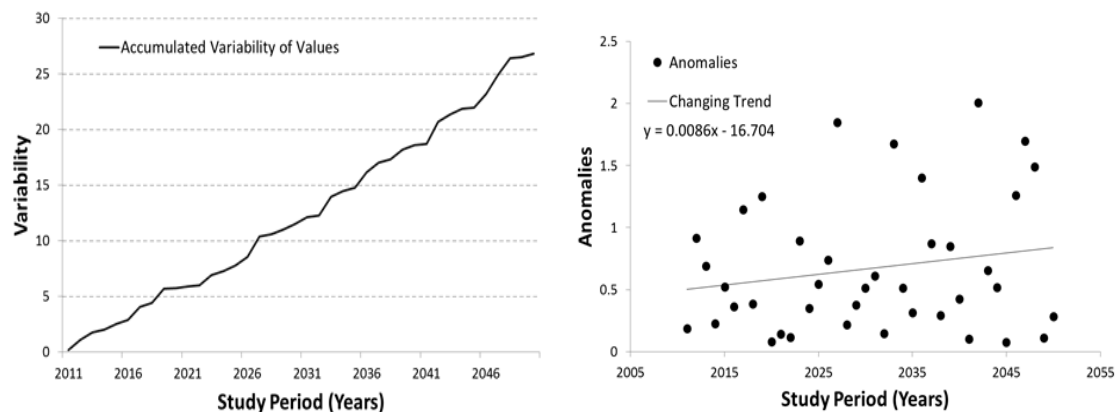
겨울철(12~2월)의 평균기온을 이용하여 꽃매미 알의 폐사율의 변화를 도출하였다(그림 4-20). 겨울철 평균기온의 변화에 따라 꽃매미가 부화할 수 있는 확률이 과거 남부 해안지방과 동해안지방에 국한된 지역만 낮았지만 기후변화로 인해 먼 미래에는 강원도 산간지역을 제외한 우리나라 전반에서 폐사율이 감소하였다. 2030년에는 현재에 비해 해안가 지역과 인근지역에서 꽃매미 알의 부화 확률이 크게 증가하는 것으로 나타났으며, 2050년에는 강원도 산간지역을 제외한 전국에서 꽃매미 알의 부화 확률이 크게 증가하는 것으로 나타났다.

그림 4-20. 기후변화 시나리오(RCP8.5)에 따른 겨울철 평균기온에 따른 꽃매미 알 폐사율 변화



알 폐사율을 기반으로 산림 병해충 취약성 평가 인자에 사용되는 민감성과 적응성 인자를 산출하고, 그 변화를 분석해 보았다(그림 4-21). 민감성은 기후변화에 따라 계속 증가하는 것으로 나타났으며, 변화경향도 계속 증가하는 것으로 분석되어 적응성도 낮아지는 것으로 나타났다.

그림 4-21. 산림병해충 취약성 평가 인자들의 변화 경향 분석



(a) 변이성 변화 경향(민감성)

(b) 변화경향 추세 분석(적응성)

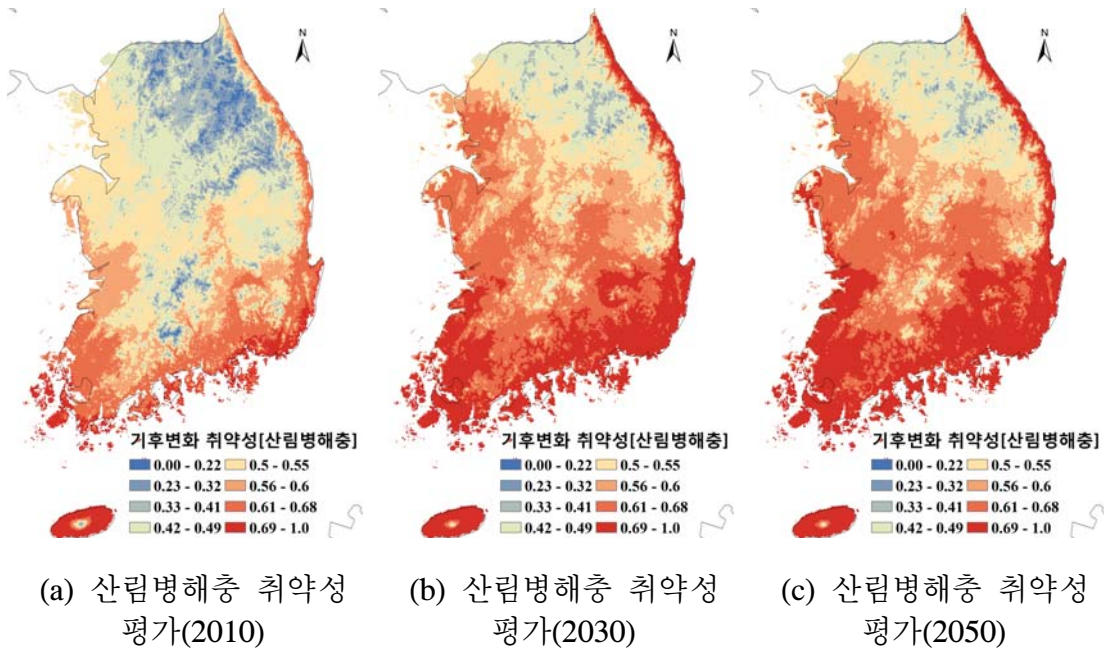
(2) 산림병해충 취약성 평가 결과

민감성과 적응성을 기반으로 병해충 취약성 평가 결과를 도출하였다. 미래 산림병해충 취약성은 전 국토에서 크게 증가하며, 강원도와 백두대간 지역을 제외한 전 국토에서 심각한 수준으로 높아지는 것으로 나타났다(그림 4-22).

특히, 2050년에는 모든 대도시 지역에서 매우 높은 취약성을 보이기 때문에, 산림의 건강과 활력도에만 영향을 미치는 것이 아니라 시민들의 삶의 질에도 직접적인 영향을 미칠 것으로 사료된다. <그림 4-23>은 행정구역별 산림병해충 취약성 값의 변화경향을 보여준다. 시간이 지남에 따라 병해충 취약성의 값이 증가하는 경향을 보이지만, 2030년과 2050년의 취약성 값은 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 제주도, 부산, 울산에서 특히 높은 취약성 값을 보였으며, 강원도와 경기도 지역이 상대적으로 낮은 취약성 값을 갖는 것으로 분석되었다.

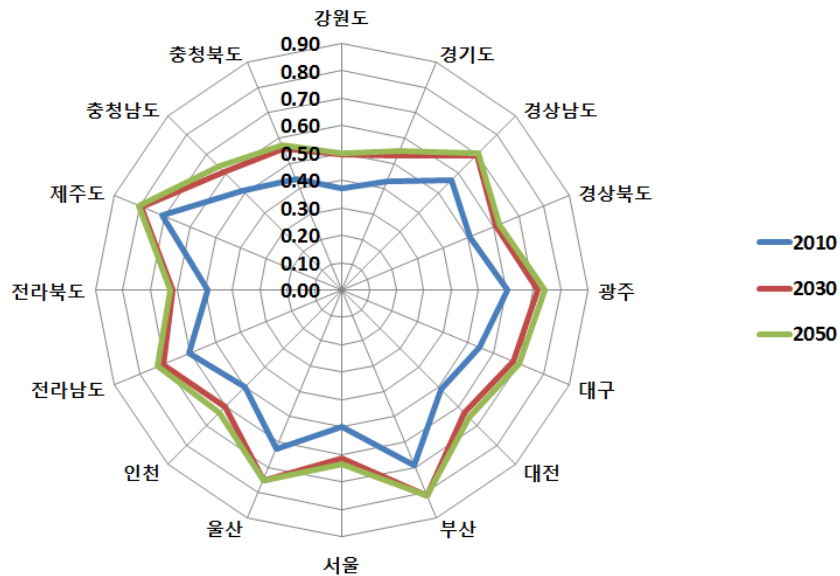
본 과제에서는 대표적인 산림 해충인 꽃매미의 알 폐사율을 통해 산림 병해충 취약성을 평가하였다. 그러나 실제로 산림에 피해를 입히는 병해충은 매우 다양하며, 각각 다른 발생 및 번식 패턴을 가지므로, 본 과제를 통해 도출된 결과가 전체 산림병해충 발생과 피해를 대표한다고 할 수는 어렵다. 따라서 향후 다양한 연구를 통해 산림에 피해를 입히는 병해충의 생리적 특성이 규명되고 이를 반영한다면 보다 고도

그림 4-22. 기후변화 시나리오(RCP8.5)에 따른 산림병해충 취약성 평가 결과



화된 병해충 취약성 평가를 실시할 수 있을 것으로 사료된다.

그림 4-23. 행정구역별 산림병해충 취약성 값의 변화



다. 산림부문 종합 취약성 평가

과거자료와 미래자료를 이용한 산림부문 종합 취약성 평가결과는 다음과 같다(그림 4-24). 전반적으로 미래로 갈수록 기후변화에 따른 기후변화의 영향 누적되고 증가하면서, 취약성 값도 증가하는 경향을 보였다. 남해안과 동해안의 해안가 지역에

서 취약성이 매우 높을 것으로 예측되었으며, 강원도 지역의 취약성이 가장 낮은 것으로 나타났다. 변화 경향을 보면 2010년에서 2030년 사이에 급격하게 취약성이 증가할 것으로 나타났으며, 2030년과 2050년 사이에는 취약성이 크게 증가하지는 않지만 취약한 상태가 계속 유지되는 것으로 나타났다.

<그림 4-25>는 산림 취약성 값을 시도별로 나타낸 그림이다. 제주도와 부산 지역의 취약성이 매우 높은 것으로 나타났으며 강원도, 경기도, 충청북도의 취약성 값이 상대적으로 작게 추정되었다. 전반적으로 2030년과 2050년의 취약성 값이 유사하지만 광주, 대구, 전라남도 지역은 소폭 증가하는 것으로 나타났다.

그림 4-24. 기후변화 시나리오에 따른 산림 취약성 평가

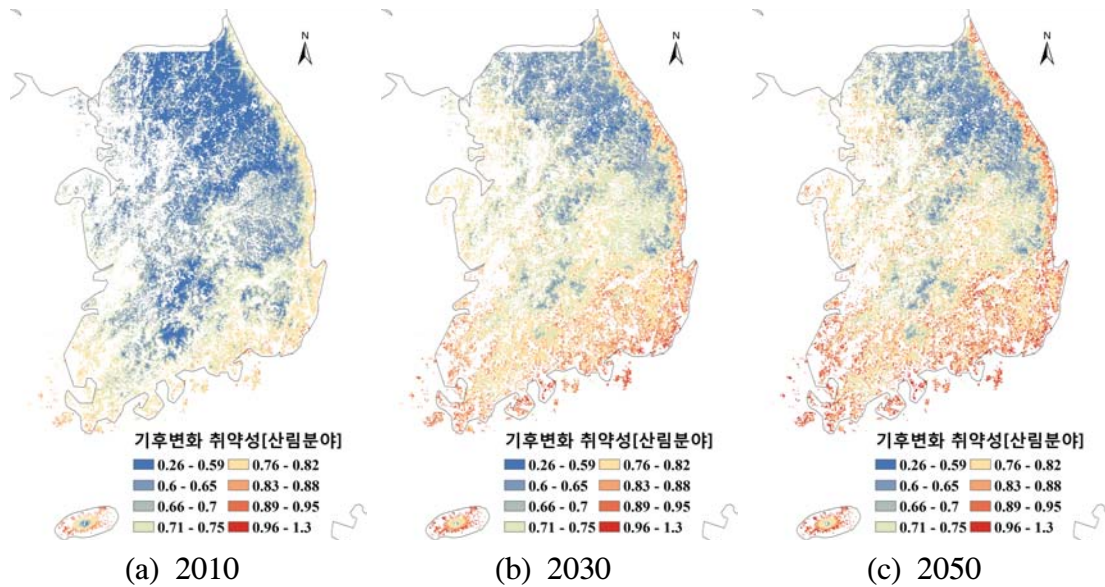
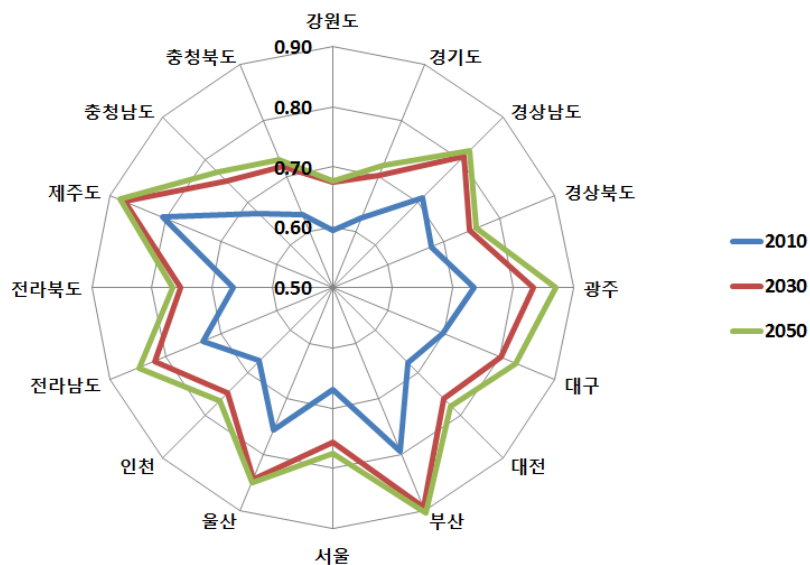


그림 4-25. 시도별 산림 취약성 변화



4. 산림분야 기후변화 취약성 및 대응전략

가. 산림생장 관련 대응

첫째, 산림 탄소흡수량 증진 및 유지를 위한 노력이 필요하다. 기후변화가 진행됨에 따라 산림생태계는 수종분포 변화, 산림생장패턴 변화, 산림재해 발생패턴 변화 등 다양한 형태로 그 영향이 드러날 것으로 전망되고 있다. 산림은 임령이 증가할수록 생산량이 감소되는 것이 일반적이거나, 기후변화로 인해 현재 산림의 일부 수종은 생산량이 보다 급격하게 둔화될 것으로 예측되고 있다. 산림의 연간 생산량이 감소하는 것은 산림의 대기 중 이산화탄소 흡수량이 감소한다는 것을 의미하며, 이는 기후변화 완화에 부정적인 영향을 초래하게 된다. 따라서 산림의 탄소흡수량 증진 및 유지를 위한 산림관리계획 수립이 요구되며, 정밀한 모니터링 체계 구축을 통해 우리나라 전체 산림의 탄소흡수량을 보다 정밀하게 정량화 하는 것이 요구된다.

둘째, 숲 가꾸기 등과 같은 산림 관리 사업 확대가 필요하다. 현재 우리나라의 산림은 4~5영급이 대부분을 차지하고 있는 불균형적인 영급구조를 가지고 있으며, 전체적으로 산림의 임령이 증가되면서 생산량이 감소하고 있는 추세를 보이는 것으로 나타났다(산림청, 2013). 이를 개선하기 위해 숲가꾸기 등과 같은 산림 사업이 필요한 지역이 많으나, 실제 산림 사업이 이루어지고 있는 면적은 연간 전체산림의 0.5% 내외로 다른 산림 선진국에 비해 매우 낮은 수준이다. 따라서 산림의 기후변화적응 능력 제고를 위해 보다 적극적인 산림관리가 요구된다.

셋째, 정밀 모니터링 체계 구축을 위한 연구와 노력이 요구된다. 현재 우리나라의 산림은 원격탐사 자료(위성영상, 항공사진 등)와 5년 주기로 수행되는 국가산림자원 조사를 통해 모니터링이 실시되고 있으나, 이 두 가지 자료가 통합된 모니터링 시스템은 구축되어 있지 않다. 기후변화가 산림에 미치는 다양한 영향을 분석하고 평가하기 위해서는 모니터링 시스템 구축이 필수적이며, 기후변화 영향평가 및 취약성평가 모형의 검증과 보완에도 사용될 수 있다. 잘 알려진 바와 같이 원격탐사자료를 이용한 모니터링은 접근이 불가능한 지역과 광범위한 지역의 모니터링에 매우 효과적이며, 이를 국가산림자원조사와 연계하여 모니터링 시스템을 구축한다면 산림분야의 기후변화 적응능력을 제고시키는데 크게 기여할 뿐만 아니라, 국가적인 적응능력 제고에도 큰 영향을 미칠 수 있을 것으로 사료된다.

넷째, 산림기후 모니터링 체계를 구축해야 한다. 기후조건이 산림에 미치는 영향을 정밀하게 파악하고 분석하기 위해서는 산림의 미세한 기상정보를 모니터링 할 수 있는 시스템이 필요하다. 기상청에서 운영하고 있는 자동기상관측장비(Automated

Weather Station: AWS)는 대부분 비산림지역과 비산악지역에 설치되어 있기 때문에, 기상청에서 제공되는 기상자료들 만으로는 연구와 모형개발에 한계가 있을 수밖에 없다. 따라서 산악기상관측망 체계를 구축하여 이를 활용한다면, 산림분야의 기후변화 영향평가 및 취약성평가를 보다 고도화할 수 있을 것으로 사료된다. 현재 산림청에서 산림기상정보 활용을 위한 선진수준의 산림기후 모니터링 체계 구축을 위한 사업을 진행하고 있으며, 현재 강원영소(5개소), 충북(10개소), 경남지역(15개소) 등 총 31개소의 산악기상관측망이 구축되었다. 향후 산악기상관측망과 시스템 구축이 완료되어 산악기상정보를 활용할 수 있다면 보다 정밀하고, 다양한 분석이 가능할 것으로 사료된다.

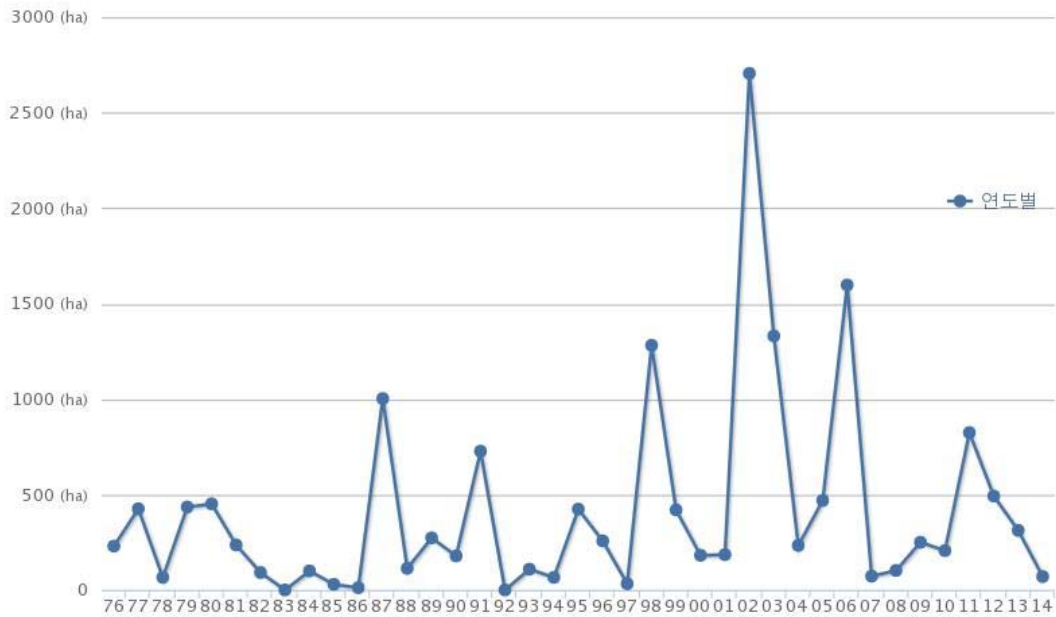
다섯째, 주요 수종의 지역별, 시기별 조림적지 추정이 필요하다. 현재 우리나라의 산림은 4영급 이상의 산림이 65%를 차지하고 있어, 점차적으로 장·노령림의 구조로 변해가고 있는 실정이다. 우리나라의 주요수종인 소나무와 참나무류의 벌기령이 60년이기 때문에 산술적으로 20년 후에는 우리나라 산림 중 65% 이상이 벌채가 가능한 산림이 된다. 따라서 임업경제 활성화, 영급구조 개선, 산림 생산성 향상 등을 위해 벌채가 확대될 것이며, 이에 따라 조림 사업도 활발하게 이루어질 것으로 사료된다. 본 연구과제 결과에 따르면 수종에 따라 생육에 적합한 기후조건이 다른 것으로 나타났으며, 기후변화에 따라 수종별 생육 적지도 변화될 것으로 예측되었다. 따라서 기후변화 시나리오에 따른 주요 수종의 조림적지를 시·공간적으로 알 수 있다면, 산림분야의 기후변화 적응능력 제고와 임업에 많은 도움을 줄 수 있을 것으로 사료된다.

나. 산림재해 관련 대응

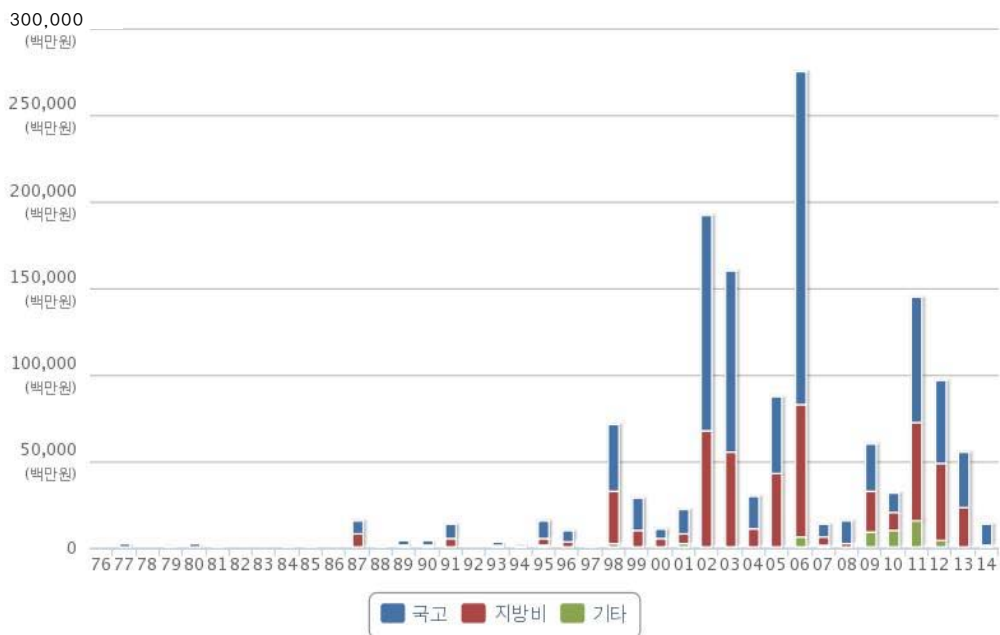
먼저, 통합 산림재해 모니터링 시스템 구축이 필요하다. 기존의 통계자료와 연구들은 기후변화로 인해 극한기상현상의 발생 빈도와 강도가 높아질 것을 시사하고 있다. 이러한 극한기상현상은 산림재해의 발생빈도와 강도에도 영향을 미칠 수 있으며, 실제로 대형 산불과 산사태로 인한 인명과 재산 피해도 최근 들어 늘어나고 있는 추세를 보이고 있다. 산불, 산사태, 산림병해충은 우리나라 산림을 교란하는 대표적인 재해들로, 매년 이와 관련된 피해가 발생하고 있지만 이런 피해와 관련된 정량적 분석과 모델링과 관련된 연구는 부족한 실정이다. 산림분야의 종합적인 기후변화 취약성을 평가하기 위해서는 산림재해 영향 및 취약성 평가는 필수적이며, 이를 위해 모니터링 체계 구축이 필수적이다. 산림재해 분야의 통합 모니터링 시스템이 구축된다면, 영향 및 취약성 평가모델이 고도화될 수 있으며 이를 통해 보다 현실적이고 적응대책 수립에 유용한 모델을 구축할 수 있을 것으로 사료된다.

둘째, 돌발성 호우에 의한 산사태 위험성 예측 고도화가 요구된다. 기후변화에 따라 강우강도가 증가하고 있으며, 이에 따라 산사태 발생 피해면적과 산사태 복구비도 증가하는 경향을 보이고 있다(그림 4-26). 기상청 기록에 따르면 강수량은 매년 큰 변동 폭을 보이지만 장기적으로는 증가 추세에 있으며, 최근 50년간 전체적인 연강수일수는 감소하였으나, 일강수량이 80mm 이상인 호우 일수의 연평균 발생빈도

그림 4-26. 국내 산사태 발생 통계



(a) 연도별 산사태 피해면적



(b) 연도별 산사태 복구비

는 증가추세에 있다(1954~1963년: 연평균 약 1.6일/년, 1994~2003년: 연평균 약 2.3일/년). 산사태 재해는 일차적으로 인명피해를 유발하며, 이차적으로는 주택, 도로, 및 농작물 파손 등의 재산피해와 같이 사회적으로 큰 경제적 손실을 야기한다. 따라서 산사태 위험성 예측 고도화는 매우 중요하며, 이를 통해 인명, 재산, 산림생태계의 파괴를 저감할 수 있다.

셋째, 산림병해충 발생예측을 통한 조기방제 시스템을 고도화시켜야 한다. 지구온난화와 기후변화 현상은 새로운 산림병해충의 유입과 돌발성 병해충의 확산을 야기하며, 산림건강성을 위협하고 있다(산림청, 2014). 실제로 산림병해충 피해발생은 솔잎혹파리³⁷, 솔껍질깍지벌레³⁸, 소나무재선충병³⁹ 피해면적이 확대되면서 2005년 315,607 ha, 2006년 389,955 ha로 크게 증가하였다. 그러나 이후 효과적인 방제노력을 통해 피해지가 많이 감소하였다. 특히 솔잎혹파리 피해는 2005년 48,846ha로 증가한 이후 2006년 195,759ha, 2008년 183,229ha, 2010년 113,123ha, 2012년 8,031ha, 2013년 59,309ha로 크게 감소하였고, 솔껍질깍지벌레 또한 2007년에 47,207ha를 보인 후 2010년 21,855ha, 2012년 8,945ha, 2013년 7,050ha로 감소하는 추세를 보이고 있다(산림청, 2014).

소나무재선충은 1988년 부산에서 처음 발견된 이래 피해면적이 점진적으로 증가하여, 2005년에는 경북 안동과 강원도에, 2007년에는 경기도에까지 확대되었으며, 피해 면적이 약 8,000 ha에 달했다. 이후 총력적 대응으로 2010년 3,547 ha로 감소하였으나, 2012년에 5,286 ha, 2013년에 11,550 ha로 증가하였다. 이 외에도 아열대성 돌발병해충인 푸사리움가지마름병⁴⁰, 꽃매미, 대벌레⁴¹ 등의 발생으로 인한 피해가 점차 증가하는 경향을 보이고 있다.

위의 통계량은 기후변화로 인해 산림병해충의 발생위험도는 증가하고 있으나, 합리적인 방제대책을 통해 그 피해를 감소시킬 수 있다는 것을 나타내고 있다. 본 연구 결과에 따르면 기후변화로 인해 겨울철 평균 및 최저온도가 증가하면서, 산림병해충의 월동이 가능한 지역이 점차 증대되고 있는 것으로 나타났다. 이는 산림병해충 발

37 파리목 혹파리과의 입엽해충이다. 유충시기에 솔잎밑부분에 벌레혹(충영)을 만들고 그 속에서 수액을 빨아먹어 기생당한 솔잎을 말라죽게 한다.

38 소나무와 곰솔을 가해하는 해충으로, 소나무 주간 및 가지의 인편 또는 수피 밑에 정착하여 가는 실같은 입을 인피부에 꽂고 즙액을 흡수하여 가해한다.

39 소나무, 잣나무 등에 기생해 나무를 갉아먹는 선충이다. 솔수염하늘소에 기생하며 솔수염하늘소를 통해 나무에 옮는다.

40 멕시코, 일본, 오키나와 등지에 분포하는 아열대성 수목병원균이며, 기주식물은 리기다소나무, 리기테다소나무, 테다소나무, 해송 등으로 알려져 있다. 바람, 매개충의 식해 등에 의한 상처로 감염되며, 포자로 전파한다.

41 몸길이는 70~100mm이며 몸과 다리는 대나무처럼 가늘고 길며 몸 색깔은 주위환경에 따라 녹색 또는 갈색을 띤다. 날개가 없으며 더듬이는 짧고 암컷은 몰에 한 쌍의 가시가 있다.

생 위험도를 크게 높이며, 병해충 발생이 지금까지와는 상이한 공간적 패턴을 가진다는 것을 의미한다. 따라서 산림병해충 발생예측과 조기방제 시스템 고도화는 매우 중요하며, 이를 통해 산림자원 보호와 산림건강성을 유지하며, 방제에 소요되는 예산 절감에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

다. 연구결과 활용 제언

본 연구에서 고안한 산림분야 기후변화 영향평가 모형은 다음과 같은 분야에 활용될 수 있다고 사료된다. 첫째, 산림보전과 시업 관련 분야에 활용될 수 있다. 본 연구에서 고안한 산림생장 기후변화 영향평가 모형은 기후변화가 산림생장에 미치는 영향을 행정구역 단위로 정량적으로 추정할 수 있으며, 이는 산림보전지역과 시업지역을 선정하는데 활용될 수 있다. 또한, 우리나라 주요 임목 수종의 성장과 기후조건의 관계를 분석한 결과를 조림사업에 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 본 모형은 미래 기후변화 시나리오에 따른 우리나라 산림의 임목축적을 예측하였으며, 이를 통해 산림 바이오매스의 잠재 에너지량을 도출할 수 있고, 이는 에너지 공급계획 수립과 잠재 친환경 에너지량 파악 등에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

둘째로, 산림병해충 관리 시스템 고도화에 활용될 수 있다. 본 연구에서는 꽃매미의 월동 가능성을 통해 산림병해충 취약성평가를 실시하였으며, 이는 기후변화 시나리오에 따른 산림병해충 발생의 공간패턴 변화를 예측할 수 있다. 따라서 모형을 통해 병해충 발생 가능성이 높은 지역에 대해 중점적, 우선적인 방제를 준비하고 실시한다면 보다 효율적이고 합리적인 방제 시스템 구축에 도움이 될 수 있을 것으로 판단되며, 과수 등의 피해 규모를 감소시키는데 활용될 수 있을 것이다.

셋째로, 본 연구결과는 토지이용 계획 수립에 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 기후변화에 따른 산림생장과 병해충 발생 취약성이 너무 높은 지역의 경우, 산림으로 유지하기 보다는 타 용도로 전용하는 것이 보다 합리적일 수 있다. 또한, 현재 산림이 아닌 지역도 기후변화에 따라 산림으로 전용되는 것이 경제적, 환경적인 측면에서 사람들의 삶에 보다 적합할 수 있다. 따라서 본 연구에서 개발된 모형은 토지이용 계획 수립을 지원할 수 있을 것으로 사료된다.

제5절 수산분야 기후변화 영향평가 모델 구축(3협동과제)

1. 기후변화가 수산자원에 미치는 영향

가. 개요

우리나라는 전통적으로 수산물을 통한 단백질 공급량이 높은 편이고 최근 웰빙(well-being) 등의 영향으로 수산물 소비가 큰 폭으로 증가하고 있다. 이는 수산물 소비량을 통해 확인할 수 있는데 1인당 연간 수산물 소비량이 1980년 36kg에서 2012년 55kg으로 약 20kg 증가하였다. 이와 같이 수산업은 국민들에게 주요한 단백질 공급원으로서 중요한 역할을 수행하고 있지만, 수산업은 기후변화에 대해 매우 취약한 구조를 지니고 있다. 이는 기본적으로 수산업이 기후변화 등 자연적 영향을 직접적으로 받는 1차 산업이면서 우리나라의 경우 전 지구 평균에 비해 높은 해양환경 변동으로 수산자원의 변동 가능성이 매우 높기 때문이다. 또한 수산업은 대표적인 온실가스 배출산업으로 연료를 기반으로 하는 어선어업 및 양식업으로 유류가격의 상승에 따른 직접적인 영향을 받고 있으며 기후변화와 관련된 어분 가격의 상승 측면에서도 취약성을 지니고 있다.

수산업에 있어 기후변화는 악영향과 순영향을 동시에 미치고 있다. 우선 악영향을 살펴보면 대표적 한류성 어종(명태, 임연수어 등)의 생산 감소를 들 수 있는데, 특히 명태의 경우 최근 국내 연안에서 거의 어획되지 않고 있다. 또한 저수온으로 인한 양식생물 대량폐사, 해파리 발생으로 인한 어획 활동 제약 및 관광산업 위축을 들 수 있다. 반면 기후변화는 난류성 어종(오징어, 고등어, 멸치 등) 어획 증대 및 새로운 상업어종(다랑어 등) 출현으로 새로운 소득원으로서의 기회를 제공하기도 한다. 우리나라에서 주로 어획되는 상업 어종은 오징어, 고등어, 멸치와 같은 부유성 소형어류가 높은 비율을 차지하고 있는데, 수온상승 및 난류세력 증가로 인하여 우리나라로의 가입량이 증가하고 있다. 특히 최근에는 부가가치가 높은 대형어종인 참다랑어와 방어 등 새로운 상업어종이 대량 출현하고 있는데, 이들 어종은 가격이 높고 국내외에서 수요가 많은 어종으로서 향후 우리나라 수산업에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

기후변화와 관련하여 본 연구는 우선 수산자원에 영향을 미치는 기후변화 요인 및 프로세스 규명을 하고자 하며 이를 위해 우리나라의 기후변화 영향과 피해 현황과 향후 기후변화가 수산분야에 미치는 영향에 대해 검토하고자 한다.

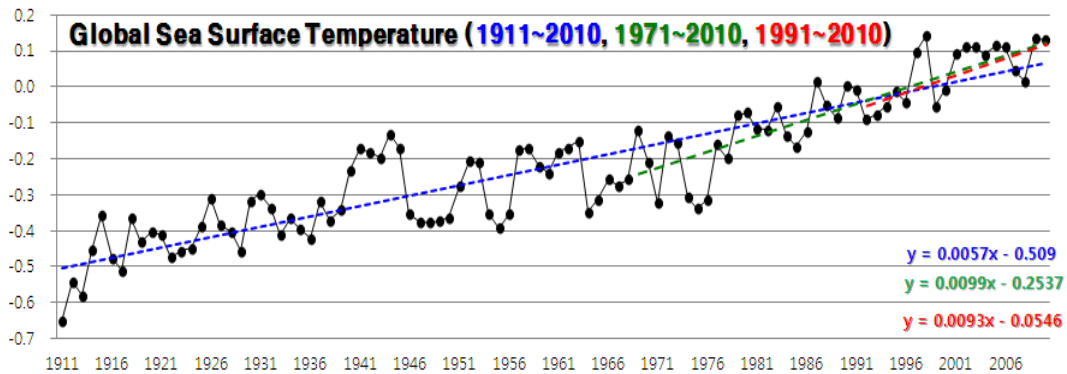
나. 수산분야 기후변화 현상

(1) 전 지구적 기후변화 영향

(가) 수온상승 경향 및 영향

최근 100년(1911~2010년) 동안의 전 세계 표층 수온을 살펴보면 매년 수온이 증가하고 있음을 확인할 수 있다(그림 5-1). 최근 100년간 전 세계 표층수온은 연간 0.0057°C , 100년간 0.57°C 상승하였으며, 최근 40년(1971~2010년) 동안에는 연간 0.0099°C , 약 0.40°C 상승하였고, 최근 20년(1991~2010년) 동안에는 연간 0.0093°C , 약 0.19°C 상승하였다.

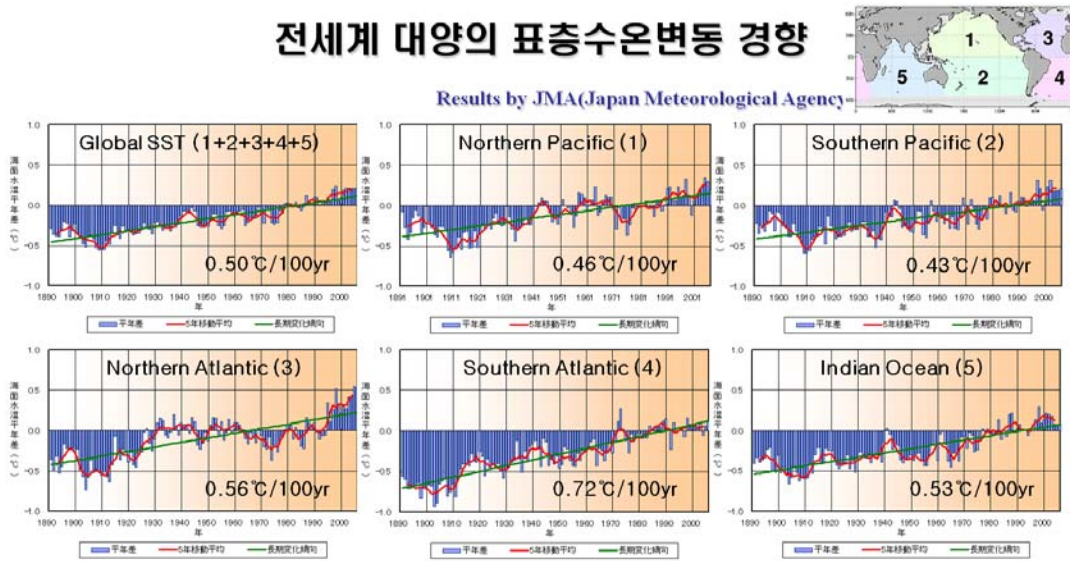
그림 5-1. 최근 100년간(1911~2010년) 전 세계 표층수온 변동 추이



자료: 한인성(2013).

1890년대 후반부터 2000년대 초반까지 표층수온 편차를 각 대양별로 살펴본 결과 100년을 기준으로 전 세계 평균 표층수온은 0.5°C 상승한 것으로 나타났다(그림 5-2). 상대적으로 북태평양의 수온상승이 낮았는데, 북태평양의 경우 0.46°C , 남태평양은 0.43°C , 북대서양은 0.56°C , 남대서양은 0.72°C , 인도양은 0.53°C 상승하였다.

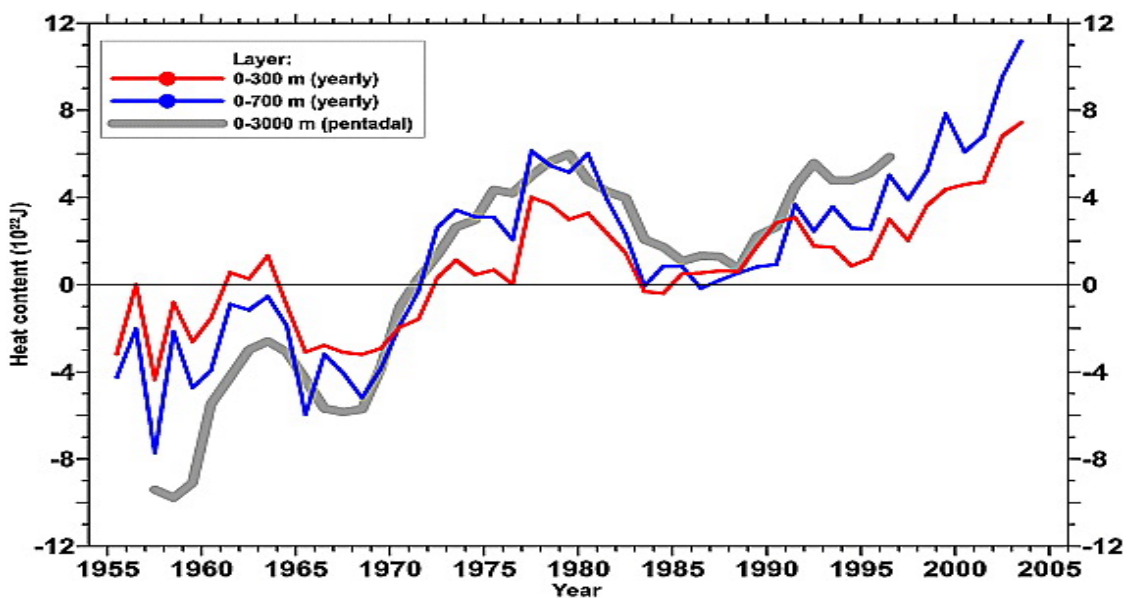
그림 5-2. 1890~2000년대까지 각 대양별 표층수온 상승률 및 100년 환산 수온 상승률



자료: 한인성(2013).

지구온난화로 인해 해수 온도가 상승하고 있다는 사실은 다양한 연구논문을 통해서도 확인된다. 특히 미국 해양대기청(NOAA), 세계해양자료센터(WODC)에서는 1955~2003년 동안의 전 세계 해양자료를 분석한 결과, 해양의 보유 열량이 점차 증가하고 있는데, 표층부근뿐만 아니라 중심층까지도 열량이 점차 증가하고 있다(그림 5-3).

그림 5-3. 1995~2003년까지 0~300m, 0~500m, 0~3000m 수층의 열량 변동 양상



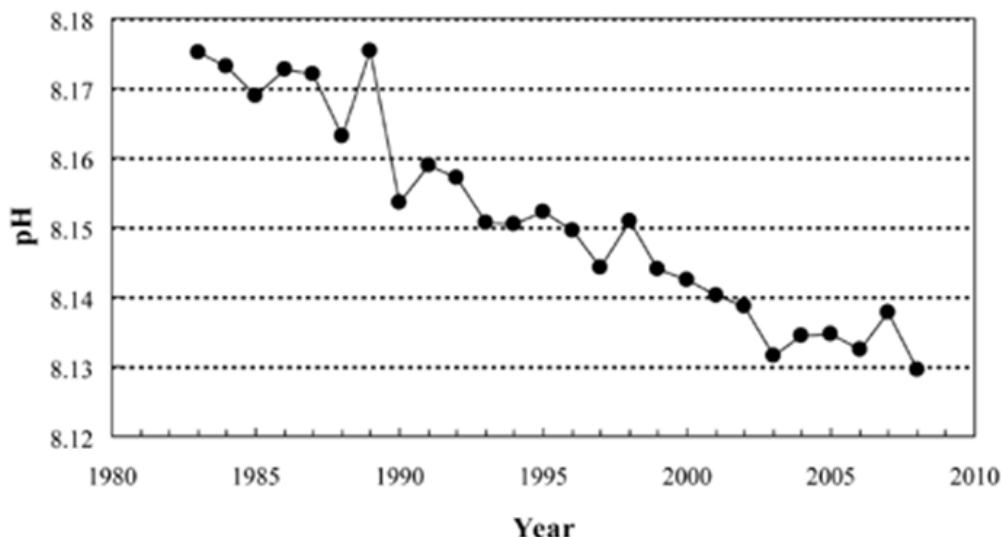
자료: Levitus et al.(2005)

FAO에 따르면 기후변화로 인한 해수의 온난화 현상이 전 세계적으로 지속될 것으로 전망하며 해수 표층온도의 빠른 상승이 수산자원 분포에 변화를 주고 있다. 실제로 기후변화로 인해 기존의 풍부한 어장에서 생산되는 어종의 생산량이 급감하고 있는 사례가 많이 발생하고 있다(정명생, 2007). 북미 지역에서 난류성 어종인 가자미, 넙치의 생산량 감소를 예측하며, 송어와 농어를 비롯한 미국 한류해역에서 서식하는 종들의 생산량이 최대 50%까지 감소할 것으로 예측되고 있다. 또한 일본에서는 김이 해수 온도의 상승에 따라 수확기 단축, 양생 조류의 빈번한 출몰 등으로 수확량이 급격히 감소되고 있다. 어류에 대한 이상현상도 나타나, 지중해 북서지역은 한류해역이지만, 최근 난류성 어종인 놀래기과 그루퍼, 세네갈 서대 등이, 미국 오대호에서는 수온 상승에 따라 27개 난류성 어종이 새롭게 서식하는 것으로 나타났다.

(나) 해양산성화 경향 및 영향

수산분야에서 수온 외 따른 중요한 문제로 해양산성화를 들 수 있는데, 해양산성화는 특히 패류 양식, 해양생물종 다양성 등에 심각한 영향을 줄 것으로 예상된다. 일본 기상청이 과거 26년간 해양산성화 관측 결과를 분석한 결과, 1982년부터 2008년까지 일본 남방 외해역의 pH가 약 0.04 감소하였는데 이는 산업혁명 후 200년간 pH의 감소치 0.1을 고려하면 매우 빠른 속도이다(그림 5-4).

그림 5-4. 일본 기이반도 외해역 해양표면에서의 pH의 감소 경향



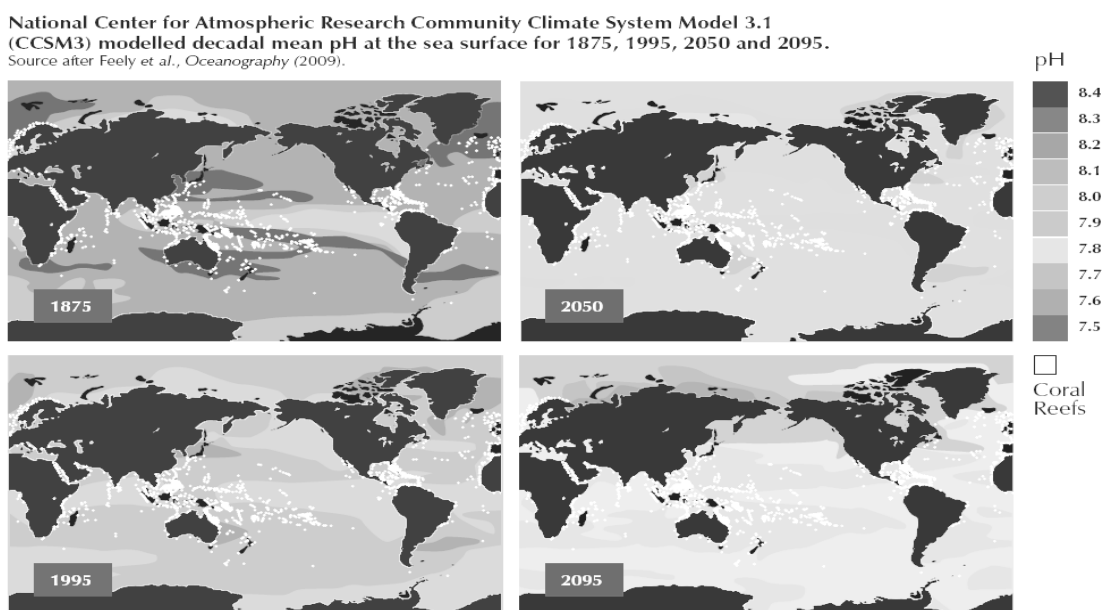
자료: 한인성(2013).

IPSO(International Programme on the State of the Ocean)는 인간의 무분별한 자원 남획과 이산화탄소 배출에 따른 해양산성화 등 기후변화 요인에 의하여 바다가 훨씬 급격한 속도로 파괴되고 있다고 밝히고 있다(IPSO, 2011). 그에 따르면 전 세계 열대 산호초 가운데 75%가 고사 위기에 놓여 있는데, 수온상승에 따른 백화현상으로 산호초가 괴사했던 1998년보다 수치가 높아진 것으로 2030년에는 전체 산호초의 90%, 2050년에는 100%가 파괴될 것이라고 전망하였다.

IUCN(International Union for Conservation of Nature)은 브리핑 페이지를 통하여 심각한 해양산성화에 의해 영향을 받을 생물에 대해서 밝히고 있다(IUCN, 2008). 그에 따르면 열대 산호와 산호조류는 향후 30~50년 사이에 30% 감소하며 산호초의 성장 역시 많은 영향을 받을 것으로 예상된다. 특히 바다가재, 홍합, 가리비 등 무척추 동물은 2050년 대기 중 이산화탄소 농도가 560ppm 정도가 되면 성장 저하, 체중 감소 등의 위험에 노출될 것으로 전망되었다.

또한 대기에서 이산화탄소를 흡수하여 광합성을 하며 수산생물의 먹이로서 지구의 탄소주기에 중요한 역할을 하고 있는 플랑크톤이 pH의 감소에 따라 산화도가 급속히 감소하여 해양 생태계의 불균형을 초래하고 있다(Feely et al., 2009). UNEP(UN Environment Programme)는 최근 이산화탄소 배출량이 급격히 증가하면서 바다의 pH를 약 30% 떨어뜨려 바다의 산성도를 빠르게 증가시키고 있으며, 이런 속도로 산성화가 진행된다면 21세기말에는 산성도가 120% 증가할 것으로 전망하였다.

그림 5-5. 1875, 1995, 2050년 및 2100년의 해양의 10년 평균 pH 공간 분포



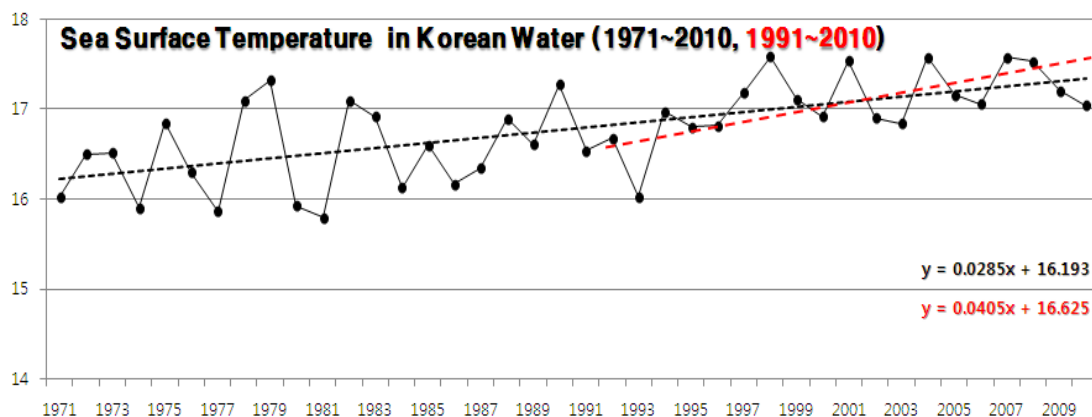
자료: Feely et al.(2009).

해양산성화에 따라 전 세계 패류의 생산량 1,170만 톤 중 각각 10.8%, 3.6%를 차지하는 굴(420만 톤)과 홍합(140만 톤)의 생산량은 이산화탄소가 740ppm으로 증가하였을 경우 홍합은 전체 생산량의 60%, 굴은 전체 생산량의 30%가 감소할 것으로 예측되었다(Gazeau et al., 2007). 해수의 산성화는 산호, 석회조류와 같이 몸을 일부로 석회질로 구성하는 생물들의 성장에 심각한 저해 영향을 미칠 수 있으며, 성게나 어류의 유생과 같이 환경변화에 민감한 생물들은 0.1~0.2 정도의 pH 변화에 의해서도 발생이 저해될 수 있다(이정석 외, 2006). 그리고 어류와 같은 해양생물은 체내의 이산화탄소 분압이 낮아 해양에 용해되어 들어온 CO₂는 쉽게 체내로 확산되어 해양동물의 체액을 산성화시키며, 해양 동물에는 환경변화에 대응할 수 있는 조절 기구를 가지고 있지만 급격하게 변화된 체내 pH 및 CO₂ 농도에 의하여 생리적 기능은 교란되어 결국 사망에 이를 것으로 전망되고 있다(이경선 등, 2008).

(2) 우리나라 해역에서의 기후변화 영향

한국해양자료센터 자료를 이용하여 최근 40년간(1971~2010년)의 우리나라 연근해 표층수온의 변동 경향을 살펴보면, 최근 40년간은 1.14℃ 상승하였으며 연간 0.0285℃ 상승하는 양상을 보여 전 세계 연평균 표층수온 상승률의 약 3배 정도로 나타났다. 최근 20년(1991~2010년)을 나누어 살펴보면 연간 0.0405℃ 상승하여 전 세계 연평균 표층수온 상승의 4배 이상 높은 상승률을 보였다(그림 5-6).

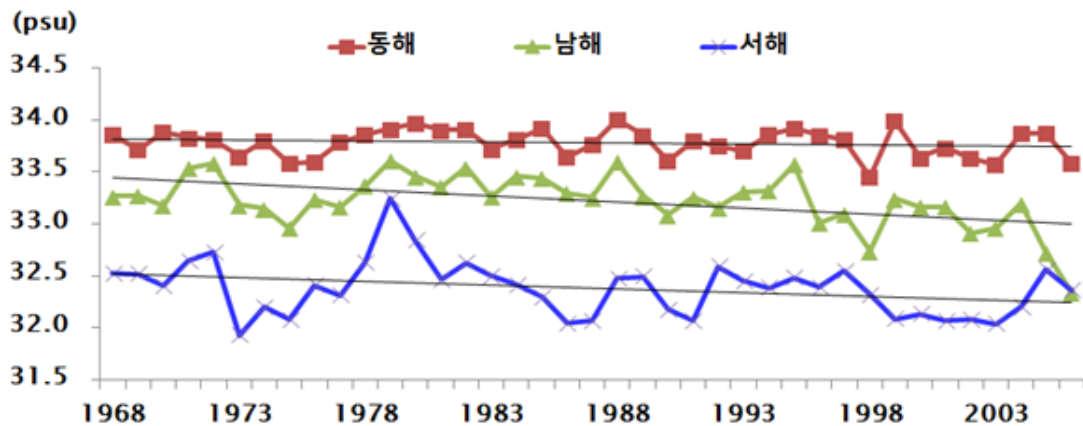
그림 5-6. 한반도 주변 해역 해수온 추이



자료: 한인성(2013).

한반도 주변 해역의 염분 장기 변동 경향을 살펴보기 위하여, 국립수산과학원의 해양정선조사 자료를 이용하여 1968년부터 2006년까지 최근 39년간 한반도 평균 염분 변동 경향을 살펴보면, 염분은 최근 39년간 대부분의 해역에서 하강 현상이 나타났는데 표층의 경우 최근 39년간 동해가 0.07psu, 남해가 0.45psu, 서해가 0.28psu 각각 하강하였다(그림 5-7).

그림 5-7. 한반도 연평균 표층염분 변동 추이(1968~2006년)

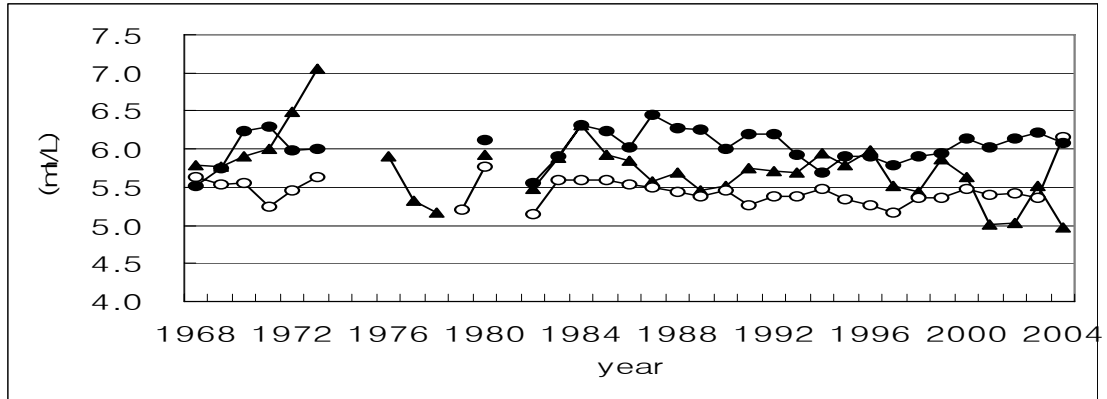


자료: 한인성(2013).

최근 기후변화와 관련하여 동해 중심층부의 용존산소 농도 감소 경향이 사회적 인 문제로 대두되고 있다. 일반적으로 동해 중심층부의 용존산소는 주로 동해고유수가 형성되는 러시아 블라디보스토크 주변 해역에서 해수의 냉각침강과 함께 공급되는 것으로 알려져 있다. 용존산소 농도의 변화는 수온변화와 밀접한 관련을 갖고 있으며, 특히 동해 중심층부의 산소공급은 동해 북부에서 냉각·침강되어 남하하는 중층수의 영향을 크게 받고 있는 것으로 사료된다.

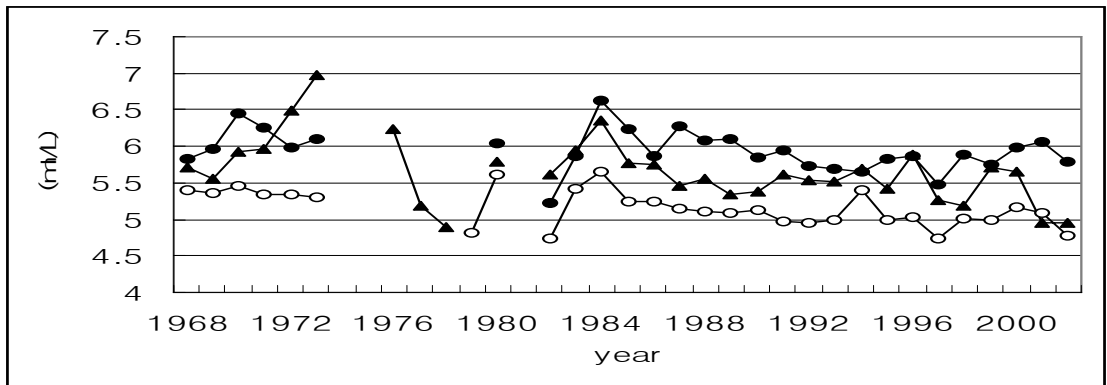
한반도 주변 해역의 용존산소 장기변동을 살펴보기 위하여 국립수산과학원이 수행한 1968~2004년의 한국근해 해양조사에서 얻어진 용존산소 농도를 각 해역별·수심별로 비교한 결과, 대부분 해역에서 용존산소가 감소한 것으로 나타났다. 용존산소 농도는 일반적으로 서해에서 가장 높은 양상을 보이고, 동해, 남해 순이다. 최근 37년간(1968~2004년) 용존산소 수심별 장기변동을 살펴보면 동해·서해·남해 모든 해역에서 용존산소가 감소하고 있음을 알 수 있다(그림 5-8, 5-9, 5-10).

그림 5-8. 최근 37년간 동해(▲), 남해(○), 서해(●)의 표층 용존산소 장기변동



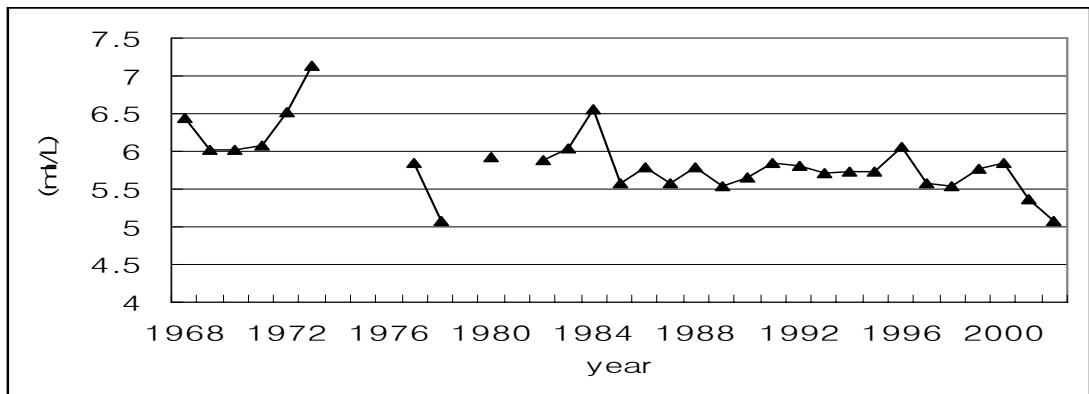
자료: 한인성(2013).

그림 5-9. 최근 37년간 동해(▲), 남해(○), 서해(●)의 50m층 용존산소 장기변동



자료: 한인성(2013).

그림 5-10. 최근 37년간 동해(▲)의 200m층 용존산소 장기변동



자료: 한인성(2013).

다. 기후변화가 수산업 생산에 미치는 영향

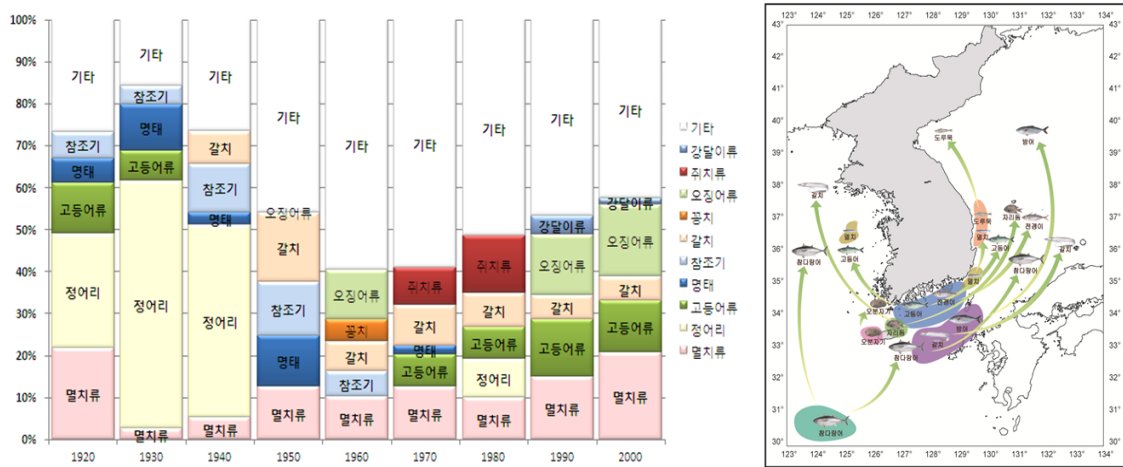
(1) 국내 어선어업의 영향

한반도 주변해역에서 기후변화가 수산자원에 미치는 영향을 이해하기 위해서는 수산자원의 일반적 특성 파악이 필요하다. 한반도 주변해역에 서식하는 어종들은 크게 한류성과 난류성, 부어류와 저어류, 단년생과 다년생, 정착성과 회유성 어종 등으로 크게 대별된다.

어류의 r/K 전략 선택이론(r/K selection theory)은 기후변화에 민감한 어류들을 어느 정도 잘 구분할 수 있다. r/K 전략 선택이론에 의하면, 어떤 이유로 인하여 어떤 개체군의 수가 갑자기 대폭 감소했다면, 그 개체군은 바로 증가하기 시작하여 개체군을 원래의 상태로 회복시키려한다. 처음에는 성장계수 r 에 의존하여 지수적으로 급격히 증가하지만 어느 정도 증가한 후에는 최대수용능력 혹은 환경수용력 K 값에 영향을 받아 증가 속도가 감소되어, 개체군의 증가는 S 모양의 로지스틱 곡선을 따르게 된다. 한 어류의 개체군이 불안정하고 예측하기 어려운 환경에 살고 있다면 자연재해에 의한 개체군의 감소가 자주 발생한다. 따라서 감소에 대한 보상으로 높은 r 값을 가져야 서식장에서의 종족유지가 가능하며, 최대수용능력 K 에 빨리 접근할 수 있다. 반면, 안정된 환경에서 서식하는 어류는 환경의 변화로 인한 대량 사망은 없지만, 서식장 내에 존재하는 한정된 먹이생물에 대한 경쟁을 성공적으로 수행하여야만 한다. 그들의 개체군 크기는 평상시 K 값에 근접해 있기 때문에 많은 수의 후손을 낳는 것보다는 생존능력이 강한 후손을 만들어 먹이경쟁에서 우위를 차지하도록 전략을 세운다. 이와 같이 생물종들은 서식환경의 상태에 따라 생존전략을 달리하는데, 전자처럼 주로 물리적 요인을 극복하기 위하여 개체군의 습성을 조절하는 것을 r -전략이라 하며 살오징어, 멸치, 꽁치, 고등어, 정어리, 전갱이 등 부어류, 단년생 어류들이 여기에 속한다. 그리고 후자처럼 생물학적 이유로 적용된 전략을 K -전략이라 하고 참조기, 갈치, 가자미류 등 저어류, 다년생 어류들이 여기에 속한다.

지구온난화에 따른 한반도 주변 수온 상승은 r -전략 어종에 크게 영향을 미칠 것으로 예상된다. 실제로 최근 해수온이 상승함에 따라 전반적으로 어종의 분포가 북상하고 있으며, r -전략 어종인 살오징어, 멸치, 고등어 등의 생산은 증가한 반면, 명태, 임연수어 등 한류성 어종의 생산은 감소한 것으로 나타났다.

그림 5-11. 한반도 주변 어획 어종 분포 변화



자료: 한인성(2013).

(2) 국내 양식어업의 영향

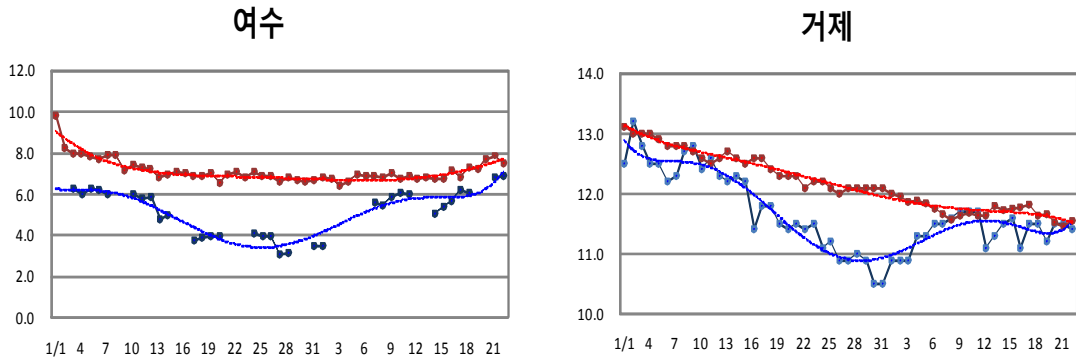
기후변화와 관련된 양식업의 피해는 주로 ‘저수온, 저염분 등 물리환경 변화에 의한 폐사’와 ‘적조 및 해파리 대량발생 등 유해생물 발생에 의한 폐사’로 구분할 수 있다.

(가) 물리환경 변화에 따른 폐사

저수온에 의한 양식생물 대량 폐사는 대표적으로 2011년 1월 한반도 주변해역에서 발생한 이상 수온 저하 현상을 들 수 있다(그림 5-12). 이 시기 충남, 전남, 경남 주변 연안에서는 평년에 비하여 1~4℃ 수온이 낮은 저수온 현상이 지속적으로 발생하여 돔, 쥐치, 우럭 등 양식생물의 대량피해가 발생하였다. 피해액은 총 13,236백만원, 피해어가는 260어가, 피해물량은 1,454만 미로 경남지역에서는 돔류 및 쥐치, 충남지역에서는 우럭 및 전복, 전남지역에서는 주로 돔류의 폐사가 발생하였다. 지자체별 피해규모를 보면 여수, 고흥 등 전남 지역의 피해가 총 9,523백만 원으로 가장 많았으며, 태안, 서산 등 충남 지역의 피해가 2,530백만 원, 통영, 사천, 거제 등 경남 지역의 피해는 2,183백만 원으로 조사되었다.

동사원인은 외부에 특이한 증상이 없고 해부 결과 혈액이 점액으로 응고된 점으로 보아 급격한 수온변화로 인한 폐사로 판단하고 있으며, 구 농림수산식품부에서는 국고, 지방비, 융자 및 자부담을 포함하여 12,143백만 원을 피해어가에 복구비로 지원하였다.

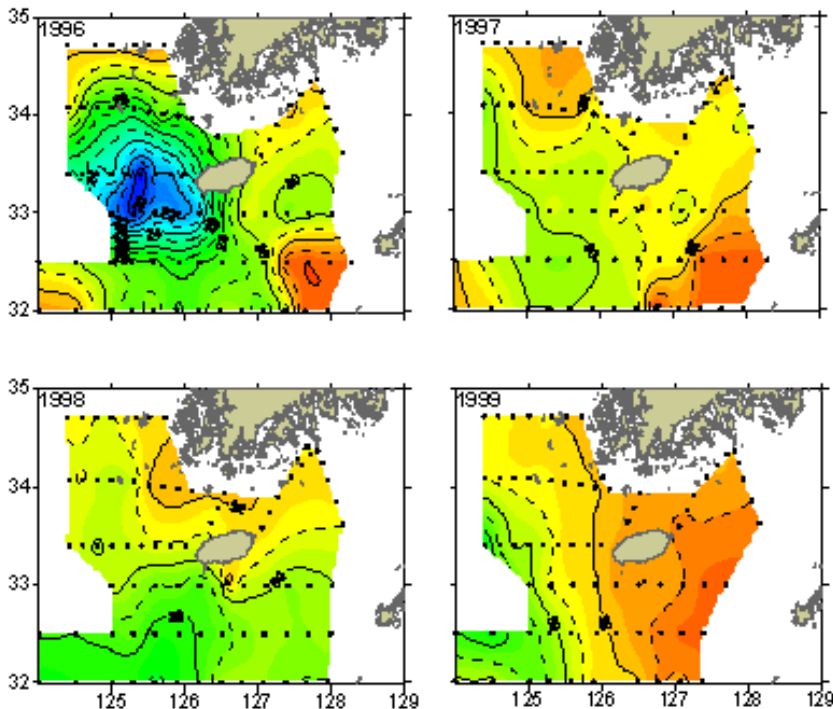
그림 5-12. 2011년 1~2월의 여수 및 거제의 연안수온 변동 경향



주: 붉은색은 평년치, 푸른색은 관측치임.
 자료: 한인성(2013).

저염분 수괴 발생에 따른 양식생물 대량 폐사는 주로 제주도 주변 패류 연안양식 어장에서 발생하고 있다. 최근에는 뚜렷한 피해가 발생하고 있지 않지만, 1996년 20psu 이하의 저염분 수괴가 제주도 서방해역을 통과하면서 대규모 양식패류 대량 폐사가 발생하여 약 59억 원의 경제적 피해와 184톤의 패류 양식생물 폐사가 발생하였다.

그림 5-13. 1990년대 후반 하계 동중국해 북부해역의 염분 분포



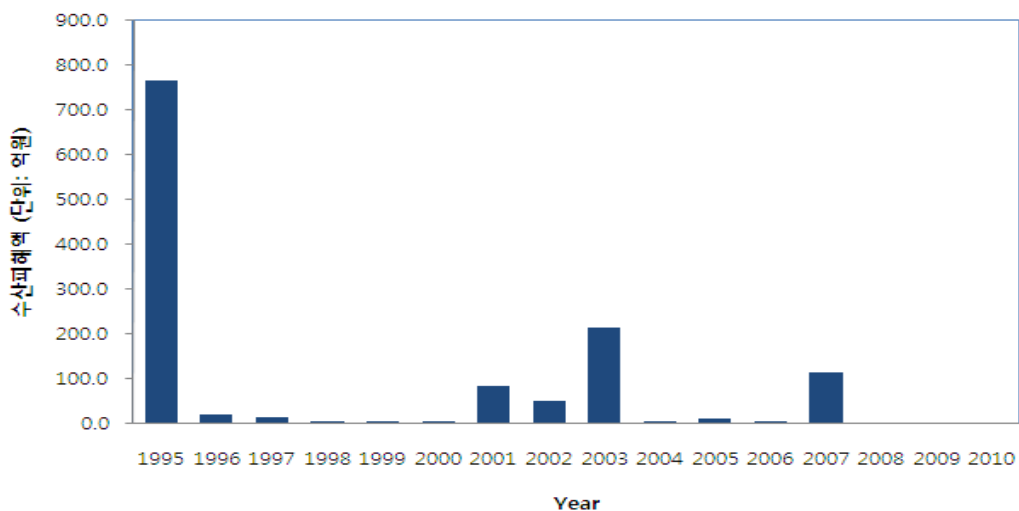
자료: 한인성(2013).

빈산소수괴는 부영양화된 폐쇄성 및 반폐쇄성 내만해역에서 표층수온이 상승하여 강한 수온약층이 형성되고, 강우 등에 의한 육수 유입이 증가하여 해수의 밀도성층이 강하게 발달하는 하계에 저층의 용존산소가 3mg/L 이하로 낮아지는 현상이다. 빈산소수괴는 일반적으로 가막만, 여수신항, 광양만 등 남해의 내만에서 주로 발생하는데, 정량적인 피해 규모는 산출되어 있지 않지만 이 해역에서는 피조개 등 살포식 패류 양식이 성행하여 빈산소수괴 발생에 따른 영향을 받을 것으로 예상되고 있다.

(나) 유해생물 발생에 따른 폐사

1990년대 중반 이후 코클로디니움(*C. polykrikoides*)의 대량발생으로 인한 적조의 영향으로 남해안을 중심으로 양식생물 대량폐사가 빈번하게 발생하고 있다. 적조 발생의 원인은 하계 일사량 등 기상요소와 표층수온, 수온성층, 쿠로시오, 강수량, 연안용승, 냉수대 등의 해양환경적 요소 및 생물종간 경쟁 등과 같은 생물학적 요인이 복합적으로 작용하여 발생하는 것으로 알려져 있지만 정확한 원인은 아직 확인되지 않았다. 적조는 대부분 여름에 발생하고 있는데, 최초 발생일은 매년 차이가 있지만 일반적으로 7월 하순에서 8월 초순에 발생하고 있으며 지속기간 역시 23~62일로 매년 차이가 크다. 적조 피해액은 적조 피해 통계가 시작된 1995년 가장 크게 나타나 764억 원의 경제적 피해가 발생하였으며 2001~2003년과 2007년이 피해가 큰 해로 기록되었다(그림 5-14). 한편 적조 외에도 1990년대 후반부터 보름달물해파리와 노무라입깃해파리 등 해파리가 대량 출현하면서 수산업은 물론 관광산업 등 타 산업부문까지 악영향을 미치고 있다.

그림 5-14. 적조 발생으로 인한 경제적 피해 현황



자료: 한인성(2013).

라. 수산분야 기후변화 미래 전망

(1) 우리나라 주변해역의 해양구조 변화 전망

IPCC 4차 평가보고서(AR4)에 사용된 25개 모델 중 해양모델의 해상도가 가장 높은 MIROC 3.2 hires 모델자료를 이용하여 향후 수온과 염분 변화를 추정하였다. 분석 결과, 우리나라 주변해역의 100년 후 수온은 2~7℃ 상승하고, 염분은 약 1psu 정도 하강하는 것으로 나타났다. 추가적으로 IPCC에 사용된 모델 중 IPCC 홈페이지를 통해 제공된 자료에 오류가 있는 3개 모델을 제외한 22개 모델을 분석하여 우리나라 주변해역의 수온 및 염분의 변동성을 앙상블 평균을 통해 확인하였다.

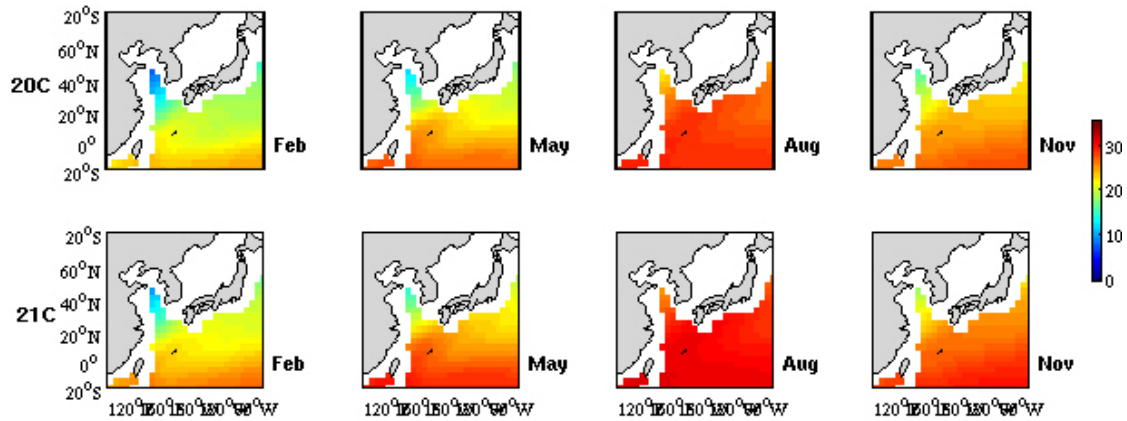
표 5-1. 분석에 사용된 IPCC 모델 리스트

모델	국가	Oceanic resolution			실제 처리 모델자료 사이즈
		Horizontal grid (degrees)	Cell size	Vertical layer	
BCCR-BCM2.0	Norway	1.5×(0.5~1.5)		L35	360×180×33
CCSM3	USA	1.125×(0.27~1)		L40	320×395×40
CGCM3.1(T47)	Canada	1.8×1.8		L29	192×96×29
CGCM3.1(T63)	Canada	1.4×0.9		L29	256×192×29
CNRM-CM3	France	2×(0.5~2)	182×152	L31	180×170×33
CSIRO-MK3.0	Australia	1.875×0.84		L31	192×189×31
CSIRO-MK3.5	Australia	1.875×0.84		L31	192×189×31
ECHAM5/MPI-OM	Germany	1.5×1.5		L40	360×180×40
ECHO-G	Germany/Korea	1.25×1.25	128×64	L20	128×117×20
FGOALS-g1.0	China	1×1			360×170×33
GFDL-CM2.0	USA	1×1			360×200×50
GFDL-CM2.1	USA	1×1			360×200×50
GISS-AOM	USA	4×3		L16	90×60×31
GISS-EH	USA	5×4			360×180×33
GISS-ER	USA	5×4			72×46×33
INGV-SXG	Italy	2×(1~2)			360×180×33
IPSL-CM4	France	2×2			180×170×31
MIROC3.2(hires)	Japan	0.28125×0.1875		L47	320×320×33
MIROC3.2(medres)	Japan	1.4×(0.5~1.4)		L43	256×192×33
MRI-CGCM2.3.2	Japan	2.5×(0.5~2)			144×111×23
PCM	USA	1.125×0.27	320×384	L40	360×180×32
UKMO-HadCM3	UK	1.25×1.25			288×144×20

자료: 한인성(2013).

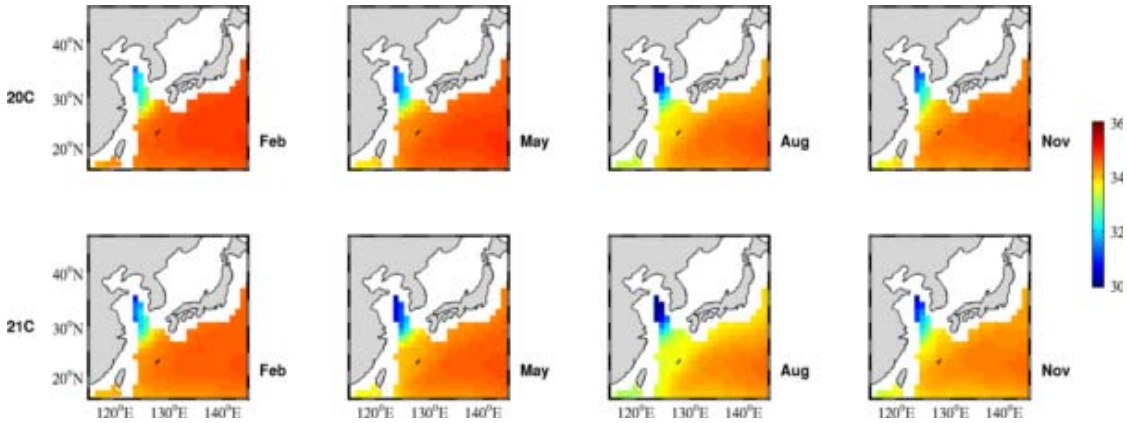
모델마다 해상도가 다르기 때문에 우리나라 주변을 모두 포괄하는 평균값을 구할 수는 없었으나 공통된 값을 가진 영역에 대해 계절별 수온과 염분 평균값을 산출하였다. 22개 모델을 종합한 결과, MIROC 3.2 hires의 결과와 유사하게 우리나라 주변 해역은 20세기에 비해 21세기에는 수온이 높아지고, 염분 농도는 낮아지는 것으로 나타났다(그림 5-15, 5-16).

그림 5-15. IPCC 모델의 20세기와 21세기 계절별 표층수온 앙상블 평균



자료: 한인성(2013).

그림 5-16. IPCC 모델의 20세기와 21세기 계절별 표층염분 앙상블 평균



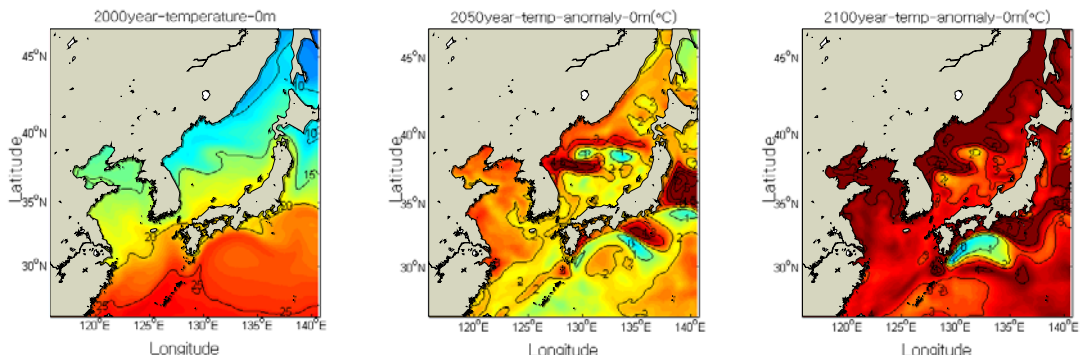
자료: 한인성(2013).

이를 좀 더 자세히 살펴보기 위하여 일본 동경대학 기후시스템센터(CCSR), 일본 국립환경연구소(NIES), 일본 지구환경프론티어연구센터(FRCGC)에 의해 공동으로 개발된 전구 대기해양결합모델(MIROC)의 버전 3.2 고해상도 모델을 이용하여 수온장과 염분장 및 유속장의 미래 예측 분포를 살펴보았다. 모델의 격자 체계는 Arakawa B 수평격자체계와 σ -z 하이브리드 연직격자체계이며, 수평해상도는

0.28125°×0.1875°(약 20~30km), 연직해상도는 47층(수심 1.25~5523m)이다. IPCC AR4는 사회경제·배출시나리오로서 IPCC의 SRES(Special Report on Emissions Scenarios) 시나리오를 사용하였는데 SRES 시나리오는 기후변화 예측연구에 있어서 통일적인 전제조건으로 설정한 것으로, IPCC가 2000년에 공표한 온실가스 배출시나리오이다.

MIROC 3.2 hires의 20세기(1901년부터 2000년까지 월평균) 재현 자료와 A1B 시나리오 예측 결과의 원자료(2001년부터 2100년까지 월평균)를 분석하였다. A1B 시나리오는 전체 에너지원의 균형을 중시하여 높은 경제성장을 실현하는 상황으로, 온실효과가스인 이산화탄소 농도가 21세기 말에 20세기 말의 약 2배(717 ppm)가 되도록 설정한 시나리오이다. 모델링 결과의 재분석 결과를 통하여 미래 한반도 주변 해양 물리적 특성 분포를 살펴본 결과, 표층 수온분포의 경우 2000년 대비 2050년에는 한반도 주변 전 연근해에서 1~6°C 수온이 상승하며, 특히 동해 중부 연근해역을 중심으로 수온 상승이 큰 것으로 나타났다. 2100년에는 2~7°C의 수온 상승이 나타나며, 특히 동해 북부해역 및 황해 중북부해역에서도 높은 상승을 보였다(그림 5-17).

그림 5-17. MIROC 3.2 hires를 통한 표층 2000년 수온 분포(좌), 2050년(중) 및 2100년(우) 수온편차분포



자료: 한인성(2013).

(2) 주요 양식품종 적지 변화 예측

양식생물의 적정 사육온도를 통하여 기후변화에 의한 양식생물의 적정 해역을 판단하는 것은 현재로서는 무리가 있다. 이는 기후변화에 의한 수온 상승은 서서히 일어나는 현상이기 때문이다. 현재 우리나라의 표층 수온 상승 정도는 연간 0.03°C로 30년 이상 지속될 경우 1°C가 상승하는 것인데 이는 충분히 양식생물이 변화하는 수온에 적응할 수 있음을 의미한다. 그러나 2100년경까지의 수온 변화에 따라 우리

나라 주요 양식생물의 적정 해역 변화에 대한 고찰은 미래 양식산업에 대한 준비를 위해 필요하다고 판단된다.

부산대학교의 CGCM 모델 결과를 통해 예측된 2020년부터 2099년까지 20년 간격의 전국 46개 지점의 수온 변화 경향을 통하여 주요 양식생물의 적정 해역 변화를 예측하였다. 전반적으로 주요 해산어류의 사육최적수온은 14~28℃ 내외로 나타났다(표 5-2).

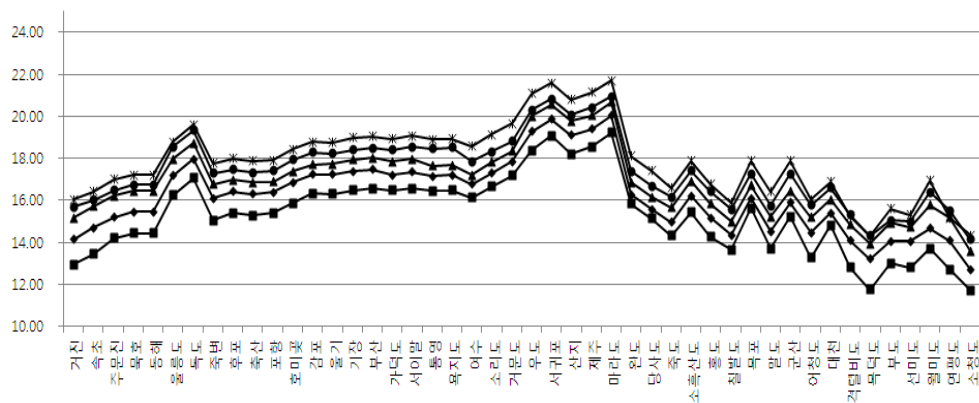
표 5-2. 주요 해산어류의 사육수온, 사육최적수온 및 폐사수온

품종	사육수온(℃)	사육최적수온(℃)	폐사온도(℃)
불락		15 이상	
농어	10~28	14~22	
방어	18~27	22~26	7 이하, 31 이상
자주복	15~25	20~25	3~6 이하, 28 이상
숭어	20~27	22~26	1.2 이하, 29.8 이상
넙치	15~26	21~24	10 이하, 27 이상
감성돔	15~30	20~28	30 이상
참돔	13~28	20~28	7 이하, 30 이상
돌돔	10~25	18~26	5~7, 33 이상
조피불락	12~20	15~20	7 이하, 30 이상

자료: 한인성(2013).

CGCM 모델(A1B 모델을 적용, 앙상블 평균값 이용)을 통한 2020년부터 2099년까지 20년 간격의 연안 연평균 표층수온은 <그림 5-18>과 같다.

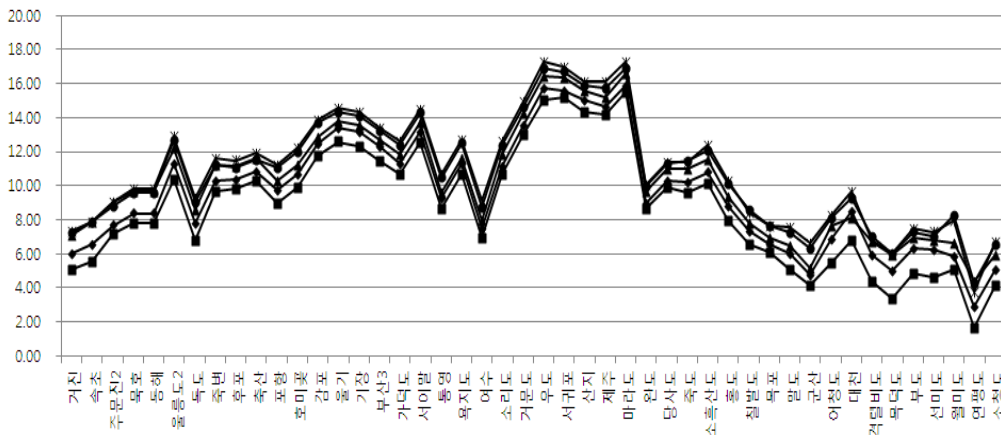
그림 5-18. CGCM 모델 결과를 통한 전국연안의 연평균 표층수온 예상



주: ■ - 2020년, ◆ - 2040년, ▲ - 2060년, ● - 2080년, * - 2099년
 자료: 한인성(2013).

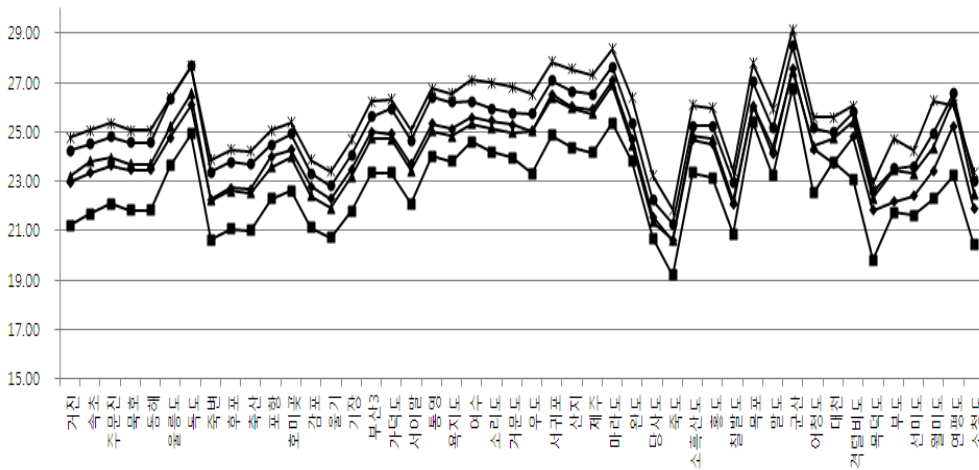
한편 우리나라 해역의 최저 및 최고 수온이라 할 수 있는 2월과 8월의 표층 수온은 <그림 5-19>, <그림 5-20>과 같다.

그림 5-19. CGCM 모델 결과를 통한 전국연안의 2월 평균 표층수온 예상



주: ■ - 2020년, ◆ - 2040년, ▲ - 2060년, ● - 2080년, * - 2099년
 자료: 한인성(2013).

그림 5-20. CGCM 모델 결과를 통한 전국연안의 8월 평균 표층수온 예상



주: ■ - 2020년, ◆ - 2040년, ▲ - 2060년, ● - 2080년, * - 2099년
 자료: 한인성(2013).

불락의 경우 사육최적수온은 15℃ 이상으로 2099년에는 서해 5도 일부 도서지방을 제외한 우리나라 전 연안의 연평균 수온이 15℃ 이상을 기록할 것으로 보여 전 연안에 양식이 가능할 것으로 예상된다.

농어의 사육최적수온은 14~22℃로서 2099년에는 겨울철에도(감포~울기 연안, 소라도 및 제주도 주변해역 등) 양식이 가능할 것으로 예상된다. 여름철에는 서해 남부

일부 도서지방을 제외하고 22℃를 상회할 것으로 전망되어 추계 및 춘계를 중심으로 농어 양식이 가능할 것으로 보인다.

방어의 경우는 사육최적수온이 22~26℃로서 대표적인 난류성 어종으로 폐사온도는 7℃이하, 31℃이상이다. 2099년에는 여름철을 중심으로 속초~부산까지의 동해안이 적수온대에 포함되며, 현재 주 양식지역인 남부지방의 경우 26℃를 훨씬 상회하여 여름철 양식은 부적절할 것으로 판단된다. 서해는 지역에 따라 차이가 크나 홍도 주변 해역 및 서해 중부지방이 적합한 양식적지로 판단된다.

자주복은 사육최적수온이 20~25℃로 폐사온도는 3~6℃ 이하, 28℃이상이다. 이에 따라 2099년에는 여름철 죽변~울기 연안까지 동해 중남부 해역과 서해지역 중 완도, 부도, 선미도 주변 해역이 여름철 적수온대에 포함될 것으로 예상된다.

송어의 경우 사육최적수온이 22~26℃이고 폐사온도는 1.2℃ 이하, 29.8℃이상으로 2099년에는 여름철 울릉도 주변을 제외한 대부분의 동해 연안이 양식적지로 나타났다. 그러나 남해연안과 제주도주변 연안은 모두 27℃에 근접하는 수온 상승이 예측되어 여름철 이 지역에서의 양식은 어려울 것으로 예상된다.

가장 대중적인 양식품종인 넙치의 경우 사육최적수온이 21~24℃로서 현재 제주도 주변해역과 남해 연안 일부 지역을 중심으로 양식이 이루어지고 있다. 넙치 양식도 수온 상승의 영향으로 2099년에는 동해 중부해역 및 동해남부 해역까지 양식적지가 확대될 것으로 예상된다. 단, 수온이 27℃ 이상일 경우 넙치 폐사가 일어나 현재 주 양식지역인 제주도와 남해 연안 일부 지역에서의 여름철 양식은 부적합할 것으로 보인다.

참돔과 감성돔 역시 대표적인 난류성 양식품종으로 사육최적수온은 20~28℃로 알려져 있다. 감성돔은 2099년에는 여름철 대부분의 해역이 적수온대에 포함되어 전국 연안에서 감성돔 양식이 가능할 것으로 예상된다.

돌돔은 참돔, 감성돔에 비하여 사육최적수온이 약 2℃ 낮은 18~26℃로 알려져 있다. 돌돔 역시 여름철 전국 대부분의 연안에서 적수온대에 포함되어 있어 춘계~추계에 전국 연안 어디에서나 양식이 가능할 것으로 판단된다.

조피볼락은 사육최적수온이 15~20℃로서 2099년에는 겨울철에도 제주도 주변해역 및 남해 일부 연안에서 양식이 가능할 것으로 예상된다. 여름철에는 전국 대부분이 적수온대보다 높은 수온을 유지하여 주로 춘계와 추계를 중심으로 전국 대부분 해역에서 양식이 가능할 것으로 보인다.

2. 수산분야 기후변화의 경제적 영향 분석

가. 분석 모델 개요

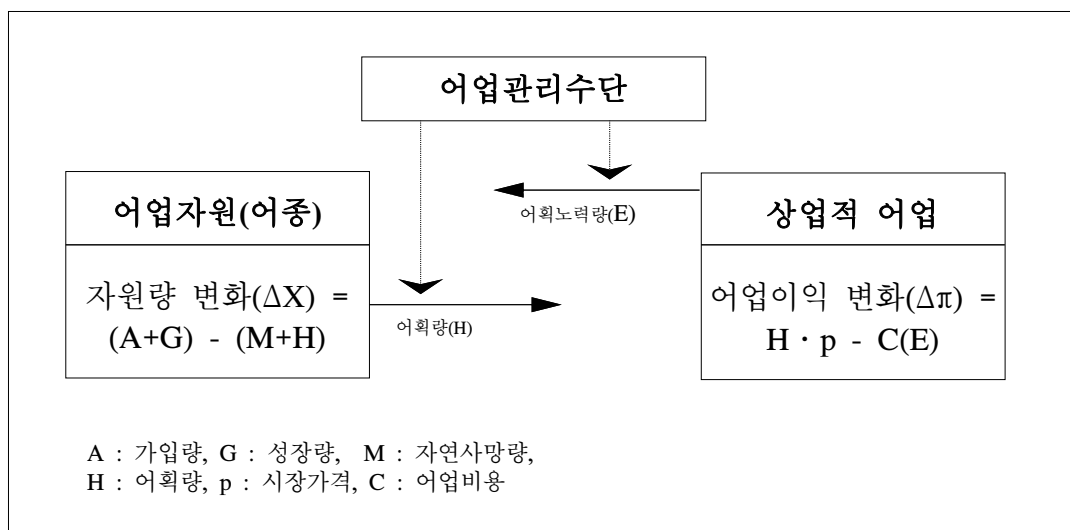
기후변화 등에 따른 어업자원량 및 어획량 변화를 예측하기 위한 분석은 생물경제 모델링(Bioeconomic Modelling) 방법이 널리 활용되고 있다. 이 방법을 사용하면 생물학적 자원평가 모델(population dynamics)과 어업인의 어업활동 모델을 동시에 분석하여 어업환경 변화로부터의 자원량 및 어획사망계수 수준 변화에 따른 자원량의 동태적 변화뿐만 아니라 어업인에 대한 경제적인 동태효과를 동시에 예측할 수 있다.

어획이 이루어지게 되면 어획노력량(E)이 투입되어 어획사망계수(F, $F=q \cdot E$) 수준이 증가하고 상업적 어업인은 투입된 어획노력량 수준에 따른 어획량(H, $H=F \cdot X$)을 얻게 되지만, 어업자원량(X)은 식 (5-1)과 같이 자연사망량과 더불어 어획량(H) 만큼 감소하게 된다.

$$\Delta X = \frac{dX}{dt} = X - H (= F \cdot X) \tag{5-1}$$

생산된 어획량(H)에 시장가격(p)을 곱하고, 여기에 어업비용(C)을 제하면 해당어종의 어획활동으로부터 어업이익(π)이 산출된다[$\pi = H \cdot p - C(E)$].

그림 5-21. 생물경제모델의 개념도



이러한 어획활동에 있어 기후변화나 어업자원 회복 및 관리를 위한 어업관리수단 등이 취해지게 된다면 어획사망계수(F) 수준에 영향을 끼치거나 직접적으로 어획량

수준을 통제할 수 있다. 예를 들어, 기술적 통제수단이나 어획노력량 관리수단이 취해지게 되면 식 (5-2)와 같은 어획량 함수식에서 어획능력계수(q)와 어획노력량(E) 수준이 통제되게 되어 어업자원에 대한 어획사망계수(F, $F=q \cdot E$)의 수준이 감소하게 된다.

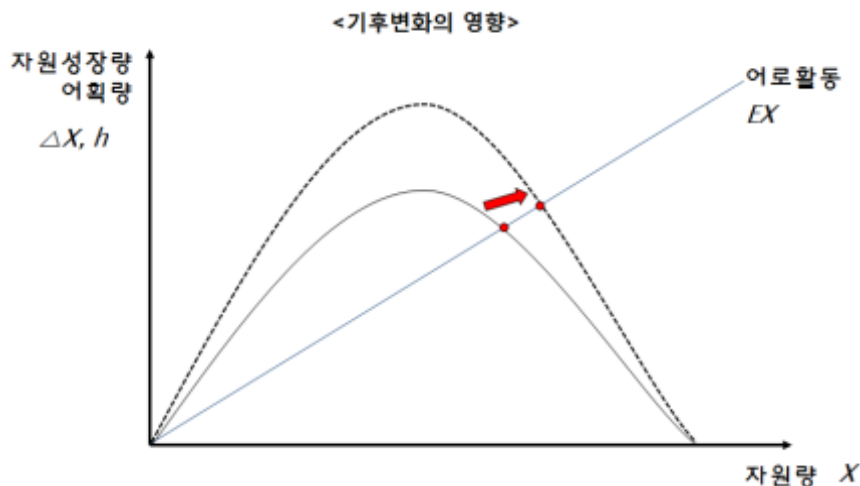
$$H = f(q, E, X) \tag{5-2}$$

또한 TAC 등과 같은 어획량 관리수단이 취해지면 어획량 자체가 통제되므로 역시 어획사망계수의 수준이 낮아져 어업자원에 대한 어획압력이 감소하게 된다. 그 결과 어업관리수단 조치 전후의 어업이익 변화는 식 (5-3)과 같이 어업관리수단의 사용에 따라 감소된 어획사망계수(\hat{E}) 수준, 즉 통제된 어획량(\hat{H})에 따라 달라진다.

$$\Delta\pi = [H \cdot p - C(E)] - [\hat{H} \cdot p - C(\hat{E})] \tag{5-3}$$

생물경제모델링 방법 하에서 어업인들의 경제적 효과(소득효과)는 향후 일정 기간 동안의 시뮬레이션 분석을 통해 어업관리수단이 취해졌을 경우와 그렇지 않을 경우 발생하는 어업이익을 현재가치로 환산하여 평가할 수 있다.

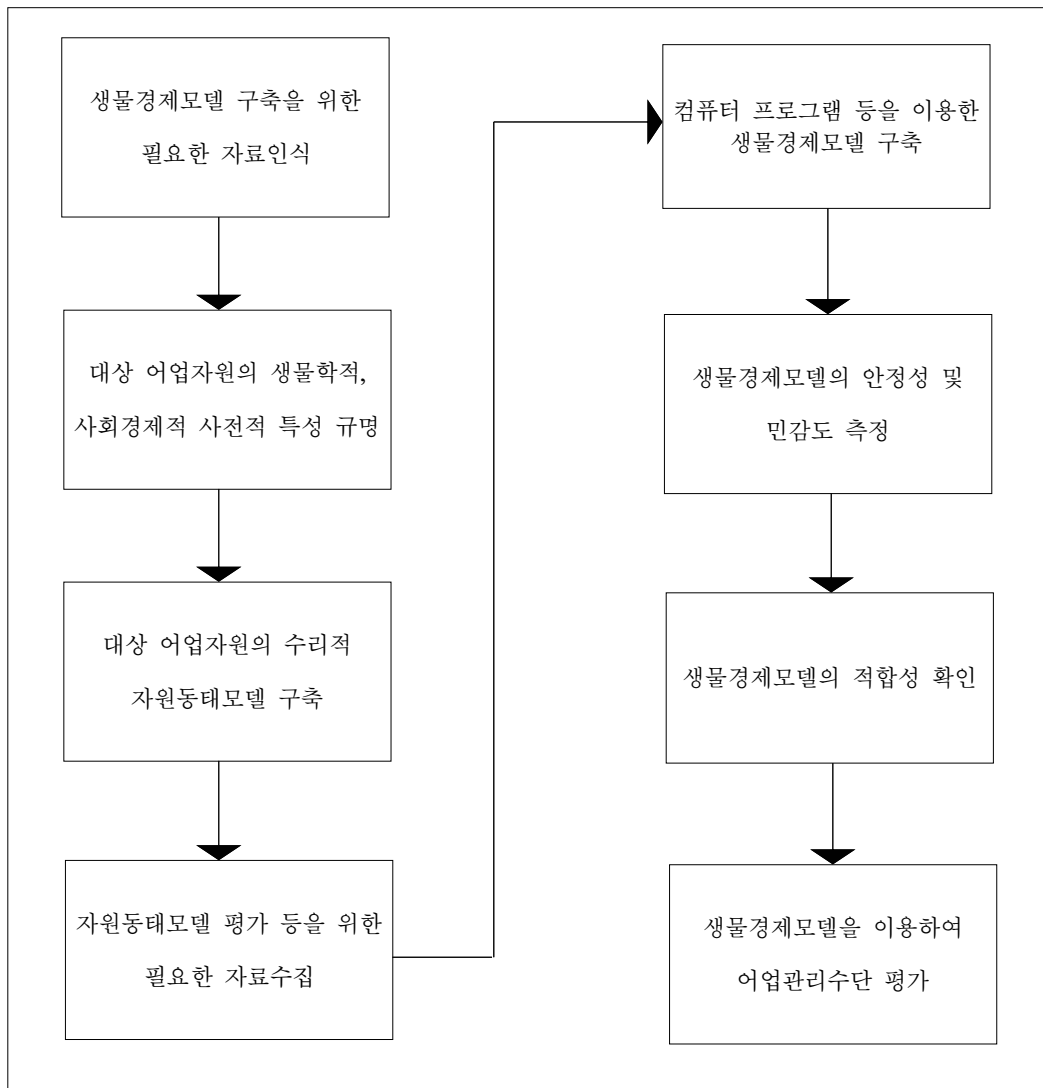
그림 5-22. 수산자원에 미치는 기후변화의 영향



기후변화나 일정 기간 동안 특정 어업관리수단을 취했을 경우의 등의 자원량 변화 정도로 기후변화의 영향이나 어업관리수단의 효과를 분석할 수 있다. 생물경제모델링 방법은 어업인들의 경제적 효과도 동시에 고려할 수 있으므로 기후변화나 어업관

리수단의 효과분석에 가장 적합한 방법으로 평가되고 있다. 생물경제모델링은 향후 일정기간 동안 자원량 변화와 어업경제효과를 분석하기 위한 동태적 시뮬레이션 방법으로 <그림 5-23>과 같은 절차를 통해 구축된다.

그림 5-23. 생물경제모델의 구축 절차



자원평가모델은 여러 가지가 있으나, 가장 널리 활용되고 있는 잉여생산량 모델은 어업자원량 평가 및 자원동태모형으로서 가장 간단한 방법으로, 어업자원의 변동량을 나타내는 가입량, 성장량, 자연사망량이 하나의 단일함수 형태로 평가된다. 잉여생산량 모델은 자원군의 크기 변화만 다루게 되므로 그 자원군의 연령분포와 같은 세부적인 속성을 고려하지 않는 것이 특징이며, 자원량 평가지표(예를 들어, 단위어획노력당 어획량(CPUE))와 어획량 자료만 있으면 모델 추정이 가능하므로 적은 생

물학적 자료를 가지고 자원량 동태변화를 추정할 수 있는 장점이 있다.

Schaefer(1954)가 처음으로 잉여생산량 모델을 사용하여 태평양 넙치 자원량을 평가했는데, 로지스틱 함수를 이용하여 자원량의 변화를 다음의 식 (5-4)와 같은 형태로 나타냈다. 여기서, X_{t+1} 은 t+1기 때의 자원량, X_t 는 t기 때의 자원량, r 은 자원의 본원적 성장률(intrinsic rate), 그리고 K 는 최대 자원량 수준(carrying capacity)을 의미한다.

$$X_{t+1} = X_t + r \cdot X_t \cdot \left(1 - \frac{X_t}{K}\right) \quad (5-4)$$

순간어획량($\frac{dH}{dt}$)은 어획사망계수(F)와 현재 자원량의 곱으로써 식 (5-5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dH}{dt} = F \cdot X \quad (5-5)$$

어획사망계수(F)는 어획능력계수(q)와 어획노력량(E)의 곱이므로 식 (5-5)는 식 (5-6)과 같은 변형이 가능하다.

$$\frac{dH}{dt} = q \cdot E \cdot X \quad (5-6)$$

Schaefer의 잉여생산량 모델은 자원의 성장곡선이나 어획노력량과 어획량간의 균형관계 등 비현실적인 가정을 하고 있는 단점이 있어 이를 보완하기 위한 수정된 잉여생산량 모델들이 개발되었다. 특히 어업생산 모형에 있어서는 기존의 Schaefer 로지스틱 모형 외에 Fox(1970)는 식 (5-7)과 같이 자원군 크기가 지수적으로 감소한다고 가정하여 Gomperts의 개체군 성장식을 적용하여 지수함수 모형을 개발하였다.

$$G = rX \ln(K/X) \quad (5-7)$$

Schaefer 모델에서와 같이 지속가능한 생산량은 어업자원의 성장량과 같은데, 이는 다음의 식 (5-8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$C = rX \ln(K/X) \quad (5-8)$$

단위어획노력당 어획량이 자원량 밀도에 비례한다고 가정할 때, C 는 다음의 식 (5-9)와 같이 나타낼 수 있다,

$$C = \frac{r\bar{U}}{q} \left[\ln\left(\frac{U_\infty}{q}\right) - \ln\left(\frac{\bar{U}}{q}\right) \right] \quad (5-9)$$

U_∞ 은 어업자원이 사용되지 않은 상태에서 얻어지는 단위어획노력당 어획량, 즉 $U_\infty = rK$, \bar{U} 는 단위어획노력당 어획량의 평균이다. 여기서 $\ln(q)$ 를 소거하여 식 (5-9)의 우변을 확대하면 다음의 식 (5-10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$C = \frac{r\bar{U}}{q} [\ln U_\infty - \ln \bar{U}] \quad (5-10)$$

식 (5-10)의 양변을 \bar{U} 로 나누면 식 (5-11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E = \frac{r}{q} [\ln U_\infty - \ln \bar{U}] \quad (5-11)$$

여기서 E 는 어업에 투입된 어획노력량 수준이다. 식 (5-11)을 $\ln \bar{U}$ 에 대해 정리하면 다음의 식 (5-12)와 같다.

$$\ln \bar{U} = \ln U_\infty - (q/r)E \quad (5-12)$$

식 (5-12)를 지수화하면, Fox 모델에서의 단위어획노력당 어획량의 평균 \bar{U} 는 다음의 식 (5-13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{U} = U_\infty e^{-(q/r)E} \quad (5-13)$$

그리고 식 (5-9)는 다음의 식 (5-14)와 같이 대체되어 표현될 수 있다.

$$\frac{\Delta U}{\bar{U}} = r \ln(qK) - r \ln(\bar{U}) - qE \quad (5-14)$$

본 연구의 분석에서 사용한 CYP(Clarke, Yoshimoto and Pooley, 1992) 모델은 Fox 모델을 수정한 것으로, 식 (5-14)를 다음의 식 (5-15)와 같이 재정의하였다.

$$\frac{1}{U} \frac{dU}{dt} = r \ln(qK) - r \ln(U) - qE \quad (5-15)$$

그리고 식 (5-15)는 다음의 식 (5-16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ln\left[\frac{U_{t+1}}{U_t}\right] = r \ln(qK) - r \ln(\bar{U}) - q\bar{E} \quad (5-16)$$

다시 식 (5-16)은 Taylor approximation 방법에 따라 식 (5-17)을 도출할 수 있다.

$$\ln(\bar{U}_{t+1}) - \ln(\bar{U}_t) = 2r \ln(qK) - r(\ln(\bar{U}_t) + \ln(\bar{U}_{t+1})) - q(\bar{E}_t + \bar{E}_{t+1}) \quad (5-17)$$

식 (5-17)의 우변항을 $\ln(\bar{U}_{t+1})$ 로 정리하면, 다음의 식 (5-18)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ln(\bar{U}_{t+1}) = \frac{2r}{2+r} \ln(qK) + \frac{2-r}{2+r} \ln(\bar{U}_t) - \frac{q}{2+r} (\bar{E}_t + \bar{E}_{t+1}) \quad (5-18)$$

단위노력당 어획량과 어획노력량 자료를 이용하여 식 (5-18)의 생물경제모형의 변수를 추정하게 되면, 이를 이용해 기후변화에 따른 자원량 및 어획량 변화 등을 예측할 수 있게 된다.

나. 분석 방법

기후변화가 수산분야에 미치는 경제적 영향을 추정하기 위해 생물경제모형 중 하나인 CYP 모형을 적용하였다. 이를 통해 본원적 자원의 성장률(r), 어획능력계수(q), 최대 자원량(K)를 추정할 수 있다. 자원량과 기후변화 인자간 인과관계를 분석하기 위해 분석 대상 어종의 회유경로상의 수심별 수온자료를 이용하였다. 그리고 현실적으로 자원량 자료를 구하기 힘들기 때문에 단위노력당 어획량(CPUE)를 이용하였다. 그리고 기후변화에 따른 균형 자원량 및 균형 어획량을 전망에 있어, 현실적으로 기후변화 시나리오를 수심별 수온 예측에 적용하기가 어렵기 때문에 회유경로상 수심별 수온의 추세를 이용하여 전망하였다.

이상의 결과를 생물경제모델에 대입하여, 향후 40년 기간 동안 ‘기후변화의 영향을 고려하지 않는 경우’, 다시 말해 현재의 수온 상황이 그대로 지속된다고 가정하는 경우와 ‘기후변화의 영향을 고려하는 경우’ 즉, 기후변화에 따른 수온의 변화가 발생한다고 가정하는 경우를 분석하고, 향후 40년 동안의 자원량과 어획량 차이를 예측한 다음, 4%의 사회적 이자율을 적용하여 현재가치를 구해 기후변화에 따른 경제적 효과 변화를 도출하였다.

분석 대상은 우리나라에서 대표적으로 어획되는 어종인 고등어, 갈치, 멸치, 삼치, 참조기, 오징어 등 6개 어종이다.

다. 분석 결과

(1) 고등어

고등어 어획량은 2000년대 들어 평균 13만 톤 수준을 유지하고 있으며, 단위노력당 어획량은 연도별로 증감을 반복하고 있지만 대체로 증가 추세에 있다. 고등어 어획량과 어획노력량(어선척수) 자료를 활용하여 앞의 식 (5-13)~식 (5-16)을 이용한 CYP 모델을 분석한 결과, 본원적 성장률(r)은 0.904, 어획능력계수(q)는 0.004, 최대 자원량(K)은 356,614톤으로 도출되었다.

자원량(어획량)과 수심별 수온 사이의 인관관계는 75m 수심에 대해 통계적으로 유의한 관계가 있는 것으로 나타났다. 분석 결과, 75m 수심의 수온이 0.01℃ 상승하면 CPUE는 0.93% 감소하였다. 그런데 75m 수심의 수온은 장기적으로 연간 0.015℃ 하락하는 경향이 있는 것으로 확인되어 수온 변화에 따른 CPUE는 연간 1.4% 증가하는 것으로 예측되었다.

현재의 어획노력량(어선척수)이 유지된다고 가정할 경우, 기후변화 영향이라 할 수 있는 75m 수심의 수온 변화에 따라 우리나라 연근해 고등어 자원량은 기후변화의 영향이 없을 경우의 자원량보다 증가하며 어획량 수준도 기후변화가 없을 때보다 증가하게 된다. 이에 따라 향후 40년 동안 발생하는 어획금액의 경제적 가치는 643억 원이 증가하는 것으로 분석되었다.

그림 5-24. 고등어의 어획량 및 CPUE 추이

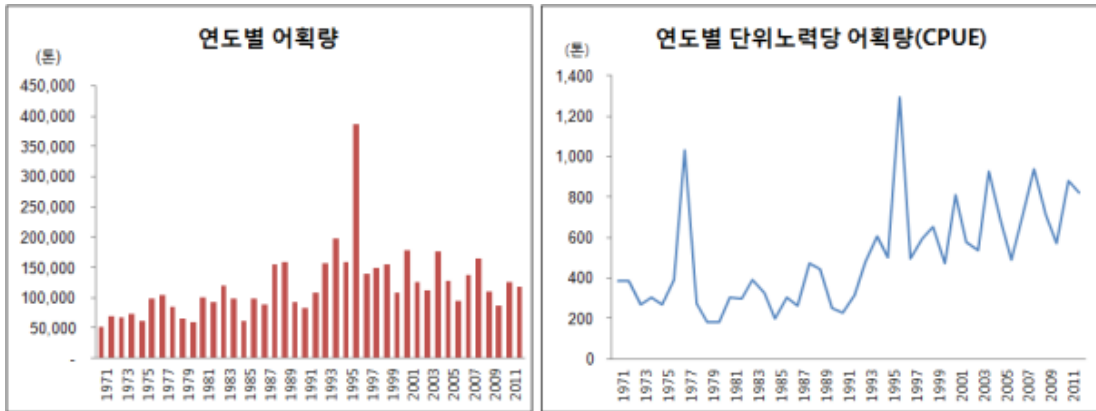
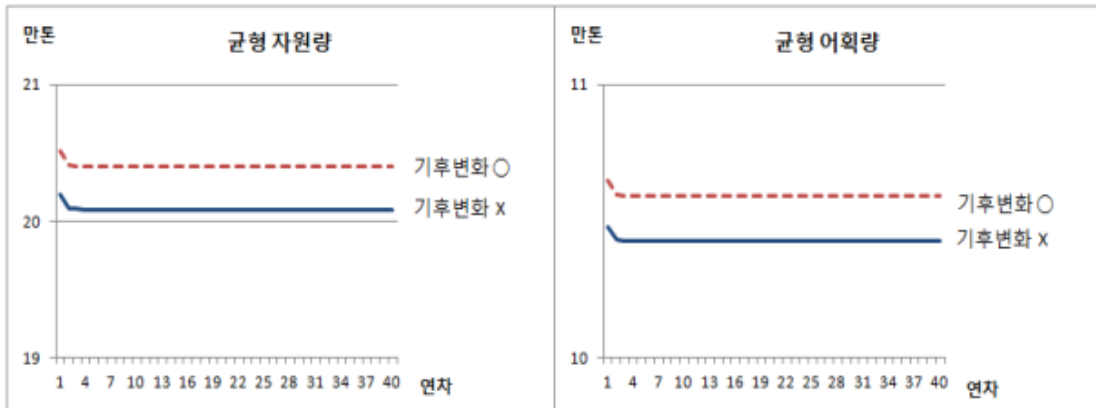


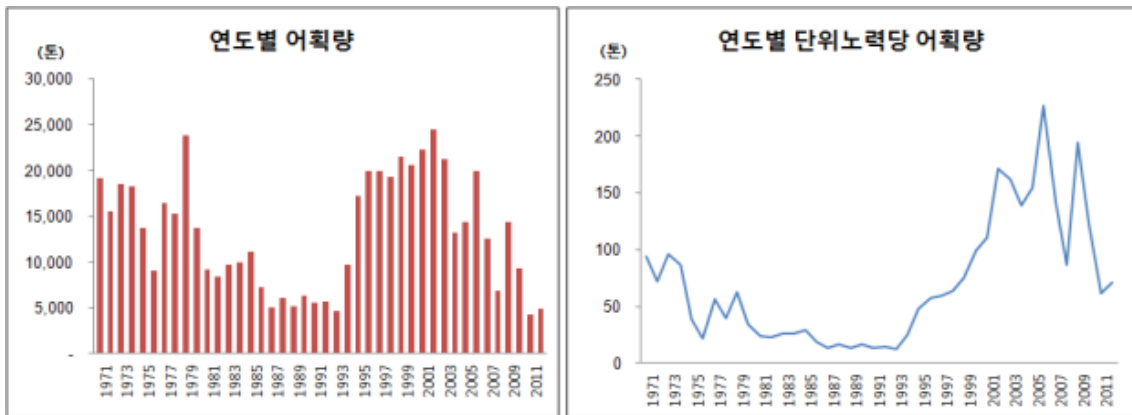
그림 5-25. 고등어의 균형 자원량 및 균형 어획량 추이



(2) 갈치

갈치 어획량은 2000년대 들어 대체적으로 감소하고 있으며, 단위노력당 어획량은 증가세에서 2000년 중반 이후 감소세로 전환되었다. 갈치의 어획량과 어획노력량(어선척수) 자료를 활용하여 CYP 모델을 분석한 결과, 본원적 성장률(r)은 0.441, 어획능력계수(q)는 0.002, 최대자원량(K)은 91,427톤으로 도출되었다.

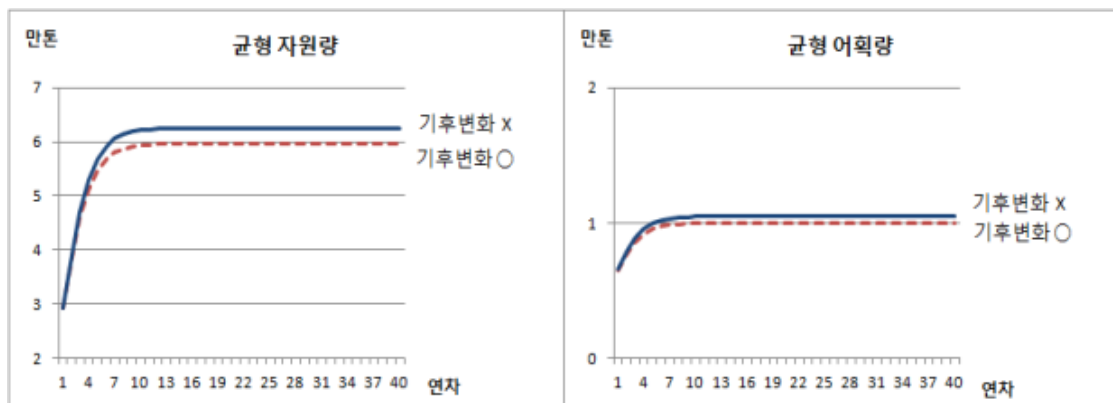
그림 5-26. 갈치의 어획량 및 CPUE 추이



갈치 자원량(어획량)과 수심별 수온 사이의 인관관계는 50m 수심과 100m 수심에 대해 통계적으로 유의한 관계가 있는 것으로 나타났다. 분석 결과, 50m 수심의 수온이 0.01℃ 상승하면 CPUE는 2.67% 감소하는 반면, 100m 수심의 수온이 0.01℃ 상승하면 0.36% 증가하였다. 50m 수심의 수온은 장기적으로 연간 0.016℃ 상승하고, 100m 수심의 수온은 0.066℃ 상승하는 경향이 있는 것으로 확인되어 수온 변화에 따른 CPUE는 연간 2.1% 감소하는 것으로 예측되었다.

현재의 어획노력량(어선척수)이 유지된다고 가정할 경우, 기후변화 영향이라 할 수 있는 50m 및 100m 수심의 수온 변화에 따라 우리나라 연근해 갈치 자원량은 기후변화의 영향이 없을 경우의 자원량보다 감소하며 어획량 수준도 기후변화가 없을 때보다 감소하게 된다. 이에 따라 향후 40년 동안 발생하는 어획금액의 경제적 가치는 639억 원이 감소하는 것으로 분석되었다.

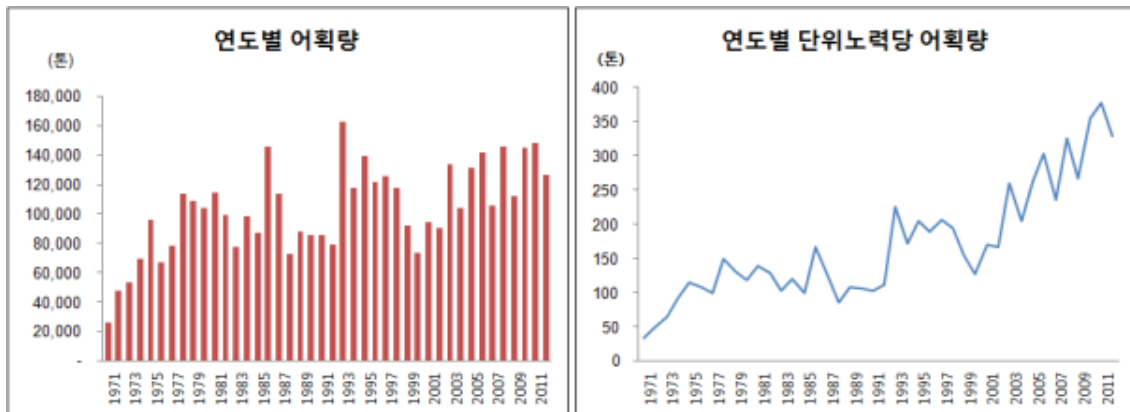
그림 5-27. 갈치의 균형 자원량 및 균형 어획량 추이



(3) 멸치

멸치 어획량은 증감을 반복하고 있지만 단위노력당 어획량은 1970년대 이후 지속적으로 증가하고 있다. 멸치의 어획량과 어획노력량(어선척수) 자료를 활용하여 CYP 모델을 분석한 결과, 본원적 성장률(r)은 0.707, 어획능력계수(q)는 0.002, 최대 자원량(K)은 499,296톤으로 나타났다.

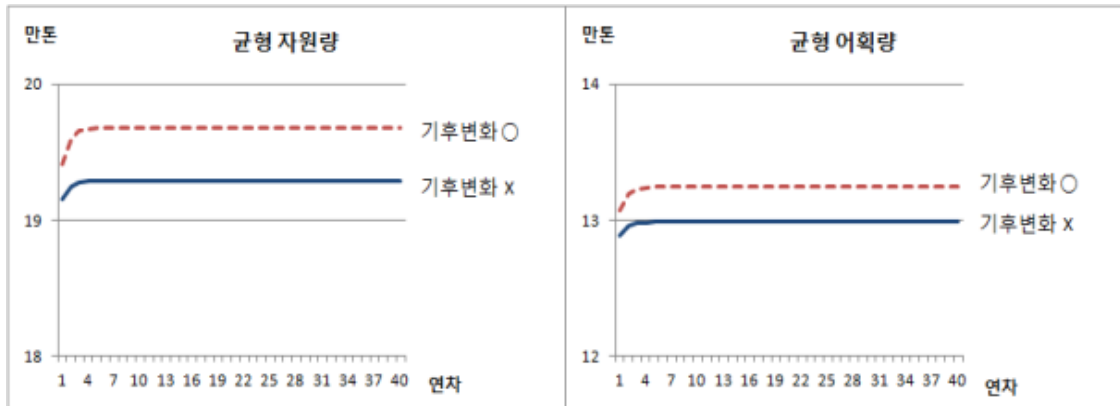
그림 5-28. 멸치의 어획량 및 CPUE 추이



멸치 자원량(어획량)과 수심별 수온 사이의 인관관계는 20m 수심에 대해 통계적으로 유의한 관계가 있는 것으로 나타났다. 분석 결과, 20m 수심의 수온이 0.01°C 상승하면 CPUE는 0.34% 증가하였다. 20m 수심의 수온은 장기적으로 연간 0.041°C 상승하는 경향이 있는 것으로 확인되어 수온 변화에 따른 CPUE는 연간 1.4% 증가하는 것으로 예측되었다.

현재의 어획노력량(어선척수)이 유지된다고 가정할 경우, 기후변화 영향이라 할 수 있는 20m 수심의 수온 변화에 따라 우리나라 연근해 멸치 자원량은 기후변화의 영향이 없을 경우의 자원량보다 증가하며 어획량 수준도 기후변화가 없을 때보다 증가하게 된다. 이에 따라 향후 40년 동안 발생하는 어획금액의 경제적 가치는 723억 원이 증가하는 것으로 분석되었다.

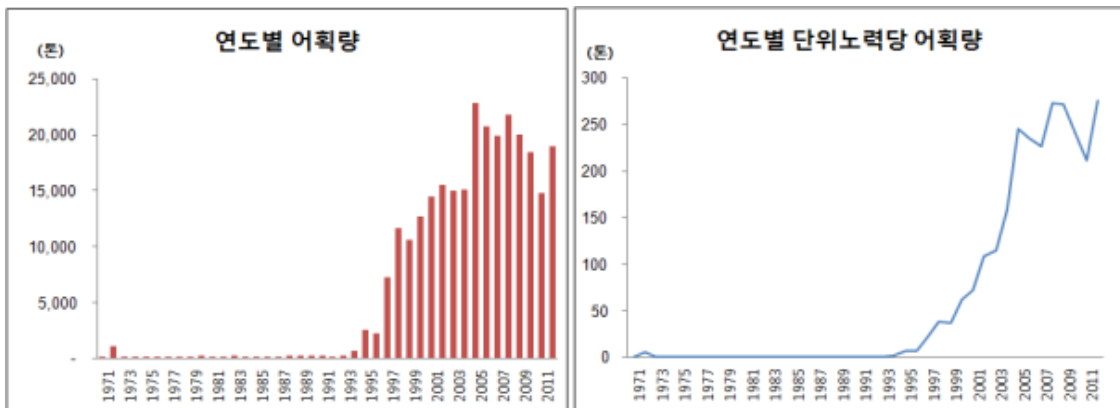
그림 5-29. 멸치의 균형 자원량 및 균형 어획량 추이



(4) 삼치

삼치는 1990년대 중반 이후 본격적으로 어획되어 대체로 어획량이 지속적으로 증가하고 있으며, 단위노력당 어획량도 급격한 증가세를 보이고 있다. 삼치의 어획량과 어획노력량(어선척수) 자료를 활용하여 CYP 모델을 분석한 결과, 본원적 성장률(r)은 0.036, 어획능률계수(q)는 0.000, 최대자원량(K)은 12,552,636톤으로 도출되었다.

그림 5-30. 삼치의 어획량 및 CPUE 추이

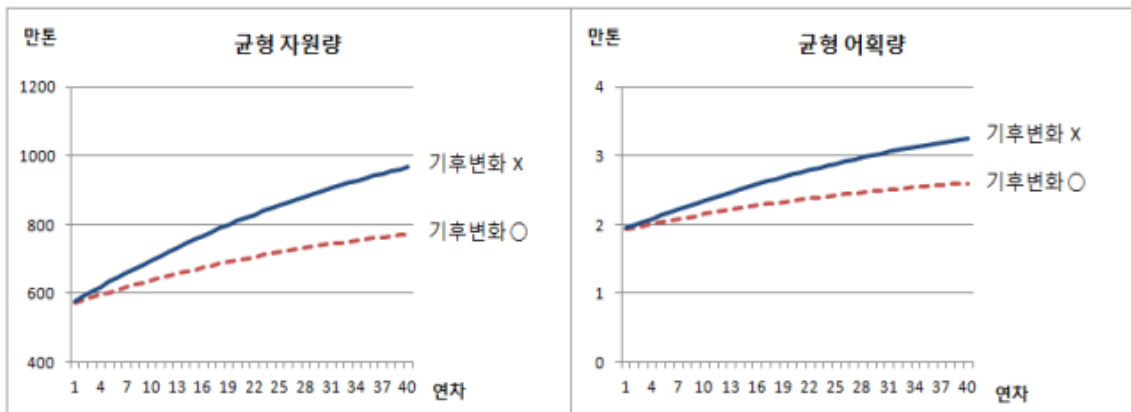


삼치 자원량(어획량)과 수심별 수온 사이의 인관관계는 20m 수심, 50m 수심, 75m 수심에 대해 통계적으로 유의한 관계가 있는 것으로 나타났다. 분석 결과, 20m, 및 50m 수심의 수온이 0.01℃ 상승하면 CPUE는 각각 4.72%, 4.36% 감소하는 반면, 75m 수심의 수온이 0.01℃ 상승하면 4.42% 증가하였다. 20m, 50m, 75m 수심의 수온은 장기적으로 각각 연간 0.009℃, 0.005℃, 0.013℃ 상승하는 경향이 있는 것으로 확인되어 수온 변화에 따른 CPUE는 연간 1.1% 감소하는 것으로 예측된다.

현재의 어획노력량(어선척수)이 유지된다고 가정할 경우, 기후변화 영향이라 할

수 있는 20m, 50m, 75m 수심의 수온 변화에 따라 우리나라 연근해 삼치 자원량은 기후변화의 영향이 없을 경우의 자원량보다 감소하며 어획량 수준도 기후변화가 없을 때보다 감소하게 된다. 이에 따라 향후 40년 동안 발생하는 어획금액의 경제적 가치는 2,037억 원이 감소하는 것으로 분석되었다.

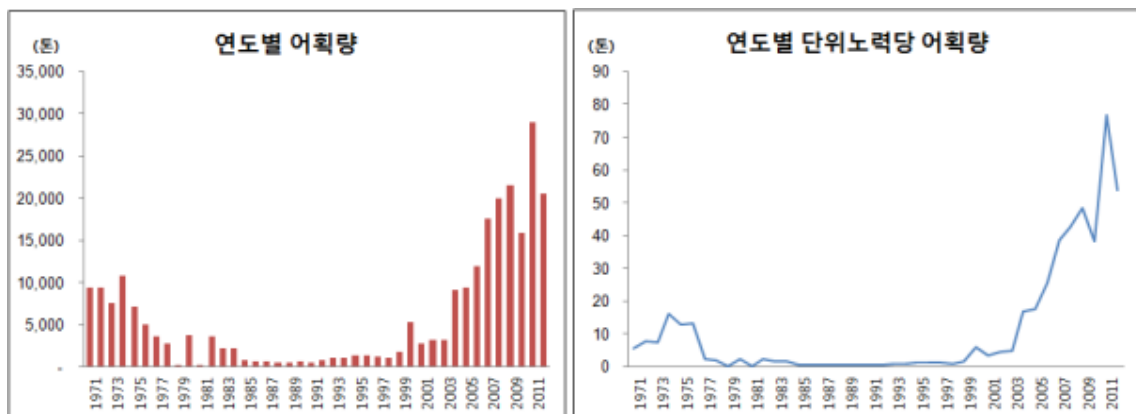
그림 5-31. 삼치의 균형 자원량 및 균형 어획량 추이



(5) 참조기

참조기는 한동안 어획량이 줄었다가 2000년대 이후 크게 증가하였고, 단위노력당 어획량도 최근 크게 증가하였다. 참조기의 어획량과 어획노력량(어선척수) 자료를 활용하여 CYP 모델을 분석한 결과, 본원적 성장률(r)은 0.722, 어획능력계수(q)는 0.003, 최대자원량(K)은 53,907톤으로 나타났다.

그림 5-32. 참조기의 어획량 및 CPUE 추이

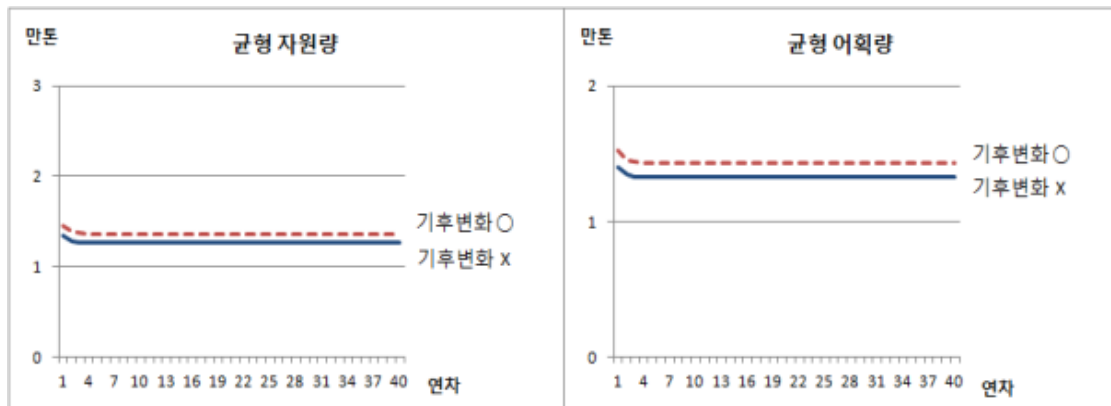


참조기 자원량(어획량)과 수심별 수온 사이의 인관관계는 0m 수심, 10m 수심, 75m 수심에 대해 통계적으로 유의한 관계가 있는 것으로 나타났다. 분석 결과, 0m

수심의 수온이 0.01°C 상승하면 CPUE는 2.70% 감소하는 반면, 10m 및 75m 수심의 수온이 0.01°C 상승하면 각각 2.17%, 2.44%, 증가하였다. 0m, 10m, 75m 수심의 수온은 장기적으로 각각 연간 0.019°C , 0.017°C , 0.029°C 상승하는 경향이 있는 것으로 확인되어 수온 변화에 따른 CPUE는 연간 5.7% 증가하는 것으로 예측되었다.

현재의 어획노력량(어선척수)이 유지된다고 가정할 경우, 기후변화 영향이라 할 수 있는 0m, 10m, 75m 수심의 수온 변화에 따라 우리나라 연근해 참조기 자원량은 기후변화의 영향이 없을 경우의 자원량보다 증가하며 어획량 수준도 기후변화가 없을 때보다 증가하게 된다. 이에 따라 향후 40년 동안 발생하는 어획금액의 경제적 가치는 1,105억 원이 증가하는 것으로 분석되었다.

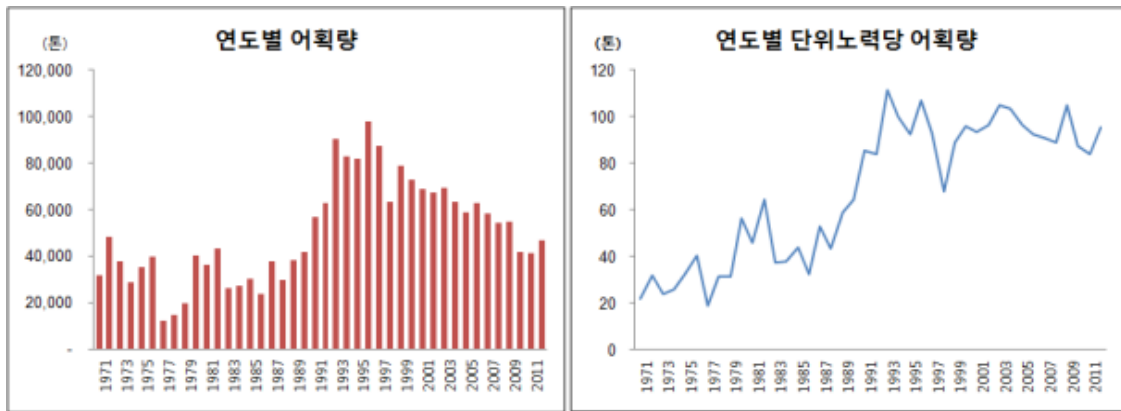
그림 5-33. 참조기의 균형 자원량 및 균형 어획량 추이



(6) 오징어

오징어는 1990년대 중반까지 지속적으로 어획량이 증가하였다가 그 이후 감소세를 나타내고 있으며, 단위노력당 어획량은 최근 정체 상태를 보이고 있다. 오징어의 어획량과 어획노력량(어선척수) 자료를 활용하여 CYP 모델을 분석한 결과, 본원적 성장률(r)은 0.231, 어획능력계수(q)는 0.000, 최대자원량(K)은 664,884톤으로 도출되었다.

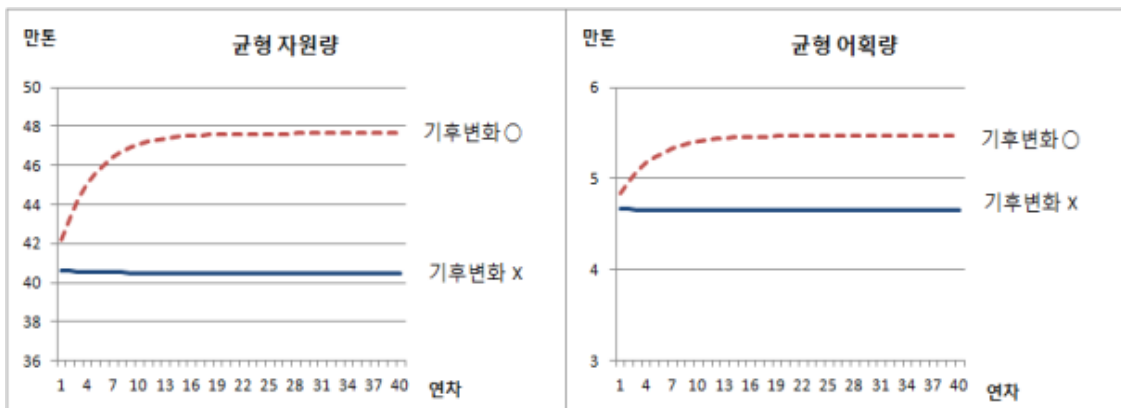
그림 5-34. 오징어의 어획량 및 CPUE 추이



오징어 자원량(어획량)과 수심별 수온 사이의 인관관계는 0m 수심, 10m 수심, 30m 수심에 대해 통계적으로 유의한 관계가 있는 것으로 나타났다. 분석 결과, 0m 및 30m 수심의 수온이 0.01℃ 상승하면 CPUE는 각각 -5.35%, -6.74% 감소하는 반면, 10m 수심의 수온이 0.01℃ 상승하면 7.93%, 증가하였다. 0m 및 10m 수심의 수온은 장기적으로 각각 연간 0.001℃, 0.000℃ 상승하고 30m 수심의 수온은 0.006℃ 하락하는 경향이 있는 것으로 확인되어 수온 변화에 따른 CPUE는 연간 3.8% 증가하는 것으로 예측되었다.

현재의 어획노력량(어선척수)이 유지된다고 가정할 경우, 기후변화 영향이라 할 수 있는 0m, 10m, 30m 수심의 수온 변화에 따라 우리나라 연근해 오징어 자원량은 기후변화의 영향이 없을 경우의 자원량보다 증가하며 어획량 수준도 기후변화가 없을 때보다 증가하게 된다. 이에 따라 향후 40년 동안 발생하는 어획금액의 경제적 가치는 4,892억 원이 증가하는 것으로 분석되었다.

그림 5-35. 오징어의 균형 자원량 및 균형 어획량 추이



라. 시사점

주요 어종에 대해 생물경제모형을 적용하여 분석한 결과, 고등어, 멸치, 참조기, 오징어는 기후변화에 따른 수온 변화로 어획량이 증가하는 반면, 갈치와 삼치는 감소하였고 그에 따라 경제적인 편익도 증가하거나 감소하는 결과가 도출되었다. 이를 통해 어종에 따라 기후변화의 영향이 자원량 및 어획량에 미치는 영향이 다르고 그에 따른 경제적인 영향에도 차이가 있다는 점을 확인할 수 있다. 그런데 본 연구의 분석은 기후변화가 수심별 수온에 미치는 영향을 구명할 수 없는 상황에서 장기 추세로 전망을 한 결과이므로 정확도가 떨어진다는 점에 유의할 필요가 있다. 다만 본 연구는 생물경제모형을 적용하는 분석의 틀을 활용하여 수산분야 기후변화의 경제적 영향의 계측을 시도하였다는 점에 의의가 있다. 향후 생물경제모형에 기후변화 인자가 더욱 정교하게 반영된다면 한층 정확한 분석이 가능할 것으로 기대된다. 이를 위해서는 해당 어종에 미치는 기후변화 영향에 대한 자연과학적인 연구 결과가 뒷받침되어야 한다.

3. 수산분야 기후변화 취약성 평가

가. 기후변화 취약성 평가 개요

(1) 배경 및 필요성

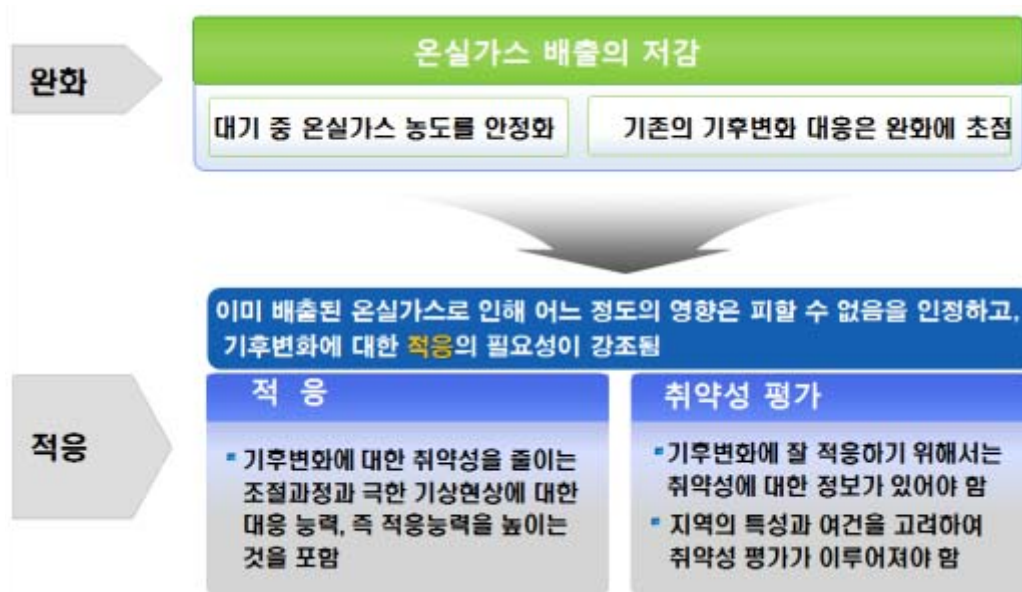
기후변화 취약성 평가의 개념은 IPCC(1995) 제2차 보고서에서 처음 도입되었다. 이후 IPCC 제3차 보고서에서도 CCI(AV(Climate Change Impacts, Adaptation, and Vulnerability)평가의 개념이 도입되고, 제4차 보고서에서 비로소 생물·물리적 영향 평가 중심의 연구 내용이 사회경제적 취약성 평가까지 그 응용 범위가 큰 폭으로 확대되었다.

국내에서도 기후변화에 따른 영향을 사전적으로 대비하기 위해 완화 및 적응정책과 관련된 연구가 활발히 이루어지고 있다. 기후변화의 영향을 저감하기 위한 장기 목표를 설정할지 아니면 취약한 지역이나 부문을 파악하여 적응전략을 개발할 것인지 등 평가 목적이나 방법에 따라 필요한 정보, 과정 설계, 시공간적 단위, 불확실성 등에 대한 고려, 기후 이외의 요인 등이 달라지므로 목적을 명확히 할 필요가 있다 (Füssel and Klein, 2006). 기후변화의 취약성은 지역적 특성이 중요하고, 이는 지역

의 지리적 여건, 기반시설, 인구적 특성, 물적·인적·사회적 자본 등에 따라 영향이 다르게 나타난다(김남의, 2012). 지역에 기반을 둔 수산업은 자연환경, 수산업 특성, 제도적 여건 등이 기후변화 영향 및 적응과 밀접하기 때문에 정책 수립 시에도 지역별 취약성에 대한 고려가 필요하다. 또한 지역별로 수산업의 세부 업종 분포가 다르므로 업종별로도 취약성에 상당한 편차를 보일 것으로 예상된다.

최근 정부 차원의 기후변화 영향 및 취약성 평가가 법제화 되었다. 「녹색성장 기본법」 제48조(기후변화 영향평가 및 적응대책의 추진)에서는 기후변화로 인한 생태계, 생물다양성, 대기, 수자원·수질, 보건, 농수산물, 산림, 해양, 산업, 방재 등에 미치는 영향 및 취약성 조사·평가하도록 명시하고 있으며, 「농어업·농어촌 및 식품산업 기본법」 제47조(기후변화에 따른 농어업·농어촌 영향 및 취약성 평가)를 개정 및 신설하여(2014.5.20.) 해양수산부장관은 지구온난화 등 기후변화에 농어업 및 농어촌에 미치는 영향과 취약성을 5년마다 조사·평가하여 그 결과를 공표하고 정책 수립의 기초자료로 활용하여야 함을 명시하고 있다(농림축산식품부, 2014). 이처럼 취약성 평가에 대한 논의가 활발해지고 있으나 아직 명료한 방법론 개발 및 관련 연구가 충분하지 않은 상황이다. 따라서 국가 혹은 지역에 적합한 기후변화 적응정책 수립의 기본 틀을 제공하고 기후변화 대책 마련을 위한 취약성 평가 연구가 필요하다.

그림 5-36. 기후변화의 영향에 따른 정책 및 대응 흐름도



(2) 취약성 평가의 정의 및 관련 선행연구

기후변화 취약성에 대한 정의는 관점, 방법, 목적 등에 따라 다르게 설정되고 있다 (유가영 외, 2008). IPCC(2007)는 취약성을 ‘기후변화의 악영향에 대처할 수 없는 극한 상태’로 정의하고, 비기후적 요소를 취약성에 고려하여 위험을 평가하고 포괄적인 사회경제적 고려, 적응능력 개념 등을 도입하였다. UNDP(2005)는 ‘기후 변화 피해에 대한 잠재적인 노출 상태’로 보고, 전체 시스템에 대한 민감도와 적응능력의 함수관계를 통해 외부 위협요인에 대한 대응 능력 증진에 초점을 두었다. 이처럼 기후변화 취약성 정의에 약간의 차이가 존재하지만, 기후변화의 영향이 높을 경우, 전체 시스템의 적응능력이 낮으면 그 시스템은 취약성이 높다고 할 수 있다. 반면 기후변화의 영향이 높을지라도 적응능력 또한 높으면 그 시스템은 적절하게 적응할 수 있는 잠재력이 있다고 평가할 수 있다.

기후변화에 잘 적응하기 위해서는 우선 어느 지역, 어떤 분야가 기후변화에 취약한지에 대한 정보가 있어야 하며, 이에 대한 정보를 얻기 위해서 취약성 평가가 필요하다(이버들 외, 2011). 생물·물리적 측면과 사회경제적 측면이 고려되어야 하지만, 이들은 단위 및 범주가 다르기 때문에 성질이 다른 여러 측면을 통합한 지표를 사용한 연구가 보편적으로 이루어지고 있다. 취약성은 추상적 개념이고 직접적으로 측정 관찰될 수 없으므로, 취약성 지표 연구에서 취약성의 개념 틀을 잘 반영할 수 있는 대리변수(proxy variable)를 이용해야 한다.

유가영 외(2008)는 우리나라 16개 시도에 대한 기후변화 취약성 평가를 수행하였고, 지역별 취약성 구성요소 분석을 통해 지역에 맞는 적응정책의 방향성을 제시하였다. 또한 고재경(2010)은 경기도 31개 시군을 대상으로 기후변화 취약성 평가를 수행하였다. 이상호(2012)는 기후변화에 따른 농업부문 적응능력의 가중치를 분석하였고, 이상호(2013)는 농업분야 기후변화 취약성 평가를 실시하였다.

국내 수산업과 기후변화에 관한 연구는 최근 증가하고 있으나, 기후변화 취약성 연구는 많지 않다. 수산업의 기후변화에 대한 연구로는 한화진 외(2007)가 수산자원의 기후변화 변동예측을 하였고, 박종화(2002)가 연근해 어황과 어업자원 변동을 중심으로 기후변화와의 관계를 분석하였다. 장동호 외(2009)는 기후변화와 수산업의 관계를 다루었고, 박성쾌 외(2010)는 어장형성과 어황변화를 중심으로 지구온난화가 수산업에 미치는 영향에 대해 분석하였다. 수산업의 기후변화 취약성 평가에 대한 연구로는 이버들 외(2011)가 수산분야의 정량적인 지표로 지역별 취약성 분석을 수행하였다. 본 연구는 대체로 이버들 외(2011)의 방법론을 따랐으나, 취약성 평가를 위한 대리변수 선정에 차이를 두었고, 지역별로뿐만 아니라 업종별로 취약성을 평가하였다.

나. 취약성 지수 구성 및 평가 방법

(1) 취약성 지수 구성 및 산정

우리나라 수산업의 지역별·업종별 비교를 목적으로 외부적 영향과 내부적 민감도, 적응능력을 대표하는 지표로 구성하여 취약성 평가를 시도하였다. 취약성 평가에 지역 뿐만 아니라 업종별 비교를 하였다는 점에서 선행연구와 차별성을 두었다. 또한, IPCC의 방법론을 따르면서 취약성 지표 구성에 대리변수의 가중치를 자의적 부여가 아닌 전문가를 대상으로 한 AHP 기법을 통해 결과의 객관성을 높였다(이버들 외, 2011).

표 5-3. 수산분야 기후변화 취약성 지표를 구성하는 대리변수

대분류	중분류	소분류	자료출처	기간
기후 변화	수생생물에 영향을 미치는 해양의 물리적 특성	수온 변화	국립수산과학원 정선해양관측자료	1972~2013년
		염도 변화	국립수산과학원 정선해양관측자료	1972~2013년
		용존산소 변화	국립수산과학원 정선해양관측자료	1972~2013년
	조업 및 정주 환경에 영향을 미치는 해양의 물리적 특성	과도/너울/바람	국립수산과학원 정선해양관측자료	1972~2013년
		해수면 상승	국립해양조사원	1972~2013년
	유해 생물 출현 빈도	적조	국립수산과학원	2004~2013년
		해파리	국립수산과학원	2012~2013년
민감도	어업생산자본·인력규 모	종사자 수	어업총조사	2009~2013년
		어선수(척·톤)	수산정보포털	2009~2013년
		양식장 면적	수산정보포털	2009~2013년
	생산 어종 구성의 다양성	-	어업생산동향조사	2009~2013년
수산분야 재난피해 규모	-	재해백서	2002~2012년	
적응 능력	지역의 제도적 역량	1인당 지역내총생산	지역소득통계	2009~2013년
		재정자립도	안정행정부 재정정책과	2009~2013년
		공무원 규모	행정조직편람	2009~2013년
	어촌의 사회적 자본 (어업인의 자율적 역량)	어업인조직률 (자율관리어업등)	수산정보포털	2013년
		어업인 학력	어업총조사	2009~2013년
		어업인 연령	어업총조사	2009~2013년
	수산분야 물적 인프라	국가어항·지방어항 보유규모	한국해양수산개발원	2009~2013년
		인공어초시설 규모	한국해양수산개발원	2009~2013년
		중요방류 규모	한국해양수산개발원	2009~2013년

취약성은 기후에 대한 노출과 해당 시스템의 민감도, 시스템이 대응할 수 있는 적응능력을 모두 포괄하는 개념이다. 취약성을 구성하는 세 가지 요소는 기후변화가 현 시스템에 미치게 될 영향을 나타내며, 실제로 측정할 수 있는 대리변수로 구성된다. 이들 요소는 함수관계로 취약성 지표를 구성하는데, 기후에 대한 노출과 기후변화에 대한 민감도가 클수록 취약성이 높게 나타나는 반면, 기후변화에 대한 적응능력이 클수록 이를 상쇄하게 된다(IPCC, 2007).

지역별 자료에 기초한 지역별 취약성 지수를 산정하고, 각 업종 및 지역별 자료를 생산규모 기준으로 업종별 자료로 전환하고, 이를 종합하여 업종별 지수로 산정하였다.⁴² 수산업의 세부적인 취약성 대리변수는 IPCC의 개념과 선행연구를 바탕으로 구성하였으며, 이버들 외(2011)의 방법론을 따랐다. 기후노출은 ‘수생생물에 영향을 미치는 해양의 물리적 특성 변화’, ‘조업 및 정주 환경에 영향을 미치는 해양의 물리적 특성’, ‘유해 생물 출현 빈도’로, 민감도는 ‘어업의 인력 및 자본의 규모’, ‘생산 어종 구성의 다양성’, ‘수산분야 재난피해 규모’로, 적응능력은 ‘지역의 제도적 역량’, ‘어촌의 사회적 자본’, ‘수산분야 물적 인프라’로 구분하였다.

분석에 사용된 자료의 기간은 기후노출과 관련된 생물·물리적 자료의 경우 장기적인 변화를 반응하기 위해 최대한 과거 자료를 이용하였고, 민감도와 적응능력 관련 자료는 최근의 사회경제적 상태를 반영하기 위해 최근 5년의 평균자료를 이용하였다.

취약성 평가의 공간적 범위는 해안에 접한 11개 시·도로 하고, 시·군·구로 세분화하여 사용할 경우 가용 자료가 크게 줄어드는 문제점이 있어 광역시·시도별로 취약성 평가를 수행하고, 추가적으로 업종별로 나누어 취약성을 평가하였다.

(가) 기후노출

기후노출은 기후 특성, 기후 변동, 극한 기후의 빈도와 크기 등 기후와 관련된 자극에 현재 시스템이 노출되는 정도를 의미하며, 지리적인 위치와 기후변화의 정도에 따라 달라진다(고재경 외, 2010). 기존 연구에서 많이 채용된 통상적인 기후노출의 요소로 기온 상승, 강우 변화, 호우·가뭄·혹서의 빈도 등이 거론되고 있지만, 수산분야의 특성을 고려할 때 표층수온, 염분, 용존산소와 같은 수생생물에 영향을 미치는 해양의 물리적 특성을 나타내는 요소가 필요하다.

본 연구에서 사용된 대리변수는 국립수산과학원의 정선해양관측자료로 축적되어 있는 표층수온⁴³, 염도, 용존산소이며,⁴⁴ 이들의 변화는 수산자원의 서식 조건을 근본

⁴² 업종별 가용 자료가 미비하여 업종의 지역별 생산 비중을 활용하여 추정하였다

⁴³ 수온 변화를 기후노출을 측정하는 대리변수로 활용하였다(Allison et al., 2009).

⁴⁴ 생물·물리적 자료는 해당 광역시·도와 가까운 정선관측치의 평균치를 시계열 자료로 구하였고, 처음 5년간 평균치와 최근 5년간의 평균치를 비교한 변화율을 대리지표로 사용하였으며, 5년간

적으로 바꾸기 때문에 수산업에 미치는 영향은 크며 직접적이다(이버들 외, 2011). 이에 더해 본 연구는 파도(너울 또는 바람)와 해수면 상승 변수를 조업 및 정주 환경에 영향을 미치는 해양의 물리적 특성으로 기후노출의 변수로 추가하였고, 적조와 해파리를 유해 생물 출현에 대한 기후노출의 변수로 추가하였다. 해수면 상승과 파도·너울·바람을 고려한 것은 수산업의 지역 근거지가 대부분 연안에 있다는 점에서 해안 침식·침수에 따른 피해를 유발하여 그 영향이 클 것으로 예상되기 때문이다. 유해 생물 출현 빈도는 기후변화로 수산업에 부정적인 영향을 미치는 생물상의 변화를 뜻한다. 예를 들어 유해 해파리 출현과 적조 현상을 들 수 있다. 본 연구에서는 지역별 자료로 이용할 수 있는 유해 해파리 출현 빈도와 적조 빈도를 대리변수로 사용하였다⁴⁵(이버들 외, 2011).

(나) 민감도

민감도는 기후변화의 자극에 의해 해당 시스템이 영향을 받는 정도를 측정하는 것이다. 기후변화에 현재의 사회시스템이 얼마나 민감하게 반응하는가는 시스템의 지형적 요인뿐만 아니라 인구의 특성, 인프라 시설 등 사회경제적 요인의 특성에 따라 차이를 보이고 시스템을 구성하는 부분마다 다르게 나타난다. 시스템의 민감도에 영향을 미치는 기반시설 등은 넓은 의미의 사회경제적 조건을 반영하기 때문에 이들 요인 중 일부는 적응 능력을 결정하는 요인과 유사하게 해석될 수 있다(고재경 외, 2010).

따라서 본 연구는 기후노출에 의해 부정적인 영향이 커지는 변수를 민감도로 규정하고, 어업생산 자본·인력 규모, 생산 어종 구성의 다양성, 수산분야 재난피해 규모를 대리변수로 구성하였다. 민감도 요인 중 어업의 인력 및 자본의 규모의 특성은 사회경제적 시스템이 얼마나 민감하게 반응하는가를 측정하기 위해서 어업 종사자 수, 어선 수, 양식장 면적을 대리변수로 채택하였다. 생산 어종 구성의 다양성은 다양성이 작을수록 외부 환경 변화에 취약한 것으로 보고, 허쉬만-허핀달 지수(HHI)⁴⁶로 기후변화의 민감한 정도를 측정하였다. 마지막으로 수산분야 재난피해 규모는 어

평균치의 비교는 이상값을 피하기 위한 방법이다.

⁴⁵ 유해 해파리 출현 빈도는 2012~2013년 출현 빈도를 중심으로 지역별 자료를 활용하였다.

⁴⁶ 허쉬만-허핀달 지수(HHI, Herfindahl-Hirschman Index)는 산업집중도를 측정하는 지표로 개발된 것으로 시장에 참여하는 모든 기업의 시장점유율을 제곱한 값을 합한 것으로 정의된다. 본 연구는 어종구성의 다양성이 작을수록 외부 환경 변화에 취약한 것으로 보고, 해당 지역의 모든 어종별 생산비중을 제곱한 값을 합하여 어종구성의 다양성(집중도) 지표를 측정함. 계산식은 다음과 같다.

$$HHI = \sum_{i=1}^N S_i^2, \text{ (단, } N = \text{어종 수, } S_i = \text{어종별 생산비중)}$$

업생산액 대비 수산분야 재난피해액을 대리변수로 활용하였다.

(다) 적응능력

적응능력은 기후노출의 부정적인 측면을 저감하는 요소로, 이러한 능력을 평가하기 위해서는 기후변화로 인한 피해의 저감이 인위적인 대응노력으로 가능한 것인지, 자연적인 현상인지를 구분할 필요가 있다. 또한 향후 대응할 수 있는 잠재능력의 보유 여부도 평가되어야 한다. 적응능력은 현재 시스템이 기후 영향으로부터 얼마나 빨리 회복할 수 있는가를 나타내므로 사회·경제·환경적인 요소가 중요하게 고려된다(고재경 외, 2010). 다수의 선행연구는 경제적 능력, 거버넌스, 교육, 건강 등을 적응능력의 대리변수로 사용하고 있으며, 본 연구에서도 이에 따르되 지역간 비교가 가능한 변수로서 경제적 능력과 제도적 역량, 수산업의 물적 인프라, 어촌의 사회적 자본으로 구분하였다.

지역의 경제적 능력과 제도적 역량은 지역의 전반적인 기후변화 대응 역량을 나타내는 것으로 1인당 지역내총생산(GRDP), 재정자립도, 인구당 공무원 수로 측정하였다.⁴⁷ 물적 인프라는 지역 수산업의 근거지이자 재난시 피항 기능을 할 수 있는 국가어항·지방어항의 규모(어선규모 대비)와, 적극적인 수산자원 조성 노력을 반영하는 것으로 인공어초 시설 규모, 수산 종묘 방류 규모(이상 어업생산 대비)를 대리변수로 채택하였다.⁴⁸ 사회적 자본은 기후변화에 적응할 수 있는 어업인의 자율적 역량을 나타내는 것으로 자발성과 신뢰에 기초한 공동체 의식이라 할 수 있다. 수산분야에서 사회적 자본은 수산자본을 관리하고 어업질서를 유지하는데 중요한 역할을 담당해왔고 기후변화에 대응하여서도 중요한 기능을 수행할 것으로 기대된다. 그러나 사회적 자본의 크기를 정량적으로 측정할 수 있는 대리변수가 많지 않아 본 연구는 최근 10년 동안 꾸준히 늘어나고 있는 자율관리어업 조직률, 어업인의 학력과 연령을 변수로 구성하였다(이버들 외, 2011).

(2) 기후변화 취약성 평가 방법

최종적으로 도출되는 기후변화의 취약성 평가 지표는 서로 다른 단위와 성질을 지닌 세부 대리변수들을 종합적으로 나타낸 것이다. 이러한 지표는 개별 변수나 자료가 표현하지 못하거나 모호하게 표현된 속성을 한층 더 명확히 드러낼 수 있는 특성이 있다(이버들 외, 2011). 취약성 평가 지표는 다음 식(5-19)와 같이 산정되며, 이버

⁴⁷ 재정자립도는 지자체의 일반회계 세입에 대비한 지방세 및 세외수입 비율이다.

⁴⁸ 수산자원 조성의 경우 근해어업보다는 연안어업과 관련이 높다고 판단하여 인공어초 시설규모는 연안어업의 어류 등의 생산금액에 대비한 규모를, 수산종묘 방류 규모는 연안어업의 해조류를 제외한 생산금액에 대비한 규모를 각각 적용하였다(이버들 외, 2011).

들 외(2011)의 연구방법을 따라 분석하였다. 기후노출과 민감도에 해당하는 변수는 취약성과 양(+)의 관계가 있지만 적응능력은 음(-)의 관계에 있으므로 적응능력에 해당하는 변수에는 실제 계산 과정에서 음의 값을 부여하였다.

$$VT = \sum_i F_i \cdot W_i \quad (5-19)$$

VT: 지역의 취약성 평가 지표

F_i : 지역의 표준화된 대리변수 i의 값

W_i : 대리변수 i의 가중치

(가) 대리변수의 표준화 방법

여러 대리변수를 하나의 지표로 집계하기 위해서는 먼저 각 변수들이 동일한 기준으로 합산될 수 있도록 표준화(normalization)하는 과정을 거쳐야 하며, 보통 표준화에는 Z-스코어(Z-score) 방법, 스케일 재조정(re-scaling) 방법이 많이 사용되고 있다. 전자는 모든 자료들을 평균은 0, 표준편차는 1이 되도록 만드는 방법으로 자료 값이 그 분포의 평균에서 표준편차의 몇 배나 떨어져 있는지를 표준화된 확률변수인 Z값으로 나타낸 것이며, 따라서 자료가 정규분포가 아닐 경우 왜곡된 결과가 나타날 수 있다. 후자는 UNDP(2006)에서 사용한 Dimension Index 방법으로 표준편차가 아닌 자료의 범위에 기초하여 0과 1 사이의 값으로 변환한 것이다. 만일 자료가 이상치(extreme value)를 포함하고 있다면 변환된 값이 왜곡될 수 있다. 실제 분석에서는 두 방법을 모두 실행한 뒤 비슷한 결과를 도출하여, Z-score 방법을 선택하여 결과를 도출하였다.

$$Z_i^t = \frac{X_i^t - \bar{X}_i}{S_i} \quad (5-20)$$

\bar{X}_i : 대리변수 i의 평균, S_i : 대리변수 i의 표준편차

$$D_i^t = \frac{X_i^t - X_i^{\min}}{X_i^{\max} - X_i^{\min}} \quad (5-21)$$

X_i^{\min} : 대리변수 i의 최소값, X_i^{\max} : 대리변수 i의 최대값

(나) 가중치 산정을 위한 AHP 기법

AHP 기법은 다기준 의사결정 문제에서 평가기준과 대안을 계층적 구조로 파악하여 최적 대안을 선택하는 방법으로 대안들의 중요도와 우선순위를 도출한다. 따라서 여러 가지 지표로 구성된 대리변수별로 가중치 W_i 를 산정하기 위해 AHP 기법을 사용하였다.

AHP 기법은 복잡한 문제를 계층화하여 주요 요인과 세부 요인들로 나누고, 이러한 요인들에 대한 쌍대비교(pairwise comparison)를 통해 중요도를 도출하는 방법으로 정성적 평가항목을 포함하는 다기준 의사결정에 널리 활용되고 있다. AHP 전문가 설문지를 통해 두 요소간 상대적 중요도를 나타내는 쌍대비교행렬을 구할 수 있는데, 이 때 행렬의 a_{ij} 는 요소 j에 대한 요소 i의 상대적 가중치를 나타낸다.

$$A = [a_{ij}] = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1n} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{n1} & w_{n2} & \dots & w_{nn} \end{bmatrix} \quad (5-22)$$

이 행렬의 최대고유치(maximum eigenvalue)를 구하면 세부 항목의 가중치를 구할 수 있다. 즉 다음 식(5-23)에서 n 은 행렬 A 의 최대고유치 벡터가 되고, 이 식은 n 개의 연립방정식 체계에서 0이 아닌 해를 구하는 문제이다. 이를 풀이하면 세부변수간 상대적 중요도를 나타내는 가중치인 열벡터 $v = (v_1, v_2, \dots, v_n)^T$ 를 구할 수 있다.

$$A \cdot v = n \cdot v \quad (5-23)$$

따라서 응답자가 완벽한 일관성을 가지고 응답했다면, 다음이 식(5-24)가 성립된다.

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = \text{trace}(A) = n, \lambda_{\max} = n, \lambda_1 = 0, \lambda_1 \neq \lambda_{\max} \quad (5-24)$$

AHP 기법을 적용하기 위한 설문조사는 수산분야의 전문가를 대상으로 2014년 9월 22일~28일 동안 실시하여 30부를 회수하였고 유효성 검증을 통과한 응답에 대해 평균치를 구하여 최종적인 가중치를 도출하였다.⁴⁹

⁴⁹ 설문조사 응답자 분포는 국립수산물품질관리원, 부경대, 한국수산물자원관리공단, 수산정책연구소, 한국해양수산개발원 등의 전문가 30명이다.

다. 기후변화 취약성 평가 결과

(1) 가중치 산정 결과

취약성 지수의 AHP 가중치 결과는 <표 5-4>와 같다. 대분류 항목의 경우, 기후변화 노출(0.406)이 가장 높게 나타났고, 다음으로 적응능력(0.340), 민감도(0.255) 순이다. 즉, 수산분야 전문가들은 기후변화의 자연적 조건이 사회경제적 조건이나 기후변화에 대응할 수 있는 잠재력 보다 기후변화의 취약성에 큰 영향을 미치는 것으로 판단하고 있는 것으로 나타났다. 소분류의 경우, 수온변화, 생산어종 구성의 다양성,

표 5-4. 취약성 지수의 AHP 가중치 결과

대분류	가중치 (A)	중분류	가중치 (B)	소분류	가중치 (C)	A*B*C
기후 노출	0.406	수생생물에 영향을 미치는 해양의 물리적 특성	0.585	수온 변화	0.687	0.163
				염도 변화	0.148	0.035
				용존산소 변화	0.164	0.039
		조업 및 정주 환경에 영향을 미치는 해양의 물리적 특성	0.217	파도/너울/바람	0.427	0.038
				해수면 상승	0.573	0.051
		유해 생물 출현 빈도	0.198	적조	0.708	0.057
해파리	0.292			0.023		
민감도	0.255	어업생산 자본·인력 규모	0.188	종사자 수	0.371	0.018
				어선수(척·톤)	0.226	0.011
				양식장 면적	0.403	0.019
		생산 어종 구성의 다양성	0.393	-	-	0.100
수산분야 재난피해 규모	0.419	-	-	0.107		
적응 능력	0.340	지역의 제도적 역량	0.293	1인당 지역내총생산	0.373	0.037
				재정자립도	0.470	0.047
				공무원 규모	0.157	0.016
		어촌의 사회적 자본 (어업인의 자율적 역량)	0.297	어업인 조직률 (자율관리어업 등)	0.671	0.068
				어업인 학력	0.149	0.015
				어업인 연령	0.180	0.018
		수산분야 물적 인프라	0.410	국가어항·지방어항 보유규모	0.388	0.054
				인공어초시설 규모	0.301	0.042
				종묘방류 규모	0.310	0.043

재난피해 규모 등이 높은 가중치를 보이고 있다.

기후노출 내에서는 수생생물에 영향을 미치는 해양의 물리적 특성(0.585)의 가중치가 2배 이상 높게 나타났고, 다음으로 조업 및 정주 환경에 영향을 미치는 해양의 물리적 특성(0.217), 유해 생물 출현 빈도(0.198)순이다. 수생생물에 영향을 미치는 해양의 물리적 특성 내에서는 수온변화(0.687)의 가중치 비중이 4배 이상 높게 나타나 취약성에 미치는 영향이 큰 것으로 평가된다. 조업 및 정주 환경에 영향을 미치는 해양의 물리적 특성 내에서는 해수면 상승(0.573)이 파도·너울·바람(0.427)보다 높게 나타났다. 유해 생물 출현 빈도에서는 적조(0.708)가 해파리(0.292)보다 2배 이상 높았다.

민감도 내에서는 수산분야 재난피해 규모(0.419)가 가장 높게 나타났고, 생산 어종 구성의 다양성(0.393), 어업생산 자본·인력 규모(0.188)순이다. 즉, 어업의 인력 및 자본보다 재난피해와 생산어종 구성의 다양성이 기후변화에 더욱 민감한 것으로 판단된다. 어업생산 자본·인력 규모 내에서는 양식장 면적(0.403), 종사자 수(0.371), 어선 수(0.226) 순으로 나타났다.

적응능력 내에서는 수산분야 물적 인프라(0.410)가 가장 높게 나타났고, 다음으로 어촌의 사회적 자본(0.297)과 지역의 제도적 역량(0.293)이 비슷한 수준이다. 즉, 국가 어항·지방어항 보유규모와 어업인 조직률에서 높은 가중치가 나타나 이 변수들이 취약성에 미치는 영향이 크다는 점이 반영된 결과로 볼 수 있다. 수산분야 물적 인프라 내에서는 국가어항·지방어항 보유규모(0.388), 종묘방류 규모(0.310), 인공어초시설 규모(0.301) 순으로 높게 나타났다. 어촌의 사회적 자본 내에서는 어업인 조직률(0.671)이 가장 높게 나타났고, 그 다음으로 어업인 연령(0.180)과 어업인 학력(0.149)이 비슷한 수준을 보이고 있다. 지역의 제도적 역량 내에서는 재정자립도(0.470)가 가장 높고, 다음으로 1인당 지역내총생산(0.373), 공무원 규모(0.157) 순으로 나타났다.

(2) 지역별 취약성 평가 분석 결과

각 변수를 표준화 하고 AHP 기법으로 가중치를 도출하여 종합적인 취약성 지표를 도출한 결과는 <표 5-5>와 같다. 기후변화 취약성을 평가하기 위해 구성된 기후노출, 민감도, 적응능력을 분석한 결과, 기후노출에서는 부산, 경북, 경남, 울산, 강원 등의 지역에서 기후 노출 빈도가 높게 나타난 반면 제주, 인천, 경기, 충남, 전북 등은 취약성이 낮게 나타났다. 즉, 기후노출이 높은 지역은 동해권을 중심으로 수온 상승, 해수면 상승, 적조 발생 등이 높게 나타났기 때문으로 판단된다.

민감도 측면에서는 강원, 경북, 경남, 인천, 제주 등의 순으로 기후변화에 민감한

것으로 나타났으며, 이에 반해 경기, 울산, 충남, 부산의 경우 민감도가 낮은 것으로 분석되었다. 민감도가 높게 나타난 지역인 강원, 경북, 경남의 경우 재난피해가 많거나 생산 구성이 단순한 특징을 보이고 있다.

표 5-5. 지표별 지역별 취약성 평가 결과

순위	기후노출		민감도		적응능력	
	지역	지수	지역	지수	지역	지수
1	부산	0.580	강원	0.687	경남	-0.510
2	경북	0.452	경북	0.516	전남	-0.472
3	경남	0.450	경남	0.362	부산	-0.401
4	울산	0.272	인천	0.261	제주	-0.386
5	강원	0.260	제주	0.225	경북	-0.284

적응능력의 경우, 경남, 전남, 부산, 제주 등의 순으로 기후변화의 영향에 적응할 수 있는 잠재력이 낮은 것으로 나타난 반면, 경기, 인천, 울산 등의 순으로 적응능력이 높게 나타났다. 즉, 경남, 전남 등의 지역은 어업인 조직률, 재정자립도, 물적 인프라 등이 낮아서 취약성이 높게 나타난 것으로 판단된다.

이상의 기후노출, 민감도, 적응능력 지표를 종합한 취약성 지수는 <표 5-6>과 같다. 경남, 경북, 부산, 전남, 강원 등 동남해권이 취약성이 높게 나타났으며, 이에 반해 경기, 전북, 인천, 충남 등 서해권이 취약성이 낮은 것으로 나타났다. 취약성 지수

표 5-6. 지역별 취약성 평가 결과

순위	지역	지수
1	경남	0.448
2	경북	0.412
3	부산	0.311
4	전남	0.269
5	강원	0.207
6	제주	-0.060
7	울산	-0.119
8	충남	-0.215
9	인천	-0.292
10	전북	-0.303
11	경기	-0.750

가 높은 지역은 기후노출이 높고, 적응능력이 낮은 특징을 보이며, 기후노출과 적응능력의 가중치가 높다는 점이 반영되었다고 볼 수 있다. 예를 들어, 경남과 경북은 기후노출과 민감도가 높고, 적응능력이 낮게 나타나 기후변화에 가장 취약한 지역으로 평가된다. 부산의 경우, 기후노출은 높고, 적응능력은 낮으나, 민감도가 낮고 기후노출과 적응능력의 가중치가 높게 나타난 점이 반영되어 기후변화에 취약한 것으로 평가된다. 반면에, 적응능력이 크고, 민감도와 기후노출이 낮은 지역일수록 취약성이 낮게 나타났다. 예를 들어, 경기와 전북의 경우, 다른 지역에 비해서 기후노출과 민감도가 낮고, 적응능력이 뛰어나 취약성이 낮게 평가되었다.

(3) 업종별 취약성 평가 분석 결과

지역별 자료를 생산규모 기준으로 업종별 자료로 전환하여 종합적으로 업종별 지수를 산정하였다. 지표별 업종별 취약성 평가 결과는 아래의 <표 5-7>과 같다. 기후변화 취약성을 평가하기 위해 구성된 기후노출, 민감도, 적응능력의 분석결과, 기후노출에서는 대형트롤, 대형선망, 장어통발, 쌍끌이서남, 쌍끌이 등의 순으로 기후노출 빈도가 높게 나타났으나, 이에 반해 기타통발, 동해구, 정치망, 기선권현망 등은 취약성이 낮았다. 기후변화의 노출이 높은 업종은 동남해권 조업 업종을 중심으로 수운 상승, 유해 생물 출현 빈도가 높다는 특징이 있다.

민감도 부문에서는 장어통발, 기타통발, 기선권현망, 동해구트롤 등 생산구성이 단

표 5-7. 지표별 업종별 취약성 평가 결과

순위	기후노출		민감도		적응능력	
	업종	지수	업종	지수	업종	지수
1	대형트롤	0.908	장어통발	1.567	장어통발	-0.485
2	대형선망	0.894	기타통발	1.189	대형선망	-0.480
3	장어통발	0.671	기선권현망	1.186	대형트롤	-0.480
4	쌍끌이서남	0.641	동해구트롤	0.839	쌍끌이서남	-0.477
5	쌍끌이	0.637	근해채낚기	0.793	쌍끌이	-0.392
6	동해구트롤	0.577	쌍끌이서남	0.529	외끌이	-0.362
7	기선권현망	0.566	연안복합	0.481	기선권현망	-0.354
8	정치망	0.528	연안선망	0.375	소형선망	-0.238
9	동해구	0.523	동해구	0.317	새우조망	-0.209
10	기타통발	0.467	정치망	0.297	연안선망	-0.168

순한 업종을 중심으로 민감하게 나타났으나, 이에 반해 정치망, 동해구, 연안선망, 연안복합 등은 민감도가 낮게 나타났다.

적응능력을 살펴보면, 장어통발, 대형선망, 대형트롤, 쌍끌이서남 등에서 기후변화에 대한 적응능력이 낮게 나타났고, 연안선망, 새우조망, 소형선망, 기선권현망, 외끌이 등에서 적응능력이 높았다.

업종별 취약성 평가의 종합적 결과는 <표 5-8>과 같다. 장어통발, 기선권현망, 쌍끌이서남, 대형트롤, 동해구트롤이 취약성이 높은 것으로 나타난 반면에, 연안개량안강망, 주목망, 근해봉수망, 근해형망 등이 취약성이 낮은 것으로 나타났다. 취약성 지수가 높은 업종은 기후노출이 높을수록, 민감도가 높을수록, 적응능력이 낮을수록 높게 나타나는 특징을 보이고 있다. 장어통발, 기선권현망, 쌍끌이서남, 동해구트롤 등의 경우, 기후노출과 민감도는 높은 반면 적응능력은 낮아 취약성이 높게 평가되었다. 이에 반해 연망개량안강망, 근해형망, 주목망의 경우, 기후노출과 민감도가 낮고, 적응능력이 높아 취약성이 낮게 평가되었다.

표 5-8. 업종별 취약성 평가 결과

순위	업종	지수
1	장어통발	0.837
2	기선권현망	0.653
3	쌍끌이서남	0.557
4	대형트롤	0.514
5	동해구트롤	0.492
⋮	⋮	⋮
32	연안조망	-0.549
33	근해형망	-0.557
34	근해봉수망	-0.565
35	주목망	-0.582
36	연안개량안강망	-0.672

라. 취약성 평가 결과의 시사점

최근 우리나라 주변 해역의 수온은 매년 약 1℃ 상승해 주요 연근해 어종인 고등어, 오징어 등 난류성 어종이 증가하고, 명태, 대구 등 한류성 어종은 현저히 줄어들고 있어 기후변화로 수산분야에 미치는 영향이 점차 확대되고 있는 실정이다. 본 연구는 이에 근거하여 적응정책과 대응책 마련을 위해, 수산업 분야의 지역별, 업종별

기후변화 취약성을 평가하고, 전문가 설문에 근거한 가중치를 도출하여 종합적인 취약성 지표를 산정하여 평가하였다. 기후변화의 취약성을 평가하기 위해 구성된 세 가지 요소의 가중치 결과는 기후노출이 가장 높았고, 적응능력, 민감도의 순으로 나타났다. 전문가들은 취약성의 구성 요소 중에 인간의 적극적인 대응 능력보다 기후여건에 더 많은 중요성을 두고 있는 것으로 볼 수 있다.

지역별 취약성 평가 결과를 살펴보면, 경북, 경남, 부산 등 동남해권이 취약성이 높은 반면, 경기, 전북, 인천 등 서해권이 취약성이 낮게 평가되었다. 동남해권은 수산업이 활발하여 기후변화에 대한 민감도가 큰 지역인 반면 적응능력은 오히려 부족하여 전체적인 취약성이 높게 평가되었다. 따라서 이들 지역을 중심으로 수산업의 기후변화 적응능력을 향상시키는 대책이 필요한 것으로 사료된다. 업종별 취약성 평가 결과를 살펴보면, 장어통발, 기선권현망, 쌍끌이서남, 대형트롤, 동해구트롤이 취약성이 높게 나타나고, 연안개량안강망, 주목망, 근해봉수망, 근해형망 등이 취약성이 낮은 것으로 나타났다. 취약성 지수가 높은 업종은 기후노출이 높을수록, 민감도가 높을수록, 적응능력이 낮을수록 높게 나타나는 특징을 보였으며, 적응능력이 큰 업종인 장어통발, 기선권현망, 쌍끌이서남 등에서 취약성이 낮았다.

이처럼 종합적인 취약성 지표를 이용한 지역별·업종별 취약성 평가를 통해 기후변화의 완화 및 적응 정책을 마련하는 데 어느 지역에 어떤 자원이 필요한지, 업종별 어떤 적응 전략이 필요한지 등 기후변화 대응책 마련의 근거를 제시할 수 있다. 본 연구는 취약성의 개념과 지표 선정에 있어서 선행연구에 비해 가용한 자료를 보다 더 활용하고자 하였으나, 지역별·업종별 구분된 자료가 충분하지 않은 한계가 있으며, 더 세밀한 분석을 위해서는 수온에 따라 서식하는 어종을 구별하는 등과 같은 정밀한 분석이 요구된다. 그럼에도 불구하고, 지역별·업종별 취약성 분석을 시도하였다는 점에서 그 의의가 있다.

4. 기후변화에 대한 어업인의 인식 및 수산분야 국외 대응 사례

가. 기후변화에 대한 어업인의 인식

(1) 인식 조사 배경 및 개요

기후변화가 수산업에 미치는 영향에 대한 구체적인 연구는 농업분야나 산림분야에 비해 부족한데, 이는 기후변화로 인한 해양의 물리적인 변화를 예측하고 그에 따른 해양 생태계의 변화와 수산물 생산의 영향을 파악하는 일이 쉽지 않기 때문이다. 이러한 상황에서 본 연구는 기후변화가 수산물 생산에 미치는 영향을 수산물 생산자인 어업인에 대한 인식조사를 통해 간접적으로 탐색하였다. 기후변화와 관련한 어업인의 경험은 개별적이고 단편적일 수 있지만 이를 종합하면 수산물 생산에서 기후변화의 체감 정도와 그 영향을 예측하는 하나의 참고자료를 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

기후변화에 대한 어업인 인식을 조사하기 위해 전국 628명의 어업인(어선어업 355명, 양식어업 273명)을 대상으로 설문조사를 실시하였다. 조사대상은 양식어업과 어선어업에 종사하고 있는 어가를 모집단으로 설정하고 지역별·어업별 모집단 규모를 감안하여 무작위 추출하였다. 조사기간은 2014년 10월 20일부터 31일까지 약 2주간이며 조사방법으로는 전화조사를 실시하였다. 조사내용은 크게 응답자의 사회·경제적 특성, 기후변화에 대한 인식으로 구분되며, 후자에는 기후변화에 대한 경험, 수산물 생산에 미치는 영향, 기후변화 대응 노력, 정부 정책 인지도, 기후변화 대응 방안 등이다.

본 조사에서 어업인의 인구·사회적 특성은 다음 <표 5-9>와 같다. 전체 응답자 628명 중 502명이 남성으로 79.9%를 차지하였고, 학력은 중졸 이하(47.3%), 연령은 50대(47.9%)가 가장 많았다. 어업별로 보면 어선어업에 비해 상대적으로 양식어업의 학력 수준이 높으며, 연령은 낮은 것으로 나타났다. 지역은 전라남도, 경상남도, 제주도에 해당하는 남해가 61.1%로 많은 비중을 차지하였다. 조사대상자의 어업종사 경력은 30년 이상이 55.3%로 과반수를 차지하였다. 수산관련 보험에 대해서는 전체 응답자의 43.9%가 가입하였으며, 상대적으로 어선어업이 양식어업에 비해 보험 가입률이 높았다. 전체 응답자 중 65.6%가 스마트폰을 보유하고 있으며, 58.9%는 날씨 정보 등을 얻기 위해 스마트폰을 적극적으로 활용하고 있는 것으로 나타났다.

표 5-9. 응답자의 인구·사회적 및 어업 관련 특성

구분		전체		어선어업		양식어업		
		빈도(명)	비율(%)	빈도(명)	비율(%)	빈도(명)	비율(%)	
성별	남자	502	79.9	278	78.3	224	82.1	
	여자	126	20.1	77	21.7	49	17.9	
학력	중졸 이하	297	47.3	211	59.4	86	31.5	
	고졸	241	38.4	119	33.5	122	44.7	
	대졸 이상	85	13.5	21	5.9	64	23.4	
	무응답	5	0.8	4	1.1	1	0.4	
연령	30대 이하	18	2.9	5	1.4	13	4.8	
	40대	84	13.4	39	11.0	45	16.5	
	50대	301	47.9	190	53.5	111	40.7	
	60대	191	30.4	104	29.3	87	31.9	
	70대 이상	34	5.4	17	4.8	17	6.2	
지역	동해	114	18.2	97	27.3	17	6.2	
	서해	87	13.9	59	16.6	28	10.3	
	남해	384	61.1	199	56.1	185	67.8	
	내수면	43	6.8	-	-	43	15.8	
어업경력	5년 미만	12	1.9	2	0.6	10	3.7	
	5~10년 미만	20	3.2	5	1.4	15	5.5	
	10~20년 미만	90	14.3	39	11.0	51	18.7	
	20~30년 미만	159	25.3	88	24.8	71	26.0	
	30년 이상	347	55.3	221	62.3	126	46.2	
수산관련보험	가입	276	43.9	196	55.2	80	29.3	
	미가입	352	56.1	159	44.8	193	70.7	
스마트폰 보유 및 활용	보유	보	412	65.6	221	62.3	191	70.0
		활용	370	58.9	204	57.5	166	60.8
	미보유	미활용	42	6.7	17	4.8	25	9.2
		미보유	216	34.4	134	37.7	82	30.0
합계		628	100.0	355	100.0	273	100.0	

(2) 어업인의 기후변화 인식 정도

어업인이 기후변화를 체감할 수 있는 요소에는 여러 가지가 있는데, 여기서는 어업인이 생산 현장에서 체감할 수 있으면서 기후변화와 밀접한 현상이라고 할 수 있는 수온 변화, 해수면 상승, 바다 생물 변화, 기상이변, 해적생물 출현에 대해 그 체감 정도를 조사하였다.⁵⁰

기후변화 체감 정도에 대한 조사 결과, 수온 변화, 해수면 상승, 바다 생물 변화 등 기후변화를 자주 경험한다는 응답이 41.8%로 가장 높게 나타났으며, 몇 차례 경

⁵⁰ 내수면 어업인의 경우 수온 변화, 기상이변에 대해서만 조사하였다

험, 약간 경험을 포함하면 전체 응답자의 84.5%가 기후변화를 경험하였다(표 5-10). 특히 수온변화와 기상이변의 경우 전체 응답자의 약 90%가 경험하고 있는 것으로 나타났다. 어업별로는 기상 조건의 영향을 더 많이 받는 어선어업이 양식어업에 비해 체감 정도가 높았다. 기후변화 체감 정도의 추이에 대해서는 매년 빈도수가 증가하거나 변화의 범위가 커지고 있다는 응답이 74.9%로 상당수의 어업인이 기후변화를 점점 더 많이 체감하고 있는 것으로 나타났으며, 이러한 경향은 양식어업에 비해 어선어업에서 더욱 뚜렷하였다(표 5-11).

표 5-10. 어업인의 기후변화 경험 정도

구분	수온변화		해수면 상승		바다 생물 변화		기상 이변		해적생물 출현		계	
	빈도 (명)	비율 (%)	빈도 (명)	비율 (%)	빈도 (명)	비율 (%)	빈도 (명)	비율 (%)	빈도 (명)	비율 (%)	빈도 (명)	비율 (%)
자주경험	310	49.4	214	36.6	221	37.8	237	37.7	277	47.4	1,259	41.8
몇 차례 경험	110	17.5	102	17.4	122	20.9	182	29.0	115	19.7	631	21.0
약간 경험	127	20.2	143	24.4	141	24.1	146	23.2	96	16.4	653	21.7
경험 없음	80	12.7	113	19.3	93	15.9	57	9.1	88	15.0	431	14.3
잘 모름	1	0.2	13	2.2	8	1.4	6	1.0	9	1.5	37	1.2
합계	628	100.0	585	100.0	585	100.0	628	100.0	585	100.0	3,011	100.0

그림 5-37. 어업별 기후변화 경험 비율

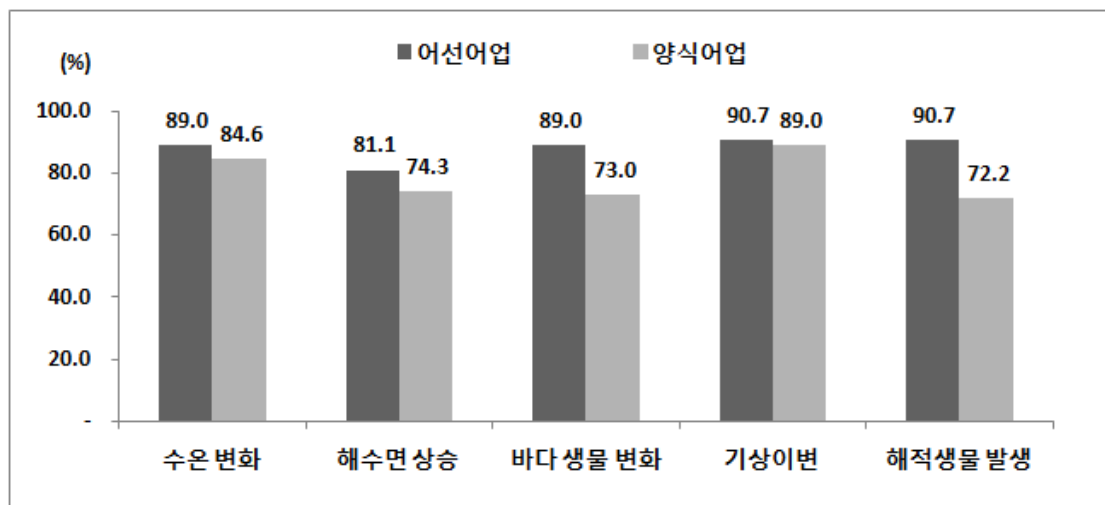


표 5-11. 어업인의 기후변화 체감 정도의 추이

구분	전체		어선어업		양식어업	
	빈도 (명)	비율 (%)	빈도 (명)	비율 (%)	빈도 (명)	비율 (%)
매년 빈도수가 증가하거나 변화의 범위가 커지고 있다	457	74.9	457	74.9	457	74.9
매년 빈도수가 감소하거나 변화의 범위가 작아지고 있다	27	4.4	27	4.4	27	4.4
매년 빈도수나 변화의 범위가 비슷하다.	121	19.8	121	19.8	121	19.8
잘 모름 또는 무응답	23	0.8	23	0.8	23	0.8
합계	628	100.0	628	100.0	628	100.0

기후변화가 수산물 생산에 미치는 영향에 대해서는 어선어업, 양식어업 모두 부정적인 영향이 큰 것으로 조사되었다. 전체 응답자 중 어선어업의 81.1%, 양식어업의 78.4%가 기후변화가 수산물 생산에 부정적인 영향을 미친다고 생각하고 있다(표 5-12). 기후변화가 수산물 생산에 부정적인 영향을 미치는 측면으로는 어선어업과 양식어업 모두 ‘생산량 감소’가 가장 응답이 많았다(그림 5-38). 또한 어업인들은 향후 기후변화가 수산물 생산에 미치는 영향에 대해서도 매우 큰 영향을 미친다고 전망한 의견이 많았는데, 약간이라도 영향을 미칠 것이라는 응답은 어선어업, 양식어업 모두 97%에 달했다(그림 5-39).

표 5-12. 기후변화에 따른 수산물 생산 영향

구분	전체		어선어업		양식어업	
	빈도(명)	비율(%)	빈도(명)	비율(%)	빈도(명)	비율(%)
매우 긍정적인 영향	6	1.0	3	0.8	3	1.1
긍정적인 영향	29	4.6	15	4.2	14	5.1
보통(긍정·부정적 동시 영향)	89	14.2	48	13.5	41	15.0
부정적인 영향	308	49.0	175	49.3	133	48.7
매우 부정적인 영향	194	30.9	113	31.8	81	29.7
무응답	2	0.3	1	0.3	1	0.4
합계	628	100.0	355	100.0	273	100.0

그림 5-38. 기후변화가 수산물 생산에 부정적인 영향을 미치는 측면

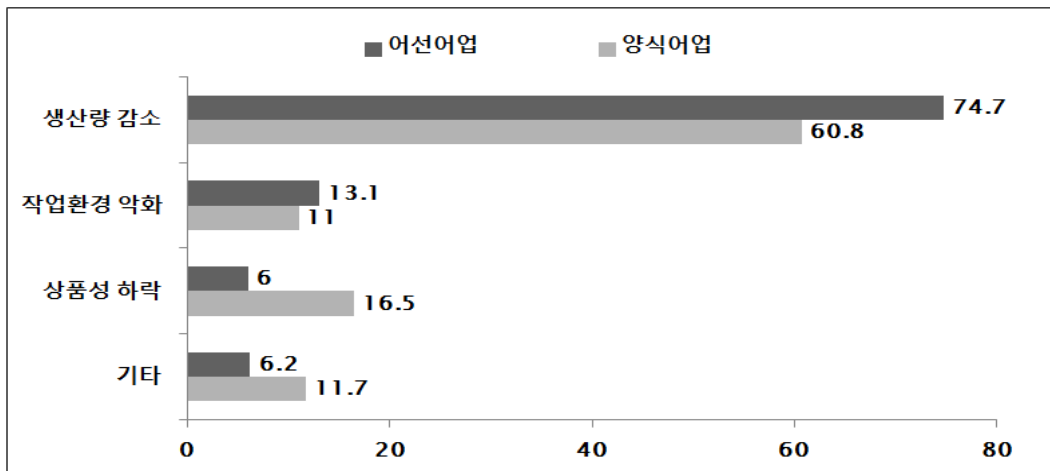
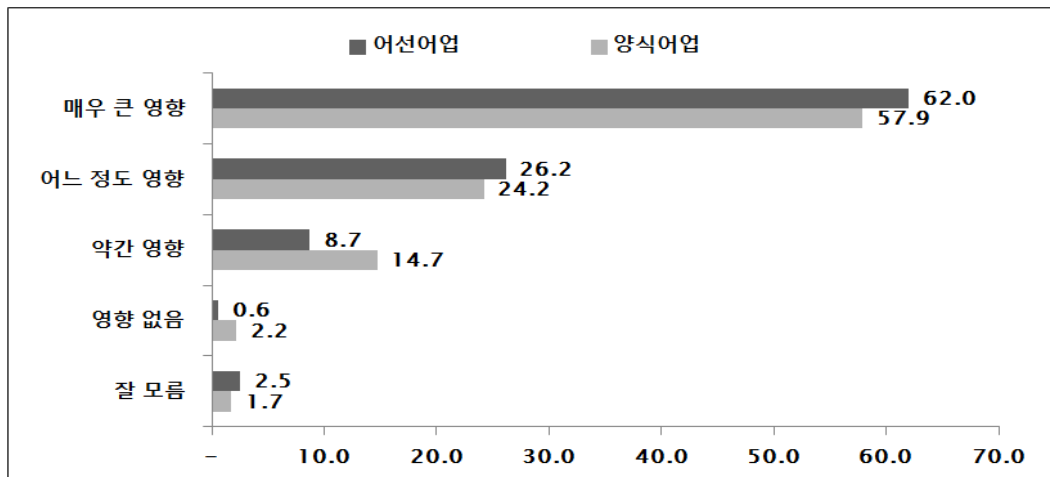


그림 5-39. 향후 기후변화가 수산물 생산에 미치는 영향 전망



기후변화 대응과 관련해 50.2%가 기후변화에 적극적으로 대응하고 있는 것으로 나타났다(표 5-13). 대응 방법으로 어선어업은 어구·어법 개선(44.6%), 양식어업은 양식 방법 개선(57.1%)이다(그림 5-40). 이에 반해 기후변화에 대응하지 않고 있다는 어업인도 대응한다는 어업인과 비슷한 비중인 49.5%에 달했으며, 대응하지 않고 있는 이유로는 어선어업의 경우 ‘기후변화 대응 방법을 모름’(37.4%), 양식어업의 경우 ‘기후변화에 인간이 대응하기 어려움’(36.4%)으로 조사되었다(그림 5-41). 그러나 기후변화에 대응하지 않고 있다는 응답자 중 향후 기후변화 대응 노력 필요성에 대해서는 어선어업, 양식어업 모두 공감하고 있는 것으로 나타났다(표 5-13).

표 5-13. 기후변화 대응 노력 유무

구분	전체		어선어업		양식어업		
	빈도(명)	비율(%)	빈도(명)	비율(%)	빈도(명)	비율(%)	
노력하고 있음	315	50.2	175	49.3	140	51.3	
노력하지 않음	311	49.5	179	50.4	132	48.4	
	노력 필요함	287	45.7	164	46.2	123	45.1
	노력 필요 없음	24	3.8	15	4.2	9	3.3
무응답	2	0.3	1	0.3	1	0.4	
합계	628	100.0	355	100.0	273	100.0	

그림 5-40. 어업인이 현재 하고 있는 기후변화 대응 노력 방법

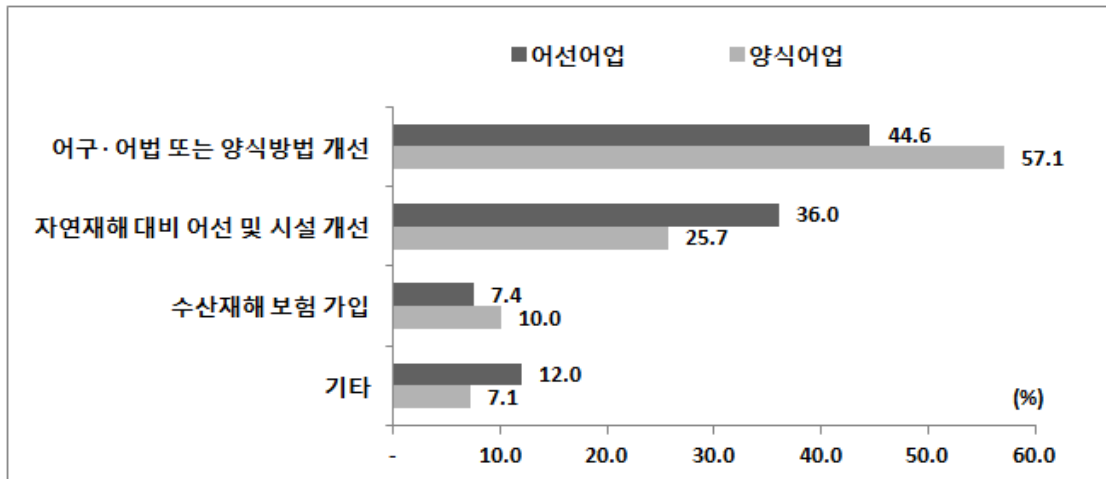
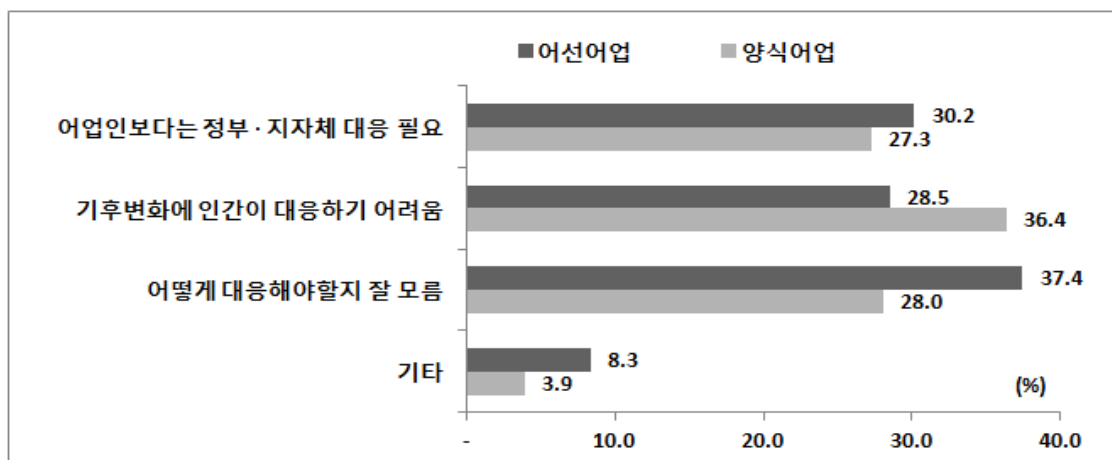


그림 5-41. 어업인이 기후변화 대응 노력을 하지 않는 이유



기후변화에 대응한 수산업분야의 정부 정책에 대해 전체 응답자 중 84.9%가 들어본 적이 있지만 잘 모름, 전혀 모름으로 답해 전반적으로 정책 인지도가 낮았다(표 5-14).⁵¹ 이러한 맥락에서 향후 기후변화 대응 방안으로 기후변화 정보 제공 강화(30.3%) 가장 필요한 것으로 조사되었다. 이밖에 기후변화 대응 연구·개발(26.8%), 재해 대비 경영안전망 확충(22.8%) 등도 주요 대응 방안으로 조사되었다. 어업별로 살펴보면 양식어업의 경우 상대적으로 재해 대비 경영안전망 확충이 어선어업에 비해 중요하다고 판단하였는데, 이는 양식어업이 어선어업에 비해 적조 등 자연재해 위험이 더 큰 것에 따른 결과로 풀이된다.

표 5-14. 기후변화 관련 정부 정책 인지도 및 기후변화 대응 방안

구분		전체		어선어업		양식어업	
		빈도 (명)	비율 (%)	빈도 (명)	비율 (%)	빈도 (명)	비율 (%)
정책 인지도	전혀 모름	235	37.4	141	39.7	94	34.4
	들어본 적이 있지만 잘 모름	298	47.5	167	47.0	131	48.0
	잘 알고 있음	95	15.1	47	13.2	48	17.6
기후 변화 대응 방안	기후변화 정보 제공 강화	190	30.3	112	31.5	78	28.6
	기후변화 대응 연구·개발 강화	168	26.8	91	25.6	77	28.2
	재해 대비 경영안전망 확충	143	22.8	67	18.9	76	27.8
	온실가스 배출 감축 기술 개발	94	15.0	66	18.6	28	10.3
	기타	33	5.3	19	5.4	14	5.1
합계		628	100.0	355	100.0	273	100.0

(3) 기후변화에 대한 어업인 인식의 시사점

어업인에 대한 인식 조사 결과, 기후변화를 체감하고 있는 어업인은 84.5%로 상당히 많았으며 기후변화의 빈도와 범위가 더욱 커지고 있다는 어업인도 74.9%에 달하여 전반적으로 기후변화에 대한 체감 정도가 높았다. 기후변화가 수산물 생산에 미치는 영향은 생산량 감소 등 부정적으로 인식되었으며 향후에도 매우 큰 영향을 미칠 것이라는 의견이 많았다.

기후변화에 대응에 대해 어업인의 절반가량은 비교적 적극적으로 대응하려는 노

⁵¹ 정부는 2010년 국가 기후변화 적응대책(2011~2015)을 관계부처합동으로 수립하였고, 2012년 구 농림수산식품부는 이를 보완하여 농림수산식품 분야 기후변화 영향 및 대응 계획을 수립하여 시행하고 있음

력을 보였으나 나머지 절반가량은 노력의 필요성을 느끼면서도 대응하지 않는 것으로 나타났다. 이는 대응 방법에 대해 잘 모르거나 기후변화를 불가항력적인 변화로 여기고 있기 때문으로 조사되었다.

기후변화에 대응하여 정부가 2010년부터 수산업 분야 대책을 수립하여 시행하고 있지만 어업인의 84.9%가 잘 모르고 있는 것을 확인하였다. 이러한 맥락에서 어업인은 기후변화에 대한 대응 방안으로 기후변화에 대한 정보 제공 강화를 가장 필요한 것으로 인식하였고 기후변화 대응 연구·개발, 재해 대비 경영안전망 확충 등에 대해서도 필요성을 제기하였다.

본 조사를 통해 얻을 수 있는 결론은 어업인이 자신의 경험을 통해 기후변화에 대해 심각하게 인식하고 있으면서도 관련 정보가 부족하여 대응 방법을 잘 모르고 있다는 것이다. 또한 정부도 어업인이 생산 현장에서 기후변화를 체감하고 있는 부분을 중요한 정보로 활용하고 있지 못한 측면도 있다. 향후 수산업 분야의 효과적인 기후변화 대응을 위해서는 어업인과 정부가 관련 정보를 공유하고 협력할 수 있는 방안 모색이 필요할 것으로 사료된다.

최근 정부는 농어업·농어촌에 대한 기후변화 영향 및 취약성 평가를 5년마다 수행하도록 「농어업·농어촌 및 식품산업 기본법」에 근거를 마련하였다(농림축산식품부, 2014). 기후변화 영향 및 취약성 평가는 향후 정책 수립의 기초가 되기 때문에 중요한 이해관계자인 어업인이 체감하는 정보를 지표로 반영하는 것도 충분히 고려할 필요가 있다.

나. 수산분야 기후변화의 국외 대응 사례

(1) 유럽연합(EU)

EU의 기후변화에 대한 대응책은 Framework Program(이하 FP)을 통하여 진행되었고, 2013년도까지 7차 FP(The 7th Framework Program, 2007~2013)가 추진되었다. 7차 FP에서는 기후변화가 더욱 부각되어 완화와 적응의 효율적 방안 마련이 강조되고 있다.

해양 부문에서는 해양 산성화와 해류 변화에, 기후 부문은 기후 평가 모델을 이용하여 지구 전체뿐만 아니라 세부 지역의 기후 변화에 초점이 있으며, 해양 및 기후 부문의 영향이 사회 및 경제에 미치는 영향을 파악하고 있다.

통합해양정책은 해양환경에 대한 기후 데이터와 수산 데이터를 통합하는 연구를 수행하고 있다. 현 시점부터 2020년까지의 광역화된 기후변화의 위협과 그에 대한 충격에 대한 새로운 정보 제공 및 영향에 적응할 수 있는 새로운 기술을 개발하고

있다. 특히 기후변화와 관련된 해당 기관 및 다수의 전문가들이 새로운 정보를 공유하고 통합하면서 축적된 정보에 기초하여 통합해양정책계획을 유연하게 설계하고 있다.

한편 유럽해양수산물기금(European Maritime and Fisheries Fund: EMFF)도 해양수산분야 기후변화에 대한 적응 정책을 추진하고 있는데 주요 정책은 다음과 같다.

- 현재와 향후 변화될 기후변화의 영향에 대한 탄력적인 사업
- 기후 변화에 대한 해양 생태계의 회복력 개선
- 기후조건에서 현재 및 향후 변화에 적합한 적지 확인
- 해양 및 해양문제에 대한 기후 영향에 대한 정보 제공을 통해 효과적인 의사결정을 위한 환경 개선에 기여

(2) 미국

미국은 기후변화로 인해 야기된 어류 및 야생생물의 이동에 따른 생활 범위 변화와 이들이 다른 지역으로 이동함으로써 새롭게 나타나고 있는 생태계의 변화 등에 대해서도 적응을 위한 정책을 시행하고 있다. 특히 미국은 통합적 관찰, 모니터링, 의사결정과 관련된 기후변화에 대한 적응·관리 체계를 구축하고 있다. 즉, 기후 충격에 따른 어류, 야생생물 등 생태계에 대하여 모니터링하고, 이에 대한 관측 정보를 통합화할 뿐만 아니라 위험평가 및 경영평가와 같은 의사결정도구를 개발·이용하여 불확실성을 관리하고 있다. 기후변화의 영향과 어종 및 생태계 반응을 이해하기 위한 평가와 모델링을 진행하고 있다.

또한 미국은 해양 산성화 문제의 위험성을 최소화하기 위해 6개 분야 42개의 행동 조치를 수립하여 적극적으로 대응하고 있다. 구체적으로 이산화탄소의 방출량 저감, 육지로부터 기인되는 해양산성화 유인 축소, 해양산성화에 적응하고 완화할 수 있는 능력 배양, 해양산성화의 원인 및 결과를 모니터링하고 조사하는 주정부의 투자 확대, 이해관계자·일반시민·정책결정담당자들에 대한 정보 제공, 교육, 참여 활성화 등을 통해 기후변화에 적극적으로 대응하고 있다.

(3) 호주

호주는 의회의 요청으로 기후변화에 대한 협력실천계획의 일환으로 국가적응체계를 수립(2006)하였다. 기후변화에 대한 협력실천계획에서는 기후변화의 영향에 대한 적응 계획에 있어 실현 가능성이 높은 활동과 향후 몇 년 안에 나타날 기후변화의 영향을 완화할 수 있는 부분 등으로 구분된다.

국가 기후변화적응체계(National Climate Change Adaptation Framework: NCCAF)로 부문별·지역별로 기후변화에 대한 취약성을 완화하기 위한 중장기 계획(Australian Government, 2007:2008)을 시행하고 있다. 수자원, 연안지역, 생물다양성, 농업·어업·임업, 보건, 관광, 정주·기반시설계획, 자연재해관리 부문으로 나누어 취약성 감소를 위한 가능한 잠재적 적응활동 계획을 세부적으로 마련하였다. 수산업의 경우 기후변화로 인한 수온 상승, 조류·바람·강수량 변화, 해양 영양화 및 산성화 등 수산업에 대한 영향 분석과 내수면 어류와 양식 어류의 위협요인 분석, 주요 수산자원(새우, 연어 등)에 대한 기후변화 영향 분석 및 행동계획을 수행하고 있다.

수산업 분야 행동계획은 2년 이내의 단기 계획과 5년 이내의 중기 계획으로 나누어 추진되고 있다. 단기 계획은 수산실행계획을 통해 기후변화의 수산업에 대한 영향과 위협 요인을 파악하고, 기후변화로 인한 수산 환경의 위기를 인정하고 기후변화가 양식 분야에 미치는 영향을 파악하며, 관련 수산 업계와 이해당사자간에 기후변화에 대응하기 위한 전략을 마련하는 것이다. 중기 계획은 해수면 온도 변화, 해양 산성화 등의 기후변화 영향을 파악하기 위한 기초자료를 수집하고, 해양 생태계의 생산성을 분석한다.

(4) 일본

일본의 수산업 분야 기후변화 적응대책은 크게 ‘기상피해 등의 발생 상황을 감안한 지구온난화 대응책’과 ‘지구온난화 적응대책에 관련된 기술개발’을 중점적으로 진행되고 있다. 기상피해 등의 발생 상황을 감안한 지구온난화 대응책’은 기존의 정책으로 근해에 대한 거시적 영향 평가 중심으로 추진되었다. 기후변화 대책으로서 지구온난화가 연안과 내만 역에 미치는 영향을 정확하게 파악·평가하는 기법을 개발하고 적응정책을 검토하며, 그 결과를 기초로 필요한 대책을 계획적으로 추진하고 있다. 또한 중앙식장, 패조장, 간석지 등의 정비사업도 지속적인 모니터링을 병행하여 정비 방법이나 정비 이후 관리 방향에 대해 재점검하는 동시에, 해수면 상승이 어항이나 어촌지역에 미치게 될 영향을 파악하여 그 결과를 기초로 필요한 대책을 마련할 계획이다.

‘지구온난화 적응대책에 관련된 기술 개발’로는 다음과 같은 정책을 추진하고 있다.

- 지구온난화 종합 예측모델 구축 및 종합 평가(부처간 협력, 산학연 협력 등)
- 세계 식료수급에 관한 중장기 예측
- 국제 식료수급동향 정보의 일괄 수집·분석, 성과 제공
- 고수온내성 양식품종 개발

(5) 캐나다

캐나다의 수산·해양 과학자들은 캐나다의 어업관리, 해양보호지역, 멸종위기 종, 해상안전 및 보안 등에 관한 정보를 제공하기 위해 지속적으로 연구하고 모니터링을 하고 있다. 수산 및 해양 부문에 기후변화 적응 서비스 프로그램(ACCASP) (2011-2016년)으로 다음과 같은 연구를 추진하고 있다.

- 4개의 대형분지의 기후변화에 대한 위험성과 취약성 평가
- 기후변화의 영향 이해를 위한 연구
- 연구를 통해 기후변화 적응에 응용된 새로운 이론의 과학적 정립
- 수산자원, 어로어업 및 양식업, 지역사회가 기후변화로 인해 영향을 받는 정도 모니터링 및 평가

(6) 국외 사례의 시사점

국외 사례에 따르면 주요 국가들은 수산분야 기후변화에 대응하기 위해 가장 기본이라 할 수 있는 기후변화 모니터링 및 영향 평가를 중점적으로 수행하고 있다. EU는 통합해양정책을 통해 해양환경에 대한 기후 데이터와 수산 데이터를 통합하는 연구를 수행하고 있으며, 미국도 통합적 관찰, 모니터링, 의사결정과 관련된 기후변화에 대한 적응·관리 체계를 구축하고 있고, 호주도 여러 기후변화 요인이 수산업에 미치는 영향을 체계적으로 연구하고 있다. 따라서 우리나라도 기후변화 영향을 파악하기 위해 수산업과 기후 사이의 데이터를 통합적으로 수집·분석하고 그에 기초한 대응 체계 마련이 필요한 것으로 사료된다.

미국은 다른 국가에 비해 해양산성화를 매우 심각하게 받아들이고 분야별로 대응 프로그램을 중점적으로 추진하고 대응하고 있다는 점이 특징적이다. 해양산성화에 대한 완화 및 적응 정책이 부족한 우리나라도 참고할 부분이 많을 것으로 사료된다.

호주는 기후변화 대응을 위해 정부가 적극적으로 이해관계자에게 정보를 제공하여 공유하고 있으며, 민간이 참여할 수 있도록 유도하고 있다. 우리나라도 정부가 기후변화 대응에 중심적인 역할을 하면서 이해관계자가 참여하여 공동 대응 체계를 구축하는 방안 모색이 필요하다.

5. 수산분야 기후변화 대응 전략

가. 기후변화의 해양환경 영향 관측 및 예측

국외 수산분야의 기후변화 적응 정책의 사례에서 알 수 있듯이 공통적으로 기후변화와 해양환경에 대한 연구·개발 중심의 대응 및 체계가 구축되어 추진되고 있는데 이는 수산분야 적응 정책 수립을 위해서는 가장 기본적으로 기후변화의 영향의 관측 및 예측이 필요하기 때문이다.

우리나라도 기후변화에 대응하기 위하여 우선적으로 한반도 주변 해역에 대한 기후변화 해양반응 모니터링 시스템을 구축하고, 해양생태계 및 해양수괴의 장기 변동 예측 기법을 개발하며, 지구규모 기후변동에 따른 한반도 주변 해양 반응을 구명하는 체제를 구축할 필요가 있다.

해양의 현황을 파악하고 기존 관측 자료의 연속성을 위하여 기존 관측 시스템은 그대로 유지하며 다양한 무인·양방향·3차원 관측이 가능한 관측시스템 구축이 필요하다. 어장변화 파악을 위한 관측시스템 구축은 현재 1920년대 초반부터 국립수산물학원에서 추진 중인 근해해양조사 및 연안정지관측 등 대규모 관측 시스템이 운영되고 있는데, 관측의 효율화를 위하여 정기여객선을 이용한 관측, 계류부이를 활용한 관측 등이 체계적 추진될 필요가 있다. 구체적으로 다음과 같은 어장환경 관측 인프라 구축이 필요하다.

- 첨단 무인 관측기술을 통한 실시간 이상해황 정보 시스템 구축
- 기후변화 기인 수산재해 다발해역에 대한 자동 어장환경 관측 시스템 구축
- 기후변화에 따른 주요 수산자원의 시공간적 변동 특성 조사
- 연안어장 활용 신규가입종 및 미기록종에 대한 장기변동조사
- 주요 수산자원 산란/성육장 파악 및 보존을 위한 특별 모니터링 시스템 구축
- 양방향 통신 및 음향통신 기술을 기반으로 한 어군형성 및 어군행동에 대한 모니터링 기법 개발
- 수산질병 유발 독성 플랑크톤에 대한 상세 모니터링 시스템 구축

예측기반의 수산자원 관리 정책 구축을 위해서는 우선 우리나라 해역의 특성을 고려한 고해상도 해양 예측 모델 개발이 우선적으로 요청된다. 수산분야 기후변화 대응을 위해서는 우선 예측 모델을 통한 미래 시나리오 구축 → 수산 분야의 취약성 분석 → 취약성 분석에 따른 적응정책 마련 → 적응 정책 실현을 위한 적응 기술 개발 → 적응기술의 보급을 통한 적응 역량 고취의 순으로 이루어져야 한다. 모델 기반

의 예측 기술 개발은 적응 정책 수립 및 보급을 위해서 가장 시급히 중요하게 시행되어야 할 부분으로 해양 모델, 생태계 모델, 수산자원 변동 모델 등 다양한 모델 개발을 통하여 향후 해양의 변동을 정확하게 파악할 필요가 있다. 이를 위해서는 다음과 같은 어장환경 변화 예측 시스템 개발이 필요하다.

- 한반도 최적합 해양-대기 기후모델 구축
- 기후변화 기인 이상해황 발생메커니즘 규명 및 모델 개발
- 주요 어종별 생물-물리 결합모델을 통한 자원량 추정 기법 개발
- 고해상도 해류모델을 활용한 주요 회유성 어종 회유경로 추정 기술 개발
- ICT 기반의 Mobile 실시간 양식어장 예측 정보 제공 기술 개발
- 주요 수산자원 별 서식지 평가 모델 개발

나. 어로어업 및 자원조성 부문

어로어업의 적응 대책으로는 ‘저비용 어선어업 활용 기술 개발’, ‘주요 어장의 기초생산력 및 잠재생산력 분석’, ‘생태계 먹이망 구조변화 분석’, ‘부유성 어종 분포역 변화 분석’, ‘어장탐색 기술 개발’, ‘내수면 어장환경 변화 파악 및 자원관리 정책’ 등을 들 수 있다.

저비용 어선어업 활용 기술 개발은 기후변화의 온실가스 저감 정책 및 저비용 수산업 기술 개발을 통한 기후변화 적응 정책이 혼재되어 있다. LED 기법을 활용한 어업 비용 저감 부분은 이미 정부가 중점적으로 추진하고 있으며, 특히 갈치, 오징어와 같은 집어등(集魚燈)이 필요한 어업에서는 일본과 함께 상당한 수준의 기술을 보유하고 있지만 향후 기존 집어등에 비해 어업효율을 높이는 등 기술적인 향상이 필요할 것으로 판단된다.

주요 어장의 기초생산력 및 잠재생산력 분석은 우리나라 수산자원의 생산력을 산정하여 산정한 생산력에 부합하는 TAC(총허용어획량)을 산정하는 등 과학적인 수산자원 관리를 위한 가장 기본적으로 이루어져야 할 부분으로 기후변화 요인을 고려하여 추진되어야 한다. 현재 기초생산력 및 잠재생산력을 산정하기 위한 근거 자료가 부족하여 아직 우리나라 해역에 정보를 파악하기 힘든 상태이다.

생태계 먹이망 구조변화 분석은 해양생태계 혹은 수산생태계에서 영양염에서 고차영양단계까지 어떤 특성을 가지고 있는가를 파악하며, 먹이망 단계에서 어떤 단계가 가장 취약한가를 파악하여 수산생태계를 건강하게 유지함으로써 수산자원의 보호 및 관리까지 이어지는 정책을 수립하는 체계적인 방법으로 우리나라 해역특성별 접근이 필요하다.

부유성 어종 분포역 변화 분석은 상업적인 가치가 높은 어종이 많기 때문에 실제

어업에서 중요한 정보이므로 중점적으로 추진되어야 한다. 부유성 어종은 환경의 변화, 특히 물리적인 요소 및 먹이생물의 분포에 따라 분포역을 달리하기 때문에 수온 등 물리적인 예측자료 및 생태계 모델을 통한 먹이생물 예측 정보를 통하여 과학적인 분포역 변화 파악이 필요하다.

어장탐색 기술 개발은 기후변화로 인한 수산자원 변동으로 어장이 달라지는 경우 적응하는 기술을 개발하는 것으로 다음과 같은 어장탐색 기술 개발이 필요하다.

- 해양-수산 변동 경향 파악을 위한 인공위성 센서 및 알고리즘 기술 개발
- 원격탐사 기법을 활용한 먹이생물 정량적 변동 경향 파악 기술 개발
- 원양어업 지원을 위한 종합 어장 탐색 정보 제공 시스템 구축
- 원격탐사 기법 활용 주요 어획대상 생물 위치추적 시스템 개발
- 음향탐지 기법을 통한 어종식별 시스템 개발

내수면 어장환경 변화 파악 및 자원관리 정책은 내수면 환경이 가뭄, 홍수 등 수자원 변동에 따른 영향을 많이 받으므로 수자원 적응 대책과 공동으로 마련되는 것이 효율적일 것으로 판단된다. 내수면 어업과 내수면 환경을 각각 관할하는 해양수산부와 환경부가 협력할 필요가 있다.

한편 자원조성 부문에서는 기존에 추진하고 있는 ‘바다숲·바다목장 조성을 통한 수산자원 마련’ 및 ‘인공어초 및 종묘방류 등을 활용한 연안 자원 활성화’를 기후변화 요인을 고려하여 지속적으로 수행할 필요가 있다. 현재의 자원조성은 기후변화에 의한 영향을 거의 고려하지 않고 있는데 향후 자원조성 및 방류사업의 효과 극대화를 위해서는 기후변화에 따른 연안 및 내수면 환경 변화를 중점적으로 고려할 필요가 있다. 아울러 기후변화에 대응하여 다음과 같은 자원조성 기술 개발이 필요하다.

- 정착성 어류 서식지 보호를 위한 서식환경 조성 기법 개발
- 친생태계적 방류어종 선별 기법 및 방류기법 개발
- 하천-해양 회유어종에 대한 자원관리 기법 개발 및 생태계 기반 하천 어도 기술 개발
- 주요 상업어종에 대한 첨단 순치 기법 개발을 통한 지속가능한 자원 이용 방안 구축

다. 양식어업 부문

양식어업의 적응정책으로는 ‘친환경 고효율 양식기법 도입’, ‘최적 양식사료 개발 및 수급 대책’, ‘기후변화에 따른 내온성 양식품종 개발’ 및 ‘열대성·아열대성 수산질병 제어기술 개발’ 등을 들 수 있다.

친환경 고효율 양식기법 도입은 수산물 수급 불안정에 대응하여 식량 안보 및 안

정적인 식품 확보를 위하여 필요한 정책으로 수산 선진국에서 추진 중인 다영양 입체양식(IMTA) 기법의 도입, 양식 생산성 향상을 위한 순환여과형 양식시스템 기술 개발 등이 있다.

최적 양식사료 개발 및 수급 대책은 미성어 사료 사용 억제를 통한 연근해의 자원 남획을 방지하고 기후변화 및 국제 어분가격 상승에 대응하는 맞춤형 사료를 개발하는 것으로 미래 양식어업의 투입재 개선을 위해 추진될 필요가 있다.

기후변화에 따른 내온성 양식품종 개발은 온난화로 인한 양식환경 및 양식적지 변화에 대응하여 육종기술 등 선진 유전 기술을 활용하여 우리나라에 적합한 양식품종을 개발하는 것으로 다음과 같은 기술 개발이 필요하다.

- 내온·내병성 고부가가치 양식생물 육종 기술 개발
- 내재해성 양식시설물 개발 기술 및 운영 체제 개발
- 수온상승에 따른 주요 양식어종의 양식적지 재산정 기술 개발
- 양식장 어장환경 변화에 대비하기 위한 첨단 양식관리 지원 정보 개발

열대·아열대성 수산질병 제어기술은 새로운 수산질병에 대한 선제적인 적응정책으로 추진될 필요가 있는데 저위도 지방에서 발생하고 있는 수산질병에 대한 DB 및 관련 백신 개발, ‘양식생물 이동병원’, ‘접종기법 고도화’ 등을 들 수 있다. 구체적으로 다음과 같은 아열대성 수산질병 제어 기술 개발이 필요하다.

- 신규 아열대성 질병에 대응한 수산분야 의약품 제조 기술 개발
- 어패류를 대상으로 한 수산질병 제어 관련 기술 개발
- 수산생물을 대상으로 한 신규 항생제 및 백신 자동 접종 관련 기술 개발
- 주요 수산물 생산해역의 무인 모니터링 시스템 개발 및 오염원 경감 기술 개발
- 우리나라 수산업 여건에 적합한 수산물 위생처리장치 및 정화기술 개발

이밖에 기후변화로 달라진 환경에서 양식생물 대량 폐사 시 원인을 규명하고 피해를 최소화하는 기술과 극한 기상환경에서도 양식을 할 수 있는 시설물 기술 개발이 필요하다.

- 기후변화에 기인한 양식생물 폐사 메커니즘 규명
- 주요 양식생물을 대상으로 한 최적서식수온 및 한계수온 설정 기법 개발
- Mobile을 활용한 양식생물 폐사 대응 시스템 개발
- 실시간 관측자료 및 단기예측정보를 활용한 양식과정 지원 정보 시스템 구축
- 극한기상환경에 대응하기 위한 무인자동형 가두리 양식시설 기술 개발
- 연안양식어장 보호를 위한 유빙예보시스템 개발

라. 해양생태계 및 서식지 보호

해양생태계 및 서식지 보호의 적응대책으로는 ‘유해생물 대량발생 피해최소화 대책’, ‘기후변화에 따른 연안 생태계 보호 대책’, ‘갯벌 생태계의 보존 대책’ 등을 들 수 있다.

유해생물 대량발생 피해 최소화 대책은 현재 해파리와 적조를 중심으로 다양한 대책이 수행되고 있으나 최근 새로운 독성플랑크톤의 대량 발생 가능성에 대응하여 대책의 수정이 필요하다. 특히 일본과 중국, 우리나라 해역의 상류역에 해당하는 다른 국가들에 일어나는 생물에 의한 피해를 감안한 대책 마련이 필요하다.

기후변화에 따른 연안생태계 보호 대책으로 기존에 시행하고 있는 ‘해양보호구역’ 및 ‘해양생태계 기본 조사’를 통해 수집한 정보로써 연안생태계를 보호하고 연안의 기후변화와 연관된 공간 정책 등 정책 활용 방안이 필요하다.

갯벌 생태계의 보존 대책 마련은 현재 해양보호 구역에 일부 포함되어 대책이 수행되고 있는데, 갯벌 활용에 따른 생태계 파괴, 기후변화의 영향 등을 기존 대책에서 보완되어야 할 것으로 판단된다.

마. 해양산성화

해양산성화에 대응한 적응 대책으로는 ‘해양산성화 대응 어장피해 저감대책 마련’ 및 ‘해양산성화 진행 파악을 위한 모니터링 확대’ 등을 들 수 있다. 우리나라의 경우 해양산성화에 대해서는 아직 구체적인 적응 대책은 물론 정확한 현황 파악도 되어 있지 않은 상태이다.

산호초, 어패류 양식어업 등에 대한 적응정책 수립을 위해서는 우선 우리나라 해역에 대한 해양산성화 영향 파악을 위한 관측 정보 및 극한 환경 실험이 가능한 인프라 구축이 필요하다. 구체적으로는 해양산성화에 대응하여 다음과 같은 기술 개발이 필요하다.

- 고정관측점을 활용한 한반도 주변해역 대기-해양 이산화탄소 분압 연속 관측
- 패류 및 어류양식장을 기반으로 한 어패류의 해양산성화 영향 심층 분석
- 해양산성화 영향에 따른 피질 및 각질 변동 경향 분석 기법 개발
- 무인 해양산성화 관측 기술 개발
- 해양산성화에 따른 우리나라 주변해역 먹이사슬 영향 분석

바. 전문인력 확충 및 민관협력

수산분야의 기후변화 전문가는 다른 분야에 비해 크게 부족한 반면 기후변화의 영

향을 관측·예측하는 작업은 다른 분야에 비해 관련 정보의 제약으로 더욱 어렵기 때문에 전문인력 확충을 위한 장기적인 육성 대책이 필요하다.

어업인들이 기후변화와 정책에 대해 이해의 폭을 넓힐 뿐만 아니라 기후변화 대응을 위해 어업인들의 정보를 활용할 수 있는 민관협력 체제 구축이 필요하다. 본 연구의 어업인 인식조사에서 알 수 있듯이 어업인들은 정부의 기후변화 정책을 대부분 인지하고 있지 못하는 반면 기후변화에 대해 민감하게 인식하고 있으며 관련 정보에 대한 수요가 많은 상황이므로 대응 지침서나 교육 자료 개발이 필요하다. 현재 해파리 모니터링과 같이 어업인들이 체감하는 기후변화 정보를 통합할 수 있는 다각적인 방안의 개발이 요청된다. 아울러 최근 정부 차원의 기후변화 영향 및 취약성 평가가 법제화되었는데 어업인의 정보를 지표로 반영하는 것도 충분히 고려할 필요가 있다.

제6절 식품분야 기후변화 영향평가 모델 구축(4협동과제)

1. 기후변화로 인한 식품분야 영향 분석

가. 기후변화와 농업환경⁵²

온실가스 농도의 증가에 따른 지구 표면의 온도 상승으로 인한 기후변화는 지난 20세기 후반 홍수, 가뭄 등의 주된 원인이 되고 있으며, 이와 관련하여 우리나라의 경우도 1973년부터 2007년 사이에 도시지역은 총 누적 상승온도가 1.23℃인 반면, 농촌지역은 0.81℃로 나타나, 같은 기간 전국 평균은 0.95℃로 세계 평균 누적 상승 온도 0.73℃보다 높았고, 연평균 강수량도 283mm 증가하였다.⁵³

특히, 우리나라는 지난 100년 동안 지구 평균의 약 2배인 1.5℃가 상승하면서 기후변화의 정도와 위험이 매우 높은 국가라고 할 수 있다. 이러한 기후변화에 따른 현상은 단순한 기온 증가를 넘어서서 기존에 유지되었던 장마의 패턴이 무너지고, 온대 기후에서 아열대 기후로의 변화, 대기불안정으로 인한 국지성 호우 증가, 여름철 폭염 일수의 빈도 및 강도의 증가, 남해안 해면상승 현상 및 미생물의 증식 등의 다양한 문제를 유발하고 있다.

- 기후변화로 인한 지구온난화는 식품안전에 매우 큰 영향을 끼칠 것이다. 홍수, 허리케인, 그리고 다른 극한 기후현상이 빈번해질 것이다.⁵⁴
- 기후변화가 진행됨에 따라 극단적이고 피해가 심각한 홍수, 가뭄 등은 농업시스템으로부터 생산된 식품에 직·간접적인 영향을 끼칠 것으로 예상했다.⁵⁵

이러한 기후변화, 즉 온난화는 대부분의 경우 가뭄과 폭염을 유발하고 생산시기를 단축시키며, 홍수와 토양의 염도를 증가시키는 등 부정적인 문제를 일으키게 된다. 특히, 농업은 본질적으로 환경 의존형 산업이며, 기후변화를 야기하는 온실가스의 흡수구이자 배출구의 역할을 하고 있기 때문에 기후변화에 매우 민감하다고 할 수

⁵² 김정선. 2013. 식품분야 기후변화 영향분석 및 영향평가 모델 구축, 한국보건사회연구원

⁵³ 김정선. 2013. 전계서, 재인용

⁵⁴ C-H Von Bonsdorff ets. 2013. Impact of Climate Change and Weather Variability on Viral Pathogens in Food and Water

⁵⁵ Marvin, H. J. P. ets. 2013. Proactive systems for early warning of potential impacts of natural disasters on food safety: Climate-change-induced extreme events as case in point

있다. 기후변화가 농작물에 미치는 효과는 농업생태계의 변화 및 농경지 면적이나 작물재배 기간, 재배지역 변경 등의 직접적인 변화 뿐 아니라 경제 및 사회, 기술 등 다양한 분야에 영향을 끼쳐 직·간접적으로 농업에 영향을 미치고 있다. 지구온난화가 농업 부문에 미치는 영향에 대한 전망은 다음의 <그림 6-1>과 같다.

그림 6-1. 지구온난화가 농업부문에 미치는 영향



자료: 강기경 외(2011). 지구온난화가 농업부문에 미치는 영향.

기후변화는 농산물 수급의 불안정문제나 식품안전문제를 발생시키는 등 인간의 생존을 책임지는 농업에 직접적으로 타격을 주게 될 것이다. 예를 들어 2008년 세계 곡물가격의 폭등과 2010년의 배추파동으로 인한 국내 채소 값 폭등 사태 등이나 국내 농·축산물의 소비자 물가 상승 기여도를 감안할 때 기후변화로 인한 갑작스런 기상이변은 농산물 생산성 하락을 초래하여, 농산물 가격 급등에 따른 소비자 물가 상승의 주요 원인이 될 것이다. 또한 많은 국가들이 식량을 수입에 의존하고 있기 때문에 기상이변은 주요 곡물생산국들로 하여금 수출물량을 감축하게 하여 사회적 불안정을 초래할 수 있다. 즉, 기후변화로 인한 농산물 수급 불안정은 전 세계적으로 식량부족에 시달리는 저개발국가 및 식량 수입 국가들의 정치·사회적 불안을 초래할 수 있다.⁵⁶

⁵⁶ 강기경·이덕배·나영은·최인명·이충근·박규현·김진호. 2011. 기후변화와 우리농업(II) - 도전과 과제 -,

기후변화는 농업생산에 전반적으로 부정적인 영향을 미칠 것으로 예상된다. 농산물에서 염려되는 곰팡이 독소는 아플라톡신, 맥각병 등인데 이러한 균류가 생산하는 독소는 습도, 기온 등이 큰 영향을 미친다.⁵⁷ 기후변화가 신선농산물의 식품안전에 영향을 끼치는 위험요인 12가지 위험요인들이 선정되었고, 북반구와 남반구의 위험수준이 비교되었다⁵⁸. 남반구가 특히 취약한 위험요인은 지표수로 인한 수자원 오염, 가뭄으로 인한 미생물학적 오염, 병해충으로 인한 농약사용 증가에 따른 화학적 오염이다. 홍수가 녹색잎채소의 미생물 오염에 영향을 끼치는 주요 인자임이 밝혀진 바가 있고⁵⁹, 지표 박테리아 오염수준 및 동물매개감염 병원균의 검출과 기온 및 강수량 사이의 관계를 연구한 결과 관개용수가 신선식품을 오염시키는 주요 원인으로 규명된 바가 있다.⁶⁰

표 6-1. 기후변화가 신선농산물의 식품안전에 영향을 끼치는 위험요인

유형	원인	위험	북반구	남반구
수자원 오염	지표수	폭우 또는 홍수로 인한 지표면 관개용수의 미생물학적 오염	4 (0.1)	4 (0.1)
		산사태로 인한 독성물질의 증가와 지표수 오염	1 (0.6)	4 (0.1)
	지하수	폭우 또는 홍수로 인한 지하수의 미생물학적 오염	4 (0.0)	4 (0.2)
	하수	가뭄으로 인한 처리되지 않은 하수의 관개용수 사용	4 (0.1)	4 (0.2)
미생물 학적 오염	범람	폭우 또는 홍수로 인한 재배지의 미생물학적 오염	4 (0.6)	4 (0.2)
	가뭄	높은 기온에서 토양의 영양소가 고갈됨으로 인한 오염된 동물 분변 사용량 증가	1 (0.5)	5 (0.5)
	노동자	높은 기온 또는 계절성 변화로 인한 농부의 질병 증가	2 (0.2)	4 (0.2)
	토양	높은 습도와 기온, 그리고 계절성의 변화로 인한 신선 농산물에서의 미생물 생존 증가	4 (0.3)	4 (0.2)
산사태로 인한 독성물질의 증가와 재배지 오염		2 (0.5)	4 (0.2)	
화학적 오염	병해충	해충의 개체수와 다양성 증가로 허가되지 않은 농약 사용 증가	4 (0.1)	5 (0.1)
		폭우 또는 홍수로 농약이 씻겨 내려감으로 인한 농약 사용 증가	3 (0.1)	5 (0.4)
	균류	가뭄 또는 기온 및 습도 증가로 인한 곰팡이독소 생산 증가	4 (0.3)	4 (0.2)

RDA Interrobang (33호), 1-20.

⁵⁷ Sangam Dwivedi ets. 2013. Food, Nutrition and Agrobiodiversity Under Global Climate Change

⁵⁸ Klementina Kirezjeva ets. 2014. Towards strategies to adapt to pressures on safety of fresh produce due to climate change, 2014.

⁵⁹ I. Castro-banez ets, Microbial safety considerations of flooding in primary production of leafy greens: A case study, Food Research International, 2014.

⁶⁰ Kevin Holvoet, Relationships among hygiene indicators and enteric pathogens in irrigation water, soil and lettuce and the impact of climatic conditions on contamination in the lettuce primary production, 2014.

나. 기후변화와 식품원료 수급현황

(1) 외식업계 농·축산물 소비행태

2011년 식품산업 분야별 원료소비실태조사에 따르면, 업종별 농·축산물 원료의 이용 현황을 조사한 결과 식품제조업의 경우 농·축산물 품목들 중 1~2개만을 취급하는 업체는 59.0%이며, 각 업체당 평균 취급 품목은 3.7인 것으로 나타났다(표 6-2).

외식업은 66.1%의 업체가 10개 이상의 품목들을 취급하고 있으며, 각 업체별로 취급하는 평균 품목은 12.4개로 조사되었다. 반면, 식품제조업체나 외식업체와는 다르게 일반가구에 있어서는 대부분(74.0% 이상)의 가구가 30개 이상의 품목(가구당 평균 31개)을 취급하고 있는 것으로 조사되었다. 이는 품목별 농축수산 이용에 있어서 제조업은 생산을 위한 품목의 원료를 위주로 구매하기 때문에 외식업이나 일반 가구보다 상대적으로 취급하는 품목 수가 낮은 것임을 알 수 있다.

이를 각 품목별로 소비량과 금액 및 부문별 소비량 비중을 계산한 결과는 다음의 <표 6-2>에 제시되었으며, 쌀을 제외한 곡류 및 두류는 제조업에서 소비되는 비중이 높았고 과채, 과실류는 일반가구의 소비비중이 높은 것으로 조사되었다.

표 6-2. 농축수산 품목별 소비규모

단위: 톤, 백만 원, %

구분		전체	식품제조업	외식업	일반가구
쌀	소비량	3,815,100	383,332	845,076	2,586,692
	소비액	8,266,857	395,271	1,735,385	6,136,201
	소비량 비중	100.0	10.0	22.2	67.8
보리	소비량	146,711	49,827	1,599	95,285
	소비액	313,427	47,614	3,767	262,046
	소비량 비중	100.0	34.0	1.1	64.9
밀가루	소비량	1,444,692	1,087,208	255,484	102,000
	소비액	1,102,747	684,872	267,342	150,533
	소비량 비중	100.0	75.3	17.7	7.1
옥수수	소비량	358,014	303,453	6,256	48,305
	소비액	388,477	207,200	9,179	172,098
	소비량 비중	100.0	84.8	1.7	13.5
콩	소비량	417,251	360,977	10,361	45,913
	소비액	839,212	430,695	59,427	349,090
	소비량 비중	100.0	86.5	2.5	11.0
감자	소비량	490,363	45,313	146,530	298,520
	소비액	982,688	47,568	298,688	636,432
	소비량 비중	100.0	9.2	29.9	60.9

(계속)

구분		전체	식품제조업	외식업	일반가구
무	소비량	889,001	198,010	244,648	446,343
	소비액	746,591	143,435	264,292	338,863
	소비량 비중	100.0	22.3	27.5	50.2
당근	소비량	232,371	17,579	85,233	129,560
	소비액	486,650	18,373	134,994	333,283
	소비량 비중	100.0	7.6	36.7	55.8
배추	소비량	1,577,294	373,844	223,240	980,211
	소비액	1,206,885	234,186	253,976	718,723
	소비량 비중	100.0	23.7	14.2	62.1
수박	소비량	752,423	283	4,320	747,820
	소비액	1,413,303	349	10,964	1,401,990
	소비량 비중	100.0	0.0	0.6	99.4
참외	소비량	249,556	16	1,254	248,285
	소비액	829,184	28	5,085	824,071
	소비량 비중	100.0	0.0	0.5	99.5
딸기	소비량	180,013	19,027	3,859	157,127
	소비액	1,217,390	37,887	29,040	1,150,463
	소비량 비중	100.0	10.6	2.1	87.3
토마토	소비량	282,488	8,799	17,786	255,903
	소비액	975,497	10,460	53,376	911,661
	소비량 비중	100.0	3.1	6.3	90.6
사과	소비량	393,331	23,130	12,995	357,206
	소비액	1,770,347	23,274	46,091	1,700,982
	소비량 비중	100.0	5.9	3.3	90.8
배	소비량(톤)	238,468	11,562	11,216	215,691
	소비액(백만원)	842,532	11,600	37,020	793,912
	소비량 비중(%)	100	4.8	4.7	90.4
포도	소비량(톤)	292,968	11,641	3,359	277,969
	소비액(백만원)	1,192,024	29,918	13,711	1,148,395
	소비량 비중(%)	100	4.0	1.1	94.9
감귤	소비량(톤)	627,307	136,517	14,088	476,702
	소비액(백만원)	1,213,959	18,081	28,848	1,167,030
	소비량 비중(%)	100	21.8	2.2	76.0
쇠고기	소비량(톤)	438,454	94,318	188,272	155,863
	소비액(백만원)	9,421,857	920,226	3,229,893	5,271,738
	소비량 비중(%)	100	21.5	42.9	35.5
돼지고기	소비량(톤)	1,024,424	417,430	346,631	260,362
	소비액(백만원)	9,762,996	2,029,086	3,184,021	4,549,889
	소비량 비중(%)	100	40.7	33.8	25.4
닭고기	소비량(톤)	646,902	122,901	365,717	158,284
	소비액(백만원)	3,167,510	442,710	1,581,319	1,143,481
	소비량 비중(%)	100	19.0	56.5	24.5

출처: 한국농수산식품유통공사. (2011) 2011년 식품산업 분야별 원료소비실태조사.

(2) 일반가구의 농·축산물 소비행태

일반가구의 농·축산물 구매특성을 파악하기 위해 2011년 전국 16개 시도 일반가구를 대상으로 조사를 실시한 결과(한국농수산물유통공사, 2011)⁶¹, 대부분의 품목을 이용한 것으로 나타나고 있다(표 6-2). 품목별로 구매하여 사용한 것을 기준으로 연간 총 물량을 살펴볼 때, 쌀 258만여 톤, 배추 98만여 톤 등 전체 조사품목에 대한 총 구매량은 1,096만 톤으로 집계되었으며, 총 구매비용은 42조1,270여억 원으로 추산되었다. 품목별 가구당 회당 평균 구매량을 살펴보면 쌀 20.9kg, 배추 30.0kg, 우유 1.0kg을 소비하고 있는 것으로 조사되었다. 과실류 중에서는 수박의 회당 평균 구매량이 7.5kg으로 가장 많고, 감귤(4.4kg), 포도(3.1kg)의 순으로 구매량이 많았으나, 사과(2.9kg), 배(2.9kg) 등은 구매량이 상대적으로 적게 나타났다. 육류의 경우 평균 구매량이 닭고기가 1.0kg으로 가장 많으며, 돼지고기 0.8kg, 쇠고기 0.7kg 순으로 조사되었으며, 농·축산물 구매현황을 구매금액 기준으로 살펴보면, 쌀의 경우 가구당 회당 약 4만9천원 정도, 쇠고기의 경우 회당 약 2만4천원 가량을 구매한 것으로 조사되었다.

(3) 기후변화가 원료수급에 미치는 영향

기후변화에 따른 식량 및 원료수급상황은 무조건적으로 나쁘다기보다는 정도에 따라 잠재적인 혜택을 가져오는 부분도 있다. 하지만 온난화에 따른 기온상승은 농업환경에 잠재적인 혜택보다는 더 많은 문제를 야기하게 될 것이다. 특히 농산물의 생산 시기는 짧아지고, 가뭄과 폭염 등의 기상이변으로 홍수와 토양의 염도 증가 등의 기상재해가 다발하게 될 것이다.

식량수급과 관련하여 고려되는 네 가지 차원으로 식량가용성, 식량공급안정성, 식량접근성, 식량활용성을 들 수 있으며, 이 중 식량가용성은 기후와 사회경제적 변화뿐만 아니라 무역, 원조, 재고 등의 영향을 받는다. 식량안정성은 지역편차가 존재하며, 황폐한 토지와 물 부족으로 열대 저개발국은 생산잠재력 감소에 직면하며, 세계적으로 식량생산은 작은 기온상승과 함께 증가될 것이지만 그 이상의 기온에서는 감소하게 된다. 국지적 강우와 가뭄 등 이상기후 현상의 증가는 식량공급안정성과 접근성에 영향을 주어 식량수급의 불안정과 경작지의 감소 등 더 악화될 전망이다. 또한 기후변화는 식량 활용성에도 영향을 주어 물 부족 지역에서는 식량 가공 및 소비 능력에 영향을 주게 된다.

전 세계적으로는 2009년 전체 곡물 생산은 22억 3,800만 톤으로, 이 중 12%만이

⁶¹ 한국농수산물유통공사. 2011, 식품산업 분야별 원료소비 실태조사

무역을 통해 거래되었고, 나머지는 산지에서 소비 또는 활용되었다. 육류 및 육류제품은 2억 8,210만 톤이 소비되었으며, 개도국과 선진국 간에 육류소비는 큰 차이를 보이는데, 1인당 연간 소비량으로 보면 개도국은 평균 31.5kg이고 선진국은 81.9kg로 조사되었다(FEU-US, 2011). 2011년에 유엔 식량농업기구(FAO)는 세계식품가격지수가 전월대비 2.2% 올랐다고 발표하였는데, 이는 세계식품가격지수가 집계되기 시작한 1990년 이후 최고치이다. 특히, 유지류의 가격상승이 크게 나타났으며, 곡류 및 육류의 가격도 비교적 상승폭이 큰 것으로 나타났다. 이는 기상이변으로 작황 부진과 더불어 2000년대 중반 이후 중국과 같은 신흥개발국의 소득 확대로 식생활패턴이 바뀌어 식품수요가 증가함에 기인하고 있다. 이에 대해 농기계 보급과 관개시설 개선으로 단위 면적당 세계 곡물생산량은 지난 30여 년간 62% 정도 늘어났지만 생산성 향상만으로 급증하는 수요를 감당하기에는 역부족이라고 할 수 있다.

우리나라는 1990년과 비교하여 볼 때 쌀의 경우 772만 톤에서 692만 톤으로, 채소는 354만 톤에서 339만 톤으로, 쌀이나 채소 등은 전반적으로 생산량이 감소하였다. 이와 달리 돼지고기는 55만 톤에서 106만 톤, 쇠고기는 13만 톤에서 24만 톤, 닭고기가 26만 톤에서 49만 톤으로 육류의 생산량은 전반적으로 증가하였다. 이러한 생산량의 변화추이는 무엇보다 서구화된 식생활 등으로 인한 식생활의 변화로 인해 곡류 및 채소 소비는 감소하고 육류 소비는 증가함에 따른 것으로 이해할 수 있을 것이다.

이와 함께 한국의 식량 순수입량도 1990~1992년에 비해 2005~2007년에 지속적으로 늘어나는 추세를 보이고 있다. 채소, 과일류, 육류 등의 수입은 꾸준히 늘어나고 있으며, 곡류의 경우 2007년 곡물가격상승으로 2000~2002년 대비 약간 수입이 줄어들기는 하였으나 전체적으로 14% 증가하였다.

식량수급과 관련하여 소비자의 식품소비패턴 변화에 따른 수요 증가와 더불어 기후변화로 인한 온난화 현상의 심화는 농업생태계에 상당한 위협요인이 될 수 있다. 우리나라의 경우도 기온 증가로 인해 주곡인 쌀을 재배함에 있어서 적합한 기상환경의 균형이 깨지고, 이에 따른 작물체내의 생리, 생화학적인 교란현상으로 정상적인 생육을 위축시켜 작물의 수량과 품질 저하가 예상되고 있다. 또한 IPCC(2007) 보고서에 따르면 기후변화가 농·축산물 생산에 미치는 영향은 온도상승과 강수량 부족으로 유럽의 농작물 생산량이 급감하였으며, 최근 10년간 와인생산의 감소로 인해 상당한 농업부문의 손실이 있었다. 이탈리아나 프랑스의 경우도 옥수수나 과일류의 생산이 감소한 것으로 나타났다.

구체적으로 온실가스 증에 따른 기후변화와 생산량 변화를 연구한 한화진(2007)의 연구에서는 온실가스 증가에 따른 우리나라 기온 및 강수량 편차자료와 CERES-Rice 모델을 이용하여 우리나라의 쌀 수량이 미래(2081~2090)에 어떻게 변할 것인가

가를 예측하였다. 여기에서는 1971-2000년에 비해 2080년대의 기온은 약 5℃ 증가하며, 강수량은 약 17% 증가할 것으로 예측하였고, 지금처럼 온도가 상승할 경우 2100년 평균 벼 수확량은 현재보다 약 15% 감소하고, 곡창지대인 남서해안지방의 경우 20% 이상 감소할 것으로 예상하였다. 동일 모형을 활용한 김창길·심교문(2009)의 연구에서도 평균기온이 2℃ 상승하는 경우 10a당 벼 수량의 전국평균은 평년보다 4.5% 감소하는 것으로 추정하였다(표 6-3).

표 6-3. 기후변화에 따른 쌀 생산량 변화

단위: kg/10a, %

지역	평년	1℃ 상승시		2℃ 상승시		3℃ 상승시		4℃ 상승시	
		수량	평년 대비	수량	평년 대비	수량	평년 대비	수량	평년 대비
강원	493	471	95.5	450	91.3	457	92.6	443	89.8
경기	520	501	96.3	480	92.3	470	90.4	449	86.5
경남	517	488	94.4	474	91.6	463	89.4	444	85.9
경북	550	532	96.7	506	92.1	503	91.5	481	87.6
전남	535	498	93.1	481	89.9	474	88.6	431	80.6
전북	531	500	94.1	487	91.7	472	88.8	456	85.8
충남	591	575	97.3	549	93.0	529	89.6	495	83.8
충북	523	510	97.6	484	92.5	494	94.4	457	87.3
평균	539	515	95.5	495	91.8	486	90.1	459	85.1

출처: 김창길·심교문. (2009) 2009 농업전망, 한국농촌경제연구원.

이처럼 농·축산물의 생산은 기후변화에 매우 민감하기 때문에 생산성 및 폐사율에 영향을 미치고, 특히 경작지 감소와 수자원 확보에 문제가 발생할 경우 매우 심각한 상황이 초래될 것이다. 또한 전 세계적으로 농작물 생산량 감소와 더불어 생태계와 농약 잔류량에도 영향을 미치게 되어 기타 식량생산의 주요 요소와 함께 기후변화는 전 세계적으로 식량 생산에 큰 영향을 미칠 것으로 전망된다.

UEF(2011)⁶²에 따르면 기타 식량생산의 주요 요소와 함께 기후변화는 전 세계적으로 식량 생산에 큰 영향을 미칠 것으로 전망된다. 식량문제와 관련이 큰 농지, 인구 등의 요인을 살펴보면 2080년까지 농지는 현재와 비슷한 수준으로 유지되고, 2011년 세계 인구는 69억 명을 넘었으며 현재도 꾸준히 증가하고 있는 추세인 가운데 기후변화는 일부 긍정적 영향과 함께 강수량 및 기온의 변화는 지역별 다양한 영

⁶² UEF-US. 2011. The Food Gap - The Impacts of Climate Change on Food Production: Perspective by 2020. Alexandria, VA 22130, USA.

향 초래하고 있는 실정이다.

공급측면에서 2020년까지 8억 9천만 명이 증가한 78억 인구의 수요를 충족시키기 위해 식량생산은 현재 수준에서 13% 증가해야 하지만 기후변화로 인해 전 세계 식량 생산량은 수요를 미충족하게 되는 상황이며, 세계 농산물 공급증가율도 2015~2030년에는 연 1.3%, 2030~2050년에는 연 0.8% 감소할 것으로 예상되고 있다. 앞으로 기온이 2.4°C 상승하면 전 세계의 농산물가격은 최대 20% 상승할 것으로 예측되고 있다.

수요측면에서 인구증가율의 감소와 추가적인 칼로리의 공급이 덜 필요한 영양상태가 좋은 사람들의 비중의 증가로 세계 식품수요의 증가율의 둔화 예상된다. 이러한 수요 증가의 속도 감소는 곡류위주에서 육류위주의 식사형태로의 이행을 의미하는 것이다.

(4) 기후변화에 따른 주산지의 변화

농산물의 생산량에 직접적인 영향을 미치는 기후변화는 주산지의 변화를 초래하고 있다. 지구온난화로 봄꽃 개화시기가 빨라지고 농산물 재배적지가 북상하고 있다. 사과와 감의 경우 주산지가 경북에서 강원으로 이동하고 있으며, 제주도에서만 생산되던 원예작물이 남해안 지역을 거쳐 전북까지 북상하였고, 특히 한라봉은 현재 전남 고흥과 경남 거제 및 전북 김제까지 북상하고 있는 실정이다. 특히, 지구온난화로 남부지역과 해안지역이 아열대기후대로 전환되면서 새로운 아열대 및 열대 채소류·과실류 생산이 가능할 것으로 전망되기 때문에 지구온난화로 망고, 키위, 한라봉, 감귤 등의 고온성 작물의 재배가능 지역이 확대될 것이다. 따라서 과거에 우리나라에서는 불가능했던 열대작물과 열대과수의 재배가 가능해지면서 재배면적도 확대될 것으로 전망된다⁶³.

다. 기후변화와 식품유통

(1) 푸드시스템과 식품유통

식품생산, 가공 및 포장, 분배 및 소매, 소비를 포함하는 푸드시스템활동은 자연자원, 투입재, 기술 등의 식품생산, 원료, 등급, 보관 등의 가공 및 포장, 수송, 마케팅, 광고 등의 분배 및 소매, 습득, 조리, 사교 등의 소비로 이루어져 있다. 푸드시스템을 통하여 사회적인 후생에 기여하고 식량안보 측면(식량 가용성, 식량 접근성, 식량 활용성)에도 기여하고 있다. 푸드시스템안의 모든 과정을 합하여 “농장에서 포크까지”

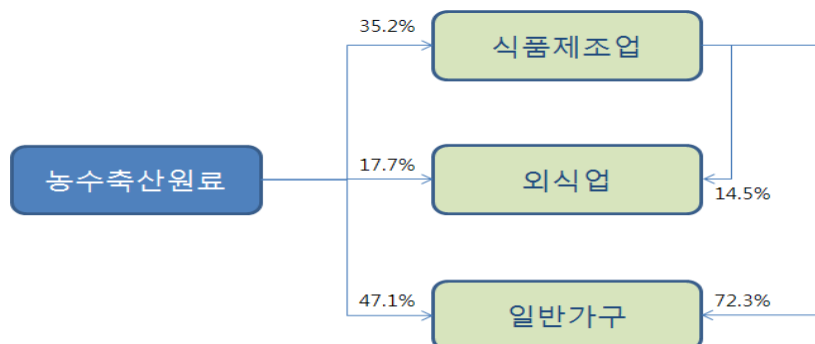
⁶³ 김창길. 2011. 기후변화가 농산물생산유통에 미치는 영향, 농식품신유통연구원 심포지엄 자료집.

또는 “쟁기에서 접시까지”로 특징지워지는 푸드체인으로 명명하기도 한다. 그러나 푸드시스템과 푸드체인 사이의 주요 개념적 차이는 푸드시스템이 동시에 상호작용하는 프로세스의 집합을 구성하는 전체적인 반면, 푸드체인은 사람들이 음식을 얻기 위해 일어나는 해야 할 활동의 순서를 포함하는 선형적인 것이라고 할 수 있다. 또한 푸드시스템의 개념은 원인과 결과 관계 및 피드백 루프를 과학적으로 분석하는 연구자들에게 유용한 반면, 기술적으로 발견된 정책적 권고사항들의 의사소통에 있어서는 푸드체인의 개념을 이용하는 것이 보다 더 용이하다고 할 수 있다.

기후는 생산되는 식품의 수량과 종류 및 생산에 따른 소득에 영향을 미치기 때문에 푸드체인을 포함하는 푸드시스템의 성과 실현에 있어서 중요 요인이 된다. 따라서 기후변화로 인한 이상 기후 현상은 운송을 포함하는 유통 인프라의 손상 또는 파괴를 야기하여 푸드시스템과 연관된 비농업 부분에도 부정적인 영향을 미치게 된다. 그러나 기후 변화는 부정적인 측면과 더불어 긍정적인 방향으로 푸드시스템을 둘러싸고 있는 대내외적 환경 및 사회경제적 변동요인에 영향을 미치는 적응적인 대응을 유발할 가능성이 크고 할 수 있다.

2011년 식품산업 분야별 원료소비실태조사⁶⁴에 따르면, 식품산업의 주체 간에 농축수산물 소비현황의 흐름을 파악하여 푸드체인 상에서 농축수산물의 유통경로를 파악한 결과는 다음의 <그림 6-2>와 같다. 푸드체인 상에서 농축수산물의 원료가 제조업과 외식업을 통해 소비되는 물량은 각각 35.2%와 17.7%로 추산되었다. 반면, 47% 정도는 일반 가구에 직접 제공되고 있음을 알 수 있다. 또한 식품제조업을 통해 일반 가구에 제공되는 비중 72.3%로 나타나 식품제조업에서 농축수산원료를 가공하여 일반 가구에 제공하는 비중이 높음을 알 수 있다.

그림 6-2. Food-chain 내 농축수산물 원료 및 식품의 소비구조

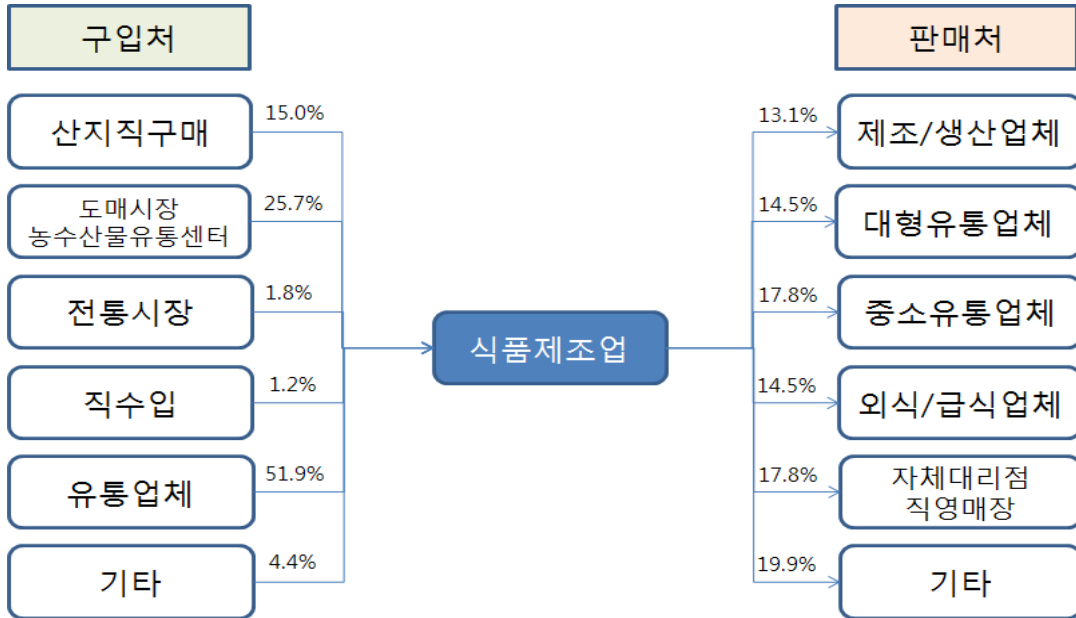


자료: 한국농수산물유통공사. (2011) 식품산업 분야별 원료소비 실태조사.

⁶⁴ 한국농수산물유통공사. 2011, 식품산업 분야별 원료소비 실태조사

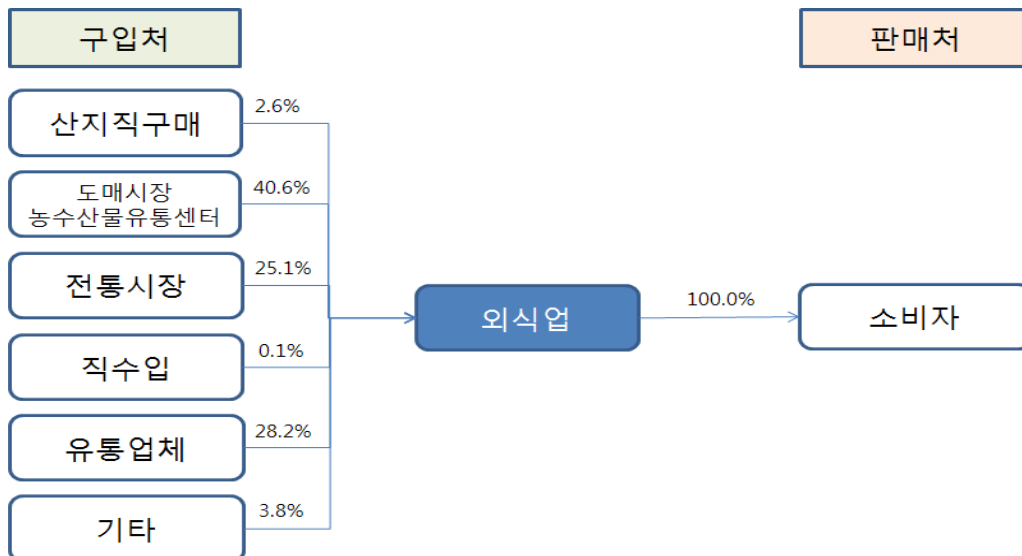
좀 더 구체적으로 식품제조업과 외식업의 경우 농축수산물의 구매처와 판매처 등의 유통경로를 파악한 결과는 다음의 <그림 6-3>, <그림 6-4>에 제시되었다.

그림 6-3. 식품제조업 농축수산물의 소비 흐름도



자료: 한국농수산물유통공사(2011). 식품산업 분야별 원료소비 실태조사

그림 6-4. 외식업 농축수산물의 소비 flow chart



자료: 한국농수산물유통공사(2011). 식품산업 분야별 원료소비 실태조사.

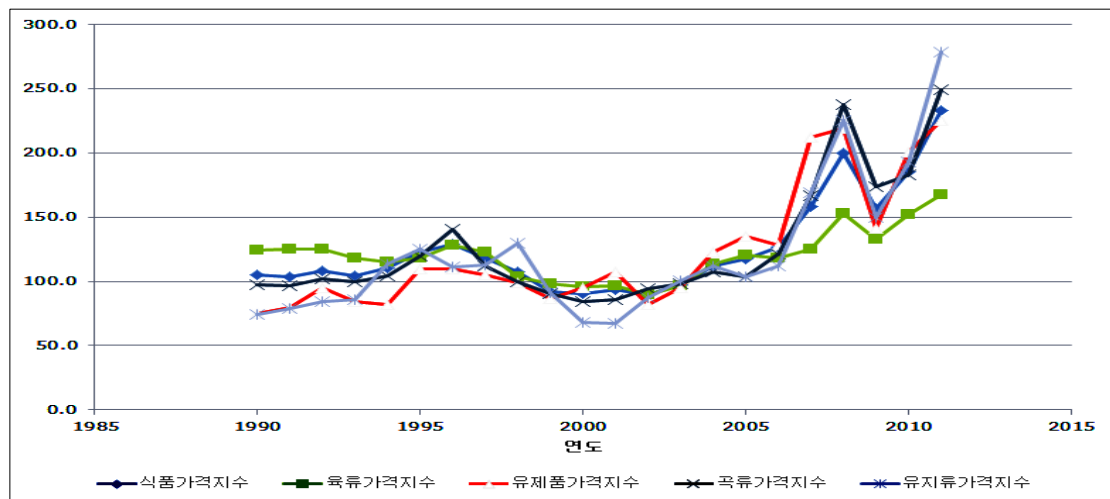
먼저, 식품제조업은 주로 유통업체와 산지직구매를 통해 농축수산물을 구입하고, 이를 가공하여 자체 대리점 및 직영매장, 대형유통업체 등을 통해 식품으로 유통을

시키고 있음을 알 수 있다. 반면, 외식업의 경우는 주로 유통업체와 도매 및 농수산물유통센터를 통해 농축수산물을 구입하여 가공된 모든 식품을 소비자에게 판매하고 있음을 알 수 있다.

(2) 기후변화가 농산물 유통에 미치는 영향

2009년 세계 전체 곡물 생산은 22억 3,800만 톤으로 이 중에서 12%만이 무역으로 거래되고 나머지 88%가 산지에서 소비 또는 활용되고 있다. 그 중 45%가 식량으로 사용되고 있다. 주요 곡물류의 상황을 살펴보면 쌀은 약 84%의 가공미가 식량에 사용되며 94%가 산지에서 사용된다. 밀은 생산량의 약 66%를 식량으로 사용하고, 산지에서 82%가 사용된다. 전 세계 옥수수 생산의 12%가 에탄올 생산을 위한 바이오연료로 사용되고 있으며 60% 가량은 사료용이며, 나머지 28%는 식용 또는 식품 생산을 위해 사용된다. 전 세계 콩 생산량 중 약 10%는 식량으로 사용되고 75%는 가장 중요한 식물성 기름인 콩기름 생산에 사용된다. FAO 통계를 보면 세계 식품가격은 최근 등락을 거듭하면서 전반적으로 상승하고 있는 추세이다.

그림 6-5. 세계 식품가격지수



주: 2002-2004=100

자료: FAO-STAT

이처럼 많은 농산물 특히 곡류가 산지에서 소비되는 상황에서 기후변화에 따른 산지에서의 생산 감소는 무역에 따른 국제거래량의 감소와 그에 따른 식품가격의 상승을 가져오게 될 것이며, 이에 따라 수입량이 많은 우리나라와 같은 순수입국가에서는 높은 수입가격으로 인하여 가공식품 생산 및 소비자 가격의 상승을 초래될 가능성이 높다. 또한 특히 제조업체나 외식업체에서 원료구입처로 유통업체와 도매 및 농수산물유통센터의 비중이 높은 우리 현실에서 농산물 유통에 있어 수입량 감소에

다른 가격상승을 막기 위한 유통비용의 감축을 위한 노력과 국내 생산량 확보가 무엇보다 필요하게 될 것이다.

또한 농업이 기후 의존적 산업이기 때문에 기후변화는 우리 곡류, 과실류, 축산물 등 농업생산 분야에 부정적 영향이 클 것으로 전망되나 기후변화로 인한 온도상승은 아열대 또는 열대 채소와 과수 등의 새로운 작목 도입을 가능케 하여 식품분야의 기회요인으로 작용할 수 있다. 그러나 기후변화가 단기적으로는 농산물의 생산량을 감소시키게 되고, 더 나아가서 기후변화가 심화됨에 따라 홍수, 가뭄, 태풍 등의 기상재해로 인해 농산물의 수급불안정이 심화되어 가격 등락 및 농가소득의 불안정을 초래할 수 있다.

이처럼 기후변화에 따른 농·축산물의 생산변화는 농산물의 유통에 영향을 주게 되는데, 직접적인 생산변화와 온실가스 감축 등의 저탄소 정책추진으로 인해 녹색물류 및 친환경농산물 소비 증가 등 간접적인 영향력이 기대된다. 특히, 아열대 현상으로 초래되는 주산지 변동에 따라 산지유통 시설의 변화가 불가피하게 되어 새로운 산지유통시설 및 신규작목 도입에 따른 새로운 유통시설이 필요하게 되었다. 이와 더불어 기후변화에 따른 간접적인 영향으로써 저탄소 녹색물류의 중요성 증가에 따른 물류의 변화를 들 수 있는데, 환경친화적 물류시스템 활용으로 가공, 포장, 수송 등에 있어서 저탄소 녹색물류시스템으로 전환되어야 하며, 저탄소 녹색식품에 대한 소비증가, 친환경농산물(유기농식품)의 유통비중 증가 및 녹색소비 증가로 저탄소 농산물에 대한 소비가 증가될 것이다.⁶⁵

(3) 식품유통과 안전관리

식품의 유통 측면에서 WTO출범으로 인해 국제교역이 자유화됨에 따라 식품유통에 따른 안전성이 중요한 문제로 대두되고 있다. 우리나라의 경우 식량자급률이 낮기 때문에 상당 부분 식품 수입에 의존하고 있다. 1995년과 비교하여 2007년의 식품수입량은 2배가 증가하였으며, 특히 중국산의 경우 5배 이상 증가하여 수입식품의 안전성 제고를 위한 방안 마련이 필요한 실정이다. 이러한 경향은 FTA의 확대에 증가 추세가 지속될 전망되며, 이에 따라 식품안전성을 확보할 수 있도록 기후변화에 따른 식품안전 환경 변화에 대한 정보 수집을 원활하게 할 수 있도록 네트워크 활성화가 요구된다.

또한 기후변화가 전반적인 식품가격의 상승을 유도함에 따라 건강에 유익한 식품들의 가격이 급격히 상승할 수 있으며, 기후변화가 직접적으로 식품의 생산, 가공이

⁶⁵ 김창길. 2011. 기후변화가 농산물생산유통에 미치는 영향, 농식품신유통연구원 심포지엄 자료집.

나 보존, 전처리 및 조리 등의 과정들에 영향을 미치게 되어 이에 따른 소비자들의 영양 및 안전에 대한 우려가 커지게 된다. 특히, 기후변화로 인한 이상기후는 식품 및 수인성 매개 병원균의 오염 확산을 용이하게 하고, 외식 증가 등의 식습관 변화 및 식품의 대량생산체제는 식중독 발생을 증가시키고 있다.

이에 대해 기후변화에 대응하기 위한 보건 및 식품안전 부문의 연구들은 환경부문에서 시작하여 2008년에는 식품의약품안전청에서 최초로 기후변화와 식품안전관리 연구를 시작하였고, 뒤를 이어 복지부에서는 2009년에 기후변화와 건강에 대한 적응 대책 연구를 시작하였다. 구체적으로 식품분야의 경우 식품군별로 문제점을 분류하고 대책을 마련, HACCP 등 관련 제도 강화에 따른 생산 안전성 강화 등의 연구를 포함하는 국내 식품안전 규정 및 체계 보완, 기후변화로 인한 갑작스런 질병발생 사례, 식품안전 관련자들의 습관이나 행태관리 및 기후변화로 인한 식품매개성 질환 연구 등에 대한 관심이 증가하고 있다.⁶⁶

기후 변화에 따른 산업별 식품안전에 대한 영향력은 1차 생산 부문인 농업의 경우 기후변화로 인한 농작물 생산효율의 감소와 농작물 피해(IPCC, 2007)는 생물적 병해충의 증가로 인해 영양결핍이나 공기오염, 극한의 온도와 수분 조건의 변화 등으로 인해 식량공급이나 식품안전 문제를 야기하게 되어 농업부문의 피해가 클 것으로 전망하고 있다. 또한 축산업의 경우도 기온이 상승함에 따라 동물들이 받게 되는 열스트레스로 인해 건강이나 성장 및 번식 등에 직접적인 변화가 초래되고, 사료공급량이나 사료품질, 목초, 풀 등의 사료작물의 변화 등으로 인한 영양변화는 동물에 간접적 영향을 주게 된다. 이 밖에도 병원 매개체와 병원체 보균 동물의 발생률 및 범위 증가로 인해 새로운 질병이 등장하게 되는 등 축산 방식의 변화를 초래하게 된다.⁶⁷

더 나아가서 식품의 제조와 유통 부문에 있어서는 1차적인 생산과정에서 유입될 수 있는 위해요소의 변화로 인해 식품 취급과 가공 및 교역 등에 상당한 영향을 미치게 된다. 따라서 소비자에게 제공되는 식품의 안전성 확보를 위해 변화되고 있는 위해요소를 효과적으로 관리할 수 있도록 안전관리체계에도 변화가 필요하다고 할 수 있다. 또한 평균온도상승으로 인해 식품의 보관이나 유통 과정에서 발생할 수 있는 위생관련 위험이 증가함에 따라 식품산업은 효과적으로 이러한 위험에 대처할 수 있는 수정된 위생프로그램의 도입이 필요하다고 할 수 있다. 식품선택에 있어서는 기후변화로 인해 식중독 발생 비율이 증가하는 등 식품안전과 위생여건의 악화로 인해 소비자들은 로컬푸드나 친환경 농산물에 대한 소비확대 및 농어촌 식생활 체험 등에

⁶⁶ 김정선·정기혜·신호성·정진욱·윤시몬·김은정. 2008. 국제 기후변화에 따른 식품안전관리 대책 추진 방안, 식품의약품안전청

⁶⁷ 김희선. 2008, 기후변화와 식품안전, 제32회 식품안전열린포럼 발표자료.

대한 관심을 갖게 되고, 생산자와 소비자 간의 신뢰를 바탕으로 한 식품 소비의 욕구 증대로 연계되고 있으나 생산부문이 이를 충족시키지 못하고 있는 실정이다.⁶⁸

라. 기후변화와 식품안전⁶⁹

최근 전 세계적으로 외식증가 및 즉석섭취식품(ready-to-eat), 신선한 과일 및 야채, 날것 또는 최소한으로 조리된 식품의 소비가 높아지면서 식중독 발생은 급증하고 있다. 기후변화에 의한 식품수급의 불균형뿐만 아니라 또 다른 중요한 위험요인은 기후변화로 인한 수인성 및 식품매개체 관련 질환 등 잠재적 위해발생률이 증가할 가능성이 높다는 것이다.

표 6-4. 기후변화와 식중독 관련 매개체의 영향

구분	기후변화에 의한 영향	
	간접영향	직접영향
바이러스	폭풍우로 인한 인간 배설물이나 하수의 증가	기후변화와 햇빛(자외선)의 변화로 생존률 증가
세균	조류의 확산으로 인한 증식 및 해수나 해산물을 통한 질병발생 증가	바닷물 염도나 온도변화에 따라 조류 생존환경 변화
기생충	폭풍우로 인한 인간 배설물이나 하수의 증가	온도상승이 기생충의 성충화와 감염성을 증가시킴

자료: 정명섭(2000). 기후변화와 식품안전관리, Safe Food, 2009년 9월호(재인용) 및 미국 국가과학기술위원회(NSTC), Climate change impacts in the United States: potential consequences of climate variability and change for human health in the United States. US global research program, Washington, DC. (원자료).

기후변화에 따른 식중독 발생은 식품의 생산에서 소비에 이르는 전 과정에 직·간접적인 영향을 주는데, 예를 들면 식품가공 전 과정인 식품원재료 공급, 제조, 유통, 소비 단계별 기후변화에 영향을 받는 잠재적 오염원들이 상존한다(표 6-4 참조). 이러한 오염원에 대한 적절한 통제 방법을 실제로 현장에서 사용할 수 있도록 지침서 등을 제시하고 교육함으로써 식품가공 단계에서 기후변화에 따른 식중독 등 식품안전에 대한 영향을 최소화하는 방안이 될 것이다.

(1) 동물건강과 동물원성 감염증

기후변화에 의하여 야간 온도가 상승되면 매개체나 동물 보균 숙주의 범위 증가 또는 과다하게 되어 바이러스의 전염성 증가를 초래하게 될 것이다. 가뭄, 가뭄 후

⁶⁸ 김정선. 2011, 기후변화와 식품안전에 대한 국민인식, 보건복지 Issue & Focus 제117호, p.1-8.

⁶⁹ 정명섭. 2009, 기후변화와 식품안전관리, 한국식품위생안전성학회 Safe Food, 9월호(재인용).

폭우나 홍수에 의해 모기, 절지동물, 진드기 등 매개동물의 확산이 대표적인 현상이다. 모기 활동 기간 연장에 따라 웨스트 나일 바이러스(west nile virus) 등에 의한 뇌에 치명적인 손상을 입히는 뇌염을 유발하기도 한다. 또한 극도의 추위, 습도, 가뭄에 노출된 가축들은 질병에 대한 동물 민감성 증가하게 되어 소 유방염(mastitis) 등 질병에 걸리기 쉽기 때문에 동물용 의약품의 사용이 증가할 것으로 예상된다.

(2) 미생물유래 식품매개질환

일반적으로 대부분의 virus, bacteria, protozoa는 기온이나 수온이 증가할 경우 식인성 질병을 유발시키기 쉽다. 기후변화와 밀접한 상관관계를 나타내는 병원성 세균으로는 *Vibrio vulnificus*, *Salmonella* spp., *E. coli* O157:H7 등이 있다(표 6-5). *E. coli* O157:H7은 출혈성 대장염(hemorrhagic colitis) 또는 용혈성 요독 증후군(hemolytic uremic syndrome)을 일으키는 대표적인 병원성 세균이다. 그 외에 급성 염증성 탈수

표 6-5. 기후변화에 민감한 예상병원체

	미생물	숙주
바이러스	Rift Valley fever virus	Multiple species of livestock and wildlife
	Nipah virus	Bats, and pigs
	Hendra virus	Bats, and horse
	Hantavirus	Rodents
	Rotavirus	Humans
	Hepatitis E virus	Wild and domestic animals
세균	Salmonella	Poultry and pigs
	Campylobacter	Poultry
	E.coli O157	Cattle and other ruminants
	Anaerobic sporeforming bacteria	Birds, mammals and live stock
	Yersinia	Birds, rodents and pigs
	Listeria monocytogenes	Livestock
	Leptospirosis	All farm animal species
원생동물	Toxoplasma gondii	Cats, pigs, sheep
	Cyptosporidium and Giardia	Cattle, sheep
기생충	Tapeworm (<i>Cysticercus bovis</i>)	Cattle
	Liver fluke (<i>Fasciola hepatica</i>)	Sheep, cattle

자료: 정명섭(2009). 기후변화와 식품안전관리, Safe Food, 9월호(재인용) 및 FAO(Food and Agriculture Organization Of The United Nations), Climate change: Implications for food safety. by Lee-Ann Jaykus, Marion Woolridge, J. Michael Frank, Marina Miraglia, Abigail McQuatters-Gollop, Cristina Tirado - FAO consultants Renata Clarke and Mary Friel - Food Quality and Standards Service, Nutrition and Consumer Protection Division, FAO. Rome. (http://www.fao.org/ag/agn/agns/files/HLC1_Climate_Change_and_Food_Safety.pdf), 2008(원자료)

초성다발성신경병증(guillain-barre syndrome)을 일으키는 *Campylobacter spp.*와 뇌수막염(meningitis)을 일으키는 *Listeria monocytogenes* 등이 대표적으로 위험한 세균이다. 식품, 사료, 자연환경에 존재하는 세균들의 생존, 증식, 감염능력은 온도, 강우, 홍수, 습도, 바람 등에 영향을 받는다. 그 예로 온도와 습도가 올라간 후 1주일 동안 rotavirus에 감염된 어린이 수가 증가하였다고 보고되었다.

(3) 곰팡이독소 오염

곰팡이독소는 주로 옥수수, 밀, 보리, 귀리, 콩, 쌀과 같은 곡류와 땅콩, 무화과 열매, 목화씨, 사과 등 다양한 농산물에서 검출될 수 있다. 온도, 습도, 강우량, 해충, 가뭄, 토양 등이 곰팡이 독소 생성에 중요한 요인이다. 곰팡이독소는 발암(carcinogenic), 기형 발생, 면역억제(immunosuppressive), 신경독(neurotoxic) 등을 유발하는 물질이다(표 6-6).

표 6-6. 대표적인 곰팡이 종류와 독소

곰팡이 종류	생산되는 곰팡이 독소
<i>Aspergillus parasiticus</i>	Aflatoxin B ₁ , B ₂ , G ₁ , G ₂
<i>Aspergillus flavus</i>	Aflatoxin B ₁ , B ₂
<i>Fusarium sporotrichioides</i>	T-2 toxin
<i>Fusarium graminearum</i>	Deoxynivalenol, Zearalenone
<i>Fusarium moniliforme</i>	Fumonisin B ₁
<i>Penicillium verrucosum</i>	Ochratoxin A
<i>Aspergillus ochraceus</i>	Ochratoxin A

(4) 유해 해조류 증가

온난화, CO₂ 배출 증가, 폭우 및 홍수가 발생되면 해수면 및 표면 온도 증가하고, 해수 표면 영양소가 변화하며 물 단층화 가속 및 염도 감소 및 산성화 현상이 나타날 수 있다. 이러한 환경적 변화에 의하여 *Prorocentrum spp.*, *Dinophysis spp.*, *Noctiluca spp.*, *Ceratiumfurca* 등의 유해 해조류가 발생 증가하게 된다. 유해 해조류는 호흡 및 소화 장애를, 기억상실, 발작, 기능장애 및 피부염증을 유발해 어류, 조류, 사람 등에 치명적이다.

또한 일반적으로 해독제가 없다. 해조류 독소는 무미, 무취이며 내열성 및 내산성의 특징이 있다. 강수량이 많아져 홍수가 나면 해수면이 높아지고, 동물 분뇨나 비료,

토양 등으로부터 질소(N)와 인(P)이 유출되어 바닷물의 영양성분이 증가된다. 또한 식물성 플랑크톤(phytoplankton) 성장이 급증하는데 생물학적으로 성장에 규소(Si)를 필요로 하는 규조(diatom)보다는 쌍편모조류 (dinoflagellates)가 주류를 이룬다.

표 6-7. 대표적인 유해해조류 독성 및 종류

구 분	Functional Group	종
설사성 패독 (Diarrhetic shellfish poisoning, DSP)	쌍편모조류 (Dinoflagellates)	Prorocentrum spp. Dinophysis spp. Protoperidinium spp.
마비성 패독 (Paralytic shellfish poisoning, PSP)	와편모충 (Dinoflagellate)	Alexandrium spp.
신경성 패독 (Neurotoxic shellfish poisoning, NSP)	와편모충 (Dinoflagellate)	Gymnodinium spp.
기억상실성 패독 (Amnesic shellfish poisoning, ASP)	규조류 (Diatoms)	Pseudonitzschial spp.
시구아테라 물고기 중독 (Ciguatera fish poisoning)	쌍편모조류 Dinoflagellates	Gambierdiscus spp.

(5) 잔류농약

기후변화는 해충 피해, 해충 번식률, 해충 치사율, 작물의 해충 내성 등에 영향을 미친다. 기후변화에 따라 농약의 사용량과 사용빈도는 증가되고 있으며, 고온현상 때문에 농약의 분해는 더욱 빨라지고 있다.

고온현상과 강우량 증가는 옥수수, 면화, 감자, 대두, 밀과 같은 작물을 생산·재배할 경우 농약의 사용을 증대시킨다. 이러한 현상은 2004년도 브라질에 폭우가 내린 후 대두에 곰팡이 성장을 억제하기 위해 fungicides의 사용이 증가된 것을 보면 알 수 있다.

(6) 동물용의약품 잔류

기후변화는 인수공통질병이나 동물 질병의 발생을 변화시키고 또한 동물용의약품 사용을 증가시킬 것이다. 양식 어류의 신종 질병 발생도 동물용의약품의 사용을 증가시켜 궁극적으로는 식품 중 잔류동물용의약품 수준이 증가될 것이다. Blue Tongue disease, Rift valley fever, 진드기매개 질병(tick-borne disease) 등이 기후변화에 따라 영향을 받는 질병이다. 또한 항생제 처리가 필요한 소 유방염과 같은 세균성 질환의 증가도 식품 중 잔류약품의 증가를 초래할 것이다.

(7) 환경 오염

홍수와 가뭄이 반복되는 곳에서는 농약, 화학비료, 유기물질, 중금속, 병원성세균

등이 토양뿐만 아니라 수자원을 오염시키게 된다. 2002년 Central Europe에서 홍수로 인해 PCBs와 dioxins이 토양에 오염되었고, 목초를 먹고 생산된 소의 우유에서 Dioxins 등이 검출된 바 있다. 또, 2005년 Hurricane Katrina에 의해 기름이 유출되었을 때 물에서는 6가크롬, 망간, 니켈, 구리, 아연 등의 중금속과, 톨루엔, 페놀, 2,4-D (제초제) 등의 화학물질이 검출된 보고가 있다. 해수 온도가 올라가면 수은의 메틸화가 촉진되어 어류의 수은(Hg) 섭취가 증가해 인체에도 유해할 수 있다. 일반적으로 해수 온도가 1℃ 증가할 때마다 3~5% 정도 메틸화가 증가된다. 방글라데시의 monsoon에 의한 홍수로 국토의 2/3가 침수되고 농사철에는 가뭄이 반복되어 토양에 비소(As)가 오염돼 이 지역에서 생산되는 쌀은 비소의 위험성이 상존하고 있는 사례가 있다. 또한 기후변화에 따른 폭우, 장마 등으로 인하여 농장분변의 지하수 유입 등으로 인한 수질오염으로 침출수가 향후 위협요인으로 작용할 가능성이 높아짐에 따라 지하수와 먹는 물(수돗물 포함)에 대한 위생 및 수질관리를 강화해야 할 것이다.

마. 기후변화와 소비자 인식

이처럼 날로 심각해지고 있는 기후변화에 대한 소비자들의 인식 수준은 다소 높다고 할 수 있으나, 이와 관련하여 기후변화의 속도를 감소시키기 위한 노력이나 식중독을 예방하기 위한 행동수칙을 실천하는 정도는 상당히 부족한 것으로 조사되었다. 또한 식품산업 분야별 원료소비실태조사⁷⁰에 따르면, 국내산 농·축산물의 안전성에 대부분(약 89%)의 응답자들이 안전하다고 응답한 반면, 수입산 농축수산물에 안전하다는 응답은 52.1% 정도로 나타나 국내산 농·축산물에 대한 안전성이 높은 것으로 인지하고 있음을 알 수 있다. 반면, 안전성과 관련하여 품질인증 마크와 원산지 표시가 농축수산물 구매 시 중요하게 고려되는 요인으로 나타나 이에 대한 관심이 필요하다고 할 수 있다. 즉, 기후변화와 식품안전에 대한 일반국민들의 인지와 이해 수준은 높았으나, 이에 대응하기 위해 필요한 대응 항목들의 중요성에 대한 확신과 실천행동 수준은 낮은 것으로 나타났다. 조사에 따르면 일반국민들의 69.4%는 기후변화에 대한 정보를 TV나 라디오, 신문 등의 언론보도로 얻고 있고, 21.2%는 인터넷을 통해 정보를 얻는 것으로 나타나 기후변화에 따른 식품안전에 대한 국가차원의 홍보가 필요하다고 인지하고 있는 것으로 나타났다. 이와 관련하여 대부분의 소비자들은 기후변화에 대응하기 위한 식품안전정책의 개선이 필요한 것으로 인지하고 있는 것으로 조사되었다. 즉, 기후변화와 관련하여 식품안전을 제고하기 위해 가장 필요한 것은 기후변화에 대응하기 위한 정책 강화라고 인지하고 있음을 알 수 있다.

⁷⁰ 한국농수산물유통공사. 2011, 식품산업 분야별 원료소비 실태조사

2. 식품분야 기후변화 영향 모델 개발

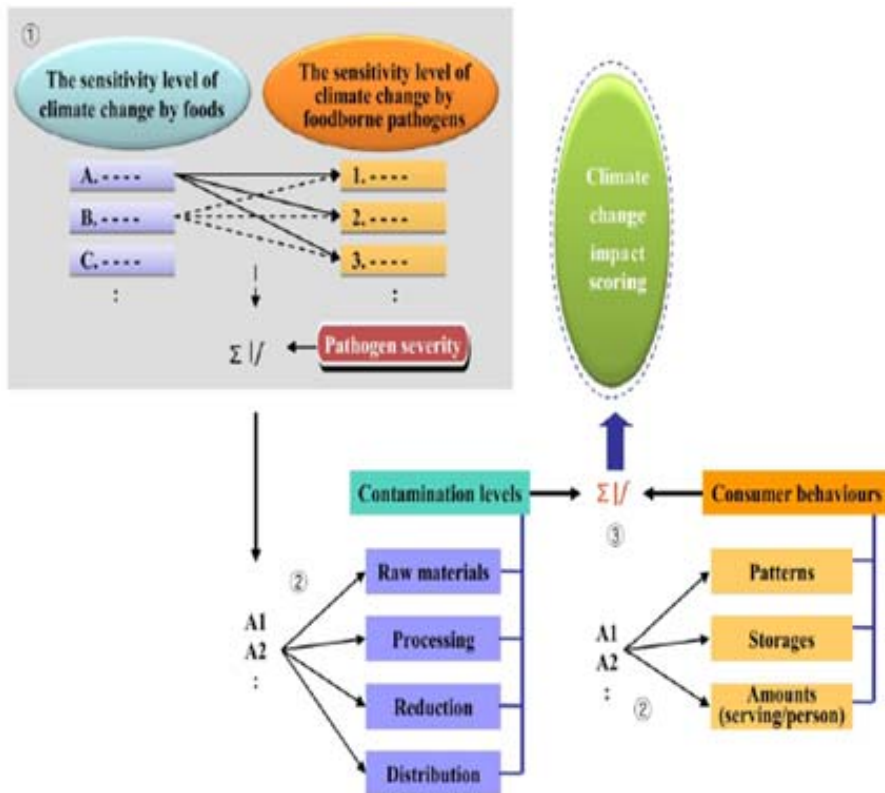
가. 관련 모델 현황

(1) MRA 모델

MRA(Microbial Risk Assessment: 미생물 위해 평가)는 기후변화에 민감한 미생물학적 위해요소에 대한 최신의 식품안전관리기법이다. 식품안전상 영향을 쉽게 받을 것으로 예상되는 식중독 세균을 결정하는데 활용할 수 있는 MRA모형을 개발하였다.⁷¹

- Risk Ranger모형을 기초로 목적에 맞게 변형하여 개발하였다.

그림 6-6. 식중독 세균을 결정하는데 활용 가능한 MRA 모델



자료: Ross, T. (2002)

QMRA 모델은 정량적 미생물 위해평가(QMRA)모델은 기후변화가 수질, 식품안전에 미치는 영향을 정량적으로 추정하는데 사용할 수 있다. 수온과 생굴 및 농업용

⁷¹ 박경진. 2013, 미생물학적 식품안전을 위한 기후변화 영향 식품 및 식중독 세균 우선순위 결정

수의 장염비브리오(*V. parahaemolyticus*) 사이에는 정적 상관관계가 QMRA로 평가된 바가 있다.⁷²

(2) APSIM 모델

밀의 작물수확량과 관련하여 다양한 기후상황 하에 잎마름병의 원인을 탐구하고 R모델, APSIM모델을 통해 생산성을 분석하였다. 연구 결과 동적 모델이 밀 재배의 모의실험에 더 효과적이었다.⁷³ 통계적 모델 동적 모델 2가지로 나누어 진행하였다. 통계적 모델과 동적 모델 둘 다 잘 수행되었지만 동적 모델 APSIM의 예상 결과가 통계적 모델보다 더 잘 묘사되었다.

(3) 통계적 모델

기후와 밀 잎마름병의 지역적 연관성을 위한 통계적 모델(다중선형회귀모형)이 개발된 바가 있다. *Alternaria*질병과 기온과 강수의 상관관계와 *Drechslera*질병과 기온과의 상관관계가 연구되었는데, 강수는 *Drechslera*질병과 유의미한 상관관계가 나타나지 않았다($p>0.05$). 기후 변화가 밀 질병에 미치는 영향은 *Alternaria*잎마름병에 대해서는 기후변화(특히 높은 기온)로부터 직접적인 영향을 받는다는 사실이 명확하였다.

체서피크만 지표수 온도는 지난 30년간 10년마다 0.3 - 0.4°C씩 상승해왔다. 체서피크만의 환경변화와 비브리오 패혈증의 관계를 연구하기 위해 과거 데이터와 비브리오 패혈 등의 통계학적 모델을 사용하였다. 그러나 불충분한 데이터세트와 기후변화로 인해 체서피크만의 비브리오 패혈증에 영향을 정확히 밝혀낼 수 없었다.⁷⁴

(4) CERES 재배모델

CERES 재배 모델과 IPCC SRES A₂, B₂ 시나리오를 사용하여 기후변화로 인한 중국의 식량안보에 미치는 영향을 연구하였다. 연구 결과 기후변화는 중국의 식량안보에 있어서 긍정적인 영향을 끼칠 것으로 예측됐다. CERES 모델은 작물수확량 예측을 하는데 있어서 타당성을 가졌다. 모의실험을 한 수확량(1981~2000)과 관측된 수

⁷² Ian Young ets. 2014. Knowledge synthesis to support risk assessment of climate change impacts on food and water safety: A case study of the effects of water temperature and salinity on *Vibrio parahaemolyticus* in raw oysters and harvest waters

⁷³ Zohra Aslam ets. 2013, A comparison of statistical and dynamic modeling of wheat (*Triticum aestivum* L.) fungal diseases under the climate change

⁷⁴ Erin Urquhart, Benjamin Zaitchik, Darryn Waugh, Seth Guikema, Carlos Del Castillo. 2014, Uncertainty in Model Predictions of *Vibrio vulnificus* Response to Climate Variability and Change: A Chesapeake Bay Case Study.

확량이 거의 일치하였다.⁷⁵

Fezzi와 Bateman에 의해 개발된 계량경제모델을 사용하여 UK 농장의 매상 총 이익을 산출한 결과, 기후변화는 농업 생산성에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 가뭄, 고온에 취약한 남부지방은 손실이 예상되었으나 전반적으로 UK의 기후변화는 긍정적인 영향을 미칠 것으로 예상되었다.⁷⁶

기후변화로 인한 붉은 곰팡이 이삭잎마름병의 위험증가에 대해 연구하기 위해 기후 논리학의 기후를 기반으로 한 회귀모델을 개발하였다. 이 모델은 이삭잎마름병 발생이 개화 이후의 30일 강수일수와 연관되어 있고 개화 전 높은 온도가 질병발생을 증가시킨다는 것을 말해주었다. 이러한 것을 통해 2020~2050년간 대부분의 중국지역에서 밀 개화 시기는 앞당겨질 것이고 이삭잎마름병은 증가할 것이라고 전망했다.⁷⁷

(5) 기후변화 적응 통합모델

WP9는 기후변화에 대한 복합작업이다. 유럽지역의 기후 시나리오를 제공하고 전 세계적 기후변화와 관련한 위험 평가에 기여할 것이다. 향후 WP9를 WP8에 적용하여 균의 성장과 곰팡이 독소 생산도 통합할 것이다.⁷⁸

“기후변화 적응 통합모델 구축”은 예측의 불확실성과 기후변화 적응정책 연계⁷⁹를 고려한 통합영향평가모델 체계 개발을 목적으로 하고 있다. 이를 위해 다수의 기후모델 결과를 이용하여 우리나라의 부문별 기후변화 영향을 예측하고, 대응 및 적응정책의 효과를 고려하기 위해 통합영향평가체계 모델 개발을 위한 추진체계 및 해외 연구기관에서 구동 중인 부문별 영향평가 및 분야 간 연계 영향평가모델의 선행연구 결과를 바탕으로 기후변화 영향평가 통합모델의 체계 개발에 필요한 기초정보를 수집하였다. 수집된 기초정보를 바탕으로 선행연구로서 산림생태계 부문과 수질 부문의 통합영향평가 모델을 이용한 기후변화 영향평가와 정책 효율성 평가를 진행하였다. 특히, 기후변화 통합 수질 예측 평가모델을 구축하기 위하여 지역 기후모델인 SNURCM를 통한 A2, B1 시나리오와 식생분포취약성 평가모델인 TAG를 통한 산림 분포 변화 결과를 유역 수질모델 SWAT의 입력 자료로 변환 후 유기적으로 구동

⁷⁵ Liming Ye ets. 2013. Climate change impact on China food security in 2050

⁷⁶ Carlo Fezzi ets, 2014. Valuing Provisioning Ecosystem Services in Agriculture: The Impact of Climate Change on Food Production in the United Kingdom

⁷⁷ Zhang ets. 2014. Climate change increases risk of fusarium ear blight on wheat in central China

⁷⁸ Mieke Uyttendaele ets, 2013. Impact of Climate Change on Food Safety: The Approach Taken in EU FP7 Veg-i-Trade

⁷⁹ 전성우 외. 2010. 기후변화 적응정책 평가 및 통합모델 개발

하여 통합영향평가체계를 구성하고, 기후변화 적응관련 정책들을 시나리오화하여 통합모델에 적용하였다. 이를 바탕으로 우리나라와 기후, 지형 등 유사한 환경적 요건을 가지고 있는 일본 환경성의 전략프로젝트 4(S4)에 이용된 통합평가모델 체계를 바탕으로 기후변화 영향의 정량적 평가가 가능한 간이통합영향평가모델 체계 개발 방향, 추진체계 및 전략과 연구 방법을 제시하였다.

우리나라의 기후변화 영향 평가는 첫 번째 수준, 즉 일관된 자료를 바탕으로 한 분야별 영향 평가 및 이에 따른 결과의 통합도 이루어지지 않은 상태로 부문별 상호작용을 고려하는 마지막 단계의 통합보다는, 일관된 자료를 이용하고 일관된 체계에 의한 부문간 연계 영향평가를 추진해야 할 것이다. 이에 향후 연구에서는 입력정보의 불확실성 평가 및 신뢰도 제고 방안연구를 우선적으로 추진하고, 부문별 영향평가와 영향평가 결과를 중심으로 모델 통합 및 적용을 위한 연계 방안이 추진되어야 한다.

기후변화는 환경에 영향을 끼칠 뿐만 아니라, 기존 화석연료중심에서 저탄소 시스템으로 전환하는 등 경제기술문제로 확대되고 있다. 이러한 상황에서 산업계의 기후변화에 대한 대응 노력이 필요하여 ‘산업계 기후변화 경쟁력지수’모델을 개발하였다. 이 모델은 기후변화로 인한 기업의 경쟁력 수준을 파악하는데 도움이 될 것이고, 이 모델이 지속적으로 발전하려면 기업의 적극적인 정보공개와 참여, 정책의사도구로 활용 될 수 있도록 법제화하는 것이 필요할 것이다.⁸⁰

(6) 장염 발생 예측모델⁸⁵⁾

국민건강보험공단의 의료기관 방문자료를 바탕으로 장염발생 추이를 분석하여 기후변화에 따라 장염 발생을 예측하는 모형을 개발하였다.

신호성 등(2009)⁸¹은 2004~2008년 5년간의 건강보험심사평가원 전산청구자료와 기상청 기후자료(AWS)를 이용하여 온도와 장염 발생과의 관계를 분석하였다, 연구 결과 우리나라 기온이 평균 1°C 증가 함에 따라 우리나라 전체의 장염 발생은 인구 천명당 평균 68.35건(6.84%) 증가할 것으로 예측하였다<그림 6-7, 표 6-8>.

⁸⁰ 최광립. 2011. 산업계 기후변화 경쟁력지수 개발 및 적용 연구

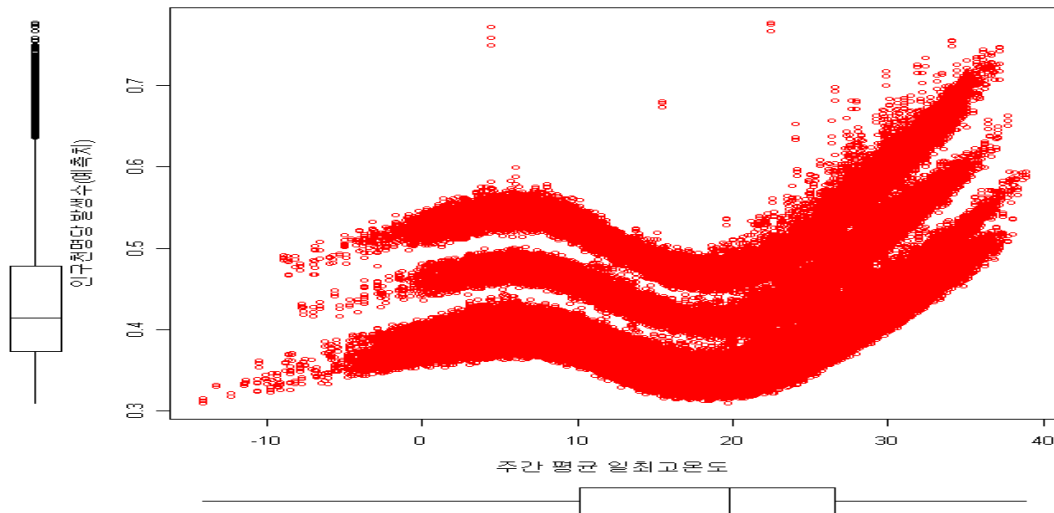
⁸¹ 신호성 등. 2009. 기후변화에 따른 식품안전 분야의 사회·경제적 손실비용 평가, 식품의약품안전평가원

표 6-8. 장염 발생 예측 모형: Hierarchical Model(2004~2008)

변수		계수값	Std. Error	p-value
온도		0.003808	0.000425	0.000000
주간 평균 강수량		0.001481	0.000438	0.000719
(기온)lag0		0.000621	0.001157	0.591548
(기온)lag1		-0.000033	0.001057	0.975242
(기온)lag2		-0.000010	0.000208	0.963279
계절성 변수	sin(주)	0.023670	0.005688	0.000032
	cos(주)	0.012970	0.005570	0.019869
연도	2005년	0.024960	0.013470	0.063896
	2006년	0.084960	0.013240	0.000000
	2007년	0.219600	0.012830	0.000000
	2008년	0.361100	0.012450	0.000000

주: 종속변수 시·군·구별 주간 장염환자 발생건수
 자료: 신호성 등(2009). 기후변화에 따른 식품안전 분야의 사회·경제적 손실비용 평가, 식품의약품안전평가원.

그림 6-7. 주간 평균 최고기온과 장염과의 관계



	온도(°C)	CI(95%) 하한(°C)	CI(95%) 상한(°C)
변곡점1	5.701	5.550	5.852
변곡점2	20.700	20.630	20.780

자료: 신호성 등(2009). 기후변화에 따른 식품안전 분야의 사회·경제적 손실비용 평가, 식품의약품안전평가원.

기상청 AWS자료와 식중독 감시자료를 활용한 식중독 예측모형은 크게 식중독 지

수와 발생 예측 모형으로 구분될 수 있다. 16개 광역시의 기온, 상대습도에 따른 주(week)단위 식중독 발생 건수 및 환자 수의 변화를 분석한 결과 식중독 환자의 수는 주간 평균기온과 양의 상관관계를 나타내었다(신호성 등, 2009)⁸² 5년간 식중독 발생 자료를 기초로 기후변화의 시간지연 효과와 식중독 발생의 계절성을 고려할 경우 식중독 발생률이 증가하였는데 발생건수는 기온 1°C 상승 시 5.27~5.99%, 기온 2°C 상승 시 10.83~12.34%, 기온 3°C 상승 시 16.67~19.07%, 기온 4°C 상승 시 22.83~26.21% 증가할 것으로 예측하였다. 환자 수의 경우 기온 1°C 상승 시 6.18~7.01%, 기온 2°C 상승 시 12.75~14.51%, 기온 3°C 상승 시 19.92~22.54%, 기온 4°C 상승 시 27.13~31.13% 증가할 것으로 보고하였다(표 6-9).

표 6-9. 식중독 발생 예측 결과

Classification	Patients (IRR)		Cases (IRR)	
	Poisson 1	Poisson 2	Poisson 1	Poisson 2
기온				
1°C increase	1.0701	1.0618	1.0599	1.0527
2°C increase	1.1451	1.1275	1.1234	1.1083
3°C increase	1.2254	1.1972	1.1907	1.1667
4°C increase	1.3113	1.2713	1.2621	1.2283
[종속변수]				
temperature	○	○	○	○
temperature time lag	×	○	×	○
humidity	○	○	○	○
humidity time lag	×	○	×	○
seasonality	×	○	×	○
year	○	○	○	○

주: 1) Poisson 1: Random effect Poisson model

2) Poisson 2: distributed lag model with seasonality

자료: 신호성 등(2009). 기후변화에 따른 식품안전 분야의 사회·경제적 손실비용 평가, 식품의약품안전평가원.

(7) 식중독지수에 근거한 식중독 발생 예측모델⁸³

식중독의 발생 예측과 관련한 기존의 연구를 분류하면 식중독 감시자료에 기반한 집단 식중독 발생 예측과 건강보험 자료를 활용한 자료로 구분된다. 식중독 감시자

⁸² 신호성 등. 2009. 기후변화에 따른 식품안전 분야의 사회·경제적 손실비용 평가, 식품의약품안전평가원

⁸³ 주용성 외. 2012. 국내 기후 권역별 식중독발생 예측모델 개발, 식품의약품안전처

료의 경우 식중독보고관리시스템을 통하여 이루어지고 있는데 각 시·군·구 보건소를 통하여 신고, 수집된 자료를 관리하고 있다. 감시자료의 경우 식중독 역학조사가 이루어진 것으로 명백히 식중독인 자료인데 반해, 신고 및 감시 기능이 제대로 작동하지 못할 경우 식중독 발생이 미보고될 가능성이 있다. 건강보험자료의 경우 식중독 관련 질환으로 의료기관을 방문한 적이 있는 환자를 근간으로 하는 것인데 역학조사에 의해 확인된 것이 아니어서 발생수준은 감시자료보다 훨씬 실제에 가까울 수 있으나, 명백히 식중독에 의한 방문인지 확인이 불가능하여 식중독 발생으로 인한 환자 수준이 과대평가 될 가능성이 있다.

식중독 지수는 집단 식중독 감시자료를 활용하여 식중독 발생 가능성을 예측하는 것으로 식중독 발생건수와 기상조건과의 연관성을 이용하여 식중독지수를 개발한다. 식중독지수는 0과 100사이의 숫자이고, 높을수록 식중독이 발생할 가능성이 높은 것을 의미한다. 식중독 발생예보는 지수값에 따라 4단계로 구분하는데 식중독 지수가 0이상~35미만일 경우 관심단계, 35이상~70미만은 주의단계, 70이상~95미만의 경우 경고단계 그리고 95이상~100이하는 위험 단계로 구분한다. 가장 최근에 개발된 식중독 지수의 경우 식중독 원인균 별로 발생을 예측한 뒤 이를 합산하는 방식을 사용하고 있다. 기존 식중독 지수와 최근 개발된 식중독 지수의 주요 차이점은 다음과 같다(표 6-10).

표 6-10. 식중독지수 비교

구분	기존 식중독 지수	식중독지수 2013
자료	세균증식실험자료	2002~2011년(10년간)
설명변수	최고기온, 습도	기상변수: 최고기온, 최저기온, 평균기온, 강수량, 습도
		2007년 신고기준 개정효과, 20007년 신고 기준 지속효과, 2008년 효과, 여름, 겨울방학 급식, 식중독 예방 홍보효과 권역효과: 권역더미, 권역교호작용 모형개발
모형개발	원인균, 권역별 나눔없이 전체 식중독 발생에 대하여 모형개발	원인균, 권역별로 모형개발
	1건 이상 발생할 확률을 이용하여 지수개발	발생건수예측 모형을 과거 3년간 기상자료에 적용한 후, 퍼센타일을 계산하여 지수개발

자료: 주용성 외(2012). 국내 기후 권역별 식중독발생 예측모델 개발, 식품의약품안전처.

식중독 지수의 경우 기상요소에 따른 식중독발생 예측을 목적으로 하지만 짧은 기

간 동안의 식중독 발생의 전체적 경향에 관심을 두고 있어 기후변화에 따른 일반적인 발생예측에 목적이 있지 않다. 식중독지수2013에 기반하여 2013년 식중독 발생 예측을 원인균별로 추정하면 <표 6-11>과 같은데 전국적으로 200여건의 식중독이 발생할 것으로 예측하였다.

표 6-11. 식중독지수에 의한 2013년 식중독 발생 예측(건수)

	병원성 대장균	황색 포도상구균	장염 비브리오	살모레라	노로 바이러스	기타	합계
1월	0.5	0.8	0.1	0.2	3.9	5.8	11.3
2월	0.6	0.7	0.1	0.2	3.1	5.9	10.6
3월	0.9	0.9	0.2	0.8	4.1	7.1	14
4월	1.4	0.8	0.3	1.2	3.8	8.2	15.6
5월	2	0.6	0.4	1.7	3.2	9.2	17.1
6월	2.7	1	1.3	2.3	2.8	10.4	20.5
7월	2.5	0.9	1	1.3	0.9	9.2	15.7
8월	3.1	1.2	1.8	1.6	0.8	10	18.6
9월	4.3	1.7	4	3.4	2.5	12.3	28.1
10월	2.9	1.5	1.5	2.4	2.9	11	22.2
11월	1.5	1.3	0.5	1.4	3.3	8.7	16.7
12월	0.9	1	0.2	0.8	4.2	7.4	14.5

자료: 주용성 외. (2012) 국내 기후 권역별 식중독발생 예측모델 개발, 식품의약품안전처.

나. 기후변화 영향 식중독 발생 예측 모델 개발

(1) 건강보험심사평가원 청구자료를 활용 예측 모델

(가) 식중독 발생 예측을 위한 통계적 접근법

식중독 예측 모형에서 가장 많이 적용되는 예측기법은 Poisson 분포에 기반한 회귀모형이다. 질병발생을 묘사하는 분포로 Poisson이 가장 적합하기 때문이다. 독립변수는 예측 모형마다 다양한 수준의 변수들이 사용되고 있는데 기상요소로는 최대 기온과 강수량, 습도 등이 주로 사용된다. 기후변화의 영향을 고려할 때 질병발생의 계절성을 반영하는 방법이 사용되는데 시간단위를 주기성을 표현하는 조화함수로 변형하여 분석에 사용한다. 본 연구는 기후변화와 관련된 식중독 발생의 계절성을 반영하기 위하여 연간 주기성(annual periodicity)을 가지고 사인함수와 코사인 함수로 표시되는 최대 6주기 조화함수인 Fourier Term을 회귀식에 반영하였다. 시간단위를 조화함수로 변형하는 방법은 아래 식과 같다.

$$f_s(t) = \cos(T) + \sin(T) \quad (6-1)$$

$$T = 2\pi \frac{(t-1)}{t_F}$$

- t_F 는 한 주기 동안 반영될 계절성의 수를 의미하며 t 는 숫자로 표시된 주 단위 시간을 의미한다. 시간 변수로 연도변수도 분석에 사용되곤 하는데 이는 기후 변화가 식중독 발생에 미치는 장기적인 영향을 차단하기 위함이다.

기상요소의 시간지연 효과(lag effect)도 기후변화의 영향을 분석하는 모형에 자주 사용된다. 이 경우 온도와 같은 노출변수의 시간지연 효과를 반영하기 위하여 일정 기간(예, 4주) 동안 노출변수의 영향을 산출하여야 한다. 노출변수간의 연쇄 상호연관 등의 white noise를 줄이기 위해 스플라인이나 다항 시간지연 효과 모형(polynomial distributed lag model)을 적용할 수 있다(Schwartz, 2000; Braga, 2002; Michelozzi, 2007). 시간지연 효과의 일반적 모형은 다음과 같이 표현 가능하다.

$$\log(E(Y_i)) = \alpha + \sum_k \beta_k X_{ki} + \delta_0 Z_0 + \dots + \delta_q Z_q \quad (6-2)$$

- 여기에서 Z 는 노출변수를 나타내며 시간 q 동안의 지연 효과는 Z_q 로 Z_0 는 현재시점이 되며 Z_1 은 바로 전 시간대의 노출변수의 크기를 나타낸다. 본 연구에서는 식중독으로 인한 질병 발생 건수에 대한 최고기온의 시간지연 효과는 주단위로 계산하고, 4주로 제한하며 각 주 시간 지연 온도변화는 3차원식을 이용한다.

(나) 분석자료

식중독 발생에 영향을 미치는 기상요소로 기온 이외에 강수량이나 습도가 주로 적용된다. 강수량보다는 습도가 더 중요한 변수이나 장래예측값을 추정하기 위해 기후변화 시나리오에 습도가 포함되어 있지 않아 강수량을 사용하였다. 본 연구의 분석기간에 해당하는 2004~2008년 5년간의 시·군·구별 주간 강수량 분포는 다음과 같다.

식중독 발생예측은 230개 시·군·구를 기반으로 하고 발생건수는 시·군·구별 주간 의료기간 방문횟수를 사용하였다. 분석 시·군·구를 230개 사용한 것은 분석모형에 적용된 기상요소가 행정안전부가 전국 시·군·구를 구분하는 단위인 230개를 기준으로 작성되어 있기 때문이다. 발생건수 역시 주간으로 시간구분을 하였는데 동일 주(week)에서 여러번 방문을 하더라도 1건으로 조사되었다. 식중독 발생건수는 입원과 외래를 모두 포함하였는데 입원과 외래에 대한 가중치 없이 모두 1건으로 구분하였다. <표 6-12>에는 식중독 예측 모델에 포함된 질병군이다.

그림 6-8. 주간 시·군·구별 강수량(2004~2008)

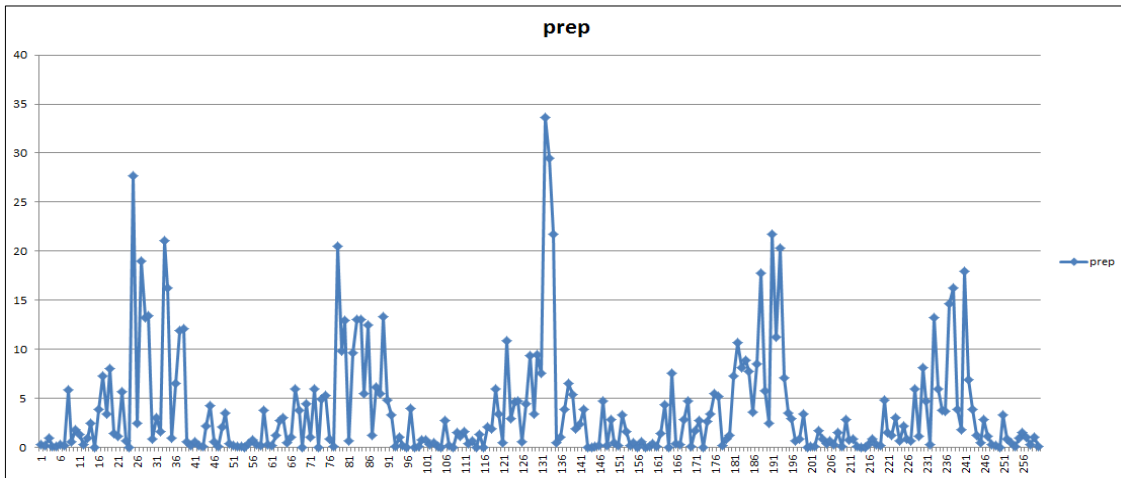


표 6-12. 식중독 예측모형에 포함된 질병군

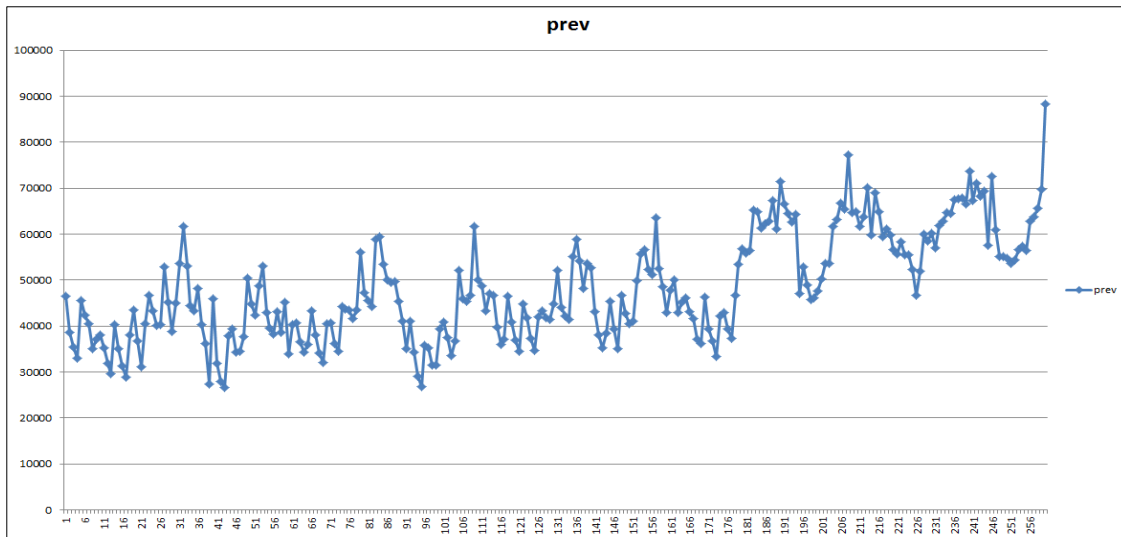
	질병군	식중독 분석 대상 질병군
A02	기타 살모넬라 감염	A02.2, A02.8, A02.9
A03	세균성 이질	A03.0, A03.1, A03.2, A03.3, A03.8, A03.9
A04	기타 세균성 장염	A04.0, A04.1, A04.2, A04.3, A04.4, A04.5, A04.6
A05	기타 식품원인 세균성 중독	A05.0, A05.1, A05.2, A05.3, A05.4, A05.8, A05.9
A06	아메바증	A06.0
A07	기타 원충성 창자 질환	A07.1, A07.2
A08	바이러스 및 기타 특정 장염	A08.0, A08.1, A08.2, A08.3, A08.4, A08.5
A09	감염성으로 추정되는 설사 및 위장염	A09.0, A09.9
K52	기타 비감염성 장염 또는 대장염	K52.1, K52.2, K52.8, K52.9

분석에 사용한 자료는 건강보험심사평가원의 5년간(2004~2008년) 자료로 유병건 수는 5년 동안 총 17백여만 건으로 나타났으며, 2004년 280여만 건을 시작으로 연도 별로 증가하여 2008년도에는 430여만 건이다. 성별 연령별 평균 요양일수는 1.48일 인데 성별로는 큰 차이가 나타나지 않았으나, 연령별로 65세 이상 노인의 요양일수가 가장 길었고, 19~64세 청장년층의 요양일수가 가장 짧았다.

표 6-13. 식중독 발생 예측모형에 사용된 변수

변수		설명
종속변수	식중독발생건수	시·군·구별 주간 의료기관방문건수
독립변수	온도	시·군·구별 주간 평균 일최고온도
	강수량	시·군·구별 주간 평균 강수량
	seasonality	식중독 발생의 계절성 효과
	lag time	최고온도의 시간지연 효과(4주)
	year	연도(2004~2008년)
	agegp	노인과 비노인의 구분

그림 6-9. 시·군·구별 주(week)간 식중독으로 인한 의료기관 방문건수



언급된 분석방법과 분석자료를 바탕으로 결정된 최종 모형은 다음식과 같다.

$$\lambda_{ij} = \alpha + \sum_{k=1}^3 a_{0k} B_k(Temp_{ij}) + rain_{ij} + \sin(x_i) + \cos(x_i) + Lag(Temp) + agegp + year \tag{6-3}$$

- 여기에서 $\sum_{k=1}^3 b_{jk} B_k(Temp_{ij})$ 은 최고기온의 3차원 다항함수 영향을 나타내며 $rain_{ij}$ 는 강수량 변화로 인한 효과, $\sin(x_i) + \cos(x_i)$ 는 장염 발생에 영향을 미치는 계절성의 효과, $Lag(Temp)$ 는 최고기온 변수의 4주간 시간지연 효과, $year$ 는 식중독 발생에 영향을 미치는 연도의 효과, $agegp$ 는 노인과 비노인을 구분하는 더미변수를 나타낸다.

(다) 분석결과

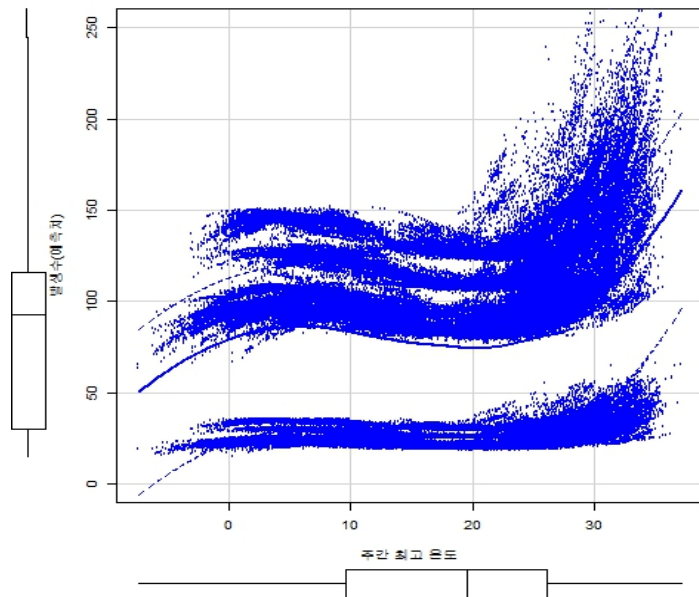
최종 분석모형에 근거한 분석결과는 아래 <표 6-14>와 같다. 강수량, 연도, 비노인 변수를 제외하고 계절성이나 기온의 효과를 직관적으로 판단하기 쉽지 않다. 주간 강수량의 증가는 식중독 발생건수와 음의관계가 성립하는 것으로 나타났다. 이는 겨울철에 노로바이러스에 의해 발생하는 식중독의 영향도 있을 것이고 비가 오는 경우 의료기관방문이 쉽지 않은 것도 작용할 것이다. 그럼에도 불구하고 시·군·구 행정단위별 주간 발생량의 차이가 강수량이 평균 1mm 상승함에 따라 상대위험도가 0.2% 줄어드는 것으로 나타나 강수량의 영향은 거의 없는 것으로 보인다. 연도별 변수 효과는 기준연도를 2004년으로 고정할 경우 2004년에 비해 모두 증가하는 양상을 보였다. 그러나 연도의 변수도 기온이나 비노인 변수들의 영향에 비교하면 보잘 것 없는 것으로 확인되었다. 노인과 비노인을 구분하면 비노인은 노인에 비해 상대위험도가 44% 낮은 것으로 나타났다.

표 6-14. 식중독발생예측 최종모형 분석결과(상대위험도)

구 분	회귀 계수	SE	P-value	통계적 유의성	
	(Intercept)	5.8480	0.0013	< 2e-16	***
최기기온 3차원다항식 4주간(week) 시간지연효과	ns.basisv1.11	-2.0980	0.2884	0.0000	***
	ns.basisv2.11	-8.6830	0.7491	< 2e-16	***
	ns.basisv3.11	11.0500	0.5408	< 2e-16	***
	ns.basisv1.12	18.0700	1.7880	< 2e-16	***
	ns.basisv2.12	32.0800	4.6430	0.0000	***
	ns.basisv3.12	-48.7900	3.3520	< 2e-16	***
	ns.basisv1.13	-38.1800	3.1740	< 2e-16	***
	ns.basisv2.13	-34.4300	8.2400	0.0000	***
	ns.basisv3.13	67.2600	5.9490	< 2e-16	***
	ns.basisv1.14	23.0200	1.6890	< 2e-16	***
	ns.basisv2.14	8.8130	4.3830	0.0444	*
	ns.basisv3.14	-27.5800	3.1640	< 2e-16	***
강수량	prep	-0.0022	0.0001	< 2e-16	***
계절성	sin (week)	0.0043	0.0004	< 2e-16	***
	cos (week)	0.0029	0.0004	0.0000	***
연도	factor(yr)2	0.0292	0.0010	< 2e-16	***
	factor(yr)3	0.1158	0.0010	< 2e-16	***
	factor(yr)4	0.2821	0.0009	< 2e-16	***
	factor(yr)5	0.4289	0.0009	< 2e-16	***
비노인	agegp	-1.4420	0.0009	< 2e-16	***

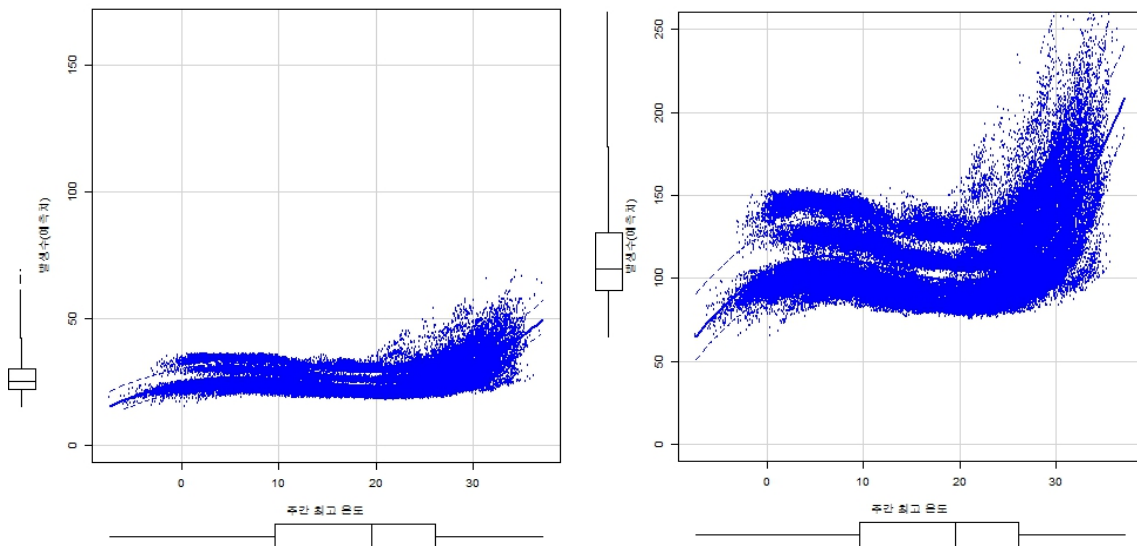
주: 통계적 유의성 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

그림 6-10. 식중독 발생예측 결과와 주간 최고온도와의 상관성



<그림 6-10>은 시·군·구별 주간 식중독발생예측건수를 주간 최고기온과 scatter-plot을 그린 것이다. 발생예측은 크게 2그룹으로 구분되는데 위쪽은 비노인 집단의 식중독 발생건수를 예측한 결과이며 아래 것은 노인집단의 식중독 발생 예측결과를 나타낸 것이다. 이를 구분하여 그리면 <그림 6-11>과 같다.

그림 6-11. 식중독 발생에서 노인과 비노인의 차이



노인집단의 식중독 발생건수는 기온과 상관성을 보이거나 비노인 집단처럼 뚜렷한 상관성은 관찰되지 않는다. 비노인 집단의 경우 변곡점이 2곳에서 나타나는데 아랫

변곡점의 아래부분은 기온과 양의 상관성을 보이거나 첫 번째 변곡점과 두 번째 변곡점 사이에서는 기온과 음의 상관성을 보이는 것으로 나타난다. 두 번째 변곡점 이후에서는 기온과의 양의 상관성이 보다 뚜렷이 관찰된다. 노인의 경우 비노인 집단에서처럼 변곡점도 뚜렷하지 않고 변곡점 사이에서 기온과의 상관성도 명확하지 않지만 상대적으로 두 번째 변곡점 이후 기온과의 양의 상관성이 관찰된다.

표 6-15. 변곡점과 변곡점 전후의 기울기

구 분	변곡점	값	95신뢰구간		기울기
노인	변곡점1	2.034	1.821	2.247	1.35443
	변곡점2	24.41	24.31	24.5	-1.54318
					1.82603
비노인	변곡점1	2.018	1.868	2.168	5.74167
	변곡점2	24.35	24.28	24.41	-6.54456
					7.67001
전체	변곡점1	1.884	1.542	2.226	4.42483
	변곡점2	24.3	24.14	24.45	-5.02642
					5.68157

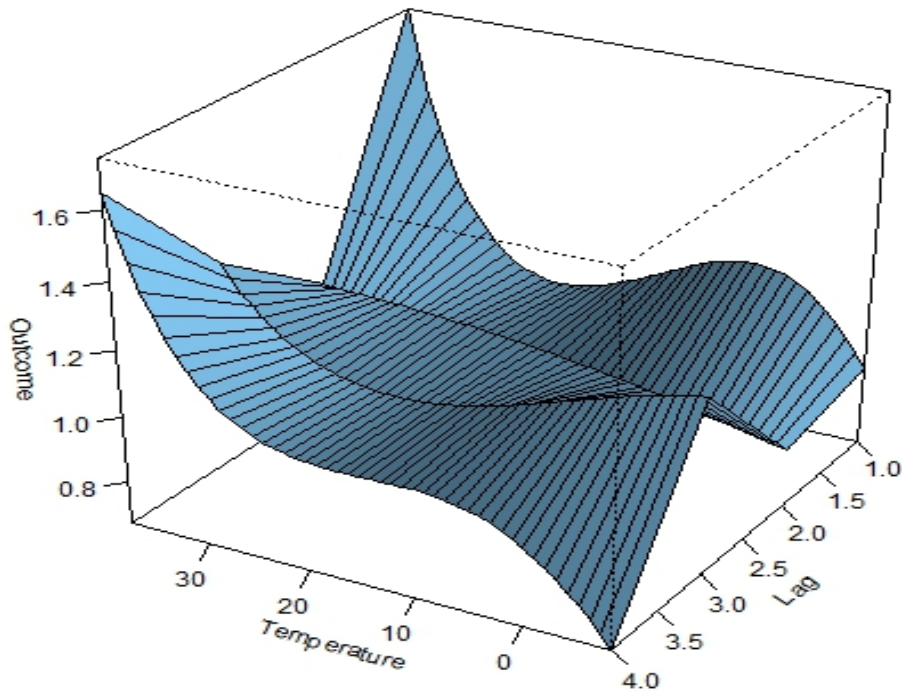
변곡점은 1.9℃와 24.3℃에서 형성되었는데 노인집단과 비노인집단에 약간의 차이가 존재한다(표 6-15). 변곡점 전후의 기울기는 단위기온 상승에 따른 시·군·구 주간 식중독 발생건수를 나타내는데 예를 들면 노인과 비노인을 모두 고려한 모형(전체)에서 24.3℃ 이후에서 기온이 1℃ 상승함에 따라 주간 시·군·구 발생건수도 5.7건 증가하는 경향을 나타낸다. 평균 주간 시·군·구 발생건수가 114건이므로 이는 5.0% 증가를 의미한다. 1.9℃와 24.3℃ 사이에서는 5건 정도 감소하며 최하위 구간에서는 4.4건 증가한다.

비노인 집단은 노인 집단에 비해 기온 상승에 따라 평균 4배 이상 높은 발생 경향이 관찰되었다. 노인집단에서 변곡점 24.4℃ 이후 기온이 1℃ 상승함에 따라 식중독 발생건수가 1.8건 증가하나 비노인 집단은 7.7건 증가하여 4.3배 많은 발생건수 증가속도를 보여준다.

<그림 6-12>는 식중독 발생에서 기온의 영향을 종합적으로 보여주는 그림이다. Z축은 상대위험도를 보여주며 2차원의 한쪽 면은 최고기온의 영향을 다른 쪽은 최고기온의 시간지연 효과를 나타내 준다. 가장 앞쪽에 보이는 단면선은 4주 후의 기온의 영향을 보여주며 제일 위쪽은 곡선은 1주후의 기온의 영향을 보여준다. 시간지연 효과는 1주후 2주까지 줄어드는 양상을 보이며 3주에는 다시 상승하였다가 4주째는

다시 줄어드는 양상을 보인다. 기온의 시간지연 효과를 살펴보면 1주의 시간지연 효과는 식중독 발생이 평균 7.3%(상대위험도 0.073) 증가하며, 2주째는 상대위험도는 -0.063, 3주째 0.081, 4주째 -0.072의 상대위험도를 나타낸다.

그림 6-12. 식중독 발생예측에서 기온의 시간지연 효과



(2) 국민건강보험공단 청구자료를 활용 예측 모델

(가) 분석자료

식품매개질환의 발생예측은 국민건강보험공단의 8년간(2003~2010) 청구자료로 251개 시·군·구의 주별 식중독 발생건수로 전체 분석자료 개수(observation)는 104,416건의 시·군·구별 주간 병원이용건수를 활용하였다. 발생건수 역시 주간으로 시간구분을 하였는데 동일 주(week)에서 여러 번 방문을 하더라도 1건으로 조사되었다. 식품을 매개로 한 환자(식품매개질환) 발생건수는 입원과 외래를 모두 포함하였는데, 입원과 외래에 대한 가중치 없이 모두 1건으로 구분하였다. <표 6-16>에는 식중독으로 간주하여 본 연구에 반영된 질병코드들이 정리되어 있다. 분석 시·군·구를 251개 사용한 것은 분석모형에 적용된 기상요소가 행정안전부가 전국 시·군·구를 구분하는 단위인 251개를 기준으로 작성되어 있기 때문이다.

표 6-16. 식중독 예측모형에 포함된 질병군

구분	질병군(ICD-10)	식중독 분석 대상 질병군
A02	기타 살모넬라 감염	A02.2, A02.8, A02.9
A03	세균성 이질	A03.0, A03.1, A03.2, A03.3, A03.8, A03.9
A04	기타 세균성 장염	A04.0, A04.1, A04.2, A04.3, A04.4, A04.5, A04.6
A05	기타 식품원인 세균성 중독	A05.0, A05.1, A05.2, A05.3, A05.4, A05.8, A05.9
A06	아메바증	A06.0
A07	기타 원충성 창자 질환	A07.1, A07.2
A08	바이러스 및 기타 특정 장염	A08.0, A08.1, A08.2, A08.3, A08.4, A08.5
A09	감염성으로 추정되는 설사 및 위장염	A09.0, A09.9
K52	기타 비감염성 장염 또는 대장염	K52.1, K52.2, K52.8, K52.9

(나) 분석방법

기후변화와 설사병 발생과의 연관성을 분석하기 위하여 본 연구에서는 일반부가모형 (Generalized Additive Model: GAM)을 사용하였으며, 아울러 설사병 발생의 시간지연 효과(time lag effect), 그리고 계절성(seasonality) 효과 등을 고려하였다. 계절성 효과란, 설사병 발생과 직접관련이 없는 계절적 요인을 통제하기 위해 모델에 반영된 것으로서, Stolwijk et al.(1999)와 Hashizume et al.(2007)가 사용한 방법을 본 연구에서도 이용하였다. 또한, 온도변수의 시간지연 효과를 반영하기 위하여 Hashizume et al.(2007), Checkley et al.(2000), Bentham과 Langford(2001), Kovats et al.(2004)가 사용한 방법에 따라 4주 동안의 온도영향을 모델에 반영하였다(Hashizume et al., 2007).

기후변화와 질병발생과의 연관성 분석의 경우 질병발생에 있어서 시간경과에 따른 변이성과 지역적 분포의 차이 문제를 적절히 통제할 필요가 있는데, 특히 노출 인구집단의 크기가 작은 경우 작은 차이가 큰 변이를 가져오기 때문에 주의를 기울여야 한다. 때문에 본 연구에서는 질병 발생의 시·공간적 변이성을 반영하기 위해 준모수적 방법인 스플라인 회귀(spline regression)분석 방법을 사용하였는데, 이는 기존의 Gaussian이나 Poisson 회귀분석 방법에서 보다 발전된 분석법으로 사용되고 있다(McMichael A., 2003).

한편, 기온과 식품관련 질병 발생의 회귀방정식에서 추정된 예측값과의 관계를 도식화 하면 특정 온도를 전후하여 분포가 바뀌어 “V” 또는 “N” 형태의 분포를 보인다. 본 연구에서는 이러한 점을 고려하여 온도의 계수값이 음에서 양으로 바뀌는 변곡점(change point) 혹은 역치(threshold) 이후의 영향을 중심으로 온도변화에 따른 설사병 발생의 영향을 살펴보았다(Muggeo, 2003; 김동진·신호성 2009 재인용).

일반적으로 식중독 예측모형에서 가장 많이 적용되는 예측기법은 Poisson 분포에 기반을 둔 회귀모형이다. 질병발생을 묘사하는 분포로 Poisson이 가장 잘 맞기 때문이다. 독립변수는 예측 모형마다 다양한 수준의 변수들이 사용되고 있는데 기상요소로는 최고기온과 강수량, 습도 등이 주로 사용된다. 기후변화의 영향을 고려할 때 질병발생의 계절성을 반영하는 방법이 사용되는데 시간단위를 주기성을 표현하는 조화함수로 변형하여 분석에 사용한다. 본 연구는 기후변화와 관련된 식중독 발생의 계절성을 반영하기 위하여 연간 주기성(Annual Periodicity)을 가지고 사인함수와 코사인 함수로 표시되는 최대 6주기 조화함수인 Fourier Term을 회귀식에 반영하였다. 시간단위를 조화함수로 변형하는 방법은 아래식과 같다⁸⁴.

$$f_s(t) = \cos(T) + \sin(T) \quad (6-4)$$

$$T = 2\pi \frac{(t-1)}{t_F}$$

- t_F 는 한 주기 동안 반영될 계절성의 수를 의미하며 t 는 숫자로 표시된 주 단위 시간을 의미한다. 시간 변수로 연도변수도 분석에 사용되곤 하는데, 이는 기후 변화가 식중독 발생에 미치는 장기적인 영향을 차단하기 위함이다.

기상요소의 시간지연효과(lag effect)도 기후변화의 영향을 분석하는 모형에 자주 사용된다. 이 경우 온도와 같은 노출변수의 시간지연 효과를 반영하기 위하여 일정 기간(예, 4주) 동안 노출변수의 영향을 산출하여야 한다. 노출변수간의 연쇄 상호연관 등의 white noise를 줄이기 위해 스플라인이나 다항 시간지연효과 모형(polynomial distributed lag model)을 적용할 수 있다(Schwartz, 2000; Braga, 2002; Michelozzi, 2007). 시간지연 효과의 일반적 모형은 다음과 같이 표현 가능하다.

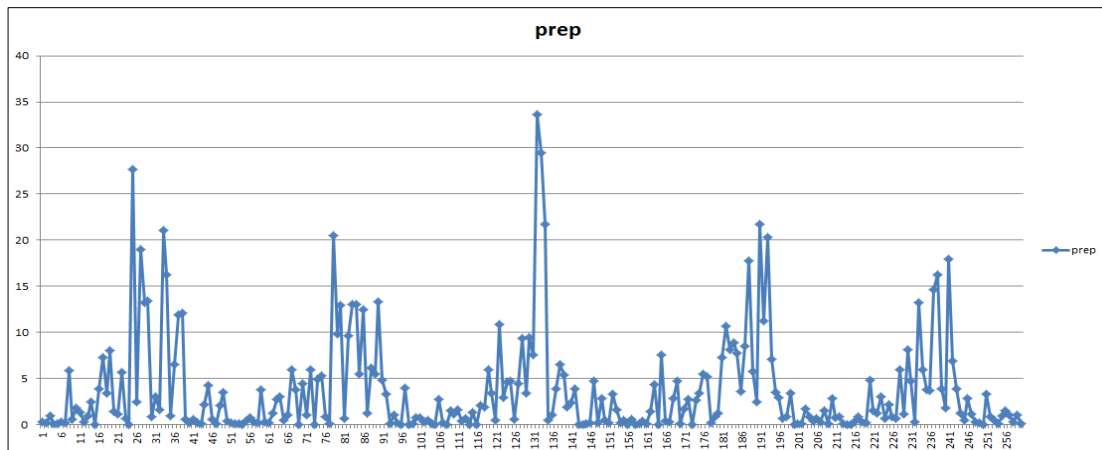
$$\log(E(Y_i)) = \alpha + \sum_k \beta_k X_{ki} + \delta_0 Z_0 + \dots + \delta_q Z_q \quad (6-5)$$

- 여기에서 Z 는 노출변수를 나타내며 시간 q 동안의 지연효과는 Z_q 로 Z_0 는 현재시점이 되며 Z_1 은 바로 전 시간대의 노출변수의 크기를 나타낸다. 본 연구에서는 식중독으로 인한 질병 발생 건수에 대한 최고기온의 시간지연 효과는 주단위로 계산하고, 4주로 제한하며 각 주 시간 지연 온도변화는 3차원식을 이용한다.

⁸⁴ 신호성 등, 2009; 신호성 등, 2011 재인용

식중독 발생에 영향을 미치는 기상요소로 기온 이외에 강수량이나 습도가 주로 적용된다. 강수량보다는 습도가 더 중요한 변수이나 장래 예측값을 추정하기 위해 기후변화 시나리오에 습도가 포함되어 있지 않아 강수량을 사용하였다. 본 연구의 분석기간에 해당하는 2004-2008년 5년간의 시·군·구별 주간 강수량 분포는 다음과 같다.

그림 6-13. 주간 시·군·구별 강수량(2004~2008)



독립변수는 251개 시·군·구의 8년간 주별 식중독 발생건수, 종속변수는 RCP4 5 기후시나리오에 따른 주별 최고기온, 주간강수량, 연도별 특이한 분포를 반영하기 위한 연도 변수, 연도별 해당 주간을 나타내는 주(week) 변수로 선정하였다.

표 6-17. 식품매개질환 발생 예측모형에 사용된 변수

변 수		설 명
종속변수	식품매개질환 발생건수	시·군·구별 주간 의료기관방문건수
독립변수	온도	시·군·구별 주간 평균 일최고온도
	강수량	시·군·구별 주간 평균 강수량
	seasonality	식품매개질환 발생의 계절성 효과
	lag time	최고온도의 시간지연 효과(4주)
	year	연도(2003~2010년)

시·군·구별 주간 식중독 발생건수가 Poisson분포를 따른다고 가정하며, 최고기온의 Basic spline smoothing과 4주간의 3차 다항분포(polynomial distribution)를 적용하였다. 주간 총 강수량은 특별한 변수변환이나 지연효과를 고려하지 않고 변수 자체의 영향을 살펴보고 시간은 sine과 cosine으로 이루어지는 최대 6주기 조화함수인 Fourier Term을 사용하였다. 이를 식으로 표시하면 다음과 같다.

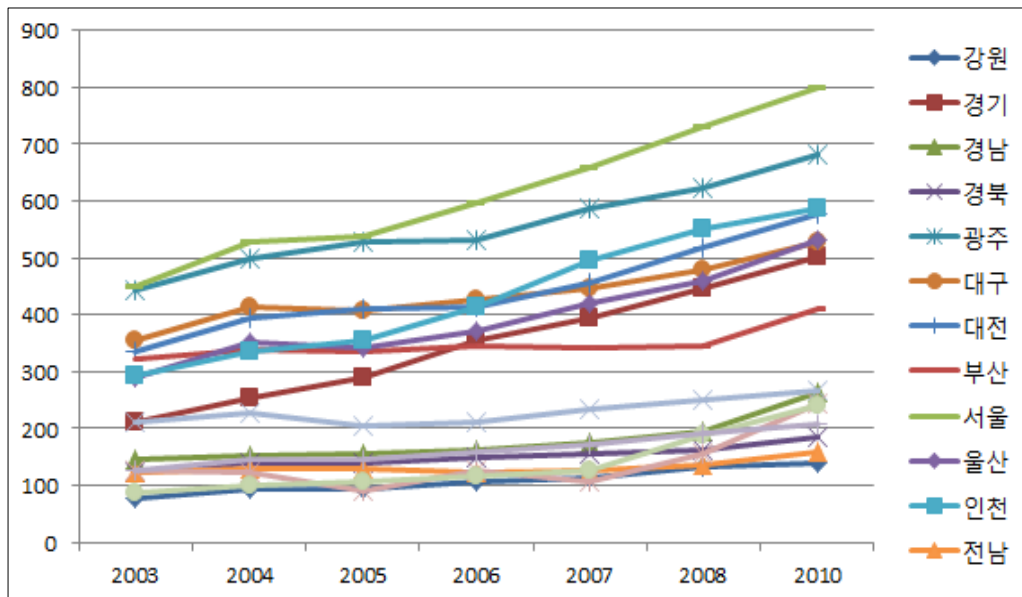
$$g(\mu_{ij}) = \alpha + \sum_{l=1}^3 \sum_{k=1}^4 a_{lk} \beta_{lk} (Temp_{ij}) + \beta_9 rain_{ij} + \beta_{10} \sin(x_{ij}) + \beta_{11} \cos(x_{ij}) + \beta_{12} year_{ij} \tag{6-6}$$

- 위 식은 평균 주간 시·군·구별 식중독 발생률(μ_{ij})는 B-spline과 3차다항 4주간 시간지연효과($\sum_{l=1}^3 \sum_{k=1}^4 a_{lk} \beta_{lk} (Temp_{ij})$)와 강수량($rain_{ij}$) 및 계절성($\beta_{10} \sin(x_{ij}) + \beta_{11} \cos(x_{ij})$)과 장기 시간효과($year_{ij}$)의 선형관계를 표시한다. $g()$ 는 연계함수(link function)로 로그분포를 의미한다.

(다) 분석결과

분석자료는 국민건강보험공단의 8년간(2003년부터 2010년까지) 자료로 식중독으로 인한 외래의료기관 방문건수(주간)가 2003년 전국 평균 232건에서 연도별 증가하여 2010년에는 전국평균 395건으로 나타났다.

그림 6-14. 시·도별 연도별 주간평균 식중독 외래이용 발생건수



시도별 외래의료기관 방문건수를 살펴보면 인구밀도 가장 높은 서울이 많았고, 광주가 특히 상위권을 차지하고 있는 것이 특징적이다. 시·군·구간의 SD값의 편차가 큰 이유는 계절성과 함께 주간 방문건수이기 때문에 높은 SD값을 보일 수밖에 없으며, 특히 강원, 경기, 경남, 경북, 전남, 제주 지역의 편차가 눈에 띈다.

표 6-18. 식중독으로 인한 외래 의료기관 방문건수(주간)

	2003		2004		2005		2006		2007		2008		2010	
	평균	SD	평균	SD	평균	SD	평균	SD	평균	SD	평균	SD	평균	SD
강원	78	82	94	100	94	104	105	117	114	128	133	143	140	162
경기	211	200	254	238	289	239	354	267	394	311	448	345	501	390
경남	144	184	152	201	155	215	162	233	175	250	194	265	263	325
경북	121	133	140	165	141	163	149	175	155	190	161	194	185	226
광주	443	212	498	259	529	254	532	257	586	306	622	350	682	393
대구	356	215	413	264	406	273	428	278	446	297	479	320	529	339
대전	336	175	395	227	410	219	413	210	457	221	517	253	578	274
부산	321	197	339	207	334	205	346	209	341	206	344	213	409	249
서울	451	185	527	219	538	211	596	228	658	272	732	277	799	326
울산	291	128	350	146	340	133	372	143	422	153	460	158	532	192
인천	293	221	337	258	356	271	414	320	497	393	552	424	588	454
전남	122	131	129	139	129	142	124	131	128	140	136	151	160	181
전북	212	225	229	246	206	214	212	221	233	250	250	265	266	286
제주	125	152	124	141	91	115	125	181	106	207	157	265	244	383
충남	86	75	101	93	107	96	116	97	125	115	188	174	241	201
충북	125	138	146	166	146	172	159	180	171	191	191	211	207	230
평균	232	166	264	192	267	189	288	203	313	227	348	251	395	288

<그림 6-15>의 연도별 식중독으로 인한 연간외래이용건수를 보면 동해안보다는 서해안이 많았고, 남해안이 더 많은 것을 볼 수 있다. 또한 연도별로 외래이용건수가 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다.

그림 6-15. 연도별 식중독으로 인한 연간외래이용방문건수

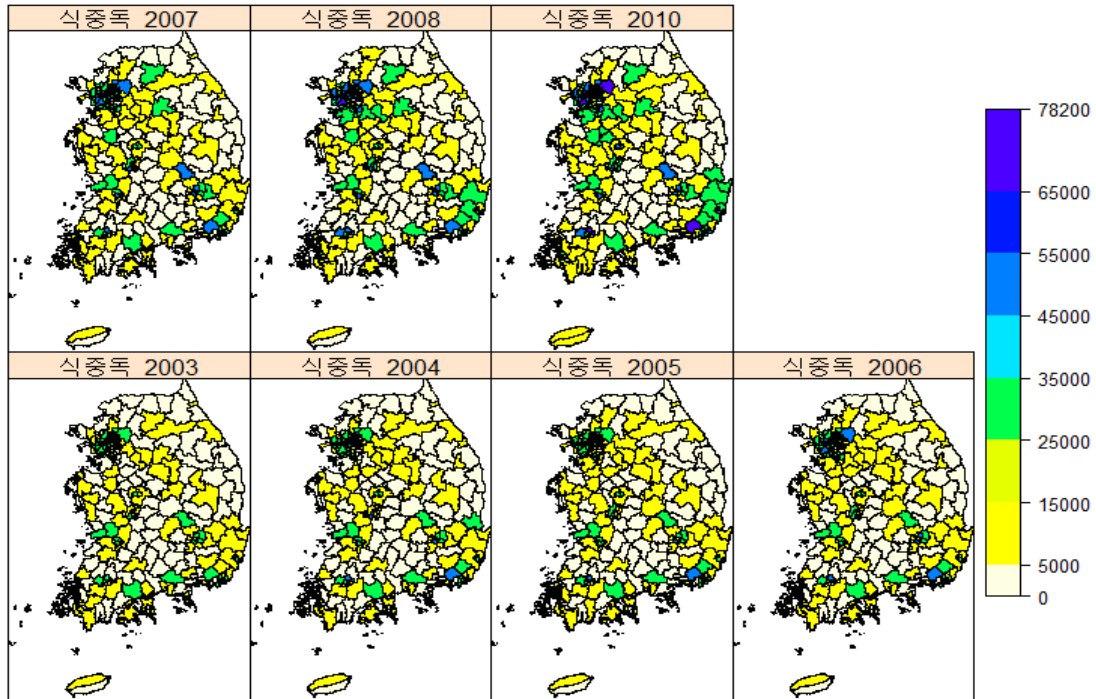
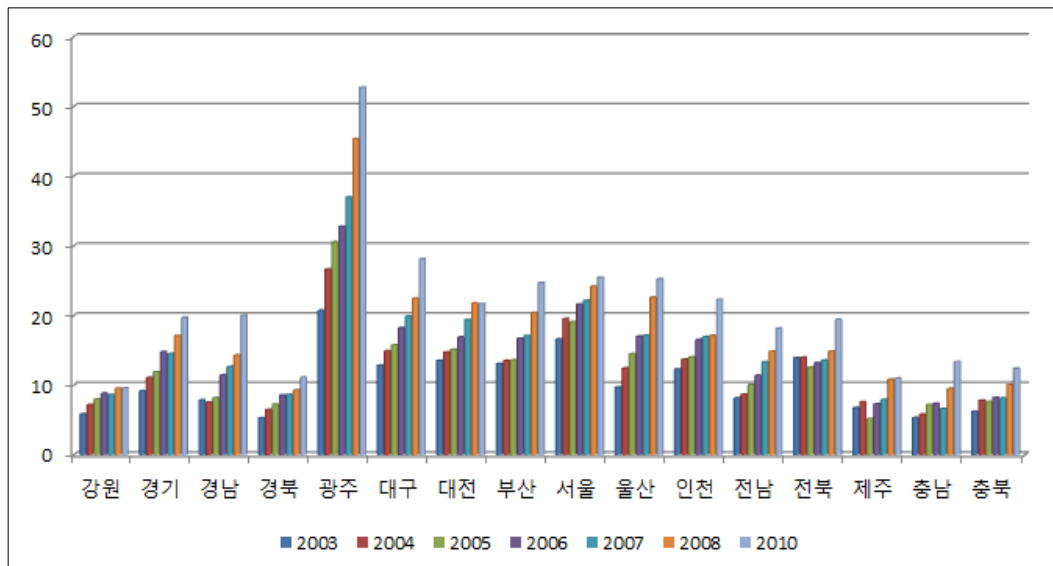


그림 6-16. 시·도별 연도별 주간평균 식중독 입원이용 발생건수



시·도별 연도별 주간 평균 식중독 입원이용 발생건수는 광주가 가장 많아서 2003년 21건에서 2010년 53건으로 2.5배 급증하였고, 서울은 2003년 17건에서 2010년 25건으로 증가하였다. 식중독으로 인한 입원건수의 SD값은 외래방문건수 보다 높아서, 더욱 강한 계절성을 보여주고 있다. 2003년 광주에서 입원환자가 가장 많았고, 이러한 추세는 2010년에도 지속되는 것으로 나타났다.

표 6-19. 식중독으로 인한 입원건수(주간)

	2003		2004		2005		2006		2007		2008		2010	
	평균	SD	평균	SD	평균	SD	평균	SD	평균	SD	평균	SD	평균	SD
강원	6	7	7	8	8	9	9	10	9	9	10	10	10	10
경기	9	10	11	11	12	11	15	12	14	12	17	14	20	18
경남	8	10	8	10	8	12	11	17	13	20	14	22	20	26
경북	5	6	6	7	7	8	9	9	9	10	9	10	11	12
광주	21	12	27	17	31	17	33	19	37	21	45	29	53	36
대구	13	9	15	11	16	12	18	13	20	13	22	15	28	17
대전	14	8	15	8	15	8	17	9	19	9	22	9	22	9
부산	13	9	13	9	14	9	17	12	17	12	20	14	25	16
서울	17	7	20	8	19	8	22	10	22	9	24	10	25	11
울산	10	7	12	7	14	8	17	8	17	9	23	11	25	12
인천	12	10	14	11	14	11	17	13	17	15	17	14	22	17
전남	8	9	9	9	10	11	11	12	13	15	15	17	18	20
전북	14	15	14	15	13	12	13	13	14	17	15	15	19	19
제주	7	10	8	9	5	7	7	11	8	15	11	19	11	17
충남	5	5	6	6	7	8	7	7	7	7	9	9	13	12
충북	6	7	8	12	8	9	8	9	8	8	10	11	12	12
평균	10	9	12	10	13	10	14	12	15	13	18	14	21	17

기후변화와 식중독 발생 예측을 위한 최종 분석모형에 근거한 분석결과는 아래 <표 6-20>과 같다. 주간 강수량의 증가는 식중독 발생건수와 유의관계가 성립하는 것으로 나타났다. 이는 겨울철에 노로바이러스에 의해 발생하는 식중독의 영향도 있을 것이고 비가 내릴 경우 의료기관방문이 쉽지 않은 것도 작용할 것이다. 그럼에도 불구하고 시·군·구 행정단위별 주간 발생량의 차이가 강수량이 평균 1mm 상승함에 따라 상대위험도가 0.05% 줄어드는 것으로 나타나 강수량의 영향은 거의 없는 것으로 보인다. 연도별 변수 효과는 기준연도를 2003년으로 고정할 경우 2003년에 비해 모두 증가하는 양상을 보였다. 그러나 연도의 변수도 기온의 영향에 비교하면 보잘 것 없는 것으로 확인되었다.

표 6-20. 기후변화와 식중독으로 인한 외래이용 양상 분석

변수	변수명	Estimate	Std. Error	Pr(> z)
절편 주간 최고기온의 3차 다항변환 및 4주간 시간지연효과	Intercept	5.16	0.001	< 2e-16 ***
	ns.basisv11	3.97	0.142	< 2e-16 ***
	ns.basisv21	15.25	0.336	< 2e-16 ***
	ns.basisv31	12.59	0.224	< 2e-16 ***
	ns.basisv12	7.343	0.873	< 2e-16 ***
	ns.basisv22	41.57	2.066	< 2e-16 ***
	ns.basisv32	37.16	1.381	< 2e-16 ***
	ns.basisv13	4.188	1.545	0.00672**
	ns.basisv23	45.37	3.657	< 2e-16 ***
	ns.basisv33	43.09	2.445	< 2e-16 ***
	ns.basisv14	0.1055	0.821	0.89777
	ns.basisv24	17.77	1.944	< 2e-16 ***
	ns.basisv34	17.48	1.300	< 2e-16 ***
	계절성	fdz_n\$sin	0.003	0.000
fdz_n\$cos		0.0095	0.000	< 2e-16 ***
주간 강수량	fdz_n\$prep	-0.0005	0.000	< 2e-16 ***
연도	fdz_n\$time	0.0761	0.000	< 2e-16 ***

시·군·구별 주간 식중독 의료이용 횟수를 주간 최고기온과 scatter plot을 그린 것이다. 식중독 발생 예측결과를 구분하여 그리면 <그림 6-17>과 같다.

그림 6-17. 주간 최고기온과 시·군·구 주간 식중독 의료이용 횟수(회귀분석 추정 값)와의 관계

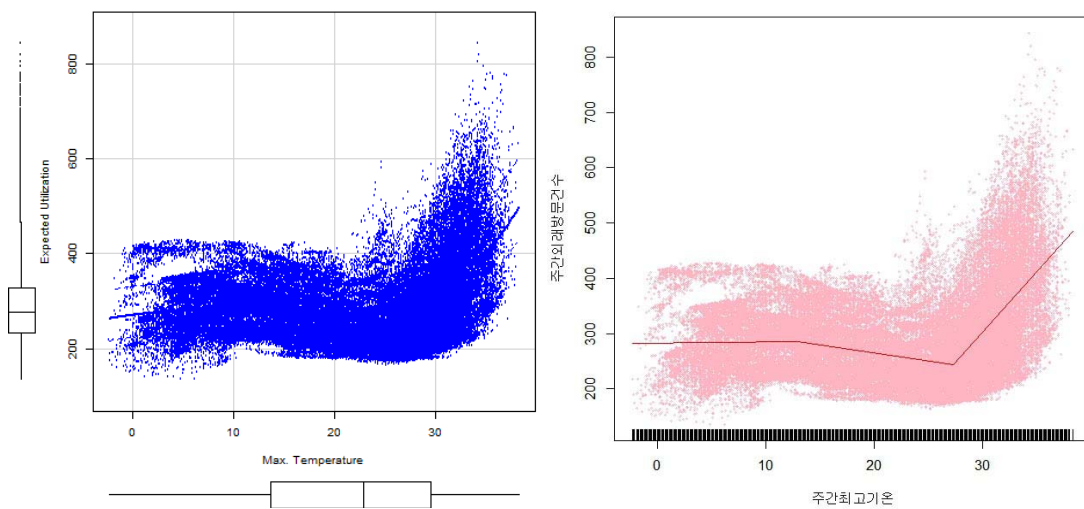


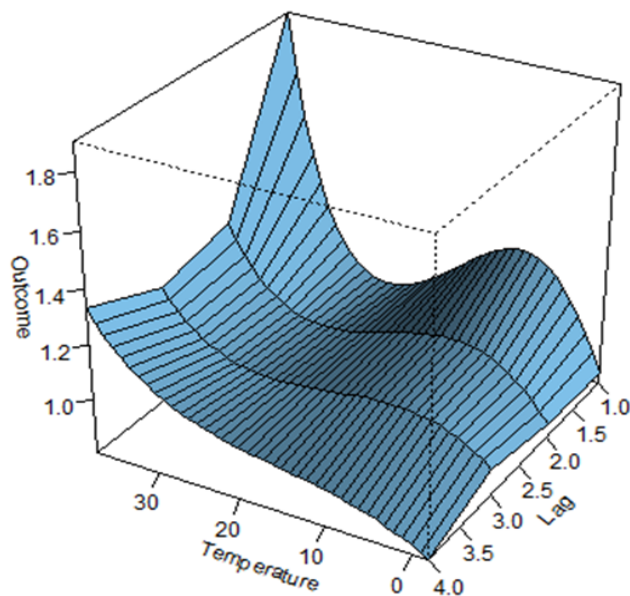
표 6-21. 기후변화가 식중독 증상 외래이용에 미치는 영향

구 분	변수	예측값	95%CI	
변곡점	기온역치1	12.910	12.210	13.61
	기온역치2	27.310	27.230	27.38
기울기	slope1	0.1613	-0.113	0.436
	slope2	-3.009	-3.324	-2.695
	slpoe3	24.671	24.312	25.030

식중독 발생건수는 기온과 뚜렷한 상관성이 관찰된다. 변곡점이 2곳에서 나타나는 데 12.9℃의 첫 번째 변곡점까지는 기온이 1℃ 상승함에 따라 주간 시·군·구 발생건수도 0.2건 증가하는 경향을 나타낸다. 첫 번째 변곡점과 두 번째 변곡점 사이에서는 기온과 음의 상관성을 보이는 것으로 나타난다. 27.3℃의 두 번째 변곡점 이후에서는 기온과의 양의 상관성이 보다 뚜렷이 관찰되어, 1℃ 상승함에 따라 주간 시·군·구 발생건수도 25건 증가하는 경향을 나타낸다.

식중독으로 인한 외래이용건수는 2010년 기준(395건)일 때 기온이 1℃ 상승함에 따라 6.5% 증가하고, 2003~2010년 평균 외래이용건수(301건)를 기준으로 할 경우 기온이 1℃ 상승함에 따라 8.2% 증가하였다.

그림 6-18. 기후변화와 식중독으로 인한 외래이용의 3차원(시간지연효과반영) 그래프



<그림 6-18>는 식중독 발생에서 기온의 영향을 종합적으로 보여주는 그림이다. Z 축은 상대위험도를 보여주며 2차원의 한쪽 면은 최고기온의 영향을 다른 쪽은 최고

기온의 시간지연 효과를 나타내 준다. 가장 앞쪽에 보이는 단면선은 4주후의 기온의 영향을 보여주며 제일 위쪽은 곡선은 1주후의 기온의 영향을 보여준다. 시간지연 효과는 1주후 2주까지 줄어드는 양상을 보이며 3주에는 유지되었다가 4주째는 다시 줄어드는 양상을 보인다.

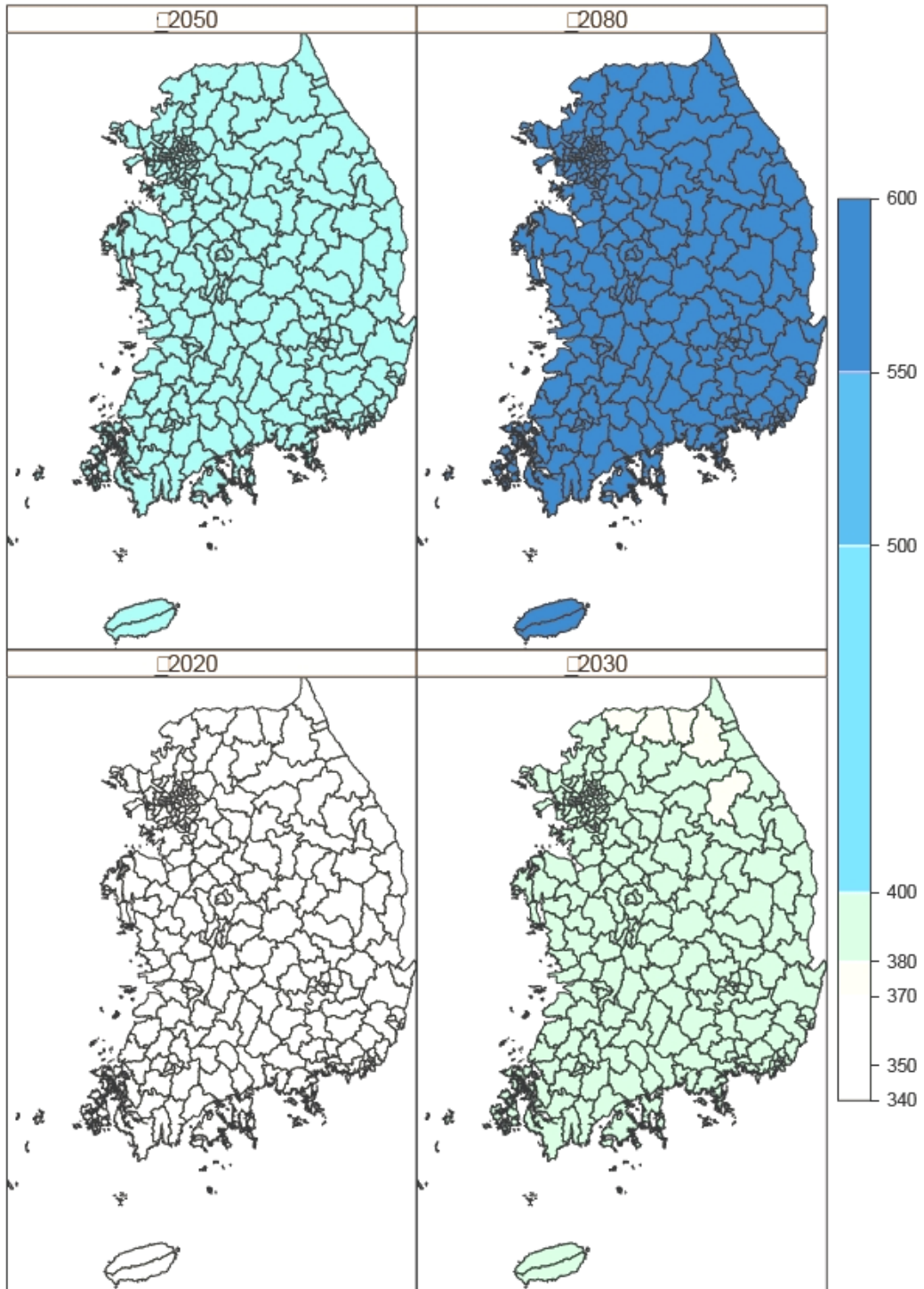
(라) 신 기후변화시나리오에 따른 발생예측

RCP4.5 기후변화 시나리오에 따라 2003~2010년 식중독으로 인한 외래 방문건수(국민건강보험공단 청구자료)를 바탕으로 우리나라의 미래 식중독 발생예측을 수행하였다. 식중독으로 인한 외래이용건수는 2010년 기준(395건)일 때 기온이 1℃ 상승함에 따라 6.5%(26건) 증가하였고, 2003~2010년 평균 외래이용률(301건)을 기준으로 할 경우 기온이 1℃ 상승함에 따라 8.2%(25건) 증가하였다. 식중독 평균발생으로 인한 평균 외래이용건수는 전국에서 2030년 382건, 2050년 462건, 2080년 581건이 예측되고, 많이 발생하는 도시는 대구가 가장 많았고, 서울, 인천, 대전, 울산, 경남, 경북에서 많이 발생할 것으로 예측되었다.

표 6-22. 16개 시·도별 주간 식중독 증상으로 인한 평균 외래이용 미래예측

시도	2019	2020	2021	2024	2025	2029	2030	2050	2080
서울	340	343	348	358	361	380	383	462	582
부산	339	342	346	357	361	378	381	461	580
대구	342	344	348	359	362	381	383	464	583
광주	340	343	347	357	361	379	383	461	582
인천	340	342	346	357	362	379	382	462	581
대전	340	343	347	358	361	379	382	462	581
울산	339	343	346	357	361	379	381	462	581
경기	340	343	347	357	361	379	382	461	582
강원	339	342	346	357	360	377	381	461	579
충남	339	342	347	357	361	378	381	461	580
충북	340	343	347	357	361	378	382	461	581
전남	340	343	347	357	361	378	382	461	581
전북	339	342	346	357	361	379	382	461	581
경남	340	343	346	358	361	379	382	462	581
경북	340	342	347	357	361	379	382	462	581
제주	338	342	345	357	361	378	381	460	579
평균	340	343	347	357	361	379	382	462	581

그림 6-19. 신 기후변화시나리오에 따른 우리나라 식중독 발생 예측



RCP 4.5/8.5 기후변화 시나리오에 따라 2003~2010년 식중독으로 인한 외래평균 방문건수에 근거한 21세기 말 미래 발생예측을 수행하였다<표 6-23>. 식중독으로 인한 외래이용건수는 2003~2010년 평균 외래이용건수(301건)를 기준으로 할 경우 기온이 1℃ 상승함에 따라 8.2%(25건) 증가하여, 2100년에는 한반도 평균 온도가 3.4℃까지 상승하므로 식중독 발생은 84건(27.9%)의 증가를 보이고, 4.8℃까지 상승하는 RCP 8.5시나리오 기준으로는 148건(49.2%)이 증가할 것으로 예측된다.

표 6-23. 21세기 말(2100년) 지구와 한반도의 평균기온 변화 및 식중독 발생 예측 전망

RCP 시나리오		RCP 4.5 (540 ppm)	RCP 8.5 (940 ppm)
지구 평균	기온(℃)	+2.8℃	+4.8℃
	식중독 발생예측(% , 건)	+22.96%(69건)	+39.36%(118건)
한반도 평균	기온(℃)	+3.4℃	+6.0℃
	식중독 발생예측(% , 건)	+27.88%(84건)	+49.2%(148건)

주: 식중독 발생예측은 2003년부터 2010년까지 평균 외래이용건수를 기준으로 개발된 식중독 발생예측모델에 근거함.

3. 식품분야 기후변화 취약성 및 대응전략

가. 식품원료 수급 관련 대응

푸드마일리지 줄이기 위한 지역 농식품 구매나 탄소발자국 정보 개선 등을 통하여 탄소발자국을 줄이기 위한 노력이 필요하다. 기후변화가 진행됨에 따라 급속한 도시화, 농업소득의 비중 감소, 농가인구 감소 등은 현저한 형태의 사회적 핵심 요인들이 될 것으로 전망하고 있다. 특히, 인구 성장의 둔화와 더불어 적은 열량의 식품을 잘 먹기를 원하는 사람들의 증가는 식품 수요의 감소로 이어질 것으로 예상하고 있어, 농·식품 생산자 뿐 아니라 소비자들도 점점 더 소비 선택에 있어서 지역 농·식품 구매나 탄소발자국이 적은 식재료를 구입하도록 홍보가 요구된다⁸⁵.

식품수요 감소와 더불어 새로운 소비 트렌드에 적응할 필요가 있다. 식품수요 감소와 더불어 식품 소비패턴이 현재의 농작물에서 육류 기반의 소비로 변화가 새로운 트렌드가 될 것이다. 반면, 전 세계 농업생산 성장률은 지난 30년 동안 연 2.2%에서

⁸⁵ Cassman et al., 2003.

2000년에서 2015년까지의 연 1.6%, 2015년부터 2030년까지 연 1.3%, 2030년에서 2050년까지 연 0.8% 등의 감소가 전망되고 있으나, 여전히 2030년까지 전세계적으로 작물생산은 증가함을 의미한다⁸⁶.

기후변화가 농업부문에 미치는 영향을 최소화하기 위한 노력으로써 품종 개발과 재배관리 기술 개발이 시급하다. EU는 기후변화에 적응할 수 있는 품종 개발과 재배관리 기술의 개발 및 안정적인 농작물 생산을 위한 재배법의 개발이나 병해충 예찰망 구축과 방제시스템 개발, 물의 소모량을 적게 할 수 있는 작목과 품종의 전환 등의 다각적인 노력을 하고 있다. 또한 농업부문의 적응정책의 일환으로 영국은 재배지 변동에 따른 지역별 식량생산계획 및 내재해성 품종개발 분야가 주요 관심 대상이 되고 있으며, 일본은 품목별 생산현장의 현황을 파악하여 온도변화에 따른 이양 및 파종시기 조정, 적절한 시비관리, 고온 내성 품종으로의 전환 등에 대한 연구를 추진하고 있다. 이에 대해 우리나라는 1999년 제1차 기후변화 대응 종합대책을 시작으로 기후변화에 대응하기 위한 적극적인 노력을 진행 중에 있으며, 지금까지 총 4차에 걸쳐 기후변화 대응 종합대책 및 녹색성장 국가전략 및 저탄소 녹색성장 기본법'을 마련하여 시행하고 있다.

농민들이 유기, 통합작물 관리 등의 환경지속농업기술을 선택하고, 탄소발자국 인증의 활용하도록 적극적인 지원이 요구된다. 일부 농민들은 유기, 통합작물 관리 등의 환경지속농업기술을 선택하고 있으나, 탄소발자국 계산에 대한 표준방법의 미비, 초기단계의 인증 양식 등 현실적으로 직면하고 있는 문제들로 인해 그들의 농업 관행을 적응을 통하여 기후변화 문제를 해결하기 위한 노력은 부족하다고 할 수 있다. 또한 시장이 어떠한 것을 제공할 수 있을지 확신하지 못하고 있는 생산자들은 기후변화뿐 아니라 불충분한 정부정책과 연계된 시장 환경 속에서 수요변화에 대응하고 있다.⁸⁷

변화된 식량수요에 부합되고 지역 천연자원을 보호하는 식생활 패턴 변화를 유도해야 한다. 이에 대해 기후변화에 대응하기 위한 방안은 변화된 식량수요에 부합되고 동시에 지역의 천연자원을 보호하고 환경품질을 개선하는 측면에서의 도전을 받게 될 것이다. 2011년 한국의 농기후 변화에 대처하는 대응은 기본적으로 온실가스 배출을 축소하고 탄소를 고정시키는 완화와 기후변화에 적합한 성장을 모색하는 적응의 두 가지 방향으로 제시되고 있다.

- 첫째, 완화는 작물 믹스의 변화로, 토양내 탄소고착량/뿌리깊은 식물을 보다

⁸⁶ FAO. 2007.

⁸⁷ Cassman, K.G., Dobermann, A., Walters, D.T., and Yang, H. 2003. "Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality". Annual Review of Environment and Resources 28:315-358.

많이 재배하거나, 경작체계를 변화시켜 메탄 배출을 감소할 수 있는 쌀 품종 및 부산물을 사용하고, 다년생작물에서 녹색초지 혼농·임업으로 옮겨가는 토지이용을 권장하고, 온실가스 배출을 줄일 수 있는 사육 및 사료 체계 개선 등을 포함하고 있다.

- 둘째, 적응은 연구를 통하여 생물학적 기술을 포함하는 품종 개량 및 생물적 및 무생물적 스트레스에 대한 저항방법을 개발하고, 도로, 물, 저장시설 등 물리적 지원과 자금지원, 투입물, 지식 등의 제도적 인프라를 구축해 나가는 것이라고 할 수 있다.

이와 함께 기후변화에 적합한 식품의 소비를 장려하는 형태로 전환하는 식습관의 변화도 주요 방법이 될 수 있다. 즉, 우선적으로 이용 가능한 식품 위주의 소비로 전환하여 곡류 생산이 감소하더라도 탄수화물 섭취를 유지하도록 뿌리식품 및 구근식물의 생산과 소비를 증가시킬 필요가 있으며, 육류 및 육가공품은 두류 등의 단백질원을 활용할 수 있도록 변화를 식생활 패턴의 변화를 유도할 필요가 있다.

그러나 이러한 대응방안을 실행함에 있어서 발생될 수 있는 문제점들(예를 들어, 높은 수준의 완화 및 적응 능력이 행동으로 반드시 전환되지 않으며, 예기치 않은 재난 발생의 가능성과 생태계가 임계치를 넘어서는 적응을 할 수 없다는 점 또는 정책적/사회적/경제적 제약 등의 발생)이 발생할 수 있기 때문에 통합적 관점 논의가 필요하다.

나. 식품 생산과 유통 관련 대응

기후변화가 생산과 유통부문에 미치는 영향의 중요성을 인식하고, 생산 및 유통업체의 대응방안에 대한 심층적 연구와 기후변화에 대응할 수 있는 생산과 유통 정책 개발 및 대응 시스템 구축이 필요하다. 기후변화에 따른 농산물 생산과 유통에의 영향은 생산량변동에 따른 직접적인 영향과 온실가스 감축 등의 저탄소녹색성장 정책 추진으로 인하여 파생되는 친환경적인 물류, 소비 증가 등 간접적 영향으로 구분될 수 있다.

농산물의 생산과 식품유통 과정에서 발생할 수 있는 다양한 안전관련 문제들과 연관이 있기 때문에 기후변화와 관련하여 식품 유통의 안전관리에 대한 중요성을 제고시켜야 한다. 첫째, 미생물에 대한 이해와 더불어 식품에 존재하는 미생물 허용수준이나 환경오염물질 및 화학 잔류물질 등이 존재하지 않도록 조치하고 기후변화 환경에서 화학물질의 오염이나 축적 경로를 모니터링하는 등 질병발생동향을 면밀히 파악하여 식인성 질병의 조기발견 및 예방할 수 있는 질병감시 체계의 구축을 통해 식

품의 안전성을 확보하는 것이 중요하다고 할 수 있다. 또한 곰팡이 독소 등의 오염으로부터 발생할 수 있는 질병을 예방하기 위해 우수농업규범(GAP)이나 병해충종합관리(IPM) 및 신제품, 생명공학기술(가뭄, 염도, 곤충 저항성)의 활용을 활성화시킬 필요가 있다. 식품의 안전성 및 품질 확보가 중요하다고 할 수 있다.⁸⁸ 둘째, 기후변화가 식품안전에 미칠 수 있는 영향력 등에 대한 정보를 제공, 사안의 중요성 홍보 및 교육의 필요성을 인식하여 범국가적 차원의 정보제공 노력이 요구된다. 이를 통해 소비자들로 하여금 기후변화가 식품안전에 미칠 영향을 인식하게 하여 기후변화로 인한 식품안전상의 문제를 감소 또는 예방할 수 있는 바람직한 소비 행동을 유도할 필요가 있다. 관련 조사에 따르면⁸⁹ 현재 탄소발자국, 탄소성적, 녹색식품 등의 식품표시제도가 시행되고 있으나 소비자들이 식품을 선택함에 있어서 활용 정도는 매우 낮기 때문에 이에 대한 활발한 홍보를 통해 적극적인 실천 의식을 유도할 필요성이 높다고 할 수 있다. 셋째, 기후변화에 따른 식품유통의 안전을 제고하기 위한 정책을 강화하기 위해 식품의약품안전처를 중심으로 각 정부기관과 지방자치단체, 식품업계 등의 긴밀한 협조가 요구된다. 또한 정책수립 시 기후변화로 인해 식품안전에 위협할 수 있는 미생물 등 요인들이 푸드체인의 시작 단계인 생산과정 뿐만 아니라 유통부분에서도 발생할 수 있기 때문에 이를 예방하기 위한 GAP시설 확대, 도매시장의 물류시스템 개선, 저온 유통 시스템의 확대, 산업전반에 대한 모니터링시스템 구축 등 산업전반에 대한 검토가 필요하다. 넷째, 외식업의 경우는 주로 유통업체와 도매 및 농수산물유통센터를 통해 농축수산물을 구입하여 가공된 모든 식품을 소비자에게 판매하고 있는데, 이러한 식품유통에 기후변화가 미치는 부정적인 영향력을 감소시키기 위한 외식업체의 대응전략으로써 전처리 등 식재료 가공관련 인프라 확충이 필요하다고 할 수 있다. 또한 지속적인 임금상승 부담이 식재료가 되는 농·축산물 구입시 비용 상승이 예상되어 외식업체에서 전처리 식재료의 사용이 불가피하기 때문에 식재료 사용의 안전성 확보 및 품질관리 등을 위해서도 전처리시설 등의 인프라 확충이 필요하다. 또한 일반소비자들의 가공식품 및 외식소비가 늘어나는 상황에서 영세한 업체의 경우도 HACCP을 통한 품질안전관리가 가능하도록 소규모 HACCP 표준모델의 개발이 요구된다. 마지막으로 기후변화 대응 식품안전관리의 제도적 강화방안으로 일원화된 안전관리체계 구축, 기후변화에 의한 위험에 대한 신속한 감지시스템 구축 및 조기경보시스템 도입 및 식중독지수 이외에 기후변화로 인한 식품 위생경고 전달체계 구축, 기후변화와 관련한 식품안전통계 등 기초자료의 지속적인 수집, 관리 및 공유, 국제 네트워크 및 협조체계 등의 구축이 필요하다.

⁸⁸ 김희선. 2008. 기후변화와 식품안전, 제32회 식품안전열린포럼 발표자료.

⁸⁹ 김정선. 2011. 기후변화와 식품안전에 대한 국민인식, 보건복지 Issue & Focus, 117호, 1-8.

결론적으로 기후변화에 따른 식품안전의 확보는 농장에서의 농산물의 생산부터 가정에서의 소비까지의 모든 단계에 안전확보가 요구되는 복잡한 문제이므로 기후변화의 영향에 대한 인식강화와 대응방안, 환경과 식품안전 간의 상호관계까지 다방면의 광범위한 접근이 필요하다. 즉, 식품안전은 푸드체인 of 모든 단계에서 적절한 안전확보 방법의 수행을 통하여 보장되어야 한다. 이를 위해 기후변화에 민감한 원료, 제품, 해충, 유통 및 보관 등의 적응/완화 방안과 분야별 효과적인 안전관리대책 마련이 필요하다. 이러한 측면에서 정부의 정책적인 노력과 함께 생산자, 생산업체와 유통업체에서는 식품안전을 책임자를 선정하고, 식품안전책임자는 기후변화로 인해 발생할 수 있는 위험을 반영한 위생수칙에 관한 위생관리매뉴얼을 작성하고, 이를 농산물 재배 및 식품생산 관리에 적용하며, 종사자들에게 자체위생교육의 강화로 기후변화와 식품안전에 대한 인식 제고 및 관련 위생관리 실무기술 습득하도록 해야 할 것이다. 또한 소비자들을 대상으로 기후변화에 대한 인식제고와 더불어 실제 소비행동으로 구체화될 수 있도록 체계적이고 주기적인 교육과 커뮤니케이션을 통해 기후변화의 영향력에 대한 인식 제고와 더불어 식품의 선택, 보관, 조리에 있어 문제 발생 시 신속히 대처할 수 있도록 하여야 할 것이다. 즉, 푸드시스템 차원의 통합적인 접근방법이 요구된다.

다. 소비자 인식 제고

기후변화가 초래할 수 있는 위험이 상당히 큼에도 불구하고 소비자들은 시간적으로나 심리적으로 먼 미래의 발생할 수 있는 상황으로 생각하고 있어 기후변화의 중요성에도 불구하고 긴급하게 대응해야 할 사안으로 생각하고 있지는 않고 있다. 이로 인해 기후변화에 대응하기 위한 구매행동은 활성화되지 않고 있는 반면, 잠재 수요는 상당하기 때문에 이는 생산자에게 있어서 위기임과 동시에 기회를 제공할 수 있을 것이다. 영국이나 미국의 경우 상당수의 소비자들이 지구 온난화에 대해 매우 중요하게 느끼고 있어 기후변화를 의식한 소비를 하고자 하는 잠재수요가 상당함을 알 수 있다. 그러나 기후변화에 대한 의식은 상당하지만 구체적으로 어떠한 행동이 수행되어야 할 것인가에 대해서는 명확한 이해가 부족하다는 것이 문제점이라고 할 수 있다.

소비자들로 하여금 효과적으로 지구온난화 방지에 기여할 수 있도록 탄소배출 제품의 소개에서 탄소 상쇄 프로그램 등의 구체적인 대안을 제시할 경우 선택행동으로 이어질 것이라고 예상된다. 그러나 대부분의 소비자들이 이러한 프로그램 선택에 수반되는 추가지불비용에 대해서 긍정적인 반응을 보이고 있는 것은 아니다⁹⁰. 그럼에도

⁹⁰ Lippincott Mercer. 2006. Serving the climate-change-conscious consumer. USA.

도 불구하고 기후변화에 의한 농식품 가격의 상승과 식품선택과 관련된 부정적인 환경변화를 인식하여 소비자들은 식품에 대한 지출과 식습관을 수정할 가능성이 높다고 할 수 있다. 이러한 노력의 일환으로써 환경문제에 의식적인 소비자들은 지역에서 생산되어 더 낮은 탄소발자국을 가지는 식품을 선호하며, 점점 희소해지고 있는 토지와 수자원을 이용하여 많은 투입물이 필요한 곡물로 자란 가축으로부터 생산된 육류에 대한 소비를 감소시키는 등 식품의 소비패턴을 변화시키기 위해 노력을 경주하고 있다.

기후변화 대응을 위하여 소비자들이 생활 속에서 의식적으로 탄소발자국 표시제품을 구매할 수 있도록 활발한 커뮤니케이션이 필요하겠다. 우리나라의 소비자들은 식품분야 탄소발자국 표시제에 대한 인식도가 높지 않고 특히 기후변화 대응 식품관련 실천항목들 중 가장 낮은 인지도, 행동도 및 실천도를 보이고 있다⁹¹.

더 나아가서 비록 환경변화를 의식한 행동을 수행하지는 못하더라도 식품에 대한 소비패턴을 변화시키고자 하는 의지가 있는 잠재적인 수요를 유효수요로 전환하기 위해서는 지식, 방향성, 공정성 및 소득 등의 장애물을 극복할 필요가 있다. 먼저, 지식적 측면에서는 일반적으로 소비자들은 기후변화에 대해 명확하게 알지 못하는 경우가 많다. 또한 방향성 측면에서 소비자들은 새로운 것에 직면할 경우 정확한 실행 방향을 알려줄 정부나 기업 등에 의존적 행태를 취하게 되며, 행동에 따라 직접적으로 결과가 발생한다는 것을 이해하는 것이 중요하기 때문에 실행의 편리성은 필수적이라 할 수 있다. 끝으로 공정성 측면에서는 소비자들이 기후변화로 인한 결과에 대한 책임감을 생산자와 다른 소비자들과 나뉘어질 수 있다고 느낄 때 공정하다고 판단하게 된다. 마지막으로 현실적으로 소득 측면에서 소비자들은 기후변화에 대한 책임에 추가적으로 비용을 지불하는데 어려움을 느끼기 때문에 이러한 문제들이 해결되어야 기후변화에 보다 능동적으로 대응할 수 있는 소비행위를 할 것이다.

이에 대해 정부와 NGO 및 생산자단체들은 소비자의 목표를 충족시켜주는 교육을 통해 지식의 장애를 극복하고, 자신의 목표와 합법성에 따라 여러 가지 다른 리더십 역할을 수행하는 방향으로 노력을 할 필요가 있을 것이다. 또한 소비자가 원하는 행동을 쉽게 지원하는 역할을 수행할 필요가 있으며, 소비자들로 하여금 정부나 생산자가 기후변화에 따른 책임을 공유하고 있다고 생각하도록 하여 소비자들이 공정무역 등과 같이 직접적인 만족이 없을지라도 이를 위해 추가적으로 지불할 것을 권장할 필요가 있다.

⁹¹ 김정선 외. 2011. 기후변화에 따른 식품안전사고 위기대응방안 연구, 한국보건사회연구원

라. 식품안전의 미래 위험요인 분석 및 대응

변화하는 기후변화 체계에 대응하는 방안은 크게 완화와 적응이라고 볼 때, 식품분야는 이미 발생했거나, 앞으로 발생하게 될 기후변화에 대해 적응하는 것에 더 많은 부분 관련이 있다고 볼 수 있다. 완화는 기후변화 영향을 줄이기 위한 전략으로서 기후변화를 유발하는 원인을 제거하거나 감축하는 일에 초점을 두는 것이고, 적응은 기후변화의 영향을 극복하기 위한 전략으로서 기후변화의 결과에 대한 대응에 중점을 둔다.

기후변화에 따른 식품안전 확보를 위해 특히 식품 관련 환경 및 식품의 생산단계, 농·수·축산물 및 수입식품, 식품 관련 유해물질 등의 안전관리가 필요하며, 기후변화 대응 식품안전정책의 개선을 위해서는 정책 강화와 함께 부처 간 및 국제적 협력 등의 체제 강화의 필요성이 중요하고, 기후변화가 식품안전에 미치는 영향에 대해서는 일반국민들의 관심이 아직 낮은 수준이므로 국가차원의 홍보가 요구된다고 할 수 있다. 이와 관련하여 대부분의 소비자들은 기후변화에 대응하기 위한 식품안전정책의 개선이 필요한 것으로 인지하고 있는 것으로 조사되었다. 즉, 기후변화와 관련하여 식품안전을 제고하기 위해 가장 필요한 것은 기후변화에 대응하기 위한 정책 강화라고 인지하고 있음을 알 수 있다. 구체적으로 관련 정책들의 중요도에 있어서는 “정부 부처간의 일관된 기후변화 대응 정책 추진, 수입식품 안전관리 강화, 국제협력체계 구축 및 확대, 기후변화 대응 식품안전 위기대응체계 및 방안 마련, 기후변화 대응 식품안전에 대한 교육, 홍보 및 컨설팅 강화”가 중요한 것으로 조사되었다.⁹²

(1) 식중독 발생 예측 및 대응

기후변화로 농축산업과 수산어업이 변화하고, 이로써 전반적인 푸드체인(Food chain)과 식생활까지도 변화하게 된다. 식품안전의 대부분의 문제가 최근 농장에서 식탁까지의 관점에서 살펴볼 때 가장 관리가 어려우면서도 문제를 해결해야 할 곳은 농장단계라고 볼 수 있다. 최근 소비자들은 건강을 추구하면서 신선식품의 소비가 늘어나고 있는데 가공처리를 최소화한 최소가공방식을 선호하게 되면서 물리, 화학, 생물학적 위해인자들 중에서 특히 생물학적 위해인자들에 대한 제거기술이 관심을 얻게 되었으나, 생물학적 위해인자는 농장단계에서 이미 자연계에 함께 존재하는 경우가 많으므로 이를 가공방식 없이 제거하기는 어려운 경우가 많다. 곰팡이 독소의 경우에도 곰팡이의 존재 및 증식으로 인해 독소가 발생하는 것이므로 미생물학적, 그리고 화학물질의 제거라는 이중의 문제점을 안고 있다고 할 수 있다. 따라서 인간이 행할 수 있는 여러 가지 관리방법을 통하여 곰팡이 번성을 최소한으로 할 수 있다

⁹² 김정선. 2011. 기후변화와 식품안전에 대한 국민인식, 보건복지 Issue & Focus, 117호, 1-8.

록 저장, 보존방식을 병행해야 할 것이다. 생산자측면에서는 해결하기 어려운 문제점을 제시하고 사회구성원들 모두 문제의 해결점을 찾도록 노력할 필요가 있다.

생산 후 가공 및 보관 유통과정에서는 기후온난화로 인한 미생물 증식을 억제하기 위해서 많은 에너지와 온도 관리기술을 적용해야 하므로 에너지의 소모가 야기될 것이다. 이는 또 다른 기후온난화의 주범이 될 수 있으니 사회구성원들이 받아들일 수 있는 적정한도에 대한 논의도 향후 필요할 것이다. 식품안전을 고집하였다가는 식량 확보에 어려움을 줄 수 있으므로 식품안전을 확보할 수 있는 한계와 식량 확보의 문제 양쪽 측면에서 살펴볼 필요가 있겠다.

소비자가 조리된 식품을 취급하고 보관하는 방법에서도 식품의 위해가 증가할 수 있으므로 위해커뮤니케이션을 통하여 어떤 식품에서 문제가 발생할 수 있으며 그 원인물질의 특성을 소비자가 잘 인식하고 적절하게 대응할 수 있어야 하겠다.

또한 우리나라에서 발생하는 식중독의 패턴을 파악하여 조기대응 할 수 있도록 하는 것이 중요할 것이다. 위험물질을 식품으로부터 섭취하여 위해가 발생하여 건강에 위해가 발생하지 않도록 식품안전을 확보하기 위해서는 단순히 농어민, 생산자, 그리고 업계의 조리 종사자뿐만 아니라 소비자, 그리고 정부와 학계가 함께 정보를 공유하고 투명하게 정보를 공개하여 위해를 줄여나가는 노력을 실시해야 하겠다. 마지막으로 인재로 인한 식품 안전사고가 아닌 기후변화로 인한 천재지변으로 인한 식품 안전문제가 발생 하였을 때는 인재와 천재를 잘 구분하여 생산자, 소비자가 합리적으로 위해 정보 교류를 할 수 있도록 하는 것이 중요할 것이다.

식중독지수는 집단 식중독 발생을 예측하는 모형으로 본 연구에서 적용한 식중독 발생예측방법과 구분이 된다. 특히 식중독지수의 경우 집단식중독 발생에 다양한 요소가 영향을 미치기 때문에 random한 요소까지 고려해야 하는 어려움이 있다. 집단 식중독이 발생하기 위해서는 식중독을 일으키는 식자재에 위험요소가 존재해야 하고 집단 급식이 이루어지는 장소에서 식품의 조리과 저장상의 문제가 발생할 뿐만 아니라 음식을 섭취하는 사람들의 식중독에 대한 예방 및 위생과 면역체계 또한 식중독에 걸릴 수 있는 상태가 되어야 하기 때문이다. 식중독 감시체계에 따르면 집단 식중독의 발생은 일정한 경향을 가지는 것이 아니라 연도에 따라 들쭉날쭉 하는 경향을 보인다. 이는 식중독 발생이 기상요소 이외에 식품의 가공 및 조리 저장에 관련된 정책 및 산업 수준 개인의 위생관념 등이 모두 관련되기 때문이다.

본 연구에서 살펴본 식중독 발생예측은 개인수준에서 발생하는 식중독 증상의 발현양상에 관한 것으로 기상요소를 주요한 변수로 상정한 것이다. 본 예측 모형에서 고려되지 않은 나머지 변수는 현재적 수준에서 다루어지는 것을 가정한다. 즉 식자재의 생산이나 가공 및 운반, 처리 등과 관련된 정책이나 이의 준수는 가까운 미래에

도 변하지 않을 것이라는 가정에 근거한다. 이 가정에는 식품을 섭취하는 경향이나 개인의 위생관념 또한 현재적 수준과 유사하게 진행될 것이라는 가정도 포함한다.

식중독지수는 복잡한 현상을 예측해야 하는 것이므로 가까운 미래(1~2년)정도에서 사용될 수 있도록 만들어진다. 반면 예측모형은 보다 먼 장래에도 적용되는 식중독 발생예측이다. 본 연구결과 새로운 기후변화 시나리오에 따른 식중독 발생은 주간 평균기온이 1℃ 상승함에 따라 식중독 발생이 8.2% 증가할 것으로 예측되었다. 그럼에도 불구하고 식품안전관정책이 향후 어떻게 변화할 것인지, 이의 영향이 식중독 발생에 어떠한 영향을 미칠 것인지, 식품에 대한 개인적 선호의 변화나 개인의 위생 관념의 변화가 식중독 발생에 미치는 영향 등은 본 연구 모형에 포함되어 있지 못하다. 이런 변수의 영향을 추정하기는 쉬운 일은 아니나 향후 연구 방법의 발전에 기대를 걸어본다.

(2) 아플라톡신 예방관리⁹³

기후변화는 아플라톡신 오염에 직접적으로 영향을 미칠 수 있고, 단계별로 아플라톡신 오염에 영향을 끼치는 요인 아래와 같다.

- 추수 이전: 열대지방과 아열대 지방에서 추수 무렵 비가 많이 내리게 되면 아플라톡신의 오염이 증가한다. 또한 독소가 존재하지 않던 지역에서도 오랜 가뭄상태에 노출되면 곰팡이에 오염이 된다. 곰팡이는 서늘한 기온에서는 잘 성장하지 않으며 기온이 상승하면 아플라톡신 농도도 증가할 것으로 예상된다.
- 추수 이후: 농작물은 소비까지 수송과 저장과정을 거친다. 이때 습하고 따뜻한 환경에 노출될 수 있고, 농작물의 수분과 온도변화가 발생하여 오염에 영향을 미칠 수 있다.

(가) 추수 전 예방관리

- 고온지역 및 재배기간 중 강수량이 매우 적은 지역에서는 관개종법 수행되고, 용수가 영매와 앞에 접촉되지 않아야 한다.
- 아플라톡신은 온도가 상승할수록 증가하므로 조기파종으로 온도의 영향을 줄여야 한다.
- 해충 피해를 최소화하기 위해 해충에 내성이 있는 교잡종을 파종하고, 농약으로 곤충, 곰팡이 감염, 기타 해충으로 야기된 손상 최소화 한다⁹⁴.

⁹³ 옥현희 외. 2013. 한국식품위생안전성학회 기후변화와 식품 중 아플라톡신의 오염 예방 전략

⁹⁴ Payne GA, Cassel DK and Adkins CR. 1986, Reduction of aflatoxin contamination in corn by irri-

(나) 추수 후 유통관리

- 다양한 곤충들이 동면할 수 있는 장소를 최소화하기 위해 수확 후 동절기에 나무에 남아 있는 잔존물은 제거해야 한다.
- 필요에 따라 가지를 잘라내고, 재배기간 이전에 적절한 농약을 살포해야 한다.
- 수확과정에서 곰팡이, 화학물질, 비료, 독성물질 등의 오염을 최소화하기 위해 이용된 컨테이너, 장비 및 기기는 깨끗한 용액으로 세척하여 저장해야 한다.

(다) 아플라톡신 다빈도 오염 가공식품의 관리

- 가공 단계 종사자의 청결 유지, 가공 시 적합한 의복 착용, 식품위생 및 일반적인 위생 절차에 대해 훈련이 필요하다.
- 교차오염 방지를 위해 원재료가 가공 및 저장되는 장소와 최종제품이 가공 및 저장되는 장소를 분리한다.
- 껍질이 벗겨진 알곡은 가능한 신속하게 건조시켜 곰팡이가 성장하지 않는 수준으로 수분활성도를 즉시 낮춰야 한다.

(라) 안전관리 시스템 적용

- 1999년 3월, 튀니지아에서 개최된 곰팡이 독소에 관한 제3차 국제 컨퍼런스에서, 일반 권장사항중의 한 가지는 곰팡이 독소에 대한 종합적인 프로그램의 일환으로 식품과 동물사료 중의 곰팡이 독소 오염 제어를 위해서는 HACCP 원칙을 포함해야 한다는 것이다.

(마) 아플라톡신 예방을 위한 통합적 접근 전략

그림 6-20. 아플라톡신 예방을 위한 통합적 접근 전략

정책, 기준 및 규격, 제도 *안전관리 정책/제도 활성화 *기준규격 제·개정 *법적 조화/수출·입 시행 규칙 *검사시행/시행/준연	실시간 조기경보시스템 구축 *국내 및 수입 식품 대상 Mycotoxin Early Warning System 구축 및 운영	이해당사자 인식 제고 및 교육 *산일제 대상 기술지도 *작물재배자, 수입업자 대상 교육 *소비자 대상 교육
바이오콘트롤 *아플라톡신 생성/비생성 균주 연구 *바이오콘트롤 제제 제조기술 *보급 및 훈련	수확 전 제어 방안 *기후변화 대응 종자 육종 *운작 등 재배법 개선 *항진균제 개발 및 제조기술의 향상 *보급 및 채택	수확 후 제어 방안 *건조 및 저장법 연구 *곰팡이/독소 제어 기술 개발 *최적화 및 비용 효율성 검토 *보급 및 채택
기후변화 대응 시스템 *재배/소비환경 중 예측 시스템 구축 *극단기후 및 장기적 기후변화 구분 *차별적, 지속적 운영	오염 작용 활용 방안 *적정 활용 방법 연구 *적정 폐기 방법 연구 *보급 및 채택	검사 기능 제고 *진단검사법 연구 및 개발 *샘플링 등 모니터링 체계 구축 *보급 및 채택
건강 영향 평가 시스템 *발육부진, 간경변, 아플라톡신중, 면 *역역제에 대한 연구 및 분석 *중재(교육, 공중보건 및 간염백신, 영 *양보조, 위생) 및 효과 분석	국제 협력 협의체 구축 *국제 통합 정보 시스템 구축 및 운영 *지역별(아태촌, 북미촌, 남미촌, 유럽 *촌, 아프리카촌 등) 협의체 구축 및 *운영	통섭적 전략 구현 *포괄적 접근유도 및 영향 평가 *특이적 제어의 사례 연구

마. 기후변화 대한 미래 적응전략의 시스템관점 접근 95

(1) 통합적 전략적 측면에서의 푸드시스템 강화

기후변화의 대응방안으로써 푸드시스템은 취약하지만 대응능력에 따라 영향력의 정도는 달라질 수 있다. 인도-젠지스 평원의 사례에서 알 수 있듯이 우유의 생산은 가뭄에 의해 영향을 크게 받아 생산량이 줄어들고, 이에 대해 빈약한 시장과 인프라 구축 및 빈약한 가공 및 보관 기능으로 상대적으로 약한 응집력을 가진 농촌지역에서는 우유에 대한 접근성이 떨어지게 되어 영양상태가 나빠지는 등 식량 안보상 취약한 결과가 나타났다. 반면, 활기찬 시장과 충분한 인프라 구축, 적절한 가공 및 보관 기능으로 상대적으로 강한 대응능력을 지닌 도시지역에서는 우유에 대한 접근성을 유지시켜 영양상태가 좋게 유지시켜 상대적으로 덜 취약하게 된다.⁹⁶

또한 푸드시스템의 세 가지 산출물(식량안보, 환경보호, 사회적 후생)이 종종 다른 수준의 의사결정자들 사이에서 의식적이거나 무의식적으로 선택을 하게 만드는데, 경제성장과 환경서비스의 보호 사이의 갈등과 같이 푸드시스템과 식량안보는 매우 경쟁적인 주제라고 할 수 있다. 이러한 산출물을 평가하는데 정치적, 사회적 맥락에

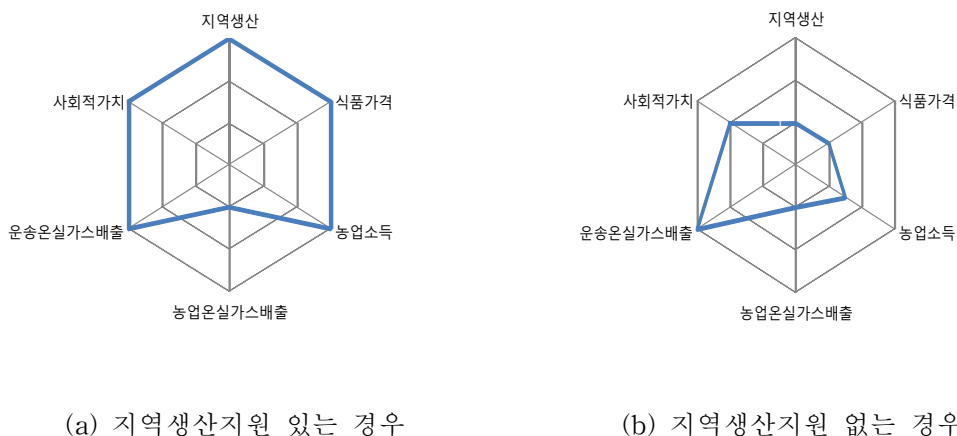
⁹⁵ Klementina Kireziova ets. 2014. Towards strategies to adapt to pressures on safety of fresh produce due to climate change

⁹⁶ Aggarwal, P., Joshi, P.K., Ingram, J.S., and Gupta, R.K. 2004. "Adapting food systems of the Indo-Gangetic plains to global environmental change: key information needs to improve policy formulation". Environmental Science and Policy 7(6):487-498.

의해 형성하는 평가자의 관점이나 목적에 따라 다양한 방법이 있는데, 예를 들어 농촌 개발전략은 농민들을 소득생성을 위한 황금작물에 투자를 장려하거나 또는 지역에서 소비되는 주곡작물 생산에 집중하게 하는데 있어 가치판단에 대한 논쟁의 여지가 있을 수 있다. 이러한 전략은 서로 다른 농민과 지역사회의 다른 집단에 대해 더 또는 덜 적합할 뿐 아니라 다른 식량 안보와 다른 환경적 성과에 관련되어 있다. 또한 단기에서는 푸드시스템의 산출물 사이에 상충관계가 있게 되며, 관리자 및 의사결정권자들은 종종 장기적으로 이러한 상충관계를 어떻게 해소할 것인가에 대한 방법에 관심을 가지고 통합적으로 대응해 나가야 할 것이다.

Ericksen(2008)⁹⁷은 푸드시스템 상 상충관계에 대한 평가하기 위해서는 예시적으로 여섯 가지 푸드시스템의 결과(지역생산, 식품가격, 농업소득, 농업 온실가스 배출, 운송 온실가스 배출, 사회적 가치) 사이에 잠재적인 상충관계를 두 개의 가상의 푸드시스템(지역생산 지원이 있는 경우와 없는 경우)간에 거미줄도표에 도시하고 비교하였다. 식품의 지역생산이 지지되는 푸드시스템에서는 높은 농업소득 뿐 아니라 높은 식품가격을 야기할 수 있다. 하지만 농업온실가스배출량은 식품을 운반하는 경우보다 높을 수 있으며, 지역 식품생산에 대한 지원이 없는 푸드시스템의 경우 식품가격은 저렴하지만 농업소득은 나빠지게 되고 식품의 운송은 온실가스배출의 주요 원천이 될 수 있다.

그림 6-21. 푸드시스템 산출물간의 상충관계



IPCC는 식량안보 측면에서 기후변화에 있어서 푸드시스템이 가지는 통합적 전략적 측면의 장점을 인식하고 있다. 그러나 완화 및 적응을 위해 필요한 자원이 다른

⁹⁷ Ericksen, P.J. 2008. Conceptualizing food systems for global environmental change research. *Global Environmental Change* 18(1):234 - 245.

메커니즘을 통해 관리되기 때문에 아직도 UNFCCC/COP과 보조적인 단체들에 의해 국제 기후정책 의제에서 별도의 주제로 다루어지고 있다.

(2) 수자원 오염에 대한 대응전략

수자원은 홍수, 범람, 산사태로 인해 미생물들과 화학적 오염원이 다른 장소로 이동하면서 오염된다. 가장 중요한 대응전략은 주변 수자원의 통제(관리) 및 처리를 발전시키는 것이다. 장기적 관점에서 기상재해 발생한 후 샘플링을 통해 오염 수준을 결정하고 수자원을 정기적으로 모니터링 하는 것을 제안했다. 농부들에게 용수를 통제하는 법(수자원 선택, 물을 처리하는 법, 수질의 샘플링 계획과 기준)을 교육시키는 것과 산사태나 지하수로 인한 오염이 발생했을 때 피해 예상 지역을 계획하는 것 또한 중요한 대응전략이다. 지표수를 사용하는 경우, 수확한 후 농산물을 살균하는 법을 교육하는 것이 중요성과 실현 가능성에서 높은 점수를 받았다. 하수를 처리하는 것은 높은 중요성으로 평가받았지만 화학적 오염을 다루는 것은 다소 실행 가능성이 낮을 것으로 예상되었다.

(3) 생산 환경의 미생물학적 오염에 대한 대응전략

농부들에게 미생물학적 위협에 대해 인식을 바로 세워줌으로써 분변의 사용과 같은 위험한 행동을 하지 않게 하는 것이 가장 중요하겠다. 수확한 후부터 파종 전까지의 휴지기 동안 생산환경을 재정비하는 것 또한 가장 높은 중요하고, 이 때 기상예측 시스템도 요구된다. 기후변화로 인한 미생물의 생존 증가에 대해서는 개인 건강 및 위생의 관리와 저온(냉동) 유통체계의 발전이 가장 중요하고 실현가능한 전략이다. 지역 차원에서 예방백신접종과 유행병의 조기경고를 통해 농업종사자들의 건강을 관리하는 전략도 중요하다. 정부와 국제단체들에 의해 ‘다양한 환경에서의 미생물 생존 및 적응 조사’가 시행되어야 하겠다.

(4) 생산 환경의 화학적 오염에 대한 대응전략

기상예보와 해충 관리 프로그램 개선이 필요하다. 농약관리를 위한 지침을 제공하고 해충을 모니터링 하여 농부들에게 그 결과를 알려주는 것이 매우 중요하며 통합적 해충관리가 중요하다. 곰팡이독소 저감화를 위해 저장능력을 향상시키고, 지역 차원에서 예측 수단과 경고 시스템을 개발하는 것도 중요하다.

4. 결론, 시사점 및 정책 제언

가. 결론

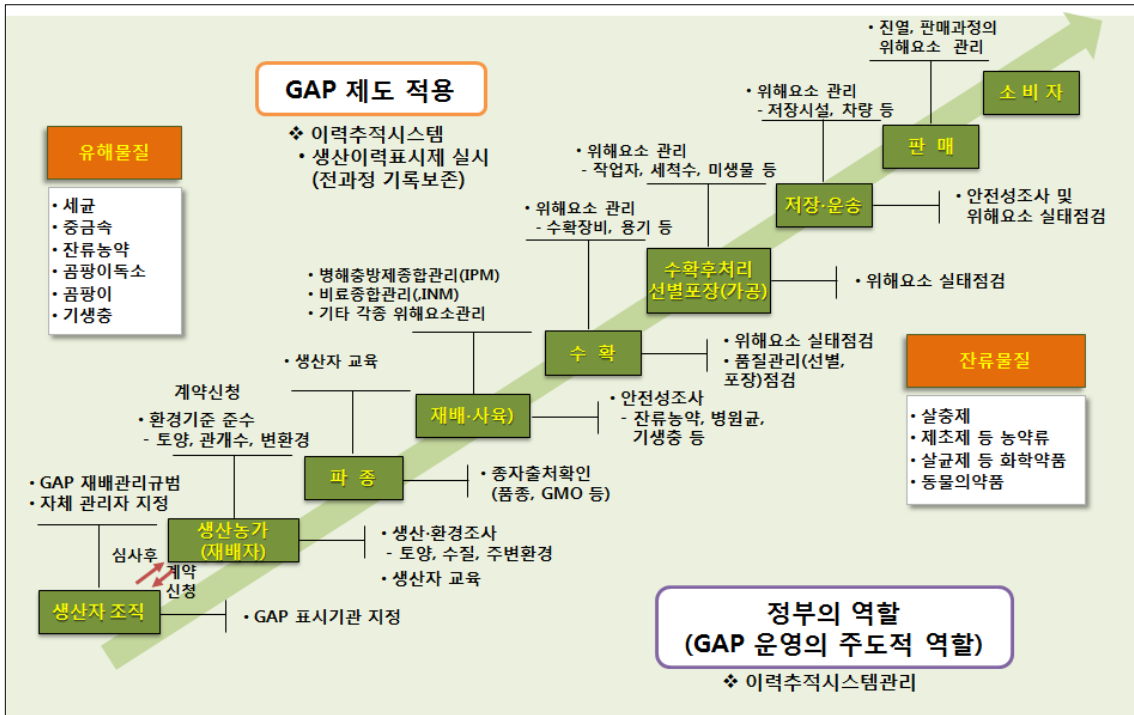
변화하는 기후변화 체계에 대응하는 방안은 크게 완화와 적응이라고 볼 때, 식품 분야는 이미 발생했거나, 앞으로 발생하게 될 기후변화에 대해 적응하는 것에 더 많은 부분 관련이 있다고 볼 수 있다. 완화는 기후변화 영향을 줄이기 위한 전략으로서 기후변화를 유발하는 원인을 제거하거나 감축하는 일에 초점을 두는 것이고, 적응은 기후변화의 영향을 극복하기 위한 전략으로서 기후변화의 결과에 대한 대응에 중점을 둔다.

(1) 푸드체인과 식품안전관리제도

우리나라의 기후변화는 이미 국제 기후변화 수준을 뛰어 넘었고, 향후에도 급속하게 변화할 것으로 예상되고, 기후변화로 농축산업과 수산어업이 변화하고, 이로써 전반적인 푸드체인(food-chain)과 식생활까지도 변화하게 된다. 식품안전의 대부분의 문제가 최근 농장에서 식탁까지의 관점에서 살펴볼 때 가장 관리가 어려우면서도 문제를 해결해야 할 곳은 생산단계라고 볼 수 있다. <그림 6-22>와 <그림 6-23>에는 생산에서 소비까지 및 제조에서 유통까지 오염 가능한 위험요인들과 적용되고 있는 식품안전관리제도가 소개되어 있다.

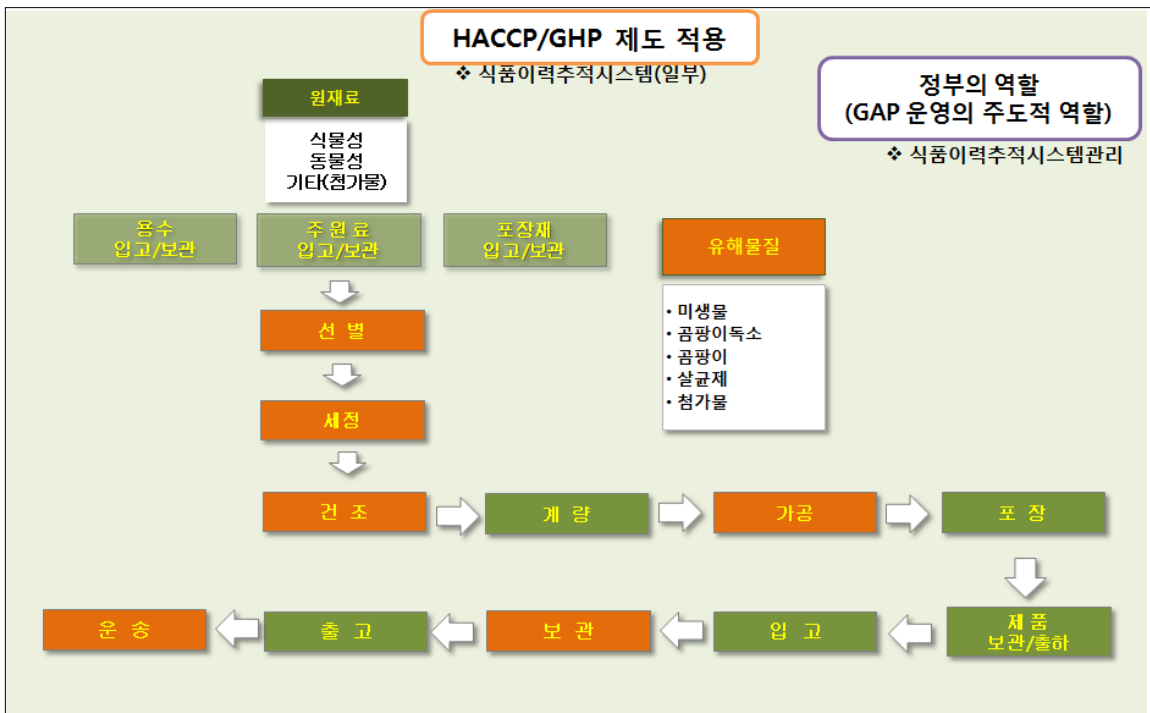
현재 국내의 식품안전관리제도별 관리영역을 각 단계별로 정리하면 <표 6-24>와 같다. 수입식품에 대한 관리에 대한 사전관리가 상대적으로 취약한 편이었고, 생산 이전에 대한 관리 또한 제조가공단계에 관리수준에 비해 다소 미흡한 것으로 판단된다. 또한 저장보관유통에 대한 현재의 관리제도는 전체 푸드체인에서 특히 기후변화 대응 관리사각지대로 분석되어지며, 이에 대한 대책마련에 대한 논의가 필요하다고 판단된다. 새로운 제도보다는 GMP와 GHP제도 안에서 저장보관유통에 대한 가이드라인이 강화되고, 특히 이력추전관리제도는 농축수산물과 가공식품의 이력추적제도가 통합적으로 관리되는 것이 효과적이라 판단된다. 식품안전관제도는 품질과 안전보증 외에 문화적, 경영적인 부분을 포괄한다.

그림 6-22. 생산에서 소비까지 단계별 오염가능 위험요인 및 안전관리제도



자료: WHO, (2014)(재구성).

그림 6-23. 제조에서 유통까지 단계별 오염 가능 위험요인 및 안전관리제도



자료: WHO, (2014)(재구성).

표 6-24. 식품안전관리제도의 관리영역 및 기후변화 대응 확대 필요 영역

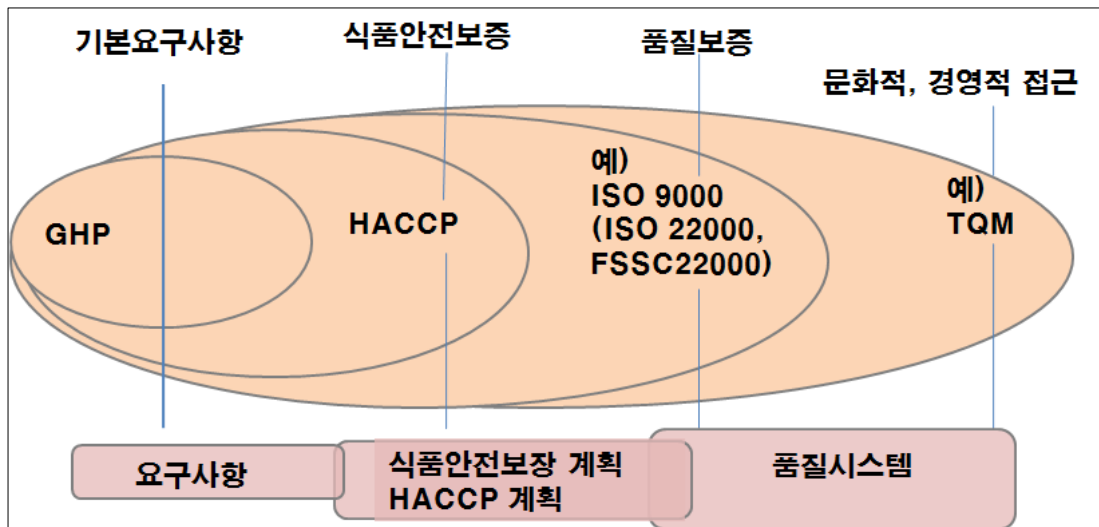
구분	이력추적관리	GAP	GMP	GHP	HACCP	음식점 위생등급평가
섭취소비	-	-	-	-	-	○
조리단계	-	-	-	●	○	●
저장보관유통	-	-	●	●	○	○
제조가공	-	-	○	○	○	-
생산재배	○	○	-	○	○	-
생산이전	○	○	-	-	●	-
수입식품	△(●)	●	-	-	●	-

주: △ 일부 관리되고 있는 영역(식품이력추적관리제도에서 수입식품의 경우는 수입신고기관, 제조국, 제조공장 명칭과 소재지, 제조일자, 유통기한 또는 품질유지기한, 원재료명 등을 알 수 있음)

○ 현재 관리영역

● 향후 관리의 확대가 필요한 영역

그림 6-24. 식품안전관리제도별 관리영역



자료: 권오건.(2005) 국제적 GHP도입을 통한 식품안전향상, 서울특별시 세미나 발표자료(재인용)

(2) 기후변화 대응 식품안전관리제도의 활성화 방안

(가) GAP 인증의 절차 개선

- 인증제도 개선: 절차의 통합 간소화. 인증기준의 내실화로 위해요소 관리강화. 교육 및 훈련 강화
- 인증 활성화: 유통수요 기반 강화를 위해 농산물 유통선도조직 운영, 정책사업과

의 연계 강화

- 기후변화 대응 농·축산물 구매시 우려 요인 사전 예방: 잔류농약, 중금속, 미생물, 기생충, 이물질
- 음식점 위생등급제에 대한 정보 제공 활성화 : 정부조직 인프라 감축에 의한 올바른 선택을 위한 정보 확대 제공은 공공기관의 필수 사항으로 대두되고 있고, 시민들의 식품위생 및 안전에 대한 요구가 높아지고 있는 반면에 지자체 차원에서의 광범위한 정보제공이 미흡한 실정이다.

(나) 탄소라벨링 제도의 확대

우리나라에서 탄소라벨이 부착되고 있는 제품 분야에 한계가 있기 때문이기도 하다. 영국의 경우 토마토 팩에서부터 자동차, 즉 모든 상품에 대한 탄소라벨 부착을 의무화했다. 따라서 우리나라 역시 소비자들이 이러한 친환경 전략에 더욱 많이 노출될 수 있도록 라벨링 제도를 좀 더 다양한 분야의 제품으로 확대시켜야 한다.

소비자의 인식부족에 대한 문제점을 점차 해결해 나가기 위해서 정부의 지원을 통한 기업의 적극적 홍보가 필요하다. 이와 같은 문제점은 저탄소 가공공정을 도입한 기업의 경쟁력 강화에 대한 정부지원과 인센티브 등의 방법으로 풀어나갈 수 있을 것이다.

이와 동시에 앞서 말했듯이 아직 탄소라벨링 제도가 충분한 홍보가 되고 있지 않다는 점을 감안하여 탄소 성적 표지제도 성공의 열쇠를 쥐고 있는 소비자들의 관심과 참여를 촉진할 수 있도록 홍보와 유통 마케팅 계획 또한 수립되어야 한다.

(다) 기후변화와 식품이력관리

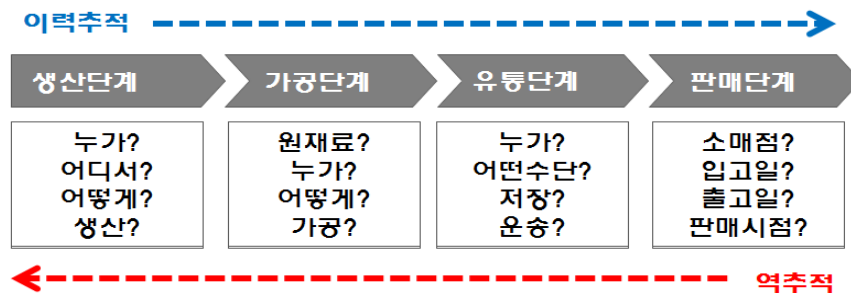
우리나라에서는 최근 몇 년 동안 각종 식품안전사고⁹⁸의 발생으로 국민들의 건강과 안전이 위협받고 있으며, 이에 따라 소비자들의 식품안전에 대한 불안과 불신이 커지고 있다.

식품안전사고는 이물질검출이나 단순 식중독 외에도 기후변화로 인한 위해요인 증가에 따른 식품안전사고에 대한 예측 및 대응이 필요한 상황이다.

기후변화는 식품의 생산, 제조, 가공, 유통, 소비와 같은 푸드체인(Food chain) 전 과정에 영향을 주기 때문에 생산 단계에서 오염된 식재료가 시장으로 출하된 후 위해요인에 오염된 사실이 밝혀질 경우 식품을 시장에서 빠르게 회수하여 국민의 생명과 안전을 지킬 수 있는 시스템이 필요하다.

⁹⁸ 멜라민 사건(2008), 불량만두소(2004), 김치기생충란(2005) 등

그림 6-25. 이력추적제도의 기본 원리



식품이력추적제도는 <그림 6-25>와 같이 생산-가공-유통-판매단계의 모든 단계에 이력정보를 인터넷상에서 기록, 저장, 관리하여 식품사고 발생 시 추적을 가능하게 하고 추적을 바탕으로 신속한 원인규명을 가능하게 한다. 또한 사고발생 원인이 되는 상품을 푸드체인(food chain)으로부터 신속하게 제거함으로써 소비자의 불안감 해소에 도움을 준다.

이상기후현상으로 가축의 질병발생, 농산물의 품질저하, 수산물의 변화 등으로 식품안전에 위협을 줄 위해식품으로 변화될 가능성이 높아짐에 따라 현재 이력추적제도에서 관리되는 이력사항 이외에 기후변화와 관련한 온도, 습도에 대한 부분을 추가하는 방안을 검토해야 할 것이다(표 6-24).

농산물의 경우 재배온도 및 습도가 농작물의 품질에 영향을 미치므로 생산정보 기재 시 이상기후 현상이 발생할 경우 온도 및 습도를 표시하는 방안과 축산물의 경우 목초지와 기온을 기록하게 하여 기후변화로 인한 축산물의 질병예방 방안을 마련한다. 또한 수산물은 녹조현상이 일어나면 어류의 집단폐사가 발생할 수 있고, 해수온도는 어류의 생장에 중요함에 따라 생산정보에 이와 같은 특이사항을 표시하게 하고, 가공식품의 경우 유통 및 판매, 보관의 과정은 기후변화의 영향을 많이 받을 수 있음에도 사각지대로 분류됨에 따라 유통과정 또는 판매점에서의 진열시 보관온도 및 습도를 기록하게 한다. 향후에는 품목별로 이원화 되어 있는 식품 이력추적제도의 통합과 더불어 기후변화시스템까지 연결할 수 있는 통합된 이력추적제도의 구축이 필요할 것이다.

(3) 푸드체인 단계별 기후변화에 의한 잠재적 오염원과 식품안전관리제도 적용

<표 6-25>에는 푸드체인의 각 단계별 오염경로와 잠재적 오염원을 구분하고 기후변화의 영향과 적용되는 식품안전관리제도의 개선방안이 정리되어 있다. 오염 가능한 위험요인은 이미 언급되었던 미생물학적, 화학적 및 물리적 요인들이 모두 포함된다. 이에 식품안전관리제도의 현황에 근거하여 기후변화로 인해 안전관리가 강화 또는 추가되어야 할 항목들이 기술되어 있다.

표 6-25. 식품 이력추적제도 단계별 주요 관리 내용

구분		이력정보	기후변화 관련정보
농산물 이력추 적제도	생산자	-생산 정보: 생산자 성명, 품목, 재배지, 면적, 비료·농약 등 영농 자재 사용 내역 등 -출하 정보: 날짜, 품목, 출하처, 이력추적 관리번호 등	온도, 습도
	유통자	-유통자 업무절차 설정 -입고 정보: 날짜, 생산자 성명, 품목, 물량 등 -출고 정보: 날짜, 품목, 판매처 명칭, 이력추적 관리번호	
	판매자	-입고 정보: 입고날짜, 구입처 명칭, 품목, 물량	
쇠고기 이력추 적제도	사육	-소의 소유자 등은 출생·폐사·수출입, 양도 등을 신고 -출생 신고된 소는 귀표 부착하여 관리 -개체식별번호, 출생 또는 수입연월일 등을 개체식별대장에 기록 관리 -개체식별대장 기록사항이 변경된 경우 변경신고	목초지, 기온
	도축	-도축한 소에서 얻은 개체식별쇠고기에 해당 개체식별번호를 표시 -귀표 미부착, 개체식별곤란, 식별대장 미등록된 소의 도축 금지 -소의 도살처리 결과를 장부에 기재 및 기록일부터 2년 간 보관 -도축장에서 도살·처리하는 소 및 그 식육에 대한 검사 후 개체 식별번호를 기재한 도축검사증명서 교부	
	포장 처리	-부분육 쇠고기 또는 포장재에 개체식별번호를 표시 -다수의 개체식별쇠고기를 한 개로 포장할 시 묶음번호로 표시 -구매자가 요청할 경우 개체식별번호를 기재한 영수증 혹은 축 산물등급판정확인서 사본을 교부 -소의 포장처리 결과를 장부에 기재 및 기록일부터 2년간 보관	
	판매	-부분육 쇠고기 또는 판매표시판에 개체식별번호를 표시 -다수의 개체식별쇠고기를 한 개로 포장할 시 묶음번호로 표시 -거래내역서에 쇠고기의 개체식별번호를 기록하고 매입일부터 1 년간 보관	
	소비	-소와 개체식별쇠고기의 개체식별정보를 공개	
수산물 이력추 적제도	생산자	-생산정보: 품목, 생산자 성명, 주소(전화번호 포함), 양식장 위치 또는 산지 위관장 주소, 양식기간, 항생제 등 약제사용·내역 -입고정보: 날짜, 생산자 성명, 품목, 물량, 이력추적관리번호 -출하정보: 날짜, 품목, 어획 후 관리시설 또는 출하처 명칭, 물 량, 이력추적관리번호	녹조현상, 해수온도
	유통자	-입고정보: 날짜, 생산자 성명, 품목, 물량, 이력추적관리번호 -출고정보: 날짜, 품목, 판매처 명칭, 물량, 이력추적관리번호	
	판매자	-입고날짜, 구입처 명칭, 입고 품목, 입고 물량, 이력추적관리번호	
가공 (수입) 식품 이력추 적제도	제조 가공	-연계대상 정보: 식품이력추적관리번호, 제조업소 명칭 및 소재 지, 제조일자, 유통기한 또는 품질유지기한, 제품 원재료 관련 정보, 원재료 공급자 및 주소, GMO여부, 생산량, 상품바코드, 출고일자, 출고량, 거래처(소재지, 연락처)	저장온도, 습도
	수입	-연계대상 정보: 식품이력추적관리번호, 수입업소 명칭 및 소재 지, 제조국, 제조회사 명칭 및 소재지, 유전자변형식품표시, 제 조일자, 유통기한 또는 품질유지기한, 원재료명 또는 성분명, 수 입량, 수입일자	
	판매	-연계대상 정보: 식품이력추적관리번호, 제품명, 판매업소 명칭 및 소재지, 입고일자, 입고량, 출고일자, 출고량, 유통기한 또는 제조일자 또는 품질유지기한	

자료: 농산물품질관리법 시행령 제15조의 19 소 및 쇠고기 이력추적에 관한 법률.

표 6-26. 기후변화에 따른 푸드체인 단계별 잠재적 오염원과 식품안전관리제도의 적용

단계		잠재적 오염원	기후변화 영향	식품안전관리제도 현황 및 개선방안
수입	-수입식품	-수출국 독성물질 및 잠재위해물질, 수입식품의 원재료 독성	-동남아 지역 등 수입식품 증가	※ 수입식품 사전확인 등록제, GIP → 수출국 역학조사제도 도입 → 보세창고 위생관리 강화 (창고시설 및 관리기준 마련)
제조가공	생산이전	-수입원재료, 사료, 비료 등에 포함된 잠재적 오염 및 위해물질, 지하수 및 먹는물 오염 등	-수입사료, 비료 수입 증가 -지하수 오염 증가	※ HACCP(사료) → 사료, 비료 등 안전관리 강화 → HACCP확대(먹는물, 제조용수 등)
	생산단계	-추수, 운반, 묶음	-관계수, 인분, 작업공간간의 위생부족, 유출수	※ GAP
	초기생산	-세척, 분류, 포장	-행균물, 처리과정	※ GHP, HACCP (제조가공)
	최종생산	-절단, 탈피, 분쇄, 압축가공	-행균물, 처리, 교차오염	※ GHP → GHP 및 HACCP 적용 확대
유통배분	-트럭 운반	-얼음, 불결한 트럭, 온도조절실패	-배송운반시 상온노출 위험성	※ 일반 위생관리기준 없음 → 운송차량 위생지침 마련 → 위해우려식품 유통보류제 ※ 수입식품 유통보관기준 미흡 → 보세창고 위생관리 강화 (창고시설 및 관리기준 마련)
소비	-음식물 조리 및 섭취	-조리원/조리기구, 조리기구와 사용물에 의한 교차감염, 부적절한 보관 및 저장온도	-주방(부엌)이나 테이블에 있는 음식물	※ 음식점 위생등급평가, → 식품위생법 개정을 통한 전국 확대 및 의무화 ※ HACCP(학교 및 단체급식) → HACCP확대검토(일반음식점)

- 주 1) 수입식품 사전확인등록제는 수입 전 위생 및 시설기준 적합여부를 확인해서 제조단계부터 안전한 제품을 수입하기 위한 제도로 등록제품은 수입검사시 정밀, 무작위 검사완화, 위해우려 정보시 모니터링 검사 및 현지조사 등을 받게 됨.
- 2) 또한 수입이전에 수출국 제조업소의 제조공정, 품질관리, 위생수준을 확인해서 수입하는 수입업소에 대한 무작위 검사면제 등 인센티브를 부여하는 우수수입업소제(GIP, Good Importer Practice)를 도입하였고, 특히 중국산 수입식품에 대해서는 수출품 표시인 CIQ표시 부착여부를 확인하고 미부착 업소의 경우 중국정부에 불법 수출여부를 확인하고 있음.
- 3) 음식점 위생등급평가는 2010년 서울시의 시범사업을 시작으로 전국도입이 검토되고 있는 일반음식점 대상의 위생등급 평가제도로 종사자 개인위생과 조리장 위생관리 등을 평가하는 제도임.

나. 시사점 및 제언

(1) 기후변화 대응 통합적 푸드시스템 구축

기후변화협약에 대응하여 농업부문과 환경부문의 정책 프로그램을 상호 보완적으로 운영할 수 있는 정책적인 통합이 필요하다.⁹⁹

식품에 대한 탄소성적표시가 제대로 운영되기 위해서는 다음과 같은 개선이 필요하다.¹⁰⁰ 소비자가 로컬푸드, 녹색식품 등 다양한 표시들 속에서 혼란스러울 수 있기 때문에 소비자 입장에서 제도 운영을 바라보아야 한다. 현재 법령 정비를 하여 법적 근거를 확보하고 부처 간의 역할 분담을 확실히 분담하여야 한다. 탄소성적표시에 대한 업계의 부담을 덜어주어야 한다.

국민 소득의 향상으로 인해 식품안전에 대한 국민의 관심은 나날이 커지고 있다. 지속적으로 발생하는 식품안전사고를 줄이기 위해 식품분야 사업추진의 방향은 다음과 같은 방향으로 추진해야 할 것이다.¹⁰¹ 미래 환경 변화 대응, 규제 합리화, 소비자 중심의 안전관리 강화를 통하여 기후변화에 대비하여야 할 것이다.

기후변화에 능동적으로 대처하기 위해 해양수산부문의 종합대책을 수립하기도 하였다. 「기후변화 대응」해양수산부문 종합대책연구에 따르면 넓은 해양에서 저장 및 흡수를 통해 온실가스를 저감화하고 기후변화와 관련한 연구수행 체계 개편과 신규 사업을 개발을 추진하여 기후변화로 인한 해양환경변화에 대응하고 있다.¹⁰²

기후변화로 인한 식품안전을 확보하기 위해선 우리나라도 조기경보시스템(Early Warning System)의 도입이 필요하다. 그리고 기후변화가 가져오는 신규 위해인자에 대한 위해평가틀 개발을 통해 과학적이고 체계적으로 관리해야 할 것이다.¹⁰³

기후변화에 따른 재난안전관리는 중앙과 지방정부의 연계를 통하여 교육활성화 하는 것이 필요하다. 또한 식품안전분야에서는 기후변화의 불확실성을 제어할 수 있는 지속적인 연구개발 및 매뉴얼 개선이 중요하다. 국제기구, 식품의약품안전처, 환경부 등 기후변화와 관련한 부처들의 연대를 강화하고 식품안전 분야를 대표하는 협의체를 운영할 필요가 있다.¹⁰⁴

기후변화에 대비하여 국가 재난형 신종 질병 및 인수공통전염병 등의 발생 가능성을 국가적 차원에서 모니터링을 하여 사전에 위해요소를 차단하고 대응하여야 한다.¹⁰⁵

⁹⁹ 김창길. 2007. 기후변화협약 대응 방안 연구

¹⁰⁰ 광노성. 2011. 식품분야 탄소성적 표시제 운영현황 및 개선과제

¹⁰¹ 정기혜. 2009. 2009년도 식품안전관리의 변화와 전망

¹⁰² 황진환 외. 2007. 기후변화 대응」해양수산부문 종합대책연구

¹⁰³ 김용수 외. 2009. 기후변화에 따른 식중독 발생 영향 분석 및 관리체계 연구

¹⁰⁴ 김정선 외. 2011. 기후변화에 따른 식품안전사고 위기대응방안 연구

표 6-27. 기후변화 적응 식품 기술 개발 목록(안)

구 분	핵심과제	주요내용
영향 평가	농림 수산 생태계 및 생산성 변동 감시 체계 구축	<ul style="list-style-type: none"> 수입 농축수산물에 대한 수출국 이상기상과 수급수준 모니터링 기후변화 및 기상재해에 대한 국제기구 및 주요 국가기관들과의 분야별 감시교류체계 구축 및 활발한 정보교류 네트워크
	농림수산식품부 문 기후변화 취약성 및 영향평가 시스템 구축	<ul style="list-style-type: none"> 이상기상 영향모델인 미생물 유래 식중독발생예측모델-시·군·구별 정교화 기후변화 대응 식품안전사고 발생예측모델 개발(중금속, 잔류농약, 곰팡이독소 등 비의도적 유해물질 중점으로) 식품분야 기후변화 통합영향모델인 푸드시스템모델 개발 농림수산식품분야 기후변화 영향평가/예측 정보서비스 구축
적응 기술	기후변화 대응 병해충/질병 관리기술	<ul style="list-style-type: none"> 기후변화 대응 비의도적 오염물질(곰팡이독소, 중금속, 잔류농약) 예방 농축수산물 안전관리 강화 기술 개발 기후변화 대응 식품포장재 기술 개발
피해 방지 기술	이상기상 대비 농림수산 식품 재해 조기경보 시스템 구축	<ul style="list-style-type: none"> 기후변화 유래 신규위해인자 조기경보시스템 구축 수입 농축수산물 수급 및 안전사고 조기경보시스템 구축 식품이력추적제와 이력추적제의 통합관리체계 구축
	피해 경감 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> 기후변화 영향 식품 수급부족 및 안전사고 발생 저감화 기술 개발

(2) 기후변화 적응을 위한 식품 관련 기술의 활용 분야

- 개발된 식중독 발생 예측모형을 활용하여 기후변화로 인해 증가하는 식품분야의 사회·경제적 비용부담을 산출할 수 있다.
- 기후변화에 능동적으로 대응하기 위한 생산·소비 행위 관련 교육과 훈련이 필요하고, 생산자와 소비자가 탄소상쇄 프로그램 및 탄소배출감소 제품을 적극적으로 선택하도록 지원하기 위한 생산자 및 소비자 대상 커뮤니케이션의 기초자료로 활용될 수 있다.
- 식량안보, 환경보호 및 사회적 후생을 포괄하는 기후변화 대응 푸드시스템의 구축에 활용될 수 있는 통합적 접근방법을 제공하고 있다.

제7절 데이터마이닝 분야 기후변화 영향평가 모델 구축(5협동과제)

1. 데이터마이닝의 개념과 방법론

가. 데이터마이닝의 정의

데이터마이닝(data mining)은 새로운 영역이며, 진화를 거듭하고 있다. 1995년도에 지식발견 및 데이터마이닝(KDD : Knowledge Discovery and Data Mining) 국제학술대회가 처음 개최된 이후, 현재 데이터마이닝에 대한 정의는 다양하게 제시되고 있다. 데이터마이닝을 한마디로 요약하면 “대량의 데이터 집합으로부터 유용한 정보를 추출하는 것”으로 정의된다(Hand et al., 2001).

데이터마이닝이란 의미 있는 패턴과 규칙을 발견하기 위해서 자동화되거나 반자동화된 도구를 이용하여 대량의 데이터를 탐색하고 분석하는 과정이다.(Berry and Linoff, 1997, 2000). 데이터마이닝의 또 다른 정의로서 가트너 그룹(2004)은 데이터마이닝은 통계 및 수학적 기술뿐만 아니라 패턴인식 기술들을 이용하여 데이터 저장소에 저장된 대용량의 데이터를 조사함으로써 의미 있는 새로운 상관관계, 패턴, 추세 등을 발견하는 과정으로 정의했다. 데이터마이닝은 통계학과 기계학습(machine learning: 인공지능으로도 알려짐)으로 알려진 두 학문분야의 공통점에서 존재한다. 데이터를 탐색하고 모델을 구축하는 다양한 기법들은 통계학분야에서 오랫동안 존재해 왔다. 예를 들어 여기에는 선형 회귀분석, 로지스틱 회귀분석, 판별분석, 주성분분석 등이 포함된다. 충분한 데이터와 계산능력을 가진 데이터마이닝의 응용분야에서는 이러한 고전적인 통계학의 핵심원리가 적용되지 않는다. 이러한 이유로 해서 Daryl Pregibon(1999)은 데이터마이닝을 “규모와 속도의 통계학(statistics at scale and speed)”으로 묘사하고 있다. 이를 좀 더 확장한 개념은 “규모, 속도 및 단순성의 통계학(statistics at scale, speed, and simplicity)”이다. 이 경우에 단순성이란 알고리즘의 단순성뿐만 아니라 추론논리의 단순성을 의미한다.

전통적인 통계환경에서는 데이터가 희소하기 때문에 추정치를 계산하고 추정치가 얼마나 신뢰할 만한가를 결정하는 데 동일한 표본이 사용된다. 그 결과, 추론을 위해 사용되는 신뢰구간과 가설검정에 대한 논리는 대부분의 경우에 이해하기가 쉽지 않으며, 또한 이러한 한계점들은 잘 인식되지 못하고 있다. 이와는 반대로 하나의 표본

으로 모델을 적합시킨 후 다른 표본으로 모델의 성과를 평가하는 데이터마이닝의 이론적인 면은 이해하기가 쉽다.

데이터마이닝의 성장을 가속화시킨 가장 중요한 계기는 데이터의 증가에 있다. 2003년 당시 대규모 유통 소매업체인 월마트는 10테라바이트 용량의 데이터베이스에 매일 2천만건의 거래데이터를 저장하였다. 반면에 1950년 가장 큰 규모의 회사들은 전자문서 형태로 수십 메가바이트를 담을 수 있을 정도의 데이터만을 갖고 있었다. 1999년에 생산된 정보의 두 배에 해당되는 5엑사바이트의 정보가 2002년에 생산되었고 이 중 40%의 정보는 미국에서 생산되었다고 추정하였다(Lyman and Varian, 2003). 데이터가 증가한 이유는 단순히 경제와 지식베이스가 확장되어서만이 아니라 데이터를 자동적으로 얻는 데 소요되는 비용이 절감되고 이에 대한 가용성이 증가했기 때문이다. 보다 많은 사건들이 기록될 뿐만 아니라 각 사건당 보다 많은 정보들이 수집되고 있다. 바코드, POS(point-of-sale)장치, 마우스 클릭 기록정보 및 위치추적 위성(Global Positioning Satellite: GPS) 데이터 등을 그 예로 들 수 있다.

인터넷이 발전함에 따라서 그 동안 정보창출을 위해 엄청나게 크고 새로운 활동무대가 만들어졌다. 예를 들어 오프라인상에서 이루어지는 소매점 쇼핑, 도서검색, 또는 카탈로그 쇼핑 등과 같이 사람들의 수많은 반복행위들은 인터넷상에 있다. 마케팅의 초점이 제품과 서비스로부터 고객과 고객의 욕구로 이동함에 따라서 매우 상세한 고객데이터에 대한 수요가 만들어졌다. 데이터마이닝에서 사용되는 많은 탐색적, 분석적 기법들은 현재와 같은 연산 능력 없이는 불가능하다. 데이터 저장과 검색의 비용이 지속적으로 줄어들며 따라 대용량의 데이터를 저장하고 생성하는 데 필요한 설비를 구축하는 것이 가능하게 되었다. 결론적으로 빠르고 지속적인 연산능력의 향상은 데이터마이닝을 발전시키는 핵심원동력이라고 할 수 있다.

데이터마이닝을 활용함으로써 비즈니스상의 매출이 신장된 여러 사례들이 나오기 시작했으며, 국방·의료를 포함한 다양한 분야에서 데이터를 통해 도출된 결과가 사람의 의사결정보다 중요하게 작용할 수 있다는 인식이 강해지고 있다. 데이터마이닝의 기법과 도구들은 일반적으로 여러 분야에 적용가능하다. 국방분야에서는 미사일의 정확도에 영향을 주는 요인들이 어떠한 작용을 하는지를 알아내기 위해 데이터마이닝을 활용하고 있으며, 국가정보기관은 엄청난 양으로 도청되는 통신들 가운데 특히 중요성이 높은 통신을 찾아내기 위해 데이터마이닝을 활용하기도 한다. 한편 보안전문가들은 패킷별로 네트워크에 위협요인을 갖고 있는지를 판단하기 위해, 그리고 의료분야에서는 의학연구자들이 암의 재발가능성을 예측하기 위해 데이터마이닝을 사용한다.

기업에 있어서는 기존의 최고 우량고객들과 가장 일치하는 개인들을 파악하기 위

해서, 또는 개별 고객들이 얼마나 많이 소비할 것인가를 미리 추정하기 위해, 그리고 파산가능성이 높은 대출신청자를 식별하기 위해 인구통계학 데이터 및 기타 데이터들을 이용하여 데이터마이닝 방법을 적용할 수 있다. 즉 파산 확률을 계산하거나 전화, 잡지 등의 가입서비스를 포기할 것 같은 고객들을 식별하기 위해 이탈 확률을 로지스틱 회귀분석 등의 데이터 마이닝 기법을 사용할 수 있다. 이 경우 이탈고객관리(churn management)를 통해 할인 또는 다른 유인책들을 선별적으로 내놓을 수 있다.

정보 기술의 발달로 인간의 데이터 수집 능력은 무한대에 가까워지고 있다. 또 수많은 데이터들을 저장하고, 필요한 데이터를 찾으려는 노력과 더불어 그 데이터로부터 가치 있는 정보나 지식을 추출하고자 하는 욕구가 증대되고 있다. 과거 이러한 창의적 작업은 인간의 몫으로 여겨 왔으나, 정보통신 기술의 발전과 추론, 인지 등 학문의 진전으로 인해 작업의 많은 부분을 컴퓨터 및 정보화 기기를 통해 자동으로 수행될 수 있게 됐다. 정보들은 대개 방대한 데이터 안에 숨겨져 있어 지금까지 사용하던 데이터베이스 관리 시스템(Database management system) 혹은 데이터베이스 기법으로는 좀처럼 발견하기 어려웠다. 이러한 상황에서 데이터마이닝은 일부 연구자들에게는 별로 중요한 일이 아니라고 여겨지며 미리 정해진 어떤 특정한 가설이나 조건 없이 데이터를 뒤적거리는 데이터 훑어내기(data dredging)의 한 형태로써 알려져 왔지만 1980년대 후반과 1990년대 초에 마케팅 분야에서 인기를 끌기 시작했다(이영섭, 2003). 데이터마이닝이 가치 있는 정보들을 발견할 수 있게 만들면서 회사 이윤을 증가시키는 정보를 찾아내는 솔루션으로 데이터로부터 무엇인가를 발굴한다는 뜻의 데이터마이닝이라는 개념이 발생하였다.

데이터마이닝의 기본 개념은 새로운 것이 아니라 인공지능 분야의 기계학습(machine learning) 이론에 그 뿌리를 두고 있다(김길준 외 2명, 1996). 즉 현실 세계에서 데이터베이스에 감춰진 유용한 정보를 캐내고자 하는 욕구가 기계학습에서 사용된 기법을 데이터베이스에 응용하기에 이르렀다. 기계학습은 규칙을 찾아내기 위한 자동화된 유도과정(inductive process)이라 할 수 있다. 기계학습에서는 트레이닝 세트(training set)라 불리는 적은 양의 실험실용 데이터를 사용하여 알고리즘을 만들어내는 작업이다. 그러나 이러한 일련의 기계학습 작업은 현실세계의 데이터베이스에는 적용하기가 곤란하다. 왜냐하면 현실 세계의 데이터베이스는 갱신이 수시로 이루어지는 등 다이내믹하고, 오류도 있을 수 있으며 데이터가 없을 수도 있고, 더욱이 대량의 데이터를 보유하고 있기 때문이다. 따라서 데이터마이닝에서는 현실세계의 대규모 데이터베이스를 트레이닝 세트로 간주해서 이로부터 유용한 지식을 캐내는 일련의 작업이다.

데이터마이닝은 크게 컴퓨터 과학의 관점', '경영 정보 시스템 관점', '통계적 관

점'으로 나누어 정의할 수 있다. 컴퓨터 과학적인 관점은 패턴 인식 기술뿐만 아니라 통계적, 수학적 분석 방법을 이용하여 저장된 거대한 자료로부터 우리에게 유익하고 흥미가 있는 새로운 관계, 성향, 패턴 등의 다양한 부가가치 정보를 찾아내는 일련의 과정이라고 정의하고 있다. 경영 정보 시스템 관점에서는 거대한 데이터베이스 혹은 자료에서 유용한 정보를 추출하는 일련의 과정뿐만 아니라 값진 정보를 사용자가 전문적 지식 없이도 사용할 수 있는 의사결정지원시스템의 개발 과정을 통틀어 데이터마이닝으로 정의하고 있다. 통계적 관점에서는 올바른 의사결정을 지원하기 위한 자료분석(Data analysis) 및 모형 선택(Model selection)으로 정의한다. 여러 서적이거나 논문에 의하면 데이터마이닝과 지식 발견이라는 용어를 혼용해서 사용하는 경우가 많다. 개념이 소개되던 초창기에 데이터마이닝이라는 용어는 특히 통계학자, 데이터베이스 연구자, 그리고 기업체에서 많이 사용한 반면, 지식 발견의 경우는 인공 지능이나 전문가 시스템 관련 연구에 주로 등장했다.

1995년 캐나다 몬트리올에서 개최된 지식 발견과 데이터마이닝에 관한 국제 학술 대회(The first international conference on knowledge discovery & data mining)에서 '지식 발견은 데이터로부터 유용한 정보를 발견하는 프로세스의 전 과정'이라고 정의했고, 데이터마이닝은 지식 발견 프로세스 중에서 데이터로부터 정보를 추출하기 위해서 기법을 적용하는 특정 단계라고 제안하였다.

데이터마이닝은 기존의 조회 도구를 대체하는 것이 아니라 보완하는 기능을 제공한다. 기존의 조회방식이 지원하지 못하는 환경에서 데이터마이닝을 사용하려는 것은 일반적으로 데이터에 내재되어 있는 정보의 90% 정도를 차지하는 기본 정보는 무시한 채 10% 이내의 숨겨진 정보만을 찾겠다는 무리한 발상이다. 하지만 데이터마이닝을 통해 추가적으로 얻게 되는 정보의 가치는 그야말로 무한하다. 데이터마이닝에서 얻고자 하는 지식은 연관(association), 분류(classification), 순서(sequence)등에 관한 지식들이다.

나. 데이터마이닝의 과정

(1) 자료수집

데이터마이닝은 대체로 수집 기가에 이르는 대용량의 데이터를 기반으로 한다. 이러한 대용량의 데이터를 데이터 웨어하우스 또는 데이터베이스라고 한다. 그러나 방대한 양의 데이터를 살피는 것은 시간의 측면에서만 보아도 많은 인내를 요하게 되는 작업이 될 수 있다. 이 때 고려해야 하는 과정이 바로 자료수집이다. 자료수집이란 방대한 자료에서 모집단을 대표하는 작은 양의 자료를 추출하는 것이다. 여기서

추출된 데이터를 Target Data라고 한다.

(2) 자료탐색

여러 측면에서 데이터 탐색을 통해서 기본적인 정보를 검색하고 유용한 정보를 추출하는 기법들을 제공한다. 데이터 분포의 시각화를 통해 이상치를 판단하고 연관성이 적은 변수와 측정되지 않은 경우가 많은 변수를 제거한다.

(3) 자료변환

탐색단계에서 얻어진 정보를 기반으로 모형화 단계에서 모형의 성능을 향상시키기 위해, 그리고 데이터가 가지고 있는 정보를 효율적으로 사용할 수 있도록 변수변환, 수량화, 그룹화 같은 방법을 통해서 데이터를 변형하고 조정한다.

(4) 모형화

데이터마이닝의 핵심이라고 할 수 있는 모형화 즉 모델링 단계는 이전 단계에서의 결과들을 토대로 하여 분석목적에 따라 적절한 기법을 통해서 예측모형을 찾아내는 방법들을 찾아낸다. 모델링 이전의 단계는 데이터베이스 전문가에 의해 이루어지며, 이 단계에서 통계적 기법을 이용한 본격적인 데이터마이닝이 시작된다.

(5) 평가

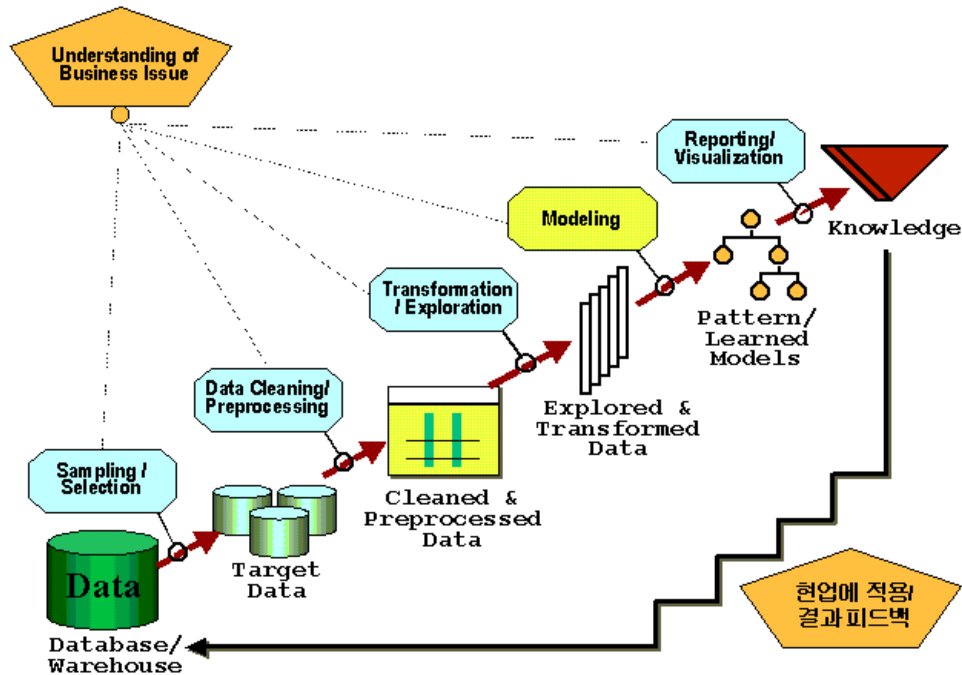
단계를 통해 얻어진 결과의 타당성, 신뢰성, 유용성 등을 평가할 수 있다. 평가단계에서는 다양한 도표와 그래프 등이 제공되는 평가도구를 이용한다. 평가를 통해 얻어진 결과를 현업에 적용시키게 된다.

데이터마이닝의 기법에는 전통적 통계(예: regression analysis, discriminant analysis), 의사결정나무(Decision Tree), 신경망(Neural Networks), K-평균 군집화(K-Means Clustering) 등이 있다. 전통적인 통계기법들은 오랜 역사와 탄탄한 이론을 배경으로 한 검증된 기법으로 타 기법들에 비해 월등하다.

반면 데이터 값들의 정규분포, 공분산(covariance) 등과 같이 여러 가지 통계학적 가정을 요구하는 경우가 많고, 데이터에 다수의 범주형(categorical) 변수가 포함되어 있을 때 이들을 가변수(dummy variable)로 변환시키는 과정에서 발생할 수 있는 치우침(bias) 등의 한계를 지니고 있다. 따라서 이러한 가정을 만족하지 않는 데이터를 분석하여 얻어지는 정보는 신뢰도가 낮고 의미 있는 정보가 될 수 없다. 그래서 기계 학습 이론을 사용하게 되는 것이다. 그러나 통계는 데이터 분석 작업에 항상 기초가

되는 분야로서, 실제로 기계학습을 근간으로 하는 기법들의 이론적 근거가 되며 기법을 통해 도출되는 정보를 평가하고 해석하는데 있어서도 반드시 필요하다. 이러한 데이터마이닝 과정을 <그림 7-1>에 나타내었다.

그림 7-1. 데이터마이닝의 과정



다. 데이터마이닝 기법

(1) 의사결정나무(Decision Tree)

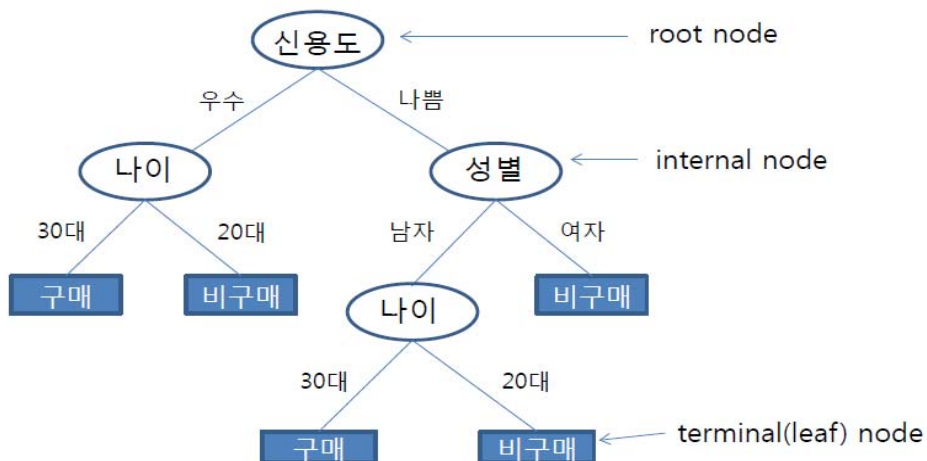
의사결정나무는 데이터마이닝의 분류 작업에 주로 사용되는 기법으로, 과거에 수집된 데이터의 레코드들을 분석하여 이들 사이에 존재하는 패턴, 즉 부류별 특성을 속성의 조합으로 나타내는 분류모형을 나무의 형태로 만드는 것이다(장남식 외 2명, 1999). 만들어진 분류모형은 새로운 레코드를 분류하고 해당 부류의 값을 예측하는데 사용된다. 새로운 레코드의 분류 값을 예측하기 위해 이미 만들어진 분류모형(의사결정나무)이 지시하는 바에 따라 레코드의 속성 값을 질문하는 작업을 반복적으로 수행한다. 특히 결정적인 질문을 던지게 되면 다른 모든 속성의 값을 묻지 않고도 레코드의 부류 값을 정확히 예측할 수 있다. 따라서 레코드를 분류하고 예측할 수 있는 나무(모형)를 얼마나 잘 만드느냐가 의사결정나무 기법의 핵심이다.

의사결정나무는 목표 변수의 유형에 따라 분류될 수 있는데, 이산형일 때는 분류

나무(Classification tree), 연속형일 때는 회귀나무(Regression tree)로 나뉜다. 이 때 이산형이란 신용상태(좋음/나쁨), 은행대출여부(가능/불가능)처럼 제한된 몇 개의 값만을 취하는 것을 말하며, 연속형이란 범주율, 평균 집 값, 교육연수처럼 숫자 자체에 의미가 있는 경우로 어떤 값도 선택할 수 있다.

의사결정나무는 순환적 분할(recursive partitioning) 방식을 이용하여 나무를 구축하는 기법으로, 노드(Node)와 가지(Branch)로 이루어져 있으며, 노드는 그 기능에 따라서 <그림 7-2>와 같이 뿌리 노드(Root node), 하위 노드(Child node), 상위 노드(Parent node), 종단 노드(Terminal node 또는 Leaf), 중간 노드(Internal node)로 구성된다. 나무구조가 시작되는 노드를 뿌리 노드라 하는데, 이 노드에는 모든 관측치를 포함한다. 입력 변수 중에서 분리기준이 될 변수가 선택되고 그 변수의 범주가 병합되는 등의 규칙에 의하여 하나의 노드를 나누게 되면 바로 밑에 2개 이상의 노드가 생기게 되는데 이를 하위 노드라 한다. 이 때 하위노드의 상위에 있는 노드는 상위 노드이고, 하위 노드는 상위 노드의 한 부분이 된다. 이런 식으로 어떤 규칙을 가지고 위의 노드를 나누게 되고 이 때 더 이상의 분리가 발생되지 않는 노드를 종단 노드라 하며, 이는 각 나무 줄기의 맨 끝에 위치하게 된다. 그리고 시작되는 노드도 아니고 맨 끝의 노드도 아닌 나무 구조의 중간부분을 이루고 있는 모든 노드를 중간 노드라 한다. 각각의 노드를 뿌리 노드로부터 종단 노드까지 연결해 주는 것을 가지라고 하고, 이 가지로 연결되어 있는 노드의 개수가 나무의 깊이(Depth)가 된다.

그림 7-2. 소비자의 구매여부에 관한 의사결정나무



의사결정나무의 장점은 분석과정이 나무구조에 의해서 표현되기 때문에 분류 또는 예측을 목적으로 하는 신경망(Neural Network), 판별분석(Discriminant Analysis),

회귀분석(Regression Analysis) 등의 다른 방법들에 비해 분류나 예측의 근거를 알려 주기 때문에 연구자가 분석과정을 쉽게 이해하고 설명할 수 있다는 점에서 분석의 정확도보다는 분석 과정의 설명이 필요한 경우에 더 유용하게 사용할 수 있으며, 데이터를 구성하는 속성의 수가 불필요하게 많을 경우에도 모형을 구축할 때 분류에 영향을 미치지 않는 속성들을 자동으로 제외시키기 때문에 데이터 선정이 용이하다는 점, 연속형이나 명목형 데이터 값들을 기록된 그대로 처리할 수 있기 때문에 지식 발견 프로세스 중 데이터의 변환단계에서 소요되는 시간과 노력을 단축시키는 점, 어떠한 속성들이 각각의 부류값에 결정적인 영향을 주는가를 쉽게 파악할 수 있다는 점, 그리고 모형구축에 소요되는 시간이 짧다는 점이 있다.

의사결정나무의 단점으로는 나이나 소득 등과 같은 연속형 데이터를 처리하는 능력이 신경망이나 통계기법에 비해 떨어지며, 결과적으로 예측력도 감소한다. 따라서 데이터에 다수의 연속형 변수(속성)가 포함되어 있을 경우 값들을 그룹화하여 이산형(discrete)이나 범주형 값으로 변환시킬 필요가 있는데, 그룹화하는 과정에서 발생하는 치우침을 배제할 수 없다. 그리고 부류가 주거나 주택의 가격등과 같은 연속형 변수의 형태를 취하며, 이것을 예측하는 모형을 구축하는 것이 목적일 경우에는 적합하지 않다. 또한 모형을 구축하는데 사용되는 표본의 크기에 지나치게 민감하다. 따라서 보다 정확한 모형을 만들기 위해서는 서로 상이한 값을 갖는 레코드들을 가능한 한 많이 포함하는 데이터가 필요하다. 마케팅에서 의사결정나무는 세분화(Segmentation), 분류(Classification), 예측(Prediction) 등에 이용될 수 있다. 세분화는 데이터를 비슷한 특성을 갖는 몇 개의 그룹으로 분할하여 각 그룹별 특성을 발견하는 경우 또는 각 고객이 어떤 집단에 속하는 지를 파악하고자 하는 경우에 사용된다. 이는 시장 세분화나 고객 세분화에 이용될 수 있다. 분류는 관측치를 여러 입력 변수들에 근거하여 목표 변수의 범주를 몇 개의 등급으로 분류하고자 하는 경우에 사용된다. 이는 고객을 신용도에 따라 우량 또는 불량으로 분류하는 일에 사용될 수 있다. 예측은 자료로부터 규칙을 찾아내고 이를 이용하여 미래의 사건을 예측하고자 할 때 사용된다. 이는 고객 속성에 따라 대출 한도액을 예측하는 것에 사용될 수 있다.

(2) 신경망(Neural Networks) 모형

신경망은 인간이 경험으로부터 학습해 가는 두뇌의 신경망 활동을 흉내 내어 자신이 가진 데이터로부터의 반복적인 학습 과정을 거쳐 패턴을 찾아내고 이를 일반화함으로써 특히 향후를 예측(Prediction)하고자 하는 문제에 있어서 유용하게 이용되는 기법이다. 매우 복잡한 구조를 가진 데이터들 사이의 관계나 패턴을 찾아내는 유연한 비선형 모형(Flexible Nonlinear Model)의 하나로 신경생리학과 유사성 때문에

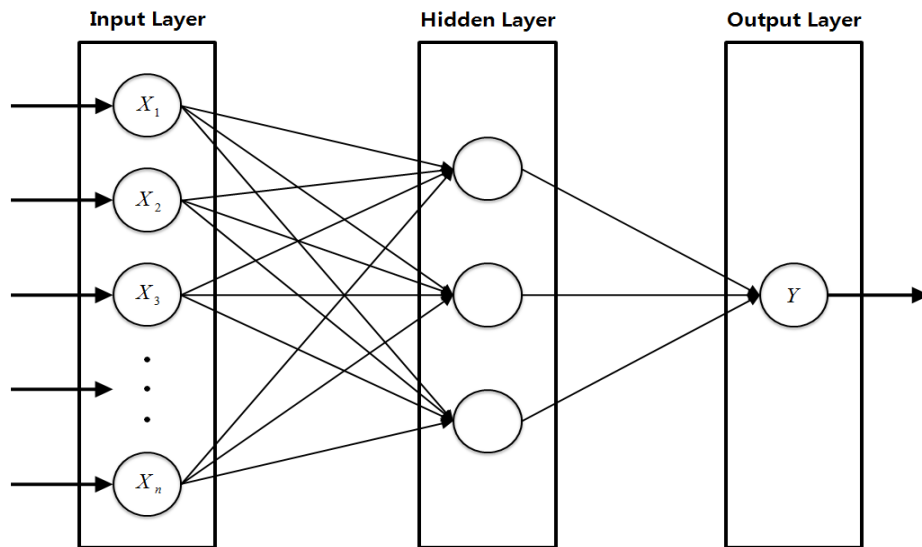
일반적으로 다른 통계적 예측모형에 비해 보다 흥미롭게 여겨지고 있다. 신경망은 신경생리학분야에서 두뇌의 활동을 이해하고자 하는 목적 하에 신경의 작업을 설명하려는 시도에서 출발하였으며, 생물학적인 프로세스를 컴퓨터를 이용하여 모형화하려는 노력에서 비롯되었다. 1980년대 이후 생물학적 활동의 모형 발전과 더불어 컴퓨터 성능의 진보, 신경망 이론에 대한 통계학적인 접목으로 인해 빠르게 발전하면서 최근에는 데이터마이닝에 있어서 유용한 기법이 되고 있다.

신경망에 관한 연구는 1943년 워렌 맥컬럭(Warren McCulloch)과 월터 피츠(Walter Pitts)로부터 시작되었다. 맥컬럭과 피츠의 모형은 네트워크 내의 단순한 요소들의 연결을 통하여 무한한 컴퓨팅 능력을 가진다는 점에서 매우 고무적이었다. 이들의 모형은 인간 두뇌에 관한 최초의 논리적 모형이라는 점에서 그 중요성이 매우 크며, 따라서 이 맥컬럭과 피츠의 모형이 신경망 이론의 효시로 여겨지고 있다. 그 이후 1949년에는 캐나다의 심리학자 도널드 헵(Donald Hebb)이 두 뉴런 사이의 연결강도를 조정할 수 있는 학습규칙을 발표하였으며, 프랭크 로젠블랫(Frank Rosenblatt)은 1957년에 ‘퍼셉트론(Perceptron)’이라는 최초의 신경망 모형을 발표하였다. 이 모형은 처음 소개되었을 때 아주 높은 관심을 불러일으켰으며 여러 분야에 걸쳐 큰 영향을 끼쳤다. 퍼셉트론 모형은 당시에 매우 가능성이 큰 연구로 여겨졌으나 그 후 여러가지 문제점들이 제시되었다. 민스키(Marvin Minsky)와 페퍼트(Seymour Papert)가 ‘퍼셉트론즈’라는 저서를 통해 퍼셉트론 모형을 수학적으로 철저히 분석하여 그 모형의 단점들을 밝혀내고 난 후에는 신경망에 관련된 연구는 약 20년간 침체의 길을 걷게 되었다.

인공지능에 관한 연구가 진행되다가 퍼셉트론의 문제점을 네트워크 구성시 한 개의 계층을 더 추가해 구성한 다층 퍼셉트론(Multi-Layer Perceptron: MLP)의 개념이 등장하면서 신경망 연구에 관한 새로운 계기를 마련하였다. 즉, 은닉층(Hidden Layer)과 역전파(Back Propagation) 알고리즘을 이용함으로써 선형분리 문제뿐만 아니라 여러 가지 문제점들을 해결할 수 있게 되었다. 각 은닉층의 노드와 출력 노드는 시그모이드 함수와 같은 비선형 활성화함수를 사용하며 그렇게 함으로써 단층퍼셉트론이 해결하지 못하는 선형분리 불가능 문제에 대해 학습능력을 갖게 된다(Patuwo, Hung, 1993). 이 때의 시그모이드 함수는 미분가능이면서 연속적인 출력함수로서 신경망의 활성화함수로 가장 많이 사용되고 있다. 시그모이드 형태의 출력함수에는 로지스틱(logistic) 함수, 쌍곡 탄젠트(hyperbolic tangent) 함수, 역 탄젠트(arc-tangent) 함수, 엘리엇(Elliott) 함수 등 여러 가지가 있다. 다층 퍼셉트론의 출력층은 시그모이드 곡면들, 즉 기저 함수들(basis functions)의 선형결합이다. 따라서 다층퍼셉트론은 상당한 유연성을 가질 수 있게 된다(강현철 외 4명, 2001). 다층퍼셉트론에서 여러

개의 은닉층을 사용할 수 있지만 대부분의 경우 한 개의 은닉층을 사용한다. 은닉층의 마디 수를 증가시키게 되면 분류능력이 향상되어 더 많은 패턴을 인식할 수 있지만 자칫 과잉맞춤의 결과를 초래하기 쉽다. 이것은 마치 의사결정나무 구축시 모든 레코드들을 완벽하게 분류할 때까지 나무를 확장하여, 새로운 레코드에 대한 예측력을 감소시키는 것과 유사하다. 따라서 의사결정나무에서는 적절한 수준에서 나무의 확장을 중단하는 것이 필요하듯이, 신경망에서는 적절한 은닉마디의 수를 결정하는 것이 필요하다.

그림 7-3. 신경망 모형의 구조



신경망 모형은 통계학적 모형과는 달리 그 자체의 귀납적 특성으로 인해 모형을 도출하기 위한 이론수립 과정을 생략할 수 있으며, 통계학적 모형에서 요구되는 엄격한 가정(Strict assumption)에 전혀 제한을 받지 않는다. 기존의 통계학적 방법론들은 엄격한 가정을 요구하기 때문에 그 사용범위에 제한을 받거나 가정을 위배한 경우에는 그 결과에 대한 신뢰성이나 사용기법의 적정성 등이 문제시된다. 반면 인간의 뇌의 신경조직을 모방하여 수학적으로 모형화한 신경망은 고도의 병렬분산처리(Parallel distribution processing)를 하는 모형으로서 이러한 통계학적 가정에 전혀 구애받지 않으며 통계학적 가정을 만족하지 못하는 자료의 분석에 적합한 비모수(Nonparameter), 비선형(Nonlinear) 모형이다.

신경망 모형의 장점은 신용평가, 카드 도용패턴 분석, 수요 및 판매 예측, 고객세분화(customer segmentation) 등 여러 가지 목적으로 상당히 다양한 산업분야의 다양한 문제에 적용될 수 있고, 입력 변수와 목표 변수의 관계를 그리기가 어려운 복잡한

데이터에 대해서도 좋은 결과를 주는 것으로 알려져 있다. 또한 입력 변수와 목표 변수의 속성이 연속형이나 이산형인 경우를 모두 다룰 수가 있다. 또한 신경망 기법을 지원하는 상용화된 데이터마이닝 제품이 많으며, 보다 다양한 기능을 제공하면서도 사용이 간편한 제품들이 지속적으로 소개되고 있어서 제품 선택의 폭이 넓고 취득하기가 쉽다.

단점으로는 망을 설계하는 작업과 다양한 매개변수(parameter) 값을 설정하는 작업이 전문성을 필요로 하기 때문에 비전문가들이 사용하기에 어려운 점과 의사결정 나무의 경우 명쾌하고 쉽게 이해할 수 있는 결과물을 제공하는 데 반해, 신경망은 인간이 어떠한 현상을 인지하게 되는 것처럼 쉽게 설명되지 않는 내부적인 작업을 수행하고 이를 통해 얻어진 결과물을 제공할 뿐 어떠한 변수가 중요한지, 어떻게 상호작용이 이루어져서 그러한 결과물을 주게 되는 지에 대한 설명은 하지 않아 종종 블랙박스(Black box)로 불리고 있다. 따라서 대출심사의 기준이나 이탈고객의 특성 파악 등과 같이 결과의 근거가 요구되는 영역에는 적합하지 않으며, 설명력(Comprehensibility)보다는 더욱 정확한 예측을 주는 것이 더 중요하게 고려되는 경우에 이용될 수 있다. 또한 입력변수의 수가 너무 많으면 망을 형성하는데 더욱 오랜 시간이 걸리며 예측력도 감소한다. 이 경우에는 통계나 의사결정나무를 이용해 변수를 선별한 후, 신경망을 구축하는 대안을 고려할 수도 있다.

(3) K-평균 군집화(K-Means Clustering)

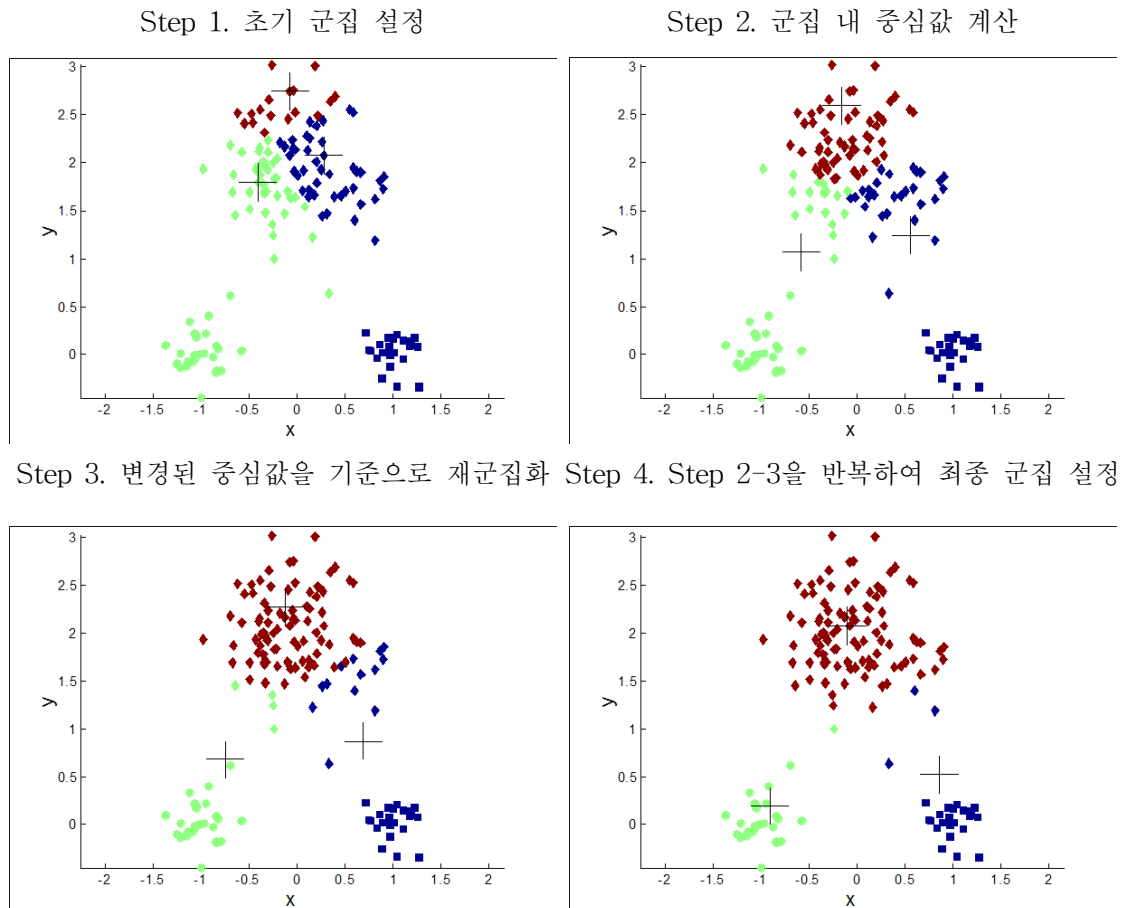
K-평균 군집화는 데이터마이닝의 군집화 작업에 주로 사용된다. 이 기법은 N개의 속성으로 구성되는 각각의 레코드를 벡터로 표시하여 N차원의 데이터 공간(space)에 나타낼 때, 유사한 특성을 갖는 레코드들은 서로 근접하여 위치한다는 가정에 근거하고 있다. 여기에서 영문자 'K'는 K개의 군집을 의미한다. K-평균군집화 기법을 2차원 공간에서 적용하는 예로 레코드들을 3종류(K=3)의 군집(부류)으로 분류하는 작업을 단계별로 설명하면 다음과 같다.

첫 단계는 레코드들 중에서 3개의 레코드를 임의로 선택하여 각 군집의 중심값으로 지정한 후, 나머지 레코드들이 소속될 군집을 결정한다. 단, 소속 군집의 결정 기준은 각 레코드와 3개 중심값의 직선거리 중에서 가장 짧은 중심값으로 한다. 레코드의 좌표 (a_1, b_1) 와 첫 번째 중심값의 좌표 (x_1, y_1) 의 직선거리는 유클리디안 거리로써 다음과 같이 계산된다.

$$\sqrt{(x_1 - a_1)^2 + (y_1 - b_1)^2} \quad (7-1)$$

다음 단계로는 각 군집에 속한 레코드들의 중심값을 재측정한다. 즉 첫 번째 군집의 새로운 중심값은 군집에 속한 레코드들의 월수입 평균값과 연령 평균값이 된다. 중심값이 구해지면 첫 단계에서와 마찬가지로 각 레코드에 대해 군집의 중심값과 직선 거리를 측정하여 가장 근접한 군집에 포함시킨 후, 군집간의 경계선을 표시한다. 새로운 군집이 형성되면 이전 단계의 과정을 중심값의 이동이 미비할 때까지, 즉 경계선의 변화가 거의 없을 때까지 반복적으로 실행한다. 단계별 과정을 <그림 7-4>와 같이 나타내었다.

그림 7-4. 군집분석 과정



K-평균 군집화의 장점으로서는 K-평균군집화 기법을 지원하는 상용화된 제품이 많으며, 사용 또한 쉽고 간편해서 사용자가 자신이 원하는 사양을 갖춘 제품을 이용하여 손쉽게 문제의 영역에 적용할 수 있다는 점과 군집분석 이외에도 분류·예측을 위한 선행작업, 특히 오류값이나 결측치 처리작업 등 다양한 분석에 사용할 수 있다는 점을 들 수 있다.

K-평균 군집화의 단점은 속성들의 형태가 다르거나 같은 형태의 속성이라도 값의 범위가 다양할 경우 거리 측정기준을 설정하는데 어려움이 따르고, 사용자가 지정한 K값에 따라 데이터를 K개의 군집으로 나누는데 실제 데이터의 구조가 이 값보다 작거나 큰 수의 군집 특성을 갖고 있다면 좋은 결과를 기대하기 어렵다. 그리고 군집 결과에 대한 해석이 용이하지 않다.

(4) 연관성 규칙(Association Rule)

연관성 규칙이란 하나의 거래나 사건에 포함되어 있는 항목들의 관련성을 파악하여 둘 이상의 항목들로 구성된 연관성 규칙을 도출하는 탐색적 자료분석 방법이며 마케팅에서 손님의 장바구니에 들어있는 품목간의 관계를 알아본다는 의미에서 장바구니분석(Market Basket Analysis)이라고도 한다. 데이터마이닝의 분야 중에서도 연관성 규칙은 대표적인 발견 위주의 데이터마이닝으로 고객의 구매 상품 간의 관계를 파악하는 데 많이 활용되는 기술이다.

연관성 규칙을 이야기 할 때, 가장 많이 인용되는 사례로 “맥주와 기저귀”기의 예가 있다(이지은, 2002). 미국의 대형 편의점의 고객 구매 데이터에서 일회용 아기 기저귀를 사는 사람은 맥주도 같이 산다는 연관 규칙을 연관성 분석을 통하여 발견하였는데, 실제 고객을 조사한 결과 보통 아내가 남편에게 기저귀를 사오라고 하면 남편이 기저귀를 사면서 맥주도 같이 사간다는 것이다. 연관성 규칙을 위한 입력 데이터는 거래(transaction) 데이터로 각 레코드는 고객이 한번에 구입한 품목(item)들로 구성된다. 즉, 각 거래에서 고객이 구입한 상품과 구입 날짜로 구성되는 이른바 장바구니 데이터(Market Basket data)이다. 이러한 연관성 규칙은 특히, 유통업체에서 바코드 기술의 도입으로 개개의 거래 데이터를 저장하여 분석할 수 있어 그 활용도가 높다. 연관성 규칙의 측도로는 지지도(support)와 신뢰도(confidence), 향상도(lift)가 있다. 지지도는 전체 거래(n) 중에서 두 품목 X와 Y를 동시에 포함한 거래(count.{X, Y})의 비율로서 연관성 규칙을 생성하기 위해 사용될 품목을 결정하는 측도로 쓰이며 식 (7-2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$support = \frac{count.\{X, Y\}}{n} = P(X \cap Y) \quad (7-2)$$

신뢰도는 품목 X를 포함한 거래(count.{X}) 중에서 품목 X와 Y를 동시에 포함한 거래(count.{X, Y})가 차지하는 비율로 일정수준 이상의 지지도를 갖는 품목들 사이에서 규칙을 생성하는 측도로 쓰이며, 품목 X가 포함되어 있을 때 품목 Y도 포함되어 있을 확률이라 볼 수 있다. 신뢰도는 식 (7-3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$confidence = \frac{count.\{X, Y\}}{count.\{X\}} = \frac{P(X \cap Y)}{P(X)} = P(Y|X) \quad (7-3)$$

향상도는 전체 거래(n) 중에서 품목 Y를 포함한 거래(count.{Y})의 비율(P(Y)) 대비 X가 포함되어 있을 때 품목 Y가 포함된 거래의 비율(P(Y|X) = confidence)로서 Y에 대한 X의 영향력을 나타내며, X와 Y가 서로 상관이 없는 독립적인 관계일 경우 $P(X \cap Y) = P(X)P(Y)$ 이므로 향상도는 1이 된다. 향상도가 1보다 작을 경우에는 Y에 대한 X의 영향력이 음의 상관관계를 가지는 것을 뜻하며, 향상도가 1보다 큰 경우에는 X의 영향력이 양의 상관관계를 가지는 것을 뜻한다. 향상도는 식 (7-4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$lift = \frac{P(Y|X)}{P(Y)} = \frac{P(X \cap Y)}{P(X)P(Y)} = \frac{confidence}{P(Y)} \quad (7-4)$$

연관성 분석의 결과는 $X \rightarrow Y$ (If X then Y)로 표현되며, 이때 X 부분을 ‘body’라고 하고 Y 부분을 ‘head’라고 한다. 장바구니 분석에서의 해석은 “품목 X를 구매하면 동시에 품목 Y도 구매한다”라고 표현한다. 지금까지 body에 하나의 품목인 X에 대해서 설명하였지만 때로는 여러 개의 품목들로 이루어진 집합으로도 볼 수 있으며, 이 때 각 품목들을 A, B, C, ...이라하면 X를 포함한 거래의 수(count.{X})는 X안의 모든 품목들을 포함하고 있는 거래의 수(count.{A ∩ B ∩ C ∩ ...})이다.

연관성 규칙의 장점은 교차판매, 묶음판매, 상품의 진열, 쿠폰 배부, 카탈로그 디자인 등의 여러 분야에서 활용될 수 있으며 연관성 분석의 결과는 이해와 적용이 용이하다. 수많은 거래, 품목을 포함하는 대용량 데이터일 경우, 계산의 수가 크게 증가하기는 하지만 분석을 위한 계산은 상당히 간단하며, 단순한 결과만을 위해서는 기초적인 워크시트의 사용법만을 알고 있는 분석자도 분석이 가능한 점 또한 장점이라 볼 수 있다. 단점으로는 품목들이 동일한 빈도를 갖지 못하거나 거래수가 적은 품목의 경우 규칙 발견 과정 중 제외되기 쉬운 점을 들 수 있다.

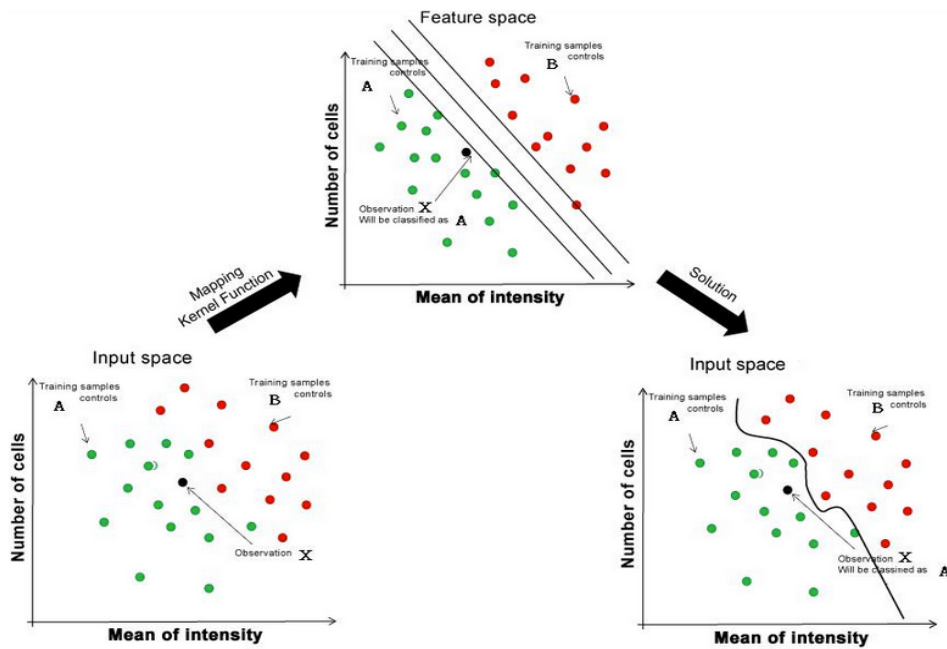
(5) 서포트 벡터 머신(Support vector machine)

서포트 벡터 머신은 지도 학습에서 사용되는 방법으로 주어진 자료에 대해서 그 자료들을 분리하는 초평면 중에서 자료들과 거리가 먼 초평면을 찾는 방법이다. 즉, 너저분한 패턴들의 분포들을 가장 잘 분류할 수 있는 기준선(평면)을 찾아내는 알고리즘이며, 이를 다차원 벡터(패턴) 경우까지를 확장할 수 있도록 체계화 시킨 것이다. 복잡하게는 음성 인식에도 사용되기도 한다. 2차원 평면 내 여러 개의 점들이 분

포되어 있는 것을 확인할 수 있으며 이런 점(패턴)들을 분류할 수 있는 몇 개의 선들이 있다. 관건은 다차원 공간에서 분류의 기준이 되는 선들을 어떻게 찾아낼 것인가라는 것이다. 어떻게 보면 의사결정나무는 레벨이나 깊이 위주로 분류의 기준을 찾아내는 데 반해, 서포트 벡터 머신은 패턴들이 분포되어 있는 다차원 공간 상에서의 분류 기준을 찾아내는 것으로 유사하다고도 볼 수 있다.

서포트 벡터 머신은 기본적으로 두 범주를 갖는 관측값들을 분류하는 방법이다. 이 방법은 Vapnik(1979)에 의하여 발표된 바 있으나 최근에 와서야 그 성능을 인정받게 되었으며, Vapnik(1979)과 Burger(1998)에 의해 잘 소개되고 있다. 서포트 벡터 머신의 목적은 주어진 많은 데이터들을 가능한 멀리 두 개의 집단으로 분리시키는 최적의 초평면을 찾는 것이다. 서포트 벡터 머신의 최적 초평면은 다음과 같은 과정을 거쳐 형성된다.

그림 7-5. SVM 알고리즘

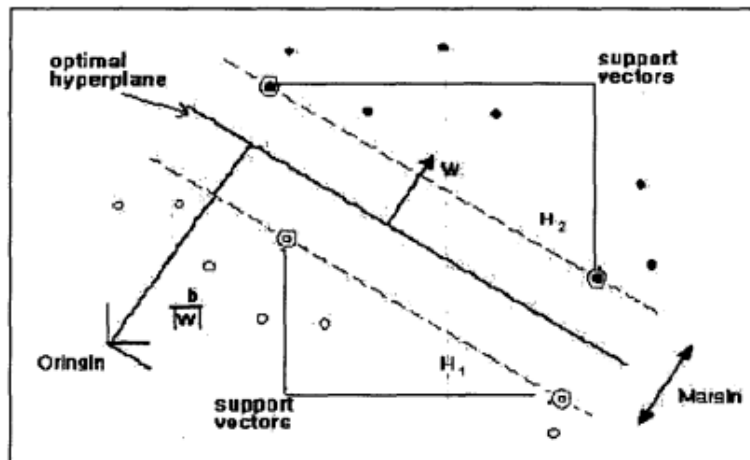


N 개의 객체로 이루어진 표본에서, i 번째 객체를 p 개의 변수로 이루어진 벡터 x_i 로 표기하고 이에 대응하는 분류된 범주를 y_i 가 1 또는 -1의 두 가지 범주를 갖는다고 하면 두 범주를 구분해 주는 초평면은 무수히 많이 존재한다. 여기서 두 개의 범주를 완전히 구분해 주는 분리 초평면을 $H: w'x + b = 0$ 과 같이 나타내며, 이 초평면을 최적 초평면이라한다. 이때 분리 초평면에서부터 가장 가까운 범주 1을 가진 객체를 지나는 초평면과 가장 가까운 범주 -1을 가진 객체를 지나는 초평면 사이의 거리는 $2/\|w\|$ 이다. (여기서 w 는 단위길이를 갖는 초평면과 직교하는 벡터이다. 이 거리를

마진(margin)이라 한다(그림 7-6). 따라서 선형 SVM은 식 (7-5)와 같은 최적화문제를 통해 마진을 최대화 시키는 w 와 b 를 찾는 것이 목적이다.

$$\begin{aligned} & \text{Min}_w \frac{w \cdot w}{2} \\ & \text{subject to } y_i(w \cdot x_i + b) \geq 1 \end{aligned} \quad (7-5)$$

그림 7-6. 최적의 분리 초평면



일반적으로 의사결정나무보다 신경망 분석이 분류율이 좋다. 의사결정나무가 각 변수에 따라 수직적으로 분류 기준을 찾지만, 신경망 모형은 여러 개의 변수를 가중치를 사용하여 동시에 고려하므로 유연한 분류가 가능하기 때문이다. 그리고 서포트 벡터 머신은 신경망 분석보다 분류율이 좋은 것으로 평가된다. 신경망 모형은 분류율을 최대로 하는 것을 목적으로 하지만 서포트 벡터 머신은 분류율을 최대로 하면서 더 나아가 분류를 구분하는 기준을 최대화 하는 것까지 고려한다.

라. 데이터마이닝 적용 사례

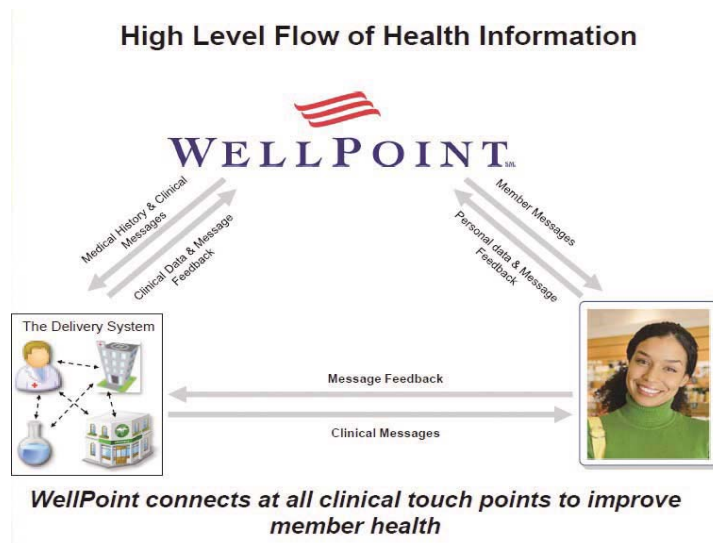
데이터마이닝을 적용한 사례는 다음과 같다. 2012년 오바마 미국 대통령의 재선 캠프 전략 중 하나가 데이터마이닝이었다. 당시 오바마 캠프의 대변인은 “데이터마이닝은 우리의 핵무기 코드”라고 밝혔을 정도였으며, 캠프 내부에는 철저한 보안 아래 데이터마이닝팀이 꾸려졌다. 특히 오바마 캠프는 2008년 대선이 끝난 직후부터 재선을 겨냥해 데이터마이닝팀을 강화했다고 알려져 있으며, 주목해야 할 점은 오바마 캠프의 데이터마이닝팀이 데이터마이닝 분석을 통해 정확한 미래 예측을 보여줬다는 점이다. 오바마 대통령은 데이터마이닝을 적극적으로 활용해 잠재적 지지자까지 공략하는 데 성공했다.

미국 국립보건원에서는 다양한 질병을 연구하기 위해 유전자 데이터를 공유 및 분석할 수 있는 시스템을 마련하여 질병치료에 도움을 주고 있다. 1,700명의 유전자 정보를 포함한 기업 및 기관들의 파트너 쉽을 통해 200TB의 유전자 데이터를 확보하였으며, 아마존 클라우드에 저장하여 누구나 접근하여 데이터를 이용 가능하게 하고 있다. 이 시스템을 사용하여 유전자 정보를 공유함으로써 새로운 질병에 대한 빠른 진단 서비스 제공이 가능해졌고, 난치병 및 불치병에 관련된 유전자 정보를 공유하여 새로운 치료제 개발 가능성을 제시하게 되었으며 최신 IT 기술 결합으로 치료 확률이 상승할 것으로 기대하고 있다(한국정보화진흥원, 2012).

또한, 미국 국립보건원에서는 미국 국립의료원에서 제공하는 의약품 정보 서비스는 알약의 제조사와 사용자간의 유기적인 쌍방향 상호작용을 통해 약 정보를 제공하고 남녀노소 쉽게 검색할 수 있는 시스템을 이용하여 pillbox 프로젝트를 통해 의료 개혁을 시행하고 있다. 빅데이터를 이용하여 의약품 사용에 대한 정보를 제공하고 약 검색 서비스를 통해 얻어진 다양한 사용자의 질병에 대한 통계 데이터를 활용할 수 있고, 주요 질병의 분포 및 추세를 예측함으로써 국가 차원에서는 조기 대응이 가능하다는 이점이 있다(한국정보화진흥원, 2012).

건강보험회사 웰포인트(Wellpoint)는 의료진의 진단과 환자 치료에 3,420만 명에 대한 환자 정보를 통합하고 분석하는 시스템을 이용하여 효율적으로 환자를 치료하고 있다. 환자의 증상, 면담결과, 진단, 연구 등 모든 정보를 수집하고 모든 사례를 고려하여 최적의 진단 및 환자 치료 가이드라인과 2억 페이지에 해당하는 자료를 검

그림 7-7. 웰포인트의 의료정보 제공 체계

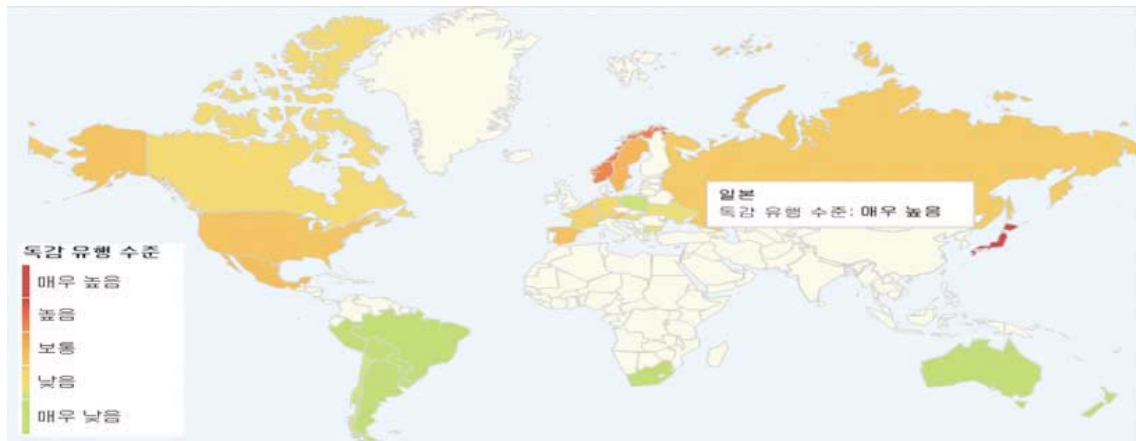


자료: Transforming the Information Unfrasturcture: Build, Manage, Optimize, Computerworld, 2011.
출처: 한국정보화 진흥원

색 분석하여 3초안에 결과를 제시하여 제공해준다. 이 시스템은 환자의 상황에 가장 맞는 최선의 치료 방법을 제시하여 불필요한 치료 및 진료를 줄여 환자 및 의료보험 회사의 진료비 낭비를 방지하고 만성질환을 체계적으로 관리하여 고령층에 대한 효과적인 진료 서비스를 제시, 환자에게 적절한 치료법을 제공하고 최신 정보를 과학적인 방법으로 제시한다(한국정보화진흥원, 2012).

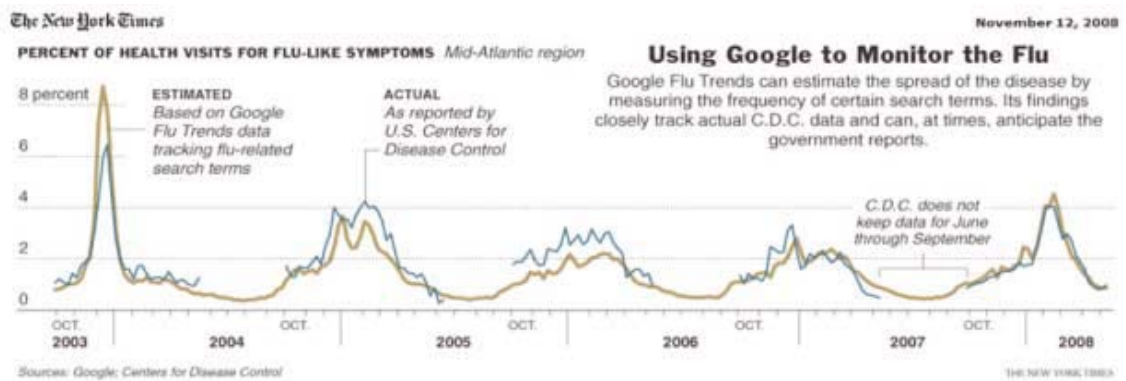
구글(Google)에서는 ‘감기’와 관련된 검색어 분석을 통한 독감예보 서비스를 제공한다. 구글 홈페이지에서 독감, 인플루엔자 등 사용자가 남긴 독감과 관련된 검색어 쿼리의 빈도를 조사하여 독감이 조기에 확산되는 것을 미리 방지하는 것으로, 미국 질병 예방센터 데이터와 비교하였을 때 실제 밀접한 상관관계가 있는 것으로 조사되었다. 미국의 보건 당국보다 훨씬 앞서 지역별 독감 유행 정보를 제공하였고, 감기뿐만 아니라 다양한 검색어를 분석하여 문화, 경제, 스포츠 등에도 적용하여 의미있는

그림 7-8. 구글 독감 동향



자료: <http://www.google.org/flutrends/>
출처: 한국정보화 진흥원

그림 7-9. 구글 독감 동향 및 실제 확산의 비교 결과

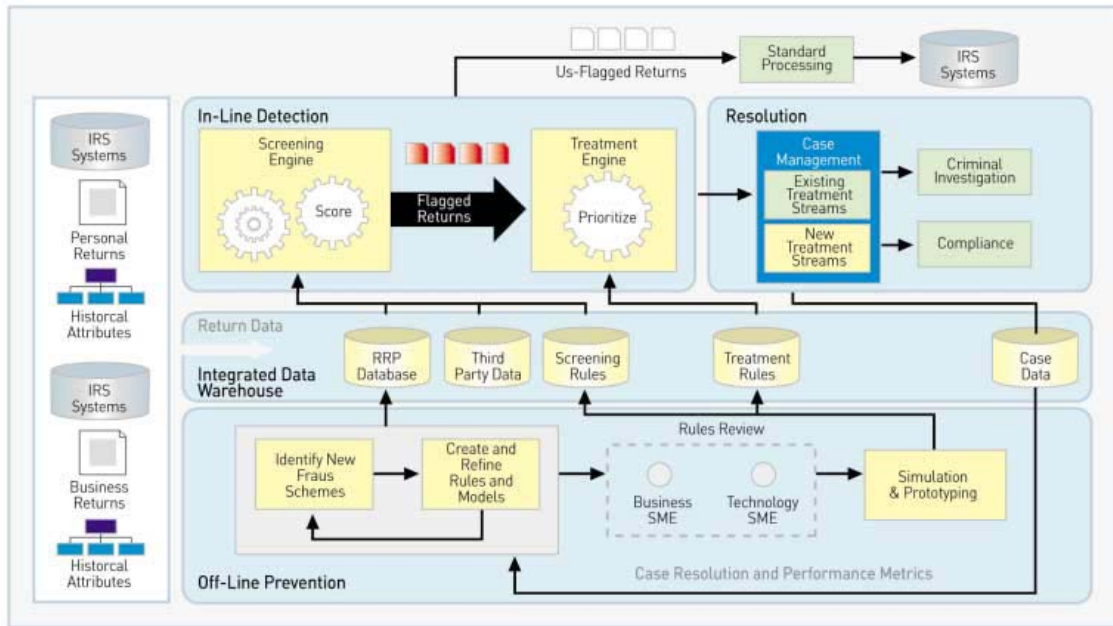


자료: 뉴욕타임즈, 2008.
출처: 한국정보화 진흥원

피드백을 제공할 수 있다(한국정보화진흥원, 2012).

미국 국세청에서는 탈세 방지 시스템을 통해 국가 재정을 강화하고 있다. 탈세와 사기로 인해 국가의 재정 위기가 증가하는 것을 막기 위해 대용량 데이터와 다양한 기술을 결합하여 탈세 및 사기 범죄 예방 시스템을 구축하였으며, 이 시스템은 사기 방지를 해결하기 위한 솔루션, 소셜 네트워크 분석, 데이터 통합 및 지능형 감시 시스템을 담고 있다. 구축된 시스템을 사용한 결과 세금 누락 및 불필요한 세금 환급 절감의 효과가 발생하였고, 과학적 데이터를 근거로 탈세 조사를 진행함으로써 탈세자 수가 감소하였으며 이 시스템을 기반으로 향후에 범죄 및 탈세 관련 사건을 미리 방지할 수 있다(한국정보화진흥원, 2012).

그림 7-10. RRP(Return Review Program) 시스템 구조



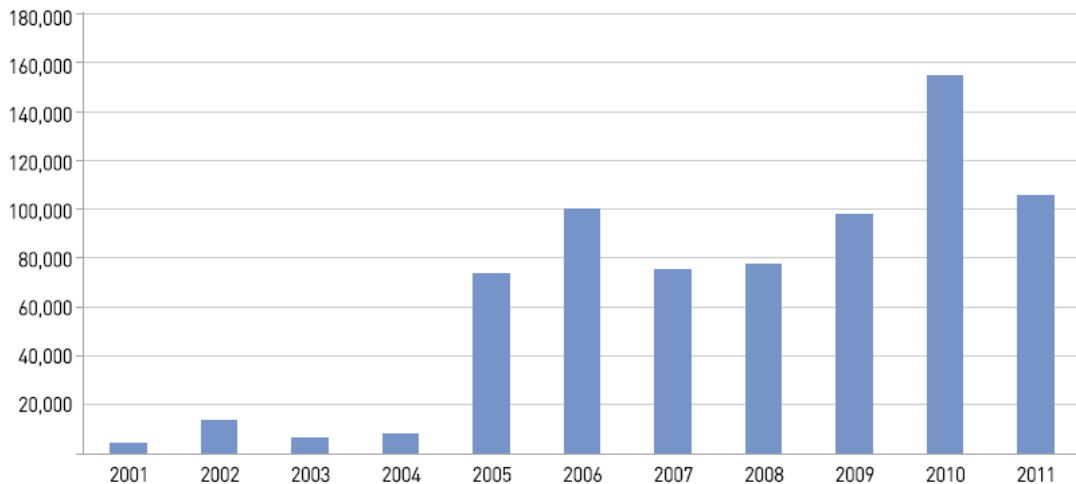
자료: SAS Korea
출처: 한국정보화 진흥원

싱가포르에서는 국가적 차원의 위험요인과 기회요인을 선제적으로 파악하여 대응 방안을 수립하기 위한 국가위험관리시스템(Risk Assessment and Horizon Scanning, RAHS)을 통해 국가안전관리를 하고 있다. 국가에 위협을 미칠 수 있는 질병, 금융위기 등 다양한 데이터를 수집하고 분석하여 국가 및 국민의 위험 요소를 파악하고 대비함으로써 국민의 생명과 재산을 보호하고 수많은 데이터와 변수를 동시에 고려하는 전천후 국가 위험 관리 체계이다(한국정보화진흥원, 2012).

FBI는 유전자 색인 시스템을 통해 유전자 분석표를 대조함으로써 단시간에 범인

검거를 하여 사건을 해결하고 있다. 유전자 정보 은행 CODIS(Combined DNA Index System)에는 50개 모든 주와 연방정부가 수집한 미제 사건 용의자 및 실종자에 대한 정보만 1만 3000건의 유전자 정보와 범죄자 12만명의 유전자 정보가 DNA 분석표로 저장되어 있으며, 이 시스템을 이용한 과학적 수사로 범죄사건을 해결하는데 획기적인 성과를 달성하였다(한국정보화진흥원, 2012).

그림 7-11. FBI에서 수집한 범죄자 DNA 샘플 수(2001. 6 ~ 2011. 5)



자료: U.S. Department of Justice Office of the Inspector General Audit Division, 2011.

출처: 한국정보화진흥원

샌프란시스코에서는 과거의 범죄 기록 분석을 통해 범죄 발생 지역 및 발생 시각을 예측하여 범죄를 미연에 방지하기 위한 시스템을 구축하였으며, 이 시스템을 이용하여 효율적인 경찰 인력을 배치와 순찰 시스템으로 범죄 예방 및 범죄율을 감소시키고 있다(한국정보화진흥원, 2012).

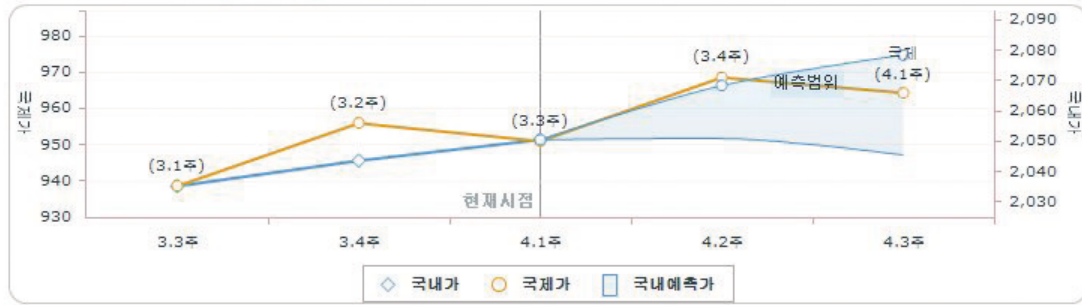
한국석유공사에서는 국내 유가 예보 서비스를 통하여 급격한 유가변동에 대응하고 고유가에 따른 소비자 부담 감소를 위해 국내 주유소 유가 가격 데이터를 수집하고 국제 유가를 기반으로 국내 정유사와 주유소 판매 가격을 추정하는 예측모델을 개발 및 유가에 직접적 또는 간접적으로 영향을 미치는 여러 가지 변수를 이용하여 유가정보 예측 서비스를 소비자들에게 제공하였다. 유가 예보 서비스를 통해 국제 유가에 민감한 국내 물가 안정에 기여하였고, 유가 변동에 대한 유기적인 대처와 미리 대책을 마련할 수 있었다. 그리고 유가 변동으로 인한 사재기 등의 부작용을 방지하는 효과를 보였다(한국정보화진흥원, 2012).

그림 7-12. 한국석유공사의 가격정보 및 유가에보 서비스

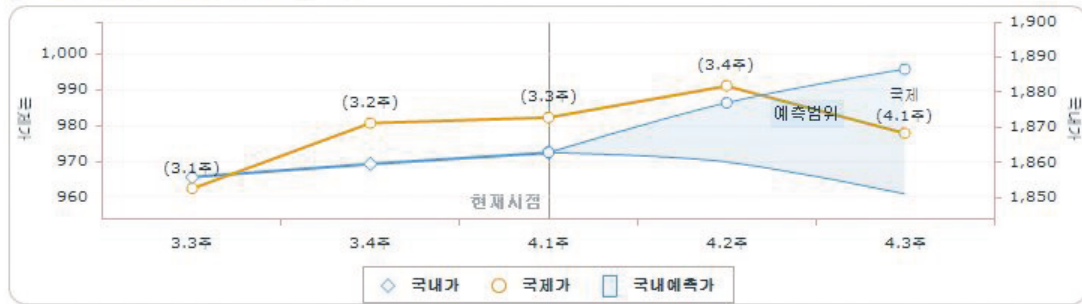
휘발유 (원/리터)				경유 (원/리터)			
2,062 (±16)				1,869 (±18)			
휘발유	현재가 (4.19)	이번주 예측가 (4.8~4.14)	다음주 예측가 (4.15~4.21)	경유	현재가 (4.19)	이번주 예측가 (4.8~4.14)	다음주 예측가 (4.15~4.21)
전체	2,062.56	2,060 (±9)	2,062 (±16)	전체	1,867.49	1,868 (±8)	1,869 (±18)
SK에너지	2,070.74	2,071 (±12)	2,075 (±21)	SK에너지	1,879.43	1,882 (±9)	1,883 (±19)
GS칼텍스	2,069.67	2,067 (±5)	2,068 (±11)	GS칼텍스	1,875.72	1,877 (±8)	1,877 (±17)
현대오일뱅크	2,053.51	2,048 (±9)	2,049 (±17)	현대오일뱅크	1,855.44	1,855 (±9)	1,855 (±19)
S-OIL	2,055.95	2,052 (±7)	2,053 (±14)	S-OIL	1,857.93	1,858 (±7)	1,858 (±16)
etc기타	2,037.58	2,031 (±8)	2,033 (±16)	etc기타	1,835.81	1,834 (±9)	1,834 (±18)

※ 예측가격은 92% 신뢰구간을 적용

■ 국제휘발유가 / 국내휘발유가 (원/리터)



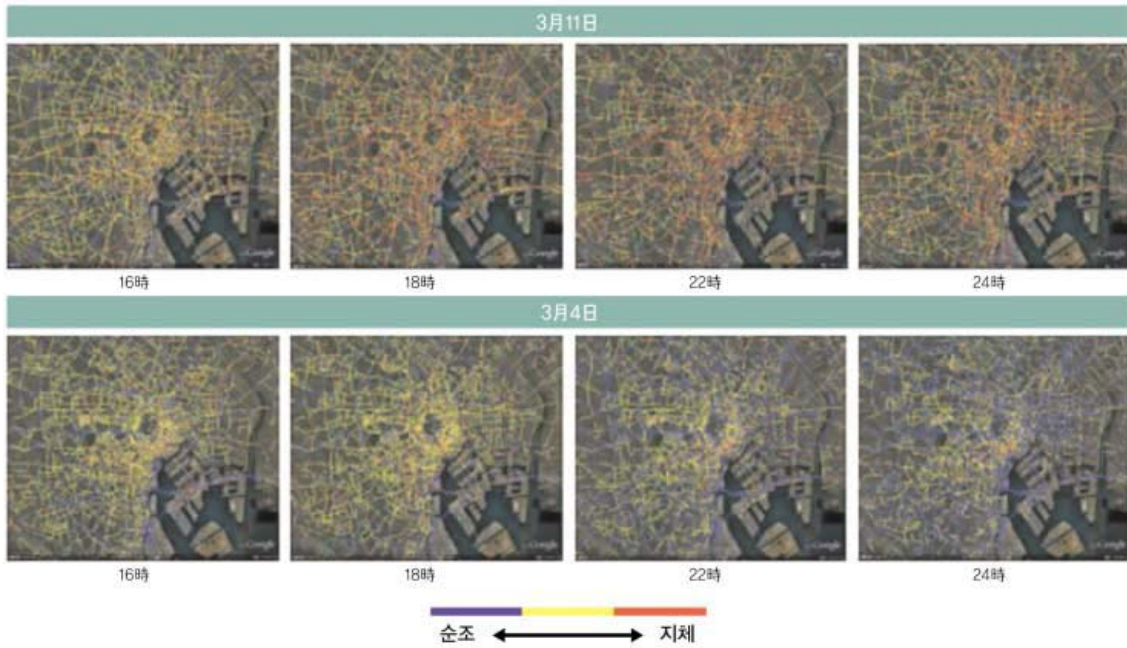
■ 국제경유가 / 국내경유가 (원/리터)



자료: Opinet 유가정보서비스
출처: 한국정보화진흥원

일본에서는 택시 및 내비게이터 사용자의 GPS 데이터로부터 자동차 주행의 스피드를 계산하여 얻어진 교통 정보와 수집된 교통 정보를 바탕으로 실시간 최적의 교통 안내 서비스를 제공하고 있다. 시스템의 사용으로 실시간 교통 정보 공유로 최적의 교통 안내 서비스가 가능해 졌고, 교통 체증으로 인한 불필요한 에너지 낭비 방지 및 효율이 증대되었다(한국정보화진흥원, 2012).

그림 7-13. 도쿄 도심부의 도로혼잡상태 추이 비교



자료: 노무라연구소, IT Solutions Frontier, Vol.29 No.4, 2012.
출처: 한국정보화진흥원

2. 텍스트마이닝을 이용한 기후변화관련 식품분야 논문초록 분석

가. 텍스트 마이닝

(1) 텍스트 마이닝 개요

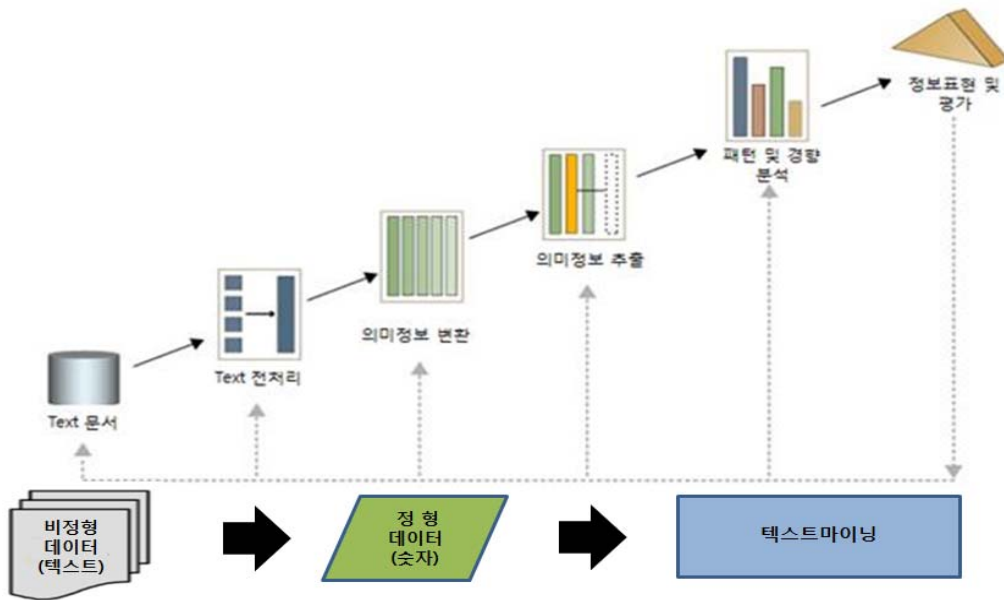
IT, 금융, 제조업 등 사회 많은 분야에서 컴퓨터의 발전과 데이터의 축적에 따라 빅 데이터 처리 및 분석 기술에 대한 관심이 증가하고 있으며, 대부분의 빅 데이터 분석기법들은 통계학과 데이터마이닝 분야에서 이미 사용되던 기법들을 대용량의 데이터 처리에 맞도록 개선하여 적용하고 있다. 소셜미디어 등 비정형 데이터의 증가로 인하여 기존의 정형데이터 분석 기법들을 비정형 데이터에 적용하는 기법들에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 객관적이고 실증적인 자료를 바탕으로 언어자원을 활용할 수 있는 방법론이 필요한데(Choi와 Lee, 2011), 그 중 대표적인 기법이 텍스트 마이닝 기법으로 비정형 텍스트 데이터에서 가치와 의미가 있는 정보를 찾아내는 기술이다. 텍스트 마이닝은 정형 또는 비정형 텍스트 데이터에서 자연어처리과정과 데이터마이닝 기법을 통하여 방대한 텍스트에서 의미 있는 정보를 추출해내고, 다른 정보와의 연계성을 파악하며, 텍스트가 가진 카테고리를 찾아내는 등, 단순한 정보 검색 그 이상의 결과를 얻어낼 수 있다. 최근에 산업공학, 건축, 특허 등 다양한 분야에서 텍스트 마이닝 기법을 활용한 연구가 활발히 진행되었다(Cho와 Kim, 2012; Go 등, 2011; Kim과 Jeong, 2012).

텍스트 마이닝이 수행되기 위해서는 대용량 언어자원을 통하여 컴퓨터가 인간이 사용하는 언어로 기술된 정보를 깊이 분석하고, 데이터마이닝 분야에 이용되는 복잡한 통계적, 규칙적 알고리즘을 적용하여 그 안에 숨겨진 정보를 발굴해야 한다.

(2) 텍스트 마이닝 과정

텍스트 마이닝의 과정은 크게 자연어 처리를 통한 데이터 전처리 과정을 거친 후, 텍스트라는 비정형 데이터를 정형 데이터로 변환하여 기존 데이터마이닝 기법을 적용하는 것이라 설명할 수 있다(그림 7-14).

그림 7-14. 텍스트 마이닝 과정



(가) 데이터 전처리

비정형 데이터인 텍스트를 정형 데이터로 변환하기 위해서는 문장을 의미를 가지는 단어 이하의 요소로 분해할 필요가 있다. 이 과정을 자연어 처리 과정이라 하며 stop words 제거 단계와 stemming 단계로 나뉘는데, stop words 제거는 일반 동사나 전치사와 같이 분석에 불필요한 용어(예 : a, for, be, about 등)를 제거하는 단계이며, stemming 단계는 같은 어원으로부터 파생된 단어들을 다시 어원으로 표현함으로써 비슷한 뜻을 가진 단어들을 묶어주는 역할(예 : computable, computation, computing, computed, computational → comput)을 수행한다.

(나) 문서-단어 행렬(Document-Term matrix)

문서-단어 행렬 <표 7-1>과 같이 자연어 처리과정을 통하여 문장을 단어의 집합을 문서를 나타내는 행과 단어를 나타내는 열로 이루어진 행렬로 표현하는 방법을 통해 정형 데이터로 만들기 위한 과정이다. 하고자하는 분석에 따라 단어를 행으로, 문서를 열로 나타내는 행렬인 단어-문서 행렬(Term-Document Matrix)로도 표현 가능하다. <표 7-1>에서 n 은 문서의 수, m 은 단어의 수, f_{ij} 는 i 번째 문서에 j 번째 단어가 포함되어 있는 빈도수를 의미한다.

이렇게 생성된 행렬을 이용하여 비정형 데이터를 정형화함으로써 데이터마이닝 기법을 적용하여 분석이 가능하다.

표 7-1. 문서-단어 행렬 표

	Term 1	...	Term j	...	Term m
Document 1	f_{11}	...	f_{1j}	...	f_{1m}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Document i	f_{i1}	...	f_{ij}	...	f_{im}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Document n	f_{n1}	...	f_{nj}	...	f_{nm}

(3) 텍스트마이닝 관련 선행 연구

감미아 외(2012)는 경향신문, 한겨레, 동아일보 세 개의 신문기사가 가지고 있는 내용 및 논조에 어떠한 차이가 있는지에 대해 텍스트 마이닝 기법을 활용하여 신문기사의 키워드 단순빈도 분석과 군집화 및 분류 결과를 분석하여 제시하였으며, 경제, 문화 국제, 사회, 정치 및 사설 분야에서의 신문사 간 차이점을 분석하고자 하였다. 연구 결과 문화 전반, 경제 전반, 정치 분야에서 통합진보당 이슈에 대한 신문기사들에 전반적인 내용과 논조에 차이를 보이고 있음을 알 수 있고, 사회분야의 4대 강 사업에 대한 긍정-부정 논조에 차이가 있음을 발견하였다.

이재운 외(2007)는 텍스트 마이닝에서 주요 기법인 문헌 글러스터링과 문헌 유사도 네트워크 분석을 적용하여 기록관리학 연구의 지적구조를 분석하였다. 군집단위 지적구조 분석 결과, 국내에서 수행된 기록관리학 영역의 핵심적인 주제 영역은 ‘전자기록관리·디지털보존’, ‘기록 관리정책·제도’, ‘기록물 기술/목록’, ‘기록 관리학 영역/교육’이었으며, 문헌단위 지적구조 분석을 통하여서는 ‘디지털 아카이빙’ 주제 영역이 중심을 이루고 있음을 확인할 수 있었다. 또한 시기별 분석을 통해서도 ‘기록 정보서비스’ 영역이 새롭게 등장하고 있음을 발견하였다.

김수연 외(2006)는 전체 문헌집단으로부터 초기 질의어에 대한 연관용어 선정 시 사용할 수 있는 최적의 기법을 찾기 위해 연관성 규칙과 용어 군집화 기법을 이용하여 연관용어 선정 실험을 수행하였다. 연구 결과 연관성 규칙 기법으로는 Apriori 알고리즘이, 용어 군집화 기법에서는 연관성 측도로 사용한 GSS 계수가 가장 좋은 성능을 나타냈음을 제시하였다.

전성해(2009)는 일자, 번호, 인적사항, 분류, 지역정보 등을 갖고 있는 서지적 정보와 기술사항, 정리된 용어, 재료, 분석, 구조 등에 대한 기술적 정보를 갖는 데이터인

특허 데이터는 분류와 회귀 그리고 군집화로 대표되는 기존의 데이터 마이닝 기법을 이용하여 분석하기에는 어려움이 있다. 이러한 특허데이터 특성을 파악하여 효율적으로 분석할 수 있도록 텍스트 마이닝 기법을 사용한 효과적인 특허 데이터의 분석에 대한 방안을 제시하였다.

민기영 외(2014)는 글로벌 철강회사인 P사의 사례를 중심으로 텍스트 마이닝을 이용한 산업트렌드 분석을 시도해 경쟁사 전략, 관심국가의 시장변화, 해외사업장 여론 등을 파악 하는데 기여할 수 있다는 가능성을 발견하고, 사례 분석으로 철강산업을 10개의 카테고리로 분류하고 각각 10개의 주제를 선정하여 분석을 시도하고, 이 중 의미 있는 변화를 발견하면 심층 분석하는 연구를 수행하였다.

김진욱 외(2011)는 텍스트의 주관성 분석, 극성 분석, 극성의 정도 분석으로 크게 세 가지로 나뉘는 오피니언 마이닝 방법 중 텍스트에 대한 극성 분석에 초점을 맞추어 한글 텍스트에 나타난 저자의 의견 및 태도가 긍정, 중립, 또는 부정인지를 판단하는 알고리즘을 제안하고, 텍스트의 극성을 분류하기 위해서 긍정, 중립, 부정 훈련 데이터 각각에 대하여 빈번하게 나타난 어절을 이용 하여 빈도수 기반으로 점수가 부여된 긍정, 중립, 부정 패턴을 추출하는 방안을 제안하였다.

원진영 외(2014)는 뉴스를 대상으로 텍스트 마이닝을 통해 주요 토픽을 추출하고 사회위험 이슈를 도출하였으며, 도출된 사회위험 이슈를 국가 기후변화 적응대책과 비교 검토하여 본 논문에서 제시한 방법이 전문가의 의견을 객관적으로 보완할 수 있는지를 연구하였다. 연구 결과 도출된 대부분의 사회위험 이슈는 국가 기후변화 적응대책과 연관이 있음을 제시하였다.

송혜지 외(2013)는 Web of Knowledge의 연구논문을 활용하여 외국 학술지에 나타난 한국의 경제 분야 트렌드를 분석하였다. 그 결과 연구논문들의 주제가 한국의 경제 이슈와 연관이 있으며, 토픽모델링과의 결합을 통해 시기별 연구동향 변화를 확인하고, 토픽 모델링과 경제학 주제 분류와의 유사성에 대해 제시하였다.

나. 연구 방법

(1) 자료 수집 및 단어 추출

기후변화 (climate change)와 관련성이 높은 식품분야 논문을 수집하기 위해 Scienedirect(www.sciencedirect.com)에서 “climate change”과 “food” 두 키워드를 사용하여 2004년도부터 2012년까지 외국 학술지에 게재된 총 4500개의 영문 논문들에서 제목과 초록을 수집하였다(그림 7-15).

그림 7-15. 수집된 자료 목록

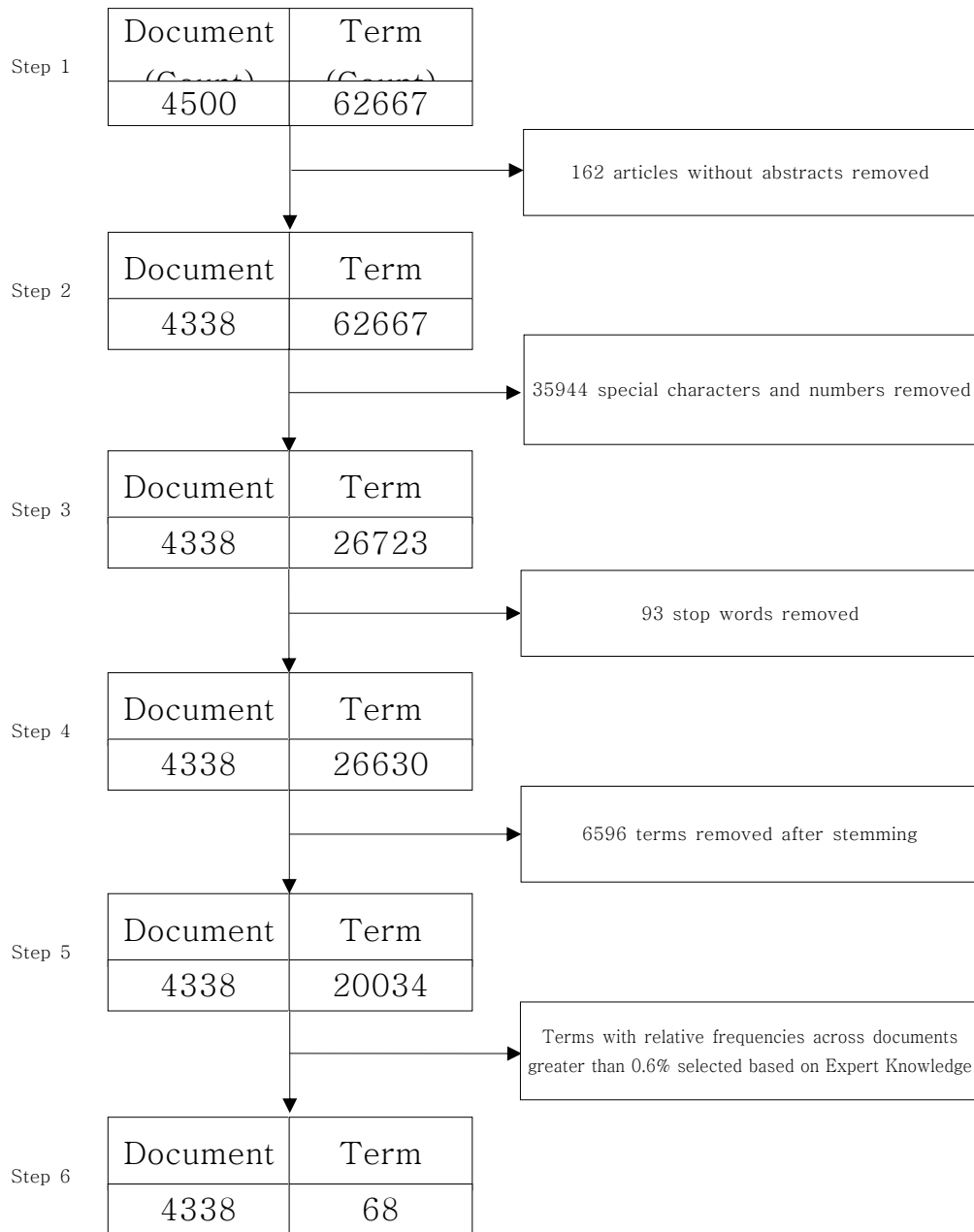
	A	B	C
1	Title	Keyword	Abstract
2	Adaptation to climate change to enhance food security an	Food security; Climate change; Modeling; Spatial scales	Adaptation strategies to climate change have been
3	Effects of climate change on global food production unde	Climate change; SRES emissions scenarios; Global food	This paper analyses the global consequences to crop
4	The need for more integrated policy for air quality, acidific	Reactive nitrogen; Cascade effect; Air quality; Acidification;	Considerable quantities of bioavailable nitrogen (N) are
5	Climate and socio-economic scenarios for global-scale clir	Socio-economic scenarios; SRES; Climate change impact	This paper describes the way in which the socio-
6	Distributional aspects of climate change impacts	Climate change; Impacts; Distribution; Scenarios;	Climate change is likely to impact more severely on the
7	Estimating global impacts from climate change	Global impacts of climate change; Agriculture; Forestry;	We surveyed the literature to assess the state of
8	The UK Climate Change Programme and communication v	Adaptation; UK Climate Change Programme; Local	Drawing on results of a 2003 survey of environmental
9	Climate change meets habitat fragmentation: linking land	Climate change; Habitat fragmentation; Metapopulation	Climate change and habitat fragmentation are considered
10	Mitigating climate change impact on soybean productivity	Global climate models; Impact mitigation; Climate	Field experiments with soybean were conducted over a
11	Water resources for agriculture in a changing climate: inte	Climate; Climate change; Water supply; Water demand;	This integrated study examines the implications of
12	Climate change and malaria: analysis of the SRES climate	Climate change; Malaria; Adaptive capacity; Vulnerability	The distribution and seasonal transmission of malaria is
13	Simulated effects of climate change on the production pat	Temperature; Juvenility; Induction; Curd growth; Maturity;	Models of the phases of juvenility, curd induction and
14	Conserving marginal populations of the food plant (Impat	AFLP; Climate change; Conservation genetics; Eustroma	Impatiens noli-tangere is scarce in the UK and probably
15	Coastal flooding and wetland loss in the 21st century: cha	Climate change; Coastal vulnerability; Flood risk; Coastal	This paper considers the implications of a range of
16	Possible effects of climate change on estuarine nutrient	estuary; climate-change; nitrogen; silica; hydrology; non-	Global change models predict effects of climate change
17	Adaptive recreation planning and climate change: a contin	Climate change; Recreation; Contingent behavior;	This paper applies a contingent visitation analysis to
18	Recovery of native plant communities after eradication of	Alien mammals; Invasive species; Plant communities;	The introduction of rabbits in 1874 into the Kerguelen
19	Adapting food systems of the Indo-Gangetic plains to glo	Indo-Gangetic plain; GEC; Food systems; Adaptation	The Indo-Gangetic plain (IGP; including regions of
20	Climate change and global water resources: SRES emissior	Climate change impacts; Global water resources; Water	In 1995, nearly 1400 million people lived in water-stressed
21	Emerging infectious diseases of plants: pathogen pollutio	Biomass; Climate change; Feedback; Grassland; Livestock;	Emerging infectious diseases (EIDs) pose threats to
22	Mutual influence between human activities and climate ch	Climate change; Amazonia; Tropical forest; Rainforest;	It is well known that there is a vast expanse of grassland
23	Are climate change impacts already affecting tropical	Carbon sequestration; Kyoto protocol; Agriculture; Carbon;	Tropical forests contain large stocks of carbon and any
24	"Green" consumption?no solution for climate change	Brazilian Proposal; GHG historical emissions; Climate	This article explores the quantitative effect on energy use

4,500개의 논문들 중 162개의 논문은 초록이 제공되지 않아서 분석에서 제외되었으며, 나머지 4,338개의 논문 초록에서 사용된 총 단어의 수는 62,667개이다. 이 중에 특수문자와 숫자를 제거한 후의 개수는 26723개로 35944개의 단어가 제거되었다. 93개의 불필요한 단어(stop word)를 제거한 후의 단어 개수는 26630개이고, 어근을 갖는 단어를 찾는 과정(stemming)을 거치면서 6596개의 단어를 변환하고 남은 개수는 20034개로써 총 4338개의 문서와 20034개의 단어들을 얻었다.

전체 문서수를 고려하였을 때 빈도수가 상대적으로 지나치게 낮은 단어들, 예를 들면 전체 문서에서의 출현 빈도가 26번 이하 (또는 전체문서 출현 상대빈도가 0.6% 이하)인 단어들이 전체 단어의 90%를 구성하고 있고, 이러한 단어들은 대부분의 경우 잡음 (noise)으로 작용을 하여 단어-문헌 행렬에 의미 있는 소수의 잠재적인 요인들 (latent component)을 이끌어 내는데 한계점이 있다. 따라서 본 연구를 위해 이 분야의 전문가적인 지식 (expert knowledge)을 반영하여 전체 문서에서 출현빈도가 26 이상인 단어들 중 그 단어의 중요성을 바탕으로 선택된 68개만을 고려하였으며, 이 과정을 <그림 7-16>에 요약하였다.

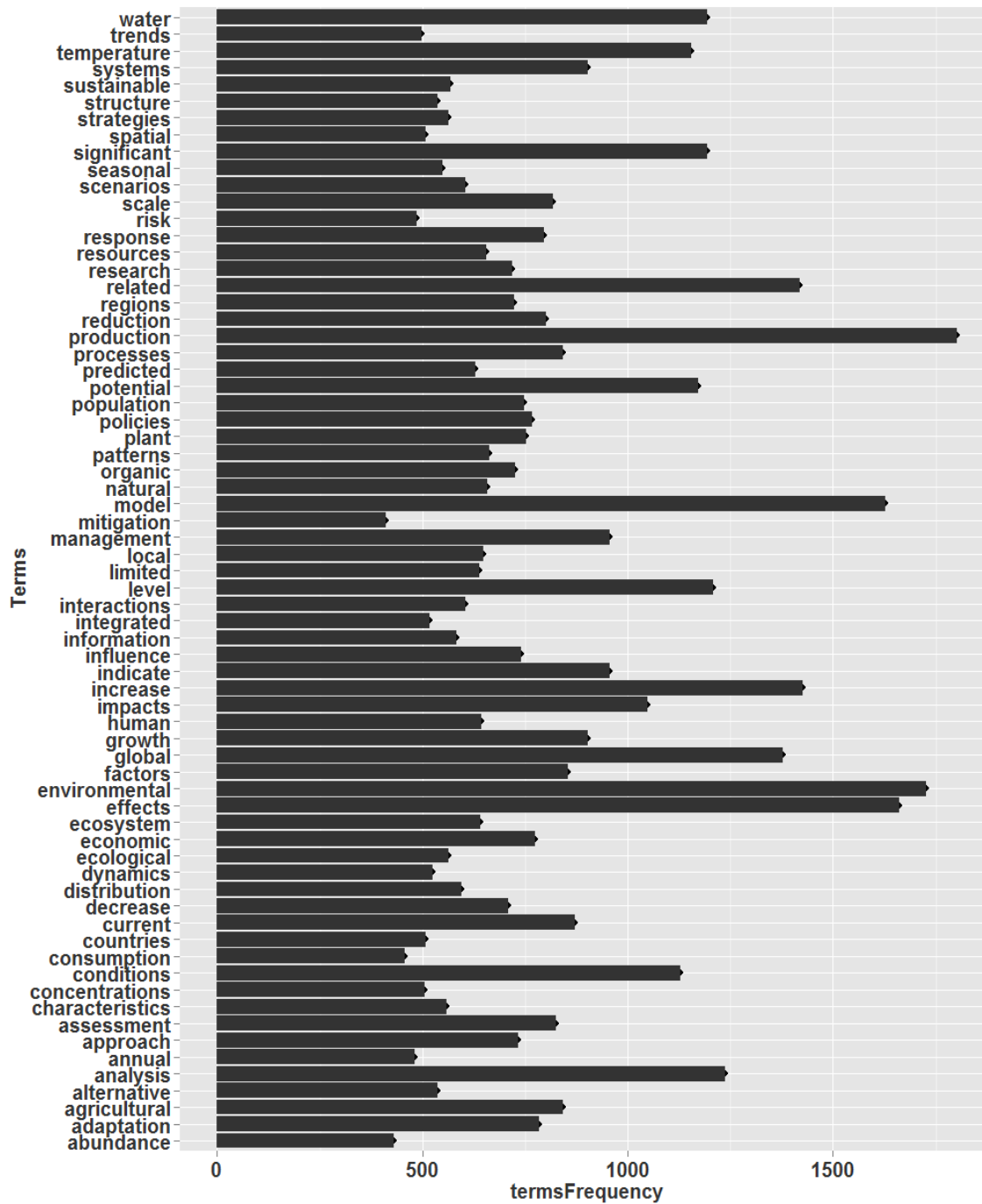
이러한 방법은 전문가적인 지식을 반영할 뿐 아니라 단어들을 직접적으로 사용하기 때문에 그 결과를 해석하는데 용이하다는 장점을 가지고 있으며, 이러한 단계를 걸쳐서, 최종적인 단어-문헌 행렬에는 총 4,338개의 문서 와 68개의 단어로 구성되어 있다. 68개의 단어의 빈도를 그래프를 <그림 7-17>과 같이 나타내었다. 총 4,338개의 문서 중 1,500개 이상의 문서에서 나타난 단어로는 production, model, environmental, effect가 있으며 1,000개 이상의 문서에서 나타난 단어는 water, temperature,

그림 7-16. 문서 및 단어 선별 작업



significant 등이 존재한다. 이러한 단어의 빈도에 대하여 <그림 7-18>과 같이 빈도수가 많은 단어들을 한눈에 알아보기 쉬운 Word Cloud로 나타내었다.

그림 7-17. 단어 빈도 그래프



분석에 앞서 각각의 문서에서 단어의 빈도수를 측정하고 그 빈도수를 전체 문서 중 몇 개의 문서에서 출현하는지 여부를 보정하는 방법이 적용되는데, 일반적으로 논문 초록은 전체 논문에서 가장 핵심적인 내용들을 간략한 형태로 제시하기 때문에

term	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	total
adaptation	46	71	72	57	78	94	113	114	139	784
analysis	146	139	141	122	137	127	132	144	150	1,238
potential	108	123	117	132	118	125	149	140	160	1,172
significant	135	138	140	121	147	125	139	114	135	1,194
growth	144	102	75	107	86	95	97	100	97	903
policies	54	60	71	73	81	107	104	112	105	767
plant	99	81	84	76	86	73	83	83	88	753
regions	127	121	154	169	150	134	152	142	160	1,309
scenarios	37	40	63	73	60	75	76	88	92	604
population	81	72	81	87	89	76	87	98	77	748
ecosystem	84	80	97	112	94	87	88	75	88	805
indicate	127	128	120	132	129	118	124	106	104	1,088
reduction	43	85	113	137	123	59	58	62	155	835
scale	96	78	103	85	78	69	97	105	108	819
economic	60	70	82	78	73	95	104	103	110	775
organic	72	87	111	89	108	63	72	53	70	725
processes	92	84	123	83	98	96	93	93	80	842
assessment	80	110	99	97	109	106	101	106	119	927
factors	103	101	100	98	96	82	99	102	73	854
approach	74	58	76	65	82	93	91	93	101	733
current	69	82	91	94	98	100	125	110	103	872
research	58	72	56	83	86	77	95	91	101	719
decrease	74	86	79	92	79	65	76	76	82	709
response	87	97	86	101	101	97	121	112	107	909
predicted	58	67	54	74	65	59	88	78	85	628
resources	77	60	56	77	62	66	70	93	95	656
haman	60	66	82	78	91	54	70	63	80	644
seasonal	88	61	70	69	81	62	67	51	56	605
local	79	57	72	67	71	61	79	80	83	649
influence	84	81	83	91	87	87	76	76	75	740
risk	41	37	36	46	51	59	71	63	83	487
countries	37	34	62	60	47	60	61	81	65	507
sustainable	53	45	63	56	62	88	62	77	63	569
distribution	57	67	76	57	78	53	69	68	69	594
patterns	71	80	86	71	89	72	76	59	60	664
natural	73	86	62	77	72	78	73	62	76	659
ecological	62	58	69	63	62	59	64	67	59	563
strategies	48	50	52	50	58	74	75	76	80	563
interactions	64	54	75	59	85	45	67	76	81	606
abundance	61	54	63	44	61	39	38	32	38	430
consumption	47	45	46	50	49	54	53	63	49	456
limited	66	63	65	70	85	75	68	81	68	641
structure	65	59	64	66	66	62	49	49	56	536
concentrations	67	72	58	53	52	50	54	51	48	505
spatial	54	58	67	49	58	59	53	56	53	507
information	64	48	66	62	68	57	86	56	77	584
trends	49	62	53	59	69	42	56	51	58	499
dynamics	51	56	60	56	72	51	68	53	55	522
annual	53	68	53	60	48	54	50	48	57	491
alternative	45	48	62	70	54	62	73	61	62	537
characteristics	73	88	69	70	65	42	60	46	47	560
mitigation	16	24	26	52	40	54	59	73	66	410
integrated	63	48	62	53	61	50	55	68	60	520

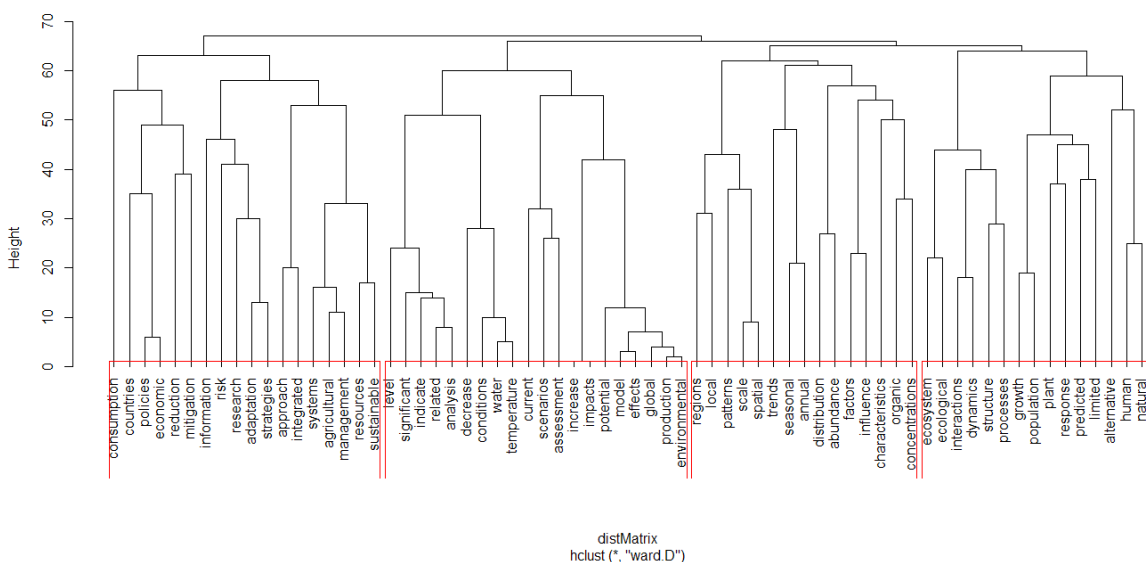
(2) 단어-문서 행렬 생성

수집된 논문 초록을 이용하여 텍스트 마이닝에 필요한 용어-문서 행렬 (term-document matrix)을 구성하기 위해 R 프로그램 3.0.1 버전의 패키지 (Feinerer 등, 2008)를 사용하였다. 이 패키지는 텍스트 마이닝에 필요한 함수들을 포함한 패키지로써, 앞서 언급한 불필요한 용어(stop word)를 제거하거나 같은 어근을 갖는 단어를 찾는 과정(stemming), 비정형 데이터를 정형 데이터로 변환하는 작업을 수행하는데 이용한다. 각 단계 별 필요한 함수들의 이용방법은 패키지 사용설명서(Feinerer, 2013)에 자세히 정리되어 있다. 이 과정을 통하여 68×4334 차원의 행렬을 구성하였다.

(3) 단어들 간의 계층적 군집분석

군집분석에 대하여 많은 연구가 진행되고 있지만(Lim과 Lim, 2012; Yeo, 2011), 본 연구에서는 특정 주제에 관련된 용어들이 어떻게 군집을 이루는 지를 확인하기 위해 계층적 군집분석 방법(hierarchical clustering)을 사용하였다. 계층적 군집분석은 자율 군집(unsupervised clustering)의 한 방법으로써 수집된 논문들을 분류하는데 알려져 있는 체계가 없는 상황에서 논문에 나타난 용어들의 비유사성(dissimilarity)을 바탕으로 계층에 따라 어떻게 용어 들이 군집을 구성하는지를 보여준다.

그림 7-19. 계층적 군집분석



계층적 군집분석 기법중 하나인 Ward 방법을 사용하여 용어들 간의 비유사성은 개별대상간의 거리로 측정을 하였으며, 군집의 수는 실루엣(silhouette) 방법

(Rousseuw, 1987)과 현장 전문가의 지식을 활용하여 집단간의 유사성(homogeneity)을 가장 크게 하는 군집의 수를 찾았다.

(4) 연도별 군집의 상대 출현빈도

연도별로 논문에서 주로 다루지는 분야에 변화가 있었는지를 확인하기 위해 단어 들 간의 계층적 군집분석의 결과로 얻는 군집들을 바탕으로 각 연도별로 전체 논문 들에서 각 주제들 즉, 군집이 얼마나 많이 다루어 졌는지를 측정하기 위해 식 (7-5)와 같이 연도별 평균 상대 빈도 $\bar{x}_{y,h}$ 를 정의한다.

$$\bar{x}_{y,h} = \sum_{i=1}^{N_y} \frac{\left(\sum_{j \in S_h} F_{y,i,j} / n_h \right)}{N_y} \quad (7-5)$$

여기서 N_y 는 y 연도의 총 문서의 수, $F_{y,i,j}$ 는 y 연도 i 번째 문서에 나타난 j 번째 용어의 빈도수, S_h 는 h 번째 군집에 포함되는 단어들의 지수 집합 (index set), 그리고 n_h 는 h 번째 군집에 포함되는 단어의 수를 의미한다.

(5) 문서의 분류

특정 문서가 어느 분야의 논문인지를 분류하기 위해 용어들의 계층적 군집분석을 바탕으로 하는 주제별 상대 비중을 계산한다. 주제별 상대 비중은 각각의 군집 (즉, 주제 분야)에 포함 된 용어들이 한 문서에 상대적으로 얼마나 자주 출현하는 지를 보여주며, 어떤 문서의 군집 $h, h = 1, 2, \dots, H$ 에 대한 상대 비중은 식 (7-6)과 같이 표현된다.

$$\Pr(C_i = h) = \frac{\sum_{j \in S_h} F_{i,j} / n_h}{\sum_{h=1}^H \left(\sum_{j \in S_h} F_{i,j} / n_h \right)} \quad (7-6)$$

여기서 C_i 는 i 번째 문서가 H 개의 군집들 중 어떤 군집에 포함되는지를 보여주는 지시 변수, $F_{i,j}$ 는 i 번째 문서에서 j 번째 용어의 빈도수, S_h 는 h 번째 군집에 포함되는 단어들의 지수 집합, 그리고 n_h 는 h 번째 군집에 포함되는 단어의 수를 의미한다.

다. 연구 결과

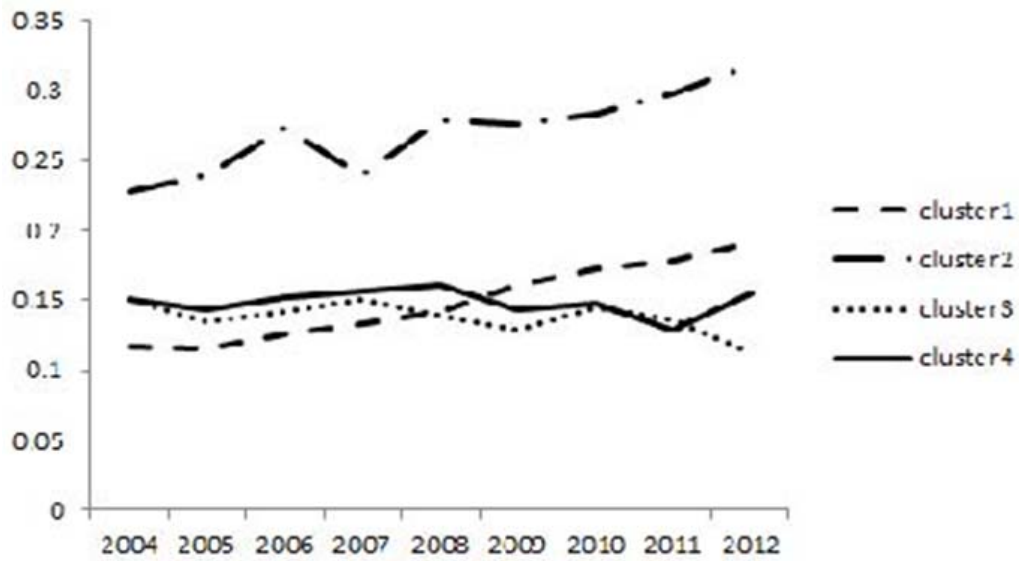
총 68개의 용어들 중에서 계층적 군집방법을 통해 <표 7-3>과 같이 4개의 군집을

형성한다. 각 군집에 포함되는 용어의 수는 계층적 군집방법에서 용어들 간의 비유사성을 바탕으로 군집을 형성하기 때문에 동일하지 않다. 여기서 ‘비유사성’의 의미는 임의의 두 용어가 함께 한 문서에 나타나면 유사성이 높은 것이고 각각 다른 문서에 나타나면 비유사성이 높은 것을 나타낸다. 따라서 같은 군집 안에 있는 용어들은 다른 군집에 있는 용어들에 비해서 한 문서에 함께 나타날 가능성이 크다는 것을 의미한다. 한편, 일반적으로 특정 주제에서 자주 언급되는 용어들은 한 논문의 초록에서 같이 나타날 가능성이 크므로, 각 군집에 포함되어 있는 핵심 용어들을 바탕으로 그 군집이 나타내는 주제를 추정할 수 있다. <표 7-3>에서와 같이 식품 분야의 전문가의 의견을 바탕으로 각 군집에 주제어를 부여하였으며, <그림 7-20>에서는 기후변화와 관련하여 논문에서 어떤 주제들이 주로 다루어졌는지를 보기 위해 군집의 수 $H=4$ 일 때 식 (7-5)를 이용하여 연도 별로 주제들의 상대 출현빈도를 살펴보았다. 주제가 “Assessment of climate-change prediction model”인 군집 2는 지난 9년 동안 전체 논문의 약 20%이상에서 꾸준히 다뤄졌으며 그 비중이 매년 증가하는데, 2004년도에는 논문의 23%에서 언급되었지만 2012년도에는 전체 논문의 약 32%가 언급되어 평균적으로 매년 약 1%씩 증가하는 추세를 보여주고 있음을 알 수 있다.

표 7-3. 68개 단어들의 군집

Cluster	term	Topic phrase
1	consumption, countries, policies, economic, reduction, mitigation, information, risk, research, adaptation, strategies, approach, integrated, systems, agricultural, management, resources, sustainable	Research and polices in preparation for climate change
2	level, significant, indicate, related, analysis, decrease, conditions, water, temperature, current, scenarios, assessment, increase, impacts, potential, model, effects, global, production, environmental	Assessment of climate change prediction model
3	regions, local, patterns, scale, spatial, trends, seasonal, annual, distribution, abundance, factors, influence, characteristics, organic, concentrations	Spatial and Temporal trends of climate change effects
4	ecosystem, ecological, interactions, dynamics, structure, processes, growth, population, plant, response, predicted, limited, alternative, human, natural	Growth of human population and environment

그림 7-20. 연도별 군집간의 상대적 출현 빈도



“Research and polices in preparation for climate change”가 주제인 군집 1 또한 지속적으로 증가하는 추세를 보여주고 있지만, “Spatial and temporal trends of climate-change effects”과 “Growth of human population and environment”가 주제인 군집 3과 4는 지난 9년 동안 큰 변화 없이 전체의 13~15%의 논문에서 다뤄졌음을 볼 수 있다.

표 7-4. 문서의 분류

	Cluster1	Cluster2	Cluster3	Cluster4	selected cluster
Document1	0.380	0.293	0.196	0.130	Cluster1
Document2	0.217	0.470	0.104	0.209	Cluster2
Document3	0.308	0.415	0.185	0.092	Cluster2
Document4	0.217	0.391	0.261	0.130	Cluster2
Document5	0.308	0.138	0.369	0.185	Cluster3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Document4334	0.577	0.115	0.000	0.308	Cluster1
Document4335	0.294	0.706	0.000	0.000	Cluster2
Document4336	0.000	0.653	0.000	0.348	Cluster2
Document4337	0.250	0.450	0.150	0.150	Cluster2
Document4338	0.000	0.462	0.385	0.154	Cluster2

<표 7-4>는 단어들의 계층적 군집 결과를 바탕으로 군집의 수 $H = 4$ 일 때, 식 (7-5)를 적용하여 각 문서들이 어떤 주제들을 주로 다루었는지에 대해 처음 5개의 문서와 마지막 문서 5개의 결과를 보여준다. ‘문서1’은 ‘군집 1’부터 ‘군집 4’까지의 주제들을 모두 다루고 있지만, 주로 ‘군집 1’과 ‘군집 2’의 주제(각각 38.0%와 29.3%)가 다른 두 군집보다는 조금 더 높은 비중을 가지고 언급되었음을 알 수 있다. 이에 반해 문서 4336은 주로 ‘군집 2’의 주제를 주로 다루었고(65.2%), ‘군집 1’과 ‘군집 3’의 주제는 전혀 다루지 않았음을 알 수 있다. 각각의 문서를 주어진 4개의 군집 중 하나로 분류하고자 하는 경우, 상대 비중이 가장 큰 군집으로 지정하여 분류하였다. 예를 들어, <표 7-4>에 보여진 것 같이 ‘문서 1’은 ‘군집 1’로 분류되지만, ‘문서 2’와 ‘문서 3’의 경우는 ‘군집 2’에 포함되었다.

라. 결론 및 토의

본 연구는 기후 변화에 맞추어 영문 학술지에 게재된 논문을 중심으로 데이터 마이닝의 기법중 하나인 텍스트 마이닝을 적용하여, 지난 9년간 학술지에서 다뤄진 주제들의 특성을 파악하였고, 용어의 계층적 군집방법을 통해 찾아낸 4개의 주제어들에 각각의 문서를 분류하는 방법을 제시하였다. 이러한 결과물은 새로운 연구를 시작하기에 앞서 기존의 유사한 논문들을 찾아내는데 유용하게 사용될 수 있을 뿐 아니라, 특정 연구 주제가 최근 학술지에서 주로 다뤄지는지 여부를 확인 할 수 있다. “기후 변화”에 관련된 연구 논문들에 대해 처음으로 텍스트 마이닝 방법을 적용하였다. 하지만, 본 연구에서는 영문 학술지에 게재된 논문들만을 대상으로 하였기 때문에 영어가 아닌 다른 언어, 특히 한국어로 게재된 논문들이 포함되지 않았다는 제한이 있다. 이는 아직 국내에서 기후 변화와 식품에 관련된 충분한 양의 논문이 없기 때문이기도 하지만 같은 의미를 다른 두 언어들로 표현할 경우, 예를 들면, ‘climate’과 ‘기후’, 두 용어를 하나의 의미로 인식할 수 있는 소프트웨어가 없기 때문이다. 포괄적인 연구를 위해 이러한 문제를 해결할 수 있는 텍스트 마이닝 소프트웨어의 개발이 필요하다.

연구는 전문가의 의견을 반영하여 각 년도 별로 관련성이 높은 100개의 논문들을 찾고 분석하였고, 이는 전문가의 의견을 반영하는 장점이 있으나 전문가에 따라 다른 논문 자료가 선택될 수 있다는 선택적 편의(selection bias)가 발생할 수 있다. 향후 연구에서는 기후 변화에 대한 문헌 검색 프로그램이나 논문 데이터 베이스를 통해 관련성이 있는 모든 논문을 분석 대상으로 하여 이러한 전문가에 의한 편의를 최소화함으로써 줄이는 노력이 필요할 것으로 보인다.

3. 기후변화가 쌀 생산량에 미치는 영향 메타분석

가. 메타분석

(1) 메타분석 방법론

메타분석은 ‘분석의 분석’을 한다는 점에서, 연구결과들을 통합할 목적으로 많은 수의 개별적 연구결과를 통계적으로 분석하는 방법이다. 즉, “메타분석”이란 하나의 주제에 대해 연구한 여러 연구의 분석 결과들을 분석하는 것(analysis of analyses)을 의미하며, 같은 목표를 가진 수많은 연구들을 종합하여 통계적 방법을 통해 객관적인 결과를 도출하는 분석 방법이다(김지은, 2010). 메타분석은 각 연구의 표본을 종합함으로써 더 큰 표본을 가지고 분석하기 때문에 통계적 검정력을 높일 수 있으며(Pillemer & Light, 1980), 하나의 주제에 관련된 여러 연구들의 각 결과를 자료로 사용하는 것과 사용되는 자료들이 가진 결점들로부터의 편견을 통제하는 것이 가능하다. 또한 복잡한 통계적 방법을 사용한다면 연구 방법이나 조건 등 각 연구의 차이가 갖는 효과를 동시에 규명할 수 있다는 장점을 가진다(Jackson, 1980).

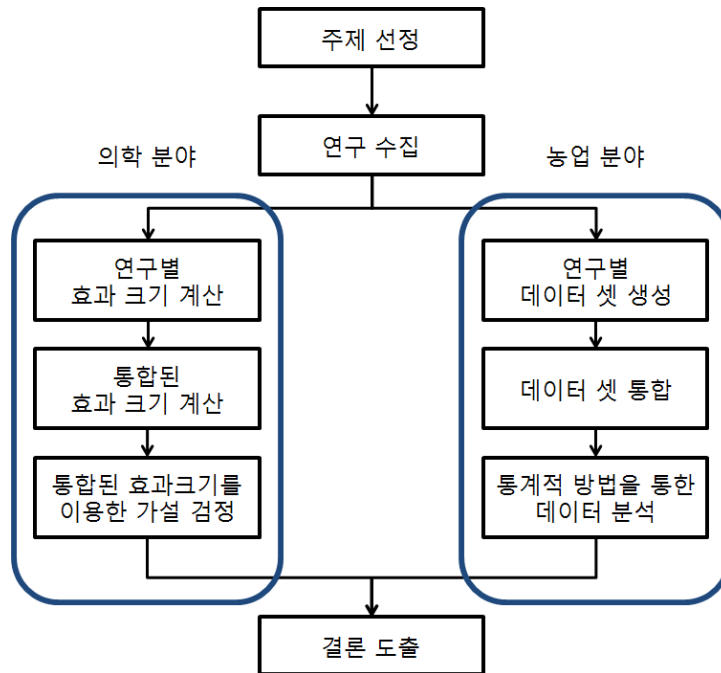
그동안 메타분석법은 주로 실험군과 대조군을 설정하여 실시한 실험 연구를 대상으로 메타분석을 위한 연구를 수집하고, 각 연구 결과의 척도를 통일시키기 위해 효과 크기(Effect size)를 계산하여 종합함으로써 결론을 도출하는 방식으로 의학 분야와 관련하여 인류보건 분야에 국한되어 수행되어 왔다. 그러나 Dore et al.(2011)이 농학 분야에 이를 적용한 이후에, 환경변수가 작물생산량에 미치는 영향 등에 관하여 다양한 연구들이 수행되었고, 최근 Challinor et al.(2014)는 수집된 연구에서 필요한 정보를 추출하고 종합하여 하나의 데이터 셋을 생성하여 메타분석을 수행하는 방법으로 기후변화가 작물 생산량에 미치는 영향, 적응방안의 적응완화, 미래 생산량 전망 등을 도출하였다(그림 7-21). 또한, 적응조치가 이루어지지 않을 경우, 전지역에서 밀, 쌀, 옥수수 등의 생산량이 기후변화에 의해 감소할 위험이 매우 클 것이라는 결론을 제시한 바 있다.

(2) 농업분야 메타분석 선행연구

Wilcox et al.(2013)은 세계적으로 기후변화에 따른 밀 생산량의 변화에 대한 연구를 수집하여 메타분석을 수행하였다. 총 90개의 논문으로부터 3679개의 데이터를 수집하였으며 고려된 변수는 지역, 이산화탄소 농도와 온도의 변화량, 강수량의 변화량, 적응 방안 중 파종시기 변경의 시행 여부이며, 전체 데이터 셋으로부터 기후변화

와 관련된 이산화탄소의 농도, 온도의 변화, 강수량의 변화에 따른 추세를 파악하고, 이 세 가지 변수를 모두 고려한 28개의 논문에서 1,084개의 데이터를 수집하여 랜덤 효과를 고려한 회귀분석을 통하여 각 기후변화 인자의 영향을 평가하였다.

그림 7-21. 의학 분야와 농업 분야의 메타분석 방법 비교



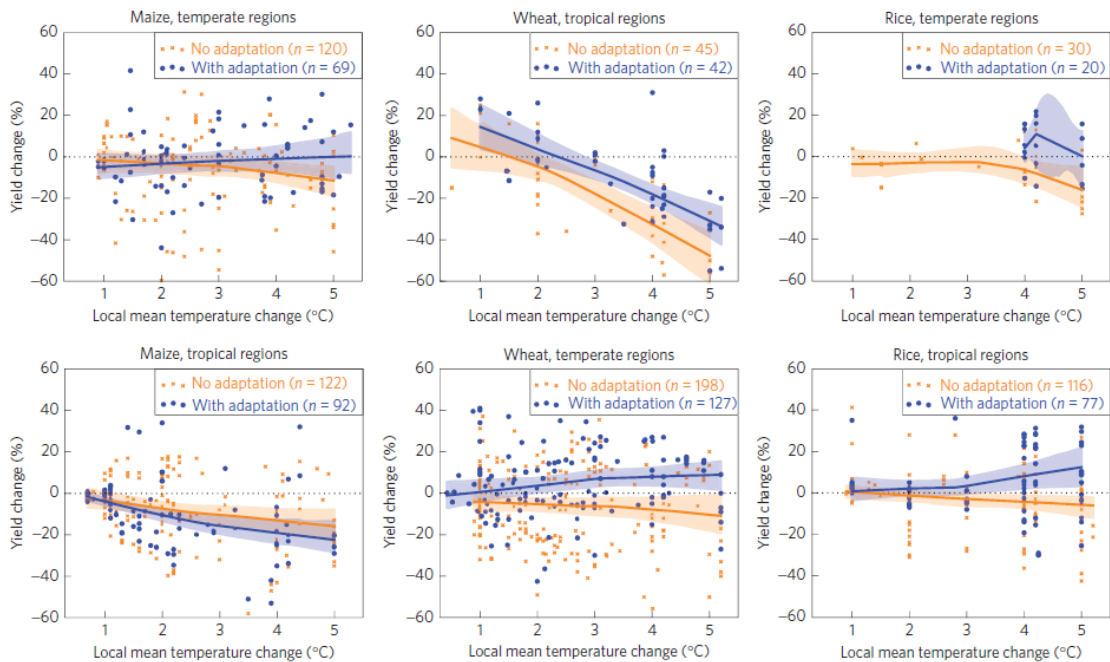
Challinor et al.(2014)는 세계적으로 여러 작물들에 대해 기후변화가 미치는 영향을 메타분석을 통하여 평가하였다. IPCC 4차보고서의 데이터베이스와 2007년부터 2012년까지 출판된 연구들로부터 91개의 논문과 1722개의 데이터를 수집하고, 이상치 등을 제거하는 작업을 통하여 데이터의 품질을 향상시키는 과정을 통하여 주요작물인 밀, 옥수수, 쌀을 대해 각각 488, 454, 295개의 데이터가 포함되었다. 변수는 범주변수로 열대지역과 온대지역을 구분하는 지역변수, 적응 방안의 적용 유무에 대한 변수, 식물의 대사가 C3인지 C4인지 구분하는 변수와 기후변화 관련 변수로써 온도의 변화, 강수량의 변화, 이산화탄소의 변화를 고려하였다.

연구 결과로 크게 세 가지를 제시하였는데, 첫째는 주요작물에 대하여 온도가 생산량의 변화에 미치는 영향을 지역과 적응방안 적용 유무에 따라 추세를 살펴보았다(그림 7-22). 이 분석은 66개 연구의 1048개의 데이터를 이용하였으며, 음영으로 나타난 부분은 데이터를 기반으로 500개의 부스트랩 표본을 이용한 회귀상수의 95% 신뢰구간의 영역을 나타낸다. 우선 데이터의 수를 보면 밀은 주로 온대지역에서 재배하며 쌀은 주로 열대지역에서 재배하는 것을 볼 수 있고, 옥수수는 온대지역과 열

대지역의 구분 없이 재배되는 것을 볼 수 있다. 세부적으로 온도변화에 따른 옥수수 생산량의 변화를 살펴보면 열대지역과 온대지역 모두 생산량이 감소하나 적응방안을 적용한 경우 옥수수 생산량이 감소하는 것을 완화시켜주는 역할을 할 뿐 옥수수 생산량의 증가는 거의 보이지 않았다. 또한 적응방안을 적용 유무에 따른 추세선의 신뢰구간이 겹치는 부분이 많으며, 신뢰구간이 다른 추세선을 포함하는 경우도 나타나는 것처럼 명확하게 구분되지 않는 점으로 미루어 적응방안의 이점이 확실히 존재한다고 보기 어렵다. 반면 밀의 경우 적응방안의 적용 유무에 따른 추세선이 명확하게 구분이 되어 이점이 존재한다고 볼 수 있으나 열대지역의 경우 옥수수와 마찬가지로 감소하는 경향을 완화시킬 뿐 온도가 증가할수록 감소하는 추세를 보이는 반면, 주 재배지인 온대지역에서는 오히려 온도가 증가할수록 밀 생산량이 증가하는 것을 볼 수 있었다. 쌀의 경우도 밀의 경우와 마찬가지로 적응방안을 적용했을 경우, 주 재배지인 열대지역에서 온도가 증가할수록 생산량이 증가하는 것을 볼 수 있었다.

0

그림 7-22. 지역과 온도의 변화에 따른 옥수수, 밀, 쌀 생산량의 변화



자료 : Challinor et al., 2014

두 번째로 모든 변수를 포함하는 882개의 데이터로 선형회귀모형을 적합하였으며, 모형적합 결과는 <표 7-5>와 같다. 변수에 대한 설명은 적응방안 적용 유무(A; Yes=1, N=0), 지역(R; 열대지역=1, 온대지역=0), 식물의 대사과정(M; C4=1, C3=0), 온도의 변화(ΔT), 강수량의 변화(ΔP), 이산화탄소 농도의 변화(ΔCO_2)이다.

표 7-5. 선형회귀모형 적합 결과

Term	Coefficient	S.E.	t	p-value
Intercept	-5.40	6.78	-0.80	0.44
A	7.16	3.11	2.30	0.022 *
R	-2.83	3.89	-0.73	0.47
M	-0.003	3.04	0.00	0.99
ΔP	0.53	0.18	2.97	0.0031 **
ΔT	-4.90	1.25	-3.92	<0.001 ***
ΔCO_2	0.06	0.02	3.07	0.0022 ***

주: *은 p-value가 0.05보다 작은 경우, **는 p-value가 0.01보다 작은 경우, ***은 p-value가 0.001보다 작은 경우

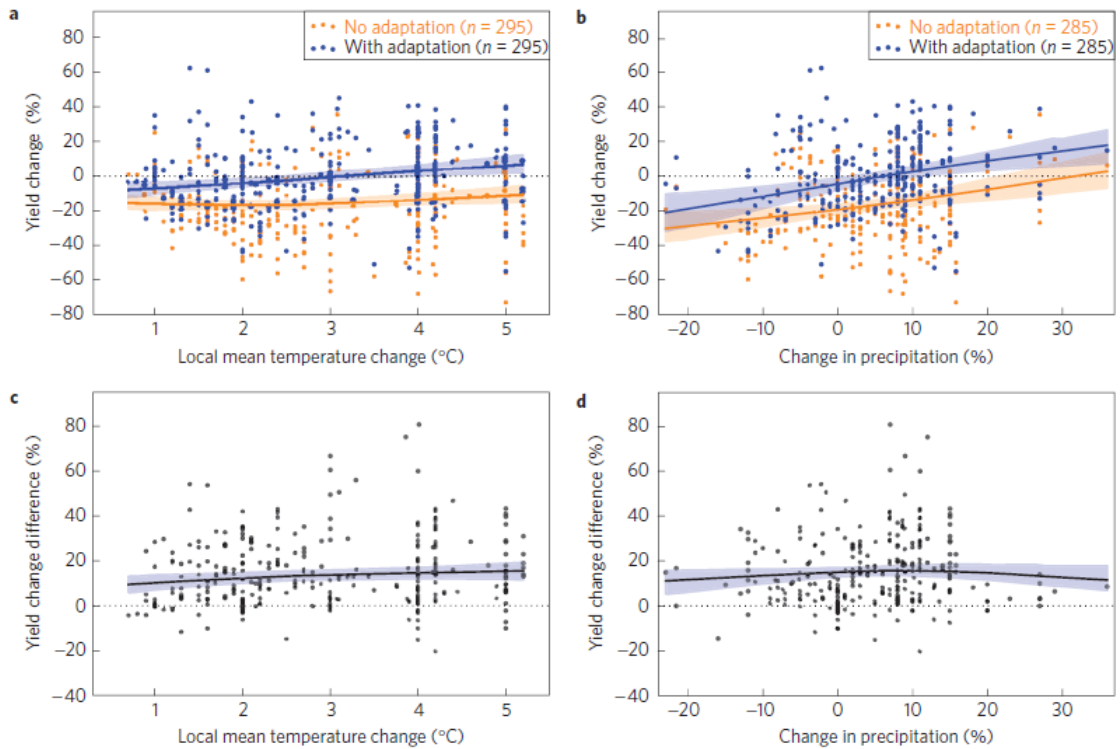
유의수준이 0.05일 때, 적응방안 적용 유무 변수와 온도의 변화, 강수량의 변화, 이산화탄소 농도의 변화 변수가 유의한 결과를 보였다. 즉, 지역과 식물의 대사과정은 작물 생산량에 영향을 미치지 않으며, 온도가 1°C 증가할 경우 작물 생산량은 4.90% 감소하는 반면, 강수량이 1% 증가할 경우 작물 생산량은 0.53% 증가하며, 이산화탄소 농도가 1ppm 증가할 경우 작물 생산량은 0.06% 증가하는 것으로 나타났고, 여기에 적응 방안이 적용될 경우에는 적응방안을 적용하지 않았을 경우보다 작물 생산량은 7.16% 증가한다는 결과를 제시하였다.

세 번째로 지역과 작물의 구분 없이 적응방안의 적용 유무의 결과 차이를 제시한 33개의 연구의 1070개의 데이터를 통해 온도의 변화와 강수량의 변화에 따른 적응방안의 이점을 살펴보았다. <그림 7-23>은 온도의 변화와 적응방안 적용 유무에 따른 작물 생산량의 변화 그래프(a)와 온도의 변화에 대해 적응 방안 적용 유무에 따른 생산량 변화의 차이를 나타낸 그래프(c), 강수량의 변화와 적응방안 적용 유무에 따른 작물 생산량의 변화 그래프(b)와 강수량의 변화에 대해 적응 방안 적용 유무에 따른 생산량 변화의 차이를 나타낸 그래프(d)이다. a에서 온도가 증가할수록 생산량의 감소가 더디게 진행되는 것을 볼 수 있는데 이는 적응방안을 고려하지 않았음에도 4°C 이상에서도 생산량의 증가를 보이는 쌀에 대한 일부 연구에 의한 결과가 원인이므로써 다른 작물에 비해 쌀이 온도 증가에 의한 영향을 적게 받는다고 볼 수 있다.

c와 d의 그래프에서 500개의 붓스트랩 표본을 이용한 신뢰구간을 나타내는 음영 부분이 0을 포함하지 않다는 점에서 적응 방안에 대한 이점은 명백함을 알 수 있다. a와 b 모두 적응 방안 적용에 따른 기온기가 거의 평행하여 변화가 없다는 점(적응방안 적용 유무에 따른 생산량의 차이를 나타낸 그래프(c)와 (d)에서 기온기의 변화가 0에 가까운 점)으로 미루어 온도의 변화와 강수량의 변화에서 적응방안의 적용

유무에 따른 차이가 상수로서 온도의 변화와 적응 방안 적용 유무, 강수량의 변화와 적응 방안의 적용 유무 사이에는 교호작용이 없을 것이라고 볼 수 있다.

그림 7-23. 온도와 강수량의 변화에 따른 적응 방안의 효과

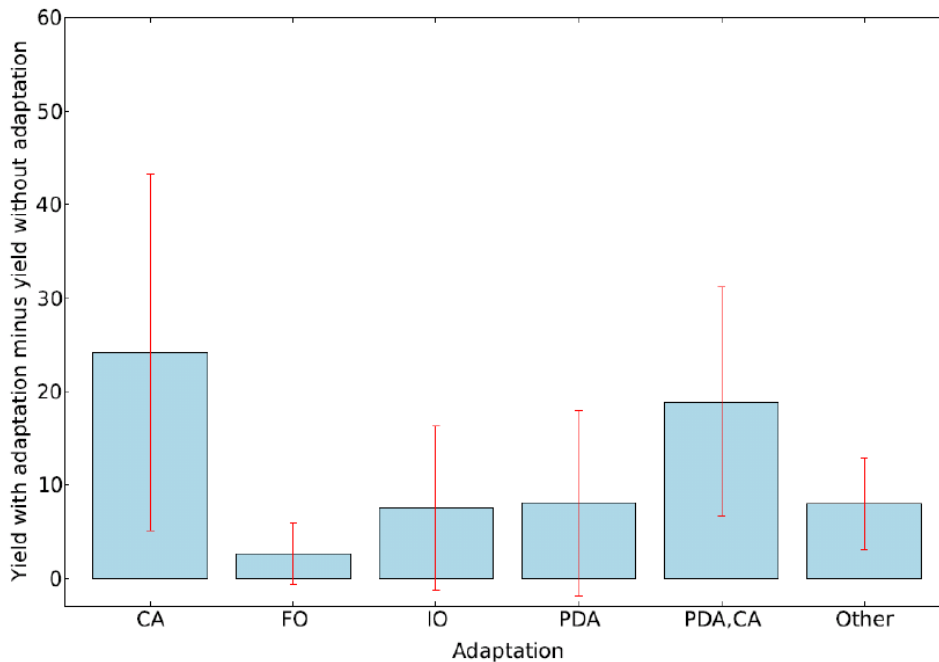


자료 : Challinor et al., 2014

<그림 7-24>는 각 적응방안의 종류에 따른 이점을 살펴보기 위해 제시되었다. x축은 각 적응 방안을 나타내며, CA는 품종 변경 방안(n=56)을, FO는 비료 최적화 방안(n=10)을, IO는 관개용수량 최적화 또는 조절 방안(n=17)을, PDA는 파종시기 변경 방안(n=19)을 other는 기술 진보를 포함한 기타 방안(n=9)을, PDA, CA는 파종시기 변경 방안과 품종 변경 방안을 둘 다 적용한 경우(n=151)를 나타낸다.

PDA, CA를 둘 다 적용한 데이터를 제공한 연구는 우리나라의 김창길 외(2010)의 연구이다. 붉은색 선은 표준 오차의 범위를 나타내며 FO, IO, PDA의 경우 적응 방안의 이점이 오차 범위 안에 있으므로 유의하다고 보기 어렵다. 가장 유의한 적응 방안 중 가장 이점을 보이는 적응 방안은 품종 변경 방안으로 볼 수 있다. 그러나 적응방안 적용 유무를 고려하지 않고 적응방안을 고려하지 않은 연구 혹은 적응방안을 고려한 결과만을 제시한 연구를 포함한 데이터를 이용하고, 비료 최적화 방안을 기타 방안으로 포함하여 분석한 결과 관개용수량을 고려한 연구만이 생산량을 증가시키는 것으로 나타나고, 품종 변경 방안과 품종과 파종시기를 둘 다 변경하는 방안

그림 7-24. 적응방안의 종류별 이점



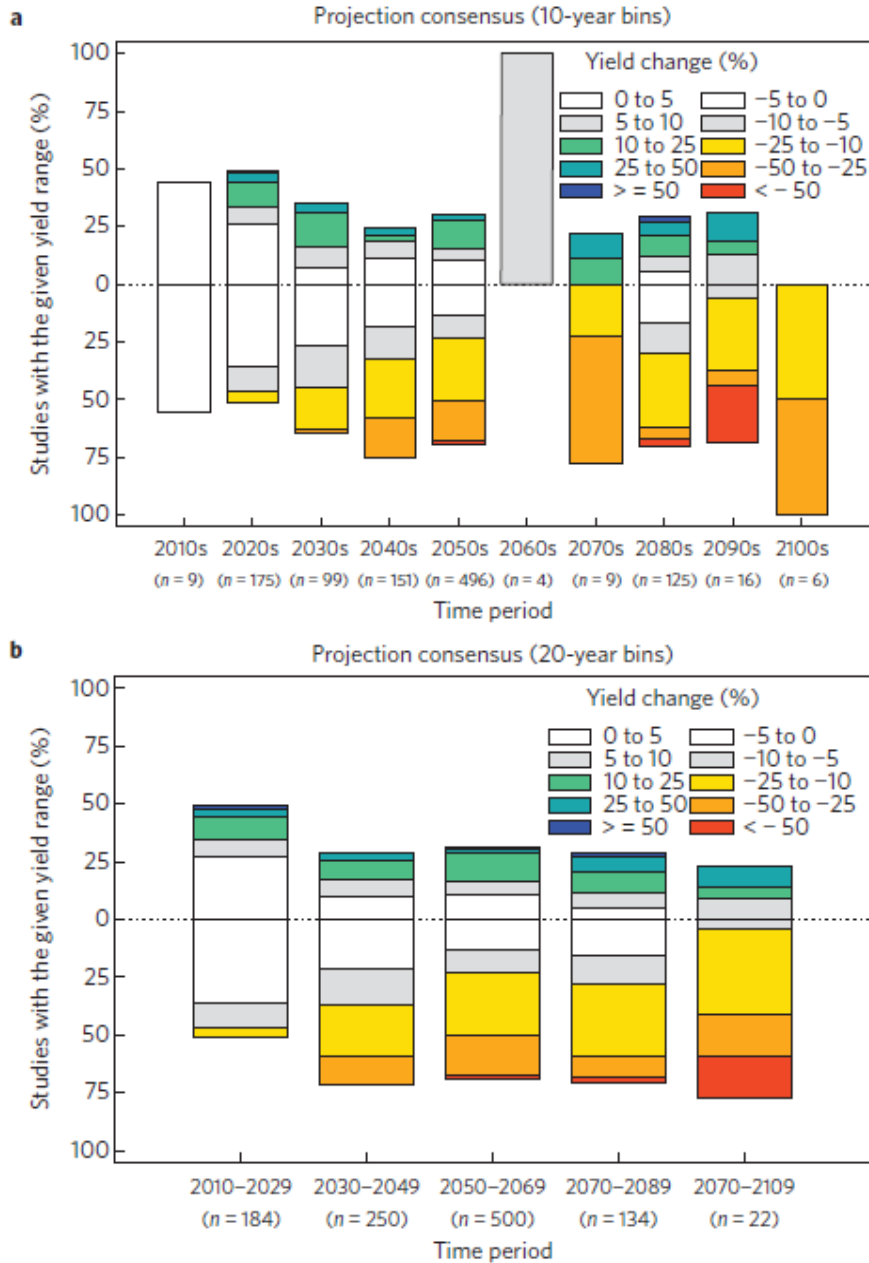
자료: Challinor et al.(2014).

외에는 데이터의 수가 작다는 점으로 미루어 어느 적응 방안이 가장 효과적인지에 대해서는 토의가 필요한 부분으로 보인다.

마지막으로 제시한 결과는 42개 연구의 1090개의 데이터를 이용하여 SRES 시나리오의 A1B, A1F1, A2, B1, B2 시나리오에서 <그림 7-25>와 같이 시간의 간격을 10년으로 잡은 경우(a)와 시간의 간격을 20년으로 잡은 경우(b)로 나누어 시간의 흐름에 따른 작물 생산량의 변화에 대한 비율을 나타내었다. a에서 각 연대별 데이터의 수를 살펴보면 2010년대를 제외한 2050년대까지의 작물 생산량을 예측한 데이터가 2060년 이후로는 데이터의 수보다 많으며 2050년대의 데이터가 가장 많은 것으로 미루어 2050년대의 작물 생산량을 예측한 연구가 활발히 진행되었음을 알 수 있다. 2040년대와 2050년대의 데이터의 70% 이상이 감소하는 결과값을 가지며, 21세기 후반에의 데이터의 45% 이상이 10% 이상의 감소하는 결과값을 갖는다. 감소하는 결과값을 갖는 데이터 중 작물 생산량이 10%이상 감소하는 데이터 수는 21세기 전반에 33.2%에서 21세기 후반에 67%로 증가하며, 작물 생산량이 25% 이상 감소하는 데이터 수는 21세기 전반에 10.4%에서 21세기 후반에 26%로 증가하였다. 또한 농부들은 21세기 전반에 있어 되도록 빨리 적응방안을 적용함으로써 작물 생산량의 감소 위험을 개선할 수 있으며, 21세기 후반에 있어서는 적용하는 적응방안을 보다 체계

화하거나 새로운 적응방안을 고려함으로써 평균 생산량이 감소할 위험을 피할 필요가 있다고 제시하였다

그림 7-25. 시간에 따른 모든 지역과 작물의 생산량 변화



자료: Challinor et al.(2014).

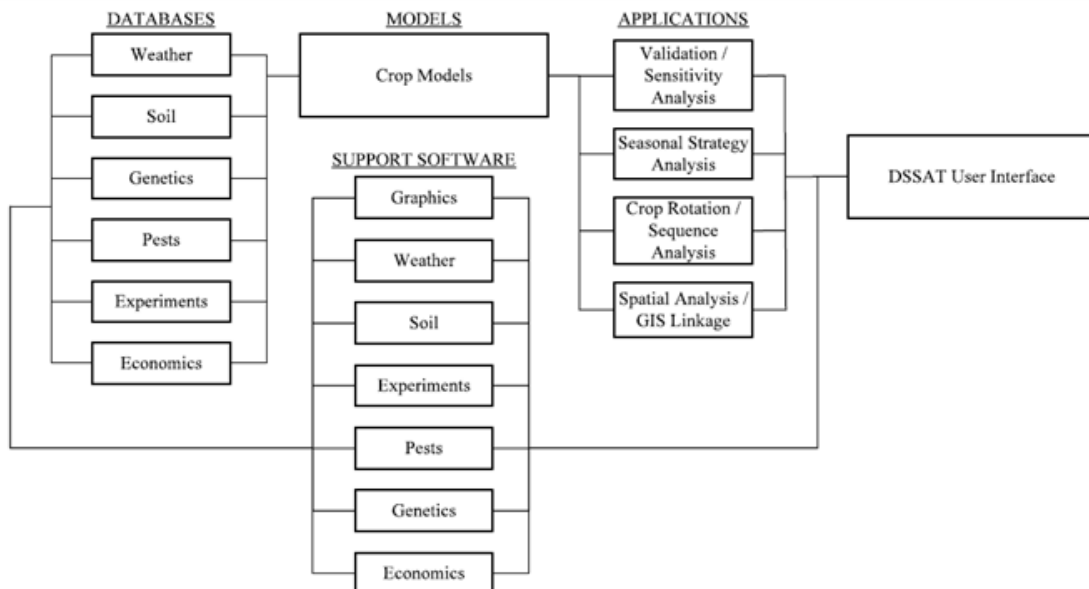
나. 작물 생육모형

(1) CERES

CERES(Crop Environment Resource Synthesis)는 DSSAT(Decision Support System for Agrotechnology Transfer)에 포함된 생육모형으로 대상 작물에 따라 쌀일 경우 CERES-Rice, 보리일 경우 CERES-Barley, 콩일 경우 CROPGRO-Soybean으로 나누어진다.

DSSAT는 ICASA(International Consortium for Agricultural System Applications)의 노력으로 다년간에 걸쳐 주로 미국에서 개발된 여러 종류의 작물모형을 동일한 입출력 파일에 의해 사용할 수 있도록 표준화 시킨 패키지 프로그램으로 농장의 정밀관리에서부터 한 지역의 기후변화 영향평가에 이르기까지 전세계적으로 다양한 부문에서 이용되고 있다(김대준 외, 2012). DSSAT은 토지, 날씨, 농작물 관리 및 실험 계획에 관한 정보를 토양-식물-대기 관계 설명변수로 이루어진 작물모형에 입력하여 주어진 기간 동안 성장과 발육, 잠재수량을 모의한다(J. W. Jones et al., 2003).

그림 7-26. DSSAT의 구조



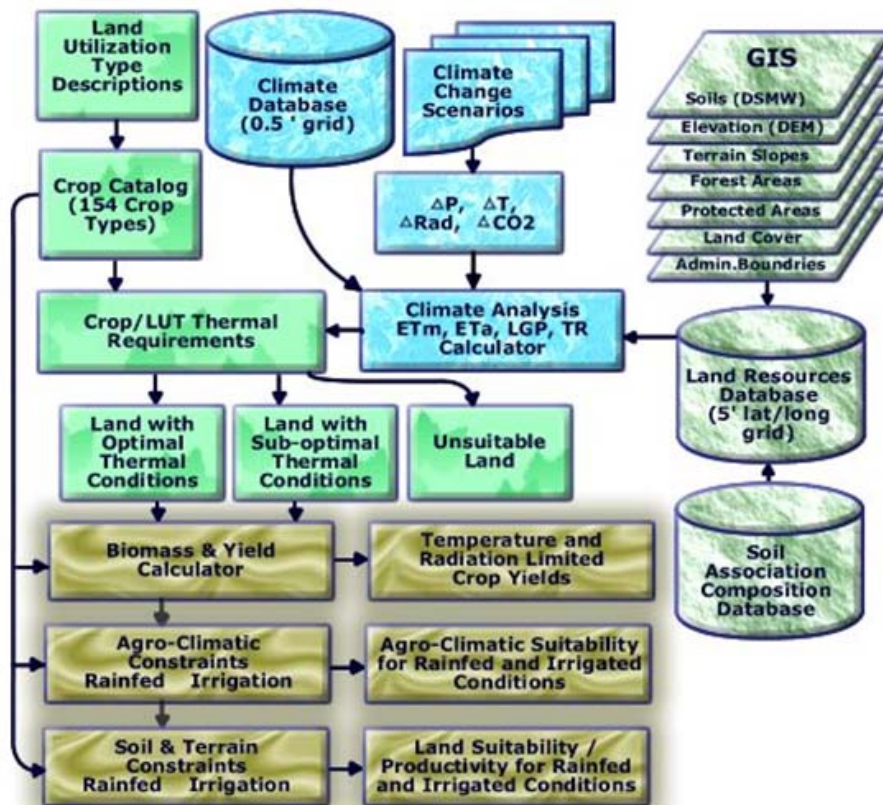
출처: J. W. Jones et al.(2003).

(2) M-GAZE

M-GAZE는 일본 국립환경연구소(National Institute for Environmental Study, NIES)에서 국제연합식량농업기구(Food and Agriculture Organization of UN, FAO)

와 국제응용시스템분석연구원(International Institute for Applied System Analysis, IIASA)이 공동 개발한 GAZE(Global Agro-Ecological Zones) 모형을 기후변화 영향 평가 및 적응 대책 연구에 적합하도록 개선한 전지구 작물 수확량 예측 모형이다 (Masutoni et al., 2009).

그림 7-27. GAZE 모형의 구조

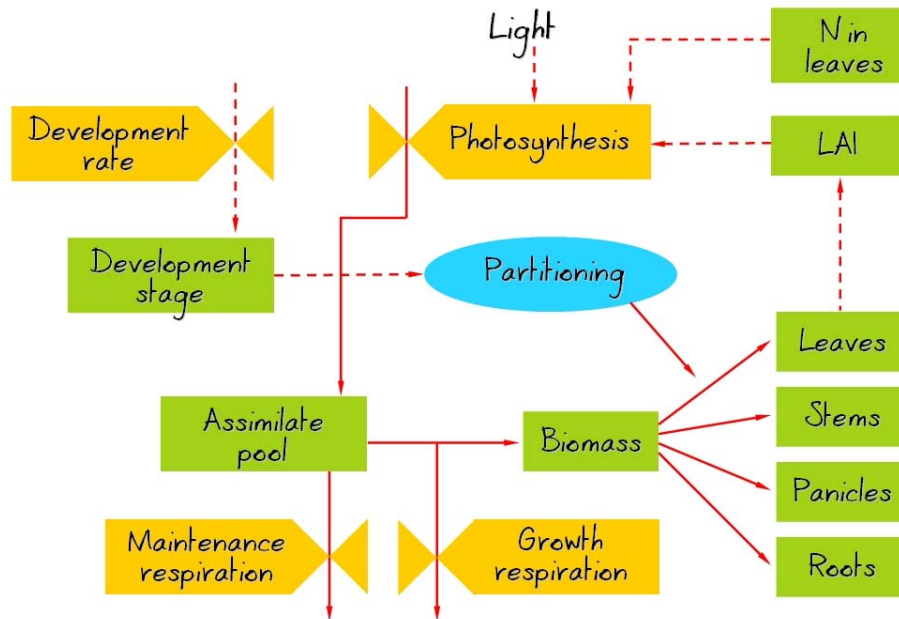


출처: IIASA and FAO(2000).

(3) ORYZA 2000

ORYZA2000은 2000년 국제미작연구소와 네덜란드 Wageningen 대학에서 공동 개발한 것으로 품종특성 모수, 기상 및 재배관련 정보자료를 입력자료로 하여 논벼의 성장과 발육을 모의하는 벼 전용 작물 모형이다(이충근 외, 2012).

그림 7-28. ORYZA 모형의 구조



출처: International Rice Research Institute

다. 연구방법 및 결과

농업부문의 기후변화 영향을 평가함에 있어서 기후변화의 비율과 정도에 있어서의 불확실성, 농산물 산출의 생물학적 반응의 불확실성, 영향에 대한 사회적 반응의 불확실성 등 다양한 형태의 불확실성을 고려해야하므로, 본 연구에서는 메타분석을 통하여 세부적인 주제에 대한 연구결과들을 통합하는 시스템 관점의 연구를 수행함으로써 불

표 7-6. 수집된 연구의 목록

No.	저자	출판연도	제목
1	신용희	2013	아태지역 쌀 생산성에 대한 기후변화 영향평가
2	김대준 등	2012	RCP 8.5 기후조건에 따른 작물생육 모의에 근거한 우리나라 곡물 생산 전망
3	김창길 등	2012	기후변화가 식량공급에 미치는 영향 분석과 대응방안
4	이충근 등	2012	생산모의 연구에 의한 한반도에서의 기후변화에 따른 벼 생산성 및 적응 기술 평가
5	이태석	2012	기후변화 시나리오와 CERES-Rice를 활용한 논벼의 소비수량 및 생산량 분석
6	김창길 등	2009	기후변화에 따른 농업부문 영향분석과 대응전략

확실성을 해소하고자 한다. 메타분석에 사용할 자료로 기후변화에 따른 쌀 생산량 변화에 대한 국내 연구들을 수집하기 위해 구글 학술검색(<http://scholar.google.co.kr/>) 및 학술연구정보서비스(RISS, <http://www.riss.kr/>) 등에서 “기후변화”와 “쌀 생산량”, 그리고 온실가스 배출 시나리오인 “RCP”와 “SRES” 등의 키워드로 검색하여 27개의 논문 및 보고서를 수집하였다. 그 중 여러 기후 변화 인자 중 연구가 가장 활발하게 진행된 온실가스 배출 시나리오와 작물생육모형을 이용하였으며, 쌀 생산량에 대한 결과 값을 추출할 수 있고, 국내(남한)의 미래 쌀 생산량 예측한 중복되지 않은 6개의 연구를 선정하였다(표 7-6).

농업 전문가의 의견을 반영하여 전문가의 모형을 기반으로 하여 기후 변화의 영향력을 분석하기 위해 쌀 생산량의 변화율을 종속변수로, 이산화탄소 농도와 파종시기 변경 여부 및 품종 변경 여부를 독립변수로 선정하였다. 분석을 위하여 해당 변수들에 대해 다음과 같은 전처리 과정을 수행하였다.

쌀 생산량의 변화율(y,%)

각 연구에서 결과는 크게 쌀 생산량과 쌀 생산량의 변화율로 제시되었다. 쌀 생산량을 결과로 제시한 경우는 일반적으로 식 (7-7)을 통해 쌀 생산량의 변화율로 변환이 가능하지만, 쌀 생산량의 변화율을 결과로 제시한 경우, 쌀 생산량으로 변환하기 위해서는 기준연도의 쌀 생산량에 대한 정보를 필요로 한다. 그러나 신용희(2013)의 연구 결과는 기준연도의 쌀 생산량에 대한 정보가 없어 쌀 생산량으로 변환이 불가능하다. 쌀 생산량의 변화율을 변수로 설정하였으며, 이는 각 연구마다 상이한 기준연도 쌀 생산량이 미래 쌀 생산량에 대해 미치는 영향을 보정하기도 한다. 수집한 개별 연구의 기준연도가 상이하므로 이를 일치시키기 위해 모든 연구의 기준연도 범위를 공통적으로 포함하는 1971년부터 2010년까지를 기준연도로 설정하였다.

$$\text{쌀 생산량의 변화율}(\%) = \frac{\text{미래연도 쌀 생산량} - \text{기준연도 쌀 생산량}}{\text{기준연도 쌀 생산량}} \times 100 \quad (7-7)$$

이산화탄소 농도(ppm)

본 연구에서 수집하여 사용한 개별 연구들은 기온 및 강수량과 같은 기후변화에 대한 정보를 충분히 제공하지 않아 변수로 사용할 수 없다. 따라서, 기후변화의 원인으로 알려진 온실가스 중에서 가장 큰 영향을 미치는 이산화탄소의 농도를 변수로 사용하였다. 전술한 바와 같이 온실가스 배출 시나리오는 크게 SRES 시나리오와 RCP 시나리오로 나뉜다. SRES시나리오의 세부 시나리오별 이산화탄소 농도의 자료

는 IPCC 3차 평가보고서(2001)에서 탄소 순환 모형인 ISAM과 BERN의 결과로 산출된 이산화탄소 농도의 평균을 이용하였으며, RCP 시나리오의 세부 시나리오별 이산화탄소 농도 자료는 IPCC 5차 평가보고서(2013)에 제시된 자료를 이용하였다. SRES 시나리오와 RCP 시나리오 둘 다 10년 간격으로 농도의 변화가 제시되어 있으므로, 10년 사이의 이산화탄소 농도 변화는 선형이라는 가정 하에 연도별 이산화탄소 농도를 계산하였으며, 이를 각 연구에서 제시하는 기간에 맞게 평균을 구하여 사용하였다. <표 7-7>은 연도별 이산화탄소 농도의 10년 단위 평균을 나타낸다.

표 7-7. 연도에 따른 온실가스 배출 시나리오별 CO₂ 평균 농도

year	B1	A1B	A2	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
2010s	400.20	405.73	403.13	401.84	401.20	400.27	403.88
2020s	423.93	436.33	433.10	422.39	424.25	420.13	433.95
2030s	448.53	470.58	468.40	435.97	449.19	440.89	471.13
2040s	473.75	509.00	508.33	441.58	474.94	465.55	517.51
2050s	496.55	549.28	552.85	442.15	498.82	495.80	575.15
2060s	514.53	588.68	603.43	439.39	517.37	532.16	643.98
2070s	528.10	626.90	661.88	434.26	528.04	574.28	721.71
2080s	537.90	663.53	729.88	428.52	532.53	617.02	805.83
2090s	543.15	696.28	808.43	423.20	536.29	654.36	894.91

SRES 시나리오는 미래 사회 구조의 사회경제적 가정에 따라 지역주의를 지향하며 경제 발전을 중시하는 경우의 A2 시나리오, 국제주의를 지향하며 환경과 경제 발전의 균형을 중시하는 경우의 A1B 시나리오, 그리고 국제주의를 지향하여 경제발전보다 환경을 중시하는 B1 시나리오 등이 있다. RCP 시나리오는 기후변화에 대응하여 온실가스 저감 정책이 실현되는 정도에 따라 현재 추세로 온실가스가 배출되는 경우인 RCP8.5 시나리오, 온실가스 저감 정책이 어느 정도 실현되는 경우인 RCP6.0 시나리오, 온실가스 저감 정책이 상당히 실현되는 경우인 RCP4.5 시나리오, 그리고 인간 활동에 의한 영향을 지구 스스로가 회복 가능한 경우인 RCP2.6 시나리오로 나뉘며, RCP 시나리오의 숫자는 복사강제력을 의미한다.

적응방안(adaptation) 적용 여부

기후 변화에 대응하기 위해 여러 적응방안이 존재하지만, 그 중 메타분석에 사용되는 6개의 연구에서 고려된 파종시기 변경(planting date adjustment, PDA)과 품종 변경(cultivar adjustment: CA)의 적용 여부를 변수로 사용하였다. 파종시기 변경은

매 해마다 최적의 파종일에 맞춰 쌀을 재배하는 방안이며, 품종 변경은 매 해마다 최적의 품종을 선택하여 재배하는 방안이다. 해당 적응방안을 적용한 경우 1, 적용하지 않은 경우를 0으로 표시하였고, 농업기술의 발전과 관련된 적응방안이 고려된 연구가 있었으나 해당 자료 수가 적어 분석에서 제외하였다.

연구간 편의를 줄이기 위한 전처리

온실가스 배출 시나리오별 여러 종류의 대기대순환모형(**General Circulation Model: GCM**)을 사용하여 결과를 제시한 신용희(2013)에 대해서는 현재 기상청에서 사용 중인 **GCM (HadGEM2-AO)**과 수집된 연구들에서 사용된 **GCM(CCCMA)**에 대한 자료를 분석 대상으로 하였다. 재배 품종을 조생종, 중생종, 중만생종으로 구분하여 연구한 이충근 등(2012)과 김창길 등(2010)의 경우는 같은 조건에서 품종에 따른 결과 값의 평균을 사용하였으며, 도시별로 결과를 제시한 이태석(2012)와 김창길 등(2010)의 경우는 1985년에 농촌진흥청에서 제안한 19개 농업기후지대에 따라 분류하고, 이충근 등(2012)이 제안한 구분 기준에 따라 북부, 중부, 남부로 구분하여 평균 값을 구하였다. 또한, 대부분의 연구에서 이산화탄소 시비효과의 중요성을 고려하고 있으므로, 이를 고려하지 않은 자료는 분석에서 제외하였다.

수집된 개별 연구가 포함하고 있는 변수에 대한 정보를 <표 7-8>에 요약하였으며, 개별 연구로부터 취합한 자료의 수는 205개로써 <표 7-9>와 같이 자료의 구조를 생성하여 분석에 사용하였다.

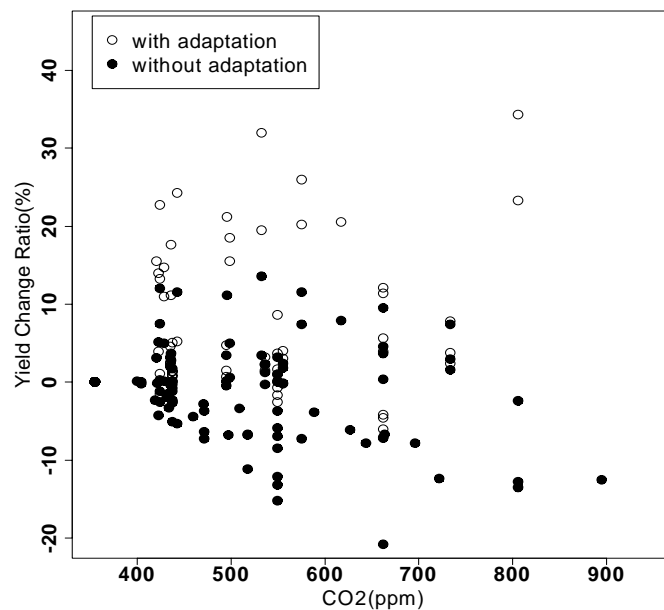
표 7-8. 수집된 연구에서 사용된 변수 정보

저자 (출판연도)	사용된 온실가스 배출 시나리오	적용된 적응방안
신용희 (2013)	RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5	PDA, CA
김대준 등 (2012)	RCP 8.5, A1B	Non-adaptation
김창길 등 (2012)	RCP 8.5, A2	Non-adaptation
이충근 등 (2012)	A1B	PDA
이태석 (2012)	A2, A1B, B1	PDA
김창길 등 (2010)	A1B	PDA

표 7-9. 데이터의 구조

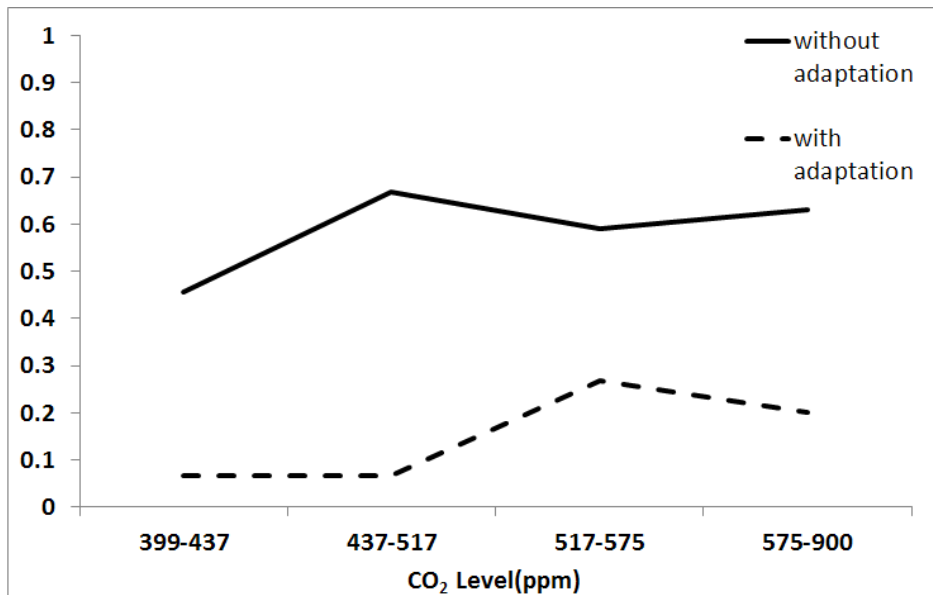
연구번호	관측번호	CO ₂	PDA	CA	y
1	1	354.5	0	0	0
	2	422.4	0	0	-4.3
	3	442.2	0	0	-5.3
	4	428.5	0	0	0.1
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2	57	354.5	0	0	0
	58	418.9	0	0	-2.3
	59	471.1	0	0	-6.4
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
6	186	354.5	0	0	0
	187	437.5	0	0	-5.1
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	204	549	1	0	8.6
	205	662.2	1	0	11.37

본 연구의 회귀모형을 이용한 분석에 앞서 자료탐색을 통해 적응방안의 효과를 살펴 보았다. <그림 7-29>와 같이 적응방안을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우로 구분하여 그린 자료의 산점도를 보면 대체로 적응방안을 적용한 자료가 적응방안을 적용하지 않은 자료보다 위쪽에 분포하는 것을 볼 수 있다.

그림 7-29. CO₂ 농도에 따른 자료의 산점도

<그림 7-29>의 경우 쌀 생산량의 변화율이 약 -5 ~ 15% 구간에서 겹치는 자료가 상당수 존재하여 적응방안의 효과를 명확히 구분하기 어렵다. 따라서 <그림 7-30>와 같이 적응방안 적용 유무에 따라 쌀 생산량의 변화율이 감소를 나타내는 자료 수의 비율을 살펴보았다. 기준연도의 자료는 기준 값이므로 제외하였고, 적응방안 적용 유무에 따른 자료의 수를 고려하여 이산화탄소 농도를 ‘399-437’, ‘437-517’, ‘517-575’, ‘575-900’으로 나누었으며, 각 이산화탄소 농도 범주가 갖는 자료의 수에서 감소를 나타내는 자료의 수의 비율을 나타내었다.

그림 7-30. CO₂ 농도별 쌀 생산량의 감소를 나타내는 자료의 비율



<그림 7-30>을 보면 적응방안을 적용하지 않을 경우 대체로 쌀 생산량의 변화율이 감소하는 자료의 비율이 증가하는 자료의 비율보다 높은 것을 알 수 있으나 그 차이가 크지 않다. 이는 쌀이 밀이나 보리 등 다른 작물들에 비해 상대적으로 기후변화에 대한 민감도가 낮기 때문이며(Lobell 등, 2007), 김창길 등(2011)이 언급했던 기후변화의 긍정적인 영향이 작용한 결과라고 볼 수 있다. 반면 적응방안의 효과는 명백하다. 이산화탄소의 농도가 높아질 경우 쌀 생산량의 변화율이 감소하는 경향을 보이는 자료의 수가 증가하지만 적응방안을 적용하지 않았을 경우와 비교하여 자료의 비율이 매우 낮으므로 적응방안이 기후변화에 대응하기 위한 방법으로써 효과가 있다고 할 수 있다. 기후변화의 영향과 적응방안의 효과를 정량적으로 알아보기 위해 식 (7-8)과 같은 선형 회귀 모형을 고려하였다. 쌀 생산량의 변화율(y)을 종속변수로, 기후변화에 대한 변수인 이산화탄소 농도(CO₂)와 기후변화 대응책인 적응방안

(adaptation)을 독립변수로 설정하였다. 또한 적응방안은 기후변화에 대응하기 위한 방법이므로 미래 기후변화의 진행과 관련되어 있을 것으로 예상하여 이산화탄소 농도와 적응방안의 상호작용을 반영하였다.

$$y = \beta_0 + \beta_1 CO_2 + \beta_2 I(adaptation) + \beta_3 CO_2 \times I(adaptation) + \epsilon, \epsilon \sim N(0, \sigma^2) \quad (7-8)$$

y : 쌀 생산량의 변화율(%)

CO_2 : 이산화탄소 농도(ppm)

$I(adaptation)$: 적응방안 적용 여부(적용 = 1, 미적용 = 0)

식 (7-8)을 통해 추정된 계수는 <표 7-10>과 같고, 선형 회귀 식에서 고려된 이산화탄소 및 적응 방안의 효과는 모두 통계적으로 유의한 효과($\alpha=0.05$)를 보인다. 적응 방안의 적용 없이 기후변화의 영향만 고려할 경우 이산화탄소 농도가 100ppm 증가할 때, 쌀 생산량의 변화율은 약 1.2%씩 감소할 것으로 예상되며, 적응방안이 적용된다면 이산화탄소 농도 100ppm 증가에 대해 쌀 생산량의 변화율은 2.4%증가할 것으로 예상된다. 이는 어떠한 적응 방안도 적용하지 않은 경우 이산화탄소의 증가에 의한 기후변화로 인하여 쌀 생산량이 감소하는 반면, 적응방안을 적용할 경우 쌀 생산량이 증가하는 점으로 미루어 기후변화 대응책의 효과가 통계적으로 유의하게 존재하는 것을 보여주고 있다.

표 7-10. 식 (7-8)으로부터 추정된 회귀계수

Variable	$\hat{\beta}$	S.E	p-value
intercept	4.942	1.982	0.0489
CO_2	-0.012	0.005	0.0146
adaptation	-9.647	4.084	0.0192
$CO_2 \times adaptation$	-0.034	0.008	<0.0001

*Adjusted $R^2=0.2391$

식 (7-8)의 모형을 통하여 적응방안의 효과를 알 수 있으나, 이는 적응방안의 종류가 다르더라도 쌀 생산량의 변화율에 미치는 영향은 같다는 가정을 전제로 한다. 따라서 적응방안의 종류에 따른 효과를 알아보기 위하여 식 (7-9)와 같이 선형 회귀 모형을 고려하였다. 적응방안 적용 여부 변수를 적응방안의 종류에 따라 파종시기 변경 여부(PDA)와 품종 변경 여부(CA)로 나누었으며 각각의 적응 방안과 이산화탄소 농도와의 상호작용을 반영하였다.

$$y = \beta_0 + \beta_1 CO_2 + \beta_2 I(PDA) + \beta_3 I(CA) + \beta_4 CO_2 \times I(PDA) + \beta_5 CO_2 \times I(CA) + \epsilon, \quad (7-9)$$

$$\epsilon \sim N(0, \sigma^2)$$

y : 쌀 생산량의 변화율(%)
 CO_2 : 이산화탄소 농도(ppm)
 $I(PDA)$: 적응 방법 중 파종시기 변경 여부(적용 = 1, 미적용 = 0)
 $I(CA)$: 적응 방법 중 품종 변경 여부(적용 = 1, 미적용 = 0)

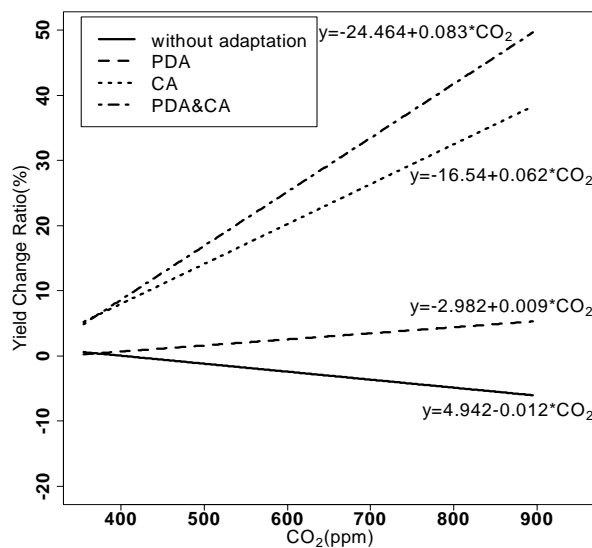
<표 7-11>과 같이 식 (7-9)의 선형 회귀 모형에서도 고려된 이산화탄소 및 적응 방안들의 효과들은 모두 통계적으로 유의한 효과($\alpha=0.05$)를 보이며, 적응방안의 효과를 쉽게 파악하기 위해 이산화탄소 농도의 증가에 따른 쌀 생산량의 변화율을 그래프로 나타내었다<그림 7-31>. 또한 식 (7-8)의 선형 회귀 모형에서 적응방안 적용 여부에 따라 계산된 각 회귀식을 <그림 7-31>의 회귀직선위에 나타내었다. 다른 적응 방안들이 전혀 고려되지 않을 경우는 이산화탄소 농도가 100ppm 증가할 때, 쌀 생산량의 변화율은 약 1.2%씩 감소할 것으로 예상된다. 그러나 이산화탄소 농도 100ppm 증가에 대해서, 적응 방안 중 파종 시기 변경만을 적용할 때는 쌀 생산량의

표 7-11. 식 (7-9)으로부터 추정된 회귀계수

Variable	$\hat{\beta}$	S.E	p-value
intercept	4.942	1.8326	0.0076
CO ₂	-0.012	0.0036	0.0009
PDA	-7.924	3.5394	0.0263
CA	-21.482	5.2706	<0.0001
CO ₂ ×PDA	0.021	0.0069	0.0023
CO ₂ ×CA	0.074	0.0109	<0.0001

*Adjusted R²=0.5931

그림 7-31. 적합된 회귀직선



변화율이 오히려 0.9% 증가하고, 품종 변경만을 적용하면 6.2%, 그리고 둘 다 적용할 때는 8.3% 증가할 것으로 예상된다. 고려된 두 가지 적응 방안은 모두 쌀 생산량을 증가시키는 효과를 가지고 있지만, 그 중 품종 변경이 파종시기 변경보다는 동일한 이산화탄소 변화량에 대해 쌀 생산을 더 크게 증가시킬 수 있음을 보여주고 있다.

<표 7-7>을 작성하기 위해 산출되었던 연도별 이산화탄소 농도 값을 식 (7-9)의 선형 회귀식에 대입하여 적응방안 적용 여부에 따른 온실가스 배출 시나리오별 쌀 생산량의 변화율이 시간에 따라 어떻게 변하는지 살펴보았다. <그림 7-32>은 적응방안이 하나도 적용되지 않은 경우를 나타내며, <그림 7-33>은 파종시기 변경을 적용한 경우, <그림 7-34>는 품종 변경을 적용한 경우, <그림 7-35>는 파종시기 변경과 품종 변경을 둘 다 적용한 경우를 나타낸다. 또한 각 조건별 시간에 대해 중기적 관점에서 2050년의 예측 값을, 장기적 관점에서 2100년의 예측 값을 선택하여 <표 7-12>에 나타내었다.

그림 7-32. 적응방안을 적용하지 않은 경우

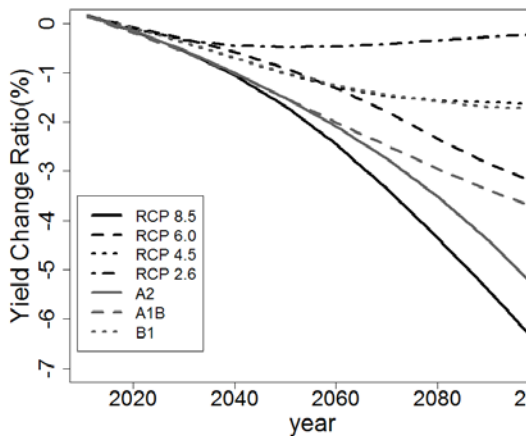


그림 7-33. 파종시기 변경을 적용한 경우

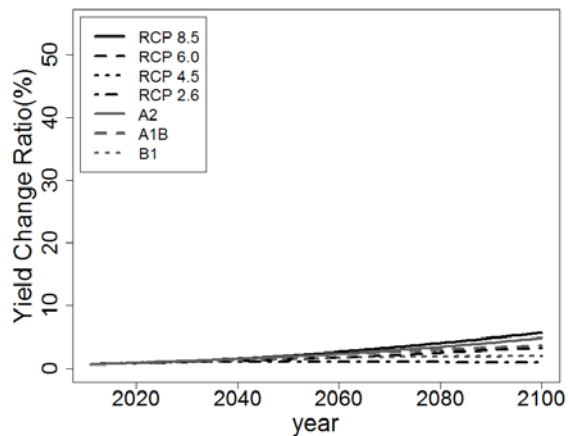


그림 7-34. 품종 변경을 적용한 경우

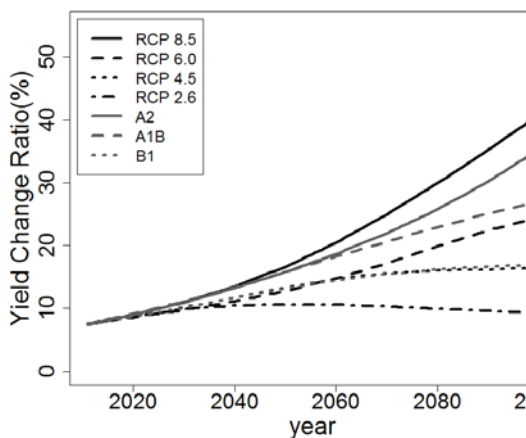
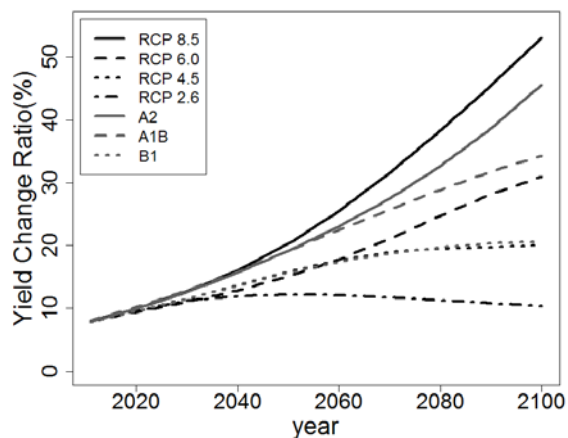


그림 7-35. 모든 적응방안을 적용한 경우



적응방안이 적용되지 않은 경우, 기후변화의 영향으로 쌀 생산량이 감소하며, RCP 8.5 시나리오에서 2050년에 1.68%에서 2100년에는 6.52%로 가장 크게 감소할 것으로 예측되었다. 반면 RCP 2.6 시나리오의 경우에는 2050년대에 감소하는 폭이 가장 작게 예측되었으며, 시간이 지날수록 감소하는 폭이 커지는 다른 시나리오와는 달리 2050년에는 0.48% 감소한 것에 비해 2100년에는 보다 작은 0.21% 감소할 것으로 예측되었다.

표 7-12. 온실가스 배출 시나리오와 적응방안 별 쌀 생산량 변화율 예측값

Emission scenario	Non-adaptation		PDA		CA		PDA&CA	
	2050	2100	2050	2100	2050	2100	2050	2100
B1	-1.00	-1.73	1.48	2.03	13.21	16.85	15.68	20.61
A1B	-1.51	-3.75	1.87	3.58	15.78	26.98	19.16	34.31
A2	-1.51	-5.42	1.87	4.85	15.78	35.30	19.16	45.57
RCP2.6	-0.48	-0.21	1.08	0.88	10.62	9.29	12.18	10.38
RCP4.5	-1.02	-1.65	1.49	1.98	13.30	16.48	15.81	20.10
RCP6.0	-0.91	-3.26	1.41	3.20	12.76	24.51	15.08	30.97
RCP8.5	-1.68	-6.52	2.00	5.69	16.61	40.80	20.28	53.01

적응방안이 적용된 경우, 모든 시나리오에서 쌀 생산량이 증가할 것으로 예측되었으나 온실가스 배출 시나리오와 적응방안의 종류에 따라 차이를 보였다. 적응방안의 종류와 관계없이 RCP 8.5 시나리오에서 쌀 생산량이 가장 크게 증가하였으며, RCP 2.6 시나리오에서 가장 작게 증가하였고, 적응방안을 비교했을 때 품종 변경이 파종 시기 변경보다 쌀 생산량을 크게 증가시키는 것으로 예측하였다.

온실가스 배출 시나리오에서 가장 큰 변동성을 갖는 시나리오는 RCP 8.5 시나리오(-6.52 ~ 53.01%)이며, 가장 작은 변동성을 갖는 시나리오는 RCP 2.6시나리오인 것으로 나타났다. 또한 모든 온실가스 배출시나리오에 따른 쌀 생산량의 증가 범위에 대해 파종시기 변경 방안의 경우 2050년에는 1.08 ~ 2%, 2100년에는 0.8 ~ 2.03%의 범위를 갖는 반면, 품종 변경의 경우 2050년에는 10.62 ~ 16.61%, 2100년에는 9.29 ~ 40.8%의 범위를 갖는다. 이처럼 시간이 흐를수록 변동성이 증가하며, 온실가스 배출 시나리오의 경우 이산화탄소 농도의 증가폭이 큰 시나리오일수록 큰 변동성을 갖고, 적응방안의 경우 품종변경 방안이 파종시기 변경 방안보다 큰 변동성을 갖고 있음을 알 수 있다.

다. 결론 및 향후 과제

기후 변화에 따른 국내 쌀 생산량의 변화에 대한 효과를 보기 위해 본 연구에서는 이산화탄소의 농도를 기후변화의 대표적인 인자로 고려하고, 쌀 생산량의 변화율에 영향을 줄 것으로 예상되는 적응 방안들 중 품종 변경과 파종시기 변경을 추가로 고려하여 쌀 생산량의 변화율에 대한 선형 모형을 적합하였다. 연구 결과, 이산화탄소 농도가 100ppm 증가함에 따라 기준 년도 대비 쌀 생산량이 1.2% 감소할 것으로 예상된다. 반면, 적응방안을 고려할 경우에는 이산화탄소 농도가 100ppm 증가함에 따라 파종시기 변경을 적용할 때 0.9%, 품종 변경 적용할 때 6.2%, 두 적응방안을 모두 적용할 때 8.3% 증가하는 것으로 예상된다. 또한 온실가스 배출 시나리오에서 가장 큰 변동성을 갖는 시나리오는 RCP 8.5 시나리오이며, 적응방안의 종류에서 가장 큰 변동성을 갖는 방안은 품종변경 방안인 것으로 예상된다. 즉, 이러한 변동성은 온실가스 배출 시나리오가 갖는 불확실성에서 비롯되기 때문에 시간이 흐를수록 큰 변동성을 갖게 되며, 미래의 쌀 생산량의 변화를 명확하게 추정하기 위해서는 정확한 기후변화 예측을 통하여 온실가스 배출 시나리오의 불확실성을 포함한 기후변화에 대한 불확실성을 줄일 필요가 있다.

기후변화에 대응하여 적응방안이 고려되지 않을 경우에는 쌀 생산량의 감소율을 최소화하기 위하여 온실가스 배출을 줄이는 방향의 정책이 필요하며, 적응방안을 고려할 경우에는 품종변경 방안이 기후변화 대응책으로써 효율적일 것이다. 국내 쌀 생산량의 변화율에 대하여 이산화탄소 농도는 적응방안을 적용했을 때의 증가율이 적응방안을 적용하지 않았을 경우의 감소율보다 크기 때문에 이산화탄소 농도의 증가는 적응방안의 적용을 통해 쌀 생산량을 증가시킬 수 있는 기회가 될 수 있다. 또한 적응방안에 대해서 파종시기를 변경하는 것보다 품종을 변경하는 것이 더 효율적으로 나타났으나, 이는 각 기후조건에서 최적의 품종으로 재배한 경우를 나타내므로 현재 알려져 있는 품종으로는 한계가 있을 수 있다. 따라서 기후변화에 보다 잘 적응할 수 있는 품종을 개발한다면 본 연구에서의 결과와 같이 쌀 생산량을 증가시킬 수 있을 것이라 예측되며, 전세계적으로 보여지는 인구 증가에 따른 식량 안보에 대한 해결방안이 될 수 있을 것이라 생각된다.

본 연구 결과에 대해 적응방안 적용 여부만을 고려한 모형의 적합도(Adjusted $R^2 = 0.2391$)에 비해 적응방안의 종류를 세부적으로 고려한 모형의 적합도(Adjusted $R^2 = 0.5931$)가 높게 나타났다. 이는 적응방안의 종류에 따라 효과의 차이가 있으며, 적응방안을 세부적으로 고려한 모형이 보다 타당함을 의미한다. 그러나 전체 자료를 설명하는 부분에서 적응방안을 세부적으로 고려한 모형의 적합도가 높다고 볼 수 없

다. 잔차 분석 결과에서 특이한 형태가 관측되지 않았으므로 적합된 선형 회귀모형에서 고려된 효과들이 분석 자료 내에서 쌀 생산 변화율의 전체 변동을 약 59% 정도만 설명할 수 있고, 설명되지 않는 변동 부분은 여기서 고려하지 않은 다른 효과들로 설명할 수 있음을 의미한다. 기후변화에 따른 작물 생산량에 대한 메타분석을 수행한 선행 연구들(A.J.Challinor 등, 2014; J.Wilcox 등, 2013)에서는 기온과 강수량을 이산화탄소와 함께 기후적인 인자로 고려하였다. 본 연구에서도 이와 같은 기후적인 요인들의 존재를 인식하여 모형 개발에 고려하고자 하였으나, 메타분석에 이용된 개별적 연구들에서 기온이나 강수량에 대한 명확한 정보가 제시되지 않았기 때문에 반영하지 못하였다. 향후 국내 기후변화에 따른 농작물의 연구에 있어서 이산화탄소, 기온, 강수량에 대한 정보를 모두 제시하는 연구가 활발히 이루어져야 할 것으로 생각된다. 이러한 연구들이 누적되어 간다면, 추후 동일한 주제의 메타분석에서 기후변화가 쌀 생산량에 미치는 영향을 명확하게 설명할 수 있고, 시간과 장소에 따라 효율적인 적응 방안 적용을 고려할 수 있을 것으로 생각된다.

제8절 농림수산식품 분야 기후변화 대응전략 수립

1. 전략수립의 기본방향

농림수산식품 분야의 기후변화 영향분석을 기초로 한 대응 전략수립(counterstrategy formulation)은 국가적인 관점에서 기술개발의 비전과 목표를 설정하고 목표달성을 위한 종합적인 활동계획이라 할 수 있다. 농림수산식품 분야 기후변화 적응의 기술개발 비전은 ‘효과적인 적응기술을 통한 안정적인 농림수산식품 생산 기반 구축’으로 설정하였다. 이러한 비전 달성을 위해서는 분야별 관련 기술의 우선순위를 설정하고 단계별 로드맵을 설정하여 지속적인 연구개발 투자가 이루어지도록 해야 한다.

기후변화에 대응하여 위기를 기회로 활용하는 분야별 최적의 기술개발 전략수립의 기본 방향은 크게 세 가지로 설정하였다.

첫째, 기후변화에 대한 정확한 진단과 평가를 위해서는 신뢰성 있는 영향분석이 필요하며, 우리의 여건에 적합하고 국제적으로 평가 받을 수 있는 농림수산식품 분야 기후변화 영향분석 모형개발에 관한 기술개발이 이루어지도록 해야 한다.

둘째, 농림수산식품 분야 기후변화 적응을 위한 기술개발은 크게 품종개발과 생산기술을 포괄하는 적응기술과 생산시설 현대화와 조기경보 및 피해경감 기술 등과 관련된 피해방지 및 기반구축 기술로 나누어 접근한다. 각 분야별로 3~4개의 핵심기술을 유형화하고, 각 핵심기술별로 구체적인 주요기술을 발굴하며, 각 분야 전문가의 의견을 수렴하고, 정책적 수요 등을 종합적으로 판단하여 분야별 중점기술개발 과제를 선정하여 추진토록 한다.

셋째, 기후변화 대응 기술개발 전략 모색을 위해 대내외적인 여건변화를 고려한 SOWT 분석을 통해 분야별 핵심전략 추진을 위하여 적절한 기술개발이 지원되도록 한다. SWOT 분석에서 제시된 바와 같이 강점과 기회를 활용하는 SO전략의 경우 관련분야 기술의 융복합화와 신소득작목 개발이 중요한 전략이며, 강점을 활용하고 위험을 최소화하는 ST전략에서는 조기감시체계 구축과 적응품종개발 및 병해충(또는 질병) 발생감시 및 예측 시스템 구축이 중요한 전략으로 제시되고 있다. 약점을 극복하고 기회를 활용하는 WO전략에서는 기후변화 정책사업과 연계된 기술개발 체계 구축이 중요한 전략이며, 약점과 위험을 극복하기 위한 WT전략에서는 취약성 평

가 및 재배지대 재설정과 기후변화 전문인력 육성이 중요한 전략으로 제시되고 있다. 이와 같이 도출된 주요 전략이 잘 추진될 수 있도록 각 분야별 핵심기술이 개발되어 추진되도록 한다.

표 8-1. 농림수산식품 분야 기후변화 대응 관련 SWOT 분석

	강점(Strength)	약점(Weakness)
	<ul style="list-style-type: none"> • 우수한 관련분야 농업기술 보유 • ICT기술, 기후·기상부문 세계적인 기술수준 • 산학연 연계 체계 및 공동연구 체계 확립 • 기후변화 대응 적극적 정책 추진 의지 	<ul style="list-style-type: none"> • 기후변화대응 통합적 정책 부재 • 적응분야 선진국과의 기술격차 • 기후변화대응 연구 인프라 취약 • 기술과 정책연계 미약 • 기후변화 연구인력 부족
기회(Opportunity)	SO전략	WO전략
<ul style="list-style-type: none"> • 정부의 기후변화 연구투자 확대 • 강수량 증가에 의한 수자원 풍부 • 온난화로 아열대작물 도입 신소득원 창출 가능 • 고온성 작물의 재배영역 확대 • 기후변화에 대한 의식 확산 	<ul style="list-style-type: none"> • 농림수산, 정보기술, 기상기술의 융복합을 통한 기술력 조기확보 • 아열대/열대 과일 등 신소득작목의 재배기술개발 보급 확대 • 기존 국가간 협력체계를 통한 선진기후변화 대응 기술도입 	<ul style="list-style-type: none"> • 기후변화대응 농식품부 세부시행계획과 연계한 종합적인 연구목표 설정 • 기후변화 정책사업과 연계된 기술개발 체계 구축
위협(Threat)	ST전략	WT전략
<ul style="list-style-type: none"> • 전 지구 평균보다 빠른 한반도 지구온난화 속도 • 기상이변과 재해빈도 증가 • 온도에 민감한 채소 수급불안 • 재배적지 이동과 재배면적 감소 • 작물의 수량감소와 품질저하 • 병해충 잡초의 활동증대 • 유기물 분해촉진으로 지력저하 • 연안 어종의 변화와 해양산성화 	<ul style="list-style-type: none"> • 기존 농업환경변동조사 체계활용 기후변화 감시체계 조기 구축 • IT인프라를 활용한 기상재해조기경보체계 구축으로 피해 최소화 • 농업기술 역량을 활용한 기후변화 적응 품종 및 재배기술 조기개발을 통해 적응역량 제고 • 병해충/질병 발생감시 및 예측체계 구축 	<ul style="list-style-type: none"> • 식량안보 대응체계 구축을 위한 글로벌 식량생산 예측기술 확보 • 멀티스케일 모델구축을 통해 정책-현장-기술의 연계강화 • 농림수산분야 관측체계의 고도화 • 재해 취약성 평가항목 확대 및 재배지대 재설정 • 기후변화 전문인력 양성

2. 농림수산물 기후변화 적응 기술개발 우선순위 평가

농림수산물 기후변화 적응 기술개발의 우선순위를 평가하기 위하여 다음과 같이 농림수산물 기후변화 적응 기술 인벤토리를 구축하였다. 우선 농업, 산림, 수산, 식품 분야의 기후변화 적응 기술 목록들을 작성하고, 영향평가, 적응기술, 피해방지 및 기반구축 기술의 3가지로 범주화하였다. 각 분야별로 특성이 상이하나, 분야별 특성을 모두 고려할 수는 없기 때문에 모든 분야에서 적용될 수 있는 공통적인 기술개발 목록을 작성하고자 하였다. 영향평가는 농림수산 생태계 및 생산성 변동 모니터링 체계 구축, 농림수산물 기후변화 영향평가 기술 개발, 농림수산물 기후변화 취약성평가 기술개발의 3가지 하위범주로 구성된다. 적응기술은 기후변화 적응품종 개발, 기후변화 대응 농림수산물 생산기술 개발, 기후변화 대응 병해충 및 질병 관리기술 개발, 기후변화 대응 농림수산 자원관리 및 이용 기술 개발의 4개 하위범주로 구분하였다. 피해방지 및 기반구축 기술은 농림수산물 생산시설 현대화 기술, 이상기상 대비 농림수산물 재해 조기경보 및 기반 시스템 구축, 피해 경감 기술 개발의 3개 하위범주를 포함한다.

표 8-2. 기후변화 적응 농림수산물 기술개발 목록

대분류	핵심과제	주요 기술
영향 평가	농림수산 생태계 및 생산성 변동 모니터링 체계 구축	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 농림수산 미래 상세전자기후도 작성 및 극최저기온 분석지도 제작 ▪ 인공위성 및 ICT 기반 농림수산 생태계 원격탐사 모니터링 기술 개발 ▪ 기상재해 발생 모니터링 및 농림수산물 기상재해 DB 구축 ▪ 기후변화에 따른 농림수산 생태계 및 생물다양성 변화 모니터링 ▪ 농림수산분야 돌발 병해충 및 질병 예찰 정보화시스템 구축 ▪ 수입 농림수산분야에 대한 주요 수출국 이상기상과 생산실태 모니터링 ▪ 원격탐사 및 고정조사 표본점을 활용한 토지이용·피복 변화 모니터링 ▪ 첨단 무인 관측기술을 통한 실시간 이상기상·이상해황 정보 시스템 구축 ▪ 국제기구 및 주요 국가들과의 분야별 감시교류체계 구축 및 정보교류 네트워킹
	농림수산물 기후변화 영향평가 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 기후변화에 따른 농림수산 생태계 영향평가 ▪ 기후변화에 따른 작물재배적지, 수종별 조림적지, 수산자원의 시공간적 변동 예측 모델 구축 ▪ 기후변화가 농림수산물 병해충 및 질병 발생에 미치는 영향 정량화 ▪ 기후변화 대응 농림수산 생산지역 변동 및 생산 적지 지도 작성 ▪ 기후변화에 따른 농림수산분야 생육 및 생산성 예측 모델 개발 ▪ 기후변화의 농림수산물 분야 사회경제적 영향평가 모델 개발 ▪ Multi-scale 농림수산생태계 통합영향평가모델 구축 ▪ 농림수산물분야 기후변화에 대한 고해상도 GIS 기법 활용 기술 개발 ▪ 농림수산물 환경자원 변동 및 경제적 손실비용 예측모델 개발 ▪ 식품분야 기후변화 통합영향모델인 푸드시스템모델 개발

대분류	핵심과제	주요 기술
	농림수산물 기후변화 취약성평가 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> 농림수산물분야 기후변화 취약성 평가지표 개발 농림수산물생태계 통합 예측모델 활용 취약성 평가 기후변화 대응 식품안전사고 발생 예측모델 개발(중금속, 잔류농약, 곰팡이독소 등 비의도적 유해물질 중점으로) 기후변화에 따른 농림수산물분야 병해충 취약성 평가 기후변화에 따른 자연재해 취약성 평가 농림수산물분야 기후변화 취약성에 대한 고해상도 GIS 기법 활용 기술 개발
	기후변화 적응 품종 개발	<ul style="list-style-type: none"> 기후변화 대응 병해충 저항성 농림수산물분야 품종 개발 글로벌 식량생산을 위한 해외농업개발용 품종개발 고온성 작물, 열대림 생장 우수수종, 아열대성 어류 등 품종 육성 기후변화에 적응성과 생장량이 우수한 농림수산물 품종 육성
	기후변화 대응 농림수산물 생산기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> 기후변화 대응 농림수산물 재배기술, 농업지대 및 작부체계 변경 기술 기후변화에 따른 농림수산물(작목, 단기임산물, 양식) 생산적지 재설정 기후변화적응 농림수산물 관리 가이드라인 개발 제공 기후변화에 대응한 주요 농림수산물 첨단 가공 기술 개발 기후변화에 따른 폐독 발생시기 변화로 폐류의 생리생태 변화 파악 및 변동 예측 기술 개발
적용 기술	기후변화 대응 병해충 및 질병 관리기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> 농림수산물 돌발병해충 및 질병 조기진단 기술 개발 농림수산물 돌발병해충 및 질병 친환경 종합관리 기술 개발 아태지역 이동성 바이러스병 및 해충 국제협력 네트워크 구축 농림수산물 질병 확산 경로분석 및 예방 기술 개발 기후변화 대응 비의도적 오염물질(곰팡이독소, 중금속, 잔류농약) 예방, 농림수산물 분야 안전관리 강화 기술 개발 기후변화 대응 농림수산물 위생처리장치 및 정화처리 기술 개발 기후변화 대응 농림수산물 포장재 기술 개발 아열대에 따른 농림수산물 대상의 항생제 및 백신 접종 관련 기술 개발
	기후변화 대응 농림수산물 자원관리 및 이용 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> 용수의 효율적 이용 및 효율화 기술 개발 농림수산물 물관리 지침 개발 강우시 경사지 토양유실 방지 기술 개발 농림수산물 서식지 보호를 위한 서식환경 조성 기법 개발
	농림수산물 생산시설 현대화 기술	<ul style="list-style-type: none"> 내재해성 생산시설물 개발 기술 및 운영 체제 개발 기후변화 대응 농림수산물 시설 안전성 내재해성 시설기준 설정 극한기상환경에 대응하기 위한 무인자동형 농림수산물 생산기술 개발 수리시설, 관배수시스템의 개선기술 개발 가뭄, 홍수 등 재해대비 수자원관리시스템 개발
피해 방지 및 기반 구축 기술	이상기상 대비 농림수산물 재해 조기경보 및 기반 시스템 구축	<ul style="list-style-type: none"> 이상기상(폭염, 강풍, 폭설, 가뭄 등) 조기경보시스템 구축 농림수산물 관련 이상기상 대응 매뉴얼 개발 산불위험예보시스템 고도화 돌발성 호우에 의한 산사태 위험성 예측 고도화 기후변화 유래 신규 위해인자(병해충 및 질병, 식중독 등) 조기경보시스템 구축 수입 농림수산물 수급 및 안전사고 조기경보시스템 구축 농림수산물 이력추적제의 통합관리체계 구축
	피해 경감 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> 기후변화에 따른 농림수산물 피해양상 메커니즘 규명 농림수산물 분야 현장 작업자 폭염피해 예방 기술개발 농림수산물 이상기상 및 기상재해 피해양상조사 및 피해산정기준 설정((재해보험)) 기후변화 영향 농림수산물 수급부족 및 안전사고 발생 저감화 기술 개발 산불피해 저감을 위한 방재통합시스템 고도화 주요 농림수산물 분야 최적기온 및 한계기온 설정 기법 개발 ICT 활용 농림수산물 폐사 대응 시스템 개발

작성한 인벤토리를 기초로 농림수산물 기후변화 관련 전문가들을 대상으로 전문가 설문조사를 실시하였다. 조사는 2014년 11월 21일부터 25일까지 전자우편을 통해 이루어졌다. 조사 대상자는 각 협동과제 연구진들이 추천한 전문가들을 대상으로 선정하였다.

전문가 조사표는 9점 척도 AHP 방식의 질문과 5점 척도를 이용한 질문으로 구성하였다. 가장 큰 범주인 영향평가, 적응기술, 피해방지 및 기반구축 기술과 각각의 핵심과제들은 AHP 방식의 질문을 이용하였고, 보다 세부적인 주요내용에 나열한 기술 개발 목록들은 5점 척도를 이용하여 우선순위를 평가하도록 하였다. 나열한 기술들이 많고, 각 기술 간의 독립성을 보장하기 어렵기 때문에 AHP방식을 활용한 질문이 적합하지 않으며, 5점 척도로 질문하는 것이 조사 대상자의 응답 부담도 줄일 수 있다고 판단하였다. 조사대상자들 가운데 총 36부의 설문응답을 확보하였다. 농업분야 15명, 산림분야 9명, 수산분야 3명, 식품분야 4명, 경제 등 기타분야 5명의 전문가들이 참여하였다.

먼저 제1계층인 대분류의 쌍대비교 계측 결과를 살펴보면, 영향평가 0.376, 피해방지 및 기반구축 기술 0.328, 적응기술 0.296의 순으로 영향평가의 우선순위가 계측되었다(CI는 0.00).

그림 8-1. 제1계층의 가중치 계측 결과

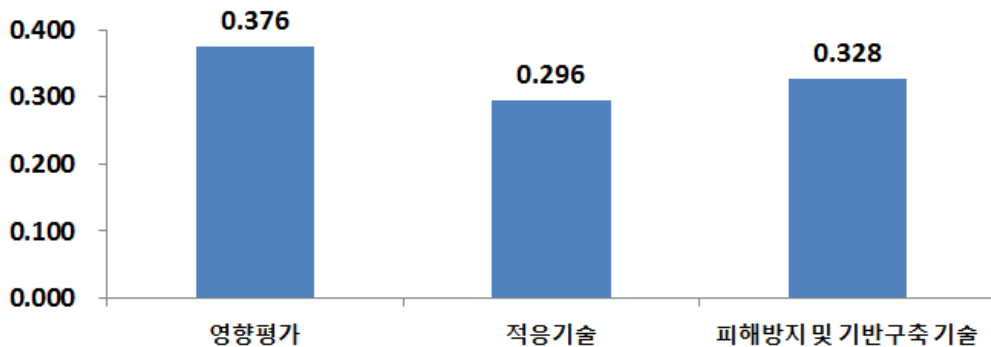
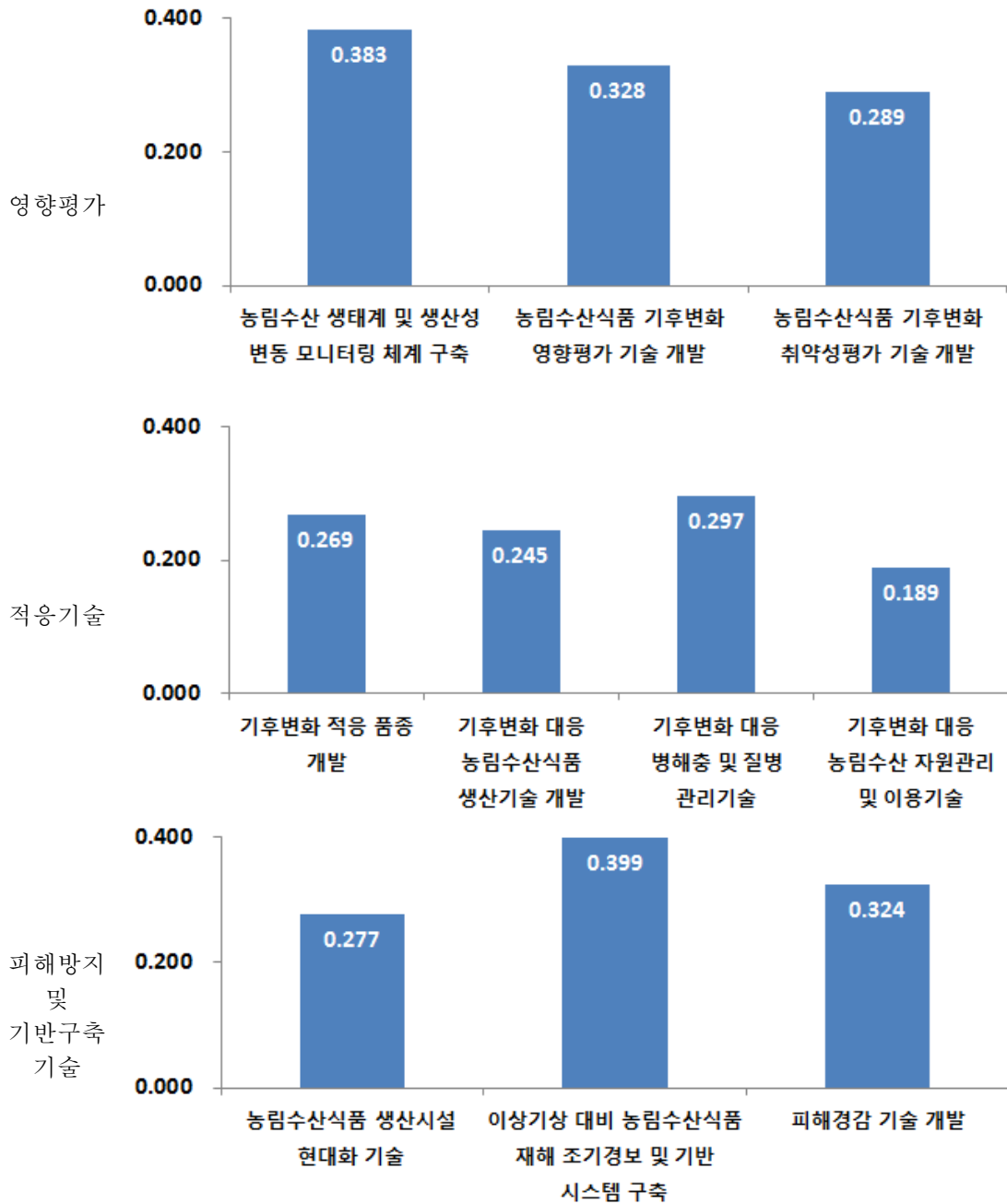


표 8-3. 제1계층의 쌍대비교 계측 결과

구분	영향평가	적응기술	피해방지 및 기반구축 기술	가중치	우선순위
영향평가	1.000	1.350	1.081	0.376	1
적응기술	0.741	1.000	0.956	0.296	3
피해방지 및 기반구축 기술	0.925	1.046	1.000	0.328	2

그림 8-2. 제2계층의 가중치 계측 결과



제2계층인 핵심과제의 쌍대비교 계측결과를 보면, 영향평가에서는 ‘농림수산 생태계 및 생산성 변동 모니터링 체계 구축’이 0.383으로 가장 높았다. 적응기술에서는 ‘기후변화 대응 병해충 및 질병 관리기술 개발’이 0.297로, 피해방지 및 기반구축 기술에서는 ‘이상기상 대비 농림수산식품 재해 조기경보 및 기반 시스템 구축’이 0.399로 높게 계측되었다.

표 8-4. 제1계층과 제2계층의 쌍대비교 계측 결과

대분류	핵심과제	가중치
영향평가 (0.376)	농림수산 생태계 및 생산성 변동 모니터링 체계 구축	0.383
	농림수산식품 기후변화 영향평가 기술 개발	0.328
	농림수산식품 기후변화 취약성평가 기술 개발	0.289
적응기술 (0.296)	기후변화 적응 품종 개발	0.229
	기후변화 대응 농림수산식품 생산기술 개발	0.245
	기후변화 대응 병해충 및 질병 관리기술 개발	0.297
	기후변화 대응 농림수산 자원관리 및 이용 기술 개발	0.189
피해방지 및 기반구축 기술(0.328)	농림수산식품 생산시설 현대화 기술	0.277
	이상기상 대비 농림수산식품 재해 조기경보 및 기반 시스템 구축	0.399
	피해 경감 기술 개발	0.324

영향평가의 주요 기술에 대한 종합평가 및 우선순위 결과를 살펴보면, ‘기상재해 발생 모니터링 및 농림수산식품 기상재해 DB 구축’이 0.596으로 가장 높게 계측되었다. 이어서 ‘기후변화에 따른 농림수산 생태계 및 생물다양성 변화 모니터링’과 ‘농림수산분야 돌발 병해충 및 질병 예찰 정보화시스템 구축’이 각각 0.580과 0.568로 우선순위가 높게 계측되었다. 상위에 위치한 하위 주요 기술들은 5점 척도 중에도 평가 결과가 매우 높은 수준이었으며, 전반적으로 영향평가 농림수산 생태계 및 생산성 변동 모니터링 체계 구축의 가중치가 높게 나타나 하위 주요 기술들의 우선순위가 높게 평가되었다. 모니터링이 영향평가나 취약성 평가의 기초가 된다는 것이 반영된 것으로 판단된다.

적응의 주요 기술에 대한 종합평가 및 우선순위 결과를 살펴보면, ‘농림수산 돌발 병해충 및 질병 조기진단 기술 개발’이 0.363으로 가장 높게 계측되었다. 이어서 ‘기후변화에 적응성과 생산량이 우수한 농림수산물 품종 육성’이 0.344, 농림수산 질병 확산 경로분석 및 예방 기술 개발’ 0.343, ‘농림수산 돌발병해충 및 질병 친환경 종합 관리 기술 개발’ 0.329, ‘기후변화 대응 병해충 저항성 농림수산분야 품종개발’이 0.315 등의 순으로 우선순위가 높게 나타났다.

제2계층의 핵심과제 가운데 기후변화 대응 병해충 및 질병 관리기술 개발의 가중치가 높아 해당 주요 기술들이 전반적으로 높게 평가되었다. 그럼에도 불구하고 기후변화 적응 품종의 주요 기술인 ‘기후변화에 적응성과 생산량이 우수한 농림수산물

표 8-5. 영향평가 기술 개발 우선순위 평가 결과

구분	핵심과제	주요 기술	중요도	종합평가	우선순위
영 향 평 가	농림수산 생태계 및 생산성 변동 모니터링 체계 구축	▪ 농림수산 미래 상세전자기후도 작성 및 극최저기온 분석지도 제작	3.250	0.468	14
		▪ 인공위성 및 ICT 기반 농림수산 생태계 원격탐사 모니터링 기술 개발	3.556	0.512	5
		▪ 기상재해 발생 모니터링 및 농림수산식품 기상재해 DB 구축	4.139	0.596	1
		▪ 기후변화에 따른 농림수산 생태계 및 생물다양성 변화 모니터링	4.028	0.580	2
		▪ 농림수산분야 돌발 병해충 및 질병 예찰 정보화시스템 구축	3.944	0.568	3
		▪ 수입 농림수산분야에 대한 주요 수출국 이상기상과 생산실태 모니터링	3.306	0.476	11
		▪ 원격탐사 및 고정조사 표본점을 활용한 토지이용·피복 변화 모니터링	3.389	0.488	8
		▪ 첨단 무인 관측기술을 통한 실시간 이상기상·이상해황 정보 시스템 구축	3.528	0.508	6
		▪ 국제기구 및 주요 국가들과의 분야별 감시교류체계 구축 및 정보교류 네트워크	3.639	0.524	4
	농림수산식품 기후변화 영향평가 기술 개발	▪ 기후변화에 따른 농림수산 생태계 영향평가	3.806	0.470	12
		▪ 기후변화에 따른 작물재배적지, 수종별 조림적지, 수산자원의 시공간적 변동 예측 모델 구축	3.722	0.460	15
		▪ 기후변화가 농림수산식품 병해충 및 질병 발생에 미치는 영향 정량화	3.639	0.449	16
		▪ 기후변화 대응 농림수산 생산지역 변동 및 생산 적지 지도 작성	3.972	0.491	7
		▪ 기후변화에 따른 농림수산분야 생육 및 생산성 예측 모델 개발	3.806	0.470	12
		▪ 기후변화의 농림수산식품 분야 사회경제적 영향평가 모델 개발	3.944	0.487	9
		▪ Multi-scale 농림수산생태계 통합영향평가모델 구축	3.861	0.477	10
		▪ 농림수산식품분야 기후변화에 대한 고해상도 GIS 기법 활용 기술 개발	3.444	0.425	19
		▪ 농림수산식품 환경자원 변동 및 경제적 손실비용 예측모델 개발	3.556	0.439	17
	▪ 식품분야 기후변화 통합영향모델인 푸드시스템모델 개발	3.333	0.412	21	
	농림수산식품 기후변화 취약성평가 기술 개발	▪ 농림수산식품분야 기후변화 취약성 평가지표 개발	3.750	0.408	22
		▪ 농림수산생태계 통합 예측모델 활용 취약성 평가	3.667	0.399	23
		▪ 기후변화 대응 식품안전사고 발생 예측모델 개발 (중금속, 잔류농약, 곰팡이독소 등 비의도적 유해물질 중점으로)	3.250	0.354	24
		▪ 기후변화에 따른 농림수산식품분야 병해충 취약성 평가	3.833	0.417	20
		▪ 기후변화에 따른 자연재해 취약성 평가	3.972	0.432	18
		▪ 농림수산식품분야 기후변화 취약성에 대한 고해상도 GIS 기법 활용 기술 개발	3.222	0.351	25

품종 육성'이 2위, '기후변화 대응 병해충 저항성 농림수산분야 품종 개발'이 5위로 우선순위가 높게 나타난 것은 적응 품종 육성이 기후변화 적응 기술의 핵심 기술임을 보여준다고 할 수 있다.

표 8-6. 적응 기술 개발 우선순위 평가 결과

구분	핵심과제	주요 기술	중요도	종합평가	우선순위
적응 기술	기후변화 적응 품종 개발	▪ 기후변화 대응 병해충 저항성 농립수산물 품종 개발	3.972	0.315	5
		▪ 글로벌 식량생산을 위한 해외농업개발용 품종개발	3.111	0.247	15
		▪ 고온성 작물, 열대림 생장 우수수종, 아열대성 어류 등 품종 육성	3.444	0.274	11
		▪ 기후변화에 적응성과 생산량이 우수한 농립수산물 품종 육성	4.333	0.344	2
	기후변화 대응 농립수산물식품 생산기술 개발	▪ 기후변화 대응 농립수산물식품 재배기술, 농업지대 및 작부체계 변경 기술	3.972	0.288	9
		▪ 기후변화에 따른 농립수산물(작목, 단기임산물, 양식) 생산적지 재설정	3.833	0.278	10
		▪ 기후변화적응 농립수산물 관리 가이드라인 개발 제공	3.500	0.254	13
		▪ 기후변화에 대응한 주요 농립수산물 첨단 가공 기술 개발	3.222	0.234	16
		▪ 기후변화에 따른 폐독 발생시기 변화로 폐류의 생리생태 변화 파악 및 변동 예측 기술 개발	3.500	0.254	13
	기후변화 대응 병해충 및 질병 관리기술 개발	▪ 농립수산물 돌발병해충 및 질병 조기진단 기술 개발	4.139	0.363	1
		▪ 농립수산물 돌발병해충 및 질병 친환경 종합관리 기술 개발	3.750	0.329	4
		▪ 아태지역 이동성 바이러스병 및 해충 국제협력 네트워크 구축	3.583	0.314	6
		▪ 농립수산물 질병 확산 경로분석 및 예방 기술 개발	3.917	0.343	3
		▪ 기후변화 대응 비의도적 오염물질(곰팡이독소, 중금속, 잔류농약) 예방, 농립수산물 안전관리 강화 기술 개발	3.389	0.297	7
		▪ 기후변화 대응 농립수산물식품 위생처리장치 및 정화처리 기술 개발	3.000	0.263	12
		▪ 기후변화 대응 농립수산물식품 포장재 기술 개발	2.583	0.227	17
		▪ 아열대에 따른 농립수산물 대상의 항생제 및 백신 접종 관련 기술 개발	3.389	0.297	7
	기후변화 대응 농립수산물 자원관리 및 이용 기술 개발	▪ 용수의 효율적 이용 및 효율화 기술 개발	3.944	0.221	18
		▪ 농립수산물식품 물관리 지침 개발	3.750	0.210	19
		▪ 강우시 경사지 토양유실 방지 기술 개발	3.611	0.202	20
		▪ 농립수산물 서식지 보호를 위한 서식환경 조성 기법 개발	3.306	0.185	21

피해방지 및 기반구축 기술 개발 우선순위 결과를 살펴보면, ‘이상기상(폭염, 강풍, 폭설, 가뭄 등) 조기경보시스템 구축’이 0.531로 가장 높게 계측되었다. 이러한 결과는 조기경보를 통한 정보 제공의 중요성을 보여주고 있다. 다음으로 ‘농립수산물 관련 이상기상 대응 매뉴얼 개발’이 0.513, ‘기후변화 유래 신규 위해인자(병해

충 및 질병, 식중독 등) 조기경보시스템 구축'이 0.502의 순으로 나타났다. 상대적으로 생산시설 현대화 기술의 주요 기술에 대한 우선순위는 전체적으로 낮게 계측된 것이 특징이다.

표 8-7. 피해방지 및 기반구축 기술 개발 우선순위 평가 결과

구분	핵심과제	주요 기술	중요도	종합평가	우선순위
피해방지 및 기반구축 기술	농림수산물 생산시설 현대화 기술	▪ 내재해성 생산시설물 개발 기술 및 운영 체제 개발	3.583	0.326	17
		▪ 기후변화 대응 농림수산물 시설 안전성 내재해성 시설기준 설정	3.639	0.331	16
		▪ 극한기상환경에 대응하기 위한 무인자동형 농림수산물 생산기술 개발	2.944	0.267	19
		▪ 수리시설, 관배수시스템의 개선기술 개발	3.306	0.300	18
		▪ 가뭄, 홍수 등 재해대비 수자원관리시스템 개발	3.917	0.356	13
	이상기상 대비 농림수산물 재해 조기경보 및 기반 시스템 구축	▪ 이상기상(폭염, 강풍, 폭설, 가뭄 등) 조기경보시스템 구축	4.056	0.531	1
		▪ 농림수산물 관련 이상기상 대응 매뉴얼 개발	3.917	0.513	2
		▪ 산불위험예보시스템 고도화	3.500	0.458	6
		▪ 돌발성 호우에 의한 산사태 위험성 예측 고도화	3.722	0.487	4
		▪ 기후변화 유래 신규 위해인자(병해충 및 질병, 식중독 등) 조기경보 시스템 구축	3.833	0.502	3
		▪ 수입 농림수산물 수급 및 안전사고 조기경보시스템 구축	3.639	0.476	5
	피해 경감 기술 개발	▪ 농림수산물 이력추적체의 통합관리체계 구축	3.500	0.458	6
		▪ 기후변화에 따른 농림수산물 피해양상 메커니즘 규명	3.611	0.384	9
		▪ 농림수산물 분야 현장 작업자 폭염피해 예방 기술개발	3.222	0.343	15
		▪ 농림수산물 이상기상 및 기상재해 피해양상조사 및 피해산정기준 설정(재해보험)	3.750	0.399	8
		▪ 기후변화 대응 농림수산물 수급안정 및 안전사고 발생 저감화 기술 개발	3.611	0.384	9
		▪ 산불피해 저감을 위한 방재통합시스템 고도화	3.333	0.355	14
		▪ 주요 농림수산물 분야 최적기온 및 한계기온 설정 기법 개발	3.500	0.372	11
	▪ ICT 활용 농림수산물 폐사 대응 시스템 개발	3.417	0.363	12	

3. 기후변화 대응 기술개발 로드맵

농림수산물 분야 기후변화 적응 기술개발은 상당한 시간과 인력 및 연구비 등을 필요로 한다. 향후 10년 후인 2025년을 목표연도로 설정하고 영향평가, 적응기술, 피해방지 및 기반구축 등 세 분야로 나누어 시기별 기술개발 로드맵을 제시하고자 한다. 분야별·과제별 로드맵은 한국농촌경제연구원에서 제시한 농업부분 기후변화 적응 로드맵(2009~2030)과 기후변화대응 농업기술개발의 총괄하는 농촌진흥청의 2단계(2014~2023) 중장기 계획 및 분야별 전문가들의 의견을 수렴하여 작성하였다.¹⁰⁶

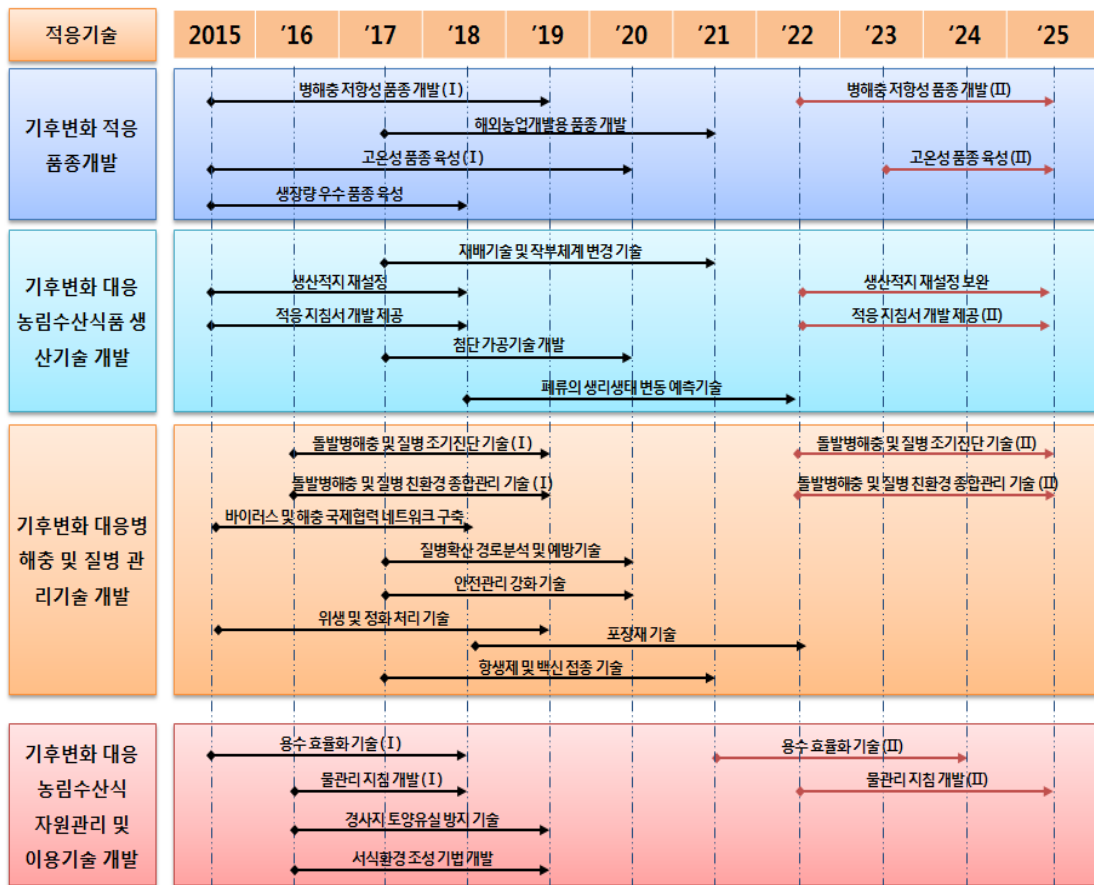
농림수산물 영향평가 분야 기술개발과 관련하여 상세기후도 작성 및 극최저기온 분석지도 제작은 이미 상세기후도 작성 기초연구가 이루어져 극최저기온 분석지도를 포함하는 연구과제를 발굴하여 2015~2017년까지 3개년 과제로의 수행이 필요하다. 인공위성 및 ICT기반 농림수산물 생태계 원격탐사 모니터링 기술개발 과제는 2017~2021년까지 5개년간의 다년차과제로 수행하여 생태계의 체계적인 모니터링 시스템이 완비되도록 할 필요가 있다. 기상재해 발생 모니터링 및 DB구축 과제는 2015~2017년까지 1차 연구와 2022~2024년까지 2차 연구 등 2단계의 연구가 필요하다. 생태계와 생물다양성 변화 모니터링 기술개발 과제와 수입 농림수산물 분야의 주요 수출국 이상기상과 생산실태 모니터링 과제의 경우도 2단계의 기술개발이 필요하다. 원격탐사 및 고정조사 표본점을 활용한 토지이용·피복변화 모니터링 과제는 2017~2019년까지, 첨단 무인 관측기술을 이용한 이상기상·이상해황 정보 시스템 구축 과제는 2016~2020년까지 연구가 이루어지는 것이 바람직하다. 국제기구 및 주요국가와의 분야별 감시교류체계 구축 및 정보교류 네트워크 구축과제는 2016~2017년까지 1차 연구, 2020~21년까지 2차 연구의 2단계의 연구가 필요하다.

농림수산물 기후변화 영향평가 기술개발 분야의 경우 농림수산물 생태계 영향평가 과제는 2015~2018년까지 1차 연구와 2022~2024년까지 2차 연구 등 2단계의 연구추진, 농림수산물 분야 생육 및 생산성 예측모델 개발과제도 2015~2017년까지 1차 연구, 2021~2023년까지 2차 연구 등 2단계의 연구수행이 바람직하다. 농림수산물 분야 생산성 예측모형은 사회경제적 모형개발의 기초가 되는 연구로 지속적인 연구 및 통합적 연구가 필요하다. 따라서 Muti-scale 농림수산물생태계 통합영향평가모델 구축 과제는 2017~2020년까지 이루어져 관련된 분야의 영향평가시스템이 완비되도록

¹⁰⁶ 농업분야의 기후변화 대응전략과 관련하여 기후변화 적응 기술개발 로드맵은 한국농촌경제연구원서 제시한 2009~2030년까지 기술개발 로드맵과 농촌진흥청에서 제시한 2014~2023년까지 기술개발 로드맵을 참고하였다(김창길 외 4인, 2010; 농촌진흥청, 2014).

농림수산물 적응기술개발 분야에서 기후변화 적응품종개발의 경우 기후변화 대응 병해충 저항성 품종개발은 2015~2018년까지의 1차 연구와 2022~2024년까지의 2차 연구 등 2단계의 연구가 필요하다. 기후변화 대응 생산기술 개발 분야에서는 재배기술 및 작부체계는 이미 기존에 상당한 연구가 이루어져 이를 기초로 2017~2020년까지 보완된 연구가 필요하며, 생산적지 재설정과 농업인들이 현장에서 대응할 수 있도록 재배기술 분야 지침서 개발은 2015~2017년까지 1차 연구, 2022~2024년까지 2차 연구 등 2단계의 연구과제가 이루어지도록 하는 것이 바람직하다. 농림수산 자원관리 및 이용기술 개발 분야는 농업용수 효율화 기술개발은 2015~2017년까지 1차 연구와 2022~2023년까지 2차 연구 등 2단계의 연구과제 수행이 필요하며, 물관리 지침 개발 과제의 경우도 2016~2017년까지 1차 연구, 2022~2024년까지 2차 연구 등 2단계의 연구수행이 바람직하다. 경사지 토양유실 방지 기술개발과 서식환경 조성기법 개발과제는 2016~2018년까지 과제를 수행토록 하는 것이 바람직하다.

그림 8-4. 농림수산물 적응기술 분야 기술개발 로드맵



4. 기후변화 대응 기술개발 중점 과제

농림수산물 분야 기후변화 대응 핵심기술 개발과제 선정은 해당 분야별로 다양한 기술과제가 발굴될 수 있으므로 구체적인 기술과제를 제시하는데 어려움이 있다. 따라서 분야별 핵심과제는 연구수행 과정에서 제시된 기술개발 과제 우선순위와 분야별 과제의 중요성을 고려하여 제시토록 한다.

첫째, 영향평가 분야의 핵심과제로는 우선 농림수산 생태계 변동 및 모니터링 체계 구축에서 ‘기상재해 발생 모니터링 및 농림수산물 기상재해 DB 구축’, ‘기후변화에 따른 농림수산 생태계 및 생물다양성 모니터링’, ‘농림수산분야 돌발 병해충 및 질병 예찰 정보화시스템 구축’ 등의 세 과제를 들 수 있다. 농림수산물 기후변화 영향평가 기술개발 분야의 핵심과제로는 ‘기후변화 대응 농림수산 생산지역 변동 및 생산적지 지도 작성’, ‘기후변화의 농림수산물 분야 사회경제적 영향평가 모델 개발’ 과제를 들 수 있다. 이들 두 과제는 이미 수행되었거나 현재 수행되고 있는 과제이나, 보다 정교하고 신뢰성 있는 생산적지 지도 및 사회경제적 영향 예측 모형개발에 관한 연구가 필요하다. 다음으로 농림수산물 기후변화 취약성평가 기술개발 분야에서는 ‘기후변화에 따른 자연재해 취약성 평가’ 과제와 ‘기후변화에 따른 농림수산물분야 병해충(또는 질병) 취약성 평가’에 관한 연구과제를 들 수 있다.

둘째, 적응기술 분야의 핵심과제로는 기후변화 대응 품종개발 분야에서 ‘기후변화 적응성과 생장량이 우수한 품종육성’과 ‘기후변화 대응 저항성 품종개발’의 과제를 들 수 있고, 기후변화 대응 농림수산물 생산기술개발 분야 과제로는 ‘기후변화 대응 농림수산물 재배기술, 농업지대 및 작부체계 변경기술’과제와 ‘기후변화에 따른 농림수산물 생산적지 재설정’과제 등을 들 수 있다. 또한 기후변화 대응 병해충 및 질병관리기술 개발 분야에서는 ‘농림수산 돌발병해충 및 질병 조기진단 기술개발’ 과제와 ‘농림수산 질병 확산 경로분석 및 예방 기술개발’, ‘농림수산 돌발병해충 및 질병 친환경 종합관리 기술개발’과제를 들 수 있다. 기후변화 대응 농림수산 자원관리 및 이용기술 개발 분야의 과제로는 ‘농업용수의 효율적 이용 및 효율화 기술개발’ 과제를 들 수 있다.

셋째, 피해방지 및 기반구축 기술의 핵심과제로 우선 농림수산물 생산시설 현대화 분야에서 중점과제로 ‘가뭄·홍수 등 재해대비 수자원관리시스템 개발’과 ‘기후변화 대응 농림수산 시설 안전성·내재해성 시설기준 설정’ 과제를 들 수 있다. 이상기상 대비 농림수산물 재해 조기경보 및 기반시스템 구축의 핵심과제 분야에서는 ‘이상기상 조기경보시스템 구축’ 과제와 ‘농림수산물관련 이상기상 대응 매뉴얼

개발’, ‘기후변화 유래 신규 위해인자 조기경보시스템 구축’ 등의 중점과제를 들 수 있다. 피해경감 기술개발에 관한 핵심과제의 중점과제로는 ‘농림수산식품 이상기상 및 기상재해 피해 양상조사 및 피해산정기준 설정’과 ‘기후변화 영향 농림수산식품 수급 부족 및 안전사고 발생 저감화 기술개발’ 등의 연구과제를 들 수 있다.

<부록 8-1> 기후변화 적응 R&D 관련 전문가 조사표

KREI 한국농촌경제연구원 (www.krei.re.kr)

「기후변화 적응 R&D 관련 전문가 조사」

우리 연구원은 “농림수산식품 기후변화 영향 분석 및 영향평가 모델 구축” 연구 수행의 일환으로 농림수산식품 기후변화 적응 R&D와 관련하여 전문가 여러분을 대상으로 설문조사를 하고자 합니다. 본 조사결과는 연구자료로 활용하는 중요한 조사입니다. 따라서 조사 대상이신 전문가 여러분의 적극적인 협조를 부탁드립니다. 조사표에 관한 문의사항은 한국농촌경제연구원 자원환경연구부로 연락주시기 바랍니다.

조사기관: 한국농촌경제연구원 자원환경연구부

주소: (우)130-710, 서울시 동대문구 회기로 117-3

조사관련 문의: 김창길 선임연구위원 02-3299-4265, changgil@krei.re.kr

정학균 연구위원 02-3299-4248, hak8247@krei.re.kr

문동현 연구위원 02-3299-4340, dhmoon0326@krei.re.kr

※ 응답자 정보

소속		직급	
성명		전화번호	
이메일주소			

※ 본 설문서의 각 문항을 답변하는 요령은 다음과 같습니다.

만약 정책 방안을 결정함에 있어서 정책A의 중요성을 정책B의 중요성과 비교하여

“비슷하게”	중요하면	숫자 1	로 응답하여 주십시오.
“약간”		숫자 3	
“매우”		숫자 5	
“확실히”		숫자 7	
“절대로”		숫자 9	

참고로 “매우”와 “확실히”의 중간 정도로 생각되면 5와 7의 중간수인 6으로 응답할 수 있음.

- 응답사례: 농림수산물 기후변화 R&D와 관련하여 부문별 중요도를 판단함에 있어 변수A(영향평가)와 변수B(적응기술)를 비교하여 **변수A(영향평가)가 변수B(적응기술)보다 매우 중요할 경우**의 상대적인 중요도는 다음과 같이 **√**로 표시하여 응답합니다.

기후변화 취약성 대리변수																		
변수A	A가 절대 중요	A가 확실히 중요	A가 매우 중요	A가 약간 중요	서로 비슷한 정도	B가 약간 중요	B가 매우 중요	B가 확실히 중요	B가 절대 중요	변수B								
	9	8	7	6	5	4	3	2	1		2	3	4	5	6	7	8	9
영향평가					√													적응기술

○ 효과적인 설문응답을 위하여 각 항목이 어떻게 구성되는지 아래 표를 참고해 주십시오

부표1. 기후변화 적응 농림수산물 기술 개발 목록(안)

구분	핵심과제	주요내용
영향평가	농림수산 생태계 및 생산성 변동 모니터링 체계 구축	<ul style="list-style-type: none"> · 농림수산 미래 상세전자기후도 작성 및 극최저기온 분석지도 제작 · 인공위성 및 ICT 기반 농림수산 생태계 원격탐사 모니터링 기술 개발 · 기상재해 발생 모니터링 및 농림수산물 기상재해 DB 구축 · 기후변화에 따른 농림수산 생태계 및 생물다양성 변화 모니터링 · 농림수산분야 돌발 병해충 및 질병 예찰 정보화시스템 구축 · 수입 농림수산분야에 대한 주요 수출국 이상기상과 생산실태 모니터링 · 원격탐사 및 고정조사 표본점을 활용한 토지이용·피복 변화 모니터링 · 첨단 무인 관측기술을 통한 실시간 이상기상·이상해황 정보 시스템 구축 · 국제기구 및 주요 국가들과의 분야별 감시교류체계 구축 및 정보교류 네트워크
	농림수산물 기후변화 영향평가 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> · 기후변화에 따른 농림수산 생태계 영향평가 · 기후변화에 따른 작물재배적지, 수종별 조림적지, 수산자원의 시공간적 변동 예측 모델 구축 · 기후변화가 농림수산물 병해충 및 질병 발생에 미치는 영향 정량화 · 기후변화 대응 농림수산 생산지역 변동 및 생산 적지 지도 작성 · 기후변화에 따른 농림수산분야 생육 및 생산성 예측 모델 개발 · 기후변화의 농림수산물 분야 사회경제적 영향평가 모델 개발 · Multi-scale 농림수산생태계 통합영향평가모델 구축 · 농림수산물분야 기후변화에 대한 고해상도 GIS 기법 활용 기술 개발 · 농림수산물 환경자원 변동 및 경제적 손실비용 예측모델 개발 · 식품분야 기후변화 통합영향모델인 푸드시스템모델 개발
	농림수산물 기후변화 취약성평가 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> · 농림수산물분야 기후변화 취약성 평가지표 개발 · 농림수산생태계 통합 예측모델 활용 취약성 평가 · 기후변화 대응 식품안전사고 발생 예측모델 개발(중금속, 잔류농약, 곰팡이독소 등 비의도적 유해물질 중점으로) · 기후변화에 따른 농림수산물분야 병해충 취약성 평가

구 분	핵심과제	주요내용
		<ul style="list-style-type: none"> 기후변화에 따른 자연재해 취약성 평가 농림수산식품분야 기후변화 취약성에 대한 고해상도 GIS 기법 활용 기술 개발
적응 기술	기후변화 적응 품종 개발	<ul style="list-style-type: none"> 기후변화 대응 병해충 저항성 농림수산분야 품종 개발 글로벌 식량생산을 위한 해외농업개발용 품종개발 고온성 작물, 열대림 생장 우수수종, 아열대성 어류 등 품종 육성 기후변화에 적응성과 생산량이 우수한 농림수산물 품종 육성
	기후변화 대응 농림수산식품 생산기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> 기후변화 대응 농림수산식품 재배기술, 농업지대 및 작부체계 변경 기술 기후변화에 따른 농림수산물(작목, 단기임산물, 양식) 생산적지 재설정 기후변화적응 농림수산물 관리 가이드라인 개발 제공 기후변화에 대응한 주요 농림수산물 첨단 가공 기술 개발 기후변화에 따른 패독 발생시기 변화로 패류의 생리생태 변화 파악 및 변동 예측 기술 개발
	기후변화 대응 병해충 및 질병 관리기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> 농림수산 돌발병해충 및 질병 조기진단 기술 개발 농림수산 돌발병해충 및 질병 친환경 종합관리 기술 개발 아태지역 이동성 바이러스병 및 해충 국제협력 네트워크 구축 농림수산 질병 확산 경로분석 및 예방 기술 개발 기후변화 대응 비의도적 오염물질(곰팡이독소, 중금속, 잔류농약) 예방, 농림수산분야 안전관리 강화 기술 개발 기후변화 대응 농림수산식품 위생처리장치 및 정화처리 기술 개발 기후변화 대응 농림수산식품 포장재 기술 개발 아열대에 따른 농림수산물 대상의 항생제 및 백신 접종 관련 기술 개발
	기후변화 대응 농림수산 자원관리 및 이용 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> 용수의 효율적 이용 및 효율화 기술 개발 농림수산식품 물관리 지침 개발 강우시 경사지 토양유실 방지 기술 개발 농림수산 서식지 보호를 위한 서식환경 조성 기법 개발
피해 방지 및 기반 구축 기술	농림수산식품 생산시설 현대화 기술	<ul style="list-style-type: none"> 내재해성 생산시설물 개발 기술 및 운영 체제 개발 기후변화 대응 농림수산 시설 안전성 내재해성 시설기준 설정 극한기상환경에 대응하기 위한 무인자동형 농림수산식품 생산기술 개발 수리시설, 관배수시스템의 개선기술 개발 가뭄, 홍수 등 재해대비 수자원관리시스템 개발
	이상기상 대비 농림수산식품 재해 조기경보 및 기반 시스템 구축	<ul style="list-style-type: none"> 이상기상(폭염, 강풍, 폭설, 가뭄 등) 조기경보시스템 구축 농림수산식품관련 이상기상 대응 매뉴얼 개발 산불위험예보시스템 고도화 돌발성 호우에 의한 산사태 위험성 예측 고도화 기후변화 유래 신규 위해인자(병해충 및 질병, 식중독 등) 조기경보시스템 구축 수입 농림수산식품 수급 및 안전사고 조기경보시스템 구축 농림수산식품 이력추적제의 통합관리체계 구축
	피해 경감 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> 기후변화에 따른 농림수산식품 피해양상 메커니즘 규명 농림수산식품 분야 현장 작업자 폭염피해 예방 기술개발 농림수산식품 이상기상 및 기상재해 피해양상조사 및 피해산정기준 설정((재해보험)) 기후변화 대응 농림수산식품 수급안정 및 안전사고 발생 저감화 기술 개발 산불피해 저감을 위한 방재통합시스템 고도화 주요 농림수산식품 분야 최적기온 및 한계기온 설정 기법 개발 ICT 활용 농림수산식품 폐사 대응 시스템 개발

#. 농림수산물 기후변화 R&D의 **3가지 분야**의 상대적인 중요도를 평가하시고 해당 부분에 √표하여 주십시오.

기후변화 취약성 대리변수																	
변수A	A가 절대로 중요	A가 확실히 중요	A가 매우 중요	A가 약간 중요	서로 비슷한 정도		B가 약간 중요	B가 매우 중요	B가 확실히 중요	B가 절대로 중요	변수B						
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9
영향평가																	적응기술
영향평가																	피해방지 및 기반구축 기술
적응기술																	피해방지 및 기반구축 기술

1. 영향평가 항목의 **농림수산 생태계 및 생산성 변동 모니터링 체계 구축과 농림수산 식품 기후변화 영향평가 기술 개발, 농림수산물 기후변화 취약성평가 기술 개발**의 상대적인 중요도를 평가하시고 해당 부분에 √표하여 주십시오.

기후노출 관련 변수																	
변수A	A가 절대로 중요	A가 확실히 중요	A가 매우 중요	A가 약간 중요	서로 비슷한 정도		B가 약간 중요	B가 매우 중요	B가 확실히 중요	B가 절대로 중요	변수B						
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9
농림수산 생태계 및 생산성 변동 모니터링 체계 구축																	농림수산식품 기후변화 영향평가 기술 개발
농림수산 생태계 및 생산성 변동 모니터링 체계 구축																	농림수산식품 기후변화 취약성평가 기술 개발
농림수산식품 기후변화 영향평가 기술 개발																	농림수산식품 기후변화 취약성평가 기술 개발

1-1. 농림수산 생태계 및 생산성 변동 모니터링 체계 구축의 주요 내용을 평가하시고 해당 부분에 √표하여 주십시오.

주요 항목	평가 (전혀 중요하지 않음=1, 보통=3, 매우 중요=5,)				
	1	2	3	4	5
▪ 농림수산 미래 상생전자기후도 작성 및 극최저기온 분석지도 제작					
▪ 인공위성 및 ICT 기반 농림수산 생태계 원격탐사 모니터링 기술 개발					
▪ 기상재해 발생 모니터링 및 농림수산식품 기상재해 DB 구축					
▪ 기후변화에 따른 농림수산 생태계 및 생물다양성 변화 모니터링					
▪ 농림수산분야 돌발 병해충 및 질병 예찰 정보화시스템 구축					
▪ 수입 농림수산분야에 대한 주요 수출국 이상기상과 생산실태 모니터링					
▪ 원격탐사 및 고정조사 표본점을 활용한 토지이용·피복 변화 모니터링					
▪ 첨단 무인 관측기술을 통한 실시간 이상기상·이상해황 정보 시스템 구축					
▪ 국제기구 및 주요 국가들과의 분야별 감시교류체계 구축 및 정보교류 네트워크					

1-2. 농림수산식품 기후변화 영향평가 기술 개발의 주요 내용을 평가하시고 해당 부분에 √표하여 주십시오.

주요 항목	평가 (전혀 중요하지 않음=1, 보통=3, 매우 중요=5,)				
	1	2	3	4	5
▪ 기후변화에 따른 농림수산 생태계 영향평가					
▪ 기후변화에 따른 작물재배적지, 수종별 조립적지, 수산자원의 시공간적 변동 예측 모델 구축					
▪ 기후변화가 농림수산식품 병해충 및 질병 발생에 미치는 영향 정량화					
▪ 기후변화 대응 농림수산 생산지역 변동 및 생산 적지 지도 작성					
▪ 기후변화에 따른 농림수산분야 생육 및 생산성 예측 모델 개발					
▪ 기후변화의 농림수산식품 분야 사회경제적 영향평가 모델 개발					
▪ Multi-scale 농림수산생태계 통합영향평가모델 구축					
▪ 농림수산식품분야 기후변화에 대한 고해상도 GIS 기법 활용 기술 개발					
▪ 농림수산식품 환경자원 변동 및 경제적 손실비용 예측모델 개발					
▪ 식품분야 기후변화 통합영향모델인 푸드시스템모델 개발					

1-3. **농림수산물식품부문 기후변화 취약성 평가 기술 개발**의 주요 내용을 평가하시고 해당 부분에 √표하여 주십시오.

주요 항목	평가 (전혀 중요하지 않음=1, 보통=3, 매우 중요=5,)				
	1	2	3	4	5
▪ 농림수산물식품분야 기후변화 취약성 평가지표 개발					
▪ 농림수산물생태계 통합 예측모델 활용 취약성 평가					
▪ 기후변화 대응 식품안전사고 발생 예측모델 개발(중금속, 잔류농약, 곰팡이독소 등 비의도적 유해물질 중점으로)					
▪ 기후변화에 따른 농림수산물분야 병해충 취약성 평가					
▪ 기후변화에 따른 자연재해 취약성 평가					
▪ 농림수산물식품분야 기후변화 취약성에 대한 고해상도 GIS 기법 활용 기술 개발					

2. 적응기술 항목의 **기후변화 적응 신제품 개발, 기후변화 대응 농림수산물 생산기술 개발, 기후변화 대응 병해충 및 질병 관리기술 개발, 기후변화 대응 농림수산물 자원관리 및 이용기술 개발**의 상대적인 중요도를 평가하시고 해당 부분에 √표하여 주십시오.

기후노출 관련 변수																		
변수A	A가 절대 중요	A가 확실 히중요	A가 매우 중요	A가 약간 중요	서로 비슷한 정도	B가 약간 중요	B가 매우 중요	B가 확실 히중요	B가 절대 중요	변수B								
	9	8	7	6	5	4	3	2	1		2	3	4	5	6	7	8	9
기후변화 적응 제품 개발																		기후변화 대응 농림수산물 생산기술 개발
기후변화 적응 제품 개발																		기후변화 대응 병해충 및 질병 관리기술
기후변화 적응 제품 개발																		기후변화 대응 농림수산물 자원관리 및 이용 기술
기후변화 대응 농림수산물 생산기술 개발																		기후변화 대응 병해충 및 질병 관리기술
기후변화 대응 농림수산물 생산기술 개발																		기후변화 대응 농림수산물 자원관리 및 이용 기술
기후변화 대응 병해충 및 질병 관리기술																		기후변화 대응 농림수산물 자원관리 및 이용 기술

2-1. 기후변화 적응 품종 개발의 주요 내용을 평가하시고 해당 부분에 √표하여 주십시오.

주요 항목	평가 (전혀 중요하지 않음=1, 보통=3, 매우 중요=5,)				
	1	2	3	4	5
▪ 기후변화 대응 병해충 저항성 농림수산물 품종 개발					
▪ 글로벌 식량생산을 위한 해외농업개발용 품종개발					
▪ 고온성 작물, 열대립 생장 우수수종, 아열대성 어류 등 품종 육성					
▪ 기후변화에 적응성과 생산량이 우수한 농림수산물 품종 육성					

2-2. 기후변화 대응 농림수산물 생산기술 개발의 주요 내용을 평가하시고 해당 부분에 √표하여 주십시오.

주요 항목	평가 (전혀 중요하지 않음=1, 보통=3, 매우 중요=5,)				
	1	2	3	4	5
▪ 기후변화 대응 농림수산물 재배기술, 농업지대 및 작부체계 변경 기술					
▪ 기후변화에 따른 농림수산물(작목, 단기임산물, 양식) 생산적지 재설정					
▪ 기후변화적응 농림수산물 관리 가이드라인 개발 제공					
▪ 기후변화에 대응한 주요 농림수산물 첨단 가공 기술 개발					
▪ 기후변화에 따른 폐독 발생시기 변화로 폐류의 생리생태 변화 파악 및 변동 예측 기술 개발					

2-3. 기후변화 대응 병해충 및 질병 관리기술 개발의 주요 내용을 평가하시고 해당 부분에 √표하여 주십시오.

주요 항목	평가 (전혀 중요하지 않음=1, 보통=3, 매우 중요=5,)				
	1	2	3	4	5
▪ 농림수산물 돌발병해충 및 질병 조기진단 기술 개발					
▪ 농림수산물 돌발병해충 및 질병 친환경 종합관리 기술 개발					
▪ 아태지역 이동성 바이러스병 및 해충 국제협력 네트워크 구축					
▪ 농림수산물 질병 확산 경로분석 및 예방 기술 개발					
▪ 기후변화 대응 비의도적 오염물질(곰팡이독소, 중금속, 잔류농약) 예방, 농림수산물 안전관리 강화 기술 개발					
▪ 기후변화 대응 농림수산물 위생처리장치 및 정화처리 기술 개발					
▪ 기후변화 대응 농림수산물 포장재 기술 개발					
▪ 아열대에 따른 농림수산물 대상의 항생제 및 백신 접종 관련 기술 개발					

3-1. 농림수산물 생산시설 현대화 기술의 주요 내용을 평가하시고 해당 부분에 √ 표하여 주십시오.

주요 항목	평가 (전혀 중요하지 않음=1, 보통=3, 매우 중요=5,)				
	1	2	3	4	5
▪ 내재해성 생산시설물 개발 기술 및 운영 체제 개발					
▪ 기후변화 대응 농림수산물 시설 안전성 내재해성 시설기준 설정					
▪ 극한기상환경에 대응하기 위한 무인자동형 농림수산물 생산기술 개발					
▪ 수리시설, 관배수시스템의 개선기술 개발					
▪ 가뭄, 홍수 등 재해대비 수자원관리시스템 개발					

3-2. 이상기상 대비 농림수산물 재해 조기경보 및 기반 시스템 구축의 주요 내용을 평가하시고 해당 부분에 √ 표하여 주십시오.

주요 항목	평가 (전혀 중요하지 않음=1, 보통=3, 매우 중요=5,)				
	1	2	3	4	5
▪ 이상기상(폭염, 강풍, 폭설, 가뭄 등) 조기경보시스템 구축					
▪ 농림수산물관련 이상기상 대응 매뉴얼 개발					
▪ 산불위험예보시스템 고도화					
▪ 돌발성 호우에 의한 산사태 위험성 예측 고도화					
▪ 기후변화 유래 신규 위해인자(병해충 및 질병, 식중독 등) 조기경보시스템 구축					
▪ 수입 농림수산물 수급 및 안전사고 조기경보시스템 구축					
▪ 농림수산물 이력추적제의 통합관리체계 구축					

3-3. 피해 경감 기술 개발의 주요 내용을 평가하시고 해당 부분에 √ 표하여 주십시오.

주요 항목	평가 (전혀 중요하지 않음=1, 보통=3, 매우 중요=5,)				
	1	2	3	4	5
▪ 기후변화에 따른 농림수산물 피해양상 메커니즘 규명					
▪ 농림수산물 분야 현장 작업자 폭염피해 예방 기술개발					
▪ 농림수산물 이상기상 및 기상재해 피해양상조사 및 피해양상기준 설정(재해보험)					
▪ 기후변화 영향 농림수산물 수급부족 및 안전사고 발생 저감화 기술 개발					
▪ 산불피해 저감을 위한 방재통합시스템 고도화					
▪ 주요 농림수산물 분야 최적기온 및 한계기온 설정 기법 개발					
▪ ICT 활용 농림수산물 폐사 대응 시스템 개발					

제4장

목표달성도 및 관련분야 기여도

1. 목표달성도

이 연구는 농림수산물분야 기후변화 영향에 대한 연구 성과의 과학적 분석을 통해 분야별 영향을 체계적으로 평가하고, 향후 기후변화 대응 연구의 종합적인 비전과 연구개발의 체계를 제시하며, 농림수산물분야 기후변화 대응 관련 설득력 있고 실효성 있는 종합기술보고서 제시하는데 당초 목표가 있었다.

우선 총괄적으로 보면 기후변화 영향분석을 위한 최적 모형을 통해 신기후변화 시나리오에 따라 기후변화에 대한 영향분석이 타당성 있게 이루어진 것으로 보인다. 또한 기후변화에 대응한 핵심 기술개발 및 정책 추진 로드맵 작성이 실효성 있게 이루어진 것으로 보인다.

분야별로 주요 연구개발 목표를 중심으로 보면, 제1세부의 경우 국내외의 주요 모형 소개를 통해 경제적 영향분석 방법론을 체계화하였으며, 신 기후변화 시나리오에 따른 경제적 영향분석이 타당하게 이루어진 것으로 보인다. 또 신 기후변화 시나리오에 따라 적절한 평가지표 선정을 통해 취약성 평가가 이루어졌고, 분석결과들을 바탕으로 기후변화 대응전략이 적합하게 이루어진 것으로 사료된다.

제1협동의 경우 생산성 예측을 위한 모델링 로드맵 작성이 적절하게 이루어졌으며, 기후변화 영향평가 및 분석 모듈(모델) 완성도 높고 신뢰성 있게 개발되었으며, 기후변화 대응 연구개발 체계가 실효성 있게 구축된 것으로 사료된다.

제2협동의 경우 국내외 기후변화 영향 평가모델이 타당성을 가지고 비교분석되었고, 산림분야 기후변화 취약성이 타당성 있게 평가되었고, 기후변화 적응대책 수

립이 실효성 있게 구축된 것으로 사료된다.

제3협동의 경우 수산자원에 미치는 영향분석 방법론을 체계적으로 제시하였고, 수산부문 기후변화 영향평가 및 분석 모델링 시스템이 실효성 있게 개발되었으며, 기후변화 대응전략이 체계적으로 실효성 있게 제시된 것으로 사료된다.

제4협동의 경우 기후변화 영향 프로세스 분석 및 평가모델 비교 분석이 적절하게 이루어졌고, 최적모델을 활용한 영향평가 결과가 타당성 있게 제시되었으며, 기후변화 적응 기술개발 프레임이 실효성 있게 설계된 것으로 사료된다.

제5협동의 경우 데이터마이닝과 메타분석 방법론이 적절하게 제시되었으며, 분석 결과가 타당성 있게 제시된 것으로 사료된다.

구분	주요 연구개발의 목표	평가의 착안점	달성도	
1 세 부	1년	○경제적 영향분석 방법론 체계화	○영향분석 관련 이론 제시	100%
	1년	○신 기후변화 시나리오에 따른 경제적 영향 분석	○영향분석 결과의 타당성	100%
	2년	○신 기후변화 시나리오에 따른 취약성 평가 ○기후변화대응전략 수립	○평가지표 선정의 적절성 ○전략의적합성	100%
1 협 동	1년	○생산성 예측을 위한 모델링 로드맵 작성	○작성된 로드맵의 적절성	100%
	2년	○영향평가 및 분석 모듈(모델)의 개발 ○기후변화 대응 연구개발 체계 구축	○모듈의 완성도 및 신뢰성 ○연구개발 체계의 실효성	100%
2 협 동	1년	○국내외 기후변화 영향 평가모델 비교분석	○모델 분석 결과의 타당성	100%
	2년	○산림분야 기후변화 취약성평가 ○적응대책 수립과 우선순위 설정 프레임 구축	○취약성 평가결과 타당성 ○구축된 프레임의 실효성	100%
3 협 동	1년	○수산자원에 미치는 영향분석 방법론 체계화	○영향분석 관련 이론 제시	100%
	2년	○영향평가 및 분석 모델링 시스템 개발 ○적용 체계 및 대응전략 제시	○시스템의 실효성 ○체계 및 전략의 실효성	100%
4 협 동	1년	○영향 프로세스 분석 및 평가모델 비교 분석	○비교분석의 결과 적절성	100%
	2년	○최적모델 활용 영향평가 결과제시 ○기술개발 프레임 설계	○영향분석의 타당성 ○기술개발 전략의 실효성	100%
6 세 부	1년	○데이터마이닝과 메타분석 방법론 도출	○관련 이론의 적절한 제시	100%
	2년	○분석결과 제시 및 활용방안 검토	○분석결과의 타당성	100%
총 괄	1년	○농림수산식품분야 기후변화 영향 분석	○영향분석 결과의 타당성	100%
	2년	○핵심 기술개발 및 정책 추진 로드맵 작성	○로드맵의 실효성	100%

2. 관련분야 기여도

이 연구는 기술적인 측면에서 기후변화 대응을 위한 농림수산식품부문의 적응기술의 개발과 보급 확산의 기초자료로 활용될 수 있으며, 기후변화 대응관련 농업경영 교육과 영농지도를 위한 지침으로 활용될 수 있을 것이다. 또, 경제적·산업적 측면에서 농림수산식품부문 기후변화 적응기술 실천으로 기후변화의 부정적인 영향을 최소화시킴으로써 생산자들의 소득 안정화에 기여하며, 기온상승으로 고온성 및 아열대성 작물의 재배가능지역 확대, 월동작물의 저온피해 감소, 상록활엽수림의 침엽수림 대체에 의한 산림의 토양수분함량 및 지하수위 증가, 온대성 갈치, 참조기 등 어획량 증가 등 생산자들에게 기후변화의 기회요인에 대한 정보 제공을 통해 신소득원 창출에 기여하게 될 것이다. 뿐만 아니라 기후변화 대응 신소득 작목 도입의 시장 분석 정보 제공을 통해 농가들의 합리적인 의사결정을 유도함으로써 위험을 최소화하고 기회를 최대화하는데 기여할 것이다. 우선순위에 따른 기후변화 대응전략을 제시함으로써 국가재정의 비효율적 이용을 지양하게 될 것이다.

기후변화의 영향에 대해 지식이 부족한 일반인에게 실증적인 연구결과를 제시함으로써 미래에 다가올 기후변화의 부정적인 영향에 대한 공감대를 형성하는데 기여하게 될 것이다. 또 모형을 통한 기후변화 영향평가에 있어서 기술기반 모형과 농업경제 기반 모형의 통합 분석이라는 새로운 분석방법을 제시함으로써 연구방법을 개선하는데 기여한 것으로 사료된다.

우리나라에서는 현재 기후변화의 영향을 고려한 산림생장모형과 임분재적 변화 예측 모형 개발 분야의 연구는 초기단계 수준인데, 본 연구과제에서 개발하여 적용한 생장모형과 방법론은 다양하게 활용될 수 있을 것이다. 또한, 대표 산림 병충인 꽃매미의 겨울철 알 폐사율을 기반으로 기후변화에 따른 산림병해충 취약성 평가를 실시하였는데, 앞으로 다양한 병해충의 기후변화에 따른 생리적 특성이 검증된다면 이를 고려하여 보다 개선된 병해충 취약성평가를 수행할 수 있을 것이다.

기후변화 연구에서 데이터마이닝 기법이라는 새로운 분석방법을 제시함으로써 연구방법을 개선한 것으로 사료된다. 이 연구에서는 텍스트마이닝을 이용한 기후변화 영향 추세 분석, 메타분석을 통한 기후변화 영향 평가, 텍스트 마이닝과 메타분석을 연계한 프로세스 구축 등을 제시하였다. 특히 메타분석을 통한 기후변화 영향 평가의 경우 이 연구에서는 기후변화가 쌀 생산량에 미치는 영향에 대해서만 분석하였는데, 기후변화가 영향을 미치는 대상으로 쌀이 아닌 다른 작물로 확장이 가능하며, 농업분야가 아닌 다른 분야의 세부 항목에도 적용이 가능할 것이다. 이러한 각 세부

항목에 대해 기후변화가 미치는 영향의 크기를 정량적으로 제시하므로 객관적인 기후변화 영향 평가가 가능하며, 영향에 대한 크기를 비교하여 우선순위를 설정함에 있어 합리적인 의사 결정에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

제 5 장

연구개발 성과 및 성과활용 계획

1. 연구개발 성과

논문(국내외 전문학술지) 게재

구분	논문명	학술지명	주저자명	학술지 게재일	SCI구분
1 세부	패널분석-확률효과모형에 의한 등숙기 이상기상이 쌀 단수에 미치는 영향 분석	Climate Change Research	정학균	2013-12-04	비SCI
	기후변화와 식량안보	농어촌과 환경	김창길	2013-06-30	비SCI
	기후변화 시나리오 활용 농업기상 과학 융합	기상기술정책지	김창길	2013-12-30	비SCI
	농업분야 기후변화 영향분석모형 비교	친환경농업연구	김창길	2013-12-30	비SCI
	벼 병해충 피해면적 발생에 미치는 영향분석	Korean Journal of Environmental Agriculture	정학균	2014-01-16	비SCI
	국내산 망고의 소비의향 요인분석	농업경영.정책연구	정학균	2014-06-25	비SCI

논문(국내외 전문학술지) 게재 (계속)

구분	논문명	학술지명	주저자명	학술지 게재일	SCI구분
1 협동	How do extreme wet events affect rice quality in a changing climate?	Agriculture, ecosystems & environment	Lee, M.S.;	2013-03-08	SCI
	Impacts of climate change on paddy rice yield in a temperate climate	Global change biology	Kim, H. Y.;	2012-12-17	SCI
	Application of the Savitzky-Golay_Filter to Land Cover Classification Using Temporal MODIS Vegetation Indices	Photogrammetric Engineering and remote sensing	Kim, S. R	2014-07-09	SCI
2 협동	기후인자가 임목의 연륜생장에 미치는 영향	Climate Change Research	윤미혜	2013-06-26	비SCI
	미래 기후변화 시나리오에 따른 우리나라 소나무 임분의 재적 추정	한국임학회지	김문일	2014-03-03	비SCI
3 협동	기후변화에 대한 어업인 인식의 특성 분석	수산경영론집	김봉태	2014-12-22	비SCI
4,5 협동	텍스트 마이닝 기법을 활용한 기후변화관련 식품분야 논문초록 분석	Journal of the Korean Data and Information Science Society	배규용	2013-11-19	비SCI

국내 및 국제 학술회의 발표

구분	발표자	발표제목	발표일시	장소, 국명 출원등록일
1 세부	김창길	State of Agricultural Modeling in KOREA (Economic Modeling)	2013-10-09	중국 베이징 중국과학원 지리과학자원연구소
	김창길	기후변화가 농업부문에 미치는 경제적 영향평가	2014-03-26	국립식량과학원
	정학균	기후변화가 벼 병해충 피해면적 발생에 미치는 영향분석	2014-05-22	APCC워크숍
	김창길	기후변화 영향분석 및 영향평가 모형 구축	2014-10-21	국립식량과학원
	김창길	Sustainable Food Security under Climate Change	2014-09-25	더플라자호텔
	김창길	기후변화 영향 분석과 영향평가 모델 구축	2014-10-21	국립식량과학원 4층 강당

국내 및 국제 학술회의 발표 (계속)

구분	발표자	발표제목	발표일시	장소, 국명 출원등록일
1 협동	고종한	Simulation of free air CO2 enriched sorghum growth and interactions with water	2013-08-23	서울대학교 공학관
	고종한	Evaluation of CERES-Sorghum and CROPGRO-Soybean under elevated CO2 conditions	2013-10-17	국립식량과학원 고령지농업연구센터 (평창)
	고종한	Paddy rice production system technology in Korea	2013-09-24	중국 Shenyang 대학교
	고종한	Simulation of maize, sorghum, and Soybean grown in elevated CO2	2013-06-27	제주도 호텔 오션 스위트
	고종한	Simulation of Climate Change Impacts on Barely and Rice Productions in Korea	2014-10-17	단국대학교 천안캠퍼스 제3과학관 국제회의장
	고종한	Seasonal and spatial variations of carbon and water fluxes of rice (Oryza Stiva) from leaf to field scale	2014-07-15	University of Bayreuth, Germany
	고종한	SEASONAL AND SPATIAL VARIATIONS OF WATER USE EFFICIENCY OF RICE (Oryza Sativa	2014-08-22	International Rice Research Institute Los Banos, Philippines
3 협동	김봉태	기후변화에 대한 어업인 인식의 특성 분석	2014-11-28	부경대학교 수산과학관 국제회의실
4 협동	김정선	기후변화와 대응한 식품안전관리강화 정책과제	2013-01-23	서울 잠실 롯데호텔
	김정선	기후 변화 대응을 위한 식품 접객업소의 위생관리 방안	2013-04-05	서울대학교 관악캠퍼스 221동 110호 (보건대학원 1층)
	김정선, 이서희	기후변화 대응을 위한 식품접객업소의 위생관리 개선방안	2014-06-19	세종대학교 광개토관
	이서희, 김정선, 신호성	기후변화와 식중독 발생 예측 모형	2014-06-19	세종대학교 광개토관
	김정선	수산물 중 메틸수은에 대한 위해-편익 분석	2014-10-24	더케이서울호텔

교육 및 지도활동

번호	일자	대상	활용내역
1 세부	2013.10.01	제2기 유기농산업반 (충북 지역 5급 이하 공무원 40명 대상)	•장소: 충북자치연수원 •내용: 기후변화 대응 방안 강의
	2014.05.16.	베트남 연수생(20명)	•장소: 한국농촌경제연구원 •내용: 기후변화 대응 방안 강의
2 협동	2013.03.18~22	산림자원조사본부 전직원(52명)	•장소: 한국 등산·트레킹 지원센터(대전) •내용: 생장목편 DB 활용 생장목편 DB를 활용한 산림생장 모형을 통한 미래 기후변화 시나리오에 따른 수종별 산림생장 변화

홍보실적(신문, 방송, 저널 등)

구분	홍보유형	매체명	제목	일시
1 세부	기타	기상기술정책(2013.12)	기후변화시나리오 활용 농업 기상 과학 융합 전략	2013-12-02
	월간잡지	농어촌과 환경(2013.06)	기후변화와 식량안보	2013-06-03
	중앙Radio	KBS1라디오(싱싱 농수산)	기후변화 영향과 대응과제	2013-07-27
	중앙전문지	한국영농신문	기후온난화가 농업부문 향후 대처 방안	2014-01-06
	중앙전문지	원예산업신문	기후변화와 국내 원예산업	2014-06-16
3 협동	중앙일간지	연합뉴스, 아이아투데이, 뉴스1	기후변화에 대한 어업인 인식조사 결과	2014-11-13
4 협동	월간잡지	보건복지포럼	기후변화가 식중독 및 수인성 질병에 미치는 영향에 대한 잠재적 영향 분석	2013-03-01
	월간잡지	보건복지포럼	기후변화와 통합적 푸드시스템	2013-12-02

기타 활용 및 홍보실적(단행본 발간, CD 제작 등)

번호	일자	활용명칭 활용내역	활용내역 출원등록일
1 세부	2014-03-18	기후변화 영향 분석 및 영향평가 모델 구축 자료집	연구 내용 중 일부를 자료집으로 제작하여 관련 연구성과물로 보급, 홍보함.
	2014-09-25	기후변화시대의 식량안보 국제심 포지엄 자료집	기후변화시대의 식량안보 국제심포지엄 자 료집을 발간하여 국내외 기후변화 영향 분석 및 모형 관련 연구결과와 정보를 공유

기타 홍보실적

구분	일자	홍보명칭	주요내용
1 세부 과제	2014-09-25	기후변화 시대의 식량안보 국제심포지엄 개최	<p>○기후변화시대의 식량안보 국제심포지엄(International Symposium on Food Security in an Era of Climate Change)를 개최하였음.</p> <p>○기조발제(Keynote speech)에서는 AgMIP과 미국의 농업분야 기후변화 영향분석 자료를 기초로 식량안보 이슈를 진단하고 미래 전망 및 향후 과제를 제시함. 미래에 대한 식량문제를 정확하게 진단하고 처방하기 위해서는 신뢰성 있는 영향분석 모형 개발이 필요하고 이를 위해서는 국제적인 공동연구의 필요성이 제시됨. 기후변화 시대 식량안보 이슈를 진단하고 향후 과제를 모색하기 위해 유럽, 일본, 중국, 호주, 한국 등 주요국의 전문가를 초청하여 해당 국가의 실태를 진단하고 향후 추진과제를 제시토록 함. 식량안보 이슈는 글로벌 핵심 어젠다의 하나이므로 이번 국제세미나에서 도출된 과제는 향후 자료집을 발간하여 기후변화 대응 식량안보 대책 수립시 한국 정부는 물론이고 관심있는 국가와 OECD, FAO 등 국제기구의 해당분야 기초자료로 활용함.</p> <p>○발표내용 및 발표자</p> <ul style="list-style-type: none"> - 21세기 세계 기후변화와 지속가능한 식량안보(John Antle) - 기후변화와 FAO의 식량안보 진단과 장기전망(Josef Schmidhuber) - 기후변화와 식량안보 - OECD 관점(Ada Ignaciuk) - 2050년 기후변화와 글로벌 식량안보(Keith Wiebe) - 기후변화와 식량안보 - APEC 관점(전종안 선임연구원) - 기후변화와 식량안보 - 한국 시각(김창길 선임연구위원) - 기후변화와 식량안보 - EU 시각(Guido Bonati 선임연구위원) - 기후변화와 식량안보 - 중국 시각(Jinxia Wang 부소장) - 기후변화와 식량안보 - 일본 시각(Jun Furuya 선임연구원)

2. 성과활용 계획

이 연구개발의 결과는 우선적으로 중장기 국가 기후변화대응전략 수립의 기초자료로 활용될 수 있으며, 정부(지자체 포함)의 농업생산 체제 재편 및 기후변화 대응을 위한 중장기 농업발전계획 수립의 기초자료로 이용될 수 있을 것이다.

기후변화의 영향분석을 통해 에너지 위기, 환경오염 등 농림수산식품분야가 안고 있는 여러 가지 문제들을 선순환 구조로 해결하기 위한 기후변화 대응 지속가능성장 전략 구축을 위한 기초자료를 제공할 것이다. 특히 농림수산식품산업의 효율적 육성을 위한 실효성 있는 정책프로그램을 도출하는데 기여할 것이다. 뿐만 아니라 기후변화 심화와 인구증가의 추세 하에서 식량안보의 중요성이 커지고 있는데, 기후변화의 영향에 대한 실증적인 연구결과와 대응전략은 식량자급률이 낮은 우리나라의 식량안보 시스템을 구축하는데 기여할 것이다.

기후변화 대응전략에 관한 우리나라의 연구 성과를 국제적으로 공유함으로써 다른 나라와의 협력적인 기후변화 대응 전략을 도출할 수 있을 것이다. 기후변화에 따른 농림수산식품부문의 변화에 대한 국제적 정보 공유, 기후변화에 대한 농업부문의 공동대응책 모색에 있어서 국가단위의 관련정보를 제공할 수 있을 것이다.

본 연구의 내용과 관련하여 발간되지는 않았으나 국내외 학회에 제출된 논문들이 다수 있다. 접수되어 심사 중에 있는 이 논문들이 국내외 유명 학회지에 발간될 수 있도록 세부과제와 각 협동과제의 연구자들이 지속적으로 대응하고, 앞으로도 이 연구내용을 응용하여 좋은 학술 및 정책 논문이 발간할 계획이다. 학회지에 발간된 논문들은 정책적으로 각 분야에서 학술적인 개선된 방법론을 제시하였다는 점에서 의미가 있으며, 개선된 방법론들은 향후 다른 연구에서 응용될 수 있을 것이다. 또한 국내외 학회 및 세미나 등에서 본 연구의 내용을 발표함으로써 연구를 홍보 및 활용할 것이다. 본 연구의 결과는 향후 세부 및 협동과제 연구자들이 진행하는 연구에서 인용되어 활용될 것이다.

또한 본 과제를 기초로 정부 유관기관과 민간기관 등이 연합하여 민-관-연 통합적 기후변화 모델링 인프라 구축이 검토될 수 있는 제안을 하고, 실제로 미국이나 유럽의 사례와 같이 통합 모델링이 이루어질 수 있도록 지속적으로 협력하여 나갈 것이다. 예를 들어 Ag-MIP 프로젝트의 세미나 및 워크숍에 참석하여 논의할 계획이다.

제 6 장

연구개발과정에서 수집한 해외기술정보

미국, 프랑스, 네델란드, 호주 등 선진국에서는 현재 개발되어 있는 모델들이 미래 기후 조건에서 작물의 생육과 수량 예측의 신뢰성 확보에 한계가 있음을 인식하고 모델의 개량을 위한 연구에 많은 투자를 하고 있다. 예를 들어 기후, 작물 및 경제 모델 관련 연구자들과 IT 전문가들을 연계하여 농업분야의 차세대 기후변화 영향 평가를 위한 모델 개선 프로젝트(AgMIP: Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project)가 범세계적으로 추진되고 있다. 이 프로젝트의 중요 분과중의 하나가 작물모델 개선 분과로 이 분과의 중요 목표 중 개화기 경의 고온이 각종 작물의 seed setting에 미치는 영향 평가 모듈을 도입하거나 개선하는 것이 포함되어 있다.

네델란드 Wageningen 대학 및 Plant Research International의 공동연구로 개발된 WOFOST는 기본적으로 다양한 조건에서 작물의 수량과 생육을 모의하며, 지속적인 개선을 통해 현재는 GIS (Geographic Information System) 기술, 원격탐사(Remote Sensing) 기술과 연계하여 활용이 가능하다. 아프리카 지역의 식량생산 예측, 유럽의 지역별 잠재 수량성 평가 등 다양한 지역과 분야에서 활용되고 있다.

미국, 캐나다, 독일, 오스트리아 등 산림분야 연구의 선진국에서는 기후변화로 인한 산림의 영향 기작을 파악하기 위해 다양한 연구들을 진행하고 있으며, 이를 기반으로 영향을 정량적, 정성적으로 파악하고 예측하기 위한 기존 모델 개량과 새로운 모델 개발에 박차를 가하고 있다. 선진국에서는 산림경영 및 산림 탄소량 정량화를 위해 1900년대 초부터 과학적이고 체계적인 산림조사를 통해 방대한 DB를 구축해 오고 있으며, 위성영상과 같은 원격탐사자료를 지상조사 자료와 연계하여 국가 및 전 세계의 탄소량을 정량화하기 위해 노력하고 있다. 또한, 임목의 광합성 기작을 기반으로 생-물리-확학적 과정기반모형을 개발하여 산림뿐만 아니라 전 지구적인 산림 탄소 동태를 추정하고 예측하기 위해 노력하고 있다. 또한, 보다 현실적인 예측과 관리, 정책 반영을 위해 기후변화 영향만이 아니라 인위적인 관리, 재해, 토지피복

등 다양한 사회, 경제적 교란인자를 고려한 모형들도 고안되고 있다. 캐나다 산림청은 전통적인 산림성장모형을 기반으로 다양한 교란인자(산불, 병해충, 산사태)들과 인간의 활동(조림, 벌채, 토지피복변화 등)을 포함한 산림탄소수지모형(Carbon Budget Model-Canadian Forest Sector 3; CBM-CFS3)을 개발하여 IPCC의 GPG(Good Practice Guideline)에 따른 탄소수지를 추정할 수 있는 모형을 개발하였다. 미국의 USDA Forest Service 기후변화가 식생의 변화 및 탄소 동태에 미치는 영향을 예측하기 위해 기존의 CENTURY모형을 보완하여 생물지리학-생물지구화학-화재 모듈을 포함한 MC1(MAPSS-CENTURY1) 모형을 개발하였다. 유럽 오스트리아에 위치한 국제응용시스템연구소(International Institute of Advanced System Analysis, IIASA)에서는 기후변화와 산림관리 뿐만 아니라 사회·경제 시나리오에 따른 에너지의 수급량을 예측하여 목재의 공급과 수요의 평형을 고려한 G4M(Global Forestry Model)모형을 개발하여 다양한 국가의 산림관리 계획 수립과 이행에 적용하고 있다. 특히, 개발도상국의 REDD+(Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation) 사업의 Baseline 구축, 모니터링, 검증 등을 지원하는데 유용하게 활용되고 있으며, 다른 모형과 연계되어 산림뿐만 아니라 전 지구적인 토지이용과 자원 공급량 예측 분야에도 활용 되고 있다.

기후변화가 수산자원에 미치는 영향에 대한 기존의 연구에 따르면 수온 변화, 용존산소 변화가 수생생물의 분포와 재생산에 큰 영향을 미치고 있다. 특히 온난화와 용존산소의 감소 경향은 수생생물의 크기를 감소시키는 결과를 초래하는 것으로 보고되고 있다. 캐나다 브리티시컬럼비아 대학 연구팀은 외부 환경 변화의 생물반응을 탐색하는 통합적인 모형을 통해 이를 전세계 600종의 수생생물에 대해 구체적으로 분석하였다(Cheung et al., 2012). 그에 따르면 2000년에서 2050년 사이 고배출 시나리오 하에서 수생생물의 중량이 평균 14~25% 감소하는 것으로 예측되었다. 지역적으로는 열대 지역과 중위도 지역이 크게 영향을 받아 20% 이상 중량이 줄어들 것으로 전망되었다.

수산업분야의 기후변화 취약성 평가와 관련해서는 호주에서 연구가 활발하다. 예를 들어 호주에서는 중요한 수산자원인 닭새우(rock lobster) 등에 대해 특화된 취약성 평가를 수행하였으며 그 결과를 바탕으로 정책 대안을 제시하였다(Pecl et al., 2009). 구체적으로는 수온 상승에 따른 닭새우의 장기적인 자원 변동을 예측하고 먹이사슬 관계에 따른 생태계의 영향을 파악하였고 이러한 변화에 수산업계가 적응할 수 있는 대책을 제안하였다. 이는 특정 어종을 대상으로 한 취약성 평가의 사례로 호주 수산업의 기후변화 취약성 평가 및 적응 대책 마련에도 시사점을 제시하고 있다.

WHO의 최근 보고서에서 전 세계의 사망이나 질병 원인의 7%가 안전하지 못한

물과 위생 때문이고, 5%는 오염된 공기 때문으로 나타났다. 기후변화는 지구온난화와 함께 홍수, 지진, 가뭄과 같은 극한 기후현상으로 물과 위생에 부정적인 영향을 미치고, 설사병과 동물매개질병의 발생을 증가시켜 인체 건강을 해칠 뿐 아니라, 의료시설을 파괴하여 광범위한 피해를 입히기도 한다. 이 때 건강에 가장 효과적인 단기 적응전략은 수질관리, 위생관리, 필수적인 백신접종 등 기본적인 공공보건을 시행하는 것으로, 기후변화에 대한 적응 행동은 시스템 관점으로부터 적응 능력을 향상시키는데 초점을 맞추도록 제안되어야 한다.

특히, 영국에서는 이를 위하여 푸드체인을 포함하는 푸드시스템을 활용하여 원인과 결과 관계 및 피드백 고리를 과학적으로 분석하는 연구를 수행하고 있고, 유럽연합은 식품안전분야의 좋은 사례로서 HACCP 또는 GAP와 같은 식품안전관리제도를 전체 식품 뿐 아니라 사료까지 포함시켜 적용시키고 있다.

참고 문헌

<1세부과제>

- 강기경. 2012. “기후변화: 농업부문 영향과 대응 방안.” 「농업·농촌의 길 2012」. GS&J 인스티튜트.
- 강지용, 고성보. 1998. “경기침체와 오렌지 수입자유화에 따른 감귤의 수급전망 분석”. 「농업경제연구」 39(2): 143-170.
- 고승찬 외 5인. 2009. “재배실태 조사 및 작형별 경제성 분석.” 「아열대과수 망고 안정생산을 위한 재배작형 및 과실 품질 향상 기술 개발」. 농촌진흥청.
- 곽한강, 하상건, 허승오, 정강호. 2005. 「비점오염원 관리와 국토 보전을 위한 전국 토양 침식 위험성 평가」. 농촌진흥청, 농업과학기술원.
- 국립기상연구소. 2009. 「기후변화 이해하기」.
- 국립기상연구소. 2011. 「IPCC 5차 평가보고서 대응을 위한 기후변화 시나리오 보고서」.
- 권영아 외 3인. 2007. “A1B 시나리오 자료를 이용한 우리나라 아열대 기후구 전망.” 외 4인. 「대한지리학회지」 42(3): 355-367.
- 권오상, 김창길. 2008. “기후변화가 쌀 단수변화에 미치는 영향: 비모수적 및 준모수적 분석.” 「농업경제연구」 49(4): 45-64.
- 권원태. 2012. “기후변화 시나리오와 농업적 활용.” 「농업전망 2012(II)」. EO4-2012. 한국농촌경제연구원. pp.997-1026.
- 기상청. 2012. 「한반도 미래기후변화 전망 보고서」.
- 김건엽 외 4인. 2008. “기후변화대응 농업환경 영향평가와 온실가스 인벤토리 연구계획.” 「2008년 농업환경분야 학술대회」. 농업과학기술원. pp.433-450.
- 김경필, 김윤형, 박재홍. 2004. “도시가구의 과실 구매행태 변화 분석.” 「농촌경제」 27(4): 55-66.
- 김명현, 방혜선, 나영은, 김미란, 오영주, 강기경, 조광진. 2013. “기후변화에 따른 주요 벼 병해충에 의한 벼 생산의 취약성 평가.” 「한국환경복원기술학회지」 16(1): 147-157.
- 김명현, 이상호, 김병무, 이기웅, 송경환, 이지혜, 박근아. 2014. 「기후변화 취약성 평가를 위한 적응능력 지표 개발」. 농촌진흥청.
- 김성용 외 3인. 2011. “국내거주외국인의 국내산 과일 구매특성 및 선호도 분석.” 「농업경영·정책연구」 38(3): 503-528.
- 김성용, 조성환. 2006. “순위화된 프로빗모형을 이용한 매실가공식품 구매의 결정요인 분석.” 「농업경제연구」 47(4): 17-32.
- 김성재, 박태양, 김성민, 김상민. 2012. “기후변화에 따른 농업생산기반 재해 취약성 평가를 위한 대리변수 선정.” 「한국관개배수논문집」 18(2): 33-42.
- 김인겸, 박기준, 김백조. 2013. “월동작형 배추와 무의 생산량에 영향을 미치는 기상요인 분석.” 「한국농림기상학회지」 15(2): 59-66.
- 김정호, 이정환. 1996. “1990년대 초의 쌀 단수 정체에 관한 요인 분석.” 「농촌경제」 19(4): 1-20.

- 김정호. 1998. “쌀 단수의 변동과 전망.” 「농촌경제」 21(1): 33-44.
- 김창길 외 4인. 2009. 「기후변화에 따른 농업부문 영향분석과 대응전략」. 연구보고서 R593. 한국농촌경제연구원.
- 김창길 외 4인. 2010. 「기후변화 대응 전략의 미래 농업기술 개발 전략」. 연구보고서 C2010-25. 한국농촌경제연구원.
- 김창길 외 4인. 2012. 「기후변화가 식량공급에 미치는 영향분석과 대응 방안」. 연구보고서 R663.
- 김창길 외 4인. 2012. 「기후변화가 식량공급에 미치는 영향 분석과 대응방안」. 연구보고서 R663. 한국농촌경제연구원.
- 김창길 외 5인. 2008. 「기후변화에 따른 농업부문 영향분석」. 연구보고서 R565. 한국농촌경제연구원.
- 김창길, 정학균, 문동현 편저. 2013. 「기후변화 영향분석 및 영향평가 모델구축 자료집」. 연구자료 D370. 한국농촌경제연구원.
- 김창길, 정학균, 장정경. 2010. “기후변화와 농업부문 대응전략.” 「농업전망 2010」 발표자료집 E04-2010. 한국농촌경제연구원.
- 김창길, 정학균. 2010. “미국 생산의 기상영향 분석,” 「농업경영·정책연구」 37(4): 621-642.
- 김창길. 2014. 미국 기후변화 영향분석 유관기관 방문 출장보고서. 한국농촌경제연구원.
- 나영은 외 6인. 2007. “농업부문의 기후변화 영향 및 적응방안에 관한 국외 동향.” 「한국국제농업개발학회지」. 19(2): 93-100.
- 노수정, 이상학, 조재환. 2012. “수입 오렌지와 국내산 과일 수요의 가격 및 지출 탄력성 추정.” 「농촌경제」 35(4): 81-96.
- 노재선, 권오상, 조승현. 2012. 기후변수와 쌀 단수간의 인과성 및 이상기후가 쌀 단수에 미치는 영향분석. 「농업경제연구」 53(1): 21-39.
- 농촌진흥청. 2002. 「기후변화와 농업생태계 변동 연구동향」. 연구동향분석보고서 2002-2.
- 농촌진흥청. 2007a. “지구 변화에 따른 농업생산 생태계 변화-지구온난화 농업생태계 지각변동 불러.” 「생활과 농약」. 한국작물보호협회.
- 농촌진흥청. 2007b. 「기후변화 대응: 농업환경 영향평가 및 적응대책」.
- 농촌진흥청. 2008. 「농업분야 기후변화대책 추진현황」. 국회기후변화대책특별위원회 보고자료.
- 농촌진흥청. 2014. 기후변화대응 농업기술개발 2단계(2014-2023) 중장기 계획.
- 서형호. 2003. 「기후 변화가 과수 재배에 미치는 영향」. 기후변화가 한반도에 미치는 영향에 대한 심포지엄 자료. 농촌진흥청 원예연구소.
- 심교문 외 3인. 2006. 「기후변화 시나리오에 따른 벼 생육 및 생산성 평가」. 환경부·기상청 한국기후변화협의체(KPCC). 제4차 기후변화학술대회 발표자료. pp.110-113.
- 심교문 외 4인. 2005. “GCM 2×CO₂ 기후변화시나리오에 따른 벼 생산량 변화.” 제7차 한국농림기상학회 학술대회 초록집. pp.88-92.
- 심교문 외 5인. 2008. “기후변화가 농업생산 환경에 미치는 영향.” 「기후온난화 대비 강원농업의 진로 탐색」. 제21회 강원농업 발전방안 심포지움. 강원도농업기술원. pp.43-71.
- 심교문 외 6인. 2011. “A1B 기후변화 시나리오가 국내 가을 쌀보리의 잠재수량에 미치는 영향 모사.” 「한국농림기상학회지」 13(4): 192-203.

- 심교문 외. 2003. “20세기 한국의 농업기상재해 특징.” 「한국농림기상학회지」 5(4): 255-260.
- 심교문 외. 2004. “최근의 기후변화를 고려한 가을보리 안전재배지대 구분.” 「한국농림기상학회지」 6(4): 218~234.
- 오인수. 2003. 기후변화가 농업생산 및 유통에 미치는 영향과 대응방안. 석사학위논문. 순천대학교 대학원.
- 유가영, 김인애. 2008. 「기후변화 취약성 평가지표의 개발 및 도입방안」. 연구보고서. 한국환경정책평가연구원.
- 유승환, 최진용, 이상현, 오윤경, 박나영. 2012. “고해상도 기후시나리오를 이용한 논용수 수요량 및 단위용수량의 기후변화 영향 분석.” 「한국농공학회논문집」 54(2): 15-26
- 윤성탁. 2005. “지구온난화가 농업생산에 미치는 영향과 대응책.” 「한국국제농업개발학회지」 17(3): 199~207.
- 윤성호 외 4인. 2001. “기후변화와 농업생산의 전망과 대책.” 「한국농림기상학회지」 3(4): 220-237.
- 이계임, 최지현, 박준기. 1998. 「과실류 소비행태에 관한 연구」. 연구보고서 R391. 한국농촌경제연구원.
- 이계임, 최지현. 1999. “AIDS 모형을 이용한 과실의 계절별 수요 분석.” 「농촌경제」 22(3): 19-34
- 이기광, 고광근, 이중우. 2012. 농작물 생산량과 기상요소의 상관관계 분석. 「한국환경과학회지」 21(4): 461-470.
- 이버들, 김봉태, 조용성. 2011. “국내 수산 부문의 지역별 기후변화 취약성 평가 연구”. 「수산경영론집」 42(1): 57-70.
- 이변우 외. 1991. “대기 중 CO_2 농도 증가에 따른 기후변화가 농업기후자원, 식생의 순 1차생산력 및 비 수량에 미치는 영향.” 「한국작물학회지」 36(2): 112-126.
- 이상돈. 2005. “기후변화에 따른 생태계 영향평가 및 대응방안.” 「대한토목학회」 53(4): 43-48.
- 이성우 외. 2005. 「프로빗·프로빗모형 응용」. 박영사.
- 이양수 외. 2005. 「기후변동에 따른 농업기후자원량 변동성 연구」. 농진청 농업과학기술원.
- 이용선, 정학균, 심송보. 2005. 「기상 요인이 청과물 수급에 미치는 영향」. 연구보고서 R494. 한국농촌경제연구원.
- 이우균. 2011. “한반도 산림 부문에 대한 기후변화 영향 및 취약성 평가”. 「우리나라 기후변화의 경제학적 분석」. 환경부.
- 이윤선·이승호, 2008. 「기후변화가 비의 생산량에 미치는 영향. 지리학연구」 42(3): 405-416.
- 이정택 외. 1994. “우리나라 최근 60년의 기후변화에 따른 농업기후자원 분포.” 「한국환경농학회지」 13(2): 160-167.
- 이정택. 2007. “기후변화가 농업에 미치는 영향.” 「토양과 비료」 32: 7-20.
- 이정환 · 서진교. 2007. 「한미 FTA를 해부한다(1): 쇠고기와 오렌지」. DDA/FTA 연구시리즈 12. 시선집중 제35호. GS&J 인스티튜트.
- 이종훈. 2001. 「도작과학」. 선진문화사.
- 이지혜, 송경환, 이상호. 2014. “기후변화 취약성 지수에 의한 사과 재배지역 유형화.” 「농업경영·정책연구」 41(3): 439-458.

- 임채일, 이정수, 최지원, 최정숙. 2005. “과실 구매 행태 및 기후도 분석.” 「한국원예과학기술지」 23(3): 351-355.
- 장남정, 안정이. 2009. 「기후변화 적응대책 수립을 위한 전라북도 기후변화 취약성 연구」. 연구보고서. 전북발전연구원.
- 전성우. 2000. 「기후변화에 따른 식생부문의 변화예측-원격탐사기법과 GIS 기법의 활용」. 서울대학교 대학원. 공학박사학위논문.
- 전승중. 2007. “지구 온난화에 따른 감귤재배지 변동과 금후 연구방안.” 「난지농업연구」. 여름 5(2) 통권18호.
- 정유란, 조경숙, 이변우. 2006. 지구온난화에 따른 우리나라 벼농사지대의 생산성 재평가. 「한국농림기상학회」 8(4): 229-241.
- 정태호. 1991. “열대과일의 수입 및 유통현황과 과제.” 「식품유통연구」 8(1): 55-81.
- 제주특별자치도. 「제주통계연보 2013」. 연구보고서. 2013.
- 조덕래, 조재환. 1992. 「주요 과실류의 수급 분석 및 전망」, 연구보고서, 한국농촌경제연구원.
- 조용성, 이우균. 2011. 「기후변화 적응부분 지표 개발 및 지수 산정」. 한국기후변화대응연구센터
- 조용수, 이용호. 2008. 「세계농업 전망모형 Aglink 2008 운용·개발연구」. 연구보고서 M93. 한국농촌경제연구원.
- 조은영. 2008. 기후변화가 농작물 생산에 미치는 효과. 숙명여자대학교 대학원. 석사학위논문.
- 채제천. 2005. 「쌀생산과학」. 향문사.
- 최광용, 권원태. 2008. “현재와 미래 우리나라 겨울철 강수형태 변화.” 「대한지리학회지」 44(1): 1-19.
- 한석호 외 4인. 2011. 「기상요인을 고려한 단수 예측모형 개발연구」. 정책연구보고서 P152. 한국농촌경제연구원.
- 한석호, 이병훈, 박미성, 승준호, 양현석, 신성철. 2011. 「기상요인을 고려한 단수 예측모형 개발연구」. 정책연구보고 P152. 한국농촌경제연구원.
- 한재환 외 4인. 2013. “과일 수급 동향과 전망.” 「농업전망 2013」 발표자료집. E04-2013. 한국농촌경제연구원.
- 한화진 외 10인. 2006. 「기후변화 영향평가 및 적응시스템 구축 II」. 연구보고서 2006 RE-01. 한국환경정책평가연구원.
- 한화진 외 12인. 2007. 「기후변화 영향평가 및 적응시스템 구축 III」. 연구보고서 RE-01. 한국환경정책·평가연구원.
- 한화진 외 19인. 2008. 「국가 기후변화 적응 마스터플랜 수립 연구」. 한국환경정책·평가연구원.
- 환경부·국립환경과학원. 2012. 「기후변화 부문별 취약성 지도 - 생태계·농업 -」
- 황진환. 2007. 「기후변화 대응 해양수산부문 종합대책연구」. 해양수산부
- 角田重三郎. 1984. 「作物品種の多收性の研究 - 生育解析の立場より」. 日本學術振興會.
- 今井鑄藏. 1983. 「作況指數の算定と生産力水準の諸問題. 農業と農村」. pp.22-30.
- 杉浦 俊彦. 2009. 「温暖化が進むと農業 食料はどうなるのか?」. 技術評論社.

- Antle, J.M. and R.O. Valdivia. 2011a. Tradeoff Analysis Model for Multi-Dimensional Impact Assessment Version 5.0. Available at <http://tradeoffs.oregonstate.edu>.
- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements. FAO irrigation and drainage paper No. 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Bartlett, Jr. and M. O. Smith. 2003. Effects of different levels of zinc on the performance and immunocompetence of broilers under heat stress. *Poultry Science* 82: 1580-1588.
- Burfening, P. J. and Ulberg, L. C. 1968. Embryonic survival subsequent to culture of rabbit spermatozoa at 38 degrees and 40 degrees C. *Journal of Reproduction and Fertility* 15: 87-92.
- Chirico, J., P. Jonsson, S. Kjellberg, and G. Thomas. 1997. Summer mastitis experimentally induced by *Hydrotaea irritans* exposed to bacteria. *Medical and Veterinary Entomology* 11: 187-192.
- Deng, W., X. F. Dong, J. M. Tong and Q. Zhang. 2012. The probiotic *Bacillus licheniformis* ameliorates heat stress-induced impairment of egg production, gut morphology, and intestinal mucosal immunity in laying hens. *Poultry Science* 91: 575-582.
- Fedde, M. 1998. Relationship of structure and function of the avian respiratory system to disease susceptibility. *Poultry Science* 77: 1130-1138.
- Geers, R., V. Goedseels, G. Parduyns, G. Vercruysse. 1986. The group postural behaviour of growing pigs in relation to air velocity, air and floor temperature. *Applied Animal Behaviour Science* 16: 353-362.
- Ghazi, S., M. Habibian, M. M. Moeini and A. R. Abdolmohammadi. 2012. Effects of different levels of organic and inorganic chromium on growth performance and immunocompetence of broilers under heat stress. *Biological Trace Element Research* 146: 309-317.
http://www.climate.go.kr/home/cc_data/2013/korea_climate/3-0311_korea_climate.pdf.
- Ingram, D.L. 1965. Evaporative cooling in the pig. *Nature* 207: 415-416.
- Johnson, H. D. and W. J. Vanjonack. 1976. Effects of environmental and other stressors on blood hormone patterns in lactating animals. *Journal of Dairy Science* 59: 1603-1617.
- Morrison, S. R. 1983. Ruminant heat stress: effect on production and means of alleviation. *Journal of Animal Science* 57: 1594-1600.
- Omtvedt, I. T., R. E. Nelson, R. L. Edwards, D. F. Stephens and E. J. Turman. 1971. Influence of Heat Stress During Early, Mid and Late Pregnancy of Gilts. *Journal of Animal Science* 32: 312-317.
- Quinteiro-Filho, W. M., A. Ribeiro, V. Ferraz-de-Paula, M. L. Pinheiro, M. Sakai, L. R. Sá, A. J. Ferreira and J. Palermo-Neto. 2010. Heat stress impairs performance parameters, induces intestinal injury, and decreases macrophage activity in broiler chickens. *Poultry Science* 89: 1905-1914.
- Scott, G. H., F. Wiersma and J. M. Woods. 1972. Reproductive health program for cattle subjected to high environmental temperatures. *Journal of the American Veterinary Medical Association* 161: 1339-1344.

- Sharma, A. K., L. A. Rodriguez, G. Mekonnen, C. J. Wilcox, K. C. Bachman, R. J. Collier. 1983. Climatological and Genetic Effects on Milk Composition and Yield. *Journal of Dairy Science* 66: 119-126.
- Sohail, M. U., M. E. Hume, J. A. Byrd, D. J. Nisbet, A. Ijaz, A. Sohail, M. Z. Shabbir and H. Rehman. 2012. Effect of supplementation of prebiotic mannan-oligosaccharides and probiotic mixture on growth performance of broilers subjected to chronic heat stress. *Poultry Science* 91: 2235-2240.
- Thatcher, W. W., F. C. Gwazdauskas, C. J. Wilcox, J. Toms, H. H. Head, D. E. Buffington and W. B. Fredricksson. 1974. Milking performance and reproductive efficiency of dairy cows in an environmentally controlled structure 1. *Journal of Dairy Science* 57: 304-307.
- Aarnink, A. J. A., J. W. Schrama, R. J. E. Verheijen and J. Stefanowska. 2001. Pen fouling in pig houses affected by temperature. in *Livestock Environment VI*. Louisville, KY. pp. 180-186.
- Adger, N.E. 2006. The Impact of Climate Change on Agriculture and Options for Adaptation. COM/AGR/CA/ENV/EPOC(2006)25. OECD JWP on Agriculture and Environment.
- Aimi, R. 1967. Cell-physiological and biochemical aspects in the physiology of ripening. IRC Newsletter special: 106-111.
- Antle, J. M. and R. O. Valdivia. 2011. Tradeoff Analysis Model for Multi-Dimensional Impact Assessment Version 5.0. Available at <http://tradeoffs.oregonstate.edu>.
- Armstrong, D. V. 1994. Heat stress interactions with shade and cooling. *Journal of Dairy Science* 77: 2044-2050.
- Baeta, F. C., N. F. Meador, M. D. Shanklin and H. D. Johnson. 1987. Equivalent temperature index at temperatures above the thermoneutral for lactating dairy cows. pp. 87-4015 in Proc. American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph, MI.
- Belliveau, S., Barry Smit, and Ben Bradshaw. 2006. "Multiple exposures and dynamic vulnerability: Evidence from the grape industry in the Okanagan Valley, Canada." *Global Environmental Change*. 16: 364-378.
- Bényei, B., A. Gaspard, C. W. C. Barros. 2001. Changes in embryo production results and ovarian recrudescence during the acclimation to the semiarid tropics of embryo donor Holstein - Frisian cows raised in a temperate climate. *Animal Reproduction Science* 68: 57-68.
- Bergen, R. D., A. D. Kennedy, K. S. Schwartzkopf-Genswein and T. Lawson. 2007. Effects of feeding time on thermoregulation of beef heifers during the winter. *Canadian Journal of Animal Science* 87: 307-313.
- Bianca, W. 1964. Thermoregulatory responses of the dehydrated ox to drinking cold and warm water in a warm environment. *Research in Veterinary Science* 5: 75-80.
- Cahill, K. N., et al. 2007. Modeling climate change impacts on wine grape yields and quality in California, Seminare: Réchauffement climatique, quels impacts probables sur les vignobles?. 28-30. Mars.

- Challinor A.J., et al. 2014. "A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation." *Nature Climate Change*. 4: 287-291.
- Chang, Ching-Cheng. 2002. "The potential impact of climate change on Taiwan's agriculture." *Agricultural Economics*. 27: 51-64.
- Collier, R. J. and R. B. Zimelman. 2007. Heat stress effects on cattle: what we know and what we don't know. Proc. of the Southwest Nutrition and Management Conference, The University of Arizona, Tucson, February 23rd.
- Collier, R. J., G. E. Dahl and M. J. VanBaale. 2006. Major advances associated with environmental effects on dairy cattle. *Journal of Dairy Science* 89: 1244-1253.
- David B. Lobell et al. 2006. "Impacts of future climate change on California perennial crop yields: Model projections with climate and crop uncertainties." *Agricultural and Forest Meteorology*. 141: 209-218.
- Decker, W., V. Jones, R. Achutuni. 1986. The Impact of Climate Change from Increased Atmospheric Carbon Dioxide on American Agriculture. Washington D.C. US. Department of Energy. DOE/NBB-0077.
- DeRensis, F. and R. J. Scaramuzzi. 2003. Heat stress and seasonal effects on reproduction in the dairy cow - a review. *Theriogenology* 60: 1139 - 1151.
- Dikmen, S. and P. J. Hansen. 2009. Is the temperature-humidity index the best indicator of heat stress in lactating dairy cows in a subtropical environment?. *Journal of Dairy Science* 92: 109-116.
- Dimech, M., V. Caputo and M. Canavari. 2011. "Attitudes of Maltese Consumers Towards Quality in Fruit and Vegetables in Relation to Their Food-Related Lifestyles." *International Food and Agribusiness Management Review*. 14(4): 31-35.
- FAO. 2007. Adaptation to climate change in agriculture, forestry and fisheries: Perspective, framework and priorities.
- FAO. 2008. Climate Change and Food Security: A Framework Document.
- FAO. 2012. Greening the economy with Climate-Smart Agriculture. Background Paper for the Second Global Conference on Agriculture. Food Security and Climate Change.
- Fischer, G., Shah, M., Tubiello, F. N. and van Velhuizen, H. 2005. "Socio-economic and Climate Change Impacts on Agriculture: an Integrated Assessment, 1990 - 2080". *Philosophical Transactions Royal Society: Biological Sciences*. 360: 2067-2083.
- Fleischer, Aliza, Lichtman Ivgenia, and Mendelsohn, R. 2007. "Climate change, irrigation, and Israeli agriculture: Will warming be harmful?" *Ecological Economics*. 65: 508-515.
- Ford, J. D. and B. Smit. 2004. "A Framework for Assessing the Vulnerability of Communities in the Canadian Arctic to Risks Associated with Climate Change." *Arctic*. 57-4: 389-400.
- Fox, D. G. and T. P. Tylutki. 1998. Accounting for the effects of environment on the nutrient requirements of dairy cattle. *Journal of Dairy Science* 81: 3085-3095.

- Fox, D. G., L. O. Tedeschi, T. P. Tylutki, J. B. Russell, M. E. Van Amburgh, L. E. Chase, A. N. Pell, and T. R. Overton. 2004. The Cornell Net Carbohydrate and Protein System Model for evaluating herd nutrition and nutrient excretion. *Animal Feed Science and Technology* 112:29-78.
- Francisco, E. M. and J. W. B. Guise. 1988. A Note on Establishing Yield-Rainfall Relationships. Elsevier Science Publishers B. V.
- Furukawa, R., Y. Kariya, H. Matsumoto and S. Terui. 1984. Studies on meteorological factors on physiological functions in cattle. *Bull. Natl. Grassl. Res. Inst.* 27: 70-77.
- Giesecke, H. W., 1985. The effect of stress on udder health of dairy cows. *Onderstepoort Journal of Veterinary Research* 52: 175-193.
- Greene. W. H. 1994. *Econometric Analysis*. Prentice Hall.
- Hansen, P. J. 2007. Exploitation of genetic and physiological determinants of embryonic resistance to elevated temperature to improve embryonic survival in dairy cattle during heat stress. *Theriogenol.* 68 (Suppl. 1): S242-S249.
- Hansen, P. J. 2007. Exploitation of genetic and physiological determinants of embryonic resistance to elevated temperature to improve embryonic survival in dairy cattle during heat stress. *Theriogenol.* 68(Suppl. 1): S242-S249.
- Hoelscher, M. A. 2001. Adverse winter conditions increase cost of production. *Feedstuffs* 73: 5.
- Hoelscher, M. A. 2001. Adverse winter conditions increase cost of production. *Feedstuffs* 73: 5.
- Hogan, J. S., K. L. Smith, K. H. Hoblet, P. S. Schoenberger, D. A. Todhunter, W. D. Hueston, D. E. Pritchard, G. L. Bowman, L. E. Heider and B. L. Brockett. 1989. Field survey of clinical mastitis in low somatic cell count herds. *Journal of Dairy Science* 72: 1547-1556.
- IIASA/FAO. 2012. "Global Agro-ecological Zones (GAEZ v3.0)." IIASA, Laxenburg, Austria and FAO, Rome, Italy.
- IPCC. 2001. Climate Change 2001: Synthesis Report.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: Synthesis Report.
- IPCC. 2014. "Chapter 7. Food Security and Food Production System." WG II AR5 Final Drafted(accepted).
- IPCC. 2014. Summary for Policymakers. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability.
- Kandlikar M, Risbey J. 2000. Agricultural Impacts of Climate Change: If Adaptation is the Answer, What is the Question? *Climatic Change* 45: 529-539.
- Khatri, Y., S. Solomou, and W. Wu. 1998. "Weather and Fluctuations in Agricultural Output, 1867-1913." *Research in Economic History* 18: 83-102.
- Kimberly Nicholas Cahill et al. 2007 "Modeling climate change impacts on wine grape yields and quality in California" Seminare: Réchauffement climatique, quels impacts probables sur les vignobles?. 28-30. Mars.
- Kobata, T. and N. Uemuki, 2004. "High temperature during the grain-filling period do not the potential grain dry matter increase of rice". *Agronomy Journal* 96: 406-414.

- Kuhar, A. and L. Juvančič. 2010. "What determines purchasing behaviour for organic and integrated fruits and vegetables?" *Bulgarian Journal of Agricultural Science* 16(2):111-122.
- Kumar, K.S.Kavi, and Jyoti Parikh. 1998. "Climate change impacts on Indian agriculture: The Ricardian Approach." World Bank Technical Paper 402. Washington, D.C.
- Kurukulasuriya, Pradeep and Shane Rosenthal. 2003. *Climate Change and Agriculture: A Review of Impacts and Adaptations*. The World Bank. Environment Department
- Kurukulasuriya, Pradeep, Mendelsohn R. 2008. "A Ricardian analysis of the impact of climate change on African cropland." *AfJARE* 2(1): 1-23.
- Lacetera, N. G., B. Ronchi, U. Bernabucci, and A. Nardone. 1994. Influence of heat stress on some biometric parameters and on body condition score in female Holstein calves. *Riv. Agric. Subtrop. Trop.* 88: 80-89.
- Lal, R. et al. eds. 2005. *Climate Change and Global Food Security*. Taylor & Francis.
- Lobell, D. B., Christopher B. Field, Kimberly Nicholas Cahill and Celine Bonfils. 2006. "Impacts of future climate change on California perennial crop yields: Model projections with climate and crop uncertainties." *Agricultural and Forest Meteorology* 141: 208-218.
- Mader, T. L., M. S. Davis and T. Brown-Bradl. 2006. Environmental factors influencing heat stress in feedlot cattle. *Journal of Animal Science* 84: 712-719.
- Mathur, P. N., J. Ramirez-Villegas and A. Jarvis. 2012. "The Impacts of Climate Change on Tropical and Sub-tropical Horticultural Production." *Tropical Fruit Tree Species and Climate Change*, Bioversity International, New Delhi, India. 27-44.
- McDowell, R. E. 1972. Improvement of livestock production in warm climates. W. H. Freeman and Co.. San Francisco, CA. pp.66-110.
- Mendelsohn, R. and W. D. Nordhaus. 1996. "The Impact of Global Warming on Agriculture: Reply." *American Economic Review* 86(5): 1312-1315.
- Mendelsohn, R. W. D. Nordhaus, and D. Shaw. 1994. "The Impact of Global Warming on Agriculture: A Ricardian Analysis." *American Economic Review* 84(4): pp. 753-771.
- Mendelsohn, R., William D. Nordhaus, and Daigee Shaw. 1993. Measuring the impact of global warming on agriculture. Cowles foundation discussion paper No. 1045. Yale University.
- Nienaber J. A., G. L. Hahn and R. L. Korthals. 1993. Upper threshold temperature limiting swine growth. Proceedings of the 13th International Congress of Biometeorology. Calgary, Canada, Sept 12-18, pp.401-408.
- NRC. 1981. Effect of environment on nutrient requirements of domestic animals. National Academy Press. Washington, DC.
- OECD. 2011b. Building Resilience to climate change in the Agriculture sector. COM/TAD/CA/ENV/ EPOC(2011)26.
- Péneau, S., A. Linke, F. Escher, and J. Nuessli. "Freshness of fruits and vegetables: consumer language and perception." *British Food Journal* 111(3): 243-256, 2009.

- Poole, N., and L. Martínez-Carrasco. 2007. "Information and WTP: fruit quality perceptions and consumer satisfaction." Paper prepared for presentation at the I Mediterranean Conference of Agro-Food Social Scientists. 103rd EAAE Seminar 'Adding Value to the Agro-Food Supply Chain in the Future Euro Mediterranean Space'. Barcelona, Spain. April 23rd-25th.
- Quiniou, N., D. Renaudeau, A. Colin and J. Noblet. 2000. Influence of high ambient temperatures and physiological stage on feeding behavior of pigs. *Productions Animales* 13: 233-245.
- Rahmstorf, Stefan and Dim Coumou. "Increase of extreme events in a warming world" PNAS. Nov 1. 108(44): 17905-9. 2011.
- Reid, S., B. Smit, C.W. and S. Belliveau. 2007. "Vulnerability and adaptation to climate risks in Ontario Agriculture." *Mitigation & Adaption Strategies for Global Change*. 12(4): 609-637.
- Renaudeau D. 2008 Nutrition of the lactating sows in hot conditions. In 3rd CLANA Congress. Colegio.
- Rosegrant, M. W. and the IMPACT development team. 2012. "International Model for Policy Analysis of Agricultural Commodities and Trade (IMPACT): Model Description." International Food Policy Research Institute, Washington DC.
- Rosegrant, M. W. et al. 2014. Food security in a world of natural resource scarcity: The role of agricultural technologies.
- Rosegrant, M. W., S. Msangi, C. Ringler, T. B. Sulser, T. Zhu, and S. A. Cline. 2008. International Model for Policy Analysis of Agricultural Commodities and Trade (IMPACT): Model description. Washington, D.C.: International Food Policy Research Institute.
- Rosenzweig et al. 2013. "The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP): Protocols and pilot studies." *Agricultural and Forest Meteorology* 170: 166-182
- Rosenzweig, C. and Parry, M. 1994. "Potential of climate change in world food supply". *Nature* 367: 133-138.
- Sanghi, Apurva, and Mendelsohn R. 2008. "The impacts of global warming on farmers in Brazil and India." *Global Environmental Change* 18(4): 655-665.
- Schmidhuber, J. and Tubiello, F.N. 2007. "Global food security under climate change." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104: 19703-19708.
- Shearer, Christine and Richard B. Rood. "Changing the Media Discussion on Climate and Extreme Weather" *Earthzine*. 2011.
- Sirohi, S. and A. Michaelowa. 2007. Sufferer and cause: Indian livestock and climate change. *Climatic Change* 85: 285-298.
- Solomou, S. and W. Wu. 1999. "Weather Effects on European Agricultural Output, 1850-1913." *European Review of Economic History* 3: 351-373.
- St-Pierre, N. R., B. Cobanov and G. Schnitkey. 2003. Economic losses from heat stress by US livestock industries. *Journal of Dairy Science* 86: E52-E77.

- Tarleton, M. and D. Ramsey. 2008. "Farm-Level Adaptation to Multiple Risks: Climate Change and Other Concerns." *Journal of Rural and Community Development* 3(2): 7-63.
- Tubiello, F.N. and G. Fischer. 2007. "Reducing Climate Change Impacts on Agriculture: Global and Regional Effects of Mitigation, 2000-2080." *Technological Forecasting & Social Change* 74: 1030-1056.
- Turrall, H., et al. 2011. Climate Change, Water and Food Security. Water Report 36. FAO
- US Environmental Protection Agency (EPA). 2014. Climate Impacts on Agriculture and Food Supply. <http://www.epa.gov/climatechange/impacts-adaptation/agriculture.html>.
- Vining, K. C. 1989. "Effects of Weather on Agricultural Crop and Livestock: An Overview." *International Journal of Environmental Studies* 36: 27-39.
- Wall, E., B. Smit, and J. Wandel. eds. 2007. Farming in a Changing Climate: Agricultural Adaptation in Canada. Toronto, Canada: UBC Press.
- Werstegen, M. W. A., A. M. Henken and W. vanderHel. 1987. Influence of some environmental, animal and feeding factors on energy metabolism in growing pigs. In: M.W.A. Werstegen and A.M. Henken(eds.) Energy metabolism in farm animals. P478. Martinus Nijhoff. Dordercht.
- West, J. W. 2003. Effects of heat stress on production in dairy cattle. *Journal of Dairy Science* 86: 2131-2144.
- Zimbelman, R. B. 2008. Management strategies to reduce effects of thermal stress on lactating dairy cattle. Ph. D. Dissertation. The university of Arizona.

<1협동과제>

- 김창길, 박현태, 이상민, 주현정, 권오상, 로버트멘델존. 2008. 「기후변화에 따른 농업부문 영향분석」. 한국농촌경제연구원 연구보고 R565.
- 이변우, 김다익, 김동진. 2011. "벼 등숙기 고온에 따른 등숙 특성 변화의 품종간 비교를 위한 예비 실험." 한국작물학회 2011년도 추계학술발표대회 논문집 p25.
- 이충근, 곽강수, 김준환, 손지영, 양원하. 2011. "미래 기후변화 및 그에 따른 재배시기 조정이 벼 생태형별 생육기간과 생육온도에 미치는 영향." 「한국작물학회지」 56: 233-243
- 이충근, 김준환, 손지영, 양운호, 윤영환, 최경진, 김광수. 2012. 생육모의 연구에 의한 한반도에서 서의 기후변화에 따른 벼 생산성 및 적응기술 평가. 「한국농림기상학회」 14: 207-221.
- 심교문. 2013. 한국의 기후변화 현황과 농업부문 적응대책. 세계곤충학회 1주년 기념 심포지움 및 2013 추계학술발표 대회 논문집 p.49.
- 심교문, 민성현, 김용석, 정명표, 황해, 김석철, 소규호. 2014. "김제 벼-보리 이모작 논에서 벼 재배기간 동안의 순생태계 CO₂ 교환량에 대한 환경요인 분석." 「한국기후변화학회지」 5: 71-81.
- 홍자영, 안중배, 심교문. 2010. "이산화탄소 배증에 따른 동아시아 지역 농업생산성 변화 예측 연구." 2010년도 한국기상학회 봄 학술대회 논문집 p. 127.

- IPCC, 2013. Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M.M.B. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P.M. Midgley (eds)], Cambridge University Press, New York, NY, USA.
- Jones, J.W., G. Hoogenboom, C.H. Porter, K.J. Boote, W.D. Batchelor, L.A. Hunt, P.W. Wilkens, U. Singh, A.J. Gijsman, J.T. Ritchie. 2003. "The DSSAT cropping system model." *Europ. J. Agron.* 18: 235-265.
- Kim, H.-Y., Ko, J., Kang, S., Tenhunen, J. 2013. "Impacts of Climate Change on paddy rice yield in a temperate climate." *Global Change Biology* 19: 548-562.
- Kim, H.-Y., Lim, S.-S., Kwak, JH, Lee, D.-S., Lee, S.-M., Ro, H.-M., Choi, W.-J. 2011. "Dry matter and nitrogen accumulation and partitioning in rice (*Oryza sativa* L.) exposed to experimental warming with elevated CO_2 ." *Plant Soil* 32: 59-71
- Ko, J., Ahuja, L., Saseendran, S., Green, T., Ma, L., Nielsen, D., Walthall, C. 2012. "Climate change impacts on dryland cropping systems in the Central Great Plains, USA." *Climatic Change* 111: 445-472.
- Ko, J., Kim, H.-Y., Jeong, S., An, J.-B., Choi, G., Kang, S., Tenhunen, J. 2014. "Potential impacts of climate change on paddy rice yield in mountainous highland terrains." *J. Crop Sci. Biotechnol.* 17: 117-126.
- Lee, K.-J., Kim, D.-I., Kim, K.-S., Lee, B.-W. 2014. "Genotypic difference in spikelet sterility response to air temperature during the reproductive stage of rice." *J. Crop Sci. Biotechnol.* 17: 53-57.
- Lövenstein, H.M., Rabbinge, R., Keulen, H. van. 1992. World food production, Textbook 2: Biophysical factors in agricultural production. I.o.v. Open Universiteit, Heerlen. 247 pp.
- Yang, W., Cho, H.-S., Kim, M., Seong K.-Y., Park, T.-S., Seo, M.-C. 2013. "Re-examination of the standard cultivation practices of rice in response to climate change in Korea." *J. Crop Sci. Biotechnol.* 16: 85-92.

<2협동과제>

- 공우석. 2005. "지구온난화에 취약한 지표식물 선정." 「한국기상학회지」 41(2-1): 263-273
- 곽한빈, 이우균, 이시영, 원명수, 이명보, 구교상. 2008. "산불 발생 분포와 지형, 지리, 기상 인자 간의 관계 분석." 한국GIS학회 춘·추계 학술대회 pp.465-470.
- 김문일, 이우균, 박태진, 곽한빈, 변정연, 남기준, 이경학, 손영모, 원형규, 이상민. 2012. "간벌강도 및 주기에 따른 동적 흉고직경 생장예측 모형개발: 기존 수확표 자료를 기반으로." 「한국임학회지」 101(2): 266-278
- 김은숙, 김경민, 이정빈, 이승호, 김종찬. 2011. "국가산림자원조사 자료와 임상도를 이용한 지상 부 바이오매스의 공간규모 확장." 「한국임학회지」 100(3): 455-465
- 김찬수, 박지훈, 장동호. 2011. "위성영상과 임상통계를 이용한 충남해안지역의 기후변화에 따른 이산변화." 「환경영향평가」 20(4): 523-538

- 변재균, 이우균, 노대균, 김성호, 최정기, 이영진. 2010. “중부지방 소나무와 참나무류의 반경생장량과 지형, 기후 인자의 관계.” 「한국임학회지」 99(6): 908-913
- 산림청. 2012. 「임업통계 연보」.
- 산림과학원. 2012. 임목재적, 바이오매스 및 임분수확표
- 송국만, 김찬수, 문명옥, 김문홍. 2012. “한라산 소나무림의 분포와 변화.” 「한국환경과학회지」 21(1): 41-47
- 이상태, 배상원, 장석창, 황재홍, 정준모, 김현섭. 2009. “지역별 잣나무의 연륜생장과 기후인자와의 관계연구.” 「한국임학회지」 98(6): 733-739.
- 이우균과 이종수, 2004. “GIS기반산림관리시스템및산림변화예측모델개발.” 「한국임학회지」 2: 371-373.
- 이정택. 2011. 「기후변화교과서, 한반도의 농업과 육상생태계」. 최재천과 최용상 엮음. 도요새. 317-358.
- 임종환, 신준환. 2005. 지구온난화에 따른 산림식생대 이동과 식물계절 변화. 「자연보존」 130: 8-17.
- 임종환. 2009. 농업전망 2009: 제 32장 기후변화에 따른 산림부문 영향과 관리방향. 「농업전망 2009」.
- 전성우, 박용하, 정휘철, 이동근, Yuzuru Matsuoka, Hideo Harasawa, Kiyoshi Takahashi. 2002. 「기후변화에 따른 생태계 영향평가 및 대응방안 연구 III」 한국환경정책평가연구원.
- 정재훈, 허준, 유수홍, 김정민, 이정빈. 2010. “kNN 알고리즘과 계절별 Landsat TM 위성영상을 이용한 단양군 지역의 지상부 바이오매스 탄소저장량 추정.” 「한국지형공간보학회지」 18(4): 119-129
- 최요순, 오승찬, 박형동, 권현호, 윤석호, 고와라. 2009. “폐탄광 지역 산림훼손지 복구를 위한 GIS 집나의 의사결정지원시스템 개발.” 「한국지구시스템공학회지」 46(6): 691-702.
- 한화진, 안소은, 최은진, 한기주, 이정택, 김해동, 손요환, 박용하, 조광우, 윤정호, 이은애, 김승만. 2005. 「기후변화 영향평가 및 적응시스템 구축 I」. 한국환경정책평가연구원. pp.212-234.
- 한화진, 안소은. 2006. 「기후변화 영향평가 및 적응시스템 구축」. 한국환경정책평가연구원. pp.22-23.
- AIM Project Team. 1997. Asian-Pacific Integrated Model. NIER. Japan.
- Akihiko Ito and Takehisa Oikawa. 2002. “A simulation model of the carbon cycle in land ecosystems(Sim-CYCLE): a description based on dry-matter production theory and plot-scale validation” *Ecological Modelling* 151: pp.143 - 176.
- Alcamo, J., Leemans, R. and Kreileman, E. 1998. Global Change Scenarios of the 21st Century, Results from the IMAGE 2.1 Model. Pergamon London. UK. p.296.
- Beaumont, J.L., Lesley, H. and Michael, P. 2005. “Predicting species distributions: use of climatic parameters in BIOCLIM and its impact on predictions of species current and future distribution” *Ecological Modelling* 186: pp.250-269.

- Bolte, A., Ammer, C., Lof, M., Madsen, P., Nabuurs, G., Schall, P., Spathelf, P., Rock, J. 2009. "Adaptive forest management in central Europe: Climate change impacts, strategies and integrative concept." *Scandinavian Journal of Forest Research* 24: 473-482.
- Brauner, M., Weinmeister, W., Agner, P., Vspernik, S., Hoesle, B. 2005. "Forest management decision support for evaluating forest protection effects against rockfall." *Forest Ecology and Management* 207: 75-85.
- Byun, J., Lee, W.K., Kim, M., Kwak, D.A., Kwak, H., Park, T., Byun, W.H., Son, Y., Choi, J.K., Lee, Y.J., Saborowski, J., Chung, D.J., Jung, J.H. 2013. "Radial growth response of *Pinus densiflora* and *Quercus* spp. to topographic and climatic factors in South Korea." *Journal of Plant Ecology* 6(5): 380-392.
- Cao, M. and Woodward. F.I. 1998. "Net primary and ecosystem production and carbon stocks of terrestrial ecosystems and their responses to climate change" *Global Change Biology* 4(2): 185-198.
- Choi, S.H. 2008. "Simulating the Response of Ecosystem to Climate Change with Mapss-Century Model 1(MC1) in Korea" IUFRO: International Union of Forest Research Organizations Conference. Kangwon National University.(14-17 October). p.71-75.
- Chun, J.H., Lim, J., Lee, D.K. 2007. Biomass Estimation of Gwangneung Catchment Area with Landsat ETM+ Image. *Journal of Korea Forest Society* 96(5): 591-601.
- Dale, V.H., Joyce, L.A., McNulty, S., Neilsom, R.P., Ayres, M.P., Flannigan, M.D., Hanson, P.H., Irland, L.C., Lugo, A.E., Peterson, C.J., Simberloff, D., Swanson, F.J., Stocks, B.J., Wotton, B.M. Climate Change and Forest Disturbances. *Journal of BioScience* 51(9): 723-734
- Field, C. B., Randerson, J.T. and Malmstrom, C.M. 1995. "Global Net Primary Production: Combining Ecology and Remote Sensing" *Remote sensing Environment* 51:74-88.
- Foley, J.A. et al. 1996. "An integrated biosphere model of land surface processes, Terrestrial carbon balance and vegetation dynamics" *Global Biogeochemical Cycle* 10: 603-628.
- Guisan, A. and Edwards, T.C. 2002. "Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: setting the scene." *Ecological Modelling* 157(2-3): 89-100.
- Haxeltine, A. and Prentice C.I. 1996. "BIOME3: An Equilibrium Terrestrial Biosphere Model Based on Eco physiological Constraints, Resource Availability, and Competition among Plant Functional Type" *Global Biogeochemical Cycle* 10(4): 693-709.
- Hastie, T. and Tibshirani, R. 1990. *Generalized Additive Models*. Chapman & Hall, London.
- Holdridge, L.R. 1947. "Determination of world plant formations from simple climatic data." *Science* 105(2727): 367-368
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Core Writing Team, Pachauri, R. K. and Reisinger, A.(Eds.). IPCC, Geneva, Switzerland. pp. 104

- Johnson, K.N. and Stuart T.W. 1987. *FORPLAN version 2: mathematical programmer's guide*. Washington, D.C.: U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Land Management Planning Systems Section, 1987. Accessed via <http://ncseonline.org/NCSSF/DSS/Documents/docs/Johnson2001.pdf>
- Jung, H.C. et al. 2003. "Evaluation of Vegetation Adaptability to Climate Change on the Korean Peninsula using Forest Moving Velocity" *Korea Environment Institute* 12(5): 383-393.
- Kent, B., Bare, B., Field, R.C., Bradley, G.A. Natural resource land management planning using large-scale linear programs: the USDA Forest Service experience with FORPLAN. *Oper Res* 39: 13-27.
- Kim, J.U. and Lee, D.K. 2006. "Vulnerability Assessment of forest Vegetations by climate change in Korea." *The Korea Society for Environmental Restoration and Revegetation Technology* 9(5): 32-40.
- Kwak, D.A., Lee, W.K., Son, Y., Choi, S., Yoo, S., Chung, D.J., Lee, S.H., Kim, S.H., Choi, J.K., Lee, Y.J., Byun, W.H. 2012. "Predicting distributional change of forest cover and volume in future climate of South Korea." *Forest Science and Technology* 8(2): 105-115
- Lee, D.K., Kim, J.U. and Jung, H.C. 2006. "A comparative Study on General Circulation Model and Regional Climate Model for Impact Assessment of Climate Changes." *Korea Environmental Impact Assessment* 15(4): 249-258.
- Lee, M.A. 2008. A study on the vulnerability of forest ecosystems to climate change in Korea. Graduate school Korea University. Dissertation. Master.
- Leung, Y. 1997. *Intelligent Spatial Decision Support Systems*. Springer, Berlin.
- Lecture, M.J., Brooks, R.T. 2005. "Decision support for multiple purpose forestry." *Forest Ecology and Management*. 207: 1-3.
- Lim, J.H. 1998. A forest dynamics model based on topographically-induced heterogeneity in solar radiation and soil moisture on the Kwangneung Experimental Forest. Graduate school Seoul National University. Dissertation. Doctor of Philosophy.
- Nemani, R.R., Keeling, C.D., Hashimoto, H., Jolly, W.M, Piper, Tucker, C. J. 2003. "Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999." *Science* 300: 1560-1563.
- Parton, W.J. et al. 1987. "Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands" *Soil science society of America* 51: 1173-1179.
- Rauscher, H. 1999. "Ecosystem management decision support for federal forests in the United States: a review." *Forest Ecol Manage* 114: 173-197.
- Reynold, K.M., Twery, M., Lexer, M.J., Vacik, H., Ray, D., Shao, G., Borges, J.G. 2008. Chapter 60: Decision Supporting Systems in Forest Management. *Handbook on Decision Support Systems* 2. International Handbooks Information System
- Shugart H.H, and D.C. West. 1977. "Development of and appalachian deciduouse forest succession model and its application to assessment of the impact of the chestnue blight." *journal of environmental management*. 51:161-79.

- Stich, S. et al. 2003. "Evaluation of ecosystem dynamics, global vegetation model" *Global change Biology* 9: 161-185.
- Thornley, J.H.M., Fowler, D., Cannell, M.G.R. 1991. "Terrestrial carbon storage resulting from CO_2 and nitrogen fertilization in temperate grasslands." *Plant, Cell and Environment* 14: 1007-1011.
- Trevor, H., Robert, T. 1986. "Generalized Additive Models." *Statistical Science* 1(3): 297-318.
- Twery, M.J., Knopp, P.D., Thomas, S.A., Rauscher, H.M., Nute, D.E., Potter, W.D. Maier, F. Wang, J., Dass, M., Uchiyama, H., Glende, A., Hoffman, R.E. 2005. "NED-2: A decision support system for integrated forest ecosystem management." *Comput Electron Agr*, 49: 24-43.
- Tyree, M.T. and Ewers, F.W. 1991. "The hydraulic architecture of trees and other woody plants." *New Phytologist*, 119: 345-360.
- UNFCCC. Secretariat. 2005. *Compendium on Methods and Tools to Evaluate Impacts of and Vulnerability and Adaptation to Climate Change*. Stratus Consulting Inc. pp.143-155.
- Watanabe, T. et al. 2004. "Developing a multilayered integrated numerical model of surface physics-growing plants interaction (MINoSGI)" *Global Change Biology* 10: pp.963-982.
- Yu, H., Lee, W.K., Son, Y., Kwak, D.A., Nam, K., Kim, M., Byun, J., Lee, S., Kwon, T. 2013. Estimating carbon stocks in Korean forests between 2010 and 2110: a prediction based on forest volume-age relationships. *Forest Science and Technology* 9(2): 105-110
- Xu, Z., 곽한빈, 이우균, 박태진, 권태협, 박선민. 2011. "GIS를 이용한 기후변화에 따른 산사태 취약성 평가." 「한국기후변화학회지」 2(1): 43-54

<3협동과제>

- 고재경 외. 2010. "지방자치단체 기후변화 취약성 평가에 관한 연구: 경기도 기초지자체를 중심으로." 「환경정책」 18(2): 79-105.
- 농림축산식품부. 2014. 「농식품부, 기후변화 영향·취약성평가 법적 근거 최초 마련」. 보도자료. 2014년 11월 20일.
- 유가영 외. 2008. "기후변화 취약성 평가지표의 개발 및 도입방안." 한국환경정책평가연구원.
- 이경선, 이시마츠 아츠시. 2008. "이산화탄소 증가에 의한 해양산성화가 해양동물에 미치는 영향." 한국해양학회 추계학술대회 초록집 p58.
- 이버들 외. 2011. "국내 수산 부문의 지역별 기후변화 취약성 평가 연구." 「수상경영론집」 42(1): 57-70.
- 이상호 외. 2014. "농업부문 기후변화 취약성에 따른 유형분류 및 요인분석." 「농업경제연구」 55(3): 1-24.
- 이정석 외 6인. 2006. "해수중 용존 CO_2 농도 증가가 해양생물 및 해양생태계에 미치는 영향: 국내외 사례 연구." 「한국해양환경공학회지」 9(4): 243-252.
- 일본 기상청(<http://www.jma.go.jp>)
- 장창익·이재봉, 2010, "기후변화에 따른 수산분야의 영향과 대책", 기후변화에 대한 농수산학 분야의 현황과 대책, 한국과학기술한림원.

- 정명생·정명화·임경희. 2007. "기후 변화가 수산업에 미치는 영향." KMI 해양수산 현안분석. 한국해양수산개발원.
- 한국농촌경제연구원. 2012. 「식품수급표」.
- 한인성. 2013. 「수산자원에 영향을 미치는 기후변화 요인 및 프로세스」. 미발간 자료.
- Allison, E.H., et al. 2009. "Vulnerability of national economies to the impacts of climate change on fisheries." *Fish and Fisheries*.
- Cheung, W. W. *et al.* 2010. "Large-scale redistribution of maximum fisheries catch potential in the global ocean under climate change," *Global Change Biology* 16: 24-35.
- Cheung, W. W. L., Sarmiento, J. L., Dunne, J., Frölicher, T. L., Lam, V. W. Y., Palomares, M. L. D., Watson, R. and Pauly, D. 2012. "Shrinking of fishes exacerbates impacts of global ocean changes on marine ecosystems," *Nature Climate Change*, published online, September.
- Clarke, R. P., Yoshimoto, S. S. and Pooley, S. G. 1992. "A Bioeconomic Analysis of the Northwestern Hawaiian Islands Lobster Fishery". *Marine Resource Economics* 7: 115-140.
- Feely, R., S. Doney and S. Cooley. 2009. "Ocean Acidification : present condition and future changes in a high- CO_2 world." *Oceanography* 22(4): 36-47.
- Fox, W. W. 1970. "An exponential surplus-yield model for optimizing exploited fish population." *Transactions of the American Fish Societ*, 99: 80-88.
- Gazeau, F., C. Quiblier, J. Jansen, J.-P. Gattuso, J. Middelburg and C. Heip. 2007. "Impact of elevated CO_2 on Shellfish calcification. Geophy." *Res. Lett*, 34: 1-5.
- IPCC. 2007. Summary for Policymakers, *Climate change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. 기상청. 기후변화 2007 종합보고서.
- IPSO. 2011. International earth system expert workshop on ocean stresses and impact, Summary report, IPSO Oxford.
- IUCN. 2008. Ocean Acidification -seas turning sour. Briefing paper
- Levitus, S., J. Antonov and T. P. Boye. 2005. Warming of the world ocean, 1955 - 2003. *Geophys. Res. Lett.* 32(2).
- Pecl G, Frusher S, Gardner C, Haward M, Hobday A, Jennings S, Nursey-Bray M, Punt A, Revill H, van Putten I. 2009. The east coast Tasmanian rock lobster fishery - . vulnerability to climate change impacts and adaptation response options. Report to the Department of Climate Change, Australia.
- Schaefer, M. B. 1954 "Some Aspects of the Dynamics of Populations Important to the Management of the Commercial Marine Fisheries." *Inter-American Tropical Tuna Commission Bulletin* 1: 25-56.

<4협동과제>

- 강금지, 노성윤, 류혜숙, 이해숙, 최성숙. 2008. 「쉽게 배우는 영양관정」. 수확사.

- 강기경, 이덕배, 나영은, 최인명, 이충근, 박규현, 김진호. 2011. 기후변화와 우리농업(II): 도전과 과제. RDA Interrobang 33: 1-20.
- 곽노성. 2011. 「식품 분야 탄소성적 표시제 운영현황 및 개선과제」. 한국보건사회연구원 국민생활체육회. 2009. 「2009 생활체육 노인건강증진 프로그램 매뉴얼」.
- 김남규. 2008. “장바구니 크기가 연관규칙 척도의 정확성에 미치는 영향”. 「경영정보학연구」 18(2): 95-114.
- 김소연, 윤미은, 승정자. 2002. 「케어복지사를 위한 노인영양」. 교육과학사.
- 김용수, 김우선, 최한주, 이종화, 정명섭, 오상석. 2009. 「기후변화에 따른 식중독 발생 영향 분석 및 관리 체계 연구」. 한국보건산업진흥원/이화여자대학교.
- 김인현. 2012. 빅데이터 가치와 도입 전략, 2012 Big Data 검색 분석 기술 Insight
- 김정선, 정기혜, 신호성, 정진욱, 윤시몬, 김은정. 2008. 「국제 기후변화에 따른 식품안전관리 대책 추진방안」. 한국보건사회연구원/식품의약품안전청.
- 김정선. 2011. “기후변화와 식품안전에 대한 국민인식”. 보건복지 Issue & Focus. 2011년 제117호 pp.1-8.
- 김정선, 정진욱, 윤시몬, 이수형, 박지은, 김경은. 2011. 「기후변화에 따른 식품안전사고 위기대응 방안 연구」. 한국보건사회연구원.
- 김창길. 2007. 「기후변화협약 대응 방안 연구」. 한국농촌경제연구원.
- 김창길, 심교문. 2009. “기후변화가 농업부문에 미치는 영향”, 「농업전망 2009」.
- 김창길. 2011. “기후변화가 농산물생산유통에 미치는 영향”, 농식품신유통연구원 심포지엄 자료집.
- 김희선. 2008. “기후변화와 식품안전”. 제32회 식품안전열린포럼 발표자료.
- 대한민국정부. 2012. 제2차 저출산고령사회 기본계획.
- 문은숙. 2010. 「식품이력추적관리제도에 대한 사회적 인지도 확보를 위한 운영방안 연구」. 식품의약품안전평가원
- 문진산. 2010. “기후변화가 동물 질병과 축산물 공급에 미치는 영향 및 이에 대한 대응방안”. 한국환경농학회 학술대회집.
- 박갑만. 2013. “한국산 담수어류의 기생충 감염 실태 및 기후변화에서 중간숙주로서 병원체 전파에 미치는 영향.” 「한국자연보호학회지」 7(2): 99-108.
- 박경진, 하상도, 오덕환. 2013. “미생물학적 식품안전을 위한 기후변화 영향 식품 및 식중독 세균 우선순위 결정.” 「한국식품위생안전성학회지」 28(1): 36-40.
- 박기환. 2009. 「건강기능식품 이력추적관리제도 적용 가이드라인 연구」. 식품의약품안전평가원
- 박영란, 홍백의. 2011. 「베이비부머 은퇴 후 생활지원을 위한 신복지모형 개발 연구」. 보건복지부.
- 박우창, 승현우, 용환승. 2003. 「데이터마이닝 : 개념 및 기법」. 서울: 자유아카데미
- 박혜련. 1996. “연령층별 영양상태”. 「지역사회영향학회지」 1(2). pp.301~332.
- 보건복지부. 2010. 「2009 국민건강통계」.
- 신승식. 2001). 해양수산부문 청정개발체제 도입방안 연구, 한국해양수산개발원
- 신호성, 이수형, 김동진, 이종경, 최성은(2009). 기후변화에 따른 식품안전 분야의 사회 경제적 손실비용 평가, 한국보건사회연구원/식품의약품안전청.
- 안현철, 한인구, 김경재, 연관규칙기법과 분류모형을 결합한 상품추천시스템: G인터넛

- 옥현이, 심재호, 박기환, 전향숙(2013). 기후변화와 식품 중 아플라톡신의 오염 예방 전략, 한국식품위생안전성학회.
- 우희동. 2010. 「유전자재조합원료 이력관리 현장적용을 위한 연구」 식품의약품안전평가원
- 윤성준. 2005. “데이터마이닝 기법을 통한 백화점의 고객이탈예측 모형 연구.” 「한국마케팅저널」 6(4): 45-72.
- 윤태중, 조기중, 이미경, 정명섭, 배연재. 2010. “기후변화와 식품해충.” 「곤충연구지」 26: 27-30.
- 이미경, 김준영, 김종성. 2013. “기후변화가 살충제 사용에 미치는 영향.” 한국농약과학회 학술발표대회 논문집 p.139.
- 이민석 .2011. 「식품이력추적관리제도의 소비자 인지도 조사, 홍보 방안 연구」. 식품의약품안전평가원.
- 이연정, 김경재. 2013. “다중모형조합기법을 이용한 상품추천시스템.” 「지능정보연구」 19(2): 39-54.
- 장영주. 2013. 식품이력추적관리제도 의무화 관련. 입법조사회답
- 전성우 외. 2010. 「기후변화 적응정책 평가 및 통합모델 개발」. 한국환경정책 평가연구원/국가기후변화적응센터.
- 전주상, 김종성. 2013. “기후변화 대응정책 수행체계에 관한 연구 : 영국과 미국 사례의 비교 분석”. 「사회과학연구」 24(1): 171-192. 충남대학교 사회과학연구소.
- 정기혜. 2009. 「2009년도 식품안전관리의 변화와 전망」. 한국보건사회연구원.
- 정기혜. 2010. 「기후변화에 따른 식품안전관리 및 국가 대응을 위한 아젠다 개발」. 한국보건사회연구원.
- 조인동, 김남규. 2011. “소셜 네트워크와 데이터 마이닝 기법을 활용한 학문 분야 중심 및 융합 키워드 추천 서비스.” 「지능정보연구」 17(1): 127-138.
- 주문배. 2011. 「우리나라의 품목별 식품 이력추적제도의 추진 현황과 시사점」. 한국해양수산개발원.
- 주용성 외. 2012. 「국내 기후 권역별 식중독발생 예측모델 개발」 서울: 식품의약품안전처 차명화, 양지혜, 오세욱, 이화정, 김동술, 정명섭, 류경. 2010. “기후변화에 따른 식품위기관리 대응 시스템 구축방안”, *Safe Food*, 5(3). pp.19-26.
- 최광림. 2011. “산업계 기후변화 경쟁력지수 개발 및 적용 연구.” 건국대학교 대학원.
- 최광선. 2012. “SNS 시대의 하이브리드 빅데이터 분석 기술 및 사례.” 2012 *Big Data* 검색 분석기술 *Insight*
- 최지현. 2011. “기후변화에 따른 외식산업 영향과 대응전략”. 식품·외식산업 기후변화 대응전략 심포지엄 자료집.
- 한국농수산식품유통공사. 2011. 「식품산업 분야별 원료소비 실태조사」
- 한국보건사회연구원/식품의약품안전청 2009. 「기후변화에 따른 식중독 발생 영향 분석 및 관리체계 연구」.
- 한화진 외 12인. 2007. 「기후변화 영향평가 및 적응시스템 구축 III」. 연구보고서 RE-01. 한국환경정책·평가연구원.
- 해양경찰청. 2009. 탄소발자국 에너지절약 생활화를 위한 지침서.
- 허행금. 2013. 기후변화에 따른 식품안전에 대한 영양사 및 영양교사의 인식도.

- 현윤진, 한희준, 최희석, 박준형, 이규하, 곽기영, 김남규. 2013. "텍스트 분석을 활용한 국가 현안 대응 R&D 정보 패키징 방법론." *Journal of Information Applications & Management* 20(3): 231-257.
- 황진환, 박광석, 김형석. 2007. 「기후변화 대응. 해양수산부문 종합대책연구」. 해양수산부.
 소 및 쇠고기 이력에 관한 법률
 식품위생법
 농수산물품질관리법
- Agrawal, R. and Srikant, R. 1994. Fast Algorithms for Mining Association Rules, International Conference on Very Large DataBases, Santiago, Chile. pp.487-499.
- Aggarwal, P., Joshi, P.K., Ingram, J.S., and Gupta, R.K. 2004. "Adapting food systems of the Indo-Gangetic plains to global environmental change: key information needs to improve policy formulation." *Environmental Science and Policy* 7(6):487-498.
- Albright, R. 2006. *Taming Text with the SVD*, SAS Institute Inc.
- Alisystair B.A. Boxall, Anthony Hardy, Sabine Beulke. 2009. "Impacts of climate change on indirect human exposure to pathogens and chemicals from agriculture." *Environmental health perspectives*.
- Aparna Lal, Michael G. Baker, Simon Hales, Nigel P. French. 2013. Potential Effects of Global Environmental Changes on Cryptosporidiosis and Giardiasis Transmissions.
- Aparna Lal, Takayoshi Ikeda, Nigel French, Michael Baker, Simon Hales. 2013. Climate Variability, Weather, and Enteric Disease Incidence in New Zealand: Time Series Analysis.
- Cassman, K.G., Dobermann, A., Walters, D.T., and Yang, H. 2003. "Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality." *Annual Review of Environment and Resources* 28: 315-358.
- C-H Von Bonsdorff, L. Maunula. 2013. "Impact of Climate Change and Weather Variability on Viral Pathogens in Food and Water." *Viruses in food and water: risks, surveillance and control 2013*. pp.458-482
- Carlo Fezzi, Ian Bateman, Tom Askew, Paul Munday, Unai Pascual, Antara Sen, Amii Harwood. 2014. *Valuing Provisioning Ecosystem Services in Agriculture: The Impact of Climate Change on Food Production in the United Kingdom*. Springer Science + Business Media.
- Center for Disease Control. 2014. Trends in Foodborne Illness in the United States.
- Dahlgren, G. and Whitehead, M. 1991. *Policies and Strategies to Promote Social Equity in Health*. Stockholm: Institute for Futures Studies.
- Ericksen, P.J. 2008. "Conceptualizing food systems for global environmental change research." *Global Environmental Change* 18(1): 234-245.
- Eddy Moors, Tanya Singh, Christian Siderius, Sneha Balakrishnan, Arabinda Mishra(2013). Climate Change and Waterborne Diarrhoea in Northern India: Impacts and Adaptation Strategies.

- European Food Information Council. 2014. Climate Change: Possible Implications for Food Safety?
- Erin Urquhart, Benjamin Zaitchik, Darryn Waugh, Seth Guikema, Carlos Del Castillo. 2014. Uncertainty in Model Predictions of *Vibrio vulnificus* Response to Climate Variability and Change: A Chesapeake Bay Case Study.
- Fried. P. F., Tangen, C. M., Walston, J., Newman, A. B., Hirsch, C., Gottdiener, J., Seeman, T., Tracy, R., Kop, W. J., Burke, G., and Mcburnie. 2001. Frailty in older adults: evidence for a phenotype. *Journal of Gerontology: Medical Sciences* 56A(3): M146-M157.
- Fan, W., Wallace, W., Rich, S., and Zhang, Z. 2006. "Tapping the Power of Text Mining" *Communications of the ACM* 49(9): 76-82.
- FAO. 2008. Climate change and food safety: A framework document.
- FAO. 2008. Climate change and food security.
- FAO. 2012. Food security and climate change the highlevel panel of experts.
- Hearst, M. A. 1999. "Untangling Text Data Mining." in Proceedings of the 37th ACL
- Han, J. and Kamber, M. 2011. *Data Mining: Concepts and Techniques(3rd ed.)*. Morgan Kaufmann Publishers
- Hyun-Soo Kang. 2013. An Empirical Analysis of the Linkages among Food Security, Agflation, and Climate Change. 한국무역연구원.
- H.J. Van der Fels-Klerx, Esther D. van Asselt, Marianne S. Madsen, Jorgen Olesen. 2013. Impact of Climate Change Effects on Contamination of Cereal Grains with Deoxynivalenol.
- Hari C. Sharmaa. 2014. Climate Change Effects on Insects: Implications for Crop Protection and Food Security, Taylor & Francis.
- IPCC. 2007a. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC. 2007b. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- IPCC. 2007c. Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Ian Young, Kathleen Gropp, Aamir Fazil, Ben Smith. 2014. Knowledge synthesis to support risk assessment of climate change impacts on food and water safety: A case study of the effects of water temperature and salinity on *Vibrio parahaemolyticus* in raw oysters and harvest waters.

- I. Castro-banez, M.I. Gil, J.A. Tudela, A. Allende. 2014. Microbial safety considerations of flooding in primary production of leafy greens: A case study.
- IPCC. 2014. Climate Change 2014L Impacts, Adaptation, and Vulnerability.
- Jun BH·Lee HG. 2000. An investigation of the intake of the health food among the salarymen in Seoul. *Kor J Soc Food Sci* 16(1): 9-16.
- Jack Schijven, Martijn Bouwknegt, Ana Maria de Roda Husman, Saskia Rutjes, Bertrand Sudre, Jonathan E. Suk and Jan C. Semenza. 2013. A Decision Support Tool to Compare Waterborne and Foodborne Infection and/or Illness Risks Associated with Climate Change.
- Joe Satran. 2013. Vibriosis, Deadly Disease Associated With Raw Oysters, May Get More Common As Ocean Warms.
- Kang MH. 1994. Nutritional status of Korean elderly people. *Korean J of Nutr* 24(6): 616-636.
- Klementina Kirezieva, Liesbeth Jacxsens, Martinus van Boekel, Pieternel Luning. 2014. Towards strategies to adapt to pressures on safety of fresh produce due to climate change.
- Kevin Holvoet, Imca Sampers, Marleen Seynnaeve, Mieke Uyttendaele. 2014. Relationships among hygiene indicators and enteric pathogens in irrigation water, soil and lettuce and the impact of climatic conditions on contamination in the lettuce primary production.
- Lippincott Mercer. 2006. Serving the climate-change-conscious consumer. USA.
- Liu C. Hofstra N. Franz E. 2013. Impacts of climate change on the microbial safety of pre-harvest leafy green vegetables as indicated by *Escherichia coli* O157 and *Salmonella* spp.
- Liming Ye, Wei Xiong, Zhengguo Li, Peng Yang, Wenbin Wu, Guixia Yang, Yijiang Fu, Jinqui Zou, Zhongxin Chen, Eric Van Ranst, Huajun Tang. 2013. Climate change impact on China food security in 2050. EDP SCIENCES.
- Metzler, D., Bernstein, Y., Crofit, W. B., Moffat, A., and Zobel, J. 2005. Similarity Measures for Tracking Information Flow. in Proceedings of CIKM, Bremen, Germany
- Mooney, R. J. and Bunescu, R. 2006. Mining Knowledge from Text using Information Extraction.” *CM SIGKDD Explorations* 7(1): 3-10.
- M.Miraglia, H.J.P. Marvin, G.A. Kleter, P.Battilani. 2009. Climate change and food safety: An emerging issue with special focus on Europe, Food and chemical toxicology.
- Marvin, H. J. P., Kleter, G. A., Van der Fels-Klerx, H. J. (Noordam, M. Y., Franz, E., Willems, D. J. M. 2013. Proactive systems for early warning of potential impacts of natural disasters on food safety: Climate-change-induced extreme events as case in point, Elsevier Science B.V., Amsterdam.
- Mirna Panic, James D. Ford. 2013. A Review of National-Level Adaptation Planning with Regards to the Risks Posed by Climate Change on Infectious Diseases in 14 OECD Nations.
- Mieke Uyttendaele, Cheng Liu, Nynke Hofstra. 2013. Impact of Climate Change on Food Safety: The Approach Taken in EU FP7 Veg-i-Trade.
- M. Hashizume. 2013. Precipitation and Flood Hazards: Health Effects, Risks, and Impacts.

- Picinin, L.C.A., Cerqueira, M.M.O.P. Vargas, E.A. Lana, A.M.Q. Toaldo, I.M, Bordignon-Luiz, M.T. 2013. Influence of climate conditions on aflatoxin M1 contamination in raw milk from Minas Gerais State, Brazil, Elsevier Science B.V., Amsterdam.
- Paterson, R. R. M. Sariah, M. Lima, N. 2013. *How will climate change affect oil palm fungal diseases?* Elsevier Science B.V., Amsterdam.
- Philip E. Hulme. 2014. *Invasive Species Challenge the Global Response to Emerging Diseases*
- Rijsbergen, C. J. V. 1979. *Information Retrieval(2nd ed.)*. Butterworth, London
- Reem Deeb. 2013. Climate Change Effects on Vibrio Bacteria in the Winyah Bay Estuary and the Projected Spread of Vibrio under Future Climatic Scenarios.
- R. Russell Paterson, Nelson Lima, Marta taniwaki. 2014. Coffee, mycotoxins and climate change.
- Salton, G., Wong, A., and Yang, C. S. 1975. "A Vector Space Model for Automatic Indexing." *Communications of the ACM* 18(11): 613-620.
- Sebastiani, F. 2002. Machine Learning in Automated Text Categorization. *ACM Computing Surveys* 34(1): 1-47.
- Sebastiani, F. 2006. *Classification of Text, Automatic, The Encyclopedia of Language and Linguistics 14*. 2nd edition. Elsevier Science Pub.
- Stanvrianou, A., Andritsos, P., and Nicoloyannis, N. 2007. "Overview and Semantic Issues of Text Mining." *ACM SIGMOD Record* 36(3): 23-34.
- Sonja J. Vermeulen, Bruce M. Campbell and John S.I. Ingram. 2012. *Climate Change and Food Systems*.
- Sangam Dwivedi, Kanwar Sahrawat, Hari Upadhyaya, Rodomiro Ortiz. 2013. *Food, Nutrition and Agrobiodiversity Under Global Climate Change*. ACADEMIC PRESS.
- Serge Morand, Katharine A. Owers, Agnes Waret-Szkuta, K. Marie McIntyre & Matthew Baylis. 2013. Climate Variability and Outbreaks of Infectious Diseases in Europe.
- UEF-US. 2011. The Food Gap - The Impacts of Climate Change on Food Production: Perspective by 2020. Alexandria, VA 22130, USA.
- Victoria Courtland. 2014. Rising Ocean Temperatures Put New England Oyster Industry in Hot Water .
- Witten, I. H. 2004. Text Mining, Practical Handbook of Internet Computing, edited by M. P. Singh, CRC Press
- Wang, W. F., Chung, Y. L., Hus, M. H., and Keh, A. C. 2007. A Personalized Recommender System for the Cosmetic Business. *Expert Systems with Applications* 26(3): 427-434.
- Wenbin Wu, Peter H. Verburg, Huajun Tang. 2014. Climate change and the food production system: impacts and adaptation in China, Springer Berlin Heidelberg.
- Yong Soo Kim, Ki Hwan Park, Hyang Sook Chun, Changsun Choi, Gyung Jin Bahk. 2014. Correlations Between Climatic Conditions and Foodborne Disease.
- Zohra Aslam, Mukhtar Ahmed, Muhammad Sajad, Muhammad Asif, Muhammad Akmal, Fahad Karim Awan, Waqas Ijaz, Raseela Ashraf, Jabar Zaman Khan Khattak. 2013. No title. WFL PUBLISHER.

Zhang, X., Halder, J., White, R. P., Hughes, D. J., Ye, Z., Wang, C., Xu, R., Gan, B., Fitt, B. D.(2014). Climate change increases risk of fusarium ear blight on wheat in central China, Blackwel Publishing Ltd.

<https://www.fishtrace.go.kr>

<http://cattle.mtrace.go.kr>

<http://tfood.go.kr>

<5세부협동>

감미아, 송민. 2012. "텍스트 마이닝을 활용한 신문사에 따른 내용 및 논조 차이점 분석." 「지능 정보연구」 18(3), 53-77.

고봉현. 2010. "기후변화가 제주 수산업에 미치는 영향과 시사점". 「제주발전포럼」 100: 68-80.

기상청. 2011. 「기후변화 시나리오 이해 및 활용 사례집」.

김대준, 김수옥, 문경환, 윤진일. 2012. "RCP8.5 기후조건에 따른 작물생육모의에 근거한 우리나라 곡물생산 전망". 「한국농림기상학회지」 14(3): 132-141.

김민경, 허승오, 권순익, 정구복, 손연규, 하상건, 이택배. 2010. "우리나라 강우량 변화 시나리오에 따른 밭토양의 토양 유실량 변화 예측." 「한국토양비료학회지」 43(6): 789-792.

김수연, 정영미. 2006. "텍스트 마이닝 기법을 이용한 연관용어 선정에 관한 실험적 연구." 「한국정보관리학회지」 23(3): 147-165.

김창길, 정학균, 한석호, 김정승, 문동현. 2012. 「기후변화가 식량공급에 미치는 영향분석과 대응방안」. 연구보고서 R663. 한국농촌경제연구원.

김길준, 이순희, 장광훈. 1996. 「프로그래밍과 자연어 처리」. 흥진출판사.

김수옥, 정유란, 김승희, 최인명, 윤진일. 2009. "미래 시나리오가 기후조건하에서의 사과 '후시' 품종 재배적지 탐색." 「한국농림기상학회지」 11(4): 162~173.

김진욱, 이선숙, 용환승. 2011. "한글 텍스트의 오피니언 분류 자동화 기법." 「정보과학회논문지 : 데이터베이스」 38(6): 423-428.

민기영, 김훈태, 지용구. 2014. "철강산업 트렌드 분석을 위한 텍스트 마이닝 도입 연구 : P社 사례를 중심으로." 「한국전자거래학회지」 19(3): 51-64.

변정연, 이우균, 최성호, 오수현, 유성진, 권태성, 정주한, 우재욱. 2012. "시공간 정보기반 산림생태계의 기후변화 취약성 평가." 「대한원격탐사학회지」 28(1): 159~169.

송혜지, 박경수, 정혜은, 송민. 2013. "텍스트 마이닝 기법을 활용한 한국의 경제연구 동향 분석." 한국정보관리학회 학술대회 논문집. pp.47-50.

신용희. 2013. 아태지역 쌀 생산성에 대한 기후변화 영향평가. APCC Research Report. 2013-05: 3-50.

신형진, 박근애, 박민지, 김성준. 2012. "미래 기후변화 시나리오 MIROC3.2 A1B에 따른 우리나라 산림식생분포의 변화 전망." 「한국지리정보학회지」 15(1): 64-76.

신정욱, 윤성철. 2011. "한국의 2011-2100년 기후변화가 고추 탄저병 살균제 살포에 미치는 영향." 「한국농림기상학회지」 13(1): 10~19.

신진철, 이충근, 윤영환, 강양순. 2000. "기후변화에 따른 작물 생산성반응과 기술적 대응." 한국작물학회 학술발표대회 논문집. 45(2): 12-27.

- 심교문, 노기안, 소규호, 김건엽, 정현철, 이덕배. (2010). 지구온난화에 따른 벼 생육 및 생산성 변화 예측. 한국기후변화학회지」 1(2): 121-131.
- 원진영, 김대곤. 2014. "텍스트마이닝을 활용한 사회위험 이슈 도출." 「한국위기관리논집」 10(7): 33-52.
- 윤동균, 정상옥, 김성준. 2011. "기후변화가 논 필요수량에 미치는 영향." 「한국농공학회」 53(4), 39-47.
- 이상철, 최성호, 이우균. 2011. "기후변화 시나리오에 따른 산림분포 취약성 평가." 「한국임학회지」 100(2): 256-265.
- 이상혁, 최재용, 이유미. 2011. "기후변화에 따른 우리나라 미선나무의 분포변화 예측." 「농업과 학연구」 38(2): 191-404.
- 이영섭 역서. 2003. 「데이터마이닝 Cookbook」. 교우사.
- 이재운, 문주영, 김희정. 2007. "텍스트 마이닝을 이용한 국내 기록관리학 분야 지적구조 분석." 「한국문헌정보학회지」 41(1): 345-372.
- 이충근, 김준환, 손지영, 양운호, 윤영환, 최경진, 김광수. 2012. "생육모의 연구에 의한 한반도에서의 기후변화에 따른 벼 생산성 및 적응기술 평가." 「한국농림기상학회지」 14(4): 207-221.
- 이충근, 윤영환, 김준환, 손지영, 이은영, 김연규. 2009. "작물모형 이용 미래 기후변화 시나리오에 따른 한반도 쌀 수량성 변화 분석." 한국작물학회 추계학술발표회. pp.55-55.
- 이지은. 2002. 「Intelligent Miner의 마이닝 알고리즘 III」. IBM.
- 이태석, 최진용, 유승환, 이상현, 오윤경. 2012. "기후변화 시나리오에 따른 미래 논벼의 소비수량 및 생산량 변화 분석." 「한국농공학회」 54(1): 47-54.
- 전성해. 2009. "특허정보 분석을 위한 효율적인 텍스트 마이닝." KIIS 춘계학술대회논문집 19(1): 255-257.
- 장남식, 홍성완, 장재호. 1999. 「데이터 마이닝」. 대청미디어.
- 장창익, 이재봉. 2010. 「기후변화에 따른 수산분야의 영향과 대책」. 한림연구보고서 66: 275-315.
- 정유란, 김수옥, 윤진일. 2008. "최저기온과 휴면심도 기반의 동해위험도를 활용한 'Campbell Early' 포도의 내동성 지도 제작." 「한국농림기상학회지」 10(4): 121-131.
- 정유란, 김진희, 김수옥, 서희철, 윤진일. 2009. "겨울기온 상승에 따른 복숭아 나무 '장호원황도' 품종의 결과지에 대한 동상해위험 공간분석." 「한국농림기상학회지」 11(4): 221-232.
- 정유란, 조경숙, 이변우. 2006. "지구온난화에 따른 우리나라 벼농사지대의 생산성 재평가." 「한국농림기상학회지」 8(4): 229~241.
- 조성진, 조창현. 2011. "농경사회의 기후변화 영향 및 적응에 관한 ABMS 활용 연구." 「기후연구」 6(2): 89-99.
- 한국정보화진흥원. 2012. 「Big Data 글로벌 10대 선진 사례」.
- 한국해양수산개발원. 2007. 「기후 변화가 수산업에 미치는 영향」.
- 한화진. 2010. 「기후변화 영향평가 및 적응시스템 구축」. 한국환경정책·평가연구원 연구보고서 RE-01.
- 홍은미, 최진용, 이상현, 유승환, 강문성. 2009. "LARS-WG를 이용한 기후변화에 따른 논벼 증발산량 산정." 「한국농공학회논문집」 51(3): 25-35

- Nkomozepe, T, Chung, S. O.. 2011. "기후변화가 짐바브웨 옥수수 수확량에 미치는 영향 모의". 「한국농공학회 논문집」 53(3): 65-73.
- Bae, K., Park, J-H., Kim, J., and Lee, Y-S. 2013. "Analysis of the abstracts of research articles in food related to climate change using a text-mining algorithm." *Journal of the Korean Data & Information Science Society* 24: 1429-1437.
- Baek, H., Cho, C., Kwon, W., Kim, S., Cho, J. and Kim, Y. 2011. "Development strategy for new climate change scenarios based on RCP". *Journal of Climate Change Research* 2: 55-68.
- Berry, Michael J.A. and Gordon Linoff. 1997. *Data Mining Techniques: for Marketing, Sales, and Customer Support*. Wiley Computer Publishing. New York.
- Challinor, A. J., Watson, J., Lobell, D.B., Howden, S.M., Smith, D.R. Chhetri, N. 2014. "A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation." *Nature Climate Change* 4: 287-291.
- Cho, S., Kim, S. 2012. Finding meaningful pattern of key words in IIE transactions using text mining. *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers* 38: 67-73.
- Choi, K., Lee, Y. 2011. "The deduction of objective linguistic information using statistical methods: The grouping of the possibility of interdisciplinary research." *Journal of the Korean Data & Information Science Society* 22: 49-55.
- Chung, S., J. A. Rodriguez-Diaz, E. K. Weatherhead, J. W. Knox. 2010. "Climate change impacts on water for irrigating paddy rice in South Korea." *Irrigation and Drainage* 60(2): 263-273.
- Cortes. C., Pregibon, D. 1999. "Information mining platform : An infrastructure for KDD rapid deployment." In Proceedings of the Fifth International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining
- Doré, T., Makowski, D., Malézieux, E., Munier-Jolain, N., Tchamitchian, M., Tiftonell, P. 2011. "Facing up to the paradigm of ecological intensification in agronomy: revisiting methods, concepts and knowledge." *European Journal of Agronomy* 34(4): 197-210.
- Feinerer, I., Hornik, K. and Meyer, D. 2008. "Text mining infrastructure in R." *Journal of Statistical Software* 25: 1-54.
- Feinerer, I. 2013. Introduction to the tm package text mining in R, R News, <http://CRAN.R-project.org/doc/Rnews/>.
- Go, G., Jung, W., Shin, Y., Park, S. and Jang, D. 2011. "A study on development of patent information retrieval using text mining." *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society* 12: 3677-3688.
- Hand, D., Mannila, H., Smyth, P. (2001). Principles of data mining. Adaptive Computation and Machine Learning Series. MIT Press.
- IPCC. 2007a. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- IPCC. 2007b. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, [M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- IPCC. 2007c. *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jackson, G. B. 1980. "Methods for integrative reviews." *Review of Education Research* 50: 438-460.
- Kim, C., Lee, S., Jeong, H., Jang, J., Kim, Y., Lee, C. 2010. *Impacts of Climate Change on Korean Agriculture and Its Counterstrategies. Research Report R593*. Korea Rural Economic Institute.
- Kim, H. , Ko, J., Kang, S., Tenhunen, J. 2013. "Impacts of climate change on paddy rice yield in a temperate climate." *Global Change Biology* 19(2): 548 - 562.
- Kim, J., Jeong, C. 2012. "Analysis of trend in construction using text mining method." *Journal of The Korean Digital Architecture·Interior Association* 12: 53-60.
- Lim, J., Lim, D. 2012. "Comparison of clustering methods of microarray gene expression data." *Journal of the Korean Data & Information Science Society* 23: 39-51.
- Lyman, P., Varian, H. 2003. How Much Information. Retrieved <http://www.sims.berkeley.edu/how-much-info-2003> on November
- Patuwo, B., Hu, M., and Hung, M. 1993. Two-group classification using neural networks. *Decision Sciences*, 24(4).
- Pillemer, D. B. and Light, R. T. 1980. "Synthesizing outcomes: How to use research evidence from many studies." *Harvard Educational Review* 40: 176-195.
- Rousseeuw, P. J. 1987. "Silhouettes : Graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis." *Journal of Computational and Applied Mathematics* 20: 54-65.
- Scholkopf, B., Smola, A., Muller, K. R., Burges, C., Vapnik, V. 1998. *Support vector methods in learning and feature extraction*.
- Shin, D., Park, J-H., Lee, M., and Lee, Y-S. 2014. "A meta analysis of Korean rice yield on the climate change impact." In submitted.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M. and H. L. Miller. 2007. *Climate change 2007*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom. 996.
- Vapnik, V. and S. Kotz. 2006. *Estimation of dependences based on empirical data*. Springer.
- Wilcox, J., Makowski, D. 2013. "A meta-analysis of the predicted effects of climate change on wheat yields using simulation studies." *Field Crops Research* 156: 180-190.
- Yeo, I. 2011. "Clustering analysis of Korea's meteorological data." *Journal of the Korean Data & Information Science Society* 22: 941-949.

<3협동과제>

- 고재경 외. 2010. “지방자치단체 기후변화 취약성 평가에 관한 연구: 경기도 기초지자체를 중심으로”. 「환경정책」 18(2): 79-105
- 김남의. 2012. “기후변화 취약성 평가에 관한 연구 : 전남 22개 시·군을 중심으로”. 「한국평화연구학회 초록집」 pp.421-443
- 농림축산식품부. 2014. 「농식품부, 기후변화 영향·취약성평가 법적 근거 최초 마련」. 보도자료. 2014년 11월 20일.
- 박성쾌 외. 2010. “기후변화와 수산업의 관계에 관한 연구”. 「한국수산해양교육학회지」 22(3): 388-401.
- 박종화, 2002. “한국 연근해의 온난화와 어업자원 변동”. 「한국해양학회 춘계학술대회 초록집」.
- 유가영 외. 2008. 「기후변화 취약성 평가지표의 개발 및 도입방안」. 한국환경정책평가연구원.
- 이경선, 이시마츠 아츠시. 2008. “이산화탄소 증가에 의한 해양산성화가 해양동물에 미치는 영향”. 「한국해양학회 추계학술대회 초록집」. p58.
- 이버들 외. 2011. “국내 수산 부문의 지역별 기후변화 취약성 평가 연구”. 「수상경영론집」 42(1): 57-70.
- 이상호 외. 2012. “기후변화에 따른 농업부문 적응능력의 다중속성 분석”. 「한국지역경제연구」 22: 107-121.
- 이상호 외. 2014. “농업부문 기후변화 취약성에 따른 유형분류 및 요인분석”. 「농업경제연구」 55(3): 1-24.
- 이정석, 이규태, 김찬국, 박건호, 이종현, 박영규, 강성길. 2006. “해수중 용존 CO₂ 농도 증가가 해양생물 및 해양생태계에 미치는 영향: 국내외 사례 연구”. 「한국해양환경공학회지」 9(4): 243-252.
- 장동호 외. 2006. “기후변화 영향평가를 위한 지역단위의 현장연구 : 전남 동부해안을 중심으로”. 제4차 기후변화 학술대회.
- 정명생, 정명화, 임경희. 2007. 「기후 변화가 수산업에 미치는 영향」. KMI 해양수산 현안분석. 한국해양수산개발원.
- 한국농촌경제연구원. 2012 「식품수급표」.
- 한인성, 2013 「수산자원에 영향을 미치는 기후변화 요인 및 프로세스」. 미발간 자료.
- 한화진 외 2007. 「기후변화 영향평가 및 적응시스템 구축 III」. 한국환경정책평가연구원.
- Allison, E.H., et al. 2009. “Vulnerability of national economies to the impacts of climate change on fisheries”. Fish and Fisheries.
- Clarke, R. P., Yoshimoto, S. S. and Pooley, S. G. 1992. “A Bioeconomic Analysis of the Northwestern Hawaiian Islands Lobster Fishery”. *Marine Resource Economics*, 7: 115-140.
- Feely, R., S. Doney and S. Cooley. 2009. “Ocean Acidification : present condition and future changes in a high-CO₂ world”. *Oceanography* 22(4): 36~47.
- Fox, W. W. 1970. “An exponential surplus-yield model for optimizing exploited fish population”. *Transactions of the American Fish Society* 99: 80-88.

- Füssel, H. -M. Klein, R.J.T. 2006. "Climate change vulnerability assessments: and evolution of conceptual thinking" *Climate Change* 75: 301-329.
- Gazeau, F., C. Quiblier, J. Jansen, J.-P. Gattuso, J. Middelburg and C. Heip, 2007. "Impact of elevated CO₂ on Shellfish calcification. *Geophy*". *Res. Lett.* 34: 1-5.
- IPCC, 1995. *IPCC Second Assesement. Climate Change 1995 A Summary*: 63.
- IPCC, 2007. *Summary for Plicymakers, Climate change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. 기상청. 기후변화 2007 종합보고서.
- IPSO. 2011. International earth system expert workshop on ocean stresses and impact, Summary report. IPSO Oxford.
- IUCN. 2008. Ocean Acidification -seas turning sour. Briefing paper.
- Levitus, S., J. Antonov and T. P. Boye. 2005. Warming of the world ocean, 1955 - 2003. *Geophys. Res. Lett.*, 32.
- Schaefer, M. B., 1954. "Some Aspects of the Dynamics of Populations Important to the Management of the Commercial Marine Fisheries". *Inter-American Tropical Tuna Commission Bulletin* 1: 25-56.
- UNDP. 2005. Adaptation policy frameworks for climate change: Developing strategies, policies, and measure. Cambridge University Press.

일본 기상청(<http://www.jma.go.jp>)

<4협 동과제>

- 강금지, 노성윤, 류혜숙, 이해숙, 최성숙. 2008. 「쉽게 배우는 영양판정」. 수학사.
- 강기경, 이덕배, 나영은, 최인명, 이충근, 박규현, 김진호. 2011. 기후변화와 우리농업(II): 도전과 과제. *RDA Interrobang* 33: 1-20.
- 곽노성. 2011. 「식품 분야 탄소성적 표시제 운영현황 및 개선과제」. 한국보건사회연구원 국민생활체육회. 2009. 「2009 생활체육 노인건강증진 프로그램 매뉴얼」.
- 김남규. 2008. "장바구니 크기가 연관규칙 척도의 정확성에 미치는 영향". 「경영정보학연구」 18(2): 95-114.
- 김소연, 윤미은, 승정자. 2002. 「케어복지사를 위한 노인영양」. 교육과학사.
- 김용수, 김우선, 최한주, 이종화, 정명섭, 오상석. 2009. 「기후변화에 따른 식중독 발생 영향 분석 및 관리 체계 연구」. 한국보건산업진흥원/이화여자대학교.
- 김인현. 2012. 빅데이터 가치와 도입 전략, 2012 Big Data 검색 분석 기술 Insight
- 김정선, 정기혜, 신호성, 정진욱, 윤시몬, 김은정. 2008. 「국제 기후변화에 따른 식품안전관리 대책 추진방안」. 한국보건사회연구원/식품의약품안전청.
- 김정선. 2011. "기후변화와 식품안전에 대한 국민인식". 보건복지 Issue & Focus. 2011년 제117호 pp.1-8.
- 김정선, 정진욱, 윤시몬, 이수형, 박지은, 김경은. 2011. 「기후변화에 따른 식품안전사고 위기대응 방안 연구」. 한국보건사회연구원.

- 김창길. 2007. 「기후변화협약 대응 방안 연구」. 한국농촌경제연구원.
- 김창길, 심교문. 2009. “기후변화가 농업부문에 미치는 영향”, 「농업전망 2009」 .
- 김창길. 2011. “기후변화가 농산물생산유통에 미치는 영향”, 농식품신유통연구원 심포지엄 자료집.
- 김희선. 2008. “기후변화와 식품안전”. 제32회 식품안전열린포럼 발표자료.
- 대한민국정부. 2012. 제2차 저출산고령사회 기본계획.
- 문은숙. 2010. 「식품이력추적관리제도에 대한 사회적 인지도 확보를 위한 운영방안 연구」. 식품의약품안전평가원
- 문진산. 2010. “기후변화가 동물 질병과 축산물 공급에 미치는 영향 및 이에 대한 대응방안”. 한국환경농학회 학술대회집.
- 박갑만. 2013. “한국산 담수어류의 기생충 감염 실태 및 기후변화에서 중간숙주로서 병원체 전파에 미치는 영향.” 「한국자연보호학회지」 7(2): 99-108.
- 박경진, 하상도, 오덕환. 2013. “미생물학적 식품안전을 위한 기후변화 영향 식품 및 식중독 세균 우선순위 결정.” 「한국식품위생안전성학회지」 28(1): 36-40.
- 박기환. 2009. 「건강기능식품 이력추적관리제도 적용 가이드라인 연구」. 식품의약품안전평가원
- 박영란, 홍백의. 2011. 「베이비부머 은퇴 후 생활지원을 위한 신복지모형 개발 연구」. 보건복지부.
- 박우창, 승현우, 용환승. 2003. 「데이터마이닝 : 개념 및 기법」. 서울: 자유아카데미
- 박혜련. 1996. “연령층별 영양상태”. 「지역사회영향학회지」 1(2). pp.301~332.
- 보건복지부. 2010. 「2009 국민건강통계」 .
- 신승식. 2001). 해양수산부문 청정개발체제 도입방안 연구, 한국해양수산개발원
- 신호성, 이수형, 김동진, 이종경, 최성은(2009). 기후변화에 따른 식품안전 분야의 사회 경제적 손실비용 평가, 한국보건사회연구원/식품의약품안전청.
- 안현철, 한인구, 김경재, 연관규칙기법과 분류모형을 결합한 상품추천시스템: G인터넷
- 옥현이, 심재호, 박기환, 전향숙(2013). 기후변화와 식품 중 아플라톡신의 오염 예방 전략, 한국식품위생안전성학회.
- 우희동. 2010. 「유전자재조합원료 이력관리 현장적용을 위한 연구」 식품의약품안전평가원
- 윤성준. 2005. “데이터마이닝 기법을 통한 백화점의 고객이탈예측 모형 연구.” 「한국마케팅저널」 6(4): 45-72.
- 윤태중, 조기중, 이미경, 정명섭, 배연재. 2010. “기후변화와 식품해충.” 「곤충연구지」 26: 27-30.
- 이미경, 김준영, 김종성. 2013. “기후변화가 살충제 사용에 미치는 영향.” 한국농약과학회 학술발표대회 논문집 p.139.
- 이민석 .2011. 「식품이력추적관리제도의 소비자 인지도 조사, 홍보 방안 연구」. 식품의약품안전평가원.
- 이연정, 김경재. 2013. “다중모형조합기법을 이용한 상품추천시스템.” 「지능정보연구」 19(2): 39-54.
- 장영주. 2013. 식품이력추적관리제도 의무화 관련. 입법조사회답
- 전성우 외. 2010. 「기후변화 적응정책 평가 및 통합모델 개발」. 한국환경정책 평가연구원/국가기후변화적응센터.
- 전주상, 김종성. 2013. “기후변화 대응정책 수행체계에 관한 연구 : 영국과 미국 사례의 비교 분석”. 「사회과학연구」 24(1): 171-192. 충남대학교 사회과학연구소.

- 정기혜. 2009. 「2009년도 식품안전관리의 변화와 전망」. 한국보건사회연구원.
- 정기혜. 2010. 「기후변화에 따른 식품안전관리 및 국가 대응을 위한 아젠다 개발」. 한국보건사회연구원.
- 조인동, 김남규. 2011. “소셜 네트워크와 데이터 마이닝 기법을 활용한 학문 분야 중심 및 융합 키워드 추천 서비스.” 「지능정보연구」 17(1): 127-138.
- 주문배. 2011. 「우리나라의 품목별 식품 이력추적제도의 추진 현황과 시사점」. 한국해양수산개발원.
- 주용성 외. 2012. 「국내 기후 권역별 식중독발생 예측모델 개발」 서울: 식품의약품안전처 차명화, 양지혜, 오세욱, 이화정, 김동술, 정명섭, 류경. 2010. “기후변화에 따른 식품위기관리 대응 시스템 구축방안”, *Safe Food*, 5(3). pp.19-26.
- 최광림. 2011. “산업계 기후변화 경쟁력지수 개발 및 적용 연구.” 건국대학교 대학원.
- 최광선. 2012. “SNS 시대의 하이브리드 빅데이터 분석 기술 및 사례.” 2012 Big Data 검색 분석기술 Insight
- 최지현. 2011. “기후변화에 따른 외식산업 영향과 대응전략”. 식품·외식산업 기후변화 대응전략 심포지엄 자료집.
- 한국농수산식품유통공사. 2011. 「식품산업 분야별 원료소비 실태조사」
- 한국보건사회연구원/식품의약품안전청 2009. 「기후변화에 따른 식중독 발생 영향 분석 및 관리 체계 연구」.
- 한화진 외 12인. 2007. 「기후변화 영향평가 및 적응시스템 구축 III」. 연구보고서 RE-01. 한국환경정책·평가연구원.
- 해양경찰청. 2009. 탄소발자국 에너지절약 생활화를 위한 지침서.
- 허행금. 2013. 기후변화에 따른 식품안전에 대한 영양사 및 영양교사의 인식도.
- 현윤진, 한희준, 최희석, 박준형, 이규하, 곽기영, 김남규. 2013. “텍스트 분석을 활용한 국가 현안 대응 R&D 정보 패키징 방법론.” *Journal of Information Applications & Management* 20(3): 231-257.
- 황진환, 박광석, 김형석. 2007. 「기후변화 대응. 해양수산부문 종합대책연구」. 해양수산부. 소 및 쇠고기 이력에 관한 법률
식품위생법
농수산물품질관리법
- Agrawal, R. and Srikant, R. 1994. Fast Algorithms for Mining Association Rules, International Conference on Very Large DataBases, Santiago, Chile. pp.487-499.
- Aggarwal, P., Joshi, P.K., Ingram, J.S., and Gupta, R.K. 2004. “Adapting food systems of the Indo-Gangetic plains to global environmental change: key information needs to improve policy formulation.” *Environmental Science and Policy* 7(6):487-498.
- Albright, R. 2006. *Taming Text with the SVD*, SAS Institute Inc.
- Alisystair B.A. Boxall, Anthony Hardy, Sabine Beulke. 2009. “Impacts of climate change on indirect human exposure to pathogens and chemicals from agriculture.” *Environmental health perspectives*.

- Aparna Lal, Michael G. Baker, Simon Hales, Nigel P. French. 2013. Potential Effects of Global Environmental Changes on Cryptosporidiosis and Giardiasis Transmissions.
- Aparna Lal, Takayoshi Ikeda, Nigel French, Michael Baker, Simon Hales. 2013. Climate Variability, Weather, and Enteric Disease Incidence in New Zealand: Time Series Analysis.
- Cassman, K.G., Dobermann, A., Walters, D.T., and Yang, H. 2003. "Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality." *Annual Review of Environment and Resources* 28: 315-358.
- C-H Von Bonsdorff, L. Maunula. 2013. "Impact of Climate Change and Weather Variability on Viral Pathogens in Food and Water." *Viruses in food and water: risks, surveillance and control 2013*. pp.458-482
- Carlo Fezzi, Ian Bateman, Tom Askew, Paul Munday, Unai Pascual, Antara Sen, Amii Harwood. 2014. *Valuing Provisioning Ecosystem Services in Agriculture: The Impact of Climate Change on Food Production in the United Kingdom*. Springer Science + Business Media.
- Center for Disease Control. 2014. Trends in Foodborne Illness in the United States.
- Dahlgren, G. and Whitehead, M. 1991. *Policies and Strategies to Promote Social Equity in Health*. Stockholm: Institute for Futures Studies.
- Ericksen, P.J. 2008. "Conceptualizing food systems for global environmental change research." *Global Environmental Change* 18(1): 234-245.
- Eddy Moors, Tanya Singh, Christian Siderius, Sneha Balakrishnan, Arabinda Mishra(2013). Climate Change and Waterborne Diarrhoea in Northern India: Impacts and Adaptation Strategies.
- European Food Information Council. 2014. Climate Change: Possible Implications for Food Safety?
- Erin Urquhart, Benjamin Zaitchik, Darryn Waugh, Seth Guikema, Carlos Del Castillo. 2014. Uncertainty in Model Predictions of *Vibrio vulnificus* Response to Climate Variability and Change: A Chesapeake Bay Case Study.
- Fried. P. F., Tangen, C. M., Walston, J., Newman, A. B., Hirsch, C., Gottdiener, J., Seeman, T., Tracy, R., Kop, W. J., Burke, G., and Mcburnie. 2001. Frailty in older adults: evidence for a phenotype. *Journal of Gerontology: Medical Sciences* 56A(3): M146-M157.
- Fan, W., Wallace, W., Rich, S., and Zhang, Z. 2006. "Tapping the Power of Text Mining" *Communications of the ACM* 49(9): 76-82.
- FAO. 2008. Climate change and food safety: A framework document.
- FAO. 2008. Climate change and food security.
- FAO. 2012. Food security and climate change the highlevel panel of experts.
- Hearst, M. A. 1999. "Untangling Text Data Mining." in Proceedings of the 37th ACL
- Han, J. and Kamber, M. 2011. *Data Mining: Concepts and Techniques(3rd ed.)*. Morgan Kaufmann Publishers

- Hyun-Soo Kang. 2013. An Empirical Analysis of the Linkages among Food Security, Agflation, and Climate Change. 한국무역연구원.
- H.J. Van der Fels-Klerx, Esther D. van Asselt, Marianne S. Madsen, Jorgen Olesen. 2013. Impact of Climate Change Effects on Contamination of Cereal Grains with Deoxynivalenol.
- Hari C. Sharma. 2014. Climate Change Effects on Insects: Implications for Crop Protection and Food Security, Taylor & Francis.
- IPCC. 2007a. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC. 2007b. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- IPCC. 2007c. Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Ian Young, Kathleen Gropp, Aamir Fazil, Ben Smith. 2014. Knowledge synthesis to support risk assessment of climate change impacts on food and water safety: A case study of the effects of water temperature and salinity on *Vibrio parahaemolyticus* in raw oysters and harvest waters.
- I. Castro-banez, M.I. Gil, J.A. Tudela, A. Allende. 2014. Microbial safety considerations of flooding in primary production of leafy greens: A case study.
- IPCC. 2014. Climate Change 2014L Impacts, Adaptation, and Vulnerability.
- Jun BH·Lee HG. 2000. An investigation of the intake of the health food among the salarymen in Seoul. *Kor J Soc Food Sci* 16(1): 9-16.
- Jack Schijven, Martijn Bouwknegt, Ana Maria de Roda Husman, Saskia Rutjes, Bertrand Sudre, Jonathan E. Suk and Jan C. Semenza. 2013. A Decision Support Tool to Compare Waterborne and Foodborne Infection and/or Illness Risks Associated with Climate Change.
- Joe Satran. 2013. Vibriosis, Deadly Disease Associated With Raw Oysters, May Get More Common As Ocean Warms.
- Kang MH. 1994. Nutritional status of Korean elderly people. *Korean J of Nutr* 24(6): 616-636.
- Klementina Kirezieva, Liesbeth Jacxsens, Martinus van Boekel, Pieternel Luning. 2014. Towards strategies to adapt to pressures on safety of fresh produce due to climate change.
- Kevin Holvoet, Imca Sampers, Marleen Seynaeve, Mieke Uyttendaele. 2014. Relationships among hygiene indicators and enteric pathogens in irrigation water, soil and lettuce and the impact of climatic conditions on contamination in the lettuce primary production.

- Lippincott Mercer. 2006. Serving the climate-change-conscious consumer. USA.
- Liu C. Hofstra N. Franz E. 2013. Impacts of climate change on the microbial safety of pre-harvest leafy green vegetables as indicated by *Escherichia coli* O157 and *Salmonella* spp.
- Liming Ye, Wei Xiong, Zhengguo Li, Peng Yang, Wenbin Wu, Guixia Yang, Yijiang Fu, Jinqiu Zou, Zhongxin Chen, Eric Van Ranst, Huajun Tang. 2013. Climate change impact on China food security in 2050. EDP SCIENCES.
- Metzler, D., Bernstein, Y., Crofit, W. B., Moffat, A., and Zobel, J. 2005. Similarity Measures for Tracking Information Flow. in Proceedings of CIKM, Bremen, Germany
- Mooney, R. J. and Bunescu, R. 2006. Mining Knowledge from Text using Information Extraction." *CM SIGKDD Explorations* 7(1): 3-10.
- M.Miraglia, H.J.P. Marvin, G.A. Kleter, P.Battilani. 2009. Climate change and food safety: An emerging issue with special focus on Europe, Food and chemical toxicology.
- Marvin, H. J. P., Kleter, G. A., Van der Fels-Klerx, H. J. (Noordam, M. Y., Franz, E., Willems, D. J. M. 2013. Proactive systems for early warning of potential impacts of natural disasters on food safety: Climate-change-induced extreme events as case in point, Elsevier Science B.V., Amsterdam.
- Mirna Panic, James D. Ford. 2013. A Review of National-Level Adaptation Planning with Regards to the Risks Posed by Climate Change on Infectious Diseases in 14 OECD Nations.
- Mieke Uyttendaele, Cheng Liu, Nynke Hofstra. 2013. Impact of Climate Change on Food Safety: The Approach Taken in EU FP7 Veg-i-Trade.
- M. Hashizume. 2013. Precipitation and Flood Hazards: Health Effects, Risks, and Impacts.
- Picinin, L.C.A., Cerqueira, M.M.O.P. Vargas, E.A. Lana, A.M.Q. Toaldo, I.M, Bordignon-Luiz, M.T. 2013. Influence of climate conditions on aflatoxin M1 contamination in raw milk from Minas Gerais State, Brazil, Elsevier Science B.V., Amsterdam.
- Paterson, R. R. M. Sariah, M. Lima, N. 2013. *How will climate change affect oil palm fungal diseases?* Elsevier Science B.V., Amsterdam.
- Philip E. Hulme. 2014. Invasive Species Challenge the Global Response to Emerging Diseases
- Rijsbergen, C. J. V. 1979. *Information Retrieval(2nd ed.)*. Butterworth, London
- Reem Deeb. 2013. Climate Change Effects on *Vibrio* Bacteria in the Winyah Bay Estuary and the Projected Spread of *Vibrio* under Future Climatic Scenarios.
- R. Russell Paterson, Nelson Lima, Marta taniwaki. 2014. Coffee, mycotoxins and climate change.
- Salton, G., Wong, A., and Yang, C. S. 1975. "A Vector Space Model for Automatic Indexing." *Communications of the ACM* 18(11): 613-620.
- Sebastiani, F. 2002. Machine Learning in Automated Text Categorization. *ACM Computing Surveys* 34(1): 1-47.
- Sebastiani, F. 2006. *Classification of Text, Automatic, The Encyclopedia of Language and Linguistics 14*. 2nd edition. Elsevier Science Pub.
- Stanvrianou, A., Andritsos, P., and Nicoloyannis, N. 2007. "Overview and Semantic Issues of Text Mining." *ACM SIGMOD Record* 36(3): 23-34.

- Sonja J. Vermeulen, Bruce M. Campbell and John S.I. Ingram. 2012. *Climate Change and Food Systems*.
- Sangam Dwivedi, Kanwar Sahrawat, Hari Upadhyaya, Rodomiro Ortiz. 2013. *Food, Nutrition and Agrobiodiversity Under Global Climate Change*. ACADEMIC PRESS.
- Serge Morand, Katharine A. Owers, Agnes Waret-Szkuta, K. Marie McIntyre & Matthew Baylis. 2013. *Climate Variability and Outbreaks of Infectious Diseases in Europe*.
- UEF-US. 2011. *The Food Gap - The Impacts of Climate Change on Food Production: Perspective by 2020*. Alexandria, VA 22130, USA.
- Victoria Courtland. 2014. *Rising Ocean Temperatures Put New England Oyster Industry in Hot Water*.
- Witten, I. H. 2004. *Text Mining, Practical Handbook of Internet Computing*, edited by M. P. Singh, CRC Press
- Wang, W. F., Chung, Y. L., Hus, M. H., and Keh, A. C. 2007. A Personalized Recommender System for the Cosmetic Business. *Expert Systems with Applications* 26(3): 427-434.
- Wenbin Wu, Peter H. Verburg, Huajun Tang. 2014. *Climate change and the food production system: impacts and adaptation in China*, Springer Berlin Heidelberg.
- Yong Soo Kim, Ki Hwan Park, Hyang Sook Chun, Changsun Choi, Gyung Jin Bahk. 2014. *Correlations Between Climatic Conditions and Foodborne Disease*.
- Zohra Aslam, Mukhtar Ahmed, Muhammad Sajad, Muhammad Asif, Muhammad Akmal, Fahad Karim Awan, Waqas Ijaz, Raseela Ashraf, Jabar Zaman Khan Khattak. 2013. No title. WFL PUBLISHER.
- Zhang, X., Halder, J., White, R. P., Hughes, D. J., Ye, Z., Wang, C., Xu, R., Gan, B., Fitt, B. D.(2014). *Climate change increases risk of fusarium ear blight on wheat in central China*, Blackwel Publishing Ltd.
- <https://www.fishtrace.go.kr>
- <http://cattle.mtrace.go.kr>
- <http://tfood.go.kr>

<5협 동 과제>

- 감미아, 송민. 2012. "텍스트 마이닝을 활용한 신문사에 따른 내용 및 논조 차이점 분석." 「지능 정보연구」 18(3), 53-77.
- 고봉현. 2010. "기후변화가 제주 수산업에 미치는 영향과 시사점". 「제주발전포럼」 100: 68-80.
- 기상청. 2011. 「기후변화 시나리오 이해 및 활용 사례집」.
- 김길준, 이순희, 장광훈. 1996. 「프로그래밍과 자연어 처리」. 홍진출판사.
- 김대준, 김수옥, 문경환, 윤진일. 2012. "RCP8.5 기후조건인 작물생육모의에 근거한 우리나라 곡물생산 전망". 「한국농림기상학회지」 14(3): 132-141.
- 김민경, 허승오, 권순익, 정구복, 손연규, 하상건, 이덕배. 2010. "우리나라 강우량 변화 시나리오에 따른 밭토양의 토양 유실량 변화 예측." 「한국토양비료학회지」 43(6): 789-792.

- 김수연, 정영미. 2006. "텍스트 마이닝 기법을 이용한 연관용어 선정에 관한 실험적 연구." 「한국정보관리학회지」 23(3): 147-165.
- 김수옥, 정유란, 김승희, 최인명, 윤진일. 2009. "미래 시나리오가 기후조건하에서의 사과 '후지' 품종 재배적지 탐색." 「한국농림기상학회지」 11(4): 162~173.
- 김진욱, 이선숙, 용환승. 2011. "한글 텍스트의 오피니언 분류 자동화 기법." 「정보과학회논문지: 데이터베이스」 38(6): 423-428.
- 김창길, 정학균, 김윤희, 김태훈, 문동현. 2011. 「기후변화 대응을 위한 농림수산물산업 전략수립 연구」. 연구보고서 C2011-32. 한국농촌경제연구원.
- 김창길, 정학균, 한석호, 김정승, 문동현. 2012. 「기후변화가 식량공급에 미치는 영향분석과 대응방안」. 연구보고서 R663. 한국농촌경제연구원.
- 민기영, 김훈태, 지용구. 2014. "철강산업 트렌드 분석을 위한 텍스트 마이닝 도입 연구: P社 사례를 중심으로." 「한국전자거래학회지」 19(3): 51-64.
- 변정연, 이우균, 최성호, 오수현, 유성진, 권태성, 성주한, 우재욱. 2012. "시공간 정보기반 산림 생태계의 기후변화 취약성 평가." 「대한원격탐사학회지」 28(1): 159~169.
- 송혜지, 박경수, 정혜은, 송민. 2013. "텍스트 마이닝 기법을 활용한 한국의 경제연구 동향 분석." 한국정보관리학회 학술대회 논문집. pp.47-50.
- 신용희. 2013. 아태지역 쌀 생산성에 대한 기후변화 영향평가. APCC Research Report. 2013-05: 3-50.
- 신정옥, 윤성철. 2011. "한국의 2011-2100년 기후변화가 고추 탄저병 살균제 살포에 미치는 영향." 「한국농림기상학회지」 13(1): 10~19.
- 신진철, 이충근, 윤영환, 강양순. 2000. "기후변화에 따른 작물 생산성반응과 기술적 대응." 한국작물학회 학술발표대회 논문집. 45(2): 12-27.
- 신형진, 박근애, 박민지, 김성준. 2012. "미래 기후변화 시나리오 MIROC3.2 A1B에 따른 우리나라 산림식생분포의 변화 전망." 「한국지리정보학회지」 15(1): 64-76.
- 심교문, 노기안, 소규호, 김건엽, 정현철, 이덕배. 2010. 지구온난화에 따른 벼 생육 및 생산성 변화 예측. 한국기후변화학회지」 1(2): 121-131.
- 원진영, 김대곤. 2014. "텍스트마이닝을 활용한 사회위험 이슈 도출." 「한국위기관리논집」 10(7): 33-52.
- 윤동균, 정상옥, 김성준. 2011. "기후변화가 논 필요수량에 미치는 영향." 「한국농공학회」 53(4), 39-47.
- 이상철, 최성호, 이우균. 2011. "기후변화 시나리오에 따른 산림분포 취약성 평가." 「한국임학회지」 100(2): 256-265.
- 이상혁, 최재용, 이유미. 2011. "기후변화에 따른 우리나라 미선나무의 분포변화 예측." 「농업과학연구」 38(2): 191-404.
- 이영섭 역서. 2003. 「데이터마이닝 Cookbook」. 교우사.
- 이재운, 문주영, 김희정. 2007. "텍스트 마이닝을 이용한 국내 기록관리학 분야 지적구조 분석." 「한국문헌정보학회지」 41(1): 345-372.
- 이지은. 2002. 「Intelligent Miner의 마이닝 알고리즘 III」. IBM.

- 이충근, 김준환, 손지영, 양운호, 윤영환, 최경진, 김광수. 2012. "생육모의 연구에 의한 한반도에 서의 기후변화에 따른 벼 생산성 및 적응기술 평가." 「한국농림기상학회지」 14(4): 207-221.
- 이충근, 윤영환, 김준환, 손지영, 이은영, 김연규. 2009. "작물모형 이용 미래 기후변화 시나리오에 따른 한반도 쌀 수량성 변화 분석." 한국작물학회 추계학술발표회. pp.55-55.
- 이태석, 최진용, 유승환, 이상현, 오윤경. 2012. "기후변화 시나리오에 따른 미래 논벼의 소비수량 및 생산량 변화 분석." 「한국농공학회」 54(1): 47-54.
- 장남식, 홍성완, 장재호. 1999. 「데이터 마이닝」. 대청미디어.
- 장창익, 이재봉. 2010. 「기후변화에 따른 수산분야의 영향과 대책」. 한림연구보고서 66: 275-315.
- 전성해. 2009. "특허정보 분석을 위한 효율적인 텍스트 마이닝." KIIS 춘계학술대회논문집 19(1): 255-257.
- 정유란, 김수옥, 윤진일. 2008. "최저기온과 휴면심도 기반의 동해위험도를 활용한 'Campbell Early' 포도의 내동성 지도 제작." 「한국농림기상학회지」 10(4): 121-131.
- 정유란, 김진희, 김수옥, 서희철, 윤진일. 2009. "겨울기온 상승에 따른 복숭아 나무 '장호원황도' 품종의 결과지에 대한 동상해위험 공간분석." 「한국농림기상학회지」 11(4): 221-232.
- 정유란, 조경숙, 이변우. 2006. "지구온난화에 따른 우리나라 벼농사지대의 생산성 재평가." 「한국농림기상학회지」 8(4): 229~241.
- 조성진, 조창현. 2011. "농경사회의 기후변화 영향 및 적응에 관한 ABMS 활용 연구." 「기후연구」 6(2): 89-99.
- 한국정보화진흥원. 2012. 「Big Data 글로벌 10대 선진 사례」.
- 한국해양수산개발원. 2007. 「기후 변화가 수산업에 미치는 영향」.
- 한화진. 2010. 「기후변화 영향평가 및 적응시스템 구축」. 한국환경정책·평가연구원 연구보고서 RE-01.
- 홍은미, 최진용, 이상현, 유승환, 강문성. 2009. "LARS-WG를 이용한 기후변화에 따른 논벼 증발산량 산정." 「한국농공학회논문집」 51(3): 25-35
- Bae, K., Park, J-H., Kim, J., and Lee, Y-S. 2013. "Analysis of the abstracts of research articles in food related to climate change using a text-mining algorithm." *Journal of the Korean Data & Information Science Society* 24: 1429-1437.
- Baek, H., Cho, C., Kwon, W., Kim, S., Cho, J. and Kim, Y. 2011. "Development strategy for new climate change scenarios based on RCP". *Journal of Climate Change Research* 2: 55-68.
- Berry, Michael J.A. and Gordon Linoff. 1997. *Data Mining Techniques: for Marketing, Sales, and Customer Support*. Wiley Computer Publishing. New York.
- Challinor, A. J., Watson, J., Lobell, D.B., Howden, S.M., Smith, D.R. Chhetri, N. 2014. "A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation." *Nature Climate Change* 4: 287-291.
- Cho, S., Kim, S. 2012. Finding meaningful pattern of key words in IIE transactions using text mining. *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers* 38: 67-73.

- Choi, K., Lee, Y. 2011. "The deduction of objective linguistic information using statistical methods: The grouping of the possibility of interdisciplinary research." *Journal of the Korean Data & Information Science Society* 22: 49-55.
- Chung, S., J. A. Rodriguez-Diaz, E. K. Weatherhead, J. W. Knox. 2010. "Climate change impacts on water for irrigating paddy rice in South Korea." *Irrigation and Drainage* 60(2): 263-273.
- Cortes. C., Pregibon, D. 1999. "Information mining platform : An infrastructure for KDD rapid deployment." In *Proceedings of the Fifth International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*
- Doré, T., Makowski, D., Malézieux, E., Munier-Jolain, N., Tchamitchian, M., Tittoneil, P. 2011. "Facing up to the paradigm of ecological intensification in agronomy: revisiting methods, concepts and knowledge." *European Journal of Agronomy* 34(4): 197-210.
- Feinerer, I. 2013. Introduction to the tm package text mining in R, R News, <http://CRAN.R-project.org/doc/Rnews/>.
- Feinerer, I., Hornik, K. and Meyer, D. 2008. "Text mining infrastructure in R." *Journal of Statistical Software* 25: 1-54.
- Go, G., Jung, W., Shin, Y., Park, S. and Jang, D. 2011. "A study on development of patent information retrieval using text mining." *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society* 12: 3677-3688.
- Hand, D., Mannila, H., Smyth, P. 2001. *Principles of data mining. Adaptive Computation and Machine Learning Series.* MIT Press.
- IPCC. 2001. *Climate change 2001: The scientific basis. contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change,* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC. 2007. *Climate change 2007: The physical science basis. contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change,* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC. 2013. *Climate change 2013: The physical science basis. contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change,* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC. 2014. *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. part A : global and sectoral aspects. contribution of working group II to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change,* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jackson, G. B. 1980. "Methods for integrative reviews." *Review of Education Research* 50: 438-460.
- Kim, C., Lee, S., Jeong, H., Jang, J., Kim, Y., Lee, C. 2010. *Impacts of Climate Change on Korean Agriculture and Its Counterstrategies. Research Report R593.* Korea Rural Economic Institute.

- Kim, H. , Ko, J., Kang, S., Tenhunen, J. 2013. "Impacts of climate change on paddy rice yield in a temperate climate." *Global Change Biology* 19(2): 548 - 562.
- Kim, J., Jeong, C. 2012. "Analysis of trend in construction using text mining method." *Journal of The Korean Digital Architecture·Interior Association* 12: 53-60.
- Lim, J., Lim, D. 2012. "Comparison of clustering methods of microarray gene expression data." *Journal of the Korean Data & Information Science Society* 23: 39-51.
- Lyman, P., Varian, H. 2003. How Much Information. Retrieved <http://www.sims.berkeley.edu/how-much-info-2003> on November
- Nkomozepe, T, Chung, S. O.. 2011. "기후변화가 짐바브웨 옥수수 수확량에 미치는 영향 모의". 「한국농공학회 논문집」 53(3): 65-73.
- Patuwo, B., Hu, M., and Hung, M. 1993. Two-group classification using neural networks. *Decision Sciences*, 24(4).
- Pillemer, D. B. and Light, R. T. 1980. "Synthesizing outcomes: How to use research evidence from many studies." *Harvard Educational Review* 40: 176-195.
- Rousseeuw, P. J. 1987. "Silhouettes : Graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis." *Journal of Computational and Applied Mathematics* 20: 54-65.
- Scholkopf, B., Smola, A., Muller, K. R., Burges, C., Vapnik, V. 1998. *Support vector methods in learning and feature extraction*.
- Shin, D., Park, J-H., Lee, M., and Lee, Y-S. 2015. "A meta analysis of Korean rice yield on the climate change impact." In submitted.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M. and H. L. Miller. 2007. *Climate change 2007*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom. 996.
- Vapnik, V. and S. Kotz. 2006. *Estimation of dependences based on empirical data*. Springer.
- Wilcox, J., Makowski, D. 2013. "A meta-analysis of the predicted effects of climate change on wheat yields using simulation studies." *Field Crops Research* 156: 180-190.
- Yeo, I. 2011. "Clustering analysis of Korea's meteorological data." *Journal of the Korean Data & Information Science Society* 22: 941-949.