기후변화에 따른
농업용수 영향평가 연구 (최종)

Climate Change Impacts Assessments on Agricultural Water Resources

2011. 12.

농 림 수 산 식 품 부
한 국 농 어 촌 공 사

제 출 문

농림수산식품부 장관 귀하

본 보고서를 “기후변화에 따른 농업용수 영향평가 연구” 연구의 3차년도 최종연구 보고서로 제출합니다.

2011년 12월

주관연구기관명 : 한국농어촌공사
농어촌연구원연 구 책 임 자 : **윤 동 균**
연 구 원 : 조 진 훈
김 진 택
한 국 헌

공동연구기관 : 서울대학교
연 구 책 임 자 : **최 진 용**
연 구 원 : 유 승 환
오 윤 경
이 상 현
이 태 석
박 나 영

위촉연구자 : 경북대학교 정 상 옥
충남대학교 김 태 철

Summary

Title : Climate Change Impacts Assessments on Agricultural Water Resources

1. Period: Jan. 2011 ~ Dec. 2011

2. Backgrounds and Purpose

2.1 Backgrounds

◦ Recently, climate changes have been great concerns as the magnitude of natural disasters is on the increase, and it becomes increasingly a pressing matter to evaluate vulnerability to such disasters and make plans to minimize the adverse impact from them.

◦ 'Vulnerability' is defined as the extent to which a natural or social system is susceptible to sustaining damage from climate change. The general consensus for vulnerability is that changes in temperature and precipitation will result in changes in the agricultural water resources.

◦ Korea feels that its agricultural sector is being affected by this climate change, and it is right time to take the initiative in this matter.

◦ The agricultural sector in Korea uses water for irrigation up to 48 percent of the water resources available in a natural environment.

2.2 Purpose

◦ The purpose of this research is to assess the uncertainty of various future meteorological data, and analyze the vulnerability of water resources for agricultural sector. In this research, frequency analyses for the required storages that will be affected by climate changes were conducted, and existing researches on the vulnerability of reservoirs for agriculture were reviewed.

3. Contents

3.1 Method

◦ Assessment of uncertainty for various future meteorological data
  - Temperature, precipitation, humidity, evaporation, duration of sunshine, and wind velocity.

◦ Sensitivity analysis for runoff and reference evapotranspiration
  - Runoff Estimation using various estimated (future) meteorological data and TANK model.
  - Estimation of reference evapotranspiration using various estimated (future) meteorological data and Penman-Monteith equation (FAO).

◦ Assessment of vulnerability for agricultural water resources
  - Estimation of water resources for paddy rice farming based on growing period and future land-use changes.
  - Estimation of crop evapotranspiration for 10-year drought return period.
  - Calculation of unit duty of water for 10-year drought return period.
  - Frequency analysis of reservoirs for drought period using DIROM.

◦ Summary of agricultural water indicators affecting irrigation reservoirs

< Study areas>

Administrative region	Irrigation reservoir	Watershed (ha)
Gyeonggi	Madun	529
Gangwon	Wonchang	305
Chungbuk	Wonnam	1,080
Chungnam	Gopung	1,293
Jeollabuk	Ingyo	841
Jeollanam	Daepo	260
Gyeongbuk	Mabuk	650
Gyeongnam	Namseong	72

3.2 Results

3.2.1 Assessment of uncertainty for various future meteorological data

- Data used : Generated by MIROC 3.2's CF, MIROC 3.2's LARS-WG, and MM5 methods.
- Factors : Temperature, precipitation, humidity, evaporation, duration of sunshine, and wind velocity.

◦ Mean Annual Rainfall (MAR)

- Slight decrease at Daepo Reservoir between 2010s and 2030s, and at Namseong Reservoir between 2010s and 2040s.
- Continuous increase at most of the other reservoirs between 2010s and 2090s.
- The biggest change from the base year (1980~2009): an increase of 46% at Madun Reservoir in 2050s.
- The biggest uncertainty: at Wonnam Reservior in 2040s.

◦ Mean Annual Temperature (MAT)

- Continuous increase at all reservoirs between 2010s and 2090s.
- The biggest change from the base year (1980~2009): an increase of 4.42 ℃ at Wonchang Reservoir in 2090s.
- The biggest uncertainty: at Wonnam Reservoir in 2030s.

◦ Mean Annual Evaporation (MAE)

- Continuous increase at all reservoirs between 2010s and 2090s.
- Slight decrease at Mabuk Reservoir between 2010s and 2030s.

◦ Mean Annual Humidity (MAH)

- Decrease from the base year at all reservoirs.
- The biggest change from the base year (1980~2009): a decrease of 7.0 % at Ingyo Reservoir between 2010s and 2090s.

◦ Mean Annual Duration of Sunshine (MADS)

- An increase of 0.5 - 1.5 hr at all reservoirs.

- The biggest change from the base year (1980~2009): an increase of 1.57 hr at Mabuk Reservoir.

◦ Mean Annual Wind Velocity (MAWV)

- Slight decrease at Daepo Reservoir between 2050s and 2090s, and at Mabuk Reservoir between 2020s and 2090s.
- Increase at other reservoirs between 2010s and 2090s.
- The biggest change: a decrease of 0.24 m/s at Deapo Reservoir.

3.2.2 Sensitivity analysis for runoff and reference evapotranspiration

- Data used: Generated by MIROC 3.2's CF, MIROC 3.2's LARS-WG, and MM5 methods.
- Simulation tools: Data and information on daily runoff, reference evapotranspiration, land-use change in 8 study areas (KRI, 2010), and TANK model.

◦ Time-series data of annual runoff change

- CF method: a decrease of 135.5 mm in Jeonnam, 45.0 mm in Gyeongbuk and 278.0 mm in Gyeongnam areas between 2010s and 2040s, but a continuous increase after 2040s in the same areas, and a steady increase in other areas.
- LARS-WG: a steady increase in all areas between 2010s and 2090s, with a significant increase in Gyeonggi and Chungbuk areas.
- MM5: a slight decrease in all areas between 2010s and 2040s, and a continuous increase after 2040s. This increase is not in excess of the other two models.

◦ Estimation of reference evapotranspiration

- CF method: generally higher in the southern regions - Jeolla and Gyeongsang- than the central regions. An increase of 115 mm in 2025s, 46.6 mm in 2055s, and 29.3 mm in 2085s from the base year.

- LARS-WG: an increase of 44.7 mm in 2025s, 34.7 mm in 2055s, and 38.7 mm in 2085s from the base year.
- MM5: an increase of 79.4 mm in 2025s, 48.1 mm in 2055s, and 49.9 mm in 2085s from the base year. The increase is in excess of an average.

3.2.3 Assessment of the vulnerability of agricultural water resources

◦ Paddy rice evapotranspiration (paddy ETc) at drought of 10-year return period is estimated by frequency analyses in 1995s~2085s.

- Increase of 8.4% in paddy ETc between 1995s and 2085s in Chuncheon
- Increase of 27% in paddy ETc between 1995s and 2085s in Suwon
- Decrease of 3.9% in paddy ETc between 1995s and 2085s in Cheongju
- Increase of 9.0% in paddy ETc between 1995s and 2085s in Seosan
- Increase of 7.6% in paddy ETc between 1995s and 2085s in Jeonju
- Increase of 13.8% in paddy ETc between 1995s and 2085s in Yeosu
- Increase of 27.1% in paddy ETc between 1995s and 2085s in Pohang
- Increase of 3.4% in paddy ETc between 1995s and 2085s in Jinju

◦ Annual maximum storage requirement of reservoirs of 10-year return period is estimated by frequency analyses in 1995s~2085s. △▽

- Wonchang reservoir : 2.4 Mm^3 in 1995s -> 1.8 Mm^3 in 2085s (▽0.6 Mm^3)
- Madun reservoir : 2.6 Mm^3 in 1995s -> 3.6 Mm^3 in 2085s (△1.0 Mm^3)
- Wonnam reservoir : 5.1 Mm^3 in 1995s -> 4.6 Mm^3 in 2085s (▽0.5 Mm^3)
- Gopund reservoir : 5.7 Mm^3 in 1995s -> 6.9 Mm^3 in 2085s (△1.2 Mm^3)

- Ingyo reservoir : 0.7 Mm³ in 1995s -> 0.9 Mm³ in 2085s (△0.2 Mm³)
- Daepo reservoir : 1.0 Mm³ in 1995s -> 0.8 Mm³ in 2085s (▽0.2 Mm³)
- Mabuk reservoir : 4.1 Mm³ in 1995s -> 4.6 Mm³ in 2085s (△0.5 Mm³)
- Namseong reservoir : 1.2 Mm³ in 1995s -> 1.1 Mm³ in 2085s (▽0.1 Mm³)

◦ Annual maximum storage requirement of reservoirs of 10-year return period is estimated by frequency analyses in 1995s~2085s, when the transplanting date is moved forward 10 days(S1) and back 10 days(S2)
- Wonchang reservoir in 2085s : Baseline : 1.8 Mm³ / S1: 1.8 Mm³ / S2 : 2.0 Mm³
- Madun reservoir in 2085s : Baseline : 3.6 Mm³ / S1: 3.5 Mm³ / S2 : 3.6 Mm³
- Wonnam reservoir in 2085s : Baseline : 4.6 Mm³ / S1: 4.6 Mm³ / S2 : 4.4 Mm³
- Gopund reservoir in 2085s : Baseline : 6.9 Mm³ / S1: 6.2 Mm³ / S2 : 6.6 Mm³
- Ingyo reservoir in 2085s : Baseline : 0.9 Mm³ / S1: 0.9 Mm³ / S2 : 0.9 Mm³
- Daepo reservoir in 2085s : Baseline : 0.8 Mm³ / S1: 0.9 Mm³ / S2 : 0.8 Mm³
- Mabuk reservoir in 2085s : Baseline : 4.6 Mm³ / S1: 4.1 Mm³ / S2 : 4.7 Mm³
- Namseong reservoir in 2085s : Baseline : 1.1 Mm³ / S1: 1.0 Mm³ / S2 : 1.2 Mm³

◦ Unit duty of water during transplanting season in irrigation district is estimated in 1995s~2085s.
- In Wonchang irrigation district, unit duty of water is 2.41 $10^{-3}/m^3/\text{sec}/ha$ in 1995s and 2.43 $10^{-3}/m^3/\text{sec}/ha$ in 2085s
- In Madun irrigation district, unit duty of water is 1.78 $10^{-3}/m^3/\text{sec}/ha$ in 1995s and 1.80 $10^{-3}/m^3/\text{sec}/ha$ in 2085s
- In Wonnam irrigation district, unit duty of water is 2.08 $10^{-3}/m^3/\text{sec}/ha$ in 1995s and 2.10 $10^{-3}/m^3/\text{sec}/ha$ in 2085s
- In Gopund irrigation district, unit duty of water is 1.94 $10^{-3}/m^3/\text{sec}/ha$ in 1995s and 2.01 $10^{-3}/m^3/\text{sec}/ha$ in 2085s
- In Ingyo irrigation district, unit duty of water is 1.94 $10^{-3}/m^3/\text{sec}/ha$ in 1995s and 1.96 $10^{-3}/m^3/\text{sec}/ha$ in 2085s
- In Daepo irrigation district, unit duty of water is 2.01 $10^{-3}/m^3/\text{sec}/ha$ in 1995s and 2.02 $10^{-3}/m^3/\text{sec}/ha$ in 2085s
- In Mabuk irrigation district, unit duty of water is 2.16

$10^{-3}/m^3$/sec/ha in 1995s and 2.17 $10^{-3}/m^3$/sec/ha in 2085s
- In Namseong irrigation district, unit duty of water is 1.91 $10^{-3}/m^3$/sec/ha in 1995s and 1.95 $10^{-3}/m^3$/sec/ha in 2085s

◦ Unit duty of water during after transplanting season in irrigation district is estimated in 1995s~2085s.
- In Wonchang irrigation district, unit duty of water is 1.84 $10^{-3}/m^3$/sec/ha in 1995s and 1.94 $10^{-3}/m^3$/sec/ha in 2085s
- In Madun irrigation district, unit duty of water is 1.45 $10^{-3}/m^3$/sec/ha in 1995s and 1.44 $10^{-3}/m^3$/sec/ha in 2085s
- In Wonnam irrigation district, unit duty of water is 1.74 $10^{-3}/m^3$/sec/ha in 1995s and 1.73 $10^{-3}/m^3$/sec/ha in 2085s
- In Gopund irrigation district, unit duty of water is 1.55 $10^{-3}/m^3$/sec/ha in 1995s and 1.62 $10^{-3}/m^3$/sec/ha in 2085s
- In Ingyo irrigation district, unit duty of water is 1.56 $10^{-3}/m^3$/sec/ha in 1995s and 1.68 $10^{-3}/m^3$/sec/ha in 2085s
- In Daepo irrigation district, unit duty of water is 1.57 $10^{-3}/m^3$/sec/ha in 1995s and 1.74 $10^{-3}/m^3$/sec/ha in 2085s
- In Mabuk irrigation district, unit duty of water is 1.89 $10^{-3}/m^3$/sec/ha in 1995s and 2.05 $10^{-3}/m^3$/sec/ha in 2085s
- In Namseong irrigation district, unit duty of water is 1.52 $10^{-3}/m^3$/sec/ha in 1995s and 1.55 $10^{-3}/m^3$/sec/ha in 2085s

◦ Storage requirement of reservoirs is estimated in 1995s~2085s.
- In Gangwon, effective reservoir storage is 99.8 Mm³ in present and the storage requirement of reservoirs will be 75.5 Mm³ in 2085s.
- In Gyeongi, effective reservoir storage is 184.3 Mm³ in present and the storage requirement of reservoirs will be 247.6 Mm³ in 2085s.
- In Gyeongnam, effective reservoir storage is 211.9 Mm³ in present and the storage requirement of reservoirs will be 198.5 Mm³ in 2085s.
- In Gyoengbuk, effective reservoir storage is 317.7 Mm³ in present and the storage requirement of reservoirs will be 357.2 Mm³ in 2085s.

- In Jeonnam, effective reservoir storage is 1141.0 Mm³ in present and the storage requirement of reservoirs will be 966.7 Mm³ in 2085s.
- In Jeonbuk, effective reservoir storage is 1850.6 Mm³ in present and the storage requirement of reservoirs will be 2272.9 Mm³ in 2085s.
- In Chungnam, effective reservoir storage is 384.3 Mm³ in present and the storage requirement of reservoirs will be 459.9 Mm³ in 2085s.
- In Chungbuk, effective reservoir storage is 160.1 Mm³ in present and the storage requirement of reservoirs will be 143.8 Mm³ in 2085s.

3.2.4 Summary of indicators affecting the agricultural water resources.

◦ To assess vulnerabilities to climate change is important in the development of appropriate national adaptation strategies. Vulnerability indicators can be useful tools for estimating the impact of climate change. Adaptive capacity to climate change comprises these vulnerability indicators. Many studies have been conducted on how to yield the vulnerability indicators due to climate change.

◦ In this study, the vulnerability indicators to be applied to Korea can be estimated using the indices of agricultural demand and supply for water. The vulnerability of agricultural water necessary for the assessment of an adaptive capacity, can be estimated by comparing crop water demands to supply capacities available from agricultural reservoirs.

◦ Evaluation of vulnerabilities on regional agricultural water is one of the basic processes necessary in the making of policies on agricultural reservoirs management.

4. Practical use of the results

◦ The results of this study, which is based on the analysis of future climate change, can be useful in the planning of disaster prevention measures and water management policies for agricultural industry.

◦ Taking climate changes into consideration, it is expected that the followings could be included in the management policies of agricultural water resources:

- To establish countermeasures to manage agricultural water resources.
- To establish new design standards for water management facilities.
- To establish water plans for sustainable agriculture.

요 약 문

1. 과제명: 기후변화에 따른 농업용수 영향평가 연구(최종)

2. 연구기간: 2011.1 ~ 2011. 12

3. 연구개요

3.1 연구배경 및 필요성

○ 농업은 기후변화에 가장 민감한 분야라고 할 수 있다. 안정적이고 지속적인 작물 생산을 위해서는 기후변화가 농업수자원에 미치는 영향에 대하여 정확히 파악하고, 이로 인해 발생할 수 있는 부정적 효과를 최소화하기 위한 연구가 필요하다. 즉 기온 상승, 강수량 및 강우강도 변화 및 일조시간의 변화 등의 기후변화에 따른 농업 전반에 미치는 영향에 대한 평가가 필요하다.

○ 지구온난화에 따른 기온상승, 강수량의 규모, 빈도 및 패턴의 변화는 수문순환과 유출량 변화 등 수자원의 변화에 직접적인 영향을 줄 것으로 판단된다. 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.

○ 국내외에서 기후변화에 의한 농업 및 수자원 변화에 관한 다양한 연구가 활발하게 이루어지고 있으며, 여러 종류의 전지구모형 자료가 활용되고 있다. 그러나 각 모형의 특성과 시나리오 조건에 따라 연구 결과가 상이하게 나타남에 따라 미래 기상자료의 불확실성을 고려한 농업 수자원 변화 분석 연구가 필요할 것으로 사료된다.

3.2 연구목적

○ 본 연구에서는 다양한 미래 기후변화 기상자료의 불확실성을 평가하고 농업용수의 취약성을 알아보기 위하여 기후변화에 따른 저수지 필요저수량의 빈도분석 및 평가를 수행하였다. 또한 관개용 저수지를 중심으로 농업용수 영향지표를 조사하고 이를 통한 농업용수 관리 방안을 제언하고자 한다.

4. 연구내용

4.1 연구방법

○ 다양한 미래 기상자료의 불확실성 평가

- 미래 기상자료의 요소별 분석

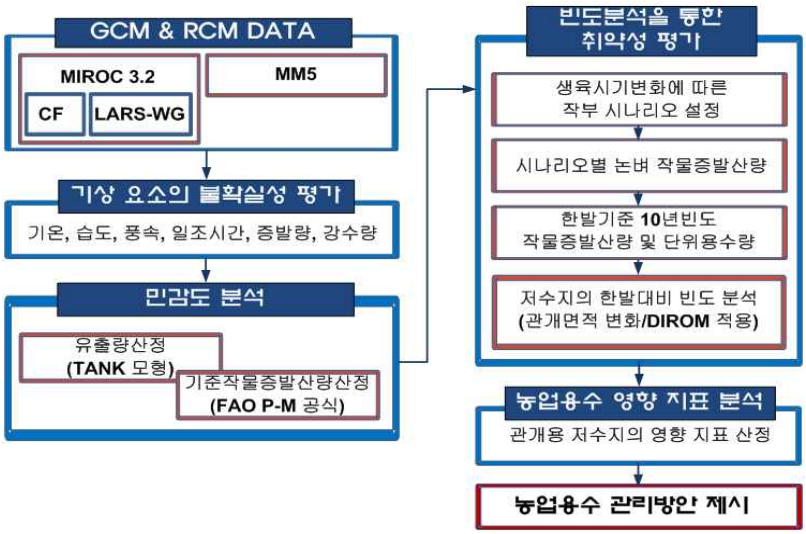
○ 유출량 및 기준작물 증발산량 민감도 분석

- 다양한 미래 기상자료를 활용하여 유출량 및 기준작물 증발산량 산정

○ 농업용수 취약성 평가

- 논벼 작부시기와 미래 토지이용 변화에 따른 필요수량 산정
- 한발기준 10년 빈도 작물증발산량 및 단위용수량 산정
- 저수지 한발대비 빈도 분석

○ 농업용수 영향지표의 정리



< 대상지: 도별 저수지 및 연구 범위>

지역	저수지	저수지 유역 (ha)	연구 범위 (시/군)
경기	마둔	529	안성/용인/이천
강원	원창	305	춘천/홍천
충북	원남	1,080	음성/진천/괴산
충남	고풍	1,293	서산/당진/예산
전북	인교	841	전주
전남	대포	260	여수
경북	마북	650	포항
경남	남성	72	진주

4.2 연구결과

4.2.1 다양한 미래 기상자료의 불확실성 평가

○ 본 연구에서는 MIROC 3.2에서 모의된 미래 기상자료를 CF와 LARS-WG로 상세화한 자료와 MM5의 미래 기상자료, 총 3가지 미래 기상자료 결과의 기상 요소별 불확실성을 살펴보기 위해 6가지 요소별로 시기별 변화 경향과 월별 강수량, 기온의 증가 경향을 편이 그래프를 통해 살펴보았다.

○ 연평균 강수량의 경우 전남 대포저수지의 2010s에서 2030s, 경남 남성저수지의 2010s부터 2040s까지 강수량이 감소하는 것으로 나타났고, 다른 대부분의 경우 미래 강수량이 증가하는 것으로 모의되었다. 기준년도에 비해 가장 큰 증가량을 보인 경우는 경기 마둔저수지로 2050s에 46% 증가하는 것으로 나타났고, 미래 강수량의 최대값과 최소값의 변동 폭이 가장 큰 경우는 충북 원남저수지로 2040s에 82% 범위를 보여 불확실성이 큰 기간으로 나타났다.

○ 연평균 기온의 경우 8개 저수지 모두 2010s에서 2090s까지 꾸준히 증가하는 경향을 나타내며, 특히 강원 원창저수지는 2090s에 과거 기준년도의 연평균 기온보다 4.42℃ 증가하는 것으로 모의되었다. 미래 기온의 최대값과 최소값의 변동 폭이 가장 큰 경우는 충북 원남저수지로 2030s에서 1.58℃ 범위를 보여 불확실성이 큰 기간으로 나타났다.

○ 연평균 증발량의 경우 8개 저수지 모두 2010s에서 2090s까지 꾸준히 증가하는 경향을 보이지만, 경상북도 마북저수지는 2010s부터 2030s까지 과거 기준년도와 비교했을 때 연평균 증발량이 과거보다 적게 모의되는 경향을 나타냈다.

○ 연평균 습도의 경우 8개 저수지 모두 과거 기준년도와 비교 하였을 때, 연평균 습도는 과거 기준년도에 비해 감소하는 경향을 보였고, 특히 전라북도 인교저수지에서 2010s~ 2090s시기에 약 -7% 감소하는 것으로 나타나 인 가장 큰 변화를 나타냈다.

○ 연평균 일조시간은 8개 저수지 모두 과거 기준년도와 비교하였을 때 0.5hr에서 1.5hr까지 증가하는 하는 경향을 나타내었으며, 특히 경북 마북저수지는 2090s에 과거 기준년도에 비해 1.57hr로 가장 큰 변화를 보였다.

○ 연평균 풍속의 경우, 전남 대포저수지의 2050s~2090s, 경북 마북저수지의 2020s~2090s 기간에 감소하는 것으로 모의되고 다른 6개 저수지에서 과거에 비해 2010s~ 2090s시기에 풍속이 증가하는 경향을 나타내었다. 특히 대포저수지의 2080s에는 -0.24m/s로 가장 크게 감소하는 것으로 나타났다.

4.2.2 유출량 및 기준작물증발산량 민감도 분석

○ 본 연구에서는 GCM인 MIROC 3.2를 CF와 LARS-WG로 상세화한 일별 미래 기상자료와 RCM인 MM5로 모의한 미래 기상자료를 이용하여 8개 저수지를 대상으로 100년간의 일별 유출량과 기준작물증발산량을 모의하였다. 미래 유출량 산정을 위해 전년도 연구 (농어촌 연구원, 2010)를 통해 산정된 대상 저수지별 유역내 토지이용변화 면적과 TANK 모형을 이용하여 산정하였다.

○ 시기별 연 유출량 변화를 모델별로 살펴보면 CF 기법의 경우, 전남 여수, 경북 포항, 경남 진주 지역 등에서 각각 135.5 mm, 45.0 mm, 278.0 mm 감소하였다가 이후 증가하는 경향을 보였으며, 이후 모든 지역에서 연유출량이 증가하는 것으로 모의하고 있다. 반면 LARS-WG에서는 모든 지역의 모든 시기에서 전 기간보다 연유출량이 증가하는 것으로 모의되었으며 특히 경기 수원지역과

충북 청주지역의 증가가 크게 나타났다. MM5의 경우 8개 대상지역 모두 2025s 기간에 연유출량이 다소 감소하다가 이후 증가하는 것으로 모의되었는데 다른 두 모델의 유출량 모의 결과보다 유출량 증가폭이 적은 것으로 모의되었다.

○ 미래 기상자료에 따른 100년간의 일별 기준작물증발산량을 모의결과 CF의 경우, 전반적으로 남부지방의 전주, 여수, 포항, 진주지방의 기준박물증발산값이 중부지방보다 크게 산정되었으나 그 변화폭은 모든 지역에서 유사하게 증가하는 경향을 나타냈다. 시기별 증가폭은 2025s에 과거 기준년도에 비해 평균 115 mm증가하는 것으로 나타났으나 수원에서 219.8 mm, 전주지역에서 268.5 mm 증가하는 것으로 평균 증가폭을 크게 상회하는 값을 보였다. 2055s에는 평균적으로 전 기간에 비해 46.6 mm, 2085s에는 29.3 mm 정도 증가하는 것으로 나타났다.

○ 반면 LARS-WG을 이용하여 기준작물증발산량을 모의한 결과, 시기별로 2025s, 2055s, 2085s에 각각 직전 시기 대비 44.7 mm, 34.7 mm, 38.5 mm 증가하는 것으로 모의되어 CF보다 고른 증가폭을 나타냈다. 이에 비해 MM5에서는 79.4 mm, 48.1 mm, 49.89 mm 증가하는 것으로 모의되어 LARS-WG 보다는 약간 크게 기준작물증발산량 산정하고 있었으며 남부지방에 위치한 전남 여수와 경북 포항의 2025s 시기 기준작물증발산량이 각각 122.2 mm, 134.4 mm 증가하는 것으로 나타나 평균 경향을 상회하는 결과를 나타냈다.

4.2.3 농업용수 취약성 평가

○ 본 연구에서는 기후변화 시나리오를 적용하여 지역별, 시기별 작물증발산량 및 연최대 필요저수량과 단위용수량을 산정하고 시기별 변화를 분석하였다. 또한 기후변화로 인한 기온 상승은 미래 이앙일의 변화를 가져올 수 있기 때문에 기존의 이앙일을 기준으로 이앙일을 10일 앞당겨졌을 경우와 이앙일이 10일 늦춰졌을 경우의 결과를 산정하고 기존 이앙일의 경우와 비교하였다. 또한 현재의 유효저수량과 미래 필요저수량 산정결과를 활용하여 미래 필요 유효저수량의 변화를 분석하였다.

1) 시기별 작물증발산량 변화 분석

○ 먼저 지역별 10년빈도 작물증발산량 산정 결과를 살펴보면, 경북 포항의 10년빈도 증발산량이 가장 높게 산정되었고 다음으로 전남 여수의 증발산량이 높게 나타났다. 10년빈도 증발산량은 중부지역, 남부지역 모두 정도의 차이는 있으나 대체로 증가하는 경향이 있음을 확인할 수 있었다.

○ 다음으로 이앙시기 변화에 따른 10년빈도 작물증발산량 산정 결과를 살펴보면, 이앙일이 10일 앞당겨질 경우 2025s 시기의 경북 포항지역의 10년빈도 작물증발산량이 기존 이앙일 대비 1.3%의 가장 높은 증가율을 나타내었고, 가장 높은 감소율은 2085s 시기의 경북 포항지역의 12.0%로 나타났다. 이앙일이 10일 늦춰질 경우 2025s 시기의 충남 서산지역의 10년빈도 작물증발산량이 기존 이앙일 대비 0.7%의 가장 높은 증가율을 나타내었고, 가장 높은 감소율은 2085s 시기의 전남 여수지역의 2.2%로 나타났다.

2) 시기별 필요저수량 변화 분석

○ 저수지별 10년빈도 연최대 필요저수량을 산정한 결과를 살펴보면 다음과 같다. 1995s 대비 10년빈도 연최대 필요저수량의 최대 증가율을 보인 곳은 경기 마둔저수지로서 2025s 시기에 약 61.6% 증가하는 것으로 나타났고, 최대 감소율은 2085s 시기의 강원 원창저수지의 24.3%로 나타났다.

○ 본 연구에서는 수자원 장기종합계획의 시나리오별 연최대 필요저수량을 산정하고 이를 앞서 산정되 10년빈도 연최대 필요저수량 산정결과와 비교하였다. 수자원 장기종합계획의 시나리오별 산정결과를 살펴보면, 고수요 시나리오일 경우 1995s 대비 연최대 필요저수량의 증가율이 높게 나타났으며, 기준수요와 저수요 시나리오로 옮겨갈수록 증가율이 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 특히 저수요 시나리오의 경우 충북 원남저수지를 제외하고 모든 저수지의 연최대 필요저수량이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

○ 이앙시기 변화에 따른 10년빈도 연최대 필요저수량 산정 결과, 이

앙일이 10일 앞당겨질 경우 2025s 시기의 전북 인교저수지 10년빈도 연최대 필요저수량이 기존 이앙일 대비 11.9%의 가장 높은 증가율을 나타내었고, 가장 높은 감소율은 2025s 시기의 경북 마북저수지의 13.1%로 나타났다. 이앙일이 10일 늦춰질 경우 2025s 시기의 경남 남성저수지 10년빈도 연최대 필요저수량이 기존 이앙일 대비 12.6%의 가장 높은 증가율을 나타내었고, 가장 높은 감소율은 2025s 시기의 전북 인교저수지의 9.0%로 나타났다.

3) 시기별 단위용수량 변화 분석

○ 각 저수지의 시기별(1995s, 2025s, 2055s, 2085s) 단위용수량을 산정한 결과는 다음과 같다. 전체적으로 중부지역의 저수지의 경우 1995s 시기에 비해 2025s, 2055s, 2085s 시기의 단위저수량이 감소하는 경향을 나타내었으며, 남부지역 저수지의 경우 1995s 시기에 비해 2025s, 2055s, 2085s 시기의 단위저수량이 증가하는 경향을 나타내었다.

○ 이앙시기 변화에 따른 중부지역의 단위용수량의 변화를 살펴보면, 이앙기 단위용수량은 이앙시기가 앞당겨질 경우 감소하는 경향이 나타났고, 이앙시기가 늦춰질 경우 증가하는 경향이 나타났다. 본답기 단위용수량은 충남 고풍저수지를 제외하고 이앙기가 앞당겨질 경우 증가하는 경향이 나타났고, 이앙기가 늦춰질 경우 강원 원창저수지와 충남 고풍저수지는 증가하고, 경기 마둔저수지와 충북 원남저수지는 감소하는 경향이 나타났다.

○ 이앙시기 변화에 따른 남부지역의 단위용수량의 변화를 살펴보면, 이앙기 단위용수량은 이앙시기 변화에 따라 변화폭이 -0.69%~0.78%로 상당히 적은 것으로 나타났다. 본답기 단위용수량은 전북 인교저수지와 경남 남성저수지에서 이앙기가 앞당겨질 경우 감소하는 경향이 나타났고, 이앙기가 늦춰질 경우 모든 저수지에서 단위용수량이 감소하는 경향이 나타났다.

4) 미래 지역별 필요 유효저수량

○ 본 연구에서는 10년빈도 연최대 필요저수량의 시기별 변화율 산정하고, 이를 현재의 도별 유효저수량에 적용하여 미래의 필요 유

효저수량의 변화를 분석하고자 하였다. 전북지역은 총 유효저수량이 약 18억㎥으로 가장 많은 저수량을 보유하고 있고, 미래의 10년빈도 연최대 필요저수량이 증가함에 따라 미래의 필요 유효저수량은 약 20억㎥이상으로 증가하게 된다. 전체 지역의 결과를 종합하면, 현재 총 유요저수량은 약 43억㎥이며, 2085s가 될 때 필요 유효저수량은 약 47억㎥으로 증가하게 된다.

4.2.4 농업용수 영향 지표 정리

○ 취약성에 대한 개념은 생태적 측면뿐만 아니라 사회, 경제학적 측면도 포함할 수 있기 때문에, 이를 평가하기 위해 다양한 측면의 정보를 종합할 수 있는 혼합 지표 (composite indicator) 연구가 활발히 진행되고 있으며, 직접 측정하거나 관측할 수 없기 때문에 기후변화 취약성 지수는 기후 변화의 잠재적인 영향을 평가하기에 유용한 통합 도구이다.

○ 기후 변화 취약성 평가지수와 관련된 국내외 문헌상에 나타난 방법론은 개념적으로 우리나라의 각 지역별 취약성 평가에 그대로 활용되고 있다. 각 분야별 기후 변화 취약성 지수는 3가지 항목(기후노출, 민감도, 적응 능력)의 대리 변수를 경험적으로 결정하므로 대리변수 선정에 대한 과학적인 근거가 필요하다.

○ 농업용수 관리의 기후변화 적응능력에 관한 지표는 농업용수 수요량과 공급량 자료를 활용할 수 있다. 즉, 농업용수의 취약성은 농업용 저수지를 통한 용수 공급량을 작물의 용수 수요량과 비교하여 농업 부분의 적응 능력을 평가할 수 있으며, 농업용수 수요량과 공급량의 시간적, 공간적 변화를 분석하고 이를 고려한 관개용 저수지를 대상으로 농업용수 부문의 기후변화에 대한 잠재 적응능력을 표현하는 지수를 개발하고 향후 미래 기후변화 시나리오에 따라 적응능력의 예측으로 확장되어 기후변화에 대비한 농업용수 관리 및 취약성에 따른 농업용 저수지 관리방안을 제시하여 정책 수립의 근거가 될 수 있을 것이다.

5. 기대효과

○ 농업수자원 대응 결과를 활용하여 다음과 같은 정책 수립에 기초 자료로 활용할수 있을 것으로 판단됨

- 기후변화를 고려한 농업 수자원 대책 수립
- 기후변화를 고려한 수리 시설물 설계 기준 수립
- 기후변화를 고려한 지속 가능 농업을 위한 수자원 계획수립

<제목 차례>

1. 서론 **1**
1.1 기후변화 연구동향 1
1.1.1 국내 연구동향 1
1.1.2 해외 연구동향 1
1.1.3 국내주요기관의 연구 결과 1
2 기후변화와 농업 수자원 **4**
2.1 국내 연구 동향 4
2.2 해외 연구 동향 4
2.3 기후변화 관련 선행연구 분석 4
3. 재료 및 방법 **7**
3.1 연구 대상지 7
3.2 다양한 미래 기상자료의 불확실성 평가 8
3.2.1 미래 기상자료 개요 8
3.2.3 미래 기상자료의 요소별 경향 8
3.2.3 지역별 불확실성 9
3.3 유출량 및 기준작물증발산량 민감도 분석 9
3.3.1 유출량 산정 9
3.3.2 기준작물증발산량 산정 방법 11
3.4 논벼 물수지 분석 12
3.4.1 저수지 물수지 분석방법 12
3.4.2 저수지 유입량 산정 방법 13
3.4.3 논 용수 수요량 13
3.4.4 필요저수량 결정 16
3.4.5 단위용수량 결정 17
4. 토지이용변화 분석 및 미래 기상자료의 불확실성 평가 **18**
4.1 토지이용 변화 분석 18
4.1.1 CLUE 모델을 이용한 미래 토지이용 변화 모델링 18
4.1.2 자료 구축 20

4.2 미래 기상자료의 요소별 경향 29
4.2.1 연평균 강수량 33
4.2.2 연평균 기온 31
4.2.3 연평균 증발량 32
4.2.4 연평균 습도 33
4.2.5 연평균 일조시간 34
4.2.6 연평균 풍속 35
4.3. 시계열 변화 36
4.4. 유출량 및 기준작물증발산량 민감도 분석 39
5. 농업용수 취약성 평가 42
5.1 시기별 작물증발산량 변화 분석 42
5.1.1 시기별 작물증발산량 산정 결과 42
5.1.2 시기별 10년빈도 작물증발산량 산정 결과 43
5.1.3 이앙시기 변화에 따른 작물증발산량 산정 결과 44
5.1.4 이앙시기 변화에 따른 10년빈도 작물증발산량 산정 결과 47
6. 시기별 필요저수량 변화 분석 50
6.1 저수지 물수지 분석 입력자료 구축 50
6.2 시기별 연최대 필요저수량 산정 결과 53
6.3 시기별 10년빈도 연최대 필요저수량 산정 결과 58
6.4 이앙시기 변화에 따른 시기별 연최대 필요저수량 산정 결과 61
6.5 이앙시기 변화에 따른 10년빈도 연최대 필요저수량 산정 결과 64
7. 시기별 단위용수량 변화 분석 67
7.1 시기별 단위용수량 산정 결과 67
7.2 이앙시기 변화에 따른 단위용수량 산정 결과 69
8. 미래 지역별 필요 유효저수량 74
9. 농업용수 영향 지표 정리 75
9.1 기후변화와 취약성 75
9.2 기후변화 취약성 및 민감도분석 연구동향 75
9.3 농업용수의 취약성 80
10. 농업용수 관리 방안 81
10.1 농업용수 관련 국내 여건변화 81
10.2 농업용수 관련 국제적 논의 82

10.3 농촌수자원의 지속적 관리 지원 방안 85
10.4 논용수관리현황과 손실 85
10.5 논용수 손실량 저감 방안 86
10.6 손실저감을 위한 정책 강화 86
10.7 가뭄 극복을 위한 농업기술적 대응 방안 87
11. 지속가능한 농업용수관리 방향과 과제 89
11.1 지속가능한 용수관리의 개념 및 기본방향 89
11.1.1 지속가능한 용수관리의 개념 89
11.1.2 기본방향과 적용원칙 89
11.2 지속가능한 농업용수관리를 위한 과제 91
11.2.1 통합유역관리시스템의 도입 91
11.2.2 농업용수관리자동화 시스템 구축 92
11.2.3 환경친화적 농촌용수 개발 및 관리 93
11.2.4 농업인의 인식전환과 참여 확대 93
11.2.5 농업용수관리체계 일원화 94
12. 결론 96

참고문헌 100

<표 차례>

(표 1-1) 기후변화에 따른 농업부분 변화의 기존 연구 내용 3
(표 3-1) 도별 저수지 및 연구 범위 8
(표 4-1) 도별 저수지 및 연구 범위 23
(표 4-2) 토지피복분류 및 구동요인 24
(표 4-3) 유역내 토지이용 변화 요소별 비율 28
(표 4-4) 시기별 관개면적 변화 증감율 28
(표 4-5) 마둔저수지의 미래 기상자료에 따른 과거 기준년도의 과거 평년값 비교 결과 37
(표 4-6) 마둔저수지의 3가지 미래 기상자료에 따른 평균 일별 유출량 변화 결과 40
(표 5-1) 시기별 연평균 작물증발산량 (중부지역) 42
(표 5-2) 시기별 연평균 작물증발산량 (남부지역) 42
(표 5-3) 시기별 10년빈도 작물증발산량 (중부지역) 43
(표 5-4) 시기별 10년빈도 작물증발산량 (남부지역) 44
(표 5-5) 이앙시기 변화에 따른 연평균 작물증발산량 (중부지역) 45
(표 5-6) 이앙시기 변화에 따른 연평균 작물증발산량 (남부지역) 45
(표 5-7) 이앙시기 변화에 따른 10년빈도 작물증발산량 (중부지역) 47
(표 5-8) 이앙시기 변화에 따른 10년빈도 작물증발산량 (남부지역) 48
(표 6-1) 중부지역 대상지구 기초자료 50
(표 6-2) 남부지역 대상지구 기초자료 51
(표 6-3) 시기별 관개면적 51
(표 6-4) 유역내 토지이용 비율 52
(표 6-5) 시나리오 설정 기본 기조(환경, 수요량, 경지면적) 53
(표 6-6) 시나리오 설정 기본 기조(주요지표적용) 54
(표 6-7) 수장기 경지면적 변화 예측 54
(표 6-8) 수장기 논면적 변화 예측 55
(표 6-9) 시기별 연최대 필요저수량 (중부지역) 56
(표 6-10) 시기별 연최대 필요저수량 (남부지역) 56
(표 6-11) 시기별 10년빈도 연최대 필요저수량 (중부지역) 59
(표 6-12) 시기별 10년빈도 연최대 필요저수량 (남부지역) 59
(표 6-13) 이앙시기 변화에 따른 연최대 필요저수량 (중부지역) 61

(표 6-14) 이앙시기 변화에 따른 연최대 필요저수량 (남부지역) 62
(표 6-15) 이앙시기 변화에 따른 10년빈도 연최대 필요저수량 (중부지역) 64
(표 6-16) 이앙시기 변화에 따른 10년빈도 연최대 필요저수량 (남부지역) 65
(표 7-1) 시기별 단위용수량 (중부지역) 67
(표 7-2) 시기별 단위용수량 (남부지역) 67
(표 7-3) 이앙시기 변화에 따른 단위용수량 (중부지역) 70
(표 7-4) 이앙시기 변화에 따른 단위용수량 (남부지역) 70
(표 8-1) 도별, 시기별 10년빈도 연최대 필요저수량 74
(표 8-2) 도별, 시기별 유효저수량 변화 산정 결과 74
(표 9-1) 취약성-탄력성 원형 모형 (VRIP model)에서 사용된 지표, 부문, 대용변수 78
(표 9-2) 취약성 부문별 지표 79
(표 9-3) 수자원 취약성 지표 79
(표 10-1) 총지지추정치에서 물지원 실태(2006년 기준) 84
(표 11-1) 지속가능한 농업용수관리를 위한 원칙 91

<그림 차례>

<그림 3-1> 연구 대상지 7
<그림 3-2> 3단 TANK 모형의 개념도 10
<그림 3-3> 저수지에서의 물수지 구성 12
<그림 3-4> 논용수 수요량 산정 흐름도 14
<그림 3-5> 이앙재배시 작물 재배 기간 (농림부, 1998) 16
<그림 4-1> CLUE 모델 수행 과정 (Verburg et al., 1999) 18
<그림 4-2> 토지이용 변화 행렬 19
<그림 4-3> CLUE-s 모델의 토지이용변화 모의순서 20
<그림 4-4> A2 시나리오에서의 토지이용변화 모의 결과 (AIM: OECD) 20
<그림 4-5> B2 시나리오에서의 토지이용변화 모의 결과 (AIM: OECD) 21
<그림 4-6> 토지이용변화 시나리오 구축 21
<그림 4-7> A1B 시나리오에서 토지피복면적 변화 22
<그림 4-8> 지역별 시가화·농업지역 면적 변화 시나리오 23
<그림 4-9> 토지이용변화 분석을위한 기초자료 구축 27
<그림 4-10> 기준년도(1980~2009)에 대한 마둔저수지의 연평균 강수량 변화 30
<그림 4-11> 기준년도(1980~2009)에 대한 마둔저수지의 연평균 기온 변화 31
<그림 4-12> 기준년도(1980~2009)에 대한 마둔저수지의 연평균 증발량 변화 32
<그림 4-13> 기준년도(1980~2009)에 대한 마둔저수지의 연평균 습도 변화 33
<그림 4-14> 기준년도(1980~2009)에 대한 마둔저수지의 연평균 일조시간 변화 34
<그림 4-15> 기준년도(1980~2009)에 대한 마둔저수지의 연평균 풍속 변화 35
<그림 4-16> 마둔저수지의 기온과 강수의 월평균 특성 (2010~2039) 38
<그림 4-17> 마둔저수지의 기온과 강수의 월평균 특성 (2040~2069) 38
<그림 4-18> 마둔저수지의 기온과 강수의 월평균 특성 (2070~2099) 38
<그림 4-19> 마둔저수지의 미래 기상자료에 따른 최대 일별 유출량 (2010~2039) 41
<그림 4-20> 마둔저수지의 미래 기상자료에 따른 최대 일별 유출량 (2040~2069) 41
<그림 4-21> 마둔저수지의 미래 기상자료에 따른 최대 일별 유출량 (2070~2099) 41
<그림 5-1> 시기별 연평균 작물증발산량 43
<그림 5-2> 시기별 10년빈도 작물증발산량 44
<그림 5-3> 이앙시기 변화에 따른 연평균 증발산량(2025s) 46

<그림 5-4> 이앙시기 변화에 따른 연평균 증발산량(2055s) 46
<그림 5-5> 이앙시기 변화에 따른 연평균 증발산량(2085s) 46
<그림 5-6> 이앙시기 변화에 따른 10년빈도 증발산량(2025s) 48
<그림 5-7> 이앙시기 변화에 따른 10년빈도 증발산량(2055s) 49
<그림 5-8> 이앙시기 변화에 따른 10년빈도 증발산량(2085s) 49
<그림 6-1> 시기별 연최대 필요저수량 57
<그림 6-2> 수자원 장기종합계획에 따른 연최대 필요저수량 57
<그림 6-3> 시기별 10년빈도 연최대 필요저수량 60
<그림 6-4> 수자원 장기종합계획에 따른 10년빈도 연최대 필요저수량 60
<그림 6-5> 이앙시기 변화에 따른 연최대 필요저수량(2025s) 62
<그림 6-6> 이앙시기 변화에 따른 연최대 필요저수량(2055s) 63
<그림 6-7> 이앙시기 변화에 따른 연최대 필요저수량(2085s) 63
<그림 6-8> 이앙시기 변화에 따른 10년빈도 연최대 필요저수량(2025s) 65
<그림 6-9> 이앙시기 변화에 따른 10년빈도 연최대 필요저수량(2055s) 66
<그림 6-10> 이앙시기 변화에 따른 10년빈도 연최대 필요저수량(2085s) 66
<그림 7-1> 시기별 이앙기 단위용수량 68
<그림 7-2> 시기별 본답기 단위용수량 68
<그림 7-3> 이앙시기 변화에 따른 이앙기 단위용수량(2025s) 71
<그림 7-4> 이앙시기 변화에 따른 이앙기 단위용수량(2055s) 71
<그림 7-5> 이앙시기 변화에 따른 이앙기 단위용수량(2085s) 72
<그림 7-6> 이앙시기 변화에 따른 본답기 단위용수량(2025s) 72
<그림 7-7> 이앙시기 변화에 따른 본답기 단위용수량(2055s) 73
<그림 7-8> 이앙시기 변화에 따른 본답기 단위용수량(2085s) 73
<그림 9-1> 기후변화 연구관련 진행 과정 76
<그림 11-1> 농업 · 농촌용수관리의 통합유역관리시스템 구성도 92

1. 서론

1.1 기후변화 연구동향

1.1.1 국내 연구동향

농업은 다른 산업과 달리 원천적으로 기후적 조건과 변화에 크게 좌우되는 분야로써 이러한 기후변화에 따른 농업환경변화를 보다 정확히 예측하여, 이를 바탕으로 효과적인 대응 전략 마련이 절실히 요구된다. 따라서 기후변화가 농업에 미치는 영향에 대한 다양한 연구가 이루어졌으며 이는 다음과 같다.

윤성호 등(2001)은 2001년 IPCC에서 보고한 기후변화의 과정과 예측 시나리오와 기상청에서 발간한 한국기후표를 이용하여 우리나라의 기온과 강수량의 변화로부터 향후 지구온난화로 인한 농업에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 농업부문의 기후변화 대책으로 기상재해에 대한 사전대책 및 기후변화에 대한 적응력 증대 등과 같은 농업생태계 안정에 역동적으로 대응해야 한다고 제언하였다.

윤성탁(2005)은 지구온난화와 GCMs 모델결과와 IPCC에서 발표한 기후변화의 예측 시나리오를 중심으로 작물기간 동안의 적산온도가 상승하여 재배적지 및 한계선이 변화하고 병해충에 의한 작물의 피해 및 우리나라 농업생산에 대한 전망을 하였으며, 이에 따른 대응 방안을 모색하고자 하였다.

정유란 등(2006)은 기상연구소에서 제작한 온실가스 증가에 따른 한반도 기온 및 강수량 변화 시나리오와 벼의 생장모형을 이용하여 벼 작황의 지리적 분포양상을 복원함으로써 지구온난화에 따른 우리나라 벼농사지대의 생산성을 재평가하였으며, 그 결과 출수기가 단축되고 수량이 감소하는 것으로 나타났다.

나영은 등(2007a, 2007b)은 기후변화에 따른 농업부문의 영향 및 적응방안, 취약성 평가에 관한 해외의 국제기관과 각 나라의 연구기관의 취약성 평가방법 및 연구동향을 살펴보았으며, 그 결과 과거 발생상황 및 피해상황을 종합적으로 분석하여 이상기후에 대한 취약지역을 선정하고 적응능력을 향상시키는 기술과 정책이 필요하다고 제언하였다.

심교문 등(2008)은 농업생산의 관점에서 기후자원을 평가하는 농업기후지수를 이용하여 기후변화에 따른 식물온도 출현지속기간, 작물온도 출현지속

기간, 벼 이앙기의 한발지수, 기후생산력지수, 무상기간 및 기후학적 정적 벼 출수기의 변동성을 과거와 비교·분석하였다.
이승호 등(2008)은 농업관련 통계자료와 기후자료를 분석하여 식량작물의 벼와 보리 및 과수류 그리고 채소류의 생육시기와 생육상태의 변화 경황과 이와 관련된 기후요소를 분석하여 기후변화가 농업생태에 미치는 영향을 분석하였다.

서영호 등(2010)은 강원 지역에서의 최근 10년간(2000～2009)의 기상 환경을 과거 30년간의 평균(1971～2000)과 비교하여 벼 재배의 기상환경 변화 추이를 살펴보고, 고품질 쌀의 안정적인 생산을 위한 대책을 수립하기 위한 기초 자료를 제공하고자 하였다. 평년에 비해 기온이 0.5℃ 상승하고, 일교차는 0.1℃ 줄었으며, 강수량은 122mm 증가하였고, 일조시간은 151시간 감소하는 것으로 나타났다. 특히, 벼가 본답에서 주로 생육하는 6월부터 9월까지는 연중 기후 변화에 비해 강수량 증가(151mm)와 일조 시간 감소(86시간) 경향이 뚜렷하였다. 고품질 벼 생산을 위한 등숙 온도인 20～22℃를 기준으로 산출한 알맞은 출수기는 평년에 비해 춘천, 홍천, 원주, 강릉은 늦어졌으나, 철원은 앞당겨졌다.

1.1.2 해외 연구동향

Buan (1996)은 4개의 GCM 시나리오를 이용하여 필리핀에서의 기후변화에 따른 벼와 농작물의 취약성과 적용성을 파악한 결과, 벼의 경우 CO2 변화에 생육에 즉각적인 반응을 보이는 반면, 옥수수 작물의 경우 기온상승과 CO2 증가에 영향을 비교적 적게 받을 것으로 예상되었다.

Rosenberg et al. (2003b)은 HadCM2와 EPIC (Environmental Policy Integrated Climate) 모델을 이용하여 2025～2034년과 2090～2099년에 기후변화에 따른 작물생육과 생태계변화에 대하여 분석하였다.

1.1.3 국내주요기관의 연구 결과

기후변화에 따른 농업생태계 영향에 따른 취약성을 평가하고 적응방안을 구축하려는 연구가 수행된 바 있다. 기후변화가 벼의 생산성에 미치는 영향으로 가장 크게 작용하는 것은 병해충에 의한 피해였으며 병해충의 급증 원인은 겨울철 고온과 잦은 강우빈도에 의한 일조시간의 부족으로

나타났다. 특히 일조량 부족은 미질을 크게 떨어뜨리는 결과를 초래한다. 또한 지구온난화에 의하여 작물기간은 길어지고, 벼 재배 북방한계선은 현재보다 북상할 것으로 연구되고 있으며, 벼의 수량은 현재의 벼 품종을 재배할 경우 CO2 농도가 증가되는 것은 일단 생산성에 좋은 영향을 미칠 수 있으나 고온현상은 생육기간을 단축시켜 생산량감소의 원인이 될 수 있다. 이에 따라 지구온난화에 따라 벼의 생산성은 약 11% 감소할 것으로 연구되고 있다(농촌진흥청, 2007).

남해안 지역의 기후변화에 대한 취약성 평가 연구도 수행된 바 있으며 연구결과 벼는 여름작물로 기온이 상승하면 재배 가능지역이 확대될 것으로 나타났다. 이앙재배에서는 조생종 재배지대가 중생종으로, 중생종 재배지대는 만생종으로 전환될 것이며, 현재 온도가 낮아 벼농사를 하지 않고 있는 표고 600m 이상의 산간지대에서 일부 조생종재배가 가능할 것으로 나타났다. 이에 따라 답의 면적은 전반적으로 증가하고, 벼의 생산량 역시 전반적으로 증가하게 될 추세이다. 기후변화에 따른 벼 이앙기와 성숙기 차이를 살펴보면 이앙기 조한일은 2~3일 빨라지고, 벼 재배 가능기간은 4~6일 증가하게 된다. 벼 출수기의 변화를 살펴보면 출수기조한일은 1~3일정도 빨라지고, 안전출수기는 1~2일 빨라지게 된다. 특히 목포, 완도 순천, 장흥 해남, 고흥, 통영, 마산, 진주 지역에서는 출수일이 더욱 빨라지고, 여수, 부산, 거제, 남해 지역에서는 출수일이 연장되는 결과가 분석되었다(기상청, 2009).

한반도 기후변화 시나리오와 농림업분야 대응방향에 대한 연구를 살펴보면 향후 10년간 봄, 가을에 강우량이 감소하고 여름철에 강우량이 증가하며, 기온도 최근 10년보다 상승할 것으로 예상되고 있다. 봄철과 가을철의 기온상승으로 봄은 빨리 오고 가을은 늦게까지 지속되어 작물생육유효온도 기간이 길어질 것으로 예상되며 작물재배기간의 차이는 기후변동에 따른 지역간 생산성 변화를 발생시킬 것으로 예상된다. 또한 봄철 강수량의 감소경향으로 인해서 봄 가뭄이 심해지고 식물체의 대사활동, 형태형성, 생장 및 수량형성에 영향을 미쳐 작물의 생장과 발육을 저하시킬 가능성이 높아지게 된다. 온난화 현상이 심화되면 우리나라와 같은 중위도 지역에서도 생육시기별로 고온 피해가 일어날 가능성이 높아지고 생육기간 중 전반적인 고온은 작물의 정상적인 생육기간을 단축시켜 작물의 수량과 품질 저하시키는 문제가 발생할 수 있다(농림부, 2003).

(표 1-1) 기후변화에 따른 농업부분 변화의 기존 연구 내용

산정 인자	산정 내용	기존 연구 결과	출처
이앙기조한일	일평균기온 15℃ 출현 첫날	▪ 1971~2000년에는 약 4~7일 빨라짐	이정태 등, 2003
수확기만한일	일평균기온 15℃ 출현 마지막날		
이앙기만한일	이앙에서 출수까지의 소요 적산 온도	▪ 조생종: 71~2000년에는 약 3일 늦어짐 ▪ 중생종보다 중만생종에 큰 영향을 미침	
출수기조한일	일최저기온 19℃가 출현되는 초일로부터 15일 후	▪ 1971~2000년에는 약 1~5일 빨라짐	
안전 출수기	일최저기온 19℃가 출현되는 초일로부터 20일 후	▪ 1971~2000년에는 약 1~5일 빨라짐	
안전 출수 및 출수만한일	일최저기온 10℃, 일평균기온 5℃ 이하가 되는 최종일부터 역산하여 적산온도 880℃(안전 출수 만한일) / 800℃(출수만한일)를 확보하게 되는 일	▪ 안전출수기와 출수기만한일의 지역적 편차 - 1971~2000년대에 0~6일 정도 늦어짐 - 울릉도와 추풍령은 차이가 없음 - 강릉, 대구, 광주에서는 차이가 큼	
출수기별 등숙기온	출수후 등숙기 40일 동안의 평균기온	▪ 1931~1960년의 출수기가 7월26일인 경우 등숙기 40일 간의 평균기온은 25~26℃. ▪ 출수기가 10일 정도 늦어질수록 등숙기온은 1~2℃ 낮아짐	심교문 등, 2008
적정 벼 출수기	출수 후 40일간의 일 평균기온	▪ 벼출수기의 출현 날짜가 늦춰짐 ▪ 적정 출수시작일과 종료일이 70년대보다 7일 정도 늦춰짐	
식물온도 출현지속기간	일 평균기온 5℃이상인 일수	▪ 평균 출현초일은 과거 18년간보다 평균 5일 빠름 ▪ 평균 출현종일은 평균 3일 늦음 ▪ 출현지속기간은 약 9일 정도 길어짐	
작물온도 출현지속기간 (여름작물)	일 평균기온 10℃이상 일수	▪ 전국 평균 214일로 과거보다 평균 4일 정도 길어짐 ▪ 태백 준고랭지 및 소백산간지에서는 2~4일 짧아짐 ▪ 중부의 일부지역은 과거보다 10일 이상 길어짐	
작물온도 출현지속기간 (벼)	유효온도 15℃ 이상으로 벼의 본답 모내기가 가능해지기 시작하는 시기	▪ 과거보다 4일 정도 빨라짐	
벼 이앙기의 한발지수	4~6월 적산증발량과 강수량 비	▪ 태백고냉 및 준고냉지, 영남 내륙산간 및 분지지역을 중심으로 개선 ▪ 근래에 증가한 강수량에 비해서 개선폭은 적은편 임	
벼 이앙기의 저온출현 변화	이앙시기를 5월 15일부터 6월 5일로 한정하고 저온출현 한계온도는 평균기온 13℃를 기준	▪ 이앙기의 저온출현율 2%의 등치선이 서해안을 중심으로 북상하여 전국적으로 저온 위험도가 낮아짐 ▪ 태백 고냉 및 준고냉지대와 동해안 중부와 북부 해안지대의 저온출현율도 낮아지고 있음	
기후생산력	출수기부터 출수기간 40일간의 평균기온 및 일조시간과 벼 수량과의 관계식	▪ 전국적으로 낮아지는 경향을 보임 ▪ 등숙기간의 일조시간의 감소와 등숙기간의 기온 상승에 기인	

2 기후변화와 농업 수자원

2.1 국내 연구 동향

기후변화가 농업수자원에 미치는 영향에 대한 연구를 살펴보면, 정상옥(2009)은 HadCM3 GCM 모형 자료를 이용하기 위하여 통계적 규모축소화 (downscaling) 방법의 일종인 kriging 방법을 사용하였으며 낙동강 권역의 농업용수 수요량을 분석한 결과, 유효강우량의 증가량이 증발산량의 증가량 보다 크기 때문에 단위용수량 및 관개요구량의 미래 시나리오에 대한 추정치가 감소할 것으로 예측되었다.

홍은미 등(2009)은 기상자료와 국립기상연구소에서 제공하는 A2 시나리오에 따른 기후변화 예측 결과를 바탕으로 LARS-WG 일 기상 생성모형을 이용하여 미래의 90년간의 일별 기상자료를 모의하여, 미래 기후변화 추이를 살펴보고 이에 따른 관개 기간 동안의 논벼의 작물증발산량을 산정하였다.

2.2 해외 연구 동향

Rosenberg et al. (2003a)은 기후변화가 관개용수에 미치는 영향을 분석하기 위하여 HadCM2모델을 이용하여 유역단위 시나리오를 만들고 기후변화에 따른 연 농업용수량 변화 뿐 아니라 계절별 영향에 대하여 미국의 대표적인 농업유역에서의 관개용수 공급 변화를 추정하였다.

Fischer et al. (2007)은 기후변화에 따른 전지구적, 지역적 농업용수 수요량의 잠재적 변화를 추정한 결과 관개량은 증가하는 것으로 나타났으며, 재생가능한 수자원 이용으로 수자원 이용량을 완화할 경우 완화하지 않은 것보다 40%정도 기후변화에 따른 관개량 감소효과를 나타낼 것으로 예상하였다.

Silva et al. (2007)는 HadCM3의 2050s 시나리오를 이용하여 스리랑카에서의 기후변화에 따른 우기(wet season)의 논벼에 대한 관개용수량 변화를 추정한 결과 A2 시나리오의 경우 23%, B2시나리오는 평균적으로 13%의 관개량이 증가할 것으로 추정되었다.

2.3 기후변화 관련 선행연구 분석

기후변화와 관련하여 다양한 분야에서 연구가 지속적으로 진행되고 있다. 우리나라 수자원 및 농업분야에 대한 연구로서는 기후변화에 따른 유역수자원의 민감도 분석에서 IPCC의 기후예측 시나리오대로 온난화가 진행된다고 가정했을 때 강물의 유량의 변화 폭이 커지고 물 부족과 수질오염이 심각한 문제로 대두될 수 있다고 배덕효(2004) 등에 의하여 분석 되었다. 이동규(2006) 등은 CCSM3 B1시나리오를 사용하여 한반도 지역기후에 대한 기후변화의 영향평가를 실시하였으며, 그 결과 봄·겨울의 길이가 감소하고, 여름은 증가하며, 봄의 시작이 빨라지는 것으로 조사되었다. 또한 한반도의 미래 지역기후변화로 인하여 이수기의 물 부족, 호우로 인한 재해피해 증가, 개화시기와 식생군의 변화가 야기될 것이라고 이동규(2006) 등이 연구한바 있다. 기후변화가 농작물 생육환경과 작물 생산에 미치는 영향으로는 1971~2000년에는 4월 24일에서 5월 16일 정도로 약 4~7일 빨라졌으며, 출수조한일은 1~5일 빨라지는 것으로 이정택(2003) 등에 의하여 분석되었다.

기후변화가 농업수자원에 미치는 영향에 대한 연구를 살펴보면, 정상옥(2009)은 HadCM3 GCM 모형 자료를 이용하기 위하여 통계적 규모축소화 (downscaling) 방법의 일종인 kriging 방법을 사용하였으며 낙동강 권역의 농업용수 수요량을 분석한 결과, 유효강우량의 증가량이 증발산량의 증가량 보다 크기 때문에 단위용수량 및 관개요구량의 미래 시나리오에 대한 추정치가 감소할 것으로 예측되었다. 홍은미 등(2009)은 기상자료와 국립기상연구소에서 제공하는 A2 시나리오에 따른 기후변화 예측 결과를 바탕으로 LARS-WG 일 기상 생성모형을 이용하여 미래의 90년간의 일별 기상자료를 모의하여, 미래 기후변화 추이를 살펴보고 이에 따른 관개기간 동안의 논벼의 작물증발산량을 산정하였다. 배덕효 등 (2011)은 IPCC SRES A2, A1B, B1 시나리오를 이용하여 각 배출 시나리오에 대한 13개 GCMs 결과를 활용하여 10년 단위의 연평균 및 계절별, 5대강 유역에서 기온과 강수를 제시하였으며, 이 불확실성 범위는 국내 수자원 적응정책을 위해 유용한 정보로서 이용될 것이라고 제언하였다.

김민지 등 (2008)은 동아시아 지역에 초점을 맞추어 IPCC에서 제공하는 SRES A2, A1B, B1 시나리오별 24개 AOGCMs의 기온과 강수 모의

결과를 관측과 비교 분석하여 그 불확실성을 평가하였는데, 기온은 모델이 관측보다 낮게 모의하는 음의 편이가 두드러졌고, 강수에서는 모델이 관측보다 더 많이 모의하는 양의 편이를 보였다. Rosenberg et al. (2003)은 기후변화가 관개용수에 미치는 영향을 분석하기 위하여 HadCM2모델을 이용하여 유역단위 시나리오를 만들고 기후변화에 따른 연 농업용수량 변화 뿐 아니라 계절별 영향에 대하여 미국의 대표적인 농업유역에서의 관개용수 공급 변화를 추정하였다.

Fischer et al. (2007)은 기후변화에 따른 전지구적, 지역적 농업용수 수요량의 잠재적 변화를 추정한 결과 관개량은 증가하는 것으로 나타났으며, 재생가능한 수자원 이용으로 수자원 이용량을 완화할 경우 완화하지 않은 것보다 40%정도 기후변화에 따른 관개량 감소효과를 나타낼 것으로 예상하였다. Silva et al. (2007)는 HadCM3의 2050s 시나리오를 이용하여 스리랑카에서의 기후변화에 따른 우기 (wet season)의 논벼의 관개용수량 변화를 추정한 결과 A2 시나리오의 경우 23%, B2시나리오는 평균적으로 13%의 관개량이 증가할 것으로 추정되었다.

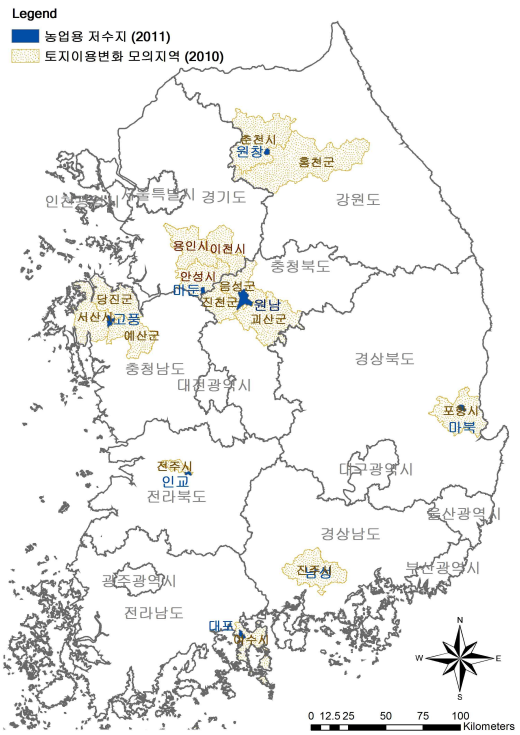
IPCC 4차보고서(2007a, 113p)에 따르면 1차보고서에서 적용된 GCM의 해상도는 약 500Km 정도였으나, 최근에는 약 110Km까지 공간해상도가 향상되었다고 제시하였다. 그러나 아직까지 GCM 결과를 유역스케일의 수자원 영향평가에 직접 활용하기에는 공간해상도가 낮다는 점과 아격자 규모의 물리과정 모사에 대한 알고리즘의 개선이 필요하다는 문제점이 남아 있는 실정이다. 역학적 상세화는 GCM 결과를 RCM의 경계자료로 사용하여 고해상도 결과를 생산하는 방법(Giorgi et al., 1990)이며, 통계적 상세화는 GCM 결과와 특정 지점의 기후변수와의 경험적인 관계를 이용하는 방법(von Storch, 1999)이다. 역학적 상세화는 물리적으로 일관된 고해상도의 기후모의 결과를 얻을 수 있는 장점이 있다. 이와 같이 역학적 상세화는 지역적인 기후특성을 모의할 수 있는 장점이 있으나 계산시간이 많이 걸리는 단점이 있다.

통계적 상세화는 경제적이고 간편한 방법이나 GCM 결과와 지상 변수들과의 물리적 연관성이 없고 복잡한 지형조건을 가진 지역에서는 변수들 사이의 공간적 상관성을 찾기 어렵다는 단점이 있다. 통계적 상세화 방법은 크게 세 그룹으로 구분할 수 있는데, 회귀 모형(regression model)을 이용한 방법, 기상 타이핑(weather typing) 기법, 기상발생기를 이용한 방법이다.

3. 재료 및 방법

3.1 연구 대상지

1차 연도 (농어촌연구원, 2009)의 연구 대상지를 바탕으로 각 저수지를 포함하는 시/군 단위의 행정구역을 선정하여 <그림 3-1>과 같이 연구 대상지를 결정하였다. 도별 하나의 시/군이 선정되었고 강원도 춘천, 경기도 수원, 충북 청주, 충남 서산은 중부지역으로 구분하였고 경북 포항, 경남 진주, 전북 전주, 전남 여수는 남부지역으로 구분하였다. 본 연구의 대상 저수지의 명칭과 유역면적, 해당 시/군 지역은 (표 3-1)과 같다. 이 중 전년도 (농어촌 연구원, 2010) 연구 대상지였던 전북 지역의 백석 저수지는 유역면적 (374 ha) 보다 관개면적 (855 ha)이 큰 저수지로서, 본 연구에 적합하지 않은 것으로 판단되어 금년도 연구에서는 유역면적 841 ha, 관개면적 213 ha인 인교 저수지로 변경하였다.



<그림 3-1> 연구 대상지

(표 3-1) 도별 저수지 및 연구 범위

지역	저수지	저수지 유역 (ha)	연구 범위 (시/군)
경기	마둔	529	안성/용인/이천
강원	원창	305	춘천/홍천
충북	원남	1,080	음성/진천/괴산
충남	고풍	1,293	서산/당진/예산
전북	인교	841	전주
전남	대포	260	여수
경북	마북	650	포항
경남	남성	72	진주

3.2 다양한 미래 기상자료의 불확실성 평가

하나의 온실가스 배출시나리오와 GCM 결과, 그리고 하나의 유출모형만을 이용하여 도출된 결과는 각 단계에 대한 불확실성들을 규명하지 못한 한계를 가지고 있다. 본 연구에서는 MIROC 3.2에서 모의된 미래 기상자료를 CF와 LARS-WG로 상세화한 자료와 MM5의 미래 기상자료, 총 3가지 미래 기상자료 결과의 불확실성 정도를 살펴보기 위해, 기상 요소별, 지역별 분석을 수행하였다.

3.2.1 미래 기상자료 개요

다양한 미래 기상자료의 불확실성 평가를 위하여 “기후변화에 따른 농업용수 영향평가 연구”의 결과자료를 활용하였다. 미래 기상자료는 A1B 배출 시나리오를 바탕으로 GCM 모델인 MIROC 3.2의 결과를 두 가지 상세화 기법을 적용하여 지역규모로 축소한 미래 기상자료와 RCM 모델의 결과인 MM5의 미래 기상자료를 이용하였다. GCM 모델에 적용한 상세화 기법은 통계적 상세화 방법 중 전이함수를 이용한 CF방법과 기상발생기를 이용한 LARS-WG을 이용한 결과물을 각각 사용하였다.

3.2.3 미래 기상자료의 요소별 경향

GCM 또는 RCM 모델로부터 모의된 미래 기상자료는 기온, 습도, 일조시간, 증발량, 강수량, 풍속을 결과 값을 제공한다. 따라서 본 연구에서는 각 기상 요소별 과거 평년 값 (기준년도: 1980~2009)과 미래 10년 단위의 연평균 강수량과 기온 및 증발량, 습도, 일조시간, 풍속의 변화를 산정하여 시계열 최대, 평균, 최소값의 변화를 분석하였다.

3.2.3 지역별 불확실성

본 연구에서는 모델별로 제공하는 지역별 미래 기상자료의 불확실성을 평가하기 위하여 기상요소별 과거 평년 값과 모델의 시계열 모의 값의 편이(Bias)를 산정하여 분석하였다.

○ 시기별 산정 기준

- 1995s : 1980~2009 (과거 기상자료)
- 2025s : 2010~2039 (MIROC 3.2 (CF, LARS-WG), MM5에 의한 미래 기상자료)
- 2055s : 2040~2069 (MIROC 3.2 (CF, LARS-WG), MM5에 의한 미래 기상자료)
- 2085s : 2070~2099 (MIROC 3.2 (CF, LARS-WG), MM5에 의한 미래 기상자료)

3.3 유출량 및 기준작물증발산량 민감도 분석

3.3.1 유출량 산정

유역에 대한 강우-유출 현상을 모의발생을 위해서는 여러 가지 수문모형이 있지만 우리나라에서 많이 이용되고 있는 장기유출량 추정모형으로는 Tank 모형이 있다. 탱크 (Tank) 모형은 Suwagara에 의하여 단일 탱크의 선형시스템(linear system)모형의 개념에서 출발된 것으로 탱크를 직렬 또는 병렬로 연결하여 유역의 지표유출, 중간유출, 기저유출을 각 성분별로 재현할 수 있도록 개념화한 것이다. 우리나라에서는 관개용 저수지의 일별유입량 모의발생 (김현영 등, 1986) 연구에서 소유역에 적합하도록

3단 직렬 탱크모형을 사용한 바 있는데, 실측 유출량 자료로 모형을 보정해야만 사용할 수 있는 매개변수를 유역면적, 토지 이용별 면적 등에 의한 회귀식을 유도하여 무계측 유역에서 사용할 수 있도록 함으로써 무계측 유역에서 사용할 수 없는 기존 탱크모형의 단점을 보완한 바 있다. 본 연구에서는 미래 유출량 산정을 위해 전년도 연구 (농어촌 연구원, 2010)를 통해 산정된 대상 저수지별 유역 내 토지이용변화 면적과 TANK 모형을 이용하였다.

저수지 유입량을 산정하기 위하여 다음 <그림3-2>와 같은 3단 TANK 모형을 이용하였다. 3단 TANK 모형 중 1단 TANK는 유출의 성분 중 지표 유출을 개념화한 것이고, 2단 및 3단은 각각 중간유출 및 기저유출을 개념화한 것이다. 1단 TANK의 유출공 수를 2개 둔 것은 홍수유출시의 오차를 1개일 때 보다 감소시키기 위한 것이다. 3단 TANK의 유출공의 높이를 "0"으로 한 것은 강수가 없을 시 초기 기저유출을 발생시키기 위하여 저류수심 ST가 항상 유출공의 높이보다 커야 하기 때문이다. 따라서 통상 대유역에서 4개의 TANK를 사용할 때 보다 매개변수의 수는 19개에서 13개 감소하게 된다 (김현영 등, 1986).

TANK모형에 의한 유역의 유출량은 일별 강수량으로 부터 다음 식에 의하여 계산된다.

$$Q_t = \sum_{t=1}^{n}\sum_{h=1}^{m}(ST_{i,t} - H_{ij})A_{ij} \quad (1)$$

여기서, Q_t는 t일의 총유출량 (mm), i는 TANK의 수, j는 i TANK의 유출공의 수, $ST_{i,t}$는 t일의 i번째 TANK의 저류수심 (mm), H_{ij}는 i TANK의 유출공의 높이 (mm) 및 A_{ij}는 유출공의 단면적 (무차원)이다.

또한 저류수심 ST는 단위시간 t에 따라 다음 식과 같이 계산된다.

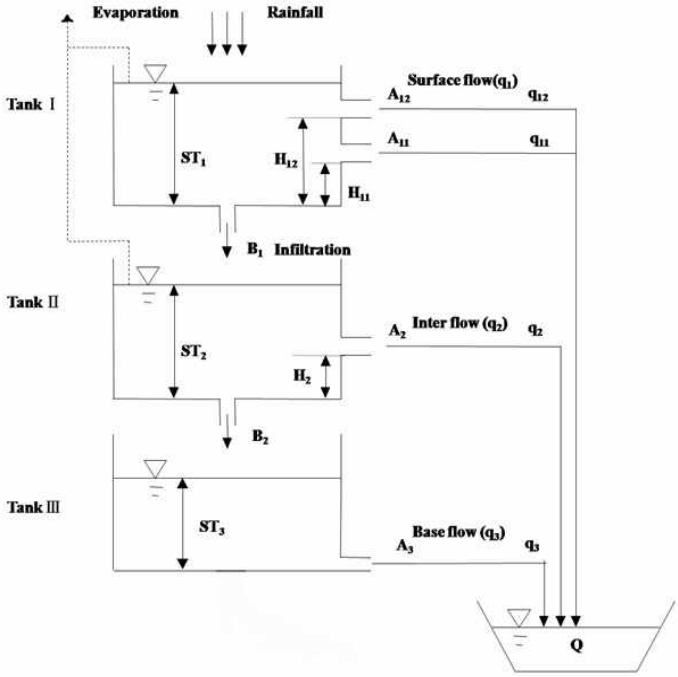
$$ST_{i,t} = ST_{i,t-1} + R_t - E_t - I_{i,t} - Q_{i,t-1} \quad (2)$$

여기서, $ST_{i,t-1}$는 $t-1$일의 i번째 TANK의 수심 (mm), R_t는 t일의 강수량 (mm), E_t는 증발량(mm) 및 $Q_{i,t-1}$는 i번째 TANK의 $t-1$일의 유출량이다.

한편 침투량 $I_{i,t}$는 다음 식과 같이 계산한다.

$$I_{i,t} = ST_{i,t} \times B_i \quad (3)$$

여기서, B_i=i번째 TANK의 침투공의 단면적 (무차원)이다.



<그림 3-2> 3단 TANK 모형의 개념도

3.3.2 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.

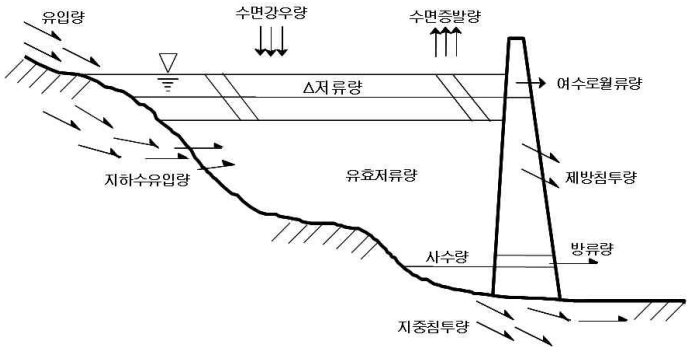
1998년 국제식량농업기구에서는 기존의 연구에서 추천했던 FAO Modified Penman 공식이 과다 산정되는 점을 지적하고, 각 지역의 조건에 따른 적합한 방법을 비교, 검토하였다. 기존에 사용되던 20여 종류의 증발산량 공식을 검정하였는데, 그 중 Penman-Monteith 공식이 건조 및 습윤 기후에서 비교적 정확하고 일정한 경향을 가지는 것으로 확인되었다. 따라서 FAO에서는 Penman-Monteith 공식을 통일하여 사용하기로 결정하였다 (Allen et al., 1998). 현재 이 공식은 세계관개배수위원회 (ICID), 세계기상기구 (WMO) 등에서 추천하고 여러 연구에서 정확한 것으로 인정받고 있다. 본 과업에서는 국제식량농업기구에서 1998년에 추천한 Penman-Monteith 공식을 이용하여 기준작물증발산량을 산정하였다.

$$ET_r = \frac{0.408\square(Rn-G)+\gamma\frac{900}{T+273}u_2(es-ea)}{\square+\gamma(1+0.34u_2)} \qquad (4)$$

여기서, ET_r은 기준작물증발산량 (mm/day), □는 증기압 곡선의 기울기 (kPa/℃), Rn은 지구(작물)표면에서 순수하게 축적되는 에너지 (순일사량) (MJm-2day-1), G는 토양 열 유속 밀도 (MJm-2day-1), γ는 건습계 상수 (kPa/℃), T는 2m 높이에서 일평균 기온 (℃), u_2는 2m 높이에서 풍속 (m/s), e_s는 포화증기압 (kPa), e_a는 실제증기압 (kPa)이다.

3.4 논벼 물수지 분석

3.4.1 저수지 물수지 분석방법



<그림 3-3> 저수지에서의 물수지 구성

저수지에서의 물수지를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$S_t = S_{t-1} + I_t + P_t + U_t - (R_t + O_t + E_t + G_t + D_t) \qquad (5)$$

여기서, S는 저수량 (Storage), I는 유입량 (Inflow), P는 수면강수량 (Precipitation), U는 지하수유입량 (Underground inflow), R는 방류량 (Release), O는 여수로월류량 (Overflow), E는 수면증발량 (Evaporation), G는 지중침투량 (Percolation), D는 제방침투량 (Dam seepage) 및 t는 일 (day)이다.

지하수유입량, 지중침투량 및 제방침투량은 실측이 거의 불가능한 요소들이다. 특히 지하수 유입은 수문 관측지점에서 지표수로 측정되거나 그 변화가 월단위 이상이기 때문에 일단위와 같이 매우 단기간의 물 수지에 있어서는 고려의 대상이 되지 않는다. 또한 지중침투량은 댐 계획시부터 누수를 방지할 목적으로 지수벽을 설치하므로 이로 인토 누수량은 매우 적거나 무시할 수 있다. 따라서 이러한 양은 매우 적거나 단기간의 물 수지에 영향을 미치지는 않는다 (김현영 등, 1986). 따라서 본 저수지의 물수지 분석에서는 지하수유입량, 지중침투량, 제방침투량 및 수면증발량은 무시한다. 이에 의해 식 (5)을 다시 쓰면, 식(6)와 같다.

$$S_t = S_{t-1} + I_t + P_t - (R_t + O_t) \quad (6)$$

3.4.2 저수지 유입량 산정 방법

저수지 유입량을 산정하기 위하여 앞서 유출량 산정부분에서 설명한 3단 TANK 모형을 이용하였다. 농업용저수지의 경우 미계측유역이 대부분이므로 다양한 매개변수를 통하여 미계측유역의 유출량 산정에 적합한 탱크모형을 이용하였다. 또한 농업용저수지는 대부분 소규모 유역을 포함하고 있으므로 매개변수의 수를 줄일 수 있는 3단 탱크모형이 적합할 것으로 판단하였다.

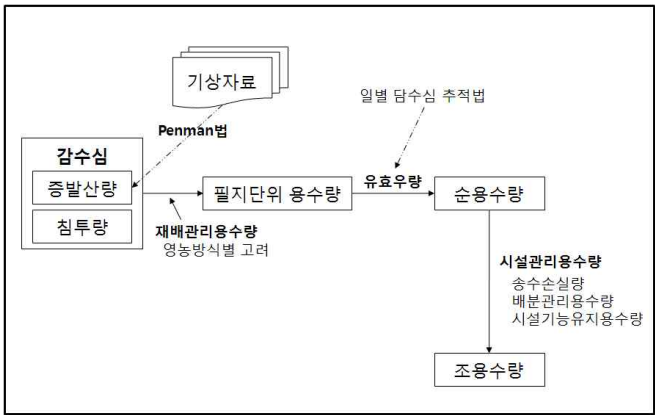
3.4.3 논 용수 수요량

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

- 순용수량 = 증발산량 + 침투량 + 재배관리 용수량 - 유효우량
- 조용수량 = 순용수량 + 시설관리 용수량

여기서 재배관리용수는 영농방식에 따라 이앙재배와 직파재배로 달리 적용하는데 직파면적은 직파재배적지기준 (농림부, 1997)에 따라 다음과 같이 산정된다.

- 이앙재배면적 = 수리답면적 - 직파면적
- 직파재배면적 = 담수직파, 건답직파로 구분



<그림 3-4> 논용수 수요량 산정 흐름도

가. 증발산량

벼의 증발산량은 답면의 수면증발량과 벼의 엽면증산량의 합으로 구성되며 작물의 종류, 작부시기, 기상 등 여러 요인에 의해 많은 변화가 발생한다. 실제의 증발산량은 여러 요인에 의해 정량화하기 어려우며 일반적으로 기준작물증발산량을 산정한 후 실제 작물의 증발산량과의 차이를 분석하여 이를 작물계수로 조정하는 방법을 적용하고 있다. 본 연구에서는 Penman-Monteith 공식을 이용하여 기준작물증발산량을 산정하고 논벼의 시기별 작물계수를 적용하여 논벼의 작물증발산량을 산정하였다.

나. 침투량

논에서의 침투량은 벼의 뿌리 아래 하층 토양으로 강하하는 물의 양이다. 이 양은 최종적으로 지하수로 남거나 일부는 회귀수로 다시 이용되기도 한다. 침투량은 재배방식과 물관리 방법에 따라 크게 변하는 포장의 수리조건 및 토양조건에 따라 달라진다. 침투량 측정방법으로 감수심을 측정하여 이로부터 증발산량을 뺀 나머지 값을 침투량으로 하는 방법, 침투량을 직접 측정하는 방법, 배수로 침출량에 의하여 구하는 방법 등을 들 수 있다. 우리나라의 일 침투량은 지역적인 편차가 대단히 큰 편으로 약 3~7 mm/day로 볼 수 있고 전 관개기간동안 약 500~800 mm 정도로 볼 수 있다.

다. 유효우량

작물 생육 기간 중 논에 내리는 강수는 그 양에 따라 일부 또는 전부가 남아 작물 생육에 이용되는데 이와 같이 작물 생육에 이용되는 강수를 유효우량이라 한다. 유효우량은 농업용수 수요량을 결정짓는 중요 인자 중 하나이다. 유효우량을 산정하는 방법은 여러 방법이 제안되고 있으나, 일반적으로 일 강수량과 물관리 방법 등을 종합적으로 고려할 수 있는 일별 담수심 추적법을 이용하여 유효우량을 산정한다. 일 강수량이 물꼬높이 이상이 되면 유효우량은 물꼬까지의 강수량이 되나 전일의 담수심이 물꼬높이를 유지하고 있으며 유효우량은 존재할 수 없다. 따라서 일별 담수심의 변화는 단일 필지에서의 물수지식을 이용하여야 한다. 일반적으로 유효우량을 고려한 논에서의 물수지 식은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$D(t) = D(t-1) + Re(t) + Req(t) - U(t) \qquad (7)$$

여기서, $D(t)$는 t일의 담수심 (㎜/day), $D(t-1)$는 전일의 담수심 (㎜/day), $Re(t)$는 t일의 유효우량 (㎜/day), $Req(t)$는 t일의 관개량 (㎜/day), $U(t)$는 당일의 소비수량 (㎜/day)이다.

그러므로 유효우량은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$Re(t) = D(t) - D(t-1) - Req(t) + U(t) \qquad (8)$$

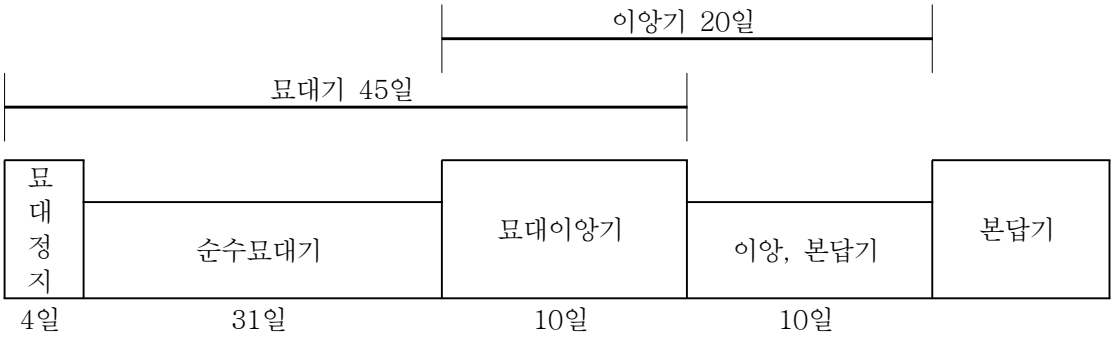
여기서, $U(t)$는 $ET+I$로 당일의 필요수량 (mm/day)이고, ET: 작물증발산량 (㎜/day), I는 당일의 침투량 (㎜/day)이다.

그러나 실제 논에서 담수심의 변화는 당일의 강수량과 필요수량 및 담수심의 관계에서 구해야 하며 이는 가정한 물꼬높이 및 상시관리 담수심에 의해 제한되어진다.

일강수량의 크기가 5.0 ㎜이하인 경우에는 볏잎에 차단되어 실제 논에는 기여하지 않는 무효강수로 보는 것이 타당하며 어떠한 경우에도 유효우량의 크기는 최대담수심에 그날의 소비수량을 더한 양을 초과하지 못한다. 이와 같이 유효우량은 당일 강수량의 크기 및 생육기의 소비수량의 시계열 분포와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다

라. 재배관리 용수량

이앙재배는 작물의 생장에 따른 시기별로 용수수요량이 달라지게 되며 이를 시기별로 살펴보면 묘대기, 이앙기, 본답기 등이 있다. 묘대기는 못자리에서 묘를 키우는 과정이며 이앙기는 못자리에서 본답으로 옮겨 심는 과정이고 이때 이앙일수는 벼의 재배체계, 써레질 또는 이앙을 위한 작업의 능률 등에 따라 정하며 일반적으로 15~20일 정도이다.



<그림 3-5> 이앙재배시 작물 재배 기간 (농림부, 1998)

3.4.4 필요저수량 결정

일반적으로 저수지 계획용량은 저수지 모의조작 결과로 나타나는 필요저수량(Required Storage)에 대한 연 최대치계열을 확률처리하여 결정한다. 그러나 모의발생에 의한 저류량이 매년말 다음해로 이월(annaul carryover)되는 경우에 대해서는 연 최대치계열에 대한 확률처리에는 신중을 기해야 한다.

표본수문변량 x 는 일반적으로 변량의 평균치 $\bar{x}$ 에 x의 편차 Δx 를 더한 것으로 표시 할 수 있다. 즉,

$$x = \bar{x} + \Delta x \qquad (9)$$

여기서 편차 ΔX는 변량 X의 확률분포가 가지는 분포특성과 변량의 재현 기간(혹은 생기확률) 및 분포형의 매개변수 등과 관계가 있으며 변량 X의 표준편차 s 에 빈도계수(frequency factor) KT를 곱한 값으로 표시된

다. 즉, $\Delta x = s \cdot K_T$로 나타낼 수 있으며, 식(4)와 같다

$$X_T = \bar{x} + s \cdot K_T \quad (10)$$

여기서 XT는 T 재현기간에 발생할 확률치이며 KT는 T년의 빈도계수이다.

통상적으로 저수지 계획규모결정에 사용되는 확률함수 식은 Gumbel-Chow법을 적용하고 있으며 그 식은 다음과 같다.

$$X_t = X + k \times \delta_{n-1} \quad (11)$$

여기서 Xt = 재현기간 t년의 기대치, X = 표본의 평균치, k = 빈도계수, δn-1 = 표본의 표준편차 등이다. 본 모형에서는 4가지의 확률 분포함수를 적용하였으며 각 확률분포 함수에 대한 계산 결과를 비교하여 최적의 값을 선택하도록 하였다.

실제 저수지 설계에 있어서는 축조 후 시일이 경과함에 따라 유역으로부터 토사가 유입, 퇴적하여 그 용적이 감소되므로 감소 정도를 고려해 주어야 한다.

3.4.5 단위용수량 결정

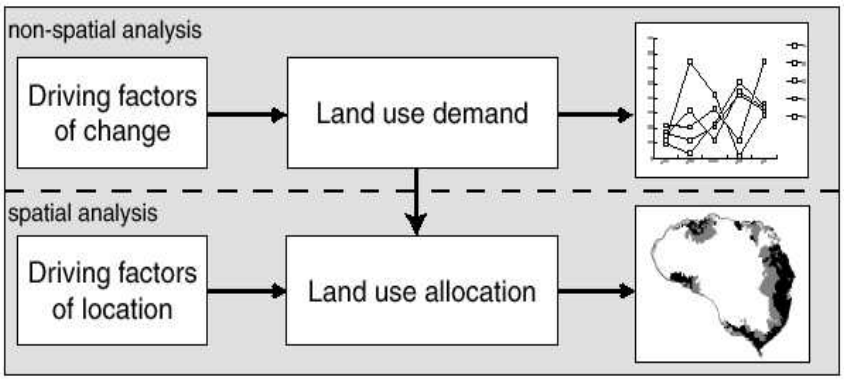
계획기준 연도의 최대용수시기에 단위면적에 대한 단위 시간당 소요되는 계획용수량으로 용수로 설계의 기준이 되는 최대용수량을 단위용수량이라고 말할 수 있다. 본 연구에서 단위용수량 산정을 위해 한국농어촌공사의 수리시설물 모의조작 시스템의 단위용수량 산정 방법을 참조하였다.

4. 토지이용변화 분석 및 미래 기상자료의 불확실성 평가

4.1 토지이용 변화 분석

4.1.1 CLUE 모델을 이용한 미래 토지이용 변화 모델링

CLUE (Conversion of Land Use and its Effects modeling framework) 모델은 네덜란드의 Wageningen 대학에서 개발한 모델로 각 토지피복 분류 사이의 경쟁관계의 동적모델링을 통하여 토지이용과 구동요인의 관계를 정량화하고 이를 이용하여 토지이용변화를 모의하는 프로그램이다 (Verburg et al., 1999). 이 모델은 <그림 4-1>과 같이 비공간적 분석과 공간적 분석으로 나누어 수행된다. 비공간적 분석에서는 토지이용변화를 유도하는 구동요인과 토지이용과의 상관성을 통계분석을 통해 파악하고 총 변화면적을 시나리오로 설정 한 후, 공간적 분석 모듈에서는 대상지역의 래스터 자료로부터 토지이용변화 위치를 배분하게 된다.

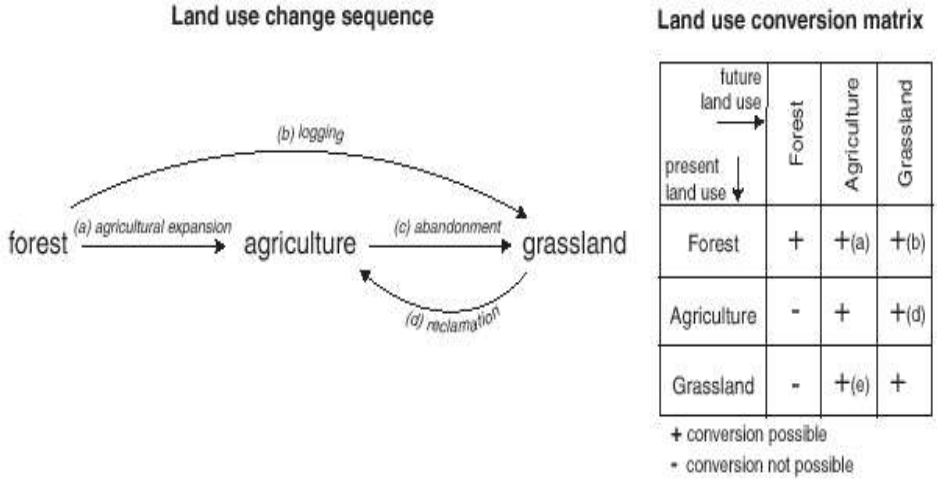


<그림 4-1> CLUE 모델 수행 과정 (Verburg et al., 1999)

이를 4가지 모듈로 나누어 설명하면 다음과 같다. 첫 번째 모듈은 공간정책과 제약조건들을 반영하는 부분(Spatial policies and restrictions)으로 국립공원이나 개발제한구역, 농업지역 등을 변화제한조건으로 규정하는 부분이다. 다음으로 토지이용별로 변화특성을 설정하는 모듈(Land use type specific conversion settings)에서는 변화가능성을 나타내는 전이 특성값(Conversion elasticity)과 각 토지분류 사이의 상호 변화가능성을 나타내는 행렬식(Land use transition sequeances)을 구성한다.

세 번째로는 과거의 토지이용변화 패턴과 토지이용변화 총량이나 인구변화 등을 반영한 시나리오를 바탕으로 토지이용변화 요구량(Land use requirements)을 설정하고, 마지막으로 다양한 구동요인으로부터 정량화한 토지이용의 위치 적합성(Location characteristics)을 확률 지도로 나타내, 이를 활용하여 토지변화를 공간적으로 표현하는 모듈로 구성된다.

정책이나 제약조건으로 규제되는 토지피복은 현재의 토지피복상태를 유지하도록 각 위치에 특정 토지피복상태를 미리 선언하여 작성한 규제지도를 입력자료로 활용하고, 각 토지이용간의 상호 변화가능성을 나타내는 전이 특성값은 변화 가능성이 큰 토지피복에서는 0에 가까운 값을 갖도록 하고 비가역적인 변화특성을 갖는 토지피복에 1에 가까운 값을 할당하여 입력한다. 변환행렬은 <그림4-2>와 같이 구성할 수 있다. 예를 들어 산림에서 경지를 확장하기 위해 농지를 개발하면 (a)로 표시된 행렬요소에 그 특성을 표현하고 산림을 벌목하여 목초지로 변화하게 되면 (b)로 표현된 요소에 그 변환 가능성을 나타낼 수 있다. 행렬요소는 변화 가능할 경우는 1, 변화 불가능할 경우는 0으로 간단하게 구성할 수도 있고, 윤작과 같은 주기적인 변환 속성을 표현하여 구성할 수도 있다.



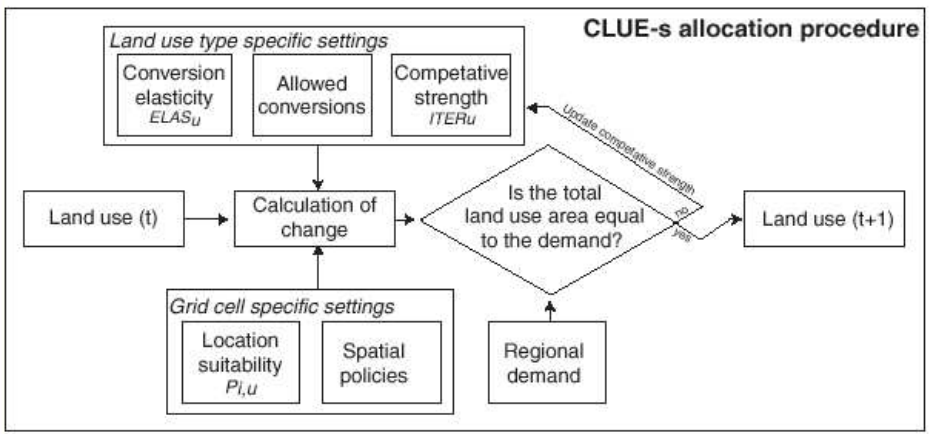
<그림 4-2> 토지이용 변화 행렬
(Verburg et al., 2002; Verburg and Veldkamp, 2003).

다음으로 본 연구에서의 토지이용 시나리오의 경우, 온실가스 배출 시나리오에 따른 미래의 논분포 변화를 알아보기 위해, 일본의 NIES (National Institute of Environmental Studies) 에서 수행한 AIM (Asian Pacific Integrated Model)의 SRES (IPCC, 2000) 모델링 결과를 바탕으로 대상지의 정량적 토지이용 총면적 변화 시나리오 설정하였다. 또한, 토지이용과 관련 있는 7가지 구동요인과 각 토지피복별 상관성 분석을 위해, ROC (Receiver Operating Characteristic) 검정과 이분형 로지스틱 회귀분석 수행하였으며, 각 토지이용 특성식을 다음과 같은 로짓모형으로 나타내어 활용하였다.

$$Log(\frac{P_l}{1-P_l}) = \beta_0 + \beta_1 X_{1,l} + \beta_2 X_{2,l} \cdots \beta_n X_{n,l}$$

$$where,\ P_i:\ the\ probability\ of\ a\ gridcell\ on\ location\ i\ ,\ X: location\ factor$$

마지막으로 기후변화 시나리오를 바탕으로 설정된 총 토지피복면적 시나리오와 토지피복별 위치 적합성을 이용하여 미래의 토지이용변화를 모의하였다<그림 4-3>.

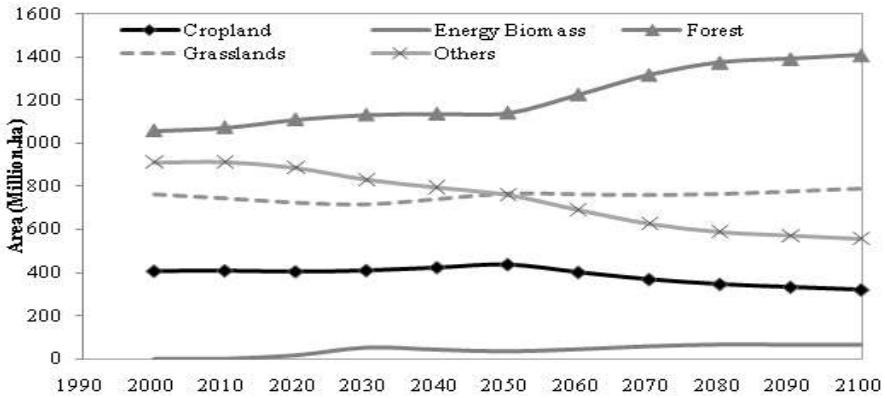


<그림 4-3> CLUE-s 모델의 토지이용변화 모의순서
(Verburg et al., 2002; Verburg and Veldkamp, 2004).

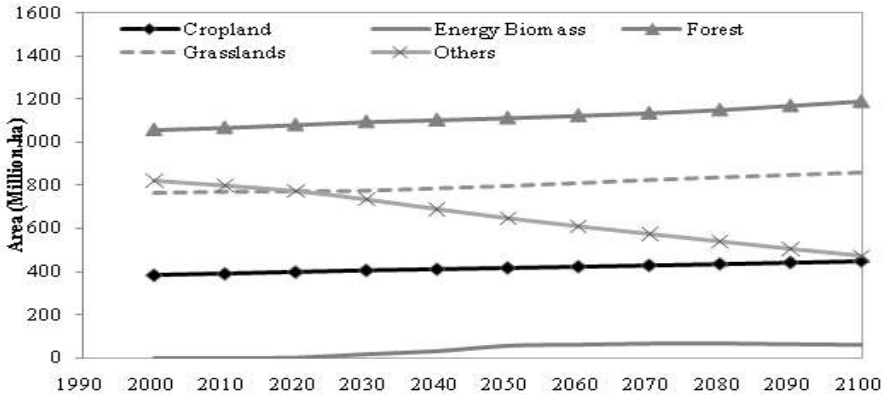
4.1.2 자료 구축

가. AIM (Asia-Pacific Integrated Model)의 토지이용변화 추세

본 연구에서는 기후, 지형조건이 한국과 유사하여 적용성이 좋을 것이라 판단되는 일본 국립환경연구소의 아시아태평양통합모델의 온실가스 배출시나리오별 토지이용변화 추계 결과를 활용하였다. AIM의 시뮬레이션 결과와 한국의 인구변화추세와 국내총생산의 변화를 OECD국가 지역의 변화 패턴과 유사하게 나타난다. 따라서 본 연구의 토지이용변화 시나리오는 ASIAP지역이 아닌 OECD 지역의 토지이용변화 추세를 기본으로 하여 시나리오를 설정하였다.



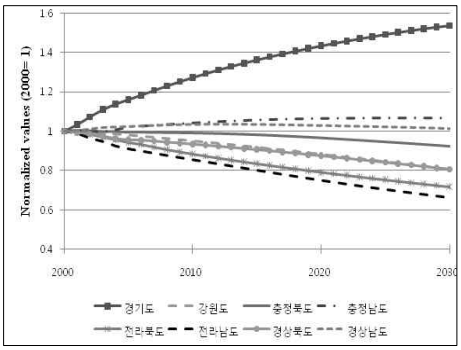
<그림 4-4> A2 시나리오에서의 토지이용변화 모의 결과 (AIM: OECD)



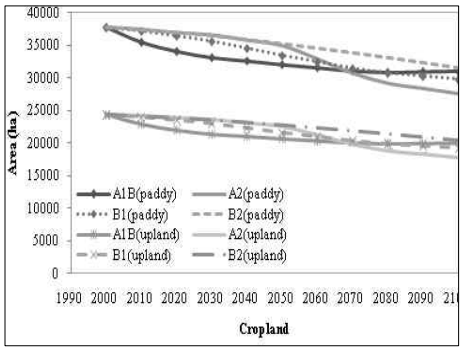
<그림 4-5> B2 시나리오에서의 토지이용변화 모의 결과 (AIM: OECD)

나. 연구 대상지의 토지이용변화 시나리오

A1B 시나리오에서의 시가화지역은 통계청에서 제공하는 도별 장래인구 추계 변화율을 고려하여 대상지의 시가화면적 증가율을 결정하였으며 인구 감소 지역은 현재 면적을 유지하는 것으로 보았다. 농경지 면적은 AIM 모델에서 Cropland로 설정된 면적 변화량의 변화비율을 적용하여 각 지역의 변화면적을 결정하였다.

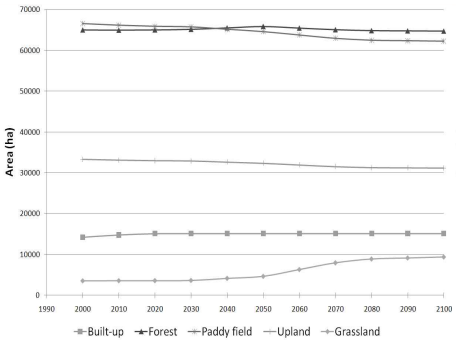


가. 인구 추계 변화율 (통계청, 2010)

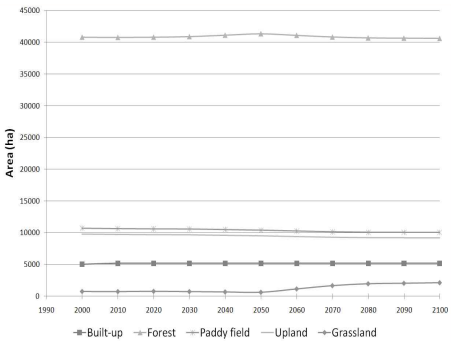


나. 경기지역의 농업지역 면적 변화 시나리오

<그림 4-6> 토지이용변화 시나리오 구축

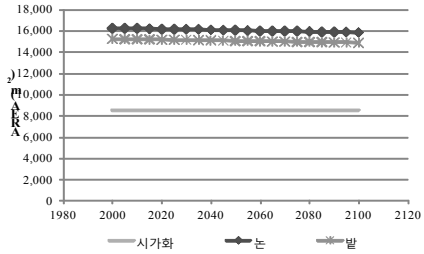


가. 충남지역

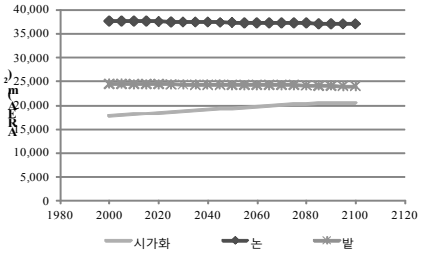


나. 경남지역

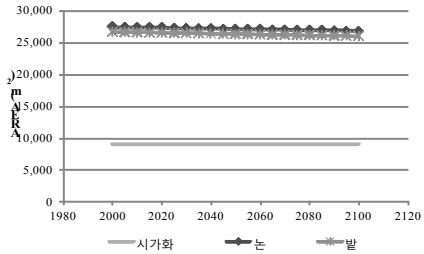
<그림 4-7> A1B 시나리오에서 토지피복면적 변화



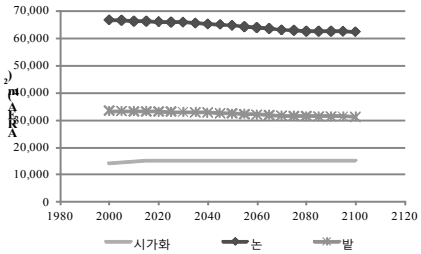
가. 강원지역



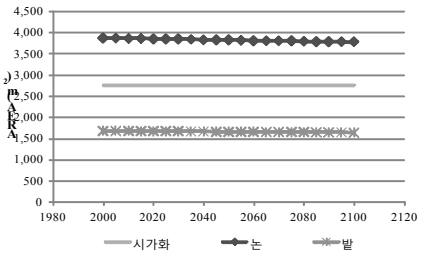
나. 경기지역



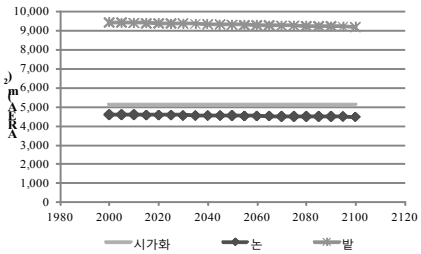
다. 충북지역



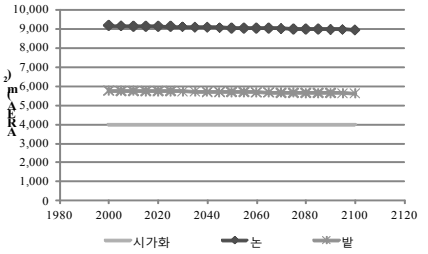
라. 충남지역



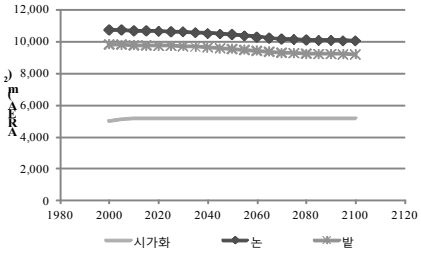
마. 전북지역



바. 전북지역



사. 경북지역



아. 경남지역

<그림 4-8> 지역별 시가화·농업지역 면적 변화 시나리오

다. 연구 대상지 및 기초자료

본 연구에서는 1차 연도(2009) 연구에서 선정되었던 농업용 저수지 유역을 포함하는 시/군 지역을 중심으로 대상지를 선정하여 토지이용변화 모의를 수행하였다. 이 중 2년 동안 (2009 ~ 2010) 연구 대상지였던 전북 지역의 백석 저수지는 유역면적(374 ha) 보다 관개면적 (855 ha)이 큰 저수지로 나타나 본 연구에 적합하지 않은 것으로 판단되어 3년차 (2011) 연구에서는 유역면적 841 ha, 관개면적 213 ha인 인교 저수지로 변경하였다. 연구 대상 저수지의 명칭과 유역면적, 토지이용변화 모의 지역은 (표 4-1)과 같다.

(표 4-1) 도별 저수지 및 연구 범위 (농어촌 연구원, 2010)

지역	저수지	저수지 유역 (ha)	연구 범위 (시/군)
경기	마둔	529	안성/용인/이천
강원	원창	305	춘천/홍천
충북	원남	1,080	음성/진천/괴산
충남	고풍	1,293	서산/당진/예산
전북	인교	841	전주
전남	대포	260	여수
경북	마북	650	포항
경남	남성	72	진주

토지이용변화 모의를 위한 기초 자료는 (표 4-2)와 같다. 환경부 (2000) 토지피복지도를 활용하여 토지이용변화 모의를 위한 기준도를 작성하고, 농경지 보존을 위한 개발제한 지역으로는 농업진흥 구역도를 활용하였다.

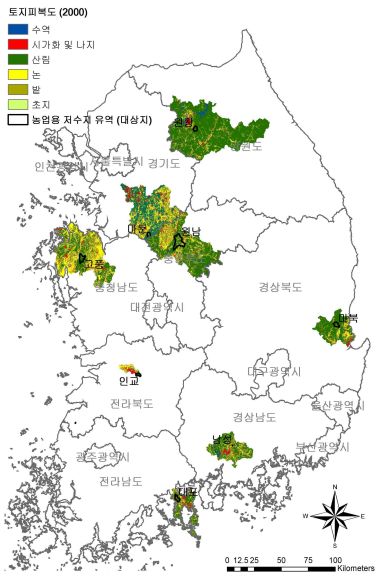
이와 함께 해당 지역의 수치표고 모델 (DEM, Digital Elevation Model), 경사 (aspect), 향 (slope), 토양특성 자료 (soil maps), 도시와의 접근성 등을 토지변화 예측을 위한 구동요인으로 선정하여 자료를 구축하였다.

(표 4-2) 토지피복분류 및 구동요인

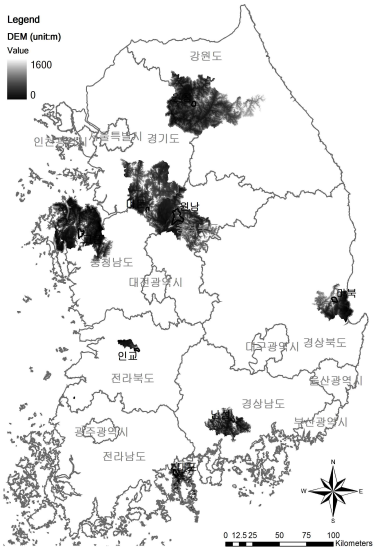
Land cover classification	
Variable	Description
Water	Water and wetlands
Built-up	Residential/industrial/commercial/and recreational areas, and public facilities
Forest	Forest and natural areas
Paddy	Paddy field area
Upland	Agricultural land not included in paddy field
Grassland	Grassland, including semi-natural grassland and biomass land calculated by the scenario

Source: 1:25,000 Land cover map (Ministry of Environment)

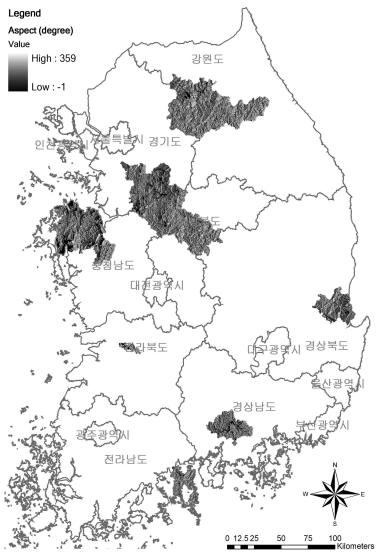
Driving factors		
Variable	Description	Sources
DEM	Height (in m)	Based on 1: 25,000 topographic map
Aspect	Aspect based on DEM	
Slope	Slope based on DEM (in degrees)	
Soil depth	Effective depth class	1:50,000 Reconnaissance soil map
Soil drain	Soil drainage class	
Soil type	Rock, sandy loam, clay loam, etc.	
D_city	Distance to city (m)	Based on 1:25,000
Restrict condition		
Variable	Description	Sources
Agricultural promotion zone	Designated to guarantee a stable food supply	Agricultural Promotion Zone map



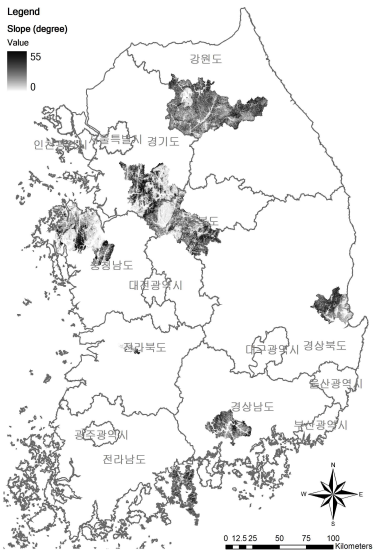
가. 토지피복도 (환경부, 2000)



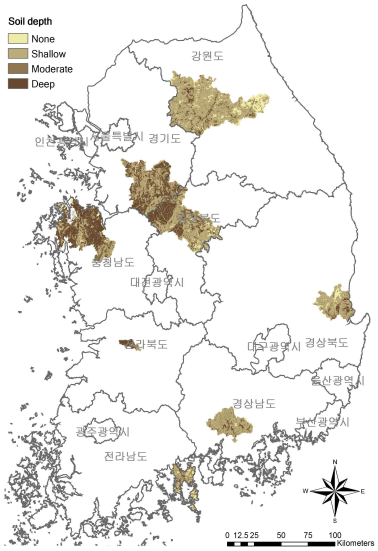
나. DEM (100mx100m)



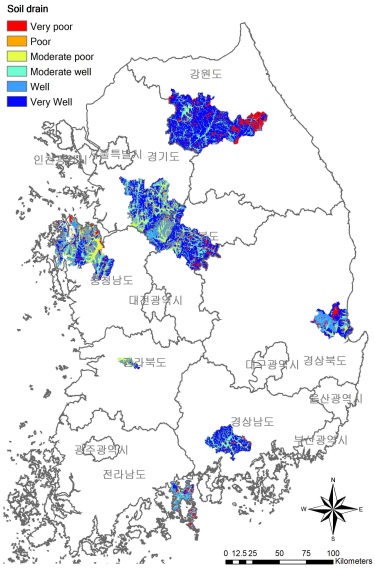
다. 경사향



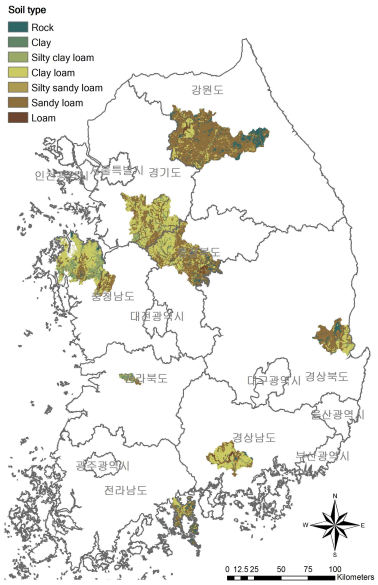
라. 경사도



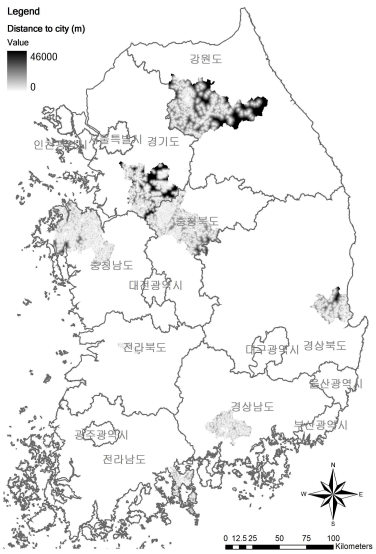
마. 정밀토양도 토심
(농촌진흥청)



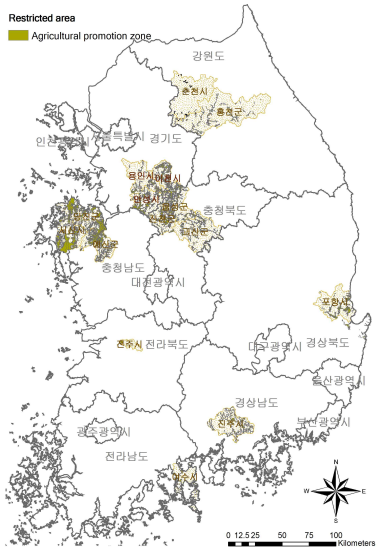
바. 정밀토양도 토양배수
(농촌진흥청)



사. 정밀토양도 토양종류
(농촌진흥청)



아. 도시(시가화지역)로 부터 거리
(단위: m)



자. 변화 제한 구역
(농업진흥지역)

<그림 4-9> 토지이용변화 분석을위한 기초자료 구축

A1B 시나리오에서의 시가화지역은 통계청에서 제공하는 도별 장래인구 추계 변화율을 고려하여 대상지의 시가화면적 증가율을 결정하였으며 인구 감소 지역은 현재 면적을 유지하는 것으로 보았다. 통계청에 따르면 2005년 전국인구는 48,138천명이며, 향후 2018년 49,340천명을 정점으로 감소하여 2030년에는 48,635천명이 될 것으로 전망하고 있다. 이를 도별로 살펴보면 <그림 4-9)와 같이 2030년까지 경기도는 인구가 계속 증가하는 반면 경남, 충남 등은 인구증가에서 감소경향으로 전환되고 강원, 충북, 전북, 전남, 경북은 인구감소세가 지속될 것으로 예측하고 있다. 이를 <그림 4-9>에 나타난 AIM의 인구변화 결과와 비교하여 인구증가가 예상되는 곳은 OECD 지역의 토지피복변화 추세를 바탕으로 하고, 인구감소가 예측되는 지역은 EFSU 지역의 토지이용변화 추세를 검토하여 각 도별 토지이용변화 시나리오를 설정하였다. 특히, 경기도 지역은 기후변화 시나리오의 A1B, A2, B1, B2의 토지피복변화를 모두 산정하여 비교하였으며 나머지 7개 지역은 미래 기상자료가 제공되는 A1B 시나리오를 중심으로 살펴보았다.

(표 4-3) 유역내 토지이용 변화 요소별 비율

구 분		1995s		2025s		2055s		2085s	
		ha	(%)	ha	(%)	ha	(%)	ha	(%)
원창저수지 (강원)	논	-	-	-	-	-	-	-	-
	밭	-	-	-	-	-	-	-	-
	산림	1,253	98.4	1,247	98.0	1,247	98.0	1,247	98.0
마둔저수지 (경기)	논	86	7.2	73	6.1	32	2.7	24	2.0
	밭	63	5.3	51	4.3	29	2.4	15	1.3
	산림	960	80.7	969	81.4	1,006	84.5	1,023	86.0
원남저수지 (충북)	논	720	9.5	685	9.1	666	8.8	649	8.6
	밭	962	12.7	780	10.3	757	10.0	752	9.9
	산림	5,369	71.0	5,323	70.4	5,425	71.7	5,526	73.1
고풍저수지 (충남)	논	153	6.0	138	5.4	115	4.5	90	3.5
	밭	211	8.3	128	5.0	82	3.2	60	2.4
	산림	2,032	80.1	2,120	83.6	2,159	85.1	2,176	85.8
백석저수지 (전북)	논	1,613	11.7	1,611	12.0	1,594	11.8	1,581	11.6
	밭	1,138	8.3	1,132	8.4	1,116	8.2	1,115	8.2
	산림	9,387	68.1	8,872	66.0	8,947	66.1	9,050	66.3
대포저수지 (전남)	논	142	9.7	142	9.7	142	9.7	142	9.7
	밭	116	8.0	93	6.4	80	5.5	80	5.5
	산림	1,079	74.0	1,061	72.8	1,038	71.2	1,038	71.2
마북저수지 (경북)	논	39	2.4	37	2.3	34	2.1	32	2.0
	밭	23	1.4	19	1.2	19	1.2	14	0.9
	산림	1,516	93.7	1,515	93.6	1,523	94.1	1,532	94.7
남성저수지 (경남)	논	31	8.3	26	7.0	25	6.7	25	6.7
	밭	2	0.5	2	0.5	1	0.3	1	0.3
	산림	325	87.1	330	88.5	332	89.0	332	89.0

(표 4-4) 시기별 관개면적 변화 증감율

대상 지구	1995s	2025s		2055s		2085s	
	면적(ha)	면적(ha)	증감율(%)	면적(ha)	증감율(%)	면적(ha)	증감율(%)
강원 원창	451.4	442.4	-2.0	441.3	-2.2	440.1	-2.5
경기 마둔	676.9	668.0	-1.3	665.4	-1.7	660.4	-2.4
충북 원남	1402.2	1334.0	-4.9	1297.0	-7.5	1263.9	-9.9
충남 고풍	1185.0	1184.0	-0.1	1154.4	-2.6	1115.7	-5.9
전북 백석	855.0	854.3	-0.1	832.9	-2.6	805.0	-5.9
전남 대포	296.7	296.7	0.0	296.7	0.0	296.7	0.0
경북 마북	583.6	583.6	0.0	583.6	0.0	583.6	0.0
경남 남성	221.7	220.3	-0.6	216.3	-2.5	212.2	-4.3

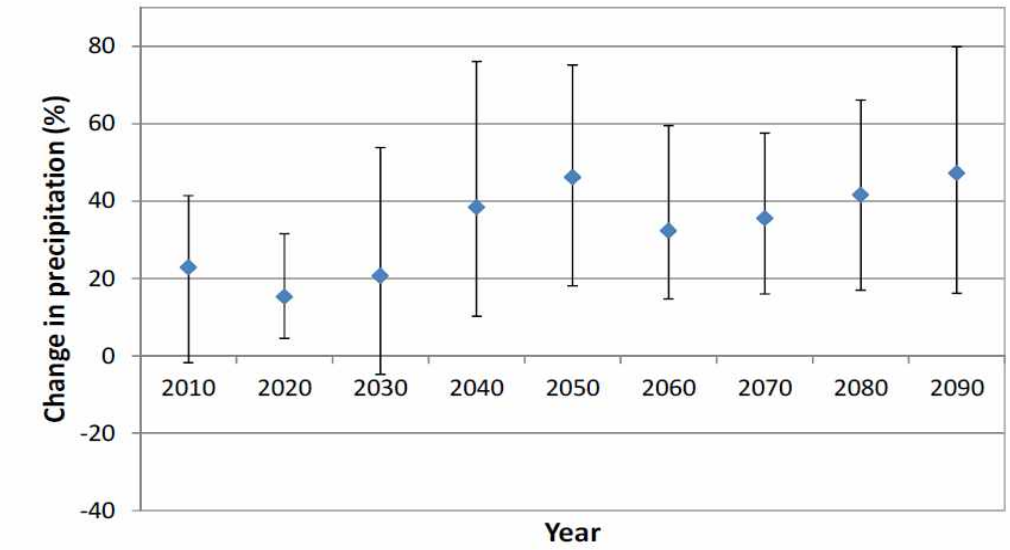
4.2 미래 기상자료의 요소별 경향

MIROC 3.2에서 모의된 미래 기상자료를 CF와 LARS-WG로 상세화한 자료와 MM5의 미래 기상자료, 총 3가지 미래 기상자료 결과의 기상 요소별 불확실성을 살펴보기 위해 다음과 같이 총 6가지 요소별 시계열 변화 경향을 살펴보았다. 8개지역중 마둔저수지를 보고서에 나타내었으며, 나머지지역은 부록에 추가하였다. 마둔저수지의 경우 기준기간 (1980~2009)의 평년 값과 미래 10년 단위의 연평균 강수량과 기온 및 증발량, 습도, 일조시간, 풍속의 변화를 산정하여 시계열 최대, 평균, 최소 값을 그래프로 나타내었다.

4.2.1 연평균 강수량

<그림 4-10>은 경기도 마둔저수지를 대상으로 모의된 3개 기후변화 모델의 미래 연평균 강수량을 기준기간(1980년~2009년)의 평년 강수량과 비교하여 10년 단위의 시계열 변동 폭을 그래프로 나타낸 것이다. 이 그래프에서 중간에 있는 선은 중앙값(median)을 나타내며, 양쪽 끝 값은 데이터의 최대, 최소 값을 나타낸다. 연평균 강수량의 중앙값을 기준으로 살펴보면 2020s가 2010s보다 8% 감소하였으나, 2020s부터는 2050s까지 꾸준히 증가하여 기준기간보다 46% 증가하는 것으로 나타났다. 2060s는 2050s에 비해 다시 14% 감소하였다가, 그 이후부터는 다시 증가하여 2090s에는 기준기간보다 47% 증가하는 것으로 모의되고 있음을 알 수 있다.

미래 강수량의 최대값과 최소값의 변동 폭은 2030s, 2040s, 2090s에서 59%, 66%, 64% 범위를 보여 불확실성이 큰 기간으로 나타났으며, 2020s의 연평균 강수량 변동 폭은 27%로 가장 작은 변화를 나타냈다.

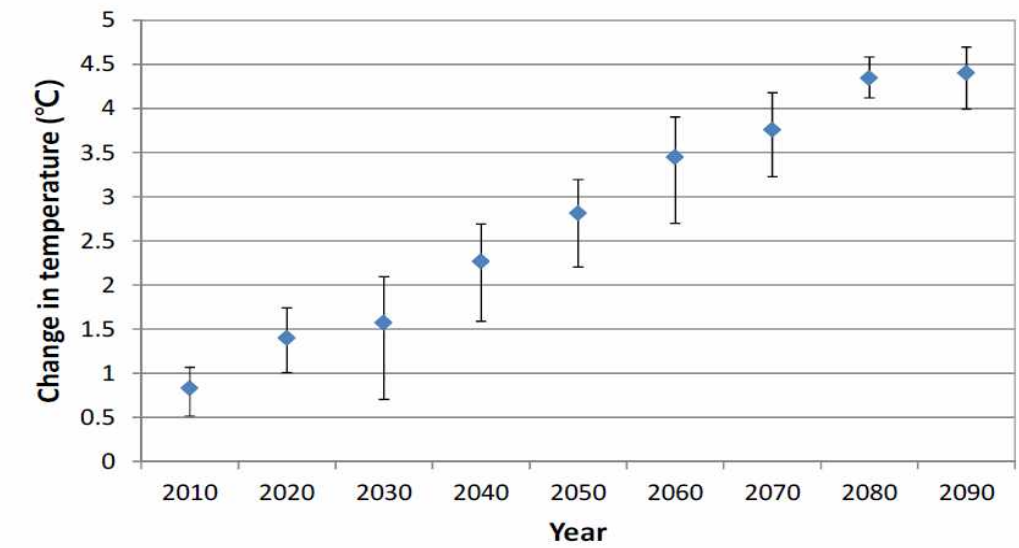


<그림 4-10> 기준년도(1980~2009)에 대한 마둔저수지의 연평균 강수량 변화

4.2.2 연평균 기온

<그림 4-11>는 경기도 마둔저수지를 대상으로 모의된 3개 기후변화 모델의 미래 연평균 기온을 기준기간의 평년 기온과 비교하여 10년 단위의 시계열 변동 폭을 그래프로 나타낸 것이다. 이 그래프에서 중간에 있는 선은 중앙값(median)을 나타내며, 양쪽 끝 값은 데이터의 최대, 최소 값을 나타낸다. 연평균 기온의 중앙값을 기준으로 살펴보면 2090년대까지 꾸준히 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 2090년에 과거 기준년도의 연평균 기온보다 4.4℃ 증가하는 것으로 모의되고 있음을 알 수 있다. 특히 2040s는 2030s에 비해 0.7℃ 증가하는 것으로 나타나 변동 폭이 컸으며, 2080s를 기준으로 2090s의 변동 폭은 0.06℃로 나타났다.

미래 기온의 최대값과 최소값의 변동 폭은 2030s, 2040s, 2060s에서 1.4℃, 1.1℃, 1.2로 나타났으며, 2080s 의 연평균 기온의 변동 폭은 0.5℃로 가장 작은 변화를 나타냈다.

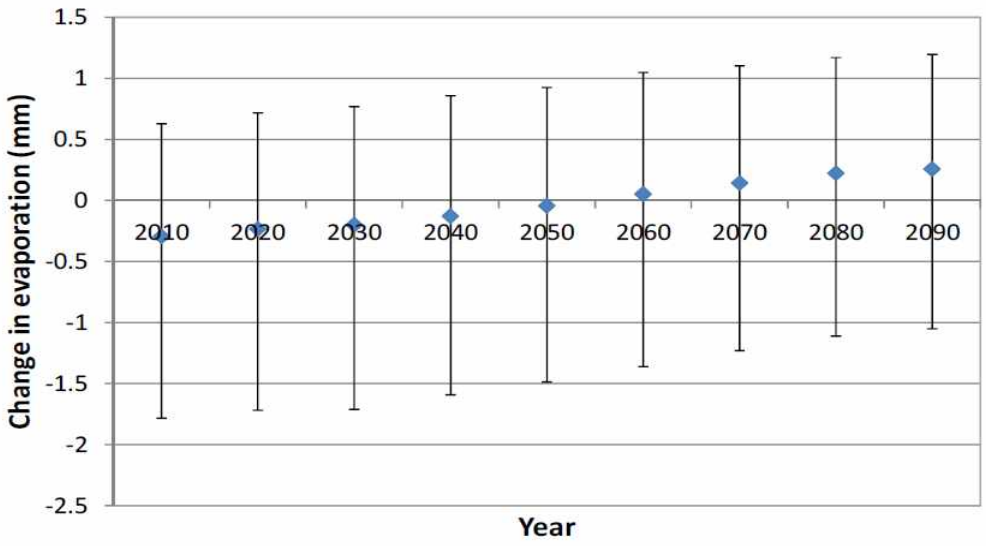


<그림 4-11> 기준년도(1980~2009)에 대한 마둔저수지의 연평균 기온 변화

4.2.3 연평균 증발량

<그림 4-12>은 경기도 마둔저수지를 대상으로 모의된 3개 기후변화 모델의 미래 연평균 증발량을 기준기간의 평년 기온과 비교하여 10년 단위의 시계열 변동 폭을 그래프로 나타낸 것이다. 이 그래프에서 중간에 있는 선은 중앙값(median)을 나타내며, 양쪽 끝 값은 데이터의 최대, 최소값을 나타낸다. 연평균 증발량의 중앙값을 기준으로 살펴보면 2050년대까지는 기준년도에 비해 감소하던 증발량이 이후부터 2090년대까지 꾸준히 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 2090년에는 과거 기준년도의 연평균 증발량보다 0.26mm 증가하는 것으로 모의되고 있음을 알 수 있다. 이를 자세히 살펴보면 2010s부터 2050s까지는 과거 기준년도와 비교했을 때, -0.29mm부터 -0.05mm까지 음의 값을 보임에 따라 연평균 증발량이 과거보다 더 적은 것으로 나타났음을 알 수 있다. 그러나 2060s는 연평균 증발량 값이 0.05mm로 양의 값을 나타내면서 2090s까지 과거 기준년도에 비해 크게 모의되었다.

미래 증발량의 최대값과 최소값의 변동 폭은 2030s에서 2.48mm로 나타났으며, 2090s의 연평균 증발량의 변동 폭은 2.25mm로 가장 작은 변화를 나타냈다.

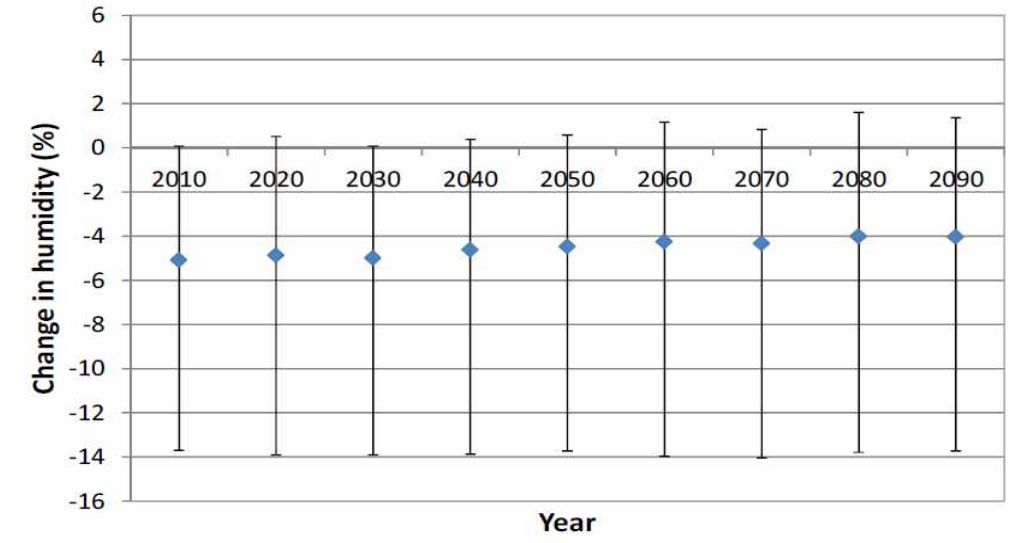


<그림 4-12> 기준년도(1980~2009)에 대한 마둔저수지의 연평균 증발량 변화

4.2.4 연평균 습도

<그림 4-13>은 경기도 마둔저수지를 대상으로 모의된 3개 기후변화 모델의 미래 연평균 습도를 기준기간의 평년 습도와 비교하여 10년 단위의 시계열 변동 폭을 그래프로 나타낸 것이다. 이 그래프에서 중간에 있는 선은 중앙값(median)을 나타내며, 양쪽 끝 값은 데이터의 최대, 최소값을 나타낸다. 연평균 습도의 중앙값을 기준으로 살펴보면 2090년대까지 눈에 띄는 변화는 나타나지 않았고, 과거 기준년도와 비교 했을 때 미래의 연평균 습도가 기준 년도보다 적게 모의되는 것으로 나타났다.

미래 습도의 최대값과 최소값의 변동 폭은 2080s에서 15.4% 범위를 보여 불확실성이 큰 기간으로 나타났으며, 2010s의 연평균 습도의 변동 폭은 13.8%로 가장 작은 변화를 나타냈다.

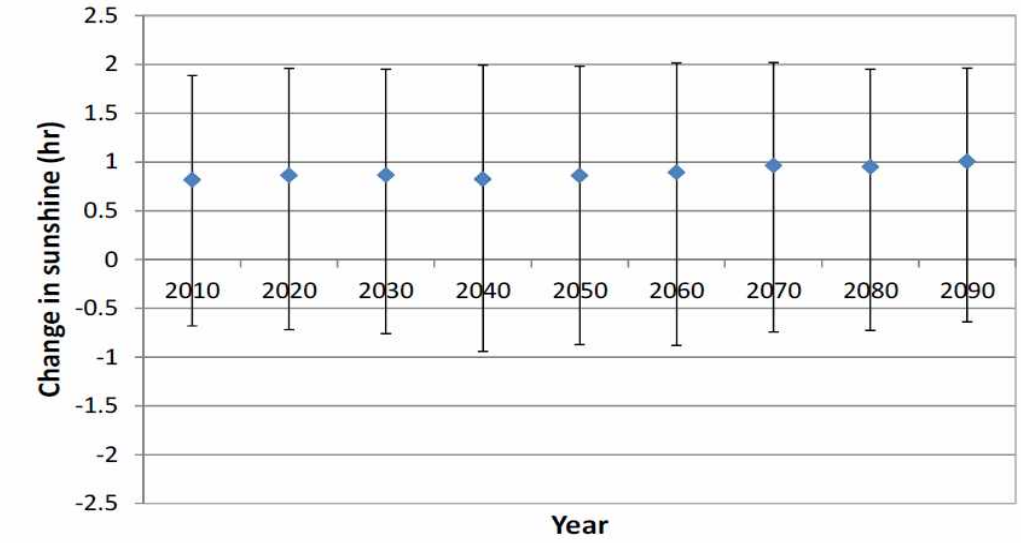


<그림 4-13> 기준년도(1980~2009)에 대한 마둔저수지의 연평균 습도 변화

4.2.5 연평균 일조시간

<그림 4-14>는 경기도 마둔저수지를 대상으로 모의된 3개 기후변화 모델의 미래 연평균 일조시간을 기준기간의 평년 일조시간과 비교하여 10년 단위의 시계열 변동 폭을 그래프로 나타낸 것이다. 이 그래프에서 중간에 있는 선은 중앙값(median)을 나타내며, 양쪽 끝 값은 데이터의 최대, 최소 값을 나타낸다. 연평균 일조시간의 중앙값을 기준으로 살펴보면 2010s부터 2090s가지 과거 기준년도와 비교하여 모두 양의 값을 가짐에 따라 과거 기준년도의 연평균 일조시간보다 크게 모의됨을 알 수 있었고, 그 변동성은 크지 않았다. 과거 기준년도에 비해 2090년대에는 1hr로 크게 증가하는 반면 2010년대에는 0.82hr만큼 증가하였고, 2040s와 2080s는 2030s와 2070s와 비교했을 때 감소하는 것으로 나타났다.

미래 일조시간의 최대값과 최소값의 변동 폭은 2040s에서 2.93hr 범위를 보여 불확실성이 큰 기간으로 나타났으며, 2010s의 연평균 일조시간의 변동 폭은 2.57hr로 가장 작은 변화를 나타냈다.

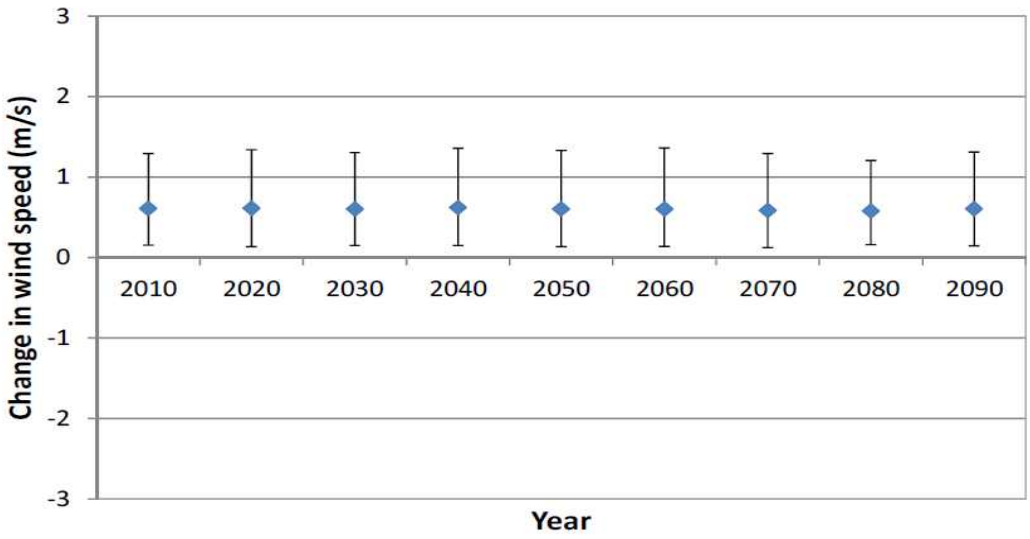


<그림 4-14> 기준년도(1980～2009)에 대한 마둔저수지의 연평균 일조시간 변화

4.2.6 연평균 풍속

<그림 4-15>은 경기도 마둔저수지를 대상으로 모의된 3개 기후변화 모델의 미래 연평균 풍속을 기준기간의 평년 풍속과 비교하여 10년 단위의 시계열 변동 폭을 그래프로 나타낸 것이다. 이 그래프에서 중간에 있는 선은 중앙값(median)을 나타내며, 양쪽 끝 값은 데이터의 최대, 최소값을 나타낸다. 연평균 풍속의 중앙값을 기준으로 살펴보면 2010s부터 2090s까지 과거 기준년도와 비교하여 모두 양의 값을 가짐에 따라 과거 기준년도의 연평균 풍속보다 크게 모의됨을 알 수 있었고, 그 변동성은 크지 않았다. 과거 기준년도에 비해 2040년대에는 0.62m/s로 크게 증가하는 반면 2070년대와 2080년대에는 0.58m/s만큼 증가하였고, 2020s, 2040s, 2090s를 제외한 나머지 기간은 2010s에서부터 감소하는 경향을 나타내었다.

미래 풍속의 최대값과 최소값의 변동 폭은 2060s에서 1.22m/s 범위를 보였으며, 2080s의 연평균 풍속의 변동 폭은 1.05m/s로 가장 작은 변화를 나타냈다.



<그림 4-15> 기준년도(1980~2009)에 대한 마둔저수지의 연평균 풍속 변화

4.3. 시계열 변화

세 가지 미래 기후변화 자료의 지역별 불확실성을 살펴보기 위하여 모델별 미래 기온과 강수량의 월평균 값을 산정하여 기준년도(1980～2009)인 과거 평년값과 비교하여 시계열 변화 편이 분석을 수행하였다. 전국 9개 지역 중 경기 마둔저수지를 분석 하였다.

(표 4-4)는 경기도 마둔 저수지의 기후 모델별 미래 월평균 기온과 강수량을 편이 분석한 결과이며, 이를 도시화한 것이 그림 3.49, 3.50, 3.51로써 시기별로 각각 2025s(2010～2039), 2055s(2040～2069), 2085s(2070～2099) 나누어 나타낸 그래프이다. 마둔 저수지의 기온과 강수의 과거 평년값과의 편이를 동시에 나타내었으며 그림의 x축은 월평균 기온, y축은 월평균 강수를 나타낸다. 이 그래프를 통해 기온과 강수 값를 동시에 기준년도의 평년값과 비교하였을 때의 모델별 차이를 살펴볼 수 있다.

<그림 4-16>에서 <그림 4-18>까지를 보면, 즉 2025s에서 2085s로 미래로 진행될수록 각각의 점(point)들이 원점에서부터 멀어지는 경향을 보임에 따라, 과거 기준년도에 비해 CF, LARS-WG, MM5 각각 편이가 증가하는 것으로 나타내었다. 특히, 원점에서 y축 방향으로 점들이 멀어지는 것보다 x축 방향으로 점들이 멀어지는 경향을 나타내면서, 과거 기준년도와의 편이가 강수보다는 기온의 변화가 더 큰 것으로 모의되었다.

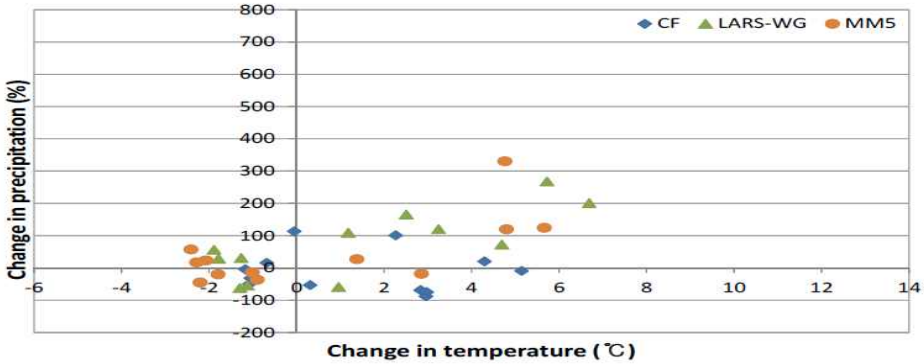
(표 4-5)를 보면 월별 강수량에서는 CF의 경우 2025s 9월에 104%, 2055s와 2085s는 10월에 각각 167%, 192% 증가를 나타내었다. LARS-WG와 MM5는 3개의 미래 시기 모두 12월에 큰 증가를 나타내었는데, 특히 LARS-WG의 12월 강수량 편이가 664%로 나타나면서 큰 값으로 모의되었다. 월별 기온은 겨울철에 큰 증가를 나타내었는데 2025s, 2055s, 2085s 모두 같은 경향성을 나타내었다. CF는 1월에 6.40℃, 7.88℃, 9.13℃의 편이값을 나타내었고, LARS-WG는 12월에 7.20℃, 8.99℃, 10.02℃의 편이값을 나타내었다. MM5는 11월에 가장 큰 편이값을 나타내었는데, 이는 5.89℃, 9.16℃, 12.06℃로 나타났다.

<그림 4-16>에서 <그림 4-18>까지의 결과를 보면 3개의 시기 모두 CF가 다른 모형에 비해 x축의 근처에 위치함에 따라, 다른 모형에 비해 CF가 강수 모의에 있어 과거 기준년도와 편이가 작게 나는 것으로 나타났다. 이에 반해 기온은 MM5가 다른 모형에 비해 x축 방향의 양 끝에

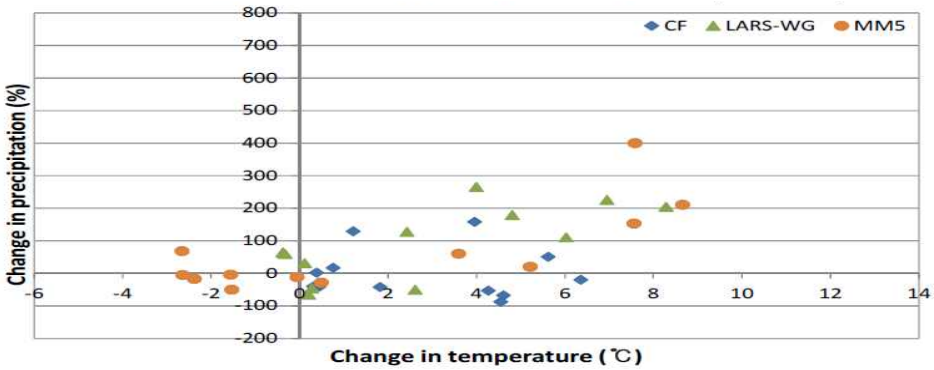
위치함에 따라, 온도가 과거 기준년도와 비교했을 때 다른 모형에 비해 변동성이 크게 모의되었다.

(표 4-5) 마둔저수지의 미래 기상자료에 따른 과거 기준년도의 과거 평년값 비교 결과

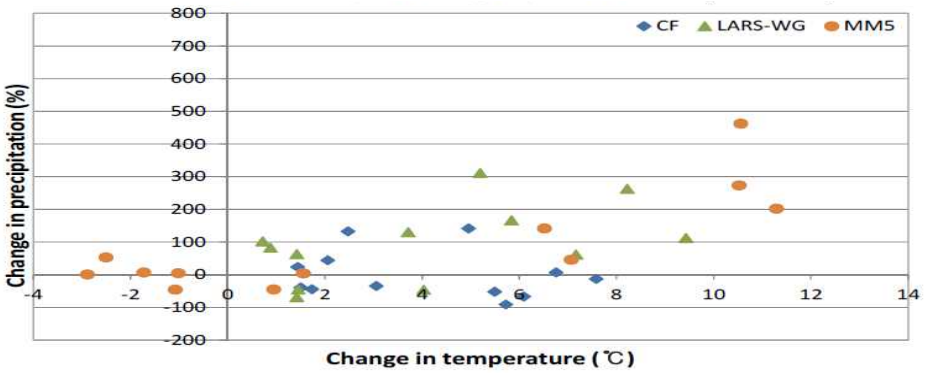
Month		CF		LARS-WG		MM5	
		Temperature (℃)	Precipitation (%)	Temperature (℃)	Precipitation (%)	Temperature (℃)	Precipitation (%)
2025s	1	6.40	-32.95	5.70	589.22	1.31	26.63
	2	2.33	55.60	1.75	395.57	-1.50	11.64
	3	-0.36	-2.77	-1.29	184.61	-2.72	62.59
	4	-1.09	87.58	-3.39	180.10	-2.27	85.80
	5	-1.90	18.23	-2.97	193.97	-2.10	72.23
	6	-0.58	54.35	-2.93	19.39	-1.70	19.51
	7	-0.64	-52.96	-2.61	-82.67	-1.53	-60.63
	8	-0.25	8.27	-1.08	-28.65	0.01	-55.23
	9	3.88	104.38	3.83	-5.55	3.52	-0.36
	10	3.91	83.36	5.93	180.48	5.46	97.48
	11	5.76	10.06	6.92	91.21	5.89	109.00
	12	2.20	39.90	7.20	664.39	4.32	202.34
2055s	1	7.88	-42.21	7.01	419.64	3.80	72.40
	2	4.20	95.84	3.90	470.05	-0.26	21.36
	3	0.99	8.31	0.16	249.11	-2.64	19.06
	4	0.46	101.89	-1.56	301.95	-2.67	70.82
	5	-0.20	33.70	-1.33	194.15	-2.29	80.36
	6	1.15	72.67	-1.32	53.88	-1.43	42.86
	7	0.91	-44.10	-1.06	-73.50	-1.04	-55.60
	8	1.49	7.03	0.82	-27.36	1.14	-29.86
	9	5.59	153.27	5.56	6.12	5.93	15.86
	10	5.40	167.18	7.46	489.23	8.43	113.19
	11	7.33	-8.14	8.61	126.02	9.16	192.34
	12	4.04	19.02	8.99	635.13	7.61	238.94
2085s	1	9.13	-31.32	8.35	454.92	7.07	119.56
	2	5.22	87.56	4.69	273.29	1.69	66.54
	3	2.26	17.10	1.22	275.06	-1.04	32.19
	4	1.79	139.59	-0.33	299.71	-2.74	47.89
	5	0.93	51.92	-0.24	248.21	-2.08	78.51
	6	2.27	67.08	-0.19	56.99	-1.62	42.21
	7	2.20	-35.81	0.14	-68.81	-0.60	-47.71
	8	2.71	-2.37	1.86	-39.81	1.97	-59.33
	9	7.04	185.77	6.95	-3.98	7.81	43.14
	10	6.56	192.47	8.59	445.83	11.53	192.85
	11	8.50	-6.30	9.76	180.43	12.06	163.62
	12	5.30	2.55	10.02	492.03	11.07	264.71



<그림 4-16> 마둔저수지의 기온과 강수의 월평균 특성 (2010～2039)



<그림 4-17> 마둔저수지의 기온과 강수의 월평균 특성 (2040～2069)



<그림 4-18> 마둔저수지의 기온과 강수의 월평균 특성 (2070～2099)

4.4. 유출량 및 기준작물증발산량 민감도 분석

GCM인 MIROC 3.2를 CF와 LARS-WG로 상세화한 일별 미래 기상자료와 RCM인 MM5로 모의한 미래 기상자료를 이용하여 8개 저수지를 대상으로 100년간의 일별 유출량을 모의하였다. 본 연구에서는 3가지 종류의 미래 기상자료에 따른 일별 유출량의 월간 평균과 월간 최대값을 시기별로 비교하여 미래 유출량 모의 특성을 비교·분석하고자 하였다. 미래 유출량 산정을 위해 전년도 연구 (농어촌 연구원, 2010)를 통해 산정된 대상 저수지별 유역내 토지이용변화 면적과 TANK 모형을 이용하였다. 전국 8개지역중 본 고에서는 경기 마둔저수지만을 정리하였다.

경기 마둔저수지를 대상으로 3가지 미래 기상자료를 이용하여 일별 유출량의 모의를 수행한 결과는 다음과 같다. 모의된 일별 유출량 값을 평년 단위로 월별 평균 값을 산정한 후, 시기별로 분석하여 일별 유출량의 시계열 변화를 나타낸 결과는 (표 4-5)와 같다. <그림 4-10>부터 <그림 4-12>는 2025s (2010～2039), 2055s (2040～2069), 2085s (2070～2099) 시기의 일별 유출량의 최대값 변화를 각각 나타낸 결과이다.

(표 4-6)을 살펴보면, 기준년도(1980～2009)에서 결과 값이 가장 크게 나타난 시기는 7월로서 약 7.26 mm로 산정되었다. 7월에 대한 3개의 미래 기후 자료별 유출량 모의 경향을 살펴보면, CF의 경우, 2025s, 2055s, 2085s 시기에 각각 -3.55 mm, -2.60 mm, -2.01 mm 감소하는 것으로 모의된 것에 비해, 다른 두 자료를 이용한 경우는 7월의 일별 유출량이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 CF에서 모의된 7월 강수량이 2025s, 2055s, 2085s에서 기준 년도에 비해 상대적으로 적게 모의된 것에 따른 결과라고 판단된다.

과거 30년의 기상자료를 바탕으로 기준년도의 일별 유출량을 산정한 결과, 2월의 평균 일별 유출량이 0.34 mm로 가장 적게 나타났다(표 4-6). 기준 년도와 비교하여 미래인 2025s, 2055s, 2085s의 유출량 변화량을 미래 기상 자료별로 살펴보면, CF의 유출량 결과는 기준년도에 비해 0.26 mm, 0.46 mm, 0.42 mm 만큼 유출량이 증가하는 것으로 나타나 다른 미래 기상자료를 이용하는 것에 비해 유출량 변화가 적게 모의되는 것으로 나타났다. 또한, CF에서 2085s 시기보다 2055s 시기의 평균 일별 유출량의 증가가 더 크게 나타났다.

(표 4-6) 마둔저수지의 3가지 미래 기상자료에 따른 평균 일별 유출량 변화 결과

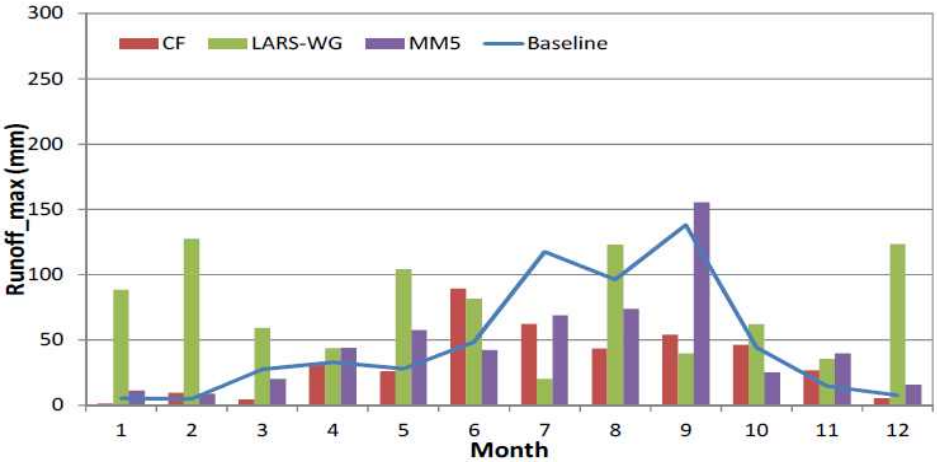
Month	기준 년도 (mm)	2025s			2055s			2085s		
		CF	LARS	MM5	CF	LARS	MM5	CF	LARS	MM5
		(△mm)								
1	0.35	-0.11	3.64	0.66	-0.12	2.80	0.90	-0.10	2.94	1.15
2	0.34	0.26	2.32	0.47	0.46	3.25	0.62	0.42	2.05	0.93
3	0.66	-0.06	2.87	1.21	0.09	3.33	0.80	0.18	3.37	1.05
4	1.09	1.54	4.00	2.53	1.92	6.37	2.40	2.58	6.33	1.90
5	1.74	0.56	6.19	3.34	1.04	6.62	3.58	1.52	7.87	3.38
6	2.30	1.13	3.83	3.30	1.69	4.73	4.22	1.55	5.27	4.37
7	7.26	-3.55	1.14	2.54	-2.60	1.95	2.90	-2.01	2.31	3.50
8	6.17	0.43	4.07	2.29	0.71	4.21	4.03	0.14	3.35	2.24
9	3.64	2.45	2.79	2.97	4.45	3.38	3.98	5.51	2.95	4.45
10	1.19	2.32	2.93	2.21	3.84	6.99	2.62	4.46	6.49	4.01
11	0.85	0.31	2.09	2.11	0.22	2.90	3.23	0.30	3.38	3.06
12	0.42	0.21	3.56	1.34	0.15	3.79	1.77	0.10	3.08	1.83

모의된 모든 미래 유출량 중에서, 가장 큰 증가를 나타낸 경우는 2085s에 LARS-WG에서 모의된 5월의 기상자료를 이용한 경우로서 기준년도에 비해 총 7.87 mm 일별 유출량 증가를 보였으며, 가장 많이 감소하는 경우는 2025s에 CF의 7월 유출량의 경우로, 기준년도에 비해 -3.55 mm 변화하는 것으로 모의되었다.

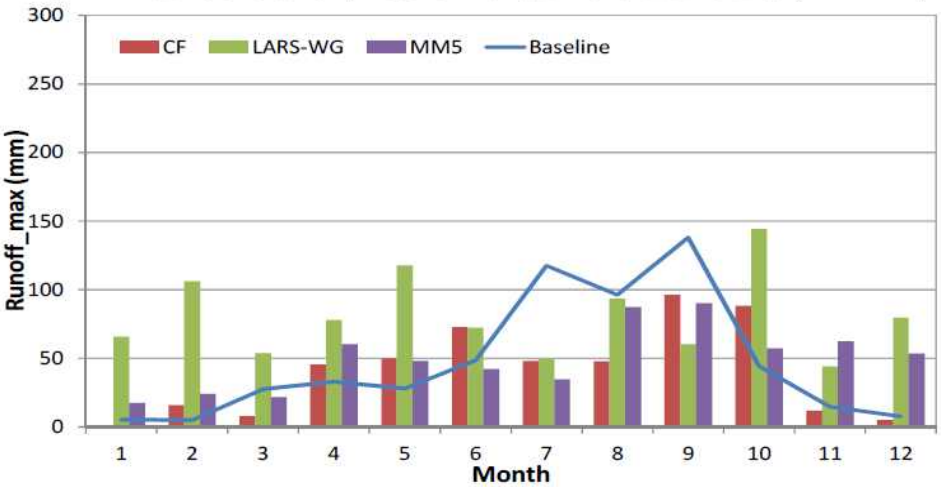
<그림 4-19>부터 <그림 4-21>는 2025s, 2055s, 2085s 단위로 일별 유출량 값의 월별 최대치를 분석하여 각각 막대그래프로 표현한 결과이다. 여기서 기준년도(1980~2009)의 최대 유출량은 실선그래프로 표현하여 비교하였다. 기준년도의 최대 일별 유출량은 9월에 138.1 mm로 나타났으며, 다음으로는 7월의 117.6 mm로 나타났다. 모의된 최대 일별 유출량은 2025s에서 9월에 MM5를 이용한 결과가 155.5 mm로 나타났으며, 2055s에는 10월에 LARS-WG의 경우에서 144.2 mm, 2085s에는 9월에 MM5로 모의한 경우가 180.8 mm로 최대값을 나타냈다. 기준년도에 7월 9월에 유출량이 크게 나타났던 것에 비해 미래 기상자료를 이용할 경우, 주로 9~10월에 유출량이 최대로 모의되는 경향을 보이고 있다. 상대적으로 연 중 1~2월에 일별 유출량이 적은 경향을 CF와 MM5에서는 유사하게 모의하

고 있으나 LARS-WG에서는 1~2월의 최대 유출량을 7월보다 크게 나타나는 것으로 모의하고 있다.

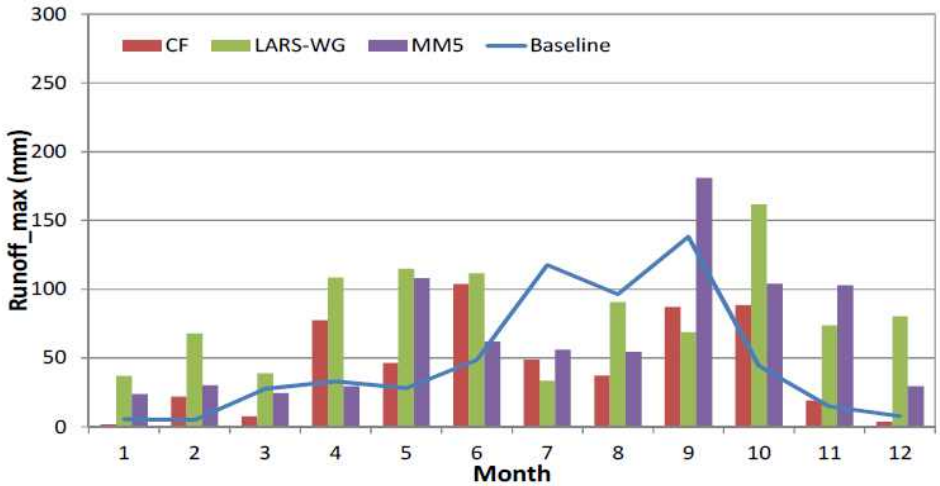
결과적으로 경기 마둔저수지 지역의 경우, 기준년도의 기상자료를 활용하여 산정한 유출량과 모의된 일별 유출량의 편차가 가장 크게 나타난 시기는 여름철인 7월로서 2025s, 2055s, 2085s 모든 시기에 최대 일별 유출량이 적게 모의되는 경향을 보였다. 미래 기상 자료별로 살펴보면, LARS-WG이 다른 자료에 비해 최대 일별 유출량을 크게 산정하는 경향을 보였고, MM5가 적게 산정되는 경향을 보였다.



<그림 4-19> 마둔저수지의 미래 기상자료에 따른 최대 일별 유출량 (2010~2039)



<그림 4-20> 마둔저수지의 미래 기상자료에 따른 최대 일별 유출량
(2040～2069)



<그림 4-21> 마둔저수지의 미래 기상자료에 따른 최대 일별 유출량
(2070～2099)

5. 농업용수 취약성 평가

5.1 시기별 작물증발산량 변화 분석

본 연구에서는 기후변화 시나리오와 FAO Penman-Monteith 식을 이용하여 지역별, 시기별 작물증발산량을 산정하고 시기별 변화를 분석하였다. 연도별 분석결과를 활용하여 한발기준 10년빈도 작물증발산량을 산정하여 시기별 변화를 분석하였다. 또한 미래의 이앙시기 변화를 고려하기 위하여 기존의 이앙시기와 이앙시기가 10일씩 앞, 뒤로 변화되었을 경우를 가정하여 작물증발산량을 산정 및 비교하였다.

5.1.1 시기별 작물증발산량 산정 결과

지역별 작물증발산량 산정 결과를 살펴보면, 경북 포항의 증발산량이 가장 높게 산정되었고 다음으로 전남 여수의 증발산량이 높게 나타났다. 시기별 증가율을 살펴보면 강원 춘천의 경우 1995s 대비 2085s의 작물증발산량의 증가율은 12.7%로 나타났고, 경기 수원의 증가율은 6.6%로 나타났으며 경북 포항은 33.5%로 가장 높은 증가율을 보이고 있다. 증발산량은 중부지역, 남부지역 모두 정도의 차이는 있으나 대체로 증가하는 경향이 있음을 확인할 수 있었다.

(표 5-1) 시기별 연평균 작물증발산량 (중부지역)

구분	강원 춘천		경기 수원		충북 청주		충남 서산	
	증발산량 (mm)	증가율 (%)	증발산량 (mm)	증가율 (%)	증발산량 (mm)	증가율 (%)	증발산량 (mm)	증가율 (%)
1995s	572.4	-	578.6	-	615.4	-	576.4	-
2025s	608.3	6.3	601.7	4.0	604.1	-1.8	610.7	6.0
2055s	637.0	11.3	596.3	3.1	598.7	-2.7	621.0	7.7
2085s	645.3	12.7	616.9	6.6	619.4	0.6	648.8	12.6

(표 5-2) 시기별 연평균 작물증발산량 (남부지역)

구분	전북 전주		전남 여수		경북 포항		경남 진주	
	증발산량 (mm)	증가율 (%)	증발산량 (mm)	증가율 (%)	증발산량 (mm)	증가율 (%)	증발산량 (mm)	증가율 (%)
1995s	579.6	-	615.5	-	606.9	-	566.1	-
2025s	596.4	2.9	653.9	6.2	749.6	23.5	583.8	3.1
2055s	617.4	6.5	683.9	11.1	781.4	28.8	586.2	3.5
2085s	643.2	11.0	731.4	18.8	810.1	33.5	615.6	8.7

<그림 5-1> 시기별 연평균 작물증발산량

5.1.2 시기별 10년빈도 작물증발산량 산정 결과

앞서 산정된 연도별 작물증발산량 결과를 활용하여, 시기별 10년빈도 작물증발산량을 산정하고 이를 지역별로 비교하였다.

지역별 산정 결과를 살펴보면, 경북 포항의 10년빈도 증발산량이 가장 높게 산정되었고 다음으로 전남 여수의 증발산량이 높게 나타났다. 시기별 증가율을 살펴보면 강원 춘천의 경우 1995s 대비 2085s의 10년빈도 작

물증발산량의 증가율은 8.4%로 나타났고, 경기 수원의 증가율은 2.7%로 나타났으며 경북 포항은 27.1%로 가장 높은 증가율을 보이고 있다. 증발산량은 중부지역, 남부지역 모두 정도의 차이는 있으나 대체로 증가하는 경향이 있음을 확인할 수 있었다. 이에 반하여 충북 청주의 경우 증가율이 -3.9%로 10년빈도 작물증발산량이 감소하는 것으로 나타났다. 남부지역의 경우 경남 진주를 제외하고 전북 전주, 전남 여수, 경북 포항에서는 증가율이 7.6%, 13.8%, 27.1%로 10년빈도 작물증발산량이 시기에 따라 증가하는 것으로 나타났다.

(표 5-3) 시기별 10년빈도 작물증발산량 (중부지역)

구분	강원 춘천		경기 수원		충북 청주		충남 서산	
	증발산량 (mm)	증가율 (%)	증발산량 (mm)	증가율 (%)	증발산량 (mm)	증가율 (%)	증발산량 (mm)	증가율 (%)
1995s	611.0	-	621.7	-	666.8	-	623.5	-
2025s	624.6	2.2	623.3	0.3	625.9	-6.1	631.2	1.2
2055s	656.0	7.4	618.6	-0.5	621.1	-6.9	649.6	4.2
2085s	662.3	8.4	638.5	2.7	641.0	-3.9	679.9	9.0

(표 5-4) 시기별 10년빈도 작물증발산량 (남부지역)

구분	전북 전주		전남 여수		경북 포항		경남 진주	
	증발산량 (mm)	증가율 (%)	증발산량 (mm)	증가율 (%)	증발산량 (mm)	증가율 (%)	증발산량 (mm)	증가율 (%)
1995s	621.1	-	668.0	-	667.2	-	613.9	-
2025s	614.6	-1.0	673.7	0.9	783.1	17.4	606.4	-1.2
2055s	639.9	3.0	718.9	7.6	810.9	21.5	604.8	-1.5
2085s	668.4	7.6	760.3	13.8	847.7	27.1	634.8	3.4

<그림 5-2> 시기별 10년빈도 작물증발산량

5.1.3 이앙시기 변화에 따른 작물증발산량 산정 결과

기후변화로 인한 기온 상승은 미래 이앙일의 변화를 가져올 수 있다. 따라서 본 연구에서는 기존의 이앙일을 기준으로 이앙일을 10일 앞당겨졌을 경우(S1)와 이앙일이 10일 늦춰졌을 경우(S2)의 지역별, 시기별 작물증발산량을 산정하고 이를 비교하였다.

중부지역의 작물증발산량의 변화를 살펴보면, 강원 춘천지역의 경우 이앙일이 10일 앞당겨지게 되면 2025s, 2055s 시기 작물증발산량은 기존 이앙일의 작물증발산량 대비 0.7%, 0.5% 감소되는 것으로 나타내었고, 2085s 시기에는 0.1% 증가되는 것으로 나타났다. 이앙일이 10일 늦춰지게 되면 2025s 시기 작물증발산량은 기존 이앙일의 작물증발산량과 동일하게 나타났고, 2055s, 2085s 시기에는 0.2%, 0.5% 감소되는 것으로 나타났다. 경기 수원지역의 경우 이앙일이 10일 앞당겨지게 되면, 2025s 시기의 작물증발산량은 1.1% 감소하고, 충북 청주지역의 경우 이앙일 10일 앞당겨지게 되면, 2025s 시기의 작물증발산량은 1.2% 감소하고, 충남 서산지역의 경우 이앙일 10일 앞당겨지게 되면, 2025s 시기의 작물증발산량은 1.3% 감소하여 가장 큰 변화를 나타내었다.

남부지역의 작물증발산량의 변화를 살펴보면, 전북 전주지역의 경우 이

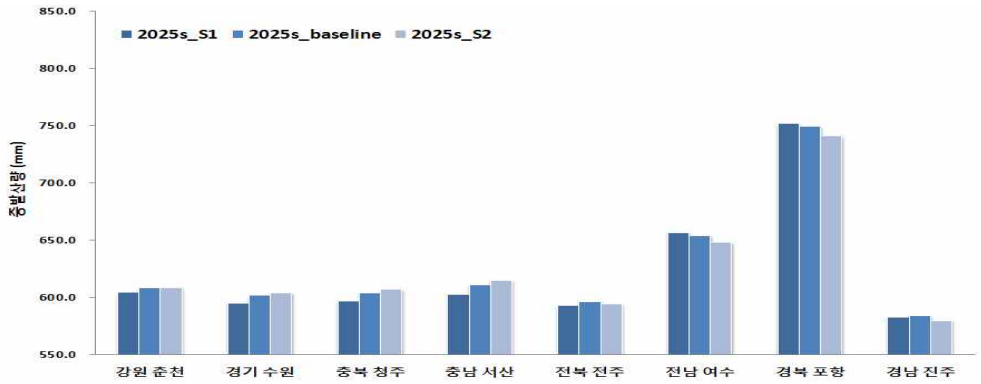
앙일이 10일 앞당겨지게 되면 2025s, 2055s, 2085s 시기 작물증발산량은 기존 이앙일의 작물증발산량 대비 각각 0.6%, 0.6%, 0.2% 감소되는 것으로 나타났다. 이앙일이 10일 늦춰지게 되면 2025s, 2055s, 2085s 시기 작물증발산량은 기존 이앙일의 작물증발산량 대비 각각 0.4%, 0.86%, 1.0% 감소되는 것으로 나타났다. 전남 여수지역의 경우 이앙일이 10일 늦춰지게 되면, 2085s 시기의 작물증발산량은 1.7% 감소하고, 경북 포항지역의 경우 이앙일 10일 앞당겨지게 되면, 2085s 시기의 작물증발산량은 11.6% 감소하고, 경남 진주지역의 경우 이앙일 10일 늦춰지게 되면, 2085s 시기의 작물증발산량은 1.4% 감소하여 가장 큰 변화를 나타내었다.

(표 5-5) 이앙시기 변화에 따른 연평균 작물증발산량 (중부지역)

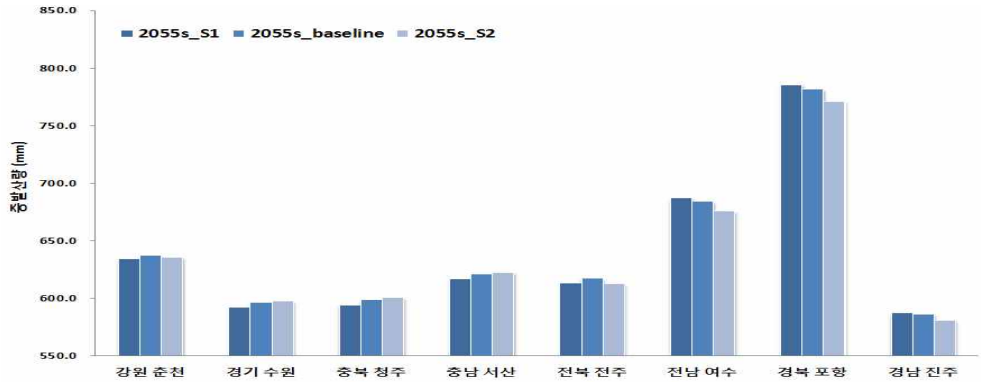
구분		강원 춘천		경기 수원		충북 청주		충남 서산	
		증발산량 (mm)	증가율 (%)	증발산량 (mm)	증가율 (%)	증발산량 (mm)	증가율 (%)	증발산량 (mm)	증가율 (%)
2025s	Baseline	608.3	-	601.7	-	604.1	-	610.7	-
	S1	604.2	-0.7	594.8	-1.1	597.0	-1.2	602.7	-1.3
	S2	608.5	0.0	604.0	0.4	606.8	0.4	614.9	0.7
2055s	Baseline	637.0	-	596.3	-	598.7	-	621.0	-
	S1	634.0	-0.5	592.0	-0.7	594.2	-0.7	617.0	-0.6
	S2	635.6	-0.2	597.6	0.2	600.3	0.3	622.4	0.2
2085s	Baseline	645.3	-	616.9	-	619.4	-	648.8	-
	S1	645.7	0.1	610.7	-1.0	613.0	-1.0	645.7	-0.5
	S2	642.3	-0.5	617.8	0.1	620.5	0.2	649.5	0.1

(표 5-6) 이앙시기 변화에 따른 연평균 작물증발산량 (남부지역)

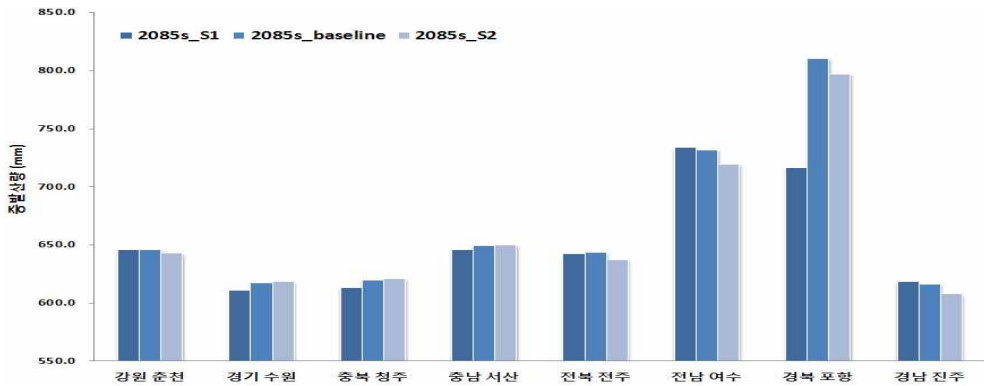
구분		전북 전주		전남 여수		경북 포항		경남 진주	
		증발산량 (mm)	증가율 (%)	증발산량 (mm)	증가율 (%)	증발산량 (mm)	증가율 (%)	증발산량 (mm)	증가율 (%)
2025s	Baseline	596.4	-	653.9	-	749.6	-	583.8	-
	S1	592.8	-0.6	656.7	0.4	751.9	0.3	582.5	-0.2
	S2	594.2	-0.4	647.9	-0.9	741.2	-1.1	579.8	-0.7
2055s	Baseline	617.4	-	683.9	-	781.4	-	586.2	-
	S1	613.5	-0.6	687.3	0.5	785.5	0.5	587.2	0.2
	S2	612.7	-0.8	675.6	-1.2	771.1	-1.3	580.7	-0.9
2085s	Baseline	643.2	-	731.4	-	810.1	-	615.6	-
	S1	642.0	-0.2	733.4	0.3	716.0	-11.6	617.8	0.3
	S2	636.9	-1.0	718.9	-1.7	796.7	-1.7	607.2	-1.4



<그림 5-3> 이앙시기 변화에 따른 연평균 증발산량(2025s)



<그림 5-4> 이앙시기 변화에 따른 연평균 증발산량(2055s)



<그림 5-5> 이앙시기 변화에 따른 연평균 증발산량(2085s)

5.1.4 이앙시기 변화에 따른 10년빈도 작물증발산량 산정 결과

앞서 산정된 이앙시기별 작물증발산량 산정결과를 활용하여 한발기준 10년빈도 작물증발산량을 산정하고, 이를 지역별 시기별로 비교, 분석하였다.

이앙시기에 따른 중부지역의 10년빈도 작물증발산량의 변화를 살펴보면, 강원 춘천지역의 경우 이앙일이 10일 앞당겨지게 되면 2025s, 2055s 시기 10년빈도 작물증발산량은 기존 이앙일의 10년빈도 작물증발산량 0.8%, 0.5% 감소되는 것으로 나타내었고, 2085s 시기에는 0.1% 증가되는 것으로 나타났다. 이앙일이 10일 늦춰지게 되면 2025s 시기 작물증발산량은 기존 이앙일의 작물증발산량과 동일하게 나타났고, 2055s, 2085s 시기에는 0.5%, 0.7% 감소되는 것으로 나타났다. 경기 수원지역의 경우 이앙일이 10일 앞당겨지게 되면, 2025s 시기의 작물증발산량은 1.1% 감소하고, 충북 청주지역의 경우 이앙일 10일 앞당겨지게 되면, 2025s 시기의 작물증발산량은 0.8% 감소하고, 충남 서산지역의 경우 이앙일 10일 앞당겨지게 되면, 2025s 시기의 작물증발산량은 1.0% 감소하여 가장 큰 변화를 나타내었다.

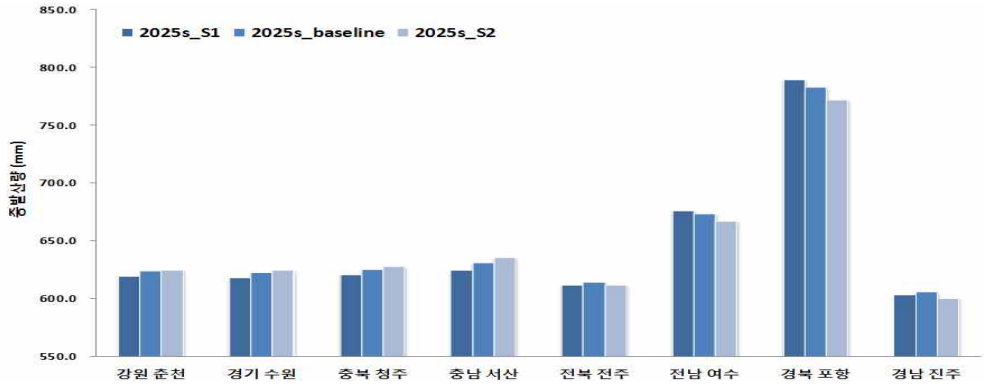
이앙시기에 따른 남부지역의 10년빈도 작물증발산량의 변화를 살펴보면, 전북 전주지역의 경우 이앙일이 10일 앞당겨지게 되면 2025s, 시기 10년빈도 작물증발산량은 기존 이앙일의 10년빈도 작물증발산량 대비 각각 0.4% 감소되는 것으로 나타났고, 2055s에는 기존의 값과 동일하며, 2085s 시기에는 0.2% 감소하는 것으로 나타났다. 이앙일이 10일 늦춰지게 되면 2025s, 2055s, 2085s 시기 10년빈도 작물증발산량은 기존 이앙일의 작물증발산량 대비 각각 0.4%, 0.8%, 1.3% 감소되는 것으로 나타났다. 전남 여수지역의 경우 이앙일이 10일 늦춰지게 되면, 2055s 시기의 작물증발산량은 1.3% 감소하고, 경북 포항지역의 경우 이앙일 10일 앞당겨지게 되면, 2085s 시기의 작물증발산량은 12.0% 감소하고, 경남 진주지역의 경우 이앙일 10일 늦춰지게 되면, 2085s 시기의 작물증발산량은 1.2% 감소하여 가장 큰 변화를 나타내었다.

(표 5-7) 이앙시기 변화에 따른 10년빈도 작물증발산량 (중부지역)

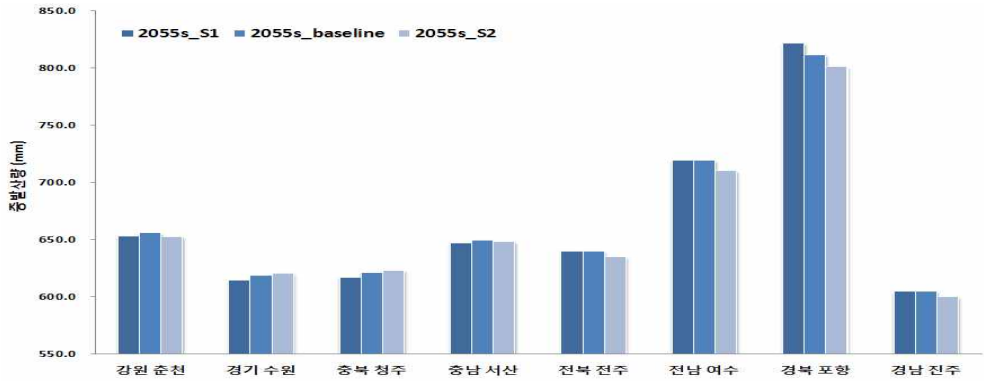
구분		강원 춘천		경기 수원		충북 청주		충남 서산	
		증발산량 (mm)	증가율 (%)	증발산량 (mm)	증가율 (%)	증발산량 (mm)	증가율 (%)	증발산량 (mm)	증가율 (%)
2025s	Baseline	624.6	-	623.3	-	625.9	-	631.2	-
	S1	619.8	-0.8	618.8	-0.7	621.2	-0.8	625.0	-1.0
	S2	624.8	0.0	625.0	0.3	628.0	0.3	635.8	0.7
2055s	Baseline	656.0	-	618.6	-	621.1	-	649.6	-
	S1	652.8	-0.5	614.5	-0.7	617.1	-0.6	646.9	-0.4
	S2	652.6	-0.5	620.4	0.3	623.0	0.3	648.2	-0.2
2085s	Baseline	662.3	-	638.5	-	641.0	-	679.9	-
	S1	662.8	0.1	634.3	-0.7	636.6	-0.7	677.0	-0.4
	S2	657.4	-0.7	639.5	0.2	642.6	0.2	676.7	-0.5

(표 5-8) 이앙시기 변화에 따른 10년빈도 작물증발산량 (남부지역)

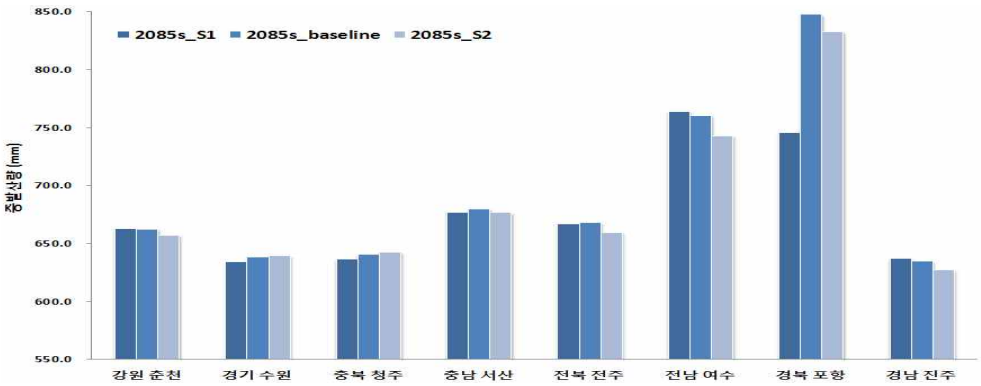
구분		전북 전주		전남 여수		경북 포항		경남 진주	
		증발산량 (mm)	증가율 (%)	증발산량 (mm)	증가율 (%)	증발산량 (mm)	증가율 (%)	증발산량 (mm)	증가율 (%)
2025s	Baseline	614.6	-	673.7	-	783.1	-	606.4	-
	S1	612.4	-0.4	676.3	0.4	789.5	0.8	603.7	-0.4
	S2	612.3	-0.4	667.5	-0.9	772.3	-1.4	600.9	-0.9
2055s	Baseline	639.9	-	718.9	-	810.9	-	604.8	-
	S1	639.8	0.0	719.4	0.1	821.3	1.3	604.6	0.0
	S2	634.6	-0.8	709.8	-1.3	800.9	-1.2	600.1	-0.8
2085s	Baseline	668.4	-	760.3	-	847.7	-	634.8	-
	S1	667.3	-0.2	764.1	0.5	745.8	-12.0	637.2	0.4
	S2	659.7	-1.3	743.2	-2.2	832.9	-1.7	627.4	-1.2



<그림 5-6> 이앙시기 변화에 따른 10년빈도 증발산량(2025s)



<그림 5-7> 이앙시기 변화에 따른 10년빈도 증발산량(2055s)



<그림 5-8> 이앙시기 변화에 따른 10년빈도 증발산량(2085s)

6. 시기별 필요저수량 변화 분석

본 지구의 물수지 분석은 유역내 수자원의 총 발생량, 관개구역에서의 수요량, 시설물 내 저류량의 정도와 재이용 등 수자원의 구성과 순환과정을 농업용수 계획기준년 기준으로 수급관계를 분석하였다. 분석 요소인 유역의 유출량은 TANK모형을 수정한 DIROM에 의해 산정하고 관개구역의 필요수량은 Penman-Monteith 방법에 의해 증발산량을 산정하였고, 저수지 모의조작에 따른 물수지를 실시하여 매년의 최대필요저수량을 산정하였다.

6.1 저수지 물수지 분석 입력자료 구축

저수지 물수지 분석을 수행하기 위하여 대상지구의 기초자료를 조사한 결과는 아래와 같다. 기본적인 저수지 자료로는 대상저수지 수위-내용적 및 만수위, 사수위 자료 등이 활용되었다. 유역 유출량 및 필요수량을 산정하기 위하여 유역면적 및 유역내 토지이용변화, 관개지구내 논벼의 관개면적변화 분석 결과를 활용하였다. 또한 대상지구내 삼투량 및 수로손실, 최소담수심, 최대담수심이 필요수량 산정을 위한 기초자료로서 활용되었다.

(표 6-1) 중부지역 대상지구 기초자료

구 분	강 원	경 기	충 남	충 북
저수지명	원 창	마 둔	고 풍	원 남
관 측 소	춘 천	수 원	서 산	청 주
관측소번호	101	119	129	131
유역면적(ha)	1,300	1,240	2,590	3,655
만수위 (El.m)	280.0	119.1	84.0	115.7
사수위 (El.m)	250.0	102.0	64.6	97.0
유효저수량(천m^3)	3,214.0	3,486.0	7,821.8	8,690.2
삼투량 (㎜)	6.5	4.0	5.1	5.5
수로손실 (%)	20	10	10	15
최대담수심 (㎜)	80	80	80	80
최소담수심 (㎜)	20	20	20	20

(표 6-2) 남부지역 대상지구 기초자료

구 분	전 남	전 북	경 남	경 북
저수지명	대 포	인 교	남 성	마 북
관 측 소	여 수	전 주	진 주	포 항
관측소번호	168	146	192	138
유역면적(ha)	1,440	841	392	1,600
만수위 (El.m)	20.1	75.5	99.0	164.3
사수위 (El.m)	6.8	64.3	76.2	134.0
유효저수량(천m^3)	1,380.1	1376.2	1,622.7	6,160.0
삼투량 (㎜)	4.0	5.0	4.1	5.0
수로손실 (%)	15	10	15	15
최대담수심 (㎜)	80	80	80	80
최소담수심 (㎜)	20	20	20	20

(표 6-3) 시기별 관개면적

대상 지구	1995s	2025s		2055s		2085s	
	면적 (ha)	면적 (ha)	증감율 (%)	면적 (ha)	증감율(%)	면적 (ha)	증감율 (%)
강원 원창	451.4	442.4	-2.0	441.3	-2.2	440.1	-2.5
경기 마둔	676.9	668.0	-1.3	665.4	-1.7	660.4	-2.4
충북 원남	1402.2	1334.0	-4.9	1297.0	-7.5	1263.9	-9.9
충남 고풍	1185.0	1184.0	-0.1	1154.4	-2.6	1115.7	-5.9
전북 인교	166.0	166.0	0.0	161.0	-3.0	161.0	-3.0
전남 대포	296.7	296.7	0.0	296.7	0.0	296.7	0.0
경북 마북	583.6	583.6	0.0	583.6	0.0	583.6	0.0
경남 남성	221.7	220.3	-0.6	216.3	-2.5	212.2	-4.3

(표 6-4) 유역내 토지이용 비율

구 분		1995s		2025s		2055s		2085s	
		ha	(%)	ha	(%)	ha	(%)	ha	(%)
원창저수지 (강원)	논	-	-	-	-	-	-	-	-
	밭	-	-	-	-	-	-	-	-
	산림	1,253	98.4	1,247	98.0	1,247	98.0	1,247	98.0
마둔저수지 (경기)	논	86	7.2	73	6.1	32	2.7	24	2.0
	밭	63	5.3	51	4.3	29	2.4	15	1.3
	산림	960	80.7	969	81.4	1,006	84.5	1,023	86.0
원남저수지 (충북)	논	720	9.5	685	9.1	666	8.8	649	8.6
	밭	962	12.7	780	10.3	757	10.0	752	9.9
	산림	5,369	71.0	5,323	70.4	5,425	71.7	5,526	73.1
고풍저수지 (충남)	논	153	6.0	138	5.4	115	4.5	90	3.5
	밭	211	8.3	128	5.0	82	3.2	60	2.4
	산림	2,032	80.1	2,120	83.6	2,159	85.1	2,176	85.8
인교저수지 (전북)	논	85	10.1	81	9.6	59	7	57	6.8
	밭	23	2.7	3	0.4	3	0.4	2	0.2
	산림	682	81.1	694	82.5	712	84.7	718	85.4
대포저수지 (전남)	논	142	9.7	142	9.7	142	9.7	142	9.7
	밭	116	8.0	93	6.4	80	5.5	80	5.5
	산림	1,079	74.0	1,061	72.8	1,038	71.2	1,038	71.2
마북저수지 (경북)	논	39	2.4	37	2.3	34	2.1	32	2.0
	밭	23	1.4	19	1.2	19	1.2	14	0.9
	산림	1,516	93.7	1,515	93.6	1,523	94.1	1,532	94.7
남성저수지 (경남)	논	31	8.3	26	7.0	25	6.7	25	6.7
	밭	2	0.5	2	0.5	1	0.3	1	0.3
	산림	325	87.1	330	88.5	332	89.0	332	89.0

6.2 시기별 연최대 필요저수량 산정 결과

각 저수지의 시기별(1995s, 2025s, 2055s, 2085s) 연최대 필요저수량을 산정한 결과는 아래와 같다.

중부지역의 저수지별 연최대 필요저수량 결과를 살펴보면, 강원 원창저수지의 경우 1995s 연최대 필요저수량 1620.5 천㎥ 대비 2025s, 2055s, 2085s 시기에 각각 14.5%, 19.2%, 24.2% 감소하는 것으로 나타났다. 경기 마둔저수지의 경우 2025s 시기의 연최대 필요저수량은 60.7%의 증가율을, 충북 원남저수지의 경우 2085s 시기에서는 24.9%의 감소율을, 충남 고풍저수지의 경우 2025s 시기에서는 35.9%의 증가율을 보여 가장 큰 변화를 나타내었다. 시기별 연최대 필요저수량의 변화가 가장 큰 저수지는 경기 마둔저수지로서 2025s 시기에 1995s 대비 연최대 필요저수량이 약 60.7% 증가되는 것으로 모의되었다.

남부지역의 저수지별 연최대 필요저수량 결과를 살펴보면, 전북 인교저수지의 경우 1995s 연최대 필요저수량 464.0 천㎥ 대비 2025s, 2055s, 2085s 시기에 각각 23.5%, 15.0%, 14.4% 증가하는 것으로 나타났다. 전남 대포저수지의 경우 2025s 시기의 연최대 필요저수량은 5.1%의 증가율을, 경북 마북저수지의 경우 2025s 시기에서 52.2%의 증가율을, 경남 남성저수지의 경우 2025s 시기에서 43.0%의 증가율을 보여 가장 큰 변화를 나타내었다. 시기별 연최대 필요저수량의 변화가 가장 큰 저수지는 경북 마북저수지로서 2025s 시기에 1995s 대비 연최대 필요저수량이 약 52.2% 증가되는 것으로 모의되었다.

본 연구에서는 기존의 시나리오와 함께 수자원 장기종합계획의 농업용수 수요량 시나리오를 고려하였다.

(표 6-5) 시나리오 설정 기본 기조 (환경, 수요량, 경지면적)

구분	적용	농업환경	농업용수 수요량	기본지표 (경지면적)
고수요	비교안(상한)	현상태 유지	점진적 증가	보수적 지표 적용
기준수요	기본안	완만한 변화	점진 감소	정부 정책의지 반영
저수요	비교안(하한)	급격한 변화	상당폭 감소	한국농촌경제연구원 모형치 반영

(표 6-6) 시나리오 설정 기본 기조 (주요지표적용)

구분	주요 지표의 적용
고수요	1) 통일대비 논 면적 최대 유지 - 2013년 경지면적 1,773 천ha (논: 1,100 천ha, 밭 : 673 천ha) 2) 기타는 기준수요와 동일
기준수요	1) 현재의 농업환경을 고려한 계획 반영 - 농업·농촌종합대책 (농림부, 2004) - 2013년 경지면적 1,731 천ha (논: 1,058 천ha, 밭 : 673 천ha) 2) 농업전망 2004 (KREI, 2004) 인용 3) 주요 농림업 통계연보 (농림부, 2004) 추세분석
저수요	1) 쌀 수입개방에 따른 논 면적 감소 반영 - 농업전망 2005 (KREI, 2005) 적용 (선진국대우, 5년간 관세 15% 감축, 관세할당제 8%까지 증량) - 2013년 경지면적 1,638 천ha (논: 1,004 천ha, 밭 : 634 천ha) 2) 기타는 기준수요와 동일

(표 6-7) 수장기 경지면적 변화 예측

(단위: 천 ha)

구분			2003년	2006년	2011년	2016년	2020년
기존	합계		-	1850	1850	1850	1850
	논면적			1100	1100	1100	1100
	밭면적			750	750	750	750
보완계획	고수요	합계	1846	1808	1784	1755	1731
		논면적	1127	1101	1100	1100	1100
		밭면적	719	707	684	655	631
	기준수요	합계	1846	1808	1754	1695	1647
		논면적	1127	1101	1070	1040	1016
		밭면적	719	707	684	655	631
	저수요	합계	1846	1790	1683	1570	1479
		논면적	1127	1094	1031	964	910
		밭면적	719	696	652	606	569

(표 6-8) 수장기 논면적 변화 예측

(단위: 천 ha)

구 분				2003년	2006년	2011년	2016년	2020년
01년 장기계획	합계			-	1100	1100	1100	1100
	수리답	이앙재배			508	458	458	458
		건답재배			199	244	244	244
		담수재배			227	289	289	289
	수리불안전답				166	109	109	109
금회보완계획	고수요	합계		1,127	1,101	1,100	1,100	1,100
		수리답	이앙재배	804	800	820	842	862
			건답재배	14	17	27	34	38
			담수재배	64	71	78	83	85
		수리불안전답		245	213	175	141	115
	기준수요	합계		1,127	1,101	1,070	1,040	1,016
		수리답	이앙재배	804	800	795	790	787
			건답재배	14	17	27	34	38
			담수재배	64	71	78	83	85
		수리불안전답		245	213	170	133	106
	저수요	합계		1,127	1,094	1,031	964	910
		수리답	이앙재배	804	793	762	724	692
			건답재배	14	17	27	34	38
			담수재배	64	71	78	83	85
		수리불안전답		245	211	164	123	95

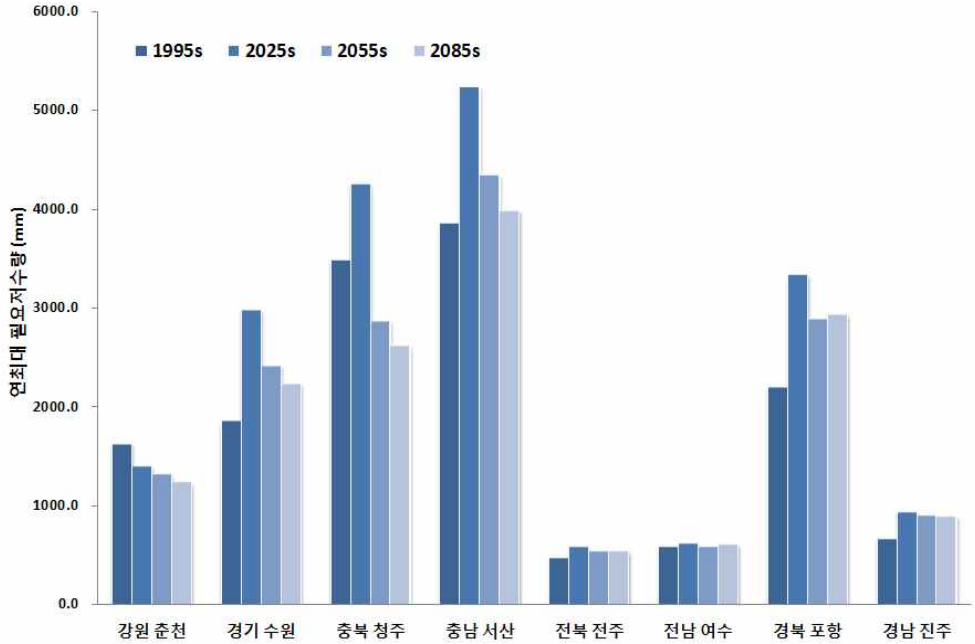
수자원 장기종합계획에서는 농업용수 수요량의 변화를 '점진적 증가', '점진 감소', '상당폭 감소'로 구분하여 각각 고수요, 기준수요, 저수요 시나리오를 고려하고 있다. 본 연구에서는 각 시나리오의 논면적 변화 비율을 적용하여 2025s의 시나리오별 연최대 필요저수량을 산정, 비교하였다. 수자원 장기종합계획의 시나리오별 연최대 필요저수량 산정결과를 살펴보면, 고수요 시나리오일 경우 1995s 대비 연최대 필요저수량의 증가율이 높게 나타났으며, 기준수요와 저수요 시나리오로 옮겨갈수록 증가율이 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 특히 저수요 시나리오의 경우 충북 원남저수지를 제외하고 모든 저수지의 연최대 필요저수량이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

(표 6-9) 시기별 연최대 필요저수량 (중부지역)

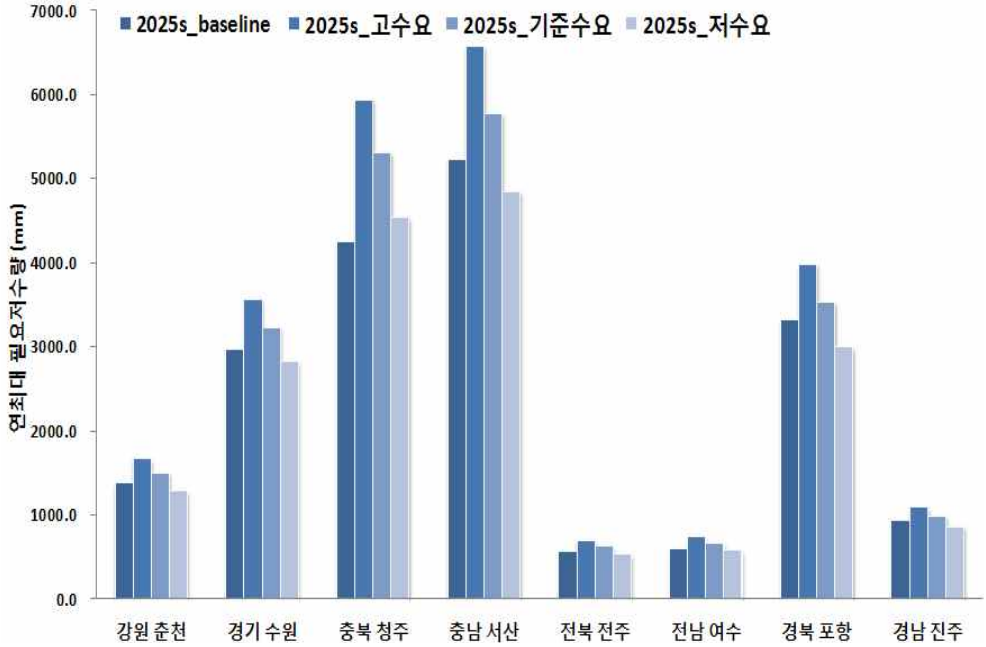
구분			원창저수지(강원)		마둔저수지(경기)		원남저수지(충북)		고풍저수지(충남)	
			필요 저수량 (천㎥)	증가율 (%)	필요 저수량 (천㎥)	증가율 (%)	필요 저수량 (천㎥)	증가율 (%)	필요 저수량 (천㎥)	증가율 (%)
1995s			1,620.5	-	1,852.6	-	3,481.3	-	3,853.0	-
2025s	Baseline		1,386.2	-14.5	2,977.4	60.7	4,250.1	22.1	5,235.4	35.9
	수자원 장기 종합 계획	고수요	1,675.4	20.9	3,568.6	19.9	5,942.7	39.8	6,579.3	25.7
		기준 수요	1,503.3	8.4	3,227.8	8.4	5,317.5	25.1	5,775.2	10.3
		저수요	1,287.6	-7.1	2,824.5	-5.1	4535.0	6.7	4,848.5	-7.4
2055s			1,309.6	-19.2	2,410.8	30.1	2865.5	-17.7	4,342.5	12.7
2085s			1,228.7	-24.2	2,229.5	20.3	2614.2	-24.9	3,980.9	3.3

(표 6-10) 시기별 연최대 필요저수량 (남부지역)

구분			인교저수지(전북)		대포저수지(전남)		마북저수지(경북)		남성저수지(경남)	
			필요 저수량 (천㎥)	증가율 (%)	필요 저수량 (천㎥)	증가율 (%)	필요 저수량 (천㎥)	증가율 (%)	필요 저수량 (천㎥)	증가율 (%)
1995s			464.0	-	578.7	-	2,189.2	-	651.0	-
2025s	Baseline		573.0	23.5	608.0	5.1	3,331.5	52.2	931.1	43.0
	수자원 장기 종합 계획	고수요	706.1	23.2	741.6	22.0	3,988.8	19.7	1,094.4	17.5
		기준 수요	627.9	9.6	669.2	10.1	3,537.2	6.2	991.4	6.5
		저수요	534.0	-6.8	580.9	-4.5	2,996.6	-10.1	866.2	-7.0
2055s			533.4	15.0	573.4	-0.9	2,887.9	31.9	891.5	36.9
2085s			530.7	14.4	595.6	2.9	2,933.0	34.0	885.7	36.1



<그림 6-1> 시기별 연최대 필요저수량



<그림 6-2> 수자원 장기종합계획에 따른 연최대 필요저수량

6.3 시기별 10년빈도 연최대 필요저수량 산정 결과

각 저수지의 시기별(1995s, 2025s, 2055s, 2085s) 10년빈도 연최대 필요저수량을 산정한 결과는 아래와 같다.

중부지역의 저수지별 10년빈도 연최대 필요저수량 결과를 살펴보면, 강원 원창저수지의 경우 1995s 10년빈도 연최대 필요저수량 2372.7 천㎥ 대비 2025s, 2055s, 2085s 시기에 각각 15.8%, 22.8%, 24.3% 감소하는 것으로 나타났다. 경기 마둔저수지의 경우 2025s 시기의 10년빈도 연최대 필요저수량은 61.6%의 증가율을, 충북 원남저수지의 경우 2025s 시기에서 30.5%의 증가율을, 충남 고풍저수지의 경우 2025s 시기에서 49.2%의 증가율을 보여 가장 큰 변화를 나타내었다. 시기별 10년빈도 연최대 필요저수량의 변화가 가장 큰 저수지는 경기 마둔저수지로서 2025s 시기에 1995s 대비 연최대 필요저수량이 약 61.6% 증가되는 것으로 모의되었다.

남부지역의 저수지별 10년빈도 연최대 필요저수량 결과를 살펴보면, 전북 인교저수지의 경우 1995s 10년빈도 연최대 필요저수량 721.2 천㎥ 대비 2025s, 2055s, 2085s 시기에 각각 32.3%, 16.9%, 22.8% 증가하는 것으로 나타났다. 전남 대포저수지의 경우 2055s 시기의 10년빈도 연최대 필요저수량은 19.6%의 감소율을, 경북 마북저수지의 경우 2025s 시기에서 15.8%의 증가율을, 경남 남성저수지의 경우 2085s 시기에서 6.3%의 감소율을 보여 가장 큰 변화를 나타내었다. 시기별 10년빈도 연최대 필요저수량의 변화가 가장 큰 저수지는 전북 인교저수지로서 2025s 시기에 1995s 대비 연최대 필요저수량이 약 32.3% 증가되는 것으로 모의되었다.

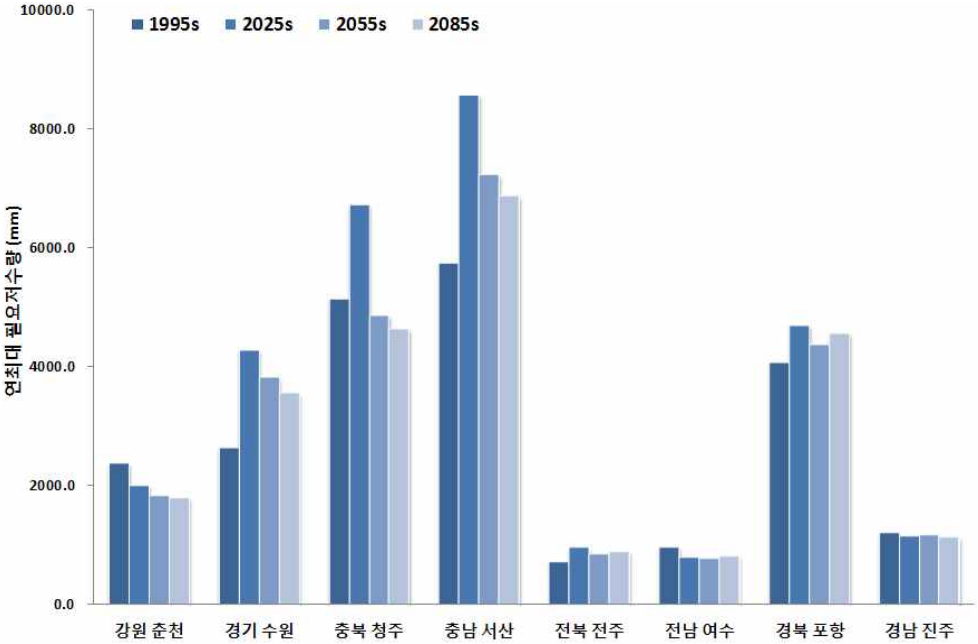
수자원 장기종합계획의 시나리오별 연최대 필요저수량 산정결과를 살펴보면, 고수요 시나리오일 경우 1995s 대비 연최대 필요저수량의 증가율이 높게 나타났으며, 기준수요와 저수요 시나리오로 옮겨갈수록 증가율이 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 특히 저수요 시나리오의 경우 충북 원남저수지를 제외하고 모든 저수지의 연최대 필요저수량이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

(표 6-11) 시기별 10년빈도 연최대 필요저수량 (중부지역)

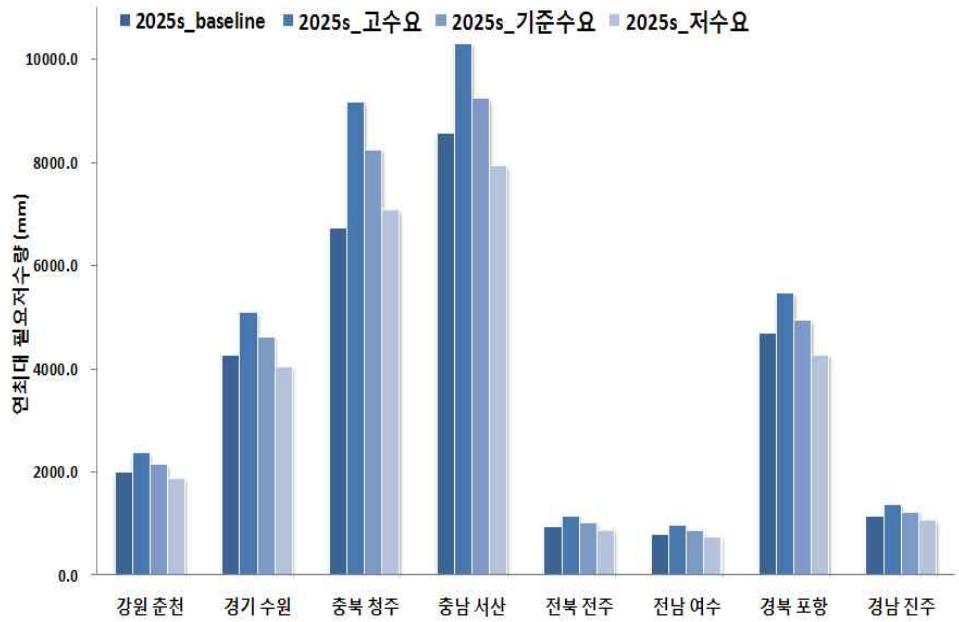
구분			원창저수지(강원)		마둔저수지(경기)		원남저수지(충북)		고풍저수지(충남)	
			필요저수량 (천㎥)	증가율 (%)	필요저수량 (천㎥)	증가율 (%)	필요저수량 (천㎥)	증가율 (%)	필요저수량 (천㎥)	증가율 (%)
1995s			2372.7	-	2646.7	-	5153.8	-	5744.2	-
2025s	Baseline		1997.8	-15.8	4277.6	61.6	6726.0	30.5	8572.5	49.2
	수자원 장기 종합 계획	고수요	2374.0	18.8	5102.4	19.3	9176.0	36.4	10305.0	20.2
		기준 수요	2147.3	7.5	4609.7	7.8	8254.2	22.7	9239.5	7.8
		저수요	1865.7	-6.6	4050.0	-5.3	7093.1	5.5	7945.5	-7.3
2055s			1831.5	-22.8	3821.2	44.4	4866.9	-5.6	7231.8	25.9
2085s			1795.6	-24.3	3556.3	34.4	4627.8	-10.2	6873.4	19.7

(표 6-12) 시기별 10년빈도 연최대 필요저수량 (남부지역)

구분			인교저수지(전북)		대포저수지(전남)		마북저수지(경북)		남성저수지(경남)	
			필요저수량 (천㎥)	증가율 (%)	필요저수량 (천㎥)	증가율 (%)	필요저수량 (천㎥)	증가율 (%)	필요저수량 (천㎥)	증가율 (%)
1995s			721.2	-	965.1	-	4061.5	-	1201.9	-
2025s	Baseline		954.3	32.3	783.9	-18.8	4701.4	15.8	1157.4	-3.7
	수자원 장기 종합 계획	고수요	1144.9	20.0	963.4	22.9	5468.5	16.3	1366.0	18.0
		기준 수요	1021.6	7.1	865.9	10.5	4936.9	5.0	1234.9	6.7
		저수요	876.1	-8.2	749.2	-4.4	4279.5	-9.0	1075.2	-7.1
2055s			842.9	16.9	776.1	-19.6	4373.4	7.7	1170.2	-2.6
2085s			885.7	22.8	817.7	-15.3	4566.3	12.4	1126.0	-6.3



<그림 6-3> 시기별 10년빈도 연최대 필요저수량



<그림 6-4> 수자원 장기종합계획에 따른 10년빈도 연최대 필요저수량

6.4 이앙시기 변화에 따른 시기별 연최대 필요저수량 산정 결과

이앙시기에 따른 중부지역의 연최대 필요저수량의 변화를 살펴보면, 강원 원창저수지의 경우 이앙일이 10일 앞당겨지게 되면 2025s, 2055s, 2085s 시기 연최대 필요저수량은 기존 이앙일의 연최대 필요저수량 대비 각각 8.4%, 8.9%, 4.2% 증가되는 것으로 나타났다. 이앙일이 10일 늦춰지게 되면 2025s, 2055s, 2085s 시기에는 연최대 필요저수량이 각각 14.8%, 16.4%, 20.0% 증가하는 것으로 나타났다. 경기 마둔저수지의 경우 이앙일이 10일 늦춰지게 되면, 2025s 시기의 연최대 필요저수량은 1.0% 증가하고, 충북 원남저수지의 경우 이앙일 10일 늦춰지게 되면, 2085s 시기의 연최대 필요저수량은 3.2% 감소하고, 충남 고풍저수지의 경우 이앙일 10일 앞당겨지게 되면, 2085s 시기의 연최대 필요저수량은 8.6% 감소하여 가장 큰 변화를 나타내었다.

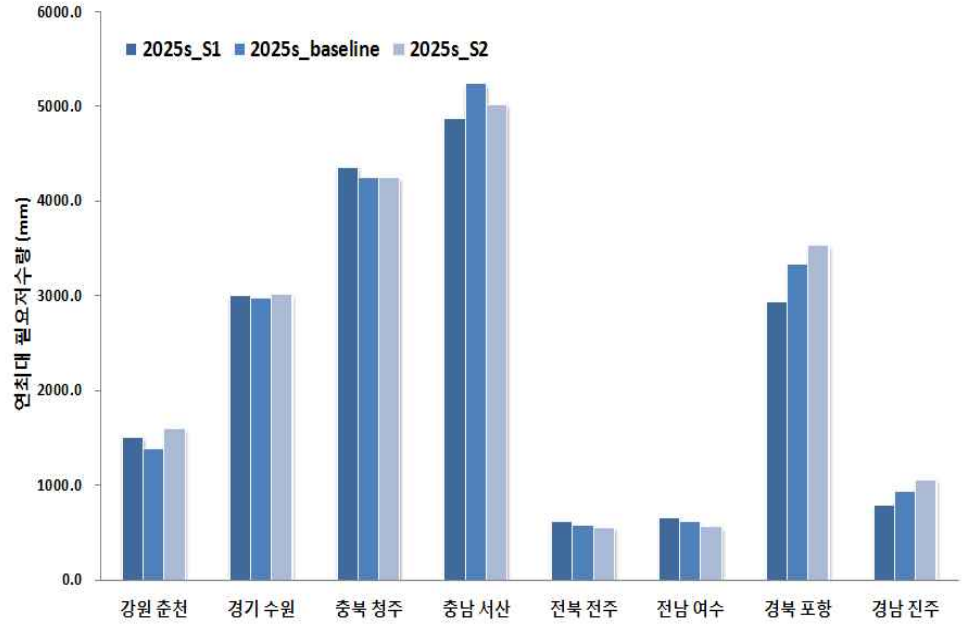
이앙시기에 따른 남부지역의 연최대 필요저수량의 변화를 살펴보면, 전북 인교저수지의 경우 이앙일이 10일 앞당겨지게 되면 2025s, 2055s 시기 연최대 필요저수량은 기존 이앙일의 대비 각각 7.3%, 2.7% 증가하고, 2085s 시기에는 5.6% 감소하는 것으로 나타났다. 이앙일이 10일 늦춰지게 되면 2025s 시기에는 연최대 필요저수량이 3.8% 감소하고, 2055s, 2085s 시기에는 각각 0.1%, 5.0% 증가하는 것으로 나타났다. 전남 대포저수지의 경우 이앙일이 10일 늦춰지게 되면, 2055s 시기의 연최대 필요저수량은 9.0% 감소하고, 경북 마북저수지의 경우 이앙일 10일 앞당겨지게 되면, 2025s 시기의 연최대 필요저수량은 12.0% 감소하고, 경남 남성저수지의 경우 이앙일 10일 앞당겨지게 되면, 2055s 시기의 연최대 필요저수량은 17.6% 감소하여 가장 큰 변화를 나타내었다.

(표 6-13) 이앙시기 변화에 따른 연최대 필요저수량 (중부지역)

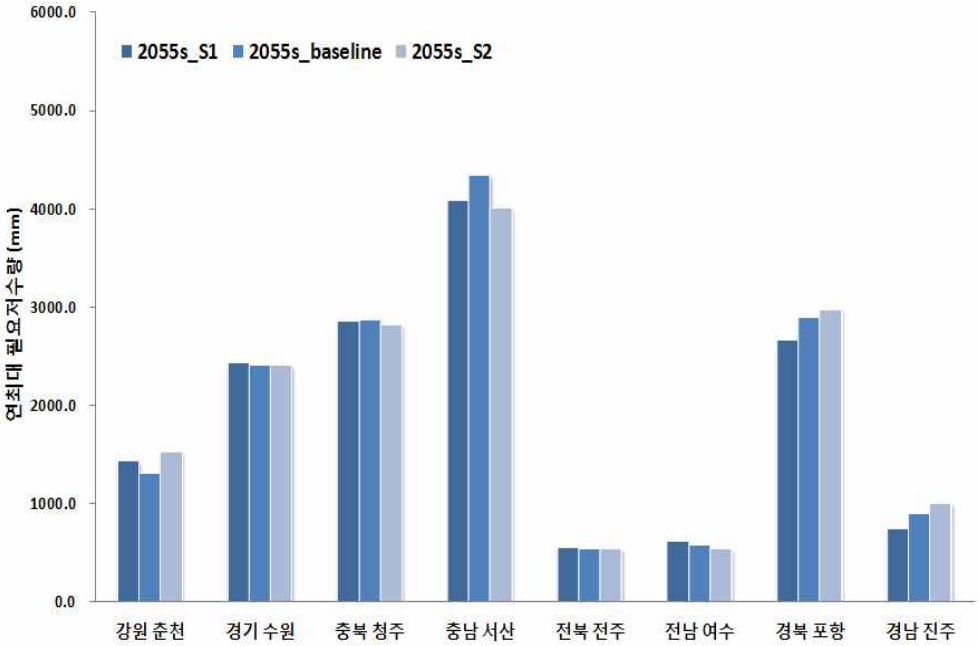
구분		원창저수지(강원)		마둔저수지(경기)		원남저수지(충북)		고풍저수지(충남)	
		필요저수량 (천㎥)	증가율 (%)	필요저수량 (천㎥)	증가율 (%)	필요저수량 (천㎥)	증가율 (%)	필요저수량 (천㎥)	증가율 (%)
2025s	Baseline	1386.2	-	2977.4	-	4250.1	-	5235.4	-
	S1	1502.3	8.4	2993.9	0.6	4353.7	2.4	4867.9	-7.0
	S2	1591.2	14.8	3007.3	1.0	4238.7	-0.3	5012.4	-4.3
2055s	Baseline	1309.6	-	2410.8	-	2865.5	-	4342.5	-
	S1	1426.4	8.9	2431.4	0.9	2859.3	-0.2	4082.7	-6.0
	S2	1524.6	16.4	2403.2	-0.3	2819.2	-1.6	4002.9	-7.8
2085s	Baseline	1228.7	-	2229.5	-	2614.2	-	3980.9	-
	S1	1280.6	4.2	2211.4	-0.8	2659.7	1.7	3637.1	-8.6
	S2	1474.5	20.0	2241.9	0.6	2531.8	-3.2	3693.2	-7.2

(표 6-14) 이앙시기 변화에 따른 연최대 필요저수량 (남부지역)

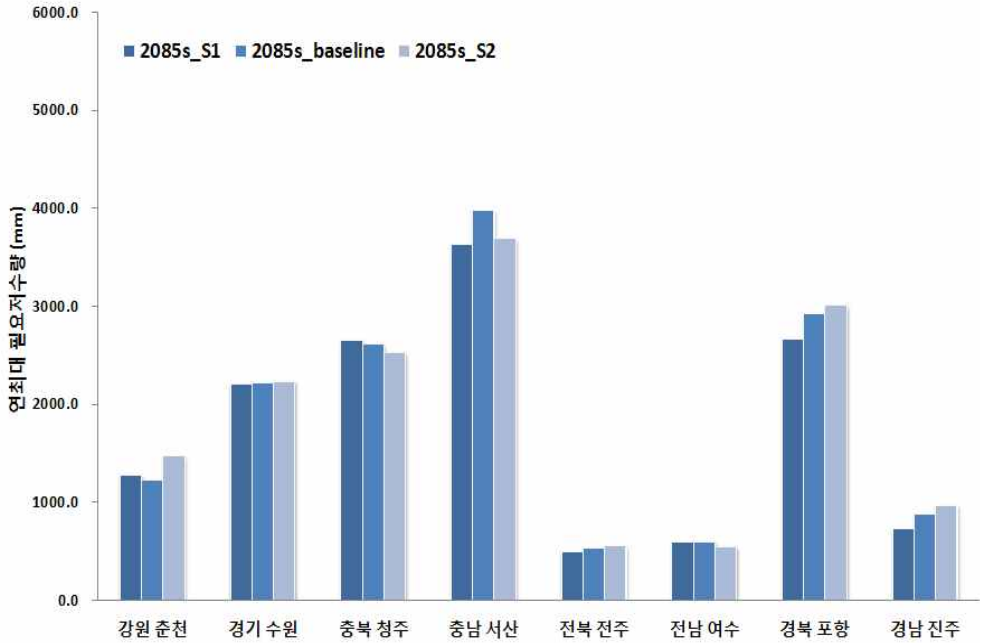
구분		인교저수지(전북)		대포저수지(전남)		마북저수지(경북)		남성저수지(경남)	
		필요저수량 (천㎥)	증가율 (%)	필요저수량 (천㎥)	증가율 (%)	필요저수량 (천㎥)	증가율 (%)	필요저수량 (천㎥)	증가율 (%)
2025s	Baseline	573.0	-	608.0	-	3331.5	-	931.1	-
	S1	614.9	7.3	658.0	8.2	2933.0	-12.0	787.9	-15.4
	S2	551.4	-3.8	553.0	-9.0	3523.2	5.8	1051.4	12.9
2055s	Baseline	533.4	-	573.4	-	2887.9	-	891.5	-
	S1	547.7	2.7	611.7	6.7	2665.2	-7.7	734.7	-17.6
	S2	534.0	0.1	528.3	-7.9	2965.9	2.7	1001.0	12.3
2085s	Baseline	530.7	-	595.6	-	2933.0	-	885.7	-
	S1	501.2	-5.6	597.1	0.3	2674.9	-8.8	731.3	-17.4
	S2	557.4	5.0	549.8	-7.7	3014.9	2.8	971.6	9.7



<그림 6-5> 이앙시기 변화에 따른 연최대 필요저수량(2025s)



<그림 6-6> 이앙시기 변화에 따른 연최대 필요저수량(2055s)



<그림 6-7> 이앙시기 변화에 따른 연최대 필요저수량(2085s)

6.5 이앙시기 변화에 따른 10년빈도 연최대 필요저수량 산정 결과

이앙시기에 따른 중부지역의 10년빈도 연최대 필요저수량의 변화를 살펴보면, 강원 원창저수지의 경우 이앙일이 10일 앞당겨지게 되면 2025s, 2055s, 2085s 시기 10년빈도 연최대 필요저수량은 기존 이앙일의 10년빈도 연최대 필요저수량 대비 각각 5.6%, 5.9%, 2.9% 증가되는 것으로 나타났다. 이앙일이 10일 늦춰지게 되면 2025s 시기에는 10년빈도 연최대 필요저수량이 0.5% 감소하고, 2055s와 2085s 시기에는 각각 4.2%, 10.8% 증가하는 것으로 나타났다. 경기 마둔저수지의 경우 이앙일이 10일 늦춰지게 되면, 2025s 시기의 10년빈도 연최대 필요저수량은 3.5% 증가하고, 충북 원남저수지의 경우 이앙일 10일 늦춰지게 되면, 2085s 시기의 10년빈도 연최대 필요저수량은 4.1% 감소하고, 충남 고풍저수지의 경우 이앙일 10일 앞당겨지게 되면, 2085s 시기의 10년빈도 연최대 필요저수량은 9.3% 감소하여 가장 큰 변화를 나타내었다.

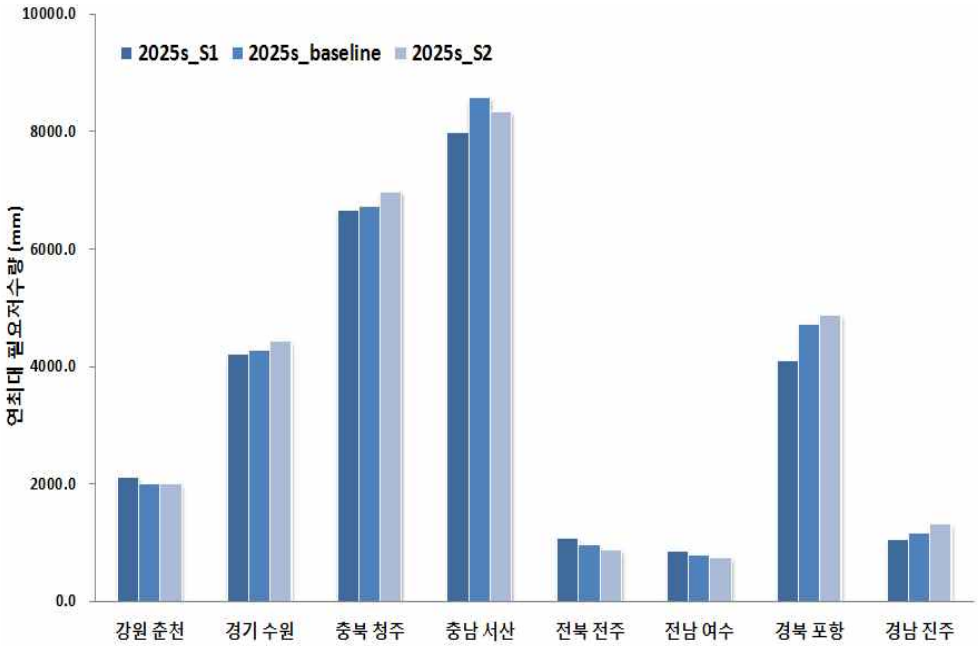
이앙시기에 따른 남부지역의 10년빈도 연최대 필요저수량의 변화를 살펴보면, 전북 인교저수지의 경우 이앙일이 10일 앞당겨지게 되면 2025s, 2055s 시기 10년빈도 연최대 필요저수량은 기존 이앙일의 대비 각각 11.9%, 7.9% 증가하고, 2085s 시기에는 3.5% 감소하는 것으로 나타났다. 이앙일이 10일 늦춰지게 되면 2025s와 2055s 시기에는 10년빈도 연최대 필요저수량이 각각 9.0%, 3.4% 감소하고, 2085s 시기에는 3.3% 증가하는 것으로 나타났다. 전남 대포저수지의 경우 이앙일이 10일 앞당겨지게 되면, 2055s 시기의 10년빈도 연최대 필요저수량은 9.5% 증가하고, 경북 마북저수지의 경우 이앙일 10일 앞당겨지게 되면, 2025s 시기의 10년빈도 연최대 필요저수량은 13.1% 감소하고, 경남 남성저수지의 경우 이앙일 10일 늦춰지게 되면, 2025s 시기의 연최대 필요저수량은 12.6% 증가하여 가장 큰 변화를 나타내었다.

(표 6-15) 이앙시기 변화에 따른 10년빈도 연최대 필요저수량 (중부지역)

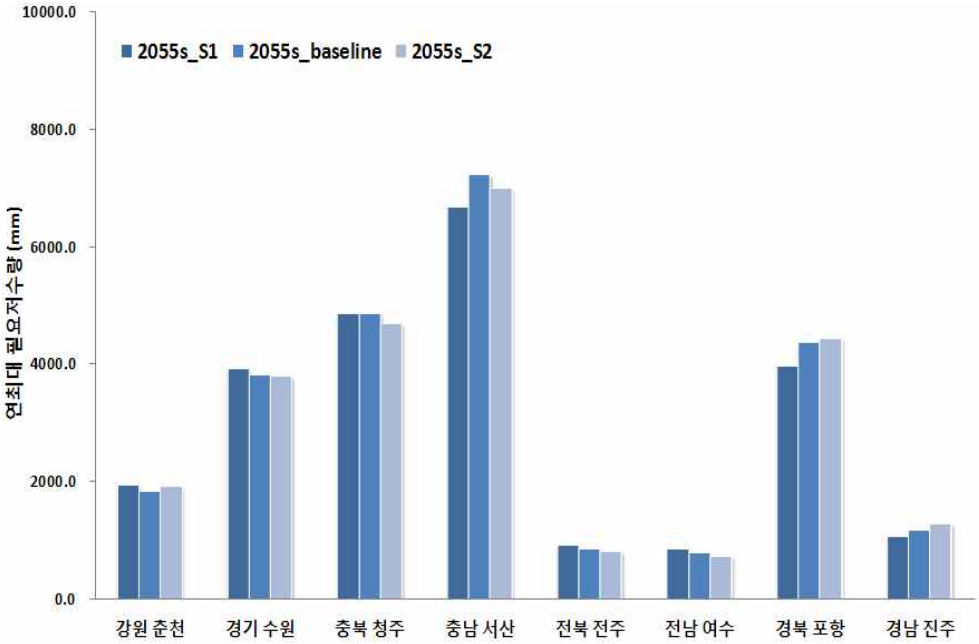
구분		원창저수지(강원)		마둔저수지(경기)		원남저수지(충북)		고풍저수지(충남)	
		필요저수량 (천㎥)	증가율 (%)	필요저수량 (천㎥)	증가율 (%)	필요저수량 (천㎥)	증가율 (%)	필요저수량 (천㎥)	증가율 (%)
2025s	Baseline	1997.8	-	4277.6	-	6726.0	-	8572.5	-
	S1	2110.6	5.6	4201.8	-1.8	6649.1	-1.1	7969.3	-7.0
	S2	1987.1	-0.5	4427.3	3.5	6972.8	3.7	8330.1	-2.8
2055s	Baseline	1831.5	-	3821.2	-	4866.9	-	7231.8	-
	S1	1939.7	5.9	3920.5	2.6	4860.6	-0.1	6668.7	-7.8
	S2	1907.6	4.2	3791.5	-0.8	4701.2	-3.4	7007.2	-3.1
2085s	Baseline	1795.6	-	3556.3	-	4627.8	-	6873.4	-
	S1	1847.8	2.9	3511.6	-1.3	4640.4	0.3	6232.1	-9.3
	S2	1988.8	10.8	3605.9	1.4	4436.6	-4.1	6582.7	-4.2

(표 6-16) 이앙시기 변화에 따른 10년빈도 연최대 필요저수량 (남부지역)

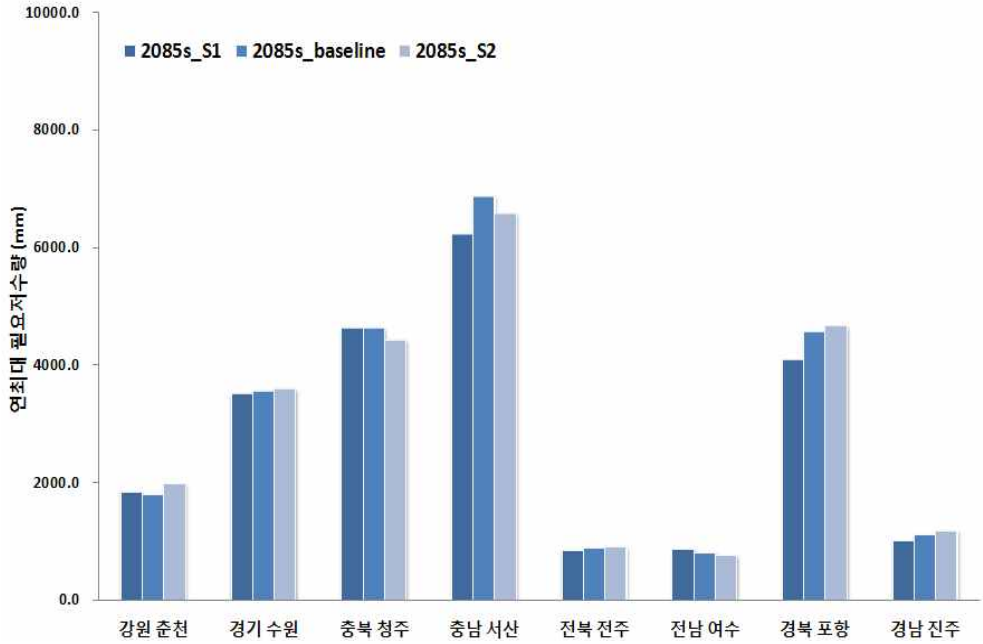
구분		백석저수지(전북)		대포저수지(전남)		마북저수지(경북)		남성저수지(경남)	
		필요저수량 (천㎥)	증가율 (%)	필요저수량 (천㎥)	증가율 (%)	필요저수량 (천㎥)	증가율 (%)	필요저수량 (천㎥)	증가율 (%)
2025s	Baseline	954.3	-	783.9	-	4701.4	-	1157.4	-
	S1	1067.6	11.9	837.1	6.8	4086.2	-13.1	1045.8	-9.6
	S2	868.0	-9.0	735.5	-6.2	4866.3	3.5	1303.3	12.6
2055s	Baseline	842.9	-	776.1	-	4373.4	-	1170.2	-
	S1	909.8	7.9	849.5	9.5	3970.6	-9.2	1051.9	-10.1
	S2	814.1	-3.4	725.4	-6.5	4440.4	1.5	1283.5	9.7
2085s	Baseline	885.7	-	817.7	-	4566.3	-	1126.0	-
	S1	855.1	-3.5	879.7	7.6	4090.7	-10.4	1015.2	-9.8
	S2	914.7	3.3	770.1	-5.8	4669.4	2.3	1187.2	5.4



<그림 6-8> 이앙시기 변화에 따른 10년빈도 연최대 필요저수량(2025s)



<그림 6-9> 이앙시기 변화에 따른 10년빈도 연최대 필요저수량(2055s)



<그림 6-10> 이앙시기 변화에 따른 10년빈도 연최대 필요저수량(2085s)

7. 시기별 단위용수량 변화 분석

7.1 시기별 단위용수량 산정 결과

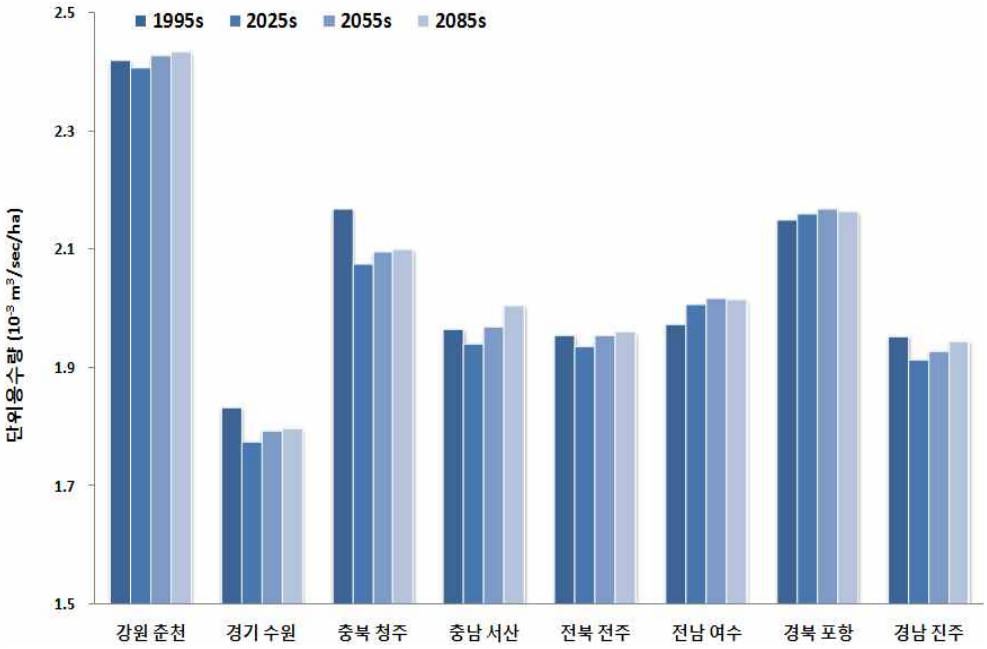
각 저수지의 시기별(1995s, 2025s, 2055s, 2085s) 단위용수량을 산정한 결과는 아래와 같다. 중부지역의 강원 원창저수지의 1995s 대비 2025s, 2055s, 2085s의 이앙기 단위용수량 변화를 살펴보면 2025s에 0.51% 감소하고, 2055s, 2085s에는 각각 0.34%, 0.60% 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 본답기 단위용수량은 2025s, 2055s, 2085s에 각각 7.48%, 4.42%, 2.59% 감소하는 것으로 나타났다. 남부지역의 경북 마북저수지의 경우 1995s 대비 2025s, 2055s, 2085s의 이앙기 단위용수량 변화를 살펴보면 2025s, 2055s, 2085s에 각각 0.46%, 0.81%, 0.60% 증가하는 것으로 나타났다. 또한 본답기 단위용수량은 2025s, 2055s, 2085s에 각각 3.85%, 8.17%, 12.19% 감소하는 것으로 나타났다. 전체적으로 중부지역의 저수지의 경우 1995s 시기에 비해 2025s, 2055s, 2085s 시기의 단위저수량이 감소하는 경향을 나타내었으며, 남부지역 저수지의 경우 1995s 시기에 비해 2025s, 2055s, 2085s 시기의 단위저수량이 증가하는 경향을 나타내었다.

(표 7-1) 시기별 단위용수량 (중부지역)

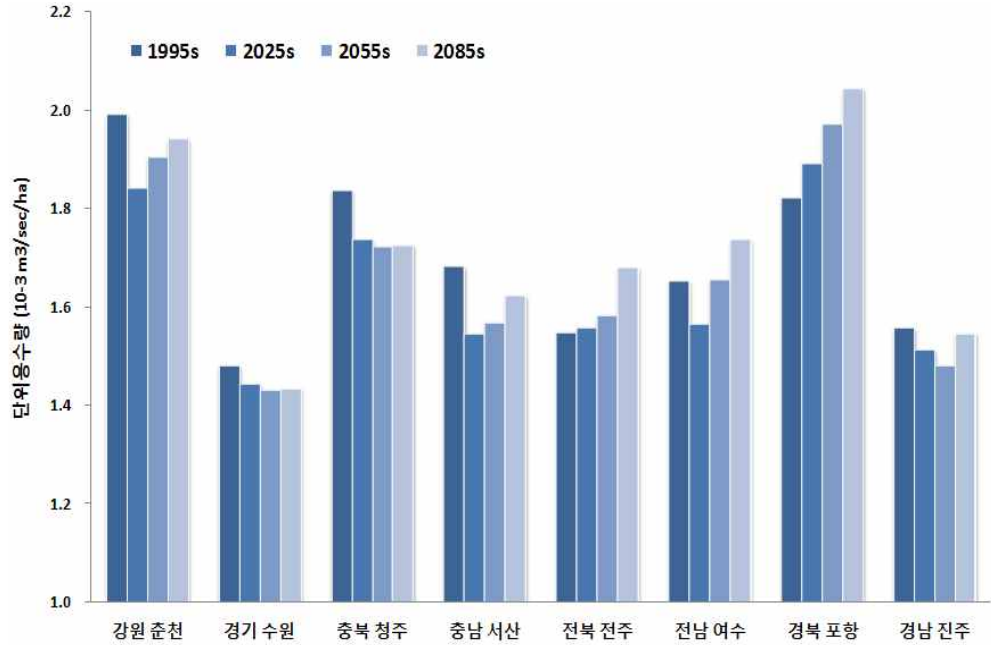
구분		원창저수지(강원)		마둔저수지(경기)		원남저수지(충북)		고풍저수지(충남)	
		단위저수량 (10^3m^3/sec/ha)	증가율 (%)	단위저수량 (10^3m^3/sec/ha)	증가율 (%)	단위저수량 (10^3m^3/sec/ha)	증가율 (%)	단위저수량 (10^3m^3/sec/ha)	증가율 (%)
이앙기	1995s	2.42	-	1.83	-	2.17	-	1.97	-
	2025s	2.41	-0.51	1.78	-3.13	2.08	-4.25	1.94	-1.18
	2055s	2.43	0.34	1.80	-2.14	2.10	-3.36	1.97	0.24
	2085s	2.43	0.60	1.80	-1.89	2.10	-3.13	2.01	2.02
본답기	1995s	1.99	-	1.48	-	1.84	-	1.68	-
	2025s	1.84	-7.48	1.45	-2.50	1.74	-5.48	1.55	-8.06
	2055s	1.91	-4.42	1.43	-3.38	1.72	-6.22	1.57	-6.76
	2085s	1.94	-2.59	1.44	-3.22	1.73	-6.07	1.62	-3.59

(표 7-2) 시기별 단위용수량 (남부지역)

구분		인교저수지(전북)		대포저수지(전남)		마북저수지(경북)		남성저수지(경남)	
		단위저수량 (10^3m^3/sec/ha)	증가율 (%)	단위저수량 (10^3m^3/sec/ha)	증가율 (%)	단위저수량 (10^3m^3/sec/ha)	증가율 (%)	단위저수량 (10^3m^3/sec/ha)	증가율 (%)
이앙기	1995s	1.96	-	1.98	-	2.15	-	1.95	-
	2025s	1.94	-0.97	2.01	1.68	2.16	0.46	1.91	-2.05
	2055s	1.96	0.01	2.02	2.16	2.17	0.81	1.93	-1.27
	2085s	1.96	0.24	2.02	2.07	2.17	0.60	1.95	-0.42
본답기	1995s	1.55	-	1.65	-	1.82	-	1.56	-
	2025s	1.56	0.68	1.57	-5.25	1.89	3.85	1.52	-2.83
	2055s	1.59	2.25	1.66	0.20	1.97	8.17	1.48	-4.92
	2085s	1.68	8.42	1.74	5.08	2.05	12.19	1.55	-0.68



<그림 7-1> 시기별 이앙기 단위용수량



<그림 7-2> 시기별 본답기 단위용수량

7.2 이앙시기 변화에 따른 단위용수량 산정 결과

이앙시기에 따른 중부지역의 이앙기 단위용수량의 변화를 살펴보면, 충남 고풍저수지의 경우 가장 이앙시기 변화에 따라 단위용수량의 변화가 가장 크게 나타났다. 이앙일이 10일 앞당겨지게 될 때 2025s, 2055s, 2085s의 이앙기 단위용수량은 기존 이앙일의 단위용수량 대비 각각 3.62%, 3.6%, 5.18% 감소하는 것으로 나타났고, 이앙일이 10일 늦춰지게 될 때 2025s, 2055s, 2085s의 이앙기 단위용수량은 기존 이앙일의 단위용수량 대비 각각 0.89%, 0.68%, 0.50% 증가하는 것으로 나타났다.

본답기 단위용수량의 경우 중북지역에서는 강원 원창저수지의 이앙시기에 따른 변화가 가장 크게 나타났다. 이앙일이 10일 앞당겨지게 될 때 2025s, 2055s, 2085s의 이앙기 단위용수량은 기존 이앙일의 단위용수량 대비 각각 3.50%, 3.05%, 1.92% 증가하는 것으로 나타났고, 이앙일이 10일 늦춰지게 될 때 2025s, 2055s, 2085s의 이앙기 단위용수량은 기존 이앙일의 단위용수량 대비 각각 2.56%, 1.71%, 2.86% 증가하는 것으로 나타났다. 전체적으로 이앙기 단위용수량은 이앙시기가 앞당겨질 경우 감소하는 경향이 나타났고, 이앙시기가 늦춰질 경우 증가하는 경향이 나타났다. 본답기 단위용수량은 충남 고풍저수지를 제외하고 이앙기가 앞당겨질 경우 증가하는 경향이 나타났고, 이앙기가 늦춰질 경우 강원 원창저수지와 충남 고풍저수지는 증가하고, 경기 마둔저수지와 충북 원남저수지는 감소하는 경향이 나타났다.

이앙시기에 따른 남부지역의 이앙기 단위용수량의 변화를 살펴보면, 경남 남성저수지의 경우 가장 이앙시기 변화에 따라 단위용수량의 변화가 가장 크게 나타났다. 이앙일이 10일 앞당겨지게 될 때 2025s, 2055s, 2085s의 이앙기 단위용수량은 기존 이앙일의 단위용수량 대비 각각 0.25%, 0.16%, 0.25% 감소하는 것으로 나타났고, 이앙일이 10일 늦춰지게 될 때 2025s, 2055s, 2085s의 이앙기 단위용수량은 기존 이앙일의 단위용수량 대비 각각 0.21%, 0.02%, 0.08% 증가하는 것으로 나타났다.

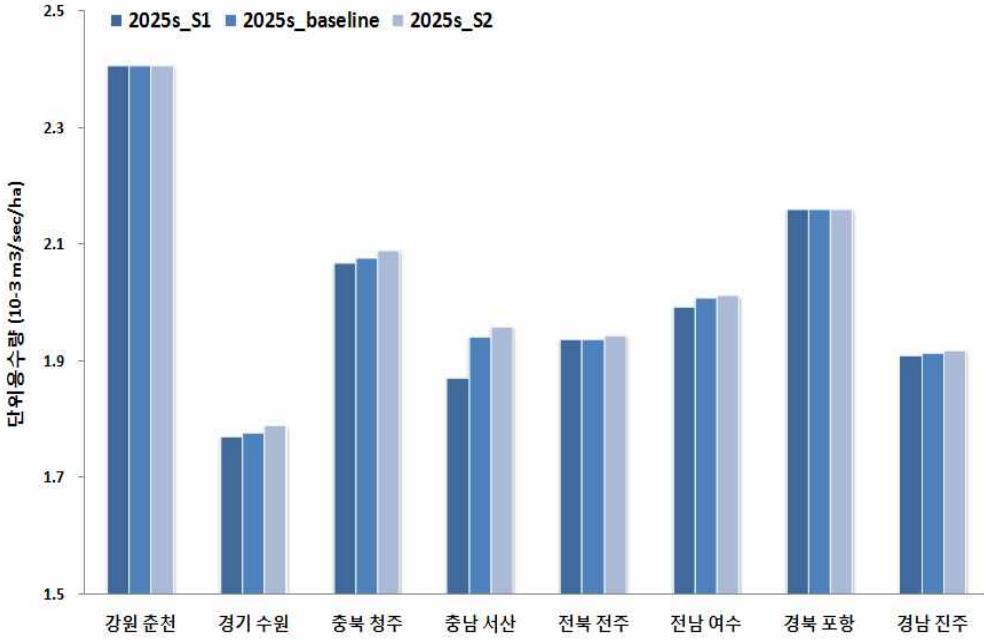
본답기 단위용수량의 경우 남부지역에서는 전남 대포저수지의 이앙시기에 따른 변화가 가장 크게 나타났다. 이앙일이 10일 앞당겨지게 될 때 2025s, 2055s, 2085s의 이앙기 단위용수량은 기존 이앙일의 단위용수량 대비 각각 0.24%, 2.98%, 3.00% 증가하는 것으로 나타났고, 이앙일이 10일 늦춰지게 될 때 2025s, 2055s, 2085s의 이앙기 단위용수량은 기존 이앙일의 단위용수량 대비 각각 4.72%, 4.64%, 3.30% 감소하는 것으로 나타났다.

(표 7-3) 이앙시기 변화에 따른 단위용수량 (중부지역)

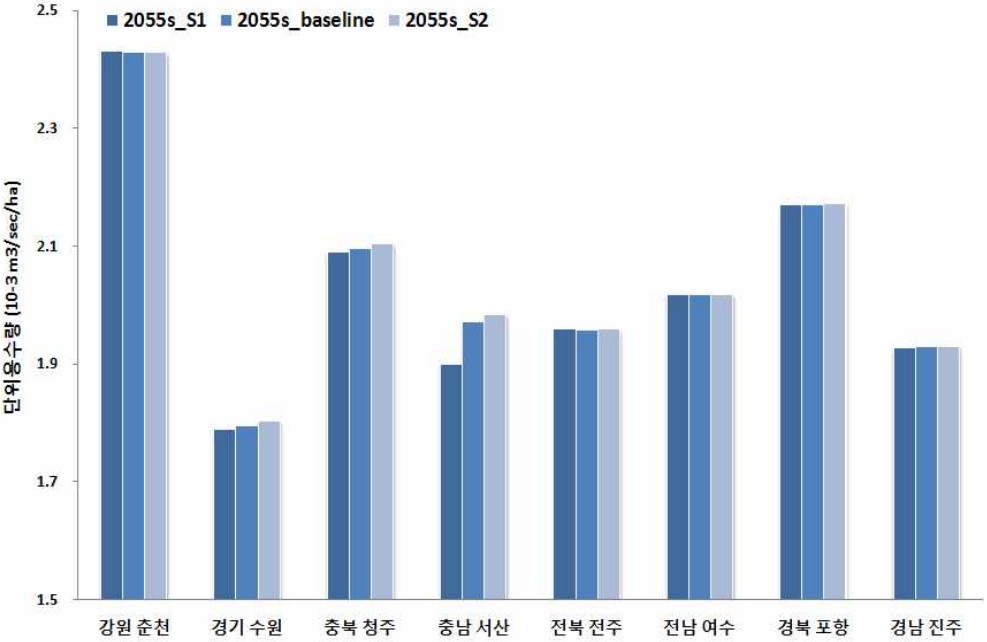
구분			원창저수지(강원)		마둔저수지(경기)		원남저수지(충북)		고풍저수지(충남)	
			단위저수량 (10^3㎥/sec/ha)	증가율 (%)	단위저수량 (10^3㎥/sec/ha)	증가율 (%)	단위저수량 (10^3㎥/sec/ha)	증가율 (%)	단위저수량 (10^3㎥/sec/ha)	증가율 (%)
이앙기	2025s	Baseline	2.41	-	1.78	-	2.08	-	1.94	-
		S1	2.41	-0.03	1.77	-0.38	2.07	-0.34	1.87	-3.62
		S2	2.41	0.00	1.79	0.76	2.09	0.68	1.96	0.89
	2055s	Baseline	2.43	-	1.80	-	2.10	-	1.97	-
		S1	2.43	0.07	1.79	-0.39	2.09	-0.34	1.90	-3.60
		S2	2.43	-0.01	1.80	0.42	2.10	0.38	1.98	0.68
	2085s	Baseline	2.43	-	1.80	-	2.10	-	2.01	-
		S1	2.44	0.21	1.79	-0.41	2.09	-0.36	1.90	-5.18
		S2	2.43	0.00	1.81	0.72	2.11	0.64	2.02	0.50
본답기	2025s	Baseline	1.84	-	1.45	-	1.74	-	1.55	-
		S1	1.91	3.50	1.48	2.05	1.77	1.79	1.53	-0.93
		S2	1.89	2.56	1.43	-1.12	1.72	-0.81	1.57	1.54
	2055s	Baseline	1.91	-	1.43	-	1.72	-	1.57	-
		S1	1.96	3.05	1.46	2.23	1.76	1.96	1.57	-0.33
		S2	1.94	1.71	1.39	-2.75	1.69	-2.28	1.63	3.62
	2085s	Baseline	1.94	-	1.44	-	1.73	-	1.62	-
		S1	1.98	1.92	1.46	1.96	1.76	1.70	1.60	-1.55
		S2	2.00	2.86	1.42	-0.97	1.72	-0.72	1.68	3.46

(표 7-4) 이앙시기 변화에 따른 단위용수량 (남부지역)

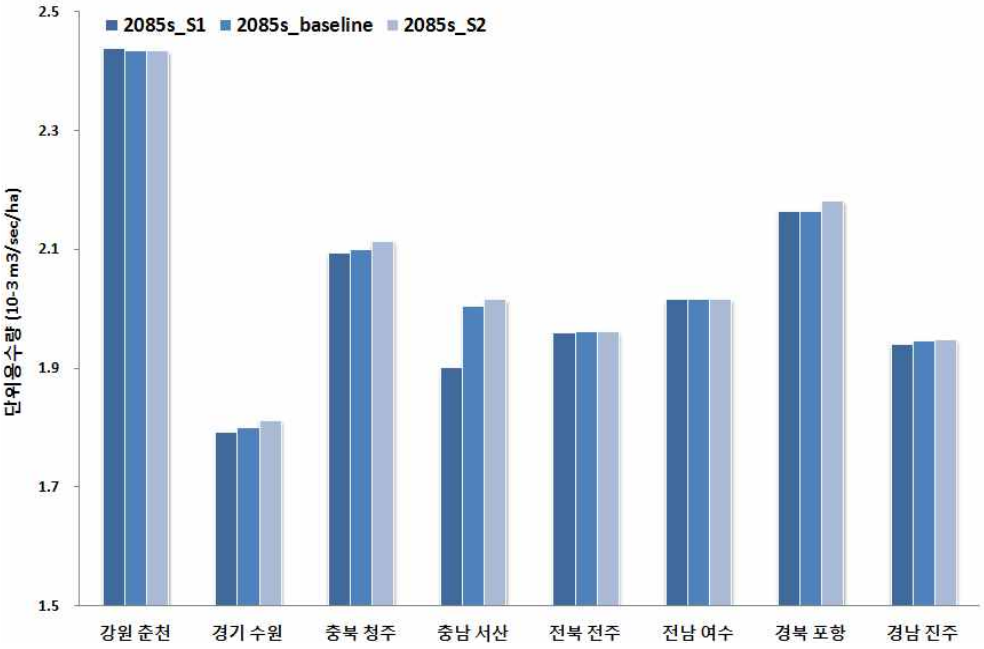
구분			인교저수지(전북)		대포저수지(전남)		마북저수지(경북)		남성저수지(경남)	
			단위저수량 (10^3㎥/sec/ha)	증가율 (%)	단위저수량 (10^3㎥/sec/ha)	증가율 (%)	단위저수량 (10^3㎥/sec/ha)	증가율 (%)	단위저수량 (10^3㎥/sec/ha)	증가율 (%)
이앙기	2025s	Baseline	1.94	-	2.01	-	2.16	-	1.91	-
		S1	1.94	0.03	1.99	-0.69	2.16	0.00	1.91	-0.25
		S2	1.95	0.39	2.01	0.19	2.16	-0.03	1.92	0.21
	2055s	Baseline	1.96	-	2.02	-	2.17	-	1.93	-
		S1	1.96	0.05	2.02	-0.02	2.17	0.00	1.93	-0.16
		S2	1.96	0.05	2.02	0.00	2.17	0.14	1.93	0.02
	2085s	Baseline	1.96	-	2.02	-	2.17	-	1.95	-
		S1	1.96	-0.05	2.02	-0.01	2.17	0.00	1.94	-0.25
		S2	1.96	-0.01	2.02	0.00	2.18	0.78	1.95	0.08
본답기	2025s	Baseline	1.56	-	1.57	-	1.89	-	1.52	-
		S1	1.50	-3.63	1.57	0.24	1.96	3.28	1.49	-1.71
		S2	1.52	-2.94	1.49	-4.72	1.83	-3.53	1.46	-3.32
	2055s	Baseline	1.59	-	1.66	-	1.97	-	1.48	-
		S1	1.56	-1.62	1.71	2.98	1.99	0.93	1.52	2.62
		S2	1.53	-3.44	1.58	-4.64	1.90	-3.41	1.42	-4.14
	2085s	Baseline	1.68	-	1.74	-	2.05	-	1.55	-
		S1	1.67	-0.96	1.79	3.00	2.06	0.71	1.53	-1.37
		S2	1.62	-3.35	1.68	-3.30	1.97	-3.58	1.50	-2.92



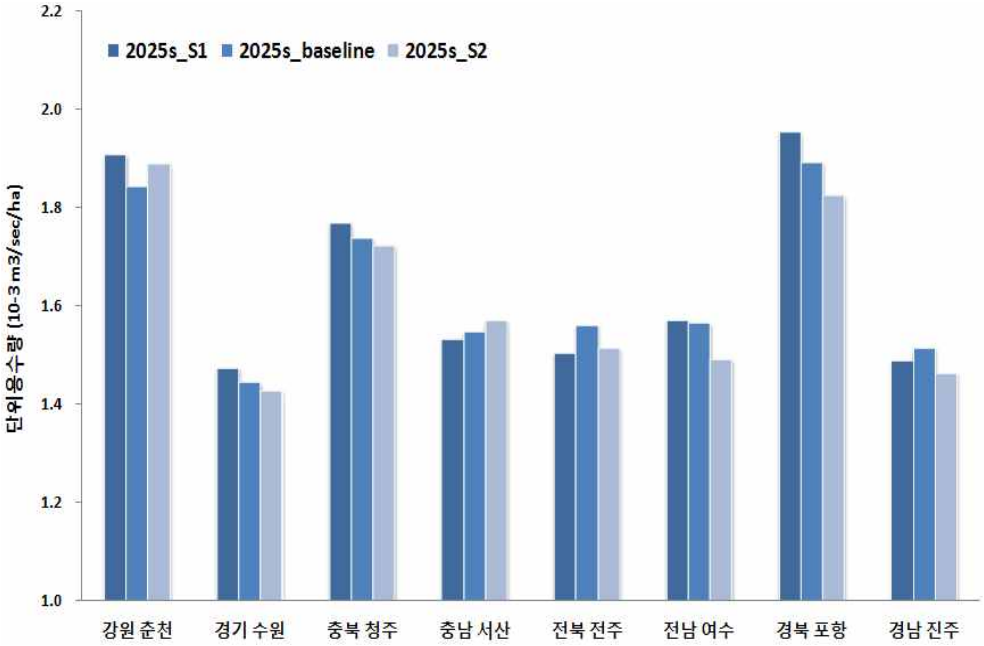
<그림 7-3> 이앙시기 변화에 따른 이앙기 단위용수량(2025s)



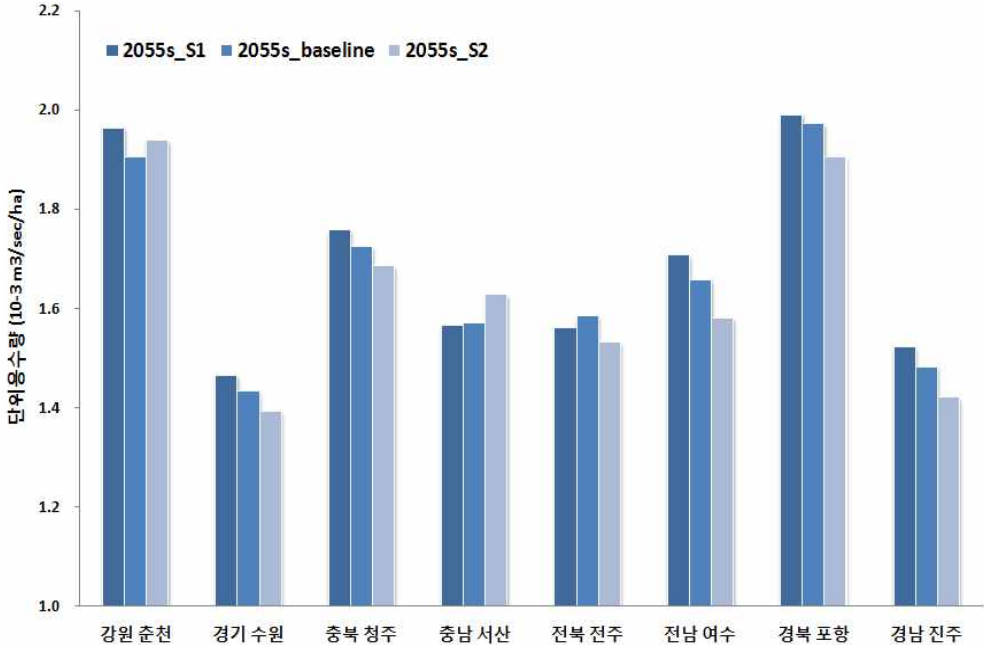
<그림 7-4> 이앙시기 변화에 따른 이앙기 단위용수량(2055s)



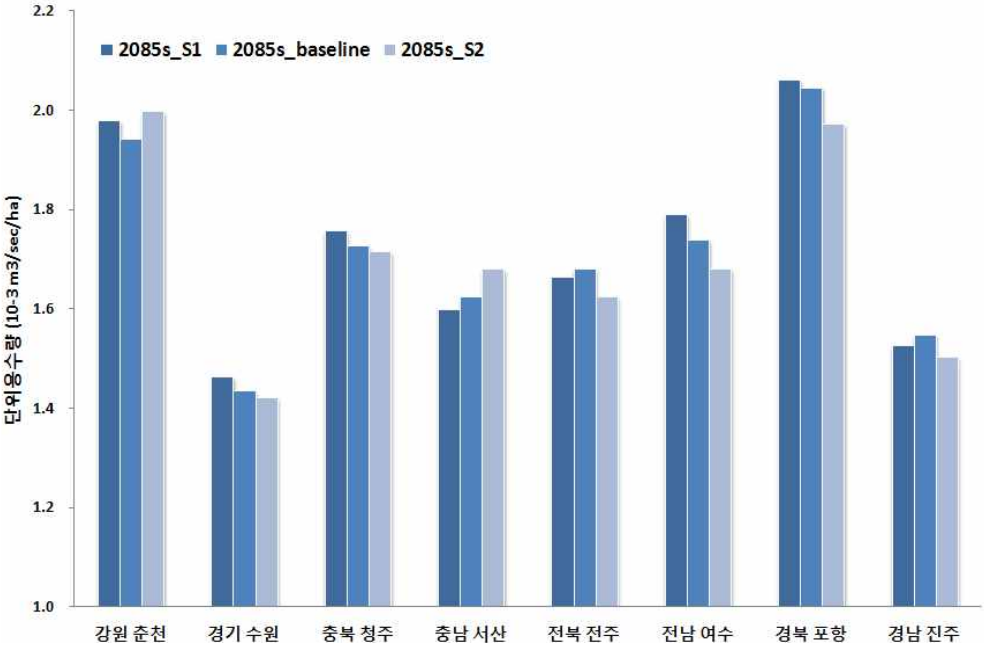
<그림 7-5> 이앙시기 변화에 따른 이앙기 단위용수량(2085s)



<그림 7-6> 이앙시기 변화에 따른 본답기 단위용수량(2025s)



<그림 7-7> 이앙시기 변화에 따른 본답기 단위용수량(2055s)



<그림 7-8> 이앙시기 변화에 따른 본답기 단위용수량(2085s)

8. 미래 지역별 필요 유효저수량

10년빈도 연최대 필요저수량의 시기별 변화율 산정하고, 이를 현재의 도별 유효저수량에 적용하여 미래의 필요 유효저수량의 변화를 분석하고자 하였다. 강원지역의 경우 총 유효저수량은 99,778 천㎥ 이고, 10년빈도 연최대 필요저수량이 줄어듬에 따라 미래 필요 유효저수량은 2025s, 2055s, 22085s에 각각 84,021 천㎥, 77,027 천㎥, 75,517 천㎥으로 줄어들게 된다. 전체 지역의 변화를 살펴보면, 전북지역의 총 유효저수량이 약 18억㎥으로 가장 많은 저수량을 보유하고 있고, 미래의 10년빈도 연최대 필요저수량이 증가함에 따라 미래의 필요 유효저수량은 약 20억㎥이상으로 증가하게 된다.

(표 8-1) 도별, 시기별 10년빈도 연최대 필요저수량

지 역		10년빈도 연최대 필요저수량 (천㎥)			
		1995s	2025s	2055s	2085s
강원	춘천	2372.7	1997.8	1831.5	1795.6
경기	수원	2646.7	4277.6	3821.2	3556.3
경남	진주	1201.9	1157.4	1170.2	1126.0
경북	포항	4061.5	4701.4	4373.4	4566.3
전남	여수	965.1	783.9	776.1	817.7
전북	전주	721.2	954.3	842.9	885.7
충남	서산	5744.2	8572.5	7231.8	6873.4
충북	청주	5153.8	6726.0	4866.9	4627.8

(표 8-2) 도별, 시기별 유효저수량 변화 산정 결과

지역	저수지 개수	유효저수량 (천㎥)	시기별 유효저수량 (천㎥)		
			2025s	2055s	2085s
강원	76	99,788	84,021	77,027	75,517
경기	122	184,273	297,822	266,046	247,603
경남	537	211,864	204,020	206,276	198,485
경북	641	317,701	367,755	342,098	357,188
전남	995	1,140,975	926,656	917,482	966,650
전북	511	1,850,617	2,448,792	2,162,907	2,272,863
충남	225	384,323	573,554	483,853	459,874
충북	185	160,104	208,944	151,191	143,763

9. 농업용수 영향 지표 정리

9.1 기후변화와 취약성

기후변화에 따른 부정적인 영향에 대처하기 위한 적응정책을 위해서는 기후변화 현상에 대한 적응능력을 파악하는 것이 필수적 요소이다. 적응능력이란 한 시스템이 기후변화에 맞게 스스로를 조절하거나 잠재피해를 감소시키고 기회로 활용하거나, 기후변화 결과에 대처하는 능력으로 정의된다(IPCC, 2007).

기후 변화 적응 대책을 수립하기 위해서는 현재의 기후 변화 정도를 파악하는 연구와 함께 어디에서 얼마만큼 취약한지에 대한 정보가 우선적으로 필요하다 (IPCC, 2007). 이러한 관점에서 지역별로 기후 변화에 따른 지역별 취약성 지수 (vulnerability indicator)를 산정하여 그 공간 분포 결과를 파악하는 것은 적응 대책의 우선순위 결정을 위한 매우 중요한 과정이다. 취약성 지수는 최근까지 국내외 문헌상의 다양한 개념 정의에도 불구하고 기후 변화에 민감한 정도와 이에 따른 적응 능력의 정량화로 요약된다. 그러나 이들 각각의 개념은 직접 산정할 수 없으므로 여러 대리변수(proxy variables)로 추정하게 된다.

기후변화에 따른 영향은 각 국가 및 해당 지역마다 지형 및 인문, 사회와 같은 여러 특성에 의해 각기 다르게 발생하기 때문에 그에 맞는 영향 및 취약성 평가 수행이 선행되어야 하고, 적절할 적응 대책 수립이 요구된다. 특히 기후변화에 의해 기상 변화에 따른 극한 사상이 민감하게 변할 것이라는 연구 결과가 제시되고 있으며, 이에 전 세계적으로 취약성에 대한 평가가 활발히 수행되고 있다.

취약성에 대한 개념은 생태적 측면뿐만 아니라 사회, 경제학적 측면도 포함할 수 있기 때문에, 이를 평가하기 위해 다양한 측면의 정보를 종합할 수 있는 혼합 지표 (composite indicator) 연구가 활발히 진행되고 있으며, 직접 측정하거나 관측할 수 없기 때문에 기후변화 취약성 지수는 기후 변화의 잠재적인 영향을 평가하기에 유용한 통합 도구이다.

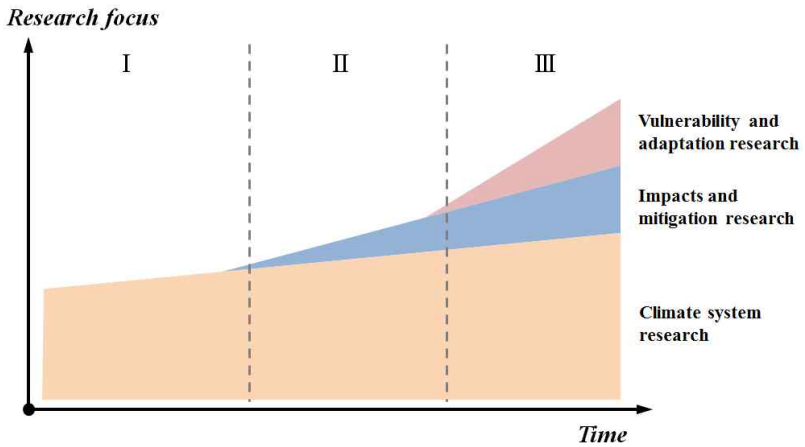
9.2 기후변화 취약성 및 민감도분석 연구동향

IPCC의 제 3 차 보고서 (IPCC, 2001)에서 정의하는 기후 변화 적응(adaptation)은 '현재 나타나고 있거나 미래에 나타날 것으로 보이는 기후

변화의 파급효과와 영향에 대해 자연 및 인위적 시스템이 피해를 완화시키도록 조절하거나 유익한 기회로 촉진시키는 활동'으로 정의하고 있다.

기후변화 취약성은 IPCC 제 2차 보고서 (1995)에서 그 개념이 처음으로 도입되었으며, IPCC 제 3차 보고서 (2001)에서는 기후변화 영향, 적응 및 취약성 (Climate Change Impacts, Adaptation, and Vulnerability, CCIAV) 평가의 개념이 도입되었다. 기후변화 연구는 기후시스템, 영향평가, 취약성 및 적응평가의 세 가지 유형으로 진행되고 있으며, 기후변화 취약성 평가 및 적응은 기후 시스템과 영향평가에 대한 연구를 기반으로 수행되어야 한다.

반면 기후 변화 취약성 개념은 외부로부터 시스템에 가해지는 영향이 시스템의 대처 및 적응 능력에 얼마나 민감한가를 나타내는 것으로서, 기후 변화 민감도, 기후노출, 그리고 적응 능력의 세 가지 인자로 구성된다 (Moss 등, 2001; 한국환경정책평가연구원, 2008; Yoo 등, 2010).



<그림 9-1> 기후변화 연구관련 진행 과정
(Biesbroek, G. R. et al., 2010)

기후 변화 민감도란 기후 변화로부터 한 시스템이 해롭거나 이로운 영향을 얼마나 받느냐는 정도이며, 적응 능력은 시스템이 자발적으로 기후 변화를 조절하여 얼마나 그 피해를 감소시키느냐는 개념으로 민감도의 반대 개념이 된다. 반면 기후노출은 민감도의 실제 정도를 결정하는 척도로 기후 변화에 대한 노출 정도를 설명하는 개념이다. 대부분의 선행연구에

서의 기후노출은 기후 변화에 직접적인 영향을 받을 수 있는 민감도를 계산하는 데 필요한 영향인자로 보았다 (IPCC, 2007; Moss 등, 2001).

Moss 등 (2001)은 취약성 지수에 대한 대부분의 개념을 가장 구체적으로 도입한 연구이며, 취약성의 개념을 생물물리적인 민감도와 사회 경제적인 적응 능력의 함수로 정의하고 이를 토대로 취약성 평가를 수행하였다. 이 연구에서 사용된 방법론은 취약성-탄력성 지수 원형 모형 (Vulnerability-Resilience Indicator Prototype model: VRIP model)으로 불리며 크게 민감도 부문과 적응 능력 부문의 대리변수가 나열되어 있다. 민감도 부문에는 인간정주, 식량 안보, 보건, 생태계, 수자원 등 5개 분야가 있고, 적응 능력 부문에는 경제적 능력, 인적자원, 환경 역량 등으로 요약하였다.

Brooks 등 (2005)은 국가 수준의 취약성을 구성하는 여러 변수들을 종합하여 국가별로 주요한 변수를 추출하려는 목적으로 취약성 연구를 수행하였다. 취약성을 구성하는 주요 변수들은 국가 단위에서의 취약성과 적응 능력의 지수로 제시하였는데, 항목별로는 기후 위험과 사회적으로 구성된 취약성의 함수로 정의하는 개념 틀에 근거하고 있다. 취약성을 구성하는 주요 대리변수의 유용성을 파악하기 위해 경험적인 연구 방법을 도입하였는데, 이 때 문헌 조사와 전문가의 판단을 통해 취약성 대리변수 후보로 경제, 보건과 영양, 교육, 인프라, 거버넌스, 지리 및 인구학적 요인, 농업, 생태, 기술 분야의 46개 변수를 도출하였고, 이 중에서 보다 중요한 변수를 산정하기 위하여 잠재적 대리변수와 기후위험에 따른 초과사망율 자료간의 상관성을 계산하여 유의한 상관성을 갖는 10개의 주요 평가 지표를 선정하였다. Wehbe 등 (2005)은 농업 부문에 초점을 맞추어 농업 부문의 적응 능력을 표현할 수 있는 보다 구체적인 지수를 적용하였다. 이 연구 역시 기후 변화의 취약성을 민감도와 적응 능력의 함수로 보고, 농업 부문에서의 적응 능력은 그 시스템의 지속가능성 특성과도 연관이 있다고 보았으며 민감도는 다른 분야가 아닌 농업분야 특유의 대리 변수만을 취급하였다.

국내에서는 이동률 등 (2006)은 저수지의 가뭄감시를 위하여 저수율을 기반으로 한 표준 물 공급능력지수 (Standard Water Storage Capacity Index)를 제안하여, 저수지의 현재 공급 가능한 물의 양이 향후 수요량에 부합할 수 있는가는 표현하는 지표로서 농업용수의 수요량에 대한 공급량

의 비교를 기반으로 한 것이다. 또한 유가영 등 (2008)은 시군별로 농업용수의 기후변화 적응능력 지표인 ACDS (Adaptive Capacity for Drought Stress) 지수를 개발하였으며, 표 6.1~6.3은 국내외 기후변화에 의한 취약성 평가에 활용된 지표를 나타냈다.

(표 9-1) 취약성-탄력성 원형 모형 (VRIP model)에서 사용된 지표, 부문, 대용변수 (Moss 등 (2001))

부문	세부 요소	대용 변수	대용 변수가 설명하는 내용
민감도	인간 정주 /기반 시설	- 해수면상승으로 홍수 위험이 있는 인구수 - 깨끗한 물에 접근할 수 없는 인구수	-해수면 상승으로 받을 수 있는 잠재적 피해 -기후 변이 및 변화에 완충역할을 해줄 수 있는 기본 서비스에 접근할 수 있는 인구수
	식량 안보	단위 면적당 곡물 생산량 일인당 동물성 단백질 섭취량	농업부문의 현대화 정도: 기후변이 및 변화에 완충할 수 있는 농부의 접근성 생산의 부족을 보충할 수 있는 시장이나 다른 기작에의 접근성
	생태계	관리되고 있는 토지 비료 이용량	자연 경관에의 인간의 침입과 토지 파편화의 정도 생태계의 오염으로부터의 스트레스 정도
	보건	출산율 평균 수명	영양, 질병에의 노출, 건강 서비스에 대한 접근성 등 인간의 건강에 영향을 주는 종합적인 조건
	수자원	수자원의 재이요율 물 사용량	내부적으로 수자원을 재이용하거나 하천으로부터의 유입되는 물의 양 현재와 미래의 물 수요에 부합되는 물 회수율
적응능력	경제적 능력	일인당 GDP	시장, 기술, 그리고 적응을 위한 유용한 자원에의 접근성의 분배정도
	인력 자원	식자율	노동력의 인간 자본 및 적응 가능성
	환경 역량	인구밀도 단위면적당 아황산가스 배출량 관리되지 않은 토지	생태계에 인구가 주는 스트레스 대기질 경관의 파편화 정도 및 생태계 이동의 용이성

(표 9-2) 취약성 부문별 지표 (명수정, 2011)

부문	상위 단계	하위 단계	세부 지표
민감도	재해취약성	재해이력	기반시설 재해이력, 인명피해, 재해발생건수
		홍수 취약성	홍수취약지, 수해취약지, 상습침수피해
	자연·사회적 요소	자연적 특성	해안선, 해발고도, 하천
노출	기반시설	토지이용적 특성	하천부지점용, 시가화 면적
		사회적 취약성	노후주택, 노령인구, 인구밀도, 취학전 아동
		교통시설	도로, 공항, 철도, 항만
		에너지시설	발전소
		하천시설	제방
		시설환경	주거시설, 국립공원, 교육시설, 산업단지, 환경기초시설
	기후	홍수	호우경보수준의 강우횟수, 강우강도, 100년 빈도 홍수량
		태풍	태풍 발생빈도
적응능력	경제적·제도적 역량	경제적 능력	GRDP, 재정자주도
		제도적 역량	공무원, 재해관리 역량
	물리적 역량	녹지 보급률	녹지 보급률
		하천개수율	하천개수율
		도로망보급률	도로망보급률
		상하수도	상수도보급률, 하수도보급률
		의료시설	의료시설
		인터넷 보급률	인터넷 보급률
	환경 역량	인구밀도	인구밀도

(표 9-3) 수자원 취약성 지표 (정일원, 2008)

규준	구분	지표
민감도	홍수	일강수량이 80mm 이상인 날의 일수
		1일 동안의 최대강수량 (mm)
		연최대일유출량 (m3/s)
		여름철 강수량 (mm)
	가뭄	연강수량 (mm)
		일강수량이 1mm 이상인 날의 일수
	물관리	연강수량
		연 평균기온
		급수 사용량 (m3)
		지하수 이용량 (m3)
		가뭄기준별 과부족량 (m3)
노출	홍수	유역평균고도 (m)
		유역별 단위면적당 인구 (인구/km2)
	가뭄	유역별 단위면적당 용수 수요량 (톤)
	물관리	평균고도
		인구수
적응 능력	홍수	하천개수율 (%)
	가뭄	유역 면적 (km2)
	물관리	상수도 보급률 (%)
		하수도 보급률 (%)

9.3 농업용수의 취약성

앞서 살펴본 기후 변화 취약성 평가지수와 관련된 국내외 문헌상에 나타난 방법론은 개념적으로 우리나라의 각 지역별 취약성 평가에 그대로 활용되었음을 알 수 있다. 각 분야별 기후 변화 취약성 지수는 3가지 항목 (기후노출, 민감도, 적응 능력)의 대리 변수를 경험적으로 결정하므로 대리변수 선정에 대한 과학적인 근거가 필요하다. 농업용수 관리의 기후변화 적응능력에 관한 지표는 농업용수 수요량과 공급량 자료를 활용할 수 있을 것이다. 즉, 농업용수의 취약성은 농업용 저수지를 통한 용수 공급량을 작물의 용수 수요량과 비교하여 농업 부분의 적응 능력을 평가할 수 있으며, 농업용수 수요량과 공급량의 시간적, 공간적 변화를 분석하고 이를 고려한 관개용 저수지를 대상으로 농업용수 부문의 기후변화에 대한 잠재 적응능력을 표현하는 지수를 개발하고 향후 미래 기후변화 시나리오에 따라 적응능력의 예측으로 확장되어 기후변화에 대비한 농업용수 관리 및 취약성에 따른 농업용 저수지 관리방안을 제시하여 정책 수립의 근거가 될 수 있을 것이다.

10. 농업용수 관리 방안

10.1 농업용수 관련 국내 여건변화

산업화의 진전으로 환경보전에 대한 사회적 요구의 증대로 농업용수 수급에 커다란 변화를 보이고 있다. 지난 40여년 동안 급속한 경제개발과 인구의 도시집중으로 물의 수요가 급속히 증가하고 있는 추세이다. 즉, 양적인 수요증가는 물론이고 질적인 측면에서 오염되지 않는 양질의 물에 대한 수요증가가 동시에 나타나고 있다. 용수 수요는 인구증가와 생활수준의 향상, 하천유지 용수의 증가 등으로 용수사용에 대한 경쟁이 더욱 심화될 것으로 전망된다. 공급측면에서 볼 때 물의 새로운 공급은 매우 어려운 상황이다. 국민의 환경보전에 대한 의식이 높아짐에 따라 새로운 댐과 저수지 건설 등 신규 수자원 개발 여건은 더욱 어려워지고 있다.

WTO, FTA 등으로 농산물시장 개방화가 확대됨에 따라 국내농업생산기반이 축소될 것으로 보인다. 농업용수 수요는 농경지면적의 증감과 밀접한 관계에 있다. 경지면적은 2006년 180만ha에서 2008년에 176만 8천ha, 2013년에는 170만ha, 2018년에는 2006년 대비 9.1% 줄어든 163만 5천ha로 전망되고 있다(한국 농촌경제연구원, 2008). 개방화, 도시화, 산업화 등으로 농경지 면적 잠식이 지속됨으로 농업용수 수요도 감소할 것으로 전망된다.

농업생산기반개선사업 가운데 농업용수개발에 투입되는 예산은 2000년에 33603억원, 2003년 4,663억원으로 증가하였으나, 이후 2004년 4,100억원, 2005년 3,743억원, 2006년 3,231억원으로 지속적으로 감소하고 있다(농림부, 2007, pp.212-213). 2003년에 발표한 농업농촌종합대책에 의하면 2003년에서 2013년까지의 10년간 총투융자 규모는 119조원에 달한다. 농촌복지 및 지역개발 분야는 2003년 8.6%로부터 2013년 17.2%로 투융자 비중이 확대되는데 반하여, 농업용수 개발 및 경지정리를 주축으로 한 생산기반정비 분야는 2003년 32.6%로부터 2013년 8.8%로부터 2013년 17.2%로 투융자 비중이 확대되는데 반하여, 농업용수 개발 및 경지정리를 주축으로 한 생산기반정비 분야는 2003년 32.6%로부터 2013년 8.8%로 대폭 축소될 것으로 예상된다. 이러한 생산기반정비 분야의 투융자의 축소는 향후 관개용수를 중심으로 한 농업용수의 개발 및 이용을 크게 위축시킬 것으로 전망된다.

논농사의 관개용수 수요는 감소하는 반면에 논에서의 밭작물 재배가 증가하면서 사계절관개의 필요성이 높아지고 있고, 밭관개 수요가 늘어나면서 밭기반 정비사업지구 등을 중심으로 수리시설을 체계적으로 관리해야 할 필요성이 증가하고 있다. 이밖에도 농업용수가 농업적 기능 이외의 농촌지역 사회의 환경유지 등 지역용수로서의 수요가 증가하고 있다. 이밖에도 농업용수가 농업적 기능 이외의 농촌지역 사회의 환경유지 등 지역용수로서의 수요가 증가하고 있다. 지역용수는 생존권적 혹은 환경권적 자원으로서의 물로서 농촌복지 및 지역개발 분야의 물의 성격을 가지고 있다. 건설교통부(2006)가 발표한 수자원장기종합계획(2006-2020)에서는 지역용수의 중요성이 처음으로 농업용수 속에 반영되어, 지역용수의 수요량이 2006년 1.2억㎥에서 2020년 6.5억㎥으로 증가할 것으로 예상하고 있다. 따라서 농업용수는 “생산의 물”로부터 “생존권적 자원으로서 물(생활의 물) 및 환경권적으로서의 물(환경의 물)”까지로 확장하여 “관개용수(농업인만의 물)”로부터 “지역용수(지역주민 전체의 물)”로 패러다임 전환의 필요성이 제기되고 있다(김진수 외 5인, 2007, p.7).

한편 농촌 지역의 경우 산업화 및 도시화의 확산에도 불구하고 환경기반시설이 미비하여 농업용수의 오염이 확산되는 추세에 있다. 특히, 집약적 영농에 다른 화학비료와 농약의 과다시용과 대규모 집약 축산으로 인한 가축분뇨의 부적절한 처리는 수질오염을 심화시키고 있다. 또한 토지 및 수자원에 대한 제약으로 토지이용률과 작물의 수량을 높임과 동시에 효율적인 농업용수 관행을 도입하여 관개효율을 높이고 용수를 절약하여 부족한 수자원의 대체효과를 도모해야 한다는 요구도 증대하고 있다.

10.2 농업용수 관련 국제적 논의

농업용수에 대한 국제적 논의는 1993년 9월 OECD 농업·환경정책위원회 합동작업반(Joint Working Party, JWP)에서 회원국의 농업환경상태를 비교·평가하기 위해 시작된 농업환경지표 개발에 포함된 물이용지표(water use indictor)와 수질지표(water quality indicator)를 들 수 있다. 물이용지표는 국가 수자원총량 가운데 농업용수가 차지하는 비중과 전체 농경지 중 관개면적의 비중 등으로 계측된다. 수질지표는 지표수와 지하수의 질산염과 인산에 대한 국가 수질의 임계치를 초과하는 농업지역내

조사지점의 비율, 지하수와 지표수의 질산염과 인산염 오염에 대한 농업부문이 차지하는 비중 등으로 계측된다(김창길, 김태영, 2006). 농업용수의 수량과 수질측면에서 평가하기 위한 농업환경지표 개발에 관한 보고서가 2008년 중반 OECD에서 발간될 예정이다.

OECD 농업위원회의 농정정책·시장작업반에서는 농업정책과 시장을 연계하려는 방안을 모색하는 과정에서 2005년 12월에 농업용수 수리시설에 대한 투자비용완전회수(full cost recovery)와 용수이용료 부과(water pricing) 등에 관한 논의가 이루어졌다. 투지비용완전회수는 사용자부담원칙에 따라 용수공급에 따른 모든 비용을 회수해야 한다는 원칙이다. 또한 OECD에서는 농업용수에 대한 보조금은 용수가격을 저하시켜 과다한 농업용수 이용을 통해 토지생산성 저하와 대수층 약화 등 환경악화를 초래하는 환경유해 보조금(environmentally harmful subsidies)로 간주하고 있다. 2006년 12월에 농업용수 보조금 산정과 지속가능한 물관리를 주제로 전문가 회의를 개최되었고, 2007년 6월에는 생산자지지추정치(Producer Suppour Estimates, PSE)에 농업용수 보조금을 포함시키는 방식에 대해 OECD 제43차 농업정책 및 시장작업반 회의에서 논의되었다. OECD에서 농업용수 보조금 산정과 관련하여 기반시설비용(capital cost) 항목을 현재의 일반서비스 보조추정치(General Services Support Estimates, GSSE)로부터 PSE로 전환하는 방안과 PSE 산정방식에 대한 검토가 활발하게 이루어졌다. OECD가 추진하고 있는 PSE 산정방식은 가격차에 의한 지지추정치 산정방식(Price Gap Approach)과 빌딩블럭 방식(Building Block Approach)으로 대별된다. 빌딩블럭 방식은 투자비용완전회수 원칙에 기초해 산정 가능한 모든 재정비용(유지관리비용+행정비용+자본비용)을 모두 블록형태로 쌓아서 농업용수 가격의 보조정도를 계산하는 것이다(OECD, 2007b).

OECD 농업용수 관련 지지정책에 대한 평가와 관련하여 우리나라는 수리시설에 대한 국가보조는 농업인에 대한 생산비 보조의 차원이 아니고 대규모 농업용수 수리시설을 관리하는 농촌공사의 운영비 보조로 공익적·사회간접자본적 기능수행에 대한 국가부담이라는 점을 강조하고 있다. 농업인의 경우 용수관리 이용료를 지불하지는 않지만 용수관리회와 농업인 자율관리구 등에서의 노동력을 제공하는 방법으로 물관리 역할을 분담하는 방식으로 제시하였다(농림부 국제농업국, 2007).

OECD 사무국은 회원국의 농업용수 지지정책에 대한 비교·평가를 위해 총 지지추정치(TSE)에서 포함되는 가변비용, 고정자산형성, 경지내 서비스, 노후시설지원, 연구개발, 경지기반시설 등 용수관련 정책 집행비용을 기초로 PSE%외 GSSE%를 산출하였다. 우리나라의 PSE%는 일본과 같은 수준인 0.3%로 OECD 전체 평균치 0.9%보다 낮은 것으로 나타났다. 그러나 GSSE%는 31%로 일본 35%보다는 낮은 수준이나, OECD 전체 평균 5.8%보다는 상당히 높은 수준이다. TSE는 4.1%FH 일본 6.0%보다는 낮은 수준이나 OECD 전체 평균 1.7%보다는 높은 수준으로 제시되고 있다((표 10-1) 참조).

OECD에서는 수자원과 용수 및 위생서비스의 가격을 지속가능성 차원에서 심층적으로 다루기 위해 OECD 수평적 물프로그램(horizontal water program)을 수립하여 체계적으로 다루고 있다. 여기서는 물가격과 재정, 지속가능한 농업용수 관리, 혁신적인 재무관리와 사업모델 등이 주요의제로 다루어지고 있다. 특히 물가격과 관련해서는 2009년 3월 터키 이스탄불에서 개최되는 제5차 세계물포럼(5th World Water Forum)에서 OECD 종합보고서(Synthesis Report)가 발표될 예정이다.

(표 10-1) 총지지추정치에서 물지원 실태(2006년 기준) (단위 : 백만달러, %)

구분	PSE		GSSE		TSE	
	US$	PSE%	US$	GSSE%	US$	TSE%
호주	679	37	-	-	679	28
일본	117	0.3	2,829	35	2,946	6.0
한국	80	0.3	1,113	31	1,194	4.1
멕시코	687	10	65	7	751	9.5
뉴질랜드	-	-	36	21	36	11.0
터키	11	0.1	-	-	11	0.1
미국	333	1	34	0.1	367	0.4
EU-25	466	0.3	19	0.1	485	0.3
OECD 전체	2,372	0.9	4,096	5.8	6,468	1.7

자료 : OECD(2007), p.19에서 인용.

OECD 국가에서 전체 또는 부분적 관개시설 건설비용과 물 공급가격과 관련한 비용을 망라하는 관개에 대해 정부가 광범위하게 지원하고 있다. 다수의 국가에서 농업에 대한 에너지 보조가 수자원 이용, 특히 지하수자원 이용에 대한 비용을 상당히 낮추고 있다. 그러나 일부 국가들은(오스트리아, 핀란드, 네덜란드) 농민에게 물 공급에 대한 투자비용 완전 회수를 적용하고 있으며 다른 몇몇 국가(호주, 멕시코, 스페인)에서는 수자원 정책개선을 실행하고 있는 중이다. 우리나라는 OECD 회원국으로 농업인 참여형 농업용수관리, 경제적 효율성 원칙, 이용자부담의 원칙, 시장왜곡의 최소화, 농업용수의 절약을 통한 타분야 용수 배정 노력 등을 농업용수관리의 기본원칙으로 채택할 것을 국제적으로 요구받고 있다(김홍상, 2005, p.57).

국제적 물관리 규범을 제시하는 세계물포럼(Would Water Forum, WWW)은 세계 수자원회의라고 하며, 물위기의 심각성을 자각하고 세계적 해결방안을 모색하기 위해 1997년 모로코 마라케시에서 제1차 물포럼이 개최되었다. WWW는 3년마다 개최되는데, 2000년에 제2차 대회가 네덜란드, 2003년에 제3차 대회가 일본, 2006년에 4차 대회가 멕시코에서 개최되었다. 제5차 대회는 2009년 터키에서 개최될 예정이다. 세계물포럼에서는 수자원정책, 기술, 개발 및 보전방향, 물문제 관련 재정조달 등 방대한 의제가 논의되어 국제적 물관리 규범으로 설정되고 있다. 특히 제4차 세계물포럼에서는 지역 차원에서의 수자원 관리에 대한 강조와 통합수자원관리(Integrated Water Management) 정보시스템 구축 등을 권고하고 있다.

10.3 농촌수자원의 지속적 관리 지원 방안

농촌용수 개발에 있어서 근래 10여년간 환경보전 등의 비판적 시각으로 인하여 신규 수리시설 개발과 기존 수리시설의 개보수에 관한 사업은 상대적으로 미진한 상태였다. 이번 가뭄과 같은 농촌지역 물부족을 개선하기 위하여는 지속적으로 농촌용수를 확보하고 관리하여야 할 것 이다.

이를 위해서는 첫째, 안정적인 용수공급을 위한 물관리 인프라 구축이 필요하다. 이를 위하여 중·소규모 용수 및 지표수 개발사업과 4대강 주변 농업용저수지 보강을 통하여 용수를 확보해 나가야 한다. 둘째, 재해에 강

한 수리시설을 구축하고 수리시설의 노후화에 따른 물손실량을 저감하도록 개보수 노력을 확대해 나가야 할 것이다. 셋째는 녹색 농업 농촌과 맞춤형 농업에 대응하는 물관리를 실현하여야 한다. 다양한 농업과 농촌주민의 물이용 서비스를 제고하여 풍요로운 농촌을 실현하고 농업용저수지, 양배수장 등 농업기반시설물의 과학적인 관리기술 개발과 시스템을 구축하여 효율적인 농촌 수자원 관리를 실현해 나가는 것이 미래 기후변화에 대응하는 방안이라 할 수 있다.

10.4 논용수관리현황과 손실

30~40%에 달하는 논용수 손실을 이해하기 위해서는 논용수관리 현황에 대한 이해가 필요하다. 근래 쌀의 과잉생산이 우려되면서 논용수에 대한 수자원개발이 축소되었고, 수리답율은 79%에 답보되고 있다. 특히 10년 빈도가뭄에 대한 수리안전답은 답면적 1,070천 ha중에서 46%인 487천 ha에 불과한 실정이다. 따라서 금년에도 상당수 저수지가 저수율이 평년에 비해 급격히 떨어지는 등 빈번히 발생하는 가뭄에 취약한 사정이다.

이런 형편속에서 논에 용수를 공급해주는 수리시설물도 매우 열악한 형편에 있다. 848천 ha의 수리답에 물을 공급해주기 위한 수원공은 68,523개소나 되어 시설 1개소당 평균 관개면적이 12ha에 불과하며, 주된 수원공인 저수지의 경우도 평균 27ha를 관개하는데 그칠 정도로 소규모가 많다. 또한 오래된 시설물이 많아 36년 이상 된 수리시설수가 전체의 43%를 차지하며, 특히 저수지의 경우는 1945년 이전에 준공한 것이 53%에 달할 정도이므로 노후화가 심각한 형편이다. 848천 ha의 수리답에 물을 공급하고 빼주는 시설인 용·배수로는 183,286 Km에 달할 정도로 방대하지만, 용수로의 경우 흙수로의 비율이 54%에 달할 정도여서 관리가 어렵고 손실도 많을 수밖에 없는 실정이다.

이러한 오래되고, 소규모이고, 낡은 형태의 수원공과 용·배수로를 개보수하는데 투입되는 개보수사업비는 연간 4,900억원 정도로 수원공의 경우 개소당 294만원, 용배수로의 경우 Km당 155만원에 불과하고 있는 형편이다.

한편으로는 수리시설물의 효율적 운영을 위해 투입되는 물관리 인력과 수리시설관리원의 경우도 해마다 그 수가 줄어감에 따라 시설물관리에 대한 집중도가 점점 더 열악해지는 형편이다. 따라서 적극적인 물관리가 어

려워 강우가 없으면 지속적으로 수문을 열어 필요량 이상으로 용수가 공급되기도 하는 등 물의 낭비 요인이 되기도 한다. 이러한 시설적 특성과 관리인력의 부족 등으로 인해 논용수의 손실량이 30~45%에 달하는 것으로 조사되고 있다. 따라서 이 손실량을 줄인ㄴ 것이 국가 수자원 관리에 있어서 매우 중요하다고 할 수 있다.

10.5 논용수 손실량 저감 방안

논용수의 손실량 저감을 위한 방안들에는 여러 가지가 있을 수 있으나 크게 시설의 개선을 통한 물리적 수단과 간리의 체계화를 통한 관리적 수단이 있을 수 있다. 물리적 수단으로는 용수로의 관수로화, 흙수로의 구조물화, 조절지를 활용한 연계운영체계 구축, 수로시설물의 현대화 등이 있다.

수로의 관수로화는 친환경이라는 측면에서 농업용 수로가 생태계 단절의 부정적 영향을 미치고 있다는 평가하에서 가장 친환경적인 방법인 동시에 수로손실을 포함한 관리손실을 가장 줄일 수 있는 효과적인 방법인 반면에 많은 사업비를 필요로 하는 사업이다. 한편 흙수로의 경우 수로에서의 손실도 콘크리트 수로보다 10%정도 많은데다가 수초발생 등 관리손실을 크게 증가시키는 유발요인이 많아 시급히 정비하여야 할 대상이다. 그러나 콘크리트 수로화도 생태계에도 적지 않은 영향을 미치므로 보다 친환경적인 구조로 구조물화를 서둘러야 한다. 이외에도 관리손실의 감소시키기 위해서는 조절지를 이용한 용수 공급 시기와 양의 조절, 논에서의 손실감소를 위한 자동물꼬의 개발, 관리 효율 개선을 위한 수문 등 수로시설물의 현대화가 시급하다.

관리적 수단으로서는 점차 심각해지는관리인력의 감소와 고령화 등에 대비하여 보다 효과적으로 수리시설물을 이용할 수 있도록 해주는 자동화 시설과 물관리를 합리적으로 할 수 있도록 지원해주는 의사결정 프로그램의 보급 등이 시급한 실정이다.

10.6 손실저감을 위한 정책 강화

앞에서 얘기한 수로의 손실량 저감 방안들은 기술적으로 나아가야할 방향을 얘기한 것으로서 이러한 것들을 시행하기 위해서는 정책적으로 제도와 예산 등이 적기에 적량이 뒷받침 되어야만 한다.

이를 위해서는 수리시설개보수사업의 대폭 확장, 이미 준공된 대단위농업개발사업지구의 재정비사업, 용수체계재편사업의 확대, 물관리자동화사업의 지속적 추진, 물관리 관련 연구사업의 활성화 등이 제도적으로 뒷받침이 되어야 한다.

수리시설 개보수사업의 경우 연간 4,900억원 정도가 투입되고 있으나, 1998년의 용수로 구조물화 33%에서 10년이 지난 지금도 47%에 불과한 실정으로 대폭적인 예산 확충이 없이는 현대화는 커녕 현상유지도 급급한 실정이다. 또한 ′70～′80년대 준공된 대단위농업개발사업지구의 경우 11개 지구에서 110천ha에 관개를 하고 있음에도 불구하고 30여년 전의 설계기준으로 시행되어 현재의 기준으로는 통수량 등 각종 설계기준에 크게 미달하고 있으며 또한 노후회도 심각하며, 특히 친환경적인 고려가 전무한 형편으로 종합적인 재정비가 시급하다. 이러한 재정비를 통하여 관수로화나 구조물화를 촉진시켜 수로 손실의 저감을 이루어야 할 것이다. 이외에도 현재 극히 부진한 용수체계개편 사업의 확대를 통하여 중소규모의 기존 시설에 대한 리모델링을 조기에 달성하여야 한다.

또한 미래 농업에 있어서 필수적인 물관리를 자동화를 지속적으로 추진해야 하며 물관리의 효율화를 위한 연구도 확대되어야만 한다.

10.7 가뭄 극복을 위한 농업기술적 대응 방안

지구 온난화에에 의한 기상이변은 한반도에 강우가 증가할 것이라는 전망과 동시에 홍수나 가뭄 등의 기상재해 발생 횟수도 빈번해질 것임을 예고하고 있다. 특히, 가뭄은 물 부족을 심화시켜 벼 재배로 인해 물 소모량이 많은 평닌 우리나라 농업에 미치는 영향력이 막대하다. 우리나라 가용수자원 중의 약 50%가 농업용수인 현실에서 가뭄에 의한 물 부족은 우리나라의 식량안보에도 영향을 미치는데, FAO에 의하면 수자원 접근성과 식량안보는 아주 밀접한 상관성이 있는 것으로 조사되어 있다. 따라서, 농업의 수자원 접근성을 높이는 노력이 궁극적으로는 국가 경제발전의 밑거름이 될 수 있다.

작물재배 하는데 있어 가장 중요한 것은 작물이 필요한 시기에 필요한 만큼의 물을 제공할 수 있는가에 있다. 물이 아무리 많다고 하더라도 작물이 필요로 하는 시기에 제공할 수 없다면 작물재배는 실패하고 만다.

따라서, 영농에 있어 물절약 방안은 가뭄 외에도 생육단계와 적정요구량과도 연결될 수 있다. 농촌진흥청에서는 가뭄시 작물재배를 위해 약건 건조한 수분상태에서도 작물의 품질이나 수량이 어떻게 되는지와 작물별로 가뭄에 대한 한계가 어디까지인지에 대한 연구결과를 제공하고 있다. 기상과 토양수분 함량에 대한 발달된 측정 장비를 통해 가뭄을 예보할 수 있는 시스템을 설정하였으며, 작물이 물을 최소로 소모하면서 적정 수량을 생산할 수 있는 연구결과 또한 제공하고 있다. 이러한 연구결과들을 종합해 인터넷상에서 작물별, 토양종류별, 지역별로 관개에 관한 물관리 처방서를 제공할 수 있도록 시스템을 작성중이며, 가뭄시 대비를 위해 논에서의 세세한 영농관리와 밭이나 시설재배지에서의 영농관리 방안을 제공하고 있다. 한편으로, 강우가 많을 때의 토양수분 관리를 통해 유효수분 함량을 높임으로서 작물에게 공급하는 관개량을 절약할 수 있는 방안도 토양보전 농법과 함께 제시하고 있다. 가뭄이 심해져 벼를 재배할 수 없을 때 대체할 수 있는 작목에 대한 연구도 있으며, 대체수자원에 관한 연구결과도 제공하고 있다.

가뭄에 대한 영농현장에서의 기술은 기상조건에 따라, 영농형태에 따라, 재배작물에 따라, 토양종류에 따라, 수자원 접근성에 따라 달라지므로, 이에 대한 연구와 기술개발은 이들을 종합하는 체계적인 접근방법이 없이는 농민의 입맛에 맞는 해결방안을 작성하기 힘들다. 따라서, 앞으로 이러한 내용들을 종합화할 수 있는 방향으로 연구를 진행할 것이며, 이는 새로운 Agenda체계에 맞춰 진행할 것이다.

11. 지속가능한 농업용수관리 방향과 과제

11.1 지속가능한 용수관리의 개념 및 기본방향

11.1.1 지속가능한 용수관리의 개념

경제성장을 위한 자연자원 이용과 관련 '세대 내' 또는 '세대 간'의 형평성에 관한 이론적 개발·논의가 계속되고 있다. 이론적인 측면에서 지속가능성의 개념은 자연자본과 인간자본의 대체가능성 정도에 따라 대체관계를 인정하는 약한 지속가능성(weak sustainability)과 대체 가능성을 거의 인정하지 않는 강한 지속가능성(strong sustainability)으로 나누어 접근되고 있다(김창길, 김정호, 2002).

지속가능한 발전(sustainable development)이란 환경보전과 경제개발을 조화시키면서 지속적인 경제성장을 달성한다는 의미로 1972년 스톡홀름 유엔회의의 환경선언에 제시된 이후 1987년 환경·개발에 관한 세계위원회(World Commission on Environment and Development, WCED)의 개념정립을 거쳐 1992년 유엔환경개발회의(United Nations Conference on Environment and Development, UNCED)에서 지구환경보전 강령으로 채택된 '환경과 개발에 관한 리우 선언(Rio Declaration)과 세부 실천과제인 「의제 21」(21세기를 위한 인류의 논의과제)'의 근간이 되고 있다.

농업부문의 수자원 이용과 관련한 지속가능성은 농업용수의 효과적인 이용을 통한 안정적 식량생산, 환결질 개선, 여타 사회적 어메니티와 문화적 가치 제고 등에 대한 영향이 현세대는 물론 미래세대의 요구를 충족시킬 수 있도록 관리되는 경우를 의미한다. 따라서 지속가능한 농업용수관리의 개념은 "환경적으로 건전하며(environmentally sound), 경제적으로 수익성이 보장되고(economically viable) 그리고 사회적으로 수용 가능한(socially acceptable) 용수관리로 설정할 수 잇다. 즉, 농업용수관리를 통해 농산물의 생산성 향상과 환경부하 감소 및 수익성 보장을 동시에 달성하는 생태효율성(eco-efficiency)을 극대화와 하는 포괄적인 개념으로 이해할 수 있다.

11.1.2 기본방향과 적용원칙

지속가능한 농업용수관리는 농업부문의 수자원을 현세대는 물론이고 미래 세대도 지속적으로 이용할 수 있도록 용수자원의 효율적인 배분과 이용이 이루어지도록 관리하는 것을 의미한다. 앞에서 제시된 바와 같이 농업용수관리에는 수량관리, 수질관리, 시설물관리를 포괄하기 때문에 지속가능한 농업용수관리의 기본방향 설정에 있어서도 이들 세 가지 분야가 고려되어야 한다.

Ⅰ. 지속가능한 농업용수시설관리체계 개편은 기본적으로 물관리의 효율성을 제고 시키고 실태 진단에서 제시된 문제점을 해결하는 방안이 모색되어야 한다.

Ⅱ. 지속가능한 수자원 이용기반 마련 및 지속가능한 용수관리를 위해서는 달성 가능한 수요관리의 목표를 설정해야 한다.

Ⅲ. 수계단위의 통합관리 및 이원화된 관리체계로 인해 저하된 물이용의 형평성을 제고시킬 수 있는 방안이 모색되어야 한다.

Ⅳ. 농업용수관리의 관련주체인 농업인, 물관리기관, 국가, 지자체 등이 얻는 수혜정도와 담당하는 역할 기능에 따라 적절한 역할 분담이 이루어지도록 해야 한다. 특히, 농업용수관리의 핵심적인 대상인 농업인, 지역주민(비농업인) 등의 참여를 통한 자율적 관리가 이루어질 수 있는 방안이 모색되어야 한다.

Ⅴ. 농업용수의 수질개선을 위해서는 기본적으로 지역단위의 원활한 물질순환 시스템을 재구축하는 방법이 모색되어야 한다.

Ⅵ. 농업용수의 수요변화에 부응하여 적절한 배분과 수질오염 방지, 생태 시스템의 제대로 작동될 수 있도록 적용될 수 있는 여러 가지 원칙이 적절히 고려될 수 있도록 해야 한다.

지속가능한 농업용수관리의 실천과제를 모색하는데 적용될 수 있는 기본원칙(basic principles)으로 통합적 원칙, 오염자 부담원칙, 수익자 부담원칙, 공동부담원칙, 사전예방원칙 등 다섯 가지 원칙을 들 수 있다((표 11-1)참조). 통합적 접근원칙(integrated approach principle)은 농업정책과 수자원관리정책을 통합적으로 고려하는 원칙을 말한다. 오염자부담원칙(polluter-pays principle)은 농업용수의 수질오염 발생과 관련하여 오염

원인자에게 문제해결에 소요되는 응분의 비용을 부담시키므로 환경비용의 내부화를 지향하는 원칙을 말한다. 수익자부담 원칙(beneficiary-pays principle)은 농업용수 시설설비 및 개선에 따라 수혜자들이 이에 상응하는 대가가 지불한다는 원칙을 의미한다. 공동부담의 원칙(shared responsibility principle)은 정부, 유관단체, 농업인 등 농업용수관리 관련 주체가 농업용수관리를 위한 비용을 공동으로 부담하도록 하는 원칙이다. 공공재의 특성을 지닌 농업용수의 경우 농업용수의 시설물의 유지·관리에 따른 편익과 비용을 수혜자를 농업인으로만 한정하는 것이 어려운 경우 적용하는 원칙이다. 사전예방원칙(precautionary principle)은 환경오염을 유발시킬 수 있는 잠재적인 원천 발생을 미연에 방지한다는 원칙으로 농업생산 활동의 환경에 미치는 영향의 정확한 정보가 부족한 상황 하에서 정책실무적 측면에서 중요한 원칙이다.

합리적이고 효과적인 친환경농업 발전을 위한 정책 추진을 위해서는 단일원칙의 적용보다는 위에서 제시된 다섯 가지 원칙들이 적절하게 고려될 수 있도록 적용·집행되어야 할 것이다.

(표 11-1) 지속가능한 농업용수관리를 위한 원칙

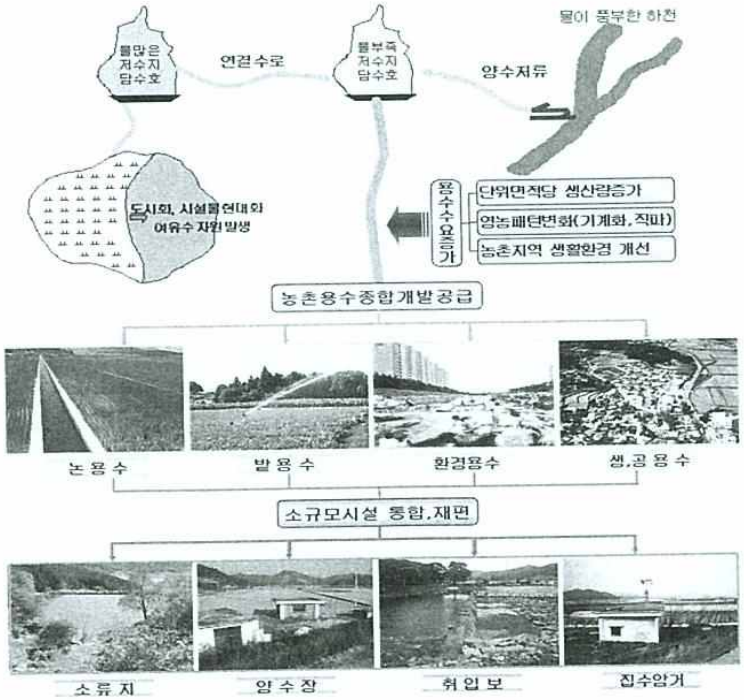
방 식	원 칙	의 미
농업정책과 수자원관리 정책의 통합 (규제와 지원 등)	통합적 접근원칙	외부경제 및 외부불경제 내부화
농업인의 수질오염에 대한 책임부과 (수질규제, 부과금 등)	오염자 부담 원칙	외부불경제의 내부화
농업용수 관련주체 공동부담	공동 부담원칙	살생비용 및 외부경제의 내부화
농업용수 사용자의 대가 지불	수혜자 부담원칙	발생비용의 사용자 부담
불확실한 결과의 사전적 예방 (교육, 홍보 등)	사전예방 원칙	사회적비용 발생 최소화

주 : 지속가능한 농업용수관리 원칙은 환경친화적 농업자원관리 원칙으로 제시된 내용(김창길 외 7인, 2004, p.29)을 기초로 일부 내용을 보완하여 제시한 것임.

11.2 지속가능한 농업용수관리를 위한 과제

11.2.1 통합유역관리시스템의 도입

기존의 쌀증산 위주의 농업·농촌용수개발사업에서 벗어나 농업·농촌의 공익적 기능을 제고하고 다양한 농가 소득원 창출을 촉진시키고 지속가능한 농촌용수의 개발 및 이용 효율화 방안이 모색되어야 한다. 이를 위해 전국 농촌지역을 대상으로 464개 용수구역을 기본으로 용수구역을 소수역 또는 수계단위로 1~4개정도로 구분하여 다목적 용수확보 및 이용계획 수립이 이루어져야 한다. 특히 지속가능한 농업·농촌용수이용체계 개편을 위해서는 통합유역물관리 개념을 도입하여 수계연결, 양수저류 등에 의한 지역간 불균형 해서, 수리시설의 통합·재편, 용수구역별 개발 등을 통해 키 개발된 수자원을 효율적으로 보전, 배분하여 다양한 목적에 맞게 물자원의 이용효과를 극대화하도록 해야 한다(<그림 11-1> 참조).



<그림 11-1> 농업 · 농촌용수관리의 통합유역관리시스템 구성도

자료 : 농림수산식품부(2008).

지속가능한 농업·농촌용수관리가 이루어지기 위한 통합유역물관리시스템이 작동되기 위해서는 농촌용수의 개발, 이용, 관리 및 이와 관련된 농지 관리에 적합한 지형적 단위로 유역을 분할하고, 유역 내 상·하류 하천과 농업용 수리시설물 간의 효율적 연계 운영을 도모할 수 있도록 해야 한다. 특히 하천 및 농업용 수리시설물 정보, 유역의 유출특성을 고려하기 위한 유역특성 정보 등 물관련 기초 자료의 DB 및 지리정보시스템 구축, 물관련 정보의 표준화 등이 이루어지도록 해야 한다.

11.2.2 농업용수관리자동화 시스템 구축

수리시설물의 노후화와 관리체계의 불합리, 물관리의 저효율성 등의 문제와 환경용수의 필요성 등 물관리 여건변화는 보다 과학적이며 계획적인 물관리를 요구하고 있다. 농업수리시설이 그 사용목적에 적합한 최대의 기능을 발휘할 수 있도록 용수조직 내의 각종 시설을 단일 의지에 의하여 중앙에서 집중적으로 체계적으로 관리할 수 있는 농업용수관리자동화 시스템이 구축되어야 한다. 이를 위해서 저수지, 양·배수장, 용·배수로 등 농업기반시설물의 주요시설에 원격측정 및 제어장치 를 설치하여 중앙감시제어식 농업용수관리 자동화를 통하여 용수수급 상황 실시간 모니터링과 DB구축으로 농업용수가 적기에 적량이 공급될 수 있도록 해야한다.

주요 수원공, 용수간선, 배수시설 등 농업기반시설을 중앙관리소에서 원격제어시설에 의한 집중적, 체계적으로 관리함으로서 효율적인 물관리 및 시설관리로 물관리비용 절감과 용수배분을 합리화하는 과학적인 물관리 기반 구축을 위해서는 저수지, 양배수장, 용배수로 등 농업기반시설물의 주요시설을 원격측정 및 제어가 가능하도록 정보통신기술을 이용한 TM(Tele-Metering)/TC(Tele-Control)등 원격제어 중앙감시제어식 물관리시스템을 설치해야 한다.

11.2.3 환경친화적 농촌용수 개발 및 관리

환경친화적인 농업기반을 정비함에 있어 기능성 및 안정성이 충족되는 공법개발과 자연생태계 순환원리에 순응하면서도 유지관리의 편리성이 확보되고 비용을 절감할 수 있는 방안이 마련되어야 한다. 이를 위해서는 우선 농촌지역의 정상적인 기능유지와 생활환경 개선에 필요한 용수로 정의할 수 있는 농촌환경용수가 고려되어야 한다. 환경용수는 농업용수 회

귀수를 활용하거나 저수지의 잉여저수량을 활용하는 방법, 기존의 저수지 보강개발을 이용하여 확보하는 방안 등이 있다. 또한 환경친화적 설계는 자연경관 및 생물 서식처 훼손의 최소화 방안을 모색하고 자연자원 활용의 효율성을 높일 수 있도록 해야 한다. 용수로 본래의 기능을 유지하고, 지역의 자연환경을 유지보전 및 조화되며, 농촌의 생활환경과 어메니티를 창출할 수 있도록 자연친화형 용·배수로 설계가 이루어져야 한다. 또한 저수지 설치 시에는 자연경관과 생태계 훼손을 최소화하고, 주변 자연과 사회·문화·역사성을 고려한 천수 및 녹지공간을 조성해야 한다. 이밖에도 환경친화적 실천방안을 위해서는 농업용수 회귀수, 잉여수량 활용 방안 검토가 필요하며 이를 위한 농업용수 회귀특성 분석, 하천용수에 대한 농업용수 기여도, 환경용수 필요시기, 필요량 등에 관한 연구가 이루어져야 한다. 아울러 지역특성에 맞는 개발유형을 분류하고 개발하는 등 구체적인 기준 정립을 위한 지속적인 연구와 시범지구의 확대가 요구된다.

11.2.4 농업인의 인식전환과 참여 확대

농촌인구의 감소로 시설이 제대로 운영되지 않고 있는 현실에서 농업인들의 적극적인 참여 유도는 쉽지 않다. 이런 맥락에서 농업인들의 인식전환이 요구된다. 특히 안정적인 농업경영체로 정착하려는 전업농가일수록 자신의 영농여건을 안정화시키려는 차원에서 수리권의 안정적 확보를 위한 적극적인 노력이 요구됨을 인식해야 한다. 지속가능한 농업용수관리를 위해서는 농업용수의 수질보전에 대한 관심과 노력이 필요하다. 화학적 투입재에 의존하는 집약농업이 지속됨으로써 농업용수질이 악화되고 있다. 영농책임자인 농업인 스스로 적정량의 화학적 농자재투입과 적기에 적량의 관개배수 활동에 적극적으로 참여하여 수질관리에 기여할 수 있도록 해야 한다.

농업용수이용료 면제는 농산물가격을 왜곡하는 수단으로 인식되어 WTO 등 외국의 관련단체에서 문제제기가 이루어지고 있다. 2006년 1월 OECD 환경성 평가회의 보고서에도 한국의 농업용수 물값 징수가 권고사항으로 포함되어 있다. 농업용수이용료 납부는 농업용수 수리권 거래제도 도입 시 수리권 권리주장도 가능하게 할 수 있고 물관리 효율화 수단으로 수리권거래제도 도입의 기초가 될 수 있다. 농업용수 이용료 납부, 수익자

부담원칙의 준수는 단순히 농업용수 및 수리시설의 안정적 관리를 위한 재원확보 차단을 넘어서서 공공적 자산인 농업용수 및 수리시설의 효율적 합리적 이용을 위한 경제적 시스템을 구축하는 차원에서 접근될 필요가 있다(이광야, 김해도, 2007, p.191). 통합적 물관리 체계의 구축과 물관련 조직의 통합 등을 고려하는 경우 매우 낮은 수준이라 해도 농업인의 농업용수이용료 납부가 필요하다. 한정된 수자원의 효율적 이용을 위해 수혜자 부담원칙에 따라 농업용수이용료 부과요구가 증가하고 있다. 따라서 중장기적으로 농업용수 수혜자인 농업인의 합리적인 이용료부담을 통해 물관리 기본원칙 준수 및 농업용수 관리 효율화를 도모하는 방안에 대한 검토가 필요하다.

농업용수시설의 공익적 기능을 고려한 공동부담원칙을 적용하여 정부, 지자체, 농촌공사, 이용자간 적정 분담비율을 설정하는 방안에 대한 검토도 필요하다. 농업용수의 직접적인 사용자의 경우 농산물의 안정적 생산과 증산 등을 위한 수리시설 유지관리비용을 부담하는 방안을 들 수 있다. 현실적으로 농업인에게 농업용수이용료를 부과하는 방안으로는 영농규모 등에 따라 차등화하는 방식, 기존 이용부분에 대하여는 면제하고 추가 물수요 발생 부분에 대하여 부과하는 방식, 공급량 계측 등의 수리시설이 완비된 지역이나 비자경농업인부터 징수하는 방식 등을 들 수 있다.

11.2.5 농업용수관리체계 일원화

향후 물부족 시대에 대비 한정된 수자원의 이용관리에 효율적이고 대처하고 빈발하는 재해 대응능력 제고와 용수이용 합리화, 농업인 영농편의를 위해 수리시설 국가관리 요구가 지속적으로 증대되고 있다. 논농업 중심의 기존 농업용수 수요가 4계절 용수이용 형태(밭농업 관개, 재해예방)로 확대됨으로 물관리 업무가 재편되어야 한다. 기본적으로 농업수리시설은 국가관리대상 사회간접자 본적(공익적기능) 시설이므로 재해·재난예방대책은 국가차원에서 관리해야 한다. 지자체관리 수리시설은 대부분 안전진단이 이루어지지 않고 있으며 개보수도 재해가 발생한 이후 복구차원에서 실시되고 있는 실정이다. 따라서 10ha 이상 집단화된 수리답 지역의 수리시설은 중요한 사회간접자본으로 인식하고 체계적인 관리가 필요하다.

다양한 물수요 증가에 대비하여 한정된 수자원을 효율적으로 이용할 수

있도록 일정규모 이상 수리시설은 국가에서 일원화하도록 해야 한다. 농촌공사에서 일원화에 따른 소요예산, 농업환경여건 변화 등을 감안, 관리가능지역부터 점차적으로 편입시키는 것이 바람직하다. 현재 편입을 희망하는 구역에 대해서 우선적으로 편입을 추진하도록 해야 한다. 정부는 농지관리 정책과 연계하여 진흥지역을 대상으로 하는 등 기준설정 국가관리 대상범위 등에 대한 일정한 기준을 마련해야 한다. 또한 위탁관리와 소유권 인수관리에 대한 장단점 등 충분한 검토가 이루어져야 한다. 이밖에도 시설현대화 및 유지관리 투자예산 대비 일원화효과 등을 감안 일원화 범위 및 방법 등 구체적으로 방안이 모색되어야 한다. 정책실패를 최소화하고 합리적인 추진체계정립을 위해서는 3~4개 지자체를 대상으로 시범지구를 선정하여 추진함으로써 소요비용 추정, 농업인 참여방안, 행정적인 문제 등에 대한 구체적인 검토가 이루어질 수 있다.

12. 결론

본 고에서는 3차년도 최종결과 정리를 위해 1차년도, 2차년도 내용을 연계하여 분석한 연구 결과를 정리하였다.

■ 본 연구에서는 GCMs 중 ECHO-G(MM5), MIROC3.2를 편이보정하여 국내 기상자료와 비료 분석한 결과 각각 한반도와 지구 전체를 모의하는 모형은 시군단위 소규모 지역에 대해서는 불확실성을 내포하고 있어 지역 관측소 관측값을 대상으로 편이보정을 하여 불확실성을 최소화 하였다.

■ 물수지 분석에 필요한 미래기상자료 6가지 중 4가지(증발량, 습도, 풍속, 일조시간)은 본 연구를 통해 개발된 기상자료 생성 프로그램(CCWG)을 이용하여 추가 생성하였다. CCWG의 신뢰성을 확인하기 위해서 춘천관측소 기상자료(1970~2003)를 이용하여 2004~2008년의 기상자료를 생성하여 실제(2004~2008)기상자료와의 상관관계를 분석한 결과 증발량 0.877, 습도 0.702, 풍속 0.655, 일조시간 0.611 의 상관관계가 있는 것으로 분석되었다.

■ 각 지역의 대상저수지를 중심으로 저수지를 포함하고 있는 지역의 토지이용변화에 대해 모의 한 결과 향후 100년동안 전반적으로 최소 1.9~72.0% 까지 논의 경지면적이 감소하는 것으로 분석되었다. 지역별 논면적 감소는 경기-마둔저수지 인근 72%, 강원-원창저수지 인근은 3%, 충북-원남저수지 인근은 2.5%, 충남-고풍저수지 인근은 6.8%, 전북-백석저수지 인근은 3.5%, 전남-대포저수지 인근은 1.9%, 경북-마북저수지 인근은 2.8%, 경남-남성저수지 인근은 7.0% 감소되는 것으로 분석되었다.

■ 잠재증발산량을 산정하기 위해 LARS-WG 기상자료를 이용하여 분석한 결과 1985s에 비해 2020s, 2050s, 2080s로 가면서 계속적으로 증가하는 것으로 나타났다. 가장 작게 증가한 지역은 청주지역으로 3개 년도 중 2020s에서 2% 증가하는 것으로 나타났으며, 가장

많이 증가하는 지역은 포항지역으로 2080s에서 42% 증가하는 것으로 타나났다. 이와 같은 결과는 8개 지역 모두 기온증가와 증발량 증가가 가장 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

■ 8개 지역에 대한 2020s, 2050s, 2080s의 필요수량은 모두 증가하는 것으로 나타났으며, 그 이유는 잠재증발산량 증가에 따른 필요수량도 증가하는 것으로 판단된다. 가장 작게 증가한 지역은 청주지역이 2020s에서 1% 증가하는 것으로 나타났으며, 가장 많이 증가한 지역은 진주 지역으로 2080s에서 27% 증가하는 것으로 나탔다. 잠재증발산량이 작은 지역은 필요수량이 가장 작게 증가한 지역과 동일한 청주 지역으로 나타났으나 잠재증발산량이 가장 많이 증가한 지역은 포항지역 이였으나 필요수량에서는 진주지역으로 나타났다. 그 이유는 포항지역이 유효우량이 2020s, 2080s, 2050s,에서 각각 -1%, 7%, 15%로 증가함에 따라 필요수량이 감소하였고, 진주지역의 경우 유효우량이 5%, -11%, 4%로 감소하여 필요수량이 증가하는 것으로 판단된다.

■ 기후변화에 따라 논벼의 재배가능시기의 변화를 분석한 결과 시간이 지날수록 재배가능기간이 늘어남을 확인할 수 있었다. 이는 일평균 기온이 높아짐에 따라 이앙이 가능한 일자가 앞당겨지고, 또한 수확기 만한일 역시 일부 지역에서는 최대 12월 15일까지 늦춰지기 때문이다. 또한 남부지역이 중부지역보다 개배가능기간의 변화가 큰 것으로 나타났으며, 전국적으로 기후변화에 따라 재배가능기간이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

■ 각 시기별 논벼의 생육기간의 변화를 적산온도를 통하여 분석한 결과 논벼의 생육기간의 변화는 기후변화가 진행됨에 따라 기온의 상승으로 인하여 짧아지는 것을 알 수 있다. 이는 기온이 상승함에 따라 보다 짧은 기간에 생육을 위해 필요로 하는 적산온도를 충족시킬 수 있기 때문이다. 전체적으로 대상 내 모든 지역에서 기후변화에 따라 시기가 지날수록 생육기간이 130일대에서 120일대로 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

■ 품종별 생육기간의 변화를 분석한 결과 기후변화에 따른 기온의 상승으로 이앙일이 타 지역보다 늦춰지는 것이 가능한 지역일수록 이앙일부터 출수기의 기간이 짧아지게 되므로 생육기간 역시 짧아지는 것으로 나타났다.

중부지역인 강원도 춘천의 중생종의 경우 1980년에서 2099년까지 안전출수가 8월 10일에서 8월 22일, 8월 29일, 9월 6일로 약 27일 정도 늦춰지는 것으로 나타났다. 생육기간은 137일에서 122일까지 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 재배가능기간은 156일에서 209일로 53일 늘어나는 것으로 나타났다.

남부지역인 전북 전주의 경우 안전출수일은 8월 21일에서 9월 19일까지 늦춰지고 생육기간은 130일에서 122일로 줄어들고, 재배가능기간은 172일에서 289일로 늘어나는 것으로 나타났다.

■ 상세화별 시계열 변화 분석에서 월별 강수량에서는 CF의 경우 2025s 9월에 104%, 2055s와 2085s는 10월에 각각 167%, 192% 증가를 나타내었다. LARS-WG와 MM5는 3개의 미래 시기 모두 12월에 큰 증가를 나타내었는데, 특히 LARS-WG의 12월 강수량 편이가 664%로 나타나면서 큰 값으로 모의되었다. 월별 기온은 겨울철에 큰 증가를 나타내었는데 2025s, 2055s, 2085s 모두 같은 경향성을 나타내었다. CF는 1월에 6.40℃, 7.88℃, 9.13℃의 편이값을 나타내었고, LARS-WG는 12월에 7.20℃, 8.99℃, 10.02℃의 편이값을 나타내었다. MM5는 11월에 가장 큰 편이값을 나타내었는데, 이는 5.89℃, 9.16℃, 12.06℃로 나타났다.

■ 지역별 작물증발산량 산정 결과를 살펴보면, 경북 포항의 증발산량이 가장 높게 산정되었고 다음으로 전남 여수의 증발산량이 높게 나타났다. 시기별 증가율을 살펴보면 강원 춘천의 경우 1995s 대비 2085s의 작물증발산량의 증가율은 12.7%로 나타났고, 경기 수원의 증가율은 6.6%로 나타났으며 경북 포항은 33.5%로 가장 높은 증가율을 보이고 있다. 증발산량은 중부지역, 남부지역 모두 정도의 차이는 있으나 대체로 증가하는 경향이 있음을 확인할 수 있었다.

■ LARS-WG를 이용하여 시기별 연최대 필요저수량 산정을 각 시기별(1995s, 2025s, 2055s, 2085s)로 산정하였다. 중부지역의 저수지별 연최대 필요저수량 결과를 살펴보면, 강원 원창저수지의 경우 1995s 연최대 필요저수량 1620.5 천㎥ 대비 2025s, 2055s, 2085s 시기에 각각 14.5%, 19.2%, 24.2% 감소하는 것으로 나타났다. 경기 마둔저수지의 경우 2025s 시기의 연최대 필요저수량은 60.7%의 증가율을, 충북 원남저수지의 경우 2085s 시기에서는 24.9%의 감소율을, 충남 고풍저수지의 경우 2025s 시기에서는 35.9%의 증가율을 보여 가장 큰 변화를 나타내었다. 시기별 연최대 필요저수량의 변화가 가장 큰 저수지는 경기 마둔저수지로서 2025s 시기에 1995s 대비 연최대 필요저수량이 약 60.7% 증가되는 것으로 모의되었다. 남부지역의 저수지별 연최대 필요저수량 결과를 살펴보면, 전북 인교저수지의 경우 1995s 연최대 필요저수량 464.0 천㎥ 대비 2025s, 2055s, 2085s 시기에 각각 23.5%, 15.0%, 14.4% 증가하는 것으로 나타났다. 전남 대포저수지의 경우 2025s 시기의 연최대 필요저수량은 5.1%의 증가율을, 경북 마북저수지의 경우 2025s 시기에서 52.2%의 증가율을, 경남 남성저수지의 경우 2025s 시기에서 43.0%의 증가율을 보여 가장 큰 변화를 나타내었다. 시기별 연최대 필요저수량의 변화가 가장 큰 저수지는 경북 마북저수지로서 2025s 시기에 1995s 대비 연최대 필요저수량이 약 52.2% 증가되는 것으로 모의되었다.

■ 기후변화에 따른 수자원의 효율적인 사용을 위해서는 여러방안을 검토하여야 한다. 본 연구에서는 농업용수 관리방안과 농촌용수관리 자동화 시스템구축, 농촌용수개발 사업 등 여러 방안을 제시하였으나 현실적으로 예산부족에 따른 사업이 추진되기가 어려운 실정이다. 논 용수의 손실량 저감 등 을 위한 방안으로서 시설의 개선을 통한 물리적 수단과 간리의 체계화를 통한 관리적 수단이 있을 수 있다. 물리적 수단으로는 용수로의 관수로화, 흙수로의 구조물화, 조절지를 활용한 연계운영체계 구축, 수로시설물의 현대화 등이 있으며, 용수추가개발 사업에 비해 효과 또한 우수하다. 따라서 관리적 수단가 작은 물리적 수단을 병행하여 수자원을 절약할 수 있는 계획

을 수립하여 현존하고 있는 기후변화에 가장 시급히 대응할 수 있는 방안이라 할 수 있겠다.

본 연구는 기후변화에 따른 변화하는 농업의 형태에 따른 농업용수 수요량 변화를 분석하고, 이에 따른 기후변화에 대비하는 농업용저수지 운영방안을 제시 하였다. 또한 기후변화를 고려하여 농업용수가 부족할 경우 수자원 확보 및 관리 방안에 대하여 제시하였으며, 현재까지의 결과를 이용하여 수장기계획 및 시설물관리 등 미래 농업용수 부족에 대한 대응 방안을 마련할 수 있을 것으로 사료된다.

현재 미래 기상자료에 대한 불확실성은 내포하고 있지만 기후변화에 대한 연구과제가 지속적으로 추진됨에 따라 향후 신뢰성 높은 기상자료와 대응 방안이 마련될 것으로 판단되어 지고 따라서 농촌분야에도 기후변화 대응할 수 있는 지속적인 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부, 2006, 수자원장기종합계획(2006-2020) 보고서
2. 기상청, 2009, 남해안지역의 기후변화에 대한 취약성 평가.
3. 김민지, 신진호, 이효신, 권원태, 2008, 동아시아 지역의 AOGCM 불확실성 평가 및 미래기후전망, 한국기상학회, Vol. 18 (4), pp. 507-524.
4. 김우선, 윤공현, 허준, 자야쿠마, 2008. CLUE-S 모델과 시계열 Landsat 자료를 이용한 토지피복 변화 예측, 한국지형공간정보학회, Vol. 16 (1), pp. 33-41.
5. 김의홍, 1994, 공간적 토지피복 예측을 위한 모형에 관한 연구, 한국GIS학회지, Vol. 2 (1), pp. 47-51.
6. 김창길, 이상민, 정학균, 장정경, 이충근, 2009, 기후변화에 따른 농업부문 영향분석과 대응전략, 한국농촌경제연구원, p. 256.
7. 김철희, 김은화, 송창근, 홍유덕, 유정아, 홍성철, 2011, 한반도 기후 변화 적응을 위한 취약성 지수 산정에 관한 고찰, 한국환경과학회지, 20 (6), pp. 789-798.
8. 김현영, 박승우, 1986. 유역특성에 따른 탱크모형 매개변수의 변화, 한국농공학회논문집, Vol. 28 (2), pp. 42-52.
9. 나영은, 이정택, 김명현, 방혜선, 한민수, 노기안, 김민경, 2007a. 농업부문의 기후변화 취약성 평가에 관한 국외 동향, 한국국제농업개발학회지, Vol. 19 (2), pp. 80-92.
10. 나영은, 이정택, 김명현, 방혜선, 한민수, 노기안, 김민경, 2007b. 농업부문의 기후변화 영향 및 적응방안에 관한 국외 동향, 한국국제농업개발학회지, Vol. 19 (2), pp. 93-100.
11. 농림부, 1997. 영농방식 변화에 따른 필요수량 변화 연구.
12. 농림부, 1998. 농업생산기반정비사업계획설계기준 관개편 (기준 및 편람).
13. 농림부, 2003. 한반도 기후변동 시나리오와 농림업분야 대응방향.
14. 농어촌연구원, 2010, 기후변화 시나리오에 따른 토지이용변화 및 논용수 변화 분석(2), 한국농어촌공사
15. 농촌진흥청 농업과학기술원 농업환경부, 2007. 기후변화에 따른 농업

생태계 영향, 취약성 평가 및 적응 방안 구축.
16. 명수정, 2011, 공간분석을 활용한 기후변화 취약성 평가, 한국수자원학회지, 44 (2), pp. 57-62.
17. 박순직, 이종훈, 2008. 식용작물학 Ⅰ, 한국방송통신대학교 출판부.
18. 박찬, 2009. 저탄소사회 구현을 위한 이산화탄소 저감 잠재량 분석-토지이용변화를 중심으로-, 석사학위 논문, 서울대학교.
19. 배덕효, 정일원, 이병주, 이문환, 2011, GCM과 수문모형의 불확실성을 고려한 기후변화에 따른 한반도 미래 수자원 전망, 한국수자원학회논문집, Vol. 44 (5), pp. 389-406.
20. 서영호, 이안수, 조병욱, 강안석, 정병찬, 정영상, 2010. 기후변화에 대한 강원지역 벼 재배의 적응, 한국농림기상학회지, Vol. 12 (2), pp. 143-151
21. 심교문, 김건엽, 노기안, 정현철, 이덕배, 2008. 기후변화에 따른 농업기후지수의 평가, 한국농림기상학회지, Vol. 10 (4), pp. 113-120.
22. 오윤경, 2011, 기후변화에 따른 토지이용변화를 고려한 농경지 및 산림에서의 온실가스 배출량 평가, 서울대학교 공학박사 학위논문
23. 유가영, 김인애, 2008, 기후변화 취약성 평가지표의 개발 및 도입방안, 한국환경정책・평가연구원, p. 85.
24. 유승환, 2009. 기후변화에 따른 미래 농업가뭄 특성 분석, 박사학위논문, 서울대학교.
25. 유승환, 최진용, 장민원. 2006. 논벼에 대한 Penman-Monteith와 FAO Modified Penman 공식의 작물 계수 산정, 한국농공학회논문집, Vol. 48 (1), pp. 13-23.
26. 유승환, 최진용, 장민원. 2007. 빈도 분석법을 이용한 논벼의 한발 기준 10년 빈도작물증발산량 산정 , 한국농공학회논문집, Vol. 49 (3), pp. 11-20.
27. 윤동균, 정상옥, 김성준, 2011. 기후변화가 논 필요수량에 미치는 영향, 한국농공학회논문집, Vol.53 (4), pp39～47.
28. 윤성탁, 2005. 지구온난화가 농업생산에 미치는 영향과 대응책, 한국국제농업개발학회지, Vol. 17 (3), pp. 199-207.
29. 윤성호, 임정남, 이정택, 심교문, 황규홍, 2001. 기후변화와 농업생산의 전망과 대책, 한국농림기상학회지, Vol. 3 (4), pp. 220-237.

30. 윤성탁, 2005. 지구온난화가 농업생산에 미치는 영향과 대응책, 한국국제농업개발학회지, Vol. 17 (3), pp. 199-207.
31. 이동률, 문장원, 이대희, 안재현, 2006, 저수지 가뭄감시를 위한 물공급능력지수의 개발, 한국수자원학회 논문집, 39 (3), pp. 199-214.
32. 이승호, 허인혜, 이경미, 김선영, 이윤선, 권원태, 2008. 기후변화가 농업생태에 미치는 영향 -나주지역을 사례로-, 대한지리학회지, Vol. 43 (1), pp. 20-35.
33. 이용준, 김성준, 2007. 미래 토지이용변화 예측을 위한 개선된 CA-Markov 기법의 제안 및 적용, 대한토목학회, Vol. 27 (6), pp. 809-81
34. 임창호, 최대식, 2002. 셀룰라오토마타 모형을 이용한 미시적 토지이용변화 예측, 국토계획, Vol. 37 (4), pp. 229-239.
35. 정상옥, 2009. 기후변화가 낙동강 권역의 논 관개용수 수요량에 미치는 영향, 한국농공학회논문집, Vol. 51 (2), pp. 35-41.
36. 정유란, 조경숙, 이변우, 2006. 지구온난화에 따른 우리나라 벼농사지대의 생산성 재평가, 한국농림기상학회지, Vol. 8 (4), pp. 229-241.
37. 정일원, 2008, 혼합상세화 기법을 적용한 국내 수자원의 기후변화 영향평가, 세종대학교 박사학위논문.
38. 정하우, 김선주. 김진수, 노재경, 박기욱, 손재권, 윤광식, 이근후, 이남호, 정상옥, 최중대, 최진용, 2009. 관개배수공학, 동명사.
39. 한국환경정책평가연구원, 2004. 기후변화영향평가모형 개발, RE-10.
40. 홍은미, 최진용, 이상현, 유승환, 강문성, 2009. LARS-WG를 이용한 기후변화에 따른 논벼 증발산량 산정, 한국농공학회논문집, Vol. 51 (3), pp. 25-35.
41. 환경부 국립 환경과학원, 2010, 한국 기후변화 평가보고서 2010.
42. Allen, R. G., L. S. Periera, D. Raes, and M. Smith., 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Requirements, Irrigation and Drainage Paper No. 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
43. Biesbroek, G. R., R. J. Swart, T. R. Carter, C. Cowan, T. Henrichs, H. Mela, M. D. Morecroft, and D. Rey, 2010, Europe adapts to climate change : Comparing National Adaptation Strategies, Global

Environmental Chage, 20, pp. 440-450.
44. Brooks, N., W. N. Adger, and P. M. Kelly, 2005, The diterminants of vulnerability and adaptive capacity at the national level and the implications for adaptation, Global Environmental Change, 15, pp. 151-163.
45. Brown, D. G., Pijanowski, B. C., and Duh, J. D., 2000. Modeling the relationships between land use land cover on private lands in the Upper Midwest, USA. J Environmental Management, Vol. 59 (4), pp. 247-263.
46. Buan, R. D., A. R. Maglinao, P. P. Evangelista and B. G. Pajuelas, 1996. Vulnerability of rice and corn to climate change in the Philippines, Water, Air, & Soil Pollution, Vol. 92, pp. 41-51.
47. Deal, B. and Schunk, D., 2004. Spatial dynamic modeling and Urban Land Use Transformation: a simulation approach to assessing the costs of urban sprawl, Ecological Economics, Vol. 51 (1-2), pp. 79-95.
48. Fischer, G., N. T. Francesco, V. Harrij and A. W. David, 2007. Climate change impacts on irrigation water requirements: Effects of mitigation, 1990-2080, Technological Forecasting & Social Change, Vol. 74, pp. 1083-1107.
49. IPCC, 1995, Climate Change 1995 : The science of climate change, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
50. IPCC, 2000, Land Use, Land-Use Change and Forestry, A Special Report of the IPCC. Cambridge University Press, 377.
51. IPCC, 2001, Climate Change 2001 : Impacts, adaptation, and vulnerability, Third Assessment Report, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
52. IPCC, 2007, Climate Change 2007 : Impacts, adaptation, and vulnerability, Fourth Assessment Report, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
53. Moss, R. H., A. L. Brenkert, and E. L. Malone, 2001, Vulnerability to climate change : A Quantitative Approach, Prepared for the U.S.

Department of Energy.
54. Rosenberg, N. J., R. A. Brown, R. C. Izaurralde and A. M. Thomson, 2003a. Integrated assessment of Hadley centre (HadCM2) climate change projections on agricultural productivity and irrigation water supply in the conterminous United States. I. Climate change scenarios and impacts on irrigation water supply simulated with the humus model, Agricultural and Forest Meteorology Vol. 117, pp. 73-96.
55. Rounsevell, M. D. A., Ewert, F., Reginster, I., Leemans, R. and Carter, T. R., 2005. Future scenarios of European agricultural land use. Ⅱ. Projecting changes in cropland and grassland, Agriculture Ecosystem and Environment, Vol. 107 (1-2), pp. 117-135.
56. Silva, C. S., E. K. Weatherhead, J. W. Knox and J. A. Rodrguez-Diaz, 2007. Predicting the impacts of climate change - A case study of paddy irrigation water requirements in Sri Lanka, Agricultural water management Vol. 93, pp. 19-29.
57. Turner Ⅱ, B. L., Lambin, E. F. and Reenberg, A., 2007. Land change science special feature: the emergence of land change science for global environmental change and sustainbility, Proceedings of th National Academy of Sciences, Vol. 104 (52), pp. 20666-20671.
58. Veldkamp A, and Fresco L. O., 1996. CLUE: a conceptual model to study the Conversion of Land Use and its Effects, Ecological Modelling, Vol. 85 (2-3), pp. 253-270.
59. Veldkamp A, Verburg P. H., 2004. Modelling land use change and environmental impact, Journal of Environmental Management, Vol. 72 (1-2), pp. 1-3.
60. Verburg P. H., Veldkamp A, de Koning G. H. J., Kok K, Bouma J, 1999. A spatial explicit allocation procedure for modelling the pattern of land use change based upon actual land use. Ecological Modelling, Vol. 116, 45-61 pp.
61. Wehbe, M. B., R. A. Seiler, M. R. Vinocur, H. Eakin, C. Santos,

and H. M. Civitaresi, 2005, Social methods for assessing agricultural producer's vulnerability to climate variability and change based on the notion of sustainability, Assessments of Impacts and Adaptations of Climate Change Working Papers.
62. Verburg, P. H., Soepboer, W., Veldkamp, A., Limpiada, R., Espaldon, V. and Mastura, S. S. A., 2002. Modeling the spatial dynamics of regional land use: The CLUE-S model, Environmental Management, Vol. 30 (3), pp. 391-405.
63. Yoo, S. H., Jin-Yong Choi, Min-Won Jang, 2008. Estimation of design water requirement using FAO Penman - Monteith and optimal probability distribution function in South Korea, AGRICULTURAL WATER MANAGEMENT Vol. 95 pp. 845-853.

주 의

1. 이 보고서는 농림수산식품부로부터 연구비를 지원받아 농어촌연구원에서 수행한 연구보고서입니다.
2. 이 보고서의 내용은 연구원의 공식견해와 반드시 일치하는 것은 아닙니다.

■ 발 행 처

저수지 취수시설 공기통 설계기준 정립 연구(최종)	
발 행 일	2011. 12
발 행 인	정 해 창
발 행 처	한국농어촌공사 농어촌연구원
주 소	경기도 안산시 상록구 사동 해안로 391번지
	전 화 031 - 400 - 1700
	FAX 031 - 409 - 6055

■ 이 책의 내용을 무단 전재하거나 복사하면 법에 저촉됩니다. 단, 이 책의 출처를 명시하면 인용이 가능합니다.