최 종
연구보고서

전국 농업기상 감시 및 실시간 작황진단체계 구축

Development of an Agrometeorological Crop Forecasting System

주관연구기관

경 희 대 학 교

협동연구기관

연 세 대 학 교

농 림 부

제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 "전국 농업기상 감시 및 실시간 작황진단체계 구축" 과제의 최종보고서로 제출합니다.

1999. 12. 15.

주관연구기관명 : 경희대학교
총괄연구책임자 : 윤진일
연 구 원 : 김기철(경희대) 김영환(국민대) 박선경(서울대)
서애숙(기상청) 신만용(국민대) 신용광(농업과학기술원)
신진철(작물시험장) 심교문(농업과학기술원)
안재훈(고령지농업시험장) 오동렬(숭실대) 오정수(국민대)
윤성호(농업과학기술원) 이동석(경희대)
이양수(농업과학기술원) 이정택(농업과학기술원)
이태희(국민대) 정영선(기상청) 정유란(경희대)
정현향(경희대) 조경숙(경희대) 최재연(경희대)
황규홍(경희대) 황범석(경희대)

협동연구기관명 : 연세대학교
협동연구책임자 : 김 준
연 구 원 : 권효정(연세대) 이희춘(연세대) 채남이(연세대)
최태진(연세대) 홍진규(연세대)

요 약 문

I. 제 목

전국 농업기상 감시 및 실시간 작황진단체계 구축

II. 연구개발의 목적 및 중요성

본 연구의 목적은 남한 전역의 농업생태계 대기환경 실황분포에 근거한 주요 식량작물의 실시간 생육상황 추정기술의 개발이며, 이를 토대로 전국규모의 농업기상학적 작황진단체계(*Agrometeorological Crop Forecasting System*)를 구축하는 것이 연구의 최종목표이다.

일 최고/최저기온, 강수량, 일사량 등 작물생육과 밀접한 관련이 있는 기상요소에 대해 표준기상관측소 자료의 공간내삽에 의해 전국적인 분포실황을 파악할 수 있다면 농작물 생육 예측 및 병해충 예찰모형의 실시간 전국적용이 가능해진다. 나아가 이산화탄소, 수증기, 메탄 등 농경지 온실기체 플럭스의 미기상학적 측정기술이 확립되면 광합성과 증발산에 관한 공간정보를 획득할 수 있다. 이러한 미기상으로부터 종관기상에 이르는 농업기상정보에 바탕을 둔 전국규모의 실시간 작황진단시스템은 농정의사지원 등 현실적인 수단 뿐 아니라 기후환경변화에 수반될 농생태계의 다양한 동태 파악에 중요한 도구로 활용될 수 있다.

III. 연구개발 내용 및 범위

제주도를 제외한 남한 전역을 약 1,500개 읍면행정구역으로 분류하고, 이

들 각각을 기후 및 토양이 유사한 작물재배의 최소 공간단위로 가정하였다. 각 단위에 대하여 첫째, 토양특성, 재배관리정보, 식부면적 등 불변속성과 실시간(real-time) 국지기상, 증발산량 등 가변속성을 생산하여 작물모형 구동에 필요한 입력정보화 한다. 둘째, 이들 공간에서 재배하는 벼, 보리, 콩, 감자 등 주요 식량작물의 생장모형을 우리 품종에 맞게 생육관련 모수를 최적화 한다. 셋째, 식물생육의 기본과정인 광합성과 증발산을 이들 공간단위로 추정할 수 있는 기술을 개발하고, 넷째, 상기 연구내용을 적절히 결합함으로써 전국토의 기상실황 감시 및 이를 토대로 한 식량작물 작황진단체계를 확립하는 것이 연구의 내용이다.

연구범위로는 주요 기상요소 분포실황 추정 및 검증에 필요한 데이터베이스 구축 및 이용 실험, 온실기체 플럭스 측정시스템의 제작 및 농경지 적용 실험, 작물모형 검증을 위한 포장 실험, 공간정보 데이터베이스를 활용한 전국규모 작황진단시스템의 실용화 실험 등이다.

IV. 연구개발결과 및 활용에 대한 건의

1. 연구개발 결과

가. 읍면 행정구역을 토대로 한 작황진단의 공간적 기본단위를 설정하고 이들의 지리적 위치, 형태, 재배면적, 토양특성 등을 데이터베이스화 하였다.

나. 이 공간단위의 가변적 속성인 기상실황정보(일별 최고/최저기온, 강수량 및 일사량)를 지형기후학적 공간내삽에 의해 추정하였다.

다. 주요 식량작물(벼, 감자, 보리, 콩)의 생장모형을 국내기상생태형에 맞게

품종별 모수를 최적화 하였다.

라. 에디 공분산 방법을 이용한 미기상학적 플럭스 관측 시스템을 개발하여 국내 및 국제 공동 야외 실험에 직접 참여하여 개발된 시스템을 활용, 평가하였다.

마. 에디 공분산 기술과 첨단 레이저 분광 기술을 접목하여 메탄, 이산화탄소 및 산화 질소 등의 온실 기체 플럭스를 감시할 수 있는 시스템을 개발하여, 다양한 생육기간 동안 벼 군락에서의 메탄, 증발산 및 현열 플럭스를 성공적으로 관측하였다.

바. 야외 관측 자료와 Penman-Monteith 복합 방정식을 근간으로 해서, 자동 기상 관측소의 기본적인 기상 자료를 사용하여 실제 증발산을 산출해 낼 수 있는 경험식들을 도출하고 검증하였다.

사. 상기 개발성과를 결합하여 전 국토의 기상실황 감시 및 식량작물 작황진단시스템을 구축하였다.

2. 결과 활용에 대한 건의

주요 기상요소에 대하여 읍면단위로 세분화된 정보를 제공할 수 있는 기법은 기상청 단기 예보자료에 적용하여 (사)한국농림수산정보센터에서 이미 활용하고 있다("AFFIS1500 농업기상"). 기상정보를 활용한 식량작물 작황진단기법의 실용화를 위해 농업과학기술원 농업기상연구실에 시작품을 설치하여 전담인력에 의한 현업화 작업을 마무리하였다.

농생태계의 지표 에너지 플럭스(순복사, 토양열 플럭스, 현열 및 잠열 플

럭스)와 온실 기체 플럭스(메탄, 이산화탄소, 산화 질소), 식물 생리(광합성, 호흡, 증산 및 기공 전도도 등), 그리고 일반 기상 변수(온도, 습도, 풍속 및 풍향, 대기 안정도, 지표면 거칠기 등)의 정보를 정확히, 그리고 연속적으로 제공할 수 있는 첨단시스템을 개발하였다. 여기서 생산되는 정보를 사용하면 실제 증발산량의 전국분포 등, 생물-대기간의 상호작용을 분석할 수 있는 생권모형의 개발과 활용에 효과적으로 쓰일 것이다.

본 연구 종료 후에도 기술을 이전 받은 농업과학기술원의 지속적인 업무 개선을 통해 대기환경 감시 및 작황진단정보가 상시 생산될 수 있을 것이며, 기상청의 고해상도 장기예보를 이용한 "작황예보"도 가능해질 것이다. 이를 위해서는 관계기관간의 협조체제가 필수적이며, 현재 최소규모의 단위 부서로 남아있는 농업과학기술원 농업기상연구실을 그 업무에 맞게 확대개편 해야 할 것이다. 특히 급속한 환경변화와 이것이 농업 생태계에 미칠 지대한 영향에 대한 우리의 우려를 명쾌히 해결하기 위해서는 개발된 시스템의 장기 운영을 담당할 전담 조직의 신설이 필요하다.

SUMMARY

1. **Title**:

Development of an ***Agrometeorological Crop Forecasting System*** Based on the Atmospheric Environment Monitoring

2. **Purpose and Importance**:

As the realm of human activities expands and their impacts on earth environment increase, it becomes more urgent to further our understanding the changing biosphere-atmosphere interactions. In particular, it is very important to monitor and be able to predict the response of agricultural ecosystems to environmental changes because of their direct linkage with food production.

The purpose of this research is to understand and monitor the atmospheric environment of agricultural ecosystem such as rice canopy. Establishment of crop evaluation and yield forecasting system based on this understanding is the ultimate goal at the completion of this project.

3. **Contents and the scope of the study**:

Southern part of the Korean Peninsula was divided into about 1,500 cultivation zone units(CZU) with the similar soil and climatic characteristics. Transient (weather) as well as stationary (soils, management, cultivars,..) attributes for each CZU were prepared for crop growth and development simulation. Crop models were tuned by parameterization with domestic cultivars of major food crops in Korea.

Near-real time atmospheric condition and its implication to crop status were monitored and interpreted by combining these technical components.

Its scope covers :

(1) Database preparation and utilization experiments for spatially interpolating the point observation data of major weather elements
(2) Field experiments for validating crop model performance
(3) Design and testing of the greenhouse gas flux measurement system applicable to rice paddy
(4) Preparation of attribute data for each CZU necessary to run the crop models
(5) Implementation of an operational crop forecasting system

4. **Results and suggestions**:

To accomplish our goal, we have (1) digitized 1,455 CZU's in the nation and established corresponding map database, (2) developed a spatial interpolation scheme to obtain near-real time meteorological fields from the standard weather station observations, (3) optimized model parameters for simulating the growth of major cultivars of rice, winter barley, soybean, and potato crops, (4) developed a micrometeorological flux measurement system using the eddy covariance technique, (5) evaluated the developed system by participating in domestic and international collaborative field experiments, (6) combined this technology with the state of the art laser spectroscopy to monitor fluxes of greenhouse gases such as methane, carbon dioxide and nitrous oxide, (7) successfully measured the fluxes of methane, water vapor and sensible heat over various rice canopies at different stages of plant growth, (8) employed the chamber technique combined with infrared gas analyzer to measure leaf photosynthesis and stomatal conductance by controlling leaf environment, (9) developed and tested empirical formulas from the field measurements to evaluate actual evapotranspiration using automated weather station data based on the Penman-Monteith combination equation, and (10) implemented an operational system for high resolution, nation-wide crop evaluation and yield forecasting.

Some products from the spatial interpolation scheme have been provided to the general public since May 1999 via AFFIS (Agricultural, Forestry and Fisheries Information Service) network. Whole system for crop evaluation and the related techniques were implemented at and transferred to Agricultural Meteorology Laboratory of National Institute of Agricultural Science and Technology. Staffs of the laboratory will continue the crop evaluation jobs as their routine task even after termination of this project.

Micrometeorological flux measurement (i.e. eddy covariance technique) has been strongly recommended by the scientific community to deal with the above problems. We have successfully developed a state of the art monitoring system for atmospheric environment of agricultural ecosystem. The system can provide information on surface energy fluxes (net radiation, soil heat flux, sensible and latent heat flux), fluxes of greenhouse gases (such as methane, carbon dioxide, nitrous oxide), plant physiology (photosynthesis, respiration transpiration, and stomatal conductance), and general meteorological variables (temperature, humidity, wind speed and direction, atmospheric stability, surface roughness, etc). Our preliminary attempts in predicting actual evapotranspiration using the information derived from this system suggest that it effectively provide information and tools for developing biospheric models to investigate changing biosphere - atmosphere interactions in the future. Establishment of long-term flux monitoring programs and persistent support by the government is essential to deal with our changing environment and our concerns on its impact on agricultural ecosystems.

CONTENTS

Chapter 3 CROP EVALUATION AND YIELD FORECAST

Chapter 4 Monitoring of Atmospheric Environment

가. Eddy covariance technique

나. Measurement criteria

1) Instrument's frequency range

2) Instrument's response time

3) Sampling rate

4) Averaging time

5) Measurement height

6) Separation distance between sensors

7) Sensor alignment

다. Three-dimensional ultrasonic anemometer

라. Dta corrections

1) Frequency response correction

2) Density variation correction

3) Coordinate rotation correction

4) Temperature correction of sonic anemometer

5) Trnasducer shadow effect correction of sonic anemometer

6) Cross sensitivity correction for absorption lines of scalar sensor

2. Field Experiments

가. International field experiment

나. National field experiment

1) Micrometeorological technique

2) Chamber technique

Section 3 Results and Discussion

1. Quality control of flux data and measurement optimization

가. Quality control of flux data

1) Energy budget closure

2) Spectrum analysis

나. Measurement optimization

2. Atmospheric environment of rice canopy

가. International collaborative experiment in Okayama, Japan

나. Field observation in Byung-jum, Kyunggi-Do

다. Field observation in Hari, Kangwha-Do

3. Coupling experiment of closed-path laser spectrometer

가. Coupling of laser spectrometer and eddy covariance system

나. Field experiments

다. Field coupling of laser spectrometer and eddy covariance system

라. Continuous operation of the measurement system

마. Modification and validation of the measurement theory

4. Measurement and modeling of photosynthesis and stomatal conductance using chamber technique

5. Evaluation of evapotranspiration using P-M combination equation

가. P-M combination equation

나. Empirical equations for different leaf area index (LAI)

다. Computation of evapotranspiration from meteorological data

라. Comparison between measured and modeled values

Chapter 5 TECHNOLOGY TRANSFER

Section 1 Introduction

목　　차

제 1 장 서 론

제 1 절 연구개발 배경

일 최고/최저기온, 강수량, 일사량 등 작물생육과 밀접한 관련이 있는 기상요소에 대해 표준기상관측소 자료의 공간내삽에 의해 전국적인 분포실황을 파악할 수 있다면 다양한 목적으로 활용될 수 있다. 우선 주요 농작물 생육예측 및 병해충 예찰모형의 실시간 구동이 가능해져 생산측면의 농업에 있어 작황예보나 병해충 예찰 등, 사후 분석이 아닌 진정한 의미의 농업기상예측(agrometeorological forecasting)을 기대할 수 있다.

환경측면의 농업에 있어서도 적절한 모형이 개발된다면 농경지의 온실기체 발생 혹은 흡수에 관한 공간정보를 획득할 수 있을 것이다. 미기상학적 플럭스 측정방법은 농업지대에서 방출 또는 흡수되는 온실기체의 플럭스를 농업생태계에 전혀 손상을 입히지 않고도 연속적으로 장기간동안 측정할 수 있으며 한 측정점만의 농도를 관측하게 되는 종전의 방법과는 달리 수백 m^2 - 수십 km^2에 달하는 넓은 지역을 대표하는 값을 산출해 낼 수 있다.

농업상의 재해 가운데 기상 요인에 의한 피해액이 해마다 증가하고 있으며 식물병해충 발생, 날씨에 의한 농작업 지연, 기상정보의 부재에 따른 적지선정이나 시설농업 상의 에너지 수급 잘못 등은 기상과 밀접한 관련이 있으므로 올바른 농업기상정보의 적시 제공에 의해 이 같은 피해를 크게 줄일 수 있다.

실시간 농업 기상정보의 통합 생산 및 분배 시스템은 기존의 개별적 기상서비스에 비해 운영효율이 높고 이용 편의성이 증대될 것이다. 또한 농업상의 기상재해를 근본적으로 회피하고 작목이나 품종의 선택, 재배기술의 보급을 효율적으로 추진하기 위해서는 전국의 농업기후자원이 정밀하게 파악되어야 한다.

정확한 기상정보에 바탕을 둔 전국규모의 실시간 작황진단시스템은 농산물 수급, 해외 농산물 무역거래, 농업경제 시책 운용 등 국가경제 측면에서 매우 효율적인 의사결정 수단이 될 것이다. 더구나, 농업지대의 온실기체 배출량을 감소시키기 위한 국제협력이 현저히 증가되고 있는 실정에서 온실기체의 농도증가에 따른 농업지대의 환경변화에 수반될 다양한 영향평가를 위해서도 이와 같은 감시 및 평가체제의 구축이 시급하다.

농업이 단순한 1차산업 영역을 벗어나 생산-가공-유통의 종합적 거대산업화 되어 가는 과정에서 정보 투입에 의한 부가가치의 창출은 가장 확실한 투자 기법이다. 정보화 사회의 주요 구성 부분으로서 농업의 정보화는 필수적이며 특히 시장 개방에 대응하는 적극 의지의 표출이라 할 수 있다.

많은 정보들 가운데 농업기상정보는 사회적 수요나 공급 가능성 측면에서 가장 현실에 접근되어 있으므로 집중적 개발이 필요하다. 궁극적으로 국가시책 측면에서 전국 농업기상 실황감시 및 실시간 작황진단체계는 미래 정보화 사회에서 선진농업국으로 발돋움하기 위한 초석이 될 수 있다.

이를 위해 필요한 핵심기술들이 개발되어 이미 다방면에서 활용되고 있는데, 우선 국가지리정보시스템(NGIS) 구축사업의 일환으로 국립지리원에서 73개 도시지역의 경우 1: 1,000, 평야지대 7만 평방키로에 대하여는 1: 5,000 정밀 지도를 수치화 하였으며, 산악지역 3만 평방키로 수치지도 역시 1: 25,000 해상도를 갖고있다. 이들 수치지도는 지리좌표를 공통분모로 삼아 다양한 속성정보를 주제별 layer에 추가시킬 수 있는데, 예를 들어 한 지역의 작황진단에 필요한 각종 입력정보 (토양물리화학성, 국지기후특성, 재배작물, 경종기술 등)를 수치지도의 속성정보화 시킬 수 있다. 수치지도는 지금까지 농업/기상분야에서 기본도로 사용해 온 '250m 격자형 지형도'를 대치할 것이며, 그 활용성을 대폭 증가시킬 것이다. 국립지리원의 NGIS 구축사업과 병행하여 전국 토양의 필지별 GIS데이타베이스화 작업이 농업과학기술원의 장기사업으

로 추진되고 있는데 GIS의 부가가치 창조, 즉 layer별 속성정보 추가 측면에서 매우 시의적절한 사업으로 판단된다.

기상정보 수집분야의 경우 국내에도 정규기상관측망, 무인기상관측망, 기상위성수신국, 기상레이다 관측망 등 생자료의 수집체계는 외국에 비해 뒤떨어지지 않지만 이들을 통합하여 농업기상정보로 변환 가공하는 기반 기술이 미흡하다. 이는 복잡한 지형 특성과 농업 환경 여건의 다양성에서 오는 외적인 어려움도 있지만 근본적으로 기상 분야와 농업 분야 사이의 인터페이스를 담당할 농업기상 전담 연구 및 지도 조직의 부재에 기인한다. 실제로 수도육종 및 재배기술은 세계 일류수준이지만 기상 변화에 따른 국내 수도 생장 및 수량 예측 모형은 외국으로부터 수입해 쓰고있으며, 그나마 전국적인 기상실황자료와의 연계운영은 불가능한 실정이다.

우리와 여건이 비슷한 일본의 경우 자동기상관측망(AMeDAS)의 실시간 기상자료를 그물망기후도 작성기법에 의해 공간내삽하여 매 1 km 간격의 기온, 일사, 강수량값을 일별로 산출하고 이를 벼 생장모형(SIMRIW)에 입력시켜 출수기, 임실율, 최종수량 등, 실질적인 작황예보를 하고 있다(Yajima, 1996).

농경지 온실기체 발생량의 추정은 그 자체로서 대기환경 감시에 커다란 기여를 하지만 작황과 밀접한 관계가 있는 경지 광합성 및 증발산량을 알아내는 기능도 갖고 있다. 그러나 국제적으로 인정받는 미기상학적 방법에 의한 측정사례는 아직 없으며, 농업과학기술원에서 작물군락내 열수지 및 에너지 이용률 연구를 위해 현열과 잠열플럭스를 측정할 수 있는 미기상학적 기기들을 최근에 수입하여 시험중에 있을 뿐이다.

현재까지 개발된 농업 및 기상분야의 단편적인 연구성과들을 수집, 정리, 분석하여 통합운영시 필요한 점을 상호 보완시키면 국내 농작물 작황분석 및 농업기상정보 생산체제의 골격으로 사용할 수 있다. 덧붙여 첨단 전산조직

및 GIS등 주변기술의 결합을 통해 실용적인 현업시스템으로 발전될 수 있다.

제 2 절 연구개발의 목적과 범위

본 연구의 목적은 남한 전역의 농업생태계 대기환경 실황분포에 근거한 주요 식량작물의 실시간 생육상황 추정기술의 개발이며, 이를 토대로 전국규모의 농업기상학적 작황진단체계(Agrometeorological Crop Forecasting System)를 구축하는 것이 연구의 최종목표이다.

구 분	연구개발목표	연구개발내용 및 범위
1차 연도 (1996)	시스템 설계 및 기반 조성	- 기상실황감시/자료수집체계 확립 - 플럭스 측정시스템의 설계, component 기기의 선정, 구입 및 적용 - 작물생장모형 수집/체제분석 - 전산 정보시스템 설계 (기초연구, 시설기반 구축)
2차 연도 (1997)	핵심 기초기술 확보	- 주요기상요소 전국분포 실황 추정기법 연구 - 작물별 생장 예측모형 선발 개선 - 플럭스측정시스템의 설치대 및 제어장치 개발 - GIS용 단위재배구역 동정 토양, 품종, 관리자료 부여
3차 연도 (1998)	핵심 응용기술 개발	- 특정 농업지대 대상 GIS-작물모형-기상 연계 - 작물별 생장예측모형 선발 개선(계속) - 국지기상 추정기법 개선 (계속) - 3차플럭스측정시스템 제작 - 접합된 플럭스시스템의 적용 및 개선 (응용연구, 시작품 제작)
4차 연도 (1999)	기술요소 통합 및 실용화	- 작황진단체계 전국 농업지대 적용 - 농업기상 감시체계의 전국 농업지대 적용 - 온실기체플럭스시스템의 포장평가 및 운영체제 구축 - 통합시스템 구축 및 시험운영, 분야별 운영기술 개선, 운영체제 최적화 (응용연구, 시작품 제작 및 실용화) - 기술 이전

제 2 장 기상실황 추정

제 1 절 서 언

오늘날의 세분화된 산업사회에서는 각 분야의 전문 기상정보의 활용이 필수적이다. 기상자료의 관측밀도가 낮은 산림이나 농촌지역의 농림업 활동에는 미관측 지점에 대하여 필요한 기상정보를 얼마나 정확하게 추정하여 사용할 수 있는가 하는 점이 중요하다. 특히 농업분야에서는 기상자료가 작물의 생육상황과 병충해 발생 등, 농업생태계 반응을 예측할 수 있는 중요한 정보로 활용된다. 이는 대기환경과 농업생태계의 상호작용에 대한 정확한 정보가 개별 농가의 영농관리대책으로부터 국가의 농정시책에 이르기까지 농업상의 의사결정에 매우 중요한 수단이기 때문이다. 결국 작물 재배지역에 대한 국지기상을 정확하게 추정하여 이를 작물 생장모형에 적용한다면 농업기상 감시 및 농작물 작황정보 생산의 토대를 마련할 수 있을 것이다. 하지만 작물 생장모형은 부단히 변화하는 대기환경에 대한 공간정보를 요구하기 때문에, 작물 생육지역을 대상으로 최소한 몇 가지 일별 기상요소에 대한 실시간 공간분포 추정이 요구된다.

지금까지의 미관측 지점에 대한 기상정보는 주로 조사 지점 근처의 기상관측소 자료를 이용하는 것이었고, 최근에 자동기상관측장비 (Automated Weather Station : AWS) 자료를 활용하려는 움직임이 있으나, 미관측 지점을 포함하는 작물 재배구역의 국지기후를 정확히 예측하기에는 역시 관측밀도가 낮은 문제가 있는 것이 사실이다. 그물망 기후 추정법(Nakai, 1990)은 미관측 지점에 대한 국지기상 실황을 일정한 격자단위로 추정할 수 있는 통계적 방법으로 우리 나라에서도 최근에 많이 활용되고 있다(윤 등, 1989; 과학기술처, 1992; 신과 윤, 1992; 신과 천, 1996; 윤 등, 1997). 이 기법은 미관측 격자점을 포함하는 국지 기상정보를 추정하기 위하여 전국 70여 개의 정

규기상관측소가 설치된 격자의 지형인자와 실측 기후치로부터 지형-기후 관계식을 도출·적용함으로써 월별 기후치별 평년값을 제공하는 것이다. 이러한 정보를 작물모형에 적용하기 위해서는 각 격자점별로 얻어진 월별 기후치 12개로부터 365개의 일별 기후치로 변환한 후, 정규기상관측소에서 수집된 일 기상자료와 미관측 격자점과 정규기상관측소간의 거리가중치를 고려한 공간통계기법에 의하여 공간변이가 추정되어야 한다. 또한 그 실용성이 검증되어야 하는데 공간적 기상분포의 패턴을 비교적 정확하게 표현하는 기상위성자료나 현재 전국적으로 약 380개소의 AWS에서 수집되고 있는 자료가 기상실황치의 검증에 적합한 독립자료로 활용될 수 있다.

본 연구는 이러한 취지에서 미관측 지점을 포함하는 남한 전역(제주도 및 이부 도서 제외)을 대상으로 작물모형의 구동에 필요한 최소 기상요소들(Minimum Data Set; 일 최고 및 일 최저기온, 강수량, 일사량)의 공간적인 분포를 추정하고 그 추정 精度를 검증하고자 하였다.

제 2 절 자료 및 방법

1. 일 최고/최저기온의 월별 공간분포의 산출

도서 지방을 제외한 남한 내 정규기상관측소 중 1973년부터 1995년까지 23년간의 자료가 모두 관측되어 있는 58개 기상관측소로부터 월별 일 최고/최저기온 평균값을 한국기후표를 이용하여 월별·관측소별로 정리하였다.

이들을 토대로 남한 전역에 적용할 수 있는 월별 일 최고/최저기온의 지형기후학적 평년값 계산식을 도출하기 위하여, 기온값이 수집된 정규 기상관측소가 위치한 지점에 대하여 국지기온값에 영향을 미치는 총 17 종류 162개 지형변수를 정량화하였다(과학기술처, 1992; 신과 윤, 1992; 수자원공사, 1993). 지형인자를 정량화하기 위하여 필요한 해발고도 자료는 USGS(United

States Geological Service)에서 제공한 GTOPO30 DEM (Digital Elevation Model)으로부터 북위 34 39˚까지와 동경 126 130˚까지의 범위에서 매 30 arc second(약 900m) 간격으로 고도값을 발췌하였다. 이 범위에 포함되는 남북방향 600개, 동서방향 480개의 총 288,000개 격자별 해발고도 자료를 이용하여 58개 정규기상관측소를 포함하는 격자점을 중심으로 사방 2´30˝(약 4.5km) 범위까지의 격자점에 대한 지형변수를 계산하였다.

정규기상관측소를 포함하는 격자(grid cell)의 월별 기온평년값과 해당 격자점의 정량화된 지형자료를 이용하여 월별 지형-기온 최적 중회귀식을 선택하였다. 월별 평년기온값 추정회귀식은 최소자승법을 이용한 다중선형회귀분석기법에 의하여 작성하였으며, 월별·기온별 최적 독립변수의 조합을 선택하기 위하여 전향선택법을 채택하였다. 이와 같이 얻어진 24개의 월별 최고/최저기온 추정식을 기상관측소가 없는 미관측 격자에 적용시키기 위하여 전 국토를 대상으로 30″격자단위의 지형인자를 정량화했다. 일부 지형인자는 사방 5개 격자(2′30″)의 지형을 고려하므로 최종적으로 정량화된 격자점은 남북방향 590개, 동서방향 470개로 총 277,300개이며, 각 격자점에 대하여 모두 162개씩의 지형인자를 수치화하여 파일로 저장하였다. 이상과 같이 수치화된 지형인자를 위에서 얻은 평년 최고/최저기온값 산출 회귀식 모형에 대입함으로써 남한 전역 격자점별 일 최고기온과 일 최저기온의 월별 공간분포를 산출하였다.

2. 격자점별 일 최고/최저기온 추정

위에서 얻은 각 격자점별 12개 달의 기온자료를 통합하여 조화해석법(淸野, 1993)에 의하여 일별 최고 및 최저기온 평년값을 추정하였다. 이 방법은 주기가 1/6 1년의 6개 사인곡선의 합으로 기후값을 표현할 수 있는 것으로 판정하여, 월별 기온값 12개로부터 365개의 일별 기온으로 변환하는 것이다.

3 7월 :

$$T_j = B_0 + \sum_{k=1}^{6}[B_k \cos 2\pi k(j+16)/365] + \sum_{k=1}^{6}[C_k \sin 2\pi k(j+16)/365]$$

8 2월 :

$$T_j = B_0 + \sum_{k=1}^{6}[B_k \cos 2\pi k(j+15)/365] + \sum_{k=1}^{6}[C_k \sin 2\pi k(j+15)/365]$$

여기서,

$B_0 = (\frac{1}{12}) \sum_{i=1}^{12}(T_{m,i})$, $T_{m,i}$ = i 번째 달의 월 평균 기후치,

$B_k = (\frac{1}{12}) \sum_{i=1}^{12}(T_{m,1})\cos(2\pi ik/12)$, 그리고

$C_k = (\frac{1}{12}) \sum_{i=1}^{12}(T_{m,1})\sin(2\pi ik/12)$이다.

결과적으로 도서지방을 제외한 남한 내 277,300개의 격자점을 대상으로 평년의 일별 최고/최저기온 공간분포를 생산하였다.

임의날짜의 최고/최저기온을 추정하기 위해 전국 정규기상관측소 중에서 제주도와 울릉도 등 일부 도서지방에 설치된 관측소를 제외한 총 66개 지점으로부터 1997년 한 해 동안 관측된 일 최고기온과 일 최저기온 자료를 기상월보로부터 수집하였고, 관측소 포함 격자의 일별 최고/최저기온 실측값과 위의 방법으로 구한 평년의 같은 날 기온과의 편차를 토대로 277,300개 전체 격자의 편차분포를 거리역산가중(Inverse Distance Weighting)에 의해 추산하였다(식 1).

$$d_0 = \sum_{j=1}^{n}[(T_j - A_j)(1/R_j)] / \sum_{j=1}^{n}(1/R_j) \qquad (1)$$

여기서, d_0 = 대상 미관측 격자점의 기온 편차값, T_j = j 번째 기상관측

소의 기온 실측값, A_j = j 번째 기상관측소 해당 격자점의 기온 평년값, R_j = 미관측 격자점에서 j 번째 기상관측소까지의 거리이다. 한편 식 (1)에 의하여 추산된 각 격자점별 편차값을 앞에서 얻은 해당 격자의 평년 기온값에 더하여 각 격자점별 일별 최고/최저 기온값을 산출하였다(식 2).

$$T_0 = d_0 + A_0 \qquad (2)$$

여기서, T_0 = 해당 격자점의 일별 기온 실황값, 그리고 A_0 = 미관측 격자점의 기온 평년값이다. 결과적으로 일 최고/최저기온에 대하여 각각 365개 (1월 1일부터 12월 31일까지)씩의 일별 기상실황 추정 파일이 만들어졌다.

3. 기온 추정값의 검증

가. AWS 자료에 의한 검증

기상청 산업기상과로부터 수집한 1997년 전국 380개소 AWS 자료를 독립자료로 간주하여 위의 방법으로 보정된 해당 격자점의 기온 추정값과 AWS 자료를 비교하여 추정값 자체의 정확도를 검증하였다. 미관측 격자점 중에서 AWS 자료가 존재하는 격자를 대상으로 실측 기온자료를 앞의 방법으로 계산된 기온실황 자료와 1 : 1 비교를 하는 것이다. 이를 위하여 같은 날 AWS에 의해 관측된 제주도 등 도서지방을 제외한 전국 300여개 지점의 일 최고/최저기온값을 수집하고 아래 식 (3)에 의하여 추정오차인 RMSE(Root Mean Squared Error)를 계산하여 정확도를 판정하였다.

$$\text{RMSE} = [\sum(Y_e - Y_o)^2/N]^{0.5} \qquad (3)$$

여기서, Y_e = 추정된 일별 기온값이고 Y_o = AWS 에 의하여 수집된 실측 기온값이다.

나. 위성자료를 이용한 기온분포 패턴의 비교

위의 방법에 의하여 얻어진 일별 최고/최저기온 분포는 국지기온의 경정인자 가운데 지리지형 특성만 고려된 것으로서 농경지, 산림, 주거지역 등 지표 특성의 영향은 무시되었다. 이러한 조건에서 얻어진 기온분포 양상이 과연 실제분포와 얼마나 다른지 알아보기 위해 공간 분해능이 약 1.1km인 극궤도 기상위성자료(NOAA/AVHRR)를 이용하여 지표면 온도를 산출, 본 연구에서 얻어진 일별 기온실황과 분포패턴의 유사성을 비교하였다. 이 위성의 오전궤도 자료는 일 최저기온, 그리고 오후궤도 자료는 일 최고기온 분포와 밀접한 관계가 있다. 수신된 위성자료로부터 정확한 지표 온도값을 산출하기 위해서는 기하보정과 복사량 보정의 전처리 과정을 거쳐야 한다. 기하보정은 왜곡이 있는 영상으로부터 그 왜곡을 제거하는 것으로 영상의 픽셀좌표(i, j)와 대상물의 지리좌표(θ, ϕ)와의 대응관계를 좌표변환식을 통해 재배열 및 내삽을 실시하는 것이다. 위성에 탑재된 AVHRR 센서로 측정된 복사량은 실제 대상물의 분광반사율 또는 분광반사 휘도값과 일치하지 않는다. 따라서 원시자료(C)에 G 및 I 보정계수값을 이용하여 복사량(N) 값을 산출하였다. 전처리 과정을 거친 후 복사에너지(N)로부터 온도 T(K)를 산출하기 위해 Planck 공식을 이용하고, 복사량이 센서에 도달하기까지 대기에 의한 흡수와 산란 영향을 제거하는 대기보정은 Price(1983)의 방법을 적용하였다. 최종적으로 default 상태인 polar sterographic map projection의 픽셀값을 경위도 좌표계로 변환하였다.

앞에서 얻어진 일별 기온 분포의 패턴을 위성자료와 비교하기 위해 작물 생육기간 중 임의의 날짜를 계절별로 선택하였다. 1997년도에 수신된 위성자료를 예비적으로 판독하여 구름이 없는 맑은 날 자료만을 선택하였다. 여기에는 3월 24일의 최고기온과 최저기온, 7월 22일의 최고기온, 7월 23일의 최

저기온, 그리고 9월 8일의 최고기온과 최저기온이 포함되었다.

NOAA/AVHRR에 의한 온도는 지표면을 흑체로 간주하여 얻은 것이므로 지상 관측소에서 측정한 기온과 상당한 편차를 보이는 것이 현실이다. 따라서 격자점별 기온값을 직접 비교하기보다는 분포패턴의 유사성을 비교하기 위해 먼저 전체 격자점으로부터 얻은 해당 날짜의 기온평균치와 표준편차를 이용하여 표준화시켰다(식 4).

$$Z = \frac{x_i - \bar{x}}{s} \qquad (4)$$

여기서, Z=표준단위, x_i=i 번째 격자의 기온값, $\bar{x}$=전체 격자점의 평균치, 그리고 s=표준편차이다. 한편 각 격자점별로 일별 기온 추정값과 위성자료간에 차이가 있는지를 통계적으로 검증하기 위하여 표준단위로 변형된 자료를 이용하여 t-검정을 실시하였는데 사용된 통계량은 식 (5)와 같다.

$$t = \frac{\bar{D}}{s_{\bar{D}}} \qquad (5)$$

여기서, $\bar{D}$ = 표준화된 격자점별 기온 추정치와 지표 흑체온도 차이를 평균한 값이고 $s_{\bar{D}}$ = 표준화된 격자점별 기온차의 표준오차이다. 기온분포 패턴의 유사성을 검증하는 통계적 기법은 일단 두 자료간의 분포패턴을 확률에 근거하여 비교하는 것으로, 본 연구에서 작성된 기온 추정모형의 적합성을 간접적으로 검정한다는 것 외에는 큰 의미가 없다. 하지만 위성자료는 해당 날짜의 기온 공간분포 패턴을 비교적 정확하게 보여준다고 가정할 수 있어, 만일 t-검정을 통하여 기온분포 패턴의 유사성이 입증된 경우에는 본 연구에서 사용된 기온 추정모형이 일별 기온의 공간분포를 추정하는데 문제가 없는 것으로 간주할 수 있다.

4. 일사량 분포의 추정

기상청 소속의 모든 정규 기상관측소에서 일조시수는 관측하고 있지만 일사량을 관측하는 지점의 수는 20개소에 불과하다. 따라서 일조시수 자료로부터 수평면 전천일사량 자료를 복원하기 위해 전국 20개 일사관측 기상대의 최근 15년간 자료를 수집하여 기상연구소에서 개발한 방법(조 등, 1987)에 따라 실측 일사량에 동일 지점의 일조시수 및 대기외 일사량을 회귀시켜 순별 일조-일사 변환 회귀식을 작성한 후, 이들의 지리적인 연관을 근거로 각 관측소가 대표할 수 있는 지역을 판별하고 각 지역내 일사 미관측 기상대의 일조시수 자료로부터 수평면 전천 일사량 자료를 복원하여 월별, 관측소별로 정리하였다. 복원된 자료로부터 상기 기온추정법과 동일한 과정을 거쳐 일별 적산 일사량 추정법을 정립하였다.

5. 강수량 분포의 추정

국지 강수량 추정을 위해 건설기술연구원 및 기상청으로부터 남한 277개소에서 최근 10년간 관측된 일 강수량자료를 수집하였다. 남한 전역 1km×1km 격자점에 대하여 강수량에 영향을 미치는 총 17 종류 162개 지형변수를 정량화 하여 각각을 Arc/Info grid 파일로 저장하였다. 이를 관측점 수치지도와 동일한 TM(Transverse Mercator) 좌표계로 변환하여 최종적으로 1km×1km 단위 해발고도값으로 이루어진 grid 파일을 얻었다.

각 격자점의 평균적인 경사방향(동, 서, 남, 북 등)을 근거로 모든 격자점을 8개 그룹으로 분류하고, 277개 우량관측소들을 여기에 따라 나누었다. 각 그룹별 관측소들의 월별 강수량값(1987-1996 평균)을 종속변수, 관측소가 위치한 곳의 지리적(geographical), 지형적(topographical), 지세적(orographical) 특징을 독립변수로 둔 중회귀분석을 실시하여 각 그룹별 최적 회귀모형을 얻었다. 마지막으로 각 그룹에 속한 1km×1km 격자점의 지리지형변수값을 해당 회귀모형에 대입하여 남한 전역의 월별 강수량 분포도를 얻었다.

그러나 일별 강수량의 분포는 지형통계학적 방법에 의해 추정하기 불가능할 정도로 불규칙하므로 보다 단순한 “고도보정 공간내삽”에 의해 추정하였다. 이를 위해 기상관측소 좌표/고도파일과 특정 일자 강수량자료 파일을 좌표에 의해 결합시키고, 각 격자점의 강수량 추정값을 격자 주변 3개 관측값을 이용하여 거리역산가중에 의해 계산하였다. 이 초기 강수량 표면을 구성하는 258,000개 격자점 가운데 기상관측소가 포함된 72개를 제외한 나머지의 추정값에는 해발고도 등 실제의 지리지형 특성이 반영되지 않은 상태이다.

같은 방법으로 주변 3개 기상관측소의 해발고도값으로부터 430×600 격자점으로 이루어진 가상지형을 만들고, 이것과 GTOPO30에서 얻은 실제 해발고도값 사이의 편차를 계산하였다. 고도에 따른 강수량의 변이는 강수시스템의 종류, 이동방향, 이동속도 등에 의해 결정되므로 일자별로 정확한 양상을 예측하는 것은 사실상 불가능하다. 다만 연간 총강수량의 분포로부터 유추해보면 산간지에서 고도 100m 상승에 따라 5% 정도씩 증가하므로(Landsberg, 1958; Yun et al., 1989), 이 결과를 근거로 본 연구에서는 72개 점 관측값을 토대로 가상지형상의 강수량 분포면을 격자단위로 내삽하여 초기 강수표면을 생성한 다음, 고도차에 따른 강수량 증가율을 +0.05%로 두고 최종분포를 얻었다.

제 3 절 결과 및 고찰

1. 최고/최저기온의 기후학적 평년값

한반도 전역에 적용할 수 있도록 지형기후학적 추정기법에 의하여 얻어진 월별 일 최고/최저기온의 최적 다중회귀식은 표 1과 같다. 이 식들에 의하면 일 최고기온은 총 8개의 지형변수에 의해 결정되는데, 월별로는 2 3개의 지형변수만이 채택되었다. 추정능력을 나타내는 결정계수(R^2)는 월별로 0.68 0.86의 범위에 있는데 겨울철이 다른 계절에 비하여 상대적으로 낮은 추정능력을 보이고 있다. 추정식에 포함된 지형변수 중에서 해발고도(ELEV)는 모든 달의 일 최고기온에 영향을 미치고 있다. 이는 해발고도가 높아짐에 따라 일정한 비율로 일 최고기온이 감소하고 있음을 나타내는 것으로, 특히 겨울철이 다른 계절에 비하여 감소의 폭이 큼을 알 수 있다. 다음으로 중요한 지형변수는 방위별 개방도로 북사면개방도(OPNP11)가 4월과 6월을 제외한 10개의 달에서 일 최고기온에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 월별 일 최고기온에 영향을 미치는 다른 지형변수로는 육도(LDR)와 해안거리(CODI)로 각각 6달과 3달의 추정식에 관여하고 있다.

일 최저기온의 경우에는 총 10개의 지형변수가 월별로 영향을 미치고 있는데, 거리에 따른 평균표고(AVAL) 또는 해발고도가 모든 달에 영향을 미치고 있다. 평균표고는 해발고도를 변형시킨 변수이기 때문에 일 최고기온과 마찬가지로 해발고도가 올라감에 따라 일정한 비율의 기온감율이 월별 최적식에 의하여 설명되고 있음을 알 수 있다. 다음으로 중요한 지형변수는 육도(LDR)로 9개 달에 영향을 미치고 있고, 다음은 북사면개방도(OPNP11)가 6개 달의 일 최저기온을 추정하는데 사용되고 있다. 월별로는 2 4개의 지형변수가 영향을 미치고 있으며 결정계수는 0.66 0.90으로 여름철의 결정계수가 다른 계절에 비하여 상대적으로 높은 것으로 나타났다. 특히 1월과 3월을 제외하고

는 모두 0.8 이상을 나타내 일 최저기온의 추정식은 비교적 잘 작성된 것으로 판단할 수 있다.

월별 최고/최저기온 회귀식을 이용하여 제주도 등 도서지방을 제외한 전국토를 대상으로 30″격자단위(약 900m) 남북방향 590개, 동서방향 470개로 총 277,300개의 격자점에 대한 월별 평년값이 추정되었다.

2. 일별 최고/최저기온 추정값

일별 기온 평년값은 각 격자점별 12개 달의 자료를 통합하여 조화해석법에 의해 월별 기온값 12개로부터 365개의 일별 기온으로 변환한 것이다. 일본의 연구결과(河野 등, 1984)에 의하면 조화해석법을 이용하여 구해진 일별 평년치는 30년 정도의 장기간일 경우 0.2 0.3℃의 오차범위에 있다고 한다. 이 기법을 이용하여 일별 최고/최저기온 평년치를 추정하여 총 730개의 파일로 저장하였다. 이 과정에서 일별 기온값의 자료는 좌측 상단을 기준으로 남쪽과 동쪽의 방향으로 각각 3개씩(약 2.7km), 즉 9개의 격자를 묶어 그 평균치를 기록·저장하였다. 이는 본 연구의 목적이 단위재배구역별 국지기상에 대한 정보를 추정하기 위한 것이기 때문에, 추정능력을 훼손하지 않는 범위 내에서 자료를 단순화하여 계산과 분석의 효율성을 높이기 위함이다. 따라서 하나의 파일은 남북방향으로 197개, 동서방향으로 157개의 격자로 구성되어 있다.

표 1. **지형기후학적 방법에 의한 일 최고/최저기온 추정용 최적 중회귀식(평년의 월별 값)**

Month	Monthly Regression Equations of Maximum Temperature	R^2
January	Tmax1 = 10.3316-0.0081*ELEV-0.0187*CODI-0.0529*OPNP11	0.71
February	Tmax2 = 11.9416-0.0086*ELEV-0.0521*OPNP11-0.0058*CODI	0.71
March	Tmax3 = 16.1665-0.0076*ELEV-0.0443*OPNP11	0.67
April	Tmax4 = 17.8189-0.0057*ELEV+0.0472*LDR4	0.80
May	Tmax5 = 21.6286-0.0054*ELEV+0.0544*LDR5-0.0319*OPNP11	0.86
June	Tmax6 = 22.4424-0.0060*ELEV+0.0675*LDR5-0.0200*OPEP12	0.73
July	Tamx7 = 27.6326-0.0063*ELEV+0.0511*LDR3-0.0307*OPNP11	0.79
August	Tmax8 = 30.5850-0.0078*ELEV+0.0418*LDR3-0.0419*OPNP11	0.78
September	Tmax9 = 29.7881-0.0038*ELEV-0.0864*OPNM15-0.0392*OPNP11	0.74
October	Tmax10 = 26.2322-0.0078*ELEV-0.0519*OPNP11	0.76
November	Tmax11 = 19.3978-0.0080*ELEV-0.0126*CODI-0.0527*OPNP11	0.70
December	Tamx12 = 13.1341-0.0101*ELEV-0.0579*OPNP11	0.68
Month	Monthly Regression Equations of Minimum Temperature	R^2
January	Tmin1 = 1.8797-0.0103*ELEV-0.0800*LDR5	0.66
February	Tmin2 = 9.6402-0.0126*AVAL5-0.0527*LDR5-0.0569*OPNP11 -0.0260*OPWP13	0.82
March	Tmin3 = 4.7387-0.0074*ELEV-0.0399*LDR5-0.0120*CODI	0.79
April	Tmin4 = 15.6395-0.0085*AVAL5-0.0365*LDR5-0.0567*OPNP11	0.85
May	Tmin5 = 16.0119-0.0089*AVAL5-0.0226*LDR5-0.0361*OPP15 +0.0146*OPSP15	0.82
June	Tmin6 = 20.0629-0.0077*ELEV-0.0356*OPNP11+0.0108*OPWM05	0.89
July	Tmin7 = 24.9643-0.0072*ELEV-0.0385*OPNP11+0.0105*OPWM05	0.90
August	Tmin8 = 27.6238-0.0087*AVAL5-0.0568*OPNP11+0.0051*OPWM05	0.88
September	Tmin9 = 25.6709-0.0100*AVAL5-0.0317*LDR5-0.0634*OPNP11	0.86
October	Tmin10 = 16.6362-0.0108*AVAL5-0.0671*LDR5-0.0108*OPNP15	0.80
November	Tmin11 = 9.5503-0.0094*AVAL5-0.0700*LDR5	0.85
December	Tmin12 = 4.0516-0.0101*AVAL5-0.0717*LDR5	0.82

*Independelnt variables used in regression equations : ELEV : Elevation of a grid cell (m). CODI : Linear distance to the nearest coast from a grid cell (km). AVAL5 : Average elevation of the 11x11 grid cells with the base cell at the center. LDR3, LDR4, LDR5 : Ratio of the grid cells falling on land (above 0 elevation) to the total cells of (2R+1) square grid; R is 3, 4, and 5 cell radius. OPXPhR : Ratio of the X-directional (2R+1) cells whose elevations are not higher than the center cell by h x 100m; X is N(north), S(south), E(east) and W(west), respectively. OPXMhR : Ratio of the X-directional (2R+1) cells whose elevations are lower than the center cell by h x 100 m. OPP15 : Ratio of $(2R+1)^2-1$ cells constituting (2R+1) grids on one side except the center cell, whose elevations are not higher than the center cell by 100m. In this case, R is 5 so total 120 cells except the center one are used for calculation.

임의의 날짜에 대한 일별 최고/최저기온 추정값은 식 (1)과 (2)에 의하여 한반도 전역의 각 격자점별로 추산하였다. 표 2는 임의로 선택된 10개 격자점을 대상으로 1997년 9월 8일의 기상관측소 실측치와 기상관측소 해당 격자점의 평년 기온값, 그리고 10개의 미관측 격자점에서 가장 가까운 4개의 기상관측소까지의 거리 등을 이용하여 해당 격자점의 9월 8일 최저기온을 추정하는 과정을 나타낸 것이다.

거리역산가중치를 이용하여 격자점의 기온을 정밀하게 추정하기 위해서는 각 격자점별로 30km 이내에 존재하는 4 6개의 기상관측소 정보가 필요한 것으로 알려져 있다(清野, 1993). 표 2에서 보면 무작위로 선택된 10개 격자점에서 최단거리에 있는 4개의 기상관측소까지의 거리(R_i)는 1개의 격자점(X=141, Y=176)을 제외하고 대부분 30km 이내에 존재하여 문제가 없는 것으로 나타났다. 현재 우리 나라 전국에 분포한 기상관측소의 수가 70여개에 불과한 현실에서 이 공간통계기법을 효율적으로 이용하기 위해서는 각 격자점별로 4개 이상의 기상관측소를 선택하는 것은 무리가 있을 것으로 보인다. 1997년 9월 8일의 최저기온 실측치(T_i)와 해당 격자의 평년값(A_i)의 편차와 거리를 고려하여 임의로 선택된 10개 격자점에서 계산된 기온 편차값은 -1.3 1.5℃의 범위에 있는 것으로 나타났다. 이 편차를 평년값에 더하여 얻은 10개 격자점의 1997년 9월 8일 최저기온은 13.9 20.1℃로 추정되었다.

표 2. 임의로 선정된 10개 격자점의 일최저기온 추정값(September 8)

Coordinates		Variables*														
X	Y	A_i (℃)				T_i (℃)				R_i (km)				A_0 (℃)	D_0 (℃)	T_0 (℃)
		A_1	A_2	A_3	A_4	T_1	T_2	T_3	T_4	R_1	R_2	R_3	R_4			
134	122	18.4	17.9	18.9	17.8	18.3	17.0	14.6	15.5	3.0	16.0	23.2	30.6	16.1	-0.7	15.4
37	112	17.7	17.6	18.1	18.0	15.3	19.4	18.5	16.8	3.0	12.7	17.5	21.0	18.6	-1.3	17.3
26	36	17.4	17.2	18.3	13.9	18.2	19.6	20.7	14.2	17.9	24.7	25.0	27.1	18.7	1.4	20.1
14	82	17.7	18.3	16.9	17.7	16.3	20.7	16.3	18.0	8.6	23.7	26.0	28.2	18.0	-0.3	17.7
73	34	16.8	13.9	18.3	16.8	15.8	14.2	16.6	14.7	10.8	20.0	28.3	30.0	14.9	-1.0	13.9
25	45	17.4	18.3	17.2	17.7	18.2	20.7	19.6	18.0	9.9	16.0	18.4	27.8	18.4	1.5	19.9
20	115	17.6	18.0	17.7	17.7	19.4	16.8	15.3	16.3	10.0	17.9	18.0	26.0	19.0	-0.3	19.6
57	50	16.8	16.8	13.9	17.2	14.7	15.8	14.2	19.6	11.4	13.4	16.5	19.3	16.9	-0.4	16.5
141	176	19.9	17.9	20.7	17.8	19.9	17.0	20.4	15.5	38.3	38.8	44.4	46.8	14.7	-0.8	13.9
22	156	17.9	17.3	17.2	18.0	20.8	19.2	16.6	16.8	13.0	13.3	22.0	25.7	13.9	1.2	15.1

*A_i : Calculated minimum temperature of station i on September 8 in normal year.
T_i : Observed minimum temperature of station i on September 8 in 1997.
R_i : Distance to the station i from grid cell(x, y).
A_0 : Calculated minimum temperature of grid cell on September 8 in normal year.
D_0 : Deviation between the normal estimate and the observed minimum temperature of grid cell.
T_0 : Estimated minimum temperature of grid cell on September 8 in 1997.

그림 1은 한반도 전역의 9월 8일의 최저기온 평년값 분포와 거리역산가중치에 의하여 추정된 1997년 9월 8일의 공간분포를 비교한 것이다. 조화해석법에 의하여 일별 기온자료로 변환된 9월 8일의 최저기온은 바다 및 도서지방을 제외한 총 19,060개의 격자에 대하여 평균 16.5℃을 나타내고 표준편차는 2.0℃이다. 반면에 거리역산가중치에 의하여 추정된 1997년 9월 8일의 최저기온 분포는 평균 15.4℃로 평년치에 비하여 1.1℃ 낮아진 반면, 표준편차는 0.7℃ 올라간 2.7℃를 기록하여 평년값보다 격자점별 변이의 폭이 다소 증가하였음을 알 수 있다. 이러한 다소간의 편차는 평년값과 1997년의 실측값

을 적용하여 추정한 공간분포의 당연한 차이로 해석되며, 그 차이가 큰 의미를 가지는 것은 아니나 그림에서 보는 바와 같이 전체적인 9월 8일 최저기온의 공간분포 변이는 평년값과 추정치 간에 다소 다른 분포를 보이고 있다.

3. 기온 추정값의 실용성

가. AWS 자료를 이용한 검증

이상과 같이 추정된 일별 기온실황 분포는 정규기상 관측망이 없는 미관측 격자점에 설치, 운영중인 AWS에서 수집된 자료와 비교함으로써 그 실용성을 검증하였다. AWS 자료에 의한 검증은 3월 24일의 일 최고기온과 최저기온, 7월 22일의 일 최고기온, 7월 23일의 일 최저기온, 그리고 9월 8일의 일 최고기온과 일 최저기온을 대상으로 하였다. 표 3은 이들 6개 기온자료에 대하여 300여개 AWS 관측 격자점의 온도자료를 이용하여 추정오차를 계산한 것이다.

표 3. 일 최고/최저기온 추정값을 기상청 자동기상관측소 실측값과 직접 비교하여 그 차를 평방근오차로 나타냄.

Date	Variables	Number of AWS	RMSE(℃)
March 24	Max. Temp.	309	1.9
March 24	Min. Temp.	305	1.8
July 22	Max. Temp.	301	2.2
July 23	Min. Temp.	300	1.5
September 8	Max. Temp.	292	2.5
September 8	Min. Temp.	298	1.7

날짜와 온도별로 검증에 사용된 AWS 관측소의 수가 다른 것은 일별 또는 요소별로 결측치의 수가 다르기 때문이다. 이러한 조건하에서 수행된 검증결과는 날짜와 요소별로 약간의 차이가 있으나 1.5℃ 2.5℃의 범위로 추정오차가 계산되었다. 일 최저기온의 추정오차가 일 최고기온에 비해 상대적으로 작았다. 일 최고기온은 지표 순복사에너지가 최대이고 따라서 대기가 불안정한 조건에서 나타나기 때문에 상대적으로 지형인자의 기온 결정력이 약하지만, 새벽이나 동틀녘에 측정되는 일 최저기온은 대기가 하루 중 가장 안정된 시기라서 지형의 영향이 뚜렷하여 이러한 결과가 나타난 것으로 추정된다.

표 4는 20개 AWS 설치지점을 무작위로 추출하여 1997년 3월 24일의 일별 기온실황 추정치와 AWS 관측치간의 편차를 계산한 결과이다. 최종적으로 추산된 일 최고기온의 실황치는 AWS 자료와 비교하여 -3.0℃ +2.5℃까지의 차이를 보이고 있다. 한편 일 최저기온은 -1.8 ° +2.2 ° 의 편차를 보이고 있는데, 3월 24일의 추정오차 RMSE(표 3)를 보면 일 최고기온은 1.9℃이고 일 최저기온은 1.8℃로 거의 비슷한 경향을 나타내고 있지만 20개 지점의 편차는 일 최저기온을 더 잘 추정하고 있음을 알 수 있다. 그밖에 7월 22일의 일 최고기온, 그리고 7월 23일 일 최저기온, 9월 8일의 일 최고기온 및 최저기온도 3월 24일의 결과와 비슷한 경향을 보이고 있다. 이상의 검증 결과는 淸野(1993)의 연구 결과와 유사하거나 추정오차가 약간 높은 것으로 본 연구에서 사용한 지형기후학적 방법이 일별 기온실황을 추정하는데 큰 무리가 없는 것으로 판단된다.

표 4. 1997년 3월 24일 임의로 선정된 20개 기상청 자동기상관측소에서 실측한 최고/최저기온값을 토대로 해당 격자점의 기온 추정값을 검증함

AWS	Latitude	Longitude	Max. Temp.(℃)			Min. Temp.(℃)		
Num.	(degree)	(degree)	Estimates	AWS	Diff.*	Estimates	AWS	Diff.
505	37.82	127.35	11.5	12.1	-0.6	-6.7	-8.4	+1.7
531	37.87	127.55	11.7	13.7	-2.0	-7.6	-7.6	+0.0
538	38.15	127.10	12.7	13.2	-0.5	-6.0	-7.9	+1.9
539	37.90	127.07	11.3	12.3	-1.0	-7.2	-6.1	-1.2
545	37.30	126.80	9.4	10.2	-0.8	-5.0	-5.0	+0.0
548	37.30	127.62	12.1	14.4	-2.3	-6.0	-8.2	+2.2
554	38.22	128.43	6.1	5.7	+0.4	-7.8	-6.7	-1.1
569	37.60	127.13	11.5	12.1	-0.6	-3.1	-3.4	+0.3
602	36.85	127.45	12.7	12.4	+0.3	-5.3	-4.2	-1.1
614	36.05	126.70	11.5	10.0	+1.5	-2.4	-3.8	+1.4
619	36.93	127.68	11.9	12.2	-0.3	-7.2	-7.0	-0.2
623	36.78	127.58	13.2	13.3	-0.1	-5.3	-5.4	+0.1
728	35.48	126.70	12.7	12.9	-0.2	-4.3	-3.3	-1.0
732	34.77	127.08	15.0	13.0	+2.0	-4.6	-5.1	+0.5
741	35.05	126.98	10.8	13.8	-3.0	-5.0	-4.2	-0.8
788	35.13	127.00	13.0	12.1	+0.9	-5.0	-3.7	-1.3
802	36.42	128.17	11.5	14.1	-2.6	-5.3	-3.5	-1.8
811	35.56	129.11	16.5	14.0	+2.5	-6.9	-7.3	+0.4
920	35.30	128.40	17.0	17.0	+0.0	-5.0	-4.4	-0.6
916	35.33	129.93	15.3	13.8	+1.5	-4.6	-4.5	-0.1

*Difference between topoclimatological estimates and observations from AWS.

나. 위성자료를 이용한 기온분포패턴 비교

육지에 해당하는 총 19,060개의 격자점을 대상으로 지형기후학적 방법에 의해 추정된 기온값과 위성자료에 의해 계산된 지표온도 평균치와 표준편차를 계산한 결과는 표 5와 같다. 전체적으로 3월 24일 일 최고기온을 제외하고는 NOAA 위성관측에 의한 지표온도 추정값이 지형기후학적 일별 기온값에 비하여 과소 추정되었음을 알 수 있다. 전체 격자점에 대한 평균치를 보면 3월 24일의 일 최저기온을 제외하고 비교적 큰 편차를 보이고 있는데, 특

히 위성관측치의 경우에는 9월 8일을 제외하고 격자점간의 변이가 상당히 심해 특정 격자점에서는 비현실적인 측정치를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 위성관측에 의한 온도가 일반 관측소에서 측정하는 방법과는 달리 지표면의 흑체온도를 산출한 것에 기인한다. 결과적으로 이 두 가지 방법에 의하여 얻어진 기온의 공간분포를 직접 비교하는 것은 의미가 없고, 큰 차이를 보이고 있는 두 자료를 합리적으로 비교하기 위해서는 두 자료를 동일한 표준단위로 변환하여 같은 날짜의 온도가 공간적으로 유사한 분포를 나타내고 있는지를 검증하는 것이 타당할 것이다.

표 5. 남한 전역의 격자점 기온 추정값을 유사 시간대 NOAA위성자료로부터 추정된 지표온도와 비교함

Date	Classification	Topoclimatological Estimates		NOAA Remote Sensing Data	
		Mean	S.D.	Mean	S.D.
March 24	Max. Temp.	11.7	2.1	14.0	4.2
March 24	Min. Temp.	-5.1	3.2	-5.8	4.7
July 22	Max. Temp.	32.4	2.2	25.7	7.2
July 23	Min. Temp.	22.5	1.6	20.0	5.2
September 8	Max. Temp.	29.0	3.1	22.7	2.8
September 8	Min. Temp.	15.4	2.7	8.0	2.6

그림 2는 공간통계 기법에 의하여 추정된 1997년 9월 8일 최저기온의 공간분포와 동일한 날짜의 새벽 3시경 기상 위성자료의 분포를 표준단위로 변환하여 비교한 예이다. 두 방법에 의하여 얻어진 공간분포는 충청도 일부 지역을 중심으로 다소 다른 분포패턴을 보이고 있지만 전체적으로는 유사한 형태를 나타내고 있음을 알 수 있다. 하지만 시각적인 비교만으로는 분포패턴

의 유사성을 객관적으로 입증하기 어렵기 때문에, 두 분포에 대하여 각 격자점의 표준화된 기온값을 1:1로 비교하는 통계적 방법에 의존하여 유사성을 입증할 수밖에 없다.

표 6은 두 자료의 분포를 평균 0과 분산 1로 같게 만든 후, 동일한 격자점의 편차를 이용하여 두 가지 방법으로 산출된 온도의 공간분포 유사성을 t-검정한 결과이다. 이 결과를 보면 정도의 차이는 있으나 검정에 사용된 6개 모든 자료가 5% 유의수준에서 지형기후학적 방법에 의한 일별 기온 추정치와 위성자료에 의한 일별 기온 관측치가 공간적 분포에서 차이가 없음을 알 수 있다.

이러한 결과는 일별 기온 추정치와 위성자료간에 공간분포의 유사성을 인정하는 것으로, 위성자료는 기온의 절대값을 표현하는 데는 한계를 가지고 있지만 평균치를 중심으로 공간분포 양상을 정확하게 나타내고 있는 것으로 판단된다. 결과적으로 본 연구에서 사용된 모형이 일별 기온실황의 분포를 추정하는데 문제가 없는 것으로 간주할 수 있다.

표 6. 위성원격탐사자료에 의한 추정값과 지형기후학적 추정값 사이의 유사성을 t-test에 의해 검정함

Date	Classification	$\overline{D}$	S_D	t
March 24	Max. Temp.	0.0136	1.17	1.60^{NS}
March 24	Min. Temp.	0.0097	0.90	1.48^{NS}
July 22	Max. Temp.	-0.0036	1.08	-0.46^{NS}
July 23	Min. Temp.	-0.0125	1.30	-1.32^{NS}
September 8	Max. Temp.	0.0032	1.10	0.39^{NS}
September 8	Min. Temp.	-0.0035	0.93	-0.51^{NS}

^{NS} Non-significant.

4. 일사량 추정값

수평면 전천일사량의 월별 추정값에는 총 16개의 비교적 다양한 지형인자가 영향을 미치고 있다. 평균경사(AVG)가 6개 달에 영향을 주고 있으며, 표고차(ELDI)와 동사면개방도(OPEP25)가 각각 4개의 달에 포함되었다(표 7). 일사량의 결정계수는 0.55 0.82로 기온에 비하여 상대적으로 낮은데, 특히 봄철의 결정계수가 다른 계절에 비하여 낮게 나타났다.

표 7. 평년의 월별 전천일사량값 추정을 위한 중회귀식

월	월별 수평면 전천일사량 추정 회귀식	R^2
1	Sol1 = 276.4625+0.1986*OPEM03-0.5548*OPNP11+0.3785*OPSP11	0.64
2	Sol2 = 281.9248+0.0703*ELDI5+0.1894*OPEM03+0.1276*OPNM02	0.66
3	Sol3 = 488.6771+0.8006*AVG15-0.6787*OPEP25	0.60
4	Sol4 = 555.4643+0.9501*AVG25-0.6198*OPEP25	0.56
5	Sol5 = 666.6390-0.9152*OPEP25+0.3320*AVG21	0.55
6	Sol6 = 586.4387+0.1073*ELDI5-0.9614*OPEP25+0.4770*OPNM02	0.73
7	Sol7 = 472.4694+0.1052*ELDI5-0.3711*OPEP15+0.4132*OPNM02	0.68
8	Sol8 = 512.6497+0.8805*AVG15+0.0618*ELDI5+0.3890*OPNM02 -0.6360*OPSP23	0.66
9	Sol9 = 468.4474+1.0141*AVG15-0.5148*OPEP24-0.2013*OPWP15	0.61
10	Sol10 = 354.8081+0.9913*AVG15+0.2284*OPNM02+0.2001*OPSM02	0.65
11	Sol11 = 282.0326+0.8668*AVG15-0.4889*LDR5-0.1933*OPSM02	0.80
12	Sol12 = 212.0413+0.2193*OPSM02+0.5794*OPSP11-0.5010*OPWP15	0.82

일사량의 경우 AWS 관측자료가 없으므로 독립자료에 의한 추정값의 검증은 불가능하다. 외국의 경우 기상위성 영상자료에 의한 간접적인 일사분포 추정방법이 개발되어 있긴 하나(Diak et al., 1998), 국내에서 수신 가능한 일본 GMS 자료를 이용한 추정법은 미개발 상태이다. 따라서 본 연구에서 추정된 일사량 분포는 전국적인 검증작업이 곤란하므로 당분간 미검증 상태에서 사용할 수밖에 없다.

5. 강수량 추정값의 실용성

강수량 추정값을 검증하기 위한 독립자료는 기상청 AWS와 건교부 TM(Telemetry)자료가 있다. 1998년 3월 27일 남해안을 스쳐 간 저기압의 영향으로 남부 일부 지방에만 강우가 관측되었다. 이 날 강수량 분포를 격자별로 추정하여 미관측 격자의 강수량을 기상청 AWS자료와 비교한 것이 그림 3이다. 부산-울산지방을 중심으로 10mm 이상의 강수를 기록하였는데 추정분포는 실제 분포와 상당히 유사한 것으로 나타났다. 결측 제외 342개 AWS 관측값과 비교한 결과 각 대응점들이 대체로 1:1 직선에 모여있으며, RMSE는 1.09로서 관측 강수량의 범위 대비 10%에 해당한다.

제 4 절 결 론

제주도 등 도서지방을 제외한 전 국토를 대상으로 작물모형 구동에 필요한 최소 기상요소인 일 최고/최저기온, 강수량, 일사량을 30″(혹은 1km)간격의 등거리 격자단위로 추정코자 하였다. 관측지점의 평년 기후값-지형 회귀식의 작성에 의해 월별 기후값을 추정하고, 이를 조화해석법에 의하여 일별 평년치로 변환한 다음 전국 66개 정규기상관측소로부터의 실측치와 평년값 간의 편차와 거리에 의한 공간통계 기법을 적용하여 내삽한 결과를 AWS 자료 및 기상 위성자료와 비교함으로써 그 정확성과 실용성을 검증하였다. 강수량은 고도보정 공간내삽에 의해 추정하여 AWS 실측값과 비교하였다.

공간통계 기법에 의하여 추정된 일별 기온의 공간분포는 미관측 지점에 설치된 300여개 AWS 설치지점의 실측치와 비교하여 실용성을 검증하였는데 동일한 날짜에 수집된 6개의 기온에서 1.5℃ 2.5℃의 범위로 추정오차가 계산되었다. 그러나 농업적으로 더욱 중요한 일 최저기온의 경우에는 상대적으로 작은 추정오차를 나타내 전체적으로 만족할만한 결과를 얻은 것으로 결론내릴 수 있다. 하지만 AWS 설치지점이 30″격자를 대표하는 위치라고는 할 수 없으며, 더욱이 건물 옥상 등 관측여건이 불량한 곳도 많아 실질적인 검증자료로서의 역할에 다소 문제가 있었던 것으로 생각된다. 현 단계에서 독립자료로 간주할 수 있는 검증자료로 AWS 자료를 제외하고는 찾아볼 수 없기 때문에 객관성 있는 결과를 얻기 위해 AWS 자료를 합리적으로 관리하는 것이 필요하다. 또한 본 연구에서 국지기온 추정에 이용한 기형-기후 관계식은 국지기온의 결정인자 가운데 해발고도 등 지형요소만 고려하였다. 만약 지표 특성을 분류하여 그 영향을 추가한다면 보다 정확한 추정이 가능할 것이다. 또한 위성자료에 의한 검증은 맑은 날에만 제한적으로 가능하므로 실

용화를 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것이다.

일사량 추정값의 검증은 비교자료가 없어 불가능하였고, 강수량 추정값은 AWS 실측값과 비교한 결과 RMSE가 실측값의 약 10%였다. 단 강수-무강수 경계지역, 특히 산악지역에서 눈에 띄는 오차를 보이고 있다. 이 같은 오류는 앞으로 정규 강수관측망 자료의 확충과 지형-강우 모형의 개선을 통해 풀어야 할 과제이다.

참고문헌

과학기술처. 1992. 전국 그물망 기후값 추정 및 기후도 작성 연구(3). 중앙기상대 기상연구소 주관 특정연구과제. 379pp.

한국수자원공사. 1993. 임하 및 주암 다목적댐 건설에 따른 기상환경 변화조사. 306 p.

신만용, 윤진일. 1992. 지형-기후 관계식에 의한 제주도의 월별 기온분포의 추정. 한국임학회지 81(1):40-52.

신만용, 천정화. 1996. 임하댐 주변지역의 기상환경 변화가 수목생장에 미치는 영향에 관한 정량적 분석. 한국임학회지 85(3):462-471.

신만용, 윤진일, 서애숙. 1999. 공간통계기법을 이용한 전국 일 최고/최저기온 공간변이의 추정. 대한원격탐사학회지 15(1):9-20.

윤진일, 유근배, 이민영, 정귀원. 1989. 제주도의 농업기상. I. 지형기후 추정법과 동계 일최저기온의 분포. 한국작물학회지 34(3):261-269.

윤진일, 황규홍, 정현향, 신만용, 임준택, 신진철. 1997. 주암 다목적댐 건설에 따른 국지기후 변화가 농작물 생산성에 미치는 영향. 한국기상학회지 33(3):409-427.

河野富香, 森 康明, 房尾一宏, 上原由子. 1984. 廣島縣農試報告 48:113-122.

清野 豁. 1993. AMeDAS 資料の Mesh化. 農業氣象 48(4):379-383.

Daly, C., R. P. Neilson, and D. L. Phillips. 1994. A statistical-topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain. *Journal of Applied Meteorology* 33(2):140-158.

Nakai, K. 1990. Japanese system of the meteorological information service to user communities including the education and training. In: A. Price-Budgen (ed.), Using Meteorological Information and Products. Ellis Horwood Ltd., U.K., 259-274.

Price, J. C. 1983. Estimating surface temperatures from satellite thermal infrared data: A simple formation for the atmospheric effect, Remote Sens. Environ., 13:353-361.

제 3 장 식량작물의 작황진단

제 1 절 서 언

작황(作況)은 여러 가지 요인들에 의해 결정되겠지만 그 중에서도 날씨는 거의 절대적인 영향을 끼친다. 최근 들어 빈발하는 기상이변과 기후변동폭의 증대는 식량 자급도가 낮은 우리 나라의 경우 많은 이의 우려를 자아내고 있다. 전지구 규모의 기후변화에 의해 우리의 식량 생산은 어떤 방향으로 얼마만큼 영향을 받을 것인가. 당장 내년 한 해 농사는 어떻게 전망되며 어떤 품종을 심는 게 좋을까. 이런 의문에 대한 기초적인 답변을 만들어 내기 위해 작물생육모형을 이용한 작황진단기법이 이용되고 있다.

작물생육모형은 작물의 광합성과정 등 주요 생리과정을 정량적으로 연구하기 위해 30여 년 전부터 소개되기 시작하였다 (Loomis and Williams, 1963; de Wit, 1965; Duncan et al., 1967). 다양한 환경조건 하에서의 생장 및 발육의 종합적인 모의가 가능한 정도로 발전한 최근에는 주요 식량작물에 대해 실용수준의 모형들이 선보이고 있다(Sinclair and Seligman, 1996).

생육모형을 어느 지역의 작황예보에 적용하기 위해서는 우선 모형의 품종모수(genetic coefficients)가 그 지역에 재배되는 품종에 맞게 조정되어야 한다. 또한 이 지역의 토양특성과 재배관리정보가 준비되어야 하며, 마지막으로 기온, 일사량, 강수량 등 매일의 기상자료가 필요하다. 이렇게 입력자료가 갖추어진 생육모의일지라도 작물의 실제 생육과 수량에 미치는 모든 요인을 완전히 고려하지는 못하므로 생육모의에 의한 작황은 실제작황과 차이가 있게 마련이다.

작물 생육모형을 이용한 생산량 예측 연구 가운데 소련의 춘파소맥, 일본 북해도의 수도작 등에 대해서는 이미 상당한 연구가 진척되었다(Parry and

Carter, 1988). Yoshino(1988)는 SIMRIW(SImulation Model for RIce-Weather relations)를 이용하여 일본에서 벼의 수량이 이산화탄소 배증에 따른 GISS(Goddard Institute for Space Studies) GCM(general circulation model)의 기후 시나리오하에서 약 9% 증가하는 것으로 예측한 바 있다. Oh(1992)는 RICEMOD-300을 이용하여 1951년부터 1985년까지 Arkansas와 Texas 등 미국내 주요 벼 재배지대에서 기상정보를 이용하여 벼의 수량을 모의하였다. 국내에서는 MACROS(Modules of an Annual CROp Simulation)를 이용, 1966년부터 1985년까지 20년간 기후자료를 입력시켜 기상변화에 대한 '진흥벼'의 실제 수량변이(收量變異)를 성공적으로 추정하였으며(과학기술처, 1990), 이 등(1991)은 대기중 이산화탄소 배증 기후하에서 37%의 수량감소를 예측함으로써 기존의 통계모형과 비슷한 예측을 하였다. 또한 윤(1990)은 MACROS를 국내 중생종인 '화성벼'의 특성을 갖도록 조정하여 이산화탄소 배증 기후 시나리오 하에서 수원지방의 벼 수량이 16% 감소할 것으로 예측하였다.

벼 생육모형 가운데 CERES(Crop-Environment REsource Synthesis)-rice는 미국에서 개발되어 IBSNAT(International Benchmark Site Network for Agrotechnology Transfer) 사업에 의해 국제적으로 널리 보급된 것이다. 이 모형은 벼의 생장(growth)과 발육(development)에 영향하는 기상, 토양, 수분, 질소 등 농생태계 구성요소간 상호작용을 종합적으로 고려한 것으로서 실험실 수준을 벗어나 실용화 단계에 있는 것으로 평가된다(Singh, 1995; Godwin et al., 1992). Lal et al.(1998)은 CERES-rice 와 CERES-wheat를 동시에 인도 북서부지역에 적용시켜, 대기중 이산화탄소의 배증에 따른 기후변화가 발생했을 때 벼와 밀의 수량이 각각 28%, 15%씩 증가할 것이라 하였고, 특히 발육에 있어 밀은 최고기온의 증가에 민감하게 반응하나 벼는 최저기온 증가에 취약점을 보일 것이라고 예측했다. 오(1995)는 이 모형을 국내에

적용하여 이산화탄소 배증 시나리오기후 하의 쌀 생산을 추정하였다.

본 장에서는 국내 주요 식량작물의 작황진단에 필요한 원천기술 및 기반 정보 가운데 기상정보를 제외한 나머지 모든 정보와 기술을 적절한 형태로 엮어서 실용성 있는 작황진단체계를 구축한 과정을 설명한다.

연구의 제 1 차 연도에는 국내에서 재배하는 주요 작물 중 벼, 보리, 옥수수, 콩, 감자 등 5종의 작물에 대하여 외국에서 개발된 9종의 생장모형을 수집하였고, 이 모형들의 구동에 필요한 최소요건을 분석, 파악하였다. 또한 ARC/INFO, MGE 등 주요 GIS 소프트웨어와 작물모형 연계운영기법을 습득하였다. 여기서 얻어진 기술을 토대로 본 과제 최종 결과물에 대한 대내외 이해수준을 향상시키기 위해 별도의 시범사업을 추진하였다.

제 2 차 연도에는 기상실황 및 작황 등 기본정보 표출의 최소 도형단위인 단위재배구역(Cultivation Zone Unit; CZU)을 지도상에서 판독하여 지리정보시스템의 벡터값으로 저장하고, 이들 각각에 대해 대기환경 및 국지기상 추정 모형과 작물생장모형 구동에 필요한 지형, 기후, 토양, 작물별 식부면적 자료를 수집하여 속성정보로 가공하였다. 기존의 벼 생장모형 가운데 1차 연도 예비실험을 통해 본 연구의 목적에 부합되는 것으로 판정된 ORYZA1과 CERES-Rice를 국내 지역별 재배실험 결과에 적용하여 기상생태형별 기본 모수를 탐색하였다. 밭작물 가운데는 감자를 대상으로 SIMPOT 생장모형을 고령지 농업시험장의 장기 작황성적에 적용하여 기본 모수를 추정한 다음 포장실험에 의해 그 실용성을 검증하였다.

3 차 연도에는 남한 전역을 1,455개 단위재배구역(CZU)으로 나누어 각 구역별로 토양특성(토층별 토성, 수분, 비옥도 등)과 작물별 재배면적 및 관리정보의 데이터베이스를 구축하였다. 가변속성인 기상정보 가운데 경기/강원도 해당분을 작물생장모형에 입력하여 각 CZU별 벼 및 감자의 단위면적당 수량과 생산량을 추정하였다. 작황예측능력 검증은 농림부 및 강원도 농업통계자

료와의 상대비교를 통해 수행하였다.

마지막 연도에는 경희대, 기상청, 농업과학기술원 등 작황진단체계 실용화에 참여한 세 기관 상호간에 유기적인 정보의 흐름 및 담당 업무의 원활한 수행을 위해 이미 확보된 소프트웨어 프로그램(공간분석, 작물모형, 인터넷 서비스, 등)을 설치, 운영하기 위해 최소한의 요건을 갖춘 작황진단시스템 시작품 3조를 제작하여 각각 설치, 완료하였다. 이 시스템들은 인터넷으로 연결되어 작황진단의 근거가 되는 일별 기상자료 수집, 1,455개 작황진단구역별 재처리, 작물모형 구동 등 전체 작업과정이 거의 실시간으로 이루어질 수 있도록 하였다.

제 2 절 작물모형

1. 주요 작물모형의 특징

CERES (Crop - Environment REsource Synthesis) 계열 모형은 보리, 밀, 옥수수, 수수 등 밭 상태에서 재배되는 grain cereals (화곡류 작물)의 생장, 발육, 최종수량을 매일의 기상에 따라 컴퓨터 상에서 모의하기 위해 개발된 것이다. 모의과정에서 고려되는 요소는 품종의 유전형질, 기상, 토양, 그리고 경종방법으로서, 십수년의 검증실험을 통해 그 안정성과 정확성이 세계적으로 확인된 우수한 모형이다. 벼의 생육모의를 위해 개발된 CERES-rice는 생장과 발육에 영향하는 기상, 토양, 수분, 질소 등 농생태계 구성요소간 상호작용을 종합적으로 고려한 것으로서 실험실 수준을 벗어나 실용화 단계에 있는 것으로 평가된다(Singh, 1995; Godwin et al., 1992).

CROPGRO 계열 모형은 두과식물 (콩, 땅콩, 강남콩) 에 공통적으로 적용할 수 있는데, 기상 및 토양자료는 CERES와 동일하다. 다만 품종의 유전적 형질을 보다 세밀하게 분류하므로 CERES 보다 훨씬 많은 정보가 필요하다. 주요형질은 개화한계일장, 일장감응도, 영양생장기-개화시, 개화시-착협, 착협-생리적 성숙 등 생육기간, 최대 엽광합성속도, 비엽중, 최대엽면적, 최대종실중, 협당립수 등이다. 콩의 경우 일장, 즉 위도에 따라 기상생태형이 다양하게 분화되어 있으므로 (보통 10 group) 우리나라에 적용할 때 조, 중, 만생종에 따른 적정 생태형의 선택이 필요하다.

SUBSTOR-potato 모형은 CERES형과 유사한 논리적 구조를 갖고 있어 기상, 토양자료를 공유할 수 있는 감자생장모형이다. 다른 감자모형과 달리 괴경형성에 미치는 일장과 온도반응이 명시되어 있어 지리적 혹은 품종적 다양성을 어느 정도 극복할 수 있는 것이 장점이다.

상기모형들은 IBSNAT (International Benchmark Site Network for

Agrotechnology Transfer; 본부 하와이대학) 에서 10년간에 걸쳐 개발하여 DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) 이란 컴퓨터 소프트웨어로 통합하였다. 따라서 기상, 토양자료만 준비되면 해당 작물모형을 사용자가 선택하여 쉽게 운영할 수 있다. 모든 프로그램들은 Microsoft DOS 5/6에서 Microsoft Fortran Compiler 5.1에 의해 개발되었으며, 각 모듈들은 FORTRAN77로 코딩되어 PC뿐 아니라 VAX 나 SUN 기종에서도 사용할 수 있다. DSSAT v. 3.1 shell 을 사용하면 작물모형 뿐 아니라 필요한 입력화일의 작성, 분석, 표출 등 편리한 유틸리티를 함께 이용할 수 있다.

ORYZA1은 SARP(Simulation and Systems Analysis for Production) 프로젝트의 일환으로 IRRI (International Rice Research Institute)의 실험 포장에서 얻은 생육조사자료를 토대로 1993년 완성되었는데, 기본 구조는 화란 Wageningen 농업대학교 model인 INTERCOM (Kropff & Van Laar, 1993), SUCROS (Pitters et al., 1989; Van Laar et al., 1992), MACROS module L1D (Penning de vries et al., 1989) 등에 바탕을 두고있다. FORTRAN 으로 작성되었으며, subroutine들 대부분이 Gaussian integration 방법을 사용한다.

2. 작물모형의 품종별 모수 추정

가. 벼(ORYZA1)

생육모의의 성공을 위해 가장 중요한 것은 각 품종이 가지고 있는 parameter(모수)를 정확하게 추정하는 것이다. 이 모수들 가운데 ORYZA1의 국내 품종 적용을 위한 선결과제는 발육단계를 정확하게 모의하는 것이라 할 수 있다. 발육이라는 것은 질적인 형질로서 시뮬레이션에서는 양적인 형질로 전환이 필요하며 수치화 되어야 한다. 즉 수도가 발아해서 성숙할 때까

지의 아날로그식의 연속적인 과정이지만 모형에서는 주요시기별로 수치화하여 표현할 수 있어야 한다. 일반적으로 모형에서는 발아하여 생육을 시작하는 시기를 기점으로 0이라 하고, 일련의 과정을 거쳐 출수하는 시기의 단계를 1이라는 수치를 주며, 성숙기를 2라고 계량화한다. 이러한 수치는 발육이라는 미분함수를 적분함으로써 도달하게 되는데, 수도의 발육에 영향을 미치는 기상요소는 온도이므로 온도의 함수가 된다. 온도 가운데는 발육에 영향하는 온도가 있으며 일정온도 이상에서만 영향을 받게 된다. 이 온도를 기본온도(base temperature, Tb)라 하고 어느 온도 이상에서는 발육에 상가적으로 영향을 하지 못하는데 이 온도를 최적온도(maximum available temperature, Tma)라 한다. 그 사이에 온도가 상가적으로 발육에 영향을 하며, 이 온도를 유효온도(effective temperature, Te)라 한다. 따라서 Te 는, Te = {(Tmax-Tb) + (Tmin-Tb)}/2 이다. 여기서 Tmax는 일중 최고기온, Tmin은 일중 최저기온이며 만약 Tmax가 Tma 보다 크면 Tmax는 Tma, Tmin - Tb가 0보다 적으면 0으로 한다. 이와 같은 발육에 유효한 온도는 발육에 상가적이어서 출아에서 출수까지 적산하면 그 값이 1 이 된다. 따라서 매일의 단위 유효온도에 대한 발육속도 Drc는 출수까지 유효온도를 적산한 값의 역수가 된다. 즉 매일의 발육속도(Dr)는 Dr = Te * Drc 로 정의된다.

이와 같은 방법으로 과거에 수행된 포장시험의 결과들로부터 조중만생종별 품종군과 파종시기에 따른 Drc를 구하고 그 품종군의 발육특성에 대한 모수를 산출하여 그 결과를 분석하였다. 이들 모수를 적용한 ORYZA1에 의해 1995년과 1996년의 경기, 충남, 충북지역 벼 생육 및 수량을 모의하여 실제수량평균과 비교하였다. 또한 모형의 계산결과와 실제수량간의 관계를 구체적으로 추정하기 위해 작물시험장 시험포장(경기도 수원시 권선구 서둔동 소재)에서 조생종으로 오대벼, 중생종으로 화성벼, 팔공벼, 중만생종으로 화신

벼, 동진벼 등 5개 품종을 공시하여 25일과 35일간 육묘한 뒤 5월26일, 6월 5일, 6월 15일, 6월 25일 4회 이앙하여 시험을 수행하였다. 이앙후 재배관리는 작물시험장 표준재배법에 의해 관리하고 시비량은 질소-인산-가리를 성분량으로 11-7-8 kg/10a 시용하여 재배하였다. 주요조사항목으로는 육묘일수 및 이앙기에 따른 출수기, 주요 시기별 식물체 부위별 건물중, 엽면적, 초장 및 경수, 수량 및 수량구성요소 등이 있다.

각 품종의 발육속도를 추정하기 위한 방법으로 컴퓨터 프로그램을 FORTRAN 언어로 작성하여 포장실험의 결과로부터 발육속도를 손쉽게 구하고 그 결과를 품종의 파라메터로 이용하고자 하였다. 추정된 모수를 토대로 경기, 충청지방의 일사관측기상대가 위치한 곳 (서울, 인천, 수원, 서산, 대전, 청주, 추풍령)을 대상으로 1995년부터 1997년까지 3개년간 일기상자료를 ORYZA1에 입력하여 해당지역의 벼 생장을 모의한 결과 중 단위면적당 정조수량(kg/ha)을 표 1에 요약하였다. 비교를 위한 실제 작황성적이 도 단위로 보고되므로 편의상 같은 도에 속한 지점의 모의결과를 산술평균하여 도별로 비교하였다.

표 1. 벼 생장모형 ORYZA1을 이용한 최근 3년간 3개 도의 평균 정조수량을 농림부 집계자료와 비교함 (Unit: kg/ha)

Province	1995		1996		1997	
	Simulated	Reported	Simulated	Reported	Simulated	Reported
Kyonggi	7,860	6,500	8,447	6,750	8,241	6,700
Chungnam	8,397	7,360	8,830	7,650	8,772	7,500
Chungbuk	8,066	6,012	8,579	6,316	8,759	6,820

실제수량에 비해 작물모형에 의한 추정수량이 높게 나타난 것은 기후 이외에 수량에 영향을 주는 다양한 요인들(병해충, 악기상, 재배기술 수준 등)이 모형 작성과정에 반영되지 않았기 때문이다. 따라서 ORYZA1에 의한 벼 생장모의는 기상조건에 따른 잠재생산력을 표현하는 것이라 할 수 있다. 기후조건에 의한 모형의 잠재생산력만을 비교한다면 충청남도가 가장 벼 재배에 유리한 곳이며 경기도는 세 지역중 가장 못한 것으로 나타난다. 실제 수량도 충남에서 가장 높았지만 충북은 경기에 비해 오히려 낮았다. 이는 아마도 배 재배기술면에서 경기도가 가장 앞선 곳이기 때문인 것으로 생각된다.

현재 중북부 지방에서 많이 재배되고 있는 주요 장려 품종 오대벼, 화성벼, 팔공벼, 화신벼 및 동진벼를 육묘일수와 이앙시기를 달리하여 재배한 결과 출수기는 표 2와 같다.

이 표에 의하면 이앙시기가 늦어질수록 출수시기도 늦어졌으며 그 늦어지는 정도는 조생종이 만생종보다 컸다. 그러나 육묘일수에 따른 출수기 차이는 거의 없었다. 특히 이앙시기가 늦어질수록 총 생육기간이 단축되며 그 단축되는 정도는 조생종이 짧고 중만생종이 컸다. 따라서 출수 반응 즉 발육속도는 품종에 따라서도 차이가 있으며 온도에 대한 반응이 품종간에 차이가 큰 것을 알 수 있다. 이와 같이 품종에 따른 발육속도의 파라메터는 작물 생육 모의에 매우 중요한 역할을 한다. 생육 반응은 매일의 생장속도와 생육기간동안의 생장 속도를 적산하는 것이기 때문에 전체 건물생산량에 큰 영향을 미치게 되는 것이다.

표 2. 이앙기와 육묘일수에 따른 주요 벼 품종의 출수기 변이

품 종	이 앙 기	육묘일수	출수기	생육일수
오 대 벼	5월 26일	25일	8월 5일	96일
		35일	8월 4일	105일
	6월 5일	25일	8월 8일	89일
		35일	8월 7일	98일
	6월 15일	25일	8월20일	91일
		35일	8월20일	101일
	6월 25일	25일	8월27일	88일
		35일	8월27일	98일
화 성 벼	5월 26일	25일	8월13일	104일
		35일	8월13일	114일
	6월 5일	25일	8월21일	102일
		35일	8월20일	111일
	6월 15일	25일	8월29일	100일
		35일	8월28일	109일
	6월 25일	25일	9월 1일	93일
		35일	9월 1일	103일
팔 공 벼	5월 26일	25일	8월12일	103일
		35일	8월12일	113일
	6월 5일	25일	8월19일	100일
		35일	8월19일	110일
	6월 15일	25일	8월28일	99일
		35일	8월27일	108일
	6월 25일	25일	8월30일	91일
		35일	8월30일	101일
화 신 벼	5월 26일	25일	8월23일	114일
		35일	8월23일	124일
	6월 5일	25일	8월28일	109일
		35일	8월27일	118일
	6월 15일	25일	9월 3일	105일
		35일	9월 3일	115일
	6월 25일	25일	9월 4일	96일
		35일	9월 4일	106일
동 진 벼	5월 26일	25일	8월25일	116일
		35일	8월24일	125일
	6월 5일	25일	8월29일	110일
		35일	8월28일	119일
	6월 15일	25일	9월 4일	106일
		35일	9월 4일	116일
	6월 25일	25일	9월 7일	99일
		35일	9월 6일	108일

나. 감자 (SIMPOT)

高嶺地農業試驗場의 1973-1996년도의 生産力 및 生産力豫備試驗 혹은 地域適應試驗 자료 중 大關嶺과 강릉의 자료를 이용하여 SIMPOT 모형의 품종별 모수를 추정하였다. 이 지역의 대표 품종이라 할 수 있는 男爵, 秀美, 早豊의 생육조사자료를 위주로, 감자수량의 경우 파종기 및 수확기가 다른 경우에는 년 2개 이상의 자료도 取扱하였던 반면, 수확시기가 현저히 늦어서 지상부가 枯死된지 오래된 후에 수확한 것은 제외시켰다. 출아기는 실측자료가 있는 경우에는 그대로 이용하였고 없는 경우에는 감자의 出芽所要日(Dn)은 지하 10cm 지온에 비례한다는 이론에 근거한 아래 出芽期 豫測式으로부터 推定하여 이용하였다.

Dn는 $Tsab - Tsan \leq 0$ 되는 날

여기서 Tsab는 出芽에 소요되는 기준 적산지온 (℃), Tsan은 파종일부터 n일 까지의 적산지온(℃)이다. 氣象資料는 대관령 實驗圃場과 1km 정도 떨어진 대관령관측소 및 강릉기상대의 자료를 이용하였고, 일사량, 평균온도, 일조시수, 강수량 등의 기상요소를 출아후 부터 적산하였다.

추정된 품종별 모수의 적합성 검증을 위해 강릉시 송정동과 평창군 도암면 횡계리를 재배지역으로 하여 무인기상관측장비를 설치하고, 3월하순부터 5월중순까지 6번에 걸쳐 품종별 난괴법 3반복으로 포장실험을 수행하였다(표 3). 재식거리는 휴간 75cm, 주간 25cm로 하였고, 시비는 $N - P_2O_5 - K_2O = 15 - 18 - 12$ kg/10a 를 전량 기비로, 퇴비는 1.5ton/10a을 시용하였다. 발육단계는 출아기, 괴경형성기, 수확기로 구분하여 조사하였고 생육상황은 출아후부터 수확시까지 잎, 줄기, 뿌리, 괴경 등 부위별로 생체중, 건물중, 엽면적 등을 1-2주 간격으로 매회 구당 생육이 균일한 10주씩 조사하였다. 수량은 괴경중 30g을 기준으로 그 이상을 규격서, 이하를 설서로 나누어 갯수와 중량을 조사하였다. 또한 건물중은 건조기(Yamato SG62)로 처음 1시간

은 100℃에서 생리반응을 정지시키고 그 후에는 2-3일 80℃에서 건조시켜 측정하였다. 시험구배치는 지역, 품종별 난괴법 3반복으로 하였다.

표 3. 1997년 강릉 및 대관령포장의 파종일별 감자 공시품종

Location	Planting date	cultivars
Kangneung	Mar.20, Mar.31, Apr.10	Superior, Jopung
Taegwallyeong	Apr.30, May 6, May 16	Superior, Jopung, Irish Cobbler

감자 생장모형 SIMPOT에 있어 품종별 생육특성을 나타내는 모수는 6개로서 G2는 생장도일로 표현된 엽면적 증가율, G3는 최대 괴경생장율, PD는 괴경 형성 직후 비대생장 지연율, P2는 괴경형성시 일장반응 정도, 그리고 TC는 괴경형성 가능 한계온도를 나타낸다.

감자 생육모의(simulation)과정에서 고려되는 중요한 발육단계는 출아기, 괴경형성기, 황엽기, 수확기 등이다. 감자 출아소요일수는, 파종기, 품종 및 지역에 관계없이 파종기가 이를수록 소요일수가 길었는데 강릉 28-35일, 대관령 25-32일이 소요되어 품종간 및 지역별 큰 차를 발견할 수 없었고 파종기가 늦을수록 소요일수가 단축되었다(표 4). 출아후부터 괴경형성기까지의 기간은 강릉에서는 파종기가 이를수록 길었는데 15-25일이 소요되어 대관령 15-17일에 비하여 다소 길었다.

표 4. 재배지역, 품종 및 파종시기에 따른 감자의 생장 및 발육 특성(1997년)

Location	Cultivar	Planting date	Date of emer.	% of emer.	Period of emer.	Date of tuber formation(days)		Harvest date
Kang-neung	Superior	Mar.20	Apr.25	98.8	35	May 16	(21)	JUL.18
		Mar.31	May 2	96.8	32	May 20	(18)	JUL.18
		Apr.10	May 8	96.8	28	May 23	(15)	JUL.18
	Jopung	Mar.20	Apr.23	97.2	33	May 18	(25)	JUL.18
		Mar.31	May 1	95.8	31	May 21	(20)	JUL.18
		Apr.10	May 8	98.8	28	May 23	(15)	JUL.18
Taegwalyeong	Irish Cobbler	Apr.30	Jun. 2	95.0	32	Jun.17	(15)	Sep.3
		May 6	Jun. 7	97.5	31	Jun.23	(16)	Sep.3
		May 16	Jun.11	98.8	25	Jun.26	(15)	Sep.3
	Superior	Apr.30	May 30	98.8	30	Jun.14	(15)	Sep.3
		May 6	Jun. 5	97.5	29	Jun.22	(17)	Sep.3
		May 16	Jun.11	98.8	25	Jun.28	(17)	Sep.3
	Jopung	Apr.30	Jun. 1	97.5	31	Jun.16	(15)	Sep.3
		May 6	Jun. 6	95.2	30	Jun.20	(16)	Sep.3
		May 16	Jun.11	96.8	25	Jun.26	(15)	Sep.3

잎의 생체중 및 건물중은 생육의 진전과 함께 증가되었는데, 모든 품종 및 파종기에서 건물율은 10% 전후로 비슷한 경향이었다. 조풍은 초기생육에는 파종기의 조만에 따라서 엽중의 차이가 컸으나 생육성기 이후에는 비슷하게 되어 파종기가 엽생장에 미치는 영향이 비교적 적은 것으로 나타난 반면 남작은 생육후기 까지 전기간 파종기에 따라서 다양한 변이를 나타내어 파종기에 예민한 품종으로 추정할 수 있었다(표 5). 경중 역시 엽중의 생장 패턴과 비슷한 경향이었으나 조풍은 타품종에 비하여 후기생장이 둔화되어 조기노화되는 경향을 보였다(표 6).

표 5. **파종기에 따른 감자 잎의 무게 변화** (unit: g/plant)

Cultivar	Planting date	June 13 Fresh	June 13 Dry	June 27 Fresh	June 27 Dry	July 9 Fresh	July 9 Dry	July 23 Fresh	July 23 Dry
Irish Cobbler	Apr.30	30.4	3.7	82.7	9.4	145.1	12.0	236.3	25.4
	May 6	21.3	2.3	59.8	5.3	137.3	10.8	179.3	18.7
	May 16	7.6	1.0	68.8	6.7	119.5	10.6	130.8	15.1
Superior	Apr.30	26.5	3.4	72.6	7.6	154.7	14.7	253.5	26.1
	May 6	20.5	2.4	72.3	6.6	138.1	12.1	187.5	19.2
	May 16	13.9	0.6	34.0	3.0	126.5	14.2	184.3	17.1
Jopung	Apr.30	40.4	5.0	82.7	9.0	151.7	13.4	177.3	17.8
	May 6	26.4	3.1	59.8	5.9	159.0	14.9	169.5	15.9
	May 16	9.9	1.3	67.3	6.6	120.2	11.0	153.0	16.1

표 6. **파종기에 따른 감자 줄기의 무게 변화** (unit : g/plant)

Cultivar	Planting date	June 13 Fresh	June 13 Dry	June 27 Fresh	June 27 Dry	July 9 Fresh	July 9 Dry	July 23 Fresh	July 23 Dry
Irish Cobbler	Apr.30	25.3	1.9	82.7	5.3	210.4	9.0	288.8	24.1
	May 6	15.5	1.0	63.7	3.8	190.2	7.8	252.2	22.8
	May 16	5.6	0.4	85.3	4.2	215.1	8.8	241.7	22.0
Superior	Apr.30	23.4	5.4	89.8	4.5	273.7	15.1	276.2	20.8
	May 6	10.7	0.9	68.1	3.0	185.6	10.5	288.2	23.0
	May 16	8.1	0.2	40.3	2.1	180.1	11.8	287.7	24.4
Jopung	Apr.30	30.2	2.4	97.9	5.0	211.9	8.7	223.4	15.9
	May 6	15.0	1.2	59.8	3.2	197.3	6.5	221.5	16.1
	May 16	5.4	0.4	67.3	3.5	174.1	6.7	222.3	18.0

표 7은 감자괴경의 생체중 변화패턴을 조사시기별로 나타낸 것이다. 파종기가 이를수록 괴경중이 높은 경향이었는데, 품종별로는 초기에는 큰 차이가 없었으나 생육성기 이후 조풍의 괴경중이 급격히 증가하는 경향을 보였다.

표 7. 파종기에 따른 감자 괴경중의 변화(unit: g/plant).

Cultivar	Planting date	Date of investigation					
		June 13	June 27	July 9	July 23	Aug. 5	Sep.3
Irish Cobbler	Apr.30	-	67.2	141.0	445.2	510.2	618.2
	May 6	-	13.9	190.2	407.5	488.8	583.3
	May 16	-	5.3	42.7	355.5	490.9	595.0
Superior	Apr.30	9.2	25.2	197.8	459.2	700.3	911.0
	May 6	-	13.9	190.0	401.3	563.3	651.3
	May 16	-	-	45.2	264.2	482.7	722.5
Jopung	Apr.30	-	31.3	173.5	508.8	880.3	1035.9
	May 6	-	26.6	197.8	544.8	566.8	766.4
	May 16	-	16.9	50.3	303.8	468.2	600.3

강릉과 대관령에서 품종 및 파종기를 달리하여 감자를 재배하였을 때의 수량이 표 8에 나타나 있다. 모든 품종과 파종기에서 강릉에서 수량과 규격서율이 높았다. 특히 조풍의 규격서중은 대관령에 비하여 강릉에서 40-80% 정도 증수되었다. 대관령에서 감자 규격서중과 규격서율은 파종기가 이를수록 높았는데, 남작은 파종기가 늦을 때에는 규격서율이 현저히 떨어지는 경향을 보였다.

표 8. **파종기에 따른 감자 수량의 변화**

Location	Cultivar	Planting date	Harvesting date	Tuber Fresh Weight (kg/10a) Obs	Pred	Marketable Yield (kg/10a)	RMY* (%)
Kang-neung	Superior	Mar.20	JUL.18	4,883	4,760	4,812	98.5
		Mar.31	JUL.18	5,570	4,120	5,358	96.2
		Apr.10	JUL.18	4,200	3,540	4,070	96.9
	Jopung	Mar.20	JUL.18	6,250	5,100	6,058	96.9
		Mar.31	JUL.18	5,162	4,220	5,082	98.5
		Apr.10	JUL.18	4,741	3,540	4,683	98.8
Taegwa-lyeong	Irish Cobbler	Apr.30	Sep. 3	3,264	4,040	2,745	84.1
		May 6	Sep. 3	3,080	3,640	2,527	82.1
		May 16	Sep. 3	3,141	3,110	2,135	68.0
	Superior	Apr.30	Sep. 3	4,810	4,570	4,218	87.7
		May 6	Sep. 3	3,439	3,750	3,029	84.7
		May 16	Sep. 3	3,815	3,110	3,013	79.0
	Jopung	Apr.30	Sep. 3	5,469	4,120	4,909	89.8
		May 6	Sep. 3	4,046	3,700	3,528	87.2
		May 16	Sep. 3	3,169	3,110	2,607	82.3

* RMY : Rate of marketable yield

다. 밭작물

밭작물 작황진단을 위해 보리, 밀, 콩을 대상으로 CERES-Barley, CERES-Wheat, CROPGRO-Soybean 모형의 국내 주요 재배품종별 모수를 추정코자 하였다. 작물시험장에서 발간한 작황시험보고서(1992년 1997년) 내용중 맥류와 콩 작황조사자료를 발췌하였는데 여기에는 수원, 익산, 밀양 등 세 곳에서 쌀보리 두 품종(송학보리, 늘쌀보리), 겉보리 두 품종(올보리, 알보리), 밀 한 품종(조광), 장콩 세 품종(장엽콩, 황금콩, 단경콩), 나물콩 두 품종(단엽콩, 은하콩)의 표준재배시 생육 및 수량조사 결과가 포함된다. 재배기간중 기상은 인근 기상청 표준관측자료를, 토양은 농과원 정밀토양도로부터 검색한 물리화학 특성을 이용하였다. 이들 자료를 토대로 각 품종별 모수를

IBSNAT에서 제공하는 모수 추정 프로그램 GENCALC에 의해 추정하였다.

콩 6개 품종에 대하여 추정된 최적 모수는 표 9와 같다.

표 9. 국내 주요 대두품종의 CROPGRO-Soybean 생육모형 모수 추정값.

VARIETY	VRNAME	ECO#	CSDL	PPSEN	EM-FL	FL-SH	FL-SD	SD-PM	FL-LF	LFMAX	SLAVR	SIZLF	XFRT	WTPSD	SFDUR	SDPDV	PODUR
KH0006	DANKYUNG	SB0501	13.19	.3030	19.80	8.000	15.50	43.43	18.00	1.030	318.0	180.0	1.000	.1864	19.79	1.841	15.29
KH0007	DANYEOP	SB0501	12.61	.3030	19.80	8.000	15.50	38.76	18.00	1.030	318.0	180.0	1.000	.1477	10.63	1.897	1.783
KH0008	DANWON	SB0501	13.02	.3030	19.80	8.000	15.50	36.50	18.00	1.030	318.0	180.0	1.000	.1931	9.638	1.821	10.23
KH0013	EUNHA	SB0501	12.96	.3030	19.80	8.000	15.50	35.00	18.00	1.030	318.0	180.0	1.000	.1261	16.54	2.129	11.18
KH0015	JANGYEOP	SB0501	12.74	.3030	19.80	8.000	15.50	33.98	18.00	1.030	318.0	180.0	1.000	.2555	14.98	1.780	11.18
KH0017	HWANGKEUM	SB0501	12.75	.3030	19.80	8.000	15.50	34.61	18.00	1.030	318.0	180.0	1.000	.2771	14.32	1.720	10.01

ECO# Code for the ecotype to which this cultivar belongs

CSDL Critical Short Day Length below which reproductive development progresses with no daylength effect (for shortday plants) (hour)

PPSEN Slope of the relative response of development to photoperiod with time (positive for shortday plants) (1/hour)

EM-FL Time between plant emergence and flower appearance (photothermal days)

Fl-SH Time between first flower and first pod (photothermal days)

Fl-SD Time between first flower and first seed (photothermal days)

SD-PM Time between first seed (R5) and physiological maturity (R7) (photothermal days)

Fl-LF Time between first flower (R1) and end of leaf expansion (photothermal days)

LFMAX Maximum leaf photosynthesis rate at 30 C, 350 vpm CO_2, and high light (mg CO_2 $m^{-2}s^{-1}$)

SLAVR Specific leaf area of cultivar under standard growth conditions (cm^2/g)

SIZLF Maximum size of full leaf (three leaflets) (cm^2)

XFRT Maximum fraction of daily growth that is partitioned to seed + shell

WTPSD Maximum weight per seed (g)

SFDUR Seed filling duration for pod cohort at standard growth conditions (photothermal days)

SDPDV Average seed per pod under standard growing conditions (#/pod)

PODUR Time required for cultivar to reach final pod load under optimal conditions (photothermal days)

국내에서 주로 재배하는 보리 2 품종과 밀 1 품종에 대하여 추정된 최적 모수는 표 10과 같다.

표 10. 맥류 주요 품종별 CERES모형 구동용 생육관련 모수 추정값

VARIETY	VAR-NAME......	ECO#	P1V	P1D	P5	G1	G2	G3	PHINT
KH0001	Albori	IB0001	3.856	2.032	3.521	10.00	3.538	1.280	95.00
KH0002	Olbori	IB0001	4.000	1.628	3.856	10.00	3.538	1.280	95.00
KH0003	Nulsalbori	IB0001	4.000	2.333	4.111	10.00	4.367	1.500	95.00
KH0004	Songhakbori	IB0001	3.800	1.893	3.387	10.00	3.542	1.367	95.00
KH0001	JOKWANG(wheat)	IB0001	3.000	2.300	6.900	9.9	12.2	3.5	95.00

여기서 각 모수의 의미는 다음과 같다.

P1V Relative amount that development is slowed for each day of unfulfilled vernalization, assuming that 50 days of vernalization is sufficient for all cultivars.

P1D Relative amount that development is slowed when plants are grown in a photoperiod 1 hour shorter than the optimum (which is considered to be 20 hours)

P5 Relative grain filling duration based on thermal time (degree days above a base temperature of 1C), where each unit increase above zero adds 20 degree days to an initial value of 430 degree days.

G1 Kernel number per unit weight of stem (less leaf blades and sheaths) plus spike at anthesis (1/g)

G2 Kernel filling rate under optimum conditions (md/dy)

G3 No-stressed dry weight of a single stem (excluding leaf blades and sheaths) and spike when elongation ceases (g)

PHINT Phylochron interval; the interval in thermal time (degree days) between successive leaf tip appearances.

이들 품종모수로 조정된 CERES-Wheat, CERES-Barley, 그리고 CROPGRO-Soybean 모형을 각각 수원, 익산, 밀양 등 세 곳의 기상, 토양, 그리고 표준재배법 조건하에서 구동시켜 생육모의한 결과를 작물시험장(수원), 호남농업시험장(익산), 그리고 영남농업시험장(밀양)의 실제 생육조사결

과와 비교하였다. 발육단계 추정은 적중율이 높은 것으로 나타났지만, 건물중이나 종실수량은 실측값과 상당한 차이가 있었다. 그림 1 은 얻어진 결과 가운데 보리 생리적 성숙기 및 콩의 개화기 추정부분이다.

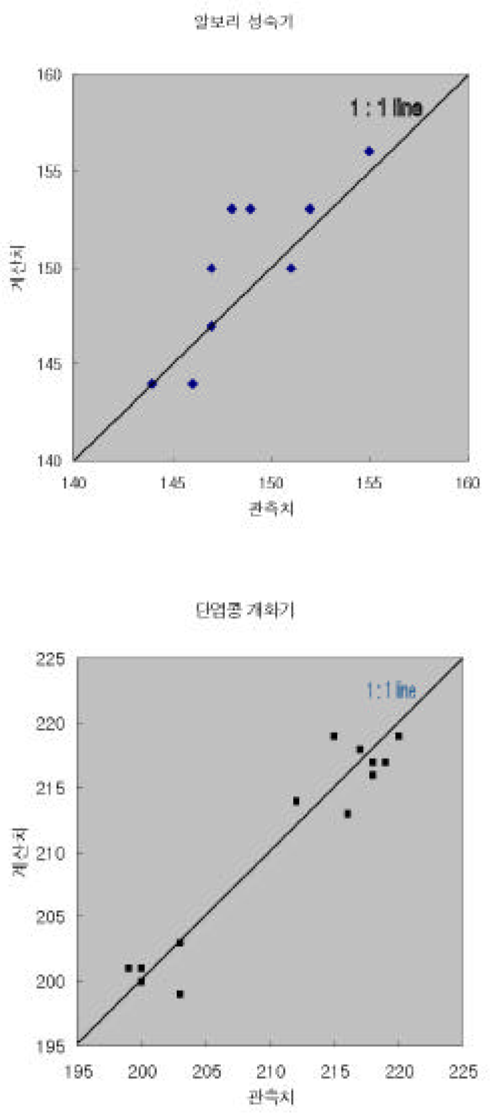


그림 1. 추정된 품종모수에 의한 발육단계 예측값의 정확도.

라. 벼 (CERES-Rice)

CERES-Rice는 기상, 토양, 재배관리정보 및 품종특성모수 자료를 입력받아 작물의 생장과 발육을 모의하는 생태계 모형으로 여러 모듈이 관여하여 벼의 전 생육과정을 모의하는 시뮬레이션 모형(simulation model)이다. 특히 벼의 생육을 모의하기 위해서는 영양생장기간, 등숙기간, 광이용효율과 같은 유전적 특성을 정량화시킨 품종특성모수(cultivar-specific coefficients)를 입력자료로 요구된다.

본 실험에서는 조생, 중생종, 중만생종의 평균적인 품종모수를 추정하였는데, 조생종 모수는 작물시험장 철원출장소에서 1993년부터 1997년까지 시험재배된 ‘오대벼’ 생육자료에 의해 최적화 한 결과이다. 중생종 벼의 경우는 영남작물시험장에서 팔공벼를 대상으로 1989년부터 1997년까지 수행한 실험결과를 이용하였다. 중만생종 모수는 전북 익산의 호남시험장에서 1990년부터 1997년까지 시험재배된 `동진벼‘의 생육자료에 의해 최적화하였으며, 구체적인 모수 추정방법은 Hunt et al.(1993)을 따랐다.

이들 기간중 기상자료는 일최고기온, 일최저기온, 강수량, 수평면일사량만을 이용하였는데, 조생종 모수 추정과정에서는 기상청 철원기상관측소의 일최고/최저기온 및 강수량을, 춘천기상대의 수평면일사량 자료를 각각 수집하였다. 중생종의 경우는 기상청 밀양기상관측소에서 일 최고/최저기온과 강수량값을 수집하였고, 수평면일사량값은 대구기상대 자료를 이용하였다. 중만생종은 기상청 남원관측소에서 일최고기온, 일최저기온 및 강우량 자료를 입수하였으며, 수평면일사량값은 전주기상대의 자료를 이용하였다.

토양자료는 농업과학기술원의 정밀토양도를 제공받아 시험포장의 토양통을 중심으로 토성 및 토심 등의 물리성과 양이온치환용량 등의 화학성에 관한 정보를 추출하였다.

철원과 밀양자료를 토대로 도출된 조생종과 중생종 벼의 품종특성모수들 가운데 두 품종간 큰 차이를 보이는 것은 기본영양생장기간의 길이를 결정하는 P1모수와 한계일장보다 일장이 길어질 때 발육지연정도를 나타내는 P2R 모수이다(표 11). 또한 증만생종이 조생종/중생종과 차이를 보이는 것도 P1 모수이며 덧붙여 낮의 길이가 한계일장보다 더 길어질 때의 발육지연정도를 나타내는 P2R모수도 조만성에 따라 차이가 났다.

표 11. 벼 생장모형 CERES-Rice 의 품종모수

	P1	P2R	P5	P2O	G1	G2	G3	G4
Early season cultivar	200	35	480	11.5	60.0	.023	1.0	1.0
Mid-season cultivar	110	130	530	12.0	45.0	.021	.59	1.0
Late-season cultivar	90	220	580	12.0	35.0	.022	.50	1.0

P1 : Degree days above 9℃ during vegetative period.
P2O : Critical photoperiod or the longest day length in hours.
P2R : Extent to which phasic development leading to panicle initiation is delayed for each hour increase in photoperiod above P2O.
P5 : Degree days above 9℃ from beginning of grain filling to physiological maturity.
G1: The number of spikelets per g of main culm dry weight.
G2: Single grain weight(g) under ideal growing conditions.
G3: Tillering coefficient relative to IR64.
G4: Temperature tolerance coefficient.

이들이 통계기법에 따라 최적화 된 모수지만 연도에 따라서는 실제 보고된 값과 상당한 차이를 보이기도 한다. 다시 말해 이들 모수는 주어진 자료범위 내에서 최적조합이라고 할 수 있지만 연차별 생육모의 조건에 따라 상반된 반응을 보이기도 한다. 이들 모수에 의해 각각 조/중/중만생종 벼의 품

종특성을 갖도록 조절된 CERES-rice 모형을 작물시험장 철원출장소, 영남작물시험장, 그리고 호남농업시험장의 재배조건에서 연차별 생육을 모의한 결과 이앙-출수까지 일수는 65일에서 70일(조생종), 70일에서 80일(중생종), 68일에서 82일(중만생종)로 연차변이의 경향은 유사하나 실제 출수소요일수에 비해 약간 긴 편이다(그림 2). 평년기후에 비해 1993년 여름은 저온, 1994년 여름은 고온이었지만 두 해의 출수기가 실측치와 비슷하게 추정된 것으로 보아 이 모형이 이 정도의 변이폭 내에서는 적절한 반응을 보이는 것으로 판단된다. 그러나 중만생종 동진벼의 경우 고온연도인 1994년에 실제보다 크게 단축되었다.

생리적 성숙기에서 출수기를 뺀 등숙기간의 경우 작물시험장 철원출장소에서 재배된 오대벼에서 1993년부터 1997년까지 연차변이가 거의 없이 46일에서 47일이 걸린 것으로 보고되었으나, 모형 계산결과는 저온연도였던 1993년에 52일로 지연되었고 고온연도였던 1994년에는 38일로 단축되었다. 경남 밀양의 영남작물시험장에서 재배된 중생종 팔공벼에서는 1989년부터 1997년까지 1주일 정도의 연차변이가 관찰되었는데, 모형계산 결과는 약 2주일 정도로 변이폭이 늘어난 점이 달랐다.

단위면적당 수량에 있어서 조생종의 경우 연차변이뿐 아니라 절대수량까지 비교적 잘 추정하고 있으며, 중생종과 중만생종의 경우에는 연차변이는 유사하나 절대수량에 있어서 과다추정 경향이 나타난다(그림 3). 본 모의실험에서는 실제 벼 생육과정에서 발생되는 병·충해, 기상재해 등 돌발현상은 고려하지 않으므로 계산된 수량은 실제 수량보다 언제나 많은, 주어진 조건하에서의 잠재수량에 가까울 것으로 기대된다. 조생종 생육모의에서 이 같은 기대와 다른 결과를 얻은 것은 몇 가지 측면에서 그 이유를 찾을 수 있겠지만, 작물시험장에서 실시하고 있는 시비수준대로 모형을 구동시킬 경우 생육초기에 질소스트레스를 받아 엽면적(葉面積)의 확보가 늦어지는 현상을 꼽을

수 있다.

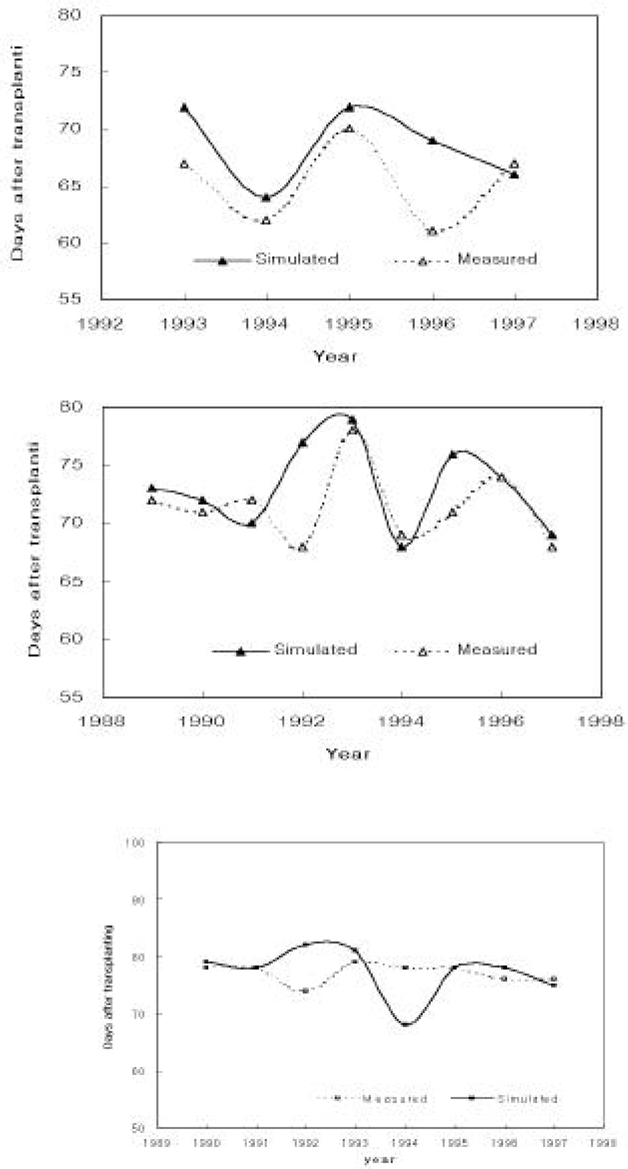


그림 2. **조(상단), 중(중앙), 중만생종(하단) 품종모수로 조정된** CERES-Rice **의 출수기 추정능력.**

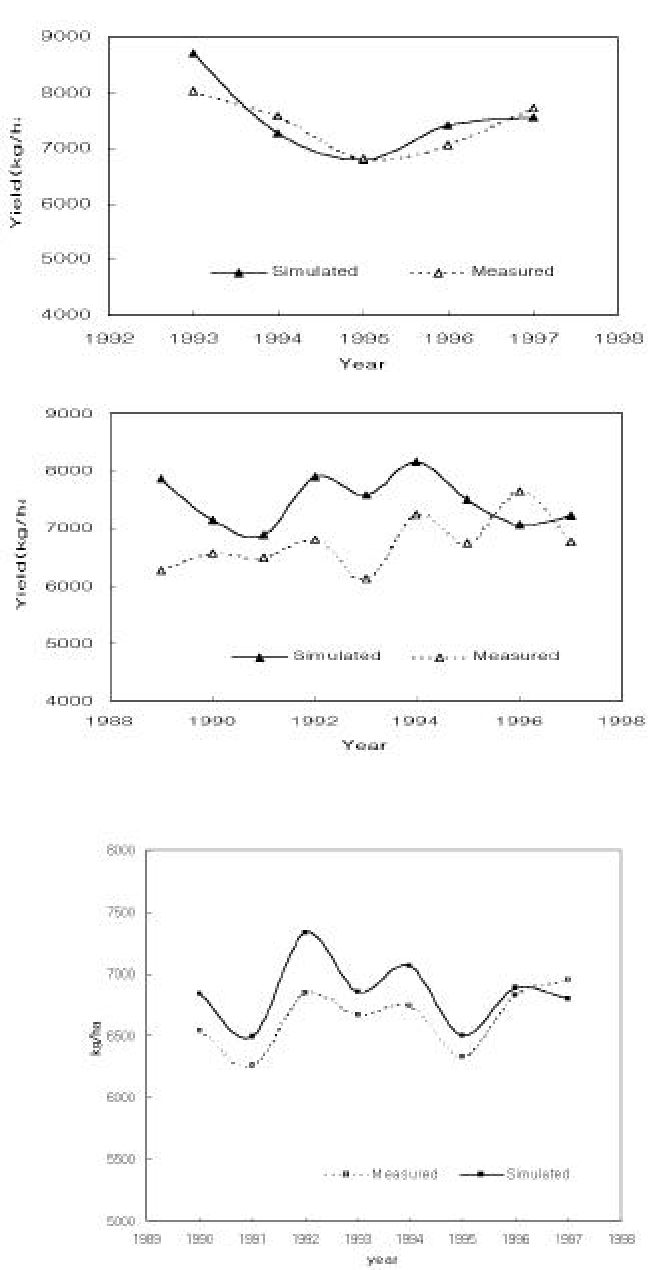


그림 3. **조(상단), 중(중앙), 중만생종(하단) 품종모수로 조정된** CERES-Rice **의 수량 예측성**

제 3 절 입력 자료

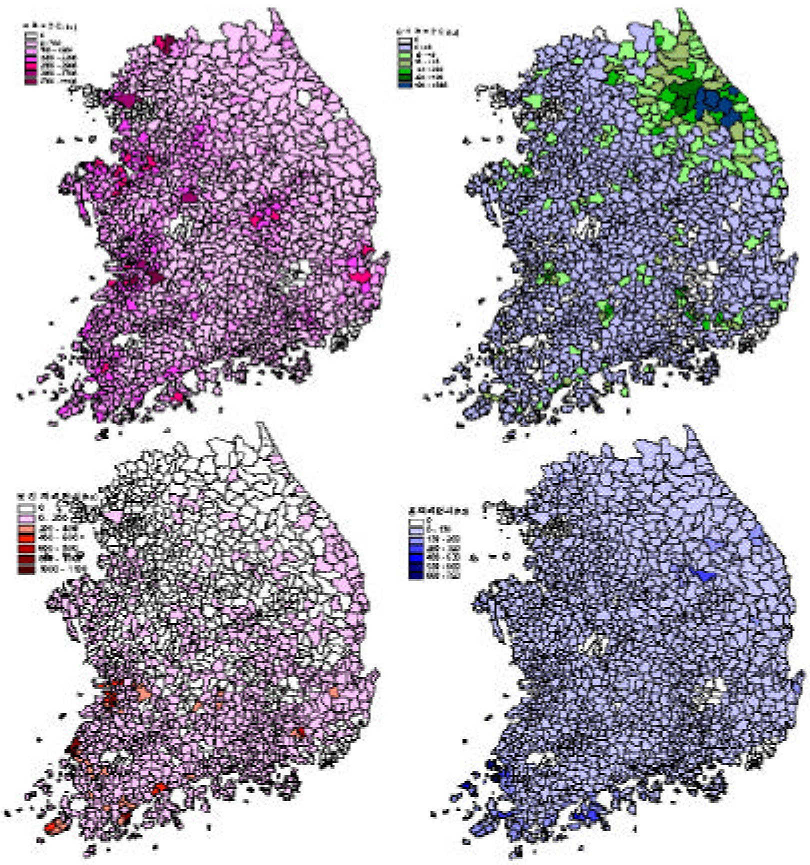
작황진단의 공간적 최소단위인 1,455개 CZU별로 작물모형 구동에 필요한 최소 기상자료(일최고/최저기온, 일사량, 강수량), 토층별 토양특성자료(토성, 토양수분, 질산태 질소, 암모니아태 질소, 유기물 함량, 양이온치환용량, 토양 pH 등), 작물별 재배관리정보(파종일, 재식밀도, 파종법, 시비, 관개, 식부면적, 품종 등)를 IBSNAT 모형의 표준양식으로 작성하였다.

1. 작황진단의 공간단위

남한 행정구역상의 읍면동을 바탕으로 하는 지도상의 작물재배 단위구역(CZU)이 작성되었고 각 CZU의 기본속성으로서 전체 면적, 읍면동 이름, 그리고 식별번호가 부여되었다. 경기도 및 강원도 지역에 한해 부가적인 속성으로서 전층토양의 토성, 토심, 토양통, pH, 유기물 함량, CEC가 입력되었고, 벼 및 감자의 재배면적 정보가 확보되었다.

작물모형의 계산에 의한 생산량은 작황진단단위(CZU)별 단위면적당 수량(kg/ha 등)으로 표현되므로 재배구역별 총생산량의 산정을 위해서는 각 CZU별로 식부면적을 곱해주어야 한다. 엄밀히 말해 식부면적은 CZU 의 가변속성으로서 해마다, 혹은 작기별로 갱신되어야 하지만 그에 대한 정보를 실시간으로 수집하기는 현실적으로 매우 어렵다. 본 연구에서는 우선 1995년말 현재로 실사된 농업총조사(농림부 통계정보관실) 자료를 수정없이 사용하기로 하였다. 앞으로 실용화되면 관계기관과의 협조를 통해 정확한 작물별 식부면적 자료로 대치해야 할 것이며, 나아가 원격탐사기술 등을 이용한 재배면적 추정기법이 개발되어야 할 것이다. 그림 4는 벼, 감자, 보리, 콩의 읍면단위 식부면적값을 CZU 사상에 속성자료로 부가하여 주제도(thematic map)

로 나타낸 것이다.



±ㅈ림 4. 주제도로 표현한 작황진단구역별 주요 식량작물의 재배면적(1995년 말 현재).

2. 기상자료

1,455개 CZU별로 각각 30년 평년, 최근 10년 기상자료 파일이 IBSNAT 표준양식에 맞추어 작성되었다(표 12). 각 파일에는 헤더부분에 CZU식별부호와 경위도정보가 포함되며 총 4,494개 파일로서 전체 용량은 60 메가바이트에 달한다. 앞으로 실제 운영시에는 해마다 새로운 기상자료 파일이 추가되는데, 현재 시점까지의 기상자료 생산에는 기상청으로부터 수집되는 실제값이 사용되겠지만 먼 미래(여기서는 연도 말)까지 기상을 정확히 예측하기는 어려우므로 우선 현 시점 이후의 기상은 30년 평년, 최근 10년, 혹은 전년도 기상자료로 대체하여 각각의 기상조건에서 작물의 생육을 모의하게 되므로 항상 기본 파일의 용량(60 메가바이트)만큼 더 필요하게 된다. 이 경우 작황진단결과는 “올해 남은 기간 중 날씨가 평년(혹은 최근 10년, 작년)과 같다는 가정 하에서 올해의 작황은 어떨 것이다”라고 표현된다. 만약 기상청의 중장기예보가 정확해진다면 이들 대신 예보자료를 이용할 수 있을 것이다.

표 12. **모형 입력용 기상자료 파일의 형식**

```
*WEATHER DATA : CZU183114.WTH
@INSI      LAT     LONG  ELEV   TAV   AMP REFHT WNDHT
KH183114 37.270  126.980    37  13.2  10.2   1.5  10.0
@DATE  SRAD  TMAX  TMIN  RAIN
97001   6.3   2.3  -8.2   0.0
97002   4.4   7.5  -0.5   0.0
97003   6.4   8.2  -0.5   0.0
.
.
97364   3.6   7.6  -4.8   0.2
97365   0.6   4.8  -2.7   2.7
```

INSI 자료생산기관 및 작황진단구역의 식별부호
(KH: 경희대학교, 18: 경기도, 31: 화성군, 14: 팔탄면)
LAT 위도(decimal degree)
LONG 경도(decimal degree)
ELEV 해발고도(m)
TAV 연평균기온(℃)
AMP 기온연교차(℃)
REFHT 기온측정고도(m)
WNDHT 바람측정고도(m)
DATE 연도 및 일년중 날짜(Julian day)
SRAD 적산 일사량(MJ/m2)
TMAX 일최고기온(℃)
TMIN 일최저기온(℃)
RAIN 일 적산 강수량(mm)

3. 토양자료

농업과학기술원으로부터 수집한 토양자료를 토대로 각 토양특성변수를 발췌하여 준비된 1,455개 CZU의 주제도(thematic map)로 표현한 것이 그림 5이다.

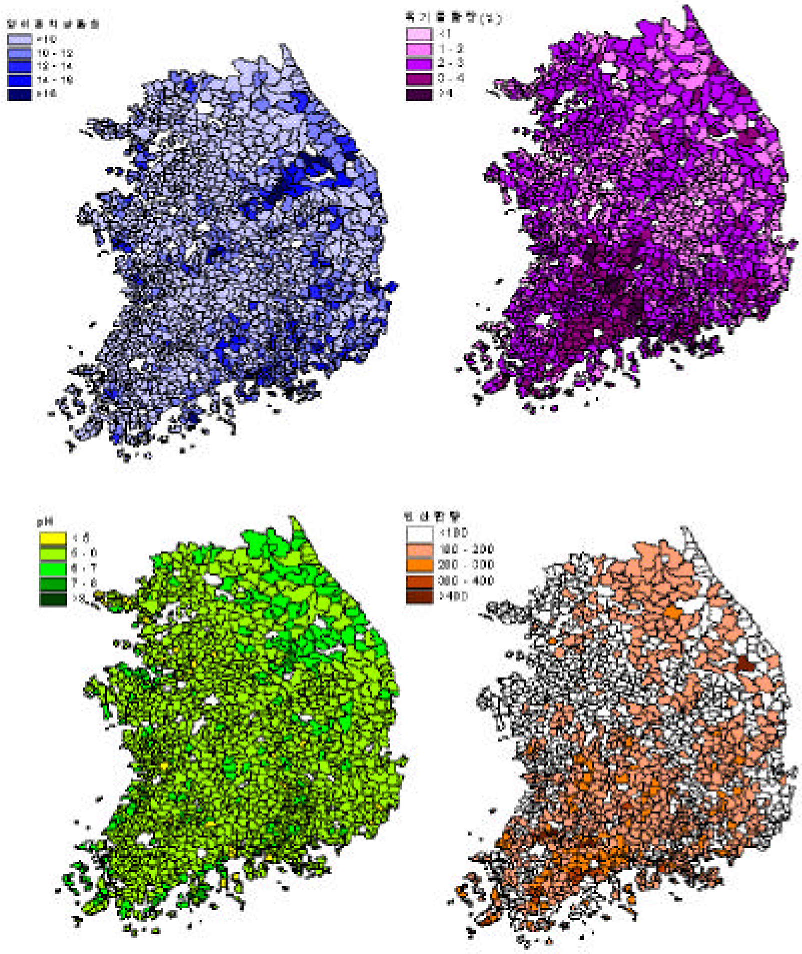


그림 5. **남한** 1,498**개 작황진단구역별 토양특성 가운데 양이온치환용량**, **유기물함량**, **토양산도**, **인산함량 분포도**

작물모형 구동을 위한 초기자료 가운데 농업과학기술원 자료만으로 정하기 어려운 부분은 이들 토양 데이타베이스에서 먼저 각 CZU의 대표 토양통을 동정하고 이로부터 토성(soil texture)과 토심(soil depth)을 알아낸 다음 USDA 토양특성 조견표(Ritchie, 1986)에 의해 계산하였다. 여기에는 bulk density, 토양수분특성 등이 포함된다. 이렇게 해서 얻어진 자료를 IBSNAT 포맷으로 작성하였는데, 여기에는 각 CZU별로 논과 밭 두 종류의 파일이 있다. 표 13은 수원시 권선구에 해당되는 CZU 181300의 논토양 파일이다.

표 13. 작물모형 입력용 토양특성 파일(경기도 수원시 권선구의 논토양 예).

```
*KHPD181300   NASTI          CLLO    130 CLAY LOAM
@SITE         COUNTRY          LAT      LONG SCS FAMILY
 SUWONSI      KOREA          36.33    128.43 JISAN
@SCOM  SALB  SLU1  SLDR  SLRO  SLNF  SLPF  SMHB  SMPX  SMKE
   -99  0.15   2.0  0.65   -99  1.00  1.00 SA009   -99   -99
@  SLB  SLMH  SLLL  SDUL  SSAT  SRGF  SSKS  SBDM  SLOC  SLCL  SLSI  SLCF  SLNI  SLHW  SLHB  SCEC
    30   -99   .21   .33   .38 1.000   1.0   1.3  2.00  35.0  30.0   0.0  0.13   6.1   -99  10.5
    50   -99   .21   .33   .38 1.000   1.0   1.3  2.00  35.0  30.0   0.0  0.13   6.1   -99  10.5
    70   -99   .21   .33   .38 1.000   1.0   1.3  2.00  35.0  30.0   0.0  0.13   6.1   -99  10.5
    90   -99   .21   .33   .38 1.000   1.0   1.3  2.00  35.0  30.0   0.0  0.13   6.1   -99  10.5
   110   -99   .21   .33   .38 1.000   1.0   1.3  2.00  35.0  30.0   0.0  0.13   6.1   -99  10.5
   130   -99   .21   .33   .38 1.000   1.0   1.3  2.00  35.0  30.0   0.0  0.13   6.1   -99  10.5
```

해설:

KHPD181300	경희대에서 가공한 CZU181300의 논토양 특성(밭은 KHUP)
NASTI	농업과학기술원(원자료 생산기관)
CLLO	대표토성(Clay Loam)
130	Soil depth (cm)
LAT	Latitude, degrees (decimals;+ north)
LONG	Longitude, degrees (decimals;+ east)
SCS FAMILY	미국 토양보전국 분류에 따른 토양통명
SLDR	Drainage rate, fraction per day
SCOM	Color, moist, Munsell hue
SLRO	Runoff curve no.(USDA Soil Conservation Service)
SALB	Albedo, fraction
SLNF	Mineralization factor, 0 to 1 scale
SLU1	Evaporation limit, mm
SLPF	Photosynthesis factor, 0 to 1 scale

SSKS	Saturated hydraulic conductivity, macropore, cm h^{-1}
SMHB	pH in buffer determination method, code
SBDM	Bulk density, moist, g cm^{-3}
SMPX	Phosphorus determination code
SLOC	Organic carbon, g kg^{-1}
SMKE	Potassium determination method, code
SLCL	Clay (립경 <0.002 mm) content, %
SLB	Depth, base of layer, cm
SLSI	Silt (립경 0.05 to 0.002 mm), %
SLMH	Master horizon
SLCF	Coarse fraction (립경 >2 mm), %
SLLL	Lower limit of soil water, cm^3 cm^{-3}
SLNI	Total nitrogen g kg^{-1}
SDUL	Upper limit of drained soil, cm^3 cm^{-3}
SLHW	pH in water
SSAT	Upper limit of saturated soil, cm^3 cm^{-3}
SLHB	pH in buffer
SRGF	Root growth factor, soil only, 0.0 to 1.0
SCEC	Cation exchange capacity, cmol kg^{-1}

제 4 절 작황진단의 실제

1. 1997년 강원도 감자 작황

강원도내 각 CZU에 대하여 평균 해발고도 500m를 기준으로 춘작지대와 하작지대로 나누어 각각에 대해 1997년 기상자료에 의한 감자 품종 “수미”의 생장을 모의하였다. 그림 6은 그 결과 가운데 하작감자의 단위면적당 수량과 지역별 총생산량을 나타낸다.

최종 생산량 추정값은 실제값과 비슷한 경향이나 이는 총생산량에 미치는 재배면적의 영향 때문이지 각 시군별 수량 추정치는 양상이 크게 다르다. 이는 감자의 최종 생산에 미치는 환경요인 가운데 본 연구에서 고려하지 않은 병해충 및 기상재해(우박, 폭우, 강풍 등)의 영향이 현실적으로 매우 크기 때문이다.

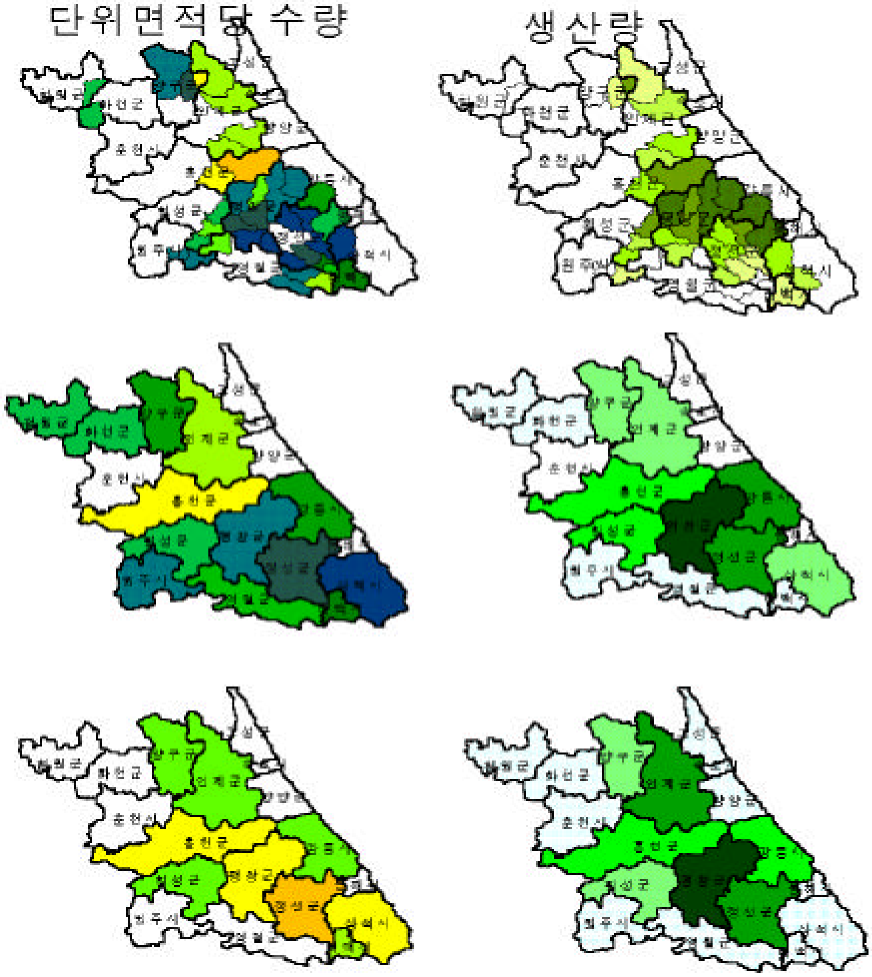


그림 6. 1997**년 기상조건하에서 모의된** “**수미**”**품종의 여름재배시 각** CZU**별 수량**(**좌상**). **이것을 토대로 각 시군별 평균값을 구해**(**좌중**), **시군에서 집계한 수량**(**좌하**)**과 비교하였다**. **오른 쪽은 재배면적을 고려한 생산량으로서 우상단은 생장모의에 의한** CZU**별 수량** x CZU**별 재배면적**(95**년 통계**)**이며**, **이를 시군별로 더하여**(**우중단**), **강원도 감자생산통계자료**(**우하단**)**와 비교하였다**.

2. 1998/99년 답리작 보리 작황

벼와 달리 보리가 재배되는 지역은 전남, 전북, 경남, 경북의 4개 도에 집중되어있다. 따라서 본 연구의 지역범위를 이들 4개 도로 한정하였다. 남부지방의 기후적 특성을 고려하여 4개 도의 파종기를 10월 15일로 통일하였으며, 재배양식은 작물시험장의 맥류 표준재배법을 따랐다. 모의에 이용된 품종은 겉보리와 쌀보리로, 전남과 전북에는 쌀보리인 늘쌀보리(호시)를, 경남과 경북에는 겉보리인 알보리(영시)를 이용하였다.

당해연도에 파종하여 그 다음해 수확하는 보리의 특성을 고려하여 1993년부터 1999년의 일별기상자료를 준비하였다. 특히 1999년의 기상화일에 주의하여야 하는데, 1999년 현재날짜 이후의 자료는 존재하지 않으므로 전년도의 기상자료로 대치하였다.

보리는 논, 밭에서 동시에 재배되지만 밭토양 정보가 충분치 못하므로 답리작에 한정시켜 논토양화일을 이용하였다.

작물모형 구동을 통해 얻어진 각종 생육 및 수량정보 가운데 우선 발육단계와 단위면적당 수량을 중심으로 분석하였다. 보리의 발육단계는 1997년에 파종하여 1998년에 수확한 시험의 결과를 토대로 출수기와 성숙기의 지역분포를 살펴 보았다. 평년수량은 각 읍, 면별 재배구역 단위로 규격화하였는데, 1994년부터 1998년의 단위면적당 수량에서 최고값과 최저값을 제외한 나머지 3개년 값을 산술평균하여 도출하였다. 이렇게 얻어진 평년값에 대해 1999년 예상수량을 백분율로 표현하였다. 이상의 결과는 그림 7로 요약할 수 있다.

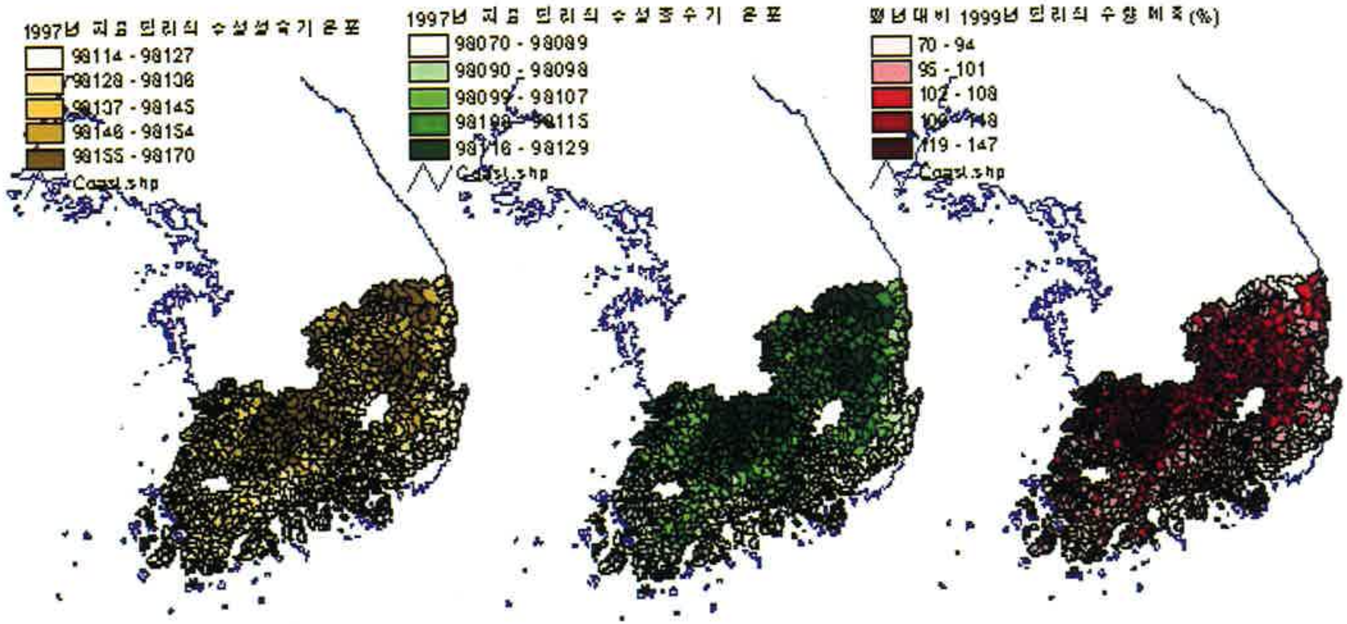


그림 7.   1997/98 작물연도의 답리작 보리 발육단계 및 1998/99 연도 단위면적당 예상수량 분포

3. 1997-1999년 전국 벼 작황

가. 읍면 단위 생육 모의

최근 3년(1997, 1998, 1999년)의 벼 작황을 농업기상학적 기법에 의해 진단하여 농림부의 작황조사결과에 의해 검증하기 위해 평년작황값을 산출하였다. 평년작황값은 작황을 진단하고자 하는 당해연도 이전 5년치로서 최고값과 최저값을 제외한 나머지 3개년 값을 산술평균한 것이다.

컴퓨터 시뮬레이션에 의한 작황진단의 공간적 범위를 전국으로 확대하는데 있어 그 결과를 현실에 근접시키기 위해서는 현지 품종 및 재배양식에 관한 정보가 절대적으로 필요하다. 하지만 1,500개에 달하는 읍・면에서 각각 그 정보를 획득하는 것이 용이하지 않아, 품종의 경우 각 재배구역(CZU; Cultivation Zone Unit)에 조생종, 중생종, 중만생종을 모두 적용하였다. 육묘일수는 35일로 일제히 정하였지만 이앙일은 조생종 5월 20일, 중생종 5월 25일, 중만생종 5월 30일로 5일씩 간격을 두었다. 재식거리는 모두 30×14cm이며, 본답 시비량은 $N-P_2O_5-K_2O$ =11-7-8 kg/ha, 관개는 작물의 수분스트레스 범위를 0에서 1로 둘 때 0.05 내외에서 물대기를 시작하는 것으로 하였다.

이렇게 하여 평년값을 산출한 후 1997년, 1998년 및 1999년 9월 15일 현재의 작황을 평년값에 대한 증감정도로 두고 분석하였다. 여기서 1999년 9월 15일 현재 실시간 작황이므로 1999년 1월 1일부터 9월 15일까지의 일기상자료는 실측값을 이용하였지만 1999년 9월 16일이후의 일기상자료는 전년도 일기상자료로 대체하였다. 1993년에서 1998년까지의 일기상자료는 한국농림수산정보센터(pc통신: center.affis.org.kr)의 “AFFIS1500" 읍면별 자료를 제공받아 이용하였다.

단위면적당 수량(kg/ha)을 비교하기 위해 재배구역(읍면)별로 계산된 단위

면적당 수량을 각 CZU의 재배면적 가중(加重) 평균으로 환산한 다음 시ㆍ군별로 합산하였다. 이는 비교를 위해 수집한 농림부 작황조사의 최소단위가 시ㆍ군이기 때문이다. 1988년부터 1996년까지의 비교수량은 농림통계연보에서 발췌하였다.

나. 작황진단 결과

평년작황의 계산을 위해 1993년부터 1998년까지 생육모의에 의한 단위면적당 수량(kg/ha)을 추정한 바 5,000에서 8,000 수준이었다(그림 8).

국립농산물검사소 농업정보통계과에서 매년 전국 5,000 10,000개의 표본구를 대상으로 직접 3차례정도 벼의 생육 및 수량을 조사하고 있어 신뢰성있는 검증자료로서 이용할 수 있다. 최근 3년(1997년, 1998년 및 1999년 9월 15일) 모의 작황을 국립농산물검사소 농업정보통계과의 시군별 실제 자료와 비교검정하였다. 최근 3년의 수량에 대한 경향성을 파악하기 위해 연도마다 동일한 계산방법으로 실제보고치와 모의치를 검정하였다. 즉, 평년값에 대한 당해연도의 단위면적당 정조수량의 증감을 백분율로 나타낸 후 -3에서 +3까지의 표준편차 범위내에 존재하는 지역만을 표시하였다. 공간해상도에 있어서 실제보고치는 시ㆍ군단위이지만 모의치는 읍ㆍ면으로 나타난다.

1997년 실제보고치의 경우 경기북부와 충남일부에서 증가한 경향을 나타내었을 뿐 전국적으로는 평년수준을 보였다. 하지만 모의치의 경우 몇몇 읍ㆍ면을 제외하고는 전국적으로 평년수준으로 나타났다(그림 9).

1998년의 경우 1997년과 유사하게 경기북부와 충남일부에서 증가한 것으로 나타났으나 경북일부에서는 감소한 것으로 보고되었다. 모의치의 경우 경기북서부에서는 평년에 비해 증가를 강원과 경북 일부지역에서 감소한 모습을 나타냈으나 전국적으로는 평년수준으로 나타났다.

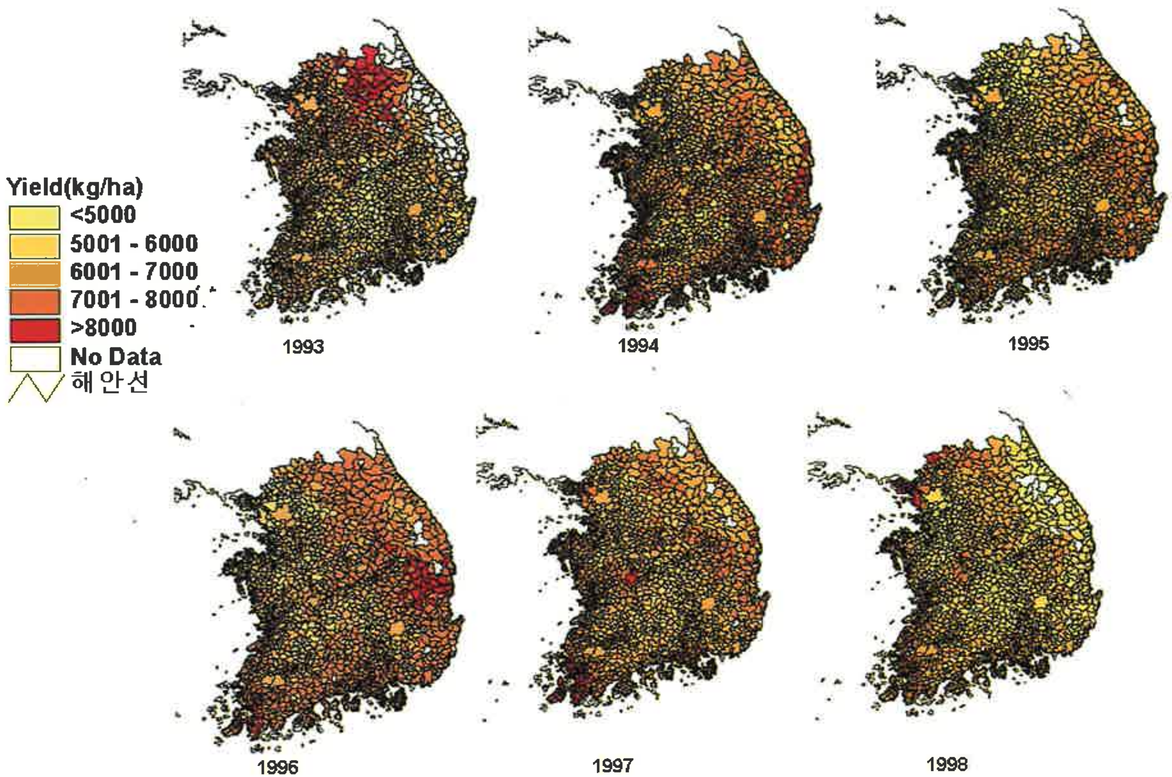


그림 8. 과거 6년간 읍면별 벼 수량성의 분포

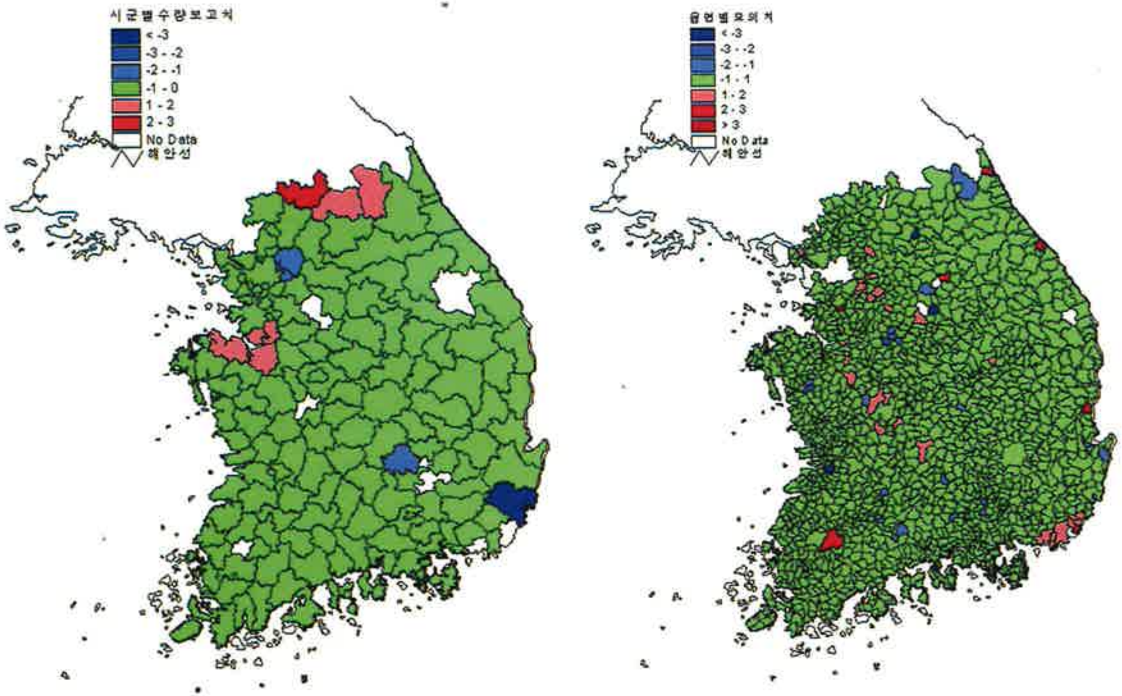


그림 9-1. 농업기상학적 진단기법에 의한 1997년 벼 작황(단위면적당 수량)을 농림부 조사자료(왼쪽)와 비교함

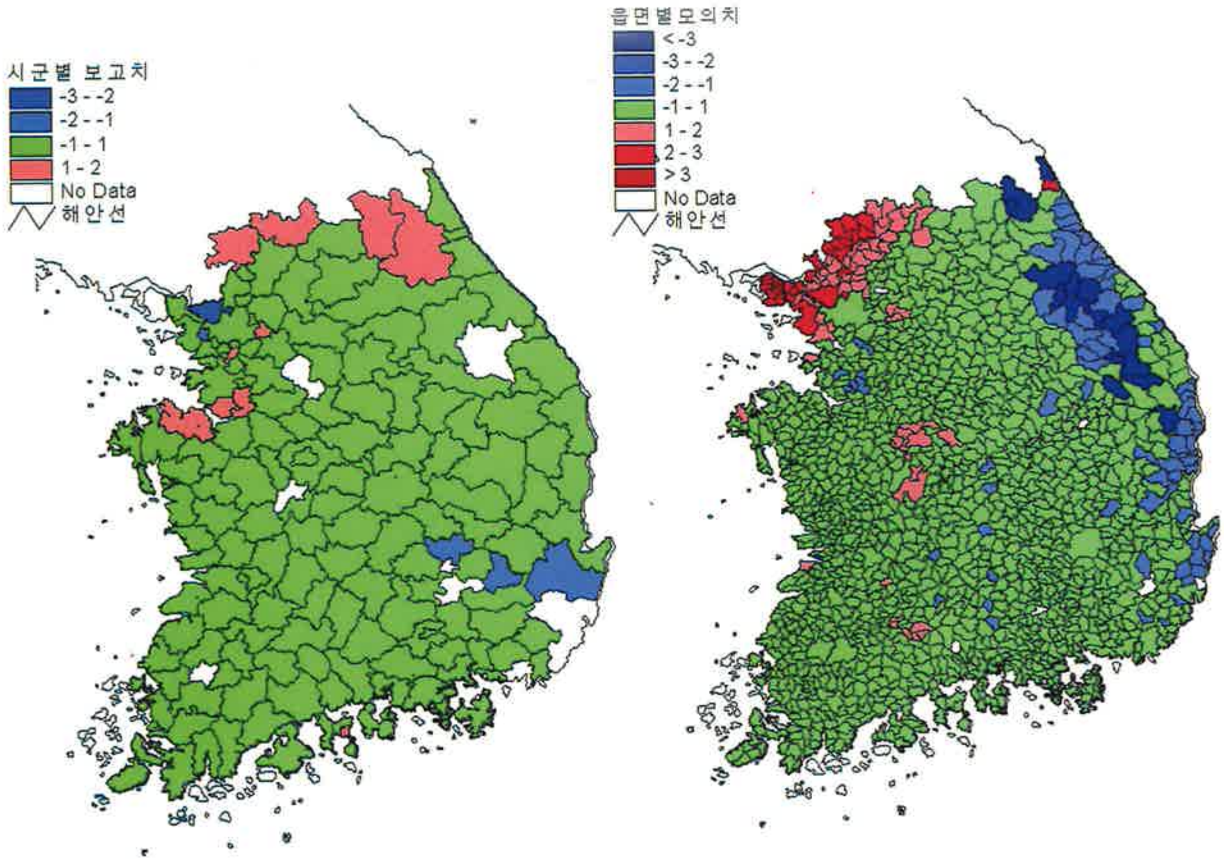


그림 9-2. 농업기상학적 진단기법에 의한 1998년 벼 작황(단위면적당 수량)을 농림부 조사자료(왼쪽)와 비교함

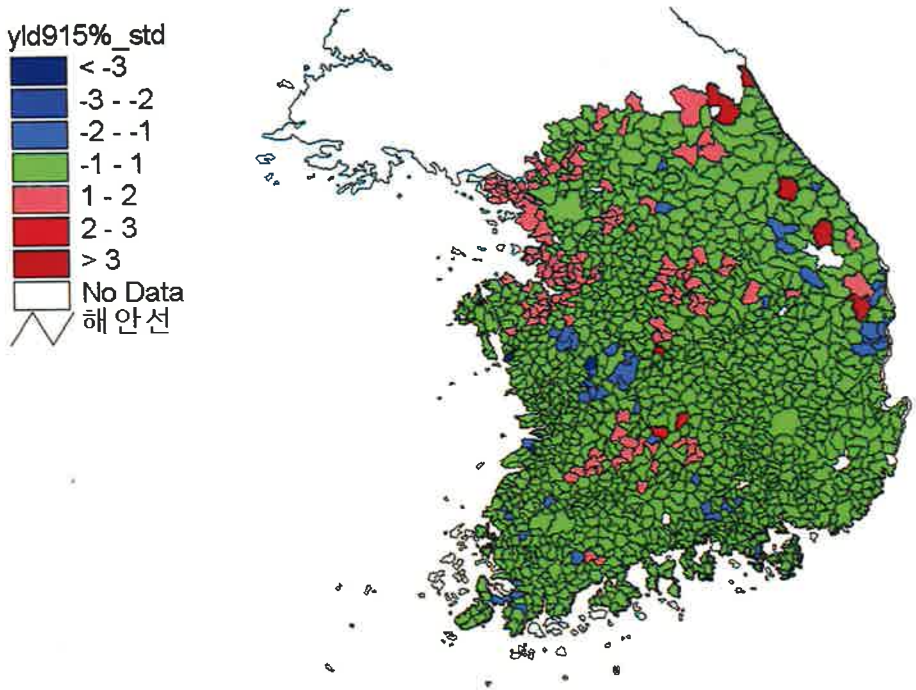


그림 10. 농업기상학적 진단기법에 의한 1999년도 벼 작황(단위면적당 수량)의 읍면별 분포 추정

1999년 9월 15일 현재 작황의 경우 전국적으로 충남, 경기, 충북 및 전북 일부 지역에서는 증가한 경향성을 보이고 있으나 전국적으로는 평년작 수준으로 모의되었다(그림 10).

생산량의 경우 농산물검사소 농업정보통계과의 공식자료에 의하면, 전국적으로 밭벼와 논벼를 모두 합쳐 1997년에 5,450천톤, 1998년에 5,097천톤이 생산되고, 1999년에는 5,263천톤이 생산된 것으로 보고되었다. 하지만 1995년의 식부면적에 단위면적당 수량을 곱하여 산출한 모의생산량은 1997년에 4,827천톤, 1998년에 4,485천톤이 생산되고 1999년에 약간 증수한 4,972천톤으로 실제 보고치보다 낮았다(그림 11). 이는 본 연구에서 다룬 1,455개 읍면에 포함되지 않은 면적(예 제주도 및 도서, 광역시) 때문이다.

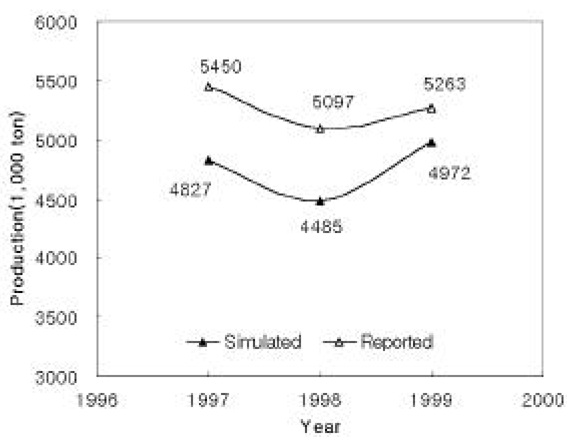


그림 11. 작황진단기법에 의한 최근 3년간의 전국 쌀 생산량 변동 추이. 전국 1,455개 읍면을 대상으로 함.

제 5 절 결 언

작황진단의 핵심기술 가운데 작물모형은 모두 외국으로부터 수집하여 국내 품종에 맞게 조정하는 작업에 중점을 두었다. 최적 모수를 찾아낸 작물모형도 작황진단에 실제 적용하기 위해서는 보다 광범위한 포장실험을 통해 실제 생육과 수량에 접근시켜야 한다. 이는 많은 인력과 예산이 소요되는 사업이므로 장기적인 계획을 수립하여 지속적으로 추진해야할 것이다. 특히 국내에 작물모형 관련 전문인력이 희소한 점을 감안한다면 외국(동구권)과의 공동연구 혹은 외국 전문가의 박사후 연수프로그램 등과 연계하는 것이 바람직하다.

본 실험의 결과로부터 일별 기상자료와 작물모형을 이용한 생산량 예측이 실용화될 수 있으며, 특히 지리정보체계와의 결합을 통해 넓은 지역의 공간변이를 분석할 수 있음을 확인하였다. 물론 실용화를 위해서는 많은 점들이 개선되어야 하겠지만 우선 다양한 품종을 나타낼 수 있는 모수 추정작업이 필요하다. 현재 국내에는 약 65종의 벼 장려품종이 재배되고 있지만 모수추정에 필요한 작황시험 혹은 생육조사 자료가 부족하여 정확한 모수 추정에 어려움이 뒤따른다.

또한 작황진단의 최소단위인 CZU별 품종, 토양, 재배법 및 재배면적에 관한 정확한 정보의 수집이 필수적이지만 이 역시 현실적으로 어려움이 많다. 나아가 식량수급 등의 농업정책결정 의사지원도구로 작황예보를 이용하기 위해서는 정확한 중·장기 일기예보가 선행되어야 한다. 정확한 일기예보는 생육모의 결과 뿐 아니라 병해충 예찰의 신뢰도를 높여 작물 생육량에 의존한 생산량 예측결과를 보완해줄 것으로 기대된다.

인 용 문 헌

과학기술처, 1990: **한반도 기후변화 감시 및 이상기상에 관한 연구(Ⅰ). 기상연구소주관 특정연구과제 최종 보고서**, 421pp.

농림부, 1997: '97 **작물생산 동향분석**, **통계정보관실**, p5-24.

신만용, **윤진일**, **서애숙**, 1999: **공간통계기법을 이용한 전국 일 최고/최저기온 공간변이의 추정**. **대한원격탐사학회지**, **15**(1), 9-20.

오성남, 1995: **배증** CO_2 **기후가 수도생육에 미치는 영향에 관한 연구**. **한국기상학회지**, **31**(3), 267-279.

윤진일, 1990: **대기중 이산화탄소 배증조건하의 기후시나리오에 의한 국내 쌀 생산 추정**. **한국기상학회지**, **26**(4), 263-274.

이변우, **신진철**, **봉종헌**, 1991: **대기중** CO_2**농도 증가에 따른 기후변화가 농업기후자원**, **식생의 순** 1**차 생산력 및 벼 수량에 미치는 영향**. **한국작물학회지**, **36**(2), 112-126.

De Wit, C. T., 1958: Transpiration and crop yields. *Agric. Res. Rep.* Pudoc, Wageningen, Netherlands, 646pp.

Duncan, W. G., R. S. Loomis, W. A. Williams, and R. Hanau, 1967: A model for simulating photosynthesis in plant communities. *Hilgardia*, **38**, 181-205.

Godwin, D., U. Singh, J. T. Ritchie, and E. C. Alocilja, 1992: *A users guide to CERES-Rice*, International Fertilizer Development Center, Muscle Shoals, AL.

Hunt, L. A., S. Pararajasingham, J. W. Jones, G. Hoogenboom, D. T. Imamura, and R. M. Ogoshi. 1993. GENCALC: Software to facilitate the use of crop models for analyzing field experiments. *Agronomy Journal*, **85**, 1090-1094.

Jones, C. A., and J. R. Kiniry (eds), 1986: CERES-Maize: *A Simulation Model of Maize Growth and Development*. Texas A&M University Press, College Station, Texas.

Loomis, R. S., and W. A. Williams, 1963: Maximum crop productivity: An estimate. *Crop Sci.* **3**, 67-71.

Lal, M., K. K. Singh, L. S. Rathore, G. Srinivasan, and S. A. Saseendran, 1998: Vulnerability of rice and wheat yields in NW India to future changes in climate. *Agricultural and Forest Meteorology*, **89**, 101-114.

Oh, S. N., 1992: Meteorological simulation of rice growth and yield in US rice area using a crop physiological model: RICEMOD-300. *Journal of Korean Meteorological Society*, **28**(1), 41-60.

Parry, M. L., and T. R. Carter, 1988: The assessment of effects of climatic variations on agriculture: aims, methods and summary of results. In: M. L. Parry, T. R. Carter, and N. T. Konijn (eds.). *The Impact of Climatic Variations on Agriculture*, Vol. 1, Kluwer Academic, p11-96.

Singh, U., and J. L. Padilla, 1995: Simulating rice response to climate change. In: *Climate Change and Agriculture: Analysis of Potential International Impacts*. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA, p99-121.

Sinclair, R. T., and N. G. Seligman, 1996: Crop modeling: From infancy to maturity. *Agronomy Journal,* **88**, 698-704.

Yoshino, M., 1988: Development of climatic scenarios. In: M. L. Parry, T. R. Carter and N. T. Konijn (eds). *The Impact of Cimatic Variations on Agriculture.* vol. 1, Kluwer Academic, p751-772.

제 4 장 대기환경 감시

제 1 절 서 설

인간의 활동영역이 넓어지면서 대기권과 생물권에 대한 영향이 점점 커짐에 따라, 대기와 지표사이의 상호작용에 관한 이해가 시급한 상황이다. 특히 농업 생태계의 경우, 식량 생산과 직접적으로 관련이 있기 때문에 이곳에서의 대기 환경 변화에 따른 예측은 매우 중요하다. 농업 생태계는 평평하고 균질하며 넓기 때문에 미기상학적인 관측방법을 적용하기에 아주 좋은 조건이다. 또한 벼가 심어진 후 3 4개월 생장하는 동안에는 논의 피복이 변하여 이에 따른 지표의 거칠기, 알베도, 증발산 등이 변하여 대기에 다른 영향을 주게 된다. 따라서 토지 사용 및 식피의 변화에 따른 영향에 대한 중요한 대기 환경 감시와 관련된 정보를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 농업생태계의 대기환경, 즉 벼 군락과 대기 지표층간의 상호 작용을 이해하기 위해 고속 및 저속 반응 관측 시스템을 이용하여 벼 군락 상부 및 하부에서의 에너지 및 물질 교환 과정을 연구하는 한편, 챔버 방법을 이용하여 단일 잎에서의 광합성과 기공 전도도를 측정, 모수화하고 이를 군락권 규모의 이산화탄소 교환 및 증발산 산출로 확장하고자 하였다. 미기상학적 방법이 전체 군락과 대기간의 교환을 기상학적 측면에서 접근하는 반면에, 챔버 방법은 벼의 식물생리학적 측면을 고려하는 접근 방법이다. 이 두 방법은 개별적인 방법이 아니라 상호 보완적이다. 즉 기후 변화에 따른 농작물 환경의 변화는 작물의 식물 생리학적인 측면에서도 연구가 이루어져야 한다. 그런 의미에서, 챔버 방법이 아주 적절하기는 하지만 벼 전체 군락으로의 규모 확장에 있어서는 많은 시공간적 제약들이 따른다. 이런 문제들은 군락 상부에서의 미기상학적인 방법을 이용한 하향 접근 방법으로 상호 보완될 수 있다. 기후 변화에 따른 벼의 식물 생리적 및 생화학적 요소의 변동과 단일 잎으로부터 측정

되는 에너지 교환과 증산 및 이산화탄소의 교환을 전체 군락으로 규모 확장하기 위해, 환경 변화(복사, 온도, 습도, 대기중 이산화탄소의 농도 등)에 따른 벼의 광합성, 증산, 기공 전도도 등의 반응을 정확한 관측을 통해 정량화해야 한다.

본 연구에서는 삼차원 초음파 풍속계를 주축으로 한 관측/제어/집록 및 분석장치로 구성되어 있는 플럭스 관측 시스템의 설계와 제작, 기기의 선정 및 구입을 국내외 전문가들의 자문 및 자료 수집을 통해 수행하였다. 기본 설계를 예정대로 마치고, 삼차원 초음파 풍속계와 이를 접합할 수 있는 기본 집록 및 제어 시스템에 필요한 기기들을 구입하였다. 구입된 기기들은 시험가동을 거쳐 접합된 후, 이를 이용하여 국제공동실험에서 약 2주간에 걸쳐 실측에 사용되었다. 이 실험에서는 선진 외국연구소들(일본 농업환경과학기술연구소, 일본 오카야마대학 농학부, 호주 CSIRO)의 플럭스 관측시스템들과 비교 관측을 수행하였다. 주목할 점은 아래의 수행방법에서 설명되어 있는 바와 같이, 에너지 및 온실기체 등의 스칼라 플럭스를 측정하기 위해서는 삼차원 초음속 풍속계 외에 스칼라(예를 들면, 메탄, 이산화탄소, 수증기 등) 농도의 변동분을 빠르고 정밀하게 측정할 수 있는 기기가 동시에 필요한 점이다. 국제 공동 실험에서는 스칼라 기기들을 일본측 연구소로부터 대여를 받아 우리 연구진의 삼차원 초음파 풍속계와 접합하여 실험을 수행하였다. 2차, 3차 및 4차년도에는 1차년도에 확보된 플럭스 관측 기술을 개선하고, 서울대학교의 농업과학공동기기센터(NICEM), 연세대학교 이과대학 대학원 중심대학, 그리고 환경부의 G-7 프로젝트에서 구입된 기기들을 대여 또는 지원을 받아서 관측지와 연구 목적에 맞도록 관측 시스템을 최적화 하여 국내 논포장(경기도 병점, 강화도 하리)에서 에너지 플럭스와 온실기체 (메탄) 플럭스 측정실험을 수행하였다.

제 2 절 재료 및 방법

1. 이론적 배경

온실 기체의 증가에 따른 지구 대기의 변화는 생태계에 영향을 주고 이에 대해 생태계는 다시 대기에 영향을 미치는 되먹임(상호 교환) 작용은 이미 잘 알려져 있다. 이에 선진국에서는 농업생태계를 비롯한 지구의 식생과 대기간에 교환되는 에너지, 물, 그리고 온실 기체 등에 대한 지표 플럭스를 정량적으로 파악하는 연구가 이미 오래 전부터 활발히 진행되어 오고 있다. 이에 반해 국내에서는 이러한 연구 결과가 본 연구 프로젝트가 시작되던 때만하더라도 보고된 바 없었으며, 다만 여러 온실 기체의 배경 농도만을 관측하고 있는 실정이었다.

식생지를 포함한 지표면과 대기간에 교환되는 질량 및 에너지 플럭스를 측정하는 데에는 크게 두 가지 방법이 있다. 하나는 일정한 부피를 가진 덮개(enclosure)를 이용해서 일정 시간 덮개 내의 농도 변화를 측정, 그것으로부터 플럭스를 구하는 재래식 방법이며, 다른 하나는 미기상학적(micrometeorological) 기술을 이용하는 방법이다. 미기상학적 방법에는 여러 가지가 있으나 주로 경도(gradient)법과 에디 상관법(eddy correlation) 또는 에디 공분산(eddy covariance)법이 주로 사용되고 있다. 에디 공분산 방법은 식생을 포함한 지표-대기간에 교환되는 물리량의 연직 플럭스(이하 간단히, 플럭스)를 정량화하고 그 교환 과정에 중요한 역할을 담당하는 난류의 구조를 밝히는데 사용된다. 예를 들면, 운동량 플럭스, 잠열 및 현열과 같은 에너지 플럭스, 이산화탄소와 메탄, 산화질소 등과 같은 온실 기체 플럭스, 지표 오존 및 건성 침적 등과 같은 환경 오염과 관련된 물리량을 측정할 수 있다

(예, Businger, 1986; Kaimal과 Finnigan, 1994; Kim 등, 1999). 이 방법을 사용하여 얻어진 플럭스 자료들은 생권 모형, 경계층 모형, 또는 지역 규모 및 대기 대순환 모형의 초기 및 경계 자료로 사용될 뿐만 아니라 모형의 검증에 사용된다. 에디 공분산 방법은 기존의 챔버 방법에 비해 관측지를 손상시키기 않으면서, 넓은 지역에 대해 적분된 플럭스를 연속적으로 장기간 구할 수 있다는 장점 때문에 학계에서 강력하게 추천되고 있다(IGBP, 1998). 본 연구에서는 이 첨단 기술인 에디 공분산 방법을 사용하였으며, 본 연구를 통해 습득된 그 이론적인 배경과 적용은 다음과 같다(최태진 등, 1999).

가. 에디 공분산 방법의 이론적 배경

지표면 위로 바람이 부는 경우, 수증기와 같은 임의 기체의 연직 수송을 고려하자. 그 기체의 수송에는 지표면 근처에서는 분자 확산이, 그 위로는 난류에 의한 수송이 지배적이다. 따라서 지표면에서 대기 또는 대기에서 지표로의 물질의 수송량은 지표면에서의 분자 확산을 계산하면 알 수 있지만 분자 확산은 직접 측정할 수 없다. 하지만 보전 방정식에 의하면 지표면이 수평적으로 균질(수평 이류항 무시) 하고 편평(평균 연직 풍속을 0으로 가정)하며, 정체성(시간 도함수 항을 무시)을 가정하면 분자 확산은 임의의 높이에서의 난류에 의한 평균 연직 공분산과 같다(부록 참조). 이 공분산은 정밀도가 높고 반응속도가 빠른 기기로 측정할 수 있다. 임의의 기체 플럭스(F_g, $gm^{-2}s^{-1}$)에 레이놀즈 평균을 적용하면 다음과 같다(예, Baldocchi 등, 1988).

$$F_g \ (\equiv \overline{w\chi\rho_a}) = \overline{\rho_a}\,\overline{w}\,\overline{\chi} + \overline{\rho_a}\,\overline{w'\chi'} \qquad (1)$$

여기서 ‘ ¯ ’는 시간 평균, w는 연직 풍속(ms^{-1}), χ (gm^{-3}/kgm^{-3}) 는 혼합비, 즉 건조 공기의 밀도에 대한 기체의 밀도, ‘ ′ ’는 평균으로부터의 변동을

나타낸다. 기기나 지표면이 기울어져 있지 않으면 $\overline{w} \approx 0$ 이므로 식 (1)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F_g = \overline{\rho_a}\ \overline{w'\chi'} \tag{2}$$

따라서 플럭스는 난류에 의한 평균 연직 공분산으로 표시할 수 있다. 식 (2)는 아래와 같이 보존 방정식으로부터 유도해 낼 수도 있다. 고정된 한 지점에서의 임의의 기체의 혼합비, χ 의 보존 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \chi}{\partial t} + \frac{\partial (u_j \chi)}{\partial x_j} = D + S_c \tag{3}$$

연속 방정식에 의해 $\chi \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0$ 이므로

$$\frac{\partial \chi}{\partial t} + u_j \frac{\partial \chi}{\partial x_j} = D + S_c \tag{4}$$

여기서 D는 분자 확산, S_c는 스칼라의 발원(흡원), j는 dummy 지수이다. 종속 변수를 평균과 변동분으로 나눈 다음 레이놀즈 평균을 적용하면,

$$\overline{\frac{\partial (\overline{\chi} + \chi')}{\partial t} + (\overline{u_j} + u_j')\frac{\partial (\overline{\chi} + \chi')}{\partial x_j}} = \overline{\overline{D} + D' + \overline{S_c} + S_c'} \tag{5}$$

$$\frac{\partial \overline{\chi}}{\partial t} + \overline{u_j}\frac{\partial \overline{\chi}}{\partial x_j} = \overline{D} + \overline{S_c} - \frac{\partial (\overline{u_j'\chi'})}{\partial x_j} \tag{6}$$

$$\left(u_j' \frac{\partial \chi'}{\partial x_j} = \frac{\partial (u_j'\chi')}{\partial x_j} - \chi' \frac{\partial u_j'}{\partial x_j} \quad \text{since} \quad \frac{\partial u_j'}{\partial x_j} = 0 \right)$$

식 (6)을 전개해서 정리하면,

$$\underset{(\mathrm{I})}{\partial \overline{\chi} / \partial t} = \underset{(\mathrm{II})}{- \overline{u}\ \partial \overline{\chi} / \partial x - \overline{v}\ \partial \overline{\chi} / \partial y - \overline{w}\ \partial \overline{\chi} / \partial z} \tag{7}$$

$$\underset{(\mathrm{III})}{- \partial\, \overline{u'\chi'} / \partial x - \partial\, \overline{v'\chi'} / \partial y - \partial\, \overline{w'\chi'} / \partial z} + \underset{(\mathrm{IV})}{\overline{D}} + \underset{(\mathrm{V})}{\overline{S_c}}$$

이 식은 평균 χ의 시간에 따른 농도 변화 (Ⅰ)는 평균 수평 및 연직 바람에 의한 이류 (Ⅱ), 평균 난류 공분산의 수평 및 연직으로의 발산/수렴 (Ⅲ), 평균 분자 확산 (Ⅳ) 그리고 χ의 평균 발원/흡원(Ⅴ)에 의해 결정됨을 가리킨다. 만약 관측지가 수평적으로 균질하면, $-\overline{u}\,\partial\overline{\chi}/\partial x$ 와 $-\overline{v}\,\partial\overline{\chi}/\partial y$ 는 0 이 되고, 편평하면 $\overline{w}=0$ 이 되어, $\overline{w}\,\partial\overline{\chi}/\partial z$ 도 0 이 된다. 평균 난류 공분산의 수평으로의 발산이나 수렴이 없다고 가정하고, χ의 평균 발원/흡원도 없으며, 평균 χ의 시간에 따른 농도 변화를 무시할 수 있는 경우라면 식 (5)는 다음과 같이 된다.

$$\partial\overline{w'\chi'}/\partial z = \overline{D} = -\nu\,\partial^2\overline{\chi}(z)/\partial z^2 \qquad (8)$$

여기서 ν 분자 확산율이다. 양변을 높이, z에 대해 적분하고, 임의의 높이에서의 분자 확산은 난류 플럭스에 비해 작아 무시할 수 있기 때문에

$$\overline{w'\chi'}(z) = -\nu\,\partial\overline{\chi}(0)/\partial z. \qquad (9)$$

따라서 연직 난류 공분산(F, $gm^{-2}s^{-1}$)은 식 (2)와 같이

$$F = \overline{\rho_a}\,\overline{w'\chi'} \qquad (10)$$

이 식은 잘 혼합된 내부 경계층에서 평균 연직 난류 공분산이 높이에 따라 일정하며, 지표면에서의 기체의 분자 경도-확산 플럭스와 같음을 가리킨다.

나. 측정 조건

1) <u>기기의 주파수 영역</u>: 이론적으로 플럭스에 기여하는 에디의 주파수는 0에서 ∞인데 이 범위의 모든 에디를 측정하는 것은 불가능하다. 그러나 모든 주파수 영역에서 에디가 균등하게 플럭스에 기여하는 것은 아니기 때문에 플럭스에 의미 있게 기여하는 실질적인 주파수 영역을 코스펙트럼으

로부터 결정할 수 있다(예, Lenchow, 1998). 그림 1은 지표층에서 연직 속도와 스칼라의 정규화된 코스펙트럼의 전형적인 그림이다. 세로축은 정규화된 코스펙트럼, 가로축은 정규화된 주파수($f = nz/U$, n은 에디 주파수, z는 높이, U는 평균 수평 풍속)이다. 이 코스펙트럼을 전 주파수(0 에서 ∞까지)에 걸쳐 적분하면 플럭스가 된다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 정규화된 코스펙트럼이 최대인 주파수로부터 멀어질수록 플럭스에 대한 기여는 작아진다. 실질적으로, 플럭스의 95% 이상을 측정하려면 주파수 영역은 적어도 $0.001 \le f \le 3$이어야 한다(예, Businger, 1986; Lenchow, 1998).

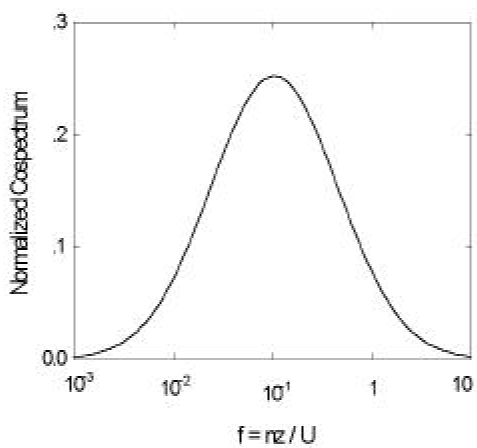


Fig. 1 Schematic diagram of a typical normalized cospectrum of vertical velocity and a scalar in a convective surface layer.

2) 기기의 반응 속도: 기기의 반응 속도는 플럭스에 의미 있게 기여하는 빠른 에디의 주파수와 같거나 더 빨라야 한다. 정규화된 주파수 식에 $f = 3$을 적용하면 기기의 반응 속도는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$n = \frac{3U}{z} \qquad (12)$$

예를 들어, $z = 2\,m$, $U = 3\,ms^{-1}$ 인 경우, $n = 4.5\,Hz$ 이다. 즉, 기기가 초당 약 5번 이상 반응할 수 있어야 함을 가리킨다. 평균 수평 풍속이 증가하거나 측정 높이가 낮아지면 기기의 반응 속도는 더 빨라야 한다. 일반적으로, $10\,Hz$ 이상의 반응 속도가 바람직한데 이 점에 대해서는 다음절에서 다시 논의한다.

3) <u>집록 속도</u>: Shannon의 표본채취(sampling) 이론에 의하면, 임의의 주파수를 갖는 현상을 파악하기 위해서는 그 주파수 보다 2배 이상 빠른 자료가 필요하다(Kaimal과 Finnigan, 1994). 예로써, 주파수가 $1/24\ hr^{-1}$인 기온의 일 변화를 파악하기 위해서는 적어도 12시간마다 즉, $1/12\ hr^{-1}$보다 빠른 속도로 기온을 관측해야 한다. 따라서, $f = 3$을 적용하면, 플럭스에 의미 있게 기여하는 고주파수의 에디는 $5\,Hz$ 이기 때문에 이보다 적어도 2배 이상의 속도로 관측된 자료가 필요하다. 이것은 에디의 스펙트럼 분석에 영향을 미치는 가명(Aliasing)을 줄이기 위해 요구되는 조건이다. 따라서 집록 속도는 $10\,Hz$ 이상이 되어야 바람직하며, 기기의 반응 속도는 집록 속도와 같거나 더 빨라야 한다.

4) <u>평균 시간</u>: 어떤 현상에 대한 관측은 발생 가능한 여러 결과들 중의 하나이다. 따라서 그 현상에 대한 특성은 같은 조건하에서 여러 번(이론적으로는 무한 번) 관측한 것을 평균한 “앙상블(ensemble)" 평균으로 결정되어야 한다. 현실적으로는, 관측으로부터 앙상블 평균을 구할 수 없다. 그러나 주어진 기간 동안의 자료가 정체성(stationarity)을 유지하면 시간 평균이 앙

상블 평균과 같다라는 "ergodicity"를 가정할 수 있다. 대기가 중립인 경우, 스칼라 플럭스의 시간 평균($T_{\overline{w'\rho_g'}}$)은 다음과 같이 표현할 수 있다(예, Businger, 1986).

$$T_{\overline{w'\rho_g'}} \simeq \frac{200\ (z - d)}{\varepsilon^2 U} \qquad (13)$$

여기서 ε은 앙상블 평균을 시간 평균으로 대체할 경우 생기는 오차, d는 영면 변위이다. 예를 들어, 군락의 높이가 약 0.72m인 논에서, z = 2.2m, d = 0.5 m, U = 3 ms^{-1} 인 경우, ε=0.2로 하면 T 2500초 ≈ 42분을 얻는다. 이 경우, 약 20%의 오차 범위 내에서 시간 평균은 앙상블 평균과 같다. ε을 작게 하려면 시간 평균을 더 길게 취해야 하는데, T ≈ 1 시간이 우리가 평균 시간을 길게 할 수 있는 한계이다. 왜냐하면 기온, 습도 등과 같이 일 변동을 하는 변수들은 이 시간 내에서 정체성을 유지하기 때문이다. 홍진규 등(1997)은 군락권 하부의 난류 통계량 특히, 스칼라 플럭스보다 운동량 플럭스가, 또한 군락 상부에서보다는 군락 내에서의 플럭스가 평균 시간의 선택에 따라 더 큰 차이가 있음을 보였다. 따라서, 연구 목적에 따른 적절한 평균 시간의 선택이 중요하다.

5) <u>측정 높이</u>: 에디 공분산 기기의 최저 측정 높이는 에디의 주파수에 대한 기기의 주파수 반응 속도와 거칠기 아층(roughness sublayer)을 고려해서 결정해야 한다. 식 (3)으로부터, 평균 수평 풍속이 일정할 경우, 측정 높이가 낮아지면 에디의 주파수는 더 빨라진다. 즉 그림 1의 코스펙트럼이 고주파수쪽으로 옮겨가게 되어 고주파수 영역의 에디를 충분히 측정하지 못할 경우 플럭스의 손실이 발생한다. 이러한 손실은 주파수 반응 보정을 통해 어느 정도 회복시킬 수 있으나, 보정 효과는 작을수록 좋기 때문에 기기의

측정 높이는 2m 이상이 바람직하다. 한편, 식생이 존재할 경우, 거칠기 아층을 고려해야 한다. 거칠기 아층이란, 평균류와 식생과의 직접적인 마찰로 인하여 강한 난류가 생성되는 지역이다. 이 층에서는 지표층에서 보편적으로 적용되는 상사이론이 적용되지 않으며, 그 깊이는 군락 높이의 약 2-3배 정도이다. 보편적인 지표 플럭스 측정의 경우, 거칠기 아층에서의 관측은 피함으로써 더 넓은 식생을 대표하는 플럭스 값을 얻을 수 있다.(Kaimal과 Finnigan, 1994). 따라서, 군락의 높이가 약 1m인 논의 경우, z = 2-3m, 10-15m인 산림의 경우라면, z = 20-30m 이상이 바람직하다.

주파수 반응 보정량을 줄이고, 관측지 전 지역에 대한 적분된 플럭스를 얻기 위해서는 측정 높이는 높을수록 좋으나, 최고 높이는 측정하고자 하는 관측지 면적의 크기와 균질성에 의해 제한된다. 앞서 식 (2)의 유도과정에서와 같이 현실적으로, 수평 균질성을 가정할 수 있는 관측지는 지극히 드물다. 예로써, 바다에 인접한 논에서 수증기 플럭스를 측정한다고 하자. 논에서의 측정 높이가 높아질수록 측정된 수증기 플럭스에 대한 바다로부터의 증발 기여율은 증가하고 측정된 플럭스는 순수한 논에서의 증발을 대표하지 못하게 된다. 따라서 최고 측정 높이는 제한되는데 그 높이의 결정은 취주 거리에 따라 결정된다. 발자국(footprint) 분석을 하면, 측정된 플럭스의 몇 %가 관측지로부터 온 것인지, 또는 측정 지점으로부터 얼마나 떨어진 곳이 측정된 플럭스에 가장 많이 기여했는지 등을 알 수 있다. Schuepp 등 (1990)은 발자국 분석을 위한 해석적 방법을 제안하였는데, 수치적인 라그란지 유선모사(Leclerc와 Thurtell, 1990)의 결과와 잘 일치하였다. 측정된 플럭스에 대한 발자국의 기여도($C_f = \frac{F_a(x,z)}{O_s}$)는 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{F_a(x,z)}{Q_s} = \exp[-\frac{U_z(z-d)}{u_* \times kx}] \qquad (14)$$

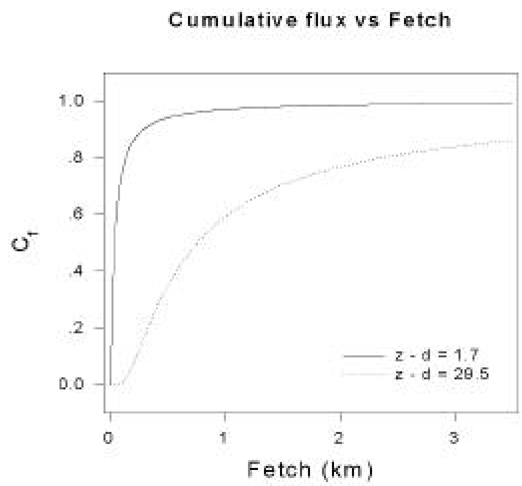


Fig. 2 Example of Footprint under neutral condition at two heights (C_f is the contributions of the cumulative flux).

여기서 $F_a(x,z)$는 측정된 플럭스, Q_s는 발원의 강도 (상수로 가정), U_z는 $d+z_0$와 측정 높이 사이에서의 평균 풍속, d는 영면 변이, u_*는 마찰 속도, k는 von Karman 상수, x는 관측지로부터의 거리이다. 식 (14)는 측정 기점에서 일정 거리 이내에서 방출된 플럭스가 측정된 플럭스에 기여하는 정도는 측정 높이, 지표면의 거칠기, 풍속 및 대기의 안정도에 따라 달라짐을 가리킨다. 일반적으로, 관측 높이와 취주 거의 비는 약 1:100 이 사용되고 있다 (Munro와 Oke, 1971). 그림 2는 국제 벼 실험(IREX) 기간 중 대기가 중립일 때의 발자국 분석이다. 실선은 실제 측정 높이에 대한 것이며, 점선은 z-d = 29.5m로 했을 경우이다. z-d = 1.7m 인 경우, 측정 높이(z=2.2m)의 100배가 되는 220m 이내에서 발생한 플럭스가 측정된 플럭스의 약 87%를 차지하였다. 이것은 취주 거리가 220m 인 경우라면, 측정된 플럭스의 약 13%가 관측지 밖의 상태를 반영함을 나타낸다. 반면에 z-d = 29.5m 인 경우, 3km 이내

에서 발생한 플럭스가 측정된 플럭스의 약 85%를 차지하여, 취주 거리가 3km인 경우, 측정된 플럭스의 15%가 관측지 밖에서 발생한 것이다. 따라서 측정된 플럭스는 실제 관측지의 플럭스를 과대 또는 과소 평가할 수 있다. 요약하면, 관측 높이는 주파수 반응 보정을 최소화하고, 거칠기 아층의 깊이 보다 높으면서, 발자국 분석을 통해 관측지 외부로부터 발생한 플럭스가 최소화 되도록 선택해야 한다.

6) 두 기기 간의 간격: 수증기, 이산화탄소 등과 같은 스칼라 플럭스를 측정하기 위해서는 초음파 풍속계와 스칼라 기기가 필요하다. 이 경우, 고려해야 할 점은 에디의 상관도와 흐름의 왜곡(flow distortion)이다. 두 기기는 자체의 부피 때문에 같은 한 점에서 측정이 불가능하다. 측정 지점이 서로 멀어질수록 두 기기에서 측정된 에디 특히, 고주파수 영역의 에디의 상관도가 작아져 플럭스는 과소 평가된다. 한편, 두 기기를 너무 가까이 두게 되면, 서로 장애물이 되어 공기 흐름의 왜곡이 생기게 된다. 예를 들면, 스칼라 기기를 통과하여 초음파 풍속계 쪽으로 이동하는 에디의 경우, 스칼라 기기와의 충돌로 인해 본래의 성질(운동량)이 변하게 된다. 그로 인해 초음파 풍속계는 흐름이 왜곡된 에디를 측정하게 된다(Wyngaard, 1988). 측정 높이와 관련해서 두 기기 간의 간격(s)을 다음과 같이 나타낼 수 있다(Dyer, 1981; Kristensen과 Fitzjarrald, 1984):

$$s < \frac{(z - d)}{5} \quad . \tag{15}$$

이 식은 기기 간의 최대 간격이 측정 높이에 비례함을 의미한다. 예로써, 수평 풍속과 수직 풍속의 측정 지점이 분리되어 있는 초음파 풍속계(예를 들면, ATI 초음파 풍속계 등)로 현열 또는 운동량 플럭스를 측정하는 경우, 주파수 반응 보정을 적용하지 않으려면, 5m 이하에서의 관측은 피해야 할 것이다.

7) <u>기기의 정렬</u>: 관측지에서 측정 높이와 기기 간의 간격을 결정한 후에는 초음파 풍속계를 지표면에 대해 평행하도록 해야한다. 그렇지 않으면, $\overline{w} \neq 0$ 이 되어 에디에 의한 수직 공분산만으로 플럭스를 구할 수 없게 된다(식 1). 야외에서 기기를 설치할 경우, 수준기를 이용하여 초음파 풍속계를 중력 방향과 직각이 되게 한다. 관측지가 기울어져 있지 않다면, 초음파 풍속계는 관측지와 평행을 이룬다. 만약, 산과 같이 지표면이 기울어져 있는 경우, 초음파 풍속계를 중력 방향에 직각이 되게 설치하면 지표면의 경사 때문에 평균 연직 풍속이 존재하게 된다. 대개, 이 경사가 15% 인 경우, 좌표 회전 보정을 통해 $\overline{w} = 0$로 만들 수 있다(예, Baldocchi 등, 1988). 이 보정은 관측지뿐만 아니라, 초음파 풍속계가 기울어져 있는 경우에도 적용 가능하다. 이에 관해서는 뒤에서 다시 논의하도록 한다.

다. 삼차원 초음파 풍향 풍속계

플럭스 측정에서 가장 중요한 역할을 담당하는 삼차원 초음속 풍향 풍속계로는 영국의 Solent 회사나 미국 Campbell 회사에서 개발된 연구용 초음파 풍속계가 성능이 가장 우수하다. 특히, 직류전원을 사용할 수 있어 야외에서 작동이 용이하므로 본 연구에서 구입, 시험가동을 거쳐 사용하였다. 본 연구에서 사용한 Solent 초음파 풍속계의 작동방법과 집록 소프트웨어의 내용은 다음과 같다.

작동방법: 본 연구에서는, 기본적인 비행시간 운영 원리를 바탕으로 하여, 단자 배열의 차원과 기하학에 주로 의존하는 공기 속도를 벡터로 측정한다. 한 쌍의 단자는 교대로 송신기와 수신기의 역할을 해서, 그들 사이의 고주파의 초음파 펄스를 보내고 받는다. 이때 각 방향에서의 비행시간(즉, t_1과 t_2)가 측정된다. 여기서 c를 음속, L을 두 단자사이의 거리, v를 양 단자를

잇는 가상선을 따라 흐르는 공기의 속도라 하면 다음과 같은 관계가 도출된다:

$$t_1 = L/(c+v) \quad ; \quad t_2 = L/(c-v)$$

위 식에서 양쪽 다 역수를 취하고, 빼면 v를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v = 0.5L(1/t_1 - 1/t_2)$$

이 바람 벡터의 유도는 c나 다른 모수 가령, 온도나 오염물의 함량 등에 영향을 받지 않는다. 여기서 또한 c $(= 0.5L(1/t_1+1/t_2))$도 구할 수 있다. 단자의 선에 수직인 공기 흐름이 t_1과 t_2에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 볼 때, v는 단자쌍의 선을 따라서 분해된 공기 흐름의 벡터 성분을 나타낸다. 세쌍의 단자를 다른 방향으로 정렬함으로써, 입사하는 공기 흐름의 방향과 크기를 명확하게 구할 수 있다. 풍속계의 윗면에 명목상의 북향을 정의한 화살표를 표시, 이 명목상의 북향에서부터 반시계 방향으로 30도 되는 곳에 단자가 있다. 이것이 1번 축의 위쪽 단자이다. 수평성분중 u축은 이 단자쌍과 나란히 놓여 있다. 이 축에서 양의 속력은 흐름이 위쪽 단자에서 아래쪽 단자 즉, 북쪽에서 남쪽으로 이동하고 있음을 뜻한다. v축은 u축에 대해 오른쪽에 있는데, 양의 속력은 흐름이 동쪽에서 서쪽임을 나타낸다. w 축은 수직으로, 양의 속력은 흐름이 아래에서 위쪽으로 움직임을 의미한다.

자료집록: 개발중인 집록장치의 주된 기능은 측정된 생자료(raw data)의 처리, 고급 자료 처리 그리고 저장과 전송이다. 먼저 시간을 측정해서 그 측정이 합리적인 한계 내에 있는 지를 확인한다. u, v, w의 처리 자료는 직렬(serial)과 아날로그로 출력이 모두 가능하므로 시스템의 설계에 따라 후에 접합될 스칼라 기기의 출력사양에 따라 결정할 예정이다. 다만, transit count 자료는 직렬 출력자료에서만 나오며, 직렬 통신은 RS422에 한정되어 있다. 네 개의 출력자료(u, v, w, c)는 고속 실시간 자료를 집록장치뿐 아니라 감시용 컴퓨터에서 실시간으로 관리/운용할 수 있다.

풍속계는 매 1ms (1/1000초)마다 초음파 발사를 수행, 그 비행시간이 측정되고, 단자 지연(transducer delay)를 참작한 수치를 뺀다. 우선, 1번 축 위에서 각 방향으로 초음파 발사를 수행한다. 각 방향에 대한 transit counts가 각각 그대로 저장된다. 같은 작업이 축 2와 3에서도 행해지게 되므로 하나의 발사 세트는 총 6ms (1ms×3개의 축×각 축당 2개의 발사)이 걸리며, 6개의 transit counts와 3개 축에서 속도가 산출된다. 연속적인 발사 세트로부터 나온 결과는 함께 더해져서 transit counts와 축 속도에 대한 평균을 산출한다. 본 연구에서는 풍속계가 초당 21번의 자료를 산출하도록 집록 속도를 정하였다. 따라서 매 48ms당 자료가 집록됨을 의미한다. 기기상으로는 비록 지체시간이 없는 것으로 나타나 있으나, 미량기체의 플럭스 계산에서는 약간의 오차도 큰 영향을 미칠 수 있으므로 실시간 생자료를 이용하여 교차 상관 분석을 통한 확인이 필수적이다. 음속 및 각 성분의 풍속이 계산되자마자 그것들은 아날로그로 출력하게 된다. 또한 이 자료들의 직렬 전송을 위해 임시 풍속 자료 저장소에 저장하게 된다.

단자 축들은 편의상 1번 축, 2번 축, 3번 축으로 부른다. 기하학적으로, 각단자 축들 모두가 수평 방향에 대해 45도 상에 있도록 되어 있다. 그림 1에서 보면 1번 축이 u 벡터와는 45도 기울어져 있는 채로 일직선에 있다. 1번 축은 2번 축으로 변형될 수 있는데, 수직축을 중심으로 시계 방향으로 120도 회전시키면 된다. 2번 축은 똑 같은 방법으로 3번 축으로 변형시킬 수 있다. 6개의 transit 시간은 언제나 1번 축의 위쪽에서 아랫쪽, 아랫쪽에서 위쪽, 2번 축의 위쪽에서 아랫쪽, 아랫쪽에서 위쪽, 3번 축의 윗쪽에서 아랫쪽, 아랫쪽에서 위쪽, 순으로 산출된다. 그 산출 자료들 역시 같은 순서로 파일들에 저장된다.

아날로그 및 디지탈 입출력 자료**:** uvw모드에서는 출력 자료 1은 u축 속력을, 출력 자료 2는 v축 속력을, 출력 자료 3은 w축 속력을, 그리고 출

력 자료 4는 음속 또는 2.5V reference를 가리키게 된다. 이때 모든 출력 자료는 0-5V의 범위를 갖는다. 0-5V의 전 범위에 걸친 출력의 총 분해능은 11bits 즉, 약 2.5mV이다. 아날로그로 출력 자료를 사용할 경우에는 그 출력 자료들을 low path filter에 통과시켜 모든 고주파 잡음을 제거해야 하므로 이를 위하여 수학적으로 filtering을 하는 것이 바람직하다. 본 초음파 풍속계는 5개의 아날로그 입력이 가능하게 되어 있다. 따라서 다른 기기들을 이 풍속계에 연결하여 자료를 집록할 수도 있으나 본 연구에서는 일단 이 방법을 사용하지 않고 별도의 집록장치를 사용하였다. (여기서, 각 입력 자료는 초당, 10번만 읽히므로 분해가 가능한 입력 주파수는 5Hz로 제한된다). 입력자료 또한 그 분해능이 11bits이고 범위는 0-5volts이다. 디지탈 직렬 접속에서는 양방향 즉, 명령이 컴퓨터로부터 풍향계로 보내지고 데이터는 풍향계로부터 컴퓨터로 전송된다. 따라서 컴퓨터를 통해 풍속계의 운영 모드를 제어할 수 있다.

풍향계 자료 전송: 풍향계에서 나오는 모든 전송들은 일반적으로 같은 형식을 취한다. 전송은 일련의 2 바이트 이진수로 진행된다. 전송되는 첫 번째 정수(즉 1과 2 바이트)는 이진수 hex 8181 (-32383)이 된다. 이 수가 전송의 시작 신호를 보내며, 자료의 다른 곳에서는 생길 수 없는 값이다. 두 번째 정수(즉 3과 4 바이트)는 기록을 위한 수치이다. 이것은 매 전송때마다 증분되는 단순한 하나의 count로서 보다 완전한 기록이 전송될 때마다 증분된다. 그리고 기록이 유실되었는 지를 확인할 수 있다. 그 값이 10000에 달하면 ‘0’으로 돌아간다. 전송의 나머지 부분은 바람과 아날로그 입력자료로 이뤄져 있다. 속력 자료는 4개의 정수 다발로 되어 있는데 그 4개의 정수는 3개의 속도 벡터(즉, u,v,w)와 음속 모수이다. 이밖에 다른 모드에서는 속력 자료가 6개의 정수 다발로 되어 있으며, 풍속계로 측정한 6개의 "raw" transit 시간으로 되어있다. 다음의 세 번째 정수에는 첫 번째 u, v, 그리고 w 속력이 있

다. 이 정수들은 m s^{-1}에 100를 곱한 단위로 속력을 나타낸다. 즉, 100이라는 값은 1.0 m s^{-1}를 의미한다. 다음 정수는 음속으로 m s^{-1}를 50배 한 값이다. 즉 17,000이라는 수치는 음속이 340.0 m s^{-1}를 나타낸다. 이 네 개의 값들은 풍속계의 이상으로 유효 속력이 계산되지 않을 경우(예를 들면, 초음파의 경로가 막혀 있을 경우라든지), -10,000라는 수치로 전송되는데 이는 결과가 유효하지 않다는 것을 의미한다. 이 속력 다발의 변수 다음에, 전송 정수의 마지막인 HEX 8282가 전송된다.

풍향계에 명령 보내기: 컴퓨터에서 풍향계로 전달되는 모든 명령들은 2개의 동일한 아스키 문자로 되어있으며, 두 번째 문자는 확인상 보내진다. 그 문자들은 하나가 보내진 직후 즉시 나머지 하나가 보내져야 한다. 만약 풍향계가 하나의 문자만을 받은 후 50ms이내에 두 번째 문자를 받지 못하면 받은 문자는 무시하고 다른 동일 쌍을 기다린다. 풍향계로 하여금 전송을 하도록 하는 명령의 경우, 명령의 두 번째 문자를 받은 후 적어도 10초를 기다린후 자료를 전송하게 된다. 컴퓨터는 반드시 10ms이내에 전송에서 송신으로 전환되어야 한다. 풍향계가 전송을 마치면 수신 스위치를 켜기 전에 7ms까지 기다린다. 따라서 적어도 컴퓨터는 풍향계로부터 자료를 받은 후 8ms를 기다린 다음, 다음 명령을 전송해야 한다. 그렇지 않으면 풍향계는 명령을 받을 수 없을 것이다. 만약 풍향계가 자료를 매초마다 자동적으로 전송하고 있다면, 풍향계가 명령을 받았는지를 확인하기 위해서는 우선, 풍향계가 전송을 수행하는 것을 기다려서 그 전송이 끝남과 동시에 그 명령을 전송해야 한다. 이때의 전송의 경우, 풍향계가 수신 상태가 되기 위해 적어도 8ms를 허용한다. 만약 이렇게 되지 않고 풍향계가 직접 전송하고 있는 동안 명령이 전송된다면 그 명령은 수신되지 않을 것이므로 프로그램에 이것을 고려하였다.

라. 자료의 보정

1) <u>주파수 반응 보정</u>: 지표층에서의 미기상 변수들의 전형적인 스펙트럼 및 코스펙트럼은 Kansas와 Minnesota 경계층 실험(Kaimal 등, 1972, 1976) 자료로부터 구해졌는데 이 (코)스펙트럼은 정규화된 주파수와 안정도 (z/L, z: 측정 높이, L: Monin-Obukhov 길이)의 보편 함수로 나타낼 수 있다. 이런 경험적 사실은 에디 공분산 기기의 발달과 더불어, 다양한 지표층에서의 난류 연구에 적용되어 입증된바 있다(예, Smith와 Anderson, 1984; Ohtaki, 1985).

실질적으로, 난류를 측정, 집록, 분석하는 데에는 물리적인 제약이 있다. 예를 들면, 기기의 경로 길이(path length)의 존재로 인해 고주파수 영역의 에디는 상대적으로 저주파수의 에디와 평균되어 플럭스에 기여하는 주파수 영역이 좁아지거나, 두 기기 간의 분리에 따른 에디간의 상관도의 감소로 플럭스를 비롯한 난류 통계량의 손실을 가져오게 된다(Kaimal 등, 1968). 따라서, 이러한 손실에 대한 다음과 같은 정량적인 평가가 필요하다(Moore, 1986).

$$\frac{\Delta F}{F} = 1 - \frac{\int_0^{\infty} T_{wq}(n)\, S_{wq}(n)\, dn}{\int_0^{\infty} S_{wq}(n)\, dn} \qquad (16)$$

여기서 ΔF는 임의의 스칼라 q의 플럭스 F의 손실량, T_{wq}는 코스펙트럼 (S_{wq})의 전달함수이다. $T_{wq} = 1$ 이면, 플럭스의 손실이 없음을 의미하며, 앞서 언급된 물리적 제약 때문에 T_{wq} 는 특정 주파수에서 1 보다 작아져서 플럭스의 손실이 발생, 즉 ΔF가 생겨난다. Silverman (1968) 과 Kaimal 등 (1968)은 이런 손실을 보정하기 위해 전달 함수를 제시하였으나, 너무 복잡하

여 실제 적용하기에 어렵다. Moore(1986)는 적절한 가정을 통하여 이러한 전달 함수를 간단화 하였는데, 원래의 식과 비교해서 작은 오차 범위 내에서

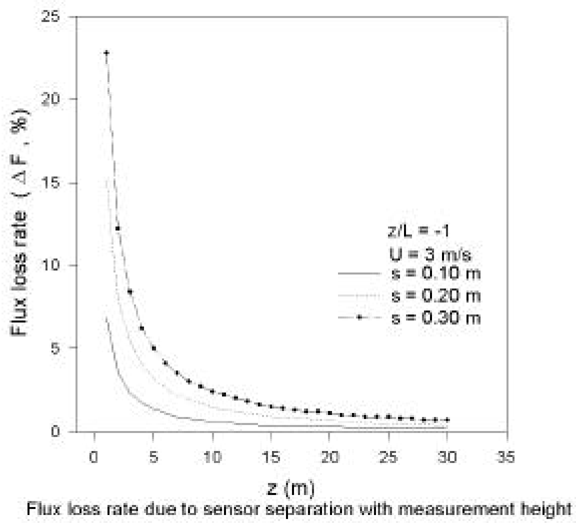


Fig. 3 Scalar flux loss rate with height due to sensor separation, s(in m)

일치하며, 적용하기에도 편리하여 많이 사용되고 있다(최태진, 1998).

전달 함수들은 측정 높이, 대기의 안정도, 풍속, 기기의 경로 길이, 기기 간의 분리 거리, 집록 속도에 따라 달라진다. 그림 3은 대기가 불안정하고(z/L = -1), U= 3 m/s 일 때, 기기 간의 분리 간격에 따른 스칼라 플럭스의 손실률을 나타낸다. 분리 거리가 넓어질수록(따라서, 같은 분리 거리인 경우에는 지면에 가까와질수록) 손실률이 커진다. 측정 높이가 아주 높으면, 기기 간의 분리 거리에 따른 손실은 상대적으로 매우 작아진다. 이런 손실은 스칼라 플럭스보다 운동량 플럭스와 같은 벡터 플럭스에서 더 크다.

2) 밀도 변동 보정: 스칼라를 측정하는 에디 공분산 기기는 혼합비나 밀도를 측정한다. 혼합비를 측정하는 경우의 플럭스는 식 (2)에 의해 구한다.

밀도를 측정하는 경우에는, 난류에 의한 연직 공분산 외에 평균 연직 바람에 의한 플럭스를 함께 고려해야 한다. 지면 위의 공기로 열이나 수증기가 공급되면 밀도가 작아져서 위로 상승하게 된다. 이렇게 밀도가 변화된 공기에 포함된 스칼라의 밀도를 측정하는 기기는 그 양을 과소평가 하게 된다. 따라서 이에 대한 보정을 해주어야 한다. 이것은 아래와 같이 지표층에서의 건조 공기(ρ_a)의 평균 질량 플럭스는 0 이라는 구속조건에 근거한다.

$$\overline{w\rho_a} = \overline{w'\rho_a'} + \overline{w}\,\overline{\rho_a} = 0 \qquad (17)$$

상승하는 건조 공기 덩어리의 경우, $w' > 0$, $\rho_a' < 0$ 이고, 따라서 $\overline{w'\rho_a'} < 0$ 이 되기 때문에 $\overline{w} \neq 0$ 이다. 여기서 $\overline{w}$ 는 지표로부터 열과 수증기 플럭스를 동시에 알면 계산할 수 있다. Webb 등 (1980)은 스칼라의 밀도를 측정하여 플럭스를 구할 경우 $\overline{w} \neq 0$ 로 인한 플럭스 효과를 다음과 같이 제시하였다.

$$F = \overline{w'\rho_c'} + \mu(\overline{\rho_c}/\overline{\rho_a})\,\overline{w'\rho_v'} + (1+\mu\sigma)(\overline{\rho_c}/\overline{T})\overline{w'T'} \qquad (18)$$

여기서 ρ_c 는 스칼라의 밀도, ρ_a 는 건조 공기의 밀도, μ 는 수증기의 분자량에 대한 건조공기 분자량의 비, σ는 평균 건조 공기의 밀도에 대한 평균 수증기 밀도의 비, ρ는 공기의 밀도, c_p 는 정압 비열 그리고 T 는 기온이다. 오른쪽 두 번째 항과 세 번째 항이 $\overline{w} \neq 0$으로 인해 플럭스에 미치는 영향으로, 잠열과 현열 플럭스의 정확한 측정이 필수적이다. 한 낮의 관개가 되어 있는 논의 경우, 잠열 플럭스, $\lambda E = 400\ Wm^{-2}$, 현열 플럭스, $H = 60\ Wm^{-2}$, 평균 기온, $\overline{T} = 300\,K$, 평균 수증기압, $\overline{e} = 30\,mb$ 라면, 잠열 플럭스의 밀도 변동에 대한 보정 효과는 약 5 % 이다. 같은 조건에서 이산화탄소의 농도가 350ppm 일 때, 보정을 하지 않은 이산화탄소 플럭스는 1

$mgm^{-2}s^{-1}$ 이며, 밀도 보정 후에는 약 20% 증가한다. N_2O, CH_4, CO_2 와 같은 농도가 작은 온실기체의 경우, 밀도 변동에 따른 보정 효과를 무시할 수 없으며, 보정 양이 보정하지 않은 원래 관측 값보다 더 클 수도 있으며 플럭스의 방향을 바꿔 놓을 수도 있다.

3) <u>좌표 회전 보정</u>: 평균 연직 속도가 존재하게 되면($\overline{w} \neq 0$), 연직 이류가 발생하여 플럭스는 과대 또는 과소평가 될 수 있다. 특히, 우리 나라와 같은 산악지역에서 플럭스 관측을 하는 경우 이로 인한 영향이 클 수 있다. 산에서 관측 타워를 세울 경우, 기술적인 제약, 관측 기기의 설치 및 유지 등의 실질적인 어려움 때문에, 지형의 경사가 무시될 만큼 높은 곳에 세우기란 현실적으로 어렵다. 이렇게 관측 타워의 높이가 제약을 받게 되면, 지형의 경사로 인한 평균 연직 바람이 존재하게 된다. Dyer (1981)는 그 기울어짐에 의해 생길 수 있는 오차가 1도당 운동량 플럭스인 경우 약 14%, 스칼라 플럭스인 경우는 3% 임을 보였다. 이런 오차는 관측지의 경사가 약 15도 이내인 경우, 좌표 회전을 통해 보정이 가능하다. 일반적으로, 두 번에 걸친 좌표 회전이면 충분한데 첫 번째는 z축을 중심으로 u 성분을 회전시켜 v 성분이 0이 되도록 하고, 두 번째는 x축을 중심으로 회전시켜 w 성분을 z 방향으로 정렬시키면 w 성분이 0 이 된다. Wesely (1970)에 의하면, 두 축에 대해 회전된 평균 연직 공분산은 다음과 같이 표현된다.

$$\overline{w'c'} = \overline{w'c_i'}\cos\theta - \overline{u'c_i'}\sin\theta\cos\Sigma - \overline{v'c_i'}\sin\theta\sin\Sigma \quad (19)$$

여기서 $\overline{w'c_i'}$, $\overline{u'c_i'}$ 그리고 $\overline{v'c_i'}$은 초음파 풍속계의 원래 좌표에서 계산된 평균 공분산들이며,

$$\cos\theta = (\overline{u}^2 + \overline{v}^2)^{1/2} \ / \ (\overline{u}^2 + \overline{v}^2 + \overline{w}^2)^{1/2}$$

$$\sin\theta = \overline{w} \ / \ (\overline{u}^2 + \overline{v}^2 + \overline{w}^2)^{1/2}, \quad (20)$$

$\cos\Sigma = \overline{u} / (\overline{u^2} + \overline{v^2})^{1/2}$, 그리고 $\sin\Sigma = \overline{v} / (\overline{u^2} + \overline{v^2})^{1/2}$.

여기서 흐름의 왜곡에 의한 효과도 이 좌표 회전을 통해 보정 되는지에 대한 의문이 생길 수 있다. 이 점에 관해서는 상충된 논의가 있는데, Wyngaard (1988)는 보정할 수 없다고 주장한 반면 Dyer (1981는)는 그 반대의 주장을 내세웠다. 이 점은 여전히 논쟁의 대상이나, Wyngarrd (1988)는 기기 들의 정렬이 연직으로 대칭을 이룰 경우 흐름의 왜곡이 최소화될 수 있음을 지적하였다.

4) <u>초음파 풍속계의 온도 보정</u>: 초음파 풍속계는 마주보고 있는 단자 쌍이 서로 초음파 펄스를 주고받을 때 걸리는 시간과 그 단자 쌍의 거리를 이용하여 풍속과 음속을 측정한다(예, Kaimal과 Finnigan, 1994) 음속(c)은 기온과 습도의 영향뿐만 아니라 초음파 풍속계의 단자에 수직으로 부는 바람의 영향을 받는데, 초음파 풍속계의 온도(T_s)는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$T_s = T(1 + 0.51q) - V_n^2/\gamma R \qquad (21)$$

여기서 T는 실제 절대 온도, q는 비습, V_n은 초음파 풍속계의 단자에 수직으로 부는 바람, rR 은 공기의 경우, 403 $m^2 s^{-2} K^{-1}$이다. T_s는 풍속 자료와 함께 실시간으로 산출되기 때문에 초음파 풍속계만으로도 현열 플럭스를 측정할 수 있다. 스칼라 기기를 이용해서 현열 플럭스를 측정할 경우, 초음파 풍속계와 더불어 미세선 열전대를 이용하여 온도를 따로 측정한다. 식 (11)에 의하면 T_s와 T는 다르기 때문에 $\overline{w'T_s'}$와 $\overline{w'T'}$는 다음과 같은 관계를 갖는다(Hignett, 1992)

$$\overline{w'T_s'} = \overline{w'T'} + 0.51\overline{T}\,\overline{w'q'} - 2\overline{u}\,\overline{u'w'}/\gamma R \qquad (22)$$

낮 동안 $\overline{w'q'} > 0$ 이고, $\overline{u'w'}$는 항상 0 보다 작기 때문에 $\overline{w'T_s'} > \overline{w'T'}$이다. 따라서 초음파 풍속계만으로 현열 플럭스를 측정할 경우, 실제 현열 플럭스를 약 10-20% 과대 평가하게 된다. 이에 대한 보정은 식 (21)에서 실시간의 q 와 V_n을 측정하여 T 를 직접 계산하거나, 식 (22)에서 $\overline{w'q'}$과 $\overline{u'w'}$을 계산하여 적용할 수 있다. 한편, 식 (22)는 보정 외에도 또 다른 의미를 내포하고 있다. 즉, $\overline{w'q'}$를 제외한 나머지 항들을 정확하게 측정할 수 있다면, 수증기를 측정하는 스칼라 기기가 없어도, 초음파 풍속계와 미세선 열전대를 이용하여 잠열 플럭스를 계산 할 수 있음을 암시한다.

5) <u>초음파 풍속계의 단자 그림자 효과 보정</u>: 초음파 풍속계는 자체의 부피 때문에 공기의 흐름을 왜곡시킬 수 있으며. 단자의 그림자 효과는 난류의 스펙트럼에 영향을 준다(Wyngaard와 Zhang, 1985). 단자간의 짧은 경로 간격에 비해 단자의 크기나 위치 때문에 비롯되는 이 효과는, 풍향과 단자간의 각도, 단자의 길이와 직경의 비에 따라 단자의 정렬 방향과 나란한 풍속 성분에 영향을 미친다. 더 자세한 내용은 Kaimal과 Finnigan(1994) 등에서 찾을 수 있으며, 이 효과를 최소화하려면 단자의 직경이 가능한 작은(예를 들면, 약 5 mm 내외) 초음파 풍속계를 사용하는 것이 좋다.

6) <u>스칼라 기기의 흡수선 겹침 및 교차 민감도 보정</u>: 특정 기체의 흡수 파장 영역을 고려한 스칼라 기기 들은 그 기체의 흡수 파장대를 사용하여 농도를 측정한다. 그러나 원하지 않는 다른 기체와 흡수 파장대가 겹치는 경우가 많다. 예를 들면, 수증기의 밀도를 측정하는 KH20 크립톤 습도계(Campbell Scientific Inc)의 경우, 수증기의 흡수 파장대의 일부가 산소에 의한 흡수되어 이에 대한 효과를 고려해야 한다. 이런 경우, 측정 농도 및 플럭

스는 과소 평가되는데 이를 피하기 위해 광학 필터를 사용하거나, 또는 관측 후 보정을 해야 한다(Leuning과 Moncrieff, 1990). 사용하는 기기에 따라 그 보정 효과가 다르며, 일본에서 주로 사용되는 개회로 CO_2/H_2O 적외선 분석기(Advanet, Inc)의 경우, 교차 민감도에 따른 이산화탄소 플럭스의 보정이 낮 평균 13%의 증가를 보였다(최태진, 1998).

지금까지 에디 공분산 방법을 이용해서 플럭스를 측정할 경우 고려해야 할 사항에 대해 살펴보았다. 주목해야 할 점은 앞서 논의된 다양한 측정 조건이나 보정량들이 절대적이지 않다는 것이다. 즉, 관측 당시의 대기의 상태, 지표면 거칠기, 군락의 생장 시기 및 구조, 측정 높이, 집록 속도, 그리고 연구의 목적에 따라 관측 조건이 달라지고 이에 따른 보정량도 달라지게 된다. 관측을 시작하기 전에 관측/집록/처리 시스템을 최적화 하여 보정량과 오차를 최소화하고 정량화 하는 것이 매우 중요하다(최태진, 1998).

2. 야외 관측 실험

가. 국제 공동 실험

본 연구과제에서 준비한 관측시스템과 미기상학적 에디 공분산 방법을 이용하여, 우리 나라를 비롯한 아시아 대륙에서 많은 면적을 차지하고 있는 논을 선정, 일본 국립 농업 환경 과학 연구소, 호주 CSIRO 및 오카야마대학 연구진들과 함께 1996년 여름 일본에서 국제 공동 실험을 수행하였다. 실험이 행해진 곳은 일본 오카야마현(岡山縣, 북위 34.5。,동경 134。)에 있는 오카야마대학 부속 농장의 논으로서 넓이는 약 300m×300m이며 주변 지역 또한 같은 논으로 이뤄져 있다. 실험은 1996년 8월 2일부터 8월 5일까지 야장에 각 관측 기기들을 설치 및 시험 운영한 후, 8월 6일부터 16일까지 관측을 하

였다. 관측기간 도중 태풍의 접근으로 13일 오후부터 15일 아침까지 관측을 일시 중단하였다. 관측 당시 벼의 초장은 평균 0.72m, 주간거리 0.27m였으며 엽면적지수 (leaf area index)는 약 3.1이었다. 관개는 해안 지역에 위치한 관계로 토양의 염도가 높기 때문에 일주일 간격으로 첫 5일 동안은 논에 물을 대었다가 주말에 배수하였다. 에디 상관 기기들이 설치된 곳은 실험지의 북서쪽이며 풍향이 남동쪽을 중심으로 동풍에서 남서풍 사이일 때 이상적인 측정이 가능하도록 하였다. Leading edge로부터 관측 지점까지의 거리는 최소한 200m정도였다.

이산화탄소 및 수증기의 농도 변화와 군락 위에서의 연직 바람 속도의 변화를 측정하기 위해서 당해연도에 구입한 3차원 초음속 풍속계(Solent Research Ultrasonic Anemometer, Model 1012R)와 Open-path CO_2 / H_2O 적외선 가스 분석기(Infrared CO_2 & H_2O Fluctuation Meter, Model E009A)를 사용하였다. 두 기기들 간의 간격은 약 0.17m로 하여 방해(obstruction) 효과를 최소화함과 동시에 두 기기 의 분리에 따른 주파수 반응(frequency response) 보정이 최소화되도록 하였다. 두 기기는 canopy로부터 약 1.5m (지표면에서 약 2.2m) 높이에 설치하였다.

이 외에도 휴대용 고속 광합성 측정기 (Portable photosynthesis system, Model LI-6400)를 이용하여 벼 잎으로부터 직접 광합성량을 측정하였고, 토양 표면에서 방출되는 이산화탄소 플럭스도 함께 측정하였다. 또한 canopy 분석기(plant canopy analyzer, Model LI-2000, LICOR)를 이용하여 벼의 엽면적과 엽면적의 profile을 구하였다.

한편, 본 연구를 위해 함께 사용한 CO_2/H_2O 적외선 가스 분석기는 일본 연구진으로부터 대여 받은 기기로서 경로 간격(path length)은 0.20m이며 초당 10개의 자료를 산출해 낼 수 있다. 본 연구에서 준비한 삼차원 초

음속 풍속풍향계는 야외 관측이전에 풍동(wind tunnel)에서 보정을 하였고, 이산화탄소 분석기는 농도를 아는 이산화탄소 기체를 이용하여 보정하였다.

이 두 기기로부터 나오는 6개의 신호(signals) 즉, 초음속 풍속계의 u, v, w, T 와 CO_2/H_2O 적외선 가스 분석기의 CO_2 및 H_2O의 농도를 초당 10번씩 집록기의 광디스크에 이진수(binary) 코드로 집록하였다. 이것을 나중에 별도의 프로그램을 이용하여 아스키(ascii) 파일로 바꾼 후 각 플럭스 및 기타 변수 값을 30분 평균하여 구했다. 이 처리 과정에서 잠열과 이산화탄소 플럭스에 대해서는, 현열과 잠열의 동시 수송에 의한 밀도 변화에 따른 보정을 Webb et al.(1980)의 방법에 따라 실행하였다.

나. 국내 포장 실험

1) 미기상학적 방법: 관측 장소는 1997년과 1998년에는 경기도 농촌진흥원 부근의 벼논 포장이었으며, 1999년에는 강화도 석모도내의 삼산면 하리에 위치한 벼논이었다. 취주 거리는 모두 적어도 500m 이상이고 설치된 곳은 포장의 중간쯤으로 사방이 논으로 둘러 쌓여 있었다. 야외 관측은 장마기간(6월말부터 7월말)을 제외하고 1997년과 1998년 초여름부터 추수직전까지의 기간 중에 진행되었다. 실험 도중 잦은 기기의 고장으로 인해, 저속 반응 기기로만 실험이 진행되거나, 다른 종류의 초음파 풍속계를 사용해야 하기도 했다. 대개, 초기(5월말-6월 중순)의 벼의 초장은 평균 0.1-0.2m 이었으며 8월말 이후에는 평균 0.7-1.0m 정도가 되었고 엽면적 지수는 대략 < 1에서 5로 증가하였다.

대기 중의 온도, 습도, 풍속과 풍향을 측정하기 위하여 각각 온습도계 5개, 풍향계 1개 그리고 3배엽 풍속계 5개를 사용하였다. 순복사, 전천일사, 광합성 유효 복사를 측정하기 위해 지면으로부터 약 1.5m의 위치에 순복

사계, 전천일사계, 광합성 유효 복사계를 설치하였다. 1998년과 1999년에는 복사의 네 성분인 상향 및 하향 단파와 장파 복사를 각각 따로 관측하였다. 두 개의 토양열 플럭스 판을 토양내 0.05m 깊이에 설치하고 상부의 토양온도를 함께 측정하여 토양층으로 전달되는 에너지를 측정하였다. 또한 관개시의 물 깊이에 따른 열저류항을 계산하기 위해 다수의 열전대를 이용하여 0.05-0.10m 깊이의 논의 수온을 함께 관측하였다. 평균 저속 반응 기기는 자료를 30초마다 집록하고 매 5분과 30분마다 평균된 자료를 계산, 집록하였다. 고속 반응 기기인 3차원 초음파 풍향풍속계와 개회로 krypton 습도계, 미세선 열전대는 지면으로부터 약 2.1-3.0m 위치에 설치하였는데 가능한 한 저속 반응 기기와 멀리 떨어지게 하였다. 고속 반응 기기로부터 나오는 신호는 10-20Hz의 속도로 집록하고, 플럭스 값은 30분마다 평균하여 생산하였다. 아울러 실시간으로 주파수 반응 보정과 밀도 변화에 따른 보정 그리고 좌표 변환에 따른 보정을 할 수 있도록 프로그램화하였으며, 보정이 최소화되도록 관측시스템을 최적화 하였다.

2) 챔버 방법: 광합성(A)은 식물의 생화학 효소와 광합성 유효복사의 영향 중 제한되는 요소에 의해 결정된다(Farquhar 등, 1980). 이 때 효소의 활동에 관련된 가장 중요한 변수는 효소의 최대 촉매 활동율(V_{cmax})이며 온도의 함수로 나타낼 수 있다. 한편 광합성 유효복사, 즉 빛의 영향에 관련된 주요 변수는 전자의 최대 이동율(J_{max})이다. 기공전도도는(g_{sw}) 광합성, 잎 표면의 상대습도와 이산화탄소 농도 그리고 기압의 선형 함수로 표현할 수 있다. 이 함수의 기울기(m)와 절편(b)은 식물의 종류에 따라 다르나, C_3와 C_4 식물에 대하여 m은 약 4 9이고, b는 약 0.01 0.04mol $m^{-2}s^{-1}$이다(Sellers 등, 1996).

외부로부터 유입되는 공기, 기공, 그리고 잎 경계층의 상태를 고려하

면 광합성, A는 다음과 같이 나타낼 수 있다(Farquhar 등, 1980; Leuning 등, 1995).

$$A = \min[A_v, A_j] - R_d \tag{23}$$

여기서 min[a,b]는 a, b 둘 중에서 작은 값을 선택함을 의미한다. 따라서 광합성 A는 A_v와 A_j 중 작은 값에 의해 결정되고, R_d는 호흡으로 주로 잎의 온도의 영향을 받는다. A_v는 Rubisco에 의해 제한 받는 광합성 값으로 다음과 같이 계산된다.

$$A_v = V_{cmax} \frac{C_i - \Gamma_*}{C_i + K_c(1 + O_i/K_o)} \tag{24}$$

$$V_{cmax} = \frac{V_{cmax0} \exp[(H_V/R T_0)(1 - T_0/T_l)]}{1 + \exp[(S_V T_l - H_d)/(R T_l)]} \tag{25}$$

V_{cmax}는 효소 Rubisco의 최대 촉매 활동율이고 Γ_*는 호흡이 없을 때 CO_2 보상점이며, O_i는 세포간 산소 농도, C_i는 세포간 이산화탄소 농도이다. K_c와 K_o는 각각 CO_2와 O_2에 대한 Michaelis 계수이다. 식 (25)에서 T_0는 기준 온도(293.2 K)이고 T_l은 잎 온도이며, H_v는 활성에너지, H_d는 불활성에너지 그리고 S_v는 엔트로피를 나타낸다. 또한 V_{cmax0}는 T_0에서의 V_{cmax}값을 의미한다. R은 보편 기체상수(8314.3 J $kmol^{-1}$ K^{-1})이다. 대부분의 변수들은 경험 상수이므로, V_{cmax}는 온도의 함수로 계산된다 (Farquhar 등, 1980, Harley 등, 1992).

전자의 이동율에 의해 제한 받는 광합성, A_j는 다음 식으로 표현된다.

$$A_j = \frac{J}{4} \frac{C_i - \Gamma_*}{C_i + 2\Gamma_*} \tag{26}$$

J는 흡수된 광합성 유효 복사에 대한 전자 이동율이다. J는 Smith (1937)에

의해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$J = \frac{\alpha PAR}{(1 + \frac{\alpha^2 PAR^2}{J_{max}^2})^{1/2}} \quad (27)$$

$$J_{max} = \frac{J_{max0} \exp[(H_V/R T_0)(1 - T_0/T_l)]}{1 + \exp[(S_V T_l - H_d)/(R T_l)]} \quad (28)$$

여기서 α는 태양에너지 전환 효율이며, PAR은 광합성 유효복사이다. J_{max}는 전자의 최대 이동율이고 J_{max0}는 T_0에서의 J_{max}값을 의미한다. 식 (25)의 경우와 같이 식 (28)의 경우도 J_{max}값이 온도에 의해 결정되는 것을 알 수 있다. 변수 K_c, K_o와 Γ*도 온도의 함수로 계산된다(Brooks와 Farquhar, 1985).

기공은 기공주위의 환경(광합성 유효 복사, 온도, 습도, 군락권 경계층의 상태, 그리고 CO_2의 농도 등)에 영향을 받는다. 수증기에 대한 기공 전도도 g_{sw}는 다음과 같이 나타내어진다(Ball 등, 1987; Collatz 등, 1992).

$$g_{sw} = m \frac{A h_s P}{C_s} + b \quad (29)$$

여기서, h_s와 C_s는 각각 잎 표면에서의 상대습도와 이산화탄소의 농도이며, P는 대기 압력이다. m과 b는 경험계수로서 선형회귀분석으로부터 유도된다. m은 C_3 식물인 경우 대략 9, 그리고 C_4 식물인 경우는 약 4이고, b는 C_3는 약 0.01 mol $m^{-2}s^{-1}$ 그리고 C_4는 약 0.04 mol $m^{-2}s^{-1}$이다(Ball, 1988).

C_i는 광합성 모형의 입력 자료이며 C_s와 g_{sw}의 함수로 표현된다. A와 g_{sw}를 알면 다음 식으로부터 C_i를 계산할 수 있다.

$$C_i = C_s - \frac{1.6AP}{g_{sw}} \quad (30)$$

식 (23), (24), (26), (29)과 함께 식 (30)를 풀면 동시에 광합성과 기공전도도

가 계산된다. 초기 C_i는 임의 값으로 설정한 후 반복해법(iterative solution method)을 통해 초기의 임의 값 C_i와 식 (30)에 의해 계산된 C_i값의 차가 0.1 μmol mol^{-1} 보다 작으면 계산을 멈춘다. 이때의 A, g_{sw}와 C_i값이 최종값으로 결정된다.

야외 관측은 1997년과 1998년의 8월 동안 경기도 병점의 논에서 벼를 대상으로 실시하였다. 8월 말(등숙기) 관측된 벼 군락 높이는 평균 1.0m이고, LAI는 대략 5.0 이었다. 이 연구에 사용된 관측 기기는 연세대학교 이과대학 대학원 중심대학의 지원에 따라 구입된 휴대용 적외선 기체 분석기(LICOR, Model LI-6400)를 사용하였다. 식물의 생화학 및 생물리 요소의 변동을 알아보기 위하여 환경변화를 인위적으로 조절하여 관측하였다. 특히 광량의 조절은 인공적인 광원(LED)을 이용하였고, 외부로부터 유입되는 CO_2 농도를 조절하여 세포간 CO_2 농도를 조절하였다. 각각의 변화에 대하여 온도(25, 30, 35℃)와 포차의 변화에 따른 광합성과 기공 전도도의 반응을 관측하였다. 또한 기상 변수들을 인위적으로 조절하지 않은 상태에서 12시간 동안의 광합성, 기공 전도도와 각종 식물 및 기상변수들을 관측하였다.

제 3 절 결과 및 고찰

1. 플럭스 자료의 품질 검증 및 관측의 최적화

가. 플럭스 자료의 품질 검증

관측된 에디 공분산 자료의 품질 검증에는 여러 가지 방법이 있으나 (Goulden 등, 1996; Vickers와 Mahrt, 1997; 홍진규 등, 1999), 여기서는 크게 두 가지 예를 살펴본다. 먼저, 직접적인 검증을 위해, 에디 공분산 방법으로 관측된 모든 생(raw) 자료를 저장하는 것이 바람직하다. 물론, 관측 및 집록 시스템이 최적화되어, 관측 오차가 최소화되어 있는 경우, 공분산 등의 일부 중요한 통계값들만을 저장하여 사용함으로써 큰공간을 차지하는 생자료의 저장을 생략할 수도 있다. 그러나 스펙트럼 분석 등을 통한 철저한 품질 검증과 난류 수송에 관한 연구를 위해서는 생자료의 저장이 필수이다(예, 홍진규, 1999). 간접적인 방법은 아래와 같이 에너지 수지의 닫힘을 살펴보는 것이다.

1) <u>에너지 수지의 닫힘</u>: 지표 에너지 수지는 다음과 같다.

$$R_n - G - S - \mu A = H + \lambda E \tag{31}$$

여기서 R_n은 순복사, G는 토양열 플럭스, S는 열저류항, μA 는 광합성 등에 이용되는 에너지, H 는 현열 플럭스, 그리고 λE 는 잠열 플럭스를 각각 나타낸다. 이 식은 저속 반응 기기로 관측된 식 (31) 왼쪽의 세 항의 합이 독립적인 에디 공분산으로 관측된 식 오른 쪽의 두 항의 합과 같아야 함, 즉 에너지 수지가 닫혀야 함을 의미한다. 일반적으로, μA 는 매우 작기 때문에 무시되며, S의 경우도 질량이 큰 산림이나 관개된 논의 경우를 제외하고는

무시된다. 그림 4는 IREX 국제 벼 실험 기간중, 관개된 논에서의 두 항의 에너지 수지의 닫힘을 나타낸다. 잠열 플럭스의 경우, 주파수 반응, 밀도 변동 그리고 교차 상관 보정을, 현열 플럭스의 경우, 주파수 반응 보정을 하였다. 관개된 논이었기 때문에 물의 깊이에 따른 열 저류항이 토양열 플럭스와 함께 고려되었다(최태진 등, 1998). 보정 전과 후의 결과를 비교해 보면, 에너지 수지의 결손이 큰 차이를 보이며, 보정 후에는 에너지 수지가 약 5% 이내에서 닫혔다. 에디 공분산 플럭스뿐만 아니라, 전반적인 플럭스 자료의 품질을 간접적으로 검증할 수 있기 때문에, 관측시 실시간 자료로부터 에너지 수지의 닫힘을 [illegible]

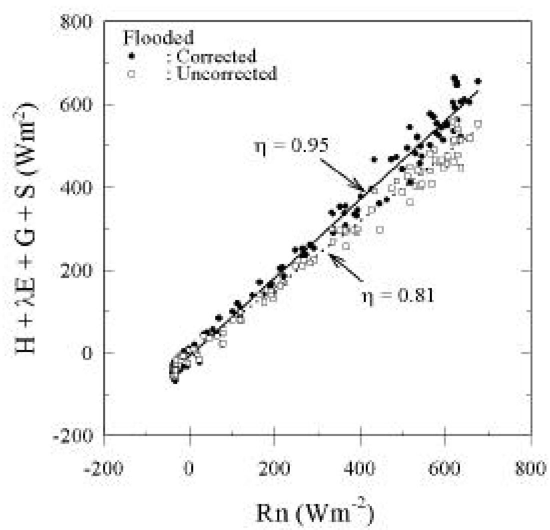


Fig. 4 Energy budget closure in a rice canopy under flooded condition where $\eta = (H + \lambda E + G + S)/R_n$

최근에 군락의 높이가 높은 산림이나 대류 운동이 활발한 경우, 또는 야간 조건을 고려한 에너지 수지 방정식이 제시된 바 있다 (Lee, 1998).

$$R_n = \lambda E + H + G + S + \overline{w_r}\delta . \qquad (32)$$

여기서 $\overline{w_r}$은 평균 연직 풍속, $\delta = \rho c_p(\overline{T_r} - <\overline{T}>) + \lambda(\overline{\rho_{vr}} - <\overline{\rho_v}>)$이다. 식 (32)의 오른쪽 마지막 항에서 $\overline{w_r}$은 대류, 국지적 열 순환, 지형 조건 등으로 인해 발생할 수 있다. 여기서 $\overline{w_r}$는 앞서 밀도 변동 보정에서 언급한 $\overline{w}$와는 구분되어야 한다(Paw U 등, 1998). 관측 높이가 높을수록 $\overline{w_r}$는 커지고, 야간의 숲이나 산림에서의 CO_2 연직 분포와 같이 δ가 큰 경우에는 $\overline{w_r}\delta$($= \overline{w_r}$ ($\overline{\rho_{co2}}_r - <\rho_{co2}>$), ρ_{co2}는 이산화탄소의 밀도) 를 신중히 고려해야 한다. 특히, 장기 관측에 따른 효과는 더 클 수 있기 때문에 이 항에 대한 측정이 중요할 것으로 사려된다(Kim 등, 1999).

2) <u>스펙트럼 분석</u>: 앞서 집록 속도와 관련하여 코스펙트럼에 대해 언급하였다. 두 변수의 코스펙트럼이나 한 변수의 스펙트럼은 지표층에서 그 측정 높이와 대기 안정도, 지표 거칠기 및 풍속 등에 따라 차이가 있을 수 있지만 보편적으로 일정한 양상을 나타낸다. 미기상학적 방법으로 얻어진 자료를 분석하는데 있어서 가장 기본이 되는 것이 스펙트럼 분석이다. 특히 에디 공분산 방법과 같이 고속으로 얻어진 자료의 스펙트럼 분석은 필수적이다. 이를 통하여 얻어진 자료의 품질이 어떤지 파악할 수 있다. 스펙트럼 분석은 병점에서의 관측 자료로부터 얻어진 시계열 자료(그림 5)를 푸리에 변환(Fourier Transformation)을 이용하여 주파수 영역으로 변환한 뒤, 이 주파수 영역에서 자료를 분석하는 것을 말한다.

일반적으로 무질서한 시계열 자료에 포함되어 있는 난류의 일정한 구조가 주파수 영역에서 보다 쉽게 알아볼 수 있는 형태로 나타난다. 또한 주파수 영역에서 난류에 대한 이론이 잘 정립되어 있어 이를 이용하여 난류

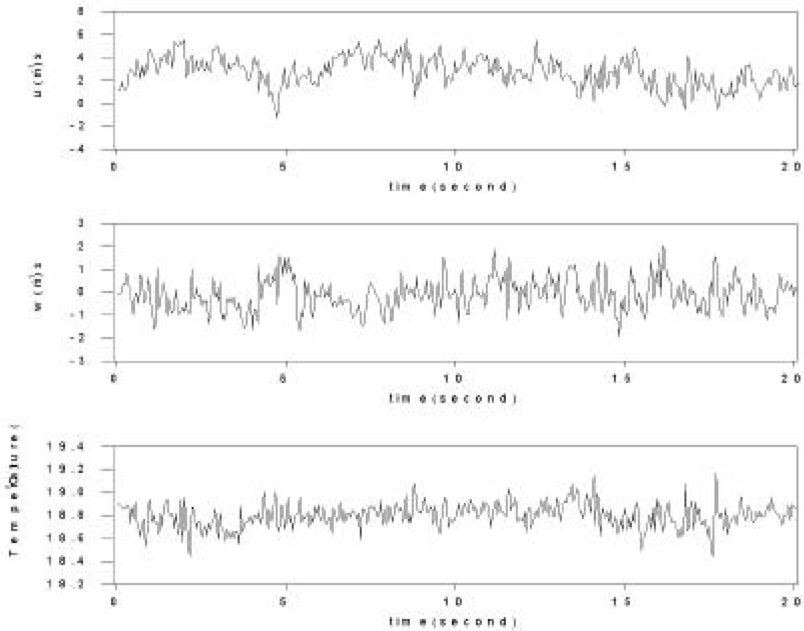


그림 5 시계열 자료 (u는 수평 풍속, w는 연직 풍속, T는 온도)

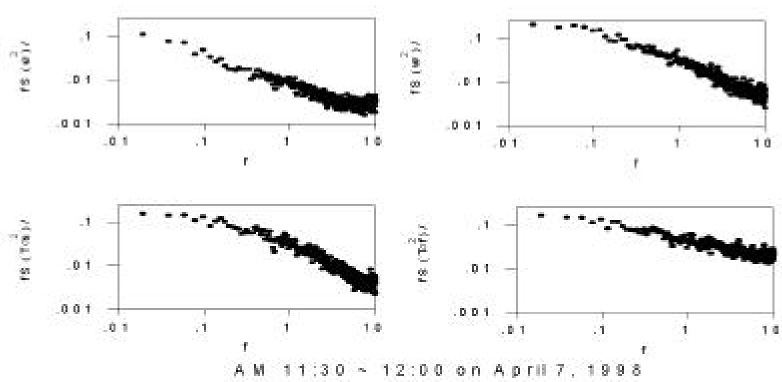


그림 6. 병점 관측 자료의 스펙트럼 (u는 수평 풍속, w는 연직 풍속, T_s는 3차원 풍향 풍속계의 가온도, T_f는 미세선 열전대로 얻어진 온도)

의 특징을 보다 쉽게 파악할 수 있다(그림 6). 스펙트럼 분석을 위한 고속 푸리에 변형(FFT) 프로그램을 이용하여 보다 쉽고 빠르게 스펙트럼 분석을 할 수 있는 알고리즘을 개발, 완성하였다.

그림 7-1과 7-2는 병점에서 관측된 연직 속도와 수증기 밀도의 코스펙트럼이다. 지표층에서 난류 코스펙트럼은 에너지 전달 구간인 관성 아구간에서 전형적인 -4/3의 기울기를 가지며 에너지의 정점이 존재한다. 이러한 특징을 관측 자료와 비교해 봄으로써 자료의 품질을 점검할 수 있다. 그림 5-1에는 비교적 이러한 특징들이 잘 나타나고 있다. 만약, 스펙트럼이 보편적인 모습을 나타내지 않을 경우, 자료의 사용과 해석에 주의가 필요하다. 예를 들어, 그림 5-1의 같은 자료를 사용하되, 수증기 자료의 집록이 연직 풍속에 비해 약 1.45초 지연되어 연직 풍속과 수증기 밀도의 변동분간의 상관도가 낮아지게 되는 경우, 코스펙트럼이 아주 다르게 나타난다(그림 5-2). 전 주파수 구간에서 코스펙트럼을 적분하면 플럭스가 되므로, 이 코스펙트럼의 손실이 플럭스의 손실을 가져오게 된다. 이 경우, 자료를 무조건 사용하지 않기보다는 이 자료의 시계열을 살펴보거나, 이 값과 관련된 다른 변수들의 변화를 함께 살펴보아 잡음의 원인을 규명하고, 자료의 취사여부를 결정하는 것이 좋다(Kaimal과 Finnigan, 1994).

나. 관측의 최적화

본 연구의 결과를 바탕으로 에디 공분산 방법을 국내의 경작지에서 적용할 경우, 바람직한 관측 요령을 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 에디 공분산 방법을 이용한 플럭스 측정의 최저 높이는 군락 높이의 2배 이상이어야 하며, 최고 높이는 취주 거리의 1/100 이내이어야 한다.

2) 초음파 풍속계와 스칼라 기기 간의 간격은 대략 관측 높이의

1/10 이

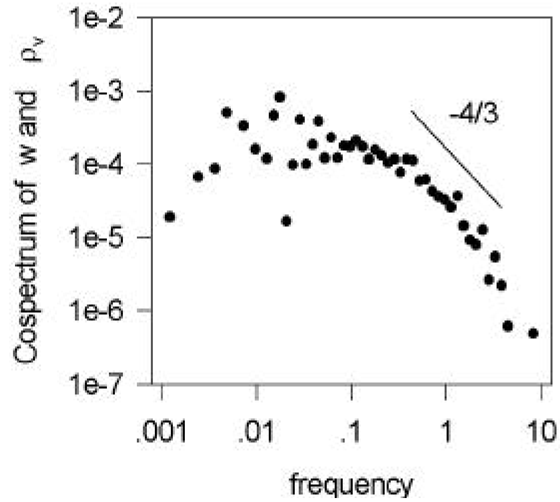


Fig. 7- ensity

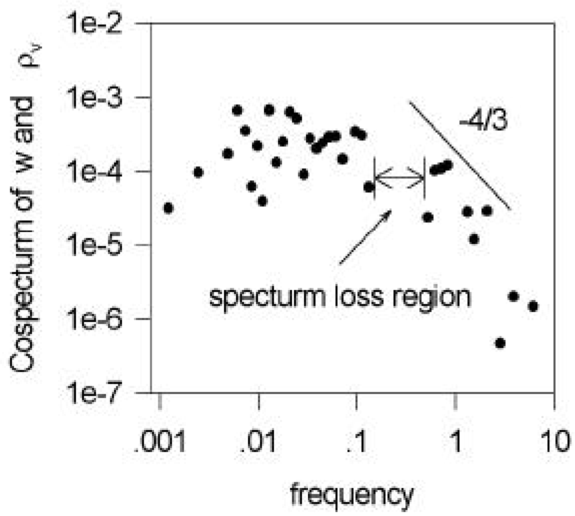


Fig. 7-: nds to w

3) 자료 집록 속도는 10Hz 이상이 바람직하다.

4) 생자료를 가능한 한 저장해 두는 것이 좋다.

5) 평균 시간은 30　60분 사이이어야 한다.

6) 자료를 처리하기 이전에 보정량이 최소가 되도록 관측 및 집록 시스템을 최적화 하여야 한다.

7) 적어도 에너지 수지의 닫힘과 스펙트럼 분석을 통한 자료의 품질 검증이 필요하다

위에 요약된 제안은 일반적인 군락 상부에서의 플럭스 측정에 적용되며, 군락 상하부에서의 난류 측정 시에는 다른 조건들을 고려해야만 한다(홍진규, 1999). 에디 공분산 방법은 그 측정 조건을 충분히 이해하고, 이론에 맞는 운영과 보정을 수행할 경우, 다음의 분석 결과에서 보이는 바와 같이 약 10%의 오차 내에서 플럭스를 측정할 수 있다. 특히, 우리 나라와 같이 취주 거리가 길지 않고, 경사진 산이나 밭에서의 관측은 사전에 충분한 관측지에 대한 분석과 이론에 맞는 시스템의 설계와 운영이 요구된다. 논과 달리 밭, 또는 산림 생태계의 경우에는 저류항, 이류 및 중력파 등의 영향이 상대적으로 클 수 있기 때문에 이에 대한 정량적인 평가를 위해 구체적인 연구가 국내외 공동연구를 통해 지속되어야 한다(Kim 등, 1999).

2. 벼 군락의 대기환경

가. 일본 오까야마 논에서의 국제 공동실험

논에 물이 없는 경우: 1996년 8월 6에서 8일까지의 3일 평균을 바탕으로 이루어졌다. 이 기간 논에 물은 없었으나 토양은 충분히 젖어 있었다. 그림 8은 에너지 수지 성분들의 일 변동을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수

있듯이 순복사가 잠열로 가장 많이 이용되었으며 보정한 토양 열 플럭스가 현열 플럭스보다 컸으며, 뚜렷한 변동을 보인다. 이 실험에서 사용한 토양열 플럭스 판의 열 전도도는 0.21 0.26 $W m^{-1} K^{-1}$으로 매우 낮은 값이었다. 토양의 열 전도도는 토양의 물리적 성질과 특히 수분의 양에 따라 변하기 때문에 대개 토양열 플럭스 판의 열 전도도와는 다르다. 이에 따른 오차는 아래의 식을 이용하여 보정하였다 (Philip, 1961).

$$\frac{G_c}{G} \equiv f = \frac{1}{1 - 1.7\frac{T}{L}(1 - 1/\varepsilon)} \qquad (33)$$

여기서 G_c는 참 토양열 플럭스, G는 토양열 플럭스 판으로 측정한 토양열 플럭스, T는 토양열 판의 두께, L은 토양열 플럭스 판의 한 면의 길이, ε는 토양열 플럭스 판의 열 전도도와 토양의 열 전도도의 비를 나타낸다. 여기서

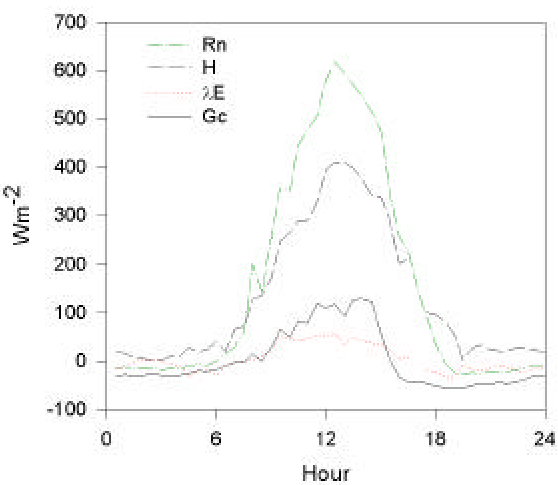


그림 8. 논에서의 지표 에너지 수지(일본 오까야마, 1996년)

토양의 열 전도도는 1 $Wm^{-1}K^{-1}$로 하였는데 이것은 논의 토양이 항상 물에 젖어 있거나 잠겨 있어 열 전도도가 거의 변하지 않음을 감안한 것이며, 또한 측정된 토양 온도의 연직 분포로부터 Fourier 분석을 통해 계산한 열 확산율을 고려한 값이다. 그림 9는 열 전도도의 차이에 따른 보정을 한 토양 열 플럭스와 보정을 적용하지 않은 토양 열 플럭스의 일 변동의 차이을 나타낸 것이다. 최대값이 나타나는 오후 1시 30분 경 G_c와 G의 차는 약 60 Wm^{-2}로 나타났으며, 두 값의 차이는 보정하지 않은 경우의 95%이상에 해당된다. (여기서는 토양열 판 상부 0.01m의 토양층에 관련된 열 저류항은 무시하였다.

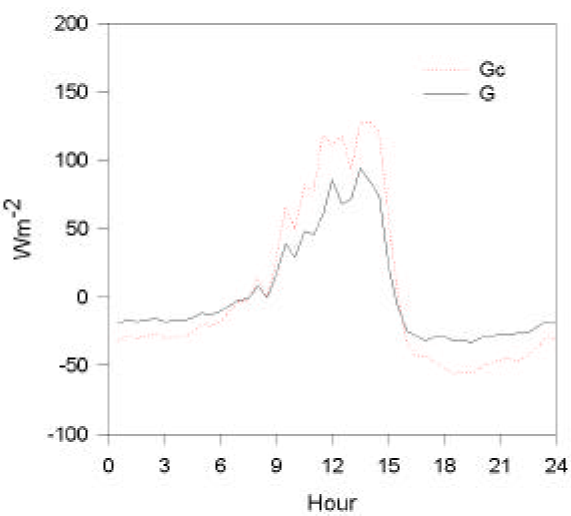


그림 9. 열 전도도의 보정에 따른 토양열 플럭스의 일변화의 차이

그림 10과 그림 11은 토양 열 플럭스를 보정하지 않은 경우와 한 경우에 대해 에너지 수지의 닫힘을 나타낸 것이다. 에너지 수지 방정식에 의하

면 관측된 순복사는 관측된 나머지 에너지 수지 성분들의 합과 같아야 한다. 따라서, 그 둘 간의 회귀선을 구하면 기울기는 이론적으로 1.0**이 되어야 한다**

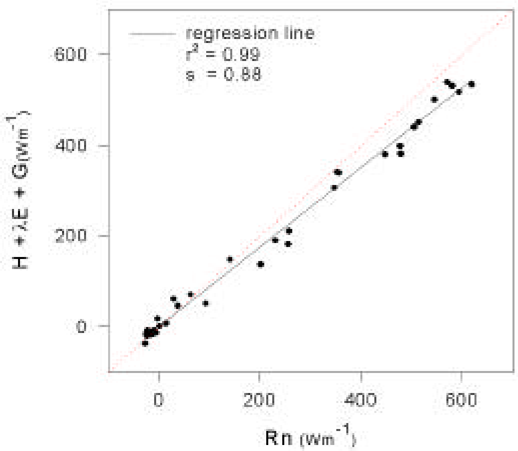


그림 9. G**를 보정 하지 않은 경우의 에너지 수지의 닫힘**

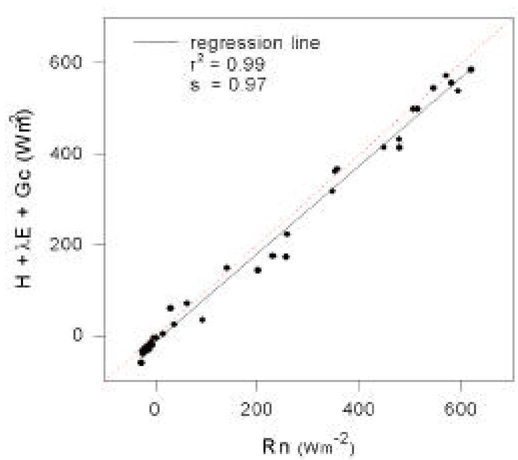


그림 10. G**를 보정한 경우의 에너지 수지의 닫힘**

그림 10와 같이 토양 열 플럭스를 보정하지 않은 경우의 회귀선의 기울기는 약 0.88으로 나타났으며 이는 약 12%의 오차 내에서 에너지 수지가 닫힘을 뜻한다. 그러나 보정을 적용한 후에는 에너지 수지가 약 3% 이내에서 닫힘으로서 오차를 최소화할 수 있었다(그림 11).

논에 물이 있는 경우: 1996년 8월 10에서 13일까지의 4일 평균을 바탕으로 이루어졌다. 그림 12는 각 에너지 수지 성분들의 일 변동을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 물이 없는 경우와 마찬가지로 순복사가 잠열 플럭스로 가장 많이 이용되었으며 나머지 세 성분들은 서로 비슷한 크기로 변동함을 알 수 있다. 여기서 열 저류항이 현열 플럭스와 토양열 플럭스의 값과 비슷함에 주목할 필요가 있다. 이 기간 동안의 물 수위는 약 0.05-0.10m 이었는데 저류항은 다음의 식을 이용하여 구하였다.

$$S = \int \frac{\partial}{\partial t}(\rho c T)\,dz \qquad (34)$$

여기서 ρ는 물의 밀도, c는 비열, T는 수온, 그리고 z는 수위이다.

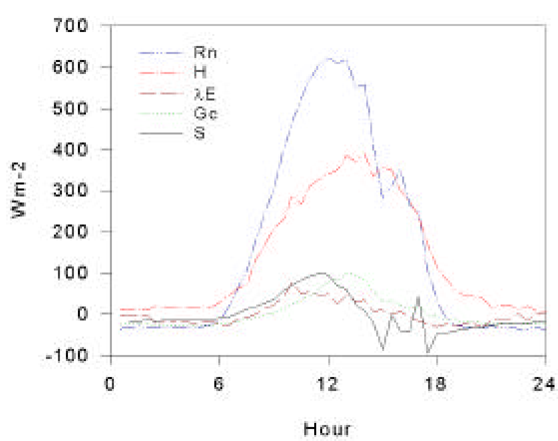


그림 12. 관개된 논에서의 지표 에너지 수지

그림 13은 열 저류항을 고려하고 또한 토양 열 플럭스를 보정한 경우의 에너지 수지의 닫힘을 나타낸다. 이 경우 회귀선의 기울기는 약 0.93로 나타났으며 이는 약 7%의 오차 내에서 에너지 수지를 닫을 수 있었다. 반면, 논에 물이 차 있었음에도 불구하고 그로 인한 저류항을 고려하지 않고 또한 토양열 판과 토양간의 열 전도도의 차이에 따른 보정을 하지 않을 경우, 회귀선의 기울기는 0.74로 26%이상의 오차를 보였다. 이러한 결과는 관측시 에디 공분산법과 같은 독립적인 방법이 아닌 Bowen비 에너지 수지 방법을 사용할 경우, 결손된 에너지가 잠열과 현열 플럭에 강제로 배분되어 증발산량을 결정하는데 잘못된 결과를 초래할 수 있음을 의미한다. 여기서 주목할 것은 지표의 피복 변화(예를 들면, 엽면적의 변화)나 벼의 기공 변화에 따른 에너지 분배의 변동량은 대개 이러한 오차의 범위 내에 있기 때문에 위와 같은 보정을 정확히 하지 않으면 관측 오차와 실제 변동 상황을 구분할 수 없게 된다는 사실이다.

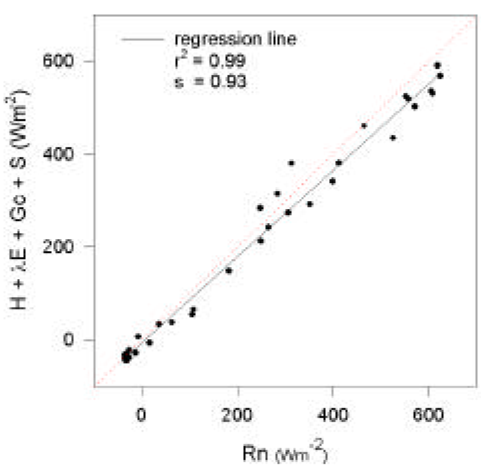


그림 13. 관개된 논에서의 에너지 수지의 닫힘

발원지 분석: 그림 14는 오카야마 관측지에 대한 발원지 분석이다. 대기가 불안정한 낮의 경우, 실제 측정 높이(z-d)는 1.7m였는데 이 경우 측정된 플럭스값의 약 90% 정도가 300m 이내에서 온 것임을 알 수 있다. 하지만 관측지 주위도 논으로 둘러싸여 있었기 때문에 측정된 플럭스는 모두 논으로부터 발생된 것이라고 볼 수 있다. 센서의 위치를 4.5m로 했을 경우는 측정도 플럭스약 80%정도가 300m이내에서 온 것이다.

한편, 대기가 안정한 밤의 경우 측정된 플럭스는 낮의 경우보다 더 먼 거리에서 온 것임을 알 수 있다. 이와 같은 분석으로부터 우리는 지표면의 거칠기 및 대기의 상태를 고려할 경우 관측점의 높이와 관측지 길이 간의 비를 짐작할 수 있다. 즉 관측지의 거리가 짧을 경우 센서의 위치가 낮아야 한다. 하지만 에디 공분산 시스템은 지면으로부터 2m 이상의 높이에서 잘 작동하며 또한 센서의 위치가 낮을 경우 주파수 반응에 대한 보정량이 커지게 된다. 따라서 에디 공분산 시스템을 이용하기 위해서는 앞서 언급된 바와 같이 우선적으로 측정 기기들의 높이와 관측지 거리 간의 비를 고려하여 관측 장소가 선정되어야 한다.

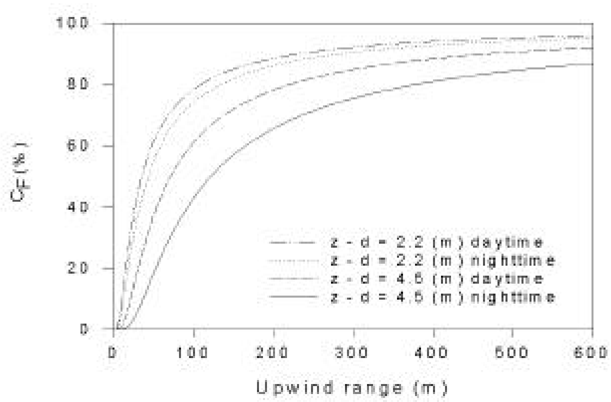


그림 14. 낮과 밤의 관측 높이에 따른 플럭스의 발원지 분석

주파수 반응: 기술적인 진보가 이루어짐에 따라서 에디 공분산 시스템의 성능도 크게 개선되어 기기의 반응 속도 및 분해능이 향상된 것이 사실이다. 하지만 기기가 가지는 자체의 부피로 인한 한계와 집록기의 자료 집록 한계, 기기의 반응 한계, 기기간의 상호 거리 등으로 인하여 플럭스를 측정하는데 오차를 발생시키게 된다. 대부분의 이러한 오차는 수학적으로 잘 정립되어 있는 편이다. 이에 대한 보정을 위해서 Moore(1986)의 논의에 근거한 복원 함수를 사용하여 이를 프로그램화하고 자료의 여러 특성 및 환경 변화에 따라서 이 오차를 정량화하였다.

표 1. 주파수에 따른 플럭스의 손실 (잠열 플럭스의 경우)

path length: sonic anemometer (0.15m)

infrared gas analyzer(0.20m); sensor separation (0.17m)

height above zero plane displacement (1.7m)

	대기 안정	대기 불안정/중립
기기간의 거리에 대한 손실	13%	7%
선 평균에 대한 손실	3%	2%
총 플럭스 손실량	16%	9%

고속반응 기기 사이의 분리에 의한 보정과 선평균에 따른 보정을 물론 고려하였다. 위의 표 1은 대기가 어느 특정한 상태에 있을 때 본 연구에서 개발된 에디 공분산 플럭스 시스템의 최적화를 위하여 주파수 반응 보정을 정량화 한 것이다. 선 평균에 의한 효과가 기기 분리에 의한 효과에 비해

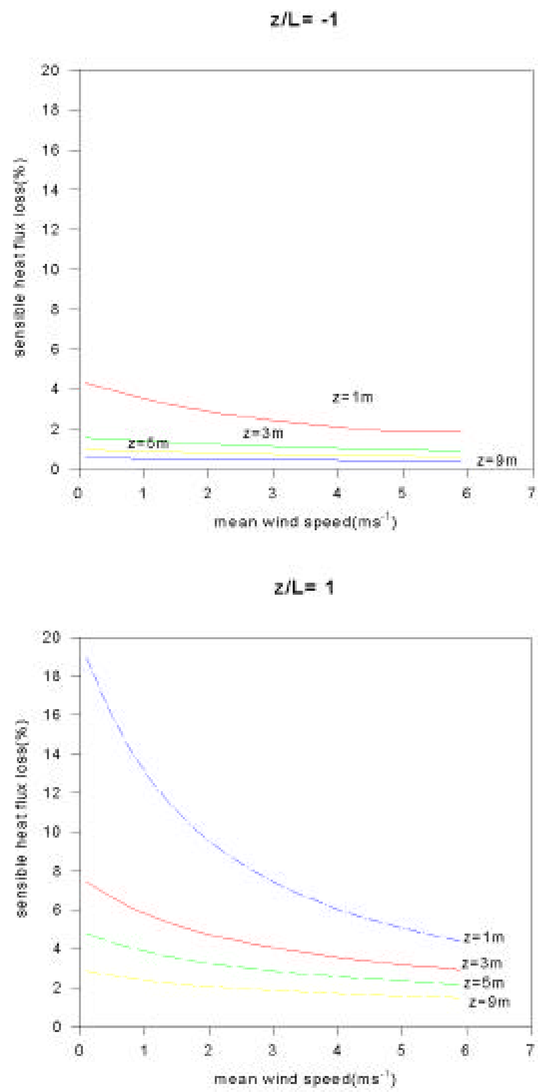


그림 15. **보정량의 대기의 안정도, 관측 높이, 풍속에 따른 변화**

매우 적다. 주파수 반응 보정을 최소화하기 위해서는 기기간의 거리를 최소화할 필요가 있다. 그러나, 너무 가까운 거리에서 관측할 경우 유체 흐름에

변형이 생길 수 있으므로 적절한 절충방안이 요구되어 진다. 이와 같은 보정량도 대기의 안정도, 관측 높이, 농생태계의 지표면의 거칠기, 그리고 풍속에 따라서도 달라진다 (**그림** 15).

밀도의 변화: **현열이나 잠열의 연직 플럭스가 있을 때 평균 연직 바람 성분,** $\overline{w}\neq 0$**이 되므로 에디 공분산 방법에 따른 가정에 위배되게 된다. 따라서** Webb **등**(1980)**이 제시한 보정식을 사용하여 실시간으로 플럭스 자료를 얻을 수 있도록 프로그램화하였다. 그림** 16**은 보정을 하지 않은 자료와 주파수 반응 보정을 한 자료, 그리고 주파수 반응 보정과 밀도 변화에 따른 보정을 한 자료의 일변화를 나타낸 것이다.**

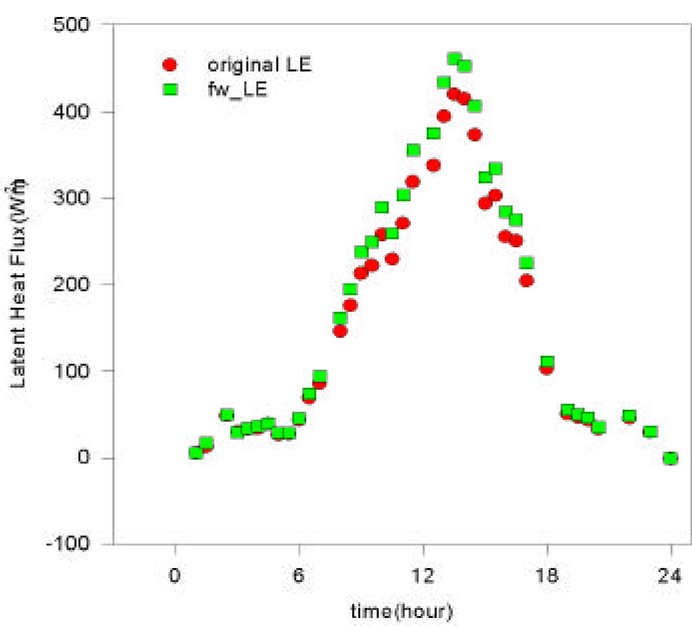


그림 16. **보정 전과 보정 후의 논에서의 잠열 플럭스의 일변화**

나. 경기도 병점 논에서의 관측

야외 실험을 통해서 얻어진 자료를 이용하여 플럭스 관측의 기본이 되는 에너지 수지를 분석하였다(그림 8). 이 결과는 주파수 반응 보정, 밀도 변화에 따른 보정은 적용하지 않았으며 이를 고려할 때 에너지 수지가 잘 닫힌다는 결론을 내릴 수 있다. 여기서 H는 미세선 열전대로 관측된 기온을 사용하여 얻어진 현열이며, H_s는 3차원 풍향풍속계의 가온도를 사용하여 얻어진 현열 플럭스이다. 선 평균 효과에 의해 일반적으로 3차원 풍향 풍속계에서 얻어진 플럭스가 과소 평가되는 경향이 있음을 고려할 때, 두 온도로 얻어지는 현열 플럭스의 값들이 거의 일치하고 있다. 따라서, 고장이 잦은 미세선 열전대 대신, 3차원 풍향 풍속계로 집록 되는 온도를 현열 플럭스를 구하는데 이용할 수 있다.

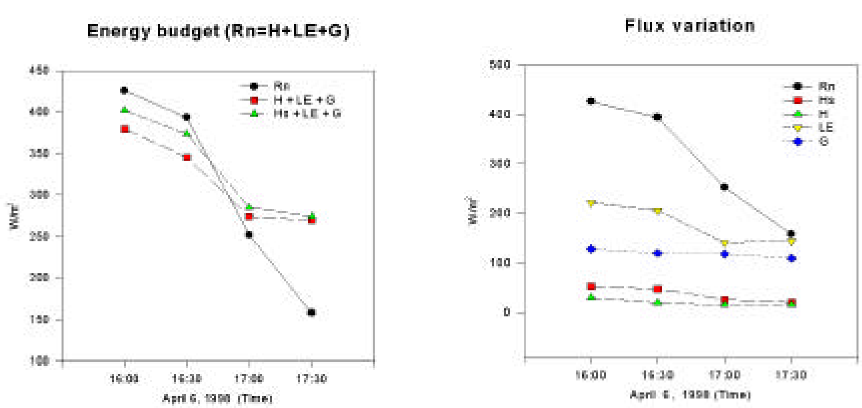


그림 8. 병점 논에서의 지표 에너지 수지의 예

보웬비가 작고 지중열 플럭스의 크기가 큰 것은 관측 전날 비가 왔으며 모내기 이전으로 벼가 없는 상황과 일치하고 있다. 식생에 의한 피복 변화에

따른 에너지 수지 식의 각각의 항들에 대한 변화에 주목할 필요가 있다.

그림 9는 지표면의 바람의 연직속도를 측정한 자료를 바탕으로 논의 거칠기 길이를 구한 것이다. 그 결과 벼의 높이가 약 0.1 m이었던 6월 22일의 거칠기 길이는 0.004m, 약 벼의 높이가 0.9 m이었던 8월 24일에는 0.04 m로 벼가 성장함에 따라 논의 거칠기가 증가하였다.

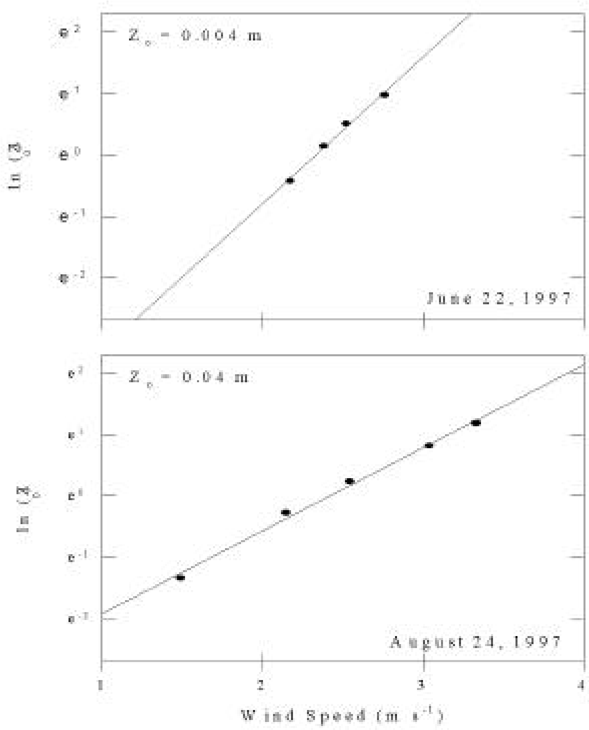


그림 9. 논의 피복 변화에 따른 거칠기

그림 10은 엽면적이 최대인 기간의 벼의 알베도의 일 변동(8월 21일)을 나타낸 것이다. 알베도는 약 0.38±0.07로 비교적 큰 값으로 나타났다.

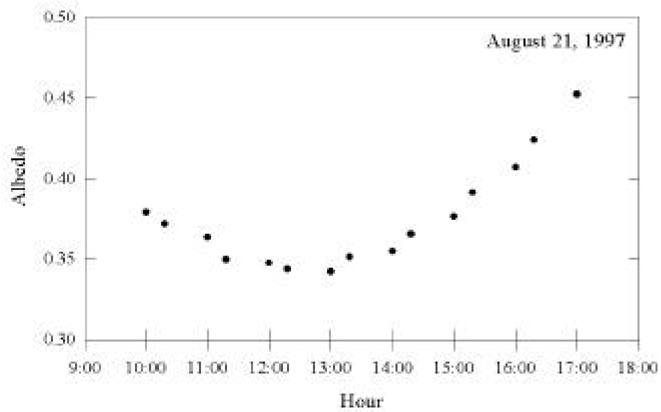


그림 10. **알베도의 변화**(8**월** 21**일**, **경기도 병점**))

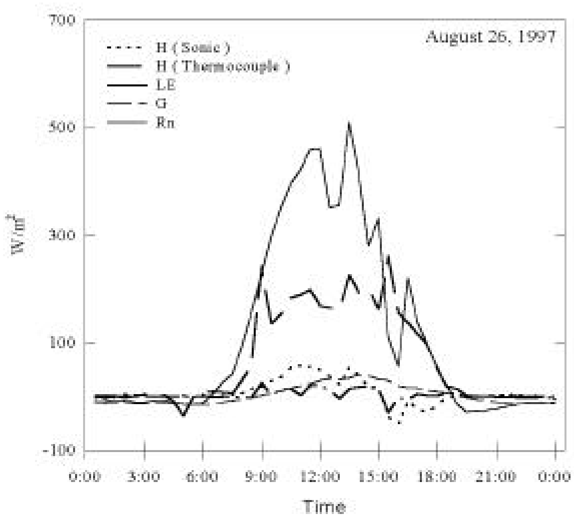


그림 11. **에너지 수지 성분의 일 변동**.

지표 에너지 수지 성분의 일 변동을 보면, 순복사의 대부분이 잠열 플럭스에 이용되었으며, 현열과 토양열 플럭스는 거의 비슷한 크기였고, 보웬비(현열/잠열플럭스)는 0.08로서 증발산이 활발히 일어나고 있음을 나타낸다(그림 11).

추수를 전후로 해서 피복의 변화가 크게 일어나며, 이에 따라 복사 수지 및 에너지 수지도 변하게 된다. 그림 12-1과 12-2는 병점의 논에서의 복사 관측 자료이다. 순복사는 하향 단파와 장파의 합에서 상향 단파와 장파의 합을 뺀 값이다. 10월 18일(흐림: 추수 전)과 11월 1일(맑음: 추수 후)의 복사량의 절대값을 살펴보면, 하향 단파복사는 낮 동안 평균 600 W m^{-2}이었다. 상향 단파복사는 모두 -100 W m^{-2}이하이었고, 하향 장파복사는 각각 400 W m^{-2}이었고, 상향 장파복사는 두 관측 날 모두 대략 -500 W m^{-2} 내외이었다. 절대값으로는 큰 차이가 없어 보이나, 알베도(상향 단파 복사/하향 단파 복사)는 추수를 전후로 해서 한 낮의 평균이 0.24-0.25에서 0.19-0.20으로 20%나 감소하였다.

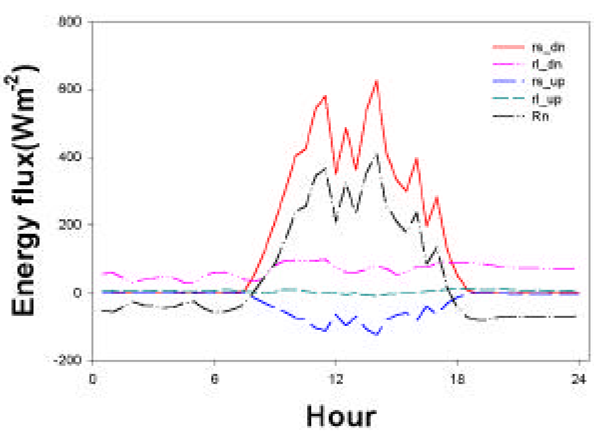


Fig. 12.1 Radiation components (18 Oct. 1998)

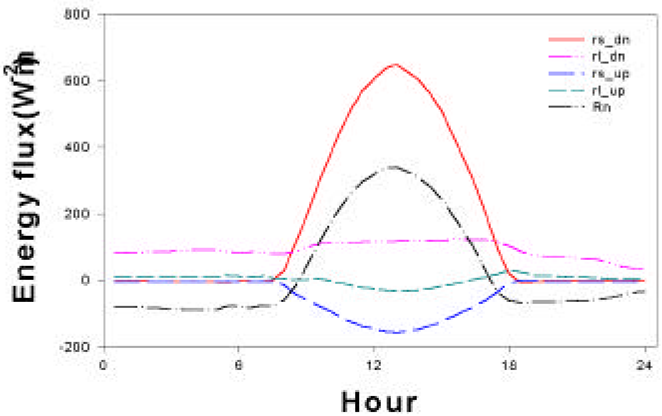


Fig. 12.2 Radiation components (1 Nov. 1998)

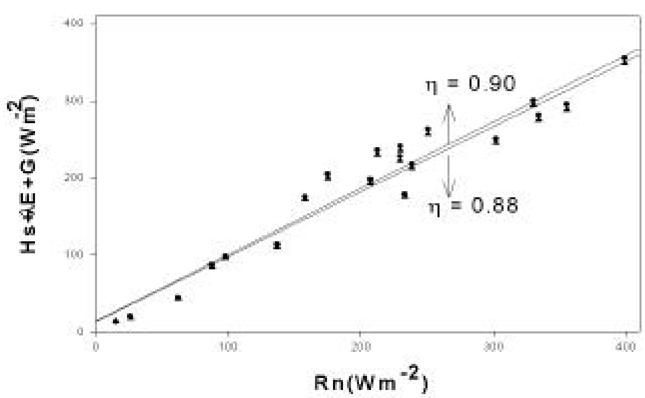


Fig. 13. Energy budget closure

그림 13**은** 10**월** 18**일 하루동안의 순복사**(R_n)**와 나머지 에너지**(**현열 플럭스**, **잠열 플럭스**, **토양열 플럭스**)**의 합의 비를 나타낸다**. **에너지 수지의 닫힘 정도를 보기 위해서 측정된 순복사와 지중열 플럭스가 관측지의 값을**

대표함을 가정하였다. 현열과 잠열 플럭스의 경우에 대해 주파수 반응에 따른 보정을 하지 않았을 때와 수행했을 때의 오차(η)의 변화이다. 보정을 수행하지 않은 경우 약 $\eta \simeq 0.88$이었고, 보정을 수행한 경우 $\eta \simeq 0.90$로서, 이는 10%의 오차 내에서 에너지 수지가 닫힘을 뜻한다.

그림 14은 관측기간동안 잠열과 현열의 변동을 나타낸다. 주목할 점은 순복사(R_n)에 대한 잠열과 현열의 배분이 추수를 전후로 바뀐다는 것이다. 순복사에 대한 잠열과 현열의 비를 나타내는 보웬비($\beta = H_s/\lambda E$)는 추수 전까지 약 0.14 0.18정도의 값을 가지다가 추수가 시작된 10월 중순이후부터 증가하기 시작하여 11월에는 약 1.4정도의 값을 보였다. 추수 전에는 지표면이 물에 젖어있어 순복사 에너지가 대부분 잠열 플럭스로 배분되었고, 추수 이후에는 지면의 물기가 빠르게 감소하면서 대부분의 복사에너지가 현열 플럭스로 배분되고 있음을 나타낸다.

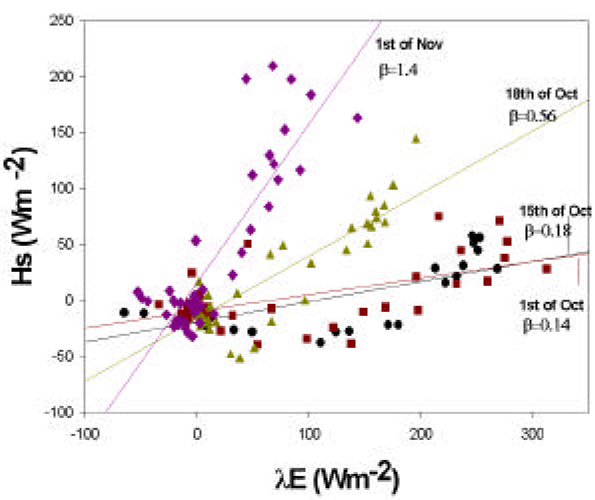


Fig. 14. Variation of Bowen ratio(= $H_s/\lambda E$)

그림 15는 고속 반응 기기로 관측된 변수들의 시계열을 나타낸다. 벼 군락과 상부의 대기간의 난류 교환에 의한 상호 작용의 형태를 잘 나타내고 있다. 사용된 고속 반응 관측 장비는 Solent 초음파 풍속계, CSAT3 초음파 풍속계, 미세선 열전대(fine-wire thermocouple), 개회로 습도계(KH20)이며 집록기로는 CR9000을 사용하였다. 정성적으로 살펴볼 때, 수직 바람속도인 w의 시계열이 수평 풍속인 u의 시계열과는 음의 상관 관계를 가지며, 온도 T와 절대 습도 q의 시계열과는 양의 상관관계를 가진다. 이 자료에 의하면 운동량이 벼에 의해 흡수되고, 논에서 대기로의 잠열과 현열 플럭스가 있음을 알 수 있다. 이로부터 에디에 의한 운동량, 열, 수증기의 수송을 빠른 측정과 집록으로 얻은 자료에 대한 시계열을 분석함으로써 에디 공분산 방법의 기본 원리를 확인할 수 있다.

한편, 그림 15의 14초 동안의 자료에서 w를 살펴보면 모두 0보다 큼을 알 수 있다. 이 기간 동안뿐만 아니라 다른 시점의 30분간의 w 평균값을 보면 약 0.6 0.7 ms^{-1}로 나타났다. 이론상으로 관측지가 평평하고 균질하면 w의 평균값이 0이 되어야 한다. 이에 대한 원인은 다음과 같은 두가지 원인으로 나누어 볼 수 있다. 첫째 원인은 영점 보정과 같은 내부 실험을 통해 확인한 결과, 이 값의 상당부분이 측정에 이용된 solent 초음파 풍속계의 w 값의 offset에 기인한다. 이는 9월 말부터 사용하기 시작한 CSAT 초음파 풍속계(미국 Campbell사)의 관측 자료와 비교해 보면 명확히 알 수 있다(그림 16). 둘째는 관측이 이루어진 논은 비교적 평평하나 일부 계단식으로 이루어진 곳으로 인한 관측지의 비균질함에 있다. 관측 시스템이 설치된 곳으로부터 약 10m정도 떨어진 부분과 시스템이 설치되어 있는 군락의 높이가 약 0.2m 정도 차이가 있다. 관측 초기에는 군락의 높이가 상대적으로 낮아 문제가 되지 않을 것으로 고려되었다. 하지만 벼의 키가 약 1m가 되었을 때, 이로 인해 평균 연직 바람이 생길 수도 있다. 위에서 지적한 평균 0.6 0.7

ms^{-1}의 연직 바람 속도가 0이 아니기 때문에 바람직하지는 않지만, 에디 공분산 플럭스의 계산에는 전혀 문제가 되지 않는다. 왜냐하면, 에디 공분산 방법에서는 평균으로부터 벗어나는 편차만을 계산하면 되기 때문에 일정한 offset는 계산에 포함되지 않는다.

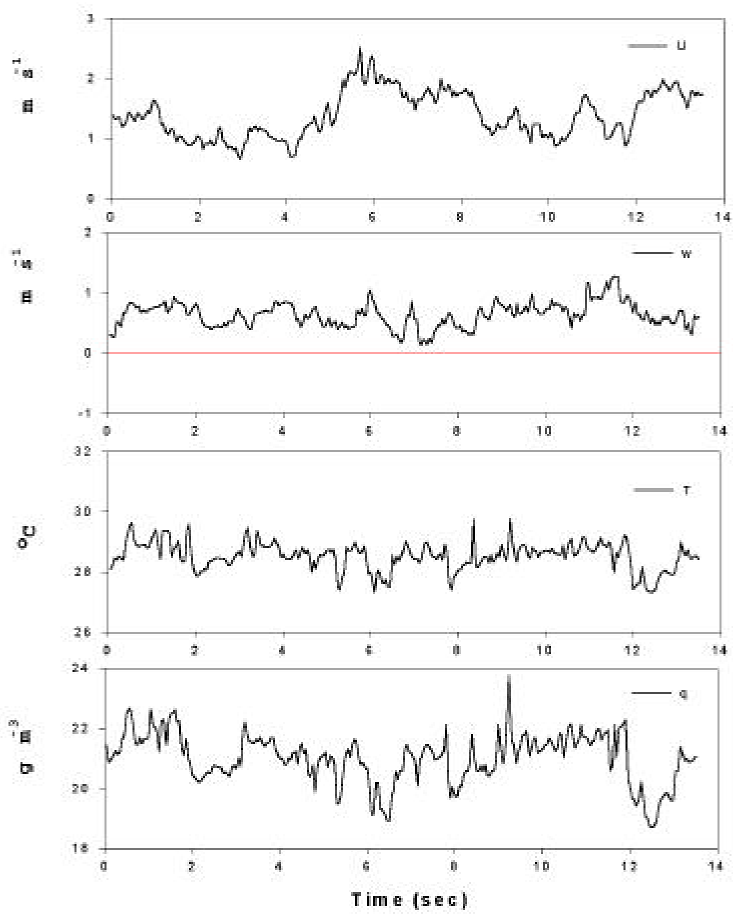


그림 15. 고속 반응 자료의 시계열: 난류 변수의 시간에 따른 변화(Solent 초음파 풍속계를 이용, u는 수평 풍속, w는 연직 풍속, T는 온도, q는 비습)

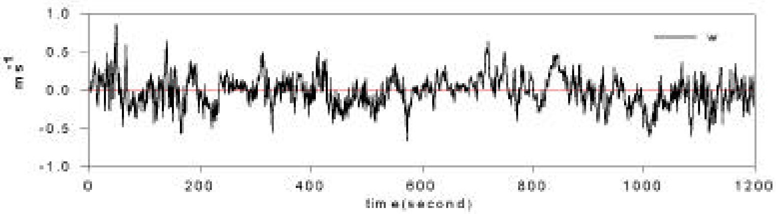


그림 16. 연직 풍속의 시간에 따른 변화(CSAT3 초음파 풍속계를 이용)

그림 17은 3시간 간격으로 30분 평균 자료를 이용하여 바람의 연직분포의 일변화를 나타낸 것이다. 고도가 올라감에 따라 지표 마찰의 영향이 작아지면서 풍속이 대수적으로 증가함을 볼 수 있다. 순복사, 광합성 유효복사, 상향·하향 전천일사, 기온(3 높이), 토양 온도, 풍속 (5 높이), 포화수증기압(3 높이)이 뚜렷한 일 변화를 보인다 (그림 18). 포화수증기압 값과 순복사값이 관측 초기에 작은 값을 나타내다가 후반부부터 안정된 값을 보인다.

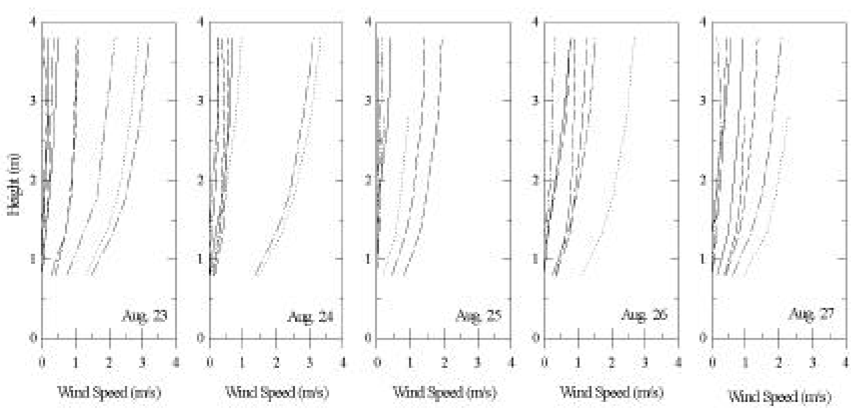


그림 17. 평균 수평 바람의 연직 분포

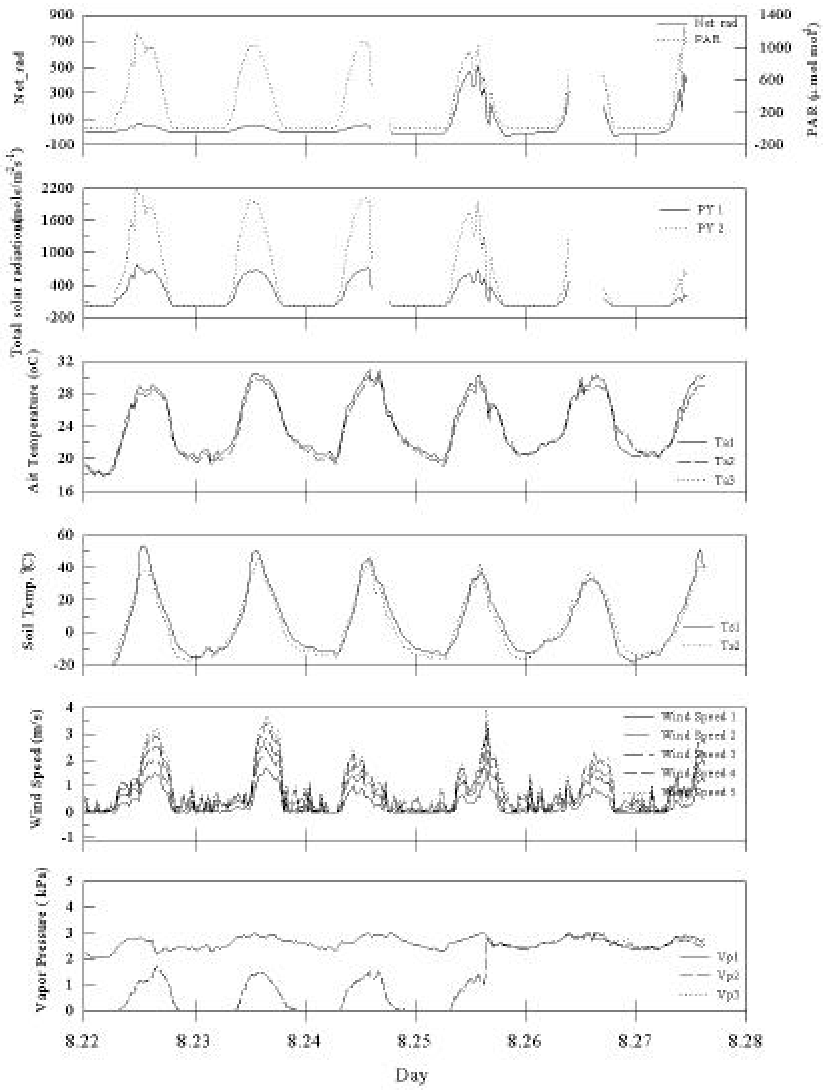


그림. 18 **순복사**(Net_Rad), **광합성 유효 복사**(PAR), **상향 전천일사**(PY1), **하향 전천일사**(PY2), **광합성 유효복사**(PAR), **기온**(Ta), **토양 온도**(Ts), **풍속**(wind speed), **수증기압**(Vp)**의 시계열**(8**월** 23**일** - 8**월** 28**일**)

나. 강화도 하리 논에서의 관측

1999년 5월에서 6월까지 강화도 석모도 내에 위치한 하리의 논에서 미기상관측을 수행하였다. 아래의 분석을 위해 모내기 직후인 6월 9일 부터 6월 20일 동안의 자료를 사용하였다. 그림 19-1과 19-2는 맑은날(6월 12일)과 흐린날(6월 18일)의 복사변동을 나타낸다. 관측 기간동안 하향 단파복사는 낮동안 각각 1000 W m^{-2}, 800 W m^{-2}이었다. 상향 단파복사는 각각 > -100 W m^{-2} 이었고, 하향 장파복사는 대략 400 W m^{-2} 이었고, 상향 장파복사는 두 관측날 모두 -500 W m^{-2} 이었다. 순복사는 약 700 W m^{-2} 이었다. 여기서 R_n, R_s, R_L은 각각 순복사, 단파복사, 장파복사를 의미하고, 아래쪽, 윗쪽 화살표는 각각 하향 및 상향 복사를 의미한다.

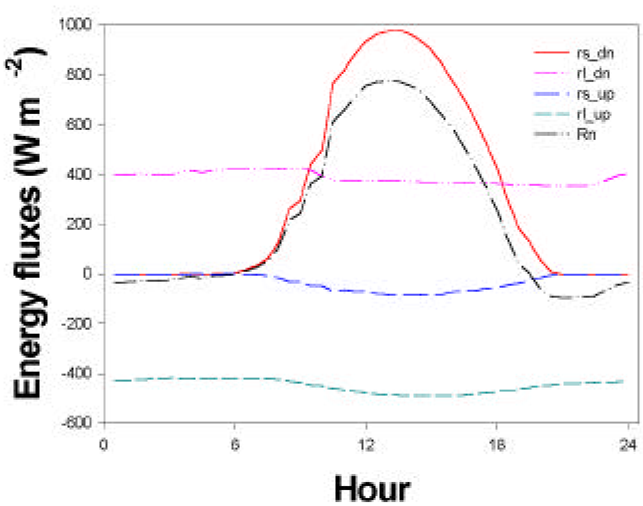


Fig. 19-1. Radiation components (12 June)

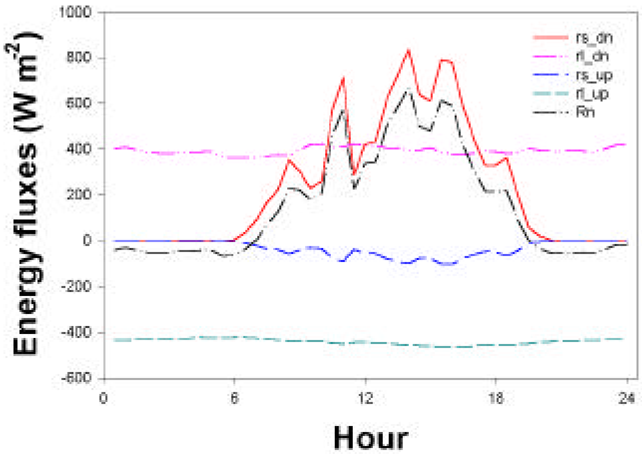


Fig. 19.2 Radiation components (18 June)

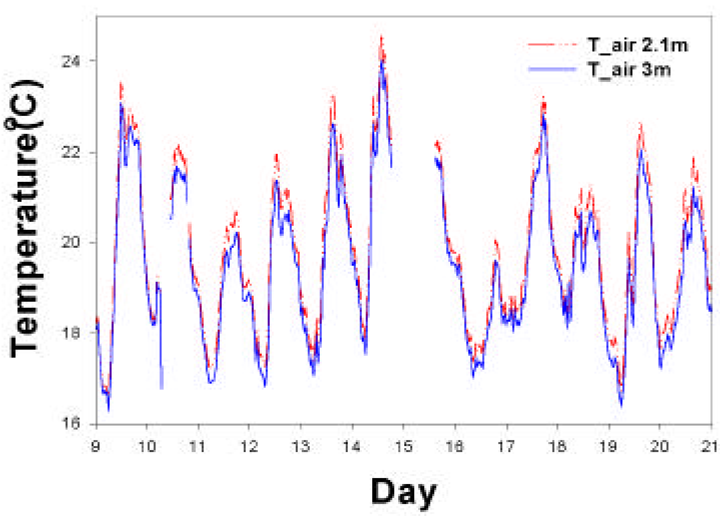


Fig. 20. Variation of air temperatures

그림 20은 관측기간동안의 온습도계(HMP-35C, Campbell Scientific, Inc)로 측정한 지표에서부터 2.1m와 3.0m에서의 기온의 일 변화를 나타낸다. 두 온도계의 지표로부터의 거리에 따른 온도차이는 평균 0.4 °C이었다. 관측기간동안 정오 무렵의 평균 기온은 약 22°C였고, 새벽 무렵의 평균 기온은 약 17° C정도로서 뚜렷한 하루주기의 기온의 경도 변동을 볼 수 있다.

그림 21은 관측기간동안의 하리에서의 풍향을 나타낸다. 에디 공분산을 비롯한 미기상 관측에서는 풍향을 고려하여 취주거리의 변화에 따른 각별한 자료 분석이 고려되어야 한다. 관측 기간동안 풍향은 대체로 남서풍이었으며, 이 풍향에서는 취주거리가 2 km가 넘는 최적의 조건이었다.

.

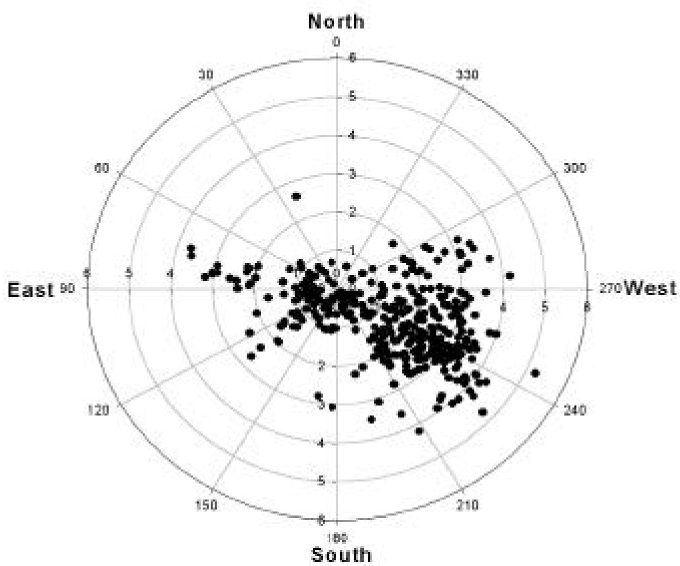


Fig. 21. Variation of wind direction

그림 22-1과 22-2는 6월 12일과 6월 18일 동안의 순복사에 대한 토양열 플럭스(G)와 표면의 물에 저장되는 열저류항(S)을 나타낸다. 순복사의 약 11%가 토양열 플럭스로 사용되었고, 열 저류항은 그 보다 큰 평균 19%를

차지하였다. **즉 순복사의 약** 30%**가 토양열 플럭스와 열 저류항으로 배분되었음을 알 수 있다**. **이것은 논이 관개되어 있을 경우**(**물의 높이가 약** 0.1 m **정도**), **토양열 플럭스는 물론**, **열 저류항에 대한 정확한 산출이 매우 중요함을 의미한다**.

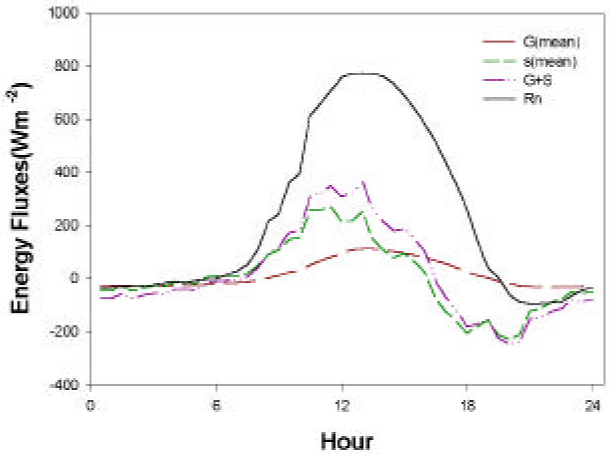


Fig. 22-1. Energy balance components (12 June)

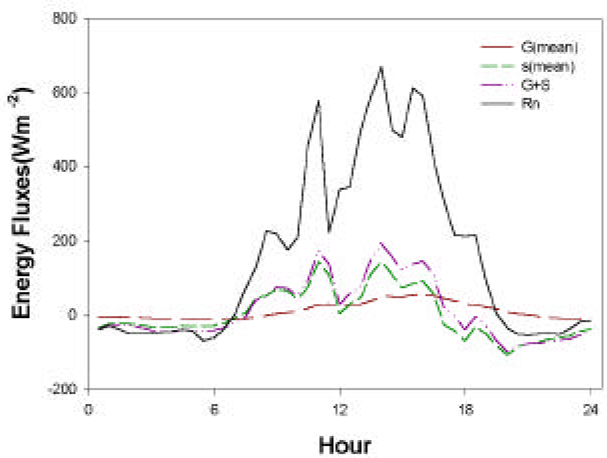


Fig. 22-2. Energy balance components (18 June)

그림 23은 현열과 잠열 플럭스의 경우에 대해 주파수 반응에 따른 보정을 하지 않았을 때와 수행 했을때의 에너지 수지의 닫힘 ($\eta = \frac{H + \lambda E + \mu A + G + S}{R_n}$; 완벽하게 닫히는 경우에는 1이 됨)의 변화를 보여준다. 보정을 수행하지 않은 경우 $\eta \simeq 0.80$, 보정을 수행한경우 $\eta \simeq 0.95$로 나타났으며 이는 5%의 오차 내에서 에너지 수지가 닫힘을 뜻한다. 에디 공분산법과 같은 독립적인 방법이 아닌 Bowen비 에너지 수지 방법을 사용할 경우, 결손된 에너지를 잠열과 현열 플럭스로 강제 배분시키기 때문에 겉으로는 에너지 결손이 드러나지 않음에 주의하여야 한다.

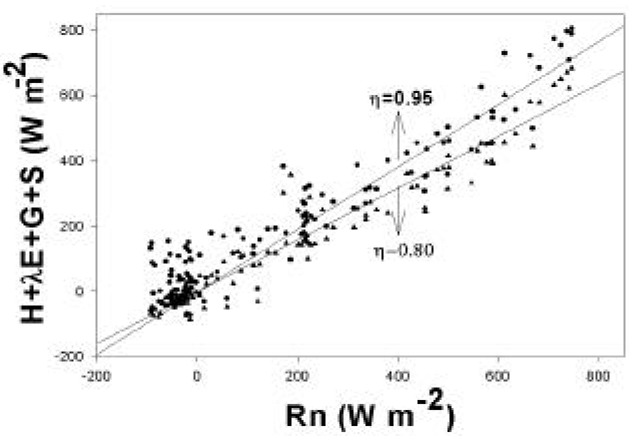


Fig. 23. Energy budget closure

미세선 열전대를 별도로 사용하지 않고 삼차원 풍속계의 가온도를 사용하여 동시에 관측된 연직속도로부터 현열 플럭스를 구하는 경우, 단자 사이에 존재하는 수증기 효과와 단자간 경로에 수직으로 부는 풍속효과에 의

해 현열 플럭스가 과대 평가된다. 이에 대한 적절한 보정을 수행하면 정확한 현열을 구할 수 있다(앞서 언급된 식 21-22 참조). 그림 24는 하리의 논에서 관측된 CSAT3 자료를 이용하여 두 효과에 대한 보정을 수행한 결과를 나타낸다. 자료는 1999년 6월 14일 6월 21일 사이의 자료를 사용하였으며, 이렇게 보정된 현열 플럭스와의 비교를 위해 미세선 열전대로 관측된 기온을 사용하여 계산된 현열과 비교하였다. 그림 24-1은 보정을 수행하기 전의 CSAT3으로 구한 현열(H_s)과 미세선 열전대로 구한 현열 플럭스(H_f)의 비를 나타낸다. 그 차이는 CSAT3로 구한 현열 플럭스가 20%정도 크다. 그림 24-2는 수증기효과에 대한 보정(H_h)을 수행함에 따라 약 24%의 현열 플럭스가 감소하여 6%내외에서 미세선 열전대로 구한 현열 플럭스와 일치함을 보인다. 그림 20-3은 수증기 효과와 단자간 경로에 수직인 풍속효과(H_{hw})를 모두 고려했을 때의 결과로서, 미세선 열전대로 구한 현열 플럭스와는 8%내외에서 일치하였다. 따라서 장-단기 관측시스템의 구축에 있어 추가적인 온도센서의 설치가 어려운 경우에는 3차원 초음파 풍향 풍속계의 설치만으로도 현열 플럭스를 10%의 오차 안에서 정확히 구할 수 있을 것이다.

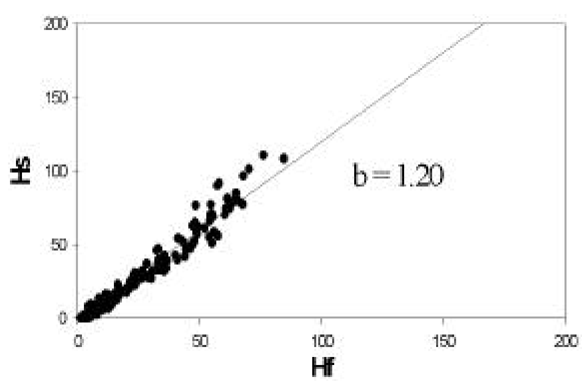


Fig. 24-1. Comparison of H_s and H_f

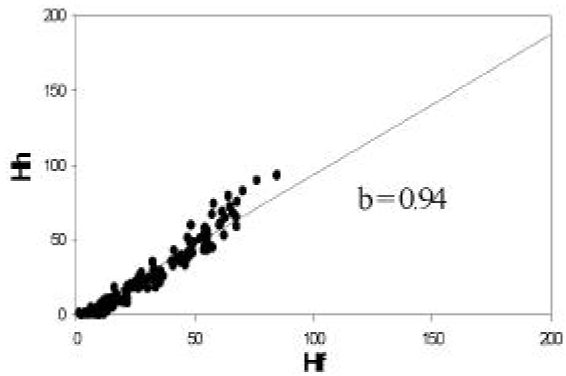


Fig. 24-2 Comparison of H_h and H_f

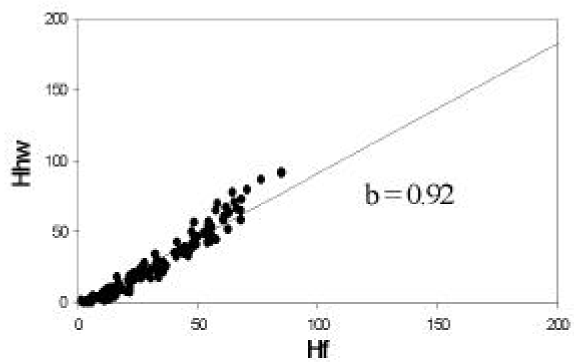


Fig. 24-3. Comparison of H_{hw} and H_f

- Hf: Sensible heat flux from fine wire thermometer
- Hs: Sensible heat flux from CSAT3
- Hh: Sensible heat flux from CSAT3 with moisture correction
- Hhw: Sensible heat flux from CSAT3 with moisture and wind correction

3. 폐회로 레이저 분광기의 접합 실험

가. 레이저 분광기와 에디 공분산 시스템의 접합

메탄 플럭스를 측정하기 위해 서울대 공동기기센터(NICEM)에서 임차한 레이저 분광기(TGA-100)를 이용하여 실험실에서 예비 접합 실험을 실시하였으며, 이를 바탕으로 야외 실험을 실시하였다. 10Hz의 속도로 관측과 집록이 가능하며, 메탄의 경우, 수 ppb의 분해능을 가진 이 폐회로 기체 분석기는 개회로 기체 분석기에 비하여 밀도 변화에 의한 보정 효과와 먼지로 인한 자료의 손실이 상대적으로 작아지며 흐름의 왜곡과 기기의 분리에 따른 오차가 최소화되는 장점이 있다(Billesback와 Kim 등, 1998). 반면에 튜브의 감쇄 효과에 의해 플럭스 값이 과소 평가될 수 있는 가능성과 진공 펌프를 사용하여야 함은 물론 펌프의 속도 및 튜브내의 압력과 흡입 속도를 일정하게 유지해야 하는 어려움도 있다. 그리고 풍속과 기체 농도의 측정이 동시에 이루어지지 않기 때문에 한 지점에서 동시에 측정된 자료를 이용하여 플럭스를 측정하는 에디 공분산 방법을 사용할 때에는 각별한 주의를 기울여야만 한다. 즉 흡입구에서 가스 농도 분석이 이루어지는 곳까지 시간이 소요된다. 이런 시간 지연에 따른 보정 체계를 확립하여 레이저 분광기를 이용하여 얻어진 자료의 분석에 적용하였다.

이런 지연 시간을 계산하는 여러 가지 방법은 국제학회에서 이미 상세히 발표하였으므로 보고서에서는 가장 실용적인 방법 한가지만을 예로 든다. 이 방법은 폐회로 레이저 분광기와 3차원 초음파 풍향 풍속계로 얻어진 생자료의 교차 상관 (cross- correlation)을 구하는 것이다. 일반적으로, 같은 시간에 얻어진 자료사이의 상관도가 가장 크기 때문에 같은 시간에 두 개의 센서로부터 얻어진 자료의 교차 상관도가 가장 크게 나타난다. 따라서 교차

상관도가 어느 가장 큰지를 알아내면 흡입구에서 가스 농도 분석이 이루어지는 곳까지 가는데 걸리는 시간을 결정할 수 있다. 여러번의 시행 착오를 거쳐서 국내의 경기도 병점과 강화도 하리에서의 야외 실험, 그리고 일본과의 북해도 공동 야외실험에서 레이저 분광기를 비롯한 각종 실험 장비를 비교, 검사하고 완성된 관측 시스템 체계와 프로그램들을 적용하였다. 특별히 메탄의 교환이 활발한 습지 생태계에서 교차 상관을 계산할 수 있는 프로그램을 완성, 지연 시간이 0.9초임을 계산해내었다(그림 25). 이 때의 연직 속도와 메탄 농도의 최대 교차 상관 값은 대략 0.002 ppm・m/s 정도였다.

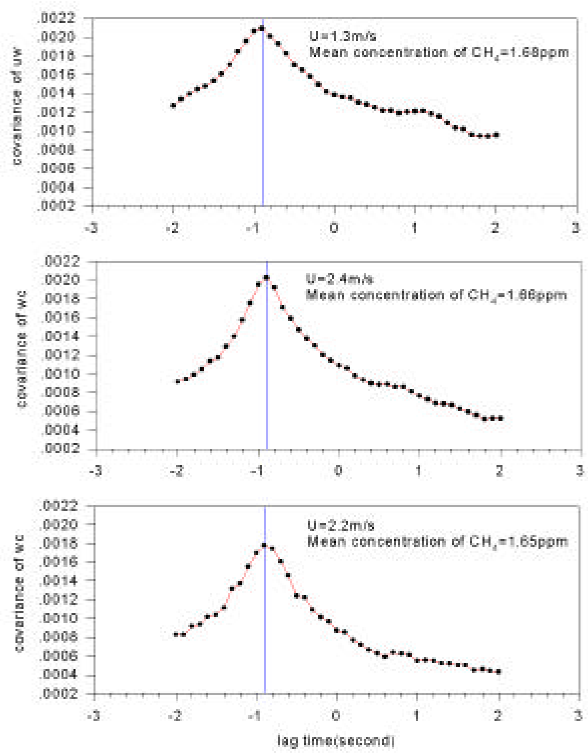


그림 25. 폐회로 레이저 분광기의 시간 지연 계산 (교차상관 방법)

한편, 레이저 분광기를 이용하여 플럭스를 측정하는데 있어서 처음에 난류의 성질을 가지고 있던 흐름이 튜브를 통과하면서 점차로 난류의 성질을 잃어버리게 된다. 따라서 폐쇄로 기체 분석기로 얻어진 자료를 이용하여 바로 플럭스를 구하게 되면 진짜 플럭스를 과소 평가하게 된다. 이런 사실은 관측된 자료의 코스펙트럼에 잘 나타난다(그림 26).

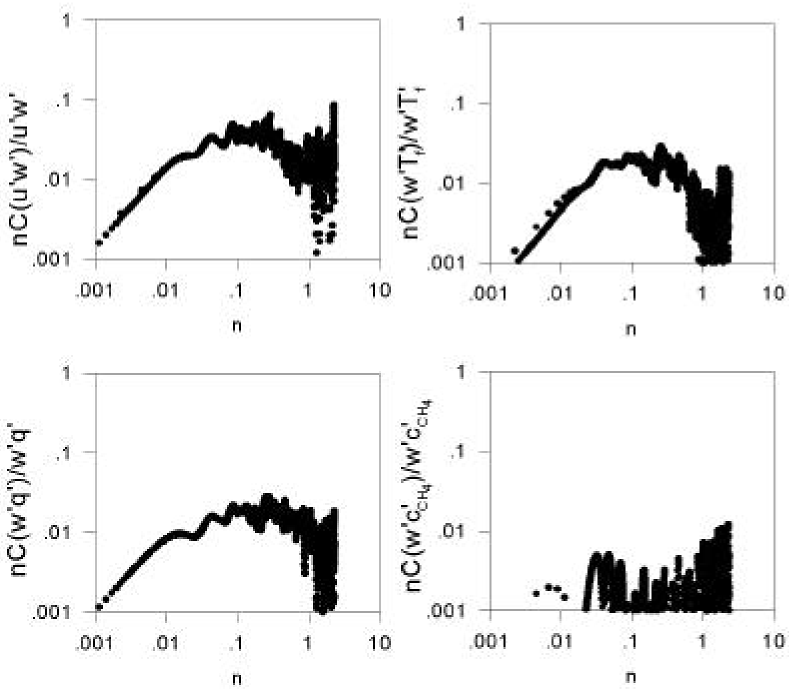


그림 26. 운동량, 현열, 수증기 및 메탄 플럭스의 코스펙트럼 (u: 수평 풍속, w: 연직 풍속, q: 비습, C_{CH4}: 메탄 농도)

폐회로 기체 분석기를 통해 얻어진 코스펙트럼이 다른 자료의 코스펙트럼과는 달리 이론적으로 알려진 inertial subrange에서의 -2/3 기울기를 만족하지

않으며 전체적으로 코스펙트럼 이 그리는 면적이 상대적으로 작다. 코스펙트럼이 이루는 면적이 플럭스와 같으므로, 관측된 메탄 플럭스가 참 플럭스보다 작음을 알 수 있다. 따라서 이런 튜브 감쇄(damping) 효과에 대한 보정이 필요하다. 하지만 이론적으로나 실험적으로 이에 대한 효과를 정량화하는 것은 어려운 일이어서 임차한 레이저 분광기를 사용한 지속적인 연구가 필요하다. 농경지 온실기체 플럭스 측정 실험은 궁극적으로 특정 작물(여기서는 벼)로 구성된 경지의 이산화탄소, 메탄, 질소산화물 등 온실기체와 수증기의 출입량을 일별 표준기상자료에 의해 알아낼 수 있도록 하는 것이 궁극적인 목표이다. 본 과제에서는 전국의 1.455개 작황진단구역별로 시간대별 기온, 일사, 바람 등 기본 기상자료를 생산하기 때문에 임의 시기 혹은 기간중의 농경지 온실기체 총 배출/흡수량을 CZU 단위 공간해상도로 생산하는 것이 이론상으로 가능하다. 이를 실현시키기 위해서는 한 지점에서 첨단의 레이저와 미기상학적 기술이 접합된 기법에 의해 관측한 플럭스 값을 그 때의 표준 기상조건에 따라 개략적으로 변환해줄 수 있는 방법이 필요하다. 또한 이러한 자료를 생산하기 위해서는 인력과 비용이 많이 들지만 장기 야외 관측이 필수적이다.

나. 야외 포장실험

1999년에는 강화도 하리에서 5월 초까지 야외포장실험 준비를 완료하였다. 실험 장소를 답사한 결과, 인천시 강화군 삼산면 하리에 위치한 벼논을 최종적으로 선택하였다. 관측에 필요한 최소 취주거리보다, 적어도 100배가 되는 사방 3-5 km이상의 매우 편평한 이상적인 관측 장소이다. 여러 가지 사정으로, 당초의 발전기 임대를 포기하고, 레이저의 진공 펌프 등의 큰 전력 소비 때문에 100 KW 전봇대를 설치하였다 (그림 27).

그림 27. 강화군 삼산면 하리의 플럭스 관측 시설

다. 레이저 분광기-플럭스 관측장비의 야외 포장 결합

서울대 농업과학공동기기센터(NICEM)로부터 임차한 레이저 분광기와 플럭스 관측 시스템의 설치를 마무리 지었다. 기기의 바른 설치와 운영을 위해, 레이저 분광기를 제작한 미국 Utah의 Campbell사에서 1명의 과학자와 3명의 기술자가 5월 26일부터 6월 2일까지 하리 관측지에서 함께 시스템의 설치를 수행하였다. 일반적으로, 메탄과 이산화탄소의 농도 및 플럭스와 증발산 등을 측정하기 위해서는, 대부분 소위 '평균 부피 (averaging volume)'라

불리는 혼합용 상자를 측정 고도 수만큼 (본 연구의 경우, 8층) 사용해야 하는 어려움이 있다. 이번에 시도하는 관측 기술은 이러한 '평균 부피'를 전혀 사용하지 않고, 특수 구멍관(orifice)를 사용하여 흡입 선 내의 압력을 대기압의 반정도로 유지하도록 하여 빠른 분석 속도를 제공할 뿐만 아니라, 흡입속도를 일정하게 유지하여 정확한 관측을 고속으로 측정할 수 있게 한 세계 최초의 시도이다 (그림 28).

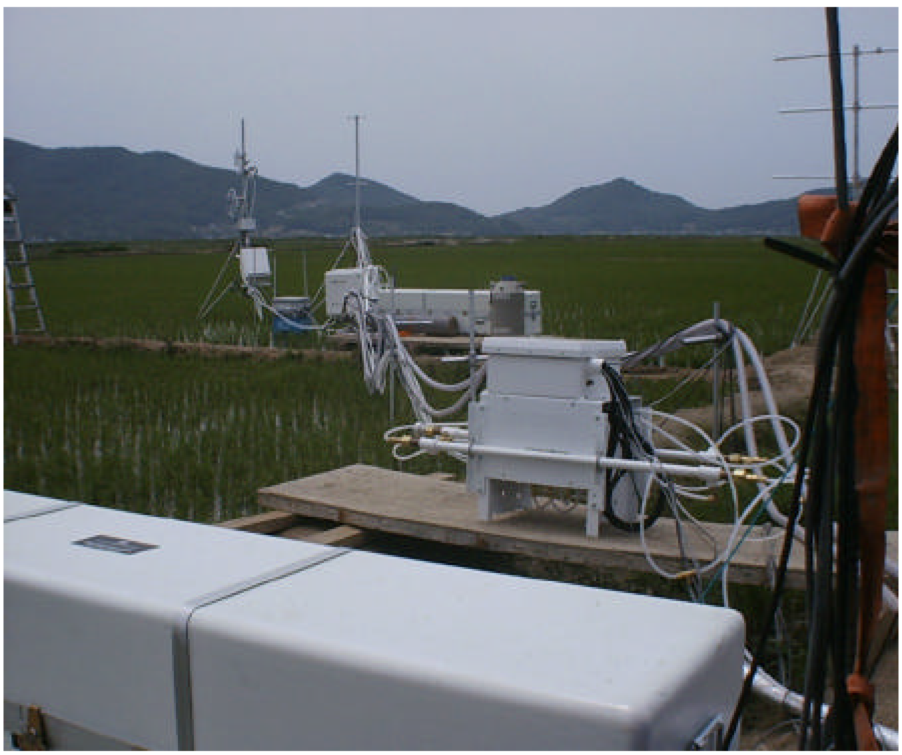


그림 28. 레이저 분광기와 8층 흡입 튜브의 설치

라. 시스템 연속 운영

현지 플럭스 관측 시스템과 레이저 분광기를 성공적으로 접합시켰으며, 접합된 시스템을 성공적으로 관측탑에 설치 운영하고 있다 (**그림** 29).

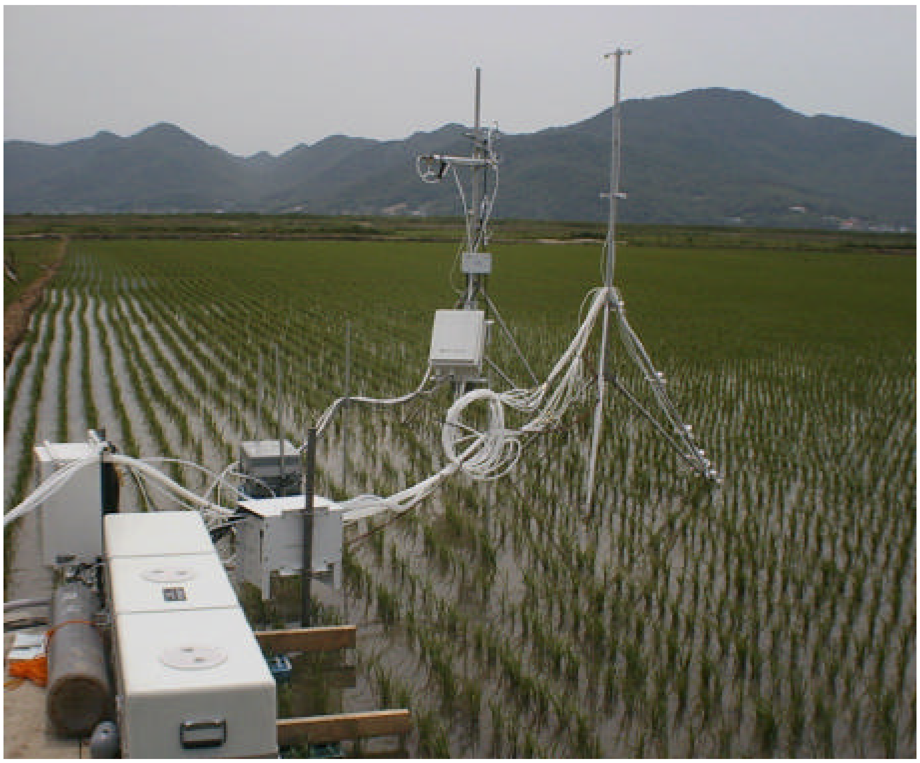


그림 29. **플럭스 관측 시스템과 레이저 분광기의 접합**

메탄과 이산화탄소 및 수증기의 농도와 플럭스를 측정하기 위해 플럭스 관측용 튜브를 초음파 풍속계의 단자들 사이에 설치하였으며, 비가 올 경우에도 관측을 계속할 수 있도록 하기 위해 흡입구 부분에 특수 대칭형 필

터를 장착하였다 (그림 30).

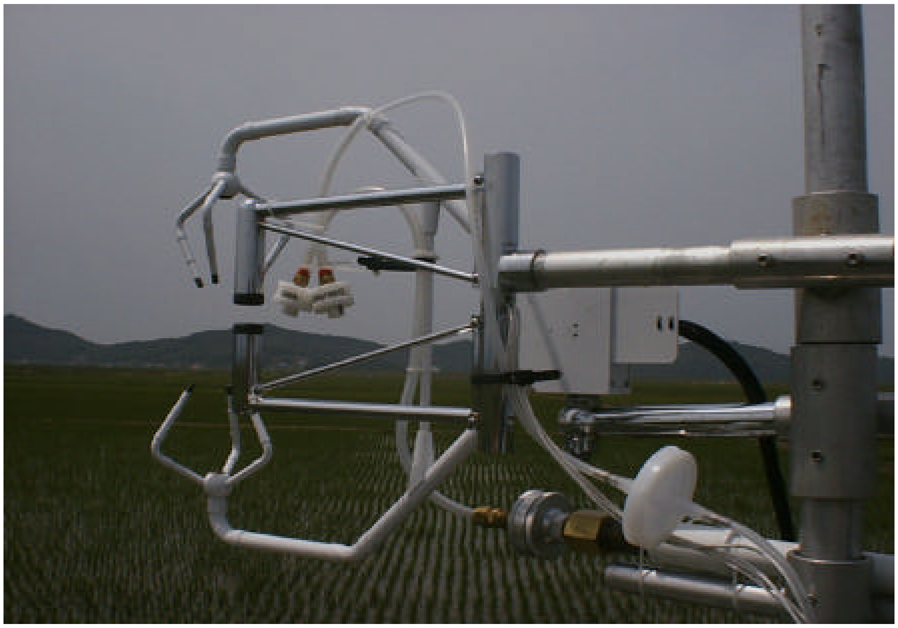


그림 30. 메탄, 이산화탄소, 수증기의 흡입부분과 필터

관측되는 자료는 실시간으로 품질을 확인하고 감시할 수 있도록 컴퓨터에 나타나도록 하였다. 그림 31에 나타난 바와 같이, 메탄의 경우, 각 관측 높이에서 관측된 메탄의 농도가 뚜렷한 농도 차를 보이고 있으며, 농도의 평균값은 약 2-3 ppm (± 20 ppb)을 나타내고 있다. 당초 계획대로 실측이 약 한달 반 동안 지속되었으나, 자주 내리는 비와 기기들의 고장, 그리고 전선의 이동에 따른 취주거리와 반대되는 풍향으로의 변화 등 때문에 고품질의 자료를 양산하지 못하였다. 이를 위해 레이저 분광기, 컴퓨터 등의 고가 장비를 악기상으로부터 보호할 수 있는 영구적인 관측소의 설치가 절실하다.

그림 31. 메탄 농도 변화의 실시간 자료분석

마. 관측 이론의 수정과 검증

온실 기체 및 에너지 플럭스의 측정 원리 중에서 1-100 km^2 규모의 관측에 가장 적절한 방법은 미기상학적 방법을 사용하는 것이다. 이미 앞서 유도한 바와 같이 간단화 된 ‘에디 공분산’ 방법이 널리 사용되고 있다(식 10 참조). 즉 연직 풍속과 임의의 스칼라의 농도의 변화량을 고속(>10 Hz)으로, 그리고 고분해능으로 연속 측정하여 두 값의 공분산을 취해서 일정 시간(대

개 약 30분) 동안 평균하면 그 플럭스를 구할 수 있다. 이론적으로는 가장 이상적인 실측 방법이다. 그러나, 관측지가 편평하고 균질해야 한다는 가정을 만족하는 자연 생태계는, 특히 한국이나 일본과 같은 산악 중심의 국가에서는, 찾기가 어렵다. 따라서, 한국 지형에 보편적으로 적용할 수 있는 실질적이고도 정확한 플럭스 방정식을 산출할 필요가 있다. 군락과 대기와 주고 받는 메탄 및 oltksghkxksth 등의 스칼라 플럭스는 보존 방정식과 연속 방정식으로부터 아래와 같이 표현할 수 있다(Lee, 1998, 1999).

$$F_c = \overline{w'c'} + \int_0^{z_r} \frac{\partial \overline{c}}{\partial t} dz + \overline{w}_r (\overline{c}_r - \frac{1}{z_r} \int_0^{z_r} \overline{c} dz) \quad (35)$$

(가) (나) (다)

식 (10)과 비교해 볼 때, 식(35)는 보편적인 에디 공분산, (가)항의 관측 외에도 추가로 두 항, 즉, (나) 저류항과 (다) 이류항을 추가로 관측해야만 농업생태계에서의 메탄 및 이산화탄소 플럭스를 정확히 관측 할 수 있음을 시사하고 있다.

식 (35)를 실제로 검증하기 위해서는, 에디 공분산 플럭스 관측 외에 적어도 메탄 밑 이산화탄소 농도를 정확히 측정할 수 있는 프로파일 샘플링 시스템을 구축하여 저류항과 이류항을 직접 관측해야만 한다. 따라서, 농업생태계, 즉 벼 군락의 상부와 하부의 메탄, 이산화탄소 및 수증기의 농도의 연직 경도를 정확히 측정하기 위해 군락 상부에 세 층, 그리고 군락 하부에 다섯 층, 모두 여덟 층의 농도를 동시에 연속적으로 관측할 수 있는 시스템을 설계하였다(그림 28과 29 참조). 서울대학교 NICEM에서 임차한 레이저 분광기 1호와 교육부의 연세대학교 이과대학 공동 기기인 레이저 분광기 2호, 그리고 연세대학교 대학원 중심대학의 지원과 학술 진흥재단의 지원으로 구입한 두 대의 LI-6262 이산화탄소 적외선 기체 분석기들을 사용하여 한 세트는 에디 플럭스를 관측하는데 사용하고, 다른 한 세트는 농도의 프로파일을 관

측하는데 사용하도록 시스템을 구축하였다. 특히, 각각의 프로파일 시스템은 크게 세 부분: (1) `필터`와 `orifice`로 이루어진 여덟 층의 폴리에틸렌 튜브 시스템, (2) 솔레노이드 밸브 와 릴래이 조절 시스템, 그리고 (3) 진공 펌프 시스템으로 이루어져 있다. 메탄의 농도 프로파일의 경우에는 생자료를 레이저 분광기 2호가 집록/처리하여 연결된 컴퓨터의 하드 디스크에 저장하였으며, 메탄의 에디 플럭스 생자료는 CR-9000이 집록/처리하여 컴퓨터에 저장하였다. 마찬가지로, 이산화탄소와 수증기의 경우, 적외선 기체 분석기 2호가 농도의 프로파일을 생자료의 저장없이 평균된 값만을 CR-23X에 집록/처리하여 저장하였고, 적외선 기체 분석기 1호는 CR-9000과 연결하여 에디 플럭스를 측정하는데 사용하였다.

시스템은 분당 약 1.35 표준 리터의 속도로 흡입구에서 공기를 흡수하도록 제작되었다. 초당 10번씩 농도 값을 집록해야 함을 감안하면, 흡입 속도가 매우 느린 편이지만 특별히 군락 내부의 자연적인 공기의 흐름을 망가뜨리지 않는다는 장점이 있다. 반면 낮은 속도로 흡입된 공기는 `orifice`를 통과하는 순간 그 속도가 초음속으로 증가함으로써 빠른 집록을 가능하게 한다. 이때 튜브내의 압력은 대기압의 약 45%인 400-450mb를 일정하게 유지하게 된다. 매분 여덟 층을 모두 집록 분석해야하므로 진공 펌프를 사용하여 공기는 항상 여덟 층에서 모두 동시에 흡입되고, 따라서 한 층에서 다른 층으로 밸브/릴래이 시스템을 통해 전환될 때 평형에 도달하는 시간을 최소화하게 된다. 메탄의 경우에는 Perma-pure 건조기 3대를 사용하여, 에디 플럭스와 프로파일 시스템에 흡입되는 모든 기체들이 100% 건조되고 난후에 처리되도록 하였다.. 지난 5월말에서 6월 사이에 강화도 하리의 논에서 메탄, 이산화탄소 및 수증기 플럭스의 관측을 시도하였다. 이미 개발/검증된 미기상 플럭스 시스템과의 물리적인 접합은 성공적으로 이루어 졌으나, 프로파일 시스템은 잦은 펌프의 고장과 프로그램상의 문제, 그리고 표준 기체를 사용한

영점 및 범위 보정의 문제로 일부 메탄 자료(그림 23) 외에는 만족할 만한 충분한 실측 자료들(플럭스와 프로파일)을 얻지 못하였다.

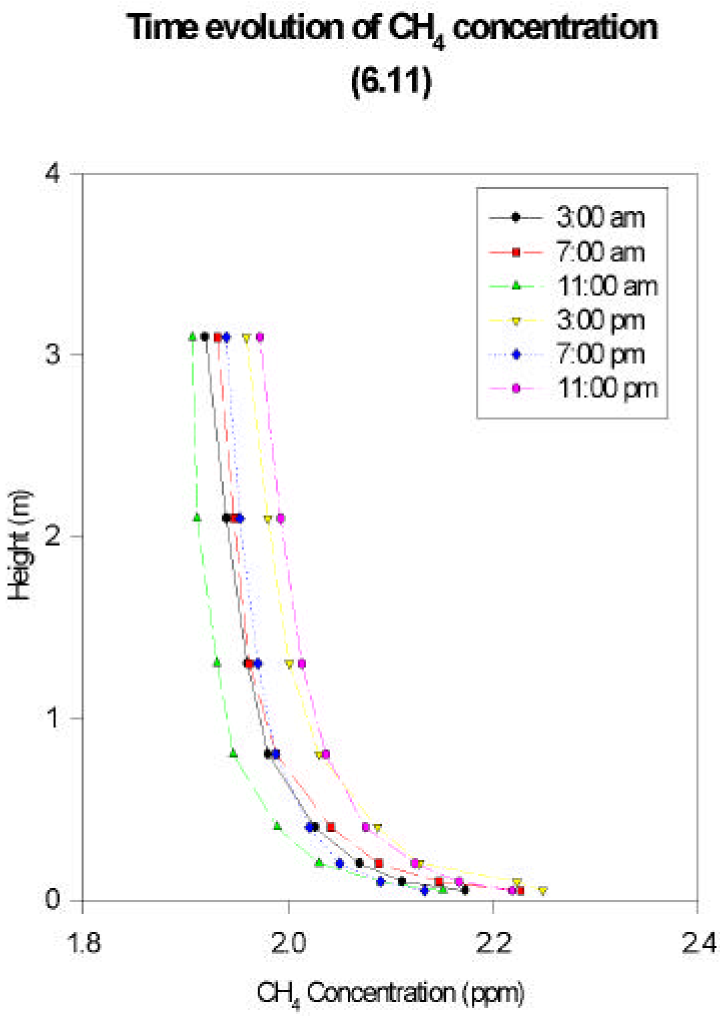


그림 32. 8층-프로파일 시스템으로 관측된 메탄 농도 프로파일의 일변화 (강화도 하리, 6월 11일, 1999)

6월 11일에 관측된 한 낮의 메탄의 에디 플럭스의 평균값, 즉 식 (35)의 (가)항은 약 10 mg m^{-2} h^{r-1} 정도였다. 반면에 (나)항인 저류항은 그림 32의 프로파일 자료로부터 계산한 결과, 한 낮에 약 < 0.1 mg m^{-2} h^{r-1} 정도로서, 에디 플럭스항의 1%보다도 작게 나타났다. 식 (35)의 마지막 항인 이류항은 프로파일로부터 계산된 지표면에서 관측 지점의 높이까지의 메탄의 평균 농도의 변화량과 실제 평균 연직 풍속과의 곱으로 되어있다. 지면에서 약 3m의 높이에서, 실제 평균 연작 풍속이 약 0.1-0.2 cm s-1라고 가정할 경우, 그림 32에 나타난 관측 자료로부터 계산한 결과로부터 이류항이 한 낮에 에디 플럭스항의 약 2-4% 정도가 되는 것으로 나타났다. 밤에는 메탄의 에디 플럭스가 작아지는 반면에, 저류항과 이류항이 상대적으로 커서, 후자의 두 항이 에디 플럭스 항의 10%가 훨씬 넘을 수 있음을 시사했다. 예비자료를 이용한 분석이기는 하나, 메탄의 에디 플럭스의 관측시에 식 (35)에서 추가로 고려한 두 항들을 고려하지 않을 경우, 실제 메탄 플럭스를 한 낮에는 약 5% 이상, 그리고 밤에는 10%이상 과소 평가할 수 있음을 암시하고 있다.

하리의 경우, 모내기 후의 6월중 메탄 플럭스는 약 10 mg m^{-2} h^{r-1}였는데 이 값은 다른 논에서 관측된 플럭스 값과 크게 다르지 않다. 병점의 경우, 추수 직전과 직후인 10월 중순에서 11월 중순경에 관측한 메탄 플럭스는 거의 0이어서, 논바닥이 마르면서 메탄이 거의 방출되지 않음을 보였다. 장기 관측의 어려움과 더불어, 여러 문제로 인해 충분한 메탄 플럭스 실측 자료를 얻지 못했고, 따라서 전국의 메탄 방출을 산출 가능케 하는 경험식의 도출을 시도 할 수는 없었으나, 이를 수행할 수 있는 장기관측 기술의 성실한 기반을 마련하였다고 사려된다. 이 연구에서 제작, 시도한 방법은 세계 최초의 첨단 방법이며, 아직 실행상의 몇 가지 문제에는 봉착해 있으나, 현재에도 개선/검토 중에 있으며, 앞으로 해결이 가능할 것으로 사료된다.

4. 챔버 방법을 이용한 광합성과 기공 전도도 관측과 모델링

그림 33은 외부 이산화탄소 농도가 320(±10) ppm, 포차 2 kPa인 환경에서 온도가 25℃, 30℃, 35℃일 때, PAR 증가에 대한 A의 반응을 나타낸 것이다. PAR이 증가함에 따라 A가 비선형적으로 증가한다. 그림 34는 각각 다른 온도에서, 세포내 이산화탄소 농도, C_i의 변화에 따른 A의 변화를 나타낸 것이다. A는 온도 변화에 대하여 큰 차이를 보이며 그림 33과 같이, 높은 온도에서 A의 값이 커지고 C_i가 증가함에 따라 A가 비선형적으로 증가한다. 이 비선형 반응 곡선은 효소에 의해 A가 조절되는 부분(A가 초기의 최대 기울기를 보이는 부분)과 빛에 의해 A가 조절되는 부분(A가 더 이상 증가하지 않는 부분)으로 나눌 수 있다.

그림 35는 대체적으로 맑은 날, 오전 7시에서 오후 7시까지 12시간 동안 PAR, 광합성, 기공 전도도, 그리고 잎 온도 변화에 대한 관측 결과이다. 관측 방법은 인위적인 환경 조절을 하지 않은 상태에서 잎을 쳄버에 장치한 후, 15분간의 관측값을 평균하여 집록하였다. PAR의 변화에 따라 광합성, 기공 전도도 그리고 잎 온도의 반응은 같은 양상을 갖고 나타나지만, 잎 온도의 경우 광합성과 기공 전도도에 비해 상대적으로 덜 민감함을 알 수 있다.

생화학 모수의 도출 : 그림 34의 관측자료로부터 비선형 회귀방법을 이용하여 생화학 모수인 V_{cmax}와 J_{max}를 도출하였다. 즉, 식 (24)를 식 (23)에 대입한 후 곡선의 기울기가 급격히 변화하는 경계점 이전의 자료로부터 비선형 회귀방법에 의해 V_{cmax}를 도출하고, 식 (26)과 식 (27)을 식 (23)에 대입한 후, 그림 34의 전 범위의 자료를 이용하여 비선형 회귀방법으로 J_{max}를 도출하였다 (Wullschleger, 1993). 이 때 PAR은 대략 1500 μmol $m^{-2}s^{-1}$을 유지하도록 조절하였다,

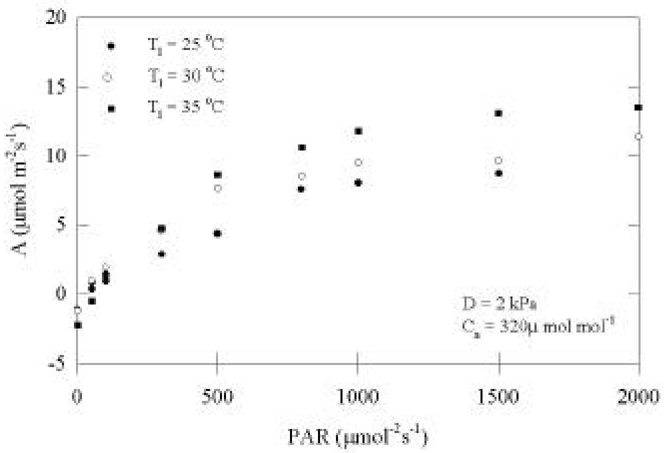


Fig. 33. Photosynthesis (A) and photosynthetically active radiation (PAR) at 25℃, 30℃ and 35℃ measured from 8 to 15 August 1997

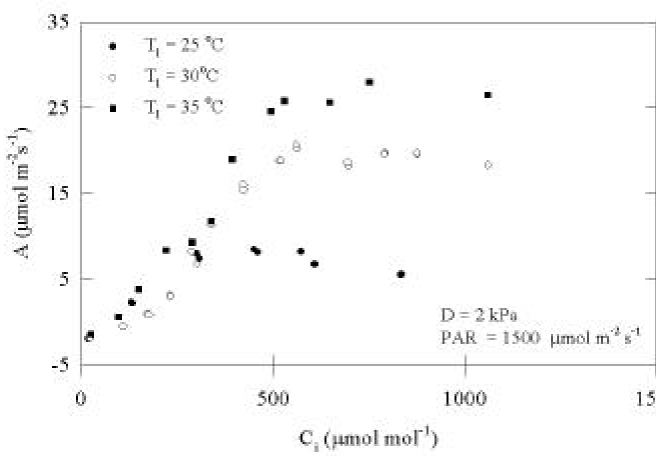


Fig. 34. Photosynthesis (A) and CO_2 concentration (C_i) at 25℃, 30℃ and 35℃ measured from 7 to 12 August 1997.

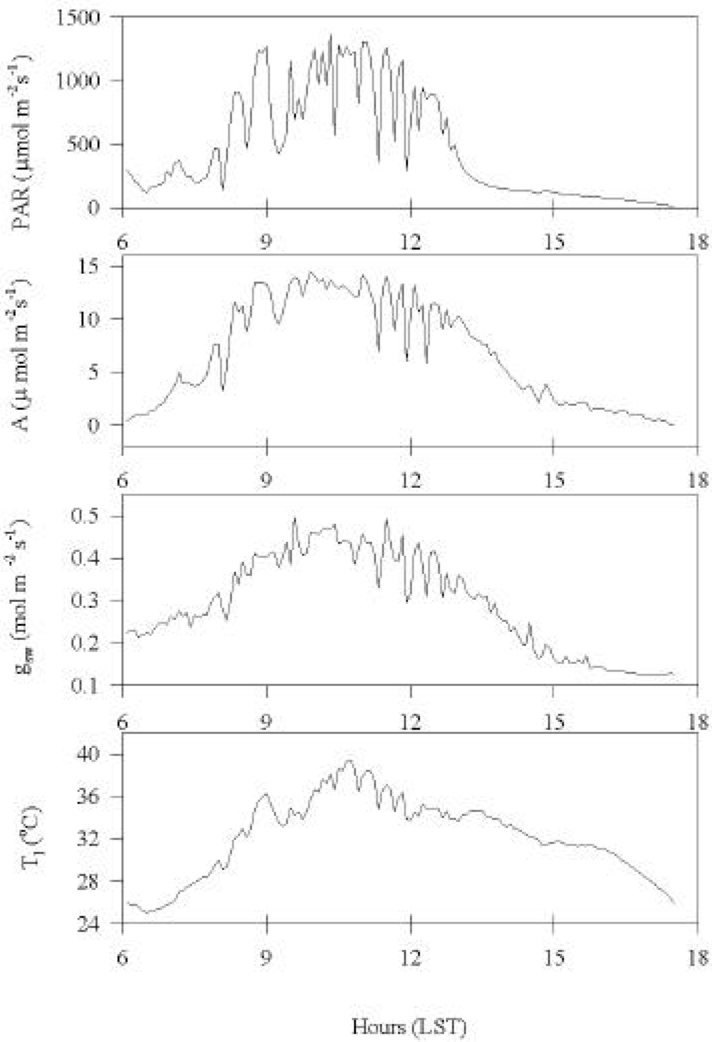


Fig. 35. Diurnal patterns of photosynthetically active radiation(PAR), photosynthesis(A), stomatal conductance(g_{sw}) and leaf temperature(T_l) (23 August 1997).

각 온도(25℃, 30℃, 35℃)에 대한 A와 C_i의 변화 관측자료로부터 도출된 V_{cmax}와 J_{max}는 각 온도에 대하여 35μmol m^{-2} s^{-1}, 77μmol m^{-2} s^{-1}, 100μmol m^{-2} s^{-1}와 42μmol m^{-2} s^{-1}, 113μmol m^{-2} s^{-1}, 141μmol m^{-2} s^{-1}이었다. 이 값들은 Wullschleger(1993)의 연구에서 온도 34℃, PAR 1800μmol m^{-2} s^{-1}에서 도출한 V_{cmax}(91±5, 83±13, 108±15 μmol m^{-2} s^{-1})와 J_{max}(190±3, 184±6, 229±12 μmol m^{-2} s^{-1})의 값과 크게 다르지 않았다.

생물리 모수의 도출 : Ball & Berry 상수인 m과 b의 도출은 식 (31)에서 관측된 자료의 선형회귀분석(r^2 = 0.83)으로부터 얻어진 기울기와 절편값이다(그림 36). 즉 g_{sw}는 $A h_s P / C_s$ 대하여 선형적인 관계를 갖고 있다. m과 b를 도출하는 과정 중 PAR이 50 μ mol m^{-2} s^{-1}보다 작은 경우, 외부 이산화탄소 농도, C_s가 100 μ mol mol^{-1}보다 작은 경우와 A가 0 μ mol m^{-2} s^{-1}일 때의 자료는 제외되었다 (Ball and Berry, 1992). m과 b의 값은 각각 9.7과 0.06 mol m^{-2} s^{-1}으로 일반적인 C_3 식물의 경우(m = 9, b = 0.01mol m^{-2} s^{-1})와 비교하여 매우 비슷한 값이다.

일변화의 모사와 검증 : 단엽 모형의 모사와 검증은 일변화 관측 자료를 이용하여 모형의 일변화 모사 결과와 비교하였다. 그림 37은, 변수 유도에 사용된 자료가 아닌 독립적으로 관측된 일변화 자료를 이용하여, 두 가지 방법에 의해 계산된 A와 g_{sw}를 모형 결과와 비교하여 나타내었다. V_{camx}와 J_{max}의 값을 온도 함수(식 (25)과 식 (28))를 사용하여 계산하였고, 또 다른 방법은 J_{max}와 V_{camx}의 비례관계(Table Ⅰ)를 이용하여 계산하였다. 첫 번째 방법은, V_{cmax}와 J_{max}에 대한 식 (25)과 식 (28)에서 변수들의 대부분이 경험상수이므로 V_{cmax}와 J_{max}가 온도에 의해 결정되어 A_v와 A_j가 계산되고, 두 값 중 제한되는 값이 광합성으로 선택되어 계산된다. 두 번째 계산 방법은 A와 C_i 의 관계의 관측 자료(그림 24)에서 유도된 V_{cmax}와 J_{max}를 각각의 온도에

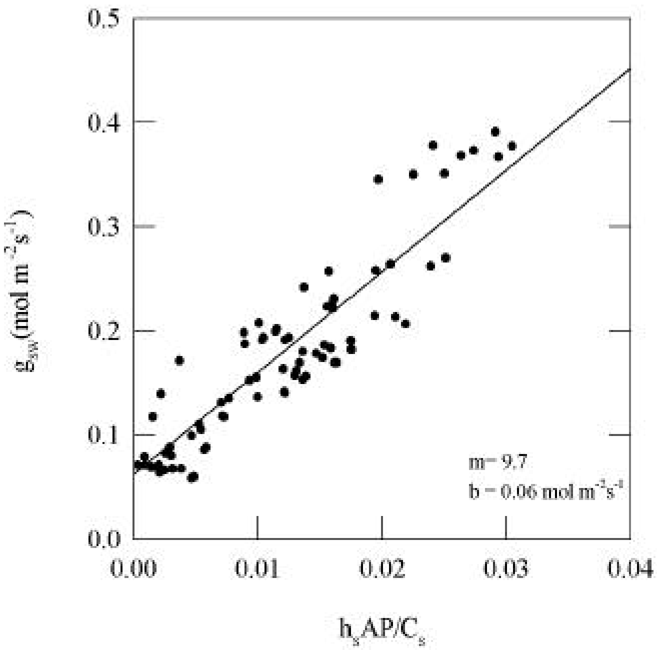


Fig. 36. Relationship between stomatal conductance(g_{sw}) and the empirical function of photosynthesis(A), leaf surface relative humidity(h_s), atmospheric pressure(P) and leaf surface CO_2 partial pressure(C_s).

따라 구한 비를 이용하여 광합성을 계산한다. 그러나 단엽 모형의 계산 결과에 있어 주목해야할 점은 광합성을 제한하는 값이 A_j 라는 점이다. 즉, 대부분의 광합성의 값은 빛에 의해 조절된다. 따라서 두 방법의 경우에서도 마찬가지로 결국은 J_{max} 가 큰 영향을 주는 요인으로 A 값을 결정한다. 단엽 모형의 두 방법에 의한 계산 결과를 비교해 보면, 오전 10시에서 오후 2시 사이의

계산 값이 뚜렷이 다른 양상을 보인다. 그것은 온도식 (28)에 의해 J_{max}값은 기온이 35 ℃를 전후로 하여 감소하므로, J_{max}는 챔버안의 잎의 온도가 35℃ 이상이 되는 정오를 중심으로 하여 값이 작아진다. 따라서 J_{max}의 계산으로 A의 값은 작게 계산된다. 그러나 V_{cmax}와 J_{max}의 비를 이용한 계산의 결과는 온도식에 의한 결과와는 달리 정오에서 최고값을 나타내며, g_{sw}의 경우도 같은 결과이다. 즉 비를 이용한 계산 결과가 일 변화를 상대적으로 잘 나타내었다.

Table 2. Values of J_{max}, V_{cmax} and the ratios of J_{max} to V_{cmax} at 25℃, 30℃ and 35℃.

Temperature (℃)	J_{max} (μmol $m^{-2}s^{-1}$)	V_{cmax} (μmol $m^{-2}s^{-1}$)	J_{max}/V_{cmax}
25	42	35	1.2
30	113	77	1.5
35	141	100	1.4

일변화의 관측 결과를 이용한 A과 g_{sw}의 검증에 있어서, J_{max}와 V_{cmax} 의 비를 적용한 경우가 온도식을 이용한 경우보다 관측값과 비교하여 더욱 일치함을 알 수 있었다. 보다 반복적이고, 다양한 관측 자료를 이용한다면 단엽 모형을 검증하는데 보다 효과적일 것이다. 단엽에서 벼논의 군락 규모로 확장한 모사의 연구 결과는 채남이 등(1999)에 자세히 나타나 있다.

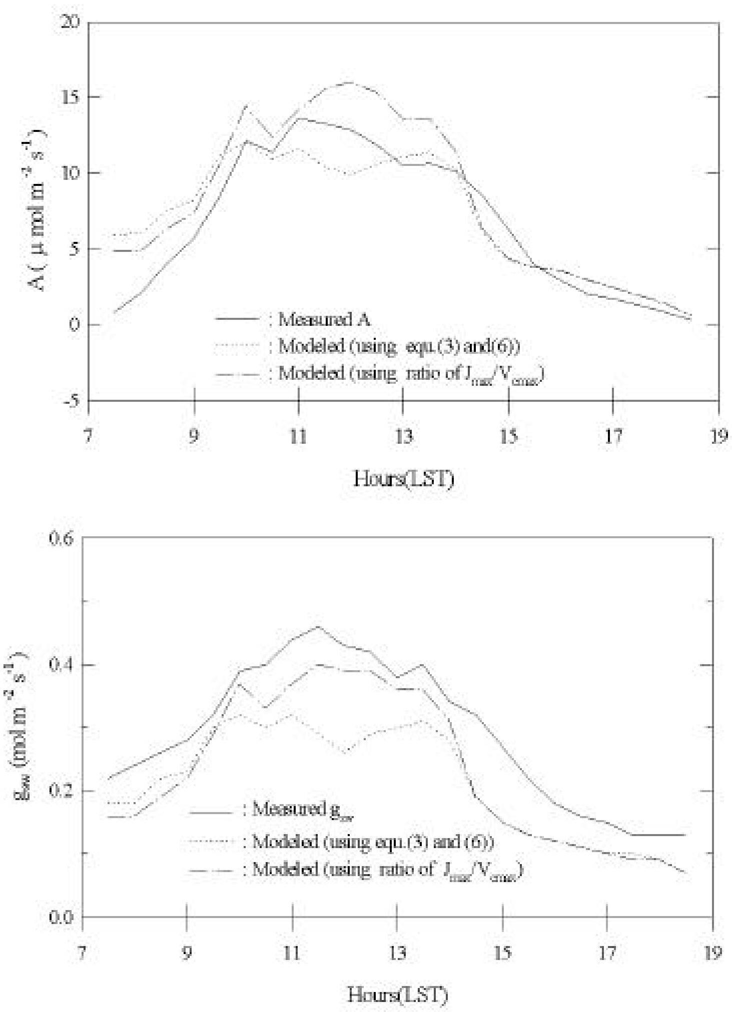


Fig. 37. Comparison of modeled diurnal variations with those of measured photosynthesis(A) and stomatal conductance(g_{sw})

5, P-M 복합방정식을 이용한 증발산 추정

일반적으로 증발산을 구하기 위해서는 미기상학적 방법(예를 들면, 에디 공분산 시스템, 공기 역학 또는 경도법 시스템 등을 이용한 플럭스 관측 시스템을 연속적으로 운영하는 것이 가장 이상적이다. 그러나 정확한 증발산을 구할 수 있는 반면에 플럭스 관측 시스템의 설치비용이 아직은 상대적으로 비싸며, 운영 및 관리 측면에서도 많은 노력과 비용이 요구된다.

논에서의 벼의 성장은 일정한 단계를 거치고, 그 단계에 맞는 관개와 배수가 수행되기 때문에 특별한 경우를 제외하면, 논의 환경은 지역에 크게 상관없이 거의 유사하다. 예를 들면, 논으로부터 증발산에 이용되는 가장 근본적인 에너지는 순복사인데, 이 순복사는 복사 수지를 구성하고 있는 각 복사 성분들뿐만 아니라, 논의 식피의 알베도, 기공 전도도의 변화, 군락의 높이와 풍속과 관련된 거칠기 등과 밀접하게 연관되어 있다. 태양 복사는 지역에 따른 차이가 크지 않으며, 만약 논의 환경(예, 엽면적(LAI) 지수나 관개 조건 등)이 유사하면, 알베도 및 장파복사 방출 등도 크게 다르지 않다. 이런 비슷한 환경은 비단 복사 수지뿐만 아니라 증발산과 관련되는 논에서의 거칠기, 습도, 기온 등과 같은 미기상 변수들에도 적용할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 증발산에 중요하게 기여하는 벼의 기공 개폐 역시 비슷한 기후 조건 및 성장 단계, 토양 수분 하에서는 그 반응이 크게 다르지 않을 수도 있다. 따라서, 이러한 비교적 균질한 논에서의 특징들을 고려해볼 때, 미기상 플럭스 관측 시스템을 사용하지 않고 무인 자동 기상 관측망에서 관측되는 기본적인 몇 가지 기상 자료들(일사량, 기온, 풍속, 습도: 표 3)과 기본적인 식생 자료(엽면적, 군락의 높이, 최대 기공 전도도 등)를 사용하여 Penman-Monteith(P-M)의 복합 방정식으로부터 증발산을 유추할 수 있을 것으로 사려된다(Kim과 Verma, 1991; 홍진규 등, 1997).

표 3. 자동 기상관측소에서 관측되는 기상 변수.

측정 변수	AIR Temp ℃	RH %	Ground Temp ℃	RAD $MJm^{-2}hr^{-}$	RAIN mm/hr	WET 1	WET 2	Wind Speed m/s	WDIR & SD degree
변수 설명	기온	상대 습도	토양 온도	전천 일사	강수량	잎이 젖은 정도 0: Dry 1: Wet		풍속	풍향 및 표준편차

가. P-M 복합 방정식

일반적으로 식생지를 포함한 지표로부터의 증발산을 계산하는데 이용되는 P-M 복합 방정식은 다음과 같다.

$$\lambda E = A\left(\varepsilon + \frac{g_a}{g_i}\right) / \left(\varepsilon + 1 + \frac{g_a}{g_c}\right) \qquad (36)$$

여기서 λE는 잠열 플럭스, A는 가용 에너지(= Rn - (G + S), Rn은 순복사, G는 토양열 플럭스, S는 열 저류항으로 관개가 되어있는 경우 존재함), ε (= $\triangle/\gamma$, $\triangle$: 온도에 대한 포화수증기압의 기울기, γ는 건습구 상수로 0.66), g_a는 공기 역학 전도도, g_c는 총체 기공 전도도, g_i는 기후 전도도이다. 이 식은 군락 위에서 관측된 기상 자료와 군락 전체를 대표하는 총체 기공 전도도로부터 증발산이 계산됨을 가리킨다(홍진규 등, 1997). 만약 논에 벼가 없거나 있어도 엽면적 지수인 LAI < 1 인 경우, 또는 LAI에 상관없이 비가 온 뒤 잎이 모두 젖어 있는 경우라면, 기공 전도도의 역할은 무시

되고, 가능 증발(potential evapotranspiration)로 간주할 수 있다. 이 경우, P-M의 증발산 방정식은 다음과 같은 식으로 간단히 쓸 수 있다.

$$\lambda E = A\,(\varepsilon + \frac{g_a}{g_i})/(\varepsilon + 1) \qquad (37)$$

나. 엽면적 지수(LAI)에 따른 경험식

표 4는 기상자료로부터 P-M 방정식에 입력할 변수들을 구하는데 필요한 경험식이다. 일본 오까야마, 경기도 병점, 그리고 강화도 하리에서 관측한 고속 반응 측정(에디공분산 방법) 및 저속 반응 측정 자료들을 이용하여 기공 전도도를 비롯한 P-M 복합 방정식에 필요한 변수들을 직접 계산한 다음, 그 변수들과 미기상 변수들과의 회귀 분석을 통하여 경험식을 도출하였다.

표 4. 증발산 계산을 위해 실측자료로부터 도출된 경험식

다. 기상 자료로부터 증발산 도출 과정

경험식 / LAI	$Rn = aRAD + b$		$u_* = aU$		$g_c = aRn/D + b$		$G(+S) = aRn + b$	
	a	b	a	b	a	b	a	b
No canopy or LAI < 1	0.85	-50	0.08				0.44	-86
1 ≤ LAI < 4	0.77	-67	0.11		0.25	6.12	0.42	-67
4 ≤ LAI	0.73	-36	0.10		0.16	2.95	0.20	
After harvest	0.63	-36	0.07				0.10	

표 3의 기상 자료들을 P-M 방정식 계산에 필요한 변수로 바꾸기 위해 표 4의 경험식들을 이용한다. 계산 과정은 다음과 같다.

1) 전천일사량의 단위를 $MJm^{-2}hr^{-1}$에서 $Jm^{-2}s^{-1} = Wm^{-2}$로 바꾼다.

예) 3 $MJm^{-2}hr^{-1}$ = 3 x 1000000/3600 Wm^{-2}

2) 경험식을 이용하여 전천일사(Wm^{-2})를 순복사 (Wm^{-2})로 바꾼다.

$Rn = a\,RAD + b$, a와 b는 경험 계수 (표 4 참조)

3) 기온으로부터 다음 수식을 이용하여 포화 수증기압을 구한다.

포화 수증기압(e_s) = 6.11 exp [17.269 T/(237.3 + T)],

여기서 T 는 기온 (℃)

4) 상대 습도와 포화 수증기압으로부터 포차(vapor pressure deficit)를 구한다. 포차(D) = $e_s - e$, e 는 수증기압 (mb)

5) 아래의 식을 이용하여 온도에 대한 포화 수증기압의 기울기(△)을 계산한다.

$\triangle = 5827\ e_s / (T + 273)^2$

6) 순복사와 포차로부터 아래의 경험식을 이용하여 군락의 기공 전도도 (g_c)를 구한다.

$g_c = a\,R_n/D + b$, a와 b는 경험 계수 (표 4 참조)

7) 평균 수평 풍속(U)으로부터 아래의 경험식을 이용하여 마찰 속도를 계산한다.

$u_* = a\,U$, a는 경험 계수 (표 4 참조)

8) 7)에서 계산한 마찰 속도와 기상 자료의 풍속을 이용하여 아래의 식으로부터 공기 역학 전도도 ($g_a = 1/r_a$)를 계산한다.

$$r_a = (U/u_*^2) + 4.62/u_*$$

9) 순복사로부터 아래의 경험식을 이용하여 토양열 플럭스(+ 열 저류항)을 계산한다. (단, 열 저류항은 논이 관개되어 있을 경우에 사용)

$G(+S) = aRn + b$, a와 b는 경험 계수 (표 4 참조)

10) 다음 식을 이용하여 기후 전도도(g_i)를 계산한다.

$g_i = \dfrac{\gamma A}{\rho C_p D}$, r는 건습계 상수, $A = R_n - G(+S)$

11) 위에서 계산된 변수들을 식(36), 혹은 식(37)의 P-M 복합 방정식에 대입하여 잠열 플럭스(λE in W m^{-2})를 계산한다.

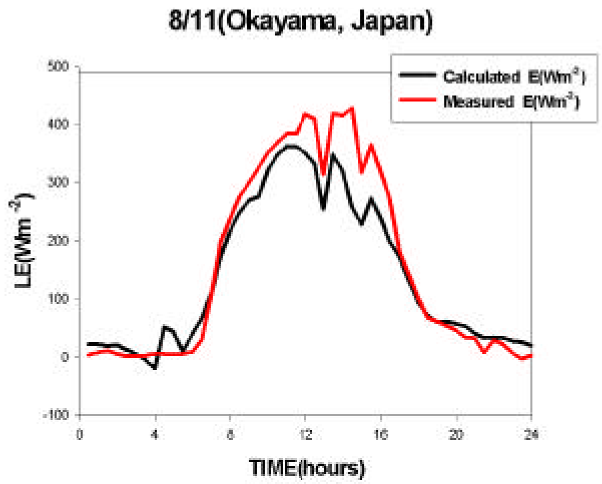
12) 계산된 잠열 플럭스를 24시간 적분하여 일 증발산을 mm d^{-1} 의 단위로 계산한다.

라. 관측값과 추정값의 비교

위에서 제시한 경험식들을 이용하여 미기상 변수로부터 증발산을 계산한 값과 에디 공분산 방법을 이용하여 직접 측정한 증발산 값을 비교하였다. 분석에 이용된 자료는 1996년 일본 논에서 측정된 값과 1997년과 1998년 수원 병점의 논에서 관측한 값, 그리고 1999년 강화도 하리의 논에서 측정한 실측 자료들이다. 일본 논의 경우 LAI가 3.1이며, 논은 배수가 되었으나 토양은 젖어 있었다. 그리고 병점의 논은 추수 직전으로 LAI값이 4보다 컸으며, 하리의 경우는 LAI가 1 미만이었다.

일본 오까야마 논 : 그림 38과 39는 일본 오까야마의 논에서 관측한 잠열 플럭스 값과 경험식에서 계산한 잠열 플럭스 값을 각각 비교하여 나타낸 그래프이다. 측정된 잠열 플럭스와 계산된 잠열 플럭스는 8월 11일의 경

우 15% 내외에서, 그리고 8월 9일에는 약 10% 내에서 일치하고 있음을 알 수 있다.



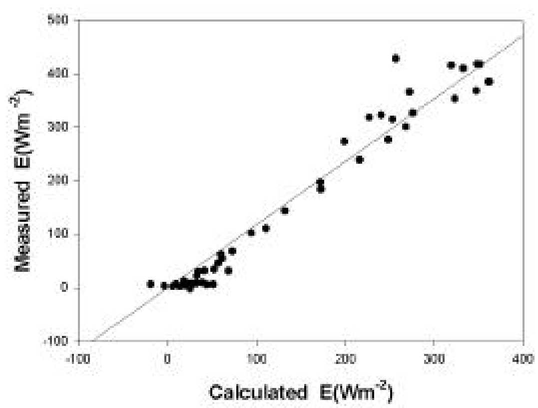
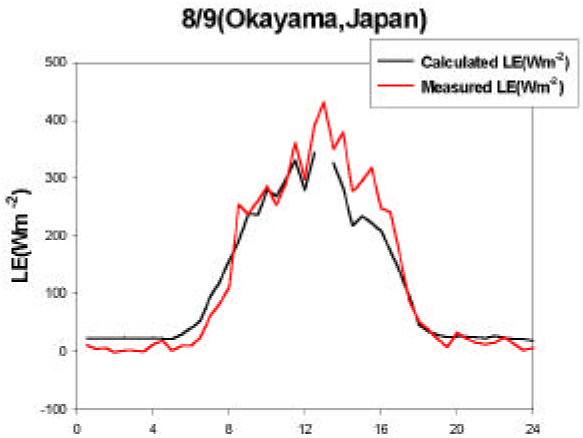


그림 38. (1) 측정 및 계산된 잠열 플럭스의 일변화, (2) 측정 및 계산된 잠열 플럭스 비교 (slope = 1.18) (11 Aug. 1996 , 일본 오까야마)



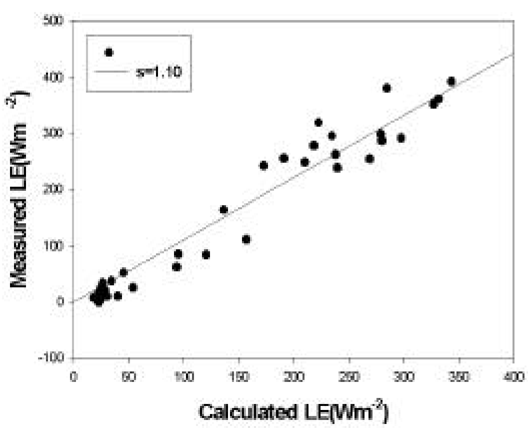


그림 39. (1) **측정 및 계산된 잠열 플럭스의 일변화**, (2) **측정 및 계산된 잠열 플럭스 비교** (slope = 1.1) (9 Aug. 1996 , **일본 오까야마**)

강화도 하리 **논** : **아래의 그림** 40**은 하리에서의 맑은 날과 흐린날에 대한 비교 결과를 나타낸다. 앞서 살펴본 일본 오까야마의 논과는 달리 계산값이 실측값보다 맑은 날과 흐린 날에 각각 약** 40% **정도 과대평가하고 있다. 일변화의 양상은 맑은 날과 흐린 날 모두 비슷한 형태를 취하고 있다.**

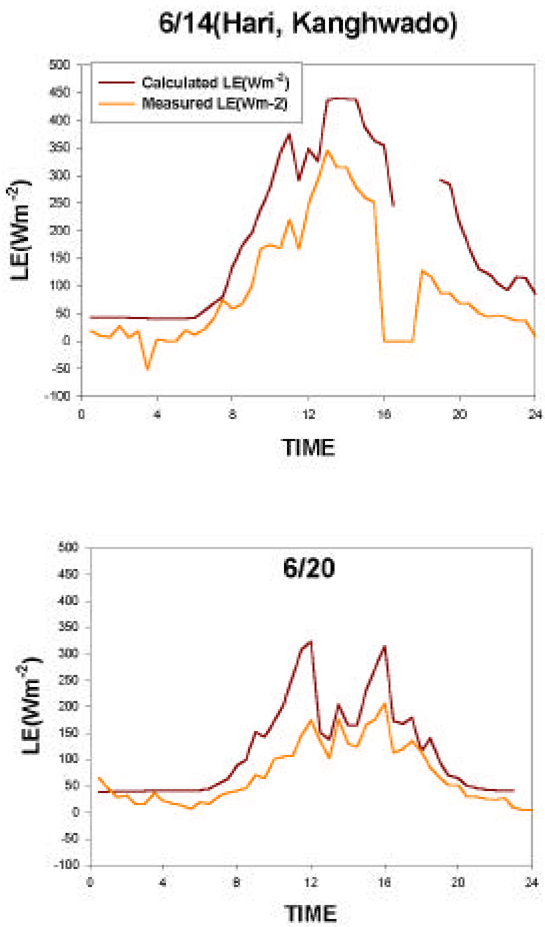


그림 40. **측정 및 계산된 잠열 플럭스의 일변화**, (1) 14 Jun. 1999 (slope = 0.57), (2) 20 Jun. 1999 (slope = 0.62), **강화도 하리**

수원 병점 **논** : **그림** 41**은 경기도 병점 논에서의 결과이다**. **하리와 같이**, **계산된 잠열 플럭스가 실측값에 비해 큰 값을 보였고**, **특히 낮 동안에 더 큰 차이를 보였다**. **이 원인은 다음의 몇 가지로 생각할 수 있다**. **우선**,

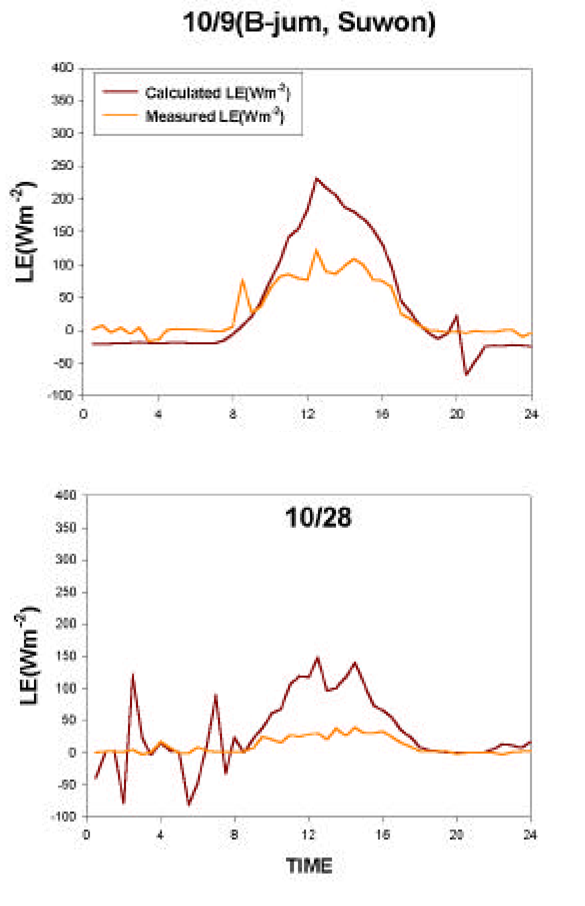
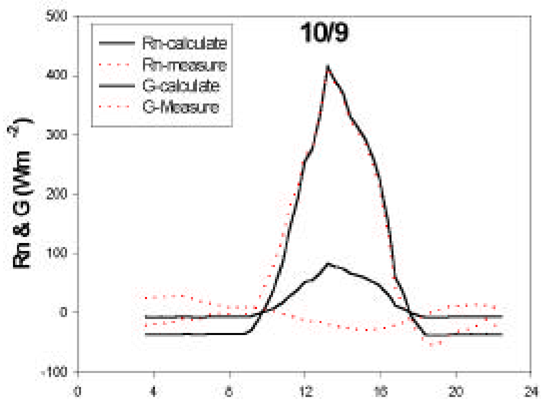


그림 41. **측정 및 계산된 잠열 플럭스의 일변화**, (1) 9 Oct. 1998 (slope = 0.51), (2) 28 Oct. 1998 (slope = 0.22), **경기도 병점**.

그림 42-1**은 병점에서의 순복사와 토양열 플럭스의 관측값과 계산값을 비교해 보이고 있는데**, **순복사 값은 거의 일치하고 있는 반면에**, **토양열 플럭스 값은 낮 동안에 계산된 값이 관측값에 비해 큼을 알 수 있다**. **이유 중의 하나는 식** (36)**의 증발산 계산시 기후 전도도**(gi)**의 값을 과소평가 함으로써**

결과적으로 계산된 잠열 플럭스 값을 증가시키는 요인으로 작용하게 된다. 한편, 그림 42-2는 일본 오까야마에서의 자료로 병점 자료와 비교해 볼 때, 토양 플럭스 값의 계산값이 관측값보다 작음을 보이고 있다.



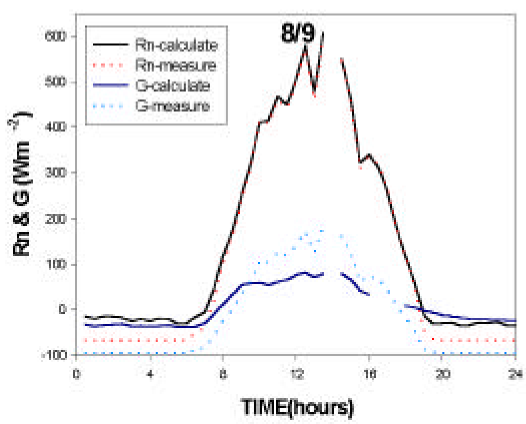


그림 42. 측정 및 계산된 순복사와 토양열 플럭스 (1) 9 Oct. 1998, 경기도 병점, (2) 9 Aug. 1996, 일본 오까야마.

이 밖에도 표 4에 나타난 바와 같이 매우 간단한 경험식들을 이용하여 잠열 플럭스를 계산하는 과정에서 기공 전도도와 공기 역학 전도도 등의 정확한 산출이 어렵고, 순복사, 열 저류항 및 토양열 플럭스의 산출 경험식도 자료가 불충분한 관계로, 매우 원시적인 방법으로 모수화되어 있기 때문에 관측된 증발산과 계산값이 차이를 보이고 있다. 이러한 차이는 엽면적 지수가 작을 때 더욱 두드러져 나타났고, 엽면적이 어느 일정한 임계값(예를 들면, LAI > 3)을 넘어서서 벼가 활발히 자라고 있는 경우에는 차이가 매우 작았음에 주목할 필요가 있다. 아마도, 한 논에서 벼의 전 생장기 동안 장기 관측을 할 수 있다면, 품질이 좋은 경험식을 도출할 수 있을 것으로 사료된다.

인용문헌

채남이, 김준, 1999: **생화학 및 생물리 모수들의 도출과 생권 모형**(SiB2)**에의 적용, 한국농림기상학회지, 1(1)**, 52-59.

최태진, 김준, 윤진일, 1999: **농림생태계와 대기간의 상호 작용 연구를 위한 에디 공분산 방법의 사용에 관하여, 한국농림기상학회지, 1(1)**, 60-71.

최태진, 1998: **지표-대기 상호 작용 연구를 위한 에디 공분산 시스템의 최적화, 연세대학교 대학원 석사 논문** 80 pp.

홍진규, 김준, 최태진, 채남이, 이희춘, 박윤호, 황숙지, 1999: **안정한 지표층 연구를 위한 준비**, **가을 기상학회 초록**, 264-267.

홍진규, 1999: **균질한 논에서의 군락 난류의 기본적 특징, 연세대학교 대학원 석사 논문** 99 pp.

홍진규, 최태진, 김준, 1997: **얼마나 오래동안, 그리고 얼마나 자주 측정할 것인가**?, **봄 기상학회 초록**, 250-253.

홍진규, 최태진, 김준, 1997: **식물에서 대기로의 증발산**: **미기상학적 고찰, 한국기상학회지, 33(3)**, 569-579.

Baldocchi, D. D., B. B. Hicks and T. P. Myers, 1988: Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. Ecology, **69**: 1331-1340.

Ball J. T., 1988 : An analysis of stomatal conductance. Ph.D. thesis, Stanford University, 89pp.

Ball J. T., I. E. Woodrow, J. A. Berry, 1987 : A model prediction stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions. In Progress in Photosynthesis Research (ed. I. Biggins), pp. 221-224. Martinus Nijhoff, Publishers, The Netherlands.

Billesbach, D. P., J. Kim, R. J. Clement, S. B. Verma, and F. G. Ullman, 1998: An Intercomparison of Two Tunable Diode Laser Spectrometers Used for Eddy Correlation Measurements of Methane Flux in a Prairie

Wetland, J. Atmos. and Oceanic Technol, **15**: 197-206.

Brooks A. and G. D. Farquhar, 1985 : Effect of temperature on the CO_2/O_2 specificity of ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase/oxygenase and the rate of respiration in the light. Estimates from gas-exchange measurements on spinach. Planta, 165: 397-406.

Businger, J. A., 1986: Evaluation of the Accuracy with Which Dry Deposition can Measured with current Micrometeorological Techniques. J. clim. Appl. Meteorol., **25**: 1100-1124.

Collatz, G. James, Miquel Ribas-Carbo and Joseph A. Berry, 1992 : Coupled Photosynthesis-Stomatal Conductance Model for Leaves of C_4 Plants. Aust. J. Plant Physiol., 19: 519-38.

Dyer, A. J., 1981: Flow distortion by supporting structures, Boundary Layer Meteorol., **20**: 206-212.

Farquhar G. D., Caemmerer S. von, and Berry J. A., 1980 : A biochmical model of photosynthetic CO_2 assimilation in leaves of C3 plants. Planta, 149: 78-90.

Goulden, M. L., J. W. Munger, S. M. Fan, B. C. Daube and S. C. Wofsy, 1996: Exchange of carbon dioxide by a deciduous forest: response to interannual climate variability, Science, **271**: 1576-1578.

Harely P. C., R. B. Thomas, J. F. Reynolds and B. R. Strain, 1992 : Modelling photosynthesis of cotton grown in elevated CO_2. Plant, Cell and environment, 15: 271-282.

Hignett, P., 1992: Corrections to temperature measurements with sonic anemometer, Boundary-Layer Meteorol. **61**: 175-187.

IGBP Terrestrial Carbon Working Group., 1998: The terrestrial carbon cycle: Implications for the the Kyoto Protocol, Science, **280**: 1393-1394.

Kaimal, J. C. and J. J. Finnigan, 1994: Atmospheric Boundary Layer Flows: Their Structure and Measurement, Oxford University Press, 289pp.

Kaimal, J. C., J. C. Wyngaard, D. A. Haugen, O. R. Cote, Y. Izumi, S. J.

Cauhgey, and C. J. Readings, 1976: Turbulence Structure in the Convective Boundary Layer, J. Atmos. Sci., **33**: 2152-2169.

Kaimal, J. C., J. C. Wyngaard, D. A. Haugen, Y. Izumi, and O. R. Cote, 1972: Spectral Characteristics of Surface Layer Turbulence, Quart. J. R. Meteorol. Soc., **98**: 563-589.

Kaimal, J. C., J. C. Wyngaard, and D. A. Haugen, 1968: Deriving Power Spectra from a Three-Component Sonic Anemometer, J. Appl. Meteorol. **7**: 827-834.

Kim, J., J. Yun, B. Tanner, J. Hong, and T. Choi, 1999: On measuring the storage and a mass flow component in the net ecosystem exchange of CO_2 and CH_4, Proceeding of Fifth International Joint Seminar on Regional Deposition Processes in the Atmosphere, 12-16 October, Seoul National University, Seoul, Korea, 235-240.

Kim, J., and S. B. Verma, 1991: Modeling canopy photosynthesis: scaling up from a leaf to canopy in a temperate grassland ecosystem,Agri. For. Meteorol. **57**, 187-208.

Kristensen, L., and D. R. Fitzjarrald, 1984: The effect of line averaging on scalar flux measurements with a sonic anemometer near the surface, J. Atmos. and Oceanic Technol, **1**: 138- 146.

Leclerc M. Y. and Thurtell G. W.,1990: Footprint prediction of scalar flux using a markovian analysis. Boundary Layer Meteorol. **53**: 247-258.

Lee, X., 1998: On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation, Agri. For. Meteorol. **91**, 39-41.

Lee, X., 1999: Reply to comment by Finnigan on "On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation, Agri. For. Meteorol. **97**, 65-67.

Lenchow, D. H., 1995: Micrometeorological techniques for measuring biosphere-atmosphere trace gas exchange. In: P. A. Matson and R. C. Marriss (eds). Biogenic Trace Gases: Measuring Emissions from Soil and Water. Blackwell Science, Oxford. 394pp.

Leuning R., F. M. Kelliher, D. G. G. De Pury and E. D. Schulze, 1995 : Leaf nitrogen, photosynthesis, conductance and transpiration: scaling from leaves to canopies. Plant, Cell and Environment, 18: 1183-1200.

Leuning, R., and J. Moncrieff, 1990: Eddy-Covariance CO_2 Flux Measurements using Open-path and Closed-path CO_2 Analysers: Corrections for Analyser Water Vapor Sensitivity and Damping of Fluctuations in Air Sampling Tubes, Boundary-Layer Meteorol. **53**: 63-76.

Moore, C. J., 1984: Frequency ressponse corrections for eddy correlation systems, Boundary-Layer Meteorol., **37**: 17-35.

Munro, D. S., and T. R. Oke, 1975: Aerodynamic boundary-layer adjustment over a crop in neutral stability, Boundary Layer Meteorol., **9**: 53-61.

Ohtaki, E., 1985: Application of an infrared carbon dioxide and humidity instrument to studies of turbulent transport, Boundary Layer Meteorol. **29**: 85-107.

Schuepp P. H., Leclerc M. Y., MacPherson J. I. and Desjardins R. L. (1990): Footprint prediction of scalar fluxes from analytical solutions of the diffusion equation. Boundary Layer Meteorol. **50**: 335-376.

Sellers P. J., D. A. Randall, G. J. Collatz, J. A. Berry, C. B. Field, D. A. Dazlich, C.Zhang, G. D. Collelo, and Bounoua, 1996 : A Revised Land Surface Parameterization (SiB2) for Atmospheric GCMs. Part1: Model Formulation. J. Climate, 9: 676-705.

Silverman, B. A., 1968: The effect of spatial averaging on spectrum estimation, J. Appl. Meteorol. **7**: 168-172.

Smith E., 1937: The influence of light and carbon dioxide on photosynthesis, General Physiology, **20**, 53-59.

Smith, S. D., and R. J. Anderson, 1984: Spectra of humidity, temperature, and wind over the sea at Stable Island, Nova Scotia, J. Geophys. Res. **89**: 2029-2040.

Vickers, D. and L. Mahrt, 1997: Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data, J. Atmos. Ocean. Tech., **14**: 512-526.

Webb, E. K., G. I. Perman, and R. Leuning, 1980: correction of flux measurements for density effects due to heat and water transfer. Quart. J. R. Met. Soc. **106**: 85-100.

Wesely, M. L. 1970: Eddy correlation measurements in the atmospheric surface layer over agricultural crops. Dissertation. University of Wisconsin, Madison, Wisconsin, USA.

Wullschleger S.D. 1993 : Biochemical limitations to carbon assimilation in C3 plants - A retrospective analysis of the A/ci curve from 109 species. Journal of Experimental Botany 44: 907-920.

Wyngarrd, J. C., and S-F. Zhang, 1985: Transducer-shadow effects on turbulence spectra measured by sonic anemometers. J. Atmos. Oceanic Tech., **2**: 548-558.

Wyngaard, J. C., 1988: Flow-distortion effects on scalar flux measurements in the surface layer: Implication for sensor design. Boundary-Layer Meteorol. **42**: 19-26.

제 5 장 기술 이전

제 1 절 서 언

남한전역의 농업생태계 대기환경 실황분포에 근거한 주요 식량작물의 실시간 생육상황 추정기술의 개발과 이를 토대로 구축된 전국규모의 농업기상학적 작황진단체계를 실용화 하기 위해서는 농업관련 정부기관으로의 기술이전이 필요하다. 이 같은 목적으로 본 과제 참여기관중 주요 기술 개발팀인 경희대학교로부터 기술수용팀인 농업과학기술원으로 시범적인 기술이전작업을 수행하여왔다.

이미 확보된 작황진단용 데이터베이스, 소프트웨어, 응용 프로그램이 설치된 작황진단시스템 시작품을 농업과학기술원에 설치하였으며, 최근 3년간의 기상자료를 이용하여 검증자료를 구할 수 있는 벼에 대하여 읍면단위 작황을 진단하고, 분야별 운영기술 개선과 운영체계 최적화를 위해 다각도로 정확성과 실용성을 검증 중이다. 관계 기관과의 협조를 통해 타 식량작물의 실측 검증자료가 준비 되는대로 맥류, 두류, 잡곡, 서류 등으로 계속 확대 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

이 시스템을 이용한 작황진단은 연구 종료 후에도 농업과학기술원 농업기상연구실의 주요 업무로서 계속 추진될 예정인데, 현재 진행중인 기상청의 "농업분야 활용을 위한 장기예보 개선사업"이 완료되면 작황진단뿐 아니라 앞으로의 날씨전망에 따른 작황예보도 가능해질 것이다.

이 장에서는 현재까지 수행된 현업차원 작황진단작업의 주요 내용을 간추려 소개한다.

제 2 절 이전대상기술의 특성

1. 기술이전 내용 요약

본 장에서는 1997년부터 1999년까지의 3년간의 실제 기상자료를 토대로 현업차원에서 벼 작황진단을 한다고 가정했을 때 예상되는 여러 가지 상황들을 도출하고 각각에 맞는 시스템 운영기법을 강구하였다. 1999년의 경우 일별기상자료는 9월 30일까지를 이용하였고 10월 1일부터 12월 31일까지의 일별기상자료는 `98년 자료를 이용하여 작황을 모의하였다. 그리고 모의된 결과는 `97년과 `98년 농림부 통계정보관실에서 제공한 작황조사 실측자료와 비교하였다.

작황진단을 수행하기 위해서는 다음과 같은 3단계의 과정을 거쳐서 이루어지게 되는데 첫 번째로는 작황진단을 위한 일기상자료(일최고기온, 일최저기온, 강수량, 일사량)의 정리단계, 두 번째로는 DSSAT 3.5를 이용한 벼 생육모의, 세 번째로는 ArcView GIS 3.1을 이용한 생육모의 결과의 공간변이 분석 및 표출이다.

2. 기술이전 세부 내용

가. 작황진단을 위한 일기상자료의 정리단계

DSSAT 3.5를 구동시키기 위해서는 1년치(365일)의 일기상자료, 토양자료, 품종자료 등이 필요하다. 토양자료와 품종자료는 제 3 장에서 설명한 입력값을 이용하며, 일기상자료는 제 2 장에서 설명한대로 전국 73개 종관기상관측소에서 관측된 값을 이용하는데 이것을 일최고기온, 일최저기온, 강수량, 일사량 등의 순으로 1일부터 365일까지 정리를 한다. 기상청으로부터 text file 형

태로 제공받은 기상자료는 다음과 같다.

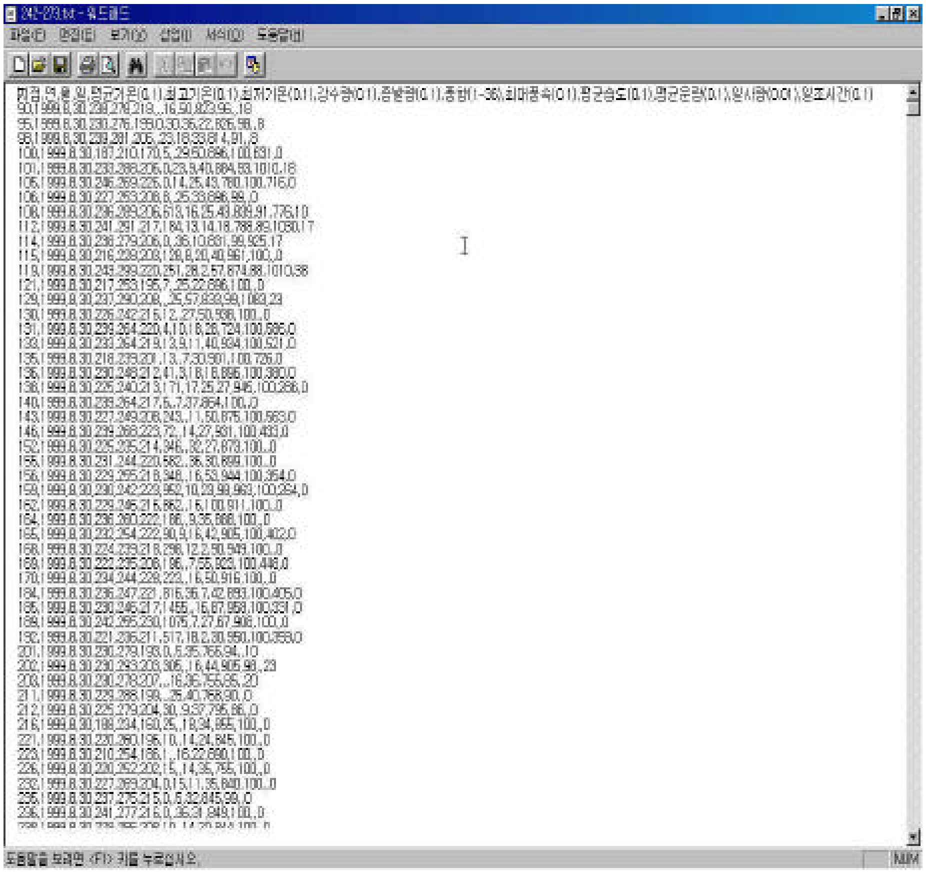
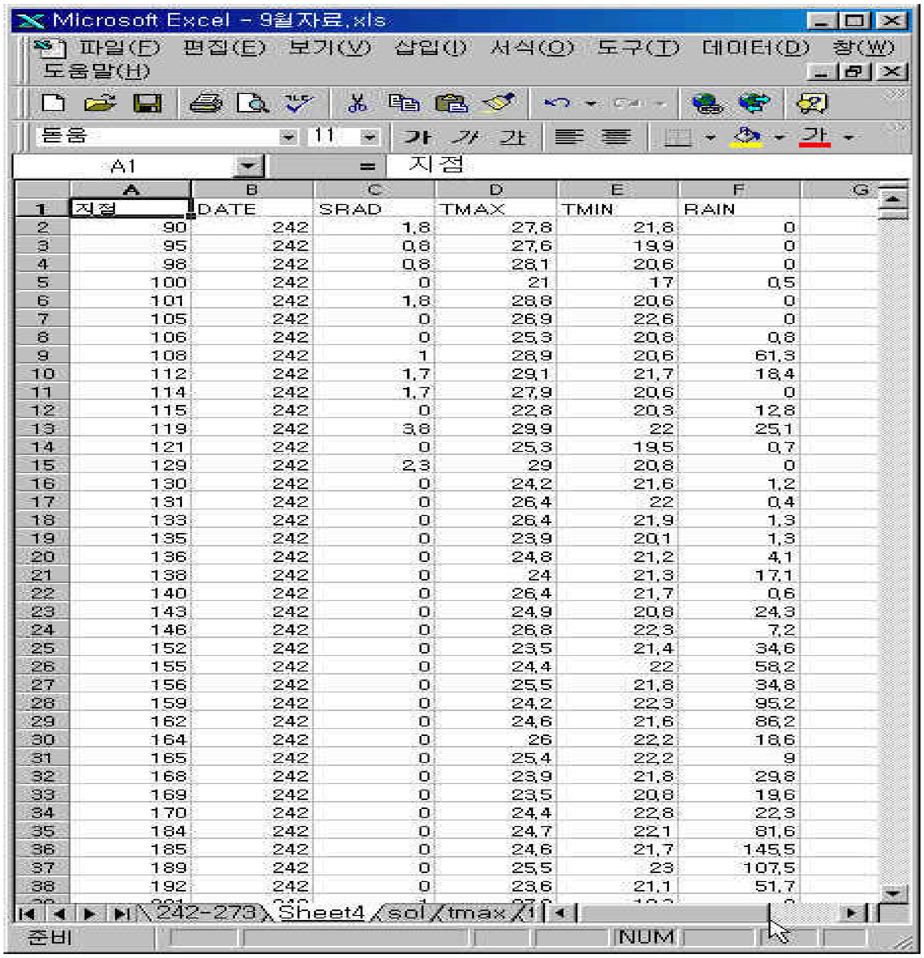


그림 77. 전국 73개 종관기상관측소별 일기상 raw data

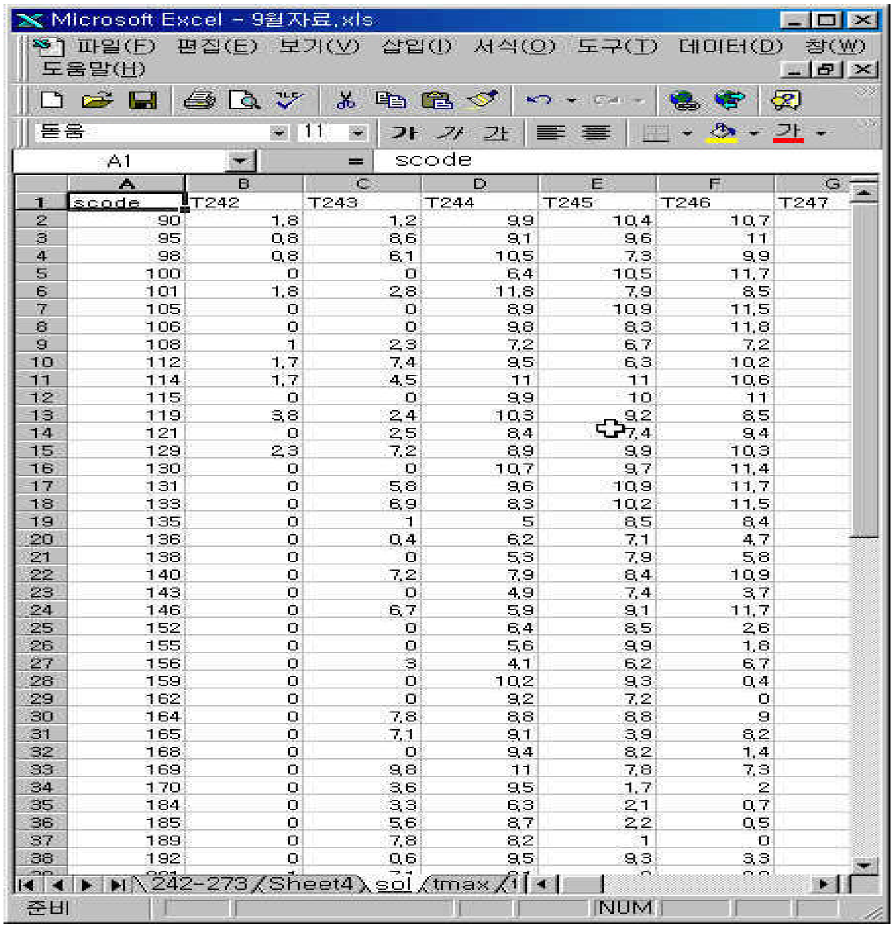
이 text file에는 지점, 연, 월, 일, 평균기온, 최고기온, 최저기온, 강수량, 증발량, 풍향, 최대풍속, 평균습도, 평균운량, 일사량, 일조시간 등의 전국 73개 종관 기상 관측소별 일기상자료가 날짜별로 포함되어 있다. 여기에서 작황진단과정에 필요한 data는 최고기온, 최저기온, 강수량, 일사량 등이므로 이 부분들만 발췌해서 정리한다. 정리한 data는 다음과 같다.



	A	B	C	D	E	F
1	지점	DATE	SRAD	TMAX	TMIN	RAIN
2	90	242	1.8	27.8	21.8	0
3	95	242	0.8	27.6	19.9	0
4	98	242	0.8	28.1	20.6	0
5	100	242	0	21	17	0.5
6	101	242	1.8	28.8	20.6	0
7	105	242	0	26.9	22.6	0
8	106	242	0	25.3	20.8	0.8
9	108	242	1	28.9	20.6	61.3
10	112	242	1.7	29.1	21.7	18.4
11	114	242	1.7	27.9	20.6	0
12	115	242	0	22.8	20.3	12.8
13	119	242	3.8	29.9	22	25.1
14	121	242	0	25.3	19.5	0.7
15	129	242	2.3	29	20.8	0
16	130	242	0	24.2	21.6	1.2
17	131	242	0	26.4	22	0.4
18	133	242	0	26.4	21.9	1.3
19	135	242	0	23.9	20.1	1.3
20	136	242	0	24.8	21.2	4.1
21	138	242	0	24	21.3	17.1
22	140	242	0	26.4	21.7	0.6
23	143	242	0	24.9	20.8	24.3
24	146	242	0	26.8	22.3	7.2
25	152	242	0	23.5	21.4	34.6
26	155	242	0	24.4	22	58.2
27	156	242	0	25.5	21.8	34.8
28	159	242	0	24.2	22.3	95.2
29	162	242	0	24.6	21.6	86.2
30	164	242	0	26	22.2	18.6
31	165	242	0	25.4	22.2	9
32	168	242	0	23.9	21.8	29.8
33	169	242	0	23.5	20.8	19.6
34	170	242	0	24.4	22.8	22.3
35	184	242	0	24.7	22.1	81.6
36	185	242	0	24.6	21.7	145.5
37	189	242	0	25.5	23	107.5
38	192	242	0	23.6	21.1	51.7

그림 78. TXT file의 정리과정 1.

→



	A	B	C	D	E	F	G
1	scode	T242	T243	T244	T245	T246	T247
2	90	1.8	1.2	9.9	10.4	10.7	
3	95	0.8	8.6	9.1	9.6	11	
4	98	0.8	6.1	10.5	7.3	9.9	
5	100	0	0	6.4	10.5	11.7	
6	101	1.8	2.8	11.8	7.9	8.5	
7	105	0	0	8.9	10.9	11.5	
8	106	0	0	9.8	8.3	11.8	
9	108	1	2.3	7.2	6.7	7.2	
10	112	1.7	7.4	9.5	6.3	10.2	
11	114	1.7	4.5	11	11	10.6	
12	115	0	0	9.9	10	11	
13	119	3.8	2.4	10.3	9.2	8.5	
14	121	0	2.5	8.4	7.4	9.4	
15	129	2.3	7.2	8.9	9.9	10.3	
16	130	0	0	10.7	9.7	11.4	
17	131	0	5.8	9.6	10.9	11.7	
18	133	0	6.9	8.3	10.2	11.5	
19	135	0	1	5	8.5	8.4	
20	136	0	0.4	6.2	7.1	4.7	
21	138	0	0	5.3	7.9	5.8	
22	140	0	7.2	7.9	8.4	10.9	
23	143	0	0	4.9	7.4	3.7	
24	146	0	6.7	5.9	9.1	11.7	
25	152	0	0	6.4	8.5	2.6	
26	155	0	0	5.6	9.9	1.8	
27	156	0	3	4.1	6.2	6.7	
28	159	0	0	10.2	9.3	0.4	
29	162	0	0	9.2	7.2	0	
30	164	0	7.8	8.8	8.8	9	
31	165	0	7.1	9.1	3.9	8.2	
32	168	0	0	9.4	8.2	1.4	
33	169	0	9.8	11	7.8	7.3	
34	170	0	3.6	9.5	1.7	2	
35	184	0	3.3	6.3	2.1	0.7	
36	185	0	5.6	8.7	2.2	0.5	
37	189	0	7.8	8.2	1	0	
38	192	0	0.6	9.5	9.3	3.3	

그림 79. TXT file**의 정리과정** 2

이렇게 정리된 자료들은 일사량(sol), **일최고기온**(Tmax), **일최저기온**(Tmin), **강수량**(rain) **등의 형태로 각각** dBASE file(.dbf)**로 저장한다**. **저장된 각각의** .dbf**들을 제** 2 **장에서 설명한 공간통계기법을 이용해 전국** 1,445**개 읍·면별로** interpolation **시킨다**.

다음은 ArcView 3.1**을 이용한 기상자료의** interpolation **과정이다**.

- **먼저** ArcView 3.1**을 구동시킨 후** 1999.apr file**을 열고** kma_stn_shp**에 위의**

.dbf를 **붙인다**.

- .dbf를 **붙이는 과정은 열린** .apr**에서** table**을 열고**, **붙일** .dbf table**의** *scode* **와** .apr**의** *scode*를 field join**한다**.

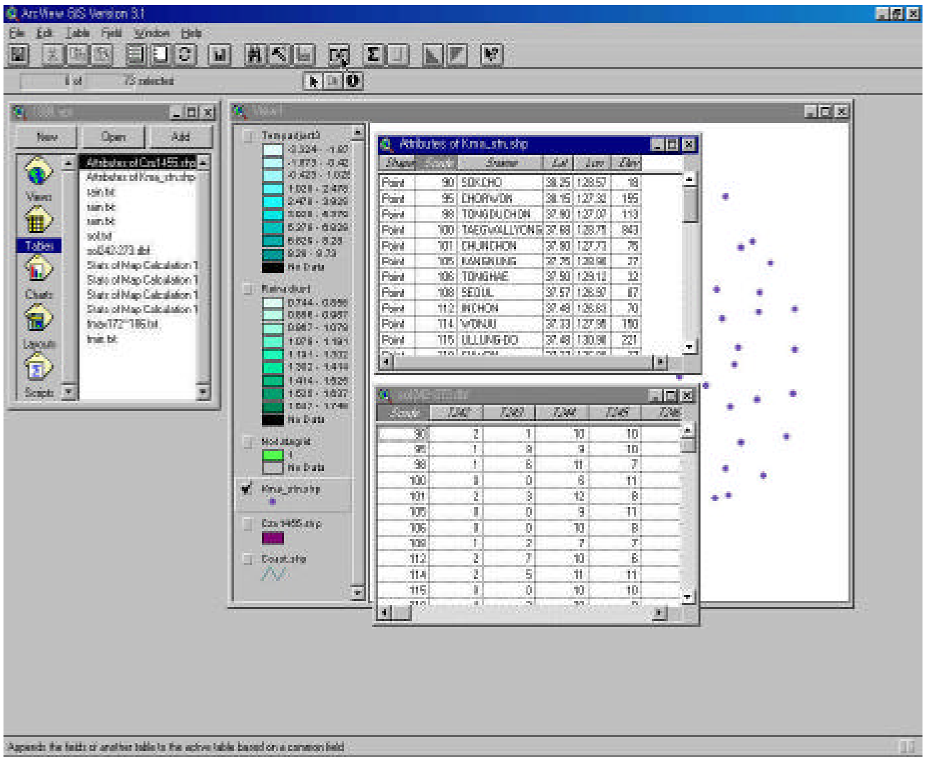


그림 80. **정리된** 73**개 종관기상관측자료의** Interpolation **과정**.

- **메뉴바에서** Analysis properties를 **선택하여 클릭 하면 아래와 같은 창이 열린다**.

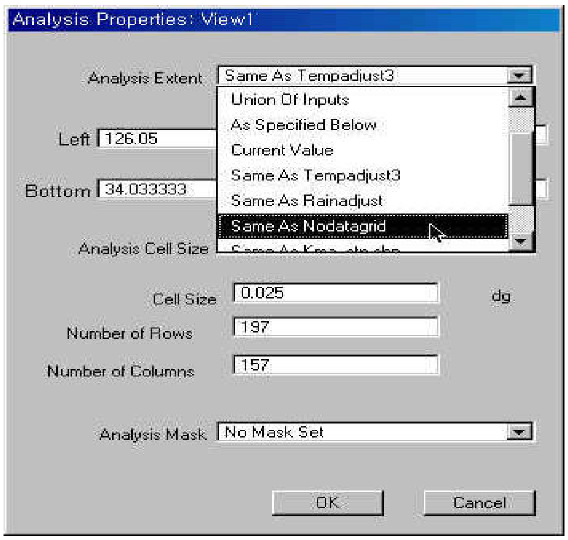


그림81. Analysis properties 1.

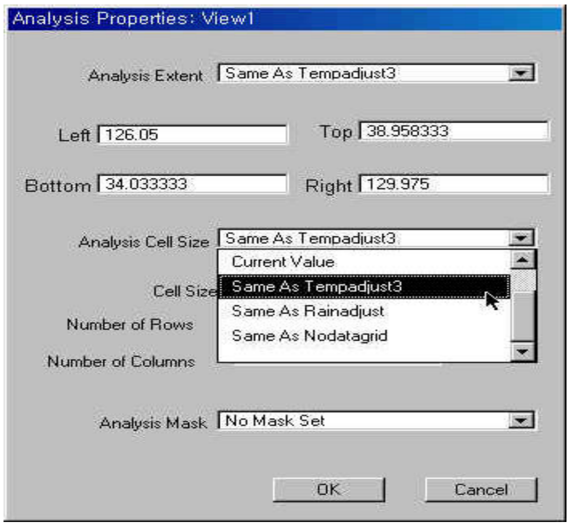


그림82. Analysis properties 2.

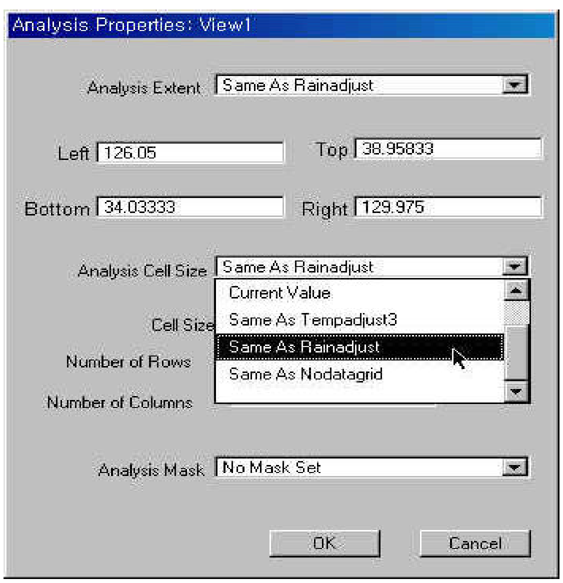


그림83. Analysis properties 3.

이들 창의 Analysis Extent와 Analysis Cell size에서 interpolation 시키기 원하는

값을 선택한다. 일사량(sol)을 원할 경우 Same as Nodatagrid, 일최고기온(Tmax)과 일최저기온일(Tmin) 경우 Same as Temp adjust3, 강수량(rain)일 경우 Same as Rain adjust를 각각 선택한 후 OK를 ⏎.

- Tmax 값을 interpolation 시킬 경우, 위의 과정 Analysis properties에서 Same as Temp adjust3을 선택한 후, 메뉴의 Surface → Interpolate Grid → Z value field → 예를 들어, "T242" 값을 선택 → No. of Neighborhood에서 3을 설정 후 OK ⏎. → View 창에 Surface from KMA 라는 theme 이 하나 생긴다.

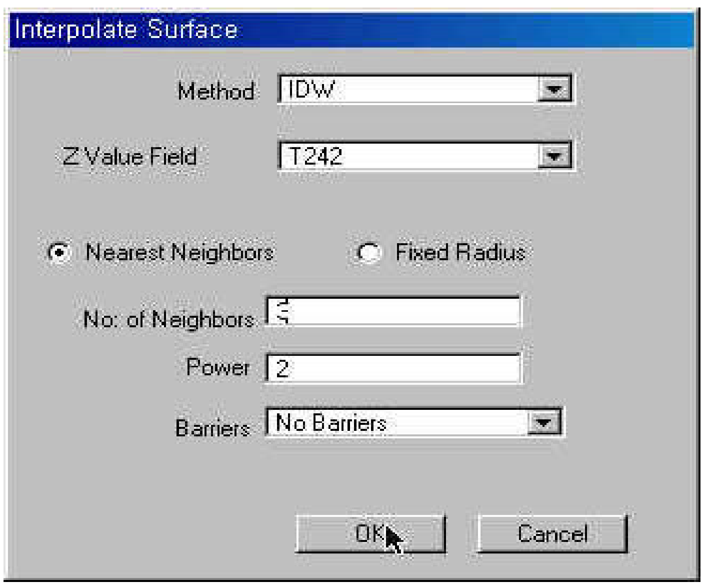


그림 84. Interpolate surface.

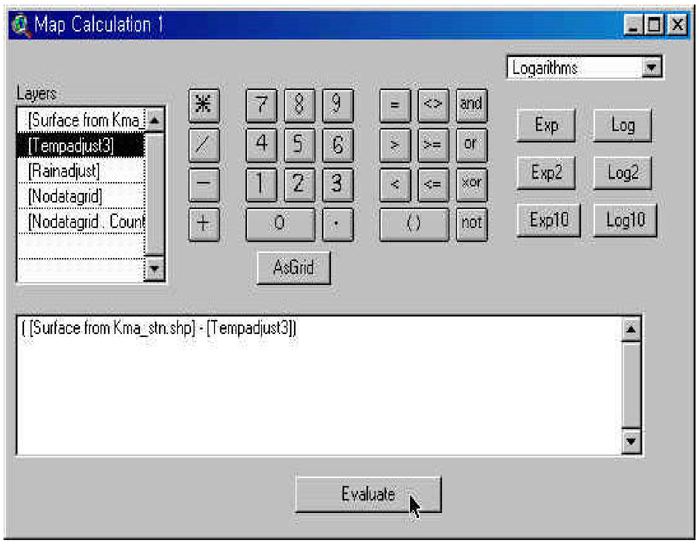


그림85. Map calculator 설정과정

- 메뉴 Analysis → Map Calculator → Surface from Kma double click → 창 내의 "-" 값 ⏎ → Tempadjust(Tmax 나 Tmin 일 경우) double click → Evaluate ⏎ → 창 닫기

이 때 Map Calculator 설정 시 Tmax 나 Tmin 일 경우,

(**Surface from kma**) - (**Tempadjust**)

Rain 일 경우,

(**Surface from kma**) * (**Rainadjust**)

Sol 일 경우,

(**Surface from kma**) * (**Nodatagrid**)

로 설정 후 Evaluate ⏎ → 창 닫기 → 하면 Map Calculation 1 이라는 theme 이 하나 생긴다.

- View 창의 czu1455.shp theme을 ⏎ → Analysis에서 Summarize Zones → No_myun →

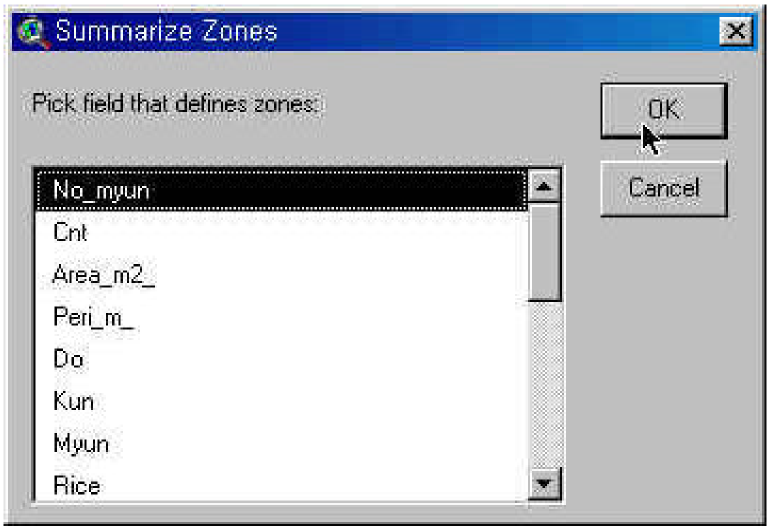


그림86. Summarized zones **설정 과정**1.

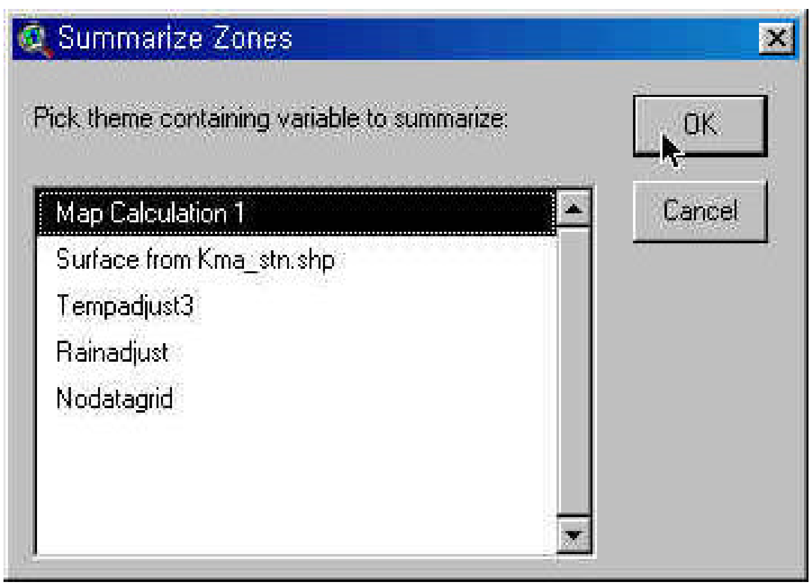


그림 87. Summarized zones **설정과정**2.

OK ↵ → table**이 하나 생김** → table**이 떠 있는 상태에서 메뉴의** File**에서**

export 시킴 → Export table 창이 뜨는데 여기에서 Delimited Text ↵ → file name을 "Tmax1" 라고 정해준 후 OK ↵ → table 닫고 Surface from kma 와 Map Calculation1 theme 은 닫고 위의 과정을 Tmax365까지 반복한다

- Tmin, Rain 및 Sol 도 위의 과정을 똑같이 반복한다.

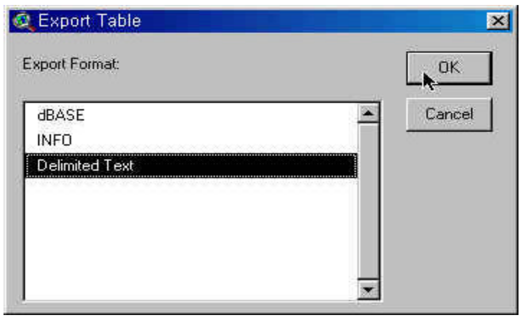
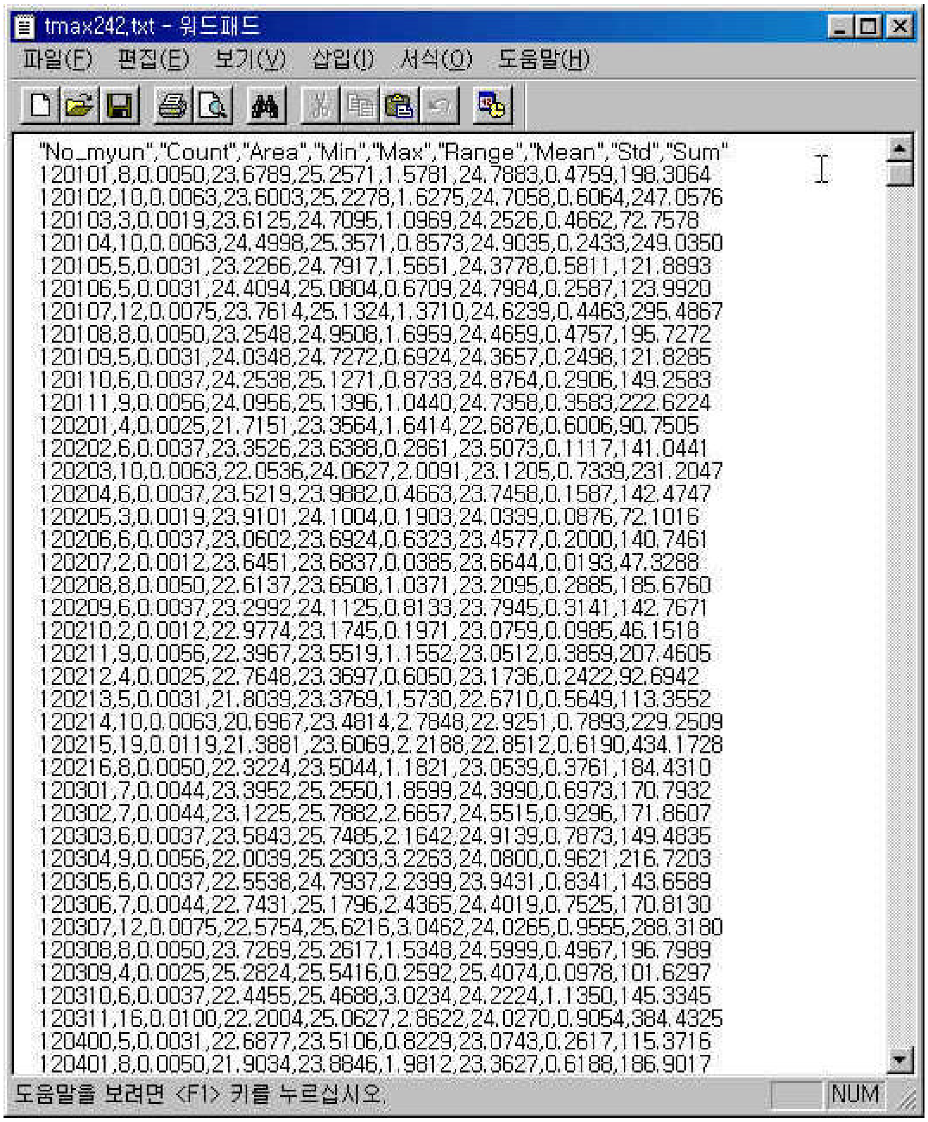


그림 88. Interpolation 한 자료의 txt file 저장.

- 이렇게 하면 전국읍면단위 1455개 지역의 365일치 기상자료들이 text file 로 만들어진다.



tmax242.txt - 워드패드

파일(F) 편집(E) 보기(V) 삽입(I) 서식(O) 도움말(H)

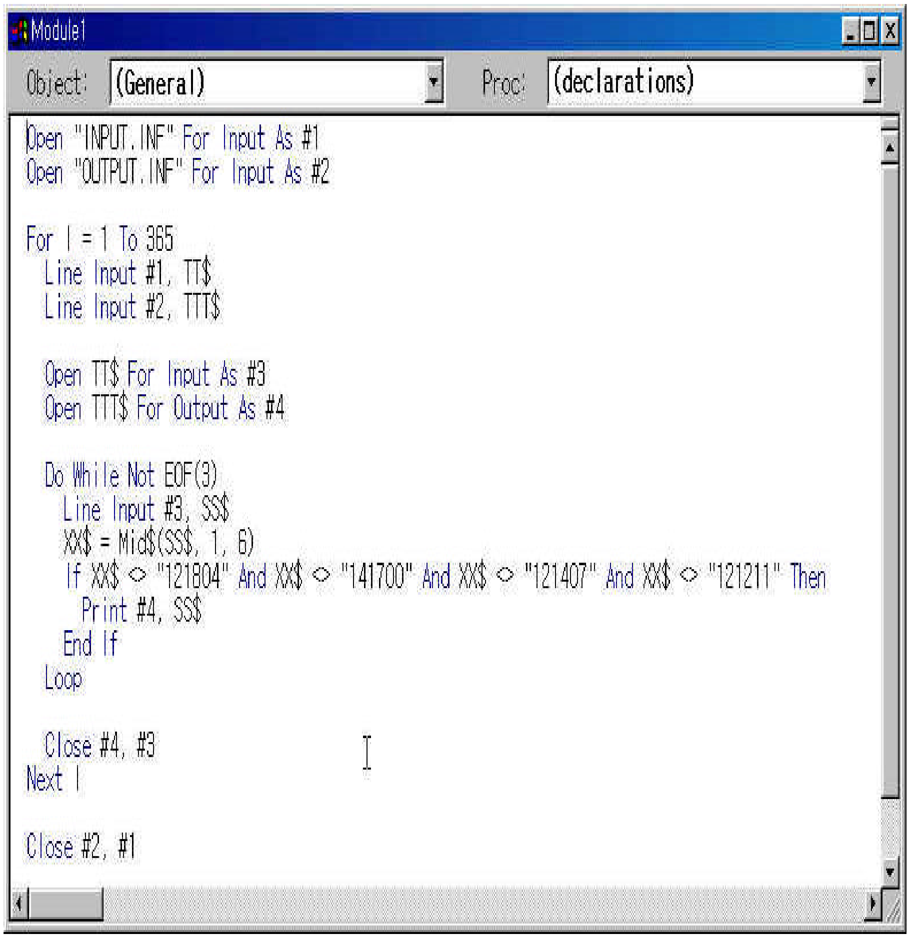
```
"No_myun","Count","Area","Min","Max","Range","Mean","Std","Sum"
120101,8,0.0050,23.6789,25.2571,1.5781,24.7883,0.4759,198.3064
120102,10,0.0063,23.6003,25.2278,1.6275,24.7058,0.6064,247.0576
120103,3,0.0019,23.6125,24.7095,1.0969,24.2526,0.4662,72.7578
120104,10,0.0063,24.4998,25.3571,0.8573,24.9035,0.2433,249.0350
120105,5,0.0031,23.2266,24.7917,1.5651,24.3778,0.5811,121.8893
120106,5,0.0031,24.4094,25.0804,0.6709,24.7984,0.2587,123.9920
120107,12,0.0075,23.7614,25.1324,1.3710,24.6239,0.4463,295.4867
120108,8,0.0050,23.2548,24.9508,1.6959,24.4659,0.4757,195.7272
120109,5,0.0031,24.0348,24.7272,0.6924,24.3657,0.2498,121.8285
120110,6,0.0037,24.2538,25.1271,0.8733,24.8764,0.2906,149.2583
120111,9,0.0056,24.0956,25.1396,1.0440,24.7358,0.3583,222.6224
120201,4,0.0025,21.7151,23.3564,1.6414,22.6876,0.6006,90.7505
120202,6,0.0037,23.3526,23.6388,0.2861,23.5073,0.1117,141.0441
120203,10,0.0063,22.0536,24.0627,2.0091,23.1205,0.7339,231.2047
120204,6,0.0037,23.5219,23.9882,0.4663,23.7458,0.1587,142.4747
120205,3,0.0019,23.9101,24.1004,0.1903,24.0339,0.0876,72.1016
120206,6,0.0037,23.0602,23.6924,0.6323,23.4577,0.2000,140.7461
120207,2,0.0012,23.6451,23.6837,0.0385,23.6644,0.0193,47.3288
120208,8,0.0050,22.6137,23.6508,1.0371,23.2095,0.2885,185.6760
120209,6,0.0037,23.2992,24.1125,0.8133,23.7945,0.3141,142.7671
120210,2,0.0012,22.9774,23.1745,0.1971,23.0759,0.0985,46.1518
120211,9,0.0056,22.3967,23.5519,1.1552,23.0512,0.3859,207.4605
120212,4,0.0025,22.7648,23.3697,0.6050,23.1736,0.2422,92.6942
120213,5,0.0031,21.8039,23.3769,1.5730,22.6710,0.5649,113.3552
120214,10,0.0063,20.6967,23.4814,2.7848,22.9251,0.7893,229.2509
120215,19,0.0119,21.3881,23.6069,2.2188,22.8512,0.6190,434.1728
120216,8,0.0050,22.3224,23.5044,1.1821,23.0539,0.3761,184.4310
120301,7,0.0044,23.3952,25.2550,1.8599,24.3990,0.6973,170.7932
120302,7,0.0044,23.1225,25.7882,2.6657,24.5515,0.9296,171.8607
120303,6,0.0037,23.5843,25.7485,2.1642,24.9139,0.7873,149.4835
120304,9,0.0056,22.0039,25.2303,3.2263,24.0800,0.9621,216.7203
120305,6,0.0037,22.5538,24.7937,2.2399,23.9431,0.8341,143.6589
120306,7,0.0044,22.7431,25.1796,2.4365,24.4019,0.7525,170.8130
120307,12,0.0075,22.5754,25.6216,3.0462,24.0265,0.9555,288.3180
120308,8,0.0050,23.7269,25.2617,1.5348,24.5999,0.4967,196.7989
120309,4,0.0025,25.2824,25.5416,0.2592,25.4074,0.0978,101.6297
120310,6,0.0037,22.4455,25.4688,3.0234,24.2224,1.1350,145.3345
120311,16,0.0100,22.2004,25.0627,2.8622,24.0270,0.9054,384.4325
120400,5,0.0031,22.6877,23.5106,0.8229,23.0743,0.2617,115.3716
120401,8,0.0050,21.9034,23.8846,1.9812,23.3627,0.6188,186.9017
```

도움말을 보려면 <F1> 키를 누르십시오. NUM

그림 89. 73**개 종관기상관측자료를 토대로** interpolation**한 후** 1,455**개 지역으로 변환된 기상자료** txt file.

위와 같이 만들어진 file**들을 이용해 생육모의 프로그램을 구동시키기 위해서는** DSSAT 3.5**에서 요구하는 아래 그림의 형식**(**그림** 16)**으로 정리할 필요가**

있다. 이것을 수작업으로 하면 많은 시간과 노력이 필요한 관계로 Quick BASIC 프로그램을 이용해서 정리를 할 수 있다.




```
Open "INPUT.INF" For Input As #1
Open "OUTPUT.INF" For Input As #2

For I = 1 To 365
  Line Input #1, TT$
  Line Input #2, TTT$

  Open TT$ For Input As #3
  Open TTT$ For Output As #4

  Do While Not EOF(3)
    Line Input #3, SS$
    XX$ = Mid$(SS$, 1, 6)
    If XX$ <> "121804" And XX$ <> "141700" And XX$ <> "121407" And XX$ <> "121211" Then
      Print #4, SS$
    End If
  Loop

  Close #4, #3
Next I

Close #2, #1
```

그림 14. ArcView 3.1을 이용해서 만든 sol, tmax, tmin 및 rain 값들을 DSSAT 프로그램 사용에 알맞는 wth file 형태로 변환하기 위해 czu를 match시키는 Quick Basic 프로그램

czu를 match 시킨 자료들은 text file 형태로 변환한 후 C++ 프로그램을 이용해서 .wth file 형태로 join 시킨다.

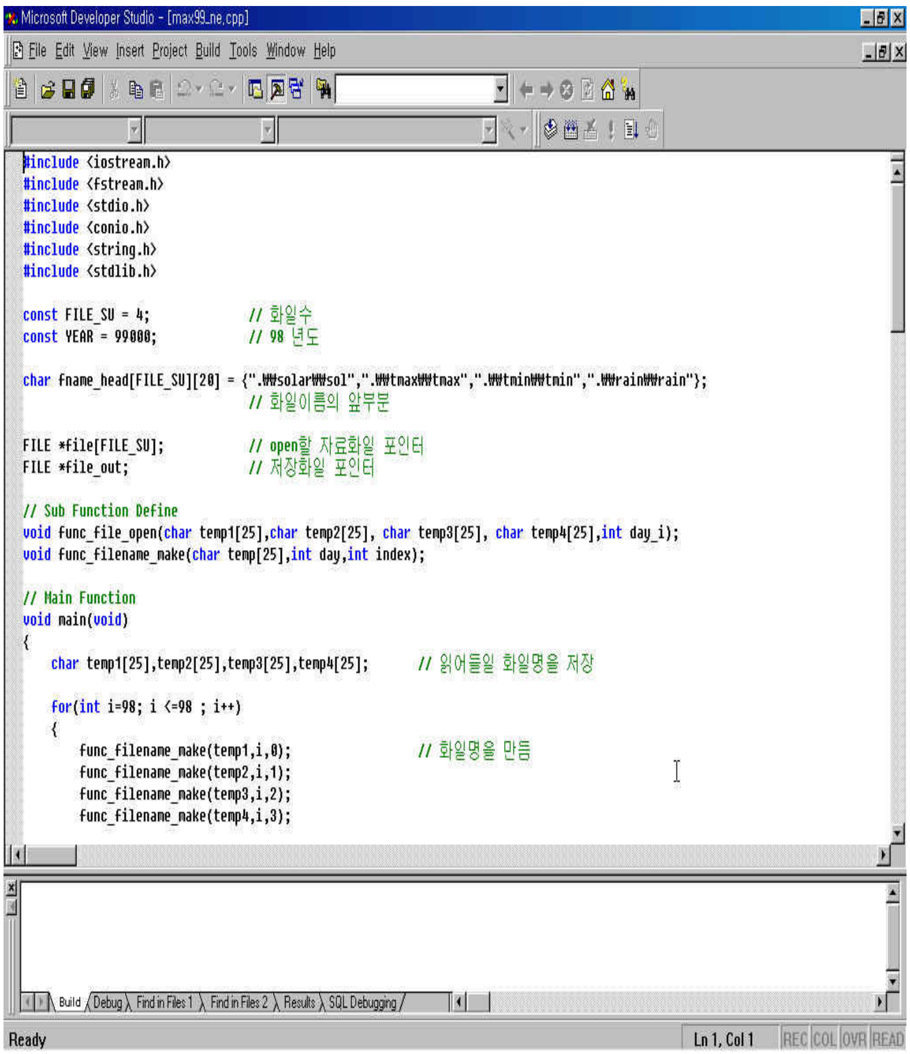


그림 91. CZU를 match 시킨 기상자료들을 wth file로 변환시키기 위한 C++ 프로그램

Khcn0100.wth - 메모장

파일(F) 편집(E) 찾기(S) 도움말(H)

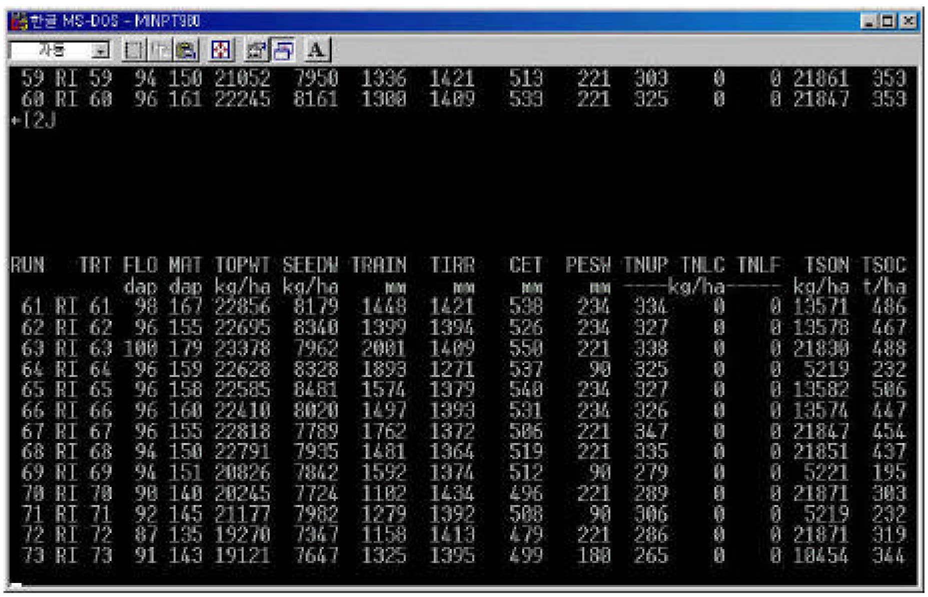
```
*WEATHER DATA : suwon

@ INSI      LAT     LONG  ELEV   TAV   AMP REFHT WNDHT
  KHSW   37.270  126.980    37  11.9   9.6   1.5  10.0
@DATE  SRAD  TMAX  TMIN  RAIN
93001   8.9   5.9  -7.9   0.0
93002   7.1   9.3  -4.4   0.0
93003   5.8   7.2  -3.3   0.0
93004   8.1   2.7  -6.3   0.0
93005   8.7   4.0  -9.1   0.0
93006   3.8   6.0  -5.3   0.0
93007   2.0   3.6  -1.9   0.0
93008   5.4   5.5  -4.2   0.0
93009   2.4   5.3  -0.0   3.7
93010   6.0   5.7  -3.0   0.0
93011   7.8   3.3  -6.0   0.0
93012   8.4   3.3  -8.2   0.0
93013   3.2   2.0  -5.1   0.0
93014   1.5   0.5  -2.6   1.3
93015   1.7  -0.3  -5.1   0.0
93016   8.3  -0.1  -7.2   0.0
93017   6.6   1.5  -7.8   0.4
93018   5.4  -2.7  -6.9   0.8
93019   9.0  -1.2 -11.2   0.1
93020  10.2  -0.5 -10.4   0.0
93021  11.2   1.1 -12.6   0.0
93022  10.7   3.5 -11.4   0.0
```

그림 16. **작황진단** simulation**을 위한 기상자료들을** wth file**로 변환한 상태**

나. DSSAT 3.5를 이용한 벼 작황진단체계

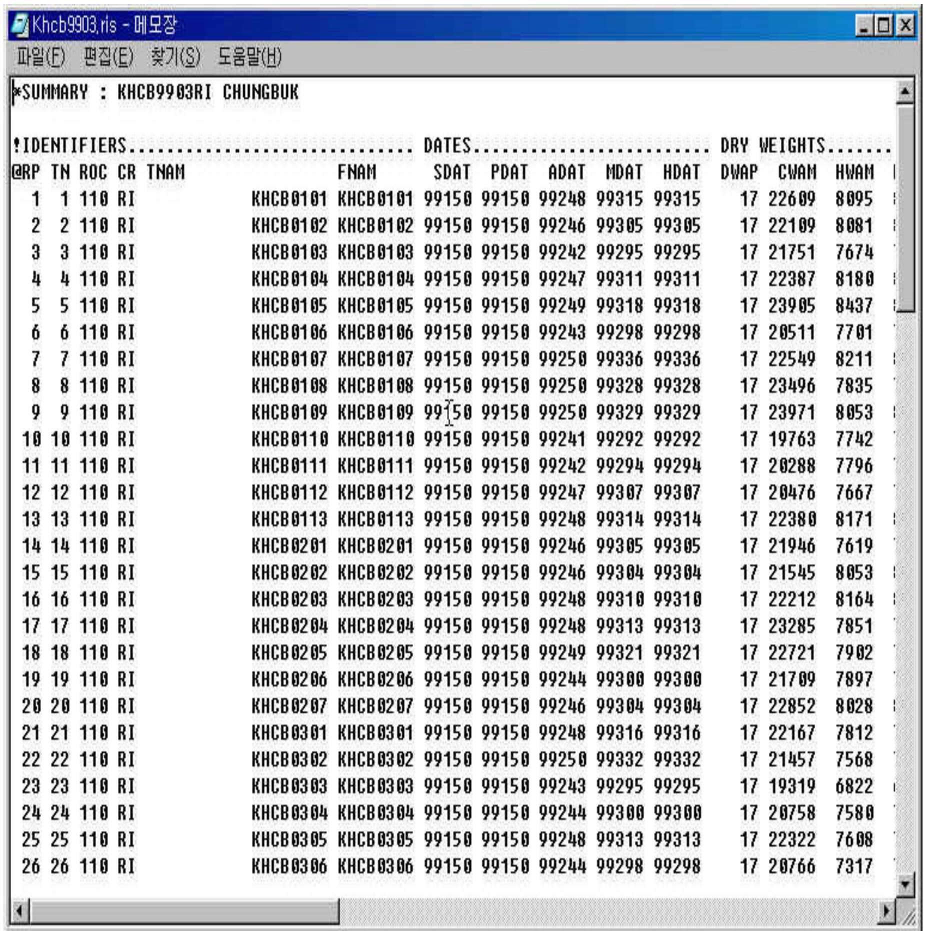
위와 같은 과정에서 생성된 자료들을 도별로 정리를 한 후 DSSAT 3.5 프로그램의 RICER980을 구동시켜 벼의 작황을 simulation 하게 된다. 이 simulation은 Windows가 아닌 DOS에서 작동된다. 아래의 그림은 DSSAT 3.5를 이용한 silmulation 과정이 실행되는 모습을 보여준다. 이 simulation은 run.bat file의 실행으로 이루어진다.



RUN	TRT	FLO	MAT	TOPWT	SEEDW	TRAIN	TIRR	CET	PESW	TNUP	TNLC	TNLF	TSON	TSOC
59	RI 59	94	150	21052	7950	1336	1421	513	221	303	0	0	21861	353
60	RI 60	96	161	22245	8161	1300	1409	533	221	325	0	0	21847	353
		dap	dap	kg/ha	kg/ha	mm	mm	mm	mm	-----	kg/ha	-----	kg/ha	t/ha
61	RI 61	98	167	22856	8179	1448	1421	538	234	334	0	0	13571	486
62	RI 62	96	155	22695	8340	1399	1394	526	234	327	0	0	13578	467
63	RI 63	100	179	23378	7962	2001	1409	550	221	338	0	0	21830	488
64	RI 64	96	159	22628	8328	1893	1271	537	90	325	0	0	5219	232
65	RI 65	96	158	22585	8481	1574	1379	540	234	327	0	0	13582	506
66	RI 66	96	160	22410	8020	1497	1393	531	234	326	0	0	13574	447
67	RI 67	96	155	22818	7789	1762	1372	506	221	347	0	0	21847	454
68	RI 68	94	150	22791	7935	1481	1364	519	221	335	0	0	21851	437
69	RI 69	94	151	20826	7842	1592	1374	512	90	279	0	0	5221	195
70	RI 70	90	140	20245	7724	1102	1434	496	221	289	0	0	21871	303
71	RI 71	92	145	21177	7982	1279	1392	508	90	306	0	0	5219	232
72	RI 72	87	135	19270	7347	1158	1413	479	221	286	0	0	21871	319
73	RI 73	91	143	19121	7647	1325	1395	499	180	265	0	0	18454	344

그림 93. DSSAT 3.5 프로그램의 RICER980을 이용한 벼 작황 simulation 모습

이 simulation을 통해서 summary file(*.ris)이 생성되는데, 이 ris file들을 ArcView 3.1을 통해 mapping을 하기 위해 MS Excel을 이용해서 database file(*.dbf)로 변환시킨다. 아래의 그림은 변환된 .dbf file을 보여준다.



Khcb9903.ris - 메모장

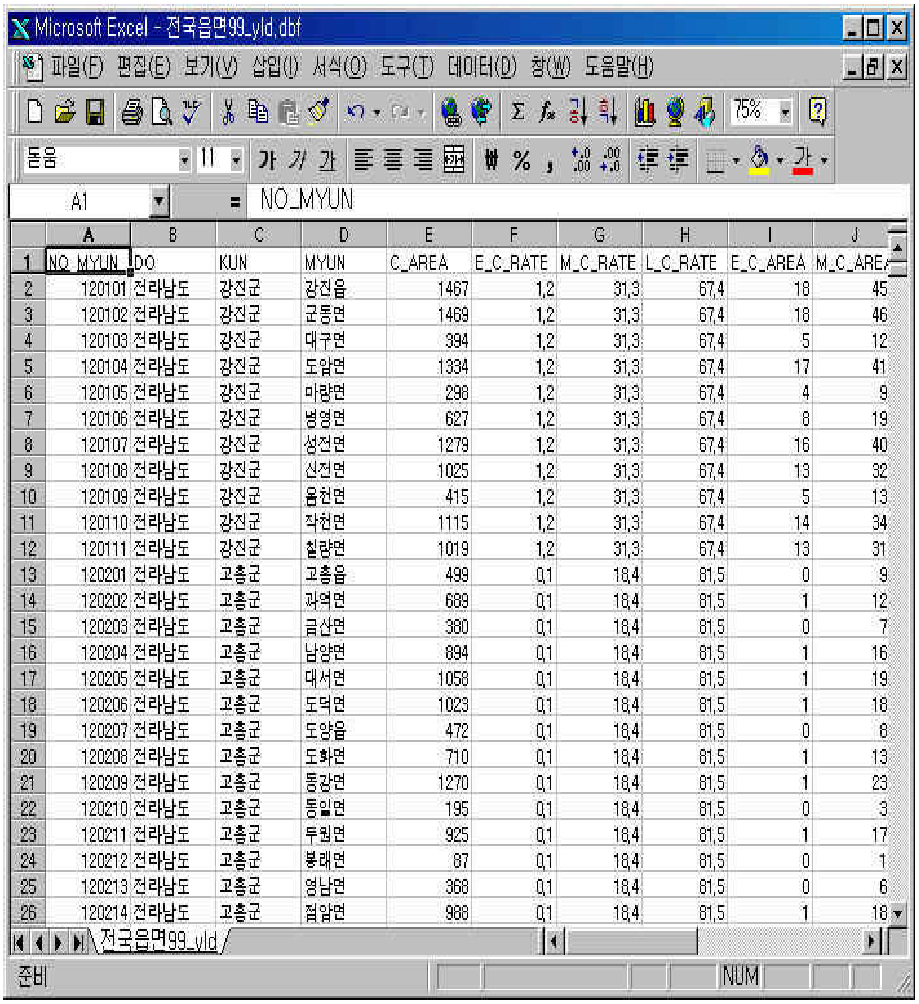
파일(F) 편집(E) 찾기(S) 도움말(H)

*SUMMARY : KHCB9903RI CHUNGBUK

!IDENTIFIERS.............................. DATES......................... DRY WEIGHTS.......

@RP	TN	ROC	CR	TNAM	FNAM	SDAT	PDAT	ADAT	MDAT	HDAT	DWAP	CWAM	HWAM
1	1	110	RI	KHCB0101	KHCB0101	99150	99150	99248	99315	99315	17	22609	8095
2	2	110	RI	KHCB0102	KHCB0102	99150	99150	99246	99305	99305	17	22109	8081
3	3	110	RI	KHCB0103	KHCB0103	99150	99150	99242	99295	99295	17	21751	7674
4	4	110	RI	KHCB0104	KHCB0104	99150	99150	99247	99311	99311	17	22387	8180
5	5	110	RI	KHCB0105	KHCB0105	99150	99150	99249	99318	99318	17	23905	8437
6	6	110	RI	KHCB0106	KHCB0106	99150	99150	99243	99298	99298	17	20511	7701
7	7	110	RI	KHCB0107	KHCB0107	99150	99150	99250	99336	99336	17	22549	8211
8	8	110	RI	KHCB0108	KHCB0108	99150	99150	99250	99328	99328	17	23496	7835
9	9	110	RI	KHCB0109	KHCB0109	99150	99150	99250	99329	99329	17	23971	8053
10	10	110	RI	KHCB0110	KHCB0110	99150	99150	99241	99292	99292	17	19763	7742
11	11	110	RI	KHCB0111	KHCB0111	99150	99150	99242	99294	99294	17	20288	7796
12	12	110	RI	KHCB0112	KHCB0112	99150	99150	99247	99307	99307	17	20476	7667
13	13	110	RI	KHCB0113	KHCB0113	99150	99150	99248	99314	99314	17	22380	8171
14	14	110	RI	KHCB0201	KHCB0201	99150	99150	99246	99305	99305	17	21946	7619
15	15	110	RI	KHCB0202	KHCB0202	99150	99150	99246	99304	99304	17	21545	8053
16	16	110	RI	KHCB0203	KHCB0203	99150	99150	99248	99310	99310	17	22212	8164
17	17	110	RI	KHCB0204	KHCB0204	99150	99150	99248	99313	99313	17	23285	7851
18	18	110	RI	KHCB0205	KHCB0205	99150	99150	99249	99321	99321	17	22721	7902
19	19	110	RI	KHCB0206	KHCB0206	99150	99150	99244	99300	99300	17	21709	7897
20	20	110	RI	KHCB0207	KHCB0207	99150	99150	99246	99304	99304	17	22852	8028
21	21	110	RI	KHCB0301	KHCB0301	99150	99150	99248	99316	99316	17	22167	7812
22	22	110	RI	KHCB0302	KHCB0302	99150	99150	99250	99332	99332	17	21457	7568
23	23	110	RI	KHCB0303	KHCB0303	99150	99150	99243	99295	99295	17	19319	6822
24	24	110	RI	KHCB0304	KHCB0304	99150	99150	99244	99300	99300	17	20758	7580
25	25	110	RI	KHCB0305	KHCB0305	99150	99150	99248	99313	99313	17	22322	7608
26	26	110	RI	KHCB0306	KHCB0306	99150	99150	99244	99298	99298	17	20766	7317

그림 94. RICER980**을 구동 시켜 얻은** summary file



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	NO_MYUN	DO	KUN	MYUN	C_AREA	E_C_RATE	M_C_RATE	L_C_RATE	E_C_AREA	M_C_ARE
2	120101	전라남도	강진군	강진읍	1467	1.2	31.3	67.4	18	45
3	120102	전라남도	강진군	군동면	1469	1.2	31.3	67.4	18	46
4	120103	전라남도	강진군	대구면	394	1.2	31.3	67.4	5	12
5	120104	전라남도	강진군	도암면	1334	1.2	31.3	67.4	17	41
6	120105	전라남도	강진군	마량면	298	1.2	31.3	67.4	4	9
7	120106	전라남도	강진군	병영면	627	1.2	31.3	67.4	8	19
8	120107	전라남도	강진군	성전면	1279	1.2	31.3	67.4	16	40
9	120108	전라남도	강진군	신전면	1025	1.2	31.3	67.4	13	32
10	120109	전라남도	강진군	옴천면	415	1.2	31.3	67.4	5	13
11	120110	전라남도	강진군	작천면	1115	1.2	31.3	67.4	14	34
12	120111	전라남도	강진군	칠량면	1019	1.2	31.3	67.4	13	31
13	120201	전라남도	고흥군	고흥읍	499	0.1	18.4	81.5	0	9
14	120202	전라남도	고흥군	과역면	689	0.1	18.4	81.5	1	12
15	120203	전라남도	고흥군	금산면	380	0.1	18.4	81.5	0	7
16	120204	전라남도	고흥군	남양면	894	0.1	18.4	81.5	1	16
17	120205	전라남도	고흥군	대서면	1058	0.1	18.4	81.5	1	19
18	120206	전라남도	고흥군	도덕면	1023	0.1	18.4	81.5	1	18
19	120207	전라남도	고흥군	도양읍	472	0.1	18.4	81.5	0	8
20	120208	전라남도	고흥군	도화면	710	0.1	18.4	81.5	1	13
21	120209	전라남도	고흥군	동강면	1270	0.1	18.4	81.5	1	23
22	120210	전라남도	고흥군	동일면	195	0.1	18.4	81.5	0	3
23	120211	전라남도	고흥군	두원면	925	0.1	18.4	81.5	1	17
24	120212	전라남도	고흥군	봉래면	87	0.1	18.4	81.5	0	1
25	120213	전라남도	고흥군	영남면	368	0.1	18.4	81.5	0	6
26	120214	전라남도	고흥군	점암면	988	0.1	18.4	81.5	1	18

그림 95. Summary file **들을** dbf**로 전환한 모습**

다. ArcView 3.1을 이용한 벼 작황진단 결과의 분석 및 표출

- 정리된 .dbf file들을 표출하기 위해서 먼저 ArcView 3.1을 실행시킨다. View 창의 CZU1455.shp를 클릭한 후, theme table을 연다. 표출하고자 하는 dbf 가 들어 있는 table을 추가하여 연 후 No_myun을 서로 join 시킨다. 아래 그림은 이 과정을 나타낸 것이다.

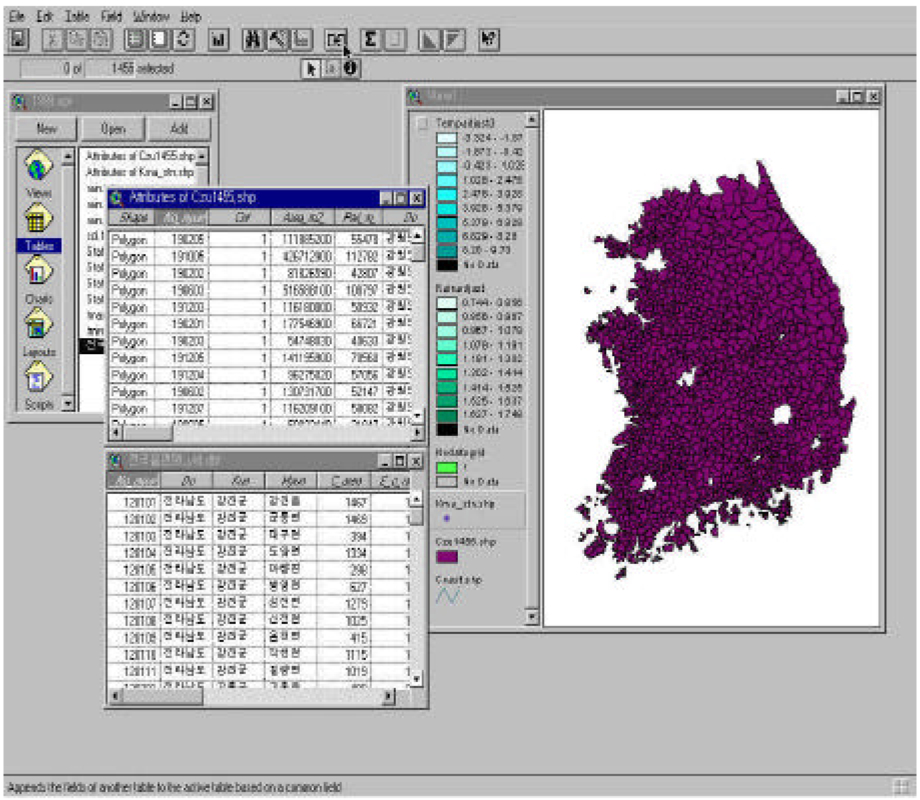


그림 96. Attributes of CZU1455.shp의 table과 표출하고자하는 dbf table의 join

- **이렇게 하여 얻어진** CZU1455.shp table**의 결과를** apply **하면 다음 그림과 같다**.

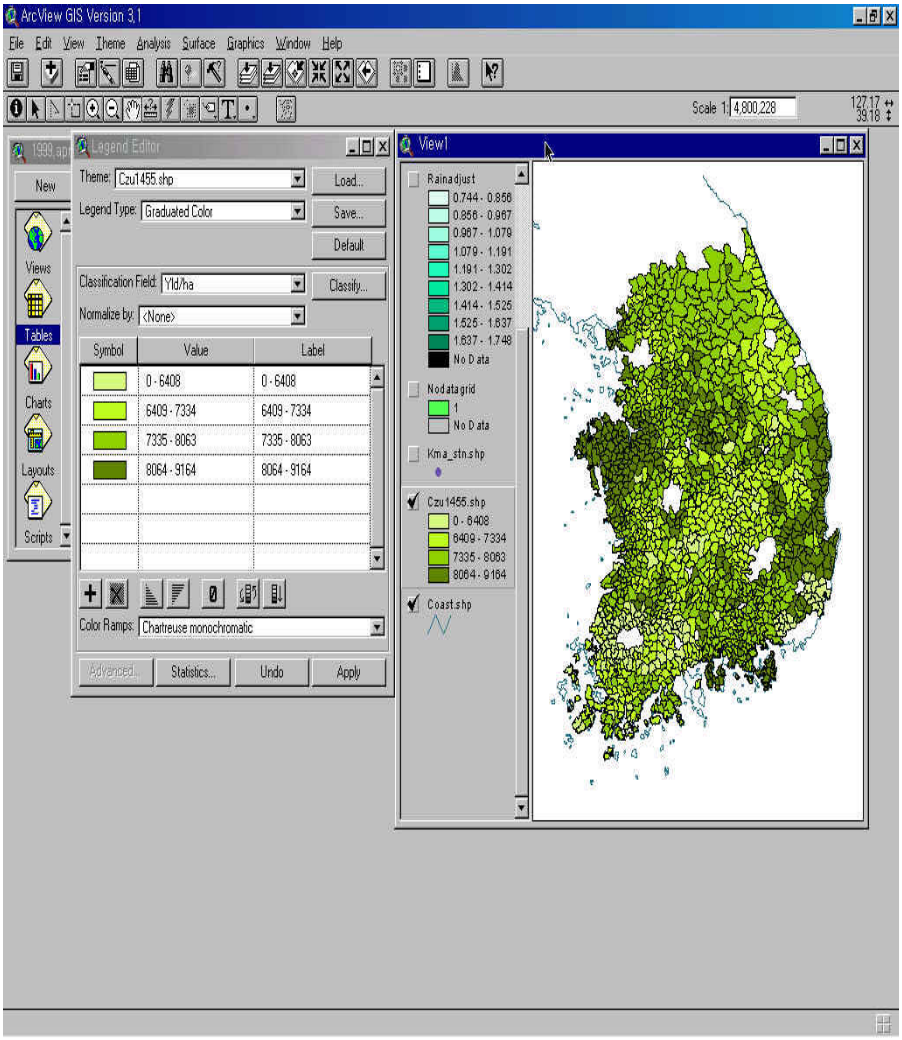


그림 97. Join**시킨** dbf table**의 결과를 적용해서 표출하는 과정**

제 3 절 현업용 시스템 구축

1. 데스크탑 작황진단 프로그램의 필요성

지금까지 살펴 본 농업기상학적 작황진단 과정은 크게 세 단계로 나누어지며 각각 독립적으로 분리운영 해도 문제는 없지만, 일관작업으로 구축하는 것이 시스템의 현업화에 도움이 될 것이다. 기상자료의 준비단계는 기상청 및 (사)한국농림수산정보센터의 협조에 의해 비교적 용이하게 작업자가 획득할 수 있으므로 굳이 일관작업에 포함시킬 이유가 없다. 나머지 두 단계 즉, 모형 구동과 GIS를 이용한 분석과 결과표출은 작업시간의 단축과 운영의 편의를 위해 반드시 통합되어야 한다.

작황진단에 이용되는 작물모형의 적용은 점(point) 단위이므로 입력자료 및 계산결과 역시 점 단위로 표현되어 재배환경의 공간적 변이를 나타내지는 못한다. 하지만 환경변이를 나타낼 수 있을 만큼 충분한 수의 점 자료가 확보된다면 작황의 공간적 변이를 표현할 수 있을 것이다. 문제는 작물의 생육과 재배관리에 관여하는 요인은 매우 다양하며 이들을 정량화 한 정보가 준비되어야만 생육모의가 가능하다는 것이다. 공간변이의 표현이 가능할 정도로 많은 지점의 생육모의를 위해서는 실로 엄청난 량의 정보를 다루어야 한다. 다행히 이들 방대한 정보들은 공통분모로서 재배지역의 지리적 좌표를 공유하므로 토양, 기상, 재배관리정보 등은 지리정보체계(Geographic Information System; GIS)에 의해 가장 효율적으로 처리될 수 있다.

과거에는 작물생장모형 출력물인 숫자로 된 정보를 비교·분석하기 편하게 하기 위하여 스프레드시트(spread sheet) 등을 통해 데이터베이스화하고, 이렇게 데이터베이스화 한 것들을 여러 가지 도구들을 사용하여 도식화하였

다. GIS는 작물모형 계산결과의 데이터베이스화, 분석, 결과표출 등 전과정을 통합해 준다.

컴퓨터 운영환경 면에서 보면 대부분의 작물생장모형은 DOS (Disk Operating System) 환경에서 실행되는 프로그램이고, GIS는 이와는 달리 GUI (Graphic User Interface) 환경에서 실행되는 프로그램이다. 따라서 GIS를 이용한 작황진단, 즉 작황의 공간적인 변이를 분석하기 위해서는 이렇게 서로 다른 두 가지 도구를 통합·연계시킬 필요가 있다.

그 동안 실험실 수준에서 사용되던 컴퓨터 기반 작물 생장모의가 현업차원에서 실용화 추세를 보이고 있다. 즉 과거에는 특정 지점에 국한시켜 그 지점의 기상, 토양, 품종, 재배기술에 고유한 생장모의에 만족했으나 지금은 GIS를 매개로 한 광역 작황진단에 작물생장모형을 이용하게 된 것이다.

이런 작물생육모형과 GIS간의 인터페이스가 제작되면 작황진단의 광역화, 즉, 동시에 넓은 지역의 여러 지점을 모의 실험하여 한눈에 그 공간적 변이를 볼 수 있도록 해줄 수 있다. 작물모형을 다수 지점에 동시 적용하여 광지역적인 작황을 지도상에 비교 분석하는 기능은 특히 정부, 지방자치단체 등 넓은 지역의 농업정책을 관장하는 이들에게 의사지원체계 (decision-making support system)로 그 효과를 발휘할 수 있다. 이런 광역 작황 진단을 위해서는 모형과 GIS 및 공간 database의 결합이 불가피하다.

최근 넓은 지역의 농업자원 탐색 및 평가를 위해 의사지원체계가 도입되기 시작했는데, 보통 이런 시스템은 database와 전문가시스템(expert system)을 GIS와 결합시킨다. JAMaica Geographic Information System(JAMGIS ; Batjes, 1989), the Dominican Republic Expert Agricultural Geographic Information System (DREAGIS ; Mendez and Grabski, 1992)과 같은 시스템들은 데이터베이스와 수치지도를 이용하여 각 나라의 토지이용도를 평가하고자 하는 목적으로 설계되었다. 푸에르토리코의 농업환경지리정보시스템

(Calixte et al., 1992)은 작물모형을 기반으로 토지이용전략을 수립하기 위해 GIS를 활용하였고, 이어서 개발된 AEGIS-2 (Papajorgji et al., 1993)는 IBSNAT (International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer)의 작물모형 패키지와 GIS 소프트웨어 ARC/INFO를 결합함으로써 지역에 상관없이 사용이 가능토록 하였다. 이 밖에도 실험실 혹은 농장 수준에서 사용 가능한 GIS-작물모형 결합시스템이 다양하게 개발되었다 (Wei et al., 1994).

그러나 이들 시스템을 이용하기 위해서는 구입비용이 만만찮은 UNIX용 GIS 소프트웨어를 구입해야 하고, 또한 GIS사용법을 알아야 하기 때문에 작물모형 이용자들에게 널리 보급되지는 못했다. 이러한 결점을 개선하기 위해 Engel et al.(1997)은 데스크탑용 GIS인 ArcView (ESRI, 1996) 환경에서 IBSNAT 작물모형을 이용할 수 있는 AEGIS/WIN을 개발하였다.

우리 나라에서는 윤 등(1997A)이 경북 안동지역에 건설된 다목적댐에 의해 생성된 대규모 저수지가 주변지역의 기후 및 농업생산성에 미치는 영향을 작물모형과 ARC/INFO를 이용하여 분석하였으며, 같은 방법으로 주암 다목적댐 건설이 주변지역 농작물 생산성에 미치는 영향을 연구하였다(윤 등, 1997B). Yun and Taylor(1998)는 지온 예측모형을 ARC/INFO와 결합하여 경사진 농경지의 지온 공간변이를 추정하였다. 그러나 이들 연구는 목적에 따라 농업모형과 GIS를 각각 별도로 이용하였을 뿐, 둘 사이의 연결을 위한 인터페이스를 제작한 것은 아니다.

본 연구는 남한 전역을 읍면 단위의 중규모 기후권으로 구분하여 각각에 대해 벼의 작황을 작물모형에 의해 추정하여 주요 결과의 공간변이를 분석하고 표출하는 전과정을 생장모형과 GIS간 인터페이스 제작에 의해 통합하고자 하였다. 이렇게 함으로써 입력자료만 준비되면 누구나 자신의 데스크탑을 이용해 비교적 간단히 작황을 진단하고 그 공간변이를 분석할 수 있어 현업

차원에서 큰 도움이 될 것으로 기대된다.

2. 시스템 설계

작황진단을 위한 작물모형으로서는 선행연구에서 사용한 DSSAT (Decision Support Systems for Agrotechnology Transfer; Tsuji et al., 1996), 데스크탑 GIS로는 ArcView GIS(ESRI, 1996)를 선정하였으며, 작황진단의 대상지역은 제주도를 제외한 전국의 각 도, 공간단위는 읍면으로 설정하였다.

DSSAT은 전세계적으로 연구, 교육, 지도 프로그램에 널리 사용되어 충분히 검증된 작물모형 패키지이다. 최근에 발표된 Version 3.5는 화곡류 생장모형 CERES와 콩과식물 생장모형 CROPGRO를 주축으로 모두 16개의 작물생육을 모의할 수 있다. 이들 모형 모두 동일한 입출력 파일 양식을 요구하며, 현재 세계적인 표준으로 자리잡고 있다(Jones and Tsuji, 1996).

ArcView GIS는 ESRI (Environmental Systems Research Institute)에서 개발한 데스크탑 GIS로서 다양한 운영체제(Windows 95/98/NT, UNIX)에서 사용이 가능하며, 일반인들도 비교적 쉽게 접근할 수 있는 지리정보시스템 소프트웨어이다. 본 연구에서 사용한 Version 3.0a는 MS-Windows용으로서 기존의 ARC/INFO coverage를 사용할 수 있고, Shape file format을 바탕으로 기존의 파일을 편집하거나 새로운 지도를 작성하는 도구들도 제공한다.

이들 두 소프트웨어의 인터페이스 제작에는 객체지향언어 (Object - Oriented Programming Language)의 일종으로서 ArcView 소프트웨어에 포함된 Avenue(ArcView scripts macro language)를 이용하였다. 이 인터페이스는 모형 구동, 출력자료의 속성테이블(attribute table)화, GIS 기능을 이용

한 그래픽(shape, coverage 등) 표출 및 간단한 분석 모듈(analysis module)로 구성되도록 하였다.

본 연구에서는 Avenue를 사용하여 광역작황진단에 필요한 최소한의 기능을 구현하는 102개의 스크립트를 작성하였다. 본 시스템의 개략적인 구조는 Fig. 22와 같다.

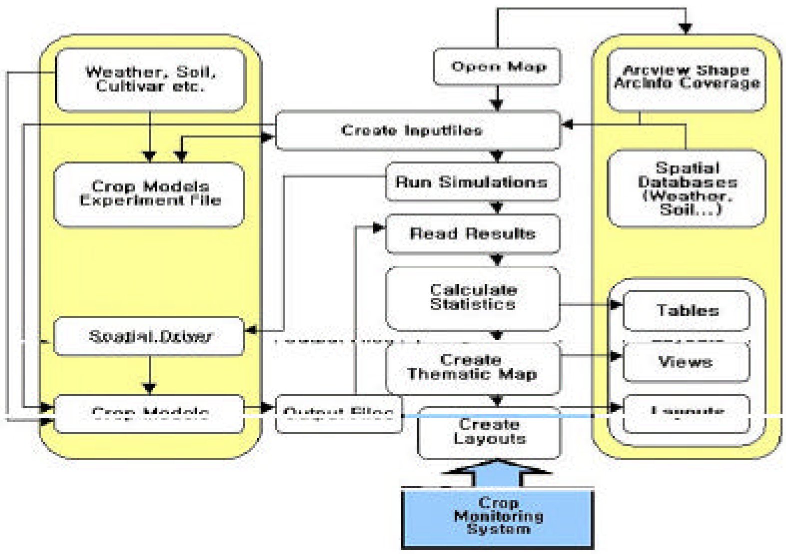


Fig. 22 System structure

이 시스템은 Microsoft Windows 운영체제 하에서 구동되며, 작황진단 대상 지역의 수치지도를 선택하면 작황진단의 최소단위(Cultivation Zone Unit, CZU)별로 준비된 기상 및 토양 파일이 열리도록 하였다. 수치지도로는 Shape file이나 ARC/INFO Coverage를 사용하며, 사용자가 시스템 내에서 CZU별 재배관리정보를 갱신할 수 있다. 원하는 기간 동안의 생육모의가 끝나면 각 출력변수(출수기, 생리적 성숙기 등 발육변수, 엽면적지수, 수량구성요소 등 생장변수, 최종 수량 등)에 대해 주제도(thematic map)를 만들 수 있

고, 나아가 변수들간의 관계나 재배면적을 고려한 총생산 분포 등을 분석할 수 있다.

이러한 기능을 갖도록 하기 위해 수치지도 생성 및 읽기, 작물모형 구동, 모형 구동결과의 속성정보화, 속성정보화 된 결과의 분석도구, 가시화(도표, 차트) 등의 단계가 시스템에 포함되도록 하였다.

3. 전국 읍면 단위 벼 작황진단 적용

가. 수치지도 및 공간속성정보

수집 가능한 자료의 공간해상도를 고려하여 설정한 작황진단의 최소 공간 단위(CZU)는 총 1,455개로서 같은 수의 polygon으로 구성된 shape 파일 양식의 수치지도로 만들었다. 하나의 재배구역 내에서는 품종, 토양특성, 기상, 재배법 등이 모두 동일하다고 가정하였다.

기상 및 토양자료는 제 3 장에서 설명한대로 신 등(1999)의 방법에 의해 한국농림수산정보센터에서 생산하는 읍면단위 재배구역별 기상자료를, 농업과학기술원에서 생산한 전국 읍면별 토양자료를 사용하였다. 읍면별 재배관리정보 역시 제 3 장에서 사용한 시험장별 표준재배법(농촌진흥청, 1997)을 해당 도내 모든 CZU에 공통으로 적용하였다. 품종은 조생종, 중생종, 중만생종 가운데 사용자가 선택할 수 있도록 하였다.

나. 프로그램 설치

본 시스템을 사용하기 위해서는 먼저 ArcView GIS 3.1과 DSSAT v3.5를 설치하여야 한다. DSSAT v3.5는 도스용 프로그램이기 때문에 기본메모리

가 590 kilo bytes 이상 되어야 하고, 하드디스크는 25 mega bytes의 여유공간만 있으면 된다. ArcView GIS 3.1는 Windows 95/98(혹은 NT 4.0) 상에서 운영되며 설치에 필요한 하드디스크의 여유공간은 84 mega bytes이다.

다음에는 본 시스템 프로그램을 복사하는데, CFS.apr (Crop Forecast System, ArcView Project file), Rice_*.shp (벼 생육모의를 위한 수치지도), Rice_*.shx (인덱스 파일), Rice_*.dbf (속성정보) 등 GIS관련 파일과 kh??990?.rix (실험설계파일), kh??*.wth (기상정보), kh.sol (토양정보), exp.lst (실험목록), output.lst (결과파일 목록) 등 작물모형과 관련된 파일들이다. 이 중 CFS.apr를 ArcView 상에서 구동시킴으로써 본 시스템이 시작된다.

다. 시스템 운영

이 시스템을 이용하여 전국의 벼 작황진단을 하기 위해 필요한 첫 단계는 각각의 CZU로 구성된 각도별 shape 파일(Rice_??.shp)을 불러오는 일이다. 각 CZU에는 속성정보로서 고유의 식별번호가 붙어있으며, 이 식별번호는 모형구동에 필요한 기상 및 토양 속성 파일의 식별번호와 연계되어있다(Fig. 23). 하나의 CZU 내에서는 기상이나 토양 면에서 공간적 변이를 무시할 수 있다고 가정하며, 재배품종 및 관리법 역시 동일하다고 전제한다. 각 CZU(polygon)에는 생육모의 후 총 생산량 추계를 위해 벼 재배면적이 속성정보로 부가되어있다. 이것은 1995년 농업총조사자료(농림부, 1996; CD-ROM에 수록)로부터 얻어졌다.

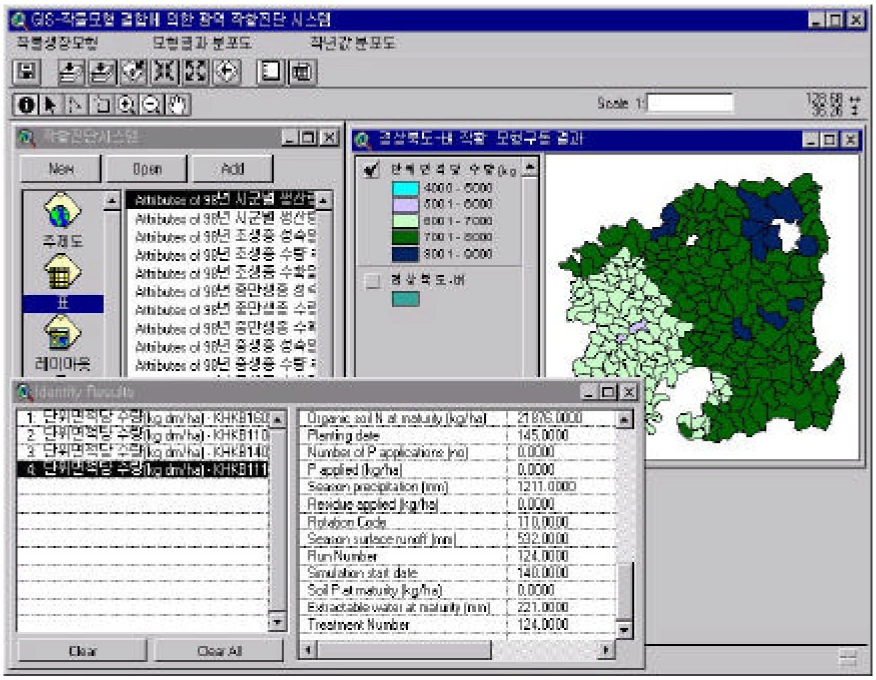


Fig. 23 Start of the rice crop evaluation program.

다음에는 각 CZU별 재배관리 시나리오를 정해준다. 실험설계파일에 바로 이들 시나리오가 수록되어 있는데, 필요하다면 이 단계에서 정보를 갱신할 수 있다. 이 파일에는 각 CZU별로 어떤 품종이 몇 일날 어떤 방식으로 파종되었는지 등이 구체적으로 명시되어 있다. 전국 작황진단용 실험설계 파일에는 전국 모두 1,455개의 "처리"(treatment) 내용이 들어있다. 사용자는 shape file의 속성테이블에 토양과 기상관측소의 코드를 추가시켜주어야 한다. 이것이 각 CZU에 작물모형의 구동결과를 결합할 수 있는 매개체가 된다. 이 정보는 작물모형의 입력자료에서도 마찬가지로 정의된다.

여기서 메뉴를 선택함으로써 작물모형을 구동시킬 수 있고 그 결과는 ASCII 텍스트 형태의 파일에 저장된다. 이 것은 다시 각 CZU 식별번호를 토대로 ArcView shape file의 속성테이블로 읽어들여지므로 ArcView의 공간분

석기능, 지도 출력기능을 이용할 수 있도록 된다. 모형구동결과 가운데 단위면적당 수량의 분포와 이미 속성정보로 포함되어 있는 식부면적으로 곱한 생산량의 분포를 주제도로 나타낸 것이 Fig. 24 이다. 계산된 생산량을 시군별로 평균하였고, 그 분포를 농림부 추계자료와 비교한 것이 Fig. 25 이다.

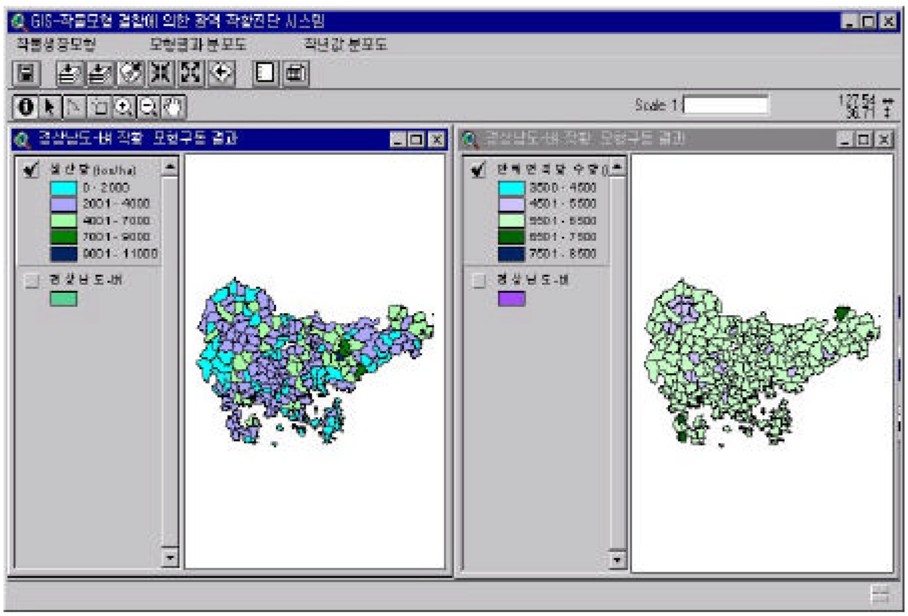


Fig. 24 A sample screen showing the rice yield variation in Kyungnam Province and the estimated crop size of each CZU based on the 1995 acreage survey.

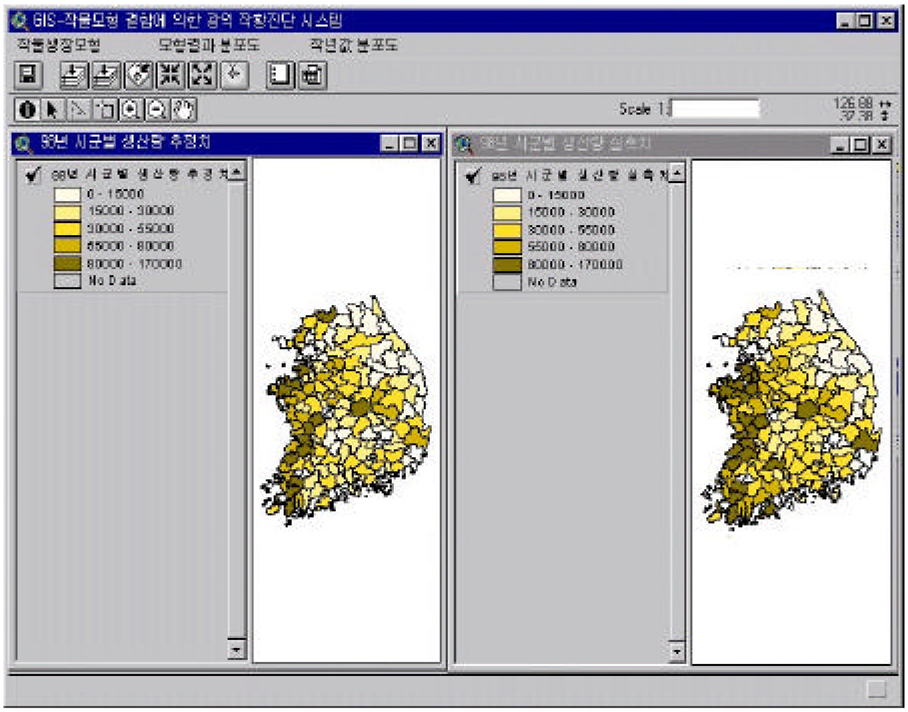


Fig. 25 A sample screen for comparing the simulated(left) and the MAF reported rice production(right) of each County.

제 4 절 작황진단 결과

위의 과정을 토대로 하여 1999년 9월 30일까지의 일기상자료는 실측 data를 사용하고 10월 1일부터 12월 30일까지는 1998년 일기상자료를 사용하여 작황진단을 한 결과 중, 벼의 수량(kg/ha)을 보면 전국적으로 정조 기준 4,825 kg/ha에서부터 9,577 kg/ha까지 분포하는데, 경기도 북동부, 강원도 북서부, 경북 동해안, 충북 및 충남 서부 지방에서 높은 수량 모의 결과를 보여주고 있다. 일기상자료의 완전한 관측이 이루어지는 내년 초에는 정확한 작

황 모의가 가능하리라 생각되며 아울러 실제 수량과의 비교도 가능하리라 생각된다.

`98년과 `97년의 벼 생육을 조생종은 오대벼, 중만생종은 팔공벼, 만생종은 동진벼의 품종모수를 각각 적용하여 simulation 한 후 읍면별 수량 평균값을 계산하였다. `98년의 경우 읍면별로 3,488  7,730 ㎏/ha의 벼 수량 분포를 나타내었으며, `97년 모의 결과, 6,765 9,008 ㎏/ha의 벼 수량 분포를 나타내었다. `97년 실제 벼 수량은 4,620  7,970 ㎏/ha, `98년 실제 벼 수량은 4,500 7,500 ㎏/ha으로 보고되었다.

1999년 벼의 작황을 모의한 결과, 최종수량은 표 1과 같은데 전국 평균 7,331 ㎏/ha의 수량을 나타내었고 가장 높은 수량을 보인 지역은 강원도로 7,906 ㎏/ha의 수량을 보인 반면 전라남도에서 6,676 ㎏/ha의 수량으로 가장 낮게 나타났다. 조생종인 오대벼의 전국 평균 수량은 6,687 ㎏/ha, 중만생종인 팔공벼는 7,331 ㎏/ha, 만생종인 동진벼는 7,014 ㎏/ha의 수량은 나타내었다. 오대벼의 경우, 강원도에서 7,467 ㎏/ha를 나타내어 가장 높은 수량을 보였고

표 1. `99년 작황모의결과 품종별 벼 수량(㎏/ha)

도	오대벼	팔공벼	동진벼	평균
강 원	**7,467**	7,597	**8,665**	**7,906**
경 기	6,667	7,226	8,283	7,392
경 남	6,480	7,283	8,299	7,354
경 북	6,322	7,377	8,205	7,301
전 남	6,660	**6,955**	**6,413**	**6,676**
전 북	**5,990**	6,957	7,813	6,915
충 남	6,523	7,521	8,522	7,518
충 북	7,465	**7,733**	7,561	7,586
전 국	**6,697**	**7,331**	**7,014**	**7,331**

전라북도에서 5,990 ㎏/ha를 나타내어 가장 낮은 수량을 나타내었다. 팔공벼의 경우, 충청북도에서 7,733 ㎏/ha를 나타내어 가장 높은 수량은 보였고 전라남도에서 6,955을 나타내어 가장 낮은 수량을 보였다. 동진벼의 경우, 강원도에서 8,665 ㎏/ha를 나타내어 가장 높은 수량은 보였고 전라남도에서 6,413 ㎏/ha를 나타내어 가장 낮은 수량을 보였다.

1998년 벼의 작황을 모의한 결과, 수량을 살펴보면 표 2와 같은데, 작황 모의 결과 전국 평균 수량은 5,547 ㎏/ha를 나타내었고 가장 수량이 많은 지역은 강원도로 6,218 ㎏/ha을 보인 반면 가장 적은 수량을 보인 지역은 경상북도로 5,046 ㎏/ha이었다. 조생종인 오대벼의 경우 전국 평균은 4,799 ㎏/ha를 나타내었고 강원도에서 5,475 ㎏/ha의 수량을 보여 가장 많은 수량을 나타내었고 경상남도에서 4,034 ㎏/ha으로 가장 적은 수량을 나타내었다. 중만생종인 팔공벼의 경우 전국 평균은 5,391 ㎏/ha 이었으며 강원도에서 6,395 ㎏/ha이 수량으로 가장 많게 나타났고 경상남도에서 4,033 ㎏/ha로 가장 적게 나타났다.

표 2. `98년 작황모의결과 품종별 벼 수량(㎏/ha)

도	오대벼	팔공벼	동진벼	평균	보고자료
강 원	**5,475**	**6,395**	6,784	**6,218**	**5,890**
경 기	4,751	5,409	6,337	5,499	6,227
경 남	**4,034**	**4,033**	**4,648**	5,138	6,063
경 북	4,533	5,037	5,568	**5,046**	5,957
전 남	4,648	5,409	5,951	5,336	6,588
전 북	4,448	5,334	5,882	5,221	6,745
충 남	5,232	5,641	6,821	5,898	**6,796**
충 북	5,273	5,872	**6,908**	6,018	6,328
전 국	**4,799**	**5,391**	**6,112**	**5,547**	**6,324**

만생종인 동진벼의 경우 전국 평균은 6,112 ㎏/ha으로 나타났으며 6,908 ㎏/ha을 나타낸 충청북도에서 가장 많은 수량을 보인 반면 4,648 ㎏/ha을 나타낸 경상남도에서 가장 적은 수량을 보였다. 1998년 보고자료에 의하면 전국 평균 수량은 6,324 ㎏/ha으로 나타났으며 충청남도에서 6,796 ㎏/ha으로 가장 많은 수량을 보인 반면 강원도에서 5,890 ㎏/ha으로 가장 적은 수량을 보였다.

1997년 벼 작황 모의 결과 품종별 수량을 나타내면 표 3과 같은데, 모의결과 전국 평균은 7,145 ㎏/ha로 나타났으며 충청북도가 7,584 ㎏/ha의 수량으로 가장 많은 것을 알 수 있으며 6,788 ㎏/ha를 나타낸 전라남도가 가장 적은 것을 알 수 있다. 조생종인 오대벼의 경우 전국 평균은 6,371 ㎏/ha으로 나타났으며 전라북도가 6,736 ㎏/ha를 기록하여 가장 많은 수량을 기록한 반면 5,922 ㎏/ha을 기록한 경상남도가 가장 적게 나타났다.

표 3. `97년 작황모의결과 품종별 벼 수량(㎏/ha)

도	오대벼	팔공벼	동진벼	평균	보고자료
강 원	-	7,161	7,388	7,275	**6,373**
경 기	6,048	6,763	7,992	6,934	6,465
경 남	**5,922**	**6,681**	7,776	6,793	6,497
경 북	6,448	7,096	8,082	7,208	6,727
전 남	6,308	7,088	**6,968**	**6,788**	7,120
전 북	**6,736**	6,865	7,702	7,101	7,019
충 남	6,474	7,372	8,589	7,478	**7,450**
충 북	6,658	**7,462**	**8,632**	**7,584**	6,757
전 국	**6,371**	**7,061**	**7,891**	**7,145**	**6,807**

중만생품종인 팔공벼의 경우 전국 평균은 7,061 ㎏/ha으로 나타났으며 충청북도에서 7,462 ㎏/ha으로 가장 많은 수량을 보인 반면 6,681 ㎏/ha의 수량을 보인 경상남도가 가장 적게 나타났다. 만생중인 동진벼의 경우 전국 평균이 7,891 ㎏/ha으로 나타났으며 가장 많은 수량을 나타낸 지역은 충청북도로서 8,632 ㎏/ha을 나타내었고 가장 적은 수량을 나타낸 지역은 6,968 ㎏/ha의 수량을 보인 전라남도였다. 1997년 보고자료에 의하면 전국 평균은 6,807 ㎏/ha로 나타났으며 가장 많은 수량을 보인 지역은 충청남도로서 7,450 ㎏/ha를 나타내었으며 강원도에서 6,373 ㎏/ha의 수량을 보여 가장 적게 나타났다.

이 장에서는 생장모형과 GIS간 인터페이스를 바탕으로 남한 전역의 읍면 단위 작물모형 구동과 그 결과의 공간변이 분석, 그리고 표출 등 전체과정을 단일 운영체제 및 하드웨어 상에서 구현함으로써 현업화를 촉진시킬 수 있는 발판을 마련하였다. 이렇게 만들어진 “데스크탑용” 작황진단체계는 입력자료만 준비되면 누구나 자신의 데스크탑을 이용해 비교적 간단히 작황을 진단하고 그 공간변이를 분석할 수 있어 현업차원에서 큰 도움이 될 것으로 기대된

다.

인용문헌

과학기술처, 1992: **전국 그물망기후값 추정 및 기후도 작성 연구**(III). 379pp.

농림부, 1988 1997: **미곡 및 맥류생산량**, **농림통계연보**.

농림부 농업통계정보관실, 1995: '95 **농업총조사**.

농촌진흥청, 1989-1997: **벼 작황 진단시험**. **작황시험보고서**.

신만용, **윤진일**, **서애숙**, 1999: **공간통계기법을 이용한 전국 일 최고/최저기온 공간변이의 추정**. **대한원격탐사학회지** 15(1), 9-20.

윤진일, **황규홍**, **정현향**, **신만용**, **임준택**, **신진철**, 1997B: **주암 다목적댐 건설에 따른 국지기후 변화가 농작물 생산성에 미치는 영향**. **한국기상학회지**, 33(3), 409-427.

윤진일, **황재문**, **이순구**, 1997A: **임하 다목적댐 건설 후 주변지역 기후 및 작물생산력 변화**. **한국작물학회지**, 42(5), 579-596.

조경숙, **윤진일**, 1999: **일기상자료에 의한 읍면별 벼 작황진단 및 쌀 생산량 예측**. **한국농림기상학회지**, 1(1), 12-19

Batjes, N. H., 1989: *Matching of land use requirements with land qualities using the Jamaica physical land evaluation system*. Tech. Bull. 15. Soil Survey Project (RRPD), Kingston, Jamaica.

Calixte. J. P., J. W. Jones, and H. Lal, 1992: *Developer's guide for AEGIS v1.00*, Agric. Eng. Dep., Univ. of Florida, Gainsville, FL.

Engel, T., G. Hoogenboom, J. W. Jones, and P. W. Wilkens, 1997: A computer program for the application of crop simulation models across geographic areas. *Agronomy Journal*, 89, 919-928.

Engel, T., and J. W. Jones, 1995: *AEGIS/WIN User's Manual,* Agricultural and Biological Engineering Department, University of Florida, Gainesville, FL.

Engel, T., J. W. Jones, G. Hoogenboom, 1995: Visualization and comparison of crop simulation results using AEGIS/WIN. In: *Proceedings of 25th annual workshop on crop simulation.*

ESRI, 1996: *ArcView, The Geographic Information System for Everyone,* Environmental Systems Research Institute, Inc., Redlands, CA.

ESRI, 1996: *Using Avenue: Customization and Application Development for ArcView.* Environmental Systems Research Institute, Redlands, CA.

Lal, H., G. Hoogenboom, J. P. Calixte, J. W. Jones, and F. H. Beinroth, 1993: Using crop simulation models and GIS for regional productivity analysis. *Trans. ASAE,* 36, 175-184.

Mendez, D., and S. V. Grabski, 1992: A knowledge-based agricultural geographic information system for the Dominican Republic. In: C. K. Mann and S. R. Ruth (eds.) *Expert system in developing countries: Practice and promise.* Westview Press, Boulder, CO, p127-145.

Papajorgji, P., J. W. Jones, J. P. Calixte, F. H. Beinroth, and G. Hoogenboom, 1993: A generic geographic decision support system for estimating crop performance. In: Proceedings *"Integrated Resource Management and Landscape Modifications for Environmental Protection".* ASAE. St. Joseph, MI, p 340-348.

Thornton, P. K., G. Hoogenboom, P. W. Wilkens, and W. T. Bowen, 1995: A computer program to analyze multiple-season crop model outputs. *Agronomy Journal,* 87, 131-136.

Thornton, P. K., H. W. G. Booltink, and J. J. Stoorvogel, 1997: A computer program for geostatistical and spatial analysis of crop model outputs. *Agronomy Journal,* 89, 620-627.

Tsuji, G. Y., G. Uehara, and S. Balas (Eds.), 1996: *DSSAT version 3.* IBSNAT, University of Hawaii, Honolulu, HI.

Wei, Y., G. Hoogenboom, R. W. McClendon, and D. D. Gresham, 1994: Impact of climate change on crop production at a farm level. *ASAE. Paper* 94-3523.

Yajima, M., 1996: Monitoring and forecasting of rice growth and development using crop-weather model. In: R. Ishii and T. Horie(eds.), *Crop Research in Asia: Achievements and Perspective.* Asian Crop Science Association, p280-285.

Yun. J. I., and S. E. Taylor, 1998: Modeling soil temperature of sloped surfaces by using a GIS technology. *Korean J. Crop Sci.*, 43(2): 113-119.

제 6 장 결 론

지난 4년간 기상청-대학-연구소-정보제공기관이 보기 드문 협동관계를 구축하여 전국 1,455개 작황진단구역별로 토양, 재배관리 등 기본정보는 물론, 일 기상자료 역시 매일 갱신하여 다양하게 활용하고 있다. 우선 기상청 발표 단기예보(70여개 지점)를 읍면 단위로 세분하여 (사)한국농림수산정보센터에서 인터넷(http://weather.affis.or.kr)과 피시통신을 통해 무료로 제공하고 있다(AFFIS1500). 나아가 이들을 토대로 농업과 보다 관련이 깊은 작물의 생장도일(Growing Degree Days) 등, 기후지수(Agroclimatic Index)를 계산하여 역시 AFFIS1500 농업기상정보 서비스를 통해 제공하고있다.

이들 자료의 입력에 의해 생산되는 작황진단 정보를 쉽게 배포하기 위해 그 동안 경희대학교 농업기상연구실 서버(http://aegis.kyunghee.ac.kr)에 작황예보 메뉴를 추가하였으며, 생산되는 기상실황 및 작황정보map을 image 파일로 변환하여 게시하여 왔다. 앞으로는 작황진단시스템 시작품이 설치되어 있는 농업과학기술원에서 현업으로 이 작업을 수행하게될 것이다.

전국 농업기상 감시 및 작황진단체계가 기관업무로서 정착되고 발전하기 위해서는 그러나 풀어야 할 숙제가 있다. 한 가지는 유관기관 상호간의 의식공유 혹은 지속적인 협력관계 유지이다. 우리 농업과 농민, 나아가 국가를 위한 공통의 목적의식이 기관 혹은 집단이기주의 때문에 흐려지는 경우가 가끔씩 있다. 어떤 기관도 이 목적 달성을 위해 필요한 모든 일을 홀로 할 수는 없다. 다른 하나는 새로이 개발된 이 업무를 주관할 기관에서 기관장의 확고한 의지가 선행되어야 한다는 점이다. "농업은 농진청, 기상은 기상청" 식의 사고방식은 21세기 다원화 사회를 리드할 지도자로서는 버려야 할 유산이다. 양자의 중간에 위치한 농업기상업무가 국가 전체에 미치는 영향을 진지하게 생각하고, 과연 이 업무를 수행하기에 부족함은 없는지 주관부서의 업무수행

능력(시설, 장비, 인력, 예산 등)을 꼼꼼히 점검해야 할 것이다.

대기환경 감시 분야에서는 에디 공분산 방법을 이용한 미기상학적 플럭스 관측 시스템을 개발하였으며, 국내 및 국제 공동 야외 실험에 직접 참여하여 개발된 시스템을 활용, 평가하였다. 또한 이 에디 공분산 기술과 첨단 레이저 분광 기술을 접목하여 메탄, 이산화탄소 및 산화 질소 등의 온실 기체 플럭스를 감시할 수 있는 시스템을 개발하였으며, 다양한 생육기간 동안 벼 군락에서의 메탄, 증발산 및 현열 플럭스를 성공적으로 관측하였다. 이러한 야외 관측 자료와 Penman-Monteith 복합 방정식을 근간으로 해서, 자동 기상 관측소의 기본적인 기상 자료를 사용하여 실제 증발산을 산출해 낼 수 있는 경험식들을 도출하고 검증하였다.

이 같은 경험을 토대로 농업 생태계의 대기 환경을 감시할 수 있는 첨단 시스템을 성공적으로 개발하였다. 이 시스템은 지표 에너지 플럭스(순복사, 토양열 플럭스, 현열 및 잠열 플럭스)와 온실 기체 플럭스(메탄, 이산화탄소, 산화 질소), 식물 생리(광합성, 호흡, 증산 및 기공 전도도 등), 그리고 일반 기상 변수(온도, 습도, 풍속 및 풍향, 대기 안정도, 지표면 거칠기 등)의 정보를 정확히, 그리고 연속적으로 제공할 수 있다.

이 시스템으로부터 유도된 정보들을 사용하여 실제 증발산을 예측한 예비 시험 결과에 의하면, 개발된 시스템이 앞으로 변해 가는 생물-대기 간의 상호작용을 연구할 수 있는 생권 모형의 개발과 활용에 매우 효과적으로 쓰일 것으로 확인되었다.

그러나 급속한 환경변화와 이것이 농업 생태계에 미칠 지대한 영향에 대한 우리의 우려를 명쾌히 해결하기 위해서는 개발된 플럭스 관측시스템의 장기 운영을 통한 감시 프로그램의 활성화와 이를 위한 정부의 지속적인 지원이 필수적임을 강조하지 않을 수 없다.