

일기상자료에 의한 읍면별 벼 작황진단 및 쌀 생산량 예측

조경숙· 윤진일

경희대학교 생명자원과학연구원/농학파, 경기도 용인시 기흥읍 서천리, 449-701

(1999년 6월 23일 접수)

**Regional Crop Evaluation and Yield Forecast of Paddy Rice Based on  
Daily Weather Observation**

**Kyung Sook Cho· Jin-II. Yun**

Institute of Life Science and Natural Resources/Department of Agronomy

Kyung Hee University, Suwon 449-701, Korea

(Manuscript received 23 June 1999)

**ABSTRACT**

CERES-rice, a rice growth simulation model, was used in conjunction with daily weather data to figure out the spatial variation of the phenology and yields of paddy rice at 168 rice cultivation zone units(CZU) of Kyunggi Province in 1997. Two sets of cultivar specific coefficients, which represent early and mid-season maturing varieties, were derived from field experiments conducted at two crop experiment stations. The minimum data set to run the model for each CZU (daily maximum and minimum temperature, solar irradiance, and rainfall) was obtained by spatial averaging of existing "Digital Map of Korean Climate"(Shin et al., 1999). Soil characteristics and management information at each CZU were available from the Rural Development Administration. According to a preliminary test using 5 to 9 years field data, trends of the phasic development(heading and physiological maturity), which were obtained from the model adjusted for these coefficients, were in good agreement with the observed data. However, the simulated inter-annual variation was somewhat greater than the reported variation. Rough rice yields of the early maturing cultivar calculated by the model were comparable with the reported data in terms of both absolute value and inter-annual variation. But those of the mid season cultivar showed overestimation. After running the simulation model runs with 1997 weather data for 168 CZU's, rough rice yields of the 168 CZU's calculated by the model were aggregated into corresponding 33 counties by acreage-weighting to facilitate direct comparison with the reported statistics from the Ministry of Agriculture and Forestry. The simulation results were good at 22 out of the 26 counties with reportedly increasing yield trend with respect to the past 9 years average.

Key Words : Rice, crop model, daily weather observation, yield forecast, GIS

---

Corresponding author : Kyung Sook Cho(cks0716@yahoo.com)

이 논문은 농림부의 1995년도 첨단농업기술 개발과제 "전국 농업기상 감시 및 실시간 작황 진단 체계 구축"(분류번호 295133-4)의 일환으로 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

## 서 언

벼의 작황(作況)은 여러 가지 요인들에 의해 결정되겠지만 그중에서도 날씨의 거의 절대적인 영향을 끼친다. 최근 들어 빈발하는 기상이변과 기후변동폭의 증대는 쌀을 주식으로 하는 우리나라의 경우 작황부진에 따른 국가적 식량수급의 불안정을 가져올 가능성도 있다. 이런 현실에 능동적으로 대응하기 위한 방안들 가운데 작물생육모형을 이용한 다양한 기후하의 작황진단기법은 작물이 수확되기 한두 달 전부터 미리 예상수확량을 산정할 수 있도록 해 주므로 식량수급정책의 의사지원도구로서 주목받고 있다.

작물생육모형은 작물의 광합성 같은 주요 생리작용을 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 벼 품종에 맞게 조정되어야 한다. 또한 이 지역의 토양특성과 재배관리정보가 준비되어야 하며, 마지막으로 기온, 일사량, 강수량 같은 매일 매일의 기상자료가 필요하다. 이렇게 입력자료가 갖추어진 생육모의일지라도 벼의 생육과 수량에 미치는 모든 요인을 완전히 고려하지는 못하므로 생육모의에 의한 작황은 실제작황과 차이가 있을 수 있다.

전국적인 벼의 작황은 공식적으로 매년 8월 15일, 9월 15일, 그리고 실수확기에 5,000내지 10,000개 표본구에서 직접 생육 및 수량조사를 통해 관찰되고 있다(농림부, 1997). 이러한 형태의 작황조사는 그 결과의 신뢰성이 매우 높기 때문에 작물모형에 의한 작황진단결과를 검증하는데 이용할 수 있다. 한편 작물모형에 의한 작황진단의 신뢰도가 확

보된다면 기존의 세 시기 외에 연중 필요한 시기에 작황진단을 할 수 있을 것이다.

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 영향을 미치는 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-rice와 CERES-wheat를 동시에 인도 북서부지역에 적용시켜, 대기중 이산화탄

소의 배증에 따른 기후변화가 발생했을 때 벼와 밀의 수량이 각각 28%, 15%씩 증가할 것이라 하였고, 특히 발육에 있어 밀은 최고 기온의 증가에 민감하게 반응하나 벼는 최저 기온 증가에 취약점을 보일 것이라고 예측했다. 오(1995)는 이 모형을 국내에 적용하여 이산화탄소 배증 시나리오기후 하의 쌀생산을 추정하였다.

본 연구는 벼 생육모형 CERES-rice를 이용한 작황예보의 국내 실용화 가능성을 타진하고자 경기도 내 168개 읍면에 대해 1997년도 벼 생육을 모의하여 그 결과를 농림부 작황조사자료와 비교하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 생육모형

CERES-rice는 기상, 토양, 재배관리정보 및 품종특성모수 자료를 입력받아 작물의 성장과 발육을 모의하는 생태계 모형으로서 여러 개의 모듈로 이루어져 있다(Fig. 1). PROGRIMODULE에서 프로그램의 이름과 품종특성모수 등과 같은 입력된 모수(parameter)들을 인식하고 모의과정에 요구되는 변수(變數)들을 초기화시킨다. SOILRI모듈은 토양과 일에서 토심과 수분에 관한 정보를 읽고, WATBAL모듈에서는 토양근권(土壤根圈)의 물 수지(收支)를 계산하게 된다. PHASEI 와 PHENOL모듈에서는 작물의 발육 정도를 단계별로 구분하여 계산한다. 구체적으로 벼의 발육단계는 ①파종기에서 발아기, ②발아기에서 출현기, ③출현기에서 유묘기, ④유묘기에서 유수형성기(幼穗形成期), ⑤유수형성기에서 출수기(出穗期), ⑥출수기에서 등숙초기(登熟初期), 그리고 ⑦등숙초기에서 생리적 성숙기로 구분되며, 각 단계별로 GROSUB모듈이 호출되어 성장량을 계산한다. 특히 PHENOL 과 GROSUB에서는 입력받은 품종모수에 의해 품종의 특성이 반영되도록 설계되어있다(Jones and Kiniry, 1986). 따라서 벼의 생육을 모의하기 위해서는 영양생장기

간, 등숙기간, 광이용효율과 같은 유전적 특성을 정량화시킨 품종특성모수 (cultivar-specific coefficients)를 미리 알고 있어야 한다.

본 실험에서는 품종별 특성모수를 추정하지 않고 경기도 지방에서 주로 재배되는 조생 및 중생종의 평균적인 품종모수를 추정하였다. 조생종 모수는 작물시험장 철원출장소에서 1993년부터 1997년까지 시험재배된 '오대벼' 생육자료에 의해 최적화 한 결과이다. 중생종 벼의 경우는 영남작물시험장에서 팔공벼를 대상으로 1989년부터 1997년까지 수행한 실험결과를 이용하였다. 구체적인 모수 추정방법은 Hunt et al.(1993)을 따랐다.

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

토양자료는 농업과학기술원의 정밀토양도를 제공받아 시험포장의 토성, 토심(土深), 양이온치환용량 등의 토양정보를 추출하였다.

### 2. 생육 모의

수집가능한 자료의 공간해상도를 고려하여 동일한 품종, 토양특성, 기상조건, 재배법이 적용되는 생육모의 최소 공간단위를 읍·면 행정구역으로 상정하였고, 이를 CZU (Cultivation Zone Unit)라고 정의하였다. 경기도는 서해 도서지역을 제외하면 총 168개의 CZU로 구분된다. 동일 CZU 내에서도 서로 다른 품종들이 섞여 재배되고 있지만 작업의 단순화를 위해 각 CZU별 대표품종을 선택하였다. 이 때 기준은 CZU의 평균 해발고도로서 200m 이상 되는 31개의 재배구역은 조생종을, 200m 미만 지역은 중생종을 일

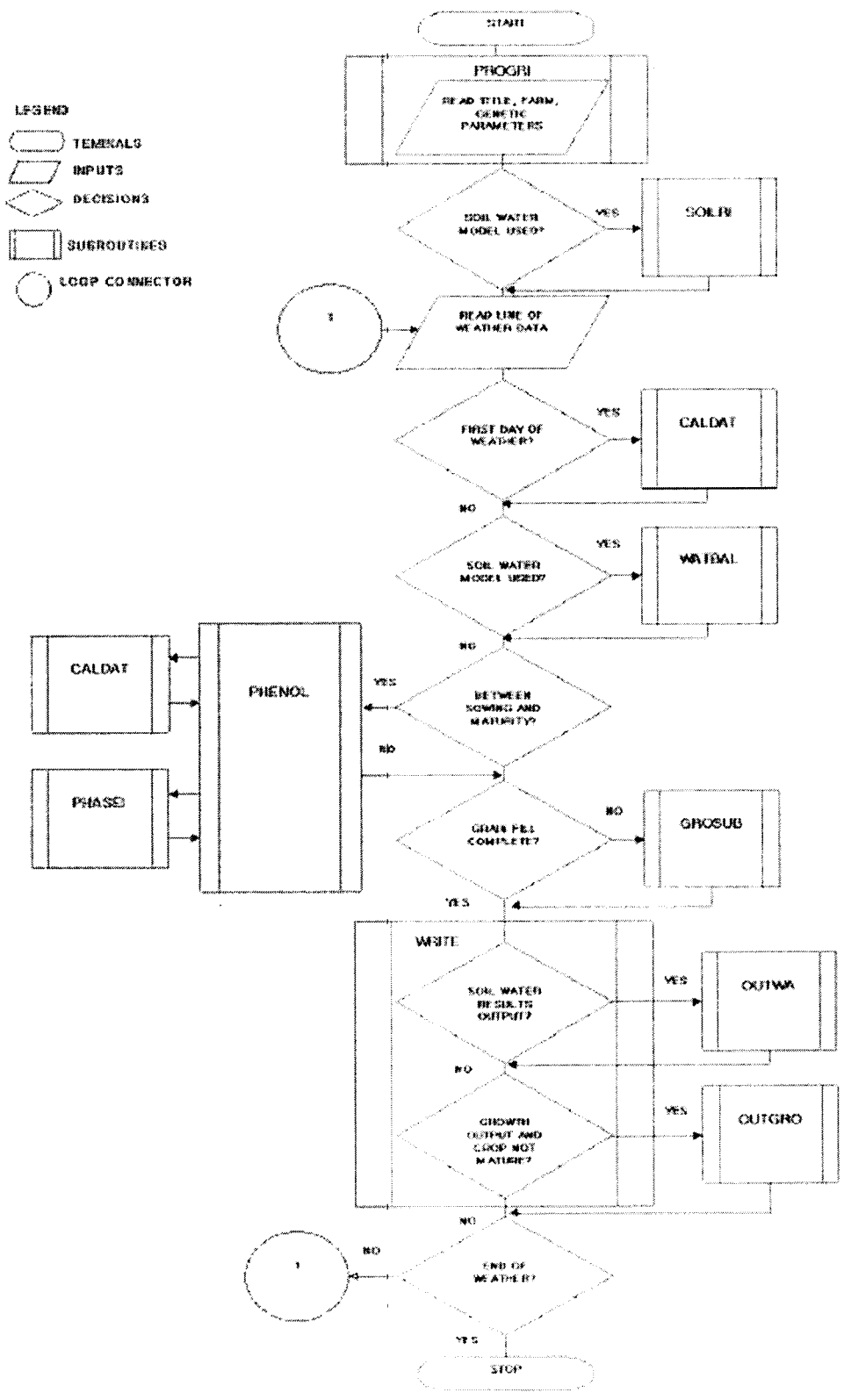


Fig. 1. Flow chart of CERES model. Redrawn from Jones and Kiniry (1986)

팔 적용하였다.

1988~1997년의 일기상자료는 신 등(1999)이 표준기상자료를 토대로 공간통계기법에 의해 전국의 읍면별로 추정된 자료 가운데 경기도지역만을 추출해 이용하였으며, 토양 자료는 농업과학기술원의 정밀토양도로부터 발췌하였다.

벼 생육을 실제에 가깝게 모의하기 위해서는 실제 농민들이 이용하고 있는 재배법울 입력시켜야 하지만, 현실적으로 한 재배구역 내 재배형태는 재배자에 따라 차이가 있으므로 본 실험에서는 재배구역을 조생종 재배와 중생종 재배지대로 이분하여 각각 통일된 재배법(작물시험장 표준재배법)을 적용하였다. 구체적으로 조생종이 이용된 지역은 4월 11일에 파종을, 5월 20일에 이앙을 하였으며, 중생종의 경우는 4월 15일 파종, 5월 25일 이앙으로 하였다. 재식거리는 모두 30×14cm이며, 본답 시비량은 N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O = 11-7-8 kg/10a, 관개는 작물의 수분스트레스 범위를 0에서 1로 둘 때 0.05 내외에서 물대기를 시작하는 것으로 하였다.

모수조정이 끝난 벼 생육모형에 1988년부터

1996년까지 9년간 일별 평균기상자료를 입력시켜 이 평균기상조건 하에서의 생육진행상황을 모의하였고, 다음에는 1997년의 일기상 자료를 입력하여 모의하였다. 단위면적당 수량(kg/ha)을 비교하기 위해 재배구역별로 계산된 단위면적당 수량을 각 CZU의 재배면적 가중(加重) 평균으로 환산한 다음 시·군별로 합산하였다. 이는 비교를 위해 수집한 1997년 시·군별 쌀생산량통계자료(농림부, 1997)의 최소단위가 시·군이기 때문이다. 1988년부터 1996년까지의 비교수량은 농림통계연보에서 발췌하였는데, 9년 평균값을 계산하여 97년 자료와 비교하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 모형의 적합성

철원과 밀양자료를 토대로 도출된 조생종과 중생종 벼의 품종특성모수들 가운데 두 품종간 큰 차이를 보이는 것은 기본영양생장기간의 길이를 결정하는 P1모수와 한계일장보다 일장이 길어질 때 발육지연정도를 나타

**Table 1. Cultivar-specific coefficients.**

	P1	P2R	P5	P20	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

P1: Degree days above 9°C during vegetative period.

P20: Critical photoperiod or the longest daylength in hours.

P2R: Extent to which phasic development leading to panicle initiation is delayed for each hour increase in photoperiod above P20.

P5: Degree days above 9°C from beginning of grain filling to physiological maturity.

G1: The number of spikelets per gram of main culm dry weight.

G2: Single grain weight(g) under ideal growing conditions.

G3: Tillering coefficient relative to IR64.

G4: Temperature tolerance coefficient. Usually 1.0 for varieties grown in normal environments. G4 for japonica type rice growing in a warmer environment would be 1.0 or greater. Likewise, the G4 value for indica type rice in very cool environments on season would be less than 1.0.

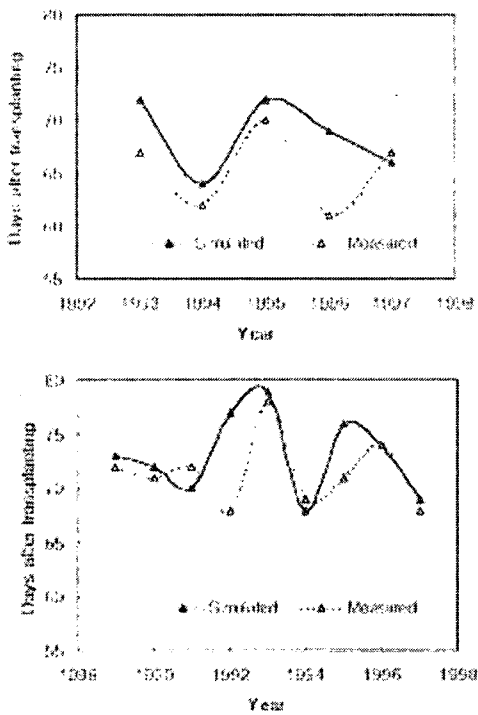


Fig. 2. Comparison between the measured and the simulated heading date of early season cultivar 'Odae' in Chulwon(upper) and mid-season cultivar 'Palkong' in Miryang (lower).

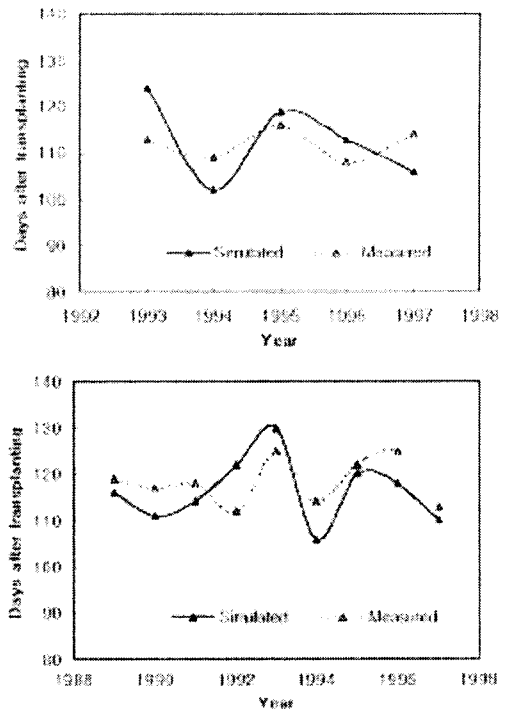


Fig. 3. Comparison between the measured and the simulated physiological maturity of early season cultivar 'Odae' in Chulwon(upper) and mid-season cultivar 'Palkong' in Miryang (lower).

내는 P2R모수이다(Table I).

이들 모수는 주어진 자료범위 내에서 최적 조합이라고 할 수 있지만 연차별 생육모의 조건에 따라 상반된 반응을 보이기도 한다. 이들 모수에 의해 각각 조생종과 중생종 배의 품종특성을 갖도록 조절된 CERES-rice 모형을 작물시험장 철원출장소와 영남작물시험장의 재배조건에서 연차별 생육을 모의한 결과 이앙-출수까지 일수는 65일에서 70일(조생종), 70일에서 80일(중생종)로 연차변이의 경향은 유사하나 실제 출수소요일수에 비해 약간 긴 편이다(Fig. 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.

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(Fig. 3). 경남 밀양의 영남작물시험장에서 재배된 중생종 팔공벼에서는 1989년부터 1997년까지 1주일 정도의 연차변이가 관찰되었는데, 모형 계산 결과는 약 2주일 정도로 변이폭이 늘어난 점이 달랐다.

단위면적당 수량에 있어서 조생종의 경우 연차변이뿐 아니라 절대수량까지 비교적 잘 추정하고 있으며, 중생종의 경우에는 연차변이는 유사하나 절대수량에 있어서 과다추정 경향이 나타난다(Fig. 4). 본 모의실험에서는

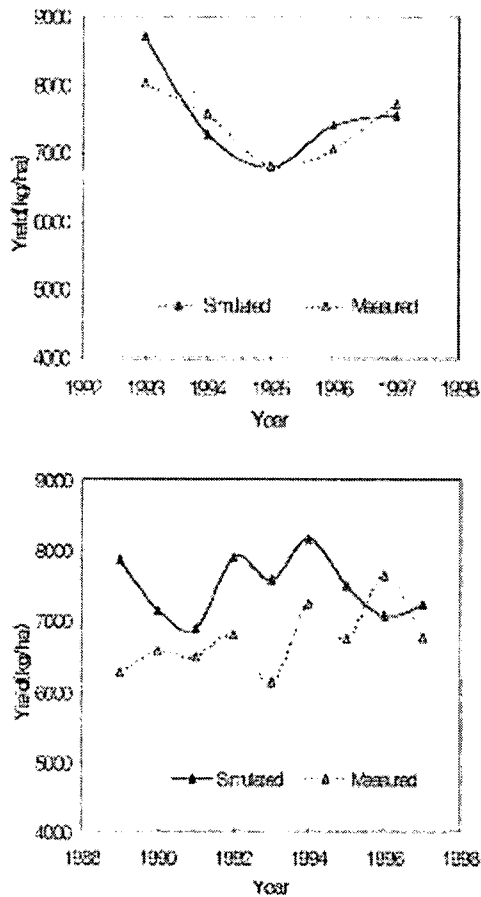


Fig. 4. Comparison between the measured and the simulated rough rice yield of early season cultivar 'Odae' in Chulwon (upper) and mid-season cultivar 'Palkong' in Miryang (lower).

실제 벼 생육과정에서 발생하는 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, 작물 시험장에서 실시하고 있는 시비수준대로 모형을 구동시킬 경우 생육초기에 질소스트레스를 받아 엽면적(葉面積)의 확보가 늦어지는 현상을 꼽을 수 있다.

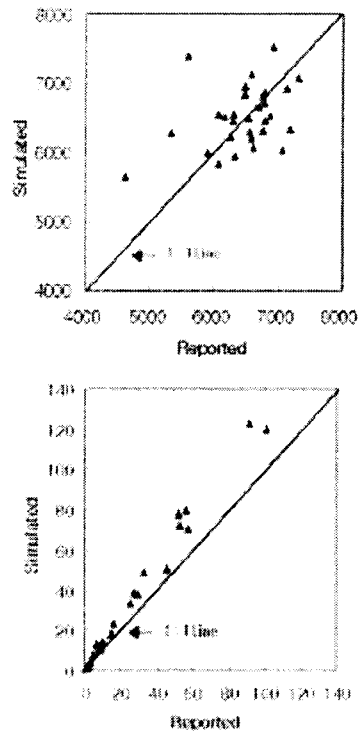


Fig. 5. Comparison between the measured and the simulated rough rice yield(kg/ha, upper) and production (1,000ton, lower) in 1997. Each spot represents the acreage-weighted summary of all CZUs within a single county(Si or Kun) in Kyunggi province.

## 2. 작황진단 결과

경기도내 168개 재배구역을 대상으로 해발고도 200m를 기준으로 미만지역은 중생종을, 이상지역은 조생종 모수를 적용시켜 1997년 기상조건하에서 수량과 생산량을 추정하고 다시 면적 가중평균을 적용하여 시군별로 통합하여 농림부 작황조사자료와 일대일 비교한 것이 Fig. 5이다. 단위면적당 수량(kg/ha)은 대체로 5,500에서 7,500으로 평방근 오차 RMSE(Root MSE)는 1035.9로 나타났다.

단위면적당 수량에 재배면적을 곱해서 얻어

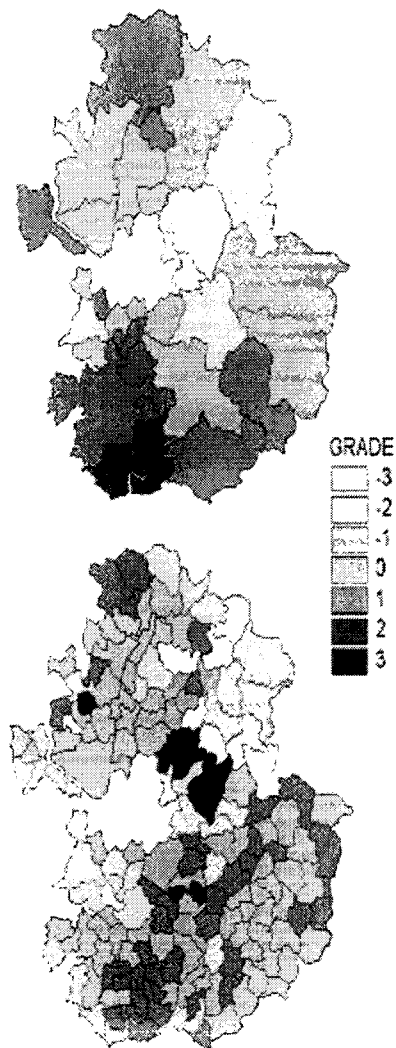


Fig. 6. Reported(upper) and simulated (lower) yield trends of 1997 crop season expressed as z-score grade with the reference yield of recent 9 years average.

지는 쌀 생산량(ton)의 경우 생육모의에 의한 값이 실제에 비해 큰 것으로 나타났다. 이는 전술한대로 모형 구동시 기상과 토양 자료를 제외하고 모든 조건이 최적상태로 주어지므로 병충해, 태풍, 홍수피해 등이 고려되지 않을 뿐 아니라, 잡초, 조류, 가축, 서류에 의한 피해 역시 전혀 없기 때문이다.

비록 특정연도의 기상조건에서 생육모의 및 수량예측이 양호했을지라도 기상의 연차변이에 대한 반응이 적절하지 못하다면 실용

성이 낮아진다. 장기간에 걸친 작황의 연차변이를 추적하거나, 평년작황에 비해 특정연도의 상대적인 작황을 알아봄으로서 생육모의의 실용성을 평가할 수 있다. 자료의 불충분으로 전자의 방법을 쓸 수 없어서 본 실험에서는 후자의 방법에 따라 상대작황의 지역변이를 비교하였다.

농림부 작황조사자료를 근거로 1997년의 시군별 단위면적당 수량을 과거 9년 평균 수량에 대한 증감정도(-3에서 3까지의 6등급)로 나타내었다(Fig. 6). 실제 통계자료에 따르면 경기 남부지역은 대체로 증가해 왔으나 북동부지역은 감소한 것으로 보인다. 읍면별 생육모의에 의한 수량 증감정도를 나타내면, 역시 경기 남부지역은 증가를, 북동지역은 감소를 보인다. 특이하게도 남양주시의 경우 통계자료와 모의 결과간에 상반된 결과를 보이고 있다. 이를 통계자료와 같은 공간 해상도(시, 군 단위)로 취합하여 표현하면 경기도내 총 33개의 시·군중에서 평년작 이상의 수량을 얻은 시군이 22개로서 농림부 보고에 의한 26개 시군과 대체로 유사하다.

본 실험의 결과로부터 일별 기상자료와 벼 생육모형을 이용한 넓은 지역의 쌀 생산량 예측 가능성이 확인되었다고 판단된다. 실용화를 위해서는 많은 점들이 개선되어야 하겠지만 우선 다양한 품종을 나타낼 수 있는 모수 추정작업이 필요하다. 1998년 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 병해충예찰의 신뢰도를 높여 작물 생육량에 의존한 생산량 예측결과를 보완해줄 것으로 기대된다.



## 적 요

생육기간중 여러 지점의 일별 기상자료에 의해 작물모형을 구동시킴으로써 벼 생육상황의 지역변이를 용이하게 감시할 수 있는 농업기상학적 작황진단기법을 경기도내 168개 읍면에 적용하였다. 기상, 토양, 재배관리 및 품종정보를 각 읍면별로 미리 준비하였다. 모형은 조생종 및 중생종 벼 특성을 갖도록 조정된 CERES-rice로서 예비실험 결과 출수기와 생리적 성숙기 예측은 적절한 것으로 나타났고, 수량은 약간 과다추정이었다. 1997년 기상자료를 이용하여 경기도 내 각 읍면별 정조수량을 추정된 다음 재배면적 가중평균을 구해 이를 시군별로 통합하여 농림부 쌀 생산량 조사자료와 비교하였다. 생육모의에 의한 시군별 단위면적당 수량 추정값의 RMSE는 1035.9였다. 최근 9년간 평균 수량에 대한 1997년의 상대수량을 계산한 결과 농림부 자료에 의해 수량증가로 판정된 26개 시군 가운데 22개에서 동일한 경향을 얻었다.

## 인용문헌

- 과학기술처, 1990: 한반도 기후변화 감시 및 이상기상에 관한 연구(I), 기상연구소주관 특정연구과제 최종 보고서, 421p.
- 농림부, 1997: '97 작물생산 동향분석, 통계정보관실, p5-24.
- 신만용, 윤진일, 서애숙, 1999: 공간통계기법을 이용한 전국 일 최고/최저기온 공간변이의 추정, *대한원격탐사학회지*, 5(1):9-20.
- 오성남, 1995: 배중 CO<sub>2</sub> 기후가 수도생육에 미치는 영향에 관한 연구, *한국기상학회지*, 31(3):267-279.
- 윤진일, 1990: 대기중 이산화탄소 배중조건하의 기후시나리오에 의한 국내 쌀생산 추정, *한국기상학회지*, 26(4):263-274.
- 이변우, 신진철, 봉종현, 1991: 대기중 CO<sub>2</sub>농도 증가에 따른 기후변화가 농업기후자원, 식생의 순 1차 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, 646p.
- Duncan, W. G., R. S. Loomis, W. A. Williams, and R. Hanau, 1967: A model for simulating photosynthesis in plant communities, *Hilgardia*, 38, p181-205.
- 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  
Climatic Variations on Agriculture*. vol. 1,  
Kluwer Academic, p751-772.