

공간정보와 생육모의에 의한 남한 벼 품종의 북한 서부지대 적응성 예측

김영호¹ · 김희동¹ · 한상욱¹ · 최재연² · 구자민³ · 정유란⁴ · 김재영⁴ · 윤진일⁴

¹경기도농업기술원 작물연구과, ²화성시농업기술센터

³기상연구소 원격탐사연구실, ⁴경희대학교 생명과학부/생명자원과학연구원

(2002년 10월 18일 접수; 2002년 11월 29일 수락)

Using Spatial Data and Crop Growth Modeling to Predict Performance of South Korean Rice Varieties Grown in Western Coastal Plains in North Korea

Y. H. Kim¹, H. D. Kim¹, S. W. Han¹, J. Y. Choi², J. M. Koo³, U. Chung⁴,
J. Y. Kim⁴, and Jin I. Yun⁴

¹Gyeonggi-do Agricultural Research and Extension Services, Hwasung, Gyeonggi-do, Korea

²Hwasung Center for Agricultural Technology, Hwasung, Gyeonggi-do, Korea

³Meteorological Research Institute, Korea Meteorological Administration, Seoul, Korea

⁴Department of Ecosystems Engineering, Kyung Hee University, Suwon, Korea

(Received October 18, 2002; Accepted November 29, 2002)

ABSTRACT

A long-term growth simulation was performed at 496 land units in the western coastal plains (WCP) of North Korea to test the potential adaptability of each land unit for growing South Korean rice cultivars. The land units for rice cultivation (CZU), each of them represented by a geographically referenced 5 by 5 km grid cell, were identified by analyzing satellite remote sensing data. Surfaces of monthly climatic normals for daily maximum and minimum temperature, precipitation, number of rain days and solar radiation were generated at a 1 by 1 km interval by spatial statistical methods using observed data at 51 synoptic weather stations in North and South Korea during 1981-2000. Grid cells falling within a same CZU and, at the same time, corresponding to the satellite data- identified rice growing pixels were extracted and aggregated to make a spatially explicit climatic normals relevant to the rice growing area of the CZU. Daily weather dataset for 30 years was randomly generated from the monthly climatic normals of each CZU. Growth and development parameters of CERES-rice model suitable for 11 major South Korean cultivars were derived from long-term field observations. Eight treatments comprised of 2 transplanting dates × 2 cropping systems × 2 irrigation methods were assigned to each cultivar. Each treatment was simulated with the randomly generated 30 years' daily weather data (from planting to physiological maturity) for 496 land units in WCP to simulate the growth and yield responses to the interannual climate variation. The same model was run with the input data from the 3 major crop experiment stations in South Korea to obtain a 30 year normal performance of each cultivar, which was used as a "reference" for comparison. Results were analyzed with respect to spatial and temporal variation in yield and maturity, and used to evaluate the suitability of each land unit for growing a specific South Korean cultivar. The results may be utilized as decision aids for agrotechnology transfer to North Korea, for example, germplasm evaluation, resource allocation and crop calendar preparation.

Key words : North Korea, Rice, Growth simulation, Climate, Crop model, GIS

I. 서 언

몇 개 농업관련 시험장에서 북한 벼 품종의 출수반응을 관찰한 결과, 북한에서 조생종으로 분류된 품종들은 온도에 민감한 반응을 보여 대조품종인 남한의 오대벼에 비해 출수가 빨랐고, 중생종은 그보다 출수가 늦어 전체적으로 남한 품종의 조만성과 유사하였다(양 등, 2000). 또한 유전자 분석을 통해 북한품종 및 계통 101개를 남한품종과 비교해 본 결과 40% 유사도 수준에서 남한품종과 같이 통일형과 자포니카형으로 나눌 수 있었으며, 자포니카형 품종들간 유사도는 80%에 달했다(정 등, 2001). 즉 품종 조만성이나 유전적 조성 측면에서 북한품종은 남한품종과 크게 다른 점이 없다. 오히려 북한에 비해 유전적으로 훨씬 다양한 기존의 남한 품종들 가운데 북한지역 재배조건에 잘 적응하는 것이 있을 가능성이 높다.

접근이 어려운 곳의 농업기후특성을 파악하거나 새로운 품종을 도입할 경우 포장실험에 앞서 생육모의를 통해 대략적인 품종별 적응도를 평가하는 일은 이제 보편적인 도구로 자리잡고 있다. 그러나 기후의 공간적 변이가 큰, 넓은 지역을 대상으로 생육을 모의하기 위해서는 동질적이거나 최소한 유사기후특성을 가진 작은 재배구역으로 잘게 나누는 일이 선행되어야 한다. 이렇게 기획된 각 단위 재배구역은 토양, 기후, 재배양식 등 생육모의에 필요한 모든 입력정보가 같다고 간주한다. 그러나 이러한 정보가 재배구역단위로 직접 얻어지는 경우는 극히 드물기 때문에 몇 개 지점에서 얻어진 자료를 토대로 공간내삽(spatial interpolation)에 의해 지역전체의 분포를 얻은 다음, 각 구역단위로 대표값을 할당하는 방식이 사용되어 왔다.

이러한 기법을 북한지역에 최초로 적용한 Yun and Lee(2000)는 북한 벼 품종 선봉 9호, 애국 72호, 평양 15호의 품종특성을 갖도록 모수조정된 CERES-rice를 북한 전역의 183개 시군에 적용하여 30년간 생육을 모의하고 그 결과를 토대로 각 시군의 벼농사 기후특성을 규정하였다. 그러나 한 개 시군의 면적이 평균 662 km², 최대 2,197 km²로서 하나의 기후값이 대표하기에는 너무 넓고, 같은 시군 내에서도 벼논의 지리적 분포가 고르지 않은 점은 이 기법의 실용화를 위해 해결되어야 할 문제이다.

작물생육모형은 작물의 광합성 과정 등 주요 생리과정을 정량적으로 연구하기 위해 30여 년 전부터 소개

되기 시작하였다. 다양한 환경조건 하에서 생장 및 발육의 종합적인 모의가 가능한 정도로 발전한 최근에는 주요 식량작물에 대해 실용수준의 모형들이 개발되어 다양한 용도로 쓰이고 있다.

벼 생육모형 가운데 CERES(Crop-Environment Resource Synthesis)-rice는 미국에서 개발되어 IBNSAT(International Benchmark Site Network for Agrotechnology Transfer) 사업에 의해 국제적으로 널리 보급된 것이다. 이 모형은 벼의 생장과 발육에 영향을 주는 기상, 토양, 수분, 질소 등 재배환경구성요소간 상호작용을 종합적으로 고려한 것으로서, 실험실 수준을 벗어나 실용화 단계에 있는 것으로 평가된다. 우리나라에서도 지구온난화에 따른 쌀 생산량 추정, 북한 183개 시군의 농업기후자원 평가(Yun and Lee, 2000), 읍면별 작황 예측(Yun and Cho, 2001) 등에 활용되었다.

CERES-rice를 어떤 지역에 적용하기 위해서는 그 지역에 실제 재배되고 있는 품종의 생장 및 발육 관련 유전적 특성을 모형에 반영시켜야 한다. 즉 벼의 발육 및 생장의 주요특성을 몇 개의 모수(parameters 혹은 coefficients)로 표현하고 각 품종별로 서로 다른 값을 부여하는 것이다. 따라서 생육모의의 성공을 위해서는 각 품종의 모수값을 정확하게 추정하는 일이 전제되어야 한다.

본 연구에서는 생육모의를 통해 북한의 주요 쌀 생산지역인 서부평야지대에 적용할 수 있는 남한 벼 품종을 선별하고자 하였으며, 이를 위해 첫 단계로서 생육모형에서 요구하는 일별 기상자료(최고기온, 최저기온, 일사량, 강수량)의 단위구역별 대표값을 생산하였다. 두 번째로는 북한 서부 평야지 생육모의에 적용할 남한 주요 벼 품종의 모수를 추정하였다. 세 번째로는 남한 주요품종의 유전적 특성을 갖도록 모수가 조정된 벼 생육모형 CERES-rice를 단위구역별 일기상 자료를 이용하여 30년간씩 구동함으로써 각 재배구역의 품종별 기후학적 적응성을 평가하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 공간해상도 1 km의 월별 기온표면 생성

2.1.1. 기온 자료

1981년부터 2000년까지 20년간 북한의 기상대급 27개 지점에서 관측된 일 기상자료로부터 월별 평균값

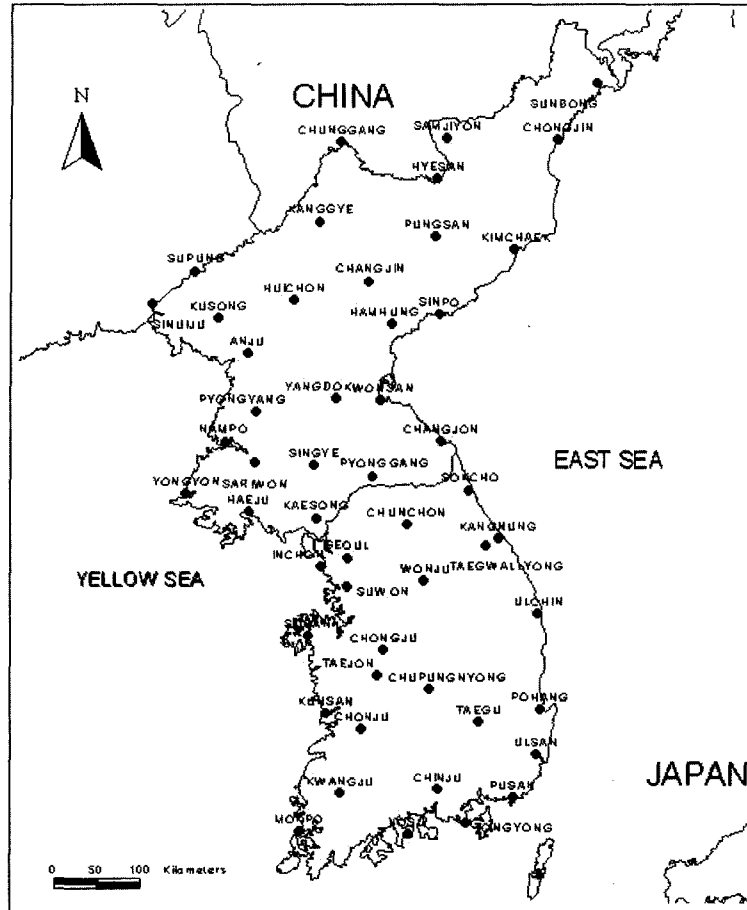


Fig. 1. Geographical location of the 51 standard weather stations in North and South Korea.

을 계산하였다. 이들 북한 27개 관측소에 대응하는 남한의 24개 표준기상관측소에 대해서도 같은 기간의 월별 평균값을 준비하였다(Fig. 1).

2.1.2. 지형자료

지형효과 분석을 위해 미국 지질청(USGS)의 30초(arc second) 해상도 수치고도모형 GTOPO30(Digital Elevation Model: DEM)을 수집하여 한반도 부분을 발췌하였다. 원래 경위도 좌표계인 이 DEM 파일을 TM 좌표계(원점 북위 38도, 동경 127도)로 투영시켜 사방 1 km 해상도의 ARC/INFO(ESRI, USA) GRID로 저장하였다. 평균고도, 지세고도 등 기후결정인자들의 계산은 Yun and Lee(2000)의 방법을 따랐다.

2.1.3. 지형-기온 관계 회귀모형 도출

51개 남북한 관측소가 위치한 셀의 지형변수를 앞에서 작성한 각종 GRID로부터 추출하였다. 이들과 관

측소별 20년간(1981~2000) 일 최고 및 최저기온의 월별 평균값 사이의 단순상관을 구하여 상관계수 크기 순으로 10개씩의 후보변수를 선정하였다. 선정된 지형변수를 독립변수로, 월별 기온값을 종속변수로 두고 SAS/REG(SAS Institute, USA) 기능을 이용하여 월별 기온추정 최적모형을 선별하였다. 이 때 변수 선택은 stay level=0.15의 STEPWISE 방법을 적용하였다.

2.2. 월별 적산 일사량, 강수량, 강수일수, 기온 연교차 추정

Yun and Lee(2000)가 사용한 방법에 의해 북한 전역의 사방 1 km 해상도 월별 일사량 분포, 강수일수 분포, 기온 연교차 분포도를 작성하였다. 월별 강수량의 평균값은 남한의 조밀한 강수관측망에서 얻어진 경사방향별 회귀식을 북한에 적용시킨 Yun(2000)의 방

법에 따라 작성하였다.

2.3. 재배구역 설정 및 공간평균 기후자료 생성

상기 방법에 의해 만들어진 각 요소별 월별 기후값의 분포는 공간해상도가 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 로서 북한전역의 기후를 약 12만개의 격자점 혹은 픽셀로 나타낼 수 있다. 위성원격탐사자료를 이용하면 이들 중 실제 벼논에 해당되는 픽셀만 골라낼 수도 있을 것이다. 하지만 이렇게 많은 픽셀에 대하여 각각 생육모의를 수행하기는 현실적으로 어려운 점이 많으므로 이들 25개씩을 결합한 $5 \times 5\text{ km}$ 격자점을 단위 재배구역으로 삼았다. 남으로 개성시에서 북으로 정주군에 이르는 북한서부 평야지대 전역은 모두 1,044개의 이 같은 재배구역으로 구성된다. 이들 가운데 실제 벼논이 존재하는 것들만 선별하기 위해 위성자료를 분석하였다.

북한의 작부체계는 2모작형으로 2월 하순~3월 중순에 춘파소맥 혹은 대맥을 파종하여 재배하고 후작으로 논에서는 벼, 밭에서는 옥수수 혹은 콩을 재배하는 형태이다. 그런데 6월 초순~중순이 되어야 전작물을 수확할 수 있으므로 벼의 이앙시기가 늦어져 어려움을 겪고 있다. 이 문제를 해결하기 위해 못자리 기간이 60일 정도로 긴 큰모(대성모) 재배방법을 도입하고 있는 것으로 알려졌다. 1999년 농업일지에 의하면 6월 4일 현재 전국적인 모내기 실적은 계획의 45%이며 평남 및 평북지역은 60%를 넘어섰다고 하였다. 이를 참고하면 북한의 벼논 분류는 5월보다는 6월의 영상자료가 중요하다.

1999년 6월의 한반도 NOAA-AVHRR 자료에 대하여 지상 기준점의 위치를 위성화상에서 동정하고 2차 함수 변환에 의해 화상등록을 실시하였으며, 평방근오차(RMSE)가 0.5 화소 이내에 들도록 bilinear interpolation에 의해 재배열하였고, 최종화소의 크기를 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 해상도로 조정하였다. AVHRR의 다섯 개 채널 중 1번과 2번 자료를 이용하여 NDVI를 계산하였다.

계산된 자료에서 북한지역만을 추출한 다음, ISODATA 기법에 의해 60개 class로 나누었다. 각각의 class를 정의하기 위해서 환경부 제작 1990년 한반도 피복분류 자료를 참고하였다. 이들 class를 각각 북한의 대표적인 벼 재배지대인 재령평야 해당 픽셀($30 \times 30\text{ m}$ 해상도)과 비교하여 유사한 지점을 벼논으로 간주하였다.

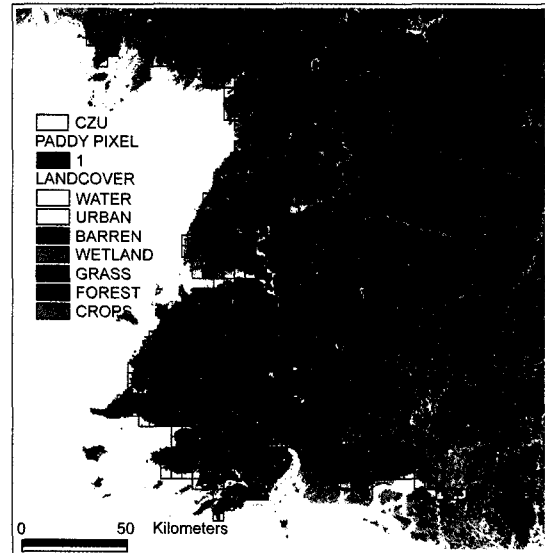


Fig. 2. Cultivation zone units identified by analyzing satellite remote sensing data. Rice paddies are represented by red dots of a 1 by 1 km pixel size.

북한 서부지역을 구성하는 총 1,044개 격자점 가운데 위성자료 분석을 통해 벼논이 존재하는 것으로 판단되는 496개를 선별하여 생육모의 최소재배단위(CZU, cultivation zone unit)로 확정하였다. 각 CZU에 포함된 벼논 픽셀($1\text{ km} \times 1\text{ km}$)에 이미 만들어 둔 평년기후값 표면을 중첩시켜 픽셀에 해당하는 기후값만 발췌하고 그들의 평균값을 구하여 각 CZU의 대표값으로 삼았다(Fig. 2).

2.4. 월별 기후값으로부터 일별 기상자료 생성

이들 CZU 대표 기후값은 월별평균값으로서, 작물모형 입력을 위해서는 일별 자료로 변환시켜야 한다. 이때 주의해야 할 점은 반드시 기후의 연차변이를 고려해야 한다는 점이다. 기후란 평균 뿐 아니라 그 변이를 함축한 의미로서 농업적으로는 특히 연차변이가 중요하다. 앞서 작성된 재배구역별 기후 평균값은 1981년부터 2000년까지 20년의 기후를 대표하지만, 매년 기후값 20개를 산술적으로 평균한 대표값에 불과하므로 실제 20년 동안 겪었던 기후의 연차변이에 대해서는 어떤 정보도 제공하지 않는다.

이러한 결점을 보완하고 현실감 있는 일 기상자료를 도출하기 위해 여러 가지 통계학적 기법이 이용되어 왔다. 본 연구에서는 Pickering et al.(1994)에 의해 제

시된 일 기상자료 생성방법에 따라 각 재배구역별로 30년씩의 일 기상자료를 무작위로 생성하였다. 이 방법에서는 우선 월별 기후값으로부터 일별 기상자료 생성에 필요한 각종 매개변수를 추정한다. 이 매개변수들은 임의 날짜의 강수출현 여부를 결정짓는 Markov Chain 과정에 이용되고, 강수량은 Gamma 분포에 의해 추정된다. 기온과 일사량은 “weakly stationary generating process”를 토대로 생성된다. 앞서 만들어 둔 일 최고기온, 최저기온, 일사량, 강수량, 강수일수의 월별 평균값과 기온의 연교차는 이들 매개변수 도출을 위해 필요한 기후자료들이다.

2.5. CERES-rice의 품종모수 소개

CERES-rice에서는 출현 이후 벼의 일생을 일장감응 개시기(End of Juvenile), 유수분화기(Panicle Initiation), 엽생장정지기(출수기), 이삭생장정지기 및 양분저장완료기(생리적 성숙기) 등 5개의 주요 발육단계로 특징 짓고, 각각의 단계에 도달하는데 필요한 Thermal time(9°C 기준 누적 생장도일)을 P1부터 P5까지의 모수로 나타낸다.

P1은 발아(출현) 후 일장에 무관하게 일정기간을 경과해야만 다음 단계로 생육이 진행되는 것을 나타낸 기본영양생장기간이다. 우리 나라 품종의 경우 주로 못자리기간을 포함, 100~200도일 정도이나, 열대품종은 500 이상으로 훨씬 길다.

P2는 유수분화기까지의 기간을 나타내는데, 전 생육기간을 통해 일장(photoperiod 혹은 daylength)의 영향을 받는 유일한 시기이다. 모형에서는 유수분화를 촉진하는 최적일장 조건에서 이 기간이 136도일이라고 가정하며, 최적일장과 실제일장간 편차에 지연율을 곱한 값을 여기에 더해줌으로써 감광성을 표현하고 있다. 이를 위해 사용자로 하여금 최적일장(P20)과 지연율(P2R)을 조절할 수 있도록 한다. 우리 나라의 재배조건에서 이 시기의 일장은 박명을 포함하여 14시간 이상이므로 최적일장을 10시간 내지 12시간으로 설정하고 지연율을 적절히 조절해주면 조만성을 표현할 수 있다.

P3는 유수분화 이후 출수까지의 기간으로서 온도환경의 직접적인 영향보다는 분얼, 출엽 등 식물의 내재적인 요인과 여기에 미치는 양분공급 등에 영향을 받는 것으로 간주하여 사용자가 임의로 조절할 수 없도록 되어 있다. 모형 내부에서는 480도일을 상한값으로

갖고 있다.

P4는 출수 이후 광합성산물, 즉 저장양분을 이삭 낱알들이 받아들일 수 있을 만큼 영화의 수, 곡립의 폭과 길이 등이 결정되는 시기까지를 말한다. 이 기간 역시 온도의 직접영향보다는 내재적인 요인(최대 영화수, 양분상태 등)에 의해 결정된다고 보아 사용자가 임의로 조절할 수 없도록 되어 있다. 온도는 다만 광합성 속도나 양분 흡수 등에 미치는 간접적인 요인으로 작용한다. 모형 내부에서는 150도일을 상한값으로 갖고 있다.

P5는 전 단계에 미리 준비된 비어 있는 영화(곡립)속으로 광합성 산물이 들어와 저장양분으로 채워주는 소위 등숙기간으로서 400에서 600도일 정도의 비교적 균일한 값을 갖는다.

열대 인디카형 품종은 일장에 둔감하며 주로 온도에 의해 출수나 성숙이 결정되는데, 우리 나라의 조생종들도 이와 비슷한 반응을 보여 긴 일장조건인 6월말에서 7월초에도 온도에 반응하여 출수가 촉진된다. 반면, 중만생종들은 고온조건에서도 긴 일장조건 덕분에 유수분화가 지연되어 출수가 늦어진다. 그러나 일단 유수가 형성되면 그 다음부터는 모두 온도의 영향만을 받게 된다.

벼의 수량생산잠재력(yield potential)을 표현하기 위해 모형에서는 주간 건물중당 최대립수(g 당 최대영화수)를 G1, 한 개의 영화가 저장할 수 있는 최대의 양분, 즉 최대립중(g/grain)을 G2, 최고분얼기의 결가지수를 대조품종 IR64와 비교한 상대분얼능력을 G3로 나타내고 있다. 또한 벼 재배지역이 열대부터 냉대에 이르기까지 지리적으로 다양한 것을 수용하기 위해 G4는 온도반응성을 나타내는데, 인디카형 품종을 추운 곳에서 재배하면 1보다 작고, 자포니카형 품종을 더운 곳에서 재배하면 1보다 큰 값을 갖는다.

2.6. 생육자료 수집 및 모수 추정

작물시험장, 호남작물시험장, 영남작물시험장 및 각도 농업기술원에서 발간한 작황시험 및 조사보고서로부터 적어도 7년 이상 자료가 축적된 벼 품종 20개를 선발하였다. 이들 품종의 처리별 출수기, 성숙기, 정조수량, 립중, 고중, 단위면적당 립수, 주당립수, 지상부 건물중 등 주요 생육특성자료를 수집하였다. 시험장의 기상자료 및 토양자료를 수집하여 CERES-rice 입력형태로 준비하였고, 재배관리방법은 보고서에 기록된 처

리내용을 참조하여 역시 모형에서 요구하는 양식으로 준비하였다.

모수 추정방법은 Hunt et al. (1993)의 방법을 따랐는데, 조, 중, 만생종별 모수의 초기값은 Yun and Cho (2001)의 결과를 이용하였다. 기상자료 가운데 수평면 일사량이 없는 지점은 인근 기상관서의 관측자료를 이용하였다. 토양자료는 각 시험장으로부터 수집한 해당 시험포장의 토성, 토심, 양이온 치환용량 등의 토양정보를 수정 없이 사용하였다.

2.7. 생육 모의

CERES-rice를 496개 재배구역별로 30년 일별 기상자료에 의해 구동시켜 출수기, 성숙기, 지상부 건물중, 종실수량 등 생육관련 정보를 생산하였다. 토양조건은 경기도 수원시 작물시험장 조건을 모든 재배구역에 공통적으로 부여하였고 질소질 비료는 생육에 영향을 주지 않을 정도로 자동시비 하였다. 즉 재배구역간 차이점은 오로지 기후 조건 뿐이다.

처리는 크게 관개, 작부방식, 이앙기 등 3요인을 각각 수리안전답(자동관개)과 천수답, 일모작과 이모작, 적식과 만식 등 2 수준으로 두어 품종별로 총 2³=8 개씩의 처리효과를 볼 수 있도록 하였다. 일모작인 경우 55일간 육묘한 모를 39주/m² 재식밀도로 적식은 5월 15일, 만식은 5월 25일 이앙하는 것으로 하였다. 이모작인 경우 75일모를 36주/m² 밀도로 적식은 6월 15일, 만식은 7월 1일에 이앙하는 것으로 모의하였다.

북한은 생육모의결과의 검증자료를 전혀 구할 수 없기 때문에 산출된 수량이나 관련형질의 절대값은 큰 의미가 없다. 남한에서 같은 조건으로 모의했을 때 산출되는 값을 기준으로 하여 상대적인 비율을 보여주는 수 밖에 없다. 이를 위해 소백벼(상주), 오대벼(철원), 일품벼(수원), 필공벼(밀양), 대성벼(철원), 상주벼(상주), 화영벼(밀양), 대안벼(수원), 만금벼(익산), 상풍벼(수원), 그리고 용문벼(수원)를 8개 처리조건별로 실제 기상자료에 근거한 생육모의를 수행함으로써 북한지방 모의 결과의 상대평가를 위한 기준자료로 삼았다.

2.8. 적응성 평가

각 품종에 대해 8개 처리조건별 30년 생육모의 결과로부터 기본 통계량, 즉 평균과 표준편차를 구하였다. 출수기 및 생리적 성숙기는 남한 기준일자로부터 단축 혹은 지연된 날짜를 얻었고, 종실 수량에 대해서

는 남한의 기준값에 대한 비율을 계산하였다.

종합적인 적응성은 Yun and Lee(2000)의 방법에 따라 30년 동안의 ① 생리적 성숙기 연차변이, ② 수량평균의 남한기준 상대비율, ③ 수량의 연차변이 등 3 항목으로 나누어 평가하였다. 성숙기 연차변이는 표준편차 기준으로 30년간 6일 이내이면 “안정” (stable), 7-9일이면 “양호” (quasi-stable), 10-15일이면 “가변” (variable), 16일 이상이면 “불안정” (unstable) 등으로 분류하였다. 수량평균의 경우 남한수량에 비해 5% 이상 증수(high), -5%에서 +5%(medium), 5-20% 감수(low), 20% 이상 감수(poor) 등으로 구분하였다. 수량의 연차변이는 변이계수를 기준으로 11% 까지는 “안정” (stable), 12-18%이면 “양호” (quasi-stable), 19-25%이면 “가변” (variable), 26% 이상이면 “불안정” (unstable) 등으로 판정하였다.

각 계급에 대해 3, 2, 1, 0의 점수를 부여하고, 세 종류의 점수를 더하여 0-9점 스케일로 종합적인 벼 재배 적합성을 나타내었다. 한 재배구역이 갖는 농업 기후학적 벼 생산 잠재력을 결정하는데 이들 세 가지 변량이 각각 동일한 기여를 하는 것은 물론 아니지만, 기술의 단순화를 위해 별도의 가중치를 부여하지 않았다.

30년 생육모의 가운데 한 해라도 결과가 나오지 않는 경우, 즉 그 해 연말까지 생리적 성숙기에 도달하지 못하는 재배구역은 이 계산에서 제외하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 북한 서부 평야지대의 기후

선발된 일 최고/최저기온의 월별 평균값 추정 회귀모형은 위도와 해안거리를 중심으로 해발고도, 경사도, 개방도 관련 지형변수들로 구성된다. 4월부터 8월까지 일 최고기온을 제외한 모든 모형에서 결정계수가 0.9 이상이었다. 이들 모형을 이용하여 북한 전역 12만여 개 격자점의 월별 최고/최저기온값을 계산하였다(Fig. 3).

3.2. 주요 벼 품종의 모수

20개 공시품종의 추정모수는 Table 1과 같다. 신뢰성 있는 모수 추정을 위해서는 장기간에 걸쳐 성실한 조사자료가 축적되어야 하지만, 국내 작황시험 및 조사기술 수준이 미흡한 점을 감안하면 이들 모수값은 앞으로 새로운 자료의 축적에 따라 바뀔 것이 거의

Table 1. Genotype coefficients of Korean rice cultivars for CERES-rice

Variety	P1	P2R	P5	P2O	G1	G2	G3	G4
ODAE	200	31	577	10.0	84	0.0281	0.9	1.00
KWANAK	200	45	491	10.0	100	0.0240	0.7	0.98
SOBAEK	200	30	565	11.5	122	0.0254	1.2	1.13
UNBONG	200	51	600	12.3	60	0.0230	1.0	1.00
SAMGANG	200	47	594	11.0	114	0.0242	1.3	1.10
SANGPUNG	200	77	479	11.0	63	0.0255	0.8	1.16
SEOMJIN	150	114	561	11.0	62	0.0270	0.6	1.08
ILPOOM	200	102	597	11.0	89	0.0249	0.9	1.00
NAKDONG	200	94	526	10.5	54	0.0244	0.5	0.99
YOUNGSAN	200	91	528	11.0	55	0.0247	0.6	0.72
DAESUNG	150	48	570	11.0	115	0.0265	1.0	1.00
SANGJU	150	53	573	11.5	110	0.0265	1.0	0.99
YEOMYOUNG	150	59	570	11.5	115	0.0280	0.9	1.00
YONGMUN	150	81	511	11.5	115	0.0275	1.0	1.00
PALGONG	200	53	540	11.0	83	0.0250	0.8	1.00
HWAYOUNG	110	95	529	11.0	89	0.0260	0.9	1.00
DAEAN	200	103	505	11.0	66	0.0256	0.7	0.96
MANGUEM	200	93	595	11.5	65	0.0258	0.6	1.00
CHUCHEONG	200	105	465	11.5	65	0.0260	0.6	1.00

확실하다. 특히 생리적 성숙기에 대한 조사자료에 문제가 많은 것으로 드러났으며, 이에 따라 발육 뿐 아니라 건물수량에도 영향을 미친 것으로 판단된다.

3.3. 품종모수의 신뢰도

이들 중 10개 품종에 대하여 도출된 모수로 조정된 CERES-rice를 구동시켜 연도별 출수기 및 수량을 계산하였다. 시험포장에서 실제 관측된 자료와 비교한 것이 Fig. 4 이다.

3.4. 작부방식별 벼의 생육

작부방식에 따른 출수기, 생리적 성숙기, 등숙기간, 상대수량지수에 대한 생육모의 결과 가운데 대성벼를 자동관개조건으로 30년 일기상 자료에 의해 모의한 것이 Fig. 5 이다.

일모작적식에서 이앙시기가 늦춰지는 일모작만식, 이모작적식, 이모작만식으로 갈수록 점차 출수기와 생리적 성숙기가 늦어지는 경향이었으며, 특히 이모작만식에서 그 정도가 뚜렷하였다. 동일한 작부방식 내에서는 북쪽에 위치한 재배단위가 남쪽에 위치한 재배단위에 비해 출수가 늦고 생리적 성숙기가 늦어지는 경향을 보였다.

등숙기간은 7월 1일 이상인 이모작만식이 다른 작부방식에 비해 등숙기간이 길게 나타났다. 상대수량지수는 남한기준수량에 대한 백분율로 나타낸 것으로 일모작적식과 만식에서는 남한기준 수량과 비슷하거나 약간 적은 경향이었으나 이모작적식은 남한수량의 60~80% 정도가 되는 재배단위가 많았다. 이모작만식에서는 수량변이가 커질 뿐 아니라 수량을 전혀 기대하기 어려운 재배단위도 많았다.

Fig. 6은 모수를 추정한 11개 남한 벼품종에 대한 북한서부평야지역에서의 지역별 적응성을 작부방식에 따라 30년 일기상 자료에 의해 생육모의하여 예측한 결과이다. 중만생종 품종으로 수원에서 출수기가 8월 15일 이후인 대안벼, 일품벼, 만금벼는 이앙일이 가장 빠른 일모작 적식에서 조차도 적응지역이 황해남도의 극히 일부에 한하여 나타난 것으로 보아 북한 지역에서의 재배 적응이 어려울 것으로 예측되었다. 이에 반하여 화영벼, 팔공벼, 여명벼는 서부평야지 대부분 지역의 일모작적식에서 재배적합성 종합점수가 8 이상으로 적응성이 높게 예측되었다.

대성벼, 오대벼, 상주벼, 소백벼, 상풍벼는 종합점수가 7~8 정도로 적응 가능하나 적응성 정도는 다소 약한 것으로 예측되었다. 모수추정품종 중 7월 1일 이

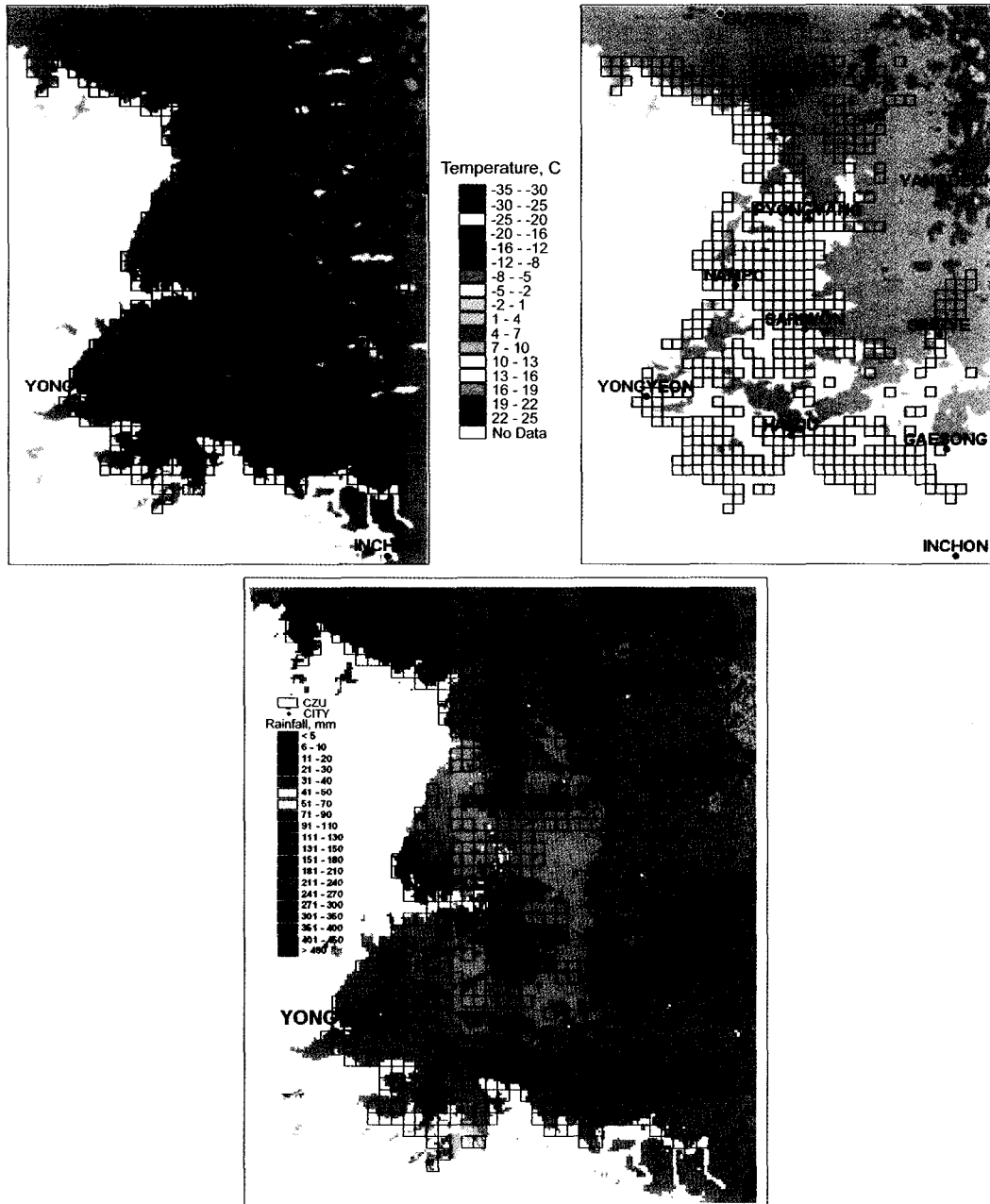


Fig. 3. Estimated surfaces of daily maximum and minimum temperature in May and monthly rainfall in July.

양인 이모작 만식재배에서의 적응성이 있는 품종은 없었다. 이러한 결과는 남한의 중생종 벼 품종들 가운데 수원에서의 출수기가 8월 15일 이전인 것들이 북한서부 평야지에서 적응성이 높을 것으로 예측한 문(1998)의 보고와 일치한다. 경기도 재배품종들 가운데서는

안산벼, 삼평벼, 수라벼, 삼백벼, 화안벼 등의 적응가능성이 높을 것으로 예측된다.

3.5. 고찰

다른 산업에 비해서 지역환경에 대한 의존성이 심한

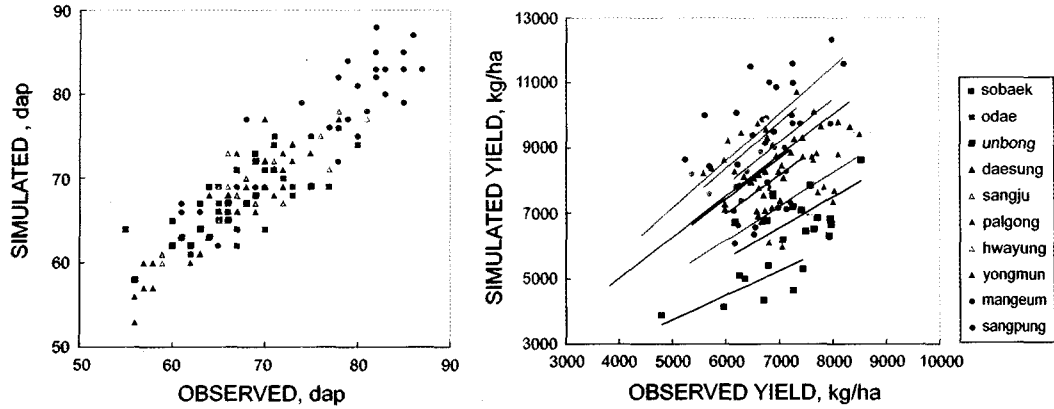


Fig. 4. Simulated heading dates (top panel) and grain yields (bottom panel) of 10 Korean rice cultivars plotted against the reported data at corresponding experimental stations(dap=days after planting).

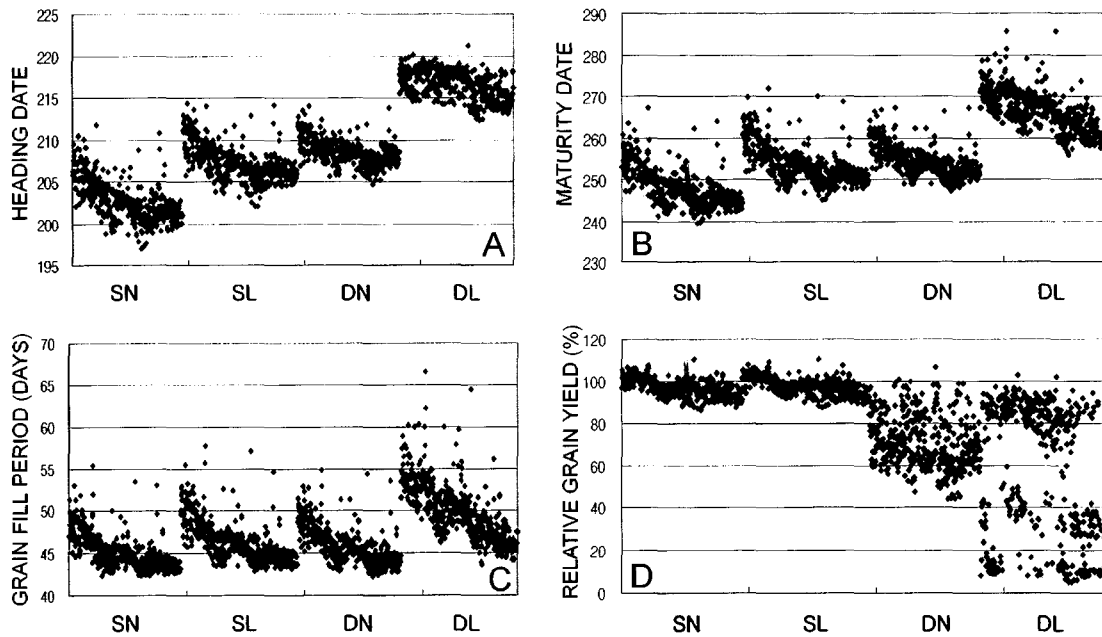


Fig. 5. The 30 year-variation in heading date (A), physiological maturity (B), grain fill period (C), and grain yield (D) of Daesung cultivar grown under 4 different cropping systems (SN: normal transplanting with single cropping, SL: late transplanting with single cropping, DN: normal transplanting with double cropping, and DL: late transplanting with double cropping). For the late transplanting, 10 and 15 days are delayed in the single and the double cropping systems, respectively, compared with the normal transplanting. Grain yield values are the percentage of simulated yield with respect to the reference yield in South Korea.

농업의 특성 때문에 농업기술의 지역간 이전은 많은 위험요인과 경제적 비용을 동반한다. 새로운 품종의 도입을 위해 사전에 다년간의 시험재배를 하는 것은

이러한 위험을 감소시키기 위한 최소한의 “보험” 이라고 볼 수 있다. 그러나 토양과는 달리 기후조건은 연차변이가 크기 때문에 단기간의 시험에 의해 기후에

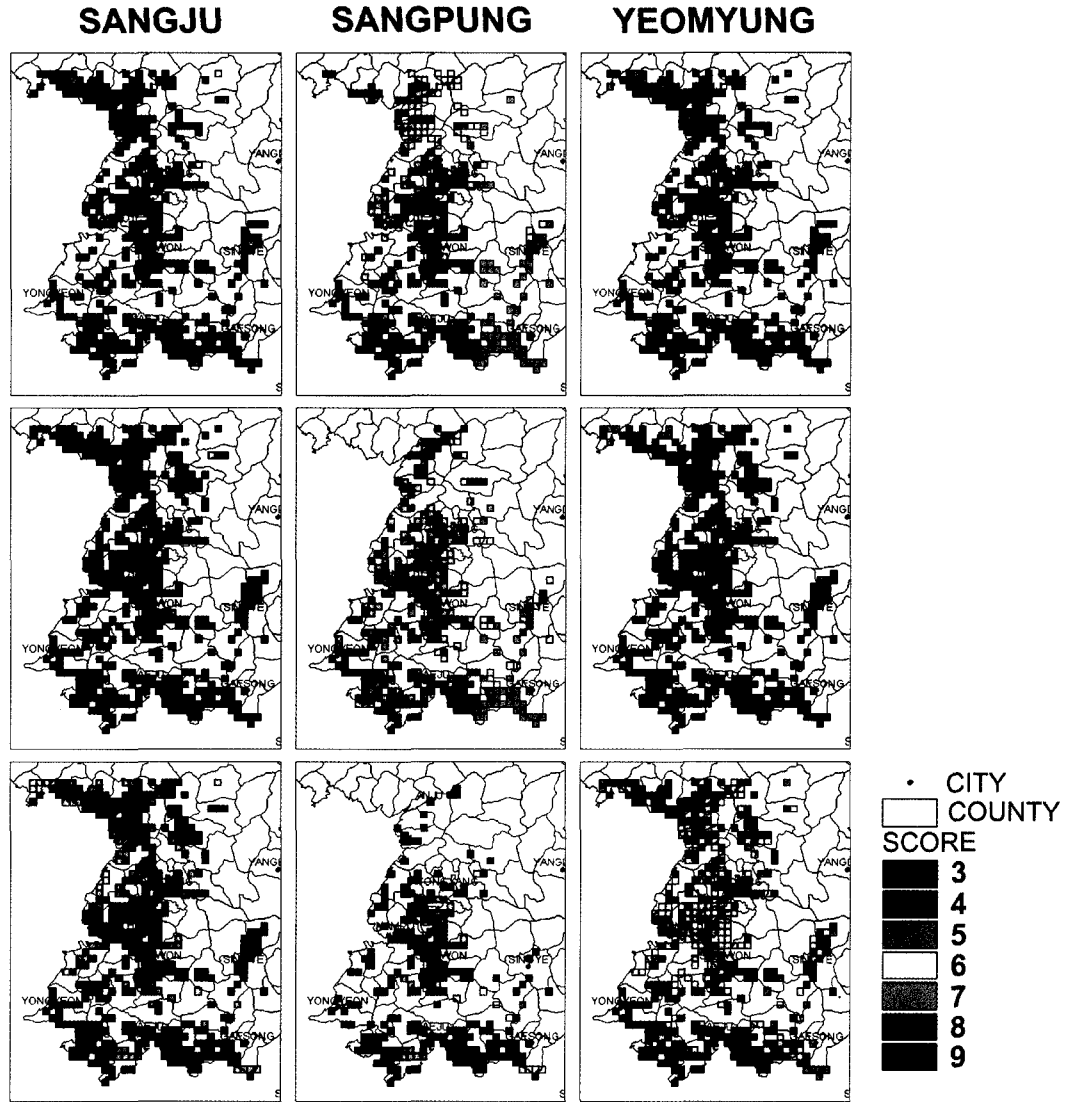


Fig. 6. Overall performance scores of selected cultivars under 3 different cropping systems : normal planting-single cropping (top), late planting-single cropping (middle), and normal planting-double cropping (bottom).

대한 적응성을 파악하기 어려우며, 지역적응성 시험을 무한정 지속할 수도 없는 실정이다. 따라서 실제 포장 시험에 들어가기 전에 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 만든 다양한 기후조건하에서 생육반응을 면밀히 검토하는 일은 효율적인 기술이전을 위해 반드시 거쳐야 하는 단계로서 널리 활용되고 있다. 더욱이 기술도입지역이 북한과 같이 접근하기 어려운 곳이라면 최소한의 포장 시험성적만으로도 기술이전에 충분한 효과를 거두기 위해 더욱 정교한 생육모의기술이 필요하다.

본 연구에서 제시한 5 km × 5 km 규모의 생육모의 단위는 기존의 시군 단위(Yun and Lee, 2000), 혹은 읍면 단위(Yun and Cho, 2001)에 비해 공간규모 면에서 크게 향상된 것이다. 공간내삽에 의한 기후자료의 생성은 선행연구에 의해 이미 1 km 해상도가 달성되었지만, 생육모의 최소단위인 시군 혹은 읍면지역의 대표값으로 변환하는 방법이 정립되지 못했다. 지금까지는 벼논의 위치와 관계없이 동일한 재배구역 내의 모든 격자점 기후값을 평균하거나 그 분산을 이용함

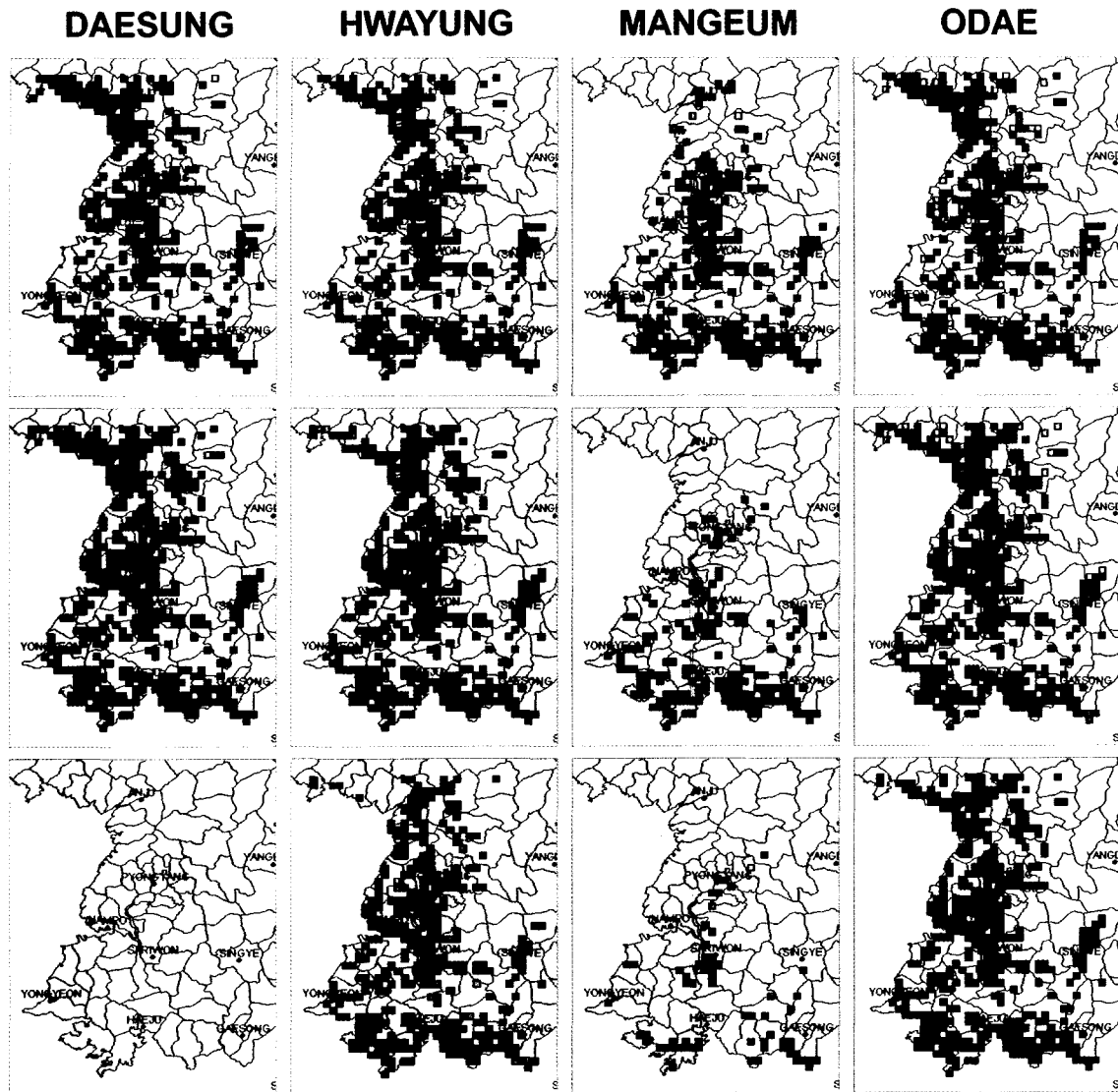


Fig. 6. Continued.

로써, 엄밀한 의미에서 벼 재배지대의 대표 기후값이라고 하기에는 미흡하였던 것이다. 이번에 위성원격탐사자료의 분석결과를 수치기후도와 중첩 분석함으로써 정확한 벼 재배지역 검출에 의해 보다 신뢰성 있는 기후자료의 준비가 가능해졌다.

벼 생육모형 CERES-rice가 국내에 활용되기 시작한 것은 벌써 오래 되었지만, 활용결과의 신뢰성에 결정적인 영향을 주는 국내 재배품종별 유전모수(genetic coefficients)의 추정작업이 이번 연구에서만큼 방대한 규모로 이루어진 적은 없었다. 사용된 작황시협성적 가

운데 생리적 성숙기 등 일부 미흡한 부분이 있긴 하나, 이번에 도출된 20개 품종의 유전모수는 생육모의 기술이 국내 농업연구 및 지도분야에 널리 확산되는 계기를 만들 것으로 본다. 앞으로의 작황조사 혹은 지방적응연락시험에서 품종별 유전모수 추정에 필요한 좋은 자료들이 얻어질 수 있도록 설계에 반영한다면 그 효과는 더욱 커질 것이다.

본 연구를 통해 제시된 작물모형과 GIS의 결합기술은 실시간 식량작물 작황진단시스템을 구축하는데도 기여할 수 있다. 벼 외에도 보리, 옥수수, 감자, 콩 등

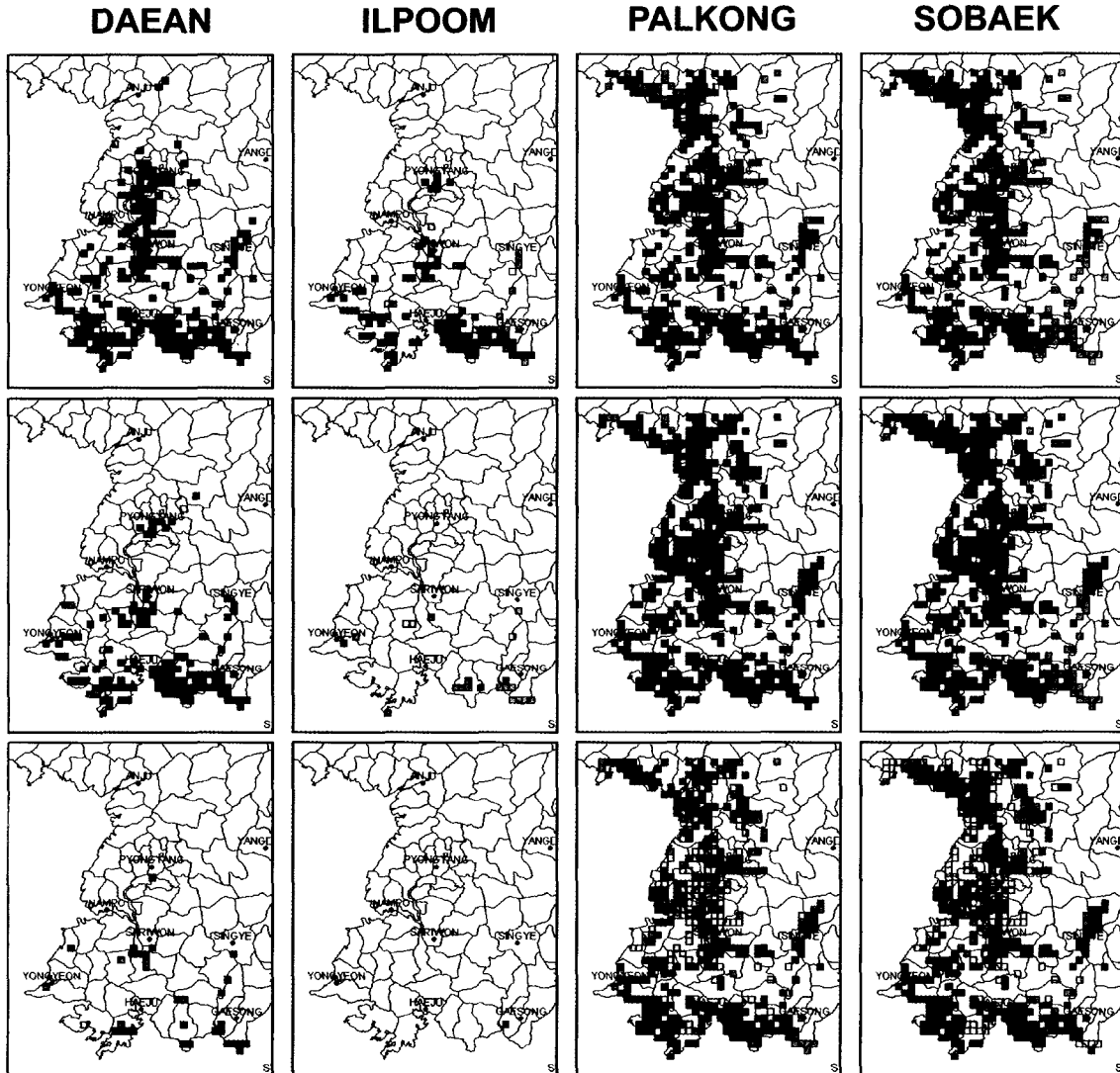


Fig. 6. Continued.

주요 식량작물에 대하여 성능이 국제적으로 인정된 생육모형을 도입하여 국내 품종별 유전모수를 도출하고, 산지별 토양특성, 재배관리정보, 그리고 파종 후 현재까지의 기상자료에 의해 성장과 발육을 모의함으로써 작황의 시공간적 변이를 상시 파악할 수 있다. 작황예보는 시장가격 및 농민소득 안정과 직결되는 농산물의 수급조절시스템 가동에 필수적이다. 기존의 농협이나 농림수산정보센터 등 전국규모 출하조절시스템의 작황분석은 주관적인 면이 강한데, 유럽, 일본 등지에서는 정교한 작물모형에 의해 객관적으로 작황을 진단하며

동시에 경비를 대폭 절감하고 있다.

한편, 우리 나라 국토의 많은 부분이 산간지대임을 고려하여 해상도 10 m 급의 초정밀 기후도(평년 월별 기온, 일사량, 강수량, 강수일수)를 작성한다면, 이미 구축된 유사 해상도의 공간정보 데이터베이스(예, 환경부의 지표피복, 농업과학기술원의 토양정보, 산림청의 임상도, 국립지리원의 국가기본지리정보 등)와 함께 “21세기형 적지적작”을 실현할 수 있다. 이와 같은 초정밀 공간정보를 활용하기 위해서는 여기에 걸맞는 작물모형, 병해충모형, 증발산모형 등 농업모형에 대한

획기적인 연구와 지속적인 투자가 필요하다.

IV. 적 요

남한 벼 품종의 북한서부평야지 재배적응성 예측을 위하여 496개 단위 재배구역 각각에 대하여 30년간의 생육모의를 실시하였다. 5 km × 5 km로 구획된 1,044개 재배구역중 벼는 재배구역은 위성영상자료를 분석하여 추출하였다. 일최고·최저기온, 강우량, 강우일수, 일사량은 1981년부터 2000년 동안 남북한의 기상관측소의 측정값을 이용하여 1 km × 1 km 해상도로 작성하였고, 최소재배단위(CZU)의 벼는 픽셀에 해당하는 기후값만을 발췌하여 그들의 평균값을 각 CZU의 대표값으로 하였으며, 각 재배구역별 월평균값으로부터 30년간의 일기상 자료를 무작위로 생성하였다.

11개 주요 남한 벼품종에 해당하는 CERES-rice 모형에 필요한 생장 및 발육관련모수는 농업관련 국가기관에서 장기간동안 수행하여 축적된 조사자료로부터 추정하였다. 남한 주요 품종의 유전적 특성을 갖도록 모수가 조정된 생육모형 CERES-rice를 북한 서부평야지 496개 벼 재배단위별 무작위로 생성된 30년간의 일기상 자료를 이용하여 이앙기(적식, 만식), 관개(천수답, 수리안전답), 작부방식(일모작, 이모작) 등 3요인을 2수준으로 두어 품종별 총 8개씩의 처리로 년도별 기상변이에 따른 생육 및 수량 등을 모의하였다. 각 품종에 대하여 같은 모형을 남한의 3개 작물시험장 실제 기상자료에 근거한 생육모의를 수행함으로써 북한 지방 모의결과의 상대평가를 위한 기준자료로 삼았다.

생육모의를 통한 분석결과 남한의 중생종 벼 품종들 가운데 수원에서의 출수기가 8월 15일 이전인 것들이 북한서부평야지에서 적응성이 높을 것으로 판단된다. 이 결과는 앞으로 있을 남·북한 농업기술교류시 남한 벼 품종의 북한 곡창지대인 서부평야지 적응성 판단의 중요한 기초자료가 될 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 핵심전문연구(981-0601-

003-2) 및 후속과제인 목적기초연구(R01-1999-000-00175-0), 그리고 경기도 농업기술원의 2001-2002 경 상연구과제의 지원을 받아 수행되었습니다.

인용문헌

- 문헌팔, 1998: 북한농업 생산성과 품종평가. 남북농업교류 협력증진을 위한 국제학술회의 발표논문초록(북한농업연구회), 17-50.
- 양원하, 김덕수, 전용희, 조영찬, 강양순, 2000: 북한 벼 품종의 출수반응. 한국작물학회, 한국농림기상학회, 한국농업정보과학회 공동학술발표논문초록, 171-172.
- 양원하, 김덕수, 최경진, 강양순, 2000: 북한 벼 품종의 감온성 및 감광성. 한국작물학회, 한국농림기상학회, 한국농업정보과학회 공동학술발표 논문초록, 173-174.
- 정용기, 조윤상, 정영평, 정오영, 강경호, 유해영, 최해춘, 2001: 북한 벼 품종의 유전적 다양성. 한국작물학회 추계학술발표논문집, 138-139.
- 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.
- Pickering, N. B., J. W. Hansen, J. W. Jones, H. Chan, and D. Godwin, 1994: WeatherMan: a utility for managing and generating daily weather data. *Agronomy Journal*, **86**, 332-337.
- Yun, J. I. and K. S. Cho, 2001: Yield and production forecasting of paddy rice at a sub-county scale resolution by using crop simulation and weather interpolation techniques. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, **3**(1), 37-43.
- Yun, J. I. and K. H. Lee, 2000: Agroclimatology of North Korea for paddy rice cultivation: Preliminary results from a simulation experiment. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, **2**(2), 47-61.
- Yun, J. I., 2000: Estimation of climatological precipitation of North Korea by using a spatial interpolation scheme. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, **2**(1), 16-23.