

지구온난화에 따른 우리나라 벼농사지대의 생산성 재평가

정유란¹ · 조경숙² · 이변우¹

¹서울대학교 식물생산과학부, ²기상청 기후예측과

(2006년 10월 27일 접수; 2006년 11월 22일 수락)

Evaluation of Site-specific Potential for Rice Production in Korea under the Changing Climate

Uran Chung¹, Kyung-Sook Cho², and Byun-Woo Lee¹

¹*Department of Plant Science, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea*

²*Climate Prediction Division, Korea Meteorological Administration, Seoul 156-720, Korea*

(Received October 27, 2006; Accepted November 22, 2006)

ABSTRACT

Global air temperature has risen by 0.6°C over the last one hundred years due to increased atmospheric greenhouse gases. Moreover, this global warming trend is projected to continue in the future. This study was carried out to evaluate spatial variations in rice production areas by simulating rice-growth and development with projected high resolution climate data in Korea for 2011-2100, which was geospatially interpolated from the 25 km gridded data based on the IPCC SRES A2 emission scenario. Satellite remote sensing data were used to pinpoint the rice-growing areas, and corresponding climate data were aggregated to represent the official “crop reporting county”. For the simulation experiment, we used a CERES-Rice model modified by introducing two equations to calculate the leaf appearance rate based on the effective temperature and existing leaf number and the final number of leaves based on day-length in the photoperiod sensitive phase of rice. We tested the performance of this model using data-sets obtained from transplanting dates and nitrogen fertilization rates experiments over three years (2002 to 2004). The simulation results showed a good performance of this model in heading date prediction [$R^2 = 0.9586$ for early (Odaebyeo), $R^2 = 0.9681$ for medium (Hwasungbyeo), and $R^2 = 0.9477$ for late (Dongjinbyeo) maturity cultivars]. A modified version of CERES-Rice was used to simulate the growth and development of three Japonica varieties, representing early, medium, and late maturity classes, to project crop status for climatological normal years between 2011 and 2100. In order to compare the temporal changes, three sets of data representing 3 climatological years (2011-2040, 2041-2070, and 2071-2100) were successively used to run the model. Simulated growth and yield data of the three Japonica cultivars under the observed climate for 1971-2000 was set as a reference. Compared with the current normal, heading date was accelerated by 7 days for 2011-2040 and 20 days for 2071-2100. Physiological maturity was accelerated by 15 days for 2011-2040 and 30 days for 2071-2100. Rice yield was in general reduced by 6-25%, 3-26%, and 3-25% per 10a in early, medium, and late maturity classes, respectively. However, mid to late maturing varieties showed an increased yield in northern Gyeonggi Province and in most of Kwangwon Province in 2071-2100.

Key words : Rice, Climate change, CERES-Rice, Gridded climate data, Japonica rice

I. 서 언

산업혁명 이후 계속되고 있는 이산화탄소, 메탄 등 온실가스 배출량 증가로 인하여 지구의 평균기온은 지난 100년 동안 0.6°C 정도 상승하였다. 기온상승은 해양보다 육지에서 더 빨라서 이미 일교차가 줄어들었고, 강수량이 증가하였으며, 식물의 생장기간이 연장된 것으로 관찰되었다. 1904년 이래 100년간 우리나라에서 관측된 기온자료를 분석한 결과 평균기온이 1.5°C 상승하여 지구온난화 추세를 훨씬 상회하고 있음을 알 수 있다(기상연구소 기후연구실, 2005). 이 같은 급격한 기온상승 원인 가운데는 전지구적 온난화 외에 세계적으로 그 유래가 드문 우리나라의 급격한 도시화를 들 수 있다. Chung *et al.*(2004)은 도시화에 따른 지난 80년간 승온효과가 월별로 0.3°C에서 0.5°C나 되며, 특히 일 최저기온의 상승분에 도시열섬효과가 많이 포함되었다고 하였다. 즉 현재 사용 중인 기온값에는 도시화효과가 포함되어 있으므로 이들로부터 아무 보정 없이 농촌지역의 기온을 추정할 경우 적지 않은 오류가 발생할 가능성이 크다. 기상관측이 대부분 도시지역에 위치한 현실을 감안하면 기후자료를 작물생산성 평가에 이용하기 위해서는 반드시 사전에 도시효과를 제거해야 한다.

최근 작물모형에 의한 대기-작물-토양 생태계의 종합적인 모의가 기후변화 영향평가에 필수적인 도구로 자리 잡고 있다. 작물모형이 실용화된 작물에는 밀, 보리 등 겨울작물은 물론, 벼, 옥수수, 수수, 콩 등 여름작물도 망라되어 사실상 우리나라에서 재배되는 모든 작물에 적용가능하다(Trnka *et al.*, 2004; Thomson *et al.*, 2002; Southworth *et al.*, 2002; Chipanshi *et al.*, 2003; Olszyk *et al.*, 1999). 우리나라에서도 이미 80년대 후반부터 기후변화 영향평가에 작물모형이 사용되기 시작하였으며(Yun, 1990), 최근에는 원격탐사, 지리정보시스템 등 공간정보기술과 결합함으로써 농업기후시대 구분(Yun and Lee, 2000), 재배적지 판정(Kim *et al.*, 2002), 작황진단(Yun, 2003) 등에 실용화되고 있다.

기후변화를 감지할 수 있을 정도의 기상관측소는 종관기상관측망(synoptic observation network)에 속하며 관측소 간 거리가 평균 30 km 이상이다. 하지만 기후변화의 충격을 직접 받는 농작물의 재배규모는 이보다 훨씬 작은 수 백 m 이내이며 대규모 농업지대에서도

대개 1 km 미만이다. 당연히 기후정보도 같은 수준의 공간해상도를 가져야 하지만 현재의 역학적 규모축소 기술(down-scaling) 수준에서 제공할 수 있는 기후변화 정보의 공간해상도는 종관망과 마찬가지로 30 km 정도가 그 한계이다(권원태, 2004). 이를 극복하기 위해 다양한 공간내삽방법이 개발되어 왔으며, 이들 가운데 거리역산가중법(inverse distance weighting, IDW)이 가장 흔하게 이용된다. 우리나라와 같이 지형의 기복이 심한 곳에서는 IDW에 의한 비관측점의 기온추정오차 가운데 가장 큰 부분이 해발고도의 편차에 의한 것이다. 따라서 추정에 사용된 지점들의 고도값으로부터 기온추정과 동일한 IDW 내삽에 의해 생성한 “가상지형”과, 비관측지점의 실제 고도간 편차를 구하여 기온감율을 보정해 주면 상당부분 개선이 이루어진다. 그러나 기상관측소의 위치가 대부분 도시지역으로서 도시열섬효과가 비도시 지역에도 동일하게 적용되어 시골지역의 추정기온이 실제보다 높은 쪽으로 왜곡되기 쉽다. 그 동안 도시열섬효과와 공간분포를 연속적인 모의시스템으로 구현하기 위해 여러 방법이 제시되었지만(Gallo *et al.*, 2002; Hansen *et al.*, 2001; Gallo and Owen, 1999; Peterson *et al.*, 1999), 우리나라 상황에 적용하기에는 어려움이 많았다.

최근 국내에서 수행된 한 연구에서는 도시열섬효과와 공간적인 확산을 모의하기 위해 먼저 불연속적인 변량인 시군 행정구역단위 인구를 지표피복도 상의 시가지 픽셀에만 할당하여 규칙적인 격자점 단위의 평균 인수로 변환함으로써 연속적인 변량인 수치인구모형(digital population model, DPM)으로 표현하였다. DPM과 기온추정오차간 회귀식을 기존의 거리-고도 보정 내삽과정에 결합함으로써 1971-2000 평년 월별 일 최저기온의 추정오차를 기존에 비해 50% 이상 제거할 수 있었다(Choi *et al.*, 2003). 이 연구 성과를 이용하면 도시효과가 제거된 농촌지역의 기온변화를 높은 공간해상도로 복원해낼 수 있다. 만약 기상관측지점별로 기온변화 시나리오가 주어진다면 미래의 공간분포 역시 재현할 수 있다. 이렇게 해서 현재를 기점으로 미래 100년간 매 30년간씩 기후평년값 세트가 준비되면, 각 시기별 농작물의 생장 및 발육을 기후자료와 동일한 공간해상도로 모의할 수 있다.

원래 농작물의 생육모의는 기후, 토양 등 환경조건이 동질적인, 혹은 한 개 기상관측소가 대표할 수 있는 지역에 한해 제한적으로 적용하고 있지만, 넓은 지

역에 걸쳐 작물반응의 공간변이를 알아내기 위해서는 지리정보시스템(geographic information system, GIS)과의 결합이 불가피하다. GIS와 결합된 작물모형은 정밀농업 수준의 영농으로부터 한 국가나 지역의 작황진단에 이르기까지 광범위한 용도에 활용될 수 있다. 최근 수행된 연구에서 전국 1,455 읍면의 일별 최고 및 최저기온, 일사량, 강수량 자료를 기상청 56개 표준관측소 자료의 공간내삽에 의해 얻어, 1997-1999기간의 읍면별 벼 수량을 계산한 결과 시군별 생산량이 농림부 보고자료와 높은 상관을 유지함을 보였다(Yun, 2003).

본 연구에서는 실측 일기상자료 대신 예측 기후평년값을 적용하여 기후변화와 그에 상응한 벼 작황의 지리적 분포양상을 복원함으로써 지구온난화에 따른 우리나라 벼농사지대의 생산성을 재평가하고자 한다.

II. 재료 및 방법

2.1. 농경지 맞춤형 기후자료 제작

2.1.1. 기준평년 기후자료 제작

기상청 56개 지점(제주도, 울릉도 제외) 종관자료(일 최고/최저 기온의 월별 평균값)를 1971-2000년 30년 단위로 수집하였다. 56개소 기상관서의 해발고도를 이용하여 가상의 해발고도표면을 생성하고 월별 기온감율값을 곱하여 해발고도 보정값을 생성하였다. 이 보정값을 IDW에 의해 추정된 초기 기온표면으로부터 감하여 고도편차가 보정된 월별 일 최고 및 최저기온 표면을 작성하였다(Yun, 2004). 일 최저기온에는 도시 지역의 인구나 토지이용도를 동시에 고려함으로써 도시열섬효과를 정량적으로 표현할 수 있는 DPM을 기존 고도보정 기온 공간내삽모형과 결합함으로써 도시효과를 보정한 Choi *et al.*(2003)의 방법에 의해 작성하였다. 모든 기후자료는 공간해상도 270 m의 ArcGIS9.1 Grid(ESRI Inc., USA) 파일로 저장하였다.

2.1.2. 시나리오 기후자료 작성

기상연구소에서 25 km 해상도로 제작한 온실가스 증가에 따른 한반도 기온 및 강수량 변화 시나리오(IPCC SRES A2 편차자료, 2011-2100)를 양여 받아 2011-2040년, 2041-2070년, 2071-2100년의 30년 단위로 월별 평균을 낸 후 ArcGIS9.1 Grid 파일로 변환하였다. 준비된 월별 편차평균 Grid를 270 m 간격

으로 re-sampling 하여 기준평년 기후도에 더해줌으로써 30년 단위별 “미래 평년기후도”(월별 기온 및 강수량 분포)를 270 m 해상도로 작성하였다.

2.1.3. 공간평균 기후자료 작성

농작물 생육에 미치는 기후의 영향을 연구하고자 할 때 농경지의 규모와 그에 적합한 기후의 규모가 반드시 고려되어야 한다. 예를 들면 농작물의 생산량은 행정구역(시, 군 polygon) 단위로 집계되지만 기후자료는 기상관측지점(point) 단위로 얻어지므로 이들 간의 일대일 비교는 바람직하지 않다. 과거 60년 간 쌀의 생산은 전국 160여 개 시군에서 이루어졌지만 기후는 14개 지점에서만 관측되었다. 기존연구에서는 한 개 지점 기후자료에 주변 여러 시군의 생산량 자료를 대응시키거나, 기후자료를 보유하지 않은 시군의 생산량 자료는 아예 분석에서 제외하였다. 나아가 같은 시군 내에서도 기후의 공간변이가 존재하므로 수집된 기후자료가 시군 내 모든 농장의 기후를 대표하기는 더욱 어렵다. 이러한 “규모의 어긋남”을 극복하기 위해서 사용하는 방법이 기후의 공간내삽(spatial interpolation)이다(Dodson and Marks, 1997; Nalder and Wein, 1998). 최근 국내에서도 GIS, RS, GPS 등 발달된 공간정보기술과 실측에 입각한 소기후모형의 결합을 통해 공간기후학적 내삽기술이 크게 발전하고 있다(Yun, 2000). 이 기술에 의해 끊임 없이 연속적인 기후자료를 복원해내면 귀중한 농작물의 생산통계자료를 버리지 않고 효율적으로 활용할 수 있게 된다.

국지기후 추정값의 정확도를 제고하기 위해 Landsat 위성영상으로부터 실제 벼농사가 이루어지는 픽셀만 선별하였으며(Koo *et al.*, 2001), 벼논픽셀을 하나라도 포함하는 시군행정구역을 생육모의를 위한 공간단위 즉 재배구역단위(Cultivation Zone Unit, CZU)라고 부르기로 하였다. 모든 CZU는 국립지리원에서 발간한 1:250,000 행정구역도 상에서 확인하고 수치지도화 작업을 거쳐 중부원점(동경 127도, 북위 38도)의 TM좌표계에 투영시킨 ArcView(ESRI Inc., USA) Shape 파일로 저장하였다. Koo *et al.*(2001)의 방법대로 추출된 벼논픽셀을 기준평년 기후도에 중첩시키고, 행정구역별로 벼논픽셀에 해당하는 기후값만을 선별하여 평균값을 구하였다. 이들 CZU 대표 기후값은 월별평균값으로서, 작물모형 입력을 위해서는 일별 자료로 변환시켜야 한다. 기후란 평균뿐 아니라 그 변이를 함축

한 의미로서 농업적으로는 특히 연차변이가 중요하다. 앞서 작성된 재배구역별 기후 평균값은 1971-2000년, 2011-2040년, 2041-2070년, 2071-2100년 등 30년씩의 기후를 대표하지만, 각 기간별 기후값 30개를 산술적으로 평균한 값에 불과하므로 실제 30년 동안 겪었던 기후의 연차변이에 대해서는 어떤 정보도 제공하지 않는다. 이러한 결점을 보완하고 현실감 있는 일 기상자료를 도출하기 위해 여러 가지 통계학적 기법이 이용되어 왔는데, 본 연구에서는 Pickering *et al.*(1994)에 의해 제시된 방법에 따라 각 재배구역별로 1971-2000년 및 2011-2040년, 2041-2070년, 2071-2100년 기간의 “통계학적인 일 기상자료”를 무작위로 생성하였다.

2.2. 자포니카형 벼의 성장모형 준비

2.2.1. 발육단계 추정식

작물을 효율적으로 재배하고 관리하기 위해서는 작물의 생육단계를 정확하게 예측할 수 있어야 한다. 벼의 발육은 출엽과 밀접한 관계가 있는데, 출수까지의 기간은 이 기간 중에 나오는 총엽수와 개개 잎의 출엽간격에 의하여 결정된다. Lee *et al.*(2001a)에 의하면 온도에 대한 출엽반응은 Logistic 함수에 의해 표현할 수 있으며(식 1), 벼의 최종엽수(final number of leaves, FNL)에 영향을 주는 환경요인이 일장(day length, DAL)일 것으로 판단하고, 최종엽수 추정식을 일장함수로 설정하였다(Lee *et al.*, 2001b, 식 2).

$$\frac{dL}{dt} = (T_i - 10) \cdot a^{-1} \cdot b^c \cdot c \cdot (a - L)^{c-1} \cdot L^c \quad (1)$$

여기서 T_i 는 일평균기온, L 은 출엽수이고, a, b, c 는 출엽속도 모델의 계수이다.

$$FNL = a + b \cdot \exp[c \cdot (DAL - 13.0)] \quad (2)$$

여기서 a, b, c 는 최종엽수 추정모델의 계수이다.

이 두 식을 결합한 출수기 예측모형의 조중만생 대표 품종인 오대벼, 화성벼, 동진벼의 모수는 이미 추정되어있다(Table 1 and 2).

2.2.2. 수량구성요소 추정식

질소영양은 작물의 생장이 진전됨에 따라 결핍하게 되고, 군락구조는 잎의 상호차광에 의해 그늘이 생기

Table 1. Estimated parameters of the equation for accumulated temperature and leaf appearance rate

Variety	Estimated parameter		
	a	b	c
Odaebyeo	19.2370	2258.9408	-1.2237
Hwasungbyeo	21.7508	3668.3946	-1.2901
Dongjinbyeo	21.8196	3179.6060	-1.2668

Table 2. Estimated parameters of the equation for final number of leaves in photoperiod sensitive phase

Variety	Estimated parameter		
	a	b	c
Odaebyeo	13.0518	-0.0265	0.6527
Hwasungbyeo	14.5681	0.0187	2.6582
Dongjinbyeo	14.8678	0.0155	2.7156

는데, 하부의 질소는 점차적으로 새로운 잎이 발생하는 상부로 전이되기 때문에 위층 군락의 질소농도는 높게 유지되는 반면, 아래층 군락의 질소농도는 낮게 유지된다. 또한 식물이 성장하면서 질소농도가 낮은 구조물질이나 저장물질이 전체 건물중에서 차지하는 비중이 높아지기 때문에 질소농도가 증가하여도 건물중의 증가가 발생하지 않는 질소농도점이 존재한다. Ulrich(1952)는 이러한 질소농도점을 식물의 한계질소농도(Critical Nitrogen Concentration, N_c)라고 하였고, “주어진 시기에 식물이 최대 성장속도를 유지할 수 있는 최소한의 질소농도”라고 정의하였으며, Lemaire *et al.*(1989)은 한계질소농도곡선은 작물의 질소영양상태를 파악하는데 필요한 요소로 이것으로부터 질소영양지수(Nitrogen Nutrition Index, NNI)를 계산할 수 있다고 하였다. NNI는 작물의 질소영양상태를 정량화한 것으로 Cui *et al.*(2002)은 Japonica 계열과 통일계열 품종간의 한계질소농도 곡선에는 차이가 없으며, $N_c = 5.19W^{-0.4256}$ ($R^2 = 0.9637$)으로 표현할 수 있다고 하였다. 또한 Lee *et al.*(2006)은 NNI를 이용하여 질소결핍정도를 나타내는 다양한 지표들을 표준화하여 질소영양상태에 따른 수당 영화수의 변화를 검증하고(식 3), Bum *et al.*(2006)은 Japonica 계열과 통일계열 품종간의 광이용효율(Radiation Use Efficiency, RUE)과 건물생산성과의 관계를 설명하였다. 이로부터 작성한 영화수 추정식과 엽생장 추정식을 CERES-Rice의 구성모듈로 결합하였다.

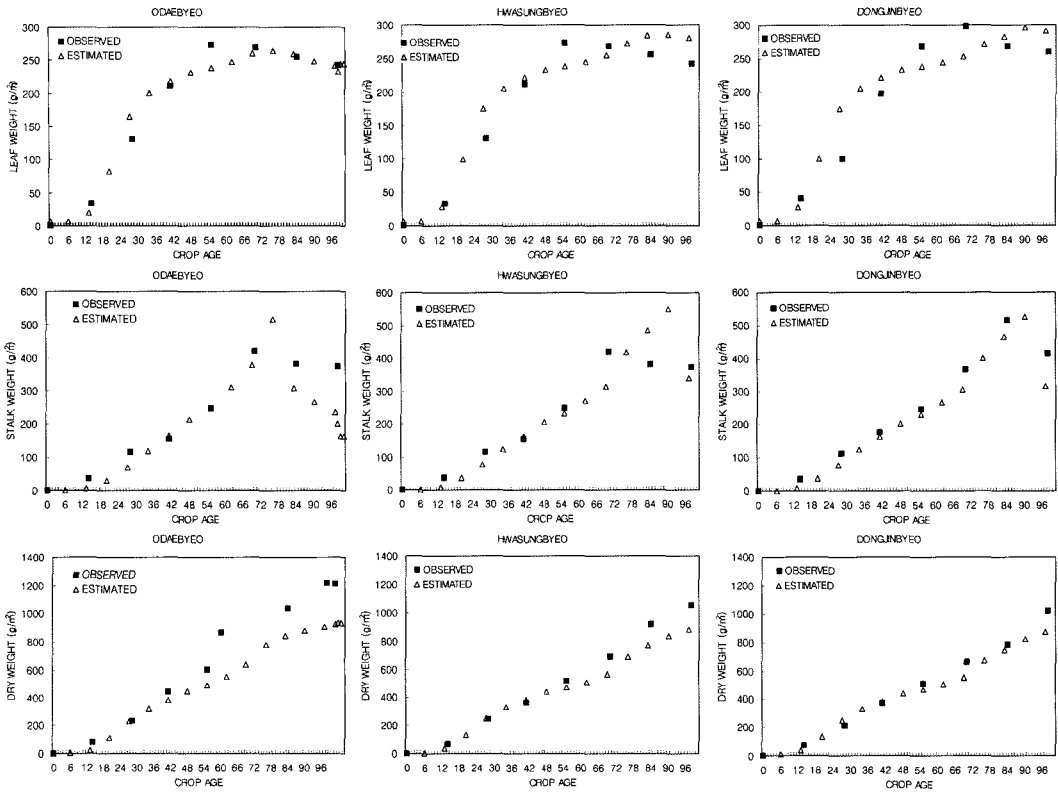


Fig. 1. Comparison between simulated and observed leaf (top), column (middle) and dry weight (bottom) of 3 maturity groups in Japonica rice (left:Odaebyeo, middle : Hwasungbye0, right : Dongjinbye0, ■ : observed, △ : simulated).

$$RUE = RUE_{max} \cdot (1 - \exp(-1.11 \cdot NNI - 0.35)) \quad (3)$$

여기서 $RUE_{max} = 7.01 - (3.72 \cdot \text{LOG}_{10}(DW))$ 이고,

$$NNI = \frac{N_{act}}{N_c}$$

이다.

온도에 따른 출엽속도와 일장에 따른 최종엽수를 감안한 출수기 예측모델과, 한계질소농도와 NNI 기반의 다양한 지표에 의한 영회수 추정 및 엽생장 모델이 결합된 CERES-Rice는 기존모형에 비해 자포니카형 벼의 생육모의에 적합한 것으로 확인되었으므로 “CERES-Japonica”로 명명하였다. 작물과확원(수원)의 이양기-질소시비실험자료(2002-2004년)로부터 이 모형의 신뢰성을 검증하였는데, 오대벼, 화성벼, 동진벼의 엽과 줄기 건물중 모델값은 실측값을 잘 표현하였으나, 총건물중 모델값은 실측값에 비해 과소 추정하는 것으로 나타났다(Fig. 1). 또한 엽령과 분얼수 모델값은 실측값에 비해 과다 추정을 하고, 출수기

엽면적지수 모델값은 초기에는 실측값에 비해 과다 추정을 하였지만, 후기에는 빠르게 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 2). 이양시기에 따라 출수기는 평균 2일, 1일, 3일의 차이가 있었으며, 질소시비의 경우는 3일, 1일, 2일로 출수기 추정능력이 높았다(Fig. 3). 생리적 성숙기는 이양시기에 따라 평균 7일, 11일, 16일로 추정능력이 오대벼가 가장 양호하였으며, 화성벼, 동진벼 순으로 나타났다(Fig. 4). 이양시기에 따른 수량은 조생종 오대벼의 경우 10a당 평균 52 kg, 중생종 화성벼는 79 kg, 만생종 동진벼 123 kg의 차이를 보였으며, 질소시비에 따른 수량은 평균 84 kg, 62 kg, 167 kg으로 나타나 모델에 의한 수량이 실측 수량에 비해 과소 추정되었다(Fig. 5). 종합해보면 이양시기와 질소시비에 따라 만생종 동진벼의 경우 출수기와 생리적 성숙기 예측이 비교적 양호하며, 조생종 오대벼와 중생종 화성벼는 출수기와 생리적 성숙기뿐만 아니라 수량면에서도 정확하게 예측할 수 있는 것으로 평가되었다.

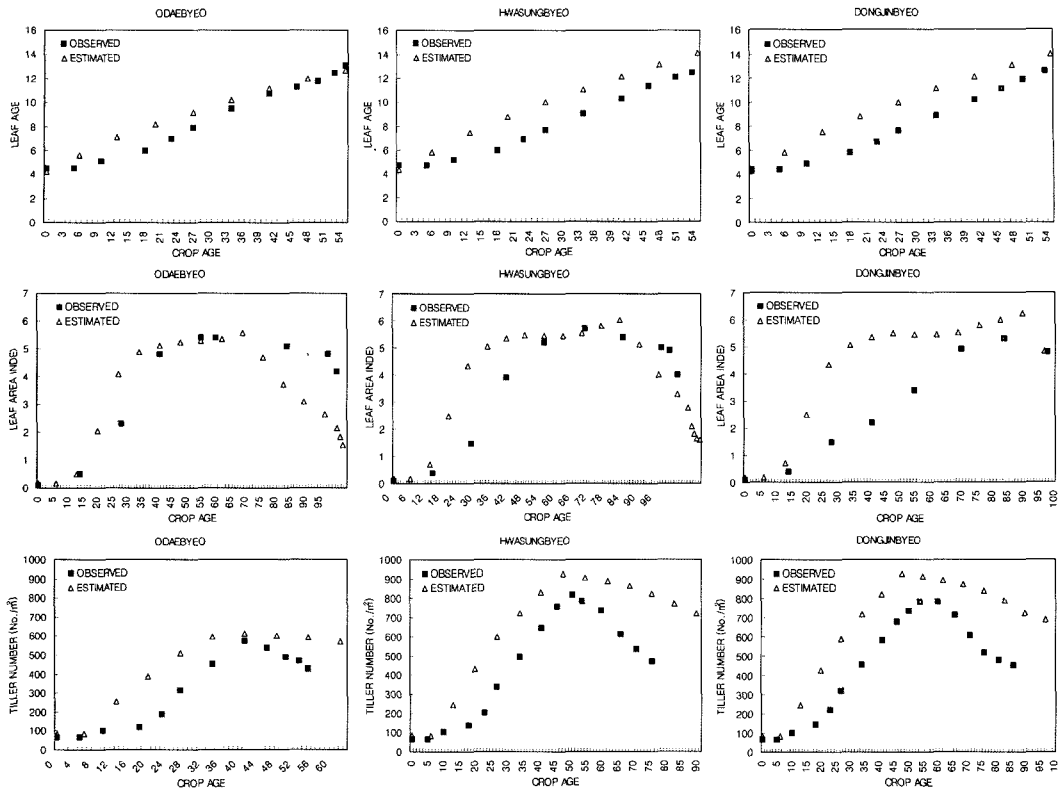


Fig. 2. Comparison between simulated and observed leaf age (top), leaf area index (middle) and tiller number (bottom) of 3 maturity groups in Japonica rice (left:Odaebyeo, middle:Hwasungbyeo, right:Dongjinbyeo, ■ : observed, △ : simulated).

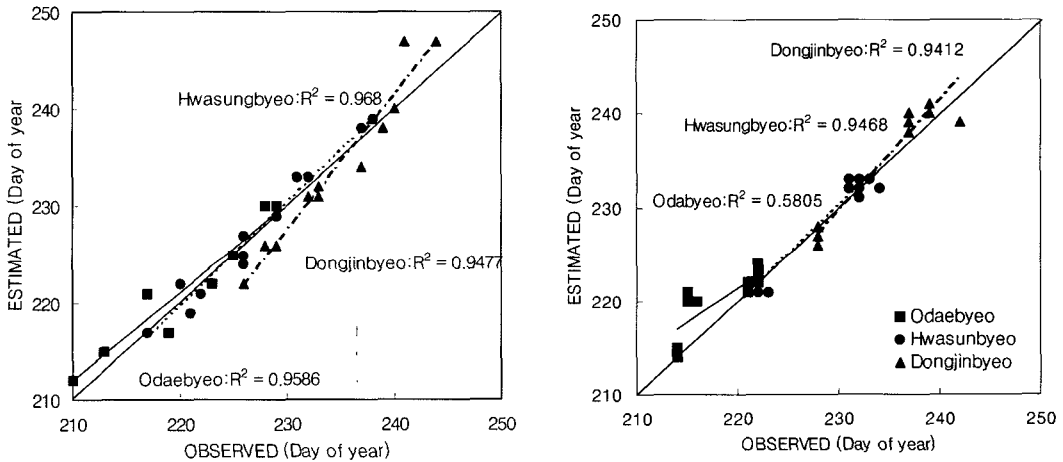


Fig. 3. Comparison between simulated and observed heading dates under different transplanting dates (left) and different nitrogen fertilization rates experiments (right) of 3 maturity groups in Japonica rice over a period of three years (2002-2004).

2.3. 모형 구동

작물모형에서 요구하는 토양자료는 생육모의 직전의 양분함량, 토성, 보수력, 그리고 포장의 지형정보이며,

모의에 이용되는 작토층의 토심 및 토층의 수는 사용자가 선택할 수 있다. 본 연구에서는 농촌진흥청에서 발간한 정밀수치토양도 위에, 앞서 작성한 벼논피복

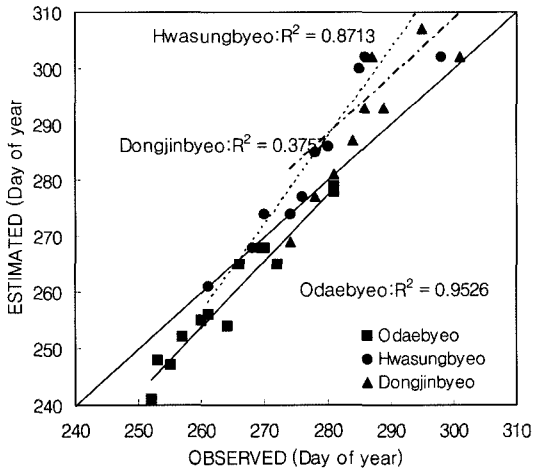


Fig. 3. Comparison between simulated and observed heading dates under different transplanting dates (left) and different nitrogen fertilization rates experiments (right) of 3 maturity groups in Japonica rice over a period of three years (2002-2004).

주제도를 중첩시켜 벼논픽셀에 해당하는 논토양 정보를 추출하고, 유효수분최저한계와 유효수분최대한계를 자세하게 추정하기 위해서 “유효수분 조건표”를 참고하여 작성하였다(Ritchie *et al.*, 1990). 준비된 토양, 기상, 재배관리정보를 작물모형에서 요구하는 형식으로 편집하고(Table 3 and 4), 모수조정이 끝난 벼 생육모형(CERES-Japonica)에 입력시켰다. 한 개 CZU를 대상으로 조생(오대벼), 중생(화성벼), 만생(동진벼)

Table 3. Management conditions for simulation of CERES-Japonica

Transplant age	Fertilizer (N-P-K, kg/ha)	No. of planting (hill)	Transplanting interval (cm)	Irrigation management
30	110-70-80	3	30	non-stress (Automatic)

*Level of CO₂ concentration: 330ppm (same as the present)

3개 품종의 생육을 모의하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 시나리오 기후자료

270 m 해상도로 제작된 기준 평년 1971-2000년의 벼 생장기간(6월~9월)동안의 일 최고기온과 최저기온에서 2011-2040년, 2041-2070년, 2071-2100년 시나리오의 일 최고기온 및 최저기온을 뺀 편차를 비교하였다(Table 5). 100년 후 벼 생육기간동안의 일 최고기온은 약 5°C 상승하고, 일 최저기온은 약 6°C 상승할 것으로 예상되었다.

3.2. 재배구역단위별 기후시나리오의 공간평균

벼 생장기간(6월~9월)동안 시군 행정구역에서 벼논 픽셀에 해당하는 기후값의 평균(spatial mean of site-specific values)과 시군 전체 평균기후값(original)을

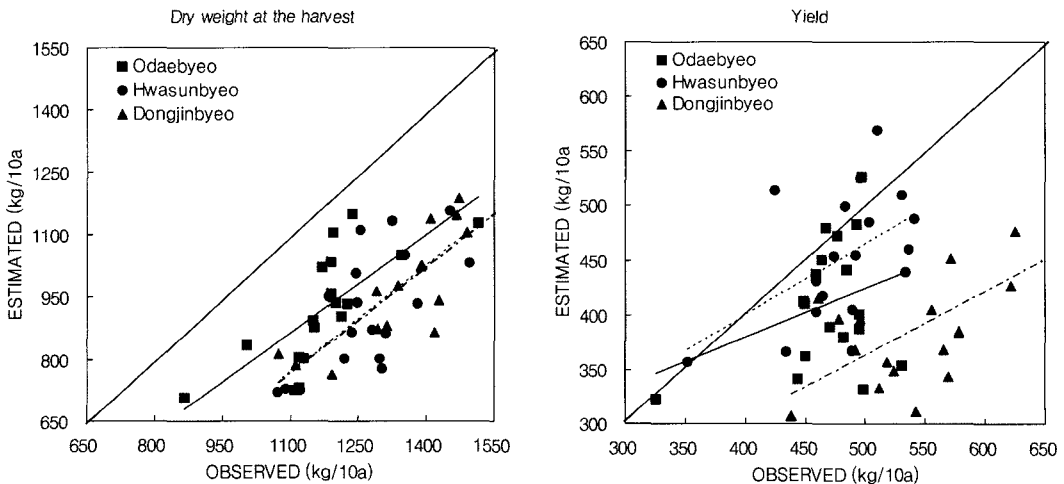


Fig. 4. Comparison between simulated and observed physiological maturity under different transplanting dates of 3 maturity groups in Japonica rice over a period of three years (2002-2004).

Table 4. Transplanting dates for simulation of CERES-Japonica

Region	Variety		
	Odaebyeo	Hwasungbyeo	Dongjinbyeo
Northern Kwangwon Province	15 May	15 May	10 May
Southern Kwangwon Province	20 May	15 May	15 May
Northern Gyeonggi Province	25 May	20 May	15 May
Southern Gyeonggi Province	30 May	25 May	15 May
Northern Chungcheong Province	25 May	20 May	15 May
Southern Chungcheong Province	30 May	25 May	20 May
Northern Gyeongsang Province	25 May	30 May	25 May
Southern Gyeongsang Province	30 May	30 May	25 May
Northern Jeolla Province	30 May	30 May	25 May
Southern Jeolla Province	30 May	30 May	25 May

*Base line temperature for transplanting is 15°C(Yun and Lee, 2001)

Table 5. Changes in daily maximum and minimum temperatures under the projected climate during 2011-2100

		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Average
Maximum temperature	2011-2040	1.5	2.1	1.6	1.7	1.9	1.5	1.4	1.6	1.6	1.7	1.3	1.8	1.7
	2041-2070	3.8	3.9	3.4	2.9	3.0	3.0	3.1	3.5	3.5	3.2	2.9	4.1	3.4
	2071-2100	5.3	5.3	5.2	4.8	4.9	4.8	4.8	5.5	5.8	5.4	5.0	5.2	5.2
Minimum temperature	2011-2040	2.3	2.8	2.0	1.7	1.8	1.8	1.4	1.6	1.4	1.7	1.8	2.5	1.9
	2041-2070	4.7	4.7	4.0	3.0	3.2	3.6	3.3	3.6	3.7	3.5	3.3	5.2	3.8
	2071-2100	6.1	6.3	5.9	5.1	5.1	5.5	5.5	5.7	6.2	5.9	5.6	6.2	5.7

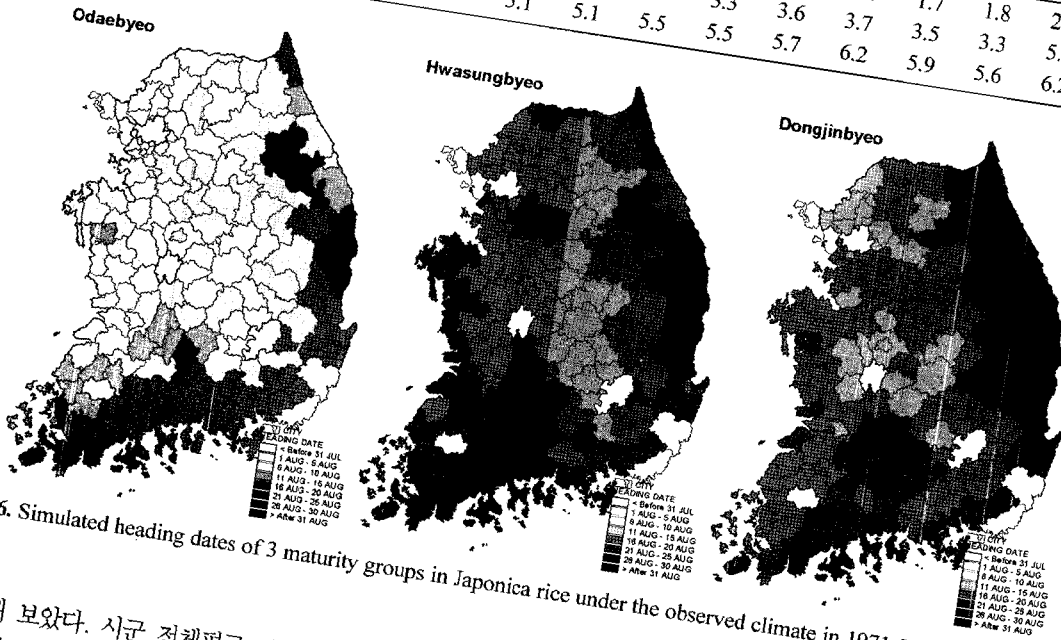


Fig. 6. Simulated heading dates of 3 maturity groups in Japonica rice under the observed climate in 1971-2000.

비교해 보았다. 시군 전체평균 기후값은 벼 재배지역 외에 숲과 도심에서 나타나는 기후값이 혼합되어 있기 때문에 실제 벼 재배지의 기후값과는 다를 수 있다. 영월, 횡성, 봉화, 문경, 장수와 같은 강원도와 경상북도 산간지역의 일 최고 및 최저기온의 경우 시군 전

체평균 기후값이 벼는 기후값보다 낮은데, 그 이유는 북부 산간지역 기온은 고도와 산악지형 효과에 의해 벼논이 존재하는 평야지보다 낮기 때문이다. 반면 여주, 남원, 수원과 같은 해안지역과 수도권 인근 평야지에서 는 시군 전체평균 기온이 벼논픽셀 기후값보다 높은

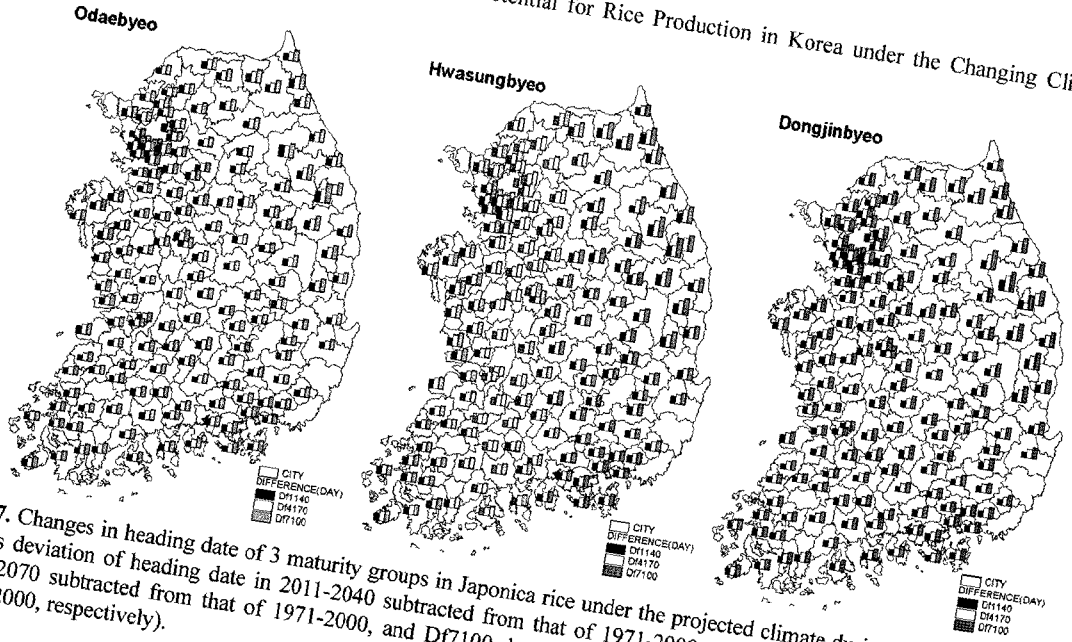


Fig. 7. Changes in heading date of 3 maturity groups in Japonica rice under the projected climate during 2011-2100 (Df1140 means deviation of heading date in 2041-2070 subtracted from that of 1971-2000, Df1170 deviation of heading date in 2041-2070 subtracted from that of 1971-2000, and Df1100 deviation of heading date 2071-2100 subtracted from that of 1971-2000, respectively).

데, 이는 낮은 지형과 도시열섬효과로 시군 전체 기후 값이 실제 비군락의 기후값보다 높아지기 때문이다.

3.3. 기후변화 시나리오에 따른 품종별 생장과 발육

3.3.1. 출수기

1971-2000년 평년기후도에서 모의된 출수기가 Fig. 6이다. 조생종 오대벼의 출수기는 중부지방에서 8월 초(최초 8월 3일)에 출수를 시작하여 남부지방에서는 8월 중순이면 대부분 출수되었으며, 태백시와 평창군의

출수가 가장 늦었다. 중만생종 화성벼와 동진벼는 강원도와 중부지방에서 8월 중순(최초 8월 16일)에 대부분 출수되었으며, 태백산맥의 산간지역 출수가 지연되었다.

1971-2000년 평년기후도에서 모의된 출수기를 기준으로 수기로 두고 미래 3시기의 출수기변화를 비교해보면, 3 품종 모두 가까운 미래(2011-2040년)에는 출수기가 일주일 정도 빨라지고, 먼 미래(2071-2100년)에는 최대 20일까지 단축될 수 있다(Fig. 7).

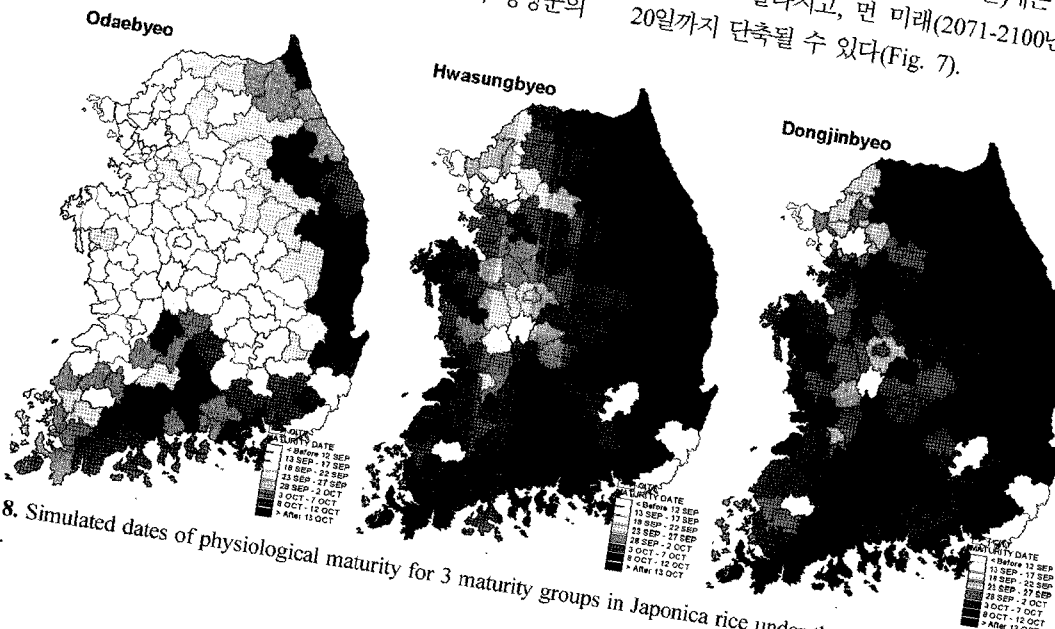


Fig. 8. Simulated dates of physiological maturity for 3 maturity groups in Japonica rice under the observed climate in 1971-2000.

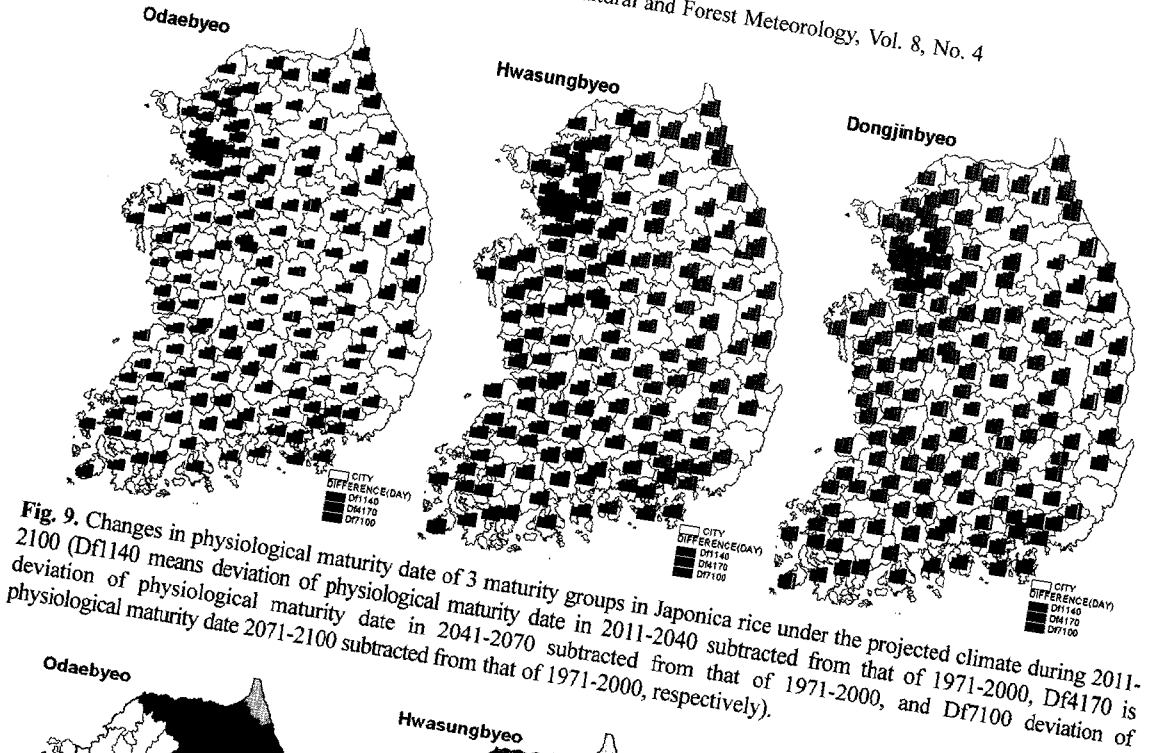


Fig. 9. Changes in physiological maturity date of 3 maturity groups in Japonica rice under the projected climate during 2011-2040 (Df1140 means deviation of physiological maturity date in 2041-2070 subtracted from that of 1971-2000, Df4170 is deviation of physiological maturity date in 2041-2070 subtracted from that of 1971-2000, and Df7100 deviation of physiological maturity date 2071-2100 subtracted from that of 1971-2000, respectively).

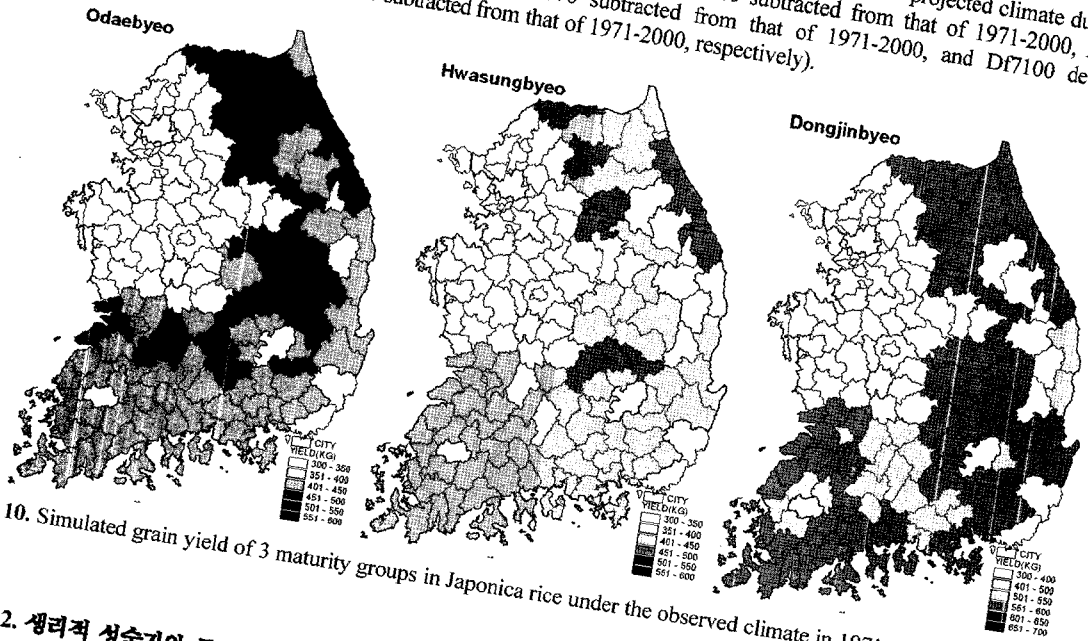


Fig. 10. Simulated grain yield of 3 maturity groups in Japonica rice under the observed climate in 1971-2000.

3.3.2. 생리적 성숙기와 등숙기간

1971-2000년 평년기후도에서 모의된 성숙기를 보면 (Fig. 8) 조생종 오대벼의 생리적 성숙기는 9월 중순 (최초 9일 13일)부터 시작하여, 10월 중순까지 진행되었고, 중만생종 화성벼와 동진벼는 9월 말(최초 9일 25일)부터 시작하여 출수 이후 평균적으로 45일이 경과되었을 때 생리적 성숙이 이루어졌다. 기준평년의 생리적 성숙기에 비해 미래 평년 성숙기 = 3품종 모두 가까운 미래(2011-2040년)에는 15일

정도 단축되고, 먼 미래(2071-2100년)에는 최대 한달까지도 빨라질 수 있어, 출수기에 비해 단축정도가 심하다(Fig. 9).

3.4. 기후변화 시나리오에 따른 품종별 수량과 수량 구성요소 변화

1971-2000년 평년기후도에서 모의된 수량을 보면 (Fig. 10), 조생종 오대벼는 강원도가 평균 10a당 450 kg, 경상도와 전라도가 470 kg, 경기도와 한강 이남이

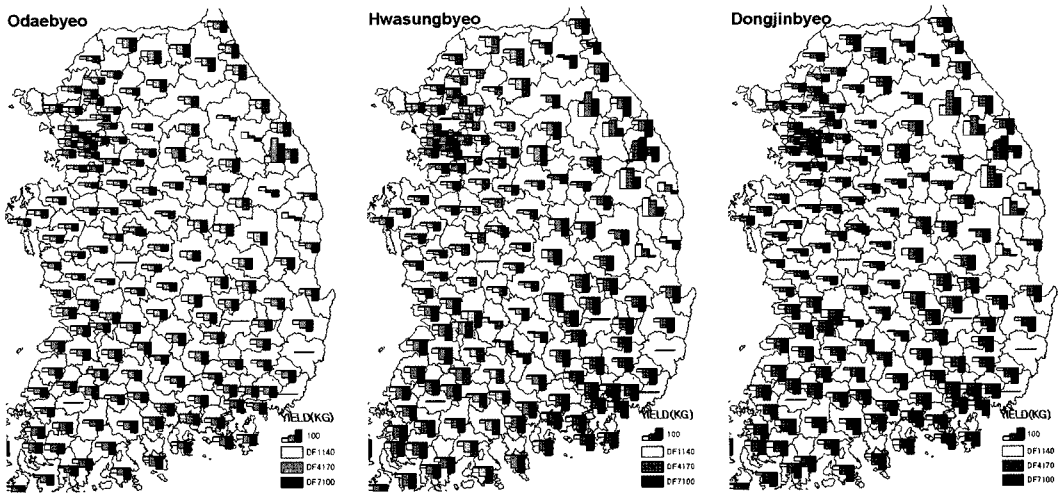


Fig. 11. Changes in grain yield of 3 maturity groups in Japonica rice under the projected climate during 2011-2100 (Df1140 means deviation of rice yield in 2011-2040 subtracted from that of 1971-2000, Df4170 is deviation of rice yield in 2041-2070 subtracted from that of 1971-2000, and Df7100 deviation of rice yield 2071-2100 subtracted from that of 1971-2000, respectively).

380 kg이다. 중생종 화성벼는 강원도가 평균 510 kg, 경상도와 전라도 500 kg, 경기도와 한강 이남 410 kg 이며, 만생종 동진벼는 강원도, 경상도와 전라도 510 kg, 경기도와 한강 이남이 420 kg이다.

기존평년의 기후조건에서 모의된 수량구성요소와 미래 3개 평년을 비교해 보면, 등숙률의 경우 중만생종 화성벼와 동진벼의 등숙률 저하가 현저하였으며, 수량에 큰 영향을 미치는 이삭수의 감소도 중만생종에서 크게 나타났다. 또한 수량에서는 조생종인 오대벼의 경우 10a당 6-25%, 중생종 화성벼의 경우 3-26%, 만생종 동진벼는 3-25%까지 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 11).

3.5. 고찰

해안지역과 수도권 인근의 재배구역단위별 평균기온이 시군 전체 평균기온보다 낮고, 강원도와 경상북도 산간지역의 재배구역단위별 평균기온이 시군 전체 평균기온보다 높게 추정되었다. 이는 지형효과와 도시열섬효과를 동시에 고려한 정밀기온자료를 제작하였으며, 순수하게 벼논에 해당하는 픽셀의 기온자료만 선별함으로써 현실감을 높인 결과라 할 수 있다.

작물은 지역의 기후특성을 잘 반영하는 기후경관 중 하나이다. 그 지역의 기후특성에 알맞은 작물은 생육이 활발한 반면 기후조건에 맞지 않으면 생육이 불량하며 생산성도 낮다. 조생종은 대체로 태백산맥과 소

백산맥을 중심으로 비교적 고도가 높은 곳에 분포하여, 강원도 대부분 지역과 경기북부 연천과 포천 일대에서 재배면적이 많다. 하지만 조생종이라고 해서 산간지에서 생육이 양호하다는 뜻은 아니다. 1971-2000년 평년기후조건에서 모의된 태백산맥의 평창군의 오대벼 생육은 다른 재배지역에 비해 불량하였는데, 해발고도 700 m가 넘는 이들 지역의 산지기후조건은 오대벼의 생육에 적합하지 않은 것으로 판단된다.

온난화시나리오 조건에서 생육을 모의한 결과 이 지역은 조생종뿐만 아니라 중만생종의 발육속도가 빨라지고, 수량 또한 증가하였는데 이는 산지기후가 온난화시나리오에 의해 가장 큰 변화를 겪을 수 있음을 보여준다. 반면 다른 지역에서는 3품종 모두 발육속도가 빨라지면서 생육기간이 단축되어 생산성이 감소하였다. 이는 온난화로 인한 등숙기간의 단축뿐 아니라 고온에서의 임실을 저하(Shim *et al.*, 2005), 그리고 야간고온에 의한 호흡손실 때문인 것으로 판단된다.

결론적으로 지역별 정밀기후 추정과 이에 근거한 최적품종의 선택, 이앙기 및 수확기 등 생육기간의 조절이 온난화 대응기술로서 유효할 것으로 기대된다.

적 요

본 연구에서는 실측 일기상자료 대신 예측 기후평년값을 적용하여 기후변화와 그에 상응한 벼 작황의 지

리적 분포양상을 복원함으로써 지구온난화에 따른 우리나라 벼농사지대의 생산성을 재평가하였다. 기상청 56개 지점 종관자료(일 최고/최저 기온의 월별 평균값)를 1971-2000년 30년 단위로 수집하여 270 m 해상도의 수치기후도를 작성하고, 벼논픽셀에 해당되는 기후자료를 추출하였다. 동일한 시군에 속하는 벼논픽셀의 기후자료를 평균함으로써 시군단위의 “벼논맞춤형 기후자료”를 준비하였다. 같은 방법으로 기상연구소에서 제작한 2011-2100년 기간의 3개 평년(2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) 기후시나리오에 근거하여 해당 평년의 기후자료를 추정하였다. 농촌진흥청의 정밀 토양도로부터 해당 픽셀의 토성과 토심정보를 검색하고 이를 토대로 유효수분 조건표에 의해 토양자료를 준비하였다. 자포니카형 벼의 특성을 갖도록 개조한 벼 생육모형(CERES-Japonica)에 이들 자료를 입력하고 조생종(오대벼), 중생종(화성벼), 만생종(동진벼)의 생육을 모의하였다. 시군 공간평균을 기준으로 3품종 모두 가까운 미래(2011-2040년)에는 출수기가 일주일 정도 빨라지고, 먼 미래(2071-2100년)에는 최대 20일 까지 단축될 수 있다. 생리적 성숙기는 3품종 모두 가까운 미래(2011-2040년)에는 15일 정도 단축되고, 먼 미래(2071-2100년)에는 최대 한달까지도 빨라질 수 있어 출수기에 비해 단축정도가 심하다. 평야지 수량의 경우 조생종인 오대벼는 10a당 6-25%, 중생종 화성벼는 3-26%, 만생종 동진벼는 3-25%까지 감소하였다. 하지만 산간지역에서는 발육속도가 빨라지고 수량이 증가하거나 큰 변화가 없는 곳도 많아 온난화조건에서도 지역별 정밀기후 추정과 이에 근거한 최적품종의 선택, 이앙기 및 수확기 등 생육기간의 조절이 온난화 대응기술로서 유효할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2005년도 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2005-037-F00003).

REFERENCES

- Bum, Y., K. J. Lee, and B. W. Lee, 2006: Comparison of traits related to dry matter production and grain yield among rice cultivars released in different years. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 8(3), 183-189.
- Chipsashi, A. C., R. Chanda, and O. Totolo, 2003: Vulnerability assessment of the maize and sorghum crops to climate changes in Botswana. *Climatic Change* 61(3), 339-360.
- Choi, J. Y., U. Chung, and J. I. Yun, 2003: Urban-effect correction to improve accuracy of spatially interpolated temperature estimates in Korea. *Journal of Applied Meteorology* 42(12), 1711-1719.
- Cui, R. X., M. H. Kim, J. H. Kim, H. S. Nam, and B. W. Lee, 2002: Determination of critical nitrogen concentration and dilution Curve for rice growth. *Korean Journal of Crop Science* 47(2), 127-131.
- Chung, U., J. Y. Choi, and J. I. Yun, 2004: Urbanization effect on the observed change in mean monthly temperatures between 1951-1980 and 1971-2000 in Korea. *Climatic Change* 66, 127-136.
- Dodson, R., and D. Marks, 1997: Daily temperature interpolated at high spatial resolution over a large mountainous region. *Climate Research* 8(1), 1-20.
- Gallo, K. P., J. O. Adegoke, T. W. Owen, and C. D. Elvidge, 2002: Satellite-based detection of global urban heat-island temperature influence. *Journal of Geophysical Research (D: Atmosphere)* 107, ACL16-1-ACL16-6.
- Gallo, K. P., and T. W. Owen, 1999: Satellite-based adjustments for the urban heat island temperature bias. *Journal of Applied Meteorology* 38(6), 806-813.
- Hansen, J., W. Lawrence, D. Easterling, T. Peterson, T. Karl, R. Ruedy, M. Sato, and M. Imhoff, 2001: A closer look at United States and global surface temperature change. *Journal of Geophysical Research (D: Atmospheres)* 106(20), 23947-23963.
- Kim, Y. H., H. D. Kim, S. W. Han, J. Y. Choi, J. M. Koo, U. Chung, J. Y. Kim, and Jin I. Yun, 2002: Using spatial data and crop growth modeling to predict performance of South Korean rice varieties grown in western coastal plains in North Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 4(4), 224-236.
- Koo, J. M., S. Y. Hong, and J. I. Yun, 2001: A simple method for classifying land cover of rice paddy at a 1 km grid spacing using NOAA-AVHRR data. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 3(4), 215-219.
- Lee, C. K., B. W. Lee, Y. H. Yoon, and J. C. Shin, 2001a: Temperature response and prediction model of leaf appearance rate in rice. *Korean Journal of Crop Science* 46(3), 202-208.
- Lee, C. K., B. W. Lee, J. C. Shin, and Y. H. Yoon, 2001b: Heading date and final leaf number as affected by sowing date and prediction of heading date based on leaf appearance model in rice. *Korean Journal of Crop Science* 46(3), 195-201.
- Lee, D. Y., M. H. Kim, K. J. Lee, and B. W. Lee, 2006:

- Changes in Radiation Use Efficiency of rice canopies under different nitrogen nutrition status. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **8**(3), 190-198.
- Lemaire, G., F. Gastal, and F. Salette, 1989: Analysis of the effect of N nutrition on dry matter yield of a sward by reference to potential yield and optimum N content. In: *Proceedings of the 16th International Grassland Congress*. (Nice, France), 179-180.
- Nalder, I. A., and R. W. Wein, 1998: Spatial interpolation of climatic normals: test of a new method in the Canadian boreal forest. *Agricultural and Forest Meteorology* **92**(4), 211-225.
- Olszyk, D. M., H. G. S. Centeno, L. H. Ziska, J. S. Kern, and R. B. Matthews, 1999: Global climate change, rice productivity and methane emissions: comparison of simulated and experimental results. *Agricultural and Forest Meteorology* **97**(2), 87-101.
- Peterson, T. C., A. Huang, D. A. Mckittrick, K. P. Gallo, J. Lawrimore, and T. W. Owen, 1999: Global rural temperature trends. *Geophysical Research Letters* **26**(3), 329-332.
- 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.
- Ritchie, J. T., D. C. Godwin, and U. Singh, 1990: Soil and weather inputs for IBSNAT crop models. In: *Proceedings of IBSNAT Symposium: Decision Support System for Agrotechnology Transfer*. University of Hawaii, Honolulu, USA.
- Southworth, J., R. A. Pfeifer, M. Habeck, J. C. Randolph, O. C. Doering, J. J. Johnston, and D. G. Rao, 2002: Changes in soybean yields in the midwestern United States as a result of future changes in climate, climate variability, and CO₂ fertilization. *Climatic Change* **53**(4), 447-475.
- Shim, K. M., Y. S. Lee, Y. K. Shin, K. Y. Kim, and J. T. Lee, 2005: Changes in simulated rice yields under GCM 2×CO₂ climate change scenarios. *Proceedings of the 8th Conference on Agricultural and Forest Meteorology* (Sangju University, Korea, 29-30 September 2005), 88-92.
- Trnka, M., M. Dubrovsky, and Z. Zalud, 2004: Climate change impacts and adaptation strategies in spring barley production in the Czech Republic. *Climatic Change* **64**, 227-255.
- Thomson, A. M., R. A. Brown, S. J. Ghan, R. C. Izauralde, N. J. Rosenberg, and L. R. Leung, 2002: Elevation dependence of winter wheat production in eastern Washington State with climate change : a methodological study. *Climatic Change* **54**, 141-164.
- Ulrich, A. 1952: Physiological bases for assessing the nutritional requirements of plants. *Annual Review of Plant Physiology* **3**, 207-228.
- Yun, J. I., 1990: Analysis of the climatic impact on Korean rice production under the carbon dioxide scenario. *Journal of Korean Meteorological Society* **26**(4), 263-274.
- 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.
- 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., 2003: Predicting regional rice production in South Korea using spatial data and crop-growth modeling. *Agricultural Systems* **77**(1), 23-38.
- Yun, J. I., 2004: Visualization of local climates based on geospatial climatology. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **6**(4), 272-289.
- Yun, S. H., and J. T. Lee, 2001: Climate change impacts on optimum ripening periods of rice plant and its countermeasure in rice cultivation. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **3**(1), 55-70.
- 기상연구소 기후연구실, 2005: 한반도 기후 100년 변화와 미래 전망. 제3차 기후변화학술대회 및 제2차 기후변화 정책 포럼 CD-ROM (2005년 9월 7-8일, 서울).
- 권원태, 2004: 기후변화와의 과학적 현황과 전망. 환경부 - 기상청 - 한국기상학회 공동주관 제 2 차 기후변화 학술대회 초록집 I-4. (2004년 11월 18-19일, 대구).