

생육모의에 의한 북한지방 시·군별 벼 재배기후 예비분석*

윤진일¹ · 이광희²

¹경희대학교 생명자원과학연구원/농학과, ²상지대학교 농학과
(2000년 3월 23일 접수)

Agroclimatology of North Korea for Paddy Rice Cultivation : Preliminary Results from a Simulation Experiment*

Jin-Il. Yun¹ and Kwang-Hoe Lee²

¹Department of Agronomy/Institute of Life Science and Natural Resources
Kyung Hee University, Suwon 449-701, KOREA

²Department of Agronomy, Sangji University, Wonju 220-702, KOREA
(Manuscript received 23 March 2000)

ABSTRACT

Agroclimatic zoning was done for paddy rice culture in North Korea based on a simulation experiment. Daily weather data for the experiment were generated by 3 steps consisting of spatial interpolation based on topo-climatological relationships, zonal summarization of grid cell values, and conversion of monthly climate data to daily weather data. Regression models for monthly climatological temperature estimation were derived from a statistical procedure using monthly averages of 51 standard weather stations in South and North Korea (1981-1994) and their spatial variables such as latitude, altitude, distance from the coast, sloping angle, and aspect-dependent field of view (openness). Selected models (0.4 to 1.6°C RMSE) were applied to the generation of monthly temperature surface over the entire North Korean territory on 1 km × 1 km grid spacing. Monthly precipitation data were prepared by a procedure described in Yun (2000). Solar radiation data for 27 North Korean stations were reproduced by applying a relationship found in South Korea ([Solar Radiation, MJ m⁻² day⁻¹] = 0.344 + 0.4756 [Extraterrestrial Solar Irradiance] + 0.0299 [Openness toward south, 0 - 255] - 1.307 [Cloud amount, 0 - 10] - 0.01 [Relative humidity, %], r² = 0.92, RMSE = 0.95). Monthly solar irradiance data of 27 points calculated from the reproduced data set were converted to 1 km × 1 km grid data by inverse distance weighted interpolation. The grid cell values of monthly temperature, solar radiation, and precipitation were summed up to represent corresponding county, which will serve as a land unit for the growth simulation. Finally, we randomly generated daily maximum and minimum temperature, solar irradiance and precipitation data for 30 years from the monthly climatic data for each county based on a statistical method suggested by Pickering *et al.* (1994). CERES-rice, a rice growth simulation model, was tuned to accommodate agronomic characteristics of major North Korean cultivars based on observed phenological and yield data at two sites in South Korea during 1995~1998. Daily weather data were fed into the model to simulate the crop status at 183 counties in North Korea for 30 years. Results were analyzed with respect to spatial and temporal variation in yield and maturity, and used to score the suitability of the county for paddy rice culture.

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

Corresponding Author : Jin Il. Yun(jiyun@nms.kyunghee.ac.kr)

*본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (981-0601-003-2) 지원으로 수행되었음.

I. 서 언

농업기술의 지역간 이전, 특히 작물품종의 도입과정에서 반드시 고려되는 것이 재배 예정지의 기후이다. 기후는 시공간적인 규모에 따라 전구규모 (global scale) 에서 미세규모 (micro scale) 까지 다양한 의미를 갖고 있으나 대체로 수평거리 100 km 이상 넓은 지역에서 관찰되는 30년 이상 장기간 날씨의 평균값을 뜻하는 '대기후' (macro scale climate) 개념으로 통용되고 있다. 우리나라는 관측여건상 이보다 공간적으로 작은 규모이긴 하나 기상청 정규관측망에서 수집된 자료를 토대로 몇 개의 대기후권역으로 구분할 수 있다. 이 같은 기후지대 구분 (climatic zoning)은 인간생활 중심으로 행해지지만 농작물을 주제로 한 기후구분은 이와는 별도로 농업기후지대 구분 (agroclimatic zoning)이라 일컫는다. 예컨대 주작물인 벼의 경우 봄철 강수량, 여름철 기온, 가을철 일조시수 등을 비교분석하여 이미 남한 전역을 19개의 기후지대로 구분한 바 있으며 (농촌진흥청, 1986), 북한에 대해서도 유사한 방법으로 9개의 동질기후권역이 확인된 바 있다 (유 등, 1996).

그러나 같은 기후지대 내에서도 위도나 지리시형적 특성에 따라 실제 나타나는 국지기후의 양상은 그 공간적 변이가 매우 심하므로 대기후 특성에 기반을 둔 조망적인 농업기후지대 구분의 성과를 유전자원의 평가 등 다양한 농업기술 이전 프로그램에 직접 적용하기는 곤란하다. 따라서 각국에서는 중규모 내지 국지규모 (meso-local scale) 기후특성을 파악하기 위해 정규관측망과 별도로 조밀한 특수관측망을 운영하는 예가 흔하다 (Nakai, 1990; Tanner, 1990; Brock *et al.*, 1995). 우리나라에서도 이미 400여 개로 구성된 자동기상관측망을 보유하고 있어 악기상 감시 및 국지기후특성 파악에 활용하고 있다.

그러나 많은 기상관측지점의 경우 관측여건상 인근 작물재배지의 기상을 대표할 수 없다는 점이 농업적인 활용을 가로막는다. 사실 우리나라처럼 지형이 복잡하고 농경지 분포가 불연속적인 경우 기후의 공간분포 파악을 위해 기상관측에만 의존할 경우 엄청난 예산을 들여 초고밀도의 관측망을 구축해야 하므로 비현실적임을 부인할 수 없다. 이 같은 문제를 해결하기 위해 수평거리 수 km 정도의 해상도로 지역의 지리시형특

성을 수치화 하고, 이를 토대로 동질 대기후권 내의 국지기후 특성을 공간통계기법에 의해 추정하려는 시도가 활발히 추진되어 왔다 (윤 등, 1989; Seino, 1993; Daly *et al.*, 1994). 남한전역을 1 km×1 km 면적의 약 10만개 격자로 나누어 이들 각각의 월별 기온과 강수량 평년값을 추정한 '그물망 기후도'는 이 같은 노력의 대표적인 결과물이다 (과학기술처, 1992).

나아가 이들 기후자료를 지리정보체계 (Geographic Information System; 이하 GIS)의 데이터베이스로 가공한다면 그 용도는 크게 확대된다. GIS는 지리적인 좌표와 관련된 모든 공간정보(예, 재배지의 토양, 국지기후, 식생, 재배품종, 관리기술 등)를 수집, 저장, 검색, 변환 및 표출하는 종합적인 관리도구이다. '그물망 기후도'는 수치지형자료 (Digital Terrain Model; DTM)와 기후자료를 GIS상에서 결합시킨 형태라 할 수 있다. 만약 농업기후자료가 GIS의 공간정보 데이터베이스로 가공된다면 어떤 지역의 농업기후 특징을 연속적인 공간변이 형태로 표현할 수 있으므로 기상관측소 존재여부와 무관하면서도 기존의 재배지대 구분과는 비교할 수 없는 세밀한 정보를 제공할 것이다. 실제로 라틴아메리카에서 옥수수 유전자원 평가를 위한 조정된 농업기후 구분사업에 GIS 기술이 성공적으로 이용되었다 (Pollak and Corbett, 1993).

한편 농업기후 구분을 위해 가장 좋은 방법은 해당 지역에서 장기간에 걸쳐 작물을 직접 재배하는 것이다. 작물의 생육과 수량에는 재배기간동안의 농업기후특성이 종합적으로 함축되어있기 때문이다. 하지만 이 방법은 시간, 노력, 비용 등 모든 면에서 실용성이 희박하므로 오래 전부터 농업기상 전문가들은 기후변량의 통계적 분석이나 기후생산력지수의 계산 등 작물생육에 미치는 기후영향 정도를 간접적으로 표현해왔으며, 이를 토대로 해당 작물의 재배가능 여부를 판단하고자 하였다. 이러한 간접적인 방법에서 한 걸음 나아가 토양-작물-대기 시스템의 동태를 직접 모의하기 위한 연구가 활발히 진행되어, 최근에는 품종별로 유전적 모수 (genetic coefficients) 최적화를 마친 작물모형 (crop models)을 이용해 작물의 성장, 발육, 최종수량 등 일생을 직접 모의하는 단계에 와 있다 (Hoogenboom *et al.*, 1992; Kiniry *et al.*, 1997; American Society of Agronomy, 1995; Yajima, 1996). 작물을 실제로 재배하지 않고도 컴퓨터 모의실험에 의해 주어질 재배환

경에 따른 작물의 반응을 예측할 수 있게 된 것이다.

만약 어떤 지역에 대해 GIS 데이터베이스화시킨 기후자료와 모수 최적화가 완료된 작물모형이 존재한다면, 이 지역 내 임의 포장의 파종후 성숙까지 작물의 생육을 모의함으로써 작물의 기상반응을 직접적으로 알 수 있게 될 것이다. 이 같은 가능성은 이미 GIS를 이용한 새로운 형태의 농업인 정밀진단농법 (precision/prescription farming)으로 소개되었다 (Petersen *et al.*, 1995).

국내에서도 도입된 몇 가지 작물모형을 국내 품종에 맞게 모수를 조절하여 사용하고 있다. 주된 용도는 지구규모의 기후변화에 의한 작물 생육변화 및 재배지대 이동 등 조방적인 수준이지만 (윤, 1990; 이 등, 1991; Shin and Lee, 1995), 댐 건설에 의해 생성된 인공호수 주변지역의 국지기후 변화와 농업생산성 평가를 위해 고해상도의 국지기후 추정 및 작황진단기법이 연구되었으며 (윤 등, 1997a; 윤 등 1997b; 임 등, 1997), 이를 토대로 남한전역을 1,500개 읍면 단위로 나누어 벼, 보리, 콩, 감자 등 식량작물에 대한 작황진단이 실용화 단계에 와있다 (농림부, 1999; 조와 윤, 1999).

현재 남한에는 인터넷상에서 실시간 기상자료 접근이 가능한 70여개 정규 기상관측소와 350여개 무인기상관측소, 그리고 250 m 단위 정밀 지형도를 토대로 작성된 '그물망 기후도'를 활용할 수 있으므로 작물모형을 이용한 정밀 재배지대 구분뿐 아니라 기상상황자료를 이용한 실시간 작황진단이 가능하다(농림부, 1999). 반면 심각한 식량부족 사태를 겪고 있는 북한 지역의 경우 정보접근이 어려워 실시간 작황진단은 물론, 기본적인 농업기후 구분조차 안된 상황이다. 이는 앞으로의 남·북한간 기술교류, 나아가 통일후의 농업 기술 이전에 심각한 장애를 초래할 것이다.

다행히 정보수집 여건이 미흡한 가운데서도 북한내 27개 지점의 최근 20년간 월별 및 일별 기후평년값이 기상청의 노력으로 발간되었고 (기상청, 1995), 위성 원격탐사자료를 가공한 북한 지형자료의 입수가 가능해졌으며, 몇 개 농업관련 시험장에서 북한내 주요 벼 품종의 시험재배가 이루어지고 있다 (작물시험장, 1995~1998).

본 연구에서는 이들 자료를 토대로 그 동안 축적된 관련기술을 활용하여 북한 벼 재배지대를 정밀하게 구

분하고자 하였다. 모형구동에 의한 작물생육 모의를 위해서는 기본적으로 일별 기상자료 가운데 최고기온, 최저기온, 일사량, 강수량값이 필요하다. 이들의 생산을 위해 먼저 지형조건에 따른 일 최고/최저기온, 강수량, 일사량, 강수일수, 기온연교차의 월별 평균값 분포도를 1 km 간격의 격자점 단위로 추정하였다. 다음에는 이 격자단위 기후도로부터 북한 행정구역상의 183개 시군별 공간평균값을 계산하고 이를 토대로 기후통계학적으로 기대할 수 있는 시·군별 일 최고/최저기온, 강수량, 일사량자료 30년 치적을 무작위로 생성하였다. 벼 생육모형의 유전적 모수를 북한품종에 접근시키기 위해 국내 일부 시험장에서 수행한 생육조사 자료를 근거로 하여 대표품종의 모수를 추정하였다. 모수 조정이 완료된 벼 생육모형을 183개 재배구역, 즉 시·군에 대해 30년간씩 구동함으로써 각 재배구역의 벼 재배측면에서의 농업기후학적 특징을 규명하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 월별 기온 평균값 추정

2.1.1. 기온 자료

우리나라 기상청에서는 세계기상통신망 (GTS)을 통해 수집한 1973년부터 1994년까지 22년간 북한의 기상대급 27개 지점 관측자료 (삼지연, 풍산 등 14 지점은 1981년부터 관측된 자료)를 통계처리하여 일별 및 월별 평균값을 '북한기상 20년보'라는 제목으로 발간하였다 (기상청, 1995). 관측지점의 해발고도는 선봉의 3 m로부터 삼지연의 1,386 m까지 폭넓게 분포되어 있으며 지리적 위치는 위도-경도로 표현된다. 기상요소로는 해면기압, 평균/최고/최저기온, 강수량, 상대습도, 평균풍속, 운량 등이 있다. 이들 가운데 1981년부터 1994년까지 14년간 기온자료를 발췌하여 월별 평균을 계산하였다. 이들 북한 27개 표준관측소에 대응하는 남한의 24개 표준관측소에 대해서도 같은 기간중 월별 자료를 준비하였다. 분석대상 기후자료의 생산지 위치를 나타낸 것이 Fig. 1이다.

2.1.2. 지형자료

기본자료: 지형효과 분석을 위해 미국 지질청(USGS)의 30초 (arc second) 해상도 수치고도모형 GTOPO30 (Digital Elevation Model: DEM)을 수집하여

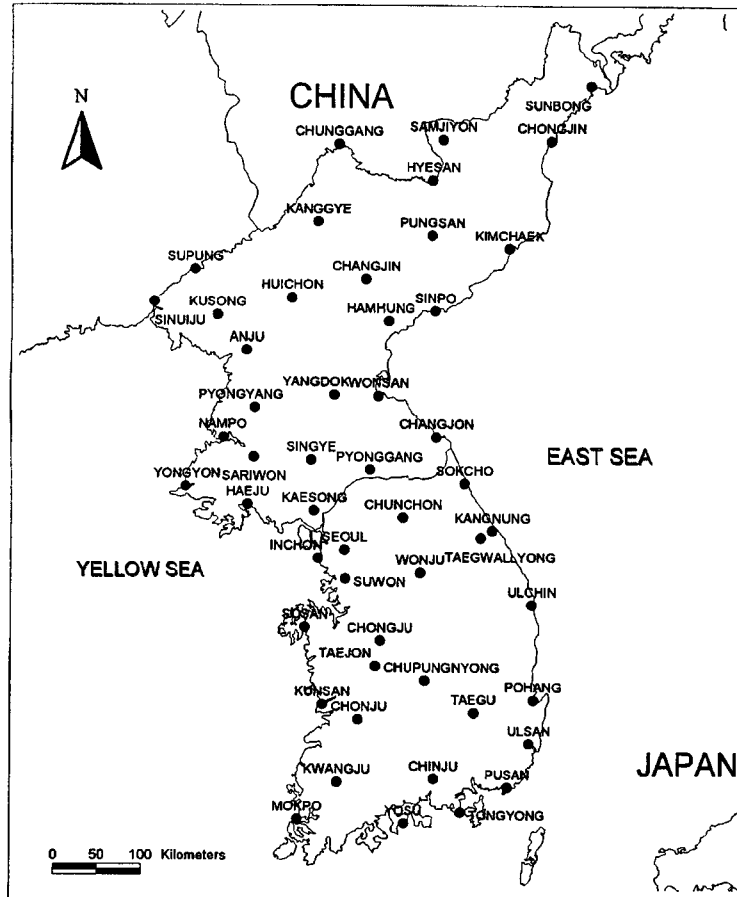


Fig. 1. Geographical location of the 51 standard weather stations in North and South Korea.

한반도 부분을 발췌하였다. 원래 경위도좌표계 상태인 이 DEM 파일을 TM좌표계(원점 북위 38도, 동경 127도)로 투영시켜 사방 1 km 해상도의 ARC/INFO (ESRI, USA) GRID로 저장하였다.

평균고도: 중심 셀(cell)을 기준으로 한 변의 길이가 3, 5, 7, . . . , 31 km인 정방형 구역에 포함되는 9, 25, 49, . . . , 961개 셀의 평균고도값을 계산하여 중심 셀에 부여하고 이들 셀로 이루어진 GRID를 각각 DEM3, DEM5, DEM7, . . . , DEM31로 저장하였다.

지세고도: 중심 셀의 가장자리로부터 1, 2, 3 km 반경에 포함되는 셀들(중심 셀 제외)의 고도값을 평균하여 이 값에 0.5의 가중치를 준 다음, 중심 셀의 고도값에 역시 0.5의 가중치를 주어 거리가중 평균표고(이하 지세고도)를 계산하였다. 이들을 각각 ELEV3,

ELEV5, ELEV7 GRID 로 저장하였다.

경사함: 셀 해상도를 3 km×3 km, 5 km×5 km, 7 km×7 km, . . . , 15 km×15 km, 31 km×31 km 등으로 확대하여 고도 평균값을 구한 다음, 방위별로 인접한 셀과의 고도차를 비교하여 가장 큰 방위값을 부여하였다. 이들을 각각 ASP3, ASP5, ASP7 등의 GRID로 저장하였다.

해안거리: 각 셀로부터 가장 가까운 해안선까지의 직선거리를 구하여 km단위로 변환하여 셀값으로 부여하고 이들을 CODI GRID로 저장하였다.

경사도: 기준 DEM GRID를 비롯하여 DEM3, DEM5, DEM7 GRID 상에서 각 셀의 경사도를 계산하여 이를 도(degree) 단위의 셀값으로 부여하고 각각 SLOPE1, SLOPE3, SLOPE5, SLOPE7 GRID로 저장하였다.

개방도: ELEV GRID를 이용하여 태양고도 45도 조건에서 방위각 (azimuth) 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315, 360도로 바뀌가며 각 셀의 개방도(0-255 범위의 brightness index)를 계산하였다. 이 값들을 OPEN3_45, OPEN3_90, . . . , OPEN5_45, . . . , OPEN7_45 GRID 등으로 저장하였다.

2.1.3. 지형-기온 관계 회귀모형

51개 남북한 관측소가 위치한 셀의 지형변수를 앞에서 작성한 각종 GRID로부터 추출하였다. 이들과 관측소별 14년간 (1981~1994) 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 선발하였다. 이 때 변수 선택은 stay level = 0.15의 STEPWISE방법을 적용하였다.

2.2. 월별 적산 일사량, 강수량, 강수일수, 기온 연교차 추정

현재 보유중인 북한 기후자료에는 일사량 값이 없으므로 우선 다른 기상요소로부터 각 관측소의 월별 일사량 평년값부터 추정하여 복원해야 한다. 남한의 경우 기상청 소속의 모든 정규 기상관측소에서 일조시수를 관측하고 있으며 일사량을 관측하는 지점의 수도 20개소에 달해 일조시수 자료로부터 수평면 전천일사량 자료를 복원하는 방법이 정립되어있다 (조 등, 1987; 농촌진흥청, 1995). 이것은 실측 일사량을 동일 지점의 일조시수 및 대기외일사량 (extraterrestrial solar radiation)에 회귀시켜 일조-일사 변환식을 작성한 후, 이들의 지리적인 연관을 근거로 각 관측소가 대표할 수 있는 지역을 판별하고 각 지역내 일사 미관측 기상대의 일조시수 자료로부터 수평면 전천 일사량 자료를 복원하는 것이다. 불행하게도 북한 기후자료에는 일조시수가 누락되어있어 이 방법을 그대로 사용할 수는 없다.

본 연구에서는 남한에서 관측되는 [일사-기온 혹은 지형요인] 사이의 경험식을 작성하여 북한에 적용키로 하였다. 우선 제주를 제외한 남한 내 19개 일사관측 기상대의 1984년부터 1997년까지 14년간 일기상자료를 토대로 기상요소별 월평균값을 계산하였다. 여기에는 일사량 외에도 상대습도와 운량, 그리고 가조시수

(일장)와 대기외일사값이 포함된다. 가조시수와 대기의 일사값의 계산은 농촌진흥청(1995)의 방법을 따랐다. 북한기후자료에 누락되어있는 일조시수 대신에 각 관측점 주변의 방위별 개방도를 이용하였는데, 이미 작성된 GRID 중에서 동-남동-남-남서-서향 등 5개 개방도를 선택하였다. 월별 일사량 관측 평균값을 종속변수, 다른 기상요소(기온, 운량, 습도, 대기외일사, 가조시수 등) 및 개방도를 독립변수로 둔 회귀모형을 작성하였다. 이 모형을 이용하여 북한 내 일사 미관측 기상대 27개소의 월별 평균 일사량 자료를 복원하였다.

복원된 27개 지점의 월별 일사량값을 거리가중역산 (Inverse Distance Weighting; 이하 IDW)에 의한 단순내삽기법으로 북한 전역의 사방 1 km 해상도의 일사량 분포 GRID를 생성하였다. 이 밖에도 IDW내삽에 의해 북한 전역의 분포도를 GRID 형태로 작성한 기후요소로는 월별 강수일수와 기온의 연교차가 있다. 이들은 작물모형에 직접 입력되지는 않지만, 다음에 설명되는 월별 기후값으로부터 월별 기후값을 유도하는 과정에서 반드시 필요한 요소들이다.

월별 강수량의 평균값은 남한지방의 조밀한 강수관측망에서 얻어진 경사방향별 회귀식을 북한에 적용시킨 윤 (2000)의 방법에 따라 작성하였다.

2.3. 재배구역 설정 및 공간평균 기후자료 준비

상기 방법에 의해 만들어진 각 요소별 월별 기후값의 분포는 공간해상도가 1 km×1 km로서 북한전역의 기후를 약 12만개의 격자점으로 나타낼 수 있다. 이는 지금까지 공개된 그 어떤 북한지역 기후도보다도 정밀한 것이다. 그러나 벼 생육모형을 구동시키는 토지공간의 단위로서는 과도하게 세밀하다. 물론 앞으로 더 높은 정밀도가 요구되는 경우도 있겠지만 (예, 정밀농업), 벼의 생육을 한번에 12만여 회씩 모의하기는 현실적으로 어렵다. 또한 생육모의결과는 반드시 실측자료에 의해 검증되어야만 가치가 있는데, 남한의 예를 보더라도 앞으로 북한지역의 작황조사자료가 입수된다면 그것은 시·군 단위가 될 것이 거의 확실하다. 따라서 본 연구에서는 농업기후 구분의 최소단위로서 북한행정체계의 시·군을 선택하였다.

시중에서 구할 수 있는 1:700,000 축척의 북한행정지도 (영진문화사, 1997)를 기본도로 하여 183개 시·군을 ARC/INFO polygon 주제도로 수치화 시켰다

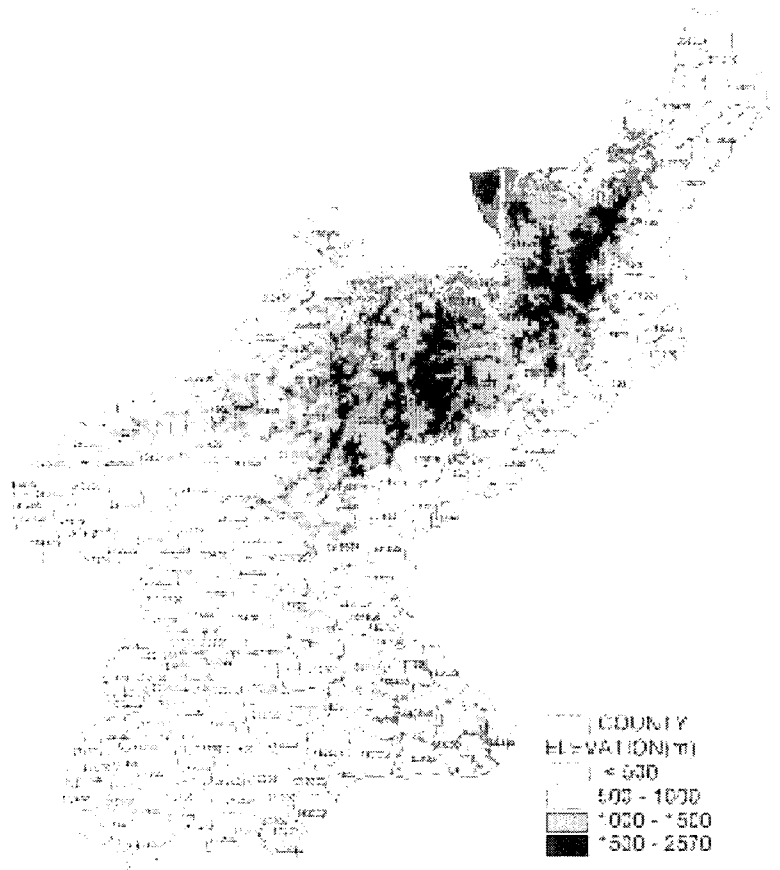


Fig. 2. Administration boundary coverage (a vector map) overlaid on the 1 km × 1 km digital elevation model (a raster grid) of North Korea. Each number on the polygon identifies crop simulation zone.

(Fig. 2). 이 시·군 주제도를 이미 작성한 각종 기후 값 GRID에 중첩시키고 각 시·군별로 기후값의 공간 평균을 계산하였다. 183개 시·군의 평균면적은 662 km², 즉 662개 GRID 셀로 이루어져 있으며 가장 넓은 곳은 2,197 km², 가장 좁은 곳은 45 km²였다. 계산된 공간 평균 기후값을 이 주제도의 속성으로 저장하였다. 이 때 기온의 평균값은 벼 재배지대가 대체로 해발고도가 낮은 저지대임을 고려하여 공간 평균에 표준편차를 더한 값으로 대체하였다. 최고기온의 경우 같은 시·군내에서도 최소 0.4°C, 최대 11.8°C, 평균 4.1°C의 범위를 보이므로 특히 산악지형이 많은 북한의 경우 기온의 평균값을 이렇게 조정하는 것이 현실에 가까울 것으로 판단되었다.

2.4. 월별 기후값으로부터 일별 기상자료 생성

작성된 시·군 재배구역 단위 기후값은 월별평균값으로서, 작물모형 입력을 위해서는 일별 자료로 변환시켜야 한다. 이 때 주의해야 할 점은 반드시 기후의 연차변이를 고려해야 한다는 점이다. 기후란 평균뿐 아니라 그 변이를 함축한 의미로서 농업적으로는 특히 연차변이가 중요하다. 앞서 작성된 재배구역별 기후 평균값은 최소한 10년 이상의 기후를 대표하지만, 10년간의 매년 기후값을 산술적으로 평균한 대표값에 불과하므로 실제 10년 동안 겪었던 기후의 연차변이에 대해서는 어떤 정보도 제공하지 않는다.

이러한 결점을 보완하고 현실감 있는 일 기상자료를 도출하기 위해 여러 가지 통계학적 기법이 이용되어 왔다 (Richardson and Wright, 1984; Geng *et al.*, 1988; Wallis, 1996). 본 연구에서는 Pickering *et al.* (1994)에 의해 제시된 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 process를 토대로 생성된다. 앞서 만들어 둔 일 최고기온, 최저기온, 일사량, 강수량, 강수일수의 월별 평균값과 기온의 연교차는 이들 매개변수 도출을 위해 필요한 기후자료들이다.

2.5. 벼 생육모형

북한지방의 벼 재배지대를 구분하는 방법에는 여러 가지가 있을 수 있지만 본 연구가 특히 차별화 되는 것은 지대구분의 기준으로서 간접적이고 단편적인 기후지수를 사용하지 않고 직접적이고 종합적인 생육모의결과를 활용한다는 점이다. 이미 남한 1,500개 재배 구역에 대해 상시 작황진단용으로 실용화된 CERES-rice를 벼 생육모형으로 선정하였다 (농림부, 1999). CERES(Crop-Environment Resource Synthesis) 모형은 미국에서 개발되어 IBSNAT(International Benchmark Site Network for Agrotechnology Transfer) 사업에 의해 국제적으로 널리 보급된 것이다. 이 모형은 벼의 성장(growth)과 발육(development)에 영향을 미치는 대기, 토양, 물, 양분 등 생태계 구성요소간 상호작용을 종합적으로 고려한 것으로서 단순한 작물의 반응뿐 아니라 환경요인의 분석에도 널리 이용되고 있다.

이 모형을 어떤 지역에 적용하기 위해서는 그 지역에 실제 재배되고있는 품종의 성장 및 발육 관련 유전적 특성을 모형에 반영시켜야 하며, CERES-rice의 경우 발육관련 4개, 성장 및 수량 관련 4개로 이루어진 품종별 모수를 조정해 주면 된다. 품종모수는 작물의 유전적 특징을 반영하고 있어 각 품종별 생육특성에 맞게 최적화 해주는 일이 바로 생육모의의 성패를 가름한다고 해도 과언이 아니다.

어떤 품종의 모수 최적화를 위해서는 반드시 실제 생육조사자료가 다년간 누적되어있어야 한다. 본 연구에서는 95년부터 98년까지 작물시험장 진부출장소와 철원출장소에서 선봉9호, 애국72호, 평양15호 등 북한의 주요 품종을 재배하여 얻은 자료를 이용하였는데

(작물시험장, 1995~1998), 구체적인 방법은 조와 윤(1999)을 따랐다. 모의실험을 위한 초기조건은 이앙기 5월 20일, 재식거리 30 cm×12 cm, 주당 5본, 시비 수준 N-P₂O₅-K₂O = 12-12-13 kg/10a이었다. 재배기간 중 기상자료는 농림부(1999)에 의해 이미 추정된 해당 지역의 일 최고/최저기온, 일사량 및 강수량을 발췌하여 사용하였다. 토양자료 역시 농림부(1999)에 의해 작성된 전국 1,500개 읍·면 논토양 자료 중 평창군 진부면 (KHPD191507)과 철원군 김화읍 (KHPD191204)을 사용하였다.

2.6. 생육 모의

세 가지 품종에 대하여 모수 최적화를 마친 벼 생육모형을 183개 재배구역별로 30년 일별 기상자료에 의해 구동시켜 출수기, 성숙기, 지상부 건물중, 종실수량 등 생육관련 정보를 생산하였다. 북한의 토양자료는 수집된 것이 없으므로 농림부(1999)의 분류기준으로 24번에 해당되는 토양조건 (토심 130 cm, 토성 사양토)을 각 재배구역에 공통적으로 부여하였다. 35일간 육묘한 모를 25주/m² 재식밀도로 5월 20일에 이앙하였으며, 질소질 비료는 생육에 영향을 주지 않을 정도로 자동시비 하였고, 강수효과를 보기 위해 관개는 하지 않는 것으로 가정하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 기후요소의 분포

선발된 일 최고/최저기온의 월별 평균값 추정 회귀 모형은 위도와 해안거리를 중심으로 해발고도, 경사도, 개방도 관련 지형변수들로 구성되며, 4월부터 8월까지 일 최고기온을 제외한 모든 모형에서 결정계수가 0.9 이상이고 RMSE는 0.4~1.6°C 범위에 들었다 (Table 1).

이들 모형을 이용하여 북한 전역 12만여 개 격자점의 월별 최고/최저기온값을 계산하였는데, Fig. 3은 벼의 생육에 중요한 7월부터 9월까지 3개월간 평균기온을 나타낸 것이다. 이 기간은 벼의 생식생장과 종실의 등숙에 해당되는 시기이므로 이 기간중 날씨의 최종수량 결정에 직접적인 영향을 끼친다. 따라서 이 기간중 평균기온은 기존의 벼 재배지대 구분에 중요한 기준으로 사용되어왔다 (농촌진흥청, 1986). Fig. 3은 공간적 정밀도와 추정과정의 신뢰성 면에서 기존의 아날로

Table 1. Regression coefficients and RMSE of the climatological temperature estimation model

Minimum Temperature												
Month Variable	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
[INTERCEPT]	50.7	43.358.2	17.7	19.1	36.6	41.4	36.7	44.2	41.7	44.1	47.6	
[LATITUDE]	-1.52	-1.27	-0.95	-0.75	-0.58	-0.54	-0.54	-0.56	-0.75	-0.86	-1.10	-1.35
[ELEV3]/100	-0.95		-1.06	-0.80								
[ELEV5]/100								-0.82				
[ELEV7]/100		-1.03			-0.81	-0.87	-0.82		-0.89	-0.89	-0.86	-0.92
[SLOPE3]	0.64	0.48	0.23								0.45	0.58
[SLOPE7]					-0.31							
[CODI]/100	-4.01	-2.51	-0.77			1.01	0.99		-0.89	-1.98	-2.25	-3.39
[OPEN_E]				0.09	0.08			0.03				
[OPEN_S]												
[OPEN_W]			-0.12									
[OPEN_NW]												
RMSE(°C)	1.6	1.2	0.8	0.9	0.7	0.6	0.5	0.4	0.8	1.2	1.2	1.4
R ²	0.93	0.95	0.96	0.91	0.94	0.94	0.95	0.97	0.95	0.91	0.93	0.93
Maximum Temperature												
Month Variable	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
[INTERCEPT]	53.6	60.7	47.7	76.7	79.7	10.5	19.7	19.8	63.6	100.8	71.0	58.4
[LATITUDE]	-1.37	-1.15	-1.01	-0.87	-0.65	-0.73	-0.61	-0.54	-0.54	-0.81	-1.17	-1.41
[ELEV3]/100	-0.65	-0.73	-0.80								-0.73	-0.64
[ELEV5]/100				-0.73	-0.70		-0.60					
[ELEV7]/100		-1.03				-0.61		-0.68	-0.78	-0.74		
[SLOPE3]	0.43											0.41
[SLOPE7]												
[CODI]/100	-1.72		1.56	2.89	3.24	3.97	3.03	2.27	1.32	0.53	-0.82	-1.94
[OPEN_E]									-0.10	-0.14		
[OPEN_S]				-0.15	-0.19							
[OPEN_W]		-0.07								-0.14	-0.08	
[OPEN_NW]						0.23	0.17	0.16				
RMSE(°C)	1.3	0.9	0.7	1.0	1.5	1.6	1.0	0.8	0.6	0.4	0.8	1.3
R ²	0.95	0.94	0.95	0.88	0.81	0.68	0.80	0.86	0.94	0.98	0.95	0.92

그형 등온선도와 비교할 수 없는 장점을 갖는다. 그러나 평균기온보다는 냉해유발 기온의 출현빈도 등 시간적인 변이가 고려되지 않는다면 재배지대 구분에 큰 의미는 없다. 나아가 평균기온 단일요인보다는 본 연구에서 사용하는 생육모의 결과야말로 재배지대 구분의 종합적인 기준인 셈이다.

남한 19개 일사관측 기상대의 14년간 자료를 토대로 구성된 일사량 추정 회귀모형 ([일사량, MJ m⁻² day⁻¹] = 0.344 + 0.4756 [대기의 일사량] + 0.0299 [남쪽 개방도] - 1.307 [운량] - 0.01 [상대습도]), 결정계수 0.92, RMSE 0.95)에 의해 복원된 북한 지방 27개

지점의 일사량 자료를 IDW내삽에 의해 1 km 해상도의 공간분포를 월별로 도출하였다. Fig. 4는 이들중 분담 생육기간에 해당되는 6월부터 9월까지의 적산일사량 분포이다. 대체로 벼 재배가 성한 서쪽 평야지대에서 일사량이 풍부한 반면 중부 고원지대 및 동부 해안에서 적은 경향을 보인다.

월별 강수일수에 대한 정보는 월별 강수량을 토대로 모형 구동에 필요한 일별 강수량 자료를 생성하는 데 꼭 필요하다. 북한지역 27개 표준관측소의 10년간 강수일수 관측값을 토대로 IDW 내삽에 의해 북한 전역에 대해 1 km×1 km 격자점 단위로 월별 강수일수

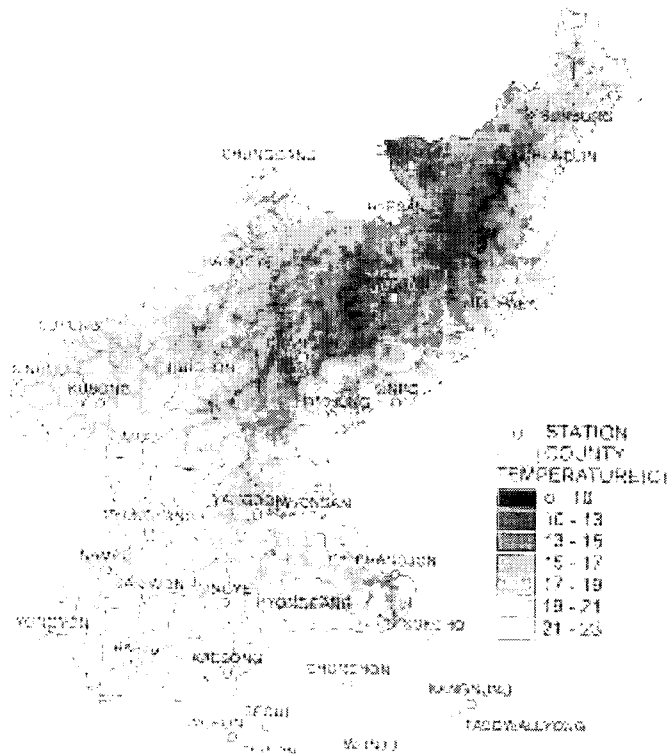


Fig. 3. Seasonal mean temperature pattern during July to September period in the climatological normal year estimated from the model calculation.

평균값을 추정하였는데, Fig. 5는 연간 총 강수일수 분포를 보여준다.

3.2. 재배구역별 벼의 생육모의 결과

작물시험장 (1995~1998)에 의하면 북한 벼 품종 선봉9호는 출수기가 7월 12일 전후로, 남한에서 제일 빠른 진부올벼보다 약 2~3일 빠른 극조생종이며, 애국72호와 평양15호는 대체로 8월 1일~8월15일에 출수하는 조생종 및 중생종으로 판단된다. 작물시험장의 생육조사자료를 이용하여 추정한 선봉9호, 애국72호, 평양15호의 CERES-rice 용 품종모수를 농림부(1999)에 의해 보고된 남한의 오대벼(조생종), 팔공벼(중생종), 동진벼(중만생종) 모수와 비교한 것이 Table 2이다.

극조생 품종인 선봉9호의 모수에 의해 CERES-rice 모형을 구동시킨 결과 183개 재배구역 가운데 20개를 제외한 나머지에서 주어진 30년치 기상조건하에서 정상적인 생육이 가능하였다. 그러나 애국72호는 동일한

조건에서 59개 구역의 생육모의가 불가능하였고, 평양 15호의 경우에도 이와 비슷한 63개였다. 극조생 품종인 선봉9호를 재배하여 30년간 한번이라도 수확에 실패한 20개 구역은 현존 재배품종 수준으로는 일단 벼 재배가 불가능한 것으로 판단할 수 있다. 벼 재배가 가능한 것으로 판단되는 나머지 163개 구역 가운데 조생종인 애국72호의 재배가 역시 30년간 한 번이라도 실패한 39곳은 벼 재배 한계지역으로 볼 수 있다. Fig. 6은 벼 재배 불가지역과 한계지역의 위치를 보여준다.

모형구동이 30년간 정상적으로 이루어진 나머지 124개 구역에 대하여 애국72호의 출수기, 성숙기, 지상부 건물중, 종실수량, 재배기간중 강수량 및 증발산량의 30년 평균값과 표준편차를 구한 다음, 이들의 공간통계값 (최고, 최저, 평균, 표준편차)을 계산하였다 (Table 3). 이 표에 의하면 30년 평균 성숙기는 지역에 따라 9월 8일에서 10월 8일로서 지역간 변이폭은 한 달 정도인데, 한 재배구역 내 30년간 연차변이를

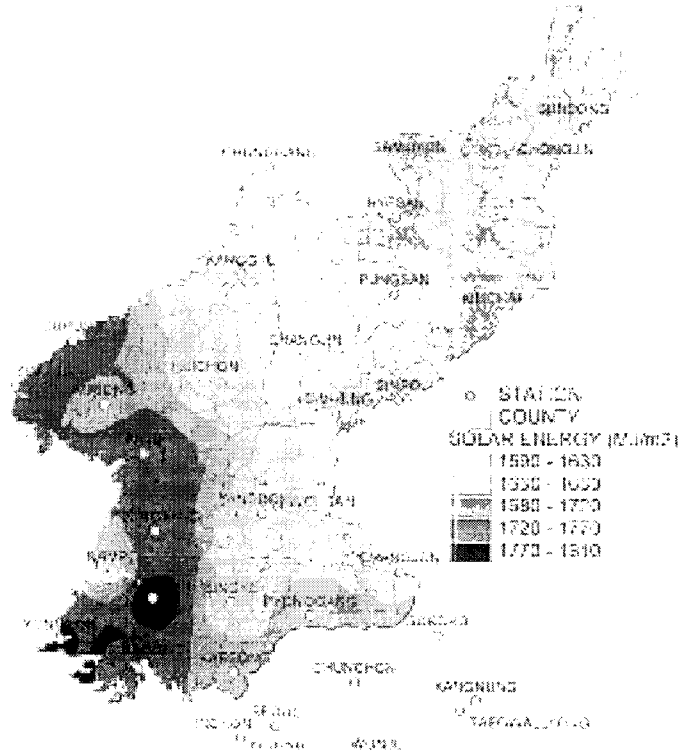


Fig. 4. Seasonal (June to September) solar irradiance pattern over North Korea estimated by interpolation of the restored data at 27 weather stations.

표준편차로 표현해 보면 $9.9\text{일} \pm 11.0\text{일}$ 이다. 즉 같은 재배구역일지라도 해에 따라서 10일 정도는 숙기가 빠르거나 늦어질 수 있다는 의미이다.

이 요소들 가운데 성숙기의 연차변이, 평균 수량, 수량의 연차변이 등 3개 자료를 분석하여 벼 재배의 적지 여부를 정량적으로 판단할 수 있는 기준을 마련코자 하였다.

이들 3개 변량은 모두 연속적인 분포를 보이므로 우선 몇 개의 범주로 나누어 분포특성을 단순화시켰다.

성숙기 연차변이는 표준편차 값을 기준으로 4~6일, 7~9일, 10~15일, 그리고 16일 이상 등 4 등급으로 나누어 각각 안정(stable), 양호(quasi-stable), 가변(variable), 불안정(unstable) 등으로 표현하였다.

얻어진 수량의 평균값은 무관개 생육모의이기 때문에 실제수량과는 차이가 있을 것이며, 여기서는 상대적인 비교목적으로만 사용한다. 계산된 모의수량을 토대로 ha당 6.5톤 이상(high), 6.2톤 이상(medium), 5.9톤 이상(low), 그리고 5.9톤 미만(poor) 등 4 범주

로 나누었다.

수량의 연차변이는 수량평균에 대한 표준편차의 비율, 즉 변이계수로 나타내고 역시 0.05~0.11은 안정, 0.12~0.18은 양호, 0.19~0.25는 가변, 0.26 이상은 불안정 등, 4 범주로 나누었다.

이들 각각에 대해 3, 2, 1, 0의 점수를 부여하고 세 종류 점수의 합(0~9점)을 계산하여 재배구역의 종합적인 벼 재배 적합성을 나타내었다 (Fig. 7). 한 재배구역이 갖는 농업기후학적 벼 생산잠재력을 결정하는데 이들 세 가지 변량이 각각 동일한 기여를 하는 것은 물론 아니지만, 기술의 단순화를 위해 별도의 가중치를 부여하지 않았다.

유 등(1996)은 8월의 평균기온, 7월부터 9월의 평균기온, 그리고 작물기간 등 3개 요소를 토대로 구한 “기온생산력지수”를 사용하여 북한지역을 7개 벼 재배지대로 구분하였다. 이 기온생산력지수는 사실상 본 실험에서 판정기준의 하나로 사용한 최종수량에 어느 정도 반영된 값이라고 할 수 있지만, 성숙기의 변이

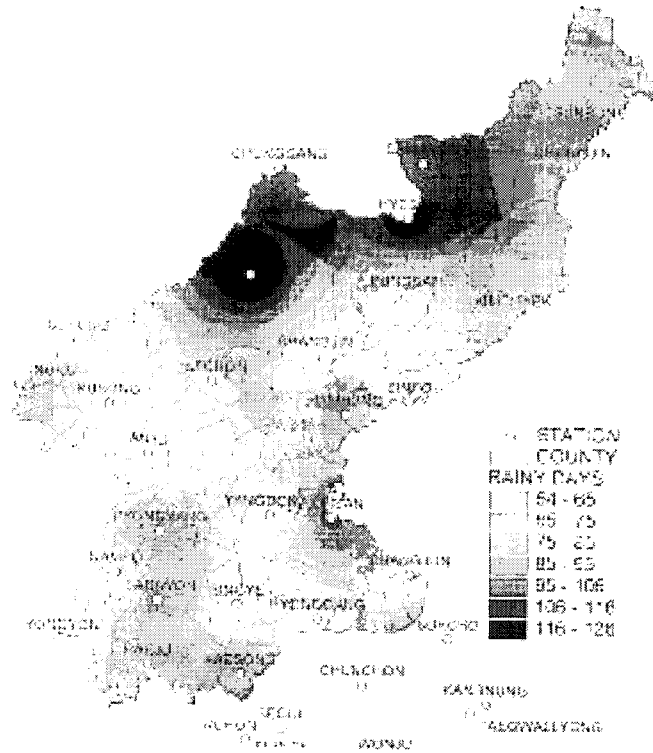


Fig. 5. Spatial variation of the number of days with measurable precipitation in a normal year, produced by IDW interpolation of 27 point data.

Table 2. Genotype coefficients of the rice cultivars grown in Korea

VARIETY(MATURITY) <i>Full name in Korean</i>	P1	P2R	P5	P2O	G1	G2	G3	G4
ODAE(early) <i>Odaebyeo</i>	200.0	35.0	480.0	11.50	60.0	.0270	1.00	1.00
PALKONG(medium) <i>Palkongbyeo</i>	110.0	130.0	530.0	12.00	45.0	.0210	0.59	1.00
DONGJIN(late) <i>Dongjinbyeo</i>	90.0	220.0	580.0	12.00	35.0	.0220	0.50	1.00
SB09(extra early) <i>Seonbong #9</i>	30.0	25.0	450.0	14.30	86.0	.0270	1.00	1.00
AK72(early) <i>Aekuk #72</i>	190.0	40.0	490.0	11.50	60.0	.0270	1.00	1.00
PY15(medium) <i>Pyeongyang #15</i>	160.0	70.0	500.0	12.00	45.0	.0210	1.00	1.00

P1: Degree days above 9°C 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°C 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: Tilling coefficient relative to IR64.

G4: Temperature tolerance coefficient. 1.0 for normal.

및 수량의 연차변이까지 고려한 본 실험의 결과와는 어느 정도 차이가 있을 것이 예상되었다.

그런데 “기온생산력지수”를 판단근거로 해서 벼 재배 불가지대로 판정된 “개마고원지대”와 “백두동서산

간지대”는 벼 생육모의 결과를 토대로 한 본 실험에서도 극조생인 선봉9호 재배 불가지대로 나타났고, “기온생산력지수”가 0.8 (수원지방에 비해 80%) 정도로 낮은 “함경동해안북부지대”는 본 실험의 경우 선봉9호

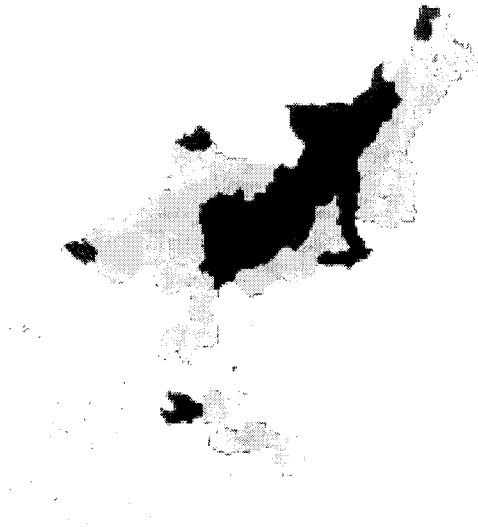


Fig. 6. North Korean counties classified into the regions of limited cultivation possible (gray) and those of cultivation impossible (black) based on 30 year growth simulation by CERES-rice with genetic coefficients of SB09 and AK72.

Table 3. Spatial statistics for growth simulation results of an early to medium maturity cultivar (AK72) obtained by feeding randomly generated daily weather data for 30 years. No irrigation and an automatic nitrogen fertilizer application assumed

Variable		Min.	Max.	Avg.	S.D.
Anthesis date (day of year)	Mean	209.6	222.4	214.6	2.9
	S. D.	2.1	4.7	3.4	0.5
Maturity date (day of year)	Mean	251.0	280.7	260.2	6.2
	S. D.	4.2	63.7	9.9	11.0
Tops Weight (kg/ha)	Mean	1171	15397	13464	786
	S.D.	8723	3646	1800	291
Seed Yield (kg/ha)	Mean	5428	6913	6339	291
	S. D.	348	2261	971	357
Rainfall amount (mm)	Mean	327	952	591	131
	S. D.	106	324	190	41
Evapo-transpiration (mm)	Mean	288	402	317	15
	S. D.	16	121	27	11

만 재배가능한 곳으로서 애국72호의 재배가 되지 않는 39개 시군중에 포함되어 두 실험의 결과가 일치한다. 그러나 기온생산력지수가 0.85인 “북부내륙중간지대”에 포함된 많은 시군들은 본 실험에서는 극조생종만 재배될 수 있는 곳으로 분류되었고, 최적 재배지대로 분류한 “북부서해안지대” 일부는 “북부평야지대”에 비해 종합점수가 낮은 것으로 평가되어 예상대로 두 실험

험간에 차이를 보였다.

본 실험에서 사용한 세 가지 척도는 생육모의를 통해 얻을 수 있는 정보들 가운데 극히 일부에 지나지 않는다. 그럼에도 불구하고 이들 척도만으로도 기존의 벼 재배지대 구분성과보다 훨씬 정교하고 구체적인 정보를 제공할 수 있다.

3.3. 고찰

모든 정보에의 접근이 극도로 제한된 북한지방을 대상으로 향후 농업기술의 이전을 염두에 둔 벼 재배지대 구분을 시도하였다. 본 연구의 주안점은 GIS 기법을 활용하여 정밀 복원된 기후자료와 이를 토대로 한 벼 생육모의결과(생장, 발육 및 수량반응)를 직접 농업 기후 지대 구분에 적용한 것이다. 본 연구에서는 재배지대 구분의 최소 공간단위로서 시·군을 사용했지만 생육모의에 필요한 기후자료는 1 km×1 km 격자점 단위로 준비되어 있기 때문에 더욱 상세한 재배지대 구분(예, 시·군내 지역변이)이 가능하다. 작물모형만 준비된다면 벼뿐만 아니라 옥수수, 감자 등 북한의 주요 식량작물 재배적지 선정작업에도 동일한 방법이 적용될 수 있다.

또한 모든 기후자료값을 1 km×1 km 격자점 단위로 표현한 것은 향후 위성이나 항공기를 이용한 원격탐사 자료와의 연계분석에 있어 이점이 될 것이다. 벼 재배면적 추정, 생육 모니터링 등에 이미 원격탐사자료의 실용화 연구가 시작되었으므로, 상호 비교 및 검증에 매우 유리하다. 특히 모든 기후자료를 널리 사용되는 상용 GIS의 데이터베이스로 구축하였기 때문에 추가적인 처리 없이도 다방면에서 즉시 활용이 가능하다.

하지만 생육모의를 위해 도입한 CERES-rice 모형의 적합성을 충분히 검토하지 못한 것이 아쉽다. 모수 최적화를 위해 사용한 북한품종의 생육조사자료 역시 국가기관에서 광범위하게 수행하고있는 연구사업의 성과를 충분히 활용하지 못했는데, 이는 해당기관의 과도한 보안정책 때문이며, 만약 기관간 혹은 연구자간 보유자료의 교환이 활성화된다면 개선의 여지가 많은 부분이다.

모형 자체의 신뢰성을 최대한 인정한다고 해도 역시 생육모의 및 이를 토대로 한 재배지대 구분은 현 수준에서 원초적인 오류를 완전히 제거하지는 못한다. 월별 기온, 강수량, 일사량 등 생육모의를 위해 복원

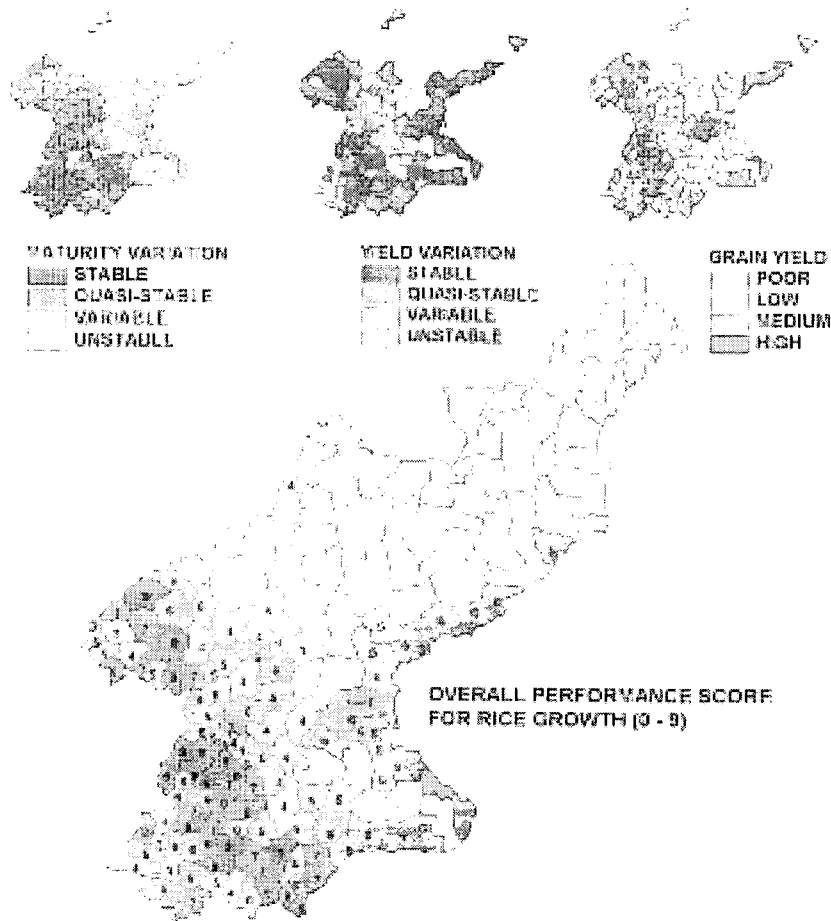


Fig. 7. Overall performance score for rice cultivation in North Korea. The score is sum of three individual scores representing the annual variation in maturity date, grain yield, and the annual variation in grain yield, respectively.

한 기후자료들은 독립자료에 의한 검증과정을 거치지 않은 것이므로 작성된 기후도는 검증결과에 따라 달라질 수 있음을 인정한다. 따라서 이들 기후자료를 토대로 모의한 벼 생육결과 역시 불확실성을 내포하고 있다. 앞으로 북한과의 협력관계가 개선되어 무인기상관측망을 공동운영하는 등의 방법으로 충분한 자료가 확보된다면 이러한 점들은 쉽게 해소될 것이다.

IV. 적 요

북한 시·군별 벼 생육모의결과를 토대로 벼 재배 적합성 여부를 판정하였다. 생육모의에 필요한 시·군별 일 기상자료는 지형기후학적 공간내삽기법을 근거

로 한 3단계 과정을 통해 생산하였다. 우선 기온의 경우 51개 남북한 표준관측소의 14년간(1981~1994) 월평균값을 관측지점 위도, 해발고도, 해안거리, 경사도, 개방도 등 지리지형변수에 회귀시켜 얻은 통계모형(RMSE = 0.4~1.6°C)을 북한전역에 적용시켜 1 km × 1 km 수평 격자점 단위로 월별 평균값을 추정하였다. 강수량의 경우 상대적으로 자료가 풍부한 남한의 지형-강수 관계를 도출하여 이를 북한지방에 적용한 윤 (2000)의 방법에 의해 월별 강수량 분포도를 작성하였다. 일사량의 경우 남한 19개 관측소의 14년간 (1984~1997) 월 평균 수평면 전천일사량 관측값의 추정식([일사량, MJ m⁻² day⁻¹] = 0.344 + 0.4756[대기 외 일사량] + 0.0299[남쪽 개방도] - 1.307[운량] - 0.01

[상대습도], 결정계수 0.92, RMS error 0.95)에 의해 북한 지방 27개 지점의 일사량 자료를 복원하였다. 이를 거리역산가중법으로 공간내삽하여 북한전역의 월별 일사량 분포도를 작성하였다. 두 번째 단계에서는 얻어진 1 km×1 km 격자점 기후값을 183개 북한 시·군별로 공간평균값을 취했다. 마지막으로 시·군 단위 월별 기후값을 이용하여 통계적인 방법 (Pickering *et al.*, 1994)에 의해 30년간의 월별 기상자료를 생성하였다. 북한의 대표적인 벼 품종 생육조사자료를 토대로 CERES-rice 모형의 유전적 모수를 조정하고, 준비된 기상자료를 입력시켜 183개 시·군별 벼의 생육을 30년치씩 모의하였다. 생육모의결과 중 성숙기와 수량 관련 특성을 점수화 하여 각 시·군의 벼 재배용 농업기후학적 잠재력을 정량적으로 표현하였다.

인용문헌

- 과학기술처, 1992: 전국 그물망 기후값 추정 및 기후도 작성 연구(3). 기상연구소 주관 특정연구 최종보고서.
- 기상청, 1995: 북한기상 20년보. 행정간행물. 200pp.
- 농림부, 1999: 전국 농업기상 감시 및 실시간 작황진단체계 구축, 농림기술개발사업 연구보고서. 235pp.
- 농촌진흥청, 1986: 한국의 농업기후 특징과 수도 기상재해 대책. 농업기술연구소. 195pp.
- 농촌진흥청, 1995: 기상정보에 의한 지역농업생산력 및 병해충 예측기술 개발. 특정연구개발사업보고서. 142pp.
- 영진문화사, 1997: 최신 우리나라 지도 (1:700,000 축척).
- 유인수, 최돈향, 윤성호, 1996: 북한의 수도작 농업기후지대 구분. 국제농업개발학회지 **8(3)**, 206-215.
- 윤진일, 1990: 대기중 이산화탄소 배증조건하의 기후시나리오에 의한 국내 쌀생산 추정. 한국기상학회지 **26(4)**, 263-274.
- 윤진일, 2000: 지형기후학적 공간내삽에 의한 북한지역 강수기후도 작성. 한국농림기상학회지 **2(1)**, 16-23.
- 윤진일, 이민영, 남재철, 1989: 제주도의 그물망 기후자료 생산. 기상연구논문집 **6(1)**, 61-74.
- 윤진일, 황규홍, 정현향, 신만용, 임준택, 1997: 주암 다목적댐 건설에 따른 국지기후 변화가 농작물 생산성에 미치는 영향. 한국기상학회지 **33(3)**, 409-427.
- 윤진일, 황재문, 이순구, 1997: 임하 다목적댐 건설후 주변지역의 기후 및 작물생산력 변화. 한국작물학회지 **42(5)**, 579-596.
- 이변우, 신진철, 봉중현, 1991: 대기중 CO₂ 농도증가에 따른 기후변화가 농업기후자원, 식생의 순일차생산력 및 벼 수량에 미치는 영향. 한국작물학회지 **36(2)**, 112-126.
- 임준택, 윤진일, 권병선, 1997: 벼 성장모형 SIMRIW를 이용한 주암호 건설에 따른 주변지역의 벼 잠재생산성이 추정. 한국작물학회지 **42(6)**, 729-738.
- 작물시험장, 1995~1998: 시험연구보고서 (수도편). 농촌진흥청 행정간행물.
- 조경숙, 윤진일, 1999: 일기상자료에 의한 읍면별 벼 작황진단 및 쌀 생산량 예측. 한국농림기상학회지 **1(1)**, 12-19.
- 조하만, 조천호, 유근배, 정귀원, 1987: 일사관계 기상변수들의 기후적 특성과 일사량 산출모형. 기상연구논문집 **4(1)**, 45-54.
- American Society of Agronomy, 1995: Climate Change and Agriculture: *Analysis of Potential International Impacts*. ASA Social Publication Number 59.
- Brock, F. V., K. C. Crawford, R. L. Elliott, G. W. Cuperus, S. J. Stadler, H. L. Johnson, and M. D. Eilts, 1995: The Oklahoma Mesonet: A technical review. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **12(1)**, 5-19.
- 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.
- Geng, S., J. S. Auburn, E. Brandsetter, and B. Li, 1988: *A program to simulate meteorological variables: Documentation for SIMMETEO*. Agronomy Progress Report No. 204. Dept. of Agronomy and Range Science., Univ. of California, Davis, CA.
- Hoogenboom, G. J., J. W. Jones, and K. J. Boote, 1992: Modelling growth and yield of grain legumes using SOYGRO, PNUTGRO, and BEANGRO: a review. *Transactions of American Society for Agricultural Engineers* **35(6)**, 2043-2056.
- Kiniry, J. R., J. R. Williams, R. L. Vanderlip, J. D. Atwood, D. C. Reicosky, J. Mulliken, W. J. Cox, H. J. Mascani, Jr., S. E. Hollinger, and W. J. Wiebold, 1997: Evaluation of two maize models for nine U.S. locations. *Agronomy Journal* **89**, 421-426.
- Nakai, K., 1990: Japanese system of the meteorological information service to user communities including education and training. In A. Price-Budgen(ed.) *Using Meteorological Information and Products*. Ellis Horwood, UK. 257-274.
- Petersen, G. W., J. C. Bell, K. McSweeney, G. A. Nielsen, and P. C. Robert, 1995: Geographic information systems in agronomy. *Advances in Agronomy* **55**, 67-111.
- 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.
- Pollak, L. M., and J. D. Corbett. 1993: Using a GIS datasets to classify maize-growing regions in Mexico and Central America. *Agronomy Journal* **85**, 1133-1139.
- Richardson, C. W. and D. A. Wright, 1984: *WGEN: A Model for Generating Daily Weather Variables*. USDA-ARS, ARS-8, Washington, DC.
- Seino, H., 1993: An estimation of distribution of meteorological elements using GIS and AMeDAS data. *J. Agricultural Meteorology(Japan)* **48(4)**, 379-383.

- Shin, J. C. and M. H. Lee, 1995: Rice production in South Korea under current and future climates. In Matthews, R. B., M. J. Kropff, D. Bachelet, and H. H. van Laar (eds.) *Modelling the Impact of Climate Change on Rice Production in Asia*. IRRI and CAB International, Wallingford, UK. 199-215.
- Tanner, B. D., 1990: Automated weather stations. *Remote Sensing Reviews* **5**(1), 73-98.
- Wallis, T. W. R. and J. F. Griffiths, 1996: Simulated meteorological input for agricultural models. In *Preprints of 22nd Conference on Agricultural and Forest Meteorology* (Jan. 28-Feb. 2, 1996, Atlanta, Georgia), American Meteorological Society, 358-361.
- 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, 280-285.