

기상자료 공간내삽과 작물 생육모의기법에 의한 전국의 읍면 단위 쌀 생산량 예측

윤진일¹ · 조경숙²

¹경희대학교 생명자원과학연구원/농학과 449-701 경기도 용인시 기흥읍 서천리

²기상연구소 응용기상연구실 156-720 서울시 동작구 신대방동 460-18

(2001년 2월 16일 접수)

Yield and Production Forecasting of Paddy Rice at a Sub-county Scale Resolution by Using Crop Simulation and Weather Interpolation Techniques

Jin I. Yun¹ and KyungSook Cho²

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

²*Applied Meteorology Lab., Meteorological Research Institute
460-18 Sindaebang-dong, Dongjak-gu, Seoul 156-720, Korea*

(Manuscript received 16 February 2001)

ABSTRACT

Crop status monitoring and yield prediction at higher spatial resolution is a valuable tool in various decision making processes including agricultural policy making by the national and local governments. A prototype crop forecasting system was developed to project the size of rice crop across geographic areas nationwide, based on daily weather pattern. The system consists of crop models and the input data for 1,455 cultivation zone units (the smallest administrative unit of local government in South Korea called "Myun") making up the coterminous South Korea. CERES-rice, a rice crop growth simulation model, was tuned to have genetic characteristics pertinent to domestic cultivars. Daily maximum/minimum temperature, solar radiation, and precipitation surface on 1km by 1km grid spacing were prepared by a spatial interpolation of 63 point observations from the Korea Meteorological Administration network. Spatial mean weather data were derived for each Myun and transformed to the model input format. Soil characteristics and management information at each Myun were available from the Rural Development Administration. The system was applied to the forecasting of national rice production for the recent 3 years (1997 to 1999). The model was run with the past weather data as of September 15 each year, which is about a month earlier than the actual harvest date. Simulated yields of 1,455 Myuns were grouped into 162 counties by acreage-weighted summation to enable the validation, since the official production statistics from the Ministry of Agriculture and Forestry is on the county basis. Forecast yields were less sensitive to the changes in annual climate than the reported yields and there was a relatively weak correlation between the forecast and the reported yields. However, the projected size of rice crop at each county, which was obtained by multiplication of the mean yield with the acreage, was close to the reported production with the r^2 values higher than 0.97 in all three years.

Key words : CERES-rice, GIS, spatial interpolation, crop models, yield forecasting, rice crop

I. 서 언

쌀을 주식으로 하는 우리 나라의 경우 벼 작황은

재배농민뿐 아니라 국가 농업정책 담당자에게도 중요한 관심사이므로 해마다 수확 이전에 전국적인 벼의 작황이 발표되고 있다. 공식적인 작황은 매년 8월 15일과 9월 15일에 5,000 내지 10,000개 표본구에서 직접 생육 및 수량구성요소 조사를 통해 관찰된다(MAF, 1997). 이 가운데 수확 한 달 전에 수행되는 '9.15 작황조사'는 평년의 경우 실제 수확량을 거의 오차 없이 예측할 수 있는 것으로 평가되어 농정 수립에 있어 그 가치가 매우 크다.

벼의 작황은 여러 가지 요인들에 의해 결정되겠지만 그 중에서도 날씨의 영향이 단연 으뜸이어서, 이미 발표된 작황이라 할지라도 그 후의 날씨 경과에 따라 달라질 가능성은 항상 존재한다. 더욱이 지금은 비전문자들 사이에서도 기후변화 및 기상이변이 언급될 정도로 날씨의 변동이 보편화된 시기인지라 수확 전까지의 날씨경과에 따른 작황 변이를 정해진 두 시기 외에 필요할 때마다 수시로 알아낼 필요성이 절실하다.

이런 현실에 능동적으로 대응하기 위한 방안들 가운데 작물생육모형을 이용한 농업기상학적 작황진단(agrometeorological crop forecasting) 기법은 파종 후 수확 전까지 날씨경과나 일기예보자료에 근거해 언제든지 예상수확량을 산정 할 수 있도록 해 주므로 식량수급정책의 의사지원도구로서 주목받을 만하다. 작물의 생장과 발육에 미치는 환경, 생물, 재배요인들의 잠재적인 영향을 정량적으로 평가하는 수단으로서 작물모형 만한 것을 찾기는 어렵다. 신품종이나 재배기술의 지역간 이전에 앞서 시간과 노력이 소요되는 포장실험 대신 작물모형을 이용한 생육모의실험이 오래전부터 이용되고 있으며(Sinclair and Seligman, 1996), 지구규모의 기후변화에 의한 농업분야 영향평가를 하는 과정에서 작물모형을 이용하는 것은 어느 지역에서나 보편화 되어있다(Parry and Carter, 1988). 작물 모형을 이용한 작황진단 및 생산량 예측 연구도 작물 및 지역에 따라 실용화 단계에 와 있는 것으로 판단된다(Yajima, 1996).

그러나 원래 작물모형의 적용이 기후, 토양 등 환경조건이 동일한 지점이거나 한 개 기상관측소가 대표할 수 있는 거의 균일한 좁은 지역으로 제한되므로, 넓은 지역에 걸쳐 작황의 공간변이를 알아내기 위해서는 지리정보시스템(geographic information system: GIS)과의 결합이 불가피하다. GIS는 불규칙하게 분포된 토양조사 및 기상관측자료로부터 규칙적인 격자단위의

자료평면을 생산할 수 있도록 해주며(Yun et al., 1999), 이들을 공간적으로 연결함으로써 효율적으로 저장, 관리할 수 있도록 해준다(Petersen et al., 1995). GIS와 결합된 작물모형은 정밀농업 수준의 영농으로부터 한 국가나 지역의 작황진단에 이르기까지 광범위한 용도에 활용될 수 있다(Lal et al., 1998; Thornton et al., 1997).

본 연구에서는 우리의 주식 작물인 벼를 대상으로 전국의 읍면별 작황과 예상수확을 매일의 기상자료에 근거하여 추정할 수 있는 상시 작황진단체계를 작물모형과 GIS의 결합을 통해 구축하고, 그 실용성을 최근 3년간의 농림부 작황조사 자료에 의해 검증하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 생육모형의 모수 추정

CERES(Crop-Environment Resource Synthesis) 모형의 개발은 처음에는 토양특성과 관리방법에 따른 작물반응을 예측하기 위한 연구목적으로 시작되었지만, 이후 신품종이나 재배기술의 이전에 따른 시간과 경비의 절감을 목표로 하는 실용목적의 모형으로 발전하였다(Jones and Kiniry, 1986; Godwin et al., 1992). 이 모형에서 군락 광합성은 엽면적지수, 일사량, 그리고 광이용효율의 함수로서 계산되어 매일의 바이오매스 누적값으로 표현된다. 바이오매스 생산량은 지나친 고온이나 질소결핍 같은 환경요인에 의해 줄어들고, 잎의 출현 및 성장속도에 의해 결정되는 엽면적지수 역시 질소부족의 영향을 받게된다. 바이오매스의 체내 분배양상은 발육단계에 따라 다른데, 발육단계는 주로 온도의 함수로 표현된다. 줄기와 뿌리로의 분배비율은 물이나 양분의 부족정도에 따라 변화한다. 발육속도와 생육기간 등 품종의 조만성은 기본적으로 그 품종의 유전적 특성이지만, 온도와 일장조건에 의해 조절된다. 또한 개화유도에 필요한 온도조건은 품종별 일장감응성에 따라 다르게 표현된다. 모형의 구동과정은 기상, 토양, 재배관리정보 및 품종특성모수 자료를 입력받아 작물의 생장과 발육을 모의하는 여러 개의 모듈로 이루어져 있다.

세 곳의 작물시험장에서 5년에서 9년 동안 연속적으로 재배해온 국내 장려품종을 가운데 등숙 조만성에 따라 한 품종씩 선택하여 Hunt et al.(1993)의 방법

대로 CERES-Rice 모형에서 요구하는 품종모수를 추정하였다(NCES, 1998). 조생종 모수는 작물시험장 철원출장소에서 1993년부터 1997년까지 시험재배된 '오대벼' 생육자료에 의해 최적화 하였다. 중생종 벼의 경우는 경남 밀양의 영남농업시험장에서 '팔공벼'를 대상으로 1989년부터 1997년까지 수행한 실험결과를 이용하였다. 만생종 벼는 전북 익산의 호남농업시험장에서 1990년부터 1997년까지 시험재배된 '동진벼'의 생육자료에 의해 최적화 하였다. 이들 기간 중 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. 만생종의 경우 기상청 전주기상대의 자료를 이용하였다. 토양자료는 각 시험장으로부터 수집한 해당 시험포장의 토성, 토심, 양이온, 치환용량 등의 토양정보를 수정 없이 사용하였다(Cho and Yun, 1999).

2.2. 생육 모의를 위한 공간자료 확보

수집가능한 자료의 공간해상도를 고려하여 동일한 품종, 토양특성, 기상조건, 재배법이 적용되는 생육모의 최소 공간단위를 읍·면 행정구역으로 상정하였고, 이를 CZU(Cultivation Zone Unit)라고 정의하였다. 제주도, 울릉도 등 도서지역을 제외한 남한 전역은 총 1,455개의 이 같은 CZU로 구성된다. 모든 CZU는 국립지리원에서 발간한 1:250,000 행정구역도 상에서 확인하고 수치 도화작업을 거쳐 중부원점(동경127도, 북위 38도)의 TM좌표계에 투영시킨 ArcView(ESRI Inc., USA)용 'shape file'로 저장하였다. 각 CZU의 면적은 최소 7 km²로부터 최대 517 km²에 이르나 평균면적은 65 km²이다.

CERES 모형에서 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 읍면 토양 데이터베이스(RDA, 1994)로부터 각 CZU별 논토양의 정보를 추출하여 사용하였다. 가비중, 토양수분특성 등 직접 얻을 수 없는 정보는 먼저 각 CZU의 대표 토양통으로부터 토성과 토심을

알아낸 다음, 미 농무성 토양특성 조건표(USDA, 1975)에 의해 추정하였다.

기상자료는 1993년부터 1999년까지 7년간의 일별 최고기온, 최저기온, 일사량 및 강수량 자료를 전국 63개 표준관측소(일사량은 19개)로부터 수집하여 Yun et al.(1999)의 공간내삽방법에 의해 1 km×1 km 격자 간격으로 산출하였다. 이들 기상표면 위에 이미 작성한 CZU 주제도를 중첩시켜 각 CZU별 기상값의 공간평균과 표준편차를 계산하였다. 주어진 CZU 내에서 벼논의 분포가 대체로 해발고도가 낮은 곡간 분지, 하천유역, 평야지대에 집중되어 있는 점을 감안하여 실제 모형에 입력되는 기온값은 공간평균에 표준편차를 더한 값으로 대체하였다. 또한 농림부 작황조사가 9월 15일에 수행되는 점을 고려하여 매년 9월 15일 이후의 기상값은 기상청에서 제작한 '그물망 기후도'(MOST, 1992)에 수록된 기후학적 평년값(1961년부터 1990년 평균)으로 대체하였다.

한 개 CZU 내에서도 서로 다른 품종들이 섞여 재배되고 있으며, 실제 농민들이 이용하고 있는 재배법 역시 차이가 있지만 본 실험에서는 모든 CZU에서 동일한 품종과 재배법을 사용한다고 가정하였다. 즉 지역에 상관 없이 35일 묘를 조생종은 5월 20일, 중생종은 5월 25일, 만생종은 5월 30일에 이앙하며, ha당 재식밀도 250,000주, 질소소비량 110 kg 수준, 자동관수(작물의 수분스트레스 범위를 0에서 1로 둘 때 0.05 내외에서 물대기를 시작) 등을 가정하였다.

2.3. 생육모의 및 결과 검증

준비된 토양, 기상, 재배관리정보를 CERES모형에서 요구하는 양식으로 편집하여 모수조정이 끝난 벼 생육 모형에 입력시켰다. 한 개 CZU를 대상으로 조종만 3개 품종의 생육을 모의하여 최종수량이 가장 많은 품종의 출력결과만을 해당 CZU의 작황분석용으로 사용하였다. 농림부에서 발표하는 작황조사의 공간단위는 1,455개 읍면이 아니라 162개 시군이므로 비교검증을 위해서는 출력결과를 다시 시군단위로 통합(aggregation) 해야 한다. 이러한 공간통합을 위해서는 읍면 단위 벼 식부면적에 대한 정보가 필요하나, 구할 수 없어 차선책으로 1995년말 현재의 농업총조사 자료(MAF, 1996)를 이용하였다. 시군 단위 수량은 CZU별로 계산된 단위면적당 수량을 각 CZU의 벼 재배면적 가중(加重) 평균으로 환산한 다음 시·군별로 합산하였다.

생육모의에 의한 수량 예측의 신뢰도를 검증하기 위해 당해 연도의 실제 수량값을 직접 비교하는 것은 아직은 좋은 방법이 아니다. 모형이란 것은 현실세계를 크게 단순화시킨 것으로서 시공간적인 평균조건에는 잘 반응하나 모형에서 고려되지 않는 요인들이 부각되거나 평균으로부터 떨어진 조건에서는 심각한 오류를 보인다. 본 연구에 사용된 CERES모형 역시 최종 작물수량에 영향을 주는 많은 요인들 가운데 해에 따라 그 정도가 크게 차이나는 식물 병해충의 대발생이나 돌발적인 악기상 등은 전혀 고려하지 않는다. 이러한 'event성 재해'를 무시하고 기온이나 일사량의 연차변이에 따른 '누적된 날씨'의 영향만을 비교하고자 한다면 평년기후에 대한 수량반응으로부터 당해연도 기후에 대한 수량반응의 상대적인 크기를 살펴보는 것이 합리적이다. 본 연구에서는 수량의 절대값 대신 다음 식으로 표현되는 '상대수량지수'를 비교의 척도로 삼기로 하였다.

$$Y_{\text{score}} = \frac{Y_i}{\bar{Y}} \times 100 \quad (1)$$

이 식에서 Y_i 는 비교대상인 1997년, 1998년, 1999년의 읍면 식부면적이 가중된 시군별 수량, \bar{Y} 는 비교연도 이전의 평년수량으로서 1993년부터 1996까지 4년간 1,455개 읍면의 평균수량이다. Y_{score} 는 평년의 전국평균 수량에 대한 주어진 연도, 특정 시군의 상대적인 수량지수로서 백분율로 표현된다. 마찬가지로 검증자료로서의 농림부 작황조사 수량도 이 식에 의해 상대수량지수로 변환하였다. 이 경우 \bar{Y} 는 1993년부터 1996년까지 농림부 보고에 의한 전국 162개 시군의 평균수량이 된다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 시군별 벼 수량 예측

최근 3년 동안의 162개 시군별 벼 수량 예측치를 상대수량지수로 환산하여 농림부 보고자료와 비교한 것이 Fig. 1이다. 양자간 상관계수는 가장 높았던 1997년에도 0.3 정도에 그쳐 선행연구(Cho and Yun, 1999)의 포장단위 생육모의에서 보여준 예측능력이 훨씬 못 미친다. 본 연구에서 채택한 공간통합기법으로는 포장단위에서 읍면 및 시군 단위로 공간규모를 확대할 경우 아직은 작물모형에 의한 신뢰성 있는 수량

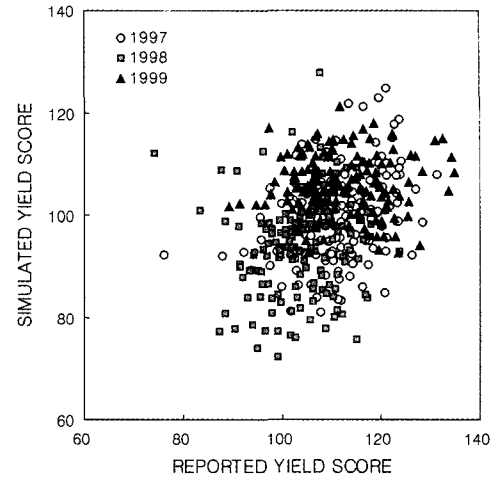


Fig. 1. Comparison of the relative yield score in 3 years between the simulated and the reported cases.

예측이 어렵다는 점을 보여준다. 또한 생육모의에 의해 예측된 상대수량지수는 농림부 보고자료에 비해 지속적으로 낮은 값을 보인다. 즉 농림부 보고자료에 따르면 대부분 시군에서 평년수량에 비해 97~99년의 수량이 증가하였는데, 모의수량의 경우 97년과 99년에 절반 정도 시군에서만 평년에 비해 높은 값을 보였고, 98년에는 오히려 감소한 시군의 수가 더 많은 것으로 나타났다. 구체적으로는 162개 시군 가운데 벼 재배면적이 1만 ha 이상인 37개만을 대상으로 평년수량에 대한 최근 3년간 상대수량지수의 변화경향을 보면, 농림부 작황조사에서는 97 및 99년에는 예외 없이 모든 지역에서 '대풍'을 기록하였고, 98년에도 단 두 곳을 빼고는 평년작 이상의 수량을 보였다. 그러나 모의수량의 경우에는 평년작 이하의 수량을 보인 시군이 37개 대상지역 가운데 97년에 11개, 98년 22개, 99년에도 4개정도로 상당한 차이를 보였다.

농림부의 시군별 작황조사도 무작위 표본구의 평균이므로 엄밀한 의미에서 한 시군 전역의 작황을 완벽하게 반영했다고 볼 수는 없지만, 통계적 유의성을 갖춘, 신뢰할 수 있는 유일한 자료이다. 그렇다면 실제 수량과 모의수량간 차이는 어디에서 기인하는가. 우선 작물모형 자체의 '비현실성'을 들 수 있겠지만, 이미 검증된 생리적 과정에 기반을 둔 모형의 구조나 이론을 재검토하는 것은 수량예측이라는 실용화 차원에서는 큰 도움이 되지 못하므로 논의대상에서 제외하고자 한다. 그보다는 개별 군락이나 포장처럼 기후, 토양,

품종, 재배법 등이 균일한 조건으로부터, 균일하지 못한 조건이 혼합된 읍면 혹은 시군 단위로 모형적용의 공간규모를 확대시키는 기술이 아직은 초보수준이기 때문에 생기는 오차에 주목할 필요가 있다. 공간규모 확대기술(*scaling-up technique*)은 GIS를 이용한 공간 나사와 원격탐사기술의 활용을 통해 작물모형을 광역 작황진단에 적용시키고자 하는 노력의 산물이다(<http://ws234.niaes.affrc.go.jp/~sympo/sympo7.htm> 참조). 또 하나의 이유는 장기일기예보의 활용이 미흡한 데서 찾을 수 있다. 본 실험에서는 농림부의 '9.15 작황'과 맞추기 위해 이 날짜까지의 기상자료만으로 벼의 생육을 모의했으며, 이후의 기상은 1961년부터 1990년 사이의 평균적인 날씨, 즉 평년기상자료로 대체하였다. 사실 9월 15일 이후의 기상조건은 벼의 후기등숙에 상당히 중요하며, 따라서 최종수량에도 영향을 미친다. 1997년은 우리나라의 벼농사 역사상 최고의 수량을 보인 해로 기록되는데, 그 주된 원인은 등숙기간 중 날씨의 호조건 때문으로 알려져 있다. 하지만 생육모의과정에서는 평년기후로부터 크게 벗어난 1997년 가을의 날씨특성이 충분히 반영되지 않았다. 만약 중장기 일기예보가 충분히 정확해진다면 9월 15일 이후의 기상자료를 예보값으로 대체할 수 있어 수량예측의 신뢰도가 크게 향상될 것이다. 반면 1998년의 벼 수량은 태풍피해와 도열병 만연에 의해 감소하였다. 최근 생장과 발육에 관한 생리과정만으로 이루어진 작물의 기본 모형에 병충해, 잡초경합, 자연재해 등의 영향을 모듈 형식으로 추가할 수 있는 기법이 개발되고 있어, 더욱 현실에 가까운 수량예측이 가능해질 것으로 기대된다.

3.2. 시군별 벼 생산량 예측

생육모의에 의해 예측된 정조수량에 시군별 식부면적을 곱하여 생산량을 얻은 다음, 농림부 작황조사(실수확기)에서 최종 집계된 시군별 생산량을 비교하였다 (Fig. 2). 3년간의 결정계수 평균값이 0.97로서 상대수량지수의 경우와는 달리 시군별 생산량 예측치가 실제 생산량과 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 이 같은 높은 적응율은 수량예측오차의 변동범위에 비해 시군별 식부면적의 변이가 워낙 크기 때문에 나타난 결과이지만, 서로 다른 기상조건을 가진 3개년의 추세선이 거의 일치하는 것은 기상의 연차변이에 대한 모의 생산량의 반응이 적어도 시군단위 공간에서는 적절함을 말해준다.

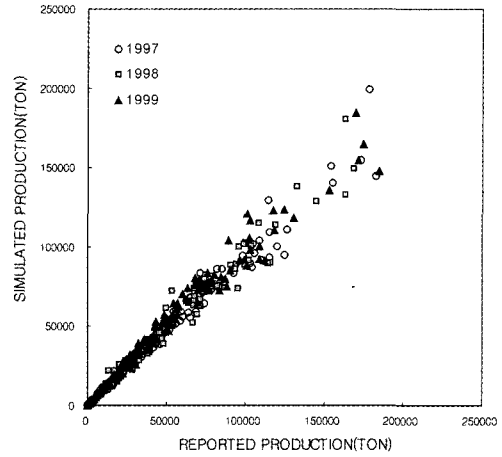


Fig. 2. Comparison of the projected grain production as of September 15 with the MAF reported final harvests for 162 counties in the recent 3 years.

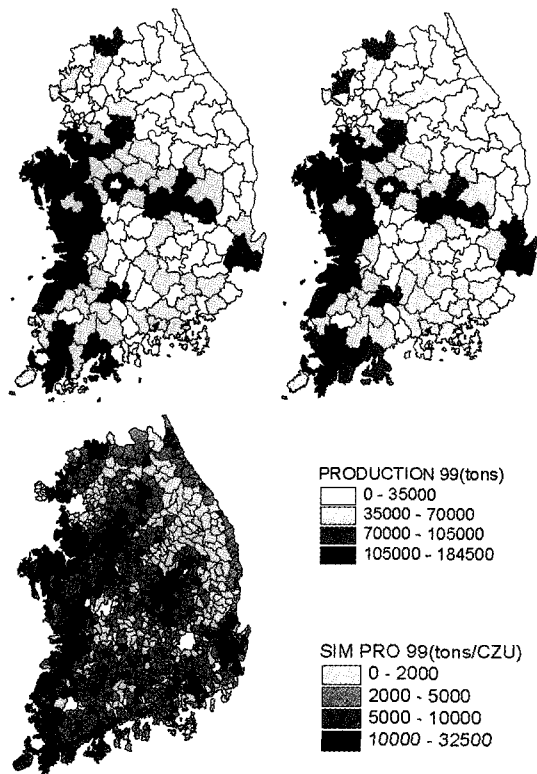


Fig. 3. Spatial variation of the reported (upper left) and the projected (upper right) rice production in 1999 on a county level resolution. Projected rice production is also shown on a CZU level resolution (lower left).

같은 해의 예측생산량 분포를 실제생산량 분포와 시군 단위 공간해상도로 비교해보면 역시 높은 상관성을

발견할 수 있다(Fig. 3). 비록 읍면 단위의 검증자료가 없어서 그 신뢰성을 확인하기는 곤란하지만, 그림의 하단에서 나타난 분포도는 쌀 생산량의 지역간 변이를 읍면 공간해상도로 정밀하게 예측할 수도 있음을 보여준다.

결론적으로 현재 수준의 작물모형만으로도 쌀 생산량의 연차변이와 지역간 변이를 실용상 큰 문제없이 추정할 수 있다는 가능성을 본 연구를 통해 확인할 수 있었다. 즉 기상청에서 제공되는 일별 기상관측자료만으로 수확 전 어느 시기에서건 전국적인 쌀 생산량의 상시 예측이 가능하며, 앞으로 중장기 일기예보 자료의 활용 여하에 따라 예측신뢰도를 크게 향상시킬 수 있을 것이다. 덧붙여 작물모형 자체의 개선, 공간 규모 확대기술의 발전, 그리고 모형 입력정보의 내실화를 통해 수량 예측 신뢰도 역시 지속적으로 향상될 것이므로 작물모형을 이용한 작황진단의 미래는 매우 밝은 것으로 판단된다.

IV. 적 요

전국의 표준기상관측망을 통해 생육기간 중 수집된 일별 기상자료에 의해 작물모형을 구동시킴으로써 벼 생육상황의 지역변이를 용이하게 감시할 수 있는 농업 기상학적 작황진단기법을 남한의 1,455개 읍면에 적용하였다. 모형은 예비실험 결과 출수기와 생리적 성숙기 예측이 적절한 것으로 확인된 CERES-Rice로서 국내의 대표적인 조생, 중생, 만생종 벼 특성을 갖도록 조정하였다. 일별 최고 및 최저기온, 일사량, 강수량 자료는 기상청 63개 표준관측소 자료의 공간내삽에 의해 얻은 1 km×1 km 해상도의 그물망기후도 위에 읍면 행정구역 지도를 중첩시켜 각 읍면의 공간평균 기후값을 취했는데, 기온값은 여기에 표준편차를 더한 값을 사용하였다. 토양 및 재배관리정보는 농촌진흥청에서 수집한 정보를 토대로 모형입력양식에 맞게 변환하였다. 최근 3년간(1997-1999) 1월 1일부터 9월 15일까지 기상자료를 토대로 읍면별 벼 수량을 계산하고 이를 식부면적 기중평균에 의해 162개 시군별 평균수량을 얻었다. 예측된 시군별 평균수량은 농림부 작황 조사자료와의 상관성이 매우 낮아 수량예측의 실용성을 확보하기 위해서는 본 연구에서 사용된 방법의 개선이 절실하다. 위성 원격탐사자료의 활용을 포함한 공간규모 확대기술의 개선, 9월 15일 이후 장기일기예보의

신뢰성 확보, 병충해 및 단기 악기상 영향의 작물모형 반영 등이 가능성 있는 방안으로 기대된다. 평균수량에 식부면적을 곱하여 산출된 시군별 생산량은 3년 모두 농림부 보고자료와 높은 상관을 유지하여, 이 방법이 기상자료만으로 전국적인 벼 생산량의 지역간 변이를 상시예측하는 업무에는 도움이 될 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 농림부의 1995년도 첨단농업기술개발과제(MAF-SGRP/HTDP 295133-4) 연구비 지원에 의해 수행되었음.

인용문헌

- Cho, K. S. and J. I. Yun, 1999: Regional crop evaluation and yield forecast of paddy rice based on daily weather observation. *Korean J. Agricultural and Forest Meteorology* 1(1), 12-19.
- 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: GEN-CALC: 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.
- 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.
- MAF, 1996: *General Survey on Agricultural Census 1995* (CD-ROM). Bureau of Agricultural Statistical Information, Ministry of Agriculture and Forestry.
- MAF, 1997: *Trend in Crop Production*. Bureau of Agricultural Statistical Information, Ministry of Agriculture and Forestry p5-24.
- MOST, 1992: *Studies on Digital Maps for Climatological Normals in South Korea*. Meteorological Research Institute, Final Report to the Ministry of Science and Technology. 379pp.
- NCES, 1998: *Annual Report (Paddy Rice)*. National Crop Experiment Station, RDA.
- 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.
- 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.
- RDA, 1994: *Development of Computer Model and Agricultural Information System for Classifying Farm Area*. Final Report of Rural Development Administration Special Project.
- Sinclair, R. T., and N. G. Seligman, 1996: Crop modeling: From infancy to maturity. *Agronomy Journal*, **88**, 698-704.
- Thernton, P. K., H. W. G. Booltink and J. J. Stoorvogel, 1997: A computer program for geostatistical and spatial analysis of crop model outputs. *Agronomy Journal*, **89**, 620-627.
- USDA, 1975: Soil Taxonomy-A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Soil Conservation Service, USDA Handbook 436.
- 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.
- Yun, J. I., D. S. Lee, J. Y. Choi, S. I. Cho, E. W. Park and H. Hwang, 1999: Elevation-corrected spatial interpolation for near-real time generation of meteorological surfaces from point observations. *AgroInformatics Journal* **1**(1), 28-33.