RCP8.5 기후조건의 작물생육모의에 근거한 우리나라 곡물생산 전망

김대준¹ · 김수옥¹ · 문경환² · 윤진일^{3*}

¹(재)국가농림기상센터, ²국립원예특작과학원 온난화대응농업연구센터,
³경희대학교 식물환경연구소재공학과

(2012년 8월 28일 접수; 2012년 9월 24일 수정; 2012년 9월 24일 수락)

An Outlook on Cereal Grains Production in South Korea Based on Crop Growth Simulation under the RCP8.5 Climate Condition

Dae-jun Kim¹, Soo-ock Kim¹, Kyung-Hwan Moon² and Jin I. Yun^{3*}

¹National Center for Agro-Meteorology, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

²Agricultural Research Center for Climate Change, NIHHS, RDA, Jeju 690-150, Korea

³College of Life Science, Kyung Hee University, Yongin 446-701, Korea

(Received August 28, 2012; Revised September 24, 2012; Accepted September 24, 2012)

ABSTRACT

Climate change impact assessment of cereal crop production in South Korea was performed using land attributes and daily weather data at a farm scale as inputs to crop models. Farmlands in South Korea were grouped into 68 crop-simulation zone units (CZU) based on major mountains and rivers as well as existing land use information. Daily weather data at a 1-km grid spacing under the A1B- and RCP8.5 scenarios were generated stochastically to obtain decadal mean of daily data. These data were registered to the farmland grid cells and spatially averaged to represent climate conditions in each CZU. Monthly climate data for each decade in 2001~2100 were transformed to 30 sets of daily weather data for each CZU by using a stochastic weather generator. Soil data and crop management information for 68 CZU were used as inputs to the CERES-rice, CERE-barley and CROPGRO-soybean models calibrated to represent the genetic features of major domestic cultivars in South Korea. Results from the models suggested that the heading or flowering of rice, winter barley and soybean could be accelerated in the future. The grain-fill period of winter barley could be extended, resulting in much higher yield of winter barley in most CZUs than that of rice. Among the three major cereal grain crops in Korea, rice seems most vulnerable to negative impact of climate change, while little impact of climate change is expected on soybeans. Because a positive effect of climate change is projected for winter barley, policy in agricultural production should pay more attention to facilitate winter barley production as an adaptation strategy for the national food security.

Key words: RCP8.5, DSSAT, GIS, Rice, Winter barley, Soybean

I. 서 론

우리나라는 식량 자급률 25%로 곡물 수입량이 세계 5위다. 쌀을 제외하면 밀과 옥수수의 자급률은

0.8%, 콩 자급률은 8.7%에 불과하므로 기상 이변 등으로 국제 곡물 가격이 상승할 경우 충격을 완화할 방안을 찾기 힘들다(2010년 기준, <http://www.index.go.kr>). 정부가 단기적으로 할 수 있는 일은 밀, 콩,

* Corresponding Author : Jin I. Yun
(jiyun@khu.ac.kr)

옥수수 등 주요곡물의 수입 관세율을 내리면서 민간과 공공 부문의 비축을 늘려 수급 불안을 일시적으로 감소시키는 정도이다. 따라서, 중·장기적으로는 쌀 외에 다른 곡물의 자급률을 높여나아가야 한다. 그러나, 자급률을 높이기 위해서는 단위 면적당 수확량을 획기적으로 증대시키거나 재배면적을 크게 늘려야 하지만 협소한 국토면적과 영세한 농장규모, 감소하는 영농인구 등 현실적인 문제가 산적해 있다. 나아가 기존 농경지 및 작부체계에 대한 기후변화의 위협 또한 간과할 수 없는 현실이다.

전 세계적으로 기후변화가 작물 생산에 미치는 영향에 대해 연구가 이루어지고 있으며, 국내에서도 지금까지 국가표준 기후변화시나리오로 인정받았던 SRES (Special Report on Emission Scenario) A1B를 적용한 미래의 곡물 생산에 관한 연구결과가 보고되었다(Shim *et al.*, 2011; Lee *et al.*, 2012). IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)는 지금까지 온실기체 배출 시나리오로 사용 되어온 SRES 대신 인간활동이 대기에 미치는 복사강제력으로 온실가스 농도를 정하는 대표농도경로(Representative Concentration Pathway, RCP)를 5차 보고서 작성을 위한 표준으로 채택하였다. 최근 우리나라 국립기상연구소는 포스트 교토 체제의 불확실성에 근거하여 특별한 감축노력 없이 현재 추세대로 온실기체가 배출되는 경우를 가정한 RCP8.5를 토대로 남한지역의 기후변화 시나리오를 1km 격자 해상도로 작성하였다(국립기상연구소, 2011).

이렇게 상세한 기후변화정보를 이용한다면 농경지에 미치는 영향 역시 정밀하게 예측할 수 있다. 파종 후 수확까지 농작물 생육에 미치는 날씨의 영향을 작물모형에 의해 미리 예상하는 농업기상학적 작황진단(agrometeorological crop forecasting) 기법은 상세기후도와 결합되어 재배적지 이동양상을 파악하거나 신 품종이나 재배기술의 도입을 위한 사전실험용으로 널리 이용되고 있다(Yun and Cho, 2001; Chung *et al.*, 2006; Shim *et al.*, 2011). 이 때 지역의 공간 평균으로 모형을 구동한다면 하천, 산림, 건물 등 농작물을 재배할 수 없는 지목까지 포함되어 수량은 물론 생산량 예측의 신뢰성이 떨어진다. 또한 기후의 연차변이가 고려되지 않는 시나리오기후자료의 속성을 개선하지 않고서는 모의결과의 현실성도 낮아질 수 밖에 없다.

본 연구에서는 기존 연구에서 사용되었던 A1B와는 많은 차이를 보이고 있는 RCP8.5 기반 미래 기후전

망을 이용하되, 실제 농작물이 재배되고 있는 농지단위의 속성정보를 작물모형에 적용시키고, 확률추정기법에 의해 연차변이를 부여한 10년 간격 일 기상자료에 의해 발육단계와 잠재수량 변화 추세를 도출함으로써 보다 현실성 있는 영향평가방법을 제시하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 작물모형

본 연구에 사용된 작물모형은 DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) Version 4.5에 포함된 벼, 보리, 콩 생육모형이다. 벼의 경우 CERES (Crop Environment Resource Synthesis)-Rice, 보리의 경우 CERES-Barley, 콩의 경우 CROPGRO-Soybean을 사용하였다. DSSAT은 ICASA (International Consortium for Agricultural Systems Applications)의 노력으로 다년 간에 걸쳐 주로 미국에서 개발된 여러 종류의 작물모형을 동일한 입출력 파일에 의해 사용할 수 있도록 표준화시킨 패키지 프로그램이다. 이 프로그램은 농장의 정밀관리에서부터 한 지역의 기후변화 영향평가에 이르기까지 전세계적으로 다양한 분야에서 이용되고 있다.

DSSAT은 토지, 날씨, 농작물 관리 및 실험계획에 관한 정보를, 토양-식물-대기 관계 설명변수로 이루어진 작물모형에 입력하여 주어진 기간 동안 생장과 발육, 잠재수량을 모의한다. 토지의 속성은 거의 변하지 않는 토양의 물리화학적 성질에 좌우되므로, 매일의 기상자료(최고·최저기온, 일사량, 강수량 등)로 표현되는 날씨야말로 작물생육모의의 구동력이며 주어진 토지의 잠재생산력을 결정한다. 한편 실험설계파일에 담긴 파종, 시비, 관개 등 농작물 관리정보는 사용자가 언제든지 변경할 수 있으므로 잠재생산력에 접근할 수 있는 최적재배방법을 찾도록 도와준다(Jones *et al.*, 2003; Hoogenboom *et al.*, 2010). 각각의 모형은 발육과 수량형성과정의 품종수준 특성을 반영하기 위해 유전모수(genetic coefficients)를 사용하는데, 사용자가 새로 만들거나 변경할 수 있다.

2.2. 품종 별 유전 모수 추정

DSSAT에는 국제적으로 알려진 품종들에 대해서는 유전모수가 이미 내장되어 있지만 국내에서 육성되어 널리 재배되는 벼, 보리, 콩 품종에 대해서는 정보가

거의 없으므로 사용자가 자체적으로 모수를 추정해야 한다. 농촌진흥청에서 매년 실시하고 있는 ‘벼 작황진단 시험’, ‘벼 작황조사 시험’, ‘기타 작황조사 시험’ 자료를 수집하여 농촌진흥청 국립식량과학원에서 육성한 ‘올해의 보급품종’에 해당되는 품종 중 1981년 이후에 5년 이상 연속자료가 있는 것만 선택하였다. 유전 모수 추정을 위해 벼의 경우 소백벼(조생종), 팔공벼(중생종), 낙동벼(중만생종), 보리의 경우 알보리(겉보리), 새쌀보리(쌀보리), 삼도보리(맥주보리), 콩의 경우 은하콩(나물콩류)과 일품검정콩(밥밀콩류) 등의 품종들이 선택되었다.

모수 추정은 DSSAT 패키지의 하부 모듈인 GenCalc 프로그램을 이용하였으며, 수집된 작황 조사 자료를 시기에 따라 둘로 나누어 전반부 자료는 모수 추정에 사용하고, 모수 추정에 사용하지 않은 후반부 자료는 검증에 이용하였다. 모수추정과정은 2단계로 나누어 먼저 생물계절과 관련된 P-part(P1, P1D, P1V)를 추정하여 결정한 다음, 성장과 수량구성요소 관련 정보를 담고 있는 G-part(G1, G2, G3 등)를 조정하는 Shim *et al.*(2011)의 방법을 따랐다. 도출된 품종 별 유전모수(Table 1)에 의해 해당 모형을 구동하고 모의결과를 후반부 자료와 비교한 결과, 추정오차의 범위는 평방

Table 1. Genetic coefficients of the relevant crop models in DSSAT for adapting selected cultivars in rice, barley and soybean

Rice	P1	P2R	P5	P2O	G1	G2	G3	G4
SOBAEK	129	78	612	12	76	0.27	1.5	1.0
PALGONG	110	130	530	12	45	0.21	0.6	1.0
NAKDONG	174	100	506	9	41	0.27	1.5	1.0

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: Tillering coefficient relative to IR64.

G4: Temperature tolerance coefficient. 1.0 for normal.

Barley	P1V	P1D	P5	G1	G2	G3	PHINT
ALBORI	17	15	468	27	54	1.3	75
SAESSALBORI	16	23	492	45	54	1.3	75
SAMDOBORI	14	34	528	56	20	1.3	75

P1V: Days at optimum vernalizing temperature required to complete vernalization.

P1D: Percentage reduction in development rate in a photoperiod 10 hour shorter than the threshold relative to that at the threshold.

P5: Grain filling (excluding lag) phase duration (°C. d).

G1: Kernel number per unit canopy weight at anthesis (#/g).

G2: Standard kernel size under optimum conditions (mg).

G3: Standard, non-stressed dry weight (total, including grain) of a single tiller at maturity (g).

Soybean	CSDL	PPSEN	EM-FL	FL-SH	FL-SD	SD-PM
ILPGEOMJUNG	15	0.29	31	10	36	20
EUNHA	15	0.29	39	6	30	29

CSDL: Critical Short Day Length below which reproductive development progresses with no daylength effect (for shortday plants) (hour).

PPSEN: Slope of the relative response of development to photoperiod with time (positive for shortday plants) (1/hour).

EM-FL: Time between plant emergence and flower appearance (R1) (photothermal days).

FL-SH: Time between first flower and first pod (R3) (photothermal days).

FL-SD: Time between first flower and first seed (R5) (photothermal days).

SD-PM: Time between first seed (R5) and physiological maturity (R7) (photothermal days).

근오차(RMSE)로 표현하여 평균적으로 벼의 경우 출수기 4.2일, 성숙기 6.0일, 보리의 경우 출수기 3.8일, 성숙기 2.3일, 콩의 경우 개화기 2.8일, 성숙기 4.2일로 나타나 미래 기후 변화 시나리오에 따른 개별 작물의 생육 및 수량 변화 추정에 충분할 것으로 판단하였다.

2.3. 재배구역 분류 및 속성정보 확보

한국수자원공사 국가수자원관리종합정보시스템(<http://www.wamis.go.kr>)에서 제작한 유역 분류 가운데 중권역에 해당하는 104개 유역을 농촌진흥청의 벼 재배지대 구분에 중첩시켜 68개 재배구역(Crop-simulation Zone Unit, CZU)으로 통합하였다. 한편 환경부의 30m 해상도 지포피복-토지이용 분류지도 위에 CZU를 중첩시키고 각 CZU에 포함되는 농경지 픽셀만 추출하여 CZU별 농경지 주제도를 래스터파일로 준비하였다.

모형구동에 필요한 토양 정보는 한국수자원공사에서 제공하는 수치토양분류도 위에 CZU별 농경지 주제도를 중첩시켜 농경지에 해당하는 토양속성을 추출하였다. 추출된 토양속성 가운데 가장 흔한 토성을 그 CZU의 대표 토성으로 간주하였는데 사양토(Sandy Loam)가 61개 권역으로 가장 많았고, 나머지는 식질양토(Clay Loam)이었다. 각 토양의 토성 별 세부적인 물리 및 화학적 속성은 국립농업과학원에서 구축한 정밀토양도로부터 입수하였다(<http://soil.rda.go.kr>). 이 자료들은 DSSAT의 하부프로그램인 S-Build를 이용하여 작물모형 구동에 적합한 포맷으로 변경하였다.

동일한 CZU 내에서도 재배양식은 지역적인 차이가 있겠지만 현실적으로 모든 재배정보를 입수하기는 힘들다. 각 시군에 있는 농업기술센터에서 제공하고 있는 표준 재배법은 상위기관인 도 농업기술원의 표준재배법을 인용하고 있으므로, 본 연구에서는 전국을 크게 중부, 강원, 호남, 영남 등 4개 권역으로 나누어 해당 농업기술원의 표준재배법을 사용하기로 했다. 각 권역의 대표 지역(수원, 춘천, 익산, 밀양) 농업기술원(또는 농업기술센터)에서 채택하는 파종, 이앙, 시비, 물 관리 등 표준재배법을 참고하여 데이터베이스화하였고, 이를 DSSAT 하부프로그램인 X-Build를 이용하여 모형 구동에 맞는 포맷으로 변경하였다.

2.4. 기후자료 준비 및 모형 구동

기상청으로부터 남한지역의 2011~2100 미래 시나리

오(RCP8.5, A1B)에 근거한 최고, 최저기온, 강수량을 수집하였다. 원본 자료의 공간 분해능을 1km로 조정하기 위해 위경도 간격이 일정하도록 내삽한 다음 TM(Transverse Mercator) 좌표계로 변환하였다. 시나리오 자료에는 존재하지 않는 일사량, 강수일수는 최근 10년(2001-2010) 자료의 평균으로 대체하였다. CZU별 농경지 주제도를 기후도 위에 중첩시켜 농경지에 해당하는 픽셀의 기후자료만 추출하고, 이들의 산술평균을 CZU 대표기후로 간주하였다. 이렇게 해서 준비된 CZU별 월별 기후자료는 각 10년 기간의 월별 평균값이므로 기대되는 연차변이를 반영한 일별 기상자료를 얻기 위해서는 날씨생성기(weather generator)를 이용해야 한다. DSSAT에는 WeatherMan이라는 날씨생성기가 내장되어 있으므로 본 연구에서는 이것을 이용하여 기간별로 30세트씩의 일별 기상자료를 생성하였다. 현재 기후조건과의 비교를 위해 최근 10년(2001-2010) 평균값을 기준으로 삼아 동일한 방법으로 일별 기상자료를 준비하였다. 최종적으로 68개 CZU에 대해 A1B 및 RCP8.5 시나리오에 따른 2011년부터 2100년까지 10년 단위 일 기상자료 30세트가 준비되었다. 이 기간 중 이산화탄소 농도 변화양상은 A1B 및 RCP8.5 시나리오에서 가정한 변동곡선으로부터 역시 10년 단위로 추출하였다. 앞에서 준비된 토양자료 및 재배방법에 의해 CERES-Rice, CERES-Barley, CROPGRO-Soybean 모형을 CZU별 일 기상자료 및 이산화탄소농도 조건에서 30회씩 구동시켜 해당 품종의 발육, 성장, 수량 관련 변수를 예측하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 출수, 개화, 종실수량의 국가 평균 변화

미래 기후시나리오를 적용하여 모형을 구동한 결과를 68개 CZU 평균값으로 나타내면 벼와 보리, 콩 공시품종 모두에서 개화기(출수기)가 앞당겨질 것으로 전망되었다. 대체로 기존의 국가표준시나리오인 A1B와 흐름은 같지만 RCP8.5에서는 더 큰 폭으로 단축되는 경향을 보였는데, 벼, 보리의 출수 및 콩의 개화 단축 정도는 현재 기준기후(2001-2010) 대비 2090년대에는 벼의 경우 A1B 평균 12.0일, RCP8.5 평균 17.2일이었다. 겨울작물인 보리의 경우, A1B 평균 24.6일, RCP8.5 평균 28.7일로 거의 한달 정도 일찍 출수할 것으로 예상되었다. 콩의 경우 A1B에서 평균

Fig. 1. Estimated anthesis dates of rice(A), barley(B), and flowering date of soybean(C) cultivars for each decade in the future under the climate conditions projected by RCP8.5 and A1B scenarios. Vertical bars represent standard deviation from 30 runs of crop model with randomly generated daily weather data per decade. Cultivar initials are: 'SB' for Sobaek rice, 'PG' for Palgong rice, 'ND' for Nakdong rice, 'AL' for Albori barley, 'SS' for Saessalbori barley, 'SD' for Samdobori barley, 'IP' for Ilpumgeom- jeongkong soybean, and 'EH' for Eunhakong soybean, respectively.

6.2일 단축되는 것에 비해 RCP8.5에서는 평균 8.2일 단축될 것으로 예상되었다(Fig. 1).

특히 벼의 경우 조생종(A1B:10.3일, RCP8.5: 14.9일, 2000년 대비 2090년의 감소 폭)에 비해 중생종(A1B:12.1일, RCP8.5:17.3일)에서 감소 폭이 컸고, 중만생종(A1B:13.5일, RCP8.5:19.3일)은 그 보다 더 감소 폭이 컸다. 벼에 있어서 기준기후 대비 2040년대, 2070년대, 그리고 2090년대의 출수기 변화는 조생종은 A1B 시나리오에서 2.8, 8.0, 10.3일, RCP8.5 시나리오에서 7.9, 11.9, 14.9일이 앞당겨 질 것으로 보인다. 중생종은 A1B 시나리오에서 3.3, 9.5, 12.1일, RCP8.5 시나리오에서 9.4, 13.9, 17.3일이 단축될 것으로 전망된다. 중만생종의 경우 A1B 시나리오에서

7.5, 10.5, 13.5일, RCP8.5 시나리오에서 9.8, 18.4, 19.3일이 각각 단축될 것으로 나타났다. 이에 따라 RCP8.5 시나리오에서 2060년이 되면 중생종의 출수시기가 현재 조생종의 출수시기만큼 당겨 진다. 또한 중만생종의 경우 2070년대가 되면 현재 중생종의 출수시기만큼 당겨진다.

보리에 있어서 기준기후 대비 2040년대, 2070년대, 그리고 2090년대의 출수기 변화는 겉보리의 경우 A1B 시나리오에서 8.3, 18.3, 27.2일 단축, RCP8.5 시나리오에서 14.0, 26.2, 31.3일이 단축되었다. 맥주 보리는 A1B시나리오에서 5.9, 15.6, 24.5일 단축, RCP8.5 시나리오에서 11.6, 23.5, 28.6일이 각각 단축될 것으로 나타났다.

기후기후 대비 2040년대, 2070년대, 그리고 2090년대의 콩의 개화기 변화는 벼, 보리에 비해 크지 않았는데, 나물콩류에서 1.6, 4.8, 6.0일(A1B) 및 5.3, 7.4, 7.8일(RCP8.5) 단축, 밥밀콩류는 1.7, 5.1, 6.4일(A1B) 및 5.5, 7.9, 8.6일(RCP8.5)이 각각 단축되었다.

이처럼 10년 단위 평균값으로 표현할 경우 출수 혹은 개화기는 모두 지속적인 단축경향을 보이지만, 각 10년 기간 동안 일별 기상자료를 확률적으로 30번씩 복원하여 표준편차로 표현한 연차변이는 변동경향이 평균과는 달랐다. 벼에 있어서는 A1B, RCP8.5 시나리오 모두 현재에 비해 미래에 출수기의 연차변이가 커지는 것으로 나타났는데, 조생종의 경우 기후기후에서 3.9일인데 반해 2090년에는 5.5일(A1B 시나리오) 및 6.3일(RCP8.5)로 각각 40%에서 60%나 증가하였다. 중생종의 경우 기후기후에서 4.5일인데 2090년대에는 6.0일(A1B), 6.7일(RCP8.5)로 증가하였고, 중만생종의 경우에도 기후기후 4.2일에서 2090년 5.0일(A1B), 5.2일(RCP8.5)로 증가하였다.

보리와 콩에 있어서는 벼와는 달리 기후기후에 비해 미래기후조건에서 출수개화기의 연차변이가 감소하였다. 기후기후에서 5.5일의 연차변이를 보인 겔보리는 2090년대에 2.2일(A1B), 2.8일(RCP8.5)로, 쌀보리도 기후기후조건의 4.4일에서 1.7일(A1B), 1.9일(RCP8.5)로 줄어들었고, 맥주보리 역시 기후기후 6.1일에서 A1B 3.0일, RCP8.5 3.6일로 크게 줄었다. 나물콩류는 기후기후 2.3일에서 1.6일(A1B) 및 1.4일(RCP8.5), 밥밀콩류는 기후기후 2.4일에서 1.7일 및 1.5일로 줄었다.

기후시나리오 별 연차변이 변동폭은 쌀, 보리의 경우 RCP8.5 기후조건에서 더 컸지만 콩에서는 A1B 기후조건에서 연차변이가 큰 것으로 나타났다.

등숙기간(출수 후 생리적 성숙까지의 날 수)은 종실의 최종수량을 결정짓는 중요한 요소인데, 공시품종들의 평균을 구해 연대별로 비교해보면 벼에 있어서는 지속적으로 단축되어 2090년대에는 기후기후보다 평균 14.5일이 짧아진다(Fig. 2). 콩의 경우에도 평균 1.9일로 약간 단축되는 경향을 보였지만, 보리의 경우에는 출수기가 거의 한달정도 단축되었음에도 불구하고 등숙기간은 큰 변화가 없이 오히려 평균 1.1일 연장될 것으로 전망되었다. 연차변이는 벼, 보리, 콩 품종 모두 기후기후 대비 미래로 갈수록 점차 줄어들었다. 벼의 경우 기후기후 7.5일에서 2090년대에는 A1B 기후조건에서 2.3일, RCP8.5 기후조건에서 2.0일로 크게

Fig. 2. Estimated grain filling period averaged across the selected cultivars in rice (A), barley (B), and soybean (C) in the future under the climate conditions projected by RCP8.5 and A1B scenarios. Vertical bars represent standard deviation from 30 runs of crop model with randomly generated daily weather data per decade.

감소하며, 보리의 경우 기후기후 3.7일에서 2090년대 A1B, RCP8.5 기후조건 모두 2.7일로 약간 감소하였다. 콩의 경우에도 기후기후조건의 3.4일에서 A1B의 1.3일, RCP8.5의 1.0일 등으로 감소하였다.

미래 기후조건에서 벼, 보리, 콩의 예상 종실수량을 전 품종 평균하여 Fig. 3에 요약하였다. 벼의 수량은 지속적으로 줄어들어 RCP8.5 기후조건에서 2070년대면 기준수량에 비해 10% 이상 감수가 전망된다. 반면 콩의 수량은 큰 변동이 없을 것으로 보이며 보리의 수량은 오히려 늘어날 것으로 예측되었다. 기후기후조

Fig. 3. Estimated grain yield averaged across the selected cultivars in rice (A), barley (B), and soybean (C) in the future under the climate conditions projected by RCP8.5 and A1B scenarios. Vertical bars represent standard deviation from 30 runs of crop model with randomly generated daily weather data per decade.

건 대비 2040, 2070, 2090년대의 수량감소 비율은 벼에서 3, 6, 8%(A1B) 및 7, 12, 13%(RCP8.5)이었다. 보리 수량의 증가는 2040, 2070, 2090년대에 각각 14, 35, 45%(A1B) 및 18, 40, 58%(RCP8.5)로 변화폭이 컸다. 콩의 경우 변화가 적었는데 A1B 기후조건에서는 2040, 2070, 2090년대에 각각 2, 4, 3% 수량증가가 예측되었지만, RCP8.5 기후조건에서는 2040 및 2070년대에는 3% 및 1% 증가, 2090년대에는 6% 감소로 나타났다. 콩의 경우 A1B와 RCP8.5 기후조

건 간에 미래 예상수량 면에서 큰 차이가 없었지만, 벼와 보리에서는 A1B에 비해 RCP8.5에서 종실수량의 감소 혹은 증가 폭이 커지는 것으로 나타났다.

종실수량의 연차변이는 표준편차로 나타낼 경우 벼는 현미기준으로 기준기후조건에서 495kg/ha이었으나 2090년의 A1B 및 RCP8.5 조건에서 각각 450kg/ha와 398kg/ha으로 약간 줄어 들었다. 보리의 경우 기준기후조건에서 1106kg/ha이었고 2090년 A1B 및 RCP8.5 기후조건에서 각각 563kg/ha 및 586kg/ha으로 크게 줄었다. 콩의 경우 기준기후조건에서 295kg/ha이었으나 2090년 A1B와 RCP8.5 기후조건에서 각각 237kg/ha와 243kg/ha으로 감소하였다. 즉 기준기후 대비 미래 기후조건에서 종실수량의 연차변이는 모든 작목에서 감소하며 그 폭은 보리가 가장 컸다.

벼의 수량 및 건물 생산성 저하는 야간기온의 상승에 따른 호흡에너지 소모가 커지는 것에 그 원인이 있을 것으로 추정된다(Peng *et al.*, 2004). 국내에서 널리 재배하는 겉보리, 쌀보리, 맥주보리의 주요 품종을 대상으로 얻은 수량증가예상은 외국의 연구보고(Holden *et al.*, 2003)는 물론, 국내에서 얻은 연구결과(Shim *et al.*, 2002; Shim *et al.*, 2011)와도 일치하였다. 이러한 보리의 증수원인에 대해서는 겨울철 온도상승에 따라 증가한 단위면적당 수수와 수당 립수가 주된 요인으로 보고된 바 있다(Shim *et al.*, 2011). 나이가 등숙기간이 짧아지는 벼의 경우 그만큼 종실의 등숙이 불량하여 수량의 감소로 이어지고, 등숙기간이 조금 연장되는 보리의 경우는 종실의 충실도를 높여서 수량증가로 이어질 것으로 예상된다.

3.2. 출수-개화, 종실수량의 지역별 변화

같은 품종이라도 기후변화의 영향은 전국 평균과는 다르게 권역에 따라 다양하게 표출되었다. 현재에 비해 미래에는 벼의 경우 강원도 일대와 중서부지역을 시작으로 전국적으로 감소하는 경향을 보이나, 남부지방에 비해 중, 북부지방에서 수량 감소의 폭이 더 클 것으로 예상되었다(Fig. 4). 반면 보리의 경우 중부내륙지역을 중심으로 증가하여 강원도일대를 제외한 중부지방에서 증가의 폭이 큰 것으로 나타났다. 동해안을 제외한 강원도 일대에서 증가의 폭에 뚜렷한 차이가 나는데, 이는 앞서 적용한 표준재배법과 기온변화의 지역적 차이 때문이다. 콩의 경우에는 큰 변화는 아니나 약간 증가하는 경향을 보인다.

Fig. 4. Expected grain yields of selected cultivars in rice, barley and soybean for each CZU in the future decades relative to those in the present decade (2001-2010).

각 CZU 별로 잠재수량을 농경지 면적과 곱하여 잠재생산량을 계산한 다음, 나라 전체 생산량에서 각 CZU가 차지하는 비율을 기간 별로 비교하면 주산지의 지리적 이동을 파악할 수 있다. 벼의 경우 현재에 비해 그 비중이 감소하는 지역은 주로 경기서부와 충남, 호남 등 한반도의 서쪽 지역이며 영남내륙에도 약간 나타난다. 수량증가가 예상되는 보리의 경우 제주, 호

남, 영남, 동해안 등 기존의 재배지대를 중심으로 그 비중이 감소할 것으로 보인다. 콩의 경우 경기, 충남, 호남 등 서해안에 가까운 지역과 영남 일부 지역을 중심으로 그 비중이 감소한다. 지표피복정보를 이용하여 추산한 남한 전체 농경지 면적은 24,136km²인데 여기에 모두 벼를 재배한다고 가정하면 쌀(현미)의 잠재생산량은 2000년대 현재 14,863,633톤이지만 2090

년대에는 11,734,019톤으로 줄어든다. 만약에 전체 농경지에 콩을 재배한다면 현재 7,365,865톤, 미래 7,129,597톤으로 비슷하다. 하지만 보리를 재배한다면 현재의 잠재생산량 9,452,416톤이 미래에는 16,972,537톤으로 크게 증가하여 쌀 생산량을 추월하게 된다.

본 연구결과는 현재 장려품종 중에서 일부를 선택하여 표준재배법(4개 권역)을 미래에도 동일하게 적용하여 전국적으로 재배한다는 가정하에 모의한 것이다. 여기서 가정한 모든 농경지에 보리를 재배하는 일은 현실적으로 불가능한 일이다. 하지만 곡물생산 부문의 기후변화 대응전략의 하나로서 벼의 경우 기후변화의 영향을 상대적으로 많이 받는 중부지방에서는 재배법이나 작부체계 변경을 강구해야 하는 한편, 지금까지 거의 재배가 되지 않았던 중부이북 지방에서도 보리재배에 적극적인 관심을 가져야 할 필요성이 이 연구결과로부터 제기된다.

IV. 적 요

본 연구는 기존 연구에서 주로 사용된 A1B와 최근 국가표준으로 채택된 RCP8.5 기반 미래 기후전망 등 두 가지를 이용하되, 실제 농작물이 재배되고 있는 농지단위의 속성정보를 작물모형에 적용시키고, 확률추정기법에 의해 연차변이를 부여한 10년 간격 일 기상자료에 의해 발육단계와 잠재수량 변화 추세를 도출함으로써 보다 현실성 있는 영향평가방법을 제시하고자 하였다. 남한 전역을 산맥, 하천, 집수역에 근거하여 68개의 작물재배구역(CZU)로 분류하고, 1km 격자간격의 10년 단위(2011-2100) 월별 남한 미래기후 시나리오 자료로부터 농경지에 해당하는 격자의 일 최저, 최고 기온, 강수량의 월별 평균자료를 추출하였다. 농경지 격자 월별 기후자료를 CZU별로 요약하고 그 공간평균값을 확률추정기법에 의해 10년 단위기간 별 30세트씩의 일별 기상자료로 변환하였다. 농촌진흥청 토양 전사지도로부터 발췌한 토양정보와 4대 권역 별 표준재배법을 적용하여 10년 단위기간의 일 기상조건 30세트에 대해 쌀, 보리, 콩 국내 주요 품종의 생육과 수량을 CERES-Rice, CERES-Barley, CROPGRO-Soybean에 의해 모의하였다. 모의결과에 의하면 모든 작목에서 기후변화에 의해 개화기(출수기)가 앞당겨지나, 연차변이는 보리와 콩에서 감소한 반면 벼에서는 증가하였다. 조기 출수에도 불구하고 보리의 종실 등숙기간은 조

금 연장되었으며, 콩에서는 변동이 적었고 벼에서만 단축되었으며, 등숙기간의 연차변이는 모든 작목에서 감소추세를 보였다. 벼의 수량은 모든 품종에서 줄어들 것으로 예상되었지만, 보리의 수량은 모든 품종에서 크게 늘어나고 콩에서는 큰 변동이 없을 것으로 예상되었다. 전국의 모든 농경지에 벼를 재배한다고 가정하면 쌀(현미)의 잠재생산량은 2000년대 현재 14,863,633톤이지만 2090년대에는 11,734,019톤으로 줄어들지만, 보리를 재배한다면 현재의 잠재생산량 9,452,416톤이 미래에는 16,972,537톤으로 크게 증가하여 쌀 생산량을 추월하게 된다. 전체적으로 기후변화의 부정적 영향은 벼에서 가장 현저하며, 콩은 영향이 덜하고, 보리에서는 오히려 긍정적인 영향이 예상되므로 곡물생산 부문의 기후변화 대응전략의 하나로 중부이북 지방에서도 보리재배에 적극적인 관심을 가져야 할 필요성이 있다.

감사의 글

본 논문은 농촌진흥청 공동연구사업(기후변화에 따른 주요 작물 별 재배적지 변동 연구, 과제번호: PJ006403)의 지원에 의해 이루어진 것임.

REFERENCES

- Chung, U., K. S. Cho, and B. W. Lee, 2006: Evaluation of site-specific potential for rice production in Korea under the changing climate. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **8**(4), 229-241.
- Holden, N. M., A. J. Brereton, R. Fealy, and J. Sweeney, 2003: Possible change in Irish climate and its impact on barley and potato yields. *Agricultural and Forest Meteorology* **116**(3-4), 181-196.
- Hoogenboom, G., J. W. Jones, P. W. Wilkens, C. H. Porter, K. J. Boote, L. A. Hunt, U. Singh, J. L. Lizaso, J. W. White, O. Uryasev, F. S. Royce, R. Ogoshi, A. J. Gijsman, G. Y. Tsuji, and J. Koo, 2010: *Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.5 [CD-ROM]*, University of Hawaii, USA.
- Jones, J. W., G. Hoogenboom, C. H. Porter, K. J. Boote, W. D. Batchelor, L. A. Hunt, P. W. Wilkens, U. Singh, A. J. Gijsman, and J. T. Ritchie, 2003: DSSAT Cropping System Model. *European Journal of Agronomy* **18**, 235-265.
- Lee, T., J. Y. Choi, S. H. Yoo, S. H. Lee, and Y. G. Oh, 2012: Analyzing consumptive use of water and yields of paddy rice by climate change. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* **54**(1), 47-54.

- Peng, S., J. Huang, J. E. Sheehy, R. C. Laza, R. M. Visperas, X. Zhong, G. S. Centeno, G. S. Khush, and K. G. Cassman, 2004: Rice yields decline with higher night temperature from global warming. *Proceeding of the National Academy of Science of the United States of America* **101**(27), 9971-9975.
- Shim, K. M., S. H. Min, D. B. Lee, G. Y. Kim, H. C. Jeong, S. B. Lee, and K. K. Kang, 2011: Simulation of the effects of the A1B climate change scenario on the potential yield of winter naked barley in Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **13**(4), 192-203 (in Korean with English abstract).
- Shim, K. M., S. H. Yun, Y. S. Jung, J. T. Lee, and K. H. Hwang, 2002: Impact of recent weather variation on yield components and growth stages of winter barley in Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **4**(1), 38-48 (in Korean with English abstract).
- 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 (in Korean with English abstract).
- 국립기상연구소, 2011: IPCC 5차 평가보고서 대응을 위한 기후변화 시나리오 보고서. 79-110p.
- 국립농업과학원 토양환경 정보시스템: <http://soil.rda.go.kr> (2012. 08. 22).
- 통계청, e-나라지표: <http://www.index.go.kr> (2012. 08. 22).
- 한국수자원공사 국가수자원관리종합정보시스템: <http://www.wamis.go.kr> (2012. 08. 22).