파종일 변경이 기후변화 조건에서 곡물생산량에 미치는 영향

김대준^{1*} · 노재환² · 김정곤³ · 윤진일¹

¹경희대학교 식물환경신소재공학과, ²국립식량과학원 벼맥류부,

³(사)한국맥류산업발전연구원

(2013년 3월 4일 접수; 2013년 3월 23일 수정; 2013년 3월 23일 수락)

The Influence of Shifting Planting Date on Cereal Grains Production under the Projected Climate Change

Dae-jun Kim^{1*}, Jae-hwan Roh², Jung-gon Kim³ and Jin I. Yun¹

¹College of Life Science, Kyung Hee University, Yongin 446-701, Korea

²Rice Research Division, National Institute of Crop Science, Iksan 570-080, Korea

³Korean Wheat & Barley Industry Development Institute, Suwon 441-857, Korea

(Received March 4, 2013; Revised March 23, 2013; Accepted March 23, 2013)

ABSTRACT

Yield reduction in major cereal grains seems unavoidable with the existing cropping systems under the projected climate change in Korea. Crop models were used to predict the effects of planting date shift on grain yields of rice, winter barley and soybeans at 64 agroclimatic zones in Korea. The shift of planting date by 7, 14, and 21 days before and after the recommended planting dates were incorporated in DSSAT experiment files to simulate growth, development and grain yields of major cereal crops. These included 3 rice cultivars representing early-, medium- and late- maturity groups, 1 winter barley and 1 soybean cultivars. Partial mitigation in yield reduction was found with earlier planting in the early maturing rice cultivar and with delayed planting in the late maturing rice cultivar under the RCP8.5 projected climate change in Korea. Additional yield increase in winter barley was expected by earlier planting treatments. Soybean showed a positive effect on grain yield with earlier planting. However, the rate was much lower than the case with winter barley and delayed planting caused yield reduction.

Key words: RCP 8.5, Planting date, DSSAT, Rice, Barley, Soybean, Climate change

I. 서 론

Kim *et al.*(2012)은 기상청에서 발표한 미래 한반도 기후변화 조건에서 주요 곡물의 작황을 10년 단위로 모의하여 출수기가 앞당겨지고 등숙기간은 단축되어 벼와 콩의 수량은 감소할 것이며 보리는 크게 증가할 것이라고 보고하였다. 하지만 이 예측결과는 기후가 변하더라도 농가에서 아무런 대책 없이 현재 재

배법을 고수한다는 전제 하에 얻은 것이다. 농가수준에서 기후변화에 대응하기 위한 가장 용이한 방안 중 하나가 파종시기 이동이다.

벼, 보리, 호밀, 옥수수 등 여러 작물에 있어서 파종시기가 최종수량은 물론 품질에 영향을 미친다는 연구결과가 국내외에서 보고된 바 있다(Kim and Kim, 1994; Son *et al.*, 2009; Ahn *et al.*, 2012; Kondo, 2009). Choi *et al.*(2010)은 보리 파종시기를 변경함

* Corresponding Author : Dae-jun Kim
(daejuy@khu.ac.kr)

에 따라 기후변화조건에서 종실수량 및 수량구성요소의 변화 여부를 연구하여 수당립수와 천립중은 만파할 수록 늘어, 수량성으로는 겉보리는 10일 정도, 쌀보리와 맥주보리는 5일정도 만파하여도, 안전일동에 문제가 없을 것으로 예상하였다. 또한, Lee *et al.*(2011)은 미래 기후변화 환경에서 벼 품종의 최적 파종기는 조생종에서 늦어지고, 중만생종에서 빠른 경향이며, 지구온난화가 진행될수록 최적 파종기가 늦어질 것이라 예상한 바 있다.

본 연구에서는 벼, 보리, 콩 등 주요 식량작물에 대해 파종시기를 변경함에 따라 예상되는 생육과 수량반응을, 기존의 파종시기 고정조건에서 예상되는 결과와 비교함으로써 현실성 있는 기후변화 적응전략 마련을 위한 기초자료로 제시하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 작물모형

본 연구에서 사용한 작물모형은 ICASA (International Consortium for Agricultural System Applications)에서 제작한 생육모델링 패키지 프로그램인 DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) Version 4.5 이다. 이 패키지는 다년간에 걸쳐 개발된 여러 종류의 작물모형들을 동일한 자료를 입력하고 출력할 수 있도록 통합한 일종의 패키지 소프트웨어라고 할 수 있다. 이 패키지에는 국내에서 생산되고 있는 벼, 보리, 콩 등 각종 식량작물에 대한 모형 또한 포함되어 있는데, 이중 벼의 경우 CERES (Crop Environment Resource Synthesis)-Rice, 보리는 CERES-Barley, 콩

Table 1. Genetic coefficients of the relevant crop models in DSSAT for adapting selected cultivars in rice, barley and soybean (Kim *et al.*, 2012)

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

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

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).

은 CROPGRO-Soybean 모델이 포함되어 있다. 입력되는 자료로는 기상자료, 토양자료 등의 환경정보를 담고 있는 파일 부터, 품종별로 생육정보를 담고 있는, 품종 모수 자료, 그리고 파종, 관개, 시비 등의 재배 기술 등 정보를 담고 있는 실험설계자료 등이 있다.

작물모형을 이용하여 잠재생산력을 추정함에 있어 토양의 경우 그 화학적 특성은 수년간에 걸쳐 거의 변하지 않는 것을 고려할 때, 변화요소가 상대적으로 큰 매일의 기상요소는 작물생육모의에 있어 큰 변별력을 주는 가장 중요한 요소라 할 수 있다. 다시 말해 다른 환경요인에 비해 기후변화가 잠재생산력에 미치는 영향과, 변화를 예측하고 대비할 수 있는 좋은 도구가 될 수 있는 것이다. 또한 실험설계파일에 포함되는 관개, 시비, 파종일 등의 재배정보를 사용자가 조절하여, 주어진 환경하의 최적의 재배 기술과 품질 및 생산력을 유추할 수 있게 되고, 변화하는 환경에 맞춰 재배방법의 변화를 꾀할 수 있는 근거자료로 이용되고 있다(Jones *et al.*, 2003; Hoogenboom *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2012).

2.2. 모형 구동용 자료 준비

모수 추정은 DSSAT 패키지의 하부 모듈인 GenCalc 프로그램을 이용하였으며, 수집된 작황 조사 자료를 이용 하여 모수 추정과 검증에 나누어 각각 이용하였다. 모수 추정 과정은 생물계절과, 생장, 수량 구성요소로 나누어 추정하는 Shim *et al.*(2011)의 방법을 따랐으며, 추정된 모수의 신뢰도가 2.3~6.0일의 범위 내인 것으로 확인된 바 있는 Kim *et al.*(2012)의 품종 모수를 그대로 이용하였다(Table 1).

전국을 모형 구동에 용이한 단위로 구획하는 작업을 위해 CZU (Crop-simulation Zone Unit)를 제작하였다. 한국수자원공사 국가수자원관리종합정보시스템(<http://www.wamis.go.kr>)에서 제작한 유역 분류 가운데, 중 권역(104개 구역)을 자연환경과 기타 여건을 고려하여, 68개로 통합하였으며, 이 CZU를 기준으로 토양 및 기상자료를 준비하였다.

토양자료의 경우 한국수자원공사에서 제공하는 수치 토양분류도에 CZU를 중첩하여, 농경지에 해당하는 토양속성을 추출하였다. 추출된 토양속성 가운데 가장 많이 분포하고 있는 속성을 각 CZU별 대표 토양으로 간주 하였다. 국립농업과학원에서 구축한 정밀토양도(<http://soil.rda.go.kr>)로부터 세부적인 토양정보를 입수

하고 DSSAT의 하부 프로그램인 S-Bulid를 이용하여 모형구동에 맞는 형태의 파일로 제작하였다.

기상자료는 현재부터 10년 단위로 2100년까지의 기상자료를 준비하였는데 온실기체 배출시나리오인 RCP (Representative Concentration Pathway) 8.5로서 감축을 위한 특별한 노력이 없다는 가정하에 현재 추세대로 온실기체가 대기 중으로 계속 유입될 경우 현재 400ppm 미만의 대기 중 이산화탄소 농도는 2100년에 이르러 940ppm까지 오를 것으로 예상된다. 이에 따라 지구 평균기온은 4.8°C 상승하고 강수량은 6% 증가하며 해수면 높이는 90cm가 상승할 것이라고 예상한다(NIMR, 2011). 국립기상연구소는 이 시나리오에 근거하여 대기-해양-해빙-수문-에어로졸 결합 모델인 HadGEM2-AO (Atmosphere Ocean version of the Hadley Centre Global Environment Model)와 한반도 지역기후모델인 HadGEM3-RA를 이용하여 2100년까지 한반도 기후전망(매일 최고, 최저기온, 강수량)을 12.5km 격자 해상도로 제작하였다. 본 연구에서는 이 자료를 받아 매 10년 단위의 월별 평균값을 계산하여 작물모형 구동에 이용하였으며, 일사량과 강수일수의 경우 최근 10년(2001-2010)의 관측값으로 대체하였다. 구체적으로 기상청자료를 작물모형 구동에 용이한 평면직각좌표계로 변환하고 전술한 CZU 레이어를 중첩시켜 각 CZU의 공간평균을 얻은 다음, 확률 추정기법(DSSAT 패키지 내 Weather Generator)에 의해 일 기상자료를 30세트씩 복원하였다. 결과적으로 2011~2100 기간 중 9개의 10년 단위기간에 대해 각각 30개씩의 일 기상자료 세트를 준비하였다.

2.3. 모형 구동

엄밀하게 보면 재배방식은 농가포장 별로 각기 다를 수 있지만 이를 모두 생육모의에 반영하기는 사실상 불가능하므로 각 도별 농업기술원에서 제시한 표준재배법을 바탕으로 파종, 이앙, 시비, 물관리 양식을 실

Table 2. Recommended planting dates for the selected cereal crops at each region in South Korea

Region (Province)	Rice		Barley	Soybean
	Early	Late		
Gyeonggi	Apr. 20	May. 1	Oct. 5	May. 15
Gangwon	Apr. 15	May. 1	Oct. 3	May. 15
Jeonbuk	Apr. 17	May. 1	Oct. 25	May. 20
Gyeongnam	Apr.25	May. 1	Oct. 25	May. 10

협설계에 반영하였다(Table 2). 모형구동기간 내 이산화탄소 농도 변화양상은 RCP8.5 시나리오에서 가정된 변동곡선으로부터 역시 10년 단위로 추출하였으며, 이 수치를 DSSAT의 'StandardData' 폴더 내 'CO2045.WDA' 파일에 적용하였다.

파종기를 이동함에 따라 예상되는 기후변화의 영향을 전망하기 위해 전국적으로 68개 CZU별로 조, 중, 만생종별 대표 품종을 선정하고, 이 품종에 대해 파종기를 현재 표준재배법에 비해 1주 또는 2주 단축하거나 지연하는 조건하에서 구동하고 그 결과를 분석하였다.

파종일 변경은 DSSAT 구동파일 중 하나인 실험설계파일(File_X)의 일부를 수정하여 진행하였다. File_X에서 파종일 입력 부분을 표준 재배법에서 7일, 14일을 지연, 또는 단축(보리, 콩은 14일 21일 지연 또는 단축)하여 저장하고 같은 방법으로 모형을 30회 구동 후 파종일을 변경하지 않은 미래의 예상결과와 비교 하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 출수기, 성숙기, 등숙기간의 변화

3.1.1. 벼

조생종 벼(대표품종 소백벼)의 파종시기를 앞당겨 모형을 구동한 결과 그렇지 않은 경우에 비해 출수와 성숙에 이르는 기간이 모두 단축되었다. 출수기의 경우 파종일 변경 전에는 현재 평년 대비 2091-2100년 기간에 전국 평균 18.4일이 단축될 것으로 전망되었으나, 7일 조기파종 시 23.2일 단축되었으며, 14일 조기파종 시 27.8일 단축될 것으로 예측되었다. 생리적 성숙기에 도달하기까지 시간은 파종시기를 변경하지 않을 경우 현재대비 2091-2100년 기간에 평균 34.6일이 단축되었다. 파종시기를 고정된 현재에 비해 파종시기를 14일 앞당길 경우 2091-2100년에는 무려 43.5일 단축된다. 반대로 파종시기를 14일 지연시키면 24.3일 단축될 것으로 예상된다.

파종일 변경에 따른 생리적 성숙기의 변화는 출수기보다 그 정도가 적어서 종실 등숙기간은 단축될 것으로 보이며 이로 인한 종실중 감소, 고온장애 등의 피해가 우려된다(Sato and Inaba, 1976; Jagadashi *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2011).

중생종 벼(대표품종 팔공벼)의 경우 출수기는 파종일

Fig. 1. Simulated changes in heading date (top), physiological maturity date (middle), and the grain filling period (bottom) in an early maturing rice cultivar (Sobaekbyeon) as affected by the planting date migration treatment under the RCP8.5 projected future climate in Korea.

변경 전에는 21.3일 단축(현재대비 2091-2100년 기간)되었고, 파종일을 14일 단축하였을 시, 31.0일 단축(파종일을 변경하지 않은 현재 대비, 2091-2100년 기간), 14일 지연하였을 시, 19.5일 단축될 것으로 예상되며, 파종일을 단축하였을 때의 출수기의 단축 폭이 파종일을 지연하였을 때의 그것보다 컸다. 생리적 성숙기는 파종일 변경 전 41.0일 단축(현재대비 2091-2100년), 14일 단축하였을 때, 성숙기 50.6일 단축, 반대로 파종일을 14일 지연하였을 때, 성숙기 50.0일 단축될 것으로 예상된다. 단축 폭의 양상은 출수기와 반대의 경향을 보이며, 파종일을 지연하였을 때 성숙기의 단

Fig. 2. Simulated changes in heading date (top), physiological maturity date (middle), and the grain filling period (bottom) in a medium maturing rice cultivar (Palgongbyeon) as affected by the planting date migration treatment under the RCP8.5 projected future climate in Korea.

축 폭이 파종일을 단축하였을 때에 비해 컸다. 즉, 전술한 소백벼와 같이 파종일을 단축하였을 때 등숙기간(파종일 14일 단축 시 16.7일)이 파종일을 지연하였을 때에 비해(파종일 14일 지연 시 30.5일) 더 단축되었다.

중·만생종 벼(대표품종 낙동벼)의 경우 출수기는 파종일 변경 전에는 26.2일 단축(현재대비 2091-2100년 기간)되었고, 파종일을 14일 단축하였을 때와 지연하였을 때 모두, 출수기는 20.7일 단축될 것으로 예상된다. 생리적 성숙기는 파종일 변경 전 60.7일 단축(현재대비 2091-2100년), 파종일을 14일 단축하였을 때, 성숙기 69.9일 단축, 반대로 14일 지연하였을 때, 성숙기 49.6일 단축될 것으로 예상되었다. 단축 폭의 양상은 출수기와 반대의 경향을 보이며, 파종일을 지연하

Fig. 3. Simulated changes in heading date (top), physiological maturity date (middle), and the grain filling period (bottom) in a late maturing rice cultivar (Nakdongbyeon) as affected by the planting date migration treatment under the RCP8.5 projected future climate in Korea.

였을 때 성숙기의 단축 폭이 파종일을 단축하였을 때에 비해 컸다. 또한 팔공벼와 마찬가지로 파종일을 단축하였을 때가 지연하였을 때에 비해 종실 등숙기간이 더 단축되었다.

3.1.2. 보리

대표품종 알보리는 출수기와 성숙기의 경우, 파종일 변경 적용 후 결과 값이 벼의 양상과는 다르게 나타났다. 파종일을 21일 단축하고 지연하였지만, 출수기와 성숙기는 파종기의 연장과 단축과는 관계없이 비슷한 것으로 나타났다. 이는 겨울작물임을 고려하였을 때 생장한계 기후 아래로 내려가는 날이 많은 겨울의 경우 기후 자체가 생장의 영향을 적게 주어 결과적으로

Fig. 4. Simulated changes in heading date (top), physiological maturity date (middle), and the grain filling period (bottom) in a winter barley cultivar (Albori) as affected by the planting date migration treatment under the RCP8.5 projected future climate in Korea.

출수기와 생리적 성숙기는 비슷한 시기에 나타날 것이라는 추정이 가능하다(Fig. 4). 출수기의 경우 파종일 변경 전에는 26.6일 단축(현재대비 2091-2100년 기간)되었고, 파종일을 21일 단축하였을 시 출수기는 27.0일 단축, 파종일을 21일 지연하였을 시 26.2일 단축될 것으로 예상된다. 생리적 성숙기는 파종일 변경 전 27.4일 단축(현재대비 2091-2100년), 파종일을 21일 단축하였을 때, 출수기 27.0일 단축, 파종일을 21일 지연하였을 때 27.0일 단축될 것으로 예상되어 파종일의 변경 유무가 출수기나 생리적 성숙기에 미치는 영향은 미약하였다.

Fig. 5. Simulated changes in flowering date (top), physiological maturity date (middle), and the grain filling period (bottom) in a soybean cultivar (Ilpumgeumjeongkong) as affected by the planting date migration treatment under the RCP8.5 projected future climate in Korea.

3.1.3. 콩

대표품종 일품검정콩의 경우 파종일 단축 지연의 영향이 클 것으로 예상된다. 미래로 갈수록 파종일을 단축하였을 경우 출수기와 생리적 성숙기의 단축비율은 점점 커졌고, 반대로 파종일을 지연하였을 경우 출수기와 생리적 성숙기는 그 지연비율이 점차 커졌다. 현재 평년 기준으로 파종일을 변경하지 않으면 출수기 12.3일 단축, 파종일을 21일 단축하였을 때 출수기는 26.2일 단축, 파종일을 21일 지연하였을 때 출수기는 6.0일 지연될 것으로 예상된다. 생리적 성숙기는 파종일 유지 시 12.9일 단축, 파종일을 21일 단축 시 24.6일 단축, 파종일을 21일 지연 시 3.2일이 지연될 것으로 예상된다.

Fig. 6. Effects of the planting date migration treatment on grain yields (in % change from the control) of an early maturing rice cultivar (Sobaekbye) under the observed past and the projected future climates in Korea.

3.2. 종실수량의 변화

3.2.1. 전국 평균 경향

64개 CZU의 평균 종실수량을 과거평년(1971-2000), 현재평년(2001-2030), 가까운 미래(2031-2060), 먼 미래(2061-2090) 등 4 시기에 대해 평균을 구하고, 각 시기별 대조값(파종기 고정 시 종실수량)으로부터의 편차를 백분율로 표현하였다.

조생종 벼(대표품종: 소백벼)의 종실수량은 조기파종에 의해 감소 양상이 완화되나, 단축기간에 따른 차이는 크지 않았다. 파종기를 지연시켰을 때는 수량감소가 심화되었다. 파종일을 변경하기 전과 비교하여 과거평년과 현재평년에는 거의 파종일 이동이 종실수량에 영향을 미치지 못하나, 가까운 미래에는 7일, 14일씩 단축했을 경우 각각 2.8% 및 3.5% 증가하였고, 먼 미래에는 14일 조기파종에서 6% 정도 증수효과가 나타난다. 반대로 파종시기를 7일 지연 시키면 가까운 미래에 3.7%, 먼 미래에 5.1%의 감수효과가 나타나며, 14일 지연 시 먼 미래에는 9.3%까지 감소할 것으로 예상된다(Fig. 6).

중생종 벼(팔공벼)의 수량은, 파종기를 앞당겼을 때

Fig. 7. Effects of the planting date migration treatment on grain yields (in % change from the control) of a mid-maturing rice cultivar (Palgongbye) under the observed past and the projected future climates in Korea.

감수 완화 효과가 약간 나타나지만, 조생종에 비해서 미미하였다. 현재평년(2001-2030)까지는 파종일을 고정하는 것이 오히려 유리할 것으로 예상되며, 가까운 미래(2031-2060)부터 파종일 단축에 의한 감수완화 현상이 약간씩 나타나기 시작한다. 먼 미래에는 파종일 고정 시 예상수량에 비해 14일 조기 파종 시 3.3% 증가, 7일 단축 시 2.9% 증가가 예상되며, 반대로 파종일 7일 지연 시 3.7%, 14일 지연 시 7.1% 감소가 예상된다(Fig. 7).

중만생종벼(낙동벼)의 경우 종실수량의 변화 양상이 조생종이나 중생종과는 다른 경향을 보인다. 조기파종 시 감수완화 효과가 나타나는 조, 중생종과는 달리 중만생종에서는 파종일 지연 시 증수효과가 뚜렷한데, 가장 큰 폭의 수량증가는 다른 아닌 현재평년(2001-2030)에 나타난다. 과거평년(1971-2000)에는 파종기 지연에 따라 큰 폭의 감수가 예측된 것에 비하면 급격한 변화라 할 수 있다. 하지만 파종기 지연에 의한 증수효과는 미래로 갈수록 줄어들어 먼 미래(2061-2090)에는 파종일을 고정하였을 때 예상되는 수량에 비

Fig. 8. Effects of the planting date migration treatment on grain yields (in % change from the control) of a late maturing rice cultivar (Nakdongbyeo) under the observed past and the projected future climates in Korea.

해 7일 지연 시 1.2%, 14일 지연 시 2.7% 증가에 그친다(Fig. 8).

보리(대표품종 알보리)의 종실수량은 파종일을 고정하였을 때에 비해 조기 파종에 따라 증수효과를, 파종일 지연 시 감수효과를 보였으며, 증감효과는 미래로 갈수록 감소하였다. 흥미로운 것은 과거평년이나 현재 평년에도 조기파종에 의해 상당한 증수가 기대된다는 점이다. 미래 기후조건에서는 오히려 증수효과가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 조기파종에 의한 증수효과 보다는 지연파종에 따른 감수효과가 훨씬 크다는 점도 눈에 띈다. 가까운 미래(2031-2060) 기준으로 파종일을 고정하였을 때에 비해 파종일을 14일 앞 당기면 3.8%, 21일 앞 당기면 7.6% 증가가 예상되며, 파종일을 7일 지연시키면 4.9%, 21일 지연 시 9.8% 감수가 예상된다(Fig. 9).

일품검정콩의 경우에도 보리와 유사한 파종기 이동 반응을 보인다. 조기파종에 의해 수량증가가 예상되지만, 그 정도는 맥류에 비해 적었고, 미래로 갈수록 파종일 변경에 따른 수량증가 정도는 줄어들어 먼 미래

Fig. 9. Effects of the planting date migration treatment on grain yields (in % change from the control) of a winter barley cultivar (Albori) under the observed past and the projected future climates in Korea.

Fig. 10. Effects of the planting date migration treatment on grain yields (in % change from the control) of a soybean cultivar (Ilpumgeumjeongkong) under the observed past and the projected future climates in Korea.

Fig. 11. Geographical distribution of the planting date migration effects on grain yields (% relative to the 1981-2010 mean yield) in an early maturing rice cultivar (Sobaekbyeon) under the projected future climates in Korea.

에는 가까운 미래에 비해 증수효과가 절반 정도에 머물렀다. 파종일 지연에 의한 종실수량 변화경향은 일정하지 않아서 파종일을 21일 지연시키면 현재평년(2001-2030)에 종실수량이 5.3% 감소할 것으로 예상되지만, 먼 미래(2061-2090)에는 오히려 1.8% 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 10).

3.2.2. 권역별 경향

남한지역의 64개 권역별로 파종시기 변경에 따른

종실수량 증감경향을 분석하면, 벼의 경우 조생종은 조기파종에 의해 호남지방에서 감수 완화효과가 두드러지며, 강원도 내륙과 경상북도 일대도 일정부분 완화될 것으로 예상된다. 파종일 지연 시에는 영남 내륙지방이 감수의 영향을 가장 많이 받으며, 강원도 내륙 일부 지역을 제외하고는 전반적으로 수확량이 줄어들 것으로 예상된다(Fig. 11).

중생종 벼는 파종일 단축 시 감수 완화효과가 전반적으로 크지 않으며 지역에 따른 차이도 뚜렷하지 않

Fig. 12. Geographical distribution of the planting date migration effects on grain yields (% relative to the 1981-2010 mean yield) in a medium maturing rice cultivar (Palgongbyeon) under the projected future climates in Korea.

다. 파종일을 지연시킬 경우에도 대조구에 비해 큰 차이가 보이지 않는다(Fig. 12).

중만생종의 경우 조기파종 시에는 전반적으로 뚜렷한 경향이 보이지 않는데, 지연파종의 경우에는 내륙 산간을 중심으로 수량증가경향이 나타난다(Fig. 13).

보리의 경우 조기파종에 의한 증수효과가 권역별로 뚜렷하지 않은 반면, 지연파종에 따른 감수효과는 강원, 경북내륙에서 나타나며 가까운 미래일수록 뚜렷하다(Fig. 14).

콩의 경우 조기파종에 의한 증수효과가 경기, 강원

지역을 중심으로 나타나지만 먼 미래로 갈수록 지역효과는 점차 사라지는 경향이다. 지연파종에 의한 수량 감소지역은 강원영동과 경북내륙이 대표적이며 먼 미래로 갈수록 더 심해진다(Fig. 15).

IV. 결 론

A1B와 RCP 8.5 기반 미래 기후전망 두 가지를 이용하여 10년 간격 일 기상자료에 의해 발육단계와 잠재수량 변화 추세를 도출한 Kim *et al.*(2012)의 보

Fig. 13. Geographical distribution of the planting date migration effects on grain yields (% relative to the 1981-2010 mean yield) in a late maturing rice cultivar (Nakdongbyeo) under the projected future climates in Korea.

고에 따르면 벼, 보리, 콩에서 모두 개화기(출수기)가 앞당겨지나, 연차변이는 보리와 콩에서 감소한 반면 벼에서는 증가하였다. 조기 출수에도 불구하고 보리의 종실 등숙 기간은 연장되었으며, 콩에서는 변동이 적었고 벼에서만 단축되었다. 등숙 기간의 연차변이는 모든 작목에서 감소추세를 보였다. 벼의 수량은 모든 품종에서 줄어들 것으로 예상되었지만, 보리의 수량은 모든 품종에서 크게 늘어나고 콩에서는 큰 변동이 없을 것으로 예상되었다.

이에 비해 파종일 변경에 따른 종실 수량의 증감

추세를 검토한 이 연구에서는 벼의 경우 조생종, 중생종에서는 미래로 갈수록 파종시기를 앞당겼을 때가 고정하였을 때에 비해 높은 수량을 예상할 수 있으며(조생종, 2090-2100년 106.0%, 중생종, 2090-2100년 103.3%), 파종시기를 지연하였을 때는 오히려 감수현상이 심화될 것으로 예상되었다. 반대로 중만생종의 경우에는 지연파종에서 더 높은 수량을 보였다. 보리의 수량은 파종일 변경과 상관없이 미래 기후조건에서 종실수량 증가가 예상되나, 이러한 경향이 지연파종에서 좀 더 촉진되는 것으로 나타났다. 하지만 미래로

Fig. 14. Geographical distribution of the planting date migration effects on grain yields (% relative to the 1981-2010 mean yield) in a winter barley cultivar (Albori) under the projected future climates in Korea.

갈수록 파종일 변경의 영향은 감소하였다.

결론적으로 미래 기후 변화조건에서 현재의 품종을 재배한다고 가정하였을 때, 파종일 변경이 일정 부분 벼 품종의 감수현상 완화 또는 보리 품종의 증수현상 촉진 확대에 기여할 것으로 예상된다. 나아가 지역별 경향을 반영하여 파종시기를 변경한다면 전국적인 적응전략 추진에 도움을 줄 것으로 기대된다. 그러나 이 연구의 전망은 곡물의 품질 측면을 고려하지 않은 한계가 있다. 일반적으로 곡물의 품질은 출수 전후 고온 현상과 등숙기간 단축으로 인해 저하되는 것으로 알려

져 있으며, 재배시기 조절과 더불어 질소 시비량 조절, 벼의 경우 냉수관개 등 추가 관리가 필요하다 (Kondo, 2009; Lee *et al.*, 2011). 또한 등숙기 고온 조건에서 품질의 저하가 적은 품종을 육성하는 일이 시급하다고 판단된다.

적 요

신 기후변화 시나리오에 따라 예상되는 미래환경조건에서 기존의 작부체계로는 여러 작목 및 품종에서

Fig. 15. Geographical distribution of the planting date migration effects on grain yields (% relative to the 1981-2010 mean yield) in a soybean cultivar (Ilpumgeomjeongkong) under the projected future climates in Korea.

수량 감소가 예상된다. 본 연구에서는 기후변화에 대처할 수 있는 재배기술 중 하나인 파종시기 이동이 주요 식량작물의 수량 변동과 어떤 관계가 있는지 작물모형에 의해 전망하였다. 현재기후조건에 맞는 기존 재배기술을 고수하였을 때 예상되는 미래의 생육 및 수량추세를 대조구로 두고, 파종 혹은 이앙시기를 7, 14, 21일씩 단축 및 지연하여 모의한 결과를 서로 비교하였다. 벼의 경우 조생종은 조기파종에 의해, 중만생종의 경우 지연파종에 의해 수량저하 현상을 어느 정도 완화시킬 수 있었다. 기존 작부체계에서도 지구

온난화에 의해 증수가 예상되는 겨울보리의 경우 조기파종에 의해 추가적인 증수효과를 기대할 수 있다. 콩은 조기파종으로 인한 증수효과를 기대할 수 있었으나, 그 정도는 보리에 비해 적었으며, 파종일 지연 시 감수현상이 발생하였다.

감사의 글

본 논문은 농촌진흥청 공동 연구사업(과제번호: PJ008972)의 지원에 의해 이루어진 것임.

REFERENCES

- Ahn, Y. K., K. C. Seong, and S. H. Kim, 2012: Effect of different sowing time on the yield and plant growth for okra (*Abelmoschus esculentus* L. Moench) Production. *Journal of Bio-Environment Control* **21**(3), 267-270. (in Korean with English abstract)
- 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. Gijssman, G. Y. Tsuji, and J. Koo, 2010: *Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.5* [CD-ROM], University of Hawaii, USA.
- Jagdish, S. V. K., P. Q. Craufurd, and T. R. Wheeler, 2007: High temperature stress and spikelet fertility in rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Experimental Botany* **58**, 1627-1635.
- Jones, J. W., G. Hoogenboom, C. H. Porter, K. J. Boote, W. D. Batchelor, L. A. Hunt, P. W. Wilkens, U. Singh, A. J. Gijssman, and J. T. Ritchie, 2003: DSSAT Cropping System Model. *European Journal of Agronomy* **18**, 235-265.
- Kim, D. J., S. O. Kim, K. H. Moon, and J. I. Yun, 2012: An outlook on cereal grains production in South Korea based on crop growth simulation under the RCP8.5 climate change scenarios. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **14**(3), 132-141. (in Korean with English abstract) doi:10.5532/KJAFM.2012.14.3.132
- Kim, J. D., and D. A. Kim, 1994: Effect of seeding date and fall harvest method on the growth characteristics, forage yield and quality of winter rye. *Journal of The Korean Society of Grassland and Forage Science* **14**(3), 238-246. (in Korean with English abstract)
- Kondo, M., 2009: Effect of global warming on rice culture and adoptive strategies. *Proceeding of International symposium 'Rice research in the era of global warming'*, Taichung, Taiwan, Taiwan Agricultural Research Institute, Council of Agriculture, 1-9.
- Lee, C. K., K. S. Kwak, J. H. Kim, J. Y. Son, and W. H. Yang, 2011: Impacts of climate change and follow-up cropping season shift on growing period and temperature in different rice maturity types. *Korean Journal of Crop Science* **56**(3), 233-243. (in Korean with English abstract) doi:10.7740/kjcs.2011.56.3.233
- Sato, K., and K. Inaba, 1976: High temperature injury of ripening in rice plant part 5 on the early decline of assimilate storing ability of grains at high temperature. *Japanese Journal of Crop Science* **45**(1), 156-161.
- 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) doi:10.5532/KJAFM.2011.13.4.192
- Son, B. Y., J. T. Kim, S. Y. Song, S. B. Baek, and C. K. Kim, 2009: Comparison of yield and forage quality of silage corns at different planting dates. *Journal of The Korean Society of Grassland and Forage Science* **29**(3), 179-186. (in Korean with English abstract)
- NIMR, 2011: IPCC 5차 평가보고서 대응을 위한 기후변화 시나리오 보고서. 79-110p.
- 최재성, 김양길, 조상균, 이미자, 최인덕, 현종내, 이광원, 박홍규, 김기종, 김정근, 2010: 기후변화에 따른 전북지역의 보리 파종시기 재설정. 한국작물학회 2010년 추계 학술발표회. 한국작물학회, 61p.