A1B 기후변화 시나리오가 국내 가을 쌀보리의 잠재수량에 미치는 영향 모사

심교문* · 민성현 · 이덕배 · 김건엽 · 정현철 · 이슬비 · 강기경
국립농업과학원 농업환경부 기후변화생태과
(2011년 10월 31일 접수; 2011년 12월 15일 수정; 2011년 12월 30일 수락)

Simulation of the Effects of the A1B Climate Change Scenario on the Potential Yield of Winter Naked Barley in Korea

Kyo Moon Shim*, Sung Hyun Min, Deog Bae Lee, Gun Yeob Kim,
Hyun Cheol Jeong, Seul Bi Lee and Ki Keong Kang
Division of Climate Change & Agro-ecology, National Academy of Agricultural Science
(Received October 31, 2011; Revised December 15, 2011; Accepted December 30, 2011)

ABSTRACT

The CERES-Barley crop simulation model was used to assess the impacts of climate change on the potential yield of winter naked barley in Korea. Fifty six sites over the southern part of the Korean Peninsula were selected to compare the climate change impacts in various climatic conditions. Based on the A1B climate change scenarios of Korea, the present climatological normal (1971-2000) and the three future ones (2011-2040, 2041-2070, and 2071-2100) were considered in this study. The three future normals were divided by three environmental conditions with changes in: (1) temperature only, (2) carbon dioxide concentration only, and (3) both temperature and carbon dioxide concentration. The agreement between the observed and simulated outcomes was reasonable with the coefficient of determination of grain yield to be 0.78. We concluded that the CERES-Barley model was suitable for predicting climate change impacts on the potential yield of winter naked barley. The effect of the increased temperature only with the climate change scenario was negative to the potential yield of winter naked barley, which ranges from -34 to -9% for the three future normals. However, the effect of the elevated carbon dioxide concentration only on the potential yield of winter naked barley was positive, ranging from 6 to 31% for the three future normals. For the elevated conditions of both temperature and carbon dioxide concentration, the potential yields increased by 8, 15, and 13% for the 2011-2040, 2041-2070, and 2071-2100 normals, respectively.

Key words : A1B Climate change scenario, Climate change impact, Naked barley, Potential yield

I. 서 론

보리(*Hordeum vulgare* L.)는 세계적으로 옥수수, 밀, 벼 다음으로 네 번째로 많이 재배되고 있는 곡물이다. 보리종실은 식용 혹은 동물의 농후사료로 이용

되고 있고, 맥아(malt) 제조 등에도 사용되고 있으며, 총채보리(whole-crop barley)는 사료작물로 활용되고 있다(하, 2000). 국내에서도 보리(42천ha)는 식량작물 중에 벼(854천ha) 다음으로 많이 재배되고 있으나, 재배면적은 벼에 비해서 아주 적다(2011, 통계청).

* Corresponding Author : Kyo Moon Shim
(kmshim@Korea.kr)

보리는 작물학적으로는 조성, 즉 보리알이 배열된 열 수에 따라서 2조(두줄보리)와 6조(여섯줄 보리)로 나누어진다. 또한 자방벽에서 배출되는 끈끈한 물질에 의하여 성숙 후에는 껍질이 종실에 밀착하여 분리되지 않는 겉보리(covered barley)와 성숙 후 껍질이 종실에서 쉽게 분리되는 쌀보리(naked barley)로 구별된다. 2조보리를 우리나라에서는 맥주보리라고 흔히 부르는데 이는 맥주원료용 보리로 주로 사용되기 때문이다(하, 2000).

보리는 좋은 유전적 변이성을 가지고 있어서 기후와 지역 적응성이 뛰어나다. 이러한 능력 때문에 밀 등 다른 곡물에 비해 생산비용이 적게 들고 제초제의 사용량을 줄일 수 있다. 즉, 지속가능하고 환경 친화적인 작물의 잠재력을 가지고 있다고 할 수 있다. 또한 보리는 일반적으로 기름과 고온에 높은 저항성을 가지고 있다(Tuttolomondo *et al.*, 2009).

기후변화는 농작물 생산에 큰 영향을 끼치며, 이는 전세계적으로 경제 및 사회정치적인 커다란 파급효과를 나타낸다. 기후변화를 일으키는 주요 요인은 대기 온도와 강수량의 변화를 일으키는 온실효과인데, 농업은 이러한 기후변화에 가장 취약한 시스템 중의 하나이다. 왜냐하면, 온도와 강수량 등 기상변수들이 농작물의 생장과 발육에 관련된 근본적인 과정들을 조정하기 때문이다(Meza and Silva, 2009). 최근 농작물에 대한 기후변동성의 효과와 농작물 생산성에 대한 기후변화 영향 등 기후변화와 농작물의 관계를 다루는 연구들이 폭넓게 진행되고 있다. 이러한 연구들은 다양한 기후조건에서 농작물의 취약성 정도를 파악하는데 크게 기여하고 있다.

기후변화에 따른 미래 곡물생산성 예측에 대한 연구 또한 지역적 또는 전 세계적인 관점에서 많은 연구가 진행되었고, 국내에서도 일찍이 관심을 가지고 연구된 바 있다(Yun, 1990; Lee *et al.*, 1991; Shin and Lee, 1995; Shim *et al.*, 2010). 그러나 주로 주곡작물인 벼에 한정되어 연구가 진행되었을 뿐, 보리, 밀, 옥수수 등 벼 이외 곡류에 대해서는 연구결과가 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구는 DSSAT 패키지의 CERES-Barley 모형을 도입하여 모형 구동에 필요한 국내 쌀보리 품종의 유전모수를 산정하고 생육모의 지역의 토양 및 답리작(cropping after rice harvest) 보리 작부체계의 재배관련정보 등 기본 자료를 조사하여 입력하였다.

그리고 기상청에서 제공한 한반도 A1B 기후시나리오를 활용하여 국내 쌀보리의 미래 잠재수량성 변화를 시뮬레이션 방법으로 평가하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. CERES-Barley 생육모형

본 연구에서 사용한 CERES-Barley 생육모형은 기상, 토양, 품종 유전모수 및 재배관련 정보자료를 입력 자료로 하여 보리의 생장과 발육을 모의하는 생태계 모형이다. CERES-Barley 모형은 크게 세 가지 하부모형으로 구성되는데, 보리의 발육단계를 예측하는 식물계절학(phenology) 하부모형, 보리의 건물생산 및 식물체 각 기관으로의 분배를 모의하는 생장 하부모형, 그리고 보리 및 토양의 수분과 질소 영양동태를 모의하는 수분 및 질소동태 하부모형이 있다(Fig. 1).

CERES-Barley 모형은 품종 유전모수를 이용하여 각 품종의 발육단계를 모의하는데, 보리의 발육속도 및 생장속도에 영향을 미치는 가장 중요한 요인은 일사량, 온도 그리고 일장이다. 보리의 건물생산량은 군락에 흡수된 광합성 유효복사(엽면적 지수, 광이용효율 및 일사량)를 이용하여 계산되며, 이렇게 계산된 건물생산량은 잠재 건물생산량이라 한다. 온도, 수분, 양분의 세 가지 요소를 고려할 경우 수분 및 질소영양동태 하부모형에서 토양수분의 변화와 토양 중 질소동태를 모의한다. 모의과정에서 계산된 매일의 수분 결핍 요인, 질소 결핍 요인 및 온도 요인의 최저값을 잠재 건물 생산량에 곱하여, 도달 가능한 건물생산량을 계산하게 되는데, 온도나 수분 또는 양분이 부족할 경우 잠재 건물생산량보다 작아지게 된다.

Fig. 1. A schematic representation of the model CERES-Barley.

2.2. 쌀보리 품종 선정

본 연구에 이용된 쌀보리 품종은 세 종류로 “새쌀보리”, “늘쌀보리”, “새찰쌀보리”이다. 이들은 농촌진흥청 국립식량과학원에서 육성한 다수성이고 현재 장려품종이다. 새쌀보리는 1983년에 장려품종으로 결정되었고, 내도복성이고 대립의 다수성이며 광지역 적응성 품종이다. 늘쌀보리는 1984년에 장려품종으로 결정되었고, 내한 및 내병성이고 양질의 다수성 품종이다. 그리고 새찰쌀보리 품종은 1995년에 장려품종으로 결정되었고, 조숙이고 대립의 다수성이며 양질의 찰성 품종이다(하, 2000).

2.3. 생육 모의 지역 설정

현재 답리작 보리가 재배되는 지역은 전남, 전북, 경남, 경북의 4개도에 집중되어 있지만, 본 연구에서는

앞으로 2100년까지 온도가 약 4°C 상승할 것으로 추정하는 미래기후(A1B 기후시나리오)를 적용하는 바, 온도상승에 따라 재배가능지역이 북쪽으로 확대될 것으로 판단되었기 때문에, 기상청 소속 기상대와 관측소가 소재하는 지역 중에 30년 이상 기상관측자료를 보유하고 있는 전국 56개 지역을 대상으로 생육 모의를 수행하였고(Table 1), 이들 56개 지역을 19개 농업기후지대(농촌진흥청, 1986) 및 3개 기후지대로 구분하여 분석하였다(Fig. 2). 본 연구에서 제주도는 생육 모의 대상지역에서 제외하였다.

2.4. 파종기 설정

가을에 파종하는 보리는 앞이 5-6개 일 때, 내한성이 가장 강하다. 따라서 보리는 월동 전에 앞이 5-6개 나올 수 있게 파종하는 것이 그 지역의 알맞은 파

Table 1. The geographical locations of the simulated 56 stations

Station	Lat. (N)	Long. (E)	H (m)	Station	Lat. (N)	Long. (E)	H (m)
Sokcho	38°15'	128°34'	17.8	Hongcheon	37°41'	127°53'	263.2
Daegwallyeong	37°41'	128°46'	842.5	Jecheon	37°09'	128°12'	263.2
Chuncheon	37°54'	127°44'	76.8	Boeun	36°29'	127°44'	174.1
Gangneung	37°45'	128°54'	25.9	Cheonan	36°47'	127°07'	24.9
Seoul	37°34'	126°58'	85.5	Boryeong	36°19'	126°34'	15.3
Incheon	37°28'	126°38'	68.9	Buyeo	36°16'	126°55'	11.3
Wonju	37°20'	127°57'	149.8	Geumsan	36°06'	127°29'	171.3
Suwon	37°16'	126°59'	33.6	Buan	35°44'	126°43'	10.7
Chungju	36°58'	127°53'	69.1	Imsil	35°37'	127°17'	246.9
Seosan	36°46'	126°59'	25.9	Jeongeup	35°34'	126°52'	44.1
Ulsan	36°59'	129°25'	49.4	Namwon	35°24'	127°20'	89.7
Cheongju	36°38'	127°27'	57.4	Jangsu	35°39'	127°31'	407.0
Daejeon	36°22'	127°22'	68.3	Suncheon	35°04'	127°14'	74.4
Andong	36°34'	128°43'	139.4	Jangheung	34°41'	126°55'	45.2
Pohang	36°02'	129°23'	1.9	Haenam	34°33'	126°34'	13.7
Gunsan	35°59'	126°42'	25.6	Goheung	34°37'	127°17'	53.3
Daegu	35°53'	128°37'	57.6	Yeongju	36°52'	128°31'	210.2
Jeonju	35°49'	127°09'	53.5	Mungyeong	36°37'	128°09'	170.4
Ulsan	35°33'	129°19'	34.7	Yeongdeok	36°32'	129°25'	41.2
Masan	35°11'	128°34'	11.3	Uiseong	36°21'	128°41'	81.1
Gwangju	35°10'	126°54'	70.5	Gumi	36°08'	128°19'	47.9
Busan	35°06'	129°02'	69.2	Yeongcheon	35°58'	128°57'	94.1
Mokpo	34°49'	126°23'	37.9	Geochang	35°40'	127°55'	220.9
Yeosu	34°44'	127°45'	66.1	Hapcheon	35°34'	128°10'	32.7
Jinju	35°12'	128°07'	21.3	Miryang	35°29'	128°45'	12.6
Yangpyeong	37°29'	127°30'	47.0	Sancheong	35°25'	128°53'	138.6
Icheon	37°16'	127°29'	77.8	Geoje	34°53'	128°36'	45.3
Inje	38°03'	128°10'	198.6	Namhae	34°49'	127°56'	44.4

Fig. 2. The division of climatic and agro-climatic zones.

Table 2. Determination of seeding date for winter naked barley based on January minimum temperature

Sowing period (Optimal sowing date)	January minimum temperature
Oct. 1 - Oct. 10 (Oct. 5)	-8.0 - -9.0°C
Oct. 5 - Oct. 15 (Oct. 10)	-7.0 - -8.0°C
Oct. 10 - Oct. 20 (Oct. 15)	-6.0 - -7.0°C
Oct. 12 - Oct. 25 (Oct. 20)	-5.0 - -6.0°C
Oct. 15 - Oct. 30 (Oct. 25)	-3.0 - -5.0°C
Oct. 20 - Nov. 5 (Oct. 30)	> -3.0°C

종적기가 되는데, 보통 최한월인 1월의 최저기온에 따라 설정될 수 있다. 생육 모의 56개 지역 중에서 1월 최저 기온이 -9.0°C 이하인 지역은 쌀보리의 파종 시기를 10월 1일로 설정하고, 그 외 지역은 Table 2의 기준에 따라 결정하였다. 다만, 대관령 지역은 벼-보리 이모작을 고려하였을 때 생육모의가 불가능한 곳으로 판단되어 제외하였다. 즉, 이 지역의 현재 평년 (1971-2000년)의 1월 최저기온은 -12.5°C 로, 미래 평년

(2071-2100년)이 현재 평년보다 4.0°C 상승한다 하더라도 -8.5°C 로서 벼-보리 이모작이 사실상 불가능하다.

III. 결 과

3.1. 기상자료 생산

쌀보리의 생육을 모의하는 데 필요한 기상자료는 현재 평년기상(1971-2000년)을 기준년도로 하고, A1B 기후시나리오에서 예측한 미래의 기후조건을 3단계로 (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100년) 나누어 미래의 평년기상을 구축하였다. 기준년도의 평년 기상자료 구축과정으로는 기상청으로부터 제공된 56개 지역의 1971-2000년까지의 30년 평균의 최고 및 최저기온, 일사량, 강수량, 강수일수의 월별자료를 입력자료로 하여 기후 생성기(climate generator)를 구동하여 각 지역의 최고 및 최저기온, 일사량, 강수량의 월별자료를 생성하였다. 생성된 일별 평년기상자료는 DSSAT의 기상 하부모형을 이용하여 CERES-Barley 모형 입력

Table 3. Weather input file of 'Miryang' station for the simulation of CERES-Barley

@ INSI	LAT	LONG	ELEV	TAV	AMP	REFHT	WNDHT
288	35.483	128.750	13	13.7	13.5	10.0	10.0
@DATE	SRAD	TMAX	TMIN	RAIN			
71001	13.3	8.9	-1.4	0.0			
71002	12.6	0.4	-2.9	0.0			
71003	10.7	5.3	-4.5	0.0			
71004	13.1	3.9	-4.5	4.3			
...	...	...	...	...			
...	...	...	...	...			
71364	13.2	4.6	-8.2	0.0			
71365	13.3	5.8	-15.2	0.0			

@INSI : Station code (ex. Miryang : 288)

LAT : Latitude (decimal degree)

LONG : Longitude (decimal degree)

TAV : Mean annual temperature (°C)

AMP : Half of the mean temperature difference between the warmest and coolest (°C)

REFHT : Height of weather instruments above ground (m)

WNDHT : Height of anemometer above ground (m)

@DATE : Year & Date (Julian day)

SRAD : Total daily solar radiation

TMAX : Maximum daily air temperature

TMIN : Minimum daily air temperature

RAIN : Total daily precipitation

Table 4. Monthly temperature and precipitation differences between three future climatological normals (2011-2040, 2041-2070 and 2071-2100) projected by A1B Scenario and the current normal (1971-2000) at 'Jeonju' station

Month	Maximum temperature (°C)			Minimum temperature (°C)			Precipitation (%)		
	2011-2040	2041-2070	2071-2100	2011-2040	2041-2070	2071-2100	2011-2040	2041-2070	2071-2100
1	0.3	2.1	3.8	0.4	2.4	4.1	-34	-29	7
2	0.6	1.1	4.0	0.6	1.3	4.4	36	0	41
3	0.6	2.1	3.2	0.5	2.0	3.5	23	-4	23
4	1.1	1.9	3.2	1.1	2.3	3.6	-3	11	7
5	0.6	1.8	2.7	0.9	2.2	3.3	-23	-9	-1
6	1.0	1.9	3.3	1.3	2.5	4.1	-7	-8	76
7	0.8	2.1	3.1	0.9	2.8	4.0	-5	23	-23
8	1.0	2.6	4.2	1.2	3.1	4.9	-29	10	-3
9	1.1	2.7	4.2	1.4	3.4	5.5	16	394	62
10	1.0	2.4	3.7	1.3	3.2	4.3	18	54	25
11	1.1	2.3	4.0	1.1	2.5	4.4	-25	-12	-2
12	1.6	2.9	4.3	1.6	3.1	4.8	14	12	19
Ave.	0.9	2.2	3.6	1.0	2.6	4.2	-1	7	14

용 기상과일의 양식으로 변화시켰다(Table 3).

다음으로 56개 지역별 미래 기후조건에 해당하는 3가지의 미래 평년기상을 생성하기 위해서는 기상청에서 제공하는 한반도 A1B 기후시나리오의 기준년도 대비 월별 기상 편차자료를 추출하여 미래의 각각 해당기간(2011-2040, 2041-2070, 2071-2100년)의 30년

평균값을 계산하였다(Table 4). 이들을 CERES-Barley 모형의 하부 프로그램인 X-FILE의 환경 콘텐츠를 활용하여, 위에서 계산된 기준년도 대비 3개 미래기후(2011-2040, 2041-2070, 2071-2100년)의 월별 평균 변동 값을 가감해 줌으로써 A1B 기후시나리오에 해당하는 3가지 미래 평년기상자료를 생성하였다. 한반

Table 5. The change in carbon dioxide concentration projected by A1B climate change scenario

Period	ISAM*	BERN	Ave.
1971-2000	346	345	345
2011-2040	438	434	436
2041-2070	552	542	547
2041-2100	666	655	661

*ISAM and BERN are carbon cycle model (IPCC, 2007)

도 AIB 기후시나리오에서 제공되는 월별 기상 편차 자료에는 일사량이 없기 때문에 현재 평년기상(1971-2000년)의 일사량을 미래 평년기상에도 그대로 적용하였고, 대기 중 이산화탄소 농도 변화는 IPCC 제4차 평가보고서에서 제시한 탄소순환 모형인 Integrated Science Assessment Model(ISAM)과 BERN의 평균 값을 이용하였다(Table 5).

3.2. 토양자료 생산

56개 생육 모의 지역의 토양자료의 생성에는 ① 각 지역별 대표 토양통 정보의 추출과정과 ② 추출된 각

지역의 토양층의 세부적인 자료의 조사과정 및 ③ 작물생육 모의에 알맞게 토양자료를 구축하는 과정이 있다. 먼저 생육 모의 지역의 대표 토양통 정보의 추출 과정으로는 논의 토지이용도와 세부 정밀토양도를 준비한 후, 중첩을 통하여 토지이용도와 세부 정밀토양도간의 연관 속성을 가지는 정보를 추출하였다. 이렇게 추출된 결과 값들의 데이터베이스들을 공간 연산하여 생육 모의 지역의 대표적인 논토양의 면적, 토양통의 명칭, 토양의 토성, 경사도, 배수등급, 유출잠재량 등에 대한 정보들을 파악하였다.

다음으로, 토양의 세부적인 물리 및 화학적 정보들은 국립농업과학원에서 구축한 정밀토양도 자료를 이용하였다. 1971년부터 조사한 전국의 정밀토양도로부터 앞에서 선발한 대표적인 논 토양통의 토심(cm), 석력·점토·미사의 함량(%), 유기물의 함량(%), 염기치환용량(cmol/kg), 토양 pH의 자료를 추출하여서 각 지역별로 토양 데이터베이스를 구축하였다. 위에서 구축한 토양 데이터베이스를 보리의 생육모형(CERES-Barley)의 하부프로그램인 Sbuild를 이용하여 작물모형

Table 6. Soil input file of ‘Miryang’ station for the simulation of CERES-Barley

*P288710018	NAAS		SIL		120		SILTY LOAM								
@SITE	COUNTRY		LAT		LONG		SCS FAMILY								
Miryang	KOREA		35.48		128.75		Pyeongtaek								
SCOM	SALB	SLUI	SLDR	SLRO	SLNF	SLPF	SMHB	SMPX	SMKE						
G	0.13	6.0	0.40	73.0	1.00	1.00	IB001	IB001	IB001						
@SLB	SLMH	SLLL	SDUL	SSAT	SRGF	SSKS	SBDM	SLOC	SLCL	SLSI	SLCF	SLNI	SLHW	SLHB	SCEC
14	-99	0.219	0.476	0.505	1.000	0.68	1.17	2.79	24.1	73.3	1.4	-99	5.3	-99	15.8
40	-99	0.225	0.454	0.492	0.583	0.15	1.22	2.10	29.0	66.0	1.3	-99	6.2	-99	15.5
55	-99	0.205	0.432	0.490	0.387	0.68	1.23	1.93	25.7	68.1	1.2	-99	6.2	-99	15.6
75	-99	0.206	0.406	0.464	0.273	0.15	1.31	1.31	30.6	62.9	1.7	-99	6.0	-99	17.0
120	-99	0.177	0.382	0.382	0.477	0.68	1.27	1.24	24.2	66.2	1.9	-99	6.1	-99	14.4

P288710018 : P(paddy), 288(site code), 71(suvey year), 0018(generation no.)

NAAS : National Academy of Agricultural Science
 SIL : Soil texture (Silty Loam)
 80 : Soil depth, cm
 LAT : Latitude, decimal degree
 LONG : Longitude, decimal degree
 SCS FAMILY : Soil series
 SCOM : Color, moist, Munsell hue
 SALB : Albedo, fraction
 SLU1 : Evaporation limit, mm
 SLDR : Drainage rate, fraction per day
 SLRO : Runoff curve no.(soil conservation service)
 SLNF : Mineralization factor, 0 to 1 scale
 SLPF : Photosynthesis factor, 0 to 1 scale
 SMHB : pH in buffer determination method, code
 SMPX : Phosphorus, extractable, code
 SMKE : Potassium determination method, code

SLB : Depth, base of layer, cm
SLMH : Master horizon
SLLL : Lower limit of soil water, $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$
SDUL : Upper limit of drained soil, $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$
SSAT : Upper limit of saturated soil, $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$
SRGF : Root growth factor, 0.0 to 1.0
SSKS : Sat. hydraulic conductivity, macropore, cm hr^{-1}
SBDMM : Bulk density, moist, g m^{-3}
SLOC : Organic carbon, g kg^{-1}
SLCL : Clay ($<0.002 \text{ mm}$), %
SLSI : Silt (0.05 to 0.002 mm), %
SLCF : Coarse fraction ($>2 \text{ mm}$), %
SLNI : Total nitrogen, g kg^{-1}
SLHW : pH in water
SLHB : pH in buffer
SCEC : Cation exchange capacity, cmol kg^{-1}

의 구동에 적합한 토양 입력자료로 변경하였고, 보리의 생육모의과정의 수분 및 질소 영양동태 하부모형 과정에서 필요한 유출 상·하한 계수, 토양의 수분포화도, 용적밀도, 수분장력, 뿌리성장 요인 등을 계산하였다.

토양의 물리 및 화학적 데이터가 구체적으로 명시되어 있지 않는 지역들은 흙도람(<http://asis.rda.go.kr/>)에서 웹으로 제공하는 해당지역 대표토의 일반적인 토양 자료를 사용하였으며, 토양 자료 중에서 미사와 점토의 함량의 합이 100% 넘는 토양통일 경우에는 포맷 과정에 오차가 발생해서, 인근 논 토양통일을 이용하였다. Table 6은 지점코드 288번에 해당하는 밀양지역의 논 토양파일이다.

3.3. 유전모수 추정 및 검증

보리의 생육단계 및 수량을 모의하기 위한 유전 모수 추정에는 모의 하고자 하는 연도의 모형 구동용 입력파일의 구축과 모의 결과를 통계분석하기 위한 관측된 생육단계 및 수량구성요소 자료가 필요하다.

유전모수 추정 모의용 입력파일에는 해당지역의 기상자료, 토양자료, 재배 관련 정보자료가 필요하다. 기상자료는 작황조사지점에서 관측한 기상자료를 이용하였는데, 누락된 자료는 인근 기상청 소재 자동기상관측장비에서 관측한 기상자료를 활용하였다. 해당지역의 토양자료는 국립농업과학원에서 구축한 정밀토양도의 세부 토양자료를 이용하였다. 그리고 파종량, 파종법, 시비량, 휴족 등 재배관련 자료는 국립식량과학원의 작황보고서의 보고 자료를 활용하였다(농촌진흥청, 1999-2003). 국립식량과학원의 작황보고서 중에서 1999년부터 2001년까지 3년간의 생육단계 및 수량구성요소 자료(출수기, 성숙기, 수수, 결실립수, 건물중, 완전

종실중, 천립중 등)를 유전모수의 추정에 이용하였다. 지역은 익산(호남농시), 나주(전남도원) 등 2지역이다.

유전 모수의 추정은 최적화 과정(optimization procedure)으로 수행하였다. 즉, 보리의 유전모수를 여러 가지로 조합으로 변경하여 모형을 구동한 후, 모의한 결과와 실제로 관측된 결과를 통계 분석하여 둘 사이에 차이가 가장 적고, 오차(root mean square error, RMSE)가 가장 낮은 유전모수 조합을 선택하여 본 연구의 품종별 유전모수로 활용하였다. 보리의 유전모수 추정은 다음과 같은 순서로 수행하였다. 먼저, 발육단계의 추정과정으로는 모의한 개화기와 실측한 개화기를 상호 비교하여 PID(춘화처리 민감도), PIV(광주기 민감도)를 추정하였고, 성숙기를 상호 비교하여 P5(등숙기간)를 추정하였다. 다음으로 수량의 추정으로는 종실수량 및 건물중을 상호 비교하여 G1(종실수), G2(등숙율), G3(이삭수)의 모수를 추정하였다. 이와 같은 방법으로 추정된 쌀보리 3품종의 유전모수는 Table 7과 같다.

각 품종별로 추정한 유전모수를 검증하기 위해서 유전모수 추정에 활용하지 않은 2개 연도(2002-2003년)의 기상관측 자료와 생육 및 수량구성요소 보고 자료를 이용하였다. 즉, 국립식량과학원의 해당품종의 작황조사지인 익산과 나주지역을 대상으로 작황보고서에서 명시된 재배관련정보와 조사지의 기상정보를 입력하여 CERES-Barley 모형을 구동한 후, 모의된 발육단계 및 수량결과와 작황보고서에 보고된 실제 관측결과를 상호 비교하였다[늘쌀보리(익산), 새찰쌀보리(나주), 새쌀보리(익산, 나주)]. 쌀보리의 발육단계뿐 아니라 수량도 실제 관측 값과 아주 유사하게 모의되어서(Fig. 3), 미래 기후변화시나리오에 따른 쌀보리 생육 및 수량 변화 추정에 활용하는데 무리가 없다고 판단되었다.

Table 7. Genetic coefficients of three major naked winter barley for CERES-barley growth simulation model

Cultivar	PIV	PID	P5	G1	G2	G3	PHINT
Saalsalbori	10	18	360	19	43	0.9	75
Nulsalbori	10	13	280	19	45	1.0	75
Saechalsalbori	10	15	340	18	40	0.8	75

PIV : Days at optimum vernalizing temperature required to complete vernalization

PID : 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)

PHINT : Phyllochron interval between successive leaf tip appearance (°C. d)

Fig. 3. Comparison of the model outputs from CERES-Barley and experiment plot data of three naked barley cultivars at one or two plots from 2002 to 2003.

Table 8. Climatic zonal changes of potential yield of three naked barley cultivars under A1B climate change scenario in the increased temperature conditions

Climate zone	Cultivar	Potential yield (kg/ha)				Rate of change (%)		
		1971-2000	2011-2040	2041-2070	2071-2100	2011-2040	2041-2070	2071-2100
Northern	Saalsalbori	3,891	4,535	4,755	4,113	17	22	6
	Nulsalbori	3,865	4,288	4,387	3,484	11	14	-10
	Saechalsalbori	3,212	3,711	3,851	3,227	16	20	0
	Mean	3,656	4,178	4,331	3,608	14	18	-1
Central	Saalsalbori	7,166	6,397	5,560	4,491	-11	-22	-37
	Nulsalbori	7,278	6,519	5,593	4,173	-10	-23	-43
	Saechalsalbori	6,068	4,792	4,533	3,377	-21	-25	-44
	Mean	6,837	5,903	5,229	4,014	-14	-24	-41
Southern	Saalsalbori	7,543	6,771	5,801	4,810	-10	-23	-36
	Nulsalbori	7,671	6,852	5,803	4,454	-11	-24	-42
	Saechalsalbori	6,439	5,294	4,752	3,636	-18	-26	-44
	Mean	7,217	6,306	5,452	4,300	-13	-24	-40
Mean	Saalsalbori	6,403	6,019	5,424	4,498	-6	-15	-30
	Nulsalbori	6,483	6,026	5,337	4,082	-7	-18	-37
	Saechalsalbori	5,417	4,671	4,423	3,425	-14	-18	-37
	Mean	6,101	5,572	5,061	4,002	-9	-17	-34

3.4. 생육 모의 조건별 쌀보리 잠재수량의 변화

기준년도(1971-2000년)의 쌀보리 잠재수량은 늘쌀보리가 가장 높았고, 다음으로 새쌀보리가 높았으며, 새찰쌀보리는 가장 낮게 평가되었다. 기후시대별로는 남부지대와 중부지대의 잠재수량성은 비슷했으나, 북부지대는 아주 낮게 모의되었다.

3.4.1. 온도증가에 따른 쌀보리 잠재수량의 변화

온도는 A1B 기후시나리오에 따라 미래 생육 모의 연도별로 적용하고, CO₂ 농도는 기준년도로 고정하여 쌀보리의 잠재수량의 변화를 모의하였을 경우에는 전반적으로 온도가 상승함에 따라 쌀보리의 잠재생산성이 크게 감소하는 것으로 평가되었다. 즉, 2011-2040,

Fig. 4. Agro-climatic zonal changes of potential yield of winter barley cultivar 'Saesalbori' under the A1B climate change scenario in the increased temperature conditions.

2041-2071, 2071-2100년의 3가지 미래 기후조건에서 쌀보리의 잠재수량은 기준연도에 비해 각각 9, 17, 34%씩 감소하는 것으로 예측되었다. 56 지역의 쌀보리 잠재수량을 북부, 중부, 남부 등 3개의 기후지대로 나누어 평균하여 분석하면, 북부지대에서는 온도가 기준연도에 비해 2.5°C 정도 상승할 것으로 예측되는 2041-2070년의 미래 기후조건까지는 잠재수량이 18% 증가하였으나, 4°C 이상 상승할 것으로 예측되는 2071-2100년의 미래 기후조건에서는 오히려 1% 감소

하는 것으로 모의되었다. 반면에 중부와 남부지대에서는 온도가 상승함에 따라 지속적으로 쌀보리의 잠재수량이 기준연도에 비해 낮아져서 2071-2100년의 미래 기후조건에서는 평균 잠재수량은 기준연도에 비해 40% 정도 감소하는 것으로 평가되었다(Table 8, Fig. 4).

3.4.2. CO₂ 증가에 따른 쌀보리 잠재수량의 변화

온도를 기준연도의 값으로 고정하고, CO₂농도는 A1B 기후시나리오에 따라 미래 생육 모의 연도별로

Table 9. Climatic zonal changes of potential yield of three naked barley cultivars under A1B climate change scenario in the elevated CO₂ concentration conditions

Climate zone	Cultivar	Potential yield (kg/ha)				Rate of change (%)		
		1971-2000	2011-2040	2041-2070	2071-2100	2011-2040	2041-2070	2071-2100
Northern	Saesalbori	3,891	4,334	5,247	6,106	11	35	57
	Nulsalbori	3,865	4,001	4,715	5,175	4	22	34
	Saechalsalbori	3,212	3,467	4,144	4,726	8	29	47
	Mean	3,656	3,934	4,702	5,335	8	29	46
Central	Saesalbori	7,166	7,748	8,786	9,713	8	23	36
	Nulsalbori	7,278	7,587	8,462	9,018	4	16	24
	Saechalsalbori	6,068	6,442	7,275	7,856	6	20	29
	Mean	6,837	7,259	8,174	8,862	6	20	30
Southern	Saesalbori	7,543	8,119	9,147	10,060	8	21	33
	Nulsalbori	7,671	7,974	8,840	9,387	4	15	22
	Saechalsalbori	6,439	6,759	7,565	8,099	5	17	26
	Mean	7,217	7,618	8,517	9,182	6	18	27
Mean	Saesalbori	6,403	6,945	7,945	8,849	8	24	38
	Nulsalbori	6,483	6,743	7,570	8,098	4	17	25
	Saechalsalbori	5,417	5,740	6,521	7,086	6	20	31
	Mean	6,101	6,476	7,346	8,011	6	20	31

Fig. 5. Agro-climatic zonal changes of potential yield of winter barley cultivar 'Saesalbori' under the A1B climate change scenario in the elevated CO₂ concentration conditions.

변화한량을 적용할 경우에는, 모든 미래 기후조건에서 쌀보리의 평균 잠재수량이 기준연도에 비해 각각 6, 20, 31%씩 증가하는 것으로 예측되었다. 즉, CO₂ 농도가 증가함에 따라 쌀보리 3품종의 잠재수량은 모두 증가하였는데, 증가 폭은 북부지대가 중부와 남부지대보다 다소 컸다. 북부지대의 잠재수량은 미래기후 조건에서 기준연도에 비해 각각 8, 29, 46%씩 증가한 반면에, 중부지대는 각각 6, 20, 30%씩 증가하였고, 남부지대는 각각 6, 18, 27%씩 증가하였다(Table

9, Fig. 5).

3.4.3. 온도 상승 및 CO₂ 증가에 따른 쌀보리 잠재수량의 변화

온도와 CO₂ 농도 모두 A1B 기후시나리오에 따라 미래 생육 모의 연도별로 적용할 경우에는, 3가지의 미래 평년에서 쌀보리 3품종의 평균 잠재수량은 기준연도에 비해 각각 8, 15, 13%씩 증가하는 것으로 예측되었다. 3개 기후지대로 구분하여 미래 기후조건에

Table 10. Climatic zonal changes of potential yield of three naked barley cultivars under A1B climate change scenario in the warming conditions

Climate zone	Cultivar	Potential yield (kg/ha)				Rate of change (%)		
		1971-2000	2011-2040	2041-2070	2071-2100	2011-2040	2041-2070	2071-2100
Northern	Saesalbori	3,891	5,214	6,325	6,374	34	63	64
	Nulsalbori	3,865	5,208	6,484	6,643	35	68	72
	Saechalsalbori	3,212	4,529	5,615	5,701	41	75	77
	Mean	3,656	4,984	6,141	6,239	36	68	71
Central	Saesalbori	7,166	7,162	7,319	6,950	0	2	-3
	Nulsalbori	7,278	7,535	7,845	7,527	4	8	3
	Saechalsalbori	6,068	6,462	6,744	6,537	6	11	8
	Mean	6,837	7,053	7,303	7,005	3	7	2
Southern	Saesalbori	7,543	7,548	7,516	7,256	0	0	-4
	Nulsalbori	7,671	7,897	8,015	7,800	3	4	2
	Saechalsalbori	6,439	6,786	6,881	6,712	5	7	4
	Mean	7,217	7,410	7,471	7,256	3	4	1
Mean	Saesalbori	6,403	6,764	7,116	6,899	6	11	8
	Nulsalbori	6,483	7,025	7,532	7,380	8	16	14
	Saechalsalbori	5,417	6,046	6,483	6,370	12	20	18
	Mean	6,101	6,612	7,044	6,883	8	15	13

Fig. 6. Agro-climatic zonal changes of potential yield of winter barley cultivar 'Saesalbori' under the A1B climate change scenario in the warming conditions.

따른 쌀보리 잠재수량의 변화를 분석하면, 북부지대는 기준연도에 비해 각각 36, 68, 71%씩 증가하여, 중부와 남부지대의 미래기후조건에 따른 증가 정도보다 훨씬 큰 것으로 분석되었다. 중부와 남부지대에서는 2041-2070년의 미래기후에서는 4-7% 증가한 후, 그 이후에는 증가 폭이 다소 감소하는 것으로 예측되었다 (Table 10, Fig. 6).

IV. 고 찰

온도와 CO₂ 농도가 증가하는 A1B 기후시나리오에 따른 우리나라 쌀보리의 잠재생산 변화를 현재의 품종과 재배조건을 그대로 고수하였을 때를 가정하여, CERES-Barley 생육모형으로 모의하였다. 56개 대부분의 지역에서 잠재생산성이 증가하는 것으로 분석되었다. 다만 중부와 남부지대에서는 증가정도가 2041-2070년의 미래기후를 정점으로 떨어지는 것으로 조사되었다. 이와 같은 결과는 최근 기후변화에 따른 올보리의 수량변화를 분석한 Shim *et al.*(2002)의 연구결과와 유사하였다. 즉, 난동현상이 지속된 최근 14년(1987-2000년) 동안 올보리 품종의 평균수량은 과거 14년(1974-1986년) 평균보다 헥타르 당 0.88톤이 증수되었으며, 증수의 요인은 단위면적당 수수 확보이고, 1수입수의 증가도 다소 기여하였다고 보고하였다. 국외 논문에서도 보리는 벼와 달리 온도, 강수량 및 CO₂ 농도가 증가하는 미래기후조건에서 생산성이 증가할 것으로 전망하고 있다(Holden *et al.*, 2003). 앞에서 제시하였지만, 본 논문은 현재 쌀보리의 장려 품종과

재배조건으로 고정하는 가정 하에서 모의한 결과이기 때문에 향후 미래 기후조건에 알맞게 재배시기의 이동 등 다양한 재배적 적응조치를 고려하는 추가 연구가 필요하며, 미래의 기후조건을 갖춘 포장연구도 함께 수행하여 쌀보리의 잠재수량 변화의 원인을 보다 세부적으로 구명할 필요가 있다.

적 요

보리생육모형인 CERES-Barley 모형을 적용하여, 한반도 A1B 기후시나리오에 따른 국내 쌀보리의 잠재수량 변화를 평가하였다. 생육 모의 지역은 30년 평년의 기상자료가 구축되어 있는 56개 지역으로 하였고, 생육모의 연도는 현재 30년 평년(1971-2000년, 기준연도)과 세가지의 미래 30년 평년(2011-2040, 2041-2070, 2071-2100년)으로 하였다. 그리고 온도 효과(온도 변화 및 CO₂ 농도 고정), CO₂ 효과(온도 고정 및 CO₂ 농도 변화), 온난화 효과(온도 및 CO₂ 농도 변화) 등 세가지 생육모의 환경으로 구분하여 기후변화에 따른 쌀보리의 잠재수량 변화를 평가하였다. CERES-Barly 모형은 국내 쌀보리의 발육단계뿐 아니라 수량을 실제 관측값과 아주 유사하게 모의하여 ($R^2=0.78$), 기후변화시나리오에 따른 쌀보리 잠재수량의 변화 예측에 활용하는데 큰 무리가 없다고 판단되었다. 온도효과 분석에서는 미래의 온도상승으로 쌀보리의 잠재수량이 크게 감소하는 것으로 평가되었다. 즉, 세가지 미래 기후조건에서 쌀보리의 평균 잠재수량은 기준연도에 비해 각각 9, 17, 34%씩 감소하는

것으로 예측되었다. 반면에, CO₂ 효과분석에는 세가지 미래 기후조건에서 쌀보리의 평균 잠재수량이 기준연도에 비해 각각 6, 20, 31%씩 증가하는 것으로 예측되었다. 마지막으로, 온난화 효과 분석에서는 미래 기후조건에서 쌀보리의 평균 잠재수량이 기준연도에 비해 각각 8, 15, 13%씩 증가하는 것으로 예측되었다.

REFERENCES

- 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.
- Lee, B. W., J. C. Shin, and J. H. Bong, 1991: Impact of climate change induced by the increasing atmospheric CO₂ concentration on agro-climatic resources, net primary productivity and rice yield potential in Korea. *Korean Journal of Crop Science* **36**(2), 112-126(in Korean with English abstract).
- Meza, F. J., and D. Silva, 2009: Dynamic adaptation of maize and wheat production to climate change. *Climate change* **94**, 143-156.
- 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).
- Shim, K. M., K. A. Roh, K. H. So, G. Y. Kim, H. C. Jeong, and D. B. Lee, 2010: Assessing impacts of global warming on rice growth and production in Korea. *Climate Change Research* **1**(2), 121-131(in Korean with English abstract).
- Shin, J. C., and M. H. Lee, 1995: Rice production in south Korea under current and future climates. In: R. B. Matthews, M. J. Kropff, D. Bachelet, and H. H. van Laar (Eds). *Modeling the impact of climate change on rice production in Asia*. IRRI & CAB International, Wallingford, UK. 199-215.
- Tuttolomondo, T., S. La Bella, G. Lecardane, and C. Leto, 2009: Simulation of the effects of climate change on barley yields in rural Italy. *Proceedings, On Statistics on rural development and agriculture household income, Rome*, Wye city group, 28.
- Yun, J. I., 1990: Analysis of the climatic impact on Korean rice production under the carbon dioxide scenario. *Journal of the Korean Meteorological Society* **26**(4), 203-287(in Korean with English abstract).
- 농촌진흥청, 1986: 한국농업 기후특징과 수도 기상재해대책, 194pp.
- 농촌진흥청, 1999: 작황시험보고서, 141-156.
- 농촌진흥청, 2000: 작황시험보고서, 143-156.
- 농촌진흥청, 2001: 작황시험보고서, 161-176.
- 농촌진흥청, 2002: 작황시험보고서, 151-166.
- 농촌진흥청, 2003: 작황시험보고서, 135-149.
- 통계청, 2011: <http://www.kostat.go.kr/>
- 하용웅, 2000, 보리, 농촌진흥청 작물시험장, 기록문화사, 505 pp.