

Article

<https://doi.org/10.7745/KJSSF.2017.50.6.509>

pISSN : 0367-6315 eISSN : 2288-2162

A Study on Grain Yield Response and Limitations of CERES-Barley Model According to Soil Types

Wan-Gyu Sang*, Jun-Hwan Kim, Pyeong Shin, Hyeoun-Suk Cho, Myung-Chul Seo, and Geon-Hwi Lee
National Institute of Crop Science, Wanju 55365, Korea

*Corresponding author: wg_sang@korea.kr

ABSTRACT

Received: July 5, 2017

Revised: November 4, 2017

Accepted: November 6, 2017

Crop simulation models are valuable tools for estimating crop yield, environmental factors and management practices. The objective of this study was to evaluate the effect of soil types on barley productivity using CERES (Crop Environment REsource Synthesis)-barley, cropping system model. So the behavior of the model under various soil types and climatic conditions was evaluated. The results of the sensitivity analysis in temperature, CO₂, and precipitation showed that soil types had a direct impact on the simulated yield of CERES-barley model. We found that barley yield in clay soils would be more sensitive to precipitation and CO₂ in comparison with temperature. And the model showed limited accuracy in simulating water and nitrogen stress index for soil types. In general, the barley grown on clay soils were less sensitive to water stress than those grown on sandy soils. Especially it was found that the CERES model underestimated the effect of water stress in high precipitation which led to overprediction of crop yield in clay soils. In order to solve these problems and successfully forecast grain yield, further studies on the modification of the water stress response of crops should be considered prior to use of the CERES-barley model for yield forecasting.

Keywords: CERES-barley, Barley, Soil series, Water stress

Changes of grain yield and heading date depending on climatic conditions and soil types in Jeonju.

Soil types	Rate of change (%)						
	Present	2051~2060	2091~2100	Temperature +2.8°C	Precipitation +12%	CO ₂ 580 ppm	
Potential yield	Clay	0	49	47	-3	21	24
	Clay loam	0	21	28	-6	9	18
	Sandy loam	0	19	13	-1	4	14
	Sand	0	2	-9	-12	2	13
	Average	0	23	20	-5	9	17
Heading date	Clay	0	-24	-53	-24	0	0
	Clay loam	0	-24	-53	-24	0	0
	Sandy loam	0	-24	-53	-24	0	0
	Sand	0	-24	-53	-24	0	0
	Average	0	-24	-53	-24	0	0



Introduction

보리는 밀, 벼, 옥수수 다음 가는 세계 제 4위의 곡물로서 세계의 온대 및 아열대에서 재배되고 있으며, 비교적 서늘하고 건조한 기상환경에 적응하는 작물이다. 우리나라의 보리 재배 면적은 1977년에 52만 ha 수준이었으나 그 후 계속적으로 감소되어 2017년 현재는 겉보리가 8,523 ha, 쌀보리가 12,418 ha, 맥주보리가 8,155 ha로 합계 29,096 ha 수준에 머물러 있다. 현재 우리나라에서 재배되는 보리는 주로 가을에 파종하여 월동하고 이듬해 초여름에 수확하는데 다른 작물보다 생육기간이 긴 반면 혹한기의 저온 및 등숙기의 고온 등으로 문제가 되는 지역이 많아 재배에 많은 어려움을 겪고 있다. 또한 연강수량이 1,000 mm가 넘는 지역이 대부분이어서 파종기와 등숙기에 생육 불량으로 인한 수량 저하 문제가 만연시되고 있다. 이처럼 우리나라에서 온도, 강수량 등 주요 기상요소들은 보리 생육 및 수량에 결정적으로 관여하는데 이에 대한 연구 결과를 살펴보면 다음과 같다. 우선 Yu (1965)는 진주지방의 보리작황분석에서 2월의 최저기온과 3, 5월의 일조시간 및 2, 3월의 강수량이 수량 및 수량구성요소에 영향이 크다고 하였으며 Nakayama and Nakazawa (1967)와 Suh et al. (1986)는 보리의 수량에 영향을 미치는 중요한 기상요소로 월동기간의 온도와 성숙기간의 강수량을 강조하였는데, 특히 1월 평균기온은 2~7°C, 4-6월의 강수량은 100 mm 전후에서 수량이 높으며, 200 mm 이상의 강수량은 수량을 떨어뜨린다고 하였다.

작물생육모형을 활용한 보리의 생육 및 수량 예측 연구 또한 널리 이루어져왔는데 이중 국제적으로 널리 보급된 DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer)의 경우, 다양한 환경조건 하에서 식량작물의 생산 및 재배환경 변화 등을 모의하는 중요한 도구로 활용되어 왔다 (Jones et al., 2003). DSSAT 작물모형을 활용한 보리 생육모의 연구 결과를 살펴보면 A1B 기후 시나리오에 따른 미래의 겉보리와 쌀보리 생산성 변동을 모의한 결과가 2011년에 발표되었고 (Shim et al., 2011), 기후변화조건에서 보리, 콩 등 주요 곡물의 생산량 예측 및 파종일을 변경함에 따라 예상되는 품종 별 반응에 대한 결과가 각각 발표되었다 (Kim et al., 2012; Kim et al., 2013b). 또한 최근에는 기온, 강수량, 이산화탄소 농도 등 기후 변화에 따른 보리 수량 민감도 반응에 대한 내용 또한 발표되어 주요 기상요소에 대한 CERES (Crop Environment Resource Synthesis)-barley의 생육 반응 특성은 대체로 구명되어 왔다 (Kim et al., 2013a). 하지만 이들 연구 대부분은 온도, 강수량, 이산화탄소 농도 등 각 기후 요소에 대한 생육 모의에 주로 초점을 맞추어 왔으며 작물모형의 주요 입력 변수 중 하나인 토양에 따른 생육 반응에 대해서는 연구결과가 거의 없는 실정이다. 특히 농촌진흥청의 작황보고서를 보면 우리나라의 경우 같은 지역이라도 답리작과 전작간 즉 토양 종류에 따라 보리의 생육 및 수량이 크게 차이가 있는 것으로 나타나 이에 대한 연구가 더욱 중요하다고 할 수 있다.

따라서 본 연구는 DSSAT 패키지의 CERES-barley 모형을 활용하여 토양 유형 및 특성에 따라 보리의 수량과 수분 및 양분 스트레스 지수가 어떻게 반응하는지 알아보고 이를 통해 CERES-barley를 이용한 생육 예측 시 발생할 수 있는 한계요인에 대해 구명하고자 수행하였다.

Materials and Methods

CERES-barley 작물모형 및 모수 추정 본 연구에 사용된 작물모형은 ICASA (International Consortium for Agricultural System Applications)에서 제작한 생육모델링 패키지 프로그램인 DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) Version 4.6에 포함되어 있는 CERES (Crop Environment Resource Synthesis)-barley로서 이 모형은 농장의 정밀관리에서부터 한 지역의 기후변화 영향평가에 이르기까지 전 세계적으로 다양한 부문에

서 이용되고 있다. 본 연구에 사용한 공시품종은 올보리이며 품종모수는 농촌진흥청에서 매년 실시하고 있는 ‘작황조사시험’ 자료를 DSSAT 패키지의 내장프로그램인 Gen Glue를 이용하여 추정하였다. 모수 추정과정은 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. 본 연구에 사용한 올보리 품종모수는 Table 1과 같다.

Table 1. Cultivar parameters of Ol-barley for simulation using the CERES-barley model.

Parameters	Definitions	Values
P1V	Days at optimum vernalizing temperature required to complete vernalization	19
P1D	Percentage reduction in development rate in a photoperiod 10 hour shorter than the threshold relative to that at the threshold	13
P5	Grain filling (excluding lag) phase duration (°C.d)	463
G1	Kernel number per unit canopy weight at anthesis (#/g)	20
G2	Standard kernel size under optimum conditions (mg)	40
G3	Standard, non-stressed dry weight (total, including grain) of a single tiller at maturity (g)	1.3
PHINT	Interval between successive leaf tip appearances (°C.d)	75

모형 구동을 위한 입력자료 생성 및 조건 설정 본 연구를 위한 토양 정보는 국립농업과학원에서 제공하는 흙 토람의 정밀토양도 (<http://soil.rda.go.kr>) 자료를 사용하였는데 먼저 각 토양통에 대한 세부적인 물리화학적 속성을 추출한 후 DSSAT의 하부프로그램인 S-Build를 이용하여 작물모형 구동에 적합한 포맷으로 변경하여 사용하였다. 또한 민감도 분석을 위해 기존 토양통 수집 자료 외에 S-Build에 내장된 12개의 Default 토양 자료도 활용하였다. 이후 각 토양통은 2011년에 발간된 국내 토양 분류 기준에 따라 논 토양통과 밭 토양통으로 각각 분류한 후 이를 다시 토성 등 물리화학적 특성에 맞추어 사질토, 사양토, 식양토, 식질토의 4종류로 구분한 후 생육 모의 및 한계요인 분석에 활용하였다.

작물의 수분 및 질소 스트레스 지수 반응 분석은 토양 유형별, 기상 조건별로 모형을 구동한 후 모형상의 발아~최고 분얼기 (Germinate-Max primordia), 최고 분얼기~영양생장 종지기 (Max primordia -End vegetative stage), 영양생장 종지기~출수 종지기 (End vegetative stage-End ear growth), 출수 종지기~등숙 시작기 (End ear Growth-Beginning grain fill), 등숙 시작기~등숙 종지기 (Beginning grain fill-End grain fill)의 5가지 생육단계에 대해 각각의 수분, 질소 스트레스 지수를 분석하였고 이를 토대로 토양 유형에 따른 작도층 토양 수분함량 추이, 최적 요구강수량 등을 추정 및 계산하여 이를 각각 수분, 양분 스트레스 지수와 비교 분석하였다.

또한 민감도 분석을 위해 각 토양 유형별로 RCP 8.5 시나리오에 따라 전주지역 2000~2010년 기준 50년 후, 100년 후 기후 조건으로 각각 수량 및 출수기에 대한 모의를 수행하였으며 별도로 50년 후 기후 조건의 온도, 강수량, CO₂ 변수를 각각 분리하여 각 기후요소 별 수량 기여도를 분석하였다.

기상 정보는 기상청 및 국립식량과학원 AWS 자료를 통해 수원, 익산, 진주, 대구 지역 자료를 수집하였고 한계요인 및 민감도 분석을 위해 온도, 강수량, CO₂ 등 각각의 기상요소를 X-Build의 ‘Environment modification’상에서 세부적으로 조정 한 후 사용하였다. 재배관리 등 그 외 입력 변수는 해당 지역의 작황 보고서 자료를 적용하였다.

Results and Discussion

CERES-Barley의 토양 유형별 온도, 강수량, 이산화탄소 농도 변동에 대한 수량 민감도 비교 Table 2는 DSSAT의 S-build에 내장된 Default 토양의 토성을 Clay, Clay loam, Sandy loam, Sand 4가지로 분류한 후 전주시역 2000~2010년도 기후를 기준으로 각각 50년, 100년 후 미래 기후조건 및 각 기후요소 (온도, 강수량, CO₂)에 대해 수량 반응을 모의한 후 평균한 결과이다. 기후요소 별로 보았을 때 전체적으로 온도 상승은 보리 수량에 부정적 효과를 보인 반면 강수량과 이산화탄소 농도 증가는 반대로 수량에 긍정적 효과를 보였다. 또한 이러한 수량 반응 정도는 토양 유형에 따라 크게 차이를 보였는데 점토 (Clay) 함량이 많은 식질 토양일수록 사질 토양보다 강수량과 이산화탄소의 긍정적 효과는 더 크게 나타난 반면 온도에 의한 부정적 효과는 다소 차이는 있지만 대체로 더 적게 나타났다. 반면 출수기의 변화는 온도 상승에 의한 단축 효과만 인정되었고 강수량 및 CO₂ 농도에 대해서는 영향이 없었다. 이들 기후요소들의 복합효과로 50년 후 미래기후 조건에서 모의 수량은 식질 토양이 약 49% 증가하는 반면 사질 토양은 2% 증가에 그치는 결과를 보여 토양 유형에 따라 큰 차이를 보였다. 이는 같은 지역, 기상 조건이라도 토양 유형에 따라 전혀 다른 수량 예측 결과를 나타낼 가능성이 있으며 특히 미래 생산량 예측 시 식질 토양이 강수량 증가에 실제보다 더 과다하게 모의될 우려가 크다는 것을 의미한다. 이러한 결과는 특히 답리작 재배가 주 재배유형인 우리나라에서 CERES-barley를 활용한 생산성 예측 연구시 큰 어려움을 줄 것으로 예상케 한다. 따라서 향후 이러한 수량 과다 모의 경향에 대한 보완 연구가 필요할 것으로 보인다.

Table 2. Changes of grain yield and heading date according to climatic conditions on different soil types in Jeonju.

Soil types	Rate of change (%)						
	Present	2051~2060	2091~2100	Temperature +2.8°C	Precipitation +12%	CO ₂ 580 ppm	
Potential yield	Clay	0	49	47	-3	21	24
	Clay loam	0	21	28	-6	9	18
	Sandy loam	0	19	13	-1	4	14
	Sand	0	2	-9	-12	2	13
	Average	0	23	20	-5	9	17
Heading date	Clay	0	-24	-53	-24	0	0
	Clay loam	0	-24	-53	-24	0	0
	Sandy loam	0	-24	-53	-24	0	0
	Sand	0	-24	-53	-24	0	0
	Average	0	-24	-53	-24	0	0

CERES-Barley의 토양 유형별 실제 수량과 모의 수량의 오차 농촌진흥청 맥류 작황보고서를 기초로 한 2000~2010년 동안의 수원지역 올보리 실제 수량은 전작 재배 조건이 답리작 조건보다 대략 50% 가량 높았으며 실제로도 우리나라에서는 답리작 보다 전작 재배가 보리 수량이 더 높은 것으로 인식되어 왔다. 하지만 CERES-barley 모형을 이용해 다양한 논토양과 밭토양들에 대해 각각 수량 모의를 한 결과는 실제 관측 결과와는 반대의 경향을 나타내었다. 모의 결과 기상조건 등 다른 입력 변수가 동일하다면 실제와는 다르게 논토양 조건이 밭토양보다 수량이 높게 모의되었으며 또한 밭토양의 경우에는 연차간 수량 변이 정도가 논토양보다 더 큰 것을 알 수 있었다 (Fig. 1). 이는 밭토양이 수량 뿐 아니라 기상변화에 대한 재배 안정성도 논토양보다 다소 낮게 모의 된다는 것을 의미한다.

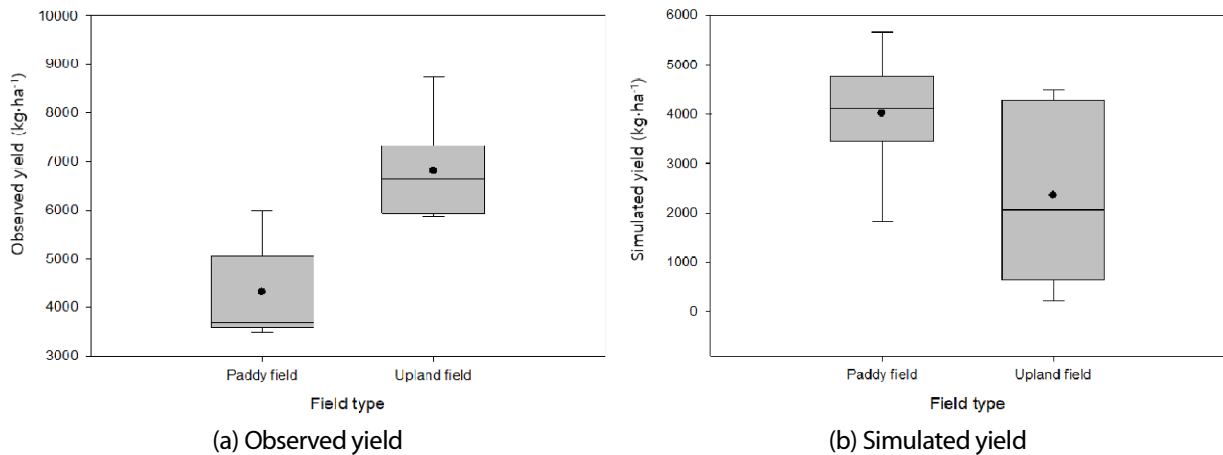


Fig. 1. Comparison of observed and simulated yields of OI-barley between cultivated upland and paddy fields.

이에 대한 원인을 밝혀보고자 Table 3과 같이 잠재적 보리 재배 가능 토양인 우리나라 주요 8개 논, 밭의 토양통들에 대해 작기 중 강우에 따른 토양 수분 동태를 DSSAT을 사용해 각각 모의한 후 이 결과를 모의 수량과 비교 분석하였다. 그 결과 토양통 종류에 따라 연중 수분 동태는 서로 큰 차이를 보였는데 특히 보리 재배기간 중 배수와 유거수를 포함한 수분 유실량이 논토양은 평균 786 mm인 반면 밭토양은 1,026 mm로 논토양이 약 30% 가량 적었으며 이러한 토양통간의 수분 유실량에 대한 차이는 각 토층의 Clay, Sand, Stone 조성 등 토양 물리성이 가장 중요하게 작용하는 것으로 보인다. 또한 Fig. 2에서 보는 바와 같이 토양통의 수분 유실량 (배수 + 유거수)은 모의 수량과 $R^2 = 0.93$ 으로 높은 부의 상관관계를 보였는데 대체로 수분유실 정도가 큰 토양일수록 수량은 크게 감소하는 경향을 보였다. 이는 CERES-barley의 수량 반응은 각 토양이 가지고 있는 고유의 수분 보유력과 이로 인한 작물의 수분 및 양분 스트레스 반응 정도가 주요 요인으로 작용한다는 것을 의미한다.

Table 3. Cultivation area by soil series of eight upland and paddy fields in South Korea.

No.	Paddy field		Upland field	
	Soil series	Area (ha)	Soil series	Area (ha)
1	JISAN	122,851	ANRYONG	44,900
2	SACHON	52,181	SANGJU	38,121
3	MANGYEONG	50,931	JIGOG	32,848
4	YONGJI	42,276	SONGJEONG	28,744
5	JEONBUG	41,650	SEOGTO	24,318
6	CHILGOG	29,847	UGOG	20,635
7	PYEONGTAEG	26,686	YESAN	17,431
8	MAEGOG	23,301	SUAM	16,993

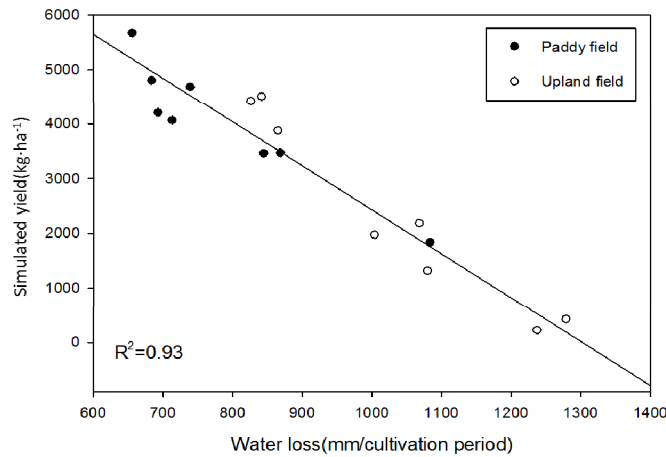


Fig. 2. Relation of simulated yields of OI-barley to soil water loss amount (drainage + runoff) in 2001~2010.

CERES-barley의 토양 유형별 최적강수량 및 수분 스트레스 반응 모의 토양 유형에 따른 토양 수분 변화 차이가 실제 작물의 수량 및 스트레스 지수에 어떻게 반응하고 모의되는지 알아보기 위해 익산지역의 최근 10년간 (2000~2010년) 기상자료에 대해 해당지역 대표 식질토인 부용토와 사양토인 석천토를 사용하여 각각 생육모의를 실시하였다. Fig. 3은 토양통간 최적 강수량을 CERES-barley를 사용해 모의한 후 5개 생육단계별로 각각 구분한 결과이다. 최적 강수량은 모형상에서 각 생육단계별 수분 스트레스 지수가 0가 되는 지점의 요구 강수량을 구하여 각각 계산한 것으로 CERES-barley의 수분생리 반응을 이해하는 데 중요한 정보를 제공한다. 모의 결과 월동기를 제외하고 대부분의 생육단계에 대해 석천토의 최적 강수량이 부용토보다 대략 5~10% 가량 높았다. 이는 사양토인 석천토의 수분 유실율이 식질토인 부용토보다 높기 때문인 것으로 생각된다. 또한 각 토양통별 최적강수량과 실제 강수량을 비교해보면 우리나라에서는 대부분의 생육기간 동안 한발 스트레스 조건에 노출되기 쉬우나 출수~등숙기간, 주로 생육재생기 이후 봄철 동안은 습해 피해를 입기 쉬운 환경 조건에 놓여 있는 것으로 모의된다 (Fig. 3). 이는 우리나라 기후조건에서 보리 재배 시 봄철 등숙기간 중의 습해가 크게 문제시 되고 있다는 기존 연구 보고와도 일치하는 결과이다.

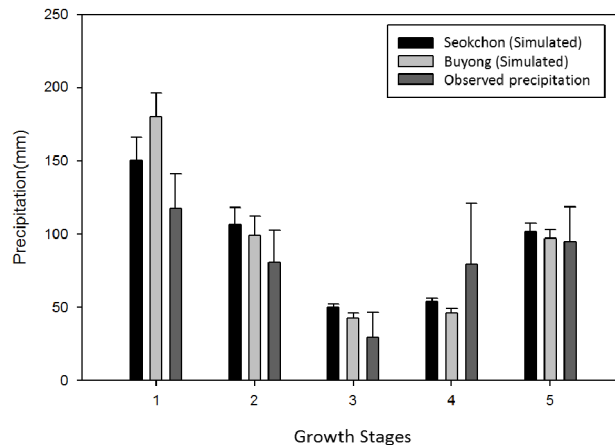


Fig. 3. Estimation of optimum precipitation by CERES-barley model at growth stages of barley in different soil series in Iksan from 2000 to 2007 (1, Germinate-Max primordia; 2, Max primordia-End vegetative stage; 3, End vegetative stage-End ear growth; 4, End ear Growth-Beginning grain fill; 5, Beginning grain fill-End grain fill).

Fig. 4는 토양통별 연중 최적 강수량과 수분 스트레스 지수에 대한 연차간 변이를 나타낸 것이다. 부용통과 석천통 모두 2002~2003년을 제외한 모든 연도에서 최적 강수량 이하의 한발 조건에 놓여 있다는 것을 알 수 있다. He et al. (2014)는 30년 작황 자료를 토대로 토성에 따른 CERES-Wheat의 수량 반응을 모의한 결과 식질토가 사양토보다 한발 스트레스 저항성이 더 크다고 하였는데 본 연구의 CERES-barley에서도 한발 피해가 예상되는 연도들에서는 식질 토인 부용통의 수분 스트레스 지수가 사양토인 석천통보다 다소 낮게 유지되는 경향을 보였다. 다만 그 수치는 한발 연차간에도 0에서 0.3까지 다양하게 나타났는데 이러한 차이는 각 연차간 한발 피해 정도가 생육단계별로 각각 다른 가중치로 적용되었기 때문인 것으로 보인다. 반면 습해 피해가 예상되는 2002~2003년에는 두 토양 모두 연중 수분 스트레스 지수가 0~0.1로 거의 피해가 없는 것으로 모의되었다. 또한 연차에 관계없이 전체적으로 식질토인 부용통이 사양토인 석천통보다 연중 수분 스트레스 지수가 대략 30~90% 낮은 것으로 보아 토양의 수분 보유력이 높을수록 전체적인 작물수분 스트레스 지수는 낮게 모의된다는 것을 알 수 있었고 이는 논토양이 밭토양보다 수량이 높게 모의되게 하는 한 원인으로 작용하는 것으로 보인다. 이러한 이유로 Fig. 5에서와 같이 특히 2002~2003년도처럼 강우가 많은 연도에는 부용통과 같은 식질토에서 수량이 실제보다 더 과다하게 왜곡되는 경향을 보이게 된다.

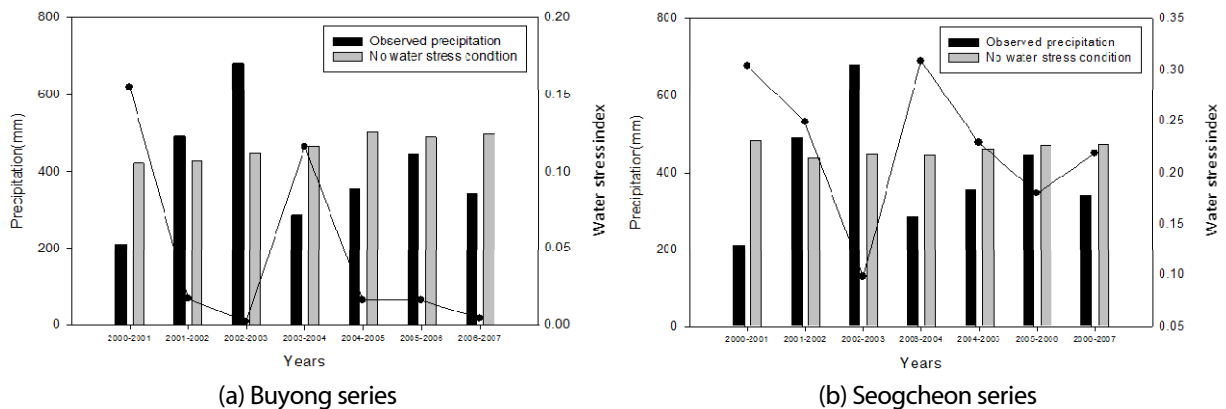


Fig. 4. Annual fluctuation of water stress index and optimum precipitation estimated for barley in different soil series.

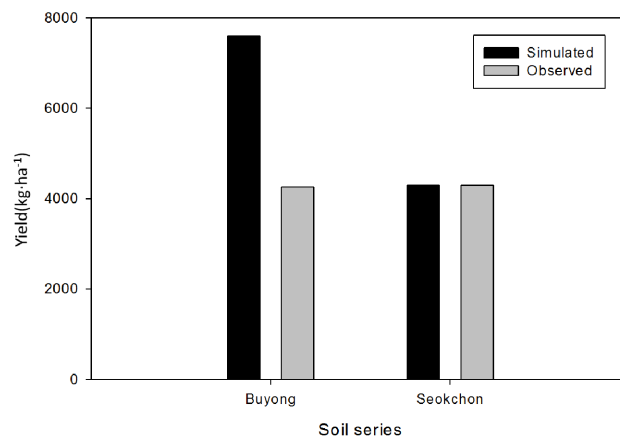


Fig. 5. Comparison of simulated- and observed- yields of barley according to soil series in a year with high precipitation.

생육단계별 수분 및 질소양분 스트레스 반응 비교 및 한계요인 분석 이러한 CERES-barley의 토양특성에 의한 한계요인을 보다 정확히 이해하기 위해서는 단순히 강수량의 많고 적음 보다 실제 식물체가 이용하는 작토층의 토양 수분 수준에서의 분석이 필요하다. Fig. 6은 수분스트레스가 0일 때의 작토층 (0~30 cm) 토양수분량을 생육 단계별로 추출한 후 이를 기준으로 강우가 많은 연도와 적은 연도에 대해 각각 작토층 토양수분 동태와 그에 따른 작

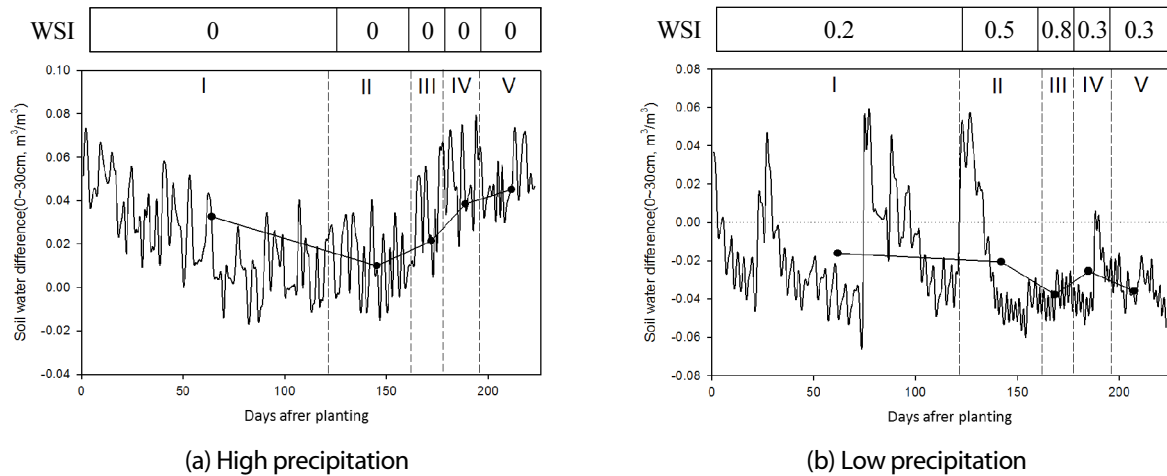


Fig. 6. Relation of soil moisture content and water stress index in CERES-barley model (WSI: Water Stress Index).

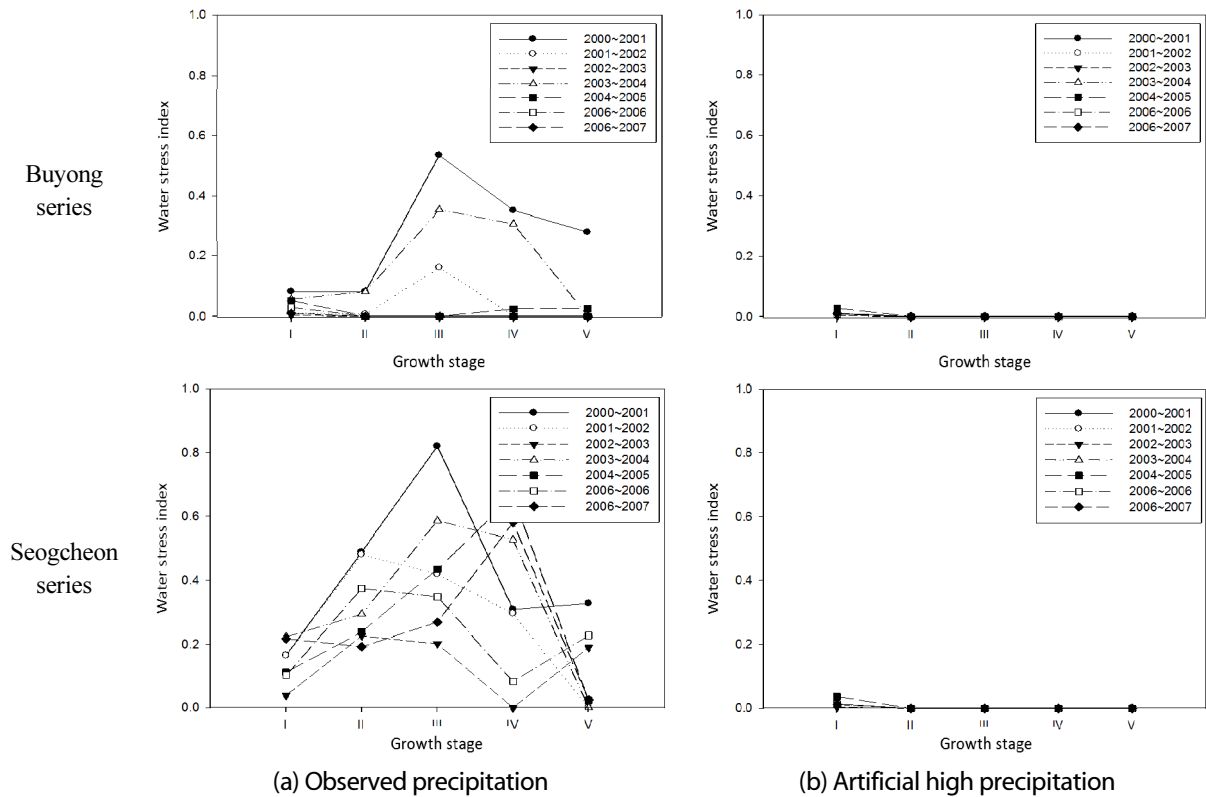


Fig. 7. Estimation of water stress index by CERES-barley model at growth stages of barley in different soil series in Iksan from 2000 to 2007 (I, Germinate-Max primordia; II, Max primordia-End vegetative stage; III, End vegetative stage-End ear growth; IV, End ear Growth-Beginning grain fill; V, Beginning grain fill-End grain fill).

물 수분스트레스 지수를 생육단계별로 나타낸 결과이다. 보는 바와 같이 강우가 많은 연도에는 전 생육기간 동안 토양 수분 함유량이 기준보다 높게 유지되었음에도 불구하고 수분스트레스 지수는 생육단계 모두 0을 나타내어 토양 수분 과다에 대한 스트레스에 매우 둔감하게 반응하였다. 반면에 강우가 적은 연도에는 토양 수분 부족에 대한 스트레스를 생육단계별로 상대적으로 잘 모의하여 기존의 한발에 대한 CERES-barley의 반응과 유사한 결과를 보여주고 있다 (Fatemi et al., 2014). 이는 CERES-barley의 작물 수분 스트레스 반응이 한발해에는 효과적으로 작용하는 반면 습해에 대해서는 다소 미흡하게 작용한다는 것을 의미한다.

Fig. 7은 토양 유형에 따라 생육단계별 작물수분 스트레스 지수가 연차간 어떻게 변동하는지를 나타낸 그림이다. 우리나라 기상 조건에서는 토양에 관계없이 수분 스트레스 반응이 주로 출수기 이후인 III, IV 시기에 크게 나타나는데 사양토인 석천통에서는 그 피해 정도가 더 크게 모의되는 것을 알 수 있다. 반면 인위적으로 강수량을 증가시켜 습해 유발 조건의 기상자료를 제작한 후 각각 모의한 결과 CERES-barley의 수분 스트레스 반응은 토양, 연차에 관계없이 전 생육단계 동안 모두 0으로 나타나 습해 피해를 제대로 반영하지 못하는 것을 알 수 있었다. 다만 이 경우 질소 양분 스트레스 지수는 사양토인 석천통에서 크게 증가하는 경향을 보였는데 이는 증가한 강수량으로 인해 수분 율실을 이 높아지면서 양분 용탈량도 같이 증가하였기 때문인 것으로 보인다 (Fig. 8). 따라서 CERES-barley를 활용한 보리 수량 모의 시에는 토양 유형에 따른 수분 스트레스 반응 정도 뿐 아니라 질소 등 양분 이용률에 대한 부분도 같이 고려해야 할 것이다.

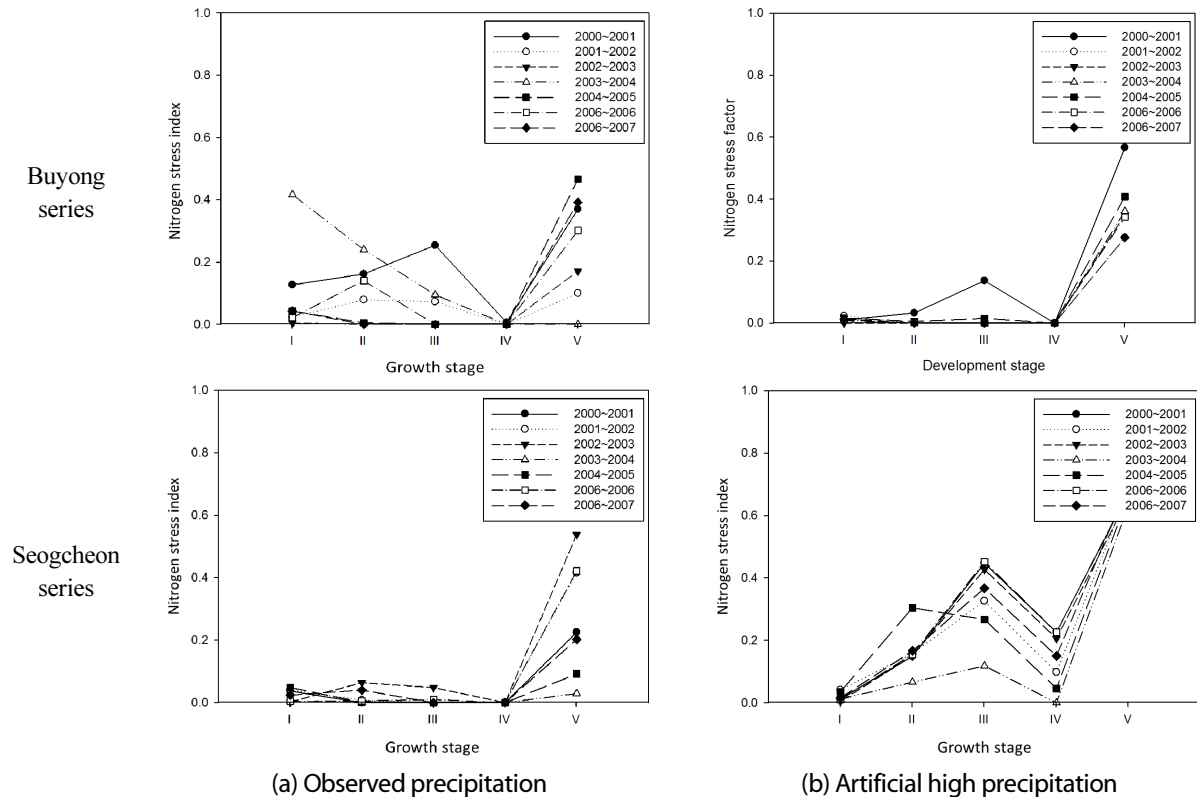


Fig. 8. Estimation of nitrogen stress index by CERES-barley model at growth stages of barley in different soil series in Iksan from 2000 to 2007 (I, Germinate-Max primordia; II, Max primordia-End vegetative stage; III, End vegetative stage-End ear growth; IV, End ear Growth-Beginning grain fill; V, Beginning grain fill-End grain fill).

Conclusions

CERES-barley 작물모형을 이용한 보리 생육 모의 시 온도, 강수량, 이산화탄소 등 각각의 기후요소 외에도 토양의 특성이 수량반응에 어떻게 기여하는지 이해하는 것은 정확한 수량 모의를 위해 매우 중요하다. 토양의 특성은 작물의 수분과 양분, 특히 질소 스트레스 반응에 직접적으로 영향을 미치는데 CERES-barley 모형은 한발해에 비해 습해에 대한 피해반응이 매우 둔감한 것으로 나타났다. 이러한 결과로 인해 강수량이 많은 조건, 물 빠짐이 나쁜 식질토 같은 토양에서는 실제와는 다르게 수량이 과다하게 모의되는 결과를 보였다. 또한 토양 유형별로 온도, 강수량, 이산화탄소 각 기후요소 별로 분석한 결과 모래보다 점토함량이 높은 식질토일수록 강수량과 이산화탄소 상승의 긍정적 효과가 더 크게 나타난 반면 온도 상승에 의한 부정적 효과는 더 적게 나타났다 이는 같은 지역, 기상 조건이라도 토양 유형에 따라 전혀 다른 모의 결과를 나타낼 가능성이 있으며 특히 강수량이 많은 이상기후 조건에서는 생육 예측이 토양에 따라 크게 왜곡될 수 있다는 것을 의미한다. 특히 우리나라의 경우에는 대부분의 보리를 답리작으로 재배하고 있어 습해에 노출되기 쉬운 환경에 처해 있기 때문에 이러한 모형의 민감도 및 한계요인을 실험 설계 시 감안하여야 보다 현실성 있는 생육모의가 가능할 것이다. 최근 Martinez et al. (2003)이 토양수분 변동 및 식물체 흡수율 보정을 통한 토양-수분 동태 모듈 개선 결과를 발표하는 등 전 세계적으로 모형 개선에 대한 여러 연구가 활발히 진행 중이지만 수분 스트레스와 이에 대한 작물 반응 연구는 여전히 미흡한 실정이다. 따라서 향후 이러한 CERES-barley의 수량 왜곡 현상을 보정하기 위해서는 토양 유형별, 생육단계별로 한발, 습해 등 수분 및 양분스트레스에 대한 정확한 생육반응 실험이 먼저 이루어진 후 이를 모형에 반영하는 작업이 선행되어야 할 것으로 보인다.

Acknowledgement

This work was carried out with the support of “Cooperative Research Program for Agricultural Science & Technology Development (Project No. PJ01134304)” Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

- Fatemi, Z., F. Paknejad, E. Amiri, and M.N. Eilkaee. 2014. Capability of the CERES-barley model for prediction of barley varieties growth under deficit irrigation. *J. Biol.* 2(1):1-7.
- He, Y., L. Hou, H. Wang, K. Hu, and B. McConkey. 2014. A modelling approach to evaluate the long-term effect of soil texture on spring wheat productivity under a rain-fed condition. *Sci. Rep.* 4:5736.
- 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. *Eur. J. Agron.* 18:235-265.
- Kim, D.J., J.H. Roh, J.G. Kim, and J.I. Yun. 2013a. Grain yield response of CERES-Barley adjusted for domestic cultivars to the simultaneous changes in temperature, precipitation, and CO₂ concentration. *Korean J. Agric. For. Meteorol.* 15:312-319.
- Kim, D.J., J.H. Roh, J.G. Kim, and J.I. Yun. 2013b. The influence of shifting planting date on cereal grains production under the projected climate change. *Korean J. Agric. For. Meteorol.* 15(1):26-39.
- 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 RCP 8.5 climate change scenarios. *Korean J. Agric. For. Meteorol.* 14(3):132-141.

- Martinez, M.S., R.L. Urrea, L.M. Molina, J. Lizaso, and M. Quemada. 2009. Improving simulation of soil water balance using lysimeter observations in a semiarid climate. *Procedia Environ. Sci.* 19:534-542.
- Nakayama, K. and A. Nakazawa. 1967. Locational effects on yield of barley. *Agric. Hort.* 42:1,027-1,032.
- 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 J. Agric. For. Meteorol.* 13(4):192-203.
- Suh, H.S., B.H. Lee, and G.S. Chung. 1986. Influence of weather condition for grain yield in barley. *Korean J. Crop Sci.* 31:318-325.
- Yu, I.S. 1965. Studies on the effect of weather factors upon the barley yields in Chinju area. *RDA Annu. Rep.* 8:57-62.