

경기북부지역 콩 생산에 미치는 지구온난화의 영향

서희철¹ · 김성기² · 이영수² · 조영철²

¹경희대학교 생명과학부, ²경기도 농업기술원 제2농업연구소

(2006년 9월 10일 접수; 2006년 11월 23일 수락)

Geographical Shift of Quality Soybean Production Area in Northern Gyeonggi Province by Year 2100

Hee-Cheol Seo¹, Seong-Ki Kim², Young-Soo Lee², and Young-Cheol Cho²

¹Department of Ecosystem Engineering, Kyung Hee University

²Northern Agriculture Research Station, Gyeonggi Agricultural Research and Extension Service

(Received September 10, 2006; Accepted November 23, 2006)

ABSTRACT

Potential impacts of the future climate change on crop production can be inferred by crop simulations at a landscape scale, if the climate data may be provided at appropriate spatial scales. Northern Gyeonggi Province is one of the few prospective regions in South Korea for growing quality soybeans. Any geographical shift of production areas under the changing climate may influence the current land planning policy in this region. A soybean growth simulation was performed at 342 land units in northern Gyeonggi province to test the potential geographical shift of the current production areas for quality soybeans in the near future (form 2011 to 2100). The land units for soybean cultivation were selected by the land use, the soil characteristics, and the minimum arable land area. Daily maximum and minimum temperature, precipitation, the number of rain days and solar radiation were extracted for each land unit from the future digital climate models (DCM, 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100). Daily weather data for 30 years were randomly generated for each land unit for each normal year by using a well-known statistical method. They were used to run CROPGRO-Soybean model to simulate the growth, phenology, and yields of 3 cultivars representing different maturity groups grown at 342 land units. According to the model calculations, the warming trend in this region will accelerate the flowering and physiological maturity of all cultivars, resulting in a 7 to 9 days reduction in overall growing season and a 1 to 15% reduction in grain yield of early to medium maturity cultivars. There was a slight increase in grain yield of the late maturing cultivar under the projected climate by 2070, but a decreasing tend was dominant by the year 2100.

Key words : Soybean, Growth simulation, Climate change, CROPGRO

I. 서 언

많은 기후전문가들이 예측하는대로 지구의 기후가 변한다면 안정된 환경에 적응해오던 생물들이 기후변화에 미처 적응하지 못해 가까운 미래에 종분포의 변화가 나타날 수밖에 없다. 이에 따라 기후변화에 대한

육상생태계의 반응과 그 사회경제적 영향에 대한 관심이 높아지고 있으며(한화진 2005), 농림업 분야에서는 기후변화에 따른 작물과 수목의 복합적인 반응을 예측하는 연구를 통해 새로운 기후에 적응할 수 있는 작물과 품종을 찾고 있다(Shim *et al.*, 2005; Yun, 2006).

콩은 다른 작물에 비해 환경조건에 민감한 편이라

재배에 제약을 받을 때가 많다(Choi et al., 1980). 콩의 수량과 수량관련형질을 보면 재배지역, 품종특성에 따라 상이한 반응을 보이는데, 재배지역에 따른 기후조건에 따라 생육양상이 달라지기 때문이라고 하였다(Lee, 1976).

경기도 북부지역은 청정환경에 기상조건이 다양하여 고품질 농산물 생산 및 친환경농업이 유리한 곳으로 알려져 있다. 경기도에서는 콩을 파주시, 연천군의 지역특산물로 육성하기 위해 품질과 수량 측면에서 이 지역에 적합한 품종을 탐색하고 있으며, 이에 따라 연천지역에 대한 30m 해상도의 정밀 수치기후도를 제작하고(Kim et al., 2004a), 제작된 기후도를 이용하여 콩의 성장모형을 구동함으로써 적지적작을 유도할 수 있는 연구가 수행된 바 있다(Kim et al., 2004b). 하지만 선정된 재배 적지의 생산성이 가까운 미래에 예상되는 지구온난화 영향으로 변할 수 있음이 우려된다. 만약 기후자료만 필지 혹은 단지규모로 주어진다면 미래의 콩 생육은 기존의 작물모형에 의해 충분히 모의할 수 있을 것이다.

이 지역의 기후자원은 1971-2000년 기준으로 30m의 고해상도 전자기후도로 제작되어있다. 하지만 미래 기후변화(예, 기온상승) 예측정보는 기껏해야 25 km 해상도밖에 되지 않으므로 필지별 혹은 단지별 기후변화 영향평가를 위해서는 기존 예측정보의 규모축소(down scaling)가 선결과제이다. 본 연구에서는 간단한 규모축소기법을 적용하여 SRES A2 시나리오에 따른 기후변화가 이 지역의 콩 재배에 미치게 될 영향을 생육모의에 의해 추정하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 콩 재배가능 지역 선정 및 토양자료 준비

경기도 북부 지역 가운데 포천, 파주, 연천 지역 가운데 콩 재배가 가능한 지역을 선정하기 위해 농업과 학기술원에서 제작된 수치정밀토양도에서 심토토성이 사양질, 미사사양질, 식양질, 미사식양질인 부분과, 배수등급이 매우양호, 양호, 약간양호인 부분만을 추출하였다. 그리고 환경부의 수치 토지이용도 가운데 실제 전답으로 쓰이고 있는 지역을 추출하였다. 이렇게 선정한 구역 중에서 대단위 재배가 가능한 구역을 얻기 위해 면적이 10ha(3만평)이상인 342개를 최종 선발하여 단위재배구역(cultivation zone unit, CZU)이라고

명명하였다.

각 재배가능구역별로 토양자료가 필요한데, 농업과 학기술원에서 제작된 수치정밀토양도에는 모형을 구동하는데 필요한 모든 속성정보를 갖고 있지 않다. 그래서 수치정밀토양도에서 토성과 토심을 알아낸 다음, USDA 토양특성 조건표(Ritchie et al., 1990)에 의해 수분상수를 결정하고, 이렇게 해서 얻어진 자료를 IBNSAT(International Benchmark Site Network for Agro-technology Transfer) 포맷으로 작성하였다.

2.2. 기준 평년의 수치기후도 제작

콩 생육모형을 구동하기 위해서 토양자료와 함께 재배구역별 일 기상자료(일최고기온, 일최저기온, 강수량, 일사량)가 필요하다. 재배구역별 일 기상자료를 생성하기 위해 기상청으로부터 1971년부터 2000년까지 30년간 남북한 51개 지점의 일별 기온, 일사량, 강수량 자료를 수집하여 월별 평균값을 계산하였다. 남북한 전역의 조방적인 관측망을 이용한 것은 경기도북부지역이 남북한의 경계에 놓여있기 때문이다.

먼저 복잡지형의 국지 최저기온 추정을 위한 소기후 모형은

$$T = \frac{\sum T_i}{\sum \frac{1}{d_{i2}}} + \left(\frac{z_i}{\frac{z_i}{d_{i2}}} \right) \Gamma - \epsilon_1 + \epsilon_2 \quad (1)$$

이다. 여기서 T_i 는 지점 'i'의 실측기온, d_i 는 내삼지점으로부터 관측점 'i'까지의 거리, z 및 z_i 는 각각 내삼지점과 관측점 'i'의 해발고도, Γ 는 해발고도에 따른 기온감율, ϵ_1 과 ϵ_2 는 각각 냉기유입 효과와 온난대 효과이다(Chung et al., 2006).

한낮의 일사량이 일 최고기온에 중요한 영향을 주므로 주어진 경사면에 대해 오전 11시부터 오후 3시까지 일사량을 적산하여 인근기상관서의 수평면일사량과의 편차에 의해 최고기온을 보정해주는 캐나다 산림청의 BioSIM을 이용하여 일 최고기온을 추정하였다(Regnere et al., 1996). 일 최고기온 보정값은

$$\epsilon = v \cdot R \cdot \Delta T_R \quad (2)$$

이며, 여기서 R 은 기온 일교차, ΔT_R 은 수평면과 경사면간 일사량 편차의 기온상승분 상한값으로 일교차 1°C당 0.1429라고 알려져 있으며 최고 4°C까지 상승할 수 있다. v 는 과열지수(over heating index)이며,

4시간 동안 수평면 일사수광량과 경사면 일사수광량간의 차이를 표준화 한 것이다(Regniere, 1996).

환경부의 30m 수치표고모형(DEM)과 이로부터 유도되는 각종 지형변수를 이용하여 식 (1)과 (2)에서 요구하는 소기후인자를 계산한 다음 경기북부지역의 기온분포도를 제작하여 기준평년의 수치기온도로 간주하였다.

2.3. 기후시나리오에 따른 일별 기상 자료 생성

기상연구소로부터 IPCC SRES(Inter-governmental Panel on Climate Change Special Report on Emission Scenarios)의 A2시나리오에 근거하여 한반도 전역에 대해 25×25 km 격자점 단위로 2011년부터 2100년까지 산출한 일별 기온 및 강수량자료(기준연도 1971-2000 평년에 대한 편차)를 수집하였다. 이 자료를 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100 등 30년치씩 3기간으로 나누어 각각의 월별 평균값을 구하고 경기북부지역 해당 격자점의 편차를 추출하였다.

앞서 30m 해상도로 제작된 1971년부터 2000년까지의 월 평년 수치기후도에 각 시기별 30년 월별 편차 평균값을 더해줌으로써 각 시기별 미래 평년의 30m 해상도 수치기후도를 제작하였다.

이렇게 제작된 수치기후도 위에 앞서 제작한 단위재배구역을 중첩시키고 각 CZU에 포함된 격자점의 자료를 공간평균 함으로써 CZU 대푯값으로 삼았다. 작물모형은 일별 기상자료에 의해 구동되므로 각 평년별 월 기후값을 근거로 생육모형이 요구하는 일별 기상자료 30년치씩을 Pickering *et al.* (1994)의 방법에 의해 무작위로 생성하였는데, 이 과정은 많은 시간과 노력이 소요되므로 자동화 프로그램(Kim *et al.*, 2004b)에 의해 수행하였다.

2.4. 생육모의

콩 생육모형 가운데 CROPGRO-Soybean은 IBNSAT에서 제공하는 DSSAT프로그램 패키지에 포함되어 있다. CROPGRO-Soybean모형은 작물의 주요 생리과정을 나타내는 알고리즘으로 되어있다(Boote *et al.*, 1998). CROPGRO는 매일의 기상조건을 입력받아 콩 식물과 토양으로 이루어진 시스템에 대해 탄소, 물, 질소수지를 모의할 수 있으므로, 환경조건과 비배관리에 대한 콩의 반응을 살펴 볼 수 있다.

1971년부터 2000년 까지 복원된 30년간의 일기상자

료와 기후시나리오에 의해 생성된 미래의 각각 30년치의 일 기상자료(2011-2040, 2041-2070, 2071-2100)를 각 CZU에 적용하여 준비된 토양자료, 그리고 사전에 준비된 재배법에 의해 생육모형을 구동시켰다. 품종은 미국에서 기상생태형별로 분류된 성숙군(maturity group) 3, 4, 5로서 우리나라의 조생종, 중생종, 만생종에 해당하며 품종모수는 IBNSAT 사업에 의해 이미 도출되어있다. 파종기는 5월 15일(day of year=135)과, 6월 14일(day of year=165)로 하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 격자형 기후자료

Fig. 1은 평년 8월의 일 최고기온과 1월의 일 최저기온을 시나리오별로 분포도를 나타낸 것이다. 경기북부지역 일 최저기온의 1월 평균값은 각 시기별로 30년후에 -8.7°C, 60년 후에 -6.1°C, 90년 후에 -4.5°C이며, -10°C 이하인 지역이 점차 줄어들어 60년 후부터는 거의 나타나지 않는다. 8월 최고기온의 경우 29.8°C, 31.8°C, 33.8°C로 매 기간 2°C 정도 상승할 것으로 예상된다.

3.2. 콩의 주요생육특성 변화

Table 1은 경기북부지역의 변화된 기후조건에서 모의한 콩의 주요 생육특성변화를 나타낸 것이다. 이 지역 342개 단지에서 모의한 결과 5월 중순 파종(파종기 5월 15일)의 경우 개화기가 11~13일 정도 단축되었고, 성숙기는 7, 8일 정도 단축되었다. 또한 개화기와 성숙기의 연차간 변이 폭도 0.5~1일 정도 줄어들었고, 전체적인 생육기간도 7~8일 정도 단축되었다. 수량은 조중생종의 경우 온난화가 될수록 립중과 단위면적당 립수의 감소로 인한 전체적인 수량이 감소하였다. 하지만 만생종의 경우는 현재보다 기온이 1~2°C 가량 상승하였을 때에는 수량이 증가하였지만 그 이상 기온이 올라가면 수량은 다시 감소하였다.

6월 중순 파종(파종기 6월 14일)의 경우 역시 5월 중순 파종과 같이 개화기와 성숙기가 단축되었고, 그 기간은 개화기는 3일, 성숙기는 4~6일 정도였다. 수량은 조생종의 경우 기준년에 비해 최고 9%의 감소를 보였다. 하지만 중생종, 만생종의 경우는 소폭 증가 후 감소하는 것으로 모의되었다. 하지만 두 파종기별로 비교하여 보면 5월 중순 파종기 기온 상승으로 인

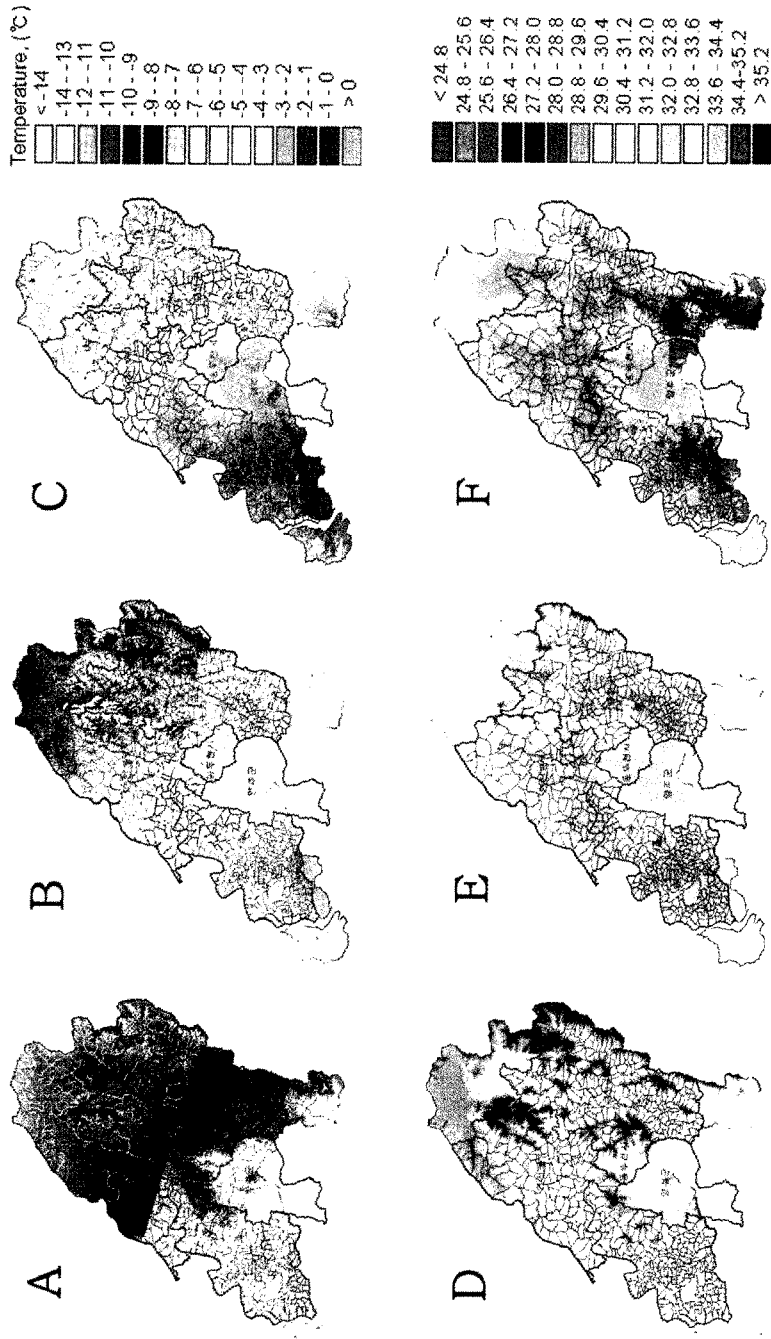


Fig. 1. High resolution January minimum temperature in northern Gyeonggi Province for the climatological normal years 2011-2040 (A), 2041-2070 (B), and 2071-2100 (C). High resolution August maximum temperature in northern Gyeonggi for the climatological normal years 2011-2040 (D), 2041-2070 (E), and 2071-2100 (F).

Table 1. Growth and yield characteristics of 3 soybean cultivars estimated at 342 land units in northern Gyunggi province under the future climate conditions projected by IPCC SRES A2 scenario (Planting date: 15 May)

		Anthesis Date (day)		Maturity Date (day)		Grain Yield (kg/ha)		Growth Duration (day)
		mean	standard deviation	mean	standard deviation	mean	standard deviation	
Maturity group 3	1971-2000	6 July	2.8	8 Sept	1.8	2783	179	116
	2011-2040	2 July	2.5	5 Sept	1.5	2713	174	113
	2041-2070	28 June	2.1	2 Sept	1.2	2565	179	110
	2070-2100	25 June	1.7	1 Sept	1.2	2339	177	109
Maturity group 4	1971-2000	16 July	2.7	22 Sept	1.7	3046	195	130
	2011-2040	11 July	2.5	18 Sept	1.4	3020	196	126
	2041-2070	7 July	2.2	15 Sept	1.2	2861	204	123
	2070-2100	3 July	1.9	14 Sept	1.1	2616	197	122
Maturity group 5	1971-2000	23 July	2.5	2 Oct	1.7	3097	244	140
	2011-2040	19 July	2.3	29 Sept	1.3	3210	215	137
	2041-2070	15 July	2.1	26 Sept	1.1	3105	238	134
	2070-2100	11 July	1.9	25 Sept	1.0	2890	229	133

(Planting date: 14 June)

Maturity group 3	1971-2000	24 July	1.4	20 Sept	1.3	2337	168	98
	2011-2040	22 July	1.0	18 Sept	0.9	2307	186	96
	2041-2070	21 July	0.8	16 Sept	0.8	2224	174	94
	2070-2100	21 July	0.8	16 Sept	0.9	2127	170	94
Maturity group 4	1971-2000	30 July	1.5	1 Oct	1.5	2536	194	109
	2011-2040	28 July	1.1	28 Sept	1.1	2585	183	106
	2041-2070	27 July	0.8	26 Sept	0.8	2502	200	104
	2070-2100	27 July	0.9	26 Sept	0.9	2380	198	104
Maturity group 5	1971-2000	5 Aug	1.4	10 Oct	1.6	2511	282	118
	2011-2040	3 Aug	1.0	7 Oct	1.1	2720	213	115
	2041-2070	1 Aug	0.8	5 Oct	0.9	2739	220	113
	2070-2100	2 Aug	0.9	4 Oct	0.9	2631	236	112

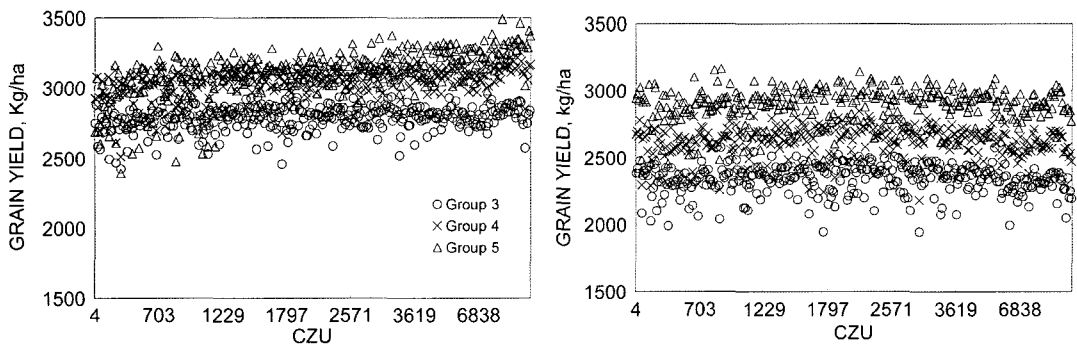


Fig. 2. Grain yields of 3 soybean cultivars at 342 land units estimated under the climatic conditions of 1971-2000 (top) and 2071-2100 (bottom).

해 수량이 감소하였다 하더라도 6월 중순에 파종을 하여 재배하였을 때보다 모든 품종에서 전체적인 수량

이 더 높았다.

Fig. 2는 연천지역의 342개 재배구역의 품종별 종실

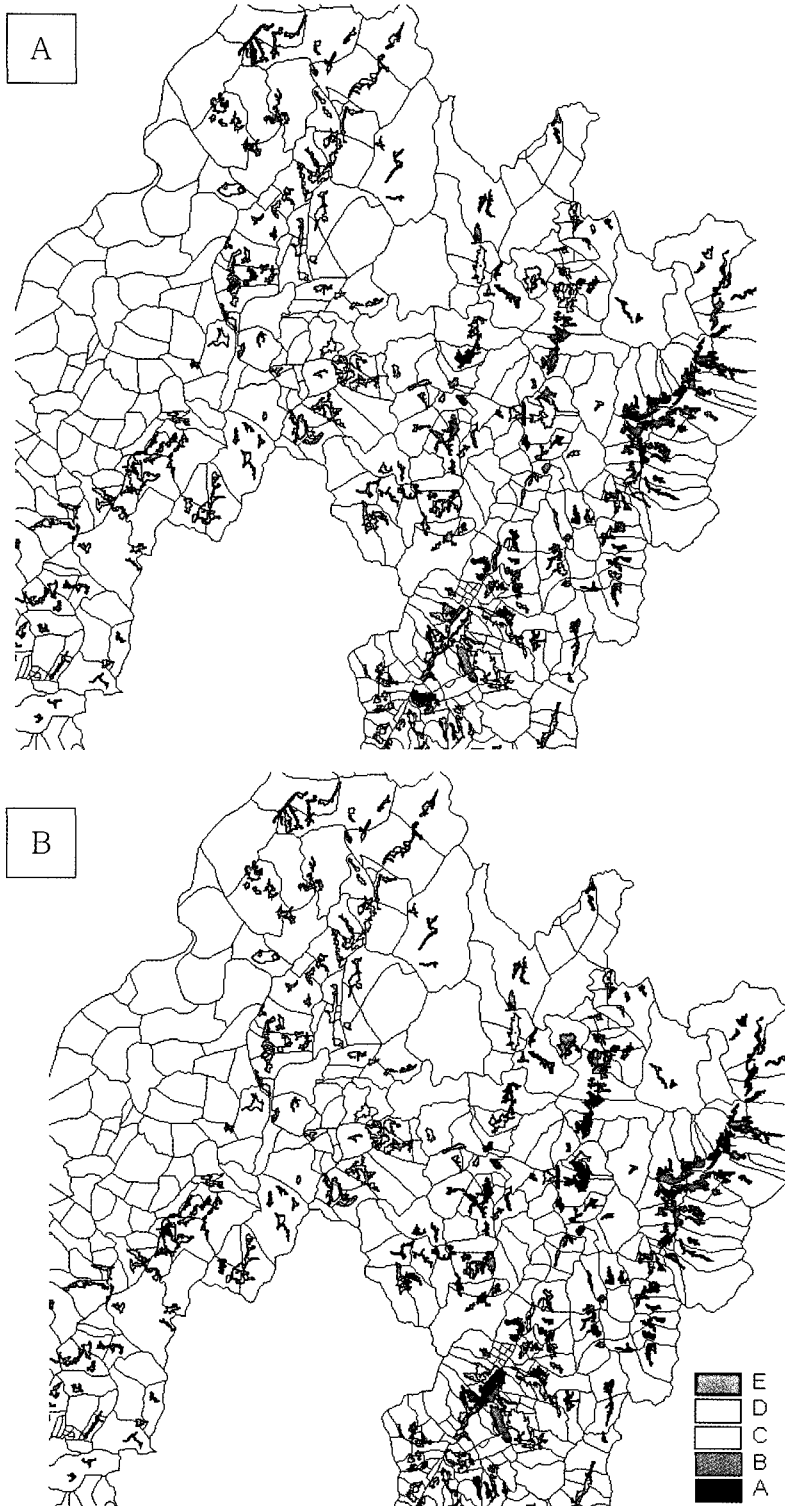


Fig. 3. Yield score distribution across 342 cultivation units in northern Gyeonggi province for the climatological normal years 1971-2000 (A) and 2071-2100 (B). Letter A stands for the highest productivity and E the lowest.

수량의 추정치이며, 재배구역의 번호가 낮을수록 북쪽에 위치해 있다. 1971-2000년의 평년에서의 종실수량은 모든 품종에서 남쪽으로 내려갈수록 수량이 증가하고 있지만 2071-2100년에는 남부 지방의 수량의 감소가 두드러져 모든 재배구역에서 위도에 의한 수량의 차이는 거의 없는 것으로 예측되었다. 이는 기온의 상승으로 인해 연천지역 보다 파주, 포천 지역의 수량감소가 더 클 것이라는 결과이다.

생육모의를 통해 얻은 결과를 종실수량을 토대로 5 등급으로 나누어 전체평균수량보다 3% 이상증수면 A, 1~3%이면 B, -1~1%이면 C, -1~-3%이면 D, 3% 이상 감수면 E로 등급을 매겼다. 평가된 종실수량지수는 GIS프로그램을 이용하여 다른 공간정보와 함께 중첩시켜 원하는 정보를 검색하고 표출할 수 있도록 하면 미래의 콩 재배 적지 이동을 예측하는데 도움을 줄 것이다.

적 요

육상생태계에 나타날 수 있는 기후변화의 영향을 평가하기 위해 생태계모형의 사용이 보편화되고 있다. 작물생육모형의 경우 포장단위로 적용할 수 있으므로 기후변화정보만 적절한 공간단위로 제공된다면 경관규모에서 상세한 공간변화를 예측할 수 있다. 경기북부 지역은 청정환경과 함께 고품질 콩 재배에 알맞는 기후시대이지만 기후변화에 의해 이 지역 내 콩 재배단지가 어떤 영향을 받을지 궁금하다. 향후 100년간(2011-2100) 예상되는 기후조건에서 선발된 10ha 이상 규모의 342개 단지를 대상으로 CROPGRO-Soybean에 의해 조중만생 콩 품종의 생육을 모의하였다. 이를 위해 3개 기후학적 평년(2011-2040, 2041-2070, 2071-2100)에 대해 월별 30m 격자형 기후변화 자료로부터 각 재배단지의 일 최고 및 최저 기온, 강수량, 강수일수, 일사량을 추출하고, 각 평년별로 일 기상자료를 통계학적 방법에 의해 무작위로 30년치씩 생성하였다. 미래 3개 평년의 기상자료에 의해 생육모형을 구동하여 342개 재배단지의 생장, 발육, 수량특성을 모의한 결과 온난화가 진행될수록 콩의 개화기와 성숙기가 단축되며, 전체적인 생육기간은 7~9일 정도 줄어들었다. 수량은 조중생종의 경우 온난화에 따라 1~15% 정도 감소하였는데 반해 만생종은 증가 후 감소하였다. 그 결과 현존하는 재배구역의 남북간 생산

성 차이가 미래에는 크게 감소하거나 품종에 따라 역전되는 현상이 기대된다.

REFERENCES

- Boote, K. J., J. W. Jones, and G. H. Hoogenboom, 1998: Simulation of crop growth: CROPGRO Model. In R. M. Peart and R. B. Curry (eds.), *Agricultural Systems Modeling and Simulation*. Marcel Dekker, New York. 651-692.
- Choi, K. G., J. K. Kim, S. C. Lee, W. H. Lee, and B. K. Jeon, 1980: Studies on ecological characteristics of some soybean (*Glycine max* L. Merr) cultivars. 2. Effects of daylength on flowering and other agronomic characteristics. *Korean Journal of Crop Science* **25**(4), 59-65.
- Chung, U., H. H. Seo, K. H. Hwang, B. S. Hwang, J. Choi, J. T. Lee, and J. I. Yun, 2006: Minimum temperature mapping over complex terrain by estimating cold air accumulation potential. *Agricultural and Forest Meteorology* **137**, 15-24.
- Kim, S. K., J. S. Park, Y. S. Lee, J. H. Jang, U. Chung, and J. I. Yun, 2004a: Development and use of digital climate models in Northern Gyeonggi Province-I. Derivation of DCMs from historical climate data and local land surface features. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **6**, 49-60.
- Kim, S. K., J. S. Park, Y. S. Lee, H. C. Seo, K. S. Kim, and J. I. Yun, 2004b: Development and use of digital climate models in Northern Gyeonggi Province-II. Site-specific performance evaluation of soybean cultivars by DCM-based growth simulation. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **6**, 61-69.
- Lee, H. S., 1976: Effect of defoliation on the grain yield of two soybean cultivars grown under different population densities. *Korean Journal of Crop Science* **21**(2), 250-258.
- Pickering, N. B., J. W. Hansen, J. W. Jones, H. Chan, and D. Godwin, 1994: WeatherMan: a utility for managing and generating daily weather data. *Agronomy Journal* **86**, 332-337.
- Regniere, J., 1996: Generalized approach to landscape-wide seasonal forecasting with temperature-driven simulation models. *Environmental Entomology* **25**(5), 896-881.
- Regniere, J., B. Cooke, and V. Bergeron, 1996: *BioSIM: A Computer-Based Decision Support Tool for Seasonal Planning of pest Management Activities. User's Manual*. Canadian Forest Service Info. Rep. SAU-X-116. 50p.
- Ritchie, J. T., D. C. Godwin, and U. Singh, 1990: Soil and weather inputs for the IBSNAT crop models. In: *Proceedings of IBSNAT Symposium Decision Support System for Agrotechnology Transfer*. University of Hawaii. Honolulu, USA.

- Shim, K. M., Y. S. Lee, Y. K. Shin, K. Y. Kim, and J. T. Lee, 2005: Changes in simulated rice yields under GCM 2×CO₂ climate change scenarios. *7th Conference on Agricultural and Forest Meteorology* 88-92.
- Yun, J. I., 2006: Climate change Impact on the flowering season of Japanese Cherry (*Prunus serrulata* var. *spontanea*) in Korea during 1941-2100. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 8(2), 68-76.
- 한화진 (대표저자), 2005: 기후변화 영향평가 및 적응시스템 구축 I. 경제인문사회연구회 협동연구총서 05-20-01, 한국환경정책평가연구원, 383pp.