기후변화에 따른 농업기후지수의 평가

심교문* · 김건엽 · 노기안 · 정현철 · 이덕배
국립농업과학원

(2008년 11월 12일 접수; 2008년 12월 14일 수정; 2008년 12월 23일 수락)

Evaluation of Agro-Climatic Indices under Climate Change

Kyo-Moon Shim*, Gun-Yeob Kim, Kee-An Roh, Hyun-Cheol Jeong and Deog-Bae Lee

National Academy of Agricultural Science, RDA, Suwon, Korea

(Received November 12; Revised December 14; Accepted December 23)

ABSTRACT

The increase in average air temperature over the past 100 years in northern Asia including Korea is the greatest (about 1.5°C) among the various regions of the world. Considering a further warming projected by the IPCC, fluctuations of agro-climatic indices under climate change must precede an evaluation of vulnerability. The purpose of this study is to analyze how climate changes represented by global warming have altered agro-climatic indices in Korea over various time scales. Drought index during the rice-transplanting period of 15 May to 5 June has changed toward the favorable with recently increased precipitation in the Taebaek Alpine and Semi-Alpine Zone, and Yeongnam Basin and Inland Zone. The frequency of low temperature occurrence below 13°C during the rice transplanting has decreased, while climatic production index (CPI) has fallen because of the decreased sunshine hour and increased temperature during the rice ripening period. We therefore concluded that the recent change of climate conditions was against the rice productivity in Korea.

Key words : Drought index, Climatic production index, Low temperature occurrence, Climate change

I. 서 론

농업생산은 지역 및 국지 기후조건에 필연적 영향을 받게 된다. 농업과 밀접한 관계를 가지는 기후조건을 농업기후라고 하는데, 농업기술이 진보함에 따라 기후조건과 농업과의 관계는 다각화되어가고 있다. 기후자원은 기온, 일사, 강수 등 여러 기후요소의 복합체로서 작물생산에 깊이 관여하는 것이다. 따라서 다수의 기후요소를 지수화하여 특정지역의 기후 자원량을 분석하고, 종합·판단하여 특정지역의 농업기후자원의 특성을 한 눈에 알 수 있게 할 필요가 있다(Choi and Yun, 1989). 농업기후자원의 특징을 단순 명료하게 표현하는 데는 기후지수가 널리 사용되고 있다. 농

업기후지수는 농업생산의 관점에서 기후자원을 평가하기 위한 것이고, 그 지수는 기후자원으로부터 생육과 수량을 추측하는 가능성과 여러 가지 농업기술의 실시 에 필요한 자료를 제공할 수 있다. 그러나 기후변화에 따라 농업기후자원의 분포도가 변화하고, 농업기후지수도 절대적인 것이 아니라 항상 변화한다. 최근의 기온상승은 계절별, 지역별로 증가 폭이 다르고 기온변동이 뒤따르기 때문에 작물 재배에도 크게 영향을 미칠 것으로 전망된다. 본 연구에서는 최근 기상환경의 변화에 따른 농작물의 생리·생태적 반응과 생산성 영향평가에 앞서, 지역별 농업생산성의 주요 지표가 되는 농업기후지수의 변동성을 과거와 현재로 나누어 비교·분석하였다.

* Corresponding Author : Kyo-Moon Shim (kmshim@rda.go.kr)

II. 재료 및 방법

농업에 있어서 기후자원의 평가는 유효온도의 출현 기간 분포, 한발과 저온출현율의 분포 등을 지수화한 농업기후지수를 이용하여 평가하는 방법이 사용되어 오고 있다. 본 연구는 기상청 산하 58개 지점의 종관 관측소에서 지난 30여 년간 관측한 일별, 그리고 월별 기상요소를 이용하여 농업기후지수의 전국적 분포를 따듯한 겨울철 지속의 시작해인 1988년을 기점으로 전·후 18년씩 두 기간(1969-1987년, 1988-2006년)으로 나누어 분석하였다. 농업기후지수의 전국적 분포도는 격자분석 및 표출시스템(Grid Analysis and Display System: GrADS)을 사용하였다. 이 시스템의 격자점의 간격은 $0.1 \times 0.1^\circ$ 로 하였고 각 격자의 내삽은 거리역산가중법(Inverse Distance Weighting; IDW)을 이용하였다. 거리역산가중법은 내삽을 하려는 위치의 거리로부터 근처에 측정된 값이 있으면 가중치가 커지고 멀어질수록 가중치가 작아지는 방법이다(Barnes, 1964).

지역별 벼 재배 기간 중의 기후 자원량을 정량적으로 나타내기에는 어려우나 특별한 기상재해가 없으면 기후생산력지수(climatic production index: CPI)에 의하여 평가가 가능하다. 기후생산력지수는 출수기부터 출수기간 40일간의 평균기온 및 일조시간과 벼 수량과의

관계식에서 다음과 같이 계산된다.

$$\text{기후생산력지수(CPI)} = \text{DS}[0.187 - 0.0034(\text{Ta} - 22.7)^2] \quad (1)$$

여기서, DS와 Ta는 출수 후 40일간의 평균 일조시간과 기온이다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 식물온도 출현지속기간의 변화

일 평균기온이 5°C 이상인 일수를 나타내는 식물기간은 봄에 일 평균기온이 5°C 이상이 되면 월동작물이 생육을 다시 시작하고, 가을철에는 5°C 이하로 기온이 내려가면 낙엽이 저서 겨울잠에 들어가게 되므로 과수와 같은 영년생 작물의 재배관리에 중요한 지표가 되는 기간이다. 특히 과수의 생육은 5°C 이상이 되는 때부터 시작되므로, 발아기와 개화기의 이르고 늦음은 그 지역의 식물기간이 시작된 이후부터의 일별 평균기온의 높고 낮음과 밀접한 관련이 있다.

최근 18년간(1988-2006년) 제주도 지역을 제외한 수원 등 56개 지역의 식물온도의 평균 출현초일은 3월 7일로 과거 18년간(1969-1987년, 3월 12일)보다 평균 5일 빨랐고, 평균 출현종일은 11월 23일로 평균 3일이 늦춰져서, 출현지속기간은 약 9일정도 길어진 것으로 조사되었다(Fig. 1). 최근 18년간의 평균 식물

Fig. 1. Changes of vegetation period (days over 5°C) for the periods of 1969-1987 and 1988-2006.

기간은 대관령지역이 210일 정도로 가장 짧았고 중부 내륙지방은 250일 내외, 남부지방은 270일 내외였으며, 부산지역을 중심으로 한 남부해안지역이 280일 이상으로 가장 길었다.

3.2. 작물온도 출현지속기간의 변화

일 평균기온이 10°C 이상이 되면 여름작물은 생육을 시작하고, 월동작물인 과수는 발아, 개화 등 발육이 한층 빠르게 진행되는 환경조건이 되므로 과수재배에서는 이 온도를 매우 중요시 한다. 한편 벼의 경우는 자연조건 하에서 15°C 이상이 되어야만 정상적인 육묘가 가능할 뿐 아니라 후기 생육의 등숙한계온도가 이 온도수준과 밀접한 관련이 있는 점을 고려하여 15°C 이상이 되는 날과 15°C 이하로 떨어지는 날간의 기간과 이 기간 중의 유효적산온도를 이용하여 벼의 재배가능기간과 재배지대를 구분하는 지표로 사용하고 있다.

최근 18년간, 일 평균기온 10°C 이상 출현지속기간은 전국 평균 214일로 과거 18년간(210일)보다 평균 4일정도 길어졌다(Fig. 2). 그러나 제천, 금산, 임실 등 태백준고랭지 및 소백산간지에서는 최근의 온도상승에도 불구하고, 오히려 2-4일 정도 짧아진 것으로 조사되었다. 최근에 작물온도 출현지속기간이 가장 크게 늘어난 지역은 수원, 청주, 대전 등 중부의 일부 지역으로 과거 18년간보다 10일 이상 길어진 것으로

조사되었다.

유효온도 15°C 이상으로 벼의 본답 모내기 가능해지기 시작하는 시기는 수원 등 56개 지역의 평균이 4월 27일(DOY: 117일)로 과거 18년간보다 4일정도 빨라졌다(Fig. 3). 지역별로는 태백산맥 중심의 산간지역에서 5월 10일-5월 20일, 중부지방은 4월 25일-5월 5일, 남부지역은 4월 20일-4월 25일경이 되는 것으로 조사되었다. 유효온도 15°C 이상의 벼 작물생육기간은 전국 평균 165일로 과거 18년간(161일)보다 평균 4일정도 길어졌다(Fig. 4). 그러나, 속초, 제천, 임실, 문경지역 등에서는 작물기간이 오히려 5일 이상 짧아진 것으로 조사되었다. 최근 18년간의 작물온도(15°C) 지속기간은 조사지역 중에서 대관령지역이 99일로 가장 짧았고, 포항지역(189일)이 가장 길었는데, 두 지역의 차는 90일 정도였다.

3.3. 벼 이앙기의 한발지수 변화

봄철 강수 부족에 의한 한발은 우리나라 수도재배에 있어 매우 중요한 제한요인 중의 하나이다. 4-6월의 적산증발량과 강수량의 비(此)인 벼 이앙기 한발지수의 전국적인 분포를 조사하면 대구를 중심으로 한 영남내륙 산간 및 분지지역이 우리나라에서 한발이 가장 심한 곳으로 평가되고, 한발지수가 1.0 이상인 곳은 남해안지대를 제외한 대부분으로서 이앙기에 물 부족현

Fig. 2. Changes of crop growth period (days over 10°C) for the periods of 1969-1987 and 1988-2006.

Fig. 3. Changes of the first appearance date (in DOY) of daily mean temperature 15°C for the periods of 1969-1987 and 1988-2006.

Fig. 4. Changes of rice growth period (days over 15°C) for the periods of 1969-1987 and 1988-2006.

상이 심할 것으로 분석된다(농촌진흥청, 1986).

따뜻한 겨울철 현상이 뚜렷하게 지속된 1988년을 기점으로 그 후 18년(1988-2006년)과 그 전 18년(1969-1987년)의 벼 이앙기에 있어서, 한발 위험도의 전국적 분포도의 변화를 나타내면 Fig. 5와 같다. 벼 이앙기의 한발지수는 태백고냉 및 준고냉지, 그리고

영남내륙 산간 및 분지지역을 중심으로 개선되고 있으나, 근래에 증가한 강수량에 비해서(전국평균 9% 증가: 1,267→1,380mm), 그 개선 폭은 적은 편이었다(전국평균 4.3% 개선: 1.17→1.12). 일반적으로 이앙기의 한발지수가 0.9이하이면 위험도가 적고(少), 1.2-1.3 범위는 위험도가 많으며(多), 1.4이상에서 위험도가 심

Fig. 5. Changes of drought index during rice transplanting period for the periods of 1969-1987 and 1988-2006.

Fig. 6. Changes of occurrence rate (%) of low temperature during rice transplanting period for the periods of 1969-1987 and 1988-2006.

하다고(甚) 한다.

3.4. 벼 이앙기의 저온출현을 변화

벼 작물은 이앙기 저온의 영향으로 이앙 후 활착불량과 생육부진에 의한 분얼(分蘖) 감소, 생육 지연 등으로 출수가 늦어지게 되면 가을철 냉해의 위협을 받게 된다. 벼 이앙기의 저온출현율은 이앙시기를 5월

15일부터 6월 5일로 한정하고, 저온출현 한계온도는 육묘방법에 따라 다르나 평균기온 13°C를 기준으로 하였을 때, 최근에 지구온난화와 더불어 이앙기의 저온출현율 2%의 등치선이 서해안을 중심으로 북상하여 전국적으로 저온위험도가 낮아진 것으로 조사되었다 (Fig. 6). 그리고 태백고냉 및 준고냉지대와 동해안중부와 북부해안지대의 저온출현율도 낮아지고 있는 것

Fig. 7. Changes of climatic productivity index for the periods of 1969-1987 and 1988-2006.

으로 분석되었다. 일반적으로 벼 이앙기의 저온출현율이 2%이하이면 위험도가 적고(少), 6.1-9.0 범위는 위험도가 많으며(多), 9.0%이상에서 위험도가 심하다고(甚) 한다.

3.5. 기후생산력지수의 변화

수원의 기후생산력지수(CPI)를 1.0으로 하였을 때, 각 지역의 상대적 CPI를 보면, 태백산맥을 중심으로 한 산간고령지와 동해안 중북부지대는 0.9이하로 낮으며, 같은 산간 고령지라 할지라도 소백산맥 일대는 CPI가 비교적 높고, 같은 위도 상에서 동·서를 비교하여 보면 영동지역은 0.9-1.0인데 비하여 중 서부 및 남부지역은 1.0이상을 보이고, 충남 보령을 중심으로 한 서해안 지역이 다른 지역보다 CPI가 높게 분포하고 있다. Fig. 7에서 보듯이, 최근에 CPI는 전국적으로 낮아지는 경향이였다. 이는 등숙기간의 일조시간의 감소와 등숙기간의 기온상승에 기인한 것으로 분석되었다.

3.6. 무상기간의 변화

서리는 맑고 바람이 없는 조용한 봄·가을의 야간에 많이 형성되는데, 가을에 내리는 첫서리 출현일(초상일)은 내륙지방이 10월 중순으로 빠르며 해안지방은 다소 늦고 남부 해안지방은 11월 중순경이다. 이에 비하여

봄의 끝서리 내리는 날인 만상일은 해안지방이 3월 하순이며, 내륙지방은 4월 중순, 산간지방은 4월 중순으로 늦다(농촌진흥청, 1986). 무상기간은 농작물의 재배적부를 결정하는데 많이 이용되며, 여름작물의 경우는 대개 서리가 내리지 않는 기간에 재배하고 벼의 경우에도 서리가 가장 빠른 극 초상일과 가장 늦은 극 만상일의 출현시기를 중요시하고 있다. 수원 등 21 지역에서 지난 35년간(1971-2005년) 동안 관측된 초상일(첫서리)과 만상일(끝서리)의 출현시기를 연도별로 나타내면 Fig. 8과 같다. 최근 지구온난화로 우리나라의 평균 초상일은 10년에 2.9일씩 늦어지는 반면에, 만상일은 10년에 3.8일씩 빨라져, 서리가 내리지 않은 무상기간은 10년에 6.7일씩 길어지고 있다. 즉, 수원 등 21지역의 평균 무상기간은 1970년대의 207일에서 2000년대에는 225일로 18일정도 길어졌다. 1970년대의 초상출현일은 수원 등 21지역의 평균이 10월 29일경이었는데, 2000년대에는 11월 6일로 8일 늦어졌다. 반면에, 1970년대의 평균 만상출현일은 4월 4일 경이었는데, 2000년대에는 3월 24일경으로 12일 빨라졌다.

3.7. 기후학적 적정 벼 출수기 변화

우리나라에서 벼에 알맞은 출수기는 출수 후 40일간의 일 평균기온으로 결정한다. 일반적으로 자포니카

Fig. 8. Trends of first frost date, last frost date, and frostless period for 35 years.

Fig. 9. Changes of duration of optimum rice heading date at Suwon station.

벼가 최고수량을 내는 등숙기간의 일 평균기온은 22°C이고, 안전수량을 내는 일 평균기온의 범위는 21~23°C로 알려져 있다. 반면에 통일형벼는 자포니카 벼보다 알맞은 등숙기온이 높아서 최고수량을 내는 일평균 기온은 25.6°C 추정되고 있다. Fig. 9는 수원지역의 연도별 기후학적 적정 벼 출수기 변화를 표현한 것이다. 지구온난화로 최근 우리나라는 기상학적으로 알맞은 벼 출수기의 출현날짜가 늦춰지는 것으로 조사되었다. 즉, 2000년대의 적정 출수시작일과 종료일이 1970년대보다 7일정도 늦춰진 것으로 분석되었다. 따라서 벼 이앙시기의 재조정 등 작부체계 개선이 요구되며, 벼 이앙기가 너무 빨라지면 등숙기의 고온으로 수량이 줄어들고 미질이 떨어질 우려가 있는 것으로 예측된다.

적 요

지난 46년간(1961-2007년) 연도별 겨울철의 평균기온을 분석한 결과, 1980년 후반부터 겨울철 고온화 현상이 뚜렷이 관측되었다. 그리고 연도별 이상기상의 발생 현황도 1988년을 기점으로 뚜렷한 차이를 나타내었는데, 그 이전에는 이상저온의 발생이 상대적으로 많았으나, 그 이후에는 이상고온이 훨씬 많이 발생한 것으로 조사되었다(농촌진흥청, 2007). 따라서 최근 지구온난화에 따른 기상환경의 변화가 우리나라의 농업기후자원량에 미친 영향을 벼 작물을 기준으로 조사하였다.

벼 이앙기의 한발지수는 강수량의 증가로, 태백고냉 및 준고냉지, 그리고 영남내륙 산간 및 분지지역을 중심으로 개선되고 있으나, 근래에 증가한 강수량에 비해서 개선 폭은 다소 적은 편이었다. 최근 우리나라의 벼 이앙기의 저온 출현위험도는 전국적으로 낮아진 것으로 조사되었지만, 벼 등숙기간의 일조시간 감소와 기온상승으로 기후생산력지수는 오히려 낮아져, 우리나라 주변의 최근 기상환경이 벼 생산성에는 불리하게 작용하는 것으로 분석되었다. 또한, 최근 벼 출수기의 출현날짜가 늦춰지는 것으로 조사됨에 따라, 벼 이앙시기의 재조정 등 작부체계 개선이 요구된다.

REFERENCES

농촌진흥청, 1986: 한국의 농업기후특징과 수도기상재해대

- 책. 194pp.
농촌진흥청, 2007: 기후변화 대응 농업환경 영향평가 및
적응대책. 68pp.
Barnes, S. L., 1964: A technique for maximizing details in
numerical weather map analysis. *Journal of Applied
Meteorology* **3**, 396-409.
Choi, D. H. and S. H. Yun, 1989: Agro climatic zone and
characters of the area subject to climatic disaster in
Korea. *Korean Journal of Crop Science* **34** (s02), 13-33.
(in Korean with English abstract).