

기후변화에 따른 작물 생산성반응과 기술적 대응

신진철, 이충근, 윤영환, 강양순

작물시험장

Impact of climate variability and change on crop productivity

Jin Chul Shin, Chung Geun Lee, Young Hwan Yoon, Yang Soon Kang
National Crop Experiment Station

Abstract

During the recent decades, the problem of climate variability and change has been in the forefront of scientific problems. The objective of this study was to assess the impact of climate variability on crop growth and yield. The growth duration was the main impact of climate variability on crop yield. Phyllochron interval was shortened in the global warming situations. A simple model to describe developmental traits was provided from heading data of directly seeded rice cultivars and temperature data. Daily mean development rate could be explained by the average temperature during the growth stage. Simple regression equation between daily mean development rate(x) and the average temperature(y) during the growth period as $y = ax + b$. It can be simply modified as $x = 1/a * (y - b)$. The parameters of the model could depict the thermo sensitivity of the cultivars. On the base of this model, the three doubled CO₂ GCM scenarios were assessed. The average of these would suggest a decline in rice production of about 11% if we maintained the current cultivars. Future cultivar's developmental traits could be suggested by the two model parameters.

Key words : development rate, climate variability, rice, production decline

1. 머리말

최근 기후변화와 이상기상 발생에 대한 관심은 작물 환경분야 뿐만 아니라 모든 과학 분야의 중심연구 과제가 되어 오고 있다. 엘리뇨 현상 등에 따른 국지적인 기후 변화도 문제가 되지만 인구 증가 및 집중과 산업화 진전에 따른 화석연료 사용 급증에 따른 대기 중 온실 가스의 증가는 지구 온난화의 주범으로 문제시되고 있으며 앞으로 20년 후인 2020년에는 대기의 CO₂ 농도가 현재의 배가 될 것이란 예측과 더불어 이에 따른 여러 가지 대기 순환모델(GCM) 구동 결과는 우리나라가 속해있는 북반부 중위도 지방의 온도가 2-5℃ 상승하고 강수량이 증가 될 것으로 내다보고 있다. 이와 같은 결과가 도래하면 결과적으로 토양수분의 변화가 유래되고, 해수면의 상승은 물론 더욱 큰 국지적 고온 현상, 홍수, 한발 등이 일어날 것이다(Hought et al., 1996).

기후변화는 모든 인간 경제 활동에 영향을 미칠 것이며 모름지기 농업 생태계에 미치는 영향은 가장 예민하고 취약할 것이다. 아직 세계의 농업은 그것이 선진국이던 후진국이던 기후자원에 절대적으로 의존하고 있다는데 큰 문제가 있다((Downing, 1996; Watson et al., 1996). 기후변화의 작물 생산성에 대한 영향은 그것이 국지적이던 지역적이던, 국가적이던 세계적인 권역에서 그 중요성은 매우 크다(Freckleton et al., 1999; Gagil et al., 1999). 결국 작물의 수량은 온도, 강수량 같은 기상요인과 한해, 홍수, 태풍, 해일 같은 극한 상황 들의 빈도에 의해서 결정된다고 본다. 최근에 기후변화의 작물 생산성에 미치는 영향에 대한 연구는 지역적 또는 전세계적인 관점에서 많은 연구가 되었고(Harrison et al., 1995; Watson et al., 1996; Adams et al., 1999) 국내에서도 일찍이 관심을 가지고 연구된 바 있다(이 등, 1992; 윤 등, 1991).

지난 200년 동안 지구의 온난화를 주도해 온 온실 가스 중에서 64%가 탄산가스 때문인 것으로 분석되고 있으며(Alexandrov and Hoogenboom, 2000) 벼에서 탄산가스 농도가 340ppm에서 680 ppm으로 증가되면 온도가 적온일 때 약 30%의 건물 생산이 많아지며(Kimball, 1983) 이는 주로 광합성 작용이 증진되기 때문으로(Lemon, 1983; Cure and Acock, 1986) 물 이용 효율이 증진된다고 한다. 반면 작물 생산성에 미치는 온도의 영향은 매우 복잡하여 작물의 생산 시스템 전체에 영향을 미치고 기온이 상승함에 따라 작물 생산 기간이 급격히 줄어들고 이 작물 생산기간은 곡물의 생산이나 등숙에 매우 큰 영향을 미친다. 벼에서 32℃ 이상의 온도에서는 입실율을 크게 낮추는 요인이 된다. 특히 GCM 모델의 시나리오들은 강수량의 증가와 에어로졸 현상이 증가함을 예측하고 있으며 이는 일조량의 감소를 말하며 광은 작물의 물직생산에 직접 관여하는 에너지원으로서 중요한 역할을 하게 된다.

이와 주된 온실가스로서 대기 중 탄산가스의 증가는 기온 상승, 국지적 이상기상

의 발생 및 지구 온난화와 강수량, 일조시수 등은 복합적으로 작용하여 작물생산에 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구는 각 기상요소별로 작물에 미치는 영향을 검토하고 이들이 복합적으로 작용했을 때 작물생산성의 변동을 벼를 중심으로 한 시물레이션 방법으로 평가해 보며 그에 대한 대응방법을 모색해 보고자 한다.

2. 작물 생산과 온도 및 탄산가스 농도

가. 탄산가스 농도

탄산가스는 유기물을 구성하는 근본으로서 작물의 광합성작용의 소스로서 이용될 뿐 아니라 작물 생육에 필요한 호흡의 산물이기도 하다. 광합성은 물질생산의 기본작용이기 때문에 광합성 효율이 높아야만 작물의 생산성이 증가된다. 대기중의 탄산가스 농도 증가는 지구 온난화의 주범으로 문제시되고 있는데 Keeling et al.(1976)은 남극에서 1957년에서 1971년까지 연평균 8ppm의 탄산가스 농도가 증가되어 왔다고 보고하였고 이러한 경향은 북극에서도 관측되었는데 북극에서는 연간 1ppm 씩 증가되었다고 한다(Machta, 1979; Keeling et al., 1982). 그러나 탄산가스 농도의 연중 변화는 6ppm 이상이라고 하며 북반부에서 이와 같은 변화는 주로 광합성과 호흡에 의한 것이라고 하였다(Hall et al., 1975).

Allen et al.(1964)는 옥수수 밭은 80m 기둥의 공기량과 같은 양의 탄산가스를 흡수한다고 하였다. 일반적으로 대기 중 탄산가스농도가 증가하면 생장이 빨라지고, 엽면적이 커지며 분얼과 지경이 발달함과 동시에 잎이 두껍고 뿌리 발육이 왕성하며 지상부/지하부의 비율이 증가되고 아울러 건물중이 증가된다(Ford and Thorne, 1967; Gifford, 1977; Hofstra et al.,1977; Knecht, 1975; Krig, 1986; Madson, 1968; Tognor et al., 1967; Baker et al.,1983; Acock and allen, 1985). 콩에 계속적으로 탄산가스를 공급하면 협수와 입수가 증가 되지만 콩의 백립중에는 거의 영향이 없다고 한다(Brun and Cooper, 1967; Cooper and Brun, 1967; Hardman and Brun, 1971; Hardy and Havelka, 1977). 반면에 광합성에 의하여 탄산가스는 고정되지만 물은 증산작용에 의하여 기공으로부터 빠져나간다. 높은 탄산가스 농도에서는 기공의 전도도가 감소되며 수분 스트레스를 보인다고 하여(Rogers et al., 1981) 탄산가스 농도 증가에 따른 작물의 생리반응은 다양하게 보고되고 있다. 많은 보고에서 탄산가스 농도를 증가시키면 작물에서 물이용효율은 증가되지만(Wittwer, 1980; Rogers et al., 1981) 전체 물 소모량은 증대된다고 한다(Moriso and Gifford, 1984).

나. 온도

대기중 탄산가스 증가는 지구 온난화의 주된 원인으로 일반대기순환 모델의 계

산 결과에 의하면 북반구 중위도 지방의 대기온도는 약 4 - 5℃ 높아진다고 한다. 온도는 작물의 생육에 가장 크게 영향을 미치는 기상요인으로 생태계 결정의 일차적 요인이 된다. 작물의 생육에 필요한 에너지는 호흡에 의해서 나오는 것이며 온도의 등가는 호흡의 증가를 초래하게 된다. 그러나 아주 높은 온도에서는 작물의 조직에 장애를 입히고 호흡을 제해하는 요인이 되기도 한다. 옥수수 잎의 호흡은 45℃까지 증가하며, 사탕무의 잎에서는 적어도 35℃까지 호흡이 증가한다고 한다 (Nevins and Loomis, 1970). 콩, 목화, 수수 같은 작물의 잎에서는 온도가 40℃로 올라갈 때까지 호흡은 지수적으로 증가한다고 하여(Brown and Thomas, 1980) 대부분의 연구가 약 40℃까지는 온도가 올라갈수록 호흡은 지수적으로 증가를 한다고 보고하고 있다.

한편 온도는 광합성 작용에도 큰 영향을 미치는데 작물의 광합성 반응은 어떤 조건에서 측정이 되었느냐에 따라 각기 다르게 보고되고 있다. 15℃ 이상에서는 조건마다 다른 반면 15℃ 이하에서는 똑같이 반응한다(Acock, 1988). 즉 온도는 광량과 탄산가스 농도에 이어서 또 하나의 광합성 속도에 제한요인이 된다. 광합성속도는 온도가 높아질수록 광량이나 탄산가스 농도에 크게 영향을 받는다. 호흡은 온도가 높을수록 광량이나 탄산가스 농도에 영향을 받지 않고 지수형태의 증가를 하게 되나 광합성 속도는 같은 조건에서는 직선적 증가를 나타내며 특히 광이 부족하거나 CO₂ 농도가 낮으면 온도가 높아지는데 따른 광합성 속도의 증가량이 매우 감소하게 된다. 온도가 광합성 속도나 호흡에 중요한 영향을 미치는 것은 물론이거니와 전반적으로 작물의 발육 속도를 향상시킨다. 고온에서는 벼의 엽신 전개 속도가 빨라지고 영양생장기간과 생식생장기간이 각각 짧아지므로 평균기온 6℃ 상승하므로 생육기간이 약 10일 단축되었다고 한다(Baker et al., 1989). 따라서 지구 온난화에 따른 생육기간에 온도상승은 전체 생육기간을 단축시켜 수량감소의 원인이 된다고 하였다(Shin and Lee, 1995; 윤 등, 1991; 이 등, 1992).

3. 연구 재료 및 방법

가. 발육단계 추정

작물의 정확한 발육단계라는 것은 작물의 재배 관리나 적지에 적기재배라는 관점에서 매우 중요한 현상이다. 더구나 지구 온난화와 그에 따른 기후변화의 영향을 평가하기 위해서는 정확한 생육 반응의 연구는 필수적이라 하겠다. 따라서 1998년과 1999년 수원 작물시험장 시험포장에서 대안벼 등 10 품종을 표 1과 같이 공시하여 파종기를 다르게 직파한 후 출수기를 조사하여 수원 기상대 기상자료를 이용 분석 발육 예측 모델을 설정하였다.

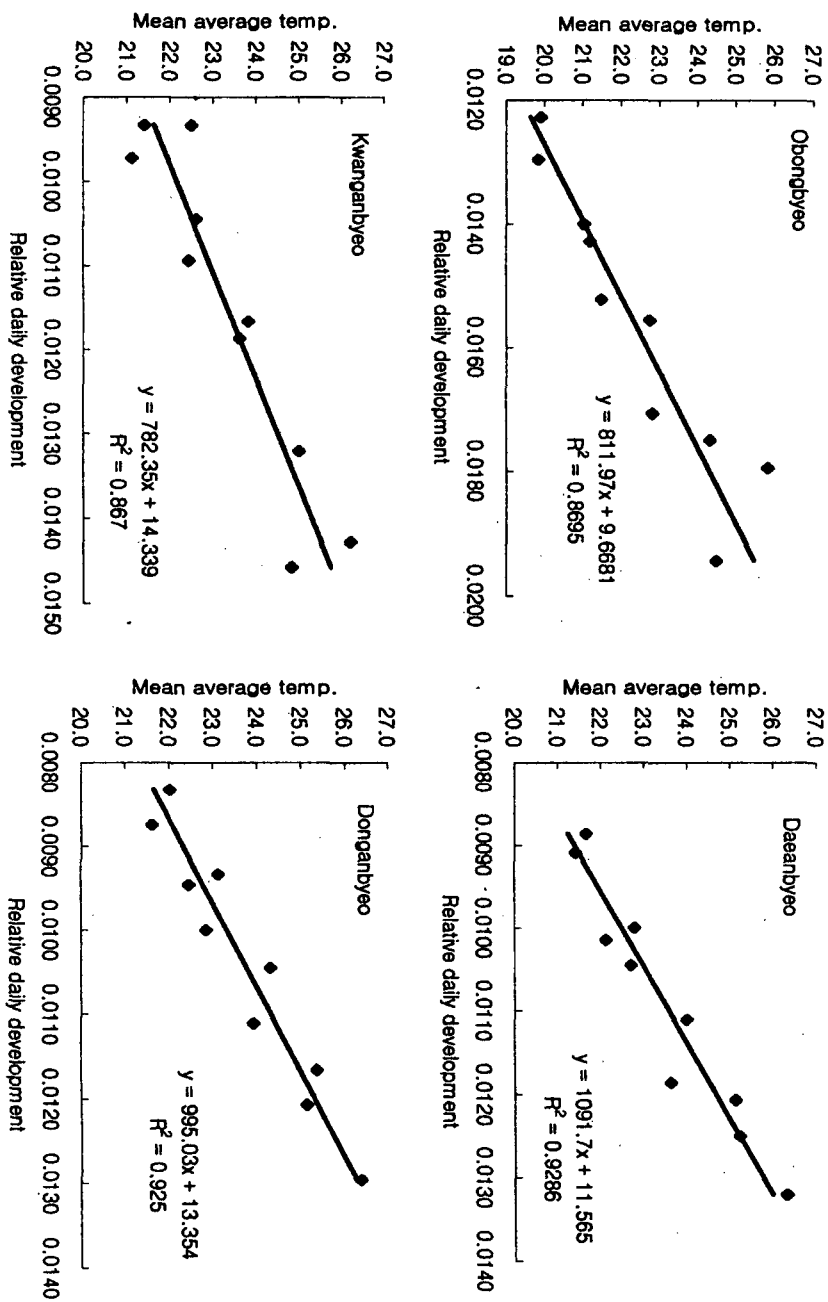


Fig 1. Relationship between relative daily development and mean average temperature during vagitative growth in various rice cultivars.

Table 1 Cultivars used to parameterize for development model and sowing dates.

Cultivar	Sowing Date	
	1998	1999
Daeanbyeo, Ansanbyeo	May 1	April 25
Nonganbyeo, Daesanbyeo	May 10	May 5
Juanbyeo, Hwaseongbyeo	May 15	May 15
Donganbyeo, Obongbyeo	May 25	May 25
Kwanganbyeo, Hwayongbyeo	June 5	June 5

나. 생육 시뮬레이션 모델과 적합성 검정

이 연구에 사용된 벼 생육 시뮬레이션 모델은 Oryzal(Kropff et al.,1993)을 이용하였는데 이는 국제미작연구소에서 주로 열대지방의 벼를 기준으로 그 특성을 모델화 하였기 때문에 직접 중위도 온대지방의 자포니카 벼에 이용하기는 어렵다. 따라서 이를 자포니카 품종과 중위도 온대지방 벼의 생육특성에 맞게 변형한 것 (Shin and Lee, 1995)을 사용하였다. 또한 이 모델의 적합성을 검정하기 위하여 1977년부터 1999년까지 농촌진흥청에서 대형과제로 수행한 신품종 개발 공동연구 중 각 지역 적응 품종선정시험 자료를 이용하였다.

다. 기후변화 시나리오에 따른 생산성 변동

기후 변화 시나리오는 GFDL, GISS 및 UKMO-GCM 으로 예측된 한반도의 자료를 이용하여 1997년 1998년 및 1999년 기상자료에 적용 각 지역별 생산성 변동을 비교하였다. 여기에 적용한 품종은 발육단계 추정 모델에 대한벼 등 10개 품종을 공시하였다.

4. 벼의 발육단계 및 출수기 예측

모든 생물이 태어나서 죽을 때까지 일정한 기간이 걸리며 그 상대적인 생육기간이 나이라 할 수 있다. 그러나 나이로 나타낼 수 있는 작물의 발육 단계는 형태적인 특성으로 정확하게 구분할 수 없기 때문에 품종의 특성상 언제 어떻게 파종했다는 자료만으로 경험적으로 판단하게 된다. 더구나 작물의 발육단계의 정확한 진단은 그 시기의 생리적 반응을 이해하고 정확하고 정밀한 생육관리를 해주기 위해서 절대적으로 필요한 요소이다. 그렇기 때문에 벼의 나이를 상대적으로 나타낼 수 있고 계량화 할 수 있는 방법이 필요하게 된다. 상대적으로 발육단계를 표현하기 위하여 발아에서 출수까지를 상대적인 값으로 나타내고 발아할 때를 0, 출수할

Table 2. Varietal and seasonal variability of the duration from germination to panicle initiation, mean developmental rate and mean daily average temperature in rice

Cultivar	Sowing date		Days to P.I.		Mean DVR		Mean Daily average		Sum temp. To P.I.	
	1999	2000	1999	2000	1999	2000	1999	2000	1999	2000
광안벼	122	116	72	75	0.0097	0.0093	21.4	21.1	1606.3	1521.6
	131	126	75	67	0.0093	0.0104	22.6	22.5	1514.7	1688.3
	136	136	64	60	0.0109	0.0117	23.8	22.5	1429.9	1437.1
	146	146	59	53	0.0119	0.0132	25.0	23.6	1325.4	1394.3
	157	157	48	49	0.0146	0.0143	26.2	24.8	1284.6	1192.6
농안벼	122	116	64	70	0.0109	0.0100	20.7	21.0	1325.5	1467.5
	131	126	50	62	0.0140	0.0113	21.0	22.3	1051.0	1379.6
	136	136	59	56	0.0119	0.0125	22.2	23.7	1310.0	1325.9
	146	146	52	51	0.0135	0.0137	23.2	24.9	1206.5	1270.7
	157	157	45	47	0.0156	0.0149	24.7	26.2	1111.5	1231.9
대산벼	122	116	84	87	0.0083	0.0080	21.9	22.3	1836.3	1937.3
	131	126	76	78	0.0092	0.0090	22.6	23.3	1716.0	1820.3
	136	136	72	70	0.0097	0.0100	23.0	24.4	1656.0	1708.3
	146	146	63	63	0.0111	0.0111	23.9	25.5	1507.2	1603.6
	157	157	60	56	0.0117	0.0125	25.1	26.3	1505.4	1473.6
대안벼	122	116	77	79	0.0091	0.0089	21.4	21.7	1648.4	1711.3
	131	126	69	70	0.0101	0.0100	22.1	22.8	1526.1	1594.5
	136	136	67	63	0.0104	0.0111	22.7	24.0	1520.8	1511.8
	146	146	59	56	0.0119	0.0125	23.6	25.2	1394.3	1412.5
	157	157	58	53	0.0121	0.0132	25.1	26.3	1457.5	1395.1
동안벼	122	116	80	84	0.0088	0.0083	21.6	22.0	1729.0	1849.7
	131	126	74	75	0.0095	0.0093	22.5	23.1	1662.1	1734.5
	136	136	70	67	0.0100	0.0104	22.8	24.3	1599.2	1628.7
	146	146	63	60	0.0111	0.0117	23.9	25.4	1507.2	1521.8
	157	157	58	54	0.0121	0.0130	25.1	26.4	1457.5	1423.6
안산벼	122	116	61	66	0.0115	0.0106	20.5	20.6	1249.7	1356.5
	131	126	54	57	0.0130	0.0123	21.3	21.7	1152.4	1238.3
	136	136	53	54	0.0132	0.0130	22.0	23.5	1165.8	1271.2
	146	146	52	49	0.0135	0.0143	23.2	24.8	1206.5	1216.3
	157	157	42	49	0.0167	0.0143	24.5	26.2	1030.9	1284.6
오봉벼	122	116	54	57	0.0130	0.0123	19.8	19.9	1071.3	1134.9
	131	126	50	49	0.0140	0.0143	21.0	21.2	1051.0	1038.3
	136	136	46	45	0.0152	0.0156	21.5	22.7	987.9	1023.1
	146	146	41	40	0.0171	0.0175	22.8	24.3	935.2	972.4
	157	157	36	39	0.0194	0.0179	24.5	25.8	881.1	1006.2
주안벼	122	116	73	77	0.0096	0.0091	21.2	21.5	1547.1	1658.7
	131	126	68	69	0.0103	0.0101	22.1	22.7	1500.4	1567.3
	136	136	65	61	0.0108	0.0115	22.5	23.9	1463.7	1457.1
	146	146	57	55	0.0123	0.0127	23.5	25.2	1342.1	1383.4
	157	157	52	49	0.0135	0.0143	25.1	26.2	1305.5	1284.6
화명벼	122	116	80	83	0.0088	0.0084	21.6	21.9	1729.0	1820.5
	131	126	74	75	0.0095	0.0093	22.5	23.1	1662.1	1734.5
	136	136	71	67	0.0099	0.0104	22.9	24.3	1626.9	1628.7
	146	146	65	60	0.0108	0.0117	24.0	25.4	1558.0	1521.8
	157	157	62	54	0.0113	0.0130	25.2	26.4	1560.1	1423.6
화성벼	122	116	71	74	0.0099	0.0095	21.1	21.3	1498.6	1579.8
	131	126	64	69	0.0109	0.0101	21.9	22.7	1399.1	1567.3
	136	136	64	61	0.0109	0.0115	22.5	23.9	1437.1	1457.1
	146	146	56	55	0.0125	0.0127	23.5	25.2	1313.2	1383.4
	157	157	51	51	0.0137	0.0137	25.0	26.2	1275.6	1337.9

때를 1로 표현한다. 이런 개념으로 보면 발아에서 시작하여 매일의 발육량을 적산하면 1이 된다. 여기에 발아에서 출수할 때까지를 유수형성기 이전과 이후로 나누어 이전을 영양생장기간, 이후를 생식생장기간으로 나누어 생각할 수 있으며 정상적인 환경 하에서 영양생장기간을 70%, 생식생장기간을 30%로 본다면 유수형성

기는 상대적 발육단계가 0.7이 된다. 한편 영양생장 기간에도 종자로부터 종속적인 생활에서 벗어나는 시기를 이유기라 보고 출수기까지의 생육기간중 상대적인 기간을 15%로 가정하고 이유기의 상대적 발육단계는 0.15가 되는 것으로 생각할 수 있다.

Table 3. The relationship between average temperature during vegetative growth and relative developmental rate in the major rice cultivars

Cultivar	Regression	R ²	RTR
Kwanganbyeo	y = 782.35x + 14.339	0.867	0.00128
Nonganbyeo	y = 907.19x + 11.69	0.827	0.00110
Daesanbyeo	y = 923.37x + 14.527	0.864	0.00108
Daeanbyeo	y = 1091.7x + 11.565	0.929	0.00092
Donganbyeo	y = 995.03x + 13.354	0.925	0.00100
Ansanbyeo	y = 957.59x + 10.143	0.757	0.00104
Obongbyeo	y = 811.97x + 9.6681	0.870	0.00123
Juanbyeo	y = 940.21x + 12.664	0.933	0.00106
Hwamyongbyeo	y = 1089.5x + 12.503	0.949	0.00092
Hwaseongbyeo	y = 1031.4x + 11.41	0.853	0.00097

RTR refers the relative response to heat unit(/°C)

벼의 발육단계를 나타내는 방법으로 열량지수, 생장도일 등을 사용하는데 일반적으로 발육에는 온도와 일장이 가장 크게 영향을 미치는 기상요인이다. 표 2는 직파 재배에서 영양생장기간 즉 발아에서 유수형성기까지 일수와 이 기간동안 평균 1일 발육속도, 발아에서 유수형성기까지의 평균기온의 적산량 및 그 기간의 일평균기온을 정리한 것이다. 하루 평균발육량 즉 일일 평균 발육속도는 품종에 따라서 크게 다르며 조생종, 중생종 및 만생종을 결정하는 요인이다. 그러나 파종에서 유수형성까지 일 평균기온은 품종간에 큰 차이가 없음을 나타낸다. 반면에 파종시기가 늦어지면 모든 품종의 생육기간동안 일평균기온은 높아짐을 알 수 있고 파종시기가 같을 경우 품종간 차이보다는 연차간 차이가 더 큰 것을 알 수 있다.

그림 1은 주요 벼 품종의 영양생장기간 동안 일평균 발육량과 그 기간동안 일평균기온의 평균치와의 관계를 나타낸 것이다. 일평균 발육량과 일평균기온과는 직선적인 관계를 나타내고 있으며 1차식으로 나타낼 수 있으며 품종간에 차이가 뚜렷함을 알 수 있다. 이 그림에서 나타난 1차식 $y = ax + b$ 의 일반식에서 파라미터 a와 b는 중요한 의미를 갖는다. 이를 다음과 같이 변형할 수 있다.

$$x = (y - b) * 1/a \dots\dots\dots (1)$$

이 식에서 a는 0이 아니기 때문에 x가 0일 때 즉 일 평균 발육량이 없는 경우 $y = b$ 가 된다. 이것은 발육이 시작되는 온도가 $b^{\circ}\text{C}$ 된다는 것을 의미하며 발육에 한

계온도가 된다는 것이다. 한편 $1/a$ 는 발육시작 한계온도 이상의 일 평균 온도에 그 값을 곱한 만큼 일일 발육량이 되는 것이다. 즉 일 평균온도 y 가 한계온도 b 보다 높아야($y > b$) 발육이 시작된다는 것을 의미하며 그때의 발육량은 $1/a$ 에 의해서 결정된다. 즉 한계온도 이상에서 온도 1도가 일일 발육에 미치는 정도를 나타내는 발육 온도 계수이다. 따라서 파종에서부터 매일의 발육량, x 를 적산하여가면 상대적인 발육단계가 된다. 즉,

$$DVS = \sum \frac{(y-b)}{a} \dots\dots\dots (2)$$

여기서 DVS는 상대적 발육단계이다. 이 값이 0.15이면 이유기, 0.7이면 유수형성기이며 1.0이면 출수기를 의미한다. 식 (2)는 매일 매일의 온도에 의해서 상대적 발육 단계를 계산해 낼 수 있는 발육단계 예측모델이며 간단한 파종시기 시험을 수행함에 의해서 한 품종에 대한 출수기 추정 모델의 파라미터를 구할 수 있는 방법이 된다.

표 3은 공시된 품종들의 생육기동안의 일 평균기온과 일 평균발육량과의 관계식을 나타낸 것이며 (1)식의 파라미터 a , b 값이다. 이 표의 a , b 값으로부터 그 품종의 출수특성을 알 수 있다. 우선 식 (1)의 절편 b 값으로부터 품종의 출수에 대한 온도의 감응성 정도를 알 수 있다. 즉 b 값이 작을수록 온도에 대한 출수 감응이 민감한 품종이며 b 값이 클수록 온도에 대한 출수반응이 둔감함을 나타낸다. a 값이 작을수록 출수까지 일수가 작으며 a 값이 크면 생육기간이 긴 품종이다. b 값이 크고 a 값이 적으면 조기파종 하면 생육일수가 길어지고 늦게 파종할수록 생육일수 단축이 커진다(광안벼의 경우). a , b 값이 모두 작으면 극조생종에 속하며(오봉벼) a , b 값 모두 크면 극만생종이 된다. 표 3에서와 같이 광안벼 대신벼 동안벼는 온도감응성이 약한 품종이며 오봉벼와 안산벼가 온도에 대한 반응성이 커서 년차간 온도변이가 큰 경우는 출수기 변이가 크게 나타날 수 있는 품종이다. 반면에 광안벼 같은 경우는 년차간 출수기 변이가 그렇게 크지 않게 된다.

그림 2는 공시한 10개 품종을 가지고 직파재배한 경우 파종기 및 연차간 출수기 변이와 식(2)의 모델에 의해서 생육기간동안의 평균기온을 가지고 모의했을 때 값을 나타낸 것이다. 이 결과 실측치와 예측치가 잘 일치하고 있으며 차이가 클 경우 5일 정도인 것으로 나타났다. 따라서 이 출수기 예측 모델은 지역이나 파종기 및 기후변화에 따른 출수반응을 분석하는데 유용하게 이용할 수 있을 것이다.

그림 3은 우리나라 65개 기상대 및 측후소로부터 측정된 1999년도 기상자료로부터 4월 30일에 파종했을 때 지역별 같은 품종의 출수 변이를 나타낸 것이다. 이와 같은 방법으로 어떤 품종의 적지가 어디이고 언제 파종해야 할 것인가에 대한 정보를 산출할 수 있을 것이고 기상자료와 파종일만 알면 식 (2)에 의해서 실시간

발육단계를 알 수 있을 것이다.

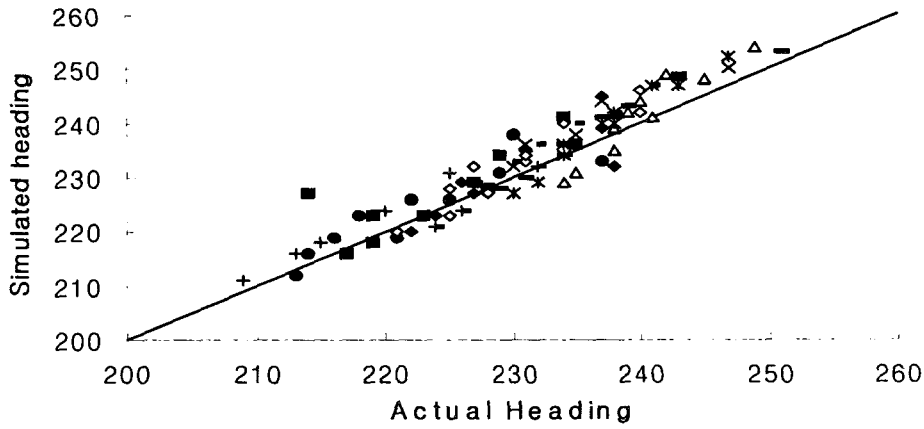


Fig. 2 Comparison of the heading dates between actual and simulated in 10 rice cultivars.



Fig. Spatial analysis of heading date of rice cultivar "Daeanby대" which was sown on April 30. Darker color represents the more lately heading site.

5. 기후변화에 따른 생산성 변동

가. GCM 시나리오와 벼 생산성 변동

우리나라 벼농사의 수량성이 지역간에 변이가 크다. 이러한 변이를 비교하기 위해서 국제미작연구소에서 개발한 Oryza1(Kropff et al., 1993)을 우리나라 품종에 적합하도록 개량한 Shin and Lee(1995)의 방법을 이용하였다. 그림에서 보는 바와 같이 생육모델에 의한 시뮬레이션 결과는 실측치와 아주 잘 일치하고 있다.

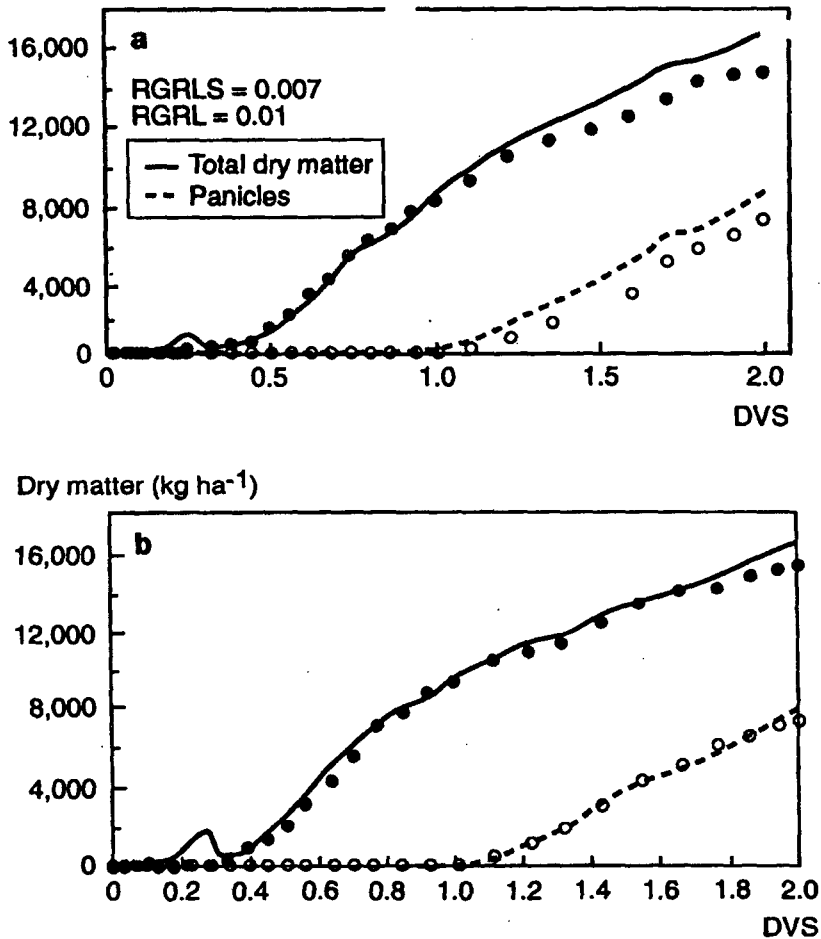


Fig. 10 Simulated and observed total dry weight and panicle dry weight in relation to development stage for rice cultivar "Hwaseongbydae"(after Shin and Lee, 1995)

이 모델을 이용하여 우리나라에서 기후 변화에 따른 생산성 변동을 모의하여 보았는데 탄산가스 농도가 1.5배, 2배 증가하였을 때와 온도가 1, 2, 4 °C 높아질 경우 그리고 GFDL, GISS 및 UKMO-GCM 시나리오에 따른 생육량 변화를 추정하여 본 결과 표11과 같다.

Table 11 Predicted change in potential rice yields in different Agroecological zones with change in CO₂ level only, temperature only and under scenarios predicted by the GFDL, GISS and UKMO GCMs.(Shin and Lee, 1995)

AEZ	Effect of CO ₂		Effect of temperature			Effect of GCM		
	1.5 × CO ₂	2 × CO ₂	+1°C	+2°C	+4°C	GFDL	GISS	UKMO
II	20.2	31.4	-11.0	-19.7	-35.0	-12.8	-3.1	-32.2
III	18.6	28.9	-7.5	-12.5	-23.3	0.0	9.5	-11.3
IV	16.2	24.6	-5.9	-10.8	-18.2	6.1	11.8	-0.6

탄산가스 농도의 증가에 따라 1.5배 증가에서는 평균 18.3%의 수량증가를 보이며 2배 증가시에는 약 28.3%증가하는 것으로 나타났다. 반면에 온도가 상승함으로 수량은 급격히 감소되는 것으로 나타났다. 반면에 탄산가스와 온도가 동시에 상승하면 남부지방에서는 수량이 감소하고 중부지방에서는 현상유지를 하며 중산간지대는 수량이 증가하는 것으로 나타났다.

Table . Predicted effect of climate change under the three doubled CO₂ GCM scenarios on overall production of rice stratified according to provinces.

Province	Current (t)	GFDL		GISS		UKMO	
		% incr.	(t)	% incr.	(t)	% incr.	(t)
Kyeonggi-do	995,883	2.8	1,023,604	12.0	1,115,876	1.2	1,007,961
Kangweon-do	325,127	2.9	334,611	9.6	356,179	-6.5	303,984
Chungbuk-do	448,043	0.8	451,658	11.6	500,119	-16.5	373,944
Chungnam-do	1,219,625	-9.2	1,107,970	0.0	1,219,061	-27.5	884,775
Cheonbuk-do	1,206,649	-11.8	1,064,533	2.1	1,231,790	-30.6	837,799
Cheonnam-do	1,402,648	-9.0	1,277,074	-0.4	1,396,478	-24.9	1,053,046
Kyeongbuk-do	1,188,958	-23.9	904,692	-14.9	1,012,278	-44.7	657,132
Kyeongnam-do	938,452	-8.8	855,644	0.1	939,789	-29.8	658,594
Total	7,725,385		7,019,786		7,771,570		5,777,235
Overall change (%)			-9.1		0.6		-25.2

지구 온난화와 탄산가스 증가에 의한 우리나라 각 도별 생산성 추이는 표와 같이 지역에 따라서 시나리오에 따라서 각각 다르게 나타나는데 중북부지방은 약간 증가하는 경향을 보이나 곡창지대인 남부지방은 수량이 감소하는 것으로 나타나 국가 전체적으로 보면 약 11%정도의 수량감소가 예측된다. 그러나 이와 같은 결과는 현재에 재배되고 있는 품종의 특성을 가지고 예측 한 것이며 대부분의 수량감소 원인은 기온 상승에 따른 전 생육기간 단축에서 오는 물질 생산의 감소와 온도가 높아지는 경우 불임이 증가되어 고온 해의 영향이 크다. 따라서 앞으로 지구 온난화에 대비한다면 생육일수에 대한 대비가 필요하고 그를 위한 유전자원의 확보 등 기온상승에 따른 생육반응을 철저히 규명하고 대비해야 될 것이다.

나. 기상변이에 따른 지역간 생산성 변동

작물에 있어서 다른 조건 즉 비료와 물과 같은 자원이 충분히 갖추어 졌을 때 기상변이에 따른 수량성의 변동은 우선적으로 그 작물의 생육기간과 가장 관계가 깊다. 수도의 경우 생육기간은 온도와 일장에 의해서 주로 영향을 받는다고 한다. 그림 3은 전국 65개 지역에 기상자료로부터 출수기를 모의하고 그 기상조건에서 잠재생산성과 생육기간과의 관계를 나타낸다. 생육일수가 짧으면 잠재 생산성도 낮음을 알 수 있다.

이는 지구 온난화 시나리오에 의한 생산성 추정에서 탄산가스가 배가되지 않으면 수량이 감소되는 것과 같은 결과이다. 즉 온난화에 따라 발육속도가 빨라지고 전체적인 생육기간이 단축되므로 생산성이 급격하게 감소되는 것으로 생각된다.

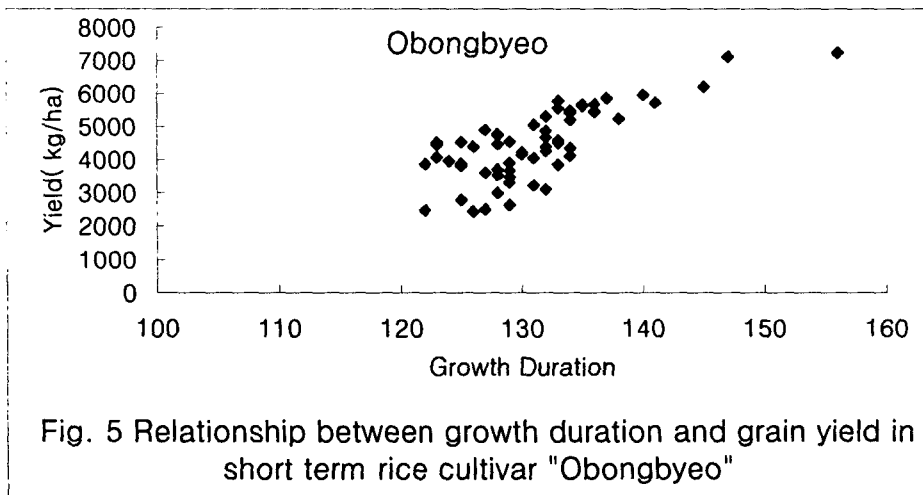


Fig. 5 Relationship between growth duration and grain yield in short term rice cultivar "Obongbyeo"

6 결론

기후변화에 따른 작물의 생산성 변화는 일차적으로 작물의 생육기간에 가장 큰 영향을 준다. 지역간에 생산성 차이도 일차적으로는 생육기간과 관계가 가장 크다. 지구 온난화에 따른 벼의 생산성은 전국적으로 약 11% 감소될 전망이다. 물론 이는 현재의 품종을 그대로 재배한다는 조건이다. 탄산가스가 배가되는 것은 일단 작물 생산성에 좋은 영향을 미친다. 그러나 고온은 생육기간을 단축시켜 수량 저하원인을 제공하는 것이다. 따라서 생육기간을 적당히 조절하면 수량은 높아질 가능성도 있다.

본 연구에서 고려된 출수기 예측모델(식 2)의 품종 파라메타를 보면 온도 반응이 낮으면서 단위온도에 따른 발육량도 낮은 품종이 즉 a 값이 크고 b값도 크면 온도에 대한 반응이 낮아서 온난화에 따른 생육 단축정도가 적으므로 수량저하가 적을 것이다. 또한 광지역성 품종이 되므로 기상 이변에 대한 수량 안정성이 높을 것이 틀림없다. 따라서 이러한 품종의 육성하기 위해서는 유전자원의 수집방안이 중요한 역할을 할 것이다.

인용문헌

- Acock, B. and L. H. Allen, Jr. 1985. Crop responses to elevated carbon dioxide concentration. P. 53-97. In B.R. Strain and J.D. Cure(ed) Direct effects of increasing carbon dioxide on vegetation. DOE/ER - 0238, US Dept. of energy, Carbon Dioxide Research Division, Washington, D.C.
- Allen, L. H. , Jr., C. S. Yocum and E. R. Lemon. 1964. Photosynthesis under field condition, 7. Radiant energy exchanges within a corn crop canopy and implications in water use efficiency. Agron. J. 56: 253 - 259
- Baker, D. N., H. z. Enoch and B. Acock. 1983. Plant growth and development. P. 107 - 130. In E. R. Lemon(ed.) CO₂ and Plants: the response of plants to rising levels of atmospheric Carbon dioxide. Wstview Press, Boulder, CO.
- Keeling, C. D. J. A. Adams, C. A. 땅뵈, Jr., and P. R. Guentherm. 1976. Atmospheric carbon dioxide variations at the south pole. Tellus 28: 552 - 564
- Baker, T. T. , L. H. Allen, Jr., K. J. Rowland Barford, J. W. Jones, P. H. Jones, G. Bowes and F. Laugei. 1989. Temperature and CO₂ effects on rice. 1988. Progress report. Joint program of the U. S. Dept. of Energy and U. S. Dept. of Agriculture, Washington, D. C.
- Brown, K. W. and J. c. Thomas. 1980. The influence of water stress preconditioning on dark respiration. Physiologia Plantarum 49: 205 - 209

- Brun, W.A. and R. L. Cooper. 1967. Effect of light intensity and carbon dioxide concentration on photosynthetic rate of soybean. *Crop science* 7: 451 - 454
- Cooper, R. L. and W.A. Brun. 1967. Response of soybeans to a carbon dioxide Enriched Atmosphere. *Crop Science*. 7: 455 - 457
- Ford, M. A. and G. N. Thorne. 1967. Effect of CO₂ concentration on growth of sugar beet. *Annals of Botany* 31: 118 - 122
- Gifford, R. M. 1977. Growth pattern, carbon dioxide exchange rate and dry weight distribution in wheat growing under differing photosynthetic environments. *Australian J. plant Physiol.* 5: 99 - 110
- Hall, C. A. C., C. A. Ekdahl, Jr. and E. E. Wartengerg. 1975. A fifteen - year record of biotic metabolism in Northern Hemisphere. *Nature* 255: 136 - 138
- Hardman, L. L. and W. A. Brun. 1971. Effect of atmospheric carbon dioxide enrichment at different developmental stages on growth and yield components of soybeans. *Agron. J.* 11: 886 - 888
- Hardy, R. W. F. and V. D. Havelka. 1977. Possible routes to increase the conversion of solar energy to food and feed by grain legumes and cereal grains(crop production): CO₂ and N₂ fertilization, foliar fertilization and assimilate partitioning. P. 299 - 322. In A. Mitusi, S. Mayachi, A. San Pierto and S. Tamura(ed) *Biological solar conversion*. Academic Press, New York
- Hofstra, G., J. D. Hesketh and D. L. Myhre. 1977. A plastochron model for soybean leaf and stem growth. *Can. J. Plant Sci.* 57: 167 - 175
- Keeling, C. D., R. B. Bacastow and T. P. Worf. 1982. Measurements of the concentration of carbon dioxide at Mauna Loa Observatory, Hawaii. P. 377 - 385. In W. W. Clark (ed.) *Carbon dioxide Review: 1982*. Oxford University Press, New York
- Knecht, G. N. 1975. Response of radish to high CO₂. *Hort. Sci.* 10: 274 - 275
- Kreg, D. T. 1986. Photosynthesis, dry matter production and growth in CO₂ enriched atmospheres. P. 193 - 225 In J. R. Mauney and J. M. Stewart(ed) *Cotton physiology the cotton Foundation*, Memphis, TN
- Machta, L. 1979. Atmospheric Measurement of carbon dioxide P. 444 -450 In W. Elliot and L Machta(ed.) *Workshop on the global effects of carbon dioxide from fossil fuels*. U. S. Dept. of energy, Carbon Dioxide Effects research and assessment Program, Washington, D. C.

- Madson, E. 1968. Effect of CO₂-concentration on the accumulation of starch and sugar in tomato leaves. *Physiologia Plant.* 21: 168 - 175
- Morison, J.I.L. and R.M. Gifford. 1984. Plant growth and water use with limited water supply in high CO₂ concentrations. *Australian J. Plant Physiology* 11:361 - 384
- Nevins, D.J. and R.S. Loomis. 1970. A method for determining net photosynthesis and transpiration of plant leaves. *Crop Science* 10: 3 -6
- Rogers, H.H., R.D. Beck, G.E. Bingham, J.D. Cure, T.M. Davis, W.W. Heck, J.D. Rawings, A.J. Riordan, N. Sionit, J.M. Smith and J.F. Thomas. 1981. Response of vegetation to carbon dioxide...005. Field studies of plant responses to elevated carbon dioxide levels (1981 progress report) . Prepared by the ARS Air Quality Research Unit and the Botany Dept., North Carolina State University, Raleigh. Joint Program of the U.S. Dept. of Energy and the US Dept. of Agriculture, Washington, D.C.
- 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. 1995. Modeling the impact of climate change on rice production in Asia. CABI International in association with International Rice Research Institute
- Tognoni, T., A. H. Halevy and S. H. Wittwer. 1967. Growth of bean and tomato plants as affected by root absorbed growth substances and atmospheric CO₂. *Planta.* 72: 43 - 52
- Wittwer, S.H. 1980. Carbon Dioxide and Climate Change: An agricultural perspective. *J. Soil water Consev.* 35: 116-120