

기후변화에 따른 국내 벼 품종과 재배기술의 적응성에 관한 고찰

서명철^{1,†} · 김준환² · 최경진¹ · 이윤호² · 상완규² · 조현숙¹ · 조정일¹ · 신평² · 백재경²

Review on Adaptability of Rice Varieties and Cultivation Technology According to Climate Change in Korea

Myung-Chul Seo^{1,†}, Joon Hwan Kim², Kyeong Jin Choi¹, Yun-Ho Lee², Wan-Gyu Sang², Hyeon Suk Cho¹, Jung-Il Cho¹, Pyeong Shin², and Jae Kyeong Baek²

ABSTRACT In recent years, the temperature of Korea has been rapidly increasing due to global warming. Over the past 40 years, the temperature of Korea has risen by about 1.26°C compared to that in the early 1980s. By region, the west region of the Gangwon Province was the highest at 1.76°C and the Jeonnam Province was the lowest at 0.96°C. As the temperature continues to rise, it is expected that the rice yield will decrease in the future using the current standard cultivation method. As a result of global warming, the periods in which rice cultivation could be possible in regions each year has increased compared those to the past, showing a wide variety from 110 days in Taebaek to 180 days in Busan and Gwangyang. In addition, the transplanting time was delayed by 3-5 days in all regions. The average annual yield of rice showed an increasing trend when we analyzed the average productivities of developed varieties for cooked rice since the 1980s, especially in the early 1990s, which showed a rapid increase in productivity. The relationship between the average temperature at the time of development and the rice yield was divided into the periods before and after 1996. The higher the average temperature, the lower the yield of the developed varieties until 1996. However, since 1996, the increase in the average temperature did not show a trend in the productivity of the developed varieties. The climate change adaptability of developed rice varieties was investigated by analyzing the results of growing crops nationwide from 1999 to 2016 and the change in the annual yields of developed varieties and recently developed varieties as basic data to investigate the growth status of the crops in the country. As a result of annual comparisons of the yields of Taebongbyeo (2000) and Ungwangbyeo (2004) developed in the early 2000s for Odaebeo, which was developed in the 1980s, the annual yields were relatively higher in varieties in the 2000s despite the increase in temperature. The annual yields of Samgwangbyeo (2003) and Saenuribyeo (2007), which were recently developed as mid-late-type varieties, were higher than those of an earlier developed variety called Chucheongbyeo, which was developed in the 1970s. Despite the rapid increase in temperature, rice cultivation technology and variety development are well adapted to climate change. However, since the biological potential of rice could reach its limit, it is necessary to develop continuous response technology.

Keywords : adaptation, climate change, global warming, rice breeding, rice farming

연간 강우량의 60% 이상이 여름에 집중되어 저습지가 많이 발생하는 우리나라의 기후조건에서 벼는 우리나라 농경지 특히, 저지대 등에 위치한 논에서 가장 쉽게 재배가 가능한 작물이다. 우리나라 토양은 대부분 약산성 토양이고

척박한 토양이 많음에도 벼는 상대적으로 비료요구량이 적고 연작장해도 거의 없고 우리나라 기후 적응성이 높아 조선시대에도 많이 재배되어 왔다. 벼 농사는 우리나라에서 가장 많은 면적이 재배되고 있으며 식량의 자급 및 안보에

¹농촌진흥청 국립식량과학원 작물재배생리과 농업연구관 (Senior Researcher, Crop Physiology and Production, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, Wanju 55365, Republic of Korea)

²농촌진흥청 국립식량과학원 작물재배생리과 농업연구사 (Researcher, Crop Physiology and Production, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, Wanju 55365, Republic of Korea)

[†]Corresponding author: Myung Chul Seo; (Phone) +82-63-238-6521; (E-mail) mcseo@korea.kr

<Received 18 October, 2020; Revised 4 November, 2020; Accepted 6 November, 2020>

있어서도 가장 중요한 작물이다. 현재에는 재배면적이 지속적으로 감소하고 있음에도 불구하고 벼가 미래에도 우리나라의 주요 작물로 자리매김을 할 것이라는 데에는 의문의 여지가 없다.

최근 온실가스 배출의 증가에 따라 온난화 등 기후 변동이 심해지면서 농업분야에도 많은 영향을 미치고 있으며 이에 대한 영향평가 및 적응에 대한 관심이 높아지고 있다. 1980년대부터 현재까지 우리나라 5년간 평균온도는 11.82°C에서 2010년 후반에는 13.28°C로 약 1.5°C가 증가한 것으로 나타났다(KMA, 2019). 이러한 수치는 온난화의 속도가 전세계의 평균보다 빠르게 진행되고 있음을 보여주고 있다.

2011년 기상청에서는 우리나라의 미래 기후변화 시나리오인 RCP 기반 새로운 시나리오를 발표하였다(NIMR, 2011). 발표된 시나리오에 따르면 온실가스 배출 추세가 현재와 같이 지속된다면 2100년대에는 온도가 약 6°C 증가하고 강수량도 약 20% 증가하고 한반도의 대부분인 아열대 기후를 나타내는 것으로 전망하고 있다. RCP 기반 기후변화 시나리오는 이전에는 A1B 시나리오가 발표되었으며 두 시나리오 모두 현재의 온실가스 배출 속도가 유지되었을 때 정량적인 온도 전망에는 차이가 있으나 기온 증가가 시간이 갈수록 빠르게 증가할 것으로 전망하고 있다.

기후변화에 따른 온난화 전망에 기반하여 많은 연구자들이 미래 벼의 생산성 변화에 대한 영향평가를 수행하였다. A1 시나리오를 기반으로 CERES-Rice 모형을 전국 시군구 단위에서 벼의 생산량 예측을 한 결과 2050년대에는 8.7%, 2080년대에는 16.5% 감소하는 것으로 전망되었다. 벼 생산량 민감도가 미래로 갈수록 매우 민감도로 변화하는 것으로 예측되었고 특히, 전라도 남서쪽 해안이 가장 민감도가 높은 것으로 예측되었다(Yoo *et al.*, 2007). RCP8.5 기후 시나리오 조건의 작물생육 모의에 근거한 우리나라 벼 생산량을 10년 간격 일기상 자료에 의해 CERES-Rice 모형을 이용하여 모의한 결과 전국의 모든 농경지에 벼를 재배한다고 가정하면 쌀(현미)의 잠재생산량은 2000년대 현재 14,863,633톤이지만 2090년대에는 11,734,019톤으로 줄어든다고 보고하였다(Kim *et al.*, 2012). KREI-KASMO 모형을 통해 RCP 시나리오에서 쌀의 단수와 재배면적 등을 고려하여 쌀 생산량을 추정된 결과 현재 생산량에 대비하여 2050년에는 약 17.8% 감소하는 것으로 보고하였다(Kim *et al.*, 2012).

지난 40년간 우리나라의 온난화는 빠르게 진행되어 왔으며 적극적인 정책적, 사회경제적 및 과학 기술적 노력이 이루어지지 않을 경우 더욱 빠르게 진행될 것이다. 우리나라 국민들의 주식으로 식량안보의 가장 중요한 위치를 감당해

온 벼는 온난화에 대응한 다각적인 연구들이 이루어져 왔고 현장에 보급되어 왔다. 작물의 기후변화 연구는 기후변화에 따른 직접적인 연구보다는 기본적으로 작물의 수량과 품질을 유지하고 피해를 저감시키기 위한 연구가 기후변화에 연계되는 경우가 많아 혼란스러운 부분도 많이 발생하고 있다. 따라서 본 연구에서는 식량작물에서 가장 많이 연구되어 왔던 벼의 생산과 관련하여 우리나라에서 기후변화와 온난화에 대한 적응에 대해 현재까지 이루어져 왔던 현황 및 기술개발 등을 분석 및 고찰을 함으로써 향후 벼의 기후변화 적응 기술개발의 방향성을 제시하고자 하였다.

우리나라 기후변화 양상

2018년은 계절변동이 매우 크고 무더위가 길고 심했던 한해로 폭염일수가 평년 9.8일에 비하여 무려 31.4일, 열대야일수가 평년 5.1일에 비해 17.7일에 달하였다. 강원도 홍천은 41.0°C로 관측 기록사상 최고를 기록하며 111년만의 극값을 기록하였다. 미래에는 온난화 속도가 더 빨라질 것이라는 전망이 우세하여 일반 국민들뿐만 아니라 농업인들의 염려도 높아지고 있다. 1979년부터 2018년까지 기상청에서 제공하고 있는 우리나라 연평균 기온 변화는 Fig. 1(a)와 같다. 연도별 편차가 심하지만 계속해서 증가하는 것을 알 수 있으며 연평균 온도변화에 대한 5년 가중평균을 하여 본 결과는 Fig. 1(b)와 같으며 연평균 온도가 매년 증가하고 있는 것을 명확히 알 수 있다. 80년대 초반 5년(1979-1983)과 가장 최근 5년을 비교하면 각각 11.98°C, 13.24°C로 1.26°C의 차이가 나며 이는 10년에 약 0.3°C가 증가하는 추세라고 할 수 있다. 동일 기간 최저기온의 상승은 1.40°C이며 최고기온의 상승은 1.06°C로 최저기온의 상승률이 더 높은 것으로 나타났다. 작물의 최소 생육이 시작되는 온도는 약 10-12°C로 알려져 있어 최저기온의 빠른 상승 속도는 작물의 파종 시기가 앞당겨질 수 있어 작부 기간의 증가에 따른 이모작 또는 이기작의 가능성의 증가 등 유리한 측면이 있다.

1979년부터 2018년까지 지역별 연 평균 기온을 5년 단위로 평균하여 분석한 결과는 Table 1과 같다. 최근 5년 평균 기온(2014-2018)을 보면 제주지역이 16.78°C로 가장 높았으며 강원도 영서지역이 11.86°C로 가장 낮게 나타났으며 그 차이는 4.92°C로 지역별 편차가 크게 나타나고 있는 것으로 분석되었다. 80년대 초반과 최근 5년의 기온을 보면 0.96°C로 온난화 속도가 가장 낮은 전라남도 지역을 제외하고 지난 40년간 모든 지역에서 1°C 이상 연 평균 기온이 증가하고 있는 것으로 나타났다. 강원도 영서 지역이

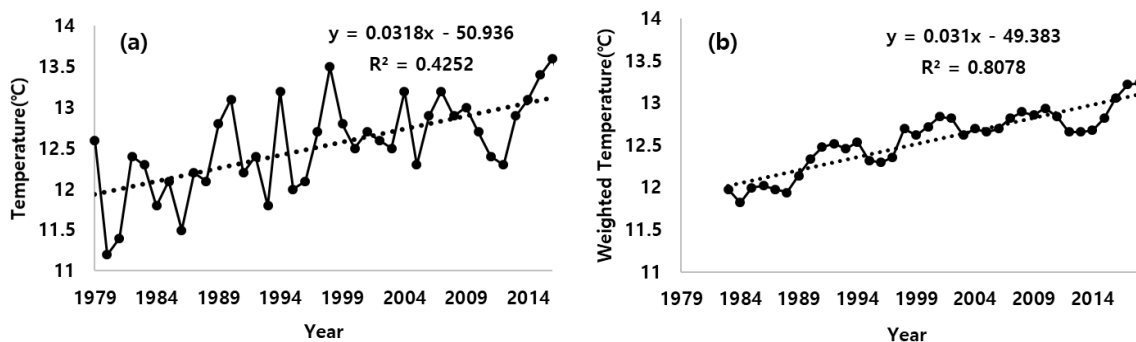


Fig. 1. Trends of annual average temperature (left, a) and annual 5-year weight average temperature (right, b) changes from 1979 to 2018 in Korea.

Table 1. Annual average temperature for 5 years from 1979 to 2018 and their differences according to region.

	Gyeonggi /Seoul	Gangwon (east)	Gangwon (west)	Chungbuk	Chungnam	Jeonbuk	Jeonnam	Kyeongbuk	Kyeongnam	Jeju
A (1979-1983)	11.24	12.34	10.10	10.82	11.46	12.40	13.34	12.12	12.88	15.64
B (1984-1988)	11.16	12.06	10.08	10.82	11.48	12.44	13.34	11.98	12.86	15.56
C (1989-1993)	11.94	12.62	10.60	11.32	11.90	12.94	13.88	12.46	13.24	16.14
D (1994-1998)	12.32	13.00	10.78	11.34	12.12	13.22	13.92	12.84	13.56	16.50
E (1999-2003)	12.18	12.76	10.96	11.52	12.06	13.10	13.70	12.60	13.44	16.56
F (2004-2008)	12.42	13.14	11.28	11.76	12.32	13.56	13.96	12.98	13.84	16.70
G (2009-2013)	11.92	12.76	10.96	11.40	12.04	13.22	13.82	12.80	13.58	16.46
H (2014-2018)	12.78	13.36	11.86	12.08	12.60	13.66	14.30	13.32	14.02	16.78
H-A	1.54	1.02	1.76	1.26	1.14	1.26	0.96	1.20	1.14	1.14

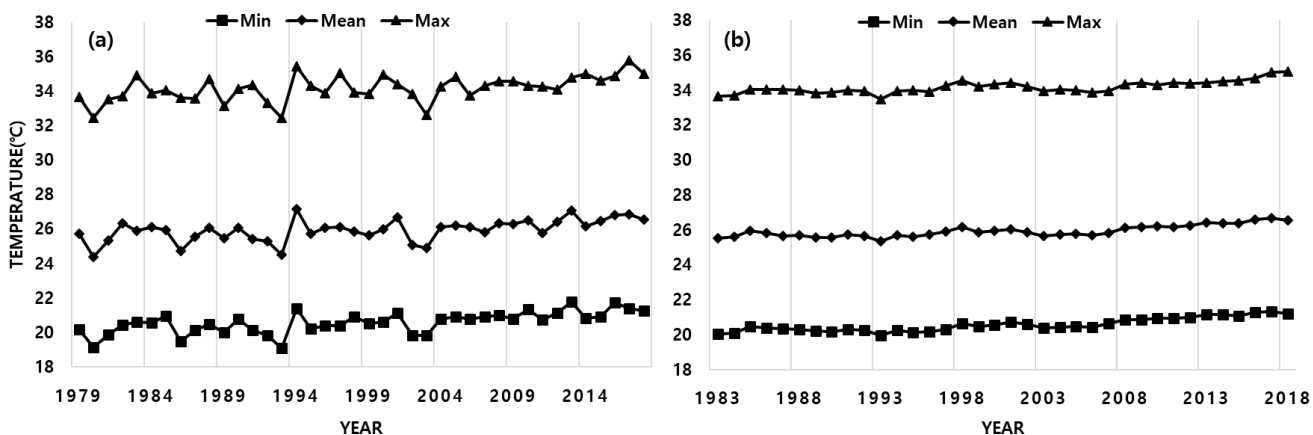


Fig. 2. Trends of annual average temperature (left, a) and annual 5-year weight average temperature (right, b) changes during rice cultivation periods (May to October) from 1979 to 2018 in Korea.

1.76°C로 가장 온난화가 빠르게 진행되었으며 다음으로는 경기도/서울 지역이 1.54°C로 높게 나타났다.

한편 우리나라에서 벼가 재배되고 있는 시기는 지역간의 차이는 있으나 대부분 5월에서 10월까지이며 1979년부터

2018년까지 벼 재배기간 연도별 최저, 최고, 평균 온도의 변화추세를 살펴보면 Fig. 2(a)와 같다. 전 기간 온도변화 추세와 유사하게 점차적으로 평균, 최저, 최고 온도 모두 연도별 편차가 있으나 지속적으로 상승하고 있는 것으로 평가되

며 2000년대 후반 이후로는 상대적으로 연도별 편차도 감소하는 양상을 나타내고 있다. 온도변화를 5년 가중평균값으로 계산하여 보았을 때 상승추세가 명확한 것을 알 수 있었으며 평균 온도에 비해 최저 온도의 편차보다 최고 온도의 편차가 더욱 큰 것을 알 수 있다(Fig. 2). 80년대 초반 5년(1979-1983)과 가장 최근 5년의 벼 재배기간 중 평균, 최저, 최고 기온의 차이를 비교하면 각각 1.04°C, 1.18°C, 1.41°C로 분석되었으며 전체 계절에 대한 연도별 평균 기온의 추세에서는 최저 기온이 주요 요인으로 분석된 것에 반해 벼 재배기간 중에는 최고기온의 상승 속도가 가장 높은 것으로 평가되었다. 최근 5년 벼 재배기간 최고 기온의

평균 값은 35.06°C로 매우 높게 나타났기 때문에 미래 벼의 생육의 가장 큰 제한 요인으로는 최고 온도에 영향을 받을 가능성이 높은 것으로 평가되었다.

벼는 재배기간 중 눈에 담수를 하여 재배하는 작물로 이앙기 한밭에 의한 용수부족과 집중호우에 따른 침관수, 등숙기 잦은 강우에 따른 도복 등이 강수량에 따라 생육과 수량에 영향을 미친다고 할 수 있다. 벼 재배기간 중 강수량의 연차별 변화를 보면 Fig. 3과 같았다. Fig. 3을 보면 6개월간 평균 1,017 mm로 재배기간 강우가 집중되고 있음을 알 수 있었으며 연도별 표준 편차는 212 mm로 약 600 mm에서 약 1,400 mm로 연도별 편차가 매우 큰 것으로 파악되었다. 따라서 집중호우 등에 따른 침관수 위험이 상시적이라 할 수 있어 배수 관리 등 대책이 필요한 것으로 판단되었다. 월별 강수량을 연도별로 변화하는 추이를 Fig. 4에 나타내었다. 7월과 8월에 가장 많은 강수량이 많았고 연도별 편차도 가장 심한 것으로 분석되었으며 특히 8월 강수량은 매년 편차가 심한 것으로 나타났다. 등숙기인 9월의 강수량의 연도별 편차도 상대적으로 크게 나타났는데 9월 말에서 10월의 잦은 강수는 벼의 수발아 확률을 높여 벼 수량에 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 10월의 연도별 강수량의 추이를 보면 최근 5년간 강수량이 증가하는 양상을 보이고 있어 수발아 위험성이 더 높아지고 있는 것을 알 수 있었다.

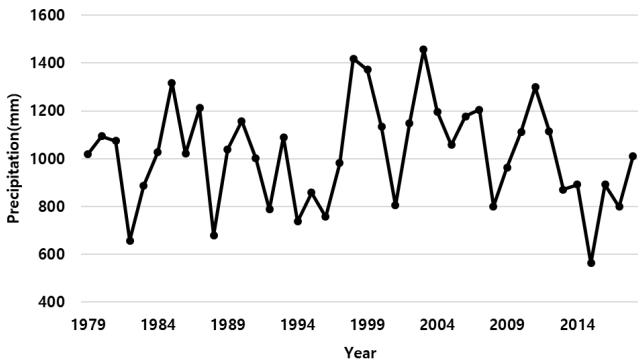


Fig. 3. Trends of annual precipitation during rice cultivation periods (May to October) from 1979 to 2018 in Korea.

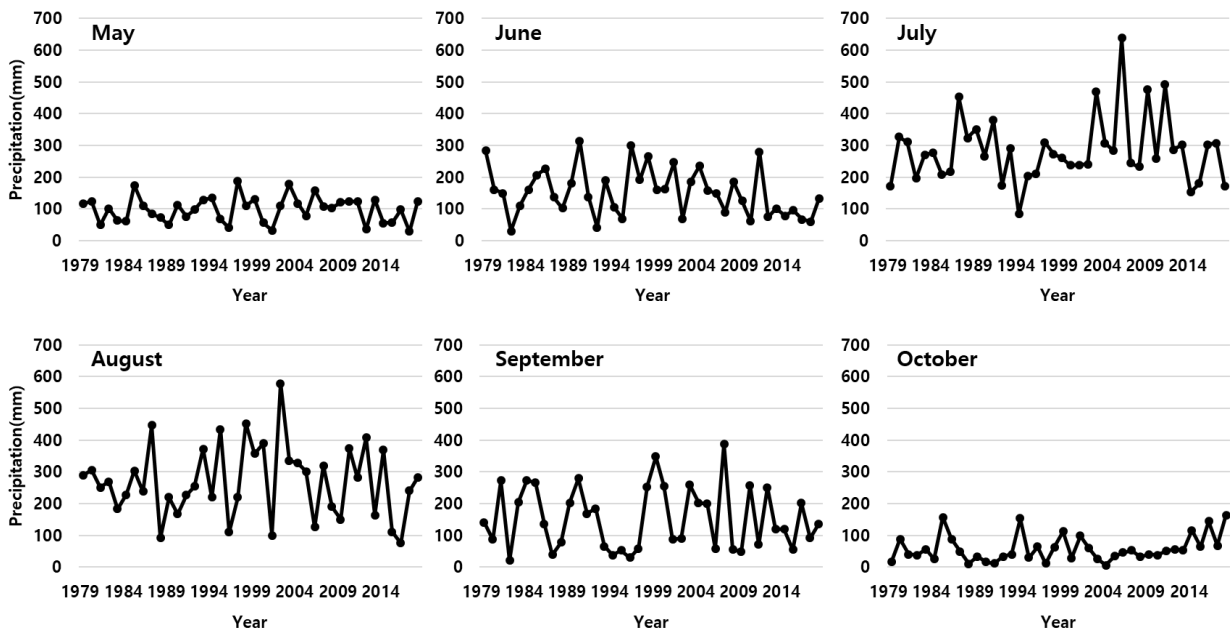


Fig. 4. Trends of annual precipitation for the months during rice cultivation periods (May to October) from 1979 to 2018 in Korea.

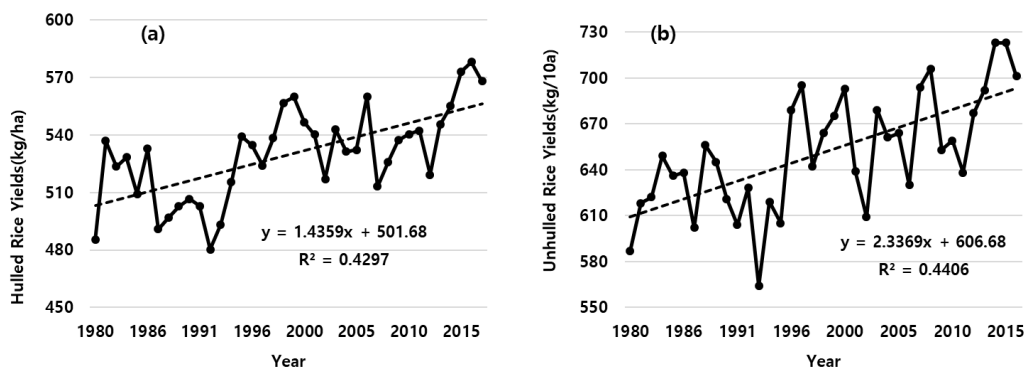


Fig. 5. Trends of annual average hulled rice productivities from developed edible rice varieties (left, a) and annual average unhulled rice productivities from national statistics (right, b).

벼 육종 분야의 적응 - 밥쌀용 품종개발을 중심으로

앞서 언급한 바와 같이 우리나라의 온도가 빠르게 상승하는 추세에 놓여 있어 벼 생산량에 대한 우려가 높아지고 있다. 1980년부터 2017년 사이 농촌진흥청에서는 약 350개의 벼 품종이 개발되었으며 그 가운데 약 269개 품종이 밥쌀용 품종으로 개발되었으며 밥쌀용 품종 개발에 따라 품종특성에 기재된 평균 수량성을 근거로 하여 벼 육종분야의 적응성을 평가하고자 하였다. 80년대 초부터 현재까지 벼 재배기간 중 평균 온도가 약 1.04°C가 증가한 가운데 지속적으로 품종 개발이 이루어져 왔으며 연도별 개발된 밥쌀용 품종들의 평균 수량성의 변화를 보면 Fig. 5(a)와 같았다. Fig. 5(a)에서 보는 바와 같이 개발된 품종들의 연차별 차이는 있지만 수량성이 지속적으로 증가하고 있는 것으로 분석되어 최근 5년간 개발된 품종들의 평균 백미 수량이 564 kg/10a로 다른 해에 비해 상대적으로 높게 나타나고 있다. 개발된 품종의 수량 특성이 온도 증가에 따른 위험성을 극복하고 기후변화에 적응되어 가는 것으로 나타난 바와 같이 실제 국가 통계에서 발표된 논 벼의 연도별 수량성도 Fig. 5(b)에서 보는 바와 같이 지속적으로 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 개발된 품종들의 수량성과 비교하여 보았을 때 기온이 추세가 더 높아 개발된 품종의 수량 특성보다 실제 농가에서는 더 높은 수량 특성을 나타내는 품종 선택에 따라 증가속도가 더 높은 것으로 판단되었다. 현재 기술과 품종을 가지고 온난화가 더 진행된 미래에는 쌀 수량 감소가 예측되고 있지만 현재까지는 온도 증가가 빠름에도 불구하고 연구개발이 지속적으로 이루어지면서 현재 진행되고 있는 온난화 적응된 품종 개발이 잘 진행되고 있는 것으로 파악되었다. 벼 재배기간 평균온도와 개발된 품종들의 수량성을 비교한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서

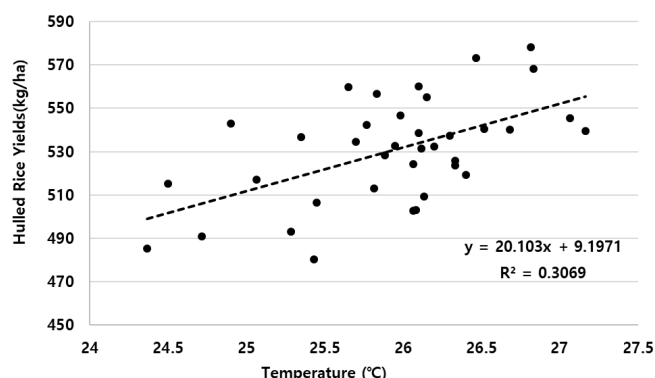


Fig. 6. Relation between temperature and edible hulled rice productivities from 1980 to 2017 in Korea.

보는 바와 같이 재배기간 중 온도가 증가함에 따라 개발된 벼 품종들의 수량성은 편차가 많이 있지만 전체적으로 증가하고 있는 것으로 나타났다. 현재까지의 벼 육종은 온난화에 적응된 품종들을 기본적으로 개발되고 있다는 사실을 암시하고 있다. 70년대 말 통일벼 품종을 자포니카 벼를 본격적으로 재배하기 시작한 1980년대 초부터 개발된 밥쌀용 벼 품종들의 연도별 평균 생산성에 대한 3년 가중평균 값을 분석한 결과는 Fig 7(a)와 같았다. 가중 평균을 하였을 경우 Fig. 5(a)와 같은 모양의 그래프가 Fig. 7(a)의 형태와 비슷한 양태로 표현되어 개발된 품종들의 추세를 더 명확하게 파악할 수 있다. 1980년대 품종들의 평균 수량은 약 514 kg/10a 내외로 나타나고 있으며 90년대 중반까지 수량성의 큰 증가는 나타나지 않은 것으로 나타났다. 1990년대 후반부터 수량성이 증가하면서 2000년대부터는 약 540 kg/10a 이상으로 안정적인 수량성을 유지하고 있는 것으로 분석되었다. 이러한 양상은 1990년대 후반부터 수량과 관련된 유전적 특성을 확립되고 이러한 기반 하에서 미질 등 이외의 특성을 가진 계통들이 선발되고 육종체계가 확립된 것으로

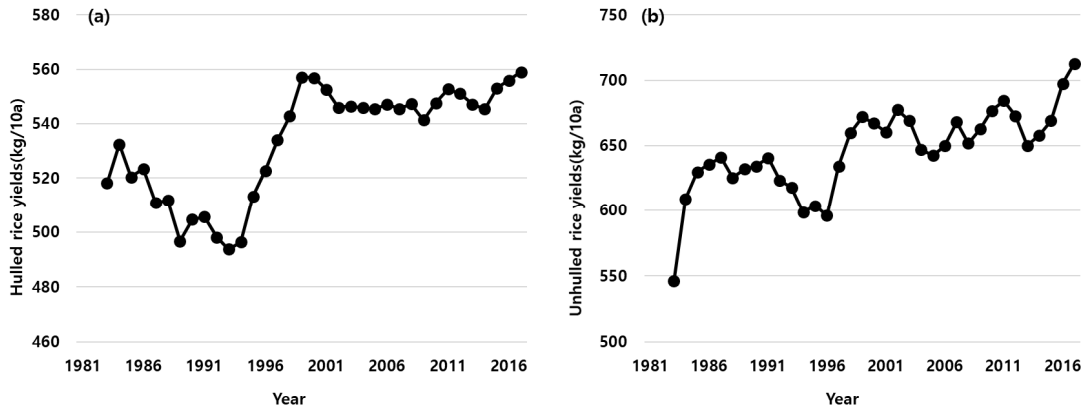


Fig. 7. Trends of annual 3-year weight average hulled rice productivities from developed edible rice varieties (left, a) and annual 3-year average unhulled productivities from national statistics from 1980 to 2017 in Korea.

판단할 수 있다. Fig. 7(b)는 농가 재배에 따른 수량을 3년 가중평균 값을 적용하여 분석한 결과이다. Fig. 7(a)와 달리 80년대 수량감소 경향이 크지 않고 비슷한 수량을 유지하고 있는 것을 알 수 있는데 이는 농업인이 수량성이 우수한 품종을 선호한 결과로 추정할 수 있다. 1990년대 후반부터 동일하게 수량이 증가하여 일정 범위 내에서 수량성이 안정화 되고 있는 양상을 나타내고 있는 것을 알 수 있어 온난화에 적응한 품종들이 농가에 보급이 잘 이루어져 안정적 수량을 유지하고 있는 것으로 추정되었다.

온난화에 대응하여 수량의 안정성을 동반하여 품질 등 다른 특성을 포함하는 육종들이 진행되어 온 것과 함께 온난화에 따른 돌발 병해충에 적응할 수 있는 저항성 유전자를 포함시키는 육종도 병행되어 왔다. 온난화는 작물의 생육뿐 아니라 병원균인 미생물과 해충에게도 큰 영향을 미치며 작물에게도 긍정적 또는 부정적으로 영향을 미칠 수 있다. 작물이 가지고 있는 많은 병 저항성 유전자들이 규명되어 있으며 많은 육종가들은 저항성 유전자를 작물에 삽입하여 특정 병에 대한 저항성을 통해 보다 안정적인 벼 생산량을 유지하고자 한다. 벼에 대한 병들의 경우 온도 등 여러 환경요인에 따라 다양한 변종이 계속적으로 발생하여 기존에 저항성인 품종들이 감수성이 되어 피해를 증가시키는 사례가 발생하기도 한다.

대표적인 사례로 1997년도에 개발된 남평벼는 내도복성과 속색이 양호하면서 이모작 재배에서 높은 수량을 나타내어 평균 쌀 수량성이 547 kg/10a이다. 잎도열병과 줄무늬잎마름병에 저항성을 가지고 있으나 흰잎마름병에 대해서는 단일 저항성을 가지고 있는 품종이다. 개발이후 농가의 호응이 좋아 2000년대 중반 호남지역 재배면적이 크게 상승하여 2008년에는 약 65,000 ha까지 재배되는 주요 품종

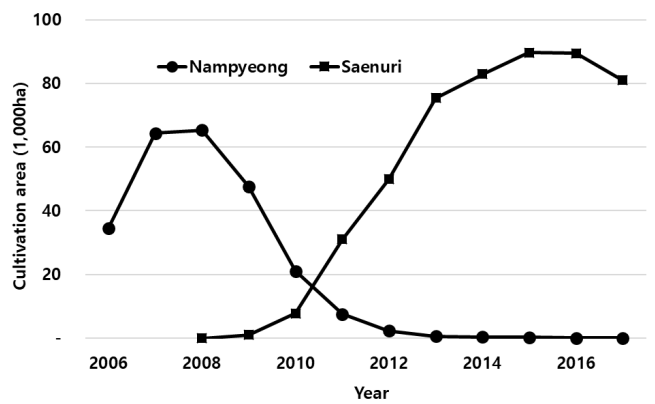


Fig. 8. Changes in annual cultivation area of the Nampyeong and Saenuri varieties in the Jeonbuk and Jeonnam provinces.

으로 자리매김을 하였다. 그러나 2000년대 후반부터 새로운 레이스의 흰잎마름병의 발생이 많아지면서 피해농가가 증가하고 재배면적이 감소하게 되었다. 한편 2007년도에 개발된 새누리벼는 쌀 수량이 571 kg/10이며 문제가 많이 되고 있는 흰잎마름병에 대한 복합저항성을 가지고 있어 2008년 농촌진흥청에서 국립종자원을 통해 종자보급을 하면서 급격하게 재배가 늘어 남평벼를 완전히 대체하게 되었고 2015년에는 89.6 ha까지 재배면적이 확대되었으며 남평벼 재배면적은 109 ha로 감소하였다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 전북과 전남에서 남평벼와 새누리벼의 재배면적의 변화 추이는 기후변화에 따른 병해충의 변동에 따른 벼 육종 분야에서 개발된 적응기술이 농가에 적용된 대표적인 사례라 할 수 있다.

그러나 온난화가 현재 추세와 같이 빠르게 진행될 경우에는 현재 농가에서 재배되고 있는 품종의 수량, 품질 등에

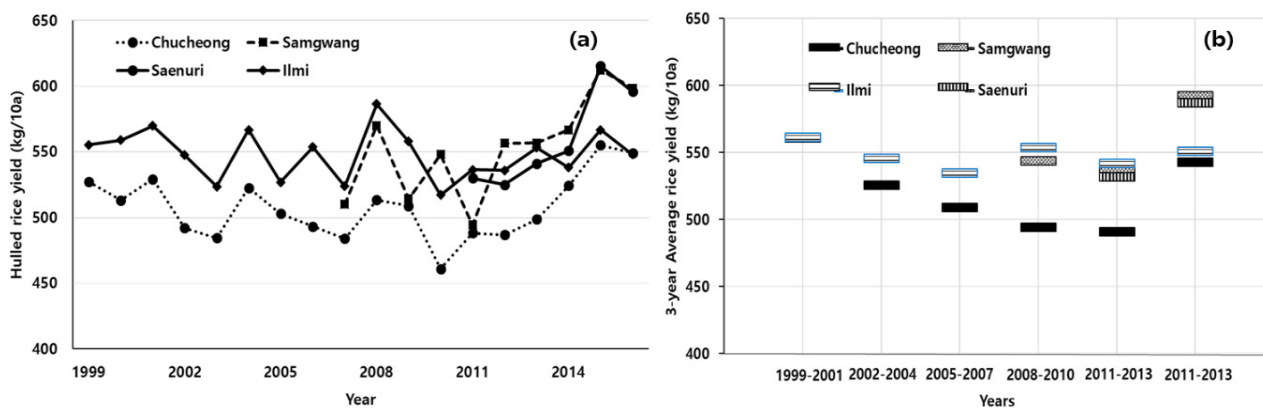


Fig. 9. Changes in annual unhulled rice yields (left, a) and 3-year average rice yield (right, b) for mid-late maturing type rice such as the Chucheong, Samgwang, Saenuri, and Ilmi rice varieties from NICS experimental regions.

대한 안전성을 담보하기는 힘들 것으로 전망되고 있다. 현재 벼 품종 개발을 위한 시스템은 1개의 품종이 등록되기 위해서는 품종 자원의 교배, 포장 재배 및 계통 선발, 생산성 검정, 지역적응 시험, 품종 등록, 종자 확보, 농가 보급까지 많은 과정을 거쳐야 하기 때문에 최소 5년 이상의 기간이 소요되고 있다. 만일 품종 개발이 중단되었다 다시 육종 연구가 될 경우 상당한 시간의 공백이 생기고 향후 기후변화 대응에 큰 차질이 생길 수 있다. 따라서 기후변화에 지속적인 적응을 위해서는 중단 없는 육종 연구가 지속적으로 수행되는 것이 필수적이라 할 수 있다.

기후변화에 따른 주요 품종의 적응 - 비적응성 평가

개발된 품종들은 농가에 보급되어 특별한 결격사유가 발생하지 않으면 보통 10년 이상 재배되기도 하지만 주요 보급 품종이 되기 위해서는 지속적으로 온난화가 진행되고 있는 현 시점에서 과거 개발된 품종들과 새롭게 개발된 품종들의 온도 적응 능력이 중요한 문제라 할 수 있다. 실제 포장에서 품종들의 수량성은 품종이 가지고 있는 유전적 특성 이외 기상조건, 시비, 물관리 등 많은 요인에 의해 수량성이 변동된다. 다른 요인을 배제하고 품종의 유전적 요인과 기후요인에 따른 수량성 변동요인을 파악하기 위해서는 시비량, 물관리 등 다른 요인을 고정하여 지속적으로 재배하여 평가하는 것이 필요하다. 농촌진흥청 국립식량과학원에서는 전국 작황을 예측하기 위하여 매년 주요 재배 품종을 비롯한 신개발 품종에 대해 17개 지점에 대해 작황시험을 수행하고 있다(RDA, 1999-2016). 지역 및 보급 품종의 변화에 재배되는 품종의 변화가 있지만 주요 품종들이 동일 조건에서 재배되고 있다. 따라서 작황시험은 다른 요

인을 동일하게 처리하기 때문에 온난화에 따른 품종의 적응성을 평가하기에 적합한 결과로 판단된다. 1999년부터 2016년까지 수행된 작황시험 결과를 바탕으로 중만생종과 조생종 품종으로 나누어 분석을 실시하였다. 대상 품종에 대한 지역별 동일 연도 수량에 대한 평균 값을 이용하였다.

먼저 중만생종 품종의 적응과 비적응 능력을 평가하기 위하여 1970년대 도입된 추청벼는 현재에도 경기 일부 지역에서 많이 재배되고 있는 품종으로 적응성을 평가하는 기준 품종으로 이에 대비하여 1995년 개발된 일미벼, 2003년에 개발된 삼광벼, 2007년 개발된 새누리벼를 대상으로 연도별 생산성의 변화 추이를 살펴 보았다. 모든 품종이 기상여건에 따른 등락이 유사한 형태로 나타나고 있는 것을 알 수 있어 기상조건이 벼 수량에 분명한 영향을 미치고 있는 것을 알 수 있다. 1970년대 개발된 추청벼는 전체 평균 수량성은 약 507 kg/10a으로 연도별 편차가 있지만 온도가 지속적으로 증가하고 있음에도 수량이 증가하는 추세를 나타내지는 않았으며 이후 개발된 비교 품종에 비해 전반적으로 매년 수량성이 낮게 나타났다(Fig. 9(a)). 각 품종들에 대한 3년간 평균 값으로 보면 Fig. 9(b)에서 보는 바와 같이 70년대 개발된 추청벼는 이후 개발된 품종에 비해 수량성이 낮은 것으로 평가되었다. 약 25년전 개발된 일미벼의 경우도 연차간 변이가 있지만 연도가 지나고 온도가 일부 증가되어도 수량의 증가나 감소 경향을 찾기는 어려웠으며 평균 약 569 kg/10a의 높은 수량성을 나타냈다. 2000년대 초반에 개발된 삼광벼는 평균 약 553 kg/10a로 일미벼와 비슷한 수준을 유지하고 있으며 최근 3년간은 약 600 kg/10a 수준으로 증가하는 양상을 나타내었다. 가장 최근에 개발된 새누리벼는 초기에는 일미벼와 비슷한 수준의 수량성을 보였으나 최근 3년간은 삼광벼와 유사하게 수량이 약 600

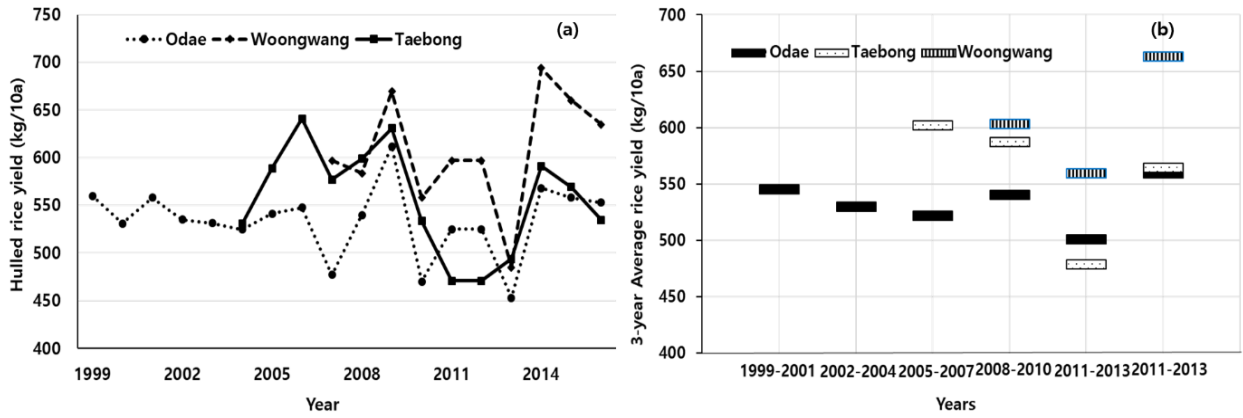


Fig. 10. Changes in annual unhulled rice yields (left, a) and 3-year average rice yield (right, b) for early maturing type rice such as the Odae, Taebong, and Woongwang rice varieties from NICS experimental regions.

kg/10a 수준으로 증가하는 양상을 나타내었다. 품종 재배 지역의 온도를 보면 최근 3년 온도가 다 높고 기상여건이 좋은 것으로 판단되었는데 이에 따라 2000년대 이후 개발된 품종에서 수량성이 과거 개발된 품종들에 비하여 수량성 증가 폭이 더 크게 나타나는 것으로 보았을 때 최근 개발된 품종들은 현재의 온난화에 적응이 되어 있는 것으로 추정되었다.

한편 조생종 품종들의 수량성을 비교하기 위하여 1980년도에 개발된 오대벼, 2000년 개발된 태봉벼, 2004년 개발된 운광벼를 대상으로 여러 지역에서 동일조건에서 재배된 생산성을 비교하였으며 품종별 연간 평균 생산성의 변화는 Fig. 10(a)와 같았다. 오대벼는 평균 529 kg/10a의 수량성을 나타낸 반면 태봉벼는 523 kg/10a로 후에 개발되었지만 오대벼보다 작았으며 특히 오대벼의 연도별 편차는 37.4 kg/10a 인 반면 태봉벼는 55.8 kg/10a에 달해 편차가 매우 큰 것으로 분석되어 태봉벼의 경우는 기후적응성이 상대적으로 다소 떨어지는 것으로 파악되었다. 가장 최근에 개발된 운광벼의 경우 연도별 편차가 60.7 kg/10로 가장 높았지만 평균 수량성이 604 kg/10a에 달해 다른 품종에 비해 수량성이 좋은 것으로 나타났다. 조생종은 온도가 낮은 중북부에서 주로 재배되는 생체형으로 냉해피해에 대한 우려가 높을 수 있다. 생육기간이 짧기 때문에 수량의 편차가 큰 것으로 추정되고 있다. 3년간 평균 수량성으로 조생종 벼의 적응성을 Fig. 10(b)와 같이 그려 분석하였다. 오대벼는 앞서 언급한 바와 같이 평균 수량성은 다른 품종에 비해 상대적으로 적은 반면 수량의 편차가 적었는데 온난화가 지속되는 시점에서는 좋은 특성이라 할 수 있으며 온난화 적응이 양호한 품종으로 평가할 수 있다. 반면 태봉벼의 경우는 초기 수량성은 양호하나 기후가 좋지 않을 경우 수량감소 폭이

매우 크게 나타나는 것을 알 수 있으며 이러한 경향은 적응성이 나쁘다고 평가할 수 있으며 실제 농가에서도 선호하지 않는 것으로 나타났다. 운광벼의 경우 불량한 기후환경에서도 수량감소는 기존 개발된 오대벼의 수준에 달하고 양호한 기후환경에서의 수량성은 오대벼보다 높기 때문에 향후 더 많은 농가에서 선호할 수 있는 수량 특성을 가지고 있다고 할 수 있다.

온난화가 지속되는 가운데 벼 품종의 육종은 생산성을 기반으로 미질, 밥맛 등의 품질 특성, 병해충 저항성, 내도복성 등 재해 저항성 등 다양한 유전적 특성을 담보할 수 있는 방향으로 전개되어 왔다. 농가에서는 온난화 및 다양한 기후 여건에서 안정적인 수량을 확보하여 소득에 반영될 수 있는 품종을 선호하는 것은 당연하다. 1980년 이후 지난 40년간 약 350여 품종이 개발되어 왔으며 이 가운데 농가에서 선호하는 품종도 계속해서 바뀌어 왔으며 중부지역, 영남지역, 호남지역에서 선호하는 품종도 차이가 있다. 개발된 품종들은 각각의 수량성, 품질, 기타 유전적 특성들을 가지고 있지만 실제 농가에서 선호하여 오랫동안 대량으로 보급되는 품종은 상대적으로 많지 않다. 지역 여건, 온난화 등의 변화에 적응한 품종으로 자리매김하는 것이 그만큼 어려운 과제이다. 따라서 미래 더 심화될 온난화에 대응하기 위해서는 적응성이 높은 품종 개발을 지속적으로 하는 것이 무엇보다 중요하다.

기후변화에 따른 벼 재배기간 변동에 대한 적응 기술

앞서 언급한 바와 같이 많은 벼 품종들이 온난화에 적응되어 수량의 안정성을 확보할 수 있는 품종들이 개발되어 보급되어 왔다. 실제로 보급되는 품종들 매년 자주 교체하

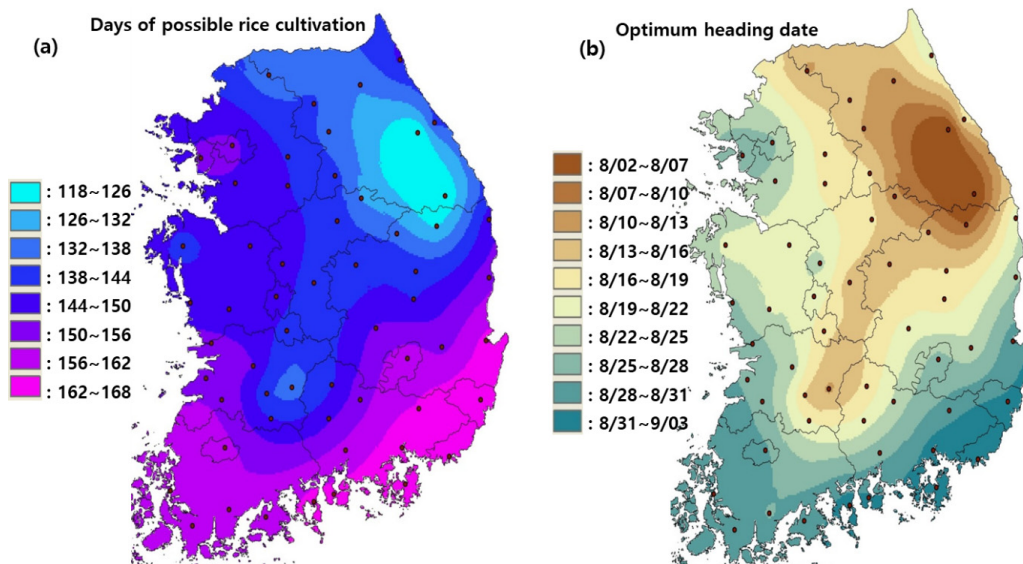


Fig. 11. Estimation map for number of days for possible regional rice cultivation (left, a) and regional optimum heading date (right, b) based on average temperature after 2000.

기 어렵기 때문에 온난화에 대응하여 안정적인 수량성을 농가에서 유지하기 위해서는 시비, 물관리, 재배방법 등 영농기술도 기후변화에 적응된 기술이 개발되어 농가에 적용되어야 한다.

우리나라는 국토면적이 적지만 위도를 따라 길게 형성되어 있고 산이 전 국토의 약 65%를 차지하고 있어 지역간 기후의 편차가 크고 온난화가 지속되면서 동일 품종의 벼를 재배하여도 지역에 따라 출수기 등 벼의 생육 반응의 정도의 차이가 클 수 있어 개발된 품종이 가지고 있는 유전적 특성 이외 이앙시기 등 재배적인 관리에 의해 수량의 편차가 클 수 있다. Fig. 11(a)에서 보는 바와 같이 2000년 이후 기후자료를 기반으로 하여 우리나라의 벼 재배 가능 일수를 지도로 표시하였을 때 연간 최대 약 40-50일 가량 차이가 크게 나타나고 있다. 중북부 산악지대인 태백시와 봉화군의 경우 벼 재배 가능 일수가 각각 110일, 118일에 불과한 반면 부산지역, 광양시의 경우 180일로 가장 벼 재배 가능 일수가 길었으며 남해평야지는 164-169일로 분포하였다. 우리나라 지역별 벼 재배 가능 일수는 위도에 따른 등고선 분포와 산악지대에 따른 등고선 분포가 혼합되어 나타나고 있으며 일부 서해안 지역에서는 바다의 영향이 특이적으로 나타나기도 하고 있다. 다른 연구에서는 영남지역 10년간(1996-2005) 기후자료에 근거하였을 때 봉화 171일부터 부산의 228일까지 매우 넓고 다양하였으며 평년대비 1-13일정도 늘어났다. 고품질 쌀 생산을 위한 적정 출수기간은 평년과 비교하여 최근에 1-3일정도 늘어났으며 최

적출수기는 봉화 7월 31일, 부산, 마산, 통영의 9월 7일까지 지역별 차이가 심하였다고 보고한 바 있다(Kim *et al.*, 2007). Fig. 11(a)에서 보여준 벼 재배 가능 일수와 차이는 생육을 위한 최저 온도와 등숙기 최저 온도의 차이가 있는 것으로 파악되어 재배 가능 일수에 차이가 나타나고 있다. 강원지역에 대하여 2000년부터 2009년까지 기후 조건을 분석한 결과 출수기는 평년에 비해 춘천, 홍천, 원주, 강릉은 늦어졌으나 철원은 빨라졌으며 등숙 온도는 올라갈 수 있어 중생종이나 중만생종을 재배하거나 이앙시기 조절하거나 직파재배와 같이 재배관리를 통해 쌀 수량과 품질 저하를 막을 수 있을 것으로 보고한 바 있다(Seo *et al.*, 2010). 우리나라 벼 재배에서는 출수기 이후 등숙온도가 수량과 품질에 미치는 영향이 큰 것으로 알려져 있어 최적 출수기 시점을 산정하는 부분이 중요하며 Fig. 11(b)에서 2000년 이후 기상을 근거로 하여 지역별 최적 출수기를 추정하여 지도로 표시하였다. 전체적으로 온난화가 진행됨에 따라 과거 1990년대에 비해 최적 출수기가 약 5일 가량 늦어지는 것을 알 수 있었다. 특히 남해안 지역은 8월 말이나 9월 초까지 최적 출수기가 지연되는 것을 알 수 있어 이와 관련한 정보가 농가들과 공유되는 부분이 필요하다. 출수기의 지연은 이앙기의 지연으로 해석할 수 있기 때문에 기존에 보급되어 왔던 지역별 이앙기도 수정되어야 할 것으로 평가되었다. 현재 이앙시기로 벼 농사가 계속될 경우에는 남부지역에서 쌀 품질저하도 우려된다. 우리나라 주곡작물인 자포니카 벼는 비교적 높은 온도에서도 생육에 문제는 없

지만 수량성과 품질이 우수해지는 적합한 등숙조건은 출수 후 40일간 평균기온이 22-23°C일 때가 좋다. 높은 온도에서 등숙되면 쌀의 단백질함량이 높아지고 천립중과 식미가 감소하고 낮은 온도에서는 등숙이 불량해지기 때문이다 (Lee *et al.*, 2016). Yun *et al.* (2001)에 따르면 기후변동에 대응한 벼 품종의 바람직한 특성으로서 먼저 출수와 등숙 관련 특성으로 현재 품종의 등숙에 알맞은 온도는 21-23도이며 향후 높은 온도의 등숙기간을 가지게 될 확률이 높아 등숙적온의 범위가 넓은 품종 개발이 필요하다. 또한 분얼 수가 많고 이삭이 너무 크지 않은 품종이 바람직하며 등숙기 고온과 더불어 일조부족 등 불량기상조건의 발생을 고려하였을 경우 뿌리는 심근성이고 중기는 탄력성이 있는 강단이 있는 품종이 선호된다. 등숙기 고온조건에 따른 일부 품종에 대해 수량평가 및 관련 기작들을 구명하기 위한 연구들이 수행되어 등숙기 평균온도 27°C로 고온 처리시 평균온도 22°C 적온치리에 비해 동안벼와 일품벼 모두 등숙율, 현미천립중, 완전미율은 감소하였고 미숙립이 증가하였으며 일품벼가 고온에 더욱 민감한 것으로 나타났다. 고온등숙시 이삭의 전분축적속도가 빨라지고 등숙기간이 짧아졌다. 등숙초기에는 α -amylase활성이 증가하였고 말토 오스 함량이 증가한 것으로 보아 합성된 전분이 일부 분해되어 전분축적이 고르지 못했던 것으로 생각된다(Lee *et al.*, 2013). 기후변화가 국내 쌀 생산량에 미치는 영향을 메타분석 방법론을 적용하여 분석한 결과, RCP 6.0 이상에서 쌀 생산량에 영향을 미치며, 적응방안 중 품종 변경보다 파종 시기 변경이 보다 효과적인 방안으로 분석된 바 있다(Kim *et al.*, 2015). 온난화가 진행되는 미래에 중만생종인 낙동벼를 대상으로 파종기를 앞당겼을 때 수량이 감소하지만 파종기를 14일 늦췄을 때 2031-2060년대에 수량이 약 4.4% 증수하는 것으로 모의된 바 있어 온난화가 지속되는 가운데 개발되어 보급된 품종들에 대하여 온도의 변이 속도 및 주기 등을 분석하여 파종 및 이앙시기를 변경하여 재배하기 위한 기술이 보급된 품종들의 우수한 특성을 지속적으로 유지하면서 수량과 품질을 안정적으로 유지하는데 가장 기본적인 기후변화 적응 기술이라 할 수 있다(Kim *et al.*, 2013).

Han *et al.* (2007)은 미래 A2 기후변화 시나리오에 따라 쌀 수량은 평년(1971-2000년) 대비 2080년대에는 14.9%가 감소할 것으로 전망하였으며 수량 감소를 극복하기 위하여 앞으로 적용 가능할 것으로 예상되는 잠재적인 적응조치들과 기존정책과의 연계방안을 부문별로 확인하여 농업생태 부문은 물, 토양의 보전, 경작활동, 농가수준의 적응, 경제적 정책 등의 13개 적응분야별로 간략히 적응 옵션을 제시한 바 있다. 앞서 언급한 재배분야에서 이앙시기 변경 등이

가장 우선시 되는 기후 적응기술이지만 이외에도 토양, 물, 시비 관리 등의 농업 환경의 적절한 관리도 동반되어야 하며 아울러 농가의 영농활동 및 농가의 경험적 지식 등도 적응 수단에 중요한 부분이다.

제 언

우리나라의 온난화는 전국 평균 온도가 1980년대 이래로 10년에 약 0.3°C가 증가하고 있는 추세이며 지금까지 발표된 많은 기후변화 시나리오에 따르면 온난화 속도가 더욱 빨라질 것으로 전망하고 있다. 벼는 우리나라 주곡으로서 매년 생산량의 변동에 따라 시장과 농가 소득에 큰 영향을 미치기 때문에 안정적인 생산을 유지하는 것이 매우 중요하다. 안정적인 시장과 농가소득을 위해 직불제, 수매 등 여러가지 정책적 수단을 도입하여 생산 농가와 소비자의 불안감을 해소하기 위해 노력하고 있지만 정책적 수단의 시행과 함께 농가에서 안정적으로 벼 생산을 할 수 있는 지속적인 연구개발과 보급이 무엇보다 중요하다.

현재까지 벼의 육종과 재배기술 개발은 계속되는 온난화의 속도에 어느 정도 맞추어 개발되어 온고 있는 것으로 평가되었다. 1980년부터 2017년까지 농촌진흥청에서 개발된 벼 품종은 약 350 품종에 달하고 있다. 최소 5년 이상의 시간이 소요되는 품종 개발의 어려움을 고려하였을 때 대단한 성과라고 할 수 있다. 개발된 다양한 품종으로 농가에서 수량의 안정성과 소득을 고려한 품종을 선택할 수 있는 여지가 많아졌으며 개발된 품종들간의 경쟁도 치열해지면서 자연스럽게 생산성이 안정적이고 기후에 적응된 품종들을 재배하고 있다고 볼 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 돌발적인 병의 발생에 따라 감수성인 품종의 재배는 줄고 저항성이 높은 품종으로 대체되는 경우도 많이 있다. 최근에는 새롭게 개발된 품종을 농가에서 재배하여 지역에 적응성을 다시 수년간 평가한 후 지역에 도입하는 사례가 일반화되고 있어 기후 적응성 평가가 자연스럽게 이루어지고 있다. 2017년을 기준으로 품종별 재배면적을 보았을 때 재배면적 상위 20개 품종이 전체 재배면적의 약 92%를 차지하고 있다. 중만생종을 기준으로 하였을 때 10년 이내 개발된 품종이 차지하는 비중이 약 13%가량 차지하고 있다. 개발에서 보급하여 수량 안정성과 기후 적응성이 인정되어 실제 농가에서 많은 면적에서 재배되기까지는 많은 시간 많은 시간이 소요되고 있다. 다행히도 급변하는 기후에 따른 적응성이 급격히 감소하는 품종을 대체하기 위한 품종 개발이 지속적으로 이루어지고 있다는 점이다.

현재까지의 기후가 온난화 추세는 분명하지만 해마다 평

균 온도 등의 큰 편차를 가지고 있기 때문에 1년 또는 3년 등 짧은 기간의 기온 변화에 따라 이앙시기 등을 변경하기는 어렵다. 따라서 벼의 최적 이앙기, 한계 이앙기를 재설정하기 위해서는 최소한 10년 이상의 기상자료를 기반으로 해야한다. 1990년대에 비해 이앙시기가 지역별 편차는 있지만 약 5일가량 늦추는 것이 기후변화에 적응하여 최적 수량을 확보하기 위해 중요한 재배기술이라 할 수 있다.

그러나 벼 재배기간 최고기온이 최근 5년 동안 평균 35.1°C로 점점 증가하고 있어 기후변화 시나리오에 따라 온난화 속도를 고려하였을 때 미래에는 향후 우리나라 벼 재배시 고온해에 대한 품종과 재배에 대한 대응 기술이 개발되어야만 할 것이다. 기후변화 시나리오에 근거하여 2050년대 약 2°C가 더 증가하는 것으로 전망되고 있기 때문에 안정적인 수량성을 유지하기 위해서는 현재의 벼 재배양식이 미래에는 상당히 바뀔 것으로 전망된다. 현재까지 이루어진 기후변화 적응기술로는 미래 상황을 대응하기에는 어려울 것으로 보이며 지속적인 품종 개발과 재배기술 개발이 이루어져야 할 것이다.

적 요

최근 한국의 기온은 지구 온난화로 인해 급격히 상승하고 있으며 지난 40년 동안 한국의 기온은 1980년대 초에 비해 약 1.26°C 상승했습니다. 지역 별로는 강원도 서부 지역이 1.76°C로 가장 높았고 전남도가 0.96°C로 가장 낮았다. 기온이 계속 상승함에 따라 현재의 표준 재배 방법으로 쌀 수확량이 감소할 것으로 전망되고 있다. 지구 온난화로 지역에서 매년 벼농사를 할 수 있는 기간이 과거에 비해 증가하여 태백시 110일에서 부산과 광양의 180일까지 지역별 다양한 모습을 보이고 있다. 또한 모든 지역에서 2000년 이전에 비해 이앙 시기가 3-5일 지연되는 것으로 분석되었다. 쌀의 연평균 생산량은 1980년대 이후 밥쌀용 품종의 평균 생산량을 분석했을 때 증가 추세를 보였으며 특히 1990년대 초반에 개발된 품종들의 생산성이 급격히 증가한 것으로 나타났다. 생육기간 평균 기온과 벼 수확량의 관계는 1996년 전후로 크게 구분되었다. 평균 기온이 높을수록 개발 품종의 수확량은 1996년까지는 낮아졌으나 1996년 이후 평균 기온은 개발된 품종의 생산성 추세를 나타내지 않았습니다. 1999년부터 2016년까지 전국의 작물 재배 결과와 개발 품종 및 최근 개발 품종의 연간 수확량 변화를 분석하여 개발된 벼 품종의 기후 변화 적응성을 평가하기 위하여 국내 작물의 생육 현황을 조사한 결과 2000년대 초반에 개발된 조생종 태봉벼(2000)와 운광벼(2004)와 1980년대에 개

발한 오대벼의 연간 생산량을 비교 한 결과 기온 상승에도 불구하고 2000년대에 개발된 품종이 상대적으로 수량성이 높게 나타났다. 최근 중만생종으로 개발된 삼광벼 (2003)와 새누리벼(2007)의 연간 생산성은 1970년대에 개발된 추청벼와 같은 초기 개발 품종보다 높았다. 빠르고 지속적인 기온 상승에도 불구하고 벼 재배 기술과 품종 개발은 기후 변화에 잘 적응하여 지속적으로 개발되고 있는 것으로 평가되었다. 그러나 벼의 생물학적 잠재력은 한계에 도달할 수 있고 특히 이상기상의 빈도와 강도가 온난화와 동반하여 발생하고 있어 지속적인 대응 기술 개발이 필요하다.

ACKNOWLEDGEMENTS

All data used in the present analysis were produced and funded by the Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (Project No. PJ012301012020) of the Rural Development Administration, Republic of Korea.

인용문헌(REFERENCES)

- Han, H. J., S. E. An, G. Y. Yu, and G. W. Cho. 2007. Climate change impact assessment and development of adaptation strategies in Korea. Research Report of Korean Environment Institute 07-24-01, pp.159-162.
- Kim, C. G., H. Y. Kim, W. G. Lee, M. S. Jung, J. S. Kim, and Y. S. Lee. 2015. Impact analysis of climate change of agriculture, forestry, fisheries and food sectors and establishing model of impact assessment. Research report of ministry of agriculture, forestry, fisheries and food. 11-1543000-000779-01, pp.125-149.
- Kim, C. S., J. S. Lee, J. Y. Ko, E. S. Yun, U. S. Yeo, J. H. Lee, D. Y. Kwak, M. S. Shin, and B. G. Oh. 2007. Evaluation of optimum rice heading period under recent climate change in Yeongnam area. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology. 9(1) : 17-28.
- Kim, C.-G., H.-K. Jeong, S.-H. Han, J.-S. Kim, and D.-H. Moon. 2012. Impacts and countermeasures of climate change on food supply in Korea. Research Report in Korean Rural Economic Institute. R663.
- Kim, D.-J., J.-H. Roh, J.-G. Kim, and J. I. Yun. 2013. The influence of shifting planting date on cereal grains production under the projected climate change. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology. 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 RCP8.5 climate condition.

- Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology. 14(3) : 132-141.
- KMA. 2019. Average Temperature in Korea, <https://data.kma.go.kr/stcs/grnd/grndTaList.do?pgmNo=70>, Korean Meteorological Administration.
- Lee, C. G., J. Y. Son, B.-I. Ku, and Y. J. Mo. 2013. Investigation of rice yield and quality change and development of adjustment technique to climate change. Cooperative Research Report in Rural Development Administration (PJ006507).
- Lee, G.-H., G.-J. Choi, H.-K. Park, M.-C. Seo, T.-S. Park, J.-T. Yoon, and B.-I. Goo. 2016. Direction of development of cultivation technology of crops for coping with climate fluctuation (Korean). 2016 Conference of Korean J. Crop Sci. : Direction of Crop Research to Mitigate Difficulties of Field Crop Production, p.10.
- NIMR. 2011. Report of Climate Change Scenario for IPCC 5th Report (Korean), National Institute of Meteorological Research, Registration No. (Korea Government) : 11-1360395-000233-01.
- RDA. 1999-2006. Annual Report On Cooperative Research for New Variety Development – Regional Adaptation Experiment.
- Seo, Y. H., A. S. Lee, B. O. Cho, A. S. Kang, B. C. Jeong, and Y. S. Jung. 2010. Adaptation study of rice cultivation in Gangwon Province to climate change. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology. 12(2) : 143-151.
- Yoo, G. Y. and J. E. Kim. 2007. Development of a methodology assessing rice production vulnerabilities to climate change. Report in Korean Environmental Institute. RE-14.
- Yun, S. H. and J. T. Lee. 2001. Climate change impacts on optimum ripening periods of rice plant and its countermeasure in rice cultivation. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology. 3(1) : 55-70.