Korean Journal of Environmental Agriculture

Korean J Environ Agric. 2022;41(1):16-23, https://doi.org/10.5338/KJEA.2022.41.1.03
Published online 25 March 2022, Printed 31 March 2022

Online ISSN: 2233-4173
Print ISSN: 1225-3537

Research Article

Open Access

경기도 화성시 20년간(2001~2020) 기후변화와 벼 수량 변화

주옥정[1], 최병열[2*], 장은규[2], 소호섭[1], 이상우[1], 이영순[2]

[1]경기도농업기술원 연구개발국 환경농업연구과, [2]경기도농업기술원 연구개발국 작물연구과

Climate Change and Rice Yield in Hwaseong-si Gyeonggi-do over the Past 20 Years (2001~2020)

Ok-Jung Ju[1], Byoung-Rourl Choi[2*], Eun Kyu Jang[2], Hoseup Soh[1], Sang-Woo Lee[1] and Young-Soon Lee[2]
([1]Environmental Agriculture Research Division, Research and Development Bureau, Gyeonggi-do Agricultural Research and Extension Services, Hwaseong 18388, Korea, [2]Crop Research Division, Research and Development Bureau, Gyeonggi-do Agricultural Research and Extension Services, Hwaseong 18388, Korea)

Received: 27 January 2022/ Revised: 18 March 2022/ Accepted: 20 March 2022

Copyright ⓒ 2022 The Korean Society of Environmental Agriculture
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ORCID
Ok Jung Ju
https://orcid.org/0000-0002-6345-0207
Byoung Rourl Choi
https://orcid.org/0000-0001-6302-4913

Abstract

BACKGROUND: Rice production by the current standard cultivation method is predicted to decrease due to global warming. It seems that there has been a strong warming trend in Hwaseong-si, Gyeonggi-do. This study attempted to understand the climate change in Hwaseong-si, Gyeonggi-do and to analyze the effect of climate change on rice production.

METHODS AND RESULTS: The statistical and physicochemical analyses were performed using the rice cultivar 'Chucheongbyeo' yields grown at the rice paddy field plot in the Gyeonggi-do Agricultural Research and Extension Services and the weather data measured in near the rice paddy plot.

CONCLUSION(S): There was no significant difference between the average rice yields per area in 2000s (2001~2010) and 2010s (2011~2020), but the rice yield variability was greater in 2010s than in 2000s. The mean, minimum, maximum temperature, and the sunshine hours were evaluated for the correlation with the rice yield. The understanding of climate change in Hwaseong-si, Gyeonggi-do and the major weather factors affecting changes in rice yield, presented in this study, would enhance scientific understanding of regional climate change, and improve rice cultivation management.

Key words: Chucheongbyeo, Climate change, Gyeonggi-do, Rice yield

* Corresponding author: Byoung-Rourl Choi
Phone: +82-31-229-5771; Fax: +82-31-229-5962;
E-mail: choi2287@gg.go.kr

서 론

기후는 장기간에 걸친 날씨의 평균과 변동 특성이다. 그러므로 기후변화란 이전과 달라진 기후의 평균과 변동 특성을 말한다. 기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC; Intergovernmental Panel on Climate Change) 제 6차 평가보고서에서는 기후변화의 과학적 근거로 1850년 이래로 21세기(2001~2020년) 전지구 평균온도가 0.99℃ 상승한 것을 제시하였으며, 한국 기후변화 평가보고서 2020에서는 1904년 이후 2000년까지 우리나라 평균기온이 1.5℃ 상승하고, 2010년대(2011~2017년) 평균기온이 이전 30년에 비해 가장 높게 나타나는 21세기 평균기온 상승과 2010년대 중반 이후로 빠르게 증가하고 있는 극한고온 현상, 극한강수의 증가추세, 한반도 주변 태풍활동의 빈도와 강도 증가 등을 기후변화의 과학적 근거로 제시한 바 있다.

기후변화가 작물 생산성에 미치는 영향에 대한 관심은 식량 안보 측면에서 많은 연구가 수행된 바 있다[1-5]. 1986년

농촌진흥청에서는 기온, 강수량, 일조시간 등 기후요소의 분석과 평가에 따라 우리나라 주곡인 벼 안정생산을 위한 농업기후지대를 구분하였고 현재까지 벼의 안전재배기준으로 활용되고 있다. 19개 농업기후지대에서 중부 내륙지대에 속하는 경기도 화성시는 연간 평균 기온 상승률이 가장 높았고[6], 국립기상과학원 한반도 100년의 기후변화 보고서에 따르면 지난 106년(1912~2017년) 동안 우리나라 연평균기온이 0.6℃로 가장 크게 상승한 1980년대(13.4℃)에서 1990년대(14.0℃)에 경기도의 경우는 1.0℃ 상승하는 등 온난화 추세가 더 강한 경향이 있다. 벼 안정생산지대에서의 지속적인 평균기온 상승은 발육속도가 빨라지면서 생육기간을 단축시켜 수량과 품질을 저하시키므로[7-10], 현재의 표준재배방법은 지구온난화에 따라 벼 생산량이 감소될 것으로 전망된 바 있다[11]. 또한 폭염, 폭우, 이상저온 등의 변동성이 커지는 이상기상 발생빈도의 증가는 우리나라 벼농사 관리기술의 변화를 필요로 하게 되었다. 한편 기후변화에 따른 벼 생산성 연구는 작물생육모형이나 온도 제어 가능한 실내 실험 등 비교적 큰 수준의 온도차이 등을 인위적으로 조장한 연구로 비교적 짧은 기간에 영향평가가 가능하여 많은 연구가 수행되었으나[12-14], 같은 재배조건의 벼논에서 실제 기상요소와 벼 수량을 장기간 조사하여 변화를 고찰한 연구는 많지 않다. 이는 실제 자연적인 벼 재배포장에서는 인위적인 것처럼 단시간내에 주요 기상변수만을 제어할 수 없으며 모든 변화가 상호작용으로 연결되어 벼 생리생태에 미치는 영향을 분석하기 어렵기 때문으로 판단된다.

2020년 통계청의 시군별 논 경지면적에 따르면, 경기도 논 면적은 82,790 ha로 전국 논 면적의 약 10%를 차지하며 전국 행정구역별 5번째로 벼농사를 많이 짓는다. 경기도 내에서는 경기도 전체 논 면적의 약 15.3%(20,086ha) 차지하는 화성시에서 벼농사를 가장 많이 짓는다. 벼농사는 우리나라 주곡 식량작물 생산으로 식량안보 측면에서도 중요하지만, 지역사회의 중요한 경제기반이기도 하다. 2020년 한국농촌경제연구원의 농업·농촌 국민의식 조사에 따르면, 농업의 가장 중요한 기능으로 도시민과 농업인 모두 '안정적 식량 공급'으로 답하였으며, 미래 가장 중요한 기능은 '환경 보전'이며, 농업경영에 주된 위협요소로 '기후변화에 따른 기상이변과 재해여건 변화'를 가장 많이 선택한 바 있다. 또한 기후변화에 대한 농업인의 인지도에 대한 선행연구에 따르면 농업인의 85.7%는 기후변화를 인지하며 기후변화를 깊이 체감하고 있는 것으로 판단한 바 있다[15]. 이에 본 연구에서는 경기도 화성시에서 나타난 기후변화 현상과 벼 수량 변화에 기후변화가 미치는 영향을 분석하여 기후변화에 적응할 수 있는 벼 품종육성과 관리기술 등을 개선하기 위한 기초 정보로 활용하고자 한다.

재료 및 방법

시험장소 및 시험방법

경기도 화성시에 나타난 기후변화와 벼 수량 변화 분석을 위하여 경기도 화성시 기산동에 위치한 경기도농업기술원 내 벼 작황시험포장(37°13′ 15″ N, 127°02′ 26″ E)에서 지난 20년(2001~2020년) 동안 표준재배법으로 재배한 추청벼 수량과 작황시험포장 주변 반경 100m 이내에 설치된 자동기상관측장비(AWS; Automatic Weather Station)로 관측한 기상자료를 분석하였다. 벼 수량 변화에 영향을 미치는 기상요소 분석을 위해 사용한 기상자료는 일(daily) 단위 평균·최고·최저기온, 강수량, 일조시간이다. 경기도 화성시에서 나타난 기후변화 현상은 일 기상자료를 매년 1월부터 12월까지 연·월평균 자료로 평균하여 분석하였으며, 벼 수량 변화에 미치는 기상요소는 벼 재배기간 6월부터 9월까지 월별 초·중·하순의 약 10일 단위로 일 자료를 평균하여 분석하였다. 지난 20년 기후변화 현상에 대한 10년 단위 연대별 기상요소 비교는 등분산 가정 두 집단에 대한 t-검정(t-test)을 하였으며, 벼 수량 변화와 기상요소의 관계는 피어슨 상관분석(Pearson correlation analysis)을 실시하였다.

시험재료 재배조건

경기도 화성시 지역의 벼 생산량 조사를 위해 경기도 내 가장 많이 재배하는 품종으로 중만생종인 추청벼를 같은 포장에서 같은 재배법으로 20년간 연속으로 재배한 자료를 분석하였다. 벼 작황시험포장 토양의 이화학적 특성은 Table 1과 같다. 2019년 농촌진흥청에서 제시한 벼 재배를 위한 토양 이화학성의 적정 범위와 비교 시 작황시험포장은 가용성 인산은 다소 낮고 치환성 양이온 중 K와 Ca은 다소 높았으나 pH, 유기물함량, 가용성 인산, 치환성 양이온, 유효규산, 토성 등 모두 적정범위내에 있다. 벼 재배는 농촌진흥청 표준재배법에 따라 5월 20~25일에 재식거리 30×14 cm로 이앙하여 표준시비(2001~2004: N-P_2O_5-K_2O = 11-4.5-5.7 kg/10a, 2005~2020: 9-4.5-5.7 kg/10a) 하였다. 수확과 동시에 잔여 식물체는 파쇄하여 토양에 환원하였으며, 별도의 유기물은 시

Table 1. Physico-chemical properties of the rice paddy used in the experiment

Field	pH (1:5)	OM (g/kg)	Av. P_2O_5 (mg/kg)	Av. SiO_2 (mg/kg)	Ex. Cations ($cmol_c$/kg)			Soil texture
					K	Ca	Mg	
Test field	6.3	23	53	217	0.59	8.0	1.6	Silt loam
*Optimal range	5.5~6.5	20~30	80~120	More than 157	0.20~0.30	5.0~6.0	1.5~2.0	Sand Loam~Clay loam

* Recommended range for rice cultivation by Rural Development of Administration, 2019

용하지 않았다. 벼 생육 및 수량구성요소 등은 농촌진흥청 농업과학기술 연구조사 분석기준(2012)에 따라 조사하였다. 출수 후 60일이 경과한 시점에서 조곡을 수확한 후 수분함량을 15%를 기준으로 계측한 후 환산하였으며 현미는 제현기(FC2K, Yamamoto, Japan)를 이용하여 제현하였고, 백미기(Toyo rice cleaning machine, JP/MC-90A, Japan)를 이용하여 10분도로 도정하여 수량분석 시료로 사용하였으며, 모든 시료는 3반복으로 조사하였다.

결 과

경기도 화성시 기후변화

경기도 화성시의 기후변화 특성을 살펴보기 위해 경기도농업기술원내 자동기상관측장비(AWS)로 관측한 2001년부터 2020년까지 20년간 연평균기온, 강수량 및 일조시간의 변화를 분석하였다(Figs. 1~5). 연평균·최고·최저 기온 변화와 추세선은 Fig. 1과 같으며, 연평균·최고기온의 20년 변화에서는 모두 상승하는 경향으로 나타났으며, 최고기온 > 평균기온 > 최저기온 순으로 기온 변화폭이 크고 상승속도도 큰 것으로 나타났다. 한편 10년 단위로 2000년대(2000s: 2001~2010년)와 2010년대(2010s: 2011~2020년)를 비교하여 보면, 연평균기온은 각각 12.4±0.4℃, 12.9±0.6℃로 2000년대 대비 2010년대에 0.5℃ 상승하였으며, 연평균 최고기온은 각각 18.3±0.5℃, 19.3±0.9℃로 2000년대 대비 2010년대에 1.0℃ 상승하였다. 연평균 최저기온은 2000년대와 2010년대 모두 7.5±0.5℃로 차이가 없었다. 평균기온의 변화폭을 알 수 있는 표준편차에서도 연평균기온은 0.2℃, 연평균 최고기온은 0.4℃, 연평균 최저기온은 차이가 없어 연평균 최고기온에서 연차간 변동성도 더 커지는 것으로 나타났다. 2000년대와 2010년대의 10년 단위 연평균·최고·최저 기온 변화를 등분산 가정 두 집단에 대한 t-검정 결과, 95% 신뢰수준에서 최고기온 변화만이 통계적으로 유의한 결과로 나타났다. 기온 상승에 따른 계절 변화를 살펴보기 위해 일 평균기온 5℃ 이상이 9일 지속되는 봄 시작일(율리우스일; Julian day)의 변화와 일 평균기온 33℃ 이상인 폭염 발생일수의 변화를 분석하였다(Figs. 2, 3). 10년 단위 연대별 봄 시작일의 평균은 각각 80.0±9.3일, 79.6±9.9일로, 2010년대에 봄의 시작이 약하게 빨라지는 경향이 있으나 통계적으로 유의하지는 않았으며, 변화의 변동성이 커지는 경향으로 나타났다. 폭염일수는 뚜렷하게 증가하는 경향을 보였으며, 2000년대 폭염일수 13.7±7.5일에 비하여 2010년대에는 28.2±10.5일로 14.5일 증가한 것이 통계적으로 유의한 결과로 나타나 경기도 화성시에서의 기온 상승 경향은 연평균 최고기온과 폭염일수에서 뚜렷한 것으로 알 수 있다.

경기도 화성시 지역의 강수량 변화와 추세선은 Fig. 4와 같다. 20년 동안의 연 강수량 변화에서는 약하게 감소하는 경향이 나타났다. 10년 단위로 2000년대와 2010년대를 비교하면 각각 1355.7±101.2 mm, 1217±±389.3 mm으로 2000년대 대비 2010년대에 10.2% 감소하였으나, 여름철(6

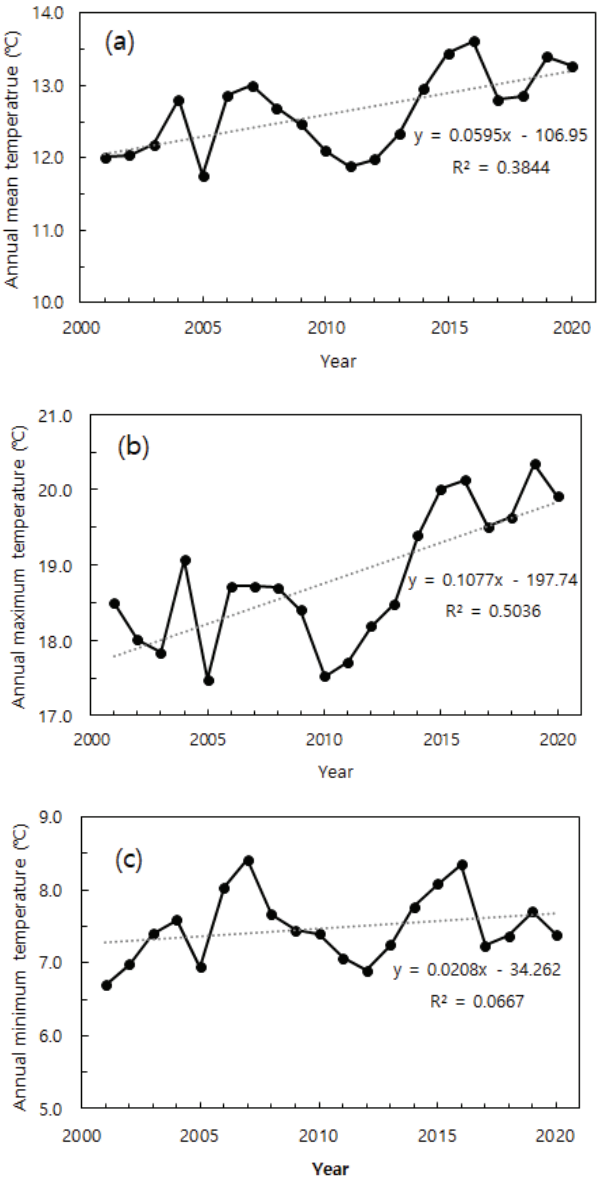

Fig. 1. Variation of the annual mean temperature (a), maximum temperature (b), and minimum temperature (c) in Hwaseong-si Gyeonggi-do over the past 20 years.

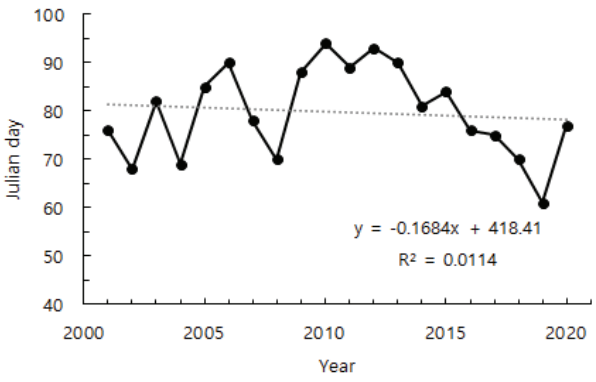

Fig. 2. Variation of the spring start day in Hwaseong-si Gyeonggi-do over the past 20 years.

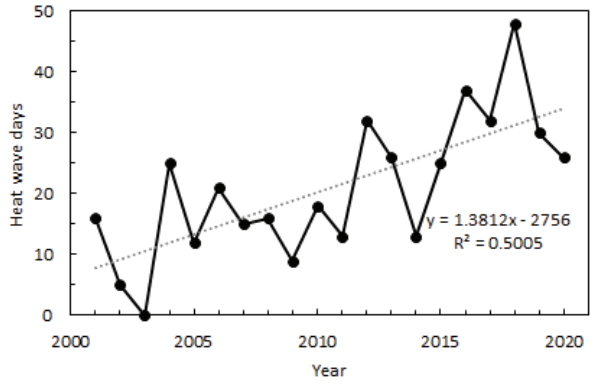

Fig. 3. Variation of the heatwave days in Hwaseong-si Gyeonggi-do over the past 20 years.

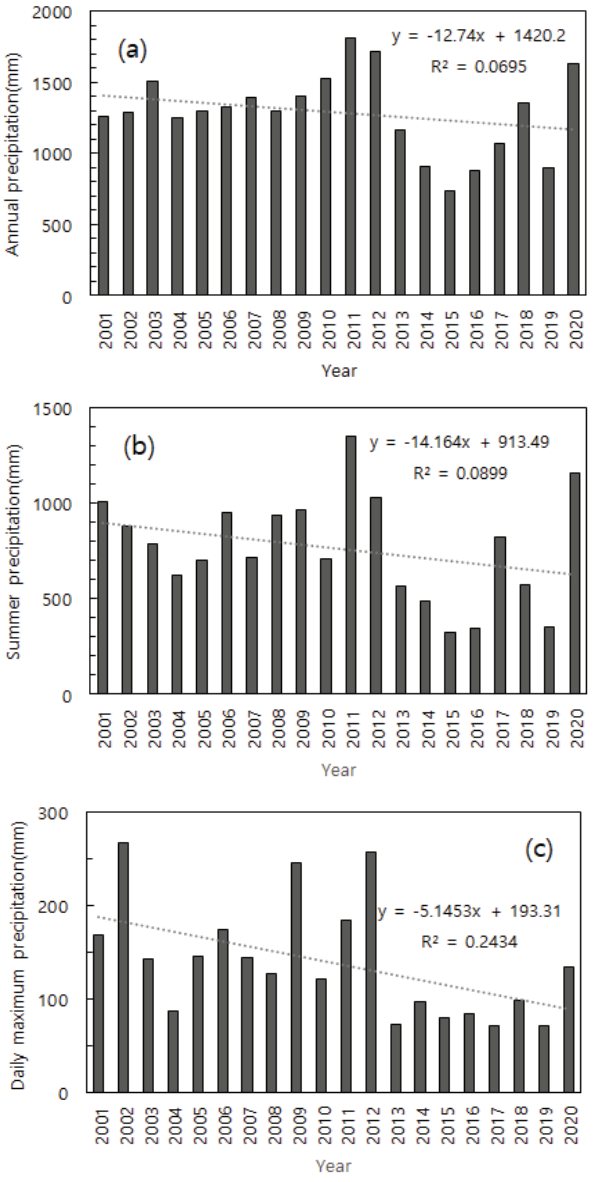

Fig. 4. Variation of the annual precipitation (a), summer (JJA) precipitation (b), and daily maximum precipitation (c) in Hwaseong-si Gyeonggi-do over the past 20 years.

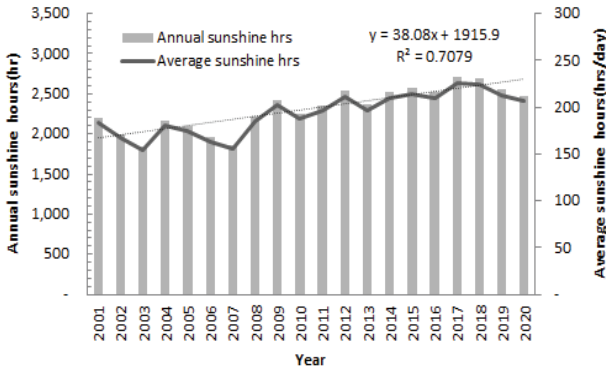

Fig. 5. Variation of the annual accumulated sunshine hours and average sunshine hours in Hwaseong-si Gyeonggi-do over the past 20 years.

월~8월) 강수량은 각각 828.1±137.5 mm, 701.5±370.2 mm으로 15.3% 감소하였으며, 여름철 일 최대강수량은 각각 162.8±55.5 mm, 115.8±61.1 mm으로 28.9% 더 큰 폭으로 감소하였으며 변동성도 더 커지는 것으로 나타났다. 한편 20년 동안의 연누적 일조시간과 연평균 일조시간의 변화는 Fig. 5와 같다. 20년 동안 연누적 일조시간, 연평균 일조시간 모두 증가하는 경향으로 나타났다. 10년 단위로 2000년대와 2010년대의 연평균 일조시간을 비교하면 각각 175.0±15.5시간, 210.9±9.8시간으로 2000년대 대비 2010년대에 20.5% 증가하였고 변동성이 적은 것으로 나타났다. 따라서 2000년대에 비하여 2010년대에 강수량은 적으나 변동성은 크고, 일조시간은 많고 변동성이 적은 것으로 요약할 수 있으며, 10년 단위 연 강수량과 일조시간을 각각 등분산 가정 두 집단에 대한 t-검정 결과, 95% 신뢰수준에서 일조시간 변화만이 통계적으로 유의한 결과로 나타났다.

경기도 화성시 벼 수량 변화와 주요 기상요소 특성

2001년부터 2020년까지 20년간 경기도 화성시 작황시험 포장에서 10a 당 질소 시비량만 2005년에 기존 11 kg에서 9 kg으로 변동된 것을 제외하고는 동일 재배법으로 재배된 추청벼의 백미 수량 변화는 Fig. 6과 같다. 20년 동안 평균 수량은 515±24 kg/10a로 나타났으며, 10년 단위로 2000년대와 2010년대의 평균 수량은 각각 512±20 kg/10a, 519±28 kg/10a으로 2010년대에 약간 증가하였으나 표준편차 이내에 있으며, 10년 단위 편차로 본 변동성은 과거 10년 보다 최근 10년에 쌀 수량 변동성이 더 큰 것으로 나타났다. 벼 수량 변화에 영향을 미친 주요 기상요소를 파악하기 위해 연도별 벼 재배기간(6~9월) 시기별 기온과 일조시간을 피어슨 상관 분석(Pearson correlation analysis)하였으며, 요소별 상관계수는 Table 2와 같다. 해당 상관계수의 통계적으로 유의한 관계($p<0.05$)를 보인 기상요소는 9월 하순의 평균기온, 9월 평균 최고기온, 8월 초순 및 8월 평균 일조시간이였으며, 상관계수에 대한 절대값 0.4 이상으로 유의한 관계를 보인 기상요소는 8월 하순의 평균기온

Table 2. Correlation coefficient (r) of each climate factors affecting milled rice yield

month	day	Temperature			Sunshine hours
		mean	max	min	mean
6	1~10 (early)	-0.111	-0.151	0.092	-0.183
	11~20 (mid)	-0.313	-0.218	-0.226	-0.002
	21~30 (late)	0.101	0.186	-0.068	0.291
	monthly average	-0.133	-0.076	-0.110	0.071
7	1~10 (early)	0.098	0.217	-0.160	0.295
	11~20 (mid)	0.210	0.303*	0.090	0.101
	21~31 (late)	0.134	0.171*	0.080	0.033
	monthly average	0.181	0.305	0.013	0.201
8	1~10 (early)	0.235	0.400	-0.167	0.493*
	11~20 (mid)	0.020	0.178	-0.212	0.435
	21~31 (late)	-0.428	-0.015	-0.584	0.383
	monthly average	-0.036	0.284	-0.430	0.622*
9	1~10 (early)	0.067	0.392	-0.252	0.290
	11~20 (mid)	-0.098	0.244	-0.426	0.426
	21~30 (late)	0.545*	0.410	0.404	-0.210
	monthly average	0.310	0.567*	-0.142	0.258

* significant at $p<0.05$

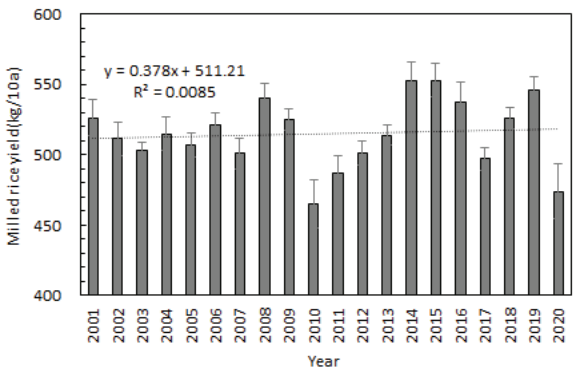

Fig. 6. Variation of the milled rice yield in Hwaseong-si Gyeonggi-do over the past 20 years.

과 최저기온, 9월 중순의 최저기온은 백미 수량과 음의 상관관계를, 9월 하순의 평균·최고·최저기온, 8월 초·중순 및 9월 중순의 일조시간은 백미 수량과 양의 상관관계를 보였다. 또한 지난 20년 동안의 단위면적당 백미 생산량의 상위 1~4순위를 풍년, 하위 1~4순위를 흉년으로 나누어 벼 생육기간의 기온, 강수량, 일조시간의 특성을 평가하였다 (Figs. 7~9, Table 3). 20년 동안의 단위면적당 백미 생산량의 상위 1~4순위의 풍년기간 평균 수량은 548±6 kg/10a, 20년 동안의 단위면적당 백미 생산량의 하위 1~4순위의 흉년기간 평균 수량은 481±14 kg/10a 이였다. 벼 수량에 부정적 영향을 주는 주요 기상요소 분석은 영양생장기(6월)의 저온, 등숙기(출수 후 40일)의 고온으로 평가하였으며, 강수량 및 일조시간 변화를 생육시기별로 분석하여 풍년과 흉년에 영향을 준 것으로 판단되는 기상요소를 정리하였다 (Table 3). 벼 수량에 영향을 미치는 주요 기상요소에 관한 선행연구에 따르면, 중만생종 벼의 쌀 수량은 등숙기의 일조시수와 높은 상관을 보인 바 있으며, 출수 후 40일간 평균 온도가 22℃ 일 때 최대 쌀 수량을 나타낸 바 있다[16, 17]. 또한 쌀풍년 발생조건으로 7월 평균 일조시간이 5.1시간 이상, 8월 하순부터 9월 중순까지의 평균일조시간이 6시간 이상이 동시에 발생해야 한다고 제시한 바 있다[18].

벼 생육단계 중 영양생장기인 6월 상순의 일 최저기온의 변화에서는 지난 20년 동안 평균은 16.0±0.9℃였으며, 2017년에 14.4℃로 가장 낮았고, 2014년에 18.1℃로 가장 높았다. 2017년은 지난 20년 벼 생산량에서 하위 4순위에 속하는 흉년이며, 2014년은 지난 20년 벼 생산량에서 상위 2순위에 속하는 풍년으로 나타난 해이다. 벼 생육단계 등

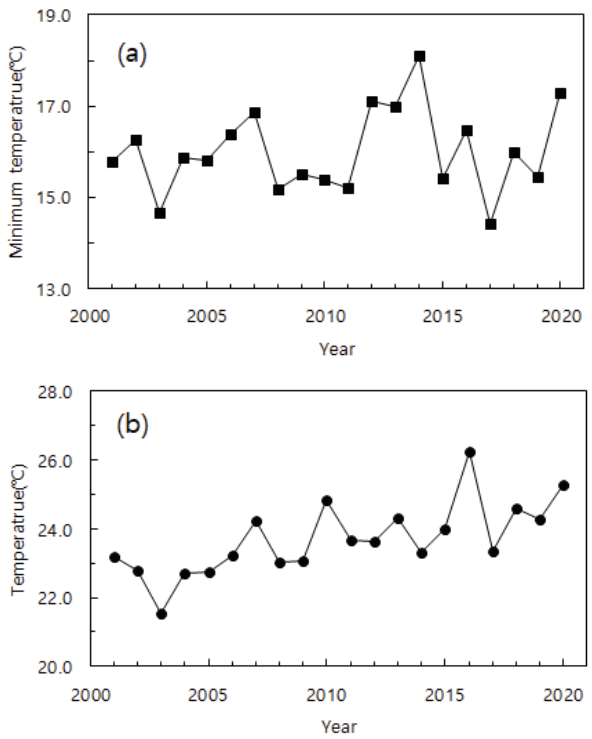

Fig. 7. Variation of the average minimum temperature during the vegetative growth stage in early June (a), average temperature during the ripening period (b) in Hwaseong-si Gyeonggi-do over the past 20 years.

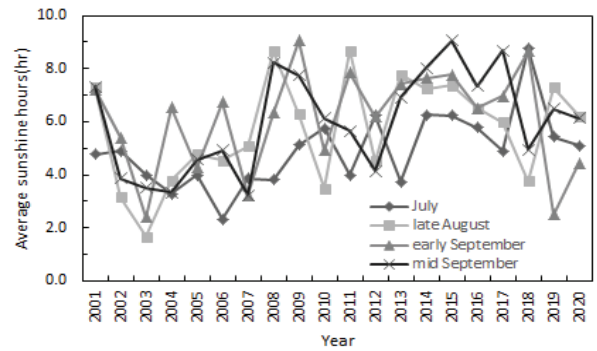

Fig. 8. Variation of the average sunshine hours in July, late August, early September and mid September in Hwaseong-si Gyeonggi-do over the past 20 years.

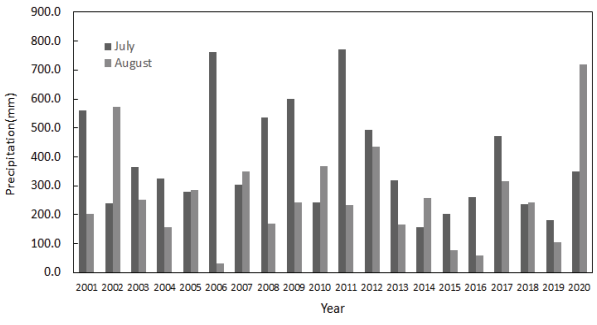

Fig. 9. Variation of the precipitation in July and August in Hwaseong-si Gyeonggi-do over the past 20 years.

숙기(출수 후 40일)의 평균기온 변화에서는 지난 20년 동안 평균은 23.7±1.1℃이고, 2016년에 26.3℃로 가장 높게 나타났으며, 2020년에 25.3℃, 2010년에 24.9℃로 높게 나타났다. 2010년과 2020년은 지난 20년 벼 생산량에서 하위 1위, 2위에 속하는 흉년이다. 지난 20년 평균 일조시간은 7월, 8월 하순, 9월 초순, 9월 중순 각각 4.9±1.4, 5.7±2.0, 6.1±1.9, 6.0±1.9 시간으로 나타났으며, 이에 비해 2014년, 2015년에 7월 평균일조시간(6.3, 6.2시간), 8월 하순 평균일조시간(7.2, 7.4시간), 9월 초순 평균일조시간(7.6, 7.8시간), 9월 중순 평균일조시간(8.0, 9.1시간)이 많았으며, 2008년에는 7월 평균일조시간이 3.8시간으로 적었다. 2014년, 2015년은 지난 20년 벼 생산량에서 상위 1, 2위에 속하는 풍년이다. 7~8월 강수량에서는 2011년 7월에 771.9 mm로 가장 많은 비가 내렸고, 2020년 8월 719.3 mm로 가장 많은 비가 내렸다. 2020년과 2011년은 지난 20년 벼 생산량에서 하위 2, 3위로 나타난 흉년이다. 10월은 등숙후기로 영향이 적다고 가정한다면 6월부터 9월까지 쌀 수량 형성에 생육단계별로 많은 기상요소가 복합적으로 영향을 미치므로 단일 생육단계로 모두 설명할 수 없는 제한점이 있지만 본 연구기간의 조사성적으로 보면 7월 평균일조시간 6시간 이상, 8월 하순, 9월 초순 평균일조시간 7시간 이상에서 경기도 화성시 추청벼 생산량이 높게 나타났으며, 반대로 7~8월에 많은 강수와 부족한 일조, 6월 초순의 낮은 기온에서는 추청벼 생산량이 떨어지는 것으로 나타났다. 본 연구에서의 기후변화와 벼 수량 평가 결과는 관측자료가 20년이라는 제한 조건으로 10년 단위로 과거와 최근에 나타난 기후변화를 비교하는 제한점이 있으나 지역의 관행농업환경과 유사한 작황시험포장에서 나타난 기후변화 현상을 규명하였으며 쌀 생산성에 미치는 영향 연구의 결과로 활용성이 크며, 추후 최소 30년 이상의 장기간 관측자료로 기후변화 및 그에 대한 영향 연구가 더 필요하다고 판단된다.

고 찰

본 연구에서는 경기도 화성시에서 나타난 기후변화 현상과 표준재배법으로 재배한 추청벼 수량 변화에 기후변화가 미치는 영향을 분석하였다. 경기도 화성시에서 지난 20년 동안 나타난 기후변화 현상에서 기온은 최고기온 > 평균기온 > 최저기온 순으로 기온 상승폭이 크고 변동성도 커지는 것으로 나타났다. 강수량 변화에서는 연강수량, 여름철(6월~8월) 강수량, 여름철 일 최대강수량 모두 감소하는 경향을 보였으나 변동성은 더 커진 것으로 나타났다. 일조시간 변화에서는 누적 일조시간, 평균 일조시간 모두 증가하는 경향을 보였으며, 연평균 일조시간은 2000년대 대비 2010년대에 20.5% 증가하고 변동성은 작아진 것으로 나타났다. 이러한 기온 상승, 강수량 감소, 일조시간 증가는 우리나라 영남내륙 지역에서 과거 20년의 주요 기상변화로 제시된 바 있다[16]. 한편 추청벼 생산량 변화에서는 뚜렷한 증감 경향은

Table 3. Summary of the weather characteristics of the year in high and low rice yield

Rice yield	Rank	Year	Weather Characteristic
High (Ascending rank)	1	2014	- Average sunshine hours on July: 6.3 hr - Average sunshine hours on late August and early September: 7.4 hr Average minimum temperature on early June: 18.1℃ (vs. normal 16.2℃) - Average temperature during ripening period: 23.3℃ (vs. optimum temperature: 22℃)
	2	2015	- Average sunshine hours on July: 6.2 hr - Average sunshine hours on late August and early September: 7.6 hr
	3	2019	- Average sunshine hours on late August: 7.3 hr
	4	2008	- Average sunshine hours on late August and early September: 7.5 hr
Low (Descending rank)	1	2010	- Average sunshine hours on late August and early September: 4.2 hr - Precipitation on late August: 335.7mm (vs. normal: 99.3mm) - Average temperature during ripening period: 24.9℃ (vs. optimum temperature: 22℃)
	2	2020	- Average sunshine hours on late August and early September: 5.3 hr - Precipitation on August: 719.3mm (vs. normal: 295.2mm) - Average temperature during ripening period: 25.3℃ (vs. optimum temperature: 22℃)
	3	2011	- Average sunshine hours on July: 4.0 hr - Precipitation on July: 771.9mm (vs. normal: 385.6mm)
	4	2017	- Average minimum temperature on early June: 14.4℃ (vs. normal: 16.2℃) - Average sunshine hours on July: 4.9 hr - Precipitation on July: 471.8mm (vs. normal: 385.6mm)

보이지 않았으며 10년 단위 연대별 평균 수량에도 유의미한 차이는 없었으나, 2000년대 보다 2010년대에 쌀 수량 변동성이 더 큰 것으로 나타났다. 벼 수량과 기상요소와의 상관분석 결과 통계적으로 유의한 관계($p<0.05$)를 보인 기상요소는 9월 하순의 평균기온, 9월 평균 최고기온, 8월 초순 및 8월 평균 일조시간으로 나타났다. 이는 중만생종 벼 수량이 등숙기의 일조시간과 높은 상관관계를 보인 바 있는 국내 사례[16]와 기온 및 일조시간과 벼 수량이 양의 관계를 보인 중국의 사례[19] 와도 일치하는 결과이다. 또한 지난 20년 동안 추청벼의 단위면적당 백미 생산량 상위 1~4위와 하위 1~4위 해당연도의 주요기상특성으로, 6월 초순의 일최저기온, 7~8월의 강수량, 7~9월의 일조시간이 벼 생산량에 영향을 미치는 요인으로 평가하였다. 본 연구에서 제시하는 경기도 화성시 지역의 기후변화 현상에 대한 이해와 벼 수량 변화에 미치는 기상요소 특성 평가는 지역의 기후변화 현상에 대한 과학적 이해를 높이는데 기여할 수 있고 기후변화에 따른 벼 수량에 미치는 주요 기상요소들을 파악하여 기후변화에 대응할 수 있는 품종육성과 관리기술 및 적응할 수 있는 재배법을 개선하기 위한 기초정보로 활용할 수 있다.

Note

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgement

This work was supported by Rural Development Administration (Project number: PJ015086022021).

References

1. Lobell DB, Schlenker W, Costa-Roberts J (2011) Climate trends and global crop production since 1980. Science, 333(6042), 616-620. https://doi.org/10.1126/science.1204531.
2. Urban D, Roberts MJ, Schlenker W, Lobell DB (2012) Projected temperature changes indicate significant increase in interannual variability of US maize yields. Climatic change, 112(2), 525-533. https://doi.org/10.1007/s10584-012-0428-2.

3. Osborne TM, Wheeler TR (2013) Evidence for a climate signal in trends of global crop yield variability over the past 50 years. Environmental Research Letters, 8(2), 024001.
4. Ray DK, Gerber JS, MacDonald GK, West PC (2015) Climate variation explains a third of global crop yield variability. Nature Communications, 6(1), 1-9. https://doi.org/10.1038/ncomms6989.
5. Liang S, Wu W, Sun J, Li Z, Sun X, Chen H, Chen S, Fan L, You L et al. (2021) Climate-mediated dynamics of the northern limit of paddy rice in China. Environmental Research Letters, 16(6), 064008. https://doi.org/10.1088/1748-9326/abfac0.
6. Jung MP, Shim KM, Kim YS, Kim SC, So KH (2014) Changing trends of climatic variables of agro-climatic zones of rice in South Korea. Korean Journal of Climate Change Research, 5(1), 13-19.
7. Jung MP, Shim KM, Kim YS, Kim SC, So KH (2014) Changing trends of climatic variables of agro-climatic zones of rice in South Korea. Korean Journal of Climate Change Research, 5(1), 13-19.
8. Shim KM, Roh KA, So KH, Kim GY, Jeong HC, Lee DB (2010) Assessing impacts of global warming on rice growth and production in Korea. Journal of Climate Change Research, 1(2), 121-131.
9. Kim JH, Shon JY, Yoon YH, Choi KJ, Lee CK (2013) Study on improving high-temperature tolerance for grain filling through adjusting sink size. Korean Journal of Crop Science, 58(2), 107-112. https://doi.org/10.7740/kjcs.2013.58.2.107.
10. Lee DJ, Kim JH, Kim KS (2014) Spatiotemporal assessment of the late marginal heading date of rice using climate normal data in Korea. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, 16(4), 316-326. https://doi.org/10.5532/KJAFM.2014.16.4.316.
11. Seo MC, Kim JH, Choi KJ, Lee YH, Sang WG, Cho HS, Cho JI, Shin P, Baek JK (2020) Review on adaptability of rice varieties and cultivation technology according to climate change in Korea. Korean Journal of Crop Science, 65(4), 327-338. https://doi.org/10.7740/kjcs.2020.65.4.327.
12. Lee CK, Kim JH, Shon JY, Yang WH, Yoon YH, Choi KJ, Kim KS (2012) Impacts of climate change on rice production and adaptation method in Korea as evaluated by simulation study. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, 14(4), 207-221. https://doi.org/10.5532/KJAFM.2012.14.4.207.
13. Lee KJ, Nguyen DN, Choi DH, Ban HY, Lee BW (2015) Effects of elevated air temperature on yield and yield components of rice. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, 17(2), 156- 164. https://doi.org/10.5532/KJAFM.2015.17.2.156.
14. Sang WG, Cho HS, Kim JH, Shin P, Baek JK, Lee UH, Cho JI, Seo MC (2018) The change of grain quality and starch assimilation of rice under future climate conditions according to RCP 8.5 scenario. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, 20(4), 296-304. https://doi.org/10.5532/KJAFM.2018.20.4.296.
15. Park GA, Lee SH, Kim MH (2014) An analysis on determinants of farmer's perception to climate change in Korea. Korean Journal of Climate Change Research, 5(1), 37-46.
16. Shin JH, Han CM, Kwon JB, Kim SK (2019) Effect of climate on the yield of different maturing rice in the Yeongnam inland area over the past 20 years. Korean Journal of Crop Science, 64(3), 193-203. https://doi.org/10.7740/kjcs.2019.64.3.193.
17. Yun SH, Lee JT (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.
18. Kim JH, Sang WG, Shin P, Cho HS, Seo MC (2017) A meteorological analysis on high rice yield in 2015 in South Korea. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, 19(2), 54-61. https://doi.org/10.5532/KJAFM.2017.19.2.54.
19. Zhang T, Zhu J, Wassmann R (2010).Responses of rice yields to recent climate change in China: an empirical assessment based on long-term observations at different spatial scales (1981?2005). Agricultural and Forest Meteorology, 150(7-8), 1128-1137. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.04.013.