

기후변화가 벼의 생산량에 미치는 영향*

이윤선** · 이승호***

The Impacts of Climate Change on Rice Yield*

Yoonsun Lee** · Seungho Lee***

요약 : 기온, 강수량, 일조시간과 같은 기후요소는 벼 생육에 있어서 중요한 요인이기 때문에 기후변화는 벼 수량과 질에 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 벼 수량구성요소와 기후의 관계를 분석하여 기후변화가 벼 생산량에 미치는 영향을 예측하고자 하였다. 이를 위하여 각 지방자치단체의 농업기술원에서 조사하고 있는 해당 벼의 주당 이삭수와 이삭당 낱알 수, 낱알 무게, 등숙비율과 이앙기, 출수기, 그리고 기온, 강수량, 일조시간 등의 기상 자료를 분석하였다.

조생종 벼 재배지역의 주당 이삭수는 기온과 양의 관계를 가지며, 중생종 및 중만생종 벼 재배지역의 낱알무게가 기온과 양의 관계를 가진다. 춘천, 청원, 나주에서 등숙비율은 기온과 양의 관계가 있고, 청원과 나주에서 이삭당 낱알수는 기온과 양의 관계가 있다.

기온이 상승하면 강릉과 제천에서는 주당 이삭수의 증가로 수량 증가가 예상되며 진부에서는 주당 이삭수와 낱알무게가 증가하여 수량이 증가할 것으로 예상된다. 그러나 춘천과 영덕, 화성, 청원, 나주에서는 기온이 상승할 경우 등숙기의 고온과 앞당겨지는 출수기로 인해 등숙비율이 감소하여 수량이 감소될 것으로 예상된다.

주요어 : 기후변화, 벼 수량, 벼 수량구성요소

Abstract : The influence of weather conditions as temperature, rainfall and duration of sunshine are very important for the growth of rice. Therefore, the climate change affects rice yield and quality. The aim of this paper is to analyze the relationship between rice yield components and climate elements, and to predict the impacts of climate change on rice yield.

The relationship between number of panicle per hill and temperature in early maturing cultivar growing region is more significant. And the relationship between the grain weight and temperature in middle and mid-late maturing cultivar growing region is more significant. In *Chuncheon*, *Cheongwon* and *Naju*, the relationship between ripening rate and temperature has a positive significant correlation. And in *Cheongwon* and *Naju*, the relationship between number of grain per panicle and temperature has a positive significant correlation.

In *Gangneung*, *Jecheon*, when temperature rising, rice yield increase is predicted according to increasing of number of panicle per hill. And in *Jinbu*, rising temperature will lead rice yield increase according to number of panicle per hill and grain weight increase. In *Chuncheon*, *Youngdeok*, *Hwaseong*, *Cheongwon* and *Naju*, when temperature rising, the high temperature during grain ripening period and earlier heading date will lead ripening rate decreasing, therefore the rice yield will decrease.

Key Words : climate change, rice yield, rice yield components

* 이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2008-4505)의 지원으로 수행되었음.

** 건국대학교 대학원, 현재 한국해양연구원 부설 극지연구소 연구원(Graduate Student, Department of Geography, Konkuk University, Researcher, Korea Polar Research Institute, KORDI, lysunny11@nate.com)

*** 건국대학교 기후연구소 · 지리학과 교수(Professor, Department of Geography · Climate Research Institute, Konkuk University, leesh@konkuk.ac.kr)

I. 서론

벼는 보리, 밀 등의 다른 주곡 작물에 비해 단위면적당 수량이 많고 안정적이어서 우리나라에서는 예부터 벼를 주식작물로 소비하고 있다. 또한 벼는 우리나라 대부분의 지역에서 재배되고 있는 작물로 농업 경제 활동에 있어서도 중요한 역할을 한다.

벼는 기온과 강수량, 일조시간, 일사량 등의 기상 조건에 민감하게 반응하며 이 요소들은 벼의 성장에 큰 영향을 미친다. 식물은 각 생육단계별로 생육할 수 있는 한계온도를 가지고 있으며 기상상태에 따라 생육이 좌우되므로 기후변화로 인한 기상상태의 변화는 벼의 수량(收量)과 질에 영향을 미칠 수 있다.

지구온난화로 인하여 전 지구적으로 1906~2005년 동안 기온이 약 0.74℃ 상승하였으며 특히 북반구 중위도지방에서의 기온상승이 두드러졌다(IPCC, 2007). 이와 같은 기온상승은 작물에 큰 영향을 미치기 때문에 기후변화가 작물의 생육과 수량에 미치는 영향에 대한 영향평가 연구가 활발히 이루어지고 있다.

작물의 생육과 수량에 대한 기후변화의 영향평가 연구는 작물모델과 실험을 통해 이루어지고 있다. 작물모델과 기후변화 시나리오를 이용한 연구에서 지구온난화로 인한 기온 상승은 밀과 벼의 수량을 감소시키며, 이산화탄소의 농도는 기온 상승으로 인한 수량의 감소를 상쇄시킨다고 하였다(정유란 외, 2006; Lal *et al.*, 1998; Attri and Rathore, 2003; Erda *et al.*, 2005; Tao *et al.*, 2008). 또한 실험을 통하여 기온의 상승이 작물의 생육상태와 수량구성요소에 미치는 영향에 대한 연구에서는 기온을 상승시켰을 때 벼의 등숙비율(登熟比率)¹⁾과 수정률이 감소한다는 것을 밝혔으며, 작물의 물질생산량이 감소한다고 하였다(Ziska *et al.*, 1996; Matsui *et al.*, 1997; Hakala, 1998).

현재 작물모델과 실험을 통한 연구는 활발히 이루어지고 있지만 기온 상승이 작물의 생육과 수량에 미치는 실제적인 영향에 관한 연구는 부족한 실정이다. 관측 자료를 이용한 기후변화 영향평가는 작물의 반응과정과 메커니즘을 고찰하는데 더 정확하고 가치

있는 정보를 제공할 수 있다(이승호 외, 2008). 또한 현재 벼 재배지역에 대한 기후변화의 실질적인 영향 평가가 가능하다는 점에서 중요하다.

벼는 우리나라 주식작물이며 벼 수량의 변화는 농업활동에 큰 영향을 미칠 수 있으므로 기후변화로 인한 벼 수량구성요소의 변화를 파악하고 분석하는 것이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 벼 수량의 변화 경향 및 벼 수량구성요소와의 관계를 파악한 뒤 벼 수량구성요소와 기후요소 사이의 관계를 분석하여 기후변화가 벼 수량에 미치는 영향을 파악하고자 한다.

II. 연구자료 및 방법

본 연구에 사용한 자료는 벼의 수량과 수량구성요소 및 기온, 강수량, 일조시간 등의 기상 자료이다. 본 연구에서 수량은 생산량과 같은 의미로 사용되었다. 벼 수량구성요소는 주(株)당 이삭수(개), 이삭당 낱알수(개), 낱알무게(mg), 등숙비율(%)을 포함하고 있다. 1988년부터 작물과학원과 각 지방자치단체의 농업기술원에서는 작황조사를 통해 해마다 여러 벼 품종의 수량과 수량구성요소를 조사하고 있다. 본 연구에서는 장기간 동안 동일한 벼 품종에 대해 벼 수량구성요소가 조사되고 있는 지역인 강릉과 계화, 나주, 안동, 영덕, 익산, 제천, 진부, 진주, 청원, 춘천, 화성을 연구지역으로 선정하였다(그림 1).

나주와 익산을 제외한 10개 지점의 조사기간은 1988~2006년이며, 나주는 1990~2006년, 익산은 1988~2005년이다. 강릉, 제천, 진부, 춘천, 안동에서는 오대벼, 영덕에서는 화성벼, 청원, 화성에서는 추청벼, 계화, 나주, 익산, 진주에서는 동진벼의 수량과 수량구성요소 자료를 이용하였다. 오대벼는 조생종, 화성벼는 중생종, 추청벼와 동진벼는 중만생종이다. 벼의 수량, 수량구성요소와 함께 조사되는 이앙기, 출수기²⁾의 생육시기 자료도 분석에 사용하였다.

기후요소 중 기온, 강수량, 일조시간은 작물의 생육에 큰 영향을 미치는 요소이며(윤진일, 1999), 작물의

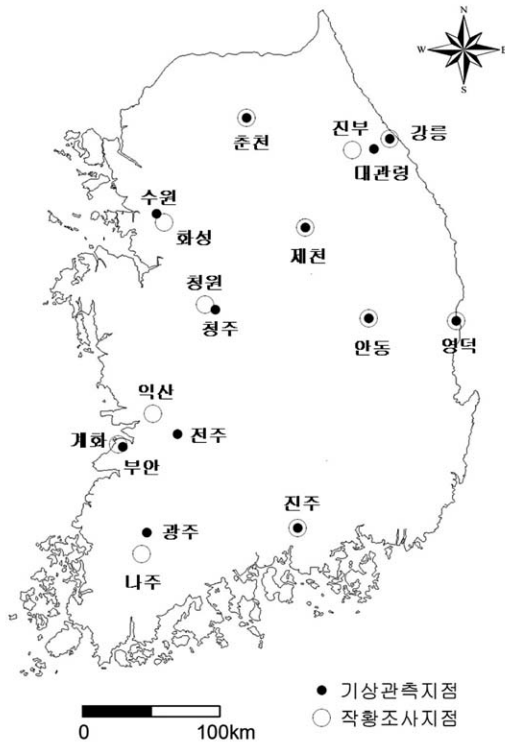


그림 1. 연구지역

생육모형에 변수로 이용되고 있다(조경숙·윤진일, 1999). 따라서 본 연구에서는 1988~2006년의 기온과 강수량, 일조시간 자료를 분석에 사용하였다.

앞에서 기술한 12개의 지역 중 기상관측소가 없는 계화, 나주, 익산, 진부, 청원, 화성의 경우 가장 인접한 거리에 위치하고 있는 기상관측소의 자료를 사용하였다. 계화와 나주, 익산, 진부, 청원, 화성은 각각 부안, 광주, 전주, 대관령, 청주, 수원,의 기상자료를 연구에 이용하였다. 따라서 본 연구에서는 1988~2006년의 강릉, 광주(나주), 대관령(진부), 부안(계화), 수원(화성), 안동, 영덕, 전주(익산), 제천, 진주, 청주(청원), 춘천의 기온, 강수량, 일조시간의 기상자료가 사용되었다.

벼 수량과 수량구성요소의 관계를 분석하기 위하여 수량을 종속변수, 주당 이삭수, 이삭당 낱알수, 낱알무게, 등숙비율을 독립변수로 설정하고 '단계선택' 방법을 이용하여 다중회귀분석을 실시하였다. 다중회귀분석의 결과를 통해 각 지역별로 수량과 유의한 관

계를 가지는 수량구성요소를 선정하였으며, 선정된 수량구성요소의 변화경향과 각 기후요소와의 관계를 분석하였다.

앞의 다중회귀분석의 결과를 통해 선정된 수량구성요소의 변화경향을 파악하기 위하여 연도를 독립변수로, 수량구성요소를 종속변수로 하여 회귀분석을 실시하였다. 회귀분석의 결과를 통하여 벼 수량구성요소의 변화율과 유의성을 파악하였다.

벼 수량구성요소와 기후요소의 관계를 분석하기 위하여 주당 이삭수, 이삭당 낱알수, 낱알무게, 등숙비율에 영향을 미치는 시기를 선행 연구의 결과를 이용하여 선정하였다. 주당 이삭수는 대부분은 모내기 후의 환경에 의해 크게 좌우되며 영화분화기(穎花分化期)³⁾가 지나면 거의 영향을 받지 않는다(채제천, 2005). 따라서 모내기 후 분얼(分蘖)⁴⁾이 시작되는 시기부터 영화분화기까지의 이앙 후 5~50일 동안의 기후요소와 주당 이삭수의 관계를 분석하였다.

이삭당 낱알수는 분화된 영화수와 그 후 퇴화된 영화수의 차에 의해 결정되며, 영화의 분화와 퇴화는 출수 전 5~35일 동안의 환경에 가장 영향을 받기 쉽다(이종훈, 2001). 따라서 이삭당 낱알수에 영향을 미치는 기후요소를 파악하기 위해 출수 전 5~35일 동안의 기후요소와 이삭당 낱알수의 관계를 분석하였다.

낱알무게와 등숙비율은 출수 후 벼 낱알이 익어가는 시기의 환경조건에 의해 강하게 영향을 받는다(이종훈, 2001). 따라서 낱알무게와 등숙비율에 영향을 미치는 기후요소를 파악하기 위하여 등숙기의 기후요소와 관계를 분석하였다. 벼 낱알이 익어가는 시기인 등숙기는 벼 품종에 따라 다소 차이가 있다. 조생종 벼는 출수⁵⁾ 후 40일, 중생종 벼는 45일, 중만생종 벼는 50일 정도 소요되기(이종훈, 2001; 채제천, 2005) 때문에 조생종 벼, 중생종 벼, 중만생종 벼의 등숙기를 각각 출수 후 40일, 45일, 50일로 정의하였다.

기후요소 자료 중 일 평균기온, 일 최고기온, 일 최저기온, 일교차는 이앙 후 5~50일, 출수 전 5~35일, 등숙기에 해당하는 일 자료를 평균하여 각 시기의 평균을 계산하였다. 강수량과 일조시간은 각 시기에 해당하

표 1. 벼의 각 수량구성요소가 수량(kg/10a) 변화에 미치는 영향*

종 류	품 종	지 역	주당 이삭수(개)	이삭당 낱알수(개)	낱알무게(mg)	등숙비율(%)
조생종	오대벼	강릉	18.0	2.9	15.6	3.5
		제천	24.1	-	25.6	-
		진부	37.4	-	26.4	4.7
		춘천	-	-	-	3.7
중생종	화성벼	영덕	-	-	21.6	-
중만생종	추청벼	화성	-	-	17.5	-
		청원	-	3.4	-	8.6
	동진벼	나주	-	3.7	-	8.4
		진주	24.0	2.4	-	4.4

* 각 값은 다중회귀식의 회귀계수를 의미함.

는 일 자료의 합을 계산하였다. 각 시기별로 계산된 기후요소와 벼 수량구성요소의 관계를 상관분석하였다.

III. 벼 수량과 수량구성요소의 관계

수량은 주당 이삭수, 이삭당 낱알수, 낱알무게, 등숙비율의 수량구성요소로 이루어진다. 벼 수량에 유의하게 영향을 미치는 수량구성요소를 파악하기 위하여 벼 수량과 수량구성요소의 관계를 파악하였다.

1. 조생종 벼

조생종 벼 재배지역인 강릉, 안동, 제천, 진부, 춘천에서 벼의 수량과 수량구성요소 사이의 다중회귀분석 결과는 표 1과 같다. 강릉 오대벼의 경우 주당 이삭수, 이삭당 낱알수, 낱알무게, 등숙비율이 모두 수량 변화에 유의하게 영향을 미친다. 제천에서 오대벼는 주당 이삭수, 낱알무게가 수량 변화에 유의한 영향을 미치며 진부의 오대벼는 주당 이삭수, 낱알무게, 등숙비율이 수량 변화에 유의한 영향을 미친다. 춘천의 오대벼는 등숙비율만 수량 변화와 유의한 관계를 보인다.

이와 같이 조생종 벼 재배지역의 벼 수량과 수량구성요소의 관계를 분석한 결과 주당 이삭수, 낱알무게, 등숙비율이 수량에 유의하게 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다(표 1). 안동의 경우 통계적으로 수량

에 유의하게 영향을 미치는 수량구성요소가 없다.

2. 중생종 및 중만생종 벼

중생종 벼 재배지역인 영덕, 중만생종 벼 재배지역인 청원, 화성, 계화, 나주, 익산, 진주에서 벼의 수량과 수량구성요소의 관계를 분석하였다. 영덕의 화성벼는 낱알무게만 수량의 변화에 유의하게 영향을 미쳤으며, 청원의 추청벼 수량은 이삭당 낱알수, 등숙비율과 유의한 관계가 있다. 화성의 추청벼의 경우 수량구성요소 중 낱알무게만이 수량 변화에 유의하게 영향을 미쳤다. 나주의 동진벼는 이삭당 낱알수와 등숙비율이 수량에 유의한 영향을 미쳤으며 진주의 동진벼 수량은 주당 이삭수, 이삭당 낱알수, 등숙비율과 유의한 관계가 있다.

중생종 및 중만생종 벼의 수량과 수량구성요소의 관계를 분석한 결과 영덕, 화성에서 벼의 수량은 낱알무게의 영향을 크게 받으며, 청원, 나주, 진주에서는 이삭당 낱알수, 등숙비율의 영향이 크다(표 1). 계화와 익산은 수량에 통계적으로 유의하게 영향을 미치는 수량구성요소가 없다.

IV. 수량과 기후요소의 관계

다중회귀분석 결과를 토대로 하여 수량에 유의하게 영향을 미치는 수량구성요소를 선정하여 변화경향

을 분석하고 기후요소와의 관계를 파악하였다. 앞의 결과를 바탕으로 주당 이삭수는 강릉, 제천, 진부, 진주에서 이삭당 낱알수는 강릉, 나주, 진주, 청원에서 낱알무게는 강릉, 영덕, 제천, 진부, 화성에서 등숙비율은 강릉, 나주, 청원, 춘천, 진부, 진주에서 각각 벼 수량구성요소의 변화경향과 기후요소와의 관계를 파악하였다.

1. 주당 이삭수의 변화와 기후요소와의 관계

주당 이삭수는 이앙 후부터 영화분화기에 해당하는 시기의 환경에 크게 영향을 받는다. 그러므로 분얼이 시작되는 이앙 후 5일부터 영화분화기인 이앙 후 50일까지의 기후요소와 주당 이삭수의 관계를 파악하였다. 오대벼와 화성벼, 추청벼의 이앙 후 5~50일은 대체로 5월 하순에서 7월 상순에 해당한다.

조생종 벼 재배지역 중 강릉과 진부에서는 주당 이삭수가 증가하였으며, 제천에서는 감소하였다(표 2). 진부 오대벼의 주당 이삭수는 1년에 0.205개씩 증가하였으며 유의수준 $\alpha=0.01$ 에서 유의하다. 강릉의 오대벼는 1년에 0.178개씩 증가하였으며 유의수준 $\alpha=0.05$ 에서 유의하다. 또한 제천의 오대벼 주당 이삭수는 -0.064개/년의 변화율로 감소하였으며 유의수준 $\alpha=0.05$ 에서 유의하다. 중만생종 벼 재배지역인 진주에서 동진벼의 주당 이삭수는 1년에 0.026개씩 증가하였다.

주당 이삭수와 이앙 후 5~50일 동안의 기후요소의 관계를 분석한 결과 기온만이 주당 이삭수와 유의한 관계를 보였다(표 3). 조생종 벼 재배지역의 주당 이삭수와 기온의 관계를 살펴보면 강릉의 오대벼는 이앙 후 5~50일 동안의 최저기온과 상관계수 $r=0.649$ 로 가장 높은 상관관계를 가지며 유의수준 $\alpha=0.01$ 에서 유의하다(그림 2). 이앙 후 5~50일 동안의 최저기온이 1℃ 상승하면 강릉에서 오대벼의 주당 이삭수는 1.12개 증가하는 경향이라고 할 수 있다.

진부에서 오대벼의 주당 이삭수는 이앙 후 5~50일 동안의 최고기온과 상관계수 $r=0.505$ 로 높은 상관관계를 가지며 유의수준 $\alpha=0.05$ 에서 통계적으로 유의하

표 2. 주당 이삭수의 변화율(개/년)

종 류	품 종	지 역	변 화 율
조생종	오대벼	강릉	0.178*
		제천	-0.064*
		진부	0.205**
중만생종	동진벼	진주	0.026

** $\alpha=0.01$ (양측검정), * $\alpha=0.05$ (양측검정)

표 3. 주당 이삭수와 이앙 후 5~50일 동안의 기온과의 상관 계수(r)

종 류	품 종	지 역	평균 기온	최고 기온	최저 기온	일교차
조생종	오대벼	강릉	0.603**	0.492*	0.649**	0.061
		진부	0.467*	0.505*	0.410	0.337
		제천	0.310	0.485*	0.070	0.351
중만생종	동진벼	진주	0.031	0.162	-0.185	0.387

** $\alpha=0.01$ (양측검정), * $\alpha=0.05$ (양측검정)

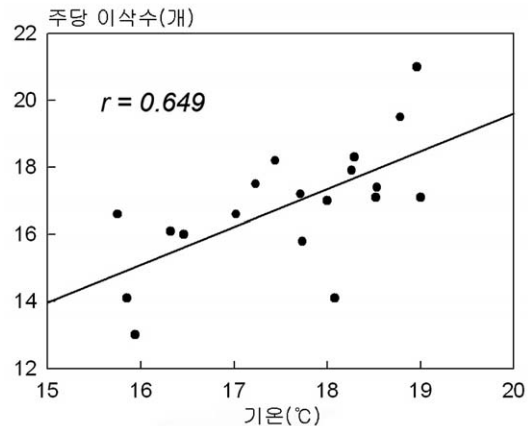


그림 2. 강릉 오대벼의 주당 이삭수와 이앙 후 5~50일 동안의 최저기온의 평균과의 관계

다. 제천에서 오대벼의 주당 이삭수도 이앙 후 5~50일 동안의 최고기온과 상관계수 $r=0.485$ 의 양의 상관관계를 보이며 유의수준 $\alpha=0.05$ 에서 유의하다. 진부와 제천에서 오대벼의 경우 이앙 후 5~50일 동안의 최고기온이 1℃ 상승할 때 주당 이삭수가 각각 0.6개, 0.4개씩 증가한다고 할 수 있다. 중만생종 벼 재배지역인 진주의 주당 이삭수는 통계적으로 유의한 상관관계를 보이는 기후요소가 없다.

주당 이삭수와 기후요소의 관계를 분석한 결과 조

생종 벼를 재배하는 지역에서 주당 이삭수와 기온의 관계가 유의하며 증생종 및 중만생종 벼 재배지역에서는 그 관계가 조생종 벼 재배지역에 비해 낮다. 중만생종 벼에 비해 조생종 벼의 이삭시기가 빠르기 때문에 조생종 벼는 중만생종 벼에 비해 이삭 후 5~50일 동안의 기온이 낮다. 벼는 고온성 작물이며 일반적으로 우리나라에서는 고온의 해에 벼 생육이 양호하다(이중훈, 2001). 그러므로 이삭 후 5~50일 동안의 기온이 상대적으로 낮은 조생종 벼는 중만생종 벼에 비해 기온 상승에 더 민감하게 반응하여 주당 이삭수와 기온의 관계가 뚜렷한 것으로 보인다.

2. 이삭당 낱알수의 변화와 기후요소와의 관계

이삭당 낱알수는 분화된 영화수와 그 후 퇴화된 영화수의 차에 의해 결정된다. 그러므로 영화의 분화와 퇴화에 영향을 미치는 출수 전 5~35일 동안의 기후요소와 이삭당 낱알수의 관계를 분석하였다. 출수기가 빠른 오대벼의 경우 출수 전 5~35일의 기간이 7월과 거의 일치하며 화성벼, 추청벼, 동진벼는 대체로 7월 중순에서 8월 상순까지에 해당한다.

이삭당 낱알수의 변화경향을 분석한 결과 조생종 벼 재배지역인 강릉에서 오대벼의 이삭당 낱알수는 연간 0.194개씩 증가하였다(표 4). 중만생종 벼 재배지역 중 청원과 진주에서 이삭당 낱알수가 증가하였지만, 나주에서는 이삭당 낱알수가 감소하였다. 청원 추청벼와 진주 동진벼의 이삭당 낱알수는 1년에 각각 0.543개, 1.149개씩 증가하였으며 이는 유의수준 $\alpha=0.01$ 에서 통계적으로 유의하다. 나주에서 동진벼의 이삭당 낱알수는 -0.196개/년 씩 감소하였다.

이삭당 낱알수와 기후요소의 관계를 분석한 결과 기온만 이삭당 낱알수와 유의한 관계를 보였다(표 5). 청원 추청벼의 이삭당 낱알수는 출수 전 5~35일 동안의 최저기온과 $r=0.498$ 의 유의한 양의 상관관계를 가지며, 유의수준 $\alpha=0.05$ 에서 유의하다. 청원의 경우 출수 전 5~35일 동안의 최저기온이 1°C 상승하면 이삭당 낱알수가 1.92개 증가하는 경향이다.

나주 동진벼의 이삭당 낱알수는 출수 전 5~35일

표 4. 이삭당 낱알수의 변화율(개/년)

종 류	품 종	지 역	변 화 율
조생종	오대벼	강릉	0.194
중만생종	추청벼	청원	0.543**
		나주	-0.196
	동진벼	진주	1.149**

** $\alpha=0.01$ (양측검정)

표 5. 이삭당 낱알수와 출수 전 5~35일 동안의 기온과의 상관계수(r)

종 류	품 종	지 역	평균 기온	최고 기온	최저 기온	일교차
조생종	오대벼	강릉	-0.185	-0.093	-0.216	0.047
중만생종	추청벼	청원	0.351	0.225	0.498*	-0.211
		나주	0.543*	0.486*	0.585*	0.270
	동진벼	진주	0.195	0.187	0.192	0.136

* $\alpha=0.05$ (양측검정)

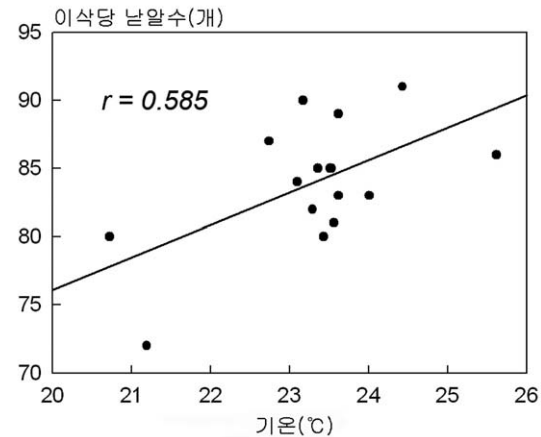


그림 3. 나주 동진벼의 이삭당 낱알수와 출수 전 5~35일 동안의 최저기온의 평균과의 관계

동안의 최저기온과 상관계수 $r=0.585$ 의 높은 상관관계를 가지며, 유의수준 $\alpha=0.05$ 수준에서 통계적으로 유의하다(그림 3). 나주 동진벼의 경우 출수 전 5~35일 동안의 최저기온이 1°C 상승하면 이삭당 낱알수가 2.38개 증가하는 경향이다.

3. 낱알무게의 변화와 기후요소와의 관계

낱알무게는 출수 후 벼 낱알이 익어가는 시기의 환경조건에 의해 강하게 영향을 받는다. 그러므로 등

숙기의 기후요소와 낱알무게의 관계를 분석하였다. 오대벼의 등숙기는 출수 후 40일, 화성벼는 출수 후 45일, 추청벼와 동진벼는 출수 후 50일이다. 출수가 빠르고 등숙기가 짧은 오대벼의 등숙기는 8월 상순에서 9월 중순까지이며, 화성벼, 추청벼, 동진벼의 등숙기는 대체로 8월 중순에서 10월 상순에 해당한다.

조생종 벼 재배지역의 낱알무게 변화경향을 살펴보면 제천, 강릉에서 오대벼의 낱알무게는 증가하였으며, 진부에서 오대벼는 감소하였다(표 6). 제천의 오대벼 낱알무게는 1년에 0.102mg씩 증가하였으며, 이는 유의수준 $\alpha=0.05$ 수준에서 유의하다. 강릉의 오대벼 낱알무게는 1년에 0.088mg씩 증가하였으며 진부에서 오대벼의 낱알무게는 1년에 0.017mg씩 감소하였다.

중생종과 중만생종 벼의 경우는 재배되는 모든 지역에서 낱알무게가 증가하였다(표 6). 영덕에서 화성벼의 낱알무게는 0.163mg/년 씩 증가하였으며, 유의수준 $\alpha=0.01$ 에서 통계적으로 유의하다. 화성에서 추청벼의 낱알무게는 1년에 0.054mg씩 증가하였으며 유의수준 $\alpha=0.05$ 에서 유의하다.

낱알무게와 등숙기의 기후요소와의 관계를 분석한 결과 기후요소 중 기온만이 낱알무게와 유의한 관계가 있다(표 7). 조생종 벼 재배지역의 낱알무게와 출수 후 40일 동안의 기후요소의 관계를 분석한 결과 강릉과 제천에서는 오대벼의 낱알무게와 유의한 상관관계를 가지는 기후요소가 없다. 진부의 경우 오대벼의 낱알무게는 최저기온과 상관계수 $r=0.656$ 의 높은 양의 관계를 보이며, 유의수준 $\alpha=0.01$ 에서 유의하다. 이를 바탕으로 진부의 출수 후 40일 동안의 최저기온이 1°C 상승할 때 낱알무게가 0.74mg 증가하는 경향이다.

중생종 및 중만생종 벼 지역의 낱알무게와 기후요소의 관계를 분석한 결과, 영덕의 화성벼 낱알무게는 출수 후 45일 동안의 최저기온과 상관계수 $r=0.620$ 의 높은 양의 상관관계를 보이며, 유의수준 $\alpha=0.01$ 에서 유의하다. 출수 후 45일 동안의 평균 최저기온이 1°C 상승할 때 영덕의 화성벼 낱알무게는 0.7mg 증가하는 경향이다. 화성의 추청벼 낱알무게는 출수 후 50일

표 6. 낱알무게의 변화율(mg/년)

종 류	품 종	지 역	변 화 율
조생종	오대벼	강릉	0.088
		제천	0.102*
		진부	-0.017
중생종	화성벼	영덕	0.163**
중만생종	추청벼	화성	0.054*

** $\alpha=0.01$ (양측검정), * $\alpha=0.05$ (양측검정)

표 7. 낱알무게와 등숙기 기온의 상관계수(r)

종 류	품 종	지 역	평균 기온	최고 기온	최저 기온	일교차
조생종	오대벼	강릉	0.276	0.228	0.346	-0.131
		제천	0.186	0.084	0.281	-0.217
		진부	0.641**	0.553*	0.656**	-0.261
중생종	화성벼	영덕	0.344	0.088	0.620**	-0.569*
중만생종	추청벼	화성	0.684**	0.701**	0.566*	-0.064

** $\alpha=0.01$ (양측검정), * $\alpha=0.05$ (양측검정)

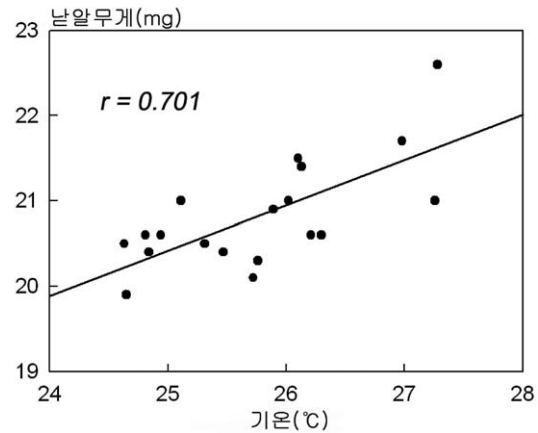


그림 4. 화성 추청벼의 낱알무게와 출수 후 50일 동안의 최고기온의 평균과의 관계

동안의 평균 최고기온과 상관계수 $r=0.701$ 의 높은 양의 상관관계를 보이며 유의수준 $\alpha=0.01$ 에서 통계적으로 유의하다(그림 4). 출수 후 50일 동안의 최고기온이 1°C 상승하면 화성 추청벼의 낱알무게는 0.32mg 증가하는 경향이다.

낱알무게와 출수 후 40일, 45일, 50일 동안의 기온의 관계를 분석한 결과 조생종 벼 재배지역의 낱알무게와 기온의 관계는 비교적 낮으며, 중생종 및 중만

생종 벼 재배지역의 낱알무게와 기온의 관계는 유의하다. 또한 중생종과 중만생종 벼 지역에서 낱알무게의 증가 경향이 뚜렷하게 나타난다.

중생종 및 중만생종 벼의 출수기가 조생종 벼에 비해 늦기 때문에 중생종 및 중만생종 벼의 경우 조생종 벼에 비해 낮은 기온에서 등숙기가 진행이 된다. 중생종 및 중만생종 벼의 낱알무게가 기온과 유의한 관계를 보이는 것은 등숙기의 기온이 상대적으로 낮은 중생종 및 중만생종 벼가 이 시기에 조생종 벼보다 기온 상승에 더 민감하게 반응하기 때문인 것으로 보인다. 즉 벼는 고온성 작물이므로 중생종 및 중만생종 벼에서 등숙기의 기온 상승의 영향이 더 뚜렷한 것으로 생각된다. 중생종 및 중만생종 벼 재배 지역 중 남부지역에 비해 중부지역에서 이러한 경향이 더 뚜렷하다.

4. 등숙비율의 변화와 기후요소와의 관계

등숙비율은 등숙기의 환경에 민감하게 반응하므로 등숙기의 기후요소와 등숙비율의 관계를 분석하였다. 등숙비율의 변화경향을 분석한 결과 조생종 벼 재배지역 중 강릉의 등숙비율이 0.521%/년 씩 증가하였으며, 유의수준 $\alpha=0.05$ 에서 통계적으로 유의하다(표 8). 진부와 춘천의 경우 등숙비율은 각각 0.597%/년, -0.161%/년 씩 변화하는 경향이다. 중만생종 벼 재배지역의 경우 나주와 진주의 등숙비율은 각각 0.058%/년, 0.344%/년의 변화율로 증가하였으며, 청원에서는 등숙비율이 -0.144%/년의 변화율로 감소하였다.

조생종 벼 재배지역의 등숙비율과 기후요소의 관

표 8. 등숙비율의 변화율(%/년)

종 류	품 종	지 역	변 화 율
조생종	오대벼	강릉	0.521*
		진부	0.597
		춘천	-0.161
중만생종	추청벼	청원	-0.144
		나주	0.058
	동진벼	진주	0.344

* $\alpha=0.05$ (양측검정)

계를 분석한 결과 조생종 벼 재배지역 중 춘천만이 기후요소와 유의한 상관관계를 보인다(표 9). 춘천의 등숙비율은 일조시간과 $r=0.694$ 의 양의 상관관계를 보이며 유의수준 $\alpha=0.01$ 에서 통계적으로 유의하다. 춘천의 등숙비율은 최고기온, 일교차와도 유의한 양의 상관관계를 보이며, 강수량과는 유의한 음의 상관관계를 보인다. 춘천 등숙기의 일조시간이 1시간 증가하면 등숙비율은 0.1% 증가하는 경향이다.

중만생종 벼 재배지역 중 청원의 등숙비율은 등숙기의 최고기온과 $r=0.761$ 의 높은 양의 상관관계를 보이며 유의수준 $\alpha=0.01$ 에서 통계적으로 유의하다(그림 5). 청원의 등숙비율은 일조시간, 일교차와도 유의한 양의 상관관계를 보인다. 청원 등숙기의 최고기온이 1℃ 상승하면 등숙비율은 2.5% 증가한다. 나주의 등숙비율은 등숙기의 최고기온과 $r=0.614$ 의 상관관계를 보이며 유의수준 $\alpha=0.01$ 에서 통계적으로 유의하다. 나주에서 최고기온이 1℃ 상승하면 등숙비율은 1.2% 증가하는 경향이다.

표 9. 등숙비율과 등숙기 기후요소의 상관계수(r)

종류	품종	지역	평균기온	최고기온	최저기온	일교차	강수량	일조시간
조생종	오대벼	강릉	-0.249	-0.272	-0.160	-0.223	0.414	-0.201
		진부	0.311	0.164	0.365	-0.335	0.204	-0.195
		춘천	0.325	0.496*	0.005	0.583**	-0.568*	0.694**
중만생종	추청벼	청원	0.485*	0.761**	0.039	0.515*	-0.329	0.595**
		동진벼	나주	0.549*	0.614**	0.366	0.226	-0.243
	진주		0.368	0.411	0.215	0.119	0.087	0.233

** $\alpha=0.01$ (양측검정), * $\alpha=0.05$ (양측검정)

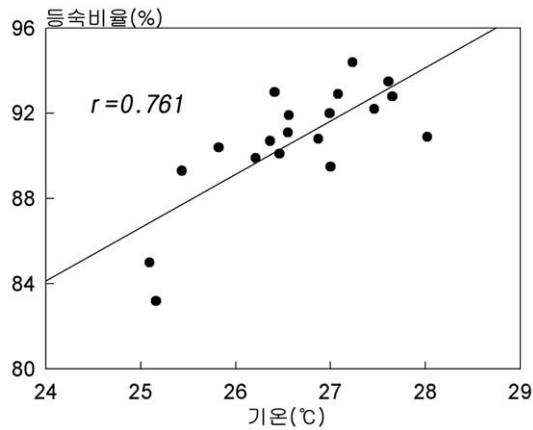


그림 5. 청원 추청벼의 등숙비율과 출수 후 50일 동안의 최고 기온의 평균과의 관계

V. 토의 및 고찰

1. 조생종 벼

조생종 벼 재배 지역 중 진부는 주당 이삭수, 낱알 무게가 기온과 유의한 양의 상관관계를 보였으며, 강릉과 제천은 주당 이삭수, 춘천은 등숙비율이 기온과 유의한 양의 상관관계를 보였다. 산지에 위치한 진부의 이앙 후 5~50일과 등숙기의 기온은 각각 15.6℃, 17.3℃로 이앙 후 5~50일과 등숙기의 생육적온인 25~30℃, 21~23℃에 비해 낮다. 진부는 낮은 기온으로 인해 벼 생육에 적합하지 않은 기후조건을 가지고 있으며 다른 지역에 비해 생육이 불량하다(정유란 외, 2006). 따라서 기온이 상승하면 이앙 후 5~50일과 등숙기의 기온이 생육적온에 가까워져 주당 이삭수와 낱알무게가 증가하여 수량이 증가할 것이다(그림 6 참조).

강릉과 제천은 주당 이삭수가 이앙 후 5~50일의 기온과 유의한 양의 상관관계를 보였다. 강릉과 제천의 이앙 후 5~50일의 평균기온은 21.3℃, 20.3℃이며 이 시기의 생육적온인 25~30℃ 보다 낮다. 따라서 기온 상승시 강릉, 제천은 주당 이삭수의 증가로 수량 증가가 예상된다(그림 6 참조).

춘천은 등숙비율이 등숙기의 기온과 유의한 양의

상관관계를 보였다. 춘천의 등숙기 평균기온은 23.9℃로 등숙기 적온인 21~23℃를 상회하고 있지만 등숙기의 기온과 유의한 양의 상관관계를 보였다. 이는 춘천에서 재배되는 조생종 벼인 오대벼의 등숙기 적온이 일반적인 등숙기 적온보다 높기 때문인 것으로 생각된다. 남부 중산간지역에서 재배되는 조생종 벼의 등숙기 적정 기온은 23.5℃로 일반적인 등숙기 적온보다 높다고 하였으며(박홍규 외, 2006), 이와 같이 북부지역에 위치한 춘천의 조생종 벼 등숙기 적온도 21~23℃보다 높아 이러한 결과가 도출된 것으로 생각된다.

춘천의 경우 오대벼의 출수기가 1년에 0.2일씩 유의하게 빨라지고 있다. 출수기가 빨라지게 되면 등숙기가 한 여름에 해당하게 되어 과거에 비해 등숙기의 기온이 높아지게 된다. 이와 같은 등숙기의 고온은 낱알이 충분히 잘 여물지 못한 상태에서 벼가 익는 결과를 초래해 수량에 큰 감소를 가져온다. 윤진일(1990)에 따르면 기온의 상승으로 인한 등숙기의 고온으로 인해 벼 수량이 20~30% 감소할 수 있다고 하였다. 따라서 비록 연구기간 동안은 기온 상승으로 등숙비율이 증가하였지만 기온이 계속 상승한다면 기온 상승으로 인한 등숙기의 고온과 출수기의 앞당겨짐에 의한 등숙기 고온으로 인해 등숙비율이 감소하여 수량이 줄어들 것이다(그림 6 참조).

2. 중생종 및 중만생종 벼

영덕, 화성의 낱알무게는 등숙기의 기온과 유의한 양의 상관관계를 보였다. 영덕, 화성의 등숙기 평균기온은 각각 21.0℃, 20.7℃이다. 영덕과 화성은 중생종과 중만생종 벼이기 때문에 출수기가 늦어 낮은 기온에서 등숙기를 보내고 또한 중부지역에 위치하고 있어 다른 중만생종 벼 재배 지역에 비해 등숙기의 기온이 낮다. 따라서 영덕, 화성은 기온과 낱알무게 사이에 유의한 양의 상관관계를 보인다.

하지만 영덕, 화성의 등숙기 평균기온과 등숙기의 적온을 비교해보았을 때 차이가 크지 않으며, 또한 기온이 상승하면 출수기가 빨라지기 때문에 계속 지

금과 같은 이양시기를 유지한다면 등숙기의 높은 기온으로 인해 낱알무게가 감소하고 수량이 줄어 들 것이다(그림 6 참조). 정유란 외(2006)에 따르면 기온 상승시 2011~ 2040년에는 출수기가 일주일 정도 빨라지고, 2071~ 2100년에는 최대 20일까지 빨라질 수 있다고 하였다. 화성의 경우 이미 출수기가 1년에 0.3일 씩 유의하게 빨라지고 있어 등숙기 고온으로 인한 낱알무게의 감소가 더욱 뚜렷할 것이라고 생각된다.

청원과 나주의 이삭당 낱알수는 출수 전 5~35일 동안의 기온과 유의한 양의 상관관계를 보였다. 청원과 나주의 출수 전 5~35일 동안의 평균기온은 각각 26.3℃, 26.5℃로 이 시기의 생육적온인 30~32℃ 보다 낮아 기온 상승시 이삭당 낱알수가 증가될 수 있다.

또한 청원과 나주는 등숙비율과 등숙기의 기온이 유의한 양의 상관관계를 보였다. 청원과 나주 등숙기의 평균기온을 살펴보면 각각 21.2℃, 22.9℃로 등숙기의 적온인 21~23℃에 위치하고 있다. 청원과 나주의 등숙기 기온은 아직 등숙기 적온 범위에 위치하고 있어 기온과 유의한 양의 상관관계를 보였지만 현재 기온과 생육 적온의 상한온도와의 차가 크지 않아 기온 상승시 등숙기 고온으로 인한 등숙비율의 감소가 초래될 수 있다. 또한 나주의 경우 출수기가 1년에 0.4일 씩 유의하게 빨라지고 있어 이로 인한 등숙기의 고온도 등숙비율의 감소를 초래할 것이다.

청원은 이삭당 낱알수와 등숙비율이 수량의 변화를 각각 11%, 47% 설명하며 나주의 경우 각각 32%, 30%를 설명한다. 청원의 경우 이삭당 낱알수와 등숙비율이 수량에 유의하게 영향을 미쳤지만, 등숙비율의 영향이 더 우세하다. 따라서 기온이 상승하게 되면 기온 상승으로 인한 이삭당 낱알수의 증가보다 등숙비율의 감소가 수량에 더 크게 영향을 미쳐 수량이 감소할 것이다. 나주는 수량에 대한 이삭당 낱알수와 등숙비율의 영향이 비슷하지만 등숙기의 기온이 22.9℃로 높고 출수기가 유의하게 빨라지고 있어 기온 상승시 등숙비율 감소가 수량에 더 큰 영향을 미쳐 수량이 감소될 것이다(그림 6 참조). 정유란 외(2006)는 기온 상승시 중생종과 중만생종 벼의 등숙비율이 현저

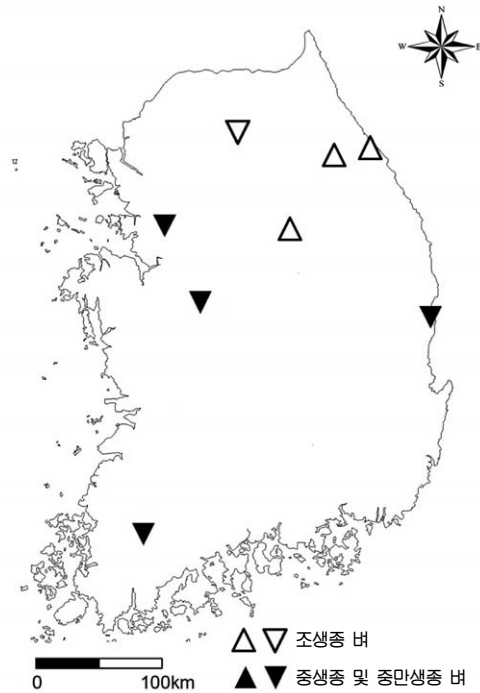


그림 6. 수량의 변화경향 예측

하게 감소한다고 하였으며, 박홍규 외(2006)는 우리나라에서 재배되는 벼 품종을 아열대 지역에서 재배하였을 때 온대지역에서 재배하였을 때보다 등숙비율이 낮았고 수량은 약 21% 적었다고 하여 본 연구의 결과와 일치한다.

VI. 요약 및 결론

본 연구에서는 벼 수량에 영향을 미치는 수량구성요소를 파악하고 기후변화가 수량에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 이를 위하여 벼 수량구성요소와 이양 후 5~50일, 출수 전 5~35일, 출수 후 등숙기의 기후요소를 분석에 사용하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

벼 수량과 수량구성요소의 관계를 분석한 결과 조생종 벼는 주로 주당 이삭수와 낱알무게, 등숙비율이 수량에 영향을 미쳤다. 중생종 및 중만생종 벼의 경

우 중부지역에 위치한 화성과 영덕은 낱알무게가 수량에 영향을 미쳤으며 그 외 중부, 남부 평야 지역의 경우 이삭당 낱알수, 등숙비율이 수량과 유의한 관계가 있다.

조생종 벼의 주당 이삭수는 중생종 및 중만생종 벼에 비해 변화경향이 뚜렷하며, 기온변화와의 관계도 높다. 조생종 벼의 이삭 후 50일 동안의 기온이 중생종 및 중만생종 벼에 비해 낮기 때문에 기온 상승에 더 민감하게 반응하여 중생종 및 중만생종 벼보다 기온변화와의 관계가 높다. 낱알무게의 경우 중부지역에서 재배되는 중생종 및 중만생종 벼가 조생종 벼에 비해 변화 경향도 뚜렷하고 기온변화와의 관계도 높다. 이는 중생종 및 중만생종 벼가 조생종 벼에 비해 낮은 온도에서 등숙기를 보내기 때문에 중생종 및 중만생종 벼가 기온 상승에 더 민감하게 반응하는 것으로 생각된다. 청원, 나주의 이삭당 낱알수는 출수 전 5~35일 동안의 기온과 양의 관계가 있으며, 등숙비율의 경우 춘천, 청원, 나주에서 등숙기의 기온과 양의 관계가 있다.

기후요소와 벼 수량구성요소와의 관계를 분석한 결과 강릉, 제천의 경우 기온 상승시 주당 이삭수의 증가로 수량 증가가 예상되며, 진부에서는 주당 이삭수와 낱알무게의 증가로 수량이 증가될 것으로 판단된다. 조생종 벼 재배지역인 춘천과 중생종 및 중만생종 벼 재배지역인 영덕, 화성, 청원, 나주에서는 기온이 상승할 경우 등숙기의 고온과 앞당겨지는 출수기로 인해 낱알무게, 등숙비율이 감소하여 수량의 감소가 예상된다. 따라서 기온이 상승하면 주로 북부해안, 산간의 조생종 벼 재배지역은 수량이 증가하고 중부, 남부 지역의 중생종 및 중만생종 벼 재배지역은 수량이 감소하는 경향을 보일 것이다.

본 연구에서는 12개 지점만을 대상으로 하였기 때문에 기후변화가 벼 수량에 미치는 영향을 지역적으로 파악하기에는 어려움이 있다. 이후에 벼 수량구성 요소에 대한 조사가 더 많은 지역에서 이루어져 지역적으로 기후변화가 벼 수량에 미치는 영향이 파악되어야 할 것이다. 또한 본 연구에서는 벼 한 작물만을

분석에 사용하였지만 이 외의 다양한 작물에 대한 조사 및 연구가 이루어져야 할 것이다.

註

- 1) 이삭에 붙은 총 낱알수에 대한 충실히 여문 낱알수의 비율
- 2) 이삭이 패는 시기
- 3) 꽃술이 밖으로 나오는 시기
- 4) 식물의 새로운 줄기가 형성되는 현상
- 5) 이삭이 나오는 현상

文獻

- 박홍규 · Migging Xu · 이경보 · 최원영 · 최민규 · 김상수 · 김정곤, 2006, “아열대와 온대 기후 하에서 벼 생육 비교,” 한국농림기상학회지 8(2): 45-53.
- 윤진일, 1990, “대기 중 이산화탄소 배증 조건하의 기후시나리오에 의한 국내 쌀 생산 추정,” 한국기상학회지 26(4): 263-274.
- 윤진일, 1999, 농업기상학, 아르케.
- 이승호 · 허인혜 · 이경미 · 김선영 · 이윤선 · 권원태, 2008, “기후변화가 농업생태에 미치는 영향-나주지역을 사례로-,” 대한지리학회지 43(1): 20-35.
- 이종훈, 2001, 도작과학, 선진문화사.
- 정유란 · 조경숙 · 이변우, 2006, “지구온난화에 따른 우리나라 벼농사시대의 생산성 재평가,” 한국농림기상학회지 8(4): 229-241.
- 조경숙 · 윤진일, 1999, “일기상자료에 의한 읍면별 벼 작황진행 및 쌀 생산량 예측,” 한국농림기상학회지 1(1): 1-10.
- 채제천, 2005, 쌀생산과학, 향문사.
- Attri, S. D. and Rathore, L. S. 2003. Simulation of impact of projected climate change on wheat in India, *International Journal of Climatology* 23:

- 693-705.
- Erda, L., Wei, X., Hui, J., Yinlong, X., Yue, L., Liping B., and Liyong, X. 2005. Climate change impacts on crop yield and quality with CO₂ fertilization in China, *Philosophical Transactions of the Royal Society* 360: 2149-2154.
- Hakala, K. 1998. Growth and yield potential of spring wheat in a simulated changed climate with increased CO₂ and higher temperature, *Europe Journal of Agronomy* 9: 41-52.
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007: The physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996pp.
- Lal, M., Singh, K. K., Rathore, L. S., Srinivasan G., and Saseendran, S. A. 1998. Vulnerability of rice and wheat yields in NW India to future changes in climate, *Agricultural and Forest Meteorology* 89: 101-114.
- Matsui, T., Namuco, O. S., Ziska, L. H., and Horie, T. 1997. Effects of high temperature and CO₂ concentration on spikelet sterility in indica rice, *Field Crops Research* 51: 213-219.
- Tao, Y. Hayashi, Z. Zhang, T. Sakamoto and Yokozawa, M. 2008. Global warming, rice production, and water use in China: Developing a probabilistic assessment, *Agricultural and Forest Meteorology* 148: 94-110.
- Ziska, L. H., Manaiio, P. A., and Ordonez, R. A. 1996. Intraspecific variation in the response of rice to increased CO₂ and temperature, *Journal of Experimental Botany* 302: 1353-1359.

(접수 2008년 8월 6일 심사완료 2008년 8월 31일)