

중부 평야지에서 조생종 벼의 이앙시기에 따른 수량 특성 변화와 작물학적 요인 분석

양운호^{1,†} · 박정화² · 최종서² · 강신구² · 김숙진³

Yield Characteristics and Related Agronomic Traits Affected by the Transplanting Date in Early Maturing Varieties of Rice in the Central Plain Area of Korea

Woonho Yang^{1,†}, Jeong-Hwa Park², Jong-Seo Choi², Shingu Kang², and Sukjin Kim³

ABSTRACT In response to elevated temperature, a shift in the rice planting period was proposed as a promising option in temperate regions. To understand the yield response of early maturing rice to different transplanting dates and to analyze the related agronomic traits in the central plain area, we performed a two-year study using different transplanting dates and six varieties in Suwon, Korea. The maximum head rice weight was achieved in the treatments transplanted between June 14 and 29, depending upon the varieties. The optimal mean temperature during the 40 days from heading stage for attaining the maximum head rice weight was 21.8°C on the average of six varieties. The index of head rice weight was positively correlated with the indices of both the milled rice weight and head rice percentage, the latter showing a higher coefficient of determination. The highest milled rice weight was commonly achieved from the treatment transplanted on June 29, where the head rice weight was also the highest. The index of milled rice weight was significantly correlated with the indices of grain filling percentage and number of spikelets per area, but not correlated with the index of 1000-brown rice weight. The transplanting date with the highest milled rice yield produced the largest number of spikelets per area, greatest biomass at the heading and harvesting stages, and highest level of harvest index. We suggest that the optimal transplanting date for early maturing rice varieties in the central plain area is from June 14 to 29. High head rice yield in this study was attributed to increased spikelets owing to the increased biomass production at the heading stage, enhanced grain filling due to the high biomass production and harvest index at maturity, and improved head rice percentage.

Keywords : central plain area, early maturing variety, rice, transplanting date

우리나라는 1912년부터 2008년까지 평균기온이 1.7°C 상승하여, 전 지구 평균기온 상승률 0.74°C에 비해 2배 이상 온난화 속도가 빨랐다(National Institute of Meteorological Research, 2009). 기온 상승 속도는 최근으로 올수록 빨라져, 1981년부터 2010년까지 한반도 연 평균기온이 1.2°C

상승한 것으로 관측되었다(National Institute of Meteorological Research, 2012). 이러한 온난화 경향은 앞으로 인류의 온실가스 감축 노력에 관계없이 2100년까지는 지속될 것으로 예상되는 가운데, 온실가스 발생이 어느 정도 통제되는 RCP4.5 시나리오에서 한반도 평균기온이 1981~2010

¹⁾농촌진흥청 국립식량과학원 중부작물부 재배환경과 농업연구관 (Senior Research Scientist, Crop Cultivation & Environment Research Division, Department of Central Area Crop Science, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, Suwon 16429, Korea)

²⁾농촌진흥청 국립식량과학원 중부작물부 재배환경과 농업연구사 (Junior Research Scientist, Crop Cultivation & Environment Research Division, Department of Central Area Crop Science, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, Suwon 16429, Korea)

³⁾농촌진흥청 국립식량과학원 기획조정과 농업연구사 (Junior Research Scientist, Planning & Coordination Division, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea)

[†]Corresponding author: Woonho Yang; (Phone) +82-31-695-4130; (E-mail) whyang@korea.kr

<Received 12 June, 2019; Revised 26 July, 2019; Accepted 7 August, 2019>

년 대비 21세기 전반기에 1.4°C, 중반기에 2.4°C, 후반기에 3.0°C 상승할 것으로 전망된다(National Institute of Meteorological Research, 2012). 최근 Han *et al.* (2018)은 RCP 4.5와 8.5 기후변화 시나리오에 근거하여 계절적, 지역적 기후 변동성을 분석하였는데, 2021년부터 2050년까지 겨울철 한파는 국지적으로 발생할 가능성이 높은 반면, 여름철 폭염은 전국적으로 발생할 가능성이 크다고 하였다. 광역지자체별로는 여름철 기온의 증가가 한반도 중부지역에 위치한 서울에서 상대적으로 높을 것으로 예측하였다.

기후 온난화는 농업 분야에도 큰 영향을 미칠 것으로 알려져 있으며, 특히 벼와 같은 노지재배 작물은 온난화의 영향을 고스란히 받을 수밖에 없기 때문에 그 영향이 더욱 크고 직접적이라고 할 수 있다. 또한 우리나라에서 벼는 주작물이기 때문에, 온난화가 벼에 미치는 영향이 농업 분야 전체에서 차지하는 비중이 크다.

그동안 벼에 대한 온난화의 영향 평가 연구는 많이 이루어졌는데, 주로 온난화의 원인이 되는 대기 중 온실가스, 특히 이산화탄소 농도의 영향과 함께 평가한 결과가 많이 보고되었다. Kim *et al.* (2013)은 CERES-Rice4.0 모형을 이용한 분석에서, 전라남도 광주 지역의 경우 2050년과 2100년에 쌀수량이 이산화탄소 농도 증가에 의해서는 각각 12.6%와 22.0% 증가하는 반면, 온도 상승에 의해서는 각각 22.1%와 35.0% 감소할 것으로 예측하였다. 이와 같이 이산화탄소 농도 증가에 의한 벼 수량 향상 효과보다 온도 상승에 의한 수량 감소 효과가 더 크다는 연구 결과는 외국에서도 보고되었다(Ainsworth, 2008; Baker *et al.*, 1995). 현재보다 기온이 2°C 상승하면 벼의 이앙기~출수기 기간이 7~8일, 5.2°C 상승하면 16~18일 단축되어 벼 생육기간이 짧아지는 것으로 예측된다(Shim *et al.*, 2010). 온난화 진행 추세에 따라 Yang *et al.* (2007)은 벼 출수 후 등숙기간에 적당한 환경이 조성되도록 재배시기를 늦추는 것이 출수 전 기상환경을 현재와 같이 유지하기 위해 재배시기를 앞당기는 것보다 기온 상승의 악영향을 줄일 수 있다고 보고하였다. 그러나 이 경우 등숙기간의 온도 환경을 개선할 수는 있지만, 출수 전 생육기간이 크게 단축될 것으로 예측되었다(Lee *et al.*, 2011). Yang *et al.* (2013) 또한 동일한 문제점을 보고하였으며, 출수기까지 벼의 건물 생산량 증가를 위한 밀식과 양분관리 등 재배적 방안 강구를 제안하였다. 위의 결과를 종합하면, 온난화 진전에 따라 이앙시기를 늦추고, 이 때 나타나는 생육기간 단축과 그에 따른 벼 생육량 감소를 보완하는 방향이 제시되었다고 할 수 있다.

이와 같이 온난화에 대응하여 벼 등숙기간 중 적온이 주어지도록 재배시기를 늦추는 방안은 출수 전의 환경보다

출수 후 등숙기간 중의 환경이 생산성에 더 큰 영향을 미치기 때문이다. 성숙기에 벼 알곡의 탄수화물 중 26%는 출수기에 식물체에 저장되어 있던 양분이 전류되어 구성되며, 나머지 74%는 출수 후의 광합성에 의해 구성된다(Cock & Yoshida, 1972). 이러한 특성은 열대지역에서도 마찬가지로, 건기와 우기 사이에 벼의 수량 차이는 출수 전 기상보다 주로 등숙기간 중의 일사량에 영향을 받는 것으로 보고되었다(Yang *et al.*, 2008). 일본에서는 저온 지역에서 온난화에 맞추어 벼 생육기간을 연장하기 위해 관행보다 10일 일찍 이앙한 경우에도 수량이 증가하지 않았다는 연구 결과가 보고되었다(Horai *et al.*, 2013). 자포니카 벼의 등숙적온은 출수 후 40일간 평균 22°C로 알려져 있다(Kim, 1983). Yang *et al.* (2015) 또한 전국 24 지역에서 11품종을 이용하여 분석한 결과, 등숙비율 기준 등숙적온이 출수 후 40일간 평균 22.6°C라고 하였고, Choi *et al.* (2011)은 현미천립중이 가장 무겁고 식미가 좋은 온도는 품종에 따라 출수 후 30일간 22.1~23.1°C라고 하였다. 이들 연구 결과에 출수 후의 기간과 온도에 약간의 차이는 있으나, Kim (1983)의 보고와 큰 차이를 보이는 것은 아니었다. 그러므로 기후 온난화에 적응하는 방법으로서 벼의 이앙시기를 늦추어 유효 등숙기의 평균기온이 22°C 정도 되도록 유지하는 것이 효과적인 방법이라 할 수 있다.

이앙적기는 지역, 지대 및 품종에 따라 다르기 때문에, 이에 대한 많은 연구가 이루어졌다(Choi *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2005; Lee *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2015; Yang *et al.*, 2017; Yang *et al.*, 2018). 이들 연구 중 최근에 보고된 결과는 지역과 지대 및 품종에 따라 정도의 차이를 보이지만, 대부분 이앙적기가 늦어진다는 공통점을 가지고 있다. 조생종은 기온이 낮아 재배기간이 짧은 지역이나 평야지 2모작을 대상으로 육성되었으나, 최근에는 조기 출하를 위한 평야지 단작에도 도입되고 있다. 그러나 조생종을 평야지에서 조기재배하는 경우 등숙기에 고온의 영향을 더욱 크게 받기 때문에 수량과 품질 저하의 우려가 크다. 본 연구는 중부 평야지에서 최근의 변화된 기상환경 조건에서 조생종 벼를 재배하는 경우 1) 이앙시기에 따른 완전미 수량을 조사하여 이앙적기를 제시하고, 2) 이앙시기 변화에 따른 등숙기 기온과 수량 특성의 관계를 분석하며, 3) 수량 형성에 영향을 미친 작물학적 특성을 알아보기 위하여 수행하였다.

재료 및 방법

시험지역 및 처리

본 연구는 중부지역 평야지에 위치한 국립식량과학원 중

부작물부 벼 재배시험 포장(수원, 37°27'N, 126°99'E, 해발 34m)에서 수행하였다. 이앙시기에 따른 완전미 수량 변화를 알아보고 관련 구성요소의 관계를 분석하기 위하여 2017년과 2018년에 조생종 6품종(백일미, 오대, 진부, 조아미, 운광, 아세미)을 5월 15일부터 7월 19일까지 6회 손이앙하였다. 각 이앙시기에 품종별 면적은 33.6 m²로 하였다. 2018년에는 이앙시기에 따른 건물 생산량 변화를 검토하기 위하여 별도의 시험포장에서 오대 1품종을 5월 31일부터 7월 10일까지 10일 간격으로 5회 기계이앙하였으며, 이앙시기별 면적은 200 m²로 하였다. 시험구는 단구제로 하고 처리당 3반복으로 조사하였다.

재배방법

전년도에 수확한 종자를 선종하여 충실한 종자를 가려내고 충분히 건조한 후 육묘상자당 130g을 파종하였다. 파종 전 30°C의 이프코나졸 8% 액상 수화제 500배액에 48시간 침지한 직후, 같은 온도의 플루디옥소닐 10% 종자처리 액상 수화제 1,000배액에 24시간 침지 소독하였다. 소독한 종자를 육묘상자에 파종하여 30°C의 전열육묘기에서 2일간 출아시킨 후 온실의 그늘에서 2일간 녹화하고 육묘상자를 못자리에 치상하였다. 5월 31일까지 파종한(6월 30일 이앙 처리)모는 보온을 위해 부직포로 피복하였고 경화를 위해 이앙 7~10일 전에 제거하였으며, 6월에 파종한(7월 이앙 처리) 모는 도장을 방지하기 위해 피복하지 않고 육묘하였다.

시험포장은 이앙 6일 전 관개하고 기비를 시용한 후 로타리정지하였다. 다음날 이앙 전 제초제로 벤조비사이클론 +티오벤카브 혼합제를 표준량 살포하였으며, 제초제의 효과가 유지되도록 이앙 직전까지 담수심을 5 cm 이상으로 깊게 유지하였다. 이앙 당일 시험포장을 배수한 후 6품종을 이용한 처리는 30×14 cm 간격으로 주당 3본씩 손이앙하였고, 오대 1품종을 이용한 처리는 3.3 m²당 80주로 기계이앙하였다. 시비는 완료성 복합비료를 10a당 질소 9 kg에 맞추어 100% 기비로 처리하였다. 이앙 후 시험포장을 5 cm 정도의 담수심으로 유지하였고, 분얼성기에 5~7일간 중간낙수하였다. 이후에는 담수상태로 유지하였으며, 출수 후 40일 정도에 완전낙수하였다.

조사방법

기상자료는 기상청 Web site에서 수원 지역의 자료를 수집하여 이용하였다. 6품종을 이용한 처리에서는 이앙시기와 품종별로 출수기를 조사하고 출수 후 40일간 평균기온을 산출하였다. 각 처리별로 출수 후 적산온도 1,100~1,200°C (Chae & Jun, 2002; Kim *et al.*, 2005) 사이의 시기에 수확

하여 수량구성요소, 쌀 무게, 완전립 비율 및 완전미 무게를 조사하였는데, 품종에 따라 7월 9일과 7월 19일 이앙 처리에서 10월 31일까지 적산온도가 1,100°C에 도달하지 못한 경우에는 일괄적으로 11월 2일에 수확하였다. 반복별로 20주의 주당 수수를 세고, 평균에 해당하는 5주를 채취하여 조사하였다. 채취한 5주를 탈립한 후 수선하여 등숙립과 비립을 구분하고, 각각을 계수하여 m²당 영화수와 등숙비율로 환산하였다. 등숙립은 자연 건조한 후 제현하고 수분함량을 측정하여 15% 수분 상태의 현미무게를 구하고, 이에 현백 비율 상수 0.92를 곱하여 m²당 쌀 무게로 환산하였다. 현미 천립중은 현미의 무게와 립수로 계산하였다. 현미 시료 중 일부를 채취하여 완전립 비율을 조사하고(Grain inspector - Cervitec TM1625, FOSS, Sweden), 이를 m²당 쌀 무게에 대입하여 m²당 완전미 무게를 구하였다.

오대 1품종을 이용한 처리에서는 각 이앙시기에서 건물 생산량, 수확지수, 영화수 및 쌀수량을 조사하였다. 건물중은 출수기와 수확기에 반복별로 20포기의 수수를 조사하고 평균에 해당하는 5주를 채취한 후 70°C에 1주일 이상 건조하여 측정하였다. 영화수는 앞의 6품종 처리에서와 동일한 방법에 따라 조사하였다. 수확지수는 수확기에 채취한 시료의 전체 건물중에 대한 등숙립 건물중의 비율로 구하였다. 수확기에 반복당 120주를 수확하여 조제 후 15% 수분 상태의 현미수량과 현미천립중을 조사하였다. 쌀수량은 6품종 처리에서와 같은 방법으로 계산하였다.

시험성적 분석

완전미 수량에 대한 이앙시기와 품종의 처리 효과 및 시험년도와 이앙기의 처리 효과는 분산분석을 통해 분석하였다. 각 품종별로 이앙시기에 따른 시험성적의 통계적 차이는 최소유의차 검정법으로 검정하였으며, 출수 후 40일간 평균기온과 완전미 수량은 상관분석을 통해 상호 관계를 분석하였다. 여기에서 완전미 수량이 최고가 되는 출수 후 40일간 평균기온이 품종 사이에 큰 차이를 보이지 않았기 때문에, 완전미 수량과 관련 요소들 사이의 관계는 모든 품종의 성적을 합한 성적으로 상관분석을 통해 검정하였다. 이 때 품종 사이에 시험성적의 차이를 표준화하기 위하여 품종별로 최고 성적에 대한 지수값으로 보정하여 상호관계를 분석하였다.

결과 및 고찰

기상경과, 출수기 및 완전미 무게

벼 재배기간 중 평균기온과 일조시간의 변화는 Fig. 1과

같다. 2017년 대비 2018년에 평균기온은 7월 13일까지는 비슷하였으나, 7월 하반기부터 8월 하순까지는 고온으로, 9월 하순 이후 10월 하순까지는 저온으로 경과하였다. 본 시

험에서는 이앙시기에 따라 벼 생육단계의 차이가 있기는 하였지만, 2017년보다 2018년이 출수기에서 등숙 중기까지는 고온으로, 등숙 중기부터 수확기까지는 저온으로 경과한 특징을 보였다. 일조시간은 5월 15일부터 6월 23일까지는 2017년에, 7월 14일부터 8월 22일까지는 2018년에 많았으며, 그 이후에는 연도에 따라 일정한 경향을 보이지 않았다.

2017년 출수기는 품종에 따라 5월 15일 이앙에서 7월 17일~28일, 7월 19일 이앙에서 8월 29일~9월 22일로, 백일미에서 가장 빠르고 아세미에서 가장 늦었다(Table 1). 2017년에 비해 2018년에 출수기는 이앙기와 품종에 따라 차이를 보였으나 6월 29일~7월 19일 이앙에서 6품종 평균 2~3일 빨랐는데, 이는 7월 14일~9월 1일 사이에 평균기온이 2017년보다 2018년에 높아 출수가 촉진되었기 때문으로 사료된다(Fig. 1 참고).

완전미 무게는 2017년과 2018년 모두 이앙시기와 품종에 따라 유의한 차이를 나타내었으며, 두 처리 사이에 상호작용도 인정되었다(Table 2). 이를 각 품종에서 분석한 결과, 시험연도에 따라서는 전체 6품종 중 백일미, 오대, 진부, 아세미의 4품종에서 완전미 무게가 차이를 보이지 않았고, 시험연도와 이앙시기의 상호작용 효과가 인정되었다(Table 3). 이앙시기에 따라 정도의 차이가 있지만, 많은 품종에서 완전미 무게가 시험연도에 따라 유의한 차이를 보이지 않았던 것은 등숙 단계에 따라 상대적인 고온과 저온의 영향을 모두 받았기 때문으로 생각된다(Fig. 1 참고).

완전미 무게가 이앙시기와 품종에 따라서는 모든 경우에 차이가 있었고 시험연도에 따라서는 6품종 중 2품종에서만

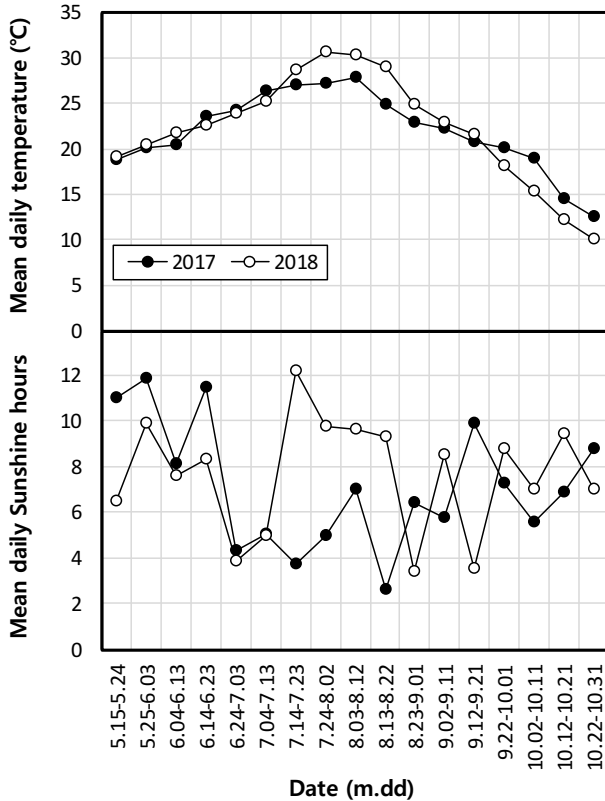


Fig. 1. Changes in the mean daily temperature and the mean daily sunshine hours during the rice cropping period in 2017 and 2018.

Table 1. Heading date of rice varieties influenced by the transplanting date (TD) in two experimental years.

TD	Heading date of rice variety (m.dd)						
	Baegilmi	Odae	Jinbu	Joami	Unkwang	Asemi	Mean
2017							
May 15	7.17	7.23	7.18	7.23	7.24	7.28	7.22
May 30	7.25	8.03	7.28	8.03	8.03	8.08	8.01
June 14	8.04	8.12	8.09	8.10	8.11	8.17	8.10
June 29	8.16	8.23	8.22	8.24	8.26	8.31	8.23
July 09	8.24	9.03	8.30	9.02	9.05	9.15	9.02
July 19	8.29	9.11	9.05	9.11	9.13	9.22	9.10
2018							
May 15	7.16	7.27	7.20	7.26	7.25	8.01	7.24
May 30	7.21	7.31	7.27	8.01	7.31	8.06	7.29
June 14	8.03	8.14	8.11	8.15	8.13	8.15	8.11
June 29	8.12	8.24	8.18	8.22	8.23	8.24	8.20
July 09	8.22	9.03	8.28	9.03	9.03	9.05	8.31
July 19	8.31	9.11	9.04	9.11	9.14	9.13	9.08

유의한 차이를 보였기 때문에, 각 품종과 이앙시기에 따른 완전미 무게 차이를 2년 평균값으로 비교하였다(Fig. 2). 완전미 무게는 모든 품종에서 5월 15일 이후 이앙이 늦어짐에 따라 증가하다가 다시 감소하는 추세를 보였는데, 3품종(백일미, 오대, 아세미)에서는 6월 14일과 6월 29일 이앙에서, 나머지 3품종(진부, 조아미, 운광)에서는 6월 29일 이앙에서 통계적으로 가장 높았다. 모든 6품종에서 공통적으로 완전미 무게가 가장 높았던 이앙시기는 6월 29일이었다. 이

결과는 중부 평야지에서 조생종 벼 백일미의 수량과 품질이 5월 26일보다 6월 25일 이앙에서 향상되었다는 최근의 보고(Yang *et al.*, 2018)와 유사하다. 중부 평야지에서 조생종의 이앙적기는 2006년 연구결과를 기초로 하여 6월 9일~14일로 제시되어 있는데(Rural Development Administration, 2015), 본 연구에서 품종별로 완전미 무게가 가장 높았던 6월 14일~29일 이앙은 이에 비해 5일~15일 늦어진 것이다. 이러한 결과는 본 연구에 최근의 온난화 상황이 반영되었기 때문으로 사료되며, 이로 미루어 온난화 추세에 따라 일정한 기간마다 전반적인 이앙적기 변동 평가가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

시험을 수행한 2년간 이앙시기가 동일하여도 출수 후 40일간 평균기온은 연도에 따라 차이를 보이기 때문에, 이앙시기 조절을 통한 등숙기간 중 기온 변화와 완전미 무게의 관계를 2년 전체 성적으로 분석하였다(Fig. 3). 완전미 무게는 모든 품종에서 출수 후 40일간 평균기온과 유의한 상

Table 2. Significance of the transplanting date and variety on the head rice weight in 2017 and 2018.

Source of variance	2017	2018
Transplanting date (TD)	**	**
Variety (V)	**	**
TD×V	**	**

** : significant at $P < 0.01$

Table 3. Significance of the experimental year and transplanting date on the head rice weight for each variety.

Source of variance	Baegilmi	Odae	Jinbu	Joami	Unkwang	Asemi
Experimental year (EY)	ns	ns	ns	**	**	ns
Transplanting date (TD)	**	**	**	**	**	**
EY×TD	**	*	**	**	**	**

* : significant at $P < 0.05$, ** : significant at $P < 0.01$, ns : not significant

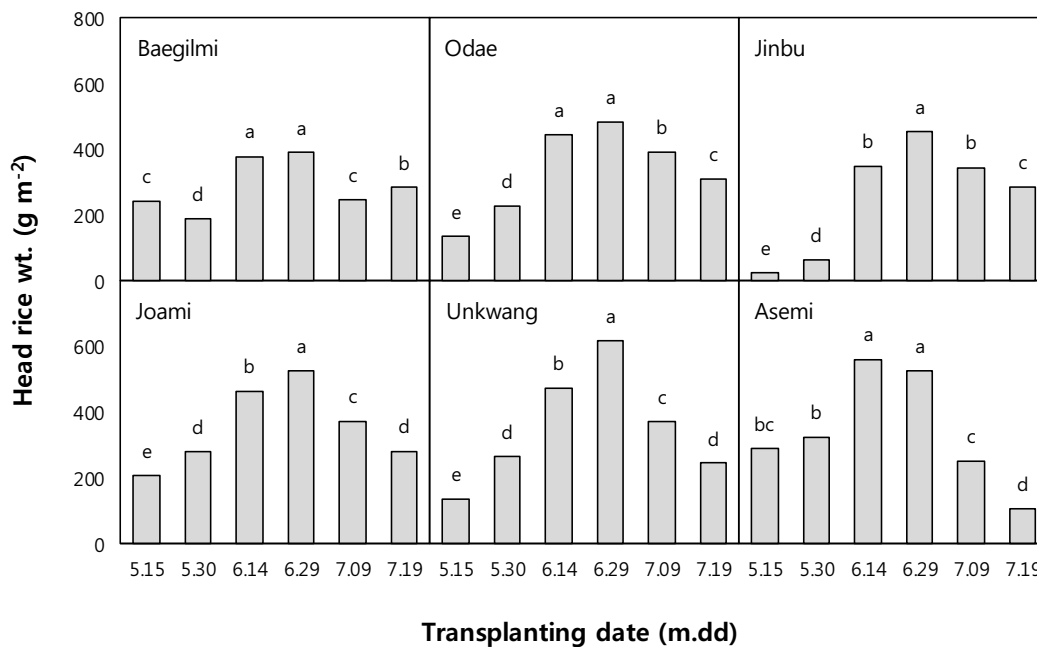


Fig. 2. Head rice weight as affected by the transplanting date for each variety of rice. Data are the means of two experimental years. Same letters in each panel are not significantly different according to LSD ($P = 0.05$).

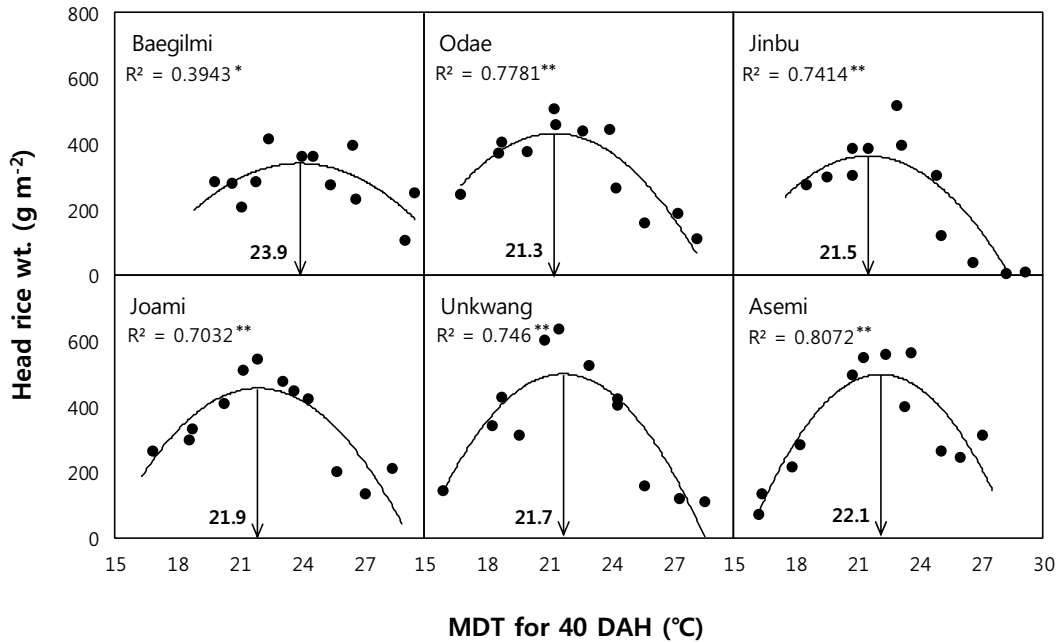


Fig. 3. Relationship between the head rice weight and the mean daily temperature for 40 days after heading (MDT for 40 DAH), induced by controlling the transplanting date. Data are the means of three replicates and were pooled across the two experimental years. Arrows and their adjacent data in the panels represent the MDT for 40 DAH where the maximum head rice weight was attained. * and **: significant at $P < 0.05$ and 0.01 , respectively.

관관계를 나타내었고, 완전미 최고 무게를 나타낸 기온은 품종에 따라 21.3~23.9°C, 6품종 평균 22.1°C로 분석되었다. 본 연구에서 조생종 벼에서 나타난 출수 후 40일간 등속적 온 22.1°C는 중만생종을 대상으로 한 Chio *et al.* (2011)의 연구 결과나, 자포니카 벼를 대상으로 검토한 Kim (1983)의 보고와 거의 같은 수준이었다. 따라서 본 연구에서 나타난 이양적기가 기존에 제시된 시기(Rural Development Administration, 2015)보다 늦어진 것은 품종의 등속적온이 달라진 것이 아니라, 온난화에 따라 등속적온이 나타나는 시기가 늦어졌기 때문으로 분석된다.

완전미 무게와 관련 구성요소의 관계

완전미 무게는 쌀 무게와 완전미 비율에 따라 결정된다. 본 연구에서 품종간 절대값의 차이를 상쇄하기 위하여 품종별 최고값에 대한 지수값으로 분석한 결과에서도 쌀 무게와 완전립 비율이 모두 완전미 무게와 고도로 유의한 직선적인 정의 상관을 나타내었다(Fig. 4). 그러나 완전미 무게는 완전립 비율과의 관계에서 결정계수가 0.6983으로 쌀 무게와의 관계에서 나타난 결정계수 0.3777보다 높아, 쌀 무게보다 완전립 비율이 완전미 무게와 보다 밀접하게 관련된 것으로 분석되었다. 이 결과는 전국 24개 지역에서 10

품종을 대상으로 한 이양시기에서 검토하였을 때, 완전미 수량이 쌀수량과 완전미 비율 모두와 유의한 관계가 있었으나 완전미 비율보다 쌀수량과 보다 밀접하게 관련되어 있다는 보고(Yang *et al.*, 2016)와 다르다. 이와 같은 차이로 미루어 쌀수량과 완전미 비율이 완전미 수량에 영향을 정도가 시험지역과 이양시기에 따라 차이를 나타내는 것으로 보인다.

완전립 비율보다 상대적으로 관련성이 적기는 하나 완전미 무게와 유의한 관계를 보인 쌀 무게는 모든 품종에서 이양시기가 늦어짐에 따라 증가하다가 일정 시기 이후 감소하는 양상을 보였다(Fig. 5). 품종별로는 백일미, 오대, 아세미는 6월 14일과 6월 29일 이양에서, 진부는 5월 30일~6월 29일 이양에서, 조아미와 운광은 6월 29일 이양에서 쌀 무게가 통계적으로 가장 높았으며, 6품종 공통 최고 쌀 무게를 나타낸 이양시기는 6월 29일이었다. 이양시기에 따른 쌀 무게의 변화 양상과 최고 무게를 보이는 이양시기는 완전미 무게에서와 거의 같은 경향이였다.

전체 6품종 중 쌀 무게와 완전립 비율 및 완전미 무게의 세 가지 특성 모두가 출수 후 40일간 평균기온과 유의한 상관을 보인 품종은 4품종(진부, 조아미, 운광, 아세미)이었다. 이들 4품종 평균 출수 후 40일간 등속적온은 완전립 비

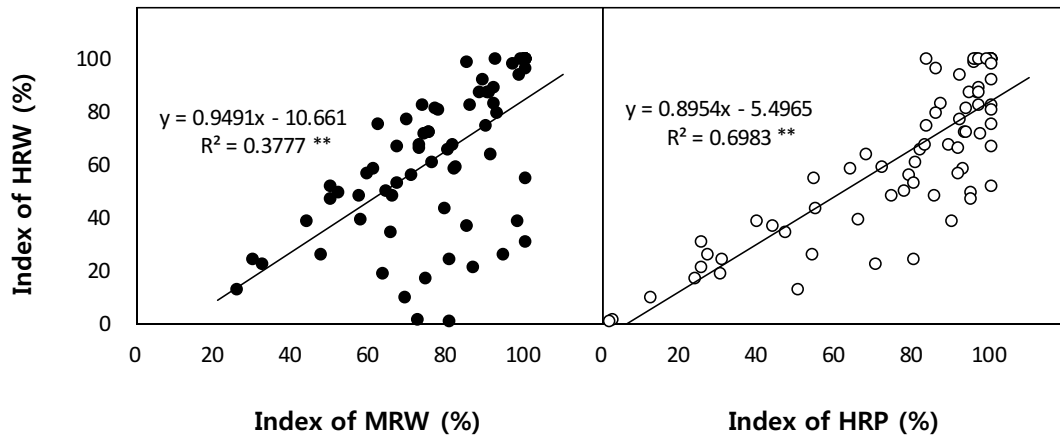


Fig. 4. Association between the index of head rice weight (HRW) and the indices of milled rice weight (MRW) and head rice percentage (HRP). Data are the indices to the maximum value for each trait and were pooled across the six varieties and two experimental years. **: significant at $P < 0.01$.

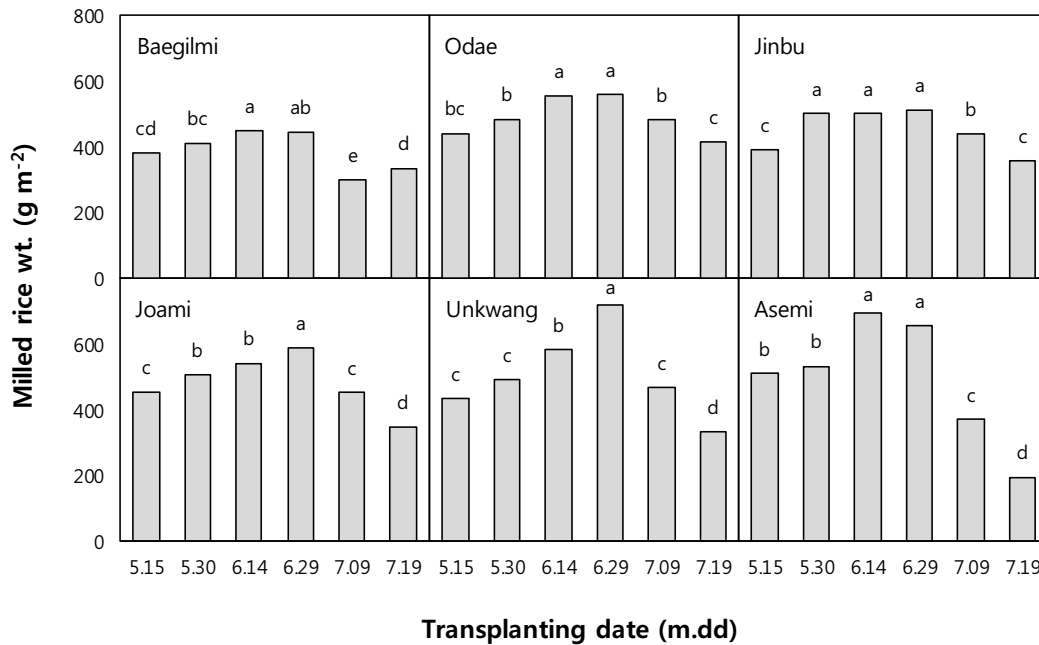


Fig. 5. Milled rice weight as affected by the transplanting date for each variety of rice. Data are the means of two experimental years. Same letters in each panel are not significantly different according to LSD ($P = 0.05$).

을 기준에서 20.5°C로 쌀 무게 기준의 23.5°C보다 3.0°C 낮았다(Fig. 6). 결과적으로 완전미 무게 기준 출수 후 40일간 등숙적온은 평균 21.8°C로 분석되었다. 본 연구에서 쌀 수량보다 완전립 비율 기준의 등숙적온이 더 낮게 나타난 것은 쌀 외관 품위가 등숙비율 기준 최적 온도보다 낮은 온도에서 향상된다는 이전의 보고(Yang *et al.*, 2015)와 유사한 결과이다.

쌀수량은 수량구성 4요소에 의하여 결정되며(Yoshida,

1981), 이들 중 등숙비율과 현미천립중은 등숙기에 결정된다. 본 연구에서 쌀수량은 위의 두 특성 중 등숙비율과는 고도로 유의한 정적 상관관계를 나타낸 반면, 현미천립중과는 유의한 관계가 인정되지 않았다(Fig. 7). 이러한 결과는 이앙시기 변화에 따라 등숙비율은 품종별 최고값 대비 25~100%의 넓은 변이를 보인 반면, 현미천립중은 84~100%의 적은 변이를 나타내었기 때문으로 판단되며, 현미천립중이 다른 수량구성요소들보다 등숙기 환경에 따라 변이가 적다

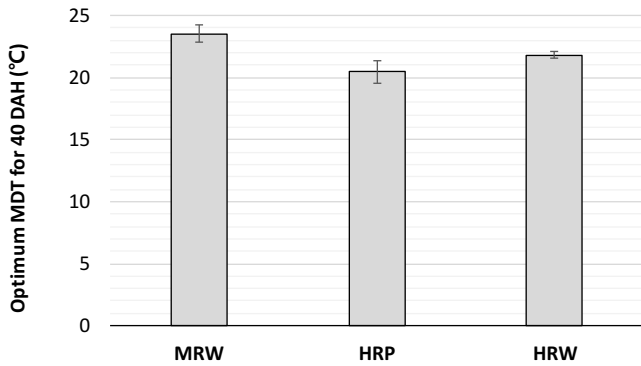


Fig. 6. Comparison among the optimum mean daily temperatures for 40 days after heading (MDT for 40 DAH) to attain the highest milled rice weight (MRW), head rice percentage (HRP), and head rice weight (HRW). Data are the means of four varieties that had significant correlations between all the three traits and the temperature. The optimum temperature for each variety was calculated based on the pooled data across the two experimental years. Error bars are the standard deviations across the varieties.

는 보고(Yang *et al.*, 2015)와 동일하다.

각 품종별 최고 쌀 무게 대비 지수에 대한 m²당 영화수와 등숙비율×현미천립중 지수의 관계는 Fig. 8과 같다. 단위 면적당 영화수는 출수기에 결정되므로 등숙기간 중 환경의 영향을 받지 않는 반면, 등숙비율과 현미천립중은 먼저 결정된 영화수와 등숙기간 중 환경에 따라 달라진다. 본 연구에서 쌀 무게의 변화는 영화수와 등숙비율×현미천립중 모두와 유의한 정의 상관을 보였고, 결정계수도 두 특성에서 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서 이앙시기 변화에 따른 쌀 무게의 차이는 출수기까지의 영향과 등숙기간 중의 영향이 비슷한 정도로 영향을 미쳤다고 할 수 있다.

2년 평균 m²당 영화수는 백일미, 오대, 조아미, 아세미에서는 6월 14일과 6월 29일, 진부에서는 5월 30일~6월 29일, 운광에서는 6월 29일과 7월 19일 이앙에서 통계적으로 가장 높았다(Fig. 9). 모든 6품종에서 공통적으로 영화수가 통계적으로 가장 많았던 이앙시기는 6월 29일로, 완전미

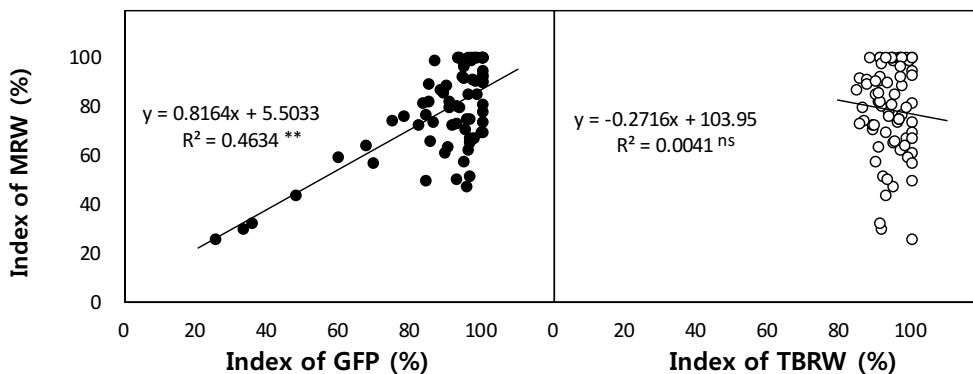


Fig. 7. Relationship between the index of milled rice weight (MRW) and the indices of grain filling percentage (GFP) and 1000-brown rice weight (TBRW). Data are the indices to the maximum value for each trait and were pooled across the six varieties and two experimental years. **: significant at $P < 0.01$, ns: not significant.

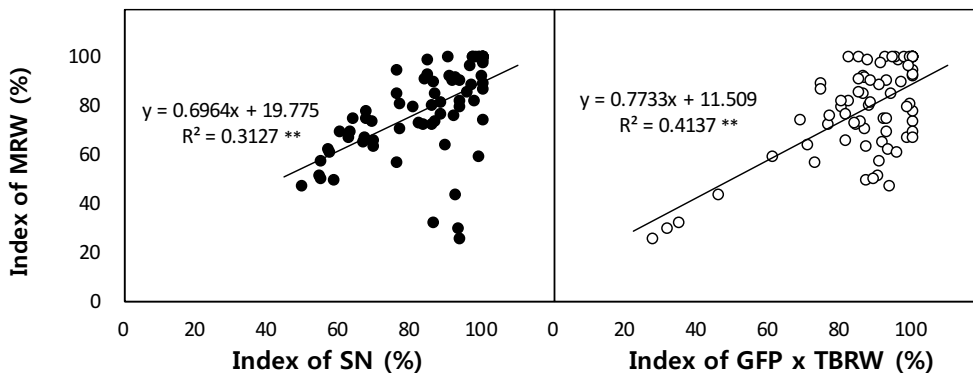


Fig. 8. Relationship between the index of milled rice weight (MRW) and the indices of number of spikelets per square meter (SN) and grain filling percentage × 1000-brown rice weight (GFP × TBRW). Data are the indices to the maximum value for each trait and were pooled across the six varieties and two experimental years. **: significant at $P < 0.01$.

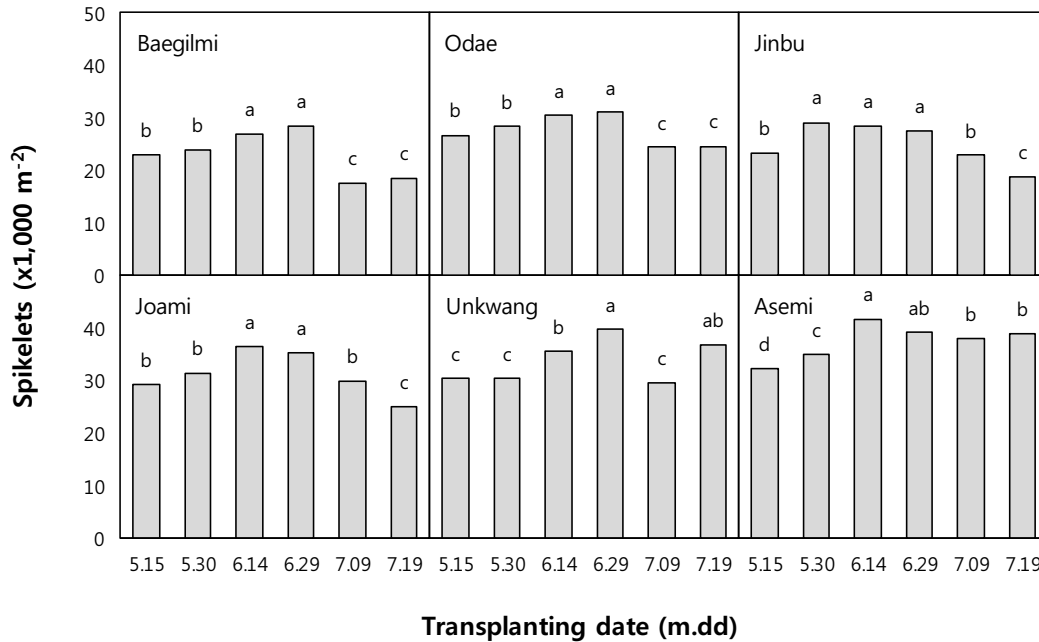


Fig. 9. Number of spikelets per square meter as affected by the transplanting date for each variety of rice. Data are the means of two experimental years. Same letters in each panel are not significantly different according to LSD ($P = 0.05$).

Table 4. Biomass production at the heading stage (BioH), number of spikelets per unit area (SN), biomass production at maturity (BioM), harvest index (HI), and milled rice yield (MRY) as affected by the transplanting date (TD) in the Odae variety.

TD (m.dd)	BioH (g/m ²)	SN (×1000/m ²)	BioM (g/m ²)	HI	MRY (kg/10a)
5.31	709 ^{b†}	25.1 ^b	1246 ^b	0.39 ^c	497 ^c
6.10	722 ^b	25.8 ^b	1225 ^b	0.44 ^b	509 ^c
6.20	885 ^a	33.4 ^a	1528 ^a	0.46 ^{ab}	693 ^a
6.30	763 ^b	31.1 ^a	1471 ^a	0.44 ^b	613 ^b
7.10	733 ^b	32.1 ^a	1418 ^a	0.50 ^a	639 ^{ab}

*Data are the means of three replicates in 2018.

†Same letters in a column are not significantly different according to LSD ($P = 0.05$).

무게와 쌀 무게가 가장 높았던 이앙시기와 동일하였다(Figs. 2 & 5 참고). 이앙 후 출수기까지의 기간은 이앙시기가 늦을수록 짧아졌으나(Table 1 참고), 6품종 공통 6월 29일 이앙까지는 5월 15일 이앙에 비해 출수기까지 생육기간이 짧아져도 영화수가 증가하였다. 이 결과는 조기이앙에 의한 생육기간 연장이 영화수 증가에 기여하지 않았다는 것을 의미하며, Horai *et al.* (2013)의 보고와 동일하였다. 앞에서 m²당 영화수는 쌀 무게와 정의 상관을 보였으며(Fig. 8 참고), 쌀 무게 증가에 따라 완전미 무게도 증가하였다(Fig. 4 참고). 그러므로 품종 공통적으로 6월 29일 이앙에서 완전미 수량이 높았던 데에는(Fig. 2 참고) 영화수 증가가 일정 부분 기여했다고 볼 수 있겠다.

이앙시기에 따른 건물 생산 및 수확지수

쌀수량과 영화수 변화에 영향을 미친 요인을 더 알아보기 위하여 2018년에 오대 1품종의 이앙시기를 조절하여 검토한 결과, 쌀수량은 6월 20일 이앙에서 통계적으로 가장 높았다(Table 4). 이는 앞에 6품종 처리 중 오대에서 쌀수량이 6월 14일과 6월 30일 이앙에서 통계적으로 가장 높았던 결과(Fig. 5 참고)와 비슷하다. m²당 영화수는 6월 20일~7월 10일 이앙에서 통계적으로 비슷하게 많았고 6월 20일 이앙에서 최대값을 보였는데, 출수기 건물중 또한 6월 20일 이앙에서 가장 높아, 출수기 건물중의 증가가 영화수 증대에 기여한 것으로 판단되었다. 수확기 건물중도 영화수와 비슷하게 6월 20일~7월 10일 이앙에서 비슷하였으나 6월 20일 이앙에서 가장 높았고, 수확지수는 6월 20일과 7월 10

일 이양에서 가장 높은 수준이었다. 그러므로 6월 20일 이양에서 쌀수량이 향상된 것은 출수기 건물중 증가에 따른 m^2 당 영화수 증대, 수확기 건물중과 수확지수의 증가에 기인된 것으로 보인다.

이상의 결과를 종합하면, 중부 평야지에서 조생종의 완전미 무게 향상을 위한 이양시기는 품종에 따라 6월 14일~29일로 기존에 제시된 시기보다 5~15일 늦어졌는데, 이때 쌀 무게와 완전립 비율 향상이 완전미 무게 증대에 기여하였으며, 쌀수량 향상은 출수기 건물중 증가에 의한 면적당 영화수 증대와 수확기 건물중 및 수확지수 증가에 의한 등숙비율 향상에 기인되었고 요약된다. 본 연구는 중부 평야지에서 조생종에 국한하여 검토한 결과이므로, 온난화 현황을 반영한 전국 규모의 이양시기 변동 평가와 같은 후속 연구의 필요성이 제기된다. 또한 수량성과 수량구성요소 및 건물 생산성 등 벼의 특성을 기준으로 이양적기를 평가한 결과이므로, 이양시기를 변경하였을 때 나타나는 병해충이나 기상재해 발생 등의 변동에 관한 추가 검토가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

적 요

중부 평야지에서 온난화 현황을 반영하여 조생종 벼의 이양시기에 따른 완전미 수량의 변화를 검토하고, 완전미 수량 향상과 관련된 작물학적 특성을 분석하기 위하여, 2017~2018년 2년에 걸쳐 국립식량과학원 중부작물부(수원) 벼 재배시험 포장에서 6품종을 이용하여 시험한 결과는 다음과 같다.

1. 완전미 무게는 품종에 따라 6월 14일~29일 이양, 6품종 공통 6월 29일 이양에서 통계적으로 가장 높았는데, 완전미 최고 무게를 나타낸 출수 후 40일간 등숙적온은 품종에 따라 21.3~23.9°C, 6품종 평균 21.8°C이었다.
2. 완전미 무게는 쌀 무게보다 완전립 비율과 더 밀접한 상관관계를 나타내었다.
3. 출수 후 40일간 등숙적온은 쌀 무게 기준에서 23.5°C, 완전립 비율 기준에서 20.5°C로, 쌀수량보다 품위 향상을 위한 등숙적온이 3°C 낮게 나타났다.
4. 완전미 무게 향상에 일정 부분 기여한 쌀 무게도 6품종 공통 6월 29일 이양에서 가장 높았는데, 이에는 등숙비율과 m^2 당 영화수의 증가가 기여하였다.
5. 오대 1품종을 이용하여 별도의 이양시기 처리에서 검토하였을 때, 쌀수량이 가장 높았던 이양시기에 m^2 당 영화수, 출수기 및 수확기 건물중, 수확지수가 통계적으로 가

장 높은 수준이었다.

6. 결론적으로, 중부 평야지에서 조생종의 완전미 수량 향상을 위한 이양적기는 품종에 따라 6월 14일~29일이었으며, 완전미 수량 향상의 작물학적 요인은 출수기 건물중 증가에 따른 m^2 당 영화수의 증대와 수확기 건물중 및 수확지수 증가에 따른 등숙비율의 향상, 그리고 완전립 비율 향상으로 분석되었다.

사 사

본 논문은 농촌진흥청 연구사업(세부과제명 : 벼 이양적기 변동의 작물학적 요인 구명과 그에 대한 기후영향평가 연구, 세부과제번호 : PJ01384802)의 지원에 의해 이루어진 것임.

인용문헌(REFERENCES)

- Ainsworth, E. A. 2008. Rice production in a changing climate: a meta-analysis of responses to elevated carbon dioxide and elevated ozone concentration. *Global Change Biology* 14 : 1642-1650.
- Baker, J. T., K. J. Boote, and L. H. Allen. 1995. Potential climate change effects on rice: carbon dioxide and temperature. In Crosenzweig, wr., *Climate Change and Agriculture: Analysis of potential international impacts*. American Society of Agronomy, Madison, WI, USA, pp. 31-47.
- Chae, J.-C. and D.-K. Jun. 2002. Effect of harvest time on yield and quality of rice. *Korean J. Crop Sci.* 47(3) : 254-258.
- Choi, K.-J., T.-S. Park, C.-K. Lee, J.-T. Kim, J.-H. Kim, K.-Y. Ha, W.-H. Yang, C.-K. Lee, K.-S. Kwak, H.-K. Park, J.-K. Nam, J.-I. Kim, G.-J. Han, Y.-S. Cho, Y.-H. Park, S.-W. Han, J.-R. Kim, S.-Y. Lee, H.-G. Choi, S.-H. Cho, H.-G. Park, D.-J. Ahn, W.-K. Joung, S.-I. Han, S.-Y. Kim, K. C. Jang, S.-H. Oh, W. D. Seo, J.-E. Ra, J. Y. Kim, and H.-W. Kang. 2011. Effect of temperature during grain filling stage on grain quality and taste of cooked rice in mid-late maturing rice varieties. *Korean J. Crop Sci.* 56(4) : 404-412.
- Choi, W.-Y., S.-S. Kim, B.-I. Ku, M.-G. Choi, H.-K. Park, Y.-D. Kim, K.-S. Lee, and C.-K. Kim. 2008. Changes of rice yield and quality of "Unkwangbyeo" as affected by transplanting date in Honam plain area. *Korean J. Intl. Agric.* 20(3) : 231-234.
- Cock, J. H. and S. Yoshida. 1972. Accumulation of ^{14}C -labelled carbohydrate before flowering and subsequent redistribution and respiration in the rice plants. *Proc. Crop Sci. Soc. Japan.* 41 : 226-234.
- Han, J., C. Shim, and S. Kim. 2018. Variance analysis of RCP4.5 and 8.5 ensemble climate scenarios for surface

- temperature in South Korea. *J. Climate Change Res.* 9(1) : 103-115.
- Horai, J., A. Ishii, T. Mae, and H. Shimono. 2013. Effects of early planting on growth and yield of rice cultivars under a cool climate. *Field Crops Res.* 144 : 11-18.
- Kim, H.-Y., J. Ko, S. Kang, and J. Tenhunen. 2013. Impacts of climate change on paddy rice yield in a temperate climate. *Global Change Biology* 19 : 548-562.
- Kim, K. C. 1983. Studies on the effect of temperature during the reduction division and the grain filling stage in rice plants. *Korean J. Crop Sci.* 28(1) : 58-75.
- Kim, S.-S., J.-H. Lee, J.-K. Nam, W.-Y. Choi, N.-H. Baek, H.-K. Park, M.-G. Choi, C.-K. Kim, and K.-Y. Jung, 2005. Proper harvesting time for improving the rice quality in Honam plain area. *Korean J. Crop Sci.* 50(S) : 62-68.
- Kim, Y.-D., S.-G. Kang, B.-I. Ku, W.-G. Sang, S.-R. Jo, H.-K. Park, W.-C. Shin, J.-C. Ko, W.-H. Yang, B.-K. Kim, J.-H. Lee, and S.-L. Kim. 2015. Optimal transplanting time for 'Sukwang' in the southwestern plain area of Korea. *Korean J. Intl. Agric.* 27(1) : 59-62.
- Lee, A.-S., Y.-S. Cho, I.-J. Kim, J.-K. Ham, and J.-S. Jang. 2012. The quality and yield of early maturing rice varieties affected by cultural practices in Gangwon plain region. *Korean J. Crop Sci.* 57(3) : 233-237.
- Lee, C.-K., K.-S. Kwak, J. H. Kim, J.-Y. Shon, and W.-H. Yang. 2011. Impacts of climate change and follow-up cropping season shift on growing period and temperature in different rice maturity types. *Korean J. Crop Sci.* 56(3) : 233-243.
- Lee, J.-H., W.-Y. Choi, J.-K. Nam, S.-S. Kim, H.-K. Park, N.-H. Baek, and M.-G. Choi. 2005. Proper transplanting time for improving the rice quality in the southern alpine area. *Korean J. Crop Sci.* 50(S) : 51-55.
- National Institute of Meteorological Research. 2009. Understanding climate change II. Climate change in Korea : Present and future. Seoul. p. 86.
- National Institute of Meteorological Research. 2012. Climate change scenario report for the 5th IPCC report 2011. Seoul. p. 117.
- Rural Development Administration. 2015. Quality rice production technologies. Suwon. pp. 147-149.
- Shim, K.-M., K.-A. Lee, K.-H. So, G.-Y. Kim, H.-C. Jeong, and D.-B. Lee. 2010. Assessing impacts of global warming on rice growth and production in Korea. *Climate Change Res.* 1(2) : 121-131.
- Yang, W., H. S. Cho, M. Kim, K. Y. Seong, T. S. Park, M. C. Seo, and H. W. Kang. 2013. Re-examination of standard cultivation practices of rice in response to climate change in Korea. *J. Crop Sci. Biotech.* 16(2) : 85-92.
- Yang, W., K.-J. Choi, J. Shon, S. Kang, S.-H. Shin, K.-B. Shim, J. Kim, H. Jung, J. H. Jang, J.-S. Jung, C. Y. Lee, Y. T. Yun, S. J. Kwon, K. An, J.-H. Shin, and S. M. Bae. 2015. Effects of temperature and sunshine hours during grain filling stage on the quality-related traits of high quality rice varieties in Korea. *Korean J. Crop Sci.* 60(3) : 273-281.
- Yang, W., K.-J. Choi, J. Shon, S. Kang, S.-H. Shin, K.-B. Shim, J. Kim, H. Jung, J. H. Jang, J.-S. Jung, C. Y. Lee, Y. T. Yun, S. J. Kwon, K. An, J.-H. Shin, and S. M. Bae. 2016. Comparative analysis on the relationship between head rice yield and its components in Korean high-quality rice varieties. *J. Korean Soc. Int. Agric.* 28(1) : 49-57.
- Yang, W., M.-K. Kim, S. Kang, J.-H. Park, S. Kim, J.-S. Choi, C.-I. Yang, and N.-H. Back. 2017. Changes in flowering date and yielding characteristics affected by transplanting date in the early-maturing rice cultivar 'Joun' in the mid-northern inland of Korea. *Korean J. Crop Sci.* 62(4) : 304-310.
- Yang, W., S. Kang, S. Kim, J.-S. Choi, J.-H. Park, and Y.-H. Yoon. 2018. Changes of heading date and yielding characteristics as affected by transplanting date in the mid-maturing rice cultivar 'Haiami' in central plain area of Korea. *J. Korean Soc. Int. Agric.* 30(1) : 51-57.
- Yang, W., S. Peng, R. C. Laza, R. M. Visperas, and M. L. Dionisio-Sese. 2008. Yield gap analysis between dry and wet season rice crop grown under high-yielding management conditions. *Agron. J.* 100(5) : 1390-1395.
- Yang, W.-H., K.-S. Kwak, K.-J. Choi, T.-S. Park, and J.-C. Shin. 2007. Climate change and rice in Korea. In the "International Workshop on Cool Rice for a Warmer World", International Rice Research Institute and Huazhong Agricultural University, 26-30 March 2007, Wuhan, China. pp. 48-50.
- Yoshida, S. 1981. Fundamentals of rice crop science. International Rice Research Institute, Philippines. p. 269.