호남평야지 재배시기별 조생종 벼 품종의 품질 및 호화점도 특성 분석

박현수* · 백만기 · 이창민 · 김석만 · 서정필 · 정오영 · 조영찬

농촌진흥청 국립식량과학원

Characterization of Quality-Related Traits and Pasting Properties of Early Maturing Rice Varieties by Cultivation Times in the Honam Plain, Korea

Hyun-Su Park*, Man-Kee Baek, Chang-Min Lee, Suk-Man Kim, Jung-Pil Suh, O-Young Jeong, and Young-Chan Cho

National Institute of Crop Science, RDA, Wanju 55365, Republic of Korea

Abstract Early maturing rice is widely utilized to diversify cropping systems in the Honam Plain, Korea. It is based on the principle of a short growth duration. There is concern regarding quality deterioration of early maturing rice owing to the high temperature during the ripening stage as compared to that for mid and mid-late maturing rice. This study was conducted to analyze six pasting property-related and eight quality traits of six early maturing rice varieties (Jopyeong, Odae, Unkwang, Haedamssal, Jinkwang, and Haedeul) on early, ordinary, and late cultivations, and to interpret the relationships between genotypes and environments. As the cultivation time increased, the ratio of head rice (HR) and glossiness of cooked rice (Toyo value, TY) increased. The cumulative mean temperature of the ripening stage showed a strong negative correlation with HR and TY at all cultivation times. Pasting temperature, peak viscosity (PV), trough viscosity, final viscosity, and breakdown (BD) decreased, whereas setback (SB) increased as the cultivation time was delayed. Pasting properties were affected more by climate conditions in the ripening stage than during the growth stage. Additive main effects and multiplicative interaction analysis revealed that pasting property-related and quality traits were affected more by environment than genotype. Jinkwang and Haedamssal in early and ordinary cultivation and Jinkwang and Haedeul in late cultivation exhibited higher HR and TY and a lower protein content. They also showed higher PV and BD and lower SB, which are characteristics of good eating quality *japonica* rice. Jinkwang, Haedamssal, and Haedeul are premium-quality, early maturing rice varieties that were recently developed. The cultivation of these varieties could improve the grain quality of early maturing rice at high temperatures during the ripening stage in the Honam Plain.

Keywords cultivation time, early maturing, Honam plain, pasting property, quality, rice

Received on December 29, 2020. Revised on January 19, 2021. Accepted on January 25, 2021.

* Corresponding Author (E-mail: mayoe@korea.kr, Tel: +82-63-238-5214, Fax: +82-63-238-5205)

서 언

우리나라에서 벼는 출수생태에 따라 조생종, 중생종, 중만생종으로 구분하며, 2010년부터 2019년까지 10년간 숙기별 평균 재배면적은 중만생 84.1%, 중생종 5.1%, 조생종 10.8%로 중만생종에 편중된 벼농사가 이루어지고 있다. 2019년까지 농촌진흥청 국립식량과학원에서 개발된 밥쌀용 벼 품종 227개의 숙기별 수는 조생종 76개(33.5%), 중생종 71개(31.3%), 중만생 80개(35.2%)로 재배면적에 비해 개발 품종 비율은 편중되어 있지 않다. 개발 품종 수는 비슷하나 중만생종에 비해 조생종과 중생종의 재배면적이 적은 이유는 우수한 중만생종 벼 품종이 개발되기도 하였지만 조생종과 중생종의 생육기와 등숙기 재배환경 조건이 중만생종에 비해 좋지 않고 품질, 수량, 재배안정성이 낮다는

인식에서 비롯된 것으로 생각된다. 중만생종에 편중된 재배는 수확기 노동력의 과중 문제, 집중 출하에 따른 건조·저장 등 수확 후 관리에 어려움을 가져오며 급격한 쌀값 변동에 영향을 줄 수 있어 조생종과 중생종의 재배면적 확대에 대한 중요성이 증대되고 있다(Nam et al. 2019).

생육기간이 짧은 조생종 벼는 주로 중산간지와 북부평야지에서 재배되어 왔으나, 최근 호남평야지에서 추석 전 햅쌀 출하를 위한 조기 재배, 수확시기 다변화를 위한 보통기 재배, 맥류 후작 이모작을 위한 만기 재배 등 다양한 재배시기에서 조생종 재배가 증가하고 있다(Nam et al. 2018). 조생종을 호남평야지에서 재배할 경우 다른 생태형에 비해 출수 후 고온 등숙조건을 거치게 되는 경우가 많다. 등숙기 고온은 원활한 전분합성을 교란시켜 쌀 외관품위를 저하시키는 주된 원인으로 고온 등숙을

거친 조생종 벼는 완전미율이 낮아지고 분상질 비율이 높아져 외관품위가 저하되며 밥맛이 떨어지는 것으로 알려져 있다(Cho et al. 2015, Lee et al. 2020). 특히 조생종 벼를 4월 하순에서 5월 상순에 이양하여 8월 중하순에서 9월 상순 사이에 수확하는 조기 재배의 경우 출수를 7월 초순에 하여 가장 더운 시기인 7월과 8월에 등숙 과정을 거치게 때문에 고온 등숙에 의한 쌀 품질 저하가 보통기나 만기 재배에 비해서 심각하다. 평야지에서 조생종 벼를 조기 재배를 할 경우 쌀 품질이 떨어지는 문제가 발생함에도 추석 전 중만생종이 출하되기 이전에 햅쌀을 수확하여 판매함으로써 높은 수익을 얻을 수 있기 때문에 조기 재배는 조생종 재배면적의 46%를 차지할 만큼 그 비중이 커지고 있다(Lee et al. 2012). 중만생종과 같은 시기에 이양하는 보통기 재배의 경우에도 조생종 벼는 중만생종에 비해 등숙기 고온을 많이 경과하기 때문에 품질이 떨어지고, 만기 재배는 생육 초기 고온 및 등숙기 저온을 경과하게 되고 생육기간이 단축되어 적기 재배에 비해 품질이 떨어진다고(Hwang et al. 2019, Lee et al. 2018).

평야지에서 조생종 벼는 짧은 생육기간을 이용하여 조기, 보통기, 만기 재배 등 작부체계를 다양화하는데 활용되고 있으나, 재배환경 조건이 중만생종의 적기재배에 비해 좋지 않아 품질이 저하될 우려가 높다. 이러한 품질 저하를 육종적 측면에서 보완하기 위해서 농촌진흥청 국립식량과학원에서는 평야지 조기재배 적응성과 맥류 이모작 및 소득작물 후작용 만기재배 적응성 조생종 벼 품종 개발을 위한 육종사업이 수행되고 있으며 평야지 조개재배용 ‘조평’, 소득작물 후작용 ‘화왕’ 등이 개발되었다(Lee et al. 2018, Nam et al. 2013). 또한, 밥맛과 품질이 향상된 ‘최고품질 벼’를 2003년부터 개발하고 있으며 조생종 최고품질 벼로는 ‘운광’(2004년 개발), ‘해담쌀’(2014), ‘진광’(2016), ‘해들’(2017) 등 4품종이 개발되었다(Baek et al. 2019). 품종 개발 당시 운광은 중북부 및 남부중산간지, 해담쌀은 영남평야지, 진광은 중부평야지 및 동북부해안지, 해들은 중부평야지가 적응 지역으로 이들 조생종 최고품질 품종 대상으로 호남평야지에서 재배시기별 품질 특성에 대한 검토는 이루어지지 않았다. 본 연구는 호남평야지에서 조생종 벼 재배가 증가하고 있는 시점에서 지금까지 개발된 조생종 최고품질 품종을 대상으로 재배시기별 이들 품종들의 품질 및 호화점도 특성과 재배 환경 변이 양상을 분석하여 품종의 성능을 검토하고, 호남평야지에서 재배 시기별 품질과 밥맛이 우수한 벼 품종 개발의 선발지표로 활용하고자 수행되었다.

재료 및 방법

시험 재료 및 재배 방법

본 시험은 호남평야지에 위치한 농촌진흥청 국립식량과학원 벼 시험포장(35°50'26.8"N 127°02'42.8"E, 해발 20 m)에서 2018-2019년 2년간 수행되었다. 시험에는 조생종 고품질 오대, 조평, 최고품질 운광, 해담쌀, 진광, 해들 등 총 6품종을 이용하였다. 재배시기별 품질 및 호화점도 관련 형질 특성을 분석하기 위하여 조기, 보통기, 만기 등 3시기 시험을 수행하였다. 조기 재배는 4월 10일 파종 5월 10일 이양, 보통기 재배는 4월 30일 파종 5월 30일 이양, 만기 재배는 6월 15일 파종 7월 10일 이양하였으며 완전임의배치법 3반복으로 주당 3분씩 104주를 재식하여 생산력검정시험을 수행하였다. 시비량은 N-P₂O₅-K₂O를 90-45-57 kg/ha으로 질소는 기비 : 분얼비 : 수비를 50 : 20 : 30 비율로 분시하였고, 인산은 전량 기비로, 칼륨은 기비 : 수비를 70 : 30 비율로 분시하였다. 기타 재배관리는 농촌진흥청 표준 재배법에 준하여 실시하였다.

기상자료

기상자료는 기상청 기상자료 개방포털(<https://data.kma.go.kr>)의 전주지점 정보를 이용하였다. 조기 재배 파종일인 4월 10일부터 만기 재배에서 가장 출수가 늦은 품종의 출수 후 40일까지의 일별 평균 및 최고 온도, 합계 일조시간 정보를 2018, 2019년 수집하여 2년간의 평균 값을 이용하였다. 파종일에서 출수기까지의 기간을 출수일수 및 생장기간으로 구분하였고 출수기에서 출수 후 40일까지의 기간을 등숙기간으로 구분하여 누적 평균온도와 누적 일조시간을 각 품종과 재배시기별로 분석하였다(Park et al. 2020).

품질 특성 조사

생산력검정시험에 공시된 재료의 시료를 이용하여 품질 관련 형질 특성을 조사하였다. 수확된 현미를 시험용 정미기(VP-32T, Yamamoto Co., Ltd., Yamagata, Japan)를 이용하여 도정 후 RN300 (Kett Co., Ltd., Tokyo, Japan)을 이용하여 백미 외관품위를 조사하였다. 백미의 단백질 및 아미로스 함량은 근적외선 분광분석법(near infrared spectroscopy) 기기인 Infratec 1241 Grain Analyzer (Foss Tecator, Hoganas, Sweden)를 이용하여 간이측정하였다. 취반미의 기계적 식미치 측정을 위한 윤기치는 식미검정기 MA-90B (Toyo Co., Tokyo, Japan)를 이용하여 백미 33.0 g을 정량하여 80℃ 더운물에서 10분간 취반 후 상온에

서 3분간 뜸을 들인 후 측정하였다.

호화점도 특성 조사

신속점도측정기 RVA4500 (Perten Instruments, Australia)를 이용하여 쌀가루의 호화점도 특성을 측정하였다. 용기에 시료 3 g과 25 mL의 증류수를 넣어 분산시키고 온도를 50-95℃까지 상승 및 유지시킨 후 다시 50℃까지 냉각, 유지하면서 점도를 측정하였다. 호화점도 특성은 호화개시온도(pasting temperature), 최고점도(peak viscosity), 최저점도(trough viscosity), 최종점도(final viscosity)를 구하고, 이것을 이용하여 강하점도(break down; 최고점도-최저점도)와 치반점도(setback; 최종점도-최고점도)를 계산하였다. 점도단위는 RVU (rapid viscosity unit)로 표시하였다.

통계 분석

통계분석은 R (Version 4.0.2, The R Foundation for Statistical Computing Platform)을 이용하였다. 삼원분산분석을 통해 연차, 재배시기, 품종 등 요인과 요인들의 상호작용이 품질 및 호화점도 관련 형질 변이에 미치는 영향을 분석하였다. 기상환경 및 형질의 평균 등 기술통계, Duncan's Multiple Range Test (DMRT)를 이용한 평균간 비교, 품종 유전형(genotype; G)과 재배시기 환경(environment; E)간 상호작용($G \times E$ interaction)에 대한 AMMI (Additive Main Effects and Multiplicative Interaction) 분석을 agricolae 패키지를 이용하여 수행하였다. 기상요인과 품질 및 호화점도 관련 형질들의 상관분석은 corplot 패키지를 이용하였고, 주성분분석은 ggfortify 패키지를 이용하였다.

결과 및 고찰

재배시기별 기상환경

호남평야지에서 조생종 벼 품종의 품질 및 호화점도 특성을 분석하기 위해서 조생 고품질 품종인 조평, 오대와 최고품질 품종인 운광, 해담쌀, 진광, 해들을 조기, 보통기, 만기 재배하였다. 공시품종들은 조기, 보통기, 만기 재배에서 각각 파종 후 96-104일, 86-94일, 72-78일 사이에 출수하였고, 생육기 및 등숙기 누적평균온도와 누적일조시간은 Table 1과 같다. 재배시기가 늦어질수록 파종 후 출수기까지 걸리는 출수일수가 짧아졌지만 생육기 누적평균온도는 조기(1,985℃), 보통기(2,031℃), 만기(1,998℃) 재배가 통계적으로 차이가 없는 비슷한 경향을 나타냈다. 이는 재배시기가 늦어질수록 출수 전 생육기간 동안의 일

평균온도가 높기 때문에 기본영양생장성과 감온성이 큰 조생종의 출수일수가 줄어들었으며, 호남평야지에서 조생종 벼 품종의 출수까지는 일정수준의 누적온도가 필요한 것으로 생각된다 (Park et al. 2020). 품종별로는 조평이 전 재배시기에서 출수일수가 가장 짧았고 해들이 가장 길었다. 조기와 보통기 재배에서 품종들의 출수일수는 조평, 오대, 운광, 해담쌀, 진광, 해들 순으로 길었으나 만기 재배에서는 조평, 진광, 운광, 오대, 해담쌀, 해들 순으로 조기와 보통기 재배에서 출수일수가 늦은 편이었던 진광의 출수가 빨라졌으며 해담쌀의 출수가 다소 늦어진 경향이었다. 남부평야지에 조기 재배는 추석 전에 조기 수확하여 높은 가격으로 추석용 햅쌀을 공급하기 위한 것으로 이에 적당한 벼 생태형별 이앙시기 설정이 필요하다(Park et al. 2013). 공시된 조생종 품종 중 출수일수가 가장 길었던 해들을 4월 10일 파종하여 5월 10일 이앙하는 조기 재배양식에 의하면 출수일수가 평균 7월 24일경에 출수하였는데 이후 조생종의 최단 등숙기간인 40일을 적용하여 가장 빨리 수확을 하게 되더라도 9월 14일은 되어야 수확이 가능하여 추석이 이른 해인 2014년(9월 8일), 2019년(9월 13일)과 같은 경우에는 추석 전에 햅쌀을 수확하는 데는 어려움이 있는 것으로 생각된다. 따라서 호남평야지에서 추석 전 햅쌀 출하를 목적으로 해들을 조기 재배를 할 경우에는 그 해 추석 일정을 확인하는 등 주의가 필요할 것으로 생각된다.

재배시기별 조생종 품종의 품질 특성

외관 품위와 관련된 정상립(head rice), 분상질립(chalky rice), 피해립(damaged rice), 쉼미(broken rice), 착색립(colored rice)과 이화학적 특성인 단백질(protein) 및 아밀로스(amylose) 함량, 밥의 윤기치(glossiness) 등 8개 품질 관련 형질에 대한 연차, 재배시기, 품종 및 이들의 상호작용에 따른 형질 변이를 분석하였다(Table 2). 분상질립을 제외한 정상립 등 7개 형질은 연차, 재배시기, 품종 모두 형질 변이에 관여하였으나, 분상질립은 연차에 의한 형질 변이는 통계적으로 유의하지 않았고 재배시기와 품종에 의한 변이만 유의하였다. 변이 요인간 비교에 있어서 정상립, 분상질립, 피해립, 쉼미는 재배시기에 의한 변이가 가장 컸고 착색립, 단백질 및 아밀로스 함량, 밥의 윤기치는 연차에 의한 변이가 가장 큰 것으로 나타났다. 품질 관련 형질 모두 연차와 재배시기간 상호작용이 있었으며, 연차에 의한 재배 환경 변화는 형질 변이에 큰 영향을 미치기 때문에 2년간의 평균값을 이용하여 재배시기와 품종들의 품질 관련 형질을 비교 분석하였다(Table 3).

각 시기별 품종들의 품질 관련 형질 특성을 비교하면 조기

Table 1. Heading date and climate conditions in early, ordinary, and late cultivations.

Cultivation time	Variety	Heading date (DAS ^z)	Cumulative mean temperature (°C)		Cumulative sunshine hours (hrs.)	
			Growth stage	Ripening stage	Growth stage	Ripening stage
Early	Jopyeong	96d ^y	1,905f	1,148b	673f	311c
	Odae	98c	1,951d	1,148a	687c	306d
	Unkwang	98c	1,963c	1,146c	682d	312b
	Haedamssal	98c	1,952e	1,144d	675e	314b
	Jinkwang	100b	2,012b	1,142d	691b	314a
	Haedeul	104a	2,126a	1,126e	727a	285e
	Mean	99A ^x	1,985A	1,142A	689A	307A
	C.V.(%)	2.6	3.8	0.7	2.8	3.4
Ordinary	Jopyeong	86f	1,897f	1,116a	607f	279a
	Odae	88e	1,965e	1,106b	622e	268b
	Unkwang	91c	2,058c	1,093d	647c	255d
	Haedamssal	91d	2,033d	1,096c	640d	261c
	Jinkwang	92b	2,087b	1,088e	657b	250e
	Haedeul	94a	2,147a	1,072f	677a	241f
	Mean	90B	2,031A	1,095B	642B	259B
	C.V.(%)	3.0	3.9	1.2	3.5	4.8
Late	Jopyeong	72e	1,907e	893a	499e	210e
	Odae	76c	2,002c	865c	510c	212c
	Unkwang	75c	2,011c	863c	511c	214c
	Haedamssal	77b	2,035b	854d	512b	218b
	Jinkwang	74d	1,971d	877b	505d	211d
	Haedeul	78a	2,059a	844e	521a	218a
	Mean	75C	1,998A	866C	510C	214C
	C.V.(%)	2.7	2.5	1.9	1.2	1.9
Total		88	1,993	1,037	611	260
C.V.(%)		11.6	3.5	11.7	12.7	15.4

^zDAS: days after seeding^yMeans with same letters in a column are not significantly different at $p < 0.05$ (ANOVA followed by DMRT)^xCapital letters indicate statistics different among cultivation time**Table 2.** F values for effects of year, cultivation time, variety, and their interactions from ANOVA on quality-related traits.

Source of variance	df ^z	Head rice	Chalky rice	Damaged rice	Broken rice	Colored rice	Protein content	Amylose content	Glossiness
Year (Y)	1	441.8 ^{***y}	0.1 ^{ns}	53.6 ^{**}	183.2 ^{**}	344.3 ^{**}	112.4 ^{**}	367.7 ^{**}	870.9 ^{**}
Cultivation time (T)	2	740.4 ^{**}	186.6 ^{**}	135.9 ^{**}	246.5 ^{**}	60.5 ^{**}	108.2 ^{**}	200.0 ^{**}	837.1 ^{**}
Variety (V)	5	52.9 ^{**}	36.7 ^{**}	17.9 ^{**}	16.5 ^{**}	10.4 ^{**}	17.5 ^{**}	13.8 ^{**}	114.3 ^{**}
Y*T	2	401.6 ^{**}	254.4 ^{**}	35.8 ^{**}	186.2 ^{**}	53.7 ^{**}	30.1 ^{**}	15.5 ^{**}	372.4 ^{**}
Y*V	5	3.5 ^{**}	12.3 ^{**}	2.3 ^{ns}	1.0 ^{ns}	6.2 ^{**}	1.1 ^{ns}	0.6 ^{ns}	16.0 ^{**}
T*V	10	7.0 ^{**}	10.3 ^{**}	4.1 ^{**}	2.3 [*]	3.5 ^{**}	1.2 ^{ns}	2.3 [*]	16.0 ^{**}
Y*T*V	10	8.0 ^{**}	9.3 ^{**}	1.9 ^{ns}	3.1 ^{**}	2.3 [*]	0.9 ^{ns}	0.3 ^{ns}	4.4 ^{**}

^zdf: degree of freedom^yns, *, and ** mean no significant, significant at $p < 0.05$, and $p < 0.01$ by three-way ANOVA, respectively

Table 3. Quality-related traits of varieties by cultivation times.

Cultivation time	Variety	Head rice (%)	Chalky rice (%)	Damaged rice (%)	Broken rice (%)	Colored rice (%)	Protein content (%)	Amylose content (%)	Glossiness
Early	Jopyeong	76.1a ^z	8.2b	3.8b	11.3a	0.6a	6.1a	19.8ab	71.8a
	Odae	68.3b	13.3a	2.2c	15.1a	1.2a	6.2a	21.2a	70.9a
	Unkwang	75.2a	6.6b	5.5a	11.7a	0.9a	5.9a	19.8ab	70.3a
	Haedamssal	79.2a	6.2b	3.4bc	9.3a	1.9a	5.8a	20.1ab	75.6a
	Jinkwang	77.2a	5.5b	2.9bc	13.5a	0.9a	5.8a	19.6ab	75.3a
	Haedeul	78.4a	7.1b	2.6bc	10.6a	1.3a	6.2a	18.8b	75.3a
	Mean	75.7B ^y	7.8A	3.4A	11.9A	1.1B	6.0B	19.9A	73.2C
	C.V.(%)	13.9	51.2	40.8	58.8	103.6	5.5	7.8	9.6
Ordinary	Jopyeong	87.9abc	1.6b	3.1a	6.8b	0.6a	6.7a	17.5a	75.4a
	Odae	84.2c	4.9a	1.7a	8.7a	0.6a	6.8a	18.1a	73.2a
	Unkwang	85.9bc	2.8ab	3.2a	7.5b	0.6a	6.5a	17.2a	75.3a
	Haedamssal	90.1ab	2.4b	2.4a	4.5d	0.5a	6.3a	17.9a	80.8a
	Jinkwang	88.9ab	3.8ab	1.4a	5.7c	0.3a	6.4a	17.4a	79.7a
	Haedeul	90.9a	2.7ab	2a	4.2d	0.3a	6.8a	16.7a	75.5a
	Mean	88.0A	3.0B	2.3B	6.2B	0.5C	6.6A	17.5B	76.7B
	C.V.(%)	4.4	66.6	73.2	29.6	78.0	7.8	8.8	8.3
Late	Jopyeong	89.7ab	4.2a	1.2a	4.1b	0.9a	7.0ab	17.3ab	78.1c
	Odae	84.6c	6.2a	0.8bc	6.0a	2.4a	7.1a	17.6ab	80.2c
	Unkwang	91.1a	2.1a	0.9ab	3.9b	2a	6.5cd	16.9b	84.6b
	Haedamssal	87.4bc	5.6a	0.6bc	3.9b	2.6a	6.3d	18.3a	89.7a
	Jinkwang	92.3a	3a	0.5c	3.1bc	1.2a	6.6bcd	17.1ab	88.5a
	Haedeul	92.2a	3.5a	0.6bc	2.4c	1.5a	6.8abc	17.2ab	88.5a
	Mean	89.5A	4.1B	0.8C	3.9C	1.8A	6.7A	17.4B	84.9A
	C.V.(%)	4.1	97.5	48.0	38.7	98.3	5.8	6.2	5.6
Total		84.4	5.0	2.2	7.4	1.1	6.4	18.2	78.3
C.V.(%)		10.9	80.5	77.7	73.9	117.0	8.1	9.9	10.0

^zMeans with same letters in a column are not significantly different at $p < 0.05$ (ANOVA followed by DMRT)^yCapital letters indicate statistics different among cultivation times

재배에서 정상립은 해담쌀(79.2%)이 가장 높았고 이후 해들(78.4%), 진광(77.2%), 조평(76.1%), 운광(75.2%) 오대(68.3%) 순이었다. 분상질립은 진광(5.5%)이 가장 낮았고 오대(13.3%)가 가장 높았으며, 쉼미는 해담쌀(9.3%)이 가장 낮았고 오대(15.1%)가 가장 높았다. 단백질 함량은 해담쌀과 진광(5.8%)이 낮았고 오대와 해들(6.2%)이 높았으며, 아밀로스 함량은 해들(18.8%)이 가장 낮았고 오대(21.2%)가 가장 높았다. 밥의 윤기치는 해담쌀(75.6%)이 가장 높았고 운광(70.3%)이 가장 낮았다. 보통기 재배에서 정상립은 해들(90.9%)이 가장 높았고 이후 해담쌀(90.1%), 진광(88.9%), 조평(87.9%), 운광(85.9%), 오대(84.2%) 순이었다. 분상질립은 조평(1.6%)이 가장 낮았고 오대(4.9%)가

가장 높았으며, 쉼미는 해들(4.2%)이 가장 낮았고 오대(8.7%)가 가장 높았다. 단백질 함량은 해담쌀(6.3%)이 가장 낮았고 오대와 해들(6.8%)이 높았으며, 아밀로스 함량은 해들(16.7%)이 가장 낮았고 오대(18.1%)가 가장 높았다. 밥의 윤기치는 해담쌀(80.8%)이 가장 높았고 오대(73.2%)가 가장 낮았다. 만기 재배에서 정상립은 진광(92.3%)이 가장 높았고 이후 해들(92.2%), 운광(91.1%), 조평(89.7%), 해담쌀(87.4%), 오대(84.6%) 순이었다. 분상질립은 운광(2.1%)이 가장 낮았고 오대(6.2%)가 가장 높았으며, 쉼미는 해들(2.4%)이 가장 낮았고 오대(6.0%)가 가장 높았다. 단백질 함량은 해담쌀(6.3%)이 가장 낮았고 오대(7.1%)가 가장 높았으며, 아밀로스 함량은 운광(16.9%)이 가장 낮았고 해담쌀(18.3%)

이 가장 높았다. 밥의 윤기치는 해당쌀(89.7)이 가장 높았고 조평(78.1)이 가장 낮았다.

재배시기별 품질 관련 형질 특성을 비교하면 조기, 보통기, 만기로 재배시기가 늦어질수록 정상립이 높아지고 착색립, 피해립, 쉼미가 줄어들어 외관품위가 향상되는 경향이였다. 단백질 함량은 조기 재배에서 가장 낮았고 보통기와 만기 재배는 통계적으로 차이가 없었으며, 아밀로스 함량은 조기 재배에서 가장 높았고 보통기와 만기 재배는 통계적으로 차이가 없는 등 조기 재배에서의 형질 특성과 보통기와 만기 재배에서의 형질 특성이 구분되었다. 밥의 윤기치는 조기, 보통기, 만기로 재배시기가 늦어질수록 통계적으로 유의한 수준에서 증가하였다.

품질 관련 형질에 대한 재배시기와 품종간 상호작용

재배시기 환경 변화에 따른 공시 품종의 품질 관련 형질 변이에 대한 유전형과 환경의 상호작용 효과를 구명하기 위해서 AMMI 모델 분석을 수행하였다(Table 4). 품질 관련 형질은 모두 재배시기에 따른 환경의 영향이 품종의 유전형에 비해 형질 변이에 미치는 영향이 컸다. 이를 통해 조생종 벼의 품질을 향상시키기 위해서는 일반적으로 품종의 선택보다는 재배시기를 조절하는 것이 용이할 것으로 생각된다. AMMI 주성분분석 결과 유전형과 환경에 대한 상호작용의 정도는 주성분 PC1이 69.8%(분상질립)-96.0%(단백질 함량)를 설명하였고 주성분 PC2가 4.0%-30.2%를 설명하였다. AMMI biplot을 이용하여 품질 관련 형질 변이에 대한 품종의 유전형과 재배시기 환경과의 상가적 주효과 및 유전형과 환경과의 상호작용을 시각적으로 제시하였다(Fig. 1). 각 형질에 대한 biplot의 가로축은 유전형과 환경의 주효과를

나타내는 형질 값이고 세로축은 유전형과 환경의 상호작용에 대한 주성분 PC1이 표시되며 중심점은 전체 재배시기에서 전체 품종의 평균 형질 값이다. 중심점에서 가로축 기준으로 변동이 클수록 주효과가 커 유전형과 환경의 형질 값이 평균에 비해 차이가 크며, 중심점에서 세로축을 기준으로 변동이 큰 유전형은 형질 발현에 미치는 환경의 영향이 크고 환경과 방향성이 근접한 유전형은 해당 환경에서 형질 값이 상대적으로 크다는 것을 의미한다(Park et al. 2020). 외관 품위에 가장 많은 영향을 미치는 것으로 알려진 정상립은 환경의 주효과에 의해 조기, 보통기, 만기 재배에서 각각 75.7%, 88.0%, 89.5%로 조기 재배에 비해 보통기와 만기 재배에서 높은 값을 냈다. 등숙기 누적평균온도가 조기 재배 1,142℃, 보통기 재배 1,095℃, 만기 재배 866℃로 재배시기가 빠를수록 고온 등숙 과정을 거치게 되어 외관 품위가 저하된 것으로 판단된다(Table 1). 등숙기 고온은 원활한 전분합성을 교란시켜 쌀 외관품위를 저하시키는 주된 원인이며, 여름철 고온 조건에서 조생종 벼 품종들은 완전미율은 낮아지고 분상질 비율이 높아져 쌀이 품질이 떨어지는 것으로 알려져 있다(Cho et al. 2015). 품종별로는 해들(87.2%), 진광(86.1%), 해당쌀(85.6%) 순으로 평균 값이 높아 최근에 육성된 최고품질 조생종 품종들이 조평(84.6%), 운광(84.1%), 오대(79.0%)에 비해서 정상립이 높았다. 특히 해들과 진광은 정상립의 세로축 변동이 다른 품종에 비해 적어 재배시기 환경변화에 안정적인 품종이었다. 해들과 진광 다음으로 정상립이 높았던 해당쌀은 조기와 보통기 재배에서는 정상립이 79.2%와 90.1%로 해들(78.4%, 90.9%)과 진광(77.2%, 88.9%)에 비해 높거나 비슷한 수준이었으나 만기 재배에서 87.4%로 해들(92.2%)과 진광(92.3%)에 비해 크게 떨어져

Table 4. Additive main effects and multiplicative interaction (AMMI) analysis of variance for quality-related traits of varieties (genotype) by cultivation time (environment).

Source of variation	df ^z	Head rice		Chalky rice		Damaged rice		Broken rice		Colored rice		Protein content		Amylose content		Glossiness	
		SS	Proportion (%)	SS	Proportion (%)	SS	Proportion (%)	SS	Proportion (%)	SS	Proportion (%)	SS	Proportion (%)	SS	Proportion (%)	SS	Proportion (%)
Genotype (G)	5	734 ^y	8.2	225 ^{**}	13.1	42 ^{**}	14.2	206 ^{ns}	6.5	12 ^{ns}	6.6	4 ^{**}	15.2	25 [*]	7.1	892 ^{**}	13.5
Environment (E)	2	4,114 ^{**}	45.8	459 ^{**}	26.8	128 ^{**}	43.1	1,231 ^{**}	39.0	28 ^{**}	15.4	11 ^{**}	37.6	144 ^{**}	41.3	2,612 ^{**}	39.7
Rep	6	40 ^{ns}	0.4	14 ^{ns}	0.8	7 ^{ns}	2.5	19 ^{ns}	0.6	0 ^{ns}	0.2	1 ^{ns}	3.7	4 ^{ns}	1.1	10 ^{ns}	0.2
G × E	10	195 ^{ns}	2.2	127 ^{ns}	7.4	20 ^{ns}	6.6	58 ^{ns}	1.8	8 ^{ns}	4.5	1 ^{ns}	2.1	8 ^{ns}	2.4	250 ^{ns}	3.8
Residuals	84	3,892	43.4	890	51.9	100	33.7	1,640	52.0	135	73.3	12	41.4	168	48.1	2,817	42.8
AMMI PC1	6	71	73.4	44	69.8	9	89.2	22	77.0	3.0	71.9	0.3	96.0	4.0	95.8	98	78.6
AMMI PC2	4	26	26.6	19	30.2	1	10.8	7	23.0	1.2	28.1	0.0	4.0	0.2	4.2	27	21.4

^zdf: degree of freedom

^yns, *, and ** mean no significant, significant at $p < 0.05$, and $p < 0.01$ by three-way ANOVA, respectively

Fig. 1. Additive main effects and multiplicative interaction (AMMI) biplots of quality-related traits in six early maturing rice varieties across three cultivation times. Head rice (A), chalky rice (B), damaged rice (C), broken rice (D), colored rice (E), protein content (F), amylose content (G), glossiness (H). HD: Haedeul, HDS: Haedamssal, JK: Jinkwang, JP: Jopyeong, OD: Odae, UK: Unkwang. E: early cultivation, O: ordinary cultivation, L: late cultivation.

biplot에서 세로축을 기준으로 조기와 보통기 재배의 방향성에 변동이 큰 형태를 나타냈으며, 이를 통해 해당쌀은 조기와 보통기 재배에 비해 상대적으로 만기 재배에서 외관 품질이 떨어지는 것으로 판단되었다. 이러한 결과는 해당쌀은 평야지 조기 재배에 적응하는 조생종 품종을 육성하고자 개발된 최고품질 품종으로 호남평야지 재배시기별 수량 관련 특성 분석에서 조기와 보통기 재배에서는 수량성과 등숙률이 양호하지만 만기 재배에서 등숙률이 상당히 낮아져 호남평야지 만기 재배 적응성은 다소 떨어진 것으로 판단된다는 결과와 유사하였다(Park et al. 2020). 따라서 해당쌀을 호남평야지에서 재배할 경우에는 외관 품질을 고려하여 만기 재배보다는 조거나 보통기 재배가 적합할 것으로 생각된다.

단백질과 아밀로스 함량은 밥의 경도와 취반 특성 등에 영향을 미쳐 밥맛을 결정하는데 중요한 역할을 하는 인자로 시비량, 이앙시기와 등숙온도 등에 의해 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Cho et al. 2017, Kim et al. 2009, Kwak et al. 2018). 단백질 함량은 환경의 주효과에 의해 조기, 보통기, 만기 재배에서 각각 6.0%, 6.6%, 6.7%로 보통기와 만기 재배에 비해 조기 재배에서 낮았으며, 아밀로스 함량은 조기, 보통기, 만기 재배에서 각각 19.9%, 17.5%, 17.4%로 보통기와 만기 재배에 비해 조기 재배에서 높았다. 이러한 결과는 기존의 이앙시기별 이화학적 특성 분석에서 이앙시기가 늦어질수록 단백질 함량은 증가한다는 결과와 일치하였으나, 아밀로스 함량도 이앙시기가 늦어질수록 증가한다는 결과와는 상반된 결과를 나타냈다(Cho et al. 2017, Kim et al. 2015). 우리나라에서 2018년은 7-8월에 이상고

온이 있던 해로 7월 11일부터 7월 30일까지 누적평균온도는 2018년 587℃, 2019년 520℃ 였고, 7월 31일부터 8월 19일까지 누적평균온도는 2018년 602℃, 2019년 565℃ 였으며, 8월 20일부터 9월 8일까지의 누적평균온도는 2018년 505℃, 2019년 492℃로 조기 재배가 보통기나 만기 재배에 비해 등숙기 고온의 영향을 더 많이 받았고 이에 따라 조기 재배에서 평년에 비해 분상질립 발생 등 등숙기 고온 피해가 심각하였다. 일반적으로 고온에서 등숙할수록 아밀로스 함량은 낮아지며, 분상질립이 정상립에 비해 아밀로스 함량이 낮다고 알려져 있다(Ahmed et al. 2015, Patindol & Wang 2003). 이에 따르면 아밀로스 함량은 조기 재배가 보통기와 만기 재배에 비해 낮아야 할 것으로 판단되나 본 연구에서는 다른 결과를 나타냈는데, 이는 아밀로스 함량 측정을 습식분석법이 아니라 Near-Infrared Reflectance Spectroscopy (NIRS) 기기를 이용한 간이측정법을 이용하는 과정 중 오차가 발생한 것으로 생각된다. NIRS는 시료 내의 특정 작용기가 근적외선 영역의 특정 파장의 빛 에너지를 흡수하여 분자진동을 일으키며 이러한 흡광현상의 크기는 작용기들의 함량에 비례한다는 램버트 비어 법칙에 근거한 정량분석방법으로 시료를 비파괴적으로 신속하게 분석할 수 있는 장점이 있어 육종사업과 같이 다량의 시료 분석에 널리 활용되고 있다(Kim et al. 2008, Oh et al. 2019). NIRS 기기를 이용한 분석을 위해서는 습식분석결과와 근적외선 스펙트럼간의 상관관계를 회귀분석을 통해 분석하여 검량식 작성 등 분석오차를 줄이기 위한 작업이 필요하다(Oh et al. 2019). 2018년 이상고온의 환경이 NIRS 기기의 아밀로스 함량 측정 검량식에 영향을 미쳐 부정확한

결과가 나왔는지에 대해서는 불분명하나, NIRS를 이용한 방법은 검량식 등으로 보정을 해주어야 하는 간이측정법으로 정량과정 중 여러가지 오차가 발생할 수 있는 점을 고려할 때 이번 연구결과의 재배시기별 아밀로스 함량 변이에 대해서는 재검토가 필요할 것으로 생각된다. 기계적 식미 측정을 위한 윤기치는 밥맛 관능평가와 높은 정의 상관을 나타내어 객관적인 밥맛 평가를 위해 유용하게 이용되고 있다(Kim et al. 2020). 밥의 윤기치는 조기, 보통기, 만기 재배에서 각각 73.2, 76.7, 84.9로 재배시기가 늦어질수록 값이 증가하였다. 쌀의 외관 품질과 식미와의 관련성에 대한 연구에서 완전미는 불완전미에 비해 기계적 식미치가 높다고 알려져 있다(Chung et al. 2005). 본 연구에서 재배시기가 늦어질수록 정상립 비율이 증가하였는데 이에 따라 밥의 윤기치도 증가한 것으로 생각된다. 품종별로는 해당쌀(82.0), 진광(81.1), 해들(79.8) 순으로 평균 값이 높아 정상립 형질과 같이 최근 육성된 최고품질 품종들이 윤광(76.2), 조평(75.1), 오대(74.8)에 비해서 밥의 윤기치가 높았고, 특히 해당쌀과 진광은 세로축 변동이 다른 품종들에 비해 적어 재배시기 환경변화에 안정적인 품종이었다. 따라서 호남평야지에서 조생종 벼 품종을 재배할 경우 최근에 육성된 최고품질 벼 품종을 선정함으로써 외관품질과 식미를 향상시킬 수 있을 것으로 생각된다.

재배시기별 조생종 품종의 호화점도 특성

식미와 관련이 있는 것으로 알려진 호화개시온도, 최고점도, 최저점도, 최종점도, 강하점도, 치반점도 등 6개 호화점도 관련 형질에 대한 연차, 재배시기, 품종 및 이들의 상호작용에 따른 형질 변이를 분석하였다(Table 5). 최저점도를 제외한 5개 형질이 연차간 차이가 있었고, 모든 형질들이 재배시기와 품종에 따른 차이가 존재하였으며 품종에 비해 재배시기에 따른 변이가 큰 경향이었다. 모든 형질에서 연차 × 재배시기, 연차 × 품종간

상호작용이 나타났고, 최고점도를 제외한 5개 형질에서 재배시기 × 품종간 상호작용이 있었으며, 호화개시온도, 최종점도, 강하점도, 치반점도는 연차 × 재배시기 × 품종간 상호작용이 나타났다. 각 형질들의 품종 간 차이는 적었는데 이는 같은 자포니카 조생종 생태형의 밥쌀용 품종으로 유전적으로 전분구조가 비슷한 것에 기인한 것으로 생각된다.

각 시기별 품종들의 호화점도 관련 형질 특성을 비교하면 조기 재배에서 호화개시온도는 진광(77.4℃), 조평(77.2℃), 윤광(77.2℃), 해들(76.9℃)이 상대적으로 높았고 오대(76.3℃)와 해당쌀(75.8℃)이 낮은 편이었다(Table 6). 최고점도는 진광이 가장 높고 나머지 품종은 비슷한 수준이었다. 최저점도와 최종점도는 해들이 가장 높고 이후 조평, 오대, 윤광, 진광, 해당쌀 순이었다. 최고점도에서 최저점도의 차이인 강하점도는 진광(148 RVU)과 해당쌀(137 RVU)이 높았고 나머지 품종들은 108-114 RVU로 비슷한 수준이었다. 최종점도에서 최고점도의 차이인 치반점도는 진광(-83 RVU)과 해당쌀(-73 RVU)이 낮았고 나머지 품종들은 -40 - -33으로 비슷한 수준이었다. 보통기 재배에서 호화개시온도는 조평(77.0℃), 진광(76.4℃), 윤광(76.2℃), 해들(76.0℃), 오대(75.8℃), 해당쌀(74.8℃) 순으로 높았다. 최고점도는 진광이 가장 높고 해들이 그 다음이었으며 이후 나머지 품종들은 비슷한 수준이었다. 최저점도는 해들이 가장 높고 이후 조평, 윤광, 진광, 오대, 해당쌀 순으로 순이었으며, 최종점도는 해들이 가장 높고 조평, 윤광, 오대, 진광, 해당쌀 순이었다. 강하점도는 진광(140 RVU)이 가장 높았고 해당쌀(127 RVU)이 그 다음이었으며 나머지 품종들은 107-112 RVU로 비슷한 수준이었다. 치반점도는 진광(-70 RVU)이 가장 낮았고 이후 해당쌀(-57 RVU)이었으며 나머지 품종들은 -41 - -27으로 비슷한 수준이었다. 만기 재배에서 호화개시온도는 조평(71.8℃), 진광(71.2℃), 윤광(70.8℃), 오대(70.5℃), 해들(70.3℃), 해당쌀

Table 5. F values for effects of year, cultivation time, variety, and their interaction from ANOVA on pasting properties.

Source of variance	df ^z	Pasting temperature	Peak viscosity	Trough viscosity	Final viscosity	Break down	Setback
Year (Y)	1	194.2**y	14.2**	0.7 ^{ns}	39.7**	10.1**	15.1**
Cultivation time (T)	2	2,857.1**	2,043.8**	352.4**	228.7**	794.6**	1,087.0**
Variety (V)	5	76.4**	58.3**	31.5**	45.2**	59.9**	118.6**
Y*T	2	234.3**	261.1**	108.3**	92.9**	51.3**	62.8**
Y*V	5	2.4*	3.0*	8.1**	7.9**	5.1**	6.4**
T*V	10	4.9**	1.6 ^{ns}	4.0**	7.2**	5.3**	10.0**
Y*T*V	10	2.4*	1.8 ^{ns}	1.8 ^{ns}	1.6**	3.4**	4.4**

^zdf: degree of freedom

^yns, *, and ** mean no significant, significant at $p < 0.05$, and $p < 0.01$ by three-way ANOVA, respectively

(68.6℃) 순으로 높았다. 최고점도는 진광이 가장 높고 해들이 그 다음이었으며 이후 조평, 운광, 해담쌀, 오대 순이었다. 최저점도는 진광과 해들이 높았고 이후 조평, 운광, 오대, 해담쌀 순이었으며, 최종점도는 진광과 해들이 높았고 이후 운광, 조평, 오대, 해담쌀 순이었다. 강하점도는 진광(78 RVU)과 해담쌀(73 RVU)이 높았고 이후 해들, 조평, 운광, 오대 순이었다. 치반점도는 진광(0 RVU)과 해담쌀(3 RVU)이 낮았고 이후 조평, 해들, 운광, 오대 순이었다.

재배시기별 호화점도 관련 형질 특성을 비교하면 조기, 보통기, 만기로 재배시기가 늦어질수록 호화개시온도, 최고점도, 최저점도, 최종점도, 강하점도가 낮아졌고 치반점도는 높아졌으며, 조기과 보통기 재배는 형질 값이 비슷한 수준이었으나 만기

재배는 차이가 많이 나는 경향이었다. 쌀 전분은 아밀로스와 아밀로펙틴으로 구성되어 있으며, 이들 비율에 따라 전분의 호화, 노화 및 물리적 특성에 상당한 영향을 받는다(Song et al. 2008). 조생종 벼의 평야지 재배에 따른 등숙기 고온 조건에서 아밀로스 함량은 감소하였고, 아밀로펙틴 단쇄 사슬의 합성은 저해된 반면 장쇄 사슬 합성은 상대적으로 촉진되는 등 등숙기 고온은 전분의 구조적 특성 차이를 유발하는 것으로 보고되었다(Kwak et al. 2018). 본 연구에서 등숙기 누적평균온도는 조기(1,142℃)와 보통기(1,095℃) 재배는 비슷하였으나 만기(866℃) 재배에서 크게 낮아지는 등 조기, 보통기 재배와 만기 재배의 등숙 환경의 차이에 발생하였고 이에 따라 전분 특성이 변경되어 쌀가루의 점성과 호화특성에 영향을 미친 것으로 생각된다.

Table 6. Pasting properties of varieties by cultivation time.

Cultivation time	Variety	Pasting temperature (°C)	Peak viscosity (RVU)	Trough viscosity (RVU)	Final viscosity (RVU)	Break down (RVU)	Setback (RVU)
Early	Jopyeong	77.2a ^z	269b	155ab	236ab	114b	-33a
	Odae	76.3b	266b	153b	228ab	113b	-38a
	Unkwang	77.2a	263b	149b	223bc	114b	-40a
	Haedamssal	75.8b	267b	130c	194d	137a	-73b
	Jinkwang	77.4a	295a	147b	212c	148a	-83b
	Haedeul	76.9a	274b	166a	238a	108b	-36a
	Mean	76.8A ^y	272A	150A	222A	122A	-50C
	C.V.(%)	0.9	5.4	9.6	8.4	14.7	48.0
Ordinary	Jopyeong	77.0a	258b	148ab	229b	110c	-29a
	Odae	75.8c	252b	140b	219bc	112c	-33a
	Unkwang	76.2bc	252b	143b	219bc	108c	-33a
	Haedamssal	74.8d	254b	128b	198d	127b	-57b
	Jinkwang	76.4b	282a	143b	212cd	140a	-70c
	Haedeul	76.0bc	270ab	163a	243a	107c	-27a
	Mean	76.0B	261B	144A	220A	117A	-41B
	C.V.(%)	1.0	6.6	12.6	8.2	12.0	44.2
Late	Jopyeong	71.8a	170ab	104ab	182ab	66ab	12ab
	Odae	70.5ab	156b	99b	178ab	58b	22a
	Unkwang	70.8ab	168ab	104ab	187ab	64ab	19a
	Haedamssal	68.6b	167ab	94b	170b	73ab	3bc
	Jinkwang	71.2a	200a	122a	200a	78a	0c
	Haedeul	70.3ab	184ab	115ab	198ab	69ab	14ab
	Mean	70.5C	174C	106B	186B	68B	12A
	C.V.(%)	2.8	16.8	17.8	12.4	19.3	95.3
Total		74.5	236	133	209	103	-27
C.V.(%)		4.1	20.7	19.5	12.4	28.1	124.1

^zMeans with same letters in a column are not significantly different at $p < 0.05$ (ANOVA followed by DMRT)

^yCapital letters indicate statistics different among cultivation times

호화점도 관련 형질에 대한 재배시기와 품종간 상호작용

재배시기 환경 변화에 따른 공시 품종의 호화점도 관련 형질 변이에 대한 유전형과 환경의 상호작용 효과를 구명하기 위해서 AMMI 모델 분석을 수행하였다(Table 7). 호화점도 관련 형질은 모두 재배시기에 따른 환경의 영향이 품종의 유전형에 비해 형질 변이에 미치는 영향이 컸다. AMMI biplot을 이용하여 호화점도 관련 형질 변이에 대한 품종의 유전형과 재배시기 환경과의 상가적 주효과 및 유전형과 환경과의 상호작용을 시각

적으로 제시하였다(Fig. 2). 호화개시온도는 환경의 주효과에 의해 조기, 보통기, 만기 재배에서 각각 76.8℃, 76.0℃, 70.5℃로 조기와 보통기 재배는 비슷하였으나 만기 재배에서 낮아졌다. 품종 별로는 조평(75.3℃), 진광(75.0℃), 운광(74.7℃), 해들(74.4℃), 오대(74.2℃), 해담쌀(73.1℃) 순으로 평균 값이 높았고, 운광, 진광, 해들이 세로축의 변동이 적어 재배시기 환경변화에 안정적이었다. 재배시기가 늦어질수록 최고점도, 최저점도, 최종점도, 강하점도가 낮아졌고 치반점도는 높아졌으며, 조기와 보통기

Table 7. Additive main effects and multiplicative interaction (AMMI) analysis of variance for pasting properties of varieties (genotype) by cultivation time (environment).

Source of variation	df ^z	Pasting temperature		Peak viscosity		Trough viscosity		Final viscosity		Break down		Setback	
		SS	Proportion (%)	SS	Proportion (%)	SS	Proportion (%)	SS	Proportion (%)	SS	Proportion (%)	SS	Proportion (%)
Genotype (G)	5	56**	5.5	1,4829**	5.8	9,059**	12.6	14,578**	20.4	12,230**	13.7	22,114**	18.8
Environment (E)	2	839**	82.6	20,7967**	81.2	40,573**	56.4	29,487**	41.3	64,861**	72.7	81,078**	68.9
Rep	6	2 ^{ns}	0.2	380 ^{ns}	0.1	631 ^{ns}	0.9	467 ^{ns}	0.7	235 ^{ns}	0.3	225 ^{ns}	0.2
G × E	10	7 ^{ns}	0.7	815 ^{ns}	0.3	2,298 ^{ns}	3.2	4,610 ^{ns}	6.5	2,148 ^{ns}	2.4	3,716**	3.2
Residuals	84	112	11.0	32,224	12.6	19,402	27.0	22,278	31.2	9,714	10.9	10,514	8.9
AMMI PC1	6	3.2	89.0	349	85.7	1,057	91.9	2,106	91.4	1,019	94.8	1,776	95.6
AMMI PC2	4	0.4	11.0	58	14.3	93	8.1	199	8.6	56	5.2	82	4.4

^zdf: degree of freedom

^yns and ** mean no significant and significant at $p < 0.01$ by three-way ANOVA, respectively

Fig. 2. Additive main effects and multiplicative interaction (AMMI) biplots of pasting properties in six early maturing rice varieties across three cultivation times. Pasting temperature (A), peak viscosity (B), trough viscosity (C), final viscosity (D), break down (E), setback (F). HD: Haedeul, HDS: Haedamssal, JK: Jinkwang, JP: Jopyeong, OD: Odae, UK: Unkwang. E: early cultivation, O: ordinary cultivation, L: late cultivation.

재배는 형질 값이 비슷한 수준이었으나 만기 재배는 차이가 많이 났다. 이러한 경향은 AMMI biplot에서 조기와 보통기 재배는 같은 방향성을 나타내며 세로축을 기준으로 만기 재배에 비해 변동폭이 적는데 반해 만기 재배는 조기와 보통기 재배와 다른 방향성을 나타내며 변동폭이 큰 것으로 확인할 수 있다. 품종별로 최고점도에서는 조평과 해당쌀, 최저점도와 최종점도 운광, 강하점도와 치반점도 오대, 운광이 세로축의 변동이 적어 재배시기 환경변화에 호화특성 변이가 안정적이었다.

일반적으로 밥맛이 좋은 품종은 호화특성 중 최고점도와 강하점도가 높고 치반점도가 낮은 것이 밥맛이 좋은 것으로 알려져 있다(Kim et al. 2020). 강하점도는 호화 중 전분의 열과 전단(shear)에 대한 저항성을 나타내며 가공의 안정도를 나타내며, 치반점도는 전분의 노화와 관련 있으며 값이 낮을수록 노화가 더디게 진행된다(Oh et al. 2012). 품종별로 진광이 모든 시기에서 최고점도와 강하점도가 가장 높고 치반점도가 가장 낮았으며, 해당쌀은 최고점도는 낮은 편이었고 모든 시기에서 최저점도와 최종점도가 가장 낮아 진광 다음으로 강하점도가 높고 치반점도

가 낮아 밥맛이 좋은 품종의 특성을 나타내는 등 최근에 육성된 최고품질 품종인 진광과 해당쌀이 호남평야지 재배 시 밥맛이 양호할 것으로 생각된다.

기상요인과 품질 및 호화점도 관련 형질들의 상관분석

재배시기별 품종의 출수일수, 이에 따른 기상환경 4요인과 품질 관련 8형질 및 호화점도 관련 6형질들 간의 상관분석을 4개의 그룹으로 계층적 군집형으로 수행하였다(Figs. 3, 4). 정상립과 밥의 윤기치는 조기 재배(상관관계수 0.92), 보통기 재배(0.74), 만기 재배(0.37)에서 높은 정의 상관관계를 나타냈는데 이는 완전미 비율이 높을수록 식미치가 높다는 기존의 결과와 일치하였다(Chung et al. 2005). 따라서 외관품위가 좋은 품종이 밥의 윤기치도 좋을 것으로 판단되며, 그 효과는 조기 재배에서 더 큰 것으로 나타났다. 일반적으로 밥의 윤기치가 높은 품종이 밥맛이 좋은 것으로 알려져 있어 호남평야지 조기 재배에 적응하는 고품질 벼 품종 개발 육종사업을 수행하는 과정에서 외관품위에 선발압을 가할 경우 윤기치가 높은 계통을 선발할 수 있고,

Fig. 3. Correlation analysis among environmental factors and quality-related traits in early (A), ordinary (B), late (C), and total (D) cultivations. HD: heading date, CMT_g: cumulative mean temperature from seeding to heading, CMT_r: cumulative mean temperature from heading to 40 days after heading, CSH_g: cumulative sunshine hours from seeding to heading, CSH_r: cumulative sunshine hours from heading to 40 days after heading, HR: head rice, CR: chalky rice, DR: damaged rice, BR: broken rice, CoR: colored rice, PC: protein content, AC: amylose content, TY: glossiness. Blue and red color backgrounds indicate positive and negative correlations, respectively.

이는 간접적으로 밥맛 좋은 품종을 개발하는데 도움이 될 것으로 생각된다. 기상요인과 품질 관련 형질들간의 상관분석에서 생육기 누적평균온도와 누적일조시간은 조기, 보통기, 만기 재배에서 정상립과 밥의 윤기치에 정의 상관관계를 나타낸 반면 등숙기 누적일조시간은 조기와 보통기에서는 부의 상관관계, 만기 재배에서는 정의 상관관계를 나타내 재배시기에 따라 다른 관련성을 나타냈으며, 등숙기 누적평균온도는 모든시기에서 정상립과 밥의 윤기치와 높은 부의 상관관계를 나타냈다(Fig. 3). 이를 통해 호남평야지에서 조생종 벼를 재배할 경우 모든 시기에서 등숙기의 고온은 외관품위와 밥맛을 저하시킬 것으로 생각된다. 특히 등숙기 누적평균온도가 높아 다른 재배시기에 비해 고온등숙 조건인 조기 재배에서 정상립이 높은 품종을 개발하는 것이 평야지 재배 조생종 벼의 외관품위와 밥맛을 향상시키는데 도움을 줄 것으로 생각된다.

기상요인과 호화점도 관련 형질과의 상관분석 결과 등숙기 기상요인이 생육기 기상요인에 비해 호화점도 관련 형질과 높은 관련성을 갖는 것으로 나타났다(Fig. 4). 출수일수는 전체시기에

서는 호화점도 특성과 높은 상관관계를 나타냈으나 조기, 보통기, 만기 재배 각 시기에서는 상관이 약했다. 등숙기 누적평균온도는 최고점도와 상관이 조기와 보통기 재배는 상관계수 0.42, 만기 재배 0.73, 전체시기 0.91로 각 재배 시기와 전체시기 모두에서 정의 상관관계를 나타내 등숙기간 중 온도가 높아질수록 최고점도는 높아지는 것으로 판단된다. 최저점도와 최종점도는 모든 시기와 전체시기에서 상관계수 0.9 이상의 매우 높은 정의 상관관계를 나타내 최저점도가 높으면 최종점도도 높았다. 최고점도와 최저점도의 관련성은 만기 재배와 전체시기에서는 매우 높은 정의 상관관계(상관계수 0.94, 0.88)를 나타냈으나 보통기 재배(0.69), 조기 재배(0.24)로 재배시기가 빨라질수록 관련성은 줄어들었다. 이는 재배시기가 빨라질수록 적온이 아닌 고온등숙 과정을 거치게 되어 품종의 유전형에 따라 전분 특성이 변경되고 이로 인해 호화점도 특성도 변하게 되기 때문으로 생각된다.

재배시기별 품질 및 호화점도 관련 형질들의 주성분분석

주성분분석을 통해 품질과 호화점도 관련 형질, 공시 품종들의

Fig. 4. Correlation analysis among environmental factors and pasting properties in early (A), ordinary (B), late (C), and total (D) cultivations. HD: heading date, CMT_g: cumulative mean temperature from seeding to heading, CMT_r: cumulative mean temperature from heading to 40 days after heading, CSH_g: cumulative sunshine hours from seeding to heading, CSH_r: cumulative sunshine hours from heading to 40 days after heading, PaT: pasting temperature, PV: peak viscosity, TV: trough viscosity, FV: final viscosity, BD: break down, SB: setback. Blue and red color backgrounds indicate positive and negative correlations, respectively.

구조적 관계를 파악하였다(Fig. 5). 주성분분석을 통해 각 재배시기별 주성분1은 41.0-62.9% 가량을 설명하였고 주성분2는 19.6-31.2%를 설명하여 이들 2개의 주성분으로 67.6(조기 재배)-82.5(전체시기)%를 설명할 수 있었다. 주성분 1을 기준으로 조기, 보통기, 만기 재배 모두 정상립, 윤기치, 최고점도, 강하점도는 같은 방향성을 나타냈으며 이들 형질과 단백질 함량 및 치반점도는 다른 방향성을 나타냈다. 일반적으로 정상립과 밥의 윤기치가 높고 단백질 함량이 낮을수록 밥맛이 양호하고 밥맛 좋은 품종은 최고점도와 강하점도가 높고 치반점도가 낮은 것으로 알려져 있다(Cho et al. 2017, Kim et al. 2020). 이 기준을 적용하여 조기와 보통기 재배에서 진광와 해담쌀, 만기 재배에서는 진광와 해들이 밥맛 좋은 형질 특성을 보유하고 있는 것으로 판단되었다. 따라서 호남평야지에서 조생종 벼 품종을 재배할 경우 최근에 육성된 최고품질 벼 품종을 선정함으로써 외관품위와 밥맛을 향상시킬 수 있을 것으로 생각된다.

품종의 유전형과 재배시기에 따른 환경 변화는 품질 및 호화점도 관련 형질 변이에 영향을 미친다. 각 품종들이 가지고 있는 형질 특성과 이들의 관련성을 파악하고 환경과의 상호작용을 이해하는 것은 환경에 적합한 벼 품종을 선정하거나 적응성이 높은 우량 품종 개발에 활용될 수 있다. 본 연구는 수량성에

초점을 맞춰 수행되었던 선행 연구의 병행으로 품질에 대한 추가 분석을 통해 호남평야지에서 재배시기별로 적합한 조생종 벼 품종을 선정하고 개발하는데 기여하고자 수행되었다(Park et al. 2020).

적 요

호남평야지에서 조생종 벼는 짧은 생육기간을 이용하여 조기, 보통기, 만기 재배 등 작부체계를 다양화하는데 다양하게 활용되고 있다. 하지만 다른 출수생태형에 비해 등숙기 고온에 의해 품질이 저하될 우려가 높다. 본 연구는 호남평야지에서 조평, 오대, 윤광, 해담쌀, 진광, 해들 등 6개 조생종 품종을 대상으로 조기, 보통기, 만기 재배시기별 8개 품질 관련 형질과 6개 호화점도 특성을 분석하여 품종의 성능을 평가하고 유전형과 환경과의 관련성을 해석하기 위해서 수행되었다. 재배시기별 품질 관련 형질 특성을 비교하면 조기, 보통기, 만기로 재배시기가 늦어질수록 정상립이 높아지고 착색립, 피해립, 쉼미가 줄어들어 외관품위가 향상되었고 밥의 윤기치가 증가하였다. 등숙기 누적평균 온도는 모든시기에서 정상립과 밥의 윤기치와 높은 부의 상관관계를 나타내 고온등숙 조건은 품질에 악영향을 미치는 것으로

Fig. 5. Principal component analysis among traits in early (A), ordinary (B), late (C), and total (T) cultivations. HD: heading date, CMT_g: cumulative mean temperature from seeding to heading, CMT_r: cumulative mean temperature from heading to 40 days after heading, CSH_g: cumulative sunshine hours from seeding to heading, CSH_r: cumulative sunshine hours from heading to 40 days after heading, HR: head rice, CR: chalky rice, DR: damaged rice, BR: broken rice, CoR: colored rice, PC: protein content, AC: amylose content, TY: glossiness, PaT: pasting temperature, PV: peak viscosity, TV: trough viscosity, FV: final viscosity, BD: break down, SB: setback. HD: Haedeul, HDS: Haedamssal, JK: Jinkwang, JP: Jopyeong, OD: Odae, UK: Unkwang.

나타났다. 호화점도 관련 형질은 조기, 보통기, 만기로 재배시기가 늦어질수록 호화개시온도, 최고점도, 최저점도, 최종점도, 강하점도가 낮아졌고 치반점도는 높아졌다. 등숙기 기상요인이 생육기 기상요인에 비해 호화점도 특성과 높은 관련성을 나타내는 것으로 나타났다. AMMI 분석 결과 재배시기에 따른 환경의 영향이 품종의 유전형에 비해 품질 및 호화점도 형질 변이에 미치는 영향이 컸다. 조기와 보통기 재배에서 진광과 해당쌀, 만기 재배에서 진광과 해들이 다른 품종들에 비해 정상립과 밥의 윤기치가 높고 단백질 함량이 낮았으며 최고점도와 강하점도가 높고 치반점도가 낮아 밥맛 좋은 품종의 특성을 나타냈다. 진광, 해당쌀, 해들은 최근에 육성된 최고품질 조생종 벼 품종으로 호남평야지에서 조생종 벼 품종을 재배할 경우 이들 품종을 선정함으로써 외관품질과 밥맛을 향상시킬 수 있을 것으로 생각된다.

사 사

본 논문은 농촌진흥청 연구사업(과제번호: PJ01187203)의 지원에 의해 이루어진 것입니다.

REFERENCES

- Ahmed N, Tetlow IJ, Nawaz S, Iqbal A, Mubin M, Rehman MSN, Butt A, Lightfott DA, Masahiki M. 2015. Effect of high temperature on grain filling period, yield, amylose content and activity of starch biosynthesis enzymes in endosperm of basmati rice. *J Sci Food Agric* 95: 2237-2243.
- Baek MK, Park HS, Nam JK, Cho YC, Kim KY, Kim JJ, Kim WJ, Shin WC, Jeung JU, Kim CS, Jeong JM, Lee KM, Park SG, Lee CM, Suh JP, Lee JH. 2019. High grain quality mid-late maturing rice cultivar 'Yechan' with lodging tolerance and multiple disease resistance. *Korean J Breed Sci* 51: 504-514.
- Cho JH, Song YC, Lee KS, Choi SW, Lee MJ, Jang KC, H.Y. K, Kang HJ, Park KD, Seo WD. 2017. Physicochemical characteristics of cultivated aromatic rice germplasm and comparative analysis of flavor components during transplanting time. *Korean J Environ Agri* 36: 175-183.
- Cho SW, Jeung JU, Kang KH, Kim HS, Kim BK. 2015. Evaluation on early-maturing Korean japonica cultivars for high-temperature tolerance during grain filling stage. *Korean J Crop Sci* 60: 146-152.
- Chung NJ, Park JH, Kim KJ, Kim JK. 2005. Effect of head rice ratio on rice palatability. *Korean J Crop Sci* 50: 29-32.
- Hwang UH, Lee CK, Jung JH, Lee HS, Yang SY, Im YH, Choi KJ. 2019. Heading and ripening characters of major early maturing breeding rice lines according to transplanting date and temperature condition. *Korean J Crop Sci* 64: 185-192.
- Kim CS, Park HS, Baek MG, Jeong JM, Park SG, Suh JP, Lee KM, Lee CM, Cho YC, Kim SM. 2020. Yearly variation of eating quality and starch RVA profiles of Korean native rice accessions. *J Korean Soc Int Agric* 32: 7-17.
- Kim JI, Choi HC, Kim KH, Ahn JK, Park NB, Park DS, Kim CS, Lee JY, Kim JK. 2009. Varietal response to grain quality and palatability of cooked rice influenced by different nitrogen applications. *Korean J Crop Sci* 54: 13-23.
- Kim JS, Song MH, Choi JE, Lee HB, Ahn SN. 2008. Quantification of protein and amylose contents by near infrared reflectance spectroscopy in aroma rice. *Korean J Food Sci Technol* 40: 603-610.
- Kim YD, Kang SG, Ku BI, Sang WG, Jo SR, Park HK, Shin WC, Ko JC, Yang WH, Kim BK, Lee JH, Kim SL. 2015. Optimal transplanting time for 'Sukwang' (*Oryza sativa* L.) in the Southwestern plain area of Korea. *Korean J Int Agric* 27: 59-62.
- Kwak JE, Lee JS, Won YJ, Park HM, Kwak KS, Kim MJ, Lee CK, Kim SL, Yoon MR. 2018. Effects of ripening temperature on starch structure and storage protein characteristics of early maturing rice varieties during grain filling. *Korean J Crop Sci* 63: 77-85.
- Lee JH, Cho JH, Kim SY, Lee JY, Kim CS, Yeo US, Song YC, Sohn YB, Oh MK, Kang HW, Nam MH. 2012. Correlation analysis between head rice ratio and agronomic traits in RILs for developing a promising rice cultivar adaptable to the early-transplanting cultivation. *Korean J Crop Sci* 57: 1-6.
- Lee JH, Lee JY, Yeo US, Song YC, Park DS, Hwang UH, Park SG, Park NB, Kim SY, Oh SH, Han SI, Nam MH, Lee JG, Cho JH. 2018. 'Hwawang': a good quality and early-maturing rice variety adaptable for rice-cash crop rotation system. *Korean J Breed Sci* 50: 534-539.
- Lee JH, Lee JY, Lee SM, Shin DJ, Cha JK, Cho JH, Kwon YH, Jo SM, Park DS. 2020. Improvement of rice quality using grain color sorter during early transplanting cultivation in the Southern plain of Korea. *Korean J Crop Sci* 65: 79-83.

15. Nam JK, Ko JK, Kim KY, Kim BK, Kim WJ, Ha KY, Shin MS, Ko JC, Kang HJ, Park HS, Baek MK, Shin WC, Mo YJ, Choi IB, Kim YD, Yang HS, Kim JG. 2013. A new early-maturing rice with blast, bacterial blight, rice stripe virus resistant and high grain quality, 'Jopyeong'. *Korean J Breed Sci* 45: 177-182.
16. Nam JK, Park HS, Kim KY, Kim BK, Cho YC, Ko JK, Baek MK, Kim JJ, Kim WJ, Shin WC, Ko JC, Lee JH, Jeong JM, Jeung JU, Kang KH. 2018. Multiple disease resistant early maturing rice cultivar 'Joil' with high grain quality adaptable to early transplanting cultivation in the southern plain area. *Korean J Breed Sci* 50: 280-288.
17. Nam JK, Park HS, Baek MG, Cho YC, Kim WJ, Kim JJ, Kim BK, Kim KY, Shin WC, Ko JC, Lee GM, Park SG, Lee CM, Kim CS, Suh JP, Lee JH. 2019. Bacterial blight-resistant medium maturing rice cultivar 'Haepum' with high grain quality. *Korean J Breed Sci* 51: 222-233.
18. Oh SJ, Choi YM, Yoon HM, Lee MC, Shin MJ, Yoo EA, Hyun DY, Chae BS. Statistical analysis of amylose and protein content in breeding line rice germplasm collected from east Asian countries based on near-infrared reflectance spectroscopy. *Korean J Breed Sci* 51: 298-317.
19. Oh SK, Lee JH, Yoon MR, Kim DJ, Lee DH, Choi IS, Lee JS, Kim IH, Lee JS. 2012. Physiochemical properties of germinated brown rice. *J Korean Soc Food Sci Nutr* 41: 963-969.
20. Park HK, Ku BI, Kang SG, Choi MK, Sang WG, Park TS, Kim YD, Nam JK, Kim BK. 2013. Estimate of transplanting dates for the maturity groups of rice cultivars to harvest before Chuseok holiday in Korea. *Korean J Int Agric* 25: 307-313.
21. Park HS, Suh JP, Baek MK, Lee CM, Kim WJ, Lee GM, Kim SM, Kim CS, Cho YC. 2020. Characterization of yield and panicle-related traits of early maturing rice varieties by cultivation times in the Honam plain area in Korea. *Korean J Breed Sci* 52: 115-130.
22. Patindol J, Wang YJ. 2003. Fine structures and physicochemical properties of starches from chalky and translucent rice kernels. *J Agri Food Chem* 51: 2777-2784.
23. Song J, Lee CK, Youn JT, Kim SL, Kim DS, Kim JH, Jeong EG, Suh SJ. 2008. Relationship among alkali digestive value, amylopectin fine structure and physical properties of cooked rice. *Korean J Crop Sci* 53: 320-325.