

담수 직파에서 산소 및 온도조건에 따른 혐기발아 내성 자원과 국내 직파 적응성 벼 품종의 입모특성 비교

정종민^{1,†} · 김진희² · 모영준¹ · 하수경¹ · 김우재¹ · 김보경³ · 정지웅³

Effect of Oxygen and Temperature Levels on the Seedling Characteristics of Korean and Anaerobic Germination-tolerant Rice under Flooding Conditions

Jong-Min Jeong^{1,†}, Jinhee Kim², Youngjun Mo¹, Su-Kyung Ha¹, Woo-Jae Kim¹, Bo-Kyeong Kim³, and Ji-Ung Jeung³

ABSTRACT The aim of the present study was to compare the germination and seedling characteristics of rice varieties grown under various flooding conditions and different temperature and oxygen levels and to identify germplasm suitable for wet direct seeding. Three anaerobic germination tolerant (AGT) genotypes (PBR, WD3, KHO) and eleven Korean rice varieties (KVs) adapted for direct seeding were evaluated for seedling performance under different temperatures (15, 18, 21, and 24°C) and oxygen levels (Low, Normal, High). Compared with the KVs, the AGT genotypes (especially KHO and PBR) exhibited relatively high germination and survival rates and coleoptile and radical growth rates under low temperature and low oxygen conditions, thereby indicating their suitability for wet direct seeding. Among the KVs, ‘Dongan,’ ‘Jungan,’ and ‘Cheongdam’ rice exhibited the highest survival rates under low temperature and low oxygen conditions. Three-way ANOVA indicated that temperature had the greater effects on seedling characteristics (43.2-78.0%) than either oxygen level (15.4-37.5%) or genotype (2.0-29.8%) did. Therefore, in direct seeding cultivation, temperature was the most important environmental factor for seedling establishment.

Keywords : anaerobic germination, oxygen, rice, temperature, wet direct seeding

벼 직파재배는 이앙재배에 비해 육묘와 이앙 작업이 생략되어 파종 및 육묘 단계에서 노력 시간과 생산비용 절감효과가 크다. 따라서 우리나라 농업인구 감소와 고령화로 인한 노동력 부족 등의 현실을 감안할 때 생력 효과가 크고 생산비 절감 효과가 우수한 직파재배는 쌀 산업의 경쟁력 향상을 위해서 확대가 필요하다(Shon *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2017).

우리나라 벼 직파재배는 1990년부터 시작되어 1997년 벼 재배 면적에 11.1%인 117,600 ha까지 면적이 증가되기도 했으나(Yang *et al.*, 2015), 직파 초기의 입모 불안정, 앵미 및 잡초 발생, 도복에 대한 우려 때문에 벼 재배 농가에

서 직파재배를 기피하여 현재 벼 재배면적의 2%대로 감소되어 정체되어 있다(Shon *et al.*, 2008).

직파재배는 파종 시 물 관리 방법에 따라 마른 논에 직접 볍씨를 파종하는 건담 직파와 담수 상태의 논에 볍씨를 파종하는 담수직파의 형태로 나눌 수 있는데, 담수 직파는 건담 직파보다 파종 절차가 간단하여 생산비 절감효과가 크고 담수 상태로 인한 잡초 발생이 억제되어 잡초 방제 효과가 우수한 장점이 있다(Azmi & Karim, 2008; Ferrero & Vidotto, 2000; Chin, 2001). 하지만 직파재배는 생육초기에 기상 및 토양 환경의 영향을 많이 받기 때문에 연차 간 입모율 변이가 큰 편이다(Shon *et al.*, 2012). 벼 직파재배는 일평균 기

¹농촌진흥청 국립식량과학원 작물육종과 농업연구사 (Junior Research Scientist, Crop Breeding Division, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, Wanju 55365, Republic of Korea)

²농촌진흥청 국립식량과학원 작물육종과 전문연구원 (Postdoctoral Researcher, Crop Breeding Division, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, Wanju 55365, Republic of Korea)

³농촌진흥청 국립식량과학원 작물육종과 농업연구관 (Senior Research Scientist, Crop Breeding Division, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, Wanju 55365, Republic of Korea)

[†]Corresponding author: Jong-Min Jeong; (Phone) +82-63-238-5236; (E-mail) jjm0820@korea.kr

<Received 3 October, 2019; Revised 29 October, 2019; Accepted 31 October, 2019>

온이 13~15°C 이상이면 가능하다고 보고되고 있으나(Kim *et al.*, 2006), 낮은 기온으로 인해 파종 기간 동안 종자가 저온에 노출되고 담수 직파의 경우 저온과 담수로 인한 혐기 상태에 동시에 노출되어 발아와 입모율이 떨어지게 된다. 입모의 안정성을 높이기 위해서는 담수 시 낮은 산소 조건 및 저온에서도 발아와 초엽 신장이 양호해야 한다(Kim *et al.*, 2006).

벼는 다른 작물에 비해 산소가 없거나 낮은 담수 환경에서도 정상적으로 발아가 가능하나(Perata *et al.*, 1993; Kato-Noguchi *et al.*, 2011) 담수상태에서는 초엽이 이상 신장하고 뿌리의 생육이 저조하여 정상적인 입모가 어렵다(Shon *et al.*, 2008). 현재 직파 적응성 품종으로 직파 적성이 개선된 품종들이 개발되어 있으나 이들 품종은 이앙재배 조건에서 육성되어 담수직파 재배 시 입모 특성의 보완이 필요하다. 담수 조건에서 안정적인 입모 확보를 위해서는 낮은 산소의 담수 조건과 저온 조건에도 안정적인 발아와 입모가 가능해야 한다. 종자의 균일하고 빠른 발아력 및 초엽 및 뿌리 성장 속도는 직파재배 초기 입모 단계에서 안정적인 입모를 위한 중요한 형질로 알려져 있다(Zhang *et al.*, 2005; Mahender *et al.*, 2015). 최근 국제 미작연구소에서는 저 산소 상태에서도 발아와 입모가 우수한 저 산소 발아 내성 유전자원을 선발하였다(EI-Hendawy *et al.*, 2011). 이들 자원들은 담수상태에서도 발아력이 우수하고 초엽의 신장이 빠른 특성이 있으며 담수상태에서 안정적인 입모가 가

능하기 때문에 국내에서도 혐기 발아성이 우수한 유전자원을 도입하여 담수직파 재배 시 초기 입모 개선을 위한 유전자원으로 이용하고 있다(Kim *et al.*, 2019). 국내 직파재배 파종기는 대체로 4월 중순에서 5월말경으로 이 시기에는 일반적으로 발아 종자가 저온에 노출되며 담수 직파의 경우에는 저온과 혐기 상태에서 발아 및 초기 입모 단계를 거치게 된다. 따라서 국내 직파 환경에서 안정적인 입모를 위해서는 온도와 담수 환경에 입모가 안정적인 품종의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 국내 담수직파 적응성 품종과 혐기 조건에서 발아성이 우수하다고 알려진 혐기발아 내성 자원에 대하여 담수 직파에서 용존 산소 및 온도차이에 따른 유전자원들의 발아 및 입모 특성을 비교 분석하여 향후 국내 담수직파 품종 육종을 위한 기초 자료로 사용하고자 수행되었다.

재료 및 방법

식물 재료

담수직파 특성 비교를 위해 국내에서 육성된 직파 적응성 벼 11품종(농안, 주안, 동안, 호안, 중안, 동진1호, 평안, 청담, 호품, 황금노들, 수광)과 혐기발아 내성자원으로 알려진 3개 자원(PBR, WD3, KHO)을 시험 재료로 사용하였다. 국내 직파 적응성 벼 품종들은 직파 적응성이 있어 이앙 및 직파재배 겸용으로 육성된 품종이며, 혐기발아 내성 유전

Table 1. Korean and anaerobic germination-tolerant rice varieties used in the present.

Group	Variety	Year released	Cross combination	Remark
	Nongan	1994	Akitssuho/Fuji269//Pungsan	Adaptable to dense direct-seeded cultivation
	Juan	1995	Seolag/Koshihikari//Samnam	Adaptable to dry or wet direct seeding
	Dongan	1997	Milyang95/HR5119-12-1-5	Adaptable to dry or wet direct seeding
	Hoan	1998	Kanto149/Milyang95	Adaptable to direct seeding
	Jungan	1999	Namyang7/Hapcheon1*2	Adaptable to direct seeding
KV	Dongjin1	2001	Hwayeong/HR12800-AC21	
	Pyeongan	2003	Iksan438/HR15003-69-B-3	
	Cheongdam	2006	SR19200-HB826-34/Juan	Adaptable to direct seeding
	Hopum	2006	Milyang165*2/Iksan438	Adaptable to dry or wet direct seeding
	Hwanggeumnodeul	2007	Milyang165/HR15151-B-21-3	Adaptable to direct seeding
	Sukwang	2011	HR20017-B-19-3-1/HR19574-B-63-2	
	PBR	-	Korea, Weedy	AGT, Weedy
AGT	WD3	-	Korea, Weedy	AGT, Weedy
	KHO	-	Myanmar landrace	AGT, Weedy

KV, Korean variety; AGT, anaerobic germination tolerant

자원은 담수상태에서 발아율과 생존율이 높고 입모특성이 우수하다고 보고된 자원이다(Table 1). 시험에 사용한 종자는 2016년 국립식량과학원 작물육종과 시험포장에서 재배하고 수확하였으며 종자활력 유지를 위해 수확 후 비중 선별한 후 종자내 수분함량은 14% 정도로 그늘에서 건조하였다. 휴면 타파를 위해 종자는 55°C에서 7일간 건조처리를 실시하고 10°C 저온 저장고에 보관하며 발아시험 및 혐기발아 내성 검정 시험에 사용하였다.

저온 발아

저온 발아성 평가를 위해 저온조건에서 발아 시험을 실시하였다. 발아 시험은 Petri-dish (직경 9 cm)에 종이 여과지 2장을 깔고 완전립 100립씩을 3반복으로 치상 후 증류수 10 ml을 첨가하였다. 이후 Petri-dish를 각각 13°C (저온)와 30°C (적온)의 항온 조건으로 설정된 항온기에 넣고 24시간 간격으로 발아한 종자 수를 조사하였다. 적온 발아율은 치상 후 7일, 저온 조건은 치상 후 14일까지 발아한 종자 수를 합산하여 평균 발아율(Germination rate; GR)을 계산하였으며 평균발아일수(Mean germination time; MGT)는 아래와 같이 치상 일수에 발아한 종자 개수를 곱한 전체 합을 총 발아한 종자 수로 나눈 값을 사용하였다(Mavi & Demir, 2010).

$$MGT = \sum n_i t_i / \sum n_i$$

(MGT: 평균발아일수, n_i : 조사 당일 발아한 종자 수, t_i : 치상 후 발아 수)

담수 중 발아율 및 생존율

공시 재료의 담수직파 입모특성 평가는 2017년 국립식량과학원에 소재한 망실온실(Net house)과 인공기상동에서 각각 수행되었다.

실외실험

실제 직파 조건과 유사한 환경에서 공시품종의 입모특성을 비교하기 위해 실외조건에서 시험을 수행하였다. 실외 조건은 비 가림 시설만 되어있고 나머지는 실외조건에 노출된 망실온실에서 수행하였다. 식물재료는 KV 11 품종과 AGT 3자원 등 총 14 품종 및 자원을 사용하였다. 종자의 파종은 2017년 5월 20일에 하였으며 아크릴 파종상자(100공, 가로 10개×세로 10개)를 이용하여 마른 종자 50립을 10개의 파종 구멍(1.5×1.5×1.0 cm, 가로×세로×깊이)에 각각 5립씩 나누어 3반복으로 파종한 후 흙을 1 cm 깊이로 복토하였다. 파종 후 담수 용 플라스틱 수조 안으로 파종판을 옮

긴 후 수돗물을 10 cm 깊이가 되도록 담수처리 하였다. 담수발아율은 담수 처리 10일 후 유아가 복토 된 흙 위로 3 mm 이상 신장한 것을 기준으로 하여 발아율을 계산하였다. 담수 생존율은 담수 처리 3주 후 초엽이 물 표면 위로 출현한 유묘를 생존 기준으로 정하고 전체 파종 된 종자 수에 대한 발아 및 생존한 개체 수의 백분율을 각각 담수발아율(Germination rate; GR)과 담수생존율(Survival rate; SVR)로 계산하였다.

실내실험

KV 품종과 AGT 자원의 담수 중 온도와 용존산소 농도에 따른 입모 특성을 면밀히 검토하기 위해 국립식량원 인공기상동에서 온도 및 용존산소 처리를 달리하여 실내 실험을 실시하였다.

담수 중 온도처리는 평균 온도 15, 18, 21, 24°C로 4개 수준으로 하였고 용존산소는 처리는 혐기조건(Anoxia), 일반조건(Normoxia), 호기조건(Hypoxia)의 3개 수준으로 처리하여 각각 온도와 산소 처리가 다른 12개 시험구에서 담수직파 검정을 실시하였다. 온도 처리는 각 처리마다 자연상태의 일교차와 유사한 환경을 구현하기 위해서 1 시간 간격으로 온도변화를 주어 그 편차는 설정한 온도 값±5°C/일가 되도록 설정하였다. 산소 처리는 용존산소 농도에 따라 혐기, 일반, 호기의 3가지 수준으로 하였는데 혐기조건은 담수 용 플라스틱 수조에 수돗물을 채운 후 질소가스로 충전하여 용존 산소농도가 2 ppm미만이 되었을 때 플라스틱 탱크 입구를 투명 접착 아스테이지로 밀봉하여 외부 공기와의 접촉을 차단한 상태로 시험기간 동안 유지하였다. 호기 조건은 담수 된 플라스틱 탱크에 산소 기포 발생기(DK-3000)를 설치하여 실험 기간 동안 산소를 공급하였다. 일반구는 플라스틱 수조를 담수 후 입구를 개봉된 상태로 실험 종료까지 유지하였다. 파종법과 담수처리는 실외에서 수행한 방법과 동일하게 수행되었으며 입모 관련특성으로는 담수발아율, 담수생존율, 초엽길이(Coleoptile length; CL) 그리고 유근길이(Radicle length; RL)를 조사하였다.

통계 분석

담수 중 발아 관련 형질에 미치는 온도, 용존 산소, 품종 간 차이 및 상호작용에 대한 분석을 위해 삼원 분산분석(Three-way ANOVA)을 실시하였으며 담수발아 관련 형질 차이는 Duncan 다중 검정 및 T-검정을 실시하고 담수 중 입모와 관련 형질들 간 상관분석을 실시하였다.

Table 2. Effect of temperature on the germination performance of Korean and anaerobic germination tolerant rice varieties.

Group	Variety	OTG (%)	MGT (day)	LTG (%)	MGT (day)
	Nongan	94.0	3.4	66.7b	10.9bc
	Juan	94.7	3.2	27.8c	11.3bc
	Dongan	96.0	3.4	61.3b	11.7bc
	Hoan	99.4	3.1	65.3b	11.1bc
	Jungan	96.0	3.2	66.0b	12.5c
KV	Dongjin1	94.7	3.4	64.0b	11.4bc
	Pyeongang	92.6	3.2	60.0b	11.0bc
	Cheongdam	96.0	3.3	60.7b	11.6bc
	Hopum	98.0	3.1	57.3b	10.6bc
	Hwanggeumnodeul	97.3	3.2	70.0ab	10.6bc
	Sukwang	94.7	3.2	82.7ab	10.5bc
	PBR	97.3	3.2	96.0a	9.4b
AGT	WD3	96.5	3.4	87.3ab	10.4bc
	KHO	97.8	3.3	95.3a	7.4a
KV	Mean	95.8	3.3	62.3	11.2
AGT	Mean	97.6ns	3.2ns	92.9***	9.1***

KV, Korean variety; AGT, anaerobic germination tolerant; OTG, Percent germination under optimum temperature (30°C) for 7 d; MGT, mean germination time; LTG, Percent of germination under low temperature (13°C) for 14 d. Different lowercase letters indicate significant differences by DMRT ($p < 0.05$). ***, Significant difference between KV and AGT (t -test at $p < 0.001$). ns; no significant difference

결과 및 고찰

저온 발아

국내 직파 적응 11품종(KV)과 혐기발아 내성 3개 유전자원(AGT)의 상온(30°C) 및 저온발아(13°C) 결과는 Table 2와 같다. 상온조건에서 KV 및 AGT 시험 품종들의 발아율(OTG)은 모두 90% 이상으로 상온조건에서는 모두 정상적으로 발아하였다. 평균 발아일수(MGT) 범위는 품종에 따라 3.1~3.4일이었으며 품종 간 유의한 차이를 보이지 않았다.

저온에서 AGT 자원들의 평균발아율은 92.9%, 평균발아일수 9.1일로 조사되었다. 전체적으로 AGT 자원들이 KV 품종(평균발아율 62.3%, 평균발아일수 11.2일)에 비해 저온조건에서도 발아율이 높았으며 발아 속도도 빠른 것으로 나타났다. 공시 품종 중 저온발아율이 90% 이상이었던 품종은 KHO (95.3%)와 PBR (96.0%)로 다른 품종에 비해 저온발아율이 높았으며 발아속도 또한 각각 7.4일과 9.4일로

빨랐다. 직파재배 생육초기 안정적인 입모를 위해서는 저온에서도 균일한 발아성과 빠른 출아성이 중요한 형질로 평가되고 있는데(Jiang *et al.*, 2006), KHO 및 PBR은 저온에서 발아율이 높고 발아속도가 빨라 저온에서도 균일하고 안정적인 발아가 가능하여 직파 초기 안정적인 입모를 위한 유망자원으로 평가되었다. KV 품종 가운데서는 저온발아율이 70% 이상이었던 품종은 ‘황금노들(70.0%)’과 ‘수광벼(82.7%)’ 2품종이었으며 다른 KV 품종에 비해 저온발아율이 높게 나타났으나 발아 속도는 각각 10.6일과 10.5일로 다른 KV 품종들과 차이가 없었다.

담수 중 온도 및 용존산소

시험기간 동안 망실온실에서 기온 및 지온 변화는 Fig. 1(a)와 같다. 시험기간 동안 기온과 지온의 평균은 각각 21.6°C와 20.3°C로 기온이 지온보다 1.3°C 정도 높게 나타났다. 시험기간 중 기온 분포는 18.8~26.2°C이었으며 지온은 20.3~21.8°C이었다. 시험기간 동안 지온은 그 변화 정도가 기온에 비해 적었으며 일변화 정도 역시 지온이 기온에 비해 안정적으로 유지되었다. 발아 초기(파종 후 10일)까지 평균 지온은 19.4°C로 파종 후기(파종11일~21일) 21.2°C보다 다소 낮게 유지되었다.

인공기상동 일반(Normoxia) 담수 처리구의 시험 기간 중 수온 및 용존 산소농도 일 변화는 Fig. 1(b1)~(b4)와 같다. 시험기간 동안 시험구별 평균 수온 값은 각각 15.2°C, 18.7°C, 21.4°C 및 24.5°C로 각 시험구별로 설정된 평균 기온 값(15°C, 18°C, 21°C, 24°C)과 유사한 수준을 나타내었다. 수온의 일변화는 기온이 증가함에 따라 증가하는 추세였으며 설정 온도에서 최저 및 최고 약 5°C의 편차로 변화하였으며 기온 변화와 유사한 경향으로 변화하였다.

담수 중 용존산소 농도는 온도 별 처리 및 시간에 따라 최저 1.59 ppm에서 최고 7.10 ppm 범위를 나타내었다. 시험구별 용존 산소 농도는 15°C 처리구가 1.97 ppm으로 가장 낮았으며, 15°C 처리구에서는 수온 변화에 따른 용존산소 농도의 변화도 거의 나타나지 않았다. 15°C 처리구를 제외한 각 처리구의 평균 용존산소 농도는 4.47~5.88 ppm으로 시험구별로 약간의 차이는 있었으나 통계적 유의성은 없었으며 수온이 상승함에 따라 용존 산소 농도도 증가하는 경향이었다. 일반적으로 수온이 낮으면 용존 산소량이 증가하고 수온 상승에 따라 용존 산소는 감소하는 것으로 알려져 있다. 하지만 담수 상태의 논 토양의 경우 일사에 의한 온도 상승에 따라 수중 조류 등 미생물의 영향으로 용존 산소 농도도 증가하고 밤 시간에 용존 산소는 물 표면으로 방출되어 용존 산소는 낮아진다(Mowjood & Kasubuchi,

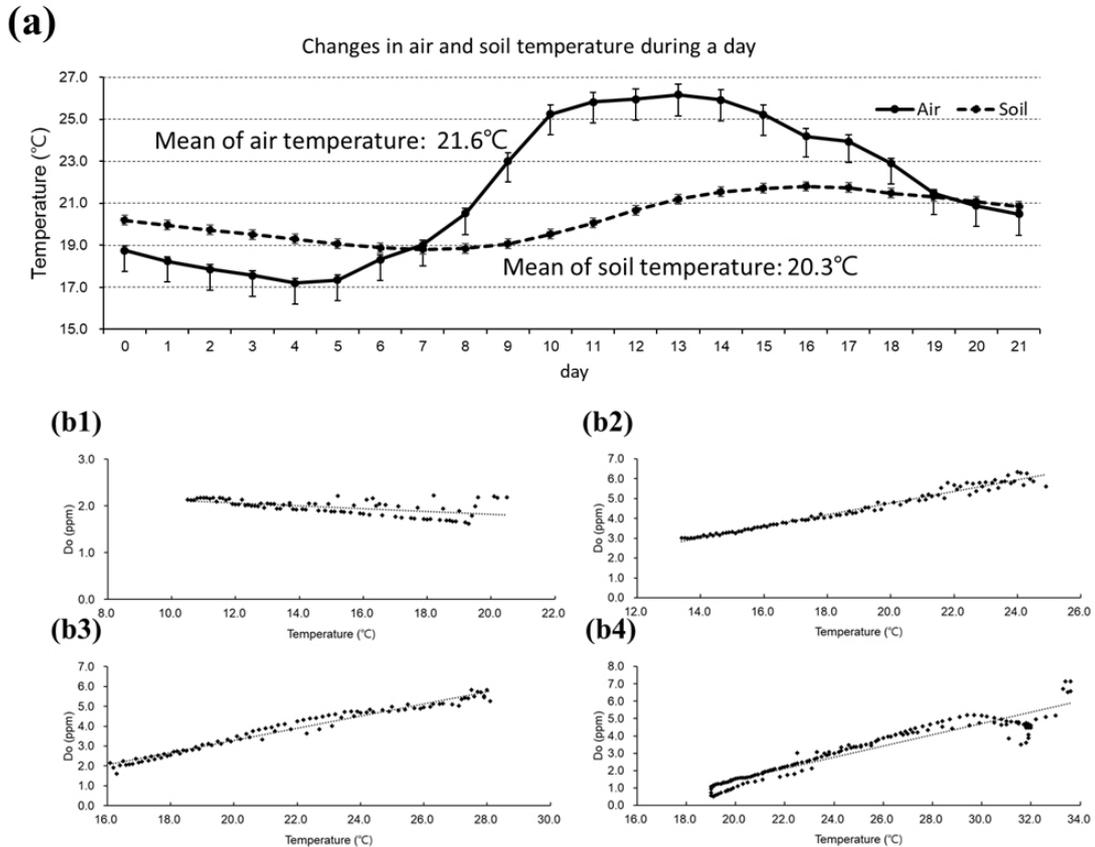


Fig. 1. Changes in daily mean temperature and during the experiment period. (a) Environmental conditions of the net-house during the experimental period. (b) Dissolved oxygen concentration (Do) of the greenhouse when the conditions were set to 15 (b1), 18 (b2), 21 (b3), and 24°C (b4), respectively. Each point represents the mean of 10 d.

1998). 본 연구 결과 조류 및 미생물과 유묘의 광합성에 의해 산소가 발생되어 낮 시간에 온도가 상승하는 시점에 산소농도가 증가하는 것으로 생각되며 15°C 시험구의 경우 낮은 온도로 미생물 및 조류의 발생이 억제되어 용존산소농도가 감소한 것으로 판단되었다.

담수 중 온도 및 산소 농도 차이 따른 발아율 및 생존율 노지 담수직파

노지 담수조건에서 실시한 담수시험결과는 Fig. 2와 같다. 공시 품종들 중 담수발아율(GR)이 50% 이상인 품종은 KHO (66.7%), PBR (62.2%), 중안벼(60.0%), WD3 (51.1%)로 전체 14개 공시품종 가운데 4품종이었으며 나머지 품종들의 발아율은 50% 미만으로 조사되었다. 담수발아율이 우수하였던 4개 품종 가운데 KHO는 담수발아율이 66.7%로 공시 품종 가운데 가장 높게 나타났으며 담수생존율 또한 63.3%로 가장 높았다. PBR과 중안벼의 담수발아율은 60% 이상으로 담수 중 발아가 우수한 것으로 평가되었으며 담수생존율은 각각 48.9%와 40.0%로 담수발아율 대비 담

수생존율은 KHO보다 다소 낮은 것으로 조사되었다. WD3는 담수발아율은 51.1%로 AGT 자원 중 가장 낮았으나 담수생존율은 46.7%로 담수 중 발아한 종자에서 생존하는 유묘 비율이 높은 것으로 평가되었다.

실내 담수직파

온도와 용존 산소 차이에 따른 KV 품종과 AGT 자원들의 담수발아율과 담수생존율 조사 결과는 Fig. 3(a), (b)과 Supplementary Table 1, Supplementary Table 2와 같다. 평균 온도 15°C, 18°C, 21°C, 24°C의 담수 상태에서 온도변화 및 용존산소 농도 차이에 따른 발아율과 생존율 분석결과, 대체로 온도가 상승함 따라 발아율과 생존율은 증가하는 경향이었으며 같은 온도 조건일 경우 용존 산소 농도가 높을수록 발아율과 생존율이 증가하는 경향이였다. 평균기온 15°C의 혐기(Anoxia) 조건에서 AGT 자원 및 KV 품종들의 평균 담수발아율은 각각 39.8%와 20.8%로 모든 시험구 중 가장 낮게 나타났으며 15°C 조건에서는 용존 산소에 관계없이 모든 개체가 생존하지 못하였다.

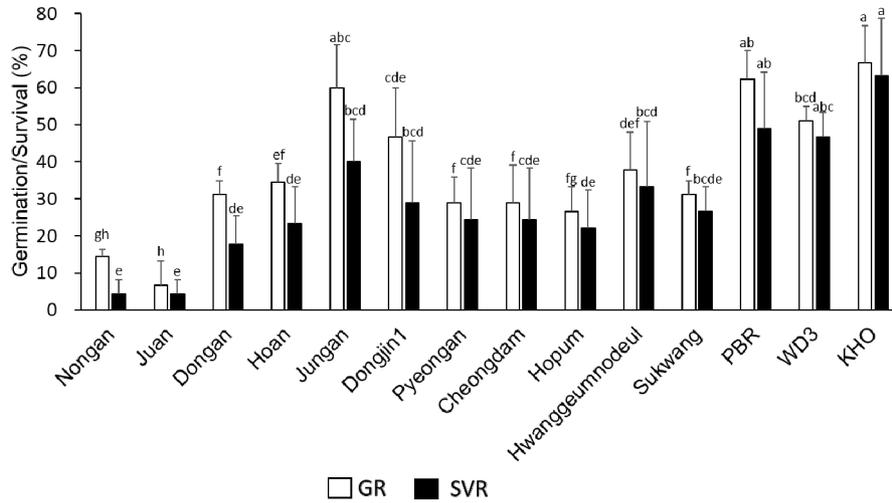


Fig. 2. Germination and survival rates of 14 rice varieties under flooded conditions in a net-house. White and black bars represent germination rate (GR) and survival rate (SVR) at 14 and 21 d after sowing, respectively. Values and error bars indicate mean \pm SE values (n=3). Different lowercase letters indicate significant differences among the genotypes (DMRT, $p < 0.05$).

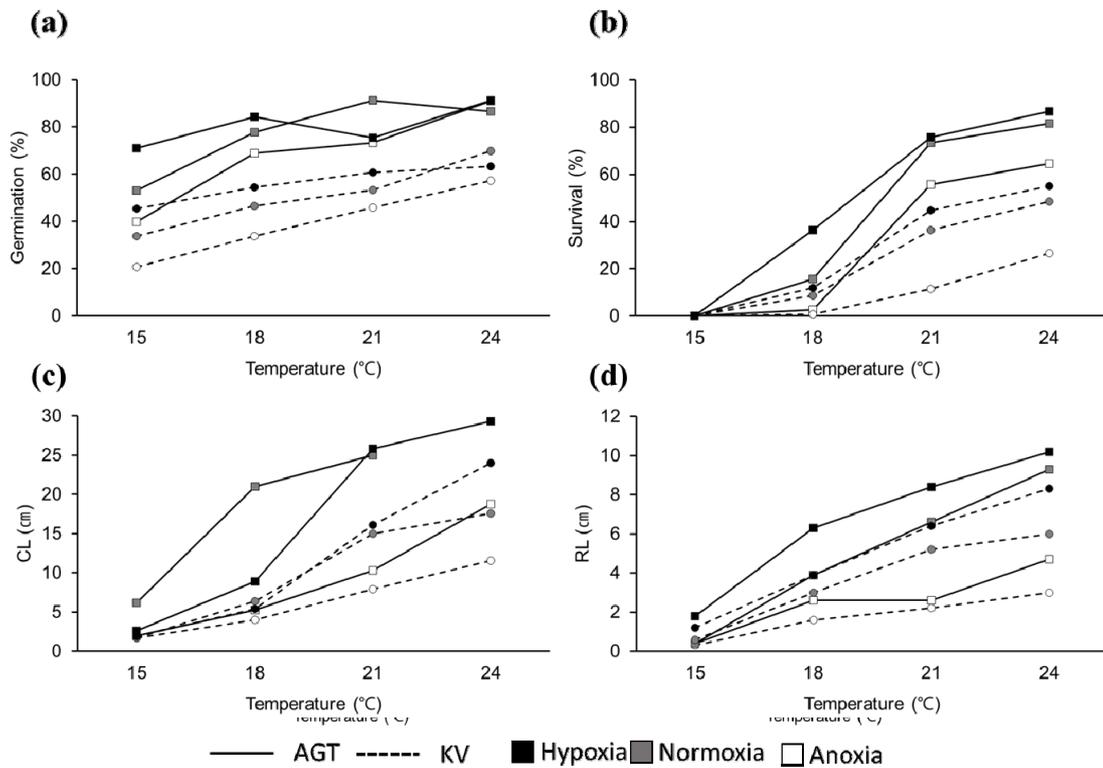


Fig. 3. Effect of temperature and dissolved oxygen level on germination related traits in Korean (KV) and anaerobic germination tolerant (AGT) rice genotypes under flooded conditions. (a) Germination rate; (b) Survival rate; (c) Coleoptile length; and (d) Radical length.

18°C의 이상 온도 조건에서 용존산소와 관계없이 50% 이상의 발아율을 나타내었던 품종은 동안벼, 중안벼, 청담벼, PBR, KHO이었다. 이들 품종은 18°C에서도 용존산소

에 관계없이 안정적인 발아가 가능하였으나 18°C이하의 낮은 수온에서는 대부분의 품종이 40% 이하의 생존율을 나타내어 저온에서 발아는 가능하나 생존을 위한 초엽의

신장은 크게 감소하는 것으로 조사되었다. KV 품종 중 동안벼는 18°C Normoxia 및 Hypoxia 조건에서 생존율이 각각 33.4%와 39.0%로 AGT 품종보다 생존율이 우수한 것으로 판단되었다.

KV 품종 및 AGT 자원의 18°C 조건에서의 평균 담수생존율 분포는 각각 0.7~12.0%와 2.6~36.4%로 낮게 조사되었으나 21°C 이상의 온도에서 담수생존율 분포는 11.5~44.8%와 55.7%~75.7%로 평균 온도 18°C 조건 보다 21°C에서 생존율이 크게 증가하는 것으로 나타났다. PBR과 KHO는 21°C 모든 용존 산소 조건에서 60% 이상의 생존율을 나타내었으며, WD는 21°C 저산소 조건을 제외한 모든 조건에서 60% 이상의 생존율을 나타내었다. 직파재배에서 벼의 안정적인 입모를 위해서는 파종 후 10일간 평균 20°C 이상의 기온이 요구된다고 하였는데(Hwang *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2014) 본 연구 결과에서도 유사한 결과를 나타내었다.

KV 품종들은 24°C의 Normoxia 및 Hypoxia 조건에서는 주안벼를 제외한 공시품종의 발아율이 대략 60% 이상으로 나타나 높은 온도에서는 KV 품종들도 발아가 양호한 것으로 조사되었으나, KV 품종의 평균 담수생존율은 약 50% 정도로 AGT 품종의 평균 담수생존율(81.6~86.8%)보다 크게 낮았다.

초엽과 유근의 신장

온도와 용존 산소 차이에 따른 KV 품종과 AGT 자원의 초엽과 유근길이에 대한 조사 결과는 Fig. 3(c), (d)과 Supplementary Table 3 및 Supplementary Table 4과 같다.

평균 온도 15°C, 18°C, 21°C, 24°C의 담수 상태에서 온도 변화 및 용존산소 농도 차이에 따른 초엽과 유근의 생장 분석결과, 대체로 온도가 상승함에 따라 초엽과 유근의 길이는 증가하는 경향이 있었다. 유근의 생장은 혐기(Anoxia)조건보다 호기(Hypoxia)조건일 때 유근의 생장이 2.2~4.8배 증가하였던 반면 초엽의 생장은 0.6~2.5배 증가되어 유근의 생장은 온도의 조건보다는 산소 농도에 영향이 더 큰 것으로 조사되었다. 동안벼, 중안벼, PBR, WD3는 낮은 용존산소 농도에서도 다른 계통에 비해 유근의 생육이 우수하여 담수직파 조건에서도 다른 품종에 비해 입모가 우수할 것으로 생각되었다. 벼는 담수 상태에서 산소가 부족해지면 생존을 위해 유아는 이상 신장하고 뿌리의 생육은 상대적으로 적어진다는 보고(Kim *et al.*, 2006)와 같은 경향을 나타내었다.

저온(15°C, 18°C) 조건에서는 KV계통과 AGT자원의 평균 초엽 길이는 각각 1.7~6.4 cm, 1.2~8.9 cm로, 모든 계통의 초엽 길이가 10 cm 이하로 생장이 다소 저조한 것으로

조사되었으나 21°C 이상의 온도조건에서는 초엽의 길이 분포는 각각 7.9~24.0 cm과 10.3~29.3 cm로 저온에 비해 크게 증가되었다. 중안벼, PBR, KHO 3계통은 18°C에서 산소조건에 관계없이 초엽길이가 5 cm 이상으로 성장하고 21°C 이상의 온도조건에서도 안정적인 생육이 가능한 것으로 판단되며 저온 담수 조건에서도 생육이 우수한 것으로 조사되었다.

온도 및 산소 품종에 대한 분산분석

담수 중 환경변화가 입모특성에 미치는 영향을 구명하기 위해 온도 및 산소 농도가 다른 12가지 조건에서 혐기발아 내성자원과 국내 직파적용 품종을 이용하여 입모 특성에 대한 분산분석을 실시하였다(Table 3). 담수발아율(GR), 담수생존율(SVR), 초엽길이(CL) 및 유근길이(RL)는 담수 중 온도(T), 용존산소(O) 그리고 유전자형에(G) 대해 고도의 유의성을 나타내었다($P < 0.001$). 담수 생존율에서 $G \times O$ 와 $G \times O \times T$ 의 영향을 제외한 다른 형질에서는 모두 고도로 유의한 상호작용 효과가 있는 것으로 분석되었다.

담수 중 발아율, 생존율, 초엽생장 및 유근생장 변이에서 온도가 전체 분산에서 차지하는 비율은 각각 43.2%, 74.5%, 78.0% 및 54.8%로 담수 중 형질 변이에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 직파재배에서 안정적인 입모를 위해서 파종기의 선정이 가장 중요하며 파종기 결정에는 기온이 가장 중요한 것으로 알려져 있는데(Choi, 1994; Shon *et al.*, 2012) 본 연구 결과에서도 담수 직파 후 입모에는 기상 환경 중 온도의 영향이 가장 큰 것으로 분석되어 벼 직파재배시 안정적인 입모를 위해서는 파종기 선정이 중요한 것으로 생각되었다.

용존산소 농도는 온도 다음으로 입모 관련 특성에 영향을 미치는 영향이 큰 것으로 분석되었다. 용존산소가 담수발아율, 담수생존율, 초엽생장 및 유근생장 변이에는 용존산소가 전체 분산에서 차지하는 비율은 각각 22.9%, 15.8%, 15.4% 및 37.5%로 용존산소는 담수 중 발아율과 유근의 생장에 미치는 영향이 큰 것으로 분석되었으며 상대적으로 생존율과 초엽의 생장에 미치는 영향은 다소 적은 것으로 분석되었다.

담수 중 발아율 변이에서 품종이 차지하는 비율이 29.8%로 다른 입모 관련 형질 보다 유전자형이 담수 발아율에 미치는 영향이 큰 반면 생존율, 초엽길이, 유근길이 변이에서 품종이 차지하는 분산은 적은 것으로 분석되었다.

담수조건에서 입모관련 형질과 담수생존율(SVR)과의 상관관계를 분석한 결과(Table 4) 실외 담수조건(Net-house)에서는 저온발아율(LGT), 담수발아율(GR)은 담수 중 생존율과 높은 정의(0.671^{***}, 0.831^{**}) 나타내었고 저온 발아일

Table 3. Effects of temperature, dissolved oxygen level, and rice genotype on seedling performance.

Trait	Source of variation	df	Sum of Square	Mean square	F-value	R ² (%)
GR	Genotype (G)	13	319908.9 ^{***}	24608.4	163.8	29.8
	Oxygen (O)	2	37837.9 ^{***}	18919.0	126.0	22.9
	Temperature (T)	3	106891.4 ^{***}	35630.5	237.2	43.2
	G x O	26	13701.4 ^{***}	527.0	3.5	0.6
	G x T	39	31157.8 ^{***}	798.9	5.3	1.0
	O x T	6	10350.7 ^{***}	1725.1	11.5	2.1
	G x O x T	78	27414.1 ^{***}	351.5	2.3	0.4
SVR	Genotype (G)	13	42855.1 ^{***}	3296.5	11.8	5.7
	Oxygen (O)	2	18574.6 ^{***}	9287.3	33.3	15.8
	Temperature (T)	3	129373.3 ^{***}	43124.4	154.4	74.5
	G x O	26	4789.4 ^{ns}	184.2	0.7	0.3
	G x T	39	25030.1 ^{***}	641.8	2.3	1.1
	O x T	6	8059.0 ^{***}	1343.2	4.8	2.3
	G x O x T	78	11124.6 ^{ns}	142.6	0.5	0.2
CL	Genotype (G)	13	4267.0 ^{***}	328.2	50.6	2.0
	Oxygen (O)	2	5192.6 ^{***}	400.3	400.3	15.4
	Temperature (T)	3	39348.2 ^{***}	2022.5	2022.5	78.0
	G x O	26	1102.6 ^{***}	6.5	6.5	0.3
	G x T	39	2947.6 ^{***}	11.7	11.7	0.4
	O x T	6	3982.4 ^{***}	97.2	97.2	3.7
	G x O x T	78	2523.2 ^{***}	5.0	5.0	0.2
RL	Genotype (G)	13	927.1 ^{***}	71.3	35.6	3.3
	Oxygen (O)	2	1620.6 ^{***}	810.3	404.4	37.5
	Temperature (T)	3	3551.3 ^{***}	1183.8	590.8	54.8
	G x O	26	174.1 ^{***}	6.7	3.3	0.3
	G x T	39	435.8 ^{***}	11.2	5.6	0.5
	O x T	6	434.1 ^{***}	72.4	36.1	3.3
	G x O x T	78	499.5 ^{***}	6.4	3.2	0.3

GR, germination rate; SVR, survival rate; CL, coleoptile length; RL, radical length; ** and ***, significance difference (3-way ANOVA, $p < 0.01$ and $p < 0.001$); ns, not significant difference

수(LT-MGT)와는 높은 부의 상관(-0.564^{***})을 나타내었다. 실내 담수조건(Greenhouse)에서는 담수생존율은 초엽길이(CL), 유근길이(RL) 담수발아율(GR)순으로 담수 중 생존율과 높은 정의 상관을 나타내었다. Yamauchi *et al.* (1993)은 담수상태에서 입모율에는 발아율과 초엽길이가 고도로 유의한 상관을 나타내며 빠른 초엽의 신장은 안정적인 입모를 위해서 매우 중요한 형질이라고 하였으며 Mori *et al.* (2012)은 직파재배에서 발아속도, 발아율 등 발아관련 형질의 개선은 입모율 향상을 위해 매우 중요 형질이라고 하여

담수직파에서 담수발아율, 초엽, 유근의 생육은 담수 중 초기 입모를 결정하는 중요형질임을 확인할 수 있었다. 따라서 담수 직파 전용 품종을 위해서는 담수상태에서의 입모 관련 형질을 기준으로 선발을 수행해야할 것으로 생각된다.

적 요

본 연구는 담수직파 초기 입모율 개선을 위해 험기발아 내성이 우수한 자원들과 국내에서 육성된 직파적응성 품종

Table 4. Correlations between survival rate and seedling traits under submergence conditions in the net-house and greenhouse.

Experiment	Variables	LT-MGT	GR	SVR
Net-house	LTG	-0.657***	0.703***	0.671***
	LT-MGT		-0.431**	-0.564***
	GR			0.831***
Experiment	Variables	SVR	CL	RL
Greenhouse	GR	0.450***	0.455***	0.460***
	SVR		0.630***	0.567***
	CL			0.822***

LTG, low-temperature germination; LT-MGT, mean germination time at 13°C; GR, germination rate; SVR, survival rate; RL, radicle length; CL, coleoptile length

간 담수 중 입모관련 특성을 조사하고 담수 환경이 입모 관련 형질에 미치는 영향을 분석하였다.

저온에서 AGT 3자원들의 평균 저온발아율은 92.9%, 평균발아일수 9.1일로 KV 품종들의 평균 저온 발아율 62.0%, 평균 발아속도 11.2일에 비해 저온조건에서도 발아율이 높았으며 발아 속도도 빠른 것으로 나타났다.

노지 담수 조건에서 AGT 품종들의 평균 생존율은 53%로 국내 직파 품종의 평균 생존율 22.7%보다 높았으며 온실 담수조건에서도 KV 품종에 비해 입모특성이 우수한 경향이였다. 특히 KHO, PBR, WD3는 저온발아율 및 혐기발아율 등 담수직파 관련형질이 우수하여 담수 직파 전용 벼 품종개발을 위한 유용 유전자원으로 활용성이 클 것으로 판단되었다.

모든 공시품종들은 저온(15°C, 18°C)의 담수조건에서 대체적으로 혐기발아율 및 생존율이 낮았으며 초엽 및 유근의 생장도 불량하였으나 21°C 이상의 조건에서는 생존율과 혐기발아 특성이 크게 개선되었다.

초기입모 관련 형질의 변이에는 온도>용존산소>품종 순으로 영향을 미치는 것으로 나타났으며 발아율 및 유근생장 변이에는 다른 형질에 비해 용존산소 농도의 영향이 다소 크게 작용하는 것으로 나타났다.

사 사

본 논문은 농촌진흥청 연구사업(과제번호: PJ01102002)의 지원에 의해 수행되었음.

인용문헌(REFERENCES)

- Azmi, M. and S. M. R. Karim. 2008. Weedy rice-biology, ecology and management. Malaysian Agricultural Research and Development Institute (MARDI). Kuala Lumpur, Malaysia. 56p.
- Chin, D. V. 2001. Biology and management of barnyardgrass, red sprangletop and weedy rice. *Weed Biol. Manag.* 1 : 37-41. doi: 10.1046/j.1445-6664.2001.00009.x
- Choi, D. H. 1994. Determination of critical early seeding date for seedling emergence in dry-seeded rice based on statistical analysis of daily mean air temperature in Korea. *Korean J. Crop Sci.* 39(5) : 437-443.
- El-Hendawy, S. E., C. Sone, O. Ito, and J. I. Sakagami. 2011. Evaluation of germination ability in rice seeds under anaerobic conditions by cluster analysis. *Res. J. Seed Sci.* 4 : 82-93
- Ferrero, A. and F. Vidotto. 2000. Red rice control in rice pre- and post-planting. In:FAO Report of the global workshop on red rice control. Varadero, Cuba. pp. 95-107.
- Hwang, W.-H., J.-H. Jeong, H.-S. Lee, T.-S. Park, S.-Y. Yang, I.-B. Choi, and K.-J. Choi. 2018. Emergence characteristics of weedy rice under flooding depth. *Weed Turf. Sci.* 7(3) : 171-179.
- Jiang, L., S. Liu, M. Hou, J. Tang, L. Chen, H. Zhai, and J. Wan. 2006. Analysis of QTLs for seed low temperature germinability and anoxia germinability in rice (*Oryza sativa* L.). *F. Crop Res.* 98 : 68-75. doi: 10.1016/j.fcr.2005.12.015
- Kato-Noguchi, H., M. A. Salam, and K. Suenaga. 2011. Isolation and identification of potent allelopathic substances in a traditional bangladeshi rice cultivar kartikshail. *Plant Prod. Sci.* 14 : 128-134. doi: 10.1626/pp.14.128
- Kim, S.-Y., S.-T. Park, J.-H. Seo, C.-D. Hwang, H. K. Bae, and M.-K. Oh. 2017. Seed germination and effect of water depths on seedling establishment of Iron-coated rice seeds. *Korean J. Crop Sci.* 62 : 9-15. doi: 10.7740/kjcs.2016.62.1.009
- Kim, S. M., C. S. Kim, J. U. Jeong, R. F. Reinke, and J. M. Jeong. 2019. Marker-assisted breeding for improvement of anaerobic germination in japonica rice (*Oryza sativa*). *Plant Breed.* 138 : 810-819. doi: 10.1111/pbr.12719
- Kim, S. E., K. M. Cho, Y. D. Kim, and J. Ko. 2006. Difference in anaerobic and low-temperature tolerance between direct-seeded rice and grass weeds. *Kor. J. Weed Sci.* 26 : 323-329.
- Mahender, A., A. Anandan, and S. K. Pradhan. 2015. Early seedling vigour, an imperative trait for direct-seeded rice: an overview on physio-morphological parameters and molecular markers. *Planta* 241 : 1027-1050. doi: 10.1007/s00425-015-2273-9
- Mavi, K. and I. Demir. 2010. Controlled deterioration and accelerated ageing tests to predict seedling emergence of watermelon under stressful conditions and seed longevity. *Seed Sci. Technol.* 38 : 14-25. doi: 10.15258/sst.2007.35.2.19

- Mori, S., H. Fujimoto, S. Watanabe, G. Ishioka, A. Okabe, M. Kamei, and M. Yamauchi. 2012. Physiological performance of iron-coated primed rice seeds under submerged conditions and the stimulation of coleoptile elongation in primed rice seeds under anoxia. *Soil Sci. Plant Nutr.* 58 : 469-478. doi: 10.1080/00380768.2012.708906
- Mowjood, M. I. M. and T. Kasubuchi. 1998. Dynamics of dissolved oxygen (DO) in ponded water of a paddy field. *Soil Sci. Plant Nutr.* 44 : 405-413. doi: 10.1080/00380768.1998.10414462
- Perata, P., N. Geshi, J. Yamaguchi, and T. Akazawa. 1993. Effect of anoxia on the induction of α -amylase in cereal seeds. *Planta* 191 : 402-408. doi: 10.1007/BF00195699
- Shon, J., J. Ko, W. Kim, B. Kim, C. Kim, and N. Jung. 2008. Changes of antioxidative enzymes and alcohol dehydrogenase in young rice seedlings submerged in water. *Korean J. Crop Sci.* 53 : 440-446.
- Shon, J.-Y., C.-K. Lee, J.-H. Kim, Y.-H. Yoon, W.-H. Yang, K.-J. Choi, M.-G. Choi, H.-K. Park, J.-C. Ko, Y.-G. Kim, C.-K. Kim, and W.-H. Yang. 2012. Comparisons of growth, heading and grain filling characteristics between wet-hill-seeding and transplanting in rice. *Korean J. Crop Sci.* 57 : 151-159.
- Yamauchi, M., A. M. Aguilar, D. A. Vaughan, D. V. and Seshu. 1993. Rice (*Oryzativa* L.) Germplasm suitable for direct sowing under flooded soil surface. *Euphytica* 67(3) : 177-184.
- Yang, W.-H., J.-K. Kim, M.-H. Lee, S.-C. Chen, and H.-S. Han. 2015. Status and prospect on rice direct seeding technology of farmers. *J. Korean Soc. Int. Agric.* 27 : 342-347. doi: 10.12719/ksia.2015.27.3.342
- Yang, W., J. Kim, J. Shon, H. Jung, K.-J. Choi, and B.-K. Kim. 2014. Comparison of seedling establishment and early growth characteristics as affected by seeding date and temperature in water broadcast-seeded whole crop silage rice genotypes. *J. Korean Soc. Int. Agric.* 26 : 462-467. doi: 10.12719/ksia.2014.26.4.462
- Zhang, Z. H., X. S. Qu, S. Wan, L. Chen, and Y. Zhu. 2005. Comparison of QTL controlling seedling vigour under different temperature conditions using recombinant inbred lines in rice (*Oryza sativa*). *Ann Bot.* 95 : 423-429. doi: 10.1093/aob/mci039

Supplementary Table 1. Effect of temperature and dissolved oxygen level on the germination rate of Korean and anaerobic germination tolerant rice varieties under flooding conditions.

Group	Temp/DO Variety	Germination (%)											
		15°C			18°C			21°C			24°C		
		Low	Nor	High	Low	Nor	High	Low	Nor	High	Low	Nor	High
	Nongan	0.0 ^e	13.2 ^h	33.2 ^{ef}	13.2 ^{ef}	33.0 ^e	39.9 ^d	38.6 ^{de}	39.6 ^g	40.0 ^{fg}	66.4 ^{cd}	59.9 ^e	59.8 ^{de}
	Juan	0.0 ^e	0.0 ⁱ	6.6 ^g	0.0 ^f	7.0 ^f	19.8 ^e	17.8 ^f	15.2 ^h	26.4 ^g	27.8 ^e	33.1 ^f	33.2 ^f
	Dongan	26.6 ^{cd}	53.0 ^c	59.9 ^{bc}	53.3 ^{bc}	72.8 ^{abc}	73.3 ^c	53.0 ^{cd}	73.1 ^{cd}	75.3 ^{abc}	73.2 ^{bcd}	95.2 ^{ab}	73.0 ^{cd}
	Hoan	13.2 ^{de}	27.2 ^{fg}	39.7 ^{def}	25.6 ^{de}	46.4 ^{de}	53.1 ^d	33.0 ^e	59.9 ^{def}	53.3 ^{def}	59.8 ^d	65.4 ^{de}	61.8 ^{de}
	Jungan	59.9 ^{ab}	66.7 ^b	87.6 ^a	66.4 ^b	80.0 ^{ab}	88.0 ^{abc}	72.0 ^b	93.3 ^{ab}	92.0 ^a	72.8 ^{bcd}	96.0 ^{ab}	93.3 ^{ab}
KV	Dongjin1	0.0 ^e	46.4 ^{cd}	66.5 ^b	40.0 ^{cd}	59.8 ^{cd}	93.0 ^{ab}	66.2 ^{bc}	66.0 ^{cde}	88.6 ^{ab}	80.0 ^{abc}	100.0 ^a	93.4 ^{ab}
	Pyeongang	26.5 ^{cd}	26.5 ^{fg}	26.6 ^f	19.8 ^{def}	33.1 ^e	33.3 ^{de}	31.2 ^{ef}	39.6 ^g	60.0 ^{cde}	33.0 ^e	66.5 ^{de}	40.0 ^f
	Cheongdam	53.3 ^b	53.4 ^c	53.3 ^{bcd}	52.8 ^{bc}	66.8 ^{bc}	53.1 ^d	69.0 ^b	59.6 ^{def}	66.4 ^{cde}	59.6 ^d	59.8 ^e	73.3 ^{cd}
	Hopum	13.2 ^{de}	19.8 ^{gh}	39.6 ^{def}	26.5 ^{de}	33.1 ^e	53.5 ^d	33.1 ^e	39.7 ^g	53.4 ^{def}	39.7 ^e	59.4 ^e	46.5 ^{ef}
	HGND	0.0 ^e	19.8 ^{gh}	46.2 ^{cde}	26.4 ^{de}	33.3 ^e	53.3 ^d	39.6 ^{de}	46.7 ^{fg}	52.8 ^{ef}	59.9 ^d	73.3 ^{cde}	59.9 ^{de}
	Sukwang	36.0 ^e	46.2 ^{cd}	46.7 ^{cd}	39.9 ^{cd}	46.4 ^{de}	39.8 ^{de}	51.6 ^{cd}	54.7 ^{efg}	61.0 ^{cde}	59.9 ^d	60.0 ^e	63.2 ^{cde}
	PBR	73.3 ^a	86.7 ^a	100.0 ^a	93.3 ^a	86.7 ^a	93.3 ^a	86.7 ^a	100.0 ^a	93.3 ^a	86.7 ^{ab}	93.3 ^{ab}	100.0 ^a
AGT	WD-3	33.0 ^e	39.9 ^{de}	66.4 ^b	40.0 ^{cd}	66.7 ^{bc}	86.7 ^{abc}	59.9 ^{bc}	93.3 ^{ab}	60.0 ^{cdef}	93.3 ^a	86.7 ^{abc}	93.3 ^{ab}
	KHO	13.2 ^{de}	33.1 ^{ef}	46.7 ^{cde}	73.4 ^{ab}	80.0 ^{ab}	73.4 ^{bc}	73.4 ^{ab}	80.0 ^{bc}	73.3 ^{bcd}	93.3 ^a	80.0 ^{bcd}	79.9 ^{bc}
KV Mean ± SD		20.8±11.2	33.8±10.4	46.0±11.4	33.1±12.0	46.5±11.2	54.6±12.4	45.9±9.2	53.4±11.3	60.8±11.4	57.4±9.5	70.0±10.9	63.4±10.9
AGT Mean ± SD		39.8±15.3	53.2±13.5	71.0±12.0	68.9±12.8	77.8±8.1	84.5±8.6	73.3±9.7	91.2±7.6	75.5±10.2	91.1±7.6	86.7±8.4	91.1±7.2
KV vs AGT		**	**	***	***	***	***	***	***	*	***	**	***

Different lowercase letters indicate significant differences (DMRT, $p < 0.05$).

KV, Korean variety; AGT, anaerobic germination-tolerant; GR, germination rate; *, **, ***, significant difference between KV and AGT by t -test ($p < 0.05$, $p < 0.01$, $p < 0.001$)

Supplementary Table 2. Effect of temperature and dissolved oxygen level on the survival rate of Korean and anaerobic germination tolerant rice varieties under flooding conditions.

Group	Temp/DO Variety	Survival (%)											
		15°C			18°C			21°C			24°C		
		Low	Nor	High	Low	Nor	High	Low	Nor	High	Low	Nor	High
	Nongan	0.0	0.0	0.0	0.0 ^b	0.0 ^e	0.0 ^e	0.0 ^c	27.7 ^{defg}	41.1 ^{ef}	0.0 ^g	51.1 ^{bcd}	53.3 ^{def}
	Juan	0.0	0.0	0.0	0.0 ^b	0.0 ^e	0.0 ^e	0.0 ^c	7.6 ^g	14.3 ^g	0.0 ^g	15.4 ^e	26.5 ^f
	Dongan	0.0	0.0	0.0	7.8 ^a	33.4 ^a	39.0 ^b	26.7 ^b	46.7 ^{bcd}	71.2 ^{abcd}	46.7 ^{cd}	55.6 ^{bc}	74.5 ^{abcd}
	Hoan	0.0	0.0	0.0	0.0 ^b	10.0 ^{de}	13.9 ^{cd}	0.0 ^c	26.6 ^{efg}	39.9 ^{ef}	33.3 ^{ef}	53.3 ^{bcd}	60.0 ^{bcd}
	Jungan	0.0	0.0	0.0	0.0 ^b	14.5 ^{cde}	60.2 ^a	25.6 ^b	66.8 ^{ab}	86.8 ^a	46.7 ^{cde}	86.8 ^a	83.4 ^{ab}
KV	Dongjin1	0.0	0.0	0.0	0.0 ^b	0.0 ^e	0.0 ^e	14.4 ^{bc}	53.5 ^{bcd}	61.2 ^{bcd}	40.0 ^{de}	55.6 ^{bc}	61.1 ^{bcd}
	Pyeongang	0.0	0.0	0.0	0.0 ^b	3.3 ^e	13.3 ^{cd}	6.6 ^c	19.9 ^{fg}	32.1 ^{fg}	19.9 ^f	26.5 ^{de}	33.2 ^{ef}
	Cheongdam	0.0	0.0	0.0	0.0 ^b	27.9 ^{ab}	0.0 ^e	26.7 ^b	65.7 ^{ab}	53.3 ^{cdef}	61.3 ^{ab}	53.3 ^{bcd}	53.3 ^{cdef}
	Hopum	0.0	0.0	0.0	0.0 ^b	0.0 ^e	0.0 ^e	6.6 ^c	40.0 ^{cdef}	13.1 ^g	26.6 ^f	33.2 ^{cde}	53.3 ^{cdef}
	HGND	0.0	0.0	0.0	0.0 ^b	6.6 ^{de}	0.0 ^e	6.6 ^c	19.9 ^{fg}	33.2 ^{fg}	0.0 ^g	47.8 ^{cd}	53.3 ^{def}
	Sukwang	0.0	0.0	0.0	0.0 ^b	0.0 ^e	6.6 ^{de}	13.3 ^{bc}	26.6 ^{efg}	46.6 ^{def}	19.9 ^f	54.5 ^{bc}	53.3 ^{def}
	PBR	0.0	0.0	0.0	0.0 ^b	26.7 ^{bc}	41.2 ^b	60.2 ^a	80.2 ^a	80.1 ^{ab}	60.1 ^{bc}	86.8 ^a	93.5 ^a
AGT	WD-3	0.0	0.0	0.0	0.0 ^b	0.0 ^e	46.8 ^b	46.8 ^a	60.1 ^{abc}	73.4 ^{abc}	60.1 ^{bc}	84.7 ^a	86.8 ^{ab}
	KHO	0.0	0.0	0.0	7.8 ^a	20.0 ^{cd}	21.2 ^c	60.2 ^a	80.2 ^a	73.4 ^{abc}	73.5 ^a	73.4 ^{ab}	80.1 ^{abc}
KV Mean±SD		0.0	0.0	0.0	0.7±1.2	8.7±6.4	12.0±9.7	11.5±6.1	36.4±10.6	44.8±11.5	26.7±10.6	48.5±9.9	55.0±9.4
AGT Mean±SD		0.0	0.0	0.0	2.6±2.0	15.6±6.7	36.4±6.7	55.7±7.1	73.5±9.7	75.7±9.4	64.6±5.1	81.6±9.9	86.8±8.7
KV vs AGT					ns	ns	**	**	**	**	**	**	**

Different lowercase letters indicate significant differences (DMRT, $p < 0.05$).

KV, Korean variety; AGT, anaerobic germination-tolerant; SVR, survival rate; *, **, ***, significant differences between KV and AGT (t -test, $p < 0.05$, $p < 0.01$, and $p < 0.001$, respectively), ns; no significant difference

Supplementary Table 3. Effect of temperature and dissolved oxygen level on the coleoptile length of Korean and anaerobic germination tolerant rice varieties under flooding conditions.

Group	Temp/DO Variety	CL (cm)											
		15°C			18°C			21°C			24°C		
		Low	Nor	High	Low	Nor	High	Low	Nor	High	Low	Nor	High
	Nongan	1.7 ^{bcd}	1.3 ^d	1.6 ^{cde}	4.1 ^{abc}	6.1 ^{de}	4.1 ^{ef}	5.3 ^{ef}	14.8 ^{cde}	16.5 ^{cde}	6.5 ^e	18.2 ^{cde}	24.9 ^{bcd}
	Juan	0.0 ^e	0.0 ^e	1.0 ^e	0.0 ^d	4.3 ^{ef}	1.5 ^g	2.3 ^f	11.8 ^{de}	12.1 ^e	5.2 ^{ef}	14.8 ^{ef}	28.5 ^b
	Dongan	2.3 ^a	2.2 ^{ab}	1.9 ^{bcde}	5.1 ^{abc}	8.9 ^{ab}	5.5 ^{cdef}	13.0 ^{ab}	16.2 ^{bc}	17.2 ^{cd}	24.3 ^a	23.5 ^{ab}	24.4 ^{cde}
	Hoan	2.3 ^{ab}	2.1 ^{abc}	2.5 ^{abc}	3.7 ^{bc}	10.0 ^a	7.7 ^{abc}	5.7 ^{ef}	15.6 ^{bcd}	17.4 ^{cd}	21.9 ^{ab}	22.4 ^{bc}	21.5 ^{def}
	Jungan	2.5 ^a	2.5 ^a	2.2 ^{abcd}	6.1 ^a	6.8 ^{bcd}	9.8 ^a	10.8 ^{bcd}	15.4 ^{bcd}	20.9 ^{bc}	14.6 ^{cd}	22.7 ^{bc}	26.8 ^{bc}
KV	Dongjin1	0.0 ^e	0.0 ^e	1.3 ^{de}	1.4 ^d	2.2 ^f	3.3 ^{fg}	7.8 ^{de}	10.5 ^e	14.7 ^{de}	8.7 ^{de}	10.5 ^f	21.9 ^{def}
	Pyeongang	1.5 ^{cd}	2.5 ^a	2.1 ^{bcd}	3.9 ^{ac}	6.1 ^{de}	5.7 ^{cdef}	6.4 ^e	16.5 ^{bc}	14.3 ^{de}	9.4 ^{de}	16.2 ^e	27.3 ^{bc}
	Cheongdam	2.2 ^{ab}	2.1 ^{abc}	1.8 ^{bcde}	5.3 ^{abc}	8.7 ^{abc}	5.0 ^{def}	8.9 ^{cde}	14.9 ^{bcd}	15.9 ^{de}	16.8 ^{bc}	18.8 ^{cde}	19.3 ^f
	Hopum	2.0 ^{abc}	2.0 ^{abc}	2.4 ^{abc}	5.4 ^{abc}	5.9 ^{de}	3.9 ^{efg}	12.4 ^{abc}	17.9 ^{bc}	16.8 ^{cd}	14.0 ^{cd}	10.8 ^f	24.0 ^{cde}
	HGND	2.2 ^{ab}	2.3 ^a	2.0 ^{bcd}	4.5 ^{abc}	5.0 ^{de}	5.9 ^{cde}	5.5 ^{ef}	15.9 ^{bc}	17.6 ^{cd}	0.0 ^f	17.4 ^{de}	24.7 ^{cde}
	Sukwang	2.1 ^{ab}	2.2 ^a	2.2 ^{abcd}	4.3 ^{abc}	6.2 ^{cde}	7.0 ^{bcd}	8.6 ^{de}	15.8 ^{bcd}	13.6 ^{de}	6.2 ^{ef}	18.2 ^{cde}	20.8 ^{ef}
	PBR	2.6 ^a	2.4 ^a	2.9 ^a	6.0 ^{ab}	6.9 ^{bcd}	8.9 ^{ab}	6.5 ^e	18.7 ^b	23.1 ^b	13.1 ^{cd}	21.3 ^{bcd}	25.7 ^{bcd}
AGT	WD-3	2.2 ^{ab}	1.7 ^{bcd}	2.3 ^{abcd}	4.5 ^{abc}	6.1 ^{cde}	9.9 ^a	10.4 ^{bcd}	18.7 ^{bc}	23.2 ^b	15.8 ^{bc}	25.6 ^{ab}	27.0 ^{bc}
	KHO	1.2 ^d	1.6 ^{cd}	2.6 ^{ab}	5.5 ^{abc}	5.7 ^{de}	8.0 ^{abc}	14.2 ^a	25.8 ^a	31.1 ^a	27.7 ^a	27.9 ^a	35.1 ^a
	KV Mean±SD	1.7±0.5	1.9±0.5	1.9±0.3	4.0±1.1	6.4±1.3	5.4±1.3	7.9±1.9	15.0±1.5	16.1±1.9	11.6±3.9	17.6±2.7	24.0±1.9
	AGT Mean±SD	2.0±0.3	1.7±0.3	1.2±0.5	5.3±1.1	6.2±0.9	8.9±1.3	10.3±2.3	21.1±2.8	25.8±2.4	18.9±4.4	25.0±2.2	29.3±2.7
	KV vs AGT	ns	ns	**	*	ns	***	*	***	***	***	***	*

Different lowercase letters indicate significant differences (DMRT, $p<0.05$).

KV, Korean variety; AGT, anaerobic germination-tolerant; CL, coleoptile length; *, **, ***, significant differences between KV and AGT (t -test, $p<0.05$, $p<0.01$, and $p<0.001$, respectively), ns; no significant difference

Supplementary Table 4. Radical length of 11 KV and 3 ATG under flooding condition with different temperature and oxygen.

Group	Temp/DO Variety	RL (cm)											
		15°C			18°C			21°C			24°C		
		Low	Nor	High	Low	Nor	High	Low	Nor	High	Low	Nor	High
	Nongan	0.0 ^d	0.2 ^{cde}	1.1 ^{bcd}	0.3 ^e	1.3 ^{fg}	4.7 ^{bcd}	0.7 ^e	3.8 ^e	4.8 ^{cd}	1.8 ^{de}	4.5 ^d	7.7 ^{efg}
	Juan	0.0 ^d	0.0 ^{de}	0.4 ^{cd}	1.0 ^{cde}	1.5 ^{efg}	2.6 ^{ef}	1.5 ^{de}	4.4 ^{de}	6.2 ^{bc}	1.6 ^{de}	4.8 ^d	6.6 ^{fg}
	Dongan	0.7 ^{ab}	1.0 ^b	1.2 ^{bc}	1.9 ^{abcde}	5.3 ^{ab}	5.2 ^{bc}	5.5 ^a	8.3 ^a	8.1 ^b	5.3 ^{abc}	9.4 ^{ab}	11.1 ^b
	Hoan	0.1 ^{bcd}	0.8 ^b	1.5 ^{ab}	1.5 ^{cde}	5.6 ^a	5.0 ^{bcd}	0.4 ^e	6.6 ^{abc}	8.2 ^b	6.7 ^a	8.6 ^{abc}	8.6 ^{cdef}
	Jungan	0.8 ^a	0.7 ^b	1.7 ^{ab}	3.7 ^a	4.1 ^{abc}	5.4 ^{bc}	3.1 ^{bcd}	5.2 ^{bcde}	6.5 ^{bc}	3.4 ^{cd}	8.4 ^{abc}	14.1 ^a
KV	Dongjin1	0.0 ^d	0.0 ^e	0.2 ^d	0.3 ^e	0.3 ^g	2.4 ^{ef}	1.9 ^{bcde}	3.4 ^e	5.9 ^{bc}	2.1 ^{de}	1.6 ^d	7.4 ^{efg}
	Pyeongang	0.0 ^d	0.8 ^b	1.5 ^{bc}	1.0 ^{de}	2.2 ^{def}	2.0 ^f	1.9 ^{bcde}	4.3 ^{de}	2.7 ^d	1.4 ^{de}	4.6 ^d	8.6 ^{bcdef}
	Cheongdam	0.3 ^{abcd}	0.5 ^{bcde}	1.6 ^{ab}	2.4 ^{abcd}	5.4 ^a	2.8 ^{def}	1.9 ^{bcde}	5.2 ^{bcde}	7.8 ^{bc}	4.9 ^{abc}	7.8 ^{bc}	5.6 ^g
	Hopum	0.6 ^{abc}	0.9 ^b	1.6 ^{ab}	2.4 ^{abcd}	2.7 ^{cdef}	3.3 ^{bcde}	3.4 ^{bc}	6.4 ^{abc}	6.4 ^{bc}	3.3 ^{cd}	4.0 ^d	8.1 ^{def}
	HGND	0.1 ^{bcd}	1.5 ^a	1.5 ^{ab}	2.1 ^{abcd}	2.3 ^{def}	5.1 ^{bcd}	3.2 ^{bc}	4.4 ^{de}	7.7 ^{bc}	0.0 ^e	6.3 ^{cd}	6.3 ^{fg}
	Sukwang	0.3 ^{abcd}	0.4 ^{bcde}	1.5 ^{bc}	1.4 ^{cde}	3.2 ^{cde}	4.5 ^{bcde}	1.5 ^{cde}	5.1 ^{cde}	5.6 ^{bc}	2.1 ^{de}	6.6 ^{cd}	7.1 ^{efg}
	PBR	0.6 ^{abc}	0.6 ^{bc}	2.5 ^a	3.4 ^{ab}	3.4 ^{bcd}	6.1 ^{ab}	1.5 ^{de}	6.1 ^{abcd}	6.7 ^{bc}	4.3 ^{bc}	9.5 ^{ab}	9.3 ^{bcde}
AGT	WD3	0.7 ^{ab}	0.6 ^{bcd}	1.9 ^{ab}	2.7 ^{abc}	5.8 ^a	7.9 ^a	3.6 ^{ab}	7.1 ^{ab}	12.2 ^a	4.1 ^{bc}	10.9 ^a	10.7 ^{bcd}
	KHO	0.0 ^d	0.1 ^{cde}	1.1 ^{bcd}	1.8 ^{bcde}	2.5 ^{def}	5.0 ^{bcd}	2.7 ^{bcd}	6.8 ^{abc}	6.5 ^{bc}	5.7 ^{ab}	7.4 ^{bc}	10.7 ^{bc}
	KV Mean±SD	0.3±0.2	0.6±0.3	1.2±0.4	1.6±0.7	3.1±1.0	3.9±0.9	2.3±0.9	5.2±1.0	6.4±1.2	3.0±1.2	6.0±1.4	8.3±1.4
	AGT Mean±SD	0.4±0.3	0.4±0.2	1.9±0.5	2.7±1.0	4.0±1.1	6.3±1.1	2.6±0.9	6.6±0.6	8.4±1.6	4.7±1.0	9.3±1.0	10.2±1.0
	KV vs AGT	ns	ns	*	*	ns	***	ns	*	**	**	***	*

Different lowercase letters indicate significant differences (DMRT, $p<0.05$).

KV, Korean variety; AGT, anaerobic germination tolerant; RL, radical length; *, **, ***, significant differences between KV and AGT (t -test, $p<0.05$, $p<0.01$, and $p<0.001$, respectively), ns; no significant difference