

벼 등숙기 침관수 피해에 따른 수량 및 품질 특성 변화

이현석¹ · 황운하¹ · 정재혁¹ · 안승현¹ · 백정선¹ · 정한용¹ · 박홍규¹ · 구본일¹ · 윤종탁¹ · 이건휘¹ · 최경진^{1,†}

Change in Yield and Quality Characteristics of Rice by Flooding during the Ripening Stage

Hyeon-Seok Lee¹, Woon-Ha Hwang¹, Jae-Hyeok Jeong¹, Seung-Hyeon Ahn¹, Jeong-seon Baek¹, Han-Yong Jeong¹, Hong-kyu Park¹, Bon-il Ku¹, Jong-Tak Yun¹, Geon-Hwi Lee¹, and Kyung-Jin Choi^{1,†}

ABSTRACT The increase in the frequency of occurrence of abnormal weather could include severe rainfall, which could cause rice submergence during the ripening stage. This experiment was conducted to clarify the effects of submergence during the ripening period on yield and quality of rice. The flooding treatment was conducted at 7 and 14 days after heading. Flooding conditions were created with two conditions, flag leaf exposed and overhead flooding, and each condition was divided into two conditions according to water quality—clear and muddy. Although the yield decrease was more severe at 7 days after heading because of the decrease in the ripening ratio, the head rice ratio was more affected at 14 days after heading because of the increase in the chalky kernel ratio. The maximum quantum yield (Fv/Fm), which indicates the photosynthetic efficiency, did not differ before and after the flooding treatment until flooding continued for 4 days. In addition, stem elongation occurred because of flooding as an avoidance mechanism in japonica rice. This phenomenon was expected to decrease the supply of assimilation products to the spikelet (sink). Overall, it was suggested that additional experiments should be conducted examining the change in the starch synthesis mechanism and transfer of assimilate products resulting from submergence, for development of cultivation techniques corresponding to submergence and breeding of varieties with submergence tolerance characteristics.

Keywords : physiological characteristics, quality, rice, ripening, submergence stress, yield

온실가스 축적 등에 의한 기후 온난화 및 빈번한 이상기상 현상 발생은 식물체의 성장과 발달에 심각한 장애를 일으켜, 인류와 생태계 등에 심각한 위협을 주고 있다(Kotak *et al.*, 2007). 이러한 이상기상현상에 따른 집중호우와 태풍의 발생 증가는 벼 침관수 피해를 일으키는 원인이 되는데, 이는 벼를 도복시키고 수량 및 품질 변화에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다(Choi *et al.*, 2000).

침관수 조건에서는 기체확산이 대기보다 만배이상 늦어져, 광합성 및 호흡에 영향을 줄 것으로 예상되며(Ruimei *et al.*, 2015; Voesenek & Sasidharan, 2012), 벼는 관수가 되면 공기중의 산소공급이 중단되어 도체 내의 산소 결핍에 의해 호흡기질이 과다하게 소모되게 되므로 에너지 부족에 직면하게 된다(Shunsaku *et al.*, 2012; Das *et al.*, 2000). 에

너지가 부족하게 되면 1차적으로 호흡기질로서 당당류, 당류 등의 탄수화물 소비가 증대되고(Debabarata & Ramani, 2015), 2차적으로 단백질이 아미노산으로 분해되어 소비가 되면서, 큰 피해를 받거나 심하면 고사하게 된다. 하지만 잎 끝이 조금이라도 수면에 노출되면 기공을 통하여 산소가 공급되므로 피해가 경감된다. 또한 탁수의 경우 강우로 인한 산소공급 중단 외에도 물 속 부유물질, 흙 등에 의한 차광으로 광합성이 저해되어 동화산물 생성 또한 감소할 것으로 예상된다(Colmer & Pedersen, 2008 ; Ram *et al.*, 2002). 이러한 동화산물 생성 및 공급의 저해는 등숙기간동안 발육정지립을 증가시켜, 등숙률과 천립중의 감소를 불러 일으키며, 완전미율 감소 등의 품질 저하를 일으킬 것으로 보인다.

¹농촌진흥청 국립식량과학원 작물재배생리과 (Crop Production & Physiology Division, NICS, RDA, Wanju 55365, Korea)

[†]Corresponding author: Kyung-Jin Choi; (Phone) +82-63-238-5262; (E-mail) choikj@korea.kr

<Received 17 February, 2017; Revised 28 April, 2017; Accepted 10 May, 2017>

침관수 처리에 따른 생육시기별 수량감소 정도에 대한 연구는 많이 이루어져있지만(Choi *et al.*, 2000), 등숙기 침관수 피해가 품질특성에 미치는 영향에 대한 연구는 미비하다. 침관수 피해의 경우 피해에 영향을 미치는 여러 요인들이 복합적으로 작용하기 때문에 자연조건에서는 침관수만의 독립적인 영향을 밝히기 어렵다. 본 연구는 인공기상 시설을 이용하여 출수 후 7일과 14일에 수온, 용존산소량 등 균일한 침관수 처리가 유지되는 조건에서 벼의 등숙기 침관수 피해양상을 구명 하고 침관수 피해 정도 예측 및 경감대책을 수립하기 위한 기초자료로 활용하기 위해 수행하였다.

재료 및 방법

시험재료 및 처리방법

본 시험에서는 남평벼를 사용하였으며, 1/5000a 포트에 3개체씩 이앙하여, 침관수 처리 전까지 자연기상조건에서

재배하였다. 침관수 처리는 국립식량과학원 인공기상동 내 침관수 처리 시설을 이용하였으며, 침수처리 시 평균기온은 24℃ (최고 19℃/최저 29℃), pH는 7~7.5로 설정하였으며, 청수와 탁수로 나누어 구분하여 처리하였는데, 탁수조건은 논흙을 이용하여 용존산소량 및 차광조건에 초점을 두어 조성하였다. 용존산소량은 청수의 경우 침수 처리 전 (6.2 mg/L), 침수처리 24시간 후(5.6 mg/L), 침수처리 48시간 후(4.8 mg/L), 침수처리 72시간 후(3.9 mg/L), 침수처리 96시간 후(3.2 mg/L) 조건에서, 탁수의 경우 침수 처리 전 (5.5 mg/L), 침수처리 24시간 후(4.2 mg/L), 침수처리 48시간 후(2.7 mg/L), 침수처리 72시간 후(1.9 mg/L), 침수처리 96시간 후(1.3 mg/L) 조건이었다. 또한 침관수 처리에 의한 일사량 변화를 분석하기 위하여, 처리별로 오전 11시 동일한 시간에 일사량을 측정하였고, 청수 및 탁수처리의 일사량은 수중 지엽높이에서 측정하였으며, 자연광대비 청수 59%, 탁수는 94%가 차광된 조건에서 출수 후 7일, 14일 각 등숙 시기별로 침관수 처리가 진행되었다(Fig. 1, 2).

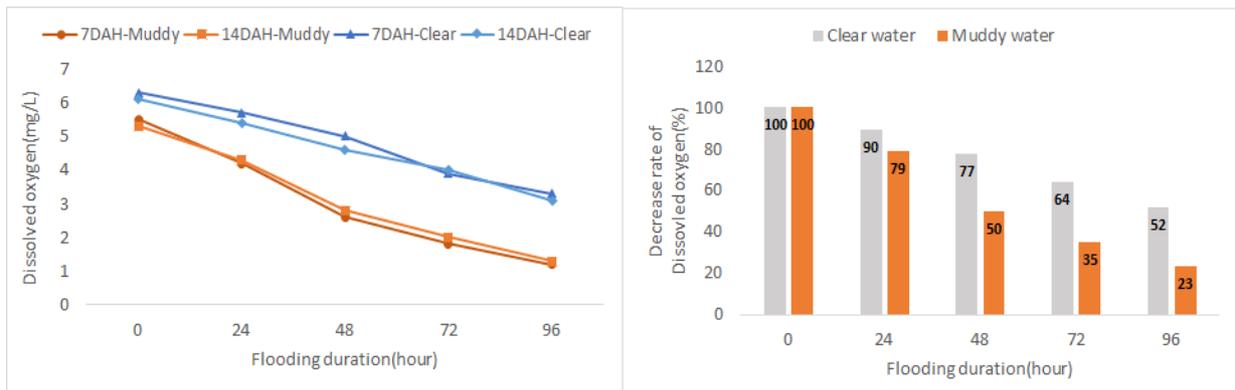


Fig. 1. Change in dissolved oxygen content (mg/L) and decrease in the rate (%) of dissolved oxygen according to flooding condition and duration.

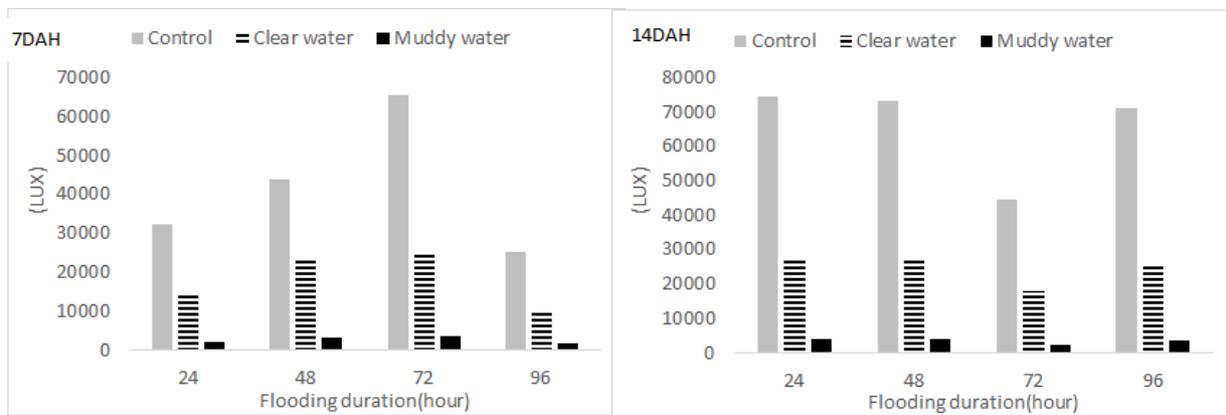


Fig. 2. Difference in solar radiation quantity according to flooding condition and duration.

분석방법 및 통계처리

엽록소의 측정은 SPAD (SPAD-502, Spectrum technologies, USA)를 이용하여 비파괴적 방법으로 분석하였으며, 최대양자수율(Fv/Fm)의 측정은 엽록소형광측정기(Os5p, Opti-sciences, USA)를 이용하여 처리전과 침수처리 직후에 측정하였다. 또한 백미 및 현미 외관품질은 Rice Quality Analyzer (RN300 model, Kett, Japan)을 이용하여 측정하였으며, 천립중·등숙률 등의 수량구성요소는 농촌진흥청 농업과학기술 연구조사 분석기준법(RDA, 2012)에 따라서 조사하였다.

모든 실험은 3회 이상 반복하여 결과 값을 평균값으로 나타냈으며, 각 실험결과의 통계처리는 R 통계프로그램 (Version 3.2.2)를 이용하여 분산분석(ANOVA) 후 Duncan's multiple range test로 $p < 0.05$ 수준에서 유의적 차이를 검정하였다.

결과 및 고찰

등숙 시기별 침관수 피해에 따른 수량 및 품질 변화

등숙시기 및 침관수 조건별 피해에 따른 수량구성요소 및 수량지수의 변화 정도는 Table 1에 나타낸 바와 같다. 처리 전 수수 및 수당립수는 통계적으로 유의한 차이가 없었으며, 등숙기 침관수 피해 시 등숙률 및 천립중의 감소가 수량지수 감소에 큰 영향을 줄 것으로 생각되었는데, 현미 천립중의 경우에는 출수 후 14일 호숙기 처리에서 탁수 및 침수기간이 길어질수록 다소 감소하는 경향을 보였지만 통계적으로 유의한 차이는 보이지 않았다. 등숙률의 경우 등숙시기별로는 출수 후 7일 유숙기 처리에서 감소 정도가 컸으며, 침수조건별로는 탁수이면서 수중에 완전히 잠긴 관수 조건, 탁수이면서 지엽이 공기중에 노출된 조건, 청수이면서 관수인 조건, 청수이면서 지엽이 공기중에 노출된 침관수조건 순으로 피해가 심하였는데, 청수이면서 관수인 조건 대비 탁수이면서 지엽이 공기중에 노출된 조건의 등숙률 감소가 더 컸다. 이러한 결과로 미루어볼 때 등숙률의 감소는 관수조건에서 무기호흡에 의한 호흡기질 소모의 영향 보다 탁수조건에서 광의 차단에 의한 광합성 저해의 영향이 더 컸을 것으로 생각된다.

침관수 조건별 피해에 따른 백미 품질변화는 Fig. 3에 나타낸 바와 같다. 백미 완전미율의 경우는 출수 후 14일에 완전미율 감소 정도가 컸는데, 완전미율 감소에는 쌀라기와 분상질립의 증가가 큰 영향을 미쳤다. 쌀라기의 경우 출수 후 7일 및 출수 후 14일 처리에서 모두 크게 증가하였으며, 등숙 시기별 차이는 크게 나타나지 않았으나, 분상질립의 증가가 출수 후 14일에 출수 후 7일 대비 크게 증가하였

음을 확인 할 수 있었다. 결국 출수 후 14일에 완전미율의 감소가 출수 후 7일 대비 컸던 것은 호숙기인 출수기 14일에 분상질립이 크게 증가하였기 때문으로 생각되었으며, 분상질립의 증가는 등숙기 침관수 시 동화산물의 공급의 저하 및 전분을 분해하는 α -amylase 활성의 증가로 인하여 전분합성이 원활하게 이루어지지 않았기 때문으로 생각된다(Hakata *et al.*, 2012). 출수시기별 이러한 결과는 출수 후 7일에 침관수에 의한 피해가 적었던 것이 아니라, 출수 후 7일 처리의 경우에는 등숙이 거의 진행되지 않은 상태에서 피해를 받은 낱알이 발육정지립이 되어, 도정 과정 중에 미숙립으로 제거되었기 때문으로 생각된다. 벼 품질에 주요한 지표인 단백질 함량을 분석한 결과(Fig. 4) 침관수조건별로 0.2~1.3%까지 증가하였는데, 이는 단백질합성이 증가한 것이 아닌 침관수 조건에서의 광합성저해 및 호흡기질의 소모에 따른 탄소대사 저해로 인한 전분합성이 감소되어 상대적으로 단백질 함량이 증가한 것으로 생각된다(Bhullar & Jenner, 1985; Diane & Maysaya, 2014).

등숙 시기별 침관수 피해에 따른 생리적 특성 변화

침관수 처리 전, 후의 엽록소 형광 반응을 이용하여 광합성효율을 나타내는 최대양자수율(Fv/Fm)값은 Fig. 5에 나타낸 바와 같다. 침관수 처리 전·후 최대양자수율은 벼의 잎에서 스트레스를 받지 않은 상태를 나타내는 정상 범위 수치인 0.82에서 0.84사이의 값을(Suriyan *et al.*, 2010; Yan *et al.*, 2010) 나타내어 처리 전 후의 차이를 나타내지 못했는데, 이는 등숙기 4일(96시간)정도의 침관수 처리가 벼의 식물체에는 큰 영향을 주지 못한 것으로 사료된다. 따라서 침관수 피해는 동화산물의 생산능력 자체에는 큰 영향을 주지 못하였으며, 바로 회복할 수 있는 상태였으나, 침수기간동안의 차광, 수중에서의 기체 확산속도 저하, 무기호흡에 의한 호흡기질 소모 등의 영향으로 동화산물의 생산 및 전류, 전분으로의 합성이 저해 되어 등숙에 영향을 준 것으로 사료된다.

침관수 시 자포니카 벼의 경우 회피기작에 의하여 간장신장 반응이 일어난다고 알려져 있는데(Wim *et al.*, 2003), 등숙시기 및 침수조건별 간장신장 정도는 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 침수처리에 따라 침관수 후 약 1 cm에서 3 cm정도 간장이 증가하는 경향을 보였다. 간장신장 정도와 등숙률 및 완전미율 간의 관계를 분석한 결과(Fig. 7) 등숙률의 경우 간장신장 정도에 따라서 출수 후 7일 처리가 출수 후 14일 처리 대비 등숙률 감소가 컸으나, 완전미율의 경우에는 출수 후 14일 처리가 출수 후 7일 처리 대비 간장신장 정도에 따른 완전미율 감소정도가 증가하는 경향을 나타내

Table 1. Yield components and yield index of rice plants affected by flooding treatment during the ripening stage.

Treatment stage (DAH)	Flooding condition	Flooding duration (hour)	No. of grain per panicle	Percentage of ripened grain (%)	1000-grain weight (g)	Yield index
7	Clear water	24	84	86 ^{ab}	20.9	99
		48	81	77 ^{cdefgh}	21.0	94
		72	89	68 ^{ijkl}	20.7	82
		96	86	64 ^{klm}	20.6	74
	Flag leaf exposure	24	86	73 ^{defghij}	21.3	83
		48	87	65 ^{ijklm}	21.4	71
		72	87	48 ⁿ	21.0	57
		96	88	47 ⁿ	20.6	50
	Overhead flooding	24	80	83 ^{abc}	21.0	91
		48	89	75 ^{cdefghi}	21.1	83
		72	90	60 ^{lm}	20.7	66
		96	89	58 ^m	20.4	62
	Muddy water	24	84	66 ^{ijklm}	21.2	77
		48	82	46 ^{no}	21.2	52
		72	78	39 ^{op}	21.3	42
		96	83	35 ^p	20.9	36
Mean			85	60	21.0	68
14	Clear water	24	86	88 ^a	20.8	98
		48	83	83 ^{abc}	20.7	93
		72	85	81 ^{abcd}	20.6	88
		96	86	82 ^{abcd}	20.3	89
	Flag leaf exposure	24	83	80 ^{abcde}	20.8	90
		48	90	79 ^{bcdefg}	20.7	87
		72	86	76 ^{cdefghi}	20.6	88
		96	84	70 ^{ghijkl}	20.3	74
	Overhead flooding	24	80	82 ^{abcd}	20.7	94
		48	87	79 ^{bcdefg}	20.6	83
		72	84	75 ^{cdefghi}	20.6	85
		96	88	71 ^{efghijk}	20.4	75
	Muddy water	24	85	79 ^{abcdef}	20.6	86
		48	86	71 ^{fghijk}	20.8	83
		72	85	69 ^{hijk}	20.3	78
		96	87	65 ^{ijklm}	20.2	75
Mean			86	77	20.6	86
Control (no treatment)			84 ^{ns}	87 ^{ab}	20.9 ^{ns}	100

† Mean separation within columns by Duncan's multiple range test at 5% level

† Ns : non significant

었다. 이를 통해 등숙기 수요부(sink)인 이삭에 공급되어야 할 동화산물이 줄기의 신장에 소모되어 등숙률 및 완전미

율이 감소되는 것으로 사료되며, 처리 시기별 간장신장 정도와 등숙률 및 완전미율 간의 관계의 차이는 등숙단계에

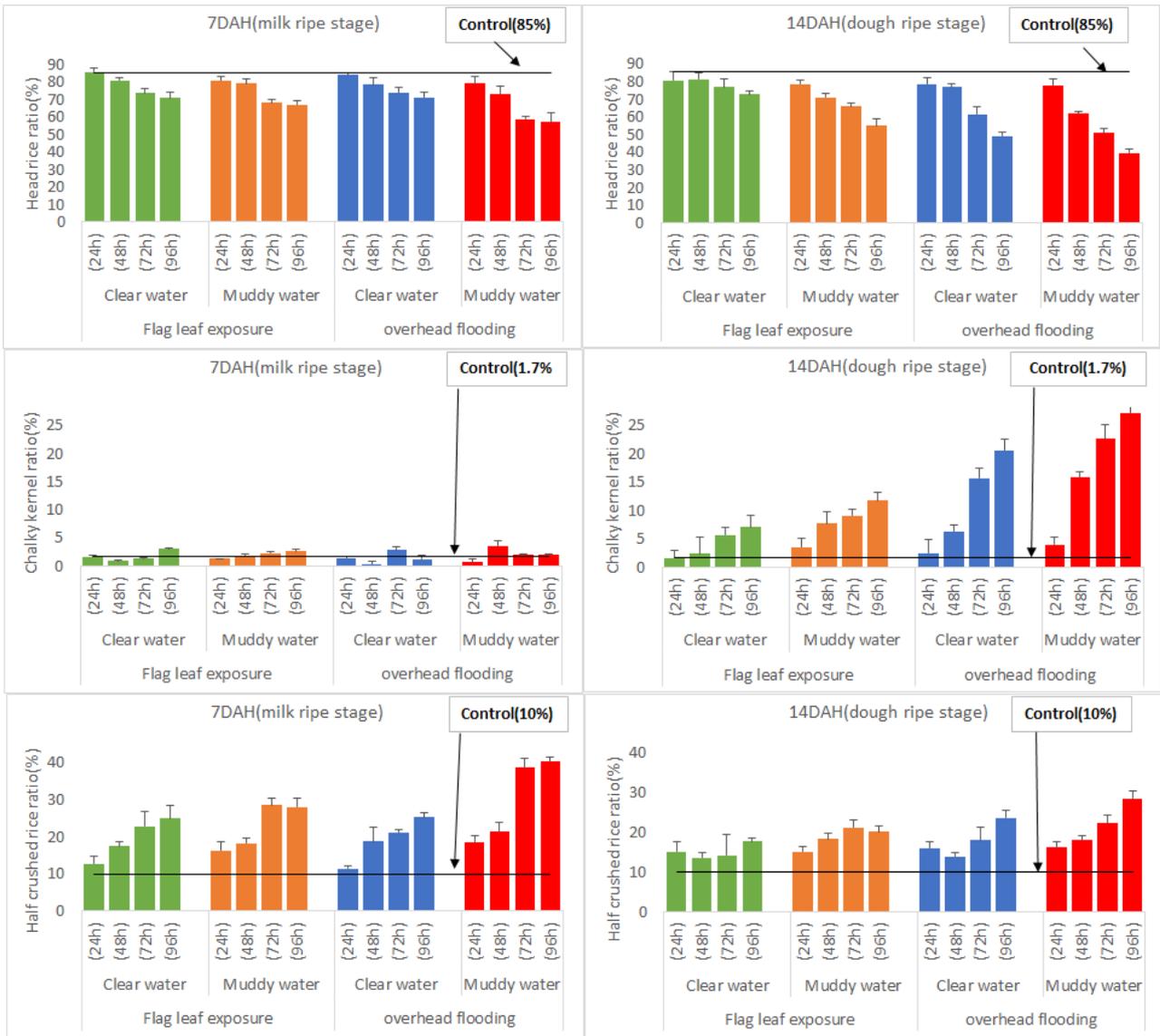


Fig. 3. Differences in the quality of white rice following flooding treatment during the ripening period.

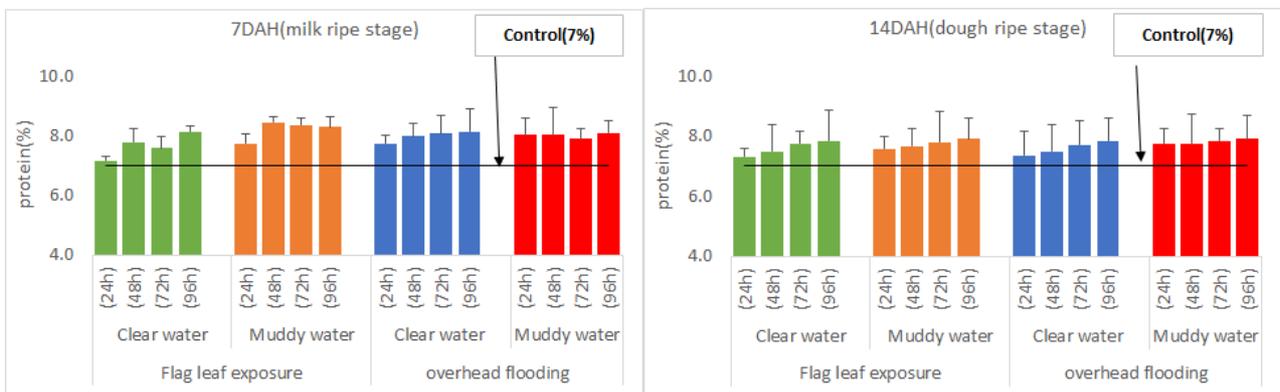


Fig. 4. Differences in protein content of brown rice affected by flooding treatment during the ripening period.

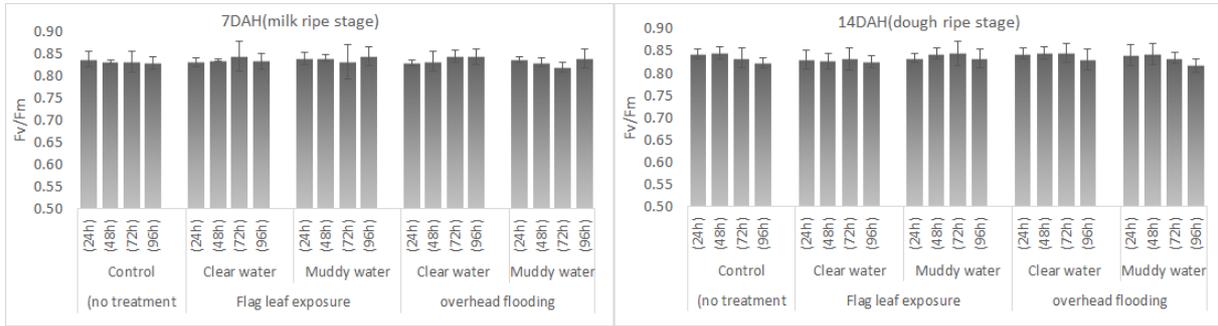


Fig. 5. Differences in optimal quantum yield affected by flooding treatment during the ripening period.

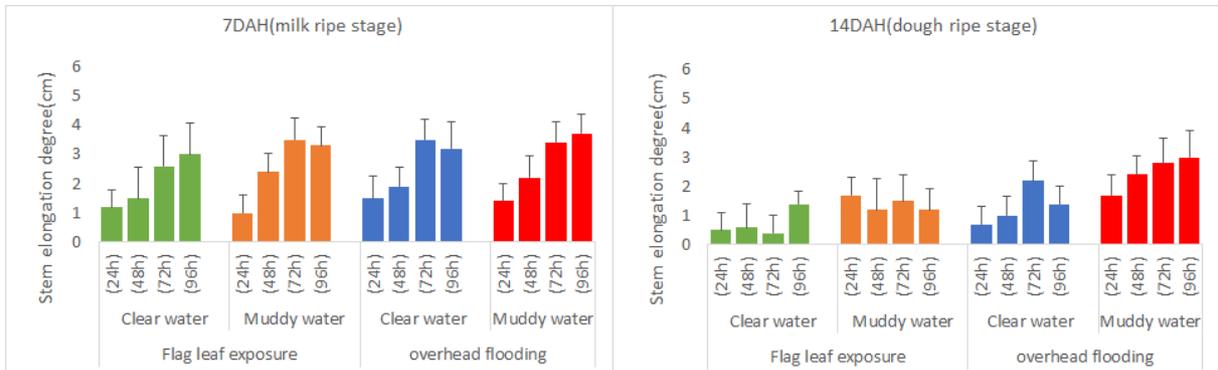


Fig. 6. Change in the degree of stem elongation affected by flooding treatment during the ripening period.

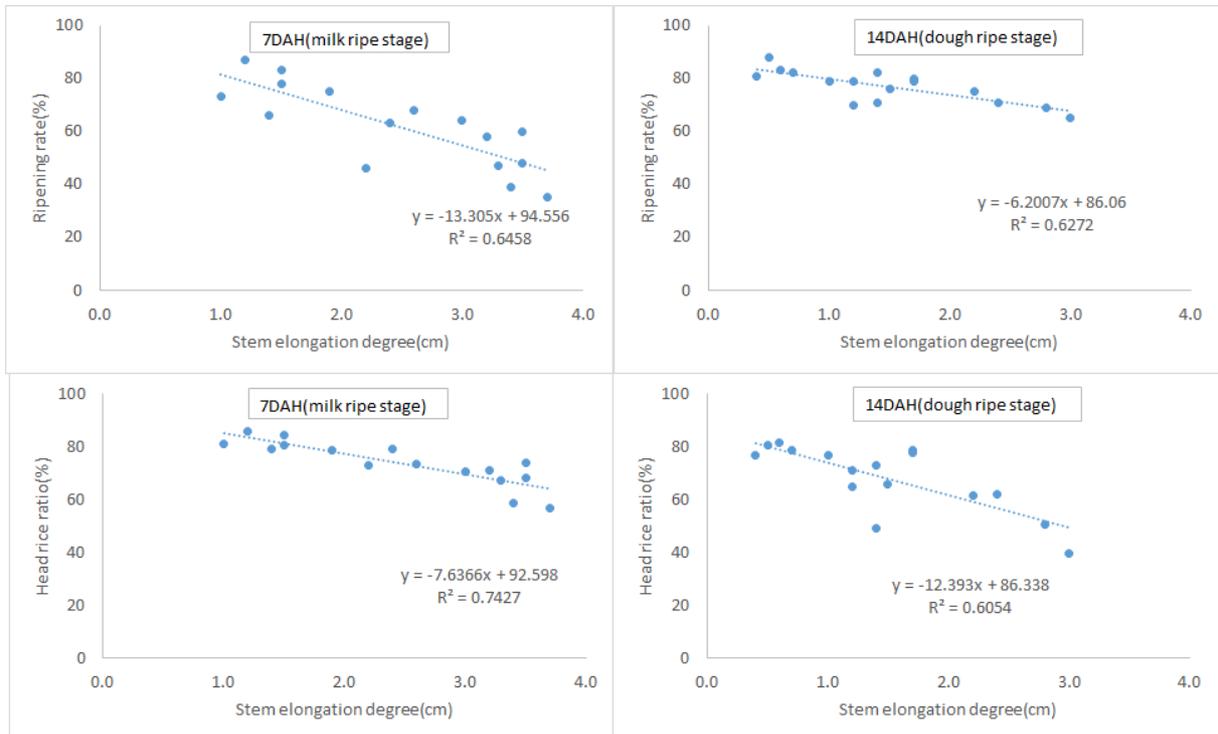


Fig. 7. Relationship of the degree of stem elongation with ripening rate and the head rice ratio.

따른 차이에 의한 것으로 사료된다.

침관수 처리 회복 후 등숙기간 동안의 엽 노화 정도는 Fig. 8과 Fig. 9에 나타난 바와 같이 침관수 처리에 따른 피해가 심한 처리구 일수록 엽색이 무처리 대비 수확기 까지 푸른 상태를 유지하였다. 이는 침관수 피해 시 피해를 입은 이삭의 낱알이 발육이 정지 되어 동화산물의 수요부(sink)가 제한되었기 때문으로 보이며, 출수 후 50일의 엽색과 등숙률과의 관계를 분석 한 결과(Fig. 10), 등숙률이 감소할

수록 엽색이 높게 유지되는 결과를 보였다. 결국 등숙기 침관수 피해시 동화산물 생산, 전류 및 전분합성 저해 정도에 따라서 수량 및 품질 감소가 예상되며, 침관수 저항성 품종 및 피해경감 재배기술 개발을 위해서는 침관수 처리기간 동안의 동화산물 생산 및 전류, 전분합성 각 단계별 피해정도 및 원인 구명을 위한 좀 더 면밀한 분석 및 검토가 필요할 것으로 사료된다.

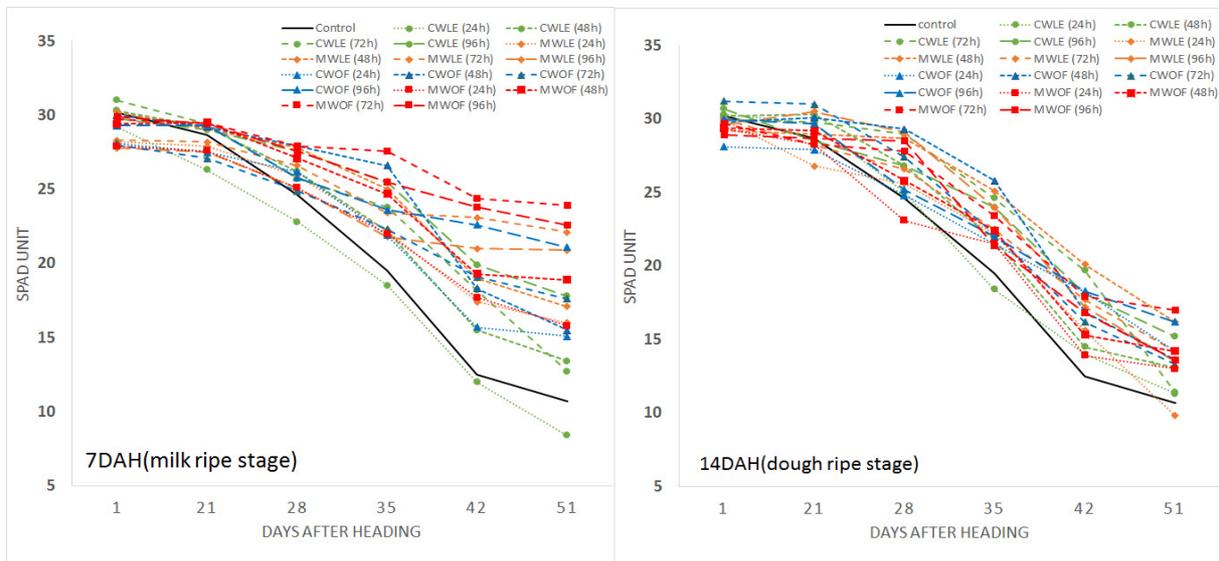


Fig. 8. Changes of leaf senescence affected by flooding treatment during the ripening period. CWLE: clear water and flag leaf exposure, MWLE: muddy water and flag leaf exposure, CWOFF: clear water and overhead flooding, and MWOFF: muddy water and overhead flooding.



Fig. 9. Difference in leaf senescence at 51 days after heading between the muddy water with 4-days (96 hour) overhead flooding treatment and the control.

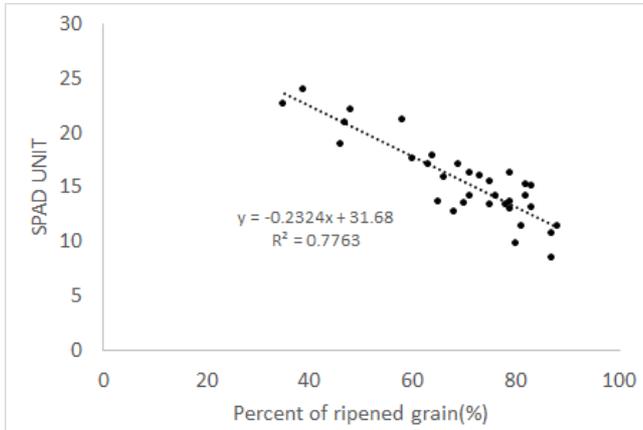


Fig. 10. Relationship between ripening rate (%) and spad value (chlorophyll content) at 50 days after heading.

적 요

벼 등숙시기 및 침관수 조건별 피해에 따른 생육 및 수량, 품질특성에 미치는 영향을 분석한 결과는 다음과 같다.

1. 등숙기 침관수 피해에 따른 수량감소의 요인중 가장 영향이 컸던 요인은 등숙률 이었고, 등숙률은 호숙기(출수 후 14일)대비 유숙기(출수 후 7일)의 감소정도가 컸으며, 침수 조건별로는 탁수이면서 수중에 완전히 잠긴 관수 조건에서 침수기간이 길어질수록 피해가 심하였다.
2. 완전미율은 유숙기(출수 후 7일) 대비 호숙기(출수 후 14일)처리에서 감소정도가 컸으며, 이는 등숙 시기별 전분 합성 단계의 차이에 의한 것으로 생각된다.
3. 침관수 처리 전, 후의 광합성효율을 나타내는 최대양자수율(Fv/Fm)값은 침관수 처리에 따른 큰 변화가 없었으며, 이를 통해 등숙기에 4일 정도의 침관수 처리는 벼의 본체의 동화산물 생산능력 자체에는 큰 영향을 주지 못하였을 것으로 사료된다.
4. 자포니카 벼의 침관수 회피기작에 따라 침수 처리 시 처리별로 간장신장 반응을 보였으며, 이로 인한 이삭으로의 동화산물 공급저하는 출수 후 7일에는 등숙률의 감소, 출수 후 14일에는 완전미율 감소에 더 큰 영향을 주었을 것으로 생각된다.
5. 침관수 피해가 심한 처리구 일수록 수확기 엽색이 무처리 대비 푸른 상태를 유지하였는데, 이는 침관수 피해에 따른 이삭 낱알의 발육정지로 동화산물의 수요부(sink)가 제한되었기 때문으로 보인다.

사 사

본 논문은 농촌진흥청 연구사업(세부과제명: 벼 등숙기 강우로 인한 침수시 피해양상 및 피해기준 표준화 연구, 세부과제번호: PJ011364032017)의 지원에 의해 이루어진 결과의 일부이며 연구사업 수행에 협조해 주신 모든 분들께 감사드립니다.

인용문헌(REFERENCES)

- Bhullar, S. S. and C.F., Jenner. 1985. Differential responses to high temperatures of starch and nitrogen accumulation in the grain of four cultivars of wheat. *Australian Journal of Plant Physiology*. 12 : 363-375.
- Choi J.-S., D.-J. Ann, C.-D. Choi, S.-P. Lee, and B.-S. Choi. 2000. Phase of Overhead Flooding Damage during Maturation of rice. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*. 2(4) : 148-155.
- Cholmer T. D. and Pedersen O. 2008. Underwater photosynthesis and respiration in leaves of submerged wetland plants; gas films improve CO₂ and O₂ exchange. *New phytologist*. 188 : 918-926.
- Das A., Nanda B., R. K. Sarkar, and S. B. Lodh. 2000. Effect of complete submergence on the activity of starch phosphorylase enzyme in rice leaves. *J.Plant Biochemistry & Biotechnology*. 9 : 41-43.
- Panda D. and R. K. Sarkar. 2015. Mechanism associated with nonstructural carbohydrate accumulation in submergence tolerant rice(*Oryza sativa* L.) cultivars. *Journal of Plant Interactions*. 9(1) : 62-68.
- Beckles D. M. and M. Thitisakasukul. 2014. How environmental stress affects starch composition and functionality in cereal endosperm. *Journal of Starch/Staerke*. 66 : 55-71.
- Hakata M., K. M. Miyashita, T. Yamaguchi, M. Kojima, H. Sakakibara, T. Mitsui, and H. Yamakawa. 2012. Suppression of α -amylase gene improves quality of rice grain ripened under high temperature. *Plant Biotechnol J*. 10 : 1110-1117.
- Kotak S., J. Larkindale, U. Lee, von P. Koskull-Dörfling, E. Vierling, and K.-D. Scharf. 2007. Complexity of the heat stress response in plants. *Current Opinion in Plant Biology*. 10 : 310-316.
- Ram P. C., B. B. Singh, A. K. Singh, P. Ram, P. N. Sungh, H. P. Singh, I. Boamfa, F. Harren, E. Santosa, M. B. Jackson, T. L. Setter, J. Reuss, L. J. Wade, V. P. Singh, and R. K. Singh. 2002. Submergence tolerance in rainfed lowland rice: Physiological basis and prospects for cultivar improvement through marker-aided breeding. *Field Crops Research*. 76 : 131-152.
- Cheng R., Z. Liu, W. Xiao, Q. Guo, Y. Wang, N. Wang, and Y. Wang. 2015. Leaf gas exchange, chlorophyll fluorescence,

- non-structural carbohydrate content and growth responses of *Distylium chinense* during complete submergence and subaerial re-emergence. *Aquatic Botany*. 124 : 70-77.
- Nishiuchi S., T. Yamauchi, H. Takahashi, L. Kotula, and M. Nakazono. 2012. Mechanisms for coping with submergence and waterlogging in rice. *Rice a Springer Open Journal*. 5 : 2-16.
- Cha-um S., S. Yooyongwech, and K. Supaibulwatana. 2010. Water deficit stress in the reproductive stage of four indica rice(*oryza sativa* L.) genotypes. *Pak. J. Bot.* 42 : 387-398.
- Voesenek, L. and R. Sasidharan. 2013. Ethylene and oxygen signalling-drive plant survival during flooding. *Plant Biology*. 15 : 426-435.
- Vriezen W. H., Z. Zhou, and D. van der Straeten. 2003. Regulation of submergence-induced enhanced shoot elongation in *oryza sativa* L. *Annals of Botany*. 91 : 263-270.
- Yin Y., S. Li, W. Liao, Q. Lu, X. Wen, and C. Lu. 2010. Photosystem photochemistry, photoinhibition, and the xanthophyll cycle in heat-stressed rice leaves. *Journal of Plant Physiology*. 167 : 959-966.