

영화수 조절을 통한 벼 등숙기 고온내성 향상 연구

김준환 · 손지영 · 최경진 · 윤영환 · 이충근[†]

농촌진흥청 국립식량과학원 경기도 수원시 권선구 수인로125

Study on Improving High-temperature Tolerance for Grain Filling Through Adjusting Sink Size

Junhwan Kim, Jiyoung Shon, Younghwan Yoon, Kyung-Jin Choi, and Chung-Kuen Lee[†]

National Institute of Crop Science, RDA, Suwon 441-857, Korea

ABSTRACT The aim of this study was to test hypothesis that low sink size could mitigate deterioration of grain filling characteristics under high grain filling temperature. To achieve this aim, we selected Donganbyeo as a tolerant and Ilpumbyeo as susceptible variety to high temperature during grain filling period through screening 6 rice varieties. Then their spikelets number and the ratio of superior and inferior spikelet were compared. Grain weight and head rice ratio of Ilpumbyeo decreased significantly in high temperature. Ilpumbyeo had more spikelets than Donganbyeo. However, there was no significant difference between two varieties in the ratio of superior and inferior spikelets. So we tried to investigate the varietal difference of grain filling characteristics with removing inferior spikelets. Removing inferior spikelet in both of varieties could recover grain weight but not improve head rice ratio under high temperature. These results showed that sink/source ratio affected grain weight but didn't affect head rice ratio. Therefore, new approach was required to improve head rice ratio beyond sink/source ratio under high temperature.

Keywords : grain filling, high temperature, sink, Ilpumbyeo, Donganbyeo

최근 기후변화에 대비한 벼의 생산성 평가 연구에 따르면 CO₂증가에 따른 생산성 증가요인에도 불구하고 고온에 의한 수량감소의 폭이 더 커서 전반적으로 수량이 감소할 가능성이 높다고 한다(Shin & Lee, 1995; Chung *et al.*, 2006). 따라서, 국가 식량안보 측면에서 주곡작물인 벼의 생산안정을 위해 고온에 대한 취약성 연구가 필요하다.

고온과 관련된 연구의 상당수는 등숙기 온도반응에 집중되어 있는데 이는 벼 이삭이 다른 기관보다 고온에 더 민감하게 반응하기 때문이다(Sato & Inaba, 1973; Morita *et al.*, 2004; Kim *et al.*, 2011). 일반적으로 벼의 등숙 적온은 21~22°C로 알려져 있으며(Murata, 1964; Kim, 1983; Lee *et al.*, 1995) 그 이상의 온도에서는 천립중이 감소되기 시작한다. 특히 유숙기까지의 평균온도가 26°C를 초과할 경우 천립중이 유의하게 감소하였다고 한다(Tashiro & Wardlaw, 1991). 또한 품질 측면에서 27°C 이상의 고온에서는 불완전미가 급격하게 증가한다고 한다(Wakamatus *et al.*, 2007). 따라서 27°C 이상에서는 양적, 질적인 면에서 종실에 문제가 발생하는 것은 명백해 보인다.

이러한 종실중 감소원인은 등숙속도의 증가가 등숙기간의 단축을 보상하지 못해 결과적으로 천립중이 감소하였기 때문이다(Nagato & Ebata, 1965; Tahshiro & Wardlaw, 1989). 이와 같은 사실은 source와 sink의 관점에서 두 가지 측면의 고찰이 가능한데, 첫째, 등숙기간을 결정하는 요인이 sink(이삭)인지 아니면 source(엽신)인지에 대한 의문이다. 둘째, 등숙속도의 증가가 등숙기간의 단축을 보상해주지 못한다면 이는 등숙기간동안 sink(이삭)의 동화산물 축적속도를 source(엽신) 쪽에서 충족시켜주지 못했음을 의미하기 때문에 이 문제는 결국 sink와 source의 균형과 관련된 문제라고 볼 수 있다. Kim *et al.*(2010)은 고온에 의한 등숙기간 단축은 이삭자체의 등숙속도가 빨라졌기 때문이지 엽신의 조기 노화에 따른 동화산물 생산중단이 원인은 아니라고 하였다. 즉 고온에서는 동화산물의 공급기간 자체가 제한요인은 아니라는 것이다. 또한 등숙속도의 측면에서 볼 때 Kobata &

[†]Corresponding author: (Phone) +82-31-290-6717 (E-mail) leegaka@korea.kr

<Received 4 November, 2012; Revised 4 April, 2013; Accepted 10 April, 2013>

Uemuki(2004)는 수광태세를 개선시켜 동화산물의 공급속도가 충분해지면 고온에서도 적은 수준으로 회복이 가능하다고 보고하였다. 그러므로 고온 발생시 이삭무게의 감소는 이삭의 등숙기간 단축과 더불어 sink/source의 불균형에 따른 등숙기간 중 source의 공급능력 부족이 문제라고 할 수 있다.

따라서, 고온에 적응하는 품종들의 경우 고온에서도 등숙기간 단축이 적거나 sink의 수가 적어 sink/source의 비율이 낮은 형태의 특징을 보일 것이라고 가정할 수 있다. 이를 위해 본 연구에서는 1) 우리나라의 주요 벼 품종들에 대하여 고온에서의 등숙특성을 평가하여 고온에 강한 품종과 약한 품종을 선발 하였으며, 이 들 품종의 2) 형태적 차이와 3) sink/source 조절에 따른 등숙 차이를 검토하여 고온에서의 미질저하 원인을 구명하고자 하였다.

재료 및 방법

본 연구과제는 2008년과 2009년 2년간 수행되었으며 실험에 사용된 모든 품종들은 1/5000a wagner pot에서 재배하였으며 고온처리에 따른 발생할 수 있는 불임률을 낮추기 위해 출수 후 4~5일까지 실외에서 관리한 후 온도 처리를 위해 인공기상동의 정밀유리실로 이동하였다. 정밀 유리실의 온도는 대조구인 22°C(최고26°C/최저18°C)와 처리구인 27°C(최고31°C/최저23°C)로 조절 되었으며 2년간 처리 온도는 동일하였다. 시험에 사용한 품종은 1년차에는 동안벼, 일품벼, 주남벼, 남평벼, 일미벼, 추청벼, 동진1호였으며 2년차에는 1년차 결과를 바탕으로 동안벼와 일품벼를 이용하였다. sink/source 조절을 위해 출수 종료 후 약세영화를 제거하였는데, 본 연구의 약세영화는 Morita *et al.*(2002)의 영화착생분류에 따르면 3차에 해당한다.

조사항목은 현미천립중과 현미완전미율, 등숙율이었다. 현미완전미율은 Kette사의 RN-500으로 판정하였다. 현미 외관품위 판단을 위해 등숙율은 일반적인 물을 사용하는 비중선을 이용할 수 없었다. 따라서 우선 제현을 하여 얻은 현미를 1.6 mm체로 걸러 통과되지 않은 것들만을 등숙 종자로 판단하였다. 도정전의 정조수로 체를 통과하지 않은 현미수를 나누어 등숙율을 구하였다. 통계처리는 통계패키지 R.2.12.2를 이용하였으며 처리간 비교는 모두 t-test로 하였다.

결과 및 고찰

등숙기 고온에 강한 품종의 선발과 고온이 등숙형질에 미치는 영향

고온등숙에 강한 품종과 약한 품종을 선발하기 위해 예비

실험을 수행한 결과 강한 품종에는 동안벼, 약한품종에는 일품벼가 선정되었다(예비시험 전체결과는 제시하지 않음). 예비 시험시 시료량이 적었기 때문에 결과의 정확도를 높이기 위해 재시험을 수행하였으며 그 결과는 예비시험과 같이 강한품종에는 동안벼가 약한 품종에는 일품벼가 선정되었다(Fig. 1).

동안벼는 다른 6개 품종들과 비교하였을 때 완전미율의 감소가 가장 적었으며 천립중의 감소 또한 가장 적어 등숙기 고온에 적응성이 있는 것으로 생각된다. 고온에 가장 취약한 품종은 일품벼였으며 천립중과 완전미율 모두 고온에서 크게 감소하였다. 전반적으로 모든 품종에서 천립중보다는 현미완전미율의 감소폭이 큰 것으로 관찰되었다. 6개 품종의 고온에 따른 현미완전미 감소는 평균 16.4%이었으나 천립중은 3.5%로 상대적으로 적었다. 따라서 현재 재배되는 품종들의 경우 고온에 의해 수량이 감소되는 것보다 미질의 악화가 더 큰 문제일 것으로 생각된다. 실례로 일본의 과거자료 분석에 따르면 고온 발생시에는 수량 감소보다 품질의 저하가 더 컸다고 한다(Morita, 2008). 따라서 등숙기에 고온에 노출될 경우 현재 재배되고 있는 우리나라 일반계 품종들은 외관품질 안정성이 가장 취약할 것으로 생각된다. 현재 국내 RPC의 대부분은 색채선별기를 이용하여 완전미를 생산하기 때문에 고온에 따른 완저미 수량이 현저히 감소한 해에는 농민과 RPC간에 채산성 문제로 인한 분쟁이 발생할 가능성이 있다. 따라서 고온내성 품종 육성시 선발의 기준을 외관품위를 우선으로 하는 것이 필요할 것으로 생각된다.



Fig. 1. Decreasing rate of grain weight and head rice at high temperature grain filling condition. Solid lines present average decreasing rate of grain weight and head rice of six varieties excluding Donganbyeo.

등숙기 고온에 강한 품종과 약한 품종들간의 비교

고온에 강한 품종(동안벼)과 약한 품종(일품벼)이 두 품종에 대하여 고온에 따른 등숙형질의 변화를 2년간 조사하여 이들의 특성을 평가하였다. 고온에 의한 등숙형질들의 변화는 일품벼의 경우 연차에 관계없이 모두 유의하게 감소하였으며 현미완전미율>천립중>등숙율의 순서로 감소폭이 높았으며, 동안벼는 유의한 차이가 발생하지 않았다. 동안벼와 일품벼를 비교하면 현미완전미율에서 품종간 차이가 가장 두드러졌으며 이는 품종 선발시험의 결과와 일치하였다.

이러한 품종간 차이를 분석하기 위해 일품벼와 동안벼의 이삭당 영화수와 그 착생 비율을 비교하였다(Table 1). 그 결과 일품벼가 동안벼보다 이삭당 영화수가 더 많았으나 강세 및 약세영화 비율에서는 차이가 나지 않았다. 따라서 일

Table 1. Number and ratio of superior and inferior spikelets in Ilpumbyeo and Donganbyeo.

Cultivar	Spikelets per panicle		
	Superior	Inferior	Total
Ilpumbyeo	52 (67)	27 (33)	77
Donganbyeo	39 (66)	21 (34)	60

Value in parentheses indicate the percentage of spikelet.

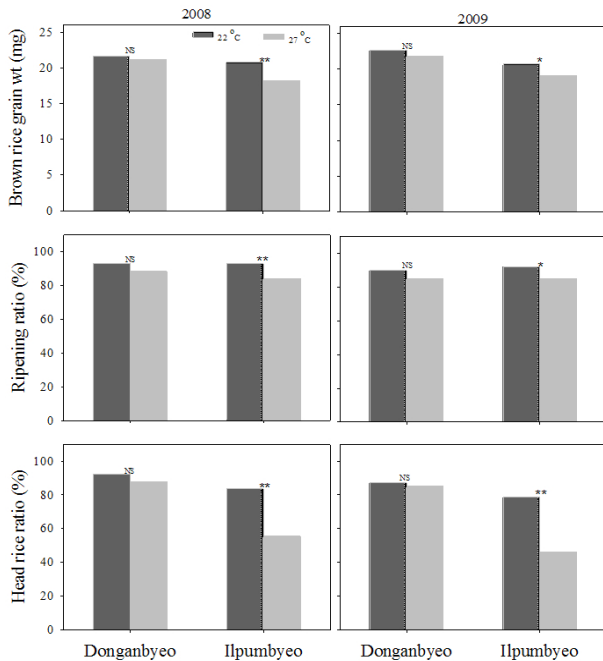


Fig. 2. Comparison of grain filling characteristics between 22°C and 27°C of Donganbyeo and Ilpumbyeo in 2008 (left column) and 2009 (right column). Comparing 22°C and 27°C by t-test, NS: Non significant, *: 5% significant level, **: 1% significant level.

품벼가 동안벼보다 고온등숙에 불리한 원인 중 하나는 많은 영화수로 인해 총 동화산물 공급이 수요량을 따라가지 못한 것으로 생각되며 착생비율에 따른 영화간 경합은 주요한 원인이 아닌 것으로 추측되었다.

등숙기 고온에 대한 sink 조절 효과

총영화수의 품종간 차이가 고온에서의 반응 차이를 결정하는 주요 원인인가를 파악하기 위해 약세 영화를 제거하여 sink/source의 비율을 조절 하였다. 약세 영화제거 처리는 sink인 영화수를 줄여 동화산물 요구도를 줄임과 동시에 영화간 동화산물 경합을 경감시킨 것이다.

동안벼의 경우 정상개체에서도 고온에서 큰 차이를 보이지 않았기 때문에 약세 영화 제거 처리에서도 역시 고온에 의한 차이는 없었다(Fig. 3).

반면에 일품벼는 등숙형질에 따라 약세 영화 제거 처리의 효과가 다르게 나타났다. 현미천립중은 연차간 차이가 있었는데 2008년 영화 제거처리는 온도간 차이를 극복하지 못하였으나 2009년에는 차이가 유의하게 줄어들었다. 이는 2009년의 일사량이 더 높았기 때문인 것으로 추정된다(Fig. 4).

이 결과는 충분한 동화산물의 공급이 고온에 의한 천립중

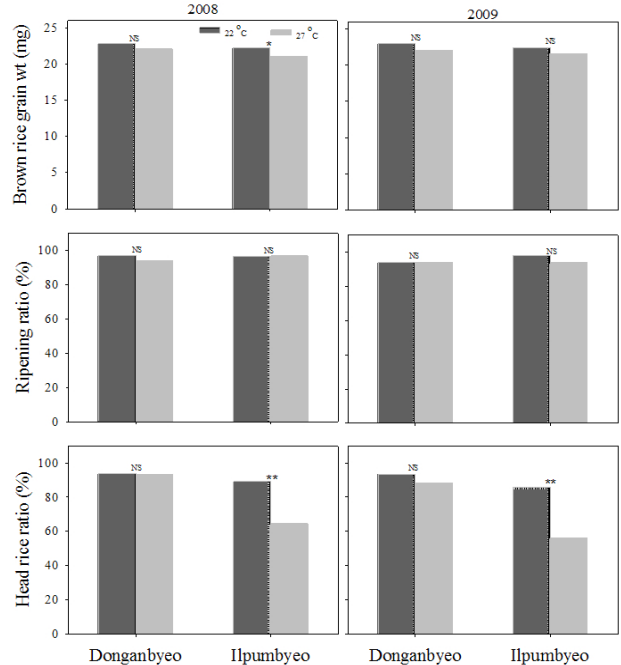


Fig. 3. Comparison of grain filling characteristics between 22°C and 27°C of inferior spikelets removed Donganbyeo and Ilpumbyeo in 2008 (left column) and 2009 (right column). Comparing 22°C and 27°C by t-test, NS: Non significant, *: 5% significant level, **: 1% significant level.

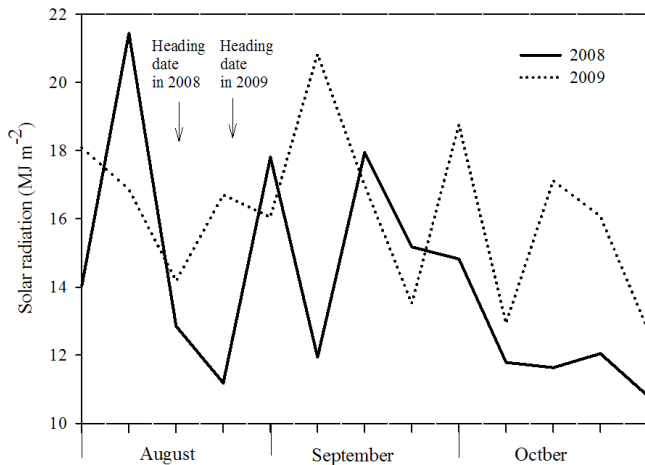


Fig. 4. 5-day mean solar radiation during grain filling duration in 2008 and 2009.

감소를 보상해 줄 수도 있음을 의미한다. Kobata *et al.* (2004)의 연구에서도 포장조건에서 발생한 고온의 경우 수광태세를 조절함으로써 수량감소를 회복할 수 있다고 하였다. 따라서 sink/source 균형을 조정하면 고온에 따른 효과를 보상할 수도 있다고 생각된다. 그러나 현미완전미율의 경우 일품벼에서는 약세 영화를 제거하더라도 시험이 진행된 2년간 현미완전미율이 회복되는 것을 관찰하지 못하였다. 즉 천립중은 sink/source의 균형 문제일 수도 있으나 외관품위는 이와는 다른 문제일 가능성이 높다고 생각된다. 또한 Morita *et al.* (2004)의 연구에서는 주간(昼間)에 벼의 이삭부위에만 고온을 노출 시킨 결과 이삭 건물중은 크게 감소하지 않았으나 현미완전미율은 유의하게 감소하였다고 하였다. 이는 완전미율의 변동은 엽신과 엽초에서 공급되는 탄수화물의 부족으로 발생하는 문제가 아니라 고온에 노출된 이삭자체의 문제임을 시사한다. 따라서 선행 연구 결과와 본 실험 결과를 바탕으로 볼 때 평균온도 27°C 이상의 등숙기 고온에서 sink/source간 균형을 조절하여 천립중을 일정부분 회복이 가능한 반면 현미완전미율은 회복이 불가능한 것으로 판단되었다. 여기에서 고온에서의 현미완전미율의 저하 원인은 동화산물의 전류량 부족이 아니라 배유의 전분대사 이상으로 생각된다. 이와 관련하여 Yamkawa & Hakata(2010)에 따르면 고온에 의해 전분축적과 관련된 유전자발현은 down-regulation되는 반면 전분분해와 관련된 것들은 up-regulation되었다고 한다. 따라서 고온등숙과 관련해서는 형태적인 측면보다는 생화학적측면에서 연구를 좀더 집중할 필요가 있다고 생각된다.

마지막으로 등숙율을 살펴보면 약세 영화 제거처리에서 두 품종 모두 고온에 의해 감소하지 않았다는 점이다. 이는

정상개체를 고온에 노출하였을 때 발생한 등숙율 변화는 약세 영화의 변동에 따른 것을 의미한다. 일반적으로 이삭하위에 있는 영화가 등숙에 불리한데 이는 sink strength측면에서 강세영화가 약세영화보다 강하며 이는 영화내 호르몬의 역할이 크다고 한다(Yang *et al.* 2003, Yang *et al.* 2006). 정상개체는 고온처리시 등숙속도 증가에 따라 영화간 경합이 더 증가하여 약세 영화가 정상적으로 동화산물을 공급받지 못해 일정 무게 이상을 채우지 못하는 것으로 생각된다.

고온에 따른 영화 위치별 등숙특성 변화

등숙형질의 영화 착생 위치별 변화를 좀더 파악하기 위해 2009년 실험에서는 이삭을 수확할 당시 강세영화와 약세 영화를 서로 분리하여 등숙형질을 각기 조사하였으며 그 결과는 Fig. 5와 같다.

현미천립중은 두 품종 모두에서 강세영화에서 나온 것들의 무게가 더 감소하였으나 약세영화에 착생하였던 것은 크게 감소하지 않았다. 따라서 전체 현미천립중의 변화는 강세영화의 감소 정도에 의한 것으로 생각된다. 그러나 약세 영화제거 처리에서는 강세영화의 천립중 감소가 없었는데 이러한 차이는 약세영화와 강세영화간의 전류물질의 경합이 발생했음을 의미한다. 결국 앞서 결론을 낸 바와 같이 천립중 유지를 위해서는 충분한 동화산물 공급을 통한 경합 최소화가 필요함을 의미한다. 동화산물 공급과 관련하여

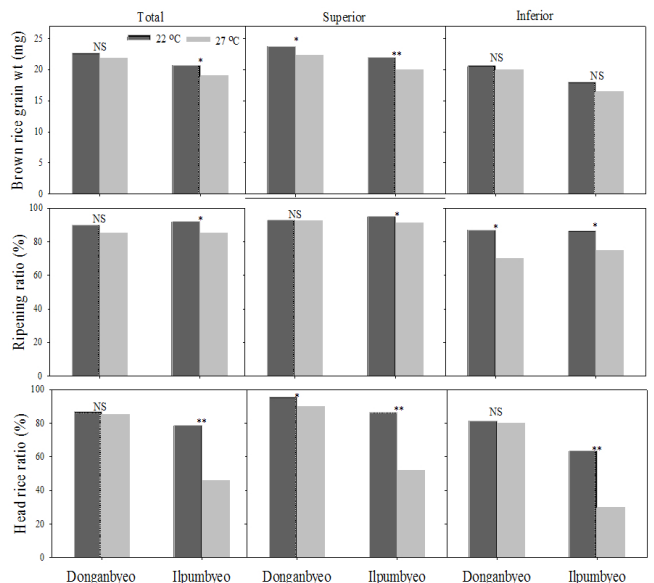


Fig. 5. Comparison of grain filling characteristics between 22°C and 27°C of inferior and superior spikelets of Donganbyeo and Ilpumbyeo in 2009. Comparing 22°C and 27°C by t-test, NS: Non significant, *: 5% significant level, **:1% significant level.

Morita & Nakano(2011)에 따르면 일본의 고온내성 품종인 Nikomaru의 경우 엽초에 저장된 풍부한 비구조탄소화물이 전류되어 고온에서의 등숙을 좀더 유리하게 할 수 있다고 한다. 따라서 영화수를 조절하지 않고 고온에서의 천립중 유지를 위해서는 출수전에 비구조탄소화물의 집적량이 많은 품종을 육성하거나 또는 재식밀도 조정들을 통한 수광태 세계선으로 광합성효율과 전류물질의 축적을 높일 수 있는 연구가 수반될 필요가 있다.

한편 등숙율은 천립중과는 반대되는 경향을 보였다. 동안벼에서 강세영화의 등숙률은 감소하지 않았으나 약세영화는 크게 감소하였고 일품벼는 위치에 관계없이 등숙율이 감소하였으나 약세영화의 감소폭이 강세영화보다 컸었다. 즉 약세영화들 중 일부만이 정상적으로 등숙되었고 나머지는 등숙이 되지 않았음을 의미하며 이는 약세영화제거처리에서 이미 예상했었던 결과이다. 현미 완전미율은 전반적으로 천립중과 유사한 결과를 보였는데 동안벼는 강세영화에서 완전미율의 감소가 인정된 반면 약세영화에서는 감소하지 않았다. 그러나 일품벼의 경우 위치에 관계없이 현미완전미율이 감소하였다. 이러한 결과는 앞의 약세영화 제거처리의 결과와 더불어 생각해 보았을 때 완전미율은 영화의 착생형태보다 전분합성과 관련된 유전적 특성이 더 중요함을 의미한다.

지금까지의 결론에 따르면 고온에 유리한 품종 육성을 위해 상대적으로 이삭당 영화수가 적은 품종을 육성할 경우 등숙율과 천립중에서는 일정부분 효과를 얻을 수 있지만 현미완전미율을 높이는 데서는 그 효과가 미미할 것으로 생각되며 형태적인 접근이 아닌 전분대사와 관련된 유전자를 탐색하는 방향이 유리할 것으로 생각된다. 또한 영화수를 줄이게 되면 결국 수량감소로 이어지기 때문에 이를 방지하기 위해서는 영화수는 유지한채 soucre능력을 증대하기 위한 광합성 효율 또는 출수전 잎 또는 줄기의 비구조적탄소화물 축적 향상과 관련된 연구가 필요할 것으로 생각된다.

적 요

고온발생시 과연 sink가 적은 것이 등숙에 유리한지를 검토하기 위해,

1. 등숙기간 동안 적온인 22°C와 고온인 27°C 에 처리한 후 천립중 감소율과 현미완전미감소율 비교하여 국내 품종들 중에서 고온등숙에 강한 품종(동안벼)과 약한 품종(일품벼)를 선발하였다.

2. 고온에 대한 두 품종의 차이를 이삭형태 관점에서 비교한 결과 동안벼와 일품벼는 약세영화와 강세영화간의 비율에서는 큰 차이가 없었으나 총영화수에서 일품벼가 더 많았다. 따라서, 많은 영화수를 고온에서의 천립중 감소의 원인으로 가정하여 영화수 조절을 통한 등숙특성 개선을 시도하였다.
3. 이를 위해 약세영화를 제거하여 영화수를 조절한 결과 천립중은 개선이 가능한 것으로 생각되었으나 현미완전미율에서는 효과가 없었다.
4. 따라서, 천립중은 동화산물의 공급균형과 관련된 문제로 추정되는 반면 현미완전미율은 영화 내부의 전분축적과 관련된 대사이상으로 생각되며, 고온 등숙 문제를 해결하기 위해 영화수를 조절하는 것은 한계가 있을 것으로 생각된다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 연구사업(ATIS 주관과제번호: PJ009203)의 지원에 의해 이루어진 것임.

인용문헌

- Chung, U., K. S. Cho., and B. W. Lee. 2006. Evaluation of site-specific potential for rice production in Korea under the changing climate. *Kor. J. of Agric. and For. Meteor.* 8 : 229-241.
- Kim, K. C. 1983. Studies on the effect of temperature during the reduction division and the grain filling stage in rice plants. II. Effect of air temperature at grain filling stage in indica-japponica crosses. *Korean. J. Crop. Sci.* 28 : 58-75.
- Kim, J. H., J. Y. Shon, C. K. Lee, W. H. Yang, Y. H. Yoon, W. H. Yang, Y. G. Kim., and B. W. Lee. 2011. Relationship between grain filling duration and leaf senescence of temperate rice under high temperature. *Field crop research.* 122 : 207-213.
- Kobata, T. and N. Uemuki. 2004. High temperature during the grain-filling period do not reduce the potential grain dry matter increase of rice. *Agron. J.* 96 : 406-414.
- Lee, J. I., J. C. Shin, J. K. Kim, E. H. Kim, and D. H. Cho. 1995. Effect of temperatures during ripening period on morphological characteristics of rachis-grain in rice. *Korean. J. Crop. Sci.* 40 : 662-669.
- Morita, S., H. Shiratsuchi, J. Takahashi, and K. Fuita. 2002. Effect of high temperature on ripening in rice plants. *Jpn. J. Crop. Sci.* 71 : 102-109.
- Morita, S., H. Shiratsuchi, J. Takahashi, and K. Fuita. 2004. Effect of high temperature on grain ripening in rice

- plant.-Analysis of the effects of high and high day temperature applied to the panicle and other parts of the plant. *Jpn. J. Crop. Sci.* 73 : 77-83.
- Morita, S. 2008. Current status of the flagging rice grain qualities and yields of Kyushu district in recent years including 2007. *Jpn. J. Crop. Sci.* 77 (Suppl.1) : 376-377.
- Murata, Y. 1964. Influence of radiation and air temperature upon the localization of paddy in Japan. *Proc. Crops. Sci. Soc. Japan* 33 : 59-63.
- Nagato, K. and M. Ebata. 1965. Effects of high temperature during ripening period on the development and the quality of rice kernels. *Proc. Crops. Sci.Soc. Japan.* 34 : 59-66.
- Sato, K. and K. Inaba. 1973. High temperature injury of ripening in rice plant in rice plant. II. Ripening of rice grains when the panicle and straw separately treated under different temperature. *Proc. Crop.Sci. Soc. Japan.* 42 : 214-219.
- Tashiro, T. and I. F. Wardlaw. 1989. A comparison of the effect of high temperature on grain development in wheat and rice. *Ann. Bot.* 18 : 259-265.
- Tashiro, T. and I. F. Wardlaw. 1991. The effect of high temperature on the accumulation of dry matter, carbon and nitrogen in the kernel of rice. *Aust. J. Plant. Phosyiol.* 18 : 259-265.
- Shin, J. C. and M. H. Lee. 1995. Rice production in south Korea under current and future climates; Matthews R. M., Kroff M. J., Bachelet D. and van Larr H. H. eds, *Modeling the impact of climate change on rice production in Asia.* IRRI, CAB International. Manila. pp. 199-213.
- Wakamatus, K., O. Sasaki, I. Uezono, and A. Tanaka. 2007. Effects of high air temperature during the ripening period on the grain quality of rice in warm regions of Japan. *Jpn. J. Crop. Sci.* 76 : 71-78.
- Yamakawa, M. and M. Hakata. 2010. Atlas of rice grain filling-related metabolism under high temperature: Joint analysis of metabolome and transcriptome demonstrated inhibition of starch accumulation and induction of amino acid accumulation. *Plant Cell Physiol.* 51 : 795-809.
- Yang, J., J. Zhang, Z. Wang, and Q. Zhu. 2003. Hormones in the grains in relation to sink strength and postanthesis development of spikelets in rice. *Plant Growth Regulation.* 41 : 185-195.
- Yang, J., J. Zhang, Z. Wang, K. Liu, and P. Wang. 2006. Post-anthesis development of inferior and superior spikelets in rice in relation to abscisic acid and ethylene. *Journal of experimental Botany.* 57 : 149-160.