

## 우리나라 자포니카 벼 품종의 등숙 한계온도 분석

양운호<sup>1,†</sup> · 강신구<sup>2</sup> · 이대우<sup>2</sup> · 채미진<sup>2</sup>

### Critical Temperature for Grain Filling of *Japonica* Rice in Korea

Woonho Yang<sup>1,†</sup>, Shingu Kang<sup>2</sup>, Dae-Woo Lee<sup>2</sup>, and Mi-jin Chae<sup>2</sup>

**ABSTRACT** Critical temperature for grain filling of three Korean *japonica* rice varieties was analyzed by late transplantation to induce a low temperature during grain filling period in a field study. The grain filling percentage (GFP) and grain dry weight (GDW) showed a sigmoid development for the first and second transplants in 2020 and first to third transplants in 2021. For the third transplant in 2020 and fourth transplant in 2021, the GFP and GDW reached a peak at 42 days after heading (DAH), and then decreased or remained unchanged. In non-linear regression analyses, 95% of the final GFP and GDW appeared at 49 - 62 DAH for the second transplant in 2020 and at 37 - 46 DAH and 30 - 36 DAH for the second and third transplants in 2021, respectively. At these time points, the critical seven-day moving temperature (7dMovT) was 8.4~9.4°C for the second transplant in 2020 and 9.4~10.9°C for the second and third transplants in 2021, depending on the grain filling traits and varieties of rice. The lowest 7dMovT was 8.4 - 8.7°C in the three varieties. The observed lowest 7-day mean temperature (7dMT) accompanying increases in the GFP and GDW was 9.4 - 10.1°C, depending on the varieties in the third transplant of 2020 and fourth transplant of 2021. In the two transplants mentioned above, the highest 7dMT that showed no increase or decrease in grain filling traits was 8.7 - 9.1°C. The critical temperature for grain filling of *japonica* rice was 8.4 - 8.7°C based on the 7dMovT and 9.1 - 9.4°C based on the 7dMT. The previous 7dMT of 10°C is recommended to determine the marginal harvest time for safe rice cropping since the temperature was the highest among the lowest temperature that accompanied an increase in grain filling traits.

**Keywords** : critical temperature, grain filling, rice

벼는 세계적으로 남위 40°에서 북위 50°까지 광범위하게 재배된다(Akinbile *et al.*, 2011). 적도에 가까운 열대지역에서는 연중 기온이 높아 벼 재배의 제약이 적은 반면, 온대 지역에서는 위도가 높을수록 기온이 낮고 계절에 따른 기온 편차가 크기 때문에 벼 재배기간이 짧아진다(Yang *et al.*, 2020). 온대지역에서 벼 이앙재배가 가능한 기간은 이앙 가능 온도가 나타나는 안전 조기이앙 한계기(Lee, 1986)부터 등숙 한계 온도가 나타나는 수확 한계기까지라고 할 수 있다. 이들 중 벼의 수확 한계기는 등숙과 관련하여 출수기 설정의 기준이 된다. 자포니카 벼의 출수적기는 출수 후 40일간 평균기온 20~22°C (Kim, 1983; Kim *et al.*,

2014; Yang *et al.*, 2015) 또는 출수기~수확기 등숙 적산온도 1100~1200°C (Chae & Jun, 2002; Kim *et al.*, 2005)에 해당하는 시기로 알려져 있다. 최근에 Yang *et al.* (2020)은 우리나라 자연조건에서 나타나는 등숙적온은 등숙 후기 기온 저하 정도와 시기에 1차 원인이 있는 것으로 추정하였다. 기온이 낮은 고위도 지역에서 벼 재배 가능 기간을 최대한 활용하기 위해서는 등숙 적산온도와 등숙 후기 기온 저하에 따라 나타나는 출수적기를 수확 한계기에 맞추어 설정해야 한다. 그러나 수확 한계기는 지역과 연도에 따라 달라진다. 그러므로 일관되게 적용할 수 있는 기준을 제시하기 위하여 등숙 한계온도 연구가 이루어졌는데, Ebata

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

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

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

<Received 11 August, 2023; Revised 9 September, 2023; Accepted 12 September, 2023>

**Table 1.** Heading dates (HD) of rice varieties at different transplanting date treatments in 2020 and 2021.

Year	Variety	HD at different transplanting date treatment (m.dd)					
		6.05	6.25	7.15	7.25	7.31	8.05
2020	Odae	8.12	8.27 <sup>†</sup>	9.14	9.25	9.30	10.05
	Haiami	8.27	9.02	9.15	9.24	9.28	10.03
	Samkwang	8.28	9.02	9.14	9.23	9.26	9.30
2021	Odae	8.05	8.20	9.09	9.20	9.29	10.07
	Haiami	8.23	9.03	9.13	9.21	9.28	10.05
	Samkwang	8.20	8.31	9.15	9.22	9.30	10.07

<sup>†</sup>Grain filling traits were traced in the transplanting date treatments corresponding to the heading dates with gray background for each variety and year.

(1990)는 7.5°C, Kim *et al.* (2003)은 9~13°C, Yang *et al.* (2020)은 10~16°C 사이로 보고하였다. Ebata (1990)는 또한 기본온도(base temperature)가 등숙 초기에는 9.4~10.1°C로 높고, 등숙 후기에는 4~5°C까지 낮아진다고 하였다. Yoshida (1981)는 인디카 품종을 포함하여 등숙 한계온도가 12~18°C 범위이며, 온대지역에서는 평균기온 13°C가 되기 전에 수확한다고 기술하였다. Ahmed *et al.* (2008)은 평균기온 22°C에 비하여 12°C에서 벼 등숙기간은 길어졌지만 최종 수량은 차이가 없었다고 보고하였는데, 이는 등숙 한계온도가 12°C보다 낮다는 것을 의미한다. 최근에는 Kim *et al.* (2003)이 보고한 등숙 한계온도 9~13°C 중 가장 높은 13°C를 적용하여 북한 지역의 수확 한계기를 분석한 결과도 보고되었다(Yang *et al.*, 2018b, 2018c, 2019). 그러나 Gao *et al.* (1987, 1992)과 Rani & Maragatham (2013)은 벼의 기본온도를 10°C로 적용하기도 하였다.

현재까지 보고된 자포니카 벼의 등숙 한계온도는 최저 4°C에서 최고 13°C로 범위가 넓으므로, 수확 한계기 기준 온도로 이용하기 위해서는 범위를 좁힐 필요가 있다. 수확 한계기는 저온 지역에서 벼 재배 가능 기간의 최대 활용 뿐만 아니라 고온 지역에서 이모작 도입 벼 재배시기의 결정에도 중요하다. 따라서 본 연구는 벼 수확 한계기의 설정에 적용할 수 있는 기준 제시를 목적으로 자포니카 벼 품종의 등숙 한계온도를 밝히기 위하여 수행하였다.

## 재료 및 방법

### 시험지역 및 품종

본 연구는 2020~2021년 2년간 국립식량과학원 중부작물부 벼 재배시험 포장(수원, 37°27'N, 126°99' E, 해발 34 m)에서 수행하였다. 시험 품종으로는 조생종 오대, 중생종 하이아미, 중만생종 삼광의 3개 품종을 이용하였다.

### 시험처리 및 재배방법

벼 등숙기 저온 조건을 유도하기 위하여 2011~2019년 기상자료에 근거하여 목표 출수기를 8월 21일부터 9월 20일까지 10일 간격으로 설정하였다. 사전 기상 분석에서 수확기 경인 출수 후 57~63일의 평균기온은 8월 21일 출수에서 14.8°C로 Kim *et al.* (2003)이 보고한 등숙 한계온도보다 높았으며, 8월 31일~9월 20일 출수에서는 6.2~10.9°C로 낮게 나타났다. 2016~2019년 별도의 이앙시기 처리에서 나타난 시험 품종의 출수기를 기준으로 6회(6월 5일, 6월 25일, 7월 15일, 7월 25일, 7월 31일, 8월 5일) 이앙하였다. 이앙시기 6 처리 중 오대는 6월 25일~7월 31일 이앙, 하이아미는 6월 5일, 7월 15일, 7월 25일, 7월 31일 이앙, 삼광은 2020년의 8월 5일 이앙을 제외하면 하이아미와 동일한 4 이앙시기 처리에서 등숙 특성을 조사하였다. 조사가 이루어진 4 이앙시기 처리에서 출수기는 8월 20일~9월 30일 범위로, 품종과 연도에 따라 차이는 있었지만, 목표 출수기를 포함하였다(Table 1). 시험구는 이앙시기별 단구제로 배치하고, 처리당 3반복으로 조사하였다.

모는 중묘 육묘방법에 따라 상자당 130 g의 종자를 파종하였다. 고온기 육묘에 의한 모의 도장을 방지하기 위하여 6월 5일 이앙은 30일, 6월 25일 이앙은 25일, 7월 15일~8월 5일 이앙은 20일간 육묘하였다. 이앙 3일 전 완효성 비료를 10a당 질소 9 kg에 맞추어 전량 기비로 사용하고 로터리-정지하였으며, 재식거리 30 × 14 cm 간격으로 기계이앙하였다. 이앙 후 본답 물관리, 잡초와 병해충 방제 등의 관리는 표준재배법(RDA, 2015)에 따랐다.

### 조사 및 분석

품종과 이앙시기별로 출수기를 조사하고, 출수 후 7일부터 63일까지 7일 간격으로 9회 등숙특성을 조사하였다. 실험 오차를 최소화하기 위하여 최초 조사에서 반복당 25주

를 채취하여 주당수수를 조사하고 평균값에 해당하는 5주를 선택하였다. 다음 조사부터는 반복당 25주를 채취한 후 최초 조사의 수수 평균에 해당하는 5주를 선택하여 조사하였다. 5주 전체를 합해 이삭을 탈립한 후 수선하여 등숙립과 비립으로 구분하고, 70°C에서 7일 이상 건조하여 정조건물중(이후 정조중으로 표현)을 측정하였다. 이후 등숙립과 비립을 계수하여 등숙비율로 환산하였으며, 정조중과 등숙립수로 정조 천립중을 계산하였다. 매 시기에 조사에 이용한 5주를 제외한 나머지 20주는 탈곡, 건조, 제현 후 Grain inspector (Cervitec TM1625, FOSS, Sweden)를 이용하여 완전립 비율을 조사하였다. 4차 이앙에서는 출수 후 57~63일 사이에 일 최저기온이 영하로 하락하여 포장이 결빙되었기 때문에 출수 후 56일까지만 조사가 이루어졌다. 이앙 차수별 마지막 채취 시료를 이용하여 불임률을 조사하였다.

$$W = \frac{A}{(1 + Be^{-kt})^{1/N}} \quad (1)$$

W: grain filling percentage or grain dry weight, A: final data, t: days from heading stage, B, k, N: coefficients determined by the non-linear regression equation.

위와 같이 조사한 등숙비율, 정조 천립중, 정조중, 완전립 비율의 변화 추세를 확인한 후 등숙기간 경과에 따라 변화 추세가 뚜렷하게 나타난 등숙비율과 정조중을 기준으로 등숙 한계온도를 분석하였다. 이때 Sigmoid curve 형태를 나타낸 2020년 1, 2차 이앙과 2021년 1, 2, 3차 이앙에서는

Richards (1959) 비선형회귀 분석을 통해 최종 성적의 95%에 도달하는 시기를 계산하였으며(1), 이 시기의 7일 이동 평균기온(이전 3일~이후 3일 평균기온)으로 등숙 한계온도를 분석하였다. 출수 후 일정 시기까지 증가하다가 이후 감소하는 추세를 나타낸 2020년 3차 이앙과 2021년 4차 이앙에서는 최고값 도달 전후 7일 평균기온에 따른 등숙특성의 변화를 기준으로 등숙 한계온도를 분석하였다. 기온은 기상청 기상정보포털(KMA, 2022)의 일별 자료를 수집하여 사용하였다.

### 결과 및 고찰

이앙 차수별로 출수기부터 7일 간격 평균기온의 변화는 Fig. 1과 같다. 2020년과 2021년 모두, 평균기온은 1차에서 4차까지 이앙이 늦어짐에 따라 낮아졌다. 2020년 평균기온은 3차 이앙의 출수 후 49~55일에 일시적으로 상승한 것을 제외하면, 모든 이앙 차수에서 완만하게 저하되었다. 반면, 2021년의 평균기온은 2020년보다 높게 경과하다가 급락하였으며, 이후 2~4차 이앙에서는 기온이 등락하는 추세를 보였다. 1차 이앙의 경우 대부분의 시기에 2020년보다 2021년에 평균기온이 높았으며, 2~4차 이앙에서도 일부 시기를 제외하고 출수 후 41일까지 2021년의 기온이 높게 유지되었다.

2020년에 이앙 차수별 불임률은 4차 이앙에서 품종에 따라 41.1~96.1%로 높았으며 3차 이앙에서는 31.3~60.1%를 나타내었는데, 특히 삼광에서 높았다(Fig. 2). 2021년에는 4차와 3차 이앙에서 상대적으로 불임률이 높은 경향이었으나, 2020년 3차 이앙보다 낮게 나타났다. 이러한 결과는 등

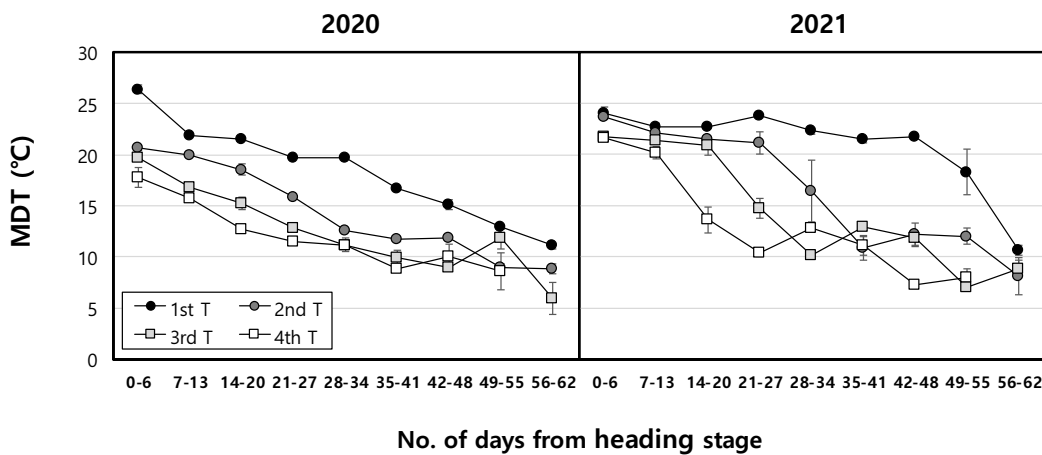
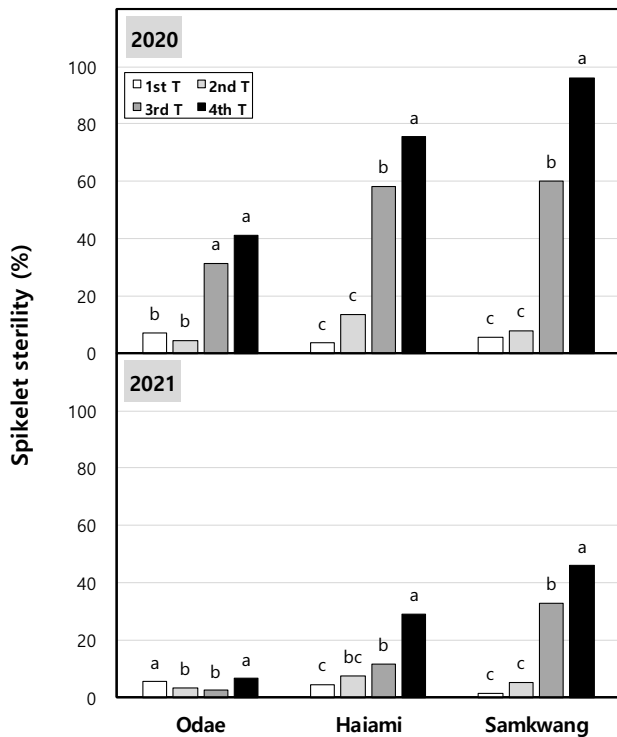


Fig. 1. Changes in mean daily temperature (MDT) from the heading stage to final harvest for the four transplants (T) in two experimental years. Each data point is the mean, and error bars are the standard deviations of three varieties.



**Fig. 2.** Spikelet sterility in the four transplants (T) of three varieties in 2020 and 2021. Each data point is the mean of three replicates. The same letters for each variety indicate that there was no significant difference according to LSD (0.05).

숙 초기 기온이 2020년에 비해 2021년에 높았기 때문으로 판단된다(Fig. 1 참고).

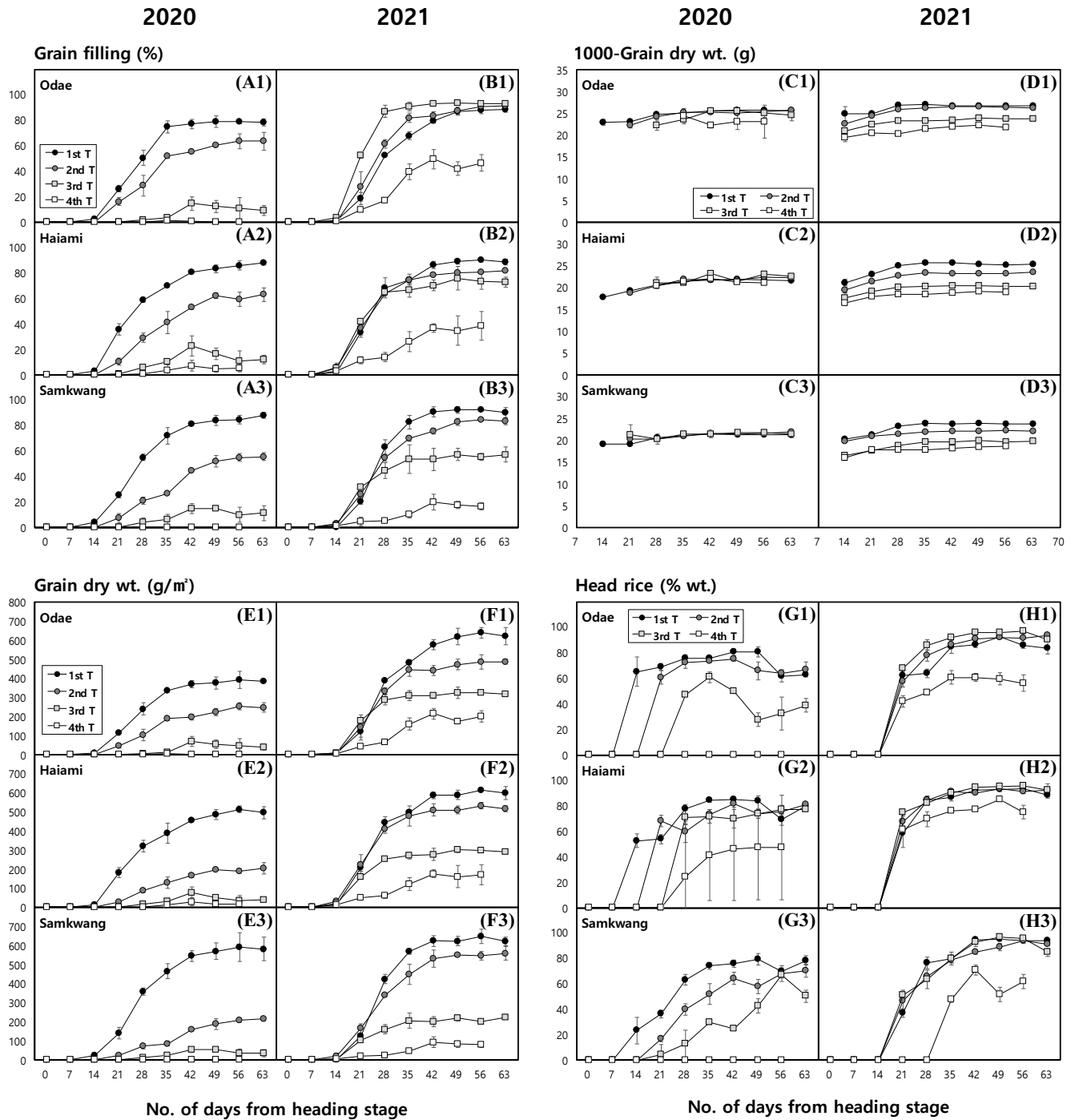
출수 후 7일 간격으로 조사한 등숙비율, 정조 천립중, 정조중, 완전립 비율의 변화는 Fig. 3과 같다. 등숙비율은 모든 품종에서 2020년의 1~2차 이앙(A1~A3)과 2021년의 1~3차 이앙(B1~B3)에서 sigmoid curve 형태의 진전을 보였으며, 2020년 3차 이앙(A1~A3)과 2021년 4차 이앙(B1~B3)에서는 일정 시기까지 증가하다가 감소하거나 정체되는 양상을 나타내었다. 2020년의 4차 이앙에서는 출수 후 날짜 경과에 따라 등숙비율이 증가하지 않았는데(A1~A3), 이는 불임률이 높았기 때문으로 판단된다(Fig. 2 참고). 출수 후 34일까지 기온이 낮게 경과하였기 때문으로 판단된다(Fig. 1 참고). 정조 천립중은 2020년의 경우 등숙 초기에 약간 증가한 후 비슷하게 유지되거나 약간씩 오르내리는 추세를 나타내었는데, 오대의 4차 이앙을 제외하면 1~4차 이앙 사이의 차이가 거의 없었다(C1~C3). 2021년에도 정조 천립중의 변화 추이는 2020년과 비슷하였으나, 이앙 차수가 높을수록 저하되는 특징을 보였다(D1~D3). 정조중은 연도와 이앙 차수에 따라 등숙비율과 비슷한 변화 양상을 나타내었다(E1~E3, F1~F3).

완전립 비율은 2020년의 경우 급격히 증가한 후 정체하거나 후기에 감소하는 양상을 나타내었는데(G1~G3), 기온이 상대적으로 높았던 2021년에는 1~3차 이앙에서 2020년보다 안정적인 변화 추이를 보였다(H1~H3). 결과적으로, 등숙 한계온도 분석에 적합한 특성은 시험 연도와 이앙 차수에서 공통적으로 sigmoid curve 형태의 변화 양상을 보인 2020년 1~2차와 2021년 1~3차 이앙, 그리고 일정 시기까지 증가하다가 정체 또는 감소 양상을 나타낸 2020년 3차와 2021년 4차 이상의 등숙비율과 정조중으로 판단되었다.

등숙비율과 정조중에 대한 2020년 1~2차, 2021년 1~3차 이앙의 비선형회귀 분석과 2020년 3차, 2021년 4차 이상의 변화 추이는 Fig. 4와 같다. 1차 이앙의 경우 품종에 따라 등숙비율은 2020년 출수 후 39~44일(A1~A3), 2021년 출수 후 38~46일에 최고값의 95%에 도달하였다(G1~G3). 정조중은 2020년 출수 후 43~47일(B1~B3), 2021년 39~45일에 최고값의 95%를 나타내었다(H1~H3). 2020년 2차 이앙에서 최고값의 95%에 도달한 시기는 등숙비율의 경우 출수 후 49~58일(C1~C3), 정조중의 경우 54~62일이었다(D1~D3). 2021년 등숙비율과 정조중이 최고값의 95%에 도달한 시기는 2차 이앙에서 각각 출수 후 37~44일(I1~I3)과 37~46일이었으며(J1~J3), 3차 이앙에서는 각각 출수 후 30~34일(K1~K3)과 31~36일이었다(L1~L3). 2020년 3차 이앙과 2021년 4차 이앙에서 등숙비율과 정조중은 품종에 관계없이 출수 후 42일에 최고값이 측정되었다(E, F, M, N).

개화 후 벼 종실의 생장은 유도기(lag phase), 직선적으로 증가하는 유효 등숙기간(effective grain filling period), 후기 등숙(late filling phase)의 3단계로 sigmoid 형태를 보인다(Cho *et al.*, 1988; Yang *et al.*, 2018a; Yoshida, 1981). 그러나 본 연구의 2020년 3차 이앙과 2021년 4차 이앙에서는 일정 시기 이후 등숙비율과 정조중이 감소하는 현상이 나타나 정상적인 조건에서 나타나는 벼의 등숙과 다른 양상을 보였다. 벼의 수확이 출수 후 60일 이후로 늦어졌을 때 수량이 감소하는 현상은 이전에도 관찰된 바 있으며(Chae & Jun, 2002; Kim *et al.*, 2005), Kim *et al.* (2011)은 고온 조건에서 벼 등숙이 완료된 시기에 엽신의 동화 활동은 유지되었다고 보고하였다. 본 연구의 2020년 3차와 2021년 4차 이앙에서 최고값이 측정된 출수 후 42일에 왕겨는 황색을 띠었던 반면, 엽신은 그 이후에도 녹색을 유지하다가 후기에 저온에 처했을 때 잎말림 현상이 관찰되었다. 이로 미루어 볼 때, 출수 42일 이후에 등숙비율과 정조중이 감소한 것은 종실에 저장되어 있던 에너지원이 식물체의 활동 유지에 이용되었기 때문으로 추정된다.

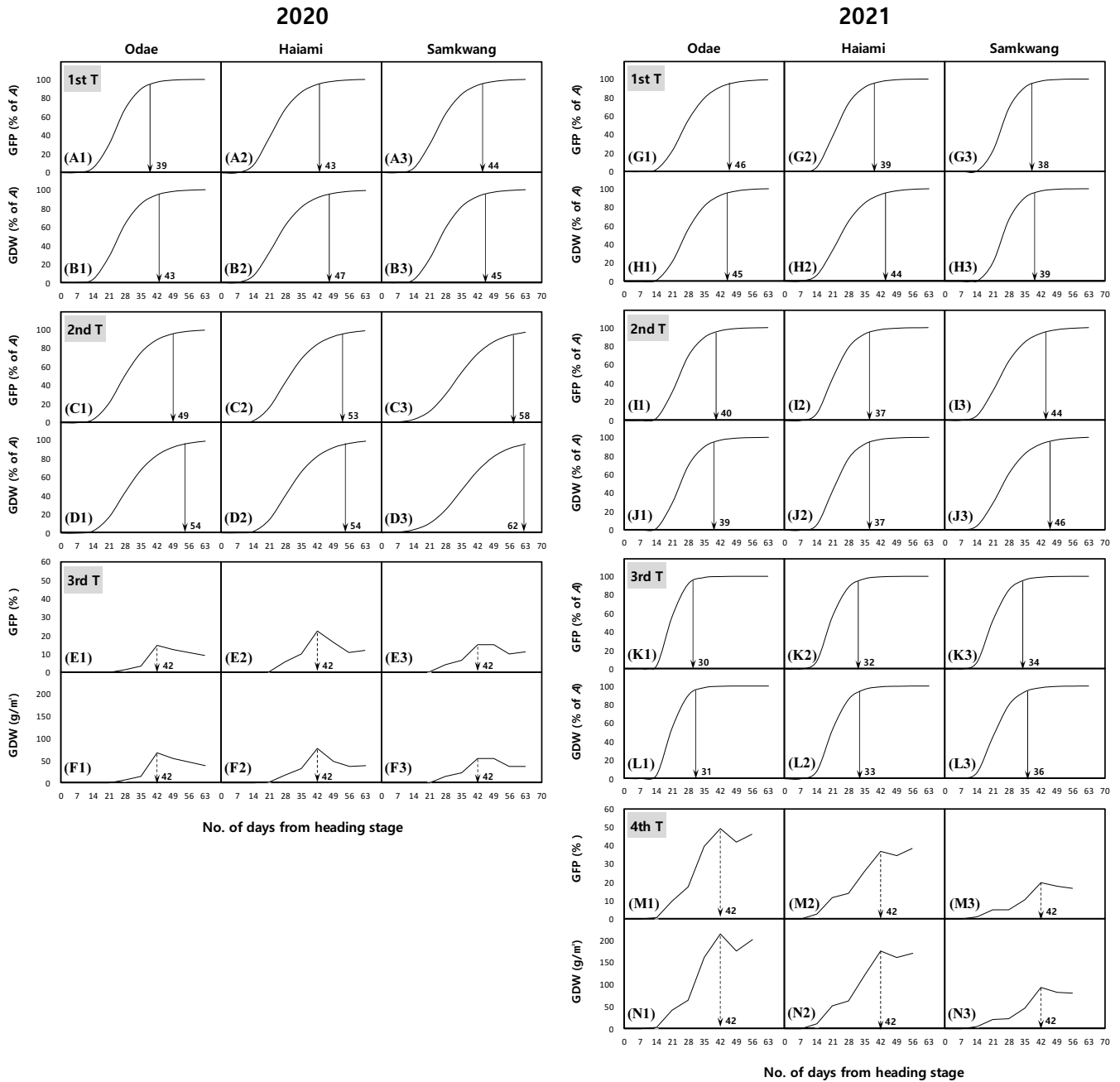
1차 이앙에서 등숙비율과 정조중이 최고값의 95%를 나



**Fig. 3.** Changes in grain filling traits from the heading stage to final harvest in the four transplants (T) of three varieties in 2020 and 2021. Each data point is the mean of three replicates, and error bars indicate the standard deviations.

타낸 시기에 7일 이동 평균기온은 품종에 따라 2020년에 13.8~16.6°C (Fig. 5 A1~A3), 2021년에 21.3~21.9°C였다 (C1~C3). 이 온도는 이전에 보고된 자포니카 벼의 등숙 한계온도 중 가장 높은 온도 이상이므로, 1차 이양에서는 등숙 한계온도가 나타나지 않았다고 할 수 있다. 2020년 2차

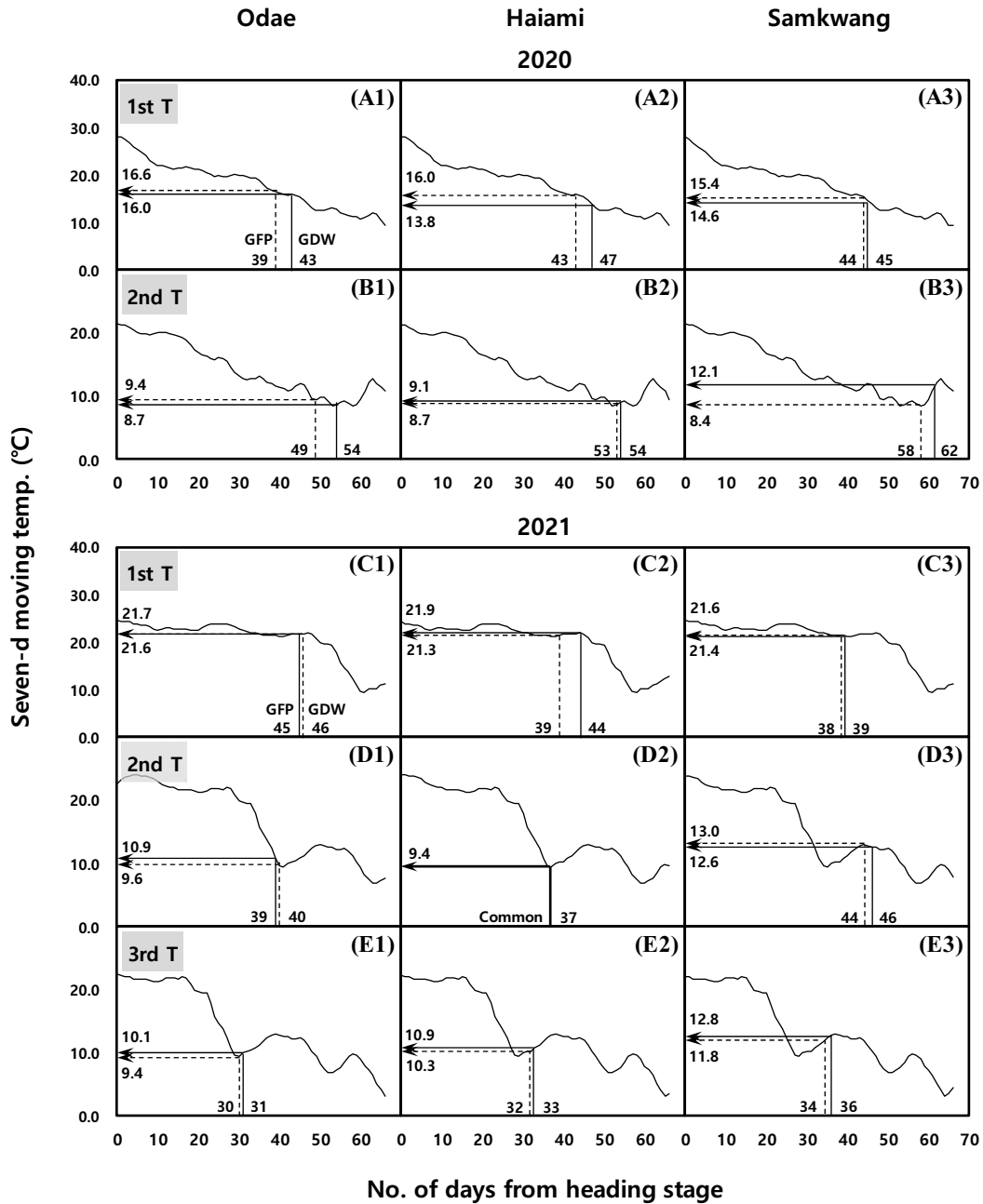
이양에서 최고값 대비 95%인 시기의 7일 이동 평균기온은 품종과 특성에 따라 8.4~12.1°C로 나타났다(B1~B3). 그러나 삼광에서 나타난 12.1°C는 기온이 저하되다가 일시적으로 상승한 시기에 나타났는데, 이는 12.1°C보다 낮은 기온에서도 등숙이 진전되었다는 것을 의미하므로 등숙 한계온



**Fig. 4.** Non-linear regression analyses of grain filling percentage (GFP) and grain dry weight (GDW) for the first and second transplants in 2020 and first to third transplants in 2021. Panels for the third transplant in 2020 and fourth transplant in 2021 represent actual data. Data with arrows indicate the number of days from the heading stage when 95% of the final data (A) were attained in non-linear regression analyses. Arrows for the third transplant in 2020 and fourth transplant in 2021 represent the number of days from the heading stage when peak data were recorded.

도로 보기 어려웠다. 따라서 삼광의 12.1°C를 제외하면, 최고값 대비 95% 시기의 7일 이동 평균기온은 8.4~9.4°C였다. 2021년 2차 이상의 삼광(D3), 3차 이상의 하이아미(E2)와 삼광(E3)에서도 등숙비율과 정조중 최고값의 95%가 기온이 떨어진 후 다시 상승한 시기에 나타났다. 그러므로 여

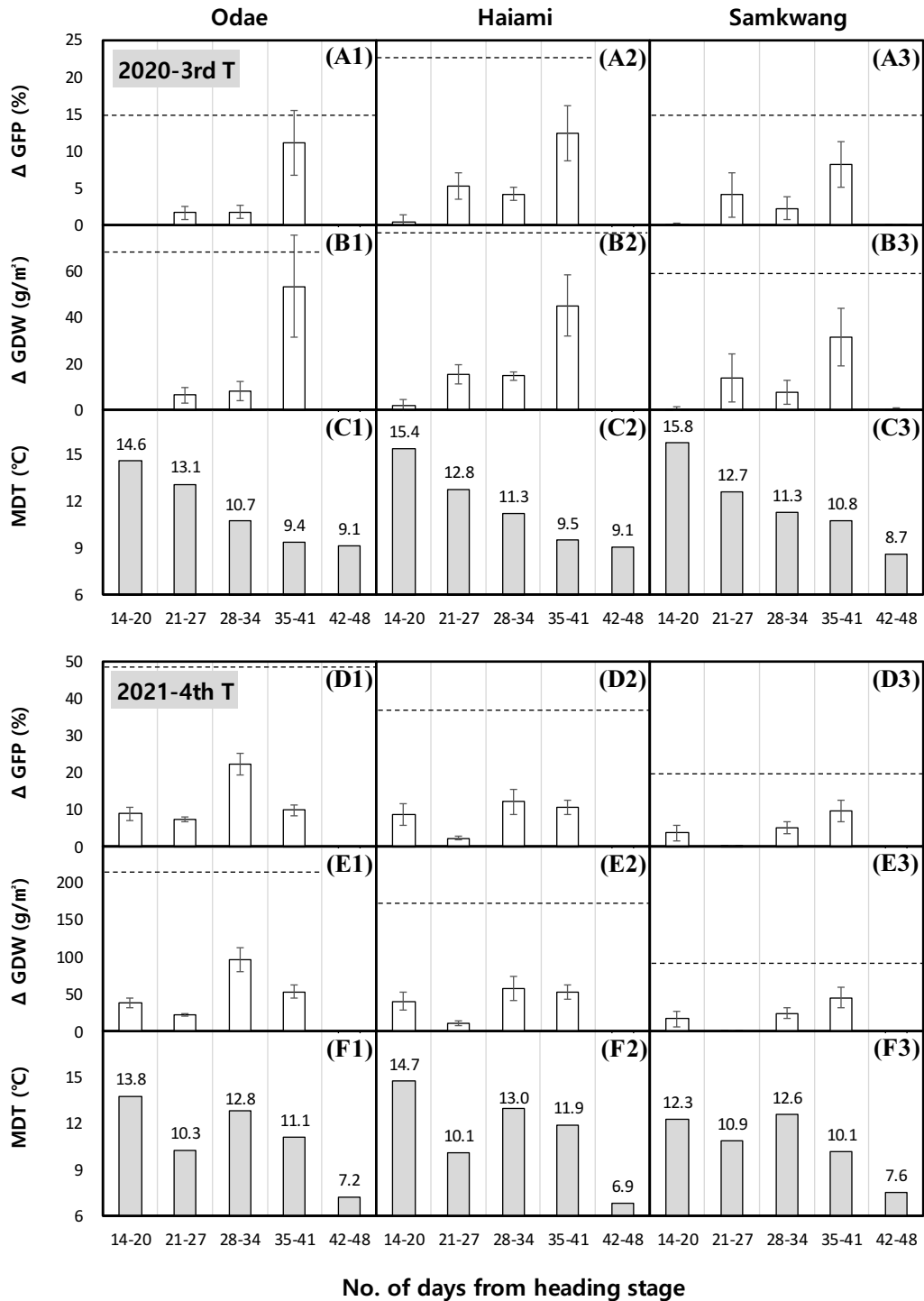
기에서 나타난 10.3~13.0°C를 등숙 한계온도에 포함하여 분석하기에는 적합하지 않았다. 2021년 위의 세 경우를 제외한 2차 이상의 오대와 하이아미, 3차 이상의 오대에서 등숙 특성 최고값 95% 시기의 7일 이동 평균기온은 9.4~10.9°C로 나타났다(D1, D2, E1). 이를 품종별로 보면, 오대는



**Fig. 5.** Seven-day moving temperature on the dates when 95% of the final data were attained in non-linear regression analyses. The numbers on the x-axes indicate the dates and those on the y-axes represent the 7-day moving temperature for grain filling percentage (GFP, dashed lines), grain dry weight (GDW, thin solid lines), and common for the two traits (thick lines). T: transplant.

8.7~10.9°C (B1, D1, E1), 하이아미는 8.7~9.4°C (B2, D2), 삼광은 8.4°C였다(B3). 여기에서 등숙 한계온도는 품종별로 나타난 범위에서 낮은 온도로 평가하는 것이 타당할 것이다. 그러므로 비선형회귀 분석에서 7일 이동 평균기온으로 평가한 등숙 한계온도는 오대와 하이아미에서 8.7°C, 삼광에서 8.4°C로 분석되었다.

등숙 한계온도를 등숙이 정제된 날의 평균기온으로 나타낼 수 있다면 가장 이상적일 것이다. 그러나 자연조건에서 기온은 날짜 경과에 따라 일정하게 변화하지 않고, 등락을 반복하며 점차 낮아진다. 그러므로 본 연구에서 나타난 등숙 정제 시기는 그 전후 기온의 영향이 함께 작용하여 결정되었다고 볼 수 있다. 비선형회귀 분석에서 등숙 한계온도

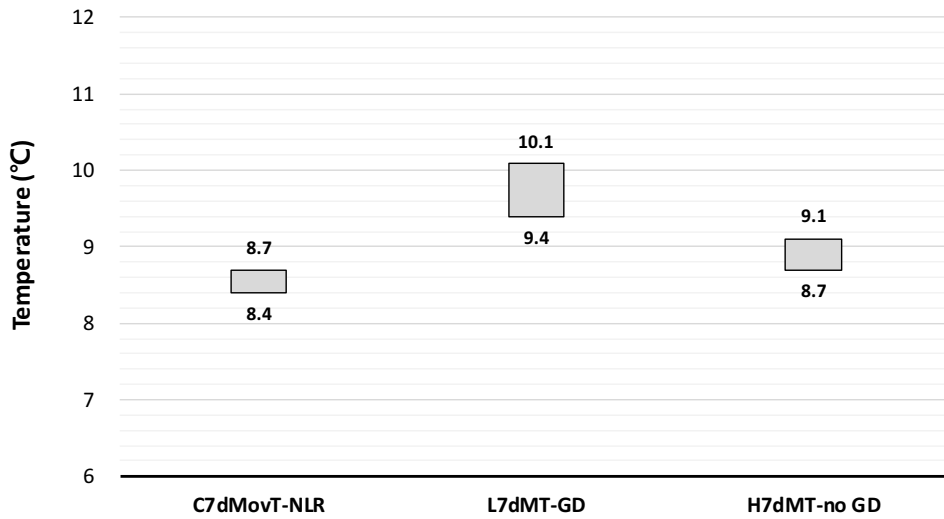


**Fig. 6.** Mean daily temperature (MDT) for 7 days, and the increase in grain filling percentage (GFP) and grain dry weight (GDW) during the 7-day period for the third transplant (T) in 2020 and fourth T in 2021. Error bars are the standard deviations, and the dashed line in each panel indicates the peak data point.

를 7일 이동 평균기온으로 평가한 것은 위와 같은 일 평균 기온의 등락, 등숙 정체 시점 전후 기온의 영향, 조사 간격을 함께 고려한 것이었다.

기온 경과에 따른 등숙 특성의 변화를 분석하기 위하여 2020년 3차 이앙과 2021년 4차 이앙에서 7일 간격 평균기온과 그에 따른 등숙비율, 정조중의 증가 정도를 Fig. 6에





**Fig. 7.** Summary of the critical 7-day moving temperature estimated from non-linear regression analyses (C7dMovT-NLR), lowest 7-day mean temperature where grain development was observed (L7dMT-GD), and highest 7-day mean temperature where no grain development was observed (H7dMT-no GD). Data represent the temperature ranges of three varieties.

나타내었다. 2020년 3차 이앙과 2021년 4차 이앙에서 등숙 비율과 정조중의 증가가 뚜렷하게 관찰되기 시작한 시기는 각각 출수 후 21~27일과 14~20일로 2020년 3차 이앙에서 더 늦었는데, 이는 출수 후 등숙 초기에 기온이 더 낮아 lag phase가 길어졌기 때문으로 판단된다(Fig. 1 참고). 2020년 3차 이앙에서 최고값을 나타낸 출수 후 42일 기준으로 이전 7일간(출수 후 35~41일) 평균기온은 오대에서 9.4°C, 하이아미 9.5°C, 삼광에서 10.8°C였으며(C1~C3), 이 기간에 등숙비율과 정조중은 가장 많이 증가하였다(A, B). 2021년 4차 이앙에서 출수 후 35~41일 7일간 평균기온은 오대에서 11.1°C, 하이아미 11.9°C, 삼광 10.1°C였으며(F1~F3), 이 기간에 등숙 특성은 유의미하게 증가하였다(D, E). 더 이상 등숙 진전이 나타나지 않은 출수 후 42일부터 7일간 평균기온은 품종에 따라 2020년 3차 이앙에서 8.7~9.1°C (C1~C3), 2021년 4차 이앙에서 6.9~7.6°C였다(F1~F3). 품종별로 보면, 등숙 진전이 관찰되었던 출수 후 35~41일의 7일 평균기온은 2020년 3차 이앙과 2021년 4차 이앙에서 각각 오대의 경우 9.4°C와 11.1°C (C1, F1), 하이아미의 경우 9.5°C와 11.9°C (C2, F2), 삼광의 경우 10.8°C와 10.1°C였다(C3, F3). 품종별로 위의 두 온도에서 등숙 특성이 모두 증가하였으므로, 증가가 측정된 등숙 한계온도는 오대에서 7일 평균 9.4°C, 하이아미에서 9.5°C, 삼광에서 10.1°C로 볼 수 있다. 반면, 등숙 진전이 이루어지지 않은 출수 후 42~48일의 7일 평균기온은 오대에서 9.1°C와 7.2°C (C1, F1), 하이아미에서 9.1°C와 6.9°C (C2, F2), 삼광에서 8.7°C와 7.6°C였다(C3, F3). 품종별로 등숙 진전이 이루어지지

않은 한계기온은 위의 두 온도 중 높은 온도가 된다. 그러므로 7일 평균기온 기준 오대와 하이아미는 9.1°C, 삼광은 8.7°C가 등숙 진전이 관찰되지 않은 가장 높은 온도이다. 등숙 진전이 관찰된 최저기온과 관찰되지 않은 최고기온을 7일 평균기온 기준에서 품종별로 보면, 오대의 경우 각각 9.4°C와 9.1°C, 하이아미의 경우 9.5°C와 9.1°C, 삼광의 경우 10.1°C와 8.7°C였다.

2021년 4차 이앙에서는 출수 후 21~27일에 기온이 급락하였는데(Fig. 6 F1~F3), 이 기간에 등숙비율과 정조중은 다른 시기에 비하여 증가가 둔화되었다(D, E). 특히 삼광에서 이 기간의 7일 평균기온은 등숙 진전이 나타난 출수 후 35~41일의 10.1°C보다 높은 10.9°C였는데도 등숙비율과 정조중이 증가하지 않았다(D3, E3, F3). 이러한 결과는 등숙 정체온도의 출현에 의한 것이 아니고, 다른 품종보다 삼광의 lag phase가 길어 왕성한 등숙이 시작되는 시점에서 기온이 급락했기 때문으로 생각된다(Figs. 3, 4 참고). 출수 후 21~27일에 기온이 급락한 후 28~34일에는 다시 상승하였는데, 이에 따라 모든 품종에서 등숙비율과 정조중의 증가 정도가 커졌다. 이러한 결과는 등숙이 완료되기 이전에 기온이 10~11°C까지 일시적으로 저하되어도 그 이후 기온이 상승하면 다시 등숙이 이루어진다는 것을 의미한다.

앞의 비선형회귀 분석에서 나타난 등숙 정체시기의 7일 이동 평균기온으로 평가한 등숙 한계온도, 최고값 전후의 7일 평균기온으로 평가한 등숙 진전 최저온도와 등숙 정체 최고온도를 Fig. 7에 종합하였다. 결과적으로 비선형회귀 분석에서 나타난 7일 이동 평균기온 기준 등숙 한계온도는

품종에 따라 8.4~8.7°C로 분석되었으며, 실측값 분석에서 7일 평균기온 기준 등숙 한계온도는 등숙 진전이 관찰된 최저기온 9.4°C와 등숙 정체 또는 감소가 나타난 최고기온 9.1°C 사이(9.1~9.4°C)로 평가되었다.

저온 지역에서 벼 재배 가능 기간을 최대한 활용하거나 이모작 후작으로 벼를 도입하는 경우 전후작 사이의 경합 기간을 최소화하기 위해서는 본 연구의 등숙 한계온도가 나타나는 시기를 수확 한계기로 결정할 수 있을 것이다. 그러나 벼의 수확 한계기 기준 온도는 본 연구에서 품종별로 등숙 진전이 관찰되었던 가장 낮은 7일 평균기온 9.4~10.1°C에서 높은 온도인 10°C 정도를 적용하는 것이 보다 안전할 것으로 판단된다.

본 연구는 포장 조건에서 벼 등숙기 기온과 등숙 특성 변화 양상을 조사하여 등숙 한계온도를 분석하였다. 그러나 여기에서 제시한 등숙 한계온도가 어느 정도의 효과를 나타내는지는 정확하게 밝히지 못한 한계가 있다. 따라서 기온과 기간에 따른 등숙 특성 변화 정도를 평가하기 위하여, 기상 조절 시설을 활용한 보다 정밀한 추가 연구가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

## 적 요

벼의 수확기 기준온도 결정에 활용하기 위하여 2020~2021년 포장 조건에서 우리나라 자포니카 벼 품종(오대, 하이아미, 삼광)의 4회 이앙 처리에서 등숙 한계온도를 분석한 결과는 다음과 같다.

1. 이앙차수별 출수기 범위는 2020년에는 1차 8월 27~28일, 2차 9월 14~15일, 3차 9월 23~25일, 4차 9월 28~30일이었으며, 2021년에는 1차 8월 20~23일, 2차 9월 9~15일, 3차 9월 20~22일, 4차 9월 28~30일이었다.
2. 등숙비율, 정조 천립중, 정조중, 완전립 비율 중 등숙 한계온도 분석에 적합한 특성은 등숙비율과 정조중이었다.
3. 등숙비율과 정조중은 2020년 1~2차 이앙과 2021년 1~3차 이앙에서 sigmoid curve 형태의 변화를 나타내었으며, 2020년 3차와 2021년 4차 이앙에서는 일정 시기까지 증가한 이후 정체 또는 감소하는 양상을 보였다.
4. 비선형회귀 분석에서 등숙비율과 정조중이 최고값의 95%에 도달한 시기는 2020년 2차 이앙에서 출수 후 49~62일, 2021년 2차와 3차 이앙에서 각각 출수 후 37~46일과 30~36일이었으며, 2020년 3차와 2021년 4차 이앙에서 등숙특성의 실측 최고값은 출수 후 42일에 나타났다.
5. 비선형회귀 분석에서 등숙 한계온도 분석에 적합한 경우

- 최고값 대비 95% 시기의 7일 이동 평균기온은 품종과 특성에 따라 2020년 2차 이앙에서 8.4~9.4°C, 2021년 2차와 3차 이앙에서 9.4~10.9°C로 나타났으며, 품종별로 평가한 등숙 한계온도는 7일 이동 평균기온 8.4~8.7°C였다.
6. 2020년 3차와 2021년 4차 이앙에서 등숙비율과 정조중의 증가가 나타난 가장 낮은 7일 평균기온은 품종에 따라 9.4~10.1°C 범위였으며, 정체 또는 감소가 나타난 가장 높은 온도는 8.7~9.1°C 범위였다.
  7. 종합적으로, 비선형회귀 분석에서 나타난 자포니카 벼의 등숙 한계온도는 품종에 따라 7일 이동 평균기온 기준 8.4~8.7°C로 분석되었으며, 실측 등숙 특성의 변화로 분석한 등숙 한계온도는 이전 7일 평균기온 기준 9.1~9.4°C 사이로 나타났다.
  8. 벼의 수확 한계기 기준 온도는 품종에 따라 등숙 진전이 관찰된 가장 낮은 온도인 이전 7일 평균기온 9.4~10.1°C에서 높은 온도인 10°C 정도를 적용하는 것이 재배 안전성 측면에서 유리할 것으로 평가되었다.

## 사 사

본 논문은 농촌진흥청 연구사업(연구개발과제명 : 기후변화 대응 북한지역 식량작물 재배적지 선정, 과제번호 : RS-2020-RD009242)의 지원으로 이루어진 것임

## 인용문헌(REFERENCES)

- Ahmed, N., M. Maekawa, and I. J. Tetlow. 2008. Effects of low temperature on grain filling, amylose content, and activity of starch biosynthesis enzymes in endosperm of basmati rice. *Australian J. Agricultural Res.* 59 : 599-604.
- Akinbile, C. O., K. M. Abd El-Latif, R. Abdullah, and M. S. Yusoff. 2011. Rice production and water use efficiency for self-sufficiency in Malaysia. A review. *Trends in Applied Sci. Res.* 6(10) : 1127-1140.
- Chae, J.-C. and D.-K. Jun. 2002. Effect of harvest time on yield and quality of rice. *Korean J. Crop Sci.* 47(3) : 254-258.
- Cho, D.-S., S.-K. Jong, S.-Y. Son, and Y.-K. Park. 1988. Studies on the duration and rate of grain filling in rice (*Oryza sativa* L.). II. Difference between the parts of a panicle. *Kor. J. Crop Sci.* 32(1) : 5-11.
- Ebata, M. 1990. Effect of heat unit summation and base temperature on the development of rice plant. II. On heading, flowering, kernel development and maturing of rice. *Japanese J. Crop Sci.* 59(2) : 233-238.
- Gao, L. Z., Z. Q. Jin, and L. Li. 1987. Photo-thermal models of rice growth duration for various varietal types in China. *Agric.*

- Forest Meteorol. 39 : 205-213.
- Gao, L., Z. Jin, Y. Huang, and L. Zhang. 1992. Rice clock model - a computer model to simulate rice development. Agric. Forest Meteorol. 60 : 1-16.
- Kim, D.-S., J.-C. Shin, K.-J. Choi, C.-K. Lee, and J.-K. Kim. 2003. Varietal characteristics of kernel growth of rice influenced by different temperature regimes during grain filling. Korean J. Crop Sci. 48(5) : 397-401.
- Kim, J., J. Shon, C.-K. Lee, W. Yang, Y. 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 Crops Res. 122 : 207-213.
- Kim, J., J. Shon, H. Jeong, W. Yang, C. K. Lee, and K. S. Kim. 2014. Statistical assessment of the late marginal heading date for normal maturation of temperate *japonica* rice in South Korea. J. Crop Sci. Biotech. 17(4) : 247-253.
- Kim, K. C. 1983. Studies on the effect of temperature during the reduction division and the grain filling stage in rice plants. Korean J. Crop Sci. 28(1) : 58-75.
- Kim, S.-S., J.-H. Lee, J.-K. Nam, W.-Y. Choi, N.-H. Baek, H.-K. Park, M.-G. Choi, C.-K. Kim, and K.-Y. Jung. 2005. Proper harvesting time for improving the rice quality in Honam plain area. Korean J. Crop Sci. 50(S) : 62-68.
- KMA (Korea Meteorological Administration). 2022. <http://data.kma.go.kr/cmnm/main.do> (2022. 12. 20).
- Lee, E.-W. 1986. Rice cropping (4th ed.). Hyangmoonsa. pp. 111-112.
- Rani, B. A. and N. Maragatham. 2013. Effect of elevated temperature on rice phenology and yield. Indian J. Sci. Tech. 6(8) : 5095-5097.
- RDA (Rural Development Administration). 2015. Quality Rice Production Technologies. pp. 126-179.
- Richards, F. J. 1959. A flexible growth function for empirical use. J. Expt. Bot. 10(29) : 290-300.
- Yang, W., J.-H. Park, J.-S. Choi, T. H. Noh, and S. Kim. 2019. Rice cultivation model to improve productivity in North Korea. National Institute of Crop Science, Rural Development Administration. p. 143.
- Yang, W., K.-J. Choi, J. Shon, S. Kang, S.-H. Shin, K.-B. Shim, J. Kim, H. Jung, J. H. Jang, J.-S. Jung, C. Y. Lee, Y. T. Yun, S. J. Kwon, K. An, J.-H. Shin, and S. M. Bae. 2015. Effects of temperature and sunshine hours during grain filling stage on the quality-related traits of high quality rice varieties in Korea. Korean J. Crop Sci. 60(3) : 273-281.
- Yang, W., S. Kang, J.-H. Park, S. Kim, J.-S. Choi, and S. Heu. 2018a. Association of grain filling duration and leaf activity with the grain yield in field-grown temperate *japonica* rice. Korean J. Crop Sci. 63(2) : 120-130.
- Yang, W., S. Kang, S. Kim, J.-S. Choi, and J.-H. Park. 2018b. Assessment of the safe rice cropping period based on temperature data in different regions of North Korea. Korean J. Agric. Forest Meteorol. 20(2) : 190-204.
- Yang, W., S. Kang, S. Kim, J.-S. Choi, and J.-H. Park. 2018c. Temperature data-based assessment of the marginal heading dates and the growth duration of rice in the regions of North Korea. Korean J. Agric. Forest Meteorol. 20(4) : 284-295.
- Yang, W., S. Kang, J.-S. Choi, J.-H. Park, and S. Kim. 2020. Optimum grain filling temperature for yield improvement of rice varieties originated from high-altitude areas. Korean J. Crop Sci. 65(3) : 182-191.
- Yoshida, S. 1981. Fundamentals of Rice Crop Science. International Rice Research Institute. p. 269.