

우리나라 자포니카 벼 품종의 조기이앙 한계온도 분석

양운호^{1,†} · 강신구² · 이대우² · 채미진²

Critical Temperature for Early Marginal Transplanting of *Japonica* Rice in Korea

Woonho Yang^{1,†}, Shingu Kang², Dae-Woo Lee², and Mi-Jin Chae²

ABSTRACT We investigated critical temperature for early marginal transplanting (CT-EMT) of the contemporary *japonica* rice varieties in Korea through the field, pot seedling tray, and the phytotron experiments during 2020 to 2023. The lowest mean temperature for 10 days from transplanting (MT-10DFT) that resulted in earlier heading date was 12.4°C and the highest MT-10DFT that did not show the earlier heading date was 12.0°C in the field study when the MT-10DFT varied by changing transplanting date. The lowest MT-10DFT that induced the increased biomass but not the earlier heading date was 11.6°C and the highest MT-10DFT that showed neither the increased biomass nor the earlier heading date was 11.4°C. Compared to the 10-day later transplanting, the dates of the first root development, initiation of the chlorophyll recovery, and the first tiller development were earlier when the MT-10DFT was 9.1°C or higher, 10.5°C or higher, and 11.6°C or higher, respectively, in the pot seedling tray and field experiments. The earliness of the first tiller development was a practical index for the estimation of CT-EMT during the early growth stage of rice. The response of transplanted rice to temperature treatments with the diurnal change of 10°C in the phytotron study was similar to that shown in the field study. The data shown for constant temperature without a diurnal change revealed that the extent of positive effects of high temperature at day-time was greater than the extent of negative effects of low temperature at night-time on the early growth of transplanted rice. It was concluded that the critical MT-10DFT for early marginal transplanting of *japonica* rice in the temperate environments was between 11.4 to 11.6°C based on the plant growth and between 12.0 to 12.4°C based on the plant development.

Keywords : critical temperature, *japonica*, rice, transplanting

우리나라와 같은 온대지역은 열대지역에 비하여 사계절이 뚜렷하고 계절에 따른 기온 편차가 크기 때문에 벼를 재배할 수 있는 시기와 기간이 제한되며, 위도가 높을수록 벼 재배기간이 짧아진다(Yang *et al.*, 2007; Yoshida, 1981). 이앙재배의 경우, 온대지역에서 한 해에 벼 재배가 가능한 시기는 생장을 시작할 수 있는 조기이앙 한계기와 등숙이 정체되는 수확 한계기에 따라 결정된다. 벼 조기이앙 한계기와 수확 한계기는 지역에 따라 다르며, 동일한 지역에서도 해에 따른 기온의 차이 때문에 일정하지 않다. 그러므로

어떤 지역에서 조기이앙 한계기와 수확 한계기는 한계온도가 안전하게 나타나는 시기를 기준으로 결정할 수 있다.

그간 자포니카 벼의 등숙 한계온도는 4-13°C로 보고되었다(Ebata, 1990; Kim *et al.*, 2003; Yoshida, 1981). 그러나 최근 우리는 우리나라 자포니카 벼 품종의 등숙 한계온도를 이전 7일 평균기온 9.1~9.4°C로 분석하고, 안전 재배를 위한 수확 한계온도를 10°C로 제안하였다(Yang *et al.*, *In press*). 조기이앙 한계온도 연구 결과도 보고되었는데, 우리나라 벼 재배론의 교재로 활용되고 있는 수도작(Lee, 1986)

¹농촌진흥청 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)

²농촌진흥청 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

<Received 18 October, 2023; Revised 6 November, 2023; Accepted 7 November, 2023>

에는 보온절충못자리 묘의 안전 착근 온도가 일 평균기온 14°C로 기술되어 있으며, 이 기온이 나타나는 시기가 안전 조기 한계이앙기로 정의되어 있다. Yoshida (1981)는 벼 착근 한계 저온이 일 평균 16°C이며, 북부 온대지역에서 비닐 멀칭 육묘하는 경우 일 평균기온이 13~15°C에 도달하면 이앙한다고 기술하였다. Lee *et al.* (1983, 2010)은 1960~1970년대 일본의 연구 결과에 근거하여 일 평균기온 15°C를 이앙기 조한일 설정의 기준으로 활용하였다. 이들을 종합하면 조기이앙 한계온도는 일 평균기온 13~16°C 범위이다.

조기이앙 한계기는 쌀 조기 출하를 위한 조기재배나 고위도 지역과 같이 벼 재배기간이 짧은 조건에서 중요하다. 후자의 경우 재배기간 연장 효과를 위해서는 저온 활착성, 저온 등숙성과 같은 품종 특성의 개선을 생각해 볼 수 있다. 그러나 최근 우리는 고위도 지역 재배 벼 품종의 등숙적온이 우리나라 품종과 비슷한 것을 확인하였고, 저온 지역 적응특성을 짧은 생육기간으로 분석하였다(Yang *et al.*, 2020). 반면, 앞에 기술한 조기이앙 한계온도 13~16°C는 모두 40년 이상 지난 과거의 연구 결과에 근거하고 있으며, 최근까지도 활용되고 있다. 만약 조기이앙 한계온도가 이보다 낮다면 이앙시기를 앞당겨 재배기간을 늘릴 수 있으며, 적응 품종 선택의 폭도 넓힐 수 있다. 본 연구는 고위도 지역과 같은 저온 환경에서 벼 재배기간 확대의 가능성 확인을 목적으로, 현시대 우리나라 자포니카 벼 품종의 조기이앙 한계온도를 검토하기 위하여 수행하였다.

재료 및 방법

시험장소 및 품종

본 연구는 국립식량과학원 중부작물부 벼 재배시험 포장(수원, 37.27N, 126.99E, 해발 34 m)과 인공기상실에서 조생종 오대, 중생종 하이아미, 중만생종 삼광을 이용하여 2020~2023년 4년간 수행하였다.

포장시험

포장시험은 이앙 후 초기 기온의 변이를 유도하기 위하여 2020년부터 2023년에 이앙시기를 조절하여 수행하였다. 2020년과 2021년에는 3 품종을 4월 5일부터 5월 15일까지 10일 간격으로 5회 이앙하였다. 모는 중묘 부직포 표준 육묘방법에 따라 상자당 130 g을 파종하여 30일간 육묘하였으며, 30 × 14 cm 간격으로 기계이앙하고 표준재배법(RDA, 2015)에 따라 관리하였다. 기계이앙 직후 한 줄은 주당 3본으로 조절하였으며, 여기에서 이앙 당시부터 이앙 후 30일까지 이앙시기 처리와 같은 10일 간격으로 생육초기 건물

중과 엽록소 함량을 조사하였다. 건물중은 반복당 5주를 채취하여 뿌리를 제거한 후 7일간 동결건조하여 조사하였다. 위의 시료를 분쇄한 식물체 0.1 g에 80% 아세톤 10 ml를 가하고 1일간 냉장보관하여 엽록소를 추출한 후 원심분리하고 여과하여 645 nm와 663 nm의 흡광도를 조사하였으며(Spectra Max 190, Molecular Devices), 아래의 식 (1)에 따라 엽록소 함량을 계산하였다(Arnon, 1967).

$$\begin{aligned} \text{Total chlorophyll content (mg/g)} & \quad (1) \\ & = \frac{20.2 \times A_{645} + 8.02 \times A_{663}}{\text{Sample weight}} \times (10/1000) \end{aligned}$$

최종 이앙시기인 5월 15일 이앙 후 30일(6월 14일)에 모든 이앙시기 처리에서 고사주 비율을 조사한 후, 반복당 12주를 채취하여 뿌리를 제거하고 70°C에서 7일간 건조한 후 건물중을 측정하여 동일시기의 생육을 비교하였다. 이후 각 이앙시기 처리에서 출수기를 조사하고 6월 14일과 동일한 방법으로 식물체 건물중을 조사하였다. 시험성적은 10일 간격 이앙시기 처리 사이의 비교를 통하여 이앙부터 10일간 평균기온의 성장 증가와 출수 조기화 효과를 분석하였으며, 처리간 차이는 최소유의차(LSD)로 검정하였다. 2020~2021년 시험 결과, 이앙 한계온도 범위가 넓게 나타나 축소가 필요하였는데, 이앙부터 10일간 평균기온의 효과는 품종에 따라 정도의 차이는 있었지만 경향은 유사하였다. 따라서 2022년에는 하이아미 1 품종을 4월 5일부터 30일까지 5일 간격으로 6회 이앙하고, 이앙부터 10일간 평균기온이 2020~2021년 시험의 한계온도 범위 내로 나타난 4월 5일 이앙처리와 10일 후인 4월 15일 이앙의 출수기 생육을 비교하였다. 2023년에는 2020~2022년에 나타난 기온 범위를 보다 축소가 위하여 4월 1일부터 21일까지 2일 간격으로 11회 기계이앙하였다. 이들 이앙시기 처리 중 이앙부터 10일간 평균기온이 2020~2022년 시험의 한계온도 범위 내로 나타난 이앙시기 처리에서 10일 후 이앙시기와 출수기 생육을 비교하였다. 2022년과 2023년 출수기 생육은 2020~2021년과 동일한 방법으로 조사하였다. 2020~2023년 시험구는 이앙시기별 단구제로 배치하고 처리당 3반복으로 조사하였으며, 기온은 기상청 기상정보포털(KMA, 2023)의 일별 자료를 수집하여 활용하였다.

인공기상실 시험

인공기상실 시험은 자연조건에서 신근, 분얼 발생 조사를 위한 포트육묘상자 시험과 기온 처리에 따른 신근, 분얼 발생과 생육 차이 조사를 위한 Growth chamber 시험을 수

행하였다. 포트육묘상자 시험은 2020~2021년 포장시험에
서와 같은 5 시기에 3 품종의 모를 품종당 2개의 72구 원예
용 육묘상자에 이양하고 인공기상실 외부 수조(포트 재배
시설)에 배치하여 재배하였다. 2 상자 중 하나에는 모의 뿌
리를 1 mm 정도 남기고 제거한 모를 이양하여 신근 발생
을 조사하였으며, 다른 하나에는 뿌리를 제거하지 않고 이
양하여 분얼 발생을 조사하였다. 신근 발생은 최초 관찰된
날부터 매일 오전 9~10시에 10개체를 뽑아 신근이 1 cm
이상 신장한 개체수를 조사하였고, 분얼 발생은 전체 36개
체 중 관찰된 개체수를 매일 조사하고 제거하였다.

Growth chamber 시험은 2022~2023년에 평균기온을 10°C
부터 15°C까지 1°C 간격으로 처리하였는데, 2022년에는 일
교차 10°C로 자연조건과 유사하게 기온이 점차 변화도록
자동 조절하였으며, 2023년에는 일교차 없이 항온 조건으
로 처리하였다. 일장은 시험지역에서 2011~2019년 일 평균
기온 10~15°C가 나타나는 4월 6일~30일의 평균값 13.2시
간을 반올림하여 13시간으로 처리하였으며, 낮 시간의 광
도는 PPFD (Photosynthetic photon flux density) 1,200
μmol/s/m²로 유지하였다. 육묘방법은 포장시험과 동일하였
으며, 5월 31일에 포트육묘상자 시험과 동일한 방법으로 3
품종을 이양하고 신근 발생을 조사하였다. Growth chamber
시험에서는 처리 후 30일까지 분얼이 거의 발생하지 않았
다. 뿌리를 제거하지 않고 이양한 포트육묘상자에서 처리
후 30일에 처리당 3반복, 반복당 10개체의 고사 식물체 비
율, 건물중, 엽록소 함량을 조사하였다. 포트육묘상자 시험
과 Growth chamber 시험은 시판상태를 이용하였고, 시험
기간이 30일로 짧았으므로 별도의 시비는 하지 않았다.

결과 및 고찰

2020~2021년 이양기~출수기 평균기온은 일부 시기를 제
외하고는 2021년에 높게 경과하였다(Fig. 1). 이양시기에
따른 이양부터 10일간 평균기온(MT-10DFT)은 2020년에
9.1~17.1°C, 2021년에 11.6~17.8°C 범위였다. 2020년에는
MT-10DFT가 4월 5일과 15일 이양에서는 각각 9.1°C와
10.5°C로 낮다가 4월 25일 이양에서부터 16.2°C 이상으로
급격하게 상승하였으며, 2021년에는 4월 5일~25일 이양에
서 2020년 4월 15일과 25일 이양 MT-10DFT 사이의 온도
인 11.6~13.9°C가 나타났다.

이양시기에 따른 고사주 비율은 2020년의 경우 4월 5일
이양에서 품종에 따라 8.6~24.9%로 유의하게 높았고, 4월
15일~5월 15일 이양에서는 통계적 차이가 없었다(Fig. 2).
2021년에는 고사주 비율이 하이아미와 삼광의 경우 0.6%

이하로 낮았으며, 오대의 경우 4월 5일 이양에서 유의하게
높았으나 2.3%로 낮은 수준이었다. 이 결과를 이양시기별
MT-10DFT에 대입해 보면, 2020년 4월 5일 이양의 9.1°C
에서는 고사주 비율이 높았고, 2020년 4월 15일의 10.5°C
와 2021년 4월 5일 이양의 11.6°C부터는 큰 차이 없이 낮
은 것으로 나타났다(Fig. 1 참고).

이양시기에 따른 이양 후 10일 간격 건물중의 변화는
Fig. 3과 같다. 2020년의 경우, 4월 5일과 15일 이양에서는
이양 후 30일까지 건물중이 증가하지 않거나 유의하게 증
가한 경우에도 증가량이 적었으나, 4월 25일 이양부터는
모든 품종에서 이양 후 20일과 30일의 건물중 증가가 뚜렷
하였다(A, B, C). 2021년에는 가장 이른 4월 5일 이양에서
도 날짜 경과에 따라 이양 당시 대비 건물중이 증가하는 추
세를 보였다(D, E, F). 이 결과는 2020년 4월 5일과 15일
이양에 비하여 2021년 4월 5일 이양에서 MT-10DFT가 더
높았기 때문으로 판단된다(Fig. 1 참고).

2020년 4월 5일과 15일 이양에서는 이양 당시 대비 10일
과 20일 후에 대부분의 경우 건물중이 정체되거나 감소하

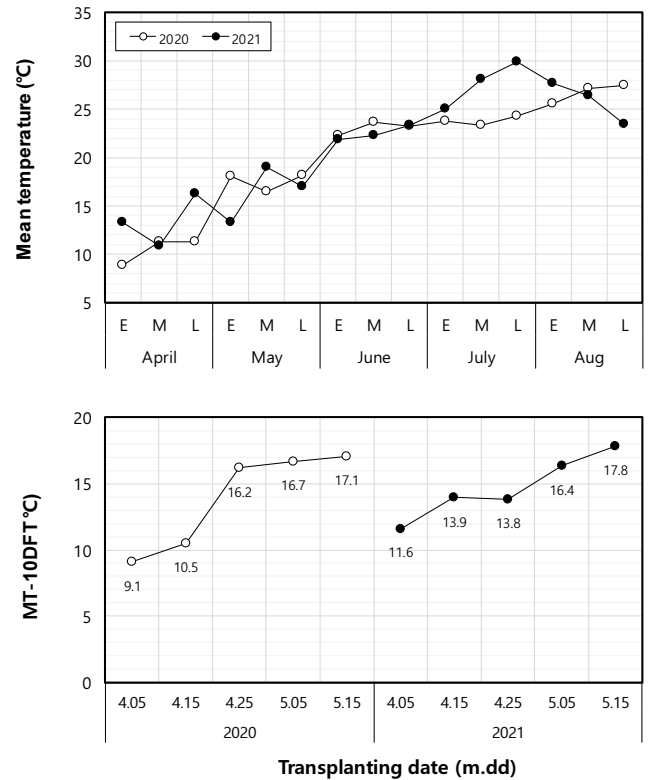


Fig. 1. Changes in the mean temperature during rice cropping period and the mean temperature for 10 days from transplanting (MT-10DAF) in the five transplanting-date treatments in 2020 and 2021. E: early, M: middle, L: late.

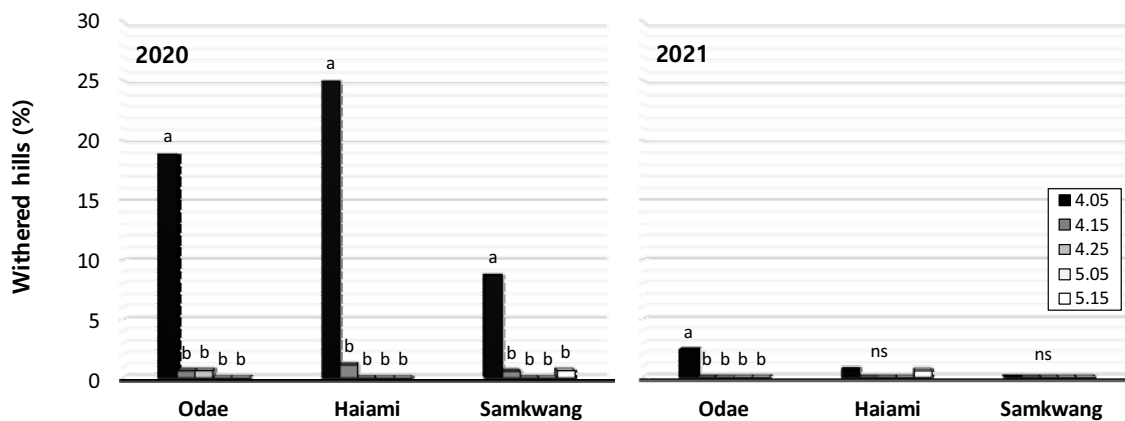


Fig. 2. Withered hills in the transplanting-date treatments for the three varieties in 2020 and 2021. Legend shows the transplanting dates in the form of m.dd. The same letters for each variety in a year are not significantly different according to LSD (0.05). ns: not significant.

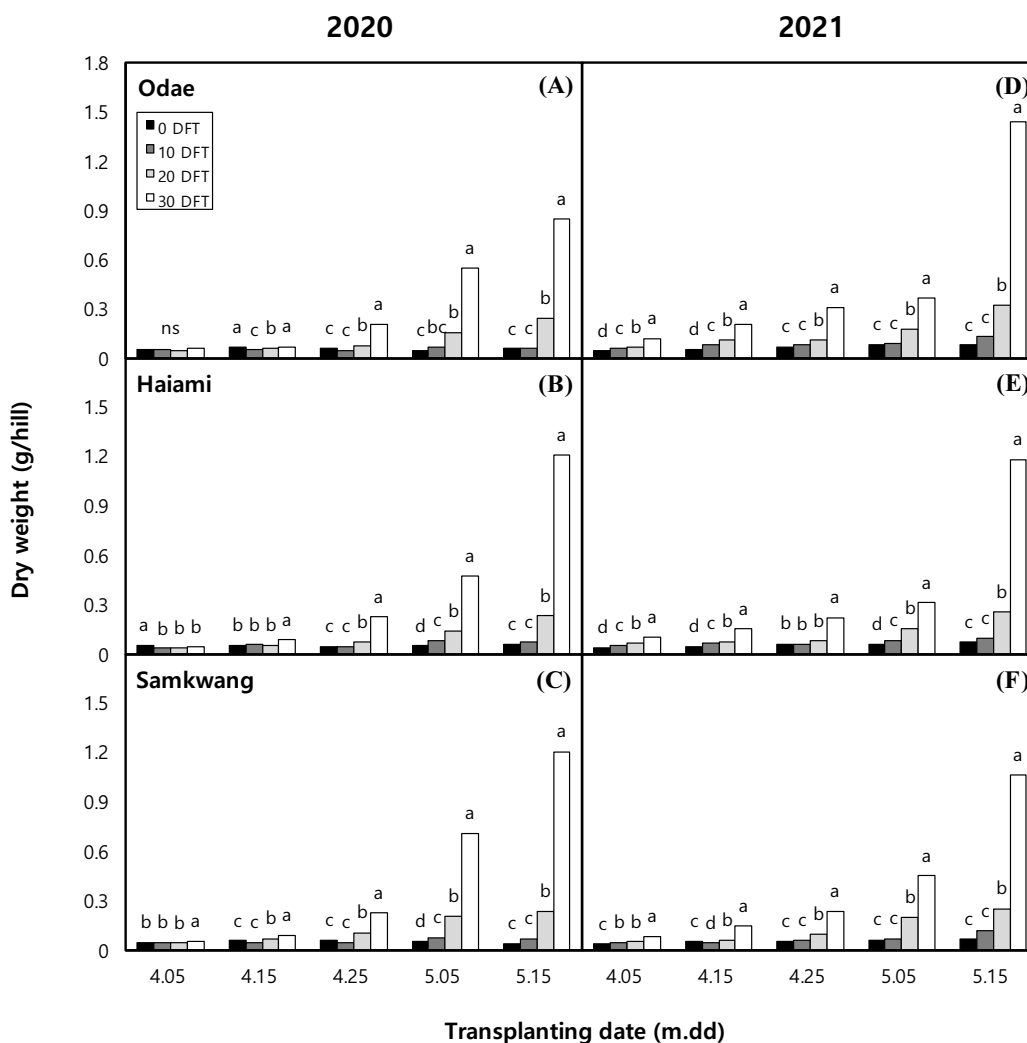


Fig. 3. Changes in the dry weight at 0 to 30 days from transplanting (DFT) in the transplanting-date treatments for the three rice varieties in 2020 and 2021. The same letters for each transplanting date in each variety and year are not significantly different according to LSD (0.05). ns: not significant.

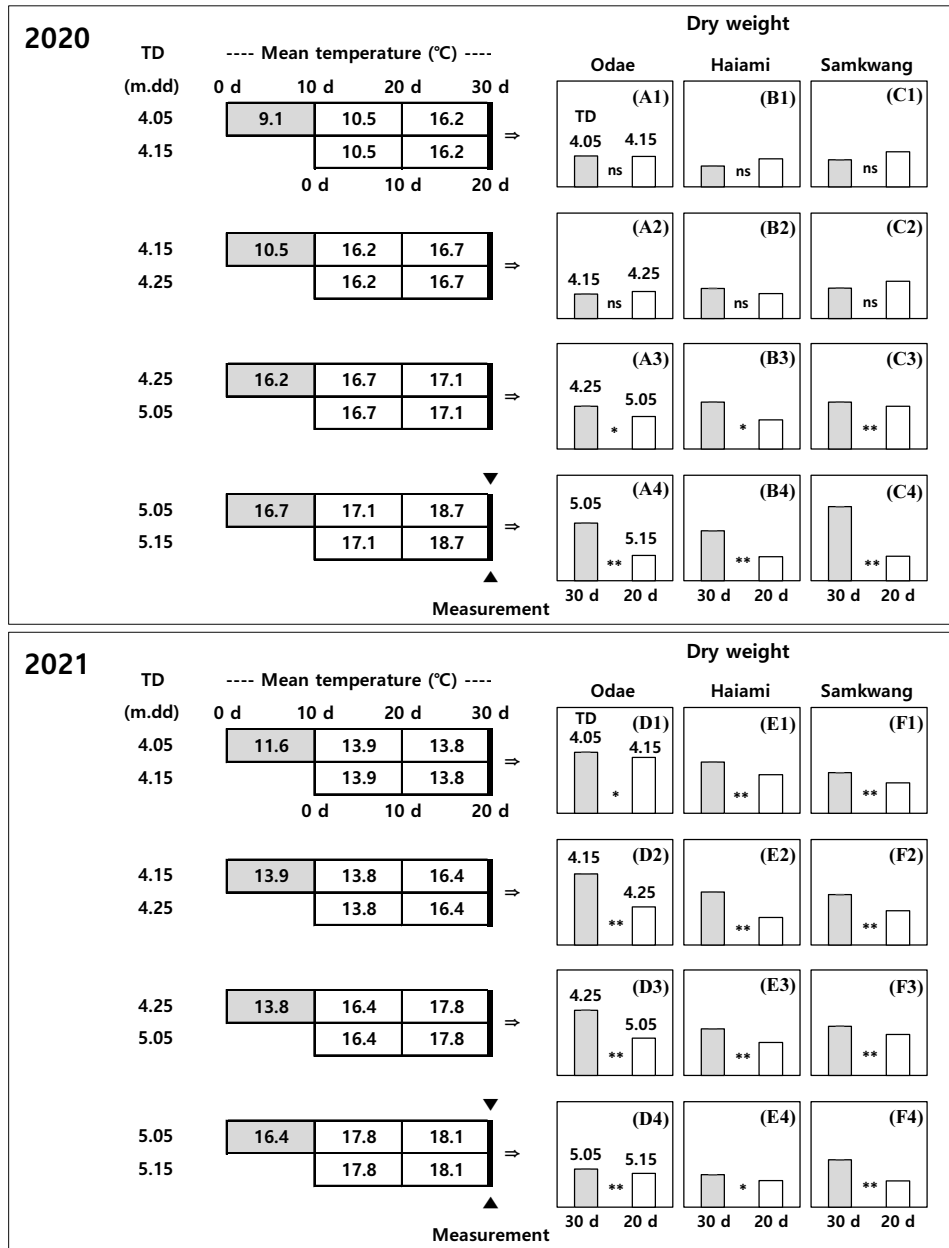


Fig. 4. Changes in the 10-day mean temperature between adjacent transplanting date (TD) treatments that were planted in a 10-day interval and the comparison of dry weight at 30 days from transplanting (30 d) in the former transplants and 20 d in the latter transplants for each of the three rice varieties in 2020 and 2021. Transplanting dates in the panels are in the form of m.dd. *, **, and ns: significant at $P < 0.05$, $P < 0.01$, and not significant, respectively.

였는데, 여기에는 낮은 기온과 식상(transplanting shock)이 함께 영향을 미쳤다고 볼 수 있다. 식상에 의한 뿌리 피해는 엽신과 분얼 발달을 지연시키는 것으로 보고되었는데 (Lee *et al.*, 2021), 현재까지 보고된 이양 한계온도는 16°C (Yoshida, 1981)가 가장 높다. MT-10DFT가 16°C보다 높았던 2020년 4월 25일 이양과 5월 15일 이양, 2021년 5월 5일과 15일 이양에서도 이양 후 10일의 건물중이 이양 당

시와 유의한 차이가 없었던 것은 위의 해석을 뒷받침한다. 그러므로 2020년 4월 5일과 15일 이양에서 생육 초기에 건물중이 정체 또는 감소한 현상을 MT-10DFT만의 영향으로 볼 수 없었다. 따라서 이양시기에 따른 MT-10DFT의 생장 증가 효과를 분석하기 위하여 한 이양시기의 이양 후 30일과 10일 후 이양 처리의 이양 후 20일 건물중을 비교하였다(Fig. 4). 2020년 4월 5일 이양 후 30일은 4월 15일 이양

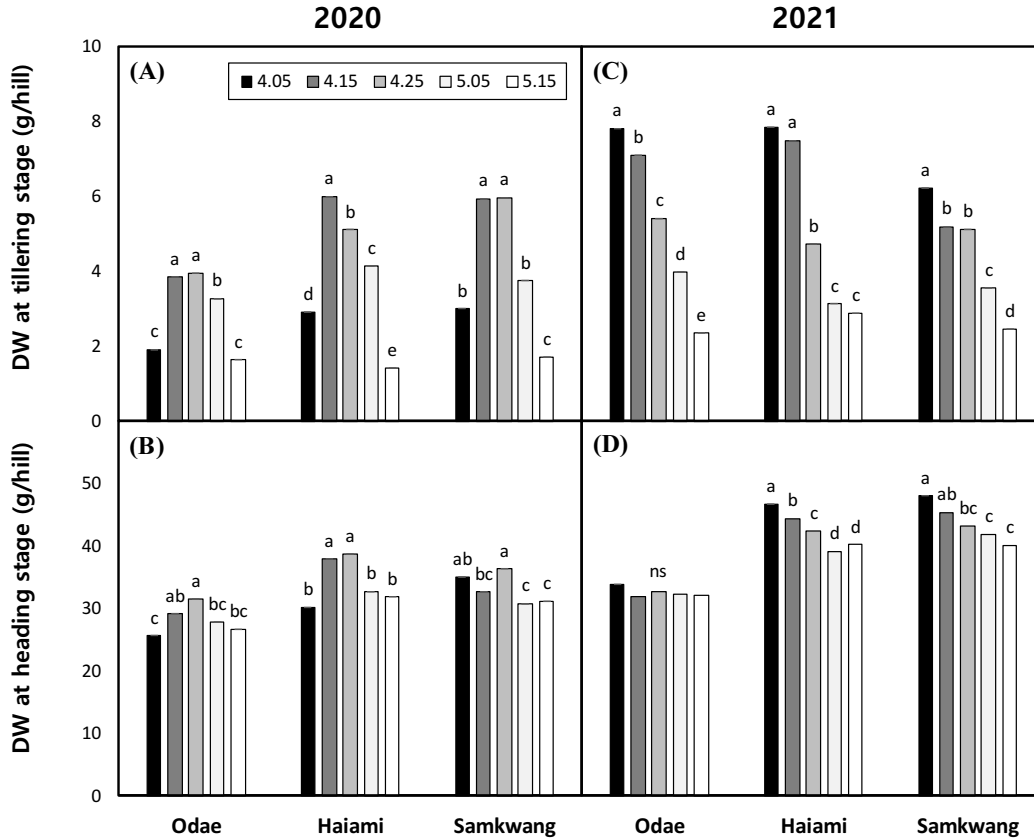


Fig. 5. Dry weight (DW) at tillering stage (June 14) and heading stage of rice plants in the transplanting-date treatments of the three varieties in 2020 and 2021. Legend shows the transplanting dates in the form of m.dd. The same letters for each variety in a year are not significantly different according to LSD (0.05). ns: not significant.

후 20일과 같은 시기이므로, 조사 시점에 두 처리의 차이는 4월 5일~14일의 10일간 평균기온 9.1°C이다. 이 시기에 두 이앙시기 처리 사이의 건물중은 모든 품종에서 통계적 차이가 없었고, 하이아미와 삼광은 늦게 이앙한 4월 15일 이앙에서 더 컸다(A1, B1, C1). 이앙시기 처리 사이에 통계적 차이가 없었던 것은 4월 15일 이앙 후 30일과 4월 25일 이앙 후 20일의 비교에서도 같았다(A2, B2, C2). 이 결과는 4월 5일과 15일 이앙의 MT-10DFT 9.1°C와 10.5°C는 초기 성장 증가 효과가 없다는 것을 의미한다. 4월 25일과 5월 5일 이앙 후 30일 건물중은 10일 후 이앙 처리의 이앙 후 20일 건물중보다 유의하게 높았다(A3-4, B3-4, C3-4). 그러므로 4월 25일과 5월 5일 이앙의 MT-10DFT 16.2°C와 16.7°C는 초기 성장 증가 효과가 인정되었다. 2021년 4월 5일 이앙 후 30일과 4월 15일 이앙 후 20일 비교에서는 모든 품종의 건물중이 4월 5일 이앙에서 유의하게 높았다(D1, E1, F1). 4월 15일부터 5월 5일 이앙 후 30일 건물중도 10일 늦은 이앙 처리의 이앙 후 20일 건물중보다 높았다(D2-4, E2-4, F2-4). 그러므로 2021년 4월 5일 이앙에서

나타난 MT-10DFT 11.6°C 이상은 초기 성장 증가 효과가 인정되었다. 결과적으로 MT-10DFT 기준 초기 성장 증가 효과가 나타난 가장 낮은 온도는 2021년 4월 5일 이앙의 11.6°C였고, 효과가 나타나지 않은 가장 높은 온도는 2020년 4월 15일 이앙의 10.5°C였다. 그러므로 초기 성장 증가 효과를 나타내는 한계온도는 MT-10DFT 기준 10.5°C와 11.6°C 사이에 존재하는 것으로 해석되었다.

생육 초기 건물중 변화 양상이 생육 진전에 따라 어떻게 변화하는지 확인하기 위하여 분얼기인 6월 14일과 출수기에 식물체 건물중을 조사하였다(Fig. 5). 2020년 4월 5일 이앙에서 분얼기 건물중은 모든 품종에서 10일 후인 4월 15일 이앙보다 낮아(A), 4월 5일 이앙의 MT-10DFT 9.1°C는 분얼기 성장을 감소시켰다(Fig. 1 참고). 2020년 4월 25일 대비 4월 15일 이앙의 분얼기 건물중은 오대와 삼광의 경우 차이가 없었고 하이아미의 경우는 높아, 4월 15일 이앙의 MT-10DFT 10.5°C가 오대와 삼광에서는 성장 증가 효과가 없었고 하이아미에서는 효과가 인정되었다. 2020년 4월 25일 이앙부터는 10일 후 이앙에 비해 모든 품종에서

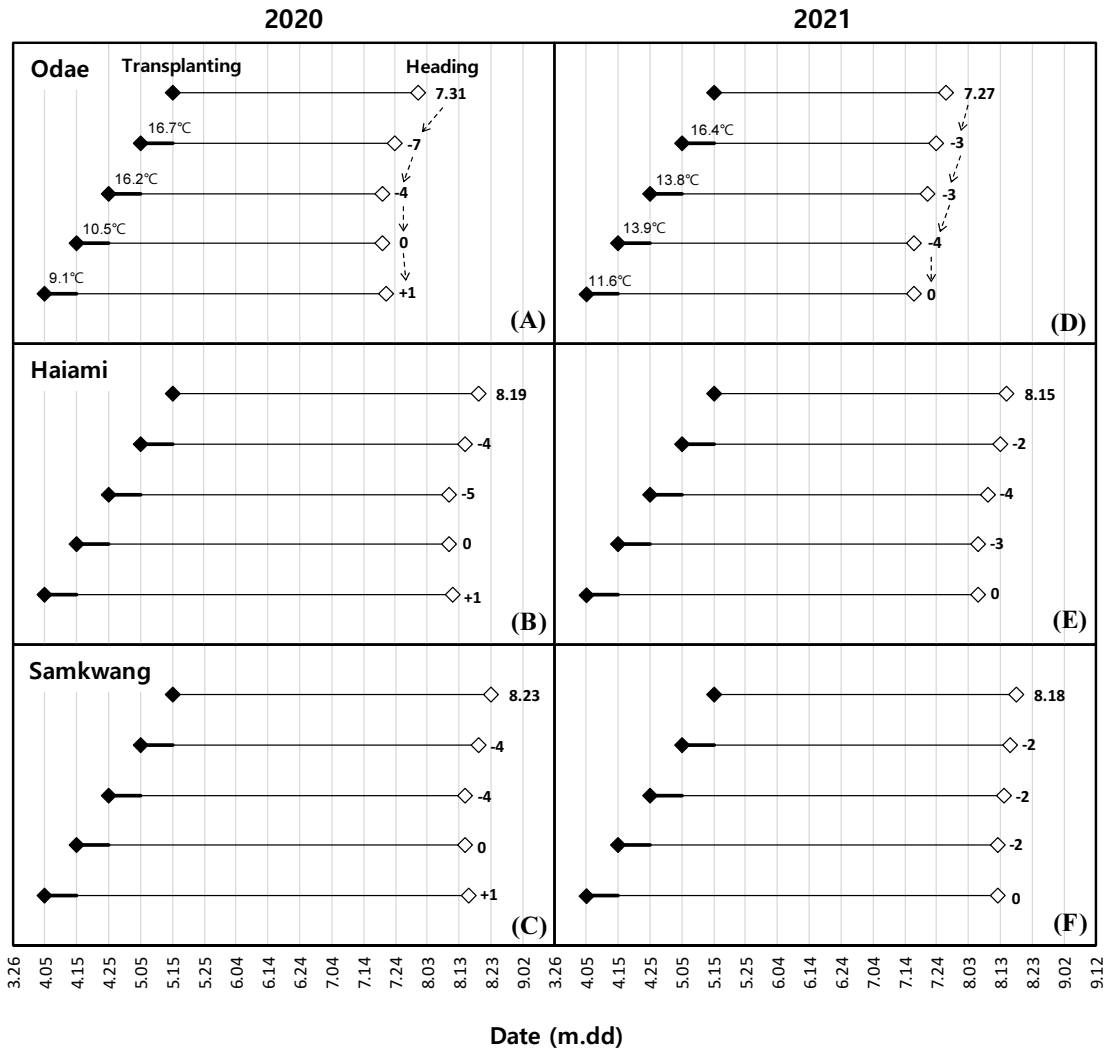


Fig. 6. Comparison of the heading dates in different transplanting dates for the three varieties in 2020 and 2021. Temperature data on the transplanting symbols represent the 10-day mean temperature from transplanting. The data adjacent to the heading symbols for the May 15-transplants show the heading dates in the form of ‘m.dd’ and those for April 5 to May 5-transplants show the difference of heading dates, compared to the next 10-day later transplanting treatments.

분얼기 건물중이 높아, MT-10DFT 16.2°C 이상에서는 분얼기 생장이 증가하였다. 2021년에는 품종에 따라 유의성에 차이는 있었지만 모든 품종의 분얼기 건물중이 4월 5일 이양에서 가장 높아(C), 이때의 MT-10DFT 11.6°C는 분얼기 성장 증가 효과를 나타내었다. 출수기 건물중은 2020년의 경우 3 품종 모두 4월 25일 이양에서 가장 높아(B), 출수기 성장 증가 효과가 4월 5일과 15일 이양의 MT-10DFT 9.1~10.5°C에서는 나타나지 않았고 4월 25일 이양의 16.2°C 이상에서 나타났다. 2021년 출수기 건물중은 오대의 경우 이양시기에 따라 통계적 차이가 없었으나 4월 5일과 4월 15일 이양의 2 처리 비교에서는 4월 5일 이양에서 높았고, 하이아미와 삼광에서는 유의성에 차이가 있었으나 4월 5일

이양에서 가장 높았다(D). 분얼기 건물중은 같은 시기에 조사하였기 때문에 10일 후 이양 대비 건물중의 차이를 MT-10DFT의 영향으로 볼 수 있다. 그러나 출수기 건물중은 출수기 차이의 영향이 함께 나타나기 때문에 출수기가 동일한 경우에만 MT-10DFT의 단독 영향을 평가할 수 있다. 따라서 출수기가 같았던 2020년 4월 15일과 25일 이양, 2021년 4월 5일과 15일 이양(Fig. 6 참고)에서 나타난 출수기 건물중을 비교해 보면, MT-10DFT 10.5°C는 출수기 성장 증가 효과가 없고 11.6°C는 증가 효과가 인정되었다. 따라서 2020~2021년 출수기 성장 증가에 효과적인 조기이양 한계온도는 MT-10DFT 10.5~11.6°C 사이로 분석되었다.

2020~2021년 이양시기에 따른 출수기의 차이는 Fig. 6과

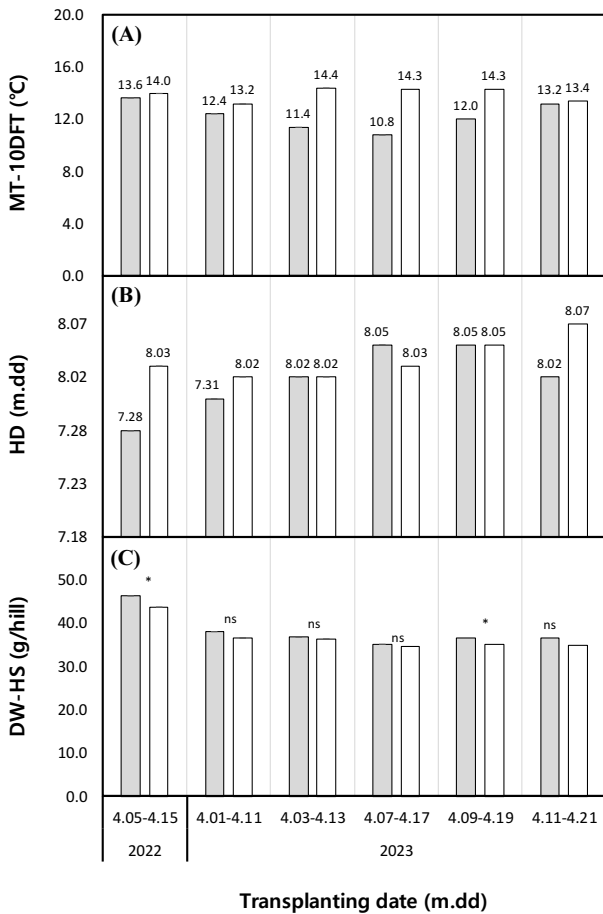


Fig. 7. Mean temperature for 10 days from transplanting (MT-10DFT), heading date (HD), and dry weight at heading stage (DW-HS) of Haiami variety in the six combinations of 10-day interval transplanting-date treatments where the MT-10DFT of the earlier transplanting was in the range of 10.8 - 13.6°C in 2022 and 2023. * and ns: significant at $P < 0.05$ and not significant, respectively.

같다. 2020년 4월 5일 이앙은 4월 15일 이앙에 비하여 모든 품종에서 출수기가 1일 늦었고, 4월 15일 이앙은 4월 25일 이앙과 출수기가 같았다(A, B, C). 4월 25일과 5월 5일 이앙은 각각 10일 후 이앙에 비하여 출수기가 4~5일과 4~7일 빨랐다. 2021년에는 4월 5일 이앙의 출수기가 4월 15일 이앙과 같았으며, 4월 15일 이앙부터는 10일 후 이앙에 비하여 출수기가 빨랐다(D, E, F). 정상적인 생장 환경에서는 일찍 이앙한 벼의 생장이 시기적으로 더 빨리 시작되고 생육상 전환 시기도 빨라지기 때문에 출수기가 이른 것이 일반적이다. 그러나 본 연구에서 2020년 4월 5일 이앙에서는 10일 늦은 4월 15일 이앙에서보다 오히려 출수기가 늦었고, 2020년 4월 15일과 2021년 4월 5일 이앙에서는 10일 후 이앙 처리에서와 출수기 차이가 없었다. 그러므로 2020

년 4월 5일 이상의 MT-10DFT 9.1°C는 벼의 발달을 지연시키며, 2020년 4월 15일 이상의 10.5°C와 2021년 4월 5일 이상의 11.6°C는 벼의 발달을 정체시키는 것으로 해석되었다. 두 해에 출수 조기화 효과가 나타난 최저 MT-10DFT는 2021년 4월 25일 이상의 13.8°C로 나타났다. 따라서 출수 조기화에 효과적인 조기이앙 한계온도는 효과가 나타나지 않은 최고 MT-10DFT 11.6°C와 효과가 나타난 최저 MT-10DFT 13.8°C 사이로 분석되었다.

2020~2021년 시험 결과를 종합하면, 3 품종 공통적으로 생장 증가에 효과적인 조기이앙 한계온도는 MT-10DFT 기준 10.5~11.6°C 사이, 출수 조기화에 효과적인 조기이앙 한계온도는 11.6~13.8°C 사이에 존재하는 것으로 나타났다. 생장 증가와 출수 조기화의 관점에서 나타난 조기이앙 한계온도는 각각 1.1°C와 2.2°C 범위로, 특히 후자의 범위가 넓었다. 평균기온 2.2°C 차이는 수원 지역에서 2011~2019년 4월 5일~5월 15일 1일 평균기온 변화의 10일 이상에 해당하므로 한계온도 범위의 축소가 필요하였다. 2022~2023년 하이아미에서 2020~2021년 한계온도 범위 이내의 MT-10DFT가 나타난 이앙시기와 10일 후 이앙 처리의 출수기와 출수기 건물중은 Fig. 7과 같다. 출수기는 2023년 4월 7일 이앙에서는 10일 후 이앙보다 2일 늦어(B), MT-10DFT 10.8°C (A) 조건에서는 벼의 발달이 지연되었다. 2023년 4월 3일과 9일 이앙에서는 10일 후 이앙과 출수기가 같아, 이때의 MT-10DFT 11.4~12.0°C는 발달 정체의 결과를 가져왔다. 2023년 4월 1일과 11일 및 2022년 4월 5일 이앙에서는 10일 후 이앙보다 출수기가 2~6일 빨라, MT-10DFT 12.4~13.6°C는 발달 촉진 효과를 나타내었다. 출수기가 같았던 비교 처리에서 출수기 건물중은 4월 3일 이앙의 경우 4월 13일 이앙과 유의한 차이가 없어(C), MT-10DFT 11.4°C는 생장 증가 효과가 없었으나, 4월 9일 이앙에서는 4월 19일 이앙보다 유의하게 높아 MT-10DFT 12.0°C는 출수기 생장 증가 효과가 인정되었다. 2022~2023년 포장시험 결과를 종합하면, MT-10DFT 기준 출수 조기화와 생장 증가 모두에 효과가 없는 최고 온도는 11.4°C, 출수 조기화 효과는 없으나 출수기 생장 증가 효과를 나타낸 최저 온도는 12.0°C, 출수 조기화 효과를 보인 최저온도는 12.4°C로 분석되었다.

2020~2023년 검토한 하이아미의 MT-10DFT와 10일 후 이앙의 비교 조합에서 출수기와 출수기 건물중의 차이를 Table 1에 종합하였다. 4년의 포장시험 결과, 출수 조기화 효과는 없으나 출수기 생장 증가에 효과적인 조기이앙 한계온도는 MT-10DFT 기준 11.4~11.6°C 사이, 출수 조기화에 효과적인 조기이앙 한계온도는 12.0~12.4°C 사이로 평가되었다.

Table 1. Effects of mean temperature for 10 days from transplanting (MT-10DFT) on the heading date and the dry weight at heading stage of Haiami variety in 2020-2023.

MT-10DFT (°C)	Year	Transplanting date (m. dd)	Growth at heading stage			
			Heading date		Dry wt.	
			(m.dd)	Difference	(g/hill)	t-test (0.05)
9.1	2020	4. 05	8.11	1	30.2	*
		4. 15	8.10		37.8	
10.5	2020	4. 15	8.10	0	37.8	ns
		4. 25	8.10		38.8	
10.8	2023	4. 07	8.05	2	35.1	ns
		4. 17	8.03		34.6	
11.4	2023	4. 03	8.02	0	36.8	ns
		4. 13	8.02		36.4	
11.6	2021	4. 05	8.06	0	46.6	*
		4. 15	8.06		44.4	
12.0	2023	4. 09	8.05	0	36.7	*
		4. 19	8.05		35.1	
12.4	2023	4. 01	7.31	-2	38.0	ns
		4. 11	8.02		36.6	
13.2	2023	4. 11	8.02	-5	36.6	ns
		4. 21	8.07		34.9	
13.6	2022	4. 05	7.28	-6	46.4	*
		4. 15	8.03		43.8	
13.8	2021	4. 25	8.09	-4	42.3	*
		5. 05	8.13		39.1	
13.9	2021	4. 15	8.06	-3	44.4	*
		4. 25	8.09		42.3	
14.0	2022	4. 15	8.03	-3	43.8	ns
		4. 25	8.06		44.9	
16.2	2020	4. 25	8.10	-5	38.8	*
		5. 05	8.15		32.8	
16.3	2022	4. 20	8.05	-10	47.3	ns
		4. 30	8.15		45.3	
16.4	2021	5. 05	8.13	-2	39.1	ns
		5. 15	8.15		40.2	
16.7	2020	5. 05	8.15	-4	32.8	ns
		5. 15	8.19		31.9	

The two transplanting-date treatments that had a 10-day difference were coupled for comparison. The data written in bold font show the critical temperature range for early marginal transplanting that resulted in the increased growth and accelerated development of rice.

* and ns: significant at $P < 0.05$ and not significant, respectively.

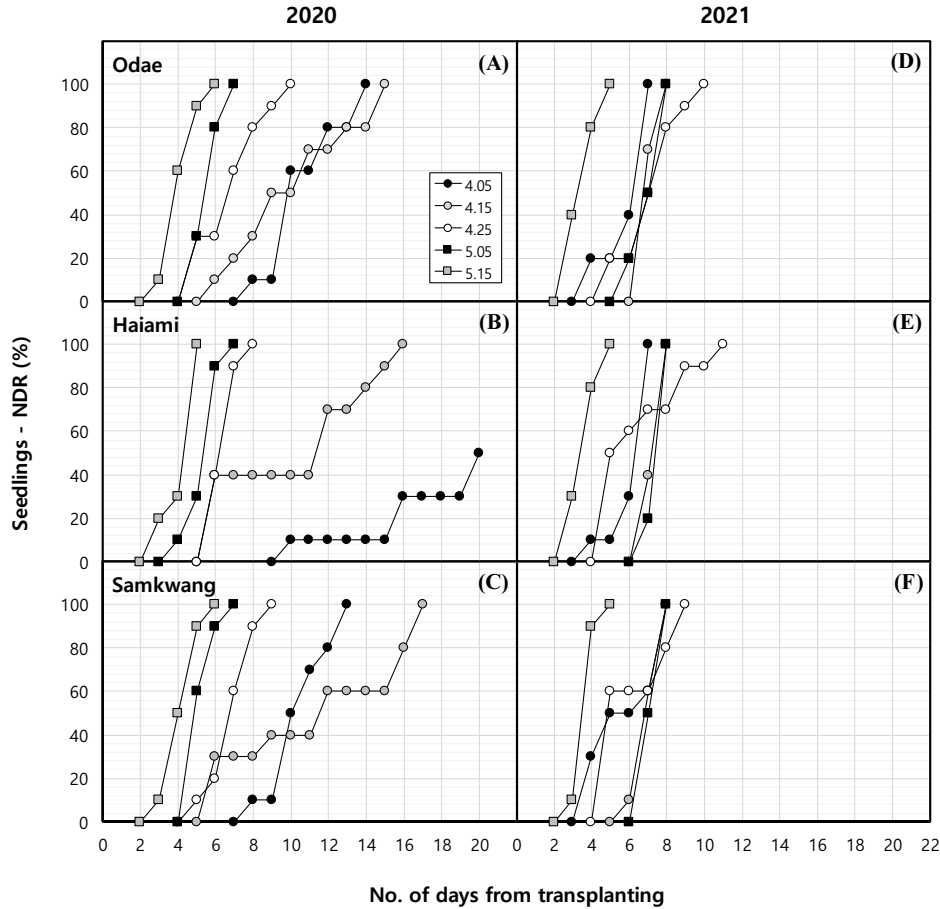


Fig. 8. Changes in percentage of seedlings that had a newly developed root (Seedlings-NDR) in the five transplanting-date treatments for the three varieties in 2020 and 2021. Legend shows the transplanting dates in the form of m.dd.

Lee (1986)는 안전 착근 한계온도를 고려하여 안전 조기 이앙기로 정하는 것이 바람직하다고 하였다. 그러므로 모의 신근 발생은 활착에 중요한 지표라고 할 수 있다. 따라서 벼의 활착과 직접 관련되는 식물체 지하부 지표인 신근 발생과 지상부 지표인 엽록소 함량, 그리고 벼의 생육 진전 지표 중 하나인 분얼 발생을 2020~2021년에 이앙시기에 따라 조사하였다. 2020년 이앙 후 신근 발생 속도는 이앙시기가 빠를수록 늦은 경향이었다(Fig. 8A, B, C). 최종 신근 발생 비율은 오대와 삼광의 경우 가장 이른 4월 5일 이앙에서도 100%를 보였으며, 하이아미의 경우 4월 5일 이앙에서 50%였고 4월 15일 이앙부터 100%를 나타내었다. 2021년에는 모든 이앙시기에서 신근 발생 비율이 100%를 나타내었으며, 신근 발생 속도는 5월 15일 이앙에서 가장 빨랐을 뿐 이앙시기에 따라서도 일정하지 않았다(D, E, F). 이앙시기에 따른 최종 신근 발생 비율과 발생 속도가 해에 따라 달랐던 것은 이앙 후 초기 기온 범위가 2020년에 더 넓었고 2021년에는 이앙시기에 따라 기온이 등락했기 때문

으로 판단된다(Fig. 1 참고). 2020년 4월 5일 이앙에서 오대와 삼광의 신근 발생 비율은 100%였지만(A, C) 고사주 비율은 9~25%로 높아(Fig. 2 참고), 신근 발생이 시작된 후 생장을 유지하지 못한 개체가 많은 것으로 나타났다. 그러나 4월 15일 이앙에서는 모든 품종의 신근 발생 비율이 100%였고(A, B, C) 고사주 비율은 0.5~1.1%로 낮아(Fig. 2 참고), 최초 신근 발생 이후 대부분의 개체에서 활착이 이루어진 것으로 나타났으며, 이때의 MT-10DFT는 10.5°C였다(Fig. 1 참고).

2020~2021년 이앙 당시부터 30일까지 식물체 엽록소 함량의 변화는 Fig. 9와 같다. 2021년 오대와 하이아미의 5월 15일 이앙(D, E)을 제외한 모든 경우, 엽록소 함량은 이앙 당시보다 낮아졌다가 다시 높아지는 추세를 나타내었으며, 이앙시기가 빠를수록 이앙 당시 대비 저하 정도가 크고 다시 증가하기 시작하는 기간이 길었다. 2021년 오대와 하이아미의 5월 15일 이앙에서 이앙 후 엽록소 함량이 감소하지 않았던 것은 이앙 후 MT-10DFT가 17.8°C로 높았기 때

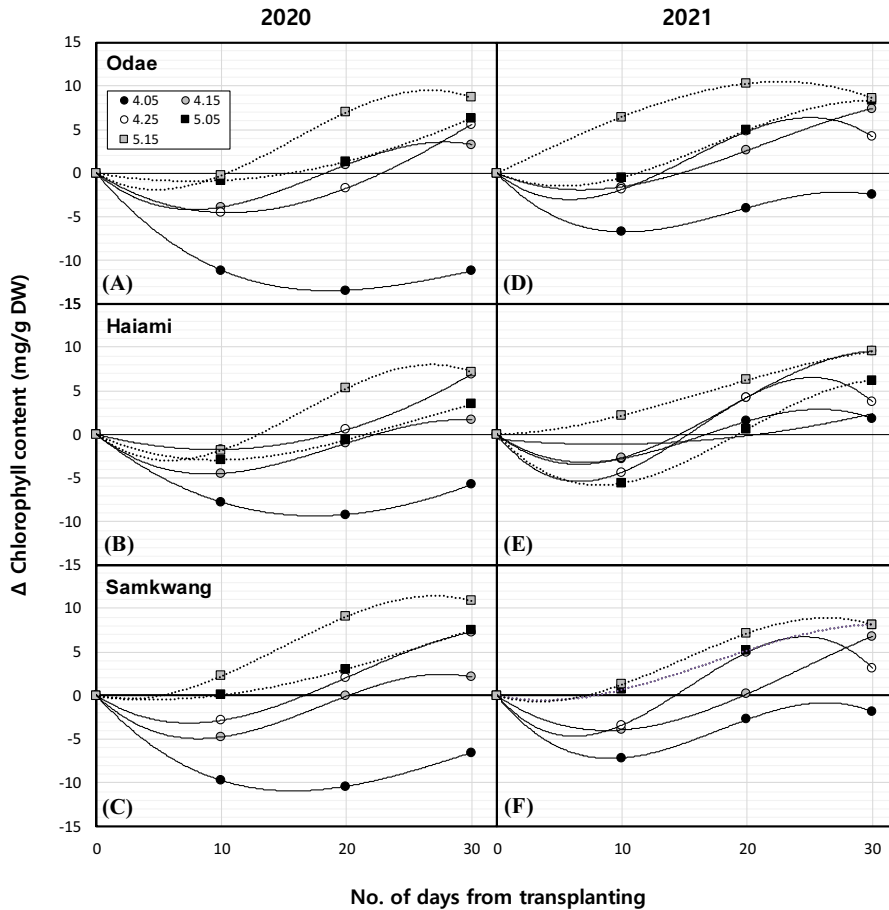


Fig. 9. Changes in plant’s chlorophyll content for 30 days from transplanting, compared to that at transplanting date, in different planting-date treatments for the three varieties in 2020 and 2021. Legend shows the transplanting dates in the form of m.dd.

문으로 생각된다(Fig. 1 참고). 이앙 후 엽록소 함량은 특히 2020년 4월 5일 이앙에서 감소 정도가 컸고, 이앙 후 30일 까지도 이앙 당시 수준까지 회복되지 않았다(A, B, C). 2020년 4월 15일 이앙부터는 이앙 후 30일에 이앙 당시 수준 이상으로 엽록소 함량이 증가하였다. 2021년 4월 5일 이앙에서 하이아미는 이앙 후 30일에 이앙 당시보다 엽록소 함량이 높아졌고, 오대와 삼광은 이앙 당시보다 약간 낮았다(D, E, F). 2021년 4월 5일 이앙에서 MT-10DFT는 2020년 4월 15일 이앙에서보다 높았는데, 이앙 후 30일에 품종에 따라 이앙 당시 수준까지 회복되지 않았던 것은 이앙 후 10일부터 30일까지 기온이 상대적으로 낮았기 때문으로 판단되었다(Fig. 4 참고).

분얼은 2020년 4월 5일 이앙에서는 3 품종 모두 이앙 후 30일까지 발생하지 않았으며, 4월 15일 이앙에서는 삼광에서만 이앙 후 28일에 발생이 시작되었다(Fig. 10A, B, C). 4월 25일 이앙부터는 이앙 후 분얼 발생 기간이 현저하게 짧아졌고 이앙이 늦을수록 더 빨라지는 경향이였다. 2021

년에는 이앙이 늦을수록 분얼 발생 비율과 속도가 높아진 것은 2020년과 같은 경향이였으나, 4월 5일 이앙한 오대에서 이앙 후 30일, 4월 15일 이앙한 오대와 삼광에서 이앙 후 27~28일에 분얼 발생이 관찰되었다(D, E, F).

2020~2021년 이앙시기에 따른 최초 신근 발생, 엽록소 함량 증가 개시, 최초 분얼 발생 시기를 Fig. 11에 종합하였다. 벼 활착 지표로 보면 2020년에는 신근 발생 → 엽록소 함량 증가 개시 → 분얼 발생의 순서로 진행되었는데, 이앙이 늦어 기온이 높을수록 최초 신근 발생과 엽록소 함량 증가 개시 시기의 차이가 작아지는 경향이였다(A, B, C). 2021년에는 4월 5일 이앙의 경우 2020년과 같은 순서로 진행되었고, 4월 15일 이앙부터는 신근 발생과 엽록소 함량 증가 개시 시기가 거의 같았다(D, E, F). 이 결과로 보면, 기온이 낮은 조건에서는 식상으로 인해 지상부 엽록소 함량이 낮아지고 순차적으로 신근이 발생하여 양수분 흡수가 진행되면서 엽록소 함량의 증가가 시작되는 것으로 해석된다. 그러나 기온이 높은 조건에서 이앙하면 식상 피해가 적

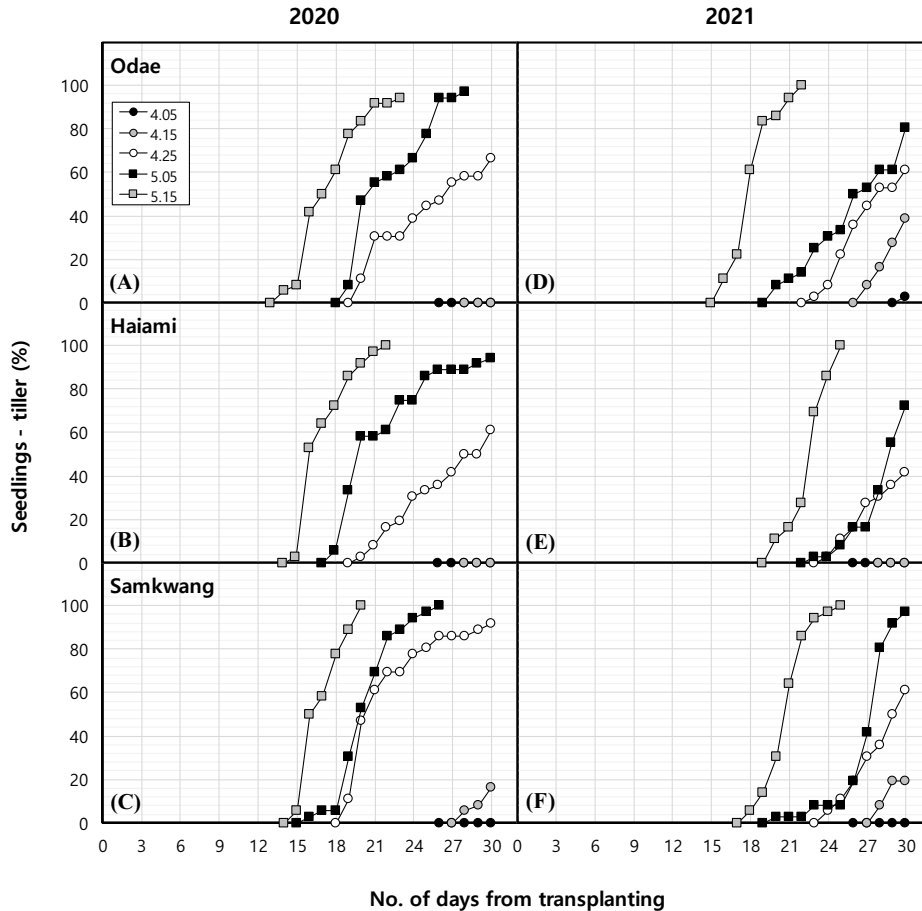


Fig. 10. Changes in percentage of seedlings that developed a tiller (Seedlings-tiller) in the transplanting-date treatments for the three varieties in 2020 and 2021. Legend shows the transplanting dates in the form of m.dd.

어지면서 뿌리 발달도 빨라 엽록소 함량 증가 개시와 신근 발생 시기의 차이가 적어지는 것으로 생각된다. 날짜를 기준으로 보면, 신근 발생은 MT-10DFT가 가장 낮았던 2020년 4월 5일 이앙의 9.1°C 조건에서도 10일 후 이앙에 비해 시기적으로 빨랐다. 그러나 엽록소 함량 증가 개시 날짜는 2020년 4월 5일 이앙과 15일 이앙에서 품종에 따라 약간의 차이는 있지만 거의 같아(A, B, C), MT-10DFT 9.1°C는 엽록소 함량 증가 개시 시기를 앞당기는 효과가 없었다. 이것은 4월 15일에 비해 4월 5일 이앙에서 최초 신근 발생 이후 근권의 발달이 늦어져 나타난 현상으로 판단된다. 이앙 후 엽록소 함량 증가 개시 시기를 앞당기는 효과는 2020년의 경우 4월 15일, 2021년의 경우 4월 5일 이앙부터 나타났으므로, MT-DFT 10.5°C 이상에서는 효과가 인정되었다. 이앙 후 30일까지 조사하였을 때, 2020년 4월 15일 이앙의 최초 분얼은 삼광의 경우 4월 25일 이앙과 비슷한 날짜에 발생하였고, 오대와 하이아미의 경우 4월 25일 이앙에서 분얼 발생이 관찰되기 시작한 날짜까지 발생하지 않았다

(A, B, C). 그러므로 4월 15일 이앙의 MT-10DFT 10.5°C는 이앙 후 신근 발생과 엽록소 함량 증가 개시 시기를 앞당기는 효과는 있지만 분얼 발생 촉진 효과는 없었다. 모든 품종에서 분얼 발생 조기화 효과가 나타난 가장 낮은 MT-10DFT는 2021년 4월 25일 이앙의 13.8°C였다(D, E, F). 2021년 4월 5일 이앙의 MT-10DFT 11.6°C는 오대에서 분얼 발생 조기화 효과를 나타내었으나(D), 하이아미와 삼광에서는 시험 종료 시기까지 분얼이 발생하지 않아 효과를 확인할 수 없었다(E, F). 분얼 발생 조기화 효과가 없었던 2020년 4월 15일 이앙(A, B, C)에서는 10일 후 이앙에 비하여 출수기 건물중이 높지 않았고(Fig. 5B 참고), 분얼 발생 조기화 효과가 확인된 2021년 오대의 4월 5일 이앙(D)에서는 10일 후 이앙에 비하여 출수기 건물중이 높았다(Fig. 5D 참고). 출수기가 같은 경우 분얼 발생 개시 시기가 빠를 때 출수기 건물중이 높게 나타난 것을 감안하면, 출수기 건물중이 이후 10일 이앙에서보다 높았던 2021년 하이아미와 삼광의 4월 5일 이앙에서도 4월 15일 이앙에 비해

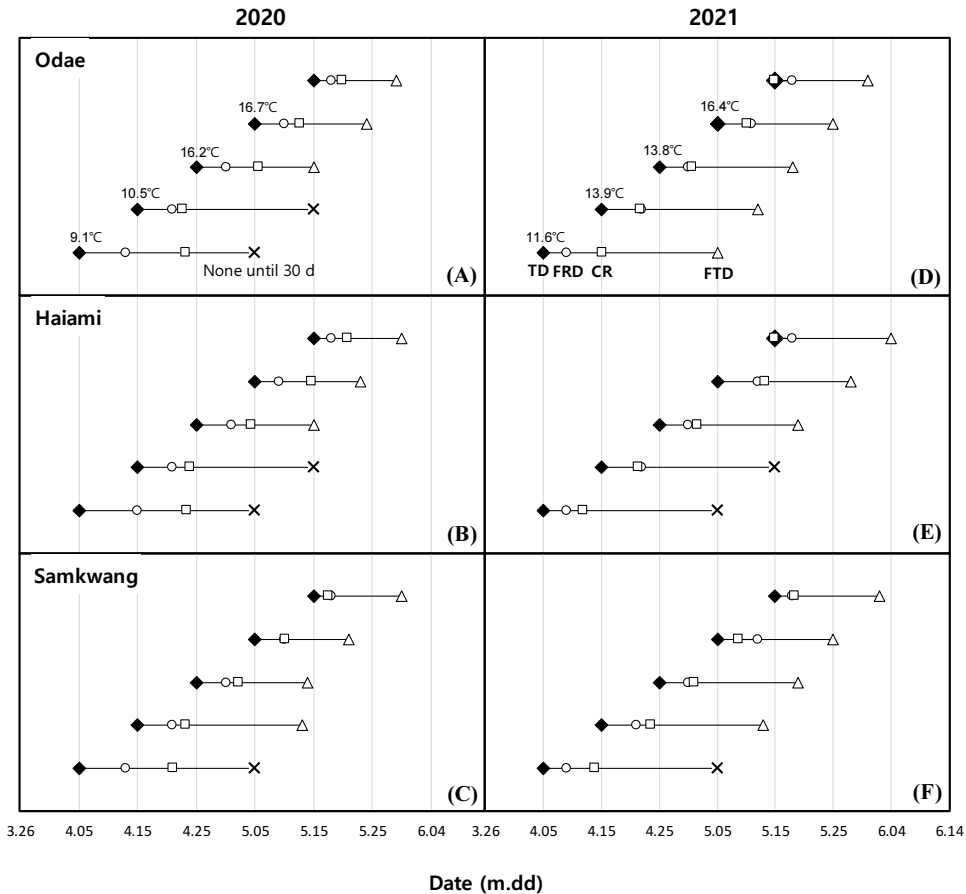


Fig. 11. Phenology of first root development (FRD), initiation of chlorophyll recovery (CR), and first tiller development (FTD) for 30 days from transplanting in transplanting-date (TD) treatments for the three varieties in 2020 and 2021. The temperature data on the TD symbols in (A) and (D) panels show the 10-day mean temperature from transplanting in 2020 and 2021. The “x” symbols show that the first tiller development was not observed until 30 days (d) from transplanting when the experiment was terminated.

분얼 발생 시기가 빨랐을 것으로 추정된다. 본 연구에서 최초 신근 발생 시기와 엽록소 함량 증가 개시 시기의 조만은 이앙시기 비교 조합에 따라 서로 다른 양상으로 나타났다. 그러나 모든 경우 분얼 발생은 신근 발생과 엽록소 함량 증가 개시 시점 이후에 시작되었고, 출수기 성장과 밀접하게 관련되어 있었으며, 벼의 생활사에서 활착 후 본격적인 생장의 시작을 가리키므로(Lee, 1986), 세 가지 특성 중 생육 초기에 조기이앙 한계온도를 가장 효과적으로 평가할 수 있는 지표로 판단되었다.

기온의 영향을 직접적으로 알아보기 위하여 2022~2023년에 일 평균기온을 10~15°C로 처리하였다. 두 해 공통적으로 평균기온이 높아짐에 따라 신근 발생이 빨랐는데, 2022년 일교차 10°C 조건에서는 평균기온 10°C에서도 대부분의 개체에서 신근이 발생하였다(Fig. 12A, B, C). 그러나 2023년 향온 조건에서는 평균기온 10°C에서 신근 발생

이 관찰되지 않았고, 13°C까지는 100%를 보인 품종이 없었다(D, E, F). 동일한 평균기온에서 신근 발생은 2023년의 향온에 비하여 2022년의 일교차 10°C 조건에서 더 빠르고 비율도 높아, 낮에 높아진 기온의 신근 발생 촉진 효과가 크게 나타났다. 2022년 평균기온 10°C에서 신근 발생 비율이 90~100%로 높았던 것은 MT-10DFT 10.5°C 조건이었던 2020년 4월 15일 이앙에서 신근 발생 비율이 100%였던 결과와 유사하였다(Fig. 8A, B, C 참고).

기온 처리에 따른 이앙 후 30일 벼 생육은 Fig. 13과 같다. 2022년 변온 조건의 기온 처리에서 고사 개체는 평균기온 10°C에서도 발생하지 않았고(A), 건물중은 온도가 높을수록 컸으며(B), 엽록소 함량은 10~14°C까지 온도가 높을수록 높았고 그 이상에서는 더 이상 증가하지 않았다(C). 2022년 이앙 당시 대비 이앙 후 30일에 유의한 건물중 증가 효과가 나타난 가장 낮은 온도는 모든 품종에서 11°C였

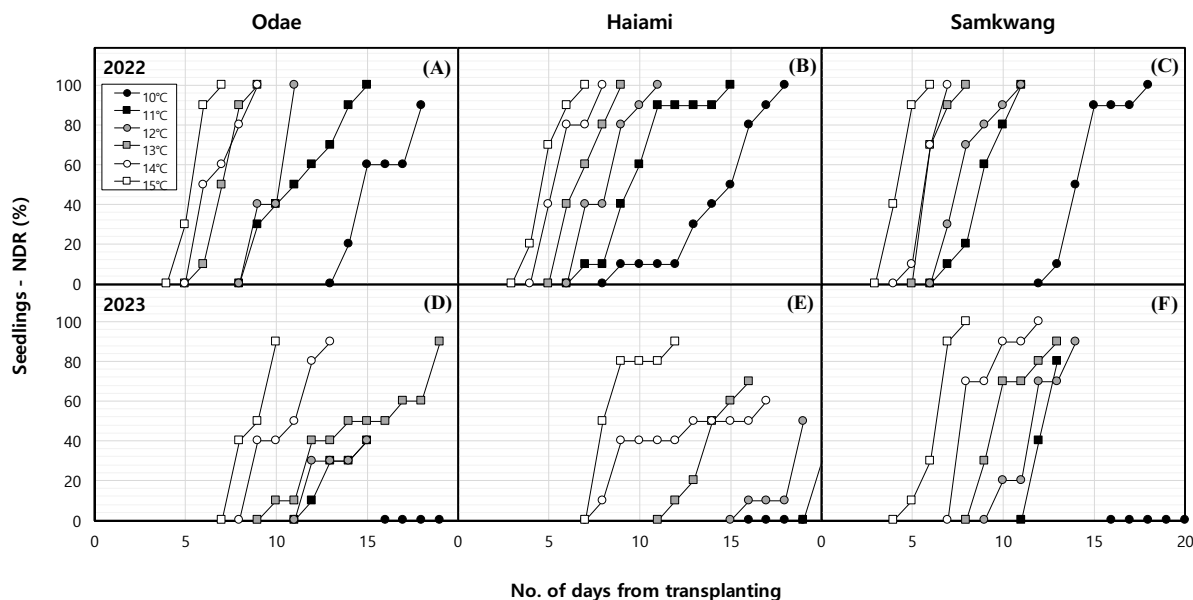


Fig. 12. Changes in the percentage of seedlings that developed a new root (Seedlings–NDR) at different daily mean temperatures for the three varieties in 2022 where the diurnal change of 10°C was imposed on rice plants and in 2023 where constant temperature without a diurnal change was imposed on plants.

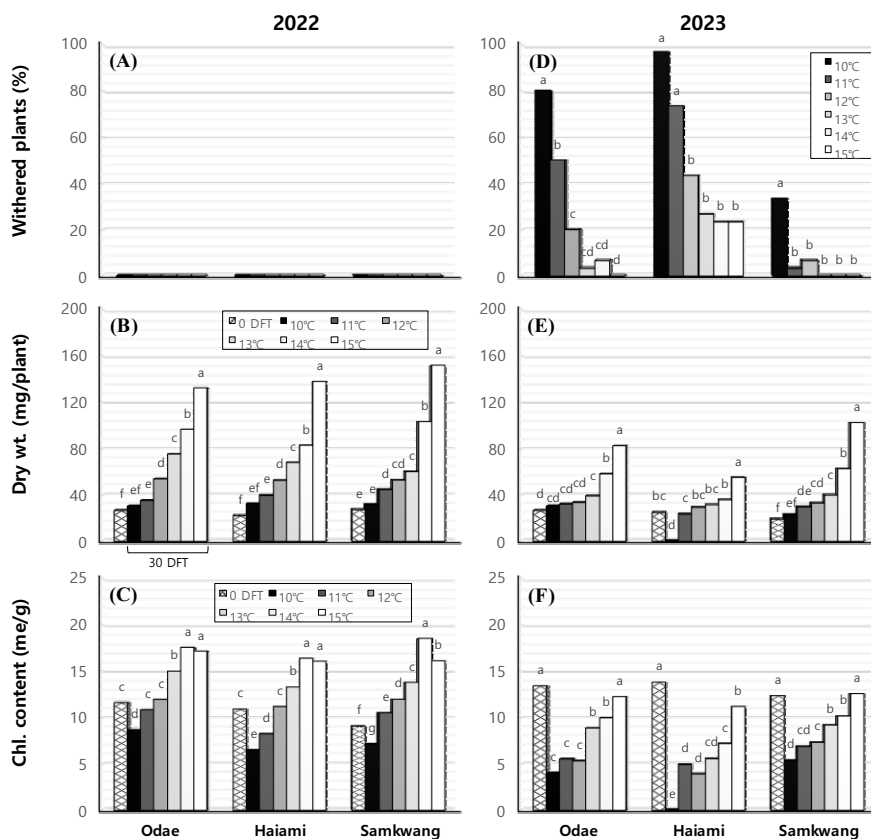


Fig. 13. Rice growth at 30 days from transplanting (DFT) at different daily mean temperatures for the three varieties in 2022 where the diurnal change of 10°C was imposed on rice plants and in 2023 where constant temperature without a diurnal change was imposed on plants. Data for 0 DFT were taken on the transplanting date immediately before the initiation of temperature treatment.

으며(B), 엽록소 함량은 평균기온 10°C에서는 이앙 당시보다 낮았고 품종에 따라 11~12°C에서는 이앙 당시 수준과 비슷하거나 높았다(C). 2022년 일교차 10°C 조건에서 평균기온에 따라 나타난 고사 식물체 비율, 생육초기 건물중 증가 효과, 이앙 당시 대비 이앙 후 30일의 엽록소 함량 추이는 2020~2021년 포장시험에서 나타난 결과와 유사하여 (Figs. 2, 4, 9 참고), 자연조건에서 나타난 한계온도 분석 결과를 뒷받침하였다. 동일한 평균기온에서 비교하였을 때, 2022년 변온 조건에 비해 2023년 항온 처리에서는 고사 개체 비율이 높고(D), 이앙 후 30일 건물중과 엽록소 함량이 낮았다(E, F). 이 결과는 앞의 신근 발생 양상에서와 같이, 낮에 높아진 기온의 생장 촉진 효과가 밤에 낮아진 기온의 생장 억제 효과보다 더 크게 나타났다는 것을 의미한다.

본 연구는 이앙부터 10일 평균기온을 기준으로 조기이앙 한계온도를 분석하였다. 이러한 방법을 적용한 이유는 사전 분석에서 봄철 이앙시기에 일 평균기온의 등락이 반복되어 1일 기준으로 하면 한계온도가 나타났다가 재출현하는 경우가 빈번하고, 5일간의 평균기온을 기준으로 할 경우에도 비슷한 현상이 자주 나타났기 때문이었다. 종합적으로 우리나라 자포니카 벼 품종의 조기이앙 한계온도는 생장 증가 기준 이앙부터 10일간 평균기온 11.4~11.6°C, 출수기 조기화 기준 12.0~12.4°C 사이로 평가되었다. 본 연구 결과의 조기이앙 한계온도는 기존에 보고된 가장 낮은 일 평균기온 13°C (Yoshida, 1981)보다 낮으므로, 저온 지역에서 벼 재배기간의 연장 효과가 기대된다.

적 요

현시대 우리나라 자포니카 벼 품종의 조기이앙 한계온도를 밝히기 위하여, 2020~2023년 시험포장, 2020~2021년 포트육묘상자, 2022~2023년 인공기상실에서 수행한 연구 결과는 다음과 같다.

1. 포장시험에서 출수 조기화 효과가 나타나는 온도는 이앙부터 10일간 평균기온 12.0~12.4°C, 출수 조기화 효과는 없지만 생장 증가 효과가 나타나는 온도는 11.4~11.6°C로 분석되었으며, 2020~2021년 이앙부터 10일간 평균기온의 출수 조기화와 출수기 생장 증가 효과는 3 품종에서 동일하였다.
2. 10일 후 이앙 대비 최초 신근 발생 날짜는 이앙부터 10일간 평균기온 9.1°C 이상, 이앙 후 엽록소 함량 증가 개시 날짜는 10.5°C 이상, 최초 분얼 발생 날짜는 11.6°C 이상에서 빨랐다.
3. 포트육묘상자 시험과 포장시험에서 나타난 최초 신근 발생, 엽록소 함량 증가 개시, 최초 분얼 발생 시기의 조만은 이앙시기 비교 조합에 따라 다른 양상으로 나타났으며, 최초 분얼 발생 시기의 조만이 조기이앙 한계온도 평가를 위한 생육 초기 지표로 실용적이었다.
4. 일교차 10°C 조건에서 신근은 평균기온 10°C에서도 대부분의 개체에서 발생하였고, 식물체 고사 현상은 평균기온 10°C에서도 나타나지 않았으며, 처리 당시 대비 처리 후 30일의 건물중은 10~11°C 이상에서 증가하였고, 처리 후 30일 엽록소 함량은 11~12°C에서 처리 당시 수준이나 그 이상으로 높았다.
5. 항온 조건의 동일 평균기온에 비하여 일교차 10°C의 변온 조건에서는 신근 발생 속도가 빠르고 비율이 높았으며, 고사 식물체 비율이 낮고, 처리 후 30일 건물중과 엽록소 함량이 높아, 낮에 높아진 온도의 생장 촉진 효과가 밤에 낮아진 온도의 생장 억제 효과보다 크게 나타났다.
6. 종합적으로, 우리나라 자포니카 벼 품종의 출수 조기화에 효과적인 조기이앙 한계온도는 이앙부터 10일간 평균기온 12.0~12.4°C 사이, 출수 조기화 효과는 없지만 출수기 생장 증가에 효과적인 한계온도는 11.4~11.6°C 사이였고, 분얼 발생 시기의 조만이 생육초기 조기이앙 한계온도의 평가지표로 실용적이었으며, 기온 처리 시험 결과는 포장시험 결과에 대한 분석을 뒷받침하였다.

사 사

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

인용문헌(REFERENCES)

- Arnon, A. N. 1967. Method of extraction of chlorophyll in the plants. *Agron. J.* 23 : 112-121.
- 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.
- 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.
- KMA (Korea Meteorological Administration). 2023. <http://data.kma.go.kr/cmnm/main.do>. Last accessed on August 30, 2023.
- Lee, E.-W. 1986. *Rice cropping* (4th ed.). Hyangmoonsa. pp.

- 111-112.
- Lee, H., W. Hwang, J. Jeong, S. Yang, N. Jeong, C. Lee, and M. Choi. 2021. Physiological causes of transplantation shock on rice growth inhibition and delayed heading. *Scientific Report*. 11(1) : 16818.
- Lee, J. T., K. M. Shim, H. S. Bang, M. H. Kim, K. K. Kang, Y. E. Na, M. S. Han, and D. B. Lee. 2010. An analysis of changes in rice growth and growth period using climate tables of 1960s (1931~1960) and 2000s (1971~2000). *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43(6) : 1018-1023.
- Lee, J. T., Y. S. Jung, and I. S. Ryu. 1983. A probability method to determine rice cropping period based on temperature. *Korean J. Crop Sci.* 28(3) : 285-290.
- RDA (Rural Development Administration). 2015. *Quality Rice Production Technologies*. pp. 126-179.
- Yang, W., K.-S. Kwak, K.-J. Choi, T.-S. Park, and J.-C. Shin. 2007. Overview on the climate change and rice in Korea. In the "International Workshop on Cool Rice for a Warmer World", International Rice Research Institute and Huazhong Agricultural University, 26-30 March 2007. Wuhan, China. pp. 48-50.
- 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.