

다중 센싱 기반 중간물떼기 기간에 따른 벼 생육 특성 변화

임우진¹ · 권동원¹ · 박혁진² · 이지현² · 장성율^{1,†} · 상완규^{1,†} · 정남진³ · 조정일⁴ · 황운하⁴

Changes in Rice Growth Characteristics during Intermittent Drainage Period using Multiple Sensing Technology

Woo-jin Im¹, Dong-won Kwon¹, Hyeok-jin Bak², Ji-hyeon Lee², Sungyul Chang^{1,†}, Wan-Gyu Sang^{1,†}, Nam-Jin Chung³, Jung-il Cho⁴, and Woon-Ha Hwang⁴

ABSTRACT The risk of global warming is increasing due to rapid climate change and increased greenhouse gas (GHG) emissions. Among the greenhouse gases, methane has a strong warming effect; in particular, 51.2% of the agricultural sector's methane emissions are from flooded rice fields. According to the current standard rice cultivation method, rice is grown during the maximum tillering stage with an intermittent drainage period of approximately 2 weeks. During the flooding period, methane-producing bacteria are active, but the activity of methane-producing bacteria and the amount of methane gas produced are reduced when the soil becomes oxidized through watering. Accordingly, this study used multiple-sensing technology to analyze the growth response according to the intermittent drainage period and to identify the extended intermittent drainage period with less impact on rice production. The equipment used for growth observations included NDVI, PRI, and IR sensors. The results confirmed that growth indices related to stress, such as NDVI and PRI, were not significantly different from those of the control when treated within 3 weeks of drainage, but drastically decreased when the drainage period was extended beyond 4 weeks. These results appear to result from the fact that soil water content (volumetric water content) also dropped to below 20% 4 weeks after irrigation, creating actual drought stress conditions. The 22nd day after treatment, when the soil moisture content reached 20%, was considered the point in time when drought stress conditions were formed. The point at which the SPAD value decreased to 0.6% of normal was estimated to be 23.5 days after treatment by using the regression equation between NDVI and SPAD.

Keywords : intermittent drainage, rice, vegetation indices, yield components

최근 급격한 온실가스 배출량 증가로 인해 지구온난화의 위험성이 커지며 국제사회는 파리협정을 통해 '2050 탄소중립'을 목표로 하였다(MAFRA, 2021). 이에 탄소중립에 관련한 다양한 정책이 시행되고 있으며, 농업분야에서도 '2050 탄소중립 실현 농업기술 개발과 현장보급 추진전략'을 마련하였다(MAFRA, 2021). 온실가스 중 메탄은 이산화탄소보다 더 강한 온난화 효과를 지니는데, 우리나라 메

탄 배출량 중 농업 부문은 43.9%를 차지하고 있으며, 특히 이 중 51.2%는 답수 벼 논에서 발생하고 있다(GIR, 2020). 벼 논에서는 답수기간 동안 메탄 생성균에 의해 메탄가스가 생성되나, 물떼기를 통해 토양이 산화상태가 되면 메탄 생성균의 활동이 저하되어 메탄가스 발생량이 감소한다(Conrad, 2007). 따라서 메탄 발생량을 낮추기 위해 최근 벼 중간물떼기 기간을 현행 1~2주에서 2주 이상으로 연장

¹농촌진흥청 국립식량과학원 농업연구사 (Junior Scientist, National Institute of Crop Science, RDA, Wanju 55365, Korea)

²농촌진흥청 국립식량과학원 전문연구원 (Master's Degree Researcher, National Institute of Crop Science, RDA, Wanju 55365, Korea)

³전북대학교 작물생명과학과 교수 (Professor, Department of Crop Science and Biotechnology, Chonbuk National university, Jeonju 54896, Korea)

⁴농촌진흥청 국립식량과학원 농업연구관 (Senior Scientist, National Institute of Crop Science, RDA, Wanju 55365, Korea)

[†]Corresponding author: Sung-yul Chang; (Phone) +82-63-238-5279; (E-mail) schang8@korea.kr

Wan-Gyu Sang; (Phone) +82-63-238-5255; (E-mail) wg_sang@korea.kr

<Received 14 March, 2024; Revised 1 May, 2024; Accepted 7 May, 2024>

하는 다양한 연구가 이루어지고 있다(Kim *et al.*, 2014; Haque *et al.*, 2017). 중간물떼기는 분얼최성기 이후 주로 이루어지며, 지속적인 담수로 환원된 토양에서 발생하는 각종 유해물질의 용출을 억제하여 뿌리활력을 높이고, 토양의 암모니아태 질소를 질산태 질소로 변환시켜 질소 과잉 흡수를 방지해 무효분얼 발생을 억제한다(Bouman & Tuong, 2001; Yoshida, 1981).

작물의 안정적 생산을 위해서는 효과적인 모니터링이 필요하며 최근에는 원격탐사와 비파괴적 기술을 이용한 작물 생육 모니터링 기술이 연구되고 있으며, 특히 식물 고유의 분광반사특성을 이용한 식생지수가 유용하게 사용되고 있다. 대표적으로 사용되는 식생지수는 정규식생지수(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI), 광화학반사지수(Photochemical Reflectance Index, PRI)등 이 있다. NDVI는 녹색식물의 상대적 분포량과 활동성, 식생피복률, 식물 생물량 등과 관련된 지표로서 다양한 연구에 활용되고 있으며(Carlson & Ripley, 1997), PRI는 식생의 광합성능 및 생리적 스트레스 상태 파악에 용이한 식생지수로 평가받고 있다(Filella *et al.*, 1996). 또한 최근 작물의 수분 상태 모니터링에 유용하게 사용되는 작물수분스트레스지수(Crop Water Stress Index, CWSI)는 식물체의 수분 상태를 나타내는 지표로서 작물이 받는 한발 스트레스를 관측하는 지수로 널리 사용되고 있다(Alderfasi & Nielsen, 2001).

탄소중립 정책 강화로 중간물떼기 기간 연장이 필요하나, 중간물떼기 기간 연장 시 분얼기 또는 유수형성기에 물부족에 따른 수분스트레스가 발생할 수 있다. 유수형성기는 특히 엽면적이 최대가 되는 시기로 증산량이 많으며, 또한 출수기는 환경변화에 가장 민감한 시기로 수분이 부족할 경우 수정장해를 일으킬 우려가 있다(Bouman & Tuong, 2001). 따라서 본 연구에서는 비파괴적으로 작물의 생육상태를 추정할 수 있는 식생지수를 산출하여 중간물떼기 기간 연장에 따른 생육반응을 분석하고, 벼 생육과 생산량에

영향을 적게 미치는 적합 중간물떼기 연장 기간을 구명하고자 한다.

재료 및 방법

재배조건 설정

본 연구는 중간물떼기 기간에 따른 벼 생육반응을 분석하기 위해 2023년 6월부터 10월까지 전라북도 완주군 이서면 국립식량과학원에서 수행되었다. 원활한 물관리를 위해 1 × 1 × 0.5 m²의 대형 포트를 하나의 반복으로 설정하여 물관리 처리별 3반복으로 실외에 설치 후 벼 재배시험을 진행하였으며, 이앙 후 벼 전생육기간 중 강우에 따른 영향을 줄이기 위해 비가 오는 날은 비가림막을 설치하고 그 이외의 날은 비가림막을 제거하였다. 시험품종은 신동진으로 재식밀도 80주/3.3 m²로 5월 18일에 파종하여 6월 9일에 손이앙하였고 농촌진흥청 표준시비법으로 비료처리하였다(RDA, 2014). 대조구는 상시담수(Continuously Flooded; CF)로 재배하였으며, 중간물떼기 처리는 이앙 후 20~25일이 되는 7월 중순을 기준으로 2주간(Intermittent Drainage 2; D2), 3주간(Intermittent Drainage 3; D3), 4주간(Intermittent Drainage 4; D4), 5주간(Intermittent Drainage 5; D5) 처리를 수행하였고 중간물떼기 기간을 제외하고는 상시담수 하였다(Table 1). 각 처리별로 중간물떼기 시기에 따른 생육 단계별 한발스트레스 처리기간을 분석하기 위해 담수처리의 출수기를 기준으로 출수기 30일 이전까지는 영양생장기, 출수기 30일 전부터 출수기까지를 생식생장기로 설정하였다. 그 결과, D2, D3, D4 및 D5의 한발스트레스는 영양생장기 기간 중 각 7.7, 14.7, 14.7, 14.7일 처리 되었으며 생식생장기 기간 중에는 각 6.3, 6.3, 13.3, 20.3일 처리 되었다. D3를 기준으로 D2의 경우 영양생장기 한발스트레스 기간이 길어졌으며, D4 및 D5의 경우 생식생장기 기간중에 한발스트레스 기간이 길어졌다.

Table 1. Overview of intermittent drainage treatment duration and dates.

Treatment	Continuously flooded	Intermittent drainage duration (weeks)			
		2	3	4	5
Start date (M/DD)	-	7/10	7/3	7/3	7/3
End date (M/DD)	-	7/24	7/24	7/31	8/7
Water stress days (vegetative/reproductive stage)	0	7.7/6.3	14.7/6.3	14.7/13.3	14.7/20.3

조사방법

중간물떼기 처리 기간에 따른 작물의 생육을 관측하기 위하여 NDVI, PRI, CWSI 등의 식생지수를 활용하였다. 650 nm와 810 nm의 파장대의 반사도를 측정할 수 있는 S2-412 NDVI sensor (Apogee instruments, USA), 532 nm와 570 nm 반사도를 측정하는 SRS-Pr PRI sensor (Apogee instruments, USA), 엽온을 측정하는 SI-431 IR sensor (Apogee instruments, USA)를 각 처리구마다 설치하여 생육을 관측하였다. 상시관측을 위해 10분 간격으로 측정하였으며, 환경의 영향을 줄이기 위해 맑은 날 11시~14시 데이터를 사용하여 NDVI, PRI, CWSI 지수를 추출하였다. 시험구의 기상환경 측정을 위해 통합기상센서(ATMOS41, METEER group, USA)를 사용하여 일사량, 대기온도, 상대습도 등의 변화를 측정하였다. 엽색은 SPAD-502 Plus (Konica Minolta Optics, Japan)을 사용하여 상위 3번째 엽을 한 잎당 3반복한 평균치 값을 활용하였다. 휴대용 토양수분측정기(HS2 Hydrosense2, Campbell Scientific, Utah)를 사용하여 토양 수분을 측정하였다. 벼 생육특성 및 수량조사는 농업과학기술 연구조사분석기준(RDA, 2012)을 기준으로 출수기, 간장, 수장, 유효분얼수 등은 3주씩 3반복으로 조사하였으며, 수확 후 수당립수, 임실률, 천립중 및 수량을 측정하였다.

식생지수 산출 방법

NDVI

정규식생지수(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)는 식생에서 반사되는 적색과 근적외선 파장대의 스펙트럼 값을 사용하여 계산하는 지표로, 건강한 식생은 적색 파장대는 흡수하고 근적외 파장대는 반사하는 특징을 바탕으로 식생피복률과 생육상태를 평가하는 지표로 널리 사용되고 있다(Peñuelas *et al.*, 1997). 본 연구에서는 각 처리구마다 지표면으로부터 150 cm 높이, 20° 경사각으로 downward-looking NDVI센서(S2-412, Apogee instruments)를 설치하여 650 nm, 810 nm 파장대의 복사휘도(Radiance)를 측정하였고, upward-looking 센서(S2-411, Apogee instruments)를 지표면으로부터 150 cm 높이에 180° 경사각으로 설치하여 복사조도(Irradiance)를 측정하였다. 반사율(ρ)은 측정된 복사휘도를 복사조도로 나누어 산출할 수 있다.

$$NDVI = \frac{\rho_{810} - \rho_{650}}{\rho_{810} + \rho_{650}} \quad (1)$$

PRI

광화학반사지수(Photochemical Reflectance Index, PRI)는 532 nm와 570 nm 파장대의 반사율을 사용하는 지수로 잔토필(Xanthophyll)의 총량과 관련이 있어 환경변화에 민감하게 반응하는 특성을 가져 식생 광합성능과 광이용효율, 스트레스 등을 평가하는 지표로 사용되고 있다(Filella *et al.*, 2009). 본 연구에서는 각 처리구마다 지표면으로부터 150 cm 높이, 20° 경사각으로 downward-looking PRI센서(SRS-Pr, Apogee instruments)를 설치하여 532 nm, 570 nm 파장대의 복사휘도(Radiance)를 측정하였고, upward-looking 센서(SRS-Pi, Apogee instruments)를 지표면으로부터 150 cm, 180° 경사각으로 설치하여 복사조도(Irradiance)를 측정하였다.

$$PRI = \frac{\rho_{532} - \rho_{570}}{\rho_{532} + \rho_{570}} \quad (2)$$

CWSI

작물수분스트레스지수(Crop Water Stress Index, CWSI) 엽온과 대기온도의 차($T_c - T_a$), 포화수증기압차(Vapor Pressure Deficit, VPD)를 사용하여 상대적인 증산 비율을 산출하는 지수이다. CWSI값의 산출 방식에는 이론적 방법과 경험적 방법 두 가지가 있으며, 본 연구에서는 경험적 방법(Idso *et al.*, 1981)을 통해 산정하였다. 각 처리구마다 지표면으로부터 150 cm 높이, 20° 경사각으로 IR센서(SI-431, Apogee instruments)를 설치하여 엽온을 측정하였고, 통합기상센서를 설치해 온도와 상대습도를 관측하여 엽온과 대기온도차($T_c - T_a$), 포화수증기압차(VPD)를 계산하여 CWSI를 산정하였다.

$$SVP = 6.1078 \times e^{\left(\frac{T}{T+233.3} \times 17.2694\right)} \quad (3)$$

$$VPD = SVP \times \left(1 - \frac{RH}{100}\right) \quad (4)$$

$$CWSI = \frac{dT_m - dT_l}{dT_u - dT_l} \quad (5)$$

dT_l = Intercept + Slope (VPD),

dT_u = Intercept + Slope ($VP_{sat}(T_a) - VP_{sat}(T_a + \text{Intercept})$)

통계처리

모든 조사 및 측정은 3회 이상 반복하여 평균값을 사용하였으며, 실험의 통계처리는 Python (Version 3.7.16)과 Metabo-

Analyst (Version 6.0)를 사용하여 분산분석(ANOVA) 후 $P < 0.05$ 유의수준에서 유의성이 나타난 항목은 최소유의차검정(Least Significant Difference test, LSD)를 통해 상호 평균간 비교를 실시하였다.

결과 및 고찰

중간물떼기 기간에 따른 토양수분함량 변화

상시담수의 경우 토양수분함량(VWC (%))은 50~52%가량으로 일정하게 유지되었으며 중간물떼기 기간이 길어질수록 토양수분함량은 크게 감소하였다(Fig. 1). 단수 10일 후 토양수분함량은 약 41%로 상시담수에 비해 약 10.6% 감소하였으며 단수기간이 17일로 길어 지면서 상시담수에 비해 약 24.8%의 수분함량이 감소하였다. 이후 단수기간이 더 길어지면서 토양수분함량은 8.1%까지 감소하였다. 단수 일수에 따라 토양의 수분함량은 약 1.62 (VWC (%))만큼 감소하고, 상시담수 대비 상대적으로 단수일별 0.03%의 수분 감소율이 나타났다.

중간물떼기 기간에 따른 생육특성 변화

생육조사를 통해 생육 특성을 확인한 결과 CF, D2, D3 모두 대부분의 항목에서 유의한 차이가 없었으나 D4는 임실률, 출수일, 수량 등에서 유의한 차이가 있었다(Table 2). 출수기는 D2처리에서는 담수처리구와 차이가 없었으나 D3, D4 처리의 경우 출수기가 1.7일, 10.28일 지연되었으며 D5 처리구에서는 식물체가 고사하여 생육분석을 할 수 없었다. 중간물떼기 시기에 따른 생육변화를 살펴보면 D2를 기준으로 볼 때 영양생장기, 생식생장기의 각 일주일 정도의 한

발 스트레스는 생육에 영향을 미치지 않았으며, D3 기준으로 볼 때 영양생장기의 한발 스트레스가 길어지면 이삭 길이가 수장과 1수당 영화수가 감소하는 모습을 보였으며, 출수기가 지연되었다. 또한 D3 대비 D4는 생식생장기의 한발 스트레스가 연장되었는데, 본 연구에서는 수잉기 직전까지 연장되어 출수기가 매우 지연되었으며 임실률 또한 크게 감소하였다. D4 처리구의 경우 물떼기 기간이 분얼기에서 수잉기 전까지 연장되어 출수기가 CF 대비 약 10일 지연되고, 영화수와 이삭수, 임실률이 감소하여 수량 감소가 나타난 것으로 보인다. 이러한 결과는 영양생장기의 한발 스트레스 기간 연장은 생육에 큰 영향을 주지 않으며, 생식생장기의 한발 스트레스 기간 연장은 큰 피해를 주는 것으로 생각된다.

SPAD로 엽색을 분석한 결과, D4 처리구에서만 8.11로 다른 처리구에 비해 크게 감소하였으나 D2, D3의 경우 담수처리와 큰 차이를 보이지 않았다(Table 2). 생육 시기별 SPAD값 변화를 분석해본 결과(Table 3), 모든 처리구에서 처리 후 21일까지는 SPAD값이 느리게 감소하였으나, D4의 경우 처리 후 24일부터 유의한 차이를 보였으며 급격하게 감소하였다. 처리 후 31일에 D4는 재담수를 통하여 회복되는 모습을 보였으며, D5는 매우 낮은 SPAD값을 보였다.

중간물떼기 기간에 따른 식생지수 변화

NDVI

관측된 오전 11시부터 오후 14시까지의 일평균 NDVI 변동을 분석한 결과 CF와 D2, D3는 유사한 추이를 보였다(Fig. 2). CF 기준 최고분얼기부터 출수기까지는 완만하게 NDVI값이 감소하는 모습을 보이다가, 출수기를 지나 등숙

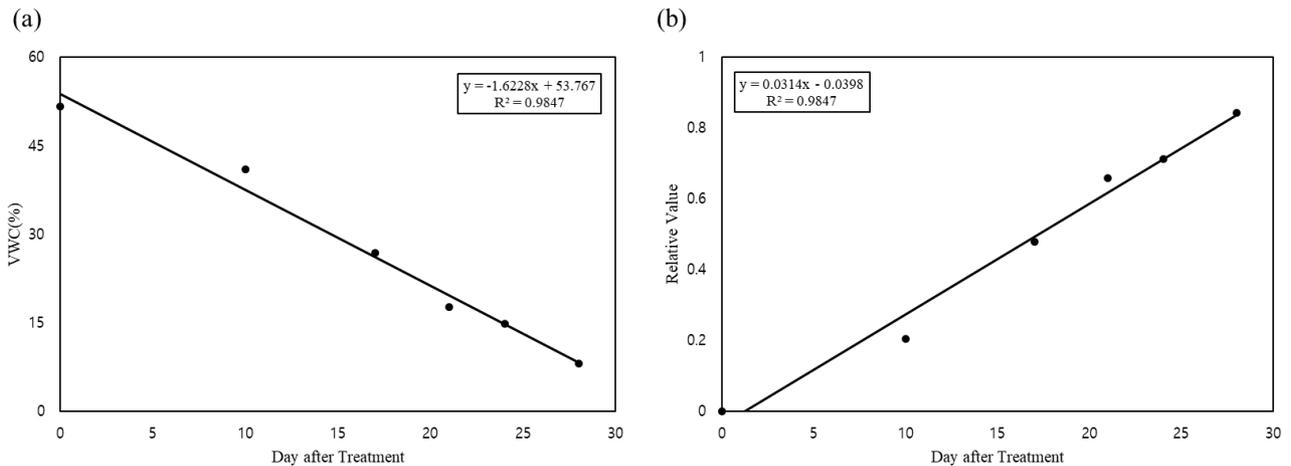


Fig. 1. Change of soil water content (VWC (%)) during the intermittent drainage period (a), and reduction in soil water content during the drainage period compared to continuously flooded conditions (b).

Table 2. Changes in major agronomic traits, grain yield, and yield-related traits under different intermittent drainage treatments. For SPAD, data from 1 day before the end of treatment were used. In treatments D2 and D3, most water stress was applied during the vegetative stage. In the D4 and D5 treatments, water stress was applied from the vegetative to the reproductive stages.

Growth characteristics	Intermittent drainage treatment				
	CF	D2	D3	D4	D5
Delayed of Heading date (days)	-	-0.46a	1.7b	10.28bc	
SPAD	38.42a	39.74a	40.28a	8.11b	-
Culm length (cm)	74.22a	76.66a	75.82a	72.42b	
Panicle length (cm)	17.90a	19.13a	17.58ab	18.05a	-
Grain No. Per Panicle	74.90a	74.60a	70.28a	69.95ab	-
Panicle No. Per Plant	11.44a	11.82a	12.69a	11.09ab	-
Grain No. Per Plant	857.24a	881.93a	891.76a	775.71b	
Seed setting rate (%)	90.01a	90.73a	89.65a	76.60b	-
1000-grain weight (g)	30.44a	31.26a	30.07ab	30.32a	-
Yield (g/plant)	25.24a	26.41a	26.10a	19.88b	-

※ Different letters indicate a significant difference detected using Least Significant Difference test ($P < 0.05$).

Table 3. Changes in SPAD values with different intermittent drainage treatments.

Day after Treatment	Intermittent Drainage Treatment				
	CF	D2	D3	D4	D5
14	39.28±0.75a	39.74±0.57a	42.36±0.48b	40.71±0.96ab	41.92±0.44ab
17	39.35±2.30a	38.88±0.52a	41.78±0.89a	41.28±0.53a	41.04±0.85a
21	38.42±1.57a	38.17±0.23a	40.28±0.62a	42.27±0.37ab	41.78±1.79ab
24	37.98±1.67a	35.51±0.90a	40.17±1.73a	12.90±2.93c	20.71±5.11b
28	36.64±2.27a	35.97±0.74a	38.31±1.15a	8.11±2.28b	7.45±2.28b
31	35.07±1.88a	31.60±1.00b	38.03±0.59a	14.86±1.16c	5.38±1.28d

※ Different letters indicate a significant difference detected using Least Significant Difference test ($P < 0.05$).

기가 진행되면서 등숙기 전보다 큰 폭으로 감소하는 경향을 보이는데, 이는 NDVI가 식생의 활력도와 연관이 있으며 등숙기에 엽색이 감소하는 특성이 반영된 것으로 판단된다(Boori *et al.*, 2020; Wada *et al.*, 1991). D4와 D5는 대조구와는 확연히 다른 모습을 보이는데, D4 기준 물떼기 처리 후 약 24일부터 NDVI값이 급격하게 감소하였으며, 재답수 후 약 12일에 65% 정도 회복되는 모습을 보였다. NDVI값의 급격한 감소는 엽색이 낮아짐과 동시에 식물체 내의 수분감소로 인하여 엽이 말려들어가 피복도가 낮아지는 현상이 함께 반영된 것으로 생각된다. 또한 D4의 경우 재답수로 인해 회복된 후에는 CF와 유의한 차이를 보이지 않았다.

PRI

오전 11시부터 오후 14시까지의 일평균 PRI 변동을 분석한 결과 CF 기준 수잉기부터 출수기에 해당하는 기간에 PRI가 전반적으로 높은 양상을 나타냈다(Fig. 3). 이는 작물의 군락 형성도가 높아짐에 따라 군락의 광포화점이 높아져 동화량이 높아진다는 특성과 일치하는 것으로 보인다(Banerjee *et al.*, 2018). 처리 후 15일까지의 데이터는 해당 시기의 낮은 일사 등 기상의 영향을 받은 것으로 생각된다. 일평균 NDVI와 마찬가지로 CF, D2, D3는 비슷한 양상을 보였으나, D3처리구가 NDVI와는 다르게 처리 후 18일부터 재답수 후 약 4일까지 PRI지수가 CF 대비 약 0.05 정도 감소되어있는 경향을 보인다. 이는 보다 광합성능에 민감하게 반응하는 PRI에서 관측할 수 있는 모습으로 생각되

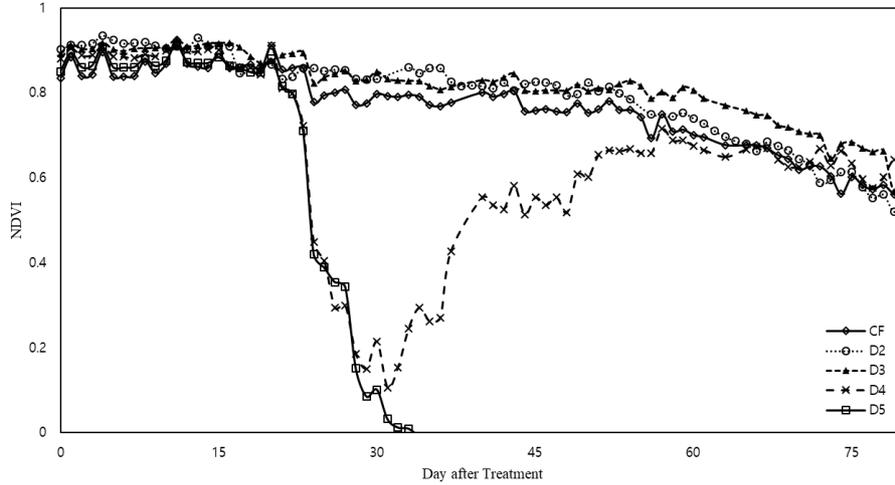


Fig. 2. Comparison of NDVI based on the intermittent drainage treatments.

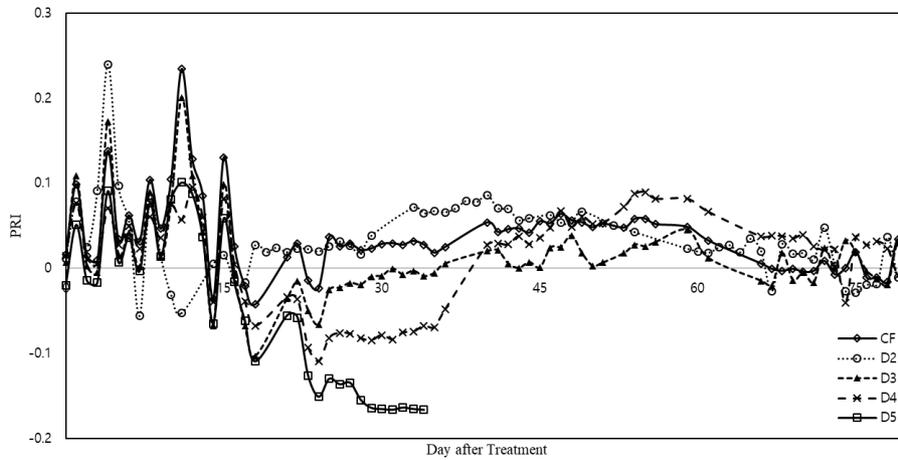


Fig. 3. Comparison of the PRI with intermittent drainage treatments.

며, D3처리구가 일시적으로 한발 스트레스를 받아 광합성 능력이 감소하였으나 스트레스 기간이 지속되지 않아 광합성 능력은 재답수 후 가역적으로 회복한 것으로 생각된다. D4 처리구는 처리 후 18일부터 재답수 후 7일까지 지수가 CF 대비 약 0.09~0.10 정도 감소하였으며, 재답수 후 8일부터 급격하게 PRI값이 증가하여 회복하는 모습을 보였다. 또한 PRI값이 증가하다가 감소하는 변곡지점이 중간물떼기 기간이 길어짐에 따라 함께 늦춰지는 모습을 보이는데, 이는 물떼기 기간 연장에 따른 출수기의 지연이 반영되었다고 추측할 수 있다.

엽온과 대기온도간 차이분석

작물의 증산 작용에 따라 엽온과 대기온도 간 차이 ($T_c - T_a$)가 발생한다고 알려져 있다(Zhang *et al.*, 2019). 중간물떼기 기간에 따른 엽온과 대기온도 간 차이를 분석한

결과, 중간물떼기 기간에 따라 확연한 차이를 보였다(Fig. 4). D4와 D5 처리구에서는 처리 후 약 22일에 엽온과 대기온도 간 차이가 급격하게 증가하였는데, 이는 한발스트레스로 인해 상대적으로 체내 수분이 적어 약한 증산이 일어나 엽온이 급격하게 증가한 것으로 보인다.

상시답수(CF)의 엽온과 대기온도 간 차이와 일사량, 대기온도 그리고 포화수증기압차와의 상관관계를 분석한 결과 부의 관계를 보였다(Fig. 5). 이는 한발스트레스가 없는 조건에서는 일사량과 기온이 높고, 포화수증기압차가 클수록 증산량이 많아져 엽온과 대기온도 간 차이가 작아지는 것으로 추측할 수 있다.

CWSI

오전 11시부터 오후 14시까지의 일평균 CWSI 변동을 분석한 결과, CWSI 지수의 변동은 $T_c - T_a$ 의 변동과 매우

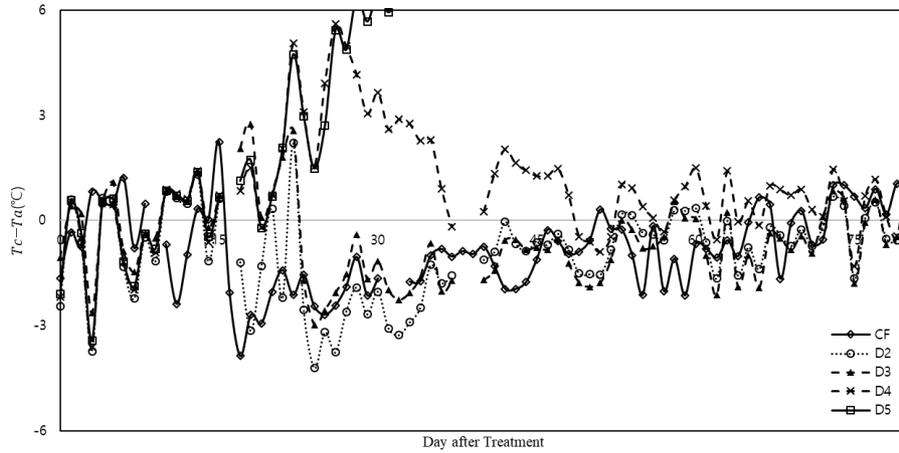


Fig. 4. Comparison of $T_c - T_a$ based on the intermittent drainage treatments.

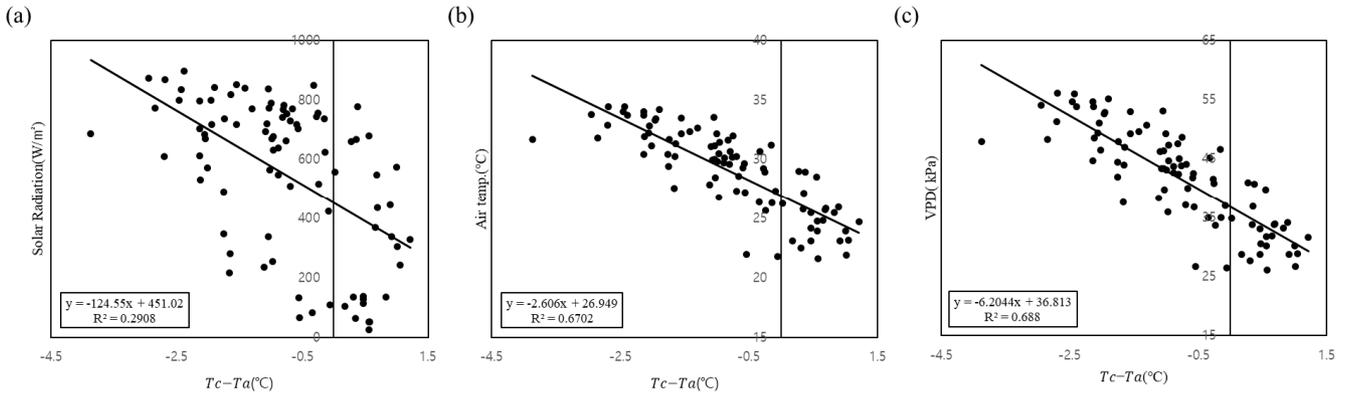


Fig. 5. Regression analysis between $T_c - T_a$ of CF and meteorological data. Solar radiation (a), air temperature (b), and VPD (c).

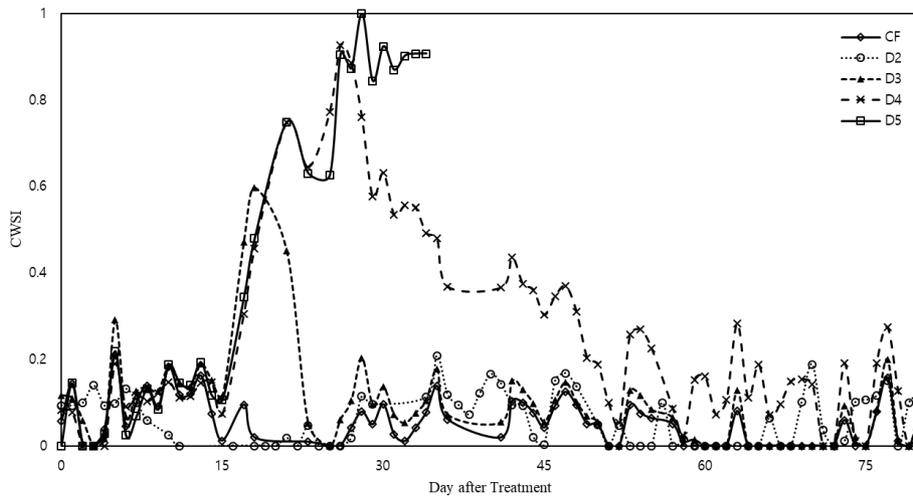


Fig. 6. Comparison of the CWSI based on intermittent drainage treatments.

유사하게 나타났으며, 일사량이 강한 날 지수도 더 높아지는 경향을 보였다(Fig. 6). 특히 D3 처리구 값의 변동이 크게 나타나는데, D3의 CWSI값은 처리 후 약 16일부터 급격

하게 증가하다가 재답수 후 급격하게 감소하는 모습을 보인다. 이는 NDVI 또는 PRI 지수로 큰 차이가 없었던 부분으로, 분광반사도를 사용하는 두 지수보다 엽·기온차, 기

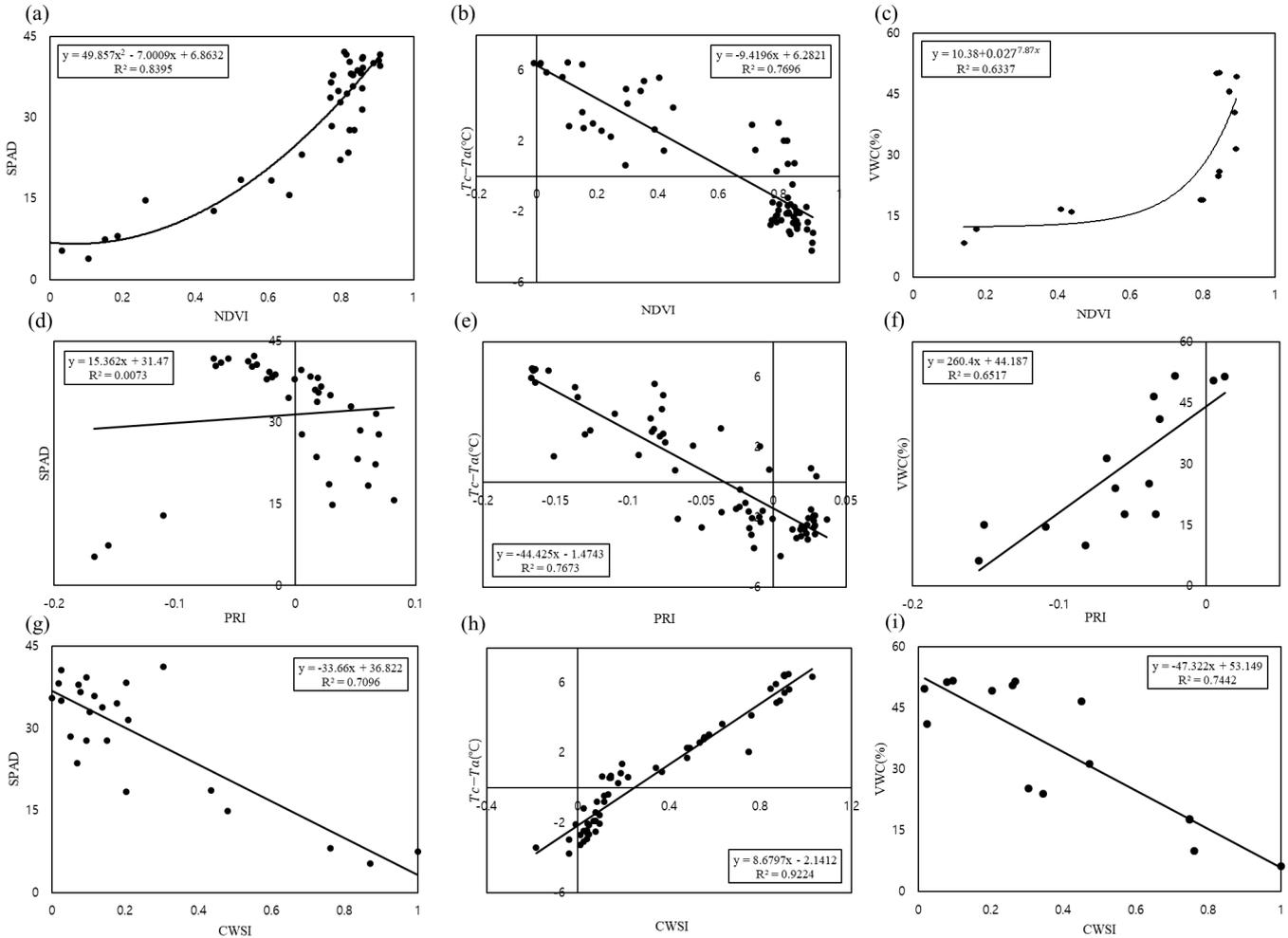


Fig. 7. Regression Analysis between NDVI and SPAD, $T_c - T_a$, and VWC. (a) NDVI and SPAD. (b) NDVI and $T_c - T_a$. (c) NDVI and VWC (%). (d) PRI and SPAD. (e) PRI and $T_c - T_a$. (f) PRI and VWC (%). (g) CWSI and SPAD. (h) CWSI and $T_c - T_a$. (i) CWSI and VWC (%). The data used in the SPAD cover June 22nd to August 28th, $T_c - T_a$ covers July 24th to August 6th, and VWC (%) covers from June 20th to June 31st.

상데이터를 사용하는 CWSI가 더 민감하게 반응하는 것으로 보인다. 또한 D4의 경우 마찬가지로 처리 후 약 16일부터 급격하게 증가하다 재답수 후 급격하게 감소하는 모습을 보이며, 처리가 종료되고 답수가 되면서도 스트레스 지수가 CF보다 약 0.07~0.19 정도 큰 값을 유지하고 있었다. 이는 NDVI와 PRI에서는 확인할 수 없었던 부분이며 D3보다 D4의 처리 기간이 길어 D3에서는 가역적 반응으로, D4에서는 비가역적 반응으로 나타난 것으로 추측된다.

생육특성 및 토양수분함량과 식생지수 간의 관계

측정된 식생지수 중 생육변화의 실측값을 가장 잘 설명할 수 있는 것을 선택하기 위해 실제 생육변화중 중간물떼기 처리 시 가장 유의적으로 값이 변한 SPAD값, 엽온과 대

기온도 간 차이, 토양수분함량과 각 식생지수와의 상관관계를 분석하였다(Fig. 7).

NDVI와 각 생육특성 간의 상관을 확인한 결과 SPAD값과는 $R^2 = 0.84$, 엽·기온차와는 $R^2 = 0.77$ 의 높은 상관을 보였다. SPAD와의 상관이 높은 것은 NDVI가 엽록소 흡수에 핵심적인 적색과 캐노피 구조에 민감한 근적외 영역을 사용하는 지수이기 때문인 것으로 생각된다(Peñuelas *et al.*, 1997). 또한 엽·기온차는 작물의 광합성과 증산 등 작물생리와 밀접한 관계가 있어 높은 상관을 보이는 것으로 생각된다(Zhang *et al.*, 2019). 토양수분함량(VWC (%))과의 상관은 $R^2 = 0.63$ 으로, 회귀식에서 토양수분함량 20%를 기점으로 상관식의 기울기가 급격하게 변하는 모습을 보여 이를 한발 스트레스 조건이 형성되는 지점으로 보았다. 위의

회귀식을 이용하여 토양수분함량 20%일 때의 NDVI값은 0.75였으며, 이를 NDVI 시계열 그래프에 대입하였을 때 처리 후 22.6일이었다. 따라서 중간물떼기가 약 23일 정도 지속되었을 때 한발 스트레스 조건이 시작되는 지점으로 보았다.

PRI는 SPAD와는 $R^2 = 0.01$, 엽·기온차와는 $R^2 = 0.77$, 토양수분함량과는 $R^2 = 0.65$ 의 상관관계를 나타냈다. SPAD값의 경우 엽색과 엽록소 함량 추정치이나 PRI는 엽록소 함량 외에 광합성 효율에 크게 영향을 받으며 또한 작물 엽에 흡수되는 광량과도 연관이 있어 외부환경 변동에 따라 비교적 민감하게 반응하는 지수이기 때문에 상관관계를 보이지 않는 것으로 생각된다(Garbulsky *et al.*, 2011). 엽·기온차의 경우 광합성능과 관련이 있는 지표이기 때문에 PRI와 높은 상관관계를 보이는 것으로 생각되며(Zhang *et al.*, 2019), 토양수분함량과의 관계는 양의 관계를 보이나 PRI의 경우 광합성능과 관련이 크기 때문에 토양수분함량 단일요소보다 다양한 외부 환경 요소들이 고려되어 분석이 필요할 것으로 생각된다.

CWSI는 SPAD와 $R^2 = 0.71$, 엽·기온차와는 $R^2 = 0.92$, 토양수분함량과는 $R^2 = 0.74$ 의 높은 상관관계를 보였다. SPAD와의 상관관계가 NDVI보다 낮은 것은 NDVI는 적색과 근적외 영역을 사용하여 엽색과 캐노피 형태에 관련이 있는 지수이기 때문인 것으로 추측되며, CWSI의 경우 작물의 수분 스트레스 지수로 엽색과 직접적인 관련이 없기 때문으로 보인다. 토양수분함량과의 경우 매우 높은 상관관계를 보였는데, 마찬가지로 토양수분함량 20%일때의 CWSI값은 0.58이었고, 이를 CWSI 시계열 그래프에 대입하였을 때 처리 후 19일이었으며, 따라서 중간물떼기 처리가 19일정도 지속되었을 때 한발 스트레스 조건이 형성되는 것으로 보았다. 이는 NDVI보다 약 4일 정도 빠르게 한발 스트레스를 감지한 것으로 나타났다.

적 요

중간물떼기 기간연장에 따른 벼 생육반응 변화를 분석한 결과는 다음과 같다.

1. 관행 2주간 중간물떼기 대비 중간물떼기 기간이 3주로 연장되었을 경우 수량 및 수량구성요소는 유의한 차이가 없다.
2. 중간물떼기 기간이 4주로 연장되었을 경우 임실률과 영화수, 수량이 급격하게 감소하였다.
3. 중간물떼기가 4주 이상 지속될 경우 NDVI, PRI, CWSI

값이 유의하게 변화하였다.

4. 중간물떼기 기간 연장에 따른 식생지수별 생육지표와의 관계를 분석한 결과 NDVI 대비 CWSI가 약 4일 정도 더 빠르게 한발 스트레스를 감지하였으며 가역적 스트레스 또한 용이하게 확인할 수 있었다.

사 사

본 논문은 농촌진흥청 연구사업(사업번호: PJ01675901 2023)의 지원에 의해 이루어진 결과로 이에 감사드립니다.

인용문헌(REFERENCES)

- Alderfasi, A. A. and D. C. Nielsen. 2001. Use of crop water stress index for monitoring water status and scheduling irrigation in wheat. *Agricultural Water Management* 47(1) : 69-75.
- Banerjee, T. B. T. and R. Linn. 2018. Effect of vertical canopy architecture on transpiration, thermoregulation and carbon assimilation. *Forests* 9(4) : 198.
- Boori, M. S., K., Choudhary, and A. V. Kupriyanov. 2020. Crop growth monitoring through Sentinel and Landsat data based NDVI time-series. *Computer Optics* 44 : 409-419.
- Bouman, B. A. M. and T. P. Toung. 2001. Field water management to save water and increase its productivity irrigated lowland rice. *Agricultural Water Management* 49(1) : 11-30.
- Carlson, T. N. and D. A. Ripley. 1997. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment* 62(3) : 241-252.
- Conrad, R. 2007. Microbial Ecology of Methanogens and Methanotrophs. *Advances in Agronomy* 96 : 1-63.
- Filella, I., A. Porcar-Castell, S. Munné-Bosch, J. Bäck, M. F. Garbulsky, and J. Peñuelas. 2009. PRI assessment of long-term changes in carotenoids/chlorophyll ratio and short-term changes in de-epoxidation state of the xanthophyll cycle. *International Journal of Remote Sensing* 30 : 4443-4455.
- Filella, I., T. Amaro, J. L. Araus, and J. Peñuelas. 1996. Relationship between photosynthetic radiation-use efficiency of barely canopies and the photochemical reflectance index (PRI). *Physiologia Plantarum*. 96(2) : 211-216.
- Garbulsky, M. F., J. Peñuelas, J. Gamon, Y. Inoue, and I. Filella. The photochemical reflectance index (PRI) and the remote sensing of leaf, canopy and ecosystem radiation use efficiencies: A review and meta-analysis. *Remote sensing of environment* 115(2) : 281-297.
- Greenhouse Gas Inventory&Research Center of Korea (GIR). 2020. 2020 National Inventory Report.
- Haque, M. M., J. C. Biswas, S. Y. Kim, and P. J. Kim. 2017. Intermittent drainage in paddy soil: ecosystem carbon budget

- and global warming potential. Paddy and water environment 15 : 403-411.
- Idso, S. B., R. D. Jackson, P. J. Pinter Jr., R. J. Reginato, and J. L. Hatfield. 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. Agricultural Meteorology 24 : 45-55.
- Kim, G. Y., J. Gutierrez, H. C. Jeong, J. S. Lee, M. M. Haque, and P. J. Kim. 2014. Effect of intermittent drainage on methane and nitrous oxide emissions under different fertilization in a temperature paddy soil during rice cultivation. Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry 57 : 229-236.
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA). 2021. 2050 Net-zero Strategy in the agri-food sector.
- Peñuelas, J., R. Isla, I. Fiella, and J. L. Araus. 1997. Visible and Near-Infrared Reflectance Assessment of Salinity Effects on Barely. Crop Science 37(1) : 198-202.
- Rural Development Administration (RDA). 2012. Standard of analysis and survey for agricultural research. RDA, Jeonju, Korea.
- Rural Development Administration (RDA). 2014. Fertilizer recommendation for crop production. RDA, Suwon, Korea.
- Wada, Y., and G. Wada. 1991. Varietal difference leaf senescence during ripening period of advanced indica rice. Japanese Journal of Crop Science 60(4) : 529-536
- Yoshida. 1981. Fundamentals of rice crop science. IRRI, Los Baños, Philippines.
- Zhang, R., Y. Zhou, Z. Yueu, X. Chen, X. Cao, X. Ai, B. Jiang, and Y. Xing. 2019. The leaf-air temperature difference reflects the variation in water status and photosynthesis of sorghum under waterlogged conditions. PLoS One 14(7) : e0219209.