Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 20, No. 1, pp. 39-48, 2026
https://doi.org/10.23042/radin.2026.20.1.39

Original article

귀리(*Avena sativa* L.)의 가뭄 스트레스 완화 및 회복에 하이드로겔 처리가 미치는 영향

김보미[1] · 류재혁[1] · 김재훈[1] · 정성린[1] · 김종현[2] · 김진백[1,*]

[1]한국원자력연구원 첨단방사선연구소, [2]주식회사 썬원

Effects of Hydrogel Application in Drought Stress Mitigation and Recovery in Oat (*Avena sativa* L.)

Bomi Kim[1], Jai Hyunk Ryu[1], Jae Hoon Kim[1], Sung-In Jeong[1], Jong Hyun Kim[2], and Jin-Baek Kim[1,*]

[1]Advanced Radiation Technology Institute, Korea Atomic Energy Research Institute, 29 Ge-umgu, Jeongeup, Jeonbuk 56212, Republic of Korea
[2]Sunone Co, 104 Bamdwi, Hwaseong, Gyeonggi 18524, Republic of Korea

ABSTRACT This study evaluates the efficacy of hydrogel application in mitigating drought stress and facilitating post-drought recovery in oat (*Avena sativa* L.). The hulless oat cultivar 'Daeyang' was subjected to drought stress followed by rewatering, and the effects of varying hydrogel concentrations were assessed by analyzing shoot and root growth alongside the expression profiles of drought-responsive genes. Under drought conditions, hydrogel-treated plants exhibited significantly reduced growth inhibition in both shoots and roots compared to the untreated drought control. Notably, the 0.4% hydrogel treatment was the most effective in maintaining root growth and yielded the highest recovery index following rewatering. Transcriptional analysis revealed that while drought control plants showed highly elevated expression of stress-responsive genes—reflecting severe stress perception—hydrogel-treated plants maintained relatively lower expression levels. A negative correlation was observed between stress gene expression and plant growth, suggesting that attenuating the excessive activation of stress pathways contributes to growth maintenance. During the recovery phase, gene expression in the shoots of hydrogel-treated plants rapidly returned to baseline levels. In contrast, the roots of drought control plants showed limited transcriptional recovery, likely due to irreversible drought damage. Conversely, hydrogel-treated plants, particularly those in the 0.4% group, demonstrated robust recovery trends at both transcriptional and phenotypic levels. Collectively, these findings suggest that hydrogel application effectively alleviates drought stress by maintaining soil moisture and suppressing excessive stress gene activation, thereby highlighting its potential as a valuable soil amendment for enhancing drought tolerance and resilience in oat cultivation.

Key words: Oat (*Avena sativa* L.), Drought stress, Post-drought recovery, Hydrogel, Gene expression

1. 서 론

전세계적으로 극심한 기후변화는 병해충 확산, 활용가능한 용수 부족, 토양 비옥도 감소 등 농업 분야에 여러 가지 문제점을 야기시킬 수 있다[1-3]. 이러한 문제들은 작물의 생산성을 감소시키고 안정적인 농산업 경쟁력을 약화시키는 요인이 된다. 더욱이 최근들어 급격한 기후변화의 빈도와 강도가 해마다 증가되고 있으며, 이를 극복하기 위한 노력이 전세계적으로 다양한 방식으로 이루어지고 있다. 농업 연구분야에서도 이를 해결하기 위한 노력으로 가뭄, 염분, 비정상적인 고온 및 저온과 같은 다양한 환경 스트레스 조건에 대한 내성 작용기작에 대한 기초연구 뿐만 아니라 이를 작물품종 개발에 적용하려는 실질적인 노력도 함께 이루어지고 있다[4-5]. 그 중에서도 가뭄스트레스는 식물이 활용가능한 토양수분 부족으로 인해 식물의 광합성 및 뿌리의 양분흡수를 저해시켜 궁극적으로는 작물 생산량을 직접적으로 감소시킬 수 있다.

하이드로겔(hydrogel)은 고분자 물질로 물을 흡수하고 유지할

ISSN 1976-2402 **http://www.ksri.kr/**

Copyright© 2026 by Korean Society of Radiation Industry

***Corresponding author:** Jin-Baek Kim
Tel: +82-63-570-3313, Fax : +82-63-570-3319, E-mail: jbkim74@kaeri.re.kr
Received 27 January 2026 **Revised** 3 March 2026 **Accepted** 3 March 2026

수 있는 능력이 있어 최근 작물재배에서 활용도가 높다[6-7]. 작물의 토양 내 수분 보유 능력을 높이고, 토양 구조를 개선하여 통기성과 배수성 개선효과를 기대할 수 있으며, 이를 통해 물 부족 상황에서도 식물이 꾸준히 생장할 수 있도록 돕는 역할도 한다. 또한, 물과 함께 용해된 영양소를 흡수하여 천천히 방출하므로, 식물이 필요로 할 때 필요한 영양소를 안정적으로 공급할 수 있다. 작물재배에 필요한 비료 이용효율성을 증대시키며 영양 결핍을 예방하는 데 기여할 수 있다. 본 연구에서는 화학적 가교제가 아닌 방사선 가교(radiation crosslinking) 방식을 통해 제조한 하이드로겔을 사용하였다. 방사선 가교는 고에너지 방사선을 이용하여 고분자 사슬 간 직접적인 가교 결합을 유도하는 방법으로, 별도의 화학적 개시제나 가교제를 사용하지 않아 잔류 독성 물질의 우려를 최소화할 수 있는 장점이 있다. 또한 방사선 조사 선량을 조절함으로써 가교 밀도(crosslink density)와 네트워크 구조를 정밀하게 제어할 수 있으며, 이는 팽윤도와 기계적 안정성 등 물리적 특성의 조절로 이어지는 것으로 보고되어 있다[8]. 이러한 특성은 토양에 직접 적용되는 농업용 소재의 안전성과 구조적 안정성을 동시에 확보하는 데 중요한 요소로 작용한다. 따라서 본 연구에서는 환경 적용성을 고려하여 방사선 가교 하이드로겔을 사용하였다.

귀리(*Avena sativa* L.)는 전 세계적으로 널리 재배되는 주요 곡물 작물로, 식량 및 기능성 식품 자원으로서 높은 가치를 지닌다. 그러나 귀리는 생식 생장기 및 등숙기에 수분 결핍에 민감하여 가뭄 스트레스에 의해 수량과 품질이 크게 영향을 받는 것으로 보고되어 있다[9]. 또한 최근 귀리에서 가뭄 스트레스 조건에 따른 전사체 분석이 수행되고 있고, WRKY, NAC, DREB 등 스트레스 관련 전사인자의 발현 조절 양상이 보고되어 분자적 수준에서 수분 스트레스 반응을 해석할 수 있는 기반이 구축되었다[10]. 이러한 생리적 민감성과 분자생물학적 연구 기반은 귀리를 하이드로겔 처리에 따른 토양 수분 완충 효과와 가뭄 반응 유전자 발현 변화를 통합적으로 분석하기에 적합하다고 판단되어 실험 재료로 선정하였다.

본 연구에서는 방사선기술 접목을 통해서 개발된 하이드로겔을 활용하여 단자엽 식물인 귀리 유묘기에 처리 농도별로 지상부와 지하부 생육효과를 검증하고 가뭄과 관련이 있는 대표적인 유전자 4종에 대한 발현검정을 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 식물 재료 및 생육 조건

식용 쌀귀리 '대양' 품종을 식물 재료로 하여 실험을 진행하였다. 귀리 종자를 페트리 디쉬에 치상하여 발아된 개체를 육묘용 32구(4×8) 트레이에 이식하였다. 바이오상토(흥농종묘, 한국)를 사용하여 한 구에 25 g씩 각각 무게를 측정하여 담았다. 가뭄 처리시에 주변 상토로 인한 수분에 영향을 최소화하기 위해서 식물체는 한 줄씩 띄워서 재식하였다. 식물체는 24°C, 16 h/8 h 광/암 조건의 유리온실에서 생육 되었다. 10일간 정상 생육 후, 11일 동안 관수를 중단하여 가뭄 스트레스를 유도하였다. 가뭄 스트레스 부여 이후 11일간 재관수하여 식물체의 회복여부를 관찰하였다. 식물체의 생육을 측정하기 위해 가뭄 스트레스 11일 후와 재관수 회복 11일 후에 식물체를 수확하였다.

2.2. 하이드로겔 제조

본 연구에 사용된 하이드로겔은 주식회사 썬원에서 제조하였으며, 폴리아크릴산(Polyacrylic acid)용액과 탄산칼륨(K_2CO_3) 분말을 증류수에 녹인 후 균일혼합기(Planetarycentrifugal mixer, Awatori Rentaro, ARE-310, THINKY Corporration, Japan)를 이용하여 균일하고 기포가 없어질 때까지 혼합하였다. 제조된 용액을 폴리에틸렌 비닐백에 부어 필름형태로 성형한 후, 다른 화학적 가교결합제 없이 전자선 가교에 의해서만 하이드로겔로 제조하였다. 전자선 가교는 전자빔 가속기(10 MeV, 10 mA, 한국원자력연구원 첨단방사선연구소)를 사용하였고, 전자선 선량은 20 kGy (선량률; 10 kGy/scan)로 조사하였다. 전자선 조사에 의해 가교된 폴리아크릴산 하이드로겔은 상온 건조 후 믹서기를 이용하여 하이드로겔 분말 형태로 제작하였다.

2.3. 하이드로겔 처리용량 결정 및 팽윤도

트레이에 25 g의 상토를 먼저 채운 다음, 가운데에 3cm 정도 깊이의 구멍을 뚫어 하이드로겔을 넣어주었다. 하이드로겔 적정 처리용량을 결정하기 위해서 0.2, 0.25, 0.4, 0.5, 0.8, 1, 2% 등의 다양한 농도로 사전테스트를 수행하였다. 하이드로겔을 처리하지 않고 가뭄 스트레스를 주지 않은 정상생육시킨 식물체를 Con (Control), 하이드로겔을 처리하지 않고 가뭄 스트레스를 준 것을 DC (Drought control)로 표기하였다. 하이드로겔의 팽윤도를 측정하기 위해 건조된 겔을 상온에서 증류수에 24시간 동안 침지시킨 후, 꺼내어 하이드로겔 표면에 존재하는 수분을 제거하고 최종적으로 무게를 측정하였다. 팽윤도는 팽윤된 무게(W_S)와 건조된 겔 무게(W_d)를 측정 후 식 (1)에 대입하여 팽윤도를 백분율로 나타내었다.

$$\text{팽윤도}(\%) = (W_S - W_d) / W_d \times 100 \quad (1)$$

2.4. 가뭄 반응 유전자 발현 검정을 위한 프라이머 디자인

실험에 사용된 프라이머는 GrainGenes (https://graingenes.org/GG3/)와 NCBI (https://www.ncbi.nlm.nih.gov/)에서 귀리 가뭄 반응 유전자의 cDNA 서열을 확보한 후, Primer3 Input ver. 4.1.0 (http://primer3.ut.ee/)을 이용하여 디자인하였다. 프라이머 서열은 NCBI 귀리 유전체 BLAST를 이용하여 다른 유전자와의 중복 서열이 없음을 확인한 후 제작하였다. 유전자별 사용된 프라이머 염기서열은 Table 1과 같다.

Table 1. Sequences of primers used for quantitative real-time polymerase chain reaction (qRT-PCR) analysis in this study

Gene Name	Primer Name	Primer Sequence (5' → 3')	Amplicon Length (bp)	Accession No./Gene ID
Actin	AsACT-F	CGAGCGGGAAATTGTAAGGG	208	KP257585.1
	AsACT-R	TCCAGCAGCTTCCATACCAA		
WRKY1	AsWRKY1-F	TTTCAACACCGATCGAAACCAG	182	AF140554.1
	AsWRKY1-R	TAAACTACTGAAGGCCACCCAT		
NAC	AsNAC-F	TACATACAGGGTAGGGAAACGG	199	KU886332.1
	AsNAC-R	ACAAGGGGAAAGGAGCTAGTAC		
DREB2	AsDREB2-F	GTTATCAGGGTTGTAGTCACGC	180	EF672101.1
	AsDREB2-R	TGAACTCAACACACAGGACAAC		
TIP4	AsTIP4-F	CTCACCTTCTCGCTGCTCTTC	211	AVESA.00001b.r3.3Dg0000336 [11]
	AsTIP4-R	CAACCCAGTAGACCCAGTGAC		

2.5. RNA 추출

최종적으로 발현유전자 검정을 위한 식물체는 가뭄 스트레스 직후와 재관수 이후에 각각 지하부와 지상부를 나누어 샘플링 하였다. 액체 질소와 막자사발을 이용해 시료를 곱게 마쇄한 후 PureLink™ RNA mini kit (Invitrogen, USA)를 사용해 RNA를 추출하였다. 귀리 잎 분말 0.2g을 제조사가 제시한 실험 방법에 따라 진행하였다. 추출한 RNA는 동일한 농도로 조절하여 분석할 때까지 −80°C에 보관하였다.

2.6. 유전자 발현 확인

RNA는 LaboPass™ cDNA synthesis kit (Cosmogenetech, Republic of Korea)를 사용하여 제품의 프로토콜에 따라 cDNA를 합성하였다. Quantitative Real-time PCR은 CFX96 Touch Real-Time PCR Detection System (BioRad, USA)을 이용하였으며 iTaq™ Universal SYBR® Green Supermix (BioRad, USA)를 사용하여 실시하였다. Housekeeping gene으로는 *AsActin*을 활용하여 유전자 발현을 정량화 하였으며, qRT-PCR 조건은 제조사에서 제시한 thermal cycling 조건을 따랐다. 각 실험은 3회 반복 수행되었으며, 마지막 사이클의 Ct값에 따라 $2^{-\Delta\Delta Ct}$ 방법[12]을 이용하여 유전자의 상대적 발현을 확인하였다. 3회 반복 수행하였으며, 결과는 평균 ± 표준편차로 나타냈다.

2.7. 통계적 분석

모든 통계적 분석과 그래프의 시각화는 R studio ver. 4.3.3 프로그램을 이용하여 수행되었다. 그룹 간 유의한 차이를 확인하기 위해 일원분산분석(One-way ANOVA)을 수행하였으며, 평균 차이의 유의성을 평가하기 위해 Tukey의 HSD 검정(p<0.05)을 사용하였다. 결과는 평균±표준편차(SD)로 표현되었다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 가뭄 처리 이후 재관수 기간을 단순한 생육 회복 단계가 아닌, 스트레스 반응의 재조정이 일어나는 회복 단계로 정의하였다.

3.1. 하이드로겔 처리용량 결정 및 팽윤도

처리용량 별 팽윤도를 분석한 결과, 0.5% 이상 처리구에서 하이드로겔이 흡습 팽윤하여 상토 표면 위로 돌출되었으며, 이에 따라 해당 수준은 실험 처리량으로 부적합한 것으로 판단하였다(Fig. 1). 0.5% 이상 처리구에서 상토 표면 돌출이 관찰됨에 따라, 해당 수준을 제외하고 0.2, 0.3, 0.4%를 본 실험수행에 적합한 처리수준으로 결정하였다. 또한 하이드로겔의 팽윤 특성을 정량적으로 확인하기 위해 건조중량 0.5 g을 대상으로 팽윤도를 반복 측정한 결과(n=5), 팽윤도는 15,557.6±41.9 % (mean±SD)로 나타났으며 반복 간 변동은 크지 않았다(Table 2).

본 연구에서 제조된 하이드로겔의 팽윤도는 15,557%로 나타났으며, 이는 건조 중량 대비 약 155배에 해당하는 수분을 흡수할 수 있음을 의미한다. 팽윤도는 하이드로겔의 수분 저장 능력을 반영하는 핵심 지표로, 10,000% 이상의 값을 나타내는 소재는 초흡수성(superabsorbent) 특성을 갖는 것으로 분류된다[13]. 이러한 높은 팽윤 특성은 고분자 네트워크 내 친수성 작용기와 적절한 가교 구조에 기인하며, 토양 내에서 일시적인 수분 저장과 점진적 방출을 가능하게 한다[14]. 특히 하이드로겔은 관수 또는 강우 직후 과잉 수분을 흡수한 뒤, 토양 수분 포텐셜이 감소함에 따라 점진적으로 수분을 방출함으로써 근권 내 수분을 완충하는 역할을 수행하는 것으로 보고되어 있다[15]. 이러한 물리적 수분 완충 메커니즘은 가뭄 조건에서 식물이 경험하는 급격한 수분 결핍 신

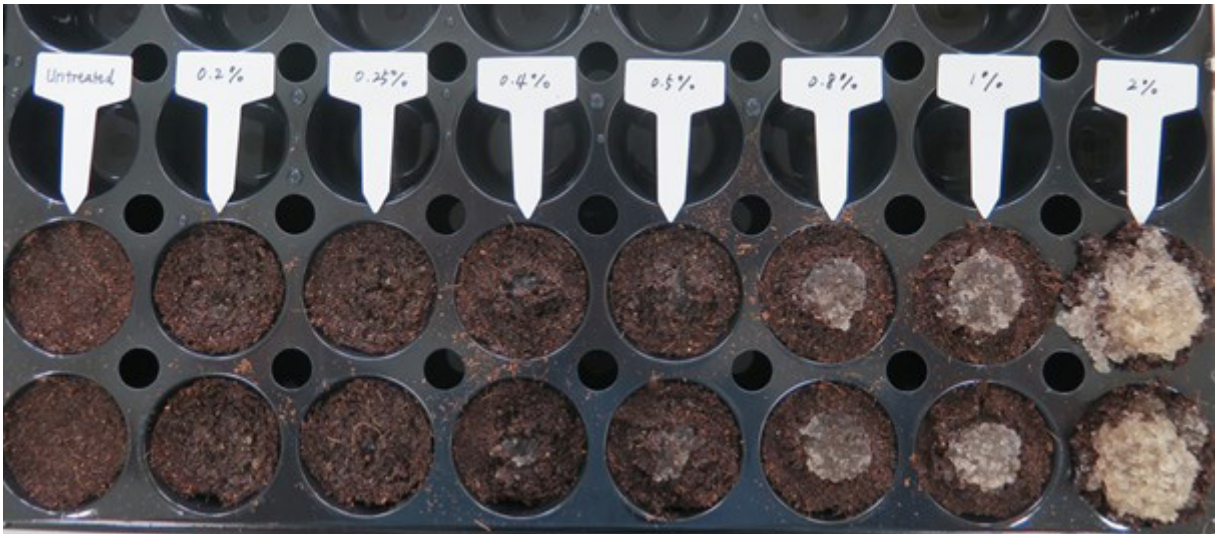

Fig. 1. Hydrogel swelling in soil (25 g) at different application rates after irrigation.

Table 2. Swelling characteristics of the hydrogel determined by gravimetric measurement (n=5)

Replicate	W_d (g)	W_s (g)	Swelling capacity (%)
1	0.5	78.49	15598
2	0.5	77.98	15496
3	0.5	78.23	15546
4	0.5	78.33	15566
5	0.5	78.41	15582
Mean±SD	0.5	78.29±0.19	15557.629±41.9

W_d indicates the dry weight of hydrogel (g) and W_s indicates the swollen weight after hydration (g). The swelling ratio was calculated from W_d and W_s as described in the materials and methods. Values are shown for each replicate (n=5), with the mean±SD provided.

호의 발생 시점을 지연시키고, 초기 탈수에 의해 유도되는 스트레스 반응의 활성화를 완화할 수 있다. 나아가 토양 수분 보유 능력의 증가는 근권 내 수분 가용성을 향상시켜, 건조 조건에서도 식물체가 급격한 방어 반응으로 전환되는 것을 억제하고 생장 유지에 필요한 에너지 배분을 보다 효율적으로 조절하도록 유도할 가능성이 있다[16-17]. 이는 본 연구에서 관찰된 생장 유지 및 스트레스 반응 완화 경향과도 맥락을 같이하며, 15,557%라는 높은 팽윤도가 단순한 물리적 특성을 넘어 생리적 안정성 확보에 기여할 수 있음을 시사한다.

3.2. 가뭄처리 및 회복 후 식물표현형 변화

11일간 가뭄 스트레스를 부여한 후와 재관수를 통한 식물체 회복 11일 후 귀리 식물체를 3개체씩 수확하여 지상부와 지하부의 길이를 측정하였다(Figs. 2, 3). 그 결과, 가뭄 스트레스 부여 후 지상부와 지하부의 길이가 Con과 비교하여 유의미하게 감소하였다(Fig. 4A). 그 중 하이드로겔 0.4% 처리구의 지하부 길이가 DC보다 유의미하게 길고 Con의 지하부 길이와 가장 유사함을 확인하였다. 재관수 이후의 경우(Fig. 4B) 역시 하이드로겔 0.4% 처리가 지상부 지하부 모두에서 DC와 차이를 보이며 Con과 유사한 길이를 보였지만, 통계적으로 유의성을 보이지는 않았다. 심한 가뭄 조건 하에서 식물체의 뿌리 길이는 통계적으로 유의하게 감소한다고 보고되어 있다[18]. 그와 반대로 하이드로겔 처리는 토양의 보수력, 수분 방출, 침투/배수 등의 수리적 특성 변화를 영향을 미칠 수 있으며, 이러한 변화가 식물이 체감하는 수분 스트레스 체감 강도에 영향을 줄 수 있다는 연구가 보고되었다[19-20]. 따라서 본 연구에서 0.4% 처리구의 지하부 길이가 DC보다 길게 유지된 것은, 하이드로겔에 의해 토양 수분 이용가능성이 개선되어 식물이 체감한 수분 스트레스 체감 강도가 완화되었기 때문으로 해석할 수 있다. 토양 조건에서 하이드로겔을 혼합했을 때 토양 수분 증발이 감소하는 등 수분 유지 효과를 정량적으로 비교한 연구들이 보고되어 있으며[21], 이는 하이드로겔이 지하부의 수분을 완충하여 가뭄 스트레스 강도를 낮출 수 있다는 해석을 지지한다. 하이드로겔 처리가 식물체의 가뭄스트레스 회복 이후에도 영향을 주었는지를 확인하기 위해 회복 지수를 계산한 결과(Fig. 5), DC의 경우 지상부와 지하부 모두 음수로 회복이 거의 일어나지 않은 것으로 나타났으나 하이드로겔 0.4% 처리구에서는 지상부와 지하부 모두 높은 회복 지수를 보였다. 하이드로겔을 배지/토양에 적용했을 때 수분 보유 특성이 개선되고 식물 생장 지표가 향상될 수 있음이 보고된 바 있으며[22], 본 연구에서 관찰된 0.4% 처리구의 높은 회복 지수 또한 이러한 선행 연구 경향과 일치한다고 판단된다. 따라서 본 결과는 하이드로겔 처리가 가

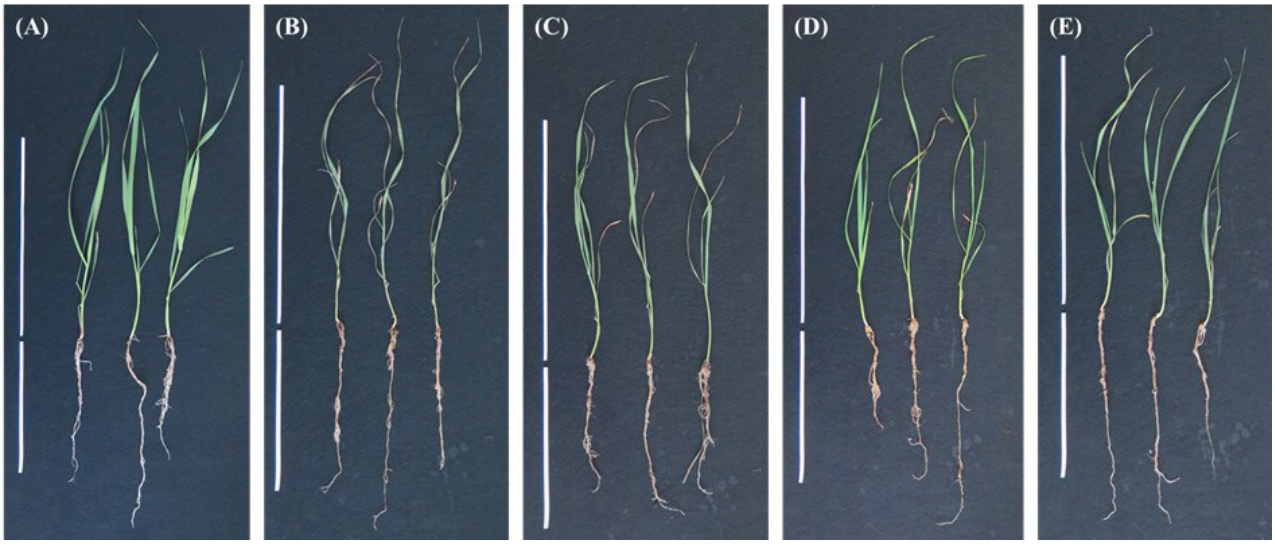

Fig. 2. Representative photographs of oat plants after 11 days of drought treatment. The white paper on the left serves as a scale bar (upper part: 30 cm, lower part: 20 cm). (A) Control, (B) Drought control, (C) 0.2% hydrogel, (D) 0.3% hydrogel, (E) 0.4% hydrogel.

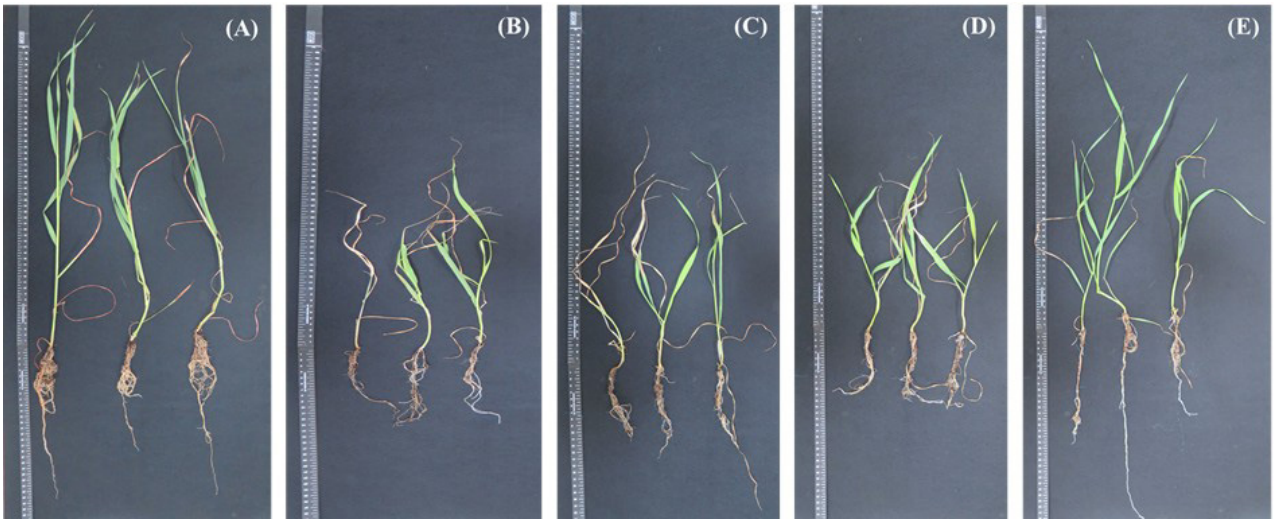

Fig. 3. Morphological appearance of oat plants 11 days after rewatering for recovery. (A) Control, (B) Drought control, (C) 0.2% hydrogel, (D) 0.3% hydrogel, (E) 0.4% hydrogel.

뭄 스트레스에 노출되었을 때 작물에 대한 피해를 경감시킬 뿐 아니라, 회복 이후의 귀리 지상부와 지하부 생육에서도 긍정적인 효과가 있음을 의미한다.

3.3. 가뭄 반응 유전자 발현

가뭄 반응 유전자의 발현은 대부분의 경우 DC에서 가장 높은 상대 발현량을 나타냈다(Fig. 6). 특히 회복 후 지상부에서 DC의 *AsTIP4* 상대 발현량은 118.26으로 매우 높은 발현량을 나타냈다(Fig. 6C). 이는 가뭄 조건 하에서 DC가 높은 스트레스를 받은 것이 회복 이후에도 유전자 발현으로 이어졌음을 시사한다. 반면 하이드로겔을 처리한 식물체에서는 DC보다 전반적으로 낮은 발현량을 보였다. 재관수 이후 DC에서 관찰된 *AsTIP4*의 급격한 발현 증가는 단순히 스트레스 반응의 잔류가 아니라, 세포 내 수분 항상성 회복과 연관된 분자적 적응 반응일 가능성이 있다. 아쿠아포린, 특히 TIP 계열은 수분 운반과 삼투 평형 조절에 중요한 역할을 하며, 가뭄 스트레스 조건에서는 발현이 억제되거나 변동하다가 재관수 후 원래 수준으로 회복되거나 오히려 증가하는 패턴이 보고된 바 있다. 보리에서 *HvTIP* 유전자들은 재관수 후 대조군 수준으로 회복되거나 일부 isoform의 발현이 높아지는 경향을 보였으며, 이러한 변화는 수분 이동 및 세포 팽압 회복에 기여함이 제시되었다[23]. 또한 *Acanthostachys strobilacea*에서도 재관수 후 아쿠아포린 발현 조절이 수분 손실을 줄이고 세포 팽

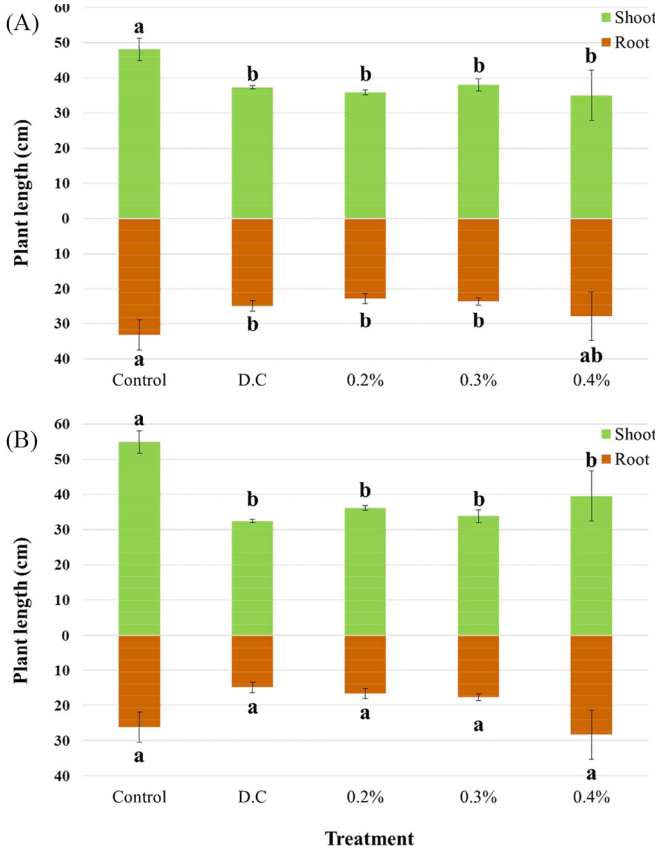

Fig. 4. Comparison of shoot and root lengths in oat plants. (A) After 11 days of drought treatment and (B) after 11 days of recovery following rewatering. Data presented as means±SD of 3 replicate plants. Different letters on bars indicate significant differences (p<0.05).

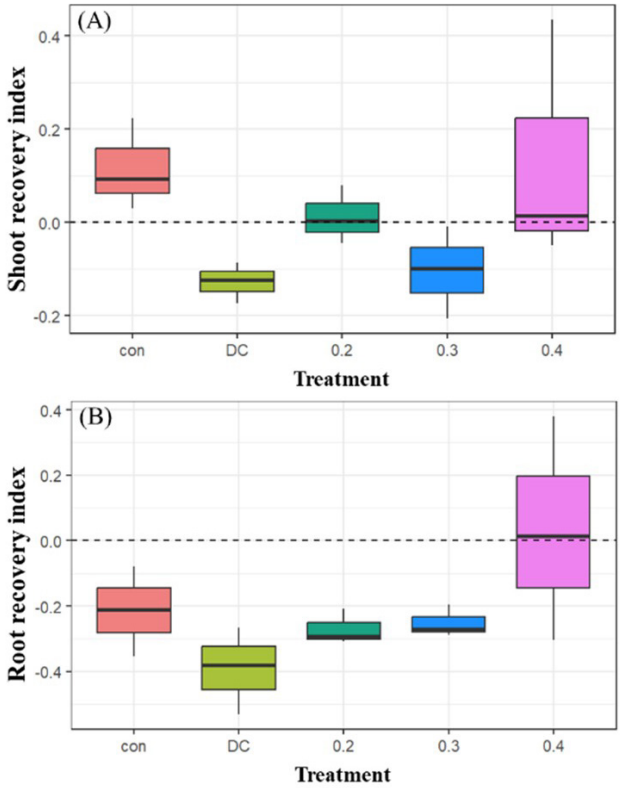

Fig. 5. Recovery index (RI) of shoots and roots after rewatering. The RI was calculated using the following formula: RI=(R-D)/D, where D is the length after drought stress and R is the length after rewatering. RI >0 indicates recovery from drought damage; RI=0 indicates no recovery; and RI <0 indicates recovery failure or further growth inhibition.

압을 재정립하는 데 도움이 된다는 보고가 있다[24]. DREB2A는 탈수/가뭄 조건에서 스트레스 반응 유전자 발현을 조절하는 전사인자로 기능 분석이 보고되어 있으며[25], 본 연구에서 하이드로겔 처리구의 *DREB2* 계열 발현이 낮게 유지된 결과는 체감 스트레스 강도 감소 가능성과 함께 해석될 수 있다. 특히 0.4% 처리구의 경우 가뭄 처리 후 지하부에서 *AsDREB2*의 발현량이 control보다 낮게 나타났으나 통계적으로 유의하지는 않았다(Fig. 6B). 그러나 가뭄 스트레스에 특이적으로 반응하는 *DREB2* 계열 유전자의 발현이 낮게 유지된 것은 하이드로겔 처리가 가뭄 조건을 완화하였음을 시사한다. NAC 전사인자는 *ERD1* (Early Responsive to Dehydration 1)과 같은 가뭄 반응 유전자의 발현을 조절하는 핵심 조절자로, ABA (Abscisic acid)-dependent 및 ABA-independent 경로 모두와 연관된 전사인자로 보고되어 있다[26]. 본 연구에서 *AsNAC*의 발현은 가뭄 처리 후 DC에서 가장 높게 나타났으며, 이는 식물이 강한 수분 결핍 스트레스를 인지하고 방어 반응이 활성화되었음을 의미한다[27]. 반면 하이드로겔 처리구에서는 *AsNAC*의 발현이 상대적으로 낮게 유지되었는데, 이는 하이드로겔 처리에 의해 토양 내 수분 이용 가능성이 개선되어 식물체가 인지한 가뭄 스트레스 신호가 완화되었기 때문으로 해석할 수 있다. 이러한 결과는 *AsNAC*의 낮은 발현이 내성 반응의 약화를 의미하기보다는 과도한 스트레스 인지가 발생하지 않았음을 반영하는 결과로 판단된다. 지하부에서 *AsWRKY1*의 발현은 가뭄 시기에 낮은 수준을 보였으나 재관수 이후 증가하는 경향을 나타냈다. 다만 회복 시점에서 처리구 간 유의적인 차이는 관찰되지 않았으며, 이는 농도 특이적 효과보다는 회복 단계에서의 전반적인 전사 재조정 과정과 관련될 가능성을 시사한다.

가뭄 조건 부여 후 가뭄 반응 유전자 발현량과 식물체 길이 사이의 연관성을 확인하기 위해 두 값을 비교한 결과, 분석한 4개 유전자 모두에서 유전자 발현이 낮을수록 지상부 길이가 더 길게 유지되는 경향을 보였다(Fig. 7). 이러한 결과는 식물이 스트레스 조건에서 생존을 위해 생장보다는 방어 기작에 에너지를 우선적으로 배분한다는 '생장-방어 트레이드오프(Growth-Defense Tradeoff)' 이론과 일치한다[28]. 즉, 하이드로겔 처리에 의해 스트레스가 완화된 식물은 불필요한 방어 유전자 발현에 에너지를

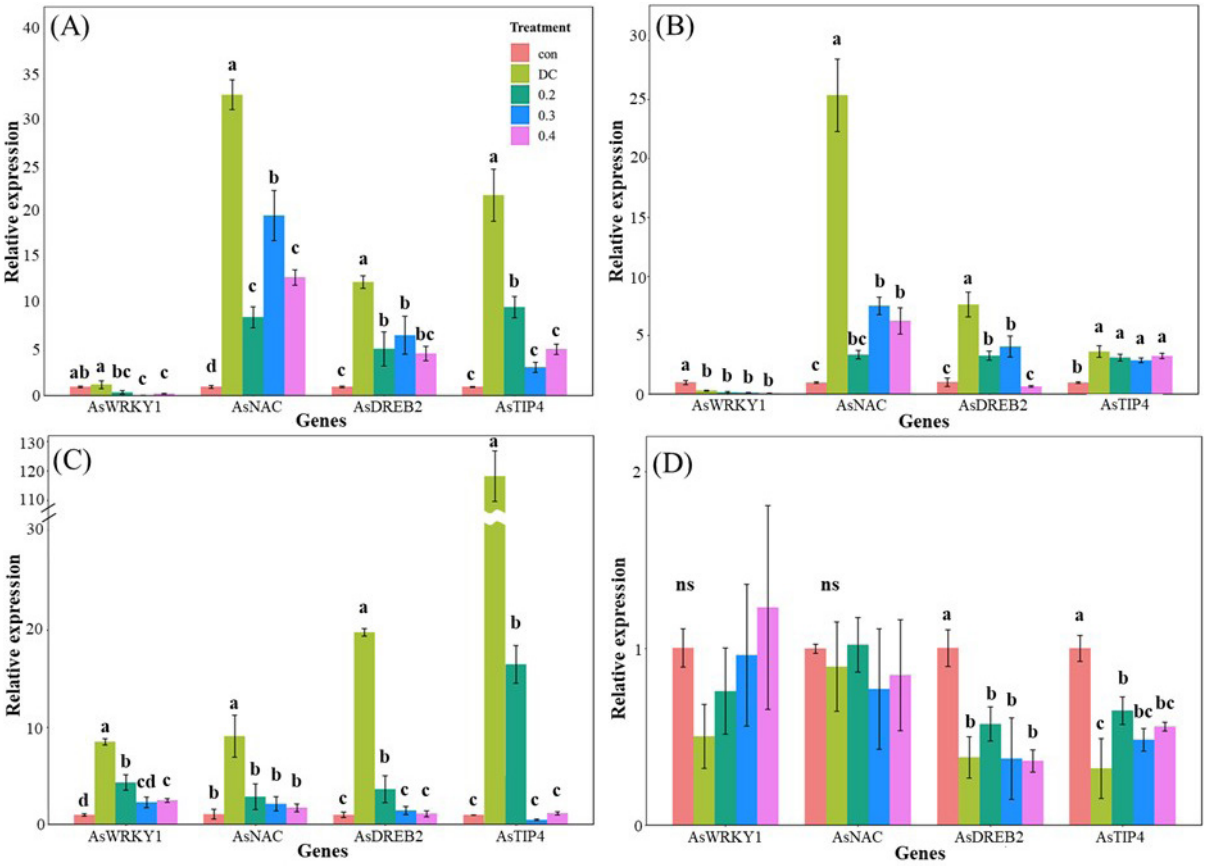

Fig. 6. Relative expression levels of four drought-response genes (*AsWRKY1*, *AsNAC*, *AsDREB2*, and *AsTIP4*) in oat plants. The bar graphs represent relative mRNA levels in (A) shoots and (B) roots after 11 days of drought treatment, and in (C) shoots and (D) roots after 11 days of recovery. Data presented as means±SD of 3 replicate. Different letters on bars indicate significant differences (p<0.05).

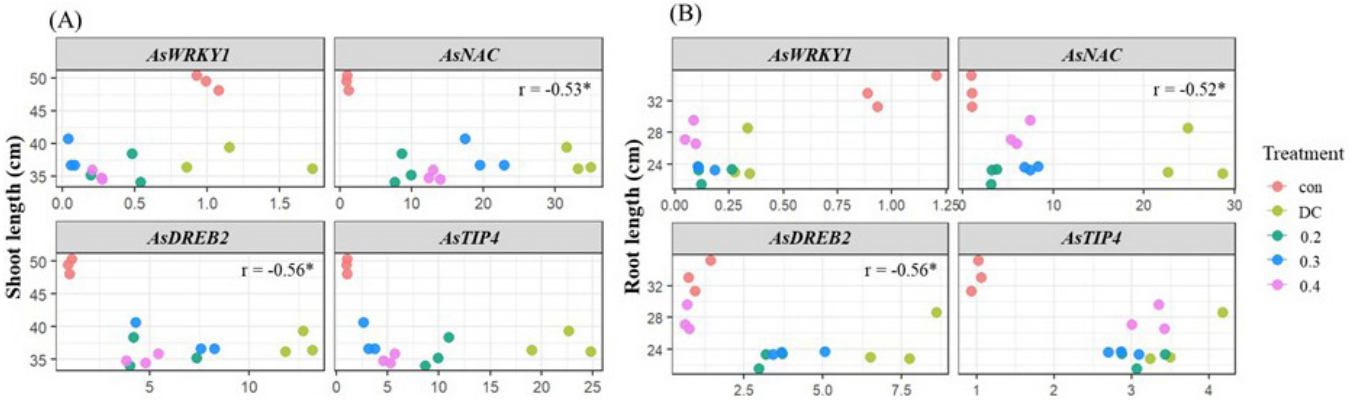

Fig. 7. Relationship between drought-response gene expression and (A) shoot length and (B) root length after drought treatment. Pearson's correlation coefficients (r) are shown for significant relationships (*p<0.05).

소모하지 않고 생장에 사용할 수 있었음을 시사한다. 이는 하이드로겔 처리가 가뭄 스트레스로 인한 지상부 생육 저하를 완화하였음을 간접적으로 나타내는 결과로 해석할 수 있다. *AsNAC* 역시 다른 가뭄 반응 유전자들과 동일하게 발현량 증가 시 생육 저하와 연관되는 경향을 보여, 가뭄 조건에서 방어 반응과 생장 간의 균형 조절에 관여함을 시사한다.

회복 재관수 후 가뭄 반응 유전자의 발현 변화를 log 변환하여 확인하였다(Fig. 8). 지상부에서 *AsDREB2*의 경우, DC에서는 소

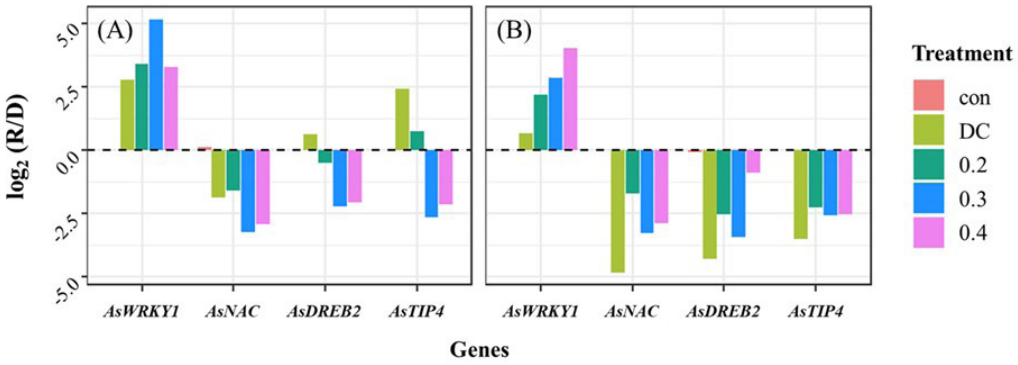

Fig. 8. Changes in drought-response gene expression after rewatering in (A) shoot and (B) root. The changes are expressed as log_2 (R/D) ratios. log_2 (R/D) >0 indicates up-regulation after recovery, suggesting the activation of recovery-related responses; log_2 (R/D) <0 indicates down-regulation after recovery, suggesting the suppression of unnecessary physiological responses.

폭 증가한 반면 하이드로겔 처리구에서는 감소하는 경향을 보였다. 이는 하이드로겔 처리에 의해 회복 이후에도 유지되던 ABA 관련 스트레스 반응이 완화되었음을 의미한다. 또한 지상부의 하이드로겔 처리에서 *AsDREB2*와 *AsTIP4*의 발현이 DC보다 감소한 것은, 재관수 이후 불필요한 스트레스 반응이 빠르게 억제되었음을 나타내며, 지상부에서의 회복이 상대적으로 신속하게 진행되었음을 시사한다. *AsNAC* 역시 가뭄 스트레스 동안 발현이 증가하였으나 재관수 이후 감소하는 패턴을 보였으며, 이는 회복 단계에서 스트레스 관련 전사 반응이 종료되고 정상 생장 단계로의 전사적 재조정이 일어나는 것을 의미한다[29]. 반면 지하부에서는 이러한 억제 양상이 지상부에 비해 지연되는 경향을 보였다. 지상부는 상대적으로 회복이 빠른 기관으로, 재관수 이후 스트레스 반응 유전자의 발현이 빠르게 감소하는 반면, 지하부는 가뭄 기간 동안 직접적인 수분 결핍 환경에 노출되면서 수리전도도 저하와 세포 탈수, 막 손상 등의 생리적 피해가 누적되며, 이러한 손상은 재관수 이후에도 즉각적으로 회복되지 않는 것으로 보고되어 있다[30-31]. 본 연구의 결과에서도 이러한 경향이 관찰되었으며, 지하부에서는 DC 처리구가 *AsWRKY1*을 제외한 모든 유전자에서 log_2(R/D) 값이 가장 큰 음의 값을 나타내 재관수 이후에도 전사 수준에서의 회복이 충분히 이루어지지 않았음을 보여주었다. 이는 가뭄에 의해 축적된 조직 수준의 손상이 지하부에서 더 크게 영향을 미치며, 식물체의 기관별로 서로 다른 회복 기작이 작동되고 있음을 시사한다.

*AsWRKY1*의 발현 증가는 식물체의 방어 반응이 재활성화되었음을 시사한다[32]. 그러나 DC에서는 하이드로겔 처리구와 비교하여 가장 작은 증가폭을 보여, 재관수 이후에도 방어 반응의 회복이 제한적으로 이루어졌음을 나타냈다. 반면 하이드로겔 처리구, 특히 0.4% 처리구에서는 *AsWRKY1*의 발현이 뚜렷하게 증가하여 가뭄 이후 지하부 수준에서 회복을 위한 방어 반응이 보다 효과적으로 유도되었음을 보여주었다. 가뭄 반응 유전자의 지속적인 높은 발현 양상은 스트레스 인지가 유지되고 있음을 의미하며, 반드시 회복에 유리한 상태를 의미하지는 않는다. 본 연구에서 하이드로겔 처리구에서 관찰된 유전자 발현 감소는 식물체가 인지하기에 스트레스 신호의 종료와 정상 생장 상태로의 전환을 반영하는 결과로 해석될 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 식물체의 지상부 및 지하부 길이 측정과 기존에 보고된 가뭄 반응 유전자의 상대 발현량 분석을 통해, 가뭄 조건 하에서 하이드로겔 처리가 식물의 가뭄 스트레스 조건에서 어떻게 작용하는지를 평가하였다. 그 결과, 하이드로겔을 처리한 식물체는 처리하지 않은 대조구에 비해 전반적으로 가뭄 스트레스에 의한 생육 저하가 완화되는 경향을 보였다. 특히 하이드로겔 0.4% 처리구는 지하부에서 가뭄 스트레스에 의한 피해가 가장 효과적으로 완화되었으며, 재관수 이후에도 높은 회복 지수를 나타내어 하이드로겔 처리의 효과가 가장 뚜렷하게 관찰된 처리구로 판단된다. 이는 하이드로겔 처리가 가뭄 스트레스 조건에서의 피해 경감 뿐만 아니라, 회복 단계에서도 식물 생육 회복에 긍정적인 영향을 미친다는 것을 의미한다. 가뭄 스트레스 조건에서 가뭄 반응 유전자의 발현과 식물체 생육 간의 관계를 분석한 결과, 해당 유전자의 발현이 낮을수록 지상부 및 지하부의 생육이 보다 안정적으로 유지되는 경향이 관찰되었다. 이는 하이드로겔 처리가 식물이 인지하는 가뭄 스트레스를 완화함으로써, 가뭄 반응 유전자의 과도한 발현을 억제하고 식물체의 생육 저하를 완화시킨 것으로 해석할 수 있다. 회복 단계에서의 유전자 발현 분석 결과, 지상부에서는 하이드로겔 처리구에서 불필요한 스트레스 반응 유전자의 발현이 빠르게 감소하여, 회복이 상대적으로 신속하게 진행되는 양상을 보였다. 반면 지하부에서는 가뭄 피해가 누적되어 회복이 지연되는 특성을 보였으나, 하이드로겔 처리구에서는 전사체 발현과 생육 지표 모두에서 회복 경향이 관찰되었다. 특히 0.4% 처리구에서 방어 반응과 관련된 유전자의 발현이 보다 효과적으

로 재활성화되어, 가뭄 이후 지하부 회복 과정에서 하이드로겔이 중요한 역할을 수행함을 시사하였다.

종합적으로, 본 연구의 결과는 하이드로겔이 토양 내 수분을 유지함으로써 식물이 인지하는 실제 수분 스트레스의 체감 강도를 경감시키고, 그 결과 가뭄 스트레스에 대한 전사체 발현과 생육 저하를 동시에 완화하여, 가뭄 조건과 회복 단계 모두에서 식물의 생육 안정성을 향상시킬 수 있음을 보여준다.

사 사

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국원자력연구원 주요사업(Project No. 523130-26)에 의해서 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Hernandez Nopsa JF, Thomas-Sharma S and Garrett KA. 2026. Encyclopedia of Agriculture and Food Systems (Third Edition). Volume 1. 173-18. Climate change and plant disease. Hardback eBook ISBN: 9780443159770.
2. Carvalho Nunes F, Narasimha Vara Prasad M, Csekö Nolasco de Carvalho C and de Jesus Alves L. 2026. Climate Change and Soil Interactions. 657-683. Climate and soil: a complex relationship and implications of climate change. https://doi.org/10.1016/C2018-0-03008-X.
3. Yvoz S, Lechenet M, Amiotte-Suchet P, Castel T, Betting E and Ubertosi M. 2025. Asscessing crop water deficiency for regional adaptation to climate change. *Agr. Water Manage*. **314**:109525. https://doi.org/10.1111/tpj.15483.
4. Sato H, Mizoi J, Shinozaki K and Yamaguchi-Shinozaki K. 2024. Complex plant responses to drought and heat stress under climate change. *The Plant J.* **117**:6. https://doi.org/10.1111/tpj.16612.
5. Rivero RM, Mittler R, Blumwald E and Zandalinas SI. 2021. Developing climate-resilient crops: improving plant tolerance to stress combination. *The Plant J.* **109**:2. https://doi.org/10.1111/tpj.15483.
6. Vedovello P, Valentim Sanches L, da Silva Teodoro. G, Ferraz Majaron V, Bortoletto-Santos R, Ribeiro C and Ferrari Putti F. 2024. An overview of polymeric hydrogel application for sustainable agriculture. *Agriculture*. **14**:840. https://doi.org/10.3390/agriculture14060840.
7. Wang H, Qu G, Liu X, He M, Yin C and Xu R. 2025. Hydrogel materials in agriculture: A review. *J Environ. Chem. Eng*. **13**:116385. https://doi.org/10.1006/j.jece.2025.116385.
8. Ahmed MS, Islam M, Hasan MK and Nam KW. 2024. A Comprehensive Review of Radiation-Induced Hydrogels: Synthesis, Properties, and Multidimensional Applications. *Gels*. **10**(6):381. https://doi.org/10.3390/gels10060381.
9. Varga B, Varga-László E, Bencze S, Balla K and Veisz O. 2013. Water use of winter cereals under well-watered and drought-stressed conditions. *Plant Soil Environ*. **59**(4):150-155. https://doi.org/10.17221/658/2012-PSE.
10. Xu W, Guo L, Wang C, Wei L, Wang Q, Ren Q, Yang X, Zhan CC, Liang X, Wang J and Ren C. 2024. Transcriptome analysis reveals drought-responsive pathways and key genes of two oat (Avena sativa) varieties. *Plants*. **13**(2):177. https://doi.org/10.3390/plants13020177.
11. Zhou X, Yi D, Ma L and Wang X. 2024. Genome-wide analysis and expression of the aquaporin gene family in *Avena sativa* L. *Frontiers in Plant.* **14**:1305299. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1305299.
12. Livak KJ and Schmittgen TD. 2001. Analysis of relative gene expression data using real-time quantitative PCR and the $2^{-\Delta\Delta CT}$ method. *Methods*. **25**(4):402-408. https://doi.org/10.1006/meth.2001.1262.
13. Guilherme MR, Aouada FA, Fajardo AR, Martins AF, Paulino AT, Davi MF, Rubira AF and Muniz EC. 2015. Superabsorbent hydrogels based on polysaccharides for application in agriculture as soil conditioner and nutrient carrier: A review. *European Polymer Journal*. **72**:365-385. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2015.04.017.
14. Ahmed EM. 2015. Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review. *Journal of advanced research*. **6**(2):105-121. https://doi.org/10.1016/j.jare.2013.07.006.
15. Abdelghafar R, Abdelfattah A and Mostafa H. 2024. Effect of super absorbent hydrogel on hydro-physical properties of soil under deficit irrigation. *Scientific reports*. **14**(1):7655. https://doi.org/10.1038/s41598-024-57786-5.
16. Zowada R and Foudazi R. 2023. Macroporous hydrogels for soil water retention in arid and semi-arid regions. *RSC Applied Polymers*. **1**(2):243-253. https://doi.org/10.1039/D3LP00117B.
17. Koushal S, Vishnoi M, Rachitha PJ, Vishnoi V, Premakumar and KC Singh. 2025. Hydrogels as a key solution for sustainable agriculture: Exploring water retention and soil improvement. *Int J Res Agron*. **8**(8S):415-423. https://doi.org/10.33545/2618060X.2025.v8.i8Sf.3604.
18. Sun Y, Robert CA and Thakur MP. 2024. Drought intensity and duration effects on morphological root traits vary across trait type and plant functional groups: a meta-analysis. *BMC Ecology and Evolution.* **24**(1):92. https://doi.org/10.1186/s12862-024-02275-6.
19. Adjuik TA, Nokes SE, Montross MD and Wendroth O. 2022. The impacts of bio-based and synthetic hydrogels on soil hydraulic properties: A review. *Polymers*. **14**(21):4721. https://doi.org/10.3390/polym14214721.
20. Jain P, Liu W, Zhu S, Chang CY, Melkonian J, Rockwell FE, Pauli D, Sun Y, Zipfel WR, Holbrook NM, Riha SJ, Gore MA and Stroock AD. 2021. A minimally disruptive method for measuring water potential in planta using hydrogel nanoreporters. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. **118**(23):e2008276118. https://doi.org/10.1073/pnas.2008276118.
21. Torres-Figueroa AV, de los Santos-Villalobos S, Rodríguez-Félix DE, Valenzuela-Hernandez G, Moreno-Salazar SF, Pérez-Martínez CJ, Ochoa-Meza A and del Castillo-Castro T. 2025. Novel Polysaccharide Hydrogels Enriched with Humic Acid for Sustainable Agricultural Applications. *ACS omega*. **10**(51):63189-63201. https://doi.org/10.1021/acsomega.5c09496.
22. Montesano FF, Parente A, Santamaria P, Sannino A and Serio P. 2015. Biodegradable superabsorbent hydrogel increases water retention properties of growing media and plant growth. *Agriculture and agricultural science procedia*. **4**:451-458. https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.03.052.
23. Kurowska MM, Wiecha K, Gajek K and Szarejko I. 2019. Drought stress and re-watering affect the abundance of TIP aquaporin transcripts in barley. *PLoS One*. **14**(12):e0226423. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226423.
24. Carvalho V, Vieira EA, Silva KR, Purgatto E, Nievola CC and Gaspar M. 2024. Succulence and aquaporin expression during drought

and recovery in the CAM epiphytic bromeliad Acanthostachys strobilacea (Schult. & Schult. f.) *Klotzsch. Environmental and Experimental Botany*. **228**:105985. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2024.105985.

25. Sakuma Y, Maruyama K, Osakabe Y, Qin F, Seki M, Shinozaki K, and Yamaguchi-Shinozaki K. 2006. Functional Analysis of an Arabidopsis Transcription Factor, *DREB2A*, Involved in Drought-Responsive Gene Expression. *The Plant Cell*. **18**(5):1292-1309. https://doi.org/10.1105/tpc.105.035881.
26. Yoon Y, Seo DH, Shin H, Kim HJ, Kim CM and Jang G. 2020. The role of stress-responsive transcription factors in modulating abiotic stress tolerance in plants. *Agronomy*. **10**(6):788. https://doi.org/10.3390/agronomy10060788.
27. Borràs D, Barchi L, Schulz K, Moglia A, Acquadro A, Kamranfar I, Balazadeh S and Lanteri S. 2021. Transcriptome-based identification and functional characterization of NAC transcription factores responsive to drought stress in *Capsicum annuum* L. *Frontiers in Genetics*. **12**:743902. https://doi.org/10.3389/fgene.2021.743902.
28. Huot B, Yao J, Montgomery BL and He SY. 2014. Growth-defense tradeoffs in plants: a balancing act to optimize fitness. *Molecular plant*. **7**(8):1267-1287. https://doi.org/10.1093/mp/ssu049.
29. Wang G, Yuan Z, Zhang P, Liu Z, Wang T and Wei L. 2020. Genome-wide analysis of NAC transcription factor family in maize under drought stress and rewatering. *Physiology and Molecular Biology of Plants*. **26**(4):705-717. https://doi.org/10.1007/s12298-020-00770-w.
30. Gao H, Ge W, Bai L, Zhang T, Zhao L, Li J, Shen J, Xu N, Zhang H, Wang G and Lin X. 2023. Proteomic analysis of leaves and roots during drought stress and recovery in *Setaria italica* L. *Frontiers in Plant Science*. **14**:1240164. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1240164.
31. Vadez V. 2014. Root hydraulics: the forgotten side of roots in drought adaptation. *Field Crops Research*. **165**:15-24. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.03.017.
32. Eulgem T, Rushton PJ, Schmelzer E, Hahlbrock K and Somssich IE. 1999. Early nuclear events in plant defence signalling: rapid gene activation by WRKY transcription factors. *The EMBO journal*. **18**(17):4689-4699. https://doi.org/10.1093/emboj/18.17.4689.