

콩 침수 스트레스에 대한 식물생장조절물질 처리 효과

서창우¹ · 이석민¹ · 강상모¹ · 박연경¹ · 김아영¹ · 박현진² · 김윤하¹ · 이인중^{1,†}

Selection of Suitable Plant Growth Regulators for Augmenting Resistance to Waterlogging Stress in Soybean Plants (*Glycine max* L.)

Chang-Woo Seo¹, Seok-Min Lee¹, Sang-Mo Kang¹, Yeon-Gyeong Park¹, Ah-Yeong Kim¹, Hyeon-Jin Park², Yoonha Kim¹, and In-Jung Lee^{1,†}

ABSTRACT This research was conducted to evaluate methods of enhancing the waterlogging resistance of soybean plant. Thus, we applied seven types of plant growth regulators (PGRs) to soybean plants and exposed them to waterlogged conditions for a total of 14 days. To evaluate stress resistance, we monitored plant growth characteristics data such as height, chlorophyll content, and chlorophyll fluorescence for 28 days after the initial waterlogging (14 days under waterlogging conditions and 14 days after waterlogging). According to the results, plant height was significantly increased by gibberellin A4 (GA₄) treatment compared to the control treatment and waterlogging-only treatment. However, we could not detect plant height owing to plant death when we applied abscisic acid (ABA). Except for GA₄ and ABA treatments, plant heights slightly decreased in all treatments compared to the waterlogging-only treatment. The chlorophyll content and chlorophyll fluorescence showed a similar tendency among PGR treatments. The chlorophyll content and chlorophyll fluorescence were significantly increased by ethephon and kinetin treatments 28 days after waterlogging compared to the waterlogging-only treatment. Consequently, kinetin and ethephon treatments induced more resistant phenotypes in soybean plants during or after exposure to waterlogging conditions.

Keywords : auxin, gibberellins, plant hormone, stress hormone, water stress

우리나라 경제 성장에 따른 국민의 식생활 패턴의 변화와 더불어 지속적인 논 농업 중심의 농업 구조로 인한 쌀 생산 과잉이 최근 사회적 문제로 제기되고 있다(Woo *et al.*, 2011). 이와 같은 이유에서 농촌진흥청에서는 쌀 생산과잉으로 인한 문제를 해결하기 위해 논에 밭작물 재배를 권장하고 있으며 이와 같은 이유에서 각 시도 자치단체의 농업연구기술센터에서도 논에서의 밭작물 재배 관련 연구를 통해 쌀 생산과잉을 줄이면서 밭작물의 자급력 도한 높일 수 있는 연구를 진행하고 있다(Seo *et al.*, 2010; Woo *et al.*, 2011). 최근 농촌진흥청 발표에 의하면 논에서 이용될 대체 밭 작물로 콩, 고구마, 연 등의 작목을 추천하고 있으며, 특히 콩을 논에서 재배하기 위해 많은 노력을 기울이고 있다(Kim

et al., 2007; Lee & Kang, 2001). 그 이유는 첫째, 우리나라에서 콩은 다양한 양념(된장, 간장 등)의 핵심 원료로써 중요하게 여겨지고 있는 식량 작물 중 하나이며(Cho *et al.*, 2015), 둘째, 콩은 2012년 기준으로 10a 당 약 73만원의 소득을 기록한 고소득 작물이기 때문에 동일한 면적에서 생산된 쌀에 비해 약 16%가량의 소득 향상을 기대할 수 있기 때문이다(Park *et al.*, 2016). 뿐만 아니라 콩은 단백질, 식이섬유, 필수 미네랄 및 항산화 효과를 지닌 것으로 알려진 다양한 이차대사물질을 함유하고 있어 여러 형태의 건강보조식품, 가공식품으로 이용이 가능하기 때문에 논 재배를 권장하고 있다(Kim *et al.*, 2012; Kim & Cho, 2005; Nacer, 2012; Muhammad *et al.*, 2014).

¹경북대학교 응용생명과학부 (Division of Applied Biosciences, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea)

²농촌진흥청 국립식량과학원 기능성작물부 (Division of Legume and Oil Crop Research, Department of Functional Crop, NICS, RDA, Miryang 50426, Korea)

[†]Corresponding author: In-Jung Lee; (Phone) +82-53-950-5708; (E-mail) ijlee@knu.ac.kr

<Received 2 April, 2017; Revised 24 August, 2017; Accepted 26 August, 2017>

작물의 중요성과 소득으로 봤을 때 논에 콩 재배가 쌀생산 과잉을 줄이고 농가의 소득을 높일 수 있는 방법임에도 불구하고 논에서 콩 재배를 위해서는 몇 가지 극복해야 할 어려움이 있다. 일반적으로 콩은 요소량은 높으나 과습에는 취약한 작물로 알려져 있다. 이러한 특성 때문에 콩 재배시 배수는 콩 생육에 중요한 요건 중 하나이다(Kim *et al.*, 2015). 그러나 대부분의 국내 논은 경우 배수가 불량하기 때문에 밭작물 재배를 위해서는 배수관 매립과 같은 노력이 필요하다(Kim *et al.*, 2015). 또 다른 이유로는 국내 기상여건이 콩 재배시 습해를 유발할 수 있는 가능성이 높다는 것이다. 왜냐하면 국내에서 콩 파종 후 영양생장 후기(vegetative stage 5) 혹은 생식생장기(reproductive growth stage 1~2)에 집중호우가 발생한 가능성이 높기 때문에 침수 혹은 과습으로 인한 피해가 발생할 확률이 높다(Cho *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2015; Koo *et al.*, 2014). 침수 스트레스는 다양한 식물의 생육과 수량에 직접적인 영향을 주는 중요한 비생물성 스트레스로(Kamal *et al.*, 2015; Kokubun, 2013), 주로 과도한 강수량, 부적절한 관개, 물 빠짐이 부족한 토성 등으로 인해 발생한다(Sasidharan & Voesenek, 2015). 현재까지 알려진 내용에 따르면, 침수로 인해 작물이 피해를 입는 원인은 토양 내 공극이 물로 가득 채워져 식물체가 이용 가능한 토양 내 산소가 부족하게 되어 산소 결핍상태(anoxia)와 저산소상태(hypoxia)를 유발하게 되며(Lee & Kang, 2001), 이로 인하여 식물은 미토콘드리아 호흡작용(mitochondria respiration)에 필요한 산소를 뿌리로부터 충분히 공급받지 못해 대사과정에 문제가 발생하여 피해를 입는 것으로 알려져 있다(Koo *et al.*, 2014). 또한 침수로 인해 대사과정에 필요한 산소 공급이 충분하지 못하면 식물은 물질대사에 에너지원으로 이용하는 ATP와 NADH가 부족하거나 NAD가 식물체내 축적하게 되어, 이를 극복을 위해 식물체는 대체회로인 혐기성 발효 과정을 활성화시키게 된다(Loreti *et al.*, 2016; Sauter, 2013). 위와 같은 이유로 인해 토양 과습조건을 식물체의 양분 흡수와 물질 이동 감소(Bacanamwo & Purcell, 1999), 잎의 엽록소 함량 감소(Lee *et al.*, 2010)와 같은 피해를 유발시켜 최종적으로 수량의 감소를 유발하는 것으로 알려져 있다.

위와 같은 이유 때문에 논에서 콩 재배를 위한 다양한 연구가 진행 중이다(Lee *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2010). 이와 같은 맥락에서 논 재배시 침수 피해를 경감하기 위한 관개 및 배수시설 확보하거나 습해 저항성 품종을 선발 하기 위한 연구가 지속적으로 진행되고 있으나(Jung *et al.*, 2010, Koo *et al.*, 2014), 아직 현장에 적용하기에는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구는 논에서 실제 콩 재배시 예상치 못

한 침수 혹은 과습 스트레스로 인해 발생될 수 있는 수량감소를 줄일 수 있는 재배 기술을 개발하기 위해 다양한 종류의 식물생장조절물질을 침수조건에서 생육 중인 콩에 처리하고 생육 결과를 비교 분석했다.

재료 및 방법

식물재료 및 생장조건

본 실험은 2015년 대구에 위치한 경북대학교 농업생명과학대학 부속실험실습장에서 진행했다. 실험에 이용된 식물재료로는 농촌진흥청 국립식량과학원에서 분양받은 대원콩을 이용했다. 먼저 원예용상토(토비랑, 백광비료, 대한민국)를 넣어 놓은 50공 트레이에 대원콩을 파종했다. 일반적으로 콩과 식물은 침수 피해가 발생했을 때 생육단계가 V2 and V3 stage 이다(Sullivan *et al.*, 2001). 따라서 본 실험은 파종 14일 후 전반적으로 식물체의 생육단계가 V2에 도달했을 때 논토양을 넣어 놓은 6공 포트(455 mm × 340 mm × 180 mm)로 이식하였다. 이식 후 식물체 V2 stage에서 침수처리 하였으며, 플라스틱 상자(530 mm × 360 mm × 310 mm)에 백색 비닐을 3겹으로 덮은 다음 물을 넣어 침수조건을 제공했다. 침수처리기간 동안 수위는 지표면에서 5 cm 까지 유지하여 14일간 유지했고, 침수처리 14일 후 물을 제거한 다음 무처리와 동일한 조건으로 재배하면서 추가적으로 생육상태를 조사했다.

식물생장조절물질 처리

본 실험은 무처리, 침수처리 및 각각 100 μM로 희석된 식물생장조절물질 [인돌-3-아세트산(IAA), 지베렐린(GA₄), 키네티(Kinetin), 앱시스산(ABA), 에테폰(Ethephon, ETP), 살리실산(SA), 메틸자스몬산(MeJA)]로 구성했다(Table 1). 식물생장조절물질 중 에테폰은 식물호르몬 에틸렌이 기체 형태로 존재하기 때문에 처리 및 정량에 어려움이 있어 식물

Table 1. Information on the plant growth regulators (PGRs) used in this study.

Group	PGRs
Auxin	Indole-3-acetic acid (Sigmaaldrich, USA)
Gibberellic acid	Gibberellin A4 (Sigmaaldrich, USA)
Cytokinins	Kinetin (Sigmaaldrich, USA)
Abscisic acid	Abscisic acid (Sigmaaldrich, USA)
Ethylene	Ethephon (Kyungnong, South Korea)
Salicylic acid	Salicylic acid (Sigmaaldrich, USA)
Jasmonic acid	Methyl Jasmonic acid (Sigmaaldrich, USA)

체내에서 에틸렌과 Cl 및 H₃PO₄를 방출하는 유도체이기 때문에 본 실험에 이용했다. 식물생장조절물질의 처리는 침수 처리 1시간 전 각각의 식물체의 20 ml씩 원예용 분무기를 이용해 경엽처리했다.

생육특성조사

식물생장조절물질 처리가 침수 피해 경감에 미치는 영향을 평가하기 위해서 침수처리 후 7 (7DAT), 14 (14DAT), 21 (21DAT), 28 (28DAT)일 뒤 생육특성(경장, 엽록소 함량, 엽록소 형광반응, 육안평가)을 조사했다(21DAT와 28DAT는 침수조건 제거 후 생육조사를 나타냄). 특히 광합성 효율과 관련된 형질인 엽록소 함량은 미국 Optisciences사의 CCM300을 이용해 콩 잎 3개 중 중간잎을 측정하였으며, 엽록소 형광반응(Fv/Fm)은 암순응 클립을 이용해 30분간 콩의 중간잎을 암조건에 적응시킨 후 활성전자를 모두 제거한 후 미국 Optisciences사의 Os5P의 측정 프로그램을 이용해 측정했다.

통계처리

모든 실험 결과는 처리 당 3반복으로 조사했고, 통계적 유의성 분석은 Statistics Analysis System (SAS, Version 9.3, Cary, NC, Inc., USA) 프로그램을 이용해 평균치(mean)와 표준편차(standard deviation)로 표시했다. 각각의 처리간 차이는 Duncan's Multiple Range Test (DMRT)를 통해 P < 0.05에서 검정했다.

결과 및 고찰

침수처리 및 식물생장조절물질 처리가 콩 식물체의 경장 변화에 미치는 영향

침수 및 식물생장조절물질 처리에 따른 콩의 경장 변화는 Table 2와 같다. 침수처리 후 7일 뒤 경장은 무처리와 비교 시 GA₄처리에서 가장 큰 것으로 조사됐고, 반면 침수처리에서 가장 작은 것으로 조사됐다(Table 2). 침수처리 후 14일 뒤 경장은 모든 생장조절물질 처리시 무처리보다 경장이 큰 것으로 조사됐으며, 침수처리와 생장조절물질 처리를 비교해 본 결과 ETP, SA처리만이 침수처리보다 경장이 작았으며, ABA처리에서 식물체가 낙엽 증상과 함께 고사되어 측정할 수 없었다. 또한 침수처리 후 7일 뒤 결과와 같이 GA₄처리에서 경장이 가장 큰 것으로 조사됐다(Table 2). 침수처리와 식물생장조절물질 처리는 침수처리 14일 뒤 물을 완전히 제거한 다음 추가적으로 생육특성을 조사했다. 그 결과 침수처리 21일 뒤 경장은 예상했던 것과 같이 GA₄처리에서 가장 높았으나, 식물생장조절물질 처리와 침수처리에서 경장은 무처리와 비교시 차이가 없는 것으로 조사됐다(Table 2). 침수처리 28일 뒤 결과에서도 GA₄처리에서 경장이 가장 큰 것으로 조사됐다. 그러나 식물생장조절물질 처리와 침수처리에서 경장이 무처리보다 큰 것으로 조사됐고, 식물생장조절물질 처리간 비교에서는 SA처리에서 경장이 가장 작은 것으로 조사됐다(Table 2). 본 실험에서 침수처리기간(물을 가득 채운 기간)동안 경장은 식물생장조절물질 처리와 침수처리에서 무처리보다 큰 것으로 조사됐으나, 침수조건이 제거되자 식물생장조절물질 처리와 침수처리에서 무처리보다 경장 증가율이 감소하는 경향을 보였

Table 2. The effect of plant growth regulators on soybean height under waterlogging condition.

Treatments	Under waterlogging (cm)		After waterlogging (cm)	
	7DAT ¹⁾	14DAT	21DAT	28DAT
Control	24.14±0.459e	33.74±0.873c	49.52±3.141b	60.23±4.048b
Waterlogging	28.22±0.964cd	38.29±2.128bc	46.24±3.354b	50.20±3.511bc
WL ²⁾ + IAA	27.37±0.898d	39.90±1.099b	50.33±1.904b	50.71±1.886bc
WL + GA ₄	57.94±1.353a	73.23±2.502a	80.09±4.368a	82.29±4.323a
WL + Kinetin	28.72±0.835bcd	40.55±1.971b	49.10±4.431b	56.61±4.712bc
WL + ABA	29.55±1.130bcd	ND***	ND***	ND***
WL + ETP	28.62±0.797bcd	36.71±1.232bc	39.46±2.608b	47.98±1.832bc
WL + SA	30.58±0.978bc	35.93±0.832bc	43.80±1.175b	46.94±0.792c
WL + MeJA	31.38±0.543b	38.61±1.035bc	49.43±1.749b	49.52±1.510bc

¹⁾DAT : days after treatment; ²⁾WL : waterlogging treatment, ³⁾ND : not detected. Same letter in the column is not significantly different at 0.05 probability level according to Duncan's Multiple Range Test.

으며, 침수처리 후 28일 조사에서 보다 큰 경장 증가율의 차이를 확인할 수 있었다(Table 2).

본 실험에서 식물생장조절물질 ABA를 처리한 경우 식물은 사멸한 것으로 조사됐는데, 식물에서 ABA의 대표적인 역할은 GA와의 비율 조절을 통해 종자의 휴면과 발아를 조절하거나, 수분스트레스 조건에서 기공의 개폐를 통한 증산작용을 조절하는 것으로 알려져 있다(Desikan *et al.*, 2002; Finkelstein *et al.*, 2002). 이외에도 다양한 작물의 단백질 합성에 관여하거나, 식물 뿌리의 목질화에 관여하는 것으로 연구된 바 있다(Desikan *et al.*, 2002; Kim *et al.*, 2015). 특히 ABA는 식물체내에서 스트레스를 해결하기 위해서 급격히 생성되며, 그 역할을 다하게 되면 불활성형(글루코스가 합성된 형태)으로 존재하여 세포내 액포에 저장되어 분해되게 된다(Dietz *et al.*, 2000; Liu *et al.*, 2004). 그러나 본 실험은 수분부족으로 인한 콩 식물체내 증산량을 조절해야하는 상황보다는 체내에 부족한 산소를 공급할 수 있는 방향으로 식물이 반응해야 하기 때문에 외부에서 공급된 다량의 ABA는 콩 잎의 탈리현상과 같이 스트레스에 부정적인 반응을 한 것으로 생각한다(Kim *et al.*, 2016). 본 연구에서 식물의 신장 조절에 관련된 것으로 알려진 GA의 처리는 침수에 대한 어느 정도의 스트레스 저항성을 보였는데, Kim *et al.* (2015)의 보고에 의하면 침수스트레스

초기에 콩 식물체내 함량이 증가했으며, 이러한 증상은 벼와 *Rumex palustris* 식물체가 침수(submergence)조건에서 스트레스 경감을 하는데 식물호르몬 에틸렌 반응 인자(ERF)에 의해서 유도되고 그로 인해 식물체의 절간 신장을 증가시켜 침수스트레스의 저항성을 유도한다는 결과와 유사한 결과라 생각한다(Fukao *et al.*, 2011; Xu *et al.*, 2006). 그러나 본 실험에서 GA의 처리는 급격한 절간장의 신장을 유도해 모든 콩 식물체가 도복 했기 때문에 실제 농가에 이용하기 위한 식물생장조절제로는 이용이 어려울 것으로 생각한다.

침수 피해 및 식물호르몬 처리로 인한 엽록소 함량 및 엽록소 형광반응(Fv/Fm) 변화

콩 잎의 클로로필 함량도 침수처리 및 식물생장조절물질 처리에서 차이를 보였다.

먼저 전반적인 클로로필 함량은 정상 조건에서 재배한 콩에서 재배 일수가 증가함에 따라 엽록소 함량이 지속적으로 증가한 반면, 침수처리를 받은 콩에서 엽록소 함량은 지속적으로 감소하는 경향을 보였다(Table 3). 침수처리 후 7일 뒤 엽록소 함량은 침수처리 및 식물생장조절물질 처리에서 무처리보다 감소한 것으로 조사됐고 이러한 경향은 침수 후 28일 뒤 조사에서까지 지속적으로 조사됐다. 침수

Table 3. Influence of plant growth regulators on chlorophyll content in soybean plants under waterlogging conditions. In this table, WL indicates waterlogging and other capital letters indicate the abbreviation of plant growth regulators.

Treatments	7DAT ¹⁾	14DAT	21DAT	28DAT	
Control	329.6±34.80a	213.6±46.43abc	394.4±39.81a	441.8±36.29a	
Waterlogging	261.5±78.49ab	249.6±50.24a	243.7±53.93b	280.9±67.68b	
WL ²⁾ + IAA	314.9±34.88a	236.4±39.96ab	249.2±33.94b	329.4±59.88ab	
WL + GA	280.2±44.63a	186.5±41.73c	242.7±47.20b	236.9±74.83b	
WL + Kinetin	314.6±42.23a	246.8±64.64a	241.7±34.96b	335.6±93.64ab	
WL + ABA	171.8±89.14b	ND ³⁾	ND	ND	
WL + ETP	318.6±54.14a	302.7±47.95bc	266.6±40.58ab	229.1±78.79ab	
WL + SA	299.5±40.31a	236.5±43.21a	259.3±40.90ab	306.7±91.67ab	
WL + MeJA	281.4±67.34a	178.2±35.91c	203.7±35.56c	176.6±40.93c	
ANOVA					
Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
TR ⁴⁾	8	988968.8723	123621.109	25.61	<.0001
PER ⁵⁾	3	992361.8997	330787.2999	68.53	<.0001
REP ⁶⁾	1	1984.4797	1984.4797	0.41	0.5219
TR*PER	22	299912.6703	13632.3941	2.82	<.0001

¹⁾DAT: days after treatment; ²⁾WL: waterlogging treatment, ³⁾ND: not detected; ⁴⁾TR: treatment; ⁵⁾PER : period; ⁶⁾REP: replication. Same letter in the column is not significantly different at 0.05 probability level according to Duncan's Multiple Range Test.

처리와 식물생장조절물질 처리를 비교한 결과 ABA처리에서 침수처리보다 엽록소 함량이 감소한 것으로 조사됐으나 다른 식물생장조절물질 처리에서는 침수처리보다 증가한 것으로 조사됐다(Table 3; 7DAT). 침수처리 14일 뒤 결과에서는 GA, ETP 및 JA처리에서 침수처리보다 엽록소 함량이 감소했으며, 침수처리 21일 뒤 결과에서는 JA처리를 제외한 GA와 ETP처리에서 침수처리와 같은 수준의 엽록소 함량을 보임을 확인했다(Table 3). 침수처리 28일 뒤 결과에서는 GA와 JA처리에서 침수처리보다 엽록소 함량이 크게 감소했다. 반면 ETP, IAA 및 CK처리에서 침수처리에 비해 엽록소 함량이 증가해 침수스트레스로 인한 엽록소 함량 감소가 회복되는 것으로 조사됐다(Table 3).

침수처리 후 엽록소 함량은 물을 채워 침수스트레스를 공급한 기간 동안에는 침수처리보다 엽록소 함량이 감소했으나, 물을 제거한 후 엽록소 함량 회복이 ETP에서 가장 좋은 것으로 조사됐고, IAA와 CK에서도 침수처리보다 좋은 것으로 조사됐다. 엽록소는 식물에서 가장 활동적인 광합성 조직인 엽육세포에 많이 존재하는 엽록체에 존재하는 빛을 흡수하는 녹색색소를 말한다(Allen, 2005; Beale, 1999). 이렇게 흡수된 빛은 엽록체내 광계(photosystem)라고 하는 각기 다른 기능적 단위에 의해서 수확되어 식물체내 대사활동에 필요한 에너지 생성에 이용된다(Liu *et al.*, 2004). 또한 식물이 스트레스를 받으면 외부적으로 쉽게 확인 할 수 있는 방법이 엽색에 변화이고, 엽색의 변화는 엽록소 함량 변화로 쉽게 확인 할 수 있기 때문에 식물의 스트레스 정도를 측정하는 방법으로 엽록소 함량을 많이 비교한다(Lee *et al.*, 2012). 위와 같은 이유로 침수처리 후 엽록소 함량을 분석해 본 결과 3 종류의 식물생장조절물질(ETP, IAA, CK) 처리에서 침수처리에 비해 향상된 결과를 확인 할 수 있었다. 아마도 ETP에서 엽록소 함량이 증가된 결과는 식물호르몬 에틸렌이 침수스트레스에서 스트레스 경감반응(뿌리내 통기조직 발달, 부정근 형성, 다른 호르몬의 합성 조절 등)에 중요한 signal molecule이기 때문에 외부에서 인위적으로 공급한 ETP이 식물체내 에틸렌 생성을 높이고 이러한 결과가 다른 스트레스 경감반응에 영향을 미쳤기 때문에 유도된 결과라 생각된다(Kim *et al.*, 2015; Xu *et al.*, 2006). 엽록소 함량이 높게 조사됐던 IAA와 CK도 식물의 기관 발달과 같은 반응을 유도하는 식물호르몬으로 알려져 있다(Friml & Palme, 2002). 옥신류(auxin)의 한 종류인 IAA는 고등식물에 주요 옥신으로 분열조직(경단분열조직, 어린잎 등)에서 많이 합성되고 대부분의 옥신이 줄기에 의존적이지만 뿌리가 신장하거나 성숙과 같이 뿌리 생육에 필요한 경우에는 근단분열조직 또한 옥신을 생성하는 주요 부위로

알려져 있다(Ljung *et al.*, 2001). Kim *et al.* (2015)의 연구 결과에 따르면 침수스트레스 저항성 품종에서 감수성 품종에 비해 부정근 발생량이 많았으며, 이러한 생육반응은 침수조건에서 산소를 잘 흡수할 수 있는 조건을 제공하는 것으로 보고했고, Shannon *et al.* (2005)도 침수스트레스에 저항성을 보이는 콩 품종에서 부정근의 발생이 상대적으로 많은 것으로 보고했다. 위와 같은 결과로 유추해 볼 때 외부에서 공급된 IAA가 침수스트레스 경감반응 중 하나인 부정근 형성과 반응에 영향을 미쳤기 때문에 유도된 결과일 수 있을 것으로 추정되나 좀 더 구체적인 연구를 통해 내용을 명확히 밝힐 필요가 있을 것으로 생각된다. KT는 식물호르몬 시토키닌(cytokine)의 한 종류로 주로 식물의 세포분열에 관여하며, 또한 줄기와 뿌리에서 세포분열을 조절하는 것으로 알려져 있다(Lee *et al.*, 2004). Nishimura *et al.* (2004)에 의하면 시토키닌 산화효소를 과다 발현하게 되면 식물의 줄기 신장이 크게 억제되였으며, 그러한 결과는 시토키닌이 근단분열조직과 경단분열조직에서 서로 상보적인 역할을 했기 때문인 것으로 보고했다(Supplement Fig. 1). 우리 연구결과에서도 콩 식물체에 KT처리는 침수처리보다 스트레스 경감을 유도하는 것으로 조사됐으며, 이러한 결과는 KT가 콩에서 부정근 발생에 영향을 미쳤기 때문인 것으로 추정된다(Supplement Fig. 1).

식물에서 Fv/Fm는 엽록체내 광계II의 효율을 직접적으로 나타내는 지표로써 전 세계적으로 가장 많이 사용되고 있는 엽록소 형광 반응 측정값이며, 암적응 상태에서의 엽록소 형광 발현 측정을 통하여 식물 스트레스가 광계II에 미치는 영향을 분석 할 때 가장 널리 이용되는 측정값이다(Baker & Oxborough, 2004). 일반적으로 Fv/Fm 측정값은 0.79에서 0.84의 수치를 나타낼 때 식물체의 광계II 효율이 가장 높은 것으로 알려져 있으며, 다양한 스트레스 조건에서 식물체의 Fv/Fm 값이 하락한다는 연구결과가 보고된 바 있다(Maxwell & Johnson, 2000; Kitajima & Butler, 1975). Fritsche-Neto & Borém (2015)에 따르면 식물체 형광 반응 측정 시 Fv/Fm 값이 0.84로 측정될 때 식물체내 광계II가 최대 효율인 상태라는 보고했기 때문에 본 연구에서는 0.84의 Fv/Fm 수치를 최적조건으로 선정하여 각각의 처리에서 조사된 결과와 비교했다. 그 결과 엽록소 함량과 비슷한 결과가 조사됐는데, 무처리에서는 침수처리 기간이 길어질수록 Fv/Fm 수치가 점차 증가하여 최적 효율에 근접하였으나, 이와는 반대로 침수처리에서는 Fv/Fm 수치가 점차 감소했고, 이러한 감소 양상은 침수기간이 길어질수록 지속됐다 또한 식물생장조절물질 처리간 비교 결과 ETP과 KT처리에서 Fv/Fm값이 무처리 보다 높은 것으로 조사됐다

Table 4. Influence of plant growth regulators on chlorophyll fluorescence in soybean plants under waterlogging conditions. In this table. WL indicates waterlogging and other capital letters indicate the abbreviation of plant growth regulators.

Treatments	7DAT ¹⁾	14DAT	21DAT	28DAT
Control	0.807±0.005a	0.801±0.020a	0.836±0.008a	0.838±0.007a
Waterlogging	0.776±0.031a	0.770±0.029bc	0.793±0.022a	0.821±0.007a
WL ²⁾ + IAA	0.760±0.043a	0.762±0.020c	0.793±0.019a	0.822±0.014a
WL + GA	0.785±0.020a	0.774±0.006abc	0.778±0.018a	0.806±0.020a
WL + Kinetin	0.787±0.050a	0.793±0.014ab	0.798±0.023a	0.823±0.008a
WL + ABA	0.748±0.050a	ND ³⁾	ND	ND
WL + ETP	0.783±0.024a	0.773±0.024bc	0.789±0.012a	0.827±0.011a
WL + SA	0.764±0.056a	0.779±0.039abc	0.801±0.020a	0.810±0.007a
WL + MeJA	0.751±0.039a	0.769±0.026abc	0.794±0.009ab	0.785±0.015ab

ANOVA					
Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
TR ⁴⁾	8	0.06483386	0.00810423	11.41	<.0001
PER ⁵⁾	3	0.07439462	0.02479821	34.92	<.0001
REP ⁶⁾	1	0.00824495	0.00824495	11.61	0.0008
TR*PER	21	0.01796245	0.00085535	1.2	0.2463

¹⁾DAT: days after treatment; ²⁾WL: waterlogging treatment, ³⁾ND: not detected; ⁴⁾TR: treatment; ⁵⁾PER: period; ⁶⁾REP: replication. Same letter in the column is not significantly different at 0.05 probability level according to Duncan's Multiple Range Test.

(Table 4). 그래서 최종적으로 경장, 엽록소 함량 및 Fv/Fm를 종합적으로 분석해 본 결과 콩 식물체에 침수스트레스 경감에 효과적인 식물생장조절물질은 KT와 Ethephon 처리인 것으로 조사됐다(Supplement Fig. 2).

적 요

국내에서 논에서 콩 재배시 토양특성과 기후적인 영향으로 인해 발생할 수 있는 침수스트레스를 경감할 수 있는 재배적 방법을 모색하기 위해 연구를 진행했다. 연구결과를 요약하면 아래와 같다.

1. 침수처리 후 경장은 GA₄처리에서 제일 컸으며 ABA처리에서는 콩 식물체가 죽는 것으로 조사됐다. 침수처리와 GA₄를 제외한 식물생장조절물질(IAA, KT, ETP, SA, MeJA) 처리 사이에는 큰 차이가 없는 것으로 조사됐다.
2. 침수처리 후 엽록소 함량과 Fv/Fm은 IAA, KT, ETP과 같이 식물의 조직과 기관의 발달에 관련된 식물생장조절물질 처리에서 침수처리보다 개선된 결과를 보였다. 이와는 반대로 식물의 스트레스 반응을 조절하는 것으로 알려진 식물생장조절물질 SA와 MeJA처리에서는 침수처리보다 엽록소 함량과 Fv/Fm값이 감소하였다.

3. 위 모든 결과를 종합해 볼 때 콩에서 침수스트레스 저항을 유도에는 식물생장조절물질 KT와 ETP 처리가 효과적이다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ01099002)의 지원에 의해 수행되었다.

인용문헌(REFERENCES)

- Allen, J. F. 2005. A redox switch hypothesis for the origin of two light reactions in photosynthesis. *FEBS letters*. 579(5) : 963-968.
- Bacanawo, M. and L. C. Purcell. 1999. Soybean dry matter and N accumulation responses to flooding stress. N sources and hypoxia. *J. Exp. Bot.* 50 : 689-696.
- Baker, N. R. and K. Oxborough. 2004. Chlorophyll fluorescence as a probe of photosynthetic productivity. In *Chlorophyll a Fluorescence*. 65-82.
- Beale, S. I. 1999. Enzymes of chlorophyll biosynthesis. *Photosynth. Res.* 60(1) : 43-73.
- Cho, S. W., T. S. Kim, S. J. Kwon, S. J. Roy, C. W. Lee, H. S. Kim, and S. H. Woo. 2015. Characterization of Protein

- Function and Differential Protein Expression in Soybean under Soaking Condition. *Korean J. Crop Sci.* 60(1) : 114-122.
- Desikan, R., R. Griffiths, J. Hancock, and S. Neill. 2002. A new role for an old enzyme: nitrate reductase-mediated nitric oxide generation is required for abscisic acid-induced stomatal closure in *Arabidopsis thaliana*. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 99(25) : 16314-16318.
- Dietz, K., A. Sauter, K. Wichert, D. Messdaghi, and W. Hartung. 2000. Extracellular β -glucosidase activity in barley involved in the hydrolysis of ABA glucose conjugate in leaves. *J. Exp. Bot.* 51(346) : 937-944.
- Finkelstein, R. R., S. S. Gampala, and C. D. Rock. 2002. Abscisic acid signaling in seeds and seedlings. *Plant Cell*, 14(suppl 1), S15-S45.
- Friml, J. and K. Palme. 2002. Polar auxin transport-old questions and new concepts? *Plant Mol. Biol.* 49(3): 273-284.
- Fritsche-Neto, R. and A. Borém. (Eds.). 2015. Phenomics: How next-generation phenotyping is revolutionizing plant breeding. Springer.
- Fukao, T., E. Yeung, and J. Bailey-Serres. 2011. The submergence tolerance regulator SUB1A mediates crosstalk between submergence and drought tolerance in rice. *Plant Cell* 23, 412-427.
- Jung, K. Y., E. S. Yun, K. D. Park, and C. Y. Park. 2010. Evaluation of drainage improvement effect using geostatistical analysis in poorly drained sloping paddy soil. *Korean J. Soil Sci. Fertil.* 43(6) : 804-811.
- Kamal, A. H. M., H. Rashid, K. Sakata, and S. Komatsu. 2015. Gel-free quantitative proteomic approach to identify cotyledon proteins in soybean under flooding stress. *J. Proteomics.* 112 : 1-13.
- Kim, E. H., S. L. Kim, S. H. Kim, and J. M. Chung. 2012. Comparison of isoflavones and anthocyanins in soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] seeds of different planting dates. *J. Agric. Food Chem.* 60(41) : 10196-202.
- Kim, J. G., E. S. Chung, J. S. Ham, S. Seo, M. J. Kim, S. H. Yoon, and Y. C. Lim. 2007. Effect of growth stage and variety on the yield and quality of whole crop rice. *J. Korean Soc. Grassl. Forage. Sci.* 27(1) : 1-8.
- Kitajima, M. and W. L. Butler. 1975. Quenching of chlorophyll fluorescence and primary photochemistry in chloroplasts by dibromothymoquinone. *Biochim. Biophys. Acta.* 376(1) : 105-115.
- Kim, Y. H., K. I. Choi, A. L. Khan, M. Waqas, and I. J. Lee. 2016. Exogenous application of abscisic acid regulates endogenous gibberellins homeostasis and enhances resistance of oriental melon (*Cucumis melo* var. L.) against low temperature. *Sci. Hort.* 207 : 41-47.
- Kim, Y. H., S. J. Hwang, M. Waqas, A. L. Khan, J. H. Lee, J. D. Lee, H. T. Nguyen, and I. J. Lee. 2015. Comparative analysis of endogenous hormones level in two soybean (*Glycine max* L.) lines differing in waterlogging tolerance. *Front Plant Sci.* 6 : 714
- Kim, Y. W. and J. H. Cho. 2005. Growth and yields of Korean soybean cultivars in drained-paddy field. *Korean J. Crop Sci.* 50(3) : 161-169.
- Kokubun, M. 2013. Genetic and cultural improvement of soybean for waterlogged conditions in Asia. *Field Crops Res.* 152 : 3-7.
- Koo, S. C., H. T. Kim, B. K. Kang, Y. H. Lee, K. W. Oh, H. Y. Kim, I. Y. Baek, H. T. Yun, and M. S. Choi. 2014. Screening of flooding tolerance in soybean germplasm collection. *Korean J. Breed. Sci.* 46 : 129-135.
- Lee, C. Y. and J. W. Cho. 2007. Comparisons in anatomical morphology between soybean cultivars of different flooding tolerance under early vegetative flooding conditions. *Korean J. Crop Sci.* 52(3) : 320-324.
- Lee, J. E., H. S. Kim, Y. U. Kwon, G. H. Jung, C. K. Lee, H. T. Yun, and C. K. Kim. 2010. Responses of photosynthetic characters to waterlogging in soybean [*Glycine max* (L.) Merrill]. *Korean J. Crop Sci.* 55 : 111-118.
- Lee, J. H., D. M. Kim, Y. P. Lim, and H. S. Pai. 2004. The shooty callus induced by suppression of tobacco CHRK1 receptor-like kinase is a phenocopy of the tobacco genetic tumor. *Plant Cell Rep.* 23(6) : 397-403.
- Lee, K. C., H. S. Noh, J. W. Kim, S. Y. Ahn, and S. S. Han. 2012. Changes of characteristics related to photosynthesis in *Symurus deltoides* under different shading treatments. *Korean J. Med. Crop Sci.* 20(5) : 320-330.
- Lee, S. G. and B. H. Kang. 2001. Effect of overhead flooding stress on photosynthesis and growth in rice. *Korean J. Crop Sci.* 46(3) : 209-214.
- Liu, Z., H. Yan, K. Wang, T. Kuang, J. Zhang, L. Gui, X. An, and W. Chang. 2004. Crystal structure of spinach major light-harvesting complex at 2.72 Å resolution. *Nature*, 428(6980) : 287-292.
- Ljung, K., R. P. Bhalerao, and G. Sandberg. 2001. Sites and homeostatic control of auxin biosynthesis in *Arabidopsis* during vegetative growth. *Plant J.* 28(4) : 465-474.
- Loreti, E., H. van Veen, and P. Perata. 2016. Plant responses to flooding stress. *Curr. Opin. Plant Biol.* 33 : 64-71.
- Maxwell, K. and G. N. Johnson. 2000. Chlorophyll fluorescence-a practical guide. *J. Exp. Bot.* 51(345) : 659-668.
- Muhammad, W., L. K. Abdul, S. M. Kang, Y. H. Kim, and I. J. Lee. 2014. Phytohormone-producing fungal endophytes and hardwood-derived biochar interact to ameliorate heavy metal stress in soybeans. *Biol. Fertil. Soils.* 50(7) : 1155-1167.
- Nacer, B. 2012. Soybean seed phenol, lignin, and isoflavones and sugars composition altered by foliar boron application in soybean under water stress. *J. Food Sci. Nutr.* 3(4) : 579-590.
- Nishimura, C., Y. Ohashi, S. Sato, T. Kato, S. Tabata, and C. Ueguchi. 2004. Histidine kinase homologs that act as cytokinin receptors possess overlapping functions in the regulation of shoot and root growth in *Arabidopsis*. *Plant Cell.* 16(6) : 1365-1377.

Park, H. J., W. Y. Han, K. W. Oh, S. O. Shin, B. W. Lee, J. M. Ko, I. Y. Baek, and H. W. Kang. 2016. Determination of Marginal Sowing Date for Soybean in Paddy Field Cultivation in the Southern Region of Korea. *Korean J. Crop Sci.* 61(2) : 104-112.

Sasidharan, R. and L. A. Voeselek. 2015. Ethylene-mediated acclimations to flooding stress. *Plant Physiol.* 169(1) : 3-12.

Sauter, M. 2013. Root responses to flooding. *Curr. Opin. Plant Biol.* 16(3) : 282-286.

Shannon, J. G., W. E. Stevens, W. J. Wiebold, R. L. McGraw, D. A. Slepser, and H. T. Nguyen. 2005. "Breeding soybeans for improved tolerance to flooding," in Proceedings of the 30th Soybean Research Conference, American Seed Trade

Association (Chicago, IL).

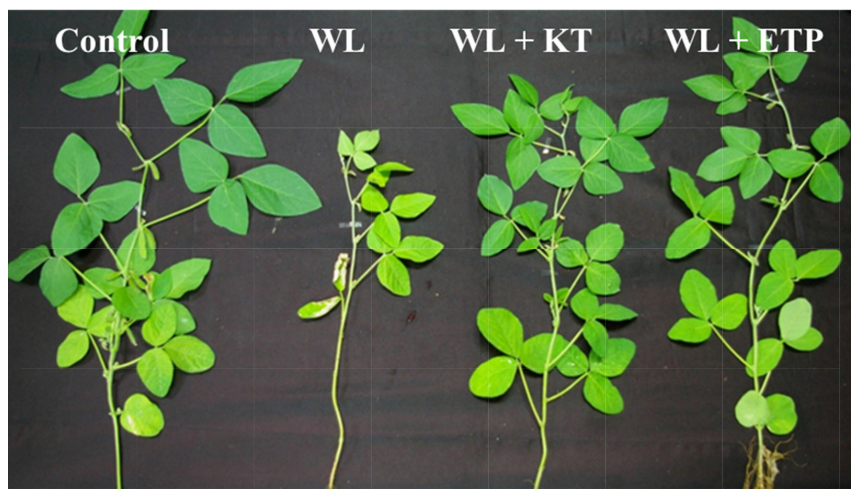
Sullivan, M., VanToai, T., Fausey, N., Beuerlein, J., R., Parkinson, and A. Soboyejo. 2001. Evaluating On-Farm Flooding Impacts on Soybean. *Crop Science.* 41(1) : 93-100.

Woo, B. J., M. K. Lee, and H. J. Kim. 2011. A Study on Establishing Rice Replacing Forage Crops Using-System. Korea Rural economic institute. Basic Research Report : 1-119.

Xu, K., X. Xu, T. Fukao, P. Canlas, R. Maghirang-Rodriguez, S. M. Heuer, A. Ismail, J. C. Bailey-Serres, P. Ronald, and J. D. Mackill. 2006. Sub1A is an ethylene-response-factor-like gene that confers submergence tolerance to rice. *Nature* 442 : 705-708.



Supplement Fig. 1. Adventitious root development of soybean plant under waterlogging conditions.



Supplement Fig. 2. Phenotypic changes after plant growth regulator application. Plant samples harvested 56 days after waterlogging treatment. WL: waterlogging only, KT: kinetin, ETP: ethephon.