



## 가지과 채소를 중심으로 본 작물의 도복저항성

이호아\* · 이주원\* · 이세형\* · 이우문\*\* · 정효봉\*\* · 유나리\*\* · 이해은\*\*  
· 문지혜\*\* · 여경환\*\*<sup>†</sup> · 장성희\*<sup>†</sup>

\*세계채소센터 한국사무소, \*\*국립원예특작과학원 채소과

## Lodging Resistance of Crops with a Focus on Solanaceous Vegetables: A Review

Hoah Lee\*, Joowon Lee\*, Se-Hyoung Lee\*, Woomoon Lee\*\*, Hyobong Jeong\*\*, Nari Yu\*\*,  
Hye-Eun Lee\*\*, Ji-Hye Moon\*\*, Kyung-Hwan Yeo\*\*<sup>†</sup>, and Seonghoe Jang\*<sup>†</sup>

\*World Vegetable Center Korea Office, Wanju-gun 55365, Korea

\*\*Vegetable Research Division, National Institute of Horticultural and Herbal Science, Rural Development Administration, Wanju-gun 55365, Korea

**ABSTRACT:** The term ‘lodging’ in agriculture is usually used when the crops fall from their upright position before harvesting. Various factors may be responsible, including inherent weaknesses in the stem, resulting from low lignin content or small root systems. Weather, such as strong winds or rains, will also likely increase lodging. Insect or disease damage can also weaken the plants, and cultural practices, such as fertilization, irrigation, and cultivation techniques, may increase the risk. Most of the research studies on lodging have been undertaken on cereal crops, but this is also an issue with many vegetable crops, and especially those that require mechanized harvesting. In this review, the issue of lodging in solanaceous vegetable crops is discussed, with an emphasis on the key risk factors and potential areas for future research that can identify damage mitigation strategies.

**Key words:** Horticultural crops, Lodging, Lodging resistance, Solanaceae, Vegetable

### 서 언

최근 기후변화에 따른 이상기상 현상들의 빈번한 발생으로, 원예작물에 다양한 피해가 증가하고 있다. 여러 피해들 중 도복(Lodging, 倒伏)은 작물의 생산량과 품질에 영향을 주는 주요한 요인이다. 도복의 가장 주된 원인은 비를 동반한 강한 바람으로, 노지 재배의 경우 농작물이 쓰러지고 열매 등이 떨어져 심각한 경제적 손실을 초래한다. 강한 비바람에 재배작물의

뿌리가 들려 생육이 지연되거나 잎과 줄기에 피해를 입었을 경우 병원균이 침입할 수 있어 효과적인 대응을 위한 적절한 조치가 필요하다.

전 세계 채소들 중, 2000년부터 2021년까지 가장 많이 생산되는 작물인 토마토의 생산량은 1억 8,900만 톤으로, 세계 채소 생산량의 16% 내외 수준을 꾸준히 유지하고 있다(Fig. 1). 토마토는 고추와 더불어 대표적인 가지과 채소작물로서 전 세계 생산량의 63.0%에 해당하는 생산이 아시아지역에서 이루어지고 있다(Fig. 2).

2022년 농림축산식품 주요 통계 자료에 따르면 고추의 국내 재배면적은 37,761헥타르(ha)이고 261,132톤(t)이 생산되었으며, 토마토의 국내 재배면적은 6,010헥타르이고 369,383톤이 생산되었다(MAFRA, 2022). 비바람의 직접적인 영향에 의한 도복 현상은 시설재배보다 노지재배에서 더 많이 나타난다. 특히 고추의 경우, 국내 노지재배의 총 면적은 27,132 헥타르이며

<sup>†</sup>Corresponding author

(Phone) +82-63-238-6663

(E-mail) khyeo@korea.kr

(Phone) +82-63-238-6677

(E-mail) seonghoe.jang@worldveg.org

<Received Oct. 11, 2023 / Revised Nov. 20, 2023 / Accepted Nov. 21, 2023>

© 본 학회지의 저작권은 한국국제농업개발학회에 있으며, 이의 무단전재나 복제를 금합니다.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

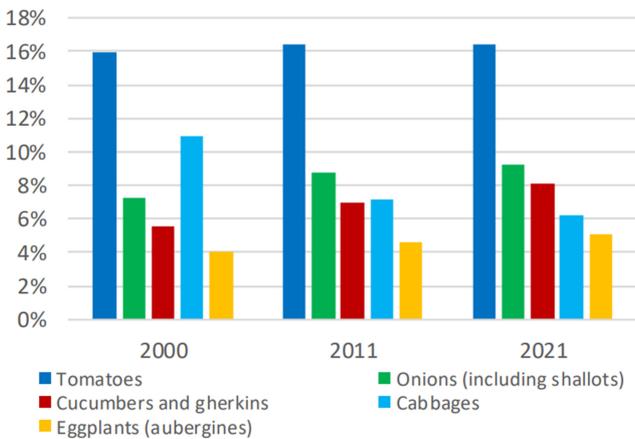
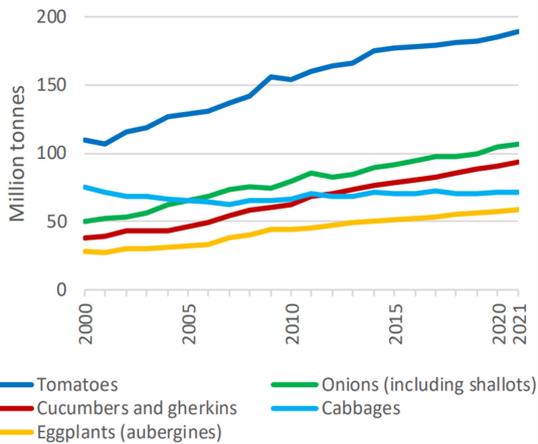


Fig. 1. World production of top vegetables, and shares of top vegetables in world production. Source: FAO (2000-2021).

(KOSIS, 2023), 5개년 평균 총 재배면적 대비 노지재배의 면적은 약 89.2%로 나타났다(KOSIS, 2020).

많은 가지과 작물들은 도복피해를 방지하기 위해 지주대를

세우고 유인줄을 설치하는 작업이 필수적이다. 일반적으로 우리나라는 작물의 수확 시기인 8, 9월에 비바람이 동반된 태풍의 영향으로 낙과, 도복 등 단시간에 큰 피해가 발생하는 특징이 있어, 사전에 지주를 더 꽂고 느슨한 유인줄을 팽팽하게 매어 태풍에 의한 도복을 최소화하는 것이 현실적인 대비책이다. 지주대 설치 및 유인줄 작업 뿐만 아니라 과실 수확에 많은 노동력을 필요로 하고 있으며, 심각한 농촌 인력난으로 인해 기계 수확이 대안으로 떠오르고 있다. 하지만 고추의 도복을 방지하기 위해 많은 시간과 노동력이 투입되어 설치된 지주대와 유인줄은, 기계를 이용한 열매 수확 작업에 큰 장애를 초래한다. 이러한 문제점으로 인해, 도복저항성이 증가된 고추 품종 개발이나 재배방법의 개선에 따른 도복저항성 향상에 대한 연구가 필요함에도 불구하고, 고추를 포함하는 가지과 채소작물의 도복 및 도복저항성에 대해서는 거의 알려져 있지 않은 것이 현실이다.

따라서 본 리뷰에서는 기존에 많이 연구되었던 화본과 작물 (Gramineous crop)의 연구자료를 바탕으로, 가지과 채소작물의 도복관련 연구 사례 및 연구 동향을 검토하고 보고된 연구결과에 있어서의 한계점과 향후 보완점에 대하여 기술하였다.

### 도복의 의미

도복은 농업용어에서 사전적 의미로 작물이 지표의 수직된 위치나 처음 위치에서 넘어지는 것과 같이 작물이 땅 표면 쪽으로 쓰러지는 것으로, 작물 지상부의 일부 혹은 전체가 수직 상태에서 벗어나는 현상이다. 이는 줄기의 구부러짐 또는 뿌리와 토양을 고정하는 부분의 부러짐으로 인해 발생하며(Wu and Ma, 2016), 일반적으로 밀, 벼와 같은 곡물에서는 알곡의 품질저하, 수량 감소 및 수확효율 저하와 관련된 상당한 손실을 일으킨다고 알려져 있다(Fischer and Stapper, 1987; Berry et al., 2003a). 작물의 도복은 일반적으로 외부 환경적 요인, 작물의 형태적 특성, 그리고 조직 및 세포의 화학적 성분 등

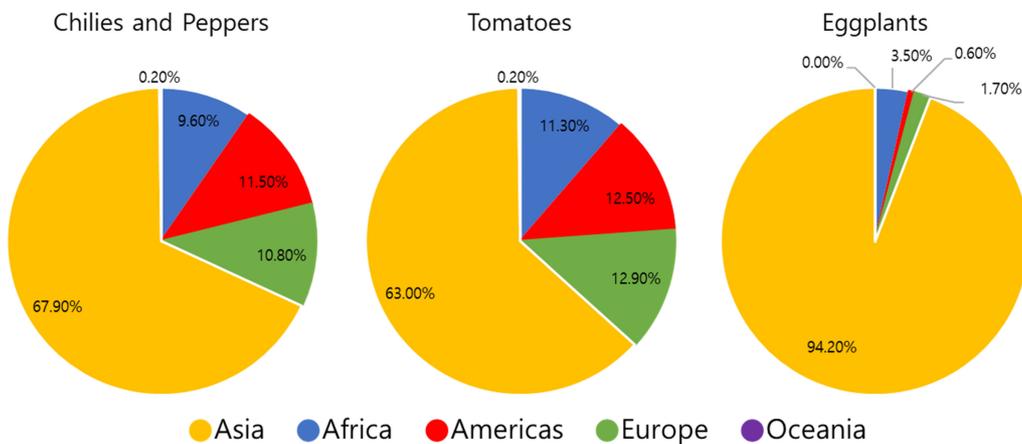


Fig. 2. Production share of representative solanaceous vegetable crops by the region. Source: FAOSTAT (2021).

다양한 요소들의 영향을 받는다. 먼저 외부 환경적 요인들은 바람, 우박, 지형, 토양입자 및 밀도를 포함하는 토성, 강우, 비료 관리, 병해충 그리고 재배방식 등이 있고(Crook and Ennos, 1993; Berry et al., 2003b; Wu et al., 2019; Jing et al., 2020; Wu et al., 2022), 작물의 형태적 특징인 초장, 줄기길이 및 지름, 절간의 길이와 지름 등은 도복의 정도와 밀접하게 관련되어 있다(Kong et al., 2013; Berry and Berry, 2015; Yadav et al., 2017). 세포생물학적 관점에서의 식물생장조절제(Plant growth regulation; PGRs)는 생체 내 물질 생합성과 이동 및 신진대사를 조절하여 내재하는 호르몬들의 작용과 유사한 효과를 내거나, 호르몬들과 상호작용하여 작물의 생장과 발육에 영향을 준다. 예컨대, 트리넥사팍에틸(Trinexapac-ethyl)은 초장 억제용으로 사용되는 생장조절제로 곡류나 잔디에 처리했을 때, 신장축진 호르몬인 지베렐린(Gibberellin)의 합성을 저해하여 절간신장을 억제하고 식물체의 키를 낮추며 줄기 두께 증가 등의 기대 효과를 통해 도복의 위험도를 낮출 수 있다(Park, 2006; Hong and Tae, 2009; Tae et al., 2010; González-Curbelo et al., 2012; MFDS, 2013; Jang et al., 2015). 미생물 유래의 천연물인 메발로시딘(Mevalocidin)은 고추와 토마토에서 적십과 분지를 위한 생장조절제로서 재배과정 중 결실과 생장장애를 초래하는 불필요한 가지의 발생을 낮추어 도복억제에 긍정적 효과를 나타낼 수 있다고 한다(Kim et al., 2020).

따라서 도복은 작물 생산량, 품질과 기계수확에 있어 작물의 수율을 제한하는 중요한 요인이며, 노동력과 생산비를 증가시키는 원인들 중 하나이다(Berry et al., 2004; Kamran et al., 2018; Berry, 2019; Li et al., 2022). 또한, 광합성과 광합성 산물의 분배를 저해하면서 열매 수량과 품질에 직접적인 영향을 주고, 수확 후 단계를 어렵게 만드는 간접적인 원인으로 제공된다(Wu et al., 2022).

### 도복 발생 원인

도복의 발생원인은 물리적 피해를 주는 기상현상에 의한 직접적인 원인과 재배관리 방법에 따라 발생하는 간접적인 원인으로 크게 나눌 수 있다(Jeong et al., 2006). 실제, 작물 상부에 가해지는 바람 등이 작물이 감당할 수 있는 힘을 초과하면서 도복이 발생하고, 가뭄과 고온같은 기후환경은 도복의 위험을 증가시킬 수 있고, 작물 수확량이 80% 이상 감소될 수 있다(Berry and Spink, 2006; Foulkes et al., 2011; Shah et al., 2019; Luo et al., 2022; Wu et al., 2022). 더불어, 강우로 인한 작물 지상부의 무게 증가 역시 도복의 위험성을 증가시킬 수 있는데, 노지재배에서 이러한 환경적 요인들은 인간이 통제하기 어렵다(Faris and De Pauw, 1980; Niu et al., 2012; Niu et al., 2016; Weng et al., 2017; Luo et al., 2019; Teng et al., 2021; Li et al., 2022; Luo et al., 2023).

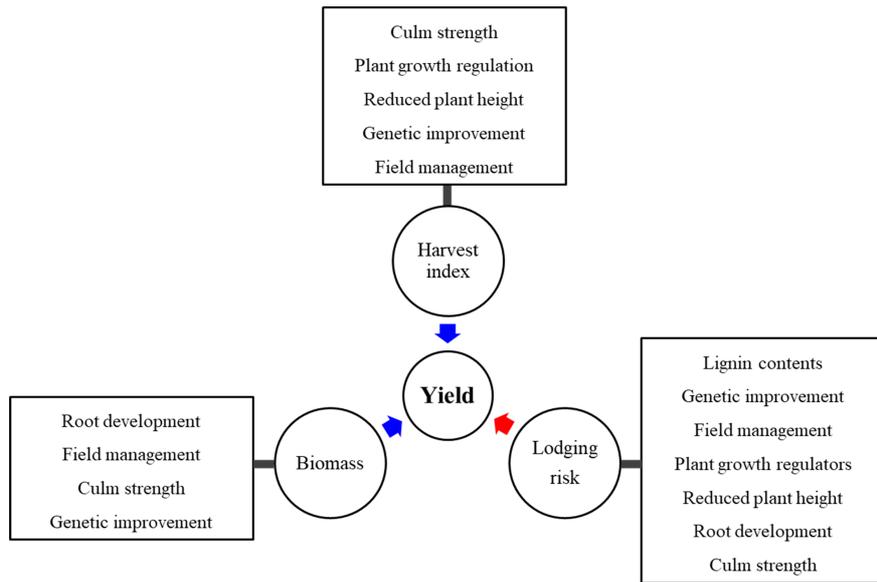
더불어, 비가 온 후 특히 침수와 같은 배수 불량 환경에 노

출되는 국내 고추 재배지의 경우, 침수로 인해 토양 구조가 변형되고 산소 부족으로 식물의 뿌리 호흡이 저하되어, 작물의 생육 감소와 그에 따른 수확량 감소가 야기된다(Kang et al., 2021). 한편, 높은 수확량을 위해 재식밀도를 높이는 재배 방법도 도복 발생의 원인이 될 수 있으며, 이는 심각한 생육 저하에 따른 작물의 수확량 감소로 이어지기에 적절한 재식밀도 환경에서의 재배가 중요하다(Cheng et al., 2020).

일반적으로 작물의 도복은 수직 상태에서 줄기가 꺾이거나 구부러지는 줄기도복과 지면과 닿는 뿌리와 줄기사이가 부러져 지상부의 물리적 손상없이 작물이 쓰러지는 뿌리도복으로 나눌 수 있으며(Pinthus, 1974; Liu et al., 2013; Chauhan et al., 2019; Wang et al., 2022), 대부분의 경우 줄기도복이 뿌리도복보다 작물 생산에 더 큰 영향을 준다고 알려져 있다(Pu et al., 2000; Berry et al., 2004; Li et al., 2022). 줄기의 도복저항성은 줄기의 형태적, 생리학적 특성과 밀접한 연관이 있으며, 작물의 중요한 농업적 형질이다(Li et al., 2022). 작물의 줄기는 작물의 지지 및 수분과 영양소의 수송 역할을 담당하는데(Du et al., 2016), 줄기 지름, 무게와 강도를 포함하는 줄기의 형태는 도복의 주요 외부적 원인이 된다(Kong et al., 2013; Wu et al., 2019). 가지과 작물인 파프리카와 토마토의 경우 영양기관(잎, 줄기, 뿌리), 과실의 수와 크기에 따라 동화산물의 분배량이 달라지며, 이는 작과부하 같은 줄기 혹은 지상부의 밀도 변화 등을 통해 식물의 생육에 영향을 미친다(Heuvelink, 1995; Heuvelink and Buiskool, 1995; Heuvelink, 1997; Lee and Cha, 2009). 고추의 경우 온도변화에 따라 줄기 지름이 변화되는데, 고온 하에서 초기에 급격한 성장하는 경우와 이와 달리 같은 조건에서도 저조한 생육상태가 나타날 수 있으며(Kang et al., 2010; Heo et al., 2013; Park et al., 2014; Song et al., 2015; Jang et al., 2018), 이러한 온도에 따른 줄기 생장은 수확량 뿐만 아니라 도복 저항성과도 관련이 있다(Liu et al., 2023).

뿌리 도복은 약한 근계, 뿌리의 손상, 토양상태가 좋지 않을 경우 줄기와 상관없이 넘어지는 것을 말한다(Lindsey et al., 2021). 토양 중심부에서 뿌리의 고정은 근계의 특징에 의해 결정되기에, 뿌리형태 및 발달은 뿌리 도복저항성과 밀접한 연관이 있다고 볼 수 있다(Ennos, 1991). 뿌리 도복의 예로 옥수수, 강판과 많은 비가 동반된 기상현상이 일어나면 뿌리의 일부가 흙에서 빠져나오는 경우가 발생한다. 뿌리 도복으로 인한 수확량의 감소는 부분적인 근활력 저하, 부족한 광합수와 관련이 있으며(Lindsey et al., 2021), 유채류 작물의 경우는 고온에 노출되었을 때 뿌리가 지상부를 고정할 수 있는 힘이 25%정도 감소하게 되어 뿌리 도복이 증가한다고 알려져 있다(Wu et al., 2022).

도복의 발생은 줄기의 단단함과 높은 리그닌(Lignin) 함량, 작물의 낮은 키, 왕성한 근계 발달 그리고 생장조절제의 처리에 따라 감소될 수 있으며, 유전적 품종개량과 재배 관리(과



**Fig. 3.** Relationships between different lodging related traits and their contribution to biomass production and yield. Blue arrows; positive contribution, red arrows; negative contribution (Niu et al., 2022).

종시기, 깊이, 재배밀도, 적절한 식물생장조절제 및 비료 사용)를 통해 도복 저항성을 높일 수 있다(Fig. 3).

**가지과 채소의 도복 및 도복저항성의 중요성**

채소 재배 시 도복저항성은 작물의 발육 및 성장과 밀접한 관련이 있으며, 최적의 재배조건에 의해 향상될 수 있다(Luo et al., 2023). 작물의 도복저항성은 내재적인 유전적 특성들 뿐만 아니라 재배환경과 재배법 등 외부 요인들에 의해서도 영향을 받는다(Kashiwagi and Ishimaru, 2004; Ookawa et al., 2014). 채소작물 재배 시 도복은 수확시기의 작업효율을 저하시키며(Seo et al., 2001), 도복이 발생한 작물은 광합성과 양분 이동이 저해되고, 이는 개화 및 착과 불량 등 생육 부진을 야기시켜 농산물의 수확량과 품질의 저하로 이어진다. 일반적으로 이러한 도복의 피해는 도복시기가 빠를수록, 도복의 각도가 클수록 두드러진다고 알려져 있다(RDA, 2020).

가지과 작물들의 도복피해를 방지하기 위해 대부분의 국내 농가에서는 많은 노동력을 필요로 하는 유인재배를 하고 있으나, 설치된 지주대와 유인줄은 기계 수확작업의 지장을 초래하는 요인이다. 게다가, 국내 농업 인구는 고령화와 함께 2022년에는 약 216만명으로, 전년대비 약 4만 9천여명으로 감소했다(KOSIS, 2022). 이러한 농업 인구 감소는 기계수확 등을 포함하는 농업기계화의 필요성을 증가시키며, 최근에는 관련연구도 활발히 진행되고 있다(Choi et al., 2010; Kim et al., 2019). 특히, 가지과 채소들 중에서 고추는 기계수확의 보급이 확대되고 있는 대표적 작물 중 하나이며, 토마토는 로봇을 연계하여 수확과 이송을 동시에 가능하게 하는 연구가 진행중이다(Fig. 4).

고추는 착과가 시작되면서 작물 크기와 과실 무게가 증가하



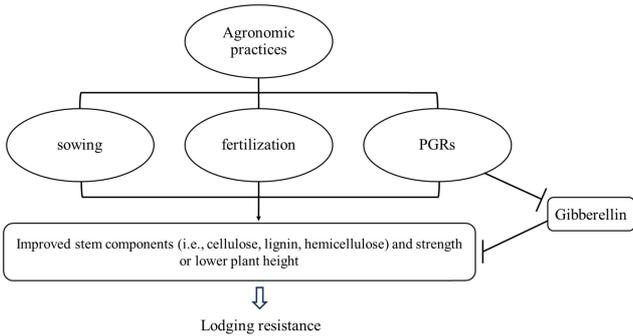
**Fig. 4.** Mechanical harvesting of peppers in the field (Chungcheongnam-do Agricultural Research & Extension, <https://cnnongup.chungnam.go.kr/>) and tomatoes in a greenhouse (Korea Institute of Machinery & Materials, <http://www.kimm.re.kr/>).

고, 측지에 의한 작물의 도복과 그에 따른 병해충 피해로 수확물의 생산량과 품질에 영향을 미칠 수 있다(Gou et al., 2011; Cui et al., 2014; Sun et al., 2019; Sun et al., 2022; Wei et al., 2023). 토마토의 경우, 기계로 수확할 때 과실의 경도, 뿌리의 활착 정도, 줄기의 부러짐과 휘어짐, 수확시기, 운반 및 저장성 등이 중요한 요인들로 작용한다(Trubilin et al., 2014; Ablikov et al., 2019). 또한, 토마토가 도복되어 과실이 지면에 닿아버린 경우 병에 감염될 확률이 높다는 사실도 보고되었다(Chaurasia et al., 2013).

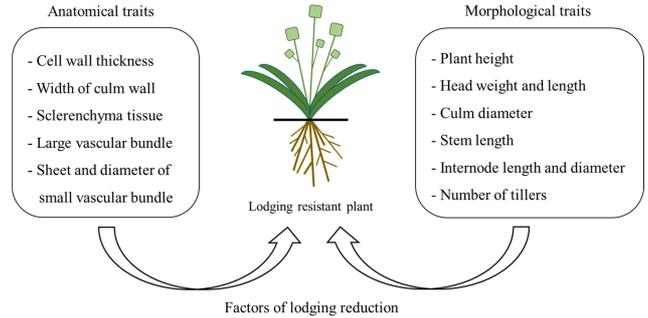
**도복과 도복저항성 연구**

**세포생물학적 연구**

도복저항성은 작물의 높이, 너비, 줄기지름과 같은 작물의



**Fig. 5.** Cultivation practices affect the stem components to resist lodging (Li et al., 2022).



**Fig. 6.** Major traits associated with the reduction of lodging in wheat and rice. Factors associated with lodging resistance are indicated by arrows (Shah et al., 2019).

형태학적 특징들과 작물의 조직 및 세포내 성분 등의 세포학적 요인에 의한 영향을 받는다(Brulé et al., 2016). 또한, 환경적 요인과 작물의 유전적 요인 모두에 의해 조절되는 것으로 알려져 있다(Niu et al., 2012; Niu et al., 2016; Weng et al., 2017; Li et al., 2022).

도복저항성은 작물 세포 내 리그닌, 셀룰로오스(Cellulose) 및 헤미셀룰로오스(Hemicellulose) 함량과 유의한 상관관계를 나타내는 것으로 알려져 있으며(Luo et al., 2023), 리그닌, 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스는 줄기를 강하고 단단하게 만들어 주는 역할을 한다(Li et al., 2022). 셀룰로오스는 수백에서 수천 개의 D-포도당 단위체들이 β-(1,4) 글리코사이드 결합으로 연결된 고분자 중합체이며, 셀룰로오스 표면에 특징적으로 결합하는 유연한 다당류인 헤미셀룰로오스, 그리고 셀룰로오스, 펙틴 성분 등으로 이루어진 세포벽 사이의 공간들을 채우고 있는 지용성 페놀 고분자인 리그닌 등이 줄기의 구조적 강도를 증가시켜 줄기 휘어짐, 부러짐 및 도복을 감소시키는 역할을 한다(Pauly et al., 2013; Li et al., 2022). 따라서 작물 내 리그닌, 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스 등의 함량이 감소되면 작물 줄기의 강도가 점차 약해지고 도복의 비율이 높아지게 되는데, 이러한 현상은 작물재배 시 과도한 질소 시비의 경우에도 나타나 도복의 위험을 증가시키는 것으로 알려져 있다(Li et al., 2022). 작물 생육에서 탄소와 질소 대사는 줄기 도복에 영향을 주는 중요한 생물학적 요소로(Wei et al., 2008; Ren et al., 2018; Li et al., 2022; Li et al., 2023), 높은 상대적 질소 함량은 도복에 대한 내성을 감소시킨다(Wei et al., 2010). 질소비료는 주로 줄기의 강도에 영향을 미치며, 줄기 리그닌화(Lignification) 정도, 유조직세포 면적, 줄기 직경 및 세포벽 두께를 감소시키는 방식으로 작물의 도복에 영향을 끼친다(Zhang et al., 2017; Li et al., 2022). 이러한 작물 생육단계에서 비료와 식물생장조절제의 적절한 사용은 리그닌, 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스의 수치를 높여 작물 도복저항성을 증가시킨다(Fig. 5).

다양한 연구에서 식물생장조절제 사용, 비료와 수분관리를

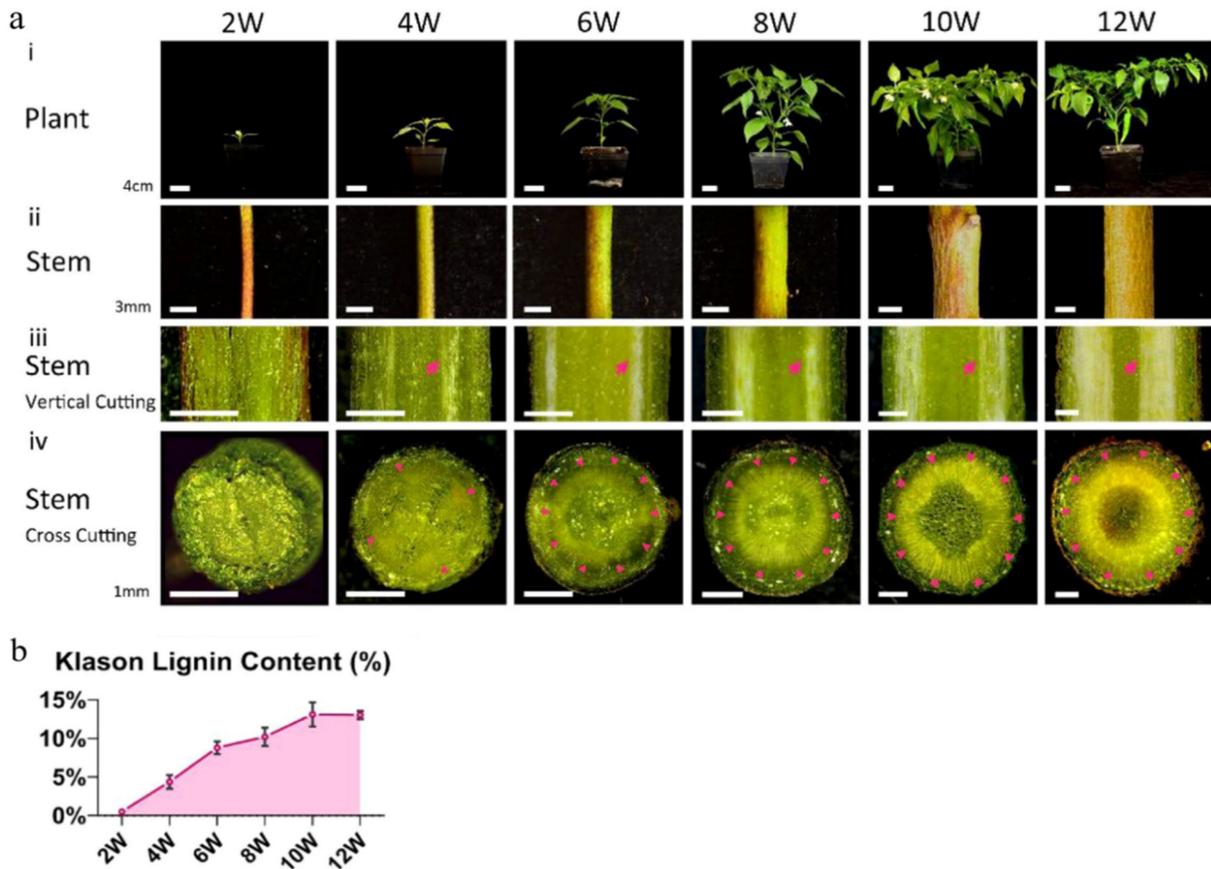
통해 작물의 형태학적 및 생리화학적 특성변화 유도를 기반으로 도복저항성을 향상시키는 결과가 보고되었다(Peng et al., 2014; Chen et al., 2018, Kamran et al., 2018; Wu et al., 2019).

또한, 보리, 밀, 벼 같은 주요 식량작물들의 경우, 도복을 줄이기 위한 다양한 육종 프로그램들이 지금까지 활발히 운영되고 있다. 곡물의 반왜성 형질(Semi-dwarf trait) 도입은 녹색 혁명을 이끌어 냈으며, 이는 도복저항성을 증가시켜 수량 안정성을 크게 향상시킨 좋은 사례이다. 밀의 도복 저항성을 나타내는 양적형질유전자좌(Quantitative trait locus, QTL)들 중에서 작물의 반왜성 돌연변이 유전자인 *Rht-B1b(Rht 1)*와 *Rht-D1b(Rht2)*는 지베렐린 호르몬의 신호전달을 지속적으로 저해하여 작물의 반왜성을 유도하는데, 밀 육종 프로그램에서 널리 활용되고 있다. 작물의 육종 프로그램 연구가 지속되면서 상대적으로 높은 신장을 가지면서 줄기의 강도증가와 재배조건에 맞게 특화된 작물 지상부 구조를 가지는 품종개발이 도복 저항성 향상을 위한 효과적인 연구방향이라는 의견이 있다(Niu et al., 2022). 일반적으로 도복 저항성과 관련된 작물의 특성은 신장, 줄기의 직경 및 두께, 상하부 절단 강도, 줄기 세포벽 두께, 줄기 세포벽의 리그닌 및 셀룰로오스의 축적 등이 있다(Fig. 6).

보리, 밀, 벼와 같은 곡물의 생산성과 생체량 증가를 위한 육종 프로그램을 통해 도복저항성을 가지는 품종이 높은 수확량을 나타냈으며, 이를 근거로 강하고 단단한 줄기를 지닌 계통들이 높은 생산성을 가지는 것으로 선발되기도 했다(Ennos, 1991; Crook and Ennos, 1993; Berry et al., 2003a).

가지과 작물에서는 고추의 XYLP1(Xylogen-like arabinogalactan protein1)과 XYLP2 단백질이 줄기 발달에서 리그닌 합성을 촉진한다고 알려져 있으며, 이 단백질을 만드는 유전자는 다양한 가지과 작물들에 잘 보존되어 있다(Zhang et al., 2022; Fig. 7).

또한, 왜성 유전자(Dwarf gene)를 가지는 왜성 토마토는 도복현상이 감소하여 과실과 토양의 접촉이 줄어들어 성숙하는 동안



**Fig. 7.** The contents of lignin increase during pepper stem development. (a) Pepper plant and stem from 2 weeks after germination 2W to 12W: (i) The whole plant morphology of pepper. Bar = 4 cm. (ii) Magnified images of pepper stems. Bar = 3 mm. (iii) Vertical cutting of pepper stems under a stereomicroscope. Red arrows indicate the position of the xylem. Bar = 1 mm. (iv) Cross cutting of pepper stems under a stereomicroscope. Red arrowheads indicate the position of the xylem. Bar = 1 mm. (b) Klason lignin contents in pepper stems from 2W to 12W (Zhang et al., 2022).

더 나은 품질의 과실을 유지할 수 있으며, 특히 가공용 토마토의 기계수확 효율을 높인다는 결과가 보고되었다(Cavasin et al., 2021). 다른 예로, 대두에서는 MicroRNA인 *GmmiR156* 과다발현을 통해 더 굵고 튼튼한 줄기 성장을 유도함으로써 도복에 대한 저항성이 나타났고 이는 생산량 증가로 이어졌다(Sun et al., 2019).

**재배학적 연구**

작물의 재배 및 관리방법도 도복저항성에 영향을 끼친다. 도복은 품종, 시비량, 시비시기, 수분 및 병해충 관리 등과 같은 재배방법에 따라 발생하기도 한다(Lim et al., 1992; Jeong et al., 2006). 재배 밀도를 높이거나 질소비료를 과잉 투입하게 되면 줄기 길이의 급격한 증가로 인해 작물이 웃자라며 도복 위험이 증가된다고 알려져 있다(Pinthus, 1974; Kashiwagi and Ishimaru, 2004; Quang Duy et al., 2004; Sposaro et al., 2008; Zhang et al., 2016).

고추 재배에 있어, 지지대가 없고 질소질 비료의 과다시비

가 이루어진 고추 밭에서 줄기도복이 많이 관찰되었으며, 부족한 일조량에 기인한 고추의 영양불균형 또한 도복 피해를 야기시킨다고 알려져 있다(Poudyal et al., 2023). 파프리카의 경우, 본엽, 자엽, 근계부를 기준으로 더 깊게 정식할수록 개화가 빨라지고 도복현상이 줄어든다. 정식 깊이가 깊어질수록 뿌리 주변은 급속한 변화없이 적당히 낮은 온도로 유지되어 뿌리 생육에 긍정적인 영향을 미친다(White, 1937; Vavrina et al., 1994). 또한, 가지과 작물은 대목을 사용하는 방법이 일반화되면서 뿌리썩음병, 뿌리혹선충 등 뿌리에 피해를 줄 수 있는 각종 토양전염성 질병을 예방할 수 있게 해준다(Chung et al., 1997, Barrett et al., 2012, Lee and Kim, 2017).

벼의 경우, 도복 정도에 따라 쌀의 도정특성, 외관품질 및 식미에도 영향을 주었으며 도복정도가 심할수록 수확량도 낮아졌다(Jeong et al., 2006). 논에서 벼를 재배했을 경우, 이앙 재배가 산파재배보다 높은 도복저항성을 나타내며(Lee and De Datta, 1989), 성장조절제를 적기에 적용하여 도복 방지의 효과를 보기도 한다(Lee and De Datta, 1990). 더불어, 지역

및 계절 적응성의 범위를 넓히고 수확량 확보를 위한 다양한 식량 및 사료작물들의 도복저항성 품종 개발이 이루어지고 있다(Son et al., 2018, Han et al., 2021).

재배기술이 발전하면서 수확량이 증가하고 있지만, 국내에서는 심각해지는 농촌 인력난으로 인해 수확 시 기계 이용이 점진적으로 증가하고 있으며 수확을 위한 기계화율이 2000년 도부터 5년마다 10%씩 증가하는 추세이다. 특히, 고추는 다른 작물에 비해 노동 투입시간이 많아 기계사용의 효과가 크게 높아질 전망이다(KREI, 2021). 단고추 품종은 보통 손으로 수확하지만 고추의 생산을 늘리기 위해서는 기계 수확이 필수적이며, 기계 수확을 용이하게 하기 위한 품종개발 혹은 재배법에 대한 연구가 필수적이다(Somos, 1984). 최근, 고추 작물체의 초장과 첫 분지의 위치가 높을수록 기계 수확이 용이하리라는 보고는, 기계 수확에 적합한 고추 품종 개발을 위한 육종목표를 제시하고 있다(Joukhadar et al., 2018). 다양한 가지과 채소 작물이 기계 수확에 용이하면서 도복 피해를 최소화할 수 있는 방안제시를 위한 다각도의 연구가 필요한 때이다.

## 적 요

원예작물의 재배에서 도복저항성은 식량안보와 지속가능한 농업의 보장을 위한 중요한 농업적 형질이다. 작물의 도복저항성을 갖는 품종 개발에 대한 필요성이 높아지고 있지만 국내에서는 벼를 제외하면 도복저항성 연구를 찾아보기 힘들다. 이 리뷰논문은 가지과 채소작물의 도복위험을 최소화하여 기계 수확 과정에서 노동력을 절감할 수 있는 방안과 도복저항성을 지닌 품종 육성의 연구 개발에 참고 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

1. 세계적인 기후변화에 따른 기상재해로 인해 원예작물의 피해가 증가하면서 주원인으로 도복이 대두되고 있다. 국내에서 원예작물의 대부분을 차지하는 가지과 채소작물은 생산량이 매우 높지만 도복으로 인한 기계수확의 어려움과 관련 연구가 많이 부족한 현실이다.

2. 원예작물에서 도복의 원인으로 환경적 요인(바람, 우박, 강우, 지형, 토성 등)과 재배적 요인(작물품종, 밀도, 토양입자, 병해충 등)이 있으며, 심각한 도복피해는 수확량 손실과 품질 저하, 기계 수확에 있어 결정적인 제한요소가 될 수 있다.

3. 국내에서 대부분의 가지과 원예작물(고추, 토마토, 가지, 파프리카 등)은 도복피해를 방지하기 위해 농가에서 많은 노동력을 요구하는 유인재배를 하고 있으며, 설치된 지주대와 유인줄은 수확기에 기계 수확작업의 지장을 초래하는 주요요인이 되기에, 도복저항성은 매우 중요한 작물의 형질이다.

4. 도복을 예방하거나 도복 피해의 최소화를 위해 세포생물학적 특성을 바탕으로 다양한 연구가 진행되고 있다. 특히, 작물의 줄기에서 리그닌, 셀룰로오스 및 헤미셀룰로오스 성분들은 세포 및 조직의 구조적 강도를 향상시켜 작물의 도복저항

성을 증가시키는 역할을 한다. 그러므로 도복저항성에 대한 세포생물학적 조절 메커니즘의 이해를 위한 추가적인 연구가 필요하다.

5. 본 논문에서 살펴본 연구사례들을 중심으로, 가지과 작물의 도복저항성 품종생산을 위한 육종연구와 재배법 개발이 활발히 이루어져 심각한 농촌 인력난과 같은 농업 현장의 여러 난제들의 해결에 기여할 수 있길 기대한다.

## ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported in part by a grant from the World Vegetable Center Korea Office (WKO #10000379) and the long-term strategic donors to the World Vegetable Center: Taiwan, United Kingdom aid from the United Kingdom government, United States Agency for International Development (USAID), Australian Centre for International Agricultural Research (ACIAR), Germany, Thailand, Philippines, South Korea, and Japan.

## REFERENCES

- Ablikov, V.A., Moiseev, V.V., Pomelyiko, S.A. 2019. Promising technology for reusable harvesting tomatoes. *In E3S Web of Conferences*. 126:57.
- Barrett, C.E., Zhao, X., McSorley, R. 2012. Grafting for root-knot nematode control and yield improvement in organic heirloom tomato production. *HortScience*. 47:614-620.
- Berry, P.M. 2019. Lodging resistance in cereals. *Crop Science*. pp. 209-227.
- Berry, P.M., Berry, S.T. 2015. Understanding the genetic control of lodging-associated plant characters in winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *Euphytica*. 205:671-689.
- Berry, P.M., Spink, J.H. 2006. A physiological analysis of oilseed rape yields: past and future. *The Journal of agricultural science*. 144:381-392.
- Berry, P.M., Spink, J., Sterling, M., Pickett, A.A. 2003a. Methods for rapidly measuring the lodging resistance of wheat cultivars. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 189:390-401.
- Berry, P.M., Sterling, M., Baker, C.J., Spink, J., Sparkes, D.L. 2003b. A calibrated model of wheat lodging compared with field measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*. 119:167-180.
- Berry, P.M., Sterling, M., Spink, J.H., Baker, C.J., Sylvester-Bradley, R., Mooney, S.J., Tams, A.R., Ennos, A.R. 2004. Understanding and reducing lodging in cereals. *Advances in agronomy*. 84:215-269.
- Brulé, V., Rafsanjani, A., Pasini, D., Western, T.L. 2016. Hierarchies of plant stiffness. *Plant Science*. 250:79-96.
- Cavasin, P.Y., Fumes, L.A.A., Fonseca, A.R., Silva, D.J.H.D. 2021. Evaluation of families derived from backcrosses of processed tomato with dwarfism gene. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*. 21:e362221113.
- Chaurasia, A.K., Chaurasia, S., Chaurasia, S., Chaurasia, S. 2013.

- Studies on the development of fruit rot of tomato caused by *Alternaria solani* (Ellis & Mart.) Jones & Grout. *International Journal of Pharmacy & Life Sciences*. 4:6.
- Chauhan, S., Darvishzadeh, R., Boschetti, M., Pepe, M., Nelson, A.** 2019. Remote sensing-based crop lodging assessment: Current status and perspectives. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*. 151:124-140.
- Chen, X., Wang, J., Wang, Z., Li, W., Wang, C., Yan, S., Li, H., Zhang, A., Tang, Z., et al.** 2018. Optimized nitrogen fertilizer application mode increased culms lignin accumulation and lodging resistance in culms of winter wheat. *Field Crops Research*. 228:31-38.
- Cheng, B., Raza, A., Wang, L., Xu, M., Lu, J., Gao, Y., Qin, S., Zhang, Y., Ahmad, I., et al.** 2020. Effects of multiple planting densities on lignin metabolism and lodging resistance of the strip intercropped soybean stem. *Agronomy*. 10:1177.
- Choi, Y., Jun, H.J., Lee, C.K., Lee, C.S., Yoo, S.N., Suh, S.R., Choi, Y.S.** 2010. Development of a mechanical harvesting system for red pepper (L)-surveys on conventional pepper cultivation and mechanization of pepper harvesting. *Journal of biosystems engineering*. 35:367-372.
- Chung, H.D., Youn, S.J., Choi, Y.J.** 1997. Effects of rootstocks on yield, quality and components of tomato fruits. *Journal of the Korean Society for Horticultural Science (Korea Republic)*. 38:603-607.
- Chungcheong Nam Do Agricultural Research & Extension.** 2018. [Online]. <https://cnnongup.chungnam.go.kr/home/board/B0005.cs?act=read&articleId=222984>
- Crook, M.J., Ennos, A.R.** 1993. The mechanics of root lodging in winter wheat, *Triticum aestivum* L. *Journal of Experimental Botany*. 44:1219-1224.
- Cui, L.G., Shan, J.X., Shi, M., Gao, J.P., Lin, H.X.** 2014. The miR156/SPL 9?DFR pathway coordinates the relationship between development and abiotic stress tolerance in plants. *The Plant Journal*. 80:1108-1117.
- Du, J., Zhang, Y., Guo, X., Ma, L., Shao, M., Pan, X., Zhao, C.** 2016. Micron-scale phenotyping quantification and three-dimensional microstructure reconstruction of vascular bundles within maize stalks based on micro-CT scanning. *Functional Plant Biology*. 44:10-22.
- Ennos, A.R.** 1991. The mechanics of anchorage in wheat *Triticum aestivum* L.: II. Anchorage of mature wheat against lodging. *Journal of Experimental Botany*. 42:1607-1613.
- Faris, D.G., De Pauw, R.M.** 1980. Effect of seeding rate on growth and yield of three spring wheat cultivars. *Field Crops Research*. 3:289-301.
- Fischer, R.A., Stapper, M.** 1987. Lodging effects on high-yielding crops of irrigated semidwarf wheat. *Field Crops Research*. 17:245-258.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).** Crops and livestock products. <https://www.fao.org/faostat>.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).** Agricultural production statistics 2000–2021. <https://www.fao.org>.
- Foulkes, M.J., Slafer, G.A., Davies, W.J., Berry, P.M., Sylvester-Bradley, R., Martre, P., Calderini, D.F., Griffiths, S., Reynolds, M.P.** 2011. Raising yield potential of wheat. III. Optimizing partitioning to grain while maintaining lodging resistance. *Journal of experimental botany*. 62:469-486.
- González-Curbelo, M.Á., Herrera-Herrera, A.V., Ravelo-Pérez, L.M., Hernández-Borges, J.** 2012. Sample-preparation methods for pesticide-residue analysis in cereals and derivatives. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 38:32-51.
- Gou, J.Y., Felippes, F.F., Liu, C.J., Weigel, D., Wang, J.W.** 2011. Negative regulation of anthocyanin biosynthesis in Arabidopsis by a miR156-targeted SPL transcription factor. *The Plant Cell*. 23:1512-1522.
- Han, O.K., Ku, J.H., Park, J.H., Kim, J.J., Woo, J.H.** 2021. 'Gwangyoung', Forage triticale cultivar of winter hardiness, Resistance to lodging and high-yielding. *Journal of The Korean Society of Grassland and Forage Science*. 41:10-15.
- Heo, Y., Park, E.G., Son, B.G., Choi, Y.W., Lee, Y.J., Park, Y.H., Kang, J.S.** 2013. The Influence of abnormally high temperature on growth and yield of hot pepper (*Capsicum annum* L.). *Journal of Agriculture & Life Science*. 47:9-15.
- Heuvelink, E.** 1995. Dry matter partitioning in a tomato plant: one common assimilate pool?. *Journal of Experimental Botany*. 46:1025-1033.
- Heuvelink, E.** 1997. Effect of fruit load on dry matter partitioning in tomato. *Scientia Horticulturae*. 69:51-59.
- Heuvelink, E., Buiskool, R.P.M.** 1995. Influence of sink-source interaction on dry matter production in tomato. *Annals of Botany*. 75:381-389.
- Hong, B.S., Tae, H.S.** 2009. Heavy rough management of golf course by using of trinexapacethyl. *Korean Journal of Golf Studies*. 3:99-103.
- Jang, D.C., Choi, K.Y., Lee, S.M., Heo, J.Y., Kim, I.S.** 2018. The effect of transplant age on growth and fruit yield in winter-planted paprika cultivation. *Horticultural Science and Technology*. 36:470-477.
- Jang, J., Kim, H., Ko, A.Y., Lee, E.H., Ju, Y., Chang, M.I., Lee, G.S., Suh, S.** 2015. Development of a Simultaneous Analytical Method for Determination of Trinexapac-ethyl and Trinexapac in Agricultural Products Using LC-MS/MS. *Korean Journal of Environmental Agriculture*. 34:318-327.
- Jeong, E., Kim, K., Cheon, A., Lee, C., Kim, S., Brar, D.S., Son, J.** 2006. Characterization of grain quality under lodging time and grade at ripening. *Korean Journal of Crop Science*. 51:440-444.
- Jing, B., Shah, F., Xiao, E., Coulter, J.A., Wu, W.** 2020. Sprinkler irrigation increases grain yield of sunflower without enhancing the risk of root lodging in a dry semi-humid region. *Agricultural Water Management*. 239:106270.
- Joukhadar, I.S., Walker, S.J., Funk, P.A.** 2018. Comparative mechanical harvest efficiency of six New Mexico pod-type green chile pepper cultivars. *HortTechnology*. 28:310-318.
- Kamran, M., Cui, W., Ahmad, I., Meng, X., Zhang, X., Su, W., Chen, W., Ahmad, S., Fahad, S., et al.** 2018. Effect of paclobutrazol, a potential growth regulator on stalk mechanical strength, lignin accumulation and its relation with lodging resistance of maize. *Plant growth regulation*. 84:317-332.
- Kang, S.B., Yang, E.Y., Cho, M.C., Takeshi, T., Tsung, H.L., Lin, S.W., Wang, Y.W., Cynthia, K.M.Y., Derek, B., et al.** 2021. The Evaluation of Growth Characteristics in Chili Pepper (*Capsicum* spp.) Germplasm for Selection of Waterlogging Tolerant Lines. *J. Korean Soc. Int. Agric.* 33:180-188.
- Kang, Y.I., Kwon, J.K., Park, K.S., Yu, I.H., Lee, S.Y., Cho, M.W., Kang, N.J.** 2010. Changes in growths of tomato and grafted

- watermelon seedlings and allometric relationship among growth parameters as affected by shading during summer. *Journal of Bio-Environment Control*. 19:275-283.
- Kashiwagi, T., Ishimaru, K.** 2004. Identification and functional analysis of a locus for improvement of lodging resistance in rice. *Plant physiology*. 134:676-683.
- Kim, E.S., Ju, J.I., Lee, J.W., Nam, Y.G., Han, K.S.** 2019. Proper Planting Dates for Mechanical Harvest of Red Pepper in Central Region. *Horticulture Abstracts*. 37:95-95.
- Kim, J.S., Yon, G.H., Kim, B.G., Choi, J.S., Kim, E.A., Ko, Y.K., Lee, I.Y.** 2020. Application of mevalocidin as a new plant growth regulator for thinning and lateral shoot induction. *Weed Turf Sci*. 9:29-42.
- Kong, E., Liu, D., Guo, X., Yang, W., Sun, J., Li, X., Zhan, K., Cui, D., Lin, J., et al.** 2013. Anatomical and chemical characteristics associated with lodging resistance in wheat. *The Crop Journal*. 1:43-49.
- Korea Institute of Machinery & Materials (KIMM).** 2023. [Online]. [https://www.kimm.re.kr/search/index/integrated\\_keyword/eNortjI0sIJ6M2\\_i6zV73nTMeDtzqpI1XDBk0gpf/page/1](https://www.kimm.re.kr/search/index/integrated_keyword/eNortjI0sIJ6M2_i6zV73nTMeDtzqpI1XDBk0gpf/page/1)
- Korea Rural Economic Institute (KREI).** 2021. Measures to improve the operation of agricultural machinery leasing business to improve the mechanization rate of field agriculture. pp. 11-21.
- Korean Statistical Information Service(KOSIS).** 2020. Census of agriculture, forestry and fisheries.
- Korean Statistical Information Service(KOSIS).** 2022. Census of agriculture, forestry and fisheries.
- Korean Statistical Information Service(KOSIS).** 2023. Census of agriculture, forestry and fisheries.
- Lee, J., Cha, J.** 2009. Effects of removed flowers on dry mass production and photosynthetic efficiency of sweet pepper cultivars 'Derby' and 'Cupra'. *Korean Journal of Horticultural Science & Technology*. 27:584-590.
- Lee, S.C., De Datta, S.K.** 1989. Effect of planting methods on lodging reaction in lowland rice. *Current Research on Agriculture and Life Science*. 7:11-21.
- Lee, S.C., De Datta, S.K.** 1990. Effect of plant growth regulator 'Hoe 78784' on lodging in rice. *Korean Journal of Crop Science*. 35:184-194.
- Lee, Y.J., Kim, B.S.** 2017. Resistance to bacterial wilt of rootstock varieties of tomato and graft compatibility. *Research in Plant Disease*. 23:228-233.
- Li, C., Chang, Y., Luo, Y., Li, W., Jin, M., Wang, Y., Cui, H., Sun, S., Li, Y., et al.** 2023. Nitrogen regulates stem lodging resistance by breaking the balance of photosynthetic carbon allocation in wheat. *Field Crops Research*. 296:108908.
- Li, Q., Fu, C., Liang, C., Ni, X., Zhao, X., Chen, M., Ou, L.** 2022. Crop lodging and the roles of lignin, cellulose, and hemicellulose in lodging resistance. *Agronomy*. 12:1795.
- Lim, J.T., Lee, H.J., Cho, K.S., Song, D.S.** 1992. Analysis of lodging related characteristics in rice plants. *Korean Journal of Crop Science*. 37:78-85.
- Lindsey, A.J., Carter, P.R., Thomison, P.R.** 2021. Impact of imposed root lodging on corn growth and yield. *Agronomy Journal*. 113:5054-5062.
- Liu, F., Zhou, F., Wang, X., Zhan, X., Guo, Z., Liu, Q., Wei, G., Lan, T., Feng, D., et al.** 2023. Optimizing nitrogen management enhances stalk lodging resistance and grain yield in dense planting maize by improving canopy light distribution. *European Journal of Agronomy*. 148:126871.
- Liu, M., Qi, H., Zhang, W., Zhang, Z., Li, X., Song, Z., Yu, J., Wu, Y.** 2013. Effects of deep loosening and nitrogen application on anatomical structures of stalk and lodging in maize. *Journal of Maize Sciences*. 21:57-63.
- Luo, J., Huang, S., Wang, M., Zhang, R., Zhao, D., Yang, Y., Wang, F., Wang, Z., Tang, R., et al.** 2022. Characterization of the transcriptome and proteome of Brassica napus reveals the close relation between dw871 dwarfing phenotype and stalk tissue. *Plants*. 11:413.
- Luo, J., Li, Y., Gao, Y., Hai, J., Xi, L., Liu, Y.** 2023. Is bunch planting suitable for wheat? An evaluation based on yield and lodging resistance. *Field Crops Research*. 297:108934.
- Luo, Y., Ni, J., Pang, D., Jin, M., Chen, J., Kong, X., Li, W., Chang, Y., Li, Y., et al.** 2019. Regulation of lignin composition by nitrogen rate and density and its relationship with stem mechanical strength of wheat. *Field Crops Research*. 241:107572.
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA).** 2022. Statistical yearbook of agriculture, food and rural affairs. <https://www.data.go.kr/data/15030202/fileData.do>.
- Ministry of Food and Drug Safety (MFDS).** 2013. Analytical methods of pesticide residues in food (fourth edition). MFDS. Seoul, Korea. pp. 104-105, 689-692.
- Niu, L., Feng, S., Ru, Z., Li, G., Zhang, Z., Wang, Z.** 2012. Rapid determination of single-stalk and population lodging resistance strengths and an assessment of the stem lodging wind speeds for winter wheat. *Field Crops Research*. 139:1-8.
- Niu, L., Feng, S., Ding, W., Li, G.** 2016. Influence of speed and rainfall on large-scale wheat lodging from 2007 to 2014 in China. *PLoS One*. 11:e0157677.
- Niu, Y., Chen, T., Zhao, C., Zhou, M.** 2022. Lodging prevention in cereals: Morphological, biochemical, anatomical traits and their molecular mechanisms, management and breeding strategies. *Field Crops Research*. 289:108733.
- Ookawa, T., Inoue, K., Matsuoka, M., Ebitani, T., Takarada, T., Yamamoto, T., Ueda, T., Yokoyama, T., Sugiyama, C., et al.** 2014. Increased lodging resistance in long-culm, low-lignin gh2 rice for improved feed and bioenergy production. *Scientific Reports*. 4:6567.
- Park, E.J., Heo, Y., Son, B.G., Choi, Y.W., Lee, Y.J., Park, Y.H., Suh, J.M., Cho, J.H., Hong, C.O., et al.** 2014. The influence of abnormally low temperatures on growth and yield of hot pepper (*Capsicum annum* L.). *Journal of Environmental Science International*. 23:781-786.
- Park, J.Y.** 2006. Effect of trinexapac-ethyl treatment on growth and quality turfgrass species. *Dankook University Master's thesis*. pp. 1-3.
- Pauly, M., Gille, S., Liu, L., Mansoori, N., de Souza, A., Schultink, A., Xiong, G.** 2013. Hemicellulose biosynthesis. *Planta*. 238:627-642.
- Peng, D., Chen, X., Yin, Y., Lu, K., Yang, W., Tang, Y., Wang, Z.** 2014. Lodging resistance of winter wheat (*Triticum aestivum* L.): Lignin accumulation and its related enzymes activities due to the application of paclobutrazol or gibberellin acid. *Field Crops Research*. 157:1-7.
- Pinthus, M.J.** 1974. Lodging in wheat, barley and oats : The phenomenon, its causes and preventive measures. *Advances in agronomy*.

- 25:209-263.
- Poudyal, D., Poudyal, P., Joshi, B.K., Shakya, S.M., Singh, K.P., Dahal, K.C.** 2023. Genetic diversity, production, and trade of chili with special reference to Nepal. *SABRAO J. Breed. Genet.* 55:1-14.
- Pu, D.F., Zhou, J.R., Li, B.F., Li, Q., Zhou, Q.** 2000. Evaluation method of root lodging resistance in wheat. *Acta Agric Boreali-Occidentalis Sin.* 9:58-61.
- Quang Duy, P., Hirano, M., Sagawa, S., Kuroda, E.** 2004. Analysis of the dry matter production process related to yield and yield components of rice plants grown under the practice of nitrogen-free basal dressing accompanied with sparse planting density. *Plant Production Science.* 7:155-164.
- Ren, S., Deng, Y., Wen, F., Liu, M., Yuan, X., Hussain, S., Pu, Q., Liu, W., Yang, W.** 2018. Effects of intercropping on the metabolism of carbon and nitrogen of soybean at the seedling stage and its relationship with lodging. *Acta Prataculturae Sinica.* 27:85-94.
- Rural Development Administration(RDA).** 2020. Rice Quality enhancement technology. pp. 339-340.
- Seo, Y.J., Huh, M.S., Kim, C.B., Lee, D.H., Choi, J., Kim, C.Y.** 2001. Characterization of rice lodging by factor analysis. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer.* 34:173-177.
- Shah, L., Yahya, M., Shah, S.M.A., Nadeem, M., Ali, A., Ali, A., Wang, J., Riaz, M.W., Rehman, S., et al.** 2019. Improving lodging resistance: using wheat and rice as classical examples. *International journal of molecular sciences.* 20:4211.
- Somos, A.** 1984. *The paprika.* Akadémiai Kiadó. pp. 302.
- Son, B.Y., Baek, S.B., Kim, J.T., Lee, J.S., Bae, H.H.** 2018. Single cross maize hybrid for silage with lodging tolerance and high yield, 'Dacheongok'. *Korean Society of Breeding Science.* 50:145-149.
- Song, E.Y., Moon, K.H., Son, I.C., Wi, S.H., Kim, C.H., Lim, C.K., Oh, S.** 2015. Impact of elevating temperature based on climate change scenarios on growth and fruit quality of red pepper (*Capsicum annuum* L.). *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology.* 17:248-253.
- Sposaro, M.M., Chimenti, C.A., Hall, A.J.** 2008. Root lodging in sunflower. Variations in anchorage strength across genotypes, soil types, crop population densities and crop developmental stages. *Field Crops Research.* 106:179-186.
- Sun, T., Zhou, Q., Zhou, Z., Song, Y., Li, Y., Wang, H.B., Liu, B.** 2022. SQUINT Positively Regulates Resistance to the Pathogen *Botrytis cinerea* via miR156-SPL9 Module in *Arabidopsis*. *Plant and Cell Physiology.* 63:1414-1432.
- Sun, Z., Su, C., Yun, J., Jiang, Q., Wang, L., Wang, Y., Cao, D., Zhao, F., Zhao, Q., et al.** 2019. Genetic improvement of the shoot architecture and yield in soya bean plants via the manipulation of GmmiR156b. *Plant biotechnology journal.* 17:50-62.
- Tae, H.S., Hong, B.S., Cho, Y.S., Oh, S.H.** 2010. Trinexapac-ethyl treatment for kentucky bluegrass of golf course during summer. *Asian Journal of Turfgrass Science.* 24:156-160.
- Teng, R.M., Wang, Y.X., Li, H., Lin, S.J., Liu, H., Zhuang, J.** 2021. Effects of shading on lignin biosynthesis in the leaf of tea plant (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze). *Molecular Genetics and Genomics.* 296:165-177.
- Trubilin, E.I., Belousov, S.V., Lepshina, A.I.** 2014. The main soil cultivation with the formation turnover in modern working conditions and devices for its implementation. *The political network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University.* 104:1902-1922.
- Vavrina, C.S., Shuler, K.D., Gilreath, P.R.** 1994. Evaluating the impact of transplanting depth on bell pepper growth and yield. *HortScience.* 29:1133-1135.
- Wang, Y., Jin, M., Luo, Y., Chang, Y., Zhu, J., Li, Y., Wang, Z.** 2022. Effects of irrigation on stem lignin and breaking strength of winter wheat with different planting densities. *Field Crops Research.* 282:108518.
- Wei, F., Li, J., Qu, H., Shen, X.** 2010. Effects of nitrogenous fertilizer application pattern on freeze injury and culm lodging resistance of winter wheat. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences.* 26:696-699.
- Wei, F.Z., Li, J.C., Wang, C.Y., Qu, H.J., Shen, X.S.** 2008. Effects of nitrogenous fertilizer application model on culm lodging resistance in winter wheat. *Acta agron. Sin.* 34:1080-1085.
- Wei, L., Liu, J., Huang, J., Wang, C., Zhang, L., Feng, S.** 2023. Genome-Wide Identification of miR156 and SPL family genes and phenotypic analysis of vegetative phase change in Pepper (*Capsicum annuum* L.). *Gene.* doi:10.1016/j.gene.2023.147542.
- Weng, F., Zhang, W., Wu, X., Xu, X., Ding, Y., Li, G., Liu, Z., Wang, S.** 2017. Impact of low-temperature, overcast and rainy weather during the reproductive growth stage on lodging resistance of rice. *Scientific Reports.* 7:46596.
- White, P.R.** 1937. Survival of isolated tomato roots at suboptimal and supraoptimal temperatures. *Plant Physiol.* 12:771.
- Wu, W., Ma, B.L.** 2016. A new method for assessing plant lodging and the impact of management options on lodging in canola crop production. *Scientific reports.* 6:31890.
- Wu, W., Ma, B.L., Fan, J.J., Sun, M., Yi, Y., Guo, W.S., Yi, Y., Guo, W.S., Voldeng, H.D.** 2019. Management of nitrogen fertilization to balance reducing lodging risk and increasing yield and protein content in spring wheat. *Field Crops Research.* 241:107584.
- Wu, W., Shah, F., Ma, B.L.** 2022. Understanding of crop lodging and agronomic strategies to improve the resilience of rapeseed production to climate change. *Crop and Environment.* 1:133-144.
- Yadav, S., Singh, U.M., Naik, S.M., Venkateshwarlu, C., Ramayya, P.J., Raman, K.A., Sandhu, N., Kumar, A.** 2017. Molecular mapping of QTLs associated with lodging resistance in dry direct-seeded rice (*Oryza sativa* L.). *Frontiers in plant science.* 8:1431.
- Zhang, M., Zhang, Q., Cheng, L., Li, Q., He, X., Wang, K., Liu, J., Li, F., Deng, Y.** 2022. Pepper (*Capsicum annuum*) xylogen-like arabinogalactan protein (XYLP) 1 and XYLP2 promote synthesis of lignin during stem development to cope with stresses. *Vegetable Research.* 2:1-10.
- Zhang, W., Wu, L., Ding, Y., Yao, X., Wu, X., Weng, F., Li, G., Liu, Z., Tang, S., et al.** 2017. Nitrogen fertilizer application affects lodging resistance by altering secondary cell wall synthesis in japonica rice (*Oryza sativa*). *Journal of Plant Research.* 130:859-871.
- Zhang, W.J., Wu, L.M., Ding, Y.F., Weng, F., Wu, X.R., Li, G.H., Liu, Z.H., Tang, S., Ding, C.Q., et al.** 2016. Top-dressing nitrogen fertilizer rate contributes to decrease culm physical strength by reducing structural carbohydrate content in japonica rice. *Journal of Integrative Agriculture.* 15:992-1004.