



기계 수확에 적합한 고추의 형태학적 특성 및 재배

이세형*,‡ · 이혜영**,‡ · 유나리** · 이건희* · 이주원* · 여경환**,† · 장성희*,†

*세계채소센터 한국사무소

**농촌진흥청 국립원예특작과학원 채소기초기반과

Horticultural Characteristics and Cultivation Practices of Peppers Suitable for Mechanical Harvesting: A Review

Se-Hyoung Lee*,‡, Hea-Young Lee**,‡, Nari Yu**, Gunhee Lee*,
Joonwon Lee*, Kyung-Hwan Yeo**,†, and Seonghoe Jang*,†

*World Vegetable Center Korea Office, Wanju-gun, Jeollabuk-do 55365, Korea

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

ABSTRACT: Peppers belong to the *Solanaceae* family and are highly valued worldwide for their flavor, nutritional content, and economic benefits. They contain various antioxidant compounds and vitamins associated with numerous health advantages, such as boosting metabolism and reducing inflammation. In addition, peppers are an important agricultural crop, contributing significantly to income along their value chain and serving as an indispensable ingredient in many dishes. However, domestic pepper production has steadily declined, mainly due to increased production costs. Peppers require a significant amount of labor during the harvest season, leading to high labor expenses. As a result, mechanized harvesting is emerging as a potential solution to address this issue. Research on mechanical harvesting of peppers has focused on developing harvesting machines, breeding suitable varieties, and exploring innovative cultivation methods appropriate for mechanization. Although similar research has been conducted in Korea, significant results have yet to be achieved. This review summarizes cases of mechanical pepper harvesting and outlines the traits and cultivation methods required for its effective implementation. For successful mechanical harvesting, the ideal cultivar should be suitable for once-over harvesting, with characteristics such as simultaneous and uniform ripening, low plant height, narrow branching angles, resistance to lodging, and ease of pedicel detachment from the stem. Moreover, fundamental research is essential for developing cultivation methods that do not rely on staking and for determining optimal planting distances.

Key words: *Capsicum annuum* L., Pepper, Mechanical harvesting, Non-staking cultivation, Once-over harvesting type

*These authors have contributed equally to this work.

†Corresponding author

Seonghoe Jang (Phone) +82-63-238-6677
(E-mail) seonghoe.jang@worldveg.org
Kyung-Hwan Yeo (phone) +82-63-238-6663
(E-mail) khyeo@korea.kr

<Received May. 14, 2025 / Revised Jun. 12, 2025 / Accepted Jun. 13, 2025>

서 언

고추(*Capsicum annuum* L.)는 한국의 대표적인 가지과 채소로서, 김치문화인 우리나라에서는 필수적인 양념 재료이다. 고추는 채소, 향신료 및 약용 등의 용도로 재배되며 캡사이신(Capsaicin), 베타카로틴(β -Carotene), 플라보노이드(Flavonoid)

© 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

등의 각종 항산화 물질 및 비타민 A, B, C 등의 공급원으로 영양학적 가치가 높아(Gang et al., 2008; Walia et al., 2015; de Aguiar et al., 2019; Tobolka et al., 2021) 전 세계적으로 소비되고 있는 작물이다(Howard et al., 2000; Bosland et al., 2012; Ganguly et al., 2017; Saleh et al., 2018). 또한 전세계적으로 고추 소비량은 매년 증가하고 있으며, 다양한 국가의 요리에 사용될 뿐만 아니라, 소비자들의 유기농 및 천연 성분의 선호도 및 매운 음식의 관심도가 점차 높아지는 트렌드에 의해 경제적으로도 가치가 매우 높은 작물이라고 할 수 있다. 그러나 국내 시장의 경우, 고추 농가의 생산비 증가로 인해 지속적으로 재배 면적이 감소되고 있는 추세이며, 특히 농업 종사자들의 고령화에 따른 노동력 부족, 인건비의 증가, 국내 고추 가격 하락 및 중국산 고추 수입의 증가 등을 주요 원인으로 들 수 있다. 국내 고추 수확은 3-4회 실시하고 있으며, 수확시기에 과도한 노동력 투입과 높은 인건비가 맞물려 생산비 증가로 이어지는 문제가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방안으로 기계화 도입이 대두되고 있으나, 국내 고추의 기계화율은 밭작물 중 가장 낮은 수준이며, 특히 가장 큰 노동력이 요구되는 수확 작업의 기계화율은 여전히 0%에 머무르고 있다(RDA, 2023). 미국이나 중국의 경우 우리나라에 비해 국토 면적이 매우 넓어 고추 재배에 적합한 기후조건을 가진 지역에 집중하여 고추를 재배하고 있으며, 넓은 면적에 대규모로 재배하고 있어 기계 수확에 적합하다고 볼 수 있다. 이에 따라 기계 수확과 관련된 연구들이 선행되어 왔으며(Wall et al., 2003; Gentry et al., 1978; Lenker and Nascimento, 1982; Marshall, 1986; Wolf and Alper, 1984), 기계 수확의 효율성을 높이기 위해 낮은 수고, 단일 줄기 등 기계 수확에 적합한 형질을 가진 고추 품종 개발(Walker et al., 2021) 및 재배 방법(Wall et al., 2003; Cavero et al., 2001; Lenker and Nascimento, 1982; Esch and Marshall, 1987, Marshall, 1997) 등의 연구가 보고된 바 있다. 우리나라 또한 고추 수확기 개발 및 기계 수확을 위한 품종 개발 연구를 진행해 왔지만 현재까지 큰 성과는 없는 실정이다(KREI, 2016; Huh, 2019). 갈수록 높아지는 생산비 문제를 해결하고 안정적인 고추 수급을 위해서는 수확 시기에 기계 수확을 통한 노동력 절감이 필수적이지만, 국내 고추의 기계 수확 연구 및 적용 사례는 극히 드문 상황이다. 이와 더불어 지속적이고 안정적인 고추 재배 및 수급을 위해 기계 수확에 적합한 품종 개발 및 재배 기술 연구 등 여러 방면에서의 연구개발이 필요하다. 본 논문은 고추 수확기 노동력 절감을 위한 국내외 고추의 기계 수확 현황과 연구 사례, 기계 수확을 위한 생육 특성과 재배 양식에 대한 정보를 제공하고 국내 기계 수확에 적합한 고추 품종 개발을 위한 주요 형질, 유전자 등에 대해 정리, 기술하였다.

국내 고추 재배 현황

고추는 2024년 기준 국내 재배면적 26,436 ha, 생산량 68,074 ton으로 김치, 고추장 등의 주원료로 사용되는 한국의 대표적인 가지과 채소이다(KOSIS, 2024a). 하지만 고추 농가의 생산비 증가로 인한 경영 어려움 등의 영향으로 국내 고추 재배 면적은 2004년 61,894 ha, 2010년 44,585 ha, 2016년 32,181 ha, 2022년 29,770 ha, 그리고 2024년 26,436 ha에 이르기까지 지속적으로 감소하는 추세를 보이고 있다(KOSIS, 2024b). 국내 고추 재배 현장은 소규모 단위로 재배되고, 재배에 불리한 기후, 과도한 노동력이 요구되는 재배 양식 등으로 인한 높은 생산비 등의 여러 난제가 존재한다(Choi et al., 2010). 고추는 수확 시 대규모 노동력이 필요한 작물이지만, 국내의 농업 종사자들은 고령화로 인해 매년 꾸준히 감소하고 있고, 인건비는 증가하고 있어 고추의 생산비 절감 및 농가의 노동력 절감이 시급하다. 국내 고추 재배는 파종, 육묘, 정식, 방제, 수확 등의 작업과정을 거치며 많은 노동력이 요구되는 작물로(Heu et al., 2001; Hwang, 2002), 그중 수확작업에서 가장 높은 경영비가 소요되며(Ha et al., 2019), 이러한 해결책으로 기계화를 통한 고추의 기계 수확의 필요성이 대두되고 있는 상황이다(Kim et al., 2002). 2023년 기준 농촌진흥청이 발표한 자료에 따르면 고추는 주요 밭작물 중 가장 낮은 기계화율을 기록하였으며, 평균 기계화율은 48.9%에 불과하고, 그중 파종, 정식은 0.3%, 수확은 0%로 보고되었다(RDA, 2023) (Fig. 1, Table 1). 또한, 고추는 일시 수확이 아닌 여러 번 수확작업을 하는 작물로 10a 당 노동 투입 시간이 142 시간으로 마늘 115 시간과 양파 94 시간 등 다른 양념 채소류에 비해 더 많은 시간을 요구한다. 시설고추 또한 수확작업의 노동 시간이 2020년 기준 188.1 시간이 소요되며, 이는 전체 고추 재배 노동시간 중 47.3%를 차지한다(GBA, 2024). 이와 같은 문제를 개선하기 위해 고추 재배의 수확작업을 생력화하기 위한 기계 수확은 고추 산업의 핵심 목표이다(Funk and Walker, 2010).

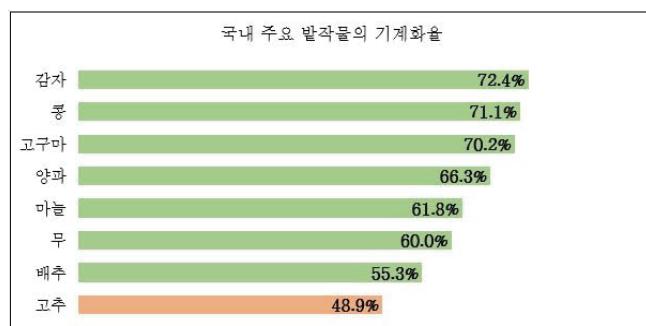


Fig. 1. Mechanization rates for field crop types in Korea for 2023(Source: RDA 2023).

Table 1. Mechanization rate for field crops by task type in Korea for 2023 (Source: RDA 2023).

작목	경운, 정지 (%)	파종, 정식 (%)	비닐 피복 (%)	방제 (%)	수확 (%)
감자	99.9	6.8	91.4	98.2	84.7
콩	99.9	42.3	76.4	96.3	62.6
고구마	100	2.6	89.2	98.0	79.6
양파	100	22.7	91.2	99.1	31.4
마늘	99.9	17.6	57.0	96.2	59.7
무	100	8.3	93.1	99.0	5.7
배추	100	0.0	84.4	96.5	0.0
고추	99.9	0.3	55.2	89.1	0.0

국내외 고추 기계 수확 사례

미국의 경우 고추는 뉴 멕시코 남부, 텍사스 서부, 애리조나 남동부를 포함한 미국 남서부 지역의 주요 작물로 신선고추 및 통조림에 사용되는 긴 녹색 고추와 분말, 파프리카, 말린 붉은 고추 등 다양한 품종이 재배되고 있다. 고추 수확 시 인건비가 매우 높기 때문에 고추 생산이 지속적으로 이루어 지려면 기계 수확이 필요하며(Wall et al., 2003), 수작업 수확 시 인건비는 전체 고추 생산 비용의 약 50%를 차지하지만, 기계 수확 시 인건비는 10% 미만으로 감소된다고 보고되었다(Eastman et al., 1997).

미국은 고추 기계 수확 연구의 주도적 역할을 하고 있으며, 여러 기업들(Boes Harvester Company, Crown Agricultural Systems, Massey Spice Harvester Limited Joint Stock Company, McClendon Pepper Company, Limited, Pik Rite Company, Ten Square Company, Oxbo Company)이 글로벌 시장에서 고추 수확기를 생산하고 있다(Zhang and Cai, 2022) (Fig. 2).

Table 2. Comparative summary of mechanical pepper harvesting technologies developed since the late 1970s.

수확 기술 유형	주요 구조/작동 방식	참고 문헌
Spring tines	스프링 강선을 이용, 진동을 통한 수확 방법	Gentry et al., 1978
Rubber finger rakes	고무 갈퀴 형태로 열매를 끌어내는 수확 방법	Lenker & Nascimento, 1982
Open double-helices	나선형 구조로 열매를 끌어들이는 수확 방법	Marshall, 1986
Cutting heads	칼날을 통한 줄기 및 과실 절단을 통한 수확방법	Wolf & Alper, 1984

고추 수확기 개발은 1970년대에 수확용 헤드와 수확, 세척 및 운반 부품이 포함된 연구용 고추 수확기로부터 시작되어 다양한 메커니즘이 연구되었으나 실용화되지 못하고 1990년대 후반에 처음 실용화되었다(Wall et al., 2003). 첫 개발 이후 기계 수확 기술은 spring tines(Gentry et al., 1978), rubber finger rakes(Lenker and Nascimento, 1982), open double-helices, cutting heads(Marshall, 1986; Wolf and Alper, 1984) 등의 다양한 형태로 발전하였다(Table 2).

수많은 연구에 따르면 펼쳐진 이중 나선 수확 형태(unfolded double spiral wire type)가 가장 안정적이고 선호되는 수확 메커니즘으로 파악된다(Zhang and Cai, 2022). 전 세계적으로 약 230 대의 수확 기계가 제작되었으며(Marshall and Boese, 1998), 30여 가지의 다양한 고추 기계 수확 메커니즘으로 최소 20가지 이상 품종의 고추를 작물의 상태 및 기계 조정을 통해 수확할 수 있다(Wall et al., 2003).

하지만 기계 수확에 있어서 상품성 있는 열매의 수확량, 기계 수확 중 낙과 및 손상되는 열매 등 여전히 해결해야 할

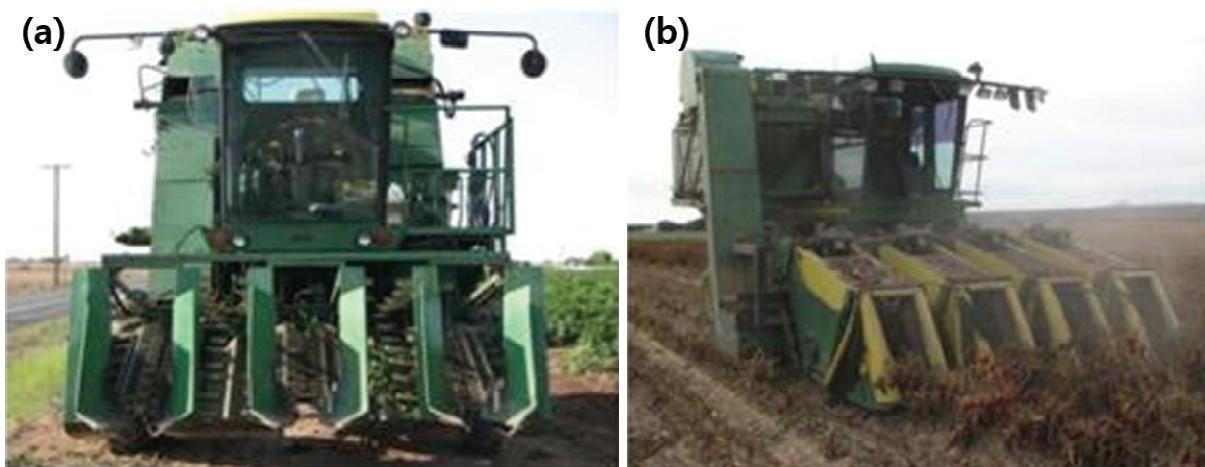


Fig. 2. (a) Massey's three-row self-propelled pepper harvester, and (b) McClendon four-row self-extracting dry red pepper harvester (Source: Zhang and Cai, 2022).

Table 3. Summary of auxiliary equipment for sorting pepper fruits after mechanical harvesting.

분류 장비 유형	주요 구조/작동 방식	기능 및 목적	참고 문헌
Air grading	공기 흐름을 통한 가벼운 이물질 분리	잎 및 가벼운 불량 과실 제거	Marshall et al., 1990
Counter-rotating rollers	반대방향으로 회전하는 롤러 사이를 통과시켜 분리	일정 크기 및 형태의 이물질 제거	Wolf & Alper, 1984
Star wheels	별 모양 회전체를 이용, 일정 크기 이상 물체 선별	과실 선별 및 이물질 분리	Wolf & Alper, 1984
Reflexed rubber-finger shaker	구부러진 고무 갈퀴와 진동을 통한 이물질 제거	과실 및 잔가지 분리	Lenker & Nascimento, 1982
Combing belts	빗살 모양 벨트를 활용, 불필요한 잎 및 가지 제거	잎과 줄기 제거	Esch & Marshall, 1987
Conveyor belt (hand sorting)	벨트 위 수확물의 수작업 선별	불량 과실 및 이물질 최종 분리	Gentry et al., 1978

과제가 존재한다. 상품성 있는 고추 열매의 회수율은 전체 수확 가능한 열매 잡재량의 70%에서 90% 수준에 불과하며, 기계 수확 도중 발생되는 낙과 및 손상되는 열매로 인한 손실이 주요 문제로 남아 있다(Lenker and Nascimento, 1982; Marshall, 1986; Wolf and Alper, 1984). 기계 수확한 열매에서 잎, 줄기 및 상품성 없는 열매를 걸러내야 하는 작업 또한 걸림돌로 작용하는 상황이다. 이를 해결하기 위해 air grading (Marshall et al., 1990), counter-rotating rollers, star wheels (Wolf and Alper, 1984), reflexed rubber-finger shakers (Lenker and Nascimento, 1982), combing belts (Esch and Marshall, 1987) 및 conveyor belts for hand sorting (Gentry et al., 1978) 등의 다양한 장비들이 개발된 바 있으며(Table 3), 기계 수확 도중 땅에 떨어지는 열매의 수를 줄이기 위한 장비를 개선하고 있는 추세이다(Wall et al., 2003). 이처럼 기계 수확 도중 발생하는 열매 손실을 줄이기 위한 연구 개발이 지속적으로 이루어지고 있고, 많은 종류의 고추 품종은 수확작업 중 수작업으로 선별하기 때문에 이러한 장비들의 개발 및 개선은 고추 기계 수확작업을 더욱 발전시킬 것이다(Marshall and Boese, 1998).

고추 수확 로봇에 대한 연구 또한 진행중인데, 기계 수확 기의 경우 수확 과정에서 식물을 파괴하기 때문에 일시 수확 체계의 넓은 밭에서만 활용할 수 있지만 고추의 온실 및 소규모 농장 재배가 점차 늘어나고 있고 이러한 환경에서는 기계 수확의 활용이 어렵기 때문에 로봇 수확 연구의 필요성이 증대되고 있다. Masood and Haghshenas-Jaryani(2021)는 고추 수확의 로봇화 가능성에 대한 연구를 통해 고추 수확 로봇의 주요한 과제는 수확 시 로봇 팔이 가지와 잎에서 분리되어 식물과 수확한 열매에 영향을 주지 않는 것, 열매를 식물에서 분리하는 것, 열매를 분리한 후 운반하는 것, 밭에서 후처리 현장까지 운송하는 것이 가장 주요한 과제라고 보고하였다. 같은 가지과 작물인 토마토, 파프리카 등의 경우 온실 재배 여건 상 수확 로봇에 대해 집중적으로 연구가 진행

되고 있으며, 이에 따라 작물의 형질 개선보다는 로봇의 자율 주행, 열매 위치 감지, 모션 제어 등의 수확 알고리즘 개선과 같은 연구 개발이 주로 이루어지는 상황으로(Arad et al., 2020), 이러한 연구들이 추후 고추 수확 로봇 연구에 긍정적인 영향을 미칠 것이라 생각된다(Fig. 3).

중국의 경우 최대 고추 생산국이자 소비국, 수출국이며 전 세계 고추 재배 면적의 약 40%를 차지하고 있지만(Anjin et al., 2021), 지속적인 재배 면적의 증가에 따른 노동력 부족으로 생산비 중 수확 비용이 차지하는 비중이 높아지는 추세이다. 따라서 중국은 고추 산업의 발전을 위해 고추 주산지에서 대부분 일시 수확 체계에 의해 재배가 이루어지고 있으며, 이에 따라 수확 작업에 투입되는 노동비 절감을 이루고 있어, 우리나라에 비해 전체 경영비가 낮게 투입되고 있다(Ha et al., 2019). 이와 더불어 개혁 개방 이후 농업의 기계화 수준이 크게 향상되어, 노동력 절감을 위한 수확 중심의 기계화 연구가 진행, 실용화되고 있다(Zhang and Cai, 2022) (Fig. 4). Jung et al.(2003)은 일시 수확체계를 도입한다면 고추 재배에 투입되는 전체 노동력의 48%가 절감된다고 보고한 바 있다. 국내 고추는 6-7회 정도의 수확 작업을 거치며 이러한 수확에 요구되는 노동력을 절감한다면 농가의 생산비 및 경영비를 대폭 절감할 수 있다(Ha et al., 2019).

미국과 중국의 경우 대부분 일시 수확형 품종을 통한 기계 수확을 활용하지만, 여러 번 수확이 가능한 다중 수확형 기계 개발도 시도한 바 있다(Shaw, 1975; Gentry et al., 1978). 하지만 이러한 다중 수확형 기계의 경우 식물체에 대한 손상을 입히며 이후 수확량이 감소됨에 따라, 한번에 수확이 끝나는 일시 수확형 기계 개발이 진행되었다(Lee et al., 1993). 국내의 경우 재배되고 있는 고추는 여러 번 수확할 수 있는 품종이 대부분이며, 또한 미국 등 외국의 고추 재배 방식과 기후, 품종 및 토양 등이 국내와 달라 외국의 고추 수확 기계의 국내 도입은 어려울 것으로 생각된다. 국내 고추 재배 시 여름철 수확기의 장마 및 고온 다습한 기후가 고추 포장의

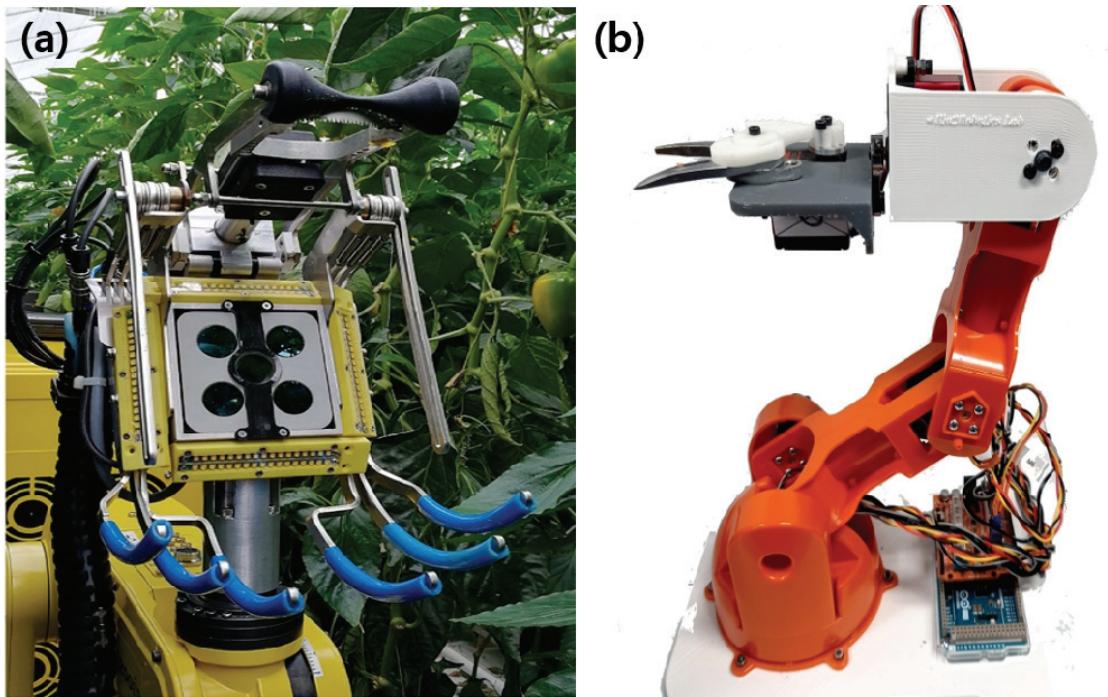


Fig. 3. (a) Sweet pepper harvesting robot, featuring an end effector with a cutting device, a Fotonics F80 camera, LED illumination, and a fruit-catching device; and (b) Pepper harvesting robot equipped with a Braccio robot arm (Source: Arad et al., 2020, Masood and Haghshenas-Jaryani, 2021).

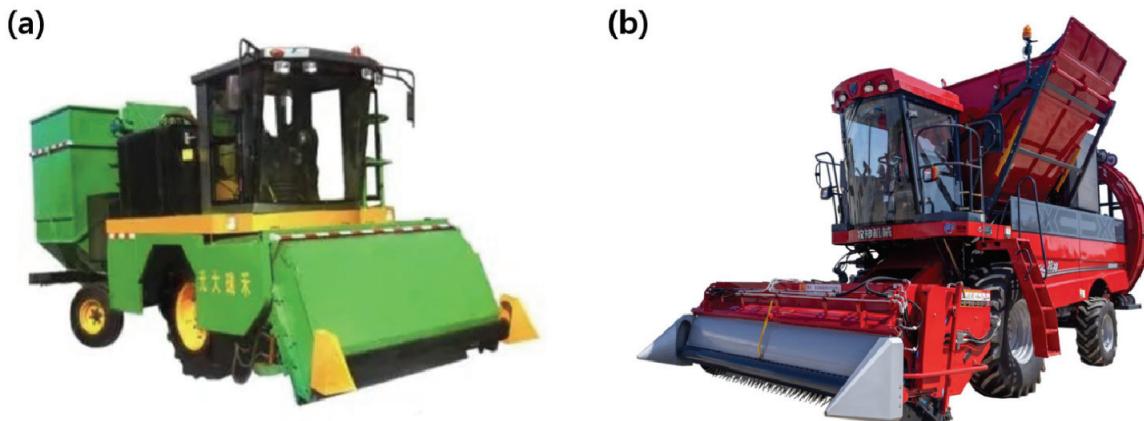


Fig. 4. (a) 4JZ-3.6 Self-propelled pepper harvester, and (b) 4JZ-3600B Self-propelled pepper harvester (Source: Zhang and Cai, 2022, Wuhan Anon Tech Trade Co., Ltd, 2025).

토양 상태를 불안정하게 만들어 기계 진입이 어려운 상황이 발생하여 수확 작업이 지연되거나, 수확 기계가 미끄러지거나 포장을 훼손할 우려가 있어 안정적인 기계 수확 환경 조성이 힘든 상황으로 우리나라의 기후가 고추 기계 수확 보급에 일정 부분 영향을 미치고 있다. 또한, 미국 및 중국의 대규모의 평坦한 면적 중심의 재배 조건과는 다르게, 국내 고추 재배 농가는 국내 고추는 전국적 재배 및 특히 경사지나 소규모 필지가 많아 수확 기계의 접근성이 제한되는 바가 있다.

그럼에도 불구하고 고추 기계 수확의 필요성(Marshall et al., 1986; Thomas and Rollason, 1980, Wolf and Alper, 1984)은 여러 연구 결과에 보고되며 지속적으로 제기되고 있으며, 국내 농업 인구의 고령화 및 인건비의 증가와 맞물려 국내에서도 1992년부터 고추 수확기 개발을 위한 기초연구(Lee et al., 1993)가 시작되고 기계 수확용 품종개발이 1991년부터 원예시험장(현 국립원예특작과학원)에서 계속적으로 수행되고 있는 상황이다. 하지만 국내의 고추 기계 수확에 대한 연구는

고추 품종의 개량 및 기계 수확에 적합한 품종 개발 연구보다는 기존의 고추 품종에 적용할 수 있는 수확 기계 개발에 치중되어 있었으며, 기계 수확에 불리한 기존의 국내 고추 품종의 특성과 맞물려 주목할 만한 성과는 없는 실정이다 (Choi et al., 2010; Lee et al., 1993; Lee et al., 1995; Lee et al., 1997; Hong et al., 2006; Kim et al., 2002). 또한 고추 기계 수확을 위해서는 재배의 양식, 규모, 방법 등에 관한 체계적인 선행 조사가 필요하지만 아직까지 이루어 지지 않은 상황이다(Choi et al., 2010).

고추 기계 수확에 필요한 생육 특성

기계 수확용 고추 품종 개발은 고추의 기계 수확을 위한 매우 중요한 과제이다. 현재 재배자, 수확기 및 기계 제조업체가 협업하여 고추 수확기계를 개발하고 있지만, 기계 수확에 최적화된 고추 품종의 생육 특성이나 수확량, 품질과 관련된 연구는 부족한 실정이다(Wall et al., 2003). 현재 뉴 멕시코에서 재배되는 붉은 고추는 80% 이상이 기계 수확되지만, 이러한 기계 수확 기법이 풋고추에는 어떻게 적용될지에 대한 연구는 미비하다. 이를 위해 붉은 고추 수확에 사용되는 기계식 수확기와 실험용 수확 헤드를 풋고추 밭에서 평가 하였는데(Funk and walker, 2010), 이 실험으로 결가지가 없는 단일 줄기 식물(single stemmed plants without basal branches)과 땅에서 더 높게 달린 열매가 기계 수확의 효율에 더 기여하는 것으로 밝혀졌으며, 식물 생장, 가지 패턴, 열매의 물리적 구조 및 기타 생물학적 특징은 기계 수확의 효율성에 상당한 영향을 미치며, 그중 낮은 수고와 좁은 분지각은 기계 수확의 효율성을 높여준다고 보고되었다(Joukhadar et al., 2018; Swami et al., 2021).

고추의 기계 수확에 영향을 미치는 중요한 요소 중 하나는 식물의 생장 형태로, 분지각이 넓으면 기계 수확 시 가지가 부러지는 것과 관련이 있지만, 분지각이 좁으면 가지가 부러지는 일이 적어 기계 수확을 용이하게 한다고 알려져 있다 (Esch and Marshall, 1987; Wolf and Alper, 1984). 보통 작물의 식재 밀도가 높을수록 수고가 높아지고 분지각이 좁아져 수확량이 향상되며(Wall et al., 2003), 개체 당 수확량은 감소하지만 면적당 수확량은 증가할 수 있다고 보고된 바 있다 (Cavero et al., 2001; Lenker and Nascimento, 1982; Esch and Marshall, 1987; Marshall, 1997).

잡초가 없는 토양에 뿌리 발달이 잘 된 작물은 기계 수확의 효율성을 높이는 것으로 보고되었으며(Wolf and Alper, 1984), 직파한 작물은 이식한 작물보다 가지 수가 적고 활착이 좋아 뿌리가 뽑히는 상황이 적고(Cooksey et al., 1994), 재배 도중 복토를 한다면 기계 수확 도중 뿌리 뽑힘을 줄일 수 있다는 연구 결과(Boese and Marshall, 1998; Esch and Marshall, 1987; McCullough et al., 1995) 등이 있다. Walker et al.(2021) 또한 기계 수확 가능여부는 현장 관리가 매우 중요하며, 직파의 경우 기계 수확에 적합한 초장이 크고 직립형인 반면, 이식의 경우 키가 작고 덤불이 무성하여 수확기에 의해 쉽게 뿌리가 뽑히는 결과 및 라인당 식물의 밀도를 높이는 경우 기계 수확의 효율이 높아지는 등, 식물의 형태 및 특성은 파종 및 정식 방법에 따라 크게 영향을 받는다고 보고하였다. 국내 연구 사례를 살펴보면 생산비 절감을 위해 기계 수확과 더불어 노동집약적 생산과정을 기계화해야 하며, 재배적 측면에서는 노동력이 많이 요구되는 기존의 유인방법 대신 무지주 재배로 전환되어야 하고, 멀칭을 통해 수확량을 향상시킬 수 있다고 보고된 바 있다(Lee et al., 1993). 또한 일시 수확형 고추 품종의 직파 재배의 경우 적정 재식



Fig. 5. (a) Etgar Moses 1010 chile harvester, and (b) 'NuMex Odyssey' marketable green fruit(Source: Walker et al., 2021).

거리는 120cm 이랑에 20cm 간격에 두줄 재배가 적당하다는 연구결과(Jeon et al., 2003) 등이 있다.

고추의 기계 수확을 위해서는 일시 수확형의 특성이 매우 중요하며 효율적인 기계 수확에 적합한 단일 줄기 및 착과 높이 등의 특성에 중점을 둔 'NuMex Odyssey'와 같은 품종 개발(Walker et al., 2021) (Fig. 5) 및 재배 방법, 재배 밀도 및 간격 조정을 통해 기계 수확에 적합한 방법을 찾는 연구 (Havlík et al., 2018) 등이 진행되었지만 국내에서는 일시 수확형 및 기계 수확에 적합한 형태를 가진 품종의 부재뿐만 아니라 이와 관련된 연구와 품종 개발은 거의 이루어지고 있지 않은 상황이다. 기존의 국내 고추 품종들은 이러한 특성과는 맞지 않고 수확 또한 일시 수확형이 아닌 여러 번 나눠 가며 수확하는 상황이다. 국내 품종은 분지가 위로 뻗쳐가며 계속 새로운 열매를 맺기 때문에 한번에 수확할 경우 수확량에 큰 손실을 초래하게 되는데 이는 같은 식물체 내에 숙성된 열매와 미 숙성된 열매가 공존하며, 기계를 통한 일시 수확 시 선택적 수확이 불가능하기 때문이다. 이를 극복하기 위하여 외국의 일시 수확형인 품종을 도입하더라도 기후, 재배 방법 및 토양의 환경 등이 외국과는 다르며, 국내에서 소비되고 있는 고추 열매와 맛과 향이 비슷하지 않으면 소비자들의 성향에 맞지 않을 우려가 있어 외국 품종의 국내 도입만이 능사가 아니라고 생각된다.

미국 및 중국에 비해 다른 우리나라의 기후 및 토양 여건상 일시 수확체계의 도입이 빠른 시일내에는 어렵겠지만 재배 방법 개선, 일시 수확형 고추 품종 개발 등의 개선이 이루어진다면 일시 수확체계 도입을 통한 기계 수확은 농가의 경영비를 크게 절감할 수 있을 것이다.

고추의 기계 수확에 있어 도복(McCullough et al., 1993)과 더불어 도복을 방지하기 위해 설치한 지주대는 기계 수확작업에서 큰 장애요인으로 작용한다(Kim et al., 2002). 국내 고추 재배는 수확기 강한 비바람에 의해 발생하는 도복을 방지하기 위해 지주대와 유인줄을 설치하는데 많은 시간과 노동력이 투입되며, 이렇게 설치된 지주대와 유인줄은 기계 수확작업에 있어 걸림돌이 된다(Lee et al., 2023). 그러나 국내 고추 품종은 수확철 강한 바람 및 폭우를 동반하는 우리나라 기후 환경으로 인해 지주대 설치 없이는 재배가 불가능한 현실이다. 도복을 결정하는 요인은 작물의 형태학, 해부학, 생화학적 특성(Shah et al., 2017) 이외에도 작물의 품종, 파종방법, 재배 밀도 등의 여러가지 원인들이 있다(Wang et al., 2022). Kim et al.(2002)은 일시 수확형 고추 수확기 개발에 관한 연구에서 고추의 기계 수확을 위해서는 국내 기존 고추 품종이 아닌 무지주 재배가 가능하면서 하향 착과형인 고추 품종의 개발이 필요하며, 무지주 상향 착과형인 고추 품종의 경우 기존 고추 품종에 비해 초장이 짧고 줄기 직경은 굵은 특성이 있지만, 고추 열매가 밀집되어 있고 상향 착과되는 특성으로 인해 탈과장치를 이용한 기계 수확 시 가장 낮은

정상 탈과율 및 가장 높은 미 탈과율을 보였다는 연구 결과를 보고한 바 있다. 또한, 뿌리는 작물의 도복저항성에 지대한 역할을 하며, 환경 및 생태 조건에 의해 영향을 받는다. 뿌리는 도복 시 작물 고정 및 지상부를 지지하는 능력이 주요 요인인데, 뿌리가 넓고 길게 발달할수록 도복저항성이 강화된다고 보고된 바 있다(Karim and Janhan, 2013; Khobra et al., 2019). Stoffella and Khan(1986)은 뿌리 생장 및 발달이 우수한 고추 품종을 개발하는 것이 도복에 강한 고추 품종을 개발하는데 유용할 것이며, 다른 연구에서는 정식 방법에도 가지과인 고추, 토마토, 파프리카의 정식 시 정식 깊이가 깊어질수록 도복이 감소하는 결과를 보였다고 보고하였다 (White, 1937; Vavrina et al., 1994; Mangan et al., 2000).

미국과 중국은 고추 기계 수확을 위한 품종, 재배방법 및 포장 관리 등의 조건을 체계적으로 정비해왔다. 미국의 경우 탈리성(abscission)이 높은 품종과 대규모 면적의 평탄한 포장을 기반으로, 수확 시기 고추 식물체의 상부 잎을 제거하거나 낙엽 유도를 통해 과실 노출을 높이고 있고, 이와 더불어 자동 수확 및 선별 장비가 도입되어 있다(Marshall et al., 1990). 또한 기계 수확을 위해서 높은 재식 밀도, 큰 초장 및 좁은 분지각의 직립 형태이면서 식물체 상부에 고르게 분포된 열매 등의 특성을 지닌 품종을 재배하고 있다(Wall et al., 2003). 중국은 미국에 비해 상대적으로 소형 장비를 기반으로 한 기계 수확 체계 및 일시 수확 체계가 발달한 상황이며, 지역별 고추 재배 농가마다 재배형태의 차이가 크지만 주로 밀식 재배를 하는 것으로 조사되었다(Ha et al., 2019). 반면, 우리나라에는 손수확이 전제된 재배 양식과 소규모 및 불규칙한 포장, 고온 다습한 여름철 수확기 등의 환경으로 인한 고추 수확 기계화 여건이 불리하고, 인프라도 미흡한 실정이다.

품종개발

고추 작물 생산의 생력회를 위하여 특히 수확 작업의 기계화에 대한 연구와 관련 형질의 품종 개발이 이루어지고 있다. 앞서 언급했듯이 기계 수확에 적합한 품종 개발을 위해선 기계 이동 및 접근이 용이한 식물체 구조, 일시 수확, 무지주 재배, 수확 및 선발 작업의 편의가 고려되어야 한다. 특히 관련 형질을 조절하는 염색체 상의 유전영역이나 유전자에 대한 이해는 신속하고 효율적인 신품종 개발에 핵심적인 역할을 할 수 있다(Lei et al., 2024).

기계 이동 및 접근이 용이한 식물체 구조는 주로 지상부의 초형에 관련된 형질들을 개량해야 하며, 분지형(sympodial) 가지 발달을 유도하는 *FASCICULATE (FA)* 유전자는 주로 연구되어 왔다(Elitzur et al., 2009). 고추의 *FA* 유전자는 토마토 *SELF PRUNING (SF)* 및 애기장대의 *TERMINAL FLOWER1 (TFL1)*의 상동 유전자로서 무한생장 형질을 유도한다. 이를 돌연변이 시키면 마디길이가 짧아지고, 심포디얼 유닛의 잎

성장이 저해되어 총생형의 꽃 무리가 형성될 뿐 아니라 전반적으로 키가 작아지며 조기 개화가 진행된다(Elitzur et al., 2009). 하지만 이 유전자는 넓은 범위의 다면발현 효과를 지녀 육종 프로그램에 즉각적으로 적용하기에는 한계가 있을 것으로 보인다. 근래 연구 결과 중 *TCP* 유전자군(*TCP* gene family)이 가지 분지(Braun et al., 2012)와 마디 길이(Kieffer et al., 2011) 조절에 관여함이 보고된 바 있으며, 특히 고추에서는 *CaTCP6*과 *CaTCP8*이 토마토의 *Solanum lycopersicum BRANCHED1* (*SIBRC1*)과 상동성을 보여 정단우성(apical dominance) 확립에 중요한 역할을 할 것으로 예측되고 있다(Dong et al., 2024). 이는 기계수학에 적합한 초형 형질 개량을 위한 유용한 유전적 자원이 될 수 있다.

일시 수확 품종 개발을 위해서는 앞서 언급한 초형 형질과 더불어, 착화 및 착과 시기에 영향을 주는 유전적 요소의 조절이 필요하다. 식물의 개화 시기 조절과 관련해서는 모델식물인 애기장대에서 플로리겐 유전자인 *FT* (*FLOWERING LOCUS T*)를 중심으로 활발한 연구가 진행되어 왔으며, 고추에서는 같은 가지과 작물인 토마토의 *FT*로 알려진 *SINGLE-FLOWER TRUSS* (*SFT*)의 상동체인 *CaFT-LIKE*가 개화를 촉진하는 것으로 보고되었다(Borovsky et al., 2020). 또한, *APETALA2* (*AP2*)의 상동체인 *CaFFN*이 개화억제의 기능을 하는 유전자로 밝혀져 조기 성숙 품종 개발에 기여할 가능성을 보여주었다(Yuan et al., 2021). 토마토의 과실 발달 및 숙성에 관련된 *SIMADS-RIN* (*RIPENING INHIBITOR*) 유전자의 상동체인 *LOC107847473*은 브레이커 단계(breaker) 열매와 성숙한 열매에서 매우 높은 발현을 보이며 고추의 비후숙성을 시사한다는 연구 결과가 있다(Dubey et al., 2019). *SIMADS-RIN*은 과육의 연화, carotenoid 축적, ethylene의 생성 및 감지에 관여하는 것으로 알려져 있으며(Dubey et al., 2019), *SEP* 유전자(*SIMADS1*)라고 불리는 유전자 그룹은 후숙성과 비후숙성 과일의 숙성에 중요한 역할을 한다고 보고되었다(Dong et al., 2013, 2014). 또한 *SIMADS-RIN* 유전자는 다른 과일 숙성 유전자와도 상호작용하며, 고추에서는 *SIMADS-RIN* 유전자의 동원체(ortholog)가 복제되어 고추의 열매 숙성에 잠재적인 역할을 한다고 보고된 바 있다(Dong et al., 2014). 이와 같은 연구는 관심 형질을 부여하는 유전자의 존재 여부에 따라 개체군을 신속하게 선발하는 마커 이용 육종으로 나아가는 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

무지주 재배를 가능하게 하기 위해서는 도복 저항성을 강화해야 하며, 이를 위해서는 지상부 구조와 더불어 지하부인 뿌리 구조의 개선이 반드시 필요하다(Lynch, 2022). 그러나 고추에서는 벼나 옥수수와 같은 주요 곡류 작물에 비해 뿌리 구조나 각도에 대한 유전학적 연구가 매우 미흡한 상황이다(Zhang et al., 2017). 다만, 다른 작물들의 연구를 종합해보면 뿌리 구조와 성장 방향을 조절하는 유전자 발굴이 도복 저항성과 안정적 생육 확보에 결정적인 기여를 하고 있다는 점이

명확히 드러난다(Hochholdinger et al., 2018; Lynch, 2022). 벼에서는 *DRO1* (*DEEPER ROOTING1*) 유전자와 같은 뿌리 각도 조절 유전자가 식별되어, 뿌리를 보다 깊게 성장시켜 가뭄 저항성과 도복 저항성을 향상시킬 수 있음을 보였다(Uga et al., 2013). 또한 굴지성(gravitropism)과 관련된 유전자군(*PIN-FORMED*, *AUX/IAA* 등)의 기능 연구는 뿌리의 성장 방향성과 구조적 특성 조절이 가능함을 보여주었으며, 이는 애기장대와 같은 모델 식물에서도 잘 확립되어 있다(Roychoudhry and Kepinski, 2015). 이러한 결과들을 고려할 때, 고추 역시 뿌리의 생장 방향성, 깊이, 밀도, 확장성 등 뿌리 구조적 특성을 유전적으로 조절하려는 연구가 병행된다면, 무지주 재배에 적합한 품종 개발이 가능할 것으로 기대된다.

마지막으로 상품성 있는 과실의 수확과 수확 후 가공작업의 효율을 높이기 위해서는 과피 두께와 과실 탈리 형질을 조절할 수 있어야 한다. 기계 수확에 표준화된 고추 품종의 기준은 정립된 바가 없지만, 미국의 경우 높은 탈립률 등의 형질에 초점을 맞춘 육종 노력이 이루어지고 있다(Hill et al., 2023). 일반적으로 고추 품종은 착색과 함께 숙과가 되면 과실과 꽂자루가 쉽게 분리되는데, 세포벽 분해효소를 암호화하는 *S* locus(Paran and van der Knaap, 2007) 및 *Capana10g002229* (Hu et al., 2023) 등이 연관되어 있음이 알려진 바 있다. 그러나 이들 유전인자들은 과피의 강도를 약화시키는 기작과 밀접하게 연관되어 있으며 과실이 완전히 착색된 후 발현되기 때문에, 풋고추와 같은 비착색 수확형 숙과 품종에 활용하기에는 다소 무리가 있다. 주목할 만한 점은 최근 멕시코 재래종 중 하나인 ‘UCD-14’ 자원이 발견되었는데, 타원형의 세라뇨 타입으로 녹색의 숙과 상태에서 쉽게 꽂받침과 분리되는 형질을 지녔으며, 유래 계통 연구를 통해 총 9개의 QTL (quantitative trait loci)이 염색체 2, 3, 4, 6, 9, 10, 11번에 분포하며, 관련 형질조절에 관여하는 것으로 보고되었다(Hill et al., 2023). 또한 기계 수확 시 ‘UCD-14’ 품종의 파생 계통은 40% 이상이 꼭지가 제거되었던 상태인 반면, 상업용 할라피뇨 품종은 2% 미만인 점과 비교된다. 이러한 결과는 고추 수확 기계화에 적합한 품종 개발을 위해 탈리 특성의 도입이 육종 프로그램에서 중요하며, 특히 10번 염색체에 위치한 *destem10.1*을 활용하여 품종 개발을 진행중이라 언급하였다(Hill et al., 2023). Lei et al.(2024)의 연구에서도 3, 4, 10번 염색체에서 이들과 유사한 QTL이 발견되었으며, 특히 3번 염색체의 QTL은 기존에 알려진 과실 특성과 관련된 QTL과 인접해 있으며, 애기장대의 낙과 신호 전달 경로에 관여하는 *Mitogen-activated protein kinase kinase5* (*MKK5*)를 후보 유전자로 지목하였다(Cho et al., 2008). 고추 과실이 꽂받침과 분리되는 탈리 지역은 감귤류의 과실 탈리 지역인 AZ-C와 흡사하며(Merelo et al., 2017), 애기장대의 화기 탈락과도 유사하여(Rajani and Sundaresan, 2001) 이에 관여하는

유전자 *HAESA-LIKE2 (HSL2)*, *Somatic Embryogenesis Receptor-like KINASE1 (SERK1)*, *EVERSHED (EVR)*, *CAST AWAY (CST)* 또한 후보 조절 유전자로 언급된 바 있다(Hill et al., 2023). 형태적 측면에서 고추의 꽃자루 분리는 과실의 크기와 너비, 꽃자루 끝 모양, 과피의 두께와 강한 상관성을 보이지만, 식물체의 구조나 스트레스 반응에는 유의미한 연관성이 보이지 않음이 보고된 바 있다(Ortega et al., 2024; Hill et al., 2023). 과실과 관련된 농업적 형질들에 대한 QTL과 후보 조절 유전자 연구는 꾸준히 진행되어 왔으며(Han et al., 2016; Lee et al., 2020), 과피 두께의 경우 염색체 4번에서 genome-wide association study (GWAS), QTL 분석에서 모두 강한 상관성을 보여 인접한 *Growth regulating factor1-LIKE (GRF1-LIKE)* 유전자가 과피 두께 및 과종 조절에 핵심적인 역할을 할 것으로 예상되고 있다(Lee et al., 2020).

이러한 품종 개발 접근은 단순히 작물의 생력화를 넘어 노동력 절감과 농가 생산성 증대라는 실질적인 효과로 이어질 수 있다(Kang et al., 2021). 또한, 고추의 초형 및 과실 특성과 관련된 핵심 유전자의 기능적 규명과 더불어 효율적인 마커 이용 선발 체계 구축이 동시에 이루어진다면, 기계 수확에 최적화된 품종 육성 기간을 단축할 수 있을 것이다(Joukhadar et al., 2018). 이를 위해 앞서 언급된 초형 조절 유전자 (*FA*, *CaTCP* 등) (Elitzur et al., 2009; Dong et al., 2024) 및 착과기·숙성기 조절 유전자(*CaFT-LIKE*, *CaFFN*, *SIMADS-RIN*, *GRF1-LIKE* 등) (Borovsky et al., 2020; Yuan et al., 2021; Lee et al., 2020)에 대한 추가적인 기능 분석과 분자육종 기술의 활용이 필수적이다. 동시에, 품종 특성과 현장 생산기술 간의 긴밀한 연계는 새로운 품종의 실제 농업 현장 적용성을 높이는 데 중요한 역할을 할 것이다(Funk and Walker, 2010; Funk et al., 2011). 따라서 품종의 형태학적, 유전학적 개선 뿐만 아니라, 수확 기계 및 현장 재배술과의 통합적인 접근 방식이 필요하며(Lozada et al., 2022), 이를 통해 고추 작물 생산의 전반적 생력화와 산업 경쟁력을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다(Marshall, 1997; Walker et al., 2021).

적 요

1. 농업 인구의 고령화로 인한 노동력 부족 및 인건비의 상승으로 인하여 농업의 기계화는 불가피한 실정이다. 특히 국내 고추 재배는 수확기에 대규모의 노동력이 요구됨으로 인하여 생산비가 증가하는 등, 고추 기계 수확에 대한 필요성이 증대되고 있다.

2. 고추 수확 기계 개발과 더불어 기계 수확에 적합한 품종을 연구 개발해왔던 외국의 사례와는 달리 국내 연구는 대부분 기준 품종에 맞춘 수확 기계에 대한 연구가 진행되어 왔으며, 이에 따라 기계 수확에 적합한 고추 품종의 부재 및 현재까지 고추 수확의 기계화율은 0%인 실정이다.

3. 기계 수확에 적합한 고추 품종의 연구 및 개발이 불가피하지만, 이와 관련된 연구는 미비한 상황이며, 지속적인 고추 수확 기계 연구 개발과 더불어 기계 수확에 적합한 특성을 가지면서 국내 고온 기후 및 수확기의 폭우, 강풍 등의 환경에 저항성을 가진 품종의 개발이 필요한 상황이다.

4. 고추 기계 수확을 위한 재배 양식, 재배 규모, 재배 방법 등에 관한 체계적인 선행 조사 및 연구가 필요하다. 특히, 장마와 고온 다습한 국내 여름철 수확기 동안의 토양 상태를 고려한 기계 수확 방식 개발이 요구된다. 이와 더불어 기계 수확에 적합한 새로운 고추 품종 개발을 위해 초장의 길이, 좁은 분지 각도, 쉬운 꽃자루 분리, 일시 수확과 일시 숙성형 및 도복 저항성 등의 국내 재배 환경 및 기계 수확에 적합한 특성과 형질을 우선적으로 파악하는 것이 중요하다고 판단된다.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported in part by a grant from the World Vegetable Center Korea Office (WKO #10000379) and 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

- Anjin, S., Chan, D., Juan, D. 2021. Development and experiment of self-propelled pepper harvesting machinery. *Journal of Agricultural Engineering*. 11:17-19.
- Arad, B., Balendonck, J., Barth, R., Ben-Shahar, O., Edan, Y., Hellström, T., Hemming, J., Kurtser, P., Ringdahl, O., et al. 2020. Development of a sweet pepper harvesting robot. *Journal of Field Robotics*. 37:1027-1039. Doi: 10.1002/rob.21937
- Boese, B.N., Marshall, D.E. 1998. Breeding *Capsicum* for mechanical harvest, Part 1-Genetics. Proc. 10th Eucarpia Meeting on Genetics and Breeding of Capsicum and Eggplant. Avignon, France. pp.41-45.
- Borovsky, Y., Mohan, V., Shabtai, S., Paran, I. 2020. CaFT-LIKE is a flowering promoter in pepper and functions as florigen in tomato. *Plant Sci.* 301:110678. Doi:10.1016/j.plantsci.2020.110678
- Bosland, P.W., Votava, E.J., Votava, E.M. 2012. Peppers: Vegetable and spice capsicums. Cambridge, MA:Cabi. pp.1-12.
- Braun, N., de Saint Germain, A., Pillot, J.P., Boutet-Mercey, S., Dalmais, M., Antoniadi, I., Li, X., Maia-Grondard, A., Le Signor, C., et al. 2012. The pea TCP transcription factor PsBRC1 acts downstream of Strigolactones to control shoot branching. *Plant Physiol.* 158:225-238.
- Cavero, J., Ortega, R.G., Gutierrez, M. 2001. Plant density affects yield, yield components, and color of direct-seeded paprika pepper. *HortScience*. 36:76-79.
- Cho, S.K., Larue, C.T., Chevalier, D., Wang, H., Jinn, T.L., Zhang,

- S., Walker, J.C.** 2008. Regulation of floral organ abscission in *Arabidopsis thaliana*. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 105:15629-15634. Doi:10.1073/pnas.0805539105
- 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(I) - Surveys on Conventional Pepper Cultivation and Mechanization of Pepper Harvesting. *Journal of Biosystems Engineering*. 35:367-372.
- Cooksey, J.R., Kahn, B.A., Motes, J.E.** 1994. Plant morphology and yield of paprika pepper in response to method of stand establishment. *HortScience*. 29:1282-1284.
- David, L.** 2010. Lawrence Convention Center. Pepper Harvester Development. *ASABE*. 11:17.
- de Aguiar, A.C., da Fonseca Machado, A.P., Angolini, C.F.F., de Morais, D.R., Baseggio, A.M., Eberlin, M.N., Marostica Junior, M.R., Martinez, J.** 2019. Sequential high-pressure extraction to obtain capsinoids and phenolic compounds from biquinho pepper (*Capsicum chinense*). *J. Supercrit. Fluids*. 150:112-121.
- Dong, T., Chen, G., Tian, S., Xie, Q., Yin, W., Zhang, Y., Hu, Z.** 2014. A non-climacteric fruit gene *CaMADS-RIN* regulates fruit ripening and ethylene biosynthesis in climacteric fruit. *PLoS One*. 9:e95559. Doi:10.1371/journal.pone.0095559
- Dong, T., Hu, Z., Deng, L., Wang, Y., Zhu, M., Zhang, J., Chen, G.** 2013. A tomato MADS-box transcription factor, SIMADS1, acts as a negative regulator of fruit ripening. *Plant Physiology*. 163:1026-1036. Doi:10.1104/pp.113.224436
- Dong, Z., Hao, Y., Zhao, Y., Tang, W., Wang, X., Li, J., Wang, L., Hu, Y., Guan, X., et al.** 2024. Genome-Wide Analysis of the *TCP* Transcription Factor Gene Family in Pepper (*Capsicum annuum* L.). *Plants (Basel)*. 13:641. Doi:10.3390/plants13050641
- Dubey, M., Jaiswal, V., Rawoof, A., Kumar, A., Nitin, M., Chhapekar, S.S., Kumar, N., Ahmad, I., Islam, K., et al.** 2019. Identification of genes involved in fruit development/ripening in *Capsicum* and development of functional markers. *Genomics*. 111:1913-1922. Doi:10.1016/j.ygeno.2019.01.002
- Eastman, C., McClellan, F., Bagwell, T.** 1997. Impact of increasing wages on New Mexico chile production. *N.M. Agr. Expt. Sta. Res. Rpt.* 714:1-7.
- Elitzur, T., Nahum, H., Borovsky, Y., Pekker, I., Eshed, Y., Paran, I.** 2009. Co-ordinated regulation of flowering time, plant architecture and growth by FASCICULATE: the pepper orthologue of SELF PRUNING. *Journal of Experimental Botany*. 60:869-880. Doi:10.1093/jxb/ern334
- Esch, T.A., Marshall, D.E.** 1987. Trash Removal from Mechanically Harvested Peppers. *ASABE*. 30:893-898. Doi:10.13031/2013.30494
- Funk, P.A., Walker, S.J.** 2010. Evaluation of five green chile cultivars utilizing five different harvest mechanisms. *Applied Engineering in Agriculture*. 26:955-964. Doi:10.13031/2013.35906
- Funk, P.A., Walker, S.J., Herbon, R.P.** 2011. A systems approach to Chile harvest mechanization. *Int. J. Veg. Sci.* 17:296-309. Doi:10.1080/19315260.2010.549167
- Gang, H.M., Park, H.S., Rhim, T.J., Kwon, K.R.** 2008. A study on the comparison of antioxidant effects between hot pepper extract and capsaicin. *JoP*. 11:109-118.
- Ganguly, S., Praveen, P.K., Para, P.A., Sharma, V.** 2017. Medicinal properties of chilli pepper in human diet: an editorial. *ARC J. Public Health Commun. Med.* 2:6-7.
- Gentry, J.P., Miles, J.A., Hinz, W.W.** 1978. Development of a Chili pepper harvester. *Transaction of the ASAE*. 21:52-54.
- Gyeongsangbuk-do Agricultural Research & Extension Service (GBA).** 2024. Revised and Expanded Cultivation Manual for Yeongyang Red Pepper. GBA. p.88. Available at: https://www.gba.go.kr/cmsh/gba.go.kr/file/yeongyang/report_03.pdf
- Ha, D.J., Choi, C.K., Woo, S.G., Li, J.Z.** 2019. Analysis on Once-over Harvesting System of Chinese Pepper. *J. Korean Soc. Int. Agric.* 31:123-130.
- Han, K., Jeong, H.J., Yang, H.B., Kang, S.M., Kwon, J.K., Kim, S., Choi, D., Kang, B.C.** 2016. An ultra-high-density bin map facilitates high-throughput QTL mapping of horticultural traits in pepper (*Capsicum annuum*). *DNA Res.* 23:81-91.
- Havlik, C.D., Walker, S.J., Funk, P., Marsalis, M.A.** 2018. Optimum plant spacing for New Mexico green chile (*Capsicum annuum*) mechanical harvest efficiency. 2018 ASHS Annual Conference. ASHS.
- Heu, B.G., Jang, G.S., Kim, H.K.** 2001. Development of Cost Reducing Pepper Production Technology, Kyeongbuk Pepper Experimental Station Report. pp.469-475.
- Hill, T., Cassibba, V., Joukhadar, I., Tonnesen, B., Havlik, C., Ortega, F., Sripolcharoen, S., Visser, B.J., Stoffel, K., et al.** 2023. Genetics of destemming in pepper: A step towards mechanical harvesting. *Front Genet.* 14:1114832. Doi:10.3389/fgene.2023.1114832
- Hochholdinger, F., Yu, P., Marcon, C.** 2018. Genetic control of root system development in maize. *Trends in Plant Science*. 23:79-88. Doi:10.1016/j.tplants.2017.10.004
- Hong, J.T., Cho, K.H., Cho, N.H., Park, H.M., Hong, S.K., Choi, Y., Shin, S.Y., Cho, C.K.** 2006. Study on Integrated Mechanization System for Harvest and Postharvest Operation of Once-over-harvest Pepper. 2006 Summer Conference Proceedings. *KSAM* 11:184-189.
- Howard, L.R., Talcott, S.T., Brenes, C.H., Villalon, B.** 2000. Changes in phytochemical and antioxidant activity of selected pepper cultivars (*Capsicum* species) as influenced by maturity. *J. Agric. Food Chem.* 48:1713-1720. Doi:10.1021/jf990916t
- Hu, F., Dong, J., Zhang, S., Song, Z., Guan, W., Yuan, F., Zhong, J., Liu, J., Hu, K., et al.** 2023. Fine mapping and gene silencing pinpoint *Capana10g002229* as a strong candidate gene regulating the deciduous character of ripe pepper fruit (*Capsicum* spp.). *Theor Appl Genet.* 136:107. Doi:10.1007/s00122-023-04355-5.
- Huh, Y.C.** 2019. Current status and prospects of chili pepper harvesting mechanization. Wonyesanup News. Available at: <http://www.wonyesanup.co.kr/news/articleView.html?idxno=44296>
- Hwang, J.M., Oh, S.M., Chung, K.M., Kim, J.I., Seo, J.U.** 2002. Red Pepper Quality and Yield of Some Varieties by Direct Sowing and Once-over Harvest Methods. *Horticulture, Environment and Biotechnology*. 5:43-43.
- Jeon, J.O., Park, J.H., Shin, S.K., Yoon, T.** 2003. Farm Adoption of Pepper Machinery Planting and Once-over Harvesting Model. *Horticulture Research Report*. pp.113-117.
- Joukhadar, I.C., 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. Doi:10.21273/HORTTECH03999-18
- Jung, J.S., Jeun, H.K., Jang, I., Kim, C.S., Kim, J., Choi, D.C.** 2003. Farm Evaluation of the Hot Pepper Production Model Development for Reducing Production Cost Via the Direct Sowing and Synchronized Harvesting Model. *Agriculture Economics Report*. pp.270-279.

- Kang, S., Kim, Y., Park, H., Woo, S., Uyeh, D.D., Ha, Y.** 2021. Effect of Planting Distance on the Mechanical Harvesting of Hot Pepper. *Agriculture*. 11:945. Doi:10.3390/agriculture11100945
- Karim, M.H., Jahan, M.A.** 2013. Study of lodging resistance and its associated traits in bread wheat. *Journal of Agricultural and Biological Science*. 8:683-687.
- Khobra, R., Sareen, S., Meena, B.K., Kumar, A., Tiwari, V., Singh, G.P.** 2019. Exploring the traits for lodging tolerance in wheat genotypes: a review. *Physiology and Molecular Biology of Plants*. 25:589-600.
- Kieffer, M., Master, V., Waites, R., Davies, B.** 2011. TCP14 and TCP15 affect internode length and leaf shape in *Arabidopsis*. *Plant J.* 68:147-158.
- Kim, Y.K., Hong, J.T., Choi, Y., Jun, H.J., Park, H.J., Cho, Y.M.** 2002. A Study on Development of Once-Over Harvest Pepper Harvester(I) - A Fundamental Factor Test for Pepper Detachment. KSAM. Proceedings of KSAM Conference. pp.54-59. Available at: https://scienceon.kisti.re.kr/srch/select_PORSrchArticle.do?cn=NPAP08059080
- Korea Rural Economic Institute (KREI).** 2016. Case studies on field crop production systems. KREI Research Report R773. Available at: <https://repository.krei.re.kr/handle/2018.oak/21805>
- Korean Statistical Information Service (KOSIS).** 2024a. Results of the 2024 survey on the production of red peppers, sesame, and highland potatoes (press release). November 22, 2024. KOSIS. Available at: <https://kostat.go.kr/synap/skin/doc.html?fn=d1cf6d847ff65806de0663f549fdb0513e012c0a66c4b5f75eae18ab62cb5819&rs=/synap/preview/board/228/>
- Korean Statistical Information Service (KOSIS).** 2024b. 「Agricultural Area Survey」, Area Cultivated for Open-field Vegetables. KOSIS. Available at: https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1ET0013&conn_path=I2
- Lee, C.H., Park, S.J., Kim, C.S., Rhee, J.Y., Kim, M.H., Kim, Y.H.** 1995. Determination of Development Strategy for a Pepper Harvester. *Journal of biosystems Engineering*. 20:22-35.
- Lee, C.H., Park, S.J., Kim, C.S., Rhee, J.Y., Kim, Y.H.** 1993. A Fundamental Study for Development of a Pepper Harvester. *Journal of biosystems Engineering*. 18:110-121.
- Lee, H.A., Lee, J.W., Lee, S.H., Lee, W.M., Jeong, H.B., Yu, N.R., Lee, H.E., Moon, J.H., Yeo, K.H., et al.** 2023. Lodging resistance of crops with a focus on solanaceous vegetables: A review. *J. Korean Soc. Int. Agric.* 35:366-375. Doi:10.12719/KSIA.2023.35.4.366
- Lee, H.Y., Ro, N.Y., Patil, A., Lee, J.H., Kwon, J.K., Kang, B.C.** 2020. Uncovering Candidate Genes Controlling Major Fruit-Related Traits in Pepper via Genotype-by-Sequencing Based QTL Mapping and Genome-Wide Association Study. *Front. Plant Sci.* 11:1100. Doi:10.3389/fpls.2020.01100
- Lee, J.H., Park, S.J., Rhee, J.Y.** 1997. Development of a Pepper Removal Mechanism for a Red-Pepper Harvester (I)- Size Reduction of the Pepper Removal Mechanism and Improvement of Pepper Recovery Ratio. *Journal of biosystems Engineering*. 22:177-188.
- Lei, S., Chen, L., Liang, F., Zhang, Y., Zhang, C., Xiao, H., Tang, R., Yang, B., Wang, L., Jiang, H.** 2024. Identification of a major QTL and candidate genes analysis for branch angle in rape-seed (*Brassica napus* L.) using QTL-seq and RNA-seq. *Front. Plant Sci.* 15:1340892. Doi:10.3389/fpls.2024.1340892
- Lenker, D.H., Nascimento, D.F.** 1982. Mechanical harvesting and cleaning of chili peppers. *Transactions of the ASAE*. 25:42-46.
- Lozada, D.N., Bosland, P.W., Barchenger, D.W., Haghshenas-Jaryani, M., Sanogo, S., Walker, S.** 2022. Chile pepper (*Capsicum*) breeding and improvement in the “multi-omics” era. *Front. Plant Sci.* 13:879182.
- Lynch, J.P.** 2022. Harnessing root architecture to address global challenges. *The Plant Journal*. 109:415-431. Doi:10.1111/tpj.15560
- Mangan, F.X., Vavrina, C.S., Howell, J.C.** 2000. Transplanting depth affects pepper lodging and maturity. *HortScience*. 35:593-595.
- Marshall, D.E.** 1986. Recovery and damage of mechanically harvested peppers. *Trans. Amer. Soc. Agr. Eng.* 29:398-401.
- Marshall, D.E.** 1997. Designing a pepper for mechanical harvest. *Capsicum Eggplant Nwslett.* 16:15-26.
- Marshall, D.E., Boese, B.N.** 1998. Breeding *Capsicum* for mechanical harvest, Part 2-Equipment. In Proceedings of the 10th Eucarpia Meeting on Genetics and Breeding of *Capsicum* and Eggplant. Avignon, France. pp.61-64.
- Marshall, D.E., Esch, T.A., Dragt, S.R.** 1986. Influenced of certain open helix variables on pepper damage. *Transactions of the ASAE*. 29:714-717.
- Marshall, D.E., Pickett, M.G., Esch, T.A.** 1990. Using air to convey mechanically harvested peppers. *Trans. Amer. Soc. Agr. Eng.* 33:47-50.
- Masood, M.U., Haghshenas-Jaryani, M.** 2021. A Study on the Feasibility of Robotic Harvesting for Chile Pepper. *Robotics*. 10:94-94. Doi:10.3390/robotics10030094
- McCullough, M.D., Motes, J.E., Kahn, B.A.** 1995. Soil Bedding Treatments Improve Pepper Plant Anchorage. *HortScience*. 30:1202-1204. Doi:10.21273/HORTSCI.30.6.1202
- McCullough, M.D., Motes, J.E., Kahn, B.A., Maness, N.E.** 1993. Lodging in Direct Seeded Peppers. *HortScience*. 28:268-269.
- Merelo, P., Agusti, J., Arbona, V., Costa, M.L., Estornell, L.H., Gómez-Cadenas, A., Coimbra, S., Gómez, M.D., Pérez-Amador, M.A., et al.** 2017. Cell wall remodeling in abscission zone cells during ethylene-promoted fruit abscission in citrus. *Front. plant Sci.* 8:126. Doi:10.3389/fpls.2017.00126
- Ortega, F., Hill, T., Van Deynze, A., Garcia-Llanos, A., Walker, S.** 2024. Identification of QTLs involved in destemming and fruit quality for mechanical harvesting of New Mexico pod-type green chile. *Front. Plant Sci.* 15:1357986. Doi:10.3389/fpls.2024.1357986
- Paran, I., van der Knaap, E.** 2007. Genetic and molecular regulation of fruit and plant domestication traits in tomato and pepper. *J. Exp. Bot.* 58:3841-3852. Doi:10.1093/jxb/erm257
- Rajani, S., Sundaresan, V.** 2001. The *Arabidopsis* myc/bHLH gene *ALCATRAZ* enables cell separation in fruit dehiscence. *Curr. Biol.* 11:1914-1922. Doi:10.1016/s0960-9822(01)00593-0
- Roychoudhry, S., Kepinski, S.** 2015. Shoot and root branch growth angle control—the wonderfulness of lateralness. *Current Opinion in Plant Biology*. 23:124-131. Doi:10.1016/j.pbi.2014.12.004
- Rural Development Administration (RDA).** 2023. ‘Agricultural Machinery Use Survey’- Field Crop Mechanization Rate (Nationwide). RDA. Available at: https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=143&tblId=DT_143004N_025&conn_path=I2
- Saleh, B., Omer, A., Teweldeemedhin, B.** 2018. Medicinal uses and health benefits of chili pepper (*Capsicum* spp.): a review. *MOJ Food Process Technol.* 6:325-328. Doi:10.15406/mojfpt.2018.06.00183
- Shah, A.N., Tanveer, M., Rehman, A.U., Anjum, S.A., Iqbal, J., Ahmad, R.** 2017. Lodging stress in cereal—effects and management: an overview. *Environmental Science and Pollution Research*.

- 24:5222-5237.
- Shaw, L.N.** 1975. The application of an off-set double crank mechanism in a selective Bell pepper harvester. *Transactions of the ASAE*. 18:606-609.
- Stoffella, P.J., Kahn, B.A.** 1986. Root system effects on lodging of vegetable crops. *HortScience*. 21:960-963.
- Swami, C.Y., Kumaran, G.S., Naik, R.K., Reddy, B.S., Rathina Kumari, A.C.** 2021. Physio-morphological and Mechanical properties of chillies for Mechanical Harvesting. *Journal of Horticultural Sciences*. 16:271-279. Doi:10.24154/jhs.v16i2.1274
- Thomas, C.H., Rollason, S.** 1980. A mechanical harvester for Tabasco peppers. *Louisiana Agriculture*. 23:8-9.
- Tobolka, A., Škorpilova, T., Dvorakova, Z., Cusimamani, E.F., Rajchl, A.** 2021. Determination of capsaicin in hot peppers (*Capsicum* spp.) by direct analysis in real time (DART) method. *J. Food Compos. Anal.* 103:104074.
- Uga, Y., Sugimoto, K., Ogawa, S., Rane, J., Ishitani, M., Hara, N., Kitomi, Y., Inukai, Y., Ono, K., et al.** 2013. Control of root system architecture by DEEPER ROOTING 1 increases rice yield under drought conditions. *Nature Genetics*. 45:1097-1102. Doi:10.1038/ng.2725
- 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.
- Walia, S., Kundu, A., Kaur, C., Singh, J., Sisodia, R.** 2015. Capsaicinoids, tocopherol, and sterols content in chili (*Capsicum* spp.) by gas chromatographic mass spectrometric determination. *Int. J. Food Prop.* 18:1535-1545.
- Walker, S.J., Funk, P., Joukhadar, I., Place, T., Havlik, C., Tonnessen, B.** 2021. 'NuMex Odyssey', a New Mexico-type Green Chile Pepper for Mechanical Harvest. *HortScience*. 56:1605-1607. Doi:10.21273/HORTSCI15793-21
- Wall, M.M., Walker, S., Wall, A.D., Hughs, E., Phillips, R.** 2003. Yield and Quality of Machine Harvested Red Chile Peppers. *HortTechnology horttech*. 13:296-302. Doi:10.21273/HORTTECH. 13.2.0296
- 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.
- White, P.R.** 1937. Survival of isolated tomato roots at suboptimal and suboptimal temperatures. *Plant Physiol.* 12:771-776.
- Wolf, I., Alper, Y.** 1984. Mechanization of paprika harvest. Proc. Symp. on Fruit, Nut and Vegetable Harvesting Mechanization. ASAE. pp.265-275.
- Wuhan Anon Tech Trade Co., Ltd.** 2025. Available at: https://en.alibaba.com/ko_KR/index.html?spm=a2700.details.0.0.12703b08Z9fxJK&from=detail&productId=1600895962468
- Yuan, X., Fang, R., Zhou, K., Huang, Y., Lei, G., Wang, X.** 2021. The *APETALA2* homolog *CaFFN* regulates flowering time in pepper. *Hortic Res.* 8:208. Doi:10.1038/s41438-021-00643-7
- Zhang, S., Cai, P.** 2022. Research Status and Development Trend of Intelligent Mechanized Pepper Harvesting. *Asian Journal of Research in Crop Science*. 7:33-41. Doi:10.9734/ajrcs/2022/v7i4143