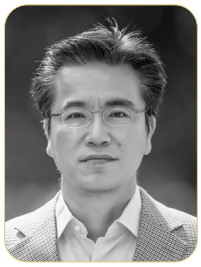
호흡하는 채소, 살아있는 품질: 상추 저장 기술의 현재와 미래

박은혜, 방우석*
Park, Eun-Hye, Bang, Woo-Suk*

영남대학교 식품영양학과
Department of Food Science and Nutrition, Yeungnam University



방 우 석

Correspondence to
Bang, Woo-Suk, Department of Food Science and Nutrition, Yeungnam University, 280 Daehak-Ro, Gyeongsan, Gyeongbuk 38541, Republic of Korea (38541 Korea)
Tel.: +82-53-810-2877,
Fax: +82-53-810-4666
E-mail: wsbang@ynu.ac.kr

서론

1. 상추 저장 기술의 중요성

상추는 전 세계 신선 엽채류 산업에서 지속적인 성장세를 보이고 있다. 전 세계적으로 상추 시장은 2024년 41억 달러에서 2031년 55억 달러로 성장할 것으로 전망하고 연평균 성장률이 약 4.0%에 달성할 것으로 예측한다. 농촌진흥청(Rural Development Administration, RDA) 통계에 따르면 2022년 국내 상추 재배면적은 약 3,904 ha, 생산량은 101,831톤으로 보고되어 국내 엽채류 중에서 상추의 생산 규모가 꾸준히 증가하고 있음을 보여준다. 이는 건강식품에 대한 요구와 의식 향상, 채식과 저속 노화 식단의 확산 등 건강한 식습관의 변화에 따른 결과이다. 더불어 상추 시장은 샐러드, 샌드위치, 랩과 같은 신선 편의 식품의 수요가 증가하여 성장하고 있다. 상추는 저칼로리 식품으로 비타민, 무기질, 식이섬유가 풍부할 뿐만 아니라 비가열 상태로 다양한 식품에서 활용할 수 있어 소비자 선호도가 높다. 실제로 상추는 소비자들이 많이 찾는 생산 품목으로 국내 잎채소 중 김치의 주재료인 '배추' 다음으로 높은 비중으로 차지하고 있다. 그러나 높은 시장 수요에도 불구하고 상추는 수확 후 단계에서 심각한 품질 저하와 손실 위험에 처해있다.

수확 후에 일어나는 손실은 지속 가능한 먹거리를 공급하는데 걸림돌이 되고 있다. 전세계적으로 생산된 식품의 약 13억 톤이 매년 손실되거나 낭비하고 있다[1]. 이는 경제적 · 사회적으로 자원 낭비를 초래한다. 특히 과일과 채소는 손실이 가장 큰 품목으로, 소비자에게 도달하기 전에 거의 45%가 버려지게 된다[1]. 에티오

피아의 경우, 수확 후 손실의 85.6%가 저장 단계에서 발생하고 있다[1]. 상추는 높은 수분함량과 호흡량으로 수분 손실과 연화 등 품질 저하가 빠르게 일어나며, 수확 후 품질 관리를 소홀히 하는 것은 상품성이 낮아지고 폐기량이 증가한다. 상추의 손실 문제를 해결하기 위해서는 생산, 저장, 유통, 소비 전 과정에서 지속 가능한 저장 및 유통 체계가 이루어져야 한다. 이는 상추의 유통기한 연장과 손실 감소를 동시에 달성하는데 중요한 기반이 된다. 특히 저장 단계에서는 상추의 호흡률과 에틸렌 민감성을 고려하여 저온 저장(0-5℃)과 적정 상대습도(95-98%)를 유지하는 것이 중요하다. 또 산소와 이산화탄소의 농도를 조절하는 Modified Atmosphere(MA) 포장과 Controlled Atmosphere(CA) 저장 기술이 품질을 유지하는데 효과적이다. 더불어 UV-C, 405nm LED, 천연 항균물질 코팅과 같은 비화학적 기술을 같이 처리하면 미생물 성장을 억제하여 저장 기간을 연장할 수 있다. 이러한 기술 개발은 지속가능한 유통 과정의 핵심 요소로, 이러한 연구는 계속 진행되어야 한다. 그리하여 먼저 상추의 생리적 특성과 품질 저하 메커니즘을 이해하는 것이 필요하다.

상추는 다른 잎채소보다 저장성이 낮고 수확 후 품질을 유지하는 것이 쉽지 않다. 상춧잎은 일반적으로 95%의 수분을 함유하고 있어 저장 중 소량의 손실만으로도 시들고 조직이 손상된다[3]. 상추의 높은 호흡률 때문에 수확 후에도 대사활동을 하고 이 과정에서 저장된 영양 성분들이 고갈되어 조직이 빠르게 노화한다. 하지만 적정 온도와 습도 조건을 유지해도 상추의 생리적 특성 때문에 저장 기간이 제한적이며, 상추의 품질에 작은 가스 조성 변화도 크게 영향받는다. 또 저장 환경에 대한 민감성을 높이는 것은 저장 기술 개발의 주요 제약 요인으로 작용한다. 한편, 상추 수확 후에 일어나는 품질 저하는 생리적 노화뿐만 아니라 효소적 갈변 반응과도 밀접한 관련이 있다. 최근 줄기상추를 대상으로 한 연구에서, 절단 과정 중 페닐알라닌 암모니아 분해효소(Phenylalanine ammonia-lyase, PAL), 폴리페놀 산화효소(Polyphenol Oxidase, PPO) 활성이 증가하고, 이들이 작용하여 조직을 갈변시킨다는 연구 결과가 나왔다[5]. 특히, PPO는 과일과 채소에서 갈변을 일으키는 효소로 폴리페놀을 산화시켜 색소 퀴논을 형성한다[4]. 상추에서 수확 과정 중 줄기가 절단되며 조직 손상을 입고, 이에 따라 세포 내 대사가 증가하면서 활성화된 PPO로 줄기 부위가 갈변된다[5]. 또 신선편이 상추를 냉장 유통 과정 중에 미생물 군집을 분석한 결과, 저온에서도 증식할 수 있는 세균인 *Pseudomons. spp*가 조직 연화, 점액성 부패, 변색의 주요 원인균으로 나왔다[6]. 이러한 효소적 갈변과 저온 미생물은 상추의 외관 품질을 저하하여 상품성을 감소시키는 주요 요인으로 작용한다.

본 리뷰는 현재 상추 저장 기술을 종합적으로 검토하고 미래 연구 방향을 제시하는 데 의의가 있다. 현재 적용되고 있는 상추의 저장 및 포장 기술을 비교하며 한계점을 분석한다. 또 상추의 품질 유지와 저장 기간 연장을 위해 저온 및 고습도 환경, 예냉 처리, MA 포장, CA 저장 기술의 원리를 종합적으로 검토하였다. 특히 기능성 포장재와 에틸렌 흡착제의 활용은 저장 기간 연장 뿐만 아니라 친환경적이면서도 경제적으로 지속가능한 먹거리 공급을 위한 해결책을 제시한다. 이를 토대로 향후 연구는 유전체 기술을 통한 품종 개발, IoT(Internet of Things) 센서 모니터링, 그리고 블록체인 기술 개발 등에 중점을 두고 진행해야 한다. 이처럼 첨단 기술들을 활용하여 손실 감소 및 식품 안전성 확보 등 상추 저장기술의 문제점을 해결해야 한다. 이를 위해 수확 후 발생하는 상추의 생리적 메커니즘을 이해하여 각 단계에 맞는 저장 기술을 적용해야 한다.

2. 상추 저장 중 품질 저하 원인

높은 수분함량과 호흡률과 같은 상추의 생리적 특성은 저장 과정 중에 품질을 저하시키는 주요 원인이다. 상추는 수확 후 호흡과 증산 작용으로 인해 수분 손실, 시듦, 갈변 현상이 발생하기 쉽다. 또 수분 함량이 높아 수확, 유통, 저장 과정에서 품질이 빠르게 저하한다[7]. 또한 상추는 에틸렌에 민감한 엽채류로 수확 후 저장 및 유통 과정에서 에틸렌 노출은 품질 저하에 큰 영향을 미친다. 한 연구에

서는 상추에 에틸렌 수용체를 차단하는 1-메틸시클로프로판(1-Methylcyclopropane, 1-MCP)을 처리한 결과, 페놀 축적과 갈변 현상이 감소하고 품질은 그대로 유지하였다[8]. 이는 에틸렌 노출이 갈변 현상과 품질을 저하하는 요인임을 보여준다. 이처럼 상추는 취급 및 유통 과정에서 물리적 · 생물학적 손상을 입기 쉬운 잎채소이기 때문에 수확 후 저장 기술의 처리는 필수적이다[9].

3. 상추 저장 기술의 발전 과정

3.1. 저온 및 습도 관리

상추의 가장 기본적인 저장 기술은 저온 및 고습도 환경에서 관리하는 것이다. 저온에서 저장하면 상추의 호흡 속도를 감소시켜 대사 활동을 억제하고 에틸렌의 생성을 억제하여 노화를 지연시킨다. UV Davis Postharvest Technology Center에서 제시한 잎상추 저장 지침에 따르면 유통기한이 0℃에서 저장하면 21일, 5℃에서는 14일로 온도가 올라갈수록 호흡률이 2배 이상 증가한다고 보고되었다[10]. 한 연구에서는 상추를 0, 5, 10℃에서 저장했을 때, 0℃에서는 품질이 현저히 유지되었지만 20℃에서는 품질이 크게 저하되었다[11]. 이는 저온에서는 호흡, 수분 손실, 미생물 증식이 억제되어 품질이 유지되지만, 온도가 증가하면서 이들이 급격하게 증가하여 품질이 빠르게 저하되기 때문이다. 더불어 상추의 저장 수명은 상대 습도(Relative humidity, RH)에도 크게 영향받는다. 상추는 저온 환경 뿐만 아니라 고습도 환경에서 동시에 저장해야 상품성을 잃지 않는다. 최적 습도 이하에서 보관하면 수분이 손실되며 저장 중 상대습도가 낮으면 증산 작용이 증가한다[12]. 따라서 상추는 저온(0-5℃)과 고습도(95~98%) 환경에서 저장하는 것은 수분 손실과 시듦 현상을 억제하고 외관의 신선함과 경도를 보존하기 위한 과정이다. 이 과정 전에 상추의 품질을 안정적으로 유지하기 위해 상추의 열을 신속하게 낮추는 예냉 처리가 병행되어야 한다.

3.2. 예냉 처리

예냉 처리는 수확 직후 상추의 온도 관리 핵심 전처리 기술이다. 예냉은 수확 직후에 신선한 상추와 같은 농산물의 열을 낮춰 신진대사 속도를 늦추고 판매 또는 저장 전 품질 저하를 최소화하는 과정이다[13]. 이는 상추의 밭열을 제거하고, 수확 후 냉장창고나 시장으로 운송되기 전에 최적의 온도로 냉각하는 것을 목표로 한다. 예냉 방식은 수냉식(Hydrocooling), 진공(Vacuum Cooling), 강제통풍(Forced Air Cooling), 실온(Room Cooling) 예냉 등 7가지 주요 기술이 있다[13]. 예냉 방식은 냉각 조건이 다르기 때문에 최종 품질에 미치는 영향도 다르다[14]. 또 상추의 표면 형태에 따라 예냉 방식의 효과도 다르다. 잎이 여러 장이 겹겹이 포개져 공처럼 결구 구조를 가진 결구상추는 일반적으로 진공 예냉 기술을 처리한다. 진공 예냉 기술은 진공 상태에서 식품 내 수분 일부를 끓여 빠르게 증발하는 예냉 기술이다[15]. 결구 상추의 치밀한 결구 구조는 내부까지 공기나 수분 전달이 어려워 예냉 효과가 떨어진다. 하지만 진공 예냉 기술은 공기를 전달하는 것이 아닌 수분이 증발하여 냉각하는 것으로 내부까지 동시에 냉각할 수 있다. 또 30분 이내의 짧은 시간에 상추의 품온을 4℃ 이내로 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라 표층 부위의 수분이 증발되면서 조직이 단단해지기 때문에 품질 유지에 효과적이다[16]. 반면, 잎이 얇고 표면적이 넓게 펼쳐진 형태인 잎상추는 수냉식 예냉 기술을 처리한다. 수냉식 예냉 기술은 증발기 코일에서 나오는 냉수가 상추 표면과 직접 접촉하여 상추의 온도가 내려간다[17]. 잎상추는 잎이 얇고 펼쳐서 있어 수냉 시 잎 전체가 단시간에 냉각이 가능하고 침지 방식으로 부패 위험이 낮다. 또 진공 예냉 기술에 비해 상추의 질량 감소가 없고 상추 전체에 더 빠르고 균일하게 냉각된다[18,19]. 이처럼 상추는 수확 직후 예냉처리를 하고 저온 및 고습도 환경에서 상추의 품온을 낮춘 상태에서 호흡과 기체의 교환을 조절하는 MA · CA 저장 기법이 다음 중요한 저장 기술로 활용된다.

4. 포장재를 활용한 Modified Atmosphere(MA) 포장 기법

MA 포장 기법은 포장 필름의 특성을 이용해 대기 환경을 조성하여 품질을 유지하는 기술이다. 필름 포장 내부에 상추를 넣고, 필름의 기체 투과성과 상추의 호흡을 이용하여 높은 습도 환경에서 낮은 산소(O_2) 농도와 높은 이산화탄소(CO_2) 농도를 유지하는 기술이다[20]. 상추의 호흡률을 낮추고 복합 기질의 효소적 분해를 지연시켜 유통기한을 연장할 수 있다[21]. 또한 이산화탄소(CO_2)의 비선택적 항균 효과로 인해 부패균의 증식을 억제한다[22]. MA 포장은 수동적인 공정과 능동적 공정으로 처리되는데, 수동적 MA는 농산물의 호흡 과정과 포장재의 투과성을 이용하여 시간이 지남에 따라 원하는 기체 조성으로 만들며 포장재 내부에 생성된다[22,24]. 반면, 능동적 MA는 기체를 신속하게 교체 또는 치환하거나, 기체 제거제 또는 흡수제를 사용하여 포장재 내부에 식품에 맞는 기체 조성의 혼합물 형성하는 공정이다[22,23,24]. 이는 산소, 이산화탄소 및 에틸렌 제거제와 같은 활성 물질을 첨가한다. 신선 농산물들은 대부분 가스 확산이 제한된 투과성 포장 필름을 사용한다. 포장 필름은 산소 투과율(Oxygen Transmission Rate, OTR)에 따라 상추 포장 내부의 가스를 조절하는 핵심 요소이다. 각 필름의 OTR은 필름의 분자 구조와 두께에 의해 결정되며 이는 포장 내부의 산소와 이산화탄소의 농도를 조절하는데 영향을 미친다. 필름 종류에는 폴리염화비닐(Polyvinyl Chloride, PVC), 폴리프로필렌(Polypropylene, PP), 폴리스티렌(Polystyrene), 저밀도 폴리에틸렌(Low-Density Polyethylene, LDPE) 등이 있다[25]. 이 중 폴리염화비닐(PVC)은 상업적으로 가장 널리 사용되는 필름중 하나이다[26]. 반면, 폴리프로필렌(PP)은 OTR이 약 1,981cc/m2/day로 높은 투과성을 띠는데, 포장 내 산소 농도를 조절하지 못하므로 상추의 호흡률이 효과적으로 억제되지 않는다. 더불어 활성탄(Activated Carbon), 칼륨 과망간산염($KMnO_4$), 등의 에틸렌 흡착 물질을 포장 내에 주입하면 상추가 생성하는 에틸렌을 제거하여 갈변, 노화, 생리적 장해 발생을 현저히 억제함으로써 저장기간을 연장시킬 수 있다. 따라서 MA 포장은 필름의 OTR과 에틸렌 흡착제 등 활성 물질을 적절히 조합하여 포장 내 대기환경을 미세하게 제어함으로써, 상추의 호흡과 노화를 지연시키고 저장 중 품질 저하를 최소화하는 핵심 포장 기술로 활용될 수 있다.

5. Controlled Atmosphere(CA) 저장 기술

CA 저장은 저온 환경에서 과일이나 채소의 신선도를 유지하기 위해 일반적인 대기 농도를 조절하여 호흡작용을 억제하는 저장 기술이다. 대기는 일반적으로 질소(N_2) 78%, 산소(O_2) 21%, 이산화탄소(CO_2) 0.03% 및 기타 미량의 비활성 기체로 구성되어 있다[25]. CA 저장의 첫 번째 요건은 농산물을 최대한 밀폐하여 외부 공기 유입을 최소화하는 것이고 두 번째 요건은 산소(O_2)와 이산화탄소(CO_2) 농도를 원하는 수준으로 유지하는 것이다[25]. 이는 산소(O_2) 농도를 낮추고 이산화탄소(CO_2) 농도를 높여 면밀하게 모니터링하고 제어한다. 일반적으로 산소(O_2)와 이산화탄소(CO_2) 농도를 각각 약 1-5% 수준을 유지하는 것이 권장되며, 이러한 조건에서 최대 10개월까지 장기 저장이 가능한 것으로 보고된다[27]. 한 연구에서는 CA 저장 조건이 과일 부패율을 줄일 뿐만 아니라 토마토에서 LsACS2, LeACS4과 같은 에틸렌 관련 유전자의 발현을 증가시키며 저온 손상의 영향을 감소시키고 결과적으로 저장기간을 연장할 수 있음을 보고하였다[28]. 이와 같이 대부분의 연구에서는 저온 저장 중 산소(O_2) 농도를 감소시키고 이산화탄소(CO_2) 농도를 증가시키면 수확 후 과일과 채소의 저온 손상을 줄이고 품질 유지에 효과적이라는 점을 제시했다[29]. 그러나 CA 저장으로는 수분 손실, 갈변 현상이나 미생물 오염을 완전히 억제하기 어려워 최근에는 천연 항균물질을 활용한 식용 코팅 기술이나 자외선, 열처리와 같은 비화학적 처리 기술을 병행하여 저장 중 품질과 안전성 향상을 위한 노력이 이루어지고 있다.

6. 물리적 처리 기술

6.1. 천연 항균 물질(Natural Compounds) 코팅 기술

상추 표면에 천연 항균 물질을 코팅하는 기술은 미생물 증식과 효소적 갈변을 억제하여 저장성을 향상시키는 방법이다. 천연 항균 물질에는 키토산, 식물 정유, 폴리 사카라이드 등이 있다[30]. 이는 상추 표면의 수분이 이동하는 것을 부분적으로 차단하여 저장 중 수분 손실을 줄이고, 가스 차단막을 형성하여 제품 주변에 변형된 대기 환경을 조성한다[31]. 이에 따라 호흡과 노화를 늦추고 색상과 질감을 유지한다[31]. 또한 천연 향 형성에 기여하는 휘발성 화합물을 유지하고 이취를 억제하며, 신선 농산물의 구조를 유지하고 물리적 손상으로부터 보호한다[31]. 폴리 사카라이드(알긴산, 키토산) 를 코팅한 연구에서 신선편이 상추는 폴리페놀 산화 효소(PPO)와 페닐알라닌 암모니아 분해효소(PAL) 활성, 지질 과산화 지표(Malondialdehyde, MDA)가 유의적으로 낮게 나왔다[30]. 총 폴리페놀 함량과 항산화 효소 활성이 높게 유지되어 갈변 현상과 노화가 억제하였다[30]. 더불어 키토산 및 폴리 사카라이드 코팅 기술은 저장 중 상추의 색, 외관, 조직감, 기호도와 같은 관능적 평가에서도 우수한 것으로 보고되었으며 이는 상품성 측면에서도 천연 항균 코팅 기술의 실용 가능성을 뒷받침한다[30,31].

6.2. 비화학적 처리 기술

자외선(UV) 조사와 열처리와 같은 비화학적 처리 기술은 잔류 농약이나 합성 보존제 없이 상추의 품질과 안전성을 향상하는 친환경 수확 후 관리 방법이다. 수확 후 자외선(UV) 조사는 숙성 및 노화를 지연시키고, 부패를 줄이며, 심지어 품질을 향상시키는 데 효과적이다[32]. 한 연구에서는 UV-C 254nm 파장 범위에서 신선편이 상추의 미생물 부하를 효과적으로 감소시켰고 조직 손상이나 관능적 품질 저하 없이 저장 수명을 3일 연장할 수 있었다[33]. 반면 UV-C 선량이 높아질수록 호흡률이 유의적으로 증가한 것을 확인하여 장기 저장 시 품질이 저하될 우려가 있었다. 따라서 UV-C 조사 시 에는 미생물 제어 효과와 호흡률 증가 위험의 사이 균형을 고려하여 선량과 저장 조건을 최적화할 필요가 있다[33]. 또 상추를 50℃에서 60초 열처리하면 페닐알라닌 암모니아 분해효소(PAL), 과산화효소(Peroxidase, POD)의 상처를 유도하고 신선편이 아이스버그 상추의 갈변현상을 최소 7일 동안 억제할 수 있다고 밝혔다[34]. 이처럼 자외선(UV) 조사와 열처리와 같은 비화학적 처리 기술은 적절한 조건에서 적용할 경우, 화학적 처리 기술을 대체하여 상추의 저장 중 품질과 안전성을 동시에 확보할 수 있는 유망한 수확 후 관리 기술로 평가된다.

7. 상추 저장 기술 연구의 과제와 향후 연구 방향

7.1. 상추 저장 기술의 종합적 비교

상추 저장 기술은 두가지 이상 적용하여 단독 처리의 한계를 보완하고 상추의 품질과 안전성을 보장하는 통합 시스템으로 발전해 왔다. 가장 기본적인 저온 및 고습도 환경 관리로 시작하여 예냉, MA · CA, 물리적 처리 등 기술들을 복합적으로 결합하여 시너지 효과를 기대하는 방향으로 발전하였다. 초기에는 저온 및 고습도 환경과 예냉처리에서 호흡과 수분 손실, 미생물 증식을 억제하는 것이 핵심이었으나, 이후 필름의 가스 투과성을 이용한 MA 포장과 CA 저장이 도입되면서 호흡과 에틸렌 대사를 조절하여 저장기간을 연장하였다. 그러나 단독으로 처리할 시 갈변, 수분 손실, 미생물 오염을 동시에 완전히 제어하기에는 어려움이 있다. 최근에는 키토산, 폴리 사카라이드, 식물 정유 기반 식용 코팅과 UV-C, 열처리 등 비화학적 처리 기술을 MA · CA와 병행하여 갈변현상 억제, 항산화 활성 유지 등 서로 보완적으로 작용하는 다중 장벽(hurdle) 기술로 발전하고 있다. 그러나 이러한 기술들은 이론적으로는 상추의 품질 유지에 효과적이지만, 현장에서는 기대하는 효과를 보이지 못한다. 이는 기술 원리의 한계가 아니라 기술을 지탱하는 기반 시스템의 구조에 문제가 있다.

Table 1. Summary of Major Storage Technologies

저장 기술 범주	대표 저장 기술	주요 목적
기본 저장 기술	저온 · 고습 저장, 예냉 처리	호흡 · 수분 손실 · 미생물 증식 억제
대기 조성 제어 기술	MA 포장, CA 저장	O_2 · CO_2 농도 조절로 호흡 · 에틸렌 대사 제어
표면/장벽 처리 기술	식용 코팅(키토산, 폴리 사카라이드, 식물 정유)	미생물 성장 · 갈변 억제, 수분 손실 감소
비화학적 처리 기술	UV-C, 단시간 열처리 등	미생물 제어, 효소적 갈변 · 저온장해 완화

7.2. 상추의 저장 기술 연구의 한계점

상추 저장 기술은 기술 원리 자체가 아니라 품종, 모니터링, 포장재, 품질 저하 경로 추적의 구조적 문제가 있다. 상추 저장 기술의 가장 큰 문제점은 품종이 분류되어 있지 않다. 현재까지 저장 기술의 연구 대상은 아이스버그, 양상추 등 특정 품종에 한정되어 있고 저온에 대한 저항성이 높거나 에틸렌 민감성이 낮은 신규 품종의 연구는 부족하다. 이는 저장 기술을 선택할 때 품종 선택의 자유를 제한하고 특정 지역이나 기후에 적합한 상추 품종 개발을 저해한다.

둘째, 실시간으로 상추의 호흡률 변화, 포장 내 가스 조성 등을 추적 · 관리할 수 있는 IoT 센서 시스템이 부족하다. 현재 MA 포장과 냉장 저장 시설은 온도, 습도, 대기 농도에 의존한다. 이에 따라 예상치 못한 상황에 즉각적인 대응이 불가능하고 예상외의 품질 저하 문제가 계속 발생할 수 있다.

셋째, MA 포장 기법에 활용되는 친환경 포장 필름 개발이 부족하다. 현재 사용되는 MA 포장 필름은 대부분 석유로 된 플라스틱(PE, PP, PVC)으로 환경 오염과 자원 낭비 문제가 일어난다. 이러한 석유 기반 플라스틱을 대체할 나노 복합 필름과 같은 생분해성 포장 필름의 연구가 필요하다.

넷째, 상추의 품질 저하 경로를 추적하는 것이 어렵다. 상추의 수확 후 손실 과정은 눈에 보이는 데이터나 숫자에 의존하며 생산, 수확부터 저장, 유통, 소비에 이르기까지 전 과정에서 온도, 습도, 대기 조성 등 실시간으로 측정하는 데이터가 부족하다. 이로 인해 품질 저하가 어느 과정에서 발생했는지, 그 원인이 무엇인지 추적이 어려워 해결 방안을 마련하기 어려운 상황이다.

7.3. 상추의 저장 기술의 향후 연구 방향

상추의 저장 기술의 한계점을 극복하기 위해서는 단순히 저장 기술 개발을 넘어 품종 개발, 스마트 모니터링, 친환경 포장, 공급망 추적성 확보라는 네 가지의 전략으로 연구가 추진되어야 한다.

첫째, 품종 미분화 문제를 해결하기 위해 유전체 기술(Genomics)을 이용하여 신규 품종을 개발해야 한다. 에틸렌 수용체 유전자의 민감성을 저하하는 품종이나 에틸렌 합성 효소의 유전자 기능을 억제하는 품종을 개발한다. 상추의 저장 기술 연구 대상에 신규 품종을 적용하여 연구가 진행하면 에틸렌의 생성을 감소시켜 유통 기한을 연장할 수 있을 것으로 기대된다.

둘째, 실시간으로 상추의 저장 환경을 추적 · 관리할 수 있도록 IoT 센서와 인공지능(AI) 기반 기술을 통합하여 시스템을 구축한다. 이는 온도, 습도, 포장 내 대기 조성을 실시간으로 모니터링하고 자동으로 저장 환경 조건을 저장하여 관리할 수 있다.

셋째, MA 포장 기술을 처리할 때 생분해 및 기능성 포장 필름 개발이 이루어져야 한다. 석유 기반 플라스틱 포장 필름 대신 키토산 코팅 필름, 나노복합 필름 등 친환경 포장 필름을 활용하여 OTR을 미세하게 조절하는 기술도 추가로 필요하다.

넷째, 상추 품질에 문제가 생겼을 때 블록체인 기술을 활용하여 문제 경로를 추적해야 한다. 이는 생산부터 소비

Table 2. Future Research Directions and Key Strategies

전략	내용	기대 효과
품종 개발	에틸렌 수용체 · 합성 관련 유전자를 조절한 저에틸렌 · 저온 내성 신규 품종 개발	에틸렌 생성 · 민감도 감소로 저장 기간 및 유통 안정성 향상
스마트 모니터링	IoT 센서 · AI를 활용한 온도 · 습도 · 가스 조성 실시간 모니터링 시스템 구축	이상 징후 조기 감지, 맞춤형 저장 조건 유지, 예기치 못한 품질 저하 감소
친환경 · 기능성 포장	생분해성 · 나노복합 필름, 기능성 코팅 필름을 활용한 MA 포장	환경 부담 감소와 동시에 OTR · 수분 투과도 정밀 제어로 품질 유지
공급망 추적성	블록체인 기반 이력 추적 시스템으로 생산 · 저장 · 유통 · 소비 전 과정 기록	품질 문제 발생 시 원인 구간을 신속히 추적 · 대응, 데이터 기반 저장 기술 개선에 활용

과정까지의 상추 이동 경로, 저장 환경 조건, 품질 변화를 기록할 수 있는 시스템을 제공한다. 더불어 기록된 데이터들은 향후 저장 기술을 연구할 때 근거자료로 사용할 수 있다.

이처럼 유기적으로 네 가지 전략을 통합하여 상추의 품질과 저장성 향상을 넘어 식량 안보 문제를 해결하고 이를 통해 상추뿐만 아니라 신선 엽채류의 지속 가능한 저장 및 유통 시스템을 구축해야 한다.

참고 문헌

1. Twum-Dei, B., Lutterodt, H., Annan, R. A., & Aduku, L. N. E. (2025). Study protocol: post-harvest losses of fruits and vegetables and their relationship with the nutritional status of women and children. Frontiers in Public Health, 13, 1654786.

2. Steensma, P., Shapiguzov, A., Annala, L., Vainonen, J. P., Mikkonen, K. S., & Kangasjärvi, S. (2025). Postharvest Dynamics of Photosynthesis in FreshCut Lettuce. Physiologia Plantarum, 177(4), e70433.

3. Shi, M., Gu, J., Wu, H., Rauf, A., Emran, T. B., Khan, Z.& Suleria, H. A. (2022). Phytochemicals, nutrition, metabolism, bioavailability, and health benefits in lettuce—A comprehensive review. Antioxidants, 11(6), 1158.

4. Yan, S., Yang, T., & Luo, Y. (2015). The mechanism of ethanol treatment on inhibiting lettuce enzymatic browning and microbial growth. LWT-Food Science and Technology, 63(1), 383-390.

5. Zhang, L., Wang, Z., Zeng, S., Yuan, S., Yue, X., Tian, T., ... & Wang, Q. (2023). Browning mechanism in stems of fresh-cut lettuce. Food Chemistry, 405, 134575.

6. Woltering, E. J., & Paillart, M. J. M. (2021). Effect of low oxygen modified-and controlled-atmospheres on quality attributes and microbial population dynamics in fresh-cut iceberg lettuce. In XIII International Controlled and Modified Atmosphere Research Conference-CAMA2021 1386 (pp. 169-174).

7. Fan, S., Chen, X. (2014). Present aspects and prospect of post-harvest processing and preservation of China leafy vegetables. Journal of Food Science and Technology, 32(5), 1-5.

8. Saltveit, M. E. (2004). Effect of 1-methylcyclopropene on phenylpropanoid metabolism, the accumulation of phenolic compounds, and browning of whole and fresh-cut 'iceberg' lettuce. Postharvest Biology and Technology, 34(1), 75-80.

9. Acedo Jr, A. L. (2010). Postharvest technology for leafy vegetables: AVRDC-ADB postharvest projects-RETA 6208/6376 (No. AVRDC Staff Publication). AVRDC-The World Vegetable Center.

10. University of California, Davis. (2024). Lettuce (romaine and loose-leaf): Produce facts. UC Postharvest Technology Center.

11. Tian, W., Lv, Y., Cao, J., & Jiang, W. (2014). Retention of iceberg lettuce quality by low temperature storage and postharvest application of 1-methylcyclopropene or gibberellic acid. Journal of food science and technology, 51(5), 943-949.

12. Agüero, M. V., Ponce, A. G., Moreira, M. R., & Roura, S. I. (2011). Lettuce quality loss under conditions that favor the wilting phenomenon. Postharvest Biology and Technology, 59(2), 124-131.

13. Subedi, S., Kattel, D., & Thokar, N. (2022). A Review on Post-Harvest Precooling Methods of Fruits and Vegetables. Food Agri. Econ. Rev, 2, 96-99.

14. Alabi, K. P., Oladipupo, R. A., Obateru, F. T., & Musbaudeen, A. (2021). Novel pre-cooling techniques and their effect on the quality of cooled fruits and vegetables. Journal of Agricultural Engineering and Technology (JAET), 26(1).

15. Zheng, L., & Sun, D. W. (2004). Vacuum cooling for the food industry—a review of recent research advances. Trends in Food Science & Technology, 15(12), 555-568.

16. In, B. C., & Kim, J. G. (2008). Effect of precooling and harvesting at different times on respiration, browning and microbial growth of fresh-cut iceberg lettuce. Korean Journal of Horticultural Science and Technology, 26(3).

17. Vigneault, C., Goyette, B., Gariépy, Y., Cortbaoui, P., Charles, M. T., & Raghavan, V. G. (2007). Effect of ear orientations on hydrocooling performance and quality of sweet corn. Postharvest Biology and Technology, 43(3), 351-357.

18. Thompson, A. K. (2008). Fruit and vegetables: harvesting, handling and storage. John Wiley & Sons.

19. Golob, P., Farell, G., & Orchard, J. E. (2002). Postharvest science and technology, principles and practices: Blackwell Sciences.

20. Park, S.-B., Lee, A.-Y., Choi, D.-S., Kim, Y.-H., Park, C.-W., & Kim, J.-S. (2024). Kimchi cabbage storage with pallet unit modified atmosphere package using gas concentration control device. Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 25(12), 1-13.

21. Kader, A. A. (1986). Biochemical and physiological basis for effects of controlled and modified atmospheres on fruit and vegetables. Food Technology, 40, 99-104.

22. Farber, J. N., Harris, L. J., Parish, M. E., Beuchat, L. R., Suslow, T. V., Gorney, J. R., ... & Busta, F. F. (2003). Microbiological safety of controlled and modified atmosphere packaging of fresh and fresh-cut produce. Comprehensive reviews in food science and food safety, 2, 142-160.

23. Kader, A. A., & Watkins, C. B. (2000). Modified atmosphere packaging—toward 2000 and beyond. HortTechnology, 10(3), 483-486.

24. Charles, F., Sanchez, J., & Gontard, N. (2003). Active modified atmosphere packaging of fresh fruits and vegetables: modeling with tomatoes and oxygen absorber. Journal of Food Science, 68(5), 1736-1742.

25. Singla, R., Kaur, B., & Goel, R. (2022). Controlled atmosphere and modified atmosphere storage for horticulture commodities: A review. Pharma Innov. J, 1581-1589.

26. Robertson, G.L., 1993. Food Packaging. Marcel Dekker, New York.

27. National Horticulture Board. (2010). Technical standard for controlled atmosphere cold stores storage for fruits and vegetables (NHB-CS-Type 03-2010). Department of Agriculture & Cooperation, Ministry of Agriculture, Government of India.

28. ark, M.-H., Sangwanangkul, P., and Choi, J.-W. (2018). Reduced chilling injury and

delayed fruit ripening in tomatoes with modified atmosphere and humidity packaging. Scientia Hortic. 231, 66-72.

29. Yuan, Q., Jiang, Y., Yang, Q., Li, W., Gan, G., Cai, L., ... & Wang, Y. (2024). Mechanisms and control measures of low temperature storage-induced chilling injury to solanaceous vegetables and fruits. Frontiers in Plant Science, 15, 1488666.

30. Li, L., Yi, P., Li, C., Xin, M., Sun, J., He, X., ... & Tang, Y. (2021). Influence of polysaccharide-based edible coatings on enzymatic browning and oxidative senescence of fresh-cut lettuce. Food Science & Nutrition, 9(2), 888-899.

31. Mahajan, P. V., Caleb, O. J., Singh, Z., Watkins, C. B., & Geyer, M. (2014). Postharvest treatments of fresh produce. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 372(2017).

32. Sonntag, F., Liu, H., & Neugart, S. (2023). Nutritional and physiological effects of postharvest UV radiation on vegetables: A review. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 71(26), 9951-9972.

33. Allende, A., & Artés, F. (2003). UV-C radiation as a novel technique for keeping quality of fresh processed 'Lollo Rosso'lettuce. Food Research International, 36(7), 739-746.

34. Vanden Abeele, C., Raes, K., & Sampers, I. (2019). Effect of mild heat treatment on browning-related parameters in fresh-cut Iceberg lettuce. Journal of Food Biochemistry, 43(7), e12906.0000