Fresh Cut 양파, 편리함 뒤에 숨겨진 사각지대

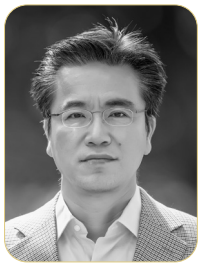
Fresh Cut Onions: The Blind Spot Hidden Behind Convenience

함제연, 방우석*

Ham, Jei-Youn, 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

신선편의식품 시장은 1인 가구 증가와 맞벌이 부부 확산 등 생활패턴 변화에 따라 빠르게 성장하였으며, 시간 절약과 편의성을 중시하는 소비 성향이 밀키트, 샐러드, 손질 채소 등 간편 제품 수요 증가로 이어졌다[1]. 특히 초고령화 사회 진입과 함께 건강에 대한 관심이 높아지면서, 신선함과 품질을 유지하면서도 간편하게 조리할 수 있는 신선편의식품에 대한 선호가 중요한 성장 요인으로 작용하고 있다[1]. 온라인 플랫폼 활성화와 유통 기술 발전은 소비자가 신선한 제품을 보다 쉽게 구매할 수 있는 환경을 조성하며 시장 확대를 가속화하였다[2]. 이에 따라 간편식과 과실 · 채소 가공 및 저장 유통업의 규모가 지속적으로 증가하고 있으며, 간편식 구매 지출액과 관련 산업 종사자 수 및 사업체 수 모두 유의미한 증가를 보이고 있다[3-5]. 또한 세계 식품시장은 지속적인 성장세를 유지할 것으로 전망된다[6].

Fresh-cut 기술은 수확 후 과일과 채소를 최소한으로 가공하여 편의성을 제공하면서도 신선한 상태를 유지하는 기술로, 고온 처리나 화학 방부제를 사용하지 않고 자연 상태에 가깝게 유지하는 것을 목표로 한다[7,8]. 이 기술은 주로 조리용 채소류, 서류, 버섯류에 적용되며, 절단, 세척, 껍질 제거 등의 물리적 변형을 거친 후 저온 냉장과 조절 대기 환경에서 저장 · 유통된다[9]. Fresh-cut 가공 공정은 원물 수령부터 절단, 세척 · 소독, 포장 및 냉장 유통까지의 단계로 구성되며, 이 중 절단과 세척 · 소독 공정은 미생물 안전성 측면에서 가장 중요한 관리 지점으로 인식된다[10]. 특히 절단 공정은 식품 접촉 표면과의 접촉으로 인해 교차 오염 위험이 높

으며, 조직 손상을 유발하여 세포 내 영양 성분을 노출시킨다[13]. 이로 인해 미생물 증식에 유리한 환경을 형성오염된 칼날이나 기계 표면을 통해 병원성 미생물이 저온 조건에서도 신선 채소로 전이 · 생존할 수 있다[11,12]. 또한 세척 · 소독 공정은 이러한 교차 오염을 제어하는 핵심 단계로, 활성염소 농도와 유기물 부하가 소독 효율에 결정적 영향을 미친다[15]. 부적절한 세척수 관리는 병원성 미생물의 확산을 초래할 수 있으며, 이에 따라 FDA는 표준 운영절차 수립과 식품 접촉 표면의 체계적 세척 · 소독을 권고하고 있다[16,17].

Fresh-Cut 기술 적용의 주요 대상으로는 양파(*Allium cepa L.*)가 있으며, 전 세계적으로 높은 소비량과 생산량을 보이는 대표적 채소이다[18]. 중국을 포함한 주요 생산국을 중심으로 생산량이 지속적으로 증가하고 있으며, 연중 안정적인 공급과 편의성 있는 제품 형태에 대한 수요가 확대되고 있다[18,19]. 그러나 절단 과정에서 발생하는 눈 자극과 냄새 문제, 저장성 한계 등은 소비자 불편을 초래하여 Fresh-cut 기술 적용의 필요성을 더욱 부각시키고 있다[20]. Fresh-cut 양파는 절단 후 저장 수명 단축과 관능적 품질 저하가 빠르게 나타나며, 변색, 미생물 증식, 조직 연화 및 이취 발생이 동시에 진행된다[21]. 특히 효소적 갈변에 의한 변색과 미생물 증식은 상품성과 안전성을 제한하는 주요 요인으로 작용한다[22,23]. Fresh-cut 과정에서 천연 보호막이 제거되고 내부 영양 성분과 산소 노출이 증가함에 따라 미생물 성장이 촉진되며, 퀘르세틴을 포함한 플라보노이드와 항산화 성분의 손실 또한 가속화된다[24,25].

이러한 저장성 저하, 품질 열화, 기능성 성분 감소 및 안전성 문제를 해결하기 위한 효과적인 제어 기술의 필요성이 지속적으로 제기되고 있으며 해당 기술들의 정보를 제공하고 복합적 대책을 구하는데 본 리뷰의 목적이 있다.

본론

1. Fresh-Cut 양파 품질 평가

1.1 Fresh-Cut 양파 품질 지표 설정

Fresh-Cut 농산물의 품질평가는 관능평가와 물리화학적 지표를 통합적으로 적용해야 한다. 이는 소비자의 수용성, 시장 경쟁력, 식품안전성을 동시에 확보하며 제품의 유통기한 결정 및 저장 조건 최적화의 핵심 기초가 된다[26]. 소비자들은 Fresh-Cut 양파 제품을 구매할 때 외관(appearance), 신선도(freshness), 영양가(nutritional value) 순서로 중요도를 두며, 특히 제품의 색상과 외형은 소비자의 초기 구매 의향을 결정하는 가장 중요한 내재적 속성(intrinsic attribute)이다. 관능평가는 9점 헤도닉 지수(hedonic scale)을 사용하여 소비자들의 외관, 풍미, 맛, 질감 등 전반적인 수용성(overall acceptability)을 정량화 하며, 일반적으로 100명 이상의 훈련되지 않은 소비자들을 대상으로 실시되어 실제 시장의 일반 소비자층을 대표한다[26,27]. 물리화학적 지표는 저장 중 품질 저하의 객관적 지표로 활용된다. 그 지표에는 색상, 경도, 수분 함량, 가용성 고형분, pH를 포함한다. 색상은 색체계(colorimeter)를 이용하여 Hunter의 L*, a*, b* 척도로 측정되며, 저장 기간과 온도에 따른 색상 변화(ΔE)는 비효소적 갈변과 엽록소 분해의 객관적 지표가 된다[28]. 경도(식감)는 Fresh-Cut 농산물의 품질을 정의하는 네 가지 주요 요소(외관, 풍미, 영양가, 식감) 중 하나로, 수확 후 저장 온도에 크게 영향을 받는다. 텍스처 분석기(Texture analyzer)를 통해 측정되며, 견고성(firmness), 응집성(cohesiveness), 복원력(resilience) 등의 상수로 정의된다[29]. 가용성 고형분(total soluble solids, TSS)은 휴대용 굴절계(portable refractometer)를 이용하여 °Brix로 측정된다. 해당 °Brix는 세포액에 용해된 당류, 유기산, 비타민 및 기타 물질의 총 농도를 나타내는데 저장 중 탄수화물 소비와 Fresh-Cut 양파의 대사 변화를 추적하는 중요한 지표이다[30]. 수소이온농도(pH)는 Fresh-

Cut 양파에서 미생물 증식 환경과 효소 활성도를 결정하는 중요한 매개변수로, 저장 중 유기산의 산화와 호흡 대사에 의해 변화한다.

Fresh-Cut 양파의 품질 변화를 예측하기 위해 온도에 따른 품질 속성의 변화를 수학적으로 표현한다. 이는 아레니우스 방정식으로 온도 의존성 반응의 속도 상수(K)를 계산하는 데 널리 사용된다.[31] 계산식은 $\ln k = \ln k_0 - Ea/RT$ 형태로 활성화 에너지(activation energy, Ea)는 품질 지표 별로 다양한 값을 나타낸다. 일반적으로 탄수화물 손실이 가장 높은 Ea를 보이고, 색상 변화나 관능평가 결과는 상대적으로 낮은 Ea를 보인다[32]. 관능평가 결과와 물리화학적 지표 간의 상관관계 분석을 통해 수용 가능한 한계값(acceptable limits)을 설정하는 것이 중요하다[33].

1.2. Fresh-Cut 양파 미생물 검사법

Fresh-Cut 양파의 미생물 품질을 보증하려면 일반세균, 대장균군, 병원성 미생물을 정확하게 검출하고 정량화 해야 된다. 이는 표준화된 배양법과 첨단 분자생물학적 방법이 있으며, 제품의 안전성 확보와 유통 관리의 필수 요소이다[35]. 표준화된 방법으로 일반세균의 검출은 국제표준(ISO 4833)에 따라 표준 한천배지(plate count agar, PCA)를 사용하여 30°C에서 48시간 배양 후 집락 수를 계산하는 방법으로 수행되며, Fresh-Cut 양파의 호기성 중온세균은 일반적으로 6.4 log CFU/g 수준을 나타낸다[36]. 대장균군(coliforms)은 violet red bile agar(VRBA)를 사용하여 35°C에서24시간 배양하고 0.5 mm 이상의 적색 집락을 계수하는 방법으로 검출된다[36]. *Listeria monocytogenes*의 검출은 University of Vermont(UVM) 선택 농축액을 1차 농축으로 사용한 후 선택 배지(PALCAM 또는 OXFORD 배지)에 배양하는 2단계 분리법으로 수행되며, 이 방법은 식품 25 g당 1개의 *Listeria* 세포를 검출할 수 있는 감도를 갖추고 있다.[37] Fresh-Cut 양파에 오염된 880 *Salmonella*의 검출은 테트라티오네이트(tetrathionate) 선택 배지와 XLD(xylose lysine deoxycholate) 배지를 사용한 선택 배양법으로 수행되며, *Salmonella*는 Fresh-Cut 양파에서 낮은 빈도로 검출되지만 온도 관리 부실 시 빠르게 증식할 수 있다[38].

다음으로 표준화된 배양법과는 다른 분자생물학적 방법이 있다. 첫 번째로 신속 검사법에 속하는 propidium monoazide(PMA) 기반의 quantative PCR(q-PCR) 있다.[39] 표준화된 배양법과는 다르게 빠른 결과 도출이 가능하다는 장점이 있다. PMA-qPCR은 사멸한 세포의 DNA를 배제하고 생존 가능한 세포(viable cells)만 선택적으로 증폭하여 정량화하므로, Fresh-Cut 양파 샘플에서 *Salmonella*, *Listeria monocytogenes*, *E.coli* O157:H7을 동시에 검출할 수 있으며 4시간 내에 결과를 도출 할 수 있다[39]. 두번째로 색상 변화 기반의 색소성 효소기질 배지(chromogenic enzyme media, CCA)를 사용 하는 방법이다. *E.coli*와 대장균군을 동시에 구별하여 검출하는 대안적 방법으로, 기존 VRBA배지와 비교하여 손상된 대장균(injured coliforms)에 대한 검출 효율이 높다[36].

1.3. Fresh-Cut 양파 포장기술

1.3.1. 진공 스킨 포장(Vacuum Skin Packaging, VSP)

진공 스킨 포장(VSP)은 고배리어 필름과 트레이를 결합하여 제품 주변 공기를 거의 완전히 제거하는 포장 기술이다. 이는 Fresh-Cut 양파의 미생물 오염을 최소화하고, 산화로 인한 품질 저하를 억제한다[40]. VSP기술의 원리는 고배리어 필름을 열로 연화시켜 산화 환경을 거의 0%까지 낮추고, 진공 상태에서 필름이 식품을 완벽하게 감싸는 것을 기반으로 한다[41]. 기존의 상단 밀봉 포장과 달리 내부의 공기가 거의 없어 미생물 증식 가능성이 현저히 감소하며, 물리적 손상 위험이 저감되는 특징을 보인다[42,43]. 또한 Fresh-Cut 양파의 기능성 성분 보존 측면에서 VSP는 산화 반응의 주요 원인인 산소 노출을 완전히 차단하여, 비타민C와 A의 손실을 방지하고 색상 및 향미를 장기간 보존한다[44]. 반면, 단점으로는 재료의 비용

및 특수 장비의 초기 투자 비용이 크고, 열에 민감한 양파 세포 조직이 포장 과정 중 고온에 노출될 수 있다[45,46]. 뿐만 아니라, 무산소 환경에 장기 보관 시 산화환원 전위(oxidation-reduction potential) 변화로 인한 혐기성 미생물 증식 위험을 초래할 수 있다[47]. 포장 과정에서 발생하는 고온은 포장 전 양파를 저온에서 사전 냉각하여 열 손상을 최소화하며, 포장 후 즉시 저온으로 이동시키는 것이 중요하다[48].

1.3.2. 가스치환포장(Modified Atmosphere Packaging, MAP)

가스치환포장(MAP)은 Fresh-Cut 양파의 호흡을 조절하고, 미생물 증식을 억제하는 포장기술이다. 이는 산소, 이산화탄소, 질소의 최적 혼합 비율을 통해 평형 대기 조성을 형성하여, 제품의 신선도 유지 기간을 연장시킨다[49]. 해당 기술 중 수동형MAP (passive MAP)은 Fresh-Cut 양파의 호흡에 발생하는 가스로 조성이 변화하는 원리를 이용하며, 포장재의 기체 투과성이 제품의 호흡률과 정확히 일치할 때 평형 상태에 도달하여 최적의 저장 환경을 유지한다[50]. 이러한 평형 대기 조성이 형성되면 양파의 호흡률과 포장재의 산소 투과율(oxygen transmission rate, OTR)이 상호작용 하여, 이산화탄소가 축적되어 미생물 억제 환경이 형성된다[51]. 이에 따른 자동 조절 메커니즘은 추가적인 기술 개입 없이 작동하기 때문에 경제성이 우수하며, Fresh-Cut 양파의 신선도 유지에 효과적이다. Fresh-Cut 양파는 최적 기체 조성비(산소(O_2) 2-4%, 이산화탄소(CO_2) 8-12%, 질소(N_2) 84-90%)에서 호흡률이 감소하고, 에틴렌 생성이 억제되어 노화 증상이 최소화된다[52]. 포장재 기체 투과성의 정확한 설계는 필름의 두께, 천공 크기, 총교환면적, 등가반경(equivalent radius)을 변수로 하는 Fick의 확산 법칙에 기반하여 계산되며, 이러한 과학적 설계를 통해 각 제품에 최적화된 포장재를 제작할 수 있다[53].

1.3.3. 혁신적 포장 기술

혁신적인 포장 기술은 친환경 소재, 스마트 기능, 식품의 품질 변화에 대한 정보를 실시간으로 제공하는 기술들을 의미한다. 이러한 기술들은 VSP와 MAP 같은 기존 포장 방식과 달리, 포장 내부에 특정 물질을 첨가하거나 센서를 내장하여 정교하게 관리하고 보다 신뢰성 있는 정보를 전달한다. 혁신적 포장 기술은 활성 포장(active packaing), 지능형 포장(smart packaging), 식용 코팅(edible coating) 등 크게 세 가지 범주로 분류된다.

1.3.3.1. 활성 포장(Active Packaging)

활성 포장은 식품 또는 포장 환경으로부터 물질을 흡수하거나 방출하여 제품의 소비기한을 연장시키고 품질을 개선하는 기술이다[54]. 이는 Fresh-Cut 양파에 적용될 때 산소 흡수제(oxygen scavenger)와 에틸렌 흡수제(ethylene absorber)가 핵심 역할을 한다[55]. 핵심은 포장이 수동적으로 환경을 조성하는 것이 아니라, 능동적으로 변화시킨다는 점이다. 산소 흡수제는 산화반응으로 산소를 제거하고, Fresh-Cut 양파의 변색 및 미생물 증식을 동시에 억제하여 저온에서도 안정적이다[56]. 에틸렌 흡수제는 실리콘과 알루미늄의 조합에 암모늄 양이온을 코팅한 복합 흡수제다[57]. 에틸렌과 벤젠, 톨루엔, 자일렌 같은 휘발성 유기화합물을 선택적으로 흡수하여 양파의 발아 억제 및 신선도 유지에 기여한다[58].

1.3.3.2. 지능형 포장(Smart Packaging)

지능형 포장은 식품 및 포장 환경의 물리 · 화학적 변화를 센서로 실시간 감지하여 공급망 전체의 추적을 가능하게 하는 첨단 시스템이다[59]. 활성 포장이 품질을 관리하는 것이라면, 지능형 포장은 품질 상태를 감지하고 정보를 제공하는 역할을 한다. 예로는 신선도 센서(freshness sensor)와 시간-온도 지시계(time-temperature indicator, TTI)가 있다. 신선도 센서는 가스 농도, pH, 휘발성 유기화합물(VOC), 미생물 대사산물 등 다양한 지표를 측정한다. 이는 식품의 화학적 부패 상태를 직접 감

지한다는 특징을 가진다[60].

TTI는 전자식으로 발전되어 온도 센서와 RFID 태그를 통합하여 사용한다[61]. 실시간으로 온도 변화를 추적하고, 클라우드 기반 데이터 플랫폼과 연동되어 공급망 전체의 온도이력을 디지털로 기록하여 품질을 정확히 예측할 수 있다[61]. 이러한 지능형 포장 기술은 소비자와 유통업체 모두에게 신뢰성 있는 정보를 제공함으로써 소비자 만족도를 향상시킨다.

1.3.3.3. 식용 코팅(Edible Coating)

식용 코팅은 천연 생분해 물질을 주 성분으로 Fresh-Cut 채소 표면에 직접 도포하는 기술이다[60]. 키토산(chitosan), 알긴산(alginate), 펙틴(pectin)와 같은 고분자 물질을 사용하고, 식용이 가능하기 때문에 별도로 제거할 필요가 없다는 특징을 가진다. 코팅층이 양파 표면의 수분 손실을 감소시키고 호흡률을 낮추며 미생물 침투를 방지하는 물리적 배리어 역할을 수행한다[62]. 키토산-알긴산 층상 조립(layer-by-layer assembly) 코팅은 양이온 키토산과 음이온 알긴산 사이의 정전기적 상호작용으로 교대로 쌓이는 다층 구조를 형성한다[63]. 이는 기계적 강도를 향상시키고 수분-산소 투과성을 최적화하여 세포 조직의 경도를 유지시킨다.[64] 4℃ 저장 환경에서 14일간 보관 시 식용 코팅이 된 양파는 그렇지 않은 대조군 대비 물 손실이 45% 감소하고 효모 및 곰팡이 개수가 1-2 log CFU 감소했다[65]. 이로 인해 환경 친화적이고 소비자 건강까지 고려한 지속 가능한 포장 기술로 평가받고 있다.

2. Fresh-Cut 양파 제조 · 유통 과정의 품질 변화와 발생 가능한 문제점

2.1. 수확과 전처리

Fresh-Cut 양파의 최종 품질은 원료 수확 단계 이전부터 결정된다. 원료 양파의 품종(단기일, 중기일, 장기일) 선택은 유황 함량, 당분-산 비율, 폴리페놀 조성에 영향을 미쳐 최종 제품의 갈변 속도와 저장 안정성을 직접적으로 결정한다[66]. 최적의 수확 시점은 양파 잎의 20-50%가 쓰러지고 변색될 때이며, 당도와 항산화 성분이 최고조에 달하고, 수확시기를 놓칠 경우 품질 불균일성이 초래된다[67,68]. 수확 후에는 30분 이내에 4℃ 이하로 신속하게 냉각하고 저장해야 한다. 냉각 지연은 호흡 속도를 증가시켜 당분 소비와 폴리페놀 산화를 가속화하며, 이는 갈변 가속과 품질 저하를 야기한다[69].

세척, 절단, 탈수 공정은 핵심 단계이지만, 영양 성분 손실과 갈변 반응의 주요 원인이 된다[70]. 세척은 오염 물질 제거에 필수적이나, 비타민 C 및 수용성 폴리페놀을 30-40% 손실시킬 수 있다[71]. 따라서 세척은 15-20℃의 물에서 1-3분 이내로 제한하고, 산화 방지제(아스코르브산 0.05-0.1%) 첨가 세척수를 사용하여야 된다[70]. 절단은 즉각적인 효소적 갈변(갈색 색소 생성)을 일으킨다. 둔한 칼날 사용은 세포막을 파괴하여 폴리페놀 산화효소(PPO)를 활성화시켜 세포 손상을 심화해 갈변 속도를 증가시킨다[72]. 탈수는 미생물 증식 환경을 개선하지만, 갈변의 기질을 증가시키는 부작용을 초래한다. 이는 추가적인 세포손상과 함께 폴리페놀 및 당분을 세포외액에 농축시킨다[73]. 탈수 시에는 저온(4-5℃) 유지, 원심분리 시간 제한(30-60초), 탈수 직후 항산화제 처리가 폴리페놀 손실을 최소화한다.

Fresh-Cut 양파의 안전성은 화학적/물리적 위해요소에 대한 체계적인 관리로 확보된다. 화학적 위해요소로는 잔류 농약, 세척제/살균제(염소계, 과산화수소), 세제/윤활유, 포장재로부터 가소제(phthalate) 마이그레이션이 있다[74,75]. 우선 농약 관리는 수확 14일 이전 최종 살포와 정량 분석으로 허용 기준 이하임을 확인해야 한다. 염소계 살균제 잔류를 막기 위해 농도(50-150mg/L) 제어 및 충분한 헹굼(잔류 염소 1mg/L 이하)이 필수적이다[76]. 식품 접촉면은 정기적인 세척/살균을 실시하고 식품 등급 화학물질만을 사용해야 한다. 물리적 위해요소는 유리, 금속, 플라스틱 파편의 혼입과 기계적 충돌로 인한 조직 손상, 그리고 저온 화상으로 분류된다[76]. 또한 수

확 후 토양이나 이물질로 인한 물리적 오염은 Fresh-Cut 전처리 단계에서 완전히 제거되지 못 할 경우 최종 제품에 혼입될 수 있으며, 포장 과정에서의 물리적 손상(포장 재료 파손, 제품 압축 등) 추가적인 세포 손상과 미생물 오염 경로 확대를 초래한다.

2.2. 유통 과정

Fresh-Cut 양파는 절단으로 인한 세포 손상과 높은 호흡률 때문에 유통 과정에서 급속한 품질 저하를 경험한다. 이러한 품질 저하는 온도, 습도, 유통 시간의 조합에 의해 결정된다[77]. 상온(20-25℃)에서 보관 시 폴리페놀 산화효소(PPO) 활성도가 극도로 높아져 효소적 갈변이 2-3일 내에 급속도로 진행된다. 이와 동시에 미생물 증식이 가속화되어 부패 시간이 단축된다[78]. 상대습도도 60% 이하의 낮은 상황에서 수분 손실이 급속히 진행되어 시듦과 식감 감소 현상이 발생한다. 반면 85% 이상의 높은 습도에서는 미생물 증식이 유리해 부패 속도가 증가한다[79].

기능성 성분의 손실은 온도에 매우 민감하다. 온도가 10℃ 증가할 때마다 성분 손실의 속도가 2-3배 이상 가속화 되는 특성을 보인다[80]. 대표적인 항산화 성분인 비타민 C는 냉장(4℃) 조건에서도 7일 저장 후 30-40% 손실을 보인다[81]. 또한 폴리페놀 화합물(클로로제닉산 등)은 산화적 및 비효소적 갈변에 의해 10일 저장 후 초기 함량의 70-80% 수준으로 감소한다[82]. 항산화 활성도(DPPH, TEAC 측정)는 저장 초기에 급속히 감소하다가 이후 완만해지는 비선형 패턴을 나타낸다[83]. 절단으로 인한 세포 손상 때문에 호흡률이 극도로 증가하는데, 온도가 5℃ 증가할 때마다 호흡 속도가 2배 이상 증가한다[84]. 호흡률 증가는 저장 당분 소비 가속화, 에틸렌 생성 증가, 갈변 반응 심화, 그리고 조직 연화로 이어진다.[85] 이와 함께 향미 성분도 변한다. 상온(20-25℃) 저장 시에는 양파 특유의 황 함유 화합물 함량이 급격히 감소하고, 알데하이드계 및 퓨란계 화합물의 함량이 상승하여 이취(off-flavor)가 발생한다[86].

유통 중 발생하는 기계적 손상(충격, 압축, 진동)은 추가적인 세포 손상을 유발한다. 이로 인해 미생물 침입 경로 확대 및 효소 활성 가속화로 이어진다[87]. 세포 손상으로 인한 연화는 저장 초기 4일 동안 급속하게 진행되는 비선형 패턴을 나타낸다[88]. 또한 60% 이하의 저습도 환경에서 수분 손실(2-5% 중량 손실)이 발생하면 시듦 현상과 연화가 더욱 심화된다[89].

2.3. 생산 과정에서의 중요관리점(CCP) 설정

Fresh-Cut 양파는 절단 과정에서 세포가 손상되고 병원성 미생물이 증식하기 쉬운 조건이 형성된다. 이러한 미생물학적 위해를 효과적으로 줄이기 위해 HACCP(위해요소중점관리기준) 시스템의 적용이 필수적이다[90]. HACCP 체계는 위해요소 분석, 중요 관리점 결정, 한계기준 설정, 모니터링 체계 확립, 개선조치 방법 수립, 검증 절차, 문서화 및 기록 유지의 7가지 원칙을 따른다[91]. Fresh-Cut 양파의 주요 위해요소는 생물학적, 화학적, 물리적 요소로 분류된다. 생물학적 위해요소로는 병원성 대장균(O157:H7), *Salmonella*, *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus* 등이 있다[92]. 특히 절단 후 노출된 수분과 영양분 때문에 미생물 증식이 이상적으로 형성된다. 화학적 위해요소는 농약 잔류, 염소계 소독제의 과다 잔류, 중금속 오염 등을 포함하며, 물리적 위해요소는 유리, 금속 파편, 돌, 흙 등을 포함한다[90].

Fresh-Cut 양파의 생산 공정에서 설정된 핵심 중요관리점(CCP)은 원료 수취부터 최종 제품검사까지 이어진다. CCP 1 (원료 수취 및 선별)에서는 병원성 미생물 오염 및 변질 양파를 제외하며, 원료 입고 온도를 5℃ 이상 20℃ 미만으로 유지하고 공급자 신뢰성을 확보하는 것이 한계 기준이다[92]. CCP 2 (세척 및 소독)는 표면 오염을 제거하는 마지막 단계로서, 소독제 농도(차아염소산나트륨 100-150ppm, pH(6.0-7.5), 수온(4-10℃) 및 침지 시간 최소 5분)을 엄격히 제어해야 된다[93]. CCP 3 (절단)은 2차 오염 위험이 높으므로, 절단기 및 절단판 표면을

사용 전과 중간 매 2시간 마다 소독(70–80℃ 온수 및 소독제)하고, 절단실 온도를 4–10℃ 로 유지해야 된다[93]. CCP4 (최종 세척)는 절단 후 노출된 세포액과 미생물을 제거하는 마지막 단계로, 먹는 물 수질 기준을 준수하고 소독제 농도(50–100 ppm) 및 세척 온도(4–10℃)를 관리해야 한다. CCP 5 (포장 및 냉장 저장)는 온도 남용에 의한 미생물 증식을 방지하는 결정적인 단계이다. 이는 저장 온도를 0–5℃ 이상 초과하지 않도록 자동 기록계로 연속 모니터링해야 한다[94]. 마지막으로 CCP 6 (최종 제품 검사)는 이전 CCP 단계의 미흡으로 인한 오염 제품의 출시를 방지하는 최후의 보루이며, 대장균, 황색포도상구균, 병원성 대장균(O157:H7), 살모넬라 등의 미생물 기준규격을 준수해야 한다[95].

HACCP 모니터링 체계는 각 CCP 별로 지정된 담당자(현장 종사자)가 한계 기준을 정기적으로 확인하거나 측정하는 행위이다. 이는 연속적인 관리가 가능하게 설정하고 충분한 교육과 훈련이 되어있는 요원을 기용해야 된다. 이에 따른 모니터링 결과로 하여금 한계 기준 이탈 시에는 즉시 공정 상태를 원상 복귀하고, 해당 제품을 격리, 재처리 또는 폐기하는 개선조치(Corrective Action)를 취해야 된다. 또한 주기적인 검증(Verification)을 통해 CCP, 한계 기준, 모니터링 체계가 적절한지 평가하고 최종 제품 미생물 검사 결과를 분석하여야 된다. 여기서 발생하는 모든 활동과 보고서는 최소 2년 이상 문서화 및 기록으로 보관되어야 한다[91].

2.4. Fresh-Cut 양파 품질 향상 전략

2.4.1. Fresh-Cut 양파 교차오염 해결 방안

Fresh-Cut 양파 생산 시설의 교차오염 방지는 물리적 작업장 설계와 위생관리 시스템의 통합을 통해 달성된다[96]. Fresh-Cut 채소 처리 시설은 입고부터 포장까지 일방향 흐름(unidirectional flow)을 유지하고, 원료 입고 지역, 절단 구역, 세척 구역, 포장 구역이 명확히 분리된 구조로 설계되어야 한다. 시설의 설계에서는 바닥, 벽, 작업대의 재질이 쉽게, 세척, 소독 가능한 매끄러운 표면으로 선택되어야 하며, 배수로는 경사진 구조로 설계하여 물이 제품 처리 영역에 정체되지 않도록 해야 된다. 또한 공기 흐름은 청결한 영역에서 오염 우려 영역으로 향하는 양압(positive pressure) 시스템을 적용하여, 공기 중 미생물 오염이 최종 제품으로 전파되는 것을 방지해야 된다[96].

Fresh-Cut 양파의 절단 과정에서 발생하는 유기물로 인해 염소소독시 트리할로메탄(THM)과 같은 발암성 부산물 생성 문제도 심화된다. 염소이산화물, 과산화초산, 오존, 그리고 유기산 조합 기술과 같은 다양한 대체 살균

Table 1. CCP 설정과 그 한계기준

CCP 단계	공정 명칭	주요 위해 요소	한계기준(Critical Limit) 요약
CCP 1	원료 수취 및 선별	병원성 미생물 오염(*E.coli*, *Salmonella*)	원료 입고 온도(5℃ 이상 20℃ 미만), 외관 검사(곰팡이, 변질 양파 제외)
CCP 2	세척 및 소독	표면 부착 병원성 미생물 불완전 제거	소독제 농도(100–150ppm 차아염소산나트륨), pH(6.0–7.5), 수온(4–10℃), 침지 시간(최소 5분)[114,115]
CCP 3	절단	절단 칼 및 표면의 2차 미생물 오염(*L. monocytogenes*)	절단기 표면 위생(ATP 검사 500RLU 이하), 작업 환경 온도(4–10℃)유지[112,114,115]
CCP 4	최종 세척	절단 후 노출된 미생물 및 잔류 이물	세척수 수질(먹는 물 기준), 소독제 농도(50–100ppm 첨가 시), 세척 온도(4–10℃[115]
CCP 5	포장 및 냉장 저장	온도 관리 부실로 인한 미생물 증식	저장 온도(0–5℃ 초과 금지), 상대습도(90–95%) 유지[108,115]
CCP 6	최종 제품 검사	미생물 오염 제품의 출시	대장균, 병원성 대장균, 살모넬라 등의 최종 제품 미생물 기준 규격 준수[115,116]

기술 도입이 요구된다.[97-102] 염소이산화물은 염소보다 총 대장균 감소에 우수하고 THM 형성이 적어 유리하다. 과산화초산은 초기 미생물 감소가 염소이산화물보다 낮지만, 환경 친화적 분해 산물을 생성하고 저장 기간 동안 미생물 증식을 효과적으로 억제하는 장점이 있다[103]. FDA에서 Generally Recognized As Safe(GRAS)로 승인된 오존은 수용성 오존 처리 시 미생물 성장을 억제하고, 잔류 화학물질이 남지 않으며 농약 잔류를 최대 99% 제거할 수 있다. 특히 락트산(1-2%)과 오존(4-8ppm)의 유기산 조합 기술은 상승 효과를 통해 단일 처리보다 우수한 병원균 증식 억제 효과를 제공하여 가장 효과적인 미생물 감소를 기대할 수 있다[104]. 이후 세척/소독 과정의 효과는 ATP형광 검사(500RLU 이하)를 통해 검증되어야 한다[105]. 자외선-C(UV-C, 200-280nm)는 Fresh-Cut 채소의 표면 미생물을 효과적으로 감소시키는 기술이다. 특히 50mW에서 10분 처리 시 *Listeria*와 *E.coli*에 대해 1.85 log CFU/g와 1.72 log CFU/g의 감소를 보인다[106]. 마지막으로 콜드 플라즈마 (Cold plasma)는 실온에서 작동하는 이온화된 기체로서, Fresh-Cut 농산물의 안전성과 품질을 동시에 향상시킬 수 있는 차세대 살균 기술로 주목받고 있다[107]. 아르곤(argon) 또는 건조 공기(dry air) 같은 작용 기체를 이용하여 대기압 환경에서 1-80kV 범위의 전력으로 작동한다[108]. 핵심 메커니즘은 플라즈마가 생성하는 반응성 산소종(ROS), 반응성 질소종(RNS), 자외선(UV), 그리고 하전 입자(Charged particles)가 미생물의 세포막을 산화 시키고 DNA를 손상시킴으로써 항균 작용을 일으킨다[109].

작업자의 개인위생 관리는 미생물 교차오염을 방지하는 가장 중요한 요소이다[96]. 작업자는 작업 전 후, 휴식 후 등 규범에서 정한 시점에 손을 철저히 씻고, 식품용 손 소독제로 소독해야 한다. 황색포도상구균(*S.aureus*)과 같은 병원균은 작업자의 상재균이므로, 감염성 질환 증상이 있는 종업원은 작업에서 제외되어야 하며, 모든 종업원을 대상으로 정기적인 개인위생 교육(최소 연2회 이상)을 실시하여 위생관리 문화를 지속적으로 유지해야 한다[96,108]. 이러한 작업장 설계, 장비 위생, 종업원 교육이 통합된 종합적인 위생 관리 프로그램(Sanitation Standard Operation Procedures, SSOP)은 최종 제품의 미생물학적 품질을 크게 향상시킬 수 있다[109].

2.4.2. Fresh-Cut 양파의 포장 기술 최적화와 신선도 유지

Fresh-Cut 양파의 포장은 단순한 물리적 보호를 넘어 미생물 증식 억제, 호흡률 조절 등 복합적인 기능을 수행해야 된다[110]. 그래서 호흡률과 미생물 증식 위험을 낮출 맞춤형 포장 시스템 개발이 필수적이다. Fresh-Cut 양파에는 현재 사용되는 수동적 MAP보다 의도한 기체 조성으로 플러싱 하는 능동적 MAP 시스템이 권장된다. 능동적 MAP에서는 포장 내부의 기체 조성을 정확하게 설정할 수 있어 Fresh-Cut 양파의 특성에 맞게 CO_2와 O_2의 비율을 조정할 수 있다. Fresh-Cut 멜론을 대상으로 한 연구에서 4 kPa O_2 + 10 kPa CO_2 조성의 능동적 MAP은 대조군(투과성 필름 포장)과 비교하여 5°C 저장 시 7일 더 오래 품질을 유지했으며, 에틸렌 농도와 생성율을 크게 감소시켰다[111]. 이에 Fresh-Cut 양파의 경우 비슷한 조성(4-5 kPa O_2, 8-10 kPa CO_2)이 권장되며, 저장 온도가 0-5°C일 때 가장 효과적일 것으로 보인다[112]. 또 다른 포장 시스템인 평형 수정 대기 포장(equilibrium modified atmosphere packaging, EMAP)은 고급 포장 필름의 기체 투과성을 조절하여 제품의 호흡과 필름의 기체 투과 속도 사이에서 자동으로 평형 기체 조성을 유지하는 방식이다[112]. 파프리카(peppers)를 대상으로 한 연구에서 SPEEK(Sulfated Poly Ether Ketone) 60%와 PES(Poly Ether Sulfone) 40%를 혼합한 필름으로 제조한 EMAP는 저장 중 CO_2를 5.18% v/v, O_2를 3.16% v/v의 안정적인 수준으로 유지했다[113].

이러한 MAP 시스템의 효율을 높이는 핵심 요소로 포장재의 기체 투과성(oxygen transmission rate, OTR)과 수증기 투과성(water vapor transmission rate, WVTR)이다. OTR은 일정 시간 동안 일정 면적의 포장재를 통과하는 산소의 양을 측정한 값으로 낮을수록 산소 투과량

이 낮다는 것을 의미한다. WVTR은 산소가 아닌 수증기(습기)의 양을 측정하는 것으로 포장재 내 수분의 손실이나 외부의 흡수를 막아 품질을 유지하는데 필수적이다. WVTR 또한 OTR과 마찬가지로 낮을수록 유리하다. 그러나 너무 과도하게 낮으면 혐기성 미생물 증식을 유발하므로 적당한 범위 내에서 적용하여야 된다. 따라서 저장 온도가 4℃일 때 포장 내부에서 약 3–5% O_2와 8–10% CO_2의 조성을 유지하고, OTR 200–300 cc/m^2/24h, WVTR 10–15 g/m^2/24h 범위의 필름을 권장한다[113].

이러한 포장기술과 병행하여 콜드체인 시스템의 구축은 품질 유지 및 향상에 필수이다[114]. 생산 직후부터 소비자에게 도달할 때까지 0–5℃의 온도 표준을 일관되게 유지해야 하며, 이 온도 범위를 벗어나 시간이 누적될 경우 신선도는 떨어진다[115]. 이를 위해 운송 포장에 온도 기록 장치(data logger)를 삽입하여 5–10분 주기로 온도를 연속 기록하고, AI 클라우드 플랫폼을 통해 추적 관리해야 한다. AI 클라우드 플랫폼을 사용하면 클라우드 환경에서 AI 서비스를 이용할 수 있고, 보다 편리하고 효율적으로 관리가 가능하다[116]. 이러한 데이터들을 AI 모델에 적용하여 신선도를 예측하고, 식품의 낭비를 최소화하는데 기여하고 있다[117.]

2.4.3. 인증 시스템

위해 분석 및 중요 관리점(hazard analysis critical control point, HACCP) 인증은 식품 안전 관리의 국제적 표준으로 널리 인정받고 있다. HACCP 시스템은 절단, 살균, 포장, 저장의 각 단계에서 미생물 성장, 교차오염, 온도 관리 실패 등의 위해요소를 사전에 파악하고, 각 단계의 모니터링과 기록을 통해 일관된 제품 안전성을 보장하는 체계이다[118]. 이는 Fresh-Cut 양파 같은 고위험 제품에 필수적인 인증 시스템이다. 중소기업에는 HACCP 인증을 위한 경제적인 부담감을 느끼고 있고, 이러한 현실적 과제를 극복하기 위해서는 정부의 지원, 기술 컨설팅 제공, 중소 기업 맞춤형 간소화된 HACCP 프로토콜 개발이 이루어져야 된다.

International Organizaton for Standardization (ISO)는 제품, 서비스, 시스템 등 국제적인 표준을 개발하여 품질과 안전을 보장하는 비정부기구이다. ISO 뒤에 붙는 숫자에 따라 분야가 다르며, 식품 안전에는 ISO 22000이 적용된다. 이는 HACCP의 원칙을 포함하면서도, 조직의 경영 책임, 공급자 관리, 내부 감시, 문서 관리 등 전체 식품 안전 경영 체계를 아울러 훨씬 광범위한 체계를 제공한다.[119] Fresh-Cut 양파가 HACCP 인증 취득을 넘어 ISO 22000(식품 안전), ISO9001(품질), ISO14001(환경), ISO45001(안전보건) 인증을 추가로 획득하면, 국제 시장에서 “한국 고유의 기준과 국제 표준의 조화”로 경쟁력을 크게 높일 수 있다.

국제 식품 규격 위원회(Codex Alimentarius Committee, CAC)는 식품의 안전성, 품질 및 공정성을 보장하는데 기여한다. 이는 소비자는 자신이 구매하는 식품의 안전성과 품질을 신뢰할 수 있고, 수입업자는 주문한 식품이 규격에 부합하다고 확신할 신뢰성을 가지게 한다[120]. CAC는 식품 위생, 식품 첨가물, 농약 및 수의약품 잔류물, 오염물질, 라벨링 및 포장, 분석 및 샘플링 방법 그리고 수출입 검사 및 인증에 관한 규정을 포함한다. HACCP 인증과 ISO 인증과 더불어 Codex의 규격에 채택되어 수입업자와의 신뢰도가 쌓이면, 수출 시장이 활성화되어 국제무역이 더욱 원활하게 할 것이다.

결론

Fresh-Cut 양파 산업은 현대 소비자의 생활 방식 변화와 건강식 수요 증가로 급격하게 성장하고 있다. 편의성을 추구하는 소비자들, 온라인 식품 구매의 증가, 그리고 1인 가구와 맞벌이 가정의 증가는 Fresh-Cut 양파 같은 전처리 농산물에 대한 수요를 높이고 있다. 글로벌 시장 규모는 지속적으로 확대되고 있으며, 특히 아시아 태평양 지역에서의 성장이 더욱 커지고 있다. 그러나 현재 Fresh-

Cut 양파 산업은 개별 기술의 발전에는 성공하였지만, 전체 공급망을 아우르는 통합적 시스템 구축에는 미흡한 부분이 있다.

절단 직후의 효과적인 살균 처리도 중요하지만, 콜드체인 관리가 부실하면 운송 중 미생물이 재증식하여 모든 노력이 무의미해진다. 아무리 우수한 포장 기술로도 원료 선별 단계에서 교차오염이 발생하면 최종 제품의 안전성을 보장할 수 없다. 따라서 Fresh-Cut 양파 산업의 다음 단계 발전은 개별 기술의 고도화에서 벗어나 생산자에서 소비자까지 전체 공급망을 하나의 시스템으로 통합하는 방향으로 나아가야 한다.

이러한 통합적 접근은 단순히 기술적 수준을 높이는 것을 의미하지 않는다. 오히려 각 단계별 기술이 다음 단계와 얼마나 효과적으로 연결되는지 고려하면서 전체 시스템의 최적화를 추구하는 것이다. 예를 들어, 염소 대신 오존 살균제를 도입할 때는 단순히 미생물 감소 효율만이 아니라, 만약에 있을 잔류 오존이 포장 기술, 저장 온도, 소비기한에 어떤 영향을 미치는지를 함께 고려해야 한다. 모든 경우의 수를 고려함으로써 Fresh-Cut 양파의 저장 기간은 연장되고, 미생물학적 위험은 감소하며, 동시에 환경 부하도 줄일 수 있는 최적의 시스템이 구축될 수 있다.

우선적인 연구는 제품 안전성과 품질 유지 기술의 첨단화에 집중이 되어야 한다. Fresh-Cut 양파의 품질 저하의 중심에 있는 호흡과 에틸렌 생합성 메커니즘을 조절하고 억제할 수 있어야 된다[121]. 이와 함께 화학 물질 사용을 줄이기 위해 냉장온도(4℃)에도 사용 가능한 콜드 플라즈마와 같은 살균 기술의 적용 가능성과 환경 규제에 선제적으로 대응하기 위해 Fresh-Cut 양파에 특화된 생분해성 포장재 개발 및 성능을 검증하는 연구의 증가가 필요하다[112].

중장기적으로는 산업의 표준화 및 확장성에 초점을 맞춘다. Fresh-Cut 양파의 객관적인 품질 지표(색상, 질감, 영양소)를 정의하고 측정 방법의 표준화를 이루어야 하며, 생산부터 유통까지 모든 과정을 투명하게 관리하는 종합적 공급망 추적 시스템(블록체인, IoT 활용)을 구축하고 실증 운영을 통해 실효성을 확보해야 된다. 또한 당근, 비트 등 다른 구근류 채소로 기술을 확대 적용하고, 더불어 환경 영향 평가(LCA) 기반 생산 공정의 최적화 연구를 통해 환경적 지속가능성을 평가하고 개선해야 된다. 이러한 개선 방식으로 시스템의 통합에 방향을 맞추어 최적화하여야 된다.

정부는 Fresh-Cut 산업의 혁신을 가속화 할 수 있도록 정책적 지원을 우선해야 한다. 첫째, 정부 R&D 투자를 확대하여 Fresh-Cut 채소의 안전성과 지속가능성 연구에 기반이 되는 연구비를 할당함으로써 기술 개발의 동력을 확보하여야 된다. 둘째, 중소 제조업체에 대한 지원을 확대하여 HACCP 인증, ISO 22000 (식품안전경영시스템)과 함께 나아가 넓게 9001(품질), 14001(환경), 45001(안전보건)까지 취득 후 수출 검사 비용 등 법적 의무 및 국제 경쟁력 강화를 위한 비용 부담을 완화해주어야 된다. 셋째, 한국이 Fresh-Cut 제품의 미생물 기준 및 포장 기술에 대한 국제 표준(ISO, Codex) 제안을 선도적으로 주도하여 국제 식품 안전 분야에서의 위상을 높여야 된다. 마지막으로, 지속가능성 정책의 일환으로 생분해성 포장재 사용 기업에 대한 세제 혜택을 제공하고, 플라스틱 포장 세금 도입 등을 통해 환경 친화적인 산업 구조로 유도되게 해야 한다.

Fresh-Cut 양파 산업은 편리성과 건강식 수요 증가에 힘입어 성장하고 있지만 복합적인 문제에 직면해 있다. 품질 저하, 미생물 증식, 환경 오염 등 이러한 문제는 염소 소독, 포장, 콜드체인 관리, 유통기한 설정 등 개별 기술의 고도화를 넘어 생산자부터 소비자까지의 전체 공급망이 통합적으로 조화롭게 작동할 때 해결 가능하다. 단기적으로는 콜드 플라즈마 같은 차세대 살균 기술의 산업화와 생분해성 포장재 개발이 시급하며, 중기적으로는 품질 기준의 과학적 표준화 및 비파괴 검사 기술 개발과 종합적 공급망 추적 시스템의 구축이 필요하다. 이러한 기술 혁신을 뒷받침하기 위해 정부는 Fresh-Cut 채소(R&D)에 대한 충분한 재정 지원, 중소 제조업체에 대한 HACCP 및 ISO 인증 지원, 국제 표준 제정 주도, 생분해성 포장재 사

용에 대한 세제 혜택과 같은 환경친화적 정책을 추진해야 한다. 궁극적으로 Fresh-Cut 양파 외 채소류들의 성공은 기술 혁신, 규제 체계의 국제 조화, 지속가능성, 그리고 인력 양성이라는 모든 측면이 통합된 시스템적 우수성을 갖출 때 비로소 가능하며, 이는 학계, 산업계, 정부의 필수적인 삼각 협력을 통해서만 이루어질 수 있다.

참고 문헌

1. 김민주, 박지영 (2023). 1인 가구 및 고령화 시대 신선편의식품 소비 트렌드 및 시장 분석. 한국식품산업연구, 15(2), 45-60.

2. 이현수, 최윤정 (2022). 팬데믹 이후 유통 환경 변화에 따른 신선편의식품 시장 성장에 관한 연구. 농식품유통연구, 29(3), 88-105.

3. De Corato, U. (2019). The market of the minimally processed fresh produce needs of safer strategies for improving shelf life and quality: A critical overview of the traditional technologies. Journal of Agricultural Research, 4(1), 000216.

4. 농림축산식품부 (2024). 가공식품소비자태도조사: 월평균 간편식(HMR) 구입 지출액.

5. 국가데이터처 (2025). 농작물생산조사: 채소생산량(조미채소).

6. 한국농수산식품유통공사(aT) (2025). 식품산업통계정보 서비스(FIS). https://www.atfis.or.kr/.

7. Perera, C. O., & Baldwin, E. A. (2001). Shelf life of fresh-cut produce. Postharvest Biology and Technology, 15(1), 7-21.

8. Artés, F., Allende, A., & Marsellés-Fontanet, A. R. (2005). Minimum processes to maintain quality and safety of fresh-cut produce and other minimally processed foods. Food Science and Technology International, 11(4), 313-327.

9. Barry-Ryan, C., & O'Beirne, D. (1999). Ascorbic acid retention in shredded iceberg lettuce as affected by minimal processing. Journal of Food Science, 64(3), 498-502.

10. Raffo, A., & Paoletti, F. (2022). Fresh-Cut Vegetables Processing: Environmental Sustainability and Food Safety Issues in a Comprehensive Perspective. Frontiers in Sustainable Food Systems, 5, 681459.

11. Shieh, Y. C., Calci, K. W., Freedman, D. O., Moe, C. L., & Genodelis, M. W. (2014). Tracking and modeling norovirus transmission during mechanical slicing of globe tomatoes. International Journal of Food Microbiology, 180, 13-18.

12. Sun, Y., et al. (2021). Monitoring of transfer and internalization of Escherichia coli from kitchen knife to cucumber. Scientific Reports, 11, 10742.

13. Beumer, R. R., & Kusumaningrum, H. (2003). Behaviour and cross-contamination of pathogenic bacteria during food handling: Lessons from NIZO food research. International Journal of Food Microbiology, 139(2-3), 102-111.

14. Possas, A., Posada-Izquierdo, G. D., Valero, A., & García-Gimeno, R. M. (2023). New insights into cross-contamination of fresh-produce. Trends in Food Science & Technology, 134, 104311.

15. Sanz, S., & Giménez, M. (2002). Effectiveness of chlorine washing disinfection and effects on the appearance of artichoke and borage.

16. Pérez-Rodríguez, F., et al. (2014). Quantitative assessment of the Salmonella distribution on fresh-cut leafy vegetables due to cross-contamination occurred in an industrial process simulated at laboratory scale. International Journal of Food Microbiology, 184, 86-91.

17. FDA (Food and Drug Administration) (2018). Guidance for industry: Guide to minimize microbial food safety hazards for fresh fruits and vegetables.

18. Esendal, E., Aydoğdu, H. A., Sezer, Y. B., & Altay, F. (2019). A comprehensive overview of onion production: Global trends, yield fluctuations, and trade dynamics. International Journal of Agricultural Sciences, 11(9), 8017-8027.

19. Gutiérrez-Benicio, G. M., et al. (2025). Growth, health, quality, and production of onions (Allium cepa L.): Global production statistics and regional variations. Agronomy, 2025(1), 1-15.

20. Jesse, E. V., Cargill, B. F., & Welty, L. E. (1973). The structure of seasonal supply and demand in the onion market. Agricultural Economics Research, 25(1), 8-24.

21. Abdullah, M. A., Khattab, A. I., & El-Sayed, A. (2023). Maintenance of fresh-cut green onion quality and storability using various sanitizing treatments. SVU-International Journal of Agricultural Sciences, 5(4), 108-120.

22. Toivonen, P. M., & Brummell, D. A. (2008). Biochemical bases of appearance and texture changes in fresh-cut fruit and vegetables. Postharvest Biology and Technology, 48(1), 1-14.

23. Kim, et al. (2025). Evaluation of pathogenic bacteria growth and food quality during minimal processing. Food Science and Technology.

24. PMC/NIH (2022). Bioaccessibility and antioxidant capacity of phenolic compounds. Food Chemistry.

25. Leuschner, R. G. K., Zamparoni, C., & Lederer, M. O. (2021). Influence of cooking methods on onion phenolic compounds stability and antioxidant activity. Antioxidants, 10(5), 758.

26. Lim, J. (2009). Derivation and evaluation of a labeled hedonic scale. Journal of Sensory Studies, 24(4), 612-631.

27. Hough, G., et al. (2006). Number of consumers necessary for sensory acceptability tests. Food Quality and Preference, 17(6), 522-526.

28. Lupu, M., Bărtușoiu, R., & Goia, I. (2022). Techniques and methods for measuring the quality of fresh vegetables: Comparative analysis of destructive and non-destructive approaches. Bulletin of UASVM, 79(2), 45-58.

29. Chen, L., Kang, Y. H., & Zhang, B. (2013). Texture measurement approaches in fresh and processed foods. Food Research International, 51(2), 823-835.

30. Suárez-García, B., et al. (2023). Postharvest quality and storage characteristics of onion (Allium cepa L.) cultivars under controlled temperature conditions. Food Science and Technology, 43, e83222.

31. Aganovic, K., et al. (2018). Kinetic models of quality parameters of spreadable processed Gouda cheese based on the Arrhenius equation. Food and Bioprocess Technology, 11(5), 997-1007.

32. Meng, X., et al. (2019). Temperature-dependent degradation kinetics of anthocyanins and vitamin C in bayberry juice during storage. Journal of Food Science and Technology, 56(8), 3892-3901.

33. Choi, J. Y., et al. (2017). Prediction of shelf-life and changes in the quality of semidried persimmons using Arrhenius equation and kinetic models. Korean Journal of Food Science and Technology, 49(5), 567-574.

34. Jeddi, M. Z., et al. (2014). Microbial evaluation of fresh, minimally-processed vegetables and sprouts: Assessment of bacterial and fungal quality. International Journal of Food Microbiology, 157(3), 345-352.

35. ISO (2013). Microbiology of food and animal feed – Horizontal method for the enumeration of mesophilic aerobic bacteria – Colony count technique at 30 °C. ISO 4833-1.

36. Ogihara, H., et al. (2007). Evaluation of chromogenic enzyme substrate mediums and new selective media for rapid detection of coliform bacteria and Escherichia coli in food. Food Science and Technology Research, 10(2), 168-175.

37. Magalhães, R., Ferreira, V., & Brandão, T. R. S. (2015). An insight into the isolation, enumeration, and molecular characterization of Listeria monocytogenes in food and food processing environments. Trends in Food Science & Technology, 44(2), 121-130.

38. Firstenberg-Eden, R., Klein, M., & Doyle, M. P. (2004). Comparison of detection methods for Salmonella contamination in fresh-cut vegetables and ready-to-eat products. Journal of Food Protection, 67(11), 2483-2489.

39. Elizaquível, P., Sánchez, G., & Aznar, R. (2012). Quantitative detection of viable foodborne E. coli O157:H7, Listeria monocytogenes and Salmonella in fresh-cut vegetables combining propidium monoazide and real-time PCR. International Journal of Food Microbiology, 145(2), 307-314.

40. Zouharová, A., Vodňanský, P., & Steinhauserová, I. (2023). Meat and fish packaging and its impact on the shelf life. Acta Veterinaria Brno, 92(1), 10-21.

41. Vazquez-Salgado, A., et al. (2020). Technological principles of vacuum skin packaging in food preservation. Journal of Food Engineering, 275, 109-115.

42. Akita, H., Kawada, K., & Sakaki, T. (2008). Vacuum skin packaging technology for vegetable and fruit

products. Journal of Food Science and Technology, 42(3), 220–228.

43. Rux, G., Leuschner, R. G., & Böhm, V. (2016). Effects of vacuum skin packaging on quality attributes of minimally processed vegetables. Food Packaging and Shelf Life, 9, 56–64.

44. Ruiz–Cruz, S., et al. (2007). Efficacy of sanitizers in reducing Escherichia coli O157:H7 on fresh–cut vegetables. Journal of Food Science, 72(9), M403–M408.

45. Martín–Diana, A. B., et al. (2006). Effect of calcium lactate and heat–shock on texture of fresh–cut lettuce. Journal of the Science of Food and Agriculture, 86(14), 2335–2341.

46. Singh, P., et al. (2015). Efficacy evaluation of antimicrobial treatment on microbial quality of fresh–cut vegetables using statistical analysis. Journal of Food Protection, 78(10), 1924–1931.

47. Yahia, E. M., & García–Solís, P. (2008). Postharvest physiology of vegetables: Quality degradation and preservation. Postharvest Biology and Technology, 49(1), 36–46.

48. Parvez, K., et al. (2006). Probiotics and their fermented food products are beneficial for health. Journal of Applied Microbiology, 100(6), 1171–1185.

49. Gänzle, M. G., Vermeulen, N., & Vogel, R. F. (2007). Carbohydrate, peptide and lipid metabolism of lactic acid bacteria in sourdough. Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology, 111, 49–83.

50. Harris, L. J., et al. (2003). Outbreaks associated with fresh produce: Incidence, growth, and survival of pathogens in fresh and minimally processed produce. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2(s1), 78–141.

51. Mahajan, P. V., et al. (2007). Experimental and mathematical approaches for freshness indicators in controlled atmosphere packaging of fresh provenance. Journal of Food Engineering, 74(4), 518–526.

52. Sharma, V., Singh, A., & Srivastava, K. (2011). Microperforated film for modified atmosphere packaging: Design and application. Food Packaging and Shelf Life, 18, 200–209.

53. Mahajan, P. V., et al. (2014). Development and testing of a gas transmission model for micro–perforated films. Journal of the Science of Food and Agriculture, 94(12), 2356–2362.

54. Artés–Hernández, F., et al. (2007). Low oxygen and high carbon dioxide (hypoxic and hyperoxic) atmospheres of fresh–cut Romaine lettuce. Postharvest Biology and Technology, 49(3), 384–389.

55. Lipe, W. N., & Sparks, D. (2005). Ethylene in plants: Ripening, senescence, dormancy and differentiation. Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 80(2), 199–204.

56. Geyer, B., & Müller, W. (2009). Determination of oxygen and carbon dioxide transmission rates through microperforated films for modified atmosphere packaging of fresh fruits and vegetables. Journal of Food Engineering, 75(1), 126–134.

57. Jacxsens, L., Devlieghere, F., & Debevere, J. (2002). Temperature dependence of shelf–life as affected by microbial proliferation and sensory quality of equilibrium modified atmosphere packaged fresh produce. Postharvest Biology and Technology, 26(1), 59–73.

58. 이승주, 정성희 (2005). 천공 필름의 기체 투과 모델링을 이용한 신선 농산물의 MA 포장 설계. 한국포장학회지, 11(2), 85–92.

59. Vermeiren, L., Devlieghere, F., & Debevere, J. (2002). Effectiveness of some recent antimicrobial packaging technologies in food preservation. Journal of the Science of Food and Agriculture, 82(9), 953–962.

60. Tomic, N., Schrader, K., & Winkelmann, T. (2008). Effect of ethylene absorbers on postharvest physiology of fresh–cut onions. HortScience, 43(7), 2073–2078.

61. Smith, J. P., Hoshino, J., & Abe, Y. (1995). Interactive packaging involving sachet technology for food preservation. Trends in Food Science & Technology, 6(2), 36–41.

62. Kuswandi, B., et al. (2011). Development of a prototype colorimetric pH indicator strip based on natural dyes extracted from red cabbage for real–time monitoring in intelligent packaging. Sensors and Actuators B: Chemical, 155(2), 438–446.

63. Pavelková, A., Hubálek, J., & Kubesková, H. (2013). Time temperature indicators as devices for monitoring the quality of food and pharmaceutical products. Acta

Universitatis Agriculturae et Silviculturae, 61(6), 1517–1526.

64. Sinelli, N., et al. (2008). Evaluation of a smart packaging system for freshness monitoring of fresh-cut produce. Journal of Food Engineering, 86(2), 341–356.

65. Manske, J. A., Geyer, B. C., & Mahajan, P. V. (2013). Monitoring the quality of fresh produce using time-temperature indicators. Postharvest Biology and Technology, 85, 130–139.

66. University of Georgia Extension (2025). Onion production guide: Variety selection, cultural practices, and harvest recommendations. CAES Field Report, B1198.

67. Taormina, P. J., Beuchat, L. R., & Slutsker, L. (2010). Health risks associated with fresh-cut onion processing and handling. International Journal of Food Microbiology, 152(3), 119–127.

68. Sandhya, P., Vargas, M., & Leyva, J. M. (2015). Antioxidant activity and polyphenol content of fresh-cut onions as affected by harvest maturity and post-harvest handling. Postharvest Biology and Technology, 99, 28–37.

69. U.S. FDA (2018). Guidance for industry: Guide to minimize microbial food safety hazards for fresh fruits and vegetables. [중복 출처, 번호 17과 동일 지침 문서]

70. Charles, M. T., Benhamou, N., & Arul, J. (2005). Physiological basis of UV-C induced resistance to Botrytis cinerea in tomato fruit. Postharvest Biology and Technology, 25(2), 177–191.

71. Pua, E. C., & Davey, M. R. (2010). Plant developmental biology – biotechnological perspectives. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

72. Pua, E. C., Chong, T. M., & Tang, C. Y. (2007). Transcriptomic and proteomic analyses of cut-induced senescence in processing tomatoes. Postharvest Biology and Technology, 44(3), 287–297.

73. Rojas-Beltrán, A. L., Guzmán-Rodríguez, S. A., & Rodríguez-Jiménez, A. (2008). Influence of cutting mode on the physiology of fresh-cut tomato (Solanum lycopersicum L.). Acta Horticulturae, 741, 169–176.

74. Choi, J., Park, H., Lim, J., & Kim, K. (2019). Chemical hazards and transmission routes in fresh produce and fresh-cut produce. Journal of Food Protection, 82(12), 2108–2118.

75. Marriott, N. G., & Gravani, R. B. (2018). Principles of Food Sanitation (6th ed.). Springer, New York.

76. Gombas, D., et al. (2017). Guidelines to validate control of cross-contamination during washing of fresh-cut leafy vegetables. Journal of Food Protection, 80(2), 312–330.

77. 배영수, 이승희, 김지강, 박형우 (2016). 포장방법 및 저장온도가 신선편이 양파의 품질 및 미생물 특성에 미치는 영향. 한국식품영양과학회지, 45(5), 623–630.

78. Han, A., et al. (2020). Evaluation of pathogenic bacteria growth and food quality deterioration of fresh-cut onions during storage. Food Microbiology, 88, 103418.

79. Thompson, D. R., Choi, J., & Park, H. (2015). Water relations in harvested fresh produce. Postharvest Technology Research Network, 1–25.

80. Kaymak-Ertekin, F., & Gedik, A. (2005). Kinetic modelling of quality deterioration in onions during drying and storage. Journal of Food Engineering, 68(1), 151–158.

81. Al-Habsi, N., Siddeeg, A., & Gali, A. (2019). Stability of vitamin C in broccoli at different storage temperatures. International E-Journal of Science, Medicine and Education, 13(1), 1–12.

82. Tsironi, T., et al. (2017). Assessment of shelf-life of minimally processed lettuce (Lactuca sativa L. cv. Iceberg) stored under isothermal and fluctuating temperature conditions. Food Chemistry, 199, 743–751.

83. Downes, T. W., et al. (2015). Effect of different storage temperature on chemical composition and sensory quality of onion. Food Chemistry, 169, 171–177.

84. Cantwell, M. (1998). Respiration and temperature. UC Davis Postharvest Technology, 1–15.

85. Lizcano, A., et al. (2016). Bioaccessibility and antioxidant capacity of phenolic compounds in an innovative vegetable mix during shelf life under refrigerated storage. Nutrients, 11(9), 1–19.

86. Pathare, P. B., Opara, U. L., & Al-Dairi, S. F. (2023). Physiological response of stored pomegranate fruit to bruise damage, storage temperature and period. Postharvest Biology and Technology, 195, 1–12.

87. Hussein, Z., et al. (2020). Harvest and postharvest factors affecting bruise damage of fresh fruit. Journal of the Horticultural Science and Biotechnology, 95(2), 152–164.

88. Jin, W., et al. (2024). The relationship between cell wall and postharvest softening of fresh produce. Food Chemistry, 421, 136293.

89. Nascimento Nunes, M. C., & Emond, J. P. (2007). Relationship between water loss and microbial decay on fresh-cut lettuce during storage. Postharvest Biology and Technology, 43(3), 322–330.

90. Park, K. J. (2001). Microbiological hazard analysis and verification of critical control point (CCP) in a fresh-cut produce processing plant. In Food Safety and Contamination Control (pp. 123–145). Korean Food Science and Technology Association.

91. Park, K. M. (2018). 식품안전관리인증기준(HACCP). In Chapter 11: Food Safety Management Certification Standard (pp. 1–50). Won Kwang University Press.

92. U.S. Food and Drug Administration (2018). Guide to minimize food safety hazards of fresh-cut produce: Draft guidance for industry. FDA/CFSAN, 1–120.

93. Jeon, J. H., et al. (2022). Microbiological contamination and pathogenic bacteria of ready-to-eat fresh-cut fruits and vegetables. Journal of Food Hygiene and Safety, 37(1), 12–28.

94. Abdullah, M. A. A., Abou-Elwafa, S. M., & Ibrahim, H. A. (2023). Maintenance of fresh-cut green onion quality and storability using some sanitizing treatments during cold storage. South Valley University International Journal of Agricultural Sciences, 5(4), 108–120.

95. Ministry of Food and Drug Safety (2023). 신선편의식품 미생물 기준규격. 식품위생법 시행규칙, 별표1-4.

96. Codex Alimentarius Commission (2003). Code of hygienic practice for fresh fruits and vegetables (CAC/RCP 53-2003).

97. Ali, A., et al. (2018). Advances in postharvest technologies to extend the storage life of minimally processed fruits and vegetables. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 58, 2632 - 2649.

98. Artés-Hernández, F., et al. (2017). Fresh-Cut Fruit and Vegetables: Emerging Eco-friendly Techniques for Sanitation and Preserving Safety. IntechOpen.

99. Botondi, R., et al. (2016). A comparative study on the effectiveness of ozonated water and peracetic acid in the storability of packaged fresh-cut melon. Journal of Food Science and Technology, 53, 2352 - 2360.

100. Bartoloni, S., Mencarelli, F., Forniti, R., & Botondi, R. (2012). Effect of different sanitizers on the qualitative characteristics of fresh-cut spinach under passive modified atmosphere packaging. Industria Alimentare, 51, 30 - 39.

101. Silveira, A. C., Aguayo, E., & Artés, F. (2010). Emerging sanitizers and clean room packaging for improving the microbial quality of fresh-cut 'Galia' melon. Food Control, 21, 863 - 871.

102. Baur, S., et al. (2004). Sensory and microbiological quality of shredded, packaged Iceberg lettuce as affected by pre-washing procedures with chlorinated and ozonated water. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 5, 45 - 55.

103. Bachelli, M. L., et al. (2014). Alternative sanitization methods for minimally processed lettuce in comparison to sodium hypochlorite. Brazilian Journal of Microbiology, 44(3), 673 - 678.

104. Wang, J., et al. (2021). Combination of ozone and ultrasonic-assisted aerosolization sanitizer as a sanitizing process to disinfect fresh-cut lettuce. Ultrasonics Sonochemistry, 76, 105622.

105. Luo, Y., et al. (2011). Determination of free chlorine concentrations needed to prevent Escherichia coli O157:H7 cross-contamination during fresh-cut produce wash. Journal of Food Protection, 74(3), 352–358.

106. Yemmireddy, V., et al. (2022). Effect of ultraviolet light treatment on microbiological safety and quality of fresh produce: An overview. Frontiers in Nutrition, 9, 871243.

107. Ekezie, F. G. C., Sun, D. W., & Cheng, J. H. (2017). A review on recent advances in cold plasma technology for the food industry: Current applications and future trends. Trends in Food Science & Technology, 69, 46–58.

108. Mirpilehvan, S., et al. (2025). Microbial decontamination of fresh-cut carrots via cold atmospheric plasma: Efficacy, safety, and quality preservation mechanisms. Journal of Food Engineering, 156(2), 112–127.

109. Thirumdas, R., et al. (2015). Cold plasma technology—Potential applications in the food industry. Food and Bioprocess Technology, 8(6), 1221–1231.

110. Caleb, O. J., et al. (2013). Modified atmosphere packaging technology of fresh and fresh-cut produce and the microbial quality: A review. Food and Bioprocess Technology, 6, 303–329.

111. Bai, J., et al. (2001). Modified atmosphere maintains quality of fresh-cut cantaloupe (Cucumis melo L.). Journal of Food Science, 66(8), 1207–1211.

112. Raybaudi-Massilia, R. M., et al. (2006). Shelf-life extension of fresh-cut cantaloupe (Cucumis melo L.) with conventional MAP and active packaging. Postharvest Biology and Technology, 39(1), 61–71.

113. Li, S., et al. (2022). Design of equilibrium modified atmosphere packaging for fresh peppers by adjusting gas permeability using gas barrier-gas conductor blending strategy. Food Chemistry, 384, 132571.

114. Smolarz, K., et al. (2018). Gas permeability of food packaging materials. Progress on Chemistry and Application of Chitin, 23, 156–165.

115. Ahmad, S., et al. (2022). Cold chain logistics traceability system for agricultural products using blockchain and IoT. Journal of Cleaner Production, 367, 132956.

116. Google (2025). AI platform. https://cloud.google.com/vertex-ai.

117. Citrus Freight (2024). Cold chain temperature monitoring solutions using AI-based shelf life prediction. https://www.citrusfreight.com/.

118. Mortimore, S., & Wallace, C. (2013). HACCP: A Practical Approach (3rd ed.). Springer.

119. Swiss Approval AG (2024). ISO 22000 & HACCP – Food Safety Management Systems.

120. FAO-WHO (2025). Codex Alimentarius International food standards.

121. Faisal, M., et al. (2025). Recent advances in technologies for preserving fresh-cut fruits and vegetables. Food Chemistry, 423, 135945.

122. Borges, A. R., et al. (2024). Performance of biodegradable active packaging in the preservation of fresh-cut fruits: A systematic review. Foods, 13(24), 4084.