KOREAN JOURNAL OF PACKAGING SCIENCE & TECHNOLOGY
Vol. 31, No. 1 65~76 (2025)
https://doi.org/10.20909/kopast.2025.31.1.65

CA 컨테이너를 활용한 한국산 신선 농산물 품질 유지 효과

한명수[1] · 이지현[2] · 김용진[3]*

[1]세중해운
[2]국립원예특작과학원
[3]인하대학교

Effect of Controlled Atmosphere Containers on Maintaining the Quality of Fresh Korean Agricultural Products

Myung Soo Han[1], Jihyun Lee[2], and Yong Jin Kim[3]*

[1]Sejung Group, Seoul, 07803, Republic of Korea
[2]National institute of Horticultural & Herbal Science, RDA, Wanju 54874, Republic of Korea
[3]Inha University Graduate School of Logistics, Incheon 22212, Republic of Korea

Abstract This study evaluated the effectiveness of controlled atmosphere (CA) containers in maintaining the quality of fresh horticultural products during long-distance maritime transport. A simulated export experiment was conducted using both reefer and CA containers, focusing on single commodities (oriental melon, Asian pear cv. Wonwhang, and king oyster mushroom) and mixed commodities (paprika, cherry tomato, and summer squash). The impact of packaging types and CA conditions on quality retention was analyzed. The results demonstrated that CA conditions (5/12 and 5/0.04) enhanced storage stability for oriental melon and pear, and CA (1/15) effectively minimized browning and moisture loss in king oyster mushrooms. However, in mixed commodity storage, the effects of CA conditions varied depending on the product. Cherry tomatoes exhibited the best quality retention under CA (5/12), whereas paprika and summer squash suffered peel discoloration and tissue softening under high CO_2 conditions. In the case of products with modified atmosphere (MA) packaging, interactions between the internal gas composition and the CA environment influenced quality changes. Notably, commodities sensitive to high CO_2 levels exhibited physiological disorders under high CO_2 conditions. This study confirms that CA containers effectively preserve the quality of fresh horticultural products and proposes optimal CA conditions for different commodities. In particular, when shipping mixed commodities, it is crucial to continuously monitor the internal gas composition of MA-packaged products in the CA environment, and storage conditions must be optimized accordingly. The findings of this study contribute to the development of quality maintenance technologies for the long-distance distribution of fresh produce.

Keywords Controlled atmosphere (CA) storage, Modified Atmosphere (MA) packaging, Postharvest quality, Mixed commodity storage, simulated sea shipment

서 론

한국의 신선 농산물의 수확 전 재배기술은 다른 선진국과 비교하여 높은 수준에 있지만 수확 후 농산물 품질유지를 위한 수확 후 처리 기술개발에 관련된 연구와 활용도는 아직도 미흡한 실정이다. 고품질의 농산물 생산체계가 고도화되면서 잉여되는 농산물의 수출 판로 확대가 필요하다. 농산물 수출 시 항공 운송의 한정된 적재 용량 및 비용을 고려하면 해상 운송이 필수적이며, 세계적으로 냉장선을 이용하던 방식에서 냉장 컨테이너(reefer container)를 이용한 선박운송으로 전환이 진행되는 추세이다[1]. CA 컨테이너는 공기조절장치가 탑재된 냉장 컨테이너로, 농산물의 호흡을 억제하고 생리 대사 속도를 낮춰 장기간 신선도를 유지하고 손실률을 줄일 수 있는 장점이 있다[2]. 신선 농산물 수출은 보통 단일 품목을 대상으로 이루어지고 있으나, 우리

*Corresponding Author: Yong Jin Kim
100 Inha-ro,Michuhol-gu, Incheon, 22212, Korea, Graduate School of Logistics, Inha University
Tel: +82-32-860-8233
E-mail: yongjin@inha.ac.kr

나라의 농업환경 특성상 다품목을 소량 생산하는 시스템에서는 수출 물량을 동시에 대량 확보하는 것이 어려울 수 있으며, 수출 대상국에서 요구하는 물량이 컨테이너 용적보다 적어 다품목을 혼합하여 운송해야 되는 경우도 많다. 이에 따라 다품목 농산물 운송에서의 품질 유지 기술 개발에 대한 실용적인 관점에서의 접근이 필요한 시점이다.

신선 농산물은 품목별로 최적 저장 조건이 다르다. 저장온도, 습도, 산소와 이산화탄소의 농도, 에틸렌 농도, 부패균 밀도 등이 신선도 유지 기간에 영향을 미친다. 선박 수출시 수송 기간이 길어져서 운송 중 숙성을 지나 노화 등이 진행되면서 세포 팽압의 감소로 인한 증산, 과실의 경우 저장양분 분해 및 세포벽 붕괴, 수분손실 등 물리화학적 품질변화가 일어난다. 선박 운송에 활용되는 냉장 컨테이너는 온도 관리 제어가 정밀하지 못하여 적재된 신선 농산물의 호흡 변화로 인해 컨테이너 내 기체조성, 습도 등이 적정하게 유지하기 어려워 동결장해, 고이산화탄소 장해, 위조, 이취 등 다양한 생리적 장해가 발생할 수 있다[3].

컨테이너 내 O_2 및 CO_2 농도가 각 품목의 생리적 특성과 맞지 않을 경우 과육의 갈변, 조직의 수침 및 붕괴, 색변화, 이취 등 생리장해가 일반 저온 저장조건보다 더 심하게 발생한다[4]. 컨테이너 내에 적재된 이후 운송 중에는 품질을 예측하기도 어렵고 선도유지 기술 투입도 불가능하기 때문에 보다 정밀한 차원의 운송 기술이 요구된다. 특히 수출 농산물의 선박운송은 항공운송 평균 소요 기간보다(1~2일) 길어져서 가까운 일본, 홍콩은 최소 3~7일 정도 소요되고, 먼 거리인 미국, 유럽 등은 20~70일 정도 걸리기 때문에 한번 선적된 컨테이너 내의 신선 농산물의 신선도와 품질을 유지할 수 있도록 수확 후 효과적인 저장기술이 적용이 필수적이다. 기존 해상 운송시에는 신선 농산물의 품질 저하를 방지하기 위해 개별 품목에 적합한 MA포장 기술을 적용하였으나, 다품목 혼합 적재시 각 품목에 대해 최적의 저장 조건을 제공하는 것은 불가능하므로 혼합 적재로 인해 문제가 발생할 가능성이 적은 CA (Controlled Atmosphere) 환경 또는 MA (Modified Atmosphere) 환경을 단일 또는 복합적으로 설정할 필요성이 있다[4]. CA 기술은 최근 백신 등과 같은 바이오 산업 운송기술 외에도 신선 농산물 수출 전략 기술에서 주목받고 있다[1]. CA 저장은 저장고나 냉장 컨테이너 내 CO_2, O_2, N_2 등 기체환경을 조정하여 과일의 후숙이나 과채류의 노화를 억제하여 저장성을 향상시키는 기술로 우수한 효과가 다양한 연구로 입증되었다. 사과, 배, 바나나, 아보카도 등 수확 후 후숙 특성을 주로 가지고 있는 농산물을 단일 품목으로 적재하여 후숙이나 노화가 촉진되지 않도록 호흡조절을 위한 기체환경조성을 유지하여 품질 저하를 예방하는 연구가 주를 이루고 있으나[5], 다품목을 혼합하여 운송해야 되는 경우에 최적의 기체환경조성을 구명하는 연구는 많이 진행된 바가 없다. 다품목 혼합 선적 시, 품목별로 수입국에서 원하는 다양한 포장 형태로 선적되는 경우가 많으며, CA 환경은 단일 조건으로 설정된다. 따라서 품목마다 가지고 있는 호흡과 저온장해 특성을 고려하여 적절한 CA 조건이 설정되어야 한다. 품목별로 다양한 포장형태로 선적된 농산물이 CA 환경과의 상호관계 속에서 어떠한 품질 변화가 진행되는 지에 대한 연구는 많지 않다.

따라서 본 연구는 우리나라에서 생산되는 다양한 신선 농산물을 품목별로 포장 후, CA 컨테이너에 단일 혹은 혼합 품목으로 선적하였을 때, 다양한 CA 농도가 품질특성에 미치는 효과를 분석하였다. 이를 토대로 실제 최적의 기체조성 환경 조건으로 수출대상국에 선박운송을 통한 모의수출 시 품목별 적절한 CA 조건과 신선도 효과를 확인하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 실험재료

본 연구에서는 한국 주산지에서 생산되는 신선 농산물을 신선 농산물을 품목별로 수출국 바이어의 요구에 따라 속포장 또는 겉포장한 후 리퍼 컨테이너(reefer container)와 CA(Controlled atmosphere) 컨테이너에 적재하여 장거리 모의수출 시 품질 유지 효과를 평가하였다. 실험은 단일 품목 선적과 과채류 혼합 품목 선적으로 구분하여 수행하였으며, 단일 선적 품목은 참외, '원황' 배, 큰느타리버섯, 혼합 선적 품목은 파프리카, 방울토마토, 애호박으로 구성하였다. 참외는 경북 성주에서 4월 8일, 원황 배는 충남 천안에서 10월 3일, 큰느타리버섯은 충남 논산에서 10월 5일, 파프리카와 방울토마토는 전북 김제에서 10월 5일, 애호박은 전북 전주에서 10월 5일 각각 수확하였으며, 외관상 결점이 없는 개체를 선별하여 사용하였다.

2. 포장 방법 및 기체 조성

포장 방법은 품목별 특성에 따라 다음과 같이 적용하였다. 단일 선적 품목으로, 참외는 PE 필름으로 1입 또는 2입씩 밀봉 포장한 후 골판지 상자에 담았으며 자체 호흡으로 MA 조건이 형성되었다. 원황 배는 9~10과를 난좌 위에 넣고 골판지 상자에 포장하였다. 큰느타리버섯은 PE필름으로 벌크 포장한 한 후 골판지 상자에 담았으며, 자체 호흡으로 MA 조건이 형성되면서 수송하였다. 혼합 품목의 경우, 파프리카는 PE필름으로 포장한 후 골판지 상자에 넣었고 자체 호흡으로 MA조건이 형성되었으며, 방울토마토는 별도의 필름 포장 없이 골판지 상자에 직접 담았고, 애호박은 재배 단계에서부터 투명한 EVA/PE 기반의 필름으로 개별 포장된 상태를 수확 후까지 유지하여 골판지 상자에 담아 컨테이너에 적재하였다. 포장재 두께, 포장 내부의 기체 조성 등 자세한 포장 조건을 <Table 1>에 나타내었다.

Table 1. Packaging, transport, and storage conditions of fresh Korean horticultural products subjected to simulated export using reefer and controlled atmosphere (CA) containers

Shipping method	Commodity	Packaging method	Transportation			Distribution conditions (^oC/days)
			Reefer container conditions (O_2/CO_2%)	CA container conditions (O_2/CO_2%)	Transport conditions (^oC/days)	
Single product	Oriental melon	30 mm PE film (1 or 2 units) + Corrugated box. Perforation ratio of film: 0.5~1.2%.	- set: 21/0.03 - inside container: 17.5/5.3 - inside of films: 3.5/0.3	- set: 5/0, 5/5, 5/12 - inside container: 5.3/0.01, 5.1/5.2, 5.1/12.3 - inside film: 0.5/0.3, 0~5/1~2, 0.5/3~4	4^oC, 10 days	10^oC, 7days
	'Wonwhang' asian pear	Corrugated box (9~10 fruits with cushion)	- set: 21/0.03 - inside container: 18.3/5.8	- set: 5/0.04 - inside container: 5.1/0.04	1^oC, 2 weeks	10^oC, 2 weeks
	King oyster mushroom	Bulk packed in 50 mm PE film + Corrugated box. Perforation ratio of film: 0%	- set: 21/0.03 - inside container: 16.8/6.8 - inside of films : 3~5/10~15	- set: 1/15 - inside container: 1.1/15.1 - inside film: 3~5/10~15	1^oC, 7 weeks	1^oC, 6 days
Mixed Fruit Vegetables	Paprika, Cherry tomato, Summer squash	- Paprika: 25 mm PE film + Corrugated box. Perforation ratio of film: 0.1~1%. - Cherry tomato : Corrugated box - Summer squash : Individually tight wrapped using transparent EVA/PE-based film + Corrugated box	- set: 21/0.03 - inside container: 18.1/5.3 - inside of paprika film: 5~8/0.3~0.5	- set: 5/0, 5/5, 5/12 - inside container: 5.1/0.05, 5.3/5.9, 5.3/12.9 - inside of paprika film: 1~2/0, 1~2/0.5~1, 1~2/5~6	8^oC, 2 weeks	10^oC, 7 days

3. CA 컨테이너 모의수송 처리

연구에 사용된 CA 컨테이너(CA container, Maersk Co., Beijing, China)는 CA 기능이 탑재된 냉동기와 전기화학식 측정 방식의 O_2 센서, 적외선(NDIR) 측정 방식의 CO_2 센서, MEMS type의 온습도 센서가 장착된 컨테이너로 효과적인 화물(농산물)의 수송을 목적으로 하는 ISO 국제규격형 냉동/냉장 컨테이너를 사용하였다. CA 컨테이너 환경조건 중 저장온도는 단일 품목으로 선적한 참외, '원황'배, 큰느타리버섯은 각각 4^oC, 10^oC, 1^oC로 설정하였고, 파프리카, 방울토마토, 애호박을 혼합 저장한 컨테이너는 8^oC로 설정하였다. 컨테이너 내부의 공기 조성은 특수 제작된 질소발생기와 순도 99.9%의 고순도 CO_2 가스를 이용하여 운송기간 동안 <Table 1>의 셋팅 조건으로 조절되도록 하여 모의 수송하였다.

4. 유통 중 품질 조사

모의 수송이 끝난 후 컨테이를 개봉하였고, 이후 참외, '원황'배, 혼합 저장하였던 파프리카,방울토마토, 그리고 애호박은 10^oC의 유통 온도에서, 큰느타리버섯은 1^oC에 보관하면서 품질 특성 변화, 부패율, 손실률 및 호흡특성을 조사하였다. 품질 특성차이가 크게 발생되지 않는 품목은 동일한 조건에서 손실률 및 주요 품질 저하 요인만 조사하였다.

5. 품질특성 조사

손실률은 대조구를 포함한 각 CA 처리구당 시료 20과를 대상으로 부패나 손실이 있는 시료를 선별하여 전체 시료량 대비 부패과 또는 결점과의 비율(%)로 나타내었다. 이때 대조구를 포함한 각 CA 처리구를 컨테이너에서 개봉시, 그리고 그 이후 상온 유통 경과일에 따라 조사하였고, 사진 자료를 확보하였다. 손실률이 4~6% 이상인 경우 육안 관찰에서도 품질 저하(wrinkling, shriveling 등)이 명확히 관찰되며, 이는 상업적 품질 유지에 영향을 미치는 기준으로 고려하였다[4].

생체중량의 감소율은 Kim 등[6])을 참고하여 모의 수송 전 초기 중량과 수송기간이 끝난 즉시부터 3일 간격으로 측정된 중량의 차이에 대한 백분율(%)로 나타내었다.

단일 혹은 혼합 품목들의 경도는 Carvalho 등[7]의 방법을 참고하여 정상과의 가식부를 기준으로 RDA(2018)의 부위별 구분에 따라 과피를 제거하고, 과육 적도 부위의 중벽을 중심으로 4등분한 과육 중 2부위의 과육을 채취하여 측정하였다. Texture analyzer(Lloyd Instrument BG/TA plus, Ametek, Inc., Fareham, UK)의 분석 조건은 depression limit 10 mm, test speed 2 mm/sec, trigger 0.98 N으로 설정하여 측정하였고, flat-tipped 형태의 직경 5 m probe를 이용하여 측정하였다.

가용성 고형물 함량(soluble solid content)은 Choi 등[8])

의 방법을 참고하여 RDA(2018)의 부위별 구분에 따라 정상과의 과피와 태좌 부위의 내벽을 제거하고, 적도부의 중벽을 중심으로 4등분한 과육 중 2부위의 과육을 착즙하여 디지털 당도계(PAL-1, Atago Co., LTD., Tokyo, Japan)로 측정하였다.

과육의 색도는 RDA(2018)의 구분에 따른 정상과 가식부의 중벽 부분을 기준으로 Lwin 등[9]의 방법을 참고해 Chromameter(CR-300, Minolta Co., Tokyo, Japan)를 사용하여 Hunter value인 L(lightness), a(redness) 및 b (yellowness) value를 측정하였다. 컨테이너 간의 색도 차이는 초기값에 대한 색차(color difference, ΔE)를 이용하여 계산하였다.

6. 호흡률 및 에틸렌 발생량

CO_2 농도는 Nichols 등[10]의 방법을 참고하여 각 시료들을 8.5 L 밀폐용기에 1과씩 넣어 1시간 방치한 후 내부에 축적된 head space의 기체 1 mL를 gas-tight syringe로 포집하여 GC (GC-7890B, Agilent Technol., Wilmington, DE, USA)를 이용하여 측정하였다. 이때 분석 조건으로 길이 30 m, 내경 0.32 mm의 column(HP-5, Agilent Technol.)을 사용하였고, 온도는 80°C에 이동상은 flow rate 5 $mL \cdot min^{-1}$의 He를 사용하였다. 검출기로는 thermal conductivity detector(TCD)를 사용하였고 호흡률은 $mL\ CO_2 \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$으로 계산하여 표기하였다. 에틸렌 발생량은 CO_2 농도와 동일한 방식으로 기체를 포집하였으며, GC(Bruker 450-GC, Bruker Corp., Billerica, MA, USA)를 이용하여 측정하였다. 에틸렌 발생량 분석 조건으로 column 온도는 70°C에 검출기로는 flame ionization detector(FID)를 사용하였고, 검출온도는 250°C로 설정하여 측정하였다. 에틸렌 발생량은 $\mu L\ C_2H_4 \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$으로 환산하여 표기하였다.

7. 통계 분석

데이터는 평균값을 구한 후 표준오차(standard error, SE)로 나타내었다. 데이터는 IBM SPSS 통계프로그램(ver30.0.0.0)을 이용하여 Duncan의 다중비교법으로 평균간 다중검정을 실시하여 각 데이터의 유의차를 비교하였다. 검정은 $p < 0.05$의 임계 유의 수준에서 평가했다.

결과 및 고찰

1. CA 컨테이너 이용 모의 수출 시 손실률

1.1. 단일 품목 모의 수출 시 손실률

참외는 4°C에서 10일간 CA(5/0, 5/5, 5/12) 컨테이너를 이용하여 모의 수출하였고, 컨테이너를 개봉한 후 10°C의 유통 온도에 보관하면서 손실률을 조사하였다(Fig. 1A). 컨테이너 개봉일(10D)에는 모든 처리구에서 손실률이 0%였

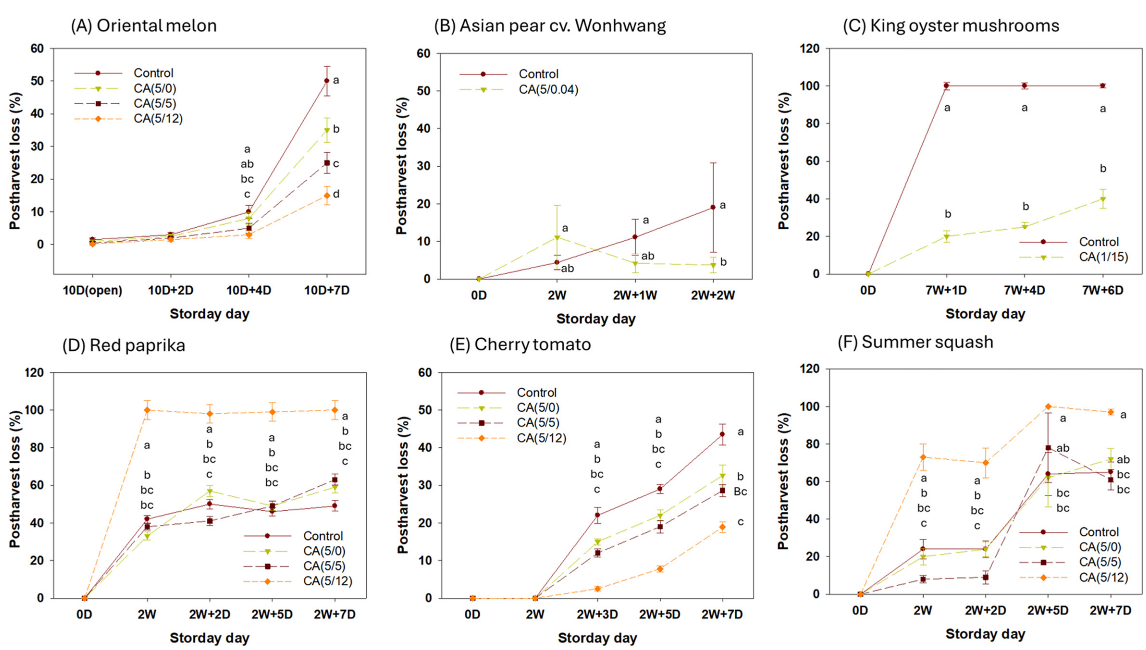

Fig. 1. Postharvest loss of fresh korean horticultural products subjected to simulated export in a controlled atmosphere (CA) container. Oriental melon (A), asian pear cv. Wonhwang (B), and king oyster mushrooms (C) were individually stored in a CA container, while red paprika (D), cherry tomato (E), and summer squash (F) were co-stored in a single CA container for simulated export. Each time point represents the storage duration in the CA container followed by an ambient distribution period. the control treatment was a commercial reefer container with an initial atmospheric composition of 23% oxygen and 0.03% carbon dioxide. all values are presented as the mean ± se (n = 3). means with the same letters are not significantly different according to duncan's multiple range test at $p < 0.05$.

으나, 개봉 후 10°C 유통 기간이 증가함에 따라 손실률이 급격히 증가하였다. 특히 대조구는 개봉 후 7일(10D+7D) 시점에서 손실률이 약 50%에 도달하여 품질 저하가 심각하게 증가한 반면, CA(5/12) 처리구에서는 20% 이하로 유지되며 가장 우수한 품질 유지 효과를 보였다.

'원황'배는 1°C에서 2주간 CA(5/0.04) 컨테이너를 이용하여 모의 수출하였고, 컨테이너를 개봉한 후 10°C의 유통 온도에 보관하면서 손실률을 조사하였다(Fig. 1B). 원황'배는 CA(5/0.04) 처리구에서 손실률이 대조구에 비해 낮았다. 대조구는 2주 유통 후 손실률이 19.0%까지 증가한 반면, CA(5/0.04) 처리구에서는 3.7%로 유지되었다. 이는 CA 환경이 저장 중 내부 대사작용을 조절하여 품질 저하를 억제한 결과로 해석된다.

큰느타리버섯은 1°C에서 7주간 CA(1/15) 컨테이너를 이용하여 모의 수출하였고, 컨테이너를 개봉한 후 1°C의 유통 온도에 보관하면서 손실률을 조사하였다(Fig. 1C). 큰느타리버섯은 컨테이너를 개봉한 후 1일째(7W+1D), CA(1/15)처리구의 손실률이 18.1%로였고, 대조구는 100%에 도달하여 유통이 불가능한 상태였다. 이는 CA(1/15) 조건이 큰느타리버섯의 장기 유통 시 품질 유지에 필수적인 역할을 할 수 있음을 의미한다.

1.2. 혼합 과채류 그룹(파프리카, 방울토마토, 애호박)의 모의 수출 시 손실률

파프리카, 방울토마토, 그리고 애호박을 8°C에서 2주간 CA(5/0, 5/5, 5/12) 컨테이너에 혼합 적재하여 모의 수출한 후, 컨테이너를 개봉한 후 10°C의 유통 온도에 보관하면서 손실률을 조사하였다(Fig. 1D, 1E, 1F). 혼합 과채류 그룹에서는 품목별 CA 환경에 대한 반응이 상이하게 나타났다. 파프리카의 경우, 개봉한 후 모든 처리구에서 건전한 품질 상태를 보였다. 그러나 CA(5/12) 처리구에서 개봉 후 2일(2W+2D) 만에 손실률이 100%에 도달하며 고이산화탄소 장해가 뚜렷이 관찰되었다. 반면, CA(5/0) 및 CA(5/5) 처리구에서는 손실률이 점진적으로 증가하였고, 개봉 후 7일(2W+7D) 시점에서도 대조구 대비 유사한 수준을 유지하였다. 방울토마토는 대조구에서 손실률이 가장 높았으며, CA(5/12) 처리구에서 가장 낮은 손실률(20% 이하)을 보였다. 개봉 후 7일(2W+7D) 시점에서 대조구의 손실률은

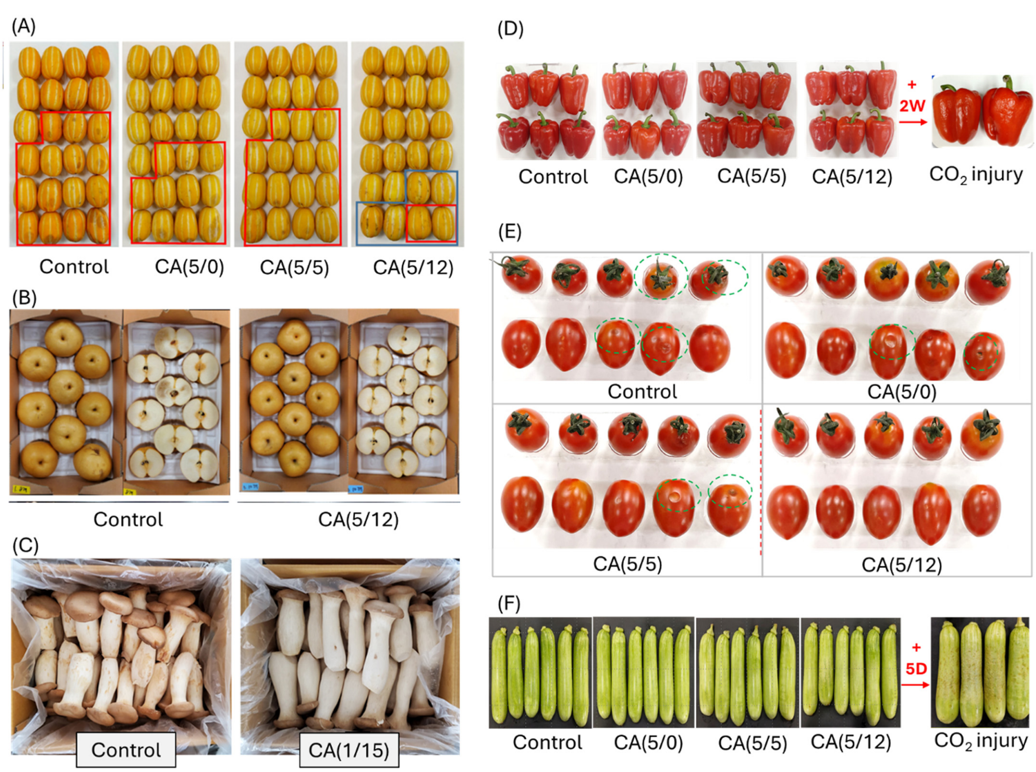

Fig. 2. visual quality of fresh korean horticultural products subjected to simulated export in a controlled atmosphere (CA) container. Oriental melon (A), asian pear cv. wonhwang (B), and king oyster mushrooms (C) were individually stored in a CA container, whereas red paprika (D), cherry tomato (E), and summer squash (F) were co-stored in a single CA container for simulated export. Photographs were taken after the storage period in the CA container followed by an ambient distribution period, specifically at the following time points: (A) 10 days in CA + 7 days ambient, (B) 2 weeks + 1 week, (C) 7 weeks + 4 days, (D) 2 weeks, (E) 2 weeks + 3 days, and (F) 2 weeks and 2 weeks + 5 days. The control treatment was a commercial reefer container with an initial atmospheric composition of 23% oxygen and 0.03% carbon dioxide.

50% 이상으로 증가한 반면, CA(5/12) 처리구는 품질 유지 효과가 가장 우수하였다. 애호박은 CA(5/12) 처리구에서 가장 빠른 품질 저하가 확인되었으며, 개봉 후 5일(2W+5D) 시점에서 손실률이 100%에 도달하였다. 반면, CA(5/0) 및 CA(5/5) 처리구에서는 손실률이 점진적으로 증가하였으며, 특히 CA(5/5) 처리구가 가장 낮은 손실률을 나타냈다.

2. 컨테이너 이용 모의 수출시 외관 품질

2.1. 단일 품목 모의 수출 시 외관 품질

참외는 컨테이너 개봉일(10D)에는 모든 처리구에서 외관 품질이 양호하였다. 그러나 개봉 후 7일, 대조구에서는 표피 변색, 골갈변 발생 등 심각한 품질 저하가 관찰된 반면, CA(5/12) 처리구에서는 이러한 증상이 현저히 감소하였다 (Fig. 2A).

'원황'배는 컨테이너 개봉일(2W)에는 모든 처리구에서 외관 품질이 양호하게 유지되었다. 그러나 개봉 후 1주(2W+1W) 경과 시점에서 대조구에서는 과육 갈변으로 인한 심각한 품질 저하가 확인된 반면, CA(5/0.04) 처리구에서 과육 갈변이 대조구에 비해 현저히 감소하였다(Fig. 2B).

큰느타리버섯은 컨테이너 개봉일(7W)에는 모든 처리구에서 외관 품질이 비교적 양호하게 유지되었으나, 개봉 후 4일(7W+4D)이 경과함에 따라 대조구)에서 심각한 품질 저하가 관찰되었다. 대조구의 경우, 버섯 표면이 갈변되고 조직이 심하게 연화되었으며, 일부 시료에서는 건조 및 수축이 두드러지게 나타났다. 반면, CA(1/15) 처리구에서는 대조구 대비 외관 품질이 우수하게 유지되었으며, 갈변 및 조직 연화 현상이 현저히 감소하였다(Fig. 2C).

2.2. 혼합 과채류 그룹(파프리카, 방울토마토, 애호박)의 모의 수출 시 외관 품질

파프리카, 방울토마토, 그리고 애호박을 8°C에서 2주간 CA(5/0, 5/5, 5/12) 컨테이너에 혼합 적재하여 모의 수출한 후, 컨테이너를 개봉한 후 10°C의 유통 온도에 보관하면서 외관 품질을 관찰하였다(Fig. 2D, 2E, 2F).

파프리카는 CA 컨테이너 개봉일(2W) 기준으로 모든 처리구의 손실률은 0%였으며, 수확 직후의 품질 상태가 유지되었다. 그러나 개봉 직후부터 CA(5/12) 처리구는 품질이 급격히 저하되었으며, 2W+2D 시점에서 손실률이 100%에 도달하였다. 이는 고농도 CO_2 환경(12%)이 파프리카의 품질을 심각하게 저하시킬 수 있음을 의미한다. 반면, 대조구, CA(5/0), CA(5/5) 처리구에서는 손실률이 점진적으로 증가하는 경향을 보였으며, 개봉 후 7일(2W+7D) 시점에서 대조구의 손실률이 CA(5/0) 및 CA(5/5) 처리구보다 낮게 유지되었다(Fig. 2D).

방울토마토는 컨테이너 개봉일(2W)에는 모든 처리구에서 표면 광택과 선명한 적색이 유지되었으며, 육질이 단단한 상태였다. 그러나 상온 유통 기간이 경과함에 따라 대조구 및 일부 CA 처리구에서 외관 품질 저하가 점진적으로 진행되었다. 특히, 대조구에서는 개봉 후 3일(2W+3D)부터 표면 광택이 감소하고, 과피에 주름 및 미세한 균열이 형성되었으며, 일부 과실에서는 탄력 저하와 과육 연화가 관찰되었다. 개봉 후 7일(2W+7D) 시점에서는 과피 변색과 부패 과실이 증가하며 품질 저하가 심화되었다. 반면, CA(5/0) 및 CA(5/5) 처리구는 대조구 대비 과피 변색과 연화가 지연되었으나, 개봉 후 시간이 경과할수록 품질 저하가 점차 진행되었다. CA(5/12)처리구가 가장 우수한 외관 품질을 유지하였다(Fig. 2E).

애호박은 컨테이너 개봉일(2W)에 모든 처리구에서 외관 품질이 양호하게 유지되었으나, 상온 유통 기간이 경과함에 따라 대조구 및 일부 CA 처리구에서 외관 품질이 급격히 저하되었다. 특히, CA(5/12) 처리구에서는 개봉 직후부터 과피 변색, 수축, 표면 손상 등이 관찰되었고, 저장 후반부에는 표면 손상과 부패 증상이 두드러졌다. 반면, CA(5/0) 및 CA(5/5) 처리구에서는 과피 변색이 대조구보다 약간 낮게 발생하였으며, 상대적으로 외관 품질이 양호하게 유지되었다. 특히, CA(5/5) 처리구는 2W+2D까지 대조구 대비 색깔, 표피 손상 등 색상 품질 유지 효과가 보다 우수하였다(Fig. 2F).

3. CA 컨테이너 이용 모의 수출 시 주요 품질 저하 요인 및 시사점

3.1. 단일 품목 모의 수출 시 품질 저하 요인 및 시사점

3.1.1. 참외

참외는 저장 및 유통 과정에서 수분 손실, 경도 저하, 부패 발생, 골갈변, 갈변 등과 같은 품질 저하가 발생할 수 있으며, 이를 감소시키기 위해서는 적절한 저장 조건 설정이 필요하다. 기존 연구에 따르면, 참외의 적정 저장 온도는 7~10°C이며, CA(Controlled Atmosphere) 저장 시 2~3% O_2 + 5~10% CO_2 환경이 추천된다[6)]. 또한, 0~3°C의 저온 환경에서 10~15% CO_2를 적용할 경우 부패 발생을 효과적으로 억제할 수 있으며, 3% O_2 + 10% CO_2 조건에서 과피 갈변 또한 감소하는 것으로 보고되었다[11]. 최근 연구에서는 선박 수출을 고려한 CA 컨테이너 활용 시, 4°C에서 5% O_2 + 12% CO_2 조건이 참외 골갈변 및 저온장해 발생을 유의적으로 감소시키는 효과가 있음을 확인하였다[12)].

본 실험에서 참외는 4°C에서 10일간 리퍼 컨테이너(초기 23.0/0.03)와 CA(5/0, 5/5, 5/12) 컨테이너를 이용하여 모의 수출하였고, 컨테이너를 개봉한 후 10°C의 유통 온도에 보관하면서 품질 특성 변화를 관찰하였다. 시간 경과에 따라 중량 감소율(Fig. 3A)은 증가하는 경향을 보였으며, 대조구에서 가장 높은 감소율을 나타냈다. 모의 수송 직후 대조구의 중량 감소율은 1.3%였으나, CA(5/0) 처리구에서는 0.7%,

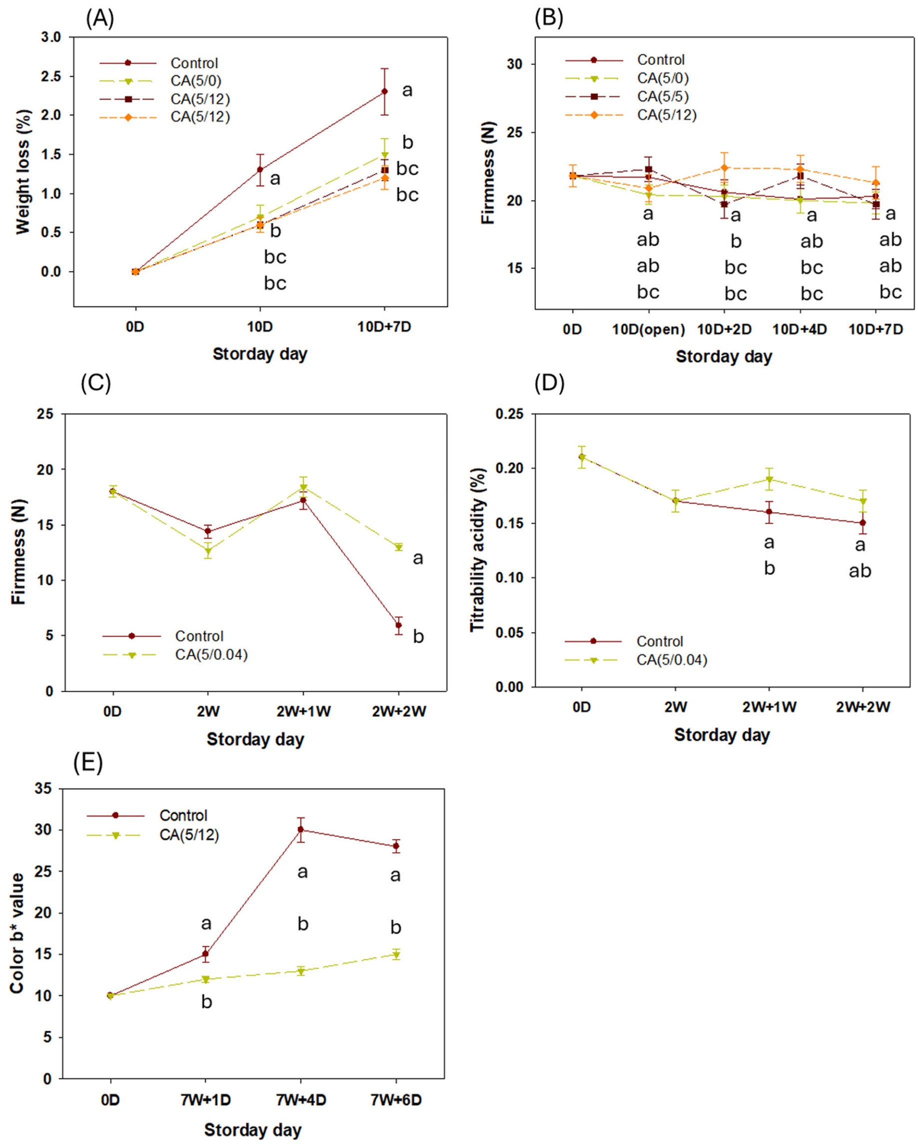

Fig. 3. Quality attributes of fresh korean horticultural products subjected to simulated export in a controlled atmosphere (CA) container. Weight loss (A) and firmness (B) of oriental melon, firmness (C) and titratable acidity (D) of asian pear cv. Wonhwang, and color b* value (E) of king oyster mushrooms were evaluated as key indicators of postharvest quality under different CA conditions. Each time point represents the storage period in the CA container followed by an ambient distribution period. The control treatment was a commercial reefer container with an initial atmospheric composition of 23% oxygen and 0.03% carbon dioxide. All values are presented as the mean ± SE (n = 3). Means with the same letters are not significantly different according to duncan's multiple range test at $p < 0.05$.

CA(5/12) 처리구에서는 0.6%로 나타났다. 이러한 차이는 유통 7일차까지 유지되었다. 경도(Fig. 3B)는 4°C에서 10일 저장하는 동안 처리구 간 차이가 없었으나, 이후 상온 보관 시 CA(5/12) 처리군이 대조구보다 높은 경도를 유지하였다. 4°C에서 10일간 저장하는 동안 처리구 간 유의적인 경도 차이는 나타나지 않았다. 그러나 컨테이너 개봉 후 10°C에서 보관하는 동안 CA(5/12) 처리구가 대조구 대비 높은 경도를 유지하였다. 특히, CA(5/12) 처리군의 경도는 모의 유통 2일차에 23.5 N까지 증가한 후, 유통 7일차에는 21.2 N으로 감소하였으나 다른 처리구에 비해 가장 높은 값을 유지하였다. 이는 고이산화탄소 환경이 과실의 경도 유지에 영향을 미칠 수 있음을 시사하며, 딸기에서 보고된 고이산화탄소 조건에서의 경도 증가 효과[11]와 유사한 결과를 보였다. 부패율과 중량감소율을 포함한 손실률(Fig. 1A)은 저장 기간 증가에 따라 상승하는 경향을 나타냈으며, 대조구에서 가장 높은 값을 기록하였다. 대조구의 부패율은 유통 7일차에 62%까지 증가하였으나, CA(5/12) 처리구에서는 12%로 유의적으로 낮았다(데이터 미제시). 이는 높은 CO_2

농도가 미생물 생장을 억제하는 효과가 있음을 보여주며, 기존 연구에서 제시된 3% O_2 + 10% CO_2 환경에서 부패 발생이 감소한 결과[11]와도 일치한다. 10°C에서 10일 저장 후, CA(5/12) 처리구에서 호흡량(23.8 mL $CO_2 \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$)과 에틸렌 생성량(1.1 µL $C_2H_4 \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$)이 대조구(호흡량 6.2 mL $CO_2 \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$, 에틸렌 0.6 µL $C_2H_4 \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$)에 비해 높게 나타났다(데이터 미제시). 그러나 모의 유통 후에는 처리구 간 유의적인 차이가 관찰되지 않았으며, 이는 CA 해체 후 내부 CO_2가 방출되면서 호흡이 활성화된 결과로 해석된다. 이 결과로, 참외는 높은 CO_2 농도에서 품질 유지 효과가 증가하였으며, CA(5/12) 처리구에서 가장 높은 상품율(77%)을 보였다. 이는 CA 환경이 중량 감소를 억제하고, 경도를 유지하며, 골갈변 발생을 감소시키는 데 효과적임을 시사한다. 이는 Ju 등[12]의 연구에서 보고된 바와 같이, 4°C에서 5% O_2 + 12% CO_2 조건이 참외 골갈변과 저온장해 발생을 유의적으로 감소시키는 효과가 있음을 뒷받침하는 결과이다.

3.1.2. '원황'배

'원황'배는 조생종 배 품종으로 수확 후 연화 속도가 빠르고 내부 갈변이 빠르게 진행하여 장기 저장 시 품질 저하가 우려되는 품목이다. 기존 연구에 따르면, '원황'배를 0~2°C에서 CA(3% O_2 + 3% CO_2)저장과 저온 저장한 결과, CA 저장이 중량감소율과 내부 갈변을 감소시키고, 경도를 유지하게 하여 저장 기간을 연장시킬 수 있다고 보고하였다. 미숙과는 CA 저장 60일째까지, 적숙과는 약 35일째까지 내부갈변이 발생하지 않았다. 단지 이 때 CA 환경은 3% O_2 + 3% CO_2 단일 조건으로 실험되었으며, 다른 CA 조성에 대해서는 연구되지 않았다[13].

본 실험에서 '원황'배는 적숙과를 이용하였다. 1°C에서 12주간 리퍼 컨테이너와 CA(5/0.04) 컨테이너를 이용하여 모의 수출하였고, 컨테이너를 개봉한 후 10°C의 유통 온도에 보관하면서 품질 특성 변화를 관찰하였다. 모의 수송 직후 경도(Fig. 3C)와 산함량(Fig. 3D)은 대조구와 CA처리구 간 유의차를 보이지 않았다. 그러나 모의 유통 1주 및 2주째에는 CA(5/0.04) 처리구가 대조구보다 경도와 산함량이 높게 유지되는 경향을 보였다. 이는 CA 저장이 '원황' 배의 연화 속도를 지연시키는 효과가 있음을 의미하며, 기존 연구[13]에서 보고된 3% O_2 + 3% CO_2 조건에서 경도 유지 효과와도 유사한 결과를 보였다. 호흡량은 모의 수송 및 모의 유통 기간 동안 CA 처리구(8.4~9.1 mL $CO_2 \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$)가 대조구(11.1~12.5 mL $CO_2 \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$)에 비해 낮은 호흡량을 보였다. 이는 CA 저장이 CA를 해제한 이후에도 호흡 속도를 감소시켜 대사 작용을 억제하였음을 나타낸다. 모의 수송 직후 내부 갈변을 포함한 손실율(Fig. 1B)은 CA(5/0.04) 처리구에서 11.1%로 나타나 대조구 4.4%에 비해 2배 이상 높은 수치를 보였으나 통계적 유의차는 없었다. 이 후 모의 유통 1주차에는 대조구의 손실률이 11.1%로 증가한 반면, CA 처리구는 4.2%로 낮았고, 모의 유통 2주차에는 이러한 차이가 더욱 뚜렷해져 대조구의 손실율이 19.0%까지 증가한 반면 CA 처리구에서는 3.7%로 유지되었다. 개봉직후 CA 처리구에서 발생한 내부 갈변은 상자에 따라 발생량에 차이가 컸으며, 이는 처리에 의한 차이라기보다는 '원황'배의 개체차이에 의한 결과로 볼 수 있다. 이러한 결과는 CA 처리구의 기체 조성이 대기 조건으로 전환되면서, 저장 기간 동안 축적되었던 갈변 잠재증상이 완화된 것으로 해석된다. CA(5/0.04) 처리구에서는 7주간의 장기 수송 및 유통 중에도 이취 발생이 관찰되지 않았으며, 이는 CA(5/0.04) 조건이 혐기적 발효를 유발하지 않았음을 의미한다. 이 결과를 요약하면 '원황'배는 CA(5/0.04) 조건이 대조구에 비해 호흡율을 낮추고 과육 갈변을 지연시키며, 손실률을 낮추는데 효과적이었음을 의미한다. 단, '원황'배에 대한 보다 적합한 CA 조건은 향후 수확시 성숙 정도 및 재배 상태에 따라 달라질 수 있으므로 보다 정밀한 실험이 요구된다.

3.1.3. 큰느타리버섯

큰느타리버섯은 저장 중 수분 손실, 갈변, 물러짐, 부패 등의 품질 저하가 일어나기 쉬운 품목으며[14], 특히 선박 운송을 포함한 장기 유통시 품질 유지가 어려운 것으로 알려져 있다. 기존 연구에 따르면 큰느타리버섯의 적정 저장 온도는 0~2°C이며, CA 저장 시 산소 농도를 1~2%로 유지할 경우 혐기적 발효로 인한 이취 발생 없이 저장이 가능하다고 보고되었다[14]. 그러나, 산소 농도가 3~4% 이하로 떨어지면 품질 저하가 발생할 수 있으며, 이산화탄소(CO_2) 농도가 12% 이상일 경우 갓의 개열이 지연되는 효과가 있지만, 심각한 갈변이 발생할 수 있다는 연구 결과도 보고된 바 있다[15]. Park와 Jhune[16]은 5% O_2 + 10~15% CO_2에서 큰느타리버섯을 저장한 결과, 15% CO_2 조건에서 줄기 갈변 억제에 효과가 나타났으며, 이취 발생에는 영향을 미치지 않았다고 보고하였다. 또한, CA 조건 보다는 유통 온도가 품질 유지에 더 중요한 영향을 미쳤으며, 저온(7°C) 유통할 경우 시장성이 4주 이상 유지된 반면, 20°C에서는 3주 이상 품질 유지가 어렵다고 하였다.

본 연구에서는 1°C에서 7주간 CA(1% O_2 + 15% CO_2) 컨테이너를 이용하여 모의 선박 운송을 진행하고, 컨테이너 개봉 후 동일온도(1°C)에서 품질 변화를 조사하였다. 그 결과 CA(1/15) 조거에서 저장된 큰느타리버섯은 갈변(Fig. 3E) 및 물러짐 발생이 대조구에 비해 유의적으로 낮았으며, 품질이 효과적으로 유지되었다. 대조구에서는 갓과 대에서 심각한 갈변 및 부패가 발생하였으며, 대부분의 버섯이 유통이 불가능한 수준까지 품질이 저하되었다. 이는 CA(1/15) 조건이 큰느타리버섯의 품질 저하를 지연시키는 데 효과적임을 의미하며, Park과 Jhune[16]의 연구에서 5% O_2 + 15%

CO_2의 조건이 줄기 갈변 억제가 제한적으로 효과를 발휘했다는 보고와는 약간의 차이를 보여준다.

큰느타리버섯을 7주간의 수송 후, 대조구의 손실률은 98.2%까지 증가한 반면, CA(1/15) 처리구에서는 18.1%로 유지되며 두 처리구 간 유의한 차이가 나타났다(Fig. 1C). 이는 CA 저장이 큰느타리버섯의 장기 유통 시 품질 유지에 필수적인 역할을 할 수 있음을 의미한다. 특히, 본 연구에서는 CA 저장 환경이 큰느타리버섯의 주요 품질 저하 요인인 수분 손실과 갈변을 효과적으로 억제하는 것이 확인되었다. Ikegaya 등[4]의 연구에서도 선박 운송 중 표고버섯의 주요 손실 요인은 중량 감소이며, 수분 손실이 4~6%를 초과할 경우 표면 주름, 수축, 탄력 감소, 그리고 갈변이 진행되어 품질이 급격히 저하되는 것으로 보고되었다. 본 연구에서도 대조구에서 심각한 갈변 및 부패가 발생한 반면, CA 컨테이너에서 저장된 큰느타리버섯은 품질 유지 효과가 뚜렷하게 나타났다. 또한, CA(1/15) 처리구에서는 7주간의 장기 수송 및 유통 중에도 이취(off-odor) 발생이 관찰되지 않았으며, 이는 CA 조건이 혐기적 발효를 유발하지 않았음을 의미한다. 이는 산소 농도가 1~2% 범위에서는 혐기적 발효로 인한 품질 저하가 발생하지 않는다는 기존 연구[15]와도 부합하는 결과이다. 본 연구에서는 CA 컨테이너가 단순한 공기 조성 조절 효과 뿐만 아니라, 리퍼 컨테이너보다 밀폐력이 우수하여 수분 손실을 억제하는 데에도 기여하였을 가능성이 있음을 보여주었다. 이는 CA 저장 시 수분 손실 감소가 품질 유지에 중요한 영향을 미친다는 기존 연구 결과[4]와도 일치한다.

3.2. 혼합 과채류 그룹(파프리카, 방울토마토, 애호박) 모의 수출 시 품질 저하 요인

파프리카, 방울토마토, 그리고 애호박을 8°C의 리퍼 컨테이너와 CA 컨테이너(5/0, 5/5, 5/12)에 혼합 적재하여 2주간 모의 운송 후 컨테이너를 개봉한 후 10°C 유통 온도에 보관하면서 품질 변화를 조사하였다. 이를 통해 적정 저장 온도 및 CA 조건이 서로 다른 품목들의 품질이 단일 컨테이너 내에서 CA 조성 조건에 따라 어떻게 달라지는지 파악하고자 하였다.

파프리카는 저장 중 과피 함몰, 색 변화, 색소 변형, 꼭지 시들음, 갈변, 이취 발생 등의 품질 저하가 일어나기 쉬운 품목이며, 특히 7°C 이하에서 장기 저장시 저온장해 발생 위험이 증가하는 것으로 알려져 있다[17]. 파프리카 저장을 위한 적정 이산화탄소 농도는 5%로 보고되었으며[15], MA(Modified Atmosphere) 포장 내부의 6.8% O_2 + 4.7% CO_2 일 때 10°C에서 저장성이 가장 좋았다고 보고되었다[17]. 그러나 이산화탄소 농가가 지나치게 높을 경우 품질 저하가 급격히 진행될 수 있으며, 특히 12% 이상의 CO_2 환경에서는 고이산화탄소 장해 발생이 증가한다[15].

본 실험에서 파프리카는 CA(5/12) 처리구에서 개봉 후 2일(2W+2D) 만에 손실률이 100%에 도달하며 고이산화탄소 장해가 뚜렷이 관찰되었다. 반면, CA(5/0) 및 CA(5/5) 처리구에서는 손실률이 점진적으로 증가하였고, 개봉 후 7일(2W+7D) 시점에서도 대조구 대비 유사한 수준을 유지하였다. 부패 발생율도 컨테이너 개봉 후 10°C에서 경과 일수가 증가함에 따라 점진적으로 증가하는 경향을 보였는데, 특히 꼭지 썩음병(stem-end rot)과 잿빛 곰팡이병 발생이 주요 부패 원인으로 작용하였다. 대조구에서는 CA 처리구들에 비해 상대적으로 낮은 수준의 부패 발생률을 유지하였는데, 이는 CA 환경이 부패균의 생장을 억제했을 가능성이 있으며, 또한 CA 환경이 노화 및 숙성을 촉진하는 에틸렌의 생성을 억제함으로써 연화를 방지하고, 세포벽 구조를 유지하여 부패균의 침입을 저해했을 가능성이 있다. 이러한 결과는 Watkins[15]의 연구에서 제시된 5% CO_2 수준이 적정 저장 조건인지 다시 고려할 필요가 있음을 보여준다.

방울토마토는 저장 중 표면 함몰, 색 변화, 색소 변형, 과피 주름, 연화, 이취 발생 등의 품질 변화가 쉽게 발생하는 품목이며, 특히 5°C 이하의 온도에서 장기 저장시 저온장해 발생 위험이 증가하는 것으로 알려져 있다[18]. 방울토마토의 품질 저하는 주로 수분 손실과 조직 연화로 인해 발생하며, 이는 장거리 수출 시 품질 유지를 위한 중요한 요인으로 작용한다[19]. 기존 연구에서는 10°C에서 5% CO_2 조건으로 저장할 경우 15일까지 저장이 가능하며[18], 13.1% 이하의 산소와 8.3% 이상의 이산화탄소 환경에서 호흡율이 유의하게 감소한다고 보고되었다[20]. 그러나 O_2 및 CO_2 농도가 부적절할 경우, 과피 함몰, 이취 발생, 세포막 손상과 같은 부작용이 나타날 수 있다[18, 21]. 본 연구에서는 혼합 저장으로, 8°C에서 2주간 CA(5/0, 5/5, 5/12) 컨테이너를 이용하여 모의 수출하였고, 컨테이너 개봉 후 10°C에서 모의 유통하면서 품질 변화를 조사하였다. CA 컨테이너 개봉 후 7일(2W+7D) 시점에서 대조구의 손실률은 50% 이상으로 급격히 증가하였으며, CA(5/0) 및 CA(5/5) 처리구에서도 손실률이 증가하였으나, 대조구보다는 낮은 수준이었다. 반면, CA(5/12) 처리구에서는 가장 낮은 손실률(20% 이하)을 유지하며 품질 유지 효과가 가장 좋았다. 방울토마토의 외관 품질 변화에서도 유사한 경향이 확인되었다. 컨테이너 개봉일(2W)에는 모든 처리구에서 표면 광택과 선명한 적색이 유지되었으며, 육질 또한 단단한 상태였다. 그러나 상온 유통 기간이 경과함에 따라 대조구 및 일부 CA 처리구에서 외관 품질 저하가 점진적으로 진행되었다. 특히, 대조구에서는 개봉 후 3일(2W+3D)부터 표면 광택이 감소하고, 과피에 주름과 미세한 균열이 형성되었으며, 일부 과실에서는 탄력 저하와 과육 연화가 관찰되었다. 개봉 후 7일(2W+7D) 시점에서는 과피 변색과 부패 과실의 증가로 품질 저하가 심화되었다. 이러한 결과는 CA(5/12) 처리가 방

울토마토의 장기 저장 및 수출을 위한 최적의 저장 환경으로 고려될 수 있음을 의미한다.

애호박은 저장 중 과피 갈변, 수침상 병변, 색소 변형, 연화, 내부 투명화 등의 품질 저하가 발생하기 쉬운 품목으로, 특히 5°C 이하에서 저온장해 발생이 증가하는 것으로 알려져 있다[22]. 기존 연구에서는 10°C에서, 1~3% O_2+1% CO_2 환경에서 15~20일간 저온장해 발생을 효과적으로 억제할 수 있음이 보고되었다[22].

본 연구에서는 8°C에서 2주간 CA(5/0, 5/5, 5/12) 컨테이너를 이용하여 모의 수출하였고, 컨테이너 개봉 후 10°C에서 모의 유통하면서 품질 변화를 조사하였다. CA 컨테이너 개봉 후 시간이 경과함에 따라 모든 처리구에서 손실률이 점진적으로 증가하는 경향을 보였다. 특히, CA(5/12) 처리구에서는 개봉 후 5일(2W+5D) 시점에서 손실률이 100%에 도달하여 높은 CO_2 농도(12%)가 애호박의 품질 유지에 부적절함을 나타냈다. 개봉 후 7일(2W+7D) 시점에서 대조구의 손실률은 약 90%까지 증가하였고, CA(5/0) 및 CA(5/5) 처리구는 대조구보다 낮은 손실률을 보였으며, 특히 CA(5/5) 처리구가 가장 낮은 손실률을 보여 장거리 유통 시 보다 적절한 저장 조건으로 판단되었다. 애호박의 외관 품질에서도 유사한 경향이 확인되었다. CA(5/12) 처리구에서는 개봉 직후부터 과피 변색, 수축, 표면 손상 등이 나타났으며, 저장 후반부에는 부패 증상이 두드러졌다. 이는 고농도 CO_2 환경에서 발생하는 생리장해로 인해 애호박의 조직 손상이 촉진되었음을 의미한다. 반면, CA(5/0) 및 CA(5/5) 처리구에서는 과피 변색과 조직 연화가 대조구보다 적었으며, 상대적으로 외관 품질이 양호하게 유지되었다. 특히, CA(5/5) 처리구는 개봉 후 2일(2W+2D)까지 대조구 대비 색상 품질 유지 효과가 약간 높았으며, 표면 수축과 생리적 손상이 감소하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 Lee와 Yang[22]의 연구에서 보고된 애호박 저장을 위한 1~3% CO_2 조건이 본 연구에서도 유사한 품질 유지 효과를 나타낼 가능성이 높음을 의미한다.

3.3. 포장 형태와 CA 환경 상호작용에 따른 신선 농산물 품질 변화

포장 형태는 신선 농산물의 저장 및 유통 중 품질에 중요한 영향을 미친다. 포장재로는 polyethylene (PE), poly vinyl chloride (PVC), poly propylene (PP) film 등이 주로 이용되며 종류와 두께에 따라 산소 및 이산화탄소 투과율이 다른데, 이는 과채류의 품질 변화에 중요한 영향을 준다[23]. 본 연구에서는 단일 품목(참외, '원황' 배, 큰느타리버섯)과 혼합 품목(파프리카, 방울토마토, 애호박)을 대상으로 서로 다른 형태로 포장된 산물들에 CA(Controlled Atmosphere) 환경을 적용하여 품질 유지 효과를 평가하였다. 수출 시에는 수입국에서 바이어가 원하는 형태의 포장이 이루어져 운송되는 특성이 있어, CA 컨테이너를 활용할 때도 이미 포장이 완료된 상태로 적재된다. 본 실험에서는 수출 시 기존에 이미 수행하고 있던 포장 형태를 그대로 사용하였다. 컨테이너 내부의 기체 조성과 포장 내부의 기체 환경은 서로 영향을 주면서 품질 변화가 발생한다. MA 포장은 포장 내부의 기체 조성을 변화시켜 농산물의 호흡을 조절하고 품질 저하를 억제하는 역할을 한다. CA 환경이 적용된 컨테이너 내부에서 MA 포장된 품목이 적재될 경우, 포장 내외부의 기체조성이 서로 영향을 주면서 예측할 수 없는 결과가 발생할 수 있다. 예로, MA 포장 내부의 O_2 농도가 낮고 CO_2 농도가 높아질 경우, CA 컨테이너 내부와의 기체 교환 속도 차이에 따라 품질 변화가 가속화될 가능성이 있다. 애호박의 경우 필름 내부에서 CO_2 농도가 급격히 상승하여 과피 변색과 수침상 등이 발생한 것으로 보인다. 특히 CA(5/12)처리구에서 그 속도가 빨랐는데, 이는 투명한EVA/PE 기반의 필름으로 밀착된 포장이 고농도의 이산화탄소 환경인 컨테이너로 CO_2를 빠르게 배출하지 못하여 CO_2가 과도하게 축적되었기 때문으로 판단된다. 반면, 개별 포장이 적용되지 않은 방울토마토의 경우 CA(5/12) 처리구에서 품질 유지 효과가 유의적으로 뛰어났다. 이는 포장 없이 CA 환경에 직접 노출됨으로써 O_2와 CO_2 농도가 균형을 이루며 호흡 대사가 안정적으로 유지된 결과로 해석된다. 만약 방울토마토를 필름이나 용기 등으로 포장하여 CA 컨테이너에 적재되었다면, 본 실험의 결과와는 다른 CA 조건에서 품질 유지효과가 더 뛰어났을 수도 있다. 따라서 향후 복합 품목을 적재하여 운송할 때 CA 조건 하에서 상호작용하면서 적절한 품질을 유지할 수 있는 MA 조건을 찾는 연구가 필요하다.

파프리카, 방울토마토, 그리고 애호박을 컨테이너에 복합 저장시, 대조구인 리퍼 컨테이너와 적정 환경의 CA 컨테이너에서의 품질 유지 효과를 비교하면, 파프리카와 애호박의 품질은 대조구와 비교시 CA 처리 효과가 미미하거나 없는 반면, 방울토마토는 CA 처리 효과가 뛰어났다. 따라서 향후 혼합 적재하여 수출시 본 실험보다 더 적절한 CA 환경 조건이 구명되기 전까지는 파프리카와 애호박은 리퍼 컨테이너로 운송하는 것이 경제성을 높일 수 있다. 이 때, 보다 적절한 MA 포장 방법이 적용된다면 신선도 유지 기간이 보다 연장될 수 있다. 또한 향후, 신선 농산물 혼합 수출을 위해서는 생산시기, 저장온도 및 적정 CA 조건을 고려하여 유사한 군끼리 혼합 적재하여 모의 수출시 환경 조건을 설정하는 연구가 필요하며, CA 조건 하에서 MA 포장을 적절히 개선하는 것이 필요하다. 농산물 수출시 품질은 재배지역, 수확 시 품질, 선적 전 전처리 과정, 유통 및 저장 조건 등에 따라 크게 영향을 받는다[24]. 또 운송 조건은 수출국의 검역법이나 절차, 콜드체인 수준에 따라 달라질 수 있다. 따라서 한 번의 수출 모의 실험 결과가 늘 동일하게

나타나는 것은 아니며, 계속 적으로 데이터를 수집하는 것이 필요하다. 이 연구 결과는 다양한 포장 형태를 가지는 과일과 채소는 단일 또는 혼합 적재하여 수출한 결과로, CA 컨테이너를 이용한 농산물 수출의 참고 자료로 활용할 수 있다.

요 약

본 연구는 신선 농산물의 장거리 해상 운송 시 품질 유지 효과를 평가하기 위해 리퍼 컨테이너(reefer container)와 제어 대기(CA, controlled atmosphere) 컨테이너를 이용한 모의 수출 실험을 수행하였다. 단일 품목(참외, '원황' 배, 큰느타리버섯)과 혼합 품목(파프리카, 방울토마토, 애호박)을 대상으로 포장 형태와 CA 조건이 품질 유지에 미치는 영향을 분석하였다. 실험 결과, 참외와 배는 CA(5/12) 및 CA(5/0.04) 환경에서 저장성이 향상되었으며, 큰느타리버섯은 CA(1/15) 환경에서 갈변 및 수분 손실이 최소화되었다. 반면, 혼합 품목에서는 품목별 특성에 따라 CA 환경의 영향이 다르게 나타났다. 방울토마토는 CA(5/12) 환경에서 가장 우수한 품질 유지 효과를 보였으나, 파프리카와 애호박은 높은 CO_2 농도에서 과피 변색과 조직 연화가 발생하였다. MA(Modified Atmosphere) 포장된 품목의 경우, 포장 내부의 기체 조성이 CA 환경과 상호작용하여 품질 변화에 영향을 미는데, CO_2에 민감한 품목들이 고농도의 CO_2 환경에서 장해가 발생하는 것을 관찰하였다. 본 연구를 통해 CA 컨테이너의 활용이 신선 농산물의 품질 유지에 효과적임을 확인하였으며, 품목별 최적의 CA 조건을 제시하였다. 혼합 품목 선적 시 특히, MA 포장된 품목의 경우 CA 환경에서 내부 기체 조성을 지속적으로 모니터링할 필요가 있으며, 이를 고려한 저장 조건 최적화가 필요하다. 본 연구 결과는 신선 농산물의 장거리 유통 시 품질 유지 기술 개발에 기여할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 인하대학교의 지원에 의해서 연구되었으며 농촌진흥청 저장유통과의 협력으로 수행되었음에 감사의 뜻을 표한다.

참고문헌

1. Lukasse, L., Schouten, R., Castelein, R., Lawton, R., Paillart, M., Guo, X., Woltering, E., Tromp, S., Snels, J. and Defraeye, T. 2023. Perspectives on the evolution of reefer containers for transporting fresh produce. Trends Food Sci. Technol. 140: 104147.
2. Yang, H., Chang, M.S., Park, P., Eum, H.L., Cho, J.H., Choi, J.W., Lim, S., Yun, Y.E., Choi, H.R., Park, M.H., Hong, Y. and Lee, J.H. 2023. Effectiveness of controlled atmosphere container on the freshness of exported PMRsupia melon. Food Sci. Preserv. 30: 822-832.
3. Ikegaya, A., Kosugi, T., Toyoizumi, T., Nagafuji, A., Yamazaki, S. and Arai, E. 2021. Ingenuity in packaging maintains the quality of fresh fruits and vegetables in mixed cargo exported by sea. Packag. Technol. Sci. 34: 693-708.
4. Ikegaya, A., Toyoizumi, T., Nagafuji, A., Yamazaki, S., Saika, T. and Kosugi, T. 2023. Development of a low-cost and simplified technology to maintain the quality of fresh produce in mixed cargo shipments. Food Human. 1: 524-535.
5. Arduino, G., Carrillo Murillo, D. and Parola, F. 2015. Refrigerated container versus bulk: evidence from the banana cold chain. Marit. Policy Manag. 42: 228-245.
6. Kim, J.S., Choi, H.R., Chung, D.S. and Lee, Y.S. 2010. Current research status of postharvest and packaging technology of oriental melon (*Cucumis melo* var. makuwa) in korea. Hortic. Sci. Technol. 28: 902-911.
7. Nascimento, P.A.M., de Carvalho, L.C., Júnior, L.C.C., Pereira, F.M.V. and de Almeida Teixeira, G.H. 2016. Robust PLS models for soluble solids content and firmness determination in low chilling peach using near-infrared spectroscopy (NIR). Postharvest Biol. Technol. 111: 345-351.
8. Choi J.W., Chang M.S., Lee J.H., Hong, Y. and Kim, J,G. 2018. Changes in quality of oriental melon 'Smartkkul' during vessel transportation. Hortic. Sci. Technol. 36: 560-568.
9. Lwin, H.P. and Lee, J. 2020. Fruit quality and major metabolites in cold-stored 'Wonhwang'Asian pears are differentially affected by fruit size. J. Sci. Food Agric. 100: 5117-5125.
10. Nichols, R. and Hammond, J. 1975. The relationship between respiration, atmosphere and quality in intact and perforated mushroom pre-packs. Int. J. Food Sci. Technol. 10: 427-435.
11. Lee S.H., Kim C,B., Seom, Y.J., Kim C.Y. and Yoon, J.T. 1999. Effect of different carbon dioxide and oxygen concentration on the quality of oriental melon during CA storage. Korean J. Postharvest Sci. Technol. 6: 386-391.
12. Ju, W., Lee, J.H., Do, E., Ko, D.Y., Jee, E., Chang, M.S., Eum, H.L., Yang, H. and Ku, K.M. 2025. Controlled atmosphere storage enhances Korean melon shelf life and quality: A comparative metabolic analysis with reefer container export. Postharvest Biol. Technol. 219: 113238.
13. Hong, S.S., Hong, Y.P., Im, B.S., Jeong, D.S. and Shin, I.S. 2024. Influence of picking stage and storage type on the fruit respiration change and panel test in 'Wonhwang', 'Hwasan', and 'Mansoo' pear. Kor. J. Hort. Sci. Technol. 22: 55-62.
14. Choi, J.W., Lee, J.H., Oh, I.H., Lim, S., Im, J.H., Yang, H.J., Choi, H., Shin, I.S. and Hong, Y. P. 2021. Effects of quality grade, trimming, and packaging method on shelf life of king oyster mushrooms. J. Mushrooms 19: 234-245.
15. Watkins, C.B. 2000. Responses of horticultural commodities

to high carbon dioxide as related to modified atmosphere packaging. HortTechnology 10: 501-506.
16. Park, Y.M. and Jhune, Y.M. 2010. Quality changes of king oyster mushroom as influenced by controlled atmosphere regimens during storage and shelf temperature conditions. Hortic. Sci. Technol. 28: 70-76.
17. Cerit, I. and Demirkol, O. 2020. Effects of modified atmosphere packaging conditions and ethylene absorber on the quality of red bell pepper. J. Food Nutr. Res. 59: 35-43.
18. Taye, A.M., Tilahun, S., Park, D.S., Seo, M.H. and Jeong, C.S. 2017. Effects of continuous application of CO_2 on fruit quality attributes and shelf life during cold storage in cherry tomato. Hortic. Sci. Technol. 35: 300-313.
19. Ikegaya, A., Yamazaki, S., Yamaga, I., Kosugi, T., Toyoizumi, T., Nagafuji, A., Saika, T. and Arai, E. 2023. Controlled atmosphere maintains the quality of certain fresh produce in mixed cargo shipments. J. Food Process Eng. 46: e14297.
20. Kitazawa, H., Sato-Takabe, Y. and Yamada A. 2023. Evaluation of the Impact of oxygen and carbon dioxide atmospheres on respiration rate measurement of cherry tomato. J. Packag. Sci. Technol. 32: 387-396.
21. Yahia, E.M. 2009. Modified and controlled atmospheres for the storage, transportation, and packaging of horticultural commodities. CRC press, USA, pp.159-192.
22. Lee, K. and Yang, Y. 1997. Physiological characteristics of chilling injury and CA effect on quality retention during cold storage of squash (*Cucurbita moschata*). Proceeding of ISHS Acta Horticulturae 483 International Symposium on Vegetable Quality of Fresh and Fermented Vegetables, Seoul, Korea, pp 339-348.
23. Park, S.J., Kim, J.Y., Laksana, A.J. and Kim, B.S. 2023. Effect of Pre-treatment and Packaging Method on Freshness Prolongation of Spring Kimchi Cabbage during Low Temperature Storage. Korean J. Packag. Sci. Technol. 29: 119-128.
24. Park, J., Kim, D., Seo, W. and Jung, H. 2023. Measurement and analysis of physical environmental load during handling and distribution of domestic fruits-focused on Seongju Korean melon. Korean J. Packag. Sci. Technol. 29: 129-138.

투고: 2025.03.24 / 심사완료: 2025.03.25 / 게재확정: 2025.03.31