

팔릿 단위 기체환경 제어 저장한 배추의 품질 변화와 품질 예측 모델

천호현 · 최은지 · 이정현¹ · 손재용² · 박찬완^{2*}

세계김치연구소 신공정발효연구단, ¹충남대학교 식품공학과
²국립농업과학원 수확후관리공학과

Quality Prediction and Change in Quality of Kimchi Cabbages Stored Under a Pallet Unit-Controlled Atmosphere

Ho Hyun Chun, Eun Ji Choi, Jeong Hyeon Lee¹, Jae Yong Son², and Chun Wan Park^{2*}

Advanced Process Technology and Fermentation Research Group, World Institute of Kimchi

¹*Department of Food Science and Technology, Chungnam National University*

²*Division of Postharvest Engineering, National Institute of Agricultural Sciences*

Abstract

This study was conducted to investigate the quality of kimchi cabbages stored under a pallet unit-controlled atmosphere (PUCA), containing 2% O₂ and 5% CO₂, and to develop quality prediction models for cabbages stored under such conditions. Summer and winter cabbage samples were divided into PUCA-exposed groups and atmospheric air-exposed control groups (in a cold storage). The control summer cabbages lost up to 8.31% of their weight, whereas the PUCA-exposed summer cabbages lost only 1.23% of their weight. Additionally, PUCA storage effectively delayed the reduction in cabbage moisture content compared with the control storage. After storage for 60 and 120 days of the summer and winter samples, respectively, the reducing sugar contents were higher in the PUCA groups than in the control groups. The linear regression analysis-derived equations for predicting the storage period, weight loss, and moisture content in the control groups, as well as those for predicting the storage period and weight loss in the PUCA groups, were appropriate according to the adjusted coefficient of determination, root mean square error, accuracy factor, and bias factor values. Therefore, this PUCA system would be useful for improving the shelf life of the postharvest summer and winter cabbages used in the commercial kimchi industry.

Key words: kimchi cabbage, storage, pallet unit-controlled atmosphere, quality, prediction

서 론

국내에서 가장 많이 소비되고 있는 엽채류인 배추 (*Brassica rapa* L. ssp. *pekinensis*)는 품종 개량과 재배 기술 개발로 연중 생산하고 있지만 계절별 배추의 주산지는 지역의 기후 환경에 따라 다르다(Ku et al., 2014). 배추는 생육 적정 온도가 18-22°C인 호냉성 채소로서 노지 재배율이 95% 이상이며 생산량의 80% 이상은 김치 가공에 이용된다(Choi et al., 2015). 수확시기에 따라 배추의 품종, 무게와 결구 상태는 차이가 있으며 이는 김치의 이화학적 품질 및 관능적 특성과 밀접한 관련이 있다(Yoon & Kim, 2000).

여름철에 강원도 평창, 횡성, 정선과 태백을 중심으로 해발고도 700 m 이상 지역에서 수확하는 고랭지 배추는 연간 약 40만톤으로 전체 배추 생산량 중 약 16%를 차지하지만 계절 특성상 폭염과 가뭄이나 국지성 호우에 의한 영향으로 작황 변동 가능성이 높으며 이로 인해 김치 원재료 공급과 가격의 불안정성이 발생한다(Eum et al., 2013). 2019년 서울시농수산물공사에서 발표한 월별 배추 도매 가격 동향에 따르면 6월은 5,600원/10 kg이었지만 9월은 14,400원/10 kg으로 6월 대비 약 2.5배 이상 상승하였다. 또한 월동 배추는 수확 후 최대 3개월까지 저장이 가능한 반면 고랭지 배추는 상대적으로 결구력이 약하고 빠른 호흡과 높은 증산 속도 때문에 저온에서 1개월 이상 저장이 어려운 것으로 알려져 있다(Bae et al., 2015). 그러므로 1월부터 9월까지 김치 원재료 수급을 집중적으로 담당하는 월동 배추와 고랭지 배추의 분산 출하를 통한 안정적 수급 체계 구축을 위해 수확 후 장기 저장 기술 개발이 시급하다.

현재 산지유통센터 또는 김치가공업체에서는 배추 선도

*Corresponding author: Chun Wan Park, Division of Postharvest Engineering, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju, Jeollabuk-do 54875, Korea.

Tel: +82-63-238-4125; Fax: +82-63-238-4105

E-mail: chunwan1@korea.kr

Received July 9, 2020; revised August 4, 2020; accepted August 11, 2020

유지를 위해 저온 저장고를 이용하고 있지만 온도 관리만으로 배추 저장한계기간 연장에 제한성이 있다(Choi et al., 2019). 이에 따라 국내 농식품 산업 현장에서 controlled atmosphere (CA) 저장 기술 도입에 대한 요구가 증가하고 있다(Bahar & Lichter, 2018). 시설형 CA 저장고는 대량으로 농산물 입고 후 내부 기체 농도와 온도를 병합하여 조절함으로써 저장 농산물 호흡을 효과적으로 억제할 수 있다(Park et al., 2016b). 그러나 시설형 CA 저장은 설치비용이 높은 단점이 있다. 또한 농산물 입고와 출하를 위한 잦은 출입문 개폐와 장비 운용 미숙으로 인한 습도 저하 및 부적절한 온도 노출로 중량 감도가 심하게 나타날 수 있으며 설정 기체 농도의 반복적 재조정으로 높은 에너지 손실이 발생할 우려가 있다(Carvalho et al., 2012). 반면 pallet unit-CA 시스템은 기존 저온 저장시설에 설치가 가능하며 저장고 내부 기밀도와 기체환경에 영향을 받지 않고 팠릿 단위로 기체 및 습도를 조절할 수 있는 장점이 있다(Selcuk & Erkan, 2015; Choi et al., 2020). 또한 이 시스템은 팠릿별로 각각의 기체환경 조절이 가능하기 때문에 다품목 저장 목적에도 유용하게 활용 할 수 있는 특징이 있다.

신선 농산물의 저장 및 유통 중 품질 예측 연구는 저장 환경 조건에서 저장일 경과에 따른 중량 및 이화학적 품질 변화에 대하여 측정된 데이터를 바탕으로 수학적 모델을 개발하는 분야이다(Song et al., 2019). 이러한 품질 예측 모델은 농산물의 품질 저하를 사전에 예방하거나 저장 농산물을 적기에 출하하는데 이용할 수 있다(Niu et al., 2020). 국외에서 호흡률 모델을 이용한 저온과 상온 저장 중 절단 양배추의 당 소비량 예측(Lei et al., 2006), 기체 치환 포장한 딸기의 headspace gas kinetic 모델과 부패율 모델을 이용한 shelf life 예측(Matar et al., 2018)과 저장 중 감자의 sucrose, glucose와 fructose 예측을 위한 선형 회귀 모델 개발(Heltoft et al., 2017)에 관한 연구가 수행되었다. 한편 국내에서 CA 저장고에 저장한 사과와 저장 한계기간 설정을 위한 중량감모을 예측 모델 개발 연구(Park et al., 2016a)는 진행되었지만 수확 후 저장 중 배추 중량 및 품질 변화 예측에 관한 연구는 현재까지 보고된 바 없다.

따라서 본 연구에서는 pallet CA 시스템이 고랭지 배추와 월동 배추의 선도 유지기간 연장에 미치는 영향을 규명하고 CA 저장 중 배추의 중량, 환원당 함량과 수분 함량을 예측할 수 있는 수학적 모델을 수립하고자 하였다.

재료 및 방법

실험재료

본 연구는 계절별 배추 주산지인 수확 시기를 고려하여 2019년 8월에 강원도 정선에서 수확한 ‘춘광’ 품종의 고랭

지 배추와 2020년 1월에 전남 진도에서 수확한 ‘아리랑’ 품종의 월동 배추를 각각 사용하였다. 외관 손상이 없는 2.3-2.7 kg 중량의 고랭지 배추와 3.3-3.6 kg 중량의 월동 배추는 시료로 각각 선별하여 high density polyethylene (HDPE) 박스(55 cm×37 cm×32 cm)에 4-5포기씩 세워 담았다. 수확 당일 박스 포장한 배추는 전북 전주에 위치한 저온 저장고까지 운송하였다.

팠릿 단위 기체 제어 시스템과 저장 조건

저온 저장고(약 25 m²) 내 설치한 팠릿 단위 기체환경 제어장치는 Fig. 1과 같이 기밀 컨테이너와 기체 공급부, 기체 농도 제어 및 저장부로 나누어진다. 상용 팠릿(110 cm×110 cm) 기준 HDPE 박스 6단까지 적재 가능하도록 철제 구조 기밀 컨테이너는 125 cm×125 cm×235 cm 크기로 제작하였으며 옆면은 polyurethane 필름(2.58 mL O₂/m²·day·atm)을 이용하여 내부 기체가 외부로 유출되지 않도록 완전히 접착하였다. 기체 공급부는 질소발생기(GNG-2n-6, GSA Co., Gwangju, Korea)와 이산화탄소 공급장치(99.999% 순도, Hankook special gases Co., Iksan, Korea)로 구성하였으며 기밀 컨테이너 내부의 기체환경은 99.9% 이상의 고순도 N₂와 CO₂를 공급하여 조절하였다. 기체 농도 제어 및 저장부는 zirconia 타입의 O₂ 센서와 non-dispersive infrared(NDIR) 타입의 CO₂ 센서가 결합한 통합 센서 모듈(SH-VT-250-O2, Sohatech Co., Seoul, Korea), 컨테이너 내부 기체를 통합센서로 이송시키는 순환펌프(DAP-3043, Robotmart, Seoul, Korea), 전자밸브를 이용한 O₂와 CO₂ 농도 제어장치(DDC-478, Systronics Co., Bucheon, Korea)와 O₂와 CO₂ 농도 변화 데이터 수집장치(SM-7000T, Systronics Co., Bucheon, Korea)로 구성하였다.

기밀 컨테이너에 배추가 담긴 HDPE 박스 30개를 5단으로 적재 후 내부 O₂와 CO₂ 농도는 2와 5%로 설정하였다. 배추의 계절적 특성을 고려하여 고랭지 배추는 2±0.5°C에서 60일 동안 저장하였으며 월동 배추는 0±0.5°C에서 120일 동안 저장하였다. 저온 저장고 대기 환경에 노출 상태로 저장한 배추 시료는 대조구로 하였다.

저장 중 기밀 컨테이너 내부 기체 조성 제어 알고리즘과 기체환경 변화 분석

기밀 컨테이너 내부의 기체환경을 제어하기 위한 기본 알고리즘은 Park et al. (2020)이 보고한 방법을 참고하여 기체환경 측정 알고리즘(a)과 기체환경 측정 데이터 기반 O₂와 CO₂ 농도 제어 알고리즘(b)으로 구분하였다(Fig. 2). 기체환경 측정 알고리즘은 순환펌프 계통 작동, 공압 튜브의 내부 잔류 기체 영향 최소화를 위한 통합센서 안정화/O₂와 CO₂ 농도 측정 및 순환펌프 계통 작동 정지 단계를 반복하는 과정으로 설계하였다(Fig. 2a). 또한 측정된 O₂와 CO₂ 농도가 설정 조건에서 ±0.5% 범위를 벗어났을 시 O₂

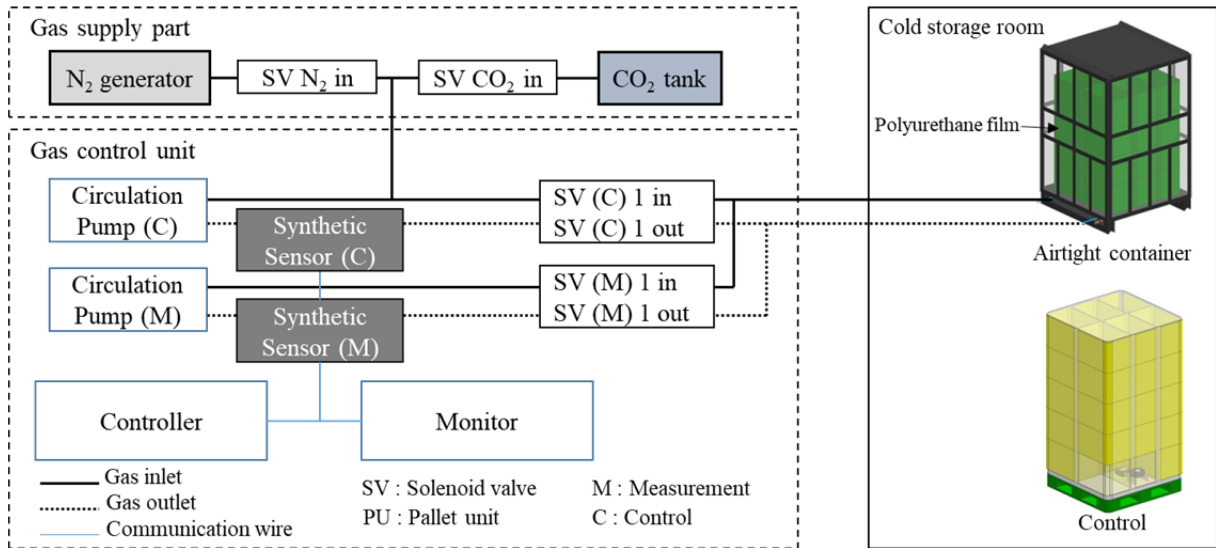


Fig. 1. Schematic diagram of the pallet unit-controlled atmosphere system.

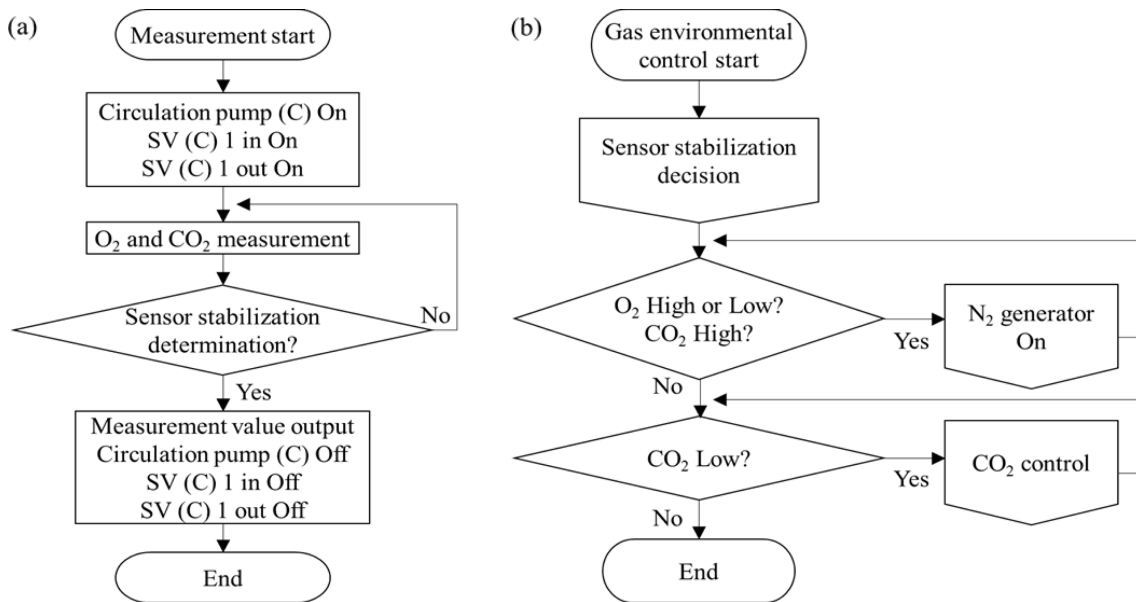


Fig. 2. Algorithms for the measurement (a) and control (b) of O₂ and CO₂ concentrations inside airtight containers.

와 CO₂ 농도 제어 알고리즘을 통해 질소발생기가 작동하여 퍼지 과정이 진행되거나 이산화탄소 공급장치가 작동하여 CO₂를 공급하게 됨에 따라 기체환경은 적절하게 유지하였다(Fig. 2b).

저장기간 동안 기밀 컨테이너 내부의 기체환경 변화를 살펴보기 위해 O₂와 CO₂ 농도는 통합센서 모듈을 이용하여 10분 간격으로 측정 후 데이터 수집장치에 보관하였다. 보관된 데이터는 시간-O₂/CO₂ 농도 profile 곡선으로 나타났다.

저장 중 배추의 품질 변화 분석

PUCA 저장 중 배추 시료의 품질 변화 예측을 위한 지

표는 배추 품질 관련 선행연구(Hong et al., 2018)를 참고하여 중량감모율, 수분 함량과 환원당 함량을 선정하였다. 중량감모율은 시료의 초기 중량을 측정한 후 저장기간 중 중량의 차이를 초기 중량에 대한 백분율로 나타내었다. 수분 함량과 환원당 함량 분석을 위한 시료 전처리로 배추는 멸균된 칼로 절단한 후 hand blender (HR1390, Philips, Guangzhou, China)를 이용하여 3분간 균질화하였다. 수분 함량은 균질한 시료 1g을 알루미늄 칭량 접시에 취한 후 적외선 수분측정기(MB45, Ohaus Co., Pine Brook NJ, USA)로 측정하여 %로 나타내었다. 환원당 함량은 dinitrosalicylic acid (DNS)에 의한 비색 정량법(Lee et al., 2010)을 이용하였다. 증류수를 이용하여 50배 희석한 시료

용액과 DNS reagent는 glass test tube에 1과 3 mL을 각각 옮겨 넣고 water bath (100°C)에서 5분간 가열하였다. 실온에서 냉각 후 반응 용액은 증류수 16 mL를 넣은 다음 분광광도계(UV-1800, Shimadzu Scientific Instruments Inc., Columbia, MD, USA)를 사용하여 550 nm에서 흡광도를 측정하였다. 환원당 함량은 농도별 glucose 표준 용액을 반응시켜 작성한 검정 곡선으로부터 산출하여 mg/g으로 나타냈다.

배추의 품질 예측 모델 개발 및 적합성 검증

CA와 일반 저온 저장 중 고랭지 배추와 월동 배추의 품질 예측 모델을 개발하기 위해 선형 회귀 분석은 저장기간, 중량감모율, 수분 함량과 환원당 함량을 종속변수 또는 설명변수로 설정하여 실시하였다. 또한 회귀 모형의 변수 선택 방법은 단계 선택법(stepwise method)을 적용하였다.

선형 회귀 분석으로부터 도출된 고랭지 배추와 월동 배추의 저장기간, 중량 감모율과 환원당 함량과 수분 함량 예측모델은 통계적 지표인 결정계수(R^2), 조정결정계수(R^2_{adj}), accuracy factor (A_f), bias factor (B_f), 평균 제곱근 오차(RMSE)을 분석하여 적합성을 검증하였다.

통계 분석

모든 실험은 3회 반복하여 측정하였으며 실험 결과는 평균값±표준편차로 나타냈다. 각 저장 처리구의 평균값 간의 차이는 SPSS (Statistical Package for the Social Science, Version 19, SPSS Inc., Chicago, IL, USA) 소프트웨어를 이용하여 일원배치 분산분석법으로 검증하였고 유의적 차이가 있는 경우는 $p < 0.05$ 수준에서 Duncan의 다중검정 방법으로 사후분석을 실시하였다. 저장 중 저온과 PUCA 처리구 간의 중량감모율, 수분 함량과 환원당 함량 차이는 독립 표본 t -test를 이용하여 각각 검증하였다. 또한 저장기간 경과에 따른 배추의 중량감모율, 수분 함량과 환원당 함량 변화의 상관관계는 Pearson 상관분석을 이용하여 분석하였다.

결과 및 고찰

저장 중 기밀 컨테이너 내부 O₂와 CO₂ 농도 변화

본 연구에서 개발한 PUCA 시스템은 설정한 O₂ 농도 도달 후 CO₂ 농도를 조절하는 순서로 기체환경을 제어한다. 저장 초기 고랭지 배추를 적재한 기밀 컨테이너 내부 O₂와 CO₂ 농도가 2와 5%까지 각각 도달하는데 4.2와 0.8시간이 소요되었다. 또한 월동 배추 입고 후 기밀 컨테이너 내부 O₂와 CO₂ 농도가 20.8과 0%에서 2와 5%까지 조절되는데 6과 1.6시간이 각각 소요되었다(Fig. 3). PUCA 저장 중 배추의 품질 분석 시료 확보를 위해 기밀 컨테이너 개방 시 내부 O₂와 CO₂ 농도는 저온 저장고 대기 환경과

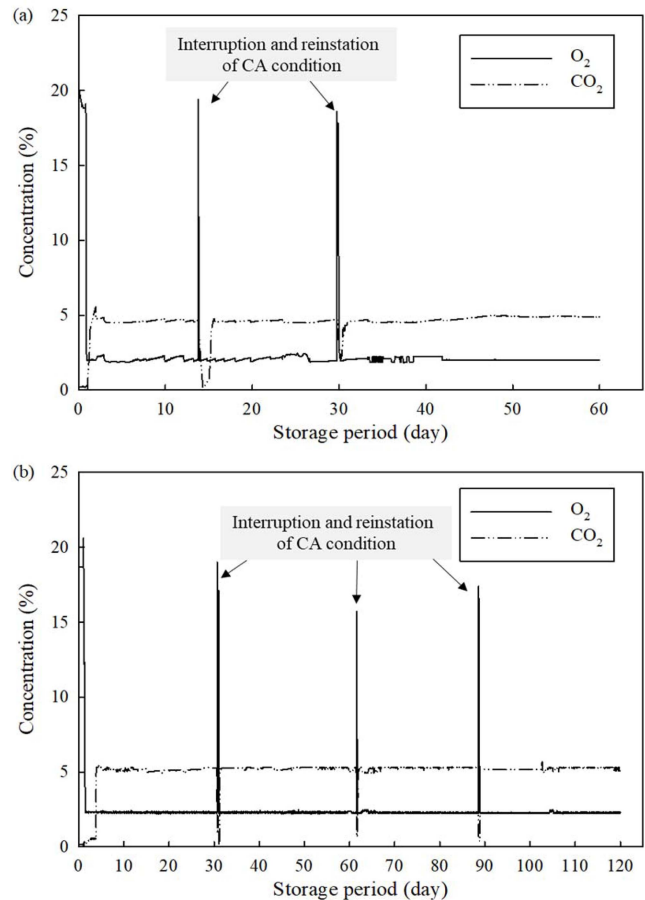


Fig. 3. Changes in O₂ and CO₂ concentrations (%) inside airtight containers during PUCA storage for summer (a) and winter (b) kimchi cabbages.

평형을 이루었으며 이후 설정 기체 농도 조건까지 재설정 되는데 고랭지 배추와 월동 배추는 약 4.1과 6.3시간이 각각 소요되었다.

저장 60일 동안 고랭지 배추가 보관된 기밀 컨테이너 내부 O₂와 CO₂ 평균 농도는 2.10±0.13과 4.63±0.47%로 각각 나타났다. 월동 배추의 경우 저장 120일 동안 기밀 컨테이너 내부 O₂와 CO₂ 평균 농도는 2.31±0.23과 5.02±0.45%로 각각 확인되었다(Fig. 3). 이러한 결과를 통해 PUCA 시스템의 기체환경 제어 알고리즘이 정상적으로 운용되었고 기밀 컨테이너 내부 기체가 외부로 유실되지 않은 것으로 판단하였다.

저장 중 배추의 이화학적 품질 변화

저장 중 배추는 호흡 등 지속적인 생리 활동과 저장고 내부의 낮은 상대습도에 의해 중량 감모와 수분 증발이 발생한다(Hong et al., 2018). PUCA 저장 중 고랭지 배추와 월동배추의 중량감모율, 수분 함량 및 환원당 함량 변화는 Fig. 4-6에 나타내었다. 저장 30일 후 대조구 고랭지 배추의 중량감모율은 5.15%로 PUCA 처리구 고랭지 배추

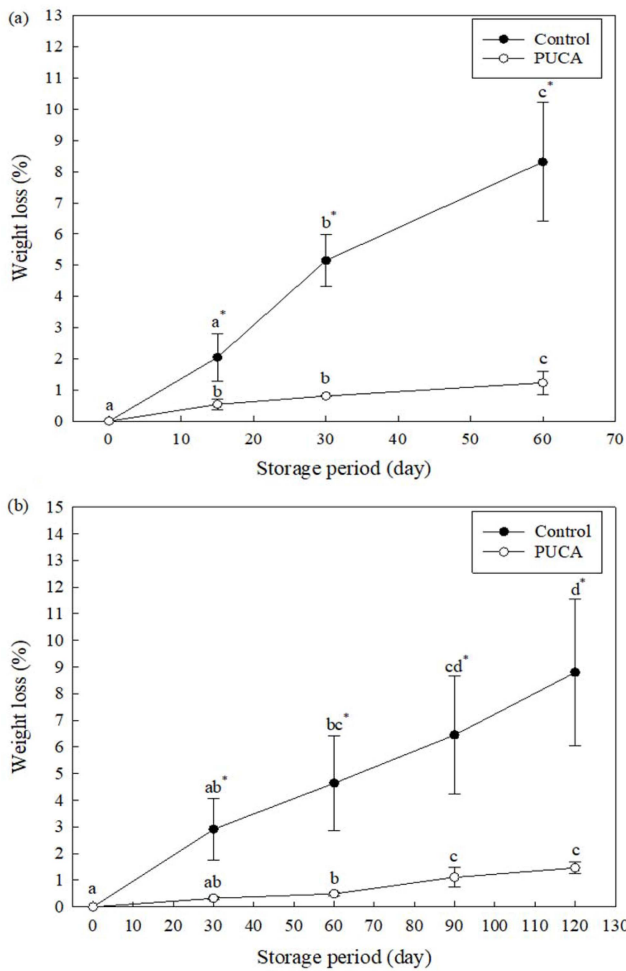


Fig. 4. Changes in the weight loss (%) of summer (a) and winter (b) kimchi cabbages stored under PUCA conditions. Means with different letters differ significantly according to Duncan's multiple range test ($p < 0.05$). Significant differences between the control and PUCA treatment are indicated by an asterisk according to independent-samples t-test ($p < 0.05$).

(0.81%)보다 약 6.4배 높았다. 또한 저장 60일 후 PUCA 처리구 고랭지 배추의 중량감모율은 1.23% 미만인 반면 대조구 고랭지 배추는 8.31%까지 증가하였다. 저장 120일 경과 후 대조구와 PUCA 처리구 월동 배추의 중량감모율은 각각 8.80와 1.46%로 유의적인($p < 0.05$) 차이를 나타냈다.

대조구 고랭지 배추의 수분 함량은 저장 초기 94.23%이었지만 저장기간이 증가함에 따라 유의적으로($p < 0.05$) 감소하여 저장 60일 후 91.83%를 나타냈다. 반면 PUCA 처리구 고랭지 배추의 수분 함량은 저장 60일 동안 93.60-94.23%를 유지하였다. 저장 120일 동안 대조구 월동 배추의 수분 함량은 약 3.0% 감소한 반면 PUCA 처리구 월동 배추의 수분 함량은 93.14-93.68%를 유지하였으며 이는 고랭지 배추의 수분 함량 결과와 유사하였다. Ktenioudaki et al. (2019)은 상대습도가 저온 저장 중 농산물의 중량 감소에 가장 영향을 미치는 환경 인자 중 하나라고 보고하였다

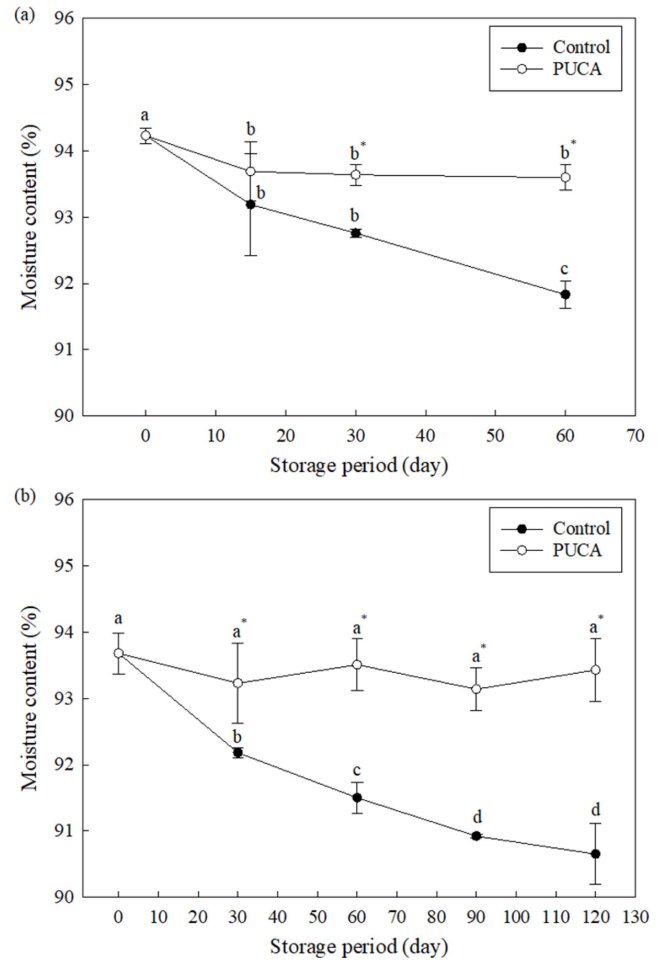


Fig. 5. Changes in the moisture content (%) of summer (a) and winter (b) kimchi cabbages stored under PUCA conditions. Means with different letters differ significantly according to Duncan's multiple range test ($p < 0.05$). Significant differences between the control and PUCA treatment are indicated by an asterisk according to independent-samples t-test ($p < 0.05$).

. 본 연구에서 PUCA 시스템 저장 배추의 수분 유지 효과는 배추 외엽의 수증기압과 기밀 컨테이너 내부 수증기압차가 적었기 때문으로 판단된다. 저장이나 유통 중 원예산물의 수분 손실과 중량감모 발생은 상품성 저하로 인한 경제적 피해를 수반한다(Lee et al., 2016). 배추 중량감모율이 저장 중 약 10% 이상 발생하면 걸잎에서부터 심한 위조 현상과 조직감 저하가 나타나기 때문에 김치 가공을 위한 원재료 정선 공정에서 손실률은 높아진다(Bae et al., 2015).

저장 60일 후 대조구와 PUCA 처리구 고랭지 배추의 환원당 함량은 19.43과 21.05 mg/g으로 각각 나타나 저장환경에 따른 유의적($p < 0.05$) 차이가 확인되었다. 또한 대조구 월동 배추의 환원당 함량은 저장 초기 25.76 mg/g이었지만 저장기간이 증가함에 따라 유의적으로($p < 0.05$) 감소하여 저장 120일 후 20.07 mg/g을 보였다. 반면 저장 120일 후 PUCA 처리구 월동 배추의 환원당 함량은 23.30 mg/g으로

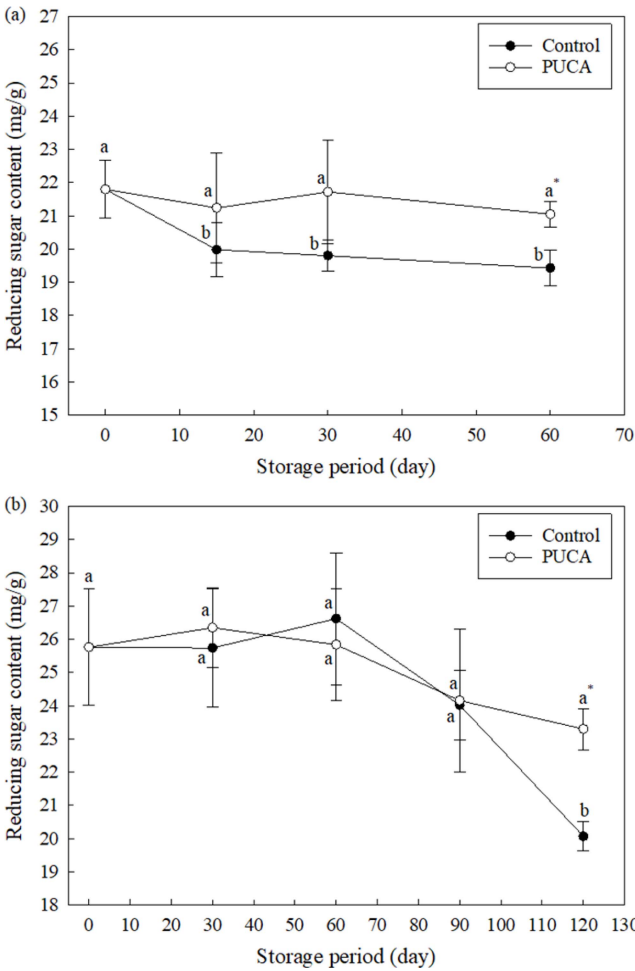


Fig. 6. Changes in the reducing sugar content (mg/g) of summer (a) and winter (b) kimchi cabbages stored under PUCA conditions. Means with different letters differ significantly according to Duncan's multiple range test ($p < 0.05$). Significant differences between the control and PUCA treatment are indicated by an asterisk according to independent-samples t-test ($p < 0.05$).

대조구 월동 배추와 비교하여 유의적으로 ($p < 0.05$) 높았다. Nei et al. (2006)의 보고에 따르면 저장 중 배추가 함유하는 환원당은 호흡 기질로 소비되기 때문에 감소하며 호흡 속도는 온도와 기체 조성 등 저장환경에 영향을 받는다. 본 연구에서 저온 저장 중 배추의 호흡이 일반 대기 환경에 비해 2% O_2 와 5% CO_2 조건에서 효과적으로 억제된 것으로 추론된다. 따라서 저온 저장고 내 PUCA 시스템 적용은 수확 후 배추의 중량감모 억제와 수분 및 환원당 함량 유지에 상승효과를 나타내 품질유지기한 연장의 가능성이 확인되었다.

저장기간과 배추 이화학적 품질 변화의 상관관계

저장환경과 저장기간에 영향을 받는 배추의 품질 지표들 파악하기 위해 저장기간, 중량감모율, 수분 함량과 환원당 함량의 각 변수 간 상관관계를 분석한 결과는 Table 1에

나타냈다. 저온과 PUCA 저장한 고랭지 배추와 월동 배추의 중량 감모율은 저장기간과 유의적인 ($p < 0.001$) 양의 상관 관계를 보였다. 저온 저장한 고랭지 배추와 월동 배추의 수분 함량과 환원당 함량은 저장기간과 유의적인 ($p < 0.05$ 또는 $p < 0.001$) 음의 상관 관계를 각각 나타냈다. 또한 저온 및 PUCA 저장한 고랭지 배추의 환원당 함량과 수분 함량의 상관계수가 0.86과 0.72로 각각 나타나 유의적으로 높은 상관관계가 확인되었다. 한편 PUCA 저장한 고랭지 배추와 월동 배추 경우 저장기간과 환원당 함량의 상관계수는 -0.20($p > 0.05$)과 -0.56($p < 0.05$)으로 각각 나타나 두 지표 간의 상관성은 저온 저장에 비해 낮았다. 또한 PUCA 저장한 월동 배추의 수분 함량과 저장기간의 상관계수는 -0.21이었으며 상관계수의 통계적 유의성도 확인되지 않았다($p > 0.05$). 이러한 결과는 PUCA 저장한 배추의 환원당 함량과 수분 함량이 저장기간이 경과되어도 저장 초기 수준을 거의 유지하였기 때문으로 판단된다.

배추의 품질 예측 모델과 모델 적합성 평가

저온과 PUCA 저장 시험으로부터 얻은 고랭지 배추와 월동 배추의 중량감모율, 수분 함량과 환원당 함량 데이터를 선형 회귀분석 방법으로 도출한 배추 중량감모(저장기간) 예측 회귀 모델은 Table 2에 나타내었다. 다중 선형 회귀분석 시 다중공선성이 존재하면 예측 모델의 회귀계수 분산 크기에 영향을 주며 모델의 적합성과 예측력은 감소한다(Yi, 2015). 따라서 설명변수의 유의성 검증과 공선성 진단(collinearity diagnostics) 결과 p 값이 0.05 이상이거나 분산팽창인자(variance inflation factor) 값이 10 이상인 설명변수는 각 예측 회귀 모델에서 제외하였다. 일반 저온과 PUCA 시스템에 저장한 고랭지 배추의 경우, 중량감모율과 환원당 함량 예측 모델은 저장기간과 수분 함량을 각각 설명변수로 하는 단순 선형 회귀식으로 표현되었으며 수분 함량 예측 모델은 저장기간/환원당 함량 또는 중량감모율/환원당 함량을 설명변수로 하는 다중 선형 회귀식으로 제시되었다. 한편 저온과 PUCA 시스템에 저장한 월동 배추의 두 저장기간 예측 모델은 다중 선형 회귀식으로 표현되었으나 두 모델의 설명변수는 각각 중량감모율/수분 함량/환원당 함량과 중량감모율/환원당 함량으로 다르게 나타났다. 120일 저장기간 동안 유의적($p < 0.05$) 변화가 관찰되지 않은 PUCA 처리구 월동 배추의 수분 함량은 예측 모델에서 제외하였다.

PUCA 시스템에 저장한 고랭지 배추와 월동 배추의 저장기간, 중량감모율, 환원당 함량 및 수분 함량 변화에 대한 실제 측정된 값과 각각의 회귀 모델을 사용하여 예측한 값 사이에 적합성 측정결과는 Table 3에 나타냈다. 일반 저온 및 PUCA 시스템에 저장한 고랭지 배추와 월동 배추의 저장기간과 중량감모율 예측 모델 R^2 과 R^2_{adj} 은 0.94-0.99 수준을 나타냈다. 저온 저장한 고랭지 배추의 수분 함

Table 1. Pearson's correlation coefficients of weight loss, moisture content, and reducing sugar content, and storage period

Cultivar	Treatment	Parameter	Weight loss	Moisture content	Reducing sugar content	Storage period
Summer kimchi cabbage	Control	Weight loss	1	-	-	-
		Moisture content	-0.819**	1	-	-
		Reducing sugar content	-0.543	0.863***	1	-
		Storage period	0.952***	-0.913***	-0.678**	1
	PUCA	Weight loss	1	-	-	-
		Moisture content	-0.485	1	-	-
		Reducing sugar content	0.016	0.715**	1	-
		Storage period	0.910***	-0.586*	-0.198	1
Winter kimchi cabbage	Control	Weight loss	1	-	-	-
		Moisture content	-0.783***	1	-	-
		Reducing sugar content	-0.477*	0.589*	1	-
		Storage period	0.889***	-0.937***	-0.700**	1
	PUCA	Weight loss	1	-	-	-
		Moisture content	-0.050	1	-	-
		Reducing sugar content	-0.431	0.626**	1	-
		Storage period	0.943***	-0.206	-0.577*	1

Level of significance: *** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$

Table 2. Fitted equations in the prediction of the storage period, weight loss, reducing sugar content, and moisture content of kimchi cabbages during storage by the single or multiple linear regressions.

Cultivar	Treatment	Parameter	Regression equation
Summer kimchi cabbage	Control	Storage period	$913.19 - 9.71 \times \text{Moisture content} + 4.20 \times \text{Weight loss}$
		Weight loss	$0.14 \times \text{Storage period}$
		Reducing sugar content	$-76.53 + 1.04 \times \text{Moisture content}$
		Moisture content	$86.08 - 0.03 \times \text{Storage period} + 0.38 \times \text{Reducing sugar content}$
	PUCA	Storage period	$42.41 \times \text{Weight loss}$
		Weight loss	$0.02 \times \text{Storage period}$
		Reducing sugar content	$-199.06 + 2.35 \times \text{Moisture content}$
		Moisture content	$89.30 - 0.35 \times \text{Weight loss} + 0.22 \times \text{Reducing sugar content}$
Winter kimchi cabbage	Control	Storage period	$1882.80 + 4.98 \times \text{Weight loss} - 19.18 \times \text{Moisture content} - 3.48 \times \text{Reducing sugar content}$
		Weight loss	$0.07 \times \text{Storage period}$
		Reducing sugar content	$27.06 - 0.04 \times \text{Storage period}$
		Moisture content	$93.25 - 0.024 \times \text{Storage period}$
	PUCA	Storage period	$143.83 + 64.97 \times \text{Weight loss} - 5.09 \times \text{Reducing sugar content}$
		Weight loss	$0.01 \times \text{Storage period}$
		Reducing sugar content	$-187.25 - 0.02 \times \text{Storage period} + 2.29 \times \text{Moisture content}$

량 예측모델은 0.99의 R^2_{adj} 값과 0.12의 RMSE 값을 보임에 따라 높은 적합성이 입증되었다. 반면 저온 저장한 월동 배추의 환원당 함량 예측 모델과 PUCA 시스템에 저장한 월동 배추의 수분 함량 예측 모델의 R^2_{adj} 은 0.63과 0.42로 각각 나타났으며 이는 예측 모델식이 실측 데이터를 근접하게 예측하기 어려운 것을 의미한다.

A_j 와 B_j 는 예측 모델의 정확도를 나타내는 지수로 실측 값과 예측 값이 일치하면 1이 된다(Kim et al., 2019). PUCA 시스템에 저장한 고랭지 배추와 월동 배추의 저장기간, 중량감모율, 환원당 함량과 수분 함량 예측 모델의 A_j 와 B_j 는

0.88-1.26으로 이상적인 값인 1에 가까운 값을 보였다.

요 약

본 연구에서는 저온 저장고에 개발한 PUCA 시스템을 설치 후 2% O₂와 5% CO₂ 환경에서 고랭지 배추와 월동 배추를 60과 120일 동안 각각 저장하여 중량감모율, 수분 함량과 환원당 함량을 분석하고 저장 중 배추의 품질 예측을 위한 선형 회귀 모델을 도출하고자 하였다. 저장 60 일 후 2°C 저온 저장고 대기 환경에 저장한 대조구 고랭지 배추의 중량감모율은 8.31%인 반면 PUCA 처리구 고

Table 3. Evaluation of the quality prediction models of kimchi cabbages stored under PUCA conditions

Variety	Treatment	Quality parameter	$R^{2(1)}$	$R_{adj}^{2(2)}$	$A_f^{(3)}$	$B_f^{(4)}$	RMSE ⁽⁵⁾
Summer kimchi cabbage	Control	Storage period	0.99	0.99	1.11	1.06	22.20
		Weight loss	0.98	0.98	1.09	0.95	0.47
		Reducing sugar content	0.86	0.86	1.02	1.00	0.35
		Moisture content	0.99	0.99	1.00	1.00	0.12
	PUCA	Storage period	0.98	0.98	1.26	1.15	23.13
		Weight loss	0.94	0.94	1.35	0.74	0.16
		Reducing sugar content	0.43	0.43	1.02	1.00	0.46
		Moisture content	0.77	0.66	1.00	1.00	0.12
Winter kimchi cabbage	Control	Storage period	0.99	0.97	1.09	1.05	4.90
		Weight loss	0.99	0.99	1.13	0.88	0.45
		Reducing sugar content	0.63	0.63	1.05	1.01	1.46
		Moisture content	0.97	0.97	1.00	1.00	0.32
	PUCA	Storage period	0.95	0.94	1.09	0.94	9.19
		Weight loss	0.97	0.97	1.15	1.12	0.11
		Reducing sugar content	0.56	0.42	1.03	1.01	0.88

¹⁾ R^2 : Coefficient of determination.

²⁾ R_{adj}^2 : Adjusted coefficient of determination.

³⁾ A_f : Accuracy factor.

⁴⁾ B_f : Bias factor.

⁵⁾RMSE: Root mean squared error.

랭지 배추는 1.30% 미만을 나타냈다. 0°C 저장 120일 후 PUCA 처리구 월동 배추의 중량감모율은 1.46%로 대조구 월동 배추에 비해 유의적으로($p < 0.05$) 낮았다. 120일 저장 종료 후 대조구 월동 배추의 수분 함량은 90.65%로 저장 초기(93.68%)에 비해 3.03% 감소하였지만 PUCA 처리구 월동 배추의 수분 함량은 93.43%로 저장 초기 수준을 유지하였다. 또한 PUCA 시스템 적용이 저장 중 고랭지 배추와 월동 배추의 환원당 함량 감소를 효과적으로 억제하였다. 선형 회귀 분석으로 도출한 대조구 배추의 저장기간/중량감모율/수분 함량 예측 회귀 모델과 PUCA 처리구 배추의 저장기간/중량감모율 예측 회귀 모델은 0.94-0.99의 R_{adj}^2 과 0.74-1.35의 A_f 및 B_f 값을 각각 나타내어 적합성이 검증되었다. 따라서 본 연구에서 개발한 PUCA 하드웨어 시스템과 기체환경 제어 알고리즘은 수확 후 고랭지 배추와 월동 배추의 저장성을 향상시켰으며 저장기간, 중량 감모율, 환원당 함량 또는 수분 함량 예측 모델은 배추 출하 시기 조절을 계획하는데 활용할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 2020년 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ0134042020)의 지원에 의해 이루어진 것으로 감사드립니다.

References

Bae SJ, Eum HL, Kim BS, Yoon J, Hong SJ. 2015. Comparison

of the quality of highland-grown kimchi cabbage 'Choon Gwang' during cold storage after pretreatments. Korean J. Hortic. Sci. Technol. 33: 233-241.

Bahar A, Lichter A. 2018. Effect of controlled atmosphere on the storage potential of Ottomanit fig fruit. Sci. Hortic. 227: 196-201.

Carvalho MO, Pires I, Barbosa A, Barros G, Riudavets J, Garcia AC, Brites C, Navarro S. 2012. The use of modified atmospheres to control *Sitophilus zeamais* and *Sitophilus oryzae* on stored rice in Portugal. J. Stored Prod. Res. 50: 49-56.

Choi EJ, Jeong MC, Ku KH. 2015. Effect of seasonal cabbage cultivar (*Brassica rapa* L. ssp. *Pekinesis*) on the quality characteristics of salted-Kimchi cabbages during storage period. Korean J. Food Preserv. 22: 303-313.

Choi EJ, Lee JH, Kim HK, Park HW, Son JY, Park CW, Song KB, Kang JH, Woo HJ, Lee CH, Chun HH. 2020. Development of multi-pallet unit load storage system with controlled atmosphere and humidity for storage life extension of winter kimchi cabbage (*Brassica rapa* L. ssp. *Pekinesis*). Sci. Hortic. 264: 109171.

Choi EJ, Park HW, Lee JH, Kim HK, Park CW, Song KB, Kang JH, Park JB, Woo HJ, Chun HH. 2019. Effect of pallet unit-controlled atmosphere packaging in maintaining the quality of kimchi cabbage (*Brassica rapa* L. ssp. *Pekinesis*) harvested in the summer. Korean J. Food Preserv. 26: 264-273.

Eum HL, Kim BS, Yang YJ, Hong SJ. 2013. Quality evaluation and optimization of storage temperature with eight cultivars of Kimchi cabbage produced in summer at highland areas. Korean J. Hortic. Sci. Technol. 31: 211-218.

Heltoft P, Wold AB, Molteberg EL. 2017. Maturity indicators for prediction of potato (*Solanum tuberosum* L.) quality during storage. Postharvest Biol. Technol. 129: 97-106.

Hong SJ, Kim BS, Kim BS, Eum HL. 2018. Responses to 1-MCP during storage of kimchi cabbage Ryouckgwang cultivar. Pro-

- tected Hortic. Plant Fac. 27: 125-131.
- Kim SJ, Lee JY, Yoon SR, Lee HW, Ha JH. 2019. Regression analysis for predicting the fermentation state of packaged Kimchi using a colorimetric indicator. J. Food Eng. 240: 65-72.
- Ktenioudaki A, O'Donnell CP, do Nascimento Nunes MC. 2019. Modelling the biochemical and sensory changes of strawberries during storage under diverse relative humidity conditions. Postharvest Biol. Technol. 154: 148-158.
- Ku KH, Choi EJ, Jeong MC. 2014. Comparison of quality characteristics between seasonal cultivar of salted-Kimchi cabbage (*Brassica rapa* L. ssp. *Pekinesis*). Korean J. Food Preserv. 21: 512-519.
- Lee JE, Wang P, Kim G, Kim S, Park S, Hwang YS, Lim YP, Lee EM, Ham IK, Jo MH, An G. 2010. Effects of soil pH on nutritional and functional components of Chinese cabbage (*Brassica rapa* ssp. *campestris*). Korean J. Hortic. Sci. Technol. 28: 353-362.
- Lee YJ, Lee HO, Kim JY, Kim BS. 2016. Effect of Pallet-unit MAP treatment on freshness extension of spring Chinese cabbage. J. Korean Soc. Food Cult. 31: 634-642.
- Matar C, Gaucel S, Gontard N, Guilbert S, Guillard V. 2018. Predicting shelf life gain of fresh strawberries 'Charlotte cv' in modified atmosphere packaging. Postharvest Biol. Technol. 142: 28-38.
- Nei D, Uchino T, Sakai N, Tanaka SI. 2006. Prediction of sugar consumption in shredded cabbage using a respiratory model. Postharvest Biol. Technol. 41: 56-61.
- Niu Y, Yun J, Bi Y, Wang T, Zhang Y, Liu H, Zhao F. 2020. Predicting the shelf life of postharvest *Flammulina velutipes* at various temperatures based on mushroom quality and specific spoilage organisms. Postharvest Biol. Technol. 67: 111235.
- Park CW, Park SH, Kim JS, Choi DS, Kim YH, Lee SJ, Son JY. 2020. Effects of controlled atmosphere storage of 'Sangjudungsi' persimmon. Food Eng. Prog. 24: 133-140.
- Park SH, Park CW, Park JW, Choi DS, Kim JS, Kim YH, Choi SR, Lee SJ. 2016a. Prediction for storage life and quality of Fuji apple stored in a controlled atmosphere container. Food Eng. Prog. 20: 373-378.
- Park SH, Park JW, Choi DS, Kim JS, Kim YH, Choi SR, Oh SS, Oh YS, Lee JS. 2016b. Development of the purge-type controlled atmosphere storage container and analysis of gas control performance. Food Eng. Prog. 20: 15-20.
- Selcuk N, Erkan M. 2015. The effects of modified and palliflex controlled atmosphere storage on postharvest quality and composition of 'Istanbul' medlar fruit. Postharvest Biol. Technol. 99: 9-19.
- Song Y, Hu Q, Wu Y, Pei F, Kimatu BM, Su A, Yang W. 2019. Storage time assessment and shelf-life prediction models for postharvest *Agaricus bisporus*. LWT - Food Sci. Technol. 101: 360-365.
- Yi NY. 2015. Mediating effects of perceived value on the relationship between university foodservice quality attributes and satisfaction of Chinese students in Daejeon. J. Korean Soc. Food Sci. Nutr. 44: 1750-1758.
- Yoon HH, Kim DM. 2000. Changes of brine characteristics during the salting process of winter, spring, and summer Chinese cabbage. J. Korean Soc. Food Sci. Nutr. 29: 26-29.

Author Information

- 천호현: 세계김치연구소 신공정발효연구단 선임연구원
 최은지: 세계김치연구소 신공정발효연구단 전임연구원
 이정현: 세계김치연구소 신공정발효연구단 학생연구원, 충남대학교 식품공학과 대학원생 (석사과정)
 손재용: 국립농업과학원 농업공학부 수확후관리공학과 농업연구관
 박천완: 국립농업과학원 농업공학부 수확후관리공학과 박사후연구원