Food Sci. Preserv., 33(5), 961-971 (2026)
pISSN: 3022-5477, eISSN: 3022-5485

Food Science and Preservation
https://doi.org/10.11002/fsp.2026.33.5.961

Research Article

Postharvest quality of spring *kimchi* cabbage from Yeongwol and Hoengseong under pallet-scale modified atmosphere packaging

영월 · 횡성 봄배추의 팰릿 단위 MA 필름 포장에 따른 저장 중 품질 변화

Seung-Hun Chae[1†], Do-Gyun Park[1], Hae Jo Yang[1], Jae-Han Cho[1], Seon Yi Lee[1], Ji Weon Choi[1], Chun-Wan Park[2], Min-Sun Chang[1†*]

채승훈[1†] · 박도균[1] · 양해조[1] · 조재한[1] · 이선이[1] · 최지원[1] · 박천완[2] · 장민선[1†*]

[1]*Postharvest Technology Division, National Institute of Horticultural and Herbal Science, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea*
[2]*Postharvest Engineering Division, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Jeonju 55365, Korea*

[1]*농촌진흥청 국립원예특작과학원 저장유통과,* [2]*농촌진흥청 국립농업과학원 농업공학부 수확후관리공학과*

Abstract This study compared the storage quality of spring *kimchi* cabbage sourced from Yeongwol and Hoengseong, with and without pallet-scale modified atmosphere (MA) packaging. Spring *kimchi* cabbages cultivated in Hoengseong and Yeongwol were stored at 2°C. Quality characteristics were evaluated during storage, and initial mineral composition was determined. Fresh weight, head height, head width, and formation index decreased, while weight loss increased during storage. Weight loss was lower in Yeongwol than in Hoengseong, and the decreases in fresh weight and formation index were alleviated. MA packaging reduced weight loss in both source groups, whereas differences in fresh weight and formation index between packaging treatments varied with storage period. Initial mineral composition differed between the two source groups; Yeongwol samples had higher phosphorus, potassium, sodium, and total nitrogen contents, whereas Hoengseong samples had higher calcium and magnesium contents. Storage period significantly affected all eight storage-quality parameters. MA packaging significantly affected weight loss, fresh weight, formation index, and color difference, but not head height, head width, firmness, or soluble solid content ($p < 0.05$). These findings indicate that pallet-scale MA packaging reduced weight loss in the two source groups under the tested storage conditions, while responses in other quality attributes varied.

Keywords *kimchi* cabbage, modified atmosphere, cultivation region, postharvest quality, mineral composition

OPEN ACCESS

Citation: Chae SH, Park DG, Yang HJ, Cho JH, Lee SY, Choi JW, Park CW, Chang MS. Postharvest quality of spring *kimchi* cabbage from Yeongwol and Hoengseong under pallet-scale modified atmosphere packaging. Food Sci. Preserv., 33(5), 961-971 (2026)

Received: September 08, 2026
Revised: October 05, 2026
Accepted: October 06, 2026

†These authors contributed equally to this study.

***Corresponding author**
Min-Sun Chang
Tel: +82-63-238-6540
E-mail: aeru@korea.kr

Copyright © 2026 The Korean Society of Food Preservation. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

배추(*Brassica rapa* L. ssp. *pekinensis*)는 국내에서 가장 널리 재배 및 소비되는 십자화과 채소로, 김치 산업뿐만 아니라 신선 농산물 시장에서도 높은 비중을 차지하는 주요 원예작물이다(Kim 등, 2022; Ku 등, 2014). 배추는 다양한 작형으로 재배되어 연중 생산 및 소비되는 채소류로서 식생활은 물론 농업 및 식품산업 전반에서 높은 경제적 가치를 지니고 있다. 또한 비타민 C, 식이섬유 및 글루코시놀레이트 등 다양한 생리활성 성분을 함유하고 있어 영양학적 및 기능적 가치가 높은 채소로 평가되고 있다(Baek 등, 2016; Wu 등, 2021). 국내에서 생산되는 배추는 재배 시기에 따라 봄배추,

여름배추(고랭지배추), 가을배추 및 겨울배추(월동배추)로 구분되며, 이 중 가을배추는 전체 생산량에서 가장 높은 비중을 차지한다(Ku 등, 2014; Lee 등, 2025). 최근 기후변화에 따른 이상고온, 집중호우 및 태풍 등의 이상기상과 병해 발생은 배추의 생산량과 품질에 영향을 미치며, 이에 따른 수급 및 가격 불안정성이 주요 문제로 제기되고 있다(Kim 등, 2022; Lee 등, 2017; Lee 등, 2024). 또한 고랭지배추의 출하 종료와 가을배추의 본격적인 출하 사이에는 배추 공급량이 감소하고 시장 수급의 불안정성이 심화된다. 이러한 수급 불안정을 해소하기 위해서는 고랭지배추의 저장 · 유통이 요구되지만, 여름철 수확으로 인해 품온이 높고 수확 후 호흡 및 증산이 활발하여 장기 저장에 한계가 있다(Eum 등, 2013; Shim 등, 2016). 따라서 안정적인 배추 공급을 위해서는 봄배추의 저장성을 향상시키고 저장 중 품질을 유지할 수 있는 저장 · 유통기술의 개발이 요구된다.

배추의 저장성 향상을 위해 저온저장, modified atmosphere (MA), controlled atmosphere (CA) 저장, 포장기술 및 예냉 등 다양한 저장 · 유통기술이 연구되어 왔다(Brosnan과 Sun, 2001; Kang 등, 2019; Lim 등, 2014; Mampholo 등, 2013). 이 중 MA 저장은 포장 내부의 기체 조성과 높은 상대습도를 유지하여 호흡과 증산을 억제하고 수분 손실을 감소시킴으로써 저장 중 중량 감소와 조직의 품질 저하를 완화하는 기술로 알려져 있으며, 저온저장과 병행할 경우 중량 감소와 조직 연화를 억제하고 저장기간을 연장하는 것으로 보고되었다(Oliveira 등, 2015; Yang 등, 2018).

한편, 저장 중 배추의 품질 변화와 저장성은 저장 · 유통기술뿐만 아니라 재배환경에 의해 형성된 초기 품질 특성의 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 배추의 초기 품질은 재배지역의 온도, 일사량, 강수량 및 토양환경 등 다양한 재배환경의 영향을 받으며, 이러한 재배환경은 수확 당시의 중량, 결구 상태 및 조직 특성을 형성하여 저장 중 품질 변화에도 영향을 준다고 알려져 있다(Charron 등, 2005; Lee, 2018; Shim 등, 2016). 따라서 동일한 저장조건과 저장기술을 적용하더라도 재배환경에 의해 형성된 초기 품질 특성에 따라 저장성이 달라질 수 있으므로, 재배지역별 초기 품질 특성을 고려한 저장 · 유통기술의 개발이 필요하다. 또한, 개발된 저장기술의 현장 적용성을 확보하기 위해서는 소규모 실험 조건을 넘어 실제 저장 · 유통 조건에 가까운 벌크 규모에서 그 효과를 검증할 필요가 있다.

그러나 기존 연구는 MA 포장에 따른 저장성 향상 효과를 규명하는 데 주로 초점을 두고 있으며, 재배환경에 의해 형성된 초기 품질 특성과 MA 포장 효과를 실제 저장 · 유통 규모에서 연계하여 평가한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 영월과 횡성에서 확보한 봄배추 시료군을 대상으로 실제 저장 · 유통 조건에 가까운 팰릿 단위의 MA 필름 포장을 적용하여 저장 중 중량, 형태적 및 이화학적 품질 특성의 변화를 조사하고, 두 시료군의 저장 특성과 MA 필름 포장에 따른 품질 변화 양상을 사례 비교하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험 재료

본 연구에는 '춘광'(*Chunkwang*) 품종의 봄배추(*Brassica rapa* L. ssp. *pekinensis*)를 사용하였다. 배추는 2025년 4월 19일 강원도 영월(Yeongwol, YW)과 횡성(Hoengseong, HS)에 정식하여 6월 19일 수확하였다. 수확 시 배추의 품온은 28-29℃였으며, 2025년 6월 20일 경북 영주 소재 저장고 입고 시 품온은 23-26℃였다. 입고된 배추는 5일간 예냉하여 품온이 2℃에 도달한 후 저장시험에 이용하였다(Fig. S1). 시험에는 영월 배추의 경우 관행 처리구 6 pallet과 MA 포장 50 pallet로 총 56 pallet, 횡성 배추의 경우 관행 처리구 3 pallet과 MA 포장 19 pallet로 총 22 pallet을 사용하였다. 각 처리구의 배추는 P-box (51 × 36 × 31 cm)에 적재하였으며, MA 포장 처리는 직경 3 cm의 천공이 160개 뚫린 30 μm 두께의 polyethylene (PE) 필름(241 × 241 × 300 cm, EcoBio, Gimje, Korea)을 이용하여 pallet 단위로 포장하였다. 배추는 평균 온도 2.0 ± 0.7℃ 및 평균 상대습도 99.6 ± 1.5%의 저장조건에서 75일간 저장하였으며, 품질 특성은 저장 후 0, 15, 30, 45, 60 및 75일에 조사하였다. 횡성 시료군은 상품성 상실로 인해 품질 항목은 저장 60일까지 조사하였으며, 중량감소율 산출을 위한 중량은 저장 75일까지 측정하였다.

2.2. 저장기간에 따른 배추의 저장 품질 특성 분석

배추의 저장기간에 따른 저장 품질 특성 변화를 평가하기 위해 중량감소율, 구고, 구폭 및 결구지수를 측정하였다. 중량은 전자저울(PB-200, CAS, Anyang, Korea)을 이용하여 측정하였으며, 구고와 구폭은 digital caliper (500-704, Mitutoyo, Kawasaki, Japan)를 이용하여 측정하였다. 구고는 배추 기부에서 최상단까지의 길이로 정의하였으며, 구폭은 결구부의 최대 직경을 측정하였다. 측정은 영월 배추 10개체(n = 10)와 횡성 배추 5개체(n = 5)를 대상으로 수행하였다. 결구지수는 Lee 등(2008)의 방법에 따라 측정된 중량, 구고 및 구폭을 이용하여 다음 식에 따라 산출하였다.

$$\text{결구지수} = [\text{중량} / \{(\text{구고} + \text{구폭}) / 2\}] \times 100$$

2.3. 경도 측정

배추의 경도는 가장 바깥잎을 제거한 후 첫 번째 엽과 다섯 번째 엽의 중륵 중앙부를 대상으로 texture analyzer (TA PLUS, DAIHAN R&D, Daejeon, Korea)를 이용하여 측정하였다. 측

https://doi.org/10.11002/fsp.2026.33.5.961

정은 영월 배추 10개체(n = 10)와 횡성 배추 5개체(n = 5)를 대상으로 수행하였다. 측정 조건은 probe 직경 5 mm, 측정 깊이 5 mm, 측정 속도 1 mm/sec 및 trigger force 0.098 N으로 설정하였다.

2.4. 색도 측정

배추의 색도는 가장 바깥잎을 제거한 후 동일 시료 첫 번째 엽의 마주 보는 두 장을 채취하여 잎맥을 제외한 중앙 녹색 부위를 colorimeter (CR-400, Konica Minolta, Tokyo, Japan)를 이용하여 측정하였다. 측정은 영월 배추 10개체(n = 10)와 횡성 배추 5개체(n = 5)를 대상으로 수행하였다. 색도는 Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) L*, a* 및 b* 값을 측정하였다. 색차(ΔE)는 저장 전 초기 시료의 색도 값(L_0, a_0 및 b_0)을 기준으로 다음 식에 따라 산출하였다.

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L^*_0)^2 + (a^* - a^*_0)^2 + (b^* - b^*_0)^2}$$

2.5. 가용성 고형분 함량 측정

가용성 고형분 함량은 배추를 1/4 크기로 절단한 후 세절하여 착즙하고, 여과한 착즙액을 digital refractometer (PAL-BX, ATAGO, Tokyo, Japan)를 이용하여 측정하였다. 측정은 영월 배추 10개체(n = 10)와 횡성 배추 5개체(n = 5)를 대상으로 수행하였다.

2.6. 무기질 함량 분석

배추의 무기질 함량은 건조 및 분쇄한 시료를 이용하여 분석하였다. 인(P), 칼륨(K), 칼슘(Ca), 마그네슘(Mg) 및 나트륨(Na) 함량은 유도결합플라즈마분광계(Integra 6000, GBC Scientific Equipment, Melbourne, Australia)를 이용하여 측정하였다. 총탄소(T-C) 및 총질소(T-N) 함량은 원소분석기(Primacs SNC-100, Skalar B. V., Breda, The Netherlands)를 이용하여 측정하였다(n = 4).

2.7. 통계 분석

통계분석은 GraphPad Prism 5 (GraphPad Software, San Diego, CA, USA)를 이용하여 수행하였으며, 처리구 간 평균 비교는 일원분산분석(one-way analysis of variance, one-way ANOVA)을 실시한 후 Tukey's honestly significant difference (HSD) 검정을 이용하여 $p < 0.05$ 수준에서 유의성을 검정하였다. 또한, 저장기간, 재배지역(영월 및 횡성) 및 MA 포장을 고정요인으로 설정하고, 모든 이원 및 삼원 상호작용을 포함한 삼원분산분석(three-way ANOVA)을 Python 환경에서 수행하였다. 각 요인에 합대비(sum-to-zero contrasts)를 적용하였으며, Type III 제곱합을 이용하여 유의성을 검정하였다. 중량감소율은 저장 0-75일 자료를 사용하였고, 나머지 품질 항목은 모든 시료 출처 및 포장 처리 조합에서 자료가 확보된 공통 관측기간인 저장 0-60일 자료를 사용하였다. 미측정값은 대체하지 않았으며, 통계적 유의성은 $p < 0.05$ 수준에서 검정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 저장기간에 따른 배추의 물리적 품질 특성 변화

저장기간에 따른 영월 및 횡성 유래 시료군의 MA 포장 처리별 물리적 품질 특성 변화를 나타내었다(Table 1). 배추의 구고, 구폭 및 결구지수는 저장기간이 증가함에 따라 유의하게 감소하였으며, 처리에 따라 저장 중 품질 변화 양상이 차이를 보였다. 영월 무처리구의 구고는 저장 0일 27.05 ± 1.05 cm에서 저장 75일 24.70 ± 3.08 cm로, 구폭은 18.63 ± 0.87 cm에서 15.68 ± 1.46 cm로 변화하였다. 결구지수는 같은 기간 13.66 ± 0.74에서 11.74 ± 1.47로 감소하였다. 구고, 구폭 및 결구지수의 변화 양상과 포장 처리 간 차이는 지역과 저장 시점에 따라 다르게 나타났다.

선행 연구에 따르면, 재배환경에 따라 배추의 구고, 중량 및 엽 두께 등 초기 생육 특성이 달라지며, 이러한 차이는 저장 중 품질 변화에도 영향을 준다고 알려져 있다(Lee, 2018). 배추와 같은 엽채류는 저장 중 증산에 따른 수분 손실로 중량 감소와 위조, 형태 변형이 발생하며, 결구 특성이 우수한 배추는 이러한 품질 저하가 상대적으로 적어 외관 품질을 안정적으로 유지하는 것으로 보고되었다(Galindo 등, 2004; Lee, 2018). 본 연구에서도 재배지역에 따라 저장 한계기와 중량감소율의 변화 양상이 달랐으며, 구고, 구폭 및 결구지수의 변화 또한 저장기간과 MA 포장에 따라 차이를 나타냈다. 이는 재배지역에 의해 형성된 초기 품질 특성과 저장 중 MA 포장의 영향이 물리적 품질 변화에 복합적으로 반영된 결과로 판단된다. 또한, MA 포장구는 무처리구보다 낮은 중량감소율을 나타냈으며, 구폭 및 결구지수의 처리 간 차이는 처리구 및 저장 시점에 따라 상이하였다. 횡성 지역에서는 수확 직전 강우가 있었으나, 본 연구에서는 지역별 강우량과 수확 당시 조직의 수분 상태를 정량적으로 조사하지 않았으므로, 강우와 저장 한계기 간의 직접적인 관련성을 확인하는 데에는 한계가 있다. 또한 개별 시료의 재배 포장 출처가 구분되지 않아, 이러한 기상 이력과 시료군 간 저장 특성의 차이를 해석하는 데 한계가 있었다.

한편, MA 포장은 내부의 기체 조성과 높은 상대습도를 유지하여 증산과 수분 손실을 억제한다고 알려져 있다(Kader 등, 1989; Mampholo 등, 2013). 본 연구에서는 두 재배지역의 배추를 평균 2.0 ± 0.7℃ 및 상대습도 99.6 ± 1.5%의 동일한 저장조건에서 저장하였으며, MA 포장구는 무처리구보다 낮은

Table 1. Changes in physicochemical quality characteristics of spring *kimchi* cabbage during storage as affected by cultivation region and MA packaging

Storage (days)	Samples	Height (cm)	Width (cm)	Formation index	Firmness (N)	Soluble solid content (°Brix)
0	YW[1)]	27.05 ± 1.05[2)NSa]	18.63 ± 0.87[NSa]	13.66 ± 0.74[NSa]	5.49 ± 0.45[NSns]	3.71 ± 0.19[NSns]
	HS	26.86 ± 0.96[a]	17.66 ± 1.76[a]	12.82 ± 1.13[a]	5.36 ± 0.51[ns]	3.52 ± 0.11[ns]
	YW (MA)	27.05 ± 1.05[a]	18.63 ± 0.87[ab]	13.66 ± 0.74[a]	5.49 ± 0.45[ns]	3.71 ± 0.19[ns]
	HS (MA)	26.86 ± 0.96[a]	17.66 ± 1.76[a]	12.82 ± 1.13[a]	5.36 ± 0.51[ns]	3.52 ± 0.11[ns]
15	YW	24.40 ± 0.82[Ba]	17.39 ± 1.36[Bab]	11.77 ± 1.51[Bb]	6.21 ± 0.44[A]	3.96 ± 0.29[A]
	HS	27.32 ± 1.52[Aa]	18.21 ± 1.06[Aa]	14.65 ± 2.06[Aa]	4.82 ± 0.60[B]	3.66 ± 0.21[AB]
	YW (MA)	26.01 ± 1.15[Aa]	19.27 ± 0.64[Ba]	13.22 ± 0.94[Aa]	5.76 ± 0.67[A]	3.29 ± 0.22[B]
	HS (MA)	24.50 ± 2.67[Bb]	19.32 ± 1.45[Aa]	12.30 ± 0.78[Aab]	5.65 ± 0.69[A]	4.00 ± 0.33[A]
30	YW	25.41 ± 1.83[Aa]	17.54 ± 0.94[Aa]	11.54 ± 1.07[Bb]	5.90 ± 0.57[A]	3.99 ± 0.22[NS]
	HS	26.60 ± 0.43[Aab]	18.81 ± 1.69[Aa]	15.09 ± 1.91[Aa]	4.54 ± 0.86[B]	3.72 ± 0.13
	YW (MA)	24.03 ± 1.71[Bbc]	17.77 ± 1.30[ABb]	11.80 ± 1.04[Bb]	5.54 ± 0.52[A]	3.89 ± 0.07
	HS (MA)	27.64 ± 0.71[Aa]	18.58 ± 1.27[Aa]	12.86 ± 1.28[Ba]	5.10 ± 0.94[A]	3.86 ± 0.34
45	YW	19.51 ± 5.00[ABb]	16.92 ± 0.93[Ab]	14.03 ± 1.72[Aa]	6.01 ± 0.89[NS]	3.57 ± 0.18[AB]
	HS	24.82 ± 0.98[Ab]	17.39 ± 1.54[Aa]	11.97 ± 1.96[Aa]	5.37 ± 0.36	3.34 ± 0.19[AB]
	YW (MA)	23.06 ± 0.94[Bc]	16.17 ± 1.43[Ac]	10.14 ± 1.31[Bc]	6.07 ± 0.49	3.71 ± 0.35[A]
	HS (MA)	22.57 ± 0.95[Bb]	14.64 ± 0.55[Bb]	10.65 ± 0.89[Bb]	5.87 ± 0.47	3.28 ± 0.15[B]
60	YW	22.04 ± 2.13[Cb]	15.88 ± 0.64[Bb]	10.69 ± 0.81[NSb]	5.61 ± 0.40[NS]	3.28 ± 0.33[NS]
	HS	27.02 ± 0.52[Aa]	18.92 ± 1.24[Aa]	12.45 ± 1.04[a]	5.12 ± 0.45	3.36 ± 0.28
	YW (MA)	24.98 ± 1.11[Cb]	17.84 ± 1.08[Ab]	11.84 ± 0.82[b]	5.74 ± 0.62	3.27 ± 0.23
	HS (MA)	26.44 ± 0.99[Ba]	18.18 ± 0.62[Aa]	12.45 ± 1.42[ab]	5.38 ± 0.81	3.18 ± 0.16
75	YW	24.70 ± 3.08[NSa]	15.68 ± 1.46[NSb]	11.74 ± 1.47[NSb]	5.69 ± 0.72[NS]	4.16 ± 0.41[A]
	HS	-[3)]	-	-	-	-
	YW (MA)	23.98 ± 0.56[bc]	17.17 ± 0.74[bc]	10.71 ± 0.61[bc]	5.74 ± 0.38	3.62 ± 0.24[B]
	HS (MA)	-	-	-	-	-

[1)]YW, Yeongwol; HS, Hoengseong; MA, modified atmosphere.
[2)]For each quality parameter, uppercase letters indicate comparisons among the source × packaging groups within the same storage period, whereas lowercase letters indicate comparisons among storage periods within the same source × packaging group. Means that do not share a letter differ significantly according to Tukey's honestly significant difference (HSD) test ($p < 0.05$). NS and ns indicate nonsignificant differences in the uppercase and lowercase comparisons, respectively. Values represent mean ± SD (n = 10 for YW; n = 5 for HS).
[3)]"–" indicates that measurements were not taken due to loss of marketability.

중량감소율을 나타냈다. 본 연구의 저장조건에서 MA 포장은 영월 및 횡성 배추의 저장 중 중량 감소를 완화하는 데 기여한 것으로 판단된다. 다만, MA 포장 내부의 O_2 및 CO_2 농도는 직접 측정하지 않아 기체 조성 변화와 품질 유지 간의 관계를 직접적으로 확인하는 데에는 한계가 있었다.

저장기간 동안 경도는 모든 처리구에서 4.54-6.21 N 범위를 유지하였으며, 저장기간에 따른 뚜렷한 감소 경향은 나타나지 않았다. 영월 무처리구는 저장 60일에 5.61 ± 0.40 N, 횡성 무처리구는 저장 30일에 4.54 ± 0.86 N으로 낮은 경도를 나타냈으며, 저장기간 동안 대부분의 처리구에서 5 N 이상의 경도가 관찰되었다. 선행 연구에 따르면, 저장 중 중량 감소 및 외관 품질 저하가 발생함에도 불구하고 배추의 경도는 비교적 안정적으로 유지되는 것으로 보고되었다(Lee, 2020; Shim 등, 2016). 본 연구에서도 중량감소율과 구고, 구폭 및 결구지수는 저장기

https://doi.org/10.11002/fsp.2026.33.5.961

간에 따라 변화한 반면, 경도는 비교적 일정하게 유지되었다. 따라서 경도는 봄배추의 저장 중 품질 변화를 반영하는 지표로는 제한적이었으며, 중량감소율과 결구 특성이 저장 중 물리적 품질 변화를 평가하는 주요 지표로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

저장 중 배추의 외관 색 변화를 평가하기 위하여 CIE L*, a*, b* 및 색차(ΔE)를 조사하였다(Table 2). 색차(ΔE)는 측정된 CIE L*, a* 및 b* 값을 활용하여 초기 시료를 기준으로 산출하였다. 저장 60일의 색차는 영월 무처리구와 MA 포장에서 각각 21.81 ± 3.60 및 16.79 ± 1.50, 횡성 무처리구와 MA 포장에서는 각각 14.26 ± 7.42 및 12.60 ± 7.71로 나타났다. 저장 60일 동안 영월 무처리구의 L* 값은 46.29에서 63.61로 증가하였으며, a* 값은 -14.09에서 -12.68로 증가하고 b* 값은 24.27에서 28.57로 증가하였다. 횡성 무처리구에서도 L* 값은 47.80에서 58.48, a* 값은 -15.84에서 -14.41, b* 값은 28.23에서 32.13으로 변화하여 유사한 양상을 나타냈다. 이는 저장 중 잎의 명도가 증가하면서 녹색도가 감소하고 황색도가 증가한 것으로, 배추 잎의 황변 진행을 반영하는 변화로 판단된다. 특

Table 2. Changes in color characteristics of spring *kimchi* cabbage during storage as affected by cultivation region and MA packaging

Storage (days)	Samples	L*	a*	b*	ΔE
0	YW[1)]	46.29 ± 9.69[2)NSbcd]	-14.09 ± 2.92[NSbcd]	24.27 ± 6.96[NSbc]	0
	HS	47.80 ± 8.10[NSbc]	-15.84 ± 1.45[NSns]	28.23 ± 5.31[NSns]	0
	YW (MA)	46.29 ± 9.69[NSbcd]	-14.09 ± 2.92[NSabc]	24.27 ± 6.96[NSbc]	0
	HS (MA)	47.80 ± 8.10[NSa]	-15.84 ± 1.45[NSns]	28.23 ± 5.31[NSns]	0
15	YW	51.04 ± 7.64[ABCbcd]	-16.11 ± 1.42[NSb]	29.24 ± 4.82[NSabc]	14.98 ± 3.60[NSns]
	HS	58.74 ± 9.42[Aa]	-15.95 ± 2.07[NSns]	32.06 ± 3.18[NSns]	14.65 ± 8.73[ns]
	YW (MA)	50.00 ± 7.95[BCbcd]	-15.89 ± 1.76[NSbcd]	28.49 ± 5.15[NSabc]	14.38 ± 3.80[ns]
	HS (MA)	46.88 ± 5.97[BCa]	-16.37 ± 1.46[NSns]	29.08 ± 4.41[NSns]	11.09 ± 7.93[ns]
30	YW	58.78 ± 8.21[NSabc]	-15.84 ± 2.17[NSbcd]	32.18 ± 4.31[NSa]	18.69 ± 3.10[NS]
	HS	57.18 ± 6.59[NSabc]	-15.62 ± 0.85[NSns]	32.79 ± 3.68[NSns]	11.68 ± 7.94
	YW (MA)	54.04 ± 6.36[NSabc]	-16.65 ± 1.25[NSbcd]	32.11 ± 3.98[NSa]	14.24 ± 3.60
	HS (MA)	54.25 ± 6.76[NSa]	-16.29 ± 1.66[NSns]	32.39 ± 3.23[NSns]	10.20 ± 5.71
45	YW	51.11 ± 8.43[NSbcd]	-15.10 ± 2.13[NSbcd]	28.99 ± 6.54[NSabc]	15.18 ± 3.30[NS]
	HS	54.05 ± 9.48[NSabc]	-15.93 ± 2.51[NSns]	31.26 ± 5.03[NSns]	13.91 ± 7.09
	YW (MA)	57.78 ± 7.79[NSa]	-16.32 ± 2.11[NSbcd]	32.89 ± 3.96[NSa]	17.97 ± 2.40
	HS (MA)	51.59 ± 7.88[NSa]	-16.04 ± 1.59[NSns]	29.82 ± 5.24[NSns]	7.87 ± 6.15
60	YW	63.61 ± 9.52[NSa]	-12.68 ± 4.55[NSabcd]	28.57 ± 5.59[NSabc]	21.81 ± 3.60[NS]
	HS	58.48 ± 6.76[NSa]	-14.41 ± 2.83[NSns]	32.13 ± 4.88[NSns]	14.26 ± 7.42
	YW (MA)	55.40 ± 8.14[NSabc]	-15.02 ± 2.60[NSabcd]	30.07 ± 5.72[NSa]	16.79 ± 1.50
	HS (MA)	56.02 ± 8.08[NSa]	-15.20 ± 1.92[NSns]	30.92 ± 3.98[NSns]	12.60 ± 7.71
75	YW	52.82 ± 9.70[NSabcd]	-10.92 ± 2.77[NSa]	24.93 ± 6.32[NSbc]	13.88 ± 3.00[NS]
	HS	-[3)]	-	-	-
	YW (MA)	54.36 ± 7.40[NSabcd]	-12.41 ± 3.72[NSa]	28.44 ± 7.26[NSabc]	16.05 ± 4.60
	HS (MA)	-	-	-	-

[1)]YW, Yeongwol; HS, Hoengseong; MA, modified atmosphere.
[2)]For each quality parameter, uppercase letters indicate comparisons among the source × packaging groups within the same storage period, whereas lowercase letters indicate comparisons among storage periods within the same source × packaging group. Means that do not share a letter differ significantly according to Tukey's honestly significant difference (HSD) test ($p < 0.05$). NS and ns indicate nonsignificant differences in the uppercase and lowercase comparisons, respectively. Values represent mean ± SD (n = 10 for YW; n = 5 for HS).
[3)]"–" indicates that measurements were not taken due to loss of marketability.

히 L* 값의 변화폭이 a* 및 b* 값보다 크게 나타나, 저장 중 ΔE 증가는 황색도의 변화뿐만 아니라 명도 변화의 영향을 크게 받은 것으로 판단된다.

선행 연구에 따르면, 엽채류는 저장 중 노화가 진행됨에 따라 엽록소가 분해되어 녹색도가 감소하고 황변이 진행되며, 이러한 색 변화는 외관 품질을 평가하는 주요 지표로 활용된다(Yamauchi, 2015). 또한, 저장 중 조직의 노화와 세포막 건전성 저하는 산화적 반응을 증가시키며, phenolic compound의 효소적 산화는 배추 조직의 갈변 발생과 관련되는 것으로 보고되었다(Gao 등, 2023). 따라서 저장기간이 경과함에 따라 엽록소 분해에 의한 황변과 조직 노화 및 산화적 변화에 따른 갈변이 진행되면서 외관 색 변화가 증가하는 것으로 판단된다. 또한 배추는 황변이 진행될수록 a* 값은 0에 가까워지고 b* 값은 증가하는 것으로 보고되었다(Amagai 등, 2022; Kang 등, 2019). 본 연구에서도 무처리구는 저장기간이 지남에 따라 L* 및 b* 값이 증가하고 a* 값은 0에 가까워지는 경향을 나타내어, 명도 증가와 함께 녹색도가 감소하고 황색도가 증가하는 황변 양상을 보였다. 특히 L* 값의 변화폭이 상대적으로 크게 나타나, 저장 중 ΔE의 증가는 명도 변화의 영향을 크게 받은 것으로 판단된다. 한편, 저장 60일의 MA 포장에서는 두 재배지역 모두 무처리구보다 L* 및 a* 값의 변화가 적고 ΔE도 낮게 나타나, MA 포장에 의해 저장 중 색 변화가 완화된 것으로 판단된다. 다만, b* 값은 MA 포장에서도 증가하는 경향을 보였으며, ΔE는 지역 및 MA 포장에 따른 유의한 차이가 나타나지 않았다. 따라서 저장 중 배추의 색도 변화는 ΔE뿐만 아니라 L*, a* 및 b* 값의 개별 변화를 함께 고려하여 평가할 필요가 있는 것으로 판단된다.

3.2. 저장기간에 따른 가용성 고형분 함량 및 초기 무기질 조성

영월과 횡성 배추의 가용성 고형분 함량은 저장 0일에는 각각 3.71 ± 0.19 및 3.52 ± 0.11 °Brix였으며, 저장 60일에는 영월 무처리구와 MA 포장은 각각 3.28 ± 0.33 및 3.27 ± 0.23 °Brix, 횡성 무처리구와 MA 포장은 각각 3.36 ± 0.28 및 3.18 ± 0.16 °Brix로 나타났다. 선행 연구에 따르면, 배추의 가용성 고형분 함량은 저장기간이 지남에 따라 유의한 차이가 없다고 알려져 있으며, 저장성이 우수한 계통은 상대적으로 높은 당 함량을 유지한다고 알려져 있다(Lim 등, 2014; Zhao 등, 2023). 또한 pak choi에서는 저장 중 당 함량의 감소가 황변 발생과 관련되는 것으로 보고되어, 당 함량의 변화가 저장 중 노화 및 품질 변화와 관련된 것으로 알려져 있다(Able 등, 2005). 본 연구에서 가용성 고형분 함량은 저장기간에 따라 상이하였으나, 재배지역과 포장 처리에 일정한 증감 경향은 나타나지 않았다. 선행 연구에서 당 함량과 저장 중 품질 변화의 관련성이 보고된 점을 고려할 때, 가용성 고형분 함량도 저장 중 품질 변화와 관련될 가능성이 있는 것으로 판단된다. 따라서 가용성 고형분 함량과 중량감소율, 결구 특성 및 외관 품질 변화와의 관계를 확인하기 위해서는 개별 당 조성 및 저장 중 품질 특성을 연계한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

영월 및 횡성 유래 봄배추 시료군의 수확 당시 초기 무기질 함량(P, K, Ca, Mg, Na), 총질소(T-N) 및 총탄소(T-C) 함량을 나타냈다(Fig. 1). 무기질, 총질소 및 총탄소 함량은 MA 포장 처리 전 수확 직후 시료를 대상으로 분석하였다. 영월은 인과 칼륨 함량이 각각 0.59% 및 0.95%로 횡성(0.56% 및 0.86%)보다 유의하게 높았으며, 총질소와 나트륨 함량도 영월에서 유의하게 높게 나타났다. 반면 칼슘과 마그네슘 함량은 횡성에서 각

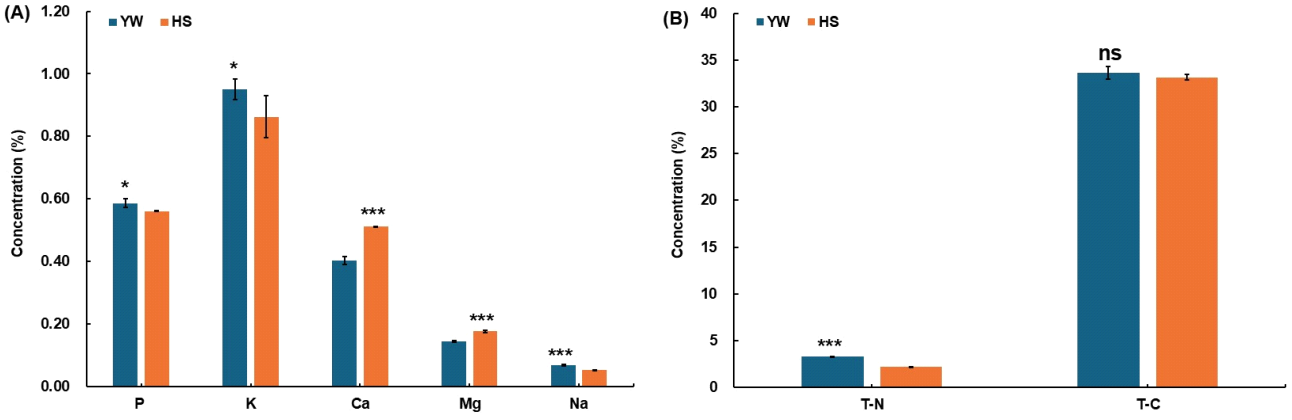


Fig. 1. Comparison of mineral composition (A) and total nitrogen (T-N) and total carbon (T-C) contents (B) of spring *kimchi* cabbage after harvest (day 0) in Yeongwol (YW) and Hoengseong (HS). Asterisks indicate the level of significance (YW vs. HS) according to Tukey's honestly significant difference (HSD) test ($^{*}p < 0.05$, $^{***}p < 0.001$, ns, not significant). The bars and error bars represent the mean ± SD (n = 4).

https://doi.org/10.11002/fsp.2026.33.5.961

각 0.51% 및 0.18%로 영월(0.40% 및 0.15%)보다 유의하게 높았다. 무기질 조성은 재배환경(온습도, 광량 및 토양의 양분 상태)에 따라 상이하며, 초기 품질 특성 및 저장 중 품질 변화에 영향을 미치는 것으로 보고되었다(Hewett, 2019; Sams과 Conway, 2003). 칼륨과 나트륨은 세포의 삼투조절 및 수분 균형 유지에 관여하고, 칼슘과 마그네슘은 조직의 안정성과 생리적 활성 유지에 기여한다고 알려져 있다(Guo 등, 2016; Thor, 2019; Wang 등, 2013; White과 Broadley, 2003). 또한 총질소와 총탄소 함량은 생육 과정에서의 양분 축적과 탄소 동화 수준을 반영하는 지표로, 재배환경에 의해 형성된 초기 내부 품질 특성을 평가하는 데 활용된다고 알려져 있다(Mahanti 등, 2024). 선행 연구에 따르면, 칼슘 처리는 배추의 저장 중 중량 감소를 억제하고 상품성 유지에 영향을 준다고 알려져 있다(Kim 등, 2014). 또한 봄배추에서는 질소 시비 수준에 따라 당 함량, 색도 및 저장성이 달라지는 것으로 보고되었다(Hong 등, 2017).

본 연구에서는 초기 경도와 가용성 고형분 함량에서 두 지역의 유의한 차이가 나타나지 않은 반면, 일부 무기질 및 총질소 함량에서는 유의한 차이가 나타났다. 특히 영월 배추는 칼륨, 나트륨 및 총질소 함량이 상대적으로 높게 나타났다. 이러한 결과와 칼륨 및 나트륨의 수분 균형 유지 기능을 고려할 때, 이들 성분은 봄배추의 저장성과 관련된 초기 품질 인자 후보로 활용될 가능성이 있는 것으로 판단된다. 반면, 칼슘과 마그네슘 함량은 횡성 배추에서 높게 나타나, 특정 무기질의 함량만으로 저장성을 설명하기보다는 초기에 형성된 무기질 및 원소 조성의 차이를 종합적으로 고려할 필요가 있는 것으로 판단된다. 한편, 본 연구의 무기질, 총질소 및 총탄소 분석은 MA 포장 처리 전 수확 당시의 시료를 대상으로 수행하였으므로, 본 결과는 MA 포장에 따른 성분 변화를 나타내는 것이 아니라 초기 성분 조성의 차이를 나타낸다. 따라서 초기 무기질 및 원소 조성과 저장 중 품질 변화와의 관련성은 고려할 수 있으나, 이를 MA 포장 효과와 직접적으로 연계하여 해석하는 데에는 한계가 있다. 또한 본 연구에서는 무기질, 총질소 및 총탄소 함량을 수확 당시에만 조사하였기 때문에 특정 성분을 저장성을 결정하는 주요 초기 품질 인자로 도출하기에는 한계가 있다. 따라서 다양한 재배지역 및 재배환경을 대상으로 초기 무기질 및 원소 조성과 저장 중 품질 변화 간의 관계를 검증하여 봄배추의 저장성과 관련된 주요 초기 품질 인자를 구명하는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

3.3. 재배지역 및 MA 포장에 따른 봄배추의 저장성 평가

저장기간에 따른 각 시료군의 포장 처리별 중량감소율 변화를 나타내었다(Fig. 2). 저장기간이 지남에 따라 모든 처리구에서 중량감소율은 유의하게 증가하였으며($p < 0.05$), 재배지역 및 MA 포장에 따라 중량감소율의 증가 양상이 상이하게 나타

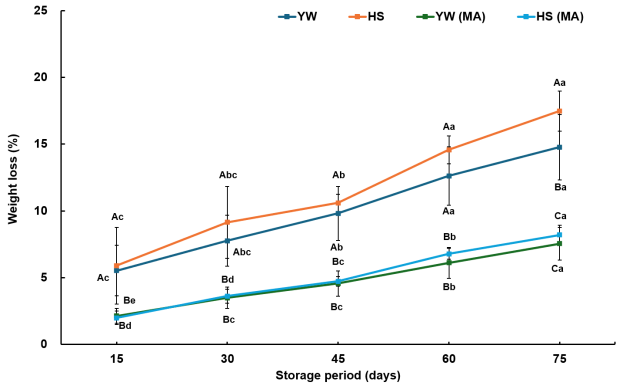


Fig. 2. Weight loss of spring *kimchi* cabbage during storage as affected by cultivation region and modified atmosphere (MA) packaging in Yeongwol (YW) and Hoengseong (HS). Weight loss (%) was calculated as [(initial weight - weight at each sampling date) / initial weight] × 100. Different uppercase letters indicate significant differences among treatments at each storage period according to Tukey's honestly significant difference (HSD) test. Different lowercase letters indicate significant differences among storage periods within each treatment according to Tukey's honestly significant difference (HSD) test ($p < 0.05$). The lines and error bars represent the mean ± SD (n = 10 for YW; n = 5 for HS).

났다. 저장 60일의 중량감소율은 영월 무처리구와 MA 포장구에서 각각 12.63 ± 2.19% 및 6.12 ± 1.16%였으며, 횡성에서는 각각 14.58 ± 1.05% 및 6.79 ± 0.41%로 나타났다. 특히 무처리구에서는 저장기간이 지남에 따라 중량감소율이 크게 증가한 반면, MA 포장에서는 저장기간 동안 상대적으로 낮은 중량감소율을 유지하였다. 또한 동일한 저장조건에서도 영월 및 횡성 배추 중량감소율의 증가 양상이 다르게 나타났다. 선행 연구에 따르면, 중량감소율은 저장 중 증산과 호흡에 의한 수분 손실로 발생하며, 엽채류의 저장성과 상품성을 평가하는 주요 지표로 알려져 있다(Galindo 등, 2004; Mampholo 등, 2016). 저장 중 수분 손실은 조직의 팽압 감소와 위조를 유발하고, 조직 수축을 촉진하여 외관 품질 및 상품성을 저하시키는 것으로 보고되었다 (Able 등, 2005; Shezi 등, 2024).

본 연구에서 영월과 횡성 배추는 수확 당시 형태적 품질 특성과 일부 무기질 조성에서 차이를 보였으며, 저장 중 중량감소율의 변화 양상도 달랐다. 이러한 초기 품질 특성의 차이가 저장 중 수분 유지와 중량 감소 양상에 영향을 미쳤을 가능성이 있다. 다만, 특정 무기질 성분과 저장성 간의 직접적인 관계를 명확히 규명하기 위해서는 다양한 재배지역 및 재배환경을 대상으로 한 추가적인 검증이 필요하다. 한편, MA 포장은 저장기간 동안 무처리구보다 낮은 중량감소율을 유지하였다. MA 포장은 필름의 수분 및 기체 투과 특성과 농산물의 호흡에 의해 포장 내부의 상대습도, O_2 및 CO_2 조성이 형성되며, 이에

따라 증산과 호흡을 억제하여 수분 손실과 품질 저하를 완화하는 것으로 알려져 있다(Kader 등, 1989; Mampholo 등, 2013; Yang 등, 2018). 특히 봄배추의 pallet 단위 필름 포장에서도 무포장구에 비해 중량감소율이 현저히 감소하였으며, 필름의 투과성과 포장 내부 온 · 습도 및 기체환경이 저장 품질에 영향을 미치는 것으로 보고되었다(Lee 등, 2018). 본 연구에서는 30 μm 두께의 PE 필름을 pallet 단위로 적용하였으며, 저장기간 동안 저장고의 평균 온도와 상대습도는 각각 2.0 ± 0.7℃ 및 99.6 ± 1.5%였다. 이러한 저온 · 고습 조건에서 MA 포장구는 무처리구보다 낮은 중량감소율을 나타냈다. 선행 연구에서 보고된 필름 포장의 수분 이동 특성을 고려하면, 이러한 결과는 포장에 따른 수분 손실 감소와 관련되었을 가능성이 있다. 다만, 본 연구에서는 MA 포장 내부의 O_2 및 CO_2 농도와 상대습도를 직접 측정하지 않았으므로, 기체 조성 및 포장 내부 습도 변화와 품질 유지 간의 직접적인 관계를 규명하는 데에는 한계가 있다.

3.4. 저장기간, 재배지역 및 MA 포장에 따른 봄배추 품질 특성 변화

선행 연구에 따르면, 다요인 분산분석은 저장기간, 품종 및 처리조건 등이 품질 특성에 미치는 영향을 각 요인별로 구분하고, 요인 간 상호작용을 함께 평가하는 데 유용한 방법으로 보고되었다(Kabir 등, 2020). 따라서 조사 시료에서 저장기간, 시료 출처 및 MA 포장에 따른 품질 특성의 차이와 요인 간 상호작용을 탐색적으로 평가하기 위하여 삼원분산분석을 실시하였다(Fig. 3).

삼원분산분석 결과, 저장기간은 중량감소율, 중량, 구고, 구폭, 결구지수, 경도, 색차 및 가용성 고형분 함량에서 유의한 영향을 나타냈다($p < 0.05$). 재배지역의 주효과는 중량감소율, 중량, 구고, 결구지수, 경도 및 색차에서 유의하였으며, MA 포장의 영향은 중량감소율, 중량, 결구지수 및 색차에서 유의하게 나타났다. 이는 본 연구에 사용된 영월 및 횡성 배추의 차이로 해석하였다. 수확 후 품질은 저장조건뿐만 아니라 수확 직후의 초기 품질 특성 및 다양한 처리조건에 영향을 받는다고 알려져 있다(Able 등, 2005; Duarte-Sierra 등, 2020; Zhao 등, 2024). 본 연구에서도 봄배추의 저장 품질은 저장기간에 따른 변화뿐만 아니라 초기 품질 특성과 MA 포장에 따른 변화 양상이 상이하게 나타났다.

특히 저장기간과 MA 포장 간 상호작용은 중량감소율, 중량, 구폭 및 결구지수에서 유의하게 나타났다. 수확 후 신선농산물

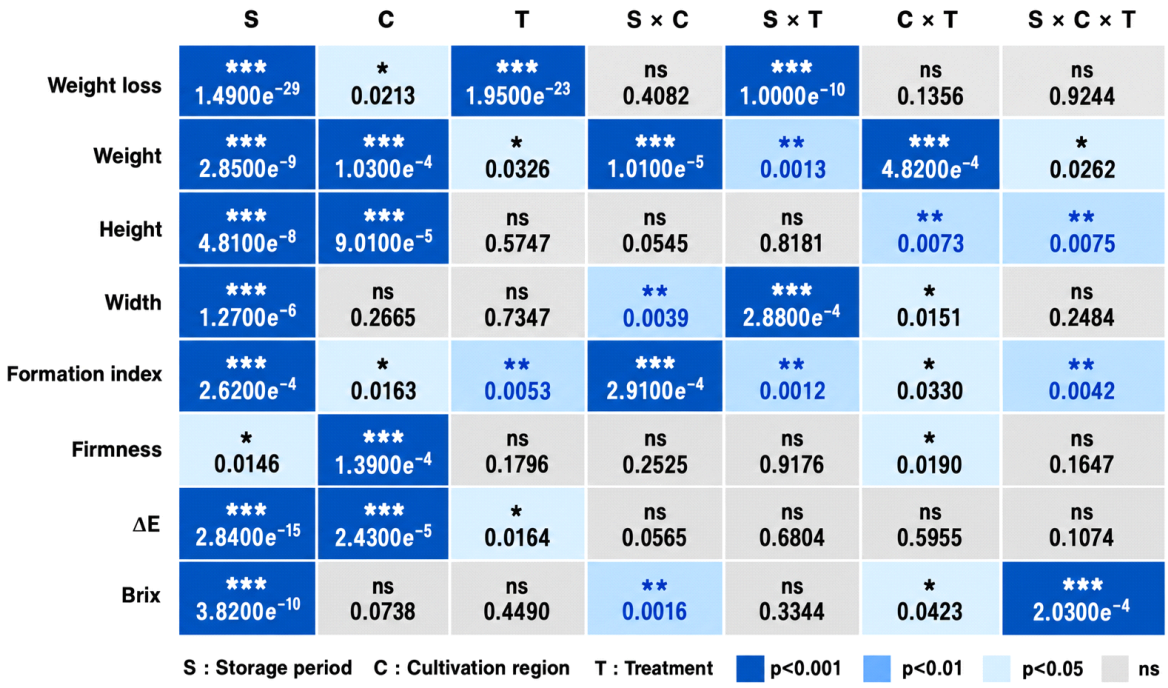


Fig. 3. Heat map of p-values obtained from three-way analysis of variance (ANOVA) for the effects of storage period (S), cultivation region (C), modified atmosphere (MA) packaging treatment (T), and their interactions on the quality characteristics of spring *kimchi* cabbage. Statistical significance was determined by three-way ANOVA. Asterisks indicate the level of statistical significance ($^{*}p < 0.05$; $^{**}p < 0.01$, $^{***}p < 0.001$, ns, not significant). Color intensity corresponds to the level of statistical significance. S, storage period; C, cultivation region; T, MA film packaging treatment.

https://doi.org/10.11002/fsp.2026.33.5.961

의 증산은 직접적인 수분 및 중량 손실을 유발하며, MA 포장에 사용되는 고분자 필름은 수분 이동의 장벽으로 작용하여 포장 내부의 수증기압을 유지함으로써 증산에 의한 수분 손실을 억제하는 것으로 알려져 있다(Bovi 등, 2016; Mahajan 등, 2014). 본 연구에서 나타난 저장기간과 MA 포장 간 상호작용은 포장 유무에 따른 중량감소율, 중량, 구폭 및 결구지수의 변화 양상이 저장 시점에 따라 달라졌음을 나타낸다. 또한 동일한 저장조건에서도 재배지역에 따라 중량감소율과 품질 변화 양상이 다르게 나타났다. 수확 후 품질은 재배 중 광, 수분 및 양분 등의 환경조건에 의해 수확 시점에 형성된 품질 특성의 영향을 받는 것으로 알려져 있으므로(Hewett, 2006), 재배지역에 따른 저장 특성의 차이는 앞서 확인된 수확 당시 품질 특성과 함께 고려할 필요가 있다.

한편, 중량과 결구지수는 저장기간, 재배지역 및 MA 포장의 주효과와 요인 간 상호작용에서 유의한 영향을 받은 반면, 구고, 구폭, 경도 및 가용성 고형분 함량은 품질 특성에 따라 각 요인의 영향이 상이하게 나타났다. 따라서 본 연구의 분석 결과에서 중량과 결구지수는 저장기간, 재배지역 및 MA 포장에 따른 품질 변화를 상대적으로 잘 반영하는 지표로 나타났다. 이러한 결과는 재배지역을 고려한 봄배추의 저장성 평가 및 저장 · 유통기술 개발에서 각 요인의 개별적인 영향뿐만 아니라 요인 간 상호작용을 함께 고려할 필요가 있음을 시사한다.

4. 요약

본 연구는 영월과 횡성에서 확보한 봄배추 시료군을 대상으로 실제 저장 · 유통 조건에 가까운 팰릿 단위의 MA 필름 포장을 적용하여, 두 시료군의 저장 특성과 MA 포장에 따른 품질 변화 양상을 사례 비교하고자 수행하였다. 봄배추는 재배지역에 따라 초기 품질 특성과 무기질 조성에서 차이가 나타났으며, 저장 중 중량감소율과 물리적 품질 특성의 변화 양상도 재배지역에 따라 상이하게 나타났다. 한편, MA 포장구는 두 시료군에서 무처리구보다 낮은 중량감소율을 나타냈다. 삼원분산분석에서 MA 포장의 주효과는 중량감소율, 중량, 결구지수 및 색차에서 유의하였으나, 구고, 구폭, 경도 및 가용성 고형분 함량에서는 유의하지 않았다. 또한 삼원분산분석을 통해 저장기간, 재배지역 및 MA 포장의 주효과와 요인 간 상호작용을 평가한 결과, 중량과 결구지수는 각 요인에 따른 품질 변화를 상대적으로 잘 반영하는 지표로 나타났다. 본 연구 결과는 시험한 저장조건에서 팰릿 단위 MA 포장의 중량 감소 완화 효과를 보여주며, MA 포장의 적용 효과를 평가할 때 품질 항목별 반응 차이를 고려할 필요가 있음을 시사한다.

Supplementary materials

Supplementary materials are only available online from: https://doi.org/10.11002/fsp.2026.33.5.961.

Funding

This study was carried out with the support of “Cooperative Research Program for Agriculture Science and Technology Development (Project No. RS-2025-02233091)” Rural Development Administration, Republic of Korea.

Acknowledgements

None.

Conflict of interests

The authors declare no potential conflicts of interest.

Author contributions

Conceptualization: Chang MS. Methodology: Chae SH, Park DG, Yang HJ, Cho JH, Park CW. Software: Chae SH. Validation: Chae SH, Cho JH, Lee SY, Choi JW. Formal analysis: Chae SH, Park DG, Yang HJ, Lee SY, Choi JW. Investigation: Chae SH, Park DG, Yang HJ, Cho JH, Lee SY, Park CW. Resources: Cho JH, Choi JW, Chang MS. Data curation: Chae SH. Writing - original draft: Chae SH. Writing - review & editing: Cho JH, Lee SY, Chang MS. Visualization: Chae SH. Supervision: Lee SY, Chang MS. Project administration: Chang MS. Funding acquisition: Chang MS.

Ethics approval

This article does not require IRB/IACUC approval because there are no human and animal participants.

Declaration of generative AI

During the preparation of this work, Codex was used for three-way ANOVA and English editing. After using this tool, the authors reviewed and edited the content as needed and take full responsibility for the content of the publication.

ORCID

Seung-Hun Chae (First author)
https://orcid.org/0009-0009-4566-4031
Do-Gyun Park
https://orcid.org/0009-0000-5763-3405
Hae Jo Yang
https://orcid.org/0000-0002-1903-3799

Jae-Han Cho
https://orcid.org/0009-0009-3830-1881
Seon Yi Lee
https://orcid.org/0000-0001-7846-5092
Ji Weon Choi
https://orcid.org/0000-0003-1929-4697
Chun-Wan Park
https://orcid.org/0000-0002-1485-6331
Min-Sun Chang (First & Corresponding author)
https://orcid.org/0000-0002-3079-8338

References

Able AJ, Wong LS, Prasad A, O'Hare TJ. The physiology of senescence in detached pak choy leaves (*Brassica rapa* var. *chinensis*) during storage at different temperatures. Postharvest Biol Technol, 35, 271-278 (2005)

Amagai Y, Lu N, Hayashi E, Takagaki M, Kikuchi M, Ibaraki Y, Kozai T. External green light as a new tool to change colors and nutritional components of inner leaves of head cabbages. J Food Meas Charact, 16, 269-280 (2022)

Baek SA, Jung YH, Lim SH, Park SU, Kim JK. Metabolic profiling in Chinese cabbage (*Brassica rapa* L. subsp. *pekinensis*) cultivars reveals that glucosinolate content is correlated with carotenoid content. J Agric Food Chem, 64, 4426-4434 (2016)

Bovi GG, Caleb OJ, Linke M, Rauh C, Mahajan PV. Transpiration and moisture evolution in packaged fresh horticultural produce and the role of integrated mathematical models: A review. Biosyst Eng, 150, 24-39 (2016)

Brosnan T, Sun DW. Precooling techniques and applications for horticultural products: A review. Int J Refrig, 24, 154-170 (2001)

Charron CS, Saxton AM, Sams CE. Relationship of climate and genotype to seasonal variation in the glucosinolate–myrosinase system. I. Glucosinolate content in ten cultivars of *Brassica oleracea* grown in fall and spring seasons. J Sci Food Agric, 85, 671-681 (2005)

Duarte-Sierra A, Tiznado-Hernández ME, Jha DK, Janmeja N, Arul J. Abiotic stress hormesis: An approach to maintain quality, extend storability, and enhance phytochemicals on fresh produce during postharvest. Compr Rev Food Sci Food Saf, 19, 3659-3682 (2020)

Eum HL, Kim BS, Yang YJ, Hong SJ. 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 (2013)

Galindo FG, Herppich W, Gekas V, Sjöholm I. Factors affecting quality and postharvest properties of vegetables: Integration of water relations and metabolism. Crit Rev Food Sci Nutr, 44, 139-154 (2004)

Gao H, Zeng S, Yue X, Yuan S, Zuo J, Wang Q. Palmitic acid regulation of stem browning in freshly harvested mini-Chinese cabbage (*Brassica pekinensis* (Lour.) Rupr.). Foods, 12, 1105 (2023)

Guo W, Nazim H, Liang Z, Yang D. Magnesium deficiency in plants: An urgent problem. Crop J, 4, 83-91 (2016)

Hewett EW. An overview of preharvest factors influencing postharvest quality of horticultural products. Int J Postharvest Technol Innov, 1, 4-15 (2006)

Hewett EW. Preharvest factors affecting postharvest quality of horticultural products. Acta Hortic, 1245, 11-20 (2019)

Hong SJ, Kim BS, Park NI, Eum HL. Influence of nitrogen fertilization on storability and the occurrence of black speck in spring kimchi cabbage. Hortic Sci Technol, 35, 727-736 (2017)

Kabir MSN, Ali M, Lee WH, Cho SI, Chung SO. Physicochemical quality changes in tomatoes during delayed cooling and storage in a controlled chamber. Agriculture, 10, 196 (2020)

Kader AA, Zagory D, Kerbel EL, Wang CY. Modified atmosphere packaging of fruits and vegetables. Crit Rev Food Sci Nutr, 28, 1-30 (1989)

Kang JH, Woo HJ, Park JB, Chun HH, Park CW, Song KB. Effect of storage in pallet-unit controlled atmosphere on the quality of Chinese cabbage (*Brassica rapa* L. spp. *pekinensis*) used in kimchi manufacturing. LWT, 111, 436-442 (2019)

Kim S, Rho HY, Kim S. The effects of climate change on heading type Chinese cabbage (*Brassica rapa* L. spp. *pekinensis*) economic production in South Korea. Agronomy, 12, 3172 (2022)

Kim SS, Seong GU, Hwang HY, Jeong MC, Chung SK. The short-term storage characteristics of cut kimchi cabbages treated with Ca^{2+}. Korean J Food Preserv, 21, 157-162 (2014)

Ku KH, Choi EJ, Jeong MC. Comparison of quality characteristics between seasonal cultivar of salted-Kimchi cabbage (*Brassica rapa* L. spp. *pekinensis*). Korean J Food Preserv, 21, 512-519 (2014)

Lee HO, Lee YJ, Kim JY, Kim BS. Effect of combined pallet unit MAP and plasma treatment for extending the freshness of spring kimchi cabbage. Hortic Sci Technol, 36, 224-236 (2018)

Lee JH, Lee HJ, Kim SK, Lee SG, Lee HS, Choi CS. Development of growth models as affected by cultivation season and transplanting date and estimation of prediction yield in Kimchi cabbage. Protected Hortic Plant Fact,

 https://doi.org/10.11002/fsp.2026.33.5.961

26, 235-241 (2017)
Lee JS. Growth and salting properties influenced by culture methods, cultivars and storage packaging of kimchi cabbage (*Brassica rapa*) in spring. Korean J Agric Sci, 45, 623-634 (2018)
Lee JS. Case study of winter kimchi cabbage storage with net packaging, and comparison of head growth and salting characteristics between winter and spring kimchi cabbage. J Agric Life Sci, 54, 25-35 (2020)
Lee JS, Park SH, Lee YS, Lim BS, Yim SC, Chun CH. Characteristics of growth and salting of Chinese cabbage after spring culture analyzed by cultivar and cultivation method. Korean J Food Preserv, 15, 43-48 (2008)
Lee NH, Jeong W, Jung JY, Han J, Baek M, Son M, Byeon JH, Hwang ET, Kim KH. Effect of abiotic stresses on *Brassica rapa* production in Korea: Learning from history to better prepare for the future impacts of climate change. Agric Syst, 228, 104374 (2025)
Lee SH, Baek SH, Lee J, Jang YA, Seo TC, Moon JH, Jang S. Production of Kimchi cabbage (*Brassica rapa* L. spp. *Pekinensis)* under high-temperature stress conditions: A review. Korean J Breed Sci, 56, 237-255 (2024)
Lim KT, Kim J, Chung JH. Development of long-term storage technology for Chinese cabbage—physiological characteristics of postharvest freshness in a cooler with a monitoring and control interface. J Biosyst Eng, 39, 194-204 (2014)
Mahajan PV, Caleb OJ, Singh Z, Watkins CB, Geyer M. Postharvest treatments of fresh produce. Philos Trans A Math Phys Eng Sci, 372, 20130309 (2014)
Mahanti NK, Chakraborty SK, Pathare PB. Effect of excess application of nitrogenous fertilizer on postharvest quality of spinach during storage. J Food Qual, 2024, 5521957 (2024)
Mampholo BM, Sivakumar D, Beukes M, van Rensburg WJ. Effect of modified atmosphere packaging on the quality and bioactive compounds of Chinese cabbage (*Brasicca rapa* L. ssp. *chinensis*). J Sci Food Agric, 93, 2008-2015 (2013)
Mampholo BM, Sivakumar D, Thompson AK. Maintaining overall quality of fresh traditional leafy vegetables of southern Africa during the postharvest chain. Food Rev Int, 32, 400-416 (2016)
Oliveira M, Abadias M, Usall J, Torres R, Teixidó N, Viñas I. Application of modified atmosphere packaging as a safety approach to fresh-cut fruits and vegetables: A review. Trends Food Sci Technol, 46, 13-26 (2015)
Sams CE, Conway WS. Preharvest nutritional factors affecting postharvest physiology. In: Postharvest Physiology and Pathology of Vegetables, 2nd ed, Bartz JA, Brecht JK (Editors), Marcel Dekker, New York, NY, USA, p 161-176 (2003)
Shezi S, Ngcobo MEK, Khanyile N, Ncama K. Physio-metabolic mechanisms behind postharvest quality deterioration in broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) and Swiss chard (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*): A review. Plants, 13, 3174 (2024)
Shim JY, Kim DG, Park JT, Kandpal LM, Hong SJ, Cho BK, Lee WH. Physicochemical quality changes in Chinese cabbage with storage period and temperature: A review. J Biosyst Eng, 41, 373-388 (2016)
Thor K. Calcium—nutrient and messenger. Front Plant Sci, 10, 440 (2019)DL
Wang M, Zheng Q, Shen Q, Guo S. The critical role of potassium in plant stress response. Int J Mol Sci, 14, 7370-7390 (2013)
White PJ, Broadley MR. Calcium in plants. Ann Bot, 92, 487-511 (2003)
Wu X, Huang H, Childs H, Wu Y, Yu L, Pehrsson PR. Glucosinolates in *Brassica* vegetables: Characterization and factors that influence distribution, content, and intake. Annu Rev Food Sci Technol, 12, 485-511 (2021)
Yamauchi N. Postharvest chlorophyll degradation and oxidative stress. In: Abiotic Stress Biology in Horticultural Plants, Kanayama Y, Kochetov A (Editors), Springer, Tokyo, Japan, p 101-113 (2015)
Yang D, Li D, Xu W, Liao R, Shi J, Fu Y, Wang J, Wang Y, He X. Design and application of a passive modified atmosphere packaging for maintaining the freshness of Chinese cabbage. LWT, 94, 136-141 (2018)
Zhao K, Yue X, Zhu X, Shi J, Yuan S, Xu X, Wang M, Huang T, Zuo J, Yu S. Evaluation of the storage longevity, postharvest quality, and sugar metabolism-related gene expression in two lines (N1 and N3) of Chinese cabbage during long-term storage. Postharvest Biol Technol, 206, 112543 (2023)
Zhao K, Zhu X, Yuan S, Xu X, Shi J, Zuo J, Yue X, Su T, Wang Q. Transcriptomic, metabolomic, and physiological analysis of two varieties of Chinese cabbage *(Brassica rapa* L. ssp. *pekinensis)* that differ in their storability. Postharvest Biol Technol, 210, 112750 (2024)