KOREAN JOURNAL OF PACKAGING SCIENCE & TECHNOLOGY
Vol. 29, No. 3 195~201 (2023)
https://doi.org/10.20909/kopast.2023.29.3.195

CFD 해석을 이용한 철망 파렛트 컨테이너 적입 마늘의 저온 저장고내 온도 분포 연구

최동수[1*] · 김용훈[1] · 김진세[1] · 박천완[1] · 정현모[2] · 박종민[3]

Study on Temperature Distribution in Cold Storage of Korean Garlic in Wire Mesh Pallet Container Using CFD Analysis

Dong-Soo Choi[1*], Yong-Hoon Kim[1], Jin-Se Kim[1], Chun-Wan Park[1], Hyun-Mo Jung[2], and Jong-Min Park[3]

[1]*Postharvest Engineering Division, National Institute of Agricultural Sciences, Korea*
[2]*Dept. of Logistic Packaging, Kyongbuk Science Collelge, Korea*
[3]*Dept. of Bio-industrial Machinery Engineering, Pusan National University, Korea*

Abstract Garlic *(Allium sativum)*is a major crop in most Asian countries, and its consumption in Asia-Pacific countries exceeds 90% of the global consumption. It contains beneficial ingredients and numerous essential nutrients, such as manganese, vitamin B6, and vitamin B1. Garlic demand is rising not only in Asian countries but also around the world. Particularly, garlic demand has been steadily increasing in European countries, such as Spain, France, Italy, and the American continent. In South Korea, 331,671 tons and 387,671 tons of garlic was produced in 2018 and 2019, respectively, making the country the fifth ranking garlic producer in the world, and the production has been increasing every year. In this study, the study on temperature distribution in cold storage of Korean garlic in folding wire mesh pallet container using CFD (Computational Fluid Dynamics) analysis was performed and Computations were based a commercial simulation software (ANSYS Workbenh Ver. 18.0). Considering the respiration heat of garlic, the decreasing rate of temperature in the area in contact with the cold air was fast due to the inflow of cold air inside, while the decreasing rate of temperature in the center of the pallet was very low. In order to maintain a uniform temperature distribution inside the agricultural product storage pallet in a low-temperature warehouse, it is considered desirable to install an air passageway to allow low-temperature air to flow into the wire mesh pallet.

Keywords: Garlic, Cold storage, Wire mesh pallet container, Temperature, CFD

서 론

마늘은 우리나라의 4대 채소중의 하나이다. 식생활에서 중요한 양념채소로 국민 1인당 일년에 약 7~9 kg의 마늘을 소비하고 있으며 특히 전 국민이 마늘을 좋아한다. 그리고 마늘은 식품으로서의 가치뿐만 아니라 약리적 효능이 있으므로, 오늘날 현대인의 가장 큰 관심인 건강에도 크게 기여하고 있다. 식용의 경우는 주로 조미, 향신료로 많이 쓰인다. 최근에는 가공식품으로 많이 소비되며, 마늘기름을 이용하여 약품으로도 생산되고 있어 앞으로 기능성 식품으로서의 수요가 증대될 것으로 기대된다. 이처럼 국내외 슈퍼푸드라고 불리는 마늘은 우리나에서 빼놓을 수 없는 식재료 중 하나지만 식탁위에 오르기까지 수많은 노동력을 필요로 한다[1]. 하지만 인건비 상승과 고령화 등으로 인한 농촌 인력 부족으로 인해 생산단가는 계속해서 올라가고 이에 따라 소비자 물가 역시 상승할 수 밖에 없어 농민은 물론 소비자까지 힘들게 하고 있다. 특히, 코로나19의 확산이 노동력 부족을 심화시키면서 마늘 등 밭농업에 대한 기계화 요구가 날로 거세지고 있다[2]. 논벼의 기계화율은 98.6%인데 반해 마늘의 경우는 인력 의존도가 상당히 높은 편이다. 1,000 m^2 (약 300평) 당 노동력 투입시간은 논벼의 경우 9.5시간이지만 밭작물인 마늘은 113.2시간으로 10배 이상에 달한다. 타 밭작물(고추 144.8시간)에 비해 마늘의 기계화율이 비교적 높

*Corresponding Author: Dong-Soo Choi
Postharvest Engineering Division, National Institute of Agricultural Sciences, 166, Nongsaengmyeong-ro, Iseo-myeon, Wanju-gun, Jeollabuk-do 55365, Korea
Tel: +82-63-238-4130, Fax: +82-238-4105
E-mail: choi0ds@korea.kr

다고 하지만 여전히 노동시간과 인력을 많이 필요로 한다[3].

최근 정부에서는 우리 농촌의 지속적인 인구 감소와 고령화를 감안할 때, 인력문제 해결 대안으로 밭농업 기계화율 제고가 시급한 상황의 인식으로 63.3% 수준인 밭농업 기계화율의 가시적 성과를 얻도록 선택과 집중을 통해 2025년까지 전국의 마늘 주산지 14개 전 지역에 기계화 우수모델 확산을 추진하고 있다[4]. 이처럼 마늘의 기계화에서 노동력의 대체를 위해서는 기계화 수확시 바로 저장용 컨테이너에 적입하여 마늘의 품질보존을 위한 건조가 이루어지고 저온저장고내로 바로 이송할 수 있는 시스템 구축이 필요하다. 기존의 경우 그물망에 주대와 뿌리를 1~2 cm 정도 남기고 통 크기별로 선별한 다음 그물함에 담아 저장하여 인력의 수요가 많은 단점이 있다. 이를 해결하기 위해서는 최근 국내 양파 주산지에서 시범 사업으로 운영되고 있는 일관수송용 접이식 철망 파렛트 컨테이너(Mesh Pallet Container) 도입의 필요성이 물류효율 측면에서도 대두되고 있다.

신선 농산물인 마늘에 대하여 저온 저장고 내부의 CFD (Computation Fluid Dynamics) 열유동해석에 관한 연구는 전무한 실정이며, CFD 시뮬레이션을 이용한 농산물 저온저장고내의 온도분포 균일화에 대한 연구[5]와 CFD 해석을 통한 후지 사과 CA(Controlled Atmosphere) 저장고 내의 적정 CO_2 농도 조성 검토에 관한 연구[6]가 진행되었으며, 대형 수송용 냉장 컨테이너(reefer container) 내부의 공기유동 및 열전달 현상에 대한 CFD 시뮬레이션에 관한 연구[7]가 진행되었다. 또한, 외국의 경우에도 파렛트 단위의 적재된 냉장 트럭 컨테이너 내부의 공기유동에 대한 실험적 연구[8]와 CFD를 활용한 콜드 스토어 내부의 공기유동 해석을 통한 유통 최적화에 대한 연구[9], 콜드체인 EPS 용기에 대한 해석[10] 및 시스템 내부의 발열 개선을 위한 열유동 분석에 대한 연구가 진행되었지만[11], 다단 적재된 철망 파렛트 컨테이너 적입 마늘의 저온 저장고내 열유동해석 및 내부 온도분포에 대한 연구는 전무한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 양파에 적용되고 있는 수확 및 저온 저장용 접이식 철망 파렛트 컨테이너에 마늘을 적입하고 다단 적재된 컨테이너 저온 저장고내의 공기 열유동해석 및 호흡열에 따른 적입 마늘 내부의 온도 분포를 CFD (Computational Fluid Dynamics) 이론적 방법을 통해 분석하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

본 연구에서는 기존 시범용으로 사용되고 있는 Fig. 1과 같은 수확과정에서부터 일관수송용 접이식 철망 파렛트 컨테이너(1100 × 1100 × 1150 mm)에 적입된 마늘의 건조후 저온 저장고(2500 × 4100 × 2910 mm)에 입고 된 형태 Fig. 1, 2단 적재)의 모델링을 구현을 통해 저장고내 CFD 열유동해석을 수행하였으며, 해석의 절차는 Fig. 2와 같이 문제인식(Problem Identification), 전처리(Pre Processing), 솔루션 계산(Solve) 및 후처리(Post Processing) 과정으로 진행하였다. 또한, Fig. 3과 같이 CFD 열유동해석을 위해 저장고내 마늘적입 철망파렛트 컨테이너를 포함한 대상체에 대한 이중격자(Mesh) 하이브리드 격자(Hybrid grid) 모델링(Node : 68,754, Element : 342,282)을 진행하였다.

본 연구에 적용된 CFD 열유동 시뮬레이션 모델은 유동 및 대류 열 전달을 지배하는 편미분방정식의 해를 기반으로 하며, 비 압축성과 열전달 과정에 기초한 유체 유동 분야의 지배방정식이 적용되었다.

a. 연속방정식 (Continuity equation)

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

Fig. 1. Mesh pallet container for cold storage of Korean garlic.

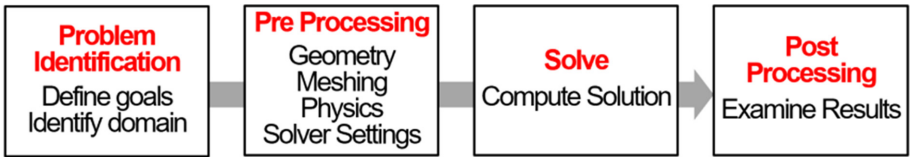

Fig. 2. CFD analysis work flow of cold storage for garlic using mech pallet container.

Fig. 3. Mesh modeling for CFD analysis.

b. 운동방정식 (Momentum equation)

$$\rho\left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t}+\mathbf{v}\cdot\nabla\mathbf{v}\right) = -\nabla p+\mu\nabla^2\mathbf{v}+f_B \quad (2)$$

c. 에너지방정식 (Energy equation)

$$\int_V \rho C_p\left(\frac{\partial T}{\partial t}+\mathbf{v}\cdot\nabla T\right)dV = \int_V k\nabla^2 T dV+\int_s (q_R+q_s)dS \quad (3)$$

여기서, t는 시간, v는 속도벡터, ρ는 밀도, p는 압력, μ는 점성계수, k는 열전도계수, Cp는 비열용량, T는 온도, q_R는 내부 열복사 에너지, q_s는 태양 복사 에너지이며, 본 연구에서는 내부 및 태양 열복사 에너지는 본 연구의 저온 저장고 내부 열유동 해석으로 인하여 무시하였다.

마늘 적입 철망 파렛트 컨테이너의 저온저장고내 CFD 열유동 해석을 위한 초기 및 경계조건은 Table 1과 같다. 저장고벽 단열재의 두께, 열전도계수 및 저장고 내부 크기와 마늘의 호흡열, 공극률(porosity) 및 전체 컨테이너 마늘 적입 무게와 저장고 내·외부 온도 및 저온저장고내 공기 유입속도와 온도에 대한 초기 및 경계조건이었으며, 본 연구에서 사용된 CFD 열유동해석을 위한 전용 소프트웨어는 범용적으로 사용되고 있는 ANSYS Workbench (Ver. 18.0)이었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 마늘 저온 저장고내 공기유동 해석

철망 파렛트 컨테이너에 적입된 마늘의 저온 저장고내의

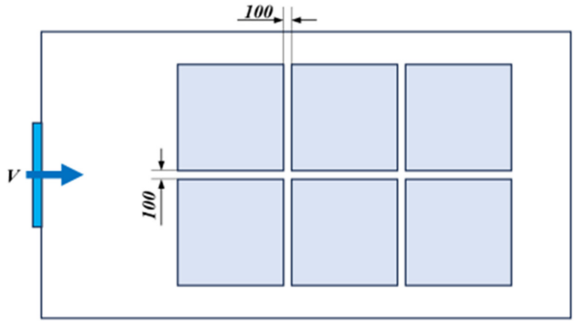

Fig. 4. Pallet container location in cold storage.

공기 열유동해석을 위해 적용된 1°C의 저온공기 유입속도별(1.5, 2.0, 2.5 m/s) 내부 공기유동 속도에 대하여 Fig. 5-7에 나타내었으며, 저장고 내부 저온공기 분산 비율을 의미하는 전체 유동 체적 비율이 최소 80%를 초과하는 저온 저장고 유입속도를 선정하였다.

마늘 일관수송용 철망 파렛트 컨테이너 2단 적재(파렛트 간 상호 간격 : 100 mm)에 의한 저장고내 유동해석 결과, 기존 저장고에서 적용되고 있는 공기유입속도 1.5 m/s로는 저장고내 전반적인 저온 관리(유동 체적 비율 : 62.3%)가 어렵고 최소 2.5 m/s의 공기유입속도가 필요(유동 체적 비율 : 85.8%)한 것으로 분석되었다. 일반적인 공기유입속도의 결정은 냉방기의 냉각팬 성능 선정시 매우 중요한 설계인자이다.

저온 저장고내 공기 유입속도 2.5 m/s에 따른 저장고내 온도 분포를 Fig. 8에 나타내었다. 해석 결과 마늘 저장고내 온도 편차가 최대 6°C이었으며, 이러한 차이는 일관수송용

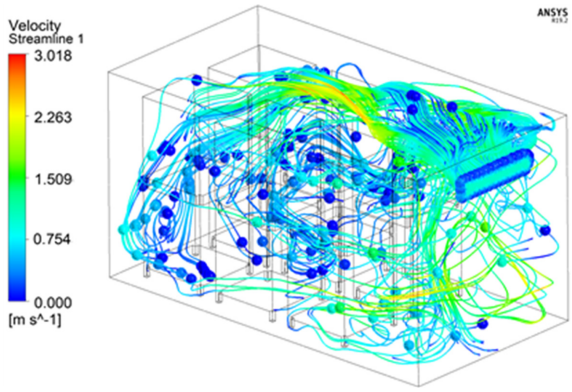

Fig. 5. Velocity stream distribution by air inlet velocity of 1.5 m/s.

Table 1. Initial and boundary conditions for CFD analysis of garlic in cold storage

Items	Specification
Cold Storage	Thickness : 100 mm, K = 0.18 kcal/m^{2}h°C, Inner size : 2500 × 4100 × 2910 mm
Garlic	Respiration Heat: 31.1 kcal/h, Porosity: 3, 7, 9%, Total weight: 2,400 kg
Outer/Inner Temp.	Outer Temp.: 35°C, Inner initial Temp.: 27°C
Air inlet velocity/temp.	Airinlet Velocity: 1.5, 2.0, 2.5 m/s, Air inlet temp.: 1°C

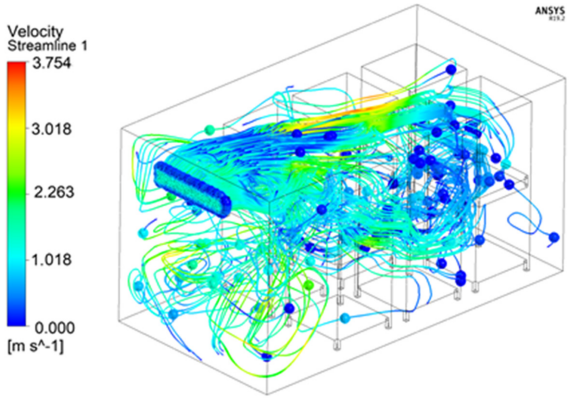

Fig. 6. Velocity stream distribution by air inlet velocity of 2.0 m/s.

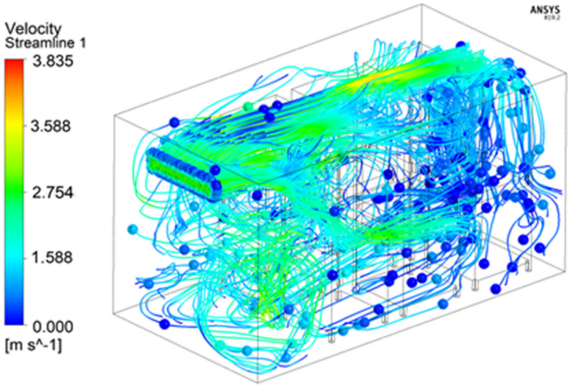

Fig. 7. Velocity stream distribution by air inlet velocity of 2.5 m/s.

Table 2. Stream volume ration of inner cold storage by air inlet velocity

Air Inlet Velocity (m/s)	Stream Volume Ration (%)
1.5	62.3
2.0	78.4
2.5	85.8

철망 파렛트 컨테이너간 상호간격 및 마늘의 호흡열에 의한 것으로 분석되었다.

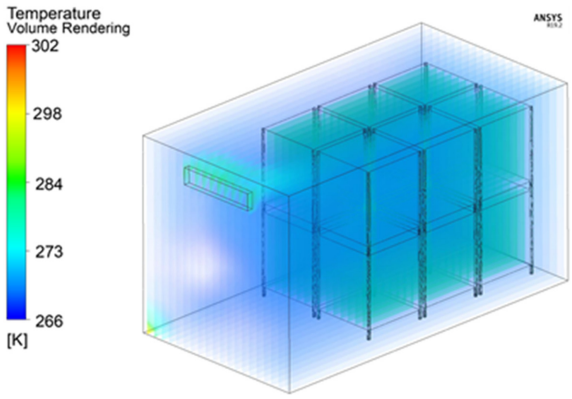

Fig. 8. Temperature volume distribution by air inlet velocity of 2.5 m/s.

3.2. 마늘의 저장고내 온도변화 해석

본 연구에서는 접이용 철망 파렛트 컨테이너 내부에 적입되어 2단 적재된 마늘의 온도분포에 대한 해석을 진행하기 위하여 최적 공기 유입속도 2.5 m/s, 마늘의 호흡열 31.1 kcal/h, 유입공기 온도 1°C와 파렛트 상단 및 하단 적입 마늘의 공극률(3, 7, 9%)별 파렛트 컨테이너 내부 마늘의 온도변화 해석을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 9에서 (14) 및 Table 3에 나타내었다. 일관수송용 철망 파렛트 2단 적재된 마늘의 온도분포는 저온 공기가 유입되는 상단 부분에 위치한 첫 번째 파렛트의 좌측과 상단면의 마늘에서 상대적으로 낮은 온도를 유지하고 있었으며, 하단의 파렛트의 경우 저온 공기가 유입되는 방향의 반대방향 하단 모서리에 저온공기가 정체되는 과정으로 인해 반대방향 하단 파렛트 우측과 바닥면에서 상대적으로 낮은 온도를 유지하였다.

철망 팰릿 적입 마늘을 하나의 시스템으로 가정하고 각각의 공극률을 입력하여 분석해본 결과 공극률이 크면 내부 공기 유입이 용이하여 마늘의 호흡열에 의한 온도상승을 방지하는데 더 유리한 것으로 평가되며, 마늘 내부의 온도 편차가 최대 6.5°C 발생하였다. 냉방기의 위치(상단)로 인해 2단 적재 컨테이너중 상단보다는 하단 파렛트 컨테이너 내부 마늘의 온도 편차가 크게 분석되었다. 마늘의 경우 수확 후

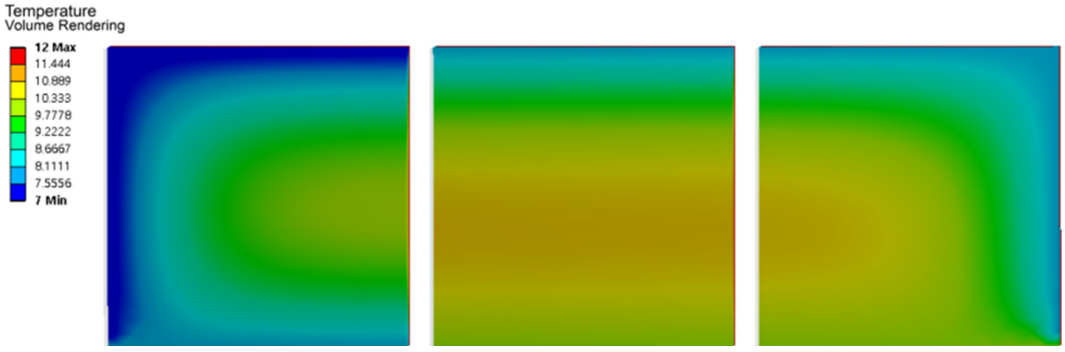

Fig. 9. Temp. distribution of upper pallet garlic by porosity of 3% and air inlet velocity of 2.5 m/s.

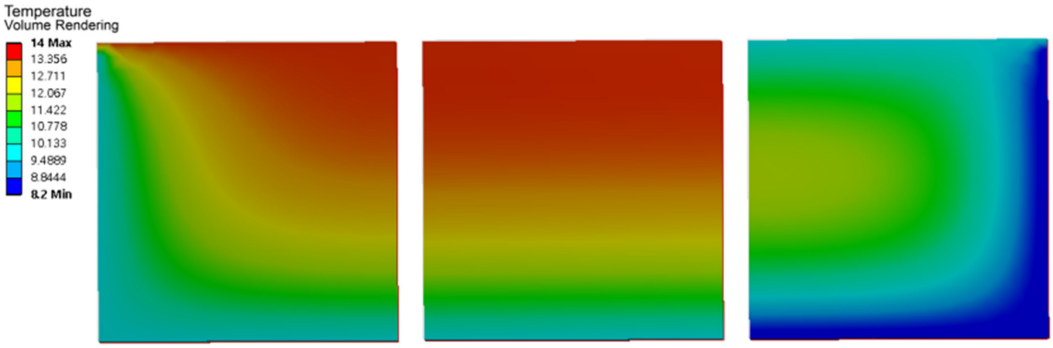

Fig. 10. Temp. distribution of lower pallet garlic by porosity of 3% and air inlet velocity of 2.5 m/s.

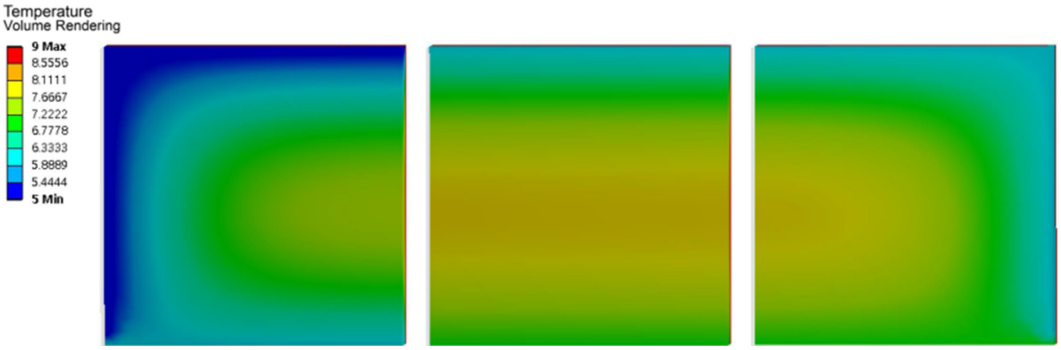

Fig. 11. Temp. distribution of upper pallet garlic by porosity of 7% and air inlet velocity of 2.5 m/s.

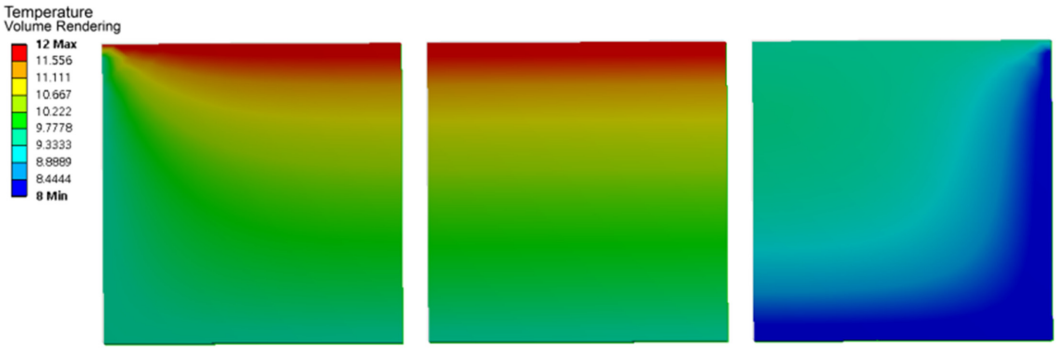

Fig. 12. Temp. distribution of lower pallet garlic by porosity of 7% and air inlet velocity of 2.5 m/s.

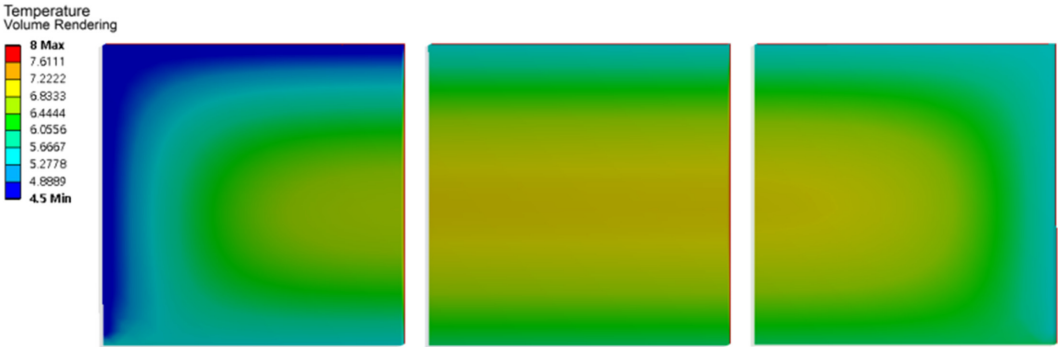

Fig. 13. Temp. distribution of upper pallet garlic by porosity of 9% and air inlet velocity of 2.5 m/s.

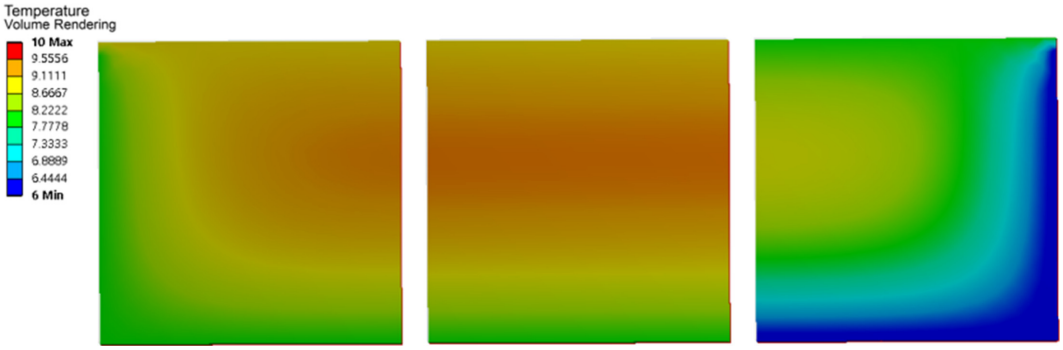

Fig. 14. Temp. distribution of lower pallet garlic by porosity of 9% and air inlet velocity of 2.5 m/s.

Table 3. Temperature change by garlic in mesh pallet container position and garlic porosity

Porosity (%)	Min. Temp. (°C)		Max. Temp. (°C)	
	Upper	Lower	Upper	Lower
3	7.0	8.2	12.0	14.0
7	5.0	8.0	9.0	12.0
9	4.5	6.0	8.0	10.0

3개월간 휴면기간을 거치므로 곧바로 맹아신장으로 인한 품질 변화는 없지만 부패 등 기타 품질변화가 발생할 수 있으므로 장기저장을 위해서는 적절한 건조 후 저장을 해야 한다. 마늘의 경우 대략 10°C 이상 온도는 마늘의 휴면이 잘 타파되는 온도이므로 이 온도에 장기간 노출되는 것은 좋지 않기 때문에 이에 대한 대처가 필요하다[1].

따라서, 우선은 마늘이 충분히 건조되어야 하며, 마늘 저장을 위한 철망 파렛트 컨테이너 사용시 해석기 적용된 온도 1°C 이하(–3~–3.5°C)의 저온 공기 유입을 적용하는 방법이 있으나 경제성을 고려했을 때 냉방장치의 온도 조절보다는 적입된 마늘 내부의 온도 상승을 방지하고 내부에까지 저온 공기를 유도할 수 있는 철망을 중앙에 위치하도록 하거나 바닥의 기울임을 주어 원활한 공기 유동이 되도록 설계하는 것이 필요할 것으로 분석되었다.

결 론

오랜 재배역사를 가진 마늘은 우리 국민 식생활의 필수 양념채로로 재배기술이 일반화되어 전국적으로 재배되며 매년 생산량이 증가하고 있는 작물이다. 마늘은 타 작물과 마찬가지로 밭 농업 기계화율이 60% 이하인 것으로 노동력 절감 및 경제성을 고려하였을 경우 수확, 건조 및 저장 단계의 일관기계화가 필수적인 작물이다. 따라서 본 연구에서는 일관기계화를 위한 접이식 철망 파렛트 컨테이너를 적용하여 마늘의 장기간 저장을 위한 저온 저장고내 공기유동 및 컨테이너 적입 마늘 내부의 온도분포를 CFD 열유동해석을 적용하여 분석하였다. 그 결과, 기존 저온 저장고 냉방기의 내부 유입 저온 공기 유동 속도인 1.5 m/s의 경우에는 저장고내 전체적인 저온 공기 분포율(유동 체적 비율)이 낮아 최소 2.5 m/s의 저온 공기 유입속도 적용이 필요할 것으로 분석되었다. 또한, 마늘의 파렛트 2단 적재 저장기간 중 호흡열에 의한 컨테이너 적입 마늘의 공극률별 내부의 온도 분포 해석 결과, 상단 및 하단의 온도차이는 최소온도의 경우 1.2~2.5°C, 최대온도의 경우 2.0~3.0°C이었으며, 전체적인 온도편차는 6.5°C이었다. 마늘의 수확, 건조 및 저장 과정중의 노동력 절감, 저장중 휴면기간 및 품질유지를 위해서 일관수송용 접이식 철망 파렛트 컨테이너를 적용하고자 할 경우에는 해석시 적용된 1°C 이하의 저온공기 유입 또는 철망 파렛트 컨테이너 내부로 저온공기가 유입될 수 있는 통로를 추가적으로 설치하는 것이 바람직할 것으로 분석되었다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업(과제번호: PJ01675501)의 지원에 의해 이루어진 것임.

참고문헌

1. 마늘. 2022. 국립원예특작과학원 파속채소연구소
2. 양파, 마늘 전과정 기계화 기술개발. 2021. 농촌진흥청
3. 마늘재배 일관기계화 기술. 2002. 새농사 9(5): 35-38.
4. http://www.agrinet.co.kr/news/articleView.html?idxno=318958 (한국농어민신문)
5. 정훈, 권진경, 윤홍선, 이원옥, 김영근 이현동. 2010. CFD 시뮬레이션을 농산물 저온저장고내의 온도분포 균일화 연구.

한국식품저장유통학회지 17(1): 16-21.
6. 이상익, 홍세운, 최원, 김락우, 이인복. 2018. CFD해석을 통한 후지 사과 CA 저장고 내의 적정 CO_2 농도 조성 검토. 한국농공학회지 60(3): 71-81.
7. 윤홍선, 권진경, 정훈, 이현동, 김영근, 윤남규. 2007. 냉장 컨테이너 내부의 공기유동 및 열전달 현상에 대한 CFD 시뮬레이션, 바이오시스템공학회지 32(6): 422-429.
8. Moureh, J., Menia, N. and Flick, D. 2002. Numerical and experimental study of airflow in a typical refrigerated truck configuration loaded with pallets. Computer and Electronics in Agriculture 34: 25-42
9. Hoang, M.L., Verboven, P., Baermaeker, J.D., and Nicolai, B.M. 2000. Analysis of air flow in a cold store by means of computational fluid dynamics. International Journal of Refrigeration 23: 127-140
10. 김수현, 박상훈, 이민아, 정현모. 2021. 이론적 열유동 및 랜덤 진동 해석을 적용한 EPS 보냉용기의 포장설계, 한국포장학회지 27(3): 175-180
11. 주민정, 서상욱, 오재영, 정현모, 박종민. 2022. 전력변환장치 캐비넷에서의 내부발열 개선을 위한 열유동 분석 및 유통안전성 향상을 위한 진동특성 분석. 한국포장학회지 28(2): 143-149.