

## 이론적 열유동 해석을 이용한 농산물 저장 및 유통 스마트 유닛로드 컨테이너의 통기공 최적화 설계

최동수<sup>1\*</sup> · 김용훈<sup>1</sup> · 김진세<sup>1</sup> · 박천완<sup>1</sup> · 정현모<sup>2</sup> · 김기석<sup>3</sup> · 박종민<sup>4</sup>

### Ventilation Hole Optimum Design of Smart Unit Load Container for Storage and Distribution Agricultural Products by Theoretical Heat Flow Analysis

Dong-Soo Choi<sup>1\*</sup>, Yong-Hoon Kim<sup>1</sup>, Jin-SE Kim<sup>1</sup>, Chun-Wan Park<sup>1</sup>, Hyun-Mo Jung<sup>2</sup>, Ghi-Seok Kim<sup>3</sup>, and Jong-Min Park<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Postharvest Engineering Division, National Institute of Agricultural Sciences, Korea

<sup>2</sup>Dept. of Logistic Packaging, Kyongbuk Science Colledge, Korea

<sup>3</sup>Dept. of Biosystems Engineering, Seoul National University, Korea

<sup>4</sup>Dept. of Bio-industrial Machinery Engineering, Pusan National University, Korea

**Abstract** Air distribution occupies an important position in the smart unit load container design process for agricultural products. Inner air may be uncomfortable because of its temperature, speed, direction, and volume flow rate. It doesn't matter how efficient the ventilation equipment is if the air is not distributed well. The main aim of this study was to design the inlet and outlet fan locations of smart unit load container for agricultural products. A numerical study was performed on the effects of the location of inlet air and outlet air in relation to the container cooling sources on air distribution and thermal comfort. A concept of combining inner container cooling sources with the exhaust outlet was employed in this investigation. Also, in this research, the developed CFD (Computational Fluid Dynamics) models were thoroughly validated. This system was adopted for use in container spaces, where the exhaust outlet was located. In this study, the location of the inlet was derived through CFD for a container with a size of 1,100×1,100×1,700 mm, and it was derived that the inlet was located at the center of the lower part of the container for efficient air flow. It was efficient to position the outlet through the air inlet in the center of the lower part of the container at the top of the same side.

**Keywords** Smart, Unit load, CFD, Ventilation hole, Agricultural products

## 서 론

신선농산물 및 원예특작의 저장·유통에 존재하는 수요와 공급의 정보 비대칭에 의한 비효율성을 방지하고 효율성을 향상시키기 위해 기존 유통시스템의 개선에 대한 현장의 요구가 있으며, 최근 IT 기술의 급격한 발전으로 인해 블록체인 및 AI기반 농산물 저장·유통용 스마트 유닛로드 컨테이

너 개발을 통해 저장 및 유통과정의 단계별 품목의 이력정보(생산자, 생산지, 생산일 등)와 품질정보(감모율, 온도 등)를 블록체인에 저장하여 공유함으로써 농산물 이력정보의 신뢰성과 신속성 향상을 위한 기술개발이 이루어지고 있다. 국내 농산물의 유통환경에 따른 스마트 리턴어블 용기(상자) 최적화 설계 방법 및 유통환경 시뮬레이션에 의한 포장시스템의 최적화 설계 기법을 다양한 타 제품군에 활용하고 있으며, 농산물의 저장 및 유통과정 중에 발생할 수 있는 품질저하요인을 경감시킬 수 있는 기술을 적용함으로써 농산물의 고급화 판매전략 구축에 크게 기여할 것이다<sup>1)</sup>.

국내외 물류 교역의 기반이 되는 파렛트 적재단위(유닛로드, Unit load)별 블록체인 및 AI기반 신선농산물 품질에 측 및 환경 제어 기술 개발의 수요가 증가하고, 국내수요

\*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, +82-238-4105  
E-mail : choi0ds@korea.kr

및 수출용 신선농산물의 저장 및 유통기간 중에 발생하는 품질저하를 최소화하기 위한 기술개발을 통해 전 세계적인 이슈로 대두되고 있는 신기술 국내의 농산물 콜드체인(cold chain) 기술 선점을 위한 스마트 유닛로드 컨테이너(Smart Unit Load Container)의 최적화 설계를 위한 내부 열유동 해석의 적용이 필요로 하고 있다. 또한, 농산물 분야의 블록체인 시장 선점을 위한 기술경쟁 상태에서 블록체인 기술 개발에 노력하여 선진국에 비해 상대적으로 낮은 기술 경쟁력을 증가할 수 있을 것으로 기대된다. 국내의 농산물의 품목별 물류표준화 및 유니트로드 시스템(ULS)의 적용 기술은 타 분야에서도 적용이 가능한 기술로 파급효과가 클 것으로 기대되며, 국내의 유통 농산물의 품질정보 공유를 통해 국내외 농산물 물류 및 포장분야에도 활용이 가능하며, 국내수요 및 수출용 신선농산물에 대한 유통단계에서 국가적인 지원정책(표준 파렛트 적재단위 활성화)에 기반한 기술개발이 가능하다<sup>1)</sup>.

국내 과수, 채소, 화훼 등 원예산업 생산액은 약 11조원으로 농업총생산액의 1/3에 해당하는데, 수확 후 유통과정이나 관리 미흡으로 생기는 손실이 최소 3조에서 많게는 5조에 이르는 것으로 분석된다. GAP(Good Agricultural Practice, 우수농산물관리제도), HACCP(Hazard Analysis and Critical Control Point, 식품안전관리인증기준) 인증이 지속적으로 늘어나고 있고, 친환경 소비형태가 증가하고 있어 농산물의 생산 유통과정에서의 신뢰성 제고가 지속적으로 필요하다. 인구감소, 노령화 및 여성가구비율 증대와 소득증가, LOHAS(Lifestyle Of Health And Sustainability)에 대한 관심증대 등 사회적 여건변화에 따라 식생활의 형태가 급속히 변화하고 있으며 농축산물의 유통과정 안전에 대한 사회적 관심 대두되고 있다. 최근 코로나19의 영향으로 인해 온라인 신선 물류 유통시장이 급성장하고 있으며, 일례로 국내 새벽배송시장의 규모가 2015년 100억원에서 2019년 8,000억원으로 약 8000% 증가하였고, 이에 따라 관련 기업을 중심으로 콜드체인 인프라가 강화되고 있으며, 머지않아 시장 규모가 1조원대를 돌파할 것으로 전망된다<sup>2)</sup>.

스마트 센서, 통합관리 시스템, ICT 등이 융합된 스마트 유통물류 시스템 시장은 독자적인 시장을 분리, 그 규모를 산정하기에 어려움이 따르므로 3PL (Third- Party Logistics) market을 통해 간접적으로 예측될수 있으며, Global 3PL Market Size Estimates (ARMSTRONG & ASSOCIATES)에 따르면 3PL 시장규모는 2015년에 7,210억 달러에서 2020년에는 8,039억 달러로 성장이 예상되고 있다<sup>3)</sup>.

미국 Infratab사는 신선도 유지가 필요한 식품의 이동 시 품질을 모니터링 하기 위해 15분 단위로 주변 온도 및 시간을 측정하여 누적 온도 변화에 따라 3단계 (정상-Green, 위험-Yellow, 상함-Red)로 LED 색을 변화시키는 Semi-Passive 형태의 RFID 태그를 개발하였으나, 유통 과정 중 실시간

위치 파악 및 정보 전송이 불가능하다는 단점이 있다. 이스라엘 StePac사의 Xsense system은 RFID/USN 기술을 사용하여 유통 과정중의 온도 및 습도 정보를 실시간 기록하고, 이를 통신망을 통해 실시간 모니터링 할 수 있는 시스템을 개발하였으며, 트럭별, 파렛트별, 상자별 정보 관리가 가능한 장점이 있다. 호주 Ceebron사는 명함 크기의 태그를 식품 운반용 팔레트에 부착하면, 무선 메시 네트워크를 통해 실시간 위치와 온도데이터를 확인할 수 있는 Smart-Trace 기술을 개발하였다. 이처럼 현재까지의 연구개발은 ICT 기반의 환경(온도, 습도) 정보를 실시간으로 모니터링 하여, 농산물의 품질인자와 연계하여 품질도 예측할 수 있는 기술이었지만, 농산물 저장 및 유통용 스마트 유닛로드 컨테이너 내부의 공기유동의 최적화를 위한 포장설계 기술은 접목되지 못했으며, 기존에는 CFD 시뮬레이션을 이용한 농산물 저온저장고 내의 온도분포 균일화에 대한 연구<sup>3)</sup>와 CFD 해석을 통한 후지 사과 CA(Controlled Atmosphere) 저장고 내의 적정 CO<sub>2</sub> 농도 조성 검토에 관한 연구<sup>4)</sup>가 진행되었으며, 대형 수송용 냉장 컨테이너(Reefer container) 내부의 공기유동 및 열전달 현상에 대한 CFD 시뮬레이션에 관한 연구<sup>5)</sup>가 진행되었다. 또한, 국외의 경우에도 파렛트 단위의 적재된 냉장 트럭 컨테이너 내부의 공기유동에 대한 실험적 연구<sup>6)</sup>와 CFD를 활용한 콜드스토어 내부의 공기유동 해석을 통한 유통 최적화에 대한 연구<sup>7)</sup>가 진행되었다.

본 연구에서는 저장 및 유통단계에서 농산물의 실시간 품질 모니터링 및 유통이력 시스템이 적용되는 블록체인 및 AI 기반의 농산물 저장 및 유통을 위한 스마트 유닛로드 컨테이너를 개발하는 단계에서 농산물의 저온 콜드체인 유통을 접목하고자 스마트 유닛로드 컨테이너의 저온 공기 유입 및 배출용 통기공(Ventilating hole)의 최적화 설계를 위해 이론적 해석 방법(CFD, Computational Fluid Dynamics)을 활용하고자 하였다.

## 재료 및 방법

본 연구를 위해 설계된 시험용 농산물 저장 및 유통용 스마트 유닛로드 컨테이너는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 크기는 1,100 × 1,100 × 1,700 mm<sup>3</sup>이었고, 두께 20 mm의 EPP (Expanded Polypropylene, 발포배율 : 12%) 패널이 단열 및 벽체 재료로 사용되었다. 저온 저장고내에서 스마트 유닛로드 컨테이너에 부착된 1개의 공기 유입 팬(최대 2,400 rpm, 2.4 m<sup>3</sup>/min, 24V)에 의해 외부의 저온 공기가 유입되고 내부 압력 상승에 의해 자연적으로 내부공기가 배출되는 구조로 저온공기의 유입 및 배출 통기공의 위치에 대하여 이론적 열유동해석을 통해 최적화 하고자 하였으며, Fig. 1에서 보는 바와 같이 좌측 내부 측면에 상단/중간/하단 중앙에 온도 센서(AcuRite, 00515M, German)를 부착하여 시

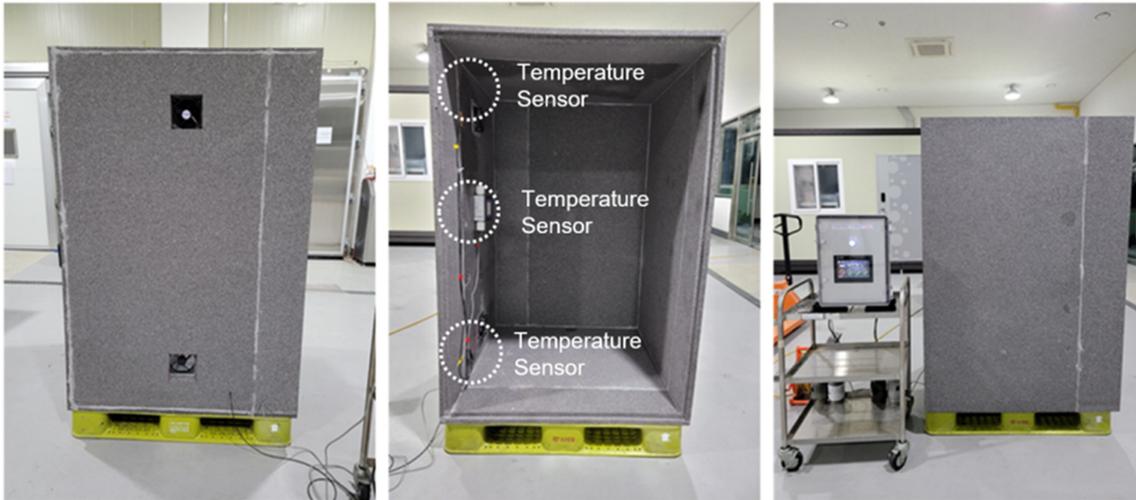


Fig. 1. Smart unit load container for agricultural products.

플레이션에 의한 온도변화와 실제 계측 온도와 비교 분석 하였다.

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

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

c. 에너지방정식 (Energy equation) (3)  
 $\int_V \rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T \right) dV = \int_V k \nabla^2 T dV + \int_S (q_R + q_S) dS$

여기서,  $t$ 는 시간,  $\mathbf{v}$ 는 속도벡터,  $\rho$ 는 밀도,  $p$ 는 압력,  $\mu$ 는 점성계수,  $k$ 는 열전도계수,  $C_p$ 는 비열용량,  $T$ 는 온도,  $q_R$ 는 내부 열복사 에너지,  $q_S$ 는 태양 복사 에너지이며, 본 연구에서는 내부 및 태양 열복사 에너지는 본 연구의 단열용기 내부 열유동 해석으로 인하여 무시되었으며. 본 연구에서 사용된 CFD 열유동 시뮬레이션 해석용 소프트웨어는 범용적으로 사용되고 있는 ANSYS Workbench (Ver. 18.1)으로 위의 연속방정식, 운동방정식 및 에너지방정식을 적용하였다<sup>8,9)</sup>.

## 결과 및 고찰

### 1. 저온 공기 유입 통기공의 최적화 설계

본 연구에서는 우선 농산물 저장 및 유통용 스마트 유닛로드 컨테이너의 내부 저온 공기 유입을 위한 통기공(R50 mm)의 위치(상단 - Upper position, 중간 - Middle position,

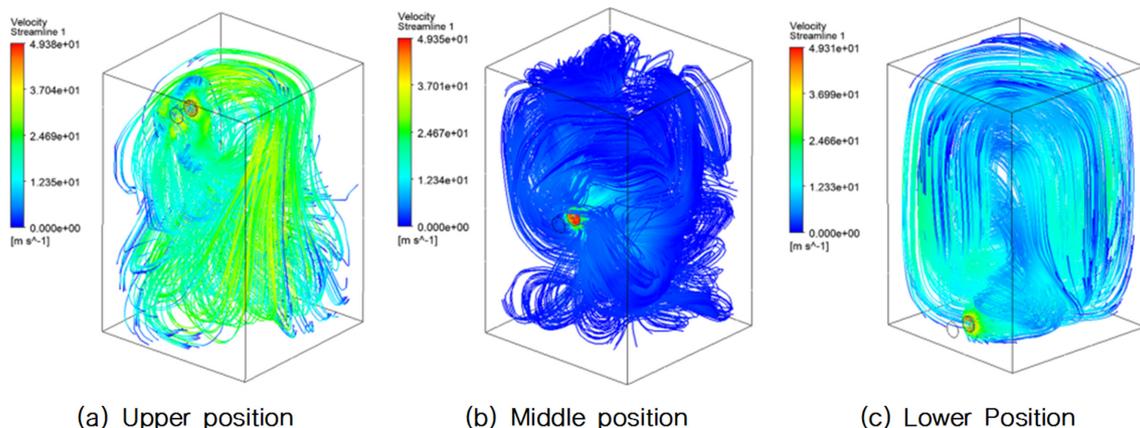


Fig. 2. Velocity stream CFD simulation on inner air circulation by air input location.

**Table 1.** Inner air cover all ratio results by air (3°C) input location using CFD simulation

Input location	Upper Position	Middle Position	Lower Position
Cover all ratio (%)	93	94	97

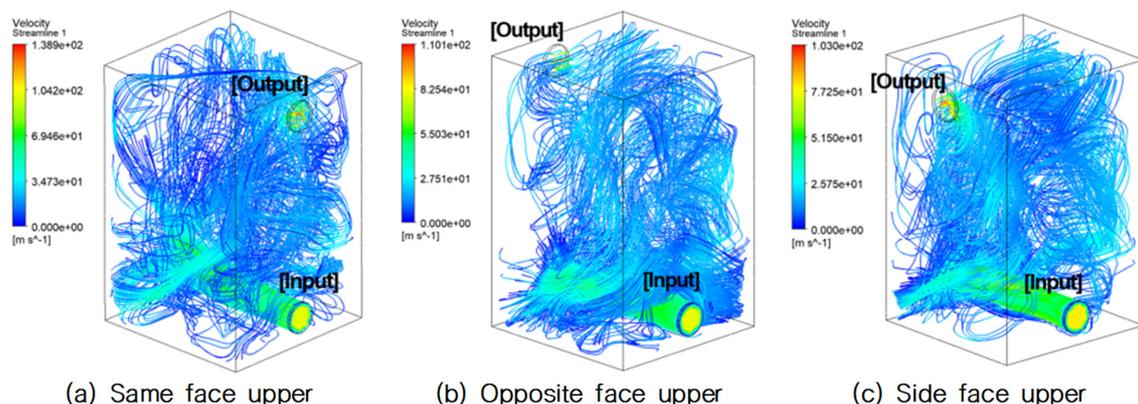
하단 - Lower position)에 대한 CFD 해석을 진행하였다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 유입 저온 공기의 내부 순환 정도를 분석했을 때, 하단의 저온공기 유입 통기공 위치에서 가장 원활한 내부 순환이 이루어짐을 알 수 있었으며, Table 1와 같이 스마트 유닛로드 컨테이너 내부의 전체적인 저온공기 분포율(Cover all ratio, Upper position - 93%, Middle position - 94%, Lower position 97%)의 경우에도 하단(Lower position)의 유입 통기공에서 가장 좋은 것으로 평가되었다. 따라서, 본 연구에서는 농산물 저장 및 유통을 위한 스마트 유닛로드 컨테이너 내부 공기 유입구의 위치를 하단으로 설정하여 배출 통기공 최적화 해석을 진행하였다.

## 2. 하단 저온 공기 유입에 따른 배출 통기공의 최적화 설계

농산물 저장 및 유통을 위한 스마트 유닛로드 컨테이너의 저온 공기 유입 통기공의 최적화 설계에 따라 내부 압력증가에 따른 공기 배출구의 최적화 설계를 위한 이론적 CFD 해석을 수행하였다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 최적화된 하단 유입구를 기준으로 상단의 같은면(Same face upper), 반대면(Opposite face upper) 및 측면(Side face upper)

의 배출 통기공에 대한 해석을 진행하였다. 내부 저온 공기의 유입 및 확산효율을 최적화하기 위해 유입구의 크기를 R10 mm로 설정하였으며, 컨테이너 내부의 초기온도 23°C, 목표온도 5°C, 유입 공기온도 3°C 및 팬의 유입속도 20 m/s의 초기조건을 적용하였다.

농산물 저장 및 유통용 스마트 유닛로드 컨테이너의 저온공기 유입 및 배출 통기공 위치에 따른 해석 결과, Table 2에서 보는 바와 같이 저온 공기 내부 분포율이 같은 면 상단의 배출 통기공에서 92%로, 반대면 86% 및 측면 88% 보다 크게 예측되었으며, 초기조건들(컨테이너 내부 초기온도, 유입 공기온도, 공기 유입속도)에 의해 내부 컨테이너 목표온도 5°C에 도달하는 시간도 같은면 상단에서 783초로, 반대면 961초 및 측면 912초로 효율성 측면에서도 우수하게 해석되었다. 이를 바탕으로 하단 저온공기 유입에 따른 배출 통기공의 위치를 같은면 상단으로 설정하여 가공 작업을 진행하였으며, 내부 상단, 중간, 하단 측면에 온도센서를 부착하였고, 해석에 의한 목표시간인 783초 후의 내부 온도를 예측하였다. 그 결과, 하단 측면의 온도는 6.5°C, 중간 측면의 온도는 7.2°C 및 상단 측면의 온도는 8.1°C로 예측되었다. 본 연구의 해석시 단열에 의하여 열손실이 없다는 가정하에서 진행되었으며, 컨테이너 단열

**Fig. 3.** Velocity stream CFD simulation on inner air circulation by air input/output locations.**Table 2.** Inner air circulation results by air (3?) input and output location by CFD simulation

No.	Input Position	Output Position	Input Air Velocity (m/s)	Initial Inner Temp. (°C)	Objective Temp. (°C)	Time (sec.)	Cover All Ratio	Temperature (Sensor, °C)
1	Lower	Same face Upper	20	23	5	783	92	6.5/7.2/8.1
2	Lower	Opposite face Upper	20	23	5	961	86	-
3	Lower	Side Face Upper	20	23	5	912	88	-

재 적용 제작시 모서리 부분의 열손실이 발생하여 실제 계측 내부 온도와 해석에 의한 온도에 차이가 발생한 것으로 판단되었다.

## 결 론

본 연구에서는 블록체인 및 AI 기반의 농산물 저장 및 유통을 위한 스마트 유닛로드 컨테이너를 개발하는 단계에서 농산물의 저온 콜드체인 유통을 접목하고자 스마트 유닛로드 컨테이너의 저온 공기 유입 및 배출용 통기공(Ventilating hole)의 최적화 설계를 위해 이론적 해석 방법을 활용하여 최적화 설계를 적용하고자 하였으며, 컨테이너 내부 온도저하를 위해 공기의 유입 통기팬은 하단에 설치하는 것이 컨테이너 내부 분포 효율 측면에서 우수하였으며, 하단의 공기 유입에 따른 배출 통기공의 위치는 같은 면 상단에 가공하는 것이 해석결과 우수한 것으로 평가되었다. 이론적 CFD 해석에 의한 온도(5°C)와 실제 온도센서를 이용한 온도(6.5, 7.2 및 8.1°C)와 차이가 발생되었으며, 이는 실제 컨테이너 제작시 일부 열손실에 의해 기인된 것으로 판단되었다. 이 결과를 바탕으로 농산물 저장 및 유통을 위한 콜드체인 스마트 유닛로드 컨테이너 제작시 저온 저장 조건의 공기 유입 통기공 설계, 유입팬 선정 및 배출 통기공 설계에 반영하여 제작이 가능할 것으로 판단되었다.

## 감사의 글

이 논문은 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ01561801 2022)의 지원을 받아 수행된 연구임.

## 참고문헌

1. 임지현. 2019. 텍스트마이닝을 활용한 콜드체인 연구동향 분석. 중앙대학교 글로벌인적자원개발대학원 석사학위 논문.
2. 이승호, 발천순, 정종윤, 김지관. 2013. 회수용 접이식 다단 플라스틱 상자의 개발 및 경제성 분석에 관한 연구. 대한설비관리학회지. 18(2): 23-32.
3. 정훈, 권진경, 윤홍선, 이원욱, 김영근, 이현동. 2010. CFD 시뮬레이션을 농산물 저온저장고내의 온도분포 균일화 연구. 한국식품저장유통학회지. 17(1): 16-21.
4. 이상익, 홍세운, 최원, 김락우, 이인복. 2018. CFD해석을 통한 후지 사과 CA 저장고 내의 적정 CO<sub>2</sub> 농도 조성 검토. 한국농공학회지. 60(3): 71-81.
5. 윤홍선, 권진경, 정훈, 이현동, 김영근, 윤남규. 2007. 냉장 컨테이너 내부의 공기유동 및 열전달 현상에 대한 CFD 시뮬레이션. 바이오시스템공학학회지. 32(6): 422-429.
6. 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
7. Hoang, M.L., Verboven, P., Baermaecker, 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
8. 김수현, 박상훈, 이민아, 정현모. 2021. 이론적 열유동 및 랜덤 진동 해석을 적용한 EPS 보냉용기의 포장설계. 한국포장학회지. 27(3): 175-180.
9. 주민정, 서상욱, 오재영, 정현모, 박종민. 2022. 전력변환장치 캐비닛에서의 내부발열 개선을 위한 열유동 분석 및 유통안전성 향상을 위한 진동특성 분석. 한국포장학회지. 28(2): 143-149.

투고: 2022.12.02 / 심사완료: 2022.12.07 / 게재확정: 2022.12.12