

이론적 열유동 및 랜덤 진동 해석을 적용한 EPS 보냉용기의 포장설계

김수현^{1*} · 박상훈¹ · 이민아¹ · 정현모²

¹로지스올 기술연구소

²경북과학대학교 물류패키징과

Packaging Design of EPS Cooling Box by Theoretical Heat Flow and Random Vibration Analysis

Su-Hyun Kim^{1*}, Sang-Hoon Park¹, Min-A Lee¹, and Hyun-Mo Jung²

¹LogisALL R&D Institute

²Dept. of Logistics Packaging, Kyongbuk Science College

Abstract Although it has recently been regulated for use as an eco-friendly policy in Korea, the use of EPS (Expanded Polystyrene) cooling boxes, which are used as cold chain delivery insulation boxes for fresh agricultural and livestock products, is also increasing rapidly as e-commerce logistics such as delivery have increased rapidly due to COVID-19. Studies were conducted to optimize the EPS cooling container through internal air heat flow of CFD (Computational Fluid Dynamics) analysis and FEM (Finite Element Method) random vibration analysis using domestic PSD (Power Spectral Density) profile of the EPS cooling box to which the refrigerant is applied in this study. In the analysis of the internal air heat flow by the refrigerant in the EPS cooling box, the application of vertical protrusions inside was excellent in volume heat flow and internal air temperature distribution. In addition, as a result of random vibration analysis, the internal vertical protrusion gives the rigid effect of the cooling box, so that displacement and stress generation due to vibration during transport are smaller than that of a general cooling container without protrusion. By utilizing the resonance point (frequency) of the EPS cooling box derived by the Model analysis of ANSYS Software, it can be applied to the insulation and cushion packaging design of the EPS product line, which is widely used as insulation and cushion materials.

Keywords EPS, Cold chain, CFD, Random Vibration, PSD, FEM, Packaging design

서 론

최근 몇 년 동안 전자상거래 기업들은 B2C(Business To Customer) 부분에서 신선 농축산물 시장을 개척하기 시작하였으며, 전자상거래의 끊임없는 발전의 결과 신선 농축산물을 유통 경로 중 온라인이 중요한 역할을 수행하고 있다. 신선 농축산물을 온라인으로 구입하는 방식은 갈수록 인기가 많아지고 사용자가 신선 농축산물 전자상거래 플랫폼을 사용하는 횟수가 현저히 증가하였다. 경제가 발전하고 시대가 변하면서 국내의 소비층도 점차 변화하고 있으며, 특히

코로나-19로 인한 소비자들의 구매행동에 제한을 받으면서 택배 등의 전자상거래를 활용한 신선 농축산물의 구입량이 급격히 증가하였다. 또한 최근의 개인의 소비 수준을 높여 삶의 질과 체험을 높이려는 욕구가 강해지면서 앞으로 모바일 가입자 규모, 모바일 네트워크 침투율의 지속적인 증가, 온라인 구매에 대한 인식이 확산되면서 온라인 구매에 대한 소비자의 수요가 확대될 것으로 전망한다.

이와 함께 국내 신선 농축산물에 대한 콜드체인(cold chain) 물류의 수요도 급증하고 있다. 신선 농축산물은 썩기 쉽고 변질되기 쉬우므로 더 높은 수준의 콜드체인 물류 수배송이 요구된다. 상품의 배송이 신속함과 화물의 품질이 신선함을 보증해야 한다. 방대한 온라인 거래량은 오프라인 물류 서비스의 뒷받침이 필요한 반면, 물류 업계는 여전히 일련의 문제에 대한 해결이 요구된다. 예를 들어 물류 업계

*Corresponding Author:
Tel: +82-10-20424332
E-mail: suhyun97@logisall.co.kr

는 제품 및 포장 파손, 배송 인력 서비스 자질 저하, 배송 효율성 저하 등에 대한 문제를 물류 서비스 품질을 향상시켜 소비자 만족도와 사업자의 경쟁력에 대해 어떻게 도움을 줄 수 있는가의 이슈에 직면하고 있다¹⁾.

특히 2020년 급격한 코로나-19에 대한 파장으로 택배 등의 물류량이 폭주하면서 물류업계의 신선 농축산물의 배송 시스템의 다양한 단열재료를 적용한 방법들을 제시하고 있다. 택배 등의 전자상거래에서 국내 신선 농축산물에 적용되는 단열재료는 EPS(Expanded Polystyrene)가 89% 이상을 차지하고 있으며, 그 외에는 다른 재료들(진공단열패드, 골판지패드 등)을 적용한 리턴너블 시스템에 적용되는 단열용기들이 사용되고 있다²⁾. EPS 보냉상자는 가격측면에서 매우 저렴하여 택배 등의 1회용으로 사용되고 있어 편리성은 있지만 최근 정부의 환경정책에 의해 기업체의 EPS 사용량에 따른 환경분담금을 내야 하는 어려움이 있다.

신선 농축산물의 콜드체인 유통을 위한 보냉용기 내부의 냉매에 의한 CFD (Computation Fluid Dynamics) 열유동 해석에 관한 연구는 전무한 실정이며, CFD 시뮬레이션을 이용한 농산물 저온저장고 내의 온도분포 균일화에 대한 연구³⁾와 CFD 해석을 통한 후지 사과 CA(Controlled Atmosphere) 저장고 내의 적정 CO₂ 농도 조성 검토에 관한 연구⁴⁾가 진행되었으며, 대형 수송용 냉장 컨테이너 (Reefer container) 내부의 공기유동 및 열전달 현상에 대한 CFD 시뮬레이션에 관한 연구⁵⁾가 진행되었다. 또한, 외국의 경우에도 파렛트 단위의 적재된 냉장 트럭 컨테이너 내부의 공기유동에 대한 실험적 연구⁶⁾와 CFD를 활용한 콜드스토어 내부의 공기유동 해석을 통한 유통 최적화에 대한 연구⁷⁾가 진행되었다. 하지만, 농산물 저장 및 유통관련 시스템의 이론적 랜덤(Random) 진동해석에 대한 연구는 전무한 실정이다.

본 연구에서는 국내의 신선물류의 콜드체인에 사용되고 있는 대표적인 신선 농축산물용 EPS 보냉용기를 설계하여 Fig. 1과 같이 일반적인 형태와 내부의 돌기부가 적용된 EPS 보냉용기에 냉매체인 아이스팩에 의한 내부 열유동의

차이를 구명하고, 기존 개발된 국내 트럭 수송환경에 대한 PSD(Power Spectral Density) 프로파일을 적용한 이론적 랜덤 진동해석을 통해 개발 EPS 보냉용기의 내구성을 평가하고자 하였다.

재료 및 방법

본 연구를 위해 설계된 EPS 보냉용기는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 크기는 길이 × 폭 × 높이가 300 × 300 × 270 mm이었으며, 용기의 두께는 25 mm이었다. 한 개의 샘플은 일반형태로 내부에 돌기부가 없는 형태로 설계되었으며, 다른 샘플은 내부 벽면에 수직형 돌기부가 적용되어 설계된 형태이었다. 설계된 보냉용기에 적용된 재료는 EPS로, 이 재료의 밀도는 30 kg/m³, 탄성계수(Young's modulus)는 13.9 MPa, 열전도율은 0.036 W/m²K이었다.

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)

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

b. 운동방정식 (Momentum equation)

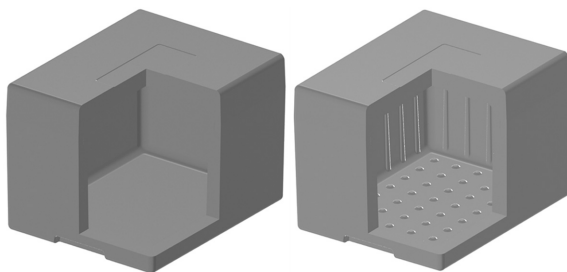
$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{f}_B \quad (2)$$

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, t 는 시간, $\mathbf{v}$ 는 속도벡터, ρ 는 밀도, p 는 압력, μ 는 점성계수, k 는 열전도계수, C_p 는 비열용량, T 는 온도, q_R 는 내부 열복사 에너지, q_s 는 태양 복사 에너지를 각각 나타내며, 본 연구에서는 내부 및 태양 열복사 에너지는 본 연구의 단열용기 내부 열유동 해석으로 인하여 무시하였다.

이론적 랜덤 진동 해석은 Table 1의 Park et al.(2020)⁸⁾이 제시한 국내 수송 트럭의 유통환경 PSD 프로파일을 적용하여 두가지 EPS 보냉용기에 대한 랜덤 진동해석을 진행하였다. 일반적으로 랜덤 진동 해석은 대상체의 Modal 해석을 통해 공진점(주파수) 대역을 도출한 후 이루어지기 때문에 EPS 보냉상자의 자체 공진 특성에 대한 결과도 알 수 있다. Modal 해석을 위한 FEA 모델로 mesh generation을 수행하였으며, Modal 및 랜덤 진동 스펙트럼 해석에서는 EPS 보냉용기의 바닥면이 고정된 조건에서 Z축의 수직 방향에 대한 해석만 진행하였다. 본 연구에서 사용된 CFD



(a) No inner protrusion Design (b) Inner Protrusion Design

Fig. 1. EPS cooling box samples for CFD and random vibration analysis.

Table 1. Composite PSD profiles for the top 30% of the data recorded (Park et al., 2020)

Breakpoint No.	Leaf-Spring Truck for the Top 30% of The Data Recorded						
	Frequency (Hz)	PSD (G^2/Hz)	dB	Oct	dB/oct	Area	Grms
1	1	0.005	-	-	-	-	-
2	2	0.03	7.78	1.00	7.78	0.02	0.12
3	3	0.03	0	0.58	0	0.05	0.21
4	7	0.003	-10.00	1.22	-8.18	0.09	0.29
5	13	0.003	0	0.89	0.00	0.10	0.32
6	25	0.0002	-11.76	0.94	-12.47	0.11	0.34
7	30	0.0002	0	0.26	0	0.12	0.34
8	40	0.0007	5.44	0.42	13.11	0.12	0.35
9	120	0.0007	0	1.58	0	0.18	0.42
10	250	0.0002	-5.44	1.06	-5.14	0.22	0.47

및 랜덤 진동해석을 위한 전용 소프트웨어는 범용적으로 사용되고 있는 ANSYS Workbench (Ver. 18.1)이었다.

결과 및 고찰

1. EPS 보냉용기 내부의 CFD 열유동 해석 결과

본 연구에서는 EPS 보냉용기 내부의 CFD 열유동 해석을 위해 두가지의 보냉용기 상자에 대하여 내부 상부에 아이스팩(200 × 150 × 30 mm, 5°C) 냉매체에 의한 내부 자체의 열유동 해석을 진행하였으며, 초기 보냉용기 내부의 공기 온도는 대기 온도인 27°C로 설정하였다. Fig. 2는 상부 냉매체의 의해 내부 돌기부가 없는 EPS 보냉용기(Nodes : 9715, Elements : 5336) 및 내부 돌기부 적용 EPS 보냉용기(Nodes : 9984, Elements : 5782) 내부 자체 공기의 흐름 분포를 보여주고 있다.

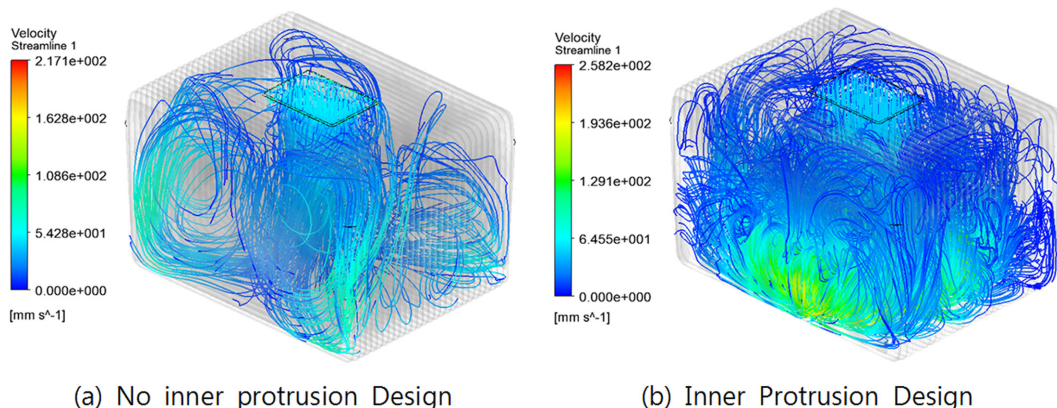
해석결과 두 EPS 보냉용기간 내부의 저온 공기의 흐름 속도에 대한 차이는 크지 않지만 공기의 확산 방향이 돌기부가 없는 경우에는 내부 모서리 4부분에 집중되는 반면, 돌기부가 적용된 용기의 경우에는 전체면으로 확산되어 보

냉용기의 목적에 적합한 것으로 판단되었다. Fig. 3은 내부 상단에 5°C의 아이스팩 냉매 적입에 따른 EPS 보냉용기 내부의 표면에 대한 온도 분포를 해석한 결과로 돌기부 적용 보냉용기[Fig. 3(b), 5~17°C] 내부 표면 최고온도가 돌기부가 적용되지 않은 보냉용기[Fig. 3(a), 5~14°C]보다 약 3°C 낮은 것으로 해석되었다. 또한, 열유동 방향 결과에 따라 돌기부가 없는 보냉용기의 경우에는 측면과 상/하단면에서 높은 온도분포가 도출되었으며, 돌기부가 있는 경우에는 상단면에서 높은 온도 분포가 발생되는 것으로 해석되었다.

Fig. 4는 보냉용기 내부에서 상단의 아이스팩 냉매 적입에 따른 중앙 단면에 대한 온도 분포를 보여주고 있으며, 돌기부가 있는 보냉용기보다 돌기부가 없는 보냉용기의 내부 표면에 높은 온도 영역이 분포하는 것으로 해석되었다. 본 해석을 통해 EPS 보냉용기 내부 설계시 수직방향의 돌기부를 적용하는 것이 열유동 측면 설계에서 유리할 것으로 판단되었다.

2. EPS 보냉용기 랜덤(random) 진동 해석

본 연구에서는 Park et al.(2020)이 제시한 국내 수송 트

**Fig. 2.** Velocity stream distribution in EPS cooling boxes by CFD Analysis.

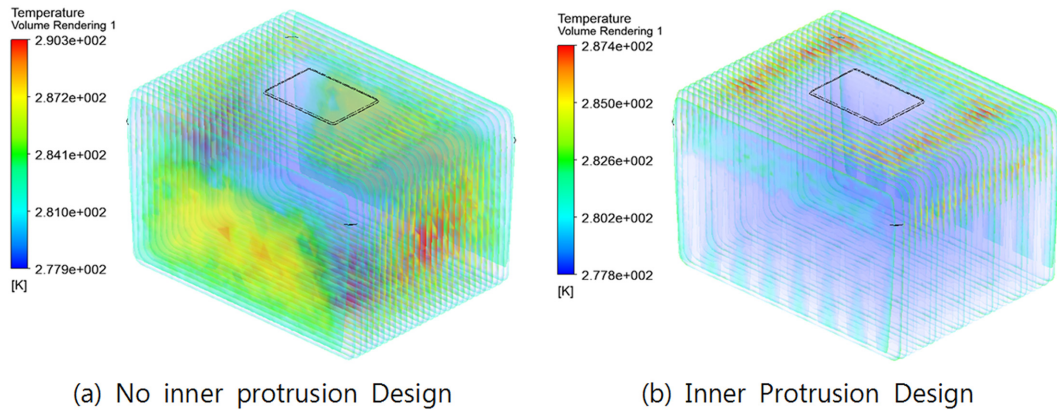


Fig. 3. Temperature distribution of the surface in EPS cooling boxes by CFD Analysis.

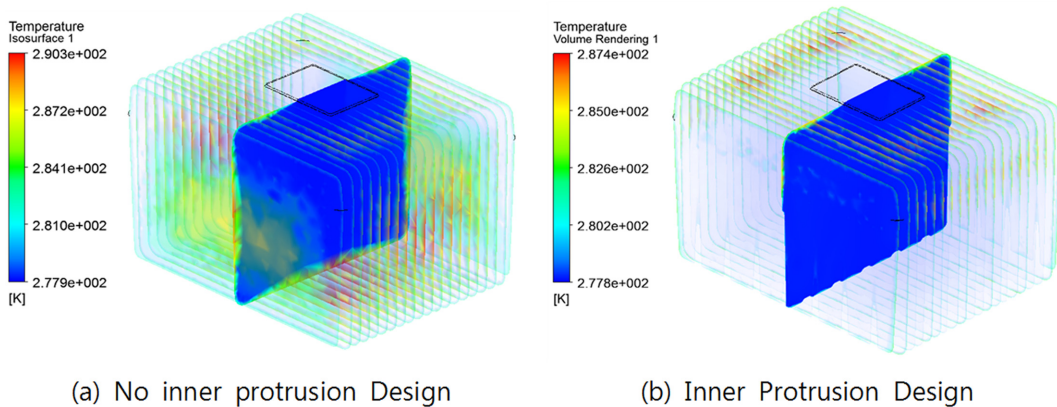


Fig. 4. Temperature distribution of the center cross section in EPS cooling boxes by CFD Analysis.

력의 PSD 프로파일을 활용하여 이론적 랜덤 진동 해석을 수행하였다. FEM 해석 전용 소프트웨어인 ANSYS Workbench (Ver. 18.1)의 경우 랜덤 진동 해석 전에 Modal 해석을 수행하여야 하며, 이를 통해 EPS 보냉상자의 자체 공진특성에 대한 분석이 가능하다. 일반적으로 진동에 의한 공진 발생시 포장용기 진동 및 충격 변형량이 최대가 되어 파손되거나 포장된 제품에 영향을 미치게 되므로 포장용기 및 제품의 공진점을 도출하는 것은 매우 중요하다⁹⁾.

Table 2는 EPS 보냉용기 샘플들 자체의 공진특성(주파수)에 대한 결과를 보여주고 있다. 도출된 공진주파수들은 1차 공진점이 160 Hz 이상으로 국내 수송환경에서 포장용기 및 제품의 손상을 발생시키는 저주파수 대역(40 Hz 이하)⁹⁾에서는 발생되지 않았으며, 두 보냉용기 간에는 공진점별 약간의 차이가 발생되었으나, 공진주파수는 무게와 상관관계가 매우 높은 인자¹⁰⁾로 돌기부 적용에 따른 무게 변화에 의해 발생된 것으로 판단되었다.

또한, 이번 공진해석은 제품이 담겨져 있지 않은 상태인 보냉용기 자체만의 해석결과로 제품이 담겨져 있을 경우 무게의 증가로 인해 공진주파수 대역이 저주파수 대역으로 이

Table 2. Resonance characteristics of EPS cooling boxes by FEM Modal analysis

Mode	No inner protrusion Design	Inner protrusion Design
	Frequency (Hz)	Frequency (Hz)
1	165.61	161.43
2	192.56	186.21
3	247.44	240.76
4	307.35	301.13
5	360.54	356.39

동할 수 있을 것으로 판단되었으며, EPS 보냉용기 자체만의 공진주파수는 트럭 수송 중 발생하는 주파수 대역 중 제품의 손상에 영향을 줄 수 있는 주파수 대역과 일치하지 않은 것으로 구명되었다. EPS는 단열재료 외에도 제품의 완충 포장재료로 다양하게 사용되고 있어 제품의 완충포장 설계시 유용하게 적용될 것으로 판단되었다.

Fig. 5 및 Fig. 6은 국내 PSD 프로파일을 적용한 두 EPS 보냉용기들의 FEM 랜덤 진동해석에 의해 도출된 동적변위 및 응력분포를 보여주고 있다. 본 연구에서 내부 돌기부가 적용된 EPS 보냉용기의 랜덤 진동에 의한 내부 최

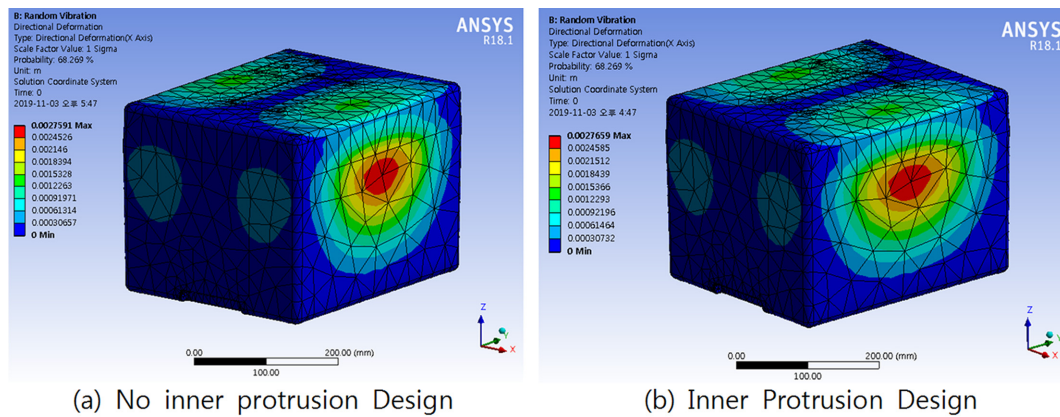


Fig. 5. Directional deformation of EPS cooling boxes by FEM random vibration Analysis.

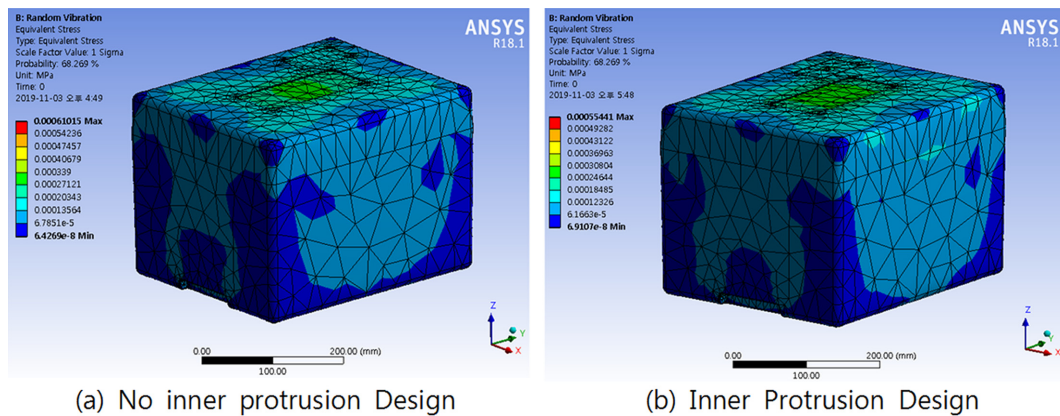


Fig. 6. Equivalent stress of EPS cooling boxes by FEM random vibration Analysis.

대 동적변위는 2.7591 mm이었으며, 일반 EPS 보냉상자의 경우 2.2765 mm이었다. 두 보냉상자 간의 차이는 약 17%의 수준으로 이는 내부 수직 돌기부에 의한 강성이 작용한 결과로 판단되었다. 또한, 랜덤 진동 해석에 의한 EPS 보냉용기의 최대응력은 내부 돌기부 미적용 보냉용기의 경우 0.610 kPa이었으며, 내부 돌기부 적용 보냉용기의 경우 0.554 kPa이었다.

두 보냉용기들 모두 상단면의 중앙부위에서 응력분포가 가장 크게 해석되었으며, 최대응력은 내부 돌기부가 적용된 보냉용기에서 돌기부 미적용 보냉용기보다 약 0.056 kPa 작게 해석되었다. 이는 동적변위와 같은 이유로 내부 수직 돌기부에 의한 보냉용기의 강성이 돌기부가 미적용된 보냉용기에 비해 수송중 랜덤 진동에 의한 강성 효과가 작용한 것으로 판단되었다. 이러한 결과를 토대로 EPS 보냉용기의 설계시 용기 내부 벽면에 수직방향의 돌기부를 적용하는 것이 내부의 원활한 공기 열유동 효과와 수송중 랜덤 진동/충격에 의한 손상정도를 최소화할 수 있는 설계인자로 판단된다.

결론

최근 사용에 대한 규제를 받고 있지만 코로나-19로 인해 택배 등의 전자상거래 물량이 급격하게 증가하면서 신선 농축산물의 택배 단열용기로 사용되고 있는 EPS 보냉용기에 대한 내부 공기 열유동해석 및 랜덤 진동 해석을 통해 EPS 보냉용기의 최적화 설계를 위한 연구를 진행하였다. 연구결과, EPS 보냉용기내 냉매에 의한 내부의 공기 열유동 측면에서 내부에 수직방향 돌기부를 적용하는 것이 체적 열유동 및 내부 공기 온도분포 측면에서 우수한 것으로 해석되었다. 또한, 랜덤 진동해석 결과, 내부 수직 돌기부가 보냉용기의 강성효과를 주어 수송중 진동에 의한 변위 및 응력발생이 돌기부가 없는 일반 보냉용기에 비해 작게 해석되었다. 이를 통해 EPS 보냉용기 설계시 내구성 강화 및 내부 원활한 공기유동을 위해서는 내부 벽면에 수직방향 돌기부를 적용하는 것이 유리한 것으로 판단되었다. 또한, Modal 해석에 의해 도출된 EPS 보냉용기의 공진점(주파수)를 활용하여 단열재와 완충재로 많이 사용되고 있는 EPS 제

품군의 단열 및 완충 포장설계에 적용할 수 있는 결과인 것으로 판단되었다.

감사의 글

이 논문은 2021년 농림축산식품부의 유용농생명자원산업 화기술개발사업 (과제번호 : 318020-04)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

- 임지현. 2019. 텍스트마이닝을 활용한 콜드체인 연구동향 분석. 중앙대학교 글로벌인적자원개발대학원 석사학위 논문.
- 이승호, 박철순, 정종윤, 김지관. 2013. 회수용 접이식 다단 플라스틱 상자의 개발 및 경제성 분석에 관한 연구. 대한설비관리학회지. 18(2): 23-32
- 정훈, 권진경, 윤홍선, 이원욱, 김영근 이현동. 2010. CFD 시뮬레이션을 농산물 저온저장고내의 온도분포 균일화 연구. 한국식품저장유통학회지. 17(1): 16-21.
- 이상익, 홍세운, 최원, 김락우, 이인복. 2018. CFD해석을 통한 후지 사과 CA 저장고 내의 적정 CO₂ 농도 조성 검토. 한국농공학회지. 60(3): 71-81.
- 윤홍선, 권진경, 정훈, 이현동, 김영근, 윤남규. 2007. 냉장 컨테이너 내부의 공기유동 및 열전달 현상에 대한 CFD 시뮬레이션, 바이오시스템공학회지. 32(6): 422-429.
- 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
- 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
- Park, J., Choi, S. and Jung, H.M. 2020. Measurement and analysis of vibration levels for truck transport environment in Korea. Applied Sciences. 10(19): 6754.
- 정현모. 2003. 청과물 포장화물의 진동거동과 골판지 상자의 내구성. 충남대학교 박사학위 논문.
- 박종민, 최동수, 황성욱, 정현모. 2019. 적정 포장설계를 위한 수출용 배의 공진특성. 한국포장학회지. 25(3): 125-130.
- 투고: 2021.12.01 / 심사완료: 2021.12.05 / 게재확정: 2021.12.07