

전력변환장치 캐비닛에서의 내부발열 개선을 위한 열유동 분석 및 유통안전성 향상을 위한 진동특성 분석

주민정¹ · 서상욱¹ · 오재영^{1*} · 정현모² · 박종민³

¹한국건설생활환경시험연구원

²경북과학대학교 물류패키징과

³부산대학교 바이오산업기계공학과

Theoretical Heat Flow Analysis and Vibration Characteristics During Transportation of PCS(Power Conversion System) for Reliability

Minjung Joo¹, Sang Uk Suh¹, Jae Young Oh^{1*}, Hyun-Mo Jung², Jong-Min Park³

¹Korea Conformity Laboratories

²Dept. of Logistics Packaging, Kyongbuk Science College

³Dept. of Bio-industrial Machinery Engineering, Pusan National University

Abstract PCS needs to freely switch AC and DC to connect the battery, external AC loads and renewable energy in both directions for energy efficiency. Whenever converting happens, power loss inevitably occurs. Minimization of the power loss to save electricity and convert it for usage is a very critical function in PCS. PCS plays an important role in the ESS(Energy Storage System) but the importance of stabilizing semiconductors on PCB(Printed Circuit Board) should be empathized with a risk of failure such as a fire explosion. In this study, the temperature variation inside PCS was reviewed by cooling fan on top of PCS, and the vibration characteristics of PCS were analyzed during truck transportation for reliability of the product. In most cases, a cooling fan is mounted to control the inner temperature at the upper part of the PCS and components generating the heat placed on the internal aluminum cooling plate to apply the primary cooling and the secondary cooling system with inlet fans for the external air. Results of CFD showed slightly lack of circulating capacity but simulated temperatures were durable for components. The resonance points of PCS were various due to the complexity of components. Although they were less than 40 Hz which mostly occurs breakage, it was analyzed that the vibration displacement in the resonance frequency band was very insufficient. As a result of random-vibration simulation, the lower part was analyzed as the stress-concentrated point but no breakage was shown. The steel sheet could be stable for now, but for long-term domestic transportation, structural coupling may occur due to accumulation of fatigue strength. After the test completed, output voltage of the product had lost so that extra packaging such as bubble wrap should be considered.

Keywords PCS, ESS, CFD, Random Vibration, PSD, FEM

서 론

최근에는 풍력, 태양광 발전과 같은 신재생에너지 발전 규모가 지속적으로 증가하면서, 안정적으로 지속 가능한 전

력계통 운영이 당면 과제로 부상하고 있다. 신재생에너지는 기후 및 계절의 영향을 받아 전력 생산량이 일정하지 않아 소규모 분산 전원으로써 계통에 의존하는 한계점이 있다. 이에 대한 해결책으로 발전량이 많을 때나 전력피크와 같은 최대전력 수요에 유연하게 대응할 수 있는 에너지저장장치(ESS, Energy Storage System)가 주목을 받고 있다. ESS는 태양광 발전 시스템과 같이 날씨에 따라 좌우되는 에너지 발생량 불안정성의 결함을 보완해주는 역할과 함께, 사용하지 않아 낭비되는 전력을 효율적으로 사용할 수 있

*Corresponding Author: Jae Young Oh
Korea Conformity Laboratories
Tel: +82-2-6912-2330
E-mail: jyoungo@kcl.re.kr

게 도와준다. 경제적으로 훌륭하지만 안정성에 대해서는 아직 연구가 필요한 시점으로, 화재와 폭발 위험도가 높은 리튬 배터리 시스템과 오작동 등과 같은 원인 미상으로 인한 ESS에 화재가 반복적으로 발생하고¹⁾ 있어 ESS의 안정성 및 신뢰성 검증에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

에너지저장장치(ESS)는 배터리, 전력변환장치(Power Conversion System, PCS) 및 에너지관리시스템(Energy Management System, EMS)로 구성되어 있으며, 배터리가 전기를 저장하는 창고 역할을 한다면, EMS는 에너지 저장 시스템 전체를 모니터링하고 관리함으로써 더욱 효율적인 운영을 돕는 역할을 한다. 전력변환장치(PCS)는 인버터와 컨버터의 기능을 수행하는데 ESS에 PCS가 필요한 이유는 우리가 일반적으로 사용하는 전기와 배터리에 저장되는 전기의 종류가 다르기 때문이다. 우리가 주로 사용하는 전기는 콘센트에서 나오는 교류 전기(AC)이나 배터리에 저장되는 전기는 직류 전기(DC)이기 때문에, 외부에서 배터리로 전기가 들어가 저장되려면 교류 전기가 직류 전기로 바뀌어야 한다. PCS는 컨버터 및 인버터 역할을 통해 신재생에너지와 ESS, 계통과의 AC/DC의 전환을 반복적으로 수행함으로써²⁾ 상황에 맞는 에너지 사용을 가능하게 한다. 에너지 손실 최소화를 위하여 송전을 유리하게 하는 AC 전압, 발전 에너지의 저장 및 사용을 위한 AC/DC 전압의 전환이 (AC→DC, DC→DC, DC→AC, AC→AC) 효율적으로 이루어져야 하며 이를 위하여 양방향 PCS가 개발되었다.

이처럼 AC/DC를 자유자재로 전환함으로써 배터리와 외부의 교류 부하를 양방향으로 이어주는 역할에는 필연적으로 전력 손실이 발생하게 되며, 이 전력 손실을 최소화시켜 보다 많은 전기를 저장하고 외부로 공급하도록 하는 기술이 PCS에서 매우 중요하다. 또한, 전력 전환 시 발생하는 전력 손실에 따라 내부에 부분적으로 열이 발생하며 때때로 높은 고온을 나타내기도 한다. 이에 대해 고온을 냉각시키기 위한 냉각팬(cooling fan)을 PCS의 상단 부위에 장착하는 경우가 대부분이며 자체적으로 고온 발생 부품들은 내부 알루미늄 냉각판에 장착하여 1차적인 냉각과 외부 공기 유입팬의 2차적인 냉각 시스템이 적용된다³⁾. PCS는 반도체 스위치를 사용하여 회로를 구성하며 고장 발생 시 PCB의 부분적 수리보다도 보드 전체의 교체를 통한 수리를 우선적으로 진행하기 때문에 고장 사유의 해석에 어려움이 많다.

기존 PCS에 대한 내부 이론적 열유동 및 수송 중 진동 해석에 대한 연구는 수행된 적이 없으며 고중량 제품의 경우 무진동차량을 이용하고 있으나 1톤 이하 중급 제품의 경우 경험치에 따라 설계되고 벨트로 트럭에 고정하여 제품을 수송하고 있다. 외국의 경우, 팔레트 단위의 적재된 냉장 트럭 컨테이너 내부의 공기유동에 대한 실험적 연구⁷⁾와 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics : CFD)를 활용한 콜드 스토어 내부의 공기유동 해석을 통한 유통

최적화에 대한 연구⁸⁾가 진행되었으며, 국내에서는 신선식품에 대한 EPS 보냉 용기내 냉매제에 의한 열유동해석 및 구조에 따른 랜덤 진동해석을 통한 EPS 보냉용기 최적설계안에 대한 연구⁹⁾가 진행되었다. CFD 시뮬레이션을 통해서 농산물 저온저장고 내의 온도분포 균일화에 대한 연구⁴⁾와 CFD 해석을 통한 후지 사과 CA(Controlled Atmosphere) 저장고 내의 적정 CO₂ 농도 조성 검토에 관한 연구⁵⁾가 진행되었으며, 대형 수송용 냉장 컨테이너(Reefer container) 내부의 공기유동 및 열전달 현상에 대한 CFD 시뮬레이션에 관한 연구⁶⁾가 진행되었다. 기존의 연구들은 식품 및 농산물 저장 환경과 제품 박스의 유통포장관련 시스템의 이론적 열유동 및 랜덤(Random) 진동 해석에 관한 것으로써 이렇게 개발된 해석 방법을 전기 부품을 장착한 시스템을 대상으로 이의 열유동 및 운송 해석에 적용한 시뮬레이션 평가는 전무한 실정이다.

본 연구에서는 전력변환장치에서 발생하는 발열과 제품 설치 시 발생하는 원인 미상의 불량에 대응하여 유통 포장에 활용되었던 기법을 적용하여 문제 원인을 해석 및 완충 포장의 방안을 찾고자 하였다. PCS 상단면의 냉각팬에 의한 내부의 이론적 열유동 해석을 통해 PCS 내부의 온도 분포를 검토하여 제품의 설계적 안정성과 제품의 트럭 수송 중 진동 및 충격에 의한 영향성을 판별하여 대안을 제시함으로써 제품의 신뢰성을 향상시키고자 하였다.

재료 및 방법

본 연구를 위해 설계 제작된 PCS (Power Conversion System, 전력변환장치)는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 철재 프레임 케이스 및 플라스틱 패널(PCB)로 제작된 것으로 무게는 800 kg, 크기는 800 × 850 × 1,770 mm이었다. 또한, PCS 내부 환경 유지를 위한 냉각팬을 상단 면에 4개 (3개: 2900 RPM, 6.8 m³/min, 1개 : 2400 RPM, 2.4 m³/min) 장착하였다.

본 연구에서는 1차적으로 PCS 내부 구조에 따른 냉각팬의 효율을 분석하고자 열유동 해석을 수행하였다. 초기 유입 공기의 온도는 26°C이었다. 본 연구에 적용된 PCS 내부 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)

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

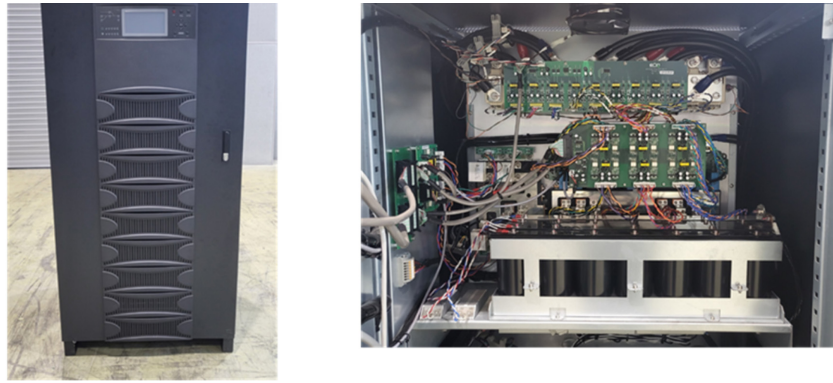


Fig. 1. Exterior and interior of PCS.

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 단일 PCS 컨테이너 내부 열유동 해석으로 인하여 무시하였다.

이론적 랜덤 진동 해석은 Table 1의 국내 트럭 KS T 5055 규격¹⁰⁾인 국내 수송 트럭의 유통환경 PSD 프로파일을 적용하여 PCS 이론적 랜덤 진동해석을 진행하였다. 일반적으로 랜덤 진동 해석은 대상체의 Modal 해석을 통해 공진점(주파수) 대역을 도출한 후 이루어지기 때문에 PCS의 자체 공진 특성에 대한 결과도 알 수 있다. Modal 해석을 위한 유한요소해석 (Finite Element Analysis: FEA) 모델로 mesh generation을 수행하였으며, Modal 및 랜덤 진동 스펙트럼 해석에서는 PCS의 바닥면이 고정된 조건에서 Z축의 수직 방향에 대한 해석만 진행하였다. 본 연구에서 사용된 CFD 및 랜덤 진동해석을 위한 전용 소프트웨어는 범용적으로 사용되고 있는 ANSYS Workbench (Ver. 18.1)이었다.

본 연구에서는 실제 전자식 진동 가진기를 (EDS20000M, Dongling technologies) 활용한 공진 및 랜덤 시험을 수행하여 이론적 해석 결과와 비교 분석하고자 하였다. Fig 2와 같이 PCS의 진동 시험 진행하였으며 설정된 진동 조건의

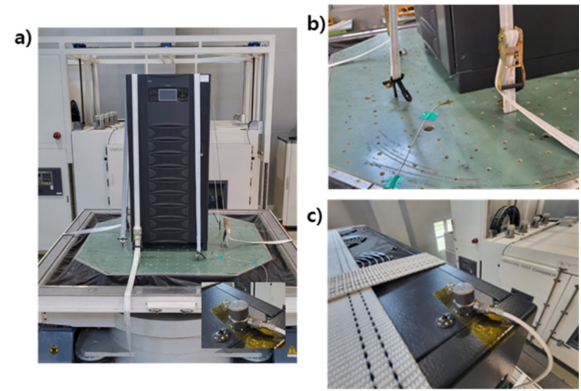


Fig. 2. a) Test setting of sweep and random vibration test for PCS, b) location of control sensor, b) location of monitoring sensor

Table 2. PSD profile for vibration test.

Breakpoint No.	Frequency (Hz)	PSD (G^2/Hz)
1	1	0.0001
2	4	0.01
3	100	0.01
4	200	0.001

구현을 확인하기 위한 컨트롤 센서와 제품의 진동 영향성을 판별하기 위한 제품 상단의 모니터링 센서를 설치하였다. 공진주파수 검출을 위한 스위프 시험은 Table 1과 같이 3~200 Hz 범위에서 0.8 G-rms 수준으로 수행하였으며, 랜덤 시험은 KS T 5055를 참고하였으며 Table 2의 PSD (Power Spectral Density)를 적용하여 1 hr 진행되었다.

Table 1. Setting of sweep test

Type	Direction	Sweep cycle	Vibration frequency (Hz)	Acceleration (m/s^2)	Sweep rate (Oct./min)
Sweep sine	Z axis	1	3~200	0.981	0.5

결과 및 고찰

1. PCS 내부의 CFD 열유동 특성

본 연구에서는 1차적으로 PCS 내부의 CFD 열유동 해석을 위해 상단면에 장착된 4개의 냉각팬에 의한 PCS (Nodes : 29213, Elements : 12421) 내부의 자체 공기의 흐름 분포(Fig. 3)를 분석하였다. 그림에서 알 수 있듯이 상단 부위로 열이 발생하는 것을 확인하였고 설계된 팬의 사양이 PCS 내부 전체 영역을 커버하기에는 부족한 것으로 해석되었다. 그러나, 내부 고온 발생 영역이 제품 상단, 제품 케이스에 외부와 맞닿은 위치인 것을 고려한다면 PCS 내부에는 문제가 없을 것으로 판단되었다. 실제로 PCS 케이스 앞면에 공기 유출 설계가 적용되었으나 뒷면의 냉각팬의 영향이 미치지 못하는 결과를 보였다. 이는 제품 내부 앞쪽에 대부분의 반도체 부품을 장착하여 냉각의 효과를 보

기 위한 것이었지만 실제 해석에서는 PCS 내외부 온도가 유사한 경계조건에서는 공기 유출 설계가 적용되지 않아도 해석의 오차가 발생되지 않는다.

따라서, 2차적으로 내부 공기 유동 해석에 따른 내부 온도분포 해석을 진행하였으며, 그 결과는 Fig. 4와 같다. 내부 공기 분포 해석 시 팬의 내부 유입온도는 26°C로 설정하였으며, 초기 방열판에 부착된 부품의 최고 온도는 120°C로 설정하였다. 초기 방열판 부품 온도는 실제 작동 시 발생온도를 측정하여 설정하였으며 그 결과, 해석에 의한 PCS 내부 온도는 27, 32, 49, 52, 79 및 115°C의 분포로 해석되었다. 분석 결과 예상했던 데로 고온 발생 부품 근처에 온도 상승이 발생 되었으며, 온도 상승에 영향을 받는 반도체 부품들(PCB)이 주로 있는 제품의 중간 영역에 대하여 40°C 이하의 온도 분포로 인해 열에 의한 부품에 대한 품질 영향은 미미할 것으로 판단되었다.

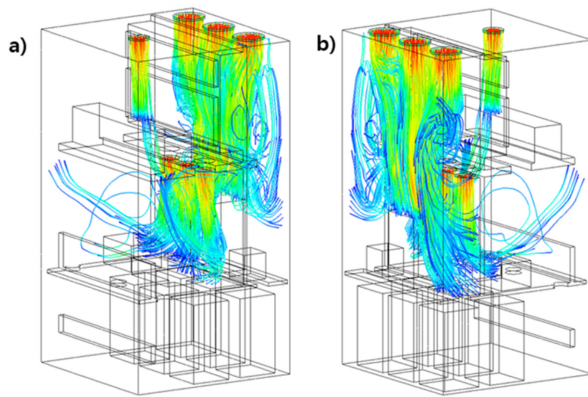


Fig. 3. Analysis of heat flow in PCS with cooling fans a) front view, b) back view.

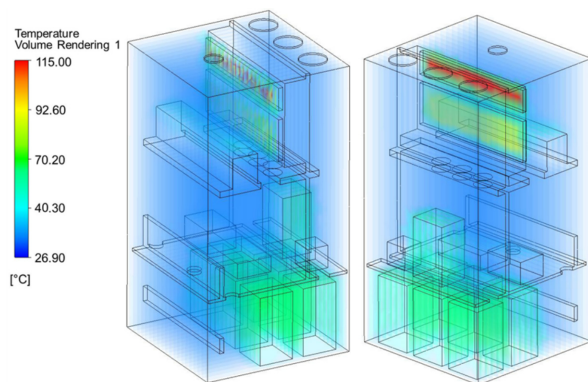


Fig. 4. Temperature distribution of inner PCS by CFD Analysis.

2. PCS의 공진 및 랜덤(random) 진동 특성

본 연구에서는 KS 표준에서 제시한 국내 수송 트럭의 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 PCS 전체 프레임에 대한 자체 공진 특성에 대한 분석이 가능하다. 일반적으로 진동에 의한 공진 발생 시 진동 및 충격 변형량이 최대가 되어 파손되는 경우가 발생되므로 제품의 공진점을 도출하는 것은 매우 중요하다⁹⁾. 공진주파수는 무게와 상관관계가 매우 높은 인자¹⁰⁾로 무거운 PCS의 공진주파수 대역은 저주파수 대역으로 추정된다.

Table 3는 Modal 해석에 의한 PCS의 공진 특성(공진주파수)에 대한 결과를 보여주고 있으며, PCS의 공진주파수가 50 Hz이하의 저주파수 대역에서 나타나는 것을 이론적 해석 방법으로 알 수가 있었다. 또한, Fig. 5는 공진주파수 대역에서의 변위를 나타냈으며, 분석 결과 PCS 자체의 공진주파수 대역에서의 변위는 진동변위가 제일 큰 첫 번째 공진점인 9.47 Hz의 X, Y, Z축 모두에서 3.5 mm 이하로 매우 미비하였으며, PCS 자체의 공진주파수 대역이 국내 수송트럭의 제품 파손과 연관된 주파수인 40 Hz 이하이었으나, 공진주파수 대역에서의 진동 변위가 매우 미비하여 파손이 발생되지 않을 것으로 분석되었다. 또한, 일반적인 중량물의 제품의 경우 무게로 인해 공진주파수가 저주파수 대역에 분포하는 것이 일반적이다.

Table 4 및 Fig. 6는 스윙 진동 시험에 의한 PCS의 공진

Table 3. Resonance characteristics of PCS frame by FEM Modal analysis

Mode	1	2	3	4	5	6
Resonance Frequency (Hz)	9.47	20.18	33.52	41.32	44.79	48.02

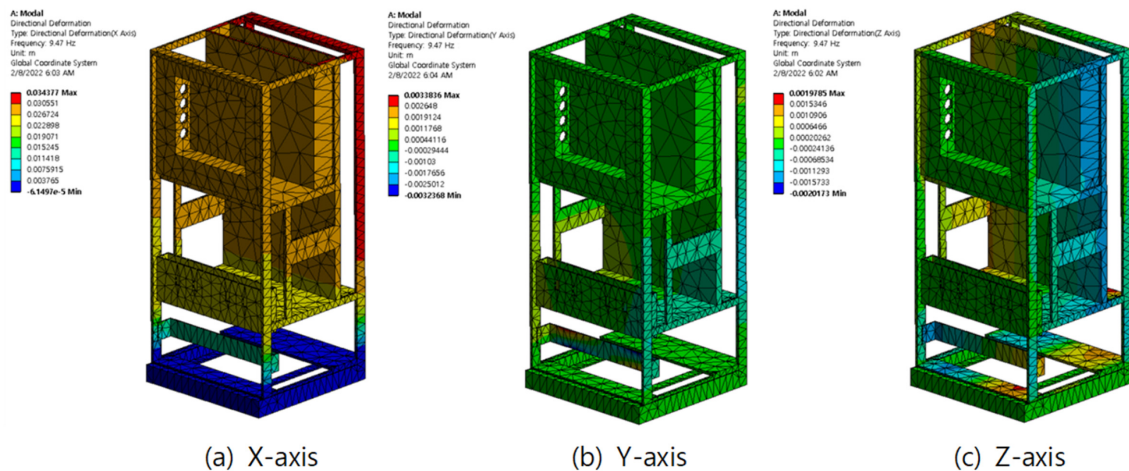


Fig. 5. Modal deformation analysis of PCS by FEM.

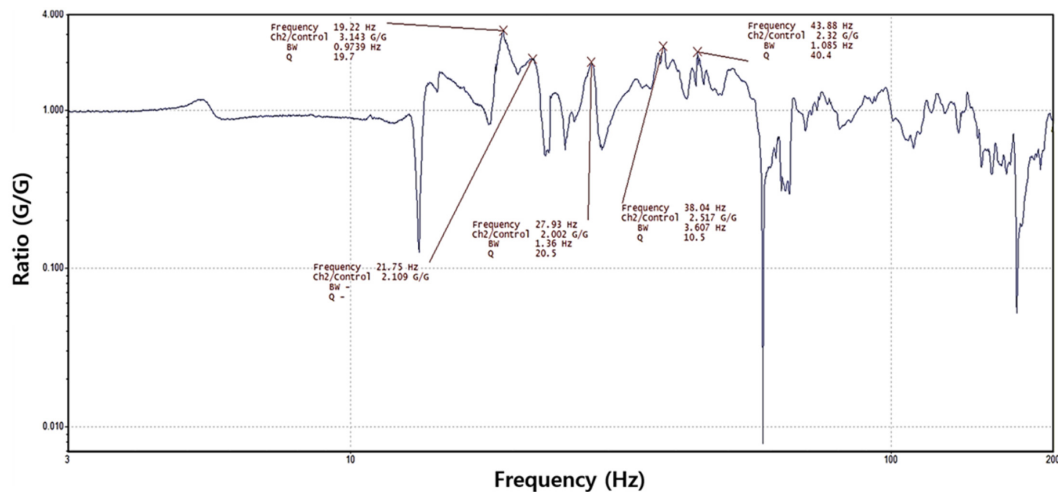


Fig. 6. Sweep vibration test results of PCS.

Table 4. Resonance characteristics of PCS frame by sweep vibration test

Mode	1	2	3	4	5
Resonance Frequency (Hz)	19.22	21.75	27.93	38.04	43.88

특성(공진주파수)에 대한 결과를 보여주고 있다. 도출된 공진주파수들은 50 Hz 이하로 Modal 해석에 의한 공진주파수 대역과 유사하게 검출되었다. 본 연구의 해석 및 시험적 방법에 의한 PCS의 공진주파수 대역은 상당 부분 일치하였으며 다양한 사이즈, 재질, 부품으로 제작됨에 따라 예상하였던 대로 다수의 공진점이 도출되었다. 일반적으로 국내 수송환경에서 제품의 손상을 발생시키는 저주파수 대역(40 Hz 이하)¹²⁾에서는 발생되고 있어 수송 중 제품품질에 영향 가능성이 높으며 완충 설계에 대한 적용을 검토해야 할 것으로 판단되었다.

랜덤 진동 시험은 Fig 8과 같이 KS T 5055의 진동 프

로파일(PSD, Power Spectral Density)을 적용하여 이론적 결과를 도출하였으며 그 결과 Fig 7과 같이 PCS 프레임의 응력(최대 15.53 MPa) 및 전단 응력(최대 3.6 MPa) 집중 해석 결과를 보여주고 있다. 해석 결과 응력이 집중되는 곳은 하단 부위로 강판의 재질적인 부분에서는 파손이 발생되지 않지만 장기간 국내 수송의 경우 응력 집중이 일어나는 위치에 피로강도 누적으로 구조적 결함이 발생될 수도 있다. 이론적으로 응력이 집중된다는 것은 진동 해석 시 수직 및 좌우로 움직이는 변위가 크다는 것과 같은 의미¹³⁾로 이에 대한 재질적인 보강보다는 수송 중 PCS의 하단면에 진동 충격을 일부 흡수할 수 있는 완충 패드를 부착

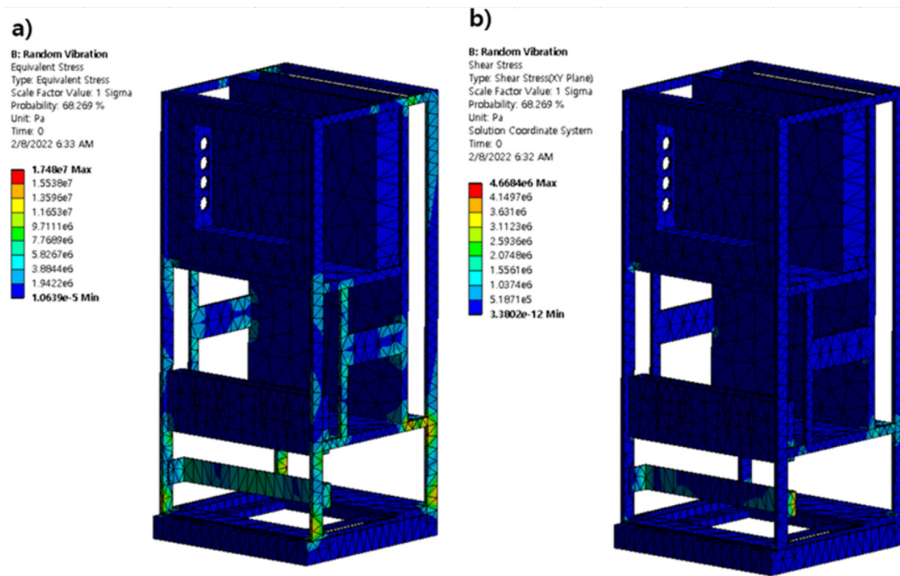


Fig. 7. a) equivalent stress and b) shear stress of PCS frame by random simulation.

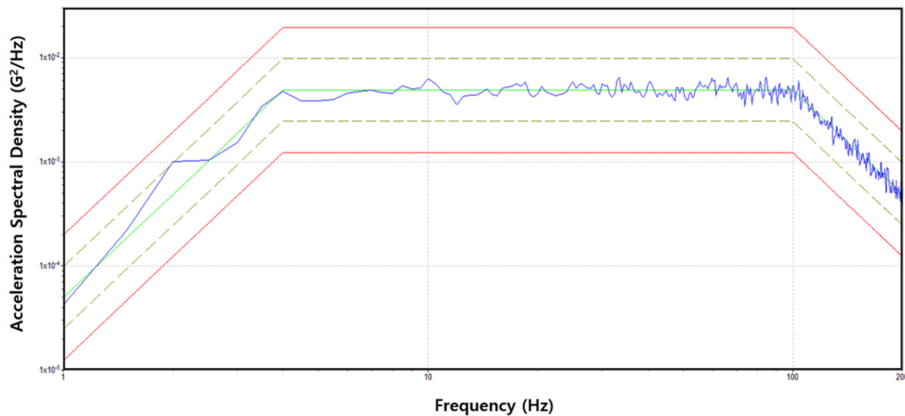


Fig. 8. Random vibration profile, Z-axis.

하는 것이 필요할 것으로 판단되었다.

KS T 5055는 국내 유통환경을 참고하여 만들어진 시험 방법으로 그 적용 대상이 택배 상자로서 본 연구의 대상 물품인 PCS 대비 경량임에 따라 가속도를 $0.8 G_{rms}$ 로 낮추고 실제 PCS 제품 수송 환경과 동일하게 슬링 벨트를 활용하여 4방향으로 고정하여 Fig 8의 profile에 따라 시험을 진행하였다. 이러한 프로파일은 국내 환경에 적합하도록 측정 결과를 완충 포장 설계에 반영하기 위한 지속적인 개선 작업이 진행되고 있음에 따라¹¹⁾ 시험에 적합할 것으로 판단하였다. 진동 시험 이후 PCS의 규열, 파손, 변형의 기준에 따라 외관의 문제는 발생하지 않았으나 PCS의 품질 시험에서 입력 출력의 전압 측정이 불가능함에 따라 PCB 혹은 IGBT 이상 발생한 것으로 확인하였다. Fig. 7에 나타난 시뮬레이션 결과에 따르면 제품 하단의 수직 및 좌우로 움직이는 변위가 큰 것으로 해석됨에 따라 하단부 프레임의

움직임이 제품 중간 수평으로 구성된 PCB, IGBT의 보드판에 영향을 준 것으로 해석된다.

결론

본 연구에서는 전력변환장치 캐비닛에서의 내부 발열 및 유통 안전성 개선을 위한 열유동과 공진점, 랜덤 진동 분석을 진행하였다. 최근 설치 시, PCS 제품의 원인 미상의 작동 불능의 제품들이 발생되고 있어, 제품 캐비닛 상단면의 냉각팬에 의한 내부의 이론적 열유동 해석을 통해 PCS 내부의 발열을 검토하고 국내 수송환경에 대한 PCS의 공진 특성과 랜덤 진동특성을 분석하고자 하였다. 제품 작동 시, 상단 부위 설치된 팬이 PCS 내부 전체 영역을 커버하기에는 사양이 부족한 것으로 해석되었지만, 제품 내부 고온 발생 영역이 전부 상단에 위치하고 외부에 맞닿아 있는 것을

고려한다면 문제가 없을 것으로 판단되었다. 또한, PCS 자체의 공진주파수 대역이 국내 수송 트럭의 제품 파손과 연관된 주파수인 40 Hz 이하이었으나, 공진주파수 대역에서의 진동 변위가 매우 미비하여 파손이 발생되지 않을 것으로 분석되었다. 랜덤 진동 시험의 해석 결과 응력이 집중되는 곳은 하단 부위로 강판의 재질적인 부분에서는 파손이 발생되지 않지만 장기간 국내 수송의 경우 응력집중이 일어나는 위치에 피로강도 누적으로 구조적 결함이 발생되고 결과적으로 PCS 내부의 전기적인 결함을 발생시킬 수 있을 것으로 예상되었다. 실제 시험 이후 외관상 제품의 이상은 발생하지 않았으나 제품 중간판에 위치한 PCB와 IGBT의 이상으로 문제 발생하였다. 국내 수송 트럭 적재 시 하단 면에 일부 진동 충격을 흡수할 수 있는 완충 패드를 보강하거나 내부 PCB 보드판의 진동 충격을 완화할 수 있는 에어랩 등의 완충 포장재를 적용하여 보조하는 것이 진동 충격에 대한 파손 방지 방법으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 다양하게 활용되고 있는 전력 및 에너지 설비 패키징에 대하여 열유동해석 및 진동해석을 통해 내부 발열 저감과 진동 내구성 향상을 위한 설계가 가능하며, 향후 이를 활용함으로써 제품의 품질 및 수명 개선에 기여할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 “지역혁신클러스터육성(R&D, P0016220)”사업의 지원을 받아 수행된 연구 결과이다.

참고문헌

1. 김웅삼. 2015. 신재생에너지와 ESS용 전력변환장치의 표준화 및 기술기준. 전력전자학회지 20(2): 31-35
2. 정태복. 2013. ESS기능을 갖는 직류배전용 전력변환시스템 통합운전. 성균관대학교 석사학위 논문
3. 조문택, 이충식, 문석환. 2021. 최적 일체형 태양광 발전용 전력 변환장치 개발. 한국차세대컴퓨팅학회지 17(1): 65-72
4. 정훈, 권진경, 윤홍선, 이원옥, 김영근 이현동. 2010. CFD 시뮬레이션을 농산물 저온저장고내의 온도분포 균일화 연구. 한국식품저장유통학회지 17(1): 16-21.
5. 이상익, 홍세운, 최원, 김탁우, 이인복. 2018. CFD해석을 통한 후지 사과 CA 저장고 내의 적정 CO₂ 농도 조성 검토. 한국농공학회지 60(3): 71-81.
6. 윤홍선, 권진경, 정훈, 이현동, 김영근, 윤남규. 2007. 냉장 컨테이너 내부의 공기유동 및 열전달 현상에 대한 CFD 시뮬레이션, 바이오시스템공학회지 32(6): 422-429.
7. 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
8. 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
9. 김수현, 박상훈, 이민아, 정현모. 2021. 이론적 열유동 및 랜덤 진동 해석을 적용한 EPS 보냉용기의 포장설계. 한국포장학회지 27(3): 175-180
10. KS T 5055: 2020, 포장-수송포장-택배 유통 포장화물의 시험 방법, 한국표준협회
11. 오재영, 서상욱, 임미진, 2022, 국내 택배화물의 안전운송 및 적정포장을 위한 Field-to-Lab 시험방법 연구, 한국포장학회지 28(2); 127-132.
12. 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.
13. 박종민, 최동수, 황성욱, 정현모. 2019. 적정 포장설계를 위한 수출용 배의 공진특성. 한국포장학회지 25(3): 125-130.

투고: 2022.08.22 / 심사완료: 2022.08.23 / 게재확정: 2022.08.24