

MIL-STD-810H를 적용한 레이더 전력공급용 이동식 컨테이너의 충격해석

권재언¹⁾ · 신동원²⁾ · 허장욱^{*,1)}

¹⁾ 금오공과대학교 기계공학과(항공기계전자융합공학전공)

²⁾ 금오공과대학교 기계시스템공학과

Shock Analysis of Mobile Power Supply Container for Radar with MIL-STD-810H

Jaecon Kwon¹⁾ · Dongwon Shin²⁾ · Jangwook Hur^{*,1)}

¹⁾ Mechanical Engineering(Department of Aeronautics, Mechanical and Electronic Convergence Engineering), Kumoh Institute of Technology, Korea

²⁾ Mechanical System Engineering, Kumoh Institute of Technology, Korea

(Received 2 June 2021 / Revised 27 July 2021 / Accepted 3 September 2021)

Abstract

Radar is a ground defense system that detects enemy aircraft and receives power from a mobile power supply in an emergency. Serious problems may occur if the equipment is damaged by impact during transportation for use. The US military standard MIL-STD-810H contains information on environmental tests such as shock and vibration applied to munitions. Therefore, in this study, the transient analysis of ANSYS 19.2 was performed using the impact data specified in MIL-STD-810H as an input value. Through this, the maximum stress generated in the impact environment of the mobile power supply container was derived, and the safety margin was calculated to confirm the reliability of the container.

Key Words : Transport Shock(수송 충격), Modal Analysis(모드 해석), Effective Modal Mass(모드 유효질량), Transient Analysis(시간이력해석), Margin of Safety(안전여유)

1. 서론

레이더는 적군의 비행체를 탐지하는 지상 방어체계

로써 평시에는 한전으로부터 전력을 공급받고 있으나^[1], 전시 혹은 예상치 못한 천재지변과 같은 비상상황에서는 전력공급용 이동식 컨테이너를 통해 운용한다. 본 장비를 사용하는 야전에서는 이동식 전력공급 컨테이너의 수송, 적재 등과 같은 원인으로 장비에 충격이 가해질 수 있고, 이러한 충격으로부터 장비가 파손

* Corresponding author, E-mail: hhjw88@kumoh.ac.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

된다면 성능에 심각한 문제가 발생할 수 있으므로 이에 대한 내구성 검증이 필요하다^{2,3}.

MIL-STD-810H는 다양한 환경 조건에서의 시험기준이 명시된 군사표준이며, 이를 참조하여 군수품에 가해지는 진동, 충격 등과 같은 환경시험을 통해 장비의 신뢰성을 검토할 수 있다⁴. 특히, Method 516.8에는 컨테이너의 수송 환경에서 발생하는 충격에 대한 물리적 및 기능적 성능평가 시험방법과 신뢰 정도를 제공하고 있다.

야전에서 운용하는 각종 무기체계는 시제품을 제작하며 시험하기 전에 모델링과 시뮬레이션을 진행하여 요구성능 충족 여부를 확인하는 것이 개발 일정 및 비용 절감에 큰 영향을 미칠 수 있다. 유한요소해석을 바탕으로 한 시뮬레이션을 통해 구조물의 구조 건전성을 평가한 관련 연구가 다양하게 진행되었지만^{5,6}, 군사표준을 적용하여 여러 가지 환경에서 장비에 가해지는 충격 등으로부터의 건전성 확보를 위한 해석 방법과 절차에 관한 연구가 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 무기체계의 환경시험 표준인 MIL-STD-810H를 적용하여 군용 장비의 충격에 대한 건전성을 유한요소해석을 통해 평가하기 위한 방법과 절차에 대해 설명하고, 모드 해석(Modal analysis)과 시간이력해석(Transient analysis)을 수행하여 전력공급용 이동식 컨테이너의 충격 환경에서 발생하는 최대응력을 도출한 뒤 안전여유를 계산하여 구조적 안전성을 확인하였다.

2. 시험규격

충격에 대한 해석방법이 수록된 MIL-STD-810H의 Method 516.8에는 Table 1에 나타난 바와 같이 시험품목에 가해지는 충격의 형태에 따라 Procedure I부터 VIII까지 총 8가지의 절차를 제공하고 있다. 전력공급용 이동식 컨테이너는 헬기 혹은 차량에 탑재되어 운송되므로 Procedure II의 절차를 참조하였으며, 충격펄스 파형은 톱니 파형, 사다리꼴 파형 및 Half-sine 파형 등이 있으나, Procedure II의 운송 충격은 Fig. 1에 나타난 바와 같은 톱니 파형 충격펄스를 사용한다.

또한, 장비를 적재한 수송 차량의 주행환경에 따른 시험조건은 Table 2와 같이 충격 작용시간, 최대 진폭 및 충격횟수로 구분하여 총 6가지 Case로 정리할 수 있으며, 여기서 Fig. 1의 A와 TD는 Table 2의 최대진

폭(G-Pk)과 충격 작용시간에 해당되는 값이다.

Table 1. Shock test procedures

절 차	적용대상
I	Functional shock
II	Transportation shock
III	Fragility
IV	Transit drop
V	Crash hazard shock
VI	Bench handling
VII	Pendulum impact
VIII	Catapult launch/arrested landing

Table 2. Transportation shock test condition cases

Case	주행환경	충격 작용시간	최대진폭 (G-Pk)	횟수
1	5000 km on road	11 ms	5.1	42
2			6.4	21
3			7.6	3
4	1000 km off road	5 ms	10.2	42
5			12.8	21
6			15.2	3

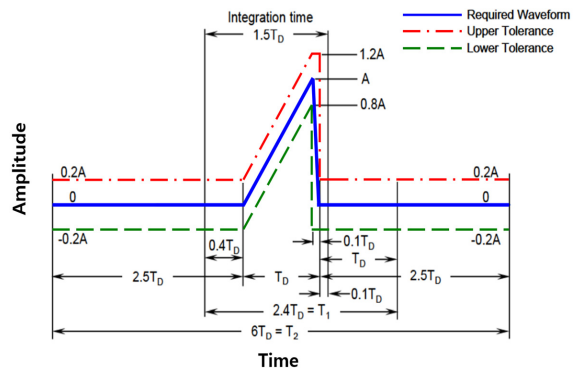
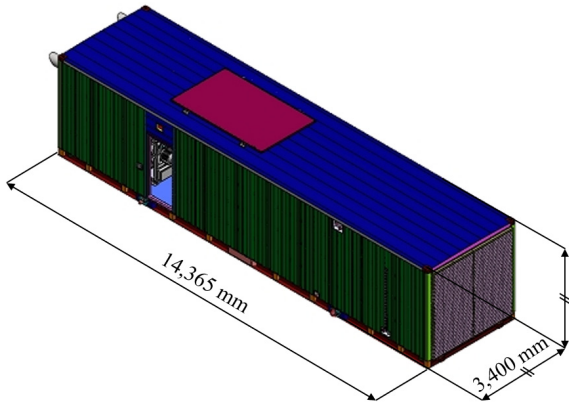
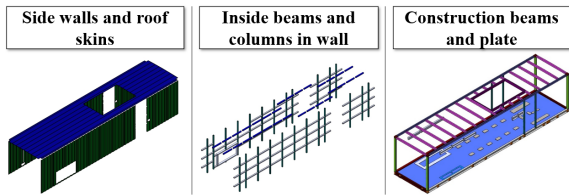


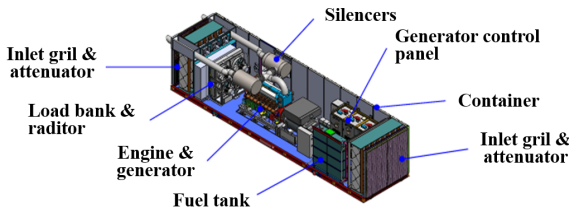
Fig. 1. Terminal peak sawtooth shock pulse



(a) Overall configuration



(b) Part of the structure



(c) Internal configuration

Fig. 2. Container configuration

Table 3. Material properties

Type	Side walls & roof skins	Inside beams and columns in wall	Construction beams & plate
Density	7,850 kg/m ³	7,850 kg/m ³	7,850 kg/m ³
Young's Modulus	210 GPa	210 GPa	210 GPa
Poisson's Ratio	0.3	0.3	0.3
Yield Strength	170 MPa	355 MPa	260 MPa

3. 해석조건 및 방법

3.1 제품 형상 및 특성

전력공급용 이동식 컨테이너의 전체적인 형상은 Fig. 2(a)와 같으며, 구조는 Fig. 2(b)에 나타난 바와 같이 외부 벽면 조립체, 내부의 보와 기둥 및 바닥면과 전체적인 틀을 이루는 빔으로 이루어져 있다. 또한, 컨테이너 내부에는 Fig. 2(c)와 같이 연료탱크, 실린더, 발전기 제어판, 로드뱅크 및 라디에이터, 엔진 및 발전기, 그릴 및 감쇠기가 위치하고 있으며, 해석에 적용된 재료의 기계적 성질은 Table 3에 나타난 바와 같다.

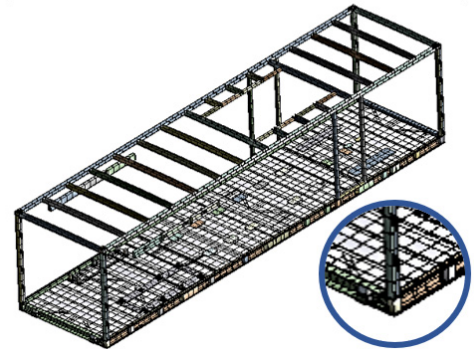
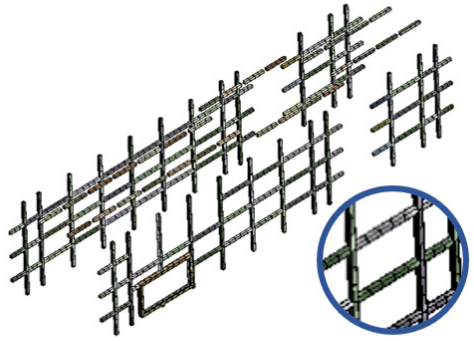
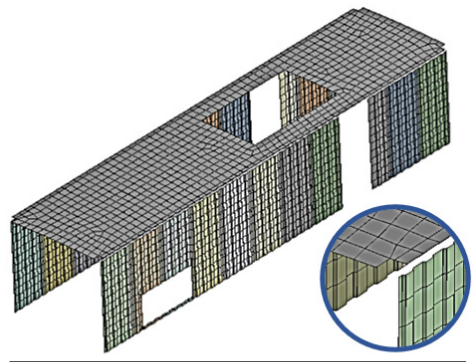


Fig. 3. Analysis model of container

3.2 요소분할 및 경계조건

유한요소 모델을 66,550개의 절점과 26,151개의 요소로 분할하였으며, 각 부분에 대한 메쉬를 Fig. 3에 나타내었다. 격자 형상은 Hex-dominant method를 통해 육면체(Hexahedron mesh)로 분할하고, 일부 육면체 형상이 어려운 부분을 사면체(Tetrahedron mesh)를 사용하여 생성하였다. 또한, 곡선부를 가진 부분은 가상의 형상 분할을 통해 내부까지 균일한 격자를 생성하는 기능인 Multi-zone method를 적용하였다.

전력공급용 이동식 컨테이너 내부에 고정되는 연료 탱크는 비어있는 상태라 가정하며, 고정되는 다른 구성품들(로드뱅크, 발전기, 감쇠기 등)은 장착 위치에 따라 Point mass로 모델링하였다^[7]. 또한, 배선 등과 같이 위치가 특정되지 않은 내부 구성요소들의 하중은 컨테이너 바닥 면에 분포하중으로 입력하였으며, 장착을 위해 설계된 총 10개의 고정부를 3축에 대해 Fixed support 구속조건을 적용하였다^[8].

유한요소 모델의 Side walls & roof skins 파트에 Solid(3D) 요소를 사용함에 따라, Bending 거동을 제대로 모사하기 위해 두께 방향으로 충분한 요소가 사용되었는지 확인할 수 있도록 메쉬 수렴성을 확인하였다. 메쉬를 반복적으로 수정하고 시뮬레이션하여 이전 결과와의 비교를 통해 일정 주파수에 수렴하는 값을 찾는 반복계산 기법을 사용하였으며, 이에 관한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Solution step의 증가에 따라 주파수(Frequency)가 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 최종적으로 약 77 Hz 주변의 최종값에 접근하였다.

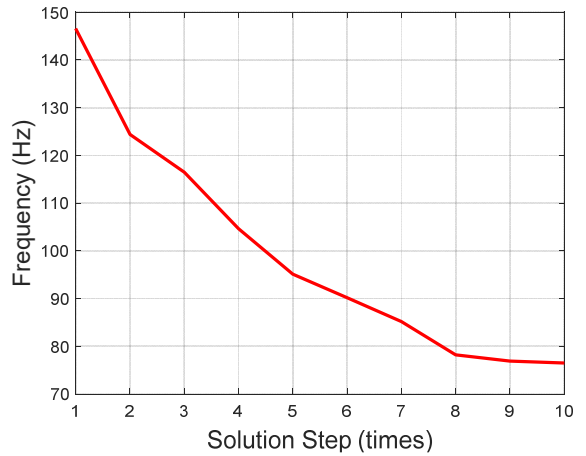


Fig. 4. Mesh convergence result

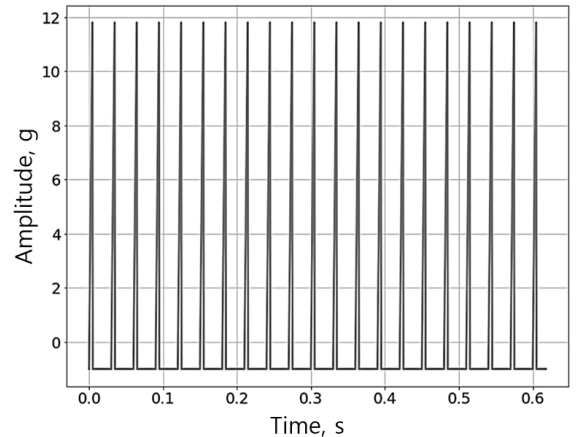


Fig. 5. Shock pulse exposure of case 5

3.3 해석방법

충격펄스 부가 시 시험품목의 진동특성을 확인하기 위한 시간이력해석을 진행하기에 앞서, 전력공급용 이동식 컨테이너의 모드 해석을 통해 결과값을 획득하여 톱니파형 충격펄스와 모드 해석의 결과값을 시간이력 해석의 입력값으로 하여 수행하였다^[9,10]. 모드 해석은 모드 주파수(Modal frequency)와 모드 형상(Mode shape) 등을 계산하기 위해 수행하였으며, 과도한 전산소요를 방지하기 위해 각 모드에서 특정한 방향으로 영향을 받는 총 모드 유효질량(Effective modal mass)이 전체 질량의 80 % 이상이 될 정도까지 추출하였다^[11]. 그리고 3축 방향 중에서 컨테이너가 가장 많은 응력을 받는 방향을 확인하기 위해 톱니 파형 충격펄스를 20 g의 진폭과 11 ms의 시간으로 각 방향당 1회씩 부가하

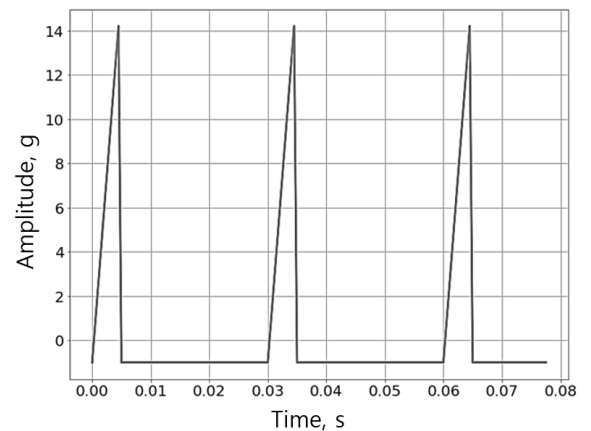


Fig. 6. Shock pulse exposure of case 6

여 응력수준을 확인하였다. 그 결과, 컨테이너 z축 방향 응력이 가장 높게 도출되는 것을 검증한 후, +z, -z 방향에 대하여 Table 1에서 가장 가혹한 조건인 Case 5와 6에 대한 해석을 진행하였다. 충격펄스의 작용시간은 Case 5와 Case 6이 각각 617.5 ms와 77.5 ms이며, 이때, +z 방향으로 적용된 충격펄스의 전체형상을 Fig. 5와 Fig. 6에 각각 나타내었다.

4. 해석결과 및 고찰

전력공급용 이동식 컨테이너에 대하여 z축 방향의 총 모드 유효질량이 전체질량의 80 % 이상이 될 수준의 모드를 추출한 결과를 Table 4에 나타내었으며, 총 103개의 모드가 추출되었다. 또한, 추출된 모드 중 1 ~ 3차 모드의 형상을 Fig. 7에 나타내었으며, 1차 모드의

Table 4. Mode extraction

Mode	Frequency (Hz)	Modal mass(%)	Mode	Frequency (Hz)	Modal mass(%)	Mode	Frequency (Hz)	Modal mass(%)	Mode	Frequency (Hz)	Modal mass(%)
1	76.5	19.28	27	205.0	0.22	53	288.6	0.08	79	365.8	0.00*
2	85.8	41.52	28	207.8	0.01	54	296.5	0.75	80	368.7	0.02
3	94.8	3.53	29	211.9	0.01	55	299.5	0.00*	81	378.3	0.28
4	95.5	1.19	30	212.7	0.00*	56	305.3	0.02	82	379.8	0.11
5	117.2	0.01	31	217.2	0.04	57	309.0	0.04	83	381.7	0.56
6	118.3	0.07	32	221.2	0.00*	58	313.6	0.07	84	387.4	0.00*
7	132.5	0.12	33	223.9	0.17	59	326.7	0.00*	85	392.0	0.01
8	138.7	0.56	34	224.6	0.02	60	327.7	0.03	86	394.5	0.01
9	155.8	0.01	35	224.9	0.00*	61	331.6	0.07	87	405.5	0.25
10	166.0	0.01	36	226.6	0.06	62	331.8	0.08	88	412.4	0.00*
11	167.2	0.00*	37	227.0	0.04	63	338.6	0.20	89	415.9	0.02
12	169.7	0.00*	38	228.5	0.01	64	339.6	0.64	90	419.2	0.21
13	169.8	0.00*	39	232.6	0.67	65	342.7	0.07	91	425.0	0.40
14	170.5	0.00*	40	237.8	0.00*	66	344.6	0.14	92	425.8	0.05
15	171.9	0.00*	41	243.5	0.02	67	346.1	0.01	93	430.0	0.06
16	172.1	0.00*	42	252.7	0.03	68	349.9	0.06	94	432.6	0.02
17	172.4	0.02	43	255.7	0.00*	69	350.1	0.01	95	433.8	0.03
18	172.8	0.01	44	260.8	0.03	70	352.5	0.00*	96	440.6	0.21
19	179.9	0.00*	45	261.5	0.09	71	352.9	0.00*	97	443.0	0.03
20	180.7	0.01	46	265.4	0.02	72	354.4	0.07	98	446.0	0.00*
21	182.4	0.00*	47	269.2	0.02	73	356.3	0.07	99	447.2	0.08
22	183.6	0.00*	48	273.8	0.01	74	359.5	0.00*	100	448.6	0.10
23	183.8	0.00*	49	276.2	0.16	75	362.3	0.02	101	449.3	0.25
24	185.6	0.01	50	280.7	0.12	76	362.7	0.09	102	453.9	0.02
25	187.0	6.87	51	282.2	0.16	77	363.9	0.00*	103	458.0	0.01
26	195.4	0.00*	52	283.8	0.00*	78	365.2	0.00*	Total		80.4

0.00* : Indicates that it has a value after 3 decimal places.

최대변위는 컨테이너의 외부 벽면에서 발생하였으나, 2차 모드의 최대변위는 컨테이너의 하단 프레임에서 발생하였고, 3차 모드의 경우에는 컨테이너 내부 브라켓이 위치한 부분에서 나타난 것을 확인할 수 있다.

앞서 수행한 모달해석의 출력값을 입력값으로 하여 시간이력해석을 수행하였는데, 컨테이너에 가장 큰 영향을 미치는 충격의 방향을 확인하기 위해 톱니 파형 충격펄스를 20 g의 진폭으로 11 ms 동안 1회 부가하여 해석한 결과를 Table 5에 나타내었다. 해석결과 가장 높은 응력수준을 나타낸 방향은 +z, -z축 방향임을 확인할 수 있었으며, 결과를 토대로 Case 5와 Case 6에 대한 해석을 각각 진행하였다.

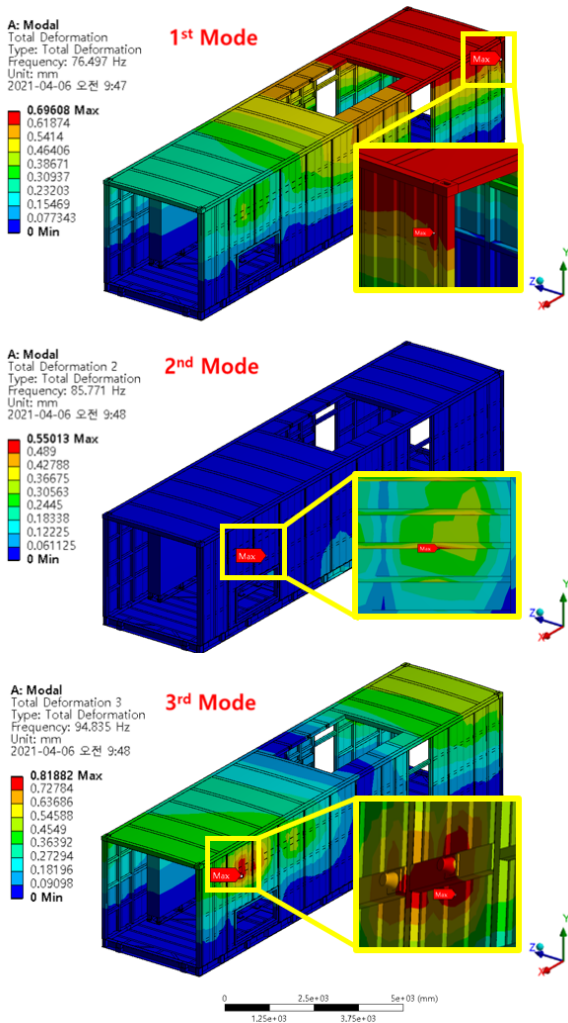


Fig. 7. 1st ~ 3rd mode shape

진력공급용 이동식 컨테이너의 시간이력해석에 따른 최대등가응력 및 발생위치를 Table 6과 Fig. 8에 나타내었다. 최대등가응력은 Case 5의 해석에서 172.3 MPa와 Case 6의 해석에서 204.7 MPa가 발생하였으며, 최대응력은 모두 브라켓에서 나타내고 있다.

최대등가응력이 발생한 구성요소의 안정성에 대한 요구조건을 검증하기 위해 안전여유(Margin of safety)를 산출하였다. 안전여유란 최대하중을 받는 구성요소가 항복강도를 견뎌낼 수 있음을 나타내는 값으로써, 안전여유가 0보다 크면 설계하중 이상의 추가하중을 견딜 수 있다고 볼 수 있다^[7]. 안전율(Factor of safety)은 통상 연성재료의 안전율인 1.25를 사용하였고, 기준 항복강도는 Table 3에서 브라켓의 물성치를 나타내는 Construction beams & plate의 항복강도(260 MPa)를 사용하였으며, 계산된 안전여유를 Table 7에 나타내었다.

$$M.S = \frac{Yield\ Strength}{Factor\ of\ Safety \times Applied\ Stress} \quad (1)$$

Table 5. Results of prior analysis

Shock direction	Max. eqv. stress (MPa)
+x	145.2
-x	148.6
+y	191.9
-y	192.3
+z	221.4
-z	220.2

Table 6. Maximum equivalent stress(Von-Mises)

Type	Case 5		Case 6	
	+z	-z	+z	-z
Value	172.3 MPa	158.6 MPa	204.7 MPa	188.6 MPa

Table 7. Margin of safeties

Type	Case 5		Case 6	
	+z	-z	+z	-z
Value	1.21	1.31	1.02	1.10

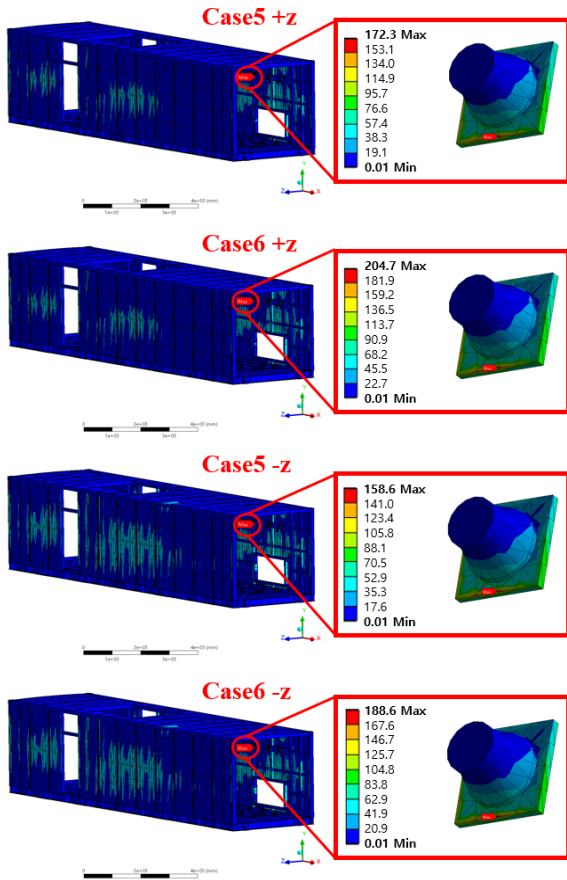


Fig. 8. Equivalent stress(Von-Mises)

해석결과 컨테이너 내부 구성요소(Generator control panel)가 고정되는 브라켓에서 가장 큰 응력이 집중되는 것을 확인할 수 있으며, 안전여유는 1.10 수준으로, 차량에 탑재되어 수송 및 운용되는 전력공급용 이동식 컨테이너는 충격에 대한 구조안전성을 만족하는 것으로 나타났다. 그러나 실제 레이더 전력공급용 이동식 컨테이너의 수송 환경에서는 완충장치의 경계조건 및 비선형 거동 등의 난점이 발생할 수 있으므로 향후 구조물의 모드 시험을 진행하여 모드 해석결과와의 비교분석을 통해 구조물이 강건하게 설계되었음을 검증하는 과정이 필요하다고 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 MIL-STD-810H의 시험조건을 적용하

여 전력공급용 이동식 컨테이너의 수송 충격에 대한 구조안전성을 수치해석과 FEM을 통한 구조해석으로 검토하였다. 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 시간이력해석 결과 +z, -z축 방향의 응력수준이 다른 방향에 비해 상대적으로 높게 계산되었다.
- 2) 이동식 전력공급 컨테이너의 충격하중에 대한 최대 등가응력(204.7 MPa)은 브라켓에서 발생하고 있다.
- 3) 최대응력이 작용하는 브라켓의 안전여유는 1.10 수준으로 나타났으며, 컨테이너는 충격하중으로부터 충분한 구조적 안전성을 확보한 것으로 보인다.

후 기

이 논문은 2019년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2019R111A3A01063935).

References

- [1] S. L. Johnston, "Radar Electronic Counter-Countermeasures," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 1, No. 1, pp. 109-117, 1978.
- [2] K. S Kim, "A Study on Characteristics of the Light-Weight Shock Test and DDAM about Shipboard Equipment," Proceedings of the KSME Conference, pp. 1414-1417, 2020.
- [3] O. S. Song, H. Y. Lee, "Shock Traveling Analysis of Truck - Mounted Special Equipments," Journal of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 20, No. 4, pp. 381-389, 2010.
- [4] "Department of Defense Test Method Standard for Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests, MIL-STD-810H," Department of Defense, US, 2019.
- [5] D. Shin, J. Lee, Y. Kang, "Development Process of Mechanical Structure for a Large Radar," Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, Vol. 20, No. 1, pp. 1-11, 2017.
- [6] D. H. Son, K. H. Kang, J. H. Choi, D. H. Park,

- “Analysis of the Structural Robustness of Cabinet Structure Equipped with Military Vehicles,” Proceedings of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering Conference, pp. 273-276, 2014.
- [7] ANSYS, “Theory Reference for the Mechanical APDL and Mechanical Applications,” ANSYS Inc, 2017.
- [8] ANSYS, “ANSYS Contact Technology Guide,” ANSYS Inc, 2004.
- [9] K. Morgan, “Shock & Vibration using ANSYS Mechanical,” ANSYS Inc, 2015.
- [10] H. Mo, H. Qiu, “Simulation and Random Vibration Test of Structural Dynamic Characteristics of Vacuum Tube,” Proceedings of the ICMMBE Conference, pp. 131-136, 2016.
- [11] E. Tasdelen, “Shock Analysis of On-board Equipment Submitted to Underwater Explosion,” Master Thesis, University of Liege, Belgium, 2018.