

# 교전 운용에 따른 충격하중을 고려한 안테나 장치의 구조건전성 및 성능 분석

## Analysis of Structural Integrity and Performance of Antenna Device under Wartime Shock Loads

김 대근<sup>\*</sup>·임 선빈<sup>\*</sup>·노현규<sup>\*</sup>·이종학<sup>\*\*</sup>·신동준<sup>\*\*</sup>  
이종훈<sup>\*\*</sup>·박경락<sup>\*\*</sup>·강신민<sup>\*\*\*</sup>·박노철<sup>†</sup>  
Daekeun Kim<sup>\*</sup>, Seonbin Lim<sup>\*</sup>, Hyun Gyu Roh<sup>\*</sup>, Jong-Hak Lee<sup>\*\*</sup>,  
Dong-Jun Shin<sup>\*\*</sup>, Jong-Hoon Lee<sup>\*\*</sup>, Gyeong-Rak Park<sup>\*\*</sup>,  
Shin-Min Kang<sup>\*\*\*</sup> and No-Cheol Park<sup>†</sup>

(Received July 25, 2023 ; Revised August 22 2023 ; Accepted August 28, 2023)

**Key Words :** Antenna Device(안테나장치), Structural Integrity(구조건전성), Shock Resistance(내충격성), Warfare Operations(교전 운용), Machine Gun(기관포), Transient Response Analysis(과도응답해석)

### ABSTRACT

The antenna device used in the close-in weapon systems is the primary device for detecting targets and effectively countering enemy aircraft, anti-ship guided munitions, and close-in maritime terrorist threats, as well as ensuring survivability in a warfare environment. The antenna device must exhibit structural integrity and meet the radar performance criteria for warfare operations scenarios that consider the shock loads from underwater weapons and machine gun fire, as well as general environmental conditions. To simulate the warfare operating environment for underwater explosion and machine gun shock loads, the German Navy's BV043 standard and actual machine gun data were used to convert the antenna mount response into a time-history signal. This simulation formed the basis for the development of a finite element analysis model of an antenna device for a ship equipped with machine guns, and modal analysis and transient response analysis were performed. For shock resistance analysis, stress-based evaluation of the structure and acceleration-based evaluation of the components were performed based on the results of the finite element analysis to evaluate the structural integrity and performance of the radar.

### 기호설명

$a_0$  : 충격 응답 스펙트럼 가속도 [ $\text{m/s}^2$ ]

$a_2, a_4$  : BV043 triangle wave 가속도 [ $\text{m/s}^2$ ]

$d_0$  : 충격 응답 스펙트럼 변위 [mm]

FOS : 안전계수(factors of safety)

† Corresponding Author ; Member, Department of Mechanical Engineering, Yonsei University, Professor  
E-mail : pnch@yonsei.ac.kr

\* Member, Department of Mechanical Engineering, Yonsei University, Student

\*\* LIG Nex1, Researcher

\*\*\* Dae Young M. Tech. Co., Ltd, Researcher

# A part of this paper was presented at the KSNVE 2023 Annual Spring Conference

‡ Recommended by Editor Jong Moon Ha

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

MOS	: 안전여유(margin of safety)
$t_2, t_3, t_4, t_5$	: BV043 triangle wave 시간 [s]
$v_0$	: 충격 응답 스펙트럼 속도 [m/s]

## 1. 서 론

근접방어무기체계에서 사용하는 안테나 장치는 목표물을 탐지하는 주요 장치로써 적 항공기 및 대함 유도탄과 근접 해상태러 위협에 효과적으로 대응하고 교전 환경에서의 생존성을 보장해야 한다. 함정의 생존성을 보장하기 위해 일반적인 환경조건 뿐만 아니라 수중무기의 수중 폭발과 기관포 운용 시 전달되는 충격하중을 고려한 교전 운용 시나리오에 대해서 안테나 장치의 구조전성 및 레이더의 성능 기준을 만족해야 한다. 군용 함정에 장착되는 장치의 경우 일반적인 환경조건은 미국 국방성이 제정하는 국방 표준 규격인 MIL-STD<sup>(1,2)</sup>를 따라서 장치의 내구성 및 내충격성에 대한 설계 및 시험 기준이 적용된다. 내충격성 검증을 위해 MIL-S-901D<sup>(3)</sup>에서 규정하는 충격시험 규격이 있지만 장치 제작 후 시험이 가능하고 시험 평가 비용 및 일정 등의 리스크가 발생하는 문제와 국내 시험 가능한 시설이 많지 않고 대형 구조물의 경우 시험 시설이 없는 문제로 인해 M&S (modeling and simulation)를 통한 검증이 요구된다.

함정용 장비의 충격 해석 방법으로는 독일 해군의 내충격성 규격인 BV043<sup>(4)</sup>에서 제시하는 과도 응답 해석(transient response analysis)을 적용한다. BV043 규정은 함정의 종류, 배수량, 장비 탑재 위치, 충격 방향에 따라 충격 응답 스펙트럼(shock response spectrum)

을 시간 이력의 바닥가진 신호로 변환하여 제공하고 이를 활용하여 장비의 내충격성을 검증하고 크기, 비용, 중량 등의 제약이 존재하는 장비에 대해서 해석을 통한 검증이 수행되었다<sup>(5-8)</sup>.

기관포에 대한 충격 수준은 MIL-STD-810H<sup>(1)</sup>의 METHOD 519.8에서 실측한 데이터를 활용하거나 충격 응답 스펙트럼(shock response spectrum)을 생성하는 방법에 대해 제시하고 있다.

이 연구에서는 수중 폭발 및 기관포 충격하중 환경에서 기관포가 장착된 함정용 안테나 장치의 구조전성과 성능을 분석하기 위하여 유한요소 해석 모델을 구축하고 모드 해석과 과도 응답 해석을 수행하였다. 과도 응답 해석을 위해 BV043 규정과 기관포의 실측 데이터를 활용하여 안테나 장치 마운트부의 응답에 대해 시간 이력의 신호로 변환하였다. 최종적으로 응력 기반 평가를 통해 구조전성을 분석하고 가속도 기반 평가를 통해 성능을 평가하였다.

## 2. 유한요소 해석

### 2.1 해석 모델 구축

안테나 장치는 능동위상배열레이더를 활용한 탐색 안테나로써 Fig. 1과 같이 레이돔(radome)과 냉각판(cooling plate)을 포함하는 하우징이 구성되어 있고 내부에는 독립적인 TRMs(transmit receive modules)과 다양한 전자 부품이 구성되어 있다.

안테나 장치의 교전 운용을 반영한 구조전성과 성능 분석을 위해 ANSYS mechanical 2022R2를 사용하여 유한요소 해석 모델을 구축하였다. 주요 구성

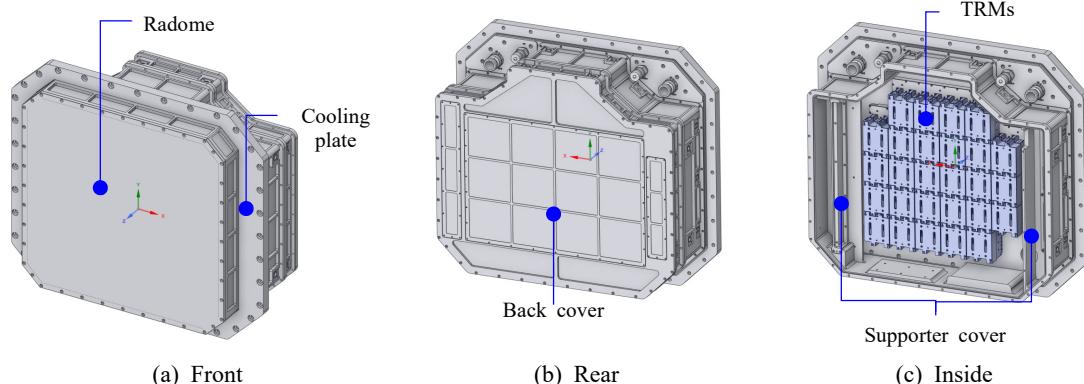


Fig. 1 Schematic diagram of antenna device

품인 레이돔과 하우징, TRMs의 형상은 유지하고 나머지 전자 부품에 대해서는 체결부에 집중 질량을 적용하였다.

능동위상배열레이더 특성상 복잡한 내부 형상으로 인해 전체적인 거동에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단되는 작은 구멍 및 라운드, 필렛 등은 간소화 모델링 과정에서 생략하였다. 레이돔은 복합재의 레이어와 허니컴 구조를 반영하였고 레이돔 복합재 레이어 두께를 고려하여 2차 요소를 적용하였다. 간소화한 유한요소 해석 모델은 사면체 요소와 육면체 요소로 구성하였고 총 1 003 884개의 요소와 748 420개의 절점으로 이루어졌으며 Fig. 2와 같다.

최종적으로 안테나 장치가 근접방어무기체계 플랫폼에 장착되는 환경을 모사하기 위해 Z축으로 45°, X축으로 22° 기울여서 유한요소 모델에 적용하였고 장착되는 면을 고정단으로 적용하였다.

## 2.2 해석조건 분석

수중 폭발과 관련된 함정용 장비의 충격 해석 방법으로는 독일 해군의 내충격성 규격인 BV043을 활용하고 있다. BV043 규정에서는 함정의 종류, 배수량, 장비 탑재 위치, 충격 방향에 따라 충격 응답 스펙트럼(shock response spectrum)을 값을 제시하고 근접



Fig. 2 Simplified model of antenna device

Table 1 BV043 Shock response spectrum value

Type of ship	Direction of shock	Mounting location	$d_0$ [mm]	$v_0$ [m/s]	$a_0$ [m/s <sup>2</sup> ]
Surface ship > 2000 t	Vertical	I	45	7	2820
		II	45	6	1400
		III	55	5	850
	Transverse	I	30	6	2500
		II	20	3	850
		III	50	3	500

방어무기체계에 해당하는 값은 Table 1의 mounting location III 값으로 제시한다. 그리고 Fig. 3의 삼각파(triangle wave)와 같이 변환된 시간 이력 가속도 값으로 충격량을 정의한다.

Fig. 3에 나타낸 이중 삼각형 충격파의 세부 값은 식(1)~식(8)과 같다<sup>(4)</sup>.

$$a_2 = 0.6 \times a_0 \quad (1)$$

$$v_2 = \frac{3}{4} \times v_0 \quad (2)$$

$$t_3 = 2 \times \frac{v_2}{a_2} \quad (3)$$

$$t_2 = 0.4 \times t_3 \quad (4)$$

$$(t_5 - t_3) = \frac{6 \times d_0 \times 1.05 - 1.6 \times a_2 \times t_3^2}{1.6 \times a_2 \times t_3} \quad (5)$$

$$a_4 = \frac{-a_2 \times t_3}{(t_5 - t_3)} \quad (6)$$

$$t_4 = t_3 + 0.6 \times (t_5 - t_3) \quad (7)$$

$$t_5 = \frac{6 \times d_0 \times 1.05 - 1.6 \times a_2 \times t_3^2}{1.6 \times a_2 \times t_3} + t_3 \quad (8)$$

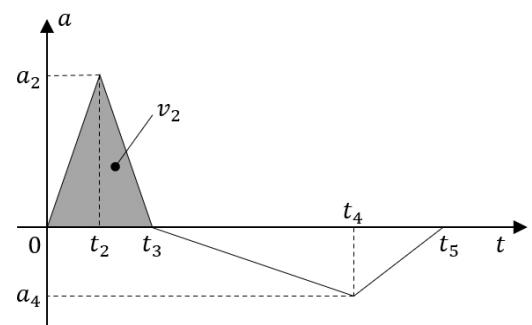


Fig. 3 BV043 triangle wave

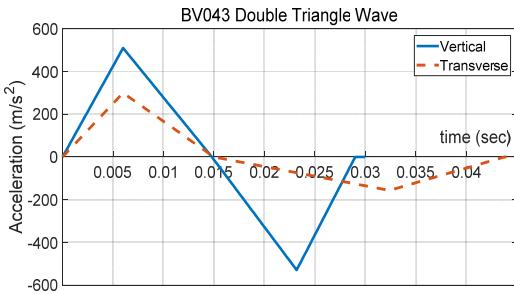


Fig. 4 BV043 input acceleration in time series

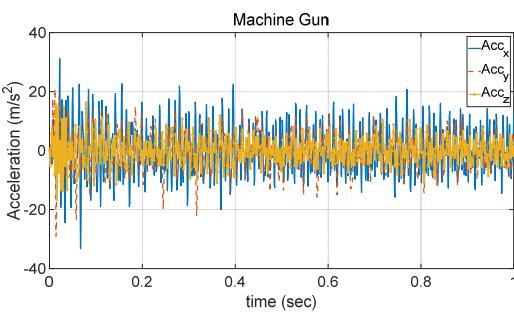


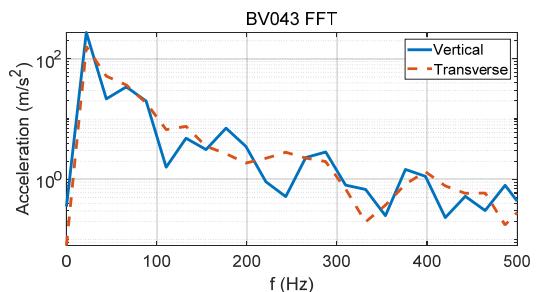
Fig. 5 Machine gun input acceleration in time series

여기서  $d_0$ 는 변위 스펙트럼의 기준값이고  $v_0$ 는 속도 스펙트럼의 기준값,  $a_0$ 는 가속도 스펙트럼의 기준값을 나타내며 Table 1의 mounting location III값을 사용한다. 주어진 기준값을 통해 식(1)부터 식(8)까지를 활용하여 BV043 triangle wave의 시간( $t_2$ ,  $t_3$ ,  $t_4$ ,  $t_5$ )과  $t_3$ 까지의 속도( $v_2$ )를 계산하고 amplitude인 가속도( $a_2$ ,  $a_4$ )를 계산하여 근접방어무기체계의 안테나 장치에 해당하는 시간 이력 가속도 값을 Fig. 4와 같이 도출할 수 있다.

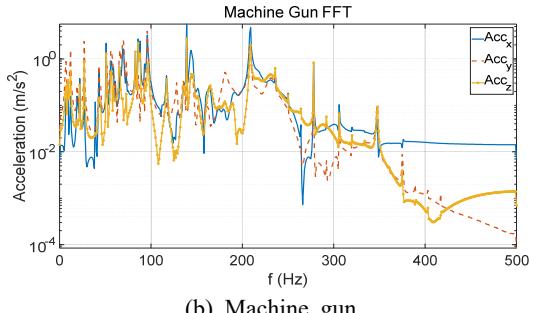
기관포 충격량은 근접방어무기체계에서 사용하는 기관포에 가속도 센서를 부착하고 측정한 데이터를 활용하여 안테나 장치 마운트부의 응답을 시간 이력 가속도 값으로 Fig. 5와 같이 제시한다.

충격하중에 대한 동특성 분석을 위해 각 시간 이력 가속도 값을 Fig. 6과 같이 FFT (fast fourier transform)하여 각 충격하중의 주파수 영역을 분석하였다.

마지막으로 교전 운용 시나리오를 고려하여 수중 폭발과 기관포 충격량을 동시에 적용한 과도 응답 해석(transient response analysis)을 진행하였다.



(a) BV043 (underwater explosion)



(b) Machine gun

Fig. 6 Frequency spectrum of input acceleration

## 2.3 해석결과 분석

### (1) 모드 분석

충격하중이 Fig. 6에서 보는 것과 같이 300 Hz 이내에 분포되어 있기 때문에 모드 해석을 통해 300 Hz 이내에 안테나 장치 하부 구성품 중 영향이 있는 구성품을 모드별로 Fig. 7 및 Table 2와 같이 확인하였다.

안테나 장치의 1차 모드는 146.14 Hz이고 하우징 뒤쪽 덮개(back cover)에서 고유 모드가 발생하였다. 4차 모드와 6차 모드도 동일한 구성품에서 발생하였고 2차 모드는 레이돔(radome), 3차 모드와 5차 모드는 하우징 내부 서포터(supporter)에서 고유 모드가 발생하는 것을 확인하였다. 이러한 해석 결과를 기반으로 1차에서 6차 모드까지 고유 모드가 발생하는 하우징(서포터 포함)과 레이돔, 주요 전자 부품인 TRMs를 평가 구성품으로 선정했다.

### (2) 구조건전성 분석

안테나 장치 구성품의 재질 물성치는 Table 3과 같다. 안테나 장치의 구조건전성 분석을 위해 각 충격 방향에 따른 응력 기반 평가를 진행하였다.

구성품별 최대 응력 값을 극한강도와 비교하여 안

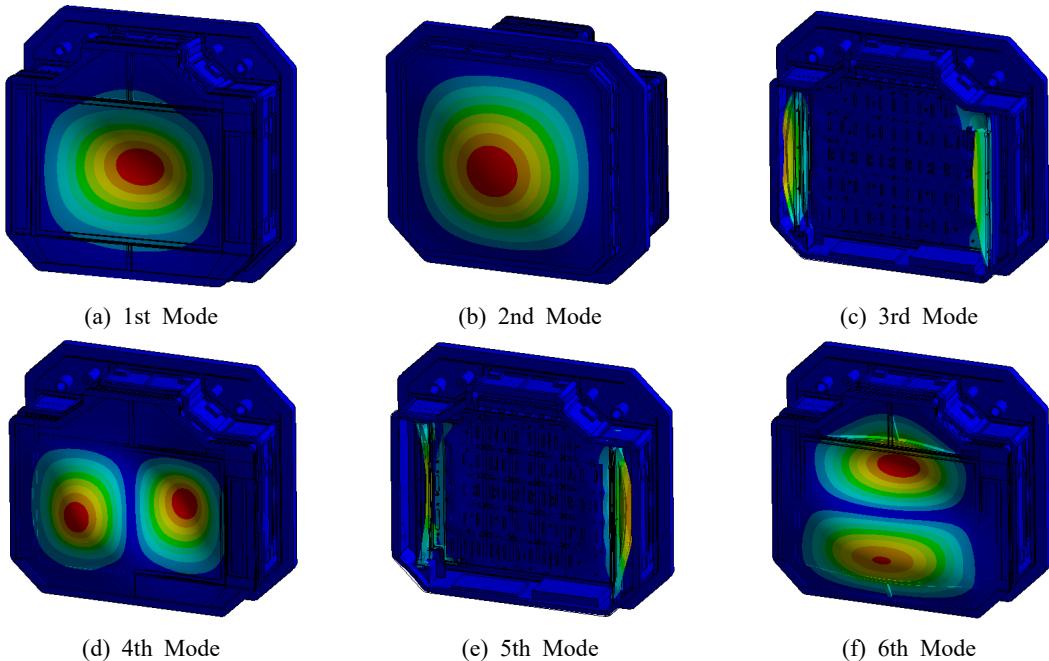


Fig. 7 Mode shape of antenna device

Table 2 Result of modal analysis

$$MOS = \frac{\text{allowable stress limit}}{\text{FOS} \times \text{actual stress}} - 1 \quad (9)$$

No.	Natural frequency [Hz]	Components
1	146.1	Back cover
2	236.0	Radome
3	255.3	Supporter
4	255.9	Back cover
5	266.1	Supporter
6	271.7	Back cover

Table 3 Material property of antenna device

Material	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Elastic modulus [MPa]	Poisson's ratio	Tensile strength [MPa]
E-glass (HG1581)	1870	24 913 (X)	0.28 (XY)	472.9 (X)
		24 935 (Y)	0.14 (YZ)	353.9 (Y)
		2450 (Z)	0.14 (XZ)	40.0 (Z)
AL6061	2713	68 900	0.33	310

전여유(MOS : margin of safety)를 식 (9)과 같이 계산하였고 안전여유 계산을 위해 안전계수(FOS : factors of safety)는 극한강도에 대해 1.5의 값을 적용하였다<sup>(9)</sup>.

최대 응력이 발생하는 위치는 하우징 내부 2t 두께의 판재 내부 훌과 주변 서포터에서 응력집중이 발생하였다. 2t 두께 판재에 구성품이 조립되고 3차 모드와 5차 모드에 의해 구조적으로 응력 집중이 발생한 것으로 판단된다.

구성품별 응력 분포와 최대 응력 및 안전여유 값은 Fig. 8 및 Table 4와 같이 나타났다. 충격 방향이 함정의 Z축 방향(BV043(Z))과 기관포 충격 방향(machine gun)일 때 안전여유 값이 0.6으로 최소값이 나타났다. 안전여유 값이 0보다 크면 구조전성을 만족한 것으로 판단하고 이외의 모든 구조물에 대해 안전여유 값이 0.6 이상으로 수중 폭발과 기관포 충격 환경에서 안테나 장치가 안전한 것으로 판단할 수 있다.

### (3) 성능 분석

안테나 장치의 성능 분석을 위해 각 충격 방향에 따른 가속도 기반 평가를 진행하였다. 구성품별 최대 가속도 값을 VITA 47.1에서<sup>(10)</sup> 제시하는 operating

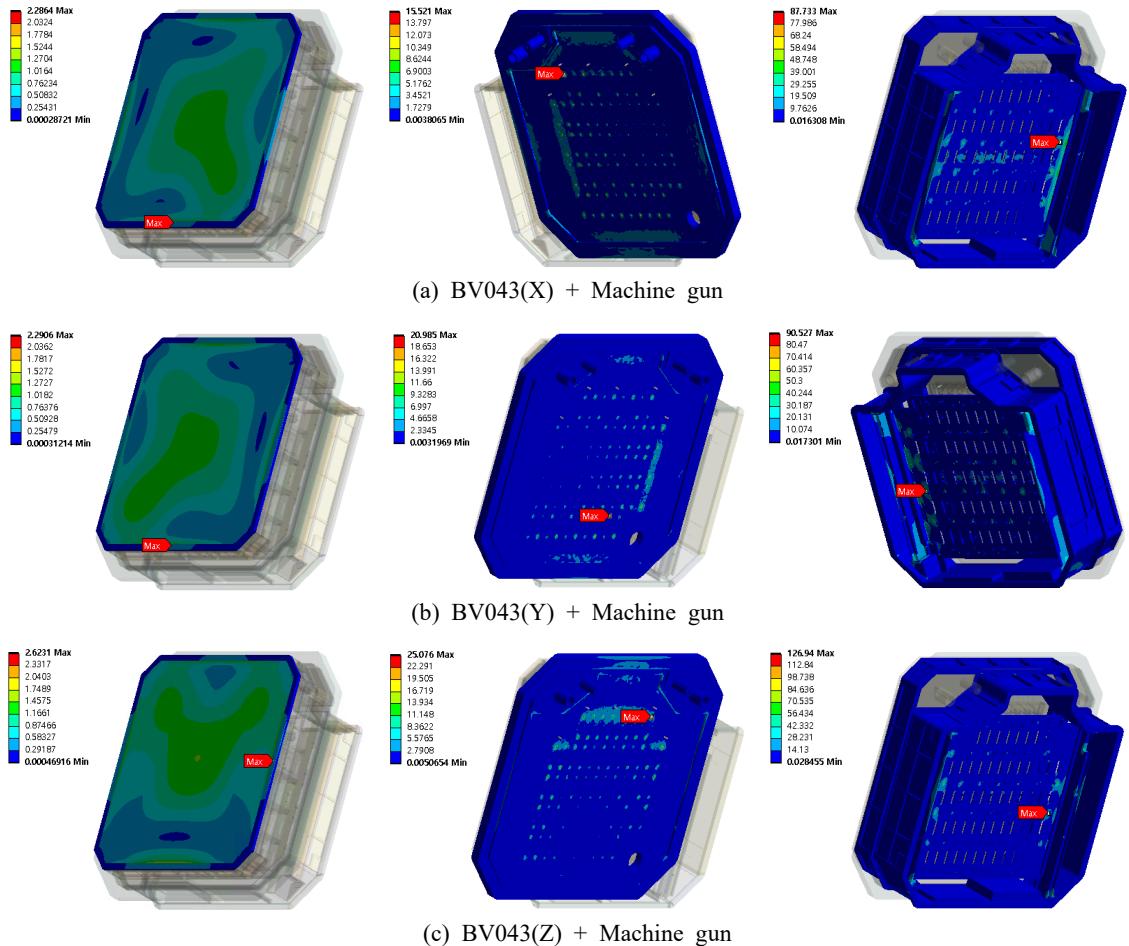


Fig. 8 Stress distribution for shock loads direction

Table 4 Stress-based evaluation

Shock loads direction	Components	Allowed value [MPa]	Max. equiv. stress [MPa]	MOS
BV043 (X) + machine gun	Radome	40	2.3	10.7
	Cooling plate	310	15.5	12.3
	Housing	310	87.7	1.4
BV043 (Y) + machine gun	Radome	40	2.3	10.6
	Cooling plate	310	21.0	8.8
	Housing	310	90.5	1.3
BV043 (Z) + machine gun	Radome	40	2.6	9.2
	Cooling plate	310	25.1	7.2
	Housing	310	126.9	0.6

shock 기준값인 40 g와 비교하여 안전여유를 계산하였고 안전계수는 불확실성을 고려하여 1.5의 값을 적용하였다.

최대 가속도 응답은 3차 모드와 5차 모드에 기반한 서포터(supporter)의 체결부에서 발생하였다. 체결부는 8개소로 7개의 전자 모듈을 집중 질량으로 입력하였고 전자 모듈의 무게중심은 센터 방향이기 때문에 체결부에서 최대 가속도 응답이 발생한 것으로 판단된다.

구성품별 가속도 분포와 최대 가속도 및 안전여유 값은 Fig. 9 및 Table 5와 같이 나타났다. 충격 방향이 BV043(Z) + machine gun일 때 안전여유 값이 0.2로 최소 값이 나타났다. 모든 구성품에 대해 안전여유가 0보다 큰 것을 확인하여 안테나 장치가 성능적으로 문제가 없다고 판단할 수 있다.

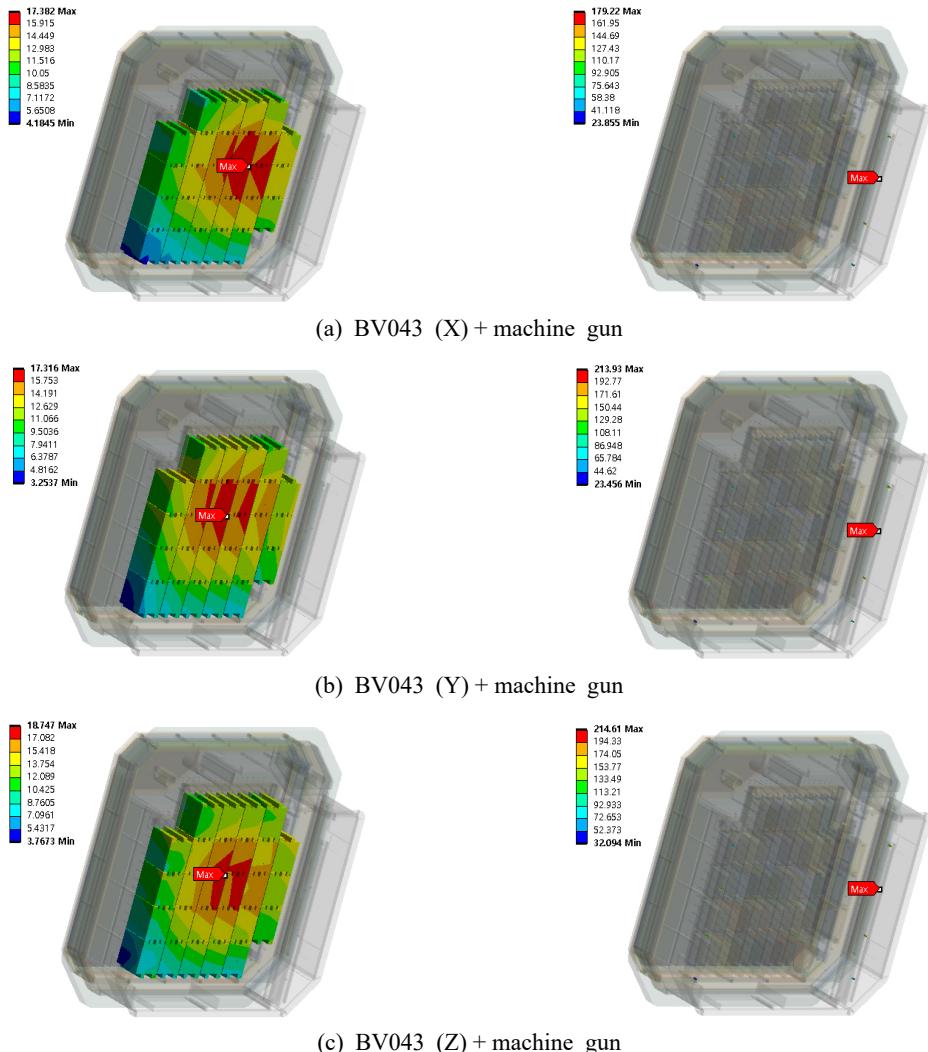


Fig. 9 Acceleration distribution for shock loads direction

Table 5 Acceleration-based evaluation

Shock loads direction	Components	Allowed value [g]	Max. total acceleration [g]	MOS
BV043 (X) + machine gun	TRMs	40	1.8	14.1
	Supporter	40	18.3	0.5
BV043 (Y) + machine gun	TRMs	40	1.8	14.1
	Supporter	40	21.8	0.2
BV043 (Z) + machine gun	TRMs	40	1.9	13.0
	Supporter	40	21.9	0.2

### 3. 결 론

이 연구는 수중 폭발과 기관포 운용 시 전달되는 충격하중을 고려한 교전 운용 환경에서 안테나 장치의 내충격성을 분석하기 위해 수행되었다. 먼저, 안테나 장치의 유한요소 해석 모델을 구축하고 모드 해석을 수행하였다. 모드 해석 결과, 1차 모드는  $146.1\text{ Hz}^{\circ}$ 이고 6차 모드까지  $300\text{ Hz}$  이내에서 발생하였다. 모드 해석 결과를 기반으로 충격하중 주파수 영역 내에 영향이 있을 구성품을 확인하였다. 그리고 교전 운용 환경 모사를 위해 BV043 규정과 기관포의 실측 데이

터를 활용하여 안테나 장치 마운트부의 응답에 대해 시간 이력의 신호로 변환하여 과도 응답 해석을 수행하였다.

내충격성 분석을 위해 유한요소 해석 결과를 기반으로 구조물의 응력 기반 평가와 구성품의 가속도 기반 평가를 수행하여 구조건전성과 레이더의 성능을 평가하였다. 구조건전성 평가 결과, 하우징 내부 2 t 두께의 판재에서 최대 응력이 발생하였고 충격 방향이 BV043(Z) + machine gun일 때 최소 안전여유 값 0.6을 확인하였다. 성능 평가에서는 마찬가지로 충격 방향이 BV043(Z) + machine gun일 때 서포터(supporter)의 체결부에서 최대 가속도 응답이 나오는 것을 확인하였고 최소 안전여유 값 0.2를 확인하였다. 구조건전성 및 성능 평가에서 모두 3차 모드와 5차 모드에 의해 응력 집중과 최대 가속도 응답이 발생한 것으로 판단되고 안전여유 값도 모두 0보다 큰 것을 확인하여 구조적으로 안전하고 성능적으로 문제가 없다고 판단하였다. 이 연구에서 제시하는 수중 폭발과 기관포 충격을 동시에 고려한 내충격성 평가 방법을 활용하여 기관포 충격뿐만 아니라 다른 충격하중에 대한 복합 충격과 다양한 플랫폼에서 복합 내충격성 평가에서도 활용 가능할 것으로 기대된다.

## 후 기

이 연구는 LIG Nex1 산학협력과제 지원으로 수행되었습니다.

이 성과는 정부(과학기술통신부)의 재원으로 한국연구장학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019M2D2A2048296).

## References

- (1) United States Department of Defense, 2019, Department of Defense Test Method Standard: Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests, MIL-STD-810H.
- (2) United States Department of Defense, 2005, Department of Defense Test Method Standard: Mechanical Vibrations of Shipboard Equipment (Type I-Environment and Type II-Internally Excited), MIL-STD-167-1A.

(3) United States Department of Defense, 1989, Military Specification: Shock Tests, H. I. (High-impact) Shipboard Machinery, Equipment, and System, Requirements for, MIL-S-901D.

(4) Federal German Army Procurement Office, 1985, Shock Resistance Experimental and Mathematical Proof, Federal German Army Procurement office, BV043.

(5) Wang, J. and He, S., 2018, The Impact-Resistance Analysis of a Fastening Belt of an Underwater Vehicle Life Raft, Vibroengineering Procedia, Vol. 20, pp. 254-259.

(6) Seo, Y.-J., Lee, C.-D., Ahn, H.-D. and Kim, C.-J., 2022, Study on Design of Vertical Column Sectional Profile of Electronic Equipment Rack for Naval Ship, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 32, No. 3, pp. 236-242.

(7) Bae, S., Hong, C., Jeong, W., Park, Y. and Bin, J., 2010, Shock Resistance Analysis of a Propulsion Motor for Naval Vessels, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 20, No. 12, pp. 1183-1189.

(8) Kim, J. B., Park, Y. K., Park, M. S., Lee, J. H. and An, S. C., 2017, Evaluation of the Shock Resistance of a Gas Turbine Package, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 41, No. 10, pp. 1005-1009.

(9) ECSS (European Cooperation for Space Standardization), 2009, Space Engineering: Mechanisms, ECSS-E-ST-33-01C.

(10) VITA (VMEBUS International Trade Association), 2019, Common Requirements for Environments, Design and Construction, Safety, and Quality for VITA 47 Plug-in Modules Dot Standard, VITA 47.1.



**Daekeun Kim** received B.S. degree from Kookmin University in 2013 and he is currently majoring in Structural Vibration in Yonsei University and research engineer at Mechanical Engineering R&D Lab, LIG Nex1. He is especially interested in structural vibration and shock.



**Seonbin Lim** is graduate school student in mechanical engineering at Yonsei University and currently majoring in Structural Vibration. He is especially interested in vibration transmissions in electric vehicles.



**Jong-Hak Lee** is a chief research engineer and team leader at Mechanical Engineering R&D Lab, LIG Nex1. He received M.S. degree from Yonsei University. His research interests are shock/vibration and dynamics.



**HyunGyu Roh** received B.S. and M.S. degrees from Ajou University in 2016 and 2018. He is currently majoring in Structural Vibration in Yonsei University. He is especially interested in shock and vibration.



**No-Cheol Park** received B.S., M.S. and Ph.D. degrees from Yonsei University in 1986, 1988, and 1997, respectively. Dr. Park is currently a professor at the department of Mechanical Engineering in Yonsei University. His research interest is in Vibration &



radar & defense.

**Dong-Jun Shin** received M.S. degree in Science of Engineering from Seoul National University in 2009. He is chief research engineer in Mechanical Engineering R&D lab, LIG Nex1. His research areas include structural vibration and acoustics related to

Optics.