

고각 구동 유닛을 포함한 대형 레이더 구조물의 구조 안전성 분석

Structural Safety Analysis of Large Radar Structures with Elevation Drive Units

김 원 목* · 임 선 빈* · 김 대 근* · 이 종 학** · 김 흥 태**
장 은 정** · 송 기 연*** · 박 노 철†

Onemook Kim*, Seonbin Lim*, Daekeun Kim*, Jong-Hak Lee**, Heung-Tae Kim**,
Eun-Jeong Jang**, Ki Yeon Song*** and No-Cheol Park†

(Received March 4, 2024 ; Revised March 20, 2024 ; Accepted March 21, 2024)

Key Words : Large Radar(대형 레이더), Elevation Drive Unit(고각 구동 유닛), Buckling(좌굴), Transport Vibration(수송 진동), Mode Superposition Method(모드 중첩 방법)

ABSTRACT

This study deals with the structural safety analysis of large radar structures with elevation drive units. Large radar is an essential military equipment that detects the trajectory of the shell, tracks the launch point, and neutralizes the enemy weapon. A large radar is equipped above the military vehicles, with an elevation drive unit that can elevate quickly to detect shell trajectories at a desired position. However, large radars with elevation drive units are affected by various external forces depending on the angle of elevation and transportation environment. Furthermore, elevation drive units that control the angle of elevation are vulnerable to buckling. Large radar structures require high reliability of structural safety under various conditions for operation. This study analyzes the structural safety of a large radar structure with respect to the drive angle and external forces using finite element analysis. For this purpose, buckling safety of the elevation drive unit and main component stresses are analyzed. The results of the analysis showed that the large radar was structurally safe against stresses and buckling caused by external forces at various angles of inclination. In addition, it is structurally safe with respect to the random vibration PSD(power spectral density) during radar transportation.

기 호 설 명

A_{ij} : 단위 구속 변위로 인한 정적 변위
행렬과 그 요소
 C_{ij} : 모달 공분산 좌표계 행렬
 e : 단위 벡터

$[F]$: 외부 하중 벡터
 $H(\omega)$: 복소 주파수 응답 행렬
 $H^*(\omega)$: 복소 주파수 응답 켈레 행렬
 $[K_G]$: 미분 강성 행렬
 M_j, M_k : j, k 자유도 유효 질량

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

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

** LIG Nex1, Researcher

*** RF Systems, Researcher

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

‡ Recommended by Editor Jong-Seok Oh

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

- n : 전체 자유도 개수
- q : 비구속된 자유도 개수
- r : 구속된 자유도 개수
- $S_{u_d}(\omega)$: i 자유도 동적 응답 스펙트럼 밀도 함수
- $S_{u_{F_i}}(\omega)$: i 자유도 응답 스펙트럼 밀도 함수
- $S_{u_{P_i P_m}}(\omega)$: l 번째 및 m 번째 요소에서 절점력 가진의 교차 스펙트럼 밀도 함수
- $S_{u_{R_l R_m}}(\omega)$: l 번째 및 m 번째 요소에서 고정부 가속도의 교차 스펙트럼 밀도 함수
- $S_{u_s}(\omega)$: i 자유도 의사 정적 응답 스펙트럼 밀도 함수
- $\{u\}$: 절점 변위 벡터
- λ_i : 좌굴 계수
- $\sigma_{f_i}^2$: 상대 변위 응답 분산
- Γ_{ij} : j 번째 요소의 j 번째 모드에 대한 기여도 벡터
- ϕ : 모달 고유 벡터
- ω_i, ω_j : i 번째, j 번째 고유진동수

1. 서 론

현대 과학 기술의 발전으로 백병전 위주의 과거 전쟁 양상은 무인화와 정보전의 형태로 전쟁이 변화하고 있다. 특히 최근 우크라이나-러시아 전쟁에서 무인기, 미사일 등 빠르게 비행하는 물체를 이용하여 적을 공격하는 방식이 유의미한 결과를 내며 그 장점이 인정받고 있다. 이에 대응하기 위해 적의 포탄이나 비행체를 탐지하고 추적하기 위한 레이더 시스템의 개발이 주목받고 있다⁽¹⁾. 레이더는 전자파를 송신하고 타겟으로부터 반사되는 파를 수신하여 거리 차이에 의해 발생하는 시간 지연을 계산하는 방식으로 목표물까지의 거리를 측정한다⁽²⁾. 특히 고속 빔 조향이 가능한 고성능, 고신뢰성의 능동 위상 배열 안테나가 개발되면서 하나의 레이더로 다수의 표적을 동시에 탐색하고 추적하는 것이 가능해졌다^(3,4). 이를 이용하여 미사일이나 포탄의 궤도를 탐지하고 초기 발사점의 위치를 역추적하는 대포병 레이더는 현대전의 핵심 방어체계로 떠오르고 있다⁽⁴⁻⁶⁾. 특히 휴전국인 우리나라는 대포병 레이더의 국산화를 위해 많은 비용과 노력을 들이고 있다. 대포병 레이더처럼 거대한 레이더 구조물은 전시상태에서 사용되는 만큼 열적,

구조적으로 다양한 환경에서도 안전성과 성능을 유지할 수 있어야 한다^(7,8). 특히 차량으로 수송되어 기동성을 가지는 만큼, 차량 이송 간 발생할 수 있는 수송 진동에 대해서도 안전성을 확보해야 한다⁽⁹⁻¹¹⁾. 또한 레이더의 원활한 작동을 위해 기립각을 형성하는 고각 구동 유닛과 함께 사용될 수 있다. 이러한 고각 구동 유닛은 다른 부품에 비해 상대적으로 응력과 좌굴이 발생하기 쉬운 형태이므로 다양한 기립각에서 그 안전성을 검증해야 한다.

이 연구에서는 이러한 고각 구동 유닛을 포함한 대형 레이더 구조물의 구조적 안전성 분석을 다루었다. 이를 위해 대형 레이더의 유한요소 해석 모델을 구축하고 외력에 의해 주요 부품에서 발생하는 응력과 좌굴 특성을 분석하였다. 또한 레이더의 수송 진동에 의한 영향을 분석하기 위해 모드 해석을 진행하고 주요 모드를 중첩하여 차량 수송 간 발생할 수 있는 랜덤 진동에 대한 안전성을 분석하였다. 수송 진동에 대한 규격으로 기검증된 미 해군 규격인 MIL-STD-810H Method 514.8에⁽¹²⁾ 제시된 차량 이송 간 발생하는 3축 방향 파워 스펙트럼 밀도(PSD, power spectral density)에 대한 구조적 안전성을 분석하였다.

2. 유한요소 해석

2.1 해석 모델 구축

이 연구에서 대상으로 하는 구조물은 Fig. 1과 같이 고각 구동 유닛을 포함한 대형 레이더 구조물이다.

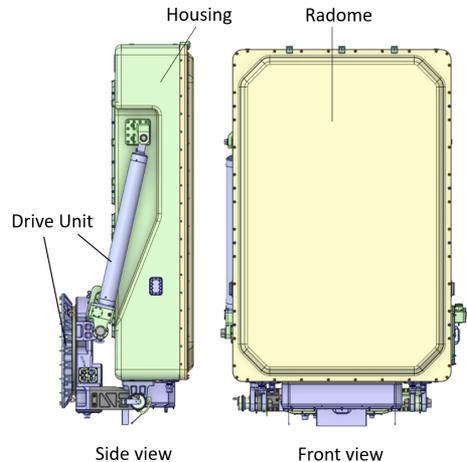


Fig. 1 Large radar

구성품으로는 전자파를 송수신하기 위한 방사관인 레이돔(radome), 내부 모듈과 결합된 하우징(housing), 방위각과 고각을 발생시키기 위한 구동부(drive unit)로 나뉜다. 원하는 방향의 비행체를 탐색/추적하며 기동성과 원활한 운용성 확보를 위해 대형 레이더는 고각과 방위각 방향으로 자유롭게 움직일 수 있도록 구성되어야 한다. 이를 위해 구동부는 고각 구동 조립체와 방위각 구동 유닛으로 나뉘어 각각 구동하도록 설계되었다. 특히 고각 구동 조립체는 하우징과 레이돔의 고각 형성을 위해 선형 피스톤을 포함한 4절 링크 구조로 구성된다. 연결된 모터의 구동에 의해 피스톤의 길이가 증가함에 따라 레이돔과 하우징은 Fig. 2와 같이 다양한 고각을 가질 수 있으며 일반적으로 최대 구동각인 80°의 고각 상태에서 운용하고 0°상태로 차량 수송한다.

대형 레이더처럼 복잡한 구조물을 시간과 비용을 절약하고 효과적으로 분석하기 위해 많은 연구에서 사용되는 검증된 상용 소프트웨어인 ANSYS mechanical 2022 R2를 이용하여 유한요소 해석하였다. 해석 결과에 큰 영향을 끼치지 않는 부품의 작은 홀이나 필렛 등을 생략하고 요소 수를 감소하여 해석 시간과 용량을 단축하도록 해석 모델을 작성하였다. 주요 응력을 받는 부위인 선형 피스톤과 연결핀은 볼트 형상을 보존하고 요소를 조밀하게 형성하였다. 작성한 유한요소 해석 모델의 요소 형상을 Fig. 3에 제시하였다. 해석 모델의 절점의 수는 1 867 324개, 요소의 수는 2 112 248개로 형성하였다. 대형 레이더는 방위각 구동 유닛의 바닥면이 차량에 단단하게 체

결되어 운용되므로 이 부분에 고정단-지지 경계 조건을 설정하였다.

2.2 안테나 기립 각도에 따른 좌굴 특성

대형 레이더 구조물은 TRM 소자를 포함한 다양한 전자장비를 포함하고 있어 고중량의 무게를 가진다. 이를 지지하는 선형 피스톤은 양 끝단에 핀 형태의 연결부로 하우징 및 방위각 구동 장치와 연결되는 양단 힌지(pinned-pinned) 구조로 체결된다. 양단 힌지 경계 조건을 가지는 기둥의 좌굴 길이 L_{eff} 와 좌굴 하중 P_{cr} 은 각각 식 (1) 및 식 (2)와 같이 작성할 수 있다. L 은 기둥의 높이, E 는 탄성 계수, I 는 단면 2차 모멘트이다.

$$L_{eff} = L \tag{1}$$

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \tag{2}$$

좌굴 해석은 미분 강성행렬 $[K_G]$ 을 계산하는 해석과 이를 이용하여 고유치(eigenvalue), 고유 벡터(eigen vector)를 계산하기 위한 해석으로 구분되는 2단계의 해석을 진행한다⁽¹³⁾. 계산 과정에서 이용되는 좌굴 계수(load multiplier) λ_i 는 식 (3)과 같다. 첫 번째 해석에 계산되는 외부 하중에 대한 미분 강성행렬에 대한 수식을 식 (4), 고유치 계산을 위한 수식을 식 (5)에 제시하였다. $F_{critical}$ 은 임계 하중, $F_{applied}$ 는 선형 피스톤에 축방향으로 인가되는 하중이다.

$$\lambda_i = \frac{F_{critical}}{F_{applied}} \tag{3}$$

$$F = \lambda_i [K_G] \{u\} \tag{4}$$

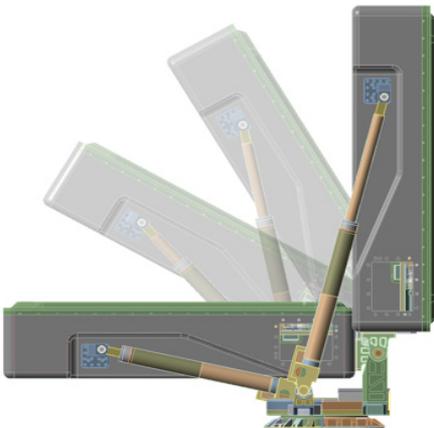


Fig. 2 Elevation driving simulation

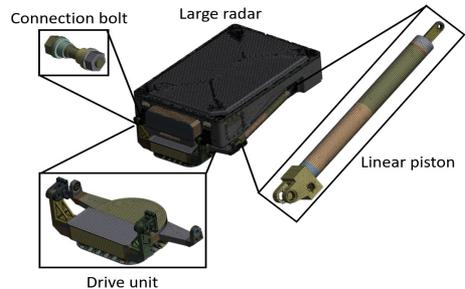


Fig. 3 Finite element model of large radar

$$([F] - \lambda_i [K_G]) \{u\} = 0 \tag{5}$$

이 연구에서는 이러한 계산 수식 방법을 이용하는 고유치 좌굴 해석(eigenvalue buckling)을 이용하여 고각 구동 유닛이 포함된 대형 레이더 구조물의 좌굴 해석을 하였다. 대표적인 40° 기립 시 발생하는 대형 레이더의 변형과 선형 피스톤의 압축 방향을 Fig. 4에 제시하였다.

식 (3)에 제시한 좌굴 계수를 이용하여 좌굴에 대한 안전성을 평가할 수 있다. 자중 환경하에서 기립각 상태에 따라 나타나는 단일 선형 피스톤 최대 압축력은 Fig. 5(a)와 같다. 기립에 따라 압축력이 Fig. 5(a)와 같이 감소하지만, 축력 또한 감소하므로 Fig. 5(b)와 같이 60° 기립각 상태에서 가장 낮은 load multiplier로 나타난다. 이는 60° 기립 상태에서 좌굴에 가장 취약하며, 이때를 기준으로 200배 이상의 안전 마진을 갖기 때문에 대형 레이더는 기립각에 상관없이 자중에 의해 발생할 수 있는 좌굴에 대해 충분히 안전하다는 것을 뜻한다.

2.3 안테나 운용 간 구조 안전성 분석

대형 레이더는 일반적으로 최대 구동각인 80° 기

Table 1 Wind load air properties

	Symbol	Unit	Value
Drag coefficient	C_D	-	1.2
Area	A	m ²	4.71
Density	ρ	kg/m ³	1.225
Velocity	V	m/s	26
Force	D	N	2340.2

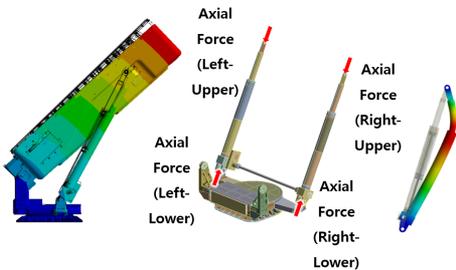
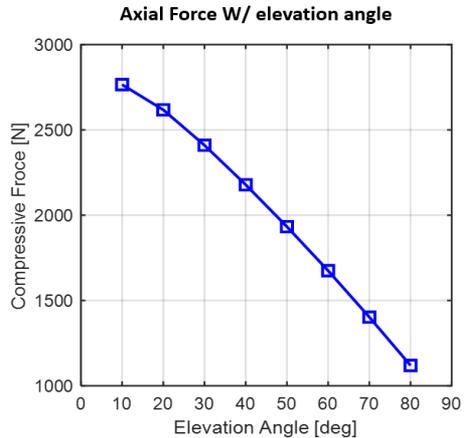


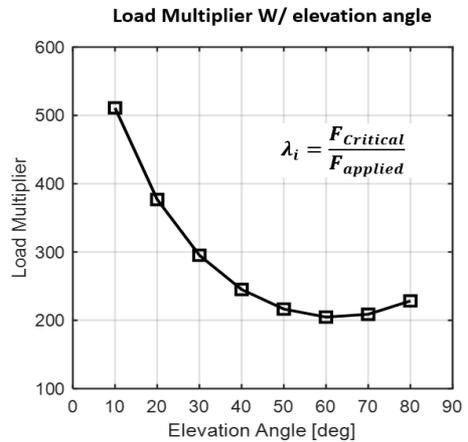
Fig. 4 Deformation of large radar

립각 상태에서 작동하여 대기 중에 노출되어 전자파를 송수신하므로 운용 시 면적이 넓은 레이돔에서 풍력에 의한 영향을 크게 받는다. 따라서 고각 구동 유닛 중 하나인 선형 피스톤은 이에 대해 구조적으로 안전성을 검증해야 한다. 레이돔에 작용하는 풍하중 계산 방법은 식 (6)과 같다. 대형 레이더의 풍하중을 인가받는 면의 중횡비를 고려하여 항력계수 C_D 는 1.2로 계산하였다⁽¹⁴⁾. 또한 레이더가 받을 수 있는 바람의 속도 V와 표준대기의 공기 밀도 ρ 를 고려하여 이를 Table 1과 같이 해석에 반영하였다. 유한요소 모델에 중력과 풍하중을 Fig. 6과 같이 인가하였다.

$$D = \frac{1}{2} C_D A \rho V^2 \tag{6}$$



(a) Compression force



(b) Load multiplier

Fig. 5 Buckling analysis results

이후 해석을 통해 외력에 의해 레이더에서 발생할 수 있는 응력에 대한 안전성을 분석하였다. 안전율에 대한 분석으로 안전 여유도(margin of safety, MOS)를 이용하였다. 이는 재료의 허용 가능 응력과 와 구조물에서 발생하는 최대 응력의 비에서 1을 뺀 값으로 MOS값이 양수일 경우 구조물에 소성 변형이 발생하지 않아 안전하다는 것을 의미한다. MOS에 대한 계산은 식 (7)과 같다.

$$MOS = \frac{\sigma_{allow}}{\sigma_{max}} - 1 \tag{7}$$

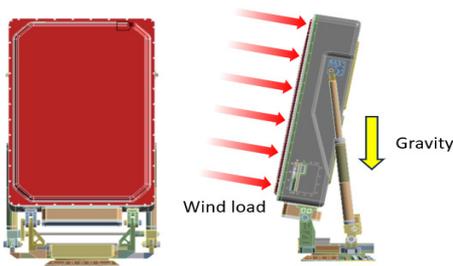


Fig. 6 Gravity & wind load direction

선형 피스톤과의 주요 체결 부위인 주요 체결부 및 연결 블록에서 발생하는 응력을 Fig. 7과 같이 분석하였다.

또한 레이더는 평탄한 지형 외에도 측면 비탈길에 정착하여 레이더를 구동하는 경우가 발생할 수 있으므로 측면 경사각에 따라 MOS를 분석하였다. 안테나 기립 및 자중 환경에 대해 주요 부품에서 발생하는 응력 및 구조 안전성을 Table 2와 같이 정리하였다(이 연구에서 제시하는 대형 레이더의 부품 정보 및 내부 구조 형상은 군사상의 문제로 정확한 수치를 표기하지 않는다).

분석 결과 최소 MOS는 7.96로, 안테나 운용 간 발생하는 풍하중과 자중으로 인해 발생하는 응력에 대해 10°의 경사각 이내로 대형 레이더가 충분히 안전하다는 것을 확인하였다.

2.4 수송 간 경사각의 영향성 분석

차량으로 수송되는 레이더는 다양한 환경에서 운용되며, 도로 등 평탄한 지형 외에도 산길처럼 험난한 지형에서도 안전하게 설계되어야 한다. 이를 위해 대형 레이더는 차량 수송 시 댐퍼 조립체 연결부를 이용하여 추가적인 지지를 해주는 구조로 설계되었

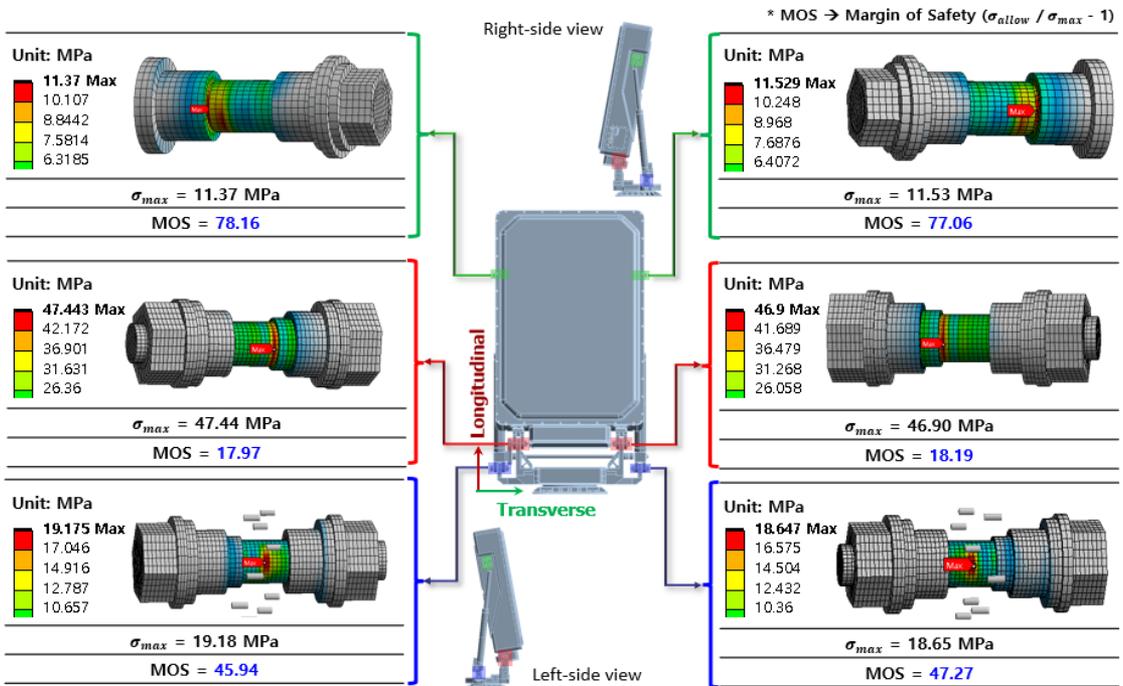


Fig. 7 Stress distribution of large radar connection bolt

다. 따라서 안테나 수송 간 대형 레이더의 차량과 연결되는 부위의 경계 조건을 Fig. 8과 같이 설정하였다. 차량 정면 방향 경사나 측면 비탈길 이동 시 발생할 수 있는 경사각에 의한 응력에 대해 구조적 안전성을 검증해야 한다. 이를 위해 수송 차량이 가질수 있는 경사각을 고려해 수평, 횡경사 11.3°, 종경사 31°의 3가지 경우에 대해 자중에 의해 수송 상태의 대형 레이더에서 발생하는 응력을 각각 분석하였다. 분석 결과 주요 부품에서 발생하는 응력 및 구조안전성을 Table 3과 같이 정리하였다.

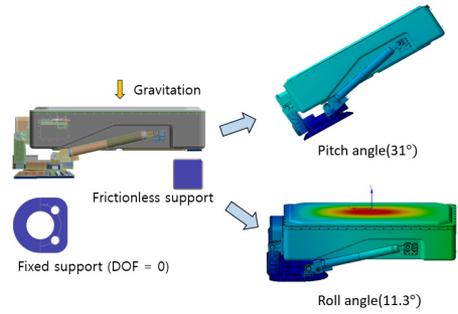


Fig. 8 Large radar vehicle transportation condition

Table 2 MOS analysis results of large radar by wind load

Order	Component	Material	MOS(roll angle)		
			(0°)	(5°)	(10°)
1	Connection bolt 1	A	78.16	69.58	62.92
2	Connection bolt 2	A	77.06	87.16	100.58
3	Connection bolt 3	A	17.97	16.49	15.29
4	Connection bolt 4	A	18.19	19.92	22.06
5	Connection bolt 5	A	45.94	43.76	41.93
6	Connection bolt 6	A	47.27	49.80	52.80
7	Linear piston (left)	B	36.21	33.76	31.71
8	Linear piston (right)	B	50.35	54.84	58.27
9	Hinge block 1	B	19.44	17.93	16.67
10	Hinge block 2	B	18.75	20.44	22.51
11	Hinge block 3	B	58.15	58.43	43.16
12	Hinge block 4	B	58.75	56.83	51.08
13	Antenna	B	39.09	39.36	38.32
14	Pipe assembly	C	122.21	121.95	122.62
15	Control unit	B	92.47	85.14	79.33
16	Control unit case	B	157.70	157.12	157.74
17	Housing assembly	B	13.72	10.88	7.96
18	Azimuth angle drive	B	21.98	15.10	11.32

Table 3 MOS analysis results of large radar in vehicle transport condition

Order	Component	Material	MOS		
			(0°)	Roll angle (11.3°)	Pitch angle (31°)
1	Connection bolt 1	A	163.45	81.08	84.20
2	Connection bolt 2	A	191.14	407.79	94.28
3	Connection bolt 3	A	119.94	64.76	40.21
4	Connection bolt 4	A	110.71	43.49	40.15
5	Connection bolt 5	A	175.30	64.07	39.46
6	Connection bolt 6	A	163.92	156.76	42.07
7	Linear piston (left)	B	218.31	71.20	55.47
8	Linear piston (right)	B	255.55	102.39	75.11
9	Hinge block 1	B	391.88	151.67	104.47
10	Hinge block 2	B	453.17	256.85	112.98
11	Hinge block 3	B	120.95	68.17	140.98
12	Hinge block 4	B	121.31	41.23	139.87
13	Antenna	B	29.05	30.47	38.79
14	Pipe assembly	C	63.82	65.15	73.50
15	Control unit	B	54.65	53.16	53.76
16	Control unit case	B	100.58	104.31	98.42
17	Housing assembly	B	40.07	28.41	25.60
18	Azimuth angle drive	B	48.03	39.72	35.52

2.5 수송 진동 해석

차량 이동 간 노면의 불규칙성으로 인해 발생하는 진동은 수송되는 구조물에 영향을 끼칠 수 있는 요소이다. 수송 진동에 대한 구조안전성 분석을 위해 미해군 군사 규격으로 제시된 MIL-STD-810H Method 514.8가 Fig. 9와 같다.

이 연구에서는 제시된 수송 진동에 대한 랜덤 진동의 파워 스펙트럼 밀도를 인가하기 위해 모드 중첩 방법(mode superposition method)을 이용한다. 다자유도 시스템의 운동 방정식으로부터 계산되는 i 자유도의 랜덤 진동에 대한 응답 스펙트럼 밀도 함수는 식 (8)과 같이 동적(dynamic), 의사 정적(pseudo-static) 그리고 이에 대한 공분산의 실수부로 구분된다⁽¹⁵⁾.

$$S_{u_{F_i}}(\omega) = S_{u_{d_i}}(\omega) + S_{u_{s_i}}(\omega) + 2Re[S_{u_{s_i}u_{d_i}}(\omega)] \quad (8)$$

이에 대한 각각의 기호가 의미하는 바는 식 (9)~식 (11)과 같다.

$$S_{u_{d_i}}(\omega) = \left[\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \phi_{ij} \phi_{ik} \left[\sum_{l=1}^q \sum_{m=1}^q \frac{\phi_{lj} \phi_{mk}}{M_j M_k} H_j^*(\omega) H_k(\omega) S_{P_l P_m}(\omega) + \sum_{l=1}^r \sum_{m=1}^r \Gamma_{lj} \Gamma_{mk} H_j^*(\omega) H_k(\omega) S_{u_{R_l} u_{R_m}}(\omega) \right] \right] \quad (9)$$

$$S_{u_{s_i}}(\omega) = \omega^{-4} \sum_{l=1}^r \sum_{m=1}^r A_{il} A_{im} S_{u_{R_l} u_{R_m}}(\omega) \quad (10)$$

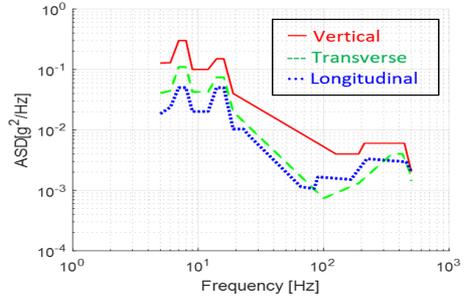


Fig. 9 MIL-STD-810H 514.8

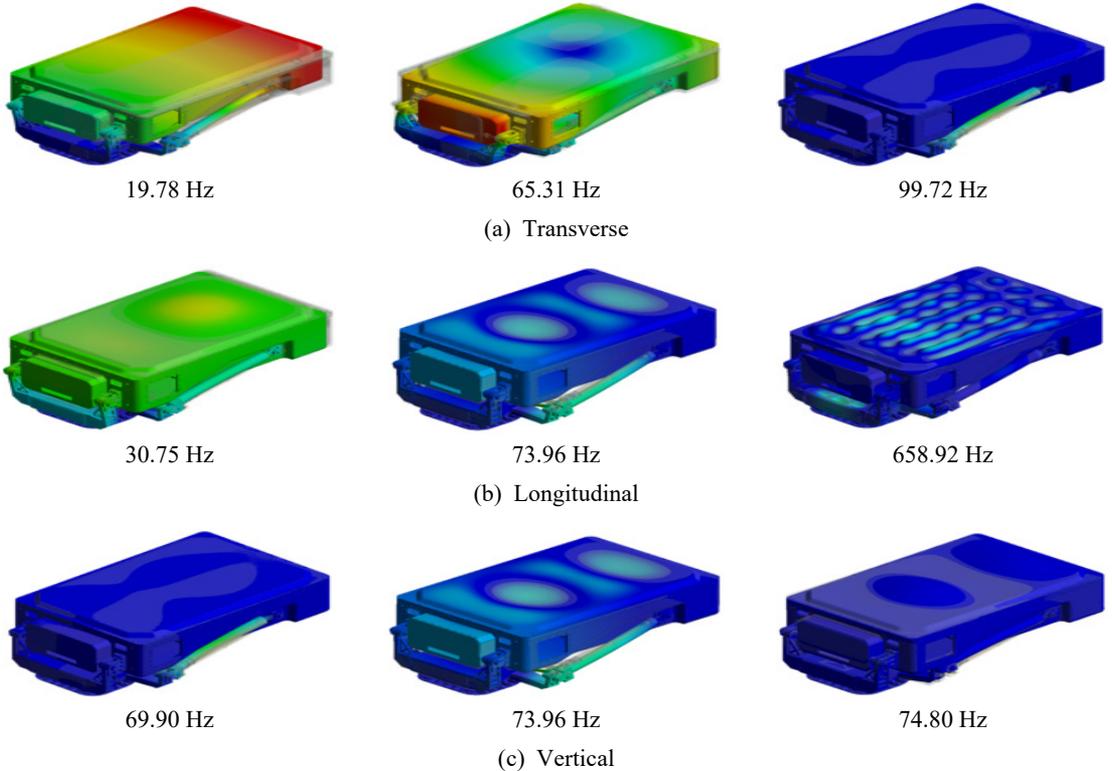


Fig. 10 Main mode of large radar based on effective mass

$$S_{u_s} S_{u_d}(\omega) = \omega^{-2} \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^r \sum_{m=1}^r \phi_{ij} A_{il} \Gamma_{im} H_j(\omega) S_{u_{R_l} u_{R_m}}(\omega) \tag{11}$$

$$\sigma_{f_i}^2 = \int_0^\infty S_{u_d}(\omega) d\omega \tag{12}$$

주요 관찰 부위가 아닌 체결부의 응답을 제외하고 PSD응답에 대한 상대 변위의 분산 수식은 식 (12)와 같이 계산된다⁽¹⁶⁾.

이를 아인슈타인 표기법을 이용하여 공분산 행렬에 대한 항으로 변경하고 식 (13)과 같이 표기할 수 있다.

$$\sigma^2 = \phi_i \phi_j C_{ij} \tag{13}$$

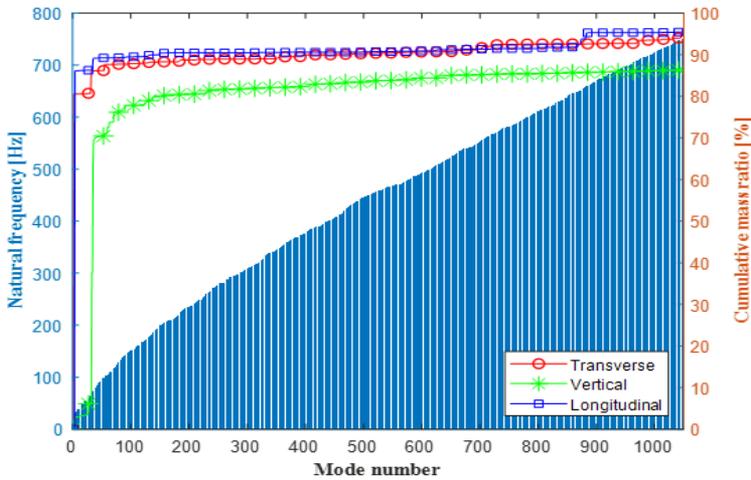


Fig. 11 Cumulative mass ratio and number of mode shape

Table 4 MOS random vibration analysis results of large radar

Order	Component	Material	MOS(axis)		
			Longitudinal	Transverse	Vertical
1	Connection bolt 1	A	8.09	58.27	10.96
2	Connection bolt 2	A	8.55	54.93	9.38
3	Connection bolt 3	A	2.82	12.30	5.48
4	Connection bolt 4	A	2.77	11.24	5.34
5	Connection bolt 5	A	3.94	22.58	7.50
6	Connection bolt 6	A	4.56	21.26	8.39
7	Linear piston(left)	B	4.27	32.96	7.95
8	Linear piston(right)	B	5.83	32.16	9.54
9	Hinge block 1	B	4.54	28.79	8.32
10	Hinge block 2	B	5.51	28.35	9.53
11	Hinge block 3	B	2.47	12.86	4.67
12	Hinge block 4	B	3.07	14.57	5.63
13	Antenna	B	14.65	22.98	8.43
14	Pipe assembly	C	38.55	53.32	38.79
15	Control unit	B	22.36	11.11	8.07
16	Control unit case	B	52.26	23.82	17.85
17	Housing assembly	B	1.63	4.55	3.43
18	Azimuth angle drive	B	8.00	21.78	10.15

이때 모달 공분산 좌표계 행렬 C_{ij} 는 식 (14)와 같다.

$$C_{ij} = \int_0^\infty \left(\frac{\phi_{ik} e_k}{\omega_i - \omega^2 + 2i\omega_i \xi_i \omega} \right) \left(\frac{\phi_{jk} e_k}{\omega_j - \omega^2 + 2i\omega_j \xi_j \omega} \right) d\omega \quad (14)$$

이처럼 랜덤 진동에 의한 시스템의 응답은 인가되는 PSD와 함께 시스템의 동적인 특성에 의해 결정된다. 이를 바탕으로 대형 레이더의 동특성을 분석하고자 모드 해석을 진행하였다. 모드 해석 결과 3축 방향 주요 모드 형상과 고유진동수를 Fig. 10에 제시하였다. 중첩하는 모드의 개수가 많을수록 랜덤 진동 해석의 정확도가 올라가지만, 많은 해석 시간과 해석 부하가 요구된다. 특히 이 연구에서 대상으로 하는 대형 레이더와 같은 거대한 구조물은 많은 요소로 이루어져 모든 모드를 계산하는 것이 현실적으로 제한된다⁽¹⁶⁾. 따라서 랜덤 진동을 위한 모드 해석 시 충분한 모드를 추출하여 해석의 정확도를 높이고 응답에 영향이 거의 없는 모드를 제외하여 해석 시간을 단축해야 한다. 이를 위해 이 연구에서는 전체 질량 대비 누적 유효 질량(cumulative mass ratio)을 85% 이상이 되도록 해석함으로써 750 Hz까지 총 1049개의 모드를 추출하였다. 대형 레이더의 모드 개수에 따른 3축 방향 누적 유효 질량을 Fig. 11에 제시하였다.

모드 해석 결과를 바탕으로 앞선 Fig. 9의 파워 스펙트럼 밀도를 차량에 구속되는 경계면에 3축 방향으로 인가하였다. 수송 진동 해석 결과 주요 부품에서 발생하는 최대 응력을 이용해 MOS값을 계산하였고 Table 4에 제시하였다. 해석 결과를 바탕으로 고각 구동 유닛을 포함한 대형 레이더는 이송 간 발생할 수 있는 수송 진동에 대해 모든 부품이 MOS 1.63 이상으로 안전함을 확인할 수 있었다.

3. 결 론

이 연구는 고각 구동 유닛을 포함한 대형 레이더 구조물의 구조 안전성 분석에 관한 내용을 다룬다. 대형 레이더는 원활한 운용을 위해 고각과 방위각을 자유롭게 형성하는 구동 유닛과 함께 차량으로 수송되어 다양한 외력을 받는다. 특히 고각 구동 유닛의 선형 피스톤은 좌굴이 발생하기 쉬운 구조이다. 대형 레이더는 전시에 사용되는 핵심 장비인 만큼 다양한

환경에서 성능 저하 없이 목표 성능을 유지하는 것이 중요하므로 이에 대한 구조적 안전성 검증이 필요하다. 이를 위해 이 연구에서는 구조물의 안전 여유도(MOS)를 이용하여 다양한 상태에서 대형 레이더 구조적 안전성을 검증하였다. 레이더의 운용 간 발생할 수 있는 기립각 상태에 따라 발생하는 좌굴 특성을 분석하였고, 차량 수송 간 발생할 수 있는 레이더 경사각에 의한 구조적 안전성을 검증하였다. 또한 노면의 불규칙성으로 인해 발생하는 진동에 대해 안전성을 검증하였다. 검증 방법으로 모드 해석을 이용해 주요 모드를 누적 유효 질량비 85% 이상 추출하고 모드 중첩 방법을 이용하여 미 해군 군사 규격인 MIL-STD-810H 518.4를 3축 PSD에 대한 구조적 안전성을 확인하였다. 이 연구에서 제시하는 검증 방법을 통해 구동 유닛을 포함한 대형 구조물이 기립각에 따라 발생하는 좌굴 특성을 분석하는 것이 가능하다. 또한 이 연구에서 제시되는 외력 이외에도 다양한 형태의 외력에 의한 구조 안전성 평가를 하는데 이 연구가 기여할 수 있다. 특히 수송 진동 해석시 적절한 갯수의 주요 모드를 중첩함으로써 적은 해석 부하와 해석 용량으로도 높은 정확도를 가지는 해석을 하는 것이 가능하다.

후 기

이 연구는 LIG Nex1 산학협력과제 지원으로 수행되었습니다.

References

- (1) Kim, I., Kim, T., Lee, J. and Kim, D., 2023, A Study on Fast Alignment of Active Electrically Scanned Array (AESA) Antenna, Journal of Korean Institute of Information Technology, Vol. 21, No. 12, pp. 137~144.
- (2) Piotrowsky, L., Jaeschke, T., Kueppers, S., Siska, J. and Pohl, N., 2019, Enabling High Accuracy Distance Measurements with FMCW Radar Sensors, Proceedings of IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 67, No. 12, pp. 5360~5371.
- (3) Hwang, I. S., Lee, Y.-R., Kim, J.-P., Jang, S. and Kim, S.-J., 2021, Design and Implementation of an X-band Low-profile Active Electronically Scanned Array for Airborne Radar, Journal of Korean Institute of Electromag-

netic Engineering and Science, Vol. 32, No. 2, pp. 127~143.

(4) Kim, K.-H., Kim, H., Kim, D.-Y. and Jin, H.-S., 2018, Development of Planar Active Phased Array Antenna for Detecting and Tracking Radar, Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 29, No. 12, pp. 924~934.

(5) Park, S.-J. and Jin, H.-S., 2020, Classification Type of Weapon using Artificial Intelligence for Counter-battery Radar Paper Title, Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 24, No. 4, pp. 921~930.

(6) Kang, S. S. and Lee, J., 2010, An Analysis of the Operational Effectiveness of Target Acquisition Radar, Journal of the Korea Society for Simulation, Vol. 19, No. 2, pp. 63~72.

(7) Kim, D., Lim, S., Roh, H. G., Lee, J., Shin, D. et al., 2023, Analysis of Structural Integrity and Performance of Antenna Device under Wartime Shock Loads, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 33, No. 6, pp. 627~635.

(8) Yim, S. H., Kim, H. T., Kang, Y., Lee, S. H. and Kwon, S. D., 2017, Study on Analysis and Experimental Validation of Wind Torque for Design of Drive Unit of Radar System, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 34, No. 9, pp. 609~616.

(9) Jeon, J. I., Lee, J. H., Kang, Y. S., Choi, J. H. and Kang, D. S., 2013, Analysis for the Dynamic Characteristics of the Moving Equipment for the large Radar Transportation, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 416~421.

(10) Shin, D., Ahn, S. H., Lee, J., Ryu, G.-H. and Kwon, M.-S., 2019, Analysis of Transport Dynamic Property for Lowbed Trailer and Vibration Specification Establishment of Large Radar, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 29, No. 5, pp. 632~638.

(11) Kim, H. T., Son, D. H., Kang, K. W. and Choi, J. H., 2013, Analysis for Structural Safety of a Vehicle-mounted Radar Mechanical Structure under Transportation Vibration, Proceedings of the KSNVE

Annual Spring Conference, pp. 422~423.

(12) U.S. Department of Defense, 2019, Test Method Standard for Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests, MIL-STD-810H, U.S. Department of Defense, Virginia, United States.

(13) Jo, J. R. and Jeong, H. Y., 2012, Numerical Research Method of High-depth Composite Cylindrical Shell, Bulletin of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 49, No. 3, pp. 19~24.

(14) Mohammed, M. G., Messerman, A. F., Mayhan, B. D. and Trauth, K. M., 2016, Theory and Practice of the Hydrodynamic Redesign of Artificial Hellbender Habitat, Herpetological Review, Vol. 47, No. 4, pp. 586~591.

(15) Harichandran, R. S., 1992, Random Vibration under Propagating Excitation: Closed-form Solutions, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 118, No. 3, pp. 575~586.

(16) Lee, E. H., Lim, S. B., Ra, C. W., Kim, H. T., Lee, J.-H. et al., 2022, Methodology for Determination of Main Modes for Transport Vibration Analysis of Large Radar, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 32, No. 4, pp. 375~383.



One Mook Kim is graduate school student in Mechanical Engineering at Soongsil University and currently majoring Structural Vibration in Yonsei University. He is especially interested in vibration analysis of actuator.



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 department of Mechanical Engineering in Yonsei University.