

대형 레이더의 수송 진동 해석을 위한 주요 모드 결정 방법론

Methodology for Determination of Main Modes for Transport Vibration Analysis of Large Radar

이 은 호* · 임 선 빈* · 라 치 웅* · 김 흥 태** · 이 종 학** · 강 석 원*** · 박 노 철†
Eun-Ho Lee*, Seonbin Lim*, Chiwoong Ra*, Heung-Tae Kim**, Jong-Hak Lee**,
Suk-Won Kang*** and No-Cheol Park†

(Received April 8, 2022 ; Revised May 31, 2022 ; Accepted June 9, 2022)

Key Words : Large Radar(대형 레이더), Transport Environment(수송 환경), Dynamic Characteristics(동특성), Mode Superposition(모드 중첩), Random Vibration Analysis(랜덤 진동 해석)

ABSTRACT

Securing the durability of transport vibration for large radars is essential. Transport vibration evaluation is performed via random vibration analysis. The response of random vibrations is determined by the covariance matrix, which is the correlation between the input power spectral density and dynamic characteristics of the radar. Therefore, in this study, the eigen-modes that have a dominant influence on the response are selected by normalizing the covariance matrix. Further, selective mode superposition ensures the accuracy of random vibration analysis. In addition, based on the analysis results, transport vibration durability evaluation for a large radar is performed.

기 호 설 명

a, b, c : 자유도
 C_{ij} : 공분산 행렬(covariance matrix)
 e : 단위 벡터(unit vector)
 $H(\omega)$: 전달 함수(transfer function)
 $H^*(\omega)$: 전달 함수의 복소 켈레 행렬
 n : 모드 중첩 개수
 r : 입력 PSD 개수
 S : 바닥 가진 PSD(base excitation PSD)
 S_{d_a} : a 자유도의 변위 응답 PSD
 γ : 참여 계수(participation vector)

ζ : 감쇠비(damping ratio)
 ϕ : 모달 벡터(modal vector)
 ψ : 모달 응력 벡터(modal stress vector)
 ω : 가진 주파수
 ω_i, ω_j : i 번째 및 j 번째 고유진동수
 σ^2 : 변위 응답 분산
 $(\sigma_{eq})_{nd}$: 절점 nd 의 등가 응력(equivalent stress)

1. 서 론

군용 레이더 장비는 일반적인 환경뿐만 아니라 전투 환경에서도 운용되어야 하기 때문에 가혹한 환경

† 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

*** RFsystems, Researcher

‡ Recommended by Editor Won Ju Jeon

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

에서 레이더의 구조건전성을 만족해야 하고 통신 및 탐지 성능을 만족해야 한다. 일반적으로 미국 국방부가 제정하는 군용 하드웨어의 환경 조건에 관한 표준 규격인 MIL-STD를 따라서 레이더 장비의 내구성과 정밀도에 대하여 엄격한 설계 기준이 적용된다⁽¹⁻⁴⁾. 규격에 따르면 레이더 장비의 이동, 수송, 인도, 운용 조건에서 열, 진동, 충격 등의 다양한 성능 평가가 이루어진다. 이러한 조건에 대하여 레이더 장비의 성능 평가 및 개발 목적의 다양한 연구가 수행되었다. Shin 등⁽⁵⁾은 대형 레이더의 기계 구조부에 대하여 풍하중, 빙부하, 진동 및 충격 하중 등에 대한 구조건전성, 구동안정성 및 열적 안정성을 고려한 개발 절차 및 설계 요구 조건을 종합적으로 도출하였다. 또한 이동식 레이더에 대하여 바람에 의한 외란으로 발생하는 진동을 규명하고 풍속 환경에서의 이동식 안테나 통신 성능 향상을 위한 설계 관점을 제시하는 연구가 수행되었다^(6,7). 이러한 연구의 연장선으로 이동식 레이더의 바람에 의한 진동을 저감하는 연구도 수행되었다⁽⁸⁾. 또한, 장갑차와 같은 궤도차량에 탑재되는 OTM(on the move) 레이더에 대하여 노면 충격 특성을 고려하여 프로파일을 생성하는 방법이 제시되기도 하였다⁽⁹⁾.

이와 같이 운용 환경, 목적, 형태의 레이더에 대한 다양한 연구가 활발히 진행되었다. 그 중에서 고정식 대형 레이더는 소형 레이더와는 다르게 최종 제작을 완료하고 일부 조립이 된 이후 레이더가 운용되는 위치에 설치하기 위하여 대형 트레일러로 각각의 조립품을 운반한다. 따라서 안테나 배열 소자 및 주요 레이더 센서 등이 트레일러로부터 전달되는 노면의 진동 및 충격 하중에 안전하게 보호되도록 설계되어야 한다. 차량으로부터 전달되어 레이더 구조물에 노출되는 진동 수준은 MIL-STD-810H⁽¹⁰⁾의 METHOD 514.8에 제시되어 있으며, 해당 수준의 가진에 대하여 구조건전성을 만족해야 한다.

이 연구에서는 대형 레이더의 수송 진동 환경에서의 구조건전성을 분석하기 위하여 유한요소 해석모형을 구축하고 모드 해석과 랜덤 진동 해석을 수행하였다. 그리고 모드 해석 결과에서 유효 질량비를 기준으로 주요 모드를 선정하였고 랜덤 진동 해석 계산과정의 공분산 행렬(covariance matrix)을 계산하여 주요 모드를 선별하였다. 각 기준에 따라 선별된 주요 모드의 차이를 분석하였고 랜덤 진동 해석에서 선

별된 각각의 주요 모드를 중첩하고 대형 레이더의 최대 응력 응답 차이를 분석하여 효과적으로 수송 진동 해석을 수행하는 방법을 제시하였다. 최종적으로 MIL-STD-810H에 제시된 차륜차량의 수직 방향, 수평 방향, 주행 방향의 3축 방향 수송 진동 입력 조건에서 대형 레이더의 구조건전성을 평가하였다.

2. 유한요소 해석

2.1 유한요소 해석 모델 구축

이 연구의 대상은 Fig. 1과 같이 매우 거대하고 고중량의 구조물이다. 고중량의 대형 레이더는 크게 안테나부와 구동부로 나눌 수 있다. 구동부는 레이더의 회전과 기립의 동력을 제공하는 구동장치(driving system)와 레이더의 회전력을 전달하고 구조적 지지 역할을 하는 플랫폼장치(platform system)로 나뉜다. 안테나부는 레이더 중앙부의 하우징프레임조립체(housing frame assembly)와 양쪽 측면의 배열소자프레임조립체(array element frame assembly)로 이루어져 주요 탐지 역할을 하는 주안테나와 아군과 적군을 식별하는 피아식별안테나(IFF antenna; identification friend or foe antenna)로 이루어진다.

대형 안테나가 수송될 때에는 하우징프레임조립체, 배열소자프레임조립체, 피아식별안테나, 구동장치, 플랫폼장치가 각각 대형 트레일러에 단단히 체결되어 이동된다. 총 5개의 대형 레이더를 구성하는 주요 조립부 중에서 탐지용 배열 소자와 다양한 전자 장비를 포함하여 수송 진동에 대한 구조건전성을 최우선적으로 확보해야 하는 하우징프레임조립체에 대하여 유한요소 해석모형을 구축하였다. 정적 및 동적 해석에 관련하여 기 검증된 전산 코드인 ANSYS Mechanical 2021R2 상용 유한요소 해석 프로그램을 이용하여 유한요소 해석모형을 구축하였다.

복잡한 대형 레이더에 대하여 효과적인 유한요소 해석모형을 구축하기 위하여 대형 레이더의 전체적인 거동에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단되는 작은 구멍, 필렛 등을 모델링 과정에서 생략하였다. 하우징프레임조립체의 전면에 고정되는 44개의 배열소자는 강체로 가정하여 각 배열 소자의 무게중심에 44개의 점질량으로 모사하였다. 레이더의 전체적인 뼈대 역할을 하는 프레임 구조물들은 서로 M16 볼트로 연결되는데, 92.1 kN의 초기 장력(pre-tension)을 가지고

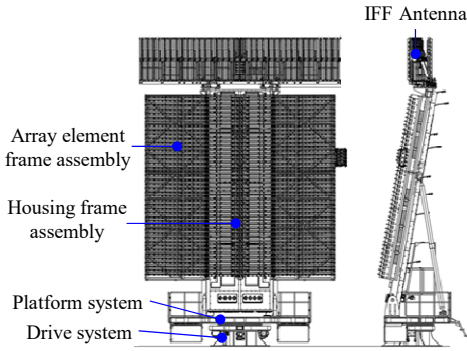


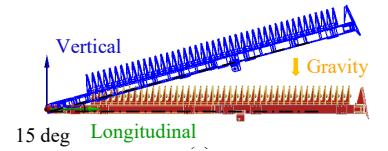
Fig. 1 Schematic diagram of large radar

체결되는 것으로 경계 조건을 선정하였다. 최종적으로 구축된 유한요소 해석모델은 사면체 요소와 육면체 요소로 구성하였다. 그리고 이 연구는 탄성 영역에서의 선형 해석이 목적이기 때문에 상대적으로 비선형 해석에 적합한 2차 요소를 사용하지 않고 각 방향으로 2개의 적분점을 사용하는 1차 요소 (SOLID185)를 이용하였다. 대형 레이더에 대한 유한요소 해석모델은 총 1 173 782개의 요소와 914 732개의 절점으로 이루어지며 Fig. 2에 나타났다. 하우징프레임조립체가 대형 트레일러에 탑재될 때 발생하는 각도인 15°를 유한요소 해석모델에도 적용하였다. 그리고 하우징프레임조립체의 측면의 총 8개의 체결부가 대형 트레일러에 고정된다. 실제로는 탭퍼와 같이 충격 및 진동을 완화시키는 장치가 적용되지만 가장 가혹한 수송 진동 조건을 가정하여 모든 체결부를 고정단으로 적용하여 충격 및 진동 흡수 장치가 소산시키는 에너지를 무시하였다.

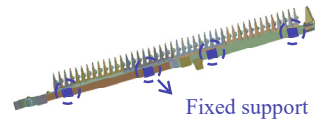
2.2 수송 진동 해석

MIL-STD-810H 에서 차량의 수송 진동 환경은 랜덤 진동(random vibration) 방법을 이용하여 시험 및 평가하도록 요구하고 있다. 이 연구에서는 구축한 유한요소 해석모델을 통하여 규격에 따라서 해석적인 방법으로 수송 진동 환경에 대한 대형 레이더의 진동 응답을 도출하였다.

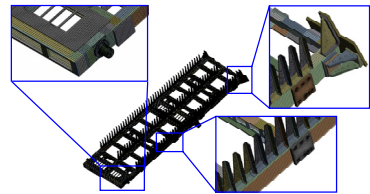
먼저, 각 프레임들을 연결하는 역할을 하는 볼트에 의한 체결력을 조사하고 중력에 의한 대형 레이더의 변형 및 강성 변화를 반영하기 위하여 정해석을 수행하였다. 정해석을 통하여 계산된 볼트로 연결된 프레임 간의 체결력과 중력에 의한 구조물 변형 및 강성



(a) Angle of inclination of the road



(b) Boundary conditions for mounting locations



(c) Constructed finite element model of the housing frame assembly

Fig. 2 Detailed information of finite element model

변화는 다음으로 수행될 모드 해석의 초기 조건 및 경계 조건으로 반영하였다.

수송 진동에 대한 랜덤 진동 해석은 모드 중첩을 기반으로 수행되기 때문에 모드 해석을 수행해야 한다. 대형 레이더가 차량에 탑재된 조건을 Fig. 2의 (b)와 같이 체결부를 고정단으로 반영하였다. 원하는 주파수 영역 내에서 고유진동수가 누락되지 않도록 모드를 추출하는 방법인 block lanczos method를 이용하여 모드 해석을 수행하였다. Fig. 3과 같이 749.76 Hz의 763차 모드까지 추출하였으며 모드 해석 결과에서 직교 좌표계의 독립적인 세 방향으로 유효 질량을 계산하였다. 누적 유효 질량은 차량의 수직 방향으로 93.65 %, 수평 방향으로 93.75 %, 주행 방향으로 90.00 %를 차지한다. 추출한 고유 모드의 누적 유효 질량이 대형 레이더의 전체 질량의 90 % 이상이므로 수송 진동 해석에서 모드 중첩을 하기 위하여 충분한 모드가 계산되었다.

일반적으로 모드 해석 결과에서 구조 진동 응답에 지배적인 영향을 미칠 것으로 예상되는 주요 모드를 판별할 때 유효 질량을 비교하며, 높은 유효 질량을 가지는 모드를 주요 모드로 판별한다. 따라서 모드 해석 결과에서 대형 레이더의 전체 질량에 대한 각 모드

의 3축 방향별 유효 질량비가 높은 순서대로 5개씩의 고유 모드를 Table 1에 정리하였다. 대형 레이더는 길이 및 폭에 비하여 두께가 얇고 길이가 긴 구조적 형상을 가지고 있기 때문에 수직 방향으로 저차 모드가 지배적이고 수평 및 주행 방향으로 상대적으로 주파

수가 높은 고차 모드가 주요 모드로 판별된다.

차량으로 전달되는 노면 진동 신호는 불규칙한 가속도로 구성된다. 불규칙한 신호는 가우시안 분포를 한다고 가정하고 주파수에 따른 신호의 성분을 파워 스펙트럼 밀도(PSD; power spectral density)로 나타낸다. 일반적으로 차량의 노면 진동은 가속도로 나타내어 Table 2 및 Fig. 4와 같이 가속 스펙트럼 밀도(ASD; acceleration spectral density)의 규격화된 입력 신호를 사용하여 랜덤 진동에 대한 확률적인 구조 응답을 도출한다. 단일 바닥 가진 입력 PSD에 대한 랜덤 진동 응답은 모드 중첩을 기반으로 식 (1)과 같이 기술된다^(11,12). 그리고 상대 변위의 분산은 식 (2)와 같이 계산되며 아인슈타인 표기법을 이용하여 모달 좌표계의 공분산 행렬에 대한 항으로 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

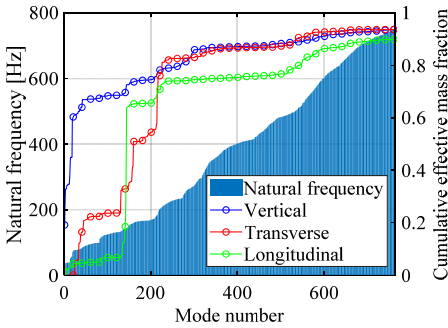


Fig. 3 Modal analysis results: number of extracted modes, natural frequencies and cumulative effective mass fraction

$$S_{d_n}(\omega) = \sum_{b=1}^n \sum_{c=1}^n \phi_{ab} \phi_{ac} \left(\sum_{s=1}^r \gamma_b \gamma_c H_b^*(\omega) H_c(\omega) S_s(\omega) \right) \quad (1)$$

Table 1 Main modes selected based on the effective mass of the modal analysis result

Vertical			Transverse			Longitudinal		
Mode #	Freq. [Hz]	Eff. mass ratio	Mode #	Freq. [Hz]	Eff. mass ratio	Mode #	Freq. [Hz]	Eff. mass ratio
1	34.89	0.1920	215	183.5	0.1323	144	143.6	0.2594
19	70.06	0.1426	160	159.5	0.09645	143	143.4	0.1533
2	36.61	0.07127	131	133.8	0.08726	135	139.0	0.04275
3	36.66	0.06528	34	78.69	0.06145	142	143.3	0.03930
14	50.32	0.05612	217	193.0	0.04243	141	143.1	0.03840

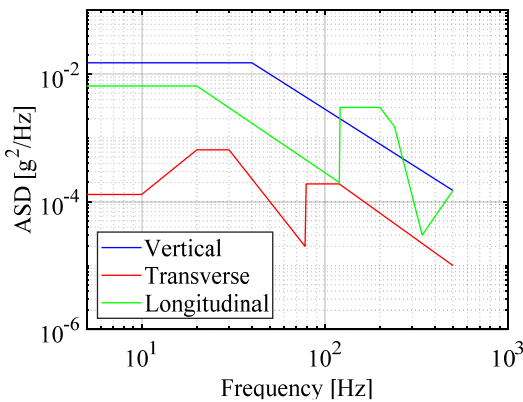


Fig. 4 Three-directional input acceleration spectral density

Table 2 Three-directional input values of acceleration spectral density

Vertical		Transverse		Longitudinal	
Freq. [Hz]	ASD [g ² /Hz]	Freq. [Hz]	ASD [g ² /Hz]	Freq. [Hz]	ASD [g ² /Hz]
5	0.015	5	0.00013	5	0.0065
40	0.015	10	0.00013	20	0.0065
500	0.00015	20	0.00065	120	0.0002
RMS = 1.08 g		30	0.00065	121	0.003
		78	0.00002	200	0.003
		79	0.00019	240	0.0015
		120	0.00019	340	0.00003
		500	0.00001	500	0.00015
		RMS = 0.21 g		RMS = 0.76 g	

$$\sigma^2 = \int_0^\infty S_{d_n}(\omega) d\omega \tag{2}$$

$$\sigma^2 = \phi_i \phi_j C_{ij} \tag{3}$$

공분산 행렬은 식 (4)와 같이 계산된다. 랜덤 진동에 대한 등가 응력 평균 제곱 응답(equivalent stress mean square response)은 식 (5)와 같이 모달 응력 벡터와 공분산 행렬로 계산되며 연산자 [A]는 식 (6)과 같다.

$$C_{ij} = \int_0^\infty \left(\frac{\phi_{ac} e_c}{\omega_i^2 - \omega^2 + i(2\omega_i \omega \zeta_i)} \right) \times \left(\frac{\phi_{bc} e_c}{\omega_j^2 - \omega^2 - i(2\omega_j \omega \zeta_j)} \right) S(\omega) d\omega \tag{4}$$

$$(\sigma_{eq}^2)_{nd} = \sum_i^n \sum_j^n \{\psi_j\}_{nd}^T [A] \{\psi_k\}_{nd} C_{ij} \tag{5}$$

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{2} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.3 \end{bmatrix} \tag{6}$$

최종적인 랜덤 진동에 대한 등가 응력 응답은 3-sigma 규칙을 따라 등가 응력의 RMS(root mean square) 값에 1, 2, 3을 곱하여 등가 응력 상한에 대한 보수적인 추정치를 산출한다.

예를 들어 랜덤 진동 해석의 3-sigma 등가 응력 결과는 계산된 값보다 작거나 같을 가능성이 99.73% 임을 나타낸다. 식 (5)를 통하여 랜덤 진동에 대한 구조물의 등가 응력 응답은 파워 스펙트럼 밀도 가진력과 구조물의 동특성 간의 상관관계로 결정됨을 알 수 있다.

2.3 공분산 행렬 계산 및 주요 모드 선별

2.2절 수송 진동 해석에서 랜덤 진동 응답은 입력으로 하는 파워 스펙트럼 밀도와 구조물의 동특성의 상관관계로 결정됨을 확인하였다. 따라서 해당 상관관계의 지표인 공분산 행렬을 계산하여 랜덤 진동 응답에 지배적인 영향을 미치는 대형 레이더의 고유 모드를 선별할 수 있다.

노면으로부터 전달되는 차량 진동에 대한 입력은 수

직 방향, 수평 방향, 주행 방향 각각 총 세 방향의 독립적인 입력으로 주어지고 각 방향의 입력은 직교성을 만족하기 때문에 각 방향에 대한 공분산 행렬을 계산하였다. 각 방향별로 계산된 공분산 행렬에 대하여 식 (7)과 같이 정규화하여 공분산 비율(covariance ratio)을 계산하여 Fig. 5에 나타냈다.

$$\text{Covariance ratio} = \frac{C_{ij}}{\text{Max}(C_{ij})} \tag{7}$$

수직 방향에 대한 공분산 비율의 대부분을 1차 모드가 차지하며 15차 모드 이하의 저주파수 고유 모드의 공분산 비율이 상대적으로 높다. 반면에, 수평 방향에 대한 공분산 비율은 약 30차 모드와 50차 모드 사이에서 높은 값을 나타내며, 상대적으로 고주파수 고유 모드인 100차 모드에서 150차 모드 사이에서도 공분산 비율이 일부 높게 나타난다. 마지막으로 주행 방향의 공분산 비율은 3차 모드에서 가장 높으며 약 140차 모드에서도 비교적 높은 값을 나타낸다. 계산된 공분산 비율이 높은 순서대로 고유 모드를 Table 3에 정리하였다.

Table 1과 Table 3을 비교하면 모드 해석을 통하여 유효 질량비를 기준으로 선정한 주요 모드와 공분산 비율을 기준으로 선정한 주요 모드는 일부 모드가 공통되지만 서로 다른 모드를 구조 응답에 지배적인 영향을 미칠 것으로 예상되는 주요 모드로 판별한다. 수직 방향에 대해서는 4개의 공통된 모드를 주요 모드로 선정하지만, 수평 방향 및 주행 방향에 대해서는 2개의 공통된 모드를 주요 모드로 선정하여 각 기준에 따라서 선정되는 주요 모드가 크게 상이하다. 그리고 공분산 비율을 기준으로 선정한 대형 레이더의 주요 모드가 상대적으로 저주파 대역의 저차 모드이다. 이는 공분산 비율을 계산할 때 입력으로 사용되는 파워 스펙트럼 밀도가 포함되기 때문이다. 3축 방향의 입력 파워 스펙트럼 밀도가 모두 40 Hz 이하의 저주파 대역에서 높은 가진 수준을 나타내므로 저차 모드에 대한 공분산 비율 계산값이 높아 상대적으로 저차 모드가 주요 모드로 선정되는 것이다. 즉, 공분산 비율을 기준으로 주요 모드를 판별하는 것은 입력 신호의 주파수 특성을 고려하여 응답에 영향을 미칠 수 있는 고유 모드를 판별할 수 있다.

유효 질량비와 공분산 비율에 대한 기준으로 각각 선정된 5개의 주요 모드(Table 1, 3)를 중첩하여 랜덤

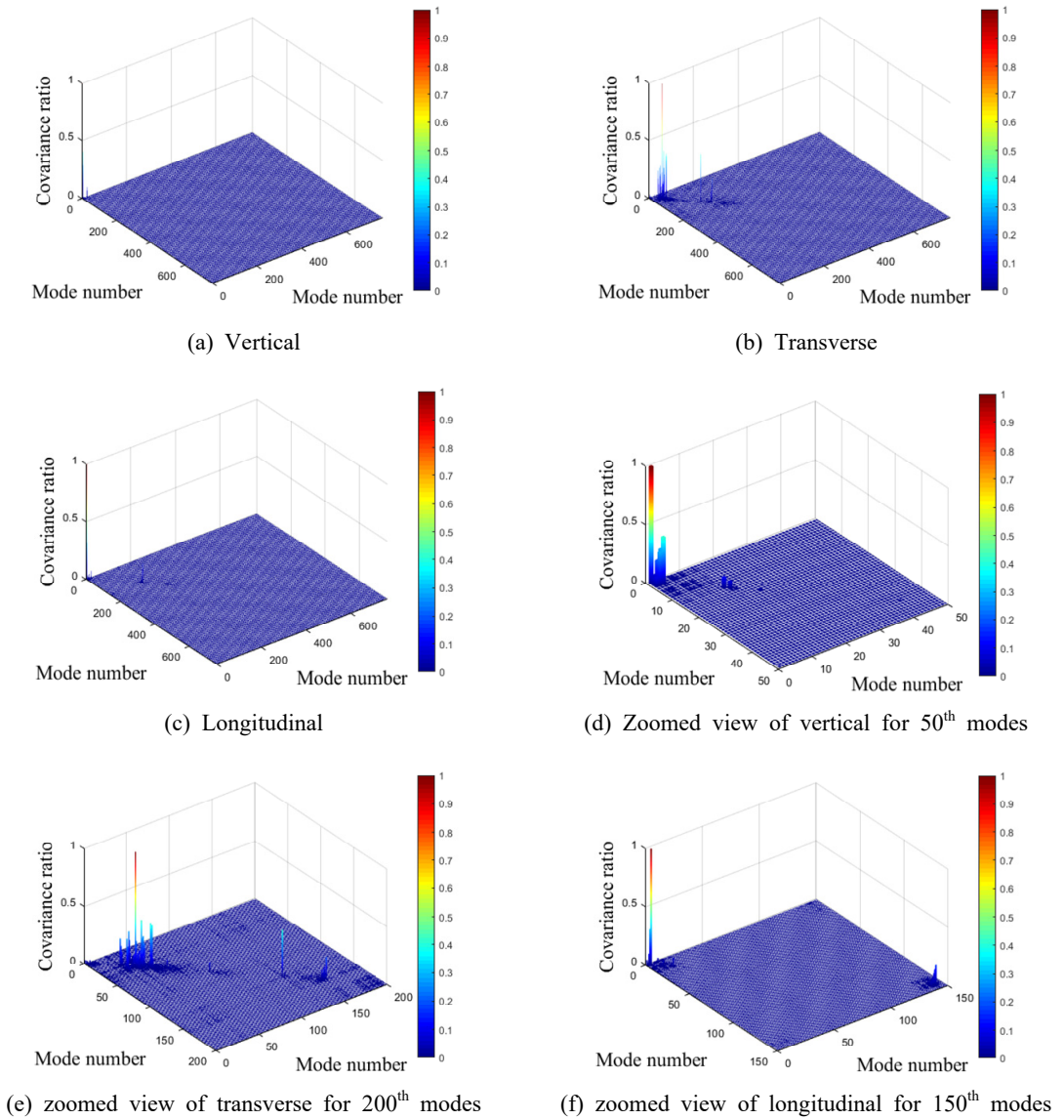


Fig. 5 Calculated covariance ratio for all modes

Table 3 Main modes selected based on the calculated covariance ratio

Vertical			Transverse			Longitudinal		
Mode #	Freq. [Hz]	Covariance ratio	Mode #	Freq. [Hz]	Covariance ratio	Mode #	Freq. [Hz]	Covariance ratio
1	34.89	1.000	34	78.69	1.000	3	36.66	1.000
3	36.66	0.4067	38	81.17	0.4161	144	143.6	0.1698
2	36.61	0.2014	131	133.8	0.4114	143	143.4	0.09721
13	41.38	0.1013	44	86.15	0.3967	2	36.61	0.09522
14	50.32	0.07201	45	86.79	0.3744	14	50.32	0.07560

진동 해석을 수행하여 응답 차이를 Table 4에 비교하였다. 대형 레이더의 총 질량 대비 90% 이상의 누적 유효 질량을 차지하도록 763개의 모드를 중첩하여 랜덤 진동 해석한 결과를 reference로 하여 유효 질량을 기준으로 선별한 주요 모드 5개를 중첩하여 수직, 수평, 주행 방향으로 랜덤 진동 해석을 수행한 결과는 각각 9.87%, 31.2%, 35.9%의 오차를 나타낸다. 반면, 공분산 비율을 기준으로 선별한 주요 모드 5개를 중첩하여 수직, 수평, 주행 방향으로 랜덤 진동 해석을 수행한 결과의 오차는 각각 0.823%, 11.6%, 7.08%로 상대적으로 정확한 해석 결과를 나타낸다. 수직 방향의 경우에는 유효 질량 기준과 공분산 비율 기준으로 선별된 주요 모드가 4개의 공통된 모드를 포함하기 때문에 랜덤 진동 해석 결과 차이가 상대적으로 낮다. 하지만 수평 및 주행 방향의 경우에는 각각 2개의 공통된 모드를 포함하고 유효 질량을 기준으로 선별된 주요 모드는 5개의 고유 모드만으로도 공분산 비율이 0.07수준으로 떨어져 응답에 지배적인 영향을 미치는 고유 모드를 대부분 포함한다. 하지만 수평 방향의 경우에는 5개의 고유 모드만으로는 공분산 비율이 0.37의 높은 수준이다. 즉, 수평 방향의 경우에는 응답에 영향을 미치는 고유 모드가 더 존재하며 이러한 이유로 수평 방향의 랜덤 진동 해석 결과의 오차가 11.6%로 수직 및 주행 방향의 해석 결과의 오차보다 높은 수준으로 나타난다.

이와 같이 공분산 비율을 기준으로 주요 모드를 선정하고 중첩한 해석 결과가 유효 질량을 기준으로 주요 모드를 선정하고 중첩한 해석 결과에 비하여 상대적으로 정확하다. 이는 공분산 행렬을 계산할 때, 각 고유 모드의 유효 질량뿐만 아니라 입력 성분이 응답

에 기여하는 정도를 함께 고려하기 때문이다. 따라서 공분산 비율을 기준으로 주요 모드를 선별하고 모드 중첩하여 랜덤 진동 응답을 도출하면 상대적으로 높은 정확성을 나타내는 해석 결과를 도출할 수 있다.

2.4 수송 진동 내구성 분석

공분산 비율을 기준으로 대형 레이더 탑재 차량의 수직 방향, 수평 방향, 주행 방향에 대하여 각각 5개의 주요 모드를 모두 포함할 수 있도록 143.61 Hz의 144차 모드까지 모드 중첩하여 수송 진동 해석을 수행하였다. 3축 방향에 대하여 동시에 파워 스펙트럼 밀도를 입력하여 랜덤 진동 해석을 수행하였고 대형 레이더에 대하여 수송 진동 내구성 분석을 수행하기 위하여 안전 여유도(M.S.; margin of safety)를 계산하였다. 안전 여유도는 식 (8)과 같이 대형 레이더 구조물 재료의 피로 한도 대비 작용하는 응력의 비율로 계산되며 안전 여유도가 0보다 크면 구조물이 안전한 것으로 판단할 수 있다. 이때 대형 레이더 구조물의 재료는 aluminum 6061이고 S-N 선도에서 10^7 사이클의 반복하중에 대한 피로 강도 값을 피로 한도로 이용하였다⁽¹³⁾.

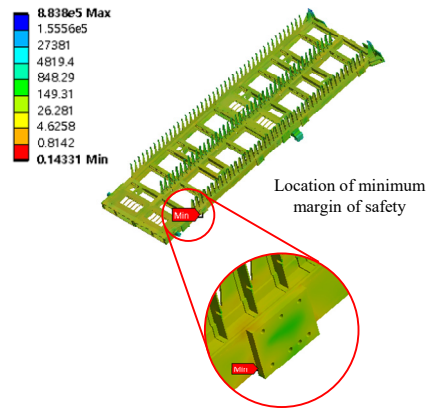


Fig. 6 Margin of safety distribution of large radar

Table 4 Random vibration analysis results by mode super-positioning the main modes selected based on the effective mass of modal analysis and the calculated covariance ratio

Random vibration analysis result		Max. Equiv. stress [MPa]		
Direction		Vertical	Transverse	Longitudinal
Reference		172.53	23.252	36.437
Main mode selection criteria	Effective mass	189.57	15.999	49.522
	Covariance ratio	173.95	20.555	33.856

$$M.S. = \frac{\text{Fatigue Limit}}{\text{Factor of Safety} \times \text{Applied Stress}} - 1 \quad (8)$$

안전 여유도를 계산할 때 필요한 안전계수(factor of safety)는 구조물에 작용하는 하중의 불확실성을 고려하여 안전율 1.50을 사용하였다⁽¹⁴⁾. 대형 레이더의 모든 부재에 작용하는 최대 등가 응력을 기준으로 안전 여유도를 계산하였고, Fig. 6에 계산된 안전 여유도의 분포를 나타냈다. 대형 레이더가 트레일러에 고정되는 위치인 사이드 블록과 부재가 연결되는 접합부에서 가장 낮은 안전 여유도가 계산되었다. 사이드 블록과 부재가 연결되는 접합부의 안전 여유도 최솟값은 0.14331이고 모든 부재에 대하여 안전 여유도가 0보다 높은 값으로 계산되었다. 따라서 수송 진동 환경에서 대형 레이더가 안전한 것으로 판단할 수 있다.

3. 결 론

이 연구는 수송 진동 환경에서 대형 레이더의 진동 내구성을 분석하기 위하여 수행되었다. 수송 진동 응답은 랜덤 진동 해석을 통하여 도출하는데, 효율적인 랜덤 진동 해석을 위하여 구조 응답에 지배적인 영향을 미치는 주요 모드를 선정하여 해당 모드를 포함할 수 있도록 모드 중첩을 수행한다. 이때 일반적으로 모드 해석 결과의 유효 질량비를 기반으로 주요 모드로 선정한다. 하지만 이 연구에서 제시하였듯이 랜덤 진동 응답은 공분산 행렬로 결정되며, 공분산 행렬을 정규화한 공분산 비율을 기준으로 주요 모드를 선정하면 입력 파워 스펙트럼 밀도를 고려할 수 있기 때문에 효과적으로 주요 모드를 선정할 수 있다.

이 연구에서는 공분산 비율을 기준으로 입력 방향별로 총 5개의 주요 모드를 도출하였고, 해당 주요 모드만을 중첩하여 랜덤 진동 해석을 수행한 결과의 정확성을 검토하였다. 최종적으로 3축 수송 진동 입력에 대한 대형 레이더의 안전 여유도를 계산하여 대형 레이더의 진동 내구성을 평가하였다. 이 연구에서 제시하는 방법론인 공분산 비율을 기준으로 주요 모드를 선별하는 방법은 수송 랜덤 진동 해석 결과에 지배적인 영향을 미치는 고유 모드를 판별할 수 있으며, 판별된 고유 모드는 주행 진동 저감에 관심을 가져야 하는 진동 모드로 구조 개선에 활용할 수 있다. 이 연

구를 확장하여 정확하고 효율적인 랜덤 진동 해석을 위한 주요 모드를 판단하는 기준으로 적절한 공분산 비율에 대한 일반화가 진행된다면, 복잡한 구조물에 대하여 효과적인 수송 진동 해석 방법론이 개발될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- (1) U.S. Department of Defense, 2008, Test Method Standard for Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests, MIL-STD-810G.
- (2) U.S. Department of Defense, 1985, Military Standard: Specification Practices, MIL-STD-490A.
- (3) U.S. Department of Defense, 1963, Military Standard: Test Reports, Preparation, MIL-STD-831.
- (4) U.S. Department of Defense, 2018, Interface Standard: Interoperability of SHF Satellite Communications Terminal, MIL-STD-188-164C.
- (5) Shin, D. J., Lee, J. H. and Kang, Y. S., 2017, Development Process of Mechanical Structure for a Large Radar, Journal of the KIMST, Vol. 20, No. 1, pp. 1~11.
- (6) Kim, S. H., Jeon, J. I., Kim, B. J., Lee, J., Choi, J. H. and Hwang, K. M., 2016, The Study on a Correlation among Wind Vibration and Aiming Performance of Radio Wave for a Large Satellite Communication System on the Truck, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 26, No. 6, pp. 744~754.
- (7) Kim, S. H., Kim, B. J., Lee, J., Kang, D. S. and Lee, H. S., 2017, A Vibration Response Analysis of Large Offset Antenna in the Wind, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 27, No. 3, pp. 318~326.
- (8) Lee, E. H., Jeon, J. I., Jeong, E. B. and Park, N. C., 2020, Methodology of Vibration Reduction for Satellite Communication Antenna in Large Fan Operating Environments, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 30, No. 6, pp. 553~562.
- (9) Suh, S. W., Lee, E. H., Lee, S. H., Kwak, D. H., Kim, C. N. and Park, N. C., 2020, Development of Vibration Profiles of Tracked Vehicle with On-mount Equipment using Driving Characteristics, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering,

Vol. 30, No. 4, pp. 389~395.

(10) U.S. Department of Defense, 2019, Military Standard: Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests, MIL-STD-810H.

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

(12) Chen, M. T. and Ali, A., 1998, An Efficient and Robust Integration Technique for Applied Random Vibration Analysis, Computers & Structures, Vol. 66, No. 6, pp. 785~798.

(13) Zhang, Q., Zhu, Y., Gao, X., Wu, Y. and Hutchinson, C., 2020, Training High-strength Aluminum Alloys To Withstand Fatigue, Nature Communications, Vol. 11, Article No. 5198.

(14) Hwang, T. K., Lim, O. K., Lee, J. S. and Lee, J. O., 2003, Optimum Design of Bracket for Satellite Antenna, Proceedings of the KSME Annual Spring Conference, pp. 451~455.



Heung-Tae Kim is a research engineer at C4ISTAR Mechanical Engineering R&D Lab, LIG Nex1. He received the M.S. degree in mechanical design engineering from Chungnam National University, Korea in 2012.



Jong-Hak Lee is a research engineer at Mechanical Engineering R&D Lab, LIG Nex1. He received the degree of master from Yonsei University. His research interests are shock/vibration and dynamics.



Suk-Won Kang is a member of RFsystems technical laboratory and in charge of mechanical design.



Eun-ho Lee received B.S. degrees from Yonsei University in 2016 and he is currently majoring in Structural Vibration in Yonsei University. He especially is interested in NPP component and structural vibration.



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.



Chiwoong Ra is graduate school student in mechanical engineering at Yonsei University. His research interests include structural vibration, non-linear finite element analysis especially in NPP piping systems.



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 & Optics.