

대형레이다 수송 동특성 외란 규격 정립 및 내구성 분석

Environmental Specification Establishment of Transport Dynamic Property for Large Radar and Durability Analysis

신 동준[†] · 이 상 정* · 이 중 학** · 강 광 희** · 진 형 석** · 김 관 성***
Dong-Jun Shin[†], Sang-Jeong Lee*, Jong-Hak Lee**, Kwang-Hee Kang**,
Hyoung-Seog Jin** and Kwan-Sung Kim***

(Received August 1, 2018 ; Revised September 14, 2018 ; Accepted September 14, 2018)

Key Words : Large Radar(대형레이다), Transport(수송), Environmental Specification(환경규격), Durability Analysis(내구성 분석), Vibration and Shock(진동 및 충격), Margin of Safety(안전여유)

ABSTRACT

Since the large radar is exposed to the vibration & shock load of the road during vehicle transport, core radar sensors such as an antenna array element including a digital transmitter receiver module (DTRM) should be designed to be safely protected. In this study, vibration and shock environment analysis was carried out in accordance with the procedure for analyzing durability in the transport of large radars, and random vibration (PSD) and shock response spectrum (SRS) analysis was performed by setting environmental specification based on tests and theories. As a result of durability analysis, the largest maximum stress occurred in the DTRM housing assembly, so structural reinforcement was performed. Finally, the margin of safety for vibration and shock was improved from 1.28 to 6.88 and from 1.3 to 9.65, respectively.

기 호 설 명

D : Bump 길이
 H : Bump 높이
 ν : Bump 통과 속도
 x : 1-자유도 레이더 차량의 변위
 y : 1-자유도 바닥 변위
 z : 1-자유도 상대 변위
 $z = y - x$: Bump 통과 운동 방정식
 m : 레이더 및 차량의 질량

c : 레이더 차량 서스펜션 점성 계수
 k : 레이더 차량 서스펜션 강성 계수
 ω_n : 레이더 차량 서스펜션 고유진동수
 ξ : 레이더 차량 서스펜션 감쇠 계수

1. 서 론

현대 전장에서 장사정포, 항공기, 유도탄, 탄도탄 등과 같은 공중 위협의 종류와 공격 능력이 날로 증가하고 있으며, 아군의 레이더 탐지체계로부터 회피하기 위한 스텔스화로 인하여 피탐 거리가 축소되

[†] Corresponding Author; Member, LIG Nex1
E-mail : dongjun.shin@lignex1.com
* Yonsei University
** LIG Nex1
*** Agency of Defense Development

A part of this paper was presented at the KSNVE 2018 Annual Autumn Conference
‡ Recommended by Hyung Jo Jung
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

고, 저피탐 성능이 증가되고 있다. 레이더는 고기동화/스텔스화/지능화되어가는 공중 위협에 대한 탐지능력을 높이기 위해 다중 센서 융합, 자동 표적 인식 기법, 레이저 레이더 기술 등 고성능 3차원 탐지 기술을 적용한 다기능 레이더로 발전하고 있으며⁽¹⁾, Fig. 1의 탐지 거리 700 km 이상이 되는 고효율레이더와 같이 차량 이동이 가능한 대형화가 되어가는 추세이다.

이러한 대형레이더는 차량으로 이동하면서 노면의 진동/충격 하중에 노출되기 때문에, 디지털 반도체송수신조립체(DTRM)를 비롯한 안테나 배열 소자들의 핵심 레이더 센서 등이 안전하게 보호되도록 설계되어야 한다. 이 논문에서는 대형레이더의 수송 동특성 외란 규격 정립을 위한 진동 및 충격 환경 분석을 진행하고, 시험 및 이론을 바탕으로 한 환경 규격을 설정하여 이에 따라 수송 진동/충격 내구성 분석을 수행하였다.

2. 수송환경 분석

2.1 진동 및 충격 환경 분석

(1) 진동 환경 분석

내구성 분석에 사용될 진동 입력을 규정하기 위해 레이더 시스템의 동특성 분석이 선행되었다.

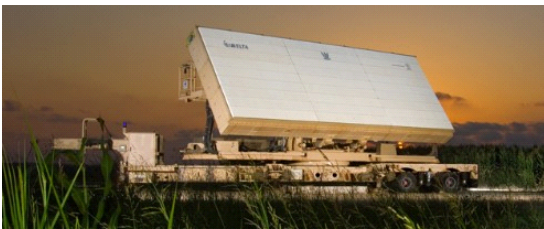


Fig. 1 Missile defense radar EL/M-2080 green pine

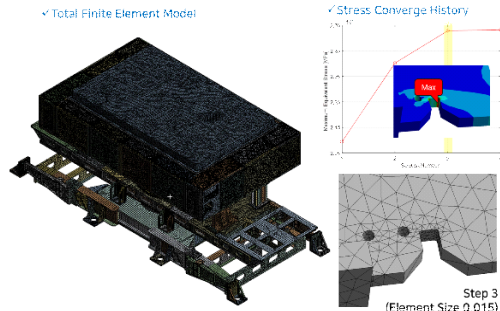
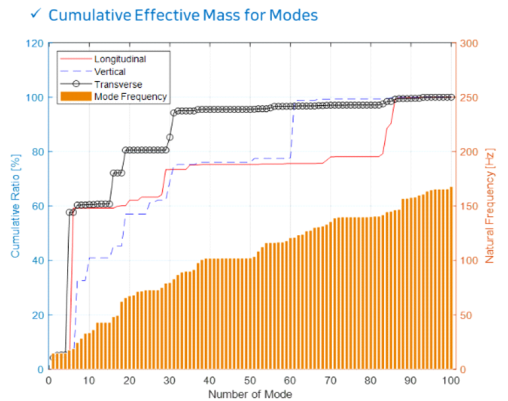


Fig. 2 Whole model and mesh determination method

ANSYS Mechanical 19 Ver.을 사용하였으며, Fig. 2과 같이 해석 모델을 구축하였다. ANSYS에서 제공하는 Quadratic node로 구성된 Solid186요소를 사용하였으며, 각 부품별로 Fig. 2와 같이 응력이 수렴되도록 요소의 개수와 질을 결정하고 이를 통해 해석 결과가 유효성을 가지도록 하였다. 같은 방식으로 모든 부품을 개별적으로 요소의 수와 질을 결정하여 전체 해석 모델을 구축하였다. 전체 해석 모델은 총 1 744 915개의 요소와 2 237 089개의 절점으로 구성되었다.

레이더 시스템의 동특성을 Fig. 3과 같이 요약하여 표현하였다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 유효 질량 (effective mass)이 큰 모드들이 저주파 대역, 35 Hz 아래에 포진하고 있다. 진동 환경에서의 내구성 분석을 위해 수행되는 random vibration 해석에서 입력 스펙트럼 설정은 결과에 큰 영향을 미친다. 그렇기 때문에 입력 스펙트럼의 35 Hz 이하 값들이 충분히 진동 환경을 반영할 수 있어야 한다.



High Effective Mass Modes

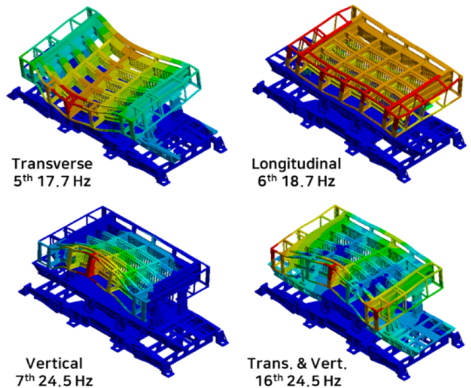


Fig. 3 Dynamic characteristic of the radar system

군사 장비 규격 MIL-STD 810G METHOD 514.7에서는 수송 환경의 진동 분석을 위해 실측 데이터를 사용하도록 권고하고 있다⁽²⁾. 이에 따라 이전에 수행한 다목적 대형 군용 차량에 대해 확보한 실제 주행 진동 데이터를 사용하여 수송 진동 환경을 구축하였다^(3,4).

다목적 대형 군용 차량의 주행 진동 및 내구 시험은 국방 규격(KDS) 및 TOP-2-2506 규격과 절차에 부합하게 진행되었으며, 두 규격보다 더 가혹한 환경에서 수행되었음을 증명하였다⁽⁵⁾. Fig. 4는 주행 시험 셋업을 나타내며, 메인 프레임에 3축 가속도계를 부착하여 총 6개의 지점에서 진동 데이터를 얻었다. 진동 및 내구 시험을 총 4사이클 각 측당 261개의 데이터를 가지고 진동 환경을 구축하였다. 복합 환경에 대한 고려와 충분한 주행 거리 및 시간을 포함하고 있다⁽³⁻⁵⁾. 이와 같이 충분히 검증된 규격을 초과하는 실측 데이터를 이 연구에 사용하여 연구가 신뢰성과 보수성을 가지도록 하였다.

(2) 충격 환경 분석

MIL-STD 810G METHOD 516.7에서는 half sine 또는 saw-tooth 파형을 이용한 충격을 모사하고

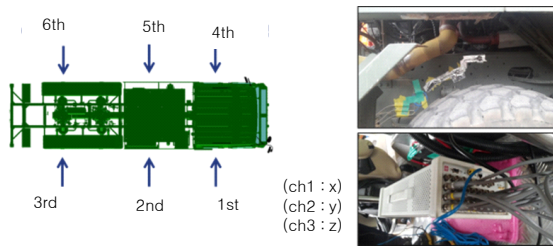


Fig. 4 Accelerometer location and data acquisition

Table 1 PSD data processing

Steps	Detail process
1st Step	Time domain - Filter : Butterworth 6 order - Bandwidth : 2 Hz ~ 500 Hz
2nd Step	Frequency domain - Sampling frequency : 6400 Hz - Frequency lines : 8192 lines
3rd Step	PSD - Resolution : 0.7813 Hz - Hanning window - 50 % overlap

shock response spectrum 해석을 통한 내구성 검증을 요구하고 있다⁽²⁾. 이에 따라 이 연구에서도 적절한 충격 환경을 모사하기 위해서 포장도로에서의 데이터를 제외한 각 측당 139개의 주행 데이터에서 충격 구간을 선별하여 분석하였다. 주행 중의 충격은 일정하지 않고 Random process에 해당하기 때문에 크기가 가우스 분포를 이룬다. 충격을 결정하는 요소 중 충격 시간은 대부분의 충격이 0.2~0.3 초로 비슷하다. 따라서 대푯값 1.31 g에 해당하는 충격을 모사하여 충격 해석에 반영하였다.

2.2 환경 규격 설정

(1) 진동 환경 규격 설정

MIL-STD 810G에서 진동 환경은 random vibration 방법을 사용하도록 요구하고 있다⁽²⁾. 이에 따라, 이 논문에서의 수송 진동은 random vibration 방법을 이용한 다자유도 random vibration 해석을 위해 입력 power spectrum density(PSD)인 진동 환경 규격을 설정했다.

각각 60초 동안 계측된 각 측당 261개의 데이터를 Table 1과 같은 과정으로 PSD로 변환하였다. 앞에서 분석했듯이 35 Hz 이하 PSD 값들이 진동 환경을 충분히 반영하고 보수성을 확보하도록 Fig. 5와 같이 축 별로 261개의 PSD 데이터들의 포락선 PSD 데이터를 진동 환경 규격으로 설정하였다.

(2) 충격 환경 규격 설정

2.1절에서 언급했듯이 충격들의 대푯값에 해당하는 충격 크기를 가지며, 충격 시간이 0.2~0.3 초가 되도록 충격을 설정해야 한다. MIL-STD 810G에 따라 half sine shock를 이용한 등가의 bump shock을 설계하여 적절한 충격 환경을 구축하였다.

등가의 bump shock을 위해 국내 규격 bump의 높이와 길이인 0.075 m, 2 m로 설정하고, 통과하는 속도를 30 km/h로 사용하였다. Fig. 6과 같이 레이더 차량의 bump 통과를 단자유도계로 모사하여 차량에 전달되는 충격을 도출하였다. Fig. 6에 따라 식 (1)과 같이 운동방정식을 basement excitation 형태로 바꾸면 바닥 가진 가속도 식 (3)과 같이 된다.

$$z = y - x$$

$$z + 2\omega_n \zeta z + \omega_z^2 = -\ddot{y}_m \tag{1}$$

$$y(t) = \begin{cases} H \sin\left(\frac{v\pi t}{D}\right) & \text{for } 0 \leq t \leq \frac{v\pi t}{D} \\ 0 & \text{for } t \geq \frac{v\pi t}{D} \end{cases} \quad (2)$$

$$y(t) = \begin{cases} -\left(\frac{v\pi t}{D}\right)^2 D \sin\left(\frac{v\pi t}{D}\right) & \text{for } 0 \leq t \leq \frac{v\pi t}{D} \\ 0 & \text{for } t \geq \frac{v\pi t}{D} \end{cases} \quad (3)$$

Air suspension이 있는 수송 차량을 1.5 Hz의 고유 진동수(ω_n)와 75% 감쇠 계수(ξ)를 갖도록 설정하였다. 위 식 (1)을 풀면 Fig. 7과 같이 응답 가속도가 도출된다. 레이더의 다자유도 SRS 해석을 위한 충격 환경 입력은 response spectrum 형태의 주파수 입력이 되어야 하므로 Fig. 7의 시간에 따른 응답 데이터를 Fig. 8과 같이 response spectrum 형태로 바꾸어 충격 환경 규격을 설정하였다. 설정된 충격은 최대 가속도가 1.27g이며, 충격 시간은 0.24 초

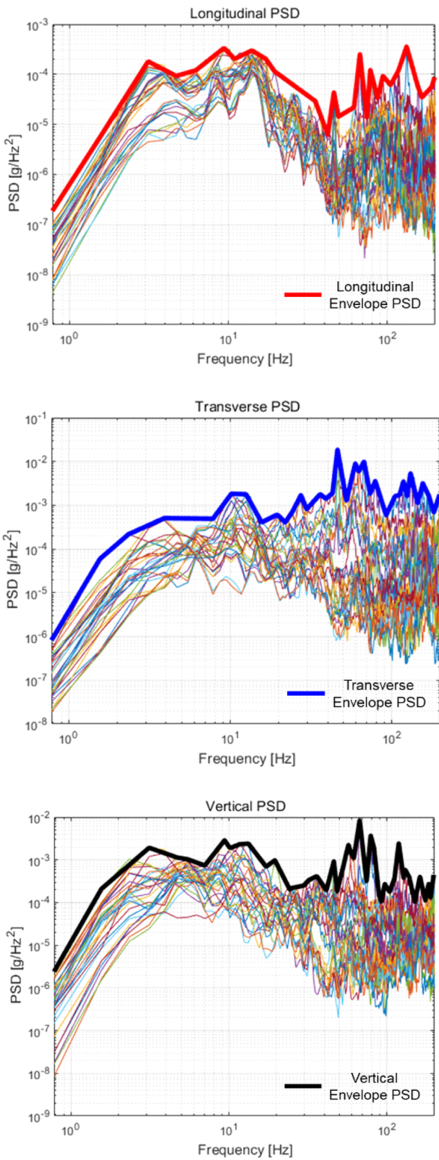


Fig. 5 Vibration environmental specification data

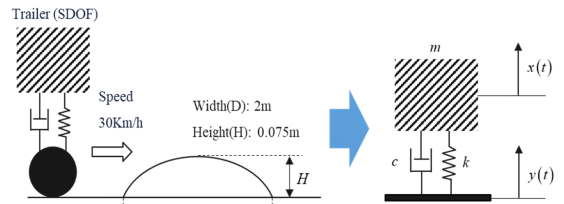


Fig. 6 Equivalent bump shock environmental modeling

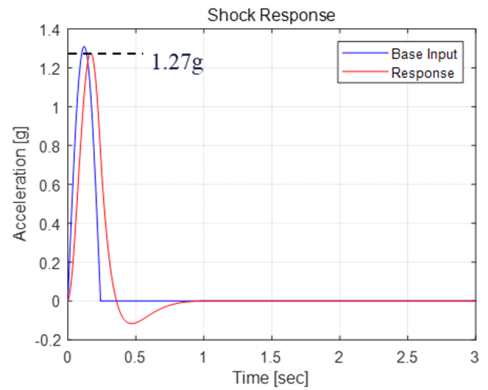


Fig. 7 Time response data for the bump shock

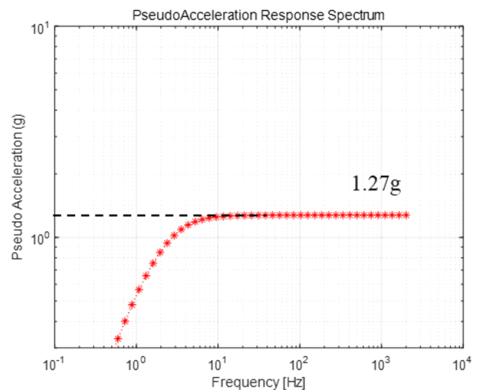


Fig. 8 Shock response spectrum data

이다. 시간 영역에서 최대 가속도를 나타내는 영주기 가속도(zero period acceleration: ZPA)가 1.27 g로 같으므로 충분히 잘 변환된 response spectrum임을 증명한다. 2.1절에서 분석한 충격 환경 크기의 대푯값인 1.31 g과 충격 시간 0.2~0.3초에 잘 부합하므로 Fig. 8과 같이 충격 환경을 잘 반영한 등가의 규격이 설정되었다.

3. 수송환경에 대한 내구성 분석

3.1 수송 진동 내구성 분석

2절에서 정립된 환경 규격을 바탕으로, 대형레이다의 수송 시 진동에 대한 내구성을 분석하였다. 내구성 분석은 유한요소해석으로 수행되었으며, 2절에서 구축된 해석 모델과 해석 툴을 사용하였다.

실제 분석된 대형레이다는 Fig. 9와 같이 이동 시 안테나를 접고 로우 베드 트레일러 위에 안착되어 이동하게 된다. 해석 모델 생성을 위해 디지털 반도체송수신조립체 및 안테나조립체 등의 전자 모듈/센서 등은 포인트 매스(집중 질량) 처리하였으며, 해석 모델 단순화를 진행하였다. 실제로 random vibration 해석은 요소수가 많거나 해석 모델이 복잡하면 해석 시간이 매우 오래 걸리거나, 해석이 불가능하므로, 해석 모델 단순화는 필수적이라고 할 수 있다.

실제로 해석 모델 단순화의 유효성을 검증하기 위해, 상세 모델과 단순화된 해석 모델의 각 모드별 형상과 natural frequency를 비교하고 다르지 않음을 검증하였으며, Fig. 10과 같이 실제 해석 결과

의 고유진동수 차이가 평균 5% 이내로 들어오는 것을 확인하였다.

구속조건으로는, 로우 베드 트레일러에 안착될 대형 레이더 구동조립체의 바닥 면 블록에 fixed 구속조건을 부여하였으며, 그 구속 면으로부터 Fig. 5의 정립된 진동 규격이 적용되어 random vibration 가진이 될 수 있도록 하였다. 3축(vertical, transverse, longitudinal) 방향을 동시에 진동을 인가하여 random vibration 해석을 진행하였으며, 그 해석결과를 Fig. 11과 같다.

해석결과, 3 sigma 등가응력까지 확인하여 대형레이다의 내구성을 분석하였다. 재질의 강도 평가는 각 재질의 항복 강도(yield strength) 대비 얼마의 안전 여유(margin of safety)를 가지고 있는지를 판단하였으며, 안전 여유가 0보다 크면 구조체가 안전한 것으로 판단하였다.

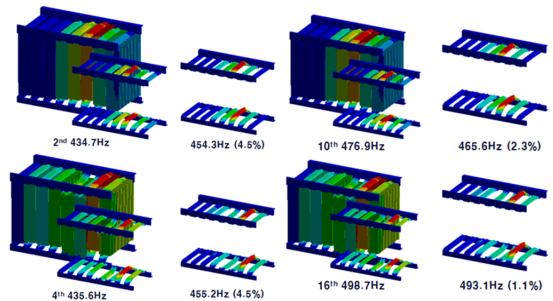


Fig. 10 Mode shape(specific model/analysis model)

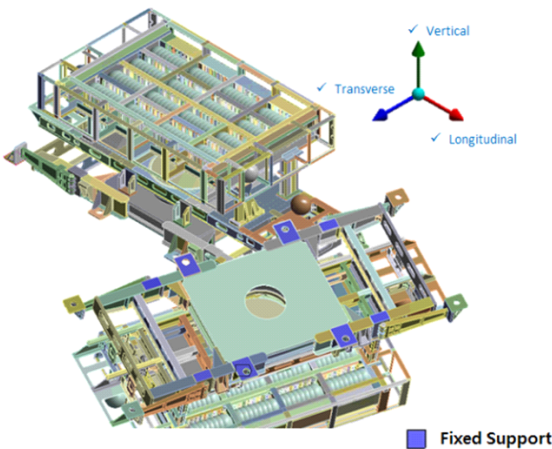


Fig. 9 Random vibration analysis model

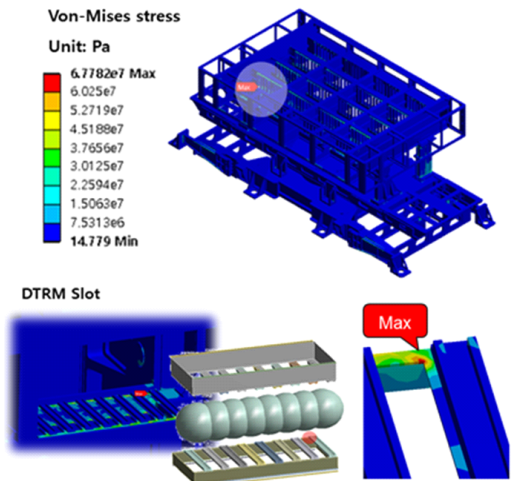


Fig. 11 Random vibration (PSD) analysis result

$$M.S = \frac{Yield\ Strength}{F.S \times Applied\ Stress} - 1 \quad (4)$$

여기서 통상 연성 재료의 안전율(factor of safety)은 1.25를 사용하였다⁽⁶⁾.

대형레이다의 핵심 부품인 디지털 반도체송수신 조립체가 조립되는 DTRM조립체의 조립부에서 가장 큰 67.7 MPa의 최대 응력이 발생하였으며, 이 조립부의 재질은 Al 5051로서 판금으로 제작되는 부위이다.

$$M.S = \frac{193}{1.25 \times 67.7} - 1 = 1.28 \quad (5)$$

Al 5051의 항복 강도가 193 MPa이므로, 식 (4)를 통해 안전 여유를 계산 한 결과는 식 (5)와 같이 1.28이었으며, 방산 특성상 신뢰성이 중요하기 때문에 항복 강도 대비 구조물의 설계 마진이 부족하다고 판단하여 DTRM조립체의 구조물을 Al 6061 재질의 블록 가공 구조로 보강을 수행하였다. 구조 보강을 수행한 이후 동일하게 random vibration 해석을 수행하였으며 그 해석결과는 Fig. 12와 같다.

기존 DTRM조립체의 슬롯 부위는 2.5 t의 얇은 판금 구조로 구성되었기 때문에, 수송 진동으로 인해 모서리부에 응력이 집중되어 항복 강도 대비 설계 마진이 부족하였지만, 이 부위를 Al 6061 재질의 15 t 부재를 가공하여 구조 보강 후의 해석결과, 동일 부위의 DTRM조립체의 슬롯 부위에서 최대 27.7 MPa의 응력이 발생하였다. Al 6061의 항복 강도가 276 MPa이므로, 식 (4)를 통한 안전 여유를 계산한 결과 6.88로 계산되었으며 충분한 안전 여유가 확보되어 구조 보강의 유효성을 확인하였고, DTRM조립체를 제외하고 전체적으로 큰 응력 변화는 없었다. 판금은 시간이 오래 걸리고 고비용의 밀링 공정을 대체하여 시간과 비용을 단축하는 장점이 있지만, 두께가 얇

아 부재의 변형이 심할 수 있어서 위와 같은 결과 나온 것으로 판단된다. 결국 제작방식을 밀링 공정을 통한 블록 가공 방식으로 변경하고, 이에 따른 재질 변경을 통해 부재의 두께를 늘려 구조 보강을 하여 안전 여유를 높일 수 있었다.

3.2 수송 충격 내구성 분석

대형레이다는 국내 도로 주행 시, 도로 위의 과속 방지턱을 지나면서 가장 큰 충격 하중을 받을 수 있는데, 2.2절에서 정립된 bump shock을 이용하여 도출한 환경 규격을 토대로 충격에 의한 내구성을 분석하였다. SRS(shock response spectrum) 해석을 통해 충격 하중에 대한 내구성을 분석하였으며, 해석 모델은 3.1절의 random vibration 해석 모델과 동일하게 구축하였다. 동일한 구축조건에서, Fig. 8의 response spectrum 충격 환경 규격을 부과하여 SRS해석을 수행하였으며, 해석결과는 Fig. 13과 같다.

SRS해석결과도 random vibration 해석결과와 비슷하게 DTRM조립체의 조립부 모서리 부분에서 가장 큰 응력이 발생하였으며, 구조 보강 전의 Al 5051 판금 구조인 상황에서 67.1 MPa의 최대 응력이 발생하였다. 판금 구조의 특성상, 부재의 두께가 얇아 과속방지턱을 넘을 때의 충격하중으로 인해 모서리 부분에 큰 응력이 발생했기 때문이며, 이는 식 (4)에 의해 계산된 안전 여유가 1.3에 해당하고 진동으로 인한 내구성 분석 시 구조 보강이 필요했던 DTRM 조립체와 동일한 부위였다. 이 부위가 항복 강도 대

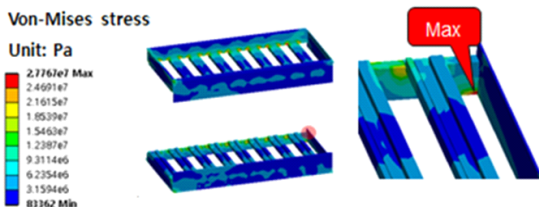


Fig. 12 Analysis result after structural reinforcement

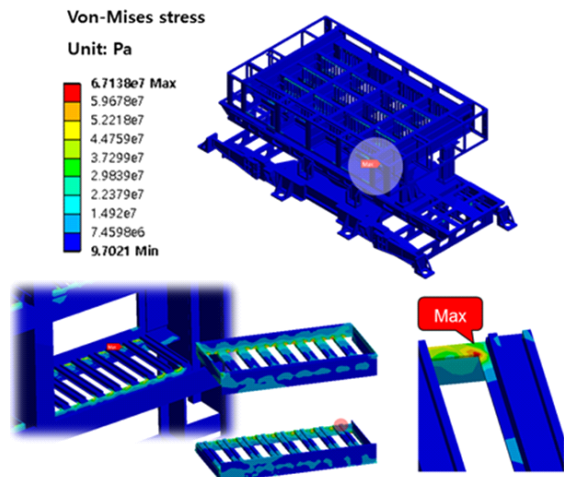


Fig. 13 SRS analysis result

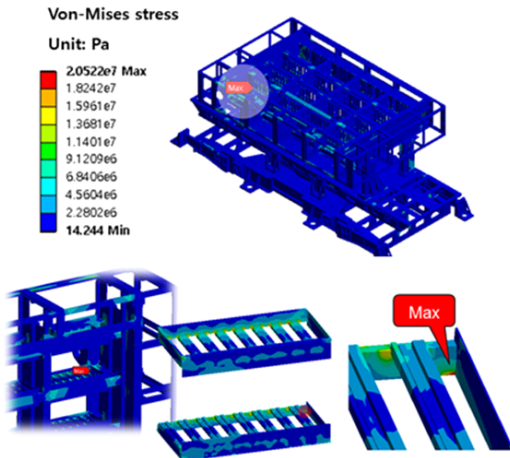


Fig. 14 Analysis result after structural reinforcement

비 설계 마진이 부족하다고 판단한 이유는, 대형레이다의 핵심 부품인 디지털 반도체송수신조립체가 조립되는 부위이며, 이 부분이 판금 구조로 진동이나 충격에 의해 변형되거나 힘을 받게 되면 당연히 핵심부품에 영향을 줄 수 있기 때문이다. Fig. 14는 DTRM조립체의 구조물을 AI 6061재질의 블록 가공 구조로 보강한 후의 SRS해석 결과이다.

4. 결 론

이 연구에서는 대형레이다의 수송 시 내구성을 분석하는 절차에 따라, 진동 및 충격 환경 분석을 진행하고, 시험 및 이론을 바탕으로 한 환경 규격을 설정하여 이에 따라 수송 진동/충격 내구성 분석을 수행하였다. 진동 환경 분석에는 이전에 수행한 다목적 대형 군용 차량에 대해 확보한 실제 주행 진동 데이터를 사용하여 수송 진동 환경을 구축하였으며 PSD처리하여 진동규격으로 정립하였다. 충격 환경 분석에는 bump shock을 이용한 적절한 충격 환경을 구축하여 이론과 수식을 바탕으로 시간에 따른 응답 데이터를 주파수에 대한 response spectrum 형태로 바꾸어 충격 환경 규격을 정립하였다.

이를 바탕으로 random vibration(PSD)해석과 충격 SRS해석을 수행하여 대형레이다의 수송 시 진동 및 충격에 대한 내구성을 분석하였으며, 분석결과 진동 및 충격 모두 디지털 반도체송수신조립체가 조립되는 DTRM조립체에서 가장 큰 최대 응력이 발

생하였으며, 기존 판금 구조에서 블록 가공 구조로 구조 보강을 수행하였다. 그 결과, 진동 및 충격에서 안전 여유가 각각 1.28에서 6.88로, 1.3에서 9.65로 각각 개선되었으며, 대형 레이다 수송 시 내구성을 확보 할 수 있었다. 이와 같은 수송 동특성 외란 규격 정립 및 내구성 분석 절차 등을 통해 향후 유사 레이다 이동 시 진동 및 충격에 대한 내구성 평가가 가능할 것이다.

References

- (1) Kim, J., 2014, Radar Development Tendency & Trend, Defense & Technology Vol. 421, pp. 77~93.
- (2) Department of Defense Test Method Standard, Environmental Engineering Consideration and Laboratory Test, 2015, Report No. MIL-STD-810G w/Change 1.
- (3) Park, J., Lee, S. J., Park, N. and Lee, J. H., 2014, Dynamic Characteristic Analysis of a Military Vehicle via Road Tests, The Korean Society for Noise and Vibration Engineering Annual Autumn Conference, pp. 277~280.
- (4) Lee, S., Park, J. B., Park, N. C., Lee, J. H., Jeong, E. B. and Kim, H. S., 2014, "Vibration Reduction of Military Vehicle Frame with Using Structural Dynamic Characteristics", The Korean Society for Noise and Vibration Engineering Annual Autumn Conference, pp. 281~284.
- (5) Jeong, E., Kang, D. S., Choi, J. H., Kim, H. S. and Choi, M. S., 2014, Endurance Test Procedure, and Validation of Multipurpose Tactical Vehicle", The Korean Society for Noise and Vibration Engineering Annual Autumn Conference, pp. 256~261.
- (6) Shin, D., Lee, J. H. and Kang, Y. S., 2017, 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.



Dong-Jun Shin received a B.S. degree in Aerospace Engineering from Korea Aerospace University in 2007, and M.S. degree in Science of Engineering from Seoul National University in 2009. He was engineer in Korea Aerospace Industries

from 2009 to 2010, and He is currently research engineer in Mechanical Engineering Team of Surveillance Reconnaissance R&D lab at LIG Nex1. His research areas include structural vibration and acoustics related to radar & defense.



Sang-Jeong Lee received a B.S. degree in Dept. of Mechanical Engineering from Yonsei University in 2013. He is currently in integrated course in Dept. of Mechanical Engineering from Yonsei University. His research areas include structural vibration with fluid-structure interaction and dynamics.