



로베드 트레일러 수송 동특성 분석 및 대형레이다 규격정립

Analysis of Transport Dynamic Property for Lowbed Trailer and Vibration Specification Establishment of Large Radar

신 동 준[†] · 안 상 혁* · 이 종 학* · 유 구 현* · 권 민 상**
Dong-Jun Shin[†], Sang-Hyeok Ahn*, Jong-Hak Lee*, Gu-Hyun Ryu*
and Min-Sang Kwon**

(Received July 26, 2019 ; Revised September 10, 2019 ; Accepted September 10, 2019)

Key Words : Lowbed Trailer(로베드 트레일러), Transport(수송), Dynamic Characteristic(동특성), Large Radar(대형레이다), Vibration Specification(진동 규격), Antenna(안테나), DTRM(디지털반도체 송수신조립체)

ABSTRACT

A large radar is transported using a lowbed trailer to reduce the height of the radar. As it is exposed to the vibration and impact load of the road during transportation, the radar core components, such as the antenna and DTRM, should be designed to be safely protected. In this paper, PSD data were analyzed through acceleration measurements during lowbed trailer transportation and were compared with the MIL-STD-810G METHOD 514.7C specification. The results show that the MIL-STD values are 19.47, 4.54, and 5.97 times larger in the X-, Y-, and Z-directions, respectively, than the measured acceleration peaks. In addition, the measured acceleration value of the antenna and DTRM assembly surfaces was approximately 0.1 Grms; its PSD data can be utilized for the design standard of the radar core components by establishing the vibration specification of the lowbed trailer transportation.

기 호 설 명

- a : 가속도
- c : 로베드 트레일러 air suspension 감쇠
- $F(t)$: 노면으로부터 가진 되는 외력
- ff_n : 주파수비
- k : 로베드 트레일러 강성
- m : 대형레이다 질량
- x : 로베드 트레일러 1-자유도 변위
- ζ : 감쇠계수

1. 서 론

최근 탄도 미사일 탐지 레이다에는 한국에서 개발하고 있는 탐지거리 300 km 급의 L-SAM 레이다를 비롯하여 이스라엘에서 개발되어 국내에 수입된 500 km ~ 900 km 급의 그린파인 레이다 등이 있으며, 가장 관심이 집중되고 있는 것은 최대 탐지거리가 1500 km로 알려진 미국의 록히드마틴에서 개발한 사드(THAAD) 레이다이다. 주파수 대역 별로 보면 L-SAM 레이다는 S-밴드, 그린파인 레이다는 L-밴드, 사드 레이다는

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

A part of this paper was presented at the KSNVE 2019 Annual Spring Conference
‡ Recommended by Editor Jun Hong Park
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

AN/TPY-2는 X-밴드를 채택하고 있다⁽¹⁾. 이와 같이 탐지거리가 긴 레이더는 성능을 위해 안테나 크기가 점차 대형화되고 있으며, 이에 따라 도로 이동을 위해 이동 시 높이를 최소화해야 한다. 로베드 트레일러는 이러한 대형레이더를 수송하기에 적합하며, 일반 카고트럭에 비해 약 700 mm 이상 높이를 낮출 수 있어서 산악 지형이 많은 국내 터널 등을 통과하기도 수월하다.

이러한 대형레이더는 이동 시 안테나를 접어 높이를 최소화하고 로베드 트레일러에 적재되어 이동하게 되는데, 이동 시 노면의 진동/충격 하중에 노출되기 때문에, 디지털 반도체송수신조립체(DTRM; digital transmitter receiver module)를 비롯한 안테나 배열소자 등의 핵심 레이더 센서 등이 안전하게 보호되도록 설계되어야 한다⁽²⁾. 이 논문에서는 실제로 로베드 트레일러 차량에 대형레이더를 적재하여 수송하였으며, 시험을 통해 이때 발생 되는 가속도 값을 측정 및 확

득하여 로베드 트레일러의 수송 동특성을 분석하였다. 또한 대형레이더의 핵심 전자부품인 디지털 반도체송수신조립체 및 안테나 배열소자가 부착되는 부분의 가속도 값을 측정하여 전자장비에 인가되는 진동량 및 PSD(power spectral density)값을 분석하였으며, 추후 대형레이더를 개발 시 활용할 수 있는 수송 진동 규격으로 활용할 수 있도록 하였다.

2. 로베드 트레일러 수송 동특성 분석

2.1 수송 동특성 시험 준비

수송 동특성 시험에 사용된 로베드 트레일러는 Fig. 2와 같이 적재공간이 길이방향 약 6.5 m, 폭방향 약 2.5 m 정도이며, 지상에서 800 mm 이하의 높이로 대형레이더를 적재할 수 있다. 로베드 트레일러는 높이가 낮아서 air suspension 시스템을 보유하고 있지 않을 것이라고 판단할 수 있지만, 로베드 트레일러도 일반 카고트럭과 유사하게 트레일러 바퀴에 에어백 형태로 구성된 air suspension이 장착되어 주행 시 노면으로부터의 진동 및 충격 하중을 감소시켜줄 수 있다. 실제로 대형레이더는 수송 시 노면으로부터의 진동 및 충격하중이 주요부품에 손상을 줄 수 있으므로, 설계 시에도 이를 고려하여 설계해야 한다. 보통 군사물품의 차량 수송을 고려한 설계는 MIL-STD-810G METHOD 514.7C 수송규격⁽³⁾ 기준을 따르는데, 이 규격은 3200 km ~ 6400 km의 긴 구간을 time scaling 하여 축당 60분으로 압축한 규격이므로, 국내 환경에서의 짧은 수송거리에 적용하기에는 과도할 수 있다. 게다가 대형레이더를 수송하는 로베드 트레일러에 해당하는 규격은 없기 때문에 실제로 대형레이더를 수송하면서 로베드 트레일러의 가속도 데이터를 측정하여 분석하는 것은 상당히 의미 있다고 할 수 있다.

로베드 트레일러에 적재된 대형레이더가 수송되는 개



Fig. 1 ELTA green pine radar for missile defense



Fig. 2 Transportation of the large radar by lowbed trailer

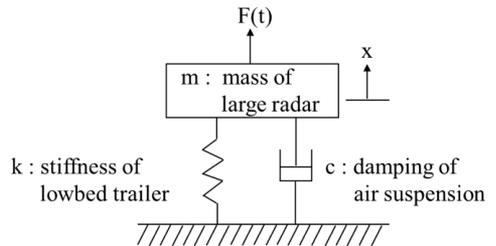


Fig. 3 Dynamic diagram of the large radar transportation

념도는 Fig. 3과 같으며 Newton의 제 2법칙에 따라 아래 진동계의 운동방정식 식 (1)과 같이 운동하게 된다.

$$\begin{aligned} \sum F &= ma = \frac{m d^2 x}{dt^2} \\ &= F_{spring} + F_{damping} + F_{external} \\ &= -ka - \frac{cdx}{dt} + F(t) \\ m\ddot{x} + c\dot{x} + ks &= F(t) \end{aligned} \quad (1)$$

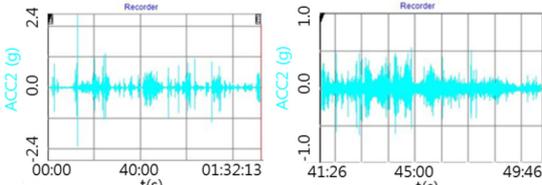
로베드 트레일러의 수송 동특성 시험을 위해 Fig. 4와 같이 대형레이다가 적재되는 트레일러 상단 면에

가속도 센서를 부착하였다. X축은 로베드 트레일러 차량의 진행방향인 longitudinal 방향으로, Y축은 차량 진행방향의 좌/우측 측면방향인 transverse, 그리고 Z축은 차량 수직방향인 vertical 방향으로 설정하였다. 가속도 센서는 Dytran사의 3220E 센서를 사용하였으며, 진동 데이터 획득을 위해 Dewesoft사의 DAQ 시스템을 활용하였다. DAQ 시스템은 배터리를 사용하여 로베드 트레일러 차량이 주행하면서 진동 데이터를 획득할 수 있었다.

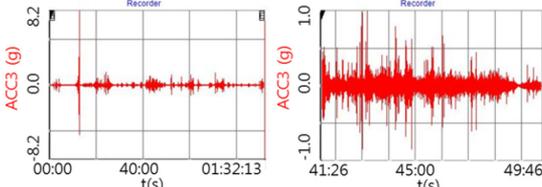
대형레이다를 적재한 로베드 트레일러 차량은 일



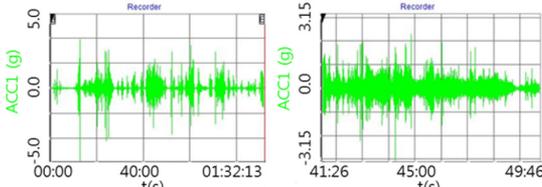
Fig. 4 Accelerometer location and DAQ system



(a) X-axis (longitudinal direction) acceleration data

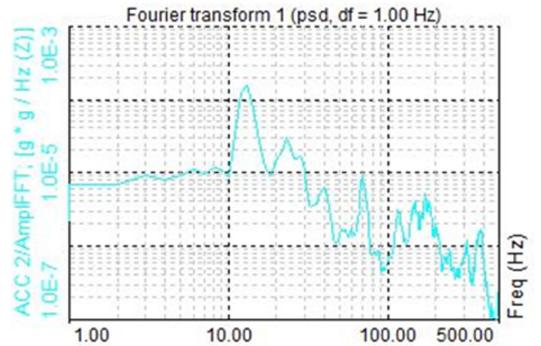


(b) Y-axis (transverse direction) acceleration data

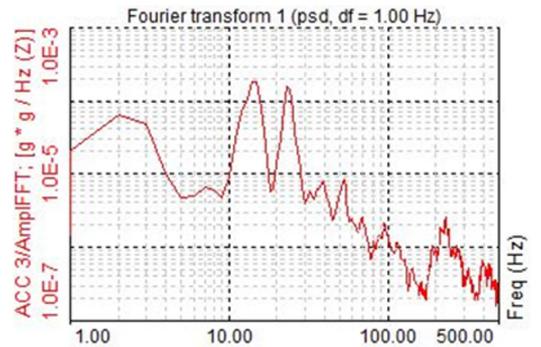


(c) Z-axis (vertical direction) acceleration data

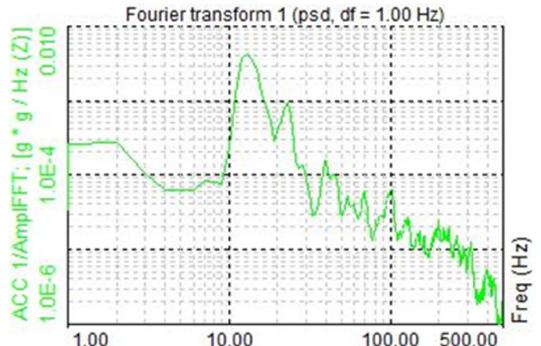
Fig. 5 Acceleration and time (raw&selected) data



(a) X-axis (longitudinal direction) PSD data



(b) Y-axis (transverse direction) PSD data



(c) Z-axis (vertical direction) PSD data

Fig. 6 PSD data of the lowbed trailer

반 국도(포장도로)를 평균 시속 60 km로 주행하였으며, Fig. 5와 같이 총 1시간 32분의 가속도 데이터를 획득하였다. 수송 동특성 데이터 분석을 위해 raw data에서 시속 60 km로 정속 주행한 구간인 41분 26초부터 49분 46초 사이의 약 8분간의 데이터에서 PSD 데이터를 추출하였으며, 이때의 구간이 가장 큰 Grms를 가진 구간이었다.

2.2 수송 동특성 시험 결과 분석

미국군사규격 MIL-STD-810G에서는 차량의 수송 규격 진동 프로파일을 500 Hz까지 제공한다. 이 논문에서도 수송 동특성 시험결과 분석을 위해 500 Hz까지 주파수 분석을 하였으며, 각 축 별 PSD 데이터는 Fig. 6과 같다. 각 그래프의 가로축은 주파수 $f(\text{Hz})$ 이며, 세로축은 단위 주파수당 에너지분포를 의미하는 $\text{PSD}(\text{g}^2/\text{Hz})$ 값을 나타낸다.

PSD 데이터 분석 결과, Fig. 6(a)~(c) 모든 축의 그래프에서 공통적으로 14 Hz 부근에서 peak를 확인하였으며, 이는 적재된 대형레이다를 포함한 로베드 트레일러 시스템의 고유진동수가 14 Hz라는 것을 의미한다. 또한 로베드 트레일러에 인가되는 노면의 진동은 100 Hz 이내의 저주파 영역에서 대부분 발생하였으며, 100 Hz ~ 500 Hz 구간의 진동 수준은 전체 진동에 큰 영향을 주지 않을 정도로 현저하게 감소한다는 것을 확인할 수 있었다. 로베드 트레일러가 주행하면서 차량의 주행방향인 X축 진동수준은 가장 낮았으며, 좌우 방향의 Y축 진동수준도 X축 방향과 큰 차이는 없었다. 단, 차량의 수직방향인 Z축 진동수준이 가장 높았으며 이는 노면의 굴곡으로 인한 진동이 차량의 상하 방향으로 가장 크게 인가되었다는 것

을 의미한다. 좌우 transverse 방향의 Y축 PSD 그래프를 보면 14 Hz와 23 Hz에서 2개의 peak가 뜨는 것을 확인할 수 있었는데, 차량이 좌우로 진동하면서 양 쪽 바퀴에 에어백 형태로 설치된 air suspension 시스템 특성 때문인 것으로 판단하였다.

로베드 트레일러의 수송 동특성 시험 결과 분석된 각 축 별 Grms는 Table 1과 같다. Table 1에서 확인할 수 있듯이, 수직 방향의 진동이 차량의 진행방향과 좌우 방향에 비해 약 4배 가량 진동 수준이 높은 것으로 확인되었다.

로베드 트레일러의 수송 동특성 시험결과를 Fig. 7의 미국군사규격 MIL-STD-810G의 METHOD 514.7C(카고 트럭의 미국 고속도로 주행 진동규격) 규격⁽³⁾과 비교해 보았는데, X축 방향으로 약 19.47배, Y축 방향으로 약 4.54배, Z축 방향으로 약 5.97배가 미 군사규격이 큰 것으로 확인되었다. 결국, 대형레이다를 국내 도로에서 로베드 트레일러로 4시간~6시간 수송한다고 하더라도, 미 군사규격 기준으로 대형레이다를 설계한다면 과도하게 설계될 수 있다는 것을 수치로 확인할 수 있었으며, 이 논문에서 분석된 로베드 트레일러의 수송 동특성 시험 결과가 추후 로베드 트레일러를 사용하여 수송될 대형레이다 설계 기준이 될 수 있다고 판단한다.

Table 1 Grms value of the lowbed trailer vs. MIL-STD-810G w/Change 1

Axis (direction)	Grms (low bed)	Grms (MIL-STD)
X-axis (longitudinal direction)	0.038	0.74
Y-axis (transverse direction)	0.044	0.2
Z-axis (vertical direction)	0.174	1.04

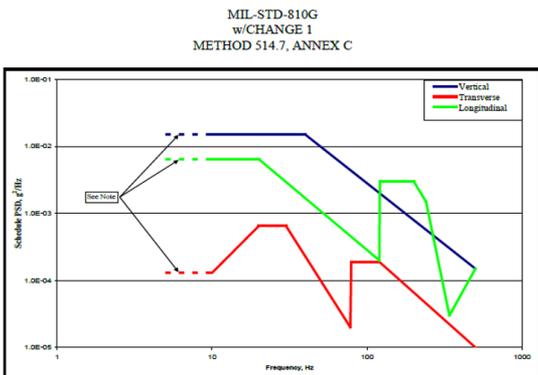


Figure 514.7C-2 – Category 4 – Common carrier (US highway truck vibration exposure).

Fig. 7 MIL-STD-810G METHOD 514.7C

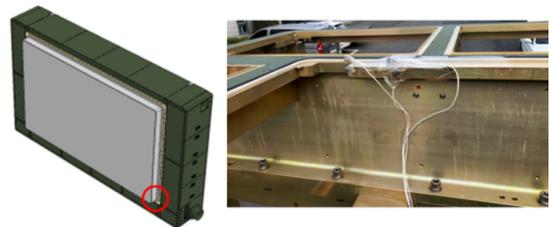


Fig. 8 Accelerometer location and DAQ system

3. 대형레이다 주요부품 규격 정립

3.1 안테나 조립면 진동 규격 정립

대형레이다는 탐지성능을 내기 위해 안테나 배열 소자라는 핵심 전자부품이 필요한데, 보통 이 배열소자는 안테나조립체에 매우 정밀한 배열 간격으로 배치되어 안테나장치에 Fig. 8과 같이 조립되어 이동하게 된다. 안테나 배열소자는 PCB와 반사판 등으로 구성되는데 대형레이다를 수송하면서 노면의 진동/충

격 하중으로부터 안테나 조립 면으로 전달되는 진동 수준이 높을 경우 부품의 오작동, 수명감소 등의 문제를 야기시키게 된다. 이러한 문제들은 군사 작전의 진행에 있어 큰 영향을 미칠 수 있으므로 강건하게 설계되어야 한다⁽⁴⁾.

보통 안테나조립체는 안테나장치 전면에 조립되는데 대형레이다가 로베드 트레일러로 수송될 경우 진동은 트레일러의 바닥 면을 통해 대형레이더의 구동부를 거쳐서 안테나장치를 통해 안테나 조립 면으로 전달되게 된다. 대형레이더 각 부위의 진동 전달률은 시스템의 동특성에 따라 다르기 때문에 식 (2)와 같이 진동이 전달되는 경로의 감쇠계수와 주파수 비에 따라 달라지게 된다. Fig. 8과 같이 안테나조립 면에 가속도센서를 부착하여 로베드 트레일러가 주행하면서 안테나 조립 면으로 어느 정도의 진동이 전달되는지를 측정해 보았다.

$$TR = \frac{\sqrt{1 + [2\zeta(f/f_n)]^2}}{\sqrt{[1 - (f/f_n)^2]^2 + [2\zeta(f/f_n)]^2}} \quad (2)$$

안테나 조립 면으로 전달되는 진동 값을 PSD로 분석한 결과는 Fig. 9와 같다. 안테나 조립 면에 전달되는 진동 값은 로베드 트레일러 바닥 면과는 다르게

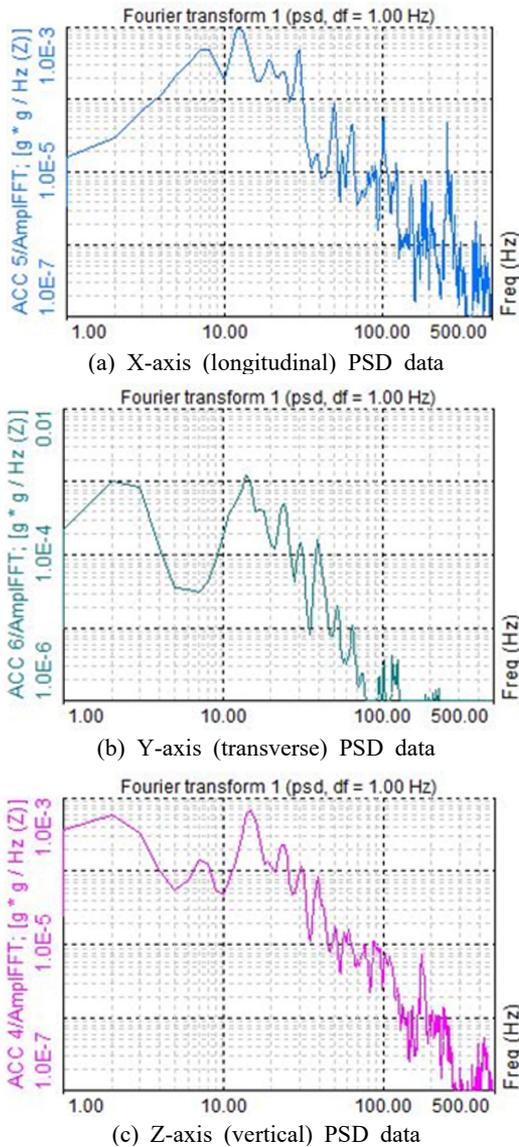


Fig. 9 PSD data of the antenna installed surface



Fig. 10 Accelerometer location of the DTRM surface

차량의 진행방향인 X축과 차량의 좌우방향인 Y축의 진동 수준이 높게 나타났으며, 오히려 차량 수직방향인 Z축 방향의 진동수준이 약간 낮게 나왔다. 이는 수직 방향인 Z축은 안테나장치 하단에 있는 구동부에서 어느 정도 구조 감쇠가 되어 전달률이 작아져서 트레일러의 바닥 면보다 낮은 수준이 된 것으로 판단하였다. 하지만 X축과 Y축은 대형레이다 구조 동특성 특성상 감쇠가 아닌 전달률이 커져서 트레일러 바닥 면 보다 약 3배 가까이 커진 것을 확인할 수 있었다. 이는 Table 2의 Grms값을 Table 1과 비교해 보면 알 수 있다.

이렇게, 대형레이다의 안테나 조립 면으로 인가되는 진동 량을 직접 측정을 통해 진동 규격으로 정립함으로써, 로베드 트레일러 수송시의 안테나조립체 설계 기준으로 사용할 수 있을 것이다.

3.2 DTRM 조립면 진동 규격 정립

디지털 반도체송수신조립체(DTRM)는 펄스 변조된 신호를 고풍력 증폭하여 안테나로 전달하고, 안테나로부터 수신된 신호를 저 잡음 증폭하는 기능을 하는⁽⁵⁾ 대형레이다의 핵심부품이다. 내부에 RF 송수신

부, 제어회로부 및 전원회로부 등의 수많은 전자부품들 및 PCB 등으로 구성되기 때문에 대형레이다에 조립되어 로베드 트레일러로 수송될 때 인가되는 진동/충격 하중으로부터 안전하게 보호되어야 한다.

로베드 트레일러로 대형레이다를 수송할 때 디지털 반도체송수신조립체에 전달되는 진동량을 측정하기 위해 Fig. 10과 같이 조립되는 면의 수직방향에 가속도센서를 부착하여 시험을 수행하였다. 시험결과 Fig. 11과 같으며, 약 14 Hz정도에서 적재된 대형레이다를 포함한 로베드 트레일러 시스템의 고유진동수를 확인할 수 있었으며, 약 300 Hz 정도에서의 공진과파수는 디지털 반도체송수신 조립체가 부착되는 프레임에서의 구조 동특성 때문인 것으로 판단된다. 측정된 Grms는 약 0.107이며 안테나조립체에 전달되는 진동량과 비슷한 수준으로 진동이 전달되었다. 이 분석결과도 진동규격으로 정립하여 로베드 트레일러 수송시의 디지털 반도체송수신조립체 설계 기준으로 사용할 수 있을 것이다.

4. 결 론

이 연구에서는 대형레이다가 로베드 트레일러로 수송될 때 실제 로베드 트레일러의 바닥 면에 X, Y, Z 3축의 가속도센서를 부착하여 주행 시 동특성을 분석하였으며, 대형레이다의 핵심 전자부품인 디지털 반도체송수신조립체 및 안테나 배열소자가 부착되는 부분의 가속도 값을 측정하여 전자장비에 인가되는 진동량 및 PSD값을 분석하였다. 일반 포장도로를 평균 시속 60 km로 주행하면서 얻은 로베드 트레일러 바닥 면 가속도 데이터를 PSD로 분석한 결과 14 Hz에서 적재된 대형레이다를 포함한 로베드 트레일러 시스템의 고유진동수를 확인할 수 있었으며, X, Y, Z 축 방향으로 각각 0.038 Grms, 0.044 Grms, 0.174 Grms로 측정되었다. 이는 MIL-STD-810G METHOD 514.7C 규격에 비해 X축 방향으로 약 19.47배, Y축 방향으로 약 4.54배, Z축 방향으로 약 5.97배가 미국군사규격이 큰 것으로 확인되었으며, MIL-STD-810G METHOD 514.7C 규격을 사용하여 설계할 경우 과도한 설계가 될 수 있으므로, 이 논문에서 분석된 로베드 트레일러의 수송 동특성 시험 결과가 추후 로베드 트레일러를 사용하여 수송될 대형레이다 설계 기준이 될 수 있을 것으로 판단한다. 또한 안테나조립체 및 디지털 반도체송수신조립체의 대형레이다 핵

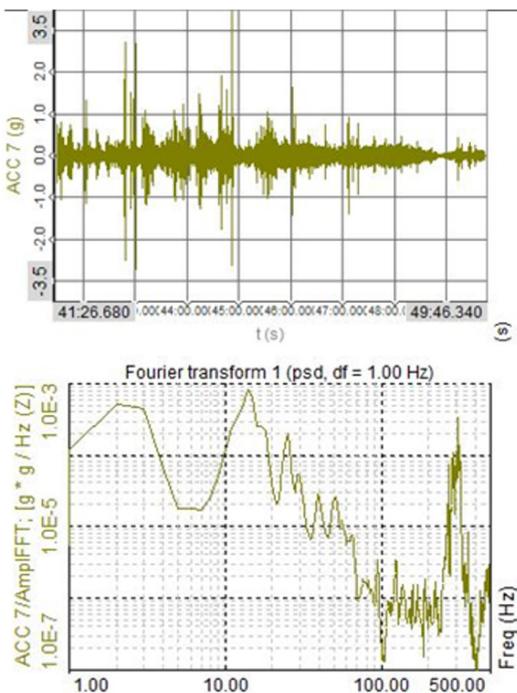


Fig. 11 Acceleration-time and PSD data (DTRM surface)

심부품의 조립 면 가속도 값을 측정된 결과 모두 약 0.1 Grms 수준이었으며, 이렇게 분석된 결과들 역시 진동 규격으로 정립되어 추후 대형레이다의 핵심 전자부품들을 설계할 때의 기준으로 활용 될 수 있을 것이다.

References

- (1) Choi, I. S., 2019, Technology Trends and Analysis of Long-range Ballistic Missile Detection Radar, Korea Institute of Information Technology Magazine, Vol. 17, No. 1, pp. 55~61.
- (2) Shin, D. J., Lee, S. J., Lee, J. H., Kang, K. H., Jin, H. S. and Kim, K. S., 2018, Environmental Specification Establishment of Transport Dynamic Property for Large Radar and Durability Analysis, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 28 No. 5, pp. 600~607.
- (3) Department of Defense Test Method Standard, Environmental Engineering Consideration and Laboratory Test, 2015, Report No. MIL-STD-810G w/Change 1.
- (4) Park, N. C., Park J. B., Lee, J. H., Lee, J. H. and Knag, K. H., 2014, Dynamic Characteristics Analysis of a Military Vehicle Via Road Test, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 277~280.
- (5) Lee, Y. R., Kim, J. P., Lee, S. H. and Jeong, M. D., 2010, Design of Solid-State Transmitter and Receiver for Active Array Radar System, Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 21, No. 12, pp. 1335~1342.



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 R&D lab (Surveillance & Reconnaissance) at LIG Nex1. His research areas include structural vibration and acoustics related to radar & defense.



Sang-Hyeok Ahn received a B.S. degree in Dept. of Mechanical Engineering from Sejong University in 2016. He is currently research engineer in Mechanical Engineering R&D lab (Surveillance & Reconnaissance) at LIG Nex1.



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