

# 항공기 외장 탑재장비의 음향소음 내구성 검증

## Acoustic Noise Durability Verification for a Jet Aircraft External Store

이종학† · 이유경\* · 강영식\* · 최지호\* · 강동석\*

Jong-Hak Lee, Yu-Kyoung, Lee, Young-Sik Kang, Ji-Ho Choi and Dong-Seok Kang

**Key Words :** Acoustic Noise(음향소음), Durability(내구성), Jet Aircraft External Store(항공기 외부 장착물), Sound Pressure Level(음압수준), Power Spectral Density(파워 스펙트럼 밀도)

### ABSTRACT

In this paper, fatigue life analysis of each structure was performed through theoretical analysis method at design stage in order to verify the success or failure of the store's acoustic noise durability according to the Method 515.5 standard of MIL-STD-810F. In addition, experimental analysis was carried out through the ground and flight test by manufacturing the measuring store, and verification of the sound durability was completed through the flight test after manufacture of the actual store. Furthermore, the commercial FEM code through the PSD calculation method applying measured SPL enables verify the durability of new store components development for the future.

### 1. 서 론

항공기 외부 탑재 장비(이하 '스토어')는 항공기의 무장 파일런 등에 장착되어 운용된다. 일반적으로 초음속 항공기는 고출력 제트엔진의 사용과 음속 이상의 빠른 속도로 비행함으로써 인해 항공기 운용 기간 동안 혹독한 음향소음 환경에 노출된다. 음향소음에 의해 발생하는 음향에너지는 얇은 판과 전자장비 등에 지속적인 하중을 가하여 피로파괴는 발생시킬 수 있다. 따라서, 각종 음향소음 환경으로 인한 스토어 구조물의 구조건전성을 설계단계에서 확보해야 하고, 이를 위해 음향소음 내구성 분석을 통한 수명예측이 필요하다. 군용 스토어가 항공기에 장착되어 운용되기 위해서는 미군사규격인 MIL-STD-810F의 Method 515.5의 규격을 만족하도록 설계, 제작 및 검증이 필요하다.

음향소음 시험은 군수품이 그 기능적 성능 및/또는 구조적 무결성의 수용할 수 없는 열화 없이 규정된 청각 환경을 견딜 수 있는지를 증명하기 위해 수행된다. 소음 환경은 대형 공중 압력 변동을 야기할 정도의 기계적 또는 전자기계적 장치에 의하여 생성된다. 일반적으로 이러한 압력 변동은 넓은 진폭 범위(5000Pa~87000Pa) 및 주파수 대역폭 10~10000Hz에 걸쳐 완전히 임의적인 자연에 근거한다. 때로는 'tones'이라고 하는 매우 높은 불연속 주파수 압력 변동이 존재하기도 한다. 압력 변동이 군수품을 강타할 때 군수품 주변 대기 에너지 사이에서 응력 변형 에너지로의 이동이 발생한다. 이러한 에너지 이동은 군수품의 진동을 야기하고 어떤 경우에는 진동 군수품이 압력 에너지를 재방사하고 군수품 진동 감폭 시 에너지를 흡수하거나 에너지를 군수품 내의 구성요소나 내부 공동으로 전달시킨다. 이러한 넓은 진폭 및 요동 압력의 대역폭 주파수 때문에 군수품 반응을 측정하는 것은 매우 중요하다.

본 연구의 대상물인 스토어는 구조적 조립단위에 따라 탑재카메라부, 탑재전자부, 환경조절장치 단위로 Figure 1 과 같은 형상으로 구성되어있다. 탑재 전자부의 구조물은 면적이 넓고 상대적으로 두께가

† 교신저자; 정회원, LIG넥스원  
E-mail : leejonghak27@lignex1.com  
Tel : +82-10-7501-7578, Fax : +82-31-8026-7084  
\* LIG넥스원

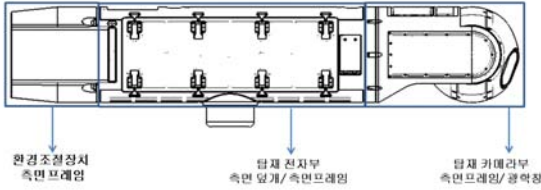


Figure 1 External store

얇은 판으로 구성되어 있기 때문에 음향소음에 인한 내구성에 영향을 받을 수 있음을 예측할 수 있다.

본 연구에서는 대상 스토어가 MIL-STD-810F의 Method 515.5 규격에 따른 음향소음 내구성 만족 여부를 검증하기 위해 설계단계에서 이론적 분석 방법을 통해 각 구조물의 피로수명 분석을 수행하였으며, 계측 스토어를 제작하여 지상 및 비행시험을 통해 시험적 분석을 수행하였고, 실제 스토어를 제작 후 비행시험을 통해 음향소음 내구성 검증을 완료하였다. 그리고 측정 Sound Pressure Level(이하 'SPL')을 활용한 Power Spectral Density(이하 'PSD')산출 기법을 통해 상용 FEM 코드를 활용해 향후 개발되는 관련 스토어 부품 내구성 검증에 활용가능 하도록 하였다.

## 2. 음향소음 내구성 분석

### 2.1 이론적 분석

#### (1) 분석 적용 및 범위

스토어의 구조 지지용 전/후방 벌크헤드를 기준으로 탑재카메라부, 환경조절장치, 탑재전자부 등 크게 3부분으로 나누어 분석을 수행하였다.

각 분석 영역 중 탑재전자부와 탑재카메라부는 분석 영역을 세분화 하였다. 탑재전자부는 고정 방식을 기준으로 측면덮개와 측면프레임으로 구분하였다. AAU(Airborne Assembly Unit)는 SRU(Shop Replaceable Unit) 단위 음향소음 시험을 만족하므로 분석에서 제외하였다. 탑재카메라부는 알루미늄 재질의 측면프레임과 요크커버, BK7 재질의 EO 광학창1, 2와 Silicon 재질의 IR 광학창으로 나누어 분석을 수행하였다.

#### (2) 분석 조건

충음압수준과 지속시간은 MIL-STD-810F의 TABLE 515.5A-I 을 적용하며 Table 1 에 발췌하

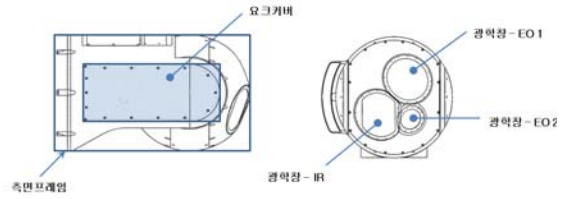


Figure 2 Camera section

Table 1 Overall sound pressure levels and duration

| TYPICAL APPLICATION  | TEST LEVEL (OASPL) dB | DURATION (Min) |
|--|-----------------------|----------------|
| Transport aircraft at locations not close to jet exhausts  | 130                   | 30             |
| Transport aircraft, in internal material bays close to jet exhausts  | 140                   | 30             |
| High performance aircraft at location not close to jet exhausts  | 145                   | 30             |
| High performance aircraft in internal material bays close to jet exhausts                                    | 150                   | 30             |
| Air-to-air missile on medium performance aircraft (i.e., q=1200 psf (57456 Pa))                              | 150                   | 30             |
| Air-to-ground missile on medium performance aircraft (i.e., q=1200 psf (57456 Pa))                           | 150                   | 15             |
| Ground material in enclosed engine ramp areas  | 135                   | 30             |
| High performance aircraft in internal material bays close to reheat exhaust and gun muzzles or in nose cones | 160                   | 30             |
| Airborne rocket most locations but excluding booster or engine bays  | 140                   | 8              |
| Air-to-air missile on high performance aircraft (i.e., q=1800 psf (86184 Pa))                                | 165                   | 30             |
| Air-to-ground missile on high performance aircraft (i.e., q=1800 psf (86184 Pa))                             | 165                   | 15             |
| Airborne rocket booster or engine bays   | 140                   | 8              |

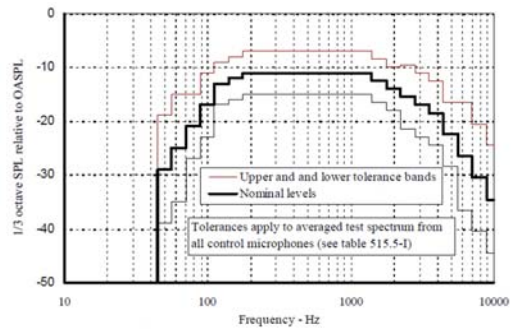


FIGURE 515.5A-1. Applied test spectrum.

Figure 3 Test spectrum

Table 2 1/3 octave band level

TABLE 515.5A-III. 1/3 Octave band levels for figure 515.5A-1.

| 1/3 octave center frequency Hz | Upper tolerance limit dB | Nominal level dB | Lower tolerance limit dB | 1/3 octave center frequency Hz | Upper tolerance limit dB | Nominal level dB | Lower tolerance limit dB |
|--------------------------------|--------------------------|------------------|--------------------------|--------------------------------|--------------------------|------------------|--------------------------|
| 50                             | -19                      | -29              | -39                      | 800                            | -7                       | -11              | -15                      |
| 63                             | -15                      | -25              | -35                      | 1000                           | -7                       | -11              | -15                      |
| 80                             | -15                      | -21              | -27                      | 1250                           | -7                       | -11              | -15                      |
| 100                            | -11                      | -17              | -23                      | 1600                           | -8.5                     | -12.5            | -16.5                    |
| 125                            | -9                       | -13              | -17                      | 2000                           | -10                      | -14              | -18                      |
| 160                            | -8                       | -12              | -16                      | 2500                           | -9.5                     | -13.5            | -17.5                    |
| 200                            | -7                       | -11              | -15                      | 3150                           | -11                      | -15              | -19                      |
| 250                            | -7                       | -11              | -15                      | 4000                           | -12.5                    | -16.5            | -20.5                    |
| 315                            | -7                       | -11              | -15                      | 5000                           | -16.5                    | -20.5            | -24.5                    |
| 400                            | -7                       | -11              | -15                      | 6300                           | -16.5                    | -20.5            | -24.5                    |
| 500                            | -7                       | -11              | -15                      | 8000                           | -20.5                    | -24.5            | -28.5                    |
| 630                            | -7                       | -11              | -15                      | 10000                          | -24.5                    | -28.5            | -32.5                    |

였다. Table 1 에 따라 스토어의 총 음압수준 (OASPL: Overall sound pressure levels and durations)은 150dB 이다. MIL-STD-810F 의 FIGURE 515.A-1과 TABLE 515.5A-III 의 기준을 적용한 시험 스펙트럼은 Figura 3 에, 1/3 octave band level 은 Table 2 에 발췌하였다. 스토어의 재질은 각 분석 영역에 따라 다르게 적용되며 각 재질의 종류에 따른 물성치는 MIL-HDBK-5에서 발췌하였다.

스토어 구성품 중 가장 취약한 부분인 측면프레임의 이론적 분석 방법을 적용하여 각 구성품들의 내구성을 분석하였다. 측면프레임에 작용하는 음향 소음 레벨을 결정하기 위하여 측면프레임의 공진 주파수를 결정하여야 한다. 계산의 편의를 위해 측면프레임은 4변이 완전 고정된 균일한 직사각형 평판으로 가정한다. 공진주파수(이하 'fn')은 균일평판의 고유진동수 Eq.1 로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$f_n = \frac{\pi}{1.5} \sqrt[3]{\left[ \frac{D}{\rho} \left( \frac{3}{a^4} + \frac{2}{a^2b^2} + \frac{3}{b^4} \right) \right]} \quad (1)$$

- a: Width of square side panel (in)
- b: Height of square side panel (in)
- h: thickness of panel (in)
- D: Plate stiffness factor
- ρ: Mass per unit area

상기 Eq.1 에서 Plate stiffness factor "D" 와 단위 면적당 무게 "ρ" 는 다음과 같다.

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} = 1587.0556 \text{ (lb-in)} \quad (2)$$

$$\rho = \frac{\gamma h}{g} = 0.0000312105 \text{ (lb-s}^2/\text{in}^3) \quad (3)$$

측면프레임의 형상 정보를 근거로 공진주파수(fn)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} f_n &= \frac{\pi}{1.5} \sqrt[3]{\left[ \frac{D}{\rho} \left( \frac{3}{a^4} + \frac{2}{a^2b^2} + \frac{3}{b^4} \right) \right]} \quad (4) \\ &= \frac{\pi}{1.5} \sqrt[3]{\left[ \frac{1587.0556}{0.0000312105} \left( \frac{3}{45.3^4} + \frac{2}{45.3^2 16^2} + \frac{3}{16^4} \right) \right]} \\ &= 105.9 \text{ (Hz)} \end{aligned}$$

측면프레임의 공진 주파수 105.9Hz 를 one-third octave 중심 주파수로 볼 때 음향 소음 레벨은 137dB가 된다. 측면프레임의 변형과 응력은 음향 소음 레벨로부터 구할 수 있다. 측면프레임의 변형 및 응력을 구하기 위하여 Sound Pressure Spectral Density (이하 'SPSD') 레벨을 다음과 같이 구한다.

$$P_s = \frac{P_{ref}^2 \times 10^{dB/10}}{0.231f_c} = 1.723 \times 10^{-5} \text{ (lb/in}^2\text{)}^2/\text{Hz} \quad (5)$$

$$P_{ref}: \text{ sound pressure reference} = 2.9 \times 10^{-9} \text{ (lb/in}^2\text{)}$$

위 식으로부터 RMS sound pressure response를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{RMS} = \sqrt[2]{\frac{\pi}{2} P_s f_n Q} \text{ (lb/in}^2\text{)} \quad (6)$$

$P_s$  : sound pressure spectral density

$f_n$  : resonant frequency (Hz)

$Q$  : transmissibility at the resonant frequency

상기 Eq.6 에서  $Q$  는 다음의 식을 통해 구할 수 있다.

$$Q = \sqrt[3]{f_n} = \sqrt[3]{105.9} = 10.29 \quad (7)$$

따라서 RMS sound pressure response( $P_{RMS}$ )는 다음과 같다.

$$P_{RMS} = \sqrt[2]{\frac{\pi}{2} P_s f_n Q} = 0.172 \text{ (lb/in.2)} \quad (8)$$

RMS sound pressure response를 사용하여 측면프레임에 작용하는 응력을 구할 수 있다. 평판에 작용하는 하중은 선형 평판 굽힘 이론과 large-deflection 이론을 사용하여 계산할 수 있다. 평판의 동적 변형량이 평판 두께의 1/3보다 작은 경우 선형 평판 굽힘 이론을 사용한다. 평판의 변형이 평판 두께의 1/3보다 큰 경우 응력 조건의 정확한 예측을 얻기 위해서 large-deflection 이론을 사용한다. large-deflection 이론은 membrane 응력으로 접근하여 bending 하중과 장력만을 고려한 membrane

하중으로 나누어 계산한다. 측면프레임의 변형량이 측면프레임 두께의 1/3을 초과하는 경우, RMS acoustic pressure response는 membrane acoustic pressure와 bending acoustic pressure의 합으로 구할 수 있다. RMS acoustic response pressure는 Timoshenko의 식에 따라서 다음과 같이 변형량(Y)에 대한 3차 방정식으로 표현할 수 있다.

$$P_{RMS} = q_m + q_b = \frac{Y^3 E h}{0.03225 a^4} + \frac{Y D}{c b^4} = 0.172 (\text{lb/in}^2) \quad (9)$$

Y : RMS displacement

E : modulus of elasticity of Al7050

$\alpha=0.00260$  : Numerical Factors for uniformly loaded and rectangular plate with clamed edges

상기 방정식으로부터 해(변형량, Y)를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} 0.172 &= 8.915 Y^3 + 9.314 Y & (10) \\ Y &= 0.0184 \text{ (in)} \end{aligned}$$

변형량(Y)은 측면프레임의 1/3인 0.0394“ 미만으로 음향 응력을 선형으로 볼 수 있다. 선형 이론을 적용할 때 측면프레임에 작용하는 하중은 bending pressure 이다. 그러나 계산의 정확성을 높이기 위하여 본 보고서에서는 Membrane 하중( $q_m$ )을 고려하여 전체 응력은 bending 응력과 membrane 응력의 합으로 계산한다. Bending 하중( $q_b$ )을 계산하면 다음과 같다.

$$q_b = \frac{Y D}{c b^4} = 0.172 \text{ (lb/in}^2 \text{ RMS)} \quad (11)$$

위 결과로부터 bending stress는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$S_b = \frac{6M}{h^2} = \frac{6 \times \beta q_b b^2}{h^2} = 1574.712 \text{ (lb/in}^2 \text{ RMS)} \quad (12)$$

M : Bending Moment(in.lb/in RMS)

$\beta=0.0833$  : Numerical Factors for uniformly loaded and rectangular plate with clamed edges

반면에, Membrane 하중( $q_m$ )은 다음과 같다.

$$q_m = \frac{Y^3 E h}{0.03225 (a)^4} = 5.584 \times 10^{-5} (\text{lb/in}^2 \text{ RMS}) \quad (13)$$

위 결과로부터 membrane stress는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$S_m = 0.396 \left( \frac{q_m^2 E \left( \frac{a}{2} \right)^2}{h^2} \right)^{1/3} = 4.189 \text{ (lb/in}^2 \text{ RMS)} \quad (14)$$

측면프레임 모서리에서 최대 총 응력은 bending 응력과 membrane 응력의 합으로 구할 수 있다. 전형적으로 전자제품의 구멍 및 모서리에서 발생하는 응력집중계수(K)=2를 측면프레임에 적용하면 측면프레임에 작용하는 총 응력은 다음과 같다.

$$S_t = K(S_m + S_b) = 3157.801 \text{ (lb/in}^2 \text{ RMS)} \quad (15)$$

측면프레임의 기대 피로수명을 예측하기 위하여 Miner의 누적손상개념을 적용할 수 있다. 피로수명을 계산하기 위하여  $3\sigma$  만 고려하는 방법이 있다. 발생율이 4.33% 로 정확성은 떨어지지만 대부분의 손상을 차지하고 있어 본 계산에 적용한다.

$$S_3 = 3S_t = 3 \times 3157.801 = 9473.404 \text{ (lb/in}^2 \text{ RMS)} \quad (16)$$

측면프레임의 피로 수명은 위  $3\sigma$  응력을 AL7050의 피로 선도에 적용하여 구할 수 있다. MIL-HABK-5에 따라 측면프레임의 fatigue cycle은  $1.4 \times 10^6$  이다. 따라서 측면프레임이 파손되기까지의 시간은 랜덤 진동 하에 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T = \frac{N}{0.0433 f_n} = \frac{1.4 \times 10^6}{0.0433 \times 105.9 \times 60 (s/min)} = 4934 (\text{min.})$$

음향소음 규격에 따라 탑재장비의 시험 지속 시간은 30min. 이다. 따라서 측면프레임의 지속 가능 시간은 4934min. 으로 규격을 만족한다.

## 2.2 시험적 분석

### (1) 시험 셋업

스토어가 비행 중 받게 되는 음향소음에 의한 진동의 크기를 분석하기 위해 계측 스토어를 제작하여 지상 및 비행 시험을 실시하였다. 계측 스토어는 실

계 스토어와 물리적 제원이 동일하며, 내부에 각종 센서 및 데이터 수집/저장 장치, 전원 장치를 구성하여 실제 발생하는 음압을 측정하였다. Figure 4, 5

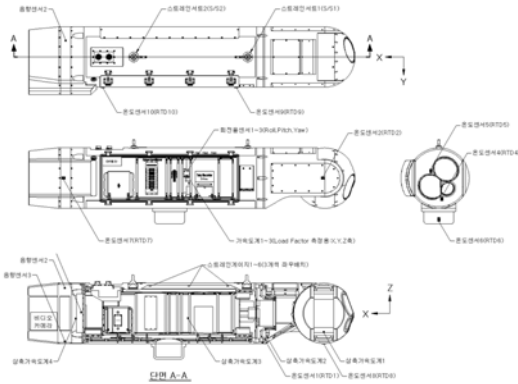


Figure 4 Measurement store

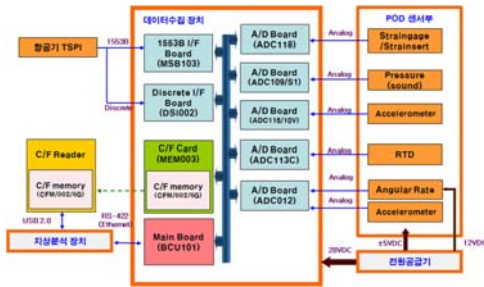


Figure 5 Measurement store configuration

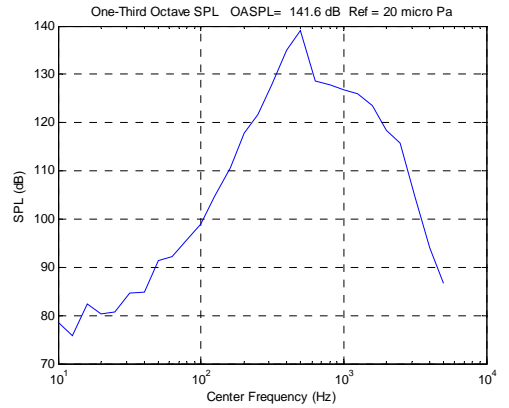


Figure 7 SPL for ground test

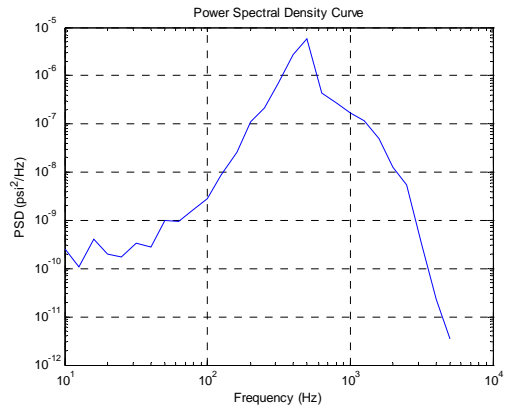


Figure 8 PSD for ground test

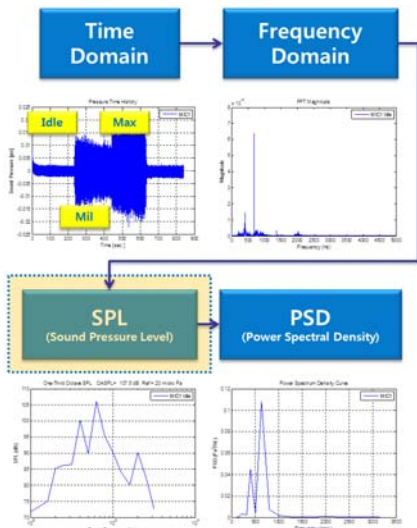


Figure 6 Analysis procedure

는 계측 스토어의 형상 및 구성도이다.

(2) 지상 시험

계측 스토어를 F-16 항공기에 장착 한 후, 엔진가동 시험장에서 항공기의 엔진을 Idle, Mil, Max로 가동하는 동안 스토어에 가해지는 음압을 측정 하였다. 센서의 위치는 스토어의 상부, 하부, 내부에 장착하여 항공기 엔진 가동에 의해 스토어에 가해지는 음압을 측정하였다. 측정된 음압은 시간이력으로 저장하여 Figure 6 와 같은 절차에 의해 SPL을 분석 하였다. 1/3 Octave Overall SPL은 141.6dB 수준이다. 측정 Sample Rate를 10000samples/sec 로 하여 5000Hz 까지 측정된 사항을 감안하면 시험규격 보다 높은 수준임을 확인 할 수 있다. 시험 후, 구조 건전성을 확인하였다.

(3) 비행 시험

계측 스토어를 F-16 항공기에 장착 한 후, 비행선

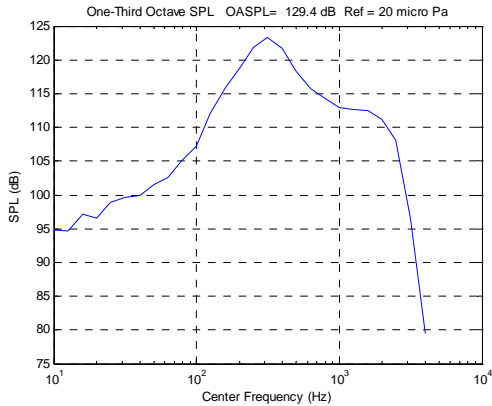


Figure 8 SPL for flight test

도에 따라 비행 시험을 실시하였다. 비행 조건은 고도 40000ft, 속도 M1.2로 기본 순항 속도 보다 조금 높은 수준으로 진행하였다. SPL 분석 결과 1/3 Octave Overall SPL은 129.4dB 수준이다.

### 3. 결 론

Steinberg, TIMOSHENKO 및 Miner's의 이론에 따라 음향소음에 대한 스토어의 내구성 분석 결과 지속시간대비 164배의 지속시간 여유를 확인했다.

지상 시험과 비행 시험을 통해 음향소음의 크기를 분석하였으며, 실제 비행 시험을 수행하여 스토어의 구조건전성을 검증하였다. 대기 중 공기 밀도 등의 영향에 의해 지상 엔진 가동 시험 시 좀 더 큰 음향소음 가진을 확인 했으며, 측정 Sound Pressure Level(이하 'SPL')을 활용한 Power Spectral Density(이하 'PSD')산출 기법을 통해 상용 FEM 코드를 활용해 향후 개발되는 관련 스토어 부품 내구성 검증에 활용가능 하도록 하였다.

### 참 고 문 헌

- (1) Steinberg, D. S., 2000, Vibration Analysis for Electronic Equipment, John Wiley & Sons Inc., 3rd Edition.
- (2) DOD, 2003, MIL-STD-810F: Department of Defense Test Method Standard for Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests, Method 515.5 Acoustic Noise