

# 설정 음압 및 스펙트럼 재현을 위한 음향 환경 시험 챔버의 기본 설계 변수 선정

## Design of High Intensity Acoustic Test Facility to Generate Required Sound Pressure Level and Spectrum

김영기\* · 우성현\* · 김홍배\* · 문상무\* · 이상설\*

Youngkey K. Kim, Sung-Hyun Woo, Hong-Bae Kim, Sang-Mu Moon and Sang-Seol Lee

**Key Words** : Environmental Test (환경 시험), Acoustic Environmental Test (음향 환경 시험),  
High Intensity Sound (고출력음), and Octave Band Control (옥타브밴드 제어)

### ABSTRACT

A high intensity acoustic test facility is constructed at Korea Aerospace Research Institute (KARI) by 2003. The reverberant chamber of the facility has a volume of 1,228 cubic meters and shall provide an acoustic environment of 152 dB over the frequency range of 25 Hz to 10,000 Hz. The facility consists of a large scaled reverberant chamber, acoustic power generation systems, gases nitrogen supply systems, and acoustic control systems. This paper describes how the basic parameters of a chamber and power generation systems are controlled to meet the requirement of the test. The volume of a reverberant chamber is controlled by the size of test objects and the reverberant characteristics of a chamber. The capacity of acoustic power generation systems is determined by the energy absorption of a chamber and the efficiency of acoustic modulators. Simple math is employed to calculate the required power of acoustic modulators. Moreover, the paper explains how the distribution of sound pressure level at low frequency is checked by analytical and numerical methods.

### 1. 서론

발사체 및 위성체는 개발 단계에서부터 음향 환경에 대한 검증시험을 필요로 한다. 국내 주로 개발 중인 국산 소형 발사체 및 다목적 위성의 경우, 기존에 검증되지 않은 초도 생산 품목을 사용하므로 이에 대한 검증이 요구된다. 특히 중대형 위성은 질량에 비해 표면적의 크기가 큰 부품을 많이 사용하므로 음향 환경에 취약하다. 음향 환경 시험 시설은 이러한 부품들의 신뢰성 문제를 발사 이전에 발견하고 이를 보완하기 위한 시설이다. 본 연구는 음향 환경 시험 시설(그림 1)을 개발하기 위한 기초 연구로서 설정된 음압과 스펙트럼을 재현하기 위한 기본 설계 변수를 설정한다.

음향 환경은 발사체에서 주어지는 가혹 환경 중 가속 및 진동과 더불어 위성의 임무수행 능력을 결정 하는 주요한 요소이다. 발사체 연료의 분

사에 의해 발생하는 과도한 제트 소음은 위성체가 탑재되는 노즈분리부(fairing) 내부로 전달되어 위성의 손상을 초래할 수 있다. 대부분의 위성에서 노즈분리부의 음압은 135dB 이상이며 이는 폭발물이 폭발할 때 발생하는 음압보다 크다. 음향

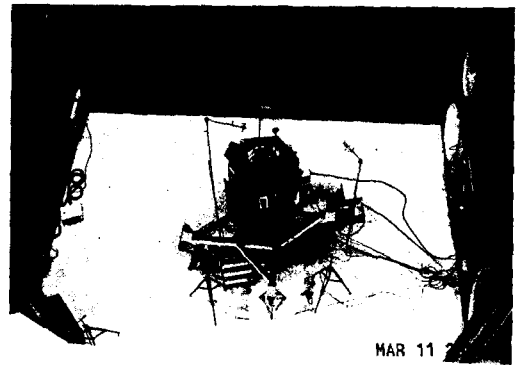


그림 1. 독일 IABG 社의 음향 환경 시험시설의 내부.  
(아리랑 2호 구조 모델의 시험장면 [1])

가진 시험 시설은 시험 대상물을 잔향실 내에 설치한 후, 인위적으로 생성한 높은 음향에너지를

\* 한국항공우주연구원 위성사업부  
E-mail : youngkey@kari.re.kr  
Tel : (042) 860-2186, Fax : (042) 860-2234

시험대상물에 부과하여, 시험대상물의 성능을 검증한다.

음향 환경 시험 시설의 크기 및 형태는 음향 환경 시험에 요구되는 규격을 만족할 수 있도록 선정 된다. 음향 가진 시험시설은 150dB 에 달하는 높은 음압의 소음을 생성하기 위하여 기화 질소(Gases Nitrogen)를 노즐을 통해 분출한다. 발생된 소음을 전달하는 혼의 특성과 챔버의 크기는 내부에 고른 음압 분포를 형성할 수 있는 최적의 형태로 결정된다. 본 논문은 이러한 규격을 만족하는 한국항공우주연구원의 시험 시설 개발을 위해 시험 시설의 기본 개념, 기본 설계 변수의 선정, 요구조건에 대한 연구 결과를 소개한다.

## 2. 시험 시설의 음압 재생 성능

음향 환경 시험 시설의 최대 음압 레벨은 전 세계 상용 발사체의 페어링 내부 음압레벨을 모두 포함하면서 제어의 융통성을 확보할 수 있도록 설계된다. 그림 2는 사용빈도가 높은 발사체 페어링(fairing)의 내부 음압을 표시한 것이다. 음압이 138dB 에서 149dB 까지 넓게 분포함을 알 수 있다. 20Hz 에서 100Hz 까지 서서히 증가하고, 100Hz 에서 1 kHz 까지 주 주파수 대역을 이루다가, 10 kHz 까지 서서히 감소함을 알 수 있다.

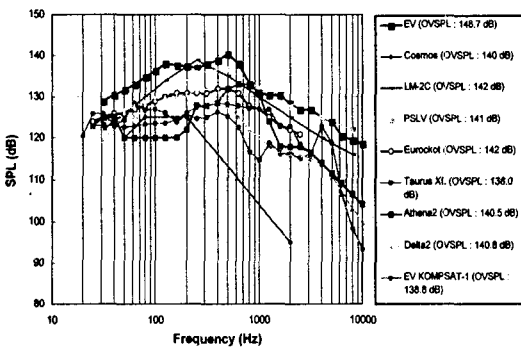


그림 2 발사체 페어링 내부의 음압 스펙트럼

그림 3 은 이러한 특성을 바탕으로 설정된 한국 항공우주 연구원 음향 환경 시험시설의 음압 요구 조건이다. 그림 2 의 발사체의 음압에서 최대 음압이 149dB 인 점을 감안하여, 본 시설의 최대 음압은 +3dB 의 여유를 두어 152dB 로 설정하였다. 또

한 본 시설은 노즐을 사용한 음원을 사용하므로, 낮은 레벨의 음압 재생에 제한이 있다. 최소 가진 가능한 음압은 그림 2 의 데이터를 바탕으로 130dB 로 설정하였다. 허용 오차는 실제 음향에너지 부과장치로부터 음압의 재현이 용이한 저주파수 대역은  $\pm 1\text{dB}$  로 설정하고 제어가 불가능한 고주파수 대역은  $\pm 4\text{dB}$  로 설정하였다. 저주파 모우드가 강하게 형성되는 20Hz 대역도  $-1\text{dB}/+3\text{dB}$  로 기준을 완화하였다.

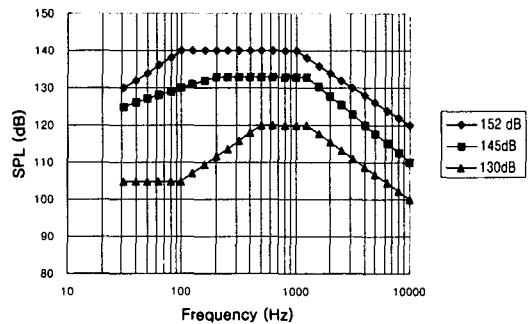


그림 3 항공우주 연구원 음향 환경 시험 시설의 음압 형성 규격

## 3. 챔버의 형상 설계

### 3.1 음향 환경 시험 시설의 형상 설계 순서

챔버 크기는 두 가지 원칙으로부터 구할 수 있다. 첫째, 내부의 음장이 확산 음장(Diffuse Field)이어야 하며, 우주 비행체의 가진을 위해 높은 모드 밀도를 형성하여야 한다. 따라서, 잔향실의 크기는 시험 대상물의 크기 및 최저 가진 주파수에 의하여 결정된다. 음향 챔버의 크기가 커질수록 저주파수에서 확산 음장의 형성이 쉬워지므로, 사용하고자 하는 최저 주파수를 결정하고 이를 수용할 수 있는 챔버의 크기를 결정하는 것이 우선적으로 수행되어야 한다.

구체적인 결정 순서는 다음과 같다.

- 가. 최소 가진 주파수의 결정
- 나. 시험 대상의 크기 조사
- 다. 최소 길이(Dimension)의 대략적인 결정.
- 라. 음향 챔버의 형상 설계
- 마. Q-Factor에 의한 모드밀도 확인

이때, 최종적으로 계산된 최저 주파수가 초기의 가정과 일치하지 않으면 위의 작업을 반복 수행한다. 그림 4 는 이러한 일련의 과정을 블록 다이어그램으로 나타낸 것이다.

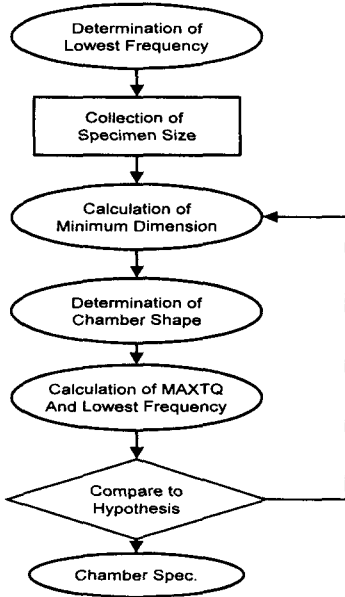


그림 4 챔버의 크기를 결정 짓기 위한 일련의 결정 과정

### 3.2 단계 가~다: 음향 챔버 최소 주파수 및 길이의 결정

최저 주파수와 위성의 크기는 기존의 데이터를 이용해 결정할 수 있다. 대부분의 발사체의 음압 규격이 25Hz 에서 시작되므로 본 시설의 최저 주파수는 25Hz 로 선정하였다. 또한, 현재까지 개발된 보편적인 위성체 및 발사체 패어링 등의 형상별 최대 치수는 지름 4m 에 높이 8m 에 이른다.

음향 챔버의 최소 길이는 위의 최대 크기와 내부 음장 특성으로부터 결정할 수 있다. 노즈부 리부의 음장은 모든 부분이 동일한 음압을 갖는 확산음장(Diffuse Field)로 알려져 있으므로 음향 환경 시험 조건도 확산음장의 조건을 최대한 만족시켜야 한다. 하지만, 저주파수 부근의 공진 주파수에서는 강한 모우드가 발생하므로 공간내의 음압 분포가 급격한 변화를 나타내게 된다. 따라서, 저주파대역에서의 과도한 음향 가진 효과를 최대한 줄이고, 제어성 등을 고려하여 잔향실 벽면과 시

험대상물사이의 거리는 최저 가진 주파수의 파장 정도를 유지하여야 한다. 이를 이용해 한국 항공 우주 연구원에 설치될 잔향실의 최소 치수를 계산 하면 8 ~9m 가 된다.

### 3.3 단계 라: 음향 챔버의 형상 결정

챔버의 설계에 있어서 가장 중요한 사항은 챔버의 확산음장을 모든 관심 주파수 대역에서 균일하게 얻기 위하여 모드 분포를 고르게 하는 것이다. 잔향실 설계에 있어서 전통적으로 사용되어 오고 있는 최적 실비율은 다음과 같다 [2].

$$L : W : H = 1 : 2^{1/2} : 4^{1/3} \quad (1)$$

여기서 L 은 챔버의 길이, W 는 폭, 그리고 H 는 높이를 나타낸다. 잔향실의 최소치수를 8.5m 로 선정 한 후 식(1)에 따라 결정된 잔향실 내부의 치수는 그림 5 와 같다. 주 출입구의 크기는 그림 8 에 나타난 시험 대상물의 크기를 고려하여 7m x 11m 으로 설계하였다.

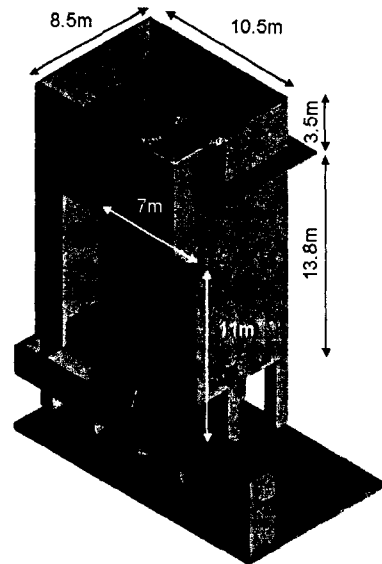


그림 4 한국 항공 우주 연구원 음향 챔버의 형상 및 크기 (상부는 혼을 설치하기 위한 혼통)

### 3.4 단계 마: Maximum Test Item Q-Factor[3]에 의한 최저 주파수 확인

시편과 음향 챔버의 공진 주파수 간격에 따라, 시편이 가진 되는 주파수의 특성이 변화한다. 예를 챔버의 공진 주파수의 간격은 매우 좁고, 반대로 동일 주파수 대역에서 시편의 공진 주파수의 간격이 매우 넓다면, 아주 이상적이 음향 챔버가 될 것이다. 시편의 공진 주파수를 포함한 모든 주파수 대역이 골고루 가진 될 수 있기 때문이다. 하지만, 이와 반대의 현상을 보인다면, 시편은 음향챔버의 공진주파수에서만 가진 되어, 올바른 시험을 수행할 수 없게 된다. 따라서 이러한 관계를 이용하여 음향 챔버의 최저주파수를 결정할 수 있다.

두 공진 주파수의 간격을 모드간격(MS, Modal Spacing)이라 정의하면 이의 역수는 모드밀도(MD, Modal Density)가 된다. 직육면체의 경우 이러한 모드밀도는 간단한 식으로 표현될 수 있다 [4].

$$MD = \frac{4\pi V}{c^3} f^2 + \frac{\pi S}{2c^2} f + \frac{L}{8c} \quad (2)$$

여기서, MD는 모드 밀도 (Modal Density), V는 음향 챔버의 체적, S는 음향 챔버의 표면적, L은 음향 챔버 코너의 총 길이, c는 공기의 전파 속도를 나타낸다.

모드 간격은 모드 밀도의 역수로 다음과 같이 표시된다.

$$MS = \frac{1}{MD} \quad (3)$$

여기서 MS는 모우드 간격을 나타낸다.

시편의 공진 주파수 간격은 Q-Factor를 이용해 대변할 수 있다. 공진 주파수 부근에서 댐핑의 정도를 나타내는 Q-Factor는 실제 공진 주파수의 상대적인 간격을 나타낼 수 있다. 예를 들어 댐핑이 작아지면 주파수 영역에서 공진에 의한 응답이 한 주파수에만 집중되므로, 요구되는 음향 챔버의 공진 주파수 간격이 작아져야 한다. 따라서, Q-Factor를 이용해 시편의 공진 주파수 간격을 설명할 수 있다.

Q-Factor는 일자유도 공진 시스템을 가정하여 정의된다. 피크의 크기에서 반이 되는 주파수를

찾아 그 간격을 정의하고, 그 간격과 중심 주파수의 크기를 비교하여 Q-Factor 정의한다.

$$Q_{\pi} = \frac{f_{\pi}}{\Delta f_{\pi}} \quad (4)$$

여기서  $Q_{\pi}$ 는 Q-Factor를 나타내며,  $f_{\pi}$ 는 공진 주파수,  $\Delta f_{\pi}$ 는 피크의 크기에서 반이 되는 주파수의 간격을 의미한다. 따라서, 역으로 시편의 Q-Factor를 아는 경우, 주파수 간격은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta f_{\pi} = \frac{f_{\pi}}{Q_{\pi}} \quad (5)$$

앞서 설명한 바와 같이 음향 챔버를 이용한 적절한 가진이 이루어지려면 위의 주파수 간격이 음향챔버의 모드 간격에 비해 커야 한다. 즉 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\Delta f_{\pi} = \frac{f_{\pi}}{Q_{\pi}} \geq MS_{CH} \quad (6)$$

여기서  $MS_{CH}$ 는 음향 챔버의 모드 간격을 의미한다.

따라서 이러한 관계를 간단한 지표로 나타낼 수 있는 Maximum Test Item Q-Factor는 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$MAXTIQ = \frac{f_{\pi}}{MS_{CH}} \quad (7)$$

즉, 음향 챔버가 결정되었을 때, 사용할 수 있는 시편의 각 주파수에서의 최대 Q-Factor를 식 (6)의 MAXTIQ 값으로부터 알 수 있다. 또한, 역으로 시편을 가정하면 음향 챔버의 최저 허용 주파수를 계산할 수 있다.

그림 5는 한국 항공우주 연구원 음향 챔버의 MAXTIQ 값을 나타낸다. 일반적으로 저주파수에서 위성체가 20 이하의 Q-Factor를 가지므로, 한국 항공우주 연구원 음향 챔버의 최저 주파수는 30Hz라 할 수 있다.

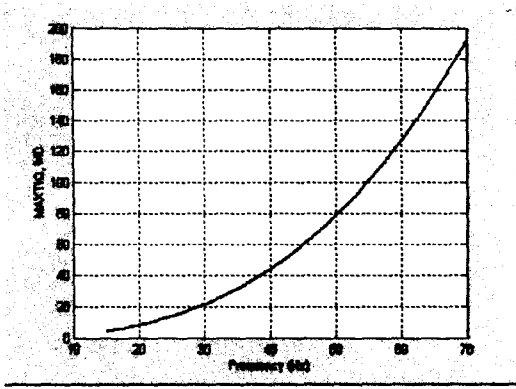


그림 5 한국항공우주연구원 음향 챔버(8.5m x 10.5m x 13.8m)의 Maximum Test Item Q-Factor

#### 4. 액츄에이터의 파워 및 규격 설정

챔버 내에 150dB 이상의 큰 음압을 형성하기 위해서는 그림 6 과 같이 고압의 질소가스를 노즐에 통과시켜 음압을 발생시키는 일종의 액츄에이터(Actuator)를 사용한다. 액츄에이터는 용량에 따라 다양한 모델이 존재하므로, 건설하고자 하는 음향 환경 시험시설의 크기에 따라 적절한 선정작업을 거쳐야 한다. 본 절에서는 선정방법을 정리한다.

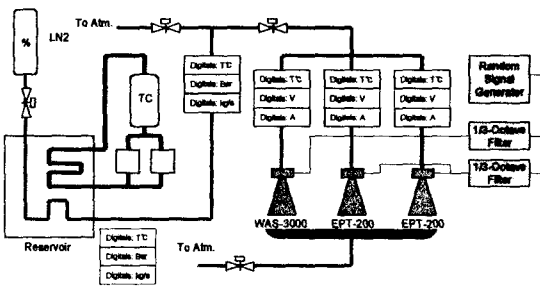


그림 6 음향 환경 시험 시설의 액츄에이터 제어 시스템

액츄에이터 용량은 챔버 내부에 가해져야 할 음향 파워와 액츄에이터의 효율을 이용해 결정할 수 있다.

$$W_a = W_c / \eta_{ac} \quad (8)$$

여기서,  $W_a$  는 액츄에이터의 파워,  $W_c$  는 챔버 내부의 음향 파워를 나타낸다.

챔버 내의 음향 파워는 챔버 내의 음장을 확산 음장으로 가정할 때, 내부의 음압과 다음과 같은 관계를 갖는다 [5].

$$W_c = \frac{(4mV + S\alpha)}{4\rho c} p^2 \quad (9)$$

여기서,  $p$  는 내부 음압,  $m$  은 질소의 흡음 계수,  $\alpha$  는 챔버 벽면의 흡음 계수이다.

식 (9)을 음압 레벨의 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$L_{wc} = L_p + 10\log(4mV + S\alpha) - 6(dB) \quad (10)$$

따라서, 식 (10)로부터 설정된 음압 규격( $L_p$ )을 이용해 챔버에 필요한 음향 파워( $L_w$ )를 계산할 수 있다. 이때, 필요로 하는 벽면의 흡음률과 질소 가스의 흡음률은  $\alpha = 0.018, m = 0.000334$  의 값을 사용하였다. 표 1 은 계산된 음향 파워이다.

표 1 설정된 음압을 재현하기 위한 액츄에이터의 파워

Stage	Required SPL (dB)	Required Power (W)	Coupling Coefficient	Actuator Power (W)
1st	145 + 3	2,500	0.18	14,000
2nd	152 + 3	13,000	0.18	70,000

표 1 의 결과를 이용해 음향에너지 부과 장치를 선정할 수 있다. 하지만, 일반적인 음향 부과 장치는 주파수 영역에 제한을 작으므로, 이를 고려하여 주파수 대역 별로 다수의 액츄에이터를 선정하여야 한다. 그림 7 는 이러한 주파수 특성의 대표적인 예를 나타낸 것이며, 그림 8 은 이를 고려한 제어 시스템의 개념도 이다. 재생하고자 하는 신호를 각각 주파수 별로 분해하여 각각의 혼에 입력한다. 그림 7 은 30~100Hz 를 재현하는 우퍼(Wofer)와 100~2,000Hz 를 재현하는 미드레인지(Midrange)를 사용한 것이다. 특징적인 것은 2,000Hz 이상의 소음은 별도의 소음원 없이 음파의 비선형성을 이용해 생성되는 소음에 의해 발생된다.

혼(Horn)은 구분된 주파수 영역에 따라 선정할

수 있다. 예를 들어 주파수 영역의 구분을 25Hz~250Hz, 250Hz 이상으로 구분한 경우라면, 저주파수 용은 25Hz의 임계주파수(Cutoff Frequency)를 갖는 혼을 사용하면 된다. 다음 주파수 영역은 250Hz의 임계주파수를 선택한다.

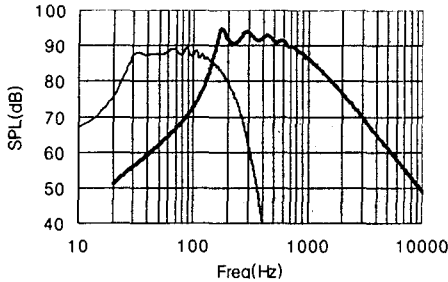


그림 7 음향 액츄에이터 (WAS-3000, EPT-200)의 주파수 특성

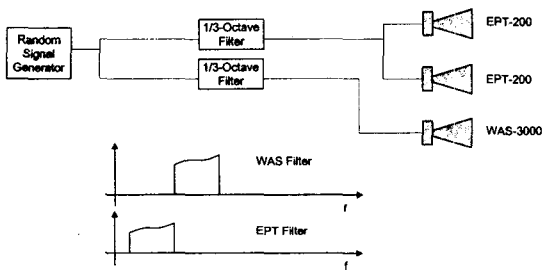


그림 8 음향 환경 시험 시설의 음압 제어 개념

표 2는 이러한 기준을 바탕으로 선정된 액츄에이터이다. 1 단계는 145dB을 음압을 재생하기 위한 액츄에이터 조합이며, 2 단계는 152dB를 재생하기 위한 조합이다.

표 2 음향 환경 시험시설에 사용된 액츄에이터 및 특성

Stage	Actuator	Power	Horn Cutoff	Remark
1 <sup>st</sup>	WAS-3000	10 kW	25 Hz	Total 40 kW
	EPT-200	30 kW	125 Hz	
2 <sup>nd</sup>	WAS-3000	10 kW	25 Hz	Total 80 kW
	WAS-3000	10 kW	80 Hz	
	EPT-200	30 kW	125 Hz	
	EPT-200	30 kW	200 Hz	

## 5. 요약

본 논문에서는 음향 환경 시험의 기본 형상 및 액츄에이터를 선정하기 위한 기본 변수를 선정하였다. 챔버의 크기는 음장의 확산성을 확보하기 위한 최소의 크기로 선정되었다. 최종 크기는 8.5m x 10.5m x 13.8m이다. 선정된 크기에서 시험 가능한 최저 주파수는 MAXTIQ 계수에 의해 계산할 수 있으며, Q-Factor가 10인 위성을 시험할 경우, 25Hz 대역부터 공진주파수의 가진이 보장된다. 액츄에이터의 파워는 챔버 내부의 흡음에 의한 파워의 소모에 의해 선정되었으며, 음압의 단계별로 각각 2개, 4개의 액츄에이터를 선정하였다. 연성 계수를 18%로 산정한 것으로 안정적인 음압을 재현할 수 있다.

## 6. 후기

본 연구는 정보통신부의 선도기반기술개발사업 (과제번호: IMT2000-A1-2)에 의한 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자께 감사드립니다.

## 7. 참고문헌

- (1) 김홍배, 문상무, 김성훈, 우성현, 이상설, 2002, "다목적 실용위성 2호 구조-열 모델의 음향 환경 시험", 춘계학술대회 논문집, 한국소음진동공학회.
- (2) Sempeyer, L. W., 1955, "Computed Frequency and Angular Distribution of normal Modes of Vibration in Rectangular Rooms," Journal of Acoustic Society of America, Vol. 37, pp. 413-423.
- (3) Personal communication with Mr. Alain Launay, Intespace, Toulouse, France.
- (4) Pierce, Allan D., 1981, "Acoustics," New York, McGraw-Hill, Chapter 6.
- (5) Irwin, J. D., and Graf, E. R., 1979, "Industrial Noise and Vibration Control," Prentice-Hall, INC., Chapter 6.