

공간크기에 따른 로켓모터 충격소음의 비교분석에 관한 연구

송기혁·정성학[†]·강우람^{*}·이덕주^{*}·박종호^{**}

국방과학연구소·^{*}한국과학기술원·^{**}충남대학교
(2014. 5. 12. 접수 / 2014. 6. 23. 채택)

A Study of the Comparison Analysis for the Rocket Motor Impulse Noise by the Indoor Sizes

Kee-Hyeok Song · Sung-Hak Chung[†] · WooRam Kang^{*} · DukJu Lee^{*} · JongHo Park^{**}

Agency for Defense Development · ^{*}Korea Advanced Institute of Science and Technology

^{**}ChungNam National University

(Received May 12, 2014 / Accepted June 23, 2014)

Abstract : The purpose of this study is to analysis the 3 differential size of the interior space for impulse noise. To achieve this goal the 3 kinds (27, 35, 50 m³) of interior space were performed comparing the impulse noise. Result of this study, the standard error of the mean peak sound pressure of value from 0.19 to 0.27dB and there was no significant difference (p<0.01). And B-duration is significant differences (P<0.01) range from 3.98 to 7.93ms. This is respectively less than 10ms. These findings are confirmed in accordance by the 3 differential space size of the indoor-impulse noise due to 0.3 dB or less, so there was no difference to the operational influence. And also below 100 Hz were found fundamental mode frequency analysis. Results were matched with calculated theoretical values.

Key Words : indoor noise, indoor-impulse noise, space size, peak sound levels, B-duration

1. 서론

보병이 운용하는 대전차 무기체계로는 RPG-7이나 106mm 무반동총, TOW 등과 같은 체계가 있다. 실내 공간(병커, 시가전에서 일반 건축물 등)에서 운용할 목적으로 체계를 개발하는 경우, 제한된 실내공간의 특성으로 인해 영구적 청력 손실이나 내부 장기(호흡기, 순환계 등)의 손상, 그리고 그 밖의 심각한 외상(화상, 골절, 전도 등)등의 위험성을 고려해야 한다¹⁾. 기존체계 운용방식은 사출장치가 초기 연소 시 급격한 압력 증가로 노즐부위에 충격파를 생성시키고 이어서 고온, 고압 및 고속의 제트 유동을 형성하여 추력을 제공받는 운용방식이다. 이때, 기존의 연구문헌에 의하면, 운용자에게 가장 위험성이 높은 인자는 충격소음으로 알려져 있다²⁻⁵⁾. 따라서, 운용자의 안전을 위하여 체계 설계 시에는 사출장치의 노즐에서 발생하는 제트 유동(후폭풍)을 형성하는 방법으로 연소가스를 방출하여 무반동 특성을 구현한다. 충격소음에 대한 음향학적인

관점에서 실외공간과 뚜렷하게 비교되는 실내공간만의 특성은 음파의 발산현상에서 확인할 수 있다. 실외공간의 경우, 지면을 제외하고 외부 경계가 없는 음원에서 발생한 음파가 자유공간으로 빠져 나가게 되는 반면 실내공간의 경우 다수의 벽면으로 인해 제한된 공간(Confined space)이 생성되어 공간내부에 음향 에너지가 잔류하게 된다. 그러므로 운용자는 경계면에서 반사되어 돌아오는 강한 충격파에 수차례 반복적으로 노출되고, 노출시간도 상대적으로 길어지게 된다⁶⁾. 따라서 로켓모터에서 발생하는 충격소음의 특성을 이해하고, 수음자를 보호하기 위한 연구가 수행되어야 할 필요성이 있다.

선진국의 충격소음에 관한 연구는 1950년대 M. J. Lighthill이 공력음향에 대한 이론을 제시한 이후 다양한 분야에서 활발히 진행되어 왔으며⁷⁾, 실내에서 발생하는 충격소음에 대한 연구는 G. R. Price에 의해 체계적으로 연구된 바 있다^{8,9)}. 그는 다양한 종류의 충격소음을 실내에서 발생시켜 충격소음의 1/3옥타브 밴드

[†] Corresponding Author : SungHak Chung, Tel : +82-42-821-0562, E-mail : shc@add.re.kr

Agency for Defense Development, 35 YuSeongPostOffice, YuSeong, DeaJeon 350-305, Korea

에너지 스펙트럼을 제시하고 동물이 입는 피해에 대해 보고한 바 있다. 이 외에도 충격소음에 대한 연구는 국내외에서 지속적으로 연구되어 왔지만 실내에서 발생하는 충격소음의 특성에 대해 구체적으로 연구된 사례는 찾아보기 힘들다.

본 연구에서는 운전자 안전을 위해서 제한된 공간의 크기별로 특성을 비교하는 실험을 수행하였다. 또한 3가지 크기의 실내공간(27, 35, 50m³)에서 측정된 음압에 대해서 저주파수 영역에서 나타나는 모드 주파수를 분석하고, 이론치와 실측치를 비교하였다. 기존의 대전차 무기체계는 35m³를 실내공간으로 운용기준을 제시하고 있으나, 명확하게 실내공간 크기의 제약근거는 제시된 바 없다. 따라서 본 연구에서는 35m³ 실내공간 크기를 기준으로 일반 건축물의 통상적인 실내공간 크기인 27m³에서 50m³를 선정하여 실내 충격소음을 비교함으로써 동일 성능의 로켓 추진기관으로 운용상의 특성을 파악하고자 하였다. 실내공간의 크기에 따른 최대피크음압과 잔향시간을 비교하였으며, 주파수 스펙트럼 분석을 통하여 100 Hz 이하 저주파 영역에서 모드 주파수도 함께 분석하였다. 따라서 본 연구에서는 주파수 공명 유무와 특성을 통하여 다양한 운용 조건에서의 성능발휘 조건을 위한 기초자료를 제공하고 자 하였다.

2. 제한된 공간에서의 소음

충격소음은 특성 상 매우 짧은 지속시간을 가지고 있으며 일반적으로 음압의 크기는 최대음압레벨(Peak Sound Pressure Level)과 지속시간(Duration)으로 나누어 표기한다¹⁰. 측정된 데이터는 시간에 대한 압력 데이터로 저장되고, 단위는 파스칼(Pa)이다. 이렇게 수집된 선형적 음압 데이터는 사람의 귀가 소리를 지수적으로 감지하기 때문에 지수 형태로 바꾸어 주어야 한다. 아래의 식 (1)을 이용하면 데시벨(dB) 단위로 변환할 수 있으며 측정된 값 중 가장 큰 피크(Peak)가 최대음압레벨이다¹¹⁻¹³.

$$dB = 20 \log_{10} \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad (1)$$

여기서 P_0 는 최소 가청값 $P_0 = 2 \times 10^{-5} N/m^2$ 을 지속시간(Duration)은 충격음이 발생하였을 때 음이 지속되는 시간을 말하며 평가방법에 따라 크게 A~D로 구분된다. 본 논문에서 다루는 B-지속시간은 미 국방부에서 많이 사용되는 기준으로 최대음압레벨로부터

-20 dB이 되는 압력(피크압력의 1/10 수준)을 기준으로 결정된다^{10,14}. 이때, 제한된 공간에서의 소음 특성은 모드 주파수를 통하여 나타난다¹⁵. 직육면체 공간의 벽면이 강제 경계조건으로 이루어진 경우 실내공간에 형성되는 음압은 여러 모드로 나타나며, 이 때 가진 주파수 계산은 식 (2)를 통해 할 수 있다. 여기서 c 는 음속을 나타내며 아래 첨자 l, m, n 은 각각 공간상의 x, y, z 방향의 모드 계수를, L_x, L_y, L_z 는 각 방향의 길이를 의미한다.

$$f_{lmn} = k_{lmn} \frac{c}{2\pi} \quad (2)$$

$$k_{lmn}^2 = \left(\frac{l\pi}{L_x} \right)^2 + \left(\frac{m\pi}{L_y} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L_z} \right)^2$$

위와 같이 닫힌 공간에서 발생하는 모드 주파수 이외에도 실내 공간에는 창문 및 출입문과 같은 일부 열린 면이 존재하기 때문에 공명기 모드도 발생한다. 공명기 모드 주파수에 대한 식은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. V 는 실내 공간의 부피를 의미하고 N 은 열린 공간의 개수를 의미한다. A_i 는 각 열린 공간의 면적이며, l_i 는 각 열린 공간의 공명기 목의 유효길이이다. 공명기 목의 유효길이는 실제 목의 길이와 목의 형상에 따른 영향을 고려한 길이를 더한 것이다. 직사각형 형태의 열린 공간에 대한 유효길이 계산은 직사각형의 가로세로비를 이용하여 계산(식 (4))할 수 있다¹⁶.

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \left(\frac{A_i}{l_i} \right)} \quad (3)$$

$$e/S = \frac{2}{\pi} \left\{ \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) \ln \left[(1 + \alpha^2)^{1/2} + \alpha \right] + (1 + \alpha) \ln \left[\left(1 + \frac{1}{\alpha^2} \right)^{1/2} + \frac{1}{\alpha} \right] \right. \\ \left. + \frac{1}{3} \alpha (1 + \alpha) \left[1 + \frac{1}{\alpha^3} - \left(1 + \frac{1}{\alpha^2} \right)^{3/2} \right] \right\} \quad (4)$$

where α : aspect ratio of rectangular section of piston
 e : hence the attached layer thickness
 l : perimeter of piston
 S : sectional area of piston

Fig. 1은 실내 충격소음을 비교함에 있어서 주요한 두 매개변수, 최고 소음도와 B-지속시간을 정의한 것이다. 지속시간에는 4가지 종류(A, B, C, D)가 있는데 MIL-STD- 1474D에 적용되는 B-지속시간은 음원에서 발생한 충격파의 에너지 뿐 만 아니라 지면 반사와 같

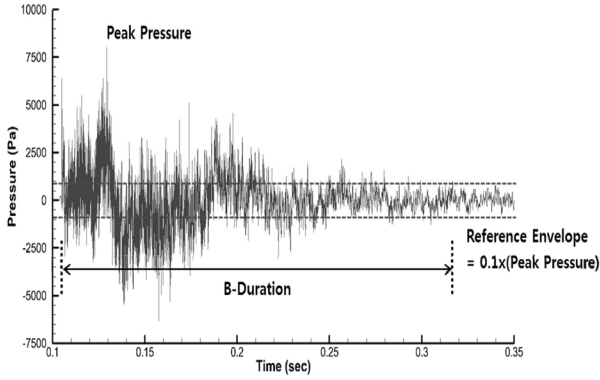


Fig. 1. Definition of Max Noise and duration

은 주변 환경의 영향도 함께 고려한 것으로, 본 연구에서 다루는 실내 공간에서의 충격소음에 대한 평가에 가장 적합하다고 할 수 있다.

두 매개변수는 다음과 같이 정의한다. 먼저 전체 음압 신호에서 최고 소음도를 정의한다. 최고 소음도는 순간 음압이 가장 높을 때의 음압 레벨 값으로 충격파에 의해 발생하는 양의 음압 값을 기준 음압(20 μ Pa)에 대해 변환한 값이다. 그리고 해당 음압 레벨보다 20 dB 낮은 값, 즉 음압 기준으로 순간 최고 음압의 1/10인 값을 기준 압력으로 설정하고 그림에 나타난 것과 같이 기준 영역(envelope)을 설정한다. 이때, 충격파가 처음 관측되는 순간으로부터 시간이 지남에 따라 음압 변동(fluctuation)이 감쇠를 통해 앞에서 정의한 기준 영역 내부로 제한되는 순간까지의 시간을 B-지속시간으로 정의한다. 일반적인 경우, B-지속시간은 최고 소음도가 관측된 순간부터라고 정의한다. 이것은 강한 충격파가 가장 먼저 관측되기 때문인데, 외부 경계면이 없는 실외 공간에서 측정된 음압 신호를 기준으로 정의한 것이다. 반면, 본 연구에서 다루는 실내공간에서는 벽면에서의 반사로 인해 가장 강한 충격파가 가장 먼저 관측되지 않을 수 있으므로 ‘최초의 충격파가 나타난 시점’을 기준으로 B-지속시간을 정의하였다¹⁰⁾.

3. 실험설계

본 실험은 제한된 실내공간에서 체적크기(27, 35, 50 m^3)가 3가지의 경우에 실험을 수행하였으며, 음압은 발사관 후방의 소음원으로부터 0.5 m 떨어진 곳에 위치한 마이크로폰으로 측정하였다. 벽 재질은 콘크리트이며 발사장과 옆문, 카메라 설치장을 하나씩 설치하였으며, 모두 열린 상태에서 실험을 수행하였다.

사용된 마이크로폰(B&K 4944A)은 압력형으로 최대 182 dB까지 측정이 가능하고 측정 시 데이터 수집 속

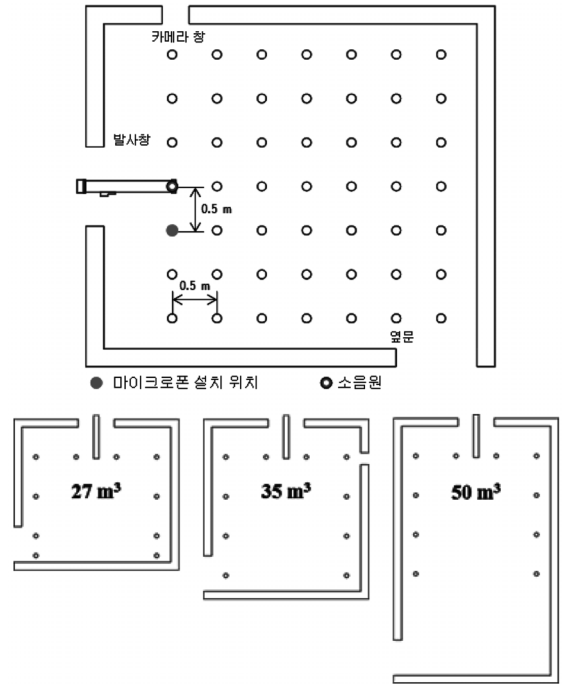


Fig. 2. Experimental Setup(Top view)

도(Sampling Rate)는 100,000 Hz 이다. 모든 마이크로폰은 지상에서 1.2 m 높이에 위치하여 마이크로폰에는 방풍망(wind screen)을 설치하여 바람으로 인한 풍잡음의 영향을 최소화하였다.

4. 제한된 실내공간 크기별 소음특성 비교분석

실외와 실내실험에서 얻은 시간에 따른 음압변화율도식화했을 때 대부분의 경우 Fig. 3과 같은 경향을 보였다.

표 1은 실내공간 크기별 최대음압의 평균차와 표준

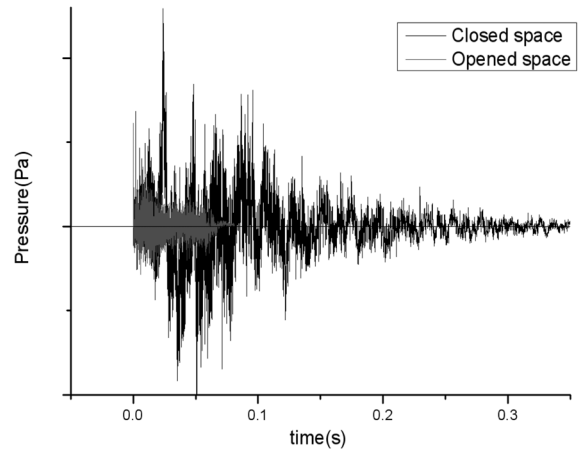


Fig. 3. Experimental result of measurement data

Table 1. Comparison Analysis by the indoor-sizes

Size	Peak Sound Pressure Level(dB)		B-Duration(ms)	
	Average	S.D.	Average	S.D.
27m ³ - 35m ³	0.28950	0.84684	-16.12500	17.79405
27m ³ - 50m ³	0.42900	1.15977	-119.65000	35.48206
35m ³ - 50m ³	0.13950	1.20073	-103.52501	32.03841

편차이다. 실내공간 크기별로 20회에서 100회의 음압 측정 후 이상치를 제외하고 각각 20회를 통계분석하였다. 실험을 통해 측정된 최대음압레벨 평균의 표준오차는 0.19에서 0.27 dB로 나타났으며, 공간의 크기별 통계적 차이는 없었다. B-지속시간은 3.98에서 7.93ms로 통계학적으로는 유의한 차이(p<0.01)를 보였으나, 10ms이하 인 것으로 나타났다. 피크 발생을 유발한 저주파 영역의 음압특성을 알아보기 위해서 100 Hz 이하 저주파 영역의 스펙트럼을 세부적으로 분석하였다. 3가지 크기의 실내공간에서 특정 주파수의 공명이 발생하였다. 100 Hz 이하 범위에서 5개 이상의 동일한 주파수 피크가 관찰되는 것을 확인할 수 있다.

또한, 최대피크음압과 지속시간 간의 평균의 표준오차와 대응 비교한 95% 신뢰구간 상한치와 하한치 등의 통계량은 표 2에서와 같다.

최대피크음압과 지속시간의 증가원인을 분석하기 위해 실내와 실외에서 측정된 시간-압력 데이터를 FFT(Fast Fourier Transform)하여 1/3옥타브 밴드 주파수 영역별 음압으로 나타내면 Fig. 4와 같다. 분석에 사용된 음압데이터는 보정이 가해지지 않은 값이다. 통상적으로 음압의 주파수 특성을 분석하는 경우에는 청각 보정(Weighting)된 1/3옥타브밴드가 사용되지만 본 연구에서는 실제 원음에 대한 조건별 주파수 특성 차이를 알아보는 것이 목적이기 때문에 보정하지 않은 원음의 시간-압력 데이터를 사용하였다. 분석 결과, 10 kHz 이하의 전 주파수 영역에서 음압이 커졌으며 특히 100 Hz 이하 저주파 영역에서 음압이 급격히 커짐을 확인하였다. 따라서 수음자 보호를 위해서 저주파의 차음성능을 고려한 청각 보호 장구 선정이 고려되어야 할 것으로 판단된다.

Table 2. Statistical data for the SE and CI by the indoor-sizes

Size	Peak Sound Pressure Level (dB)					B-Duration (ms)				
	SE	95% CI		T value	P value	SE	95% CI		T value	P value
		upper	lower				upper	lower		
27m ³ - 35m ³	0.331	-0.809	0.575	-0.353	0.728	3.624	-24.835	-9.664	-4.759	0.000
27m ³ - 50m ³	0.276	-0.324	0.829	0.916	0.371	7.978	-132.548	-99.151	-14.521	0.000
35m ³ - 50m ³	0.401	-0.469	1.208	0.922	0.368	6.623	-112.463	-84.736	-14.886	0.000

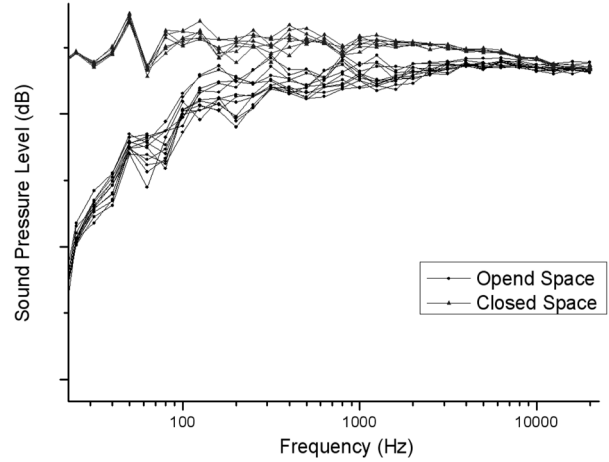


Fig. 4. FFT results (no weighting)

Fig. 5는 실내 공간에서 측정된 시간-압력 데이터와 이를 가지고 100 Hz 이상의 고주파 성분을 제거(100 Hz Low-pass filter)하여 함께 나타낸 결과를 보여주고 있다. 100 Hz 이하의 저주파수 만으로도 전체 소음의 경향성을 잘 나타내주고 있고, 결과적으로 이러한 저주파 음압이 피크 발생에 크게 기여했음을 알 수 있다.

다음으로 피크 발생을 유발한 저주파 영역의 음압특성을 알아보기 위해서 100 Hz 이하 저주파 영역의 스펙트럼을 세부적으로 분석하였다. Fig. 6은 27, 35, 50m³ 세 가지 크기의 실내공간에서 특정 주파수의 공명이 발생한 것을 보여주고 있다. 공간크기에 따라 100 Hz 이하 범위에서 5개 이상의 동일한 주파수 피크가 관찰되는 것을 확인할 수 있다.

발생된 주파수 피크는 실내에서의 공명에 의한 반사파의 중첩으로 인한 것으로 분석된다. 실내에서 모드 주파수와 공명기 모드가 발생하여 저주파 영역에서 톤(tone) 주파수를 유발시킴으로써 음압의 증가 원인이

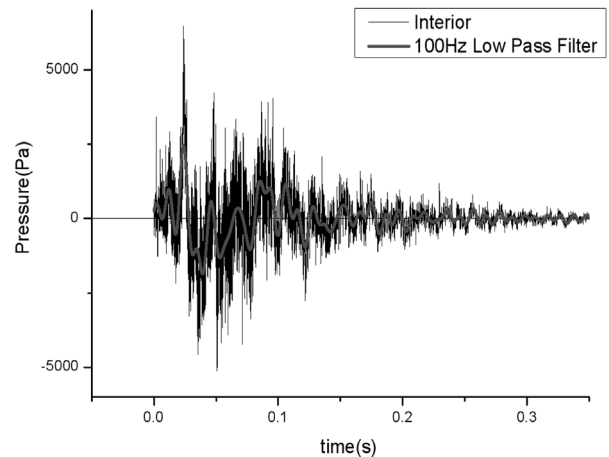
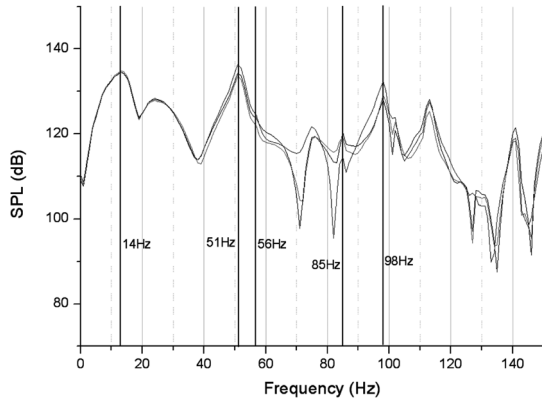
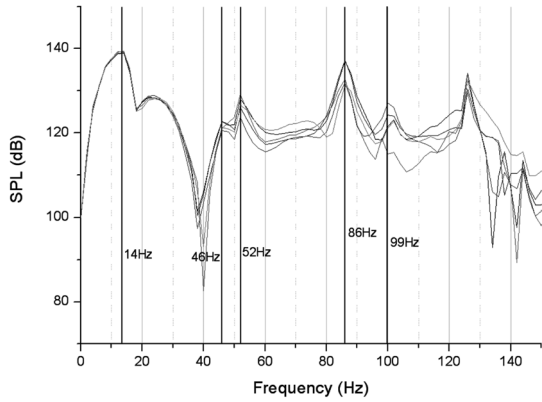


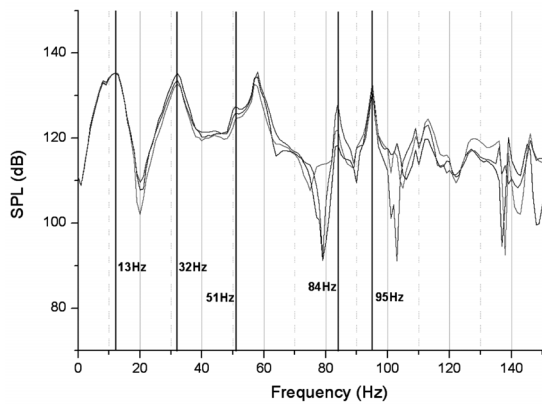
Fig. 5. 100 Hz Low Pass Filter



(a) 27 m³



(b) 35 m³



(c) 50 m³

Fig. 6. Indoor Acoustic Modes at Below 100 Hz

되었다. Table 3은 주파수 이론값과 실제 측정값을 비교한 것이다. 주파수 이론값은 식(2), (3)을 통해 얻은 결과로 실내공간의 벽에 존재하는 발사 창, 카메라 창 및 출입문의 영향이 고려되었다.

다음으로 피크 발생을 유발한 저주파 영역의 음압특성을 알아보기 위해서 100 Hz 이하 저주파 영역의 스펙트럼을 세부적으로 분석하였다. Fig. 6은 27, 35, 50 m³ 세 가지 크기의 실내공간에서 특정 주파수의 공명이 발생한 것

Table 3. Comparison of the frequency modes between theoretical data and experimental data

Freq. by the indoor sizes (Hz)	27 m ³		35 m ³		50 m ³	
	Theo. data	Exp. data	Theo. data	Exp. data	Theo. data	Exp. data
Modes						
Frequency mode	22	14	20	14	16	13
FB(f_{100})	53	56	43	46	29	32
LF(f_{010})	49	51	49	52	49	51
UL(f_{001})	85	85	85	86	85	84
LR(f_{020})	97	98	97	99	97	95

을 보여주고 있다. 공간크기에 따라 100 Hz 이하 범위에서 5개 이상의 동일한 주파수 피크가 관찰되는 것을 확인할 수 있다.

본 실험에 사용된 실내공간은 그 크기를 조절하기 위해 발사 창 맞은편에 있는 뒷벽을 앞뒤로 움직이는 형태이다. 따라서 이론적으로 상하(UL: Upper Lower), 좌우(LR: Left Right) 모드 주파수는 동일하여야 한다. 실제 측정된 결과에서도 스펙트럼을 통해 상하, 좌우 모드 주파수가 세 경우 모두 비슷한 대역에서 발견되는 것을 확인할 수 있다. 또한 실내 공간 크기가 전후로 커짐에 따라 공명기 모드(Frequency mode)와 전후(FB: Front Back) 모드 주파수가 이론적으로 작아지며 실제 측정된 결과가 이론적으로 계산된 결과와 잘 일치하였으며, 10 kHz 이하의 전 주파수 영역에서 음압이 커졌으며 특히 100 Hz 이하 저주파 영역에서 음압이 급격히 커짐을 확인하였다¹⁶⁾.

5. 결론

본 연구는 미 국방부의 MIL-STD-1474D의 충격소음 평가 기준에 따라 공간크기에 따른 실내 충격소음의 특성을 비교분석하였다. 소음원이 되는 로켓 추진장치의 충격소음 분석결과, 3가지 실내 공간 크기(27, 35, 50 m³)에서 최고음압레벨(Peak sound pressure level) 간에는 통계적으로 유의차가 없었으나, 지속시간 간에는 유의한 차이를 보였다(p<0.001). 또한, 주파수 분석을 통해 100 Hz 이하 저주파 영역에서 모드 주파수가 발생했음을 확인하였다. 실내 공간크기에 대한 모드 주파수 분석 결과, 실험값이 이론값과 비슷함을 알 수 있었다.

본 연구결과의 주요한 의미 중에서 한 가지는 3가지 공간크기에 따른 최대음압레벨 차이는 없었으며, 저주파 영역에서만 음압이 크게 증가하는 특성을 보였다(p<0.001)는 특징이다. 이러한 이유를 밝혀내기 위한 분석을 수행하였다. 실내 공간 크기별(27, 35, 50 m³)로

각각의 측정된 음압데이터를 대상으로 100 Hz 이하 저주파 영역을 분석해 본 결과, 기본 모드 주파수와 공명기 모드가 발생하였으며 이것이 톤(tone) 주파수를 유발시킴으로써 음압의 증가 원인이 되었음을 실험을 통해 확인하였다.

References

- 1) U.S. Environmental Protection Agency, "Information on Levels of Environmental Noise Requisite to Public Health and Welfare with an Adequate Margin of Safety", U.S. EPA Office of Noise Abatement and Control, Report 550/9-74-004, 1974.
- 2) E. B. Shank and G. R. Grinther, "Firing from Enclosures with LAW, DRAGON an TOW", Technical Memorandum 16-75, U.S. Army Human Engineering Laboratories, Aberdeen Proving Ground, MD, pp.39, 1975.
- 3) G. R. Garinther and K. D. Kryter, "Auditory and Acoustical Evaluation of Several Shoulder-rifles", Technical Memorandum, U.S. Army Human Engineering Laboratories, Aberdeen Proving Ground, MD, pp.1-65, 1965.
- 4) U.S. Army Human Engineering Lab., "Maximum Noise Level for Army Materiel Command equipment", HEL Standard S-1-63B, Aberdeen Proving Ground, MD, pp.16, 1965.
- 5) A. Glorig, W. D. Ward and J. Nixon, "Damage Risk Criteria and Noise-induced Hearing Loss", Arch. Otolaryngol., No.74, pp.413-423, 1965.
- 6) W. J. Murphy and C. A. Kardous, "A Case for using A-weighted Equivalent Energy as a Damage Risk Criterion", National Institute for Occupational Safety and Health, EPHB Report No.350-11a, 2012.
- 7) M. J. Lighthill, "On Sound Generated Aerodynamically: I, General Theory", Proc. Royal Society of London, Series A, pp.564-587, 1952.
- 8) G. R. Price, "Firing Recoilless Weapons from Enclosures," Technical Memorandum 20-91, U.S. Army Human Engineering Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD, pp.39-48, 1991.
- 9) G. R. Price, "Firing from Enclosures with 90mm Recoilless Rifle: Assessment of Acoustic Hazard," Technical Memorandum 11-78, U.S. Army Human Engineering Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD, pp.1-14, 1978.
- 10) MIL-STD-1474D, "Department of Defense Design Criteria Standard", 1996.
- 11) M. P. Branch, "Comparison of Muzzle Suppression and Ear-level Hearing Protection in Firearm use", 2011.
- 12) G. R. Garinther and J. B. Moreland, "Transducer Techniques for Measuring the Effect of Small Arms' Noise on Hearing. Technical Memorandum", U.S. Army Human Engineering Laboratories, Aberdeen Proving Ground, MD, pp.11-65, 1965.
- 13) J. H. Patterson and D. L. Johnson, "Temporary Threshold Shifts Produced by High Intensity Free field Impulse Noise in Humans Wearing Hearing Protection", USAARL Report No. 8, pp.94-46, 1994.
- 14) K. Buck, "Performance of Hearing Protectors in Impulse Noise", RTO HFM Lecture Series, 2000.
- 15) Y. H. Kim, "Lecture of Acoustics", ChungMonGak, pp.204-213, 2013.
- 16) C. L. Morfey, "Acoustic Properties of Openings at Low Frequencies", J. Sound Vib., Vol.9, No.3, pp.357-366, 1969.