

패널형 흡음재를 이용한 무향실의 설계

Anechoic Chamber Design using Broadband Compact Absorber

두세진* · 오세웅** · Peter Brandstätt*** · Helmut V. Fuchs***

Sejin Doo, Sewoong Oh, Peter Brandstätt, and Helmut V. Fuchs

Key Words : 무향실, 썰기, 차단주파수, 정제파, 모드, 공진, BCA

ABSTRACT

Conventional method for designing and installing anechoic chambers is to utilize porous wedges for the sound absorbers. As cutoff frequency lowers down such as 63Hz or 50Hz, the corresponding long wedges diminish the free field area of the chamber. In this study, a new broadband compact absorber(BCA) is introduced which absorbs acoustic energy down to 50Hz. Most prominent is that it measures only 250mm thick. A freely vibrating panel between the non-fibrous absorbers allows tuned absorption at the low frequency region in addition to the high frequency absorption resulted from the conventional absorber installed at the front. Standing waves at low frequency range are suppressed as the BCA modules which are tuned to the corresponding modes absorb sound energy effectively, resulting in anechoic condition. Not only the low frequency performances, but the high frequency absorption is measured to meet adequate conditions for the anechoic chamber. Realized BCA chambers are presented.

1. 서론

음원의 음향특성을 측정하는 데에 있어서 사용되는 실험실적 음향환경은 극단적인 2가지 환경이다. 즉, 음원으로부터 방출되는 음 이외에 전혀 다른 음이 존재하지 않는 것을 조건으로 하는 무향실과, 음원으로부터 방출된 음이 벽, 천장, 바닥 등의 경계에서 난반사하도록 하는 잔향실이 그것이다. 무향실에서는 음원 자체만으로부터 음향이 출력되고 반사음이 전혀 없으므로 음원의 여러 가지 특성, 즉 절대적 음압레벨, 인텐시티, 음향출력, 지향특성 등 많은 특성을 측정할 수 있을 뿐만 아니라 멀티채널 스피커를 이용한 심리음향과 서라운드 음향의 연구 등에도 유용하게 사용될 수 있다. 반면에 잔향실은 음향출력을 측정하는 용도로 주로 사용되며, 흡음과 차음 특성 측정시에 기준실로 지정되어 있는 실험공간이다. 무향실과 잔향실은 그 음향적인 성능에 관하여 국제규격인 ISO 등에 규정되어 있다.[1][2]

본 연구에서는 무향실의 조건을 만족시키기 위해 설치하는 썰기형태의 흡음재가 아닌 두께 250mm 패널형태의 흡음재를 제안한다. 광대역 흡음패널의 원리와 음향적인 특성, 그

리고 이를 이용한 설계의 방법과 설치 예에 대하여 설명한다.

2. 기존무향실의 흡음재

무향실을 구성하기 위한 흡음재는 일반적으로 유리섬유, 폴리우레탄, 멜라민 등 다공질 흡음재를 썰기형태로 가공하여 사용하고 있으며, 썰기의 길이는 무향실의 조건을 만족하는 최저 하한 주파수와 직접적으로 관계가 된다.

1946년 Beranek과 Sleeper의 실험적 연구 이래 반사음의 에너지가 1퍼센트 이하일 것, 다시 말해서 음압반사계수가 0.1 이하일 것이라는 조건을 만족하는 최저주파수가 무향실의 차단주파수로 정의되어 사용되어 왔다[3]. 이에 근거하면 흡음썰기의 길이는 무향실 하한주파수 파장의 1/4 이상이어야 하므로, 예를 들어 차단주파수를 63Hz로 설정하면 63Hz의 파장이 5.4m이므로 썰기의 길이는 1.35m로 설계된다.

같은 썰기길이라면 차단주파수가 낮을수록 유리하므로 썰기길이를 고정하고 차단주파수를 가능한 한 낮추기 위한 노력은 썰기의 밀도와 각도를 조절하는 노력으로 이어졌으며, 썰기와 후부 공기층을 이용하여 공진시스템을 구성하는 방법에 대한 연구도 수행되었다.[4]-[6]

하지만 현재까지도 무향실의 차단주파수와 썰기길이는 반

* 동아방송대학 방송기술과
E-mail : sjdoo@dabc.ac.kr
Tel : (031) 670-6700, Fax : (031) 670-6703

** 두오어쿠스틱스

*** Fraunhofer-Institut für Bauphysik,
D-70569 Stuttgart

비례한다는 원칙에는 크게 변함이 없어 차단주파수를 63Hz, 혹은 50Hz 등으로 낮추기 위하여서는 썩기길이가 1.35m, 1.7m 등으로 길어지게 된다. 썩기를 설치함으로써 불편한 것은 이로 인해 사용가능한 실의 영역이 많이 좁아지게 된다는 점이다.

3. 신개념 광대역 흡음재 BCA

저역에서의 흡음 문제를 해결코자 독일의 Fraunhofer Institut für Bauphysik에서는 이전과는 전혀 새로운 방법의 시도를 하게 되었으며 이것은 기존의 썩기를 사용하는 resistive 흡음방법에서 탈피하고 reactive한 흡음을 제안하고 있다.[7][8] 제안하는 방법은 실의 치수에 따라 결정되는 정재파와 깊은 관계가 있다.

경계가 단단한 일반적인 장방형, 혹은 정방형 실의 경우 벽 반사에 의한 정재파가 형성되며 그 정재파 주파수 $f_{(n_x, n_y, n_z)}$ 는 다음 식에 의해 결정된다.

$$f_{(n_x, n_y, n_z)} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (1)$$

여기서 n_x, n_y, n_z 는 정재파 모드를 나타내는 정수이며, c 는 음속, l_x, l_y, l_z 는 실의 치수이다. 예를 들어 다음 그림 1과 같은 치수의 실에는 그림 2와 같은 모드와 정재파 주파수가 형성된다.

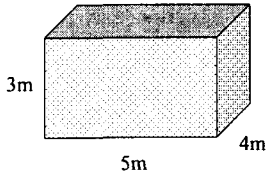


그림 1. 정재파 발생의 예로 상정한 실의 치수

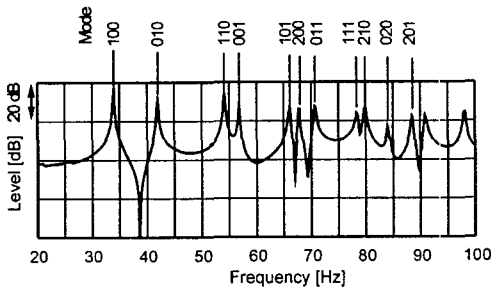


그림 2. 정재파 주파수 및 모드

이렇게 발생하는 정재파는 다음 그림과 같이 각 정재파 주

파수별로 실의 위치별 음압이 서로 다르게 분포하게 된다. 그림은 (1,1,0) 모드인 55Hz와 (2,1,0) 모드인 92Hz의 정재파 형상을 3차원 그래프로 그린 것이다.

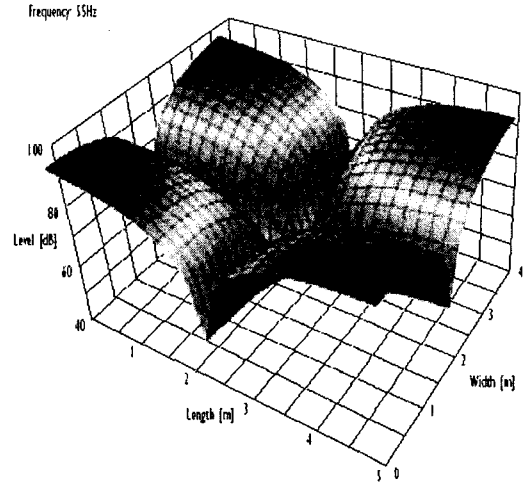


그림 3. (1,1,0) 모드의 정재파 55Hz

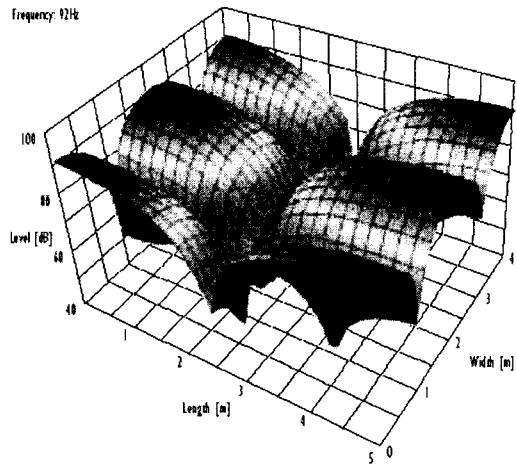


그림 4. (2,1,0) 모드의 정재파 92Hz

벽의 각 위치를 고정하고 보면 각 위치에서 음압이 최대로 되는 주파수가 결정되며 따라서 해당 주파수의 음을 흡음하면 정재파를 효과적으로 억압할 수 있게 된다. 이렇게 정재파 주파수를 각 위치에서 적극 흡음토록 계획하는 것이 본 연구의 핵심 중의 하나이다.

또한 일정 위치에서 정재파 주파수를 흡음하는 것은 현대역 흡음이므로 패널공진을 이용하며 이것은 본 연구의 또 하나의 중요한 요소이다. 그림 5의 기존 무향실 썩기는 공기 중 음파의 고유저항값인 비음향임피던스 (specific acoustic impedance) 400 [rayl]로부터 썩기로 입사되면서

점차로 증가적으로 증가, 혹은 감소하는 저항성분으로 나타낼 수 있다. 패널 공진은 이러한 전통적인 흡음체를 이용하는 resistive 흡음과는 다른 개념으로서 그림 6에 보이는 바와 같은 reactive 흡음 기법이다. 판재 흡음체는 그림 6에 보인 바와 같이 전후면에 둘러싸는 흡음재 안쪽에 경계가 자유진동할 수 있는 상태로 유지되는 판재를 설치하고 음파가 입사되면 판진동이 발생하여 흡음재와 판재의 열손실로 흡음토록 하는 구조이다. 전기음향적으로 표현하면 전면의 고음용 저항부하 R(f)와 판재의 저음용 L-C-R 공진부하로 그림과 같이 증가적으로 표현할 수 있다. 그림 7에 보인 것처럼 판진동의 공진에 의한 admittance와 판재의 앞에 설치하는 고역용 흡음재의 admittance의 합이 총합 admittance가 되며, 이것이 적절히 평탄하게 유지되도록 설계하게 된다. 공기의 자체 비음향임피던스인 400[rayl]이 정재파 주파수를 중심으로 넓은 대역에서 유지되도록 공진특성의 Q를 조절함으로써 흡음계수를 높일 수 있다.

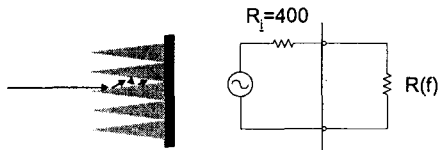


그림 5. 기존의 무향실 썩기와 음향등가회로

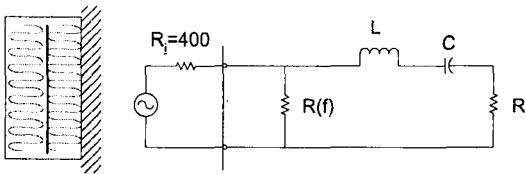


그림 6. 광대역 패널 흡음재 BCA의 형상과 음향등가회로

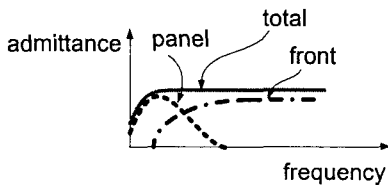


그림 7. 패널 흡음재의 음향 어드미턴스

경계조건이 "free"인 판재의 공진주파수는 다음 식 (2)와 (3)에 의해 결정되며, 이를 이용하여 원하는 주파수 f_R 로 공진토록 설계가 가능하다.

$$f_R = \frac{c_d}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\rho_d}{\rho_l \cdot t \cdot d}} \quad [\text{Hz}] \quad (2)$$

윗 식에서 c_d 는 흡음재 내부에서의 음속, ρ_d 와 ρ_l 는 각각 흡음재

와 판재의 밀도, 그리고 t 와 d 는 각각 판재와 흡음재의 두께이다.

$$f_{x,y} = \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{\frac{B'}{m''}} \cdot \left[\left(\frac{x}{L_x} \right)^2 + \left(\frac{y}{L_y} \right)^2 \right] \quad [\text{Hz}]$$

$$B' = \frac{E \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)}, \quad x, y = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

그리고 윗 식에서 E 는 Young률, B' 는 L_y 에 정규화된 굽힘강도, μ 는 0.35, 그리고 m'' 는 단위면적당 질량이며, L_x 와 L_y 는 판재의 치수이고, $f_{x,y}$ 는 판재의 공진주파수, x 와 y 는 모드를 나타내는 정수이다.

제한하는 방법의 가장 큰 장점은 1.35m 혹은 1.7m의 긴 흡음체가 필요하던 저음대역의 흡음이 단지 두께 250mm인 얇은 흡음체로 가능하게 된다는 것이다. 따라서 무향실의 가용 면적이 기존 방법을 사용한 경우보다 월등히 넓어진다는 장점이 있다.

4. 광대역 패널형 흡음재 BCA의 성능

100Hz 이하의 저음대역에 대한 흡음특성 측정이 가능하도록 저음대역에서의 정재파 발생 현상을 저감시킨 잔향실에서 측정된 패널형 흡음재 BCA의 흡음성능은 다음과 같다. 잔향실법에 의한 예지 효과에 의해 1.0이 넘는 높은 흡음계수를 보이고 있다.

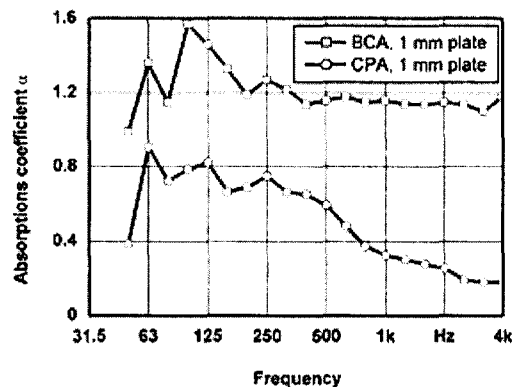


그림 8. 패널형 흡음재 BCA의 흡음성능

50Hz~4kHz에 걸친 넓은 대역에 걸쳐 높은 흡음계수를 보이는 것을 알 수 있어 본 연구의 결과가 유용함을 볼 수 있다.

실험에 사용한 잔향실에서의 흡음특성 측정은 4kHz 대역 이상에서는 불가능하므로 이 이상의 고역에 대해서는 다음과 같이 현장 측정 방법을 사용하였다. 스피커로부터 신호를 출력하여 측정 마이크로폰으로 임펄스 응답을 수음하면

스피커의 직접음과 패널형 흡음재 BCA에 반사되어 돌아오는 반사음이 일정 시간차를 가지고 마이크로폰에 입력된다. 거리에 의한 감쇠를 제외하고 진폭의 감쇠량을 측정하면 패널 흡음재 BCA의 수직입사에 대한 반사계수를 구할 수 있다.

그림 9는 측정된 임펄스 응답이며 그림 내의 작은 사각형으로 표시한 부분은 흡음재 BCA로부터 반사된 양을 나타낸다.

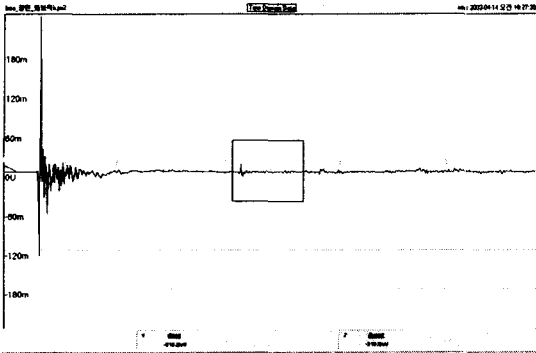


그림 9. 광대역 흡음재 BCA의 반사음 임펄스 응답

스피커의 직접음과 흡음재 BCA로부터 반사된 부분을 각각 주파수 영역으로 변환하고 이를 이용하여 반사계수를 구하고, 다시 흡음계수로 변환하면 다음 그림 10과 같은 흡음계수 주파수특성을 얻을 수 있다. 그림은 가로축이 선형주파수 영역인 점에 주의하고, 협대역 측정인 점을 감안하면 1/3옥타브 분석인 경우 0.99를 상회하는 흡음계수임을 예측할 수 있다.

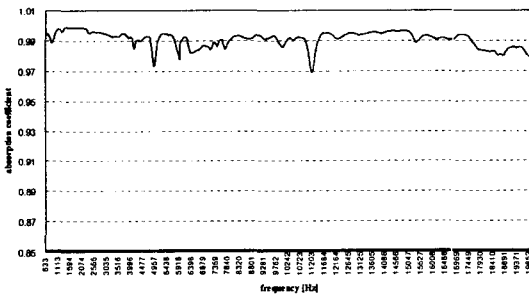


그림 10. 광대역 흡음재 BCA의 고역에서의 흡음계수

5. BCA 무향실의 설치 예

무향실의 유효자유음장 영역을 확장시킬 수 있다는 면에서 장점이 많은 이유로 광대역 패널형 흡음재 BCA는 유럽지역을 중심으로 설치되었으며 특히 자동차업체가 채택에 주도하고 있다. 다음 그림은 그 한 예로서 BMW

의 엔진테스트를 위한 완전무향실에 BCA가 설치된 모습을 보여주고 있다.

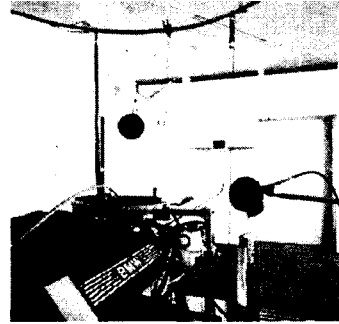


그림 11. BCA 흡음재를 이용한 BMW의 완전무향실

5. 결론

차단주파수가 낮은 무향실의 경우 흡음 썬기의 길이로 인하여 사용할 수 있는 자유음장영역이 작아질 수 밖에 없었다. 새로이 개발된 BCA흡음재를 이용하면 250mm의 두께로 최저 50Hz에 이르는 차단주파수의 무향실을 실현할 수 있으므로 무향실 치수가 작아지고 공조, 방진, 기계부 등이 모두 절약될 수 있어 향후 무향실 설치에 좋은 대안이 될 것으로 기대한다.

참고 문헌

- (1) ISO 3741: Acoustics Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure Precision method for reverberation rooms, 1999
- (2) ISO 3745: Acoustics Determination of sound power levels of noise sources. Precision methods for anechoic and semi-anechoic rooms. 2000.
- (3) Beranek, L. L. and Sleeper, H. P., Jr., 1946, "The Design and Construction of Sound Anechoic Chambers", J. Acoust. Soc. Am. 18, pp.140-150.
- (4) Koidan, W. and Hruska, G. R., 1978, "Acoustical properties of the National Bureau of Standards anechoic chamber", J. Acoust. Soc. Am. 64(2), pp.508-516.
- (5) Koidan, W., Hruska, G. R., and Pickett M. A., 1972, "Wedge Design for National Bureau of Standards Anechoic Chamber", J. Acoust. Soc. Am. 52(4), pp.1071-1076.
- (6) Ingerslev, F., Pedersen, O. J., Møller, P. K., and Kristensen, J. 1967, "New Rooms for Acoustic Measurements at the Danish Technical University", Acustica 19, pp.185-199.
- (7) Zha, X., Fuchs, H.V. and Späh, M., 1998, "A new concept for acoustic freefield rooms (in German). Rundfunktechnische Mitteilungen 42(3), pp.81-91.
- (8) Fuchs, H.V., 2001, "Alternative fibreless absorbers new tools and materials for noise control and acoustic comfort", acta acustica - Acustica 87(4), pp.414-422.