

무향실의 설계 및 제작

이 득 웅

The Design and Construction of the Anechoic Chamber

Deuk-Woong Lee



●이득웅[(주)다비엔지니어링 대표이사]
●1951년생
●기계공학에서 음향학을 전공하였으며, 소음·진동원인에 관하여 분석 및 제어 방법에 깊은 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

산업 문명이 발달됨과 더불어 현대인은 원하지 않는 환경소음에 더욱 빈번히 노출되고 있다. 산업사회 초기에는 이런 불편한 환경소음에 대하여 신경을 쓰지 못하거나 중요하게 인식을 하지 않았다. 그러나 생활의 질적 수준이 향상되어 감에 따라 물질적인 만족뿐만 아니라 문화 생활을 영위하고자 하는 욕구가 증대되고 있으므로, 쾌적하고 정온한 생활환경을 유지해야 할 필요성이 요구되기 시작하였다.

따라서, 음향 학자들은 소음의 발생 원인과 특성을 연구하기 시작하였다. 소음은 원하지 않는 듣기 싫은 소리로 정의된다. 소음의 판단 기준은 크기와 더불어 주파수 성분, 지속 시간 등이며 개인의 경험에 따라 어떤 사람에게는 신경쓰이는 소음이 될지라도 다른 사람에게는 그렇지 않을 수도 있다. 이를 객관적으로 표현하기 위해 여러가지 단위가 고안되어 현재 사용되고 있다.

소음의 저감 대책은 소음원의 소음 감쇠,

소음 전달 경로의 소음 저감 및 수음자에 대한 대책으로 나눌 수 있다. 여기에서 소음원의 소음 저감 대책을 세우기 위해서는 소음원의 주파수 특성을 정확하게 분석해야 하고 이를 위해서는 자유음장이라는 공간이 필요하게 된다. 음향학적으로 자유음장이란 점음원으로부터 무지향적으로 방사되는 음의 음압레벨(sound pressure level)이 역이승법칙(inverse square law)을 따르는 음장으로 정의된다. 이는 음원으로부터 거리가 두 배 증가함에 따라 음압레벨이 6dB 감소함을 의미한다. 즉, 주변 소음으로부터 발생한 음이 다른 물체나 벽으로부터 반사된 반사음이나 회절음의 영향을 받지 않는 음장을 말한다. 자유음장은 자연계에서 극히 제한적으로 존재하지만 인간이 측정장비 및 측정 대상물을 이동시켜 이용할 수 없으므로 인공적인 시설로서 무향실을 만들어 자유음장 환경을 조성한다.

이 글에서는 무향실의 특성 및 국내에서 시공되는 무향실의 설계 및 제작 과정을 간단히 소개하고 현재의 국내 무향실의 수준과 앞으로 나아갈 방향을 제시하고자 한다.

2. 무향실의 정의와 종류

무향실은 반향(메아리)이 없는 실(room)을 일컫는 총칭이다. 무향실을 크게 완전무향실과 반무향실로 분류할 수 있다. 완전무향실은 사면 벽과 천장 및 바닥에 흡음 썰기를 설치하여 전 방향에 역이승법칙(inverse square law—거리가 2배 증가되면 6 dB 감소)이 성립하는 경우이고, 반무향실은 바닥만 일반 내장 형식으로 처리하고 나머지는 흡음 썰기로 처리하는 것을 말한다. 일반적으로 무향실은 신축인 경우 철근 콘크리트 외부구조와 방진부상 구조로 시공하나 사용자의 형편에 따라 기존 건물에 차음 및 흡음 처리하고 흡음 썰기를 붙여 사용할 수 있다. 흡음 썰기를 설치하지 않고 흡음 및 차음 처리만을 실시한 실(room)은 일반적으로 방음실이라 부르며 이런 경우에는 차단 주파수가 300 Hz가 넘는 경우로서 무향실로 분류하기가 어렵다.

초기의 방음실은 1936년 Bedell에 의해 10장의 무명천과 6장의 프란넬천으로 만들어졌으며 4년 후 Meyer, Buchmann, Sehoch 등에 의하여 피라미드형 무명천 자루에 암면을 넣어 벽과 바닥, 천정에 석순(石筍)처럼 부착하여 방음실을 만들었다. 그후 1945년에 Beranek, Sleeper 및 Moots⁽¹⁾ 등이 썰기형

유리 섬유를 이용한 무향실을 만들었으며 이 방법이 현재 무향실 제작에 있어 일반적인 표본이 되고 있다.

3. 무향실의 용도

음향 연구에 필요한 무향실은 제품의 음향 성능 시험 또는 소음 및 진동 해석을 위한 측정 시스템, 측정실, 공조실 및 기타 부대 시설로 구성되어 다음과 같은 음향 특성을 측정한다.

- 음원의 소음레벨 분포도
- 음원의 방사 지향성
- 음원의 음향파워(power) 레벨
- 음 형성의 구조적인 분석
- 소음 측정 방법의 표준화
- 음향적인 연구개발
- 음향 특성 시험
- 소음 감소 효과 측정

4. 무향실의 설계

무향실의 전공정을 그림으로 나타내면 그림 1과 같다.

4.1 무향실의 크기 선정

무향실의 크기는 차단 주파수와 측정 대상의 크기로 결정된다. 차단 주파수는 무향실

표 1 실의 용도에 따른 차단 주파수

차단 주파수(Hz)	용 도
50	기초 음향 연구
60~65	고급 음향 기기, 통신 장비
75	자동차 엔진 부품, 항공기 엔진 및 부품
100	전기 기기류(전동기, 발전기, 변압기 등) 사무용 기기류(복사기, 프린터 등), 악기류
125	오디오 제품
150	자동차 부품, 가정용 전기 제품(냉장고, 세탁기 등)

무향실의 기초 자료 조사 및 계획
<ul style="list-style-type: none"> • 용도 선정 (피측정물의 크기, 중량, 최저음압레벨) • 입지 선정 (신축, 개축, 기존건물) • 크기 선정 • 형태 선정 (완전무향실, 반무향실) • 부대 시설 결정 (향은, 향습설비, 소화설비, 환기설비, 측정설비, 기타 부대설비) • 성능 결정 (압소음, 차단 주파수) • 예산 책정 • 시공자 선정
무향실의 기본설계
<ul style="list-style-type: none"> • 주위 환경 평가 • 흡음 뺨기 재질 선정 • 벽체 설계 (차음층, 흡음층) • 작업 바닥 구조 설계 • 부상 바닥 구조 설계 • 방음문 및 흡음문 설계 • 부대 설비 설계
무향실의 세부 설계
<ul style="list-style-type: none"> • 시공 도면 작성 • 시공 도면 승인
무향실의 제작
무향실의 성능 시험 및 보고서 제출
<ul style="list-style-type: none"> • 벽체 차음 성능 측정 • 압소음 측정 (공조기 가동시, 정지시) • 자유음장 측정
인 수

그림 1 무향실의 전과정

의 성능을 평가하는데 사용되는 중요한 인자이며, 흡음 뺨기가 어떤 주파수 성분의 음을 99%까지 흡수할 수 있는 가장 낮은 경계 주파수를 차단 주파수(cut-off frequency)라 한다. 무향실의 용도에 따른 일반적인 차단 주파수는 표 1과 같다.

그림 2는 무향실의 측정 면적을 표시한다.

위 그림 2에 의하면 무향실의 최소 유효 크

기는

$$L = 2.55a + \frac{\lambda}{2} + a \quad (1)$$

여기서, a 는 음원(측정 대상물)의 최대 치수(m), λ 는 차단 주파수의 파장(m), a 는 여유 측정 범위(보통 400 mm)를 나타낸다.

식 (1)은 최소 유효 치수이므로 건물의 여유가 없을 때 부득이 하게 채택되지만 이상적으로는 다음의 유효 크기를 사용해야 한다.

$$L = 4a + \frac{\lambda}{2} + a \quad (2)$$

유효 치수는 측정 가능한 지역을 나타내며 실 외부 체적은 흡음 뺨기 점유 공간, 흡음층 및 차음층, 건물 외벽을 더하면 식 (2)보다 더욱 커진다. 국제표준기구(ISO)에서는 유효 체적을 음원(측정 대상 소음원) 체적의 200배로 추천하고 있다. 예를 들면 측정 대상물의 체적이 2m^3 이면 무향실의 유효 크기는 400m^3 이어야 한다.

4.2 무향실 성능 결정

성능 결정은 무향실 성능을 좌우하는 매우 중요한 요소이다. 압소음 및 차단 주파수는 무향실에서 측정하고자 하는 대상물에 따라서 결정되어야 한다. 압소음의 경우 단순히 20 dB(A)과 같은 단일값으로 규정하기보다는 NC 20 등과 같이 주파수별로 판정이 가능한 등급을 제시하는 것이 좋다. 압소음은 부대 설비(공조 설비)가 가동시와 정지시로

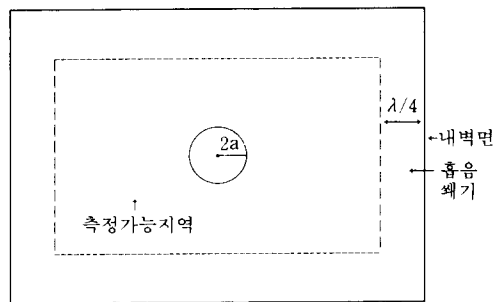


그림 2 무향실의 측정 지역도

나누어 규정하는게 바람직하다.

4.3 무향실의 기본 설계

4.3.1 주위 환경 평가

무향실을 설계하기 전에 시공자가 입지에 와서 소음과 진동을 측정하여 분석, 평가하여야 한다. 아울러 미래의 인접 토지 이용 계획까지도 고려하여 소음과 진동에 대한 대책을 세워 설계를 하여야 한다.

4.3.2 흡음 썰기 재질 선정

흡음 썰기(wedge)는 대부분 유리솜(glass wool)을 사용한다. 유리솜이 날리는 것을 방지하기 위해 난연 처리한 천을 덧씌운다. 그

리고 현재는 유리솜의 유해성 논란 때문에 다른 재질인 우레탄 폼(urethane foam)을 이용하여 흡음 썰기를 많이 사용하고 있다. 흡음 썰기 재질 선정시 고려해야 할 요소는 시공 용이성, 경제성 및 내화성이다. 표 2는 흡음 썰기의 재질을 비교한 것이고, 표 3은 재질에 따른 흡음 계수를 나타내고 있다.

4.3.3 흡음 썰기 크기 결정

흡음 썰기의 흡음효과는 음파가 흡음재의 내부에 침투하여 공기를 진동시켜 흡음재와의 점성 손실이 발생되어 얻어진다. 따라서 흡음 썰기의 두께는 상당하여야 한다. 흡음 썰기의 길이는 다음과 같이 결정한다. 흡음 썰기의 길이를 L 이라 하고 차단 주파수를

표 2 흡음 썰기 재질 비교

No.	항 목	유 리 솜	우 레 탄 폼
1	흡 음 률	양 호	양 호
2	내 열 성 내 화 성	불연소성, 접착제인 페놀 수지는 170~180°C에서 퇴화하기 시작하여 300~500°C에서 연기를 내기 시작함	110~120°C에서 녹기 시작
3	노 화	없 음	있 음 특히 자외선에 의한 노화가 있음
4	비 산	있 음 (천으로 보호)	없 음
5	인체유해성	없 음 (유리섬유 비산의 우려가 있음)	없 음
6	시 공 성	불 편	용 이

표 3 재질 종류에 따른 흡음 계수

재질 주파수(f)	유리솜 (밀도 32 kg/m ³)	유리솜 (밀도 40 kg/m ³)	수입 우레탄폼 (밀도 32 kg/m ³)
63	0.538	0.568	0.748
125	0.988	0.986	0.976
250	0.999	0.990	0.991
500	0.999	0.999	0.994
1000	0.994	0.990	0.996

150 Hz라 하면 $\lambda=c/f$ 에서 $\lambda=340/150=2.226\text{m}$ 이 된다. $L=\lambda/4$ 에서 L 은 567 mm가 된다. 이 경우 약간의 여유를 주어 L 을 600 mm로 선정하면 된다. 그림 3은 전형적인 흡음 썰기의 모양을 보여준다.

흡음 썰기의 흡음 특성은 흡음 썰기의 치수와 단위 면적당 유동 저항과 관련이 있다. 이런 성질은 흡음 썰기의 밀도와 관련이 있지만 유동 저항은 흡음재 섬유소의 크기와 관계가 있다. 따라서 흡음 썰기의 특성은 밀도가 규정된다 하더라도 보증될 수 없다. 현재 생산되는 섬유소의 크기로 보아 유리솜으로 만들어지는 흡음 썰기의 밀도는 24 kg/m^3 의 밀도를 가진 유리솜을 사용하여야 한다. 따라서 무향실에는 32 kg/m^3 유리솜을 사용하면 된다. 다음 표 4는 유리솜과 섬유소 지름에 따른 흡음률을 표시한다. 섬유소의 지름이 증가하고 주파수가 내려가면 흡음률은 감소한다.

흡음 썰기의 흡음 성능도 저주파수에서 주파수가 증가할수록 음압 반사율이 상대적으로 감소한다. 음압 반사율은 어느 지점에서 최소값에 도달하며 이 지점보다 높은 주파수에서는 일정한 값을 유지한다. 음압 반사율

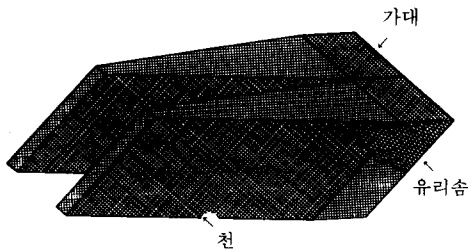


그림 3 흡음 썰기

은 무향실의 내부 치수의 차이에 의해서도 영향을 받으므로 유효 크기 선정에도 이 점을 유의해야 한다. 따라서 흡음 썰기의 반사율이 0.01(흡음률 0.99)이 되는 최저 주파수를 선택하여 차단 주파수로 한다. 차단 주파수는 흡음 썰기의 형태와 밀접한 관련이 있는데 특히 흡음 썰기의 경사진 면과 관련이 있다. 만일 흡음 썰기의 밑부분의 폭이 고정된다면 차단 주파수는 흡음 썰기의 경사진 면의 길이에 따라 결정된다. 그림 4는 흡음 썰기의 테이퍼 길이와 차단 주파수 사이의 관계를 잘 보여주고 있다. 즉, 흡음 썰기의 경사진 길이가 길어질수록 차단 주파수가 작아지고 있음을 알 수 있다.

선단 절단형이나 비절단형에서 차단 주파

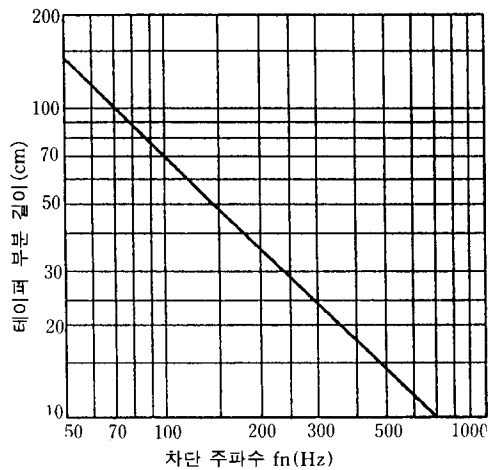


그림 4 흡음 썰기의 테이퍼 길이와 차단 주파수 사이의 관계 (재질: 유리솜, 밀도: 32 kg/m^3 , 밀판 폭: 200 mm, 형태: 선단 절단형, 테이퍼 부분 길이는 선단 절단전 길이임)

표 4 유리솜의 섬유소 지름에 따른 흡음률 비교

24 kg/m ³ 100 mm 유리솜	1/3 옥타브 대역 중심 주파수(Hz)						섬유소 지름 (μm)
	125	250	500	1k	2k	4k	
A	0.21	0.53	0.90	0.99	0.96	0.99	8.5
B	0.68	0.99	0.99	0.88	0.88	0.92	7.0

수 성능에는 거의 차이가 존재하지 않으나 시공시 시공비의 절감을 위해 선단 절단형을 채택하는 것이 바람직하다.

4.3.4 벽체 설계

무향실은 다른 건축 구조물과 분리하여 건축하는 것이 소음·진동의 영향을 최소화하는데 가장 큰 도움이 된다. 부득이 한 경우에 기존 건축물에 설치할 수 있다. 이런 경우에는 소음·진동을 측정평가하여 외부 소음원과 진동원에 대한 차단책을 미리 마련하여야 한다. 진동원의 차단책은 다음의 방진 구조 설계에서 언급하고 여기서는 벽체 구조 설계를 기술한다. 충분한 차음이 되기 위해서 외벽의 구조는 20 cm에서 25 cm의 철근 콘크리트 구조로 하는 것이 일반적인 경향이다. 이때의 차음량은 500 Hz에서 60 dB 정도로 본다. 외벽과 내벽을 부상 바닥 구조로 격리시키고 내벽의 외부는 철판이나 석고보드로 시공하여 전체 차음량을 증가시킨다. 벽체 설계에 가장 중요한 요소는 차음량과 흡음량을 적절히 고려하여 원하는 무향실의 암소음 목표치가 달성되도록 함에 있다. 따라서 벽체 설계시 각 재료의 음향 성질을 잘 파악하고 선정하여야 한다. 그림 5는 전형적인 벽체 구조의 한 예이다.

4.3.5 작업바닥 구조설계

완전 무향실의 경우는 바닥에도 흡음 썬키가 설치되므로 작업 바닥 구조를 추가로 설계하여야 한다. 작업 바닥 구조는 측정 대상물과 계측기의 무게, 측정인의 무게 등을 고

려하여 이를 모두 지지할 수 있는 그레이팅 구조로 설계하고 가능하면 반사면이 적도록 하여 음향 성능에도 영향을 미치지 않게 하여야 한다. 표준 작업 바닥 구조는 2~3 mm의 피아노선을 사용하던가 6~9 mm의 강봉 구조로 설계한다. 이런 바닥 구조로 하면 2000~4000 Hz 주파수 범위에서 바닥에 의해 반사된 간접효과가 나타나 역제곱법칙에서 편기가 더 발생한다. 정확한 측정 결과를 얻으려면 일단 음원과 마이크로폰을 고정시키고 흡음 매트를 깔아 반사를 최소로 하여야 한다. 이는 완전무향실과 반무향실의 바닥 모두에 사용할 수 있다.

4.3.6 부상바닥 구조설계

부상바닥 구조는 외부의 진동을 차단시켜 측정 마루에 전달되는 것을 막아주고 아울러 저주파수 대역의 소음이 전달되는 것을 막아주는데 진동원의 탁월 주파수 대역에 따라 금속 스프링 또는 고무를 채택하거나 진동원의 주파수 대역이 저주파이면 공기 스프링을 사용하여 설계할 수 있다.

4.3.7 방음문 설계

방음문의 설계는 무향실에서 가장 중요한 부분중의 하나이다. 방음문의 크기는 무향실 내에 들어와야 할 측정물의 크기에 따라 결정된다. 특히 대형 기계류나 자동차의 음향 측정의 경우는 방음문의 치수가 더욱 중요하다. 반무향실의 경우 측정물 반입문과 인원 출입문은 가능하면 작게 설계하여야 한다. 음향적으로 차음과 흡음 성능이 벽체와 같도록 설계하여야 한다.

4.3.8 부대 설비 설계

공기 조화 설비와 환기 설비는 무향실의 용도에 따라 결정된다. 공기 조화 설비는 계절별 온도차와 습도차가 심하거나 측정실의 환경이 규정된 경우에 고려하여야 한다. 일반적으로 온도는 18~25°C, 습도는 50~90%

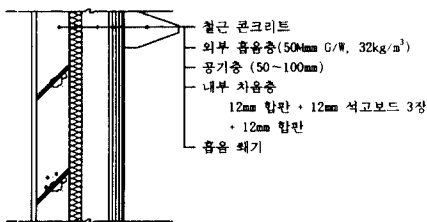


그림 5 전형적인 무향실의 벽체 구조

수준으로 유지시킨다. 무향실과 분리되어 있는 전실과 측정실에서도 측정물의 상태를 동일하게 유지시키기 위해 공기 조화 설비를 하여야 한다. 자동차나 제트 엔진의 시험용 무향실에는 반드시 환기 설비를 시설해야 한다. 암소음의 증가를 방지하기 위해 공기 조화 설비나 환기 설비에는 소음기를 부착하여 부대 설비의 운전중이나 정지시도 동일한 암소음을 유지시켜야 한다.

5. 무향실의 제작

무향실은 소리의 특성을 연구하는 실(room)로서 시공할 때 틈새 및 절연 처리가 중요하다. 소리는 회절 특성이 있기 때문에 무향실에 틈새가 있으면 소리가 전달된다. 또한 무향실 내부에서는 구조물을 통하여 전달되는 진동에 의해 무향실에 저주파수 영역의 소음이 발생될 수 있으므로 시공 도면에 따라 음향 기술자의 감독하에 시공되어야 한다.

6. 맺음말

인간의 생활 가치관이 물질적 풍요에 만족하지 않고 정신적인 것을 포함하여 전반적인 생활의 질을 추구함에 따라 점점 저소음의 가전 제품을 비롯한 소음이 적은 제품을 원하게 된다. 이런 소비자의 욕구를 만족시키기 위해서 암소음이 점점 낮은 무향실을 설계, 제작하여 제품의 음향 특성을 연구해야 한다. 현재 우리 나라의 무향실 설계 및 제작 수준은 선진국과 비교하여 성능 및 외관

에서 경쟁할 정도로 눈부신 발전을 해왔다. 최근에는 가전 제품의 음향성능을 테스트하기 위한 무향실에서부터 자동차의 소음을 측정, 분석할 수 있는 엔진 무향실, 실차 무향실 등의 설계 및 시공에도 선진국과 어깨를 나란히 하고 있다.

앞으로 시공되는 무향실의 암소음은 점점 낮아질 것으로 예상된다. 주변 환경에 의해 암소음 수준을 낮출 수 있는 범위가 제한되겠지만, 인간의 정신적 생활의 질적 수준을 충분히 만족시킬 수 있는 제품의 음향 분석이 가능하도록 무향실 설계 및 시공이 이루어져야 한다. 현재의 무향실 설계, 제작 수준에 만족하지 않고 초저주파수(20 Hz 이하) 영역을 측정할 수 있고, 암소음의 음압 레벨이 0 dB에 근접한 무향실을 제작할 수 있도록 설계를 해야 한다. 초저주파수 영역을 측정하려면 지반에서 전달되는 지반 진동과 외부에서 구조물을 통하여 진동이 전달되는 것을 완전하게 절연시켜야 한다. 또한 이 영역에서 자유음장이 만족하도록 내부의 흡음 처리 방법도 아울러 개선되어야 한다. 이와 같은 무향실은 순수 음향을 연구하는 학자들에게 도움이 될 것이며, 산업현장에서 가전 제품 및 자동차의 소음을 제어, 분석하는데 크게 기여할 것이다.

참고문헌

- (1) Beranek, L. L., Sleeper, H. P. and Moots, E. E., 1945, "Design and Construction of Anechoic Chamber," ORSD Report #4190. 