

무향실과 잔향실의 설계

테/마/기/학

5

글 ■ 이 득 용 / (주)디비엔지니어링 소음·진동기술사
e-mail ■ dwlee@dbengr.com

이 글에서는 음향연구에 필요한 무향실, 잔향실의 기본 개요와 설계사항 및 성능 평가 방법에 대하여 소개하고자 한다.

초기 음향시험실은 주로 스피커나 마이크로폰 등의 지향특성 및 교정에만 국한되어 사용되었지만, 요즘에는 각종 기계류의 방사 출력(radiation power) 측정, 측정 장비의 교정검사, 기자의 음향측정값의 비교평가, 음압 분포 등의 음향 분석 연구가 각 분야에서 광범위하게 행해지고 있다. 특히 주거환경 개선이 강조되면서 세탁기, 냉장고 등의 가전제품에 대한 소음저감효과로서 소비자들에게 보다 큰 만족을 주게 되었으며, 이러한 제품의 성능 향상을 위하여 보다 우수한 성능의 음향시험실이 요구되기도 한다. 정확한 음향 데이터 산출을 위해서는 기본적으로 국제적 규격의 성능을 만족하는 시험실의 조건과 테스트 절차를 갖추어야 한다. 우수한 성능의 음향실 설계를 위하여 이론치와 경험치에 의한 정확한 데이터 산출과 컴퓨터 시뮬레이션 해석으로 예상 성능을 평가하여 설계에 반영하고 있다.

음향실 설계 및 성능평가

음원의 음향 출력, 지향 특성 등을 연구할 때는 음원으로부터의 직접 음만을 측정해야 하며, 시험은 잔향이나 반사가 없는 자유음장을 갖는 무향실에서 이루어지게 된다. 이러한 측정은 자유공간을 갖는 외부에서 할 수 있지만 실제로는 측정에 영향을 주는 지면 반사를 피하기 어렵고 주변의 다른 소음의 영향으로 음원 자체만의 소리를 측정하기 어렵게 된다. 일반적으로 무향실

은 용도에 따라 차단 주파수를 결정하게 되며, 차단 주파수(cutoff frequency)에 의해 실의 규모와 흡음구조의 설계가 이루어진다. 차단 주파수의 범위는 63Hz~250Hz 대역을 취하는 경우가 많으며, 소음계의 교정, 특수기계, 차량의 소음측정, 대형 스피커나 마이크로폰의 특성을 측정하기 위해 더 낮은 차단 주파수로 설계하는 경우도 있다.

무향실은 반향(메아리)이 없는 실(room)을 일컫는 총칭으로 크게 완전무향실과 반무향실로 분류할 수 있다. 완전무향실은 사면 벽과 천장 및 바닥에 흡음패기를 설치하여 전 방향에 역제곱 법칙(inverse square law-거리가 2배 증가되면 6dB 감소)이 성립하는 경우이고, 반무향실은 바닥만 일반 내장 형식으로 처리하고 나머지는 흡음패기로 처리하는 것을 말한다. 무향실은 신축인 경우 철근 콘크리트 외부 구조와 방진 부상 구조로 시공하나, 사용자의 형편에 따라 기존 건물에 차음 및 흡음처리하고 흡음패기를 붙여 사용할 수도 있다. 흡음패기를 설치하지 않고 흡음 및 차음 처리만을 실시한 실(room)은 방음실이라 부르며 차단 주파수가 300Hz가 넘는 경우로서 무향실로 분류하기가 어렵다.

무향실의 설계

무향실 설계시 우선 고려해야 할 사항으로 무향실의 용도, 형태(완전, 반무향실), 성능결정(암소음, 차단주파수)이 있으며, 기본 설계 사항으로는 흡음 패기, 벽체설계(차음층, 흡음층), 바닥구

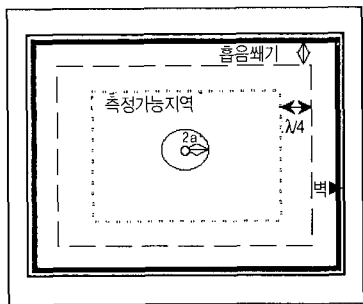


그림 1 무향실의 측정 가능 면적

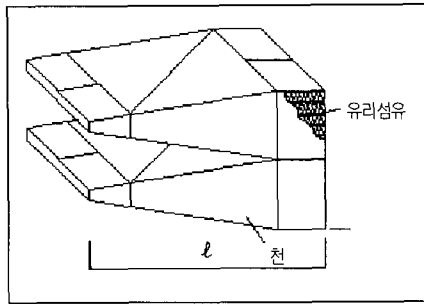


그림 2 흡음재

조, 부상바닥 구조, 방음문 및 흡음문 설계, 부대 설비 설계로 나눌 수 있다.

먼저 무향실의 크기는 차단 주파수와 측정 대상의 크기로 결정된다. 차단 주파수는 흡음재가 어떤 주파수 성분의 음을 99%까지 흡수할 수 있는 가장 낮은 경계 주파수이며 무향실의 성능 평가에 사용되는 중요한 인자가 된다. 무향실은 용도에 따라서 기초음향연구에는 50Hz, 고음향기기, 자동차 엔진 및 부품류는 75Hz, 복사기, 프린터 등의 사무용기류는 100Hz, 자동차 부품 및 냉장고, 세탁기 등의 가정용 전기 제품에 대해서는 150Hz의 차단주파수 성능이상을 가지는 무향실이 필요하다.

무향실의 설계시 이상적인 자유 음장을 만족시키는 역사승 법칙 성립 범위내의 실내 유효 치수는 무향실의 흡음재 선단에서 $(\lambda/4)C$ 이내인 Edge effect와 음원에 가까운 Near field를 제외한 전 범위가 되며, 실 외부 체적은 흡음재 점유 공간, 흡음층 및 차음층, 건물 외벽을 더 하게 된다. 국제표준기구(ISO)에서는 유효 체적을 음원(측정대상 소음원 : 2a) 체적의 200배로 추천하고 있다. 암소음 및 차단 주파수는 측정하고자 하는 대상물에 따라 결정된다. 암소음은 단순히 20dB(A)와 같은 단일 값으로 규정하기보다는 NC 20 등과 같이 주파수별로 판정이 가능한 등급을 제시하는 것이 좋으며, 부대 설비(공조 설비)가

가동시와 정지시로 구분하여 규정하는 게 바람직하다.

무향실 내부의 흡음 구조는 1940년 Meyer의 이론에 따라 개발된 흡음재를 사용하게 되었으며, 1945년 Beranek, Sleeper 및 Moots에 의해 하버드 대학 내에 썬기 모양의

흡음 구조로 무향실이 건설되었다. 흡음재는 다공질 흡음재를 층상으로 부착하는 다층 흡음 구조형에 비해 충분히 높은 입사 흡음률을 얻을 수 있으며, 테이퍼 길이의 조절로서 그러한 흡음 특성을 필요로 하는 저음역까지 연장하기가 용이하다. 또한 시공 면에서도 다른 방법과 비교해 쉬운 장점이 있다. 흡음재의 설계 과정에서 흡음재의 차단 주파수는 재료의 밀도와 형태에 밀접한 관련이 있다. 흡음재의 흡음 성능은 저 주파수가 증가할수록 음압 반사율이 상대적으로 감소하게 되며, 음압 반사율은 어느 지점에서 최소 값에 도달하면 이 지점보다 높은 주파수에서는 일정한 값을 유지한다. 음압 반사율은 무향실의 내부 치수의 차이에 의해서도 영향을 받으므로 유효 크기 선정에서도 이 점을 유의해야 한다. 따라서 흡음재의 반사율이 0.01(흡음률 0.99)이 되는 최저 주파수를 선택하여 차단 주파수로 한다.

흡음재의 경사진 길이가 길어질수록 차단 주파수는 작아지게 되며, 흡음재의 길이를 l , 차단 주파수를 f_c 라 하면, $\lambda=c/f$ 에서, 흡음재의 길이는 $l=\lambda/4$ 로 결정된다. 흡음재의 흡음 효과는 음파가 흡음재의 내부에 침투하여 공기를 진동시켜 흡음재와의 점성 손실의 발생으로 얻을 수 있으므로 흡음률이 높아지기 위해서는 흡음재의 두께는 상당히 두꺼워지게 된다.

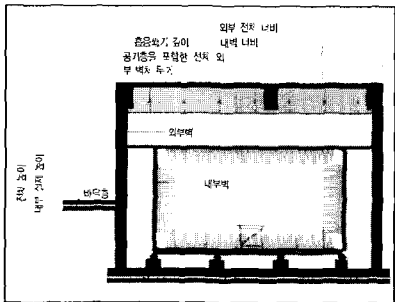


그림 3 완전 무향실 단면

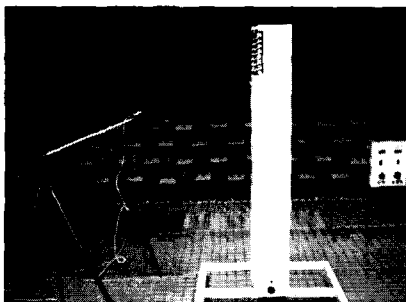


그림 4 완전 무향실 내부 및 제품 성능 측정

제작된 흡음구조물의 성능을 측정하기 위해서 수직 입사 흡음 측정법을 사용하였다. 마이크로폰을 이용하여 여러 방향에서 입사하는 음파의 입사, 반사의 크기를 측정함으로써 반사율을 결정할 수 있다. 음파는 넓은 범위의 입사각 영역에서 반사에 대한 Snell의 법칙을 적용하면, 최대 반사는 표면에 수직 입사되는 경우에 발생하게 되는데, 수직 입사 흡음율의 측정은 흡음체의 성능 측정에 있어 가장 나쁜 경우의 측정이라 할 수 있다. 흡음체의 차단 주파수에 대한 사양은 에너지 흡음율의 관계에서 구할 수 있으며, 흡음률(sound absorption coefficient)과 음압 반사율과의 관계에서 정재파비를 측정하면 흡음체의 차단 주파수를 구할 수 있게 된다. 흡음체 연구에 많이 이용되던 유리섬유(glass wool)를 사용한 무향실은 유리 섬유 입자의 비산에 의한 사용자의 불편이 있고, 전자 제품과

자동차 제품의 연구시 문제가 있어 발포우레탄(urethane foam)과 같은 재질이 사용되기도 한다.

벽체 및 바닥 설계

무향실은 다른 건축 구조물과 분리하여 건축해야 소음·진동의 영향을 최소화 할 수 있으며, 기존 건축물에 설치할 경우에는 소음·진동을 측정 평가하여 외부 소음원과 진동원에 대한 차단책을 미리 세워야 한다. 충분한 차음이 되기 위

해서 외벽의 구조는 철근 콘크리트 구조로 하는 것이 일반적인 경향이며, 외벽과 내벽을 부상 바닥 구조로 격리시키고 내벽의 외부는 철판이나 석고 보드로 시공하여 전체 차음량을 증가시킨다. 벽체 설계에서 가장 중요한 요소는 차음량과 흡음량을

적절히 고려하여 원하는 무향실의 암소음 목표치가 달성되도록 하는 데 있다. 완전 무향실의 경우는 바닥에도 흡음체가 설치되므로 작업 바닥 구조를 추가로 설계하여야 한다. 작업 바닥 구조는 측정 대상물과 측정기의 무게, 측정인의 무게 등을 고려하여 이를 모두 지지할 수 있는 그레이팅 구조로 설계하여 반사면에 의해 발생하는 영향을 최소화해야 한다. 표준 작업 바닥 구조는 피아노선이나 강봉 구조로 설계한다. 이런 바닥 구조로 하면 2,000~4,000Hz 주파수 범위에서 바닥에 의해 반사된 간섭효과가 나타나 역제곱 법칙에서 편이가 더 발생 할 수 있다. 정확한 측정 결과를 얻기 위해서는 일단 음원과 마이크로폰을 고정시키고 음향 매트를 깔아 반사를 최소로 하여야 한다.

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

방음문은 음향적으로 차음과 흡음 성능이 벽체와 같도록 설계한다. 크기는 무향실 내에 들어와야 할 측정물의 크기에 따라 결정되며, 측정물 반입문과 인원 출입문은 가능하면 작게 설계한



다. 계절별 온도차와 습도 차가 심하거나 측정실의 환경이 규정된 경우 공기조화 설비와 환기 설비를 고려해야 하며, 부대설비의 운전 중이나 정지 시에도 동일한 양소음 유지를 위해 소음기를 부착한다.

무향실의 성능평가

무향실의 성능평가는 암소음과 자유음장을 측정하게 된다. 무향실의 음향 성능을 보장하기 위해 외부 소음을 차단하는 것은 매우 중요하다. 무향실의 벽체 및 방음문의 차음성능 평가를 위해 KS F 2809(건축물의 현장에 있어서의 음압 레벨차의 측정 방법)규정을 적용할 수 있다. 스피커는 측정 대상에서 2m 떨어진 위치에 설치하고 음원측과 수음원측의 소음계는 벽체에서 각각 1m 떨어져 높이 1.2m로 일직선상으로 설치하였다. 자유음장의 측정은 스피커를 고정시키고 스피커 출력이 일정한 상태에서 마이크를 그림에서와 같이 A, B, C의 3방향으로 이동시켜 거리별 소음도를 측정한다. 한편, 이상적인 자유 음장내 한 지점에 있는 점음원으로부터 단조화구면파가 발생되면 음원으로부터 거리 r인 지점에서의 음압레벨 L(r)은 자유음장에서 음원으로부터 떨어진 거리에 따라 20logr만큼 감소된다. 따라서 측정소음치와 이론 소음치를 비교하여 ISO 3745-1977의 허용 편차규정에 따라 자유음장 성립 범위를 판단한다. 이때 사용하는 마이크로폰

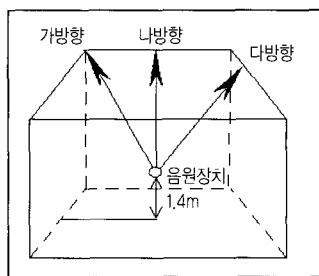


그림 5 자유음장 측정 위치도

은 무지향성 마이크로폰이며, 음원 장치는 무지향성 스피커로서 주 파수 대역이 100Hz~10kHz의 광대역 음원 발생 장치(sound source)를 사용한

다. 출입문이나 유리창의 차음 성능 기준은 주택에 대한 '방음 사시 차음 등급 곡선(JIS-A4708)'에 따라 평가하기도하며, 음향실의 특수 소음 환경조건을 조성하기 위해서는 이러한 기준보다 높아야 한다.

무향실은 각종 음향 측정을 위한 기본적인 설비로서 자유음장 즉, 음원으로부터 발생되어 나오는 음향이 반사나 회절 등의 구애 없이 공간을 전파해 나가는 음장을 형성한다

잔향실의 설계 및 성능평가

잔향실의 형상은 7면의 부정형으로 벽, 천장, 바닥의 모든면에서 음을 완전 반사(흡음률 6% 이하) 시켜 벽면 부근을 제외한 전 공간에서 균일한 음압 분포를 유지해야 하며, 공간 내 임의 위치에서 음파의 진행 방향이 모든 방향으로 균일하게 전파(sound intensity I = 0)되는 두 조건을 만족시키는 확산음장(diffuse sound field)으로 형성된다. 그러나 실제로 위의 두 조건을 만족시켜 100% 확산음장 상태의 잔향실을 만드는 일은 불가능하며, 가능한 한 이에 가깝게 설계하도록 요구된다. 실내음장을 확산음장에 가깝게 하기 위해서는 실의 크기가 파장에 비하여 충분히 크고 벽면이 파장과 동일 정도 크기의 불규칙성(요철, 경사, 부정형, 불균일한 흡음성 등)을 갖도록 하는 것이 필요하다. 실의 크기가 커지면 고유진동수는 실용적에 비례하여 증가하며, 실용적이 크고 음향적으로 불규칙한 형상의 공간에서는 고유진동수가 매우 많게 된다. 따라서, 음원의 주파수가 현대역에 집중된 경우에도 음원에 의한 것이 되어 실내에서 발생하는 정재파(standing wave)는 각 벽면에 거의 모든 방향으로부터 입사하여 실내의 모든 방향으로 전파하는 상태가 된다. 이 경우 실내의 음압 분포는 이것이 복합된



것으로 되기 때문에 음압의 차이가 적고 공간적으로 거의 일정하게 되어 확산음장에 가깝게 된다. 또한 실내면의 높은 반사율은 정재파를 증가시켜 모드 밀도가 상대적으로 낮은 저주파 성분의 공간분포가 불균일하게 된다. 이를 피하기 위해 저주파 흡음용 흡음판넬을 실내에 설치하여 실내의 모드 밀도를 증가시키기도 하지만 이 경우에는 잔향시간의 감소가 수반되기 때문에 주의가 요구된다.

확산음장의 측정과 평가

확산음장을 평가하는 방법은 잔향상태 측정에 의한 방법과 음압레벨 분포에 의한 방법이 있다. 잔향상태 측정에 의한 방법은 다시 잔향시간 측정치의 편차를 이용하는 방법과, 잔향곡선의 불규칙성을 이용한 두 가지 방법이 있다. 잔향시간 측정치의 편차방법인 경우, 완전히 확산이 될 때에는 어느 위치에서 몇 회 측정하여도 동일한 값이 되고 각 위치에서의 측정치와 평균치와의 편차가 클수록 확산성은 나쁘게 된다. 잔향곡선의 불규칙성을 이용한 방법은, 잔향곡선의 감쇠 형태에 있어서 요철이 적고 일직선에 가깝게 될수록 확산은 좋지만, 기록시 레벨레코더에서의 응

답반응속도(fast, slow)에 따라 요철의 크기가 달라지기 때문에 이에 의한 평가는 일반성이 적다는 특징이 있다. 한편, 잔향실 내의 잔향시간은 길수록 유리하며 재료의 흡음률 측정시 요구되는 잔향실의 최소잔향시간(ISO/R354, 잔향실에서의 흡음률 측정 방법 기준)은 125Hz, 250Hz, 500Hz에서 5초, 1kHz 4.5초, 2kHz 3.5초, 4kHz에서 2초로 나타나 있다. 음압레벨 측정에 의한 확산성 평가 방법에는 정상상태 음압분포 측정방법과 단음 음압분포의 측정방법이 있다. 정상상태 음압분포 측정방법은 음원으로 1/3옥타브 대역 잡음을 이용하고 마이크로폰을 연속적으로 이동하여 기록한 음압레벨을 완전 확산으로 가정한 이론 계산식 결과값을 비교한다. 완전 확산인 경우 어느 위치에서 몇 회 측정하여도 동일한 값이 되고 각 위치에서의 측정치와 평균치와의 편차가 거의 없게 된다(잔향감쇠곡선). 그러나 실제 100% 완전 확산을 유지하기는 어려우며, ISO3741 또는 ASHRAE 36-72에는 잔향실에서의 표준편차 최대 허용한계치가, 1/1옥타브 대역 중심주파수에서 125Hz에서 ±1.5dB, 250Hz에서 ±1.0dB로 나타나 있다.

잔향실에서의 평균흡음률은 적절한 잔향음장을

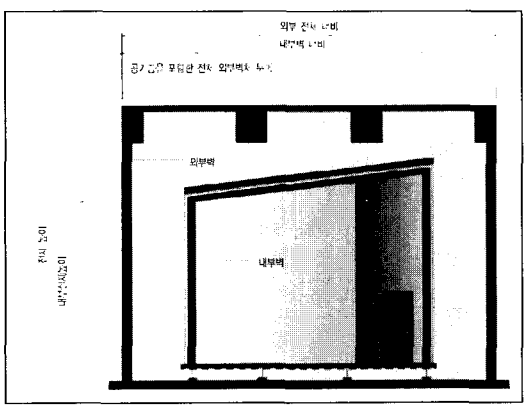


그림 6 잔향실 단면

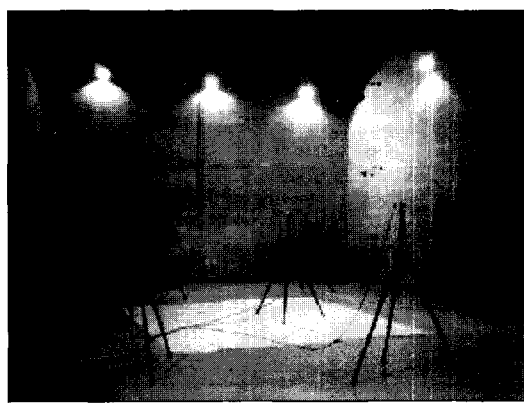


그림 7 잔향실 내부 및 확산 음장 측정



잔향실은 내부의 모든 벽면에서 소리를 흡수하지 않게 하여 실내에서 발생한 소리가 쉽게 소멸하지 않도록 만든 음향 측정실로서 실내의 전 공간에서 음압분포가 균일하게 전파되는 확산음장을 형성한다.

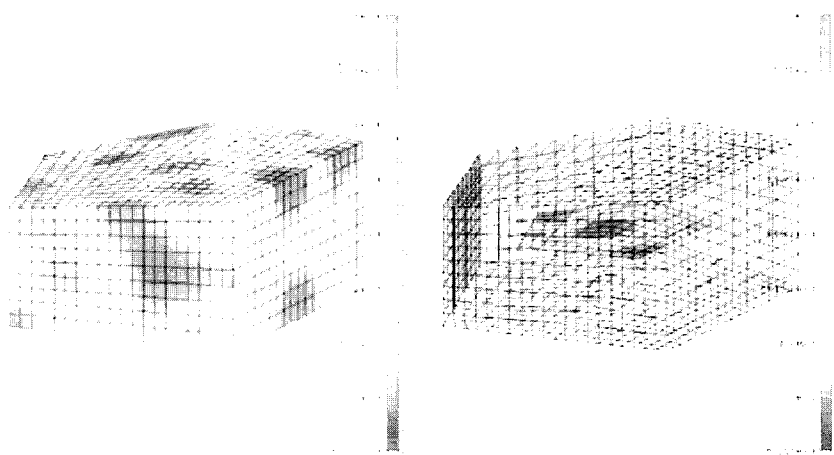


그림 8 잔향실 내 Simulation 결과 (음압분포도)

유지할 만큼 충분히 적어야 하며, ISO규격에서는 주파수 $f = 2000/V^2$ (V :실용적(m^3)) 이하를 제외한 중심주파수에서 0.06을 초과해서는 안 되며, 이 주파수 이하에서는 잔향실의 기본 Mode의 공진 커브 대역을 증가하기 위해 흡음력을 다소 높여 도록 한다. 이러한 잔향실의 흡음력과 평균 흡음률은 잔향시간을 실측 후 흡음력 및 평균 흡음률 계산식으로 구할 수 있다.

잔향실의 파동 음장 Sysnoise Simulation 및 실측

Twin TYPE 잔향실에서 실측된 음압 분포도와 sysnoise로 simulation한 음압 분포도의 표준 편차를 비교하여 주파수별 상대오차를 유추하고, 정확한 음압분포도를 예측함으로써 확산음장이 형성되는지를 예측할 수 있다. 음장 해석을 위해 ISO 3741 및 KS A 0704 규격에 의한 측정 방법을 적용하였다. 음원은 1/3옥타브 밴드 무지향성 음

원을 이용하였다. 음압 분포도(확산음장)를 분석하기 위해 음원에서 안정된 음을 구동시키고 각 측정 지점마다 음압레벨을 측정하여 ISO 3741에서 규정하고 있는 표준 편차를 만족하는 범위를 예측하여 하한 차단 주파수(cut off frequency)를 설정할 수 있다. 분석 방법 차이에 의한 오차를 최소화하기 위하여, ISO 3741 및 KS A 0704 규격에 따라 여섯 지점에 음원을 선택하고 각 음원 위치마다 세 곳의 측정지점을 선택하여 평균음압레벨의 표준편차를 구하는 방법과 음원 하나에 대하여 잔향실의 음장을 point mesh로 구분하여 각 mesh에 대해 세 지점을 지정하여 평균표준편차를 구하는 방법을 선택하여 simulation을 실시하였다. 첫째 방법에 따라 음압레벨을 측정 후 주파수별 평균표준편차를 구하였다. 흡음률에 따른 주파수별 임피던스를 고려한 simulation 결과와 측정에 의한 평균표준편차를 비교한 결과 확산음장이 형성됨을 확인할 수 있었다.