

출품번호

1426

제69회 전국과학전람회

소리의 투과 손실을 역이용한
벽체의 면밀도 측정

2023. 8. 24.

출품학생	
지도교원	
구 분	학생부
출품부문	산업 및 에너지

【 차 례 】

I. 탐구 동기 및 목적	4
1. 탐구 동기	4
2. 탐구 목적	5
II. 탐구 개요	6
1. 탐구 절차	6
2. 탐구 기간	6
III. 이론적 배경 및 선행연구 조사	7
1. 이론적 배경	7
가. 차음(insulation)	7
나. 질량 법칙(mass law)	8
2. 선행연구 조사	9
IV. 탐구 내용	12
1. [탐구 1] 측정장치의 제작	12
가. 변인 설정 및 실험 설계	12
나. 실험 과정 및 결과 해석	13
2. [탐구 2] 측정 물질 변화에 따른 투과 손실 실험	17
가. 실험 목적 및 설계	17
나. 측정 물체의 최대 두께 결정	17
다. 측정 물체의 크기 결정	18
라. 측정 물체의 재질에 따른 투과 손실 영향	19
마. 측정 물체의 공기층에 따른 투과 손실의 영향	22
3. [탐구 3] 투과 손실을 이용한 면밀도 예측과 검증	24
V. 결론 및 향후 탐구 계획	25
1. 결론	25
2. 향후 탐구 계획	25
VI. 참고문헌	26

〈그림 차례〉

그림 1) 붕괴 사고 자료	4
그림 2) 문제 상황 파악 및 탐구 목표 설정	5
그림 3) 탐구 절차 표	6
그림 4) 두 실내 사이의 음의 전반	7
그림 5) 벽의 두께에 따른 차음 효과	8
그림 6) 질량 법칙에 의한 투과 손실 변화	8
그림 7) 연구 과정에서 사용한 투과 손실 측정장치	9
그림 8) 진동수에 대한 투과 손실 그래프 (로그 스케일)	9
그림 9) 투과 손실 측정 모델 개념도	9
그림 10) 투과 손실의 소리 에너지 분배를 전기회로에 비유하여 설명	10
그림 11) 밀도와 특성 임피던스 비율(Charactistic Impidence Ratio) 간의 상관관계 그래프	11
그림 12) ‘선행연구 가’ 에서 발췌한 그래프	12
그림 13) 실험 장치 제작 과정	13
그림 14) 실험 장치 구성	13
그림 15) 측정 위치 실험 세팅	14
그림 16) 진동수에 따른 투과 손실 그래프 (40Hz~5000Hz)	14
그림 17) 마이크의 위치에 따른 진동수에 대한 음압 레벨 그래프	15
그림 18) 진동수에 따른 투과 손실 그래프를 통해 질량 법칙 적용 구역 예측	15
그림 19) 121.5Hz~144.4Hz의 진동수에 따른 투과 손실 표	16
그림 20) 121.5Hz~144.4Hz의 진동수에 따른 투과 손실 그래프	16
그림 21) 진동수 범위에 따른 투과 손실의 기울기	16
그림 22) 최대 두께 실험 장면	17
그림 23) 아크릴의 면밀도에 따른 투과 손실 그래프 (125Hz)	18
그림 24) 아크릴의 면밀도에 따른 투과 손실 표 (125Hz)	18
그림 25) 판의 개수, 판의 크기에 따른 투과 손실 표 (125Hz)	19
그림 26) 판의 개수, 판의 크기에 따른 투과 손실 그래프 (125Hz)	19
그림 27) MDF의 면밀도에 따른 투과 손실 그래프 (125Hz)	20
그림 28) MDF의 면밀도에 따른 투과 손실 표 (125Hz)	20
그림 29) 아크릴과 MDF의 면밀도에 따른 투과 손실 그래프 (125Hz)	21
그림 30) 단일 재질에서 면밀도에 따른 투과 손실 그래프 (125Hz)	21
그림 31) 공기층이 있는 실험 장치의 모습	22
그림 32) 공기층이 있는 실험 장치의 모식도	22
그림 33) 공기층이 있을 때와 단일 재질의 투과 손실 값과의 비교 그래프 (125Hz)	23
그림 34) 공기층이 있을 때와 단일 재질의 투과 손실 값과의 비교표 (125Hz)	23
그림 35) 아크릴과 MDF 혼합 재질에서의 투과 손실 측정	24
그림 36) 투과 손실을 이용한 면밀도의 예측	24

I

탐구 동기 및 목적

1. 탐구 동기



그림 1) 붕괴 사고 자료

삼풍백화점 붕괴 사고, 수원 월드컵 경기장 지붕 붕괴 사고, 그리고 1년 전, 광주 아이파크 붕괴 사고 등 많은 건물 붕괴 사고가 부적절한 벽체 사용으로 인해 발생하고 있다. 이를 예방하기 위해서는 주기적으로 벽체의 균열과 밀도를 측정해야 한다.

그중에서 밀도는 타격법, 초음파, 중성자 라디오그래피 등을 이용하여 측정할 수 있다. 타격법은 슈미트해머를 사용하며, 값이 50~100만 원 대로 저렴한 편이라 널리 사용된다. 슈미트해머는 벽체를 직접 타격한 후, 반발계수를 측정하는데, 내부를 측정하기에는 표면 의존성이 너무 커 정확도가 떨어진다는 단점이 있다. 초음파 검사도, 초음파의 반사 시간을 측정하는 방식이며, 더 정확하지만, 미세한 반사 시간을 측정하기 때문에 장비의 가격대가 적게는 수백만 원, 많게는 수천만 원이다.

이런 비싼 장비들로 인해, 점검을 주기적으로 하기가 어려울 수 있으며, 이는 벽체의 노후화와 건물 붕괴 및 인명사고로 이어진다. 광주 아파트 붕괴와 삼풍백화점 등, 널리 알려진 사고들은 전부 신축 아파트, 대형 쇼핑몰로, 비교적 벽체의 안정성을 검사할 기회가 많았던 경우이다.

관리 기회가 많았던 건물도 붕괴 사고 일어나는 와중에, 개발도상국, 인구밀도가 낮은 곳, 건축 관련 규정이 마련되지 않은 곳 등의 낙후지역에서는 이러한 붕괴 위험이 훨씬 더 심각하며, 이에 대한 대책이 필요하다.

그 와중, 음향 건축에서 차음성이 좋은 벽체를 제작하기 위해 사용되는 투과 손실과 질량 법칙 개념에 대해서 접하게 되었고, 이를 역이용하여 소리의 투과 손실로 벽체의 면밀도를 알아낼 수 있지 않을까? 라는 생각을 하게 되었다.

이를 위해서 관련된 음향 이론을 깊게 공부하고 관련된 선행연구와 논문을 읽어보며, 재현성 있고 실현 가능성 있는 면밀도 측정 방식이 될 수 있을지에 대해 탐구를 시작하게 되었다.

2. 탐구 목적

물체의 투과 손실과 면밀도와 관계는 이미 한 세기 전에 질량 법칙을 통해 증명되었던 사실이다. 그러나 면밀도를 투과 손실 측정을 통해 알아낼 수 있다는 사실은 아직 확실히 규명되지 않았으며, 투과 손실에 영향을 미칠 수 있는 요인은 무엇이며 어떻게 통제해야 투과 손실로 면밀도를 도출할 수 있는지 알려진 바가 없다.

이를 위해 본 탐구에서는, 면밀도 측정의 핵심 개념인 질량 법칙의 선행연구 논문을 찾아보며, 질량 법칙이 성립하는 조건이 무엇인지 공부하였고, 질량 법칙이 적용되기 위해서는 잔향실 조건을 만족해야 한다는 것을 알게 되었다. 또한, 강성 변화 및 공명의 영향으로 모든 진동수에서 질량 법칙이 성립되지 않으며, 질량 법칙이 성립하는 진동수의 범위가 따로 존재한다는 것을 알게 되었다.

진동수 실험을 통해, 과연 질량 법칙이 성립하는 진동수는 범위는 무엇이며, 이를 어떻게 판단할 수 있을지 탐구할 것이다. 잔향실은 모든 지점에서 음압 레벨(dB)이 같기에, dB 측정기의 위치를 다르게 하여 dB 측정값이 달라지는지에 대한 실험을 진행할 것이고, 공명이 일어나지 않는 동시에 질량 법칙을 만족하는 진동수 조건을 찾아낼 것이다.

또한, 투과 손실에 영향을 미치는 요인이 면밀도 외에 무엇이 있는지 알아내고, 이후 그 요인들을 장치에서 통제할 수 있도록 구현할 것이다. 물체의 면밀도 외에도 물체의 재질, 강성, 공기층 여부 등등이 있을 수 있기 때문에, 이를 변화시키며 질량 법칙이 여전히 유효한지, 투과 손실을 동일한 조건으로 측정 가능한지에 대해 탐구할 것이다.

궁극적으로, 투과 손실을 통한 면밀도 측정이 유효한지, 유효다면 정확도를 높일 수 있는 방법이 무엇인지 알아내는 것이 본 탐구의 목표이다.

II

탐구 개요

1. 탐구 절차

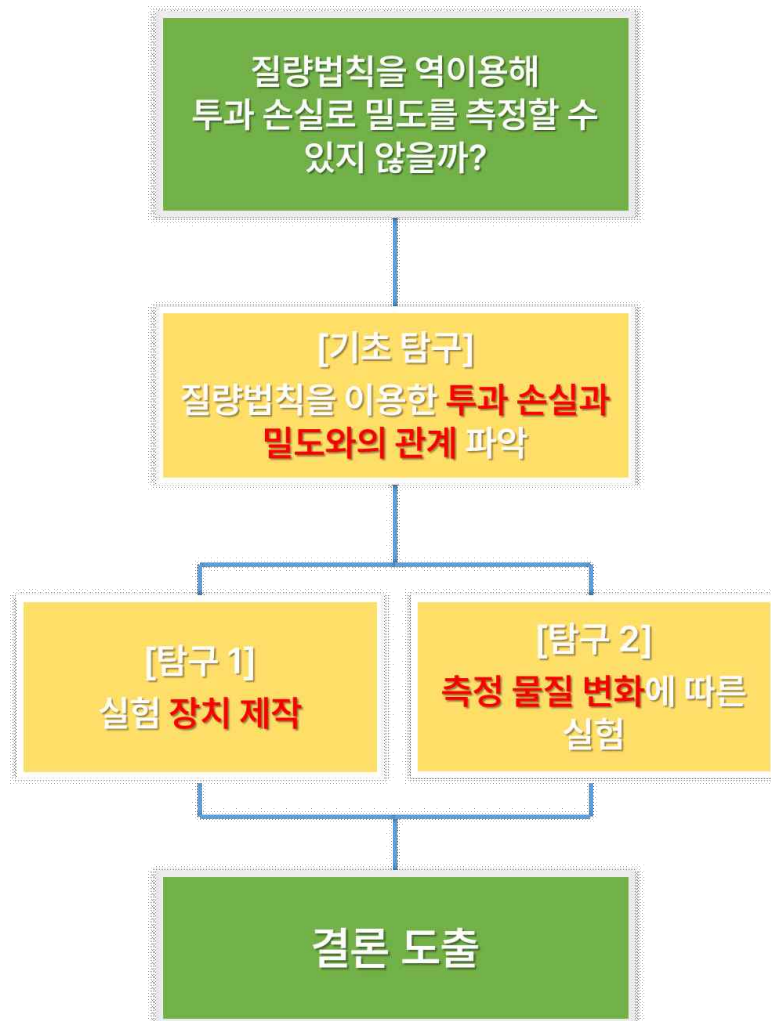


그림 2) 탐구 절차 표

2. 탐구 기간

연구내용	추진 시기(월)														
	4월			5월			6월			7월			8월		
	초	중	말	초	중	말	초	중	말	초	중	말	초	중	말
탐구 주제 선정	▶	▶					▶	▶							
선행연구 조사 및 분석		▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶					
이론적 배경 파악		▶	▶	▶	▶	▶	▶								
탐구 설계					▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶		
탐구 수행						▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	
결과 정리 및 보고서 작성							▶	▶					▶	▶	▶

표) 탐구 기간 정리 표

Ⅲ

이론적 배경 및 선행연구 조사

1. 이론적 배경

가. 차음(insulation)

실내에서 재생한 음이 외부로 새어 나가지 않는 정도를 차음이라고 한다. 벽의 구조나 재료에 따라서 차음 정도가 달라지며, 이를 측정하는 방법은 다음과 같다.

1) 투과율

벽의 한쪽 공간에서 입사된 소리의 세기 P_i 와, 벽을 투과해서 반대쪽 공간에 방사된 소리의 세기 P_t 의 비가 투과율(τ)이다. 소리의 세기는 음압 $[W/m^2]$ 을 의미한다. 투과율에 대한 식은 다음과 같다.

$$\tau = \frac{P_i}{P_t}$$

2) 투과 손실

위 그림은 투과 손실의 개념도를 나타낸다. 투과율의 역수에 상용로그를 취하여 10배 한 것을 투과 손실 (Transmission Loss; TL)이라고 한다. 소리의 세기에 사용 로그를 취했기 때문에 음압 레벨을 나타내며, 단위는 데시벨(dB)이다.

$$TL = 10\log_{10}\left(\frac{1}{\tau}\right) [dB]$$

$$\therefore TL = 10\log_{10}\left(\frac{P_t}{P_i}\right) [dB]$$

3) 차음도

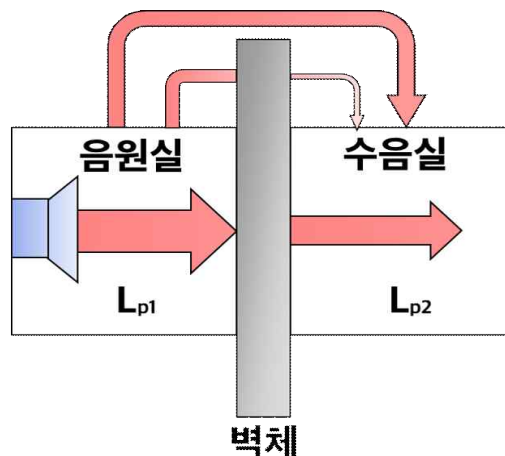


그림 3) 두 실내 사이의 음의 전반

그림과 같이 인접한 두 실내 사이의 벽을 기준으로 음원이 있는 곳을 음원실, 소리가 벽을 투과해서 도착하는 반대쪽 실을 수음실이라고 한다. 음의 전반은 벽만 투과해서 전달되고, 마루나 천장 등의 다른 경로에 의한 전반을 무시한다. 수음 측 실내 평균 음압 레벨인 L_{p2} 는 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$L_{p2} = L_{p1} - TL - 10\log_{10}\left(\frac{S}{A_2}\right) [dB]$$

L_{p1} : 음원실의 평균 음압 레벨

L_{p2} : 수음실의 평균 음압 레벨

TL : 벽의 투과 손실

S : 벽의 면적

A_2 : 수음실의 흡음력

이 두 실내의 음압 레벨 차를 차음도라고 한다. 또, 실제 건물에서 음의 전반은 천장이나 바닥 등을 경우에서 전달되는 것과 출입문과 창 등을 통한 음이 복도 등을 통해서 전달되는 경우도 있다. 다음 그림은 벽의 두께에 따른 차음 효과의 예시를 나타낸다. 식에 따라 벽의 두께가 2배가 되면, dB는 약 5씩 증가한다.

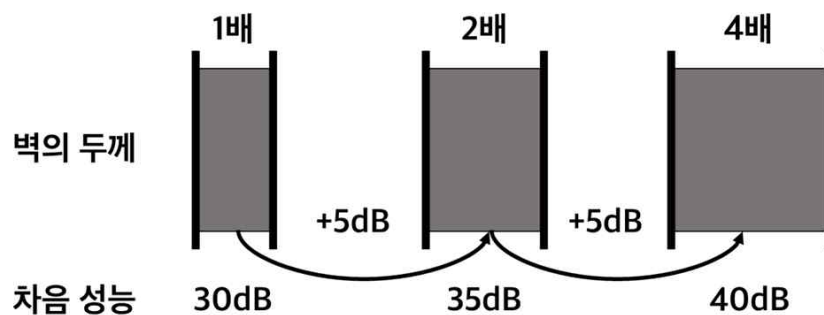


그림 4) 벽의 두께에 따른 차음 효과

나. 질량 법칙(mass law)

벽에 수직 입사한 소리에 벽이 전체 질량으로 저항할 때, 투과 손실은 질량 법칙을 따른다. 질량 법칙이란, 투과 손실이 면밀도와 진동수 곱에 상용로그를 취한 것과 비례한다는 법칙이다.

면밀도가 높을수록 투과손실이 커진다

진동수가 클수록 투과손실이 커진다

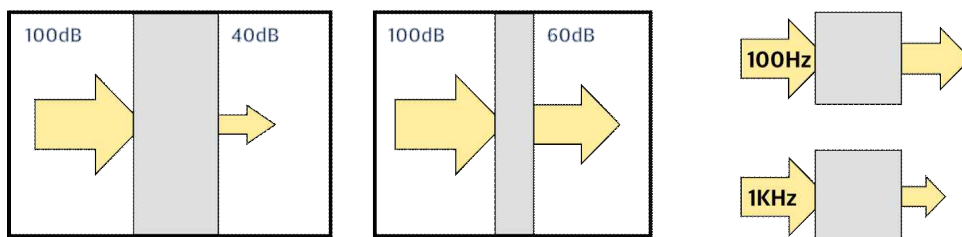


그림 5) 질량 법칙에 의한 투과 손실 변화

기준에는 차음률이 좋은 벽체를 판별하여 음향 관련 건축물에 사용하기 위해 사용되었지만, 본 탐구에서는 이를 역이용하여 물체의 면밀도를 투과 손실로 알아내는 데에 사용했다. 질량의 법칙을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$TL_0 = 20\log_{10}\frac{2\pi fm}{2\rho c} \doteq 20\log_{10}(fm) - 43 [dB]$$

f : 진동수

m : 단위 면적당 질량

ρ : 공기의 밀도

c : 음속

2. 선행연구 조사

가. Sound Absorbing and Insulating Low-Cost Panels from End-of-Life Household Materials for the Development of Vulnerable Contexts in Circular Economy Perspective

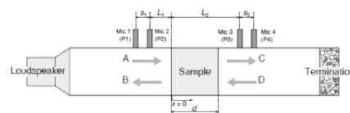


Figure 5. Schematic drawings of a four-microphones impedance tube. A represents the energy emitted by the loudspeaker, C is the component that crosses the sample, D is the component reflected by the termination, and B is the component reflected by the sample and/or that crosses the sample after being reflected by the termination.



그림 6) 연구 과정에서 사용한 투과 손실 측정장치

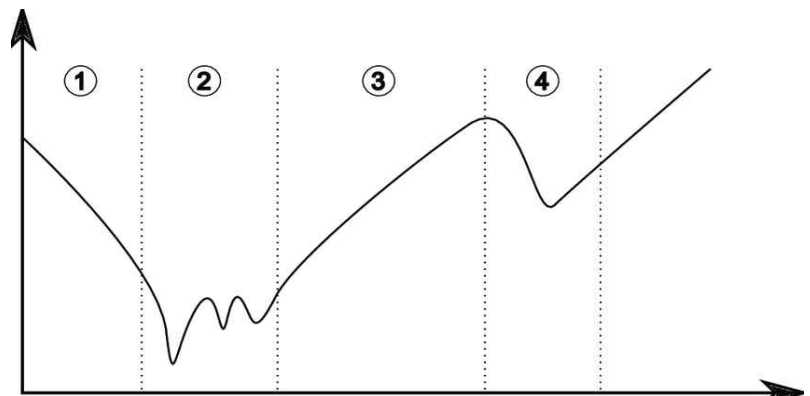


그림 7) 진동수에 대한 투과 손실 그래프 (로그 스케일)

내용 요약
해당 연구는 가정 폐기물을 이용해 저렴하고 지속 가능한 소리 흡수 및 절연 패널을 개발하는 방법을 제시했다. 그 과정에서 진동수에 따른 패널의 투과 손실에 관한 연구를 진행했고, 진동수에 대한 투과 손실 그래프가 4가지 영역으로 분류된다고 설명하고 있다. 각각 ① Stiffness Controlled Region 강성 제어 영역, ② Resonance Region 공진 영역, ③ Mass Law Region 질량 법칙 영역, ④ Concidence Region 우연의 일치 영역이 존재한다. 해당 논문은 본 연구의 [참고 1]에서 장치 제작 과정 중 장치에 사용될 사인과 음원의 진동수를 결정하는 과정에서 사용되었다. 해당 논문의 진동수에 따른 투과 손실 그래프를 실험적으로 재현하고, ③ (질량 법칙 영역)에 해당되는 진동수를 찾기 위해서 논문을 참고했다.

나. Prediction of Transmission Loss using an improved SEA Method - Rainer Stelzer, Nicolas Totaro, Goran Pavic, Jean-Louis Guyader

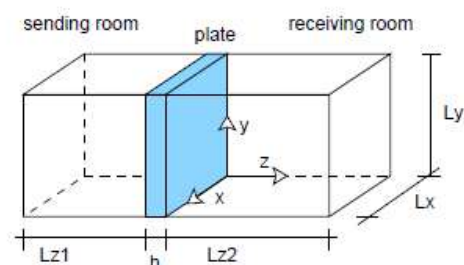


Figure 1: Sketch of the system

그림 8) 투과 손실 측정 모델 개념도

내용 요약
해당 연구는 개선된 SEA(Statistical Energy Analysis, 통계적 에너지 분석) 방법을 이용해 투과 손실을 예측하는 방법에 대해 다루고 있다.
진동수가 클수록 분해능이 높아져 복잡한 구조물의 측정이 가능해진다는 결과, SEA 방법의 한계 및 개선 방안을 제시하고 있다.
해당 연구는 가청음과를 사용하는 본연구가 기존 밀도 측정에서 사용되었던 초음파 방식과의 차이점으로 무엇을 제시할 수 있는지를 알아보기 위해 참조하였다.

다. Total Transmission Loss of Finite Single and Double Panels Using Statistical Energy Analysis - Prof. Dr. M. A. Kenawy (Ain-Shams University, Cairo-Egypt)

Non-Resonant Transmission Loss of Double Panels:

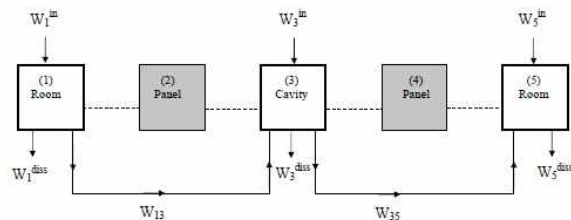


Figure 5: Block diagram representing power flow between coupled room-panel-cavity-panel-room system, when the panels are non-resonant and no panel-to-panel path

그림 9) 투과 손실의 소리 에너지 분배를
전기회로에 비유하여 설명

내용 요약
해당 연구는 SEA 방법을 통해 유한한 단일 패널 및 이중 패널의 총 투과 손실 (Total Transmission Loss)에 대해 다루고 있다. SEA는 측정에 사용되는 계에서 공명이 일어나는 공진진동수가 분석에서 사용되는 진동수 대역에서 균일하게 분포한 것으로 가정한다.
공진 상태의 하위 계(System)의 총에너지는 음향 임피던스에 따라 각각 균등하게 분배되며, 이 논문에서는 이를 전압이 직렬회로에서 임피던스에 따라 균등하게 분배되는 것, 전류가 병렬회로에서 임피던스에 따라 균등하게 분배되는 것 등 전기회로에 비유하여 설명한다.
해당 연구는 [참구 1]의 장치 제작 과정 중, 사인과 음원의 진동수를 결정하는 과정에서 공진 영역의 그래프가 어떻게 나타나며, 어떻게 공진 영역인지를 확인하고 이를 피할 수 있는지 알기 위해 참조했다. 또한, 공진 상태에서의 에너지 분배를 전기회로 개념으로 설명하여 음향 개념의 이해를 도와주었다.

라. Acoustic impedance measurement of snow density (2017) - O. Marco, O. Buser, P. Villemain, F. Touvier & Ph. Revol (Cambridge University Press)

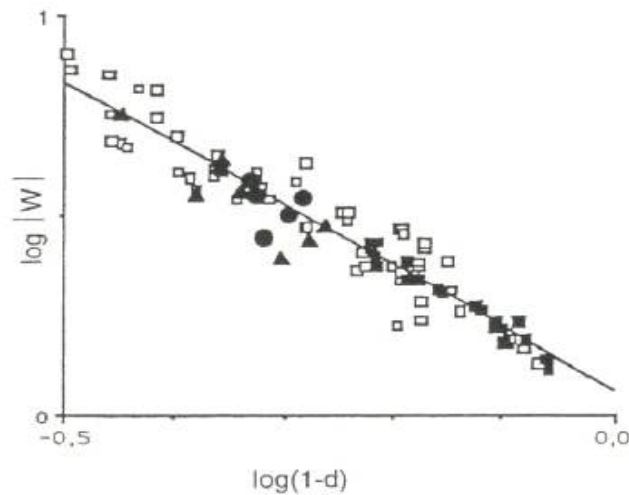


Fig. 7. Relation between density d and the modulus of characteristic impedance ratio $|W|$. $\square$ this study; $\blacksquare$ Buser (1986); $\bullet$ ice grains in front of the surface of the sample; $\blacktriangle$ sample with a chipped surface.

그림 10) 밀도와 특성 임피던스 비율(Charactistic Impidence Ratio) 간의 상관관계 그래프

내용 요약
해당 연구에서는 음향 임피던스를 이용하여 눈의 밀도를 측정하는 것에 대해 다루고 있다. 냉동실에서 눈 샘플을 측정하고, 음향 특성과 밀도 간의 상관관계를 임피던스, 다층 매질 이론(acoustic multilayered media theory) 등을 통해 연구하였다. 그 결과, 눈의 밀도와 임피던스 간의 강력한 상관관계가 있으며, 이를 이용하여 새로운 눈의 밀도 측정 방식을 제시하였다.
논문에서는 이러한 음향을 이용한 밀도 측정이 기존 방법보다 더 편리하다는 것을 강조하였으며, 이를 통해 눈의 밀도를 확인할 수 있는 분야에서 이 논문의 내용을 참고하고 적용할 수 있다고 제시했다.
본 연구와 해당 연구는 음향 이론을 이용하여 물체의 밀도를 측정한다는 공통점이 있지만, 해당 연구는 임피던스를, 본 연구는 음압의 투과 손실을 이용했다는 차이점이 있다.

IV

탐구 내용

1. [탐구 1] 측정장치의 제작

가. 실험 목적 및 설계

실험에 앞서, 사전 탐구에서 변인에 대한 통제가 부족했던 것을 보완하고자 투과 손실을 측정하는 것에 영향을 줄 수 있는 변인에 대해 생각해보게 되었다. 그 결과, 사인파의 진동수, 마이크(dB 측정기)의 위치, 장치의 크기 등의 변인이 투과 손실 측정에 영향을 줄 수 있으리라 예상했다. 본 탐구의 목적은 선행연구 조사와 실험을 통하여 장치가 측정한 값의 신뢰도를 향상하도록 하는 것이다.

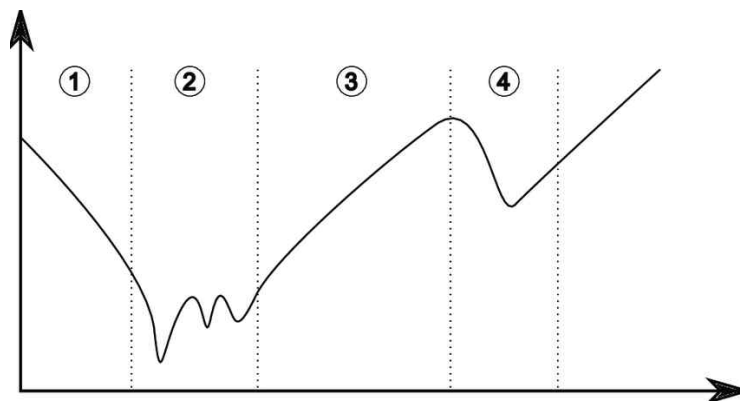


그림 11) ‘선행연구 가’에서 발췌한 그래프

가로축: 진동수 [Hz] (로그 스케일 축)

세로축: 투과 손실 [dB]

- (1) 불안정 구역 stiffness controlled region
- (2) 공명 구역 resonance region
- (3) 질량 법칙 구역 mass law region
- (4) 공진주파수 구역 coincidence region

기초 탐구에서는 사인파의 진동수를 임의로 정했으나, ‘선행연구 가’를 통해, 질량의 법칙이 성립하는 질량 법칙 구역이 따로 존재함을 알게 되었다. 질량 법칙 구역은 위 그래프의 (3)에 해당하며, 투과 손실을 측정하는 실험을 진행하기 위해선 이 구역에 해당하는 진동수를 찾아야 한다.

질량의 법칙은 음원실과 수음실이 모두 이상적인 잔향실 조건일 때 성립한다. 잔향실일 경우 모든 소리가 벽을 통과하지 않고 내부로 반사되어, 실 내부의 모든 지점에서의 음압이 균일해진다. 그러나, 장치의 고유 진동수와 사인파의 진동수가 일치하여 공명이 일어나는 경우, 장치 내부에 정상파가 형성되므로 정상파의 마디와 배 부분에서의 음압이 달라져 잔향실 조건을 만족하지 않게 된다.

위 조사를 바탕으로 본 실험에서 측정할 요소들은 다음과 같다.

1) 진동수에 따른 투과 손실

진동수에 따른 투과 손실을 측정한다 (진동수에 따른 투과 손실 변화 탐구)

- 예상 결과: 질량 법칙 식에 의해 $TL \propto 20\log_{10}(f)$ 이므로, 진동수가 증가할수록 투과 손실도 증가할 것이다. 그러므로 진동수에 상용로그를 취한 값과 투과 손실 간의 관계 그래프를 그렸을 때, 질량 법칙이 이상적으로 성립하는 구간에서는 기울기가 20이다.

2) 마이크 위치에 따른 음압 레벨

서로 다른 위치에 설치된 마이크(dB 측정기)가 측정하는 dB 값의 차이를 기록한다 (dB 측정기의 위치에 따른 측정값 변화 탐구)

- dB 차이가 유의미한 진동수 범위: 공명이 일어나는 구역에 해당하므로, 해당 범위의 진동수는 실험에 사용할 수 없다.

- dB 차이가 무의미한 진동수 범위: 잔향실 조건을 만족하므로, 해당 범위의 진동수 중 일부가 실험에 사용 가능할 수 있다.

나. 실험 과정 및 결과 해석



그림 12) 실험 장치 제작 과정

프로파일을 이용하여 실험 장치의 뼈대를 제작하였으며, AutoCAD와 레이저 절단기로 아크릴판을 자르고, 세어나가는 공간이 없도록 글루건으로 마감했다.

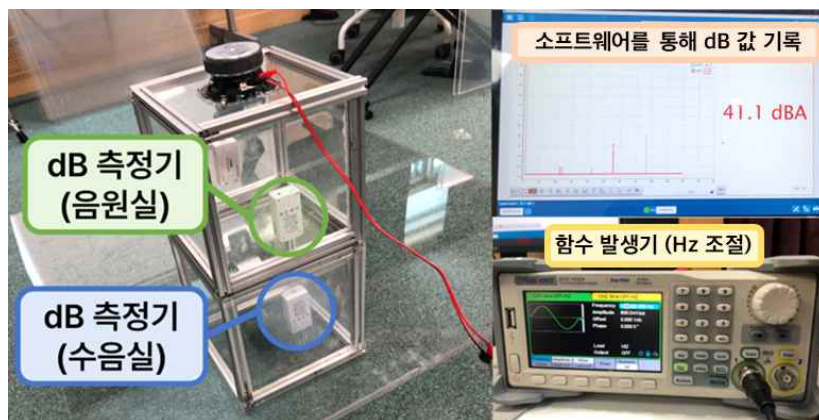


그림 13) 실험 장치 구성

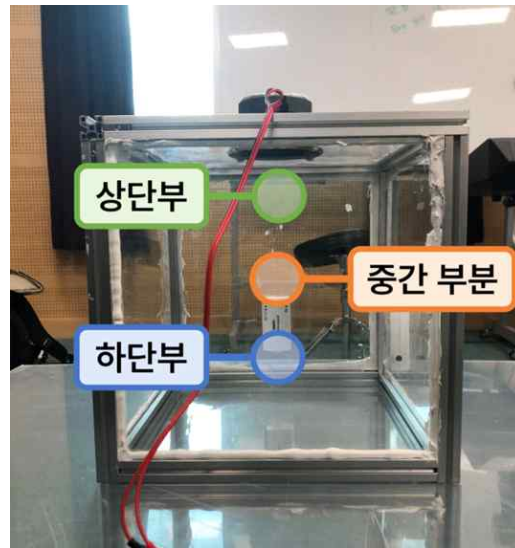


그림 14) 측정 위치 실험 세팅

- 음원실에 하단부, 중간부, 상단부, 총 3개의 dB 측정기를 설치했다.
- 수음실에 한 개의 dB 측정기를 설치했다.
- 진동수에 따른 투과 손실을 측정한다.
- 진동수는 40Hz부터 41/40 비율로 5054Hz까지 총 197번 변경하며 측정했다. (같은 비율로 증가하여 로그 스케일 그래프로 나타냈을 때 같은 간격을 가지도록 했다)



그림 15) 진동수에 따른 투과 손실 그래프 (40Hz~5000Hz)

첫 번째 실험의 경우 40Hz부터 5000Hz까지 측정을 진행했다. 그 결과, 약 1500Hz 이후의 후반부에서는 재현성이 낮고 랜덤한 값이 나와 질량 법칙 구역이라고 보기 어려웠기에, 두 번째 실험부터는 이 범위를 제외하고 측정을 진행했다.



그림 16) 마이크의 위치에 따른 진동수에 대한 음압 레벨 그래프

위 그래프는 두 번째 측정에서 하단, 중간 마이크와 수음실의 마이크에서 측정한 음압을 나타낸다. 40Hz~800Hz 범위에서는 그래프의 개형이 거의 일치하는 모습을 보여주나, 400Hz~500Hz 범위에서 수음실의 dB이 낮아지는 현상이 발견되어 제외했다. 이는 두 개의 측정값이 모두 동시에 감소했기에, 공명이라고 볼 수 없으며 진동을 통한 소리 유출 등의 다른 요인으로 인한 감소로 보인다.

그리고 500Hz~800Hz 범위에서 651.4Hz를 최저점으로 마이크 하단부의 dB가 급격하게 감소하였기에 제외했다. 음원실 상단부의 dB와 수음실의 dB은 감소하지 않았기 때문에 해당 범위가 공명 구역임을 알 수 있다. 800Hz부터는 중간부와 하단부의 dB 차이가 증가하여 잔향실 조건이라고 볼 수 없으므로 제외하게 되었으며, 결론적으로 질량 법칙이 성립하는 진동수는 40Hz~400Hz 범위에 있는 것으로 좁혀지게 되었다.



그림 17) 진동수에 따른 투과 손실 그래프를 통해 질량 법칙 적용 구역 예측

위 그래프는 두 번째 측정에서 중간 마이크에서 나온 투과 손실 결과를 나타낸다. 우상향하는 구간 중, 121.5Hz~144.4Hz 구간이 가장 20에 가까운 기울기를 가졌으므로, 해당 범위 내에 질량 법칙이 성립하는 진동수가 있다고 예상했다.

진동수 [Hz]	log(진동수)	투과 손실
121.5	2.08	13.5
124.6	2.10	14.0
127.7	2.11	14.3
130.9	2.12	15.4
134.1	2.13	16.7
137.5	2.14	18.2
140.9	2.15	19.1
144.4	2.16	20.1

그림 18) 121.5Hz~144.4Hz의 진동수에 따른 투과 손실 표

마이크 위치가 중간일 때, 진동수에 따른 투과손실
121.5Hz~144.4Hz

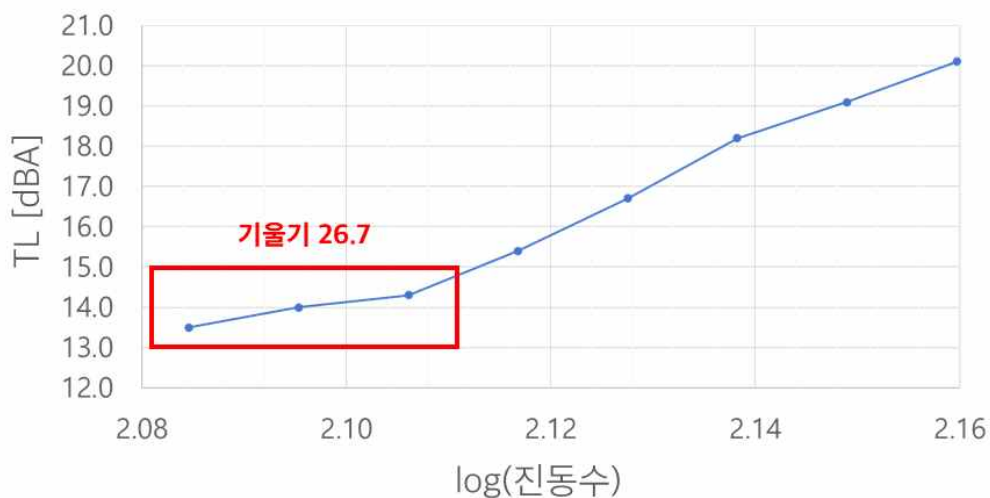


그림 19) 121.5Hz~144.4Hz의 진동수에 따른 투과 손실 그래프

진동수 범위	log(진동수) 차이	투과손실 차이	기울기
121.5Hz ~ 144.4Hz	0.08	6.6	82.5
121.5Hz ~ 127.7Hz	0.03	0.8	26.7

그림 20) 진동수 범위에 따른 투과 손실의 기울기

121.5Hz~144.4Hz 구간의 기울기는 82.5이며, 구간을 121.5Hz~127.7Hz로 잡았을 때는 20과 더 가까운 26.7의 기울기가 나오는 것을 확인할 수 있었다. 이는 진동수 구간 중, 121.5Hz~127.7Hz 이 가장 질량 법칙 구역에 적합함을 뜻하며, 이 범위 내의 값인 125Hz를 투과 손실 측정에 사용하는 것으로 결정하게 되었다.

2. [탐구 2] 측정 물질 변화에 따른 투과 손실 실험

가. 실험 목적 및 설계

본 실험에서 확인하고자 하는 것은, 물체의 재질이 바뀌는 상황에서도 면 밀도에 따른 투과 손실을 측정할 수 있을 것인가이다. 이를 위해서 아크릴판과 MDF 총 두 가지 재질의 판을 준비하여, 면 밀도에 따른 투과 손실 그래프를 완성하고 이 그래프를 이용해서 투과 손실로 면 밀도를 도출할 가능성이 있는지 확인할 것이다.

본격적인 실험에 들어가기 전에 확인해야 할 것은 다음과 같다.

1) 장치에 최대 몇 개의 판을 쌓을 수 있는가?

장치의 음원실과 수음실이 서로 분리되어 있기에, 두 실 사이의 간격이 크게 벌어지면 외부로 새 나가는 소리와 유입되는 소리로 인한 오차가 발생할 것이라고 예상했다. 그러므로 유의미한 결과를 얻을 수 있는 물체의 최대 두께를 알아낼 필요성이 있다.

2) 판의 면적이 투과 손실에 어떠한 영향을 주는가?

판의 넓이가 커질수록 음원실에서 나오는 소리가 수음실로 우회해서 들어가는 것을 방해해 주기 때문에, 판의 면적이 작을수록 투과 손실 값이 작게 나오며, 넓을수록 투과 손실 값이 정확해질 것이라고 예상했다.

나. 측정 물체의 최대 두께 결정

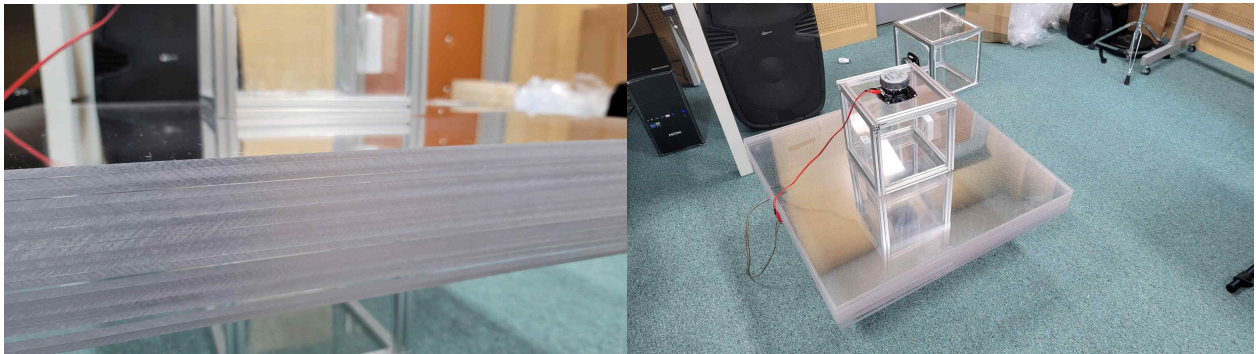


그림 21) 최대 두께 실험 장면

장치가 측정할 수 있는 최대 두께를 알아내기 위해, 총 19장의 5T(두께 5mm)의 아크릴을 한 개씩 쌓아가는 방식으로 실험을 진행했다. 아크릴의 두께에 따른 투과 손실을 총 3번 반복하여 측정했다.

아크릴의 면밀도에 따른 투과 손실

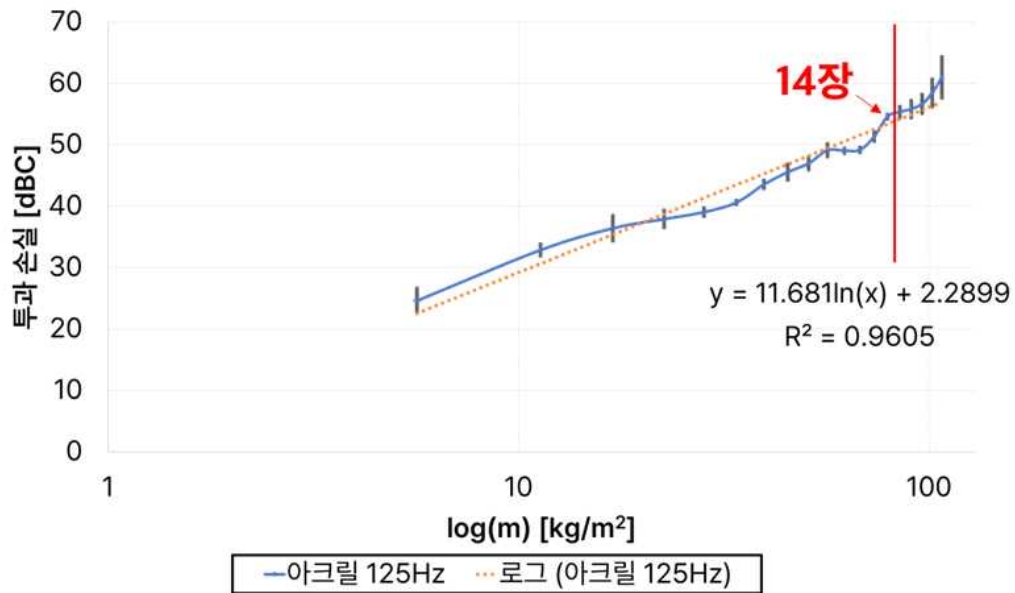


그림 22) 아크릴의 면밀도에 따른 투과 손실 그래프 (125Hz)

아크릴의 면밀도에 따른 투과손실							
판 수	면밀도	TL-1차	TL-2차	TL-3차	평균	표준분포	표준오차
1	5.66	28.50	23.40	22.00	24.63	3.42	1.98
2	11.32	34.80	32.00	31.80	32.87	1.68	0.97
3	16.99	38.40	38.50	32.30	36.40	3.55	2.05
4	22.65	39.60	38.90	35.20	37.90	2.36	1.37
5	28.31	39.90	39.40	37.80	39.03	1.10	0.63
6	33.97	40.90	40.80	40.10	40.60	0.44	0.25
7	39.64	42.90	44.80	42.90	43.53	1.10	0.63
8	45.30	44.10	48.00	44.50	45.53	2.15	1.24
9	50.96	45.40	48.90	46.60	46.97	1.78	1.03
10	56.62	47.90	51.20	48.20	49.10	1.82	1.05
11	62.28	48.40	48.90	49.80	49.03	0.71	0.41
12	67.95	49.90	48.80	48.80	49.17	0.64	0.37
13	73.61	51.90	52.30	49.80	51.33	1.34	0.78
14	79.27	53.90	54.80	55.00	54.57	0.59	0.34
15	84.93	53.90	56.80	55.30	55.33	1.45	0.84
16	90.60	53.90	58.50	55.00	55.80	2.40	1.39
17	96.26	53.90	59.10	56.90	56.63	2.61	1.51
18	101.92	54.10	60.40	60.80	58.43	3.76	2.17
19	107.58	54.30	63.80	64.80	60.97	5.80	3.35

그림 23) 아크릴의 면밀도에 따른 투과 손실 표 (125Hz)

실험 결과, 아크릴판 14장(7cm)까지는 이론과 맞는 정비례 직선 그래프의 개형을 확인했지만, 15장부터 급격히 상승하여 정확도가 낮아지는 경향이 보였다. 그러므로 장치가 측정하는 물체의 두께는 최대 7cm까지 제한하는 것으로 결정하게 되었다.

다. 측정 물체의 크기 결정

한 변이 30cm, 45cm, 60cm, 75cm인 정사각형 5T 아크릴판을 이용하여 실험을 진행하였다. 이 4종류의 아크릴에 대해 1장일 때와 2장일 때를 측정했고, 이를 세 번 반복하여 실험했다.

판의 개수	TL-1차		TL-2차		TL-3차		평균값		표준오차	
판의 크기(한변 길이) [m]	1개	2개	1개	2개	1개	2개	1판	2판	1판	2판
0.3	19.3	24.8	12.2	20.6	12.5	21.2	14.67	22.20	2.32	1.31
0.45	21.7	25	20.1	27.1	20.9	27.3	20.90	26.47	0.46	0.74
0.6	24.8	27	28.4	26.9	21.9	29.6	25.03	27.83	1.88	0.88
0.75	28.5	34.8	23.4	32	22	31.8	24.63	32.87	1.98	0.97

그림 24) 판의 개수, 판의 크기에 따른 투과 손실 표 (125Hz)

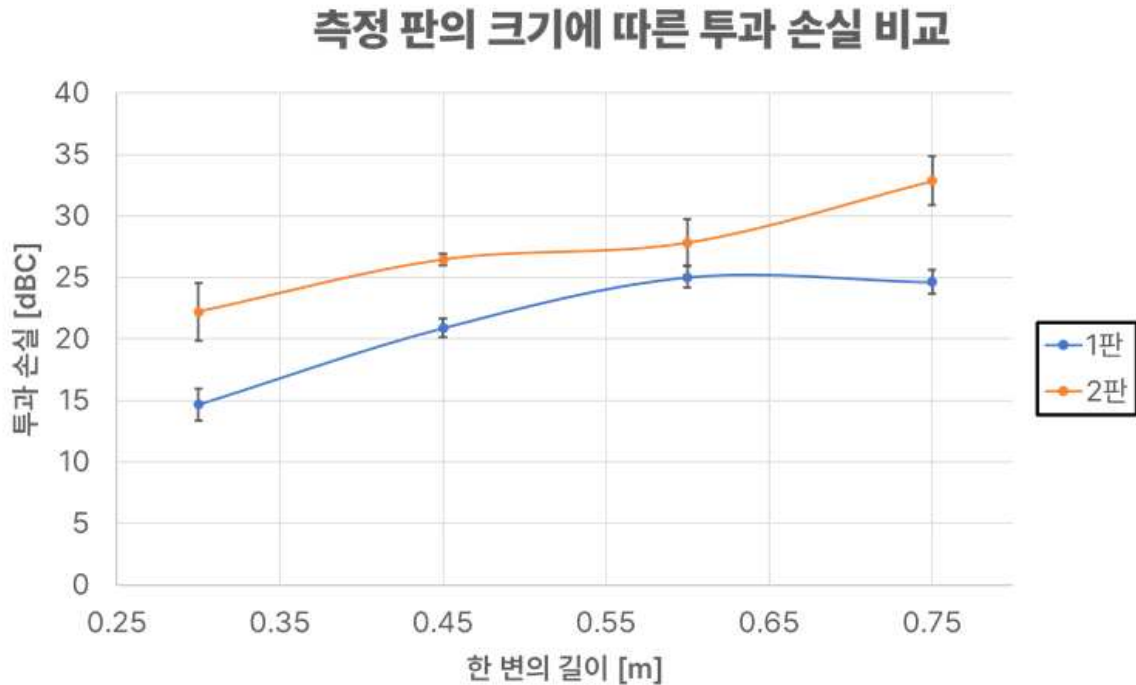


그림 25) 판의 개수, 판의 크기에 따른 투과 손실 그래프 (125Hz)

1장일 경우 60cm*60cm 판 이상의 크기에서는 더 이상 판의 크기가 영향을 주지 않음을 알 수 있었다. 2장의 경우에는 판이 커질수록 투과 손실이 커지는 경향이 끝까지 나타났으며, 더 큰 판을 이용한 실험을 통해 판의 크기가 영향을 주지 않는 최소 면적을 확인할 수 있지만, 더 큰 아크릴판을 구할 수 없었다. 그러므로 결론은 판의 크기가 클수록 투과 손실 측정의 정확도가 높아지며, 실험을 진행할 때는 가능한 최대 크기의 판을 사용하도록 해야 한다는 결론을 내리게 되었다.

라. 측정 물체의 재질에 따른 투과 손실 영향

아크릴을 이용한 먼 밀도에 따른 투과 손실 측정은 이미 활동 가.에서 완료했으므로 5T MDF를 쌓아서 먼 밀도에 따른 투과 손실을 측정할 것이다. 그리고 먼 밀도에 대한 투과 손실의 그래프를 분석하여 재질이 투과 손실에 영향을 미치는지 판단할 것이다.

MDF의 면밀도에 따른 투과 손실

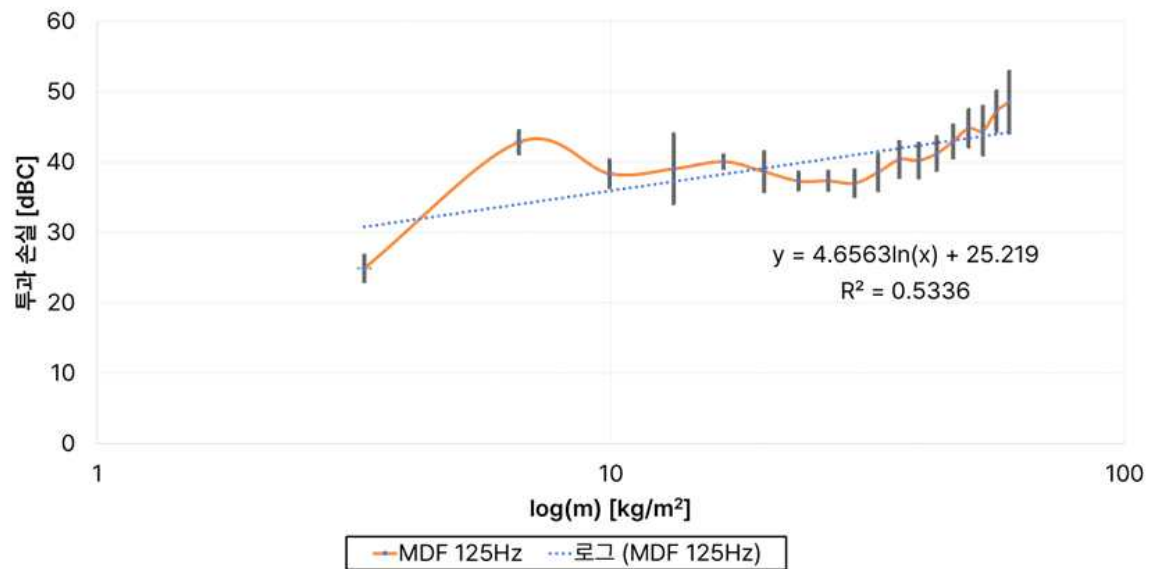


그림 26) MDF의 면밀도에 따른 투과 손실 그래프 (125Hz)

MDF의 면밀도에 따른 투과손실							
판 수	면밀도	TL-1차	TL-2차	TL-3차	평균	표준분포	표준오차
1	3.31	26.50	21.30	26.90	24.90	3.12	1.80
2	6.62	44.70	44.10	39.70	42.83	2.73	1.58
3	9.93	42.00	35.50	37.60	38.37	3.32	1.92
4	13.24	48.80	33.40	34.90	39.03	8.49	4.90
5	16.55	41.70	38.60	39.90	40.07	1.56	0.90
6	19.86	44.00	34.70	37.20	38.63	4.81	2.78
7	23.17	39.40	37.30	35.20	37.30	2.10	1.21
8	26.48	39.90	35.70	36.40	37.33	2.25	1.30
9	29.79	40.40	36.40	34.20	37.00	3.14	1.81
10	33.10	43.30	34.70	37.60	38.53	4.38	2.53
11	36.41	45.30	38.20	37.60	40.37	4.28	2.47
12	39.72	45.00	37.90	37.80	40.23	4.13	2.38
13	43.03	45.80	39.60	38.20	41.20	4.04	2.34
14	46.34	44.80	45.60	38.40	42.93	3.95	2.28
15	49.65	49.10	45.20	40.10	44.80	4.51	2.61
16	52.96	49.80	45.50	38.10	44.47	5.92	3.42
17	56.27	50.80	49.20	41.70	47.23	4.86	2.80
18	59.58	53.80	51.80	39.90	48.50	7.51	4.34

그림 27) MDF의 면밀도에 따른 투과 손실 표 (125Hz)

5T MDF 판을 한 개씩 겹쳐, 면 밀도에 따른 투과 손실을 측정하는 실험을 총 3번 반복해서 진행하였다.

아크릴판과 MDF로 실험한 면 밀도에 따른 투과 손실 그래프를 서로 겹쳐서 비교하기 위해 <아크릴과 MDF의 면밀도에 따른 투과 손실 그래프 (125Hz)>를 제작했다.

면밀도에 따른 투과 손실

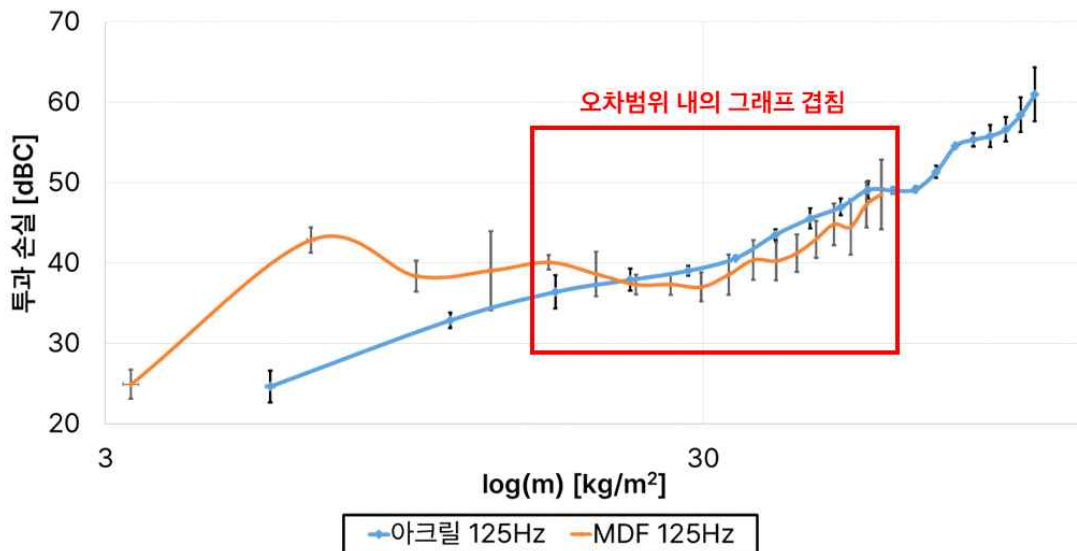


그림 28) 아크릴과 MDF의 면밀도에 따른 투과 손실 그래프 (125Hz)

면밀도 $20\text{kg/m}^2 \sim 60\text{kg/m}^2$ 에서 오차범위 내의 그래프 겹침이 나타났음을 확인할 수 있었으며, 투과 손실로 면 밀도를 측정하는 것은 해당 범위에서만 유의미할 것이라는 결론을 내릴 수 있었다.

투과 손실 측정으로 면 밀도를 알 수 있도록 $20\text{kg/m}^2 \sim 60\text{kg/m}^2$ 범위에서 추세선을 그린 <단일 재질에서 면밀도에 따른 투과 손실 그래프 (125Hz)>를 제작했다. 이 그래프를 통해, 물체의 투과 손실을 측정하면 $R^2 = 0.8863$ 의 정확도로 면 밀도를 도출할 수 있다는 결론을 내렸다.

면밀도에 따른 투과 손실

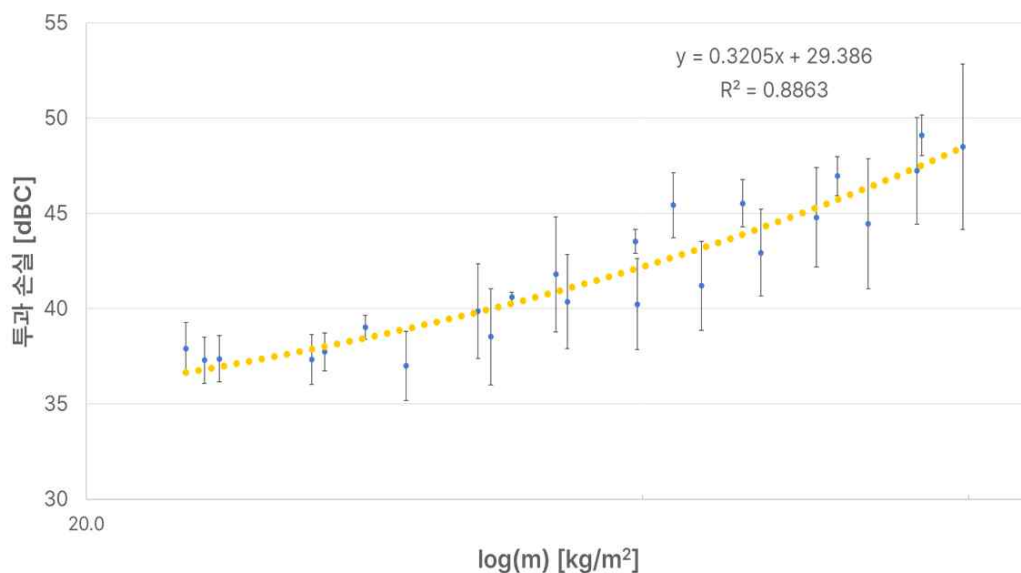


그림 29) 단일 재질에서 면밀도에 따른 투과 손실 그래프 (125Hz)

마. 측정 물체의 공기층에 따른 투과 손실의 영향

‘실험 라’에서 도출한 <단일 재질에서 면밀도에 따른 투과 손실 그래프 (125Hz)>를 이용하여 물체의 투과 손실을 측정해 면밀도 값을 유추할 수 있었다. 그러나 내부에 비어있는 공간이 있는 경우 투과 손실에 오차가 있을 수 있다고 생각하여 본 실험을 진행하기 시작했다.

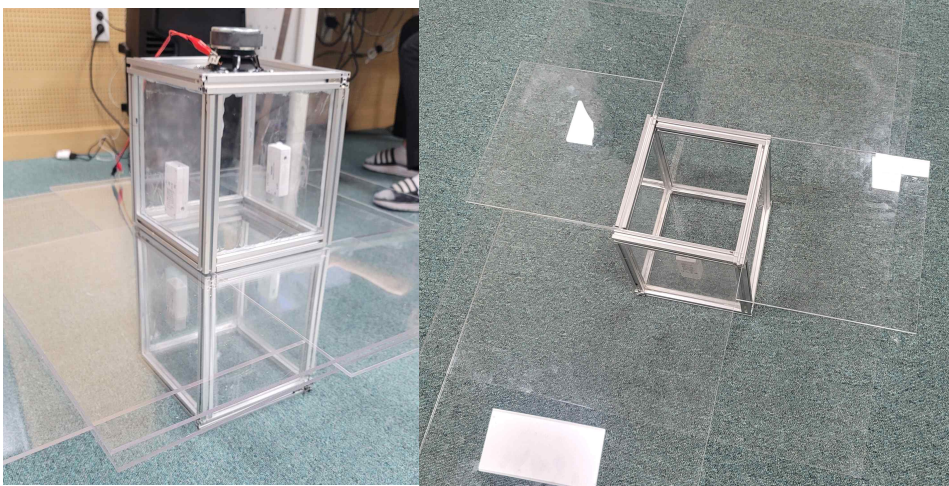


그림 30) 공기층이 있는 실험 장치의 모습

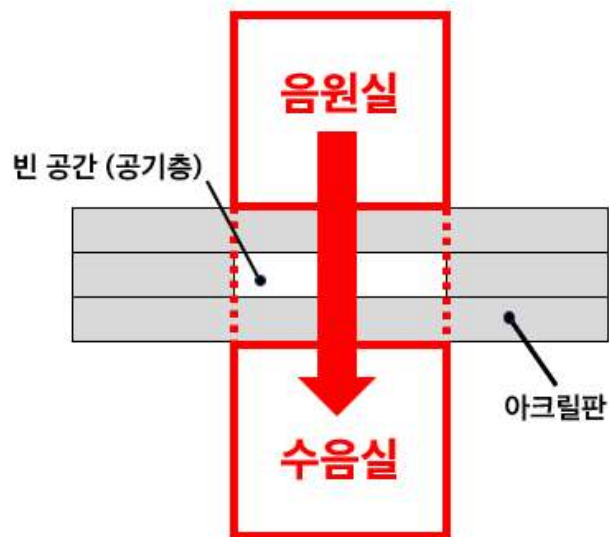


그림 31) 공기층이 있는 실험 장치의 모식도

측정부 주변을 작은 아크릴판으로 감싸는 형태로 공극 층을 만들었다. 아크릴을 ‘아’, 공극을 ‘공’ 이라고 할 때 아-아-공-아-아 패턴으로 아크릴 4장과 공극 1개, 아-공-아 패턴으로 아크릴 2장과 공극 1장에 대한 투과 손실을 총 세 번 반복하여 측정하는 실험을 진행했다.

면밀도에 따른 투과 손실

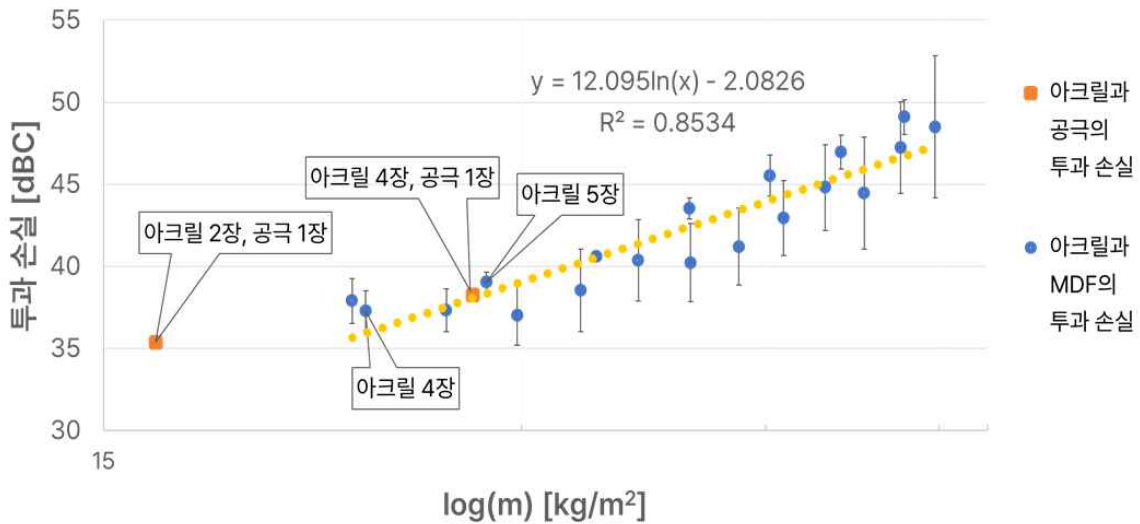


그림 32) 공기층이 있을 때와 단일 재료의 투과 손실 값과의 비교 그래프 (125Hz)

1차 실험

공극 위치	음원실(dBC)-1차	수음실(dBC)-1차	TL-1차
아-공-아	109	73.5	35.5
아-아-공-아-아	109.1	70.3	38.8

2차 실험

공극 위치	음원실(dBC)-2차	수음실(dBC)-2차	TL-2차
아-공-아	108.8	73.5	35.3
아-아-공-아-아	109.1	70.5	38.6

3차 실험

공극 위치	음원실(dBC)-3차	수음실(dBC)-3차	TL-3차
아-공-아	109	73.7	35.3
아-아-공-아-아	109.2	71.8	37.4

그림 33) 공기층이 있을 때와 단일 재료의 투과 손실 값과의 비교표 (125Hz)

그 결과를 <단일 재료에서 면밀도에 따른 투과 손실 그래프 (125Hz)>에 표시한 결과가 <공극이 있을 때와 단일 재료의 투과 손실 값과의 비교 그래프 (125Hz)>이다. 아크릴 4장과 공극 1장의 측정 결과는 아크릴 4장과 아크릴 5장 결과의 중간값이 나왔으며, 아크릴 2장과 공극 1장의 경우에도 아크릴 2장과 아크릴 3장 결과의 중간값이 나왔다.

기존 그래프의 오차범위를 크게 넘는 값이 나오지 않기 때문에, 공기층이 투과 손실 측정값에 영향을 주지만, 투과 손실로 면 밀도를 유추해내는 과정에서 크게 문제가 발생하지는 않는다는 결론을 내리게 되었다.

3. [탐구 3] 투과 손실을 이용한 면밀도 예측과 검증

최종적으로 얻게 된 면밀도에 따른 투과 손실 그래프를 이용해 모르는 면밀도의 물질을 투과 손실을 이용해서 알 수 있는지 확인하는 과정을 거치고자 하였다. 따라서 아크릴과 MDF를 임의로 혼합해 층을 쌓고 투과 손실과 면밀도를 측정하였다.



그림 34) 아크릴과 MDF 혼합 재질에서의 투과 손실 측정

측정한 투과 손실은 A - 37 [dBC], B - 42.1 [dBC], C - 45.4 [dBC]로 측정하였다. 이를 예측한 식에 대입한 결과, 각각 25, 39.5, 50.5의 면밀도가 나올 것으로 예측하였다.

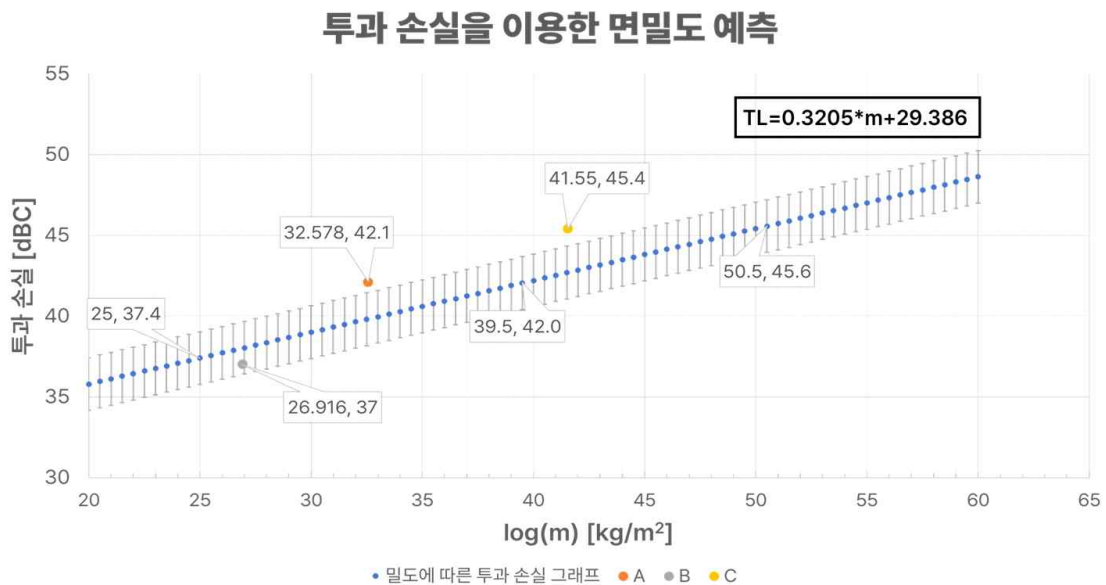


그림 35) 투과 손실을 이용한 면밀도의 예측

이후 예측한 면밀도와 실제 면밀도를 비교해본 결과, 92.9%, 85.7%, 82.3%의 정확도를 얻을 수 있었다. 이를 통해 0.70의 R^2 을 갖는 그래프에 있어서 측정 범위 내의 정확도를 갖고 있다는 결과를 얻었다. 따라서, 혼합 재질에 있어서 이 그래프를 이용할 수도 있다는 결론을 얻게 되었다.

1. 결론

본 연구에서는 아크릴판과 MDF 판의 투과 손실을 측정해 면밀도를 도출해 낼 수 있는가에 대한 실험을 진행하였고, 투과 손실과 아크릴은 양의 상관관계가 있었으며, 특정 범위의 진동수와 특정 조건에서 질량 법칙이 성립함을 확인하였다.

서로 다른 재질, 면적, 두께의 판에 대하여 실험을 진행하였으며, 결론은 다음과 같다. 아크릴 판과 MDF처럼 재질이 달라도 꼭 찬 벽체에서 실험을 진행할 경우, 구한 예측식에 투과 손실을 대입하면 의미 있는 면밀도를 얻을 수 있다. 하지만 공기층이 존재하는 경우는 투과 손실에 영향을 주었기 때문에, 공기층의 두께와 같은 정보가 추가로 있어야 면밀도를 구해볼 수 있을 것이다.

음향학에서 물체의 차음성을 확인하는 용도로 사용되는 질량 법칙을 역이용하여 투과 손실로 물체의 면밀도를 측정하는 새로운 방식의 비파괴 밀도 측정 메커니즘을 제시했다는 점과, 이 아이디어의 실제 활용을 위해서 어떤 조건이 필요한지 제시했다는 점에서 의의가 있다.

2. 향후 탐구 계획

- 본 탐구가 실험한 물체는 빈공간 없는 단단한 고체 판이라는 제한적인 재질이었다. 같은 물질이 균일하게 배열된 것이 아닌, 서로 다른 물질이 불규칙하게 배열되었을 때 투과 손실에 미치는 영향을 알 수 없으므로 이에 대한 실험을 진행하고자 한다. 점토나 모래 안에 밀도가 다른 구슬을 채워 넣어, 구슬의 배열이나 밀도에 어떠한 영향이 있는지에 대하여 탐구해 더 많은 재질에서의 밀도 측정이 가능하도록 노력할 예정이다.

- 본 탐구의 경우 질량 법칙을 이용했기 때문에 밀도가 아닌 면밀도를 측정한다는 한계가 있다. 물체의 두께를 알아내기 위해서 물체의 깊이를 측정하는 방법이 필요하다. 물체의 두께도 알아낼 방법을 연구하고 적용한다면 훨씬 더 활용도가 높은 측정 방식이 될 수 있을 것이다.

- 장치의 음원실과 수음실이 분리되어 있었기 때문에, MDF같이 불투명한 재질의 경우 음원실과 수음실이 동일 지점에 있도록 맞추기 힘들다. 이를 개선하기 위해 자석을 이용하거나, 레이저 포인터 모듈을 이용하는 등의 개선 방안을 적용하고자 한다.

VI

참고문헌

- [1] 음향기술총론 (2010) - 강성훈 저 (연세대학교 전자공학 석사, 고베대학교 전자공학 박사, 한국음향학회 부회장) <https://www.yes24.com/Product/Goods/4106216>
- [2] Acoustic impedance measurement of snow density (2017) - O. Marco, O. Buser, P. Villemain, F. Touvier & Ph. Revol (Cambridge University Press) https://www.cambridge.org/core/journals/annals-of-glaciology/article/acoustic-impedance-measurement-of-snow-density/9F5BB89BD0F7C63AAFFAAD194B89DCCB?utm_campaign=shareaholic&utm_medium=copy_link&utm_source=bookmark
- [3] Sound Absorbing and Insulating Low-Cost Panels from End-of-Life Household Materials for the Development of Vulnerable Contexts in Circular Economy Perspective <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/12/5372>
- [4] Prediction of Transmission Loss using an improved SEA Method - Rainer Stelzer, Nicolas Totaro, Goran Pavic, Jean-Louis Guyader https://www.researchgate.net/publication/266458685_Prediction_of_Transmission_Loss_using_an_improved_SEA_Method
- [5] Total Transmission Loss of Finite Single and Double Panels Using Statistical Energy Analysis - Prof. Dr. M. A. Kenawy (Ain-Shams University, Cairo-Egypt) https://www.researchgate.net/publication/287283876_Total_transmission_loss_of_finite_single_and_double_panels_using_Statistical_Energy_Analysis
- [6] Analytical Expression for Sound Transmission Loss Calculation: An Improvement to the Existing Method after Singh and Katra - Iwan Yahya (The Iwany Acoustics & Applied Physics Research Group, iARG) <https://www.hindawi.com/journals/aav/2009/574604/>
- [7] Transmission of Reverberant Sound Through Single Walls - Albert London (U.S. Department of Commerce) https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/jres/42/jresv42n6p605_A1b.pdf
- [8] Sound transmission through simple and double infinite covers - Adria Oliveras Simon (University of Barcelona) https://www.researchgate.net/publication/243711183_Sound_Transmission_Through_Simply_Supported_Finite_Double-Panel_Partitions_With_Enclosed_Air_Cavity