

# 전기차용 플랫폼 플로어 적용을 위한 시뮬레이션 기반 다층 구조 흡음재 설계 최적화

정예담 · 조성진 · 김세종 · 이인성<sup>†</sup>

한국섬유기계융합연구원

## Simulation-Driven Design and Optimization of Multilayer Acoustic Absorbers for EV Flat Floor Applications

Yedam Jeong, Seongjin Cho, Sejong Kim, and Insung Lee<sup>†</sup>

Korea Textile Machinery Convergence Research Institute, Gyeongsan 38542, Korea

**Abstract:** This study aims to develop high-performance acoustic interior materials for flat floor structures in electric vehicles (EVs) by optimizing a multilayer sound-absorbing system composed of TPS composite, PET felt, and PU foam. To enable simulation-based acoustic prediction, fundamental material properties were first evaluated. The sound absorption coefficient was measured using the impedance tube method, while bulk density and open porosity were obtained via Phi-X analysis. These values were applied in FOAM-X to simulate single-layer absorption behavior and determine the optimal thickness for each material. Based on these results, NOVA software was used to predict the acoustic performance of multilayer structures. Among the design cases, the #2 configuration (TPS 2T / PET felt 10T/PU foam 20T) showed the most stable and efficient absorption in the mid-to-high frequency range. A prototype based on this configuration was fabricated, and its sound absorption was evaluated using an Alpha cabin test. The comparison showed that in the 400–4,000 Hz range, Alpha cabin measurements exhibited higher absorption coefficients than NOVA simulations, mainly due to micro-pore changes during forming and edge effects of the setup, while results above 4,000 Hz remained stable and demonstrated meaningful accuracy. This confirms the reliability of simulation-based acoustic design and demonstrates its applicability to eco-friendly EV interior components.

<sup>†</sup>Corresponding Author: Insung Lee  
E-mail: islee@kotmi.re.kr

Received August 4, 2025  
Revised August 23, 2025  
Accepted August 25, 2025

© 2025 The Korean Fiber Society

**Keywords:** flat floor, E-mobility, automobile interior, lightweight, sound absorption, acoustic simulation

## 1. 서 론

최근 전 세계적으로 탄소중립을 실현하기 위한 친환경 정책이 강화되면서, 다양한 산업 분야에서 지속가능성을 고려한 기술 개발의 중요성이 커지고 있다. 그 중 자동차 산업의 경우, 내연기관 차량 중심의 산업 구조에서 벗어나 전동화 기반의 E-Mobility 구조로 패러다임이 변화하고 있다 [1]. 특히, 전기차(electric vehicle, EV)의 보급 확대가 가속되는 양상이 나타남에 따라 차량의 구조 설계 전반에도 근본적인 변화가 요구되고 있다[2]. 전기차는 내연기관 차량

과 달리 엔진, 변속기, 배기라인 등의 구성요소가 제거되어 하부 공간 활용성이 증가하는 구조적 특징을 지니며 이에 따라 차량 바닥 구조의 평탄화(flat floor) 설계가 가능해진다[3,4]. 최근 개발되는 전기차 플랫폼은 대부분 배터리 모듈을 차체 하부에 배치할 수 있도록 플로어 패널 전체가 평판형 구조로 설계되고 있으므로 기존 내연기관과 달리 흡음 성능, 내열성, 경량화 등의 특성이 향상된 고기능성 부품이 요구되고 있다[5].

특히 전기차는 엔진에서 발생하던 기계적 소음이 사라진 반면, 상대적으로 로드노이즈(Road noise)의 영향이 부각되

는 특성을 보인다[6]. 이러한 외부 소음은 차량 내로 전달되어 소비자의 만족도에 영향을 미친다. 따라서 전기차의 구조적 변화는 단순한 소음 차단을 넘어, 다양한 주파수 대역에서의 흡음 기능을 갖춘 소재 적용이 필수적이며, 이는 소비자의 고감성적 수요를 반영한 정숙성 중심의 기능성 부품에 대한 요구로 이어지고 있다[7,8]. 하지만 현재 상용화된 전기차의 플로어 패널의 경우, 기존의 내연기관 차량에서 사용되던 금속 패널이나 강화 플라스틱 패널이 그대로 적용되고 있으며, 이러한 경우 소음에 대한 성능 요구를 충족시키는 것에는 한계가 있다. 기존에 사용되는 소재는 높은 강성과 구조 안정성 측면에는 유리하지만, 전기차에 요구되는 경량화 기준을 충족시키기 어려우며, 고온 환경에 노출되기 쉬운 플로어 패널의 구조상 소재의 물성 저하 또는 열변형이 발생할 가능성이 높다[9]. 따라서 전기차 플랫폼에 적용되는 플로어 패널은 기존 단일 기능 중심의 소재가 아닌 흡음 성능을 중심으로 내열성, 경량성, 구조 적합성을 동시에 고려할 수 있는 소재로 전환되어야 한다[10].

이러한 기술적 요구를 충족하기 위해, 다층 구조 기반의 복합소재 설계가 필수적이다[11]. 다층 구조는 각 소재의 기능적 특성을 층별로 분산 적용함으로써 부품에 복합 성능을 구현할 수 있는 장점을 가진다[12,13]. 이러한 적층 설계는 전기차에 요구되는 소음 저감 특성에 효과적일 뿐만 아니라 내열성과 경량성, 구조적 안정성을 동시에 충족할 수 있다는 점에서 차세대 전기차용 내장재 설계의 핵심 기술로 자리잡고 있다[14]. 최근에는 이와 같은 다층 구조 설계와 고기능성 복합소재 개발을 중심으로 다양한 고효율 내장재에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 기존의 내장재 흡음 설계는 주로 반복적인 실험을 통해 소재에 대한 최적화를 진행하였으나, 이는 시간과 비용 소모가 크며 다층 구조에 대한 정량적 예측이 어려워 설계 효율이 낮다는 한계가 존재한다. 이러한 문제를 개선하기 위해 다양한 음향 시뮬레이션 장비가 도입되었으며, 다양한 두께와 물성 조건에서 최적의 흡음 성능을 빠르게 예측할 수 있는 기술이 연구되고 있다[15].

이에 본 연구에서는 전기차용 플랫폼 플로어 구조에 적용 가능한 고효율 내장재 개발을 위해, 흡음 성능 향상 뿐만 아니라 내열성과 경량화 특성을 동시에 고려한 다층 구조 기반의 복합소재 설계 및 최적화를 진행하였다. 이를 위해 각 소재에 대한 음향 물성 분석을 수행하였고, 단층 흡음 설계 시뮬레이션(FOAM-X)과 다층 흡음 설계 시뮬레이션(NOVA)을 활용하여 설계 단계에서 각 소재의 흡음 성능을 정밀하게 예측하였다. 도출된 최적의 조건은 실제 소재 제

작에 반영하였으며, 이를 통해 정숙성 확보에 필수적인 흡음 성능 향상뿐 아니라, 기능적 측면인 내열성 및 경량화 요구를 충족할 수 있는 복합적 성능을 확보하였다. 또한, 시뮬레이션 기반 단순 성능 평가를 넘어, 실제 제작 및 적용 단계에서 발생할 수 있는 변동성과 불확실성을 최소화함으로써, 개발된 복합소재의 고감성 품질과 신뢰성 및 효율성을 확보하였다. 이에 따라 최종적으로 설계된 다층 구조 소재의 흡음 성능을 Alpha Cabin 시험을 통해 검증함으로써 전기차용 고효율 내장재 개발의 가능성을 확인하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 플랫폼 플로어 초기 소재 구성

본 연구인 플랫폼 플로어에 대한 흡음 설계 최적화를 위해서는 초기 설계된 소재에 대한 구조, 음향 물성에 대한 분석이 선행되어야 한다. 이에 따라 플랫폼 플로어의 기본 구조인 TPS(thermoplastic styrene-based elastomer) composite, PET(polyethylene terephthalate) felt, PU(polyurethane) foam의 3중 구조(3 layer structure)체에 대한 구성 정보를 Figure 1에 나타내었다. 상부층에는 내열성과 내구성이 요구되는 점을 고려하여 TPS composite로 구성되어 있으며, 이는 열가소성 탄성체 기반 고강성 경량 소재로, 우수한 가공성과 열 안정성을 갖는다. 중간층에는 다양한 공극 구조를 통한 흡음 성능 구현 및 고강성/고내열 성능을 위하여 Needle punching 공정을 적용한 PET felt를 구성하였다. 하부층에는 차량 하부를 통해 유입되는 소음 흡수 및 내열성을 확보하기 위해 PU foam을 적용하였으며, 이는 다공성 구조를 바탕으로 흡음 성능 보완 및 충격 완화 특성을 가진다.

**TPS Composite:** 본 연구 개발 목표인 플랫폼 플로어 내장재의 고감성 품질 확보를 위해 사용된 TPS(styrene-based thermoplastic elastomer) composite은 SEBS(styrene-ethylene-butylene-styrene)의 경우, 고기능성 복합소재로, 자동차 플

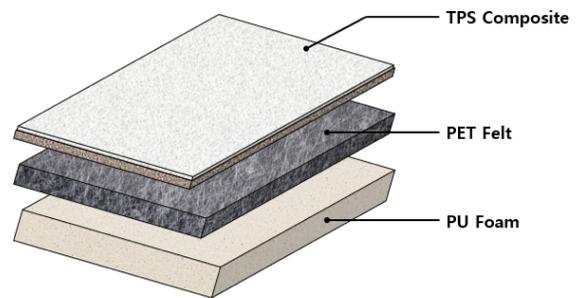


Figure 1. Multilayer structure of the triple-layer flat floor material.

Table 1. Composition ratio of TPS resin components

Component	Polypropylene(PP) + Styrene-Ethylene-Butylene-Styrene(SEBS)	Organic additives	Inorganic filler
Composition	35%	32%	33%

**Table 2.** Physical properties of TPS resin

Test property	Test result	Test standard
Hardness (shore A)	85	ASTM D2240
Melt index (MI)	50 g/10 min	190 °C, 2.16 kg

로어 내장재 적용을 위해 유연성, 내열성, 내마모성, 그리고 외관 품질을 동시에 고려하여 설계되었다. 수지 조성은 PP, SEBS, 유기첨가제, 무기 Filler로 구성되며, Table 1에 배합비를 정리하였다. 유기첨가제와 무기 필러의 구체적인 성분은 자동차 내장재에 일반적으로 사용되는 조성 기준에 따라 선정되었다. Table 2에 기재된 것과 같이 Shore A 기준 경도는 85, 용융지수(melt index)는 50 g/10 min(190 °C, 2.16 kg)이다.

제조된 TPS 수지는 캘린더(calender) 공정을 통해 0.4 T TPS sheet로 가공되었다. 제조된 TPS sheet는 상부의 직조 원단과 캘린더 열압 공정을 통해 삼중 구조체인 2T의 두께를 가진 TPS 복합소재로 라미네이팅되었다. 해당 다층 구조는 차음성과 흡음성의 복합적 기능 확보를 목표로 설계되었으며, 플랫플로어 내장재의 고감성 품질 확보를 위한 소재로 적용되었다.

**PET Felt:** 본 연구에 사용된 플랫 플로어 내장재의 중간층 소재인 PET felt는 고강성, 고내열성, 고흡음성을 동시에 확보하기 위해 Table 3에서 제시한 바와 같이, 3중 적층 구조(3-layer structure)로 설계되었다. 전체 구조는 중간층(1 layer) 고강성 PET felt와 상·하부층(2 layer) 이형중공사

**Table 3.** Composition and processing conditions of the 3-layer PET felt

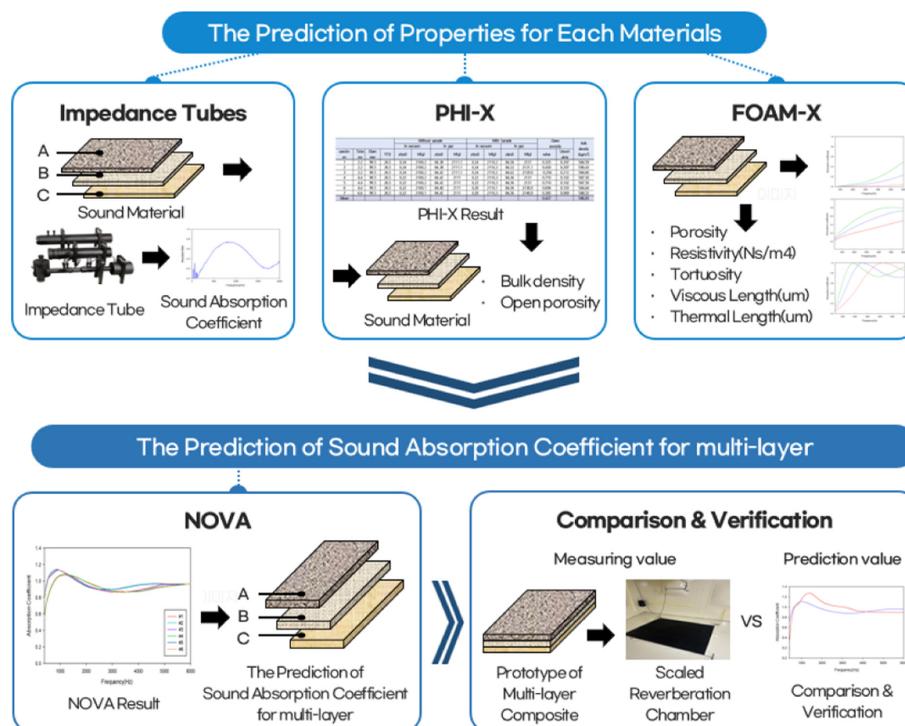
Layer	Material type	Basis weight (g/m <sup>2</sup> )
Top layer	Heterogeneous Hollow PET Felt	800
Middle layer	High-Stiffness PET Felt	400
Bottom layer	Heterogeneous Hollow PET Felt	800

기반 PET felt로 구성된다. 각 층은 기능적 역할에 따라 물성 및 제조 공정을 달리하였으며, 단섬유의 길이 및 데니어는 상용 사양 기준에 따라 구성되었다.

중간층(1 layer)은 400 g/m<sup>2</sup> 고강성 PET felt로, 일정 방향성을 갖는 섬유 web을 카딩기(carding)를 통해 분산시킨 후, 대차 왕복 적층방식으로 웹을 쌓은 뒤, 1차~3차 니들 펀칭(needle punching) 공정을 통해 섬유 간 결합력을 향상시켜 기계적 물성을 확보하였다. 상부 및 하부층(2 layer)은 각각 800 g/m<sup>2</sup> 이형중공사 기반 PET felt로 구성되었다.

최종적으로 제조된 PET felt는 3중 구조로 구성되어, 플랫 플로어 복합 내장재의 중간층으로 적용되었다.

**PU Foam:** 플랫 플로어 소재 구성의 하부층에는 실제 차량용 플로어 패널에 일반적으로 사용되는 사양과 동일한 조건의 PU foam을 적용하였다. 이에 따라 두께는 20T로 설정되었으며, 30 kg/m<sup>3</sup>의 저밀도 구조를 가진다. PU foam은 다공성 재료로, 내부에 다량의 공기층을 함유함으로써 음향 에너지의 점성 손실 및 열 손실을 유도하는 흡음 특성을 지닌다. 특히 고주파 영역에서의 흡음 성능이 우수하



**Figure 2.** Schematic of acoustic performance optimization strategy.

며, 다른 구조재(TPS composite, PET felt 등)와의 적층 시 전체 주파수 대역에서의 흡음 성능 보완에 효과적으로 기여한다. 본 연구에서는 PU foam을 하부층에 단독으로 적용함으로써, 상부층 복합재와의 기능 분리 구조를 기반으로 한 흡음 최적화 구조를 구현하였다.

2.2. 플랫 플로어 소재 음향적 특성 분석

초기에 설계된 플랫 플로어 소재를 활용하여 Figure 2에 나타난 흡음 성능 최적화 프로세스에 따라 음향적 특성 분석을 수행하였다. 소재의 각 층을 구성하는 음향 재료의 물성치를 확보하기 위해 각 소재의 음향 물성치 중 기본 흡음 특성을 평가인 관내법(impedance tube)을 적용한 흡음 시험을 수행하였으며, 이를 통해 초기 흡음 성능을 정량적으로 분석하였다. 이어서, 소재의 음향학적 모델링에 필요한 필수 데이터인 음향 물성(bulk density, open porosity)을 확보하기 위해 PHI-X 장비를 이용한 공극 구조 분석을 실시하였고, 이를 기반으로 음향 물성 데이터베이스를 구축하였다. 또한, 구축된 음향 데이터베이스를 이용하여 FOAM-X 시뮬레이션을 통해 각 재료별 단층 구조의 음향 물성을 분석하고, 소재 두께에 따른 주파수 대역별 흡음 성능을 예측하였다. 예측된 단층 흡음 data를 활용하여 다층 흡음 예측 시뮬레이션인 NOVA를 통해 다층 소재의 흡음 성능을 예측하였으며, 최종적으로 시뮬레이션 결과와 실제 제작된 소재의 흡음 성능을 비교 분석함으로써, 시뮬레이션 기반 설계의 신뢰성을 검증하였다.

**관내법을 이용한 흡음 시험:** 본 연구에서는 플랫 플로어 소재의 흡음 성능 최적화 연구를 위한 각 소재의 물성치를 확보하기 위해 관내법 시험을 통한 흡음 시험을 수행하였다. 관내법은 임피던스 튜브(impedance tube, Scien-9301, Korea) 설비 기반 임피던스 관에 의한 흡음 계수와 임피던스의 결정 방법-제2부 : 전달 함수법(KS F 2814-2)을 참고 준용하였으며, 장비의 세부 사양은 Table 4에 나타내었다.

흡음 구조의 설계 최적화를 위해서는 적용 대상 소재의 초기 흡음 성능에 대한 정량적 분석이 선행되어야 한다. 따라서 흡음 성능 시뮬레이션인 FOAM-X의 입력 변수로 활용되는 기초 음향 물성을 확보하기 위해 관내법을 통한 소

Table 4. Specifications of impedance tube system

Item	Description
Equipment name	Acoustic impedance tube (Impedance Duct)
Manufacturer	Scien
Model	9031
Application	Measurement of sound absorption coefficient and transmission loss using an impedance tube
Frequency range	- Low frequency: 125-1,600 Hz - High frequency: 500-6,300 Hz
Test standard	KSF 2814-2

Table 5. Layer configurations of materials for absorption test

Layer	Layer composition
1 layer	#1, #2, #3
2 layer	#1+#2, #2+#3, #1+#3
3 layer	#1+#2+#3

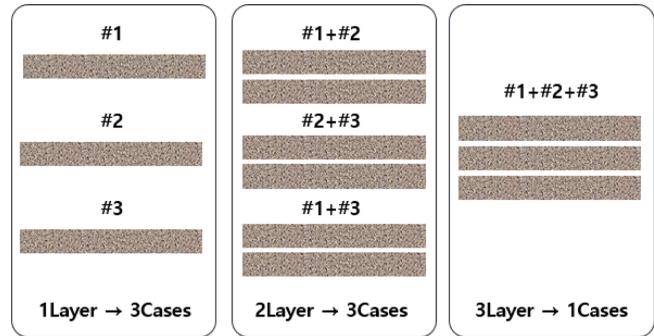
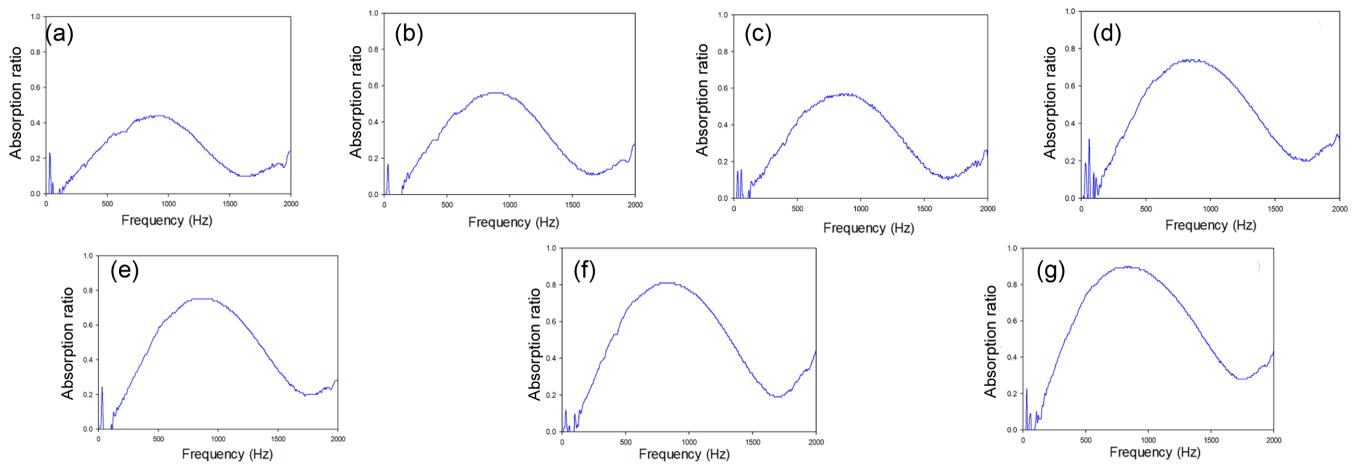


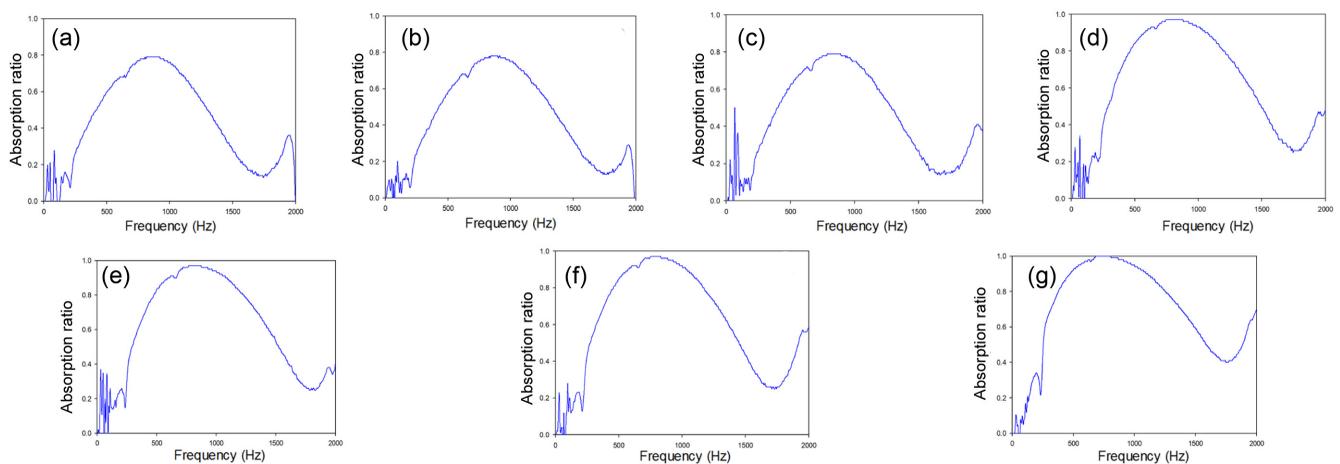
Figure 3. Schematic diagram of layer configuration for sound absorption test.

재 두께별 linear data를 측정하였다. Linear data는 각 소재의 공극 구조 및 음파 전달 특성을 반영하는 주요 지표로, 소재의 음향 응답 특성을 정량적으로 평가하는데 활용된다. 성능 편차를 최소화하기 위해 설정된 적층에 따른 layer 구성은 Table 5 및 Figure 3와 같으며, 각 소재별 layer 구성에 따른 흡음 linear data는 Figure 4-6에 제시하였다. 세 소재의 peak 특성을 비교한 결과, TPS composite, PET felt, PU foam 모두 약 1,000 Hz에서 peak를 형성한 후 감소하는 양상을 보였으며, 이후 2,000 Hz 이상의 고주파 영역에서 다시 계수가 상승하는 이중 peak(double-peak) 응답 특성이 나타났으나, 소재별 곡선 형태와 대역 폭은 상이하였다. TPS composite의 경우, 1 layer에서 최대 흡음계수가 0.6 이하로 낮게 나타났으나, 2 layer에서 0.8 이하, 3 layer에서 0.8 이상으로 상승하여 적층에 따른 두께 증가가 흡음계수 향상에 기여함을 확인할 수 있었다. PET felt는 단층에서도 약 0.8 수준의 높은 흡음계수를 확보하였고, 2 layer에서 1 이하, 3 layer에서는 거의 1에 근접하는 값을 나타내어 적층에 따른 성능 향상이 뚜렷하게 나타났다. PU foam은 1 layer에서 이미 약 0.8 수준의 흡음계수를 나타냈으며, 2 layer와 3 layer에서는 모두 1에 가까운 값을 나타내었다. 이는 적층 효과가 PET felt보다 다소 완만하긴 하지만, 단층 상태에서도 이미 우수한 성능을 확보하고 있음을 의미한다. 관내법을 통해 추출된 linear data를 바탕으로 시뮬레이션 결과와의 비교분석을 통해 최적의 플로어 패널 흡음 구조를 도출하고자 한다.

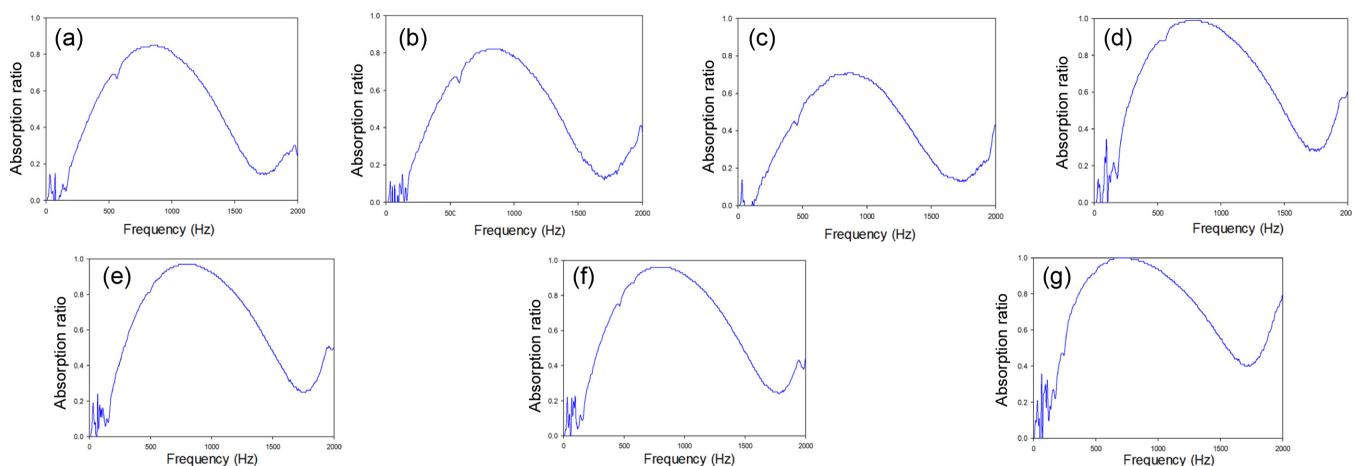
**PHI-X를 이용한 소재 음향 물성 측정:** Table 6에 제시된 PHI-X 장비(PHI-X, Mecanum, Canada)를 활용하여 음향 모델링의 입력 변수로 활용 가능한 재료의 고유 음향 특성



**Figure 4.** Linear absorption data measured via impedance tube for TPS composite under various layer configurations: (a) #1, (b) #2, (c) #3, (d) #1+#2, (e) #2+#3, and (f) #1+#2+#3.



**Figure 5.** Linear absorption data measured via impedance tube for PET felt under corresponding layer configurations: (a) #1, (b) #2, (c) #3, (d) #1+#2, (e) #2+#3, and (f) #1+#2+#3.



**Figure 6.** Linear absorption data measured via impedance tube for PU foam under corresponding layer configurations: (a) #1, (b) #2, (c) #3, (d) #1+#2, (e) #2+#3, and (f) #1+#2+#3.

**Table 6.** Specifications of the PHI-X system

Item	Description
Equipment name	Acoustic property measurement System
Manufacturer	Mecanum
Model	PHI-X
Application	Measurement of acoustic properties such as bulk density, porosity of porous materials
Measured property	Porosity and Density

치를 확보하였다. 복합소재의 최적 적층 설계를 위한 기초 데이터베이스로 구축하기 위해 재료의 공극 구조에 대한 필수 데이터인 bulk density와 open porosity를 도출하였다.

**FOAM-X를 이용한 흡음 단층 최적 설계:** 다층 구조 흡음 성능 최적화에 앞서, 각 소재에 대한 두께별 흡음 성능 예측 데이터 확보를 위해 단층 구조 설계를 선행적으로 수행하였다. 단층 구조 흡음 설계 최적화 시뮬레이션인 FOAM-X에 측정된 필수 음향 데이터인 linear data, bulk density 및 open porosity를 입력 변수로 적용하였으며, 이를 바탕으로 각 소재의 두께 조건에 따른 흡음 특성을 예측하고 흡음 성능에 미치는 주요 인자들을 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 관내법을 이용한 흡음 시험 결과

시뮬레이션 적용에 앞서, 시뮬레이션 기반 흡음 설계의 정확도 및 신뢰성 검증을 위하여 임피던스 튜브를 통해 TPS composite, PET felt, PU foam 소재의 관내법 흡음 계수 측정을 수행하였다. 각 소재의 흡음 계수를 측정한 결과를 Figure 7에 나타내었다. TPS composite의 경우, 전 주파수 대역에서 흡음 계수가 0.1 이하로 매우 낮은 값을 보였으며, 이는 소재 자체가 높은 밀도와 낮은 공극률로 인해 음향 에너지의 투과와 내부 흡수가 제한되었기 때문으로 판단된다. PET felt는 주파수가 증가함에 따라 흡음 계수가 점진적으로 상승하는 경향을 보였으며, 5,000 Hz 부근에서부터 0.5 이상의 높은 값을 나타내어 중/고주파 대역에서의 흡음 성능이 우수함을 확인하였다. 이는 높은 공극률과 기

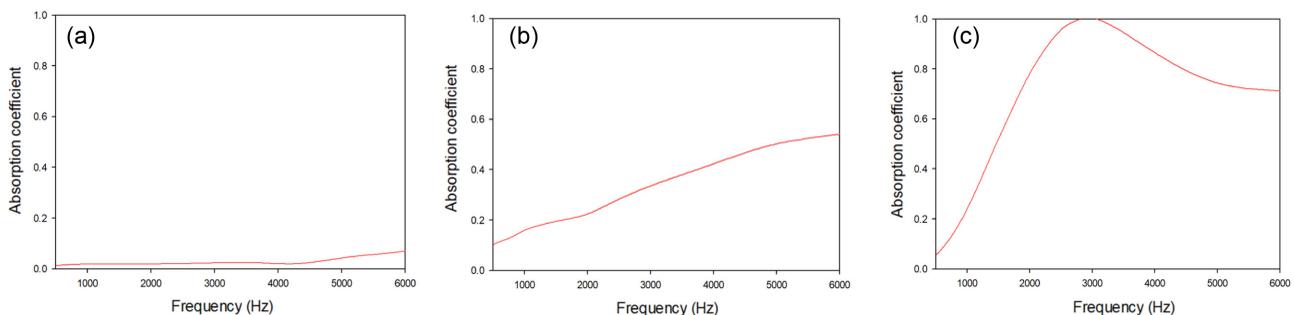
공 구조에 기인한 다공성 매질의 음향 에너지 손실 특성에 의한 것으로 판단된다. PU foam은 3,000 Hz 부근에서 1.0에 근접하는 최대 피크를 보인 후, 고주파 대역에서 완만히 감소하는 경향을 나타내었다. PU foam 내부의 기공 구조가 저/중주파 대역에서 음파 감쇠에 효과적으로 작용한 것으로 판단되며, 이는 하부층 흡음재로서의 적합성을 시사한다, 이러한 결과는 각 소재의 고유 흡음 특성을 파악하고, 시뮬레이션 기반 최적 설계 시 소재 선택과 적층 구조 구성을 위한 기초 자료로 사용할 수 있다.

#### 3.2. PHI-X를 이용한 소재 음향 물성 측정 결과

Table 7에 PHI-X를 사용하여 플로어 패널 소재인 TPS composite, PET felt 및 PU foam의 각 소재에 대한 bulk density, open porosity를 측정한 결과를 나타내었으며, Figure 8에 각 측정 결과를 비교한 그래프를 나타내었다. Bulk density와 open porosity는 음파의 침투 및 에너지 소산에 영향을 미치는 주요 인자로, 특히 높은 open porosity는 흡음 성능 향상에 효과적인 특성으로 작용한다. TPS composite은 bulk density가 586.83 kg/m<sup>3</sup>로 가장 높게 측정되어 구조적 강성과 내열성이 우수하나, open porosity가 0.427로 낮아 공기 투과성과 음파 침투 성능이 제한될 수 있다. 이는 단독 사용 시 흡음 성능 확보에 불리할 수 있으며, 외피 또는 표면 안정화 용도로의 활용이 적합함을 시사한다. 반면, PET felt와 PU foam은 각각 81.73 kg/m<sup>3</sup>, 61.54 kg/m<sup>3</sup>의 낮은 밀도와 0.951, 0.941의 높은 open porosity 값을 보여, 음파가 소재 내부로 원활히 침투하며 다공성 흡음재로서 적합한 특성을 가진다. 이러한 특성은 FOAM-X 시뮬레이션을 통한 단층 흡음 성능 분석의 기초 자료로 활용되었으며, 이를 바탕으로 주파수 대역별 흡음 특성을 정밀하게

**Table 7.** Measured bulk density and open porosity of materials using PHI-X

Material	Open porosity	Bulk density (kg/m <sup>3</sup> )
TPS composite	0.427	586.83
PET felt	0.951	81.73
PU foam	0.941	61.54



**Figure 7.** Sound absorption coefficient measured by impedance tube; (a) TPS composite, (b) PET felt, and (c) PU foam.

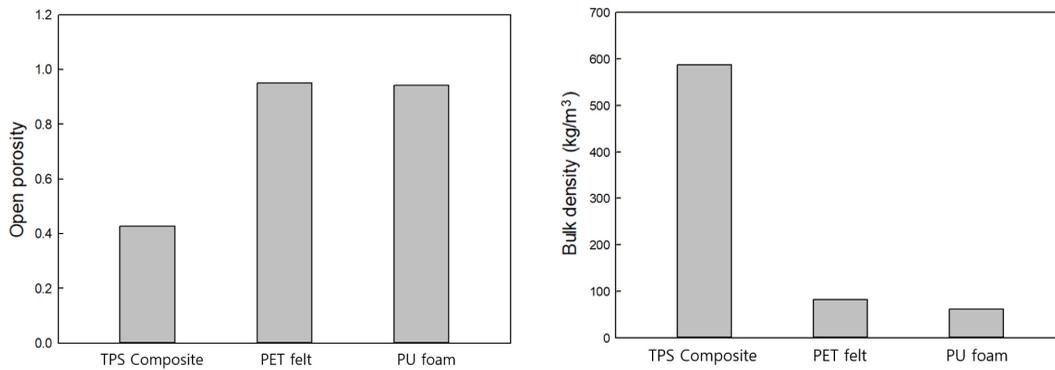


Figure 8. Comparison of bulk density and open porosity using PHI-X.

예측하고, 최적의 두께 및 적층 구조 설계에 적용되었다.

### 3.3. FOAM-X를 이용한 흡음 단층 최적 설계 결과

먼저, FOAM-X의 정확도 및 신뢰성을 검증하기 위해 초기 소재에서 관내법으로 측정된 흡음 계수와 단층 구조 시뮬레이션 흡음 예측 결과와 비교하였다. Figure 9에 제시된 바와 같이, 시뮬레이션 결과는 전체 주파수 대역에서 실측 값과 유사한 경향을 보였다. 이는 FOAM-X에 입력된 음향 물성치를 기반으로 도출된 예측값이 실제 재료의 음향 거동을 잘 반영하고 있음을 시사하며, 해당 시뮬레이션 모델의 신뢰성과 적용 가능성을 입증한다.

플랫 플로어 소재의 다층 구조 흡음 최적화를 위해, FOAM-X를 활용하여 각 소재의 두께에 따른 단층 흡음 성능을 시

뮬레이션하였다. 각 시뮬레이션은 초기 두께를 기반으로 각 소재의 특성에 따라 가장 효율적인 흡음 성능을 발휘할 수 있는 구간을 선정하여 수행하였으며, 이를 통해 NOVA에 적용 가능한 최적 두께 조건을 도출하였다. 적용된 두께 조건은 Table 8에 정리하였으며, FOAM-X 시뮬레이션 결과를 Figure 10에 나타내었다.

Table 8. Applied thickness for single-layer simulations by material layer

Material	Simulated thickness (T)
TPS composite	2.0, 3.5, 4.5
PET felt	10, 15, 20
PU foam	15, 20, 30

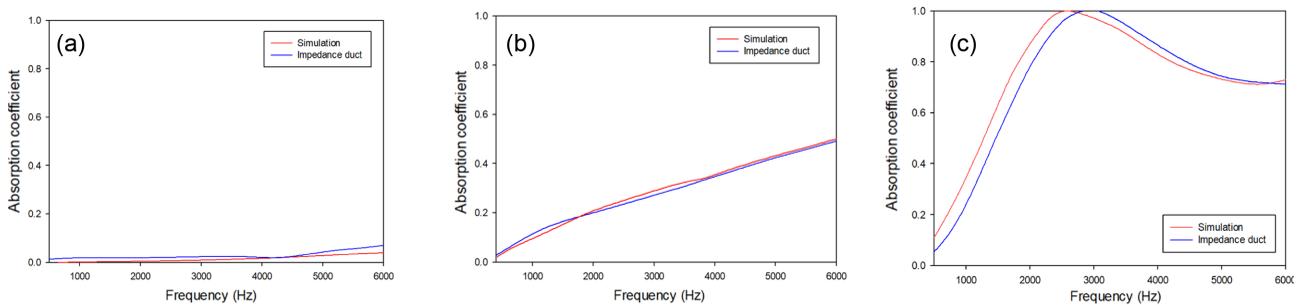


Figure 9. Validation of simulated and measured absorption coefficients: (a) TPS composite, (b) PET felt, and (c) PU foam.

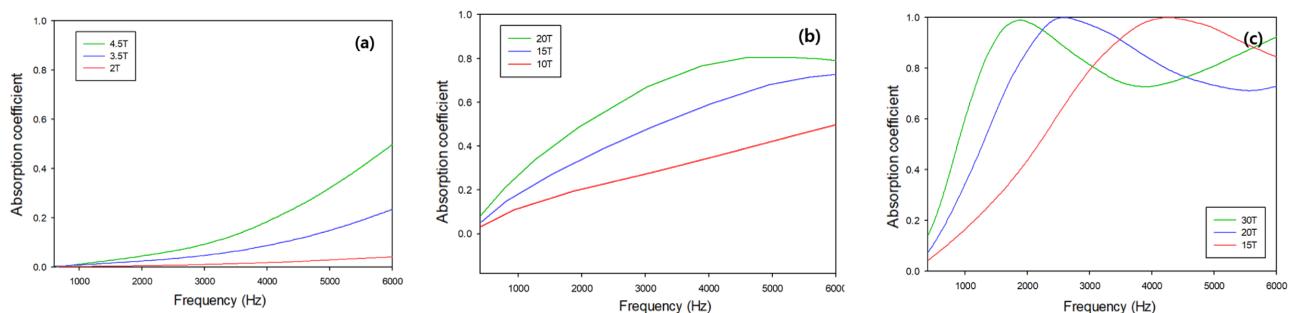


Figure 10. Acoustic property results of materials measured using FOAM-X: (a) TPS composite, (b) PET felt, and (c) PU foam.

TPS composite의 경우, 초기 두께인 2T를 중심으로 3.5T 및 4.5T의 조건에서 FOAM-X 시뮬레이션을 수행하였다. 해당 소재는 고강성·고내열 특성을 바탕으로 플로어 패널의 구조적 안정성 확보에 기여하나, 낮은 공극률로 인해 흡음 성능은 상대적으로 제한적이다. 이에 따라, 구조적 기능을 유지하면서도 흡음 성능 개선이 기대되는 범위 내에서 두께를 단계적으로 증량하였으며, 재료의 가공성 및 실차 적용 가능성을 종합적으로 고려하여 두께 조건을 설정하였다. 시뮬레이션 결과, 2T에서는 흡음 성능이 미흡하였고, 3.5T 및 4.5T에서는 성능 향상이 나타났으나, 4.5T의 경우 질량 증가에 비해 성능 개선 효과가 제한적인 것으로 분석되었다. 이에 따라 실용성과 성능 간 균형을 고려하여 2T와 3.5T를 다층 설계에 적합한 최적 두께 후보로 선정하였다.

PET felt는 높은 공극률을 기반으로 흡음 성능에 유리한 특성을 가지며, 중간층에 적용되는 고흡음재로 사용된다. 초기 두께는 10T이며, 두께 증가에 따른 흡음 성능 향상 효과가 뚜렷하게 나타나는 점을 고려하여 10T, 15T, 20T 조건에서 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과, 두께 증가에 따라 흡음 성능이 전반적으로 향상되는 경향이 확인되었다. 하지만 20T에서는 구조적 중량 증가가 크게 발생하는 반면 고주파 성능 향상은 둔화되는 것을 고려하여 10T와 15T를 최적 두께 후보로 선정하였다.

PU foam은 내부 기공 구조를 통해 우수한 흡음 성능을 발휘하는 고흡음재로, 본 연구에서는 하부층 흡음재로 적용하였다. PU foam은 두께 변화에 따라 흡음 성능뿐만 아니라 성형성, 중량, 구조 적합성에 복합적인 영향을 미치기 때문에, 다양한 두께 조건을 고려한 시뮬레이션이 필수적이다. 본 연구에서는 기준 두께인 20T를 중심으로, 흡음 성능을 극대화할 수 있는 상향 조건인 30T와, 경량화 및 성형 공정성 향상을 검토할 수 있는 하향 조건인 15T를 선정하였다. 시뮬레이션 결과, 30T는 일부 주파수 대역에서 우수한 흡음 성능을 보였으나, 중량 증가 및 성형 공정 제약으로 인해 실차 적용에는 한계가 있는 것으로 나타났다. 반면, 20T는 전반적인 흡음 성능과 성형성, 구조 호환성 측면에서 가장 균형 잡힌 성능을 나타냈다. 15T는 흡음 성능이 다소 낮았지만, 고주파 대역에서의 흡음 효율이 우수하고,

경량화 측면에서 유리한 특성을 보였다. 이러한 분석을 바탕으로, 실차 적용 시 요구되는 성능과 제조 적합성의 균형을 고려하여 15T와 20T를 최적 두께 후보로 선정하였다.

또한, FOAM-X를 통해 각 소재에 대한 음향 물성 data를 Table 9에 나타내었다. FOAM-X를 통해 도출된 음향 물성치는 NOVA 시뮬레이션의 주요 입력 변수로 활용되며, 주파수 대역별 흡음 성능 예측의 정밀도를 제고하는 데 기여한다. Open porosity와 bulk density는 앞서 Phi-X 분석에서 고찰된 바 있으므로, 본 절에서는 추가적으로 도출된 음향 물성치를 중심으로 고찰하였다. Resistivity(공기 흐름 저항 계수)는 소재의 흡음 특성을 결정짓는 핵심 인자로, TPS composite은 521,380.2 Ns/m<sup>4</sup>로 매우 높은 수치를 보여 차음에 유리하나, 흡음 성능은 제한적일 수 있다. 반면 PET Felt와 PU Foam은 각각 8,963.4 Ns/m<sup>4</sup>, 36,344.0 Ns/m<sup>4</sup>로 낮은 값을 나타내, 음파의 침투가 용이한 다공성 흡음재로 적합함을 시사한다. Tortuosity(우회성)는 TPS composite에서 4.857로 가장 높게 나타나 내부 구조의 복잡성을 보여 주며, PU foam과 PET felt는 2.388과 1.012로 상대적으로 낮은 값을 보여 고주파 영역에서의 흡음에 유리한 구조적 특성을 갖는다. Viscous characteristic dimension 및 thermal characteristic dimension은 각각 점성 손실과 열 손실을 나타내며, PU foam은 42.8 μm 및 142.0 μm로 가장 작은 값을 보여 고주파 대역에서의 흡음 효율이 우수할 것으로 분석된다. PET felt는 128.3 μm 및 152.4 μm로 중저주파 영역에서 효과적인 흡음을 기대할 수 있다.

### 3.4. NOVA를 이용한 흡음 다층 최적 설계 결과

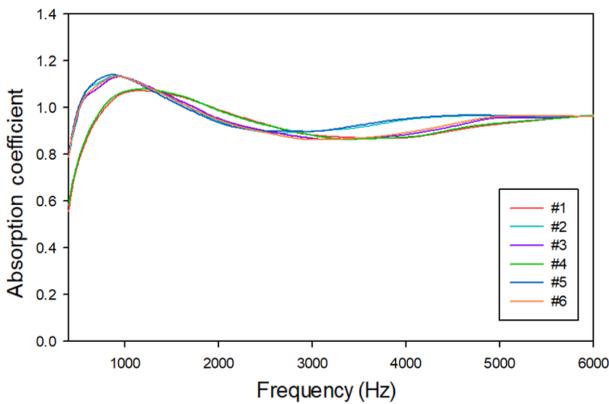
단층 구조의 흡음 성능 시뮬레이션 결과를 기반으로, 최적 조합을 도출할 수 있는 다층 구조 흡음 설계 최적화 시뮬레이션인 NOVA를 활용하였다. NOVA는 다양한 소재의 조합과 주파수 응답 특성을 기반으로 다층 흡음 소재의 전체적인 음향 거동을 정밀하게 예측할 수 있는 해석 도구로, 실험에 앞서 효율적인 구조 설계를 가능하게 한다. 본 연구에서는 TPS composite, PET felt, PU foam 세 가지 소재를 활용하여 다층 흡음 구조를 구성하였으며, FOAM-X에서 도출된 최적 단층 두께를 기반으로 6가지 다층 설계

**Table 9.** Acoustic property data of materials obtained using FOAM-X

Material property	TPS composite	PET felt	PU foam
(Open) Porosity	0.427	0.951	0.941
Bulk density (kg/m <sup>3</sup> )	586.83	81.73	61.54
Sound speed (m/s)	345.22	347.09	345.11
Resistivity (Nm <sup>-4</sup> s)	521380.2	8963.4	36344
Tortuosity	4.857	1.012	2.388
Viscous c.d (μm)	30.3	128.3	42.8
Thermal c.d (μm)	1354.2	152.4	142

**Table 10.** Selected material thicknesses for NOVA simulation application

	TPS composite	PET felt	PU foam
#1	2T	10T	15T
#2	2T	10T	20T
#3	2T	15T	15T
#4	3.5T	10T	15T
#5	3.5T	10T	20T
#6	3.5T	15T	15T



**Figure 11.** Acoustic property results of multilayer material configurations simulated using NOVA.

구성을 Table 10에 나타내었다. 전체 적층 두께는 차량 플랫폼 플로어 내장재 적용을 고려하여 35T를 넘지 않도록 각 소재의 두께를 설정하였으며, 이에 따른 NOVA 시뮬레이션 결과를 Figure 11에 나타내었다.

시뮬레이션 결과, 모든 구성에서 흡음 계수는 500 Hz 이하의 저주파 영역에서 급격히 증가하여 1,000 Hz 부근에서 최대값을 형성한 후 3,000 Hz까지 완만한 감소 곡선을 보였다. 이 중 #1, #2, #3 조합은 1,000–4,000 Hz의 중·고주파 영역에서 전반적으로 우수한 흡음 성능을 나타냈으며, 이는 TPS composite의 얇은 표면층과 PET felt 및 PU foam의 높은 공극률을 가진 구조체로 판단된다. 특히, #2 조합 (TPS composite(2T) + PET felt(10T) + PU foam(20T))은 전체 주파수 대역에 걸쳐 비교적 평탄하고 안정적인 경향을 유지하면서 최대 흡음 계수를 기록하였다. 이는 고공극·저밀도 소재의 적층 효과와 두께 비율의 조합이 음향 에너지 소산 메커니즘에 효과적으로 작용한 결과로 판단된다. 또한, 해당 구성은 구조적 안정성 및 경량화를 동시에 충족할 수 있어 실제 양산 적용에도 유리한 조합으로 판단된다.

실제 시편은 최적 조건으로 도출된 1개 구성(#2)에 한정되었으나, 본 연구는 상용 시뮬레이션 도구(FOAM-X, NOVA)의 정량 예측 능력을 기반으로 설계 신뢰성을 확보하는 데 중점을 두었다. 특히 다양한 조합 중 하나의 대표 조합을 실험적으로 검증함으로써, 시뮬레이션 기반 설계 접근이 실제 조건과의 일치 가능성을 갖는다는 점을 입증하고자 하였다. 따라서 본 연구에서는 NOVA 시뮬레이션 결과를 바탕으로 #2 조합을 최적 다층 구조로 선정하였으며, 이후 실제 소재를 해당 구성으로 적층하여 Alpha cabin 시험을 통해 흡음 성능을 측정하고, 시뮬레이션 예측 결과와의 정합성을 비교·검증하고자 하였다.

**3.5. Alpha Cabin을 이용한 NOVA 해석 검증 결과**

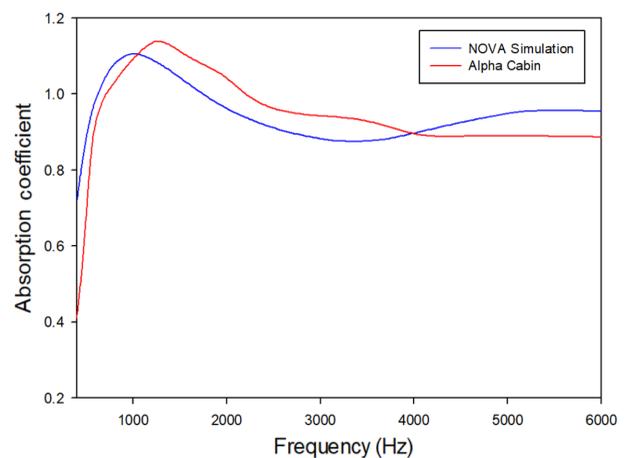
흡음 소재 설계의 예측 정확도를 검증하기 위해 소재들

을 시뮬레이션을 기반으로 도출된 최적 설계 조건인 #2 조합(TPS composite(2T) + PET felt(10T) + PU foam(20T))과 동일한 두께 및 구성으로 합지하여 플랫폼 플로어 복합소재 시편을 제작하였다. 시편은 Alpha cabin 시험규격(ISO 354)를 참고하여, Table 11에 제시된 Alpha cabin 장비 사양에 적합하도록 가로 1,200 mm, 세로 1,000 mm 크기로 제단하였으며, 이후 Alpha cabin을 활용하여 흡음 성능을 측정하였다. 장비의 세부 사양은 Table 11에 나타내었다. 실측값과 시뮬레이션 결과 간의 비교를 통해 설계의 신뢰성을 검토하였다. 두 결과의 비교 분석 결과는 Figure 12 및 Table 12에 제시하였다.

비교 결과, 400–4,000 Hz 구간에서 Alpha cabin 측정값과 NOVA 시뮬레이션 값은 주파수에 따라 상이한 경향을 보였다. 약 400–1,000 Hz의 저주파 영역에서는 Alpha cabin 측정값이 NOVA 시뮬레이션 결과보다 낮게 나타났는데, 이는 시뮬레이션이 이상화된 물성치와 균질한 조건을 가정하여 상대적으로 최적화된 결과를 산출하는 반면, Alpha cabin은 실제 시편을 대상으로 측정하므로 이상조건과 현실의 시험 환경 차이에 의한 편차로 해석된다. 또한, 약 1,000 Hz 부근에서 역전되어 Alpha cabin 측정값이 시뮬레이션 값을 상회하는 결과를 보였으며, 이러한 변화는 다층 구조 복합

**Table 11.** Specifications of the Alpha cabin

Item	Description
Equipment name	Alpha Cabin(Small Reverberation Chamber)
Model	Alpha Cabin
Application	- Measurement of sound absorption coefficient of sound-absorbing materials - Characterization of acoustic properties of various sound-absorbing materials
Specification	Measurement range: (400~10,000) Hz Recommended specimen size: 1.0 m×1.2 m



**Figure 12.** Verification of product sound absorption performance using Alpha cabin.

**Table 12.** Comparison of sound absorption data from NOVA simulation and Alpha cabin test

Hz	NOVA simulation	Alpha cabin
400	0.7134	0.3290
500	0.9081	0.7790
630	1.0219	0.9910
800	1.0887	1.0600
1000	1.1145	1.1800
1250	1.0873	1.3000
1600	1.0361	1.2300
2000	0.9668	1.1000
2500	0.9118	1.0300
3150	0.8822	0.9900
4000	0.9027	0.9080
5000	0.9528	0.9030
6300	0.9585	0.8970

재 내부에서 발생하는 음향학적 요인에 의해 설명될 수 있다. 실제 시편 제작 과정에서 형성되는 미세 기공(micro-void)과 층간 불균질성은 공극률을 증가시켜 음향 에너지의 산란 및 점성 손실을 증대시키며, 이는 시뮬레이션이 이상적으로 가정한 조건과 차이를 발생시킨다[16]. 또한, 다층 구조의 공진·반사 효과는 특정 주파수(약 1,000 Hz 인근)에서 흡음 효율을 강화시켜 실험값이 예측치보다 높아지게 만든다[17]. 더불어, Alpha cabin에서의 edge effect는 시편 가장자리의 회절과 경계 임피던스 불연속으로 인해 가장자리 부근 음압이 증가하고 시편이 실제보다 큰 ‘가상 면적(virtual area)’을 갖는 것처럼 작동하여 흡음계수가 과대 산정되는 경향을 유발하며, 이상조건을 가정하는 NOVA 예측과 Alpha cabin 실험 사이의 불일치를 확대할 수 있다[18]. 반면, 4,000 Hz 이상의 고주파수 영역에서는 두 결과 모두 흡음 계수의 변화가 거의 없이 일정하게 유지되는 경향을 보였다. 이는 NOVA 시뮬레이션이 고주파 대역에서의 흡음 물성 예측에 있어 높은 정밀도와 상관성을 확보하고 있음을 나타낸다. 고주파수 영역에서는 음파의 파장이 짧고 표면 반사 및 미세 공극에서의 감쇠가 크게 작용하기 때문에, 시뮬레이션 모델에서 적용된 이론값이 실제 소재와 더욱 유사한 경향을 나타낸 것으로 분석된다.

이와 같은 분석 결과는 NOVA 시뮬레이션이 중·고주파 대역을 중심으로 흡음 성능 예측에 유의미한 정확성을 가지며, 특히 소재의 물성치가 정밀하게 측정되고 입력될 경우 실제 성형 결과와 높은 상관성을 가짐을 나타낸다. 이러한 결과를 바탕으로, 본 연구에서 실험 검증을 수행하지 않은 다른 조합들에 대해서도 시뮬레이션 결과를 기반으로 한 거동 예측이 가능하다. #4 및 #6 조합의 경우, 필름층인 TPS의 두께가 증가함에 따라 흡음 특성이 감소할 것으로 예측되며, 이미 최적 조합(#2)에서도 동일한 구간에서 NOVA

시뮬레이션 결과가 실제 측정값보다 높게 나타난 점을 고려할 때, 유사한 수준의 오차가 발생할 가능성을 시사한다. #5 조합의 경우에는 TPS의 두께가 높아 흡음 성능이 떨어질 것으로 예상되나, 흡음층인 PU foam의 영향으로 흡음 특성이 크게 감소하지 않을 것으로 예측된다. 그럼에도 불구하고, 각 조건별 시뮬레이션과 실측의 비교 경향은 일관되게 나타나고 있어, NOVA 기반 시뮬레이션의 예측 정확도와 신뢰성은 충분히 확보된 것으로 판단된다. 결과적으로, 본 연구에서 적용한 시뮬레이션 기반 흡음 구조 설계 접근은 실측 데이터와의 일치도를 확보함으로써 모델의 신뢰성과 유효성을 검증하였으며, 이는 향후 실험적 반복 없이 소재 개발의 초기 설계 단계에서 빠르고 정확한 흡음 성능 예측을 가능하게 하는 기술적 기반이 될 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구는 전기차용 플랫 플로어에 적용 가능한 고흡음 다층 구조 소재 개발을 목표로, TPS composite, PET felt, PU foam을 조합한 흡음재의 성능을 시뮬레이션 기반으로 최적화하고, 실측 결과와의 비교를 통해 예측 모델의 신뢰성을 검증하였다.

우선, 관내법 및 PHI-X 분석을 통해 각 소재의 기본 음향 물성치인 linear data 및 bulk density와 open porosity를 확보하였으며, 이를 기반으로 FOAM-X 시뮬레이션을 통해 단층 구조의 흡음 성능을 예측하였다. 도출된 최적 단층 두께 조건은 NOVA 시뮬레이션에 적용되어 다층 구조의 흡음 성능을 종합적으로 평가하는 데 활용되었다. NOVA 결과, 최적 복합소재 구성인 #2 - TPS(2T)/PET felt(10T)/PU foam(20T)에서 중·고주파수 대역(1,000–4,000 Hz) 내 가장 안정적이고 높은 흡음 성능을 나타내며 최적 설계 구조로 도출되었다. 이어, NOVA에서 도출된 최적 구성과 동일한 구성으로 실제 시편을 제작하고, Alpha cabin을 활용하여 흡음 성능을 측정하였다. 그 결과, 중·저주파 대역(400–4,000 Hz)에서는 실측값이 시뮬레이션보다 전반적으로 높은 흡음 계수를 나타내었으며, 이는 성형 과정 중 소재 내 미세 기공층 및 edge effect의 영향으로 해석된다. 반면 4,000 Hz 이상의 고주파수 대역에서는 NOVA와 Alpha cabin 결과 간의 흡음 곡선이 거의 일치하여, NOVA 시뮬레이션의 고주파 예측 정확도가 매우 높은 수준임을 확인하였다.

이러한 비교 분석 결과는 FOAM-X 및 NOVA 시뮬레이션 기반 설계가 실제 흡음 성능을 정량적으로 예측할 수 있는 유의미한 설계 도구임을 입증하며, 실험적 반복 없이도 흡음재 두께, 조합 구조, 적용 위치 등을 최적화할 수 있는 효율적인 개발 방법론으로서의 가능성을 보여준다. 본 연구는 하나의 대표 조합에 대한 실측 검증을 통해, 시뮬레이션 기반 흡음 설계의 신뢰성과 적용 가능성을 확인하

였으며, 향후 동일한 모델을 기반으로 다양한 조합에 대한 실험적 검증이 병행될 경우, 보다 일반화된 설계 기준 정립이 가능할 것으로 기대된다. 따라서 본 연구는 전기차 내장재의 흡음 성능 향상을 위한 시뮬레이션 기반 설계 접근의 실효성을 실험적으로 검증한 사례로, 향후 다양한 복합소재 개발 및 실차 적용 확대에 있어 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

**감사의 글:** 본 논문은 2023년도 정부(중소벤처기업부)의 재원으로 중소기업기술정보진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00218249, 2023 중소기업기술혁신개발사업 소부장전략).

## References

1. X. Hua, A. Thomas, and K. Shultis, "Recent Progress in Battery Electric Vehicle Noise, Vibration, and Harshness", *Sci. Prog.*, 2021, **104**, 1–11.
2. K. Horváth and A. Zelei, "Simulating Noise, Vibration, and Harshness Advances in Electric Vehicle Powertrains: Strategies and Challenges", *World Elect. Veh. J.*, 2024, **15**, 367–383.
3. G. Belingardi and A. Scattina, "Battery Pack and Underbody: Integration in the Structure Design for Battery Electric Vehicles—challenges and Solutions", *Vehicles*, 2023, **5**, 498–514.
4. C. Wang, "Sound Transmission Loss of an Automotive Floor Panel Section with Cross Members", *Appl. Acoust.*, 2023, **202**, 109177.
5. K. W. Zakri, R. S. J. Sarwono, S. P. Santosa, and F. N. Soelami, "Modeling and Validation of Acoustic Comfort for Electric Vehicle Using Hybrid Approach Based on Soundscape and Psychoacoustic Methods", *World Elect. Veh. J.*, 2025, **16**, 64–78.
6. Z. Lan, M. Yuan, S. Shao, and F. Li, "Noise Emission Models of Electric Vehicles Considering Speed, Acceleration, and Motion State", *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2023, **20**, 3531.
7. S. Baclet, J. Cesbron, P. Aumond, A. Can, and R. Rumpler, "A Correction Model for the Noise Emissions of Light Electric Vehicles during Acceleration", *Appl. Acoust.*, 2025, **236**, 110713.
8. A. Wazeer, A. Das, C. Abeykoon, A. Sinha, and A. Karmakar, "Composites for Electric Vehicles and Automotive Sector: A Review", *Green Energy and Intelligent Transportation*, 2023, **2**, 100043.
9. M. K. Singh, S. K. Palaniappan, I. Suyambulingam, S. M. Rangappa, S. Siengchin, and D. Marinkovic, "Sustainable Composite Materials for Electric Vehicle Applications: A Comprehensive Review", *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*, 2025.
10. L. Yan and H. Xu, "Lightweight Composite Materials in Automotive Engineering: State-of-the-art and Future Trends", *Alexandria Engineering Journal*, 2025, **118**, 1–10.
11. M. Mohammadi, M. R. Ishak, M. T. Hameed Sultan, and E. S. Zainudin, "Cutting-edge Innovations in Sound Absorption Properties of Natural Fiber Reinforced Polylactic Acid Composites", *J. Reinforced Plastics and Composites*, 2025.
12. X. Liu, X. Tang, and Z. Deng, "Sound Absorption Properties for Multi-layer of Composite Materials Using Nonwoven Fabrics with Kapok", *J. Ind. Text.*, 2022, **51**, 1601–1615.
13. R. X. Liu, D. L. Pei, and Y. R. Wang, "Experimental Research on Sound Absorption Properties of Impedance Gradient Composite with Multiphase", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, **733**, 012009.
14. P. Sun, R. Dai, H. Li, Z. Zheng, Y. Wu, and H. Huang, "Multi-Objective Prediction of the Sound Insulation Performance of a Vehicle Body System Using Multiple Kernel Learning–Support Vector Regression", *Electronics*, 2024, **13**, 538.
15. J. Chen, H. Li, Z. Yan, Z. Zhang, J. Gong, Y. Guo, and J. Zhang, "Simulation, Measurement and Optimization of Sound Absorption in Gradient Impedance Fiber-based Composites", *Measurement*, 2023, **221**, 113499.
16. H. Suo, J. Xu, Y. Feng, D. Liu, P. Tang, and Y. Feng, "Experimental Research and Theoretical Analysis of the Coupling Mechanism Between Microstructure and Acoustics in Porous Materials", *Appl. Sci.*, 2025, **15**, 3104.
17. R. Zulkifli, M. M. Nor, M. M. Tahir, A. R. Ismail, and M. Z. Nuawi, "Acoustic Properties of Multi-layer Coir Fibres Sound Absorption Panel", *J. Appl. Sci.*, 2008, **8**, 3709–3714.
18. Y. Zhao, R. Sauro, R. A. Hallman, J. L. Davy, and M. Fard, "Estimation of the Random Incidence Sound Absorption Coefficients of Different Size Rectangular Samples", *J. Acoust. Soc. Am.*, 2023, **154**, 3041–3051.