

수송기계의 소음진동 저감

흡차음재 전용 소프트웨어 개발 및 응용

강연준*, 김윤재

(서울대학교 공과대학 기계항공공학부)

1. 머리말

최근 자동차 모델별 동호회 및 튜닝 모임 등을 중심으로 차량 관리와 성능에 대한 의견 교환이 활발하고 차량 관리에 필요한 물품들의 판매가 증가하는 등 현대인들에게 있어 자동차는 단순한 교통수단이 아닌 제 2의 생활공간으로서 각광받고 있는 만큼이나, 좋은 자동차에 대한 조건은 까다로워지고 있다. 특히, 좋은 자동차에 대한 조건 중 절대 빠지지 않는 것이 좋은 승차감으로서 좋은 승차감을 결정하는 중요 요소는 정숙함이다. 즉, 쾌적한 차실 내 환경의 구축이 저가 모델, 고가 모델 구분 없이 꼭 고려되어야 할 좋은 자동차에 대한 조건인 것이다.

쾌적한 차실 내 환경을 구축하기 위해서는 외부 소음의 차단 및 실내 소음 저감이 무엇보다 중요하다. 대표적인 외부 소음 차단 및 소음 저감 방법으로는 흡차음

재의 사용이 있다. 그림 1과 같이 차실의 모든 부분이 흡차음재로 둘러싸여 있다고 해도 과언이 아니다.

따라서 흡차음재를 적재적소에 배치하여 차량 실내 소음 저감을 극대화하기 위하여 흡차음재의 음향학적 모델의 개발과 이들의 음향학적 성능의 예측은 필수가 되었다.

현재 산업 현장에서 음향 재료의 성능을 예측하는 방법은 실험을 통하여 음향 재료의 각 성능과 흡차음재의 물리적 성질을 매번 측정하여 파악하는 것이었다. 그러나 실험을 통하여 음향재료의 물성을 측정하는 방법은 많은 시간이 필요하며 실험하기가 상당히 까다로운 경우가 많고 정확한 실험 결과를 얻는 것이 거의 불가능한 경우도 많다. 따라서 음향재료의 성능 예측 및 물성을 추정하는 기간을 단축하고 방대한 양의 음향재료를 효과적으로 관리하기 위해 음향 재료 선정 및 성능 평가 과정을 일원화하고, 음향 재료의 성능을 데이터베이스(database)화함으로써, 개발 기간의 단축과 함께 대량 생산을 위한 생산성 향상 효과를 꾀할 수 있다.

앞으로 우리 실험실에서 개발한 응용소프트웨어를 설명하기 위해 음향재료에 대한 기본 이론에 대하여 간략히 설명하고 개발된 흡차음재 전용 소프트웨어에 대해서 설명하겠다.

2. 음향 재료

흡음재는 일반적으로 고체(frame)와 유체(air)로 구성되어 있으며, 유기적인 음향학적인 거동을 열로 전환시

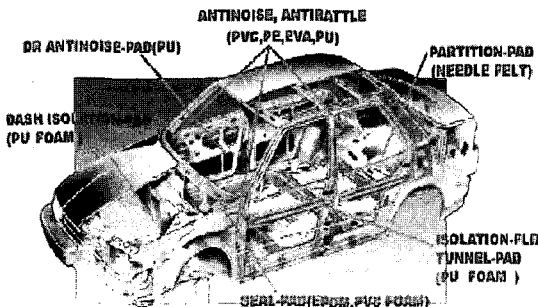


그림 1 차량에 적용된 흡차음재

* E-mail : yeonjune@snu.ac.kr / Tel : (02) 880-1691

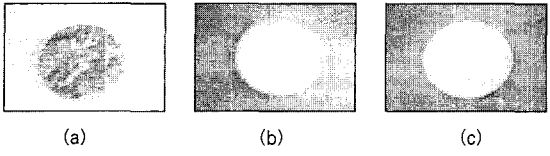


그림 2 흡음재의 종류

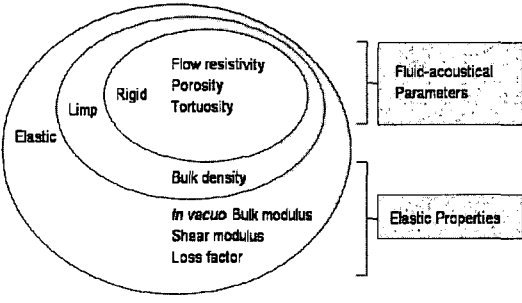


그림 3 흡음재의 물리적 특성

킨다. 이러한 에너지 소산 메커니즘은 점성적 효과 (viscous effect)와 열적 효과(thermal effect), 구조적 효과 (structural effect)를 통해 이루어진다. 흡음재만으로는 소음을 차단할 수 없기 때문에 차음재와 함께 쓰이는 경우가 많다.

흡음재는 고체상의 벌크상수를 공기의 벌크 상수(1.4×10^5 Pa)와 비교하여 작을 경우 limp porous material, 같을 경우 elastic porous material, 클 경우 rigid porous material이라고 한다.

그림 2의 (a)는 limp porous material에 해당하는 재료의 모습으로 glass fiber, mineral wool, resin felt가 이에 속한다. (b)는 elastic porous material의 대표적인 예로 polyurethane foams, polymeric foams, polyimide foams 등이 있다. 마지막으로 그림 2의 (c)는 rigid porous material 이고 sintered metal, ceramic foams, metallic foam 등이 해당된다.

이와 같은 흡음재는 거시적인 물리적 특성에 의해 음향학적인 특성이 결정된다. Rigid porous material은 유체 음향변수(fluid-acoustical parameters)에 해당하는 유동저항계수(flow resistivity), 공극률(porosity), 뒤틀림도(tortuosity)의 유체음향 변수로 음향학적 모델링이 가능하며, limp porous material은 rigid porous material이 갖는 3개의 유체음향 변수 외에 탄성 물성치에 해당하는 벌크 밀도(bulk density)를 지닌다. 마지막으로 elastic porous

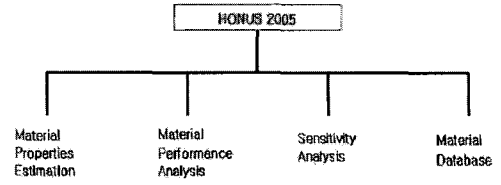


그림 4 소프트웨어의 개요

material 은 limp porous material의 4개의 물성치 외에 추가적으로 세가지의 탄성 물성치인 진공에서의 벌크영률, 전단율, 손실인자를 갖는다. 이를 표로 정리하면 그림 3과 같다.

위의 특성들 외에 추가적으로 점성특성 길이(viscous characteristic length)와 열특성 길이(thermal characteristic length)를 고려하여 흡음재를 모델링하는 경우도 있다.

3. 소프트웨어 개발

이 실험실에서 개발한 HONUS 2005의 개요는 그림 4와 같다. HONUS 2005는 음향 재료의 물성치를 추정하는 모듈인 material properties estimation 과 음향 재료의 성능을 예측하는 모듈인 material performance analysis, 각 물성의 변화에 따른 음향재료의 성능의 변화를 볼 수 있는 sensitivity analysis, 마지막으로 데이터베이스화된 각 재료들의 음향 성능 비교 및 검색을 위한 material database 이렇게 크게 네가지로 구성되어 있다.

3.1 Material Properties Estimation

Material properties estimation 에서 다루는 9가지 물성치는 그림 3에서 소개되었던 바와 같고 그에 대한 정의는 다음과 같다.

고체상 물성에는 음향재료의 축방향 힘에 대한 변형비에 해당하는 벌크영률, 음향재료의 전체 부피에 대한 고체부 질량의 비를 뜻하는 벌크밀도, 고체부의 진동과 관련된 기계적 감쇠인 손실인자와 재료의 길이방향 변형에 대한 횡방향 변형비인 푸아송 비로 구성되어 있다.

유체상 물성에는 일정한 유체 유동에 대한 재료의 저항을 의미하는 유동저항계수와 유체 및 고체부의 내부 결합구조를 정의하는 물성인 뒤틀림도, 음향재료 전체 체적에 대한 공기의 체적비인 공극률이 있다.

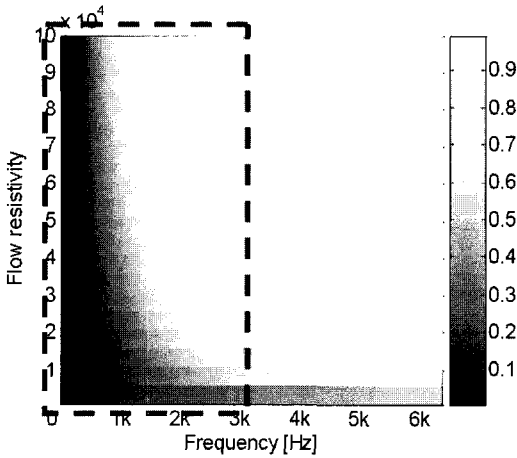


그림 5 유동저항계수에 따른 흡음율의 변화

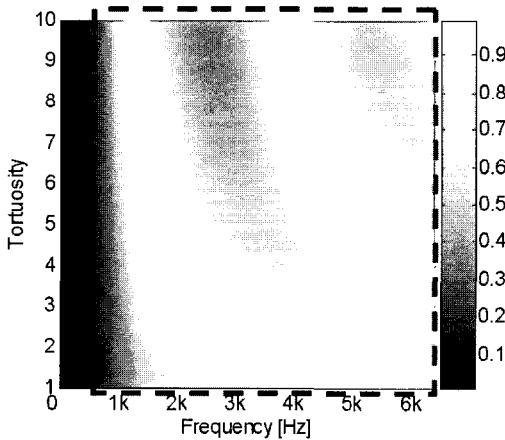


그림 6 뒤틀림도에 따른 흡음율의 변화

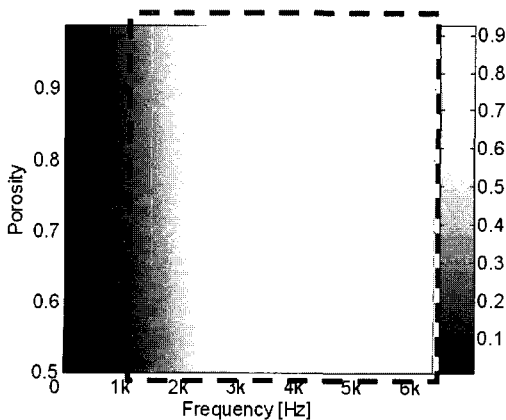


그림 7 공극률에 따른 흡음율의 변화

이 외에 다공성 재료의 공극 중 작은 것의 평균 직경인 점성특성 길이와 다공성 재료의 공극 중 큰 것의 평균 직경인 열특성 길이가 있다.

위와 같은 물성 중 유동저항계수와 공극률 그리고 벌크 밀도의 경우 측정이 비교적 쉽고 정확한 값을 얻을 수 있는 반면에 벌크영률, 손실인자, 뒤틀림도, 그리고 두 특성길이는 그 측정이 어려울 뿐만 아니라 정확한 값을 얻는 것조차 불가능한 경우가 많다.

Material properties estimation에서는 앞에서 설명한 limp, elastic, rigid porous material에 대한 물성을 추정한다. 이 소프트웨어는 물리적 성질 추정에 신뢰성과 효율성을 부여하기 위해 각 물성이 음향재료의 수직입사 흡음률에 미치는 영향을 파악하여 그 영향에 따라 수직입사 흡음률의 측정치와 추정치 사이의 오차를 최소화 승법을 이용하여 최소화하는 알고리즘을 개발하였다.

물성의 영향을 파악하고자 하는 물성 값만 변화시키고 그 이외의 물성들은 값을 고정시키고 유동저항계수, 뒤틀림도 및 공극률의 영향을 각각 살펴보았다.

그림 5의 점선으로 표시된 영역에서 볼 수 있듯이 유동저항계수값이 증가함에 따라 비교적 저주파 영역에서는 유동저항계수 값이 변화됨에 따라 흡음률의 값이 다른 주파수 영역에 비해서 상대적으로 크게 변화함을 볼 수 있다. 즉, 흡음률의 첫 번째 피크값 이하의 주파수 영역에서 흡음률이 상대적으로 급격하게 변화함을 확인할 수 있다.

다음으로 뒤틀림도에 따른 흡음률의 변화를 살펴보면 그림 6에서 볼 수 있는 바와 같이 점선으로 표시된 주파수 영역에서는 뒤틀림도가 증가함에 따라 흡음률의 굴곡이 심해지고 보다 많은 피크값들이 나타나고 있음을 알 수 있다.

또한, 공극률에 따른 흡음률의 변화를 살펴보도록 하겠다. 그림 7에서 공극률이 증가할수록 첫 번째 피크값은 거의 변하지 않고 고주파 영역에서 흡음률이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

여기서, 유동저항계수의 경우 뒤틀림도와 공극률과는 별도의 주파수 영역, 즉 저주파 영역에서 그 값의 추정이 가능하며 뒤틀림도와 공극률의 경우는 두 물성이 공통적으로 고주파 영역에서 큰 영향을 보이므로, 두 물성을 동시에 변수로 설정하고 최소화승법을 적용하였다.

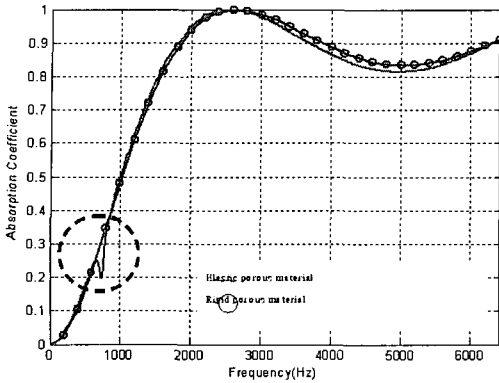


그림 8 벌크영률, 손실인자, 푸아송 비의 영향(흡음률)

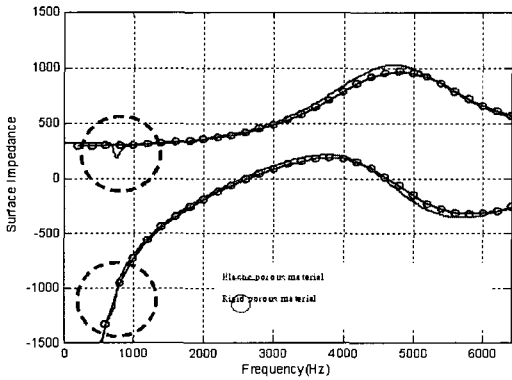


그림 9 벌크영률, 손실인자, 푸아송 비의 영향(표면 임피던스)

마지막으로 고체상 물성을 나타내는 변수들이 흡음률과 표면 임피던스에 끼치는 영향을 살펴 보면 그림 8 과 그림 9에서 저주파 영역에 점선으로 표시된 부분에서 흡음률과 표면임피던스에 deep이 생긴 것을 확인할 수 있다. 이는 elastic porous material을 고체상을 표현하는 벌크영률과 푸아송 비, 손실인자의 영향으로 공진이 발생하여 나타난 것이다. 공진주파수는 다음과 같이 표현된다^{(1),(2)}.

$$f_r = \frac{1}{4L} \sqrt{\text{Re}\left(\frac{K_c}{\rho}\right)}$$

여기서 K_c 는 다공성 재료의 고체상의 벌크상수, ρ 는 재료의 밀도, L 은 재료의 두께이다.

이 공진주파수는 후면을 강체 접촉시킨 다공성 재료의 표면임피던스에서 다공성 재료의 두께가 다공성 재료에 입사되는 파동의 4분의 1 파장이 되는 주파수이

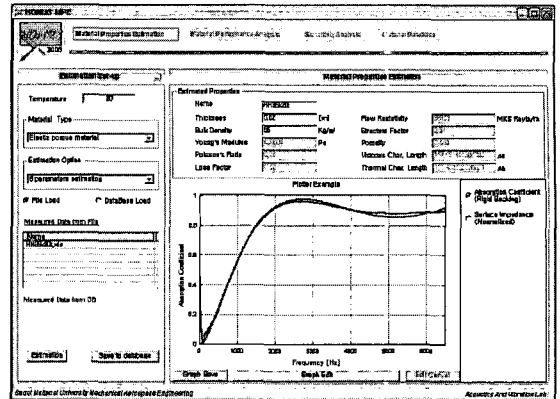


그림 10 Material properties estimation 모듈

다. 이때, E_m , ν , η_{loss} 를 영계수, 푸아송 비, 손실계수라 하면

$$E = E_m (1 + \eta_{Loss})$$

$$K_c = E \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 + 2\nu)}$$

와 같이 표현된다.

위와 같은 물성에 따른 흡음률 변화 등을 바탕으로 추정 알고리즘은 유체상의 물성은 유동저항계수, 뒤틀림도와 공극률, 형상계수 이렇게 3가지 그룹으로 분리하여 주파수 영역을 나누어 추정하고 고체상의 물성은 측정된 표면 임피던스에서 공진 주파수를 찾아 해당 공진 주파수를 나타내는 최적의 조합을 산출하였다. 이와 같은 과정을 거쳐 만들어진 material properties estimation의 모듈은 그림 10과 같다.

음향재료의 종류와 추정할 음향재료의 물성에 따른 옵션을 지정한 다음 임피던스 튜브에서 측정된 수직입사 흡음률⁽³⁾과 표면 임피던스 측정데이터를 프로그램으로 불러들이면 그림 10과 같이 추정된 물성의 값이 회색 텍스트상자안에 표시되고 동시에 추정된 음향재료의 물성을 이론식에 대입하여 구한 음향재료의 흡음률과 임피던스 튜브에서 측정한 흡음률이 그래프로 비교 표시된다.

이 소프트웨어는 표 1, 표 2와 같이 여러 가지 옵션을 통해 위의 물성을 추정하도록 개발되었다.

Limp 와 rigid porous material의 물성을 추정할 때는 측정된 두께와 벌크밀도와 유동저항 계수를 입력하고 다

표 1 Limp & rigid porous material 옵션(○입력, ●추정)

추정 옵션	물성	유동저항 계수	뒤틀림도	공극률	점성특성 길이	열특성 길이
4 P.E		○	●	●	●	●
5 P.E		●	●	●	●	●
Optional	선택한 물성 추정					

표 2 Elastic porous material 옵션(○입력, ●추정)

추정 옵션	물성	유동저항 계수	뒤틀림도	공극률	점성특성 길이	열특성 길이
4 P.E		○	●	●	●	●
5 P.E		●	●	●	●	●
8 P.E	5 parameters estimation + 벌크영률 + 푸아송비 + 손실인자					
Optional	선택한 물성 추정					

표 3 전달행렬이 구성된 음향재료

Layer type	Input parameters
Air	두께
Permeable membrane	두께, 밀도, 유동저항계수
Impermeable embrane	두께, 밀도
Panel	두께, 벌크영률, 푸아송비
Limp porous material	두께, 밀도, 유동저항계수, 뒤틀림도, 공극률, 점성특성길이, 열특성길이
Rigid porous material	두께, 밀도, 유동저항계수, 뒤틀림도, 공극률, 점성특성길이, 열특성길이
Elastic porous material	두께, 밀도, 유동저항계수, 뒤틀림도, 공극률, 점성특성 길이, 열특성길이, 벌크영률, 푸아송비
BU configuration	패널 및 다공성 재료의 물성
UB configuration	
UU configuration	

른 4개의 물성을 예측하는 4 parameters estimation 옵션과 두께와 벌크밀도만 입력하고 유동저항계수를 비롯한 5가지 물성을 예측하는 5 parameters estimation 옵션, 추정할 임의의 물성 선택이 가능한 optional estimation 옵션이 있다.

표 4 Layer 종류, 입사조건 및 주파수에 따른 옵션

System type	Incidence conditions	Frequency band
Single layer	Normal	Narrow freq. band
Multi-layer	Random	Octave freq. band
		1/3 octave freq. band

Elastic porous material의 물성을 추정할 때는 음향재료의 두께와 벌크밀도, 벌크영률, 푸아송 비, 손실인자, 유동저항계수를 입력하고 다른 네가지의 물성을 예측하는 4 parameters estimation 옵션, 앞의 네가지 물성에 추가로 유동저항계수까지 예측할 수 있는 5 parameters estimation 옵션과 앞의 limp와 rigid porous material에 대한 추정 옵션과 같은 optional estimation 옵션이 있다. 그리고 그 외에 8 parameters option은 5 parameters option 옵션에 벌크영률과 푸아송 비 그리고 손실인자로 정의되는 고체상의 물성을 추가적으로 추정하는 옵션이다. Optional estimation을 이용하여 사용자가 측정 가능한 물성은 직접 측정하고 측정이 어려운 물성의 경우는 본 소프트웨어를 이용하여 수치적 방법을 통하여 추정하고자 하는 물성의 추정값을 얻을 수 있다.

이와 같은 다양한 옵션은 실제 현장에서 측정하기 어려운 물성의 측정없이 음향 재료의 성능을 예측할 수 있도록 현실적인 제약을 벗어나 사용자의 편의성을 고려한 것으로 본 소프트웨어의 장점이라 할 수 있다.

3.2 Material Performance Analysis

음향재료의 성능을 해석적으로 예측하는 방법^{(1),(8)}에는 여러가지가 있다. 그 중에서도 전달행렬법⁽⁹⁾을 이용하면 좀더 쉽게 재료의 음향학적 성능을 예측할 수 있다. 입사면에서의 음압과 입사속도를 전달행렬과 투과면에서의 음압과 입사 속도의 곱으로 표현할 수 있다. 그 식을 이용하면 반사계수와 투과계수를 구할 수 있으며, 다중층으로 구성된 음향재료의 경우 단순히 각 층에 해당하는 전달행렬들을 배열 순서에 따라 곱해주면 원하는 음향재료의 성능을 얻을 수 있다. 이러한 이론적 계산이 가능하기 위해서는 각 층을 이루고 있는 음향재료의 물성들을 사전에 알고 있어야 한다.

위와 같은 전달행렬법을 통하여 여러 입사 조건에 따른 각 음향재료의 전달행렬을 구성하고 이 전달행렬을

그림 11 Layer type선택 후 물성 입력창

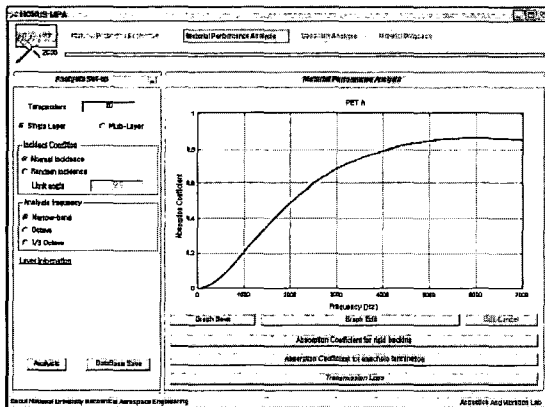


그림 12 흡음률 예측결과 그래프

이용하여 음향성능을 예측할 수 있는 음향성능 예측 모듈을 구성하였다. 개발된 응용소프트웨어에 삽입된 전달행렬을 종류는 표 3과 같고 이를 이용하여 각 음향재료의 성능을 예측할 수 있는 조건은 표 4에 나타내었다.

표 3에 나타난 음향재료와 더불어 차후에 perforated panel에 대한 전달행렬이 추가될 예정이다.

HONUS 2005의 material performance analysis를 실행하여 그림 11의 물성 입력 창에 음향재료의 물성을 입력하고 음향재료의 음향학적 성능을 예측한 예를 그림 12에 나타내었다. 음향재료의 표면에서의 음 입사 조건, 층 구조 및 해석 주파수 요건을 설정한 다음, 재료의 각 물

성을 입력하면 재료의 세가지 음향학적 성능 즉, 투과면을 강체 접촉했을 경우의 흡음률, 투과면을 자유단으로 두었을 때의 흡음률 및 전달손실을 예측할 수 있다.

추정된 결과를 데이터베이스에 측정된 음향성능과는 별도로 저장이 가능하며 데이터 베이스에 저장된 재료의 물성을 이 모듈에 불러 음향 성능을 예측하는 것도 가능하다.

예측된 음향성능은 그림 12와 같이 표시되며 그림 12 하단에 위치한 버튼을 누르면 각 음향성능을 그래프를 통하여 확인할 수 있다.

3.3 Sensitivity Analysis

Sensitivity analysis는 음향재료의 물성의 변화에 따라 음향성능이 얼마나 변화하는지를 관찰할 수 있도록 설계된 모듈로 다공성 재료에 국한되어 개발되었다. 앞에서 설명한 모듈들에서 기본적인 입력값으로 사용된 모든 물성 값들을 변수 값으로 설정할 수 있으며 수직 입사 뿐만 아니라 랜덤입사에 대해서도 해석을 수행할 수 있다.

앞에서 설명한 다른 모듈들과 같은 방법으로 재료 본래의 물성들 및 종류를 입력하고 변화를 예측할 음향성능 그리고 변화시킬 물성을 설정한 다음 analysis 버튼을 클릭하면 그림 13의 adjustment range 부분이 활성화된다. 활성화된 부분에 물성을 변화시킬 범위와 증가분을 입력한 뒤 OK 버튼을 클릭하면 그림 13에 나타낸 그래프와 같은 colormap이 나타난다. 이후에 원하는 물성 값을 설정하여 new parameter 란에 입력하고 OK 버튼을 클릭하면 물성을 변경하기 전 그래프는 파란색, 변경하고 난 후의 그래프는 빨간색으로 비교하여 도시된다. 그림 14는 변경 전, 후의 물성에 대한 음향성능을 그래프로 표시한 것이다.

Sensitivity analysis는 신재료를 개발하기 위하여 변화시켜야 할 물성을 시제품 개발 이전에 파악하고, 원하는 음향성능을 가지는 재료의 두께나 각 물성을 미리 파악함으로써 음향 재료가 적용될 상황에 맞는 음향재료를 선정하는데 이용될 수 있다.

3.4 Material Data Base

Material data base 모듈은 음향재료의 성능 및 물성을 데이터베이스화하여 음향재료의 품질을 효과적으로 관

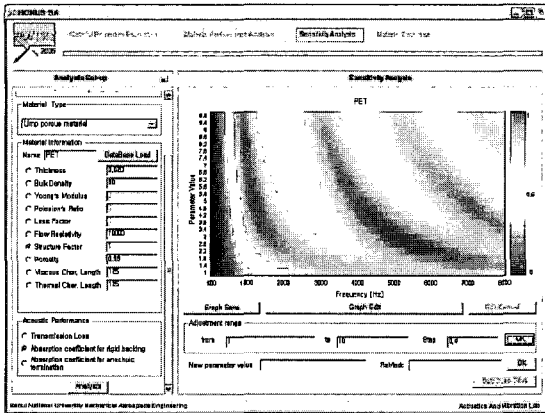


그림 13 Colormap과 adjustment range 의 활성화

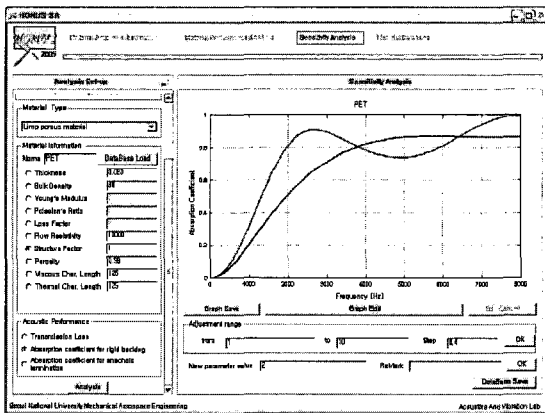


그림 14 물성변경 전후의 흡음율 그래프 비교

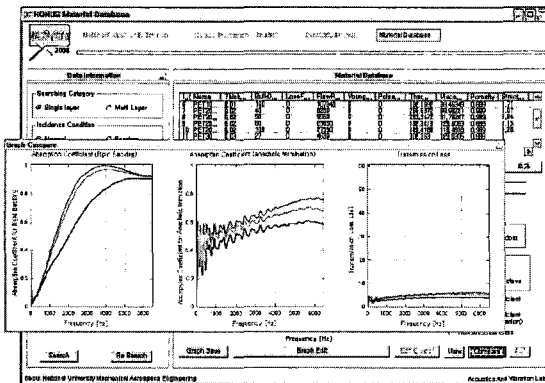


그림 15 음향성능 비교

정에 있어서 보다 효율적인 방법으로 적용 상황에 적합한 재료를 선택할 수 있도록 하였다. 재료 성능의 비교뿐만 아니라 재료의 성능을 기준으로 한 검색이 가능하며, 재료의 생산 시기를 기준으로 한 검색 또한 가능하다. 그림 15는 재료를 검색 조건에 따라 검색한 후 재료의 세가지 음향학적 성능 동시에 그래프로 비교한 화면이다.

4. 맺음말

이상으로 이 실험실에서 개발한 흡차음재 전용 소프트웨어에 대해 살펴보았다. 흡차음재 소프트웨어를 개발하면서 중점을 두었던 부분은 시중에 나와있는 흡차음재 전용 소프트웨어들이 사용하기 불편하고 측정하기 어려운 물성을 입력해야만 음향 성능을 예측할 수 있는 한계를 극복하고자 함이었고, 정확한 예측과 사용자 중심의 편의성과 현실적인 제약을 고려한 실용적인 프로그램 개발이었다.

HONUS 2005의 장점은 측정하기 쉬운 두께와 밀도만으로 음향재료의 물성을 예측하는 모듈처럼 모든 물성을 측정하기 어려운 사용자의 연구환경을 고려한 것이다. 그래프의 편집 기능 강화, 다양한 확장파일로 저장할 수 있는 기능이나 검색 및 비교 기능을 통하여 사용자가 손쉽게 추가적인 편집이나 작업을 쉽게 할 수 있도록 하였다.

좀 더 다양한 종류의 음향재료에 대한 물성 예측이나 성능 예측을 위하여 계속해서 프로그램을 보완할 예정이며, 이 프로그램을 측정 장비와 통합하여 물성 및 성능 측정에서부터 성능예측까지 가능한 소프트웨어 개발을 위하여 연구를 진행 중이다.

외부의 소음 차단 및 저감을 위한 흡차음재 사용은 쾌적한 차 실내 환경을 구축하기 위한 중요한 작업이다. 새로운 흡차음재의 개발과 적절한 사용을 위해서는 흡차음재의 물성과 성능을 예측하는 작업이 필수요소이다. 이 소프트웨어가 흡차음재 연구 활성화에 기여하고 관련 연구에 많은 도움이 될 수 있으면 한다.

참고문헌

리하고 검색 및 비교 기능을 통하여 단일 음향 성능 및 세가지 음향성능을 동시에 비교함으로써 음향재료 선

(1) Allard, J. F., 1993, "Propagation of Sound in Porous Media : Modeling Sound Absorbing Materials Elsevier

- Applied Science", Elsevier, London and New York.
- (2) Allard, F., 1991, "Effect of a Resonance of the Frame on the Surface Impedance of Glass Wool of High Density and Stiffness", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 89, No. 3, pp. 999~1001.
- (3) Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, 1998, "Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System", ASTM, E1050-EBGL.
- (4) Johnson, D. L., 1987, "Theory of Dynamic Permeability and Tortuosity in Fluid Saturated Porous Media", J. Fluid Mech., 176, pp. 379~402.
- (5) Champoux, Y., 1991, "Dynamic Tortuosity and Bulk Modulus in Air-saturated Porous Media", J. Appl. Phys., 70, pp. 1975~1979.
- (6) Biot, B. A., 1956, "Theory of Propagation of Elastic Wave in a Fluid-saturated Porous Solid. I. Low-frequency Range", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 28, No. 2, pp. 168~178.
- (7) Biot, B. A., 1956, "Theory of Propagation of Elastic Wave in a Fluid-saturated Porous Solid. II. High-frequency Range", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 28, No. 2, pp. 179~191.
- (8) Bolton, J. S., 1996, "Sound Transmission Through Multi-panel Structures Lined with Elastic Porous Materials", Journal of Sound and Vibration, Vol. 191, No. 3, pp. 317~347.
- (9) Kang, Y. J., 1994, "Studies of Sound Absorption by and Transmission Through Layers of Elastic Noise Control Foams : Finite Element Modeling and Effects of Anisotropy", Ph. D thesis, Purdue University, America.