한국소음진동공학회 2000년도 추계학술대회논문집, pp. 415~420.

복합재료를 이용한 시트형 차음재 개발

°이동훈*, 이태근**, 정성균*, 이희원***, 강 문****, 김영배****

Development of Sound Isolation Sheets with Compound Materials

Dong-Hoon Lee, Tae-Kun Lee, Seong-Kyun Cheong, Hee-Won Lee,
Moon Kang, Young-Bae Kim

ABSTRACT

This paper describes a part of the results obtained in the process of the development of thin sound isolation sheets filled mineral compound powder with PVC. The raw materials used are pyrophillite, pottery stone and graphite. The physical properties such as the crystal structures, compositions, and specific gravities, etc. of raw materials are analyzed and discussed from a point of view of sound isolation material. From the analysis of experimental results, the particle size and the additive amount of mineral compound powder for manufacturing sample isolation sheets are decided. The resistant capability against fire of sound isolation sheets including mechanical, thermal and physical properties is tested. The transmission loss measuremenst of sound isolation sheets are performed using two-microphone method in an impedance tube. It is shown that the sound isolation capability of thin sheets has an excellent performance in excess of the object of development.

1. 서 론

최근에 건설되는 각종 건축물은 초고층화, 다기능화, 고급화 및 경량화를 추구함과 동시에 주거자에게 편리성, 안전성 그리고 정숙하고 쾌적한 환경친화적 공간제공을 기본목표로 하고 있다. 특히 초고층화와 경량화는 기존의 공간설계와 설비방식에 커다란 변화를 야기시키고 있다. 이러한 공간설계와 설비방식의 변화로 인해 파생된 가장 심각한 문제의 하나로 소음공해를 꼽을 수 있다. 그러나 환경문제를 중시하는 최근의 상황으로 볼 때 종래의 건축물에 사용했던 흡.차음재를 이용하여 현대의 건축구조나 설비변화로부터 야기된 소음문제를 해결하는데는 그 한계성을 갖는다. 따라서 변화된 공간설계 및 설비방식에 능동적으로 대처할 수 있는 친환경적 흡.차음재를 연구개발하여 실용화하는 것이 시대적으로 절실하게 요청되고 있다.

* 서울산업대학교 기계공학과, ldh@duck.snut.ac.kr
** 서울산업대학교 재료공학과
*** 서울산업대학교 기계설계학과
**** 서울산업대학교 산업대학원 기계공학과

한편 차음재와 관련하여 국내에서의 연구는 차음재료의 개발을 목적으로 하기보다는 주로 상용 차음재의 특성이나 성능평가에 주안점을 두어 왔다[1-3]. 또한 국내에서 상용화되고 있는 차음재는 대부분 건축용으로 쓰이고 있으며, 대표적인 예로 경량콘크리트 블록, 석면슬레이트판, 유리, 강판, 연판, 알루미늄판 및 철골플라스터 이중벽 등이 이에 속한다. 이외에도 기계류 등의 소음방지 목적으로 방음실이나 방음상자 등을 제작하는 경우에는 강판에 감쇠재료를 부착한 차음재 또는 밤라이트 패널, 유리섬유, 짚섬보드 및 나무라이트 패널로 조합된 복합구조형 차음재가 쓰이고 있으나 건축용에 비하면 그 수요는 아주 적다고 할 수 있다. 또한 필요에 따라 제진재가 차음재의 대용으로 쓰이는 경우도 있다. 이와 같이 국내에서 사용되고 있는 차음재는 특정용도를 염두에 두고 연구개발의 결과로부터 얻어졌다기 보다는 대부분 건축현장에서 확보할 수 있는 자재를 적절히 조합하여 차음재 형태로 활용하여 왔다고 할 수 있다.

그러나 외국의 경우는 오래전부터 차음재용 재료개발, 차음특성 및 성능평가에 대한 연구가 폭넓

게 진행되어 왔다[4-7]. 지금까지 개발된 차음재의 형태로는 금속 또는 비금속 분말을 소결하는 방식, 이종재료의 접합을 이용한 방식 그리고 폴리비닐에 특수합금 분말을 배합하는 방식 등이 있다. 이 중에서 폴리비닐에 특수합금 분말을 배합하여 성형한 차음재는 현재 국내로 다량 수입되고 있으며, 본 연구를 통하여 개발한 복합재료형 차음재와 어느정도 유사성을 갖는다고 할 수 있다. 개발한 복합재료형 차음재는 내구성, 방염성, 시공 및 제조의 용이성을 만족시킬 수 있는 차음재로서 상용화되고 있는 차음재와 비교하여 두께가 매우 얇은 시트형이므로 적용범위가 넓고 시공이 간편할 뿐만아니라 기존제품의 문제점인 방염성, 공간낭비 및 자중문제도 해결할 수 있다는 많은 장점을 갖는다. 특히 PVC에 특수합금 분말을 배합한 복합재료형 차음재의 개발은 국내에서의 첫시도라 할 수 있으며, 본 논문에서는 두께 2mm 차음재에 대한 개발결과의 일부만을 소개하고자 한다.

2. 시료제조

2.1 원료탐색

차음재용 원료탐색에서 무엇보다도 중요한 것은 성능요건과 함께 풍부한 매장량과 가격의 경제성을 갖는 재료의 선택이 중요하다. 이러한 관점에서 본 연구개발에서는 결정형태가 판상을 갖는 엽납석과 도석 그리고 적층판상 구조를 갖는 흑연을 선정하였다. 엽납석 $(Al_2(Si_4O_{10})(OH)_2)$은 국내의 매장량이 풍부하며, 점토광물의 구조와 비교하여 (Si_2O_5)층, $Al(OH)$층, (Si_2O_5)층과 알칼리 이온층의 순서로 적층되어 있는 운모의 구조에서 단지 층간의 알칼리 이온이 없는 단사정계 구조를 갖는 해남 엽납석을 이용하였다. 또한 정팔면체를 이루며 Al^{3+}와 같이 3가 이온이 정팔면체 자리의 2/3를 채우는 도석은 광물조성상으로 카올린질 도석, 엽납석질 도석, 장석질 도석 등으로 구분되며, 육방정계 또는 의(pseudo)육방의 단사정계 단위포를 갖는다. 국내 도석광으로는 석영광물 함량이 적은 경주 우원, 제천, 장산 광산이 있으며, 석영광물 함량이 많은 태백, 김해, 보배, 서창, 압해 수오, 천초 도석 광산이 있다. 그리고 유기물의 탄화로 인해 변성암으로부터 생긴 천연흑연(인상흑연, 토상흑연)의 색은 회색과 검정색을 나타낸다. 결정형태는 적층판상으로 잘 쪼개지는 성질을 가지고 있으며 상주산을 이용하였다. 이상에서 소개한 해남 엽납석, 경주 도석 그리고 상주 인상흑연 분말을 주원료인 PVC에 첨가하여 시트형 차음재를 제조하였으며, 특수합금 분말의 물리적 특성을 정리하면 Table 1과 같다.

Table 1 Physical properties of raw materials

	조 성	결정계	비중	경도	결정형태	색
납석	$Al_2(Si_4O_{10})(CH)_2$	단사정계	2.80	1.5	판상	무색
도석	$Al_2(Si_4O_{10})(CH)_2$	단사정계	2.80	1.5	판상	무색
흑연	C	육방정계	2.25	1	적층판상	검정

2.2 성분분석

특수합금 분말의 결정상을 분석하기 위해서는 Rikagu DMAX 3C(Rigaku Denki Co.Ltd)의 NI-filtered $Cu-K\alpha$ $X-$선을 이용하였다. 또한 분말의 모양과 크기 그리고 미세조직은 주사전자현미경(JSM-6400 JEOL)을 사용하였으며 EDS를 이용하여 조성을 확인하였다. 재료의 단위 질량 또는 부피당 입자의 표면적을 분석하기 위하여 Micromerltics 6300(Micromeritics Co. Ltd)을 이용하여 N_2 gas의 물리적 흡착에 의한 비표면적을 측정였다. 입자를 둘러싸고 있는 표면전하를 측정하기 위하여 Zetasiger (Malvern Instrument Ltd)을 이용하여 Zeta-포텐셜을 측정하였다. 이상의 기기로부터 측정 및 분석을 통하여 얻은 결과를 정리하면 해남산 엽납석은 $(Al_2(Si_4O_{10})(OH)_2)$의 결정상을 가지며 98%이상의 순도를 가지고 있으며 입자크기는 200μm정도였다. 석영광물의 함량이 작은 경주도석은 연미색을 띠며 엽납석과 같은 결정상을 가지고 있으며, 95%이상의 순도에 1-2% 정도의 Fe성분이 포함되어 있다. 상주산 인상흑연의 경우는 고정탄소분이 85%이고, 회분이 15%에 이르는 B급 천연흑연이었으며 결정성이 우수하였다.

또한 N_2 gas의 물리적 흡착을 이용한 분말의 비표면적 측정결과로부터 해남산 엽납석 원료는 6.1366m^2/g의 비표면적을 나타내었으며 경주산 도석 원료는 2.6278m^2/g의 비표면적을 나타내었다.

차음재의 주원료인 PVC 기지상내에 화학적인 결합력 없이 전기적인 쿨롱의 힘만으로 결합하고 있다면 결합력은 전기적 포텐셜 차이에 크게 영향을 받을 수 있다. 그러나 경주 도석의 경우는 5.1mV의 아주 약한 양의 Zeta Potential을 나타내고 있으며 해남산 엽납석의 경우도 아주 약한 -5.6mV의 음의 Zeta Potential의 값을 나타내는 것으로 보아 결합력은 약하다고 할 수 있다.

2.3 배합설계

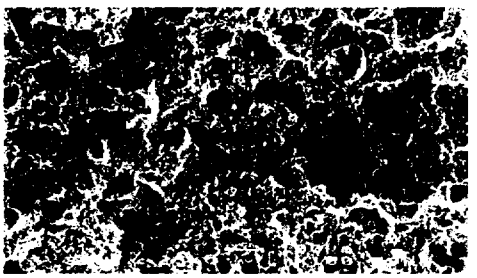

Fig. 1 SEM photograph of compound sheets filled with 100 μm pyrophillite.

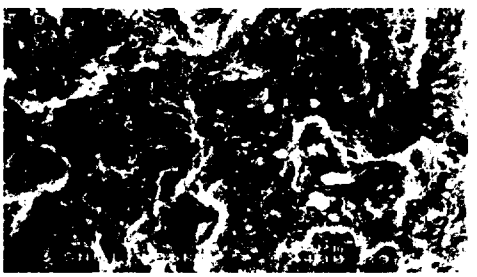

Fig. 2 SEM photograph of compound sheets filled with 100 μm pottery stone.

Fig. 3 SEM photograph of compound sheets filled with 100 μm graphite.

Fig. 1에서 Fig. 3까지 도시된 결과는 차음재의 주원료인 PVC에 입자크기 100㎛의 해남 엽납석, 경주 도석 그리고 상주 흑연을 배합시킨 차음재의 파단면 사진을 나타낸 것이다. 사진결과에서 보듯이 엽납석과 도석의 경우와는 다르게 흑연이 포함된 차음재의 경우는 흑연의 형상 그대로인 lamelar 형태의 미세조직을 나타내고, 기공이 매우 많은 porous한 조직을 가지고 있음을 볼 수 있다. 이 때문에 차음재의 기계강도 값이 크게 낮아질 것으로 예상됨에 따라 주원료인 PVC에 배합되는 합금분말로는 부적당하다고 생각된다. 엽납석과 도석의 경우는 PVC에 결합력이 없이 박혀있는 형상을 보여주고 있다. 특히 시트제작시 Roller의 영향으로 합금분말의 파괴가 일어나고 있음을 파단면의 사진결과로부터 알 수 있다.

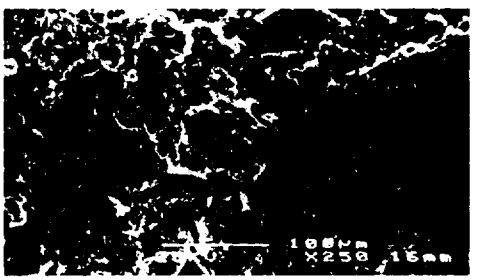

Fig. 4 SEM photograph of compound sheets filled with 50 μm pyrophillite.

Fig. 5 SEM photograph of compound sheets filled with 50 μm pottery stone.

한편 Fig. 4와 Fig. 5에 제시된 입자크기 50㎛의 해남 엽납석과 경주 도석을 첨가한 경우는 입자크기 100㎛의 결과와 비교해 볼 때 조직이 매우 조밀하고 기공이 많이 감소하였음을 알 수 있다. 입

자크기가 미세해짐에 따라 표면에너지의 증가로 인한 활성화된 첨가 분말의 역할로 기계적 성질이 증가할 것으로 판단된다. 특수합금분말이 첨가된 PVC 복합차음재의 파괴거동은 연질의 합금분말의 파괴에 의한 거동보다 경질의 기지상인 PVC의 파괴거동이 우선되어지므로, 첨가입자가 미세하여질수록 조밀한 미세구조를 갖게 되어 높은 면밀도를 기대할 수 있으리라 사료된다. 또한 50㎛의 첨가입자의 경우는 100㎛의 첨가입자의 경우와 마찬가지로 원료의 파괴적인 면이 다소 나타나는데 이는 앞선 결과와 마찬가지로 시트제조시 Roller에 의한 첨가입자의 파괴로 생각되며, Rolling방법을 이용하여 시트를 제조할 때 필연적으로 나타나는 결과라 사료된다. 염납석과 도석의 경우 Zeta Potential의 값은 반대의 전기력을 나타내나 그 값이 매우 미세하여 시트형 차음재의 주원료인 PVC 기지내와의 결합력의 정도는 관찰할 수 없었다.

이상의 실험과 분석으로부터 특수합금분말이 포함된 시트형 PVC 차음재의 제조특성은 출발원료의 종류와 입자크기 효과에 따라 변화됨을 알 수 있었다. 본 실험에 사용되어진 Roll 형태의 시트 제조기와 PVC 기지상에 있어서는 해남 염납석과 경주 도석의 경우 유사한 실험결과를 나타내었다. 신장율이 낮은 경질의 PVC 기지상내에 첨가되는 해남 염납석과 경주 도석의 경우는 입자크기가 미세해질수록 조밀하고 기공이 적은 미세조직을 보이므로, 50㎛ 이하의 입자크기와 100~150 part 의 비율이 최적의 배합비임을 알 수 있었다. 또한 기지상과 합금원료의 결합력을 향상시킬수 있는 표면처리방법과 신장율이 높은 기지상 재료의 선택으로 합금원소의 첨가량을 증가시킬 수 있을 것으로 생각된다.

2.4 제조공정

실험용 차음재는 Milling- Sieving- Mixing- Rolling- Testing 순으로 제조하였으며, Table 2는 Roller를 이용하여 제조한 시트형 차음재의 종류를 나타낸 것이다. Table 2에서 보듯이 분쇄된 분말의 입자크기는 50㎛와 100㎛ 그리고 PVC에 대한 배합비율은 100 part와 150 part의 두가지의 형태로 s는 표면코팅을 뜻한다.

Table 2 Recipe of sample sheets

시료기호	조 성 내 용
D-100-100	PVC + 100㎛ 도석 100 part
D-100-150-s	PVC + 100㎛ 도석 150 part
P-100-100	PVC + 100㎛ 납석 100 part
C-100-100	PVC + 100㎛ 흑연 100 part
D-50-100	PVC + 50㎛ 도석 100 part
P-50-100	PVC + 50㎛ 납석 100 part

3. 물성시험

개발하려는 차음재는 주로 건축물에 쓰이므로 차음성능과 더블어 화재시에도 안전성을 보장하는 것이 필수적이라 할 수 있다. 또한 송풍기, 공조기, 유체수송라인 및 각종 기계설비류의 Lagging용으로도 쓰이기 때문에 차음성능과 방염성 시험뿐만 아니라 강도특성, 열적특성 및 물리적 특성을 얻기 위한 포괄적인 물성시험이 필요하다 할 수 있다. 따라서 본 연구개발에서 수행한 성능, 사용범위 및 용도에 준하는 시험항목은 Table 3과 같다.

Table 3 Testing items of sound isolation sheets

시 험 항 목		단 위	개발목표치	시험방법
차음성능	음향투과손실 (125~8000Hz)	dB	10~20	
	면 밀 도	kg/m^2	2~4	
방염특성	잔 염 시 간	sec	5 이하	소방법규에 준한 시험
	잔 진 시 간	sec	10 이하	
	탄 화 면 적	cm^2	25 이하	
	탄 화 길 이	cm	10 이하	
강도특성	탄 성 계 수	kg/m^2	물성확인	KS M 6518
	인 장 강 도	kg/m^2	물성확인	KS M 6518
	전 단 강 도	kg/m^2	물성확인	KS M 6518
	접 착 강 도	kg/m^2	시공성평가	KS M 6518
열적특성	내 열 성		최대	KS M 6518
	내 한 성		최대	KS M 6792
	열 전 도 율	kcal/m hr ℃	물성확인	KS L 9016
물리특성	전 기 저 항	Ω	최소	KS M 6405
	비 중	%	물성확인	KS M 6519
	흡 수 율		최소	KS M 6789 KS M 6518

4. 차음성능

4.1 이론검토

차음재의 성능은 입사음에 대한 투과음의 강도비인

음향투과계수로 나타내며, 본 연구에서와 같이 굽곡강성이 아주 작은 연질의 얇은 시트형 차음재인 경우는 다음에 제시되는 연질차음재의 질량법칙(limp-wall mass law)[5]식을 이용하여 음향투과계수 $\tau(\theta)$ 를 구할 수 있다.

$$\tau(\theta)=\frac{I_t}{I_i}=\left|\frac{p_t^2}{p_i^2}\right|\cong\frac{1}{\{1+(\omega m\cos\theta/2\rho_o c_o)^2\}} \quad (1)$$

식 (1)에서 θ는 차음재 시트면의 법선방향으로부터 접선방향에 이르는 음의 입사각도를 나타내며, m는 단위면적당 질량 (면밀도라 부른다), ρ_o와 c_o는 각각 공기밀도와 음속을 나타낸다. 관내의 음장조건이 평면파인 경우는 수직입사 ($\theta=0$) 조건에 해당되므로, 식 (1)에서 보는 바와 같이 법선방향에서의 음향투과계수값이 가장 크게 된다. 특히 시트형 차음재의 흡음력은 거의 무시할 수 있으므로 입사음과 반사음의 음향세기 차이는 곧바로 투과음의 음향세기 $I_t=I_i-I_r$ 가 되므로 입사음과 투과음의 음향세기 비인 음향투과계수 $\tau=I_t/I_i$ 관계로부터 입사음과 반사음의 음향세기만을 알면 음향투과손실을 쉽게 구할 수 있다. 따라서 입사음과 반사음의 파워스펙트럴 밀도함수를 각각 음향세기 I_i 와 I_r 에 대하여 정리하면 다음과 같다[8].

$$I_i=|S_{11}\cdot[1+|H_{12}|^2-2\mathrm{Re}(H_{12})\cos k(x_1-x_2) -2\mathrm{Im}(H_{12})\sin k(x_1-x_2)]/4\sin^2 k(x_1-x_2)|/\rho_o c_o \quad (2a)$$

$$I_r=|S_{11}\cdot[1+|H_{12}|^2-2\mathrm{Re}(H_{12})\cos k(x_1-x_2) -2\mathrm{Im}(H_{12})\sin k(x_1-x_2)]/4\sin^2 k(x_1-x_2)|/\rho_o c_o \quad (2b)$$

식 (2)에서 보듯이 입사음과 반사음의 음향세기를 구하는데는 자기스펙트럼 밀도함수와 두 지점간의 음향전달함수만이 필요하다는 것을 알 수 있다.

4.2 측정장치

Fig. 6은 시트형 차음재의 음향투과손실을 측정하기 위한 측정장치도를 나타낸 것이다. 관단으로부터 첫 번째와 두 번째 음향센서까지의 거리를 각각 x_1, x_2라 할 때, 두 음향센서간의 간격은 s 가 된다. 음향센서의 간격이나 위치를 조절하기 위하여 어댑터를 관에 부착하였다. 음향센서의 크기는 1/4인치이며 압력형 마이크로폰을 사용하였다. 주파수분석기의 분석주파수 범위는 5000 Hz, 해상도는 12.5Hz로 하였다. Bias오차와 Random오차를 줄이기 위하여 센서의 위치와 간격을 조절하였다.

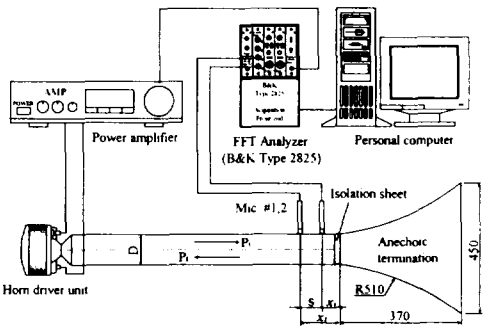

Fig. 6 Experimental apparatus for measuring sound isolation capability of compound sheets

4.3 결과 및 고찰

다음은 엽납석과 도석의 입자크기 및 배합비를 각기 다르게 하여 제조한 시트형 차음재의 음향투과손실 측정결과이다. 결과에서 보듯이 차음성능은 전반적으로 개발목표치를 크게 만족하며 탁월한 성능을 갖는다.

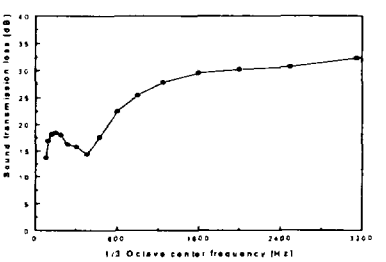

Fig. 7 Sound transmission loss of D-100-150(S) compound sheets

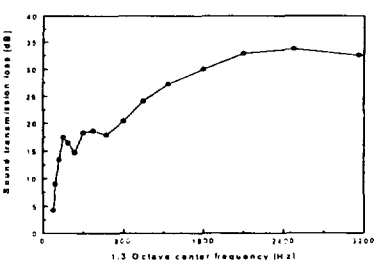

Fig. 8 Sound transmission loss of D-50-100 compound sheets.

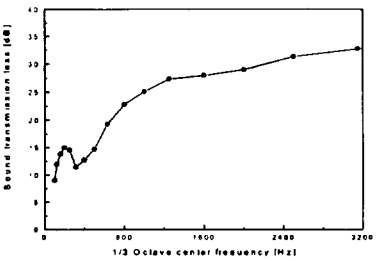

Fig. 9 Sound transmission loss of P-100-150 compound sheets.

다만 낮은 주파수영역에서 공진에 의하여 차음성능이 떨어지는 것을 볼 수 있으나, 경질의 차음재에서 나타나는 일치효과는 보이지 않는다. 성능결과에서도 확인하였듯이 본 개발품은 일반적으로 상용화되고 있는 차음재와 비교하여 두께가 매우 얇으면서도 우수한 차음성능을 갖기 때문에 적용범위가 넓고 시공이 간편할 뿐만아니라 기존 제품의 문제점인 공간낭비 및 자중문제를 해결할 수 있는 또 다른 장점을 갖는다. 특히 PVC에 특수합금 분말을 배합한 복합재료형 차음재의 연구개발에 대한 국내에서의 첫시도라는 점에서 큰 의미를 갖는다.

5. 결 론

복합재료를 이용한 시트형 차음재의 개발을 위해 차음재용 원료탐색, 성분분석, 배합설계, 제조공정 설계, 차음성능 평가 및 각종 물성시험을 수행하였으며, 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 특수합금 분말이 포함된 시트형 PVC 차음재의 특성은 출발원료의 종류, 분말의 첨가량 그리고 입자크기에 영향을 받는다. 특히 PVC 기지상 내에 첨가되는 해남 엽납석과 경주 도석의 경우는 입자크기가 미세해질수록 조밀하고 기공이 적은 미세조직을 가지며, 50㎛ 이하의 입자크기와 100~150 part의 비율이 최적의 배합비임을 알 수 있었다. 또한 기지상과 합금원료의 결합력을 향상시킬 수 있는 표면처리방법과 신장율이 높은 기지상 재료의 선택을 통하여 합금원소의 첨가량을 증가시킬 수 있을 것으로 생각된다.

2) 본 연구개발을 통하여 설계/제조된 차음재의 차음성능은 개발목표치를 크게 만족한다. 특히 본 개발품은 두께가 얇으면서도 우수한 차음성능을 갖기 때문에 적용범위가 넓고 시공이 간편할 뿐만아니라 기존 차음재의 문제점인 공간낭비 및 자중문제를 해결할 수 있는 장점을 갖는다.

3) 차음재의 물성시험(방염특성, 강도특성, 열적특성, 물리적특성)을 통하여 필요로 하는 각종 물성값을 확보하였다.

편집후기

본 연구는 산업기반기술개발사업의 일환으로 수행한 위탁개발 연구결과의 일부임을 밝히며, (주)유일산업에 감사를 표한다.

참고문헌

(1) 김선우, 이태강, 유창남, "경량칸막이 벽체의 차음특성에 관한 실험적 연구," 한국소음진동공학회 춘계학술대회 논문집, pp.466-472, 1997.

(2) 김선우, 이태강, 송민정, "중량벽체의 차음특성에 관한 실험적 연구," 한국소음진동공학회지, 제8권, 제6호, pp.1078-1085, 1998.

(3) 강현주, 김현실, 김재승, 김상렬, "이중판의 차음손실(I) : 중공 이중판," 한국소음진동공학회지, 제7권, 제6호, pp.945-952, 1997.

(4) S.Kubota,"Soundproofing and Damping Properties of Polnorbornen Compounds Filled with Large Amounts of Lead Powder," 高分子論文集, Vol.52, No.7, pp.395-401, 1995.(in Japanese)

(5) M. HECKL, "The Tenth Sir Richard Fairly Memorial Lecture: Sound Transmission in Buildings," *Journal of Sound and Vibration*, 77(2), pp.165-189, 1981

(6) W .LAURIKS, P.MEES and J.F.ALLARD, "The Acoustic Transmission Through Layered Systems," *Journal od Sound and Vibration*, 155(1), pp.125-132, 1992.

(7) K.J.Plotkin, "Tutorial Lecture on Sound Transmission Loss Through Structures and Protection of Building Occupants from Outdoor Noise," *3rd Joint Meeting : Acoustical Society of America and Japan, Honolulu Hawaii*, 2-6 December, pp.1-30, 1996.

(8) 이동훈, 강 문, 이주원, 정갑철, 권영필, "차음시트의 음향투과손실 측정에 관한 연구," 한국소음진동공학회, 추계학술대회 논문집, (발표예정), 2000.