

발포알루미늄을 이용하여 제조한 기능성 판넬 특성 연구

김재용[†] · 엄명현* · 안대현 · 심명진

충북대학교 환경공학과, *공주대학교 화학공학부
(2005년 9월 9일 접수, 2005년 12월 30일 채택)

Characteristics of the Functional Panel Made from Foamed Aluminum

Jac-Yong Kim[†], Mycong-Heon Um*, Dae-Hyun An, and Mycong-Jin Shim

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea

*Division of Chemical Engineering, Kongju National University, Cheonan 330-717, Korea

(Received September 9, 2005; accepted December 30, 2005)

본 연구에서는 폐 알루미늄을 이용하여 제조한 환경친화적인 발포 알루미늄 기능성 판넬의 특성을 조사하였고, 중점 공정, 교반 혼합 공정, 발포 공정, 냉각 공정을 거쳐 침색 공정에 의한 제품 품질의 고급화를 추구하였다. 시험은 크게 세 가지로 구분하여 음향투과 손실 시험, 흡음율 측정 시험, 그리고 발포작업조건 및 스크랩 혼합시험을 시행하였다. 그 결과 폐 알루미늄을 이용해 만든 기능성 판넬은 초경량성이며 방음과 차음, 유해전자파 차폐에 탁월하고 약 2.2 kcal/mh^{°C} 정도로 낮은 열전도율 및 뛰어난 단열효과를 보이는 것으로 나타났다.

In this work, the properties of environmentally friendly functional panel made from waste aluminum were investigated. Product quality enhancement was pursued through an improved viscosity process, a mixing process by agitating, a foaming process, a cooling process, and a color addition process. An acoustic transmission attenuation test, a sound absorption rate measurement test, and a foaming condition and scrap mixing test were implemented. As a result, the functional panel made from waste aluminum was ultra lightweight and had excellent properties such as soundproof, sound interception, and shielding harmful electromagnetic waves. Also, the functional panel showed low thermal conductivity (about 2.2 kcal/mh) and excellent heat-insulating property.

Keywords: environmental friendly functional panel, foamed aluminum

1. 서 론

문화수준의 향상으로 시민들의 의식수준 역시 높아짐에 따라 건축물의 실내환경과 생활주변의 공장, 도로, 철도, 항공기 및 각종 생활기기 등에 의한 소음공해에 민감하게 되어 이에 따른 쾌적한 음향환경에 대한 관심이 증대되고 있다. 일반적으로 지금까지 흡음재로 사용되고 있는 유기 고분자계 제품과 석면은 환경적으로 그 유해함이 입증된바 있으며, 제품 특성으로도 진동, 풍압, 충격 등으로 인해 쉽게 부서지고, 분진이 발생하거나, 무거우며 내열성이 없다. 또한 공기 중의 수분을 흡수하여 흡음특성이 저하되고 시공이 어려워 다른 보강재와의 조합에 의한 복합구조를 가지는 단점을 안고 있으며 일부 제품은 분진이 쉽게 발생하여 인체에 유해한 발암물질로 분류되어 산업 폐기물로서 폐기하는데 많은 문제점을 안고 있다[1,2]. 기존의 흡음재로 쓰이고 있는 판넬들이 안고 있는 내열성, 내구성, 흡습성 및 경량성 등에 대한 단점을 보완하고 보다 환경친화적이며 인체에 무해한 고기능성의 경량 판넬 개발이 절실히 요구된다. 이에 본 연구에서는

초 경량성, 흡음성, 내열성, 용이한 시공성과 가공성, 재활용성 등이 가능한 소재인 발포알루미늄을 이용한 환경친화적 기능성 판넬을 개발하고자 하였다[3,4]. 발포 알루미늄을 이용한 경량 판넬은 기존의 방음재보다 내구성·내열성이 뛰어나 소음분야에서 흡음방음재로 산업분야에서는 복합 판넬로도 사용될 수 있을 뿐만 아니라 초경량이므로 특히 경량에 불연성이 요구되는 분야에 대해서는 절대적으로 사용될 것이고 화재시에 유해가스유출이 없어 인명피해를 줄이는데 기여할 것이다. 각종 화재나 붕괴사고 등에서 보았듯이 단열재, 방음재를 그라스울이나 스티로폼, 석면 같은 재료를 사용하였을 경우에는 분진 등이 호흡기나 피부에 악영향을 미치고 유해가스나 연기 등으로 구조작업도 늦어질 뿐만 아니라 질식사하는 등의 인명피해를 막기도 어렵다는 사회적 문제 때문이라도 발포알루미늄과 같은 불연재의 사용은 꼭 필요하다. 발포알루미늄의 개발은 소음에 의한 환경공해, 가연재 사용에 따른 화재를 예방할 수도 있다는 장점과 더불어 경량성으로 인하여 건축, 자동차, 비행기, 철도, 선박 등의 수송기기에서도 사용가능하며 100% 재활용이 가능하므로 폐기물을 유발할 위험도 없어 사회적으로도 환경공해를 유발하지 않으므로 청정산업을 주도할 수 있을 것으로 기대된다[5]. 따라서 본 연구에서는 침색 공정에 의한 제

[†] 주 저자(e-mail: jykim4@korea.com)

품 품질의 고급화 및 폐 알루미늄을 이용한 환경친화형인 발포알루미늄 기능성 판넬 개발과 판넬의 흡음률, 음향투과 손실에 중점을 두어 실험을 시행하였다.

2. 이론적 고찰

2.1. 제조원리

발포금속제조 방법은 금속분말과 발포제를 혼합성형 소결하는 분말야금법과 용융 금속에 적당한 점성과 표면장력 증진능을 부여한 후 증점제와 발포제를 투입하여 잉고트형이나 연속주조판재의 스폰지형 금속 다공질 고품체를 제조하는 주조법이 핵심사항으로서, 기능성 금속재료 분야에서 신소재 첨단 기술로 구조에 의한 제진, 방음능과 기본소재의 점, 탄성에 의한 흡음, 방음, 차음, 재진, 내열, 단열성 등 고기능성, 고부가가치의 특징을 가지고 있고 적층 발포의 다공질 제조와 절단 기능성 부여 등의 내용으로 구성되어 있다[6,7]. 발포알루미늄의 제조공정은 알루미늄을 용융하는 용융공정과 용융된 용탕에 일정한 점성을 부여하는 증점 공정, 용탕내에 가스기포를 발생시키기 위해 금속성 발포제를 첨가 균일하게 분산시키는 교반 혼합공정, 발생된 기포 가스를 옹고시켜 독립된 셀 구조(스폰지 형상)를 갖도록 만드는 발포 공정, 발포된 금속을 안정적 균일성을 유지하고 품질의 확보를 위한 냉각공정 등으로 요약되며 발포금속의 제조 시 주요 요소는 발포금속제를 통한 기포발생의 균일성과 교반 분산 확산을 통하여 발포제의 수소분해 시간이 적어야 하고 발포제 투입과 동시 수소가스가 기포를 형성하므로 고속 교반을 통하여 용탕 내 기포발생을 최대한 분산시켜야 한다[8-10].

2.2. 발포알루미늄의 흡음구조 및 원리

발포알루미늄은 독립구조의 집합이지만 이 격막에 압축 가공 등의 수단에 의해 미세한 균열을 발생시켜서 기포가 서로 통하도록 하여 통기성 다공성체로서 높은 흡음효과를 나타낸다. 통기성 발포알루미늄에 셀 구조의 파면과의 마찰로 음파가 열에너지로 변환되어 다공질 재료 특유의 흡음효과, 공명흡음 효과 등이 있다[11]. 또한 강벽 사이의 공기층의 두께 등의 선택으로 광범위한 주파수역에 높은 흡음효과를 나타낸다. 그리고 발포알루미늄은 종래의 곤란한 저주파지역에서 흡음효과가 뛰어나므로 일반적인 소음대책으로 활용이 가능하다[9].

2.3. 발포알루미늄의 기계적 특성

발포알루미늄은 기포가 입체적으로 가장 안정한 다면체를 형성하

고 있기 때문에 방향성이 없고 강성이 높다. 따라서 발포 알루미늄 판 자체로 흡음판과 벽 재료로서 사용이 뛰어나고 새로운 금속판, 목판, 플라스틱 판 등을 발포 알루미늄 판의 양면에 접하거나 또는 FRP가공을 하여 샌드위치 판으로 겹치면 압축, 굽힘 강성이 훨씬 높아져 바닥재, 벽재, 천장재 등 구조재료도 사용된다.

2.4. 발포알루미늄의 열적특성

발포알루미늄은 불연재료로 사용 가능하다. 초경량성에 불연성재료로서도 주목된다. 또 열전도율은 2.2 kcal/mh²°C로 낮아 대리석벽과 같은 단열성이 있고, 한냉지에 있어 콘크리트 구조물, 특히 경량콘크리트를 사용하는 경우 침투수의 동결에 의한 파괴가 문제시 되고 있는데 발포알루미늄은 동력시험결과 8 h 수중침적 -20 °C, 15 h 냉동을 2회 반복해서 깨어지거나 그 밖의 이상한 점이 발견되지 않았다. 이 결과로 한냉지에 있어서 건재로 사용이 유력시된다.

2.5. 발포알루미늄의 전자파 차폐특성

전자기기의 발달은 최근 전자파 장애 대책이 과제가 되고 있는데 금속판, 도전성 도료 및 도장, 플라스틱 도금 등 많은 전자파 실드체가 개발되고 있다. 그 중 발포알루미늄의 전자파 실드의 특성은 5 mm 두께에서 80 dB의 투과손실이 생기므로 전자파 차폐특성이 뛰어난 것으로 평가되고 있다. 따라서 전자파 실드 및 전자파의 광채용으로 사용 될 수 있다. 또한 경량성, 흡음성, 단열 특성 등 다기능 재료로서의 효과를 만족시키는 것이 가능하다.

3. 실험재료 및 방법

시험은 크게 세 가지로 구분하였다. 음향투과손실 시험, 흡음을 측정 시험 그리고, 발포작업조건 및 스크랩 혼합 시험을 하였다.

3.1. 발포작업조건 및 스크랩 혼합 시험

이 시험의 조건은 볼드 규격은 1250 mm×550 mm×210 mm이고, 우선 알루미늄 발포시 최적조건을 알아내기 위해서 순 알루미늄의 양을 50 kg으로 고정하고 증점제 및 발포제의 양과 투입시간을 변화시켜가며 시험하였다. 알루미늄의 단가가 비싸기 때문에 경제성을 갖추기 위해서 재생 알루미늄과 순 알루미늄의 비율을 변화시켜가면서 증점제와 발포제양 및 투입시간도 변화시키며 시험하였고 경제성 있는 발포알루미늄의 생성조건을 알아보고자 하였다. 발포작업조건 및 스크랩 혼합시험의 조건은 Table 1, Table 2에 나타내었다.

Table 1. Foaming Condition

구분	Al량(kg)	증점제			발포제			Al파우더량(g)
		량(g)	속도(rpm)	시간(min)	량(g)	속도(rpm)	시간(min)	
1	50	900	150	8	800	400	50	800
2	50	850	150	9	800	450	55	800
3	50	800	150	10	800	500	45	800
4	50	750	150	11	800	550	40	800
5	50	700	150	12	800	600	20	800
6	50	750	150	10	750	650	25	800
7	50	750	250	10	700	400	45	800
8	50	750	300	10	700	400	45	800
9	50	750	350	10	700	400	45	800

Table 2. Scrap Mixing Test Condition

구분	Al량(kg)		증점제			발포제			Al과우너량 (g)
	재생 Al	순 Al	량(g)	속도(rpm)	시간(min)	량(g)	속도(rpm)	시간(sec)	
1	20	30	800	150	10	800	400	50	800
	20	30	800	200	11	800	450	55	800
	20	30	700	250	10	700	500	45	700
2	15	35	750	150	10	750	550	40	750
	15	35	700	250	10	700	600	20	700
	15	35	750	200	11	700	650	25	750
3	10	40	750	250	10	750	400	45	700
	10	40	750	250	11	700	400	45	700
	10	40	750	300	10	700	400	45	700
4	50	0	700	150	10	700	400	30	700
	50	0	750	200	9	750	450	35	750
	50	0	650	250	11	700	500	40	700

3.2. 음향투과손실 시험

이 시험방법은 KSF2805에 의거하여 음원용의 제 2잔향실과 수음용의 제 1 잔향실 사이의 시료 설치용개구부에 시료를 설치하고 각각의 평균음압레벨 및 흡음력을 측정하여 시료의 음향투과 손실을 측정하였다. 시험체 명은 발포 알루미늄 판 125 t이고, 단위 판넬의 길이 2000 mm×폭 500 mm×두께 125 mm이다. 구성은 정면-발포알루미늄 9 mm, 측면-강판 1.6 mm, 후면-강판 1.6 mm이다. 시험체의 설치는 시험체를 유효개구부 가로 3.0 m×세로 3.5 m에 발포 알루미늄 판넬의 단위 판넬을 중방향으로 설치하여 시험체를 완성하고 조우부에 고정용 형강(100×100×13 mm)으로 시험체를 고정시킨 후 시험체와 시험체들간 틈새는 실리콘으로 밀실 처리하였다. 측정조건은 다음과 같다. 잔향실의 용적은 음원실-249 m³, 수음실-325 m³이다. 음원은 백색잡음이고, 측정시 온도는 9.1 °C, 습도는 58.5%였다. 시험검사에 사용된 장비는 Real Time Analyzer (SA-28, RION, Japan), Microphone (Modal Shop Inc., U.S.A), Signal Conditioner Amplifier (PCB, U.S.A), Sound Source (GDB95 - 01 dB, France)을 사용하였다.

3.3. 흡음을 측정 시험

이 시험방법은 KSF2805에 의거하여 제 1잔향실내에 시료를 설치한 상태와 설치하지 않은 상태 각각의 잔향시간을 측정한 후 아래에 나타낸 식에 의하여 시료의 흡음율을 산출하였다[12].

$$a = \frac{55.3V}{cS} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$$

- 여기서, A : 잔향실법 흡음율
- T₁ : 시료를 넣은 상태에 있어서의 잔향시간(sec)
- T₂ : 시료를 넣지 않은 상태에 있어서의 잔향시간(sec)
- V : 잔향실 용적(m³)
- S : 시료면적(m²)
- c : 공기 중의 음속(m/s), c = 331.5 + 0.61 t, t : 공기의 온도(°C)

시험체는 음향투과손실 시험과 같으며, 시험체의 설치는 제 1잔향실 바닥면 중앙에 흡음형 방음 판넬의 단위 판넬을 12 m²의 면적이 되도록 바닥면에 밀착시켜 설치한다. 측정조건은 잔향실의 용적 325

m³, 시료면적 12 m², 음원은 백색잡음, 측정 시 온도는 7.0 °C, 습도는 44.2%였다. 시험검사에 사용된 장비는 음향투과손실 시험에서와 같다.

4. 결과 및 고찰

발포알루미늄에 대한 음향투과손실험, 흡음을 측정시험, 발포작업조건 및 스크랩 혼합 시험조건 결과는 다음과 같다.

4.1. 발포작업조건 및 스크랩 혼합 시험

4.1.1. 발포제 첨가량에 따른 발포현상

본 시험은 순 알루미늄 량을 50 kg으로 고정시킨 후 증점제 및 발포제의 량, 속도, 투입 시간 등의 변화를 주면서 최적의 발포작업조건을 시험한 것이다.

증점제의 첨가량이 적어 용탕의 점도가 부족하면 발포가스의 분산이 많아서 충분히 발포되지 않으며, 증점제의 첨가량이 많지 않으나 용탕의 온도가 낮아 점성이 높아지면 기포가 편재되어 발포제의 분산이 악화된다. 그리고 금속 칼슘은 알루미늄을 포화하는 성질이 있기 때문에 첨가제의 양을 늘리는 것을 피하여야 한다. 알루미늄을 용해한 후에 용탕의 점도를 향상시키기 위해 금속 칼슘을 첨가하여 용탕내로 끌고루 분산되도록 교반한 후에 용탕이 충분한 점도가 생기게 되면 발포제나 발포 가스를 첨가한 후에 교반을 하면서 분출되는 가스가 용탕내에 끌고루 분산되게 하면서 응고시켜 고상과 기공의 혼합상의 발포알루미늄을 제조하였다. 이때 용탕은 유동성과 점성이 적절히 조합되어야만 균일하고 적당한 셀 크기를 갖는 발포알루미늄을 제조할 수 있다. 점성은 용탕내에서 발생된 가스가 외부로 방출되는 시간과 양을 억제하는 효과는 있으나 점성이 너무 크면 용탕내에 형성된 가스가 용탕내로 끌고루 분산할 수 없으므로 적당한 유동성이 확보되어야 한다[13,14]. 알루미늄 용탕중에 합금을 첨가하면 첨가량에 따라 교반 저항이 점진적으로 증가한다. 용탕의 교반저항은 시간에 따라 증가하고 첨가량이 많아지면 빠르게 증가된다. 알루미늄 용탕이 교반에 의해 점도가 증가하는 것은 용탕표면에 생성된 산화물이 교반력에 의해 용탕내에 혼입, 분산되기 때문이다[12]. 미립자를 단시간 내에 용탕중에 분산시키는 것이 매우 중요하며, 미립자의 분산시간을 단축하게 되면 고가의 발포제의 감소는 커다란 경제적 이익을 발생한다.

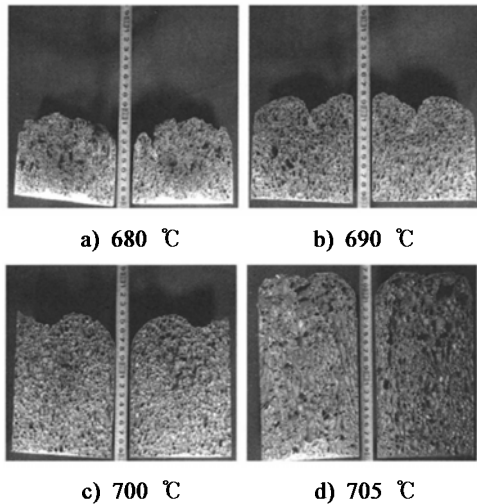


Figure 1. Macrostructure of Variation of melting temperature.

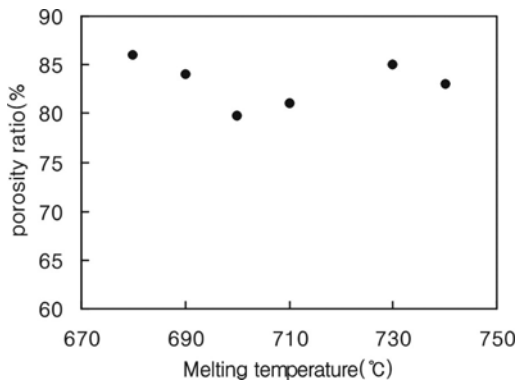


Figure 2. The relation of porosity ratio and melting temperature

Table 1의 조건1은 size 불량으로 비규격 제품이 나왔고, 조건2는 중점 과다로 인한 텀팅 불량과 사이즈 불량이 나왔으며, 조건3은 셀 (cell)사이즈 불량, 조건4는 셀 사이즈 분포가 고르지 못했다. 조건5는 셀 상하부 제품의 차이가 크고 하부 셀은 비교적 상태가 양호했고, 조건6은 셀 상태가 비교적 큰 것으로 나왔다. 조건7은 셀 상태가 비교적 양호하였고, 조건8은 셀 상태가 고루 분포됨을 보였으며, 조건9는 셀 상태는 양호하였으나, 상하 편차가 나타남을 보였다. Table 2 시험은 재생 알루미늄을 이용해서 생산단가를 낮추기 위해 순 알루미늄과 재생 알루미늄의 비율을 바꿔가며, 최적조건을 알아내기 위한 시험이다. 재생 알루미늄은 캔 뚜껑 및 박판 스크랩을 이용하였다. 순 알루미늄과 재생 알루미늄의 비율을 4단계로 나눴으며, 단계별로 중점체와 발포제의 량, 속도, 투입시간 등을 변화시켜가면서 시험하였다. Table 2를 보면, 재생 알루미늄의 함유량이 많을수록 취성(부석부석함)이 많아지고 색상이 어두워지는 경향이 발생하였다. 또한 중점 상태가 높아지는 것으로 나타났다. 재생 알루미늄과 순 알루미늄의 혼합 발포시에도 셀 상태는 비교적 양호함을 보였다.

4.1.2. 용융 온도에 따른 발포현상

용탕의 용융온도에 따라 점성의 차이를 보이나, 용탕의 용융온도가 낮을때 최적의 중점교반 시간은 그만큼 짧아진다[15]. Figure 1, Figure 2는 기공율과 용융온도와의 관계를 나타낸 것이다.

보온시간이 너무 낮으면 발포제가 충분하게 반응할 시간적 여유를

Table 3. Acoustic Transmission Attenuation test of Foamed Aluminum

시험 명		음향투과손실시험	
시험체 명	발포 알루미늄 판 125 t	시험조건	9.1 °C, 58.5%
주파수(Hz)	음향투과손실(dB)	주파수(Hz)	음향투과손실(dB)
100	19.6	800	39.7
125	19.2	1000	41.6
160	25.3	1250	42.7
200	24.2	1600	43.2
250	27.5	2000	44.5
315	29.8	2500	45.1
400	32.9	3150	46.2
500	34.5	4000	49.1
630	37.6	5000	51.1

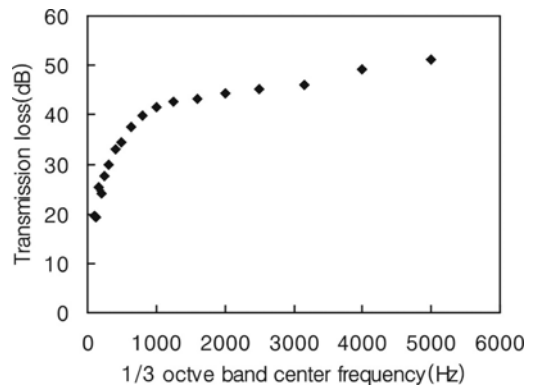


Figure 3. Acoustic transmission attenuation test of foamed aluminum

Table 4. Sound Absorption Rate Measurement Test of Foamed Aluminum

시험 명		흡음율 측정시험	
시험체명	발포 알루미늄판 125 t	시험 조건	7.0 °C, 44.2%
주파수(Hz)	흡음율	주파수 (Hz)	흡음율
100	0.34	800	0.57
125	0.5	1000	0.49
160	1.04	1250	0.46
200	1.04	1600	0.54
250	1.09	2000	0.58
315	1	2500	0.58
400	0.93	3150	0.58
500	0.76	4000	0.49
630	0.67	5000	0.26

주지 못하기 때문에 발포높이가 낮아지고 기포율도 낮아진다. 용융 온도는 발포제 중점제 첨가시 교반속도 점도와 관련되고 교반속도에 영향을 미치는 것으로 파악 된다. 본 연구의 실험결과로서 690 °C ~ 700 °C 사이가 가장 적당한 것으로 나왔다. 이 결과는 용융온도가 너무 낮으면 발포 높이가 적게 나오고 용융온도가 너무 높으면 국부적으로 조대한 크기의 기공이 생성되었다. 용탕의 표면장력의 증가는 용탕내의 기공들의 형상이 구형에 가까워지며, 점성의 증가는 용탕내의 기공들의 병합이 자유로워 셀의 크기가 증가하는 것에 기인한다. 그리고 온도가 감소하면 용탕 표면의 응고가 먼저 일어나 drainage에 의한 셀의 찌그러짐 현상이 나타남을 알 수 있다.

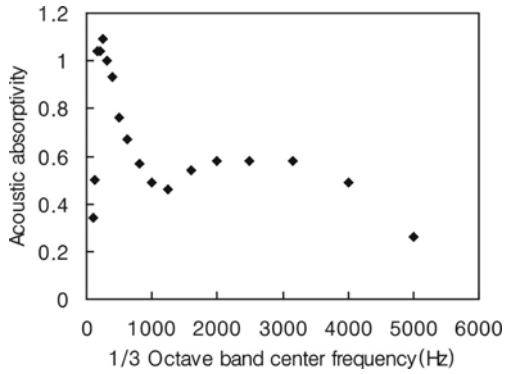


Figure 4. Sound absorption rate measurement test of foamed aluminum.

4.2. 음향투과손실 시험결과

환경부 고시 방음벽의 성능 및 설치기준에 관한 소음진동 규제법에 의하면 주파수 500 Hz 이상은 음향투과 손실이 25 dB 이상, 1000 Hz 이상은 30 dB 이상이 되어야 하는데 발포 알루미늄 음향투과손실 측정결과 이를 모두 만족하는 것으로 나타났다.

4.3. 흡음율 측정 시험결과

소음 진동법에 의하면 1/3옥타브대역으로 측정된 중심 주파수 영역인 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz의 흡음률 평균치가 70% 이상이 되어야 하는데 흡음률 측정시험결과 73% $((1.19 + 0.76 + 0.49 + 0.58) / 4 = 0.73)$ 로 우수한 흡음률을 나타내었다.

5. 결 론

발포알루미늄을 이용하여 제조한 기능성 판넬 개발에 관한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 용융온도가 너무 낮으면 발포 높이가 적게 나오고, 용융온도가 너무 높으면 국부적으로 조대한 크기의 기공이 생기는데, 본 실험에서는 690 °C ~ 700 °C에서 균일한 기공크기를 나타내었다.
- 2) 음향투과손실은 500 Hz 일때 30 dB, 1000 Hz 일때 42 dB로 측정되었고, 이는 환경부고시 소음진동규제법의 500 Hz(25 dB 이상), 1000 Hz(30 dB 이상)를 모두 만족시키는 것으로 나타났다.
- 3) 1/3옥타브 대역에서 각각의 중심주파수의 평균흡음율은 73%로 나타났다.

이는 소음진동법의 70% 이상을 상회하므로 흡음율이 우수하다 할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2005년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었음. 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. W. Jiejun, L. Chenggong, W. Dianbin, and G. Manchang, *Composites Science and Technology*, **63**, 569 (2003).
2. B. Y. Heo, Y. S. Eon and S. Y. Kim, *J. Kor. Inst. Met. Mater.*, **17** (2004).
3. S. Y. Kim, B. Y. Heo, C. G. Kwon, D. G. An, and S. H. Park, *J. Kor. Inst. Met. Mater.*, **40**, 910 (2002).
4. K. Ishizaki, S. Komameni, and M. Nanko, *Porous Materials*, **1**, 1 (1998).
5. S. G. Kim, T. W. Hong, S. Y. Jo and Y. G. Kim, *J. Kor. Foundrymens Soc.*, **18**, 5, 10, 419 (1998).
6. J. Banhart, J. Baumeister, and M. Weber, *Aluminium*, **70**, 209 (1994).
7. U.S. Patent, 3,839 (1974).
8. P. H. Tbonton and C. L. Magee, *Metall. Trans, A*, **6**, 1253 (1975).
9. B. Y. Heo, *Journal of Materials Processing Technology Symposium*, 87 (2000).
10. K. D. Woo, H. S. Na, S. W. Kim, T. Sato, and A. Kamio: *Metals and Materials*, **7**, 613 (2001).
11. Y. K. Kang, S. M. Kim, and S. S. Cho, *J. Kor. Inst. Met. Meter.*, **31**, 1221 (1993).
12. ISO 354-85, Measurement of sound absorption in a reverberation room (1997).
13. K. D. Woo, H. S. Na, S. W. Kim, T. Sato, and A. Kamio, *Metals and Materials*, **7**, 613 (2001).
14. B. Y. Hur, S. H. Cho, and K. B. Kim, *Proceedings of 2001 Fall Conference, KIMST*, **1**, 246 (2001).
15. K. Hashi, K. Ishikawa, and K. Aoki, *Metals and Materials*, **7**, 175 (2001).