

下水슬러지 焼却滓를 사용한 輕量材料 製造研究[†]

*李 華 永

韓國科學技術研究院 二次電池研究中心

A Study on the Preparation of Lightweight Materials with Sewage Sludge Ash[†]

*Hwa-Young Lee

Battery Research Center, Korea Institute of Science & Technology, P. O. Box 131, Cheongryang, Seoul 130-650, Korea

요 약

본 연구에서는 하수슬러지 소각재를 원료로 사용한 다공성 경량재료의 제조 및 물성측정 실험을 수행하였다. 경량충진재로써 perlite와 silica sphere의 2종류 경량물질을 각각 사용하였으며, 무기바인더로써 벤토나이트를 첨가하여 1,000°C에서 소성하는 방법으로 경량재료를 제조하였다. 제조한 시편은 밀도, 압축강도, 열전도도 및 흡음율을 측정하여 원료 조성 및 제조 조건에 따른 각각의 물성변화를 조사하였다. 실험결과 perlite를 경량충진재로 사용한 시편의 밀도는 1.23~1.37g/cm³, 압축강도는 242.3~370.5 kg/cm²로 나타났으며, silica sphere를 사용한 경우는 perlite에 비해 밀도가 낮고 압축강도가 100 kg/cm² 이하인 것으로 나타났다. 또한, 경량재료의 열전도도는 원료 조성에 따라 0.3~0.5 W/m²K의 수치를 보여 일반 콘크리트보다 단열효과가 매우 우수한 것으로 나타났다.

주제어 : 경량재료, 하수슬러지 소각재, 밀도, 압축강도, 흡음율

Abstract

The preparation of porous lightweight materials as well as the measurement of physical properties has been performed by using SSA(sewage sludge ash) as the raw material. For this aim, two types of lightweight filler, that is, perlite and silica sphere were employed respectively and bentonite was also used as an inorganic binder. The properties of lightweight specimen calcined at 1,000 were measured in terms of density, compressive strength, thermal conductivity and sound absorption to examine the effect of material composition as well as the preparation condition on the properties of lightweight material. As a result, the density of specimen prepared with perlite was ranged from 1.23 to 1.37g/cm³ and the compressive strength was ranged from 242.3 to 370.5 kg/cm². In case of specimen prepared with silica sphere, it was found that the compressive strength was less than 100 kg/cm² even though density was lower than that of specimen with perlite. As far as the thermal conductivity of specimen was concerned, it was ranged from 0.3 to 0.5W/m²K depending on material composition so that the insulation effect was superior to conventional concrete.

Key words : lightweight material, SSA, density, compressive strength, sound absorption

1. 서 론

최근 들어 국민 생활수준이 향상되고 각 지방자치체의 하수 처리장이 신규 보급 혹은 증설됨에 따라서 하수슬러지 발생량은 해마다 꾸준히 증가하고 있으며, 2006년도에는 연간 2백만톤 이상의 하수슬러지가 발생

한 것으로 보고되고 있다. 하수슬러지의 특성은 함수율이 높고 가연성 혹은 유기성분의 함량이 높다. 우리나라의 경우 하수슬러지의 처리를 대부분 종래의 처리방법에 의존하고 있으며, 매립처분 30%, 해양투기 45%, 재활용 5% 그리고 소각처리 20%의 비율로 처리하는 것으로 알려져 있다.

미국의 경우 하수슬러지의 처분유형을 살펴보면 약 36%가 농업지대, 목초지대 및 복원용으로 재활용되고 있으며, 해양투기는 전면 금지되어 있다. 유럽 국가들의

[†] 2008년 2월 1일 접수, 2008년 7월 11일 수리

*E-mail: hylee@kist.re.kr

Table 1. Chemical composition of sewage sludge ash used in the study. (unit: wt%)

Element	Na	Mg	Al	Si	Ca	Fe	C
Fly Ash	10.8	3.02	9.78	17.0	8.06	3.20	0.29
Bottom Ash	6.93	3.45	8.30	19.3	7.09	6.92	0.01

경우 평균 재이용 비율은 36.4%로써 대부분 농경지 및 토양에서 재활용되고 있으며, 우리나라와 같이 육상매립 기준이 점차 강화되고 있는 추세이기 때문에 매립비율은 상당히 감소하고 있다. 한편, 일본의 경우에는 퇴비화 등을 통한 하수슬러지 재활용 비율이 약 25% 이상이며, 육상매립과 해양투기는 크게 감소하고 있는 추세이다.

우리나라의 경우에도 2012년부터 발효되는 런던협약(London Convention)에 의거 해양투기가 전면 금지됨에 따라 하수슬러지의 효과적 처분이 심각하게 대두되고 있는 실정이다. 육상매립과 해양투기를 대체하기 위한 방안으로는 하수슬러지를 소각 혹은 재활용하는 방법이 있으나, 국내 실정상 농경지 등에 직접 재활용하는 것은 한계가 있기 때문에 앞으로는 불가피하게 소각 처리를 확대하여야 할 것으로 생각된다. 하수슬러지 소각처리시 대두되는 문제는 일반 생활폐기물 혹은 산업폐기물 소각에서와 마찬가지로 발생하는 소각재¹⁾의 효과적 처리라 할 수 있다. 하수슬러지의 경우 소각재 발생량은 건조 슬러지를 기준으로 볼 때 적게는 대략 40%에서부터 많게는 50% 이상의 소각재가 발생하는 것으로 알려져 있다. 하수슬러지 소각재는 일반 생활폐기물 소각재²⁻⁶⁾와는 달리 중금속 함량이나 용출량이 그다지 높지 않고, 특히 입도분포 및 화학적 조성 등에 있어서 비교적 균일한 특징을 가지고 있기 때문에 도로공사용 기반재나 인공골재로의 재활용 가능성이 매우 높다 하겠다. 이미 선진국에서는 하수슬러지 소각재를 활용한 각종 경량골재⁷⁻¹²⁾의 제품화가 이루어져 있는 상태로써, 우리나라도 이에 대한 연구 및 상용화가 시급히 요구되고 있다.

본 연구에서는 국내 하수슬러지 소각재의 재활용 방안으로써 다공성 경량재료로의 제조 및 이의 밀도, 압축강도, 열전도도 및 흡음을 특성을 조사하여, 향후 급증할 것으로 예상되는 하수슬러지 소각재의 효과적 재활용 방안을 제시하고자 하였다.

2. 시료 및 실험 방법

2.1. 하수슬러지 소각재 및 경량충진재

본 실험에서 경량재료 제조를 목적으로 사용한 하수

Table 2. Physical properties of lightweight filler used in the study.

	GP-1	SMF-100
Bulk Density(g/ml)	0.08	0.16
Specific Gravity(g/ml)	0.18	0.70
Particle Size(μm)	50~300	60~300

슬러지 소각재는 국내 A 하수슬러지 소각장에서 발생하는 바닥재 및 비산재이다. A 소각장의 소각방식은 유동상 방식(fluidized bed type)의 소각로로써 바닥재와 비산재의 발생비율이 5:95로 일반 생활폐기물의 경우와는 다른 것이 특징이며, 특히 산성 배기가스 중화를 위해 일반적으로 사용하는 slaked lime 대신 가성소다와 황성탄을 사용하고 있다.

Table 1은 본 연구에서 사용한 하수슬러지 소각재의 종류별 주요성분 분석결과를 나타낸 것이다. Table 1에서 보는 것처럼 하수슬러지 소각재의 주요성분은 바닥재와 비산재 모두 Al 및 Si, Ca, Fe 등인 것으로 나타났다. 이들 원소는 대부분 응집제 혹은 토사에서 기인된 것으로 사료된다.

주원료인 하수슬러지 소각재와 함께 본 연구에서는 경량재료의 밀도를 낮추기 위한 목적으로 다공성의 경량충진재(lightweight filler)를 사용하였다. 본 실험에서 사용한 경량충진재료는 국내 S사에서 공급받은 perlite계(상품명: GP-1)와 silica sphere계(상품명: SMF-100)의 두 가지 원료를 사용하였으며, Table 2 및 Fig. 1은 경량충진재인 GP-1과 SMF-100에 대한 기본물성과 SEM 사진을 나타낸 것이다.

이들 경량충진재의 입도 및 비중은 Table 2에 나타난 것처럼 수십 μm에서 수백 μm의 입도 범위를 가지고 있고, bulk density가 0.08~0.16g/ml 정도로 상당히 작은 특징을 보이고 있다. 한편, Fig. 1에서 보는 것처럼 팽창 perlite계인 GP-1은 증간팽창 모습이 뚜렷이 관찰되고 있으며, 입도 범위에 있어서 대체적으로 측정결과와 일치하는 것을 확인할 수 있다. 전체적으로는 구형에 가까운 입자 모양과 내부에 개구공을 많이 포함한 형태를 보인다. SMF-100은 석탄회 부산물인 silica sphere로써, 사진에서 보는 것처럼 완전한 구형의 입자

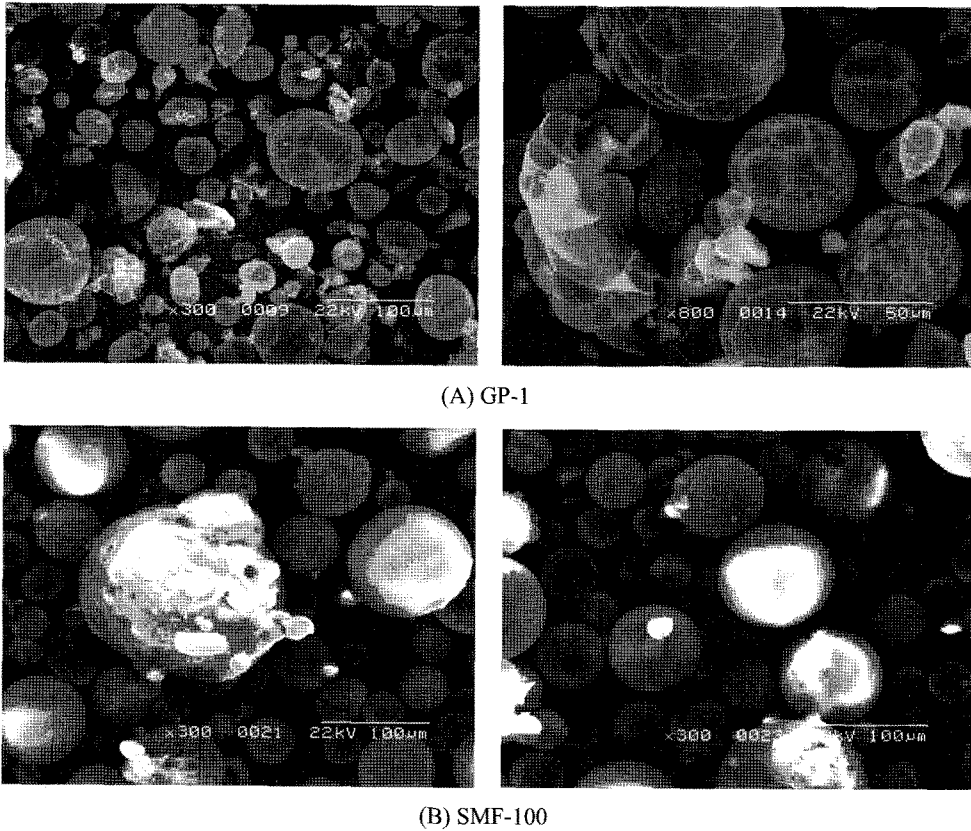


Fig. 1. SEM photographs of lightweight filler used in the study.

모양을 보여 주고 있으며, 입자 내부가 비어있기 때문에 밀도가 매우 작은 특징을 가지고 있다.

2.2. 실험 방법

하수슬러지 소각재를 원료로 사용한 경량재료 제조실험은 주원료인 하수슬러지 소각재에 경량충진재와 무기 바인더인 벤토나이트를 혼합하고 3% CMC (carboxymethylcellulose) 용액으로 반죽 및 성형하였다. 본 실험에서 사용한 경량충진재는 앞에서 설명한 GP-1과 SMF-100의 두 가지 원료를 사용하였으며, 벤토나이트는 미국 Wyoming산 Na-bentonite를 사용하였다. 직경 30 mm, 길이 20~25 mm의 pellet으로 성형한 경량재료는 105°C에서 건조한 다음 1,000°C에서 고온 소성처리 하였다. 한편, 본 실험에서 제조한 경량재료의 물성은 우선 시편비중과 압축강도를 측정하고, 이와 함께 열전도도(Mathis Instrument Co., Model TC-30)와 흡음율을 측정하여 원료조성별 및 제조조건에 따른 영향을 조

Table 3. Equipments for measurement of sound absorption.

No.	Equipment	Model	Maker
1	Multi-Ch. Analyzer	3560D	B & K
2	Power Amplifier	2706	B & K
3	Microphone Amplifier	5935	B & K
4	Microphone Calibrator	4226	B & K
5	Microphone	4187	B & K
6	Two-Microphone Impedance	4206	B & K

사하였다. 열전도도 측정 방법은 Fig. 2에 나타난 모식도와 같이 일정 규격으로 제조한 시편을 센서위에 올려 놓고 600 g의 무게를 시편위에 덮은 다음 아래쪽에서 가열하여 시편의 열전도도를 측정하였다. 측정 온도는 29.8°C에서 5번 측정하여 평균값을 산출하였다. 시편의 흡음율 측정은 KS F 2814-2:2002에 의거 음향관법으로 측정하였으며, Table 3은 이의 측정에 사용한 장비

를 나타낸 것이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 경량재료의 비중 및 압축강도

Table 4와 Table 5는 하수슬러지 소각재를 원료로 사용하여 제조한 경량재료의 밀도 및 압축강도를 측정 한 결과이다. Table 4는 무기 바인더인 벤토나이트를 10wt%로 고정하고 비산재와 경량충진재인 GP-1의 첨가율을 변화하며 1,000 소성을 통하여 제조한 시료의 밀도와 압축강도를 나타낸 것이다. 비산재 첨가율 30~70 wt% 범위에서 밀도는 1.23~1.37 g/cm³, 압축강도는 242.3~370.5 kg/cm²의 값을 보인다. 또한, 경량충진재로써 silica sphere계인 SMF-100을 사용한 경우에서 의 경량재료의 밀도 및 압축강도는 Table 5에서 보는 것처럼, 비산재 첨가율 30~70 wt% 범위에서 밀도는 0.55~1.06 g/cm³, 압축강도는 43.2~98.4 kg/cm²의 값을 보인다.

GP-1을 사용한 경우 하수슬러지 소각재 첨가량이 증가할수록 상대적으로 경량충진재 첨가량이 줄어들면서 밀도는 약간씩 증가하는 경향을 보이나 압축강도는 일정한 경향이 관찰되지는 않았다. Perlite계인 GP-1을 경량충진재로 사용하였을 때의 특징은 고온소성할 경우 시편이 크게 수축한다는 점으로서, 이것은 GP-1의 입자

가 층간 팽창 구조로 되어 있어 하수슬러지 소각재 및 벤토나이트와 혼합하여 소성하게 되면 입자끼리 단단히 뭉치면서 초기에 가지고 있던 공극이 크게 줄어들기 때문인 것으로 사료된다. 따라서, 소성후 시편 밀도는 성형시 밀도에 비해 크게 증가하는 반면 상대적으로 압축강도는 급격히 증가하는 현상이 나타나게 된다. 본 실험 결과에서도 경량재료의 밀도는 하수슬러지 소각재 첨가율 30~70 wt%에서 1.23~1.37 g/cm³로 나타나 성형시에 비해서는 크게 증가하였으나, 반면 압축강도는 모두 200 kg/cm²이상으로써 상대적으로 매우 높은 값을 보이는 것을 알 수 있다.

한편, SMF-100을 사용하여 경량재료를 제조하는 경우 GP-1과는 달리 소성후에도 밀도변화가 거의 없는 특징을 보이는데, 이것은 SMF-100의 입자 구조가 폐구 공 형태이기 때문에 소성시 공극을 감소현상을 보이지 않기 때문이다. Table 5에서 보는 바와 같이 SMF-100을 사용한 경량재료의 밀도는 하수슬러지 소각재 첨가율 30 wt%(SMF-100 첨가율 60 wt%)에서 0.55 g/cm³, 50 wt%(SMF-100 첨가율 40 wt%)에서 0.77 g/cm³, 70 wt%(SMF-100 첨가율 20 wt%)에서 1.06 g/cm³와 같이 일정한 추세를 보이며 변함을 알 수 있다. 또한, 압축강도의 경우에 있어서도 하수슬러지 소각재 첨가율이 증가할수록 증가하나 대체로 100 kg/cm² 이하의 값을 보여 GP-1을 사용한 경우보다는 낮은 것을 알 수 있다.

이와 같이 하수슬러지 소각재를 사용한 경량재료의 제조에 있어서 경량충진재의 종류에 따라 밀도 및 압축강도가 크게 좌우되는 결과를 얻었다. 실험 결과에 의하면 perlite계인 GP-1보다는 silica sphere계인 SMF-100을 경량충진재로 사용하여 밀도 및 압축강도를 제어하는 것이 보다 효과적임을 알 수 있다.

Table 4. Effect of mixing ratio on density and compressive strength. (calcination temperature 1,000, lightweight filler: GP-1)

Mixing ratio(wt%) (fly ash:GP-1:bentonite)	Density (g/cm ³)	Compressive strength (kg/cm ²)
30 : 60 : 10	1.23	242.3
50 : 40 : 10	1.31	370.5
70 : 20 : 10	1.37	290.6

Table 5. Effect of mixing ratio on density and compressive strength.(calcination temperature 1,000, lightweight filler: SMF-100)

Mixing ratio(wt%) (fly ash:SMF-100:bentonite)	Density (g/cm ³)	Compressive strength (kg/cm ²)
30 : 60 : 10	0.55	43.2
50 : 40 : 10	0.77	87.0
70 : 20 : 10	1.06	98.4

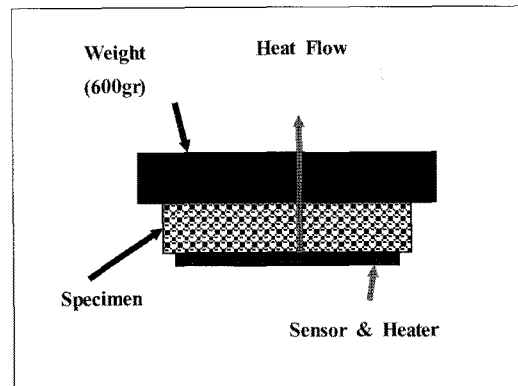


Fig. 2. Schematic diagram for measurement of thermal conductivity.

한편, Fig. 3은 400mesh 이하 입도의 유리분말을 소각재, 경량충진재 및 벤토나이트와 함께 혼합하여 소성하고 제조한 경량재료의 소성온도에 따른 압축강도 변화를 나타낸 것이다. 유리분말을 첨가한 이유는 유리분말의 용융점이 낮은 특징을 이용하여 소성시 경량재료의 강도를 증진시킬 수 있는 가능성을 타진하기 위한 것으로써, Fig. 3에서 보면 비산재 50 wt%, SMF-100 20wt%의 조건하에서 유리분말을 각각 10 및 20 wt% 첨가하여 소성하는 경우 600°C를 제외하고는 전반적으로 유리분말을 첨가한 경량재료의 압축강도가 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, 800 소성의 경우 유리분말을 첨가하지 않았을 때의 압축강도는 50 kg/cm²이나 유리분말 10% 첨가시 65kg/cm², 20% 첨가시 67 kg/cm²로 대략 30% 이상의 강도 증진효과를 보인다. 한편, 유리

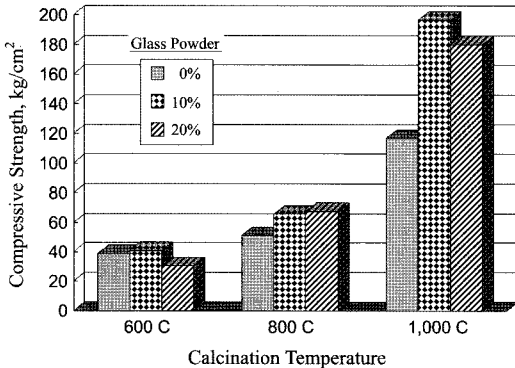


Fig. 3. Compressive strength of lightweight materials with different fraction of glass powder as a function of calcining temperature.(fly ash 50wt%, SMF-100 20wt%)

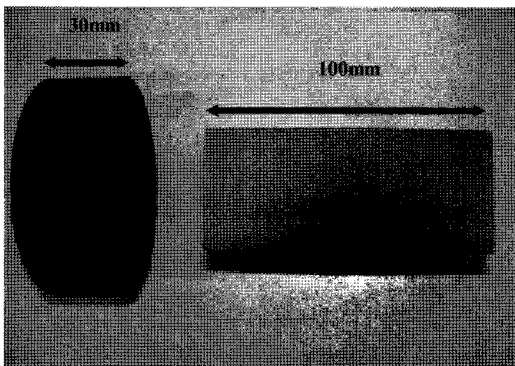


Fig. 4. Specimens for measurement of sound absorption (100mmf).(Bottom ash 30wt%, SMF-100 50wt%, Bentonite 20wt%, 1,000 calcination)

분말을 첨가하여 1,000°C 소성하였을 경우 첨가량에 따라서 대체로 60% 내외의 강도 증진효과를 보였다. 즉, 800°C 이하의 소성시에는 유리분말 첨가 효과가 없으나 그 이상의 온도에서는 소각재를 비롯한 원료 혼합시 유리분말을 첨가하는 방법으로 경량재료의 압축강도를 증가시킬 수 있음을 알 수 있다.

3.2. 열전도도 및 흡음율

Table 6은 본 실험에서 제조한 경량재료에 대한 열전도도 측정결과를 나타낸 것이다. 표에서 보는 것처럼 경량충진재인 SMF-100 첨가량이 증가할수록 열전도도는 낮아지고 있으며, 동일한 원료 조성일 경우 고온소성하게 되면 열전도도는 다소 상승하는 것을 알 수 있다. 또한, 본 실험의 다공성 경량재료에 대한 열전도도는 대략 0.3~0.5 W/m²K 범위인 것으로 확인되었다. 이와 같이 경량충진재 첨가량이 증가할수록 열전도도 값이 낮아지는 것은 시편 내부에 공극이 많이 형성되어 열전도를 저해하기 때문이며, 또한 고온소성하는 경우 시편 수축으로 인하여 내부 공극이 상대적으로 작아져 열전도도가 증가하는 것으로 판단된다. 따라서, 경량재료의 열전도도를 작게 하기 위해서는 경량충진재 첨가량을 늘려 시편의 공극율을 극대화시키는 것이 필요한 것을 알 수 있다. 다공성 경량재료의 특징중 하나인 낮은 열전도율은 각종 보온재 및 단열재료의 사용 가능성을 높여 주고 있다. 일반 콘크리트의 열전도도가 1~3 W/m²K 이고, 통상적인 단열재의 열전도도가 0.05~0.1 W/m²K 임을 감안할 때, 본 실험에서 제조한 경량재료는 단열재와 콘크리트의 중간 수준에 위치하고 있음을 알 수 있으며, 따라서 단열재 용도로는 사용이 어렵더라도 부수적인 단열효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 4는 경량재료 시편의 흡음율 측정을 위하여 본 실험에서 제조한 직경 100 mm의 원판형 시편으로써, 동일한 모양으로 직경 29 mm의 소형 시편과 함께 3번의 평

Table 6. Thermal conductivity of lightweight materials prepared in the study.

Mixing ratio(wt%) (Bottom ash:SMF-100:Bentonite)	Calcination temp. (°C)	Thermal conductivity (W/m ² K)
90 : 0 : 10	1,000	0.45
70 : 20 : 10	-	0.34
70 : 20 : 10	1,000	0.39
50 : 40 : 10	1,000	0.32

Table 7. Variation of sound absorption with frequency(1/3 Octave Band Center Frequency[Hz]).

Frequency	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630
흡음계수	0.06	0.08	0.09	0.08	0.12	0.15	0.20	0.27	0.32	0.29
Frequency	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300
흡음계수	0.23	0.27	0.35	0.61	0.63	0.43	0.38	0.35	0.34	0.36

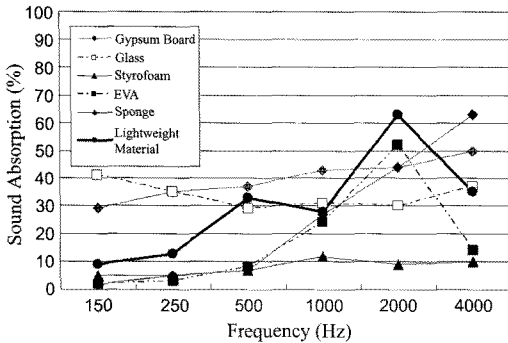


Fig. 5. Variation of sound absorption with frequency depending on materials.

균값을 측정하기 위해 각각 3개씩 제조하였다. 측정환경은 실온 20°C, 상대습도 47% 이하, 대기압 101.02 kPa 이었다. Table 7은 1/3 octave band에서 각 주파수에 따른 경량재료의 흡음을 계수를 보여주고 있으며, 주파수 80 Hz부터 시작하여 흡음율은 서서히 증가하여 500 Hz에서 0.32(32%)를 보인후 다소 감소하다가 2000 Hz에서 최대치 0.63(63%)을 보였다. 주파수에 따라 흡음율이 변하는 것은 재질 특성에 기인하는 것으로서, 따라서 최대 흡음율을 보이는 주파수도 재질에 따라 모두 달라지게 된다.

Fig. 5는 본 연구에서 제조한 경량재료의 흡음을 특성 흡음재로 많이 쓰이는 석고보드, 유리, 스티로폼, EVA, 스폰지의 경우와 비교한 것으로써, 500Hz 이하의 저주파수대에서는 유리나 석고보드에 비해서 흡음율이 낮으나 2,000Hz에서의 최대 흡음율은 다른 재료에 비해 우수한 것을 알 수 있다. 일반적으로 흡음율은 재료의 공극율에 따라서 크게 영향을 받기 때문에 경량충진재인 SMF-100 첨가량을 증가시키면 흡음계수는 향상될 것으로 보이며, 강도가 크게 중요하지 않은 흡음재 혹은 차음재료의 용도를 목적으로 하는 경우 원료 혼합 비율을 제어함으로써 최대 흡음율을 높이는 것이 가능할 것으로 생각된다.

4. 결 론

하수슬러지 소각재를 주원료로 사용한 다공성 경량재

료의 제조 및 물성측정 실험을 수행한 결과 다음의 결론을 얻었다.

(1) 경량충진제로써 perlite계인 GP-1을 사용하고 1,000°C 소성을 통하여 제조한 경량재료의 밀도 및 압축강도를 측정된 결과 비산재 30~70 wt% 범위에서 밀도는 1.23~1.37 g/cm³, 압축강도는 242.3~370.5 kg/cm²의 값을 보이는 것으로 나타났다. 또한, 동일한 제조 조건하에서 silica sphere계인 SMF-100을 사용한 경우에 있어서 밀도는 0.55~1.06 g/cm³, 압축강도는 43.2~98.4 kg/cm²의 값을 보였다.

(2) 유리분말을 첨가제로 사용하여 경량재료를 제조한 경우 800°C 소성시 30% 이상의 강도 증진효과를 보였으며, 1,000°C 소성시에는 첨가량에 따라서 60% 내외의 강도 증진효과가 있었다. 그러나, 600°C 소성시에는 유리분말에 의한 강도 증진효과가 거의 없는 것으로 나타났다.

(3) 경량재료의 열전도도 측정결과 경량충진재 첨가량이 증가할수록 열전도도는 낮아지며, 동일한 원료 조성일 경우 고온소성 하게 되면 열전도도가 다소 상승하는 것으로 나타났다. 본 연구의 다공성 경량재료에 대한 열전도도는 0.3~0.5 W/m²K 범위인 것으로 확인되어 부수적인 단열효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

(4) 경량재료 시편의 흡음을 측정결과 주파수 80Hz부터 흡음율은 서서히 증가하여 500Hz에서 32% 흡음율을 보인 후, 다시 감소하다가 2,000Hz에서 최대 흡음율 63%를 나타냈다. 또한, 본 실험에서 제조한 경량재료의 흡음 특성을 석고보드, 유리, 스티로폼, EVA, 스폰지의 경우와 비교하였을 때 500Hz이하의 저주파수대에서는 유리나 석고보드에 비해서 흡음율이 낮으나, 2,000Hz에서의 최대 흡음율은 다른 재료에 비해 우수한 흡음 특성을 보이는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 소제원천기술개발사업의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

1. 이화영, 2007: ASR 소각재의 이화학적 불성 및 재활용을 위한 기초연구, *자원리사이클링*, **16**(2), pp. 32-39.
2. Hammy, F., Mercier, G., Blais, J., 2005: Removal of lead in APCR leachates from municipal solid waste incinerator using peat moss in a batch counter-current sorption process, *Hydrometallurgy*, **80**, pp. 232-240.
3. Matsuzawa, Y. *et al.*, 2006: Leaching behavior of heat-treated waste ash, *Fuel*, **85**, pp. 401-409.
4. Fuoco, R. *et al.*, 2005: Innovative stabilization/solidification processes of fly ash from an incinerator plant of urban solid waste, *Microchemical Journal*, **79**, pp. 29-35.
5. Reich, J. *et al.*, 2002: Effects of limestone addition and sintering on heavy metal leaching from hazardous waste incineration slag, *Waste Management*, **22**, pp. 315-326.
6. Oygard, J. K., Gjengedal, E., and Mage, A., 2005: Mass-balance estimation of heavy metals and selected anions at a landfill receiving MSWI bottom ash and mixed construction wastes, *Journal of Hazardous Materials*, **A123**, pp. 70-75.
7. Seabrook, P. I. and Wilson, H. S., 1988: High strength lightweight concrete for use in offshore structures: utilization of fly ash and silica fume, *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, **10**(3), pp. 183-192.
8. Tay, J. H. and Show, K. Y., 1997: Resources recovery of sludge as a building and construction material, *Water Science & Technology*, **36**(11), pp. 259-266.
9. Bhatti, J. I. and Reidt, K. J., 1989: Moderate strength concrete from lightweight sludge ash aggregates, *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, **11**(3), pp. 179-187.
10. Kayali, O., Haque, M. N., and Zhu, B., 1999: Drying shrinkage of fibre-reinforced lightweight aggregate concrete containing fly ash, *Cement and Concrete Research*, **29**, pp. 1835-1840.
11. Cheeseman, C. R., Makinde, A., and Bethanis, S., 2005: Properties of lightweight aggregate produced by rapid sintering of incinerator bottom ash, *Resources, Conservation & Technology*, **43**, pp. 147-162.
12. Demirboga, R. and Gul, R., 2003: The effects of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete, *Cement and Concrete Research*, **33**, pp. 723-727.

李 華 永

- 현재 한국과학기술연구원 이차전지연구센터 책임연구원
 - 당 학회지 제 10권 4호 참조
-