

## Silica Aerogel과 펄프 복합체의 기계적 특성에 관한 연구

유정근\* · 김학희\*\* · 김학수\*\* · 최창하\*\*\*,†

\*한서대학교 화학공학과  
 356-706 충남 서산시 해미면 한서1로 46  
 \*\*선문대학교 생명화학공학과  
 336-708 충남 아산시 탕정면 선문로 221번길 70  
 \*\*\*선문대학교 하이브리드공학과  
 336-708 충남 아산시 탕정면 선문로 221번길 70  
 (2013년 12월 18일 접수, 2014년 3월 4일 수정본 접수, 2014년 3월 10일 채택)

## A Study on Mechanical Properties of Composite of Silica Aerogel and pulps

Jeong-kun Yoo\*, Hak-Hee Kim\*\*, Hak-Soo Kim\*\* and Chang-Ha Choi\*\*\*,†

\*Department of Chemical Engineering, HanSeo University, 46 Hanseo 1-ro, Haemi-myun, Seosan-si, Chungnam 356-706, Korea  
 \*\*Department of Chemical and Biochemical Engineering, SunMoon University,  
 70, 221 beon-gil, Sunmoon-ro, Tangjeong-myeon, Asan-si, Chungnam 336-708, Korea  
 \*\*\*Department of Hybrid Engineering, SunMoon University,  
 70, 221 beon-gil, Sunmoon-ro, Tangjeong-myeon, Asan-si, Chungnam 336-708, Korea  
 (Received 18 December 2013; Received in revised form 4 March 2014; accepted 10 March 2014)

## 요 약

본 연구는 실리카 에어로겔-펄프 복합체의 특성을 조사하였다. Paste 형태의 실리카 에어로겔과 펄프를 혼합하여 복합체를 제조하였으며, SEM 분석을 실시하였다. 또한 임피던스 튜브를 사용하여 흡음률을 측정하였다. 흡음계수의 피크치는 900 Hz 범위에서 얻어졌다. 실리카 에어로겔-펄프 혼합체는 우수한 흡음능과 복합체의 표면이 소수성을 띠기 때문에 기인하는 내구성 때문에 새로운 흡음체의 가능성이 있다고 사료된다.

**Abstract** – The studies on the characteristics of composite of silica aerogel and pulps were carried out. The composite was manufactured by mixing the paste of silica aerogel and pulps and analyzed by SEM. Using the impedance tube, the sound absorption measurement was investigated. The maximum value of sound absorption coefficient of this composite was obtained in the range of 900 Hz. It was found that the composite of silica aerogel and pulps could be a new sound absorbent because of high absorption capacity and durability which was due to hydrophobic effect on the surface of the composite.

Key words: Silica Aerogel, Pulps, Sound Absorption, Absorbent

## 1. 서 론

에어로겔은 이름 그대로 공기로 채워진 겔(gel)을 일컬으며 무게가 같은 부피의 공기보다 3배 정도밖에 되지 않아 지구상에 존재하는 가장 가벼운 고체로 알려져 있다. 실리카 나노 사이즈의 입자들이 성글게 형성되어 기공들로 가득 차게 되며 이러한 미세한 기공의 분포로 인해 뛰어난 단열성 및 흡음성을 나타낸다. 0.01~0.02 w/mk 수준

의 낮은 열전도율과 내화성, 발수성, 나노다공성으로 인해 단열성, 흡음성, 경량성 등의 기능성이 많으며, 내구성면에서도 매우 뛰어난 강점을 갖는 소재이다. 아울러 에어로겔은 섭씨 1000도 이상의 온도에도 타지 않으며 에어로겔은 영하 200에서 영상 650도까지 사용이 가능하며 발수성을 갖고 있기 때문에 거의 반영구적으로 사용이 가능한 것이 특징이다. 일반적으로 실리카 에어로겔은 머리카락 1만분의 1 굵기의 실 형태로 이루어진 이산화규소( $\text{SiO}_2$ ) 나노 구조체가 부직포처럼 성글게 얹혀 이루어졌지만 실과 실 사이 전체 부피의 80~98%를 차지하는 공간에는 공기가 가득찬 구조로 이루어져 있다. 1 m<sup>3</sup>의 실리카 에어로겔은 100 kg 내외의 나노다공성 소재이며 80~98% 정도의 기공율과 1~50 nm 범위의 기공크기를 갖는 고비표면적(500 m<sup>2</sup>/g 이상의 BET 비표면적) 물질로서 현재까지 인류가 개발한 고체 물질 중에서 가장 가볍고 가장 뛰어난 초단열 특성을 갖고 있으며, 흡음

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: chchoi@sunmoon.ac.kr

‡이 논문은 동국대학교 화학생명공학과 김병식 교수님(초당대학교 총장님)의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

특성을 갖는 소재이다.

그동안 국내외적으로 에어로겔에 대한 많은 연구[1-6]가 이루어지고 있으며 원천소재에 대한 연구뿐만 아니라 응용기술에 대한 연구[7-9]가 더욱 많이 이루어지고 있다. 그러나 이러한 많은 노력에도 불구하고 에어로겔의 양산기술이나 응용기술은 아직 산업에 직접적으로 적용할 수 있는 부문은 극히 제한적인데 현실이다. 이같은 이유는 에어로겔이 매우 뛰어난 특성을 가졌음에도 불구하고 자체가 가지는 강한 소수성 등으로 인해 이를 현실적으로 적용할 수 있도록 수분산이나 형상화 등에 많은 어려움이 있기 때문이다. 본 연구진에서는 에어로겔을 수분산시키거나 다양한 형상으로 제작할 수 있는 기본기술을 개발하고 이의 자료를 구축하고 있는 중이며 본 논문에서는 이의 관련기술을 적용하여 제조된 수분산 에어로겔을 이용하여 이를 펄프 등과 혼합한 후 혼합물을 성형하고 건조공정을 거쳐 보드형태의 에어로겔-펄프 혼합체를 제조하였으며 이의 간단한 기초특성을 조사하여 보고자하는 것이다.

본 연구에서는 실리카 에어로겔을 펄프와 혼합한 복합체에 대해 단열, 난연, 발수, 흡음, 흡착성 등 물리적, 기계적 특성을 파악하고자 하는 것이며 이러한 결과들로서 기존의 연구 중에있는 다양한 분야에[10,11] 적용할 수 있음은 물론이고 이러한 에어로겔과 펄프의 복합체가 단열, 흡음, 발수, 흡착, 난연 등의 복합적 기능을 가지는 건축분야 및 가전제품, 건축단열재(단열보드, 보온용 시트, 단열테이프), 중간소음 흡음재, 방음벽 흡음재, 방열재 등 매우 다양한 산업분야에 적용할 수 있는가에 대한 기초적 판단 자료로서 활용될 수 있을 것으로 기대하였다.

## 2. 실험

### 2-1. 실리카 에어로겔 복합소재 제조

앞서 언급한 바와 같이 실리카 에어로겔은 자체가 가지는 강한 소수성으로 인하여 물에 고해된 펄프와의 재료분리현상이 생겨 sheet 형태나 board 형태로 복합체를 제조하는 것이 이제까지는 사실상 불가능하였고 특히 비중이 매우 작은 에어로겔은 어떠한 틀 또는 복합재료와 혼합시키기 위해서는 많은 분진이 많이 발생해 작업자들이 이를 다루기가 쉽지 않았던 것이 현실이다. 하지만 본 실험에서는 본 연구진이 연구하고 있는 소수성을 가지는 에어로겔을 물과 물리적으로 혼합시킬 수 있는 기술을 이용하여 제작된 밀가루 반죽과 같은 PASTE 형태의 물에 분산된 에어로겔 물질을 먼저 제조한 후 이를 에어로겔로서 펄프와의 혼합에 사용하여 복합체를 제조하였으며 이를 건조시켜 최종시편을 제조하였다. 이때 펄프와 균일하게 혼합된 수분산된 에어로겔은 상온건조 또는 열을 가해 수분이 제거되고 나면 다시 원래상태의 98% 이상의 소수성과 단열성을 나타내는 에어로겔 특유의 성질을 유지하며 이러한 에어로겔 수분산 기술로 인해 비교적 쉽게 에어로겔 펄프 복합체의 제조가 가능하게 되었다. 이러한 차원에서 이어지는 향후 연구에서는 수분산 에어로겔의 함량비와 펄프 고해조건, 혼합방법, 온도제어, 압착방식, 건조조건 등의 다양한 조건에 대한 최적화 연구가 필요할 것으로 판단된다.

에어로겔과 펄프복합체는 흡음과 동시에 단열, 유흡착(오염된 기름제거), 난연 등 여러 가지 기능을 동시에 제공할 수 있는 복합소재이다.

본 실험에서 사용한 수분산 에어로겔과 펄프를 혼합하여 에어로겔-펄프 복합체를 제조한 후 두 물질 간의 혼합상태를 확인하기 위

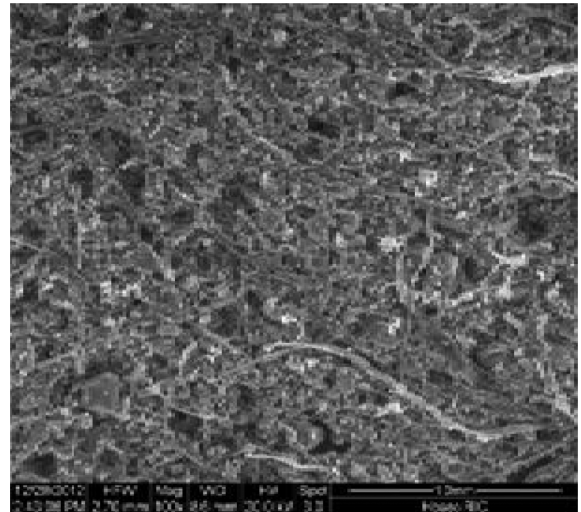


Fig. 1. SEM of composite of silica aerogel and pulps.

하여 SEM 분석해보았으며 이를 Fig. 1에 나타내었다.

이때 제조된 보드에는 펄프성분과 에어로겔 분말이 Fig. 1에 나타난 바와 같이 비교적 균일하게 분포되어 있는 것을 확인하였고 이같이 비교적 균일하게 분포된 에어로겔로 인해 이 복합체는 단열성능이 상당부분 발휘될 뿐 아니라 난연, 흡음소재로서의 효과가 탁월하게 좋아지며 수분에 강한 소수성을 가지게 되어 펄프단독소재만으로는 기대하기 불가능한 다양한 강점을 가지는 소재가 될 수 있었다.

이 시편은 에어로겔과 펄프의 무게비가 건조중량으로 1:3으로 제조한 것이며 사진에서 보면 섬유질의 펄프와 에어로겔이 비교적 균일하게 혼합되어 있음을 볼 수 있다.

에어로겔의 비중이 0.1 내외인 것을 고려하며 1:3의 비율은 매우 많은 양의 에어로겔이 혼합된 비율이다.

### 2-2. 실험 방법

실리카 에어로겔과 펄프의 복합체를 만들고자 밀가루반죽형태의 수분산된 에어로겔과 재생펄프(대화제지)를 원료로서 사용하였다. 먼저 10~20% 함량의 수분산 에어로겔을 제조하고 이를 10% 농도 내외의 재생펄프고해액과 혼합하고 이를 성형틀 내에서 여과하고 이를 건조시켜 보드형태의 복합체를 제조하였다. 이때 에어로겔의 건조중량과 펄프의 건조중량 무게비가 1:3이 되도록 조정하였다. 에어로겔의 함량이 많아질수록 복합체의 성형성이 어려워지며 강도도 낮아진다. 또한 건조공정 전 성형공정에서 압력을 주면서 성형할수록 강도는 좋아지지만 단열성이나 흡음성이 감소하게 된다. 본 실험에서는 몇 가지 성형압축강도에서 이 복합체를 성형해보았다. 이러한 성형특성에 의해 단열특성 등에 크게 영향을 받는다. 물론 펄프의 종류 등에 따라라도 모든 특성이 크게 영향을 받을 것으로 예상되며 이에 대한 구체적인 변수에 대한 실험은 추가적으로 진행중에 있다.

한편, 흡음에 있어서는 소음감쇠의 목적으로 사용되는 흡음재로는 그 종류가 매우 많고 흡음구조도 다양하게 고안[12,13]되어 있지만 이중 중주파수와 고주파수 대역의 소음제어에 유리한 형태는 다공질형 흡음재가 많이 사용되고 있다. 다공질형 흡음재는 구조를 구성하는 고체부와 이들 사이에 형성되어지는 공극인 유체부로 구성되어 있고 이들 다른 두 개의 상이 복잡한 형상을 형성하게 되므로 매질들의 구조 사이에는 공기층이 존재하게 된다. 다공질형의 흡음은 이

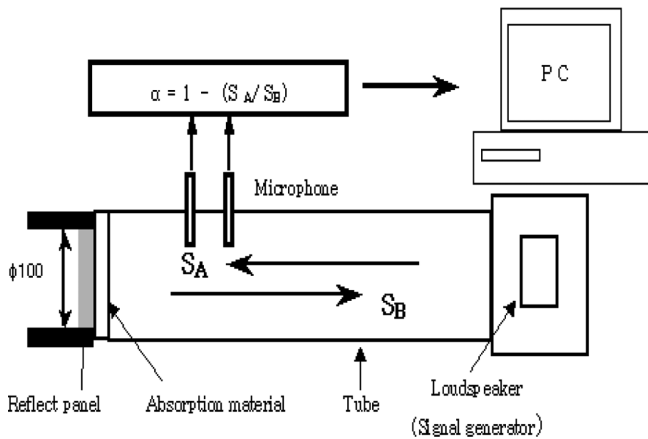


Fig. 2. The schematic diagram of sound absorption measurement system.

공기층으로 음이 매질 내를 전파하게 될 때 음파와 함께 미소 진동하는 입자들과 매질과의 상대적 운동에 따른 경계면에서의 점성에 의한 마찰이 발생하게 되어 음 에너지가 열로써 변환되게 된다. 또한 매질 자체가 음파로 인하여 수축, 팽창, 구부러짐 등이나 섬유소 자체의 진동 등을 발생시키는 에너지로 변환하게 되어 흡음이 이루어진다. 이러한 음의 저항 손실은 입자속도에 비례하므로, 다공질체는 음파의 입자속도가 큰 위치에 놓이게 될수록 그 흡음효과가 커지게 된다. 흡음계수는 일반적으로 흡음체의 기본 특성을 나타내어 주는 인자이다. 이러한 흡음계수를 측정하는 방법에는 임피던스 튜브(KSF 2814-1, 2)[14]를 사용하여 관 내부에 정재파를 발생시켜 수직 입사에 대한 흡음율을 구하는 방법과 임의의 입사음에 대한 흡음율을 구하는 잔향실법(KSF 2805) 등의 방법이 있다. 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 임피던스 튜브를 사용해서 흡음율을 측정하였다.

두 개의 마이크로폰을 이용한 흡음률 측정은 튜브의 한 쪽 끝에 스프커로 백색잡음을 발생시키고 반대편에 측정하고자 하는 시편을 설치한다. 실험 방법은 ASTM E1050을 따라 수행하였다.

수직입사에 대한 음원의 광역 대 가진을 통하여 50~6400 Hz까지의 1/3 Octave band 중심주파수에 대해 실험을 행하였다.

### 3. 결과 및 고찰

에어로겔-펄프 복합체는 300\*300\*10(mm)으로 제조하였으며 이 복합체의 열전도율(KS L 9016: 2010 규격 시험)을 측정해본결과 35 mW/mk를 나타내었다. 또 이 에어로겔-펄프복합체를 제조할 때 고해한 펄프와 에어로겔을 혼합하여 압력을 가하며 성형공정을 수행하게 되는데 이때 앞서 언급한 바와 같이 성형압력이 변화함에 따라 열전도율이 변화되는 것을 확인하였으며 Fig. 3에 나타난 바와 같이 성형압력을 2.5, 5, 10 ton/cm<sup>2</sup>로 변화하면서 복합체의 열전도율을 조사해 본 결과 2.5 ton/cm<sup>2</sup>에서 35 mW/mk로 가장 좋은 단열성을 나타내었으며, 5 ton/cm<sup>2</sup>에서는 39 mW/mk, 10 ton/cm<sup>2</sup>에서는 45 mW/mk로서 성형압력이 증가하면 복합체의 강도는 좋아지지만 단열성이 저하되는 것으로 나타났다. 이때 이러한 압력 하에서 에어로겔 자체가 압축되어 이러한 열전도율의 변화가 나타나는 것은 아니며 펄프 자체 상호간 또는 펄프와 펄프사이의 공간 또는 에어로겔과 펄프와의 공간 등이 수축되어 전체적 기공부파가 감소했기 때문인 것으로 사료된다. 본 실험에서 사용된 펄프와 제조조건에서는 에어로겔-펄프 복

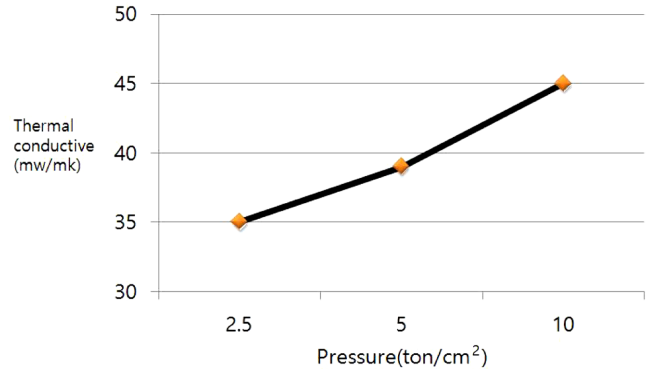


Fig. 3. Thermal conductivity of composite of silica aerogel and pulps.

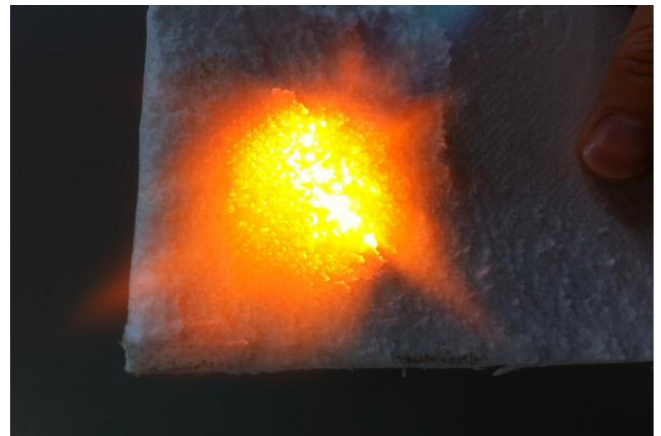


Fig. 4. Flame-resistance test of composite of silica aerogel and pulps.

합체의 단열성을 위해서는 2.5 ton/cm<sup>2</sup> 수준의 낮은 성형압력으로 제조하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

또한 이의 난연성(KS F 2271 규격 시험)을 측정해 본 결과 난연 등급을 나타내었다. 펄프단독만의 보드의 경우는 화염에 노출되면 수초 내에 불꽃이 생기면서 연소되는 것이 일반적이지만 아래의 사진에서 보는 바와 같이 에어로겔과 펄프의 복합체는 상당시간 화염에 노출되어도 까맣게 탄화는 진행되지만 펄프단독보다는 훨씬 오랜 시간동안 불꽃이 생성되지 않는 것을 볼 수 있었다. 이의 화염 시험 사진을 Fig. 4에 나타내었다.

또한 이의 복합체는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 뛰어난 발수효과도 나타내었다.

이 복합체의 또하나의 특성은 물과 기름에서의 선택적 유흡착인데 복합체 1g이 기름 약 15~20배를 흡착할 수 있다. 이러한 유흡착 특성을 나타내는 것은 복합체내에 나노기공을 갖는 실리카 에어로겔과 펄프소재가 가지는 무수한 크고 작은 기공 때문이다. 그러나 이러한 선택적 유흡착은 복합체 내에 있는 에어로겔이 주기능 물질이 되며 이렇게 유분 및 유막 등을 흡착함에 있어서는 에어로겔이 가지는 나노수준의 적절한 기공 크기가 매우 중요하다. Fig. 6의 그래프는 이 복합체의 제조에 사용된 실리카 에어로겔에 대한 pore volume 및 pore diameter를 측정한 결과이다. 기공크기는 평균적으로 10~50 nm 수준으로 분포되어 있으며, 이러한 미세한 구조체로 인하여 유분 및 유막 등을 효과적으로 흡착할 수 있고 흡착한 유류성분을 다시 배출하지 않는 탁월한 유흡착 특성을 갖게 되는 것이다.



Fig. 5. Hydrophobic effect on the surface of composite of silica aerogel and pulps.

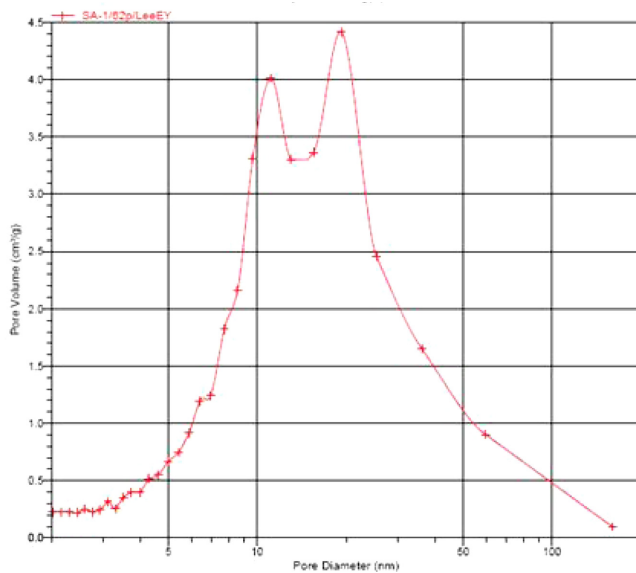


Fig. 6. Pore size distribution of composite.



Fig. 7. Oil absorption by composite of silica aerogel and pulps.

Fig. 7에는 실리카 에어로겔의 유분흡착을 나타내는 사진이다.

Fig. 8의 그래프는 실리카 에어로겔-펄프 복합체 흡음시료의 흡음계수를 측정된 결과이다. 주파수 증가에 따라 흡음률이 증가하다가

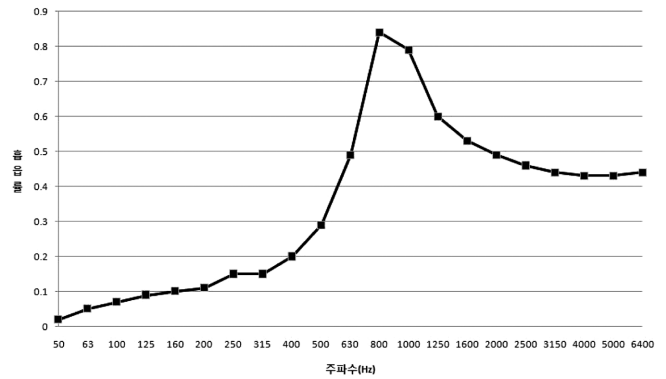


Fig. 8. Measured absorption coefficients of composite of silica aerogel and pulps.

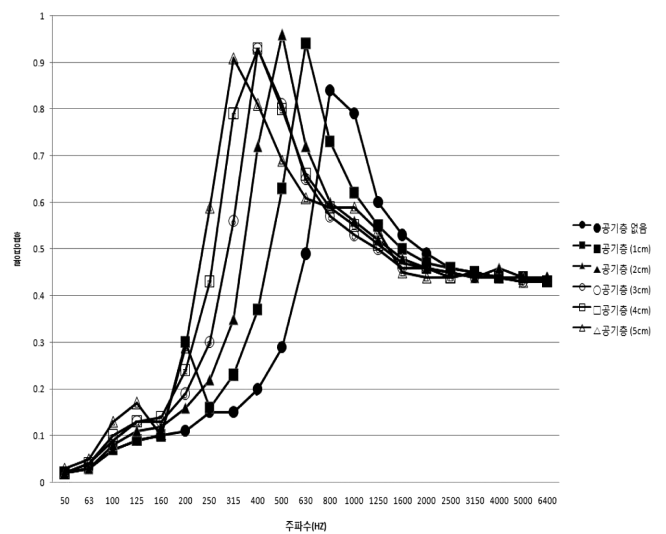


Fig. 9. Effect of the air cavity depth on the absorption coefficients of composite of silica aerogel and pulps.

900 Hz 부근에서 피크점이 나타나고 그 후 주파수영역에서 흡음률이 급격히 감소하였다. 피크치의 경향을 보면 다공질[15] 재료에서 나타나는 주파수영역에서 우수한 흡음성능을 나타내는 것을 볼 수 있는데, 이것은 공극률이 크기 때문이다[16,17]. 주파수 2000 Hz에서 6400 Hz까지 흡음률의 변화는 거의 없음을 알 수 있다. Fig. 9 그래프는 흡음시료를 임피던스관에 장착한 상태에서 시료배후에 공기층을 0, 1, 2, 3, 4, 5로 변화시키면서 흡음계수를 측정된 결과이다. 결과에서 공기층 두께가 커질수록 흡음계수의 피크치가 저주파수영역으로 이동되는 것을 볼 수 있다. 흡음계수의 피크치는 시료두께와 공기층의 두께를 합한 길이가 입사음의 1/4 파장과 같을 때 얻어진다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 실리카 에어로겔-펄프 복합체가 다양한 기능을 가지는 흡음재와 건축자재로서의 활용이 가능한지를 판단하기 위하여 흡음재의 음향성능 지표인 흡음계수를 측정하고 또한 난연성 및 발수성, 단열성, 흡착성 등을 실험하여 고찰하였으며, 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 소수성 실리카 에어로겔을 수분산 에어로겔형태로 적용한 펄

프 복합체의 표면이 소수성을 나타내었으며 이는 내구성에 좋은 영향을 미칠 것으로 생각된다. 또한 흡음재로서 기존 발포콘크리트 및 무기질 다공성 흡음재에 비하여 경량성이 뛰어나기 때문에 복잡한 구조에도 작업성 및 적용이 용이하다. 기존 유기섬유 흡음재에 비해 화재 시 독성가스 발생이 거의 없으며 뛰어난 난연성을 가져 시장진입의 경쟁력이 있을 것으로 예상된다.

(2) 뛰어난 단열성, 유흡착 등 복합기능을 가져 건축자재 및 내장 재료의 사용뿐만 아니라 단열재, 흡착제 등으로의 사용도 가능함을 알 수 있다.

(3) 실리카 에어로겔-펄프 복합체는 우수한 흡음성능을 갖는 흡음재 소재로서의 충분한 가치가 있다고 생각된다. 또 실리카 에어로겔-펄프 복합체 흡음재의 흡음계수와 흡음대역폭은 공기층을 두므로써 제어 가능함을 알 수 있다.

## References

1. Rao, A. P. and Rao, A. V., "Effects of Protic Solvent on the Properties of the Ambient Pressure dried Hydrophobic Silica Aerogels using Sodium Silicate Precursor," *J. Porous Mater.*, **15**(5), 507-512(2008).
2. Ann, M., Anderson, Mary K., Carroll Emily C. and Green, "Hydrophobic Silica Aerogels Prepared Via Rapid Super Critical Extraction," *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, **53**(2), 199-207(2010).
3. Shewale, P. M., Rao, A. P. and Rao, A. V., "Effect of Different Trimethylsilating Agents on the Hydrophobic and Physical Properties of Silica Aerogels," *Appl. Surf. Sci.*, **254**(21), 6902-6907(2008).
4. Tillotson, T. M., Sunderland, W. E., Thomas, I. M. and Hrubesh L. W., "Synthesis of Lanthanide and Lanthanide Silicate Aerogels," *J. Sol. Gel. Sci. Technol.*, 1P:241-24(1994).
5. Brinker, C. J. and Scherer G. W., "Sol-gel Science the Physics and Chemistry of Sol-gel Processing," Academic Press, New-York(1990).
6. Vacher, R., Phalippou, J., Pelous, J. and Woignier, T. (eds), "Proceedings of the Second International Symposium on Aerogels (ISA2)," *Rev. Phys. Appl. Colloq.*, 24-C4(1989).
7. Zhang, G., *et al.*, "Isocyanate Cross Linked Silica Aerogel Monoliths: Preparation and Characterization," *J. Non-Cryst. Solids*, **350**, 152-164(2004).
8. Fischer, F., Rigacci, A. and Pirard, R., "Cellulose-Based Aerogels," *Polymer* **47**, 7636-7645(2006).
9. Sequeira, S., Evtuvin, D. and Portugal, I., "Preparation and Properties of Cellulose/Silica Hybrid Composites," *C27*, 172-179(2009).
10. Son, H., Kim, H., Lee, G., Kim, J. and Sung, W., "Enhanced Oil Recovery Using Nanoparticle-stabilized Oil/Water Emulsion," *Korean J. Chem. Eng.*, **31**, 338-342(2014).
11. Youn, L. S. and Kim, Y. C., "Study on Fabrication and Thermal Properties of the ABS/Silicate Composites," *Korean Chem. Eng. Res. (HWAHAK KONGHAK)*, **49**(3), 301-305(2011).
12. Ju, K. M., Yong, H. T. and Lee, D. H., "Acoustical Properties of Polyester Sound Absorbing Materials," Autumn Conference Proceedings of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Korea, 1347-1352(2001).
13. Maa, D. Y., "Microperforated-Pannel Wideband Absorber," *Noise Control Engineering Journal*, **29**(3), 77-84(1987).
14. Lee, D. H., Yong, H. T. and Lee, S., "Sound Transmission Loss Measurement for Sound Isolation Sheets by Two-Microphone Impedance Tube Method," *Journal of the SAREK*, **14**(1), 63-72(2002).
15. Lee, D. H., Hur, S. C. and Kwon, Y. P., "Estimation of the Absorption Performance for Multiple Layer Perforated Plate Systems by Transfer Matrix Method," *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, **12**(9), 709-716(2002).
16. Heo, S. W., Ju, K. M., Hur, S. C., Yong, H. T. and Lee, D. H., "Acoustical Performance Measurement of Steel-Wire Sound Absorbing Materials," Proceedings of the SAREK 2002 Winter Annual Conference, Korea, 438-443(2002).
17. Ju, K. M., Lee, D. H. and Yong, H. T., "A Study on the Physical Characteristics of Steel-Wire Sound Absorbing Materials," Spring Conference Proceedings of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Korea, 1244-1249(2002).