

# 팽창진주암 무기복합재에서의 단열성능 및 열크랙 방지에 관한 연구

안원술<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>계명대학교 화학공학과

## A Study on Thermal Insulation Property and Thermal Crack Protection for Expanded Perlite Inorganic Composites

WonSool Ahn<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Chemical Engineering, Keimyung University

**요약** 400°C의 고온에서 사용할 수 있는 무기단열재를 개발하기 위한 기초 연구로서 물유리(water glass)를 바인더로 사용하여 제조한 팽창진주암(expanded perlite) 무기복합재의 단열성과 열 충격에 의한 크랙 방지에 관한 연구를 진행하였다. 정량된 팽창진주암 미세분말과 물유리를 혼합한 반죽을 몰드에 넣고 하루 동안 안정화시킨 후에 150°C 오븐에서 완전히 건조하여 샘플을 제작하였다. 인산알루미늄(aluminum phosphate)과 마이카(mica) 분말이 각각 반응촉진제와 열 충격 방지제로 사용되었다. 특히 마이카 분말이 도입된 샘플은 500°C의 고온에서도 열에 의한 크랙 발생이 일어나지 않았으며, 샘플의 단열성은 팽창진주암의 혼합비율이 높아질수록 향상됨을 보여주었으며, 중량비로 물유리/perlite/mica/Al phosphate=100/200/10/1.5의 조성비를 갖는 샘플은 500°C에서 약 0.09 W/mK의 열전도도를 나타내는 우수한 단열 특성을 나타내었다. 그러나 나트륨 실리케이트(sodium silicate)가 주성분인 물유리 바인더의 열적 특성으로 인하여 600°C이상의 온도에서는 심한 치수변형을 발생시켜 실제 사용상의 온도 제한성을 보여 주었다.

**Abstract** A study on the crack protection and thermal insulation properties of the expanded perlite inorganic composites was performed. Mixed expanded perlite with a water glass was stabilized for 24 hrs at room temperature in the mold and, thereafter, converted into a massive foamed body through complete drying process at 150°C. Aluminum phosphate and micron size mica powder were used as a reaction accelerator and a stabilizer for thermal crack, respectively. Especially, use of mica exhibited a remarkable effect on the protection of thermal crack at higher temperature over 500°C, and thermal conductivity of the composites was enhanced with higher perlite contents, showing ca. 0.09 W/mK for the sample of 100/200/10/1.5 water glass/perlite/mica/Al phosphate by weight. A severe dimensional deformation of the composite materials was observed over 600°C, however, showing a temperature limitation for a practical application. The facts were considered as the results from the glass transition temperature of the water glass, of which main component is sodium silicate.

**Key Words** : expanded perlite, inorganic composites, thermal insulation, thermal crack

### 1. 서론

일반적으로 단열재는 원료의 종류나 형태, 및 사용온도에 따라 구분할 수 있으나 사용된 재질에 따라 분류하면 Table 1에서 나타낸 바와 같이 크게 나누어 무기단열재와 유기단열재로 나뉜다. 유기단열재는 무기단열재

에 비하여 단열성이 우수한 반면 열에 약한 것이 문제점이 된다. 반면에 무기단열재는 단열성은 약간 떨어지지만 600°C 이상의 고온에서도 견디는 뛰어난 내열성으로 인하여 고온단열재로 주로 사용된다. 사용온도에 따른 단열재의 종류의 예를 Table 2에 나타내었다. 표에서 살펴보면 잘 알 수 있듯이 600°C이상의 고온 단열재로는 유

\*Corresponding Author : WonSool Ahn(Keimyung Univ.)

Tel: +82-53-580-5358 email: wahn@kmu.ac.kr

Received February 5, 2014

Revised March 3, 2014

Accepted May 8, 2014

기재료는 사용될 수 없으며 Mineral Wool과 같은 무기재료만 사용가능하다[1,2].

[Table 1] Typical classification of thermal insulation materials

Class	Typical Examples
Inorganic	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mineral Wool</li> <li>- Glass Wool</li> <li>- Ceramic Wool</li> <li>- Fumed Silica</li> <li>- Aerogel,</li> <li>- Ceramic Fiber</li> <li>- Perlite, Vermiculite, etc.</li> </ul>
Organic	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Polyurethane Foam</li> <li>- Polystyrene Foam</li> <li>- PE, PP Foam, etc.</li> </ul>

한편, 무기재료를 단열재로 사용하고자 할 때의 최대 문제점은 재료의 유연성과 시공 시의 분진 발생 및 가격이 된다. Mineral Wool은 천연 암석에 석회석을 첨가하여 전기로에서 요해하고 이것을 공기 또는 수증기를 불어 넣어 만드는 섬유상의 무기재료로서, 비중이 0.02 ~ 0.04 g/cm<sup>3</sup>이며 열전도율도 0.038 ~ 0.044 W/m.°K로서 가격이 상대적으로 싸고 단열성이 우수하며, 화재 발생 시에도 유해가스가 발생하지 않는 점 등으로 인하여 주택이나 산업용 플랜트, 및 설비 배관 등에 널리 사용되고 있다. 그럼에도 불구하고 시공시의 분진 발생 등의 문제점은 실제 적용에 있어서의 해결해야할 과제 중의 하나이다. 또한, Fumed Silica와 같은 분말형 무기단열재는 사염화규소(SiCl<sub>4</sub>)를 precursor로 하여 수소와 산소로 태우며 화염수화(flame hydrolysis)시키는 과정에서 만들어지며 조건에 따라 비표면적 200~220 m<sup>2</sup>/g 밀도 0.16~0.22 g/cm<sup>3</sup>의 가벼운 입자(fluffy powder)가 만들어진다. 단열성이 매우 좋아 상온 상압에서 약 0.02 W/m.°K의 단열성능을 나타낸다. 이렇게 좋은 단열 특성으로 인하여 Fumed Silica는 진공 단열 패널(vacuum insulation panel, VIP)의 심재(core) 재료로서 많이 연구되고 있다[3-8].

이들과는 달리 천연물질로부터 만들어지는 팽창 진주암 (expanded perlite)은 진주암 원석을 고온에서 팽창시켜 만드는 분말형 다공성 무기재료로서 밀도 0.03~0.20 g/cm<sup>3</sup>의 초경량의 천연 분말이다. 열전도도도 0.038~0.046 W/m.°K로서 우수한 보온 단열특성을 나타낸다. 그럼에도 불구하고 미립자의 분말 형태이기 때문

에 분진 발생 등의 이유와 함께 실용상의 사용상에 있어서의 제한성을 보이고 있다. 따라서 이러한 입자상의 단열재를 유효하게 사용하기 위하여서는 블록이나 패널 등의 형태로 성형하는 것이 가장 큰 해결과제가 된다. 이를 위하여 시멘트, 석고 등의 다양한 무기 바인더 들을 사용하여 연구된 바 있으나 이러한 방법은 Fumed Silica나 Perlite의 경량성과 단열성을 크게 저하시키는 효과가 있으므로 좋은 방법이라고는 할 수 없다.<sup>9</sup>

따라서 본 연구에서는 천연물질로부터 만들어지는 단열성과 가격경쟁력이 뛰어난 입자상의 Perlite를 근간으로 하여 여기에 무기바인더로서 물유리 (Water Glass)와 몇 가지 강화재를 첨가하여 사용함으로써 분말상의 Perlite를 블록형태로 성형이 가능한 고온단열재를 제조하고 이의 열적 특성을 살펴보고자 하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험재료

미립자 형상의 팽창진주암 분말은 (주)서경CMT의 MSD-601을 지원 받아 사용하였다. SiO<sub>2</sub>가 주성분인 회색 분말 상으로서 플라스틱의 경량재, 도료, 건축재 및 보온단열재로 널리 사용된다. Table 2에 MSD-601의 물리적인 특성을 나타내었다.

[Table 2] Physical properties of expanded perlite powder, MSD-601[10]

Property	Average Value
Bulk Density [g/cm <sup>3</sup> ]	0.15
Effective Density [g/cm <sup>3</sup> ]	0.25
Particle Size [μm]	55
Water Content [1hr/105°C%]	0.35
Thermal Conductivity [W/m.°K]	0.041

무기바인더로 사용된 물유리(water glass)는 수화된 나트륨 실리케이트(Hydrated sodium silicate)로서 (주)영일화학의 YGS-40 물유리 제품으로서 SiO<sub>2</sub> 고체 함량 40 w%인 것을 사용하였다. 액상 규산염은 화학식으로는 일반적으로 Na<sub>2</sub>O-nSiO<sub>2</sub>·xH<sub>2</sub>O의 분자식으로 표시되며 세 가지 성분의 조성비에 따라 다양한 물리적인 상태를 이룬다[11].

복합재료의 치수안정성 및 물성 강화제로 사용한 마

이카 분말 (mica powder)는 (주)서경CMT의 Scovite Mica SM-10과 SM-40을 사용하였다. 황색상의 판상 분말로서 SiO<sub>2</sub>와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 주화합성분을 이룬다. Table 4에 SM-10 및 SM-40의 물리적인 특성을 나타내었다[10].

반응촉진 및 내열안정성을 위한 강인화제로서 Aluminum Phosphate는 시약급을 구입하여 그대로 사용하였다.

[Table 3] Physical properties of mica powder, SM-10 and SM-40[10]

Property	Average Value	
Bulk Density [g/cm <sup>3</sup> ]	0.32	
True Density [g/cm <sup>3</sup> ]	2.8	
Particle Size [μm]	SM-10	864
	SM-40	107
Water Content [1hr/105°C%]	0.35	
Thermal Weight Decrease [1hr/100°C%]	4.5	

## 2.2 실험방법

첫 번째 실험으로서 perlite 함량에 대한 괴상으로서의 성형 가능성 및 기계적인 물성의 변화 영향을 살펴보기 위한 예비 실험으로서 샘플의 조성비를 몰유리 100 phr에 대하여 MSD-601 perlite 분말을 100, 200, 및 300 phr로 하고 Aluminum Phosphate는 1.5 phr로 고정하였다. 정량된 재료들을 믹서를 사용하여 혼합하여 슬러리(slurry) 형태로 만들고 이를 12cmx12cmx2.5cm의 개방형 몰드에 부은 후에 상온에서 안정화한 후에 150°C에서 24시간 완전히 건조하여 샘플을 제작하였다. Table 4에 각 샘플의 formulation을 나타내었다. 만들어진 샘플은 치수안정성과 내열성 및 단열성을 측정하였다.

[Table 4] Sample formulation for Exp-1

Exp-1	#1-1	#1-2	#1-3
YGS-40	100	100	100
MSD-601	100	200	300
Al Phosphate	1.5	1.5	1.5

두 번째 실험으로서 EXP-1의 예비실험결과를 바탕으로 고온에서의 치수안정성을 살펴보기 위하여 규회석(wallstone), 흙드실리카, 및 마이카 분말을 사용하여 몰유리 100 phr에 대하여 Table 5에 보이는 바와 같이 혼합하여 앞에서와 같이 샘플을 제작하였다.

[Table 5] Sample formulation for Exp-2

Exp-2	#2-1	#2-2	#2-3
YGS-40	100	100	100
MSD-601	90	90	90
Al Phosphate	1.5	1.5	1.5
	10 (Wallastone)	10 Fumed Silica)	10 (Mica)

## 3. 결과 및 고찰

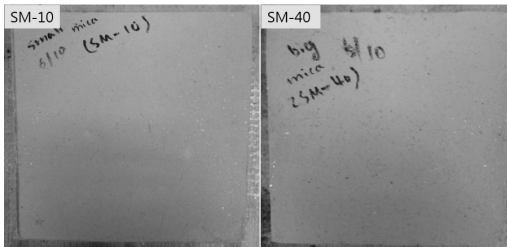
Table 6에는 Exp-1에서의 샘플들에 대하여 몰드에 부은 후의 상온 안정화 시간에 따른 건조 후의 온도에 따른 크랙 발생 여부를 관찰한 상태를 나타낸 것이다. 상온에서 5일 이상 안정화시킨 샘플의 경우 150°C에서는 크랙이 발생하지 않으나 이를 다시 500 및 700°C의 고온에 3시간 방치했다가 꺼낸 샘플들은 조성비에 관계없이 모두 크랙이 발생하여 문제점이 있음을 드러내었다. 따라서 열충격에 의한 크랙 방지를 위하여서는 조성 재료의 개선이 반드시 필요함을 알 수 있다.

[Table 6] Stabilization time effect on crack formation of samples in Exp-1

Temperature [°C]	Stabilization Time [day]		
	1	3	5
150	x	x	o
500	x	x	x
700	x	x	x

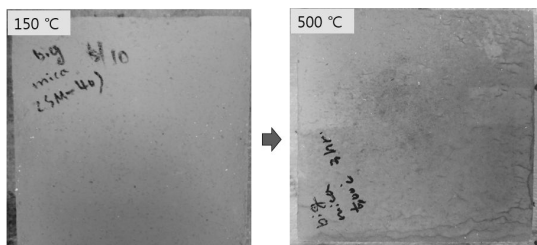
Exp-1에서의 결과를 바탕으로 새롭게 Table 5에 나타낸 Exp-2의 각 조성비를 시험하게 되었다. 일반적으로 mica와 같이 이방성을 가진 입자들은 등방성의 구형 입자들에 혼입될 경우 형상 안정화 기능을 나타낼 수 있으므로 여기서는 Table에 나타낸 바와 같이 점유상의 입자상을 가진 규회석과 mica, 및 넓은 비표면적을 가진 fumed silica를 내열 충격 보완제로 사용하여 열충격 안정성을 살펴보기로 하였다. 실험의 결과로서 mica를 충전한 샘플 이외에는 모두 500°C 이상의 고온에서 크랙이 발생하는 것이 관찰되었다. 이러한 결과로부터 규회석의 경우에는 입자의 작은 L/D 값과 분산성이 약한 것에 기인하는 것으로 생각할 수 있고, fumed silica의 경우에는 넓은 비표면적이 유효한 영향 인자가 될 수 있지만 fumed silica의 형상이 벌크밀도가 매우 낮은 fluffy한 입

자로서 기계적 강도에는 영향을 미치지 못하기 때문인 것으로 생각되었다. Fig. 1에서는 실험방법에서 기술한대로 입도가 서로 다른 SM-10과 SM-40 mica 분말을 내열 안정화 보강재로 사용한 경우의 150°C에서의 10시간 건조 후의 형상 안정성을 나타낸다. Exp-1에서와는 달리 두 개 샘플 모두에서 건조 조건에 의한 크랙 발생 없이 안정한 형태를 보여 주고 있음을 알 수 있다.

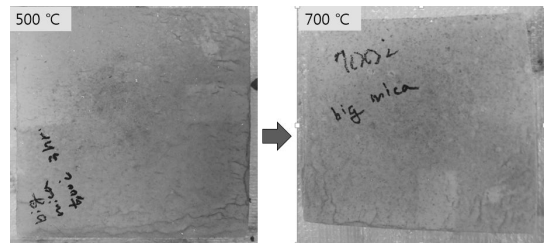


[Fig. 1] Effect of mica on crack formation in Exp-2 after drying for 10hr at 150oC.

한편 Fig. 2에서는 SM-40 mica 분말을 보강재로 사용한 경우의 고온 내열성을 보기 위하여 Exp-2의 #2-3조 성비로 만들어진 샘플을 500°C에서 3시간 방치 후 실온으로 꺼내었을 때의 형상 안정성을 나타내었다. 500°C에서의 고온 환경에서도 크랙 발생 없이 안정한 형상을 보여 주었으나 치수 변화에서 초기에 비하여 약 5.5%의 수축율을 보였다. 이것은 무기바인더로 사용된 몰유리의 유리전이온도가 500~600°C의 구간에 위치하므로 나타나는 결과로 생각된다. 이러한 결과는 Fig. 3에서 보이는 700°C의 온도에 노출된 경우의 심각한 형상변화로서 확인 할 수 있다. 그림에서 보듯이 700°C에 3시간 이상 노출되는 경우에는 부피 수축율이 매우 커지는 것을 관찰할 수 있다. 따라서 몰유리를 바인더로 사용하는 mica 보강 단열재는 600°C 이상의 고온에 장시간 노출되는 경우의 치수안정성은 따로 연구되어야 할 것으로 생각된다.

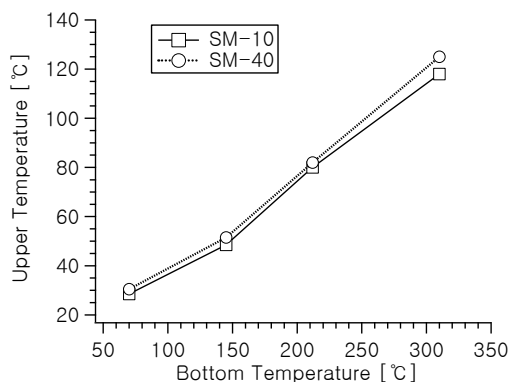


[Fig. 2] Effect of high temperature on the dimensional stability of sample #2-3 in Exp-2 after exposure for 3hr at 500oC.



[Fig. 3] Effect of high temperature on dimensional stability of sample #2-3 in Exp-2 after exposure for 3hr at 700oC.

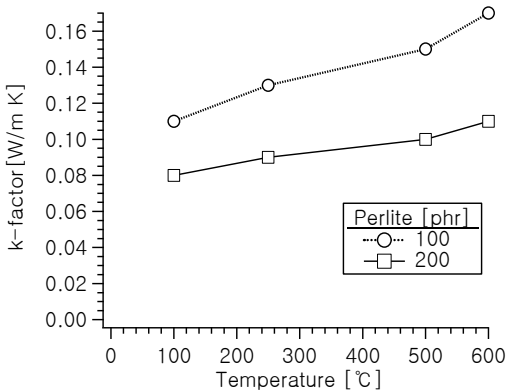
한편 샘플의 단열 및 열전도 특성을 살펴보기 위하여 Exp-2에서의 #2-3의 mica 보강 샘플에 대한 열전달 시험을 행하였다. 두께 2.5cm의 12cmx12cm 직사각형 샘플을 사용하여 온도가 조절되는 hot plate에 올려두고 온도를 올리면서 샘플 상-하부의 온도변화를 측정하여 간접적인 단열 효과를 알아보려고 하였다. Fig. 4에는 입자 크기가 서로 다른 SM-10 및 SM-40 mica를 보강한 샘플에 대한 측정결과를 나타내었다. 그림에서 살펴보아야 할 수 있듯이 mica 크기에 따른 단열특성은 보강한 mica의 크기에는 거의 무관하게 샘플 상부의 온도는 하부의 온도 상승에 따라 거의 직선적으로 변하는 것을 관찰할 수 있다. 하부의 온도 변화에 따른 기울기가 작을수록 샘플의 단열효과는 크다고 판단할 수 있으며, #2-3의 샘플은 하부 온도 350°C일 경우 상부의 온도가 140°C가 될 정도로 단열 효과를 보이고 있음을 알 수 있다.



[Fig. 4] Temperature difference between upper- and bottom-side of #2-3 samples as function of temperature.

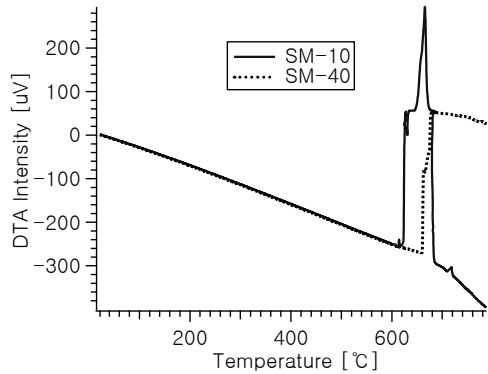
한편 이와 같은 샘플의 단열 효과를 좀 더 정량적으로 알아보고, 또한 perlite 함량 변화에 따른 단열성을 알아

보기 위하여 물유리 100 phr에 대하여 perlite가 각각 100 및 200 phr 혼합된 샘플에 대하여 열전도도 k-factor를 측정하였다. Al phosphate 및 mica는 Exp-2에서의 #2-3과 같이 각각 1.5 및 10 phr로 고정하였다. Fig. 5에서는 각각의 경우에 대한 온도에 따른 k-factor의 변화를 나타내었다. 그림에서 보아 알 수 있듯이 두 경우에 대하여 같은 온도에서는 perlite 함량이 많은 경우에 열전도도가 더 낮아지며, 같은 함량을 가진 샘플에서는 온도의 증가에 따라 거의 직선적으로 열전도도가 증가함을 알 수 있다. 이로부터 perlite 200 phr 샘플의 경우 500°C에서 약 0.90 W/m<sup>2</sup>K의 열전도도 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

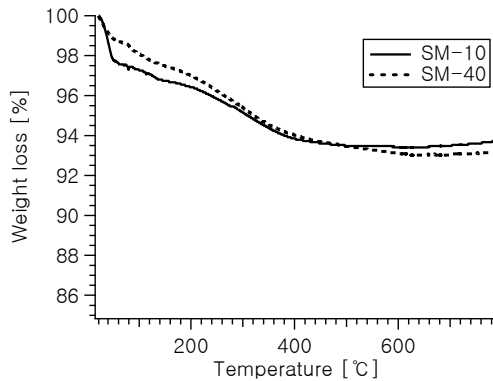


[Fig. 5] k-factor of samples with perlite 100 and 200 phr, respectively, as function of temperature.

한편 위의 샘플들에 대한 열적 안정성을 살펴보기 위한 TG/DTA 열분석을 행한 결과를 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 보듯이 DTA 열분석 곡선에서는 600°C 이상에서의 온도에서 두 샘플 모두 심각한 열정 성질의 변화를 일으키고 있는 것을 알 수 있으며, 이는 앞에서 살펴 본 바와 같이 바인더 물유리의 Tg와 관련되는 재료 내부의 특성변화에 따른 것으로 생각된다. 또한 perlite 분말의 제조과정에서 혼합된 불순물이나 여분의 수분 등에 의하여 약 400°C의 온도에 이르기까지 전체 샘플 무게의 5% 정도에 이르는 중량 감소를 보이는 사실을 TGA 분석 곡선으로부터 알 수 있다.



[Fig. 6] DTA thermogram of samples with perlite 100 and 200 phr, respectively, as function of temperature.



[Fig. 7] TGA thermogram of samples with perlite 100 and 200 phr, respectively, as function of temperature.

#### 4. 결론

경제적이며 고온단열재로서 성능이 우수한 무기단열재로서 천연재료로부터 만들 수 있는 팽창진주암 분말을 이용하여 무기바인더로서 물유리를 사용하고 반응축진 및 형상안정보강제로서 각각 인산알루미늄과 마이카를 사용하여 실험하였다. 연구의 결과로서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 이방성 입자인 마이카를 도입함으로써 고온의 열충격에도 크랙이 발생하지 않는 팽창진주암 무기 복합재료를 성공적으로 만들 수 있었다.
- 2) Sodium Silicate를 근간으로 하는 무기 바인더의 내열 특성으로 인하여 만들어진 무기 샘플의 내열 한

계 온도는 유리전이온도 근처인 600°C 이하인 것으로 나타났으며 그 이상의 온도에서는 심한 형상 수축 등의 형상 불안정 현상을 보였다.

- 3) perlite 함량이 많아질수록 더 낮은 열전도도 값을 보이며, 본 연구에서와 같이 중량비로 물유리/perlite/mica/Al phosphate = 100/200/10/1.5의 조성비를 갖는 샘플은 500°C에서 약 0.09 W/mK의 열전도도를 나타내는 우수한 단열 특성을 나타내었다.

한편 물유리의 내열성을 대체하여 600°C 이상의 고온에서도 사용할 수 있는 친환경성 무기단열재료에 대한 연구는 앞으로 더 연구되어야 할 과제이며 본 연구실에서는 이를 위한 연구를 계속 수행하고 있다.

organophilic treatment on reactivity, morphology and fracture properties, *Polym.*, **46**, pp. 1267-1278, 2005.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymer.2005.10.089>

- [8] M. A. Kumar, K. H. Reddy, Y. V. Mohana Reddy, G. Ramachandra Reddy, N. S. V. Kumar, B. H. Nanjunda Reddy, "Assessment of nanoclay filled epoxy on mechanical, thermal and chemical resistance properties of nanocomposites", *J. Metal. Mater. Sci.*, **52**, pp. 305-315, 2010.
- [9] C.-T. Lee, M. Jang, and T.-M. Park, "A Foamed Body through the Complexation with the Sepiolite and Expanded Pearlite", *Appl. Chem. Eng.*, **23**(1), pp. 77-85, 2012.
- [10] Seokyoung CMT Co., [www.sk-cmt.co.kr](http://www.sk-cmt.co.kr)
- [11] Young-il Chemical Co., [www.youngilchem.co.kr](http://www.youngilchem.co.kr)

## References

- [1] A. M. Papadopoulos, "State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments", *Energy and Buildings*, **37**, pp. 77-86, 2005.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.05.006>
- [2] A. Berge and P. Johansson, "Literature Review of High Performance Thermal Insulation", *Chalmers Civil and Environmental Engineering*, Report 2012:2.
- [3] M. A. Kumar, G. R. Reddy, V. P. Chandrakar, "Hydrophilic fumed silica/clay nanocomposites: Effect of silica/clay on performance", *International Journal of Nanomaterials and Biostructures*, **1**(1), pp. 1-11, 2011.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2011/189731>
- [4] J. C. Lin, L. C. Chang, M. H. Nien, H. L. Ho, "Mechanical behavior of various nanoparticle filled composites at low- velocity impact", *Comp. Struct.*, **74**, pp. 30-36, 2006.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2005.03.006>
- [5] Y. Zheng, Y. Zheng, R. Ning, "Effects of nanoparticle SiO<sub>2</sub> on the performance of nanocomposites", *Mater. Lett.*, **57**, pp. 2940-2944, 2003.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-577X\(02\)01401-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-577X(02)01401-5)
- [6] M. H. G. Wichmann, M. Cascione, B. Fiedler, M. Quaresimin, K. Schulte, "Influence of Surface treatment on mechanical behaviour of fumed silica/epoxy nanocomposites", *Comp. Interf.*, **13**, pp. 699-715, 2006.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1163/156855406779366723>
- [7] L. Le Pluart, J. Duchet, H. Sautereau, "Epoxy/montmorillonite nanocomposites: influence of

## 안 원 술 (WonSool Ahn)

[정회원]



- 1979년 2월 : 서울대학교 화학공학과 (공학사)
- 1981년 2월 : 서울대학교 화학공학과 (공학석사)
- 1992년 8월 : KAIST 화학공학과 (공학박사)
- 1995년 3월 ~ 현재 : 계명대학교 화학공학과 교수

<관심분야>

고분자 기능화, 고분자복합재료, 고무재료 등