

Effect of Ceramic Fibers and SiC Opacifiers on Thermal Conductivities of Fumed Silica-Based Thermal Insulation Media

Young-Pil Kwon, Hyuk-Chon Kwon, Sung Park, and Jae Chun Lee[†]

Department of Materials Science and Engineering, Myongji University, Yongin 449-728, Korea

(Received November 19, 2007; Accepted December 18, 2007)

탄화규소 불투명화재와 세라믹섬유가 Fumed 실리카 단열재의 열전도도에 미치는 영향

권영필 · 권혁천 · 박성 · 이재춘[†]

명지대학교 신소재공학과

(2007년 11월 19일 접수; 2007년 12월 18일 승인)

ABSTRACT

The thermal conductivities of nano-sized fumed silica-based insulation media were investigated by varying a mean particle size of the silicon carbide opacifiers and ceramic fiber content. Opacifying effect of ceramic fiber and silicon carbide powders was discussed in terms of their content and the mean particle size of them. As the fiber contents increased from 10 wt% to 30 wt% in a material, its thermal conductivity at temperatures of about 620°C decreased from 0.171 Wm⁻¹K⁻¹ to 0.121 Wm⁻¹K⁻¹. Meanwhile, the thermal conductivity at temperatures of about 625°C decreased from 0.128 Wm⁻¹K⁻¹ to 0.092 Wm⁻¹K⁻¹ as the mean SiC particle size decreased from 31 μm to 10 μm.

Key words : Fumed silica, Insulation, Thermal Conductivity, Ceramic Fiber, Silicon Carbide Opacifier

1. 서 론

초단열재는 나노크기의 실리카 분말 또는 에어로겔을 주성분으로 하여 부재료로 탄화규소 또는 티타니아와 같은 입자를 불투명화제로 첨가하고 구조강화를 위해 세라믹 섬유로 보강시킨 보드형태로 종종 제조된다.^{1,2)} 자동차, 비행기 등의 운송기관에 사용하기 위한 고체산화물 연료전지의 경우, 소형화 및 경량화를 필요로 한다. 따라서 700°C 이상의 고온에서 작동되는 고체산화물 연료전지의 효율적인 단열을 위해서 부피가 작으며 고강도 경량 초단열재의 사용은 필수적이다. 대표적인 나노크기의 실리카 분말의 한 종류인 실리카흙은 SiO₂ 사면체 구조가 비규칙적으로 연결된 그물망 구조를 형성하여 나노 수준의 기공크기를 가지고 있어서 이러한 소재로 만든 초단열재는 예로, 상온의 경우, 공기의 열전도도인 0.026 Wm⁻¹K⁻¹ 보다도 낮은 열전도도 값을 나타내는 것으로 알려져 있다. 한편 실리카 소재의 비흡수계수는 8 μm 이하의 파장에서는 매우 작기 때문에 순수한 실리카의 복사열전도는 온

도가 증가됨에 따라 크게 증가한다.³⁾ 따라서, 고온에서 복사열전도를 방지하기 위해서는 실리카흙을 주성분으로 하는 단열재에 복사열을 산란 또는 흡수하여 복사열전도를 감소시킬 수 있는 불투명화제 첨가가 필수적으로 요구된다.⁴⁾ 본 논문의 목적은 함량이 상이한 세라믹섬유 또는 평균입자크기가 상이한 탄화규소 불투명화제가 포함된 단열재를 제조하고 고온 열전도도를 측정하여, 상기 부재료 및 함량이 열전도도에 미치는 영향을 조사하는데 있다.

2. 실험 방법

비표면적이 200 m²g⁻¹인 실리카흙 분말(CAB-O-SIL M-5, CABOT)를 단열재의 주 원료로 사용하였다. 불투명화제로 입도가 다른 세 종류의 탄화규소 분말을 사용하였다. 사용되는 탄화규소 분말의 입도분포는 입자크기분석기(SHIMADZU, SALD-2001)로 조사하였다. 또한, 지름이 3~5 μm인 상업용 알루미늄규산염 세라믹섬유(Cerfiber, Thermal Ceramics)를 구조보강제로 사용하였다.

단열재는 자체적으로 제작한 건식혼합기를 사용하여 제조하였다.²⁾ 두께와 지름이 각각 약 10 mm와 40 mm인 디스크 모양의 시편은 성형 원 시편의 부피밀도가 0.25~0.33이 되게끔 성형하였다. 성형된 각 단열재 시편의 부피밀

[†]Corresponding author : Jae Chun Lee

E-mail : jcl@mju.ac.kr

Tel : +82-31-330-6462 Fax : +82-31-330-6457

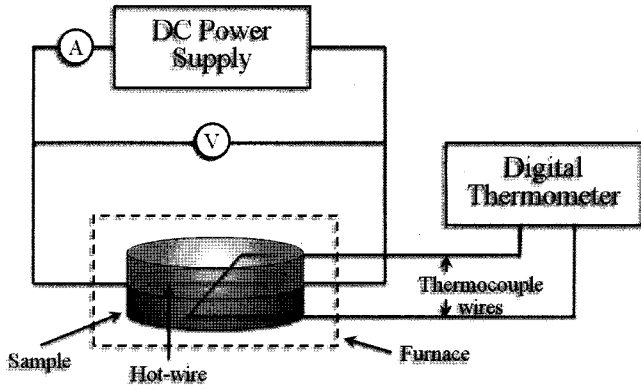


Fig. 1. Experimental set up for thermal conductivity measurement by transient hot-wire technique.

도는 부피와 무게로 측정하여 계산하였으며, 이론밀도는 혼합물 법칙과 조성으로 계산하였다. 단열재의 열전도도는 순간열선법(Hot Wire method)을 사용하여 측정하였다.⁵⁾ 온도상승 대 경과시간은 Ni-NiCr 선으로 용접한 K형 열전대의 팁으로 측정하였는데 열전대의 팁은 Fig. 1에 나타난 대로 가열된 선과 직접적으로 접촉하였으며 똑같은 크기의 두 개의 시편 사이 중앙에 위치시켰다. 열전도도 측정은 상온과 각각 약 200, 400, 600°C 부근으로 유지된 고온에서 각각 측정하였다. 순간열선법에 의한 열전도도 λ 는 식 (1)로 나타내며, 열선이 발열하는 시간에 따른 시편의 온도 상승추정자료를 이용하여 열전도도 λ 를 계산하였다.

$$\lambda = 0.0796 I^2 R / S \quad (1)$$

여기서 λ 는 시편의 열전도도이며, I 는 열선에 흐르는 전류, R 은 열선의 저항, 그리고 S 는 열선이 발열하는 동안 시간 t 에 대한 온도상승 곡선의 기울기를 각각 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

단열재 시편의 조성과 부피밀도, 623~637°C에서의 열전도도 측정 값을 Table 1에 각각 나타내었다. 시편 SSF1-75, SSF2-75, SSF-75의 경우, 비교적 낮은 성형압력인 2MPa를 목표로 하였는데, 세라믹섬유와 탄화규소가 동일하게

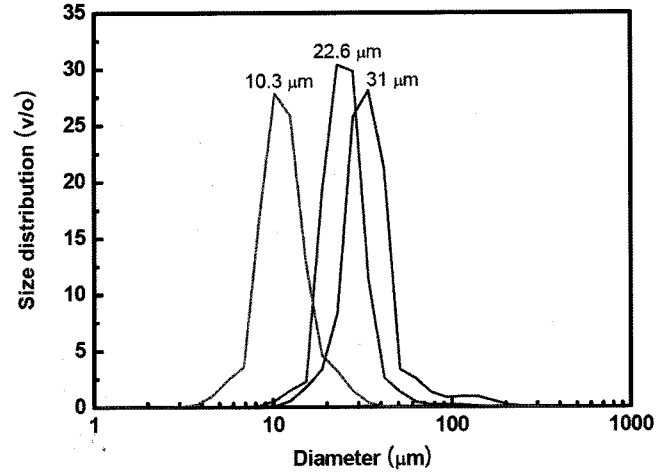


Fig. 2. Particle size distribution curves of three different SiC powders used as opacifiers.

함유되었음에도 부피밀도가 0.31~0.33 cm⁻³으로 일정하지 않은 것은, 시편성형 시에 목표로 한 성형압력을 정확하게 유지하지 못하였기 때문으로 판단된다. Fig. 2는 불투명화제로 사용한 세 종류의 탄화규소 분말의 입도분석 그래프로 모든 분말이 비교적 균일한 입자크기로 이루어져 있음을 알 수 있으며 각 분말의 평균입자크기를 Table 1에 나타내었다.

각 시편에 대해 Table 1에 나타난 623~637°C에서의 열전도도 측정값을 살펴보면 세라믹섬유가 첨가되고 평균 입자크기가 10.3 μm로 가장 작은 탄화규소 분말을 불투명화제로 사용된 SSF1-75 시편의 열전도도가 637°C에서 0.094 Wm⁻¹K⁻¹로 Table 1에 나타난 시편 중 가장 낮음을 알 수 있다. Fig. 3은 실리카 단열재에 구조보강재로 세라믹섬유를 함유한 시편, 즉 SF계 시편에 대해, 623~624°C에서 열선 발열시간에 따른 시편의 온도 상승 곡선을 보여준다. 세라믹섬유 중량백분율이 10%에서 30%로 증가함에 따라, 시편의 온도상승 기울기가 증가하는 것을 알 수 있는데 이것은 단열성능이 증가함을 의미한다. Fig. 4는 Fig. 3과 같은 측정자료로부터 얻은 결과로, 세라믹 함량이 증가함에 따라 250°C 이상에서 단열재의 고온 열전도도 값은 낮아지고 있음을 보여주고 있다. 치밀한 구조

Table 1. Physical Properties and Compositions for Various Insulation Media

Sample	Density (gcm ⁻³)	Thermal conductivity at ~625°C (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	Composition (wt%)			Mean SiC particle size (μm)
			Fumed silica	SiC	Ceramic fiber	
SF-90	0.26	0.171 (624°C)	90	0	10	-
SF-80	0.29	0.133 (624°C)	80	0	20	-
SF-70	0.30	0.121 (623°C)	70	0	30	-
SSF1-75	0.32	0.094 (637°C)	75	15	10	10.3
SSF2-75	0.33	0.114 (625°C)	75	15	10	22.6
SSF3-75	0.31	0.128 (625°C)	75	15	10	31.0

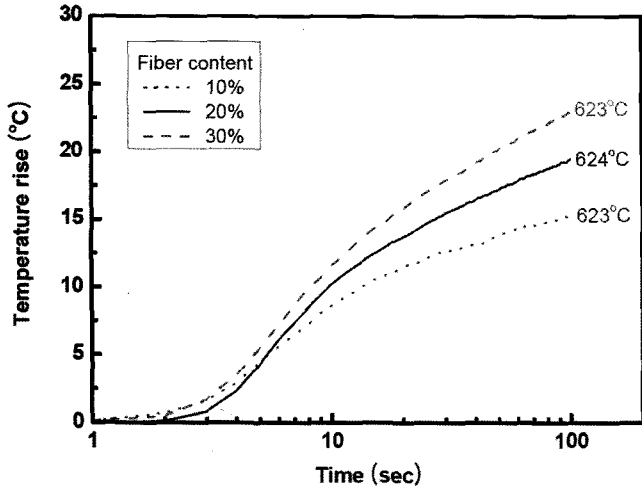


Fig. 3. Effect of ceramic fiber content on the wire temperature rise during heating of a series of SF samples at temperatures of 623~624°C: (---) SF-70; (—) SF-80; and (· · ·) SF-90.

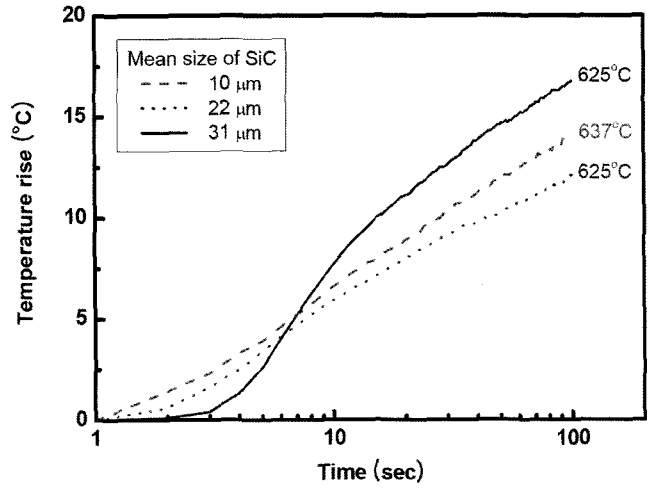


Fig. 5. Effect of mean SiC particle size on the wire temperature rise during heating of a series of SSF samples at temperatures of 625~637°C: (---) SSF1-75; (· · ·) SSF2-75; and (—) SSF3-75.

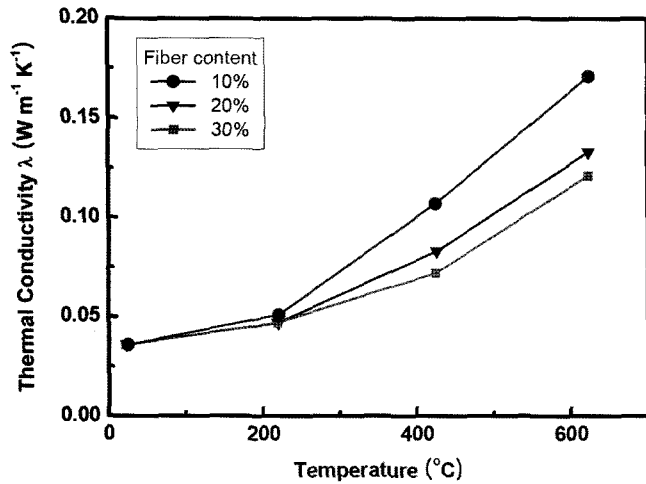


Fig. 4. Effect of ceramic fiber content on the high temperature thermal conductivity of a series of SF samples: (●) SF-90; (▼) SF-80; and (■) SF-70.

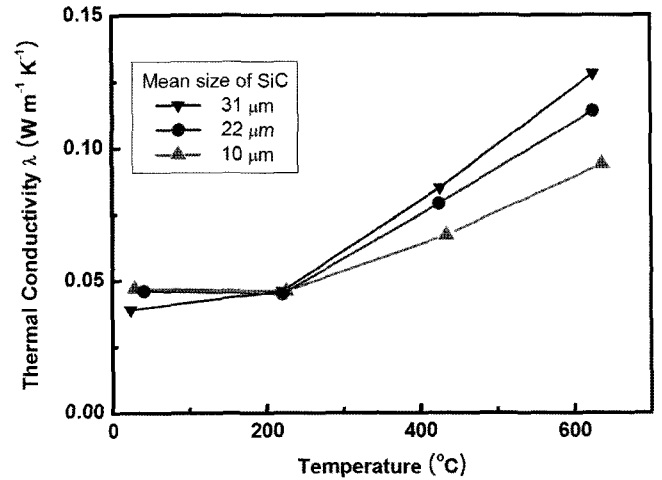


Fig. 6. Effect of mean SiC particle size on the high temperature thermal conductivity of a series of SSF samples: (▲) SSF1-75; (●) SSF2-75; and (▼) SSF3-75.

의 세라믹섬유는 나노기공을 갖는 실리카흙에 비해 고체 열전도도는 수십 배 크다. 따라서 단열재에 세라믹섬유가 많이 함유된 시편일 수록, 열전도도의 상승을 예상할 수도 있으나, Figs. 3과 4에 나타난 결과는 예상과는 반대의 결과를 보여주고 있다. 이것은 본 단열재 시편의 경우에, 약 250°C 이상에서 열전도는 고체열전도 보다는 복사열전도가 주요 열전달 기구가 됨을 의미한다. 즉 실리카흙을 주원료로 하는 단열재의 경우에, 세라믹섬유는 구조보강 이외에도 복사열전달을 억제하는 불투명화제의 역할을 수행하는 것을 뜻한다.⁶⁾ 이것은 Fig. 4에도 잘 나타나 있는데, 세라믹섬유가 10% 함유된 시편의 열전도도는 624°C에서 0.171 Wm⁻¹K⁻¹인 반면 30% 함유된 시편의 열전도도는 623°C에서 0.121 Wm⁻¹K⁻¹로 나타난다. 세라믹

섬유 중량백분율을 10%에서 30%로 증가함에 따라 약 41%의 고온 열전도도 감소효과가 얻어지므로, 세라믹섬유가 증가됨에 따른 복사열전도 감소효과임을 다시 한번 확인할 수 있다.

Figs. 5와 6은 세라믹섬유와 불투명화제로 사용한 탄화규소 분말이 중량백분율로 각각 10%와 15% 함유된 SSF계 실리카 단열재 시편에서 불투명화제로 사용한 탄화규소 분말의 평균입자크기가 단열재의 고온 열전도도에 대한 영향을 분석한 결과이다. Fig. 5는 Table 1에 나타난 세 종류의 SSF계 시편에 대해, 625~637°C 온도에서 열선 발열시간에 따른 시편의 온도 상승 곡선을 보여준다. 여기서 31 μm 탄화규소 분말을 함유한 시편은 0.5 A 전류를, 22 μm과 10 μm 입자를 함유한 시편은 0.4 A 전류

를 사용하였다. 탄화규소 분말의 평균입자크기가 31 μm 에서 10.3 μm 으로 감소함에 따라, 시편의 온도상승 기울기가 증가하는 것을 알 수 있는데 이것은 평균입자크기가 작을 수록 단열성능이 증가함을 의미한다.

Fig. 6은 Fig. 5와 같은 측정자료로부터 얻은 결과로, 탄화규소 분말의 평균입자크기가 작아짐에 따라 약 250°C 이상에서는 단열재의 고온 열전도도 값은 낮아지고 있음을 보여주고 있다. 탄화규소는 세라믹소재 중에서 고체열전도도가 매우 큰 소재의 하나로 알려져 있는데, Figs. 4와 6에 나타난 시험결과를 비교하면, 탄화규소는 입자크기에 따라, 복사차폐재로 작용하여 실리카 단열재의 고온 열전도도를 크게 낮추거나 아니면 복사차폐재로의 역할이 크지 않을 것으로 판단된다. 즉 Fig. 6에 나타난 결과를 보면, 평균입자크기가 31 μm 인 탄화규소 분말을 함유한 시편의 열전도도는 625°C에서 0.128 $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 인 반면 평균입자크기가 10.3 μm 분말을 함유한 시편의 열전도도는 637°C에서 0.094 $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 로 나타난다. 따라서 625°C에서 탄화규소 분말의 평균입자 크기가 31 μm 에서 약 33% 수준인 10.3 μm 으로 작아짐에 따라 약 28%의 열전도도 감소효과가 나타난다. 불투명화제의 입자크기가 감소됨에 따른 복사열전도 감소효과임을 다시 한번 확인할 수 있다. 불투명화제 분말의 적외선 산란효과는, 적외선 파장크기와 불투명화제의 입도와 관계가 있을 것으로 판단된다. 예로 250~820°C 온도에서 흑체복사가 나타내는 피크방사강도의 파장은 약 2.7에서 5.5 μm 이다.³⁾ 한편 복사를 산란 또는 흡수할 수 있는 능력은 불투명화제로 사용되는 분말의 비표면적이 클 수록 크다. 따라서 이 두 요소를 고려하면 탄화규소 분말의 평균입자 크기가 10.3 μm 인 분말의 복사열전도 차폐효과가 상대적으로 가장 클 것으로 판단된다.

4. 결 론

실리카흙을 주 원료로 하여 세라믹섬유 또는 탄화규소 불투명화제를 함유한 단열재를 제조하고 순간열선법을 사

용하여 상온에서부터 637°C 부근까지 고온 열전도도를 측정하여 이들 부재료가 단열재의 고온 열전도도에 대한 영향을 조사하였다. 실리카흙을 주원료로 하는 단열재의 경우, 세라믹섬유는 약 250°C 이상의 고온에서 복사열전달을 억제하는 불투명화제의 역할을 수행하며 그 효과는 매우 큼을 알 수 있었다. 불투명화제로 사용한 탄화규소 분말의 평균입자크기가 31 μm 에서 10.3 μm 으로 작아짐에 따라 약 250°C 이상부터 단열재의 고온 열전도도는 감소하여 약 625°C에서는 72% 수준을 나타낸다. 탄화규소 분말의 평균입자크기가 고온 열전도도에 미치는 영향은 흑체복사가 나타내는 피크방사강도의 파장과 분말의 비표면적 영향을 동시에 고려하면 설명할 수 있다.

Acknowledgment

본 연구는 에너지관리공단 에너지기술 학술진흥사업(에너지효율 향상)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. J. Wang, J. Kuhn, and X. Lu, "Monolithic Silica Aerogel Insulation Doped with TiO_2 Powder," *J. Non-Cryst. Solids*, **186** 296 (1995).
2. H. Abe, I. Abe, K. Sato, and M. Naito, "Dry Powder Processing of Fibrous Fumed Silica Compacts for Thermal Insulation," *J. Am. Ceram. Soc.*, **88** 1359 (2005).
3. R. Caps and J. Fricke, in *Aerogels* edited J. Fricke, Springer, Heidelberg, p110 (1986).
4. J. Kuhn, T. Gleissner, M.C. Arduini-Schuster, S. Korder, and J. Fricke, "Integration of Mineral Powders into SiO_2 Aerogels," *J. Non-Cryst. Solids*, **186** 291 (1995).
5. J. Healy, J. J. de Groot, and J. Kestin, "The Theory of the Transient Hot-wire Method for Measuring Thermal Conductivity," *Physica*, **82C** 392 (1976).
6. F. Aslanaj, G. Jeandel, J. R. Roche, and D. Lacroix, "Transient Combined Radiation and Conduction Heat Transfer in Fibrous," *Int. J. Thermal Sciences*, **43** 939 (2004).