

論文

레이저 섬광법을 이용한 Carbon/Phenolic 및 Silica/Phenolic
내열복합재료의 열전도도 분석

김희영* · 김평원* · 홍순형* · 김연철** · 예병한** · 정발**

**Analysis of Thermal Conductivities of Carbon/Phenolic and
Silica/Phenolic Ablative Composites by Laser Pulse Method**

H. Y. Kim*, P. W. Kim*, S. H. Hong*, Y. C. Kim**, B. H. Yeh** and B. Jung**

ABSTRACT

The thermal properties of carbon/phenolic and silica/phenolic ablative composites were investigated by measuring the heat capacity, thermal diffusivity and thermal conductivity. The heat capacities of carbon/phenolic and silica/phenolic composites were calculated from differential scanning calorimeter curve. The thermal diffusivities of carbon/phenolic and silica/phenolic composites were measured by the laser flash method with varying laminated direction, i.e., with laminar direction and across laminar direction. The thermal diffusivities decreased with increasing temperature. The thermal conductivities of carbon/phenolic and silica/phenolic composites were calculated using the heat capacity, density and thermal diffusivity. The thermal conductivities increased with increasing temperature. The thermal conductivity of with laminar direction is two times higher than that of across-laminar direction in carbon/phenolic composite due to the directionality of thermal conductivity of carbon fiber. The thermal conductivities of two dimensional fiber reinforced composites were analyzed using the conductivities of constituents and volume fraction of each constituent. The thermal conductivities of carbon fiber and silica fiber were calculated from thermal conductivities of carbon/phenolic and silica/phenolic composites. The thermal conductivities of carbon/phenolic and silica/phenolic composites at RT were predicted from thermal conductivities of fiber and resin with varying the volume fraction of fiber.

초 록

Carbon/phenolic 및 silica/phenolic 내열 복합재료의 강화재의 종류와 적층방향에 따른 비열, 열확산 계수, 열전도도를 분석하였다. Carbon/phenolic 및 silica/phenolic 복합재료의 비열은 시차 주사 열량법을 이용하여 측정하였으며, 열확산계수는 레이저 섬광법을 이용하여 laminar와 평행방향과 laminar와 직교방향으로 측정하였다. Carbon/phenolic 및 silica/phenolic 복합재료의 열확산계수는 온도가 증가함에 따라 감소하였다. Carbon/phenolic 및 silica/phenolic 복합재료의 열전도도를 밀도, 열확산계수 및 비열을 이용하여 계산하였다. 열

* 한국과학기술원 재료공학과

** 국방과학연구소

전도도는 온도가 증가함에 따라 증가하였으며, carbon/phenolic의 경우 laminar와 평행방향의 열전도도가 laminar와 직교방향의 열전도도보다 2배 높은 이방성을 나타내었으며 이는 carbon 섬유유의 열전도도 이방성 때문으로 해석되었다. 이차원 섬유강화 복합재료의 열전도도를 기지와 강화재의 열전도도와 부피분율을 이용하여 해석하였다. Carbon/phenolic 및 silica/phenolic 복합재료의 열전도도를 적층방향에 따라 강화재와 기지의 열전도도를 이용하여 해석하여 carbon 섬유와 silica 섬유의 열전도도를 계산하였다. 계산된 섬유의 열전도도와 기지의 열전도도로부터 섬유의 부피분율에 따른 복합재료의 상온열전도도를 예측할 수 있었다.

1. 서 론

삭마재료(ablative materials)는 초음속항공기나 우주선의 표면 또는 로케트나 미사일의 노즐부위에 사용되어 재료가 화학적, 물리적 상태가 변화되며 열을 흡수하여 열 차폐의 기능을 하는 소재이다[1-6]. 미사일 노즐 부위에는 밀도가 낮고, 내열성이 우수하고 연소가 스로부터 발생하는 열류(heat flux)에 의한 삭마율이 높은 섬유강화 복합재료가 열차폐재로 사용된다. 기지재료로는 열분해시 탄소의 수율이 가장 높은 페놀수지가 사용되며 강화재로는 탄소(C) 섬유, 실리카(SiO_2) 섬유등이 사용되어 열분해된 기지재료를 지지하는 역할을 한다[7].

내열성 복합재료의 삭마성능은 비열, 상변화에 따른 엔탈피변화가 클수록 향상되고 열전도도, 밀도가 클수록 저하된다. 따라서 내열성 복합재료의 설계, 구조성능 예측뿐만 아니라 내열성 복합재 구조체의 신뢰도를 향상시키기 위하여 복합재료의 비열, 열확산계수, 열전도도 등의 열적 물성을 아는 것이 필수적이다.

열확산계수 및 열전도도의 측정에 이용되는 주요 측정법으로는 직류 가열법[8], 펄스 가열법, 레이저 섬광법[9-10]등이 있으나 최근에는 레이저 섬광법이 주로 사용되고 있다. 레이저 섬광법(Laser Flash Method)은 1961년 Parker[9]에 의하여 측정 이론이 제기된 이후 레이저 기술의 향상과 더불어 급속히 발전되어 왔으며 현재는 열확산계수의 실용적 측정법으로 광범위하게 이용되고 있다[10]. 레이저 섬광법은 단시간에 측정이 가능하고, 데이터 취득이 용이하며 시편의 크기를 작게 할 수 있고, 고온 및 저온에서도 측정이 가능할 뿐만 아니라 전도성 재료와 비전도성 재료 모두 측정할 수 있는 장점이 있다. 레이저 섬광법의 원리는 펄스레이저를 이용하여 시료의 전면과 후면을 순간적으로 가열한 후 시료 후면에서의 온도상승곡선을 구한 다음 이 곡선으로부터 최고 온도에 도달하는 시간과 최고온도의 반에 도달하는 시간 $t_{1/2}$ 을 얻고 이 값들을 열확산방

정식에 대입하여 미지의 열확산계수를 구하는 방법이다.)

본 연구에서는 carbon/phenolic 및 silica/phenolic 내열 복합재료의 열확산계수를 레이저 섬광법을 이용하여 측정하고, 비열을 시차주사열량법(DSC)을 이용하여 측정하였다. 비열과 열확산계수로부터 carbon/phenolic 및 silica/phenolic 내열복합재료의 열전도도를 계산하고, 강화재의 종류와 적층방향, 부피분율에 따른 열적 특성의 변화를 분석하였다.

2. 실험방법

Carbon/phenolic 및 silica/phenolic 복합재료는 강화재로 평면직조된 carbon 섬유 및 SiO_2 섬유를 사용하고, 기지로 phenolic 수지를 사용하였다. 평면직조된 섬유 mat를 bias-tape을 이용하여 적층한 후 phenolic 수지를 함침한 후 autoclave에서 4MPa의 압력으로 80℃에서 30분, 130℃에서 90분, 150℃에서 120분의 조건으로 경화하였다.

밀도는 ASTM D792[11]에 규정된 수중침법을 이용하여 측정하였다. 각 복합재료에서 강화재의 무게 및 부피 분율을 ASTM D3171[12]에서 규정된 방법을 적용하여 끓는 질산에서 phenolic 수지를 용해시킨 후 잔류 강화재의 무게를 측정하여 구하였다.

비열의 측정은 ASTM E1269[13]에서 제시된 시차주사열량법(Differential Scanning Calorimeter, DSC)를 이용한 측정방법을 이용하였다. DSC를 이용한 비열 측정 원리는 열용량을 알고 있는 표준시편과 동일한 온도를 유지하며 시편을 가열하면서 표준시편과 시편의 에너지 공급량을 비교하는 것이다. 본 연구에서는 표준시편으로 고순도 Al_2O_3 분말을 사용하였고, 시편 홀더는 열전도가 높은 Al홀더를 사용하였다.

열확산계수의 측정은 레이저 섬광법을 이용하였다. 본 실험에 사용된 실험장치는 Fig. 1에 나타낸바와 같

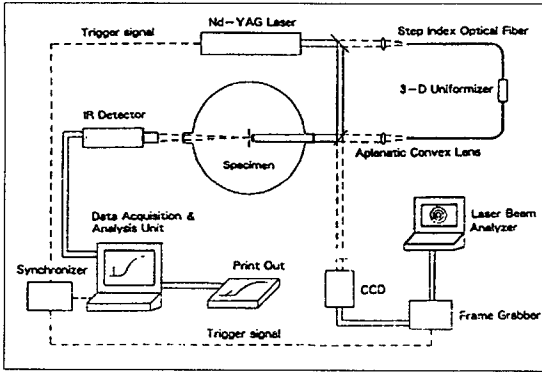


Fig. 1. Schematic diagram of laser flash equipment

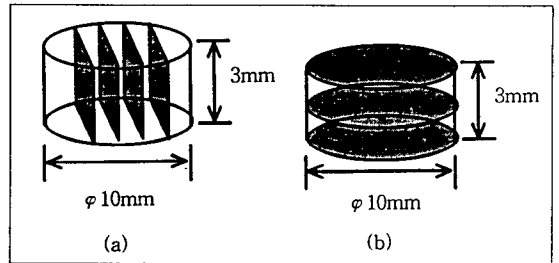


Fig. 2. Schematic diagrams of specimens of carbon/phenolic and silica/phenolic composites for thermal diffusivity measurement. (a) With laminar direction, (b) across laminar direction

이 열원부, 레이저빔의 모드믹싱부, 진공 및 온도조절부, 시료지지부 그리고 데이터 취득 및 해석부 등으로 구성된다[14]. 본 실험에서 시료의 가열원으로 사용되는 펄스 레이저는 Nd-YAG 레이저이며, 이는 레이저헤드, 레이저 펄스폭 조절장치, 레이저 출력 조절장치 그리고 전원공급기로 구성된다. 레이저헤드에는 광열의 정열을 위해 사용되는 He-Ne 레이저와 시료의 가열원으로 사용되는 Nd-YAG 레이저가 내장되어 있다. 일반 레이저빔은 중심부의 에너지 밀도가 높고 불균일한 분포를 가지고 있으나, 레이저 섬광법을 이용하여 열물성을 측정할 때에는 에너지 분포가 균일해야 하는데 이러한 레이저빔의 공간분포 균일화를 위해 레이저빔의 모드믹싱부를 설치하였다. 고온에서 열확산계수를 측정할 때 대류에 의한 열손실 및 대기중의 산소에 의한 산화를 방지하기 위하여 진공 하에서 시험한다. 진공 및 온도조절부는 진공조, 로터리 펌프, 가열히터 그리고 직류전력공급장치등으로 구성되어 있다. 시료지지부는 시료를 직접 지지하는 부분과 그것을 히터 내에 히터와 접촉되지 않도록 장착하는 부분으로 이루어져 있다. 시료를 직접 지지하는 부분은 원형의 graphite의 중심부에 $\phi 11mm$ 의 홈을 파서 턱을 만들어 $\phi 10mm$ 의 크기로 가공된 시료가 위치되도록 만들어져 있다. 데이터 취득 및 해석부는 비접촉 적외선 방식 온도계, data acquisition board, IBM486 computer와 열확산계수 측정 프로그램 등으로 구성된다.

열확산계수의 측정용 시편은 carbon/phenolic 및 silica/phenolic 복합재료를 Fig. 2와 같이 각각 laminar와 수직방향과 평행방향으로 $\phi 10mm \times 3mm$ 의 원판형으로 가공하였다. 시료를 진공로에 장입하고, 레이저빔 균일화 장치를 이용하여 레이저빔의 에너지 분포

가 균일하게 되도록 하고, 레이저빔이 시료의 중앙에 정확하게 조사되도록 정열한다. 진공펌프를 이용하여 노 내부를 10^{-5} torr 의 진공으로 만든 후 시료를 실험 조건에 맞추어 가열시킨다. 이 때 시료와 아주 근접한 위치에 텅스텐-라디움 열전대를 설치하여 측정하고자 하는 온도가 안정되는지를 확인하였다. 온도가 안정되면 레이저의 펄스폭, 충전전압 등 발진 상태를 조절한 후 레이저를 발진시켜 시료를 가열하고, 시료 이면의 온도 변화를 방사계를 이용하여 측정하고, 측정된 데이터를 곡선 보간법을 이용하여 해석하고 열확산계수를 구한다. Silica/phenolic 시편의 경우 시편 표면에서 레이저의 반사로 시편이 충분한 에너지를 흡수하지 못하여 S/N비가 작아져 신호처리가 어렵고, 오차발생이 커지므로 표면에 그라파이트를 칠하여 재료 표면에서의 반사를 줄이고, 더 많은 에너지를 흡수하도록 하였다.

3. 결과 및 고찰

Carbon/phenolic과 silica/phenolic 복합재료에서 강화재의 무게 및 부피분율을 ASTM D3171[12]에 따라 다음식으로부터 측정하였다.

$$W_f = \frac{m_f}{m_{total}} \quad (1)$$

$$V_f = \frac{m_f / \rho_f}{m_f / \rho_f + m_m / \rho_m} = \frac{m_f / \rho_f}{m_{total} / \rho_{total}} \quad (2)$$

Table 1. The density, weight fraction and volume fraction of carbon/phenolic and silica/phenolic composites

Specimen		Weight Fraction(%)		Volume Fraction(%)		Density (g/cm ³)
		Fiber	Matrix	Fiber	Matrix	
Carbon/Phenolic	Across	59.0	41.0	57.2	42.8	1.45
	With	62.3	37.7	60.5	39.5	1.45
Silica/Phenolic	Across	66.5	33.5	58.7	41.3	1.79
	With	64.9	35.1	57.0	43.0	1.79

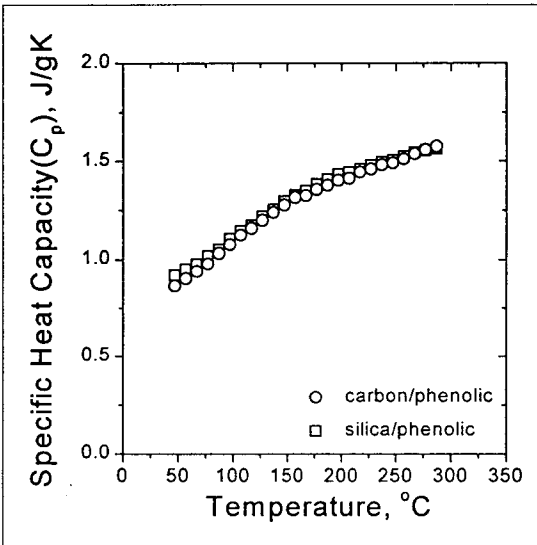


Fig. 3. The specific heat capacities of carbon/phenolic and silica/phenolic composites

이때 W_f 는 강화재의 무게분율, V_f 는 강화재의 부피분율, m_f 는 강화재의 무게, m_{total} 은 복합재료의 무게, ρ_f 는 강화재의 밀도, ρ_m 은 기지의 밀도, ρ_{total} 은 복합재료의 밀도를 나타낸다.

Carbon/phenolic과 silica/phenolic 복합재료에서 강화재의 무게는 끓는 질산으로 phenolic 기지를 용해 후 측정하였다. 복합재료의 밀도는 ASTM D792[11]에 규정된 Archimedes의 원리를 이용하여 측정하였으며, 용액은 phenolic 수지의 흡습성을 고려하여 글리세롤을 이용하였다. Carbon/phenolic과 silica/phenolic 복합재료의 밀도, 무게분율 및 부피분율을 Table 1에 나타내었다.

DSC 곡선으로부터 구한 온도에 따른 비열을 Fig. 3에 나타내었다. Carbon/phenolic과 silica/phenolic의 비열은 상온에서 각각 0.864J/gK, 0.919J/gK로 측정되었고, 온도가 증가함에 따라 증가하여 100 °C에서는

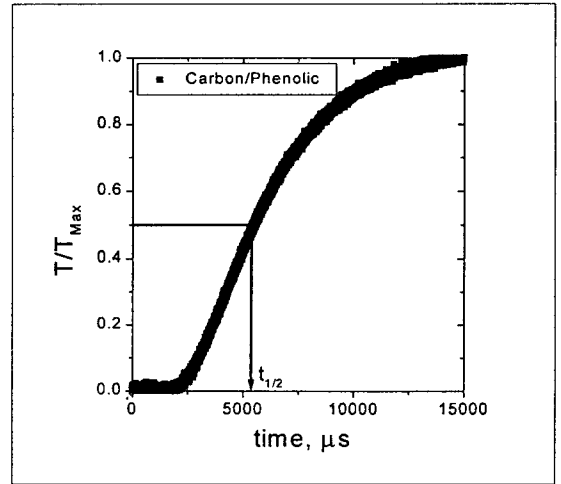


Fig. 4. Temperature profile on rear side of specimen

1.076J/gK, 1.106J/gK, 290 °C에서는 1.577J/gK, 1.564J/gK으로 측정되었다. 본 실험에서 구한 carbon/phenolic과 silica/phenolic의 비열은 상온에서 290 °C까지 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

$$C_{p,c/p} = 0.2035 + 9.54 \times 10^{-3} T - 2 \times 10^{-5} T^2 + \frac{3.5834 \times 10^2}{T^2} \quad (3)$$

$$C_{p,s/p} = 0.2971 + 1.028 \times 10^{-3} T - 2 \times 10^{-5} T^2 + \frac{3.1883 \times 10^2}{T^2} \quad (4)$$

이때 $C_{p,c/p}$ 는 carbon/phenolic 복합재료의 비열이고, $C_{p,s/p}$ 는 silica/phenolic의 비열을 나타내고, T의 단위는 °C이다.

레이저 섬광법으로 carbon/phenolic 및 silica/phenolic 복합재료의 열확산계수를 상온에서 140 °C의 범위에서 측정하였다. 앞장에서 설명한바와 같이 레이저 pulse의 도달 후 시편의 후면에서의 온도상승곡선을 측정한 후 최고 온도의 반에 도달하는 시간, 즉 $t_{1/2}$ 로

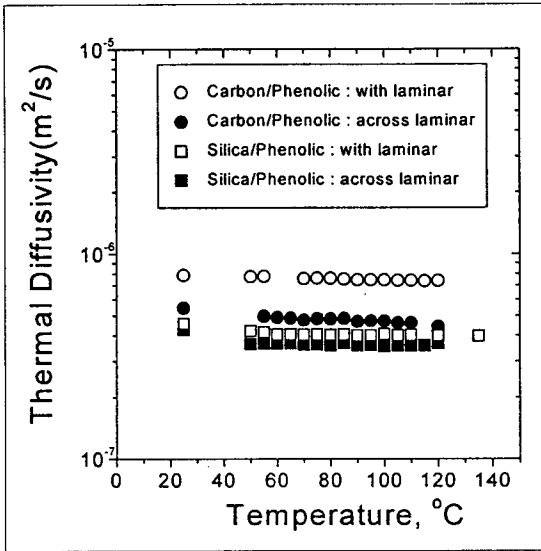


Fig. 5. Thermal diffusivities of carbon/phenolic and silica/phenolic composites with varying temperature

부터 열확산계수를 측정하였다. Fig. 4는 carbon/phenolic 시편의 대표적인 온도상승곡선으로 이 곡선에서 $t_{1/2}$ 을 측정 한 후 아래 식에서 열확산계수를 계산하였다.

$$\alpha = \frac{1.37L^2}{\pi^2 t_{1/2}} = \frac{0.1388L^2}{t_{1/2}} \quad (5)$$

이때, L은 시편의 두께이고, 단위는 mm이다.

Carbon/phenolic 및 silica/phenolic 복합재료의 온도에 따른 열확산계수의 측정결과를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 carbon/phenolic 및 silica/phenolic 복합재료의 열확산계수는 온도가 증가함에 따라 감소하는 것으로 측정이 되었으며, 강화재의 종류와 방향에 따라 열확산계수는 다음과 같이 수식화 할 수 있다.

$$\alpha_{clp,with} = 9.17 \times 10^{-7} - 1.94 \times 10^{-9}T + 7.12 \times 10^{-12}T^2 - \frac{5 \times 10^{-5}}{T^2} \quad (6)$$

$$\alpha_{clp,across} = 4.34 \times 10^{-7} + 1.24 \times 10^{-9}T - 9.78 \times 10^{-12}T^2 + \frac{5 \times 10^{-5}}{T^2} \quad (7)$$

$$\alpha_{slp,with} = 4.15 \times 10^{-7} - 3.22 \times 10^{-10}T + 1.43 \times 10^{-12}T^2 - \frac{3 \times 10^{-5}}{T^2} \quad (8)$$

$$\alpha_{slp,with} = 3.45 \times 10^{-7} + 6.91 \times 10^{-11}T + 2.97 \times 10^{-13}T^2 - \frac{5 \times 10^{-5}}{T^2} \quad (9)$$

Carbon/phenolic 복합재료의 경우 상온에서 laminar와 수직방향이 $5.515 \times 10^{-7} m^2/s$, laminar와 평행방향이 $7.761 \times 10^{-7} m^2/s$ 로 laminar와 평행방향이 높은 열확산계수를 나타내었다.

Carbon/phenolic 및 silica/phenolic 복합재료의 열전도도는 아래 식에서와 같이 열확산계수, 밀도, 비열의 곱으로부터 계산된다.

$$K = \alpha \rho C_p \quad (10)$$

이때 K는 열전도도, α 는 열확산계수, ρ 는 밀도, C_p 는 비열을 나타낸다. 측정된 carbon/phenolic 및 silica/phenolic 복합재료의 밀도, 비열, 열확산계수로부터 구한 열전도도를 ASTM C177[15]에 규정된 열판(hot plate)을 이용하여 측정된 NASA(National Aeronautics and Space Administration)의 결과[16]를 Fig. 6에 비교하여 나타내었다. Fig. 6에서 레이저 선풍법을 이용하여 측정된 열확산계수로부터 계산된 열전도도는 laminar에 수직인 방향의 경우 열판법에 의해 측정된 열전도도 값과 일치하였다. Laminar에 평행한 방향의 경우, 열확산계수로부터 계산된 열전도도가 열판법에 의해 측정된 값보다 약간 높게 나타났다.

각 복합재료에서 강화재의 종류와 적층방향에 따른 열전도도를 강화재와 기지의 열전도도와 부피분율을 이용해 분석하였다. 적층면에 평행한 방향의 열전도도와 적층면에 수직인 방향의 열전도도를 Fig. 7에 나타내며와 같이 각각 $K_{0^{\circ}2D}$ 및 $K_{90^{\circ}2D}$ 라 가정하였다. 이때 $K_{0^{\circ}2D}$ 및 $K_{90^{\circ}2D}$ 를 일방향 섬유강화 복합재료의 열전도도를 이용하여 표시하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_{0^{\circ}2D} = \frac{1}{2}K_{0^{\circ}1D} + \frac{1}{2}K_{90^{\circ}1D} \quad (11)$$

$$K_{90^{\circ}2D} = K_{90^{\circ}1D} \quad (12)$$

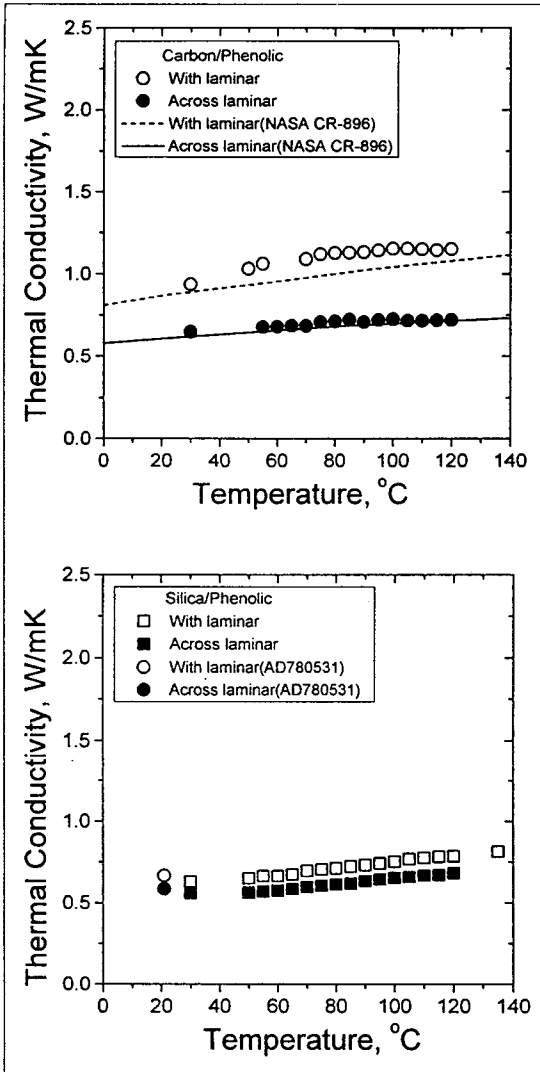


Fig. 6. Thermal conductivities of carbon/phenolic and silica/phenolic composites with varying temperature

이때 K_{02D} 는 laminar와 평행방향의 열전도도, K_{902D} 는 laminar와 수직방향의 열전도도, K_{01D} 는 일방향 섬유강화 복합재료에서의 섬유의 길이방향의 열전도도, K_{901D} 는 일방향 섬유강화 복합재료에서 섬유에 수직방향의 열전도도를 나타낸다. 일방향 섬유강화 복합재료에서의 섬유의 길이방향의 열전도도는 Fig. 7에 나타낸바와 같이 섬유가 열전달 방향에 평행하므로 rule-of-mixture를 이용하여 다음과 같이 강화재와 섬유의 길이방향 열전도도와 섬유의 부피분율을 이용해서 나

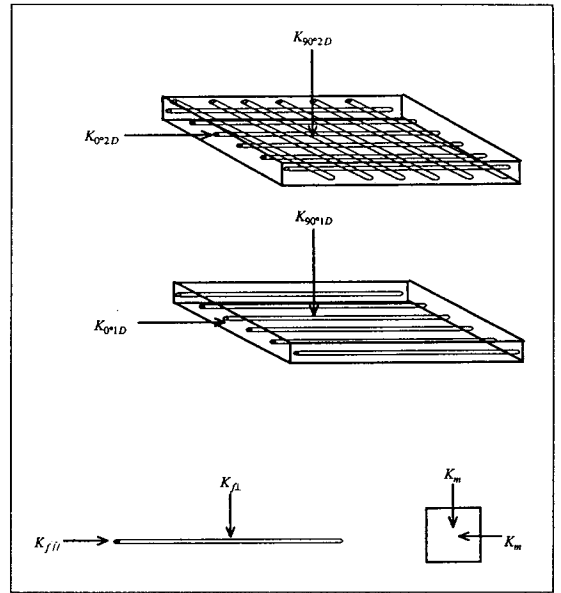


Fig. 7. The notation of thermal conductivities in two dimensional and one dimensional composite systems

타낼 수 있다.

$$K_{01D} = V_f K_{f||} + (1 - V_f) K_m \quad (13)$$

이때 $K_{f||}$ 는 섬유의 길이방향의 열전도도, K_m 은 기지의 열전도도, V_f 는 섬유의 부피분율을 나타낸다. 일방향 섬유강화 복합재료에서 섬유에 수직방향의 열전도도는 정립된 이론이 없으나, J. T. Mottram 과 R. Taylor[18, 19]은 carbon/phenolic 및 silica/phenolic 복합재료의 경우 다음 식이 가장 잘 만족하는 것으로 보고하였다.

$$V_{90*1D} = \left[\left[(1 - V_f)^2 \left(\frac{K_{f\perp}}{K_m} - 1 \right)^2 + 4 \frac{K_{f\perp}}{K_m} \right]^{1/2} - (1 - V_f) \left(\frac{K_{f\perp}}{K_m} - 1 \right) \right]^2 \times K_m / 4 \quad (14)$$

이때 $K_{f\perp}$ 는 섬유의 횡방향의 열전도도를 나타낸다. 위의 식 (13)과 식 (14)를 식 (11)와 식 (12)에 대입하면 carbon/phenolic 및 silica/phenolic 복합재료의 laminar와 평행방향과 laminar와 수직방향의 열전도도를 기지와 섬유의 열전도도로부터 계산할 수 있다. 한편 측정된 K_{02D} 와 K_{902D} 로부터 섬유의 열전도도 즉

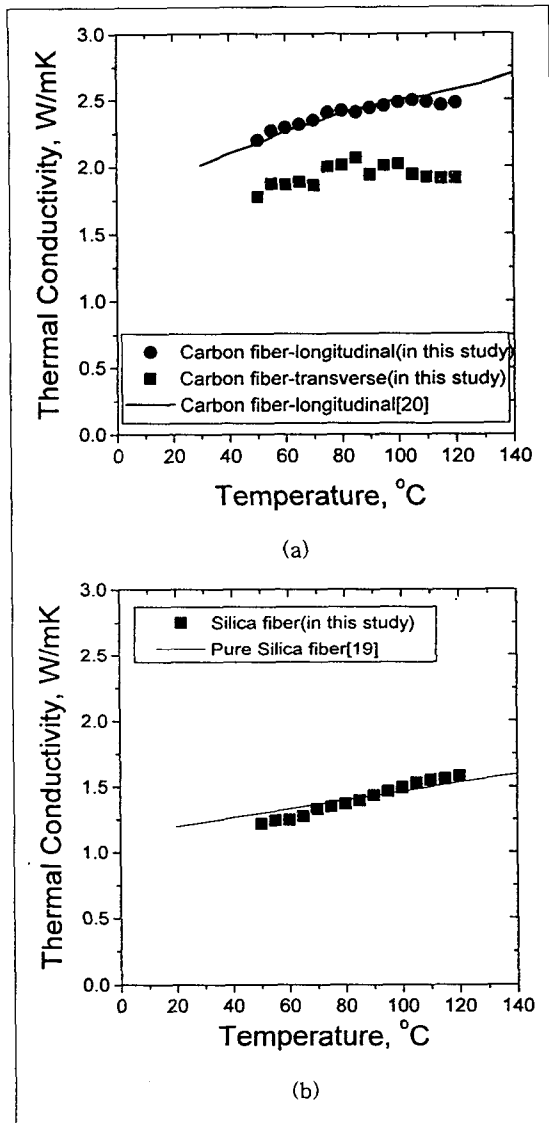


Fig. 8. Calculated thermal conductivities of fibers from thermal conductivities of carbon/phenolic and silica/phenolic composites with varying temperature. (a) carbon fiber and (b) silica fiber

$K_{//}$ 와 K_{\perp} 를 구할 수 있다. Silica 섬유는 섬유의 방향에 따라 열전도도의 방향성이 없으므로 $K_{//}$ 와 K_{\perp} 가 같다고 가정하고, carbon 섬유의 경우는 섬유의 길이방향과 횡방향의 열전도도가 다르므로 $K_{//}$ 와 K_{\perp} 를 각각 구하였다. 이때 phenolic resin의 열전도도는 W.A.Clayton의 결과[20]를 이용하였다. 식 (13)과

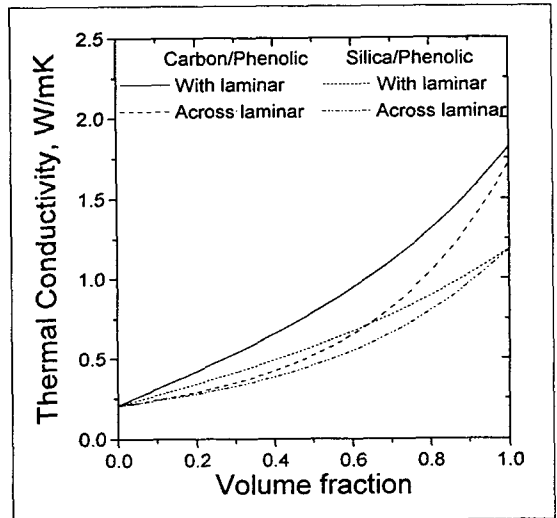


Fig. 9. Predicted thermal conductivities of carbon/phenolic and silica/phenolic composites with varying the volume fraction of fiber at RT

식 (14)에 의해 계산된 carbon 섬유와 silica 섬유의 열전도도를 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 8에서 보는 바와 같이 본 실험으로부터 계산된 silica 섬유의 열전도도는 J. T. Mottram과 R. Taylor[19]가 측정된 pure silica 섬유의 열전도도와 일치하는 것을 알 수 있다. 그리고, 본 실험에 의해 계산된 carbon 섬유의 섬유길이 방향의 열전도도는 W.A.Clayton[20]에 의해 보고된 rayon계 carbon 섬유의 열전도도와 일치하는 것으로 나타났다. Fig. 9에 carbon/phenolic과 silica/phenolic에서 laminar와 평행방향과 laminar와 수직방향의 열전도도를 섬유의 부피분율에 따라 나타내었다. Fig. 9의 열전도도는 Fig. 8에서 계산된 섬유의 열전도도와 기지의 열전도도를 이용하여 식 (11), 식 (12)로부터 계산되었다. Carbon/phenolic의 경우는 silica/phenolic의 경우에 비해 laminar와 평행방향과 laminar와 수직방향의 열전도도 방향성이 크게 나타났는데, Fig. 8에서 나타낸 바와 같이 carbon 섬유는 섬유의 길이방향의 열전도도가 횡방향의 열전도도에 비해서 크기 때문에 분석된다.

4. 결 론

본 연구에서는 로켓트 노즐부위에 열차폐 재료로 응

용되는 carbon/phenolic 및 silica/phenolic 내열성 복합재료의 강화제의 종류와 적층방향에 따른 비열, 열확산 계수, 열전도도를 분석하였다. Carbon/phenolic 및 silica/phenolic 복합재료의 비열은 DSC curve로부터 측정하였다. Carbon/phenolic 및 silica/phenolic 복합재료의 비열은 온도가 증가함에 따라 증가하였으며 상온에서 290℃의 온도범위에서 온도의 함수로 수식화하였다. 레이저 섬광법(Laser flash method)를 이용하여 carbon/phenolic 및 silica/phenolic 복합재료의 열확산계수를 측정하였다. Carbon/phenolic 복합재료의 경우 laminar와 평행방향이 laminar와 수직방향보다 높은 열확산계수를 나타내었다. Carbon/phenolic 및 silica/phenolic 복합재료의 열확산계수는 온도가 증가함에 따라 감소하였으며, 상온에서 120℃까지 온도에 따른 열확산계수를 예측가능한 식을 제시하였다. Carbon/phenolic 및 silica/phenolic 복합재료의 열전도도를 밀도, 열확산계수 및 비열을 이용하여 계산하였다. Carbon/phenolic 및 silica/phenolic 복합재료의 열전도도를 적층방향에 따라 강화제와 기지의 열전도도를 이용하여 해석하여 carbon 섬유와 silica 섬유의 열전도도를 계산하였다. Carbon/phenolic의 경우는 silica/phenolic의 경우에 비해 laminar와 평행방향과 laminar와 수직방향의 열전도도 방향성이 크게 나타났는데, carbon 섬유는 섬유의 길이방향의 열전도도가 횡방향의 열전도도에 비해서 크기 때문에 해석된다. 계산된 섬유의 열전도도로부터 섬유의 부피분율에 따른 carbon/phenolic 및 silica/phenolic 복합재료의 열전도도를 예측하였다.

참고 문헌

- Schmidt, D. L. Ablative Plastics for Re-entry Thermal Protection, WADD TR 60-862, USAF ASD, Wright-Patterson AFB, Ohio, 1961.
- Schmidt, D. L. Environmental Effects on Polymeric Materials, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1968, pp.487-587.
- Sutton, G. P., and Ross, D. M. Rocket Propulsion Elements, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1976, pp.107-122.
- Weiss Haus, H., and Engleberg, I. High Temperature Properties of Ablative Composite-I, J. Advanced Materials, Vol. 28, No. 2, 1997, pp.16-27.
- Goetzel, C. G. High-temperature properties of some reinforced phenolic composites, High Temp. High. Press., Vol. 12, 1980, pp.131-146.
- Clayton, W. A. and Fabish, T. J. Effect on Ablation on Thermal Conductivity to 5000R in Phenolic-Carbon and Phenolic-Graphite, Technical Report AFML-TR-67-413, 1967, pp.48-56.
- Stokes, E. H. Kinetics of Pyrolysis Mass Loss from Cured Phenolic Resin, J. Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 9, No. 2, 1995, pp.352-358.
- Powell, R. W. and Taylor, R. E. Multiproperty Apparatus and Procedure for High Temperature Determinations, Rev. Int. Hautes Temp. et Refract., Vol. 7, 1970, pp.298-304.
- Paker, W. J., Jenkins, C. P., Butter, C. P., and Annot, G. L. Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity and Thermal Conductivity. J. Appl. Phys., Vol. 32, 1961, pp.1679-1684.
- Arai, T., Baba, T., and Ono, A. Thermographic Investigation of Laser Flash Diffusivity Measurement, High Temp.-High. Press., Vol. 19, 1987, pp. 269-273.
- ASTM D792, Standard Test Method for Density and Specific Gravity(Relative Density) of Plastics by Displacement, pp.152-155.
- ASTM D3171, Standard Test Method for Fiber Content of Resin-Matrix Composites by Matrix Digestion, pp.109-111.
- ASTM E 1269, Standard Test Method for Determining Specific Heat Capacity by Differential Scanning Calorimetry, pp.787-791.
- 국립공업기술원, 공업기반 기술개발사업 최종보고서, 통상산업부, 1995.
- ASTM C177, Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus, pp.20-41.
- Engelke, W.T., Pyron, C. M., Jr and Pears, C.D. Thermal and Mechanical Properties of a Nondegraded and Thermally Degraded Phenolic-

Carbon Composite, NASA Contractor Report, NASA CR-896, National Aeronautics and Space Administration, Washington, D. C., 1967, pp.23-32.

17. ADD Report, AD780531.

18. Mottram, J. T., and Taylor, R. Thermal Conductivity of Fibre-Phenolic Resin Composites. Part I : Thermal Diffusivity Measurements, Composites Science and Technology, Vol. 29, 1987, pp.189-210.

19. Mottram, J. T., and Taylor, R. Thermal Conductivity of Fibre-Phenolic Resin Composites. Part II : Numerical Evaluation Measurements, Composites Science and Technology, Vol. 29, 1987, pp.211-232.

20. Clayton, W. A. Constituent and composite thermal conductivities of phenolic-carbon and phenolic-graphite ablators, AIAA/ASME 12th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 1971, pp.1-17.