

## 산화억제제 첨가에 의한 탄소/탄소 복합재료의 물성에 관한 연구 : 4. Gibbs 표면 자유에너지 및 층간 전단강도

박수진<sup>†</sup> · 조민석 · 이재락  
한국화학연구소 화학소재연구부  
(1999년 2월 23일 접수)

## Influence of Oxidation Inhibitor on Carbon-Carbon Composites : 4. Gibbs Surface Free Energy and ILSS Improvement

Soo-Jin Park<sup>†</sup>, Min-Seok Cho, and Jae-Rock Lee  
Advanced Materials Division, Korea Research Institute of Chemical Technology,  
P.O. Box 107, Yusong, Taejon 305-600, Korea  
<sup>†</sup>e-mail : psjin@pado.kRICT.re.kr  
(Received February 23, 1999)

요약: 이규화 몰리브덴 ( $\text{MoSi}_2$ )의 첨가 유무에 따른 일방향 탄소/탄소 복합재료의 표면 자유에너지 변화를 상온에서의 접촉각 측정 방법을 이용하여 고찰하였다. 접촉각은 Rame-Hart contact angle goniometer를 사용하여 측정하였으며, 증류수, diiodomethane, 그리고 ethylene glycol을 젖음액으로써 사용하였다. 본 연구에서는 Owens와 Wendt, 그리고 Wu가 제안한 방법에 따라서 복합재료의 표면 자유에너지를 분석하였다. 결과적으로 탄소/탄소 복합재료는  $\text{MoSi}_2$ 를 첨가함에 따라 표면 자유에너지의 London 비극성 요소의 증가를 가져왔으며, 반면에 극성 요소에는 별 영향이 없었다. Short-beam test를 통해 알아본 층간 전단강도의 결과로부터  $\text{MoSi}_2$ 를 첨가함에 따라 계면결합력이 증진되는 것을 알 수 있었다. 이것은 역시 접촉각 결과로부터 얻은 바와 같이 복합재료의 표면 자유에너지의 London 비극성 요소의 증가에 기인한다고 사료된다.

**ABSTRACT:** The effects of molybdenum disilicide ( $\text{MoSi}_2$ ) on the surface free energy of unidirectional carbon-carbon composites were investigated by contact angle measurements at room temperature. The contact angle measurements were carried out employing a Rame-Hart contact angle goniometer. Deionized water, diiodomethane and ethylene glycol were chosen as the testing liquids. In this work, Owens-Wendt and Wu's models were studied to analyze the surface free energy of the composites. As a result, the composites made with  $\text{MoSi}_2$  showed an increase of the London dispersive component of the surface free energy. But, the specific or polar component was not influenced by the addition of  $\text{MoSi}_2$ . Interlaminar shear strength of the composites determined by short-beam tests increased with increasing the  $\text{MoSi}_2$  contents. As mentioned above, this is due to improving the London dispersive component of surface free energy of the composites.

**Keywords:** carbon/carbon composites,  $\text{MoSi}_2$ , surface free energy, ILSS.

## 서 론

탄소/탄소 복합재료는 강화재인 탄소섬유와 열안정성 및 탄소수율이 우수한 고분자 수지를 전구체로 사용한 탄소 매트릭스로 구성되어 있다. 이러한 탄소/탄소 복합재료의 물성은 흔히 강화재와 매트릭스 수지의 중간 물성을 나타낸다는 혼합법칙에 의해 설명된다. 그러나 실제 응용에서는 이 혼합법칙을 따르지 않는 경우가 자주 발생하는데, 이는 복합재료의 물성이 매트릭스와 강화재의 특성뿐만 아니라 매트릭스와 강화재 사이의 결합력, 즉 계면결합력에 의해서도 상당한 영향을 받기 때문이다.<sup>1,2</sup> 다시 말하면 강화재 또는 매트릭스 각각은 주로 내부의 강한 화학적 결합을 이루고 있는 것에 반하여 그들 계면은 약한 물리적 결합을 이루고 있기 때문에 외부로부터 전달되는 힘은 그 물리적 결합의 정도에 의존될 것이기 때문이다.<sup>3,4</sup>

복합재료의 계면은 외부에서 가해지는 충격 에너지 및 응력, 변형 등을 매트릭스에서 섬유로 전달해주는 역할을 한다. 또한 복합재료의 두 상 사이의 간격을 줄여줌으로써 복합재료에 습기, 가스 및 화학 약품의 선택적 투과를 감소시켜 줄 수 있음으로 해서 강화재의 물성의 균일성과 연속성을 향상시켜 주게 된다. 이와 같이 계면은 복합재료에서 중요한 역할을 하며 계면 개질화를 통해 복합재료의 기계적 물성은 크게 향상될 수 있다. 따라서 탄소/탄소 복합재료의 계면 결합력을 증가시키는 것은 상당히 중요한 연구 과제로 인식되어져 있는 실정이다.<sup>5,6</sup>

물리화학적으로 고체상 표면 또는 계면 특성이라고 하면 두 가지 서로 다른 조성 사이에 일어나는 분자간의 인력성으로 동일시킬 수 있으며, 이를 흔히 표면 자유에너지 또는 과잉 자유에너지라 일컫는다. 이러한 계면에서의 결합은 분자간력과 표면 자유에너지의 관점에서 기술될 수 있으며, 고체의 표면 자유에너지를 측정하는데 이용되는 방법 가운데 접촉각 측정방법은 여러 공정중에 일어나는 고체의 흡착, 젖음, 및 접착 현상 등을 예측가능하게 한다. 이러한 접촉각을 측정하는 방법으로는 크게 sessile drop method와 Wilhelmy plate method의 두 가지 방법이 알려져 있다.<sup>7,8</sup> 이 중 sessile drop method는 액을 고체 표면 위에 떨어뜨려 이로인해 생기는 각을 측정

하는 것으로 이러한 접촉각이 형성되기 위해서는 액체, 고체 그리고 기체간의 여러 상호작용에 기인한다. 접촉각은 주로 젖음성을 측정하는데 이용되며, 이러한 젖음성 등을 이용하여 고체물질의 친수성, 소수성 등의 물성을 측정할 수 있다.<sup>9-11</sup>

탄소/탄소 복합재료에 있어서 매트릭스 수지에 산화억제제로서 유기 또는 무기 충전제를 첨가함으로써 기계적 물성을 증진시키는 연구가 활발히 진행되고 있으나,<sup>12,13</sup> 이러한 고분자 복합재료의 기계적 물성 증가가 고체 표면 또는 계면에서의 에너지 특성의 관점으로 해석 및 보고되어진 바는 없는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 매트릭스 수지에 높은 용점과 우수한 산화저항성을 가지고 있으며, 특히 900 °C 전후에서 취성-연성 전이 (brittle-to-ductile transition, BDT) 특성을 보이는 세라믹 분말인 MoSi<sub>2</sub>를<sup>14,15</sup> 첨가하였을 경우의 탄소/탄소 복합재료의 물리화학적 계면 특성에 미치는 영향을 알아보기 위해 다양한 접근 방법을 통한 표면 자유에너지 및 충전 전단강도 특성을 조사하여 살펴보고자 한다.

## 실 험

재료 및 시편 제조. 본 연구에서 보강재로 쓰인 탄소 섬유는 태광산업(주)에서 생산된 polyacrylonitrile (PAN)계 고강도 탄소섬유 (TZ-307, 12K)를 장섬유로 사용하였다. 탄소/탄소 복합재료의 탄소 매트릭스의 전구체로서는 강남화성(주)에서 생산된 레졸계 페놀수지 (CB-8057)를 사용하였다. 산화억제 목적으로 사용된 MoSi<sub>2</sub>는 Aldrich Co.로부터 제공받은 약 2 $\mu$ m의 분말을 비표면적 등의 증가에 의한 물리적 결합력의 증진을 통한 산화억제제로의 목적을 충분히 달성하기 위하여 0.5 $\mu$ m 정도의 분말로 분쇄하여 사용하였다. 탄소/탄소 복합재료의 제조공정은 이미 보고된 바와 같은 방법으로,<sup>15</sup> 우선 페놀수지에 MoSi<sub>2</sub>를 0, 4, 12, 20%의 중량비로 고르게 첨가하여, 여기에 준비된 탄소섬유를 통과시키는 continuous process에 의하여 일방향으로 filament winding 하였으며, 이렇게 제작된 프리프레그를 적층하여 경화시켜 초벌 (green) 복합재료를 성형하였다. 이렇게 제작된 각각의 복합재료를 가열로를 이용하여 불활성 분위기에서 1100 °C까지 시간당 10 °C의 속도로 승

온시켜준 후 2시간 동안 탄화시켜 탄소/탄소 복합재료를 제조하였다.<sup>15</sup> 제조한 복합재료는 물성 시험의 크기에 맞추어 가공하였으며, 섬유 체적비는 약 60% ( $\pm 2\%$ )이었다.

**접촉각 측정.** 고분자의 표면 특성 중 표면에너지는 표면장력을 알고 있는 용매와 고분자간의 접촉각을 측정함으로써 얻을 수 있다. 본 연구에서 표면 자유에너지를 알아보기 위하여 측정된 접촉각은 Rame-Hart goniometer를 사용하여 sessile drop 방법으로  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 의 온도조건에서 측정하였다.<sup>11</sup> 본 연구에서는 탄소/탄소 복합재료 시편의 고유 특성인 미세 기공에 의해서 젖음액의 모세관 현상에 의한 기공내의 흡수 현상이 일어나기 전의 접촉각을 측정하기 위하여, 젖음액을 떨어뜨린 후 시간에 대한 함수로 각 표면 자유에너지를 구하였으며<sup>16,17</sup> 초기 변화 시간이 0으로 외삽한 값을 임계 표면 자유에너지로 정하였다.<sup>7</sup> Fig. 1은 본 연구에서 사용된 각각의 젖음액에 대하여  $\text{MoSi}_2$  미첨가시의 탄소/탄소 복합재료 시편에 대한 접촉각의 시간에 따른 경시변화를 나타내었으며, 예상한 바와 같이, 시간이 경과함에 따라 모세관 현상 및 퍼짐 현상에 의한 접촉각의 감소를 나타내었다. 접촉각은 각각의 젖음액에 대하여 각 시편당 서로 다른 3군데에서 3번씩 측정하여 평균값을 취하였다. 본 연구의 접촉각 측정을 위해 사용된 젖음액으로는 증류수와 diiodomethane, 그리고 ethylene glycol의 3가지를 사용하였으며, Table 1은 사용된 젖음액에 대한 계면 (혹은 표면) 장력과 각각의 성분들의 값을 나타내었다.<sup>10,18,19</sup>

**기계적 특성 시험.** 제조된 탄소/탄소 복합재료의 기계적 계면특성은 short-beam에 의한 삼점 굴곡시험으로부터 얻을 수 있는 층간 전단강도 (ILSS) 측정을 통하여 알아보았다. Short-beam test는 ASTM D2344에 따라 cross-head speed는 2 mm/min, span-to-depth비는 4:1로 고정하여 실험하였으며, 각 조건당 7개씩을 측정하여 그 평균값으로부터 구하였다.

### 결과 및 고찰

**표면 자유에너지.** 복합재료의 흡착, 젖음성, 접착성, 그리고 표면 형상은 계면 혹은 표면 자유에너지

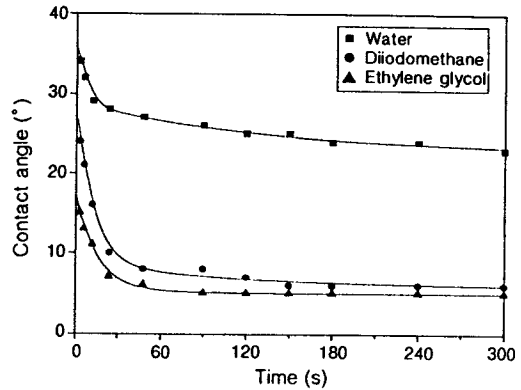


Figure 1. Evolution of contact angle on carbon-carbon composites with the wetting time elapsed.

Table 1. London Dispersive ( $\gamma_S^L$ ) and Specific ( $\gamma_S^{SP}$ ) Components of Surface Tension ( $\gamma_L$ ) in Wetting Liquids (Subscript: L), Measured at  $20^\circ\text{C}$

wetting liquids	$\gamma_L^L/\text{mJ}\cdot\text{m}^{-2}$	$\gamma_L^{SP}/\text{mJ}\cdot\text{m}^{-2}$	$\gamma_L/\text{mJ}\cdot\text{m}^{-2}$
water	21.8	51.0	72.8
diiodomethane	49.5	1.3	50.8
ethylene glycol	29.3	19.0	48.3

의 영향을 크게 받으며, 이것은 물리적 및 기계적 특성을 알아내는데 중요한 역할을 한다.<sup>11,19</sup> 1960대 초반에 Fowkes는<sup>20</sup> 표면 자유에너지의 개념을 보고하였으며, 여기에서 표면 자유에너지는 아래의 식 (1)과 같이 다시 London 비극성 요소 ( $\gamma^L$ )와 극성 ( $\gamma^{SP}$ ) 요소로 나눌 수 있다.

$$\gamma = \gamma^L + \gamma^{SP} \quad (1)$$

여기에서,  $\gamma$ 은 표면 자유에너지,  $\gamma^L$ 은 London 인력에 대한 van der Waals 힘을 나타내며  $\gamma^{SP}$ 는 물리적 상호작용 (Debye, Keesom 인력에 대한 van der Waals 힘, 수소결합, 그리고 다른 작은 극성 효과)의 모든 극성 요소를 나타낸다.

고체 표면상에서 크게 다른 특성을 가진 두 가지 이상의 액체를 사용하여 접촉각을 측정할 때, Owens와 Wendt,<sup>21</sup> 그리고 Wu는<sup>19</sup> geometric mean method를 이용한 위의 Fowkes의 개념을 도입하여 다음과 같은 식 (2)를 유도해 냈다.<sup>10</sup>

$$\gamma_L (1 + \cos \theta) = 2 (\gamma_L^L \cdot \gamma_S^L)^{1/2} + 2 (\gamma_L^{SP} \cdot \gamma_S^{SP})^{1/2} \quad (2)$$

여기에서, 아래첨자 L은 액체를, S는 고체를 나타낸다.

다시, 식 (2)에 따라서 두 가지의 액체에 대하여 식을 연립하여 풀면 추정하고자 하는 고체의 표면 자유에너지인  $\gamma_S^L$ 과  $\gamma_S^{SP}$ 에 대한 식 (3)과 (4)로 나타낼 수 있다.<sup>11</sup>

$$\gamma_S^L = \frac{1}{4} \left[ \frac{(1 + \cos \theta_1) \gamma_{L1} \cdot (\gamma_{L1}^{SP})^{1/2} - (1 + \cos \theta_2) \gamma_{L2} \cdot (\gamma_{L2}^{SP})^{1/2}}{(\gamma_{L1}^L \cdot \gamma_{L2}^{SP})^{1/2} - (\gamma_{L2}^L \cdot \gamma_{L1}^{SP})^{1/2}} \right]^2 \quad (3)$$

$$\gamma_S^{SP} = \frac{1}{4} \left[ \frac{(1 + \cos \theta_2) \gamma_{L2} \cdot (\gamma_{L2}^L)^{1/2} - (1 + \cos \theta_1) \gamma_{L1} \cdot (\gamma_{L1}^L)^{1/2}}{(\gamma_{L1}^L \cdot \gamma_{L2}^{SP})^{1/2} - (\gamma_{L2}^L \cdot \gamma_{L1}^{SP})^{1/2}} \right]^2 \quad (4)$$

또한, 식 (2)는 세가지 이상의 액체에 대하여 다음의 식 (5)와 같이  $y = mx + n$ 의 형태로 유도할 수 있다.<sup>9,21</sup>

$$\frac{\gamma_L (1 + \cos \theta)}{2 (\gamma_L^L)^{1/2}} = (\gamma_S^{SP})^{1/2} \cdot \left( \frac{\gamma_L^{SP}}{\gamma_L^L} \right)^{1/2} + (\gamma_S^L)^{1/2} \quad (5)$$

$$\frac{\gamma_L (1 + \cos \theta)}{2 (\gamma_L^{SP})^{1/2}} = (\gamma_S^L)^{1/2} \cdot \left( \frac{\gamma_L^L}{\gamma_L^{SP}} \right)^{1/2} + (\gamma_S^{SP})^{1/2} \quad (6)$$

따라서, 식 (5) 및 (6)에서 기울기  $m$ 과 절편  $n$ 을 구함으로써 고체표면의  $\gamma_S^{SP}$ ,  $\gamma_S^L$ 를 각각 알 수 있다.

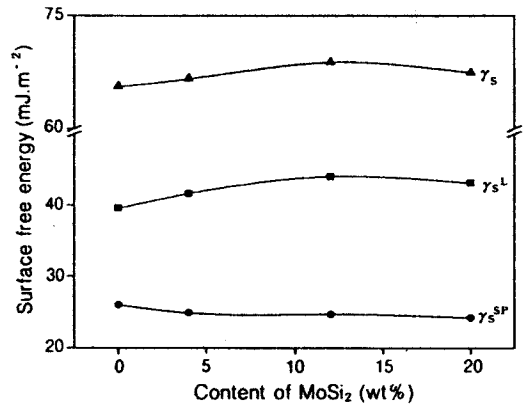
MoSi<sub>2</sub>의 첨가량에 따른 각각의 시편에 대하여 Table 1의 젖음액을 사용하여 측정된 접촉각을 Table 2에 나타내었다. 표면 장력이 높은 젖음액일수록 고체표면에 대한 접촉각은 더욱 큰 것을 알 수 있었으며, 극성 요소가 큰 물보다 London 비극성 요소가 큰 diiodomethane과의 MoSi<sub>2</sub> 첨가량에 따른 탄소/탄소 복합재료의 접촉각 변화가 큰 것으로서 표면의 극성기에 의해서 보다는 분산력에 의한 영향을 클 것으로 사료된다.

Fig. 2는 two-liquid geometric method를 이용한 식 (3)과 (4)로부터 각각의 시편에 대한 표면 자유에너지를 계산한 결과이다.  $\gamma_S$ 는 탄소/탄소 복합재료

**Table 2. Contact Angle Determination (in degree) of Carbon-Carbon Composites with Content of MoSi<sub>2</sub> in the 95% Confidence Level**

wetting liquids	water	diiodomethane	ethylene glycol
0 wt% MoSi <sub>2</sub>	35.8 ± 0.3 (SD=0.44)	27.9 ± 0.5 (SD=0.60)	16.9 ± 0.3 (SD=0.33)
4 wt% MoSi <sub>2</sub>	35.9 ± 0.3 (SD=0.33)	22.3 ± 0.7 (SD=0.87)	15.1 ± 0.3 (SD=0.33)
12 wt% MoSi <sub>2</sub>	34.1 ± 0.7 (SD=0.93)	12.2 ± 0.5 (SD=0.67)	10.9 ± 0.3 (SD=0.33)
20 wt% MoSi <sub>2</sub>	35.6 ± 0.7 (SD=0.88)	17.1 ± 0.8 (SD=1.05)	12.9 ± 0.3 (SD=0.33)

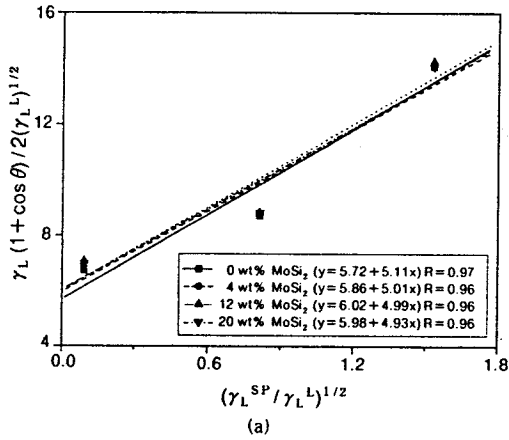
SD: Standard deviation.



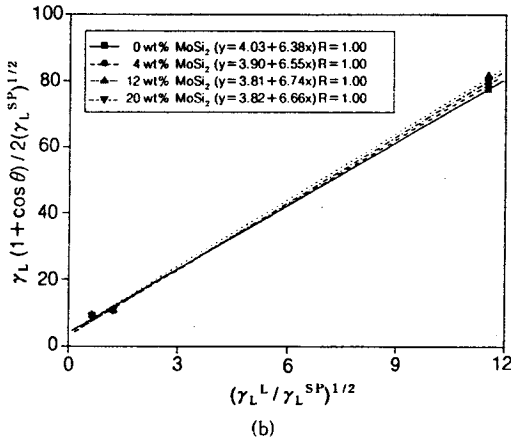
**Figure 2.** Surface free energies (in mJ.m<sup>-2</sup>) of carbon-carbon composites as content of MoSi<sub>2</sub> using a two-liquid geometric method.

에 대한 MoSi<sub>2</sub>의 첨가량이 증가할수록 증가함을 보이다가 12 wt% 이상 첨가되면 오히려 감소함을 나타내었다. 이러한 결과는 예상한 바와 같이  $\gamma_S^{SP}$ 보다는  $\gamma_S^L$ 의 영향이 크게 작용함을 알 수 있으며, 또한 MoSi<sub>2</sub>가 첨가됨으로서 분산력은 증가되지만 과량 (12 wt% 이상) 첨가되면 충전간의 응력증가로 인하여 본 목적의 섬유-충전제-고분자 매트릭스간의 분산력 증가보다는 서로간의 새로운 계면을 형성함으로써<sup>15</sup> 오히려 복합재료에서의 각 요소간의 분산력을 감소시키는 결과를 보였다.

한편, Fig. 3의 (a)와 (b)는 Owens와 Wendt에 의해 제안된 wetting angle data reduction method를 이용한 결과를 나타내었다. 특히, Hoecker의 경우에는<sup>9</sup> 탄소섬유의 표면처리를 통하여 식 (5)에



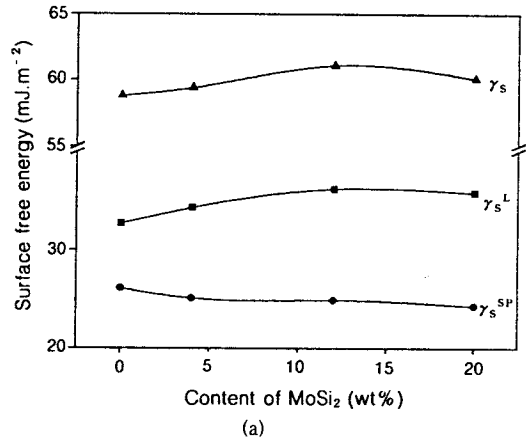
(a)



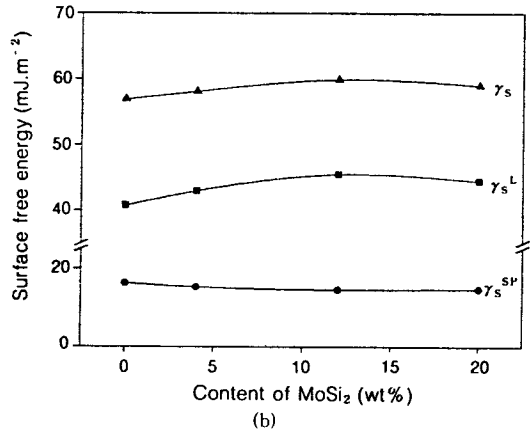
(b)

**Figure 3.** Owens-Wendt plots for carbon-carbon composites as content of MoSi<sub>2</sub> based on eq. 5 (a) and eq. 6 (b). (*R* = coefficient of regression).

대하여 실험치를 접근시킴으로서,  $\gamma_S^{SP}$ 의 영향이 큰 것을 입증하였으나, 본 연구에서는 앞의 접촉각 결과에서 보여주었듯이 MoSi<sub>2</sub> 분말의 첨가에 의한 표면 자유에너지에서의 분산력 성분인  $\gamma_S^L$ 가 미치는 영향이 클 것으로 사료되는 바, 식 (6)을 유도하여 식 (5)와 같이 실험치를 대입하여 보았다. Fig. 3의 (a)와 (b)에서 알 수 있듯이, 각각의 시편에 대한 접촉각 점들은 식 (5)와 (6)에 의해 주어진 직선식에 잘 접근함을 보여주었다. 특히, 실험치들과 식 (6)에 의해 주어진 직선식이 더욱 잘 일치함을 알 수 있었다. Fig. 3에 따라서 결정된  $\gamma_S^L$ ,  $\gamma_S^{SP}$ , 그리고  $\gamma_S$ 를 각각 Fig. 4의 (a)와 (b)에 나타내었다. Fig. 2



(a)



(b)

**Figure 4.** Surface free energies of carbon-carbon composites as content of MoSi<sub>2</sub> using Owens-Wendt plots based on eq. 5 (a) and eq. 6 (b).

에서와 마찬가지로  $\gamma_S^{SP}$ 보다는  $\gamma_S^L$ 의 영향이  $\gamma_S$ 에 미치는 영향이 큰 것을 확인할 수 있으며, Hoecker가 사용한 식 (5)보다는 식 (6)에 의한  $\gamma_S^L$ 이 더욱 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.

이로써 탄소/탄소 복합재료에 MoSi<sub>2</sub>를 첨가하였을 경우에, 극성 요소보다는 MoSi<sub>2</sub>의 미트릭스에 대한 분산력, 즉 London 비극성 요소에 의한 영향이 큰 것을 알 수 있었으며, 특히 12 wt% 이상의 과량이 첨가되었을 경우에는 오히려 결합재의 계면결합력을 저하시키는 것을 확인할 수 있었다.<sup>15</sup>

기계적 특성. 탄소/탄소 복합재료에서 기계적 특성 및 내구성은 섬유와 매트릭스 수지간의 계면접착력에

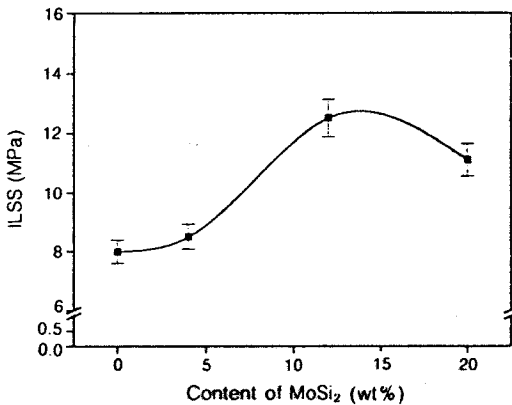


Figure 5. Interlaminar shear strength (ILSS) of carbon-carbon composites as content of MoSi<sub>2</sub>.

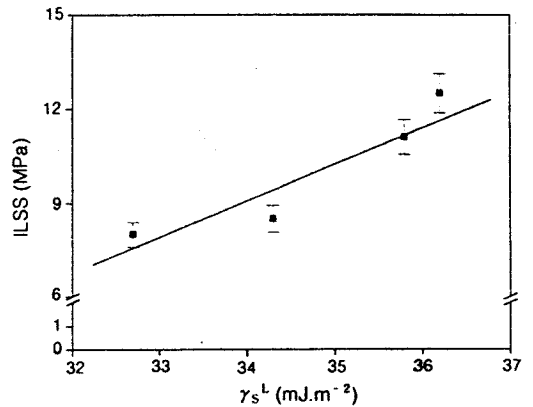
큰 영향을 받는다는 것은 주지의 사실이며, 우수한 기계적 특성 및 내구성을 얻기 위해서는 복합재료를 이루는 각 재료의 강한 화학적 결합력보다는 구성 요소들 사이의 물리적 계면접착력이 더욱 요구되어진다. 본 연구에서 MoSi<sub>2</sub>를 첨가함에 따른 탄소/탄소 복합재료 계면에서의 기계적 물성을 알아보기 위하여 일방향 복합재료의 양단을 단순지지하고 중앙에 하중  $F$ 를 가하여 시편의 중앙면에 최대전단 응력을 발생시켜 전단파괴시킴으로서 층간 전단강도를 측정하였으며, 다음의 식 (7)에 의해서 ILSS ( $\tau_{max}$ )를 구하였다.

$$\tau_{max} = \frac{3F}{4bd} \text{ (at } L/d \text{ being a constant)} \quad (7)$$

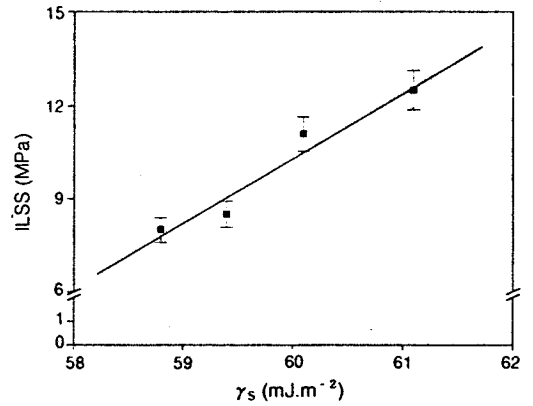
여기에서  $b$ 는 시편의 넓이,  $d$ 는 시편의 두께 그리고  $L$ 은 span간의 거리를 나타내며  $L/d$ 는 4로 일정하게 하였다.

Fig. 5는 식 (7)에 의해서 구한 탄소/탄소 복합재료의 MoSi<sub>2</sub> 첨가량에 따른 ILSS를 나타내었다. 이 결과 역시 앞에서 논의하였던 표면 자유에너지와 유사한 경향을 보임을 알 수 있으며, 이로써 탄소/탄소 복합재료에 MoSi<sub>2</sub>를 첨가함으로써 계면결합력을 증가시켜 주는 것을 확인할 수 있었으며, 특히 일정량 이상을 첨가할 경우 오히려 결합력 저하에 따른 기계적 물성의 감소를 알 수 있었다.

Fig. 6에는 앞 절에서 구한 표면 자유에너지 값과 Fig. 5에서 구한 ILSS와의 관계를 나타내었다. 본



(a)



(b)

Figure 6. Dependence of the ILSS on  $\gamma_s^L$  (a) and  $\gamma_s$  (b) of the carbon-carbon composites studied.

그림에서 알 수 있듯이 물리화학적으로 구한 표면 자유에너지와 기계적 계면접착력을 알아본 ILSS와는 밀접한 관계가 성립함을 알 수 있었으며, 특히 이러한 MoSi<sub>2</sub>에 의한 ILSS의 증진은 탄소/탄소 복합재료의 표면 자유에너지 가운데 London 비극성 요소의 증가에 기인한다는 것을 확인할 수 있었다.

### 결론

일방향 탄소/탄소 복합재료의 제조시 MoSi<sub>2</sub> 분말을 첨가하였을 경우의 계면 특성에 미치는 영향을 알아본 결과, 우수한 산화저항성과 연성-취성 전이 거동을 보이는 MoSi<sub>2</sub>를 첨가하였을 경우에는 표면 자

유에너지가 증가함을 알 수 있었으며, 특히 London 비극성 요소와 극성 요소로 나누어 살펴보았을 경우, London 비극성 요소인  $\gamma_s^1$ 의 증가에 의한 영향이 절대적임을 알 수 있었다. 또한, 표면 자유에너지와 층간 전단강도사이의 경향이 직선상임을 확인하고 표면 자유에너지의 변화로써 복합재료의 최종 기계적 특성과 연관지을 수 있음을 확인할 수 있었다.

### 참 고 문 헌

1. C. E. Knox, "Handbook of Composite", ed. by George Lubin, van Nostrand Reinhold, New York, 1982.
2. C. R. Thomas, "Essentials of Carbon-Carbon Composites", The Royal Society of Chemistry, Cambridge, 1993.
3. T. Norita, J. Matsui, and H. S. Matsuda, "Composite Interfaces", eds. by H. Ishida and J. L. Koenig, Elsevier, New York, 1986.
4. S. J. Park, "Interfacial Forces and Fields: Theory and Applications", ed. by J. P. Hsu, Marcel Dekker, New York, 1999.
5. E. Fitzer, "Carbon Fibers and Their Composites", Springer-Verlag, New York, 1985.
6. L. A. Manocha, O. P. Bahl, and Y. K. Singh, *Carbon*, **27**, 381 (1989).
7. A. W. Adamson, "Physical Chemistry of Surfaces", 5th ed., John Wiley, New York, 1990.
8. J. N. Israelachvili, "Intermolecular and Surface Forces", 2ed., Academic Press., San Diego, 1991.
9. F. Hoecker and J. Karger-Kocsis, *J. Appl. Polym. Sci.*, **59**, 139 (1996).
10. K. Ma, T. S. Chung, and R. J. Good, *J. Polym. Sci., Part, B*, **36**, 2327 (1998).
11. S. J. Park, W. B. Park, and J. R. Lee, *Polymer J.*, **31**, 28 (1999).
12. R. J. Zaldivar, R. W. Kobayashiand, and G. S. Rellick, *Carbon*, **29**, 1145 (1991).
13. S. R. Dhakate, R. B. Mathur, and O. P. Bahl, *Carbon*, **35**, 1753 (1997).
14. S. Jandhyala, *J. Am. Ceram. Soc.*, **76**, 226 (1993).
15. S. J. Park, M. S. Cho, J. R. Lee, and P. K. Pak, *Carbon*, in press.
16. A. Schwarcz, *J. Polym. Sci.: Polym. Phys. Ed.*, **12**, 1195 (1974).
17. A. Kim, S. J. Park, and J. R. Lee, *J. Colloid Interface Sci.*, **197**, 119 (1998).
18. C. J. van Oss, "Interfacial Forces in Aqueous Media", Marcel Dekker, New York, 1994.
19. S. Wu, "Polymer Interface and Adhesion", Marcel Dekker, New York, 1982.
20. F. M. Fowkes, *J. Phys. Chem.*, **66**, 382 (1962).
21. D. K. Owens and R. C. Wendt, *J. Appl. Polym. Sci.*, **13**, 1741 (1969).