

## 반응소결 SiC/Graphite 복합체에서 Graphite 입자의 크기에 따른 마찰마모특성

백용혁 · 서영현\* · 최 웅 · 이종호

전남대학교 무기재료공학과  
\*포항제철(주) 광양제철소  
(1997년 6월 30일 접수)

### Tribological Properties of Reaction-Bonded SiC/Graphite Composite According to Particle Size of Graphite

Yong-Hyuck Baik, Young-Hean Seo\*, Woong Choi and Jong-Ho Lee

Dept. of Inorganic Materials Eng., Chonnam National Univ.

\*Posco, KwangYang Works.

(Received June 30, 1997)

#### 요 약

세라믹스의 마찰마모특성은 seal ring, pump부품, thread guide 및 mechanical seal 등에 이용될때 매우 중요한 특성의 하나이다. 본 연구에서는 SiC 분말, 금속규소, 카본블랙, 알루미늄나 혼합물에 입도가 서로 다른 흑연 분말을 첨가하여 RBSC/graphite 복합체를 제조하고, 첨가된 흑연 분말의 입자 크기가 마찰마모특성에 미치는 영향을 고찰하였다. 흡수율과 꺾임 강도, 마찰마모 저항성 등을 측정하였고, 결정상들은 XRD 로 분석, 미세 구조는 SEM 으로 관찰하였다. 첨가한 흑연 입자가 미세(2  $\mu\text{m}$ )하면  $\beta$ -SiC 의 합성을 크게 증가시키므로서 꺾임강도의 증가와 흡수율의 감소를 나타냈으나 내마모성 향상에는 도움이 되지 못하였다. 흑연입자가 큰 경우(88~149  $\mu\text{m}$ )에는  $\beta$ -SiC 합성에는 큰 영향이 없고 강도가 낮고 흡수율은 큰 편이었으나 20 vol% 에서 내마모성은 크게 향상되었다. 흑연의 입도 범위가 넓은 경우(53  $\mu\text{m}$  이하)에는 모든 물성에서 가장 좋지 않았다. 내마모성이 가장 좋은 흑연의 입도는 53~88  $\mu\text{m}$  범위였으며 첨가량은 10~15 vol% 일 때  $0.4\sim0.6 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$  으로 가장 효과적이었다. 이때 꺾임강도도 380~520  $\text{kg/cm}^2$  으로 비교적 양호하였다

#### ABSTRACT

The tribological property of ceramics is very important for use in seal rings, pump parts, thread guides and mechanical seal, etc. In the present study, which RBSC/graphite composites were manufactured by adding graphite powders with different particle sizes to mixtures of SiC powder, metallic silicon, carbon black and alumina, effects on the tribological property of each RBSC/graphite composite was investigated in accordance with the particle size of the added graphite powder. The water absorption, the bending strength and the resistance for the friction and wear were measured, and the crystalline phase and the microstructure were respectively examined by using XRD and SEM. In case that the particle size of the graphite powder was fine(2  $\mu\text{m}$ ), the formation of  $\beta$ -SiC was accelerated, thereby making the increase of the bending strength and the decrease of the water absorption, but no improvement for the tribological properties. Furthermore, in case that the particle size of the graphite powder was some large(88~149  $\mu\text{m}$ ), the formation of  $\beta$ -SiC was not accelerated, to thereby make the decrease of the bending strength and the increase of the water absorption, but the improvement for the tribological property of only the composite having the graphite powder of 20 vol%. In addition, in case that the particle size distribution of the graphite powder was large(under 53  $\mu\text{m}$ ), there was no improvement for every properties. However, the composites, which the graphite powder with the particle size of 53~88  $\mu\text{m}$  was added in 10~15 vol%, had the most increased resistance for the friction and wear which show the worn out amount of  $0.4\sim0.6 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ , and the value of the bending strength is 380~520  $\text{kg/cm}^2$ .

**Key words :** RBSC/graphite composite, Tribological properties, Particle size, Friction, Wear

## 1. 서 론

세라믹스의 내마모특성은 다른 재료에 비해 매우 우수하다. 특히 탄화규소는 경도와 강도가 높고 내마모성이며 마찰계수가 적으면서 화학적안정성이 우수한 특성을 가지고 있으므로 기계나철 설을 비롯하여 여러가지 기계부품등 내마모재료로 이용이 확대되고 있다.<sup>1-4)</sup>

마찰은 접촉하고 있는 두 고체면(접촉면)의 상호 미끄러짐에 대한 저항을 말한다. 즉, 두 고체표면이 높은 접촉압력으로 접촉하게 되면 표면의 미세한 convex 부분(진실접촉면, asperity contact)에서는 상대면과 응착(adhesion)이 일어나며, 소성변형이 일어날 정도로 응력을 받게 된다. 이 부분에서 상대운동, 즉 미끄러짐이 일어나려면 이 응착부분을 전단(剪斷)하지 않으면 안된다.<sup>5,6)</sup> 응착부가 전단력을 받게 되면 재료의 내부로 가면서 소성적(塑性的)으로 미끄러짐이 확대된다. 따라서 전단파괴가 일어나는 곳은 최초로 접촉, 응착된 면이 아니고 표면에 가까운 내부에서 crack 이 발생하고 여기에서 마모분(粉)의 탈락이 일어난다.

마찰표면의 응착과 소성적 미끄러짐에 의한 마모를 감소시키는 방법으로 두 접촉면 사이에 액상이나 고상의 윤활제를 개재시키고 있다. 즉, 내부재료보다 소성적 미끄러짐이 쉬운 윤활성 물질이 재료표면에 있으면 거의 모든 전단은 표면의 윤활성 물질층 내에서만 일어난다. 그러므로 기지재료 내부에서는 소성파괴적인 crack 이 일어나지 않아 마찰마모시에 마모를 억제할 수 있다.<sup>7,8)</sup>

고체윤활성 재료로 흑연이 있다. 흑연이 고체윤활성을 나타내는 것은 육각판상층이 공유결합으로 강하게 결합되어 있는데 반하여 층간결합은 결합력이 약한 반데르발스 결합을 하고 있기 때문에 tangential force 가 작용하면 층간 밀립현상이 쉽게 일어나 자기윤활성을 나타내기 때문이다.<sup>7-10)</sup>

본 연구에서는 입도범위가 서로 다른 흑연분말을 SiC-Si-carbon black 조합물에 첨가하여 반응소결 방법으로 RBSC/graphite 복합체를 만들었을 때 복합체 조직내에 있는 흑연 입자의 크기가 SiC 합성에 미치는 영향, 이에 따른 꺾임강도의 변화, 비마모량 및 미세구조에 미치는 영향을 검토하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 사용원료

본 연구에서 사용한  $\alpha$ -SiC의 순도는 98.7%, 0.1~20  $\mu\text{m}$ 의 입도범위(평균입경 4.31  $\mu\text{m}$ )를 가지며 주 결정형은 4H와 6H로 되어 있다. 금속 규소는 순도 96.14%이며, 불순물로는 SiC 0.43%, Fe 1.0%, free carbon 이

2.43%가 포함되어 있고 입도범위는 0.1~50  $\mu\text{m}$ (평균입경 6.65  $\mu\text{m}$ )이었다

carbon black은 96%의 순도를 가지며 회분이 0.07%, 휘발분이 4.11%, 평균 입경이 0.8  $\mu\text{m}$  이었으며, 첨가제로 사용한  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 는 99.85%의 순도(AL-160SG, 昭和輕金屬)를 가지며 평균입경이 0.4  $\mu\text{m}$ 인 것을 사용하였다. 흑연은 비중이 1.72  $\text{g}/\text{cm}^3$ 인 인삼흑연(이하 흑연이라 표시) mgot를 분쇄하여 88~149  $\mu\text{m}$ , 53~88  $\mu\text{m}$ , 53  $\mu\text{m}$  이하 및 평균입경이 2  $\mu\text{m}$ 의 입도범위를 가진 입자로 분리하여 사용하였다.

### 2.2. 시편제조

본 연구에서는 60 wt% SiC, 40 wt%(7Si+3carbon black)의 혼합물에  $\text{Al}_2\text{O}_3$  5 wt% 첨가한 조성을 기본 조성으로 하고 여기에 여러가지 입도 범위를 가진 흑연을 5~20 vol%의 범위에서 5 vol% 간격으로 조합하였다. 조합물의 혼합은  $\alpha$ -SiC와 carbon black을, 그리고 금속 규소와 첨가제  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 를 각각 먼저 혼합한 후 이들을 한 용기에서 전체 혼합하면서 흑연을 첨가하였다. 이때 혼합은 무수 methyl alcohol 중에서 각 원료의 비중 차이로 인한 분리가 일어나지 않는 상태로 될때까지 alcohol 을 서서히 증발시키면서 충분히 혼합하였으며 혼합된 것은 50°C의 dry oven 에서 건조하였다. 시편 성형은 건조된 혼합물에 성형성을 향상시키기 위하여 phenol 을 성형조제로 첨가, 금형에서 30  $\text{N}/\text{mm}^2$ 의 압력으로 예비성형한 후 가압방향에 따른 물성의 이방성을 방지하기 위하여 다시 100  $\text{N}/\text{mm}^2$ 로 냉간 정수압(CIP)방법으로 성형하였다.

금형에서 예비성형할 때 흡수율이나 꺾임강도 측정용 시편은 5×8×30 mm인 각주형으로, 마찰마모 특성 측정용 시편은 직경 25.4 mm, 두께 5 mm인 disk형으로 각각 성형하였다.

반응 소결은 성형된 시편을 코크스 분말이 들어있는 알루미늄질 도가니에 묻고 덮개를 덮은 후 1°C/min의 승온속도로 1450°C 까지 가열후 2시간 유지시켰다.

### 2.3. 물성 측정

기본 조성에 흑연의 첨가량을 변화시키면서 반응소결 하였을때 시편의 흡수율, 꺾임강도, X-선 회절분석, 마찰마모특성 및 미세구조 관찰등의 측정방법은 다음과 같다.

소결된 시편의 흡수율은 알키메데스원리를 이용한 방법으로, 꺾임강도는 3 point loading 방법으로 상온에서 측정하였으며 이때 cross head speed는 0.5 mm/min 이고 span의 길이는 20 mm로 하였다. 측정값은 시편 5개를 측정하여 그 평균값으로 하였다.

마찰마모량 측정은 ball-on-plate type의 마찰마모시

험기(ORIENTEC EFM-111-F)를 사용하였다. 마모 상대 재료인 ball은  $Al_2O_3$  98%의 직경 5 mm인 구상 소결체를 사용하였고 disk형 시편은 약  $2\mu m$ 의 diamond paste로 최종 연마하였다.

마찰마모 시험은 수중에서 하중 2 kg, 집동속도(sliding speed) 300 mm/sec로 2시간 동안 행하여 마모량을 구하였다. 마모량 측정은 표면 조도계(Tokyo SEIMITSU사 SURFCOM 113-B)로 마모된 track의 4개 지점에서 마모된 단면적을 측정하고 그 평균값을 비교하였다.

흑연의 입도와 첨가량변화에 따른 SiC 결정상의 변화를 확인하기 위하여 소결 시편의 결정상을 XRD(Rigaku geiger-flex, Ni-filter, 35 Kv-15 mA)로 분석하였으며, 마찰마모 시험후 마모된 track의 미세구조와 마모상태는 SEM으로 관찰하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 흡수율 및 꺾임강도

흑연 입자의 크기와 혼합량 변화에 따른 흡수율의 변화는 Fig. 1에 꺾임강도의 변화는 Fig. 2에 각각 나타내었다.

Fig. 1에서 흡수율의 변화를 보면 흑연입자의 크기가  $88\sim 149\mu m$ ,  $53\sim 88\mu m$ ,  $53\mu m$  이하일때에는 흑연입자가 미세할수록, 첨가량이 증가할수록 흡수율이 증가하고 있으며, 이중에서도 특히  $53\mu m$  이하의 입도를 첨

가한 시편에서 그 경향이 크게 나타나고 있다.

그러나 흑연의 입자크기가  $2\mu m$ (평균입경, 이하  $2\mu m$ 로 표시)으로 미세하게 되면 오히려 흡수율이 감소하고 있다. 즉,  $2\mu m$ 인 흑연을 첨가한 경우에는 15 vol%까지는 흡수율이 감소하나 그 이상 첨가되면 다시 증가하고 있다.

흑연의 첨가량이 15 vol% 일 때 흑연의 입도변화에 따른 흡수율 변화를 보면 평균입경이  $2\mu m$  일때 가장 낮은 값을 나타내며  $53\mu m$  이하의 경우에는 가장 높게 나타나고 있다.

Fig. 2에서 꺾임강도 측정결과를 보면  $53\mu m$  이하의 흑연을 제외한 모든 범위에서 흑연의 입자가 미세할수록, 첨가량이 적을수록 꺾임강도는 증가하고 있다. 이는 carbon black 보다 화학적안정성이 높은 흑연의 첨가량이 많게되면 첨가된 흑연이 Si+carbon black  $\rightarrow$  SiC의 반응소결에서 Si와 carbon black의 접촉을 방해하여 반응소결을 억제할뿐만 아니라 일부 미반응 Si와 비정질로 되어 있는 매트릭스양<sup>11)</sup>이 상대적으로 감소하기 때문에 꺾임강도가 낮아지는 것으로 생각된다.

$53\mu m$  이하의 경우, 꺾임강도가 크게 낮아지고 있는 것은 다른 입도의 흑연에 비하여 입도분포 범위가 넓기 때문인 것으로 생각된다. 즉, 매트릭스에 흑연이 복합된 조직에서 흑연의 입도분포가 넓게되면 매트릭스 층의 두께가 큰 부분과 작은 부분이 동시에 불균일하게 존재하게 될 것이다. 이런 상태에 있을때 파괴에너지가 도달

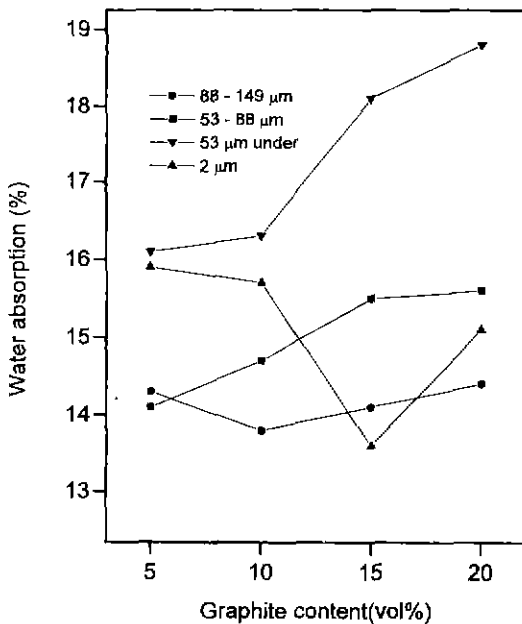


Fig. 1. Variation of water absorption as a function of graphite content and particle size.

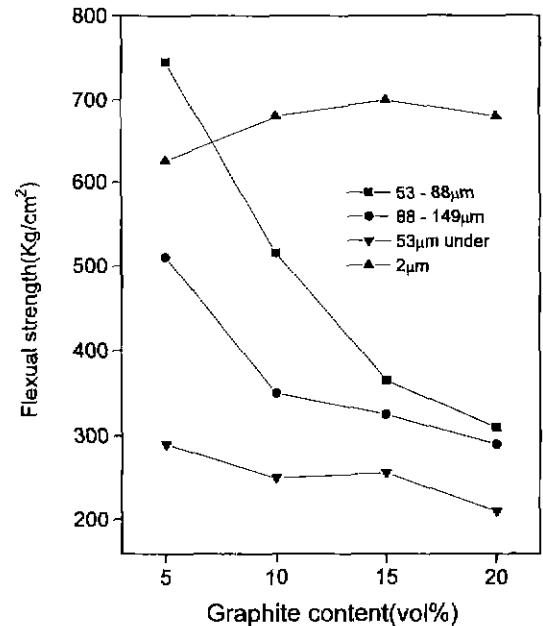


Fig. 2. Variation of flexural strength as a function of graphite content and particle size.

되던 매트릭스층의 두께가 작은 부분이 우선 파괴될 것이므로 강도가 낮아지는 것으로 생각된다.

흑연의 입자가 2 μm로 미세할 경우에는 반응소결 과정에서 carbon black 외에 흑연의 일부도 금속규소와의 탄화반응에 참여하여 β-SiC의 생성량을 증가시키면서 소결을 촉진시키기 때문에 꺾임강도가 크게 증가하는 것으로 생각된다. 이 경우 흑연의 첨가량은 15 vol%가 적당하였으며 그 이상으로 첨가되면 오히려 β-SiC의 생성에 의한 강도 증진보다 미반응 흑연의 양이 많게 되기 때문에 꺾임강도가 낮아지는 것으로 생각된다.

3.2. SiC의 생성 반응

그러므로 본연구에서 원료 조합물중 carbon black(또는 일부 미세한 흑연분말)이 금속 규소와 반응하여 SiC가 생성될때 1450°C는 반응 초기단계의 온도로 SiC의 α형(4H, 6H 등)보다는 2H형(1400°C 이하에서 안정)과 β형(1400~1600°C 에서 안정)이 우선 생성될 것이므로 이는 앞의 연구보고<sup>13)</sup>에서 첨가제를 극히 소량 첨가하여 1450°C 에서 반응소결 탄화규소 소결체를 제조할 때 2H형 보다 β형이 많이 생성된 것을 확인하였고, 또한 B<sub>2</sub>C와 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 소량씩 첨가하여 1450°C 에서 RBSC 시편을 제조할때 β-SiC의 생성을 확인한 보고<sup>12)</sup>도 있다.

본 XRD 분석에서는 2H, β형, 4H 및 6H형 등 각 결정형에 대하여 I/I<sub>1</sub> 값이 큰 순서로 3개의 peak 를 선택한 후 이들의 dÅ 값과 2θ 값을 정밀하게 비교 검토하였다.

즉, 2H형의 변화는 2θ 38.1~2°(I/I<sub>1</sub>=100)의 peak, β형은 2θ 60~60.1(I/I<sub>1</sub>=35)의 peak intensity를 비교하였다. 이 때 2H형의 경우 (101)면의 2θ=38.1~2°(I/I<sub>1</sub>=100)와 4H형의 (102)면, 2θ=38.1~2°(I/I<sub>1</sub>=94)가, β형의 경우 (220)면의 2θ= 60~60.1°(I/I<sub>1</sub>=35)와 6H형의 (110)면, 2θ=60.4~5°(I/I<sub>1</sub>=35)가 각각 중복되었으나 1450°C 에서는 원료로 사용한 SiC의 고온형인 4H형과 6H형에는 변화가 없을것이므로 이들을 각각 2H형과 β형의 변화로 생각하였다.

Fig. 3 에는 입도범위가 다른 흑연을 15 vol%로 일정량씩 첨가했을때 2H형(38.1~2°)과 β형(60~60.10°)의 peak intensity 변화를 각각 나타내었다.

흑연의 입자크기가 53~88 μm와 2 μm 일 때 2H형은 감소하고 β형은 크게 증가하였으나 53 μm 이하에서는 반대로 2H형이 증가하고 β형은 크게 감소하였다.

이 결과를 Fig. 1 및 Fig. 2의 경향과 비교해보면 β형의 생성이 흡수율과 꺾임강도 특성에 영향을 크게 미치는 것으로 보여진다. 즉, β형의 생성이 많은 2 μm 에서는 흡수율이 감소하고, 꺾임강도가 증가하는 반면 이의 생성이 적은 53 μm의 경우에는 흡수율이 많고 꺾임강도가 크게 낮은 것을 볼 수 있다.

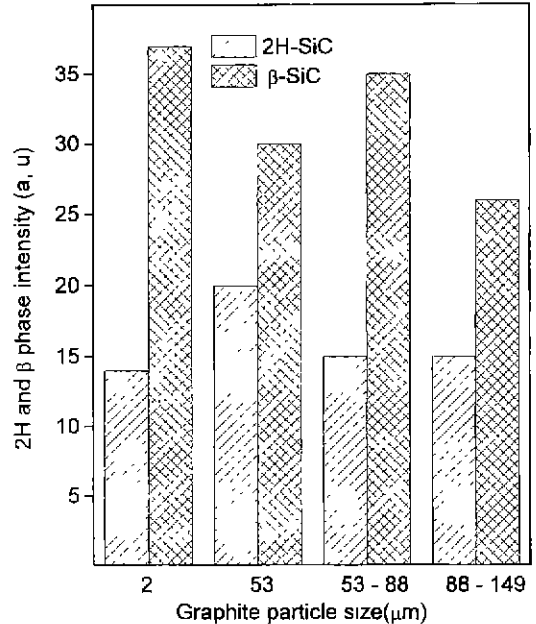


Fig. 3. Variation of 2H, β-SiC phases on particle size of 15 vol(%) graphite composition.

Fig. 4 에는 53~88 μm와 2 μm의 흑연을 첨가하였을 때 첨가량 변화에 따른(2H+β)형의 생성변화를 나타내었다. 53~88 μm의 것은 15 vol% 에서 최대를 나타내고 그 이상 첨가하면 크게 감소하고 있다. 또한 2 μm의 경

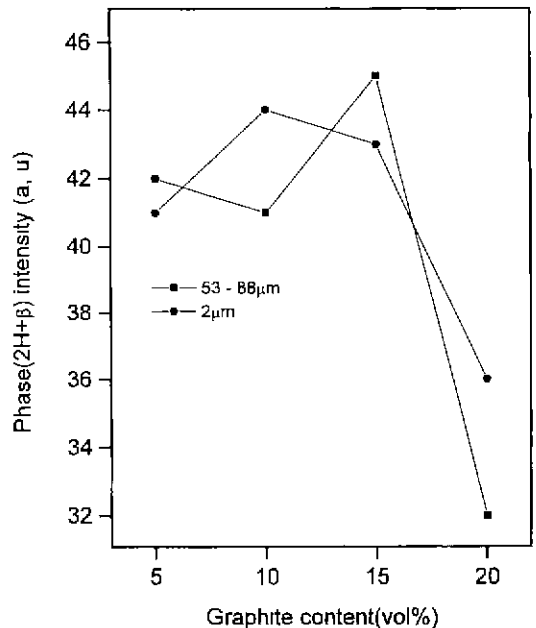


Fig. 4. Variation of (2H+β) phases on graphite content of particle size of 2 μm(av) and 53-88 μm

우도 10~15 vol% 에서 크게 증가한 후 그 이상 첨가되면 역시 크게 감소하고 있다. 53~88  $\mu\text{m}$ 의 흑연 15 vol% 에서  $\beta$ 형이 가장 크게 나타나고 있음에도 불구하고 꺾임강도(Fig. 2)값이 낮은 것은  $\beta$ 형의 생성으로 인한 소결 증진 효과보다 흑연 입자들에 의한 소결 억제작용이 더 크기 때문이라 생각된다.

2  $\mu\text{m}$ 의 경우에도 15 vol%를 넘으면  $\beta$ 형의 생성이 감소하면서 꺾임강도도 감소하는 경향을 보이고 있다.

### 3.3. 마찰마모 특성 및 미세구조

입도가 다른 흑연분말을 각각 5, 10, 15, 20 vol%씩 각각 첨가하여 제조한 소결체를 치밀질의 알루미늄 ball을 상대재료로 마찰마모했을 때 비마모량의 변화를 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5 에서 88~149  $\mu\text{m}$  범위의 흑연이 첨가된 경우 첨가량이 많아질수록 비마모량은 계속 감소하였으며 20 vol% 에서  $0.9 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ 의 값을 나타내고 있다.

53  $\mu\text{m}$  이하의 경우 첨가량을 증가시키면 비마모량은 15vol% 까지 계속 감소하여 15 vol% 에서  $1.1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ 의 값을 나타낸후 20 vol% 에서는 다시  $1.6 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ 로 증가하고 있다.

평균 입경이 2  $\mu\text{m}$ 인 경우에는 비교적 높은 비마모량을 나타내었다. 즉, 5 vol%의  $2.83 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$  에서 10 vol%의  $1.5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$  으로 낮아진후 20 vol% 까지 첨

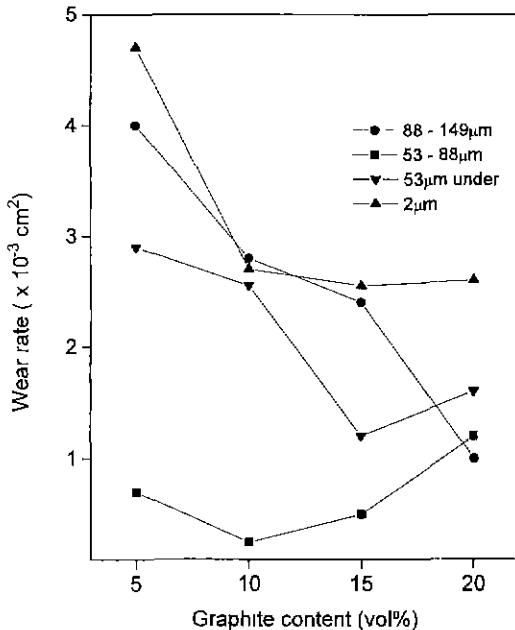


Fig. 5. Variation of wear rate as a function of graphite content and particle size

가량이 증가하여도 비마모량은 크게 변하지 않고 있다.

53~88  $\mu\text{m}$ 의 경우 가장 비마모량이 적었다. 즉, 5 vol% 에서  $0.9 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ , 10 vol% 에서  $0.4 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$  으로 낮아진후, 15 vol% 에서는  $0.6 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$  으로 다소 증가하기 시작하여 20 vol% 에서  $1.3 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$  으로 크게 증가하고 있다.

비마모량의 변화경향과 SiC(2H+ $\beta$ )의 생성량(Fig. 4)을 비교해 보면 다음과 같다. 즉, 반응소결과정에서 금속규소와 carbon black 또는 흑연분말이 반응하여 SiC를 생성할때 흑연보다는 반응성이 큰 carbon black이 우선 반응에 참여하게 되며, 흑연은 일부분만이 SiC 합성 반응에 관여하게 된다. 이때 흑연의 입자가 미세하면 반응성이 높아지게 된다.

흑연의 입자가 88~149  $\mu\text{m}$ 로 크게되면 첨가된 흑연의 표면적이 적기 때문에 SiC 생성에는 크게 영향을 주지 못하게 되므로 꺾임강도는 낮아지고 있다. 일반적으로 강도가 낮으면 비마모량도 많아질 것으로 생각되나 20 vol% 에서는 비마모량이 감소하는 것은 마모로 탈락된 흑연 입자들이 마찰면에 존재하면서 윤활작용을 하기 때문이라 생각된다. 이는 흑연 입자의 grooving 현상으로 생성된 흑연의 마모분(worn debris)도 마찰과정에서 윤활제 역할을 할수 있기 때문에 비마모량 및 마찰계수가 감소하는 것을 확인한 보고<sup>13)</sup>도 있다.

반대로 흑연의 입자가 미분(2  $\mu\text{m}$ )으로되면 이들이  $\beta$ -SiC 합성에 많이 참여하여 반응소결을 촉진시키므로 소결체 조직은 치밀하게 되고 따라서 꺾임강도는 증가되었다. 이는  $\text{Y}_2\text{O}_3$ 를 소량 첨가하여 1450 $^\circ\text{C}$  에서 반응소결시킨 SiC 소결체의 미세구조에서 whisker 상의  $\beta$ -SiC가  $\alpha$ -SiC 입자들을 결합시키고 있는 것을 확인한 보고도 있다.

그러나 비마모량이 많은 것은 마찰마모과정에서, 일부 미반응 Si가 포함된 유리질 매트릭스와 탄화반응으로 생성된 SiC의 미세입자들이 응집체를 이룬 치밀조직 부분에서 crack이 발생하고 이 crack의 전파속도가 커지면서 입자의 탈락이 많아지기 때문이라 생각된다. 이러한 현상은 마찰마모될때, 상온에서의 꺾임강도 특성보다 입자들 사이에 발생하는 crack의 전파속도가 내마모특성에 크게 영향을 미치고 있다는 보고에서도 확인할 수 있다. 또한 흑연의 입도분포가 넓으면서 미분이 적은 경우(53  $\mu\text{m}$  이하)에는 carbon black과 금속규소 분말의 탄화반응을 촉진하는 것보다 이를 억제하는 영향이 더 크기 때문에 흡수율은 증가하고 꺾임강도가 낮아지는 것으로 생각된다.

위의 결과로부터 RBSC/graphite 복합체에서 흑연의 윤활성은 흑연의 입자크기에 따라 차이가 있으며 흑연의 입자가 지나치게 미세하거나 입도범위가 넓으면 윤활성이 좋지않은 것을 알 수 있다. 본 연구결과에서는

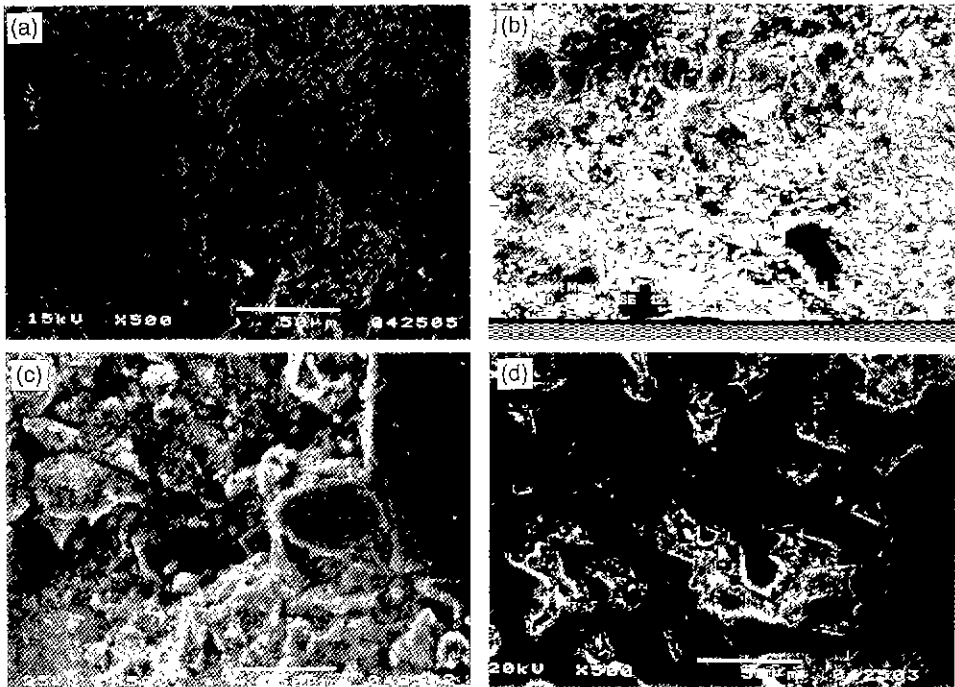


Fig. 6. SEM microphotographs of worn surfaces of composites:

(a) 2  $\mu\text{m}$ , 10 vol%, (b) 53-88  $\mu\text{m}$ , 10 vol%, (c) 88-149  $\mu\text{m}$ , 10 vol% and (d) 88-149  $\mu\text{m}$ , 20 vol%

흑연입자의 크기가 53~88  $\mu\text{m}$ 의 범위를 가질 때 가장 좋은 윤활성을 나타내었다.

그러므로 흑연을 첨가한 반응소결 탄화규소의 내마모성은 SiC 입자의 내마모성, 흑연입자-매트릭스-탄화규소 사이에 적절한 결합강도 및 흑연입자의 크기때문에 윤활성등이 평형상태를 이룰 때 내마모성이 향상하는 것으로 생각된다.

Fig. 6은 Fig. 5의 내마찰마모 측정으로부터 대표적인 시편의 wear track을 SEM 으로 관찰하여 나타낸 것이다. 즉, 조직이 치밀하고 강도는 높으나 내마모성이 낮은 시편(2  $\mu\text{m}$ , 10 vol%), 내마모성이 가장 우수한 시편(53~88  $\mu\text{m}$ , 10 vol%) 및 흑연 첨가량이 증가하면 계속 내마모성이 향상되는 시편(88~149  $\mu\text{m}$ , 10 vol% 및 20 vol%)의 미세 조직을 관찰한 것이다.

(a)의 조직을 보면 마찰마모 과정에서 입자들의 탈락 원인이라고 생각되는 micro crack 들이 SiC 입자들 사이에서 많이 나타나고 있으며 마모로 탈락된 부분은 깊게 파인 것을 볼 수 있다. 반면 입자들의 일어나지 않은 부분의 조직은 미세 입자들이 치밀하게 응집되어 있는 것을 볼 수 있으며 이 부분에도 crack이 전파되고 있다.

(b)의 조직에서는 crack이 거의 보이지 않으나 미세한 입자 주위에서 micro crack이 간혹 관찰되었다. 마모는 주로 SiC 입자와 매트릭스 부분에서 일어나고 있으

며 흑연 입자들이 있는 부분에서는 crack이 없고 마모되는 경향도 적었다.

(c)는 첨가된 흑연 입자가 크며 첨가량이 적은 경우이다. 우측에 큰 덩어리의 흑연 입자가 남아 있으며 그 일부가 떨어지지 않고 있다. 흑연 입자가 없는 부분에서는 마찰마모로 입자들이 많이 탈락되고 있다. 그러나 (a)의 경우와 같이 깊게 탈락되지는 않았다.

(d)는 첨가 흑연의 입자가 크며 첨가량이 많은 경우이다. 흑연 입자들이 많이 보이며 서로 응집된 것으로 보인다. 흑연 입자가 없는 부분에서 micro crack과 SiC 입자의 탈락 흔적이 보이며 흑연이 응집된 부분에서도 crack 들이 관찰되고 있으나 입자들의 탈락은 적었다.

위의 미세 조직 관찰 결과 마찰마모로 탈락이 일어나는 곳은 흑연 입자들이 있는 부분보다 SiC 입자들과 매트릭스가 많이 존재하는 부분에서 일어남을 알 수 있다. 즉, crack 들은 주로 SiC 입자들 사이에 있는 매트릭스 부분에서 일어나므로 SiC 입자들이 우선 탈락되는 것으로 생각된다. 또한 흑연 입자들은 매트릭스와 탄화 반응으로 생성된 SiC에 의하여 강하게 결합되어 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

입도범위가 88~149  $\mu\text{m}$ , 53~88  $\mu\text{m}$ , 53  $\mu\text{m}$  이하 및

평균입경이 2  $\mu\text{m}$ 인 흑연 분말을 SiC-Si-carbon black 조합물에 각각 첨가하여 RBSC/graphite 복합체를 만들었을 때 흡수율, 꺾임강도, 마찰마모 측정 및 X-선 회절 분석 결과는 다음과 같다.

첨가한 흑연입자가 미세(2  $\mu\text{m}$ )하면 반응소결과정에서  $\beta$ -SiC의 합성을 크게 증가시키므로서 꺾임강도의 증가와 흡수율의 감소를 나타냈으나 내마모성 향상에는 도움이 되지 못하였다.

흑연입자가 조대한 경우(88~149  $\mu\text{m}$ )에는  $\beta$ -SiC 합성에는 큰 영향이 없고 강도가 낮고 흡수율은 큰 편이었으나 20 vol% 에서 내마모성은 크게 향상되었다.

흑연의 입도 범위가 넓은 경우(53  $\mu\text{m}$  이하)에는 모든 물성에서 가장 좋지 않았다.

내마모성이 가장 적당한 흑연의 입도는 53~88  $\mu\text{m}$  범위였으며 첨가량은 10~15 vol% 일때  $0.4\sim 0.6 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$  으로 가장 효과적이었다.

### 감사의 글

이 논문은 1995년도 교육부 학술연구 조성비(신소재 분야)에 의하여 수행된 것이며, 이에 감사를 드립니다.

### REFERENCES

1. John B. Wachtman Jr., "Structural Ceramics," Academic Press INC., Vol. 29, 91-163 (1989).
2. S. Somiya and Y. Inomata, "SiC Ceramics," Roka-kuho, 409-25 (1988).
3. E. N. Leno and J. L. Meglen, "International Perspective on Ceramic Heat Engines," *Ceram. Bull.*, **64**(2), 271-75 (1985).
4. D. R. Johnson, A. C. Schaffhauser, V.J. Tennery and E.L. Long, "Ceramic Technology for Advanced Heat Engines Rocket," *Ceram. Bull.*, **64**(2), 276-281 (1985).
5. P. J. Bryant, R. L. Gutshall and L. M. Taylor, "A Study of Mechanisms of Graphite Friction and Wear," *Wear* **7**, 118-126 (1964).
6. R. H. Savage, "Graphite Lubrication," *J. Appl. Phys.*, **19**, 1-10 (1948).
7. E. R. Braithwaite, "Graphite and Molybdenum Disulfide," *Nucl. Eng.*, **2**, 107-110 (1957).
8. E. R. Braithwaite, "Friction and Wear of Graphite and Molybdenum Disulfide," *Sci. Lubrication(London)*, **18**(5), 17-21 (1966).
9. R. F. Deacon and J. F. Goodman, "Lubrication by Lamellar Solids," *Proc. Roy. Soc. Ser. A* **243**, 463-482 (1958).
10. W. Bollman and J. Spreadbourough, "Action of Graphite as a Lubricant," *Nature(London)*, **186**, 29-289 (1960).
11. Y. H. Baik and H. K. Park, "Effect of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  on Tribological Properties of Reaction Bonded SiC," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **31**(9), 1069-75 (1994).
12. Y. H. Baik, "Sintering of Silicon Carbide by Reaction Bonding and its Characteristics," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **25**(6), 609-614 (1988).
13. Y. H. Baik and J. Y. Shin, "Tribological Properties of Reaction-Bonded SiC-Graphite Composites," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **33**(5), 479-484 (1996).