

일방향성 배열을 가진 SiC whisker 에 의해 강화된 알루미나 복합체의 마모마찰 특성

간태석, 임대순, 한병동*
고려대학교 재료공학과
*한국기계연구원

Tribological Behavior of the Alumina Reinforced with Unidirectionally Oriented SiC whiskers

T.S. Kan, D.S. Lim, B.D. Han*
Division of Materials Science and Engineering, Korea University, Seoul, Korea
*Ceramic Materials Group, Korea Institute of Machinery and Materials,
Chang-Won, Kyong-Nam, Korea

abstract

Sliding wear test and surface characterization techniques such as micro-Raman spectroscopy were employed to determine the effect of whisker content and orientation on the friction and wear behavior of SiC whisker reinforced alumina. Composites containing unidirectionally oriented whiskers were fabricated by novel technique. Addition of SiC whiskers up to 20 vol.% lowered the friction and improved wear resistance. The results of this study indicated that highly disordered graphite and size of the layer behind the whiskers were responsible for variation of wear rate and friction coefficient.

1. 서론

세라믹재료가 가지는 특유의 취성을 극복하고 기계적 성질을 향상시키기 위해 SiC whisker 와 같은 강화재를 첨가하는 방법이 사용되어오고 있다.¹⁾ 이렇게 첨가된 강화재는 crack deflection²⁾, crack bridging¹⁾ 과 같은 강화 메커니즘에 의해 세라믹 복합체의 인성 강화에 기여한다.

Al₂O₃-SiCw 복합체의 경우 열팽창 계수 차에 의해 SiC whisker 는 압축응력을, matrix 는 인장응력을 받아 계면에 응력이 형성된다. Crack 이 형성되어 전파되는 중 whisker 를 만나면 응력이 형성되어 있는 계면을 타고 퍼짐으로써 인성 강화 효과를 볼 수 있다. 이렇게 향상된 성질을 가지는 Al₂O₃-SiCw 복합체는 내마모성과 고인성 특성을 요구하는 절삭공구로서의 응용이 기대 되고 있다.³⁾

Al₂O₃-SiCw 의 마모마찰 특성에 대한 연구는 다른 연구자들의 보고에서도 볼 수 있다. Yust 의 논문에서는 온도를 높이면

나 마모시간을 늘렸을 경우 격렬한 마모양상을 보이는 것으로 보고하였다.⁴⁾ DellaCorte 는 온도가 증가함에 따라 pin 의 마모 거동과 disk 의 마모 거동이 다르게 나타난다고 보고하였다.⁵⁾ pin 의 마모에 있어서 그 거동은 Yust 가 보고한 결과와 비슷하나 disk 의 마모는 온도가 상승함에 따라 감소하는 결과를 보였다. 그는 여러 분석 결과 상온에서의 주된 마모 메커니즘은 crack 의 생성과 진행에 따른 matrix 와 whisker 의 취성파괴라고 보고하였다.

본 연구에서는 tape casting 에 의해 제조되어 whisker 가 일방향성을 가지는 Al₂O₃-SiCw 복합체로 마모 마찰실험을 행하였고 whisker 의 부피비를 0%, 10%, 20%, 30% 로 나누어 조성에 따른 마모양상의 변화를 보고자 하였다.

2. 실험방법

1) 시편제조 및 가공

SiC whisker의 함량에 따라 4가지의 시편이 준비되었다. Whisker의 함량이 0%인 알루미늄의 경우 에탄올과 직경 5mm인 알루미늄볼(SSA999, Nikkato corp., Tokyo, Japan)과 분말을 8시간동안 planetary ball milling으로 혼합하였다. 혼합된 분말 중에 whisker가 첨가되지 않은 분말은 30Mpa, 1823K, 1시간의 조건으로, 그리고 whiskerrk 첨가된 분말은 30 Mpa, 2123K, 1시간의 조건으로 열간가압소결(hot pressing sintering)하였다.

SiC whisker가 함유된 시편은 whisker를 일방향으로 정렬하기위해 변형된 tape casting 방법으로 제조되었다. Tape casting slurry는 planetary ball milling으로 준비되었다. solvent로는 metyl-Isobutyl-Ketone, dispersant는 KD-1 (ICI Chemical Co., Barcelona, Spain), binder는 Polyvinyl-butylal (Aldrich Chemical Co., New York, U.S.A.), plasticizer는 di-butyl phthalate (Aldrich Chemical Co.) 이 각각 사용되었다. 혼합시 whisker에 손상이 가지 않도록 최대한 주의를 기울였다. Whisker를 첨가하지 않고 7.5시간동안 혼합한 다음 whisker를 첨가한 뒤 0.5시간동안 혼합하였다. 슬러리는 whisker의 정렬을 향상시키기 위해 제작된 tape casting 장비의 용기에 붓는다. 자세한 내용은 기 발표된 논문에서 소개되었다.⁶⁾

잘려진 tape는 50Mpa, 353K의 압력과 온도하에서 0.5시간동안 적층되었다. Binder burn-out은 대기중에서 823K의 온도로 10시간동안 진행한 후 2123K, 30Mpa의 온도와 압력에서 1시간동안 열간가압소결하였다.

이렇게 제조된 시편을 whisker가 배열하고 있는 방향과 직각을 이루도록 15mm×5mm×3mm의 크기로 절단하였다. 마모실험에 사용된 표면은 작은 정도의 마모량도 쉽게 관찰하고 마모 표면의 관찰이 용이하도록 1/μm diamond slurry로 연마작업을 행하였다.

2) 마모마찰 실험 및 분석

마모마찰실험의 상대재는 직경 12.7mm인 SiC ball로 하였다. 실험에 사용된 마모시험기의 개략도는 기 발표된 논문에서 소개하였다.⁷⁾ 이 실험기기는 ball형 시편이 plate상단에서 전달되는 힘을 받으면서 plate가 왕복운동하여 시편과 ball과의 마찰이 일어날 수 있도록 설계되었다. 시편과 ball의 마찰력에 의해 발생하는 torque가 마모 실험장치에 장착된 load cell에 전달된다. 이때 발생하는 전압변화가 indicator에 의해 측정되고 컴퓨터에 기록되어 마찰계수 값으로 환산되도록 하였다.

마모실험은 whisker의 배열 방향과 직각으로 수행되었다. 매 실험환경의 재현성을 유지하기 위해 상온에서 증류수 분위기에서 실험하였다. ball에 가해진 하중은 40N으로 고정하였으며, 13mm/sec의 왕복속도로 0.5시간동안 총 왕복거리 23.4m의 마모실험을 행하였다. 모든 마모실험 조건을 Table 1.에 나타내었다.

Table 1. Wear test condition.

Parameters	Values
Counter part	SiC ball (1.27mm diameter)
Temperature	Room temperature
Applied load	40N
Sliding speed	13mm/sec
Sliding distance	23.4m
Experimental time	0.5hr
Environment	Distilled water

마모실험 후 SiC ball 마모 흔적의 직경을 광학현미경으로 측정하였다. 마모 실험이 끝난 시편은 초음파세척기로 5분동안 세척한 다음 surface profilometer (Tencor P-1, long scan profiler, Japan)로 wear track을 가로질러 측정하여 마모된 단면의 넓이를 계산한 뒤 wear track의 길이를 곱해 부피를 구한 후 sliding distance와 인가된 하중을 나누어 마모율을 구하였다.

마모된 표면을 관찰하기 위해 주사전자현미경(SEM)을 사용하였고 마모 후 표면

의 성분변화를 보기위해 마모된 곳과 마모되지 않은 부분을 Micro Raman Spectroscopy 로 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

SiC whisker 의 함량에 따른 마찰계수 값을 Fig. 1 에서 나타내었다. Whisker 로 강화된 알루미나의 마찰계수 값은 서로 비슷하고 whisker 가 첨가되지 않은 알루미나의 마찰계수 값보다는 낮은 성향을 보인다. Fig. 2 는 SiC whisker 함량에 따른 마모 표면을 SEM 으로 본 것이다. Whisker 가 함유되지 않은 알루미나의 마모 표면과 whisker 로 강화된 알루미나의 마모 표면을 비교해 보면 전자의 경우에는 달리 후자의 경우 마모 표면에 작은 판상이 형성되는 것을 볼 수 있다. 따라서 이렇게 형성된 판상들이 Hertzian 접촉응력을 감소시키는 작용을 하여 마찰계수 값을 떨어뜨리는 것으로 볼 수 있다.

Fig. 3 은 SiC whisker 로 강화된 알루미나 시편의 마모된 부분과 마모되지 않은 부분에 대한 Raman 분석 결과이다. 마모되지 않은 부분에서는 wave number 800 cm^{-1} 부근에서 SiC 상의 피크가 보이나 마모된 부분에서는 SiC 상의 피크폭이 넓어지고 1350 cm^{-1} 부근의 "D"(disorder)와 1570 cm^{-1} 부근의 "G"(graphite)에서 넓은

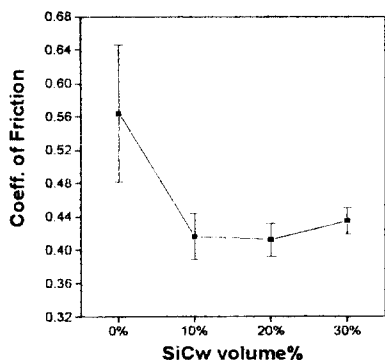
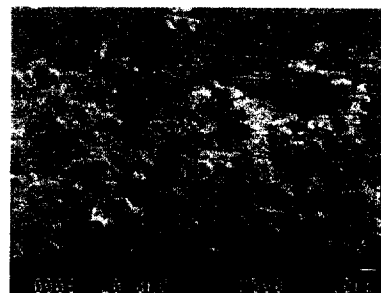


Fig. 1. The variation of friction coefficient with SiC whisker contents for Al_2O_3 -SiCw.



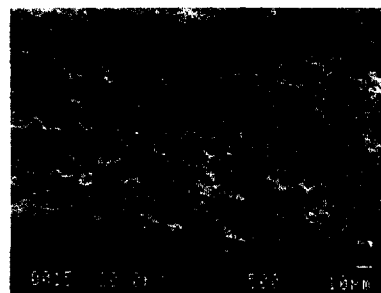
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 2. SEM images of worn surface with SiC whisker contents for Al_2O_3 -SiCw ; (a) 0%, (b) 10%, (c) 20% and (d) 30%.

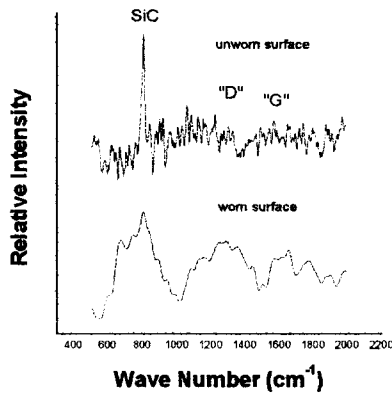


Fig. 3 Micro-Raman spectroscopy of worn surface and unworn surface of Al_2O_3 -SiCw.

폭의 피크가 보이는 것으로 보아 disordered graphite가 생성된 것으로 볼 수 있다.^{8),9)} 이렇게 확인된 disordered graphite는 Fig. 2의 SiC whisker로 강화된 알루미늄의 마모된 표면에서 형성된 판상층과 관계된다고 생각되고 이것이 고체 윤활제로서 작용함에 의해 마찰계수 값이 낮아지는 결과를 나타낸다고 볼 수 있다.

Fig. 4와 Fig. 5는 각각 SiC whisker 함량에 따른 마모율과 상대재인 SiC ball의 마모 직경을 나타낸 그래프이다. 두 경우의 값 모두 SiC whisker의 함량이 20%까지는 감소하는 경향을 보이나 SiC whisker의 함량이 30% 일 때는 마모율과 상대재의 마모 직경 모두 증가하는 모습을 보인다. Fig. 2 (a)와 (b)에서 보이는 판상의 폭이 whisker의 평균길이($10\ \mu\text{m}$)와 거의 일치하는 것으로 보아 마모 진행 방향과 직각을 이루며 배열되어 있는 whisker가 matrix에 강하게 잡혀 있으므로 그 길이와 비슷한 폭을 가지는 판상을 형성하는 것으로 볼 수 있다. 이것으로 미루어 볼 때 whisker는 matrix에 강하게 붙잡혀 있고 또 이렇게 잡혀있음으로써 표면을 보호하는 역할을 한다고 볼 수 있다. Fig. 2 (b)와 (c)를 비교해 보면 whisker의 함량이 많은 (c)의 경우 더

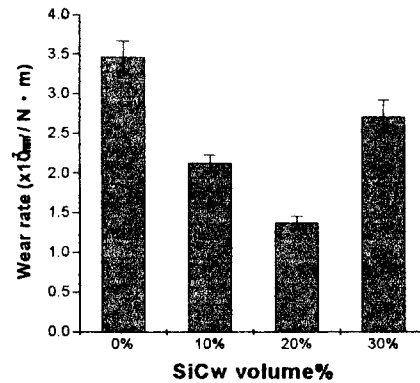


Fig. 4. The variation of wear rate with SiC whisker contents for Al_2O_3 -SiCw.

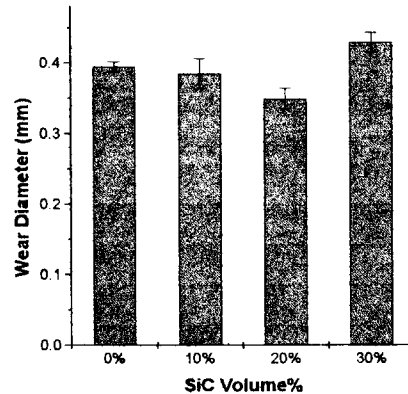


Fig. 5. The variation of wear diameter of SiC ball with SiC whisker contents for Al_2O_3 -SiCw.

많은 판상이 표면에 존재하고 있는 것을 확인 할 수 있다. 이것은 SiC whisker 20%가 함유된 알루미늄이 더 효과적으로 표면을 보호하고 그 결과 가장 작은 마모율을 나타내는 것으로 확인 할 수 있다. 상대재의 마모 직경의 경우 whisker의 함량이 20%일 때 최소인 것은 낮은 마찰 계수값에서 볼 수 있듯이 Hertzian 접촉 응력의 감소로 설명 될 수 있고 그것은 Fig. 2와 Fig. 3에서 보인 disordered graphite로 확인된 판상에 의해서도 설명

될 수 있다. 그러나 SiC whisker 가 30% 함유된 알루미늄의 경우 마모율이 다시 증가하는 결과를 보인다. 서론에서 언급했듯이 알루미늄과 SiC whisker 는 열 팽창계수가 다르므로 그 경계면에는 응력이 분포하고 있다. whisker 가 다량 함유되어 있을 경우 이렇게 응력이 분포되고 있는 경계면은 증가 될 것이고 이것은 SiC whisker 로 강화된 알루미늄의 상온에서 주된 마모 매커니즘으로 보고된 크랙의 생성과 진행에 도움을 줄 것으로 생각된다. Fig 2 (d) 를 보면 (b) 와 (c) 에서 보이는 마모 표면과 다른 모습을 보인다. Fig 2 (b) 와 (c) 에서 보인 whisker 의 길이와 비슷한 폭을 가지는 판상은 거의 보이지 않고 더 커다란 폭을 갖는 판상이 한쪽에 몰려 형성됨을 볼 수 있다. 이것으로 보아 작은 판상이 떨어져 나가 뭉쳐져서 커다란 너비의 판상을 이룬것이라고 볼 수 있다. 이것은 whisker 가 matrix 에 붙잡혀 있는 정도가 약하다는 것을 의미하고 마모량의 증가가 설명될 수 있다. 상대재의 마모직경이 증가하는 것은 판상이 떨어져 나감으로써 마모량이 증가하는 것으로 설명될 수 있다. 판상이 떨어짐으로써 드러난 whisker 와 접촉면의 마찰로 인해 상대재의 마모 직경도 증가시키는 것으로 볼 수 있다.

4. 결론

Tape casting 법으로 whisker 가 마모 방향에 직각으로 놓이도록 제조된 Al_2O_3 -SiCw 복합체의 마모실험 결과 whisker 의 첨가로 인해 마찰계수 값이 감소되고 SiC whisker 의 함량이 20%인 경우가 마모율과 상대재의 마모 직경이 가장 작은 것으로 나타났다. 이것은 마모 거동중 형성된 판상에 의한 마찰계수 감소로 설명될 수 있는데 이 판상은 Raman 분석결과 disordered graphite 로 확인되었다.

whisker 의 함량이 30%인 경우 matrix 와 경계면에서의 응력이 마모 특성을 떨어뜨리는 것으로 확인되었다.

감사의 글

본 연구는 한양대학교 세라믹공정 연구 센터를 통한 한국 과학재단 우수 연구센터 지원금에 의한 것입니다.

5. 참고문헌

- 1) P.F.Becher, Microstructural design of toughened ceramics, J. Am. Ceram. Soc., 74, 1991, 255-69.
- 2) K.T.Farber and A.G.Evans, Crack deflection processes I-theory, Acta Metal., 31, 1983, 565-76.
- 3) E.R.Billman, P.K.Mehrotra, A.F.Shuster and C.W.Bee gly, Machining with alumina-SiC whisker cutting tools, Ceram. Eng. Sci. Proc., 9, 1988, 543-552.
- 4) C.S.Yust, Tribological behavior of whisker-reinforced ceramic composite materials, S.Jahanmir(ed), Friction and Wear of Ceramics, Maecel Dekker Inc., New York, 1994, pp.199-223.
- 5) C.DellaCorte, Tribological characteristics of silicon carbide whisker-reinforced alumina at elevated temperatures, Friction and Wear of Ceramics, Maecel Dekker Inc., New York, 1994, pp.225-59.
- 6) D.-S.Park, C.-W.Kim and C.Park, Self-reinforced silicon nitride composite containing unidirectionally oriented silicon nitride whisker seeds, to be published in Ceram. Eng. Sci. Proc.
- 7) 김장엽, 임대순, 안효석, 플라즈마 용사법에 의한 ZrO_2 - Y_2O_3 코팅의 고온에서의 마모, 한국 요업학회지, 30(12), 1993, 1059-1063.
- 8) F.Tuinstra and J.L.Koenig, Raman spectrum of graphite, J. Chem. Phys., 53(3), 1970, 1126-130.
- 9) S.Nakashima and H.Harina, Raman Investigating of SiC Polytypes, Phys.Stat.Sol., 162(39), 1997, 39-63.