

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

간태석, 한병동*, 임대순
고려대학교 재료공학과
*한국기계연구원

Tribological Behavior of the Alumina Reinforced with Unidirectionally Oriented SiC whiskers depending on whisker orientation

T.S. Kan, B.D. Han*, D.S. Lim
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 was 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 prepared by a modified tape casting followed by lamination, binder removal and hot pressing in order to align the whiskers in the tape casting direction. Wear coefficients on three directions were measured; parallel and normal to the tape casting direction on the tape casting surface and normal to lamination direction on surface normal to the tape casting direction. In the effect of whisker orientation, the highest wear rate was obtained in the direction parallel tape casting direction and the lowest in the direction normal to lamination direction at all temperatures. Silicon oxide layer smoothing the surface was detected by energy dispersive X-ray analysis on the worn surface.

1. 서 론

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⁾

본 연구에서는 일방향성을 갖는 휘스커의 방향에 따른 마모 마찰 특성에 대해 온도에 따른 마모율, 마찰계수, 표면상태 등을 측정하고 관찰하여 가장 응용이 많이 되야 될 마모저항성이 뛰어난 방향을 평가하였다.

2. 실험방법

1) 시편제조 및 가공

whisker 가 불규칙하게 보강되어 있는 알루미나 복합체는 에탄올, 알루미나 볼, 알루미나 분말, MgO 를 5 시간동안 planetary ball milling 으로 혼합한후 whisker 를 10 vol.% 넣고 10 분동안 planetary ball milling 하고 건조와 분쇄 과정을 거친 후 2073 K, 30 Mpa, 1 시간의 조건으로 열간가압소결 하였다.

SiC whisker 가 일방향으로 10 vol.% 보강

되어있는 알루미늄 복합체를 제조하였다. whisker를 일방향으로 정렬하기 위해 변형시킨 tape casting 방법으로 제조되었다. Tape casting slurry는 planetary ball milling으로 준비되었다. solvent로는 methyl-Isobutyl-Ketone, dispersant는 KD-1 (ICI Chemical Co., Barcelona, Spain), binder는 Polyvinyl-butyril (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 6.75시간동안 혼합한 다음 whisker를 첨가한 뒤 15분동안 혼합하였다. 슬러리는 whisker의 정렬을 향상시키기 위해 제작된 tape casting 장비의 용기에 붓는다. 자세한 내용은 기 발표된 논문에서 소개되었다.⁴⁾

잘려진 tape는 50Mpa, 358K의 압력과 온도하에서 1시간동안 적층되었다. Binder burn-out 과정을 거친후 2073K, 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 6 μm diamond slurry로 연마작업을 행하였다.

2) 마모마찰 실험 및 분석

마모마찰실험의 상대재는 직경 12.7mm인 Si₃N₄ ball로 하였다. 실험에 사용된 마모시험기의 개략도는 기 발표된 논문에서 소개하였다.⁵⁾

마모실험은 1시간동안 40 N의 일정한 하중과 10 mm/s의 속도, 5.64 mm의 stroke로 실험하였다. 수분의 흡착에 의한 실험결과의 오차를 피하기 위해 403 K의 온도에서 실험하였고 격 마모 양상을 관찰하기 위해서 873 K의 온도에서도 실험하였다. 휘스커의 방향에 따른 결과를 관찰하기 위해 whisker가 마모방향에

random, parallel, normal, standing 하계 4 방향으로 각각 마모실험을 행하였다.

마모실험 후 wear rate는 surface profiler (Tencor P-1, long scan profiler, Japan)로 시편의 wear track을 가로질러 surface profile을 측정 후 그래프에서 계산한 단면적과 wear track의 길이를 곱해 부피를 구한 후 sliding distance와 인가된 하중으로 나누어 계산하였다. 마모된 표면을 관찰하기 위해 EDX(energy dispersive X-ray analyzer)가 장착된 SEM (JSM-5310LV, Jeol, Tokyo, Japan)을 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig.1에서 볼 수 있듯이 403 K에서 가장 낮은 마찰계수 값은 whisker가 마모방향에 수직인 방향으로 배향되어있을 때 측정되었고 가장 높은 마찰계수 값은 whisker가 마모방향에 서 있을 때였다. whisker가 마모 방향에 평행한 방향으로 배향되어있을때의 마찰계수 값은 whisker가 서 있는 방향의 마찰계수 값과 비슷하게 측정되었다. 이것은 마모방향과 수직으로 휘스커를 projection 시킨 길이가 두 경우 거의 비슷하기 때문이다. 이 두 경우는 Fig.2 (b)와 (d)에서 볼 수 있듯이 휘스커의 직경과 비슷한 폭을 갖는 미세한 ridge와 groove가 마모 표면에 형성되는 것을 확인할 수 있다. 좁은 폭을 갖는

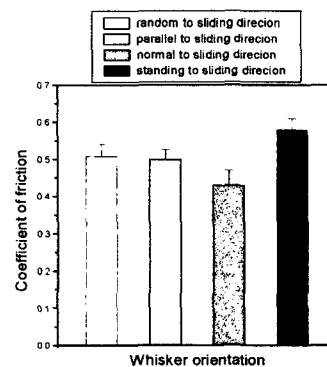


Fig.1 Friction Coefficients depending on whisker orientation at 403K

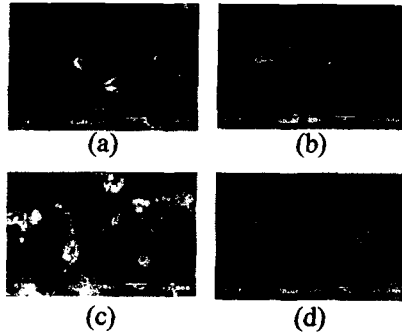


Fig.2 SEM images of worn surface at 403 K; (a) random, (b) parallel, (c) normal, (d) standing to sliding direction

groove와 ridge는 실제적 접촉 면적을 늘이는 효과를 주기 때문에 마찰력을 증가시키고 또한 마찰계수값을 증가시키는 원인이 된다. 마모 진행 방향과 수직으로 휘스커를 projection 시킨 길이가 길면 길수록 더 넓은 영역이 debris layer로 덮이게 되는 것을 Fig.2 (c)에서 확인할 수 있다. 그로 인해 접촉면은 더 smooth해지고 마찰계수 값은 더 낮게 측정된다. 또한 whisker가 random한 방향과 평행한 방향의 마찰계수값이 비슷하게 높은 값을 형성하고 있는 것이 확인되는데 이것은 마모 방향에 수직으로 있는 휘스커와의

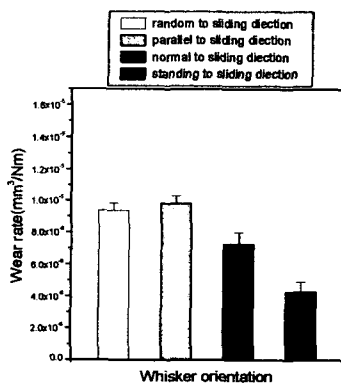


Fig.3 Wear rate depending on whisker orientation at 403K

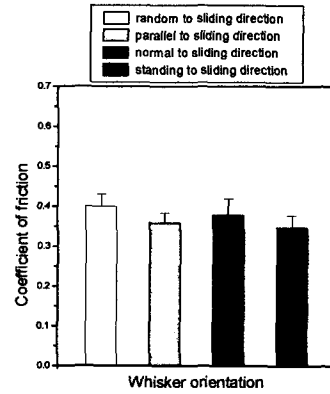


Fig.4 Friction Coefficients depending on whisker orientation at 873 K

접촉에 의해 쉽게 제거되는 볼의 미세한 asperity가 떨어져나가기 위해서 이러한 시편에서는 더 많은 왕복횟수가 필요하기 때문이다. 403 K에서 휘스커 배향에 따른 마모결과 또한 Fig.3에 나타나 있다. 단 결정 탄화규소의 hardness는 그 결정학적인 방향과 면에 따라 다르다는 보고가 있다. basal plane에서 가장 높은 hardness 값을 갖고 prismatic plane에서 c축에 수직인 방향에서의 hardness가 c축에 평행한 방향의 hardness 값보다 더 높다고 보고되고 있다.^{9,7)} 이러한 결과로 볼 때 whisker가 서있는 방향으로 마모실험했을 때 휘스커의 basal plane이 가장 많이 드러나는 면이므로 가장 높은 hardness를 갖는 휘스커가 표면에 분포되어 있다고 볼 수 있다.

873 K의 온도에서의 마찰계수값의 결과는 Fig.4에 있다. 4 방향 모두 비슷한 값이 측정되었고 403 K에서보다 모두 낮아지는 경향을 보이고 있다. Fig. 5의 저배율로 마모 표면을 관찰한 SEM 사진을 보면 비슷한 양상을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 매끈한 층이 형성되어 있고 그 아래쪽에 거칠게 보이는 면이 존재하고 있다. Fig. 5(d)에서는 거의 모든 부분이 매끈한 층으로 덮여 있다. 고배율의 image에서도 순마모 상태에서 보았던 whisker를 중심으로 형성되었던 미세한

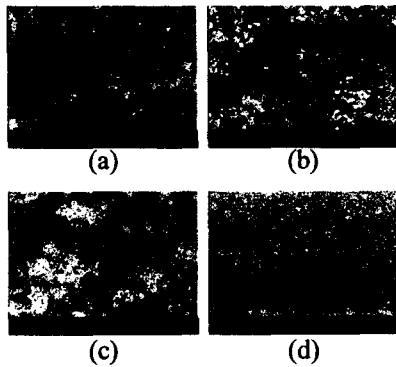


Fig.5 SEM images of worn surface at 873 K; (a) random, (b) parallel, (c) normal, (d) standing to sliding direction

폭을 갖는 ridge 와 groove 가 발견되지 않았다. Fig. 6(b) 에서 볼수 있듯이 휘스커 주위로 layer 가 넓게 형성되어 있고 주위에 whisker 의 크기와 비슷한 debris 가 존재하고 있는 것을 볼 수 있다. Fig. 5 (c) 에서 보이는 layer 아래의 거친 부분에서 whisker 를 발견 할 수 있었다. Fig. 6 (c) 가 그것인데 휘스커가 탈락된 whisker pocket 의 모습을 보여주고 있다. 순마모 상태에서는 마모 방향에 휘스커를 projection 시킨 길이와 거의 일치하는 ridge 가 형성되어 이것이 마찰 계수 값을 변화시키는 중요한 요인이 되었으나

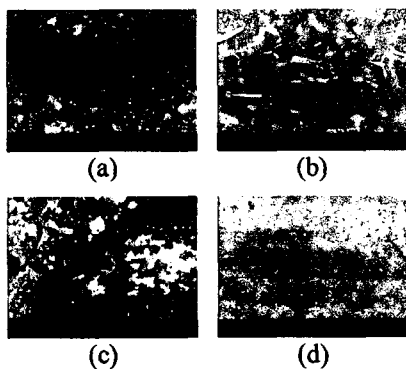


Fig.6 Higher magnification of Fig.5; (a) random, (b) parallel, (c) normal, (d) standing to sliding direction.

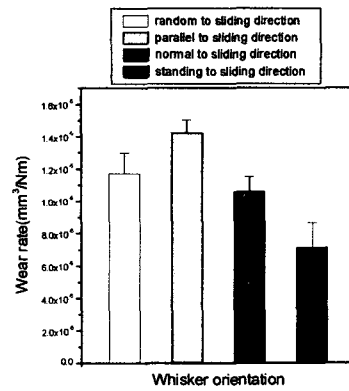


Fig.7 Wear rate depending on whisker orientation at 873 K

격마모 상태에서는 이렇게 형성된 ridge 등이 연결되어 layer 를 형성한다고 생각된다. 순마모 영역에서 가장 미세한 ridge 의 형태를 가졌던 whisker 가 서있는 방향으로 마모실험한 시편인 Fig. 6 (d) 에서 가장 매끈한 표면을 보이는 것도 확인할 수 있었다. 따라서 격마모 상태에서는 작은 차이지만 lamination 방향과 수직인 방향으로 마모실험 했을 때 가장 작은 마찰계수값이 측정되었다.

마모율은 873 K에서는 방향에 따라 확실한 차이를 보인다. Fig.7 의 결과를 보면 마모율은 온도의 상승에 따라 증가했지만 방향에 따라 403K 에서와 같은 경향을 보인다. 그리고 whisker 가 random 하게 배향되어 있을 때의 마모율이 whisker 와 수직인 방향으로 마모실험 했을 때의 마모율보다 크게 측정되었다. Whisker 의 방향에 따른 hardness 값의 차이로 마모율을 설명하였는데 격마모 상태에서도 마찬가지로 설명될 수 있다. 또한 whisker 의 배열상 마모 방향과 평행으로 whisker 가 존재하고 있는 경우 matrix 의 마모에 충분히 관여 하지 못하기 때문에 마모 방향과 수직으로 whisker 가 있을 때 관찰되었던 whisker pocket 이 관찰 되지 않았다. 결과적으로 whisker 가 마모 방향에 직각을 이룰수록 더욱 효과

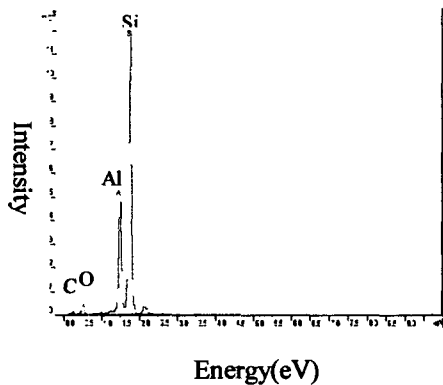


Fig.7 EDX pattern of the layer around whisker (point A in Fig.6 (b)).

적으로 matrix 를 보호한다고 생각된다. Whisker 가 서있는 방향으로 마모실험한 시편의 경우에는 강도가 높은 휘스커가 단면으로 보았을 때 가장 hardness 가 높은 basal plane 이 구형의 이차상과 같은 형태로 존재하고 matrix 에 안전하게 잡혀 있으므로 가장 낮은 마모율을 나타낸다고 설명할 수 있다.

whisker 가 함유된 시편에서 발견되는 매끈하게 보이는 layer 의 성분을 EDX 로 분석하였다. Fig. 6 (b) 의 whisker 주변에 형성된 layer 를 분석하였다. Fig.7 에 나타난 결과를 보면 layer 에 Si 가 가장 많이 존재하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 이렇게 whisker 를 중심으로 형성되는 layer 는 silicon 계열의 층을 형성하여 표면을 보호하고 마찰 계수 값을 낮추는 역할을 한다고 생각된다.

4.결론

403 K 에서는 순마모양상을 보였으며 휘스커의 basal plane 이 가장 많이 드러나 있는 면에서 가장 높은 마찰계수 값과 가장 낮은 마모율이 측정되었다. 873 K 에서는 격마모 양상을 보였고 whisker 를 중심으로 넓게 형성되는 layer 에 의해 마찰계수값이 감소하였다. 방향에 따른 마찰계수값을 거의 비슷하게 측정되었다. 마모율은 403K 에서보다 증가하였으나 같은

경향을 나타내었다.

감사의 글

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

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) 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.
- 5) 김장엽, 임대순, 안효석, 플라즈마 용사법에 의한 $ZrO_2-Y_2O_3$ 코팅의 고온에서의 마모, 한국 요업학회지, 30(12), 1993, 1059-1063.
- 6) M. Moser, Microstructure of ceramics-Structure and Properties of Grinding Tools, Akademiai Kiado, Budapest, p136, 1980.
- 7) P. T. Shaffer, Effect of Crystal Orientation on the Hardness of Silicon-Carbide, J. Am. Ceram. Soc., 47, 466-471, 1964.