한국윤활학회지(1993), 제 9권 제 2호
Journal of KSLE(1993) Vol. 9, No. 2, pp.49~55

무윤활 미끄럼 마찰하에서 SiC 휘스커 및 입자강화 청동기지 복합재의 마모특성

이상로 · 허무영

고려대학교 금속공학과

The Dry Sliding Wear Properties of SiC_w and SiC_p Reinforced Bronze Matrix Composites

Sang-Ro Lee, Moo-Young Huh

Dept. of Metallurgical Engineering, Korea University

Abstract—The dry sliding wear properties of the sintered Cu-10 wt%Sn bronze alloys reinforced with SiC_w and SiC_p were investigated by a pin-on-disc wear testing machine. The worn surfaces and the cross sections of the wear specimens and the wear debris were observed by SEM to study the effect of the variation of the ceramic phase contents in the composite and the wear condition on the wear behaviors. The wear of bronze matrix was dominated by the adhesive wear. The transition from mild to severe wear was found in the bronze matrix specimens at the applied load higher than 20N where the surface delamination caused the severe wear. The addition of SiC_w and SiC_p reinforcements in the composites was proved to reduce the wear rate by the matrix strengthening at the applied load higher than 20N. SiC whiskers having a large length to diameter ratio which hold the deformed matrix were effective to hinder the crack propagation near the worn surface. Thus the maximum wear resistance was obtained in the composite reinforced by SiC_w at the higher applied load.

1. 서 론

고품위의 소형 동력전달장치와 같은 고정밀 기능부품들은 보다 높은 비강도, 고경도, 내마모성 및 내식성을 가져야 한다. 특히 소재의 마찰, 마모특성은 기아와 같은 마찰부품의 수명, 정밀도 및 에너지 손실을 좌우하는 것으로서 물성의 열화를 극복할 수 있는 소재의 개발이 요구되고 있다. 지난 수년 동안 금속기지에 Al_2O_3나 SiC 등의 세라믹 보강재를 첨가하여 복합재의 응착 및 연삭마모에 대한 저항성을 향상시키는 연구들이 보고되고 있다[1-3]. 세라믹 입자 보강 복합재료는 제조비용이 저렴하고, 거의 등방성을 가지며 가공성이 우수하지만 복합효과에 의한 기지강화와 탄성계수의 증가가 적다는 단점을 갖고 있다[4]. 최근에는 새로운 형태의 복합재료로 세라믹 휘스커 보강 금속기지 복합재료가 개발되어 복합재료의 강도증가와 함께 내마모성의 증가를 얻고 있다[5-8].

보강재의 부피비, 분산상태, 기지와 보강재의 계면안정성 등이 세라믹상 보강 금속 복합재료의 마모성질을 지배하는 인자라고 알려져 있으며 또한 마모환경에서 보강재가 기지로 부터 분리되면 오히려 내마모성의 저하를 가져올 수 있다[9-11]. 그런데 세라믹상의 종류와 첨가량에 따른 동계기지 복합재의 내마모성 변화를 연구한 보고는 거의 없다. 따라서 최적의 내마모특성이 얻어지는 동계기지 복합재의 제조와 이 복합재의 마모기구를 규명하기 위하여 많은 연구가 요구되고 있다.

본 연구에서는 분말야금법을 이용하여 동계 금속기지에 세라믹상으로 SiC 입자 및 휘스커가 보강된 복합재를 제조하여, 세라믹상의 종류와 첨가량에 따른 마모거동을 pin-on-disc 형태의 마모시험기에서 실험하였으며, 주사전자현미경에 의한 마모표면관찰 등으로 복합재의 마모기구 변화를 연구하였다.

2. 실험방법

본 연구에서는 동계 금속기지로 내마모성이 우수한 Cu-10 wt%Sn 청동을 선택하였다. 이 금속기지에 세라믹 보강재로 SiC 휘스커 및 입자를 2~10vol% 분산시켜 복합재를 제조하였다. 보강재로 사용된 SiC 휘스커는 직경 2~3μm, 길이 30~200μm로 Advanced composite matrix사 제품이었으며, SiC 입자는 직경이 2~3μm로 불규칙한 입형을 갖는 일본 고순도 화학제품을, 그리고 기지분말은 (주) 창성에서 제조한 구리분말과 주석분말을 사용하였다. 분말-입자-휘스커의 균일한 혼합체를 얻기 위하여 분산매를 이용한 초음파 분산 및 기계적 혼합을 행하였다. 혼합된 분말은 압축성형 후 680℃의 수소분위기에서 20 분간 1차 소결과 재성형 그리고 800℃에서 40 분간 2차 소결에 의하여 이론밀도 93% 정도의 최종복합재를 제조하였다.

마모시험은 Fig. 1의 pin-on-disc형 마모시험기로 행하였다. 마모조건은 무윤활 상태에서 미끄럼속도를 0.93m/sec로 일정하게 유지하고, 마모변수로 마모하중을 4.9~49N, 미끄럼 거리를 500~3000 m로 변화시켰다. 마모시편은 4×4×10 mm 크기로, 모서리를 45°로 가공하여 접촉을 용이하게 하였다. 마모시편과 상대재인 SCM4(HRC63±3) steel disc는 #800연마지로 평탄하게 연마한 후, 아세톤으로 초음파 세척하여 윤활 성분을 제거한 후 시험에 사용하였다. 마모율은 마모시험 후 10^{-4}g까지 칭량 가능한 화학저울을 사용하여 시편의 무게 감량으로 측정하였다. 마모율은 각 조건에서 마모시험을 3회 실시하여, 그 평균값을 취하였다. 복합재에서 마모거동변화는 주사전자현미경을 이용하여 마모표면 및 마모시편 측면 관찰과 마모입자 관찰 등으로 연구하였다.

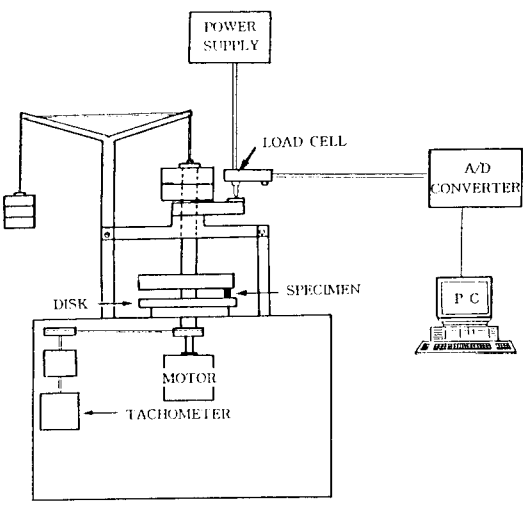

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental wear testing machine (pin-on-disk type)

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 세라믹 강화재의 분산

Fig. 2는 성형에 사용되었던 주석분말에 SiC 휘스커가 균일하게 분포된 혼합체의 미세조직이다. SiC 휘스커는 그 형태적인 특징 때문에 부피당 표면적이 매우 커서 표면에너지를 감소시키기 위하여 서로 엉켜있어 일반적인 혼합방법으로는 금속분말에 균일하게 분산시킬 수 없다. 본 실험에서는 용매와 초음파분

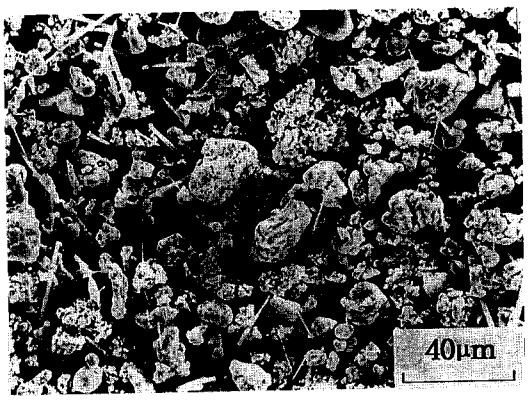

Fig. 2. Scanning electron micrograph of mixed powders before compaction (Cu+Sn+SiCw+Acrowax)

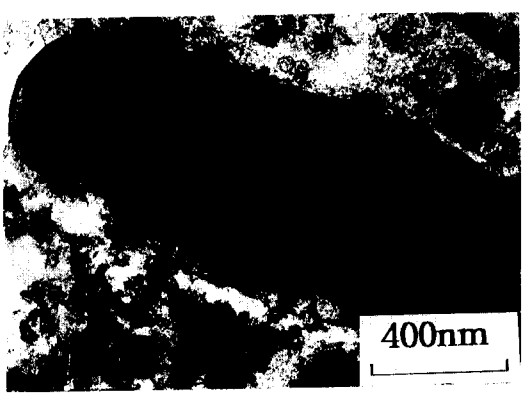

Fig. 3. Transmission electron micrograph showing interface between whisker and matrix

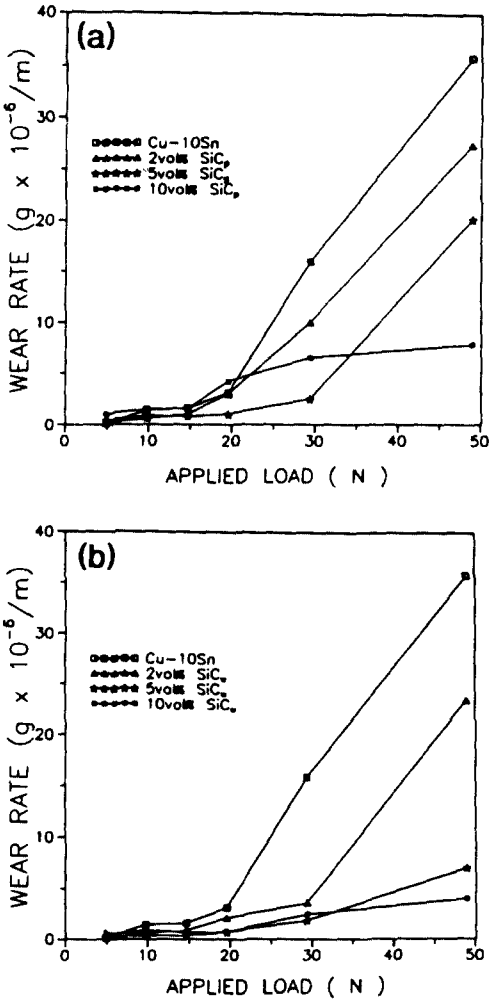

Fig. 4. Variation of wear rates with the applied load at the sliding velocity of 0.93 ms^{-1}
(a) Bronze-10 vol% SiC$_p$ (b) bronze-10 vol% SiC$_w$

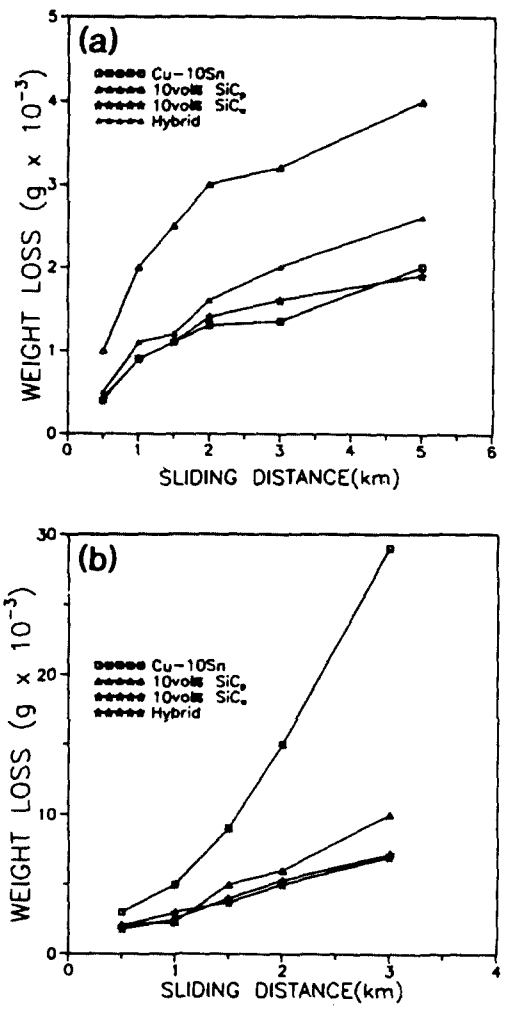

Fig. 5. Wear loss vs sliding distance curves at the sliding velocity of 0.93 ms^{-1} with applied load
(a) 4.9N (b) 49N

산을 이용하는 혼합법에 의해 서로 형태가 상이한 분말입자들과 휘스커의 균일한 혼합체를 얻을 수 있었다. 이와 같은 균일한 세라믹상의 분산이 얻어져야 내마모성과 같은 기계적 성질의 향상을 기대할 수 있다.

3-2. 기지-세라믹 휘스커 계면

복합재료에서 금속기지와 강화상인 세라믹상 사이의 결합은 세라믹상이 기지강화 효과를 갖기 위한 요건이다. 본 실험에서는 금속기지의 성분에 주석분말이 포함되어 소결 초기의 낮은 온도에서 액상이 생성되어 세라믹상의 젖음성을 향상시켜 기지-세라믹상간에 안정계면을 얻었다. Fig. 3은 2차 소결후 소결체 복합재를 투과전자현미경용 박판시료로 제조하여 관찰한 미세조직으로 휘스커와 금속기지의 계면에 분리된 곳이 없이 완전한 계면결합이 보여진다. 투과전자현미경으로 소성변형된 소결체의 기지-휘스커 계면을 관찰한 결과와 소결체를 파괴하여 파면에서 휘스커의 형태를 관찰한 결과에 의하면 주석이 포함되는 액상소결법에 의하여 기지-세라믹상의 계면에서 매우 높은 계면안정성이 확인되었다.

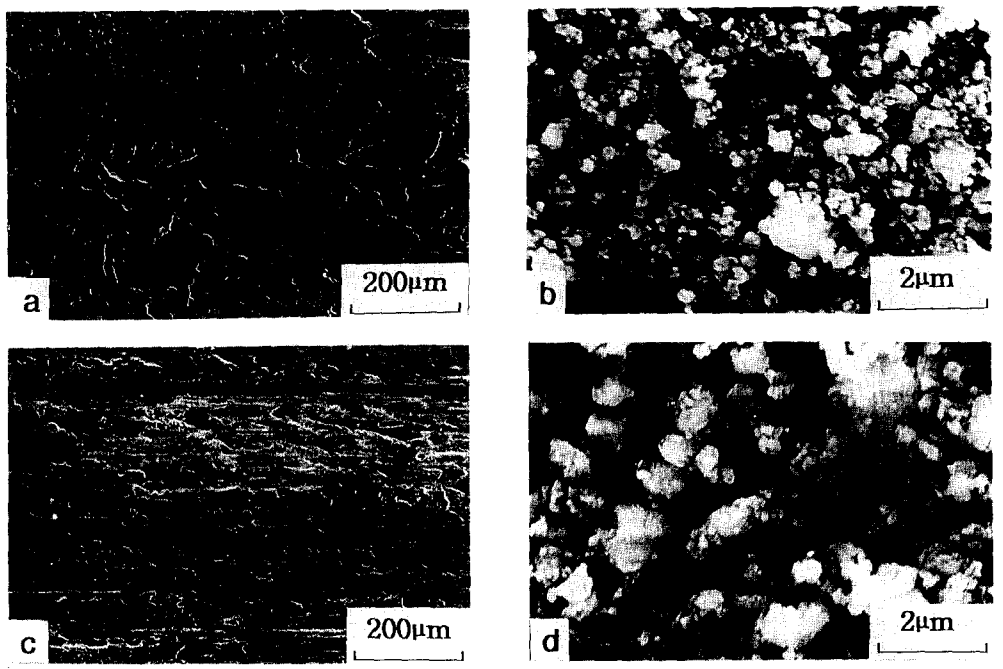

Fig. 6. Scanning electron micrographs showing (a) worn surface of bronze (b) loose debris of bronze (c) worn surface of Bronze-10 vol% SiC_p (d) loose debris of Bronze-10 vol% SiC_p(load : 4.9N, sliding velocity : 0.93 m^{-1})

3-3. 복합재의 마모거동

Fig. 4는 Cu-10 wt%Sn 합금기지에 (a) SiC 입자(SiC_p) 및 (b) SiC 휘스커(SiC_w)가 첨가될 때, 마모거동을 마모하중 변화에 따른 마모율의 변화를 측정한 결과이다. 시험시 미끄럼속도는 0.93m/sec로 일정하게 유지하였으며, 미끄럼거리는 3000 m였다. 비보강 금속기지 시편은 약 15N 이하의 마모하중에서 10^{-6} g/m 정도의 낮은 마모율을 보이나, 20N 이상에서는 마모율이 급증하여 10^{-5} g/m 이상의 높은 마모율이 얻어졌다. SiC 휘스커가 보강재로 첨가됨에 따라 모든 마모하중에서 마모율의 감소가 얻어지며, 특히 5vol % 이상의 SiC휘스커의 첨가는 30N 이상의 고하중에서 매우 효과적으로 내마모성을 향상시켰다. 그러나 20N 이상의 하중에서는 대체로 SiC 입자 보강에 의하여 내마모성이 증대되었다. SiC 입자가 10vol% 첨가된 시료는 20~30N의 하중에서 5vol% 첨가된 시료에 비하여 오히려 마모율이 조금 높게 나타났다.

Fig. 5의 (a)는 저하중인 4.9N, (b)는 고하중인 49 N에서 세라믹 보강재의 양을 10vol%로 일정하게 유지하여 제조된 시료들의 마모거동을 마모거리에 따른 마모량으로 측정한 결과이다. 여기서 hybrid 시편은

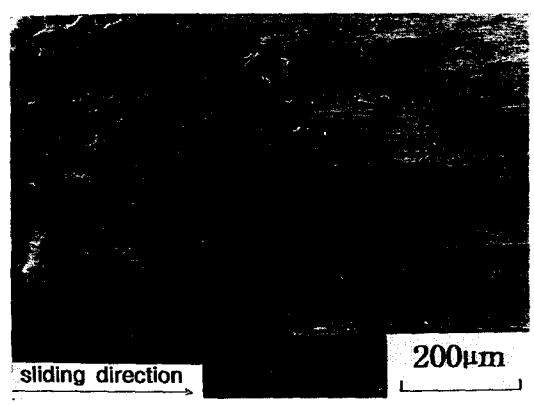

Fig. 7. Scanning electron micrograph showing worn surface of Bronze-10 vol% SiC_w (load : 4.9N, sliding velocity : 0.93 m^{-1})

SiC 휘스커와 입자가 각각 5vol% 포함된 복합재이다. 4.9N의 고하중에서는 10vol% 첨가된 복합재들의 마모량은 기지에 비하여 매우 적었으며, 특히 SiC 휘스커 보강재와 hybrid 보강재는 49N 하중에서 매우 우수한 내마모성이 얻어졌다.

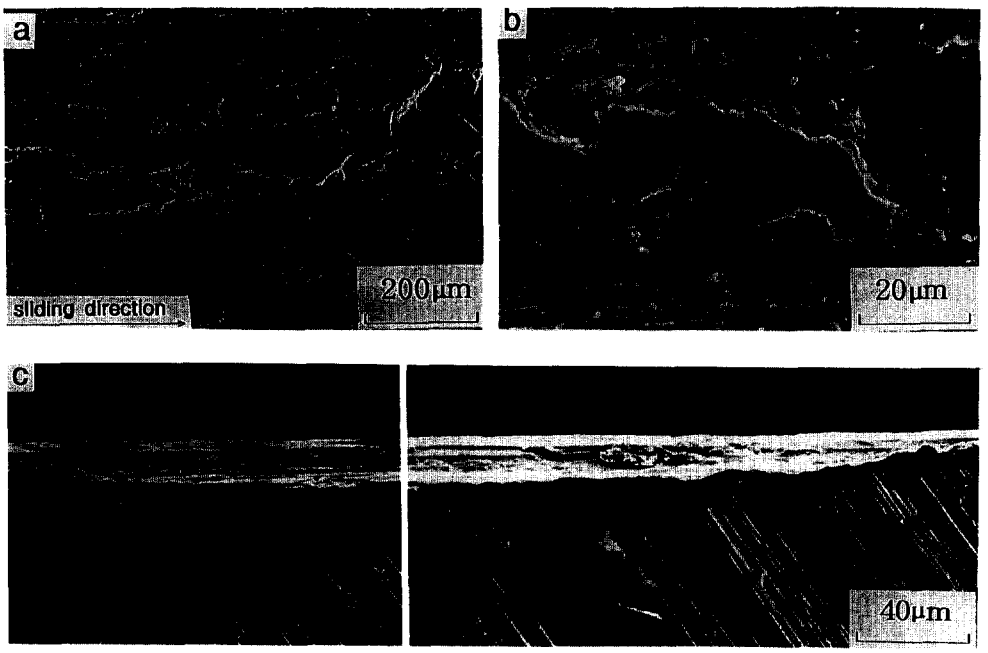

Fig. 8. Scanning electron micrographs in unreinforced bronze showing (a) worn surface (b) fragmentation of surface layer (c) cross-section of a cavity formed by delamination(load : 49N, sliding velocity : 0.93 m/sec)

3-4. 복합재의 마모기구 해석

Fig. 6은 4.9N의 하중에서 3000 m 마모시험후 마모표면과 마모에 의해 발생한 마모입자들의 주사전자현미경 사진이다. (a)의 비강화 청동기지의 마모표면에는 마모면에 돌출부가 형성된 후 소성변형에 의하여 재료가 밀려나가며, 응력이 파괴응력을 넘는 부위에서 재료의 이탈이 일어나 마모손상이 일어나는 금속재료의 대표적인 마모기구인 응착마모가 일어나고 있다. 여기서 얻어진 마모입자는 주로 1μm 정도로 미세한 마모입자가 (b)와 같이 관찰되었다. 4.9N의 하중에서 가장 마모율이 높았던 SiC 10vol% 입자강화 복합재의 마모표면인 (c)에는 부분적인 소성구역과 함께 깊은 골들이 미끄럼 방향으로 형성되어 있다. 이것은 복합재가 상대재와 마찰시 복합재로부터 이탈된 SiC 입자가 연삭재로 작용하거나, SiC 입자로 연삭된 상대재가 다시 복합재를 연삭하여 연삭마모가 이 재료의 마모기구로 작용하였음을 의미한다. 이 마모면에서 이탈된 (d)의 마모입자들은 대부분 수 μm 이상으로 (b)에 비하여 크고, 불규칙한 형상으로 관찰되어 연삭마모에 의하여 생성되었음을 입증한다.

Fig. 7은 4.9N에서 3000m 마모시험 후 SiC 휘스커 보강 복합재의 마모표면으로 Fig. 6의 기지금속과 SiC입자 보강 복합재의 마모표면에 비하여 매끄럽고 응착마모로 형성된 마모손상구역의 크기도 매우 적다. SiC 휘스커와 입자가 각각 5vol% 첨가된 hybrid 재료에서도 SiC 휘스커 보강 복합재와 유사한 단범위의 응착마모만이 관찰되었다.

49N의 고하중에서 마모시험한 Fig. 8의 비강화 청동기지의 마모표면 (a)에는 심한 소성변형에 의한 물질흐름이 넓게 분포되고 있으며, Suh[7]가 보고하였던 판상박리현상에 의하여 형성된 공동이 관찰된다. 판상박리는 마모시 반복하중에 의하여 균열이 발생한 후, 이 균열이 전파하여 장범위 재료이탈이 일어나는 현상이다. 마모시편의 측면에서 약 15μm의 두께로, 100μm 이상 길이의 공동이 형성된 것을 보여준다. 판상박리로 표면으로부터 이탈된 재료는 마모표면 사이에서 깨어져 불규칙한 크기의 마모입자가 만들어져 (b)와 같이 큰 덩어리와 미세한 입자로 이루어진 마모입자가 관찰되었다.

SiC 휘스커는 높은 경도와 강도를 가져 금속기지에 보강재로 첨가될 때 보강재의 부피비에 따라 복합재의

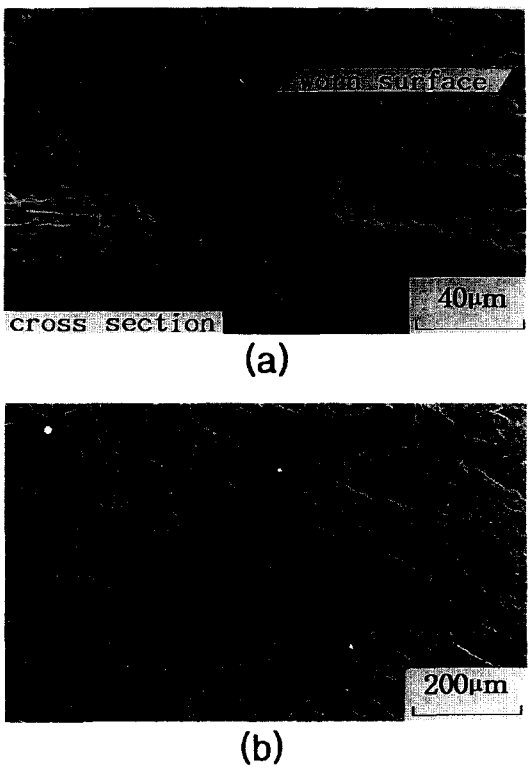

Fig. 9. Scanning electron micrographs showing (a) subsurface crack in cross section in bronze-10 vol% SiC_p (b) worn surface in bronze-10 vol% SiC_w (load : 49N, sliding velocity : 0.93 m/sec)

기계적 성질의 향상 효과를 가지며 또한 휘스커는 단섬유 강화재로 길이/직경의 비가 매우 크기 때문에 금속기지를 장범위로 잡아주어 균열전파 억제 효과를 가져서 휘스커 보강 복합재에서 낮은 마모율이 얻어진 것으로 믿어진다. Fig. 9의 (a)는 10vol% SiC 입자 강화 복합재 마모시편의 마모접촉면과 측면으로 마모표면에는 미세균열이 관찰되며, 이 균열은 마모시편의 측면쪽으로 발달하고 있다. 마모시 반복하중에 따른 균열의 발생과 전파는 표면 박리층을 형성시켜 큰 재료손상을 일으킨다. 그러나 49N에서 가장 마모율이 낮았던 10vol% SiC 휘스커 보강 복합재의 마모표면인 (b)에서는 이와 같은 미세균열이 거의 관찰되지 않았는데 이것은 휘스커의 장범위 기지보강 효과를 입증하는 것이다. 또한 본 연구에서는 마모표면 직하에서 소성변형에 따른 물질흐름이 휘스커 보강에 의하여 억제되는 것도 관찰되었다. 이와 같이 세라믹상 SiC 휘스커는 고하중에서 기지를 지탱하는 역할을 하여 복합재료의 내마모성을 향상시키는 것으로 믿어진다.

4. 결 론

본 연구에서는 분말법을 이용하여 청동기지 합금에 세라믹상으로 SiC 휘스커와 SiC 입자가 보강된 복합재료를 제조하여 복합재의 구성성분과 마모조건의 변화에 따른 마모특성을 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 기지의 마모기구는 모든 범위의 마모하중에서 응착마모였으며, 약 20N에서 경한 마모로부터 심한 마모로 천이가 일어나며 심한마모는 표면박리 현상에 의하여 일어났다.

(2) 5N 이하의 낮은 마모 하중에서 SiC 입자 강화 복합재는 이탈된 SiC 입자와 시편표면에 돌출된 SiC 입자가 상대재를 연삭하여 형성되는 돌기부에 의하여 연삭마모가 일어나 강화재 첨가효과는 얻어지지 않았다.

(3) 20N 이상의 고하중에서 경한 SiC 입자 및 휘스커의 복합에 따라 세라믹상의 부피비가 증가하면 기지강화로 내마모성의 향상이 얻어졌다.

(4) SiC 입자강화복합재의 마모표면층에서는 균열전파가 관찰되었으나, SiC 휘스커 보강 복합재에서는 휘스커의 장범위 기지 보강효과로 균열 전파가 억제되는 것으로 믿어진다.

후 기

본 연구는 1992년도 교육부 신소재분야 학술연구조성비로 지원되었습니다.

참 고 문 헌

1. M.K. Surappa, S.V. Prasad and P.K. Rohatgi, "Wear and Abrasion of Cast Al-Alumina Particle Composites", Wear, Vol. 77, pp. 295-302, 1982.
2. M. Gupta, C. Lane, "Microstructure and properties of Spray Atomized and Deposited Al-7 Si/SiC_p Metal Matrix Composites", Script. Met., Vol. 26, pp. 825-830, 1992.
3. A.T. Alpas, J. Zhang, "Sliding and Abrasive Wear Behavior of an Aluminum(2014)-SiC Particle Reinforced Composite", Script. Met., Vol 24, pp. 931-935, 1990.
4. A.T. Alpas, J. Zhang, "Wear Rate Transitions in

Cast Aluminum-Silicon Alloys Reinforced with SiC Particles and Abrasive Wear", Script. Met., Vol. 26, pp. 505-509, 1990.
5. L. Cao, "The Wear Propertities of a SiC_w Reinforced Aluminum Composites", Wear, Vol. 140, pp. 273-277, 1990.
6. Aiguo Wang, H.J. Rack, "Abrasive Wear of Silicon Carbide Particulate and Whisker Reinforced 7091 Aluminum Matrix Composites", Wear, Vol. 146, pp. 337-348, 1991.
7. Nam P. Suh, "An Overview of the Delamination Theory of Wear", Wear, Vol. 44, pp. 1-16, 1977.
8. 김영환, 이성학, 김낙준, 이두영, "SiC 휘스커 보강 Al 복합재료의 미세조직과 기계적 특성에 관한 연구", 대한금속학회지, 제 28권, 제 7호, pp. 640-647, 1990.
9. H.C. Park, "Wear Behavior of Hybrid Metal Matrx Composites Materials", Script. Met., Vol. 27, pp. 465-470, 1992.
10. R.J. Arsenault, "R.M. Fisher, Microstructure of Fiber and Particulate SiC in 6061 Al Composites", Script. Met., Vol. 17, pp. 67-71, 1983.
11. A.D. Sarkar, "The Role of Wear Debris in the Study of Wear", Wear, Vol. 90, pp. 39-47, 1983.