

## 알루미나 단섬유 및 입자강화 알루미늄 청동기지 복합재의 마모특성

이상로 · 허무영

고려대학교 금속공학과

## On the Wear Properties of the Alumina Short Fiber and Particle Reinforced Aluminium Bronze Alloy Composite

Sang-Ro Lee and Moo-Young Huh

Department of Metallurgical Engineering, Korea University

**Abstract** – In order to investigate the effect of the ceramic reinforcements on the wear properties of aluminum bronze composites, Cu-8wt%Al aluminum bronze alloys reinforced with the Saffil alumina short fiber were produced by the powder metallurgical method and tested by a pin-on-disc wear testing machine. The wear surfaces of the pin specimens and discs, wear debris, and the cross sections of the wear specimens were observed by SEM. The wear mechanism according to various wear conditions and the change of microstructure in the composites were also discussed. In the results, the reinforcement of the composites with alumina short fiber was very effective at the higher applied load over 10N. The material transportation to the counter disc was observed in the alloy specimens without reinforcements. However, the composites reinforced with ceramic particles and fibers showed the resistance against the material transportation.

### 1. 서 론

첨단소재로써 자체의 경도와 강도가 높아 복합효과가 우수하게 나타나는 세라믹상 입자 또는 단섬유 강화 금속기지 복합재가 최근에 개발되고 있다[1-3]. 입자 또는 단섬유 형태의 세라믹상을 포함하는 금속기지 복합재의 제조법에는 용탕을 이용하는 주조법[4, 5]과 분말야금을 응용한 방법[6,7]으로 대별된다. 본 연구에서 복합재의 제조에 사용한 분말야금법은 용탕을 이용한 주조법에 비하여 낮은 온도에서 복합재의 제조가 가능하고, 쉽게 균일한 금속-세라믹상의 혼합체를 용이하게 얻을 수 있으며 또한 금속기지의 미세조직을 쉽게 제어할 수 있다는 특징이 있다. 금속기지 복합재에 대한 대부분의 연구[8-12]들은 경량화와 고강도화를 목적으로 알루미늄 금속기지를 갖는 복합재의 제조와 특성에 관한 것들이었다. 최근에 고품위의 소형 동력장치와 같은 고정밀 기능 부품들의 소재특성으로 고강도, 고경도, 내마모성, 내식성이 요구되면서 본 연구에서와 같이 청동과 같은 동계의 금속기지를 갖는 세라믹상 강화 금속기지 복합재가 연구되고 있다[13,14]. 입자를 세라믹보강재로 하는 금속기지복합재는 제조가 용이하고 등방성의 기계적 성질을 갖으며 가공성도 우수하나 복합효과가 단섬유에 비하여 적다는 단점을 갖는다. 근래에 새로운 형태의 세라믹보강재로 세라믹 휴스커가 개발되어 복합재료의 기계적성질과 함께 내마모성의 증가를 얻고 있다. 휴스커는 자체의 강도도 높고 또한 기지를 잡아주는 성질을 갖기 때문에 동계의 금속기지의 내마모성을 크게 향상시키는 결과가 보고되었다[6,12, 14,15]. 그러나 휴스커는 가격이 비싸고 폐암을 일으키는 등의 유해성이 밝혀져 선진국에서는 휴스커의 대체물질로 가격이 저렴하고 인체에도 무해한 알루미나 단섬유가 보강재로 사용되는 복합재료에 대한 연구가 시작되고 있다[16,17]. 따라서 본 연구에서는 Saffil알루미나 단섬유를 알루미늄 청동계 기지금속에 보강재로 선택하였다.

세라믹상 보강 금속기지 복합재료의 마모성질을 지배하는 인자들로는 보강재의 종류, 보강재의 부피비, 분산상태, 기지와 보강재의 계면안정성 등이 알려져 있다[18-21]. 그런데 알루미나 단섬유강화 동계 금속기지 복합재에서 복합재의 공정변수에 따른 미세조직의 변화가 복합재의 내마모성질에 미치는 효과를 연구한 보고는 거의 없다. 따라서 본 연구에서는 복합재의 보강재의 종류와 부피비에 따른 복합재의 마모특성과 마모조건에 따른 복합재의 마모기구를 규명하기 위하여 Saffil 알루미나 단섬유 보강 알루미늄 청동기지 복합재를 분말법으로 제조하여 pin-on-disc 형태의 마모시험기에서 마모특성을 측정하였으며 주사전자현미경에 의한 마모표면, 마모부스러기, 마모시편의 단면, 상대재표면 등을 관찰하여 복합재의 미세조직 변화와 마모조건에 따른 마모기구의 변화를 고찰하였다.

## 2. 실험방법

본 연구에서 보강재로 사용한 세라믹 단섬유는 ICI사의 milled Saffil 알루미나 단섬유로 직경이 평균  $3\text{ }\mu\text{m}$ 였고 길이는 대부분  $100\sim 200\text{ }\mu\text{m}$ 였다. 이 단섬유는 젖음성 향상 성분인 약 3%의  $\text{SiO}_2$ 를 포함하는 97%의  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 였으며, 융점은  $2000^\circ\text{C}$  이상, 인장강도가  $1000\sim 2000\text{ MPa}$ 인 RG-급의 내마모성 항상용 보강재였다. 또한 단섬유와 입자의 보강효과를 비교하기 위한 보강재로 사용한 알루미나 입자는 불규칙한 면체로 크기가  $10\sim 20\text{ }\mu\text{m}$ 였다. 복합재의 동계급속기

지는 합금 자체기 내마모성이 우수한 Cu-8wt%Al 알루미늄 청동을 선택하였다. 사용된 동과 알루미늄 분말의 입도는 세라믹상과 가장 혼합이 용이한  $-325\text{ mesh}$ 였다. 금속분말-입자-단섬유의 균일한 혼합체를 얻기 위하여 분산매를 이용한 초음파 분산 및 기계적 혼합을 행하였다. 혼합체는 압축성형 후  $750^\circ\text{C}$ 에서 30분 1차 소결후  $950^\circ\text{C}$ 에서 60분 2차 소결하여 이론밀도 92% 정도의 최종복합재를 제조하였다. 마모시험은 Fig. 1의 pin-on-disc형 마모시험기로 무윤활 상태에서 미끄럼속도를  $0.93\text{ m/sec}$ 로 일정하게 유지하고 마모하중  $4.9\text{ N}\sim 19.6\text{ N}$ , 미끄럼거리  $500\sim 3000\text{ m}$ 로 변화시키면서 행하였다. 상대재인 disc는 침탄 열처리된 SCM45C강으로 경도는  $\text{HRC }63\pm 3$ 였으며, 마모시편인 pin은  $4\times 4\times 10\text{ mm}$ 의 크기로 모서리를  $45^\circ$ 로 가공하여 마모접촉을 용이하게 하였다. 마모시편과 상대재는 #800 연마지로 평활하게 연마한 후 아세톤으로 초음파 세척하여 시험하였다. 마모율은  $10^{-4}\text{ g}$ 까지 측정가능한 화학서울로 무게감량을 구하여 얻었으며, 마모율은 각 마모조건에 따라 3회 실험결과의 평균값을 취하였다. 복합재의 미세조직과 마모조건에 따른 마모거동의 변화는 마모표면, 상대재표면, 마모면에 수직한 단면, 마모입자 등을 주사전자현미경으로 관찰하여 조사하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3-1. 알루미나 단섬유의 분산과 장경비의 변화

Fig. 2는 금속분말과 saffil알루미나 단섬유가 혼합된 혼합분말의 주사전자현미경 관찰결과이다. 단섬유는 그 길이가 짧을수록 단섬유와 금속분말파의 혼합이 용이하지만, 단섬유의 길이가 길수록 기지강화효과가

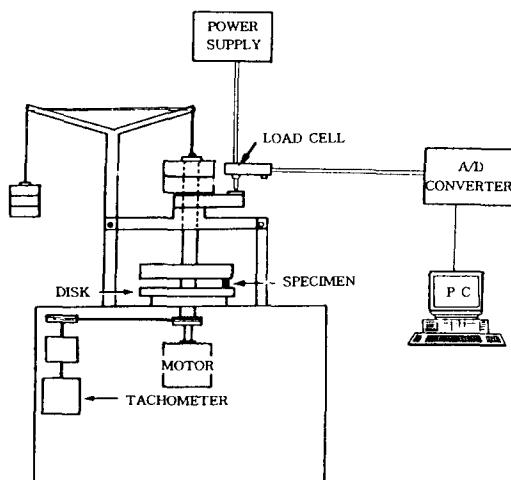


Fig. 1. Schematic diagram of wear testing machine.



Fig. 2. Scanning electron micrograph of mixed powder.

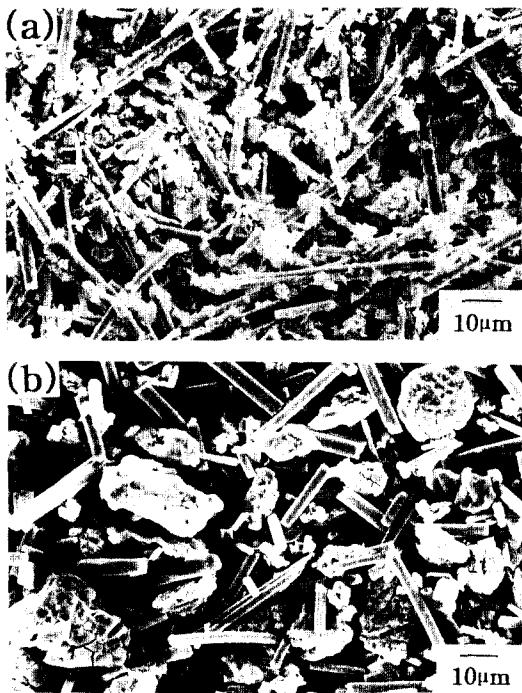


Fig. 3. Aspect ratio changes of Saffil aluminar fiber as a function of compacting load. (a)  $3 \text{ ton}/\text{cm}^2$ , (b)  $6 \text{ ton}/\text{cm}^2$ .

크기 때문에 적정한 길이의 단섬유를 선택하여 적절한 혼합법에 적용하여 균일한 혼합체를 얻어야 한다[7]. 습식혼합법은 그 과정이 복잡하고 오염 등의 단점이 있으나 단섬유의 손상을 최소로 하며 고른 분산을 얻을 수 있다[6,7]. 메탄올을 용제로 하고 초음파 분산 및 습식혼합법을 적용함에 의하여 본 연구에서는 서로 형태·상이하고 밀도의 차이도 큰 단섬유와 금속분말들의 균일한 혼합체를 Fig. 2와 같이 얻을 수 있었다.

단섬유 강화복합재에서 단섬유의 길이가 길수록 기자보강효과가 크게 나타나지만 분말법으로 복합재를 제조할 때는 성형공정을 거치기 때문에 필연적으로 단섬유의 길이가 감소하게 된다. 일반적으로 성형압이 증가함에 따라 성형체 밀도는 증가하지만 단섬유 길이의 감소가 일어난다. 따라서 성형시 적절한 성형체의 밀도가 얻어지며 단섬유의 손상도 최소가 되는 최적의 성형압을 선택하여야 한다. Fig. 3은 성형압에 따른 Saffil알루미나 단섬유의 손상정도를 알아보기 위하여 성형체의 금속기지를 질산으로 녹여내어 주사전자현미경으로 관찰한 결과이다. 성형압이 증가할 수록 단섬유의 길이는 감소하여 Fig. 3(a)의 3 ton/

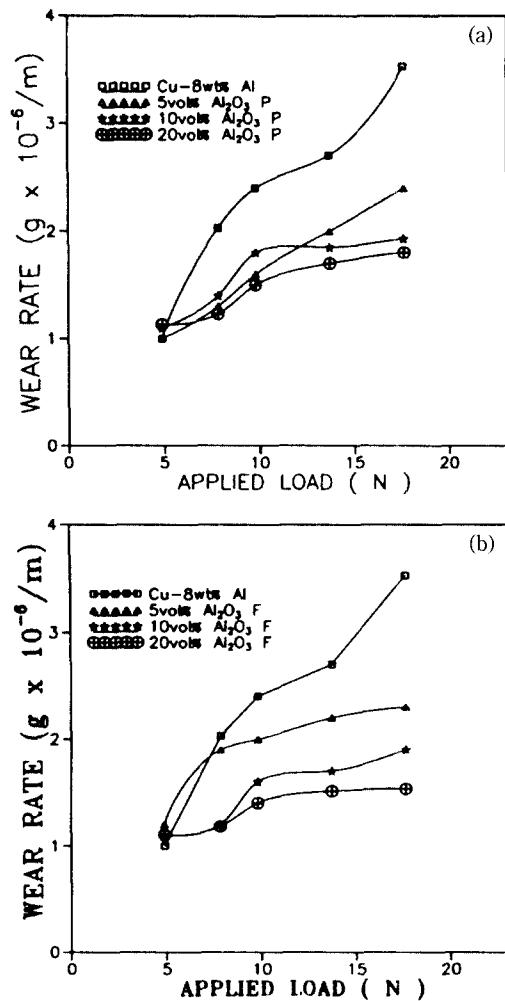


Fig. 4. Variation of wear rates with the applied load in the (a)  $\text{Al}_2\text{O}_{3p}$  reinforced composites, (b)  $\text{Al}_2\text{O}_{3f}$  reinforced composites. (slid. ing velocity:  $0.93 \text{ m/sec}$ )

$\text{cm}^2$ , (b)의  $6 \text{ ton}/\text{cm}^2$  성형압에서 단섬유의 장경비는 각각 약 40, 25 정도가 얻어졌다. 또한 성형압이  $10 \text{ ton}/\text{cm}^2$ 의 성형체에서 단섬유의 손상이 커서 장경비가 10이하였다. 성형압에 따른 성형체 밀도의 변화를 실험한 결과에 의하면 복합재의 종류와 양에 따라 차이가 있지만  $5 \text{ ton}/\text{cm}^2$ 의 성형압에서 이론밀도의 90% 이상이 얻어졌다. 따라서 본 연구에서는 성형체 밀도가 이론밀도의 약 92%가 얻어지며 대부분 단섬유의 장경비가 25 이상이 얻어지는  $6 \text{ ton}/\text{cm}^2$ 를 성형압으로 선택하여 단섬유 강화복합재를 제조하였다.

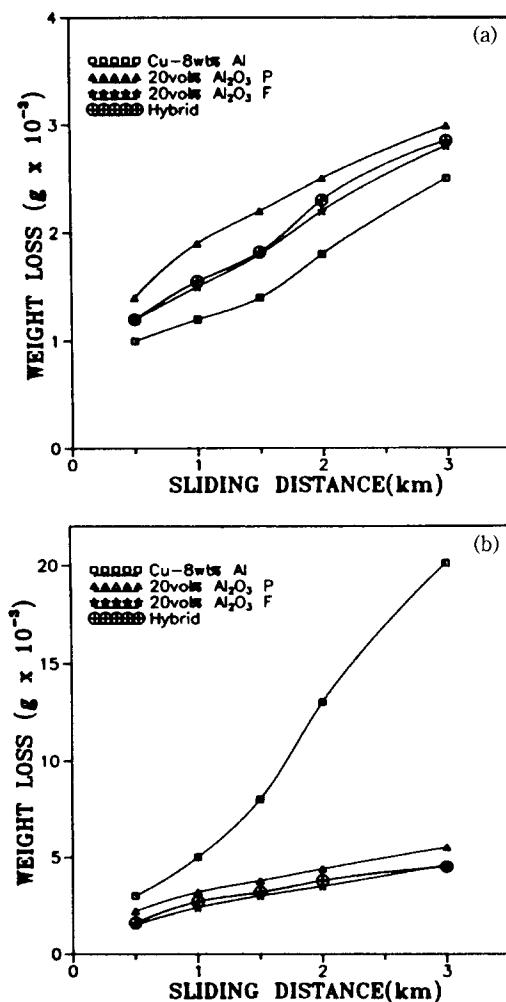


Fig. 5. Wear loss with sliding distance at the applied load at (a) 4.9N, (b) 19.6N. (sliding velocity: 0.93 m/sec)

### 3-2. 마모하중에 따른 복합재의 마모특성

Fig. 4(a, b)는 Cu-8wt%Al 합금기지에 알루미나 입자( $Al_2O_{3p}$ ) 및 알루미나 단섬유( $Al_2O_{3f}$ )가 첨가됨에 따른 마모율의 변화를 pin-on-disc 마모시험기에서 측정한 결과이다. 시험시 미끄럼속도는 0.93 m/sec로 일정하게 유지하였으며, 미끄럼거리는 3000 m였다. 낮은 마모하중에서는 모든 시료에서 마모율이 거의 유사하여 세라믹상의 보강효과가 거의 보여지지 않았다. 그러나 세라믹상이 보강되지 않은 시편에서는 10N 이상의 마모하중에서 마모율이 매우 커서  $2 \times 10^{-6} g/m$  이상의 마모율이 얻어졌다. 알루미나입자 및

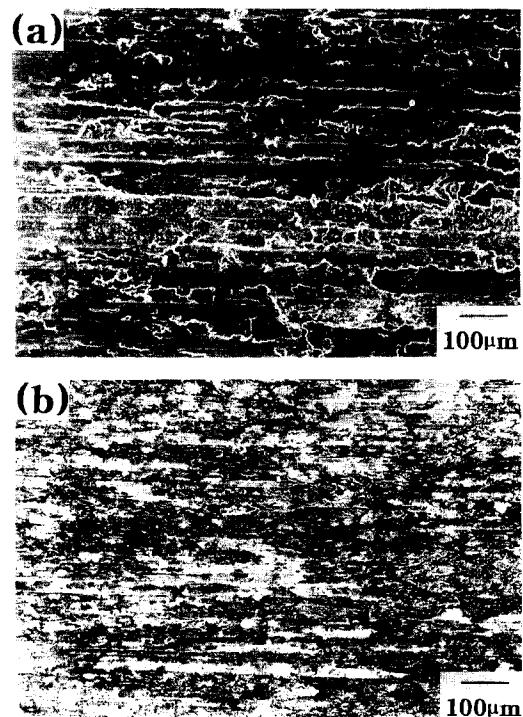


Fig. 6. Scanning electron micrographs of worn surface in the (a) Cu-8wt%Al, (b) Cu-8wt%Al-20vol%Al<sub>2</sub>O<sub>3p</sub>. (applied load: 4.9N, sliding velocity: 0.93 m/sec)

단섬유 강화복합재는 8N 이상의 마모하중에서 마모율이 낮았으며, 특히 15N 이상의 마모하중에서는 단섬유가 매우 효과적인 보강효과를 나타내었다.

Fig. 5는 Cu-8wt%Al 합금기지 시료와 세라믹보강재의 양을 20vol% 포함하는 복합재의 마모거동을 낮은 마모하중과 높은 마모하중에서 비교 실험한 결과이다. 여기서 hybrid 시료는 알루미나 단섬유와 입자가 각각 10 vol% 포함된 복합재이다. (a)의 낮은 마모하중 4.9N에서 모든 시료에서 마모거리가 증가함에 따라 마모손실이 거의 직선적으로 증가하고 있다. 이 마모하중에서는 알루미나 입자보강재가 가장 높은 마모율을 나타내며 세라믹 강화상을 포함하고 있지 않은 Cu-8wt%Al 합금기지 시료의 마모율이 가장 낮았다. 그러나 (b)의 19.6N의 높은 마모하중에서는 Cu-8wt%Al 합금기지의 마모손실은 마모거리가 증가함에 따라 매우 키이며 복합재들은 합금기지에 비하여 매우 낮은 마모손실을 나타낸다. 특히 알루미나 단섬유가 포함된 복합재의 내마모성이 높은 하중에서 매우 낮게 나타났다.

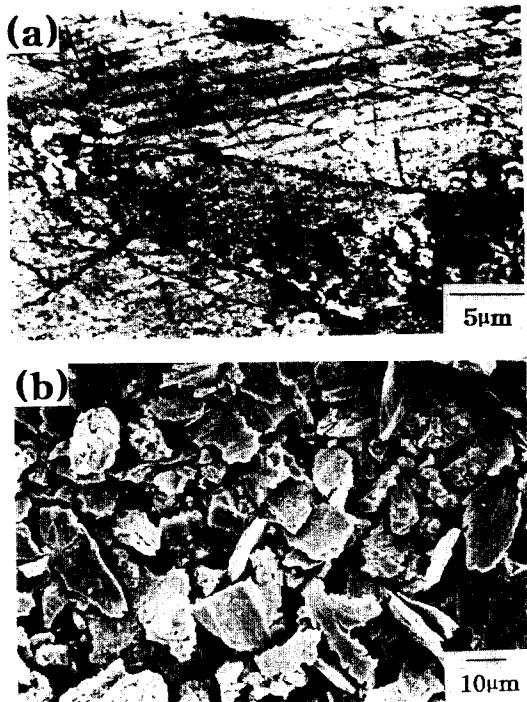


Fig. 7. Scanning electron micrographs in Cu-8wt%Al.  
(a) cross section showing surface cracks(etched), (b) loose debris. (applied load: 19.6N, sliding velocity: 0.93 m/sec)

### 3-3. 복합재의 종류에 따른 마모거동

Fig. 6은 4.9N의 마모하중에서 가장 마모율이 낮았던 (a) Cu-8wt%Al 합금기지 시료와 가장 마모율이 높았던 (b) 20 vol% 알루미나 입자강화 시료의 3000 m 마모 후 마모표면을 주산전자현미경으로 관찰한 결과이다. 여기서 미끄럼방향은 사진의 가로 방향이다. 두 시료의 마모표면에서는 미소돌기가 형성된 후 소성변형에 의하여 재료가 밀려나가며 재료손상이 일어나는 금속재료의 대표적인 마모기구인 응착마모가 관찰되고 있다. 그런데 알루미나 입자강화시료의 마모표면에서는 부분적인 소성구역들과 함께 미세한 연삭골들이 미끄럼방향으로 관찰되고 있다. 이것은 복합재가 상대재와 마찰 접촉하면서 복합재로부터 알루미나 입자가 이탈되어 마모표면에서 연삭재로 작용하였거나, 알루미나 입자로 연삭된 상대재의 거친 표면이 다시 복합재 표면을 연삭하는 연삭기구가 마모기구로 작용하였음을 의미하는 것이다. 따라서 4.9 N의 낮은 하중에서 세라믹상 보강재를 포함하는 복합재들에서 마모율이 높았던 것은 응착마모와 함께

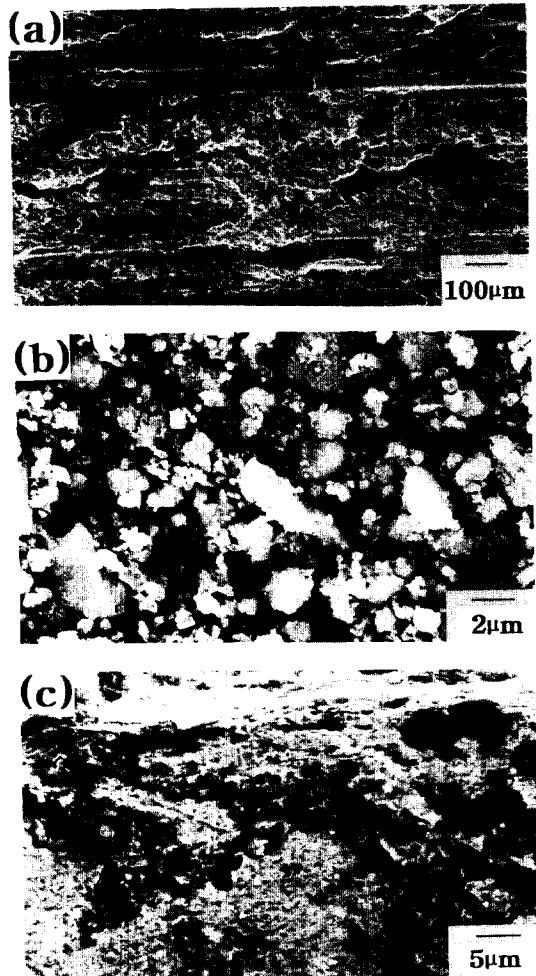


Fig. 8. Scanning electron micrographs in Cu-8wt%Al-20vol%Al<sub>2</sub>O<sub>3p</sub>. (a) worn surface, (b) loose debris, (c) cross section showing surface crack (unetched). (applied load: 19.6N, sliding velocity: 0.93 m/sec)

연삭마모가 동시에 작용하였기 때문일 것이다.

고하중에서 알루미나 강화상을 포함하지 않는 Cu-8wt%Al 합금기지 시료는 매우 심한 마모손상을 나타내었다. Fig. 7(a)는 19.6N의 하중에서 합금기지 시료를 1500 m 마모시험 후 마모시편을 세로로 절단 후 10% Nital로 부식하였을 때의 세로단면 미세조직으로 마모표면으로부터 10 μm 부근까지 균열이 전파되고 있다. 이 시료에서 균열은 소결체에 존재하는 기공에서 시작되어 마모에 의한 반복하중에 의하여 성장하며 균열들은 대부분 표면과 평행하게 전파되다 시료로 부터 재료를 판상으로 박리시키는 것으로 관

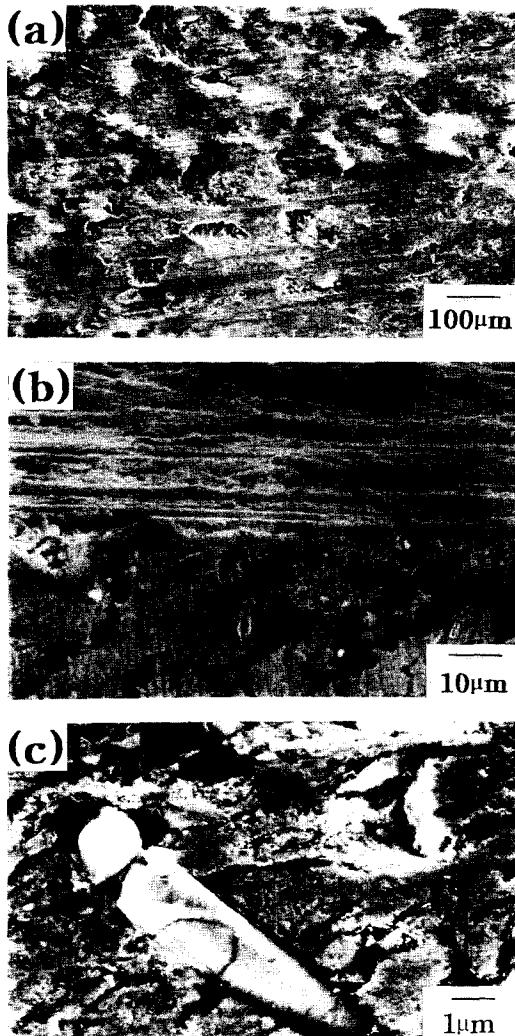


Fig. 9. Scanning electron micrographs in Cu-8wt%Al-20vol% $\text{Al}_2\text{O}_3$ . (a) worn surface, (b) cross section (unetched), (c) high magnification of cross section(etched). (applied load: 19.6N, sliding velocity: 0.93 m/sec)

찰되었다. 여기서 일어진 마모입자는 (b)와 같이 두께가 얇은 판상형태로 약 20 μm 이상의 크기였다. 이런 형태의 마모기구는 Suh[22-24]가 보고하였던 판상박리마모이다. 판상박리마모는 반복하중에 의하여 마모재의 표면 아래에서 균열이 발생하고 전파하여 장벽위로 재료의 이탈이 일어나는 현상이다. 이 마모기구가 작용하면 응착마모에 비하여 급격한 마모율의 증가가 일어난다. 판상형태를 갖는 마모입자의 한쪽면은 평평함에 비하여 다른 쪽에서는 계단형태가

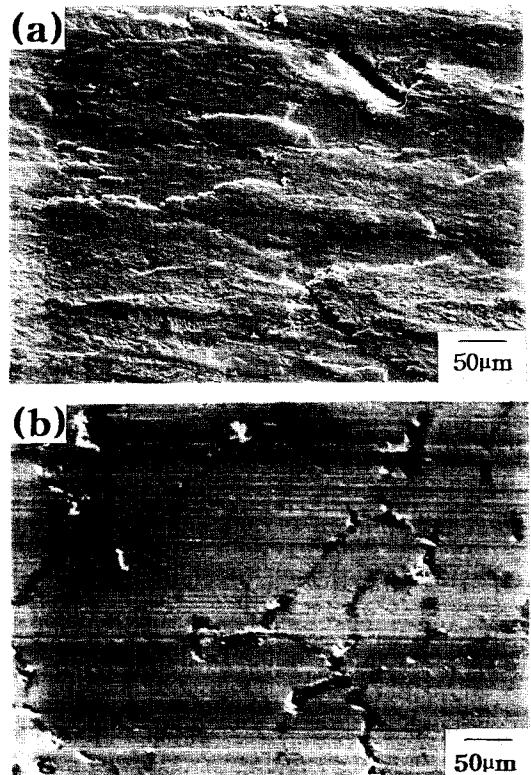


Fig. 10. Scanning electron micrographs of counter steel disks after wear testing with (a) Cu-8wt%Al, (b) Cu-8wt%Al-20vol% $\text{Al}_2\text{O}_3$ . (applied load: 19.6N, sliding velocity: 0.93 m/sec )

관찰되는데 이것이 반복하중에 의하여 형성된 것임을 입증하고 있다.

마모하중이 높을 때 알루미나 강화복합재들은 모두 비강화 합금기지 재료에 비하여 우수한 내마모성을 나타내었으나 알루미나 입자보강재는 복합재중 가장 마모율이 높았다. Fig. 8은 19.6N의 마모하중에서 1500 m 마모시험한 20 vol% 알루미나 입자 보강 복합재의 (a) 마모표면, (b) 마모입자, (c) 마모시편의 미끄럼방향과 평행한 선단면인 세로단면을 주사전자현미경으로 관찰한 결과이다. 이 복합재의 마모표면에서는 부분적으로 응착마모의 증거로 재료가 소성변형을 받은 구역이 관찰되며, 연삭마모가 일어났던 증거로 미끄럼 방향으로 기울어 끌어 형성되어 있고 또한 국부적으로 판상박리마모가 일어난 증거로는 덩어리로 마모손상이 일어난 곳들도 동시에 관찰된다. 이와 같은 복합적인 마모기구가 작용함에 따라 이 마모시편에서 형성된 (b)의 마모입자들은 5 μm 정도의 크

기로부터  $0.1 \mu\text{m}$  이하의 크기를 갖는 다양한 크기를 갖고 있다. 여기서 큰 덩어리로 이루어진 마모입자는 판상박리마모에 의하여 그리고 미세한 마모입자는 연삭마모에 의하여 형성되었을 것이다. 그런데 마모 표면에서 물질 이탈이 일어난 곳에서 미세한 균열의 흔적이 관찰되고 있다. (c)는 이 시편의 세로단면을 절단후 에칭한 미세조직으로 마모시편의 표면층에서 생성된 균열의 형태를 보여주고 있다. Fig. 7(a)의 합금기지의 세로단면에서 관찰되는 균열과는 형태가 다르게 이 복합재에서의 균열은 대부분 알루미나 입자에서 균열이 멈추거나 그 방향을 바꾸고 있다. 이와 같이 마모표면의 밑에 존재하는 알루미나 입자는 어느 정도 균열의 진행을 방해하고 있는 것으로 믿어진다. 알루미나 입자첨가에 의한 경도 상승에 따른 내마모성의 향상 효과와 함께 이 균열의 진행을 방해하는 효과가 동시에 작용하여 고하중의 마모조건에서 알루미나 입자 복합재의 마모율이 기지에 비하여 현저하게 낮았던 것으로 믿어진다.

Fig. 9는 고하중인 19.6N에서 가장 마모율이 낮았던 20 vol% 알루미나 단섬유를 포함하는 복합재의 (a) 마모표면과 (b)와 (c)는 미끄럼 방향과 평행한 방향으로의 절단면인 세로단면이다. 마모표면에서는 아주 약한 연삭골들이 보여지지만 전범위에 걸쳐 굴곡이 거의 없이 비교적 매끈한 표면이 관찰되었다. 또한 마모표면에서는 미세균열들이 거의 발견되고 있지 않다. (b)는 이 마모시편의 세로단면의 미세조직인데 마모표면으로부터 재료 내부로 마찰에 의한 재료의 손상이 거의 관찰되고 있지 않다. (c)는 마모표면의 직하를 고배율로 관찰한 미세조직으로 에칭에 의하여 수  $\mu\text{m}$  정도 길이를 갖는 미세균열이 보이고 있다. 이 미세균열이 전파함에 따라 마모표면에서 마모입자가 형성될 것이다. 그런데 이 세로단면에서 미세 균열들은 복합재에 포함된 알루미나 단섬유를 통과하지 못하는 것을 볼 수 있다. 따라서 단섬유가 미세균열의 전파를 효과적으로 방해하고 있는 것이다. 이와 같이 합금기지에 알루미나 단섬유의 첨가는 경한 상의 복합효과로 소재의 전체적인 경도를 증가시킴과 동시에 기지를 장범위로 잡아주며 또한 균열전파의 억제 효과를 나타내어 내마모성의 향상이 얻어지는 것으로 믿어진다.

Fig. 10은 상대재인 SCM45 강의 마모면에 미치는 복합재 특성의 영향을 규명하기 위하여 19.6N의 하중에서 미끄럼거리 1500 m 마모시험후 상대재의 표면을 관찰한 결과이다. (a)의 알루미나 강화상을 포

함하지 않는 Cu-8wt%Al 합금과 마모시험한 상대재의 표면에는 마모시편으로부터 물질이 전달된 것이 관찰되고 있다. 미끄럼이 일어난 혼적에는 동합금과 같은 색이 관찰되었으며, 표면조도측정기로 상대재의 표면을 측정한 결과 원래의 기준면 보다도 약  $0.3 \mu\text{m}$  정도 표면이 상승되어 있었다. 이것은 Cu-8wt%Al 합금기지의 경도가 상대재에 비하여 현저히 낮기 때문에 연한 마모시편으로부터 경한 상대재로 물질전달이 일어났기 때문이다. (b)는 알루미나 단섬유가 20 vol% 포함된 복합재료와 시험한 상대재의 표면으로 (a)에서와 같이 물질전달은 관찰되지 않으며 미끄럼 방향으로 연삭골이 관찰되고 있다. 이것은 단섬유가 복합재의 경도를 높여줌과 동시에 기지가 상대재로 이탈되는 것을 막아주기 때문이다 생각된다. 여기서 상대재인 disc는 마모시험전 침탄열처리된 SCM45C 강으로 경도는 HRC  $63 \pm 3$ 였으며 미세조직을 확인한 결과 결정립계에는 세멘타이트가 석출되어 있고 기지는 마르텐사이트였다. 그런데 단섬유가 포함된 복합재와 마모시험한 상대재의 표면에서는 입계석출물이 선택적으로 마모손상을 받았음을 알 수 있다. 마모시험시 마르텐사이트는 세멘타이트에 비하여 경도가 낮기 때문에 우선적으로 마모가 일이나 부분적으로 세멘타이트가 표면쪽으로 돌출될 수 있다. 마모가 진행됨에 따라 복합재에 포함된 경한 알루미나 단섬유와 세멘타이트가 국부접촉을 하게 되면 이곳에는 반복적으로 높은 응력집중이 생겨날 것이다. 이에 따라 경하지만 부서지기 쉬운 입계 세멘타이트에서 파괴가 일어나 Fig. 10(b)와 같은 상대재의 마모표면이 형성되는 것이라 믿어진다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 알루미나 단섬유 및 입자 보강 알루미늄 청동기지 복합재를 분말법으로 제조하여 마모특성을 측정하였으며 마모표면, 마모부스러기, 마모시편의 단면, 상대재표면 등을 관찰하고 복합재의 보강재의 종류와 부피비에 따른 복합재의 마모특성을 실험하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 5N 이하의 마모하중에서는 알루미나 입자 또는 단섬유 보강에 의한 복합재의 내마모성의 향상은 얻어지지 않았으며, 낮은 마모하중에서 기지금속의 마모기구는 옹착마모였다.

2. 비강화 알루미늄 청동기지 시편은 15N 이상의 하중에서 마모표면에서 큰 덩어리 형태로 재료의 이

탈이 일어나는 판상바리마모가 작용하여 심한마모를 일으켰다.

3. Saffil 알루미나 단섬유는 장경비가 크기 때문에 복합재에서 기지를 잡아주어 마모표면 직하에서 균열전파 억제효과를 나타내며 마모입자의 발생을 억제하여 복합재의 내마모성을 향상시켰다.

4. 비강화 합금기지 시편은 강도가 낮아 마모시험시 상대재로 물질전달이 일어났으나 세라믹상을 포함하는 복합재는 기지강화 효과가 얻어져 상대재로 물질전달이 일어나지 않았다.

## 후 기

본 연구는 1993년도 교육부 신소재분야 학술연구 조성비로 지원되었습니다.

## 참 고 문 현

1. A. G. Wang and I. M. Hutchings, "Wear of Alumina Fibre-Aluminum Metal Matrix Composites by Two Body Abrasion", Mater. Sci. Technol., Vol. 5, pp. 71-76, 1989.
2. A. T. Alpas and J. D. Embry, "Sliding and Abrasive Wear Resistance of an Aluminum (2014)-SiC Particle Reinforced Composite", Scripta Metall. Mater., Vol. 24, pp. 931-935, 1990.
3. F. M. Hosking, F. Folgarportillo, R. Wunderlin and R. Mehrabian, "Composites of Aluminum Alloys: Fabrication and Wear Behaviour", J. Mater. Sci., Vol. 17, pp. 477-498, 1982.
4. R. J. Arsenault and R. M. Fisher, "Microstructure of Fiber and Particulate SiC in 6061 Al Composites", Script. Met., Vol. 17, pp. 67-71, 1983.
5. 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.
6. 김영환, 이상학, 김낙준, 이두영, "SiC 휘스커 보강 Al 복합재료의 미세 조직과 기계적 특성에 관한 연구", 대한금속학회지, 제 28권, pp. 640-647, 1990.
7. 이수영, 허무영, "SiC 휘스커 강화층을 적층 복합재료의 재조와 그 특성에 관한 연구", 고려대학교 생 산기술 연구소, 1992.
8. S. V. Prasad and P. K. Rohatgi, "Tribological Properties of Al Alloy Particle Composites", J. of Met., Vol. 39(11), pp. 2-26, 1987.
9. M. Gupta and C. Lane, "Microstructure and Properties of Spray Atomized and Deposited 1-7Si/SiCp Metal Matrix Composites", Script. Met., Vol. 26, pp. 825-830, 1992.
10. A. T. Alpas and J. Zhang, "Sliding and Abrasive Wear Behavior of an Aluminum(2014)-SiC Particle Reinforced Composite", Script. Met., Vol. 24, pp. 931-935, 1990.
11. A. T. Alpas and J. Zhang, "Wear Rate Transitions in Cast Aluminum Silicon Alloys Reinforced with SiC Particles and Abrasive Wear", Script. Met., Vol. 26, pp. 505-509, 1992.
12. L. Cao, "The Wear Properties of a SiCw Reinforced Aluminum Composites", Wear, Vol. 140, pp. 273-277, 1990.
13. V. Sridhara and K. Gopinath, "Technological Evaluation of Aluminium Bronze Friction Material", Solid State Phenomena, Vols. 8 & 9, pp. 251-258, 1989.
14. 이상로, 허무영, "무윤활 미끄럼 마찰하에서 SiC 휘스커 및 입자강화 청동기지 복합재의 마모특성", 한국윤활학회지, Vol. 12, pp. 49-55, 1993.
15. Aiguo Wang and H. J. Rack, "Abrasive Wear of Silicon Carbide Particulate and Whisker Reinforced 7091 Aluminum Matrix Composites", Wear, Vol. 146, pp. 337-348, 1991.
16. W. R. Symes and E. Rasstetter: "24 International Colloquium on Refractories" at Aachen, Sep., pp. 23-25, 1981.
17. J. Dinwoodie, "Automotive Applications for MMC's Based on Short Staple Alumina Fibres", International Congress and Exposition Detroit, Feb., pp. 23-27, 1987.
18. L. F. Allard, S. P. Rawal and M. S. Misra, "Characterization of Interfaces in Metal Matrix Composites", Journal of Met., pp. 40-42, 1986.
19. K. Kannikeswaran and R. Y. Lin, "Trace Element Effects on Al-SiC Interfaces", Journal of Met., pp. 17-43, 1987.
20. H. C. Park, "Wear Behavior of Hybrid Metal Matrix Composites Materials", Scripta Met., Vol. 27, pp. 465-470, 1992.
21. A. D. Sarkar, "The Role of Wear Debris in the Study of Wear", Wear, Vol. 90, pp. 39-47, 1983.
22. Nam P. Suh, "An Overview of the Delamination Theory of Wear", Wear, Vol. 44, pp. 1-16, 1977.
23. J. R. Fleming and Nam P. Suh, "Mechanics of Crack Propagation in Delamination Wear", Wear, Vol. 44, pp. 39-56, 1977.
24. S. Jahanmir and Nam P. Suh, "Mechanics of Sub-surface Void Nucleation in Delamination Wear", Wear, Vol. 44, pp. 17-38, 1977.