

## 論文

## 탄소 혼합 금속복합재료의 상온 및 고온 마모거동 비교

정기홍\* · 남현욱\* · 송정일\*\* · 한경섭\*

Comparisons for Wear Behavior of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/C Hybrid Metal Matrix Composites at Room and High Temperature

K.H. Jung\*, H.U. Nam\*, J.I. Song\*\* and K.S. Han\*

## ABSTRACT

Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> metal matrix composites(MMCs) and Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/C hybrid MMCs were fabricated by squeeze infiltration method. Optimal aging time of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/C composites was 7 hours and that of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites was decreased with increasing volume fraction.

Wear behavior of aluminum matrix composites was characterized by the abrasive wear test under various conditions(volume fractions, sliding speeds). Wear resistance of composites was improved due to the presence of reinforcements. To analyze wear mechanisms, wear surfaces were examined by scanning electron microscope(SEM). Dominant mechanism of MMCs was the abrasive-adhesive wear at all sliding speed range at room temperature, but changed at high temperature. The abrasive-adhesive wear was dominant at low and intermediate sliding speed, but the melt and slip wear were the major mechanisms at high sliding speed. The wear resistance of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/C hybrid composites was superior to Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MMCs. It was found that carbon hybrid composites were suitable to high sliding speed condition due to solid lubrication of carbons.

**Key Words** : Metal Matrix Composites(금속복합재료), Squeeze Infiltration Method(가압용침법), Wear Mechanism(마모기구), Abrasive Wear(연삭마모), Adhesive Wear(응착마모), Melt Wear(융착마모), Solid Lubrication(고체윤활효과).

## 초 록

가압 용침법을 이용하여 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/C 금속복합재료를 제조하였다. 탄소를 혼합한 하이브리드 금속복합재료의 최적 시효 시간은 7시간이었다. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 금속복합재료의 최적 시효시간은 부피분율의 증가에 따라 감소하였다. 다양한 조건(보강재의 부피분율, 상대 마모속도) 하에서 마모실험을 통해 알루미늄 기지 금속복합재료의 마모거동을 규명하였다. 금속복합재료의 내마모성은 보강재의 첨가로 인해 향상되었다. 마모기구를 규명하기 위해 마모표면을 SEM사진으로

\* 정희원, 포항공과대학교 기계공학과

\*\* 정희원, 포항산업과학연구원 기계설비 연구원

관찰하였다. 상온에서 금속복합재료의 주 마모기구는 전 속도구간에서 연삭-응착마모였다. 그러나 고온에서의 마모기구는 달라졌다. 저속과 중속에서는 연삭-응착마모가, 고속에서는 응착마모와 밀립현상이 주 마모기구였다. 탄소 혼합 금속복합재료의 내마모성은 탄소의 고체 윤활효과 때문에 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 금속복합재료 보다 향상 되었으며, 고속에서 더욱 안정성을 띠었다.

## 1. 서 론

지난 30여년동안 금속복합재료에 대한 과학적인 기초 연구와 응용연구가 많이 이루어져 왔다. 그러나 금속복합재료가 공학적인 가치가 있는 재료로 자리를 잡은건 불과 몇년 전이다. 금속복합재료의 높은 기계적 열적 물성에도 불구하고 최종제품의 단가가 높고 제조공정이 복잡했기 때문이다. 그동안의 연구결과로 지금은 보강재의 제조기술이나 복합재료 제조공정기술이 괄목할 만큼 발전했다. 금속복합재료는 자동차 및 항공우주산업 등에서 피스톤, 커넥팅 로드, 실린더 그리고 브레이크 라이너 같은 극소보강재로 각광받고 있다[1~3]. 주목할만한 예로는 Toyota가 개발한 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 디젤 엔진 피스톤과 Honda가 개발한 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/C 실린더 라이너가 있다[4].

특히 알루미늄 기지 금속복합재료는 내마모성이 뛰어나 관심의 대상이 되고 있다[5~7]. 중요한 응용 예중의 하나는 브레이크 디스크이다. 기존에 사용하던 주철 보다 열전도성이 뛰어나고 밀도가 낮은게 특징이다. 세라믹 보강재료는 SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> 등이 쓰이는데 Koczak등에 의하면 가격이 저렴하고 기지재와의 반응이 적은 Saffil 알루미늄 섬유가 전망이 밝다고 한다[8].

알루미늄을 보강재로 한 금속복합재료의 마모특성에 대한 연구가 많이 진행되고 있지만 아직 마모량을 정확히 예측할 수 있는 믿음만한 법칙은 없다. 이것은 변수가 다양한 형태로 존재하고 예측할 수 없는 상호작용을 하기 때문이다. 마모에 영향을 미치는 인자로는 시편재료, 상대재, 보강재와 기지재의 경계면과 같은 윤활인자와 접촉하중, 상대속도, 마모거리, 시간, 온도와 같은 실험 인자가 있다. Burwell[9]에 의하면 마모기구에는 응착마모, 부식마모, 표면피로 등이 있는데 각각 독립적으로 작용하지 않고 두 가지 이상의 마모기

구가 동시에 작용한다고 한다. 지금의 연구추세는 단일보강재만을 이용하는 금속복합재료에서 두가지 이상의 혼합보강재를 사용하여 경제성과 내마모특성을 더욱 배가시키고자 하는 하이브리드 복합재료의 연구가 증대되고 있다. 특히 탄소를 혼합한 하이브리드 복합재료(Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/C)는 가격이 저렴하고 고체 윤활특성이 뛰어나 상대재를 보호하는 재료로 알려져 있다[10~13].

본 연구에서는 가압주조법을 이용하여 AC2B 주조용 Al 합금과 알루미늄과 탄소를 보강재로한 부피분율 15%의 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/C 복합재료를 제조하여 상온 및 고온에서의 마모특성을 조사하고 SEM 사진을 통해 마모기구를 규명하고자 한다.

## 2. 마모이론

마모는 윤활조건에 따라 건식과 습식마모, 온도 조건에 따라 상온 및 고온 마모로 구분된다. 본 연구에서는 상온 및 고온 마모시험을 수행했는데 마모기구로는 크게 응착마모, 연삭마모, 표면피로로 나눌 수 있다. 응착마모는 두 물체가 서로 상대운동을 할 때 국부적인 압력증가에 따라 두 물체간의 결합이 생기기도 하고 없어지기도 하는 현상을 말한다. 이런 현상은 인발다이, 캠과 플런저, 기어, 저널 베어링 등에서 자주 발생한다. Derjaguin[14]등에 의하면 상대운동중인 두 물체가 전자를 주고 받으면서 강한 응착결합이 생긴다고 한다.

연삭마모는 물체의 상대운동 중 생긴 경질의 입자에 의해서 재료가 떨어져 나가는 현상을 말한다. 유압제, 압출성형기, 파쇄기, 다이등에서 관찰되는 현상들이다. 연삭마모에서는 마모부스러기나 상대마모재의 경도가 중요한 역할을 하는 것으로 금속복합재료에서는 기지금속내에 존재하는 입자의 정도에 따라 마모량이 영향을 받는다.

Table 1. Chemical composition of AC2B Al alloy

Mat.	Si	Cu	Mg	Ni	Fe	Mn	Zn	Ti	Pb	Al
AC2B	6.0	3.0	0.4	0.3	0.9	0.4	0.9	0.1	0.15	Rem.

표면피로에 의해서 생기는 마모현상은 반복하중에 의해 야기된 크랙 생성으로 특징지을 수 있다. 철로, 볼베어링, 기어, 냉각 및 열간 압연, 해머 등에서 관찰되는 현상들이다. 크랙은 마모표면이나 표면 바로 일부분에서 생긴다. Suh[15]의 모델에 따르면 마모표면 밑면의 크랙은 마모면과 나란한 방향으로 전파해 나간다. 피로에 의해서 생기는 마모입자들은 발생한 크랙이 표면을 뚫고 나왔을 때 발생한다.

### 3. 실험방법

#### 3-1. 사용재료

본 연구에서는 Al-Cu-Si계의 주조용 알루미늄 합금인 AC2B를 기지재로 사용하였다. AC2B는 주조성이 좋고 불순물의 허용범위가 넓어 크랭크 케이스, 클러치 하우징, 밸브 바디 등으로 사용되고 있는 재료이다. AC2B에 대한 구체적인 화학적 성분과 기본 물성에 대한 것은 Table 1[16]과 Table 3[17]에 각각 나타내었다.

금속복합재료의 단섬유 보강재로는 알루미늄( $Al_2O_3$ )와 탄소를 사용하였다. 알루미늄은 ICI사의

Saffil  $Al_2O_3$  RF grade의 단섬유로서  $\delta$ -결정상이며, 5% 정도의 무기성형제인 silica를 포함하고 있다. 탄소섬유는 Kureha 제품의 PAN계 단섬유를 사용하였고 표면의 코팅은 하지 않은 것으로 이에 대한 제원은 Table 3[18]과 같다.

#### 3-2. 마모실험

마모실험은 Fig.1과 같은 Rinken-Ogoshi Co.의 spindle type 마모시험기를 사용하였다. 이 시험기는 기어 비를 이용해서 마모하중, 거리, 속도를 조절할 수 있다. 마모시편의 크기는  $50 \times 30 \times 5(mm^3)$  이고 상대재는 유냉 처리된 SCM4를 사용하였다. 시험 전 마모시편과 상대재는 sand paper #600으로 균일하게 연마하였다.  $10^{-5}$ 까지 측정 가능한 전자저울을 사용하여 실험 전 후의 시편 질량을 측정하였다.

마모시험에 영향을 주는 변수로는 하중, 온도, 속도, 거리가 있다. 본 실험에서는 마모하중과 거리를 각각 11.8kg, 100m로 고정하고 온도와 속도를 변화시켰다. 온도는 상온에서 100, 200, 300°C로 변화시켰고 상대속도는 0.081, 0.94, 1.98, 3.53 m/s 변화시키면서 마모량의 변화를 관찰하였다.

Table 2. Mechanical property and heat treatment condition of AC2B alloy

Material	Mechanical property			Heat treatment condition(T6)	
	T.S. (MPa)	Elong. (%)	HB	Solution H.T.	Precipitation H.T.
AC2B	245	1	90	500°C for 10 hrs	160°C for 5 hrs

Table 3. Specifications of alumina and carbon fiber

Material	Density ( $g/cm^3$ )	Diameter ( $\mu m$ )	Length ( $\mu m$ )	Tensile strength (GPa)	Modulus (GPa)
$Al_2O_3$ (Saffil)	3.3	3.0	100	2.0	310
$C_{PAN}$ (Kureha)	1.9	9.1	119	2.0	290

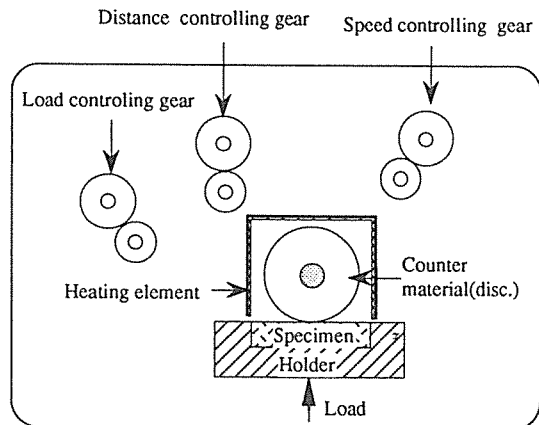


Fig. 1. Schematic illustration of abrasive wear tester

### 3-3. 금속복합재료의 제조

금속복합재료의 제조를 위해서 먼저 예비성형체를 제조하였다. 평균 길이가 각각 100 $\mu\text{m}$ , 119 $\mu\text{m}$ 인 알루미늄과 탄소 단섬유를 부피분율에 맞게 계량하고 성형체인 물유리( $\text{SiO}_2$ )의 농도를 5%로 한 수용액을 만들어 약 5분간 교반기로 교반하였다. 이 수용액을 진공압 추출장치가 부착된 금형에 부어 예비 성형체를 제조하였다. 이 상태에서는 부피분율이 정확하게 나오지 않으므로 공압 실린더로 가압하여 원하는 부피분율을 얻었다. 이렇게 제조된 예비 성형체는 두께가 20mm이고 직경이 110mm이다. 부피분율의 영향을 살펴보기 위해 알루미늄의 부피분율을 10, 15, 20%로 하였고, 알루미늄과 탄소를 혼합한 하이브리드의 경우 탄소의 영향을 보기 위해 전체 부피분율을 15%로 고정하고 탄소의 부피분율을 3%와 6%로 각각 변화시켰다.

예비성형체는 제조 후 전자 오븐(microwave oven)에서 1차 수분을 제거하고 전기로에서 소결하였다. 알루미늄만을 사용한 예비 성형체는 100 $^{\circ}\text{C}$ 에서 2시간 소결 후 열충격에 의한 손상을 막기 위해 노냉시켰다. 탄소를 사용한 하이브리드 예비 성형체는 탄소의 산화를 막기 위해 450 $^{\circ}\text{C}$  질소 분위기 하에서 소결시켰다[19].

금속복합재료의 제조는 가압 용침법을 사용하였다. 기지체인 AC2B의 용해 온도는 780 $^{\circ}\text{C}$ 이고 질소

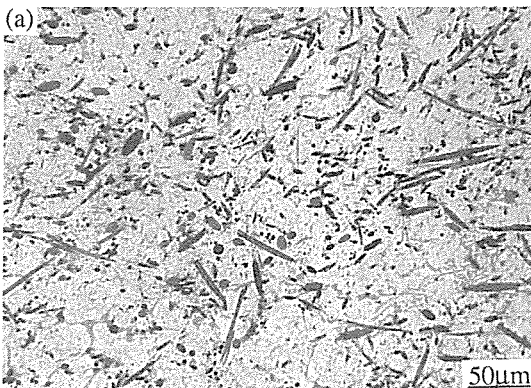


Fig. 2. Microstructures of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/C composite. (a) perpendicular and (b) parallel to direction of applied pressure

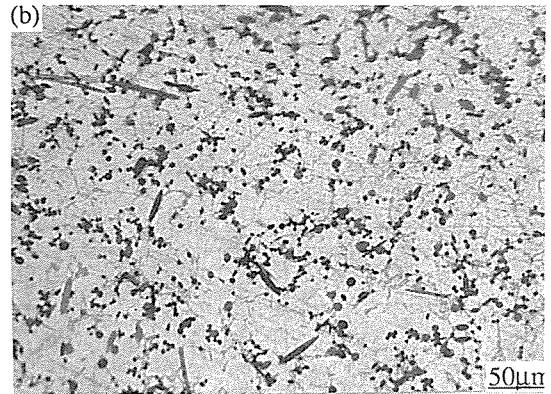


Fig. 2. Continued

분위기 하에서 용해시켰다. 제조에 사용된 금형 및 예비 성형체는 450 $^{\circ}\text{C}$ 로 예열시켰고, 램의 이동 속도는 2cm/s, 가압력은 25MPa로 하여 60초 동안 유지시켰다.

이렇게 제조된 잉곳은 500 $^{\circ}\text{C}$ 에서 10시간 용체화 처리(solution treatment) 후 수냉하였다. 시효처리(aging) 시간은 160 $^{\circ}\text{C}$ 에서 최고 경도가 나타나는 시간을 기준으로 T6 열처리를 하였다.

Fig. 2는 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/C 복합재료의 미세구조를 광학 현미경으로 관찰한 것이다. 보강섬유는 2차원적으로 균일하게 분포되어 있음을 볼 수 있다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4-1. T6 열처리

용체화 처리를 마친 금속복합재료의 시효시간을 결정하기 위해 160 $^{\circ}\text{C}$ 의 온도에서 매 시간마다 경도값을 측정하였다. Fig. 3은 금속복합재료의 열처리 시간에 대한 경도값의 변화를 나타낸다. 알루미늄의 부피분율이 증가할수록 최고경도에 달하는 시효시간이 짧아지는 것을 볼 수 있다. 전체의 부피분율이 15%인 경우 탄소의 양이 증가하더라도 시효시간은 7시간으로 변화가 없는 것을 알 수 있다.

### 4-2. 상온 마모거동

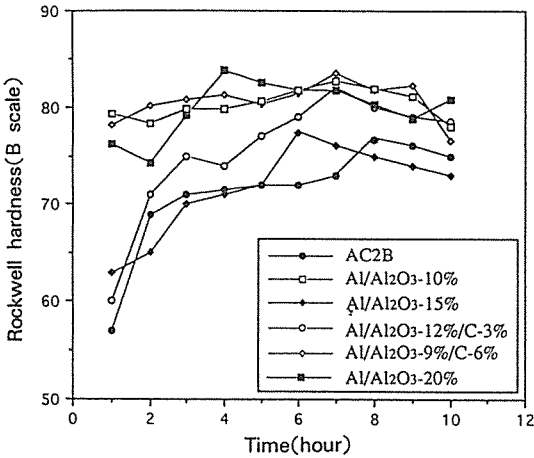


Fig. 3. Effect of volume fraction of alumina and carbon fibers on hardness(Ageing temperature : 160°C)

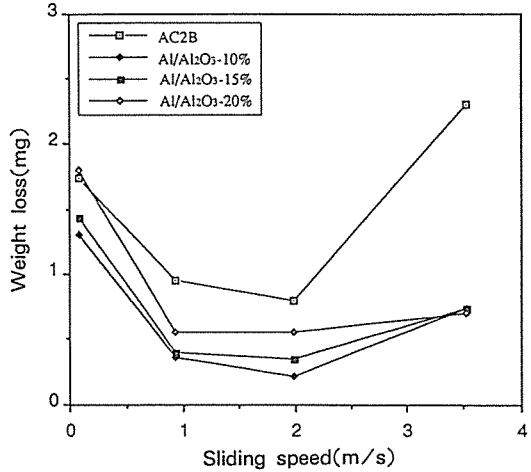


Fig. 4. The effect of sliding speed on the wear behavior of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites with variation of volume fraction at room temperature.

Fig. 4는 상온에서 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 부피분율 변화에 따른 마모량을 각 속도별로 AC2B 기지재와 비교한 것이다. 저속(0.081m/s)에서는 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-20%의 마모량이 기지재 보다 많다. 보강재의 보강효과가 나타나지 않았음을 알 수 있다. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 부피분율이 증가할수록 마모량이 증가했는데, 저속에서 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 복합재료가 기지재 보다 마모량이 많은 것은 부서진 보강섬유가 기지재의 연삭작용을 배가시켰기 때문이다. 이는 Hosking 등[20]의 결과와 일치한다. 중속(0.94-1.98m/s)에서는 저속에 비해 전체적으로 마모량이 감소하였다. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 복합재료의 마모량은 기지재 보다 적고 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 부피분율이 증가할수록 마모량이 증가하였다. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 보강효과로 기지재에 비해 마모량이 72.5%까지 감소되었다. 고속(3.53m/s)에서는 기지재의 마모량 증가율이 큰데 급격한 응착작용 및 마모면의 온도상승에 따른 재료의 밀립현상 때문으로 보여진다. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 복합재료의 마모량은 중속에 비해 큰 차이가 없어 고속에서는 MMCs가 더 안정된 내마모성을 나타냄을 알 수 있다. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 보강효과는 기지재에 비해 최대 81.3%의 마모량 감소를 가져왔다. 알루미늄의 부피분율에는 별다른 영향을 받지 않았다. 전속도구간을 비교해 볼 때 고속에서 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 보강효과가 가장 크게 나타났다.

Fig. 5는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 부피분율이 다 같은 15%일 때 탄소의 증가에 따른 마모량의 변화를 각 속도별로 본 것이다. 저속에서는 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>나 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/C의 마모량이 큰 차이는 없으나 탄소가 6%일 때 마모량이 제일 많다. 중속에서는 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/C가 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>보다 마모량이 적다. 이것은 탄소 고체윤활막이 형성되어 시편과 상대재의 마찰력을 감소시킨 결과이다. 고속에서는 중속과 큰 차이는 없으나 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/C가 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>보다 마모량 증가율이 낮

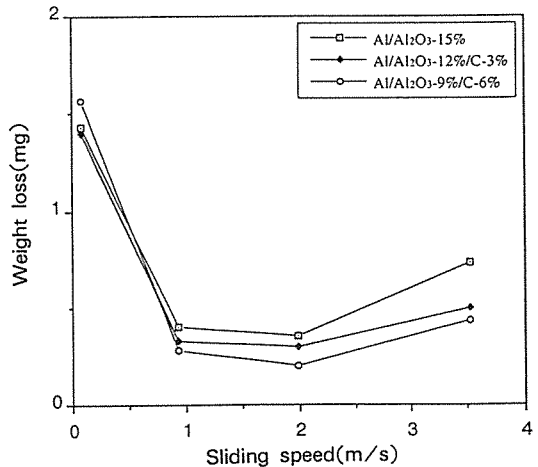


Fig. 5. The effect of sliding speed on the wear behavior of hybrid MMCs at room temperature.

고 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 보다 41.1% 까지 마모량이 감소하였다. 고속에서 탄소혼합 금속복합재료의 내마모성이 안정적인 특성을 가진다는 것을 알 수 있다.

### 4-3. 고온 마모거동

Fig. 6은 300°C에서의 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 부피분을 변화에 따른 마모량의 변화를 나타낸다. 저속에서는 기지재나 MMCs의 마모량에 큰 차이는 없으나 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-20% 복합재료의 마모량이 많은데 상온에서와 마찬가지로 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 여전히 연삭입자로 작용했음을 알 수 있다. 0.94 m/sec에서는 저속에 비해 마모량이 전체적으로 감소하였고 기지재와 MMCs간의 마모량 차이는 크지 않다. MMCs의 마모량이 저속에 비해 감소한 것은 고온 분위기이고 또 마모속도가 증가하면서 마모면에 발생한 마찰열로 기지재가 연화되어 경질의 보강재 마모입자가 기지재의 박혀 마모입자가 마모를 억제시켜주기 때문이다. MMCs는 기지재에 비해 마모량이 적다. 1.98 m/sec에서는 상온 마모거동과 다른데, 기지재와 MMCs 모두 마모량이 급격히 증가하였다. 상온에서는 고속에서 일어났던 윤착마모가 고온에서는 중속으로 이동하여 나타났음을 말해준다. 이것은 상온에서는 고속에 가서야 윤착마모가 일어나는데 필요한 마찰열이

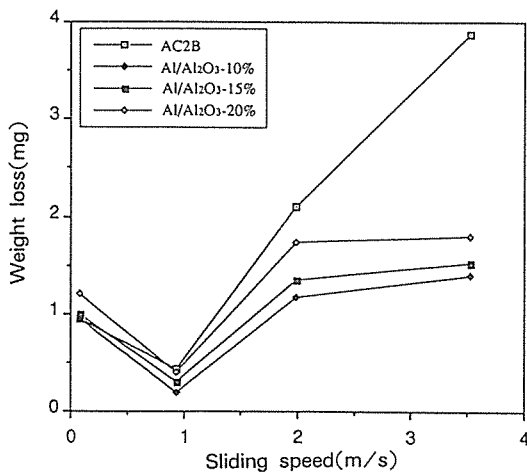


Fig. 6. The effect of sliding speed on the wear behavior of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites with variation of volume fraction at 300°C

발생하였지만 고온에서는 중속에서도 충분한 마찰열량이 공급되었기 때문이다. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 부피비가 증가할수록 마모량은 증가했는데 마모면의 마찰열 및 고온의 분위기로 기지재가 연화되어 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 기지재의 debonding이 생겼기 때문이라고 생각한다. 3.53 m/sec에서도 1.98 m/sec와 같은 마모거동을 보이지만 기지재의 마모량이 계속 증가한 반면 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 마모량은 큰 차이를 보이지 않고 안정된 마모특성을 나타낸다.

Fig. 7은 300°C에서 탄소의 영향을 본 것이다. 모든 속도구간에서 탄소의 첨가로 인한 고체 윤활 효과가 나타나 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/C가 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>보다 낮은 마모량을 나타냈다. 탄소의 부피분을 변화에 대해서는 고속으로 갈수록 큰 영향을 받지 않아 마모량에는 큰 차이가 없었다. 1.98 m/s 이후로는 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/C와 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 모두 안정된 내마모성을 보여준다.

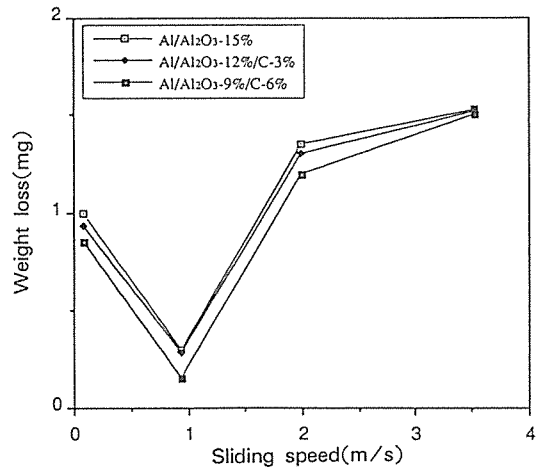


Fig. 7. The effect of sliding speed on the wear behavior of hybrid MMCs at 300°C

기지재의 상온과 고온 마모거동을 비교해 보면, Fig. 8에서 보듯이 저속에서는 고온으로 갈수록 마모량이 감소하였고 고속에서는 증가하였다. 저속에서 온도증가에 따라 마모량이 감소하는 이유는 상대재 및 기지재가 연화되며 마모표면에 산화막이 형성되어 상대재와 마모 시편의 직접적인 접촉을 막아주었기 때문이라고 생각한다. 고속에서 마모

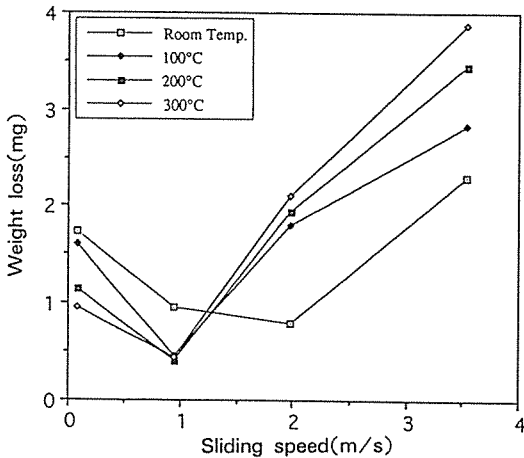


Fig. 8. The effect of the temperature on the wear behavior of AC2B matrix alloy.

량이 증가하는 이유는 기지재의 연화율이 급격히 커지고 윤착 및 밀립현상이 심화되었기 때문이다. 0.94 m/sec 에서는 상온의 마모량이 많으나 1.98 m/sec 에서는 고온의 마모량이 많다. 이것은 두 경우의 마모기구가 다름을 의미한다. 즉 고온에서는 1.98 m/sec 에서 이미 윤착마모가 시작된 반면 상온에서는 3.53 m/sec 에 이르러서야 윤착마모가 일어났다.

Fig. 9는 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-15%의 온도변화에 따른 마모량의 변화를 나타낸다. 저속에서는 고온에서의

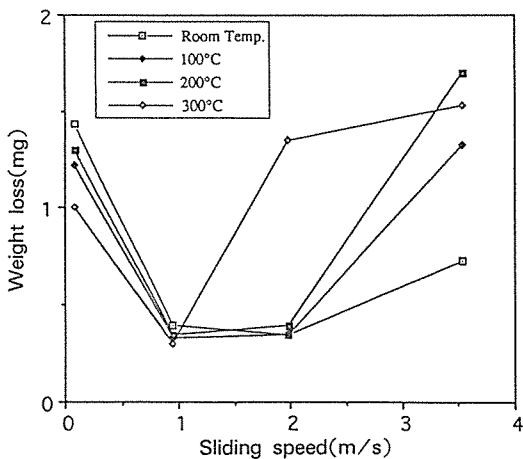


Fig. 9. The effect of the temperature on the wear behavior of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-15 vol% composites.

마모량이 상온보다 적다. 이는 저속에서는 마모기구가 연삭마모인데 비해, 고온에서는 연삭입자로 작용하던 보강재가 기지재에 퇴박하기 때문이다. 중속에서 기지재의 마모거동이 상온과 고온으로 나뉘어 나타난 반면 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 300°C와 그 밖의 경우로 나뉘어졌다. 즉 300°C에서는 1.98 m/sec에서, 그 이하의 온도에서는 3.53 m/sec에서 급격한 마모현상이 나타났다. 고속에서는 온도가 증가하면서 마모량이 증가하는 경향을 나타낸다.

Fig. 10은 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/C의 온도가 마모량에 미치는 영향을 본 것이다. 저속에서는 온도가 증가할수록 마모량은 감소하였다. 중속에서는 고온으로 가면서 마모량이 급격히 증가했는데 마모기구가 바뀌었음을 알 수 있다. 고속에서의 마모 거동은 처음에는 온도 증가에 따라 마모량이 증가하였지만 고온에서는 감소하였다. 고온에서의 마모 거동이 더 안정되어 있음을 알 수 있다.

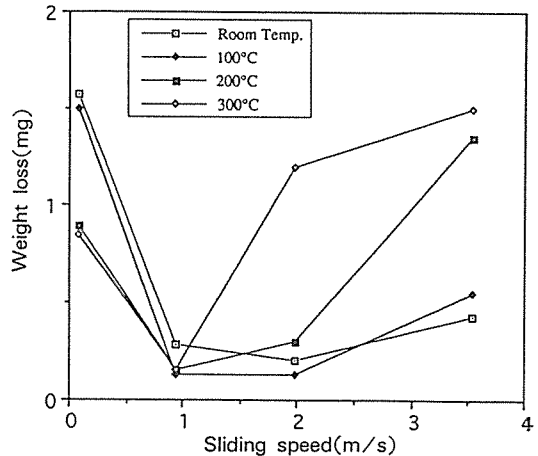


Fig. 10. The effect of the temperature on the wear behavior of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-9%/C-6% composites.

#### 4-4. 마모면의 SEM 사진 관찰

Fig. 11은 AC2B 기지재의 상온에서의 마모면을 나타낸다. 저속에서는 연삭마모의 흔적인 골괘임(ploughing) 현상을 볼 수 있다. 중속에서는 마모면이 부드러운 것을 볼 때 마찰계수가 낮았음을

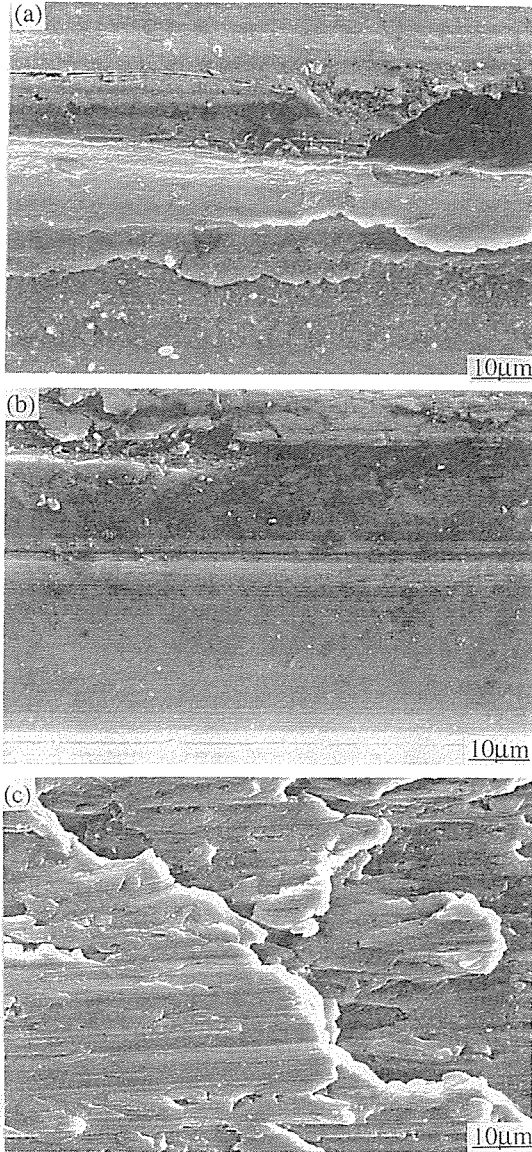


Fig. 11. Wear surface of AC2B alloy at room temperature. (a) 0.081 m/s, (b) 0.94 m/s and (c) 3.53 m/s.

예측할 수 있다. 고속에서는 용착현상과 재료의 밀림 현상을 볼 수 있다. 용착현상은 재료가 들겨 나간 것을 보고 알 수 있고 밀림 현상은 재료가 회전방향으로 밀린 흔적을 통해 알 수 있다. 이렇게 밀린 재료는 마모면 끝단에서 lip을 형성하고 밀림

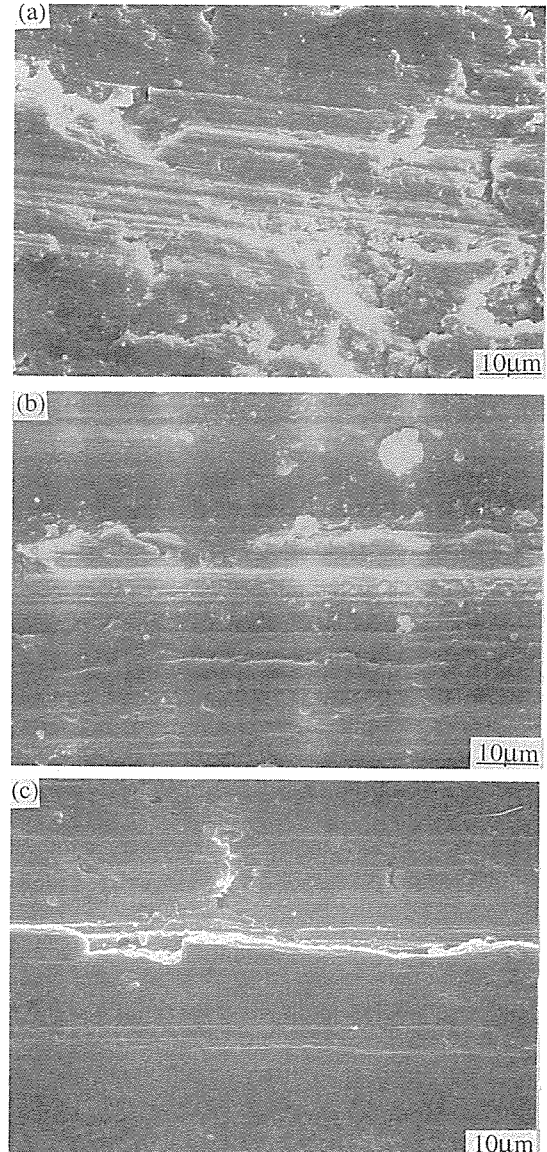


Fig. 12. Wear surface of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites at room temperature (a) 0.081 m/s, (b) 0.94 m/s and (c) 3.53 m/s.

현상이 심할수록 이 lip은 커지게 된다.

Fig. 12는 상온 마모시험을 한 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-15% 복합재료의 마모면 중앙부분을 나타낸다. 저속에서는 AC2B 기지재와 마찬가지로 골캐임 현상을 통해 연삭마모가 일어났음을 알 수 있다. 그러나



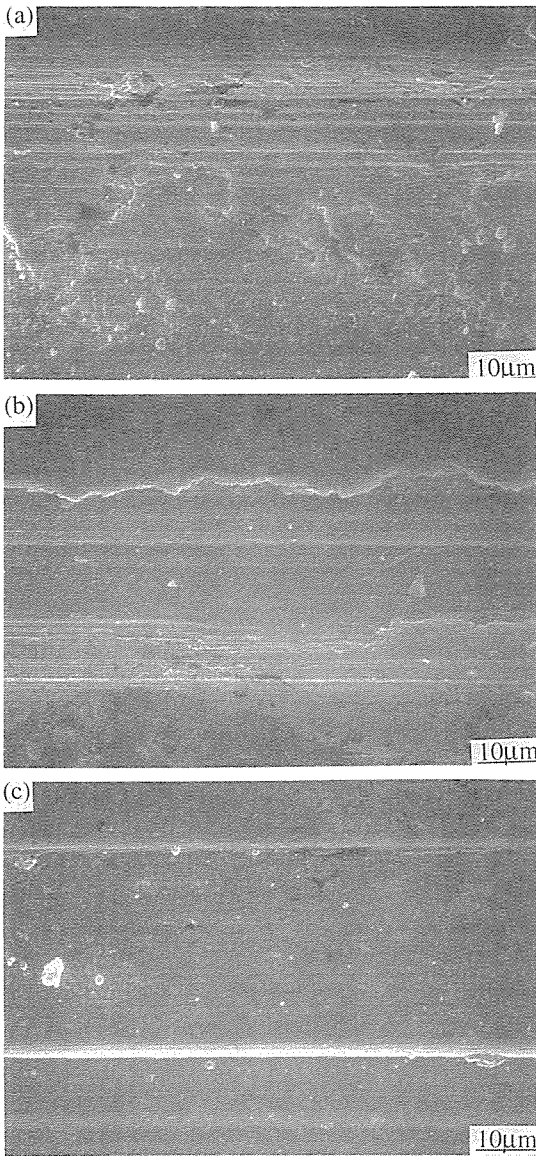


Fig. 13. Wear surface of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/C composites at room temperature (a) 0.081 m/s, (b) 0.94 m/s and (c) 3.53 m/s.

속도가 증가하더라도 재료의 밀립현상이 관찰되지 않음을 볼 때 마모량이 기지재 보다 적게 나타났음을 알 수 있다.

Fig. 13은 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/C 복합재료의 상온 마모면을 나타낸다. 저속에서는 골패임 현상을 통해 마

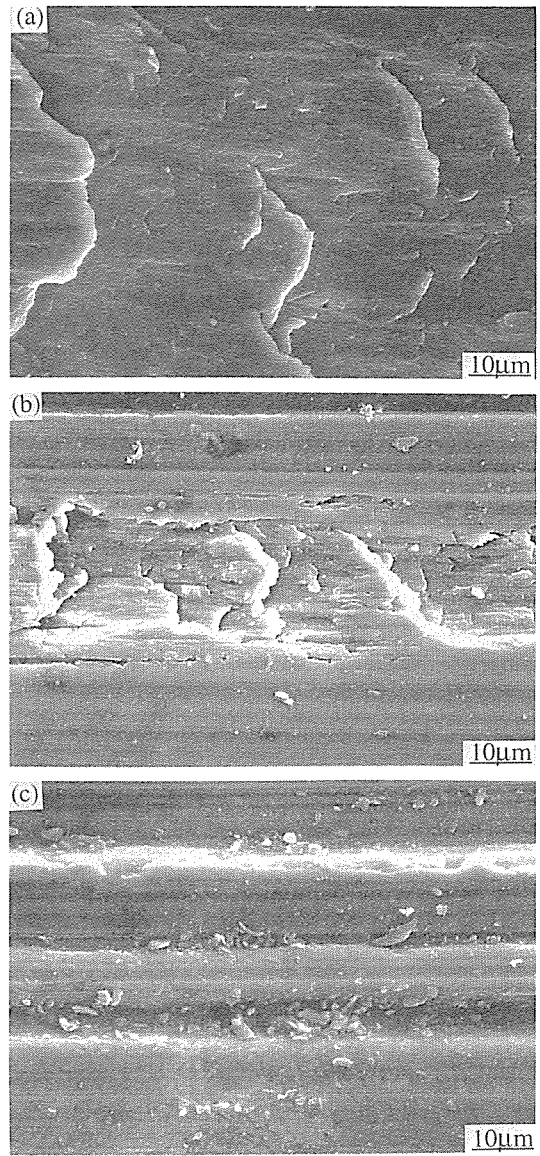


Fig. 14. Wear surface comparison between matrix alloy and MMCs at 300°C and 1.98 m/s (a) matrix alloy, (b) Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and (c) Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/C.

모기구가 연삭마모임을 알 수 있다. 고속에서는 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 복합재료와 달리 마모면이 훨씬 매끄러운 것을 볼 때 연삭-응착 마모가 줄었음을 알 수 있다. 그것은 탄소의 고체윤활 효과가 나타났기

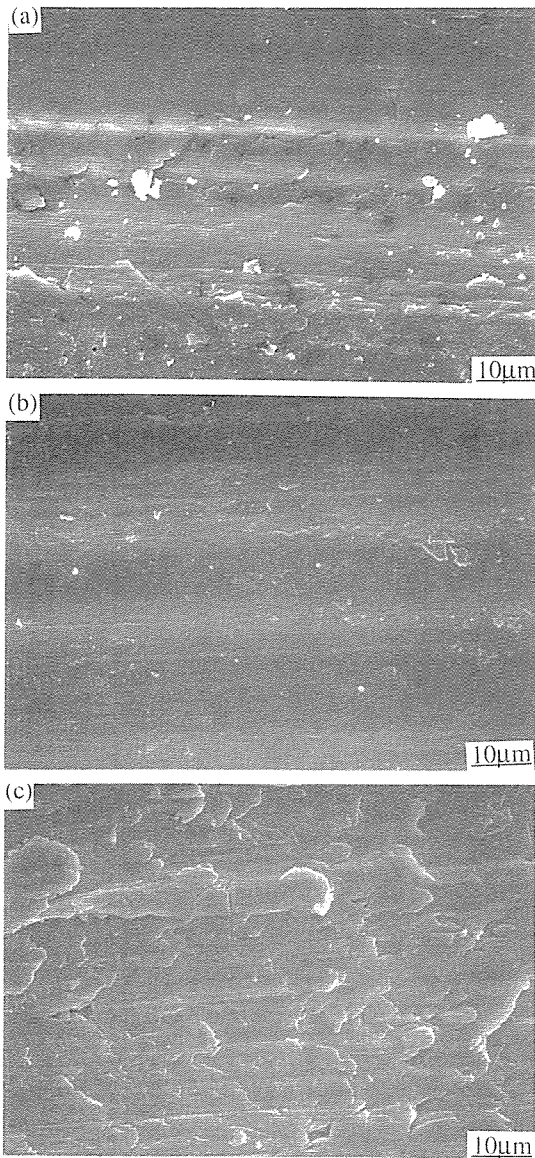


Fig. 15. Wear surface of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/C composites at 300°C (a) 0.081 m/s, (b) 0.94 m/s and (c) 3.53 m/s.

때문이다.

Fig. 14는 300°C, 1.98 m/s에서의 기지재, Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 복합재료, Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/C 복합재료의 마모면을 비교한 것이다. 300°C에서는 1.98 m/s 마모량이 급격히 증가하였는데 SEM 사진을 보면 기지재와

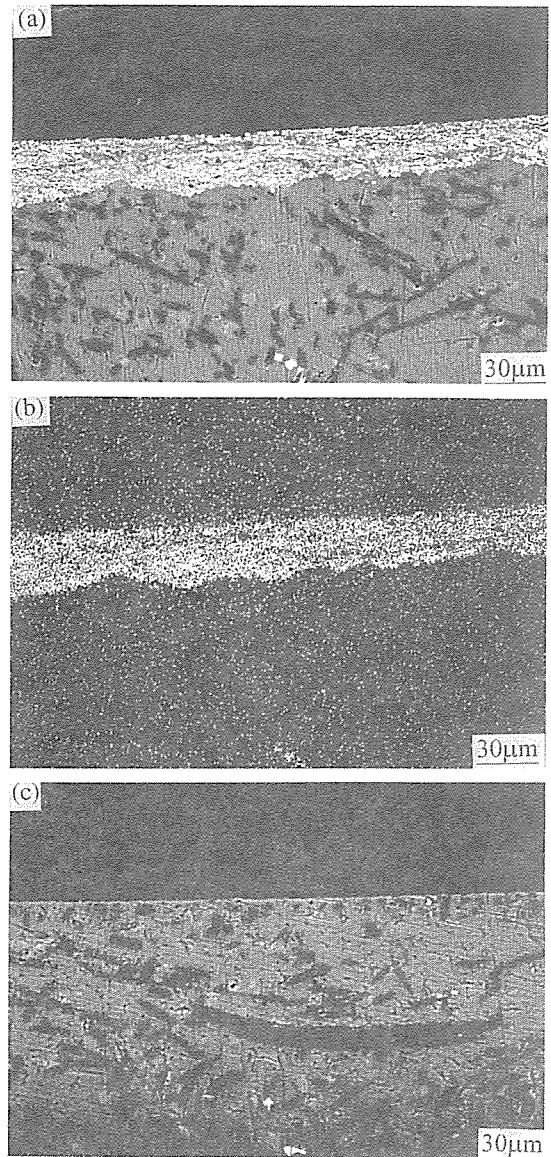


Fig. 16. Comparison of wear subsurfaces of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/C composites at room temperature (a) 0.081 m/s, (b) EPMA at 0.81 m/s and (c) 3.53 m/s.

Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 복합재료는 고속에서 나타났던 융착현상 및 밀림 현상이 나타났음을 알 수 있다. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/C 복합재료는 그런 현상이 발견되지 않았다. 이것은 고체윤활 현상에 기인하는 것으로 탄소의

마모입자가 경계면에서 윤활층을 형성해 상대재와 시편간의 직접적인 접촉을 막아주기 때문이다.

Fig. 15는 고온에서의 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/C 복합재료의 마모면을 나타낸다. 중속까지의 마모기구는 연삭-응착마모이고, 고속에 가서야 응착현상 및 밀림 현상이 나타나 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 복합재료 보다 내마모성이 뛰어난 것을 알 수 있다.

Fig. 16은 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 복합재료의 마모면 측면을 관찰한 것이다. SEM 사진을 비교해 보면 저속에서는 마모면의 밀부분 조직이 변해 있지만 고속에서는 관찰되지 않는다. 저속에서는 마모면 밀부분에 Fe 성분이 많이 분포된 층이 존재하는데 이 층은 마모 과정에서 생긴 상대재의 미세한 Fe 입자와 기지재가 섞여서 형성된 것이다. 이 층은 임계하중 미만에서는 복합재료의 마모저항을 높여서 마모량을 감소시키는 역할을 한다. 임계하중 이상이 작용하게 되면 보강재와 기지재의 경계면에서 발생한 크랙의 성장으로 이 층은 불안정해지게 되고 마모 부스러기로 떨어져 나가는 부분도 생기게 된다. 고속에서 마모면 밀부분의 층이 관찰되지 않는 이유는 임계하중 보다 큰 하중으로 인해 이 층이 마모 부스러기로 떨어져 나갔기 때문으로 생각한다.

지금까지의 연구 결과 금속복합재료의 마모거동은 실험조건에 따라 달라지는데 마모속도와 온도가 증가할수록 탄소의 고체윤활효과 때문에 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/C 복합재료가 나은 내마모성을 보이는 것을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 알루미늄과 탄소를 보강재로 한 혼합 금속복합재료를 제조하였으며, 상온 및 고온에서의 내마모성을 비교하고 마모기구를 규명하였는데 정리하면 아래와 같다.

(1) Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/C 복합재료는 마모속도와 실험온도가 증가할수록 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 복합재료 및 AC2B 기지재에 비해 내마모성이 향상되었다.

(2) Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/C 복합재료는 탄소의 부피분율이 증가할수록 내마모성이 향상되었다.

(3) 상온에서 AC2B 기지재의 마모기구는 저속

에서 연삭마모, 고속에서 응착마모, 밀림현상이고, Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/C 복합재료의 마모기구는 전 속도 구간에서 연삭-응착마모이다.

(4) AC2B 기지재의 고온 마모기구는 저속에서 연삭마모, 중속 이상에서 응착마모 및 밀림현상이고, Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/C 복합재료의 고온 마모기구는 중속까지는 연삭-응착마모이고 고속에서는 응착마모 및 밀림현상이다.

## 감사의 글

본 논문은 1996년도 한국과학재단의 핵심전문연구과제(고내마모성 금속복합재료의 제조 및 마모거동) 연구비 지원으로 연구되었으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 한경섭, 김영한, "금속복합재료의 제조 및 응용", 대한기계학회지, 제 32 권, 제 1 호, 1992, pp.46-56.

2. T.W. Clyne. and J.F. Mason., "The squeeze infiltration process for fabrication of metal matrix composites", Metallurgical Transaction A, Vol.18A, 1987, pp.1519-1530.

3. T.W. Lim, "Fabrication and mechanical behavior of aluminum matrix composite materials", Ph.D. Dissertation, State Univ. of New York at Buffalo, 1990.

4. S. Subra, M. Andreas and N. Alan, "Fundamentals of Metal Matrix Composites", Butterworth-Heinemann, 1993, pp.3-22.

5. M. Narayan, M.K. Surappa and B.N. Pramila Bai, "Dry sliding of Al alloy 2204-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle metal matrix composites", Wear, Vol. 181-183, 1995, pp.563-570.

6. C. Perrin and W.M. Rainforth, "The effect of alumina fibre reinforcement on the wear of an Al-4.3% Cu alloy", Wear, Vol.181-183, 1995, pp.312-324.

7. N. Axen, A. Alahelisten and S. Jacobson, "Abrasive wear of alumina fiber reinforced aluminum", *Wear*, Vol.173, 1994, pp.95-104.
  8. S. Subra, M. Andreas and N. Alan, "Fundamentals of Metal Matrix Composites", Butterworth-Heinemann, 1993, pp.297-326.
  9. J.T. Burwell, "Survey of possible wear mechanism", *Wear*, Vol.1, 1957, pp.119-141.
  10. T. Lim, Y.H. Kim, C.S. Lee and K.S. Han, "Fabrication and mechanical properties of aluminum matrix composite", *J. Com. Mater.*, Vol.26, 1992, pp.1062-1083.
  11. X.C. Liu and C. Bathias, "Defects in squeeze-cast  $Al_2O_3/Al$  alloy composites and their effects on mechanical properties", *Composites Science and Technology*, Vol.46, 1993, pp.245-252.
  12. C.M. Friend, "The effect of matrix properties on reinforcement in short alumina fiber-aluminum MMC's", *J. of Material science*, Vol.22, 1987, pp.3005-3010.
  13. A.A. Das and A.J. Clegg, "Enhancement in the properties of a squeeze cast aluminum magnesium alloy containing alumina fiber", *Cast Reinforced Metal Composites*, ASM, 1988, pp.217-224.
  14. B.V. Derjaguin and V.P. Smilga, "Electronic theory of adhesion", *J. Appl. Phys*, Vol.38, 1967, pp.4609-4616.
  15. N.P. Suh, "The delamination theory of wear", *Wear*, Vol.25, 1973, pp.111-124.
  16. Data Sheet from JIS-H5202.
  17. Data Sheet from ICI CO.
  18. Data Sheet from Kureha Co.
  19. J.B. Donnet and R.C. Bansal, *Carbon Fibers, International Fiber Science and Technology*, Vol.3.
  20. F.M. Hosking, F.F. Portillo, R. Wunderlin and R. Mehrabian, "Composites of aluminum alloys : fabrication and wear behavior", *J. of Materials Science*, Vol.17, 1982, pp.477-498.
-