論文

고 내마모성 혼합 금속복합재료의 연삭마모

송정일*

Abrasive Wear of Hybrid Metal Matrix Composites for High Wear Resistance

J.I. Song*

ABSTRACT

Aluminum based metal matrix composites(MMCs) are well known for their high specific strength, stiffness and hardness. They are gaining further importance because of their high wear resistance.

In this study wear behavior of $Al/Al_2O_3/C$ hybrid MMCs fabricated by squeeze infiltration method was characterized by the abrasive wear test under various sliding speeds at room and high temperature. Wear resistance of MMCs was improved due to the presence of reinforcements at high sliding speed. Especially wear resistance of carbon hybrid MMCs was superior to other materials because of its solid lubrication of carbon. The friction coefficient of MMCs was not affected by the sliding speed.

초 록

알루미늄 기지 금속복합재료는 비강도, 비강성, 경도가 뛰어난것으로 널리 알려져 있으며 높은 마모 저항으로 인해 점점 중요한 재료로 인식되고 있다. 본 연구에서는 AC2B 알루미늄 합금을 기지재로 하고, 알루미나(Al_2O_3)및 탄소를 단섬유를 보강재로한 혼합금속복합재료를 제조하였다. 다양한 상대 마모 속도하에서의 연삭 마모 시험을 통해 금속복합재료의 상온 및 고온 마모 거동을 규명하였다. 금속복합재료의 마모 저항은 고속에서 보강재로 인해 향상되었다. 탄소 혼합 금속복합재료의 마모 저항은 탄소의 고체 윤활 효과로 인해 알루미나(Al_2O_3) 복합재료보다 우수하였으며, 특히 고속에서의 내마모성이 가장 향상되었다. 금속복합재료의 마찰계수는 상온과 고온에서 상대 속도의 변화에도 큰 차이를 보이지 않았다.

1. 서 론

지난 30여년동안 금속복합재료에 대한 과학적인 기초 연구와 응용연구가 많이 이루어져 왔다. 그러나 금속복합재료가 공학적인 가치가 있는 재료로 자리를 잡은 것은 불과 몇 년 전이다. 금속복합재료의 높은 기계적 열적 물성에도 불구하고 최종 제품의 단가가 높고 제조공정이 복잡했기 때문이다. 그 동안의 연구 결과로 지금은 보강재의 제조기술이나 복합재료 제조 공정 기술이 괄목할 만큼 발전했다.

단섬유 보강 금속복합재료는 비강도, 비강성 등과 같은 기계적 물성이 우수하고, 기존의 금속재료 제조 기

* 창원대학교 기계공학과

술을 이용할 수 있다는 장점 때문에 자동차 및 항공우주산업 등에서 피스톤, 커넥팅 로드, 실린더 그리고 브레이크 라이너 같은 국소 보강재로 각광받고 있다. [1-3] 주목할만한 예로는 Toyota가 개발한 Al/Al_2O_3 디젤엔진 피스톤과 Honda가 개발한 $Al/Al_2O_3/C$ 실린더 라이너가 있다[4]. 또한 알루미늄 기지 금속복합재료는 내마모성이 뛰어 나고 질량 감소에 효과적이어서 관심의 대상이 되고 있다[5-7]. 브레이크 디스크에 응용 되는데 기존에 사용하던 주철 보다 열전도성이 뛰어나고 밀도가 낮아 연료 효율 및 제조 단가에 이로운 것이 특징이다.

특히 알루미늄 기지 금속복합재료는 내마모성이 뛰어나 세라믹 보강재로는 SiC, Al_2O_3, SiO_2등이 쓰이는데 Koczak 등에 의하면 가격이 저렴하고 기지재와의 반응이 적은 Saffil알루미나 섬유가 전망이 밝다고 한다[8]. 지금의 연구 추세는 단일 보강재 만을 이용하는 금속복합재료에서 두 가지 이상의 혼합 보강재를 사용하여 경제성과 내마모 특성을 배가시키고자 하는 하이브리드 복합재료의 연구가 증대되고 있다. 특히 탄소를 혼합한 하이브리드 복합재료($Al/Al_2O_3/C$)는 가격이 저렴하고 고체 윤활특성이 뛰어나 상대재를 보호하는 재료로 알려져 있다[9-12].

금속복합재료의 마모 특성에 대한 연구들을 살펴보면 연구의 초점이 대개 상온에 제한되어 있어 고온에서의 마모 특성에 대한 연구는 부족한 실정이다. 실재 금속복합재료가 피스톤, 실린더 라이너, 커넥팅 로드와 같이 높은 열이 발생하는 곳에 사용되는 점을 생각해 보면 고온에 대한 연구가 선행되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 AC2B 알루미늄 합금을 기지재로 하고, 알루미나(Al_2O_3) 및 탄소 단섬유를 보강재로 한 금속복합재료를 제조하여 상온 및 고온에서 금속복합재료의 연삭마모 거동을 규명하고자 하는 것이다.

2. 이론적 배경

마모에 영향을 주는 인자는 크게 윤활 인자와 실험 인자로 나눌 수 있다. 윤활 인자로는 시편 재료, 상대재, 보강재와 기지재의 경계면 등이 있고 실험 인자로는 상대 속도, 마모 거리, 접촉 하중, 시간, 온도가 있다. 이렇게 많은 인자들이 복잡하게 상호 작용을 하기 때문에 윤활계(tribosystem)를 명확히 나타내긴 힘들다. DIN 50320에 따르면 기본적인 마모 기구로서 응착(adhesion)마모, 연삭(abrasion)마모, 표면 피로(surface fatigue), 윤활 화학 반응(tribochemical reaction)이 있다[13].

건식 마모계(dry sliding system)에는 경마모(mild wear)와 급격 마모(severe wear)의 두 종류가 있는 것으로 밝혀졌다. 경마모는 연삭 마모에 의한 미세 균열로 인해 재료가 손상을 입어 발생되는 마모이고, 급격 마모는 응착 마모와 재료의 거시 균열에 의해 발생되는 마모이다. Y.S. Chiao 등[14]에 의하면 경마모는 저하중, 저속에서 나타났고 급격 마모는 고하중에서 나타났다. 마모면을 비교해 보면 경마모일 때는 산소와 철이 주성분이고 급격 마모일 때는 기지재인 알루미늄이 주 성분이었다. 이는 경마모 영역에서는 Al_2O_3 보강 입자가 마모 저항을 높여 주지만 급격 마모 영역에서는 고 하중에 의해 보강 입자가 파괴되 마모면에서 떨어져 나가기 때문이다.

마모현상을 규명하는 데 중요한 목표 중의 하나는 마모에 관련된 주된 변수들의 관계를 수학적으로 정리하는 것이다. H.C.Meng등[15]에 의하면 마모량을 예측하는 식은 300 여개가 있고, 사용된 변수만도 30여개에 이른다고 한다. 경험식으로는 Burwell, Blomberg, Axen등이 제안한 식이 있다[16-18]. Burwell[16]등에 의하면 마모율(wear rate)은 아래식으로 나타낼 수 있다고 한다.

$$V = \frac{\beta}{\alpha}\{1\text{-}\exp(-at)\} \tag{1}$$

$$V = \alpha t \tag{2}$$

$$V = \beta \exp(-\alpha t) \tag{3}$$

여기서 V는 체적손실(volume loss)이고, α는 상수, t는 시간을 나타낸다. β는 초기 표면의 특성을 나타내는 척도로 정의된다.

Blomberg등[17]은 마모량을 가압하중(F), 상대마모속도(V), 시간(t)의 함수로 식(4)와 같이 나타낼 수 있다고 제안하였으며, Archard등은 V는 체적손실(V), 마모거리(S), 가압하중(L), 경도(H)의 관계식으로 식(5)를 제안한 바 있다.

$$\Delta W = k F^{a} V^{b} t^{c} \tag{4}$$

$$\frac{V}{S} = K\frac{L}{H} \tag{5}$$

Axen등[18]은 식 (5)를 부피분율의 변화에 대한 마모저항식을 제안하였다.

$$\Omega = \frac{A_p}{A}\Omega_p + \frac{A_m}{A}\Omega_m \quad : \text{EW mode}$$

$$\Omega = \left(\frac{A_p}{A\Omega_p} + \frac{A_m}{A\Omega_m}\right)^{-1} \quad : \text{EP mode}$$

여기서 EW (Equal wear rate) mode는 기지재와 보강재의 마모율이 같다는 가정이고, EP(equal pressure)mode는 기지재와 보강재에 같은 압력이 작용한다는 가정이다. EW mode는 마모저항의 상한선을, EP mode는 마모저항의 하한선을 나타낸다. Ω는 마모저항, A는 접촉면적, 첨자 p와 m은 각각 보강재와 기지재를 나타낸다. 이식에 의하면 금속복합재료의 마모저항은 보강재의 부피분율이 증가할수록 증가해서 내마모성이 향상된다.

West와 Erturk 등[19,20]은 기지재와 보강재의 계면응력을 해석함으로써 마모현상을 해석하였다. West 등[19]에 의하면 크랙은 보강재와 기지재의 경계면에서 시작되어 성장하기 때문에 계면에서의 응력해석은 중요하다. 금속복합재료의 연삭마모는 파괴된 보강섬유에 의해서 일어나는 데 보강섬유는 응력집중에 의해서 debonding되고 굽힘에 의해 파괴된다는 것이다. 본 연구에서는 이와같이 실험적으로 제안된 수식을 기본으로 연삭마모거동을 고찰한 후 고내마모성 혼합 금속복합재료의 미세기구를 규명하였다.

3. 실험 방법

3.1 사용 재료

본 연구에서 사용한 기지재는 Al-Si-Cu계의 AC2B 알루미늄 합금이다. AC2B는 주조성이 좋고 불순물의 허용 범위가 넓어 크랭크 케이스, 클러치 하우징, 밸브 바디, 엔진의 실린더 라이너 등으로 사용되는 재료이다. Table.1[21]은 이들 재료에 대한 기계적 성질과 화학적 성분비를 나타낸 것이다. 보강재는 영국 ICI사의 Saffil Al_2O_3 RF grade의 단섬유로서 δ결정상을

Table. 1 Chemical composition and mechanical property of Al alloy

Mat.	chemical composition(w/o)										T.S
	Si	Cu	Mg	Ni	Fe	Mn	Zn	Ti	Pb	Al	σ_{ut}(MPa)
AC2B	6.0	3.0	0.4	0.3	0.9	0.4	0.9	0.1	0.15	rem	24.5

Table. 2 Specifications of reinforcements

Mat.	Density (g/cm^3)	Diameter (μm)	Length (μm)	T.S (MPa)	E (GPa)
Al_2O_3(Saffil)	3.3	3.0	60	2.0	310
C_{pan}(Kureha)	1.9	9.1	119	2.0	290

가지며 5% 정도의 무기성형제인 silica를 포함하고 있다. Silica가 포함된 단섬유는 Al 합금과의 젖음성과 결합력이 향상된다고 알려져 있다. 탄소섬유는 Kureha 제품의 PAN계 탄소 단섬유를 사용하였다. Al_2O_3는 알루미늄과의 양호한 결합 능력을 가지고 있어 단섬유 보강재로써 많이 사용되는 재료이고 탄소는 금속에 비해 가볍고 열적인 안정성 및 열전도성이 우수하고, 낮은 열팽창 계수로 인하여 열충격에 대한 저항이 양호하며, 고체 윤활성을 가지고 있어 상대재를 보호하는 기능과 내마모성을 향상시키는 재료로 알려져 있다. Table.2[22]는 이들 보강재들의 기계적 성질을 나타낸 것이다.

3.2 예비 성형체 및 금속복합재료의 제조

예비 성형체의 제조에는 진공압 추출법을 사용하였다. 제조된 예비 성형체의 크기는 직경이 11cm, 두께는 2cm이다. 보강재에 따른 기계적 물성 및 마모 특성을 비교해 보기 위해 Al_2O_3-15%, Al_2O_3-12%/C-3%의 예비 성형체를 제조하였다. 예비 성형체는 수분을 완전히 제거시킨 후 소결하게 되는데 알루미나를 보강재로 사용한 경우 1000℃에서 2시간 소결 후 열 충격에 의한 보강재의 손상을 피하기 위해 노냉시켰다. 탄소를 혼합한 예비 성형체는 450℃ 이상의 온도에서 탄소의 산화 현상 때문에 450℃의 질소 분위기에서 소결하였다[16].

금속복합재료의 제조에는 가압 용침법을 사용하였다. AC2B 기지재는 용융 온도인 540-570℃ 보다 높은 780℃의 온도에서 용융시켰다. 동시에 금형, 펀치, 예비 성형체를 각각 450℃에서 예열하였다. 잉곳을 제조할 때는 피스톤 램의 가압 속도가 2cm/s인 50ton 용량의 가압 프레스에 금형과 예비 성형체를 위치시킨 후 용탕을 투입하고 25MPa의 압력으로 60초 동안 유

지시켰다. 제조된 금속복합재료는 T6 열처리를 하였다. AC2B 기지재는 500℃에서 10시간 용체화 처리(solution treatment)를 하고, 160℃에서 25시간 시효 처리(artificial aging)를 하였다. 금속복합재료는 용체화 처리 과정은 기지재와 같고 시효 처리시간은 한 시간 단위로 경도를 측정하여 최고 경도치가 나타나는 시간을 기준으로 하였다.

3.3 마모 시험

마모 시험은 Orientech Co.의 ring on disc type의 마모 시험기를 사용하였다. 가압 하중, 상대 마모 속도 및 온도를 제어할 수 있고 마찰 계수의 측정이 가능한 시험기이다. 마모 시험기의 개략도 및 마모 시험편 형상은 Fig.1과 같고 상대재로는 SCM4를 사용하였다. 시험 전 시험편과 상대재의 표면은 sand paper 800번으로 균일하게 연마하였다. 연마된 표면의 조도가 균일한지 조도 측정기를 통해 확인하였다. 마모량은 10^{-5}g까지 측정이 가능한 전자 저울을 사용하여 실험 전과 후의 마모량을 측정하였다.

마모 실험에 영향을 주는 변수로는 마모 하중, 마모 거리, 상대 마모 속도, 분위기 온도 등이 있다. 본 연구에서는 마모 하중을 5kg$_f$, 마모 거리를 215m로 고정하고 상대 마모 속도의 변화에 따른 기지재와 금속복합재료의 마모 특성을 상온과 고온(300℃)에서 건식 마모 시험을 통해 관찰하였다. 상대마모속도는 0.179, 0.358, 0.716m/s로 변화시키면서 마찰계수 및 마모면의 온도 변화를 관찰하였다. 마모면의 온도는 상대재에 1mm 구멍을 뚫고 Thermocouple을 마모면에서 2mm 상단까지 삽입하여 측정하였다.

마모 기구를 규명하기 위해 주사전자 현미경(SEM)을 사용하여 마모면을 미시적으로 관찰하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 금속복합재료의 미세 구조

Fig.2와 Fig.3은 가압 용침법으로 제조된 Al/Al_2O_3와 Al/Al_2O_3/C 복합재료의 미세 구조를 광학 현미경을 통해 관찰한 것이다. 그림과 같이 균일한 보강재의 분포 상태와 양호한 결합 상태를 확인할 수 있다. 복합재료를 제조할 때 생기는 문제점들 중 하나인 보강재들의 높이 방향에 따른 분포의 차이는 거의 발견되지 않았고, 보강재들의 방향성은 가압 방향에 따라 달라짐을 확인할 수 있었다.

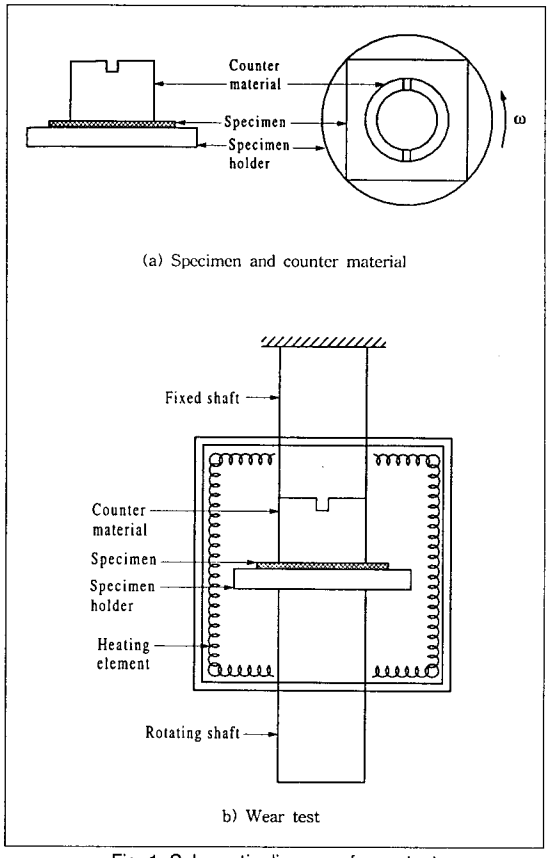

Fig. 1. Schematic diagram of wear test

금속복합재료의 열처리 조건을 결정하기 위해 시효처리 시간에 따른 경도 시험을 하였다. 경도 시험 결과 최고 경도치가 나타나는 시간이 AC2B 기지재는 25시간, 금속복합재료는 22시간이었다. 금속복합재료의 시효 처리 시간이 더 짧게 나타났는데 이는 보강재 주위에 열전이 현상이 발생해 기지재의 석출 경화 속도가 빨라지기 때문이다.

4.2 상온 연삭 마모거동

AC2B 기지 금속복합재료의 보강재에 따른 마모 특성을 관찰하였다. Fig.4는 상온에서 기지재와 금속복합재료의 상대 마모 속도에 따른 마모량의 변화를 본 것이다. 저속(0.179m/s)에서는 기지재의 마모량이 가장 많았다. Al/Al_2O_3, Al/Al_2O_3/C 복합재료의 마모량은 큰 차이를 보이지 않았다. 중속(0.358m/s)에서는 기지

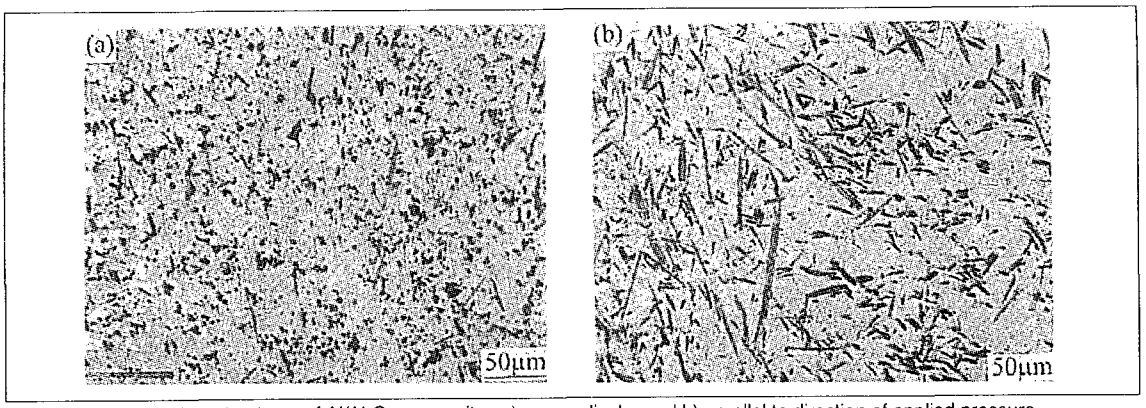

Fig. 2. Microstructures of Al/Al_2O_3 composites a) perpendicular and b) parallel to direction of applied pressure

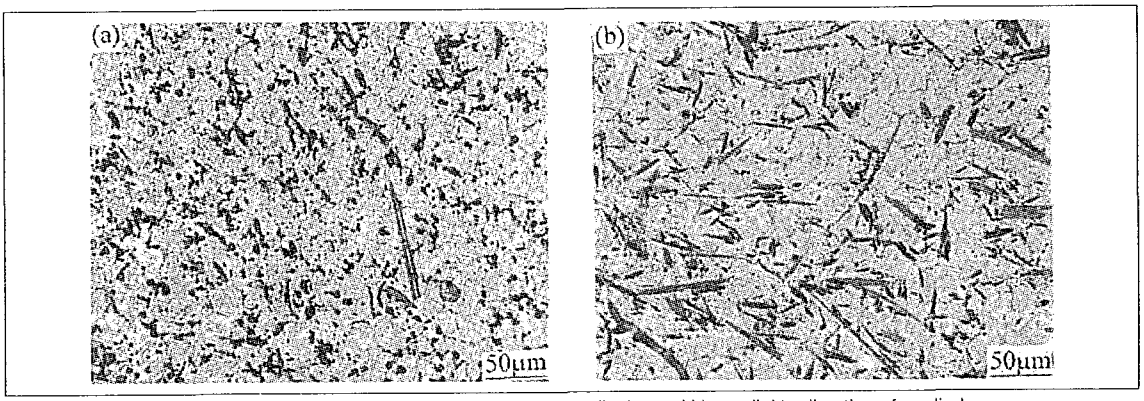

Fig. 3. Microstructures of $Al/Al_2O_3/C$ composites a) perpendicular and b) parallel to direction of applied pressure

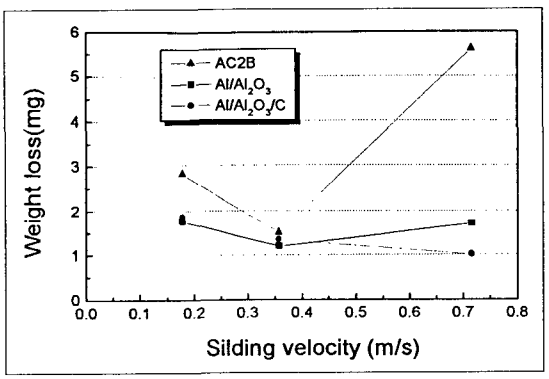

Fig. 4. The effect of sliding velocity on the wear behavior of AC2B Al Alloy and MMCs at room temperature

재와 금속복합재료 모두 저속에 비해 마모량이 감소하였고, 기지재의 마모량이 가장 많았다. 중속에서 금속복합재료의 마모량이 저속에 비해 적은 것은 저속에서 연삭 입자로 작용하던 보강재가 속도가 증가하면서 마모면에 되박히는 현상이 발생해 마모 발생을 저지하는 역할을 했기 때문이다. 고속(0.716m/s)에서 기지재는 마모량이 급증하였다. 두 금속복합재료를 비교해 보면, 중속까지는 비슷한 마모 거동을 보이다가 고속에서 Al/Al_2O_3 복합재료의 마모량은 증가하였고 $Al/Al_2O_3/C$ 복합재료의 마모량은 감소하였다. 또, 모든 속도 구간에서 금속복합재료의 마모량이 기지재 보다 적었다. 고속에서 탄소 혼합 금속복합재료의 마모량이 가장 적은데 탄소의 고체 윤활 효과에 기인한 것이다. 탄소의 고체 윤활 효과는 마모면에서 탄소의 마모 부스러기가 상대재와 금속복합재료의 직접적인 접촉을 막아주어 연삭 마모와 응착 마모 발생을 저지해 준다. 또한 마찰열의 발생이 많은 영역에서 상대재와 금속복합재료 경계면에서 발생하는 전단력을 흡수해 밀림 현상을 줄여준다.

상대 마모 속도가 증가하면서 마찰계수는 어떻게 변

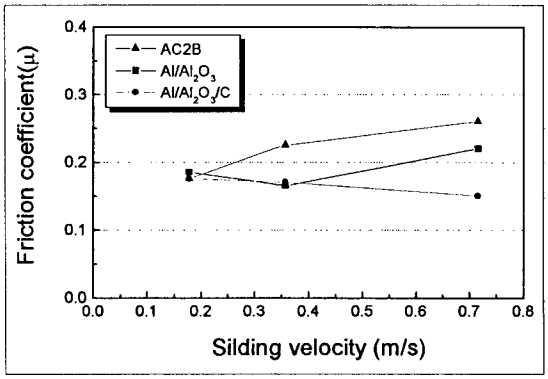

Fig. 5. The effect of sliding velocity on the friction coefficient fo AC2B Al alloy amd MMCs at room temperature

하는지 관찰하였다. Fig.5는 AC2B 기지재와 금속복합재료의 상대 마모 속도에 따른 마찰계수를 나타낸 것이다. 저속에서는 기지재와 금속복합재료의 마찰계수가 비슷하게 나타났다. 중속 이 후로는 기지재의 마찰계수가 가장 크게 나타났다. 고속에서는 탄소 혼합 금속복합재료의 마찰계수가 가장 낮았다. 이는 탄소의 고체 윤활 효과 때문이다. Fig.5의 마모량과 Fig.5의 마찰계수를 비교해 보면 마모량은 마찰계수의 함수가 아니라는 사실을 알 수 있다. 즉, 마찰계수가 크다고 해서 반드시 마모량이 많은 것은 아니었다.

상온 마모 시험을 마친 시편의 마모면을 주사 전자현미경을 통해 관찰하였다. Fig.6은 기지재의 저속, 중속, 고속의 마모면을 나타낸다. 저속에서는 골패임 현상으로 대별되는 연삭 마모 및 응착 마모의 흔적이 보인다. 융착 현상이나 재료의 밀림 현상은 관찰되지 않았다. 중속에서는 저속에 비해 마모면이 더 부드러운 것을 볼 때 마모량이 적었음을 알 수 있다. 고속에서는 재료의 융착 현상과 재료의 밀림 현상이 보인다. 융착 현상은 재료가 뜯겨 나간 것을 보고 알 수 있고, 밀림 현상은 재료가 회전 방향으로 밀린 것을 보고 알 수 있다. 이로써 마모량이 많았음을 예측할 수 있다.

Fig.7은 Al/Al_2O_3 복합재료의 마모면을 본 것이다. 기지재와 마찬가지로 저속에서는 연삭 및 응착 마모의 흔적이 관찰되고, 융착 현상 및 밀림 현상은 보이지 않는다. 중속에서도 비슷한 거동을 보였지만 고속에서는 달랐다. 고속에서 관찰되었던 기지재의 융착 마모 및 밀림 현상이 Al/Al_2O_3 복합재료에서는 발견되지 않았다. 이로 미루어 볼 때 융착 마모 및 밀리 현상이 주 마모 기구이면 마모량도 많음을 예측할 수 있다.

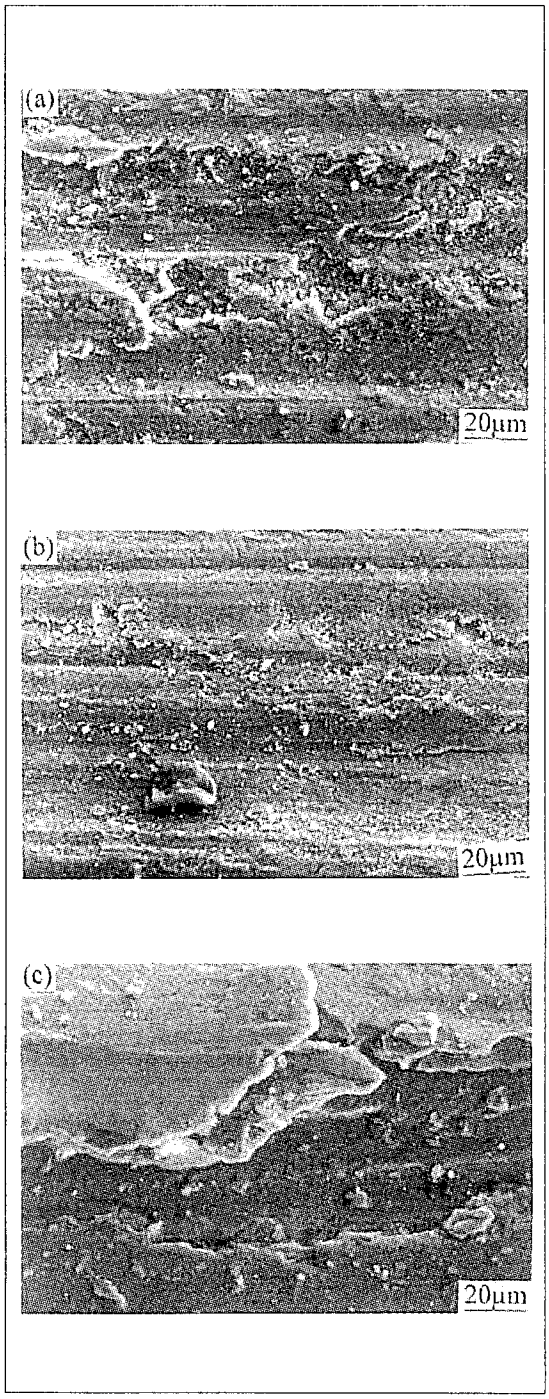

Fig. 6. Wear surfaces of AC2B Al alloy at room temperature a) 0.179, b) 0.358 and c) 0.716m/s

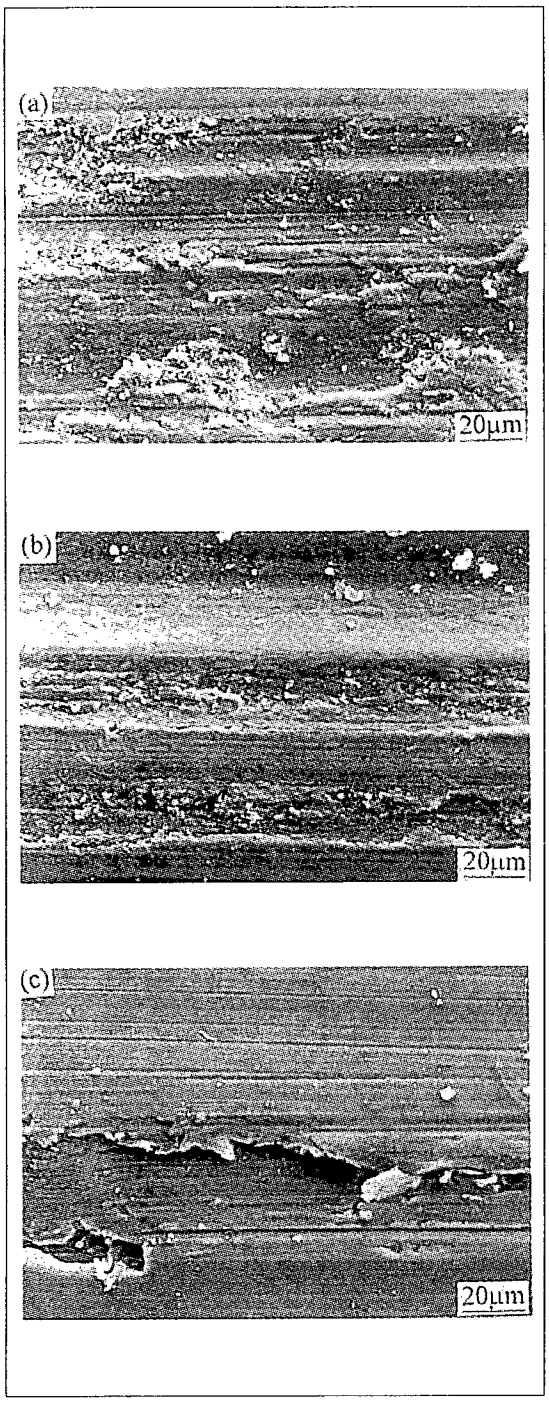

Fig. 7. Wear surfaces of Al/Al_2O_3 composites at room temperature a) 0.179, b) 0.358 and c) 0.716m/s

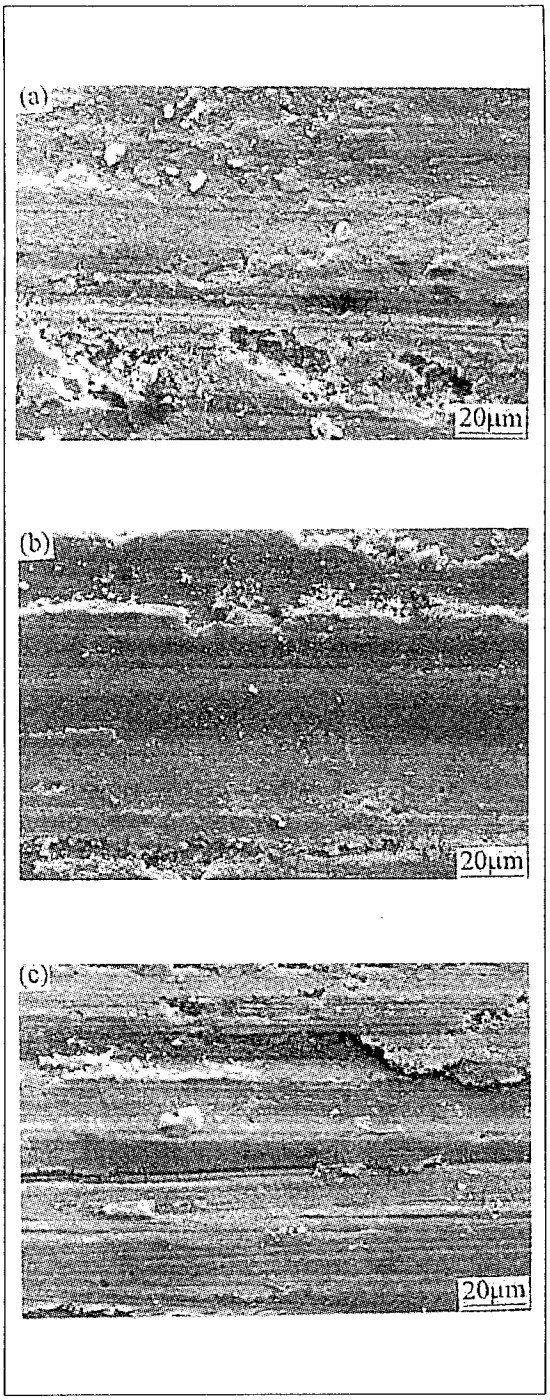

Fig. 8. Wear surfaces of $Al/Al_2O_3/C$ composites at room temperature a) 0.179, b) 0.358 and c) 0.716m/s

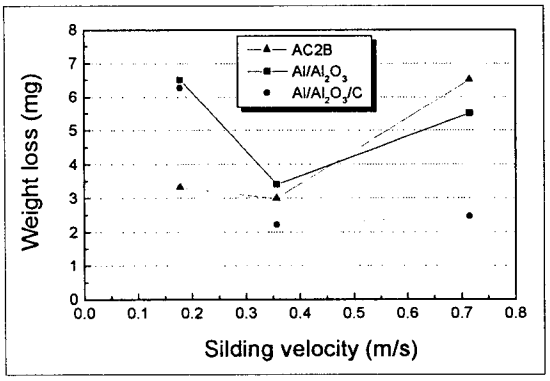

Fig. 9. The effect of sliding velocity on the wear behavior of AC2B Al alloy and MMCs at high temperature

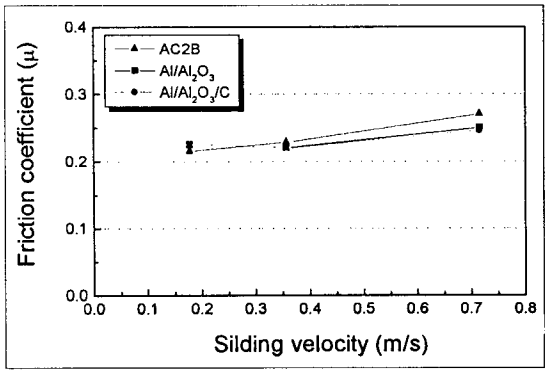

Fig. 10. The effect of sliding velocity on the friction coefficient of AC2B Al alloy and MMCs at high temperature

Fig.8은 $Al/Al_2O_3/C$ 복합재료의 마모면을 본 것이다. 모든 속도 구간에서 Al/Al_2O_3 복합재료와 유사한 거동을 보였다. 고속에서 융착 마모 및 밀림 현상은 나타나지 않았다. 이것은 마모면에 분포한 고체 윤활막에 의해서 전단력이 흡수되었기 때문이다. 주 마모 기구는 연삭 및 응착 마모였으며, 이것은 탄소 혼합 금속복합재료의 마모량이 고속에서 가장 낮은데 마모면을 통해 관찰한 사실과 일치한다.

4.3 고온 연삭마모거동

Fig.9는 AC2B 기지재와 금속복합재료의 상대 마모속도 변화에 따른 마모량의 변화를 나타낸다. 저속에서는 금속복합재료의 마모량이 기지재 보다 많았다. 이것은 금속복합재료의 보강 입자가 연삭 마모를 저해하지 못하고 오히려 연삭 입자로 작용했기 때문이다. 두 금속복합재료의 마모량은 비슷하게 나타났다. 중속 이후로는 탄소 혼합 금속복합재료의 마모량이 가장 적었다. 고속에서는 금속복합재료의 마모량이 기지재 보다 적었고, 특히 탄소 혼합 금속복합재료의 마모량은 중속 이후로도 큰 변화가 없고 일정하게 나타났다. 이는 탄소의 고체 윤활 효과에 기인한 것이다.

Fig.10은 마찰계수의 변화를 본 것이다. 저속에서는 기지재의 마찰계수가 가장 낮게 나타났다. 두 금속복합재료의 마찰계수는 비슷하였다. 중속 이 후로는 기지재의 마찰계수가 금속복합재료 보다 커졌다. 금속복합재료는 모든 속도 구간에서 비슷한 거동을 보였고, 속도 변화에 큰 영향을 받지 않았다.

고온 마모 실험이 끝난 마모 시편의 마모면을 관찰하였다. Fig.11, 12, 13은 각각 AC2B 기지재와 Al/Al_2O_3, $Al/Al_2O_3/C$ 복합재료의 마모면을 속도별로 비교한 것이다. Fig.11의 기지재는 저속에서부터 재질이 연화되었음을 볼 수 있다. 골패임 현상에 의한 연삭 마모가 관찰되고, 재료가 밀린 것을 볼 때 재료의 밀림 현상이 시작되는 단계임을 알 수 있다. 중속에서는 연삭 마모는 관찰되나 밀림 현상은 관찰되지 않는다. 고속에서는 재료의 밀림 현상이 심화되고 융착 현상이 발생하였다. 마모량이 많았음을 확인할 수 있다.

Fig.12의 Al/Al_2O_3 복합재료 경우 저속에서 골패임 현상이 크게 일어났음이 관찰되고, 기지재에서 보였던 밀림 현상의 흔적은 보이지 않는다. 중속에서도 연삭 마모만의 흔적이 관찰된다. 고속에서는 재료의 융착 현상 및 밀림 현상이 나타난 것을 볼 때 마모량이 증가했음을 알 수 있다. Fig.13의 $Al/Al_2O_3/C$ 복합재료는 저속에서 Al/Al_2O_3 복합재료와 비슷한 거동을 보였다. 마모 기구는 연삭 마모였다. 중속에서는 마모면이 매끈한데 저속에 비해 마모량이 적었음을 알 수 있다. 고속에서는 기지재나 Al/Al_2O_3 복합재료에서와 같은 심한 융착 마모나 밀림 현상이 나타나지 않고, 밀림 현상의 초기 단계임을 관찰할 수 있다. 이는 탄소의 고체 윤활 효과로 인한 결과이다.

상온과 고온 마모량을 상대 마모 속도별로 비교해 보면 모든 재료가 상온과 고온에서 비슷한 마모 거동을 보였다. 전체적으로 보면, 고온에서의 마모량이 상온에서의 마모량 보다 많게 나타났다. Song 등[6,9]의 연구에 따르면 금속복합재료의 경우 저속에서 분위기 온도가 증가하면서 마모량이 감소하는 것으로 보고하고 있는데 비해 본 연구는 다른 결과를 보였다. 즉 저속에서도 역시 분위기 온도가 증가하면서 마모량이 증가하였다. 이는 고온 분위기에서는 기지재와 보강재의

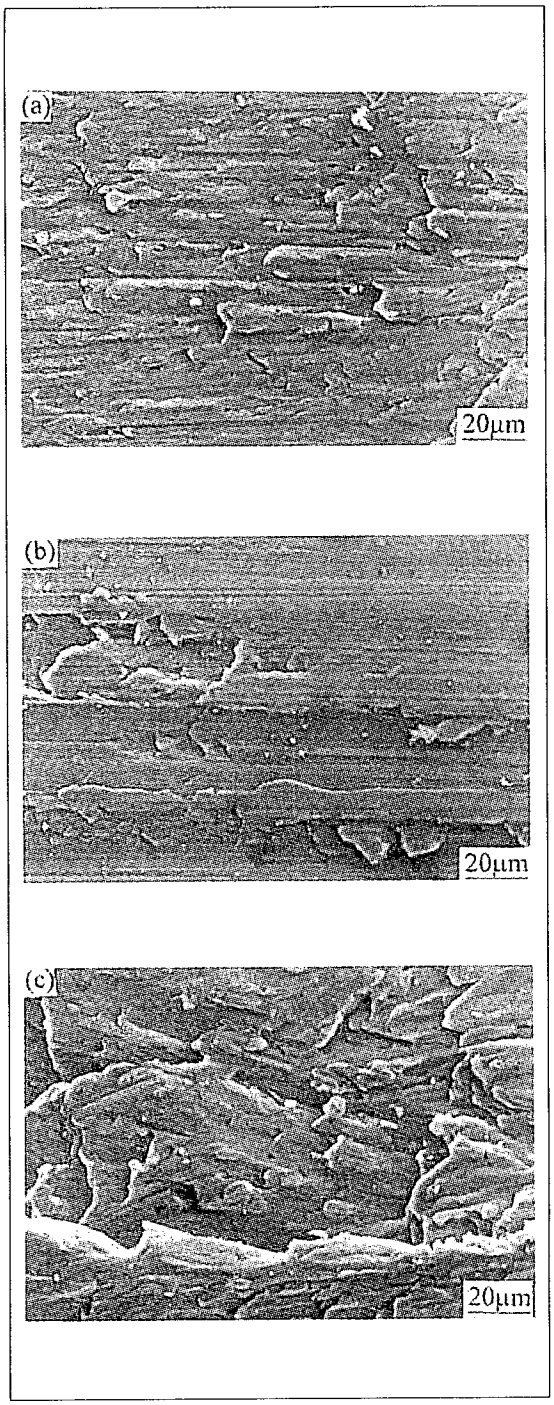

Fig. 11. Wear surfaces of AC2B Al alloy at high temperature a) 0.179, b) 0.358 and c) 0.716m/s

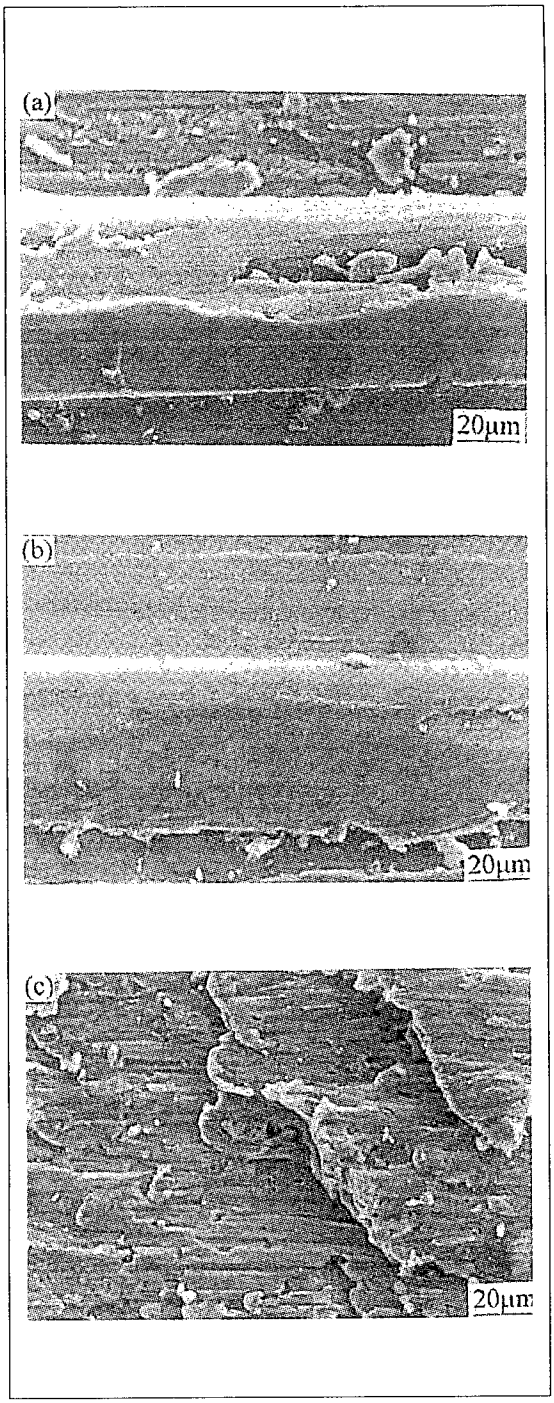

Fig. 12. Wear surfaces of Al/Al_2O_3 cmposites at high temperature a) 0.179, b) 0.358 and c) 0.716m/s

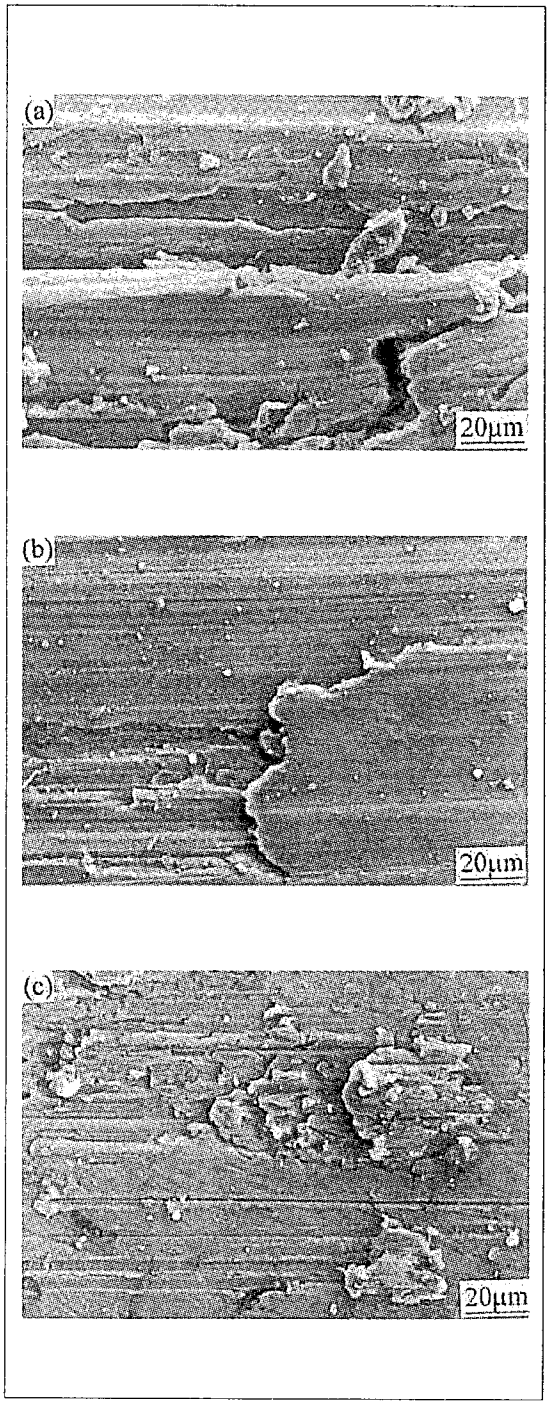

Fig. 13. Wear surfaces of $Al/Al_2O_3/C$ composites at high temperature a) 0.179, b) 0.358 and c) 0.716m/s

결합력이 약해져 보강재와 기지재가 분리(debonding)되기 쉽고, 연삭 입자로 작용하는 보강재가 많아지기 때문이다.

5. 결 론

본 연구에서는 금속복합재료를 자체 제조하여 상온 및 고온에서의 연삭 마모 거동을 규명한 것으로 그 내용을 요약하면 다음과 같다.

1) AC2B 알루미늄 합금을 기지재로 한 Al/Al_2O_3-15%, Al/Al_2O_3-12%/C-3%의 균일한 조직을 갖는 금속복합재료를 제조하였다.

2) 금속복합재료의 상온 연삭마모는 기지재와 비교할 때 모든 속도 구간에서 향상된 결과를 보였으며, 특히 탄소 혼합 금속복합재료의 내마모성은 고속에서 크게 향상되었고, 안정된 마모 특성을 보였다.

3) 금속복합재료의 고온 연삭마모는 기지재와 비교할 때 저속에서는 떨어졌지만 고속에서는 현저히 향상되었다. 이것은 고체 윤활 효과를 가지는 탄소를 포함한 혼합 금속복합재료는 고속에서의 내마모성이 가장 향상되었다.

4) 금속복합재료의 고온마모 기구는 저속에서는 연삭마모, 고속에서는 융착마모와 밀림현상을 보였으며, 마찰계수는 상온과 고온에서 상대 속도의 변화에도 큰 차이를 보이지 않았다.

참고문헌

1. Lim, T.W., Kim, Y.H., Lee, C.S. and Han, K.S., " Mechanical properties and fracture behaviors of a aluminum matrix composites", Proceeding of ICCM/VIII, 1991, pp. 21 C-1-14

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

3. Song, J.I., Bong, H.D., Han, K.S., "Mechanical and wear properties of $Al/Al_2O_3/C$ hybrid metal matrix composites," Scripta Metallurgica et Materialia, Vol. 33, No. 8, 1996, pp. 1307-1313

4. Subra, S., Andreas, M. and Alan, N., "Funda-

mentals of Metal Matrix Composites", Butterworth-Heinemann, 1993, pp. 3-22

5. Narayan, M., Surappa, M.K. and Pramila Bai, B.N., "Dry sliding of Al alloy 2024-Al2O3 particle metal matrix composites", Wear, vol. 181-183, 1995, pp. 563-570

6. 송정일, 봉하동, 한경섭, "Al/Al_2O_3/C혼합금속복합재료의 제조 및 마모거동," 한국복합재료학회지 Vol.7, No.4, 1996, pp. 19-31

7. Axen, N., Alahelisten, A. and Jacobson, S., "Abrasive wear of alumina fiber rienforced aluminum", Wear, vol. 173, 1994, pp. 95-104

8. Subra, S., Andreas, M. and Alan, N., "Fundamentals of Metal Matrix Composites", Butterworth-Heinemann, 1993, pp. 297-326

9. Song, J.I., Han, K.S., "Mechanical property and solid lubricant wear behavior of Al/Al_2O_3/C hybrid composites fabricated by squeeze casting method," J.of Composite Materials Vol. 13, No. 4 1999, pp. 316-344

10. Liu, C. and Bathias, C., "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

11. Prasad, S.V. and McConell, B.D., Tribology of aluminum metal-matrix composites : lubrication by graphite , Wear, vol. 149, 1991, pp. 241-253

12. Das, A. and Clegg, A.J., "Enhancement in the properties of a squeeze cast aluminum magnesium alloy containing alumina fiber", Cast Reinforced Metal Composites, ASM, 1988, pp.217-224

13. Zum Gahr, "Microstructure and wear of materials", Elsevier Science Publishers B. V, 1987, pp. 86-109

14. Chiao, Y.S., Fan, F.M., Lin, C.A. and Horng, J.L., "Studies of Al2O3(p)-6061 Al composites under dry sliding conditions using scanning electron microscopy, energy-dispersive spectrometry and X-ray diffractometry", Wear, vol. 161, 1993, pp. 155-160

15. Meng, H.C. and Ludema, K.C., "Wear models and predictive equations : their form and content", Wear, 181-183, 1995, pp.443-457

16. Burwell, J.T., "Survey of possible wear mechanism", Wear, vol. 1, 1957, pp. 119-141

17. Blomberg, A., Olsson, M. and Hogmark, S., Wear mechanisms and tribo mapping of Al2O3 and SiC in dry sliding , Wear, vol. 171, 1994, pp. 77-89

18. Axen, N. and Jcobson, J., "A model for the abrasive wear resistance of multiphase materials", Wear, 174, 1994, pp. 187-199

19. West, H.A. and Fahmy, A.A., "Analysis of the stresses induced on inclined fiber wear surfaces", in P.K.Rohatgi, P.J.Blau and C.S.Yust (eds.),Tribology of Composite Materials, ASM International, Materials Park, Ohio, 1990, pp.51-58

20. Erturk, T., Saka, N. and Szeto, N.K., "Experimental and finite element study of the friction and wear behavior of continuous fiber metal composites", ASM International Materials Park, Pennsylvania, 1993, pp. 47-63

21. Data Sheet from JIS-H5202

22. Data Sheet from ICI CO.