

論文

Al/Al₂O₃/C 혼합금속복합재료의 제조 및 마모거동

봉하동* · 송정일* · 양유창* · 한경섭*

Fabrication and Wear Behavior of Al/Al₂O₃/C Hybrid Metal Matrix Composites

H.D. Bong*, J.I. Song*, Y.C. Yang* and K.S. Han*

ABSTRACT

Al/Al₂O₃/C hybrid metal matrix composites(MMCs) were fabricated by squeeze infiltration method. From the microstructure of Al/Al₂O₃/C hybrid composites, uniform distribution of reinforcements and good bondings were found. Optimal aging time of Al/Al₂O₃/C hybrid composites with 2% carbon was 4 hours and that with 4~10% carbon was 3 hours. The hardness of Al/Al₂O₃/C hybrid composites increased with increasing the relative quantity of alumina with respect to 20% volume fraction of alumina and carbon chopped fiber.

Through the abrasive wear test and wear surface analysis, wear behavior and its mechanism of AC2B aluminum and Al/Al₂O₃/C hybrid composites were characterized under various sliding speeds. The wear mechanism of aluminum alloy was mainly abrasive wear at low speed and abrasive and slip wear at high speed. In contrast, that of Al/Al₂O₃/C hybrid composites was abrasive and slip wear at all speed range. The addition of carbon chopped fiber to Al/Al₂O₃/C composites gave rise to improvement of the wear resistance. Specially carbon chopped fiber played an important role in interfering sticking between the counter material and MMCs. Therefore, the wear resistance of Al/Al₂O₃/C hybrid composites was investigated superior to that of Al/Al₂O₃/C composites and aluminum alloy. The wear resistance of hybrid composites was invested the best when carbon was 6% at low speed but increased with increasing in relative sliding speed between the counter material and specimen. Consequently, Al/Al₂O₃/C hybrid composites were found suitable to high speed due to solid lubrication of carbon.

Key Words : Metal Matrix Composites(금속복합재료), Squeeze Infiltration Method(가압용침법), Wear Mechanism(마모기구), Adhesive Wear(응착마모), Abrasive Wear(연삭마모)

초 록

가압용침법을 이용한 Al/Al₂O₃/C 혼합금속복합재료를 제조하였으며, 미세조직 검사를 통하여 보강재의 균일한 분포와 양호한 결합을 확인하였다. Al/Al₂O₃/C 혼합금속복합재료의 경도를 조사하여 최적의 시효시간을 결정하였다. 최적 시효 시간은 2%의 탄소를 함유한 것이 4시간 그리고 4~10% 탄소는 3시간이었다. 경도는 알루미늄과 카본의 혼합이 전체 20%의 부피분율에 대해

* 정회원, 포항공과대학교 기계공학과

알루미나의 상대적인 양이 증가함에 따라 증가한다.

마모시험과 마모표면의 해석을 통해 다양한 속도변화에 따라 AC2B 알루미늄과 Al/Al₂O₃/C 혼합금속복합재료의 마모기구를 규명하였다. 모재인 알루미늄의 마모기구는 주로 저속에서는 연삭마모이고 고속에서는 응착마모이다. 반면에 Al/Al₂O₃/C 혼합금속복합재료의 마모기구는 전 속도 구간에서 연삭과 밀립마모였다. Al/Al₂O₃ 금속복합재료에 탄소를 첨가함으로써 마모저항을 향상시켜 주며, 특히 탄소섬유는 상대재와 금속복합재료 사이에서 응착을 방해하는 중요한 역할을 하는 것으로 밝혀졌다. 따라서 Al/Al₂O₃/C 혼합금속복합재료의 마모특성은 모재 보다는 우수한 것으로 나타났고, 저속에서 탄소가 6%인 경우가 제일 좋은 마모특성을 보였으나 상대속도가 증가함에 따라 이러한 특성은 더욱 향상되는 결과를 보였다. 본 연구결과 Al/Al₂O₃/C 혼합금속복합재료는 탄소의 고체윤활 특성으로 인해 고속에서 마모특성이 가장 좋은 결과를 얻었다.

1. 서 론

최근 자동차 및 항공우주분야에서 엔진의 고성능화 및 엔진자체의 향상을 도모하기 위해 금속복합재료를 이용한 경량화, 내열화 및 내마모성에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있다[1]. Al/Al₂O₃와 Al/SiC 등과 같은 금속복합재료는 모재에 비해 인장강도와 탄성계수의 향상은 물론 내마모성, 내열성 및 내피로성이 우수하여 자동차 및 항공우주 산업 등에서 엔진의 구동부품인 피스톤, 커넥팅로드, 실린더 그리고 브레이크라이너 등의 국소 보강재로 널리 각광받고 있다. 그러나 이들 재료는 경제적인 부담 요인과 지나친 내마모성의 향상으로 상대재를 손상시킬 수 있는 문제점 때문에 알루미늄과 실리콘카바이드에 비해 상대적으로 가격이 저렴하고 고체윤활특성을 가지는 탄소(carbon)를 사용한 혼합금속복합재료(Al/Al₂O₃/C)의 연구가 점차 대두되고 있다[2].

탄소는 금속에 비해 가볍고 열적인 안정성 및 열전도성이 우수하고, 낮은 열팽창 계수로 인하여 열충격에 대한 저항이 양호하며, 초고온에서 높은 강도 및 강성을 유지하며, 고체윤활성을 갖고 있어 상대재를 보호하는 기능과 내마모성을 향상시킬 수 있는 재료로 알려져 있다[3]. 그러나 탄소와 알루미늄(Al₂O₃) 단섬유를 보강재료로 혼합금속복합재료의 제조는 탄소가 예비성형체 제조시 공기중의 산소와 반응하여 적정 소결온도 유지에 어려움이 있고, 금속복합재료로 제조했을 때 기지재인 알루미늄과의 반응으로 기본물성을 저하시키는 문제점

등을 극복해야 하는 이유로 현재까지 연구는 미미하며 특히 이러한 탄소혼합금속복합재료의 마모특성을 규명한 연구는 현재까지 거의 전무한 실정이다.

본 연구에서는 가압주조법을 이용하여 AC2B 주조용 Al 합금과 알루미늄(Al₂O₃)와 탄소를 보강재료로한 전체부피분율이 20%인 Al/Al₂O₃/C 복합재료를 제조하여 이에 따른 제조조건과 열처리조건을 조사하고, 상온마모실험을 통하여 탄소의 혼합비를 2~10% 까지 2%씩 변화시킬 때 최적의 마모특성을 보이는 탄소량의 결정과 마모기구를 규명하고자 한다.

2. 금속복합재료의 제조 및 마모이론

알루미늄 복합재료의 다양한 제조방법 중 가압용침법은 대량생산이 용이하고 기존의 주조공정과 유사하여 생산기술이 널리 알려져 있으며, 가압하에서 용탕이 응고되기 때문에 양호한 조직의 재료를 얻을 수 있으며, 기지금속과 보강재간의 젖음성(wettability)이 향상되고 원하는 부분만 보강시킬 수 있다는 장점으로 인해 많은 연구가 행해지고 있다. 가압용침법에 의한 제조공정 연구에는 가압시 예비성형체의 수축과 회복, 보강재 파손, 용융된 기지금속의 침투과정과 응고과정 등에 관한 연구[4]와 가압에 의한 보강재의 배향성과 기계적 물성에 관한 연구[5], 보강재와 기지재의 계면반응에 관한 연구[6], 금속복합재료의 열처리과정에서 인공시효되는 속도에 대한 연구 등 많은 연구가 활발하게 진행되고 있다.

그러나 탄소와 같은 고체윤활제를 통한 금속복합재료의 제조 및 마모특성 연구는 현재까지는 미미한 실정이다. 특히 탄소는 알루미늄과의 젖음성이 좋지 않아 탄소와 액체인 Al 사이의 접촉각은 155° 이고, 고상상태에서는 Al_4C_3 를 형성한다. 이 Al_4C_3 화합물은 깨지기 쉬운 성질을 갖고 있고, 공기 속의 수분을 흡수해서 변화하는 성질을 갖고 있어서, 섬유와 Al 기지 계면에서 Al_4C_3 가 생성되면 강도를 저하시키는 것으로 보고되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 Ti, Ni, Si 등을 표면에 코팅하는 방법을 이용하여 계면에서의 반응을 억제하려는 연구[7]가 진행되고 있다. 그러나 실제로 이러한 표면코팅법에 의한 피막탄소의 이용은 물성은 좋아지나 제조원가의 증가요인으로 작용되고 있다.

Das[8]등은 금속복합재료의 제조시 최적의 용탕온도의 결정과 가압력에 관한 연구를 한 바 있으며, Fukunaga[9]등은 알루미늄을 예비성형체에 용침시키기 위한 최소가압력에 대한 연구를 하였다. 이들에 따르면 용탕온도는 기지재료의 용융점 보다 $30^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$ 정도 높은 온도에서 예열시켜 복합재료를 제조하는 것이 적당하며, 주조시 최소압력은 5~10MPa 정도이지만 가스의 존재를 고려하면 이로 인한 역압력에 의해 용탕의 최소가압력은 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 낮은 압력에서 발생하는 복합재료 내부의 가스 및 수축공의 형성과 같은 문제들을 제거하기 위해서는 충분히 높은 압력을 가해줄 필요가 있고, 150MPa 정도의 고압에서도 섬유의 손상없이 주조가 가능하나 경제적인 이유로 현재는 30MPa의 저압이 널리 적용되고 있다.

일반적으로 금속재료에서는 접촉하중과 마모속도가 증가함에 따라 마모면에서의 온도 상승에 의한 급격한 연화현상을 발생시켜 마모량이 증가하는 것으로 밝혀져 있으나[10], 단섬유 보강 금속복합재료의 경우는 마모시험 중에 발생하는 생성물간의 상호작용이 불확실한 상태에서 여러 외부조건이 복합적으로 작용하여 금속복합재료에서와 같이 마모특성평가가 일반화되어 있지 않다[11].

마모는 윤활조건에 따라 건식과 습식마모, 그리고 온도조건에 따라 상온, 저온 및 고온마모로 구분된다. 본 연구에서 수행한 상온 건식마모에서 발

생하는 마모기구로는 크게 응착마모와 연삭마모 현상으로 구분할 수 있다.

응착마모는 반데르 발스(Van der Waals) 힘과 매우 가까운 거리에서 작용하는 강한 표면력으로 상호 접촉부에서 응착부분의 전단력에 의해 생기는 것으로 재료의 상호작용이 중요한 요소로 작용하는 마모기구이다[12~13]. 특히 응착마모는 마모 부위에 산화막이 생기기 전에 마모가 일어나면서 접촉부분이 서로 응착되는 현상이며, 이러한 마모는 대부분 산화막이 생기지 않을 때 발생된다.

연삭마모는 단단한 면의 돌기나 경질입자의 절삭작용에 의해 일어나는 마모로서 미세전단에 의한 변형이 주요 원인이다. 연삭마모에서는 마모 부스러기나 상대마모재의 경도가 중요한 역할을 하는 것으로 금속복합재료에서는 기지금속내에 존재하는 입자의 정도에 따라 마모량이 영향을 받는다. 즉 경도가 높은 세라믹등의 보강재를 첨가한 금속복합재료는 보강재 자체에 의해 마모량이 감소되고, 탄소 등과 같이 알루미늄에 비해 경도가 낮은 보강재의 첨가로 마모시 생성된 부드러운 마모 부스러기가 마찰면에 윤활막을 형성하여 마모량이 감소된다고 한다[14~15].

특히 탄소를 혼합한 금속복합재료는 고온, 고속에서 탄소가 윤활제 역할을 하여 응착마모를 저지시키는 효과를 주어 마모량을 감소시킬 수 있으며, 탄소의 빠른 열전달효과에 의해 접촉면에 발생하는 열을 빠르게 방출시키기 때문에 재료의 내마모성 향상에 지대한 역할을 하는 것으로 알려져 있다[16, 18~20].

그리고 마모에 미치는 여러 인자들로는 접촉하중, 마모재질의 강도, 상대재의 강도, 열전달계수, 마모거리, 마모속도, 접촉면의 온도 및 분위기 온도, 윤활상태, 시험편과 상대재의 표면상태 등 여러가지가 있다[16~17].

3. 실험방법

3-1. 사용재료

본 연구에서 사용한 기지재료로서는 Al-Cu-Si계의

Table 1. Chemical composition of AC2B Al alloy[21]

Mat.	Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Ti	Pb	Sn	Al
AC2B	2.0~4.0	5.0~7.0	0.5max.	1.0max.	1.0max.	0.50max.	0.35max.	0.20max.	0.20max.	0.10max.	Rem.

주조용 알루미늄합금인 AC2B로 주조성이 좋고 불순물의 허용범위가 넓어 크랭크 케이스, 클러치 하우스, 밸브바디 등으로 사용되고 있는 재료이다. AC2B의 화학성분들 중에 Cu는 가공성을 좋게하는 성질을 가지고, Si의 양이 많아지면 열팽창계수를 감소시키는 효과를 가지고 있다.

AB2B에 대한 구체적인 화학적 성분과 기본 물성에 대한 것은 Table 1과 Table 2에 각각 나타내었다[21].

Table 2. Mechanical property and heat treatment condition of AC2B Al alloy[21]

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 10hrs	160°C for 5hrs

금속복합재료의 단섬유 보강재는 알루미늄(Al₂O₃)와 피치계탄소(C)를 사용하였으며, 알루미늄은 ICI사의 Saffil Al₂O₃ RF grade의 단섬유로서 δ-결정상이며, 5% 정도의 무기성형제인 silica를 포함하고 있다. 탄소섬유는 Kureha의 고탄성을 Pitch계 단섬유를 사용하였고 표면의 코팅은 하지 않은 것으로 이에 대한 제원은 Table 3과 같다[22~23].

Table 3. Specification of short alumina fiber and chopped carbon fiber[22,23]

Material	Density (g/cm ³)	Diameter (μm)	Length (μm)	Aspect ratio(1/d)	T.S. (GPa)	E (GPa)
Al ₂ O ₃ (Saffil)	3.3	3	150	50	2.0	310
Carbon (Kureha)	1.85	16	144	9	1.2	276

3-2. 금속복합재료의 제조

금속복합재료의 제조를 위해서는 먼저 강화재로 예비성형체를 제조한다. 예비성형체의 부피분율을 적절히 조절하기 위하여 평균길이가 150μm인 알

루미나 단섬유와 물을 혼합하여 직경이 10mm인 95% 알루미나 볼과 함께 Ballmill Jar에 넣은 후, 밀봉하여 120RPM의 조건에서 약 10시간 정도 회전시켜 평균길이 100μm정도로 절단하였다. 이렇게 절단된 단섬유는 완전한 수분제거를 위해 건조시켰다. 그리고 탄소단섬유는 Table 3과 같이 평균 길이와 직경이 각각 144μm과 16μm인 구매 상태를 특별한 절단없이 사용하였다.

이렇게 준비된 알루미늄과 탄소 단섬유는 부피분율에 맞는 적정량을 계량하고, 성형체인 물유리(SiO₂)와 함께 수용액 속에 넣고 회전수 조절이 가능하도록 자체 제작된 교반기에서 약 5분 정도 교반하였다. 진공압 추출장치가 부착된 금형은 잘 섞여진 보강섬유를 예비성형체 제조시 높이방향의 부피분율의 차이를 없애기 위해서 사용했다. 이 장치는 짧은 시간 내에 예비성형체를 제조하여 단섬유가 높이 방향으로 이동하는 것을 최소화함으로써 전체적인 강화재의 크기 분포를 일정하게 하기 위함이다. 이렇게 제조된 예비성형체는 직경이 110mm이고 두께가 20mm이고, 탄소혼합 예비성형체는 전체부피분율 20%에 대해서 탄소의 양을 알루미늄에 대해 상대적으로 0~10%까지 2%씩 증가시키면서 제조하였다.

예비성형체는 제조 후 110°C의 온도에서 수분을 완전히 제거시킨 후 소결하게 되는데 알루미늄(Al₂O₃)만을 보강재로 사용한 경우는 1000°C에서 2시간 소결 후 열충격에 의한 손상을 피하기 위해 노냉시켰다. 반면에 탄소를 혼합한 예비성형체는 450°C 이상의 온도에서 탄소의 산화현상 때문에 450°C의 온도와 질소분위기 하에서 소결시켰다[24].

금속복합재료의 제조는 가압용침법을 이용하였으며 그 제조과정을 상술하면 다음과 같다. 먼저 기지재로 사용된 AC2B 주조용 알루미늄합금은 산화방지를 위한 질소(N₂) 분위기에서 전기로에서 AC2B를 780°C에서 용해시켰다. 이와 동시에 실린 더형으로 상부와 하부로 분리된 주조용 금형 및

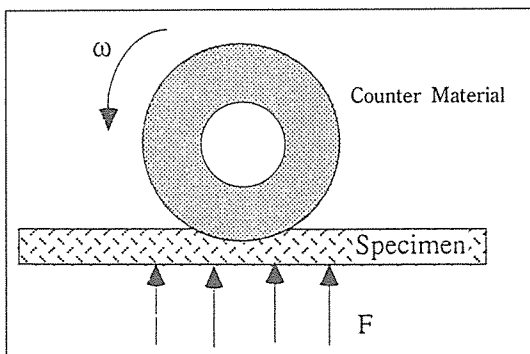
편치와 예비성형체를 각각 450°C에서 예열시킨 후 피스톤 램의 이송속도가 2cm/sec인 50ton 용량의 가압 프레스에 금형과 예비성형체를 위치시킨 후 용탕을 조심스럽게 투입하고 가압력을 25MPa로 하여 60초 동안 유지시켰다.

상기와 같은 방법으로 제조된 잉곳(ingot)은 500°C에서 10시간의 용체화 처리 후 수냉하였고, 시효처리 시간은 160°C에서 최고 경도가 나타나는 시간을 기준으로 T6 열처리를 수행하였다.

제조상태의 확인을 위해서는 주사전자현미경(SEM)으로 예비성형체 내의 탄소의 배열상태와 보강재간의 결합상태를 관찰하였으며, 금속복합재료는 광학현미경을 이용하여 보강재의 분포상태를 확인하였다. 이때 시험편의 채취는 두께가 20mm인 예비성형체의 경우 표면으로 부터 5mm에 위치한 것을, 그리고 금속복합재료는 복합화된 잉곳의 중앙에서 가압방향의 수평과 수직면을 각각 선택하였다.

3-3. 마모시험

마모시험은 Fig.1의 개략도와 같은 spindle type (Riken-Ogoshi Co.)의 마모시험기를 사용하였으며, 이 시험기에서 마모속도는 상대재의 회전속도에 의해 결정되고 마모거리는 상대재가 회전한 거리를 나타낸다. 그리고 하중은 spring force를 이용해서



ω : Rotating speed of counter material
F : Contact force

Fig. 1. Schematic diagram of spindle type wear tester

이동거리에 비례하는 값으로 나타난다.

시험편의 크기는 50×30×5(mm³)이고, 상대마모재는 유냉처리된 SCM4(550VHN)를 사용하였다. 시험전 시험편과 상대재의 표면은 sand paper #800로 각각 균일하게 연마하여 표면조도를 일정하게 하였다. 그리고 마모량은 10⁻⁵g까지 측정이 가능한 전자 저울을 사용하여 마모전과 마모후의 질량을 비교하여 측정하였다.

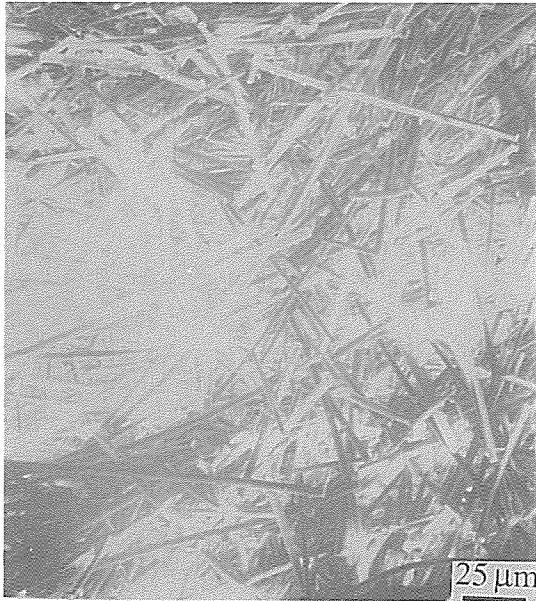
마모실험에 영향을 주는 변수들로는 최종마모하중, 마모거리, 상대마모속도, 분위기 온도상태 등과 같은 것들이 있는데 본 연구에서는 상온의 전식 마모시험을 수행하였으며 마모실험 조건은 최종마모하중을 12.6kg로, 마모거리는 시험기의 사용한다 거리인 400m로 고정시킨 상태에서 상대마모속도를 0.51, 1.14, 1.97, 3.62(m/s)로 각각 변화시켜 가면서 마모량의 변화를 관찰하였다.

4. 실험결과 및 고찰

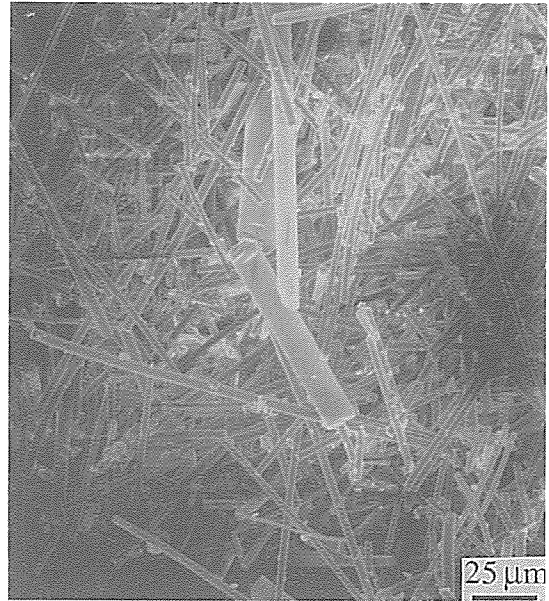
4-1. 탄소혼합 금속복합재료의 제조

Fig.2는 주사전자현미경(SEM)으로 예비성형체의 제조상태를 관찰한 것으로 알루미늄과 탄소의 분포상태와 결합상태를 나타내고 있다. Fig.2(a)는 부피분율이 20%인 알루미늄만을 보강제로한 것이고, Fig.2(b)는 전체 부피분율을 고정시킨 상태에서 탄소를 4% 혼합한 것을, Fig.2(c)는 본 연구에서 가장 좋은 마모특성을 보이는 탄소함량 8%가 혼합된 것이고, Fig.2(d)는 (c)를 2배 확대한 것이다.

그림에서와 같이 탄소의 분포상태는 전체적으로 균일하며 알루미늄과의 결합 상태도 양호한 것으로 나타났다. 또한 탄소의 산화 유무는 소결 후 예비성형체의 무게 변화로 관찰하였다. 즉, 300°C 부터 500°C까지 질소분위기와 대기분위기의 전기로에서 소결시킨 후 계량한 결과 질소분위기 전기로를 사용한 경우 500°C까지 무게감량은 없었으나, 대기분위에서 소결시킨 경우는 400°C 부터 감소를 보이다 500°C에서는 탄소의 양이 2/3이상 줄어든 것을 확인 할 수 있었다. 이러한 실험 결과와 Kruger등[25]의 연구를 참조하여 본 연구에서는 사용된



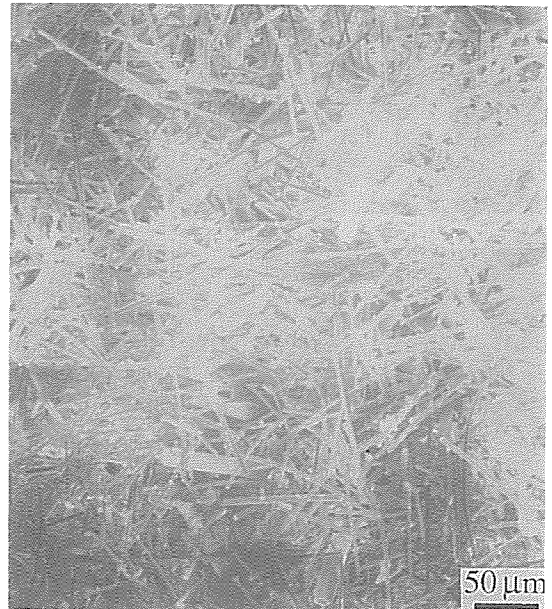
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 2. SEM photographs of preforms. (a) Al₂O₃-20 vol.% (b) Al₂O₃-16 vol.%/C-4 vol.%
(c) (d) Al₂O₃-12 vol.%/C-8 vol.%

탄소혼합 예비성형체는 450℃의 질소분위기의 전기로에서 소결시킨 결과 산화가 없이 양호한 제조상태를 보였다.

Fig.3은 금속복합재료의 제조 상태를 확인하기 위해서 알루미늄만을 사용한 것과 상대적인 탄소의 혼합이 2%에서 10%까지 좌측에는 가압방향에 수

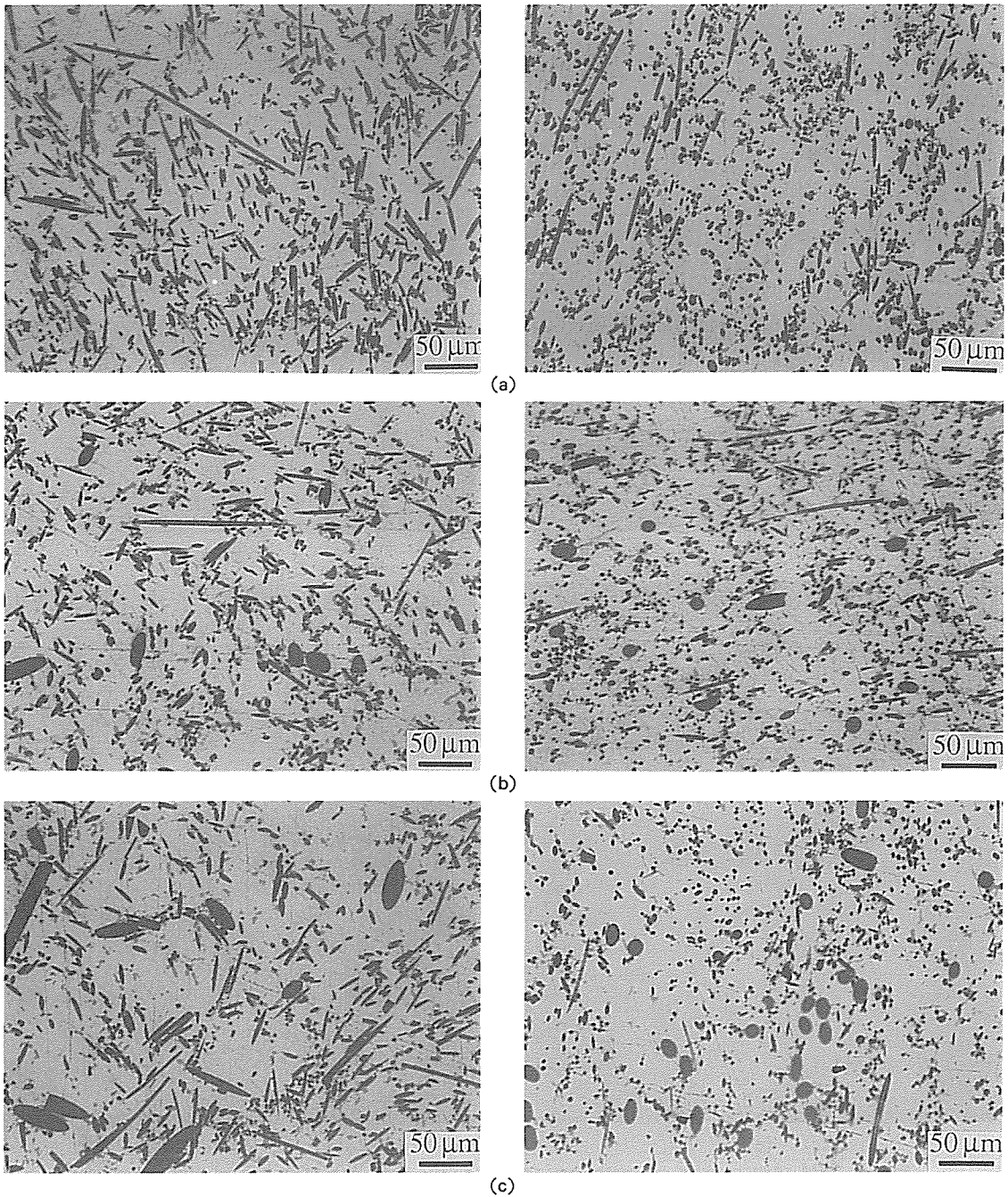
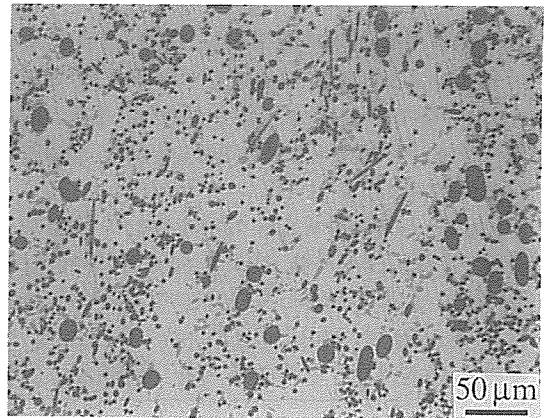
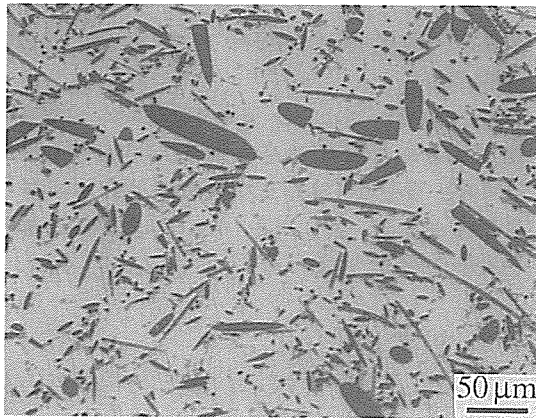
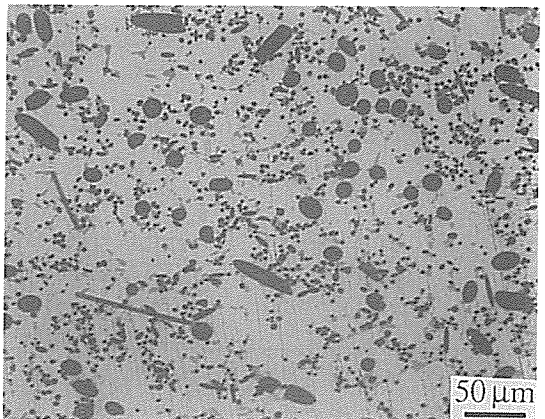
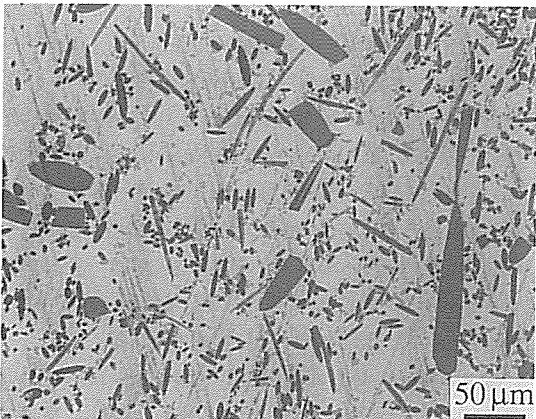


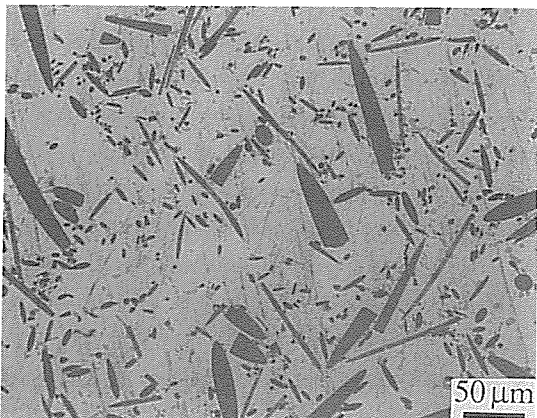
Fig.3. Microstructures of Al/Al₂O₃/C composites fabricated by the squeeze infiltration method
 (a) Al/Al₂O₃-20 vol. % (b) Al/Al₂O₃-18 vol. %/C-2 vol. % (c) Al/Al₂O₃-16 vol. %/C-4 vol. % (d) Al/Al₂O₃-14 vol. %/C-6 vol. % (e) Al/Al₂O₃-12 vol. %/C-8 vol. % (f) Al/Al₂O₃-10 vol. %/C-10 vol. % Left ; perpendicular to pressure direction, Right ; parallel to pressure direction



(d)



(e)



(f)

Fig. 3. (Continued)

직인 방향과 우측에는 수평인 방향에 대해서 각각 광학현미경으로 관찰한 것이다. 그림에서와 같이

보강제로 사용한 알루미늄과 탄소의 배열 상태는 전체적으로 균일하게 분포된 것으로 나타났고, 부

피분율에 따른 보강재의 분포 상황도 마찬가지로 양호하게 제조된 결과를 보이고 있다. 단섬유 보강 알루미늄 복합재료는 보강재와 기지금속의 열팽창 계수의 차이로 인해 보강섬유 주위에 전위밀도가 증가하여 기지금속의 석출경화 속도가 빨라지는 것으로 보고 되고 있다.

Fig. 4는 금속복합재료의 열처리 시간에 대한 경도 값의 변화를 도식화한 것으로 탄소의 양이 점차 증가하면서 최고경도에 도달하는 시효시간이 짧아지는 것을 볼 수 있다. 탄소의 양이 4~10%일 경우에는 시효시간이 3시간이 가장 적당하고, 알루

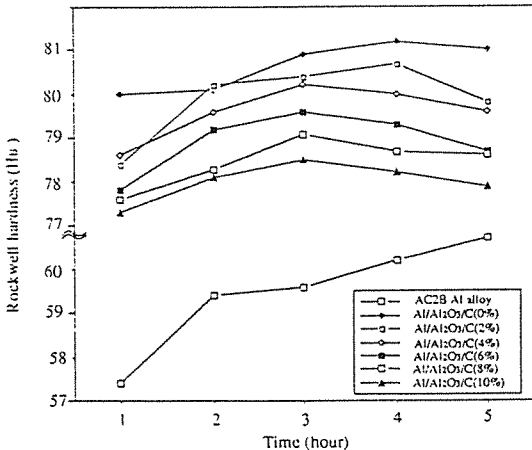


Fig. 4. Effect of the volume fraction of carbon fibers on aging conditions in $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{C}$ composites (Aging temperature : 160°C).

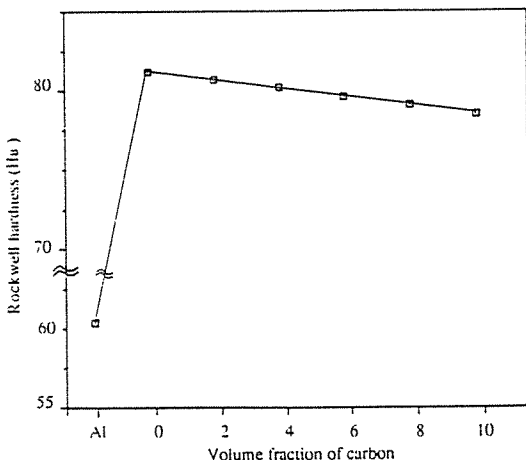


Fig. 5. Effect of the volume fraction of carbon on hardness in $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{C}$ hybrid composites.

미나만을 보강재로한 것과 탄소의 양이 2%일 경우에는 시효시간이 4시간이 가장 적당한 것으로 나타났다.

Fig. 5에서는 탄소혼합 금속복합재료의 제조상태를 경도값을 통해서 관찰한 것으로 전체적인 경도 값에서는 알루미늄의 경도가 탄소의 경도 보다 높기 때문에 탄소의 양이 적은 재료가 경도값이 높은 분포를 보이고 있다.

4-2. 마모실험

Fig. 6은 상대마모속도의 변화에 따른 마모량의 변화를 종합적으로 도시한 것이다. 그림에서와 같이 기지재인 AC2B의 마모량은 0.51m/s 의 저속에서 중간 속도인 1.14m/s 와 1.97m/s 까지는 점차 증가하다가 1.97m/s 이상이 되면서 마모량이 현저한 증가 추세를 보인다. 이러한 속도에 따른 마모량의 변화는 상대마모속도가 저속일 때 골패임현상(ploughing)에 의한 재료의 연삭마모와 상대마모속도가 증가함에 따른 상대재와 AC2B의 응착작용 및 마모면의 온도상승에 의한 재료의 밀립(slip) 현상으로 마모량이 증가하기 때문이다.

그러나 금속복합재료의 경우 중속에서는 저속과 고속에서 보다 마모량이 적은 것을 보이나 전체적으로 마모량의 변화가 크지 않은 것으로 나타난다. 이것은 금속복합재료의 경우는 응착마모가 거의 일어나지 않는다는 것을 나타낸다. 따라서 금속복합재료에서는 보강재가 응착이 일어나는 것을 억제하는 요인으로 작용한다고 할 수 있다. 금속복합재료의 속도에 따른 마모량을 살펴보면 상대마모속도가 저속인 0.51m/s 에서는 연삭작용에 의해서 마모된 경질의 보강재가 상대재와 금속복합재료의 경계에서 연삭작용의 매개 역할을 하기 때문에 마모량이 기지재에 비해서 많은 것으로 나타났다. 또한 금속복합재료의 경우 마모량이 1.97m/s 부근까지 감소를 보이는데, 이것은 시편과 상대재간의 상대운동에 의한 접촉면의 온도 상승이 기지재의 연화를 촉진시키고, 이러한 연화 현상에 의해 경질의 보강재 마모입자가 마모시 기지재에 박히는 현상이 발생되어 저속에서와는 달리 마모입자가

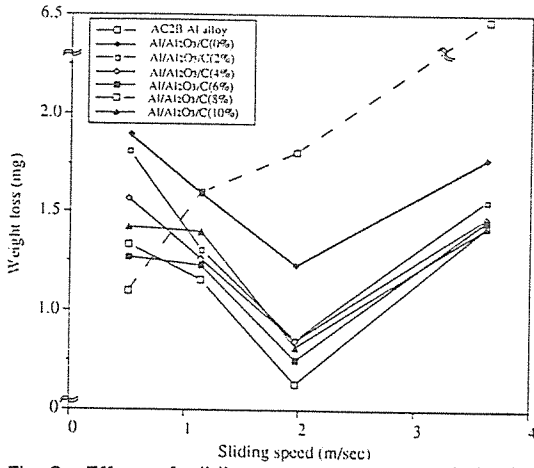
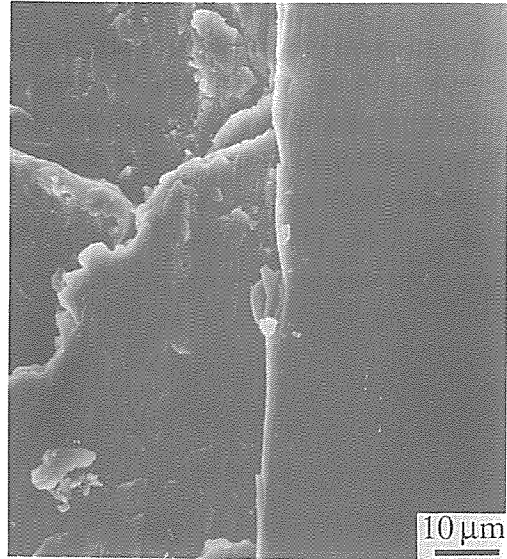


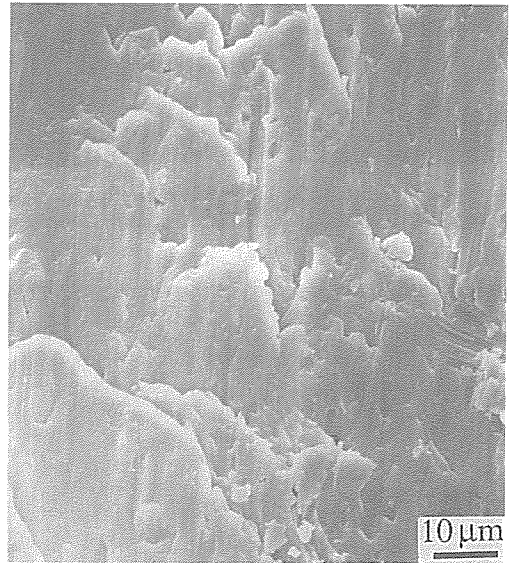
Fig. 6. Effect of sliding speeds on wear behavior of Al alloy and Al/Al₂O₃/C hybrid composites.

마모가 일어나는 것을 저지시켜 주는 역할을 한다. 그러나 마모속도가 1.97m/s 이상이 되면서 기지재에서 볼 수 있는 응착현상은 관찰 할 수 없으나 기지재의 연화 현상이 심해져 AC2B의 고속마모에서와 같은 밀림현상이 발생하게 된다. 이것은 마모량을 다시 증가시키는 작용을 한다.

Fig. 7, Fig. 8은 이러한 현상을 마모면의 관찰을 통해서 본 것이다. Fig. 7은 기지재인 AC2B의 마모면을 관찰한 것이고, Fig. 8은 금속복합재료의

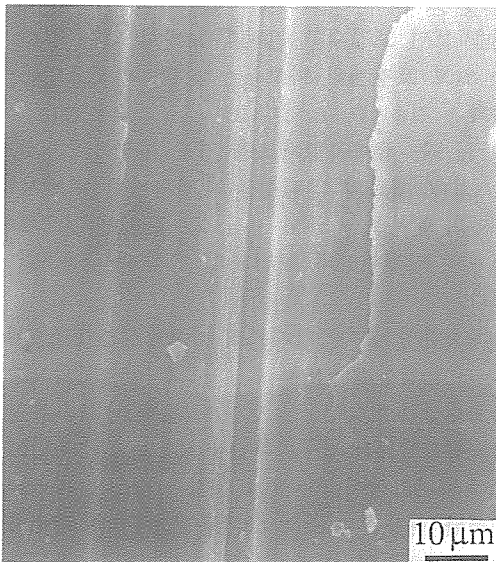


(b)



(c)

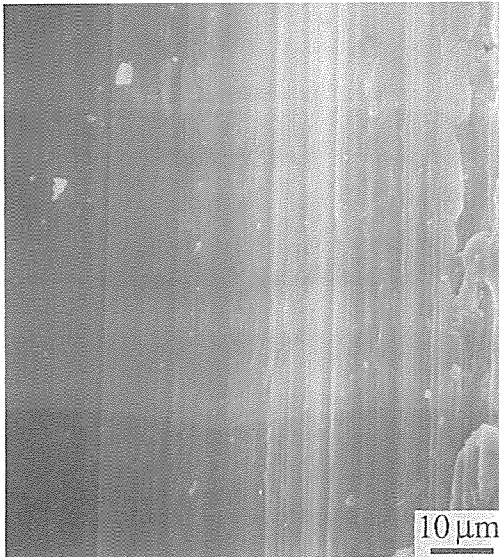
Fig. 7. Wear surfaces of Al alloy(AC2B)
sliding speed ; (a) 0.51m/s (b) 1.97m/s
(c) 3.62m/s
Sliding distance ; 400m, final load ; 12.6kg_f,
counter material ; SCM4



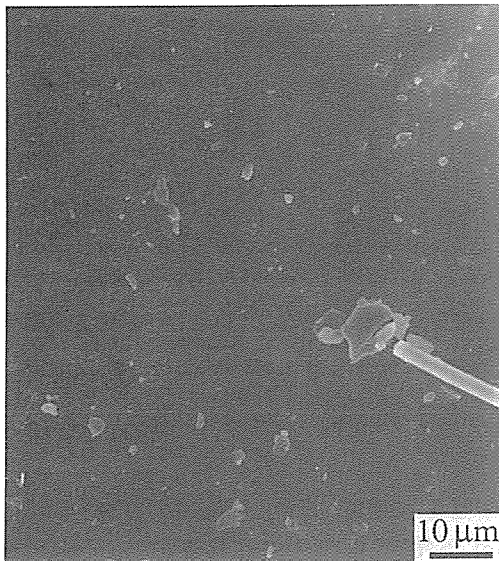
(a)

마모면을 관찰한 것이다. Fig. 7을 보면 0.51m/s에서 연삭마모의 흔적인 골패임현상(ploughing)을 볼 수 있다. 속도가 증가하면서 응착마모의 흔적이

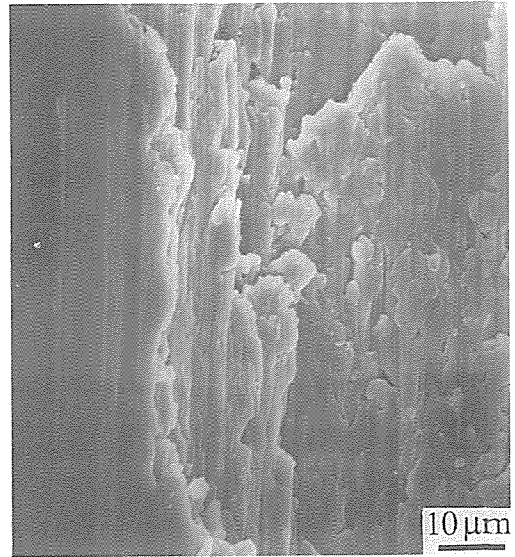
나타나고 속도가 3.62m/s에서는 응착현상과 재료의 밀립현상을 볼 수 있다. 응착마모는 재료가 뜯기는 현상으로 알 수 있고, 밀립현상은 마모 상대재의 회전방향으로 물결 무늬가 나타남으로 알 수 있다. Fig.8의 금속복합재료 마모면을 보면 속도가 0.51m/s일때는 Fig.7 (a)보다 많은 골패임현상을 볼 수 있다. 이것은 금속복합재료가 저속에서 기지재



(a)



(b)



(c)

Fig.8. Wear surfaces of Al/Al₂O₃-12 vol. %/C-8 vol. %

sliding speed ; (a) 0.51m/s (b) 1.97m/s

(c) 3.62m/s

Sliding distance ; 400m, final load ; 12.6kg,
counter material ; SCM4

보다 더 많은 연삭마모를 한다는 것을 보여준다. 그리고 속도가 3.62m/s일때는 재료의 밀립현상을 볼 수 있다. 또한 1.97m/s에서 금속복합재료의 표면을 보면 보강재가 기지재에 박혀 있는 것을 볼 수 있고 보강재의 마모부스러기가 마모표면에 존재하는 것을 볼 수 있다.

Fig.9는 금속복합재료의 경우 마모속도가 3.62 m/s일때 재료의 밀립현상을 관찰하기 위해서 마모면의 끝부분을 SEM 사진으로 관찰한 것으로 기지재의 밀립현상과 보강재의 뽑힘 현상을 볼 수 있다.

탄소혼합 금속복합재료의 마모특성은 Fig.6에서와 같이 알루미늄만을 보강제로한 금속복합재료의 마모현상과 비슷함을 보인다. 그런데 탄소를 혼합한 금속복합재료는 알루미늄만을 함유한 금속복합재료보다 내마모성이 20~30% 향상된 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 탄소의 고체윤활 현상에 기인하는 것으로 탄소의 마모입자가 경계면에서 윤활층을 형성해 상대재와 시편간의 응착에 의한 마모를 저

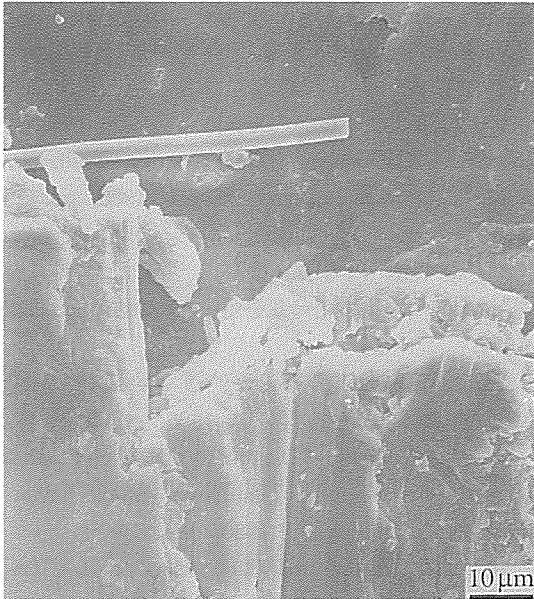


Fig. 9. Wear surfaces of Al/Al₂O₃-12 vol. %/C-8 vol. % observation of fiber pulled out or slipped
sliding speed ; 3.62m/s, sliding distance ; 400m
final load ; 12.6kg, counter material ; SCM4

지시켜주는 역할을 하기 때문이다. 저속인 0.51 m/s에서 금속복합재료의 마모량이 탄소의 양에 따라 전체적으로 넓게 분포함을 알 수 있고, 속도가 점차 증가하면서 마모량이 탄소를 혼합한 것과 혼합하지 않은 알루미늄 금속복합재료로 크게 두 부분으로 나누어져 존재하는 것을 보여준다. 이것은 탄소의 역할이 저속의 연삭마모 보다 속도가 증가하면서 발생하는 응착마모에 더 큰 효과를 나타냄을 보여준다. 재료의 응착현상은 마모된 면이 산화되기 전에 다시 그 자리에 마모가 발생되어 상대재와 기지재가 붙어 버리는 현상에 의해서 지배적으로 발생된다. 그러나 탄소혼합 금속복합재료의 경우 마모면에 탄소의 마모입자가 막을 형성해서 재료 간의 응착이 일어나는 것을 막아주기 때문에 내마모성이 알루미늄만을 사용한 금속복합재료에 비해서 향상됨을 보여준다.

또한 탄소량의 증가에 따라 내마모성이 향상되어 탄소의 양이 8% 일때 가장 좋은 내마모성을 나타낸다. 그러나 탄소의 양이 10% 일때에는 내마모성이

8%에 비해서 좋지 않은 것으로 나타난다. 이것은 경질입자에 의한 마모특성과 고체윤활 효과에 의한 마모특성간에 적정선이 있음을 말해준다. 즉 강도가 낮은 탄소가 강도가 높은 알루미늄과 비교해서 상대적으로 높은 비율을 차지하면 재료자체의 강도가 떨어져서 마모에 견딜 수 있는 능력이 저하된다. 그러므로 고체윤활을 할지라도 재료자체의 적당한 강도를 유지한 상태에서 내마모성을 증가시키는 방안을 모색해야 한다.

이상의 마모실험 결과로부터 전체 20% 혼합금속복합재료의 마모특성을 보면 중속과 고속에서는 12%의 알루미늄 단섬유와 8%의 탄소가 혼합된 복합재료에서 가장 좋은 마모특성을 나타낸다. 그러나 저속에서는 탄소의 양이 더 적은 즉, 6%의 탄소영역에서 더 좋은 마모 특성을 나타낸다. 이로부터 온도발생이 상대적으로 낮은 영역에서는 탄소의 양이 적은 것이 유리하나 그 마모량의 차이가 8%와 비교해서 거의 차이가 없고, 온도발생에 의한 마모의 발생을 억제하고 온도의 방출을 원활하게 한다는 의미에서 탄소의 양이 8%일때 더 안정적으로 사용이 가능하리라 여겨진다.

5. 결 론

본 연구에서는 알루미늄과 탄소를 보강재로 혼합 금속복합재료를 제조하였으며, 최적의 탄소함유량을 찾기 위한 마모실험의 수행결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 피치계탄소를 혼합한 금속복합재료는 양호한 미세조직을 갖고, 탄소의 양이 증가할수록 최고 정도에 도달하는 시효처리시간이 짧아지는 것으로 나타났다. 즉 전체 20%의 Al/Al₂O₃/C 복합재료에서 탄소의 양이 2% 일때는 4시간, 탄소의 양이 4%에서 10%까지는 3시간의 시효처리시간이 소요되는 것으로 나타났다.

2) Al/Al₂O₃/C 복합재료는 기지재인 알루미늄금 보다 내마모성이 더 좋은 결과를 보였고, 알루미늄만을 보강재로 사용했을 때보다 20~30%의 내마모성 향상을 나타냈다.

3) Al/Al₂O₃/C 복합재료의 내마모성은 상대마모

속도가 1m/sec 이상에서는 탄소의 부피분율이 8% 일때 가장 좋은 결과를 보였으며, 1m/sec 이하의 마모속도에서는 탄소량이 8% 보다 낮은 6%에서 더 좋은 내마모성을 나타낸다.

감사의 글

본 논문은 1993년도 G7-Project(경량 금속복합 재료 개발)의 연구비 지원으로 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. S.H. Research Center, "World economy", Japan Economic Press, 1994, pp.135-168.
2. Engineering Materials Handbook, COMPOSITES, ASM International, 1987, pp.899-910.
3. S. Das and S.V. Prasad, "Microstructure and Wear of Cast(Al-Si Alloy)-Graphite Composites", Wear, 133, 1989, pp.173-187.
4. 한경섭, "특수용도 복합재료", 복합재료의 성형 및 설계-복합재료 강좌교재, 한국복합재료 학회, 1990, pp.8-16.
5. 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.
6. S. Bengtson, C.H. Li and R.Warren, "Microstructural Studies of δ -Alumina Fiber Reinforced Aluminum and Al Alloys", Proceeding ICCM-VIII, Vol.3, 1989, pp.607-612.
7. W.B. Aiston, R.W. Lauver; SAMPE, 30, 1985, pp.1622.
8. 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.
9. H.Fukunaga, K.Goda, Y.Kurita, "Strength and Reliability of Silicon Carbide Reinforced Aluminum Composites by Squeeze Casting including a Vacuum System", ICCM VI, Vol.2, 1987, pp. 362-371.
10. M.B.Peterson, "Design Consideration for Effective Wear Control", Wear Control Handbook, ASME Centennial Research Project, 1980, pp.413-434.
11. 문한규, 이해수, 김종집, 한준희, "마모시험", 재료시험법, 한국표준연구소, 1987, pp.228-314.
12. J.T.Bruwell, "Survey of Possible Wear Mechanisms", Wear, Vol.1, 1985, pp.119-141.
13. D. Godfrey, "Diagnosis of Wear Mechanisms", Wear Control Handbook, ASME Centennial Research Project, 1980, pp.283-311.
14. S.V. Prasad and B.D. McConnell, "Tribology of Aluminum Metal-Matrix Composites: Lubrication by Graphite", Wear, 1991, pp.241-253.
15. E.R. Braithwaite, "Solid Lubricants and Surfaces", Pergamon, New York, 1964.
16. J.F. Archard, "Wear Theory and Mechanisms", Wear Control Handbook, ASME Centennial Research Project, 1980, pp.35-79.
17. A.D. Sarkar, "Wear of Metal", Materials Science and Technology, Pergamon International Library, Vol.18, 1976, pp.86-87.
18. E. Michal, D.M. Goddard, and J.C. Romine, "Metals, Carbon/Graphite, and Ceramic Matrix Composites", Engineering Materials Handbook, Composites, ASM, International, Vol.1, T.J. Reinhart et al. eds., 1987, pp.849-877.
19. S.Towata, H. Ikuno, and S. Yamada, "Mechanical properties of carbon Fiber-Reinforced Aluminum Alloys with Whisker and Particulates of Silicon-Carbide", Trans. of the Japan Institute of Metals, Vol.29, No.4, 1988, pp. 314-321.
20. C. Subramanian and A. Kishore, "Influence of Graphite Type, Modification and Hot Wo-

cking on Wear of Aluminum Based Particulate Composites", J. of Reinforced Plastics and Composites, Vol.3, Oct. 1984, pp.274-293.

21. Data Sheet from JIS-H5202

22. Data Sheet from ICI Co.

23. Data Sheet from Kureha Co.

24. Jean-Baptiste Donnet, Roop Chand Ban-

sal, Carbon Fibers, International Fiber Science and Technology, Vol.3.

25. G. Kruger and K.U.Kainer, "Characterization of ceramic fibre preforms" Preceedings of the Ninth International Conference on composite Materials(ICCM/9) Vol.2, July, 1993, pp.15-22.

