

〈論 文〉

## Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>복합재료의 기계적 성질 및 마멸특성

임흥준\* · 김영한\*\* · 한경섭\*\*\*

(1993년 3월 27일 접수)

### Mechanical Properties and Wear Behaviour of Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composite Materials

J. J. Lim, Y. H. Kim and K. S. Han

**Key Words :** Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hybrid composites(Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 혼합복합재료), squeeze infiltration method(가압용침법), Hardness(경도), ultimate tensile strength(인장강도), wear behaviour(마멸거동)

#### Abstract

Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hybrid composites are fabricated by squeeze infiltration method. From the microstructure of Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hybrid composites fabricated by squeeze infiltration method, uniform distribution of reinforcements and good bondings are found. Hardness value of Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hybrid composites increases linearly with the volume fraction of reinforcement because SiC whisker and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fiber have an outstanding hardness. Optimal aging conditions are obtained by examining the hardness of Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hybrid composites with different aging time. Tensile properties such as Young's modulus and ultimate tensile strength are improved up to 30% and 40% by the addition of reinforcements, respectively. Failure mode of Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hybrid composites is ductile on microstructural level. Through the abrasive wear test and wear surface analysis, wear behaviour and mechanism of 6061 aluminum and Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hybrid composites are characterized under various testing conditions. The addition of SiC whisker to Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites gives rise to improvement of the wear resistance. The wear resistance of Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hybrid composites is superior to that of Al/SiC composites. The wear mechanism of aluminum alloy is mainly abrasive wear at low speed range and adhesive and melt wear at high speed range. In contrast, that of Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hybrid composites is abrasive wear at all speed range, but severe wear when counter material is stainless steel. As the testing temperature increases, wear loss of aluminum alloy decreases because the matrix is getting more ductile, but that of Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hybrid composites is hardly varied. Oil lubricant is more effective to reduce the wear loss of aluminum alloy and Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hybrid composites at high speed range.

#### 1. 서 론

단섬유 보강 금속복합재료는 비강성, 비강도 등과 같은 기계적 성질이 우수하고, 기존의 금속재료 제조기술을 제조에 응용할 수 있다는 장점때문에, 자동차 산업의 기계부품과 항공기산업 등의 대체재료로서 관심의 대상이 되고 있다. 특히, 알루미늄 금속복합재료는 양호한 내식성을 갖고 있으며, 질

\* 포항공과대학 기계공학과 대학원

\*\* 정회원, 대우자동차 의장설계실

\*\*\* 정회원, 포항공과대학 기계공학과

량감소에 효과적이어서 그 응용범위가 확대되고 있다.<sup>(1-2)</sup> 그런데 재료의 실제 응용에 있어서, 종종 낮은 내마모성으로 인하여 그 응용 영역에 제한을 받는 경우가 있다. 즉, 피스톤과 같은 왕복기구의 마찰면은 기계적, 화학적 작용으로 인하여 마모가 발생하게 되며, 이는, 기계부품의 수명 단축을 유발하는 중요한 원인의 하나가 된다.

금속복합재료의 제조방법에는 여러가지가 있으나 그 방법중 가압용침법은 유기 및 무기 성형재(binder)를 사용하여 보강재를 예비성형체(preform)로 만들고, 용융된 금속을 압력 상태에서 침투시킨 다음 응고함으로써 제조하는 방법이다. 현재까지 가압용침법의 공정조건에 대해서는 많은 연구가 수행되었다. 가압시 예비성형체의 수축과 회복, 보강재 파손, 용융된 기지금속의 침투과정과 응고과정 등에 관한 연구<sup>(3)</sup>와 가압에 의한 보강재의 배향성과 기계적 물성에 관한 연구,<sup>(4)</sup> 보강재와 기지의 계면 반응에 관한 연구<sup>(5)</sup> 등이 있었고, 가압용침법의 공정기술을 이용하여 금속복합재료로 국소보강된 디젤엔진의 피스톤을 제작하는 연구<sup>(6)</sup> 등이 있었다.

지금까지 금속복합재료의 기계적 성질에 관한 많은 연구<sup>(7-11)</sup>가 수행되어져 왔다. 이들의 연구결과에 의하면 영률과 인장강도는 보강재의 첨가에 따라 향상되나, 연성과 파괴인성은 현저히 감소하는 경향을 보여주고 있다.

그러나 복합재료의 제조방법과 기계적 성질 규명에 관한 논문은 많이 발표되었으나, 마멸에 관한 연구는 부족한 실정이다. 지금까지의 연구에서, 알루미늄합금에 경도가 높은 세라믹보강재를 첨가하거나,<sup>(4, 12-15)</sup> 탄소(graphite), 운모(mica) 등의 비교적 경도가 낮은 보강재를 첨가함<sup>(16-18)</sup>으로써 내마멸성이 향상됨이 발표되었다. 전자는 보강재 자체의 높은 내마멸성에 의한 효과이고, 후자는 마멸에 의해 생성된 부드러운 입자가 마찰면에 존재하여 윤활 작용을 하기 때문으로 분석된다. Hosking 등<sup>(19)</sup>과 Rana 등<sup>(20)</sup>은 보강재의 크기가 마멸에 미치는 영향에 관한 연구를 통하여 내마멸성이 보강재의 평균 크기와 양에 비례하며, 주된 마멸기구는 연삭마멸라는 결론을 내렸다. 지금까지, 마멸거동에 있어서 보강재의 경도나 형태의 영향은 확실히 규명되지 않고 있다. Bhansali 등<sup>(21)</sup>은 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 복합재료의 내마멸성이 Al/SiC복합재료보다 뛰어난데, 이는 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>복합재료는 양호한 계면을 가지나 Al/SiC복합재료는 SiC입자(particle)와 알

루미늄합금 기지사이에는 취약한 계면(brittle interface)이 존재하기 때문으로 발표하였다. 반면에, SiC입자의 큰 경도때문에 Al/SiC복합재료가 조금 더 나은 내마멸성을 가진다는 연구결과도 있다.<sup>(22)</sup> Long 등<sup>(23)</sup>은 Al/SiC복합재료의 마멸거동에 있어서, SiC휘스커(whisker)의 역할을 높은 경도와 휘스커 자체의 큰 내마멸성으로 인한 복합재료의 내마멸성 향상효과와 휘스커가 복합재료 내에서 균일한 분포를 이루게되어 Si입자의 미끄러짐(slip)을 막아줌으로써 마멸에 대한 저항성을 높여주게 되는 것으로 분석했다. 그리고 뒤이은 Al/SiC, Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(hybrid)의 세가지 복합재료의 마멸거동에 관한 연구에서 그들은 SiC휘스커가 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>단섬유보다 내마모성을 향상시키는 데 효과적이며, 혼합복합재료(hybrid composites)의 내마멸성이 Al/SiC보다 뛰어나다는 연구결과를 발표했다.<sup>(24)</sup>

본 연구에서는 가압용침법으로 제조한 Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>복합재료의 기계적 성질을 조사하고, 주사전자현미경을 통한 마멸면의 관찰을 통하여 알루미늄복합재료의 마멸양상과 기구에 대하여 규명하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 시편준비 및 제조

본 연구에서 Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>복합재료를 제조하기 위해 사용한 재료로는 기지재료로 6061알루미늄을 사용하였고, 보강재로는 SiC휘스커와 "Tokawhis-ker"(TEXTRON Specialty Material Co.)와 "Saf-fil"(RF grade, ICI Co.)알루미나 단섬유를 사용하였다. 보강재의 제원은 아래 Table 1과 같다.

가압용침법에 의한 금속복합재료의 제조는 예비성형체를 미리 제조하여야 하는데 예비성형체 제조과정은 다음과 같다.

중류수와 silica binder를 95 : 5의 질량비율로 혼합한 후, 보강재끼리 뭉침을 억제하기 위하여 회전하는 교반기에 넣은후 일정 속도로 5분동안 교반한 다음, 진공압을 30~40 mmHg으로 일정하게 유지하고 수분이 제거될때까지 펄프를 작동시켜 직경 9 cm, 높이 2 cm의 예비성형체를 제조하였다. 이후 400°C의 전기로에서 1시간동안 건조시켰다.

금속복합재료의 제조는 가압용침법으로 행하였으며, 상세한 제조공정은 다음과 같다. 제조방법은

알루미늄 용탕과 예비성형체를 질소(N<sub>2</sub>)분위기의 전기로에서 770°C로 예열시켰으며, 이때 알루미늄이 금형에 소착하는 현상을 방지하기 위하여 이형체를 금형에 coating하였다. 그후 450°C로 가열한 금형에 소입하여 50 ton 유압프레스에서 25 MPa의 압력으로 약 120초동안 가압용침하여 원판형의 잉곳(지름: 9 cm, 높이: 2~3 cm)을 제작하였다. 이때 제조시 가압에 의해 기공들을 제거하고, 공기의 배출을 용이하게 하기 위하여 금형내벽과 펀치사이에 0.3 mm의 공차를 두었다.

제조된 복합재료는 T6조건, 즉 540°C에서 4시간 용체화처리 — 수냉 — 180°C에서 3시간동안 시효처리 — 공냉의순서로 열처리 하였다. 열처리과정중 시효처리시간은 시효시간에 따른 로크웰 경도시험기(Rockwell Hardness Tester, SHIMADZU Co.)를 이용하여 최고경도가 나타나는 시간으로 하였다.

금속복합재료의 미세조직은 광학현미경을 사용하여 보강재들의 분포를 관찰하였다. 가압방향에 따른 보강재의 분포경향을 알아보기 위하여 가압방향에 평행한 방향과 수직인 방향의 표면을 모두 관찰하였고, 높이방향에 따라 보강재의 분포 경향을 확인하기 위하여 밀면으로부터 2 mm, 10 mm, 18 mm지점의 표면을 채취하여 보강재들의 분포를 확인하였다.

## 2.2 경도 및 인장시험

재료의 경도는 로크웰 경도시험기(Rockwell Hardness Tester, SHIMADZU Co.)를 사용하여 부피분율에 따른 경도변화를 B scale로 측정하였고, 최적의 시효조건을 구하기 위하여 시효시간을 변수로 하였다.

인장시험은 만능인장시험기(UTM, SHIMADZU Co.)에서 0.5 mm/min의 변위제어(displacement control)로 행하였다. 인장시험은 가압방향에 수직하도록 Fig. 1과 같이 기계가공하였으며, 변형률을 측정하기 위하여 스트레인게이지를 시험편의 중앙부에 부착하였다. 인장시험 후 파단면을 관찰하기 위하여 주사전자현미경(SEM, HITACHI Model No. S-570)을 사용하였다.

## 2.3 마멸시험

마멸시험은 Fig. 2와 같은 회전원판식 마멸시험기(Universal Wear Testing Machine, TOKYO TESTING MACHINE MFG Co.)를 사용하였다. 이 시험기는 접촉하중, 마멸거리, 마멸속도 등이 여러 조합의 기어에 의해 정확히 조절되며, 상온 및 고온 분위기하에서의 시험과 건식 및 습식 분위기하에서의 시험이 가능하다. 마멸시험은 마멸시험의 요구규격에 의거하여 50 mm×20 mm×6 mm의

Table 1 Specifications of SiC whisker and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fiber<sup>(25,26)</sup>

Material	Composition (wt%)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Diameter (μm)		Length (μm)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Saffil RF Crade)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 96-97 SiO <sub>2</sub> : 3-4	3.3	1.5-6.6*		3-110*
			Av.	3.5	70
SiC (Tokawhisiker)	SiC : 100	3.2	0.3-0.6*		5-15*
			Av.	0.45	8.4
Material	Aspect ratio (l/d)		Tensile Strength (GPa)	Young's Modulus (GPa)	Use temp. stability to (°C)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4-38*		2.0	310	1600
	Av.	20			
SiC	10-25*		3-14	400-700 (inair)	1600
	Av.	13.5			

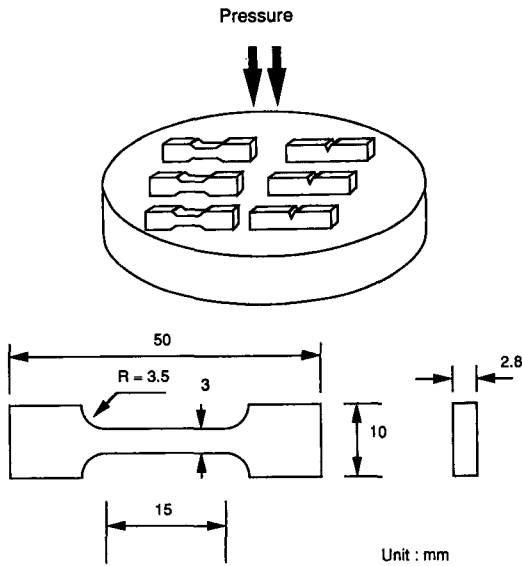


Fig. 1 (a) Crack plane orientation code for tensile tests  
(b) Specimen for tensile tests

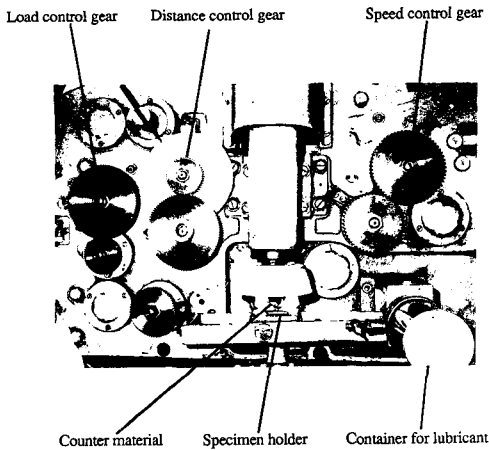


Fig. 2 Photograph of the abrasive wear tester

크기로 제작하였다. 고온분위기하에서의 마멸시험기를 위하여 상대마멸재와 시편의 접촉점으로부터 3 mm 떨어진 곳에 열전쌍을 접촉시켜  $100 \pm 3^\circ\text{C}$ 와  $200 \pm 3^\circ\text{C}$ 로 제어하면서 비교 시험하였다. 습식마멸 시험은 엔진오일(SF 15W/40)을 윤활재(lubricant)로 하여  $0.08 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 의 조건으로 회전하는 상대마멸재에 공급하면서 시험하였다. 마멸시편은  $50 \times 20 \times 6 \text{ (mm}^3\text{)}$ 로 기계가공하고, 균일한 마멸면을 얻기 위하여 600번의 연마지(metallographic paper, No.

600)를 사용하여 최종 연마를 하였다. 마멸시편과 상대마멸재의 표면조도를 조사하기 위하여 조도테스트기(Surftest-501, Mitutoyo Co.)를 사용하였다. 상대마멸재는 유냉처리된 SCM 4 (550 VHN)와 SUS 304(160 VHN)의 두가지를 사용하여 비교 시험하였다. 시험 후 마멸량을  $10^{-5} \text{ g}$ 까지 측정이 가능한 전자저울을 사용하여 조사하였고, 마멸면의 변화를 관찰하기 위하여 광학현미경과 주사전자현미경(SEM, HITACHI Model No. S-570)을 사용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 미세구조 및 기계적 성질

가압용침법에 의해서 만들어진 Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>복합재료의 미세구조는 Fig. 3와 같다. 그림에서 보는바와 같이 높이방향에 따라 보강재는 비교적 고르게 분포하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 알루미늄나 단섬유들이 가압방향에 수직인 방향으로 배향하려는 경향이 있으며, 이들 사이에 SiC 휘스커들이 무질서하게 분포함을 알 수 있다.

Fig. 4는 Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>복합재료의 보강재의 부피분율 증가에 따른 경도변화를 나타내었다. SiC휘스커와 알루미늄나 단섬유는 높은 경도값(SiC휘스커; 약 2800VHN, 알루미늄나 단섬유; 약 1600 VHN)을 가지기 때문에 부피분율의 증가에 따라 복합재료의 경도는 거의 선형적으로 증가한다. 부피분율이 20%일 때 복합재료의 경도는 기지금속의

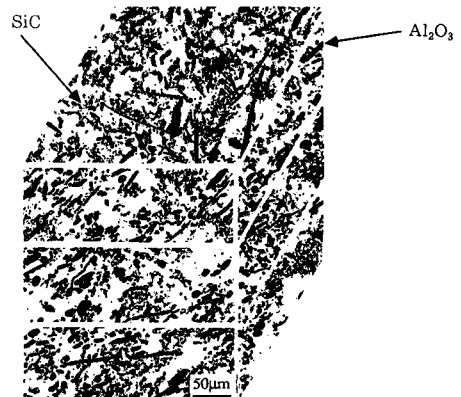


Fig. 3 Microstructure of Al/5 vol. % SiC/10 vol. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites fabricated by squeeze infiltration method

경우 주조상태에서는 57B-scale, T6열처리조건에서는 36 B-scale정도인데 반하여 부피분율이 20%일 때 복합재료의 경도는 각각 92 B-scale, 63 B-scale로서 62%, 55% 정도 향상된 물성치를 보였다.

세라믹 계열의 보강재가 첨가된 금속복합재료의 경우 보강재와 기지금속간에 큰 열팽창계수의 차이에 의해 계면 주위에 높은 전위 밀도가 형성된다. 따라서, 계면주위가 불균일한 핵생성 위치(heterogeneous nucleation site)로 되기 때문에 석출반응이 촉진된다.<sup>(7)</sup> 현재까지 연구된 바에 의하면 SiC 휘스커나 알루미늄나 단섬유를 포함하는 금속복합재료의 최적 시효조건은 보강재의 부피분율, 시효온도, 시효시간 등에 따라 달라지는데, 부피분율이

15~25%일때 시효온도가 150°C, 180°C, 250°C, 300°C이면 각각 6, 4, 0.7, 0.5시간에서 최고 경도값을 가지며, 시효온도가 180°C일 때, 부피분율이 23~25%이면 최적 시효시간은 4시간이고, 0.05%일 때는 7시간 정도이다.<sup>(11)</sup> Fig. 5는 시효시간에 따른 Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>복합재료의 경도변화를 보여주고 있다. 시효온도가 180°C일 때 6061알루미늄의 경우 약 8시간 동안 시효시킬 때 최고의 경도값을 가지는데 반하여 Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>복합재료의 경우는 약 3시간에서 최고 경도값을 보였다. 따라서 최적 시효 조건을 최고 경도값을 기준으로 할 때, Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>복합재료의 경우 보강재의 전체부피분율이 12~20%일때 최적 시효조건은 시효온도 180°C에서 약 3시간이다.

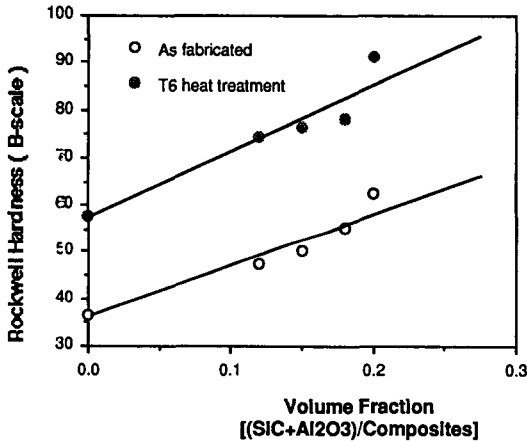


Fig. 4 Dependence of hardness on the volume fraction of reinforcements in Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites

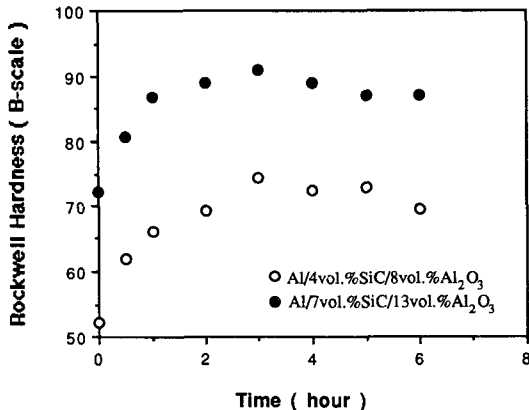


Fig. 5 Effect of the volume fraction of reinforcements on aging conditions(aging temperature; 180°C)

Lim<sup>(11)</sup>의 연구에 의하면 금속복합재료의 탄성계수와 인장강도는 각각 Al/SiC에서는 70%, 60%까지 증가하였고, Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>에서는 35%, 25%정도 증가하였다. 따라서 SiC는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>보다 보강효과가 크다고 볼 수 있으며, Fig. 6에서 보는 바와 같이 Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>복합재료에의 인장강도 또한 동일한 부피분율에서 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 Al/SiC의 중간값을 나타내고 있다.

Fig. 7은 가압용침법에 의해 제조된 Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>복합재료의 인장시험 후 파단면을 보여주고 있다. 보강재들의 뽑힘(fiber pull-out)은 거의 관찰되지 않으며, A와 같이 알루미늄나 단섬유에 묻어있는 기지금속의 형태, B와 같이 딥플(dimple)의 중심부에서 보이는 보강재의 형태로 보아 알루미늄나 단섬유와 기지금속의 결합정도는 양호함을 알수 있다. C와 같이 휘스커뽑힘(whisker pull-out)이 일부 관찰되기도 하였으나 전반적인 결합정도는 양호

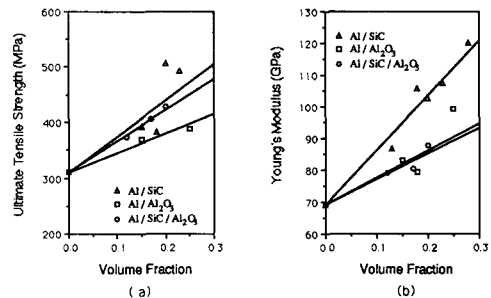


Fig. 6 Effect of the volume fraction of reinforcement on (a) Ultimate tensile strength (b) Young's modulus of MMCs

하다고 볼 수 있다. (a)와 (b)에서 전반적으로 보여지는 벽개파단면(cleavage facet)과 많은 딩플들로부터 Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>복합재료의 파괴양상은 거시적으로 취성파괴의 양상을 가지고, 국부적으로는 연성파면을 보인다.

### 3.2 마멸특성

Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>복합재료의 마멸특성을 규명하기 위하여 보강재의 부피분율, 마멸거리, 마멸속도, 시험온도, 윤활조건 등을 변수로 하여 시험하였고, 6061알루미늄, 그리고 Al/SiC 및 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>복합재료의 마멸특성과 비교하였다.

재료의 마멸특성은 표면상태에 따라서 크게 달라진다. 본 연구에서는 상대마멸재와 마멸시편의 표면조도를 균일하게 하기 위하여 600번의 연마지를 사용하여 최종 연마를 하였고, 이로부터 만들어진 표면조도는  $R_{max}$ 가 1.8 $\mu$ m이하였다.

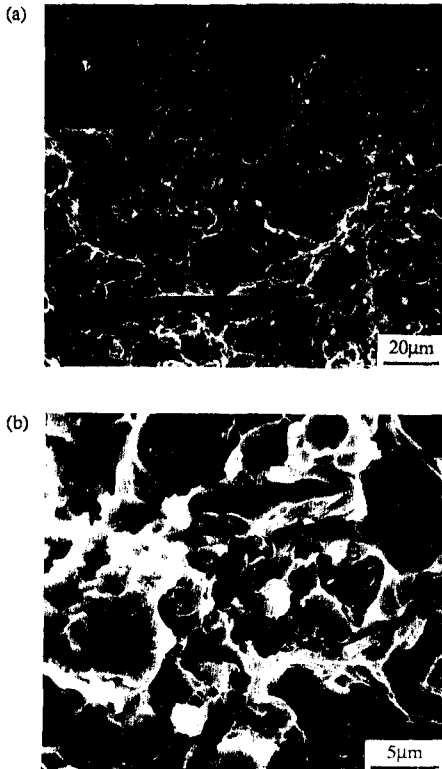


Fig. 7 Fracture surface of Al/7 vol. % SiC/13 vol. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hybrid composites fabricated by squeeze infiltration method  
(a) low and (b) high magnifications

금속복합재료는 보강재의 종류와 부피분율에 따라서 내마멸성이 크게 달라진다. Fig. 8은 부피분율변화에 따른 Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>복합재료와 Al/SiC복합재료의 마멸특성을 보여주고 있다. 일정부피분율까지 금속복합재료는 부피분율이 증가함에 따라 마멸량은 선형적으로 감소하는 경향이 있다. Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>복합재료의 경우 전체부피분율이 20%일 때 기지금속에 대하여 약 60%이상 마멸량이 감소하며, 같은 부피분율의 Al/SiC복합재료보다 약 40%정도 낮은 마멸량을 나타낸다.

Fig. 9는 6061알루미늄과 Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>복합재료의 마멸거리 변화에 따른 마멸면의 형상 변화를 보여주고 있다. (a)와 (b)는 마멸거리가 20 m일 때 마멸면의 형상으로 연삭마멸작용에 의해 형성된 가는 줄무늬들이 관찰된다. (c)와 (d)는 마멸거리가 60 m일 때의 마멸면으로 6061알루미늄의 경우는 (a)에서 형성된 줄무늬들이 연삭작용이 심화되면서 굵어지게 되는데 반하여, Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>복합재료의 경우, 연삭작용은 심화되지 않고 A와 같이 일부 응착마멸에 의한 부분들이 관찰되었다. 응착마멸은 상대마멸재와의 접촉부에서의 응착부분의 전단작용이 주요한 마멸기구로서, 마멸면을 관찰하면 응착되어 이탈된 재료가 상대 재료의 표면에 달라붙어 있는 것을 확인할 수 있는데 시편의 표면에는 SCM4와의 마찰에 의해 뜯겨져나간 흔적이 보인다. (e)와 (f)는 100 m의 마멸거리에서 마멸면의 형상으로 알루미늄은 (e)와 같이 연삭작용에 의해 심하게 마멸되어 B와 같이 홈패임(plowing)이 관

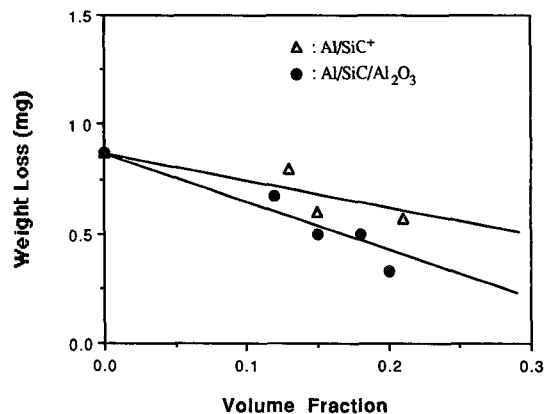


Fig. 8 Effect of reinforcements on wear behaviour; Final load; 3.2 kgf, Sliding distance; 100 m, Sliding speed; 0.94 m/s, Counter material; SCM4(+; Reference[11])

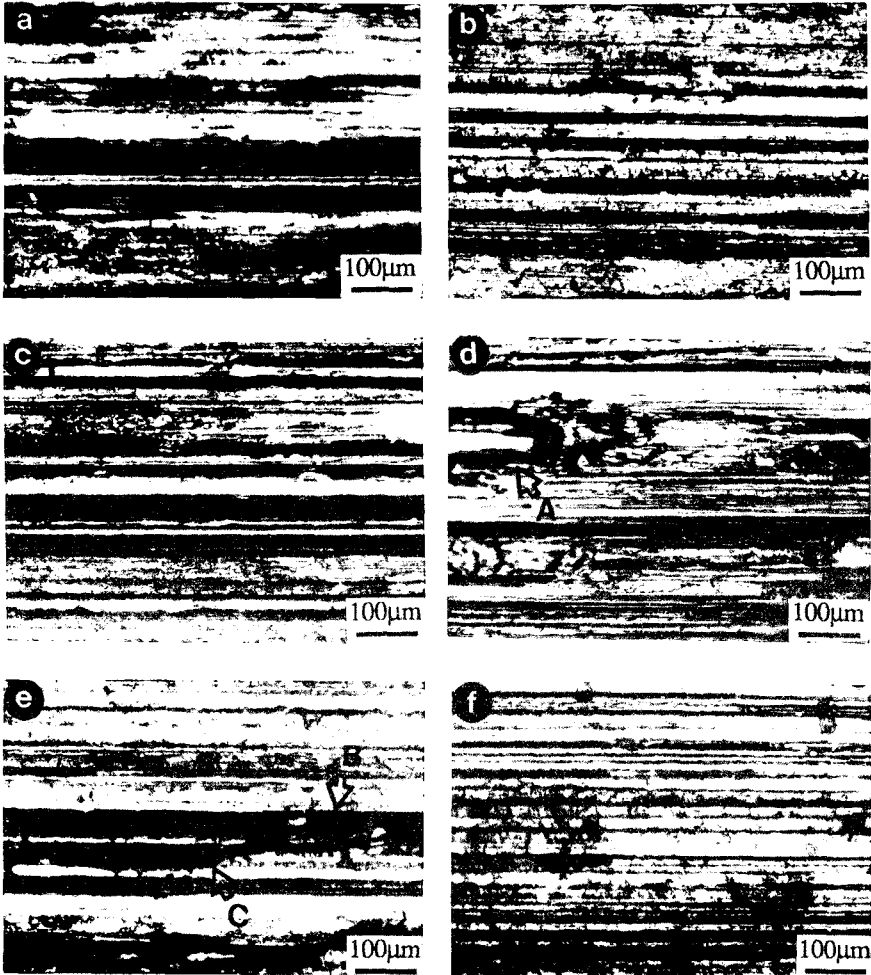


Fig. 9 Wear surfaces of 6061 Al alloy(a, c, e) and Al/ SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hybrid composites (b, d, f) with various sliding distance ; (a), (b) at 20 m, (c), (d) at 60 m, (e), (f) at 100 m ; Final load ; 3.2 kgf, Sliding speed ; 0.08 m/s, Counter material ; SCM 4

찰되기도 한다. 이러한 흠패임은 연삭작용에 의해 모재로부터 분리된 칩(chip)이 상대마멸체에 응착되고 다시 연삭작용을 일으키는 돌기로 작용하기 때문에 발생하는 것으로 마멸량은 급증하게 된다. 마찰속도가 0.94 m/s일때 마멸거리가 100 m까지 알루미늄은 주로 연삭마멸가 주된 마멸기구이고 Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>복합재료는 약간의 응착현상을 보이기도 하나, 알루미늄에 비하여 상대적으로 낮은 연삭마멸을 일으키므로 전체적인 마멸량은 작게 나타난다.

Fig. 10은 마멸속도 변화에 따른 알루미늄과 금속복합재료의 마멸특성을 비교한 것이다. 그림으로

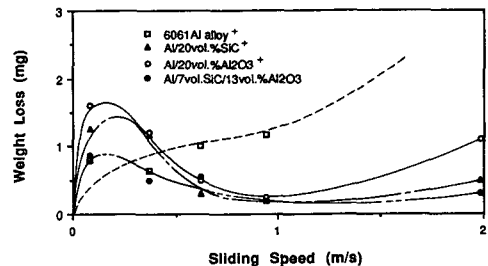


Fig. 10 Effect of sliding speeds on wear behaviour of Al alloy and MMCs ; Final load ; 3.2 kgf, Sliding distance ; 100 m, Counter material ; SCM 4(+ ; Reference[11])

부터 각 재료의 마멸거동은 마멸속도에 많은 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. Al-6061의 경우, 마멸기구는 마멸속도가 1 m/s가 될 때까지는 마멸면에서의 마찰력에 의한 응착마멸(Adhesive wear)과 연삭마멸(Abrasive wear)이나 1 m/s 이상에서는 국부적인 마멸면에서의 온도의 증가에 의해 마멸기구는 용해마멸(Melt wear)로 마멸기구가 변하게 된다. 따라서 마멸량은 1 m/s를 경계로 하여 마멸량이 급증한다. 또한, 마멸속도가 약 0.5 m/s 이하의 저속에서는 금속복합재료의 마멸량이 6061알루미늄보다 많은데, 이는 낮은 마멸속도에서는 마멸면에서의 높은 마찰력에 의해서 보강재가 기지재로

를 연삭시키기 때문에 일어나는 현상이다. 따라서 0.5 m/s와 1 m/s사이의 구간에서는 마멸속도가 증가함에 따라 마찰계수의 감소에 의해 마찰력이 줄어들기 때문에 금속복합재료의 마멸량이 기지재료에 비해서 줄어들며, 용해마멸이 주요한 마멸기구가 될 때까지 감소하게 된다. 1.98 m/s이 넘는 마멸속도에서는 온도에 의한 용해마멸에 의해서 두 재료 모두 마멸량은 증가하나, 기지재료에 비해 내열성이 강한 복합재료가 기지재료에 비해서 상대적으로 낮은 마멸량을 보인다. 보강재면에서는 Al/SiC복합재료의 내마멸성이 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>복합재료보다 우수하며, Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>복합재료는 Al/SiC복합재

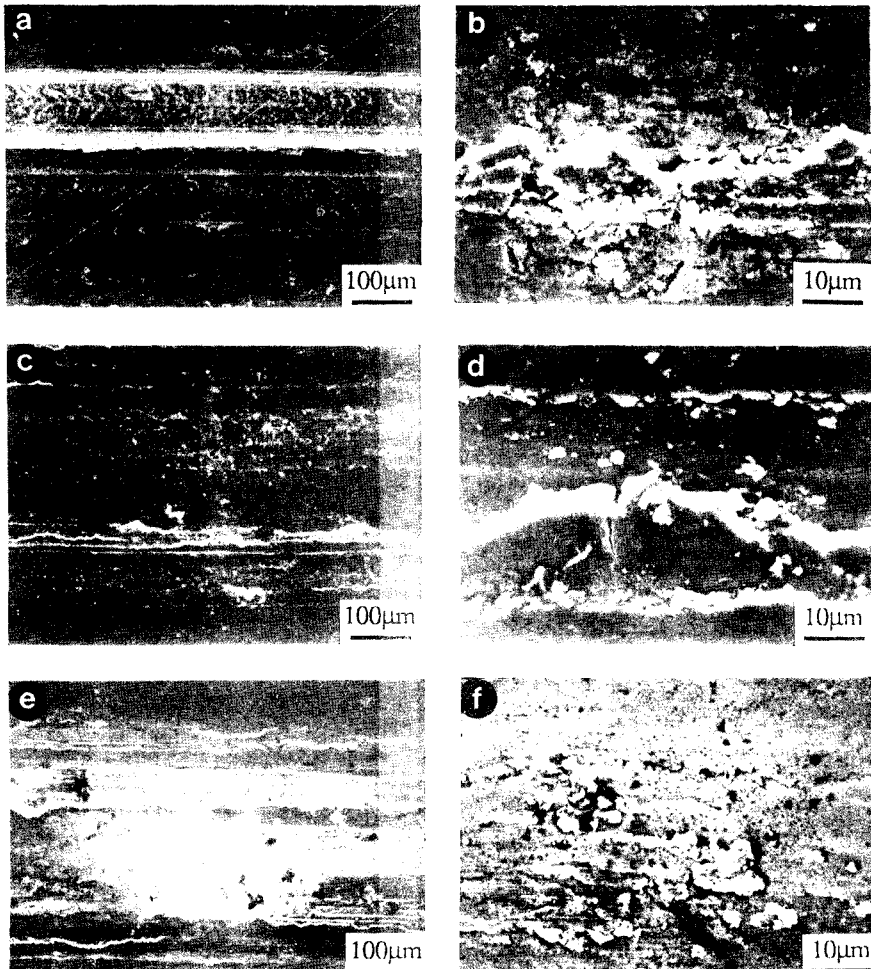


Fig. 11 Overall (a, c, e) and magnifying (b, d, f) wear surfaces Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hybrid composites with various sliding speed; (a), (b) at 0.08 m/s, (c), (d) at 0.94 m/s(e), (f); 1.98 m/s; Final load; 3.2 kgf, Sliding distance; 100 m, Counter material; SCM 4



료보다 우수하다는 것을 그림으로부터 확인할 수 있다. Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>복합재료는 전반적으로 Al/SiC 복합재료나 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>복합재료에 비하여 낮은 마멸량을 보였다. Fig. 11는 주사전자현미경을 사용하여 Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>복합재료의 마멸속도 증가에 따른 마멸면 변화를 저배율과 고배율로 관찰한 것이다. 마멸속도가 0.94 m/s까지는 앞에서 설명한 바와 같이 연삭 및 응착마멸의 일반적인 형태를 가지나, 1.98 m/s이상의 고속이 되면 (e)와 (f)에서 보이는 바와 같이 일부 응착현상이 발견되기도 하며, 알루미늄나 단섬유들이 빠져나기도 한다. Al/SiC복합재료는 고속에서도 양호한 마멸특성을 갖는데 이는 미세한 SiC휘스커들이 기지금속에 균일하게 분산되어 재료의 경도를 높이고, 연삭 및 응착마멸에

대하여 내구성을 갖게 해주기 때문이다. Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>복합재료에서 미세한 SiC휘스커는 기지금속을 강화시킴으로써 응착마멸에 대한 저항성을 높여주며, 상대적으로 큰 크기를 갖는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>단섬유는 연삭마멸에 대해서 저항성을 갖게 해주므로, SiC 휘스커와 알루미늄나 단섬유의 복합효과에 의해 Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>복합재료는 SiC휘스커만으로 보강된 복합재료보다 내마멸성이 우수하다.<sup>(24)</sup>

Fig. 12은 과시효처리된 마멸시편에 대하여 접촉 온도를 변화시키면서 시험한 결과이다. 6061알루미늄은 온도가 증가함에 따라 연화에 의해서 연삭마멸의 경향은 줄어들게 되어, 마멸량은 크게 감소하게 된다. 이에 대하여 Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>복합재료는 마멸량이 거의 변하지 않고, 알루미늄에 대하여 상대적으로 양호한 마멸특성을 나타내었다.

Fig. 13은 0.08 m/s의 저속과 2.38 m/s의 고속에서 건식마멸시험과 습식마멸시험의 결과를 비교한 것이다. 오일을 윤활재로 사용할 때 마멸량은 건식마멸시험의 결과와 비교하여 현저히 감소하는데, 특히 고속에서 큰 효과가 있음을 알 수 있다.

이상의 마멸시험결과로부터 Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>복합재료는 전반적으로 6061알루미늄이나 Al/SiC 및 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>복합재료에 비하여 양호한 내마멸성을 가진다. 알루미늄나 단섬유는 SiC휘스커보다 경제성면에서 유리하므로 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>복합재료에 SiC휘스커를 소량 첨가함으로써 내마멸성면에서 특히 유리한 금속복합재료를 제조할 수 있다.

#### 4. 결 론

(1) Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>복합재료의 경도는 부피분율 증가에 따라 기지금속에 대하여 주조상태에서 약 62%증가하였고, T6열처리에 의하여 약 55%증가하였다. 또한 부피분율의 증가에 따라 영률은 약 30%, 인장강도는 약 40% 증가하였다.

(2) Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>복합재료는 부피분율 증가에 따라 마멸량은 기지금속에 대하여 약 60%감소하며, Al/SiC복합재료보다 약 40% 낮은 마멸량을 가진다. 마멸거리변화에 따른 마멸면의 형상변화를 관찰한 결과 알루미늄은 연삭 및 응착마멸가 심하였고, 금속복합재료는 일부 응착현상이 보이기도 하였으나 주된 마멸기구는 연삭마멸였다.

(3) 고온에서의 마멸시험결과 200℃의 시험온도까지 Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>복합재료의 내마멸성은 유지되

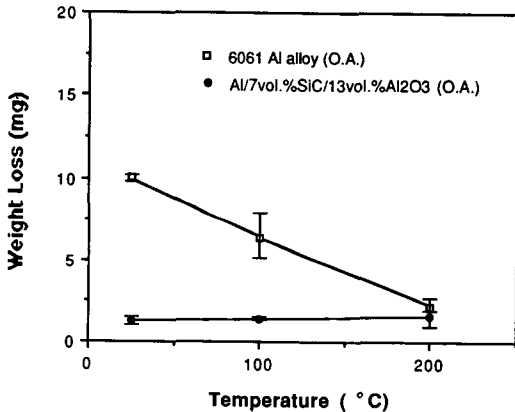


Fig. 12 Effect of testing temperature on wear behaviour; Final load; 3.2 kgf, Sliding distance; 100 m, Sliding speed; 0.94 m/s, Counter material; SCM 4

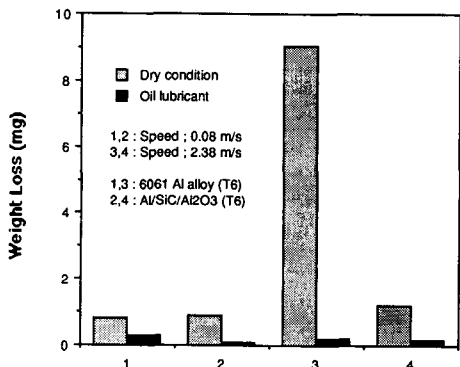


Fig. 13 Effect of lubricant condition on wear behaviour; Final load; 3.2 kgf, Sliding distance; 100 m, Counter material; SCM 4

며 알루미늄에 비하여 상대적으로 우수한 마멸특성을 가진다. 습식마멸시험에서도 Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>복합재료의 내마멸성이 우수하며 특히 고속에서는 윤활 작용에 의하여 마멸량이 현저히 감소한다.

(4) Al/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>복합재료의 내마멸성이 우수한 것은 알루미늄나 단섬유들이 연삭마멸에 대해 내구성을 향상시키고, SiC휘스커들이 기지금속을 강화시킴으로써 응착마멸에 대한 저항성을 갖게 해주기 때문이다.

#### 4. 후 기

본 연구는 학술진흥재단의 연구비지원에 의해 진행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Cook, J. L. and Mohn, W. R., 1987, "Whisker-reinforced MMCs," Engineered Materials Handbook, Composites, ASM International, Vol. 1, Reinhart et al. eds., pp. 896~902.
- (2) Hosking, F. M., Portillo, F. F. and Wunderlin, R., 1982, "Composites of Aluminum Alloys: Fabrication and Wear Behaviour," J. of Mat. Sci., Vol. 17, pp. 477~498.
- (3) Clyne, T. W. and Mason, J. F., 1987, "The Squeeze Infiltration Process for Fabrication of Metal Matrix Composites," Metallurgical Transaction A, Vol. 18A, pp. 1519~1530.
- (4) Bengtsson, S., Li, C. H. and Warren, R., "Microstructural Studies of  $\delta$ -Alumina Fiber Reinforced Aluminum and Al Alloys," Proceeding ICCM-VIII, Vol. 3, Nov. 22~24, 1989, pp. 607~612.
- (5) 홍순형, 이길근, 김진, 이상관, 1990, "Squeeze Casting에 제조된 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al-Si금속복합재료의 고온강도와 계면반응," 대한금속학회지, Vol. 28, No. 7, pp. 615~622.
- (6) 김진, 이상관, 홍순형, 이길근, 1989, "Squeeze Casting을 이용한 금속복합재료 제조공정 개발," 한국복합재료학회지, Vol. 2, No. 2, pp. 1-9
- (7) Chistaman, T., Needleman, A., Nutt, S. and Suresh, S., 1989, "On Microstructural Evolution and Micromechanical Modelling of Deformation of a Whisker-Reinforced Metal Matrix Composite," Mat. Sci. & Eng., Vol. 107A, pp. 49~61.
- (8) Lim, t., Lee, C. S., Kim, Y. H. and Han, K. S., 1990, "Fracture Behaviors and Mechanical Properties of Metal Matrix composites," Proceeding of KSME/JSME International Conferance, pp. 624~629.
- (9) Lee, C. S., Kim, Y. H., Lim, T. and Han, K. S., 1991, "Dynamic Observation of Failure Processes in Al/SiC Composite Materials," Scripta Metallurgica, Vol. 25, No. 3, pp. 613~618.
- (10) Lim, T., Kim, Y. H., Lee, C. S. and Han, K. S., 1991, "Mechanical Properties and Fracture Behaviors of Aluminum Matrix Composites," Proceeding of ICCM/VIII, pp. 21-C-1~14.
- (11) Lim, T. W., 1990 "Fabrication and Mechanical Behaviour of Aluminum Matrix Composite Materials," Ph. D. Dissertation, Stat Univ. of New York at Buffalo.
- (12) Prasad, S. V., Rohatgi, P. K. and Kosel, P. K., 1986, "Mechanisms of Material Removal During Low Stresses and High Stress Abrasion of Aluminum Alloy-zircon Particle Composites," Materials Science and Engineering, Vol. 80, pp. 213~220.
- (13) Prasad, S. V. and Rohatgi, P. K., 1987, "Tribological Properties of Al Alloy Particle composites," J. of Metals, Nov., pp. 22~26.
- (14) Yang, J. and Chung, D. D. L., "Wear of Bauxite Particle Reinforced Aluminum Alloys," Private Communications.
- (15) Rohatgi, P. K., Asthana, R. and Das, D., 1986, "Solidification, Structures, and Properties of Cast Metal-ceramic Particle Composites," International Metal Reviews, Vol. 31, pp. 115~139.
- (16) Subramanian, C. and Kishore, 1984, "Influence of Graphite type, Modification and hot Working on Wear of Aluminum Based Particle Composite Composites," J. of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 3, Oct., pp. 278~293.
- (17) Das, S., Prasad, S. V. and Ramachandran, T. R., 1989, "Microstructure and Wear of Cast(Al-

- Sialloy)-graphite Composites," *Wear*, Vol. 133, pp. 173~187.
- (18) Friend, C. M., 1989, "The Effect of Temperature on the Tensile Strength of Short  $\delta$ -alumina Fiber/aluminium Alloy Metal Matrix Composites," *Scripta Metallurgica*, Vol. 23, pp. 33~37.
- (19) Hosking, F. M., Portillo, F. F., Wunderlin, R. and Mehrabian, R., 1982, "Composites of Aluminium alloys: fabrication and wear behavior," *J. of Materials Science*, Vol. 17, pp. 477~498.
- (20) Rana, F. and Stefanescu, D. M., 1989, "Friction Properties of Al-1.5 Pct Mg/SiC Particulate Metal-Matrix Composites," *Metallurgical Transactions A*, Vol. 20A, August, pp. 1564~1566.
- (21) Bhansali, K. J. and Mehrabian, R., 1982, "Abrasive Wear of Aluminum-matrix Composites," *J. of Metals*, Sept., pp. 30~34.
- (22) Bhansali, K. J. and Silence, W. L., 1981, "metallurgical Factors Affecting Wear Resistance," *Met. Prog.*, November, pp. 38~43.
- (23) Long, T. T., Aisaka, T., Ose, M. and Morita, M., 1987, *J. of Japan Inst. Metals*, Vol. 51, pp. 864.
- (24) Long, T. T., Nishimura, T., Aisaka, T., Ose, M. and Morita, M., 1988, "Mechanical Properties and Wear Resistance of 6061 Al Alloy Reinforced with Hybrid Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Fibers and SiC Whiskers," *Transaction of Japan Institute of Metal*, Vol. 29, No. 11, pp. 92~927.
- (25) Data Sheet from TEXTRON Specialty Materials Co.
- (26) Data Sheet from I. C. I. Co.