

Rheo-compocasting법에 의한 SiC입자분산 복합재료의 마모특성에 관한 연구

곽현만*, 최창욱**

A Study on the Wear Characteristics of SiC Particle Dispersed Composites by Rheo-Compocasting Method

Hyun-Man Kwak* and Chang-Ock Choi**

Abstract

Microstructure, hardness and wear characteristics of SiC_p/Al-6.5wt%Si-1.7wt%Mg alloy composites fabricated by the method of rheo-compocasting and hot pressing are investigated in this study. The dispersion of SiC particles in the composites is homogeneous and the hardness improves as additional amount increases. The wear amount of the matrix metal increases highly as wear rates increase, for the wear mechanism changes from adhesive wear to melt wear, and the matrix metal was coated on the surface of revolving disc and its weight increases. In the 5vol% composites, Fe is adhered on the surface of specimen by the projection of the dispersed hard SiC particles which have net-work structure and the coating layer is about 300μm. But in the composite more than 20vol%, the wear amount of composite decreases because the SiC particles which have superior hardness, wear resistance and heat resistance properties resist wear, the abrasive wear turn out predominant wear mechanism and so the wear amount of revolving disc increases.

(Received January 16, 1993)

1. 서 론

금속기 복합재료(Metal Matrix Composites : 이하 MMC)에 대한 연구 및 개발이 활발히 진행됨에 따라 세라믹입자들을 강화상으로 하는 MMC는 경량화, 고성능화가 요구되는 자동차 엔진의 피스톤, 실린더 라이너, 컨넥팅 로더 등에 실용화되고 있다¹⁾. MMC는 강화재의 형태에 따라 섬유(fiber), 휘스커(whisker), 입자(particle) 강화 복합재료로 분류할 수 있으며, 휘스커 및 섬유강화 복합재료는 강화상을 일방향으로 배향시켜 우수한 기계적 성질을 나타내는 반면, 제조

비가 고가일 뿐만 아니라 재료의 이방성이 심하고 특히 2차 가공으로 인한 강화상의 효과를 크게 기대하기 어렵다^{2,3)}. 그러나 입자강화 복합재료(Particle Reinforced Metals : 이하 PRM)는 물성이 등방적이며 압연, 압출 등의 소성가공시 강화재의 파손이 거의 일어나지 않는다. PRM의 제조법은 액상법과 고상법이 있으며, 액상법 중 Rheo-compocasting법은 비교적 저온에서 복합화가 가능하므로 탄화물계 강화상의 결점인 Al₄C₃ 형성으로 인한 기계적 성질저하를 줄일 수 있고, 분산성과 젖음성의 향상 및 강화재와 기지금속간의 과잉계면반응을 억제할 수 있는 이점이 있다⁴⁾.

* 동명전문대학 금속과(Dongmyung Junior College)

**동아대학교 금속공학과(Dept. of Metallurgical Eng., Dong-A University)

또한 열적으로 안정하고, 높은 경도를 가진 세라믹입자를 강화상으로 하는 PRM은 우수한 내열 및 내마모특성을 나타낸다^{5,6)}. Yamada⁷⁾ 등은 Al 합금이 강과 마찰할 경우 응착하기 쉽고 마모량이 많으므로 마찰부분에 사용되는 것이 극히 제한됨을 보고하였고, Hosking⁶⁾ 등은 SiC와 Al₂O₃ 입자를 첨가한 복합재료의 마모시험결과 내마모성은 SiC(Hv 2600)입자가 Al₂O₃(Hv 1800)입자보다 더 효과적이며 기지금속과 복합재료의 마모기구는 각각 응착마모 및 연삭마모라고 보고하고 있다. 지금까지 마모에 대한 연구는 저하중, 저마찰속도의 조건에서 Al합금 및 주철에 대한 연구^{7,8)}가 대부분이고 SiC입자강화 복합재료의 마모에 대한 연구^{6,9)}는 그다지 많지 않은 것으로 조사되었다.

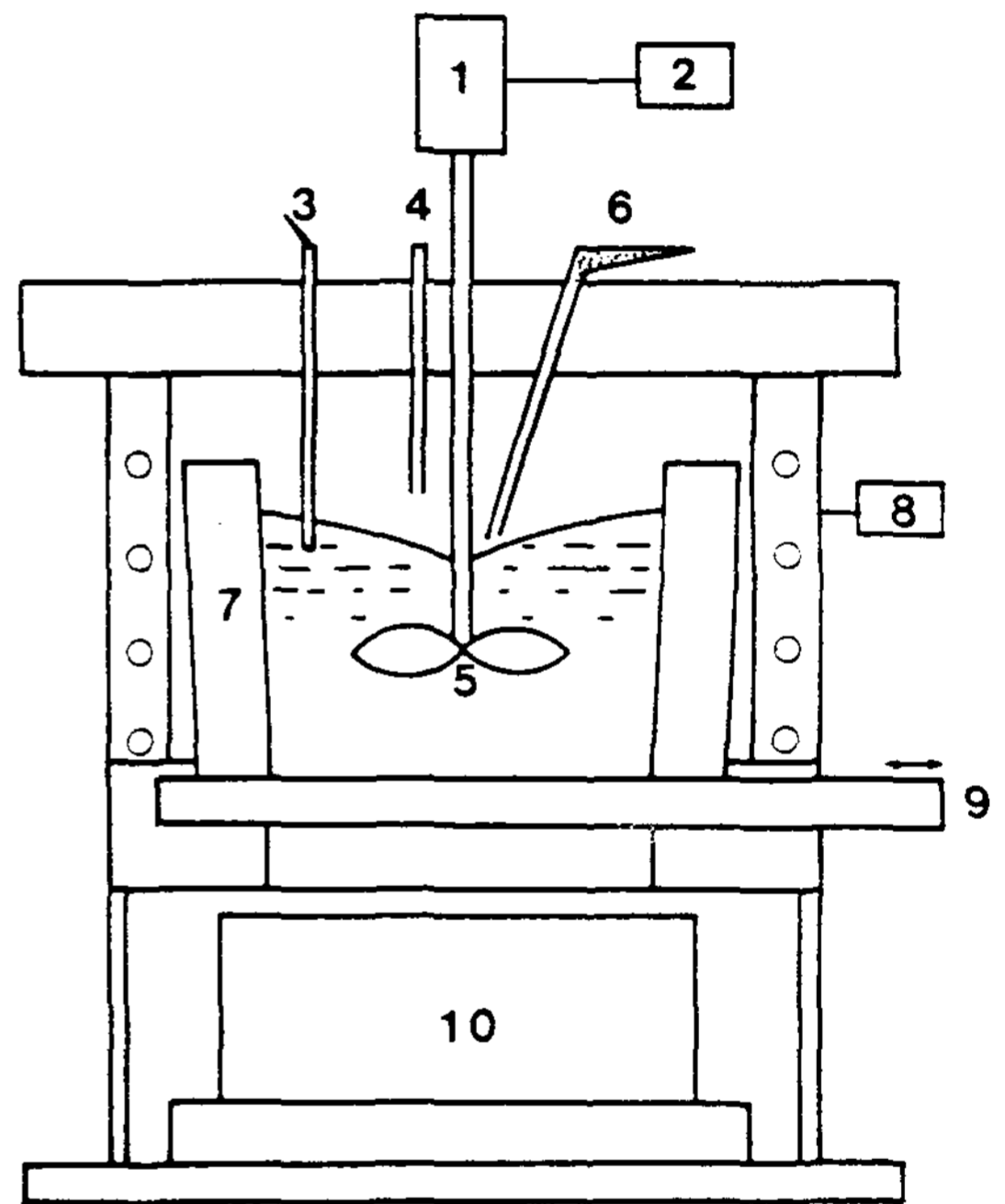
따라서 본 연구에서는 Rheo-compocasting법 및 hot press에 의한 SiC입자강화 복합재료를 제조하여 극한 마모조건하에서 마모시험 후 기지금속과 복합재료의 마모기구를 조사하였다.

2. 실험방법

2.1 시편제작

시편의 합금조성은 Al-6.5wt%Si-1.7wt%Mg을 기지금속으로 하고, SiC입자를 5, 10, 20 및 30vol%로 각각 첨가하여 SiC입자강화 복합재료를 제조하였다. Table 1과 Fig. 1은 각각 기지금속의 조성 및 Rheo-compocasting 장치를 나타내었다. 복합재료의 제조장치는 직류모터에 의해 회전하는 교반장치, 용해 및 슬러리 상태를 유지하기 위한 전기로 및 용융금속의 흐름을 제어할 수 있는 스톱퍼 등으로 구성되어 있으며, 용융금속의 산화를 방지하기 위하여 아르곤가스 분위기로 하였다. 복합재료 제조는 Al합금 용융금속의 고상률이 30%가 되도록 605°C로 유지된 슬러리 상태의 용융금속에 아세톤으로 세척후 100°C에서 완전히 건조된 SiC(99~93% SiC, 평균입경 : 25 μ m, Hv 2600)입자를 분당 2~3g 정도 첨가하면서 400rpm의 속도로 교반하였다. 이때 스

테니스 impeller는 Al합금 용융금속과의 반응을 억제하기 위하여 boron nitride를 표면에 분사하여 용융금속과의 반응을 최대한 억제하였다. Al 용융 금속과 SiC입자간의 젖음성 및 분산성을 향상시키기 위해 슬러리 용융금속에 shear force를 충분히 가할 수 있는 최적 교반조건으로 입자들을 첨가 및 분산시켰으며, 복합재료 제조 후 605°C에서 3000초 동안 420kg/cm² 압력으로 hot press한 다음 T6(500°C×1hr→수냉→180°C×15hr→공냉)처리를 하였다.



- 1. D.C Motor
- 2. Motor Controller
- 3. Thermocouple
- 4. Ar Gas Inlet
- 5. Impeller
- 6. SiC Particle Inlet
- 7. Crucible
- 8. Temp. Controller
- 9. Stopper
- 10. Steel Mold

Fig. 1. Schematic diagram of rheo-compocasting apparatus

Table 1. Chemical compositions of matrix alloy(wt%)

Nominal composition	Si	Mg	Fe	Mn	Cr	Al
Al-7wt% Si-2wt% Mg	6.51	1.70	0.15	0.13	0.10	Bal.

2.2 실험방법

조직은 알루미늄 분말(0.5 μ m)을 사용하여 복합재료를 미세연마한 후 0.5% HF로 부식하여 광학현미경으로 관찰하였다. 경도는 로크웰 경도 시험기로 측정하였으며, 하중은 15kg, 1.588mm의 강구를 사용하여 6회 측정한 후 최대 및 최소 값은 버리고 그 평균값으로 하였다.

마모거리, 속도 및 시편에 가해지는 최종하중 등을 변화시킬 수 있는 Okoshi type의 고속마모 시험기를 사용하여 Table 2와 같은 마모조건하에서 대기중 건식마모시험을 하였으며, 마모시험 후 마모량은 직시천칭을 사용하여 10⁻⁴g까지 측정하였다. 또한 마모면의 표면거칠기는 축침식 표면조도계를 사용하여 조사하고, 마모면과 마모면 직하의 조직변화 및 마모분 등을 광학현미경, SEM 및 EDAX로 관찰하였다.

Table 2. Wear test conditions of matrix alloy and composite

Specimen size(mm)	10×40×10
Revolving disc materials	SM45C(HR _B 90)
Final load(kg)	2.1, 3.2, 6.3, 12.6
Sliding speed(m/sec)	0.62, 1.65, 2.88, 3.53
Sliding distance(m)	400
Specimen (R _{max} μ m)	0.5
Revolving disc (R _{max} μ m)	5.5

3. 실험결과 및 고찰

3.1 조직관찰 및 경도변화

입자강화 복합재료에서는 용융금속과 세라믹 입자간의 젖음성 및 계면반응이 중요한 인자이며, 강화입자의 분산성에 큰 영향을 준다. Photo 1은 SiC입자강화 복합재료의 현미경 조직을 나타내었다. (a)는 Rheo-compocasting으로 제조된 10vol% SiC입자가 첨가된 조직이며, (b)는 Rheo-compocasting후 hot press한 30vol% SiC입자가 첨가된 조직이다. (c)의 경우 SiC입자가 기지금속 내에 균일하게 분산된 복합재료를 나타내었다. 일반적으로 세라믹입자의 분산성은 입자직경 및 용융금속간의 젖음성이 클수록, 용융금속의 표면장력이 적을수록, 입자 첨가량이 증가할수록 향상되며, SiC입자 첨가속도를 느리게, 교반속도

및 응고속도를 빠르게 하는 것이 유효하다. 본 실험에서는 합금원소로서 Mg 및 Si를 첨가하여 젖음성 향상 및 취성화합물인 Al₄C₃가 생성되는 반응을 제어¹⁰⁾하여 건전한 복합재료를 제조할 수 있었다.

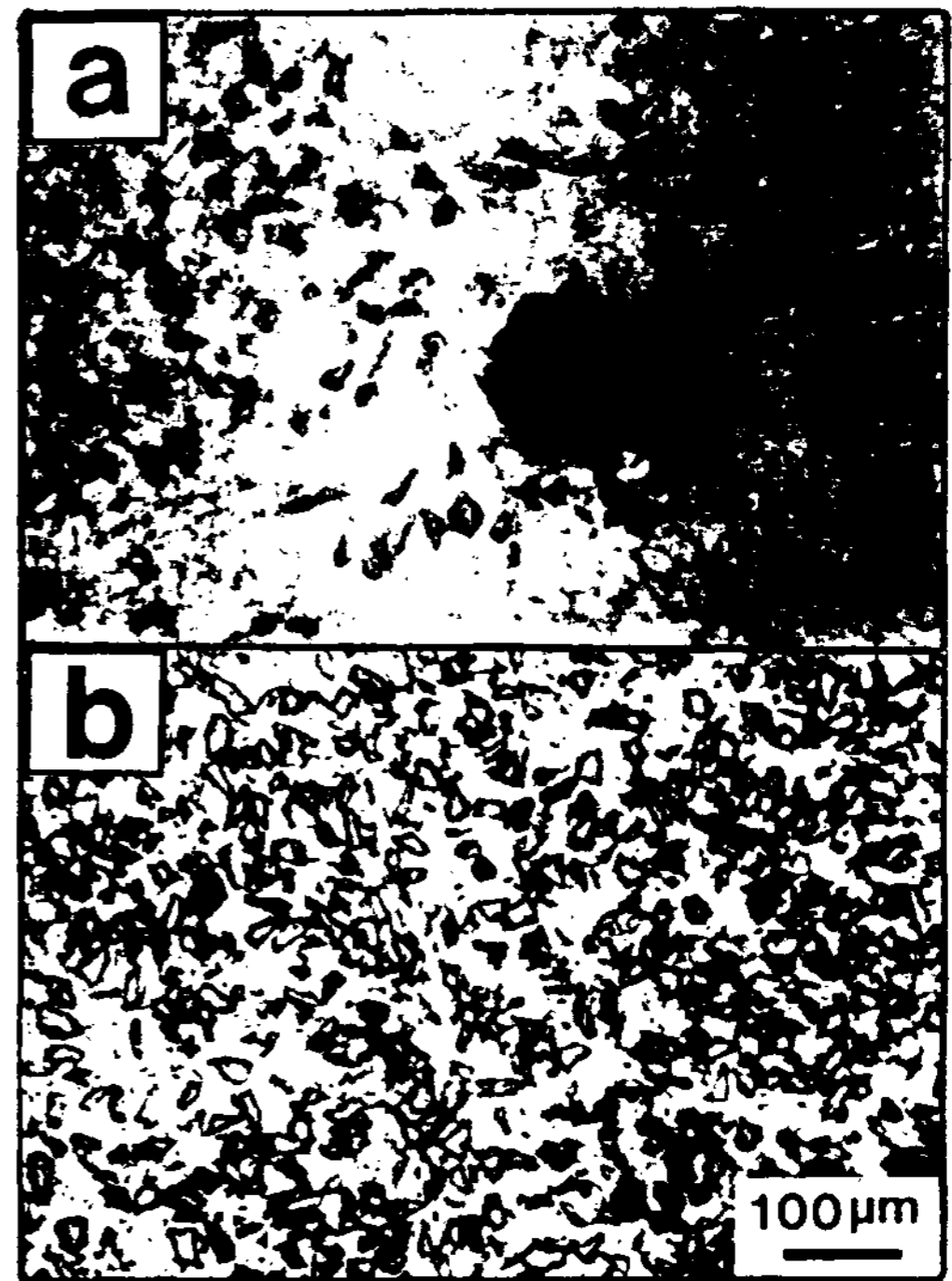


Photo 1. Microstructures of SiC particle dispersed composite
(a) rheo-compocast
(b) rheo-compocast and hot press

Fig. 2는 SiC입자강화 복합재료를 T6처리 전, 후의 SiC입자 부피분율에 따른 경도변화를 나타내었다. 시편의 경도변화는 T6처리 후의 경우가 T6처리 전에 비해 평균 약 15% 정도 향상되었으며, 특히 T6처리 후 30vol% SiC입자강화 복합재료(HR_B83)의 경도는 T6처리 전의 기지합금(HR_B52)의 경도에 비해 약 60% 정도 향상되었다. SiC입자의 부피분율이 증가할수록 경도의 증가현상은 기지금속보다 SiC입자(Hv 2600) 자체의 고경도에 의한 강화효과와 부피분율에 따른 SiC입자의 균일분산에 의한 입자간 거리감소, 시편제조 및 T6처리시 SiC입자와 기지금속간의 열

팽창계수 차이에 의한 전위밀도 증가 때문이라 생각되었다¹¹⁾.

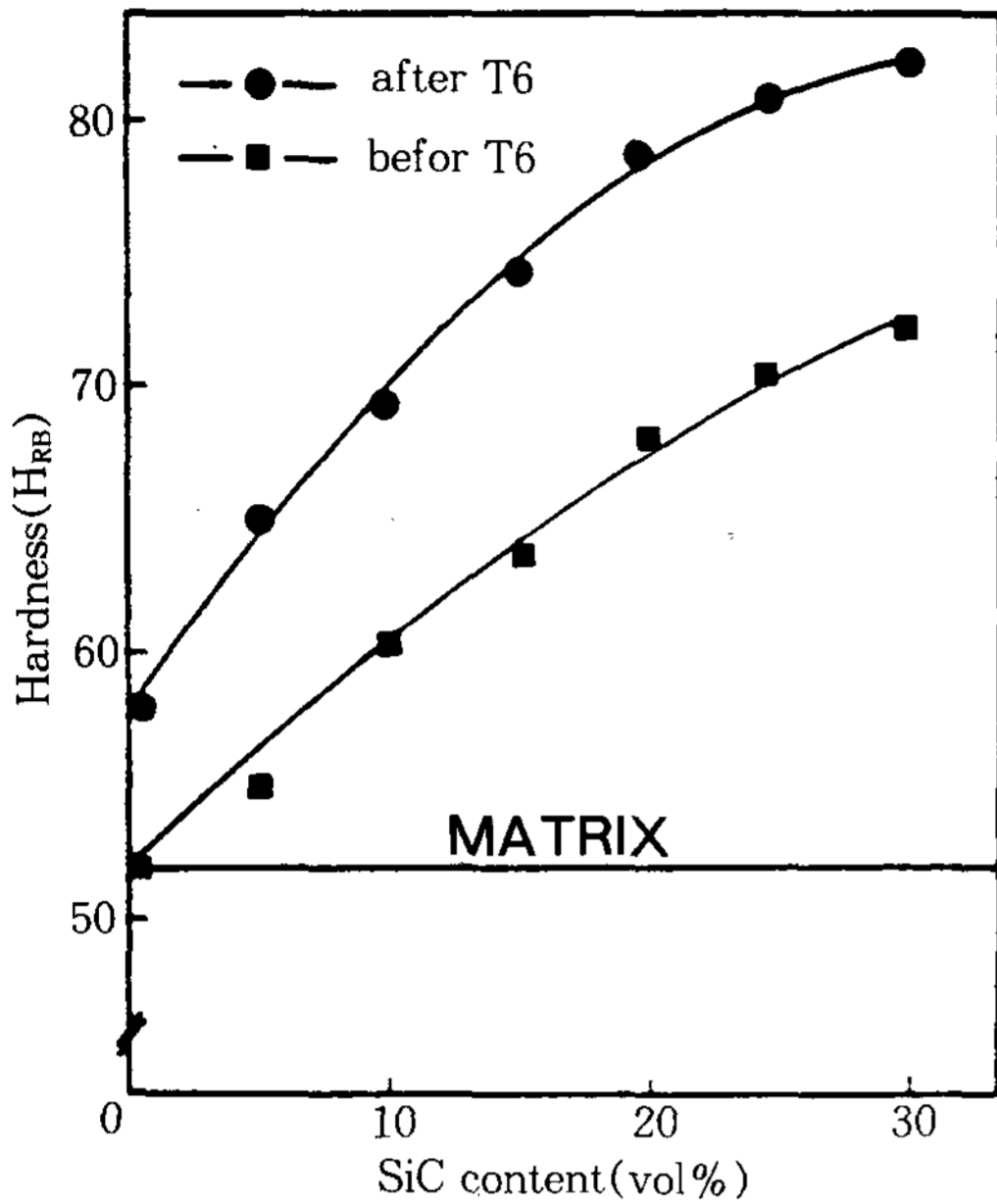


Fig. 2. The effect of SiC particle content on the hardness

3.2 마모면 관찰

Photo 2는 마모시험(거리 400m, 속도 3.53m/sec, 하중 12.6kg)후 마모면 직하의 조직에서 (a),(b) 및 (c)는 각각 기지금속과 5, 30vol% SiC 입자강화 복합재료의 조직을 나타내었다. 기지금속의 경우, 마모면 직하는 용융층과 약 200 μ m 정도의 소성변형층을 관찰할 수 있었다. 이것은 고속마모에서 마찰열에 의한 온도상승으로 표면에서 부터 내부로의 심한 온도구배가 일어나 표면은 용융되고, 표면 직하는 모재조직과 연속되어 있는 소성변형층이 상대 disc의 회전력에 의해서 마찰방향으로 소성변형된 조직을 나타내었다. 5vol% SiC 입자강화 복합재료의 경우에는 상대 disc가 300 μ m 정도 코팅되어 있는 것을 관찰할 수 있었다. 이와 같은 현상은 입자 첨가량이 적을 경우, SiC입자가 net-work상으로 형성되어 기지금속의 내마모성은 향상되나 상대 disc는 net-work상으로 형성된 SiC입자 분산층의 경한 돌기에 의한 적층된 결과로 사료되었다^{9,12)}.

그러나 30vol% SiC입자강화 복합재료에서는 기지금속의 소성유동현상은 일어나지 않고, 마찰면 및 표면 직하 약 50 μ m에서 미세하게 파괴된 SiC입자를 관찰할 수 있었다. 이것은 마찰전단응력이 최대가 되는 탄성역에서 SiC입자가 마찰응력에 대한 응력집중을 받아 미세하게 파괴된 것으로 사료되었다. 따라서 파괴된 SiC입자가 진접촉점으로 되어 상대 disc와 금속간의 접촉을 방해하여 응착제어 및 윤활작용으로 마찰계수가 감소할 것으로 생각되었다^{13,14)}.

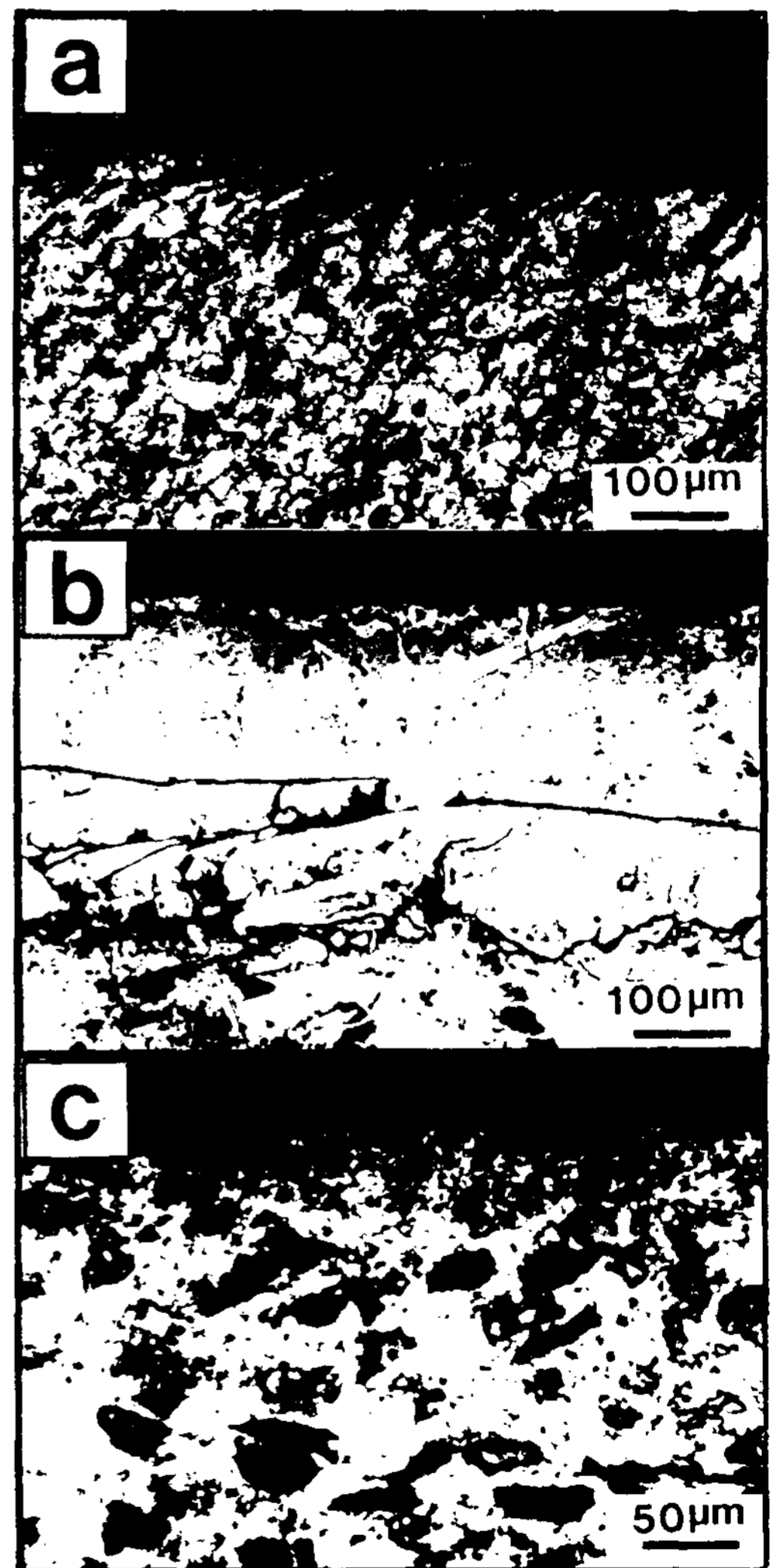


Photo 2. Optical microstructures of the surface layers of worn matrix alloy and composite (a) matrix alloy (b) 5vol% SiC (c) 30vol% SiC

Photo 3은 저·고속에서 마모시험(거리 400m, 속도 3.53m/sec)후 마모면의 SEM사진을 나타내었다. (a) 및 (b)는 각각 기지금속과 복합재료(30vol% SiC)의 마모면을 나타내었다. 기지금속의 경우, 하중이 증가함에 따라 plastic flow 및 ploughing이 크게 발생한 것으로 생각되었다. 그러나 복합재료에서는 약간의 plastic flow를 관찰할 수 있으나, 기지금속에 비해 mild 마모면을 나타내었다. 이와같이 복합재료가 기지금속에 비해 우수한 내마모성을 나타내는 이유는 SiC입자의 우수한 내열 및 내마모성에 의한 직접적인 효과와 연질의 기지금속에 균일분산된 SiC입자가 기지금속의 마모를 저지하는 간접적인 효과외에 Mg, Si합금 첨가에 의한 SiC입자와 기지금속간의 양호한 계면접착성에 의해 SiC입자가 pull-out되지 않고, Photo. 1 (c)에서 관찰한 바와 같이 미세하게 파괴된 SiC입자가 마찰면에서 윤택작용을 하기 때문이라 생각되었다.

Photo 4는 마모거리 400m, 하중 12.6kg으로 마모시험 후 마모면의 SEM사진을 나타내었다. (a)는 저, 고속일 때의 기지합금의 마모면을 나타

내며, (b)는 30vol% SiC입자강화 복합재료의 마모면을 나타내었다. 기지합금의 경우 저속에서는 groove가 생성된 mild 마모면을 나타내고, 고속에서는 마찰열에 의한 용융현상으로 용융마모가 진행되어 마모면은 거칠고 plastic flow가 lip 형태로 pile-up된¹⁵⁾ 마모면을 나타내었다. 그러나 복합재료의 경우에는 Photo 1 (c) 및 Photo 3 (b)에서와 같은 경향을 나타내며, 저속일 경우보다 고속일 경우 마찰열에 의한 국부적 용융으로 plastic flow가 더 많이 관찰되고, 마모면은 거친 마모면을 나타내었다. 따라서 마모거리 및 하중이 일정할 때 마찰속도가 증가할수록 마모면의 표면거칠기는 거칠고, 마모량도 증가할 것으로 생각되었다.

Fig. 3은 마모시험조건에 따른 마모면의 표면 거칠기를 측정식 검사기로 측정한 결과를 나타내었다. (a)는 마모거리 400m, 하중 12.6kg에서 기지금속 및 30vol% SiC 입자강화 복합재료를 마모속도 변화에 따른 표면거칠기를 나타낸 것이며, (b)는 마모거리 400m, 속도 3.53m/sec에서 SiC입자 첨가량의 변화에 따른 복합재료의 표면

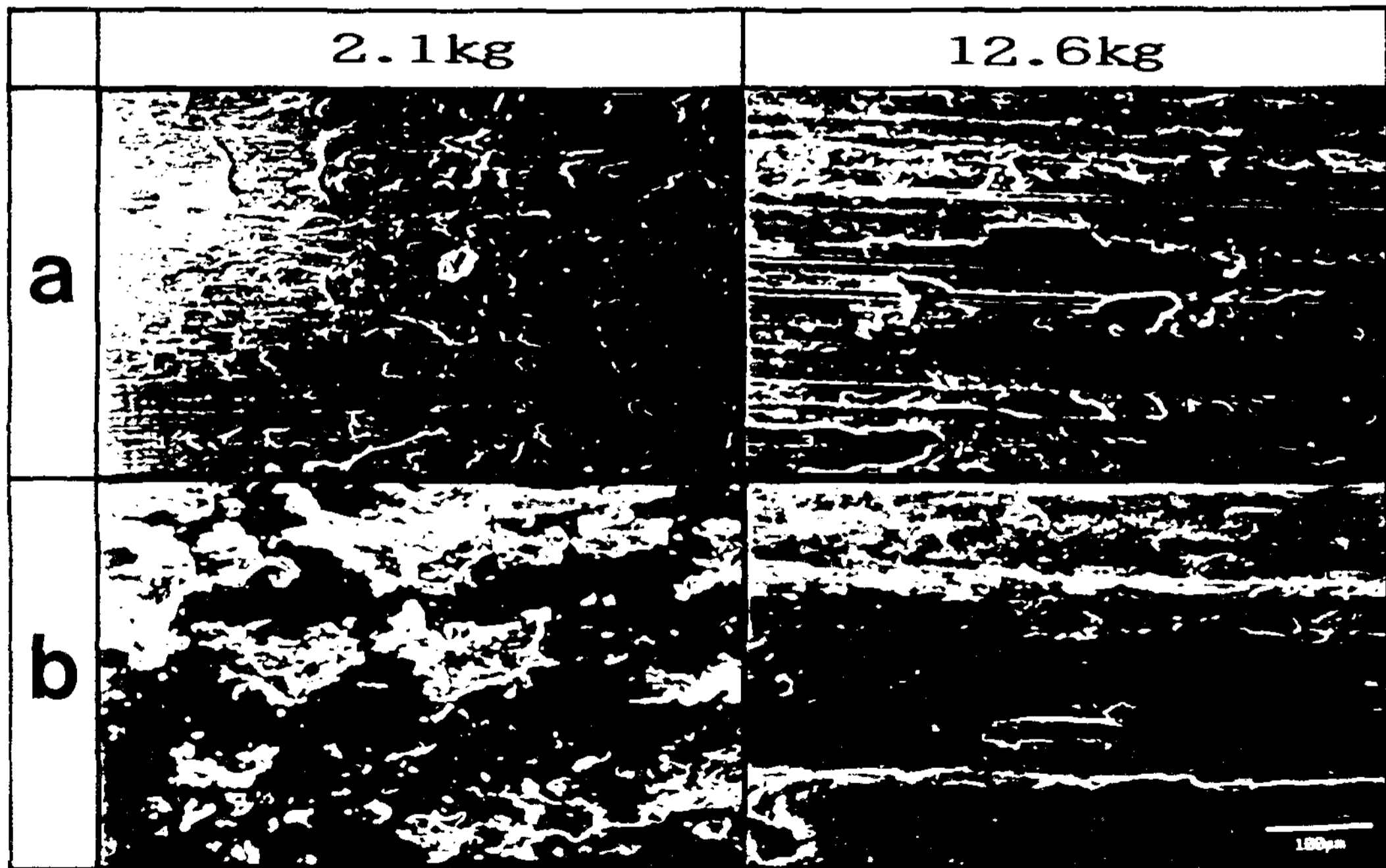


Photo 3. SEM of worn surfaces of matrix alloy and composite
(a) matrix alloy (b) composite(30vol% SiC)

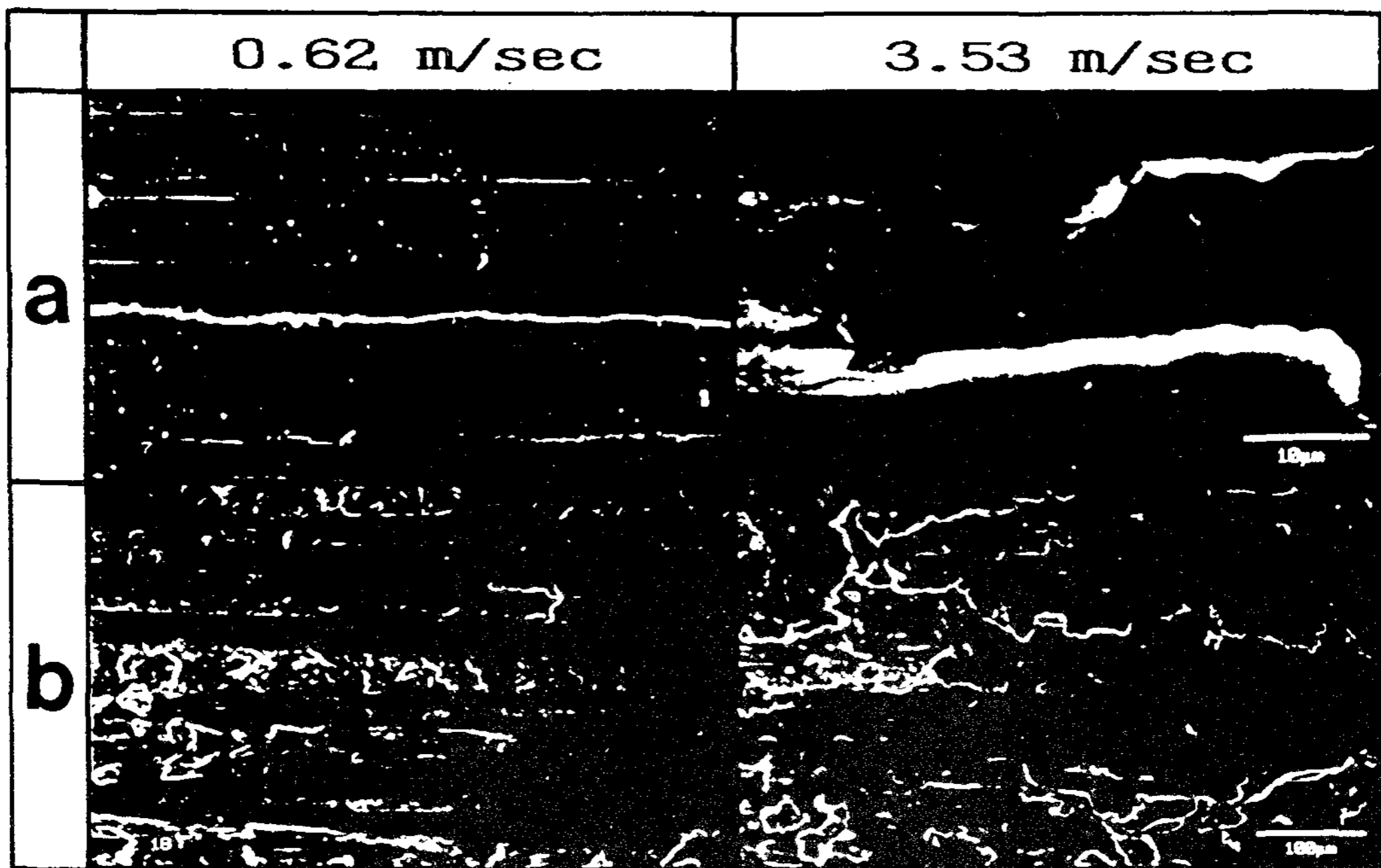


Photo 4. SEM of worn surfaces of matrix alloy and composite
(a) matrix alloy (b) composite(30vol% SiC)

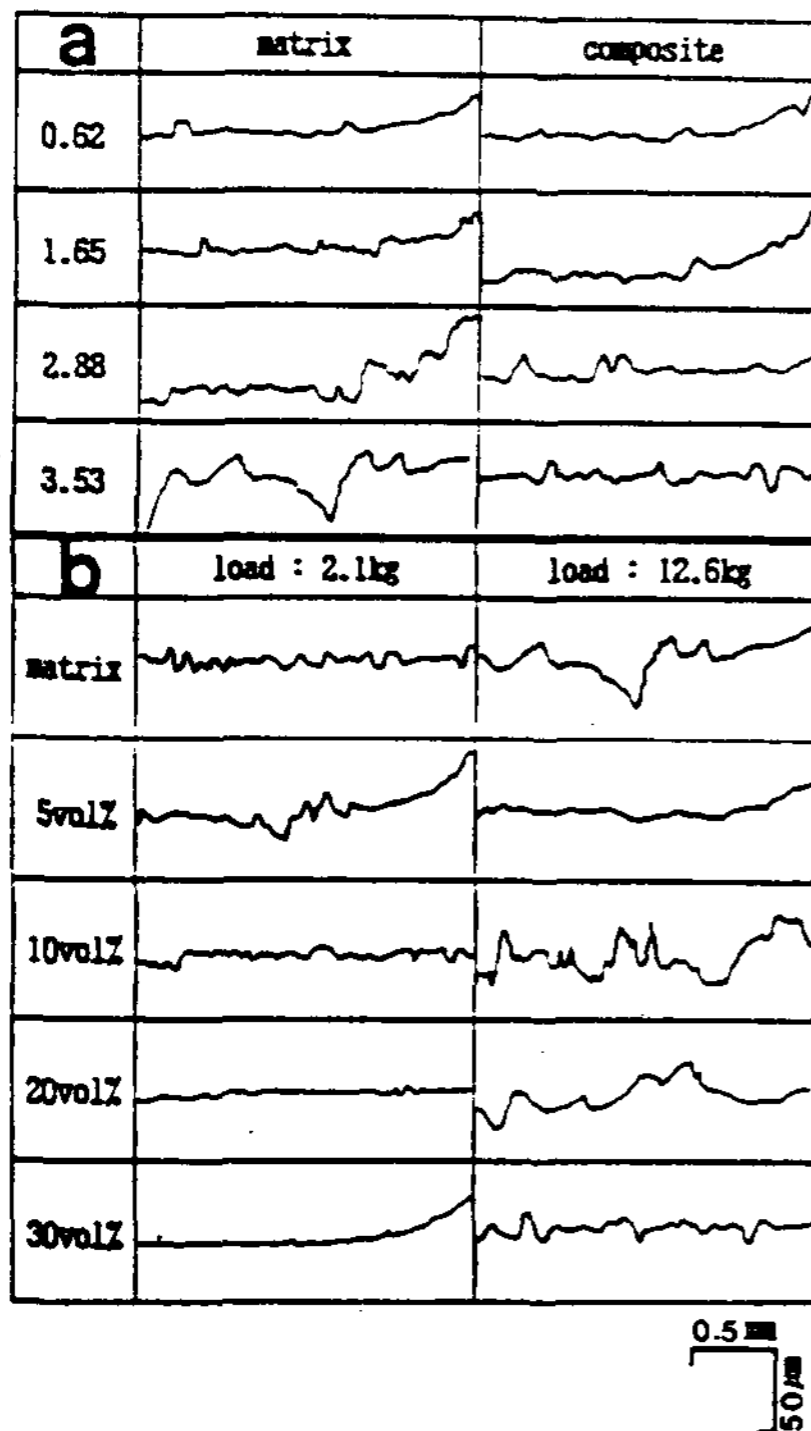


Fig. 3. Line profiles of surface roughness after wear test
(a) line profile of matrix alloy and composite
(b) line profile of load : 2.1kg, 12.6kg

거칠기를 나타내었다. (a)의 경우 기지금속과 복합재료의 표면거칠기는 마모속도가 증가할수록 증가되었으나, 복합재료의 경우에는 기지금속에 비하여 마모속도의 영향은 그다지 크지 않았다. (b)의 경우, SiC입자의 부피분율이 증가할수록 표면거칠기는 감소되는 경향을 나타내고, 저하중에서보다 고하중일 때 표면거칠기는 더욱 증가되었다. 그러나 5vol% SiC 입자강화 복합재료의 경우, 고하중(12.6kg)에서는 Photo 1 (b)에서와 같은 현상으로 표면거칠기는 현저히 작은 값을 나타내었다. 이와같이 표면거칠기의 변화는 각 마모시험 조건에서 마모기구가 변화하기 때문으로 생각되었다. Okabayashi¹⁶⁾ 등은 마모속도가 고속으로 됨에 따라 마모량이 증가하여 H_{max} 가 크게 되고, 소착이 일어날 경우 H_{max} 는 현저히 크게 된다는 보고와 본 실험결과는 거의 일치함을 나타내었다.

3.3 마모분 관찰

물체가 마모를 일으킬 때는 반드시 그 일부가 마모분말로서 탈락한다. Kimura¹⁷⁾ 등은 극한 통계법을 이용하여 마모분의 평균체적은 마모속도

에 비례하며, 마모속도가 증가할수록 마모분의 평균체적은 증가한다고 보고하였다. Photo 5는 마모거리 400m, 하중 12.6kg에서 마모시험 후 마모분의 SEM사진은 나타내었다. (a) 및 (b)는 각각 기지금속 및 30vol% SiC입자강화 복합재료의 마모분을 나타내었다. 기지금속의 경우 저속에서 마모분의 크기는 고속에 비해 적고 미세한 흑색분말과 일부 금속광택을 가진 입자가 관찰되었으며, 마모속도가 증가함에 따라 미세한 흑색분말은 감소하고 금속성의 조대한 입자가 관찰되었다. 이것은 저속, 고하중에서는 산소흡착이 충분히 이루어지기 때문에 상대 disc에서 탈락한 미세한 Fe입자가 대기중 산소와 반응하여 산화된¹³⁾ 미세한 흑색분말과 마찰면에 작용하는 큰 전단력에 의해 기지금속이 금속분으로 탈락되어 혼재된 마모분이 관찰되었다. 또한 고속, 고하중에서는 기지금속의 용융현상으로 용융상태에서 회전 disc에 의해 급냉응고한 것으로 보여지는 구상의 마모분이 관찰되었다. 그러나 복합재료에서는 속도가 증가함에 따라 미세한 흑색분말은

감소하고 기지금속 및 상대 disc 마모분으로 생각되는 금속성의 조대한 입자가 관찰되었으며, 특히 상대 disc의 성분인 금속광택의 조대한 Fe 마모분이 다량 관찰되었다. 따라서 마모분의 평균크기 및 형상은 고하중에서 속도가 증가할수록 기지합금은 구상에 가까운 조대한 형태를 나타내고, 복합재료는 조대한 괴상형태를 나타내므로 마모분의 평균크기는 마모속도에 비례하는 경향을 나타내었다. Fig. 4는 Photo 5의 고속마모 조건(3.53m/sec)하에서 형성된 마모분의 구성성분을 EDAX로 관찰한 것이다. 기지금속의 마모분은 AlK α 선 peak가 높고 FeK α 선 peak는 아주 낮은 값을 나타내었다. AlK α 선 peak는 Photo 5 (a)에서 알수 있는 바와 같이 용융마모에 의한 것이며, FeK α 선 peak는 초기 마모시 두 마찰면간의 미소돌기(시험편 :R_{max} 0.5 μ m, 상대 disc:5.5 μ m)의 전단에 의한 상대 disc의 기계적 파괴(마모¹⁵⁾)에 기인된 것으로서 아주 적게 나타내었다. 그러나 복합재료의 경우, 연삭마모에 의해 상대 disc의 마모는 상대적으로 증가되어 FeK α 선

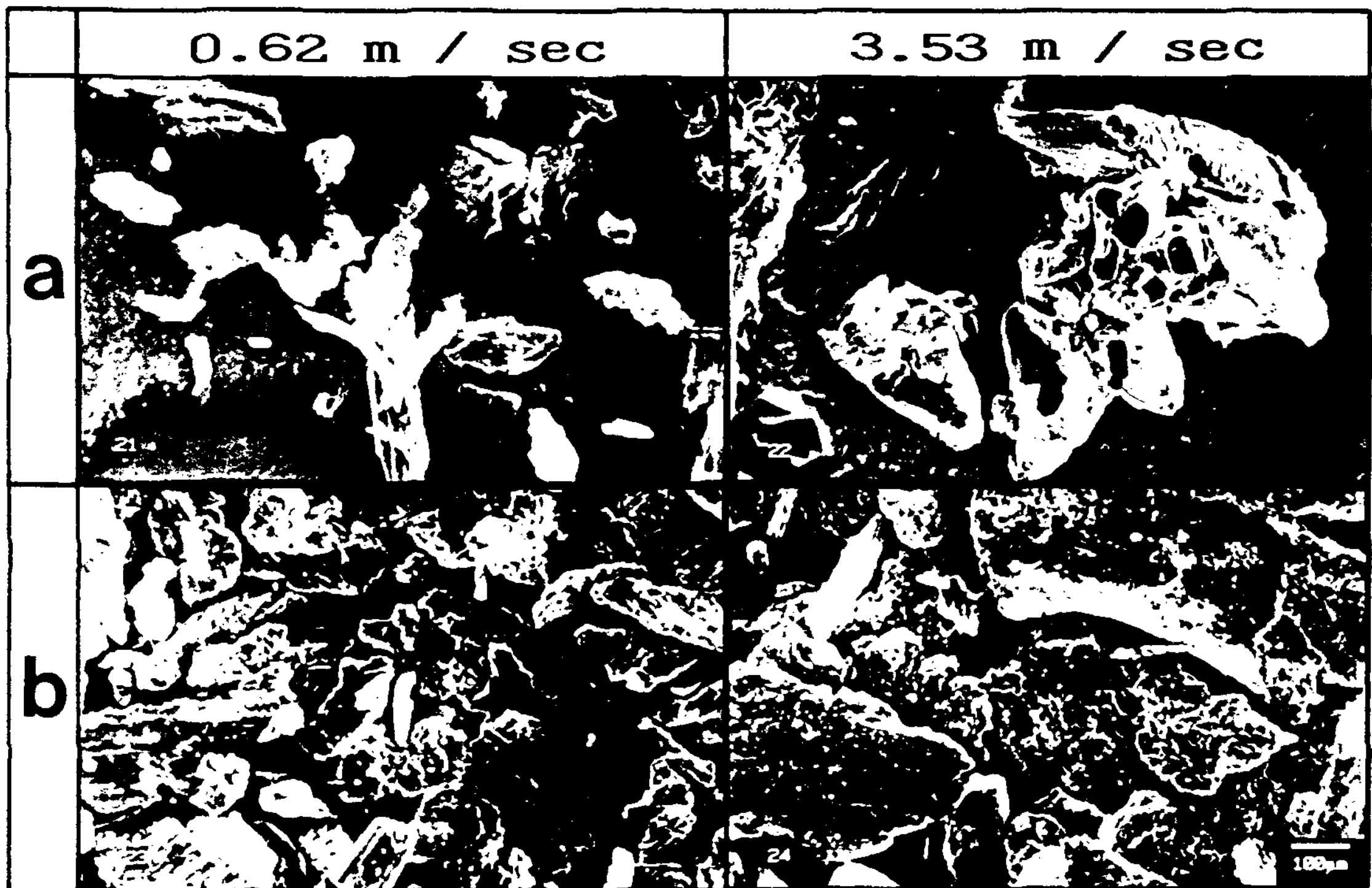
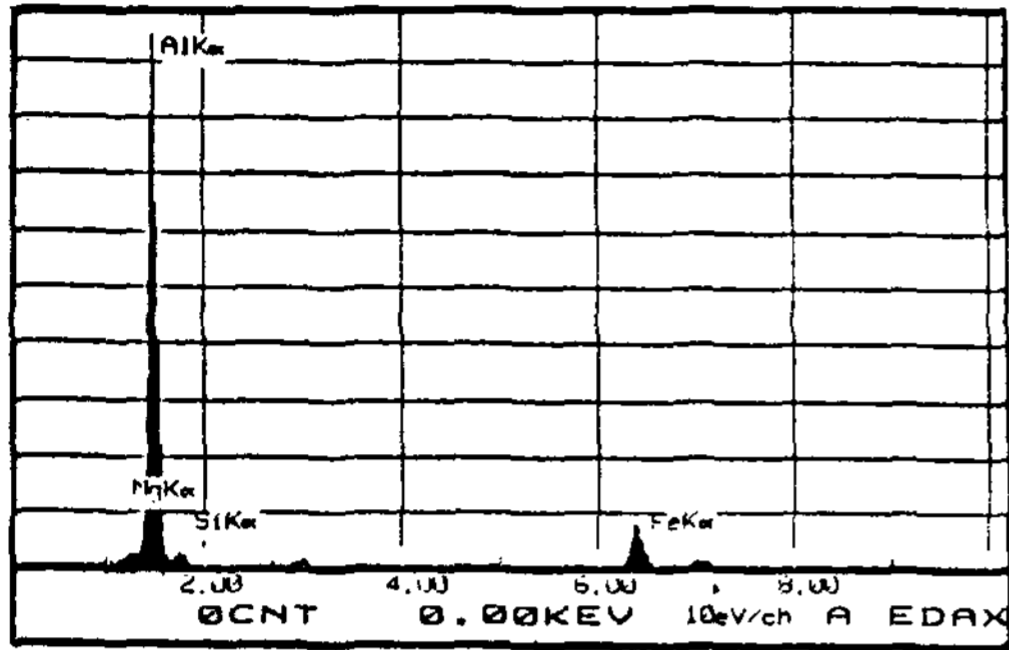
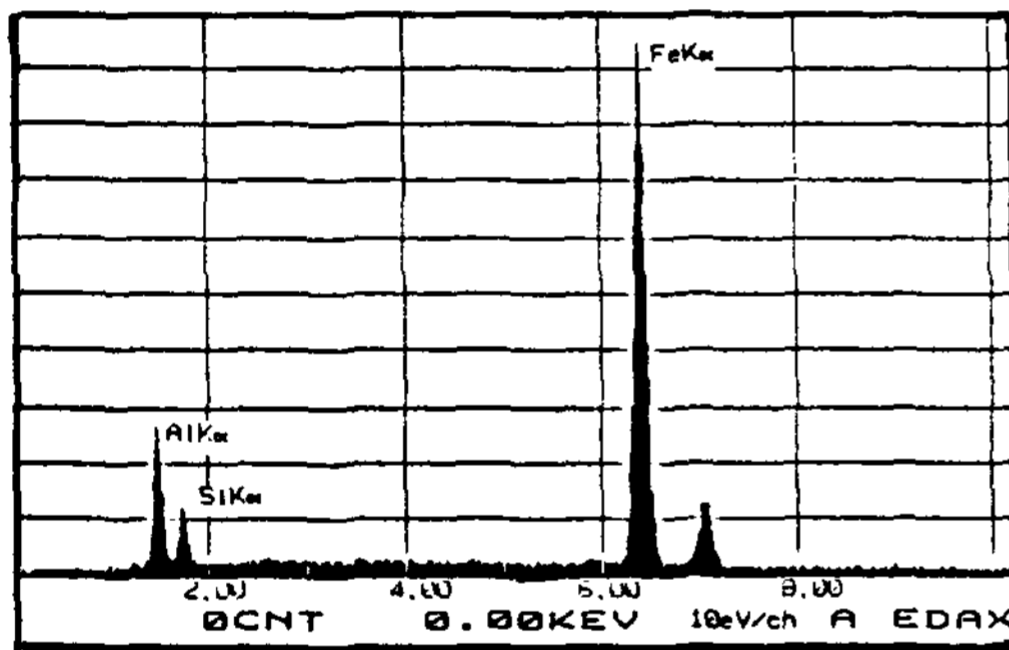


Photo 5. SEM microphotograph of wear debris particles obtained under various wear conditions (a) matrix alloy (b) composite(30vol% SiC)

peak는 크게 나타내었다. 따라서 마모에 의해 탈락한 마모분의 성분, 크기 및 형상으로부터 기지 금속 및 복합재료의 마모기구를 예상할 수 있었다.



(a) matrix alloy



(b) composite(30vol% SiC)

Fig. 4. X-ray diffraction pattern of wear debris

3.4 속도-마모특성

본 실험에서는 마모시험에서 일반적으로 사용되는 중량 감소량을 구하는 방법으로 마모량을 측정했다. Fig. 5는 고속(3.53m/sec), 고하중(12.6kg)에서 마모량에 미치는 마모속도 및 SiC입자 첨가량의 영향을 나타내었다. (a) 및 (b)는 각각 시편 및 상대 disc의 마모시험결과를 나타내었다. 시편의 경우, 기지금속은 마모속도가 증가함에 따라 마모량이 증가하다가 감소하는 경향을 나타내었다. 이와같은 현상은 응착마모에 의해 기지금속이 직접 노출되어 마모량이 극대치로 되고 마찰속도가 증가되면 마찰면의 온도가 상승하여 기지금속의 용융현상으로 마모면이 평활화되어 진접촉압력의 감소¹³⁾ 및 용융된 부분이 산화되어 윤활작용을 함으로써 마모량이 감소된 결과

로 생각되었다. 그러나 상대 disc (b)에서는 기지 금속의 심한 이착현상으로 중량증가를 나타내었다($56 \times 10^{-4}g$). 또한 5vol% SiC입자강화 복합재료는 SiC입자 강화효과보다는 고속에 의한 마찰면 온도의 영향으로 2.88m/sec의 마모속도까지는 기지금속과 비슷한 마모경향을 나타내지만, 3.53m/sec의 고속에서는 Photo 2 (b)에서 나타낸 바와 같이 상대 disc의 이착현상으로 중량증가를 나타내고($56 \times 10^{-4}g$), 상대 disc (b)에서는 중량 감소현상을 나타내었다($-53 \times 10^{-4}g$). 그러나 10vol% 이상 SiC입자강화 복합재료에서는 2.88m/sec를 기준으로 속도가 증가할수록 마모량이 증가하다가 그 이상의 마모속도에서는 역으로 마모량이 감소되었다. 이와같은 현상은 저속구역에서는 두 면간의 연삭마모에 의해 마모량이 증가하다가 그 이상의 속도에서는 연삭마모시 생성된 상대 disc의 미세한 Fe입자가 시편에 이착되어, 대기중 산소와 반응하여 마찰면에 산화막이 형성되어 두 면간의 마찰면에서 윤활작용 및 금속간 응착방지^{13,14)}, 산화피막에 의한 단열효과, 마찰면의 평균온도 상승억제¹⁸⁾ 및 마찰계수 감소^{5,6)} 등으로 마모량이 감소하는 것으로 생각되었다. 그러나 상대 disc의 마모량은 증가하였다. 이것은 고 경도의 SiC입자에 의해 연삭마모가 일어나 상대 disc로부터 탈락한 Fe 마모분은 연질인 복합재료의 기지금속내에 이착 또는 매몰되어, 기지금속의 동종마모 경우와 같이 복합재료 표면에 이착된 Fe성분과 상대 disc가 부분적 동종마모가 일어나 마모량이 증가된 것으로 생각되었다. Saga⁸⁾ 등은 시편에 매몰된 Fe성분의 산화물은 상대 disc에 대하여 scratch 혹은 groove 등의 마모손상을 일으키는 원인이 된다고 하였다. 즉 두 면간에 연삭마모가 일어나서 시편의 마모량은 적으나, 상대 disc의 마모량은 크게 되었다. 따라서 속도변화에 따른 마모양상은 재료에 따라 다양하나 기지금속은 고속, 고하중에서 마찰면의 온도 상승으로 주된 마모기구는 응착 및 용융마모로 되어 마모량이 크게 증가하고, 복합재료(30vol%)는 경도, 내마모성 및 내열성이 우수한 SiC입자가 마모에 대한 저항을 나타내기 때문에 연삭마모가 일어나, 마모량은 기지금속에 비해 마모 속도 2.88m/sec에서 1/130로 감소하였다.

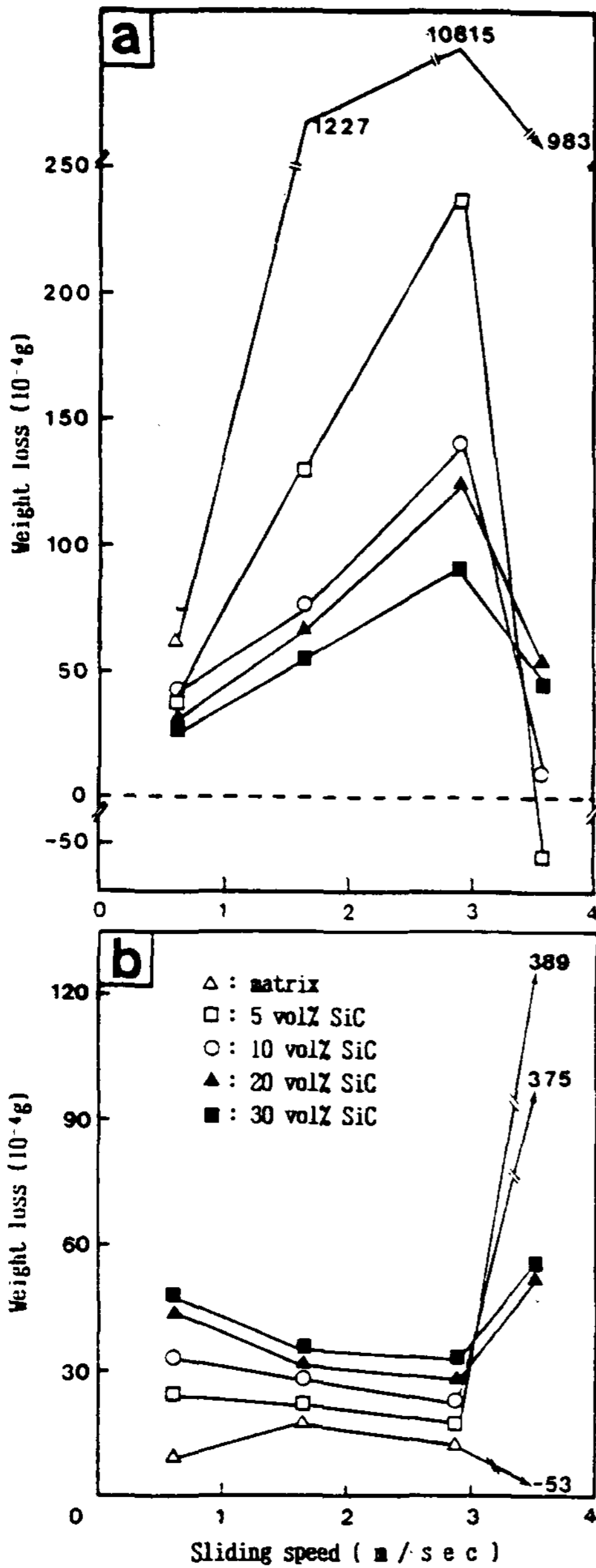


Fig. 5. Wear characteristics of matrix alloy and composite at various sliding speed
(a) specimen (b) revolving disc

4. 결 론

Rheo-compocasting 및 hot press에 의해서 SiC입자강화 복합재료를 제조하여 대기중 건식

마모시험에 의하여 기지합금과 복합재료의 마모 특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) Rheo-compocasting 후 hot press에 의해서 얻어진 복합재료는 입자의 분산성이 양호하고, T6처리에 의하여 경도는 약 15% 향상되었다.

2) 5vol% 복합재료의 마모면에는 상대 disc의 Fe가 약 300 μ m로 코팅되어 마모시험후 중량증가를 나타내고, 30vol% 복합재료의 마찰면 직하에는 SiC입자가 미세하게 파괴되었다.

3) 마모면의 표면거칠기는 속도가 증가할수록 크게 되고, SiC입자 첨가량이 증가할수록 감소되었으며, 마모분의 평균 크기는 마모속도에 비례하여 증가하는 경향을 나타내었다.

4) 고속, 고하중하에서 기지금속의 주된 마모는 응착 및 용융마모에 의하여 마모량이 크게 증가하고, 복합재료에서는 고경도의 SiC입자에 의해 연삭마모가 일어나 마모량이 감소하고, 상대 disc의 마모량은 증가하였다.

참 고 문 헌

1. 森田幹部 : MMのお好み焼き (金屬複合材料), 冬街社, (1989) 71
2. 池也進, 多多靜夫 : 輕金屬, 37, 6 (1987) 419
3. 이학주, 홍준표 : 한국주조공학회지, 11, 4 (1991) 293
4. D. J. Lloyd : Composite Science and Technology, 35 (1989) 159
5. 三浦恒井, 福井一郎 : 輕金屬, 39, 8 (1989) 555
6. F. M. Hosking, F. Folgsrportillo, R. Wunderlin : J. of Meter., 17 (1982) 477
7. 山田始, 田中他善男 : 輕金屬, 39, 2 (1989) 123
8. 嵯峨常生, 竹内榮一 : 輕金屬, 32, 8 (1982) 402
9. Than Trong Long, T. Aisaka, M. Ose and M. Morita : J. Japan Inst. Metals, 51, 9 (1987) 864
10. S. Towata, S. Yamada : J. Japan Inst. Metals, 48, 12 (1984) 1192
11. B. Derby, J. R. Walker : Scr. Met., 22 (1988) 529

12. N. Yahata : J. Japan Inst. Metals, 47, 8 (1983) 692
13. T. Tomita, Y. Takatani, G. Hashizume and Y. Harada : J. Japan Inst. Metals, 54, 6 (1990) 664
14. 柳瀬政俊, 江川勝一, 津田昌利 : 輕金屬, 32, 2 (1982) 82
15. A. W. Ruff, L. K. Ives, W. A. Glaesr : Fundamentals of Friction and Wear of Materials, (1980) 258
16. 岡林邦夫, 中谷義三, 野谷秀雄, 川本信 : 輕金屬, 14, 6 (1964) 71
17. 木村 : 潤滑, 17, 1 (1972) 53
18. 岡林邦夫, 川本信 : 潤滑, 18, 4 (1973) 282