

|||||||
論 文
|||||||

무가압 침투법에 의해 제조된 Al-5Mg-X(Si,Cu,Ti)/SiC_p 복합재료의 조직 및 마멸특성

우기도 · 김석원 · 안행근 · 정진호*

Microstructure and Wear Property of Al-5Mg-X(Si,Cu,Ti)/SiC_p Composites Fabricated by Pressureless Infiltration Method

Kee-Do Woo, Sug-Won Kim, Haeng-Keun Ahn and Jin-Ho Jeong*

Abstract

Metal matrix composites(MMCs) reinforced with hard particles have many potential application in aerospace structures, auto parts, semiconductor package, heat resistant panels, wear resistant materials and so on. In this work, the effect of SiC particle sizes(50 and 100 μm) and additional elements such as Si, Cu and Ti on the microstructure and the wear property of Al-5Mg-X(Si,Cu,Ti)/SiC_p composites produced by pressureless infiltration method have been investigated using optical microscopy, scanning electron microcopy(SEM) with EDS(energy dispersive spectrometry), hardness test, X-ray diffractometer(XRD) and wear test. In present study, the sound Al-5Mg-X(Si, Cu,Ti)/SiC_p(50 and 100 μm) composites were fabricated by pressureless infiltration method. The Al-5Mg-0.3Si-0.1Cu-0.1Ti/SiC_p composite with 50 μm size of SiC particle has higher hardness and better wear property than any other composite with 100 μm size of SiC particle produced by pressureless infiltration method. The hardness and wear property of Al-5Mg/SiC_p(50 and 100 μm) composites were enhanced by the addition of Si, Cu and Ti in Al-5%Mg matrix alloy. (Received April 27, 2000)

1. 서 론

최근 자동차산업, 항공기산업 및 철도차량산업 부품 재료로서 경량이면서 고강도, 내열 및 내마모 특성을 갖는 알루미늄 복합재료의 개발이 매우 필요하다[1,2]. 최근 주조법에 의해 저가의 세라믹 입자강화 MMC를 제조하는 방법이 널리 활용되고 있으나 용융금속과 세라믹상 사이의 젖음성이 문제가 되므로, 이를 극복하기 위해서는 용탕 교반 및 스퀴즈 캐스팅법이 이용되고 있다[3-7]. 용탕교반법에서는 용융금속을 교반할 때 세라믹상이 뭉치는 현상과 세라믹상이 파괴되기도 하며, 심한 계면반응이 생기기도 한다. 이와 같은 단점을 개선하기 위한 방법으로서 자발침투 및 *in situ* 반응을 이용한 복합재료의 제조방법이 있으며 Lanxide process가 그 대표적인 방법이다. 이 Lanxide process

방법으로 제조된 알루미늄 복합재료는 상기한 단점이 해결되며 또한 가볍고 고기능을 갖게 된다고 알려져 있다[8-13].

본 연구에서는 Lanxide process를 이용하여 보다 고강도 및 고내마멸성을 갖는 MMC제조를 위하여 입자 크기가 상이한 SiC분말에 Al-5%Mg합금을 무가압 침투시켜 Al-5%Mg/SiC_p 복합재료를 제조하여 제조된 복합재료의 조직 및 특성을 평가하였다. 또한 Al-5%Mg 기본 합금에 Si, Cu, Ti 등을 단독 및 복합첨가함으로써 SiC분말과 *in-situ* 반응에[13] 의한 TiC상의 생성과 Si, Cu 등을 첨가에 의한 제2상의 생성등을 SEM의 EDS 및 XRD를 이용하여 조사하였고 또한 제조된 복합재료의 마멸성도 조사하였다.

2. 실험방법

*동방금속(Dongbang Special Steel Co.)
전북대학교 신소재공학부, 신소재개발연구소(Division of New Materials Engineering & The Research Institute of Advanced Materials Development, Chonbuk National University)

2.1 시편 제조 및 조직관찰

Fig. 1은 본 실험에서 알루미늄 도가니 안에서 SiC 분말베드 위에 Al-5Mg 및 Al-5Mg-X(Si, Cu, Ti)합금을 올려놓고 예비실험에서 설정된 제조조건인 10cc/min의 질소를 흘려주면서 950°C의 온도로 5시간동안 가열하여 용융금속을 자발침투시켜 복합재료를 제조한 후 산화방지를 위해 약 550°C까지 질소분위기인 노안에서 냉각시킨 후 노로부터 시편을 꺼내어 공냉하였다. 사용한 SiC 입자는 50 및 100 μm 크기의 두 종류로 하였고, 기지합금은 Al-5wt%Mg-X(Si, Cu, Ti) 조성의 합금을 사용하였다. Table 1은 본 시험에 사용된 복합재료의 설계 조성이다.

제조된 복합재를 다이아몬드 휠로 절단후 다이아몬드 페이스트를 사용하여 연마를 하여 복합재의 SiC 입자의 분포, 생성상의 조직등을 광학현미경과 SEM 및 XRD로 관찰하였다. 또한 상분석기(Image analysis)를 이용하여 각 상의 량을 측정하였다. X-선 회절시험에서

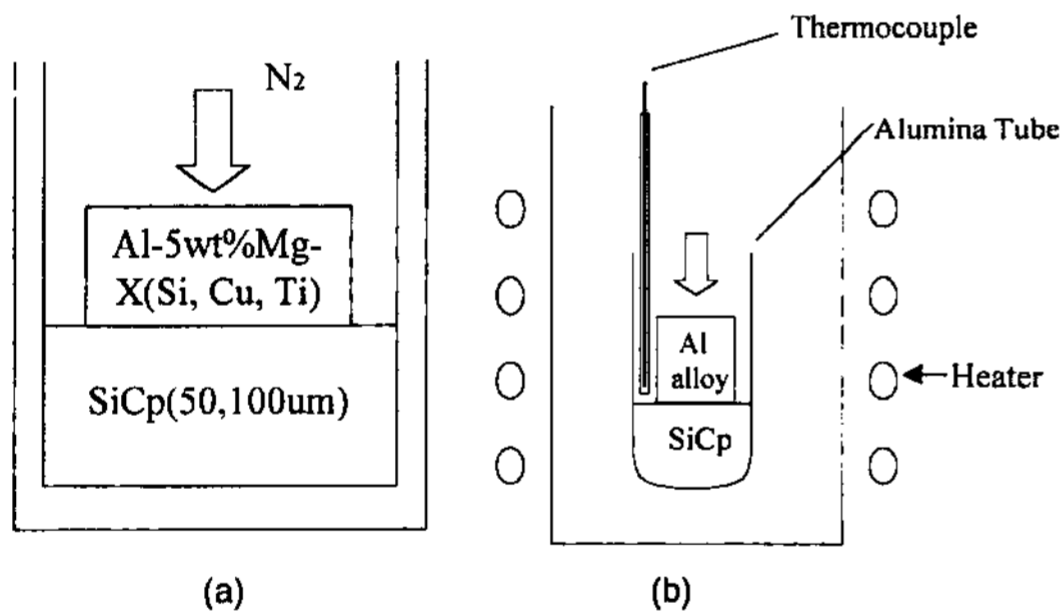


Fig. 1. Schematic diagrams of the experimental apparatus. Diagrams of infiltration apparatus(a) and furnace apparatus(b).

Table 1. Chemical compositions of mother alloys (wt%).

Alloy No.	Alloy design
R0	Al-5Mg alloy
A0	Al-5Mg/SiC _p composite
A1	Al-5Mg-0.3Si/SiC _p composite
A2	Al-5Mg-0.3Si-0.1Cu/SiC _p composite
A3	Al-5Mg-0.3Si-0.1Cu-0.1Ti/SiC _p composite
B0	Al-5Mg/SiC _p composite
B1	Al-5Mg-0.3Si/SiC _p composite
B2	Al-5Mg-0.3Si-0.1Cu/SiC _p composite
B3	Al-5Mg-0.3Si-0.1Cu-0.1Ti/SiC _p composite

* A: 100 μm SiC_p, B: 50 μmSiC_p

회절분석 조건은 CuKα(λ = 1.542Å) 타겟을 사용하였으며, 30 kV, 20 mA에서 scan speed : 5°/min, 회절범위는 10°~90°(2θ)로 하였다.

2.2 경도 및 마멸시험

본 제조공정에서 제조한 복합재는 균일한 강화입자의 분산상을 얻었으므로 경도측정은 Rockwell 경도기(B scale)를 사용하였다. 경도측정은 시편 중심부위를 각각 7회씩 측정하여 최대값과 최소값을 제외한 나머지 값을 산술 평균하여 구하였다.

제조된 시편의 내마멸 특성은 원판식 고속마멸 실험기(OAT-U type)와 SEM를 이용하여 조사하였다. 마멸 시험은 건식으로 하였으며 최종하중(Final-load)은 12.6 Kg, 주행거리(Sliding distance)는 800m, 주행속도(Sliding speed)는 0.59, 1.09, 1.9, 4.21 sec/m로 변환시켜 속도의 변화에 대한 SiC 입자강화 크기 및 체적분율에 따른 마멸면과 마멸량을 관찰하였다.

마멸량은 마멸된 현의 길이와 상대 마멸재의 폭을 곱한 체적이며 아래와 같은 식을 이용하여 계산하였다. [8,9]

$$W \approx Bb^3/12r$$

여기서 W, B, r과 b는 각각 마모량(mm³), 상대재료의 회전 디스크(revolving disc) 폭(mm), 상대재료의 회전디스크 반경(mm) 및 마멸된 단면의 현 길이(mm)를 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3.1 복합재의 미세 조직과 상분석

Fig. 2는 Al-5Mg-X(Si, Cu, Ti)/SiC_p(50, 100 μm) 복합재료의 주사전자현미경 조직사진으로서 a)에서의 같이 복합재료의 일부에서 기공도 관찰되었으나 전반적으로 알루미늄 합금 용탕이 SiC 입자사이로 우수한 침투현상을 보였다. 이것은 질소의 적절한 유량(10cc/min)과 5 wt%의 Mg의 첨가에 의하여 젖음성이 크게 개선되었기 때문으로 사료된다. Suganuma[6]에 의하면 3 wt% 이상의 Mg을 첨가하면 침투가 용이하다고 하였다.

Al-5Mg-X(Si, Cu, Ti)/SiC_p(50, 100 μm) 복합재료 중에서 SiC_p(50, 100 μm) 모양이 톱니바퀴 모양의 형태로 변화했는데 이것은 침투과정 중 SiC가 Al과 반

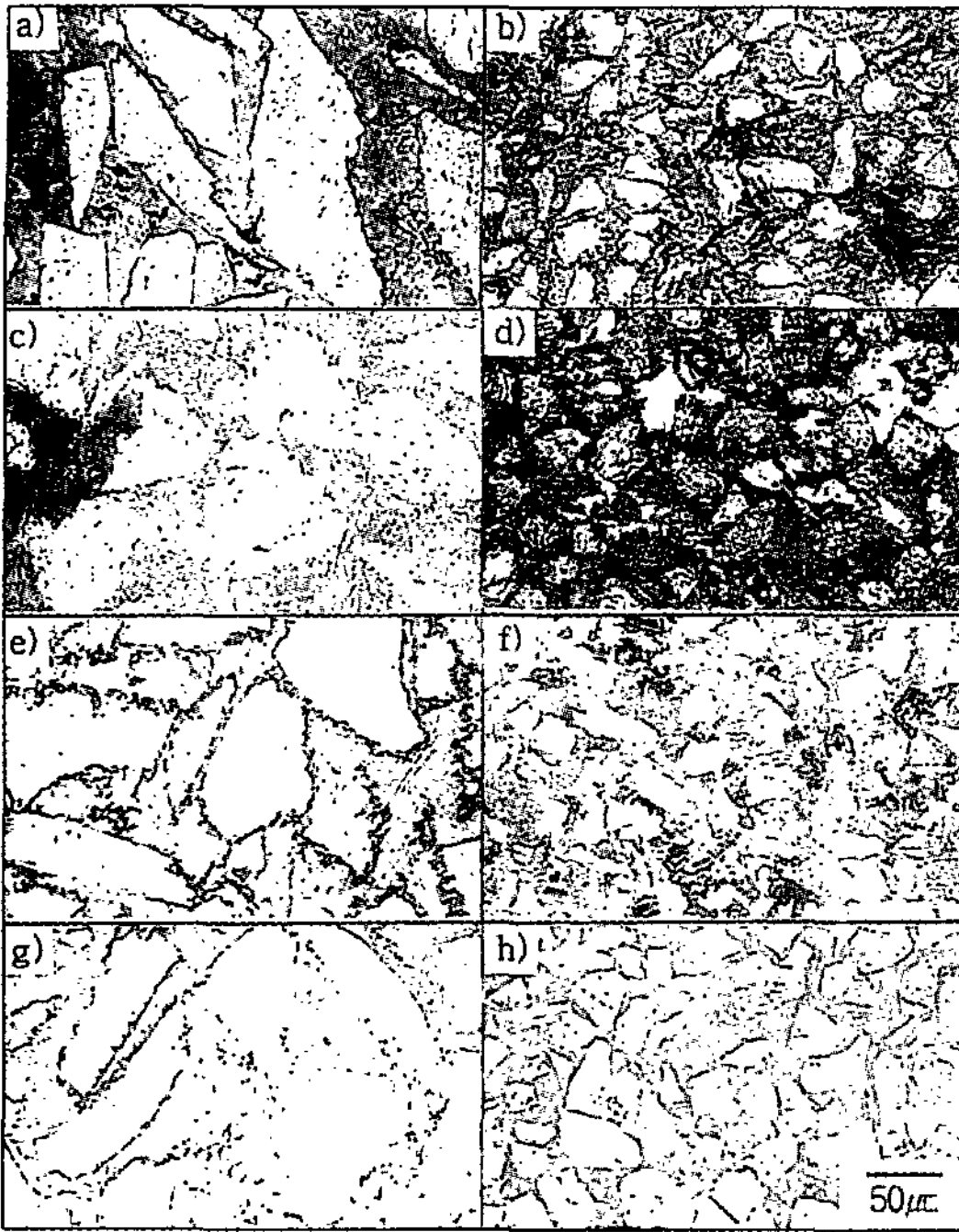


Fig. 2. SEM micrographs of Al-5Mg-X(Si,Cu,Ti)/SiC_p (50, 100 μm) composites
 (a)Al-5Mg/SiC_p(A0) (b)Al-5Mg/SiC_p(B0)
 (c)Al-5Mg-0.3Si/SiC_p(A1) (d)Al-5Mg-0.3Si/SiC_p(B1)
 (e)Al-5Mg-0.3Si-0.1Cu/SiC_p(A2)
 (f)Al-5Mg -0.3Si-0.1Cu/SiC_p(B2)
 (g)Al-5Mg-0.3Si-0.1Cu-0.1Ti/SiC_p(A3)
 (h)Al-5Mg-0.3Si-0.1Cu-0.1Ti/SiC_p(B3)

Table 2. The area percentage(%) of SiC particles in composites.

Specimens	A0	A1	A2	A3	B0	B1	B2	B3
SiC particle area (%)	51.8	50.5	51.5	50.3	58.8	55.9	56.8	57.9

응하여 Al₄C₃를 형성하였기 때문으로 사료된다. SiC 입자크기가 상대적으로 조대한 100 μm SiC 입자의 부피분율이 미세한 50 μm SiC 입자의 부피분율 보다 작은 것을 알 수 있으며 정량적으로 상분석기를 이용하여 면적 분율을 구한 결과가 Table 2와 같다.

SiC 입자크기 및 첨가합금에 관계없이 복합재료에서 입자의 면적분율은 유사하였다. 모합금과 SiC 입자간 침투과정에 생성되는 반응물을 조사하기 위하여 주사전자 현미경의 EDS분석기와 XRD를 이용하였다.

Fig. 3에서는 주사전자 현미경의 EDS를 이용하여 복합재료 제조간 생성되는 반응물을 조사하기 위하여 C, Si, Mg, Cu 성분분석을 한 결과를 나타내었다.

이와 같은 현상은 선분석 결과에서도 잘 나타내 주고 있었다.[10] 분석결과 SiC 입자와 모상의 계면에 Mg이 다량 분포하고 있으며 SiC 입자주위에 생성된 상을 점분석 한 결과[10] Mg과 Si이 각각 61at% 및 37at%가 되었으며 따라서 이 상이 Mg rich 상이라 사료된다.

Fig. 4에서는 Al-5Mg-0.3Si/SiC_p 및 Al-5Mg-0.3Si-0.1Cu-0.1Ti/SiC_p 복합재료의 XRD결과로서 Mg₂Si,

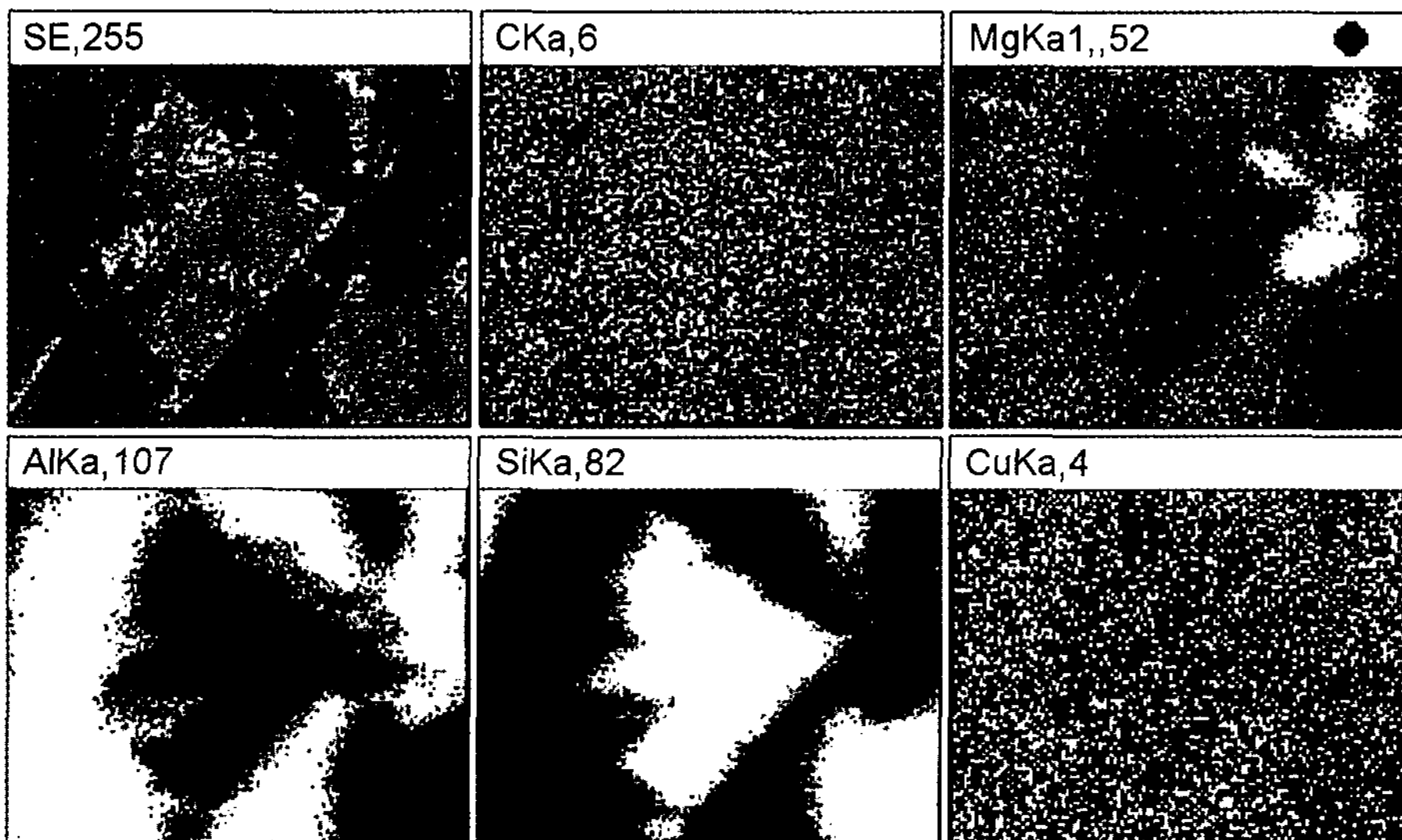


Fig. 3. Analysis of elements(C, Mg, Al,Si, Cu) in as-fabricated Al-5Mg-0.3Si-0.1Cu-0.1Ti/SiC_p composite(A3) using EDS.

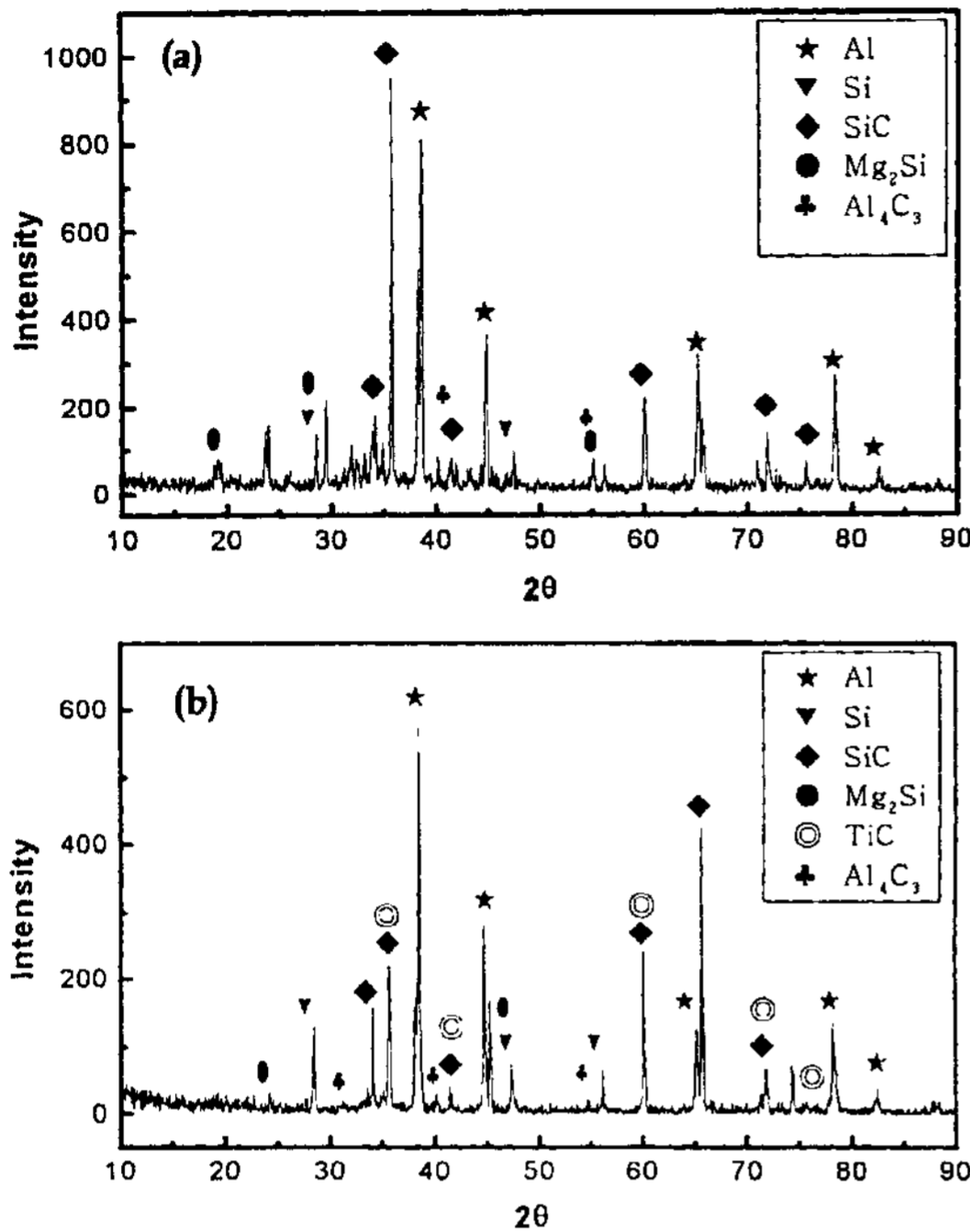


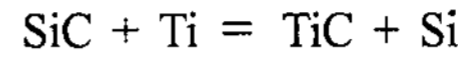
Fig. 4. X-ray diffraction patterns of composites. (a) Al-5Mg-0.3Si/SiC_p(A1) (b) Al-5Mg-0.3Si-0.1Cu-0.1Ti/SiC_p(A3)

Al₄C₃ 피크가 SiC 피크와 함께 나타나고 있으나 Ti을 첨가한 Fig. 4(b)에서는 이들 생성상 이외에 TiC상이 생성되었다. 이 중 Al₄C₃상은 취약하여 강화재인 입자와 기지의 계면 강도에 악영향을 미치며[11] 위에서 기술한 반응에 의하여 생성되는 것으로 알려져 있다. 또한 제조중에 생성되리라 예측되었던 θ(CuAl₂)상은 Fig. 4(b)에서 분석되지 않았으나 TiC상이 분석되는 것으로 보아 제조중 Ti과 SiC의 C와 반응하여 SiC보다 안정한[12,13] TiC가 생성된 것으로 사료된다. 이와 같이 생성된 TiC는 복합재료의 기계적 성질에도 영향을 미치리라 사료된다.

3.2 경도에 미치는 SiC 입자크기 및 첨가원소의 영향

Table 3에서는 미세한 SiC 입자로 제조한 복합재료가 조대한 SiC 입자로 제조한 복합재료보다 경도 값이 높은 것을 알 수 있다. 이는 복합재료에서 SiC입자 체

적용의 차이에 기인한다고 생각된다. 또한 Ti이 첨가된 복합재료의 경도가 높은 것은 아래와 같은 *in-situ* 반응에 의하여 생성된 TiC형성에 기인한 것으로 사료된다[13].



3.3 내마멸성에 미치는 입자크기 및 첨가원소의 영향

마멸기구는 마멸면에서의 metal transfer morphology 및 마멸분, 마멸면을 관찰함으로써 마멸상태를 관찰할 수 있으며 마멸기구는 응착(adhesion), 연삭(abrasion), 산화(oxidation) 및 용융(fusion)기구로 구분할 수 있다 [1,8,9].

Fig. 5는 제조된 복합재료의 sliding speed에 따른 마멸량의 변화를 나타낸 것이다. 모든 복합재료에 있어서 마멸량은 1.09 m/s까지는 증가하다가 그보다 고속에서는 마멸량이 다시 감소되었다. 저속마멸의 경우 SiC가 기지로부터 분리되어 빠져나가므로 기지는 용이하게 마멸 현상이 일어나며 마멸량은 마멸 속도의 증가에

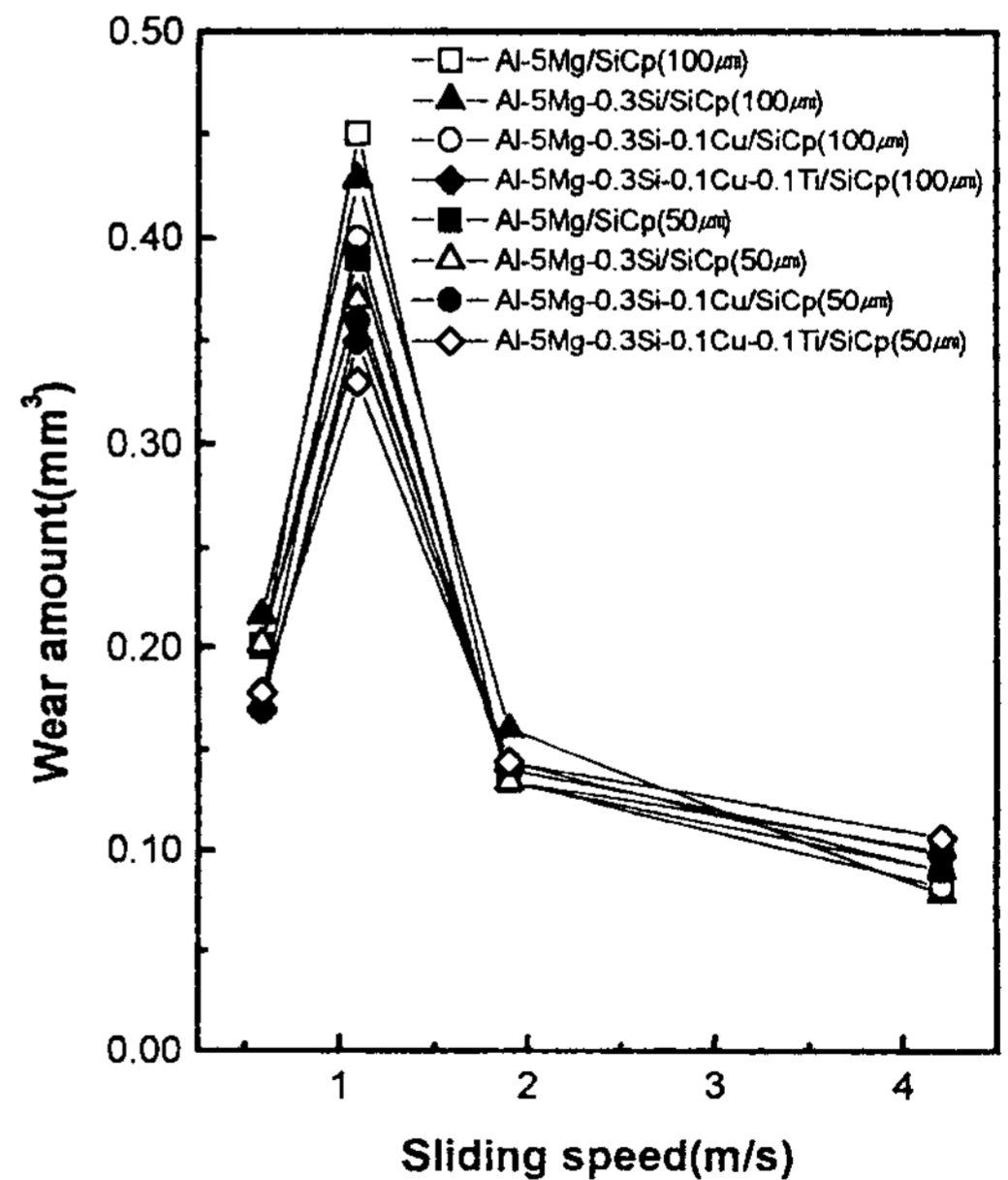


Fig. 5. Changes of wear amount as-fabricated Al-5Mg-0.3Si-0.1Cu-0.1Ti/SiC_p composites(A3).

Table 3. Hardness changes of Al-5Mg alloy and Al-5Mg-X(Si, Cu, Ti) /SiC_p(50, 100 μm) composites as fabricated.

Specimens	A0	A1	A2	A3	B0	B1	B2	B3
Hardness(HRB)	30-35	88-95	89-95	91-96	97-104	98-105	99-104	100-106

따라 증가된다. 어느 임계 마멸 속도(1.09m/s)를 초과하면 SiC 입자가 부서지면서 연삭마멸되어 이들 입자들이 상대적으로 연한 기지에 박히게되므로 내마멸성이 재차 증가된다고 생각된다. 그리고 50 μm SiC입자 강화 복합재료가 100 μm SiC입자 강화 복합재료 보다 내 마멸성이 우수한 것은 입자의 분포가 균일하여 마멸저항이 증가되며[9] 또한 경도도 높기 때문으로 사료된다. 재료의 내마멸성은 경도가 높을수록 우수하다는 이론[21]과도 잘 일치되고 있다. 특히 Ti을 첨가한 알루미늄 복합재료에서 저속 연마시 우수한 내마멸성을 나타내는 것은 제조중 생성된 TiC 입자에 기인한다고 사료된다.

Fig. 6은 마멸후 시편의 마멸면과 debris를 주사현미경으로 관찰한 것이다. 저속 마멸(1.09m/s)의 경우 입자가 기지로부터 이탈되어 빠져 나온 조대한 SiC입자와 마멸시험 동안 빠져 나온 조대한 입자의 일부가 상대재 및 입자간 상호충돌에 의하여 깨어진 미세한 SiC 입자가 공존하고 있다.

따라서 마멸면은 rough하다. 반면 고속 마멸(4.30m/s)의 경우 마멸면이 평활하고 debris의 크기도 미세한 것으로 보아 SiC입자가 기지로부터 빠져나오기 보다는 상대재에 의하여 연삭마멸 된 것을 알 수 있고, 깨어진 입자가 마멸 시험동안 모상에 박히게 되어 복합재의 마멸량을 감소시킨 것으로 사료된다.

s)의 경우 마멸면이 평활하고 debris의 크기도 미세한 것으로 보아 SiC입자가 기지로부터 빠져나오기 보다는 상대재에 의하여 연삭마멸 된 것을 알 수 있고, 깨어진 입자가 마멸 시험동안 모상에 박히게 되어 복합재의 마멸량을 감소시킨 것으로 사료된다.

4. 결 론

Al-5Mg-X(Si,Cu,Ti) 합금을 SiC 입자로 자발침투시켜 복합재료를 제조하여 조직 변화, 생성상을 분석하였다. 또한 제조된 복합재의 경도 및 내마멸성에 미치는 입자크기 및 첨가원소의 영향을 SEM, 상분석기, XRD, 경도 및 내마멸 측정기를 이용하여 조사한 결과는 아래와 같다.

질소분위기하에서 Al합금의 용융금속을 950°C의 온도로 5시간 동안 가열하여 SiC 분말베드로 자발 침투시켜 Al-5Mg-X(Si,Cu,Ti)/SiC_p 복합재료를 제조할 수 있었다.

복합재의 입자강화를 위하여 첨가한 SiC 입자 크기가 작을수록 제조상태의 복합재료의 경도 및 내마멸성이 우수하였으며 또한 Si, Cu, Ti을 복합 첨가한 Al기 복합재료가 높은 경도와 우수한 내마멸성을 나타내었다. 그리고 제조된 복합재료는 고속의 마멸속도에서 우수한 내마멸성을 보였다.

후 기

본 연구는 1998년도 한국 학술진흥재단의 연구비지원에 의한 과학기술기초연구 중점지원 과제(과제번호: 1998-017-E00070)의 일부로서 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] H. K. Lee, C. Jin, K. Cho and I. M. Park: J. Kor. Inst. Met. & Mater., 33 (1995) 242
- [2] S. W. Han, K. D. Woo and S. W. Kim: J. Kor. Inst. Met. & Mater., 34 (1996) 70
- [3] S. K. Hong, H. Tezuka and A. Kamio: J. Jpn. Inst. Light Met., 43 (1993) 82
- [4] L. M. Hsiung, A. J. Schwartz and T. G. Nieh: Scr. Mater., 36 (1997) 1017
- [5] C. F. Feng and L. Froyen: Scr. Mater., Scr. Mater., 36 (1997) 467
- [6] K. Sukanuma: J. Jpn. Inst. Light Met., 40 (1990) 936

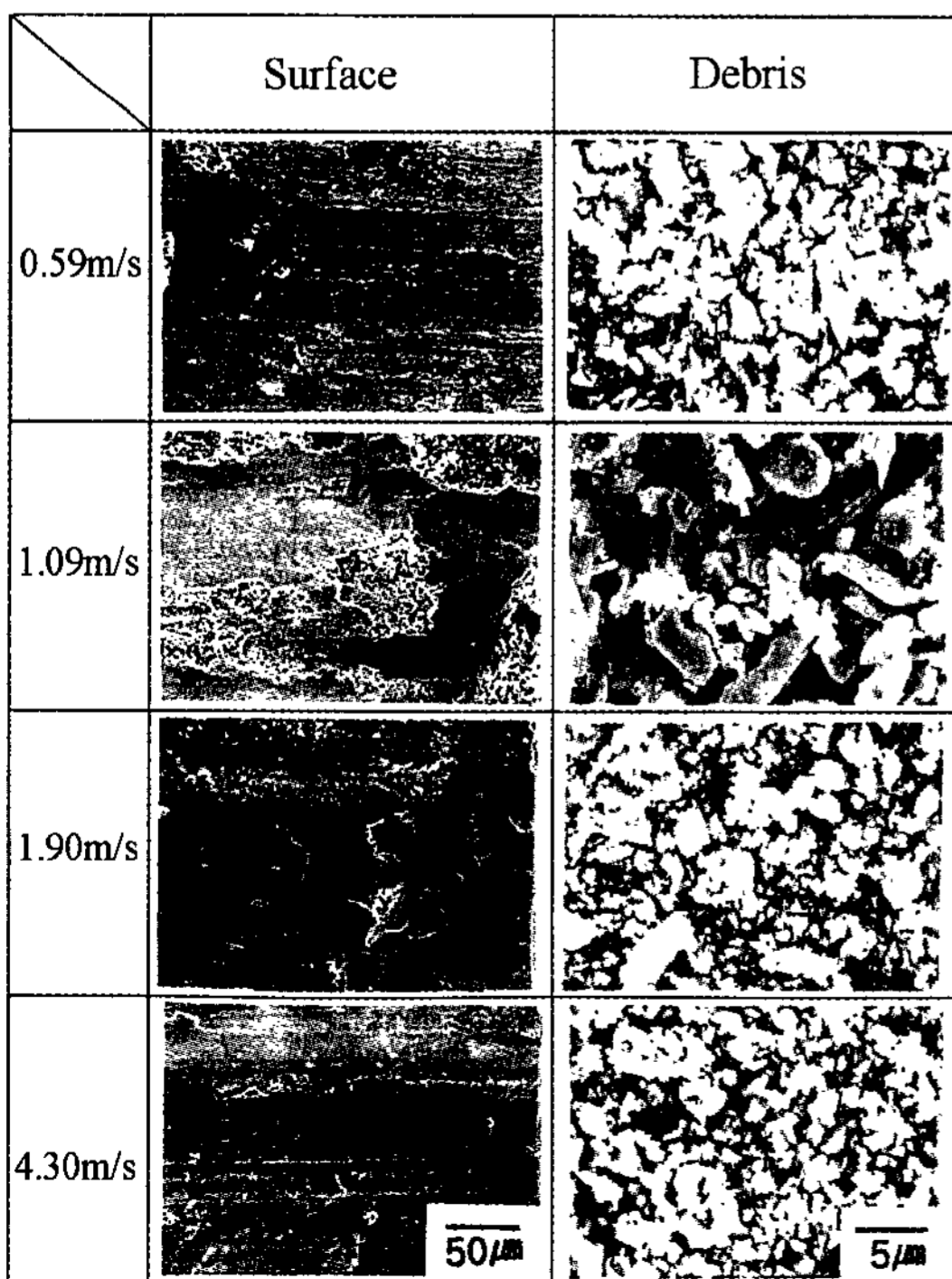


Fig. 6. SEM micrographs of worn surface and debris at low and high speed of as-fabricated Al-5Mg-0.3Si-0.1Cu-0.1Ti/SiC_p composite(A3).

- [7] J. T. Burke, M. K. Aghajanian, M. A. Rozazella: 34th Inter. SAMPE Symp. May (1989) 2440
- [8] T. W. Lim: "Fabrication and Mechanical Behavior of Aluminium Matrix Composite Material", Ph. Dr. dissertation, State Univ. of New York at Buffal, (1990)
- [9] I. M. Huchings: Mater. Sci. Tech., 10 (1994) 513
- [10] J. H. Jeong: Mast thesis, Chonbuk National University (1999)
- [11] Shy-Wen and D. D. L. Chung: J. Mater. Chem., 6(3)469-477 (1996)
- [12] K. D. Woo, J. S. Lee and S. W. Kim: "THERMEC '97", ed. by T. Chandra and T. Sakai, TMS, Vol 2, (1997) 1193
- [13] T. Choh, M. Kobashi, H. Nakai and H. Keneda: "Materials Sci.Forum", 217-222 (1996) 353.

國內外鑄物關聯行事

2000

9월 18일~9월 22일

42. internationale Maschinenbaumesse
Brno, 체코

10월 8일~10월 11일

AFS Environmental Health and Safety Conference
Orlando, FL, 미국

9월 19일~9월 21일

fonderie sous pression 2000
Paris, 프랑스

10월 12일~10월 13일

ADI-Guss-Angebote fur Konstruk-teure und Benutzer
Krakow, 폴란드

9월 20일~9월 22일

ALUMINIUM 2000

Essen, 독일

10월 13일~10월 16일

제137회 일본주조공학회 전국강연대회
北海島 室蘭市, 일본

9월 20일~9월 22일

6th International Foundry Trade METAL '2000
Kielce, 폴란드

10월 18일~10월 20일

6th World Duplex Stainless Steels 2000
Venice, Italy

9월 26일~9월 27일

37th Foundry Days
Brno, 체코

10월 24일~10월 27일

FOND-EX
Brno, 체코

9월 27일~9월 28일

Magnesium 2000
Munich, 독일

11월 3일

한국주조공학회 추계학술발표 및 기술강연대회
서울