

## 이종입자 강화 SiC/Al7075 금속복합재료의 압축특성 및 마모특성 연구

이동현\* · 조승찬\* · 김양도\*\* · 이상관\* · 이상복\* · 조일국\*†

### Mechanical Properties and Wear Performance of the Al7075 Composites Reinforced with Bimodal Sized SiC Particles

Donghyun Lee\*, Seungchan Cho\*, Yangdo Kim\*\*, Sang-Kwan Lee\*, Sang-Bok Lee\*, Ilguk Jo\*†

**ABSTRACT:** In this study, we have investigated microstructure, mechanical properties and wear characteristic of aluminum metal matrix composites with a high volume fraction and uniformly dispersed SiC particles which produced by a liquid pressing process. The volume fraction of bimodal SiC/Al7075 composite was 12% higher than that of the monomodal SiC/Al7075 composite and a compressive strength is increased about 200 MPa. As a result of the abrasion test, the wear width and depth of the bimodal SiC/Al7075 composite were 285.1  $\mu\text{m}$  and 0.45  $\mu\text{m}$ , respectively. The coefficient of friction of bimodal SiC/Al7075 was 0.16.

**초 록:** 본 연구에서는 액상가압공정을 통해 고체적용의 SiC 입자가 균일 분산된 알루미늄 금속복합재료를 제조하고, 미세조직, 기계적 특성 및 내마모 특성에 대해 분석하였다. 입자크기가 다른 이종 SiC 입자가 약 60 vol.% 이상의 체적율로 균일하게 분산된 SiC/Al7075 복합재료는 단일 SiC 입자로 강화된 복합재료에 비해 체적율이 약 12% 이상 높았으며 압축강도가 200 MPa 이상 증가하였다. 내마모시험 결과 이종 SiC 입자 금속복합재료의 경우 마모 너비와 깊이가 각각 285.1  $\mu\text{m}$ , 0.45  $\mu\text{m}$ 이며, 마찰계수는 0.16으로 내마모 특성이 가장 우수하였다.

**Key Words:** 금속복합재료(Metal matrix composite), 이종입자(Bimodal particle), 고체적용(High volume fraction), 액상가압공정(Liquid pressing process)

## 1. 서 론

최근 자동차 산업은 엄격해진 환경규제에 맞춰 배기가스 감소를 해결하기 위해 엔진 및 동력전달효율의 개선과 경량소재 개발을 시도하고 있다. 경량소재를 사용함으로써 차량 중량을 감소시키는 방법은 다른 방법보다 더 쉽게 차량의 연비 효율을 증대시킬 수 있는 장점이 있다[1]. 차량의 구성 요소 중 브레이크, 바디, 파워트레인과 같은 부품은 고온과 가혹한 작동환경에서 사용되기 때문에 고강도, 내마모성 등의 우수한 기계적 특성을 요구한다. 이에 따라

필요 물성을 만족하는 경량 소재 개발의 연구가 진행되고 있다[2,3].

다양한 소재 중에 알루미늄 합금은 낮은 비중으로 주목을 받고 있으나, 연성이 높고 강도가 낮은 단점을 가지고 있어 SiC, B<sub>4</sub>C, TiB<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 같은 세라믹 강화재를 첨가하여 강도가 높은 금속복합재료(Metal Matrix Composites, MMCs)를 개발하고 있다[4]. 알루미늄 금속복합재료(Aluminum Matrix Composites, AMCs)는 Fe 계 합금이나 복합재료 보다 중량 대비 고강도, 고경도, 내마모성, 고강성 등 많은 장점을 가지고 있다. 따라서 자동차 산업뿐만 아니라, 구조물,

Received 24 August 2017, received in revised form 20 October 2017, accepted 30 October 2017

\*Composites Research Division, Korea Institute of Materials Science, Changwon, Korea

\*†Composites Research Division, Korea Institute of Materials Science, Changwon, Korea, Corresponding author (E-mail: [ilguk@kims.re.kr](mailto:ilguk@kims.re.kr))

\*\*School of Materials Science and Engineering, Pusan National University, Pusan, Korea

항공, 선박, 터빈 부품, 경주용 자전거 등 다양한 분야에서 사용 될 수 있다. 그러나 저체적율의 세라믹 강화재가 분산된 알루미늄 금속복합재료의 경우 상대적으로 우수한 내마모 특성과 높은 강도를 요구하는 분야에 적용하기 어려우므로 고체적율의 복합재료의 개발이 필요하다[5].

금속복합소재의 제조공정은 분말야금법과 액상제조법으로 대별할 수 있으며, 분말야금 공정인 경우 고체적율 금속복합재료의 제조가 유리한 장점은 있으나 후 가공이 어려우며 공정이 복잡하고 대형복합재료의 제조에 불리한 단점이 있다. 액상제조공정은 세라믹계 강화재와 기지금속의 나쁜 젖음성으로 공정의 난이도가 높고, 재현성이 낮은 단점이 있으나, 대형화에 유리하고 near-net shape 성형 등 일체 성형이 가능하며 분말공정 대비 가격이 저렴한 장점이 있다[5,6]. 본 연구에서 이용한 액상가압공정은 정수압 원리를 이용하는 것으로 액상(용탕)상태에서 가압하여 함침시키는 기술로서 기존 용탕단조 공정보다 저압에서 성형이 가능한 장점이 있다[7,8].

따라서 본 연구에서는 고체적율의 SiC/Al7075 복합재료를 액상가압 공정을 이용하여 제조하고 강화재 입자크기 및 체적율에 따른 미세조직, 기계적 특성 및 내마모특성에 대해 고찰하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 알루미늄 복합재료(AMCs) 준비 및 제조

알루미늄 복합재료의 강화재로는 10  $\mu\text{m}$  크기의 SiC 분말 F600(Saint Gobain Sika®ABR)과 30  $\mu\text{m}$  SiC F240 입자를 사용하였으며, 금속복합재료의 기지재료로는 Al7075(Kaiser aluminum)를 사용하였다. 레이저 회절분석기(Sympatech HELOS, Clausthal-Zellerfeld, Germany)를 이용하여 분말의 평균 입도 크기를 분석한 결과 각각 11.45  $\mu\text{m}$ , 46.13  $\mu\text{m}$ 였다. SiC 입자의 체적율이 복합재료의 기계적 특성 및 내마모 거동에 미치는 영향을 조사하기 위하여 10  $\mu\text{m}$ , 30  $\mu\text{m}$  입자를 3:1 질량비로 준비한 뒤 3차원 믹서기를 이용하여 플라스틱 병에 SUS 볼과 함께 넣어 1시간 동안 혼합하였고, 혼합된 분말의 미세조직을 Fig. 1에 나타내었다.

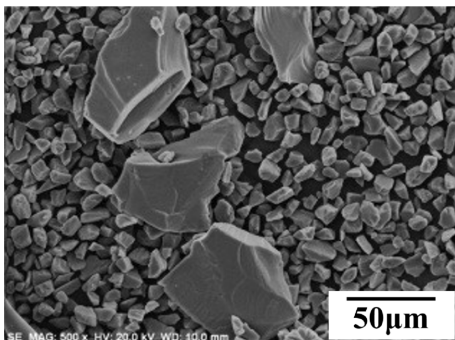


Fig. 1. SEM image of bimodal SiC particle with ratio of (3:1)

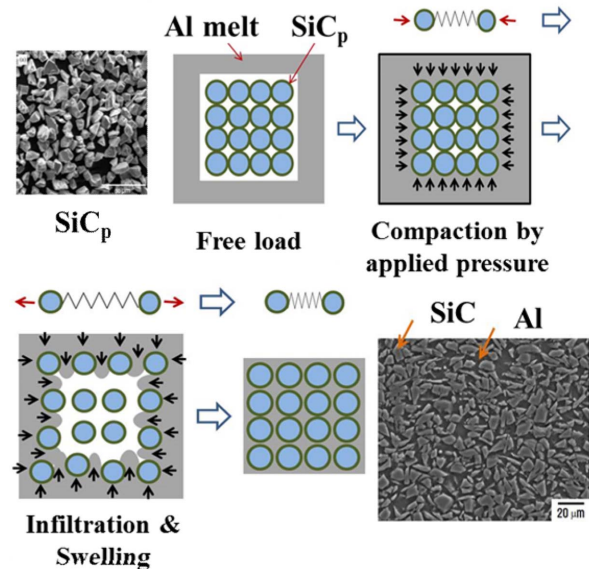


Fig. 2. Schematics of the liquid pressing process

본 연구에서는 액상가압공정(Fig. 2)을 이용하여 SiC/Al7075 복합재료를 제조하였다. 준비된 스틸 몰드에 SiC 강화재와 Al7075 모재를 적층하여, 800°C로 가열하고 진공분위기를 유지한 다음에 100 kg/cm<sup>2</sup> 하중으로 470°C까지 가압하였다.

### 2.2 미세조직 및 특성 평가

액상가압 공정으로 제조된 SiC/Al7075 복합재료의 조직 건전성을 평가하기 위해 광학현미경(Nikon Eclipse LV150N)과 주사전자현미경(JSM-6610LV, JEOL)을 이용하여 미세조직을 분석하였다.

제조된 복합재료의 압축시험은 3 × 3 × 6 mm<sup>3</sup> 크기의 시편을 준비하여 5 × 10<sup>-4</sup> s<sup>-1</sup>의 strain rate 조건에서 만능재료시험기(5882 model, Instron)로 진행하였다. SiC/Al7075 복합재료의 마모 거동을 평가하기 위하여 ball-on-disk 타입의 마모시험기인 Tribometer(JLTB060, J&L Tech) 장비를 이용하였다. 금속복합재료 마찰 시험편은 직경 20 mm, 두께 3 mm의 디스크 형태로 준비하였다. 디스크 시편 위에 직경이 5 mm인 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 볼을 사용하여 하중 5 N, 마모 시간 1800 sec, 속도는 60 mm/s의 조건에서 마모 시험을 수행하여 마찰계수를 측정하였다. 마모 너비(wear width)는 이미지분석 프로그램(Image tool)을 사용하여 주사전자현미경 분석으로부터 얻은 이미지의 마모 폭을 5번 측정하여 평균값을 계산하였다. 마모 깊이(wear depth)는 접촉식 3차원 표면분석기(Dektak XT, Bruker)를 사용하여 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 미세조직 및 기계적 특성

액상가압공정으로 제조된 SiC/Al7075 복합재료의 미세

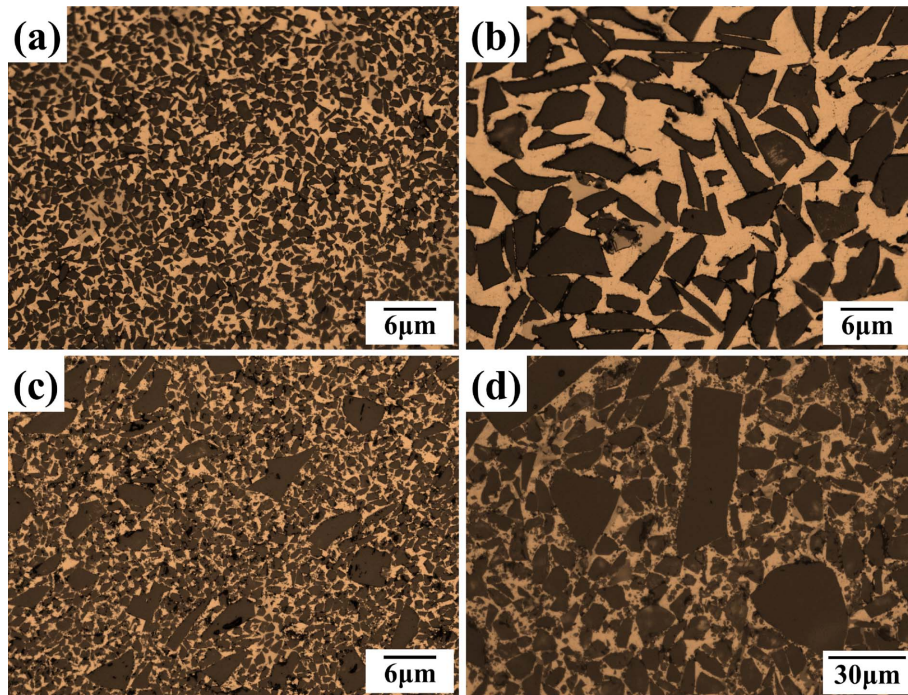


Fig. 3. OM images of AMCs containing SiC reinforcement size of; (a) 10  $\mu\text{m}$ , (b) 30  $\mu\text{m}$ , (c) bimodal SiC, and (d) high magnification image of (c)

조직을 광학현미경으로 분석한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. (a)는 단일입자 10  $\mu\text{m}$  SiC/Al7075 복합재료, (b)는 단일입자 30  $\mu\text{m}$  SiC/Al7075 복합재료, (c)는 3:1 이중입자 SiC/Al7075, (d)는 3:1 이중입자 SiC/Al7075 복합재료의 고배율 이미지이다.

분석 결과로부터 알 수 있듯이 기공 및 크랙 등의 결함이 관찰되지 않았으며 알루미늄 기지에 SiC 강화재가 균일하게 분산된 것을 확인할 수 있었다. 이미지분석 프로그램을 이용하여 체적율을 분석한 결과, 이중입자 복합재료 시편 (Fig. 3c)의 체적율은 약 69.9%로 가장 높았으며, 10  $\mu\text{m}$ , 30  $\mu\text{m}$  단일입자 복합재료 (Fig. 3a,b)의 체적율은 각각 59.5%, 67.7%로 30  $\mu\text{m}$  입자 복합재료가 10  $\mu\text{m}$  SiC/Al7075 복합재료에 비해 10% 이상 높았다. 이를 통해 단일 입자 복합재료보다, 두 가지 사이즈의 동종 강화재 입자를 혼합하여 복합재료를 제조할 경우 체적율이 더 높은 금속복합재료를 건전하게 제조할 수 있음을 확인할 수 있었다.

Fig. 4는 강화재 입자크기에 따른 SiC/Al7075 복합재료 및 기지재인 Al7075의 압축강도를 측정한 결과를 나타낸다. Al7075 기지재의 경우 항복압축강도 (Compressive Yield Strength, CYS)는 약 200 MPa로 측정되었고, SiC 강화재를 첨가 할 경우 항복압축강도가 약 400 MPa 이상 증가하였다. 강화재 입자크기에 따른 최대압축강도 (Ultimate Compressive Strength, UCS)를 비교해보면 단일입자의 경우, 입자크기가 더 작은 10  $\mu\text{m}$  SiC/Al7075 복합재료의 최대압축강도값이 871 MPa로 입자크기가 큰 30  $\mu\text{m}$  SiC/Al7075 복합재료의 최대압축강도 626 MPa 보다 약 200 MPa 이상 높았

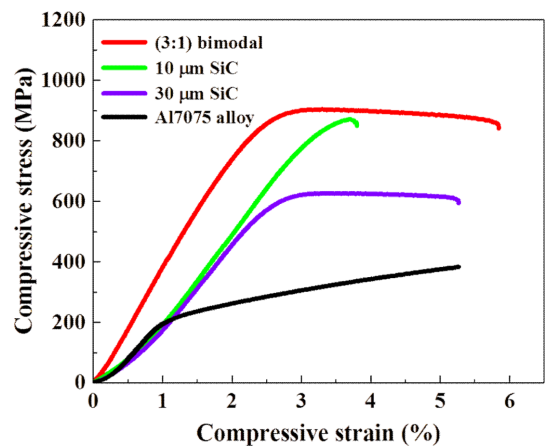
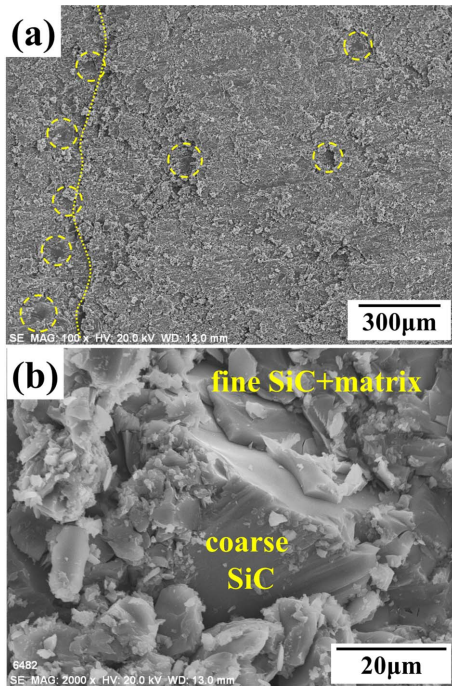


Fig. 4. Compressive strength of the matrix alloy and composites

다. 체적율에 따른 압축강도 비교결과, 3:1 SiC 이중입자 복합재료의 경우 최대압축강도가 904 MPa로 30  $\mu\text{m}$  단일입자 SiC 복합재료 보다 압축강도가 278 MPa 이상 높게 측정되었다. 일반적으로 복합재료의 강도 및 경도의 강화는 전위와의 상호작용으로 인해 강화된 보강 입자에 의한 하중 전달로 인해 나타난다. 강화재의 입자가 작을수록 전위밀도 (dislocation density)가 증가하여 파단이 일어나기 위한 에너지가 증가하게 된다[9,10]. 그렇기 때문에 10  $\mu\text{m}$  SiC/Al7075 압축강도가 30  $\mu\text{m}$  SiC/Al7075 복합재료 보다 높은 것이고, 이중입자의 경우 체적율 증가로 압축강도가 향상된 것으로 판단된다.





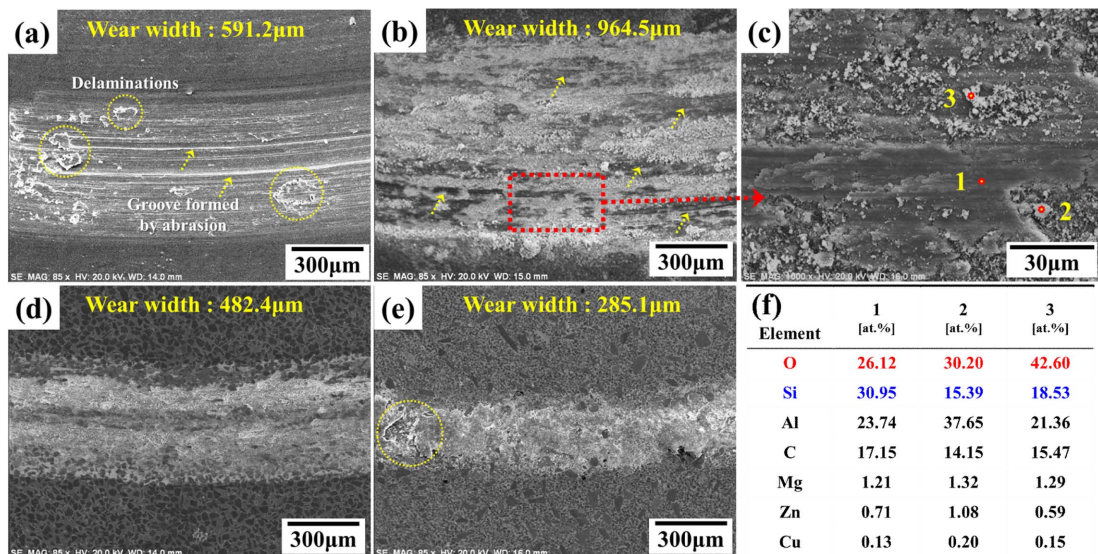
**Fig. 5.** Fracture surface of the bimodal SiC/Al7075 composite after compressive test at (a) low magnification, and (b) high magnification

Fig. 5는 3:1 이중입자 SiC/Al7075의 압축강도시험 후 파단면의 미세 조직이다. Fig. 5(a)에서 관찰할 수 있듯이 크랙의 근처에 입자가 큰 30 µm SiC 강화재가 다수 관찰 되는 것을 확인할 수 있었다. 일반적으로 복합재료에서 파단은 응력집중이 되는 강화재의 모서리 부분에서 미세기공 발생 및 성장, 크랙 전파 등으로 일어난다[2]. 따라서 금속복합재료가 압축 응력 하에서 큰 강화재 입자들에 응력이 집

중되어 크랙이 먼저 생겨 파단이 발생하고, 이 후 작은 입자와 기지재 부분으로 파단이 이어지는 것으로 판단된다.

### 3.2 내마모 특성

마모 시험후의 SiC/Al7075 복합재료의 마모 표면을 주사전자현미경을 이용하여 분석한 결과를 Fig. 6에 정리하였다. Fig. 6(a)에서 볼 수 있듯이 Al7075 기지재의 마모 표면을 분석한 결과, 마모 폭은 약 591.2 µm으로 확인되었다. 마모가 진행됨에 따라 노란색 원형 점선으로 표시된 부분과 같이 모재의 박리(delamination)가 일어난 것을 확인할 수 있으며, 노란색 화살표로 표시한 부분과 같이 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 볼에 의한 마모로 상대적으로 연질인 Al7075 표면에 홈(groove)이 생성된 것을 확인하였다. 10 µm SiC/Al7075 복합재료의 마모면 분석결과 마모 폭이 약 964.5 µm으로 마모 너비가 가장 넓었으며 많은 양의 마모 파편(wear debris)들이 관찰되었다. 이것은 입자크기가 작을수록 볼과의 상호작용으로 작은 입자가 더욱 쉽게 pull out되기 때문이다[11,12]. 자세한 마모 거동을 살펴보기 위하여 고배율의 이미지(Fig. 6c)를 관찰한 결과 마모 표면에서 pull out 된 SiC 강화재 입자들이 포함된 마모 파편과 이 부분에 의해 생성된 홈(wear ploughing)이 관찰되었다. 10 µm SiC/Al7075 복합재료의 마모 표면에 대한 EDS 포인트 분석 결과를 Fig. 6(f)에 나타내었다. 1번 부분은 마모가 진행되는 중이나 박리가 아직 일어나지 않은 부분으로 성분 분석결과 산소의 농도가 26.12%로 산화가 진행되고 있는 것을 알 수 있었다. 2번 부분은 표면에서 산화층이 박리(spalling)가 시작되는 부분으로 크랙이 발생하고 산소농도도 30.2%로 증가하였다. 3번 부분은 마멸입자들로 박리 이후 표면에서 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ball과 마찰하고, 접촉에 의한 온도증가로 산화가 많이 진행되어 산소농도가



**Fig. 6.** SEM micrographs of worn surface of; (a) Al7075 alloy, (b) 10 µm, (c) high magnification image of 10 µm composite, (d) 30 µm, (e) bimodal SiC AMCs and (f) EDS point analysis on (c)

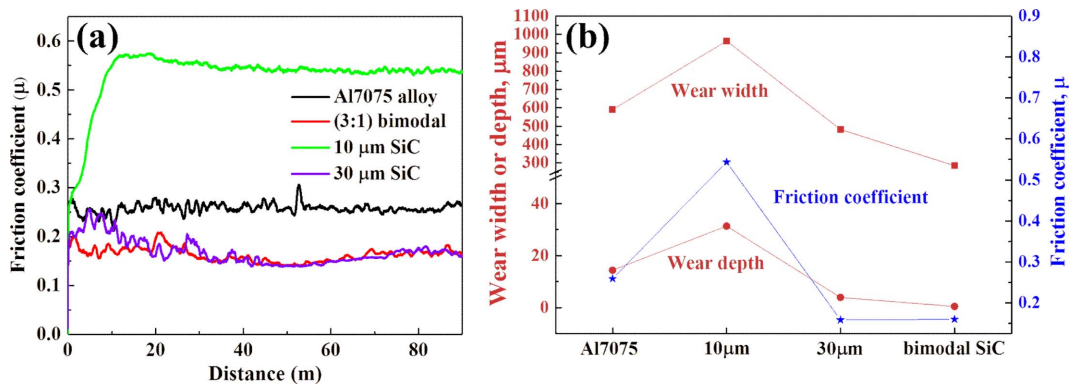


Fig. 7. (a) Friction coefficient of wear test specimens, and (b) summary of wear depth, wear width, and friction coefficient

42.6%로 가장 높았다. 이 결과를 통해, 초기에 SiC 입자가 시편에서 이탈하여 시편표면에 마모 흠을 생성시키고, 마모가 진행됨에 따라 표면박리를 일으켜 마모 파편을 발생시킴을 알 수 있다. 이렇게 발생한 마모 파편들은 ball과의 마찰운동으로 복합재료의 마모를 가속시키게 된다. Ball과 시편 표면부 마찰이 진행 될수록 온도가 상승하여 마모 표면이 산화되고 더 나아가 산화 층의 박리가 일어나  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ball과 마멸 작용을 하여 마모파편이 발생하는 것으로 판단된다.

Fig. 6(d)와 (e)는 30 μm SiC/Al7075 복합재료와 3:1 SiC/Al7075 복합재료의 마모 시험 결과이며, 각각 마모 폭이 482.4 μm, 285.1 μm로 이중입자 복합재료의 경우 마모 너비가 가장 좁았다. 이것은 높은 체적율의 SiC 입자가 고르게 분포되어 마모에 대한 저항성을 가지기 때문으로 판단된다.

SiC/Al7075 복합재료의 마모 시험을 통해 분석한 마찰계수를 Fig. 7(a)에 나타내었다. 10 μm SiC/Al7075 복합재료의 평균 마찰계수는 0.544로, 알루미늄 합금인 Al7075의 마찰계수인 0.259 보다 높았다. 하지만 Al7075 대비 내마모 특성이 우수했던 30 μm SiC/Al7075, Bimodal SiC/Al7075의 마찰계수는 각각 0.158, 0.160으로 Al7075 대비 낮은 수치를 나

타내었다. Fig. 6의 마모 표면 분석 결과와 비교해 볼 때, 마모 시험 중 산화층이 생성되고 이것이 박리되어 발생하는 산화된 마모 파편들이 많을 수록 마찰계수가 높으며, 상대적으로 마모면이 깨끗할수록 마찰계수가 낮은 것을 알 수 있다. 30 μm SiC/Al7075, Bimodal SiC/Al7075 복합재 대비 Al7075의 마찰계수가 높은 것은 마모 과정중 표면에서 산화층이 생성되고 이 부분들이 박리 되면서  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ball과의 상호작용에 인한 것으로 판단된다. 10 μm SiC/Al7075 복합재의 경우, 예상한대로 마찰계수가 가장 높았으며, 이것은 다량의 마모 파편 발생으로 마모진행 방향으로  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ball에 대한 큰 반발력이 작용하기 때문이다. Fig. 7(b)는 SiC/Al7075 복합재료의 마모시험 결과로부터 얻은 마모 너비, 마모 깊이와 마찰계수를 요약한 그래프이다. 요약결과 bimodal SiC/Al7075 복합재가 내마모성이 가장 우수하였고, 10 μm SiC/Al7075 복합재의 경우 마모가 심하게 발생하여 마모 너비와 마모 깊이 가장 컸다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 유사한 경향성을 나타내는 것을 알 수 있었다.

10 μm SiC/Al7075 복합재료의 마모 시편에서 마모 파편 부분의 고배율 SEM 이미지와 EDS 분석 결과를 Fig. 8에 나

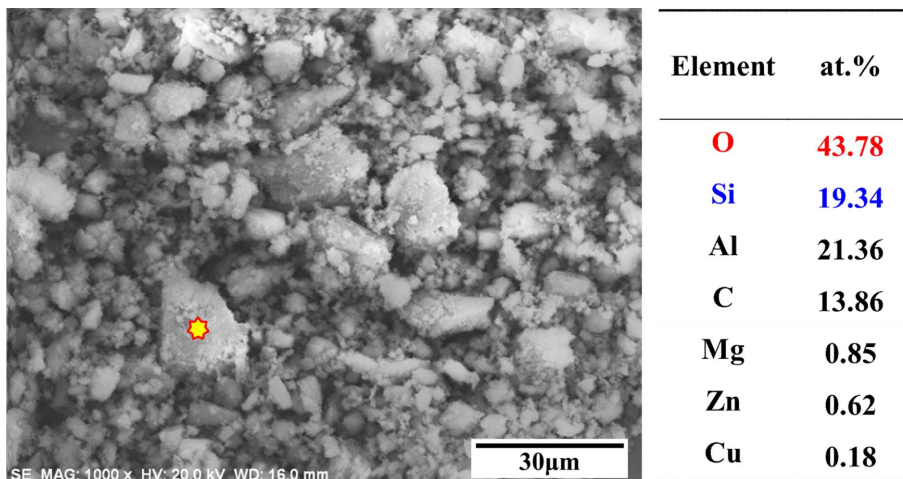


Fig. 8. SEM micrographs and EDS point analysis of wear debris of 10 μm SiC reinforced AMCs



타내었다. 이미지에서 확인할 수 있듯이 마모 파편 부분에서 1~20  $\mu\text{m}$  정도의 다양한 크기의 입자들을 관찰할 수 있었다. EDS 분석 결과 이 부분은 SiC 입자가 Al7075모재와 섞여서 산화되어 있는 것임을 알 수 있었다. Fig. 1과 Fig. 3에서 알 수 있듯이 복합재료 제조에 사용된 SiC 입자는 각진 형상이지만, 마모시험 후의 시편의 마모 파편에서 관찰되는 입자는 둥근 형태를 보인다. 또한 입자크기도 평균입도에 비해 더 작은 입자와, 더 큰 입자가 관찰되는데, 이것은 SiC 입자가 마모가 진행되면서 표면에 각진 부분이 마멸되고, 마모가 계속 진행될수록 분쇄 및 모재와 물리적으로 결합하여 더욱 큰 사이즈의 입자로 성장 되는 것으로 사료된다. EDS 분석 결과 산소 원자 비율이 43.78%로 산화가 많이 진행되었음을 알 수 있다. 이렇게 발생된 마모 파편들이  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ball과 시편표면에서 상호작용하여 마모를 더욱 가속시켜 10  $\mu\text{m}$  SiC/Al7075 복합재료의 마모 너비가 가장 넓은 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 고체적용 SiC/Al7075 복합재료를 액상가압공정으로 제조하였다. 제조된 복합재료의 미세조직을 분석한 결과 고체적용의 SiC 강화재가 균일하게 분산되어 있었으며, 크랙이나 기공 등의 결함이 없는 것을 확인할 수 있었다. 압축시험결과 이중입자 복합재료의 경우 단일입자 복합재료보다 최대압축강도가 약 200 MPa 이상 더 우수하였다. 내마모 시험결과 마모 너비는 10  $\mu\text{m}$  SiC/Al7075 복합재료가 964.5  $\mu\text{m}$ 로 가장 높았으며 이것은 체적율이 낮은 복합재료에서 강화재 입자가 적출, 마모 파편과 입자들이 마모 과정에서 복합재료 표면의 마모를 더욱 가속화시킨 것으로 사료된다. 또한, 마모 너비, 깊이, 마찰계수 비교결과 세가지 값이 유사한 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 민군기술협력사업(NRF-2014M3C1A9060717)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

#### REFERENCES

1. Nan, C.W., and Clarke, D.R., "The Influence of Particle Size and Particle Fracture on the Elastic/plastic Deformation of Metal Matrix Composites", *Acta Materialia*, Vol. 44, 1996, pp. 3801-3811.
2. Tuncer, N., Tasdelen, B., and Arslan, G., "Effect of Passivation and Precipitation Hardening on Processing and Mechanical Properties of  $\text{B}_4\text{C}$ -Al Composites", *Ceramics International*, Vol. 37, 2011, pp. 2681-2687.
3. Avcu, E., "The Influences of ECAP on the Dry Sliding Wear Behavior of AA7075 Aluminium Alloy", *Tribology International*, Vol. 110, 2017, pp. 173-184.
4. Rao, R.N., and Das, S., "Wear Coefficient and Reliability of Sliding Wear Test Procedure for High Strength Aluminium Alloy and Composite", *Materials and Design*, Vol. 31, 2010, pp. 3227-3233.
5. Mandal, A., Murty, B.S., and Chakraborty, M., "Wear Behavior of Near Eutectic Al-Si Alloy Reinforced with in-situ  $\text{TiB}_2$  Particles", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 506, 2009, pp. 27-33.
6. Costa, H.L., Oliveira Junior, M.M., and de Mello, J.D.B., "Effect of Debris Size on the Reciprocating Sliding Wear of Aluminium", *Wear*, Vol. 376-377, 2017, pp. 1399-1410.
7. Lee, S.B., Lee, S.-K., Lee, S., and Kim, N.J., "Microstructure and Mechanical Properties of Two Continuous-Fiber-Reinforced Zr-Based Amorphous Alloy Composites Fabricated by Liquid Pressing Process", *Metallurgical and Materials Trans. A*, Vol. 39, 2008, pp. 763-771.
8. Lee, H., Sohn, S.S., Jeon, C., Jo, I., Lee, S.-K., and Lee, S., "Dynamic Compressive Deformation behavior of SiC-particulate-reinforced A356 Al Alloy Matrix Composites Fabricated by Liquid Pressing Process", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 680, 2017, pp. 368-377.
9. Pramanik, A., Islam, M.N., Davies, I.J., Boswell, B., Dong, Y., Basak, A.K., Uddin, M.S., Dixit, A.R., and Chattopadhyaya, S., "Contribution of Machining to the Fatigue Behaviour of Metal Matrix Composites (MMCs) of Varying Reinforcement Size", *International Journal of Fatigue*, Vol. 102, 2017, pp. 9-17.
10. Shen, M.J., Wang, X.J., Ying, T., Wu, K., and Song, W.J., "Characteristics and Mechanical Properties of Magnesium Matrix Composites Reinforced with Micron/Submicron/Nano SiC Particle", *Journal of Alloy and Compounds*, Vol. 686, 2016, pp. 831-840.
11. Liang, Y.N., Ma, Z.Y., Li, S.Z., Li, S., and Bi, J., "Effect of Particle Size on Wear behaviour of SiC Particulate-reinforced Aluminium Alloy Composites", *Journal of Materials Science Letters*, Vol. 14, 1995, pp. 114-116.
12. Chung, S., and Hwang, B.H., "A Microstructural Study of the Wear behavior of  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  Composites", *Wear*, Vol. 27, 1994, pp. 307-314.