

## 저압함침법에 의한 FeCrSi/AC8A 복합재료의 제조와 마모특성 평가

송태훈\* · 이현준\* · 최용범\*\* · 김성진\*\*\* · 박원조\*\*\*\*

\*경상대학교 대학원 정밀기계공학과

\*\*히로시마대학 기계시스템공학과

\*\*\*한국폴리텍 I 대학

\*\*\*\*경상대학교 기계항공공학부

## Fabrication and Wear Property Evaluation for FeCrSi/AC8A Composite by Low-pressure Infiltration

TAE-HOON SONG\*, HYUN-JUN LEE\*, YONG-BUM CHOI\*\*, SUNG-JIN KIM\*\*\* AND WON JO PARK\*\*\*\*

\*Graduate school of Mechanical and Precision Engineering, Gyeongsang National University, Tongyong, Korea

\*\*Department of Engineering System, Hiroshima University, 1-4-1 Kagamiyama Higashi-Hiroshima, Japan

\*\*\*Jeju Campus of Korea Polytechnic I College, Jeju, Korea

\*\*\*\*Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University, Tongyong, Korea

**KEY WORDS:** Low-Pressure casting 저압주조, Preform 프리폼, Molten aluminum alloy 용융알루미늄합금

**ABSTRACT:** In this paper, study about property evaluation for the metal matrix composites fabricated by low pressure infiltration process. Aluminum alloy composite which is reinforced by Metal fiber preform was fabricated by low pressure casting process. Infiltration condition was changed the pressure infiltration time of 1 sec, 2 sec and 5 sec under a constant pressure of 0.4 MPa. The molten alloy completely infiltrated the FeCrSi metal preform regardless of the increase in the pressure acceleration time. The porosity in the FeCrSi/AC8A composite was investigated. The porosity was reduced as the pressure acceleration time as shorter. The FeCrSi/AC8A composite was investigated the wear test for to know the relationship between Porosity and wear resistance. FeCrSi/AC8A composite at pressure acceleration time of 1sec is shown excellent wear resistance.

### 1. 서 론

금속기 복합재료는 기지재료(Matrix materials)인 금속에 주로 소성변형이 되지 않는 무기질의 섬유재를 적절한 방법으로 혼합 분산시킨 신소재로서 우주항공 분야에서 광범위하게 실용화되고 있다. 비강도, 내열성, 내마모성 및 내구성 등의 기계적 특성이 우수하여 자동차 부품으로 엔진부와 구동축의 부품으로도 활용되고 있으며, 소결법을 이용한 세라믹 복합재료는 핵융합로의 블랭켓(Blanket), 제1벽(First-wall) 및 디이버터(Divertor)등의 후보재료로 적용이 기대되고 있다(윤한기와 정현채, 2006). 자동차에 이용되고 있는 복합재료는 엔진을 중심으로 약 100~300°C의 고온에서 주로 사용된다. 특히, 엔진 퍼스톤부에 복합재료를 이용함으로써 경량화하는 것은 연료절약에 크게 기여한다. 이러한 우수한 특성의 복합재료의 제조 방법으로서 종래에는 고압 주조방법(Squeeze casting)으로 주조를 많이 행하였으며, 이에 대한 힘침 거동에 대한 연구 또한 많이 행해졌다(Westengen and Holta, 1989; Morimoto et al., 1987). 그러나 위의 제조방법은 고압을 얻기 위해 기계의 대형화가 필요하며, 복잡한 형상의 복합재료의 주조가 어렵다. 또한 고압이 예비성형체의 손상이나 변형을 일으켜 오히려 복합재료의 기계적 특성을 저하시키는 문제점을 가지고 있다(Clyne and Mason, 1987). 따라서 최근

함침압력을 저감화 시키는 연구가 많이 행해지고 있다. 함침압력을 저감화 하기 위한 방법에는 강화재와 용융금속과의 젖음성을 개선하는 방법(Segurado et al., 2003)과 국부적으로 고압을 부가시키는 방법(Fleming and Temis, 2002)등이 있다. 본 연구에서는 젖음성을 개선하여 저압함침으로 복합재료 제조에 성공한 연구(Choi et al., 2005)를 바탕으로 하여 알루미늄합금과 젖음성이 우수한 금속섬유(FeCrSi)를 강화재로 이용하여 저압의 상태에서 FeCrSi/AC8A 복합재료를 제조 하였으며 복합재료의 기공율 분포와 원인을 알아보는 한편 함침 가속 속도와 마모특성과의 상관관계를 알아보고자 미끄럼 마모시험을 행하였다.

### 2. 실험 방법

#### 2.1 FeCrSi/AC8A 복합재료의 제조

Fig.1 (a)는 예비성형체에 용융금속을 함침시키는 저기압 함침 장치를 나타내고 있다. 금형의 형상, 프리폼의 위치를 표시하고 있다. Fig.1 (b)는 금형의 형태와 프리폼의 위치를 단면으로 나타내고 있다. 금형의 온도는 200°C, 프리폼의 온도는 400°C, 알루미늄 합금 용탕의 온도는 750°C로 하였다. 저압상태에서 용탕의 침투용이를 위해 크게 두 가지 방법을 사용하였다. 첫 번째 방법은 예비성형체를 예열함으로써 섬유와 용탕간의 젖음성을 향상(Ochiai et al., 1982) 시켰으며 또한 이 방법은 섬유표면에 흡착된 가스들을 제거 할 수 있다. 두 번째 방법은 용융금속과의

교신저자 박원조: 경상남도 통영시 인평동 445

055-0640-3183 wjpark@gnu.ac.kr

젖음성이 좋은 금속섬유(FeCrSi)를 강화재로 사용하였다. 용융합금은 0.2~0.8MPa의 범위에서 가압을 할 수 있으며, 상부에서 프리폼 내부의 공기를 제거하기 위해 진공상태로 감압을 하였다.

Table 1과 Table 2는 각각 강화재의 기본적인 특성과 기지재의 물성치를 나타내고 있다.

## 2.2 마찰 마모시험

마모시험은 회전 원판식 마모시험기(PD-102)를 사용하였다. 상온에서 견적 마모시험을 하였으며 마모시험편은 제조된 복합재료

로부터 기압방향과 수직한 면에서 채취하였다. 시험편의 크기는  $11 \times 11 \times 5(\text{mm}^3)$ 이고, 상대재는 고탄소 크롬강인 SUJ-2 블 (800HV)을 사용하였다. 시험편의 표면은 Sand paper를 이용하여 표면조도를 일정하게 하였으며, 각 시험편에 동일한 조건을 부여하기 위하여 1분간 Pre-track 부여하였다. 하중은 20N으로 일정하게 하였으며, 속도에 따른 마멸특성비교를 위하여 회전속도를 각각 50rpm, 70rpm으로 하였으며 미끄럼 시간은 60분으로 하여 마모시험을 하였다.

## 2.3 미세조직과 마모트랙관찰

제조된 복합재료의 조직관찰과 마모시험후 마모트랙을 관찰하기 위하여 광학현미경과 주사전자현미경(SEM: Scanning electron microscope)을 사용하여 분석하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 기공율

#### 3.1.1 압력에 따른 기공율

복합재료의 성질은 섬유분포, 체적률, 섬유배향 등에 의존한다는 것은 일반적으로 잘 알려져 있다. 따라서 완성된 복합재료의 기공의 존재여부를 알아보기 위하여 시험편 표면을 관찰하여 보았다. Fig. 2는 금형에 용융합금을 주입한 후, 각 함침압력에 따른 복합재료내의 기공분포를 나타내고 있는 조직사진이다. 그림 (a)는 0.4MPa의 압력으로 제작된 복합재료이며 다소 많은 기공을 관찰할 수 있으며 용융금속의 함침 압력이 증가할수록 기공률은 감소함을 알 수 있다. 함침압력이 가장 높은 그림 (d)는 0.8MPa에서는 기공이 거의 관찰되지 않음을 알 수가 있다. 따라서 압력에 따른 기공률은 압력이 높을수록 낮게 나타났으며 0.8MPa [ 본 실험 조건에서 최적의 압력임을 알 수 있다(Park et al., 2007).

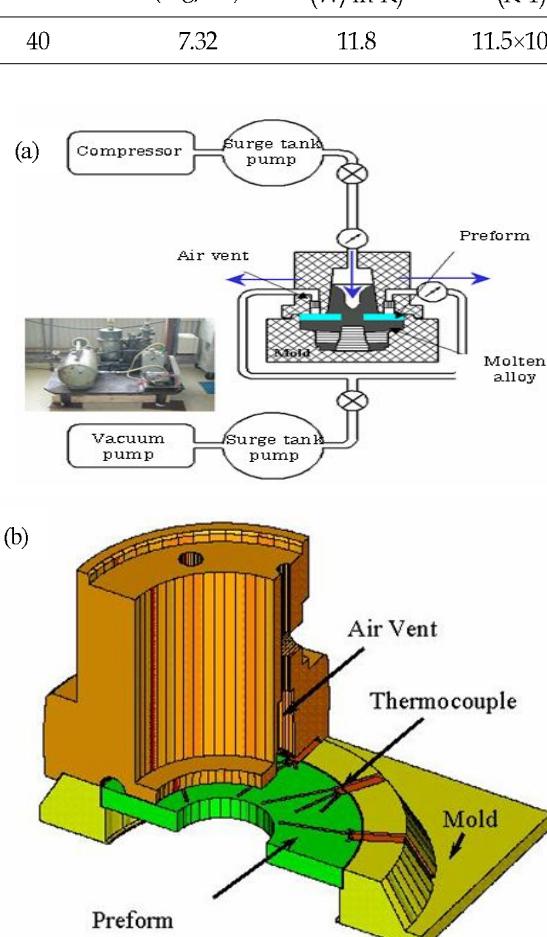


Fig. 1 Equipment of low pressure casting

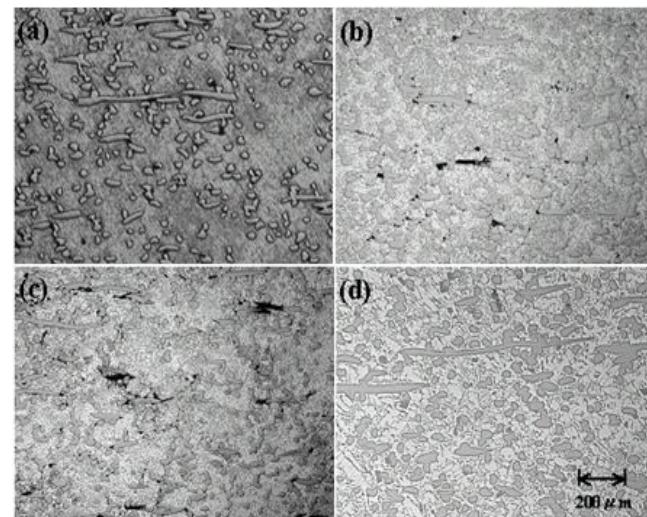


Fig. 2 Optical micrographs of porosity in composites fabricated by low pressure infiltration with (a) 0.4MPa, (b) 0.6MPa, (c) 0.7MPa and (d) 0.8MPa

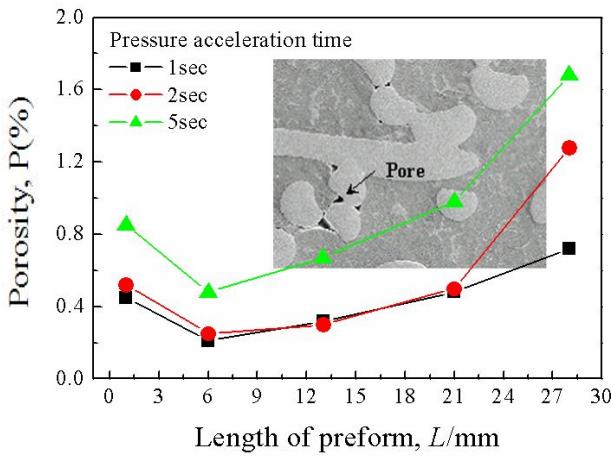


Fig. 3 Relationship between porosity by imperfect infiltration and applied pressure acceleration speed

### 3.1.2 함침가속 속도에 따른 기공률

앞 절에서 설명한 바와 같이 용융금속에 가해지는 압력이 높을수록 기공의 양은 현저하게 줄어들 수 있다. 본 연구에서는 보다 낮은 압력으로 최소한의 기공률을 구하기 위하여 함침압력 0.4MPa의 조건하에서 제조된 복합재료시험편 이용하여 함침가속시간에 따른 기공률을 비교하여 보았다. 이 함침가속시간이라는 것은 용융금속의 압력이 0.4MPa에 도착하기까지의 시간을 나타내며 이 시간을 각각 1초, 2초, 5초(이하 1s, 2s and 5s)로 하여 복합재료를 제조한 후 기공률을 관찰하였다. Fig. 3은 가압시간에 따른 시험편 표면의 기공률을 나타내고 있다. 그래프의 왼쪽부분은 기압부분이며 오른쪽 부분은 감압부분이다. 감압 측으로 갈수록 기공률이 증가하고 있으며 그 정도는 함침시간이 길수록 증가하는 하는 양상을 보이고 있다. 이는 용융금속의 압력이 감압 측으로 갈수록 약해지기 때문이라고 생각되어진다. 따라서 압력의 부족으로 프리폼의 빈 공간으로 함침이 끌고루 이루어지지 않아 기공이 잔존한 것으로 보인다. 또한 함침시간이 길어지면 함침이 이루어지는 동안에 응고가 되기 때문에 함침가속시간이 길수록 기공이 증가하는 것으로 생각된다. 그래프내의 그림은 강화재와 강화재 사이에 존재하고 있는 기공을 나타내고 있다.

### 3.2 경도시험결과

Fig. 4는 기지재인 AC8A와 함침가속시간에 따른 경도값을 비교하여 나타낸 그래프이다. 기지재인 AC8A는 약 110HV가 장 낮은 경도값을 나타내었다. 용융함침압력 0.4MPa에서 제조된 복합재료는 금속섬유로 강화가 되어 경도값이 모두 기지재보다 약 3배 이상 증가하였음을 알 수 있다. 함침속도에 따른 경도값을 비교해보면 함침 가속 속도가 가장 빠른 1s의 경도값이 380HV로 가장 높게 나타났으며 2s와 5s의 경도값은 각각 340HV, 360HV로 나타났다. 같은 종류와 양의 강화재가 첨가되었기 때문에 함침가속도에 따른 경도값 차이가 크게 나타나지 않았다.

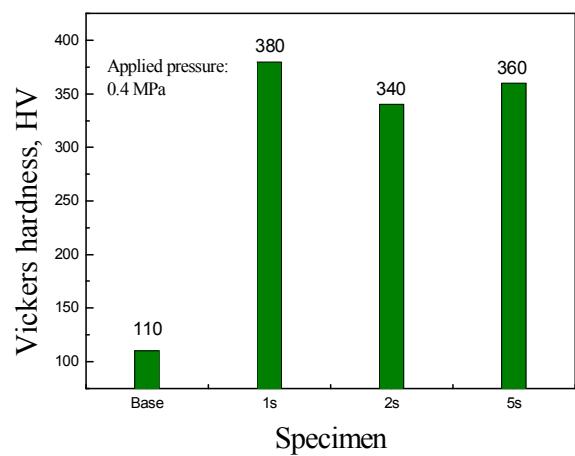


Fig. 4 Relationship between micro-vickers hardness and pressure acceleration speed

### 3.2 마모 시험 결과

#### 3.2.1 마찰계수와 마멸량

Fig. 5는 상대재인 불의 미끄럼 속도 50rpm과 70rpm 조건에서의 마찰계수를 나타낸 그래프이다. 두 속도 조건에서 모두 복합재료가 기지재에 비해 낮은 마찰계수를 나타내었다. 강화재를 첨가함으로써 기존의 알루미늄합금에 비해 마찰계수값이 낮게 나타남을 알 수 있다. 또한 복합재료 시험편을 서로 비교해보면 함침가속속도가 증가함에 따라 마찰계수값이 다소 증가함을 알 수 있다. 이는 복합재료 내에 전존해 있는 기공의 영향으로 생각된다. 경도값의 비교에서 복합재료간의 경도값은 큰 차이를 보이지 않았으나 함침가속시간이 길어짐에 따라 마찰계수값이 증가하는 것은 함침가속시간이 길어질수록 기공의 양이 증가하며 이로 인하여 마찰계수가 증가하는 것으로 생각된다.

Fig. 6은 불의 미끄럼 속도 50rpm과 70rpm 조건에서의 마멸량을 나타낸 그래프이다. 두 속도 조건에서 모두 기지재에 비해 복합재료의 마멸량이 적게 나타남을 알 수 있다. 이는 첨가된 강화재가 마모시험중에 표면에 드러남으로써 기지재의 마모를 억제해주는 동시에 강화재의 마모분이 마모트랙에서 고체 윤활제 역할을 함으로써 내마모성을 향상시킨 것으로 생각된다. 또한 마찰계수와 마찬가지로 함침가속시간이 증가함에 따라 점차 마멸량이 증가하는 경향을 나타났다. 이 역시 마찰계수에서 언급한바와 같이 기공에 의한 영향으로 보인다. Fig. 7은 평균 마찰계수와 평균마멸량에 대한 그래프이다. 평균마찰계수의 경우 상대적으로 저속인 50rpm에서 상대적으로 높게 나타났다. 평균마멸량의 경우를 살펴보면 기지재의 경우 70rpm에서의 마멸량이 50rpm 보다 높게 나타나고 있으며, 복합재료의 경우는 반대로 70rpm에서 오히려 마멸량이 적게 나타남을 알 수 있다. 이것은 경도가 낮은 기지재의 경우 미끄럼 속도가 증가함에 따라 마찰열이 발생하고 그에 따라 용-용마모와 응착마모가 주된 마모기구로 작용한 것으로 보인다. 하지만 복합재료의 경우 강화재인 금속섬유의 마모분이 마모트랙에서 윤활작용과 저속에서 주된 마모기구로 작용하던 연삭입자가

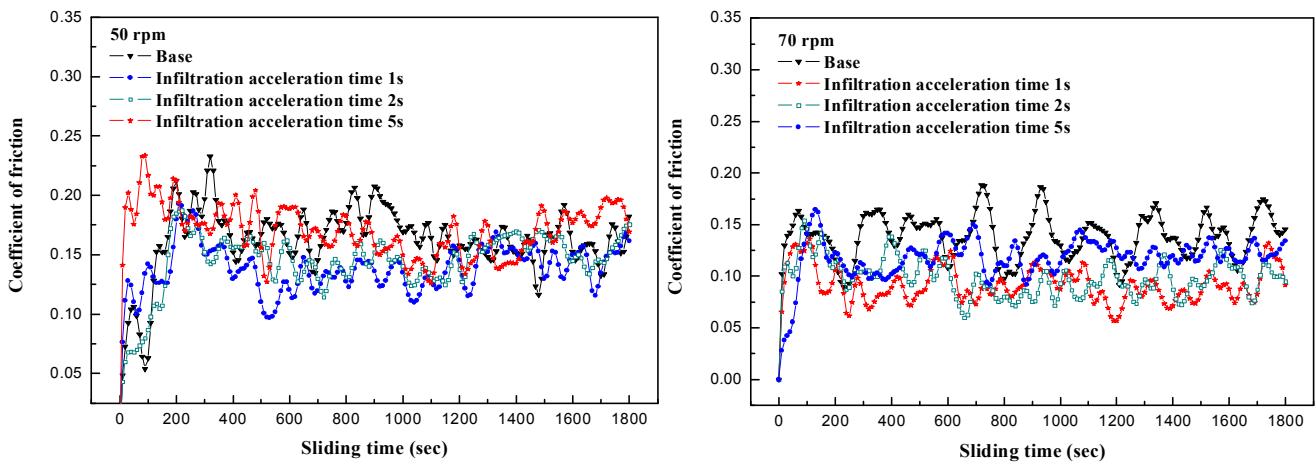


Fig. 5 Relation between coefficient of friction and sliding time (50 rpm, 70 rpm)

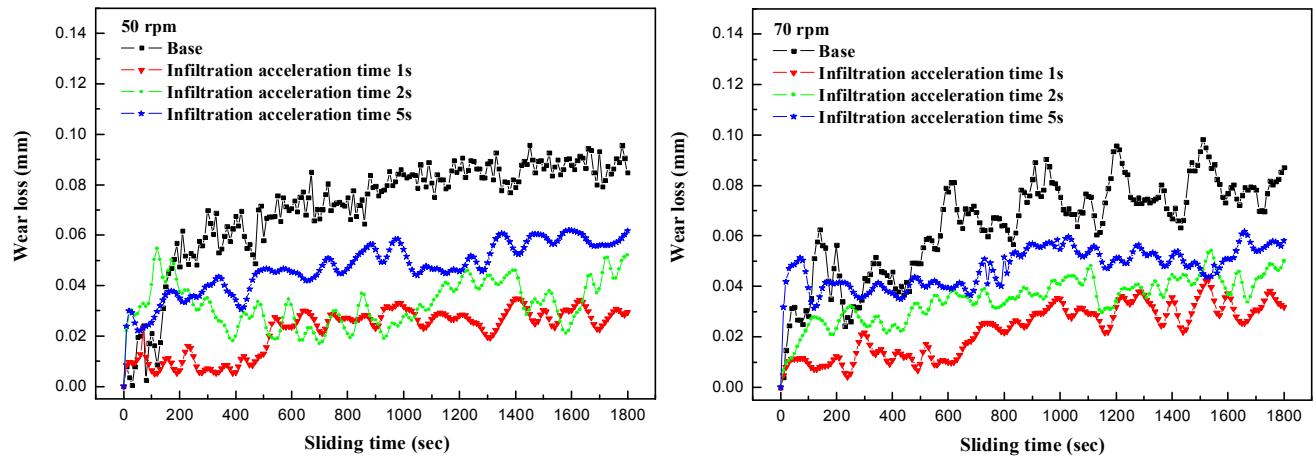


Fig. 6 Relation between wear loss and sliding time (50 rpm, 70 rpm)

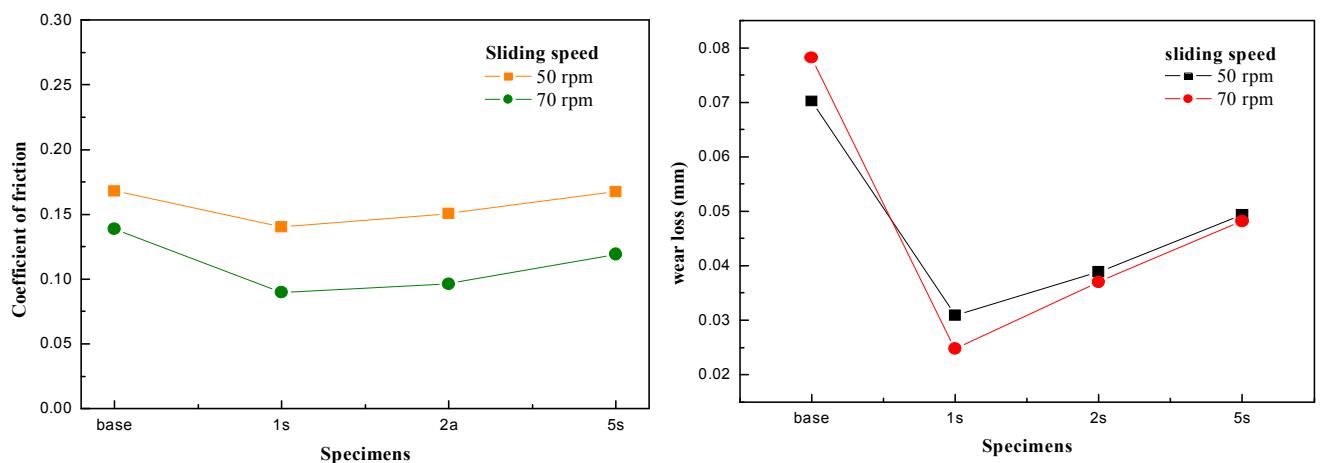


Fig. 7 Average coefficient of friction and average wear loss

속도가 증가함에 따라 뒤박히는 현상이 발생하기 때문이라고 생각된다(남현우 등, 1999). 두 속도 조건 모두 함침가속도가 가장 빠른 1s에서 가장 적은 마멸량이 나타났으며 함침가속시

간이 증가함에 따라 복합재료 내부에 잔존하는 기공의 양이 증가로 인하여 마멸량 증가에 좋지 않은 영향을 미치는 것으로 생각된다.

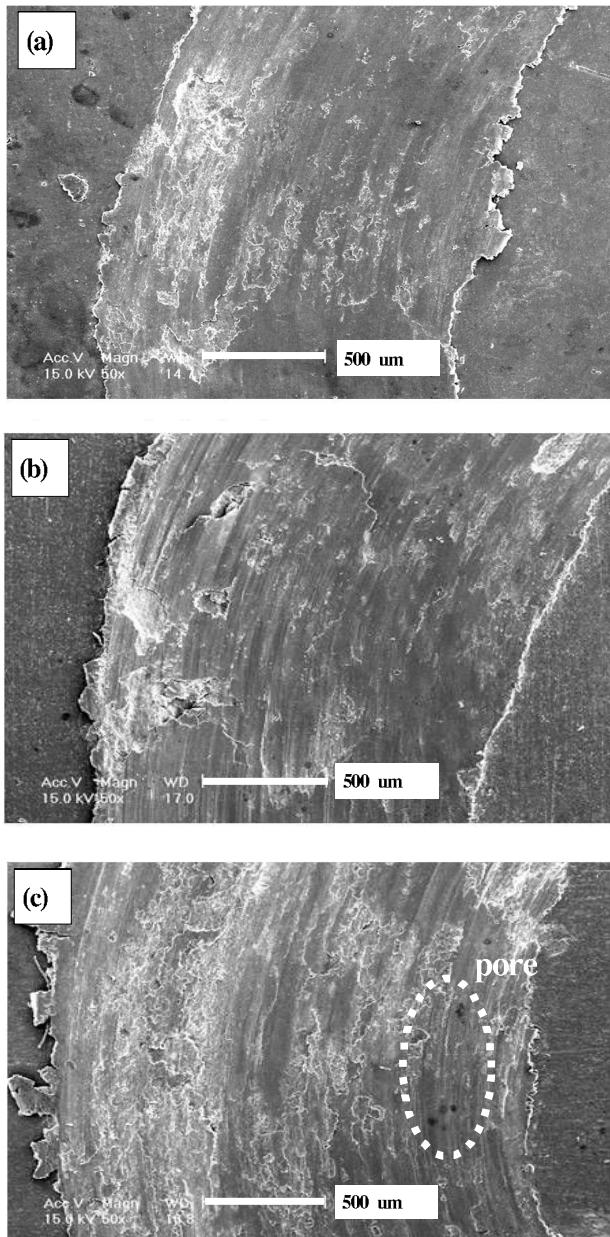


Fig. 8 Fracture surface of the MMC (70 rpm) ((a) 1s, (b) 2s and (c) 5s)

### 3.2.2 마모트랙 관찰

Fig. 8은 주사전자현미경(SEM)으로 촬영한 마모트랙을 나타내고 있다. 미끄럼속도 70rpm으로 시험한 시험편을 나타내고 있으며 각각 함침가속시간 1s, 2s, 5s에 대한 마모트랙을 나타내고 있다. 마모시험데이터에서 확인한바 가장 마멸량이 적었던 함침가속속도 1s의 마모트랙의 폭이 가장 좁게 나타남을 알 수 있었으며 함침가속속도가 증가함에 따라 그 폭도 넓어짐을 알 수 있었다. 또한 1s의 경우 경한재질에서 많이 보이는 연삭마모형태가 많이 관찰되었으며, 2s의 경우 연삭과 응착형태의 마모를 함께 관찰되었다. 5s에서는 응착형태의 마모형상을 많이 관찰되었으며, 약간의 기공이 관찰되기도 했다. 이 기

공은 함침과정에서 함침가속시간이 길어짐에 따라 용융된 알루미늄 합금이 내부까지 충분히 함침되기 전에 응고가 일어나 발생한 것으로 보인다. 경도값은 비슷하게 나타났지만 이런 기공들로 인하여 5s에서의 마찰계수와 마멸량이 높게 나타난 것으로 생각되어지며, 또한 마모시험 전 폴리싱 작업 후 표면에서 관찰할 수 없었던 기공들이 마모시험후 마모트랙에서 발견되는 것으로 미루어 보아 Al 기지에서 FeCrSi 금속섬유가 뽑히는 Pull out 현상이 발생한 것으로 사료된다. 이러한 함침시 발생한 기공과 마모시험과정에서 발생한 기공들로 인하여 함침가속시간이 가장 긴 5s에서 마멸량이 많이 나타난 것으로 보인다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 저압함침법을 이용하여 금속섬유(FeCrSi)를 강화재로 사용하여 FeCrSi/AC8A 금속기 복합재료를 제조하였으며, 기공율을 관찰, 경도측정, 마모시험 등을 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 용융함침 압력 0.8MPa에서는 기공을 거의 찾아볼 수 없는 최적의 압력임을 알 수 있었다. 기공이 다소 관찰되는 0.4MPa에서 함침가속시간에 따른 기공율을 관찰한 결과 가속시간 1s와 2s에서 기공율이 0.2%이하로 나타났으며, 5s에서는 0.5%이상 나타나는 등 시간이 길어질수록 기공률이 증가하는 것을 알 수 있었다.

(2) FeCrSi 금속섬유를 AC8A 알루미늄에 강화시킴으로써 기지재에 비해 복합재료의 경도값이 약 3배 이상 증가함을 알 수 있었다. 함침가속시간에 따른 경도값은 1s-380HV, 2s-340HV, 3s-360HV으로 큰 차이는 없었다.

(3) 마찰마모시험결과 50rpm과 70rpm의 두 미끄럼속도에서 모두 기지재보다 복합재료가 내마모성이 좋음을 알 수 있었으며 함침가속속도가 빠를수록 내마모성이 좋게 나타났다.

(4) SEM을 이용하여 함침가속시간에 따른 마모면을 관찰한 결과 기공률이 가장적은 1s에서는 주로 연삭마모, 2s에서는 연삭마모와 함께 응착마모형태도 관찰이 되었으며, 5s에서는 응착마모형태가 많이 관찰되었으며, 불충분한 함침으로 인한 기공과 Pull out에 의해 발생된 것으로 보이는 기공이 5s에서 많이 관찰되었다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업, 경상대학교 2단계 BK사업으로 수행된 연구결과이며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

남현우, 민병렬, 이종해, 한경섭 (1999). “예비성형체 및 금속복합재료에 미치는 바인더의 영향에 관한 연구”,

- 대한기계학회논문집 A권, 제23권, 제6호, pp 952-960.
- 윤한기, 정현채 (2006). "LPS-SiC 세라믹스의 굽힘강도 특성에 미치는 미시조직 영향", 한국해양공학회지 제20권, 제5호, pp 77-81.
- Choi, C.Y., Sasaki, G., Matsugi, K., Kondoh, S. and Yanagisawa, O. (2005). "Development of FeCrSi/AC8A Composite by Low Pressure Casting and Application of Piston", Spring Annual Meeting Program JSME, pp 9-12.
- Clyne, T.W. and Mason, J.F. (1987). "The Squeeze Infiltration Process for Fabrication of Metal Matrix Composites", Metal L Trans, Vol 18A, No 8, pp 1519-1530.
- Fleming, W. and Temis, J.M. (2002). "Numerical Simulation of Cyclic, Plasticity and Damage of an Aluminum Metal Matrix Composite with Particulate SiC Inclusions", Int. J. of Fatigue, Vol 24, pp 1079-1088.
- Morimoto, S., Ohnishi, N. and Okada, S. (1987). "Development of a Low-pressure Die Casting Process for Improved Soundness of Aluminum Castings", AFS Transactions, Vol 20, pp 39-46.
- Ochiai, S., Osamura, K. and Murakai, Y. (1982). "Process in Science and Engineering of Composites", ICCM-IV, pp1331.
- Park, W.J., Anowar, H.M., Choi, Y.B., Park, S.H. and Huh, S.C. (2007). "A Study on the Manufacturing Conditions of Metal Matrix Composites by Low Pressure Infiltration Process", J. of Mechanical Science and Technology, Vol 21, pp 1694-1699.
- Segurado, J., Gonzalez, C. and Lloca, J. (2003). "A Numerical Investigation of The Effect of Particle Clustering on The Mechanical Properties of Composites", Acta. Mater. Vol 51, pp 2355-2369.
- Westengen, H. and Holta, O. (1989). "Low Pressure Permanent Mould Casting of Magnesium-recent Developments", Founder Trade Journal, Vol 163, pp 738-742.

---

2008년 8월 14일 원고 접수

2008년 9월 26일 최종 수정본 채택