

# 용사법에 의한 Al/Al-SiC 복합재료의 제조 Fabrication of Al/Al-SiC Composites by Thermal Spray Process

김균택 · 김영식  
K. T. Kim and Y. S. Kim

**Key Words** : Metal Matrix Composites(금속기 복합재료), Thermal Spray Process(용사법), Microstructure(미세 구조), Wear Behavior(마모거동)

**Abstract** : Metal matrix composites(MMCs) reinforced with ceramic particulates are receiving increasing attention because their high specific strength, low coefficient of thermal expansion and excellent wear resistance. Especially, Al-based composites(AMCs) have been widely applied for the aerospace and automotive industries. Such composites are mainly fabricated by the cast, powder metallurgy and infiltration process. In this study, SiC particulate reinforced Al-based composites were fabricated by thermal spray process and their wear behavior were investigated. Composites with different spray parameter were fabricated by using flame spray apparatus. Microstructure and wear behavior of the composites were observed by scanning electron microscope(SEM) and electron probe micro-analysis(EPMA).

## 1. 서 론

최근 기계, 자동차 및 우주항공 산업 등에 사용되는 재료의 상당부분이 기존의 철강재료 대신 알루미늄 합금 및 알루미늄-세라믹 복합재료로 대체되어가고 있다. 특히 알루미늄-세라믹 복합재료는 높은 비강도, 내마모성 및 내열성으로 인해 폭넓은 관심을 받고 있으며, 산업현장에서의 적용성이 점차 확대되어 가고 있다<sup>1, 4)</sup>. 현재 사용되고 있는 금속기 복합재료(metal matrix composites)의 대부분은 분말야금법(powder metallurgy), 용탕교반법(melt stirring), 침투법(infiltration process) 등의 방법으로 만들어지고 있는데, 이러한 방법들은 높은 제조비용, 제품내부에 발생하는 기공, 강화재의 편석, 제품의 형상과 크기의 제한 등의 단점들을 가지고 있다<sup>5, 6)</sup>. 이에 반해 용사법(thermal spray process)은 제품의 표면만을 복합화 할 수 있고, 제조공정이 단순하며 경제적이고, 특히 코팅층의 형성속도가 매우 빠르고 제품의 형상과 크기에 제약을 받지 않는다는 큰 장점을 가지고 있다<sup>7)</sup>.

본 논문에서는 용사법에 의한 내마모용 Al/Al-SiC

입자강화 복합재료를 제조하기 위한 연구의 일환으로, 복합재료 코팅층 제조의 최적 공정조건을 도출하고 아울러 제조된 복합재료 코팅층의 미세구조 및 마모특성을 분석하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 Al/Al-SiC 복합재료의 제조

본 실험의 모재(substrate)로는 Al 6061 디스크(40  $\phi$  6 mm)를 사용하였다. 복합재료 코팅층의 기지재(matrix)로는 Al 분말(Praxair, Al-104)을, 강화재(reinforcement)로는 SiC 분말(Aldrich, 37809-7)을 사용하였다. Fig. 1은 본 실험에 사용된 Al 및 SiC 분말의 형상을 나타낸다. 용사장치는 Sulzer-Metco사의 flame spray system(6P-II)을 사용하였다. 용사작업 전 이물질 제거를 위해 아세톤에서 초음파 세척을 하고, 모재와 복합재료 코팅층의 접합력을 증가시키기 위해 #24 알루미늄 그릿트를 사용하여 블라스트 처리를 하였다. 용사공정에 영향을 끼치는 주요 공정변수들은 아세틸렌 가스, 산소 가스 및 캐리어 가스의 압력, 용사거리, 용사 건의 이송 속도, 분말의 송급량 등이 있으나, 본 실험에서는 다른 공정변수들은 고정하고, 용사거리를 60, 80, 100, 120 mm로 변화시키면서 강화재 분율이 6, 9, 12%인 세 종류의 복합재료 코팅층을 제조하였다. 제조된 복

접수일 : 2006년 1월 25일  
김균택 : 부경대학교 대학원 기계설계학전공  
김영식(책임저자) : 부경대학교 공과대학 기계공학부  
E-mail : yeongsik@pknu.ac.kr

합재료 코팅층의 두께는  $800 \pm 50 \mu\text{m}$ 로 조절하였다. Table 1은 용사법에 의한 복합재료 코팅층 제조의 공정조건을 나타낸다.

Table 1 Thermal spray process parameters

Oxygen gas pressure	0.21 [MPa]
Acetylene gas pressure	0.10 [MPa]
Powder feed rate	0.23 [Kg/min]
Spray distance	60, 80, 100, 120 [mm]
SiC volume fraction	6, 9, 12 [%]

Table 2 Chemical composition of STB-2 alloy (wt%)

C	Si	Mn	Cr	P	S	Mo
0.95	0.15	<0.50	1.30	<0.025	<0.025	<0.08
1.10	0.35		1.60			

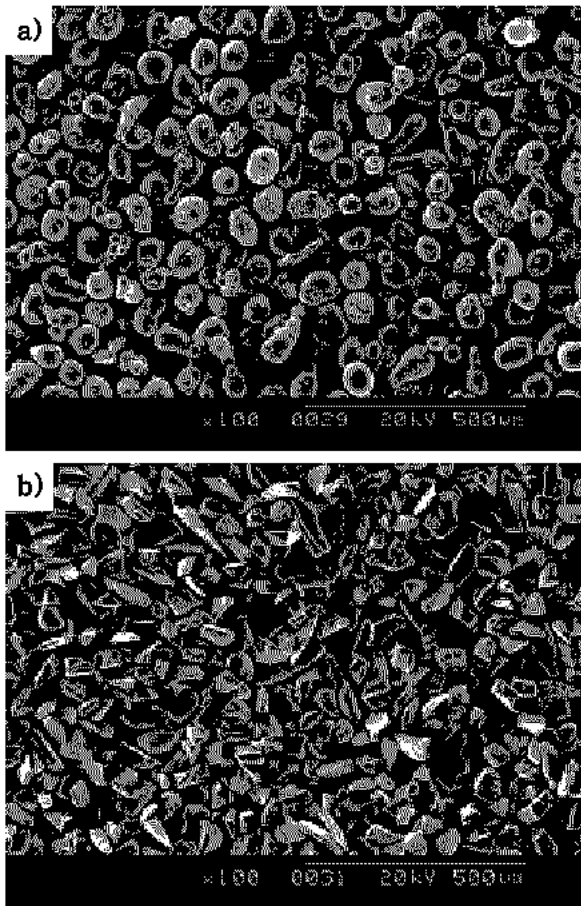


Fig. 1 SEM photographs of powder used : a) Al, b) SiC

## 2.2 미세구조분석

각각의 공정조건에 따라 제조된 복합재료 코팅층에 대하여 SEM(scanning electron microscopy)을 사용하여 코팅층의 구조 및 강화재의 분포상태 등을

관찰하고, EPMA(electron probe micro-analysis)를 통해 복합재료 코팅층의 제조과정에서 발생할 수 있는 반응생성물이나 기타 화합물의 생성을 분석하였다.

## 2.3 마모거동 분석

각각의 공정조건에 따라 제조된 복합재료 코팅층의 마모특성을 분석하였다. 복합재료 코팅층의 표면을 #1500 연마지로 연마한 후, ball-on-disk 타입의 마모시험기를 사용하여 수직하중 3 N, 마모속도 0.2 m/s, 마모거리 1000 m의 조건으로 STB-2 강구를 마모상대재로 하여 마모시험을 실시하고, SEM을 통해 그 마모거동을 분석하였다. Table 2에 마모상대재인 STB-2의 화학조성을 나타내었다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 복합재료 코팅층의 미세구조 분석

Fig. 2는 SiC 분율이 6%인 경우 용사거리에 따른 복합재료 코팅층 단면의 SEM 사진이다. 용사거리가 80 mm일 경우 SiC 입자의 분포상태가 상대적으로 양호하며, 이 조건하에서는 모재와 복합재료 코팅층 계면의 산화층이 거의 관찰되지 않는다. 반면 용사거리가 100 mm, 120 mm로 증가함에 따라 SiC의 분포가 줄어들고 또한 모재와 복합재료 코팅층 계면의 산화층도 뚜렷하게 관찰된다. 이와 같이 용사거리 따라 강화재의 분포상태와 계면 거동의 차이가 생기는 이유는 용사거리에 따라 기지재인 Al 입자의 용융상태와 용융된 Al 입자가 모재 표면에 충돌할 때의 속도와 온도 등이 다르고, 또한 모재 표면에 도달하는 SiC 입자의 수가 달라지기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 결과들로부터 복합재료 코팅층을 제조하기 위한 최적의 용사거리를 80 mm로 판단하였다. Fig. 3은 복합재료 코팅층의 EPMA mapping 결과이다. 무가압 침투법에 의해 금속기 복합재료를 제조할 경우 용융금속의 침투를 원활하게 하기 위해 Mg 분말이 첨가되고, 복합재료 제조과정에서  $\text{Mg}_2\text{Si}$  등의 반응생성물이 형성되어 복합재료의 기계적 특성에 나쁜 영향을 미치는 것으로 보고되고 있는데<sup>8,9)</sup>, 용사법에 의해 제조된 복합재료 코팅층의 EPMA mapping 결과 Al과 SiC의 영역이 뚜렷하게 구분되는 것으로 보아 제조과정에서 Al과 SiC 간의 반응생성물이나 기타 화합물이 전혀 형성되지 않음을 잘 알 수 있다.

이상의 결과로 미루어 용사법에 의한 복합재료 제조 공정변수 중 용사거리가 강화재인 SiC 입자의 분포상태 및 모재와 복합재료 코팅층 간의 계면 형성에 큰 영향을 미치며, SiC 분율은 복합재료 코팅층의 제조에는 별다른 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

3.2 복합재료 코팅층의 마모거동

Fig. 4(a), (b)는 각각 용사거리와 SiC 분율에 따

른 복합재료 코팅층의 마모율의 변화를 나타낸 것이다. 용사거리가 100 mm 이하인 경우에 있어서 용사거리에 따른 마모율에 큰 차이는 없으나 그 중에서도 80 mm일 때 가장 적은 마모율을 보인 반면 용사거리 120 mm일 때에는 마모율이 급격히 증가하는 경향을 나타낸다. 또한 SiC 분율이 6%, 9%로 증가함에 따라 마모율은 점진적으로 낮아지나 SiC 분율이 12%가 되면 다시 증가하는 경향을 나타낸다.

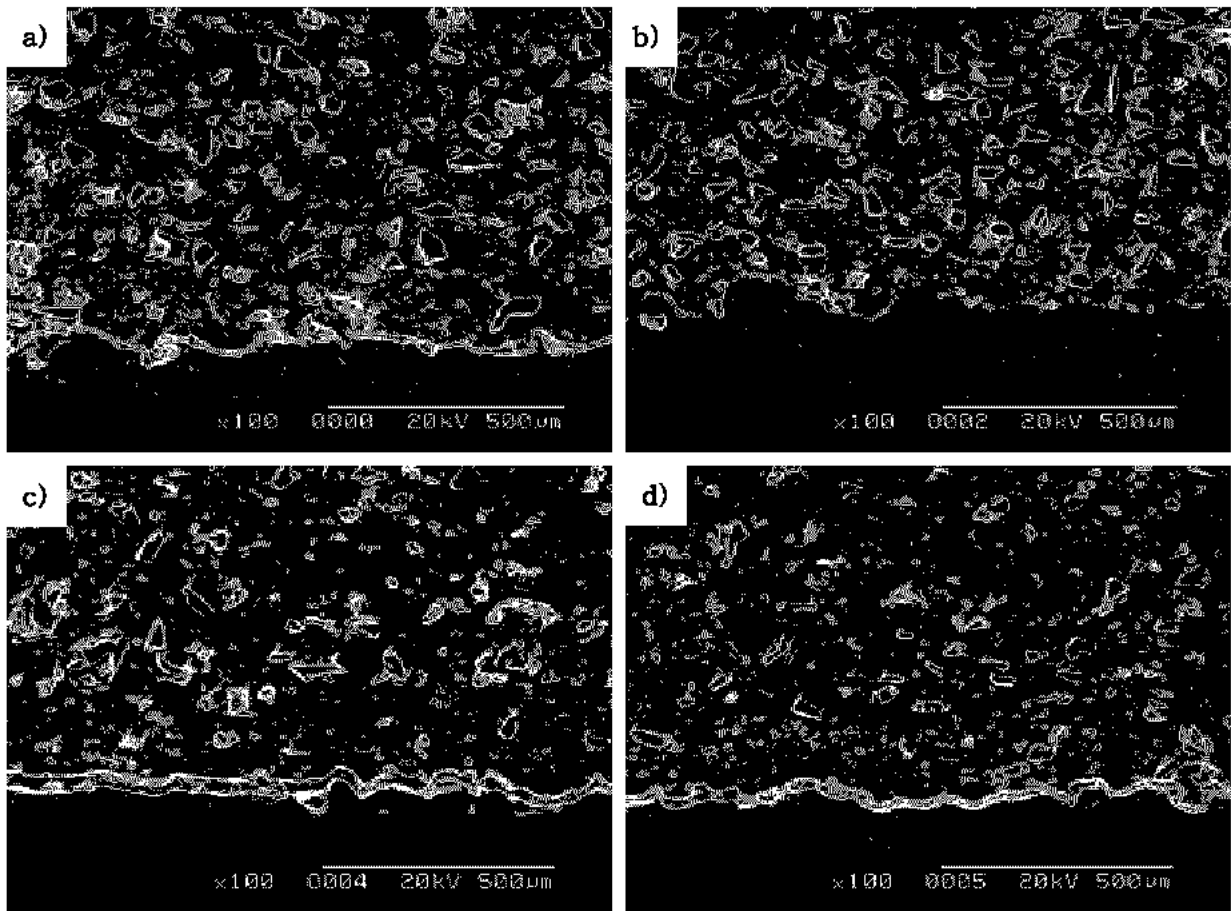


Fig. 2 Microstructure of composite coating layer as to spray distance : a) 60 mm, b) 80 mm, c) 100 mm, d) 120 mm

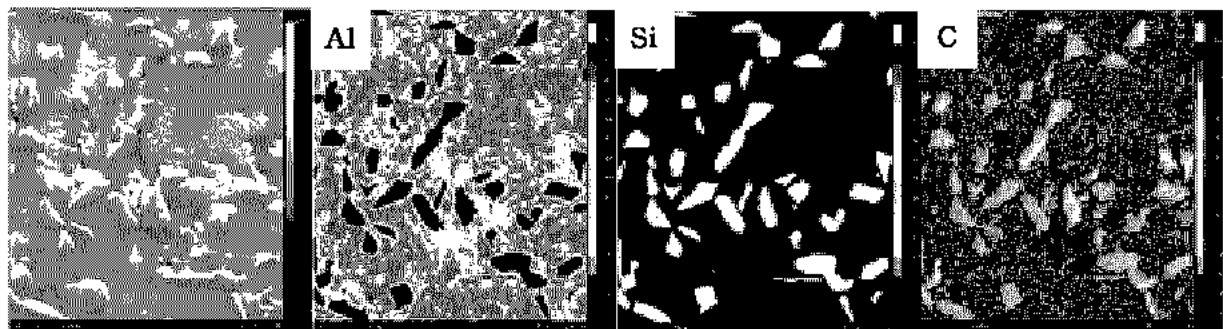


Fig. 3 EPMA map of composite coating layer for Al, Si and C

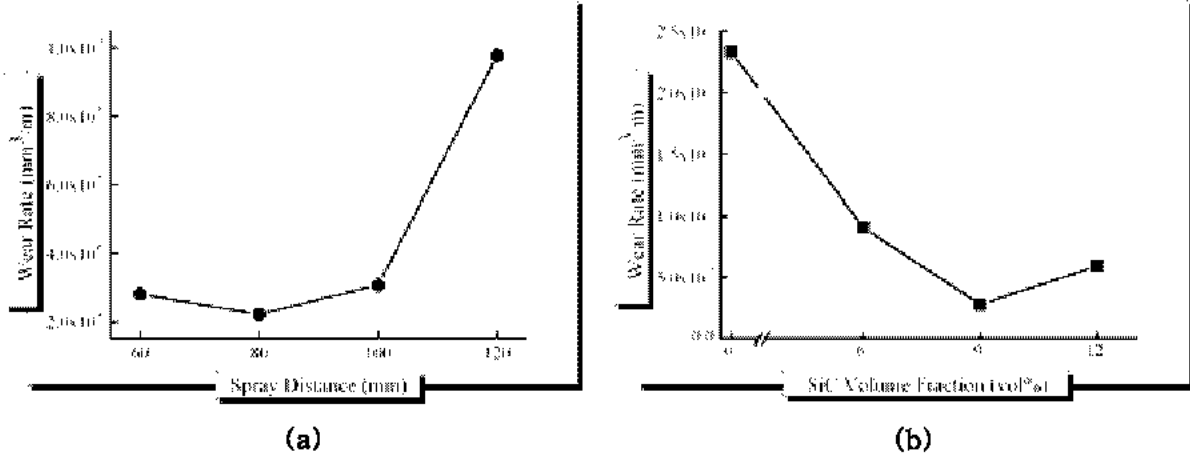


Fig. 4 Wear reat of composit coating layer as (a) spray distance and (b) SiC volume fraction

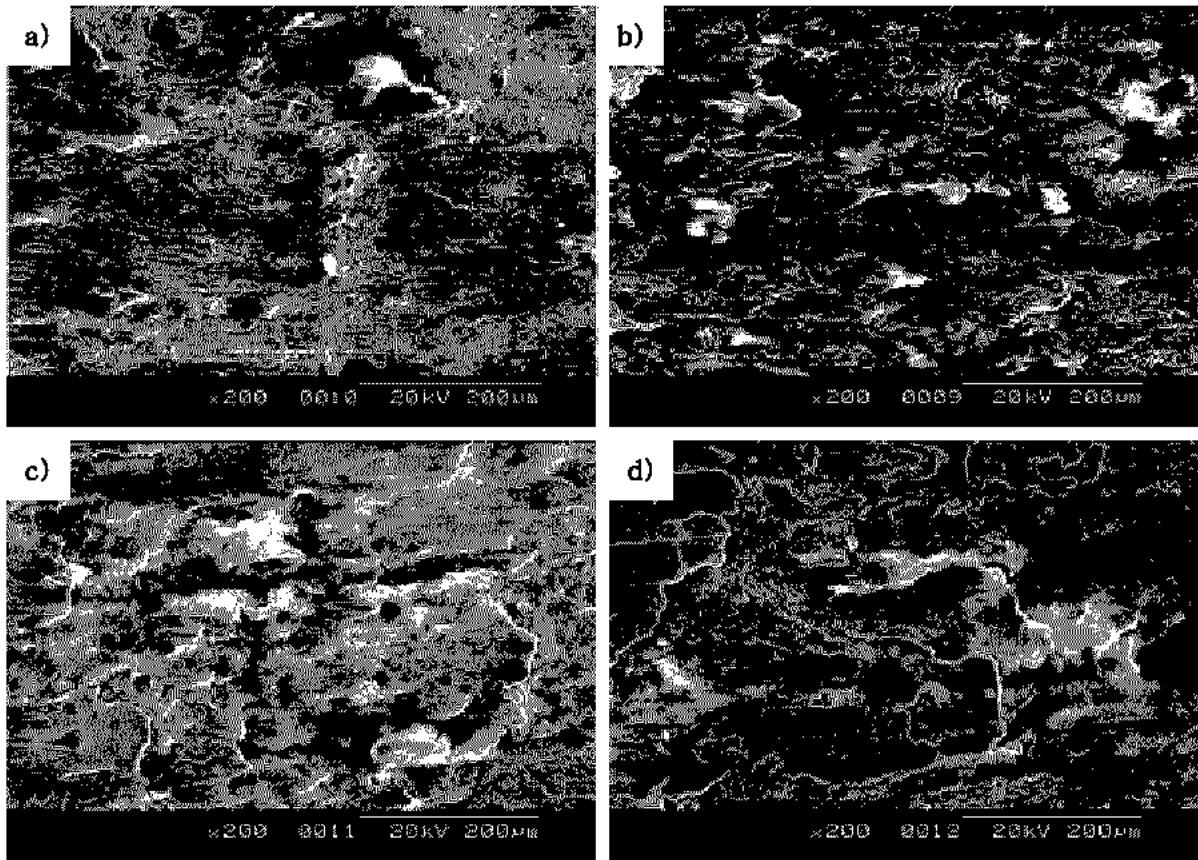


Fig. 5 SEM photographs of worn surfaces as to spray distance

: a) 60 mm, b) 80 mm, c) 100 mm, d) 120 mm

이러한 경향은 Fig. 5 및 6의 마모면 사진으로 설명될 수 있다. Fig. 5에서 볼 수 있는 바와 같이 복합재료 코팅층의 마모거동은 대체로 응착마모의 형태를 나타내고 있는데, 용사거리 120 mm인 경우에 급격히 마모율이 증가하는 것은 이 조건하에서 제조된 복합재료 코팅층은 기지재인 Al 코팅층과의 결합력이 현저히 낮아져 응착마모로 형성된 큰 덩

어리가 쉽게 떨어져 나가기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 6은 SiC 분율에 따른 복합재료 코팅층의 마모면 사진이다. SiC가 포함되지 않은 순수한 Al 코팅층은 대체로 연삭마모 거동을 보인다. SiC 분율이 6%인 코팅층은 연삭마모와 응착마모의 두 가지 마모형태가 함께 관찰되며, 9%인 코팅층은 마모면 전체에 걸쳐서 응착마모가 일어나는 것을 관찰할

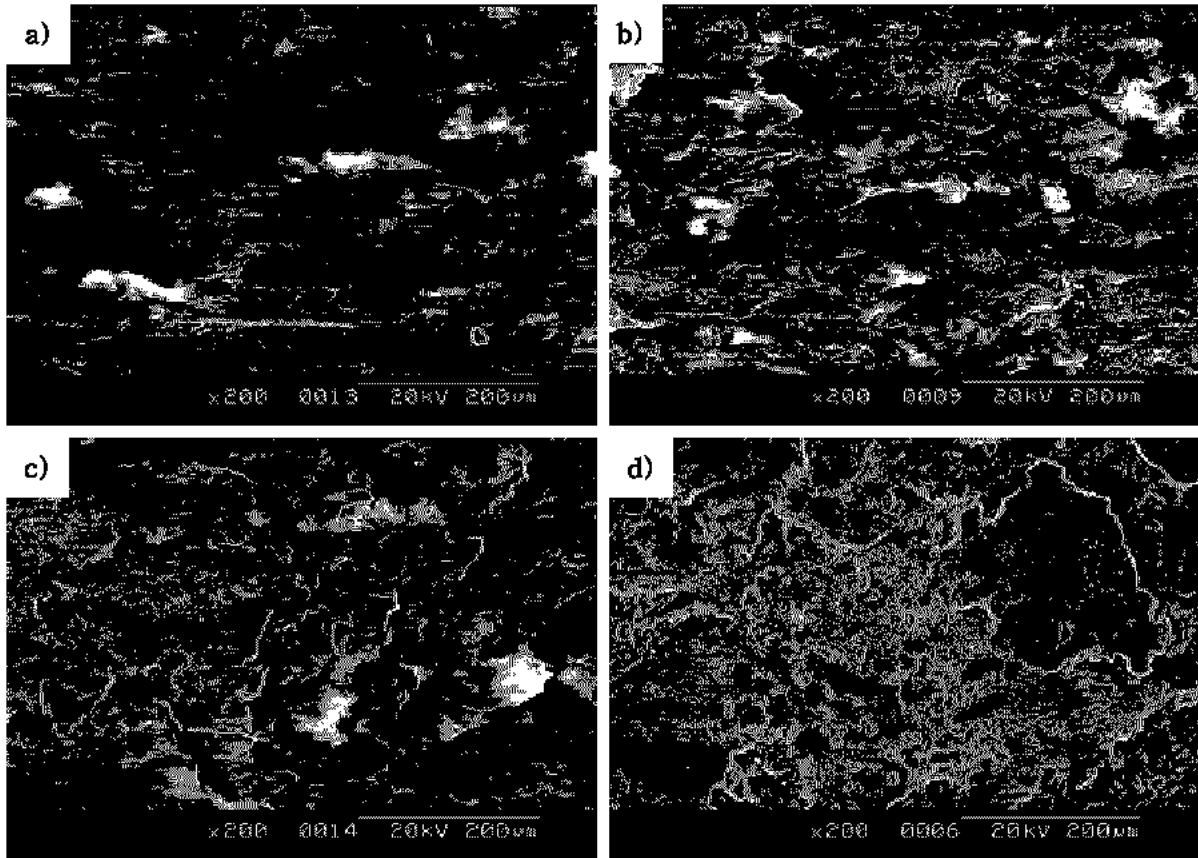


Fig. 7 SEM photographs of worn surface as to SiC volume fraction : a) 0%, b) 6%, c) 9%, d) 12%

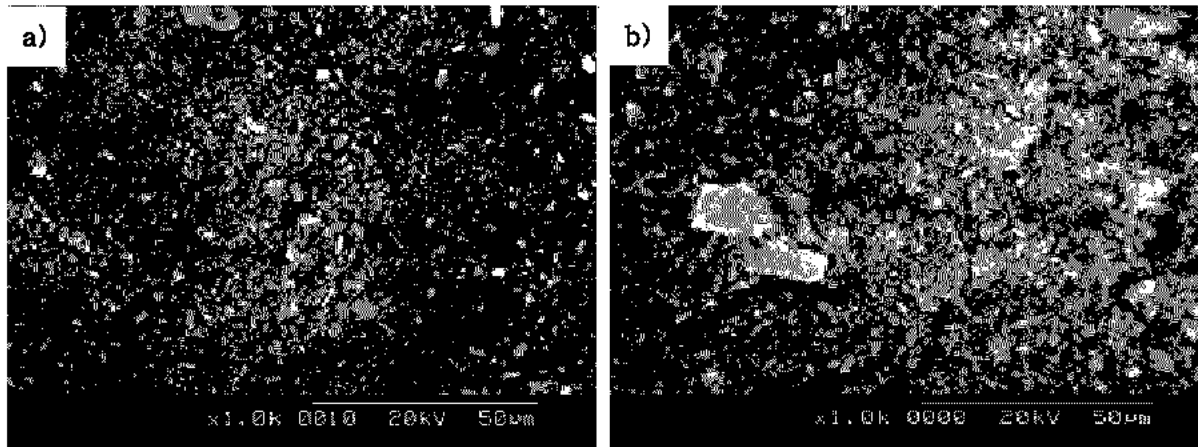


Fig. 8 SEM photographs of wear debris as to SiC volume fraction : a) 9%, b) 12%

관찰할 수 있다. SiC 분율이 12%인 코팅층은 응착된 마모면이 큰 덩어리를 이루며 떨어져 나가고 또한 마모에 의한 SiC 입자의 탈락이 증가되기 때문에 SiC 분율이 9%인 코팅층에 비해 오히려 마모율이 증가하는 것으로 판단된다. 이것은 Fig. 7의 마모분 사진에서도 확인할 수 있는데, SiC 분율이 9%인 코팅층의 마모분은 미세한 반면, 12%인 코팅층의 마모분은 미세한 마모분과 크게 떨어져 나간 마모분이

함께 관찰된다. 즉, 강화재인 SiC 분율이 증가함에 따라 복합재료 코팅층의 마모거동은 연삭마모로부터 응착마모로 천이되고 이에 따라 내마모성도 향상되지만, SiC 분율이 12% 이상이 되면 SiC 입자의 탈락과 함께 응착마모에 의해 생성된 마모면이 파괴됨으로써 오히려 내마모성이 저하된다는 사실을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 용사법에 의한 내마모용 Al/Al-SiC 입자강화 복합재료를 제조하기 위한 연구의 일환으로, 복합재료 코팅층 제조의 최적 공정조건을 도출하고 아울러 제조된 복합재료 코팅층의 미세구조 및 마모특성을 분석하였다. 주요한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 제조비용이 저렴하고 제조공정이 비교적 단순한 flame spray process에 의해 양호한 내마모성을 나타내는 금속기 복합재료 코팅층을 제조할 수 있었다.
- 2) 용사법에 의한 복합재료 코팅층의 제조에 있어서 용사거리는 강화재인 SiC 입자의 분포상태 및 모재와 복합재료 코팅층 간의 계면 형성에 큰 영향을 미친다.
- 3) 용사거리 80 mm, SiC 분율 9%인 공정조건하에서 제조된 복합재료 코팅층이 가장 양호한 내마모성을 나타내었다.
- 4) 강화재인 SiC 분율이 증가함에 따라 복합재료 코팅층의 내마모성도 향상되지만 SiC 분율이 어느 한도를 넘게 되면 오히려 내마모성이 저하된다는 사실을 확인할 수 있었다.

#### 후 기

이 논문은 2004학년도 부경대학교 기성회 학술연구비에 의하여 연구되었습니다.

#### 참고문헌

1. F. Gul and M. Acilar, 2004, "Effect of the reinforcement volume fraction on the sliding wear behaviour of Al-10Si/SiCp composites produced by vacuum infiltration technique", *Comp. Sci. Tech.*, No. 64, pp. 1959~1970
2. J. Rodriguez, A. Martin, and J. Llorca, 2000, "Modeling the effect of temperature on the wear resistance of metal reinforced with ceramic particles", *Acta Mater.*, No. 48, pp. 993~1003
3. M. V. Kevorkijan, 1998, "MMC for automotive applications." *Am. Ceram. Soc. Bull.*, No. 77, pp. 53~59

4. H. S. Lee, J. S. Yeo, S. H. Hong, D. J. Yoon and K. H. Na, 2001, "The fabrication process and mechanical properties of SiCp/Al-Si metal matrix composites for automobile air-conditioner compressor pistons." *J. Mater. Pro. Tec.*, Vol. 113, pp. 202~208
5. E. M. Assar, 1999, "Fabrication of metal matrix composite by infiltration process - part2 : experimental study", *J. Mater. Pro. Tec.*, Vol. 86, pp. 152~158
6. S. W. Lai and D. D. L. Chung, 1994, "Phase distribution and associated mechanical property distribution in silicon carbide particle-reinforced aluminium fabricated by liquid metal infiltration.", *J. Mater. Sci.*, Vol. 29, pp. 2998~3016
7. K. Ghosh, T. Troczynski and A. C. D. Chaklader, 1998, "Aluminum-silicon carbide coating by plasma spraying", *J. of Thermal Spray Technology*, No. 7, pp. 78~86
8. 이건배, 건훈, 1995, "SiCp/Al기 복합재의 무가압 침투거동 및 미세조직", *대한금속학회지*, 33권 8호, pp. 1101~1109
9. K. B. Lee, H. S. Sim, S. Y. Cho and H. Kwon, 2001, "Reaction products of Al-Mg/B4C composite fabricated by pressureless infiltration technique", *Mat. Sci. and Eng.*, A. 302, pp. 227~234