

Al/SiC_p 복합재료의 마모거동에 미치는 MML의 영향

김군택 · 김영식*

부경대학교 기계공학부

Effect of MML on the Wear Behavior of Al/SiC_p Composites

Kyun Tak Kim and Kim Yeong Sik[†]

School of Mechanical Engineering, Pukyong National University

(Received January 5, 2009; Revised January 31, 2009; Accepted February 4, 2009)

Abstract – Al-based composites reinforced with SiC particulate were fabricated using a thermal spray process, and dry sliding wear behavior of the composites was investigated. Pre-mixed Al and SiC powders were sprayed on an Al6061 substrate by flame spraying, and dry sliding wear test were performed under various sliding speed and applied load conditions against Al₂O₃ ball. Wear behavior of the composites was studied by using scanning electron microscope (SEM), energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX) and X-ray diffraction (XRD). And build-up mechanism of MML on the worn surface of the composites was examined. It was revealed that these MML was formed of debris from the contact surface of the composites and effected to wear behavior of the composites protecting the contact surface of the composites.

Key words – metal matrix composites(금속기 복합재료), thermal spray process(용사법), wear(마모), mechanically mixed layer(기계적 혼합층)

1. 서 론

최근 기계, 자동차, 우주항공 및 해양 산업분야의 급격한 발전과 함께 기계구조물이나 그 부재에 대한 경량화, 고강도화, 고효율화에 대한 요구가 증대되고 있다. Al기 복합재료(Al-based composites:AMCs)는 높은 비강도와 내마모성, 내열성을 가지고 있어 기존의 철강재료 및 Al-alloy 재료들을 대체하고 있는 추세이다[1]. 현재 AMCs는 가압법, 용탕주조법, 분말야금법, 무가압침투법, 용사법 등의 다양한 방법으로 만들어지고 있는데, 이들 방법 중 용사법에 의한 AMCs의 제조는 여타의 다른 방법들과 달리 제품의 표면만을 복합재료화 할 수 있고, 비교적 간단하고 경제적인 공정을 통해 강화상의 분포가 균일한 복합재료 코팅층을 빠른 시간에 제조할 수 있는 장점이 있다[2-5].

AMCs의 마모거동에서, 상대마모재가 금속 재료인 경우 마모면에서 기계적 혼합층(mechanically mixed layer: MML)이라 불리는 층이 생성되고, 이 층이 AMCs의 마모거동에 중요한 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다[6-8].

현재까지 보고된 MML에 관한 연구는 상대마모재가 금속 재료인 경우가 대부분이었다. 그러나 최근 각종 산업분야에 적용되는 기계부품에 고경도의 내마모성 재료인 세라믹 재료의 사용이 증가하고 있는데, 이러한 실정을 고려하면 상대마모재가 세라믹 재료인 경우의 마모거동에 대한 다양한 연구가 필요하다. 저자들은 상대마모재로서 Al₂O₃을 사용한 경우에 있어서 Al/SiC_p 복합재료 코팅층의 마모거동에 대한 연구결과를 발표하며 있는데, Al/SiC_p 복합재료 코팅층의 마모면에서 응착층이 관찰되는 것으로 보고하였다[9].

본 연구에서는 Al/SiC_p 복합재료 코팅층의 마모거동에서 관찰된 응착층이 MML임을 규명하고, 상대마모재

*주저자 · 책임저자 : yeongsik@pknu.ac.kr

Table 1. Spray parameters

Oxygen gas pressure [MPa]	Acetylene gas pressure [MPa]	Powder feed rate [kg/min]	spray distance [mm]
0.21	0.10	0.23	80

Table 2. Wear test conditions

Type	Counterpart materials	Sliding speed [m/s]	Applied load [N]
Ball-on-disk	Al ₂ O ₃	0.2, 0.4, 0.6, 0.8	3, 6, 9, 12
	AISI52100	0.8	3

로서 Al₂O₃를 사용한 경우 Al/SiCp 복합재료 코팅층의 마모거동에 미치는 MML의 영향을 분석하였다.

2. 실험 방법

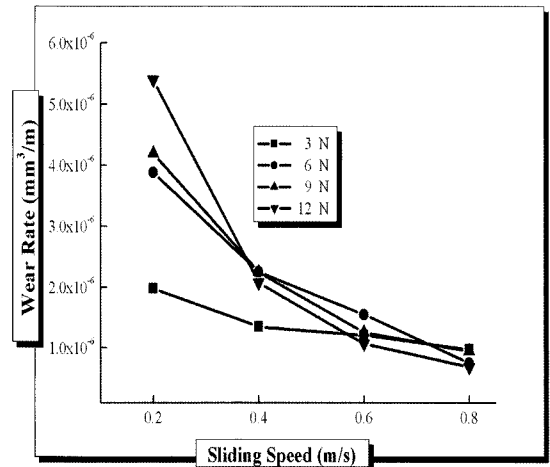
프레임 용사장치(Sulzer-Metco, 6P-II)를 사용하여 디스크 형태의 Al6061 기체의 표면에 Al과 SiC의 무게 분율을 60:40으로 하여 고르게 혼합한 분말을 용사하여 Al/SiCp 복합재료 시험편을 제조하였다. 용사법으로 제조된 Al/SiCp 복합재료 시험편을 코팅층의 두께가 700±50 μm가 되도록 연마하고, 최종적으로 2000번 사포를 사용하여 조도를 일정하게 하였다. 준비된 시험편을 ball-on-disk 방식의 건식마모시험기를 사용하여 미끄럼마모시험을 실시하였다. 상대마모재로는 8 mm 직경의 Al₂O₃ ball을 사용하고, 마모거리는 1000 m로 하였다.

미끄럼 속도는 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 m/s의 4가지 조건으로, 하중은 3, 6, 9, 12 N의 4가지 조건으로 변화시키면서 마모시험을 실시하였다. 또한 상대마모재가 금속 재료인 경우와 마모거동을 비교하기 위해 8 mm 직경의 AISI52100 ball을 상대마모재로 하여 미끄럼 속도 0.8 m/s, 하중 3 N의 조건하에서 마모시험을 실시하였다. 본 연구에 사용된 용사공정 조건과 마모시험 조건을 Table 1과 2에 각각 나타내었다.

마모시험 후, Al/SiCp 복합재료 시험편의 마모면과 마모면에 형성된 MML 및 상대마모재의 접촉면을 SEM, XRD 및 EDX에 의해 관찰·분석하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 미끄럼 속도의 변화에 따른 Al/SiCp 복합

**Fig. 1. Volumetric wear rate with sliding speed.**

재료 코팅층의 마모율을 나타낸 그래프이다. 그래프에서 보는 바와 같이 동일한 하중조건하에서는 미끄럼 속도가 증가할수록 마모율은 감소한다. 상대적으로 하중이 작은 3 N에서는 미끄럼 속도 증가에 따른 마모율의 변화가 적으며, 특히 0.4 m/s 이상에서는 미끄럼 속도가 증가하여도 마모율은 거의 변화가 없다. 반면, 상대적으로 하중이 높은 12 N인 경우에는 미끄럼 속도가 증가함에 따라 마모율이 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 미끄럼 속도를 중심으로 살펴보면, 2.0 m/s일 때에는 하중이 증가할수록 마모율은 급격히 증가한다. 그러나 미끄럼 속도가 0.4 m/s 이상인 경우 하중의 증가에 따른 마모율의 차이는 감소하는 것을 알 수 있는데, 미끄럼 속도가 0.6 m/s일 때에는 하중이 증가하더라도 마모율은 크게 변화하지 않으며, 미끄럼 속도가 0.8 m/s일 때에는 하중의 증가에 따른 마모율의 차이는 거의 없거나 오히려 조금 감소한다. 이러한 미끄럼 속도에 따른 마모율의 변화는 다음에 기술하는 마모면의 관찰에 의해 설명 될 수 있다. Fig. 2의 (a), (b)는 미끄럼 속도가 0.2 m/s이고, 하중이 각각 3 N, 12 N인 마모면의 SEM사진이다. 하중이 3 N인 경우, 주된 마모거동은 응착마모로써 마모면 전반에 걸쳐서 응착된 흔적이 관찰되는 반면, 하중이 12 N인 경우는 응착마모와 함께 거친 연삭마모 거동이 관찰된다. 즉, 상대적으로 저속인 0.2 m/s의 경우에는 하중이 증가할수록 응착마모가 격렬하게 일어나고, 그에 따른 마모면의 파괴가 진행됨으로써 마모율이 높게 나타나는 것으로 판단된다. 미끄럼 속도가 0.8 m/s이고, 하중이 각각 3 N과 12 N인 Fig. 2의 (c)와 (d)를 살펴보면, 전술한 미끄럼 속

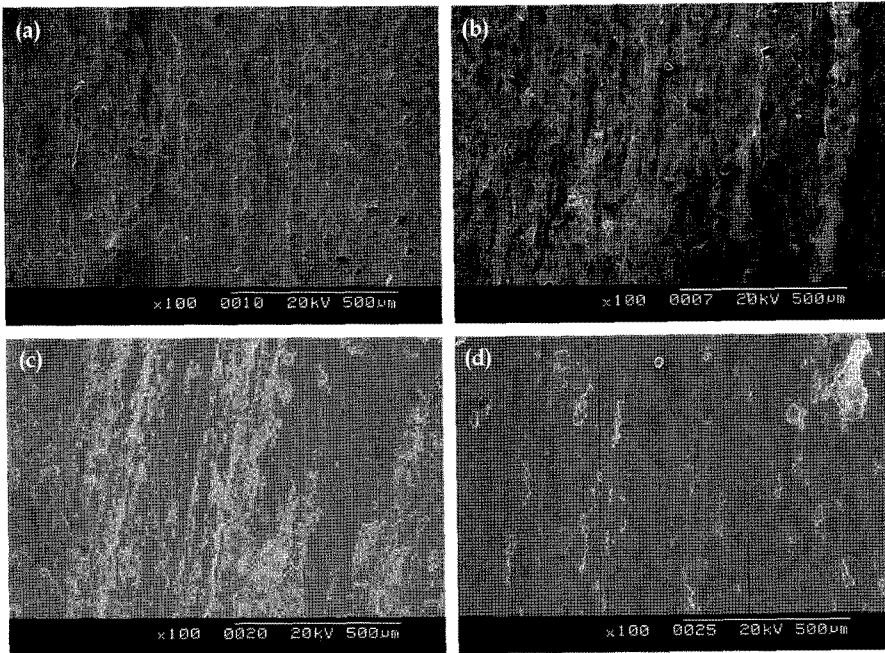


Fig. 2. SEM photographs of worn surface at (a) 0.2 m/s, 3 N, (b) 0.2 m/s, 12 N, (c) 0.8 m/s, 3 N and (d) 0.8 m/s, 12 N.

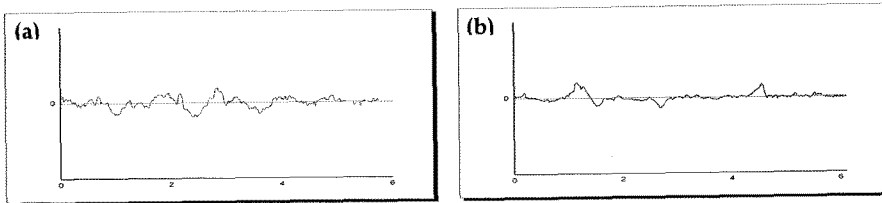


Fig. 3. Surface profiles of worn surface at (a) 0.2 m/s, 12 N and (b) 0.8 m/s, 12 N.

도 0.2 m/s인 경우 인 경우와는 반대로 하중이 3N인 경우에는 응착마모와 거친 연삭마모 거동이 함께 관찰되며, 하중이 12N인 경우에는 마모면 전체가 응착층으로 덮여있고, 이 응착층 위에서 약한 연삭마모가 진행된 흔적이 관찰된다. 이 응착층은 미끄럼 속도가 0.4 m/s 이상인 경우의 마모면에서 관찰되는데, 미끄럼 속도가 증가할수록 그 면적이 크게 증가한다. 또한 Fig. 3에 나타낸 마모면의 profiling 결과를 보면, 마모면에 이 응착층이 크게 형성될수록 마모면의 요철이 적어지며, 이러한 결과로부터 마모면에 형성된 응착층이 마모면 표면을 보호하고 그 결과 응착층이 크게 형성된 시험편(미끄럼 속도 0.8 m/s, 하중 12N)의 마모율이 다른 시험편들에 비해 낮게 나타나는 것으로 판단된다. Fig. 4는 마모면의 단면 SEM사진을 나타낸

것이다. 미끄럼 속도 0.2 m/s, 하중 12N인 경우에는 마모면이 고르지 못하고 복합재료 코팅층만 관찰되지만, 미끄럼 속도 0.8 m/s, 하중 12N의 경우에는 복합재료 코팅층 위에 새로운 층이 형성되어있는 것을 확인할 수 있다. 이 응착층에 대한 XRD분석 결과(Fig. 5), 응착층을 구성하고 있는 것은 복합재료의 성분인 Al과 SiC인 것으로 확인되었으며, 상대마모재의 성분인 Al_2O_3 는 전혀 검출되지 않았다. 이러한 사실은 마모과정에서 복합재료 코팅층 표면으로부터 탈락된 미세한 debris들이 반복적인 접촉에 의해 마모면에 응착됨으로써 이 응착층이 형성되었다는 것을 의미한다. 이 응착층은 금속 재료를 상대마모재로 한 경우 AMC의 마모면에서 주로 관찰되는 것으로 MML(mechanically mixed layer)이라고 알려져 있다[10]. 또한 그 성분은

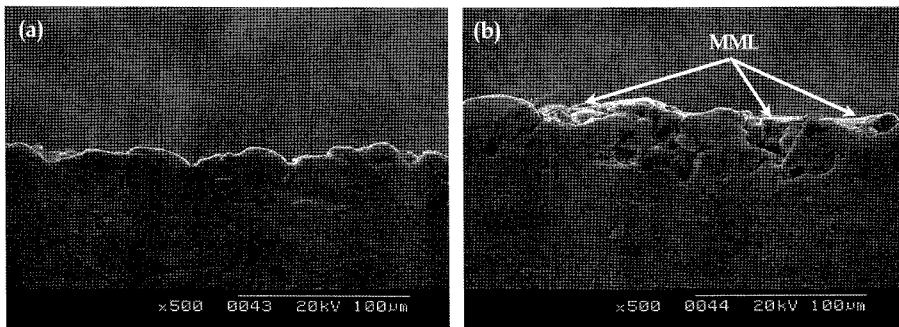


Fig. 4. SEM photographs of cross section of worn surface at (a) 0.2 m/s, 12 N and (b) 0.8 m/s, 12 N.

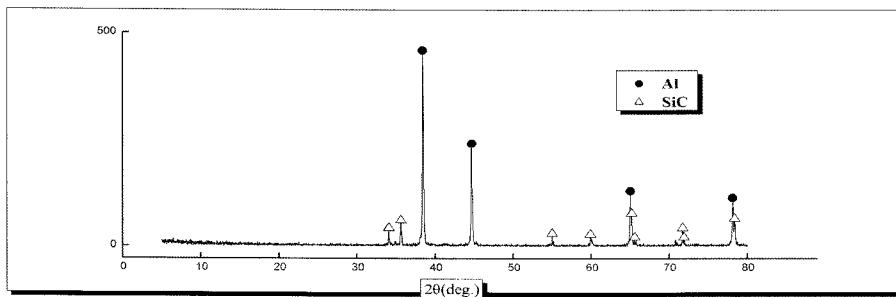


Fig. 5. XRD analysis result of MML generated under the conditions of 0.8 m/s, 12 N.

마모면과 상대마모재에서 탈락된 debris이며, 이 debris가 마모면과 상대마모재 사이에서 반복적으로 접촉하여 미세해지고, 이것이 혼합되어 마모면에 응착된 것으로 화학적인 반응생성물이 아닌 혼합층인 것으로 알려져 있다. 이들 연구에 의하면, MML에 의해 마모면이 매끄럽게 되고, 그 결과 보다 약한 마모조건이 형성됨으로써 AMC의 표면을 보호하여 내마모성을 높이는 것으로 보고되고 있다[6-8]. 본 연구는 상대마모재로서 금속 재료가 아닌 세라믹 재료를 사용한 것으로, 이 경우에도 MML이 형성되어 복합재료 표면의

내마모성을 높이는 결과를 보여주고 있다. 다만, Fig. 5에서도 알 수 있는 바와 같이 상대마모재로 금속 재료를 사용한 이전의 연구결과들과는 달리 MML에서 상대마모재의 성분은 전혀 검출되지 않았다. 세라믹 재료를 상대마모재로 사용한 본 연구에서 관찰되는 MML의 형성과정 및 그것이 마모거동에 미치는 영향을 상대마모재가 금속 재료인 경우와 비교 분석하였다. Fig. 6과 7은 각각 미끄럼 속도 0.8 m/s, 하중 3 N의 조건하에서 상대마모재가 금속 재료인 AISI52100을 사용한 경우와 세라믹 재료인 Al_2O_3 를 사용한 경우의 마모면

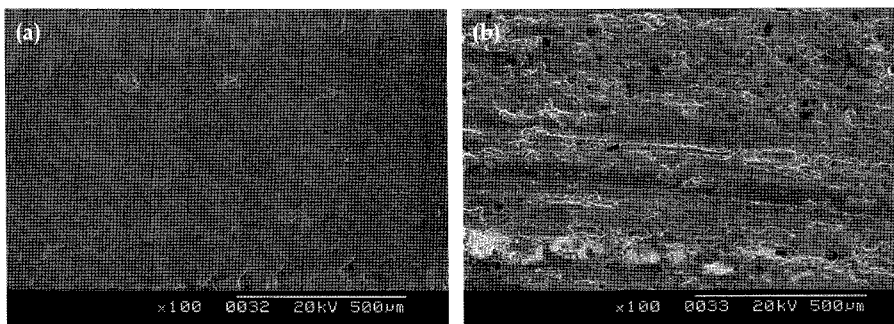


Fig. 6. SEM photographs of worn surface of composites at 0.8 m/s, 3 N against (a) AISI52100 and (b) Al_2O_3 .

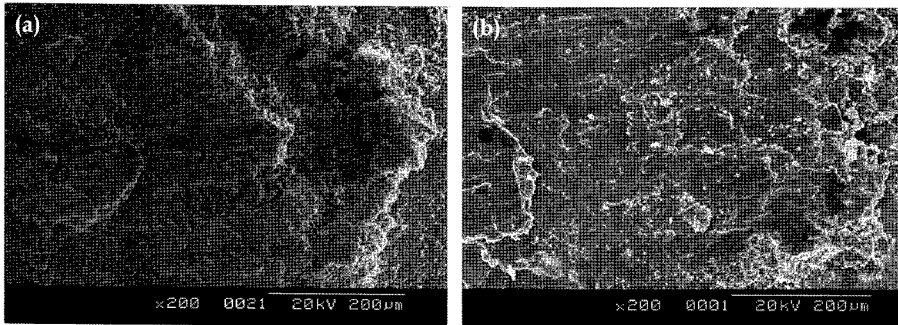


Fig. 7. SEM photographs of contact surface of counterpart at 0.8 m/s, 3 N against (a) AISI52100 and (b) Al_2O_3 .

과 상대마모재의 접촉면 사진을 나타낸 것이다. 상대마모재가 AISI52100인 경우에는 마모면이 좁고, 마모면 전체에 걸쳐서 MML이 형성되어 있으며 이 MML 위에서 약한 연삭마모가 진행된 것을 볼 수 있다(Fig. 6(a)). 반면, 상대마모재가 Al_2O_3 인 경우에는 마모면이 넓고, 거친 연삭마모와 응착마모 거동이 함께 관찰되며 부분적으로 MML이 형성되어 있는 것을 볼 수 있다(Fig. 6(b)). 또한 상대마모재로 AISI52100을 사용한 경우와 Al_2O_3 를 사용한 경우 모두 접촉면에 MML이 형성되어 있는 것을 관찰할 수 있는데, 상대마모재로 Al_2O_3 를 사용한 경우보다 AISI52100을 사용한 경우가 MML이 얇고 형상이 더 매끄러운 것으로 보인다(Fig. 7). 상대마모재로 AISI52100을 사용한 경우와 Al_2O_3 를 사용한 경우, 복합재료의 마모면과 상대마모재의 접촉면에 형성된 MML의 EDX분석 결과를 각각

Fig. 8과 9에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 상대마모재가 AISI52100인 경우에는 복합재료의 마모면과 상대마모재의 접촉면 모두에서 Al, Fe, Si 및 O가 검출되었다. 이에 반해 상대마모재가 Al_2O_3 인 경우에는 Al, Si 및 O가 검출되었다. 전술한 XRD분석 결과에서 Al_2O_3 가 검출되지 않은 것으로 미루어 EDX분석 결과에서 검출된 O는 기타 산화물의 성분인 것으로 판단된다. 이러한 결과는 상대마모재가 금속 재료인 경우에 형성되는 MML은 복합재료와 상대마모재의 성분으로 구성되어 있는 반면, 상대마모재가 세라믹 재료인 경우에 형성되는 MML은 복합재료의 성분만으로 구성되어 있음을 의미한다. 지금까지 기술한 바와 같이 Al/SiC₆ 복합재료의 마모에 있어서 상대마모재가 세라믹 재료인 Al_2O_3 를 사용한 경우에도 마모면에서 MML이 형성되는 것을 확인하였다. Fig. 10의 (a), (b)

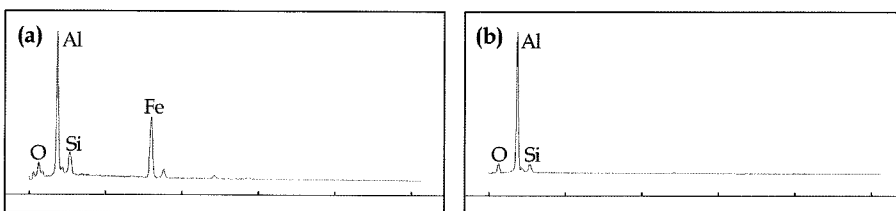


Fig. 8. EDX analysis results of worn surface of coating layer at 0.8 m/s, 3 N against (a) AISI52100 and (b) Al_2O_3 .

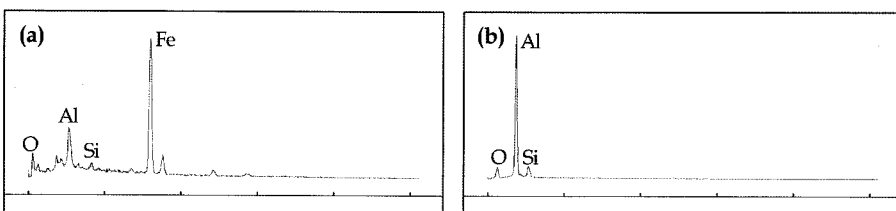


Fig. 9. EDX analysis results of contact surface of counterpart at 0.8 m/s, 3 N against (a) AISI52100 and (b) Al_2O_3 .

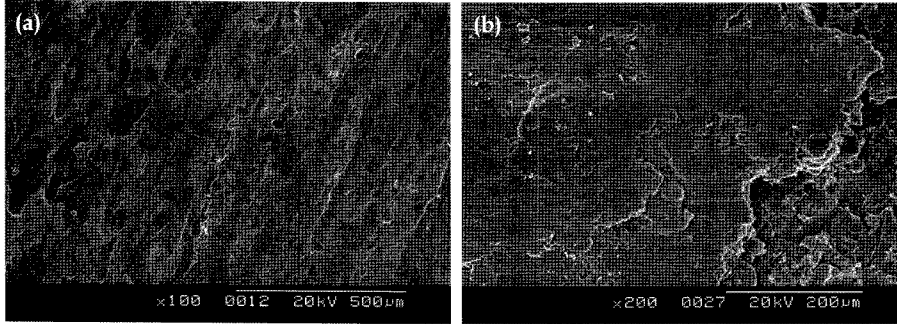


Fig. 10. SEM photographs of (a) worn surface of composites and (b) contact surface of counterpart at 0.4 m/s, 6 N against Al_2O_3 .

는 각각 미끄럼 속도 0.4 m/s, 하중 6N의 조건하에서 상대마모재로 Al_2O_3 를 사용한 경우의 복합재료 마모면과 상대마모재 접촉면의 SEM사진이다. 복합재료 마모면에는 응착마모와 부분적인 MML이 관찰되는 반면, 상대마모재의 접촉면에는 전체적으로 MML이 형성되어 있음을 알 수 있다. 이것으로 미루어 마모과정에서 복합재료 마모면으로부터 탈락된 debris가 먼저 상대마모재의 접촉면에 응착되어 MML을 형성하고, 이후에 복합재료의 마모면에 MML을 형성하는 것으로 보인다. 이러한 결과 미끄럼 속도와 하중이 높아짐에 따라 상대마모재 접촉면에 형성된 MML과 복합재료간의 마모를 거쳐서 최종적으로는 상대마모재 접촉면에 형성된 MML과 복합재료 마모면에 형성된 MML간의 마모로 친이된다.

이상의 결과들로부터 상대마모재로서 Al_2O_3 를 사용한 경우, 미끄럼 속도와 하중이 증가함에 따라 마모거동은 연삭마모에서 응착마모로, 다시 연삭마모로 친이 되는데, 이러한 마모거동의 변화에는 복합재료 마모면과 상대마모재 접촉면에 형성되는 MML이 큰 영향을 미친다는 사실을 알 수 있다. 이와 같은 사실은 상대마모재로서 금속 재료를 사용한 경우 상대적으로 낮은 하중에서도 MML이 형성되고, 주된 마모거동이 연삭마모인 것과는 매우 다르다.

4. 결 론

본 연구에서는 Al/SiCp 복합재료 코팅층의 마모거동에서 관찰된 응착층이 MML임을 규명하고, 상대마모재로서 세라믹 재료인 Al_2O_3 를 사용한 경우 Al/SiCp 복합재료 코팅층의 마모거동에 미치는 MML의 영향을 분석하였다. 본 연구에서 얻어진 주요한 결과들을 요약하면 다음과 같다.

약하면 다음과 같다.

- (1) 미끄럼 속도와 하중에 따라 복합재료 마모면과 상대마모재의 접촉면에 응착층이 형성되고, 이 응착층이 MML임을 확인하였다.
- (2) MML이 형성되지 않은 조건하에서는 복합재료 마모면에서의 거친 연삭마모와 응착마모가 주된 마모거동이며, MML이 형성되는 조건하에서는 MML 위에서의 약한 응착마모와 연삭마모가 주된 마모거동이다.
- (3) 상대마모재가 Al_2O_3 인 경우, 상대마모재의 접촉면에 먼저 MML이 형성되고, 이 MML과 복합재료간의 마모를 거쳐 최종적으로는 MML과 MML간의 마모로 친이됨으로써 복합재료의 마모거동에 영향을 미친다.

참고 문헌

1. Gul, F. and Acilar, M., "Effect of the Reinforcement Volume Fraction on the Dry Sliding Wear Behaviour of Al-10Si/SiCp Composites Produced by Vacuum Infiltration Technique", *Composites Science and Technology*, Vol. 64, Issues 13-14, pp. 1959-1970, 2004.
2. Assar, E. M. and Al-Nimr, M. A., "Fabrication of Metal Matrix Composite by Infiltration Process-part 1: Modeling of Hydrodynamic and Thermal Behavior", *J. of Composite Materials*, Vol. 28, No. 15, pp. 1480-1490, 1994.
3. Gopalakrishnan, M.V., Metzgar, K., Rosetta, D., and Krishnamurthy, R., "Structural Characterisation and Strength Evaluation of Spray Formed Ceramic Composite Near-net Shapes", *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 135, Issues 2-3, pp. 228-234, 2003.
4. Lai, S. W. and Chung, D. D. L., "Fabrication of Particulate Aluminium-matrix Composites by Liquid

- Metal Infiltration”, *J. of Materials Science*, Vol. 29, No. 12, pp. 3128-3150, 1994.
5. Assar, E. M., “Fabrication of Metal Matrix Composite by Infiltration Process-part 2: Experimental Study”, *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 86, Issues 1-3, pp. 152-158, 1999.
 6. Riahi, A. R. and Alpas, A. R., “The Role of Tribolayers on the Sliding Wear Behaviour of Graphitic Aluminum Matrix Composites”, *Wear*, Vol. 251, Issues 1-12, pp. 1396-1407, 2001.
 7. Rosenberger, M. R., Forlerer, E., and Schvezov, C. E., “Wear of Different Aluminum Matrix Composites under Conditions that Generate a Mechanically Mixed Layer”, *Wear*, Vol. 259, issues 1-6, pp. 590-601, 2005.
 8. Sannino, A. P. and Rack, H. J., “Dry Sliding Wear of Discontinuously Reinforced Aluminum Composites: Review and Discussion”, *Wear*, Vol. 189, Issues 1-2, pp. 1-19, 1995.
 9. Kim, Y. S. and Kim, K. T., “Wear Behavior of SICp Reinforced Metal Matrix Composites Fabricated by Thermal Spray Process”, *Key Engineering Materials*, Vol. 326-328, pp. 1845-1848, 2006.
 10. Alpas, A. T. and Zhang, J., “Effect of Microstructure (Particulate Size and Volume Fraction) and Counterface Material on the Sliding Wear Resistance of Particulate-reinforced Aluminum Matrix Composites”, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 25, No. 5, pp. 969-983, 1994.