

플라즈마 용사에 의해 제조한 Al-SiC_p 복합재료 코팅층의 고온마찰특성

민준원[†] · 유승을* · 서동수

충남대학교 재료공학과, *자동차부품연구원 환경소재실

High Temperature Friction Characteristic of Al-SiC_p Composite Coating Prepared by Plasma Thermal Spray

Joon Won Min[†], Seung Eul Yoo* and Dong Soo Suhr

Dept. of Mat'ls Eng., Chungnam National University

*Environmental Mat'ls Lab., Korea Automotive Technology Institute

Abstract – Al-SiC_p composite layer was prepared by plasma thermal spray on aluminum substrate. The homogeneously dispersed composite powder for thermal spray was fabricated by mechanical alloying with ball mill. The friction tests of the composite layers and commercial aluminum alloys for comparison were performed in the temperature range of 20~260°C with the interval of 40°C with steel counter-face. Friction coefficient was recorded during test sequence, and the microstructure of surface and debris was investigated by optical and scanning electron microscope. Friction coefficients of composite and aluminum alloys at room temperature were similar except pure aluminum. As the temperature increase, friction coefficient was increased rapidly in AC4C, AC2A. But friction coefficient of Al-SiC_p composite was not increased so much up to 220°C. Consequently, the reinforcement of SiC_p into aluminum matrix increased the stability of friction coefficient as well as wear resistance.

Key words – friction coefficient, aluminum, ceramic particle, composite, high temperature, thermal spray, mechanical alloying.

1. 서 론

알루미늄과 같은 경량 연질 금속에 Al₂O₃, SiC와 같은 경질 세라믹 입자를 분산시키면, 재료의 강성과 마모저항에서 현저한 향상을 나타낸다는 것은 잘 알려져 있다. 또한 이 복합재료는 모재금속에 비해 크립 속도와 열팽창을 감소시키며, 열전도도는 받아들일만한 수준으로 유지된다[1,2].

자동차산업에서는 금속-세라믹 복합재료의 이러한 장점을 이용하여 부품의 경량화, 성능향상 등을 목적으로 실린더 라이너, 피스톤, 브레이크 로터 등에 응용이 시도되고 있으며, 주로 경량 알루미늄 합금-세라믹 입자계 복합재료가 고비중의 주철을 대체하여 사용되고 있다[3].

한편, 이러한 복합재료 부품은 실제 사용 환경에서 연소열 또는 마찰열에 의해 발생된 수 백 °C 이상의 고온에서 여러 하중 변화조건과 가혹한 마찰 환경을 겪게 된다. 그러나 복합재료에 대한 연구는 주로 부품의 제조공정이나 상온 물성 또는 내마모성에 치중되어 있으며 고온에서의 마찰특성에 대한 연구는 아직 부족한 상황이다[1,4,5,6].

또한, 입자강화 복합재료(PRC, Particle Reinforced Composite)의 제조법으로는 분말야금(Powder metallurgy), 교반주조(Stir casting), 기계적 합금화(Mechanical alloying) 등과 같이 소재 전체를 복합화시키는 방법[7]과 용사(Thermal spray)[8], PTAW(Plasma Transferred Arc Welding)[9] 등과 같이 모재금속의 표면만을 복합재료화 하는 방법으로 분류할 수 있는데, 자동차 부품으로의 개발은 주로 주조법에 의해 제조된 복합재료의 재

[†]주저자 · 책임저자 : jwmin@katech.re.kr

가공에 의해 수행되고 있다. 그러나 실제 복합재료의 내마모성 등 향상된 특성이 요구되는 경우는 표면에 국한된 경우가 많다.

따라서 본 연구에서는 알루미늄 모재의 표면에 플라즈마 용사공정에 의해 세라믹입자가 복합화 된 표면개질 층을 형성시키고 고온에서의 마찰특성을 분석하고자 하였다. 플라즈마 용사공정에 사용된 복합용 분말은 기계적 합금화법[10,11]에 의해 Al matrix에 SiC_p (Silicon Carbide Particle)이 분산된 Al-SiC_p 복합용사분말을 사용하였다. 복합재료 코팅층은 steel pin을 상대재로 하여 왕복구동 방식의 건식 마찰시험을 실시하였으며, pure Al, 주조용 알루미늄 합금(AC4C, AC2A) [12]과 동일한 조건에서 비교시험을 실시하여 마찰거동의 차이를 연구하였다.

2. 실험 방법

2-1. 복합코팅층의 제조

플라즈마 용사공정을 적용하여 복합재료 코팅층을 제조하기 위해서는 50~150 μm 정도의 입도 분포를 가지는 유동성이 양호한 분말을 제조하여야 하며, 또한 강화제가 균일하게 분포된 복합재료층을 형성시키기 위해서는 원료분말부터 잘 혼합된 복합재료이어야 한다. 본 연구에서는 이와 같은 목적을 위해 ball mill을 이용한 기계적 합금화법을 이용하였다. 사용된 원료분말 중 알루미늄은 일본 고순도화학의 제품으로 99.9% 순도와 177~420 μm(-40+80 mesh) 사이의 입도를 가지는 분말을 사용하였으며, 경질 세라믹 입자로는 연삭재로 사용되는 600 mesh(평균입경 약 29 μm) SiC 분말을 사용하였다. Table 1에 분말제조 조건을 나타내고 있으며, 사용된 ball은 직경 9.525 mm인 SUS304 Ball을 사용하였고, 원료조합에서는 분말들의 과도한

Table 1. Powder preparation condition

Parameter	Unit	Condition
Composition	Al	wt% 60
	SiC	wt% 40
Process Condition	Batch weight	g 443
	Ball weight	g 4431
	Milling time	hr 24

압접을 막아주기 위해 공정 제어제(Process Control Agent)로 메탄올을 4 wt% 첨가하였다. Ball milling을 실시한 분말은 자동 체질기에 의해 30분 이상 체질하여 -100+325 mesh(45~150 μm)로 분급하여 용사분말을 제조하였다. 복합재료 코팅층을 제조하기 위한 용사공정은 Sulzer-Metco사의 플라즈마 용사 시스템을 사용하였으며 용사건은 3MB-II이었다. 모재시편은 72×36×3 mm 크기의 알루미늄 판재를 사용하였으며, 용사작업 실시 전에 이물질의 제거를 위해 알콜로 세척하고, 모재와 용사층의 접합력을 증가시키기 위해 80 mesh fused alumina분말로 Sand blasting 처리하였다. Fig. 1에 용사장치의 개략도를, 그리고 Table 2에 적용된 주요 용사공정 조건을 나타내고 있다. 복합재료 코팅층 제조에 관한 내용은 별도의 논문에 자세히 언급되어 있다[13].

Table 2. Plasma thermal spray condition

Parameter	Unit	Applied condition
Arc current	A	500
Arc voltage	volt	70
Plasma gas	-	Ar+H ₂
Plasma gas(Ar) flow	ft ³ /hr	100
Work distance	cm	8
Gun traverse speed	cm/s	4
No. of pass	pass	40

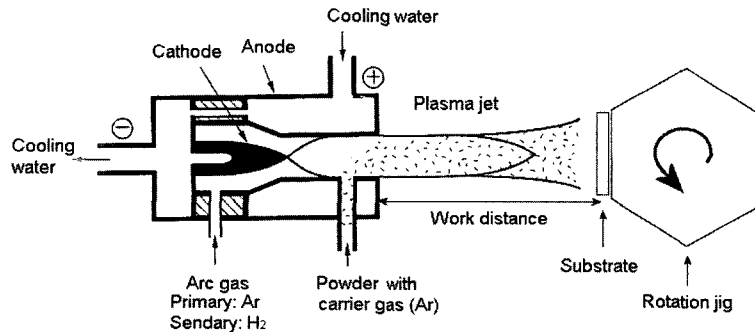


Fig. 1. Schematic diagram of plasma thermal spray system.

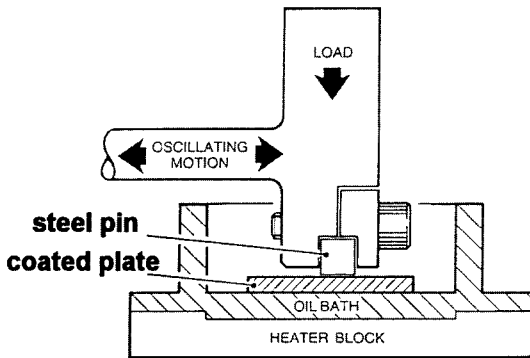


Fig. 2. Schematic diagram of wear test equipment.

2.2. 복합코팅층의 마찰시험

복합재료 코팅층의 마찰특성은 왕복구동 방식의 마찰 시험기(TE77, Plint & Partners)를 사용하여 분석하였다. 시험장비의 개략도를 Fig. 2에 나타내고 있다. 하부에 용사 코팅된 시편을 장치하고 상부에는 상대재로 직경 8 mm인 steel pin을 설치하였다. 시험조건은 무윤활 상태에서 왕복거리 10.8 mm, 왕복속도 5 Hz (0.108 m/s), 부하 100 N, 시간 30분의 조건으로 실시하였으며, 시편의 온도를 먼저 정해진 범위까지 상승시킨 후에 마찰시험을 실시하였으며, 시험 중에 발생하는 마모입자는 제거하지 않았다. 마찰시험 후 마모 표면 및 마모입자에 대해 광학현미경, 전자현미경을 이용하여 미세조직 및 성분을 분석하였다.

3. 결과 및 토의

플라즈마 용사공정에 의해 알루미늄 모재의 표면에 형성된 복합재료 용사 코팅층의 각 시험온도에서 시험 시간에 따른 마찰계수의 변화를 Fig. 3에 나타내고 있다. 상온 -220°C 범위에서 시험구간내의 평균 마찰계

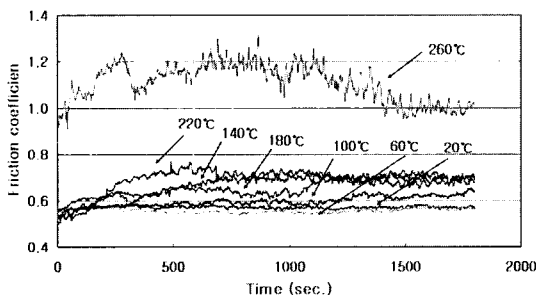


Fig. 3. Change of friction coefficient at each friction temperature.

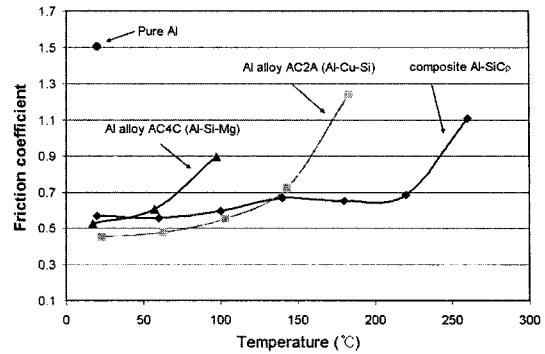


Fig. 4. Change of average friction coefficient.

수는 0.56-0.69로 온도에 따라 약간의 상승 경향은 있으나 서로 중첩되며 그다지 큰 변화를 보이고 있지 않았다. 그러나 시험온도 260°C에서는 마찰계수가 1.0 이상으로 급격한 증가를 나타내고 있다. 260°C에서 마찰계수의 증가는 용사 코팅층 일부 탈락에 의한 것으로 코팅층의 모재와의 접합성이 향상되면 더 높은 온도까지 마찰계수의 증가를 억제시킬 것으로 판단된다.

Fig. 4는 복합재료 코팅층 및 비교시험으로 실시한 알루미늄 합금에서 시험구간내의 평균 마찰계수를 시험온도에 따라 나타내고 있다. 순수 알루미늄의 경우에는 본 시험조건에서 상온부터 상당히 큰 마찰계수(> 1.0)를 나타내고 있으며, 그 이상의 온도에서는 마찰저항 과다로 시험을 진행시킬 수 없었다. 알루미늄 합금 소재(AC4C, AC2A)와 Al-SiC_p 복합재료 코팅시편의 마찰계수는 상온에서 0.45-0.57로 유사한 값을 나타내고 있다. 그러나, 시험온도가 상승하면서 마찰계수의 변화양상에서 차이점을 나타내고 있다. 즉, 세라믹 입자로 강화되지 않은 알루미늄 합금(AC4C 및 AC2A)의 경우 140°C(AC2A) 이후 또는 그 이하의 온도에서 급격한 마찰계수의 증가 경향을 나타내었다. 한편, 세라믹 입자로 강화된 Al-SiC_p 복합재료 코팅층의 마찰계수는 알루미늄 합금에 비해서 상대적으로 시험온도에 둔감한 특성을 보여주고 있으며 220°C까지 큰 변화를 나타내지 않았다. 즉, 세라믹 입자가 강화되지 않은 알루미늄 합금의 경우에는 상대적으로 낮은 온도에서부터 마찰계수의 현격한 상승이 나타나지만, 세라믹 입자가 강화된 경우 마찰계수의 상승이 억제되고 있는 것을 알 수 있었다.

입자강화 알루미늄기 복합재료의 마찰계수에 대한 연구는 주로 주조법에 의해 제조된 비교적 치밀한 복합재료에 대해 행해져 왔으며, 그 내용들을 Table 3에

Table 3. Friction coefficient of various aluminum metal matrix composite

Matrix	Reinforcing Mat'l				FC ¹⁾		Comment	ref.
	Mat'l	Process	Contents	Size (μm)	Matrix	Comp. ²⁾		
Al-4Cu-0.75Mg	SiC	Casting	10-15 wt%	5-46	0.36-0.42	0.43-0.56	greater FC than matrix at RT ³⁾	14
Al-4Cu-0.75Mg	Al ₂ O ₃	Casting	15%	3	0.36-0.45	0.39-0.51	greater FC than matrix at RT	14
Al-1.5Mg	SiC	Casting	12.5-15 wt%	50-100	0.63	0.24-0.47	lower FC than matrix at RT	15
Al	SiC	PM	10-20 vol%	3.5-7	0.53-0.66	0.36-0.49	lower FC than matrix at RT	2
Al-7Si (A356)	SiC	Casting	20 %	16	-	0.62-1.16 (RT-175°C)	abrupt increase over 200°C	4
Al-1Mg-0.6Si (6061)	Al ₂ O ₃	Casting Duralcan process	20 vol%	15	0.3-0.6 (RT-220°C)	0.4-0.5 (RT-250°C)	6061: abrupt increase at 300°C Comp.: abrupt increase at 300°C	5
Al-2.3Cu-1.6Mg -1.1Fe-1.0Ni (2618)	SiC	Spray forming	15 vol%	7.5 (3-22)	0.8-0.9 (RT-100°C)	0.55-0.90 (RT-150°C)	2618: greater than 1 over 150°C Comp.: abrupt increase at 200°C	6
Al-4.7Cu-0.8Si -0.8Mn (2014)	Al ₂ O ₃	Casting	15 vol%	12	-	0.62-0.95 (40-170°C)	abrupt increase at 230°C	1

1) FC : Friction coefficient

2) Comp. : Composite

3) RT : Room temperature

나타내었다. 상온에서의 마찰계수를 살펴보면, Sato 등 [14]이 복합재료에서 모재보다 마찰계수가 증가함을 관찰한 바 있으나, 그 이후의 연구자들[2,15]은 복합재료에서 마찰계수가 감소함을 관찰하였다.

한편, 고온에서의 마찰계수는 모재조성 및 시험조건에 따라 150 내지 250°C 이하에서는 상온 마찰계수의 유지 또는 완만한 상승을 나타내다가 임계온도 이후에 급격히 증가하는 것을 관찰하고 있으며[1,4,5,6], 세라믹 입자강화에 의해 마찰계수는 모재에 대비하여 동등 [5] 또는 20-30% 감소[6]하는 양상을 관찰하고 있다.

본 실험에서 준비된 플라즈마 용사에 의한 복합재료 코팅층에서는 상온에서 순수 알루미늄 대비 1/3 수준의 마찰계수를 나타내고 있으며, 주조용 합금(AC4C, AC2A)과는 유사한 마찰계수를 나타내고 있고, 시험온도 상승에 따른 마찰계수의 변화는 AC2A 대비 40°C, AC4C 대비 180°C 이상 마찰계수 유지능력이 있음을 확인하였다. 이러한 마찰계수의 차이를 마모면의 미세조직 및 마모입자의 형상과 성분 그리고 그에 따른 마모기구의 변화에 대해 검토해 보았다.

Fig. 5는 마찰시험 후 마모트랙의 표면조직 및 마모입자의 전형적인 외관을 나타내고 있다. 알루미늄 합금(AC2A, AC4C)의 경우에는 상온시험에서 100 μm 이하의 미세한 마모입자가 소량 혼재하기도 하였으나, 순수 알루미늄이나 60°C 이상의 시험온도에서는 대부분 약 100 μm 에서 2 mm 정도의 넓은 크기분포를 가진 마모입자를 관찰할 수 있었다. 그에 반하여 Al-SiC_p 복합재료 코팅층의 경우에는 전 온도 영역에서 Fig. 5(d)에 나타난 바와 같이 10 μm 이하의 미세한 마모입자들이 주로 생성되었다.

알루미늄 및 그 합금의 경우 상대재인 steel pin의 접촉면에서 알루미늄의 부착을 확인할 수 있었으며, 마모트랙에서는 마모입자의 크기에 상응하는 크기로 표면조직이 떨어져나가 요철이 형성된 모습을 나타내고 있고, 알루미늄 합금과 steel pin과의 응착 및 전단과 그에 의한 응착마모(Adhesion wear)의 양상을 보이고 있다. AC4C 와 AC2A에서 마모면이나 마모입자는 큰 차이를 나타내지는 않았다. 한편, AC4C와 AC2A의 온도에 따른 마찰계수변화의 차이는 재료의 기계적 물

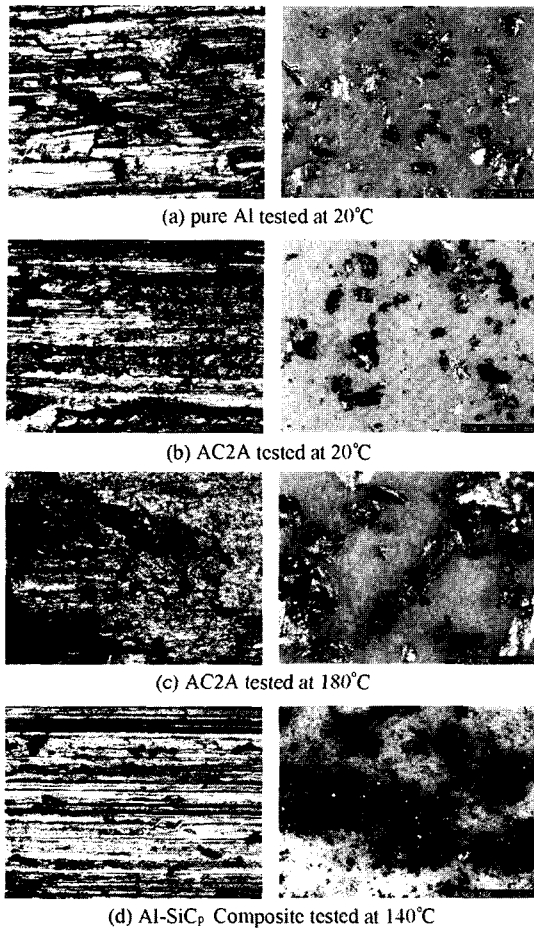


Fig. 5. Optical microscopy of wear surface and debris.

성의 차이와 연관될 수 있다. 일반적으로 AC4C는 주 조성은 좋으나 인장강도(16 kg/mm²이하)가 작고 연신율(3%이하)이 크며, AC2A는 AC4C에 비해서는 인장강도(18 kg/mm²이하)가 크고 연신율(2%이하)이 작은 소재로 알려져 있다[12]. 또한, 비커스경도를 측정한 결과 AC4C는 71, AC2A는 102로 AC2A에서 훨씬 우수한 물성을 나타내고 있다. 따라서, 강도, 연신율, 경도 등, 기계적으로 우수한 물성에 의해 mild wear에서 severe wear로의 transition이 억제되고 AC2A에서 AC4C 보다 좀 더 높은 시험온도까지 마찰계수의 상승이 억제된 것으로 판단된다.

한편, Al-SiC_p 복합재료 코팅층의 마찰에서는 마모 입자가 미세한 분말의 응집체로 구성되어 있었으며 전자현미경 분석결과 10 μm 이하의 입자로 구성되어 있는 것을 알 수 있었다. 마모면은 알루미늄 합금의 마모면에 비하여 균일하고 연속되며 미세한 마모흔을 보

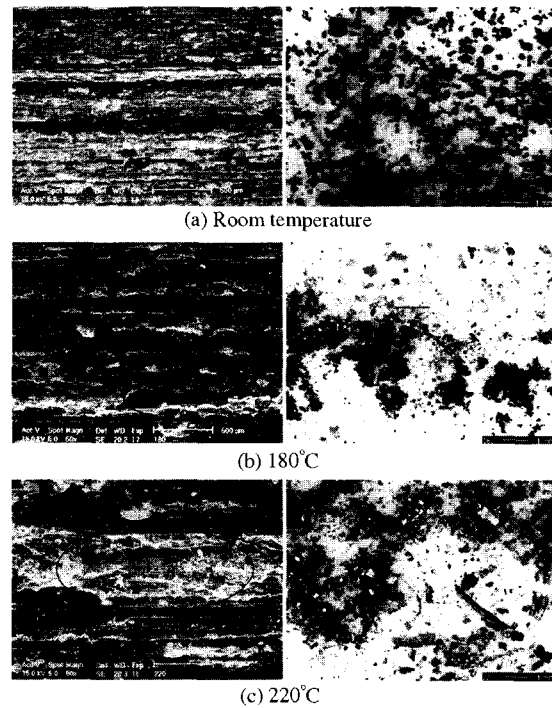
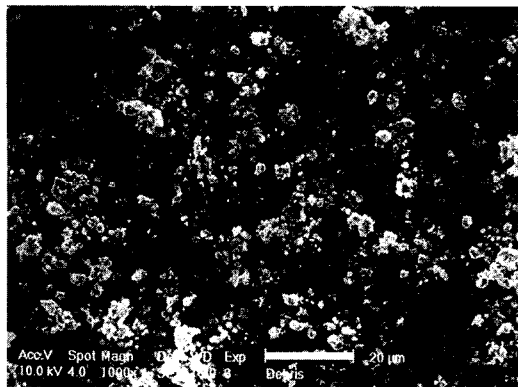


Fig. 6. SEM and optical microscopy of wear surface and debris.

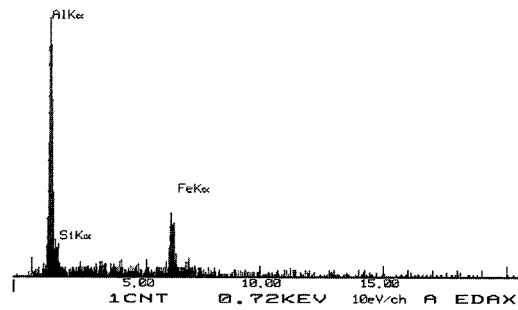
이며, 경질의 SiC입자 개체에 의한 연삭마모(Abrasive wear)의 경향을 나타내고 있다고 판단된다. 그러나 Al-SiC_p 복합재료 코팅층의 경우에도 온도상승에 따라 180°C 이상의 시험온도에서는 길이 수백 μm 이상의 길쭉한 마모입자들이 일부 발견되었으며, 마모 트랙에서도 마모입자의 크기에 해당되는 패인 곳을 발견할 수 있었다(Fig. 6 참조). 복합재료 코팅층의 경우에는, 경질 SiC_p의 첨가에 따라 경도가 높아지고 모재의 소성 변형양이 제한되며[2], 또한, Alpas 등[16]에 의하면, 상대재인 강의 표면에서 떨어져 나온 철의 산화에 의해 생성된 Fe₂O₃가 고체윤활제의 역할을 한다고 알려져 있다. 실제로 본 실험에서 복합재료 코팅층과의 마찰에서 형성된 마모입자를 SEM/EDS 분석한 결과 Fig. 7과 같이 Fe의 존재를 확인할 수 있었다. 따라서, SiC 첨가에 의한 경도의 상승 및 소성변형의 억제, 그리고 마모입자 중에 포함된 Fe의 존재가 마찰계수의 상승을 억제한 것으로 추정된다.

4. 결 론

기계적 합금화법에 의해 제조한 Al-SiC_p 복합분말을



(a) appearance of debris



(b) EDS analysis

Fig. 7. SEM microscopy and EDS analysis of wear debris formed between Al-SiC_p composite and steel pin friction tested at 60°C.

사용하여 플라즈마 용사법에 의해 알루미늄 기판 위에 Al-SiC_p 복합재료 용사 코팅층을 제조하였다. 복합재료 코팅층 및 알루미늄합금에 대해 상대재로 steel pin을 사용하여 20~260°C에서 40°C 간격으로 건식으로 왕복 구동 마찰시험을 실시하였다.

1) 알루미늄 합금(AC2A, AC4C)과 복합재료 코팅층은 상온에서 유사한 마찰계수를 나타내었으나, 시험 온도가 상승하면서 알루미늄 합금의 경우 빠른 마찰계수의 증가 경향을 나타내었고, 복합재료 코팅층은 220°C까지 거의 일정한 마찰계수가 유지되었다. 즉, SiC 입자의 복합에 의해 마찰특성의 고온안정성이 향상됨을 관찰하였으며, 기존의 주조법에 의한 복합재료와 유사한 특성을 나타내는 것을 확인하였다.

2) 알루미늄 합금의 경우에는 Al-SiC_p 복합재료 코팅층에 대비하여 상대적으로 저온에서 응착마모의 발생과 함께 마찰계수가 상승하였으며, 복합재료 코팅층의 경우에는 경질 SiC 입자 개재에 의한 연삭마모 현상을 관찰할 수 있었다.

참고 문헌

- Rodriguez, J., Martin, A. and Llorca, J., "Modeling the Effect of Temperature on the Wear Resistance of Metal Reinforced with Ceramic Particles," *Acta Mater.*, Vol. 48, pp. 993-1003, 2000.
- Roy, M., Venkataraman, B., Bhanuprasad, V. V., Mahajan, Y. R. and Sundararajan, G., "The Effect of Particulate Reinforcement on the Sliding Wear Behavior of Aluminum Matrix Composite," *Metall. Trans.*, Vol. 23A, pp. 2833-47, 1992.
- Kevorkijan, M. V., "MMCs for Automotive Applications," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, Vol. 77, No. 12, pp. 53-9, 1998.
- Martinez, M. A., Martin, A. and Llorca, J., "Wear of Al-Si Alloys and Al-Si/SiC Composites at Ambient and Elevated Temperatures," *Scripta Met.*, Vol. 28, pp. 207-12, 1993.
- Singh, J. and Alpas, A. T., "High-Temperature Wear and Deformation Processes in Metal Matrix Composite," *Met. Mat. Trans.*, Vol. 27A, pp. 3135-48, 1996.
- Martin, A., Martinez, M. A. and Llorca, J., "Wear of SiC-reinforced Al-matrix composites in the temperature range 20-200°C," *Wear*, Vol. 193, pp. 169-79, 1996.
- 西田義則, 금속기복합재료입문, p.33, Coronasha, Tokyo, 2001.
- Heimann, R. B., *Plasma-Spray Coating*, VCH Publishers, New York, 1996.
- 민준원, 유승을, "PTA법에 의한 TiC분말 표면강화 Al합금층의 제조 및 마모특성에 관한 연구," *한국자동차공학회지*, Vol.7, No.9, pp.138-45, 1999.
- Gilman, P. S. and Benjamin, J. S., "Mechanical Alloying," *Ann. Rev. Mater. Sci.*, Vol. 13, pp. 279-300, 1983.
- Benjamin, J. S. and Bomford, M. J., "Dispersion Strengthened Al Made by Mechanical Alloying," *Metal. Trans.*, Vol. 8A, pp. 1301-5, 1977.
- 박순석, 이기문, 자동차재료, 7장, p.153, 골든벨, 서울, 1996.
- 민준원, 유승을, 김영정, 김정석, 서동수, "플라즈마 용사에 의한 Al-SiC_p 복합재료 코팅층의 제조," *한국세라믹학회지*, Vol. 40, No. 5, pp. 460-7, 2003.
- Sato, A. and Mehrabian, R., "Aluminum Matrix Composites: Fabrication and Properties," *Metal. Trans.*, Vol. 7B, pp. 443-51, 1976.
- Rana, F. and Stefanescu, D. M., "Friction Properties of Al-1.5 Pct Mg/SiC Particulate Metal-Matrix Composites," *Met. Trans.*, Vol. 20A, pp. 1564-6, 1989.
- Alpas, A. T. and Zhang, J., "Wear rate transition in cast Al-Si alloys reinforced with SiC_p," *Scripta Met.*, Vol. 26, pp. 505-9, 1992.