

니켈기 자용성 합금 코팅층의 마모거동에 미치는 상대마모재의 영향 Effects of Counterpart Materials on Wear Behavior of Thermally Sprayed Ni-based Self-flux Alloy Coatings

김균택 · 김영식

K. T. Kim and Y. S. Kim

Key Words : Thermal spray process(용사법), Ni-based self-flux alloy(니켈기 자용성 합금), Counterparts(상대마모재), Heat treatment(열처리), Wear behavior(마모거동)

Abstract : This study aims at investigating the wear behavior of thermally sprayed Ni-based self-flux alloy coatings against different counterparts. Ni-based self-flux alloy powders were flame-sprayed onto a carbon steel substrate and then heat-treated at temperature of 1000 °C. Dry sliding wear tests were performed using the sliding speeds of 0.2 and 0.8 m/s and the applied loads of 5 and 20 N. AISI 52100, Al₂O₃, Si₃N₄ and ZrO₂ balls were used as counterpart materials. Wear behavior of Ni-based self-flux alloy coatings against different counterparts were studied using a scanning electron microscope(SEM) and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX). It was revealed that wear behavior of Ni-based self-flux alloy coatings were much influenced by counterpart materials.

1. 서 론

최근 각종 공업기술의 발전과 더불어 기계, 자동차 및 우주 항공 산업 등에 있어서 재료의 표면에 내마모성, 내식성, 내열성 등의 특성을 부여하는 다양한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 그 중의 한 방법으로서 용사법(thermal spray process)은 기재에 대한 열영향이 적고, 코팅층의 형성속도가 빠르며, 부재의 형상이나 크기에 제약을 받지 않고, 다양한 재료를 사용할 수 있다는, 다른 표면개질기술에서 볼 수 없는 장점으로 인해 그 적용 분야가 점차 확대되고 있다¹⁻³⁾. 이러한 용사법에 의한 니켈기 자용성 합금 코팅은 내마모성이나 내식성을 필요로 하는 고온용 보일러, 열교환기, 터빈, 고온 압연 롤, 팬 블레이드, 내연기관의 로커암 등에 널리 적용되고 있다^{4,5)}.

마모현상은 상대운동을 하는 두 재료의 반복적인 접촉에 의해 발생한 결과이다. 따라서 마모거동은 접촉되는 재료의 종류, 하중, 속도 및 환경 등의 조

건에 따라 달라진다⁶⁾. 니켈기 자용성 합금 코팅층이 여러 산업분야에 그 적용성을 넓혀감에 따라 금속 재료 뿐만 아니라 다양한 재료의 부재와 함께 사용된다. 따라서 니켈기 자용성 합금 코팅층의 마모현상에 관한 폭넓은 이해를 위해서는 다양한 종류의 상대마모재에 따른 마모거동에 대한 연구가 필요하다. 그러나 지금까지 보고된 대부분의 연구보고는 상대마모재로서 고탄소크롬강을 사용하고 있으며, 그 밖의 재료를 상대마모재로 사용한 연구는 그다지 많지 않다.

최근 기계구조물이나 부재의 내식, 내마모용 재료로서 비강도가 높고 화학적, 열적 안정성이 우수하며 고온 내마모성이 뛰어난 세라믹재료가 주목받고 있다. 이러한 세라믹재료는 강한 취성과 높은 융점, 난가공성 등의 단점으로 인해 적용이 어려웠으나 플라즈마 용사법의 발달과 가공기술의 발전으로 Al₂O₃, Si₃N₄, ZrO₂과 같은 세라믹재료들이 내식, 내마모성이 요구되는 분야에 많이 사용되고 있다.^{6,7)}

이에 본 연구에서는 기존의 고탄소크롬강 이외에 Al₂O₃, Si₃N₄, ZrO₂ 세라믹재료를 상대마모재로 사용하여 니켈기 자용성 합금 코팅층에 대한 건식 미끄럼 마모시험을 실시하고, 마모면의 관찰을 통해 니켈기 자용성 합금 코팅층의 마모거동에 미치는 상대마모재의 영향을 분석하였다.

접수일 : 2007년 10월 30일, 채택확정 : 2007년 11월 16일
김영식(책임저자) : 부경대학교 공과대학 기계공학부
E-mail : yeongsik@pknu.ac.kr Tel. 051-620-1613
김균택 : 부경대학교 공과대학 기계공학부 대학원

2. 실험방법

본 실험에서 사용된 용사재료는 Sulzer Metco Co.의 니켈기 자용성 합금 분말(16CNS)로서 그 화학적 조성은 Table 1과 같다. 기재로는 5 mm 두께의 탄소강 평판을 사용하였다. 용사 전 기재의 표면을 #23 알루미늄 그릿으로 블라스트 처리를 하고 아세톤으로 초음파 세척을 하였다. 이와 같이 전처리된 기재의 표면에 Sulzer Metco Co.의 flame spray system(6P-II)을 사용하여 약 1000 μm 두께로 코팅하고, 코팅된 시험편을 진공로에서 1000°C로 30분간 열처리를 실시하였다. 본 실험에서의 코팅조건을 Table 2에 나타내었다. 열처리된 시험편은 코팅층의 두께가 약 700 μm 가 되도록 연마하고 emery paper를 사용하여 조도를 일정하게 한 후, ball-on-disc 타입의 마모시험기로 건식 미끄럼 마모시험을 실시하였다. 상대마모재로는 직경 8 mm의 고탄소크롬강인 AISI 52100과 Al_2O_3 , Si_3N_4 , ZrO_2 ball을 사용하였다. 미끄럼 속도와 작용 하중은 각각 0.2 m/s와 0.8 m/s, 5 N과 20 N의 두 가지 조건으로 하였다. 마모 거리 1000 m의 조건으로 마모시험을 실시한 후, SEM과 EDX를 통해 마모면을 관찰·분석하였다. Table 3에 마모시험 조건을 나타내었다.

3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 1 (a)와 (b)는 각각 미끄럼 속도가 0.2 m/s 및 0.8 m/s인 경우 작용 하중 변화에 따른 마모율을 나타낸 것이다. 상대적으로 저속인 0.2 m/s인 경우 상대마모재에 관계없이 상대적으로 고하중인 20 N에서 마모율은 크게 높게 나타났다. 상대적으로 고속인 0.8 m/s인 경우 마모율은 작용 하중에 따라 큰 차이를 나타내지 않으나, 상대마모재가 ZrO_2 인 경우에는 고하중에서 마모율이 높게 나타났다.

Fig. 2는 미끄럼 속도가 0.2 m/s일 때 작용 하중과 상대마모재에 따른 마모면을 관찰한 것이다. Fig. 1 (a)에서 보인 바와 같이 저속인 경우, 상대마모재에 관계없이 작용 하중이 높을 때 마모율도 높으나, 그 마모거동은 상대마모재에 따라 크게 다르다. 상대마모재가 AISI 52100인 경우를 살펴보면, 상대적으로 저하중인 5 N인 경우에 마모면에서 거친 응착마모 거동과 마모에 의한 소성변형 흔적이 관찰된다. 그러나 고하중인 경우에는 연삭마모 거동이 관찰된다.

Table 1 Chemical compositions of 16CNS powder used(wt %)

Ni	Cr	Si	B	Cu	Mo	Fe	C
53.68	14.47	6.70	17.40	2.22	1.47	2.11	1.96

Table 2 Spray process parameters

Oxygen pressure	Acetylene pressure	Powder feed rate	Spray distance
0.21 [MPa]	0.10 [MPa]	0.23 [Kg/min]	80 [mm]

Table 3 Wear test conditions

Type	Ball-on-disc
Sliding speed	0.2, 0.8 [m/s]
Applied load	5, 20 [N]
Counterpart materials	AISI 52100, Al_2O_3 , Si_3N_4 , ZrO_2

반면 상대마모재가 세라믹인 경우에는 하중에 관계없이 마모면에서는 응착마모 거동과 소성변형 흔적이 관찰된다. 또한 고하중에서는 응착마모에 의해 생성된 것으로 보이는 응착층이 증가하고, 상대마모재와의 반복적인 접촉에 의하여 마모면의 파괴 및 소성변형이 증가한 것을 볼 수 있다. 즉, Fig. 1에서 보인 바와 같이 상대마모재에 관계없이 작용 하중이 높을 때 마모율도 상대적으로 높지만, 그 마모거동은 상대마모재에 따라 크게 다르다.

Fig. 3은 미끄럼 속도가 0.8 m/s일 때 작용 하중과 상대마모재에 따른 마모면을 관찰한 것이다. Fig. 1 (b)에서 보인 바와 같이 고속인 경우에는 상대마모재가 ZrO_2 인 경우를 제외하고 하중변화에 따른 마모율은 크게 차이가 없다. 그러나 그 마모거동은 상대마모재에 따라 크게 다르다. 즉, 상대마모재가 AISI 52100인 경우, 저하중일 때의 마모면에서는 응착마모 거동이 관찰되나, 고하중일 때의 마모면에서는 응착층이 넓게 분포하고 그 층 위에 연삭마모가 진행된 흔적이 관찰된다. 반면, 상대마모재가 Al_2O_3 과 Si_3N_4 인 경우, 저하중일 때 마모면에서는 연삭마모 거동이 관찰되고, 고하중일 때는 AISI 52100인 경우와 마찬가지로 응착층 위에 연삭마모가 진행된 흔적이 관찰된다. 작용 하중에 따라 마모거동이 크게 다름에도 불구하고 그 마모율의 차이가 크지 않은 것은 응착층에 의해서 코팅층이 보호되어 마모입자의 탈락이 감소되었기 때문인 것으로 판단된다. ZrO_2 인 경우에는

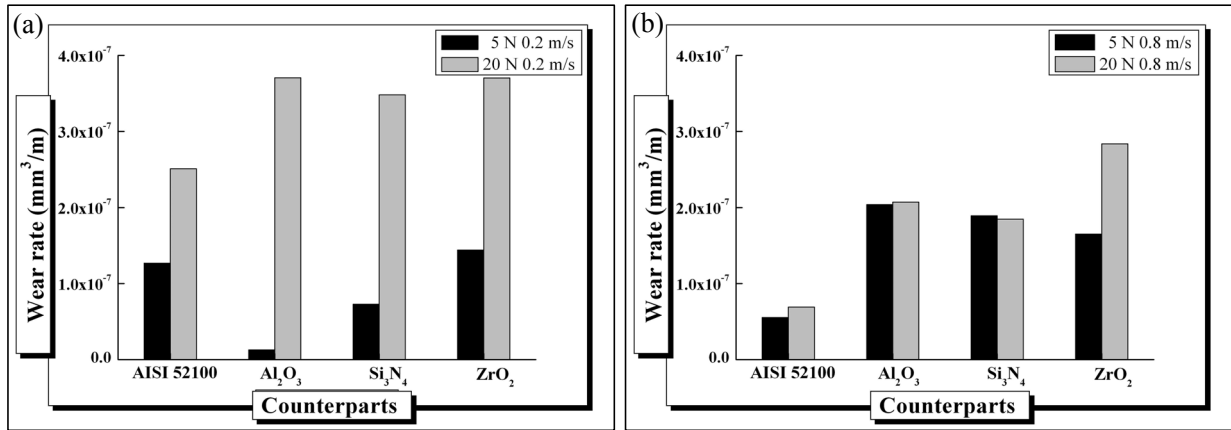


Fig. 1 Wear rate of coating layers : (a) sliding speed 0.2 m/s, applied load 5 N and 20 N, (b) sliding 0.8 m/s, applied load 5 N and 20 N

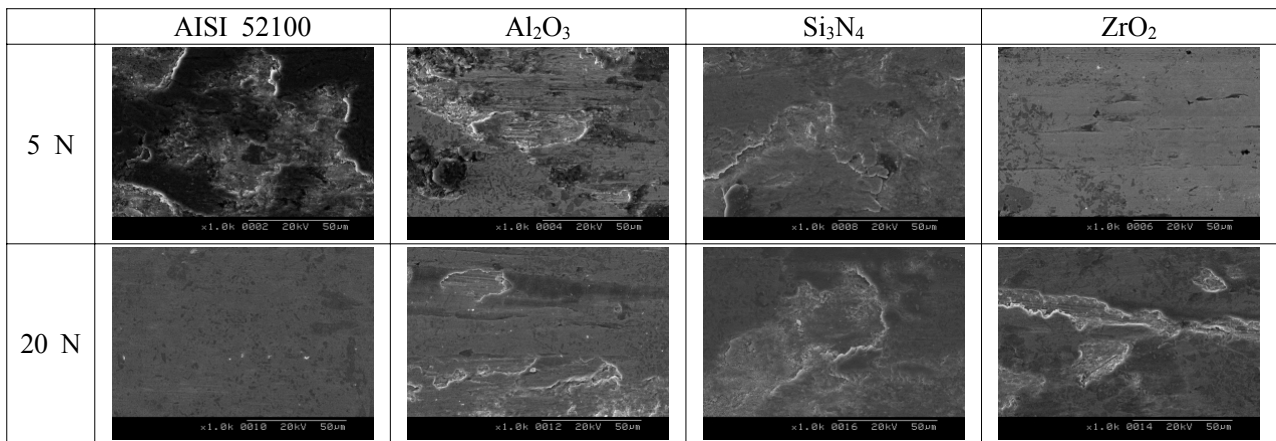


Fig. 2 Worn surface of coating layer at the sliding speed of 0.2 m/s with different counterparts and applied load

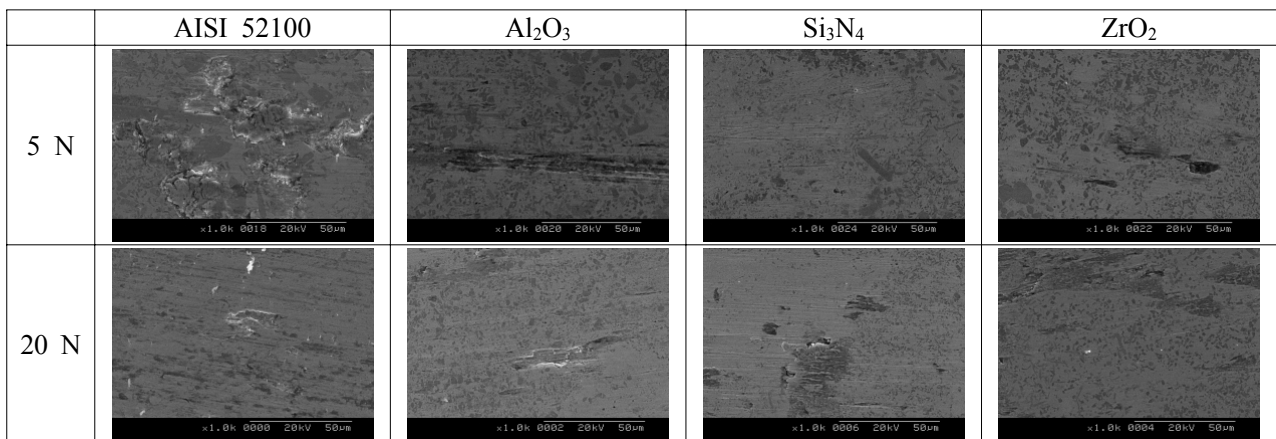


Fig. 3 Worn surface of coating layer at the sliding speed of 0.8 m/s with different counterparts and applied load

저하중일 때와 고하중일 때 모두 연삭마모 거동을 보이고 있다. 그러나 고하중인 경우 마모면의 일부에서 응착마모의 흔적이 관찰되는 것으로 미루어 다른 세라믹재료와 마찬가지로 마모의 초기 단계에서 응착층이 형성되지만 계속된 상대마모제와의 접촉에 의한

연삭마모에 의해 응착층이 마멸된 것으로 생각된다. 이것이 ZrO₂인 경우 다른 상대마모제와는 달리 하중 변화에 따라 마모율이 크게 차이가 나는 원인으로 판단된다. 상대마모제가 세라믹재료인 경우 AISI 52100인 경우보다 마모율이 높은 것은 마모의 초기

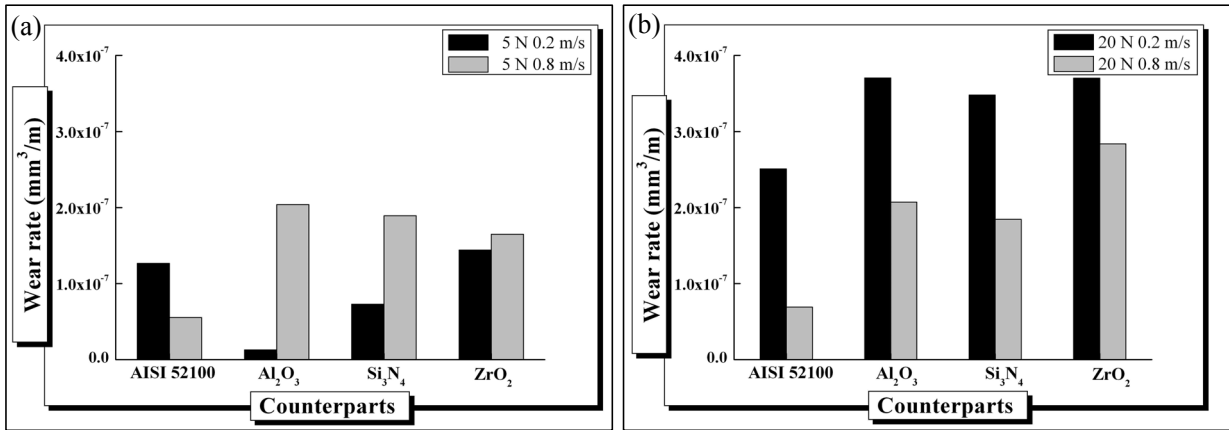


Fig. 4 Wear rate of coating layers : (a) applied load 5 N, sliding speed 0.2 m/s and 0.8 m/s, (b) applied load 20 N, sliding speed 0.2 m/s and 0.8 m/s

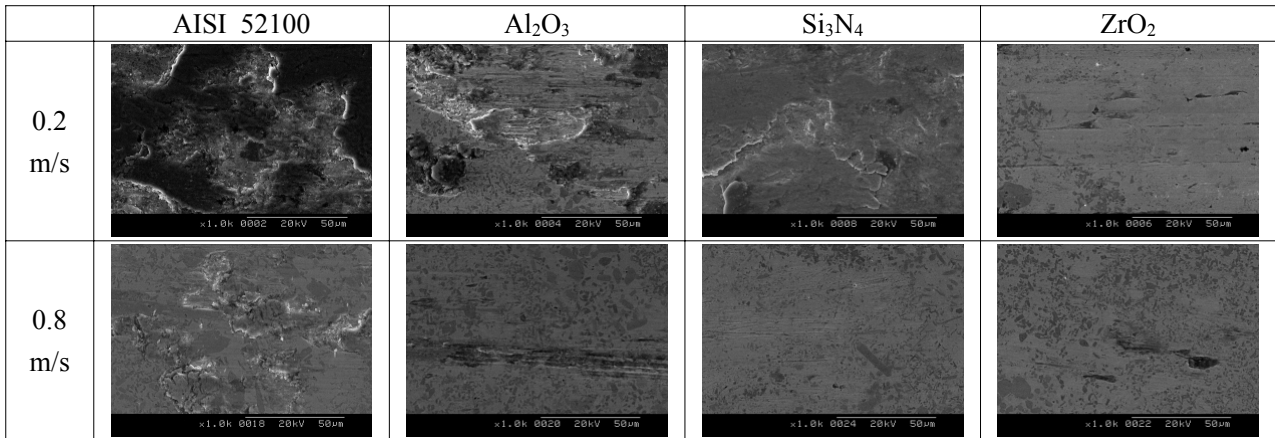


Fig. 5 Worn surface of coating layer at the applied load of 5 N with different counterparts and sliding speed

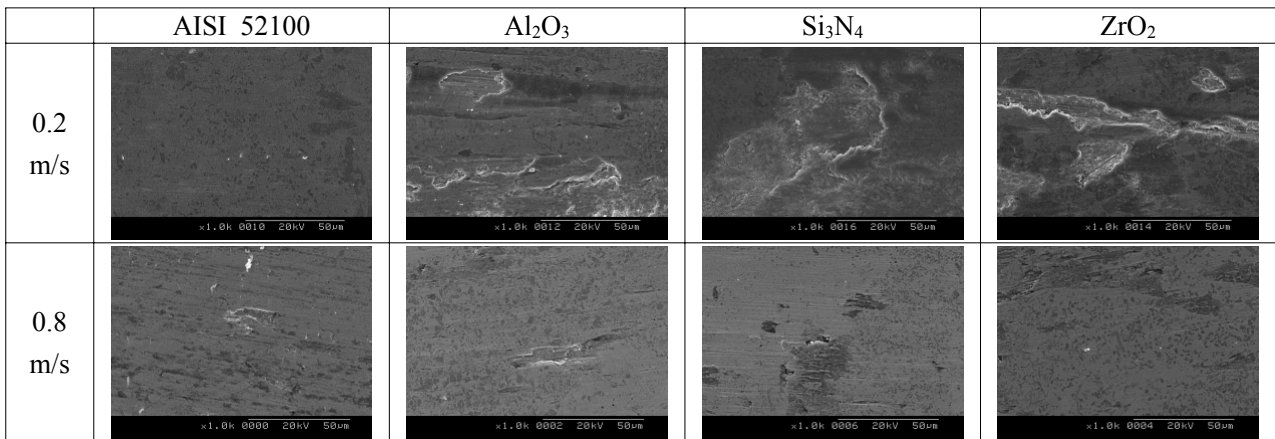


Fig. 6 Worn surface of coating layer at the applied load of 20 N with different counterparts and sliding speed

단계에서 연삭마모에 의해서 마멸되는 양이 많기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 4의 (a)와 (b)는 각각 작용 하중이 5 N 및 20 N인 경우 미끄럼 속도와 상대마모재에 따른 마모율을 나타낸 것이다. 상대적으로 저하중인 5 N에

서는 상대마모재가 AISI 52100일 때 고속에서 마모율이 낮은 반면, 상대마모재가 세라믹일 때는 고속에서 마모율이 오히려 높다. 그러나 상대적으로 고하중인 20 N에서는 상대마모재의 종류와 관계없이 마모율이 감소하는 경향을 보이고 있다.

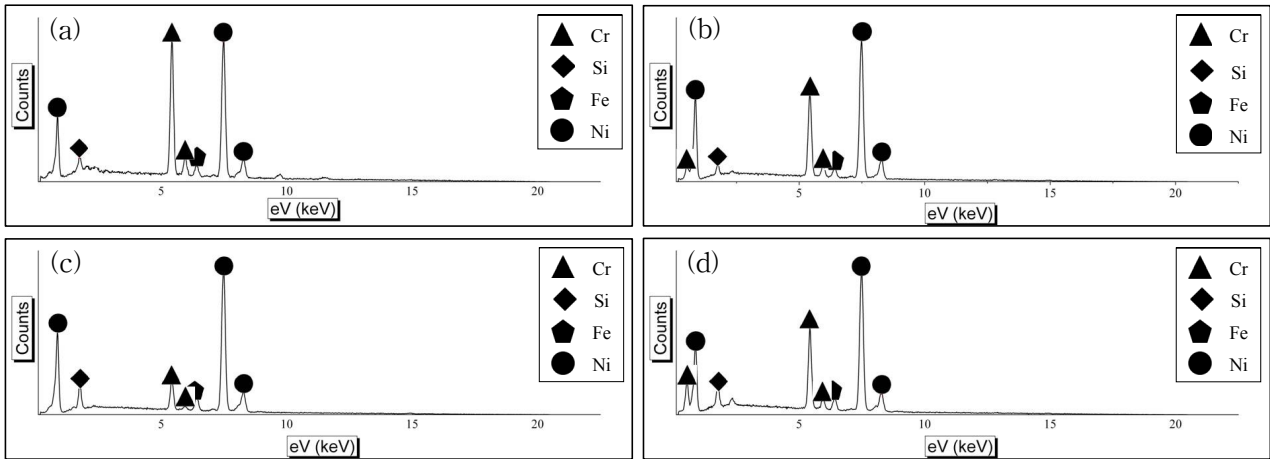


Fig. 7 EDX results of worn surface against different counterparts at applied load of 5 N and sliding speed of 0.2 m/s : (a)AISI 52100, (b) Al₂O₃, (c) Si₃N₄ and (d) ZrO₂

저하중일 때 상대마모재에 따라 마모율에 차이가 나는 것은 Fig. 5에 나타난 마모면의 관찰 결과에 의해 설명된다. 상대마모재가 AISI 52100인 경우, 저속에서는 거친 응착마모 거동과 함께 소성변형과 마모면의 파괴를 보이는 반면, 고속에서는 마모면에 응착층이 생성되고 그 층 위에서 연삭마모가 진행된 흔적이 보인다. 상대마모재가 세라믹인 경우, 저속에서는 응착마모 거동을 볼 수 있으나, 고속인 경우에는 연삭마모 거동을 보이고 있다. 또한 마모면에서 부분적으로 응착층이 관찰되는 것으로 미루어 고속인 경우에는 마모의 초기 단계에서 응착층이 형성되지만 계속된 상대마모재와의 접촉에 의한 연삭마모에 의해 응착층이 마멸된 것으로 판단된다.

고하중일 때 상대마모재에 관계없이 속도가 높으면 마모율은 낮지만, 상대마모재에 따른 마모거동은 크게 다르다. 즉, Fig. 6에 보이는 바와 같이 상대마모재가 AISI 52100인 경우, 저속에서는 연삭마모 거동만이 관찰되나, 고속에서는 응착층 위에 연삭마모가 진행된 흔적이 관찰된다. 반면 상대마모재가 세라믹재료인 경우, 저속에서는 거친 응착마모 거동과 함께 마모면의 파괴흔적이 관찰되고, 고속에서는 연삭마모 거동과 함께 부분적으로 응착층의 흔적이 관찰된다. 이는 마모의 초기 단계에서 응착층이 형성되지만 계속된 상대마모재와의 접촉에 의한 연삭마모에 의해 응착층이 마멸되었기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 7은 작용 하중 5 N, 미끄럼속도 0.2 m/s일 때의 마모면의 응착층에 대한 EDX 결과를 나타낸 것이다. 상대마모재가 AISI 52100인 경우, 다른 세라믹재료인 경우와는 다르게 Cr 피크가 매우 높게

나타난다. 이것은 응착층과 상대마모재의 반복적인 접촉과정에서 고탄소크롬강인 AISI 52100 ball의 Cr 성분이 응착층으로 천이되었기 때문인 것으로 판단된다. 반면 상대마모재가 세라믹재료인 경우, 상대마모재의 성분인 Al, Si, Zr 등은 전혀 검출되지 않았다. 이것은 AISI 52100인 경우에는 상대마모재가 코팅층과 함께 마모되어 마모면에 응착층을 형성하지만, 세라믹재료인 경우에는 코팅층만이 마모되어 응착층을 형성하기 때문인 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 고탄소크롬강인 AISI 52100 이외에 Al₂O₃, Si₃N₄, ZrO₂ 세라믹재료를 상대마모재로 하여 니켈기 자용성 합금 코팅층에 대한 건식 미끄럼 마모시험을 미끄럼 속도 0.2 m/s와 0.8 m/s, 작용 하중 5 N과 20 N의 조건하에서 실시하였다. 마모면의 관찰을 통해 니켈기 자용성 합금 코팅층의 마모거동에 미치는 상대마모재의 영향을 분석하였다. 주요한 결과들을 요약하면 다음과 같다.

1) 미끄럼 속도 0.2 m/s에서는 상대마모재에 관계없이 작용 하중이 높을 때 마모율도 높고, 미끄럼 속도 0.8 m/s에서는 ZrO₂의 경우를 제외하면 작용 하중이 높아도 마모율의 변화는 거의 없다.

2) 작용 하중 5 N에서는 AISI 52100인 경우, 저속에서는 거친 응착마모가, 고속에서는 응착층 위에서 연삭마모가 진행된다. 세라믹재료인 경우, 저속에서는 응착마모에 의한 층이 형성되고, 고속에서는 그 응착층이 연삭마모에 의해 감소된다. 작용 하중 20 N에서는 AISI 52100인 경우, 저속에서는 연삭마모

가, 고속에서는 응착층 위에 연삭마모가 진행된다. 세라믹재료인 경우, 저속에서는 거친 마모 거동을, 고속에서는 대체적으로 연삭마모 거동을 보인다.

3) 응착마모에 의해 생성된 응착층은 상대마모재에 관계없이 코팅층의 마모율을 감소시킨다. 그러나 0.2 m/s, 20 N인 조건하에서는 상대마모재에 관계없이 마모율이 가장 높는데, AISI 52100인 경우에는 연삭마모에 의한 마멸이, 세라믹재료인 경우에는 응착층의 파괴가 그 원인이다.

4) AISI 52100인 경우에는 상대마모재가 코팅층과 함께 마모되어 응착층을 형성하지만, 세라믹재료인 경우에는 코팅층만이 마모되어 응착층을 형성한다.

8. Akira Okada, 2007, "Automotive and Industrial Applications of Structural Ceramics in Japan", Journal of the European Society submit for publication.

참고 문헌

1. S. Schicjer, et al. 1998, "Reaction synthesized Al₂O₃-based intermetallic composites", Acta. Metl. Mater., Vol. 46, pp. 2485~2492.
2. L. Lin, K. Han, 1998, "Optimization of surface properties by flame spray coating and boriding", Surface and Coatings Technology, 106, pp. 100~105.
3. 김균택, 김영식, 오명석, 2007, "니켈기 자용성 합금 코팅층의 미세구조 및 마모거동에 미치는 후열처리 조건의 영향", 한국동력기계공학회지, 제 11권, 제1호, pp. 121~126.
4. Rosso M, Bennani A, 1998, "Studies of New Applications of Ni-based Powders for Hardfacing Processes", PM World Congress Thermal Spraying/Spray Forming, pp. 524~530.
5. A. Tomiguchi, Y. Sochi, Y. Matsubara, 1998, "Proceeding of International Thermal Spraying Conference", Nice, pp. 1061~1065.
6. S. I.-U. Ahmed, G. Breglizzi, H. Heafke, 2003, "Microfractional Properties of Diamond-like Carbon Films Sliding Against Silicon, Sapphire and Steel", Wear, 254, pp. 1076~1083
7. L. C. Erickson, H. M. Hawthorne, T. Troczynski, 2001, "Correlations Between Microstructural Parameters, Micromechanical Properties and Wear Resistance of Plasma Spray Ceramic Coatings", Wear, 250, pp. 569~575.