

STS316 용사코팅의 마모거동에 미치는 작용하중 및 미끄럼속도의 영향

Effect of Applied Load and Sliding Speed on Wear Behavior of Thermally Sprayed STS316 Coating

이재홍* · 김영식**†

Jae-Hong Lee* and Yeong-Sik Kim**†

(접수일 : 2014년 4월 15일, 수정일 : 2014년 8월 7일, 채택확정 : 2014년 8월 7일)

Abstract: This article aims at investigating the effect of applied load and sliding speed on wear behavior of thermally sprayed STS316 coating. STS316 coatings were fabricated by flame spray process according to optimal parameters on steel substrates. Dry sliding wear tests were performed on STS316 coating using four different applied load as 10, 15, 20 and 25 N and four different sliding speed as 15, 30, 45 and 60 rpm. Wear behavior on worn surface was investigated using scanning electron microscope(SEM) and energy dispersive X-ray spectroscopy(EDS). The dominant wear mechanism of STS316 coating under low applied load and sliding speed was oxidation on worn surface. However, under high applied load and sliding speed the principal wear mechanism was abrasion on oxidation film and damage of oxidation film.

Key Words : Thermal Spray Process, STS316 Coating, Wear, Oxidation Film, Friction Coefficient

1. 서 론

최근 우주·항공, 원자력, 조선, 자동차 등의 공업기술의 발달로 인해 가혹해진 사용 환경을 해결하기 위한 방안 중의 하나로 용사법이 다양하게 이용되고 있다. 특히 내식성 및 내마모성을 향상시키기 위한 용도로 많이 이용되고 있으며,¹⁻³⁾ 그 외에도 여러 산업현장에서 손상된 기계 및 장치류의 육성가공을 위해 이용된다.⁴⁾

STS316 코팅은 해양산업에서 침식이나 캐비테이션에 의한 손상을 보수하는 목적으로 사용되는

대표적인 코팅으로서, 연구에 의하면 손상된 선박의 Rudder 외부에 STS316 판을 용접하여 부착하는 것보다 용사법에 의해 STS316 코팅을 실시하는 것이 보수유지가 용이하며 또한 경제적이라는 결과가 발표된 바 있다.⁵⁾ 이와 같이 STS316 코팅이 해양산업 등에서 널리 적용되고 있지만 STS316 코팅의 기계적 특성에 대한 연구보고는 그다지 많지 않다.

본 연구에서는 화염용사법에 의해 STS316 코팅을 제조하고, 마모시험을 통해 STS316 코팅의 마모거동에 미치는 작용하중 및 미끄럼 속도의 영향을 분석하고자 한다.

**† 김영식(교신저자) : 부경대학교 기계자동차공학과
E-mail : yeongsik@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6155

*이재홍 : 부경대학교 대학원

**† YeongSik Kim(corresponding author) : Department of Mechanical & Automotive Engineering, Pukyong National University.

E-mail : yeongsik@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6155

*JaeHong Lee : Graduate School of Pukyong National University.

Table 1 Chemical compositions of STS316 powder used(wt%)

Fe	Cr	Ni	Mo	Si	C
Bal.	17	12	2.5	1	0.1

Table 2 Spray condition

Acetylene gas flow (ft ³ /h)	44
Oxygen gas flow (ft ³ /h)	44
Powder feed rate (lb/min)	30
Spray distance (mm)	160

Table 3 Wear test conditions

Type	Ball-on-disk
Sliding speed	15, 30, 45, 60 rpm
Applied load	10, 15, 20, 25 N
Wear distance	1000 cycle
Counterpart	AISI 5200

2. 실험방법

본 실험에서 사용된 코팅재료는 Sulzer Metco Co.의 STS316 분말인 Metco 41C로서 그 조성은 Table 1과 같다. 기지재는 40×40×5 mm의 SS400 평판을 사용하였으며, 용사 전 기지재의 표면을 #23 알루미나 그릿으로 블라스트 처리를 하고 아세톤으로 초음파 세척을 하였다. 이와 같이 전처리된 기지재의 표면에 Sulzer Metco Co.의 flame spray system(6P-II)을 이용하여 Table 2의 조건에 따라 코팅 시험편을 제작하였다. 이 코팅 조건은 K. T. Kim 등⁶⁾의 연구보고에서 제시된 것으로, 본 연구에서는 이 코팅조건을 그대로 사용하였다. 제조된 코팅층을 표면조도를 일정하게 하기 위해 #2000 연마지와 연마포를 이용하여 정밀 연마하였다.

전처리된 시험편에 대해 ball-on-disk 타입의 마

모시험기를 이용하여 마모거리와 회전반경은 각각 1000 cycle 및 15 mm로 일정하게 하고 작용하중과 미끄럼 속도를 각각 10, 15, 20, 25 N 및 15, 30, 45, 60 rpm의 네 가지로 변화시키면서 모두 16조건 하에서의 건식 미끄럼 마모시험을 실시하였다. 상대마모재는 직경 8 mm의 고탄소크롬강인 AISI 52100 ball을 사용하였다. Table 3에 마모시험 조건을 정리하여 나타내었다. 마모시험 후 SEM과 EDS를 사용하여 마모거동을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 작용하중과 미끄럼 속도에 따른 STS316 코팅의 마모율의 변화를 나타낸 것이다. 작용하중과 미끄럼 속도가 증가할수록 마모율이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 또한 낮은 10, 15 N의 작용하중에 비해 높은 20, 25 N의 작용하중에서 마모율에 미치는 미끄럼 속도의 영향이 상대적으로 크게 나타났다. 이러한 경향을 분석하기 위해 작용하중 15 N의 조건하에서 미끄럼 속도를 달리하여 마모시험을 실시한 시험편의 마

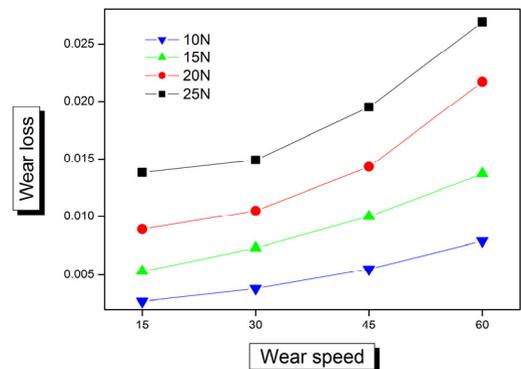


Fig. 1 Variation of wear loss of STS316 coating

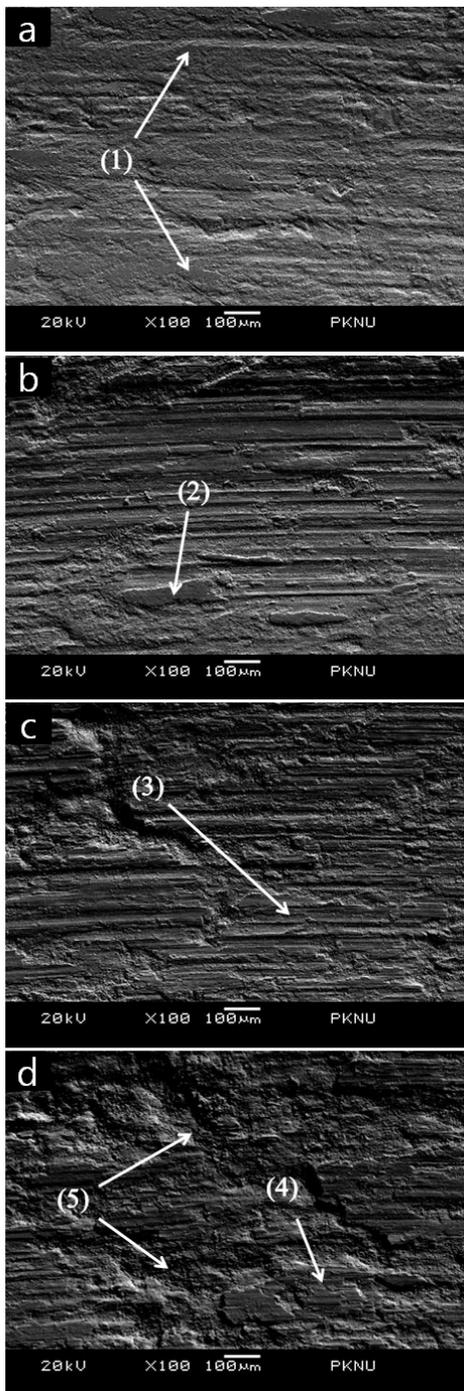


Fig. 2 SEM morphologies of the worn surface of STS316 coating : applied load 15 N, sliding speed a) 15rpm, b) 30 rpm, c) 45 rpm and d) 60 rpm

모흔을 관찰한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 미끄럼 속도가 15 rpm(Fig. 2a)일 경우 연삭마모흔과 함께 부분적인 불규칙적으로 평활한 면(Fig. 2a(1))을 관찰할 수 있으며, 이 불규칙적으로 평활한 면(Fig. 2b(2))은 미끄럼 속도가 30 rpm(Fig. 2b)일 경우 15 rpm일 때보다 더 넓게 나타나고 있다. 미끄럼 속도가 45 rpm일 경우 평활한 면은 위의 두 경우에 비해 더욱더 넓게 나타나고, 그 면 위에서 연삭마모가 일어난 흔적(Fig. 2c(3))을 관찰할 수 있다. 미끄럼 속도가 60 rpm일 경우에는 평활한 면 위에서의 연삭마모(Fig. 2d(4))와 함께 평활한 면이 손상된 흔적(Fig. 2d(5))이 관찰된다. 이 평활한 면에 대한 EDS 분석결과를 Fig. 3에 나타내었다. 평활한 면에서는 대량의 산소가 검출되었다. 또한 마모시험 전의 코팅 표면과 마모시험 후 생긴 두 종류의 마모흔에 대해 각각 EDS 분석하고, 그 결과를 Table 4에 정리하여 나타냈다. 평활한 구역(Region 1)에서는 산소가 대량으로 검출되고 있으나, 다른 구역(Region 2)에서는 마모 전(as-sprayed) 표면의 화학조성과 거의 동일하게 나타났다. 이는 평활한 구역(Region 1)에서 산화막층이 생성되었다는 것을 의미한다. 산화막층은 기계가공 또는 마찰·마모과정 중 산소와의 결합에 의해 발생한다. 마모·마찰로 인해 발생한 열은 주위환경의 화학반응을 촉진시켜 산화율(rate of oxidation)을 증가시키며, 그 결과 여러 종류의 산화물을 생성시키게 된다. 특히 본 실험과 같이 실온환경하에서는 마찰열이 발생하는 돌기면(asperity contact)에서 산화가 발생한다.⁷⁾ 이와 같이 마모시험 후 코팅층에서 산화막층이 형성되는 것은 HVOF로 제작된 Fe-Al 코팅의 마모거동을 분석한 B. Xu 등의 연구 결과에서도 보고된 바 있다.⁸⁾

Fig. 4에 미끄럼 속도 60 rpm의 조건하에서 작용하중을 달리하여 마모시험한 결과의 마모흔을 나타내었다. 작용하중이 10 N인 경우(Fig. 4a) 산화막층 위에서 연삭마모가 일어난 것(Fig. 4a(1))을 관찰할 수 있다. 작용하중이 25 N인 경우(Fig. 4b)에는 산화막층 위에서의 뚜렷한 연삭마모흔과 함께 산화막층이 손상된 흔적(Fig.

Table 4 Chemical composition of the worn region analyzed by EDS

	Fe	Cr	Ni	Si	Co	Mo	O
As-sprayed	62.96	17.62	11.04	7.43	0.55	0.39	-
Region 1	35.28	10.08	5.57	3.38	0.4	-	45.25
Region 2	63.53	17.68	10.3	7.23	0.89	0.37	-

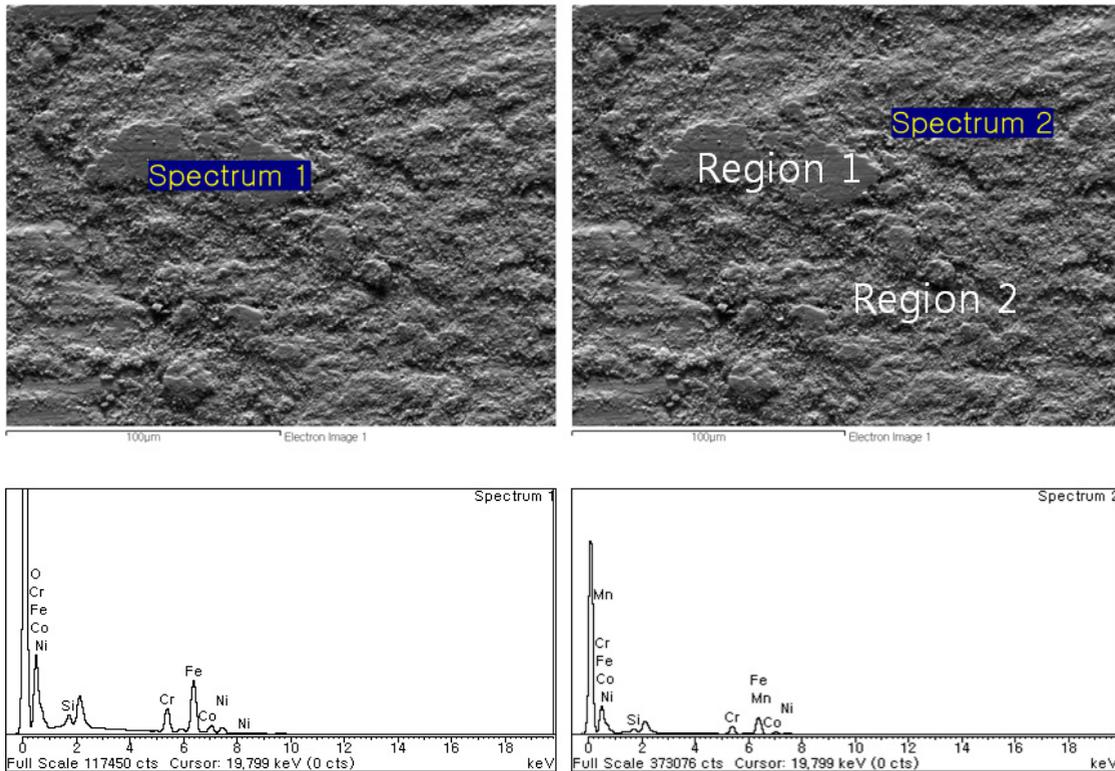


Fig. 3 SEM morphologies of the worn surface of STS316 coating and EDS analysis spectrum

4b(2))이 동시에 관찰된다. 본 실험의 결과 작용하중이 10 N에서 15, 20, 25 N으로 커질수록 산화막층의 손상도 증가되었는데, 이러한 결과로 인해 작용하중이 증가할수록 마모율이 증가하는 것으로 판단된다. Fig. 5는 미끄럼 속도 15 rpm의 조건하에서 작용하중이 각각 10 N과 25 N일 경우 마모시험동안의 마찰계수 변화를 나타낸 것이다. 전반적으로 작용하중이 25N일 경우 10 N 일 때보다 마찰계수가 낮게 나타난다. 이는 큰 작용

하중으로 인해 코팅층 위에 산화막층이 빠른 시간에 넓게 형성됨으로써 평균적인 마찰계수가 낮아지는 것으로 생각된다. 작용하중이 10 N일 경우 300-600 cycle 구간에서 상대적으로 높은 마찰계수를 나타내고 있으며 또한 마찰계수의 편차가 크다. 이는 300-600 cycle 구간에서 산화막층이 형성되면서 마찰계수 및 마찰계수의 편차가 커지나, 이후에는 이 산화막층으로 인해 이후의 마찰계수와 마찰계수의 편차가 감소하는 것으로 생각

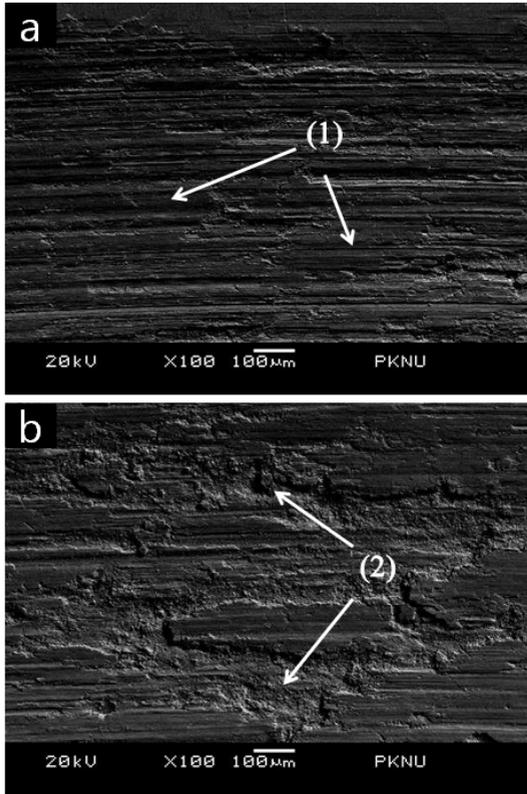


Fig. 4 SEM morphologies of the worn surface of STS316 coating : wear speed 60 rpm, applied load a) 10 N, b) 25 N

된다. 작용하중이 25 N일 경우 cycle 수가 증가함에 따라 마찰계수도 증가하는 경향을 나타내고 있는데, 10 N의 경우와는 다르게 산화막층의 손상으로 인해 마찰계수의 편차가 더욱 크게 나타난다. Fig. 6에 마모시험 동안의 작용하중과 미끄럼 속도에 따른 평균 마찰계수의 변화를 나타내었다. 작용하중이 커질수록 평균마찰계수는 감소하며 또한 동일한 하중 조건하에서는 미끄럼 속도가 증가할수록 평균마찰계수는 낮아진다. 일반적으로 마찰계수가 증가할수록 마모율이 증가한다. 그러나 본 실험의 경우 작용하중과 미끄럼 속도가 클수록 산화막층의 형성으로 인해 평균마찰계수는 감소하지만, 이 산화막층의 손상으로 인해 마모율이 증가하는 것으로 판단된다. 본 연구와 마찬가지로 작용하중과 미끄럼 속도가 증가

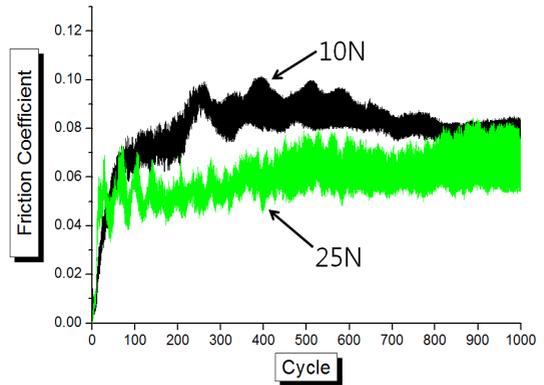


Fig. 5 Variation of friction coefficient under 15 rpm of sliding speed

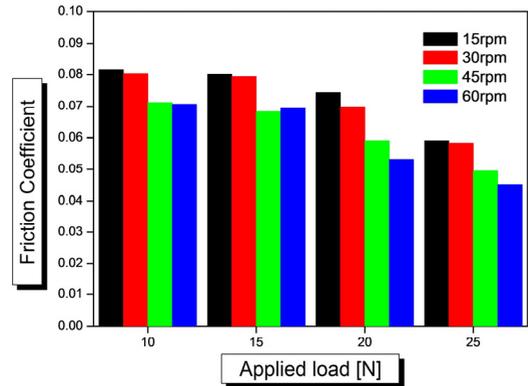


Fig. 6 Variation of friction coefficient according to applied load and sliding speed

함에 따라 마찰계수가 감소하는 것은 J. M. Chen 등의 레이저 클레딩 Fe-based 코팅의 트라이볼로지 특성에 관한 연구에서도 보고된 바 있다.⁹⁾

이상에서 살펴본 바와 같이 용사법에 의해 제작된 STS316 코팅에 대해 마모시험을 실시할 경우 마찰열로 인해 산화막층이 발생하게 되고, 작용하중과 미끄럼 속도가 증가할수록 산화막층의 면적이 증가하게 되며 산화막층에서의 연삭마모가 이루어진다. 또한 높은 작용하중과 미끄럼 속도에서의 마모과정에서는 산화막층 위에서의 연삭마모와 함께 산화막층의 손상이 발생하여 마모율이 크게 증가한다.

4. 결 론

본 연구에서는 화염용사법을 이용해 STS316 코팅을 제조하고, 제작된 코팅시편에 대해 작용하중 및 미끄럼 속도를 달리하여 마모시험을 실시하여 각 조건에 따른 마모거동을 SEM과 EDS를 이용하여 분석하였다. 주요한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) STS316 용사코팅의 주마모거동은 산화막층의 형성에 의한 산화마모와 연삭마모이다.
- 2) 작용하중과 미끄럼 속도가 높을수록 산화막층이 넓어지고 이 산화막층 위에서의 연삭마모가 진행된다.
- 3) 작용하중과 미끄럼속도가 모두 높은 경우에는 산화막층의 손상으로 인해 마모율이 크게 증가한다.

참고문헌

1. K. T. Kim and Y. S. Kim, 2010, "Effects of process parameters on the wear behavior of thermally sprayed Ni-based hard coatings", Journal of the KSTLE, Vol. 26, No. 3, pp. 157-161.
2. J. H. Lee, and Y. S. Kim, 2013, "Process optimization for Co-based self-flux alloy coating by Taguchi method", Journal of the KSPSE, Vol. 15, No. 6, pp. 109-115.
3. T. Y. Kim, J. D. Kim and Y. S. Kim, 2013, "Effect of fusing treatment on anti-corrosion characteristics of Ni-based self-flux alloy coating", Journal of the KSPSE, Vol. 17, No. 4, pp. 79-85.
4. J. R. Davis et al., 2004, "Handbook of Thermal Spray Technology", ASM International.
5. H. I. Lee, M. S. Han, K. K. Back, C. H. Lee, C. H. Shin and M. K. Chung, 2008, "Study on new candidate coating materials to challenge rudder cavitation damage", Corrosion Science and Technology, Vol. 7 No. 5, pp. 274-282.
6. K. T. Kim and Y. S. Kim, 2010, "Process optimization of thermal-sprayed STS316 coatings", Journal of the KSOE, Vol. 24, No. 1, pp. 161-165.
7. B. Bhushan, "Principles and Applications of Tribology", Wiley-Interscience.
8. B. Xu, Z. Zhu, S. Ma, W. Zhang and W. Liu, 2004, "Sliding wear behavior of Fe-Al and Fe-Al/WC coatings prepared by high velocity arc spraying", Journal of Wear, No. 257, pp. 1089-1095.
9. J. M. Chen, C. Guo and J. S. Zhou, 2012, "Microstructure and tribological properties of laser cladding Fe-based coating on pure Ti substrate", Transactions of Nonferrous Metals Society of China, No. 22, pp. 2171-2178.