

Al₂O₃/NiCr 코팅의 미끄럼 마멸 특성

채영훈* · 박병희* · 김석삼**
(1999년 1월 5일 접수)

Sliding Wear Behavior of Al₂O₃/NiCr Coating

Young-Hun Chae, Byung-Hee Park and Seock-Sam Kim

Key Words : Plasma Spray(플라즈마용사), Alumina Coating(알루미나 코팅), Bond Coating(본드 코팅), Wear(마멸), Friction(마찰)

Abstract

The sliding wear behavior of Al₂O₃/NiCr coating deposited on steel(SM45C) was investigated under lubrication. The parameters of sliding wear are normal loads, coating thickness. As a result, the wear resistance of Al₂O₃/NiCr coating was remarkably greater than that of Al₂O₃ coating. The optimized coating thickness was found to be 300 μm to ensure good anti-wear. The bond coating played important role in decreasing residual stress. The residual stress had much influence on wear mechanism. These results were correlated with the stress state of coating and the microstructure of coating.

1. 서 론

구조용 세라믹재료는 마멸, 부식 및 산화에 대한 저항성이 우수한 재료로서 산업계의 주목을 받아왔다. 그러나 구조용 세라믹은 생산의 고비용과 특유한 기계적인 취성으로 인해 기계 부품 재료로서의 응용은 제한된 범위에서만 이용되어져 왔다. 이에 최근에는 세라믹의 장점과 모재로 사용되는 강의 장점만을 취한 세라믹코팅이 많이 이용되고 있다. 세라믹코팅의 방법 중 화학증착법(CVD), 물리증착법(PVD) 및 플라즈마 용사법(plasma spray)등이 산업현장에서 가장 광범위하게 적용되고 있다. 일반적으로 화학증착법 및 물리증착법은 작업공간(vacuum chamber)의 제한된 크기 때문에 작업물의 크기를 한정하고 있다. 그러나 상온 및 대기압 하에서 플라즈마 열원을 이용한 APS(Air Plasma Spray)는 작업물의 크기에 관계

없이 이용되고 있으며 코팅에 사용되는 세라믹 분말의 선택이 광범위하며 증착두께의 조절이 용이한 장점을 갖고 있다.

APS에서 세라믹코팅과 모재간의 열팽창계수, 탄성계수등의 차이로 인한 불일치성이 보고되고 있다.⁽¹⁻⁵⁾ 이러한 탄성계수와 열팽창계수의 불일치는 코팅의 접착파괴(cohesive failure), 스펠레이션(spallation) 및 접착강도(adhesive strength)의 저하 등으로 나타나며 접촉압력의 불연속성으로 인한 응력집중과 코팅의 특성에 많은 영향을 미친다.

선진 외국에서는 이러한 단점을 보완하여 코팅의 기계적 특성 및 트라이볼로지적 특성을 향상시키기 위하여 본드코팅(bond coating)을 적용하여 열팽창계수 불일치 및 접착강도를 개선하고 있으며, 이에 대한 연구가 활발하다.⁽⁵⁻⁷⁾

따라서 본 연구에서는 일반 산업현장에서 내마멸성 증대를 목적으로 널리 사용되고 있는 알루미늄(Al₂O₃)를 일반 기계구조용 탄소강(SM45C)표면에 APS법으로 Al₂O₃/NiCr 구조를 갖추도록 용사하여 시편을 제작한다. 이 시편을 이용하여 상온, 상압 및 윤활하에서 불은

* 회원, 경북대학교 대학원 기계공학과

** 경북대학교 대학원 기계공학과

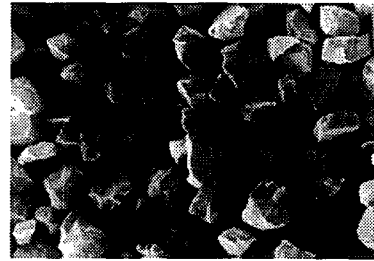
*** 회원, 경북대학교 기계공학부

디스크 타입(ball on disk type)으로 실험하고자 한다. $Al_2O_3/NiCr$ 코팅의 특성에서 본드코팅의 영향과 코팅두께의 변화에 대한 미끄럼 마멸특성을 연구하고, 최적 코팅두께의 조건을 규명하려고 한다. 열팽창계수의 차이로 발생된 잔류응력의 마멸특성에 대한 영향과 본드코팅이 코팅의 잔류응력과 마멸기구에 미치는 영향에 대해 고찰하려고 한다.

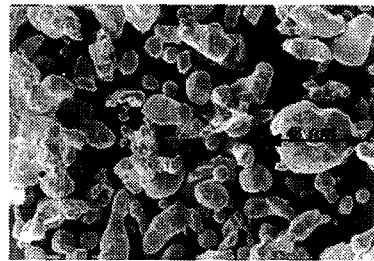
2. 실험

2.1 코팅분말과 코팅방법

본 연구에 사용된 코팅분말은 Al_2O_3 와 NiCr이다. 그 조성은 Table 1과 같다. Al_2O_3 는 탑(top) 코팅재로 사용되었고 NiCr은 본드코팅 재료 사용하였다. Fig. 1은 코팅에 사용된 분말의 전자주사현미경(Scanning Electron Microscopy, SEM) 사진이다. (a)는 Al_2O_3 분말로서 원재료를 용융시킨 후 냉각시켜 부수어 만든 것으로 상당히 불규칙한 형상을 가지고 있다. 본드코팅 재료 사용된 분말은 가스무화(gas atomization)의 방법으로 제조된 것으로 낮은 내부 기공율과 구의 형상을 (b)에서 볼 수 있다. 분말이 구의 형상을 가지게 되면 용사시 모재로 분사될 때 공기의 저항력이 감소되어 모재와의 접착력이 증가한다⁽²⁾. 분말의 크기는 플



(a) Al_2O_3 powder



(b) NiCr powder

Fig. 1 SEM photographs of coating powder.

Table 3 The structure of coating specimen.

Specimen	$Al_2O_3/NiCr$	Al_2O_3
Coating thickness	250 (50)	
(Bond coating)[μm]	300 (50)	300
	400 (50)	

Table 1 Chemical composition of coating powder.

Coating powder	Component(wt. %)
Al_2O_3	98%
NiCr	80%Ni 20%Cr

Table 2 The plasma spraying parameters for Hexa plasma.

Parameter	Al_2O_3 coating	Bond coating
Current [A]	630	650
Primary gas [l/min] (Ar)	60	60
Secondary gas [l/min] (H_2)	12	3
Powder carrier gas [l/min] (Ar)	8	8
Powder inlet position	internal	external
Feed rate [g/min]	30	30
Distance [mm]	80	100

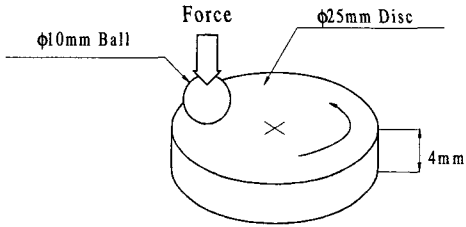
라즈마 용사에 적합한 $100 \mu m$ 미만의 분포를 가졌다. 본 연구에 사용된 용사장비로는 Hexa plasma를 사용하였으며, Table 2와 같은 조건으로 코팅하였다.

2.2 시험편

본 연구에서 사용된 모재는 일반 기계구조용강 SM45C이며, 실험에 사용된 시험편의 종류는 Table 3과 같다. 모재를 표면 연마기(META-SERV 2000, BUEHLER)를 사용하여 1차로 연마하여 형상 및 크기를 같게 하였고, 시험편의 형상과 크기는 Fig. 2와 같이 하부시험편은 직경 25mm, 두께 4mm의 원판으로 하였다. 코팅 전 시험편에 조도를 부여하기 위하여 샌드

Table 4 Result of surface roughness test.

Specimen	Roughness Ra(μ m)
As-ground	0.6
After sand blasting	6.4
As-spray coating	6.8
After ground coating	1

**Fig. 2** Schematic illustration of ball on disk type wear test.

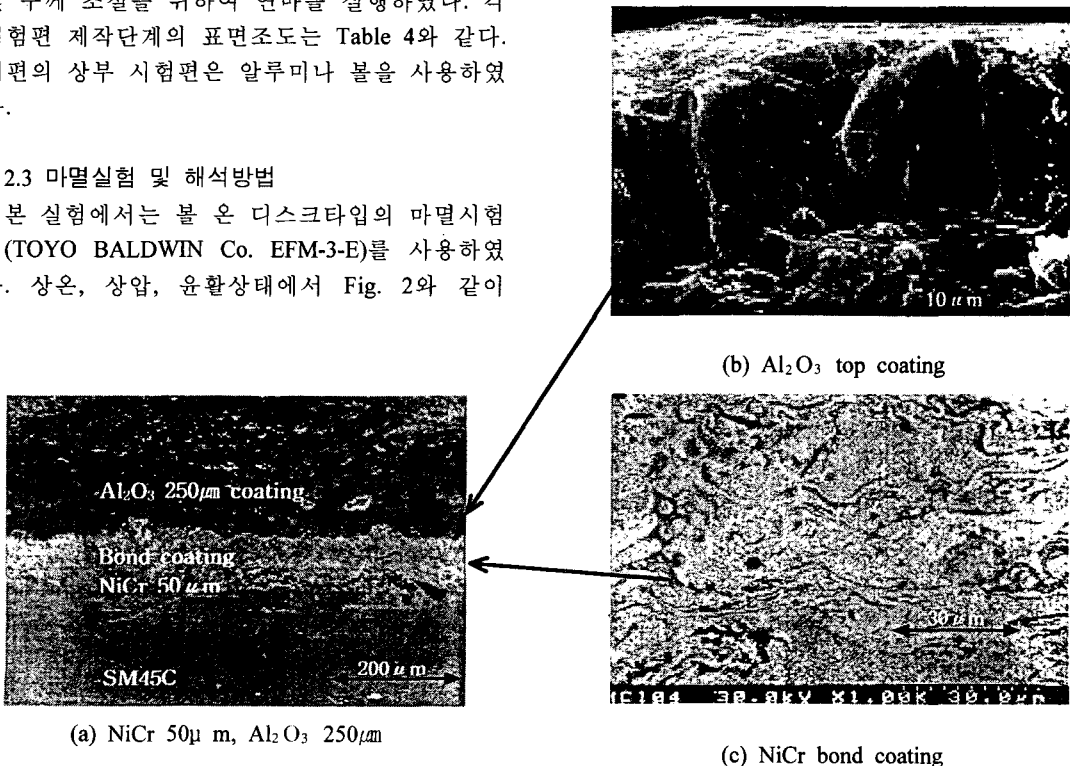
블라스트(sand blasting)를 하였다. 조도를 부여한 시험편 위에 NiCr 본드코팅과 알루미나를 순차적으로 용사하였다. 코팅시험편의 표면 조도 및 두께 조절을 위하여 연마를 실행하였다. 각 시험편 제작단계의 표면조도는 Table 4와 같다. 시험편의 상부 시험편은 알루미나 볼을 사용하였다.

2.3 마멸실험 및 해석방법

본 실험에서는 볼 온 디스크타입의 마멸시험기(TOYO BALDWIN Co. EFM-3-E)를 사용하였다. 상온, 상압, 유회상태에서 Fig. 2와 같이

상대 시험편인 세라믹 볼을 고정시키고 시험편 디스크 위에 접촉시켜 일정한 하중으로 가압하면서 마멸시험을 수행하였다. 사용한 윤활유는 터빈유(TERESSO 32)를 사용하였다. 실험순서는 초음파세척 → 건조 → 마찰·마멸시험 → 초음파세척 → 건조 → 현미경관찰 → 표면거칠기측정의 순으로 수행하였다.

실험조건은 미끄럼속도를 100mm/sec로 고정하고 수직하중은 50N, 80N 및 110N으로 변화시켜 실험하였으며, 10분, 20분, 30분, 40분, 50분 간격으로 실험을 중단하여 시험편을 아세톤 용액 속에서 10분간 초음파 세척하여 시험편에 묻은 마멸입자를 제거하고, 1분간 건조후 표면거칠기 측정기(MITUTOYO, SURF-500)를 사용하여 디스크 마멸면 4곳의 단면곡선을 얻었다. 이러한 마멸면의 단면곡선을 면적계(planimeter)를 사용하여 마멸면적을 구하고, 마멸부피를 계산하였다. 실험이 완료된 후 마멸면의 미시적 관찰을 위하여 SEM을 사용하였다.

**Fig. 3** SEM photographs of cross-section for coating.

3. 실험결과

3.1 코팅의 미시적 구조

Fig. 3(a)는 SM45C 모재위에 Al₂O₃/NiCr구조로 용사된 시편의 단면을 SEM으로 촬영한 것이다. NiCr 본드코팅의 두께는 50 μm이며, 전체코팅의 두께는 300 μm이다. 코팅의 미시적 구조는 플라즈마 용사 조건에 많은 영향을 받는다.^(2,3) 플라즈마 용사에서 용사시 모재표면에 부착된 분말은 용사온도에서 상온으로 급냉시 발생되는 응고수축으로 인한 내부응력에 의해 냉각면에 대해 수직으로 성장하여 Fig. 3(b)와 같이 주상조직을 형성한다. 마멸이 진행되는 과정에서 주상조직의 입계에서 균열이 발생한 후 성장하여 마멸입자를 형성한다.^(2,3,10) Fig. 3(c)는 NiCr 본드코팅의 단면을 확대한 사진이며, 유동형의 형상을 가지고 있음을 보여준다. 이것은 용사시 용사온도에서 용융된 입자들과 용융되지 않은 입자들이 뒤섞여 산재함으로 형성되는 전형적인 본드코팅의 형상을 가지고 있다.^(2,3)

3.2 코팅의 접착강도

3.2.1 접착강도 측정 실험방법

코팅과 모재간의 접착강도를 평가하기 위해 ASTM C 633-69에 따라 코팅의 풀오프(pull-off) 실험을 수행하였다. 용사 전 모재의 표면에 샌드블라스트를 수행하여 표면조도를 각각 50 μmR_{max}, 100 μmR_{max}로 조절하였으며, 마멸시험에 사용된 용사조건과 동일하게 시험편을 제작하였다. 코팅의 두께는 사용된 접착제(araldite)의 영향을 배제하기 위하여 400 μm로 하였다. 용사된 시편을 접착제를 사용하여 코팅되지 않은 시험편과 접착시켜 최종적인 시험편을 제작하였다. 인장시험시 발생하는 편심하중과 모멘트의 영향을 배제시키기 위하여 ASTM C 633-69에 규정된 지그(self-aligning device) 제작하였다. Fig. 4와 같이 인장시험기(INSTRON1342, 25Ton)를 이용하여 0.013 m·s⁻¹의 인장속도(constant rate of cross head travel)로 하중을 증가시켜 코팅의 파괴가 발생하는 순간의 하중을 기록하였다. 코팅의 접착강도는 식(1)과 같이 코팅의 파괴가 일어나는

순간의 하중을 시편의 단면적으로 나누어서 계산하였다.

$$\text{Adhesion Strength} = \text{Maximum Load} / \text{Cross-sectional Area} \quad (1)$$

3.2.2 접착강도 실험결과

Fig. 5는 표면조도 50 μmR_{max}와 100 μmR_{max}

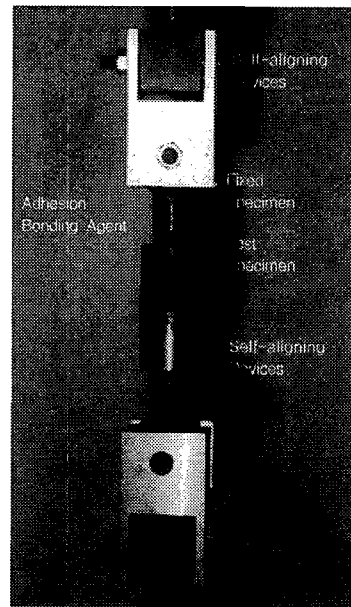


Fig. 4 Photograph of test apparatus.

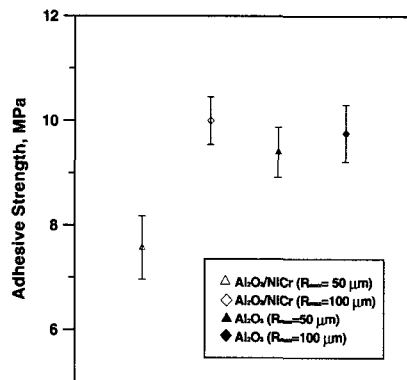


Fig. 5 Adhesive strength for various specimen.

인 Al₂O₃/NiCr 코팅과 본드 코팅되지 않은 Al₂O₃ 코팅에 대한 접착강도를 측정 한 결과이다. 다섯번을 실험하여 얻어진 평균값과 표준편차 범위를 보여주고 있다. 본드코팅으로 인한 코팅과 모재간의 접착강도의 개선은 그다지 크지 못하였으며, 표면조도 50 $\mu\text{m}R_{\text{max}}$ 에서 Al₂O₃/NiCr코팅의 접착강도는 오히려 Al₂O₃ 코팅의 접착강도 보다 더 낮은 값을 가졌다.

샌드블라스트 후 표면조도가 클수록 높은 접착강도를 나타내었다. 따라서 코팅과 모재간의 결합력은 표면조도의 영향이 큼을 확인 할 수 있다.

3.3 마멸실험 결과

3.3.1 본드코팅의 영향

Fig. 6, Fig. 7 및 Fig. 8은 코팅두께 300 μm , 수직하중이 50N, 80N 및 110N 일 때 NiCr 본드코팅된 알루미늄 코팅과 본드코팅을 적용하지 않은 알루미늄 코팅의 비마멸율(specific wear rate)의 변화곡선이다. Al₂O₃/NiCr 코팅의 비마멸율은 미끄럼거리가 증가하여도 일정한 값을 가지나 Al₂O₃ 코팅의 비마멸율은 미끄럼거리가 증가할수록 감소하는 경향을 보여주고 있다. 본드코팅을 적용한 코팅이 적용하지 않은 코팅보다 2배 이상 적은 비마멸율을 가지고 있음을 알 수 있다. 따라서 본드코팅된 알루미늄 코팅이 뛰어난 내마멸성을 가지고 있음을 알 수 있다.

3.3.2 코팅두께의 영향

Fig. 9, Fig. 10 및 Fig. 11은 수직하중이 50N, 80N 및 110N일 때 코팅의 두께변화에 따른 비마멸율의 변화곡선이다. 마멸의 초기상태에서는 불과 코팅표면간의 점접촉으로 인한 높은 접촉압력에 의해 비마멸율의 변화가 급격히 변화한다. 마멸이 진행되면서 코팅표면에는 그루부(groove)가 형성되고 결과적으로 접촉면적은 증가한다. 따라서 접촉압력이 감소하여 마멸량이 감소됨을 알 수 있다. 코팅의 두께가 250 μm 에서 300 μm 증가할 때는 마멸율이 감소하였으나 400 μm 로 증가할 때는 마멸율이 증가하였다. 따라서 코팅두께에 대한 마멸율의 변화는 300 μm 일 때 가장 적은 비마멸율의 값을

가진다.

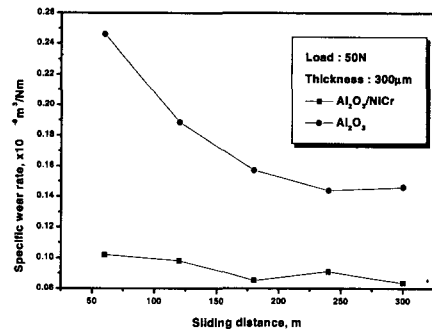


Fig. 6 Variation of specific wear rate for Al₂O₃/NiCr and Al₂O₃ coating as function of sliding distance under 50N.

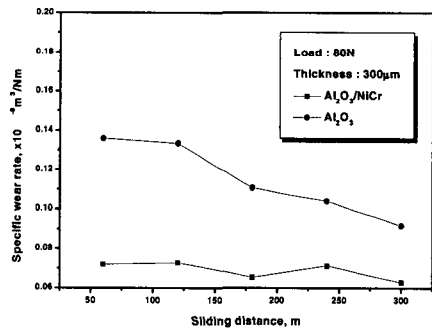


Fig. 7 Variation of specific wear rate for Al₂O₃/NiCr and Al₂O₃ coating as function of sliding distance under 80N.

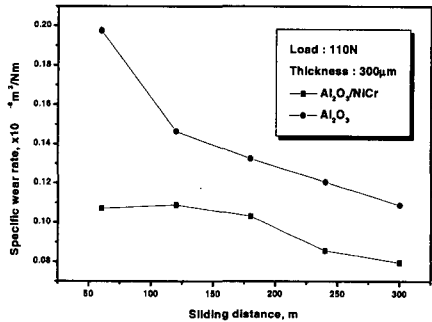


Fig. 8 Variation of specific wear rate for Al₂O₃/NiCr and Al₂O₃ coating as function of sliding distance under 110N.

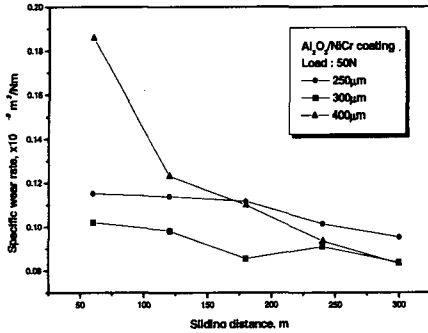


Fig. 9 Variation of specific wear rate for specimens of various coating thickness in Al₂O₃/NiCr coating as function of sliding distance under 50N.

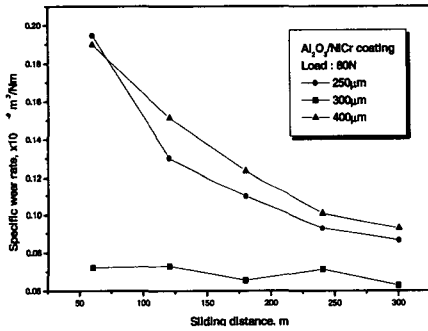


Fig. 10 Variation of specific wear rate for specimens of various coating thickness in Al₂O₃/NiCr coating as function of sliding distance under 80N.

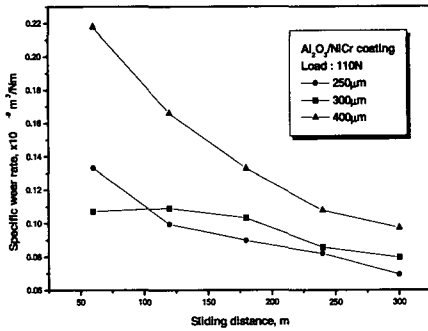


Fig. 11 Variation of specific wear rate for specimens of various coating thickness in Al₂O₃/NiCr coating as function of sliding distance under 110N.

4. 고찰

플라즈마용사시 표면조도를 크게 함으로서 접합부의 앵커기구(anchor mechanism)가 향상되어 모재와 코팅간의 접착력은 증대된다. 본드코팅을 적용함으로써 나타나는 접합부의 기하학적인 표면은 인위적으로 가공한 접합부보다 앵커기구를 향상시킬 수 있으며, 이로 인해 코팅의 접착강도는 증가한다고 보고되어지고 있다.^(4~7) 그러나 본 연구에서는 본드코팅의 적용으로 인한 접착강도의 개선은 나타나지 않았다 (Fig. 5).

실험의 결과를 근거로 하여 접착강도에 영향이 없었지만 본드코팅이 내마멸성 향상에는 어떠한 영향을 미치는지 고찰하였다.

코팅의 내마멸성은 코팅과 모재간의 접착강도, 코팅 내부의 잔류응력 등에 많은 영향을 받는다.^(1~3) 모재와 코팅간의 접착강도는 용사방법과 조건, 스플레이트(splats)의 형상 등에 영향을 받는다. 코팅내부에는 용사시 용융된 세라믹분말입자들이 상온 또는 강제 냉각으로 인한 수축과 응고로 인해 잔류응력이 발생한다.^(1~3,8,12~15) 잔류응력은 모재의 온도와 냉각과정 그리고 코팅과 모재간의 열적·기계적 물성치의 차이에 많은 영향을 받는다. 이중 가장 큰 영향을 받는 것이 열팽창계수의 차이이다.^(1~3,12~14) 모재 SM45C의 열팽창계수($\alpha=12 \times 10^{-6}K^{-1}$)가 알루미늄의 열팽창계수($\alpha=8 \times 10^{-6}K^{-1}$) 보다 크다. 따라서 코팅내부에는 상당한 크기의 압축 잔류응력이 존재한다. 이러한 압축잔류응력은 모재와 코팅간의 열팽창계수의 차이를 감소시키는 NiCr 본드코팅($\alpha=10 \times 10^{-6}K^{-1}$)을 적용시킴으로써 크기를 감소시킬 수 있다. 본드코팅되지 않은 Fig. 12(a)의 코팅 마멸면의 형상은 용사온도 1400K에서 상온으로의 냉각시 열팽창계수 차이로 인한 높은 잔류응력이 발생하여 코팅내부 접착과파괴현상인 스플레이션이 발생하였다. 스플레이션과 연삭마멸(abrasive wear)로 인해 큰 표면손상이 발생하였으며 미세한 스플레이트간의 파괴가 발생하였음을 알 수 있다. 그러나 본드코팅이 적용된 Fig. 12(b)의 마멸면에서 잔류응력에 의한 스플레이트간의 파괴현상은 나타나지 않으며,

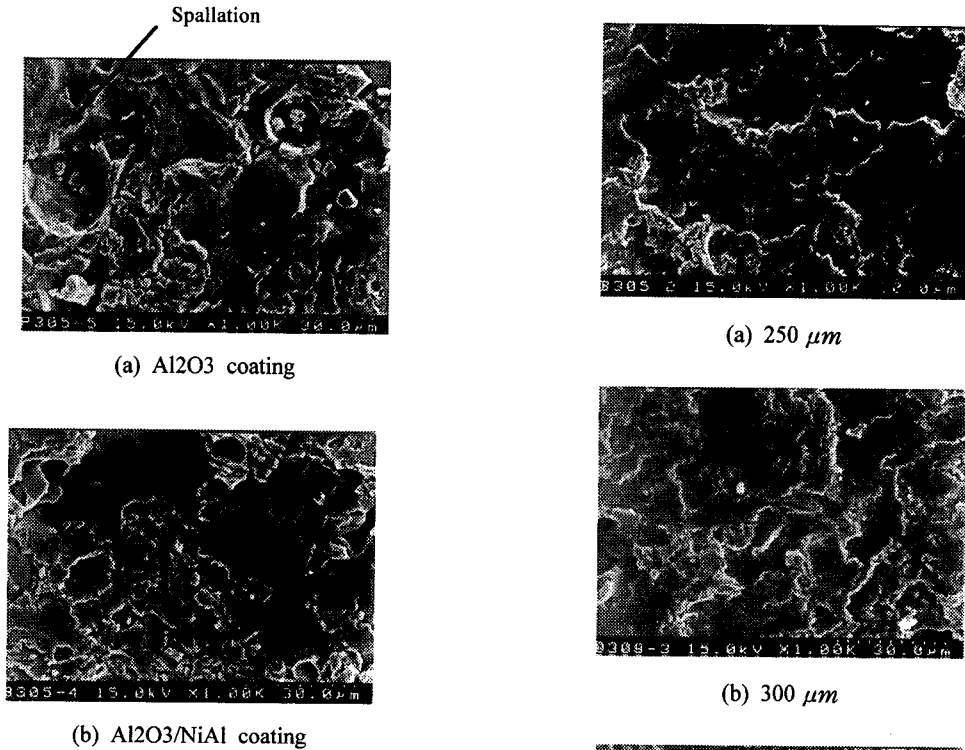


Fig. 12 SEM photograph of worn surface (Coating thickness : 300 μm, Load : 50N) Arrow is sliding direction.

하중에 의한 약간의 소성변형으로 인한 파괴거동이 관찰된다. 이와 같이 모재와 코팅간에 열팽창계수차이 등과 같은 열적, 기계적 불일치를 감소시키는 본드코팅을 적용함으로써 코팅의 잔류응력의 영향을 줄일 수 있다.^(7~12)

코팅의 두께는 마멸특성에 아주 중요한 인자이다. 코팅이 얇으면 모재에는 상당한 소성변형이 발생하고, 결과적으로 코팅내부에 굽힘이 발생하여 급격히 마멸이 진행된다(Fig. 9, Fig. 13(a)). 코팅의 두께가 증가할수록 코팅은 하중을 지지하며, 이로 인해 마멸특성은 개선된다. 그러나 이러한 코팅두께의 증가에 따른 내마멸성의 향상은 어떠한 임계값의 범위 내에서만 이루어진다. 플라즈마 용사에서는 코팅의 두께 증가에 따라 코팅 내부 잔류응력 크기는 증가한다.^(1~5) 따라서 코팅의 두께가 임계값을 넘어서 증가되면 코팅의 내부에는 매우 큰 잔류응력이 발생한다.^(1~6) 이는 코팅내부 파괴현상

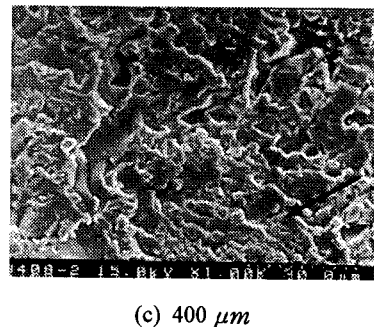


Fig. 13 SEM photograph of worn surface for Al₂O₃/NiCr coating (Load : 50N) Arrow is sliding direction.

인 스펠레이션을 발생시켜 마멸을 촉진시키는 요인으로 작용한다(Fig. 9, Fig. 13(c)). 따라서 모재의 소성변형을 줄이고 또한 코팅내부의 잔류응력을 감소시켜 마멸의 저항성을 최대로 증가시키는 코팅의 두께가 존재하고 있음을 실험적으로 알 수 있었다. 본 연구에서는 코팅두께 300 μm에서 최대의 내마멸성을 나타내고 있다(Fig. 9).

결론적으로 본드코팅의 적용으로 인한 내마멸성의 증가는 접착강도의 향상보다는 코팅내

부에 존재하는 잔류응력의 감소와 열팽창계수의 불일치의 보완에 크게 영향을 받고 있었다.

5. 결 론

내마멸성 증대를 목적으로 널리 사용되고 있는 알루미늄(Al_2O_3)을 일반 기계구조용 탄소강 표면에 APS법으로 $Al_2O_3/NiCr$ 구조로 용사하여 시편을 제작한 뒤 상온, 상압, 윤활하에서 붙은 디스크 타입으로 코팅두께 250 μm , 300 μm 및 400 μm 와 수직하중 50N, 80N 및 110N에 관하여 실험하였다. 본드코팅의 영향과 코팅두께에 대한 미끄럼 마멸특성을 규명하였으며, 최적 코팅의 조건에 대하여 고찰하였다.

본드코팅을 적용한 $Al_2O_3/NiCr$ 코팅의 마멸특성이 Al_2O_3 코팅의 마멸특성보다 아주 우수한 것으로 나타났다. 그리고 마멸에 대한 최적 코팅두께의 존재에 대해 확인할 수 있었으며, 본 연구의 조건에서는 300 μm 로 나타났다. $Al_2O_3/NiCr$ 코팅의 마멸기구는 잔류응력에 많은 영향을 받았으며, 본드코팅의 적용은 잔류응력 감소에 중요한 역할을 하였다.

참고문헌

- (1) Matthews, Holmberg, 1994, *Coating Tribology*, ELSEVIER.
- (2) Pawlowski, Lech, 1995, *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings*, JOHN WILLEY & SONS.
- (3) Heimann, Robert B., 1996, *Plasma-Spray Coating principles and Applications*, VCH.
- (4) Tekeuchi J., Nakahira H. and Nagai J., 1991, "Physical Properties of Some Oxide Coatings by Low Pressure Plasma Spraying, 2nd Plasma-Technik-Symposium, Vol 2, pp. 141~151.
- (5) Wang Y., Jin Y. and Wen S., 1988, "The Analysis of the Chemical Structure and Properties of Ceramic Surface Films in Friction Using SEM, AES and Micro-Region X-ray Diffraction," *Wear*, 128, pp. 277~290.
- (6) Vijande-Diaz R., Belzunce J. and Fernandez E., Rincon A., 1991, Perez M. C., "Wear and Microstructure in Fine Ceramic Coatings," *Wear*, 148, pp. 331~233.
- (7) Lugscheider, E., 1987, "Plasma Spraying for Wear Applications," *Proceedings of the National Thermal Spray Conference*, pp. 14~17.
- (8) Pina j., Dias, A. M., Costa, V., Goncalves, A., Zaouali, M. and Lebim, S. L., 1991, "Residual Stresses in Plasma Sprayed Coatings," 2nd Plasma-Technik-Symposium, Vol. 2, pp. 99~108.
- (9) Kvernes, I., Lugscheider, E. and Weber, Th., 1991, "Protective Bond Coatings(Coating Systems) for Aluminium, Magnesium and Carbon Parts for the Automotive Industries," 2nd Plasma-Technik-Symposium, Vol. 3, pp. 75~87.
- (10) Ahn, H. S. and Kwon, O. K., 1993, "Wear Behaviour of Plasma-Sprayed Partially Stabilized Zirconia on a Steel Substrate," *Wear*, 162~164, pp. 636~644.
- (11) Fernandez, J. E., Rodriguez, R., Yinglong, Wang, R. Vijande, A. Rincon, 1995, "Sliding Wear of a Plasma-Sprayed Al_2O_3 Coating," *Wear*, 181~183, pp. 417~425.
- (12) Bull, S. J., Kingswell, R. and Scott, K. T., 1996, "The Sliding Wear of Plasma Sprayed Alumina," *Surface Coatings Technology*, 82, pp. 218~225.
- (13) 채영훈, 임정일, 박준목, 김석삼, "플라즈마 코팅한 구조용 알루미늄합금의 마찰 및 마멸특성," 1997, *대한기계학회지논문집(A)*, 제21권 제 5호, pp. 791~799.
- (14) 채영훈, 김석삼, 1997, "구조용 알루미늄합금의 Al_2O_3 -40% TiO_2 용사층에 대한 마멸특성 평가," 제26회 추계윤활학회학술대회, pp. 183~190.
- (15) 박병희, 채영훈, 김석삼, 1998, " $Al_2O_3/NiCr$ 코팅의 미끄럼 마멸특성," *대한기계학회 '98년 추계학술대회 논문집 A*, pp. 68~73.