

SiO₂와 TiO₂가 첨가된 Cr₂O₃용사코팅의 마찰·마멸 특성

서보현, 김태형, 김석삼*

경북대학교 기계공학과 대학원, *경북대학교 기계공학부

Wear and Friction characteristics of Cr₂O₃ coating included SiO₂ and TiO₂

Bo-Hyun Suh, Tae-Hyung Kim, Seock-Sam Kim*

Graduate School, Department of Mechanical Engineering,
Kyungpook National University, Taegu, Korea

*School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University, Taegu, Korea

Abstract- Wear and Friction characteristics of plasma-sprayed Cr₂O₃ coating and Cr₂O₃ coating included SiO₂ and TiO₂ against SiC ball have been investigated under different loads. Worn surfaces were observed by SEM and worn surfaces were analyzed by EDS.

The Friction coefficient and the Wear resistance of Cr₂O₃-5SiO₂-3TiO₂ coating was less than that of Cr₂O₃ coating. The main mechanisms were plastic deformation and brittle fracture. The film on surface were made by plastic deformation and compacted wear debris. This film protect wear of coating

Key words - Wear, Friction, Cr₂O₃ coating, Cr₂O₃-5SiO₂-3TiO₂ coating, compacted layer

1. 서 론

선진국에선 합금으로 제작되던 기계요소들을 취성재료라는 단점에도 불구하고 금속에 비해 밀도가 낮고, 압축강도가 크며, 경도, 내식성, 내마멸성이 우수하다. 특히 다른 재료의 사용이 불가능한 작동환경에서도 우수한 성능을 발휘하는 세라믹재료를 플라즈마 용사법의 적용을 신중히 고려하고 있으며 항공용, 자동차 산업, 금속가공, 건설, 조선, 제지, 발전

산업, 광산산업, 화학산업, 의료용, 정유 산업, 인쇄산업, 전자 및 식료산업에 이르기까지 다양하다.

플라즈마 용사 세라믹 코팅의 주요 마멸기구는 피로, 취성파괴, 재료의 이착으로 인한 소성변형, 균열생성, 스폴(spall)이라고 보고 되고 있으며, 고착에 의한 소성변형과 마멸입자의 축적으로 인한 마멸보호층이 논의되었다[1,2,11].

산업 현장에선 기계부품의 내구성 증대를 목적으로 하는 APS도 제작과정에

서 생기는 코팅층의 기계적 특성 및 트라블로지적 특성을 개선하기 위하여, 산업 현장에서는 실링 및 레이저 열처리 등의 후처리 과정을 행한다[5,10,11]. 그러나 이는 또 다른 경제적 시간적 비용을 증가시키는 요인이 된다. 이런 문제를 해결하기 위하여 Y_2O_3 , TiO_2 와 같은 세라믹재료를 첨가함으로써 코팅의 기공율을 낮추고, 경도와 상의 안전성을 높이고 잔류응력을 완화 시켜 내마멸성을 향상시킨다. 플라즈마 세라믹 코팅재료중 널리 적용되고 있는 Al_2O_3 , Cr_2O_3 , Wc-Co 및 TiO_2 등이 연구대상이 되어, Al_2O_3 에 다른 세라믹을 첨가하여 파괴인성치 및 내마멸성을 개선한 연구 결과보고 되었으며, 특히 TiO_2 첨가에 따른 기공율, 파괴인성치 및 내마멸성의 변화를 연구 보고 하였다[3,13]

따라서 본 연구에서는 산업 현장에서 널리 사용되는 재료인 Cr_2O_3 을 SiO_2 와 TiO_2 가 첨가된 코팅과 첨가되지 않은 코팅을 탄화규소를 상대재료로 붙은 디스트 타입의 미끄럼 마찰·마멸실험을 수행하여 하중에 따른 마찰·마멸 특성을 비교하고, SiO_2 와 TiO_2 가 마찰·마멸에 미치는 영향에 대해 고찰하려고 한다.

2. 실험

2.1 시험편

본 실험에서 시험편은 Table. 1와 같이 Ni22Cr10Al1.0Y을 기계구조용강 SM45C 모재에 본드코팅한 시험편에 Cr_2O_3 와 $Cr_2O_3-5SiO_2-3TiO_2$ 을 용사하여 두가지의 탑코팅이 다른 시험편을 준비하였다. 모재를 표면 연마기(METASERV2000, BUEHLER)

Table. 1 Chemical composition of coating powder

Coating powder	Component (wt%)
Cr_2O_3	Cr_2O_3 (99%)
$Cr_2O_3-5SiO_2-3TiO_2$	Cr_2O_3 SiO_2 (5%) TiO_2 (3%)
Ni-22Cr-10Al-1.0Y	Ni Cr(22%) Al(10%) Y(1%)

를 사용하여 1차 연마하여 형상 및 크기를 같게 하였고, 시험편의 형상과 크기는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 하부 시험편은 직경이 25mm, 두께 8mm의 원판으로 하였다.

코팅 전 코팅의 접착강도를 높이기 위해 조도를 증가시켜 코팅의 앵커기구(anchor mechanism)을 향상시켰다[8,9]. 시험편을 T:C:E(1:1:1) 침적 초음파(Ultrasonic)세척을 2분 동안 실시한 후 샌드의 입도를 #46, 노즐압력 2.94kPa, 노즐에서 0.35m거리에서 90° 각으로 샌드블라스팅(sand blasting)을 하여, 조도를 Ra 6.7~6.8 μ m로 맞추었다.

조도를 부여한 시험편 위에 Ni22Cr10Al1.0Y 본드코팅을 용사한 후 Cr_2O_3 와 $Cr_2O_3-5SiO_2-3TiO_2$ 을 용사하였다. 코팅된 시험편의 표면조도 변화의 영향을 감소시키고 코팅두께를 조절하기 위해 2차 연마를 실행하였다. 각 시험편의 표면조도는 0.15 μ m-2.0 μ m로 맞추었다.

Table. 2은 표면 거칠기 측정기 (MITUT-OYO, SURF-500)을 사용하여 각 단계에서의 표면조도를 측정한 것이다. 모든 시험편의 가공전후의 표면조도 측정은 기준길이 8mm로 하여 비교가 될 수 있도록 하였다.

상부 시험편은 Fig. 1와 같이 탄화규소 불을 사용하였다.

Table. 2 Result of surface roughness test

Specimen	Roughness Ra (μ m)
As-ground	0.5
After sand blasting	6.8
As spray coating	7.0
After ground coating	0.15-0.20

2.2 실험장치

본 실험에서 사용한 시험기는 회전운동에 의한 미끄럼 마찰운동을 하는 마찰·마멸시험기(TOYO BALDWIN Co. EFM-3-E)를 사용하였다. 시험편에 가해지는 축하중과 마찰·마멸실험시에 발생하는 마찰력은 마찰토크(friction torque)로 로드셀(load cell)에 의해 측정된다. 정밀도는 $\pm 0.7\%$ 이내이다

축하중과 마찰토크는 실험기의 로드셀에서 나오는 전압신호를 증폭기와 아날로그/디지털 변환기(A/D converter)로 변환시켜 컴퓨터에 입력하였다.

실험장치는 크게 상단부와 하단부 두 부분으로 나눌 수 있는데, 상단부에는 하중을 가해주는 수직축과 그 밑에 볼을 고정하는 지그(jig)가 있고 하단부에는 회전하는 축에 시험편 디스크를 고정하는 지그가 있다. 실험은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 회전하는 디스크 위에 볼을 얹고 일정한 하중으로 가압하는 볼 온 디스크 타입으로 마찰·마멸 시험을 수행하였다. 볼의 접촉점은 디스크의 회전중심에서 5mm 편심이 되도록 고안하여, non-conformal 접촉으로 디스크면에 직경이 10mm인 마멸 트랙(wear track)이 발생하도록 하였다.

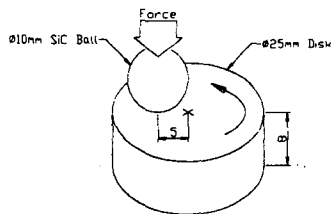


Fig. 1 Schematic illustration of ball-on-disk type wear test

2.3 실험방법

본 실험에서는 Fig. 1에서와 같이 볼 온 디스크타입(ball-on-disk type)으로 상대

시험편인 SiC 세라믹 볼을 회전하는 시험편 디스크 위에 접촉시켜 일정한 하중으로 가압하면서 마찰·마멸 시험을 수행하였다. 실험순서는 초음파세척 → 건조 → 마찰·마멸시험 → 초음파세척 → 건조 → 현미경 관찰 → 마멸량 측정 → SEM/EDS 관찰순으로 수행하였다.

마찰·마멸의 실험조건은 미끄럼속도를 0.1m/sec로 하고 하중을 80N, 100N, 150N으로 변화시켜 실험하였으며, 마멸량 계산을 위하여 15분, 30분, 60분, 90분, 150분, 210분, 300분 간격으로 실험을 중단하여 측정하였다. 이때 각 단계마다 시험편을 아세톤 용액 속에서 10분간 초음파 세척하여 시험편에 묻은 마멸입자를 제거하고 건조기로 1분간 건조하여 청정후 3차원 표면거칠기 측정기(MITUTOYO, SURF-500)을 사용하여 디스크 마멸면 4곳의 단면을 측정하여 마멸면적을 구하고, 마멸부피를 계산하였다. 실험은 각각 3회 실시하였다.

3. 실험결과

3.1 코팅의 미세구조

Fig. 2(a),(b)는 Ni22Cr10Al1.0Y을 SM45C 모재에 본드코팅한 시험편에 Cr_2O_3 와 $Cr_2O_3-5SiO_2-3TiO_2$ 을 용사한 시험편의 단면을 SEM으로 관찰한 것이다. Ni22Cr10Al1.0Y 본드 코팅의 두께는 $20\sim 50\mu m$ 이며 전체 코팅의 두께는 $200\mu m$ 이다.

Table. 3 Microhardness of the specimen

	Surface	Cross-section
	Hardness	Hardness
	(Hv ₅₀₀ , Kg _f /mm ²)	(Hv ₅₀₀ , Kg _f /mm ²)
Cr ₂ O ₃	1050	950
Cr ₂ O ₃ -5SiO ₂ -3TiO ₂	1220	1050

Fig. 3(b), (d)는 용사후 polishing을 하기 전 코팅 표면을 SEM으로 관찰한 것이다. 플라즈마 용사에서 용사되면서 모재표면에 부착된 스플레이트는 용사온도로부터 상온까지의 급냉에서 발생하는 응고수축으로 인한 응력으로 냉각면에 대해 수직으로 성장하며, 코팅내부의 홀패턴(hole's pattern) 결합으로 내부의 기공이 생성·산재되어 있음을 볼 수 있다[2,15].

Table. 3는 코팅층의 표면과 단면에 미소비커스경도계 (Micro Hardness Testing Machine, MVK-H2)으로 측정결과이다.

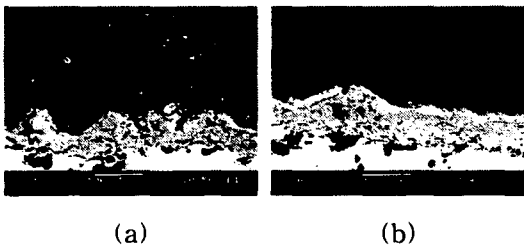


Fig. 2 SEM photograph of cross-section (a) Cr_2O_3 (b) $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-5SiO}_2\text{-3TiO}_2$

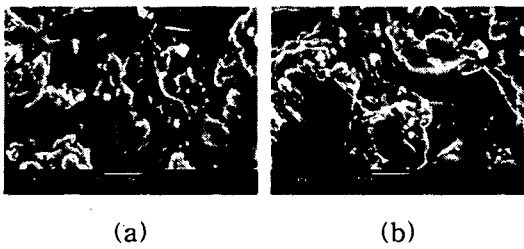
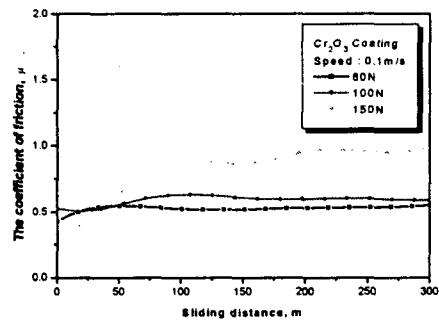


Fig. 3 SEM photograph of plasma sprayed surface (a) Cr_2O_3 (b) $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-5SiO}_2\text{-3TiO}_2$

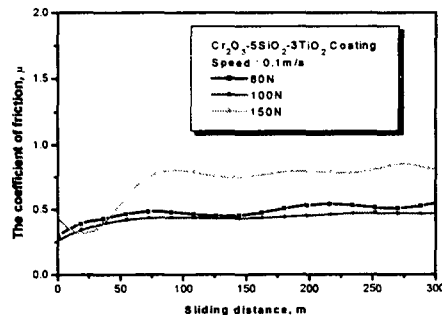
3.1 마찰계수의 변화

Fig. 4는 미끄럼거리의 변화에 대한 각 코팅에서의 마찰계수를 실시간으로 처리하여 평균값으로 나타낸 것이다. 두 재료는 하중이 증가함에 따라 마찰계수의 증가를 보이고 있다. 일정거리 후엔 일정한 마찰계수를 유지하는 경향을 알 수 있다.

Fig. 4(a)는 크롬옥사이드의 미끄럼거리의 변화에 대한 각 하중에서의 마찰계수를 나타낸 것이다. 80N과 100N에서는 전구간에서 안정적인 마찰계수를 보이고 있으나, 150N에서 초기 높은 하중으로 마멸이 많아져서 일시적으로 마멸표면에 마멸입자 양이 많아지면서 볼베어링과 같은 역할로 마찰계수가 0.35정도로 떨어졌다가 곧 마찰계수가 0.8정도로 높아져 일정하게 유지된다. 반면에 80N과 100N에서는 상대적으로 낮은 하중으로 하부시편에서 소성변형과 마멸면에 탄화규소와 크롬옥사이드의 마멸입자가 압착되면서 새로운 층을 형성하면서 안정된 마찰계수를 보이고 있다.



(a)



(b)

Fig. 4 Variation of friction coefficient as a function of sliding distance for (a) Cr_2O_3 coating, (b) $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-5SiO}_2\text{-3TiO}_2$ coating

Fig. 4(b)은 SiO_2 와 TiO_2 가 첨가된 크롬옥사이드의 미끄럼거리의 변화에 대한 각 하중에서의 마찰계수를 나타낸 것이다. 상대적으로 크롬옥사이드 코팅보다 낮은 마찰계수를 보이고 있으나 전체적인 경향은 비슷하게 나타나고 있다.

정상상태에서 마찰계수는 50N에서는 두 재료의 마찰계수가 같이 나타나지만 하중이 증가하면서 SiO_2 와 TiO_2 가 첨가된 재료가 약 0.1정도 더 낮은 마찰계수를 보이고 있다.

3.2 마멸량/비마멸율

Fig. 6와 Fig. 7은 미끄럼 거리의 변화에 따른 각각의 하중에 따른 마멸량 변화를 나타낸 그래프이다. 마멸량은 미끄럼거리가 증가할수록 증가하고 상대적으로 SiO_2 와 TiO_2 가 첨가된 코팅이 더 낮은 마멸량을 보인다. 하중이 증가할수록 마멸량은 증가하지만 하중의 증가폭에 대비하여 그 영향이 줄어들고 있다. 마멸면에 매끈한 표면이 관찰되고 있으며 이 층은 소성변형과 마멸입자에 의해 압착층으로 생성되어 마멸을 줄여 준다.

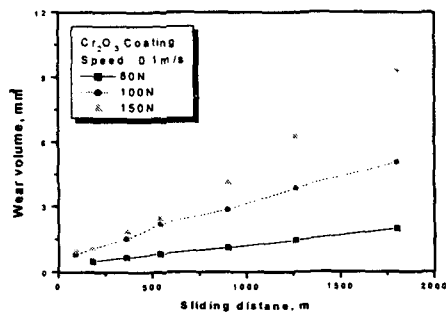


Fig. 6 Variation of wear volume for specimens of Cr_2O_3 coating as function of sliding distance

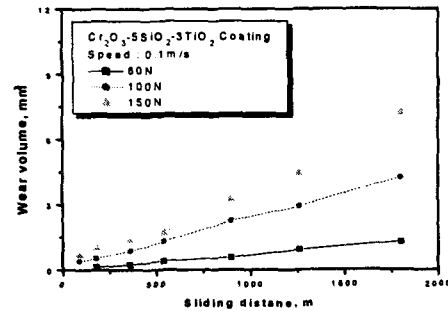


Fig. 7 Variation of wear volume for specimens of $\text{Cr}_2\text{O}_3-5\text{SiO}_2-3\text{TiO}_2$ coating as function of sliding distance

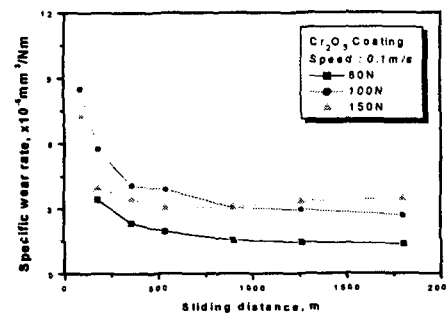


Fig. 8 Variation of specific wear rate for specimens of Cr_2O_3 coating as function of sliding distance

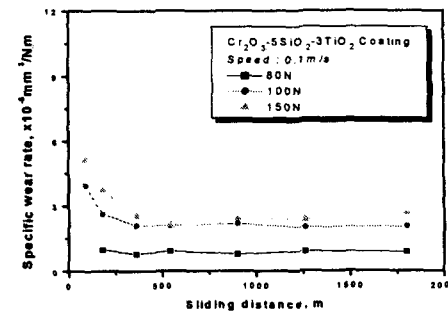


Fig. 9 Variation of specific wear rate for specimens of $\text{Cr}_2\text{O}_3-5\text{SiO}_2-3\text{TiO}_2$ coating as function of sliding distance

Fig. 8과 Fig. 9는 미끄럼 거리의 변화에 따른 각각의 하중에 따른 비마멸율의 변화를 나타낸 그래프이다. 마멸초기에 상대적으로 낮은 진실접촉면에 수직하중과 마멸입자에 의한 보호층 생성되지 않아서 높은 비마멸율을 보이고 있다. 마찰계수가 정상상태가 되는 거리보다 긴 300-500m에서 정상상태의 비마멸율을 보이고 있다.

3.3 마멸면의 미시적 관찰

마멸면의 미시적인 현상을 관찰하여 마멸에 미치는 영향을 밝히기 위하여 SEM/EDS를 이용하였다. 각 사진에서 화살표는 미끄럼방향을 나타낸다.

Fig. 10은 Cr₂O₃코팅의 마멸면의 SEM사진이다. Fig. 10(a) 높은 접촉압력에 의해 모재의 탄성 및 소성변형이 발생하게 되고 소성변형으로 매끈한 면이 형성된 모습을 보여주고 있다. Fig. 10(b) 코팅내부에 산재되어 있던 내부 기공에 의해 마멸입자가 떨어져 나간 모습이다. 상대적으로 기공율이 높은 Cr₂O₃코팅 마멸면에서 주로 발견된다.

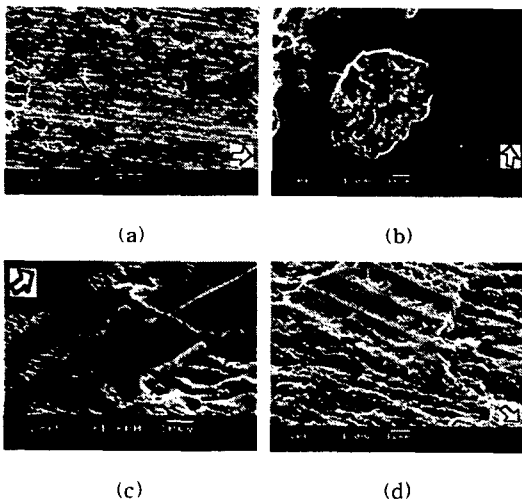


Fig. 10 SEM photograph of worn surface for Cr₂O₃ coating

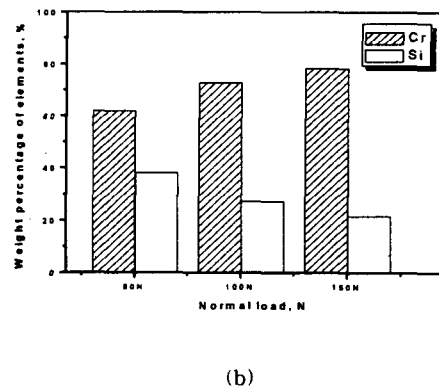
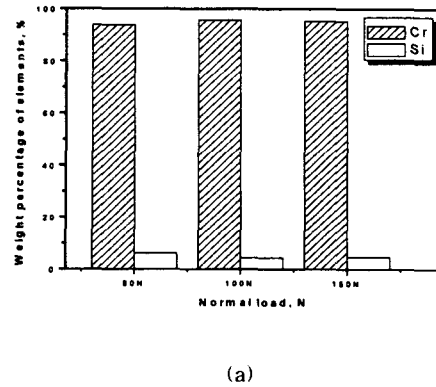


Fig. 11 The weight percent of elements of worn surface for Cr₂O₃ coating (a) after wear (b) before wear

Fig. 10(c) 소성변형의 축적으로 압착층과 소성변형층에서 취성과괴되어 균열이 성장하여 마멸입자가 생성된 그림이다. Fig. 10(d)는 마멸입자가 표면에서 탈락되면서 하중을 지지하는 면적이 줄어들면서 표면에심한 긁힌 자국(scratch)을 남기며 응력이 집중되어 더욱 마멸이 심화된다. 이 과정에서 마멸입자가 탈락된 부분에 다시 마멸입자가 쌓이고 압착이 일어나면서(Fig. 11) 새로운 표면층을 형성하게 된다.

Fig. 12은 Cr₂O₃-5SiO₂-3TiO₂코팅의 마멸면이다. Fig. 12(a)는 마멸면에 마멸입자 표면에 응착되어 새로운 층을 생성하는 모습을 보여주고 있다. Fig. 12(b)는 표면에

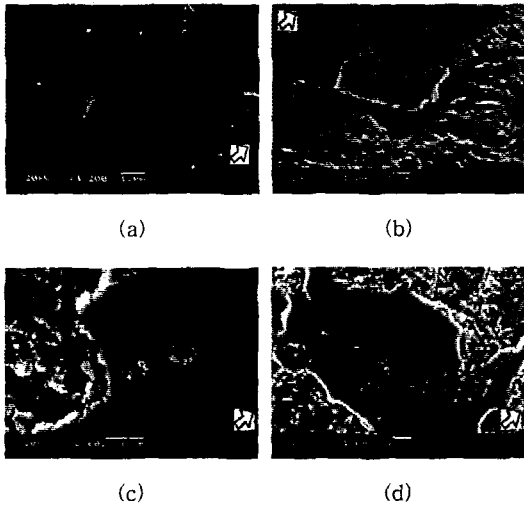


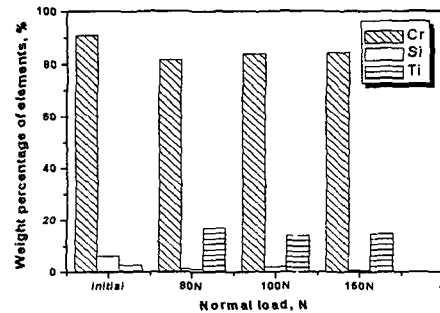
Fig. 13 SEM photograph of worn surface for $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-5SiO}_2\text{-3TiO}_2$ coating

수직하중에 의해 탄소성 변형을 하면서 코팅내부에 굽힘응력이 발생하여 소성변형의 축적으로 취성과파괴로 생성된 균열이 표면과 내부로 성장하여 균열이 스플레이트 결합면을 타고 진전하여 하여 마멸입자를 생성하고 있다. Fig. 12(c)와 fig. 12(d)는 생성된 표면층에 마멸입자가 소성변형을 하면서 층이 성장하는 모습을 보여주고 있다. 탈락된 마멸입자는 일부는 마멸트랙 밖으로 배출이 되고 나머지는 마멸트랙에 남아 있으며, 생성된 마멸입자는 마멸트랙을 따라 움직이다가 마멸면에 응착되면서 수 μm 의 새로운 층을 형성하게 된다(Fig. 13). 이 층은 볼의 마멸입자와 디스크의 마멸입자가 섞여 생성되고 마멸과 마찰에 영향을 미친다.

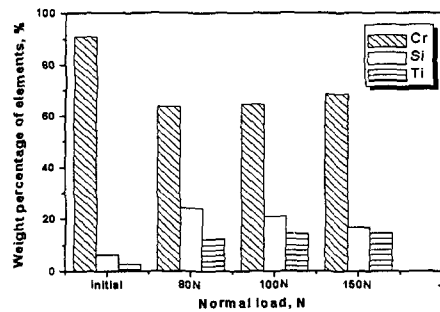
4. 고찰

Cr_2O_3 코팅에 SiO_2 와 TiO_2 가 첨가된 코팅과 첨가되지 않은 코팅을 미끄럼 마찰·마찰실험을 수행하여 하중에 따라 마멸거동의 변화를 관찰하였다.

상대운동을 하는 두 물체에서 일어나는 트라이볼로지적 현상들은 재료의 거칠기, 경도, 연성, 산화층, 반응층, 응착이착등에 영향을 많이 받는다[1-2]. 마멸과정에서 마멸표면에 형성되는 모재와 다른 이질층은 미끄럼 접촉에서 정상상태 마찰계수와 마멸기구에 밀접한 관계를 가지고 있으며, 중요한 요인이다. 이 층은 공기와 수분과 같은 주위 환경과 모재 표면의 트라이볼로지적 작용으로 많은 영향을 많이 받는다[5,12]. 이 층은 재료의 이착(Transfer)과 마멸입자의 압착(Compact)에 의해 생성된 매끈한 면(Smooth film)으로 나타난다[6,7]. 마멸량과 비마멸율에서는 수직하중이 증가하면서



(a)



(b)

Fig. 13 The weight percent of elements of worn surface for $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-5SiO}_2\text{-3TiO}_2$ coating (a) after wear (b) before wear

마멸량이 증가하며, 비마멸율도 증가를 한다. 표면층이 형성되면서 정상상태의 비마멸율과 마찰계수의 거동을 나타내며, 초기의 마멸은 계면의 고하중, 고속에서는 돌기들간의 수평충격효과(Tangential Impact Effect)로 돌기 내부에 높은 응력이 발생하여 파괴가 일어나며, 저하중, 저속에서는 파괴는 일어나지 않고 소성유동(Plastic flow)이 발생하며[3,4], 정상상태의 마멸과 마찰이 일어나면서 마멸과정은 마멸입자가 압착되어 층을 형성하게 된다. 수직하중에 의한 소성 변형의 축척과 내부 굽힘응력으로 인하여 Fig. 10(c), Fig. 10(b)에서 보이듯 표면에 균열이 발생하게 된다. 이 표면 균열은 표면과 층내부로 진전하여 마멸입자를 생성하게 된다. 마멸입자가 떨어져 나간만큼 남아 있는 층에 응력이 증가되며, 이를 중심으로 표면층의 마멸이 점진적으로 진행하게 된다. 마멸입자가 떨어져 나간 곳은 상대적으로 층에 비해 적은 하중을 받으며 층의 압력이 증가하면서 마멸이 진행되면서 생성된 마멸입자가 Fig. 11에서 Fig. 12에 보여지듯이 다시 마멸입자의 응착이 일어나고 압착되어 새로운 보호층을 다시 생성하게 된다. 이렇게 표면의 보호층의 생성과 파괴의 과정을 반복하면서 마멸이 진행된다. 하중이 증가하면서 이 표면에 형성된 층의 영향으로 마멸에서 그 영향이 점점 적어지고 있다. 수직하중이 80N일 때보다 높지만 100N, 150N에서는 비슷한 비마멸율을 보이고 있다.

5. 결론

논문에서는 일반적으로 널리 쓰이는 크롬옥사이드(Cr_2O_3)와 크롬옥사이드에 용사층의 미세 구조를 향상시키기 위해 실리카(SiO_2)와 티타니아(TiO_2)를 첨가한 코팅을 탄화규

소를 상부시편으로 하여 볼온디스크 타입(ball-on-disk type)의 미끄럼 마찰·마멸실험을 수행하였다. SEM와 EDS를 이용하여 마멸면을 살펴보았다.

(1) 80N에서는 두 코팅이 비슷한 값을 보이지만 하중이 증가하면서 SiO_2 와 TiO_2 를 첨가한 코팅이 약 0.1정도 낮은 마찰계수를 보인다.

(2) 미끄럼거리가 증가함에 따라 비마멸율은 감소하였고, 하중이 증가함에 따라 마멸량은 증가하였다. 하중이 증가하면서 SiO_2 와 TiO_2 를 첨가한 코팅이 우수한 내마멸성을 보이고 있으며, 150N에서 1.5배의 비마멸율이 증가하였다.

(3) 주요마멸기구는 소성변형과 취성파괴이다. 생성된 마멸입자는 소성변형을 하면서 표면에 압착되어 새로운 층을 형성하게 되고 소성변형의 축척으로 취성파괴하여 마멸이 진행된다.

참고문헌

- 1) K. Holmberg, A. Matthews, "Coatings Tribology : Properties, Techniques and Applications in Surface Engineering", Elsevier, 1994.
- 2) Peter J. Blau "Friction and Wear Transitions of Materials : Break-in, Run-in, Wear-in", Noyes Publications, 1989.
- 3) J. E. Fernandez, R. Rodriguez, Y. Wang, R. Vijande, A. Rincon, "Sliding wear of a plasma-sprayed Al_2O_3 coating", Wear, Vol. 181-183, pp.417-425, 1995.
- 4) J. E. Fernandes, Yinglong, R. Tucho, M. A. Martin-luengo, R. Gancedo, A. Rincon, "Friction and wear behaviour of plasma-sprayed Cr_2O_3 coatings against steel in a wide range of sliding velocities and normal loads", Tribology International, Vol. 29, pp.333-343, 1996.
- 5) Y. Wang, Y. Jin, S. Wen, "The analysis

of the friction and wear mechanisms of plasma-sprayed ceramic coating at 450°C", *Wear*, Vol. 128, pp.256-276, 1988.

6) H.S. Ahn, O.K. Kwon, "Tribological behaviour of plasma-sprayed chromium oxide coating", *Wear*, Vol. 225-229, pp.814-824, 1999.

7) H.S. Ahn, I.W. Iyo, D.S. Lim, "Influence of molybdenum composition in chromium oxide-based coating on their tribological behavior", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 133-134, pp.351-361, 2000.

8) S. Amada, H. Yamada, "Introduction of fractal dimension to adhesive strength evaluation of plasma-sprayed coating", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 78, pp.50-55, 1996.

9) Vijande-Diaz R., Belzunce J., Fernandez E., Rincon A., Perez M. C., "Wear and microstructure in fine ceramic coatings", *Wear*, Vol. 148, pp.331-233, 1991.

10) Vijande-Diaz R., Belzunce J., Fernandez E., Rincon A., Perez M. C., "Wear and microstructure in fine ceramics", *Wear*, Vol. 148, pp.221-233, 1991.

11) E. Lugscheider, "Plasma Spraying for Wear Applications", *Proceedings of the National Thermal Spray Conference*, pp.14-17, 1987.

12) Jianjun Wei, Qunji Xue, "The friction and wear properties of Cr₂O₃ coating with aqueous lubrication", *WEear*, Vol. 199, pp.157-159, 1996.

13) E. Marc, H.J. Kim, Y.G. Kweon, "Micro-structural Evaluation of the Al₂O₃ and Cr₂O₃ based coating produced by the APS process", *RIST 研究論文* 第13卷 第4號, 1999.