

Cr₂O₃와 ZrO₂ 플라즈마 용사한 코팅재의 마모 특성

김성익[†] · 김희곤* · 이봉길* · 김귀식

제주대학교 기계공학과, *한국폴리텍대학 자동차과

Wear Characteristics of Cr₂O₃ and ZrO₂ Coating Materials by Plasma Spray

Sung-Ig Kim[†], Hee-Gon Kim*, Bong-Gil Lee* and Gui-Shik Kim

Department of Mechanical Engineering Cheju National University

*Korea Politech University, Cheju Campus of Korea Politechnic V

Abstract – This paper reports the wear characteristics of two types of coating materials, which are Cr₂O₃ and ZrO₂, by coated plasma thermal spray method. The wear test was carried out under air, grease, and bearing fluid conditions. The wear testing machine of a pin-on disk type were used to measure friction forces, friction coefficients and the weight losses of the coating specimens on the various sliding velocity and loading condition. The wear surface of specimens were observed by scanning electron microscope (SEM) photographs.

Key words – plasma, lubrication, abrasive, adhesion, splats, mild, severe, coating, Cr₂O₃, ZrO₂, friction, wear, ceramic, SEM.

1. 서 론

상대운동을 하는 두 물체사이의 마찰, 마멸현상은 재료의 성질, 표면상태, 접촉조건, 윤활상태 등 다양한 인자들이 관여하는 복잡한 메커니즘이다. 동적인 기계요소간의 접촉에서 필연적으로 발생하는 마찰현상은 에너지 손실을 유발하여 효율을 떨어뜨리고, 마멸은 기계요소의 수명 및 성능에 중요한 영향을 미친다. 마찰과 마멸이 과도하면 기계요소의 접촉면에 스커핑(scuffing) 등과 같은 표면 손상이 발생하여 기계요소의 수명이 줄어든다. 따라서 기계의 신뢰성과 수명, 그리고 성능 등을 높이기 위해서는 마찰·마멸에 대한 연구가 필연적이다.

표면의 기하학적인 특성 중 실제 표면 거칠기의 미시적 차원의 표면의 높낮이가 결합되어 실제 표면의 거칠기가 표현된다. Staph 등[1]은 스커핑 표면이 거친표면보다 우수한 스커핑 하중을 가지는 것은 스커핑 거동에 있어서의 표면 거칠기의 영향을 고찰하여 매끈한 면을 보였다. Barwell 등[2]은 mineral oil을 이용한 미

끄럼 운동에서 표면 거칠기가 감소함에 따라 스커핑 하중은 증가한다고 보고했다. 세라믹 코팅피막은 단열, 내열, 내고온 부식성의 향상을 위하여 항공기용 제트엔진의 연소실 내벽, 밸브류, 로켓의 연료분사노즐 터빈 블레이드 등에 ZrO₂계 피막을 사용하고 있으며, 내부식성이 요구되는 펌프류, 제트엔진의 컴프레서 등에 WC, TiC, Cr₂O₃계 피막이 적용되고 있다.

본 연구에서는 플라즈마 용사법에 의해 기계구조용 탄소강의 표면에 Cr₂O₃와 ZrO₂로 코팅된 시편을 사용하여 공기중, 그리이스 윤활환경 및 베어링유 윤활환경에서의 마모 특성을 조사하고자 한다. 실험은 부하 하중 및 미끄럼속도를 달리하여 이에 따른 마찰력과 마찰계수, 마모량을 조사·검토하였다. 그리고 마모 실험이 끝난 후 SEM 사진을 통해 마모 특성을 검토 하였다.

2. 재료 및 방법

2-1. 시험편

Fig. 1(a)와 (b)는 Cr₂O₃과 ZrO₂의 세라믹 분말 형상을 보여주고 있다. Cr₂O₃는 그림에서 보이는 바와 같이

[†]주저자 · 책임저자 : ksi6043@hanmail.net

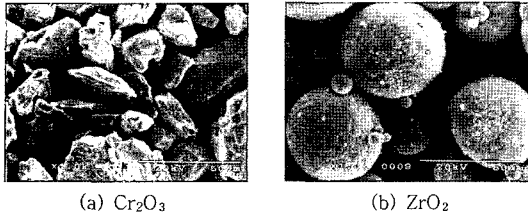


Fig. 1. SEM photographs of Cr_2O_3 and ZrO_2 powders.

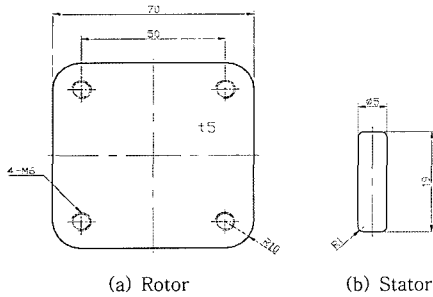


Fig. 2. Shapes and dimensions of test specimens. (unit : mm)

침상형의 구조로 되어 있으며, ZrO_2 는 완전한 구상형의 분말임을 알 수 있다. 플라즈마 코팅기로 Fig. 2(a)에 나타난 회전 시험편의 윗면에 탑 코팅을 하여 실험하였다. Fig. 2(a)와 (b)는 시험편은 회전시험편과 고정 시험편의 형상과 치수를 나타냈다. 회전시험편의 기재는 S45C를 사용했고, 고정시험편은 $\phi 5$ mm의 핀(pin)으로서 SUJ II를 사용하였다. 그것의 화학적 성분 및 기계적 성질을 Table 1에 나타내었다. 모재 표면에 블라스팅(blasting)을 실시함으로써 코팅과 모재와의 기계적인 결합력을 향상시켰고, 그 조건은 Table 2에 나타내었다. 모재와 코팅층간에 열팽창계수 차이에 의해 균열 등을 방지하기 위하여 시험편에 Ni-4.5 wt%Al 합금분말을 사용하여 본드 코팅을 실시하였다. 또 플라즈마 용사 조건은 Table 3에 나타내었다. 본드 코팅의 두께는 $50 \mu\text{m}$ ~ $100 \mu\text{m}$, 상부 탑 코팅은 $150 \mu\text{m}$ ~ $200 \mu\text{m}$ 로 하였으며, 탑 코팅 분말의 조건과 특성을 Table 4에 나타내었다. 용사되어진 코팅 층의 표면은 매우 거칠어 마멸 실험에 민감한 영향을 미치므로 표면조도의 차이에

Table 1. The chemical composition and mechanical properties of test specimens.

(a) Chemical composition (wt %)								
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu
Rotor (S45C)	0.464~0.470	0.246~0.251	0.770~0.774	0.0154~0.0162	0.00693~0.00835	0.02	0.13	0.01
Stator (SUJ II)	0.95~1.10	0.15~0.35	0.5	0.025	0.25	0.25	1.30~1.60	0.25
(b) Mechanical properties.								
	Yield strength (MPa)	Stress (MPa)	Strain (%)	Poisson's ratio	Specific gravity (g/cm^3)	Young' modulu (GPa)		
Rotor (S45C)	390	670	25	-	-	-		
Stator (SUJ ii)	-	1568~1960	-	0.3	7.77	0.8		

Table 2. Blasting conditions.

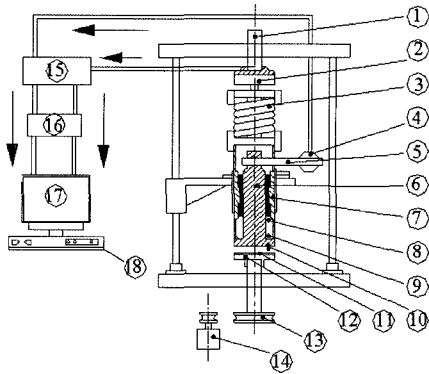
Material	Powder compositionr size (μm)	Air pressure (kg/cm^2)	Distance (mm)
White alumina	15~53	5.5	50~100

Table 3. Plasma spraying conditions

Condition	Type 9MP powder feed Unit		Plasma gas (kg/cm^2)		DC (A)	DC (V)	Spray distance (mm)
	Flow rate (m^2/h)	Feed rate (g/min)	Ar	H_2			
Cr ₂ O ₃	0.38	38	5.62	1.05	500	65~70	65
ZrO ₂	0.38	38	5.62	1.05	500	65~70	75
Ni-4.5 wt%Al	0.38	68	5.62	1.05	500	65~70	100~175

Table 4. Top coating powders used.

Powder	Condition	Typical composition	Grain size (μm)	Trade name
Cr ₂ O ₃		98%Cr ₂ O ₃ 2%TiO ₂	-125+11 μm	Metco 106
ZrO ₂		76%ZrO ₂ 24%MgO	-90+11 μm	Metco 210NS-1



- 1. Pressure handle
- 2. Load cell
- 3. Coil spring
- 4. Load cell
- 5. Torque arm
- 6. Torque arm holder
- 7. Pressure rod
- 8. Pressure ring
- 9. Thrust bearing
- 10. Stator
- 11. Rotor
- 12. Turning table
- 13. Belt pulley
- 14. Motor
- 15. Strain amplifier
- 16. A/D converter
- 17. Monitor
- 18. Computer

Fig. 3. Block diagram of friction testing machine.

서 오는 마멸량의 차이를 없애기 위해 정제 연마하여 코팅재의 표면조도를 약 1 μm Ra 이하로 가공하였다.

2-2. 시험장치

본 실험에 사용된 시험기는 Fig. 3에 나타난 Pin on disk형 마모시험기이다. 시험기의 자체의 고유 진동을 줄이기 위하여 중량이 무거운 재질을 선택하였고 스프링 부분은 스프링 상수가 서로 다른 이중 스프링을 사용하였다. 로드셀에서 검출한 스트레인을 증폭해 주는 스트레인 증폭기는 Kyowa 사 제품인 DPM-612 형으로 ±5V의 용량을 가진다. 용사조건과 윤활유의 물리적 성질을 Table 5와 Table 6에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 하중 및 속도에 따른 마찰력의 변화

3-1-1. 공기에서의 마찰력 비교

Fig. 4에서는 두 종류의 코팅재를 비교하기 위하여 부하 하중(Normal load)이 200 N일 때 Cr₂O₃ 코팅시험편과 ZrO₂ 코팅시험편의 마찰력의 변화만을 비교하

Table 5. Experimental conditons

Normal load (N)	In air	In lubrication
	100, 200	300, 500
Sliding speed (m/s)	0.1, 0.2	
Sliding times (hours)	2	
Test temperature (°C)	25	
Environment	Air, lubrication	

Table 6. Physical qualities of lubrication oils

Kinds of lubrication	Grease	Bearing fluids
Density (@15/4°C)	-	0.872
Kinematic viscosity @40°C	-	150
viscosity @100°C	-	15.37
Viscosity index	-	104
Flash point (Open type °C)	-	276
Pour point (°C)	-	-12.5
Thickener	Li-Ca	-
Worked Penetration (@25°C)	265~295	-
Dropping point (°C)	180	-
Used temperatures (°C)	-21/+130	-

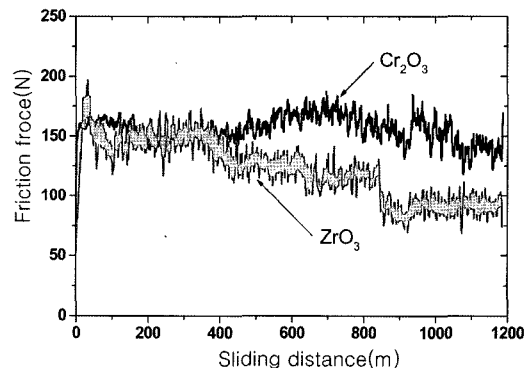


Fig. 4. The friction force of Cr₂O₃ and ZrO₂ coating specimens (V=0.1 m/s, in air, NL=200 N).

여 나타냈다. Cr₂O₃ 코팅시험편인 경우 마찰력은 200 m까지는 약 165 N 정도로 높게 상승했다가 약 140 N으로 하강하였다. 마찰력이 미끄럼 거리 700 m 정도로 약 180 N까지 상승하였다. 그 이후에도 마찰력은 불안정한 하계 상승과 하강을 계속 하는 것을 볼 때 공기 중에서의 불안정한 마찰과 마멸이 일어나고 있음을 알려주고 있다[3].

ZrO₂ 코팅시험편인 경우 마찰력은 초기에 거의 190 N 정도로 상승 하였다가 급격히 감소하여 약 120 N으로 되어 있는 시점이 약 100 m 지점이다. 그 후에 400 m까지 약간 상승할 때의 마찰력은 150 N이 되었다. 다시 미끄럼 거리가 400 m에서 850 m 될 때까지 120 N에서 약 110 N으로 하강을 하였고, 850 m에서 100 m까지는 약 90 N으로 낮은 마찰력을 보여주고 있다. ZrO₂ 코팅시험편인 경우는 초기에 마찰력이 급격하게 높게 나타나는 현상을 확인할 수 있는데 이런 현상은 ZrO₂ 코팅시험편인 경우 공기 중에서의 마찰 마모가 불안한 정도가 심하고, 초기 마모가 매우 심하게 발생했음을 예측할 수 있다.

Fig. 5은 작용하중을 좀 줄인 100 N에서 마찰 마모 실험을 한 것을 나타냈다. Cr₂O₃의 마찰 실험 초기에 마찰력이 약 120 N까지 상승하였고 점점 그 마찰력 70 N으로 하강할 때 즉, 약 500 m까지 이 현상이 계속 되었다. 그 다음 부터는 끝까지 약 90 N으로 정상 마모가 이루어졌다. ZrO₂는 Cr₂O₃의 마찰력의 더 높아져서 170 N까지 상승하였다가 110 N으로 하강 하는 데는 약 200 m까지 걸렸다. 그 후 130 N 정도로 끝 이 날 때까지 상승하여 정상적인 마찰 마모가 이루어졌다. 이것은 작용 하중을 줄였기 때문에 정상적인 마모상태를 보여준 것으로 사료된다.

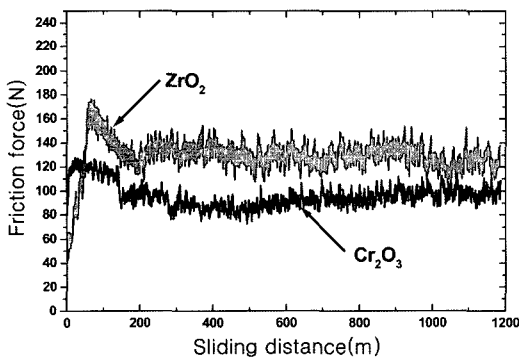


Fig. 5. The friction force of Cr₂O₃ and ZrO₂ coating specimens (V=0.1 m/s, in air, NL=100 N).

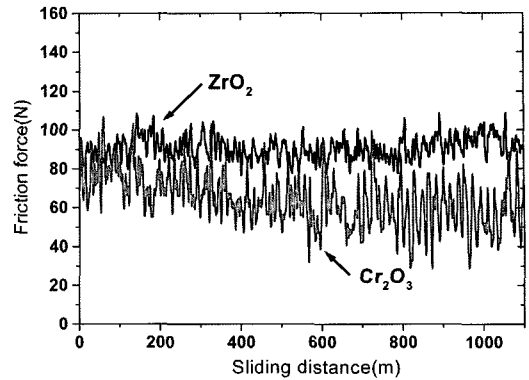


Fig. 6. The friction force of Cr₂O₃ and ZrO₂ coating specimens (V=0.1 m/s, in grease, NL=500 N).

3-1-2. 그리이스 윤활환경에서의 마찰력의 변화

Fig. 6은 하중을 500 N으로 하였고 V=0.1 m/s일 때 그래프인데, Cr₂O₃ 코팅시험편인 경우 마찰력이 실험 초기에는 60 N에서 100 N 정도로 높게 나타나다 400 m를 지난 지점부터는 약 60 N 정도로 낮게 나타났으며, ZrO₂ 코팅시험편인 경우 마찰력은 약 90 N 정도로 Cr₂O₃ 코팅시험편인 경우 보다 높게 나타났다. 공기 중에서의 실험과 비교했을 때 부하 하중이 증가 하였는데도 마찰력이 낮게 나타나는 이유는 마찰, 마모 실험을 할 때 Rotor와 Stator 사이에 제 3의 물질인 그리이스가 윤활 역할을 하여 마찰면에 발생하는 열을 흡수하고 또한 회전 시험편과 고정 시험편이 직접적으로 접촉되는 것을 막아주는 원인에서 발생하는 현상이라 생각할 수 있다. 또 그리이스의 색상이 변하는 것을 보면, 그리이스 윤활환경에서도 또한 아주 경미하기는 하나 마모가 일어나고 있음을 예측할 수 있고, 이는 마모입자들이 그리이스의 응집력으로 인해

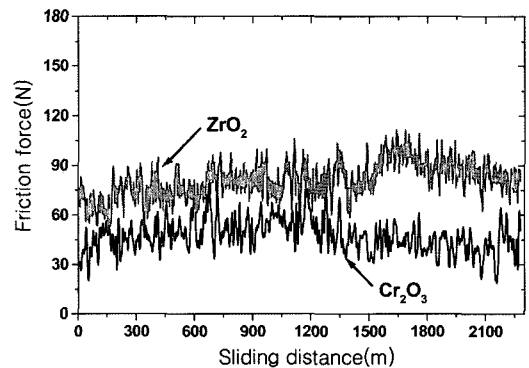


Fig. 7. The friction force of Cr₂O₃ and ZrO₂ coating specimens (V=0.2 m/s, in grease, NL=500 N).

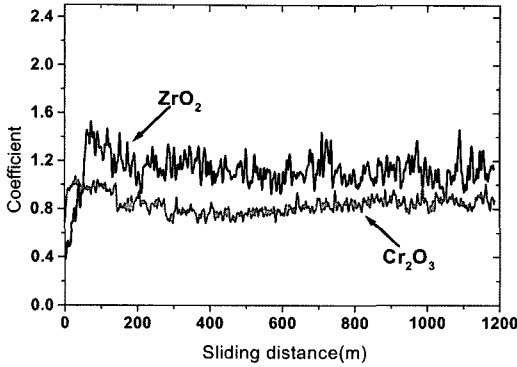


Fig. 8. Friction coefficient of Cr₂O₃ and ZrO₂ coating specimens (V=0.1 m/s, load=100 N, in air).

분산되지 못하고 그리이스에 섞여 있음으로 인해 생기는 원인이라 볼 수 있다.

Fig. 7은 하중을 500 N이고 미끄럼속도를 0.2 m/s로 하여 실험 했을 때 그래프인데, Cr₂O₃ 코팅시험편인 경우 마찰력은 약 40 N에서 50 N정도의 진폭으로 변화 하면서 마찰력이 나타났으며, ZrO₂ 코팅시험편인 경우 마찰력은 약 1700 m까지는 110 N정도로 나타나다 다시 상승하고 하강하는 복잡한 마찰력의 변화를 보이고 있는데, Cr₂O₃ 코팅시험편인 경우보다 마찰력이 높게 나타나고 있음을 알 수 있다.

3-2. 하중 및 속도에 따른 마찰계수의 변화

3-2-1. 공기 중 건조 마찰시 마찰계수의 변화

Fig. 8은 하중 100 N, V=0.1 m/s로 마찰 마모 실험을 한 그래프이다. ZrO₂ 코팅시험편인 경우 마찰계수는 Chrl에 0.4에서 약 1.4까지 상승하였다가 미끄럼 거리 200 m 될 때까지 0.8로 하강하였다. Cr₂O₃ 코팅 시험편은 실험 초기 150 m 지점까지는 1.1까지 급상승하다 0.8로 하강하였다. 이렇게 마찰계수가 갑자기 상승했다가 하강하는 것을 볼 수 있는데 이처럼 복잡한 마모 형태나 마찰거동을 나타내는 것은 접촉면에 마모 분말이 건조 상태에서의 미치는 영향이 고찰되었고, 이런 개재 물은 두 물체 간에 접촉된 마모분말에 의한 것임을 알 수 있었다[4]. 이는 실험이 진행되는 과정에서 마모입자들이 설 새 없이 생성, 응집, 탈락되는 현상에서 발생하는 현상이라 사료된다.

3-2-2. 윤활 중에서의 마찰계수의 비교

Fig. 9은 Cr₂O₃ 코팅시험편을 그리이스와 베어링유의 윤활 환경에서 실험한 내용이다. 부하하중을 500 N으로 하고 미끄럼 속도 V=0.2 m/s로 하였다. 그리이스

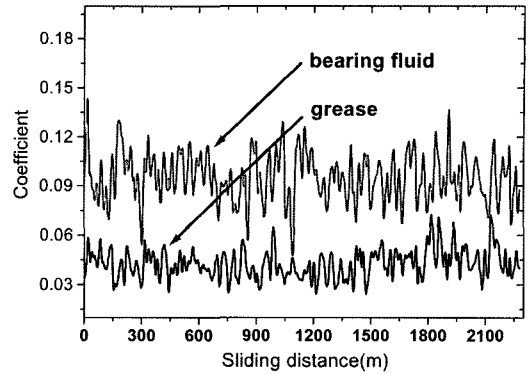


Fig. 9. Friction coefficient vs. sliding distance (load 500 N, Velocity 0.2 m/s, Cr₂O₃).

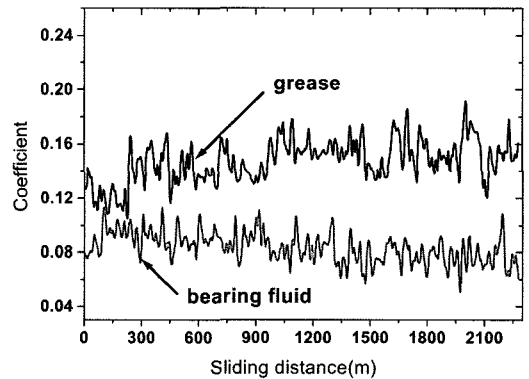


Fig. 10. Friction coefficient vs. sliding distance (load 500 N, Velocity 0.2 m/s, ZrO₂).

윤활환경인 경우 마찰계수가 0.035정도로 나타나고 있으며, 베어링유 윤활환경에서는 0.09정도로, Cr₂O₃ 코팅시험편인 경우에는 베어링유 윤활환경에서 보다는 그리이스 윤활환경에서 우수한 마찰, 마모 특성을 보이고 있음을 확인할 수 있었다.

Fig. 10은 ZrO₂ 코팅시험편을 그리이스 윤활 환경과 베어링유 윤활 환경에서 실험한 내용이다. 하중 500 N에 미끄럼속도를 0.2 m/s로 실험하여 그리이스 윤활 환경에서와 베어링유 윤활환경에서의 마찰계수의 변화를 비교한 것이다. 그리이스 윤활환경에서는 마찰계수가 0.12에서 0.18정도로 나타나고 있으며, 베어링유 윤활 환경에서는 0.06에서 0.15정도의 값을 나타내고 있었다. ZrO₂ 코팅시험편인 경우는 Cr₂O₃ 코팅시험편인 경우와 반대로 그리이스 윤활환경에서 보다는 베어링유 윤활환경에서 우수한 마찰, 마모 특성을 가지고 있음을 예측할 수 있다.

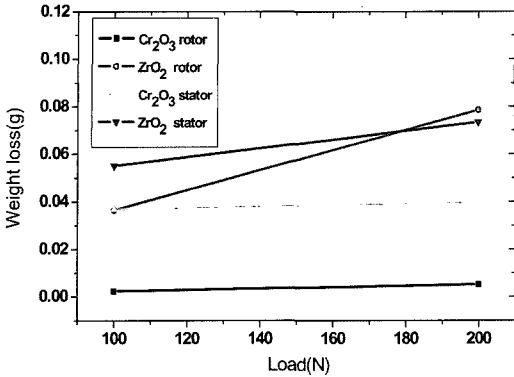


Fig. 11. Relation of weight loss and load (V=0.1 m/s, in air).

3-3. 마모량의 변화

Fig. 11은 공기 중에서 미끄럼속도를 0.1 m/s로 했을 때 부하하중을 100 N과 200 N으로 한 그래프 내용이다. ZrO₂ 코팅시험편은 하중 100 N일 때 0.036 g에서 하중이 200 N으로 증가했을 때 마모량은 0.078 g로 마모량이 많이 증가하였다. 그러나 Cr₂O₃ 코팅시험편은 하중이 100 N일 때는 0.002 g에서 하중이 200 N으로 증가 했을 때 마모량은 0.005 g으로 많은 마모량의 차이가 없었다. 이는 건조 마찰시 Cr₂O₃ 코팅시험편이 ZrO₂ 코팅시험편보다 우수한 내마모 특성을 가지고 있다고 예측이 가능하다.

Fig. 12는 미끄럼속도를 0.1 m/s로 하고 하중을 300 N, 500 N, 700 N으로 했을 때 회전 시험편과 고정 시험편의 마모량을 비교한 그래프이다. 그래프에서 Cr₂O₃ 회전시험편의 경우에, 마모량이 300 N일 때는 0.001 g, 500 N일 때 0.005 g, 700 N일 때는 0.007 g로 점점 높은 하중을 가했는데도 마모량의 증가가 적었다. 하지만

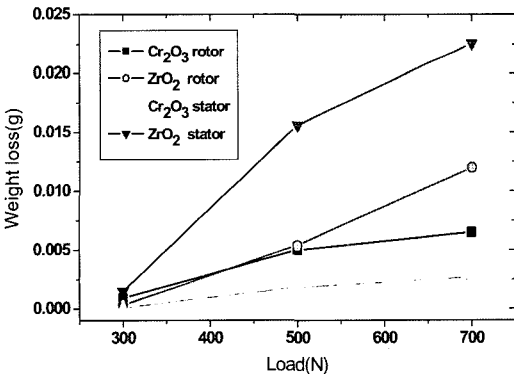


Fig. 12. Relation of weight loss and load (V=0.1 m/s, in bearing fluid).

ZrO₂ 코팅시험편인 경우 300 N일 때는 0.0003 g, 500 N일 때는 0.005 g, 700 N일 때는 0.012 g으로 하중이 증가할수록 많은 마모량의 증가를 확인 할 수 있었다. 이는 베어링 윤활환경에서 Cr₂O₃ 코팅시험편이 ZrO₂ 코팅시험편보다 뛰어난 마찰마모 특성을 가지고 있다고 사료된다. 그리고 고정시험편의 마모량 역시 상대 재료가 Cr₂O₃ 코팅시험편인 경우에는 많은 마모량의 증가가 없는데, 반해 ZrO₂ 코팅시험편인 경우에 하중 증가에 따라 마모량이 많이 증가했음을 알 수 있다.

3-4. 마멸면의 미시적 관찰

Fig. 13(a)에서 Cr₂O₃ 코팅시험편의 사진이다. 마멸면을 보면 공기 중에서 회전시험편과 고정시험편이 상대적으로 마찰열에 의해 응착(adhesive)이 되는 마모를 보여주고 있다. ZrO₂인 그림(b)에서 Cr₂O₃ 코팅시험편과 비교했을 때 스플레이트가 더 많이 탈락되었으며, 코팅 층이 심하게 패이며 마모가 일어남을 알 수 있다. 이는 ZrO₂ 코팅의 마멸 특성인 취성파괴의 특성을 잘 나타내는 것을 볼 수 있다[5].

Fig. 14(a)에서 미끄럼 속도가 0.2 m/s인 마모상태이다. 빠른 미끄럼 속도에 의해 발생하는 마찰열로 인해 심하게 응착되면서 마멸되었음을 알 수 있다. 이는 모재가 탄성 및 소성변형이 발생하면서 소성변형에 의해 매끈한 면이 형성된 모습을 보여주고 있다[6]. 이런 층은 소성변형과 마멸입자에 의해 압착층으로 생성되어

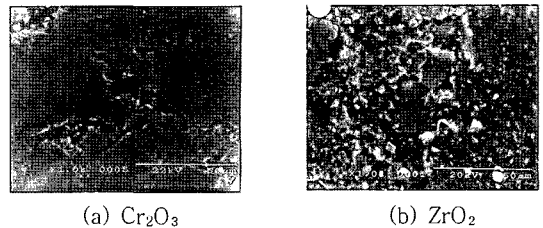


Fig. 13. SEM micrograph of the worn surface (load=100 N, V=0.1 m/s, in air).

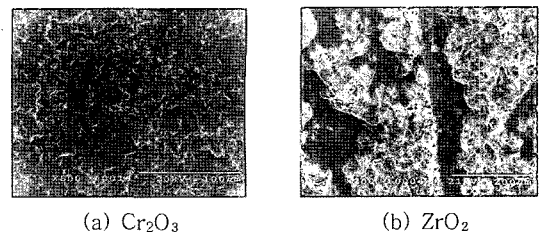


Fig. 14. SEM micrograph of the worn surface (load=100 N, V=0.2 m/s, in air).

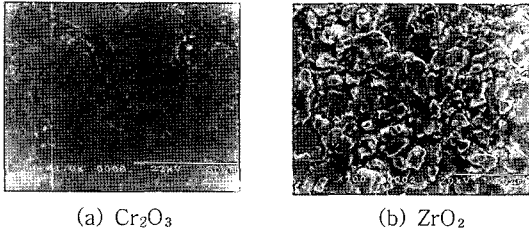


Fig. 15. SEM micrograph of the worn surface (load=300 N, V=0.1 m/s, in grease).

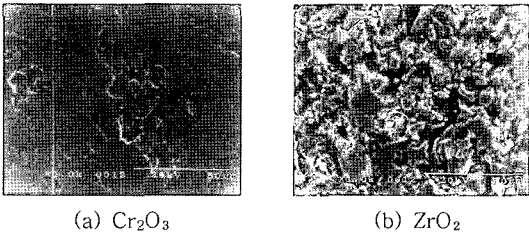


Fig. 16. SEM micrograph of the worn surface (load=300 N, V=0.1 m/s, in bearing fluid).

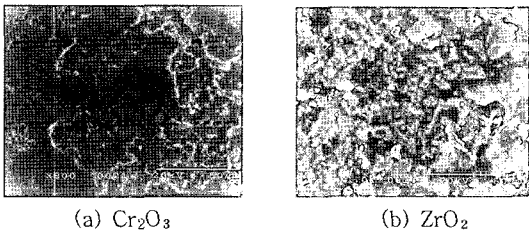


Fig. 17. SEM micrograph of the worn surface (load=300 N, V=0.2 m/s, in bearing fluid).

마멸을 줄여 주는 원인으로 작용할 것이라고 사료된다. 그림(b)를 보면 마멸면의 중심부에 심한 연삭(abrasive) 마멸이 진행되었음을 알 수가 있다.

Fig. 15(a)는 전체적으로 마일드(mild)한 응착마멸이 발생함을 알 수 있으며, 일부분에서는 스플레이트들이 미소한 범위이지만 탈락된 것을 확인할 수 있다. (b)의 그림에서 스플레이트 사이사이에 기공이 산재해 있음을 알 수 있고, 스플레이트들이 하중에 의해 눌러져 응착되면서 마멸됨을 알 수 있다.

Fig. 16과 Fig. 17의 사진에서 두 시험편 모두 미끄럼속도가 증가 할수록 응착 마멸 면이 넓게 분포되어 지고 있음을 알 수 있다. 그리고 스플레이트들이 탈락 되는 부분이 넓게 분포됨을 알 수가 있다. 이는 미끄럼속도의 증가로 인해 스플레이트들이 밀리다가 결국 탈락이 되는 소성변형에 의한 것이라고 사료된다.

4. 결 론

플라즈마 용사에 의한 내마모성 세라믹 Cr₂O₃와 ZrO₂ 코팅재의 마모특성을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 건조 마찰시 하중 및 속도 증가에 따른 마찰력 및 마찰계수의 변화를 살펴 본 결과, 동일한 실험조건에서는 Cr₂O₃ 코팅시험편의 마모 특성이 ZrO₂ 코팅시험편 보다 우수하다.

2. Cr₂O₃ 코팅시험편인 경우에는 그리이스 윤활환경에서 우수한 마찰, 마모 특성을 보이고 있으며, 반면에 ZrO₂ 코팅시험편인 경우는 베어링유 윤활환경에서 우수한 마찰, 마모 특성을 가진다.

3. 부하 하중과 미끄럼속도 변화에 따른 회전시험편과 고정시험편의 마모량은 Cr₂O₃ 코팅재가 ZrO₂ 코팅재 보다 작다.

4. 마모면 관찰결과 건조 마찰의 경우, Cr₂O₃ 코팅시험편인 경우 미끄럼속도에 관계없이 응착마모를 나타내며, ZrO₂ 코팅시험편은 미끄럼속도가 0.1 m/s에서는 응착마모를 나타내며, 미끄럼속도가 0.2 m/s에서는 연삭마모로 나타난다. 윤활환경에서는 두 종류의 코팅재 모두 응착마모로 나타나며, 마모입자들은 소성변형에 의해 탈락된다.

참고 문헌

1. Staph, H. E., P. M. and Carper, H. J., "Effect of surface roughness and surface texture on scuffing," *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 18, pp. 197-208, 1973.
2. Barwell, J. T. and Royleance, B. J., "Some Implication of Surface Texture in Partial Elastohydrodynamic Lubrication," *ASME Trans.*, Vol. 20, No. 2, pp. 177-182, 1977.
3. 김희곤, "플라즈마용사 세라믹코팅 강재의 마찰속도와 하중의 변화에 의한 마모 특성," pp.11-42, 1999.
4. 久野正人, 出水 敬, 石神逸男, 三浦健一, 網 二, ホウ素イオン 注入處理を施した SUS304, Si3N4, WC-9%Coの摩擦摩耗特性評価. [材料] Vol. 42, No. 473, pp. 202-208, 1993.
5. 박찬, 채영훈, 김석삼, "지르코니아 용사코팅의 상변화에 따른 마멸특성," 한국윤활학회추계학술대회. pp.322-330.
6. 서보현, 김태형, 김석삼, "SiO₂와 TiO₂가 첨가된 Cr₂O₃ 용사 코팅의 마찰·마멸 특성," 한국윤활학회 추계학술대회 pp.69-77, 2001.