

研究論文

大韓熔接學會誌
第11卷 第4號 1993年12月
Journal of the Korean
Welding Society
Vol.11. No.4, Dec., 1993

크롬탄화물 용사피막의 고온마모 특성연구

金 義 煉* · 權 肅 仁**

A Study on Wear Properties of Plasma Sprayed Cr₃C₂-NiCr Coating at High Temperature

E. H. Kim* and S. I. Kwun**

Key Words : Plasma Spraying(플라즈마용사), Bond Coating(접합코팅), Chromium Carbide Coating
(크롬탄화물코팅), Tensile Adhesion Test(접착강도시험), Residual Stress(잔류응력),
Pore(기공), Wear Property(마모특성), Adhesion(융착)

Abstract

The plasma sprayed Cr₃C₂-NiCr coatings are widely used as wear-resistant and corrosion-resistant materials. The mechanical and wear properties of the plasma sprayed Cr₃C₂-NiCr coating on steel plate were examined in this study.

The pore in the coatings could be classified into two types, the one is the intrinsic pore originated from the spraying powder, the other is the extrinsic pore formed during spraying.

During the tensile adhesion test, the fracture occurred at the interface of top coating and bond coating. It is thought that the compressive residual stress increases with the increase of the top coating thickness.

From the wear test, it was found that the wear rate increased with the increase of the sliding velocity regardless of the temperature. It is thought that the fracture toughness reduces with the increase of the sliding velocity at 30°C and that the adhesion amount increases with the increase of the sliding velocity at 400°C.

It is concluded that the wear mechanism at 30°C is the fracture and pull-out of the carbide particles due to the fatigue on sliding surface, while the wear mechanism at 400°C is the adhesion of the smeared layer formed during wear process.

* 정희원, 한전기술연구원 전력연구실

** 정희원, 고려대학교 공과대학 금속공학과

1. 서 론

마모손상이 예상되는 가혹한 사용조건하에서도 장치효율이 유지되기 위해서는 기계부품의 높은 내구성과 신뢰성이 요구된다.

기계부품의 내마모특성을 향상시키기 위한 표면처리 방법으로는 열처리, 확산처리, 화학증착(CVD: Chemical Vapor Deposition)법, 물리증착(PVD: Physical Vapor Deposition)법, 용사법등이 있다. 그 중에서 용사법은 저용접의 플라스틱에서 고용접의 세라믹에 이르는 광범위한 재료의 용융상태 입자를 고속으로 모재에 충돌시켜 피막을 형성하는 특징이 있다.

플라즈마 용사법은 모재의 열화가 적고, 접착력이 우수하며, 피막의 형성속도가 빠르고, 용사재료의 제한이 거의 없고, 작업이 비교적 간편한 잇점이 있으므로 최근 다양한 목적으로 사용되고 있다¹⁾.

이러한 용사법은 취약한 환경 즉 원자력산업, 우주산업과 같은 극래의 윤활기술이 적용될 수 없는 분야에 절대적으로 필요하다.

크롬탄화물의 플라즈마 용사피막은 기계적 특성의 열화없이 마모저항성이 우수하고 비교적 고온에서 화학적 안정성 및 열적 안전성이 우수하여 부식, 고온산화, 마모등에 저항성이 요구되는 가스터빈 블레이드 부품²⁾, 斷熱엔진의 실린더 라이너 및 퍼스톤 링³⁾, rocket tail exhaust pipes, HTGR(High Temperature Gas-Cooled Reactors)의 증기발생기⁴⁾ 등에 널리 적용되고 있으며 그에 대한 연구도 활발하게 진행되고 있다.

본 연구에서는 내마모, 내식재료로 널리 쓰이고 있는 Cr₃C₂-NiCr 용사피막에 대해 특정용사조건에서의 미세조직, 기계적 특성조사 및 왕복운동에 의한 마모시험방법으로 미끄럼속도, 하중 및 온도에 따른 마모거동변화 및 마모과정을 고찰하였다.

2. 실험방법

2.1 용사작업

용사피막의 접착력측정을 위한 시편의 재질은 SM 45C이며 또한 마모실험에 사용한 모재의 디스크

(Disk)재질은 SUM24L을, 플레이트(Plate)재질은 SK5 종을 Fig. 1과 같이 기계가공하여 사용하였다.

시편제작은 규정침수로 절삭가공하고 연마처리 후 아세톤으로 초음파세척을 한 후 건조, 보관하였다. 모재와 코팅층사이에 기계적인 결합이 매우 중요하므로 표면의 산화스케일 제거 및 접착면적을 증대시키기 위해 모재표면을 그립블라스팅(grit blasting)하였다. 그립블라스팅 조건은 Table 1과 같으며 시편의 표면산화를 최소화하기 위해 곧바로 용사작업을 행하였고 실험에 사용한 각 용사분말의 조성을 Table

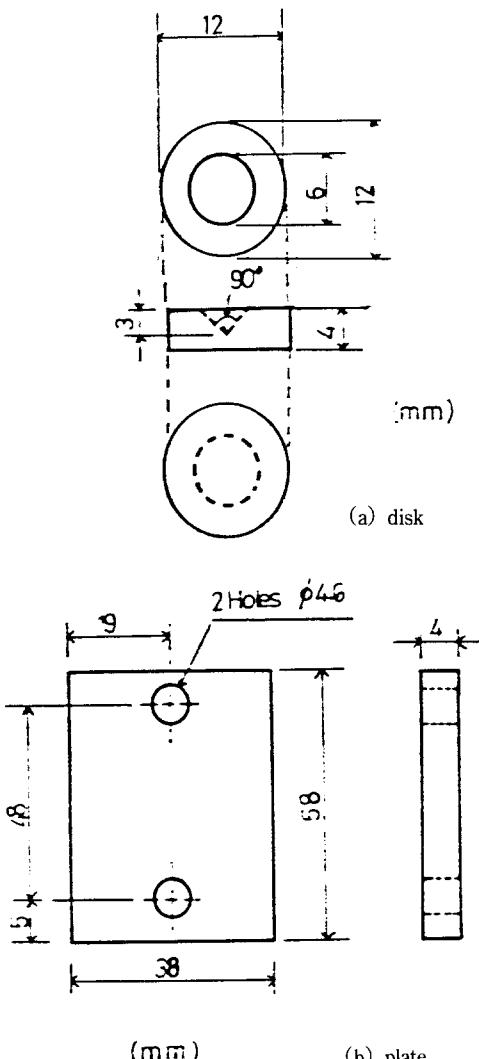


Fig. 1 Dimensions of wear test specimens for

Table 1 Conditions of grit blasting procedure

Parameters	Condition
Distance	20mm
Grit size	Alumina(Metcolite "F")
Blasting pressure	7kg/cm ²
Grit Size	440μm
Roughness(Ra)	3.8, 4.0, 6.2μm

Table 2 Material compositions

Material Sign	Composition	Average Particle Size(μm)
Bond Metco 450	95Ni-5Al	75.5
Top Metco 81	75Cr ₃ C ₂ -25NiCr	65.7

2에 나타내었다.

용사시편 제작시의 용사장비는 Metco 9MB 高 에너지 플라즈마 건(High Energy Plasma Gun)을 사용하였으며 용사조건은 Table 3에 나타내었다.

Table 3 Conditions of plasma spraying procedure

Parameters	Bond	Top
Gun type	9MB	
Gas		
primary(Ar) pressure(psi)	100	
flow(FMR)	80	
secondary(H ₂) pressure(psi)	50	
flow(FMR)	15	
Power		
arc amperage(A)	500	
arc voltage(V)	68	
Spraying		
spray distance(mm)	100	
spray rate(Kg/hr)	4.1	4.5
Gun travelling speed(cm/sec)	38.3	

플라즈마 발생가스 및 분말송급가스는 순도 99.99% 아르곤가스를 또한 열용량을 증가시키기 위한 2차가스는 순도 99.9% 수소를 각각 사용하였다. 용사피막의 접착력을 증진시키기 위해 먼저 접합코팅(bond coating)을 행한 후 그 위에 크롬탄화물용사를 행하였다. 접합코팅 두께는 약 50μm, 접착력측정시편 및 마모시험용 플레이트 시편의 코팅두께는 각각 약 250μm, 300μm 정도가 되도록 용사하였다. 마모시험용 플레이트는 기계연마하고 사포 및 3μm 다이아몬드 페이스트(paste)로 연마하여 마모전 코팅두께를 약 150μm로 하였으며, 한편 디스크는 350μm 두께로 제작하여 기계연마 후 사포 및 3μm 다이아몬드 페이스트로 연마하여 마모전 코팅두께를 약

270μm로 유지하였다.

2.2 코팅층 기계적 특성 실험

코팅층의 두께측정은 Elcometer사의 코팅두께측정기를 이용하여 10³mm까지 측정하였고 표면거칠기는 Taylor-Hobson사의 Talysurf 6를 이용하여 측정하였는데 블라스팅 후의 디스크, 플레이트 및 접착력 측정용시편 표면거칠기는 각각 Ra=3.8, 4.0, 6.2μm이었고 마모실험용 플레이트의 마모전 시편의 표면거칠기는 Ra=0.7μm, 또한 디스크는 Ra=0.4μm로 나타났다.

한편 경도측정은 Wilson사의 Tukon 미소경도측정기로 측정하였으며 그때 하중은 100g으로 하여 10번 측정 후 최고값과 최저값을 제외하고 나머지 측정값을 평균하여 값으로 취했다. 한편 기공은 코팅층 조직을 주사전자현미경(SEM)으로 3장 연속 촬영한 사진으로 Joyce Noebl사의 Magicscan Image Analyzer를 이용했고, X선회절분석은 Rigaku RTP 300RC를 이용하여 측정하였다.

용사피막의 접착력측정은 ASTM Standard Method C 633-79를 기준하여 Fig.2에 나타낸 바와 같이 직경 20 mm, 길이 20 mm의 봉상시편에 3M사의

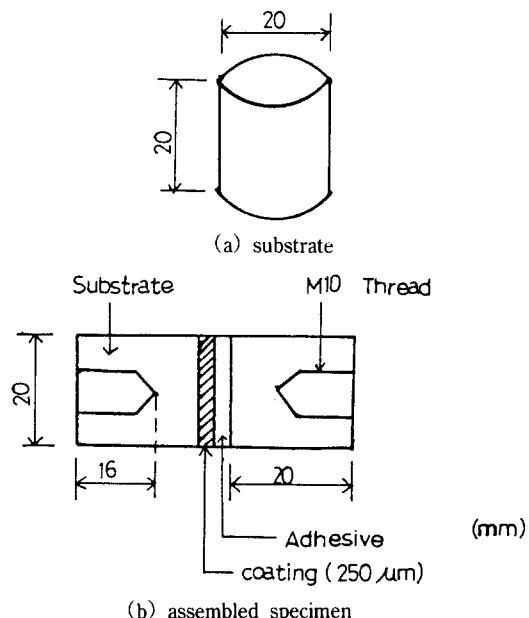


Fig. 2 The shape and demensions of tensile adhesion test specimen

EC 2214 접착제를 바른 후 275°C 온도의 Hot plate에서 15분가량 경화시켜 두 시편을 붙인후 Instron 사의 Model 8501을 이용하여 인장속도(cross head speed)를 분당 0.5mm 속도로 하여 5번 측정하여 평균한 값을 취했다.

2.3 마모실험장치 및 조건

마모실험을 위해 사용한 마모시험기는 CARMERON-PRINT사의 고주기마찰시험기(High frequency friction machine) TE 9717568 모델이며 정지상태인 플레이트 위를 디스크가 15mm폭으로 전후로 왕복 운동을 하게 되어 디스크와 플레이트사이의 상대운동을 야기시키도록 되어있다. 또한 고온에서 마모시험을 행할 수 있도록 플레이트하부에 가열장치 및 열전대가 위치되어 600°C까지의 온도에서 실험이 가능하며 미끄럼운동속도도 조절이 가능하도록 되어 있다.

마모실험은 플레이트 및 디스크의 등종의 용사피막에 대해 미끄럼속도, 하중, 온도를 변수로 하여 속도는 0.15 m/sec, 0.3 m/sec, 0.6 m/sec로 하중은 20N, 40N으로 변화시켰다. 또한 온도는 30°C와 400°C에서 시험을 행하였다. 모든 실험은 무윤활조건 및 대기 중에서 행하였고 마모량은 마모실험시 디스크의 무게 감량으로 측정하였다. 마모실험조건은 Table 4에 나타내었다.

Table 4 Conditions of wear test

Parameter	Conditions
Sliding speed(m/sec)	0.14, 0.3, 0.6
Load(N)	20, 40
Temperature(°C)	30, 400
Stroke(mm)	15
Environment	Air

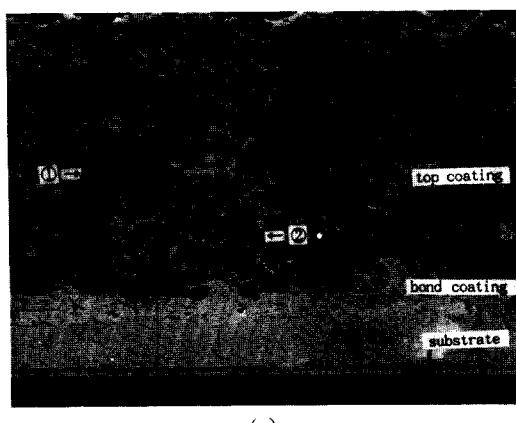
3. 실험결과 및 고찰

3.1 코팅층 미세조직

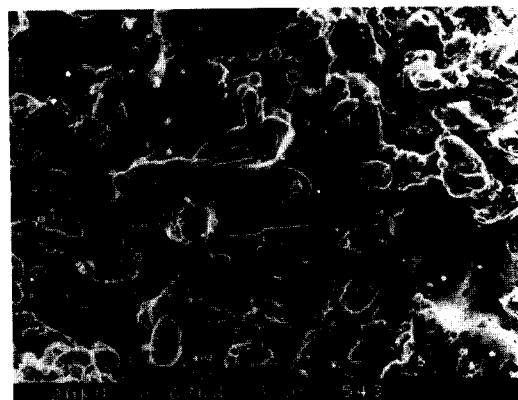
Photo.1(a)는 코팅층의 단면사진을 나타내 주고 있다. 접착력증대 목적의 접합코팅 위에 최종코팅(top coating)이 있으며 용사조직은 총상구조를 하고 기

공을 다수 포함하고 있는 것을 알 수가 있었다. 피막의 미세조직은 플라즈마 화염중의 비행용사입자가 모재에 적층될 때의 온도 및 속도에 의해 좌우되는데 즉 입자온도에 따른 점도변화 및 입자속도에 비롯된 운동량에 의한 입자의 퍼짐성 차이에 크게 관계된다. 본 연구에서는 이전의 연구에서 용사거리에 따른 기계적 특성변화에 있어서 용사거리 100mm인 경우가 Photo.1 (b)의 코팅층의 표면사진에서 보는 것과 같이 입자의 퍼짐성이 좋아 용사특성이 가장 우수하게 나타났으므로 입자의 속도 및 온도의 관점에서 볼 때 용사거리에 대한 최적조건이라 판단되어 이 조건으로 실험을 행하였다.

용사전후의 상변화는 Fig.3(a)에서 알 수 있는 것과 같이 용사입자(powder)에서 주로 나타난 탄화물은 Cr_3C_2 상 및 Cr_7C_3 상이었고 코팅층의 인성부여를 위한



(a)



(b)

Photo. 1 (a) Microstructure of $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ coating layer
(b) Top view of $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ coating

결합(binder) 금속인 Cr 이 Ni에 고용된 Ni 상도 함께 존재함을 알 수 있다. 반면 Fig.3(b)의 코팅층에는 용사입자에 존재하는 모든 성분들이 다 나타났지만 용사입자에서 보다 Cr_3C_3 상이 더 많이 존재함을 인지할 수 있었다. 그리고 Table 5에 나타낸 용사입자와 코팅층의 성분분석결과를 보면 코팅층에서의 탄소 량이 용사입자에 비해 훨씬 낮게 나타났는데 이는 용사과정중에 용사입자에 있던 탄소성분의 일부가 분해, 소실되어 사방정(orthorhombic) 구조의 Cr_3C_2 상보다 안정한 탄화물인 육방정(hexagonal) 구조의 Cr_7C_3 상을 형성함을 알 수가 있었다. 반면 G.Y.Lai⁵⁾에 의하면 Cr_3C_2 및 Cr_7C_3 상외에 Cr_3C_2 상이 변형된 약간의 $\text{Cr}_{0.62}\text{C}_{0.35}\text{N}_{0.03}$ 상도 나타난다고 하였고 Y.S.Borisov⁶⁾ 등은 본 실험에서 나타난 상 외에 약간의 Cr_2O_3 상도 나타난다고 보고하고 있으나 본 실험에서는 산화물상의 존재를 확인할 수 없었다.

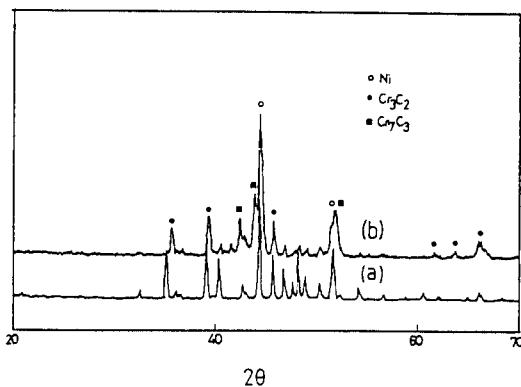


Fig. 3 Results of X-ray diffraction of powder and coating
(a) powder (b) coating

Table 5 Chemical compositions of Cr_3C_2 -NiCr powder and coating

	Element (wt. %)			
	Cr	Ni	C	S
powder	72.2	18.0	10.2	0.005
coating	62.6	28.6	7.4	0.003

3.2 코팅층 기계적 특성

코팅층의 기계적 특성측정결과를 Table 6에 나타내었다.

Table 6 Mechanical properties of coating

Item	Result
Micro Vickers hardness(100g) bond coating (Ni-Al)	176
top coating(Cr_3C_2 -NiCr)	869
carbide(Cr_3C_2)	1,452
binder metal(NiCr)	397
Porosity (%)	3.5
Carbide area fraction (%)	78.4
Tensile adhesion strength (Kg/mm ²)	4.3

3.2.1 기공 측정결과

기공의 측정방법으로는 가) 수은암입 (Mercury Intrusion Porosimetry)법 나) Water Immersion Technique (ASTM C20-46)법 다) 화상분석법 등이 있고 측정방법에 따라 약간의 기공율차이가 있다.

용사에 있어서 기공의 생성원인은 가) 불규칙적인 형태의 lamella의 적층 나) 금냉입자 사이의 수축에 의한 voids 다) 잔류응력에 의한 균열 라) 상변태에 의한 균열이나 voids로 분류⁷⁾하고 있으나 일반적으로 기공의 대부분은 불규칙적인 lamella의 적층에 의해서 생성된다. 또한 S. Safai 등⁷⁾은 기공을 형태에 따라 분류하고 있는데 모재에 평행한 elongated pore와 entrapped gas에 의한 구형기공으로 기공의 위치에 따라 粒界(interparticle)기공, 粒内(transparticle)기공으로 분류했으며 또한 千田哲也⁸⁾ 등은 Al_2O_3 피막에 있어서 크기에 따라 1 μm 이하 크기의 기공을 미시적기공(micropore), 10 μm 이상의 기공을 거시적 기공(macropore)이라고 분류하고 있으며 R. McPherson⁹⁾은 입자의 용융상태 및 용사입자 크기에 관련되어 채워지지 않은 간극을 coarse pore라고 했으며 용사입자에 원래 존재하는 기공을 fine pore라고 분류하고 있다. 본 실험에서는 Photo.2에 나타난 코팅전 용사입자에 대한 EDS(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) 분석결과 기공을 다수 포함한 입자는 탄화물 입자이고 반면 기공이 적고 매끄러운 입자는 결합금속 입자임을 알 수 있었다. Photo.1(a)에서 볼 수 있는 바와 같이 피막중에 존재하는 기공은 크게 두가지로 대별할 수 있는데 ①과 같이 탄화물입자 내에 존재하는 기공과 ②와 같이 층간에 존재하는 기공이다. ①과 같이 탄화물입자 내에 존재하는 기공은 Photo.2에 나타난 바와 같이 용사전입자내에 존재하는 기공에 의한 것이며 ②기공은 용사중 층간에 생성되는 기공이다. 따라서 본 실험에서는 용

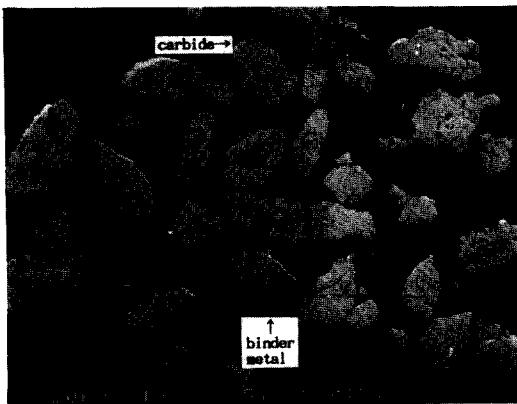


Photo. 2 The cross-section of $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ sprayed powder

사전 즉 용사입자에 있던 기공이 피막에 존재하는 것을 intrinsic pore, 용사과정 중에 적층에 의해 생성된 기공을 extrinsic pore로 분류하고자 한다. 그런데 intrinsic pore는 대부분이 구형인 반면 extrinsic pore는 길게 늘어진 형상을 보이고 있었다. 또한 기공의 크기분포는 $1.34\text{--}21.74\mu\text{m}$ 의 넓은 범위에 걸친 크기의 기공이 생긴 것을 알 수가 있었고 이러한 것은 용사입자 크기분포에 의해서도 크게 좌우된다고 생각된다.

일반적으로 기공을 포함한 용사층의 미세조직에 영향을 주는 인자는 100여개이며¹⁰⁾ 그 중에서도 용사입력전력(power input), 용사거리, 플라즈마 가스 조성, 피막두께등이 주요한 인자인데 용사거리가 기공에 가장 큰 영향을 준다고 보고되고 있다.

3.2.2. 접착력 측정결과

본 실험에서의 용사피막의 접착강도 평균값은 4.3 Kg/mm^2 이었는데 이는 기존의 보고¹¹⁾에서 나타난 $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ 피막의 접착강도값 3.5 Kg/mm^2 보다 약간 높은 값이었다.

Photo.3(a)는 용사피막의 접착력측정후의 파면에 대한 단면사진이고 Photo.3(b)는 파면 및 EDS 분석 결과인데 접합코팅의 성분원소인 Al, Ni 과 최종코팅의 성분원소인 Cr, Ni 이 혼재하고 있는 것으로 보아 파단은 대부분 접합코팅과 최종코팅의 접착경계부위에서 일어났음을 알 수 있었다. 이러한 경향은 O.Knotek¹²⁾ 등이 $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Ni}$ 피막에 관해 보고한 파단 양상 결과와도 유사하였다. 그리고 파면을 더욱 자세

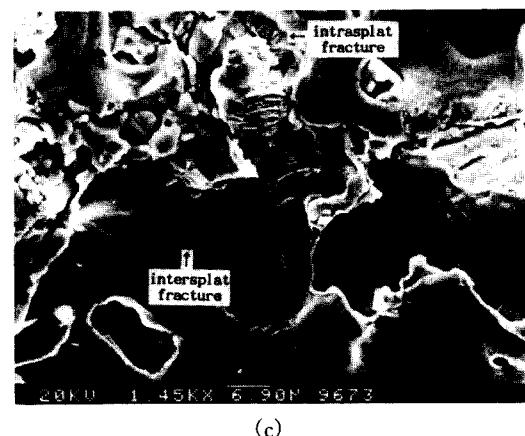
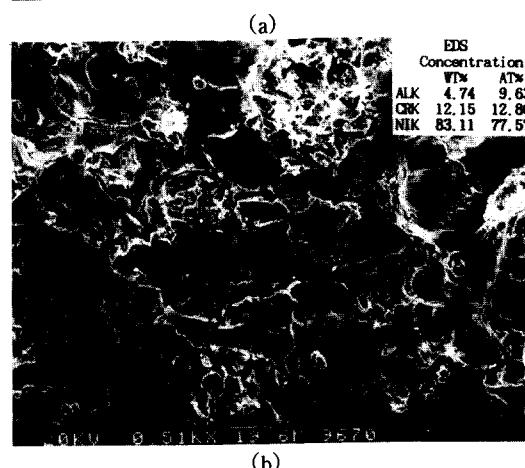
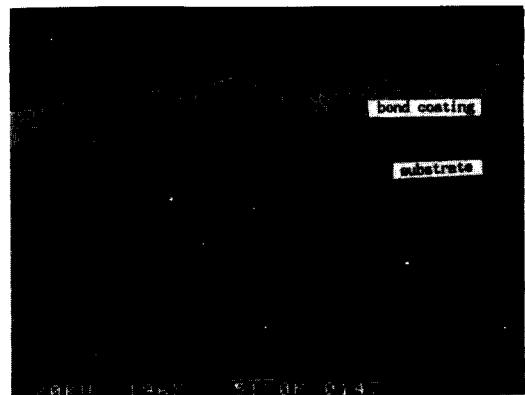


Photo. 3 Fracture morphologies of tensile adhesion test specimens

- (a) cross-section of fractured specimen
- (b) overall appearance of fractured surface
- (c) detailed appearance of fractured surface

Table 7 Thermal expansion coefficients of substrate and plasma sprayed coatings

	Material	Thermal expansion coefficient $\alpha \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	Ref.
Substrate	SM45C	14.0	14)
Sprayed coating	Ni-5Al	12.8	15)
	Cr ₃ C ₂ -NiCr	7.4	*13), 16)

* No data, Calculation based on thermal expansion coefficient of chromium carbide and Ni-Cr alloy

히 조사해 보면(Photo.3(c)) 접합코팅과 최종코팅 경계가 파괴되어 나타나는 intersplat 이외에 접합코팅과 탄화물 접착부에서 탄화물 자체가 깨어져 파단이 일어난 intrasplat 형태도 존재함을 확인할 수 있었다.

용사입자는 용융상태에서 모재에 충돌 부착하여 피막을 형성하고 모재로 열이 빠지면서 냉각한다. 이 냉각에 의한 용사피막의 수축은 모재로 구속되어 열응력이 생기고 이것이 잔류응력으로 발생된다. 納富啓¹³⁾ 등이 제안한 잔류응력에 관한 식은 다음과 같다.

$$\sigma_R = \frac{E_c E_M A_M}{(E_c + E_M A_M) (1 - \nu)} \{ \alpha_c (T_c - T_o) - \alpha_M (T_M - T_o) \} \quad (1)$$

E: 종탄성계수

α_c : 코팅층의 열팽창계수

α_M : 모재의 열팽창계수

A: 단면적

T_c: 피막에 잔류응력이 생성되기 시작하는 온도

v: 포이슨 비

T_M: 용사피막이 T_c로 되는 때의 모재의 평균온도

T_o: 실온

c: 용사피막

m: 모재

본 실험에서 사용한 모재 및 피막에 대한 열팽창계수값 (Table 7)에서 알 수 있는 바와 같이 모재와 접합코팅의 열팽창계수값 차이는 적은 반면 접합코팅과 최종코팅의 열팽창계수값 차이는 크다. 즉 (1)식의 { }항이 (-)부호를 나타내므로 최종코팅에는 압축잔류응력이 존재하게 된다. 따라서 접합코팅과 최종코팅 접착경계 부위에서 파단이 일어난 이유는 최종코팅의 두께증가에 따라 압축잔류응력이 증가하기 때문이라 생각된다. 한편 Y. C. Kim¹⁷⁾ 등은 접착면 최인접부 코팅층에서 인장잔류응력이 최대로 되는 모델을 제안하였다.

3.3 마모 특성

우선 정상마모가 일어나기 까지의 마모거리를 알아보기 위해 하중 20N, 30°C, 0.15m/sec 조건에서 마모실험을 행하여 마모거리에 따른 마모율의 결과를 Fig.4에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 마모거리 700m 이상에서는 마모율이 변화하지 않으므로 정상 마모가 유지됨을 알 수 있었다. 한편 마모거리에 따른 마찰계수 변화를 Fig.5에 나타내었는데 마모가 진행됨에 따라 마찰계수가 급격히 증가하다가 약간 감소하는 것을 알 수 있었다. 이는 이후에 언급할 상온 마모기구로 탄화물이 깨져 떨어져 나오는 과정이 마모거리에 따라 증가하여 마찰계수가 급격히 증가하지만 마모가 계속 진행됨에 따라 탄화물이 떨어져 나간 마모면 일부가 마모입자로 채워져 마찰계수가 약간 감소한다고 사료된다.

Fig.6, Fig.7에는 일정마모거리에서의 각 마모조건에

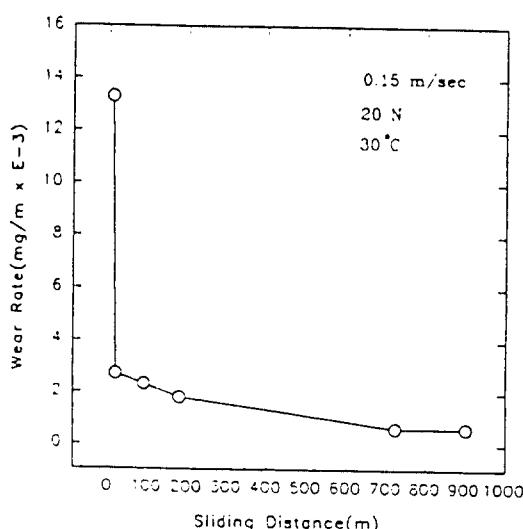


Fig. 4 The variation of wear rate with the sliding distance

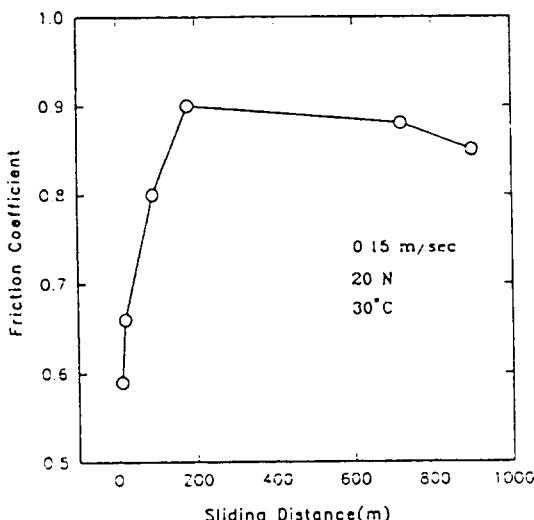


Fig. 5 The variation of friction coefficient with the sliding distance

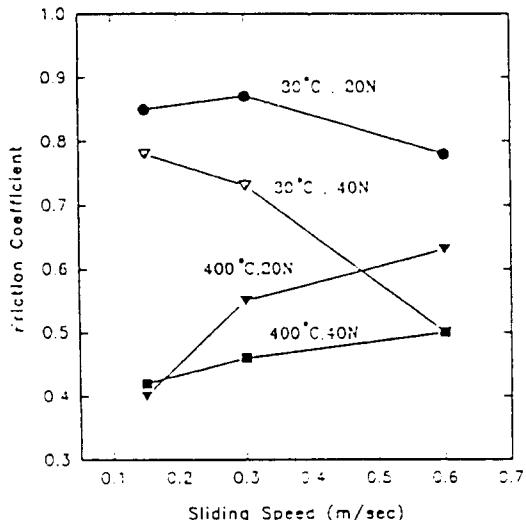


Fig. 7 The variation of friction coefficient with sliding speed

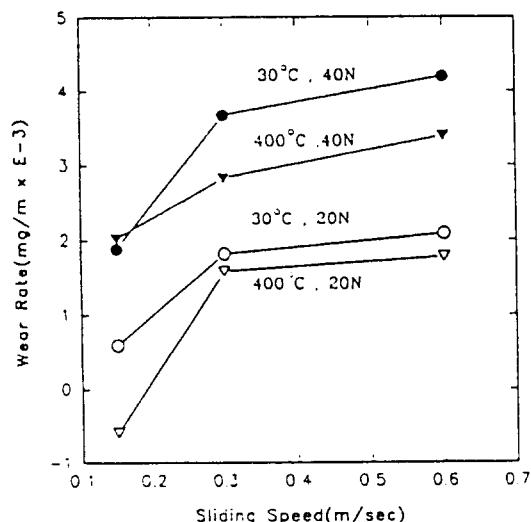


Fig. 6 The variation of wear rate with sliding speed

따른 마모율변화와 마찰계수변화를 나타내었는데 이에 대한 자세한 고찰을 살펴보기로 하자.

3.3.1 하중변화에 따른 마모특성

하중변화에 있어서 하중이 높은 경우가 낮은 경우보다 마모율은 크게 나타났으나 마찰계수는 작은 값을

나타내고 있다. 마찰에 있어서 고하중인 경우가 마찰계수값이 낮은 이유는 K. H. Zum Gahr¹⁸⁾등이 Al_2O_3 에 대한 마모실험에서 하중에 따른 마찰계수감소의 이유를 하중증가에 따른 Al_2O_3 의 파괴정도 보다는 변형량의 증가때문이라고 했지만 본 연구에서는 고하중인 경우 마모에 있어서 결합금속의 변형량이 탄화물의 마모증가보다 상대적으로 커지기 때문이라 생각된다.

3.3.2 속도영향에 따른 마모특성

속도변화에 있어서는 온도에 관계없이 속도증가에 따라 마모율은 증가하였지만 (Fig.6) 마찰계수는 Fig.7에서와 같이 저온의 경우 속도증가에 따라 점차 감소하는 경향을 보인 반면 고온의 경우는 점차 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 현상들을 설명하기 위해 우선 상온과 고온에서의 마모기구를 살펴보았다.

Photo.4(a)는 상온마모시험의 표면형상이고 Photo.5(a)는 단면사진이다. 표면에서 탄화물이 빠져나간 흔적이 많이 보이고 단면에서 탄화물들이 깨지거나 탄화물주위에 균열이 존재하는 것으로 미루어 보아 상온마모기구는 탄화물의 반복적인 깨짐과 떨어져 나감이며 또한 반복하중에 의한 피로가 탄화물부근의 균열을 조장하여 탄화물이탈을 야기시키는 과정이라

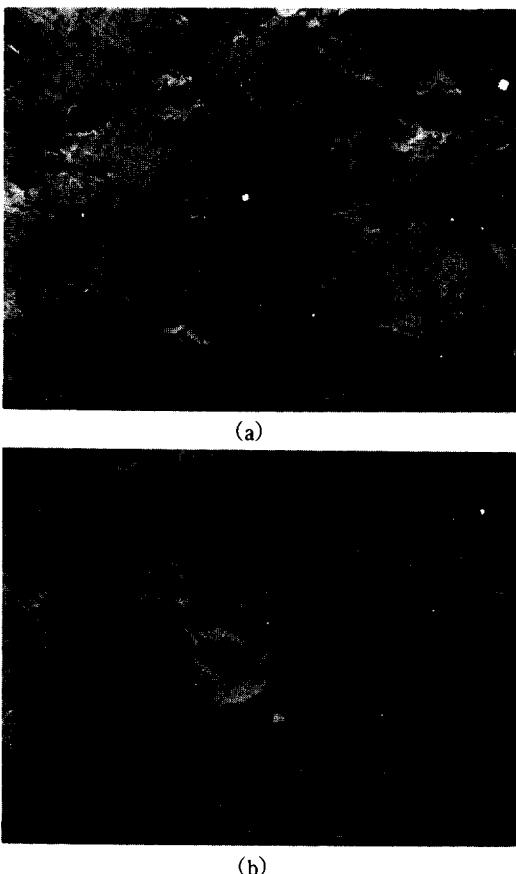


Photo. 4 SEM photographs of worn surfaces
 (a) at 0.15m/sec, 20N, 30°C
 (b) at 0.15m/sec, 40N, 400°C

하겠다. 이때 부가적으로 떨어져 나온 탄화물에 의한 부분적인 기지연삭도 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 상온마모 단면관찰에서 마모속도가 빠를 수록 마모면 인접부에 있는 탄화물내에 균열이 더 많이 존재하였다. 즉 상온마모조건에서 마모속도가 증가하게 되면 하중속도/loading rate) 가 증가하여 파괴인 성값이 감소하므로 탄화물내에서의 균열생성 및 전파속도가 빨라져 결국 마모량이 증가한다고 생각된다.

반면 고온의 경우 Photo.4(b)에서처럼 마모는 깨져 나온 탄화물과 결합금속들이 섞여 마모입자들이 마모면에 전체적으로 smear되어 이들의 응착에 의해 마모가 진행된다. 이때 마모입자의 응착에 의해 떨어져 나온 부위는 마모면인접부에 존재하는 탄화물 주위의 균열이 심한 부위가 된다. 따라서 속도증가에

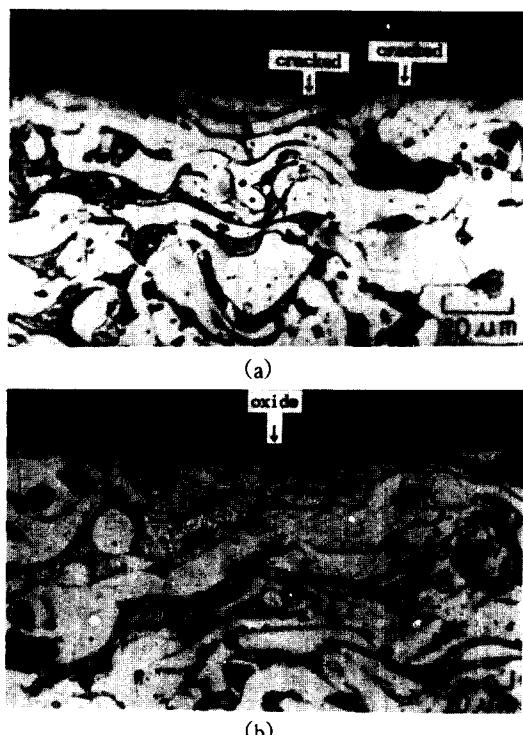


Photo. 5 Optical micrographs of cross-section of worn specimens
 (a) at 0.3m/sec, 40N, 30°C
 (b) at 0.15m/sec, 40N, 400°C

따른 마모율증가는 분위기온도와 더불어 마찰열 증가로 smear된 층의 응착마모량이 증가하기 때문이라 생각된다.

위에서 언급한 온도에 따른 마모과정은 마모입자 관찰(Photo.6)에서도 알 수 있는데 상온의 경우는 마모입자 대부분이 깨어진 탄화물입자여서 크기가 작음에 반해 고온의 경우에는 마모입자가 smear된 응착층이 떨어져 나와 생성되었기 때문에 마모입자 크기가 크며 따라서 속도증가에 따라 이러한 마모입자의 크기는 더욱 커짐을 알 수 있었다.

또한 마찰계수의 변화는 상온의 경우에는 속도증가에 따라 마모면의 연마(polishing) 정도가 증가하여 마찰계수가 감소하며¹⁹⁾, 고온인 경우는 속도증가에 따라 smear된 층의 응착량증가 및 마모면에서의 온도증가에 따라 탄화물의 연화²⁰⁾가 일어나 마찰계수가 증가된다고 생각된다.

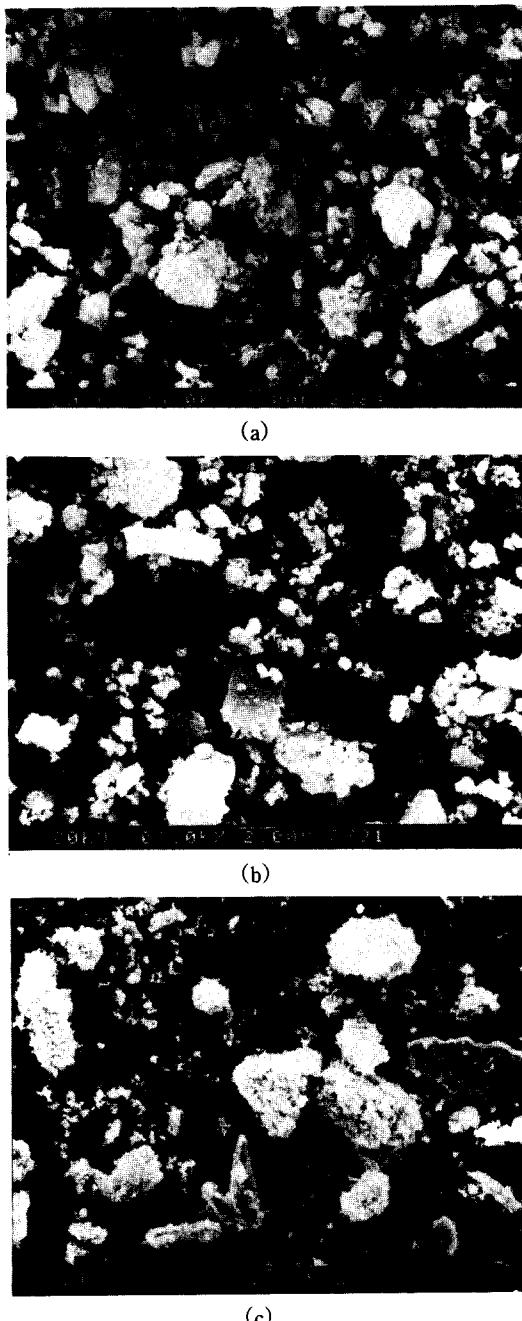


Photo. 6 Wear debris from sliding surfaces

- (a) at 0.15m/sec, 40N, 30°C
- (b) at 0.15m/sec, 40N, 400°C
- (c) at 0.3m/sec, 40N, 400°C

3.3.3 온도영향에 따른 마모특성

온도에 따른 변화는 동일한 미끄럼속도조건에서 고온의 경우가 마모율 및 마찰계수가 상온보다는 적은 값을 나타냈다. 이에 대해 마모면에 대한 X선 회절분석 결과(Fig.8) 고온마모의 경우에서만 분위기온도 및 마찰열에 의해 Cr_2O_3 상 및 NiO 상의 산화물이 마모면에 생성됨을 알 수가 있었다. 또한 단면사진관찰(Photo.5 (b))에서도 마모면 일부분에서 산화물이 관찰되었다. 고온마모의 경우 이러한 산화물이 생성된 부위에서는 더 이상의 웅착이 방지되고 마찰계수도 저하한다고 생각된다.

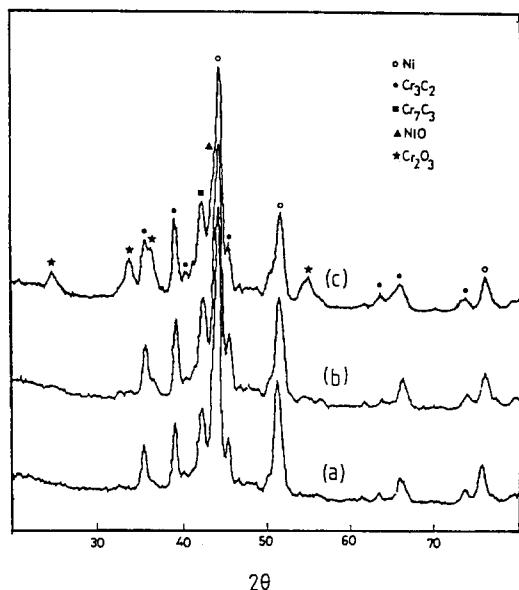


Fig. 8 Results of X-ray diffraction of worn surfaces

- (a) before wear
- (b) at 0.6m/sec, 40N, 30°C
- (c) at 0.6m/sec, 40N, 400°C

한편 Yu.S.Borisov⁶⁾등의 크롬탄화물 용사피막의 온도에 따른 시험결과 600°C이상에서는 마모율 및 마찰계수가 감소하고 그 이하온도에서는 탄화물의 깨짐과 그에 따른 결과된 마모입자의 연삭작용으로 마모율이 증가하며 400°C이상 온도에서는 약간의 NiO 필름(film)이 생성된다고 보고하고 있다.

결 론

본 연구에서는 크롬탄화물 용사피막의 기계적 특성조사 및 마모조건변화에 따른 30°C와 400°C에서의 마모특성변화를 조사하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 피막중의 기공은 용사입자에 원래 있던 기공이 피막에 존재한 intrinsic pore와 용사과정중에 생긴 extrinsic pore가 존재하였다.

2. 접착력 측정시 관찰한 파단은 접합코팅과 최종코팅 접합면에서 일어났다. 이러한 현상은 최종코팅 층에는 압축잔류응력이 존재하고 접합면으로부터 두께에 따라 압축잔류응력이 증가하기 때문이다.

3. 마모율변화는 온도에 상관없이 속도증가에 따라 증가했다. 그 이유로 저온의 경우는 하중속도(loader rate) 증가에 따른 파괴인성값의 저하 때문이며 고온의 경우는 응착량의 증가 때문이다.

4. 마모조건에 따른 마찰계수변화는 30°C인 경우는 속도증가에 따라 마모면 연마(polishing) 정도의 증가로 감소했으나 400°C인 경우는 속도증가에 따라 응착량이 많아져 증가했다.

5. 온도에 따른 마모기구는 30°C인 경우는 탄화물입자에 균열이 발생되어 떨어져 나가는 즉 반복하중에 의한 피로이고 400°C인 경우는 마모과정중 분위기온도 및 마찰열증가로 인해 형성된 smeared layer의 응착마모이다.

참 고 문 헌

1. H.Herman : Plasma-Sprayed Coatings, Scientific American, Sep. (1988), pp.78~83
2. R.H.Wedge, A.V.Eaves : Coatings in the Aero Gas Turbines, 9th International Thermal Spraying Conference Paper 19, The Hague, 19~23, May, (1980)
3. Tomoki Shimauchi, Kazunori Umeda : Tribology at High Temperature for Uncooled Heat Insulated Engine, SAE Paper, 840429, (1984)
4. J.R.Lindgren, W.R.Johnson : Friction and Wear Behavior of Chromium Carbide Coatings, Surface and Coating Technology, Vol.32 (1987), pp.249~260
5. G.Y.Lai : Evaluation of Sprayed Chromium Carbide

Coatings for Gas Cooled Reactor Applications, Thin Solid Films, Vol.53 (1978), pp.343~351

6. Yu.S.Borisov, Yu.G.Tkachenko : Wear Behavior of Plasma-Sprayed Chromium-Carbide-Base Coatings at Temperatures of 20 ~ 1000°C, Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics, Vol.120, No.10 (1978), pp.801~804
7. S.Safai : A Microstructural Investigation of Plasma-Sprayed Metal and Oxide Coatings, Ph.D.Dissertation, (1979), State University of New York
8. 千田哲也, 天田重康 : アルシナ 溶射皮膜の細孔構造について, 日本溶射協会誌 Vol.24, No.2 (1988), pp.1296~1300
9. R.M.Pherson : A Review of Microstructure and Properties of Plasma Sprayed Ceramic Coatings, Surface and Coating Technology, Vol.39/40 (1989), pp.173~181
10. A.R.Nicoll, H.Gruner, R.Prince, G.Wuest : Thermal Spray Coatings for High Temperature Protection, Surface Engineering, Vol.1 No.1 (1985), pp.59~71
11. AWS : Thermal Spraying, practice, theory and application, American Welding Society, (1985)
12. O.Knotek, R.Elsing, H.R.Heintz : On Plasma Sprayed WSi₂ and Cr₃C₂-Ni Coatings J.Vac.Sci.Technol. A, Vol.3, No.6, Nov/Dec. (1985), pp.2490~2493
13. 納富啓, 児玉克, 谷昇 : プラズマ溶射皮膜の殘留應力測定に關する研究, 溶接學會論文集, 第6券, 第3號 (1988), pp.341~347
14. 日本金屬學會, 日本鐵鋼協會編 : 丸善株式會社 (1967), pp.55
15. 武藤陸治, 坂本勳 : ジルコニア溶射を施した構造用鋼の熱サイクルおよび熱衝擊破損特性, 溶接學會論文集, 第7券, 第2號 (1989), pp.208~213
16. Metco Technical Bulletin : Metco 70 Chromium Carbide Powder
17. Y.C.Kim, T.Terasaki, T.H.North : A Method of Measuring the Through-Thickness Residual Stress in a Thermally-Sprayed Coating, Proceedings, 4th NTSC, Pittsburgh, PA, USA, 4~10 May (1991), pp. 221~227
18. K.H.Zum Gahr : Sliding Wear of Ceramic-Ceramic, Ceramic-Steel and Steel-Steel pairs in Lubricated and Unlubricated Contact, Wear, 133 (1989), pp.1~22

19. A.V.Levy, N.Jee : Unlubricated Sliding Wear of Ceramic Materials, *Wear*, Vol.121 (1988), pp.363~380
20. Jen Fin Lin, Tzuen Ren Li : Analysis of the Friction

and Wear Mechanisms of Multilayered Plasma-sprayed Ceramic Coatings, *Wear*, 160 (1993), pp.201~212