

플라즈마 용사시킨 Carbide Coating층의 고상입자 Erosion 특성에 관한 연구

전승범 · 남승훈 · 김종집 · 이주진

한국표준연구소 역학물성실

Solid Particle Erosion of Plasma-Sprayed Coatings

S.B. Jeon, S.H. Nahm, J.J. Kim, and J.J. Lee

Mechanical Properties Lab., Korea Standards Research Institute Taejon 305-606 Korea

Abstract

The erosion characteristics of plasma-sprayed tungsten carbide and chromium carbide coatings were investigated. Erosion tests were performed at room temperature by using Al_2O_3 and SiC particles accelerated in air stream. Weight losses of the coatings were measured over a range of particle velocities and impingement angles. It was found that, for both of the coatings, the maximum erosion occurred at a normal angle of impact, and the erosion rate at this impact angle was a power function of particle velocity. The values of the velocity exponent were between 3.07 and 3.50. Erosion value of chromium carbide coating was higher than that of tungsten carbide coating.

1. 서 론

Erosion은 고상입자를 포함한 모든 유동체에 의해 생기는 재료의 손상현상으로서, 재료의 내 erosion 특성은 단일 물성치에 의한 예측이 어려우며, 정도, 강도, 파괴인성, 충격치 등의 재료물성 복합적인 상관관계를 갖고 있으며, 충돌입자의 모양, 크기, 속도, 충돌각도 등 실험조건에 따라 매우 큰 폭으로 erosion 특성이 변한다.¹⁾ 그간의 연구동향을 보면 초기에는 화학 plant, 석탄 연소장비, 석유 정제등에서 연구가 진행되어, 점차 gas나 steam turbine의 blade, 헬기, 전천후 비행기, 로켓, 미사일, 고속함정 우주선 등으로 확대되어 현재는 거의 모든 분야의 설비 및 부품의 유통중등 부품이 연구의 대상이 되고 있다. 내 erosion 특성을 향상시키기 위해서는 재료 자체의 표면 처리를 통해서 표면층을 강화시키는 방법이나

내 erosion 특성이 월등한 재료를 코팅시키는 방법이 사용되고 있는데 전자는 후자에 비해 향상시킬 수 있는 정도가 낮다. 피복재는 금속, 산화물, 탄화물 등 다양한 재료가 사용되며, 피복방법도 용도, 형상, 두께 등에 따라 여러가지가 사용된다. 이중 플라즈마용사(plasma spray) 방법은 피복 속도가 빠르고 두께 조절이 용이하며 복잡한 형상에도 적용 가능하여 내 erosion 특성이 요구되는 부품의 피복에 많이 이용되고 있다.^{2,3,4)} 본 연구에서는 내 erosion 특성이 우수하다고 보고된 tungsten carbide 및 chromium carbide의 플라즈마 용사 피복층의 내 erosion 특성을 조사하여, 충돌속도, 충돌각도, 고체입자의 크기 등의 영향을 조사하였다.

2. Erosion 기구(Mechanism of Erosion)

고상입자에 의한 erosion 기구에 대해서는 60년대 초 부터 Finnie⁶⁾, Bitter⁷⁾ 그리고 Neilson과 Gilchrist⁸⁾ 등에 의해 주로 연구되어 왔으며, 아직도 모든 영역에서 잘 맞는 이론은 정립된 상태가 아니나, 이들의 erosion 기구를 중심으로 정리하면 다음과 같다.

Fig. 1과 같이 시편표면의 무게 M , 속도 V 인 입자가 각도 α 인 상태에서 부딪칠때 시편에 가해지는 힘을 시편표면에 평행한 힘과 수직된 힘으로 분리하면 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_s &= \sigma_t \cdot \cos \alpha, \quad \sigma_N = \sigma_t \cdot \sin \alpha & (1) \\ \sigma_s &: \text{시편표면에 평행한 힘} \\ \sigma_N &: \text{시편표면에 수직된 힘} \end{aligned}$$

고상입자에 의한 재료의 erosion 기구는 cutting wear와 deformation wear로 나뉘어지며, 일반적으로 재료가 무른(soft) 경우에는 표면에 평행한 응력에 의해 재료가 깎여나가는 cutting wear가 일어나고, 재료가 단단한(hard) 경우에는 표면에 수직된 응력에 의해 균열이 발생한 후 떨어져 나가는 deformation wear가 주로 일어난다고 보고되어^{8,9,10)} 있으며, erosion에 의한 무게 감소량 W 는 충돌각도에 따라 다음의 식(2)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} W &= \frac{1/2 M (V^2 \cos^2 \alpha - V_p^2)}{\phi} + \frac{1/2 M (V \cdot \sin \alpha - K)^2}{\epsilon} \alpha < \alpha_0 \\ W &= \frac{1/2 M V^2 \cos^2 \alpha}{\phi} + \frac{1/2 M (V \sin \alpha - K)^2}{\epsilon} \alpha > \alpha_0 \quad (2) \end{aligned}$$

이 식에서 ϕ 는 cutting wear에 의해 erosion이 일어날때 단위무게의 재료를 마모시키는데 필요한 에너지 단위이며, ϵ 은 deformation wear에 의해 erosion이 일어날때의 에너지 단위를 나타낸다. 즉 ϕ 가 크다면 cutting wear가 잘 안 일어난다는 의미이며, ϵ 이 크면 deformation wear가 어렵다는 것을 알 수 있다. V_p 는 충돌각도가 α_0 보다 작을 경우 표면에 평행한 응력의 일부 중 cutting wear에 기여하지 못하는 부분을 나타낸다. K 는 deformation wear에서 erosion이 일어날 수 있는 최소 속도이다.

재료가 매우 단단하여 erosion 기구가 거의 deformation wear로만 진행될 경우 (즉 ϕ 가 매우 큰 경우)는 erosion되는 양 W 는 $\sin^2 \alpha$ 에 비례하게 된다.

반대로 재료가 매우 무른 경우에는 erosion 기구가 거의 cutting wear로 진행되는데 (즉 ϵ 이 매우 큰 경우) 이때의 erosion되는 양 W 는 $\alpha < \alpha_0$ 인 경우에는

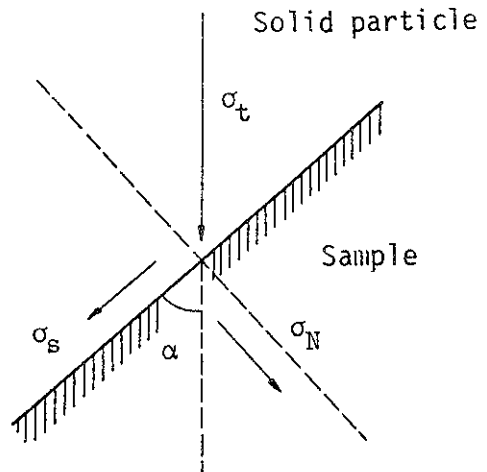


Fig. 1. Analysis of stress generated by a single particle impingement.

$\cos^2 \alpha \cdot \sin \alpha$ 에 비례하고 $\alpha > \alpha_0$ 인 경우에는 $\cos^2 \alpha$ 에 비례하게 된다. 그러나 일반적으로 양쪽 erosion 기구 중 어느 한쪽만 일어나는 경우는 매우 적고 대부분의 경우 cutting wear 및 deformation wear가 섞여서 나타나게 된다.

3. 실험방법

1) Erosion 시험기

본 연구에 사용한 erosion 시험기는 상온·고온 겸용이며, 당 연구소에서 제작한 것으로서 개략도는 Fig. 2와 같다. 노즐의 직경은 4mm, 압축공기용 regulator는 10kgf/cm²까지 조절 가능하며 powder feeder는 vibrating hopper를 사용하였다. 분사되는 particle의 최고속도는 110m/sec까지 가능하다.

시편 holder는 15~90°까지 충돌각도를 조절할 수 있으며, 고온시험시에는 프로판가스를 연소시켜 온도를 상승시킨다. 연소용 공기와 연소개스를 solenoid valve를 통하여 pilot burner에 주입되고 burner controller에서 자동적으로 착화를 시켜준다. 또한 폭발을 방지하기 위하여 UV flame detector를 장착시켜 불이 꺼졌을 경우 자동으로 solenoid valve를 닫히게 하였다. 온도조절은 K-type 열전대를 사용하여 burner controller를 조절하였다. 연소개스는 cooling chamber를 통해 냉각된후, ventilator로 흡입되어 배출된다.

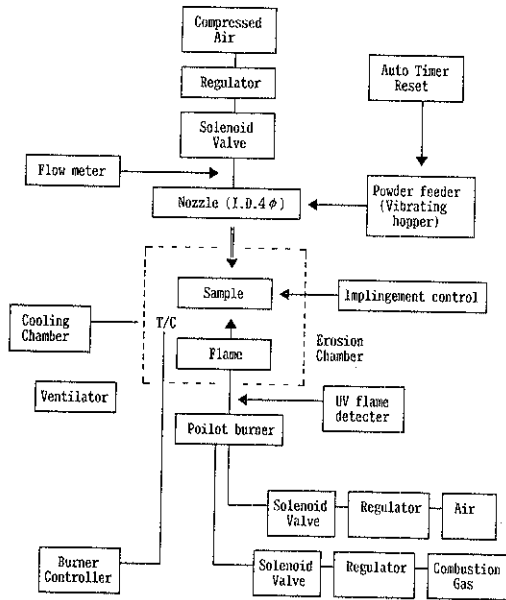


Fig. 2. Block diagram of solid particle erosion tester.

2) 시편제조 및 erosion 시험

피복용 시편은 지름 40mm, 두께 5mm인 SUS 304이고, 용사재료는 tungsten carbide와 chromium carbide를 선택하였다. 또한 금속과 carbide 사이의 접착강도를 증가시키기 위한 bond coating 재료로는 Ni-Al composite 분말을 사용하였다.

본 연구에서 사용한 분말은 METCO사 제품으로 주요 특성은 표 1과 같다.) Coating 순서는 먼저 시편표면을 sand blasting한 다음 bond coating을 약 100 μ m 전후로 피복한 후 tungsten carbide 및 chromium carbide를 300 μ m 정도 coating하였다.

플라즈마 용사기는 METCO사 제품으로 용량 80 kw, gun type 9MB를 사용하였으며, 각 분말의 용사 조건은 METCO사의 표준작업 조건에 따랐다.

각 코팅재료의 내 erosion 특성을 측정하기 위하여 충돌각도, 충돌속도, abrasive 입자등을 변화시키며 erosion 시험을 행하였다. Abrasive 입자는 50 μ m Al₂O 및 150 μ m인 SiC를 사용하였다. 충돌하는 입자의 속도는 double-disc type속도 측정기를 사용하여 측정하였다.¹¹⁾

충돌각도에 따른 erosion 특성을 측정하기 위하여

15, 30, 45, 60, 90°의 다섯단계에 충돌각도에 입자속도 60m/sec로 Al₂O₃ 및 SiC를 이용하여 각 조건당 2회씩 반복 측정하였다. 초기단계에서는 steady state한 erosion이 일어나지 않으므로 충분히 erosion시킨후 그때의 무게를 초기무게로 하고 50g의 분말을 분당 10g씩 분사시킨후 최종 무게를 측정하여 (0.01mg까지) erosion되는 양을 결정하였다. 다음으로 충돌속도의 영향을 조사하기 위하여 충돌각도 90°에서 30, 60, 90m/sec의 속도로 erosion 시험을 하였다.

4. 결과 및 고찰

1) 코팅층의 조직 및 경도

Tungsten carbide와 chromium carbide의 광학현미경 조직사진을 각각 Fig. 3 및 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 보면 bond coating층의 두께가 대략 50~100 μ m, carbide층의 두께는 약 300 μ m임을 알 수 있다.

코팅이 균일한 조성으로 양호하게 되었는지를 측정하기 위하여 주사전자현미경을 이용해 조직검사를 한후 tungsten carbide 코팅에서는 Co에 대하여, chromium carbide 코팅에서는 Ni에 대한 mapping을 하였다. (Table 1. 참조)

각각의 전자현미경 조직과 mapping 결과를 Fig. 5~Fig. 8에 나타내었다. 이 결과를 보면 tungsten carbide의 경우 Co가 비교적 균일하게 분포한 것으로 보아 코팅은 균일한 조성으로 되었으나 조직을 보면 일부 녹지 않은 carbide가 존재함을 알 수 있다.

Chromium carbide의 경우 Ni-mapping의 결과를 보면 Ni이 부분적으로 편중된 것을 알 수 있었으며, 이 결과들은 경도시험 결과에서도 확인되고 있다.

Table 1. Characteristics of coating powder.

Powder No.	Size	Composition	Melting point
Tungsten Carbide METCL 74SF	5~45 μ m	Tungsten Carbide 88% Co 12%	1,260°C
Chromium Carbide METCO 81VF-NS	5~45 μ m	Chromium Carbide 75% Ni 20% Al 5%	1,400°C
Ni-Al (METECO 450NS)	45~88 μ m	Ni 95.5% Al 4.5%	660°C

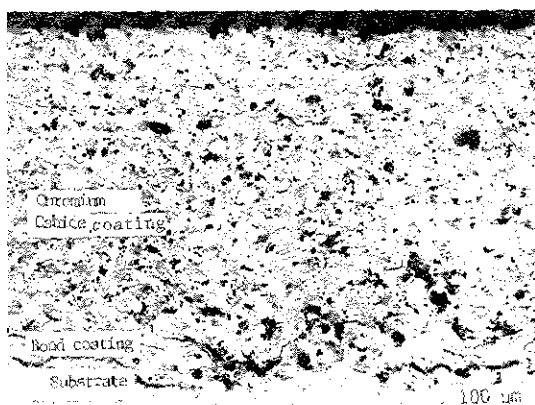


Fig. 3. Microstructure of tungsten carbide coating, $\times 200$.

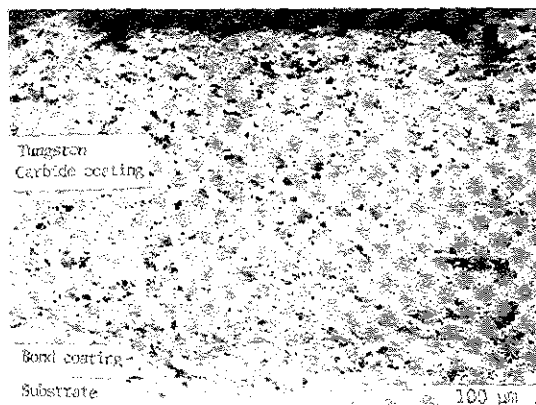


Fig. 4. Microstructure of chromium carbide coating, $\times 200$.

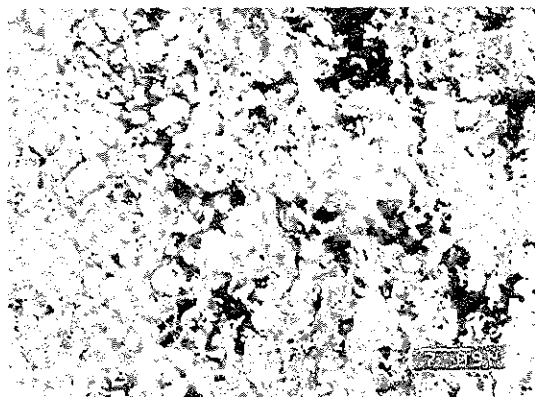


Fig. 5. Scanning electron micrograph of tungsten carbide coating ($\times 1410$).

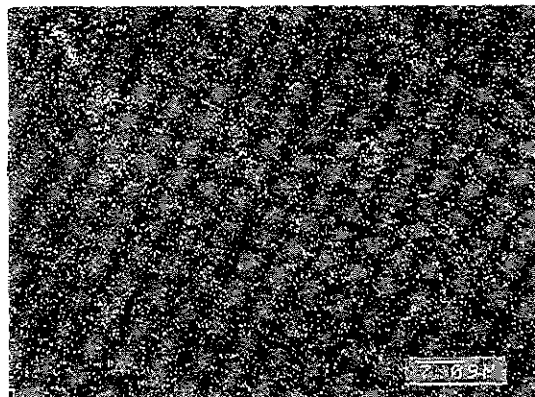


Fig. 6. Co-mapping in tungsten carbide coating ($\times 1410$).

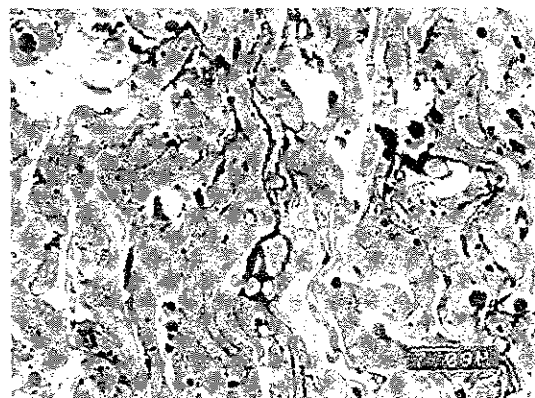


Fig. 7. Scanning electron micrograph of chromium carbide coating ($\times 1410$).

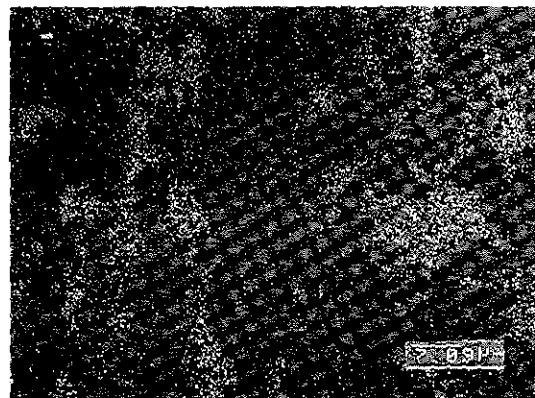


Fig. 8. Ni-mapping in chromium carbide coating ($\times 1410$).

즉, chromium carbide나 tungsten carbide coating 공히 정도예상치가 HRC 50~54이나, 본 연구에서 측정된 결과는 chromium carbide 경우는 HRC 54~55 이고, tungsten carbide 경우가 HRC 65~67로서 tungsten carbide의 경우가 예상치보다 상당히 높게 나타나고 있다. 따라서 tungsten carbide 입자의 일부가 완전히 용융되지 않은 상태에서 코팅된 것으로 생각된다.

2) 코팅층의 내 erosion 특성

가) 충돌각도에 의한 영향

충돌각도에 따른 코팅층의 erosion 속도(erosion rate)의 결과를 도시하면 Fig. 9와 같다. 이 결과를 보면 2종의 coating 공히 충돌각도 90°에서 erosion 속도가 최대치를 보이며 충돌각도가 감소하면 erosion 속도도 감소함을 알 수 있는데, 이는 단단한 재료에서 나타나는 deformation wear의 전형적인 특성으로 알려져 있다. Abrasive powder의 영향을 보면 Al₂O₃보다 SiC에서 약 3배 정도 erosion 속도가 큰 것을 알 수 있는데, 이것은 Al₂O₃ abrasive powder와 SiC abrasive powder의 크기가 같으면 erosion rate는 차이가 없으나¹², SiC abrasive powder가 Al₂O₃ abrasive powder 보다 크기 때문인 것으로 추정된다. 또한 tungsten carbide와 chromium carbide의 내 erosion 특성이 Fig. 9에서 질량감소로 표시되어 큰 차이를 보이지 않고 있으나 erosion 값(erosion value : abrasive powder 1g에 대한 부피감소 mm³/g)으로 다시 도시하면 Fig. 10과 같이 tungsten carbide 경우가 거의 두배 정도 내 erosion 특성이 좋은 것을 알 수 있다.

나) 충돌속도에 따른 erosion 특성

충돌각도가 90°일때의 충돌속도가 erosion 특성에 미치는 영향을 Fig. 11, Fig. 12에 나타내었다. 이 결과를 보면 tungsten carbide나 chromium carbide 피복층 공히 고체입자의 속도가 증가됨에 따라 erosion 속도가 증가되었으며, 두가지 coating에서 큰 차이가 없었다. 또한 입자가 크기가 작은 Al₂O₃를 사용할 때의 erosion량 (W)과 입자속도(V)의 관계는 대략 $W \propto V^{3.4} \sim 3.5$ 이며, Al₂O₃보다 큰 입자가 큰 SiC를 사용하는 경우는 $W \propto V^{3.07} \sim 3.15$ 로 표시할 수 있어서, 고체입자의 속도변화에 따른 erosion량의 변화는 입자크기가 작은 경우가 더 크게 나타났다. 이러한 결과는 deformation wear의 전형적인 특성을 보이고 있다.

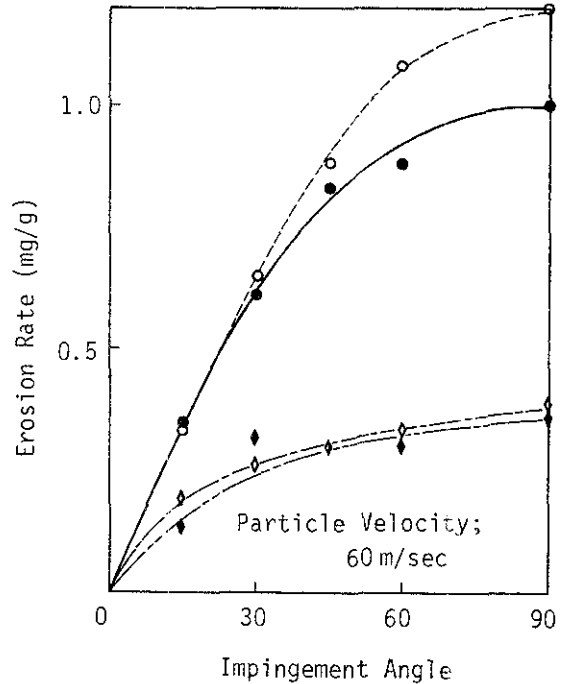


Fig. 9. Erosion rate vs impingement angle.

- : Chromium Carbide coating, SiC 150µm erosion
- : Tungsten Carbide coating, SiC 150µm erosion
- ◇ : Chromium Carbide coating, Al₂O₃ 50µm erosion
- ◆ : Tungsten Carbide coating, Al₂O₃ 50µm erosion

3) Erosion된 코팅층의 표면형상

Erosion 시험을 완료한 피복층을 전자현미경으로 관찰한 사진은 Fig. 13 및 Fig. 14에 나타내었다. Fig. 13의 tungsten carbide 경우 화살표로 표시된 부분들은 다른 부분보다 깊게 파여진 부위를 나타내는데 이 부분을 EDX로 분석한 결과 Co함량이 거의 없이 tungsten만 측정되었다. 이는 녹지 않은 tungsten carbide들이 erosion 시험시 abrasive 입자와의 충돌로 국부적으로 심하게 마모되어 나타나는 것으로 추측된다. 그러나 chromium carbide 피복층의 경우는 위치에 따른 성분분포의 차이가 없어서 Ni-Cr 및 Chromium Carbide의 erosion이 비교적 균일하게 나타남을 알 수 있다.

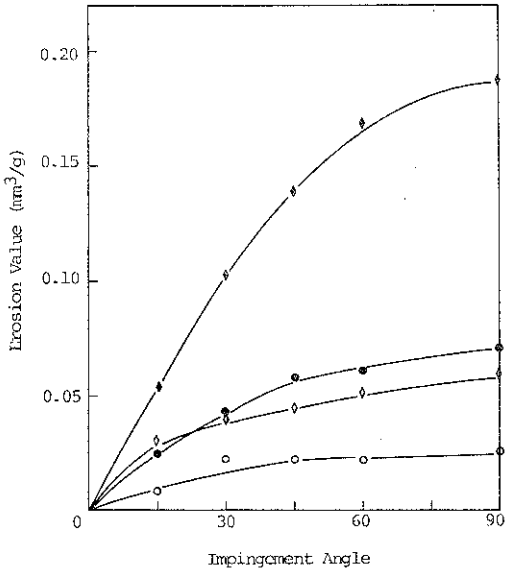


Fig. 10. Erosion vs impingement angle.

- ; Tungsten Carbide coating, SiC 150µm erosion
- ◆ ; Chromium Carbide coating, SiC 150µm erosion
- ; Tungsten Carbide coating, Al₂O₃ 50µm erosion
- ◇ ; Chromium Carbide coating, Al₂O₃ 50µm erosion

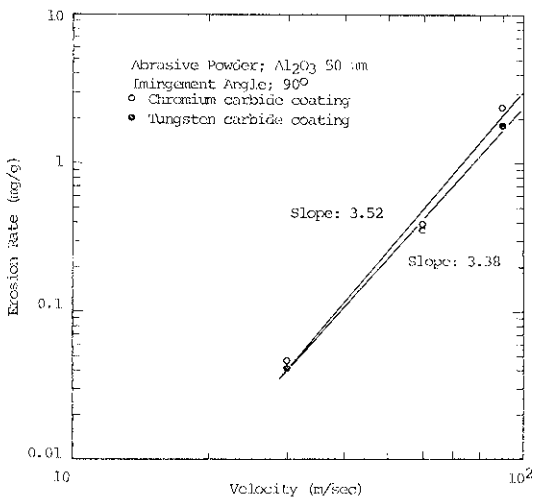


Fig. 11. Erosion rate vs particle (Al₂O₃ 50µm) velocity.

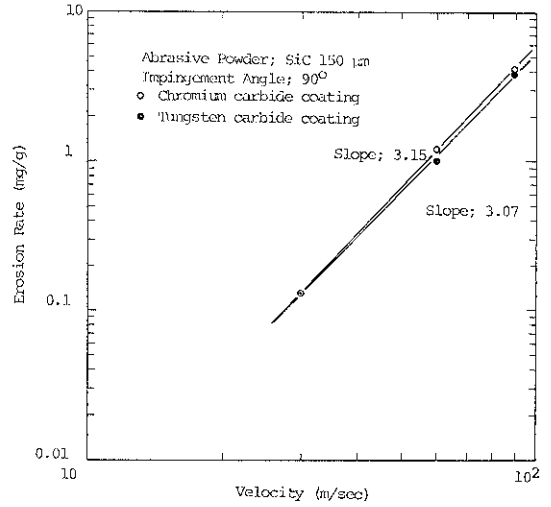


Fig. 12. Erosion rate vs particle (Al₂O₃ 150µm) velocity.



Fig. 13. Eroded surface topology of tungsten carbide coating.

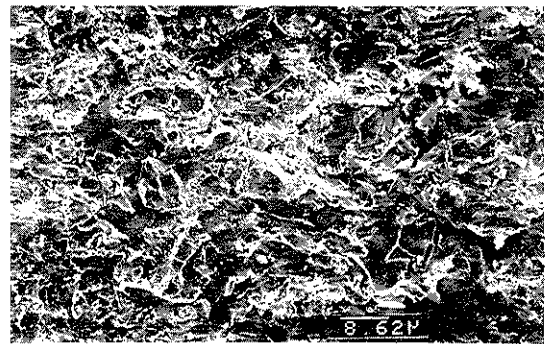


Fig. 14. Eroded surface topology of chromium carbide coating.

5. 결 론

- 1) Tungsten carbide 및 chromium carbide coating 모두 충돌각도 90°인 경우 최대 erosion rate를 나타낸다.
- 2) Erosion rate에 대한 충돌속도 (V)의 영향은 Al_2O_3 의 경우 $V^{3.1-3.2}$ 에 비례하며 SiC의 경우는 $V^{3.07-3.13}$ 에 비례하여, erosion rate의 속도 의존성은 abrasive powder의 크기가 큰 경우 낮게 나타난다.
- 3) Tungsten carbide의 경우가 chromium carbide 경우보다 약 2배 정도 erosion value가 낮다.
- 4) Tungsten carbide 피막층은 일부 녹지 않은 chromium carbide에서 마모가 먼저 발생하나 chromium carbide 피막층은 균일하게 발생한다.

6. 참고문헌

1. *Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jet*, ASTM G76.
2. C. C. Li : *Thins solid film*, 73(1980), 59
3. J. D. Reardon, M. R. Dorfman : *J. Material for energy systems*, 8(4) (1987), 414
4. A. A. Shershnev et al. : *Scientific research* (1987), 59.
5. METCO Technical Bulletin 10-082, 10-106 (1988).
6. I. Finnie : *Wear* 3(1960) 87
7. J. G. A. Bitter : *Wear* 6(1963), 169.
8. J. H. Neilson and A. Gilchrist : *Wear* 11(1968), 111.
9. I. Finnie : *Wear* 19(1972), 81
10. T. Foley and A. levy : *Wear* 91, (1983), 45.
11. A. W. Ruff and L. K. IVES : *Wear* 35(1975), 195
12. J. P. Young and A. W. Ruff : *J. of Engineering Materials and Technology* April(1977), 121.

1. *Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impi-*