

## 폭발용사에 의한 내어로전성 서멧 피막 코팅에 관한 연구

김현근\* · 남인철\* · 오재환\*\* · 김영식\*

\* 한국해양대학교 기계소재공학과

\*\* 삼공사(주) R&D부

### A Study on the Erosion-Resistant Cermet Film Coating using the Detonation Spray Method

Hyun Guen Kim\*, In Chul Nam\*, and Jea Wan Oh\*\* and Young Sik Kim \*

\* Division of Mechanical & Materials Engineering, Korea Maritime University, Pusan 606-791, Korea

\*\* SamgongCo. (Ltd), Pusan 604-030

#### Abstract

The properties of the detonation sprayed cermet coating are investigated through the mechanical, corrosion and erosion test. The test results are also compared with the properties of the substrate materials, STS 329J1, dual phase stainless steel and the plasma sprayed cermet coatings. The two kinds of carbide cermet power, WC+NiCr,  $Cr_3C_2$ +NiCr were used in this experiment.

The experimental results showed that the anti-corrosive and anti-erosive properties of the detonation sprayed cermet coatings are superior to the plasma sprayed cermet coatings. The WC+NiCr cermet coating appears to be more effective than  $Cr_3C_2$ +NiCr cermet coating in abrasive erosion environment, whereas the  $Cr_3C_2$ +NiCr cermet coatings are more effective in cavitation erosion environment.

(Received September 22, 2000)

Key Words : Detonation sprayed coating, WC carbide,  $Cr_3C_2$  carbide, Anti-corrosion, Abrasive erosion, Cavitation erosion

#### 1. 서 론

폭발용사는 폐쇄된 관내에 연료와 적당량의 산소를 충전하여 점화시킴으로써 초고속 충격파를 수반하는 폭발현상을 이용하여 세라믹스와 같은 고용점의 용사 피막을 코팅하는 기술이다.

폐쇄된 관내에서 얻어지는 폭발파(detonation wave)의 속도는 산소·아세틸렌 혼합기체를 사용할 경우 약 3,000m/sec까지 도달한다. 이러한 고온과 초고속의 폭발파 속에 용사용 분말을 투입해서 용융 또는 반응용 상태의 입자를 고속으로 모재에 붙여 붙여 피막을 형성하는 방법이 폭발용사이다. 이러한 고속 압력파에 의해 가속되는 용사입자의 비행속도는 음속의 2~4배에 도달할 수 있으므로 모재표면에서의 앵커효과(anchoring effect)가 대단히 높아 밀착성이

우수한 피막을 얻을 수 있다.

폭발용사는 지금까지 개발된 여타의 용사법에 비해 가장 탁월한 밀착특성을 얻을 수 있는 용사법으로 평가되어 매우 다양한 분야에 그 적용이 검토되고 있다.

그러나 이 용사법은 일반 프레임용사나 플라즈마용사법에 비해 그 개발역사가 짧아 그 기술이 충분히 확립된 단계에 와 있지는 않다.

초고온·고속류의 플라즈마 제트를 이용한 플라즈마용사 제트의 온도는 노즐 출구의 중심선에서는 10,000℃ 이상이며 용융입자의 비행속도는 900m/sec 정도이다. 따라서 합금금속, 산화물 세라믹스 등 용융 가능한 물질은 모두 용사가 가능하고, 더구나 생성된 피막은 분말식 프레임용사에 비해 더욱 세밀하며 밀착강도도 훨씬 높다. 이러한 이유로 지금까지 플라즈마용사가 분말용사의 주류로 되어 왔다<sup>1~5)</sup>

그러나 WC,  $Cr_3C_2$  등을 포함하는 탄화물 세라믹스

서멧 용사의 경우, 플라즈마용사에 의한 피막의 품질은 폭발용사에 비해 떨어지는 경향이 있어 상당히 가혹한 조건에서 사용되는 경우에는 폭발용사의 피막이 주로 사용된다. 폭발용사와 플라즈마용사의 차이는 화염의 온도는 플라즈마용사 쪽이 폭발용사보다 훨씬 높고, 화염의 유속은 폭발용사 쪽이 훨씬 빠르다. 화염의 온도가 너무 높으면 탄화물의 분해가 격렬하게 되고, 반대로 유속이 낮아지면 입자가 공기 중의 산소와 접촉하는 시간이 길게 되어 탄화물 중의 탄소가 산화하게 되어 탄화물 서멧의 특성을 저하시킨다.

내마모, 내식성을 증대시키기 위하여 공업적으로 광범위하게 사용되고 있는 용사재료는  $Al_2O_3$ ,  $Al_2O_3-TiO_2$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $Cr_2O_3-SiO_2$  등의 산화물계 세라믹스 분말과 WC,  $Cr_3C_2$  등의 탄화물계 세라믹스 분말로 분류할 수 있고, 탄화물계가 산화물계보다 높은 경도를 가지며 우수한 내마모성을 갖는다. 그러나 탄화물들은 고온에서 분해되기 쉽고 취성이 큰 단점이 있어 순수한 탄화물 상태로는 용사가 불가능하다. 그러므로 고온에서의 내식성과 내산화성이 우수한 NiCr, NiAl, CoNi 등의 금속 결합체를 첨가하여 서멧형태의 혼합분말을 제조하여 사용한다. 이렇게 함으로써 모재와의 접합강도와 코팅층의 인성을 증대시키고 탄화물의 분해를 방지하여 코팅층의 특성을 향상시킬 수 있다<sup>6)9)</sup>.

본 연구에서는 내열, 내식, 내마모 용사피막재료로서 가장 탁월한 특성을 갖는 것으로 알려진 WC와  $Cr_3C_2$ 의 탄화물 세라믹스 분말에 대해 각각 적당한량의 바인더재료를 혼합시킨 혼합분말로 하여 폭발용사법에 의해 서멧 피막코팅을 실시하고 피막의 에로전 특성을 중심으로 한 여러 가지 특성을 조사하여 이들 특성과 폭발용사조건과의 상관관계를 규명하였다. 또한 동일한 용사 분말을 사용하여 기존의 플라즈마용사법에 의해 용사피막을 형성하고 폭발용사피막과의 특성을 비교 고찰하였다.

소지금속(substrate)으로는 고강도, 고내식성의 STS 329J1급 2상 스테인리스강재를 이용하였고, 용사피막의 특성과 소지금속 자체의 특성까지도 비교 고찰하였다. 이러한 실험결과로부터 최적의 용사피막 형성 조건을 도출하여 가혹한 운전조건에서 작동되는 각종 부품의 표면용사 코팅조건을 제시하고자 한다.

## 2. 실험방법

### 2.1 시험 재료

용사에 사용한 소지금속은 Cr 24.5~26.0wt%, Ni

4.5~5.5wt% 함유된 고강도와 높은 내에로전성을 갖고 내산성, 내공식성이 탁월한 STS 329J1급 2상 스테인리스강재로서 Table 1과 같은 화학조성을 갖고, 인장강도 588MPa 이상, 연신율 18% 이상으로 그 기계적 특성은 Table 2와 같다. 시험편은 1201×50×12t의 크기로 하였다.

용사코팅용 분말재료로는 고온에서의 내마모성, 내에로전성, 내식성이 지금까지 가장 탁월한 것으로 알려진 WC계와  $Cr_3C_2$ 계를 선택하였다. Table 3은 이들 서멧 재료의 화학적 조성과 입자의 크기를 나타낸 것이다.

Table 1 Chemical compositions of substrate

(wt%)											
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N	Al	Fe
0.03	1.00	1.00	0.04	0.03	24.5 ~26.0	4.5 ~5.5	1.0 ~2.0	0.5 ~1.00	0.08 ~0.15	-	RE

Table 2 Mechanical properties of substrate

Proof Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (Hv)
> 392	> 588	> 18	> 277

Table 3 Chemical compositions of spraying materials

(wt%)							
	C	Cr	Ni	Fe	W	Normal particle size	m.p(°C)
WC-NiCr	5.90	20.25	4.65	< 2.0	RE	45+15 $\mu$ m (-325mesh+15 $\mu$ m)	2777
$Cr_3C_2$ -NiCr	9.5	70.5	20	-	-	45+11 $\mu$ m (-325mesh+11 $\mu$ m)	1890

### 2.2 용사 시험편 및 전처리 조건

본 실험에서는 용사에 앞서 소지금속표면을 조면화하기 위해  $Al_2O_3$  #46 그릿으로 블라스팅을 실시하고, 또한 조면화 과정에서 생긴 이물질들을 제거하기 위해 에어 블라스팅(air blasting)을 실시하였다.

폭발용사장치로서는 연속 폭발 시스템(CDS : continuous detonation system)을 사용하였다. CDS 시스템은 고속프레임(HVOF) 용사를 개량한 완전 자동식 용사장치로서 산소와 연료가스의 화학반응을 이용하며, 이 화학반응에 의해서 생긴 열에너지와 운동에너지를 이용해서 용사재료를 용융하고 용융된 입자를 초고속으로 가속시켜 피막을 형성하는 용사장치이다.

본 실험에서는 연료기체로 산소-프로판 혼합기체를 사용하였으며 클리닝 기체는 질소를 이용하였다. 용사건의 연료혼합비율, 혼합기체의 유량, 클리닝 기체의

유량은 일정하게 하고 용사조건 중에서 가장 크게 영향을 미치는 용사거리를 변화시켜, WC계와 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 서멧 재료에 대해 각각 3가지 조건씩 총합 6개의 시험편을 제작하였다. 그리고 이러한 폭발용사 코팅피막을 기존의 플라즈마용사피막과 비교하기 위해 동종의 재료를 이용하여 플라즈마용사 시험편을 제작하였다.

Table 4, 5는 각각 폭발용사 시험편과 비교제인 플라즈마용사 시험편에 대한 용사조건을 나타낸 것이다. 모든 조건의 시험편은 80 $\mu$ m의 피막두께로 용사하여 제작하였다.

**Table 4** Specimen designations and spraying conditions for detonation spraying

Specimen designation	Powder	Oxy : Propane mixing ratio	Flow rate of mixture gas	Cleaning gas & its flow rate	Spraying distance (mm)
W1	WC-NiCr	1.4 : 1	48 l/min	N <sub>2</sub> 20 l/min	200
W2	WC-NiCr	1.4 : 1	48 l/min	N <sub>2</sub> 20 l/min	200
W3	WC-NiCr	1.4 : 1	48 l/min	N <sub>2</sub> 20 l/min	200
C1	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> -NiCr	1.4 : 1	48 l/min	N <sub>2</sub> 20 l/min	200
C2	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> -NiCr	1.4 : 1	48 l/min	N <sub>2</sub> 20 l/min	200
C3	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> -NiCr	1.4 : 1	48 l/min	N <sub>2</sub> 20 l/min	200

**Table 5** Specimen designations and spraying conditions for plasma spraying

Specimen designation	Powder	Gun model	Plasma gas flow (l/min)	Ampere (A)	Voltage (V)	Powder feeding rate (gr/min)	Spraying distance (mm)
PW	WC-NiCr	GE731	Ar 100 H <sub>2</sub> 8	400	57	60	75
PC	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> -NiCr	GE732	Ar 100 H <sub>2</sub> 8	500	68	42	62

**2.3 용사피막의 조직, XRD 분석 및 경도 특성 실험**

본 실험에서는 용사피막 단면의 미세구조 및 표면의 적층상태를 SEM을 이용하여 분석하였다. 또한 용사전의 서멧 분말과 용사후의 피막에 대한 XRD 분석을 통해 용사시 탄화물의 분해현상, 결정학적 성장변화현상을 분석하여 이러한 변화거동이 피막의 기계적 특성에 미치는 영향을 고찰하였다.

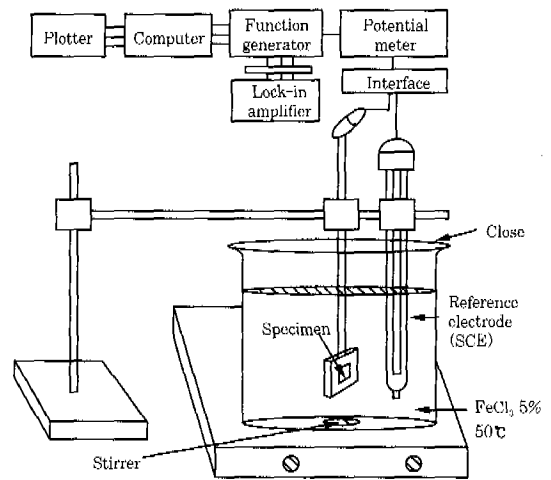
용사피막의 경도 측정에는 세라믹스 용사피막 단면의 미소 경도 측정을 규정한 JIS 8666에 의거하여 시험하중 1kgf, 하중 유지시간 15sec로 하여 10회 측정하여 그 평균값을 구하였다.

**2.4 내부식성(Anti-corrosion) 실험**

본 실험에서는 스테인리스강의 내공식성을 조사하기

위한 시험법으로 규정된 JIS G0578에 의거하여 부식 시험을 실시하였다. 시험편의 크기는 20×25mm로 하고 그 중 노출면적은 10×10mm로 하여 나머지 부분은 마스킹(masking)을 실시하였다.

부식용액은 5%의 염화 제2철 용액(FeCl<sub>3</sub>)으로 50℃로 항온 유지한 상태에서 용사 시험편을 부식액에 침지시켜 부식시험을 행하였다. 기준전극으로는 포화 카로멜 전극(SCE : saturated calomel electrode)을 사용하여 부식전위를 측정하였다. 또한 수증기의 증발을 방지하기 위해 밀폐 시켰으며, 농도 분극의 영향을 방지하기 위해 교반기를 사용하여 용액에 유동을 주었다. 부식시험법의 시스템을 Fig. 1에 나타내었다.



**Fig. 1** Schematic of the corrosion test equipment and specimen set up

**2.5 내에로전성(Anti-erosion) 실험**

본 연구에서는 용사피막의 내에로전성을 평가하기 위해 어브레시브 에로전 시험과 캐비테이션 에로전 시험을 행하였다.

어브레시브 에로전 실험은 ASTM-G65-91 표준에 의거하여 건식고무바퀴 마모시험법에 의해 평가하였다. 시험편 크기는 251×16w×6tmm이며, 측정조건은 하중 32N으로 하고 회전속도는 150rpm, 마모시간은 200회전으로 하여 무게감량을 측정하였다. 연마재는 120mesh의 알루미늄을 사용하였으며, 연마재의 유출량은 1kg/min으로 하였다. Fig. 2에 어브레시브 에로전 실험법의 모식도를 나타내었다.

한편 용사피막의 캐비테이션 에로전성을 실험하기 위해 캐비테이션 실험법으로 표준화된 ASTM-G32를 개량한 개량형 캐비테이션 실험법<sup>(10)</sup>을 이용하여 진동자의 선단에 볼트형의 스테인리스 강재 디스크를 삽입하고, 이것을 매 시험편마다 교체하였다. ASTM-G32

의 캐비테이션 실험법을 참조하여, 시험편은 디스크로부터 0.5mm 떨어진 위치에 고정하여 자연해수를 채워 시험편이 해수면 아래 8~10mm 위치에 잠기도록 배치하였다. 표준화된 실험법에서는 증류수를 채워 시험하도록 되어있으나, 이 실험에서는 더욱 가혹한 분위기를 만들기 위해서 자연해수를 채워 시험하였다. 진동자의 진동수는 20kHz, 진폭은 50 $\mu$ m로 하고 각 시험편에 대해 4시간씩 시험하여 그 무게감량을 조사하였다. 이와 같은 방법으로 용사분말, 용사방법, 용사조건의 차이에 따른 캐비테이션 에로전 특성을 조사하였다. Fig. 3에 캐비테이션 에로전 실험법의 모식도를 나타내었다.

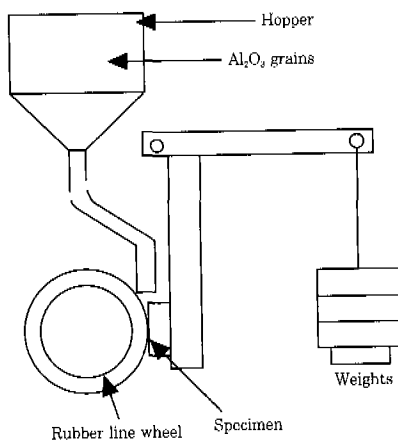


Fig. 2 Schematic of abrasive erosion test

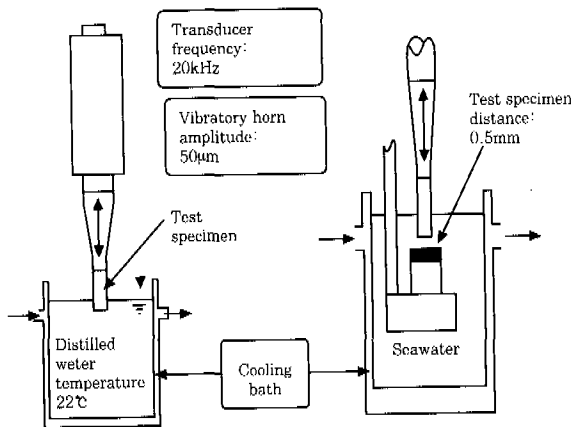


Fig. 3 Schematic of the vibratory cavitation corrosion test according to ASTM-G32 and of the modified test used in this study

### 3. 실험결과 및 고찰

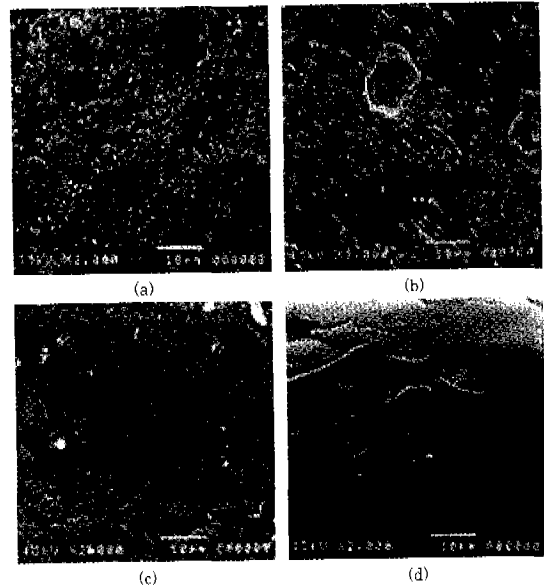
#### 3.1 용사조건과 용사분말에 따른 피막의 조직과 경도 특성

Photo. 1은 WC-NiCr 분말과 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr 분말을

폭발용사와 표준조건의 플라즈마용사를 행하여 얻어진 피막의 미세조직을 비교하여 나타낸 것이다. 사진 (a)는 WC-NiCr 분말의 폭발용사피막이며, (b)는 동일재료를 이용한 플라즈마용사피막이다. 사진 (b)의 플라즈마용사피막은 (a)의 폭발용사에 비해 기공의 크기가 크고, 스프렛(splat)과 스프렛 사이에도 산화막이 존재해 있다. 또한 미용융 부분인 탄화물의 양도 폭발용사에 비해 현저히 줄어들었다는 것을 알 수 있다.

이것은 플라즈마용사는 발열온도가 높고 용융입자의 비행속도가 폭발용사에 비해 느리므로 후술하는 XRD 분석 결과로부터 알 수 있는 바와 같이 용융입자의 비행 중 탄화물의 분해와 산화반응이 일어나기 때문인 것으로 사료된다<sup>11,12)</sup>.

사진 (c)은 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr 서멧 폭발용사피막이며 사진 (d)는 동일한 분말에 대한 표준조건의 플라즈마용사에 의해 얻어진 피막의 미세조직 사진이다. Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr 서멧 분말은 폭발용사나 플라즈마 용사에 의해 모두 완전 용융되어 모재표면에 적층되어 있으며, 플라즈마에 의해서 형성된 피막은 폭발용사에 의해서 형성된 피막보다 스프렛과 스프렛 사이에 다소 많은 미세기공과 산화물이 존재함을 보이고 있다.



(a) WC-NiCr detonation sprayed coating (b) WC-NiCr plasma sprayed coating (c) Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr detonation sprayed coating (d) Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr plasma sprayed coating

Photo. 1 Comparisons of different spray methods

Fig. 4는 WC계 피막과 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>계 피막의 용사거리의 변화에 따른 경도 변화를 나타낸 것이다. 모든 조건의 용사피막은 소지금속에 비해 2~3배 이상의 높은 경도를 나타내고 있으며, 폭발용사에 의한 WC계 피막과 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>계 피막을 비교하면 WC계 피막이 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>계 피막

보다 약 150~250 Hv. 정도 높은 경도를 보이고 있고, WC계 피막의 경우 용사거리 200mm에서 가장 높은 경도를 나타낸다. 그리고 플라즈마피막은 WC계의 경우 동종의 폭발용사피막에 비해 약 200~300 Hv. 정도의 낮은 경도를 나타내고 있으나, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>계 피막의 경우는 동종의 폭발용사피막에 비해 약 30 Hv. 정도 높은 경도 값을 나타내지만 큰 차이는 없음을 보이고 있다.

여기서 폭발용사의 경우 200mm의 용사거리에서 가장 높은 경도를 나타내는 것은 이 거리에서 가장 치밀한 조직이 얻어지기 때문인 것으로 생각된다. 그리고 플라즈마 코팅피막의 경우, WC의 경우에는 폭발용사에 비해 더 낮은 경도를 나타내는 것은 경도 특성에 큰 영향을 미치는 탄화물의 분해와 산화반응이 폭발용사에 비해 현저하게 일어나기 때문으로 사료된다.

Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>의 경우에는 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 입자와 NiCr 바인더재료 모두 완전 용융된 상태에서 소지금속에 적층되기 때문에 두 용사시의 경도 값은 큰 차이가 없는 것으로 사료된다.

용사입자의 용융과 비행중의 반응을 고찰하기 위해 용사전 분말입자의 성상과 용사 후 코팅피막의 성상을 XRD 분석을 통해 조사하여 그 결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 제시하였다.

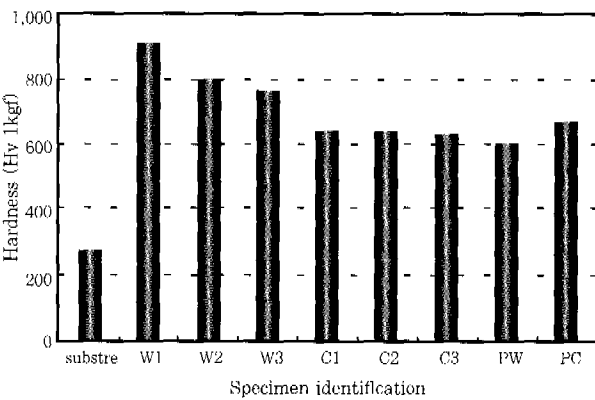


Fig. 4 Variation of micro-hardness with spray condition

Fig. 5의 WC-NiCr 서멧 분말의 경우 분말(powder)의 주된 상은 WC상으로 회절각 40°, 48°, 54° 부근에서 피크가 나타났다. 그러나 폭발용사에 의한 피막에서는 분말상태와 같은 회절각도에서 WC상이 뚜렷이 나타났지만, 플라즈마용사 피막에서는 회절각 40° 부근을 제외한 모든 부분에서는 피크가 거의 나타나지 않았다. 이것은 플라즈마용사시 WC 분말이 고온의 화염 중에서 분해되었기 때문인 것으로 사료된다.

또한 회절각 35° 부근을 보면 분말상태에서는 나타나지 않은 W<sub>2</sub>C의 새로운 상의 피크가 폭발용사피막과 플라즈마용사피막에서 나타났다. 이것은 WC 탄화물

이 용사과정 중 고온, 고속의 화염 중에서 분말의 조립 상태가 부서져 미세한 WC 입자가 고온의 연소가스에 노출됨으로써 탄화물의 분해반응이 촉진되어 탄소(C)는 대기 중으로 방출되고 W<sub>2</sub>C의 새로운 상으로 상변화를 일으키기 때문이다.

이것을 화학반응식으로 나타내면 다음과 같다<sup>11,12)</sup>.

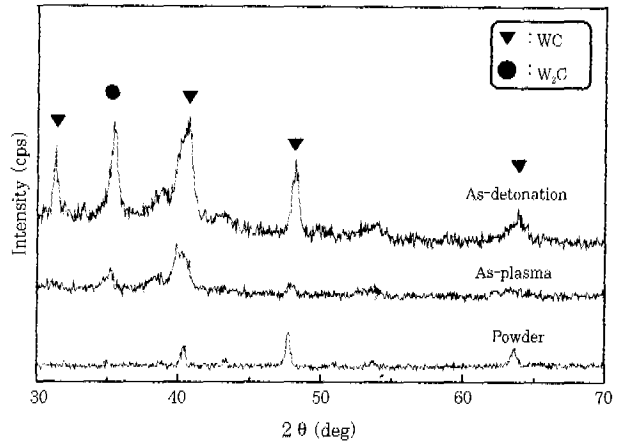
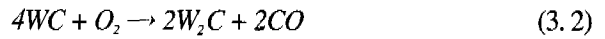


Fig. 5 Traces for WC-NiCr powder and as-sprayed

Fig. 6의 XRD 분석결과를 보면 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr 서멧 분말의 경우 분말상태에서의 주된 상은 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>상이다. 그러나 폭발용사피막과 플라즈마용사피막에서는 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>상은 거의 나타나지 않으며, 회절각 44° 부근에서 Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>상이 주된 상으로서 나타났으며, 전체적으로는 비정질에서 나타날 수 있는 형태의 피크를 나타내고 있다. 이것은 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr 서멧 분말은 용융점이 상대적으로 낮기 때문에 폭발용사시나 플라즈마용사시 다같이 완전 용융된 상태에서 모재에 충돌하여 적층되기 때문이다. 또한 용사 후의 주된 상이 Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>상으로 나타나는 이유는 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 탄화물이 용사과정 중에 고온, 고속의 화염 중에서 탄소성분이 분해, 소실되어 탄소 결핍층인 Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>상으로 상변화를 일으켰기 때문이다. 분말상태에서 Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>상이 나타나는 것은 분말의 제조과정 중에서 생성된 것으로 사료된다.

한편, 크롬 탄화물은 Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>의 3가지 형태의 상이 존재하며 이들 각각의 용융점은 1,518℃, 1,787℃, 1,920℃이다. Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>는 고온에서 장시간 노출시키면 탄소의 산화에 의해 탄소의 결핍이 야기되므로 사방정인 δ-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>는 육방정 구조인 γ-Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>와 입방체인 β-Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>으로 상변화 한다. Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>에서 Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>으로 상변화할 때 부피수축이 일어나 용사피막의 파괴

원인으로 작용하여 기계적 성질을 저하시킨다고 보고 되고 있다<sup>13-15)</sup>.

이상의 XRD 결과로부터 WC계 서멧 분말의 폭발용사피막과 플라즈마용사피막의 미세조직과 경도 특성의 현저한 차이는 용사공정 중 탄화물의 분해거동이 서로 다르기 때문이라는 사실을 알 수 있었다. 이것은 폭발용사와 플라즈마용사의 열원과 용융입자의 비행속도의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 플라즈마용사의 열원은 폭발용사보다 상대적으로 매우 높기 때문에 이 열원에 의해서 WC계 서멧 분말이 완전 용융되어 소지 금속 표면에 적층된다. WC계 피막의 경우 플라즈마용사시 탄화물의 분해가 많이 일어나는 이유는 화염의 온도가 매우 높고, 용융입자의 비행속도가 느리기 때문에 비행 중 탄화물의 분해가 현저하게 일어난다. 그러나 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>계 서멧 분말의 경우에는 용융점이 WC계 서멧 분말보다 상대적으로 낮기 때문에 폭발용사시나 플라즈마용사시 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 입자와 NiCr 바인더 재료 모두 완전 용융된 상태로 소지 금속 표면에 적층되었기 때문에 두 용사법에 의한 용사피막의 미세조직과 경도 특성의 차이는 거의 나타나지 않는 것으로 판단된다.

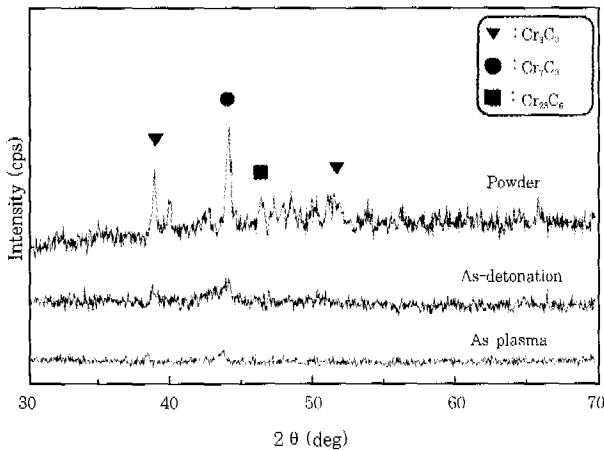


Fig. 6 Traces for Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr powder and as-sprayed

### 3.2 용사피막의 내부식 특성

Fig. 7은 5%의 FeCl<sub>3</sub> 용액을 50℃로 항온 유지한 상태에서 용사시험편을 용액에 침지시켜, SCE 기준 전극으로 부식전위를 측정할 결과이다.

실험 결과에 의하면 부식전위가 처음에는 감소하다가 다시 상승하고 대략 48시간 후에는 안정된 부식전위 값을 보이고 있다. 안정된 상태에서의 부식전위 값은 소지 금속인 2상 스테인리스강재와 WC계 용사피막, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>계 용사피막에서는 큰 차이를 보였다. 즉 소지 금속의 부식전위가 가장 낮고 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 피막, WC 피

막의 순으로 그 값이 상승하고 있어서 소지 금속 표면에 이러한 피막코팅은 그 만큼 귀(noble)한 방향으로 전위 값을 상승시키므로 내부식성은 WC계 피막이 가장 높고, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>계 피막, 소지 금속의 순으로 낮아지는 현상을 알 수 있다.

또한 동일계 피막의 경우 용사거리가 200, 250, 300mm로 증가함에 따라 부식전위 값이 낮아지는 경향을 보이고 있어서 용사거리의 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 동일계 분말을 사용한 피막에 있어서도 피막의 치밀도, 피막내에 잔류하는 탄화물의 양, 서멧 재료 중의 금속성분의 산화도 등에 의해 피막의 부식전위는 변화될 수 있다<sup>16,17)</sup>.

그러므로 용사거리가 길어짐에 따라 피막의 치밀도가 떨어지고 서멧 분말의 금속성분이 공기와의 접촉시간이 길어짐에 따라 그 만큼 산화물의 양이 많아지게 된다. 따라서 이 실험결과에서 용사거리가 200mm인 경우가 가장 높은 전위값을 보이는 것은 피막의 치밀도가 가장 높고 산화물의 양이 가장 작기 때문인 것으로 판단된다.

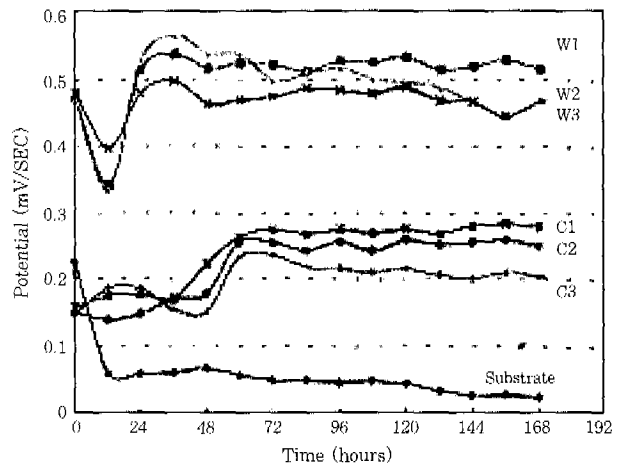


Fig. 7 Variations of corrosion potential in each spraying condition

### 3.3 용사피막의 내에로전성 특성

Fig. 8은 어브레시브 에로전 시험 결과를 나타낸 것이다. 이 결과는 200회전 어브레시브 에로전 시험 동안 무게감량을 측정하여 용사분말의 비중 값을 고려하여 계산한 값이다.

이 결과에 의하면 폭발용사에 의한 WC계 피막이 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>계 피막에 비해 우수한 내에로전성을 보이고 있으며, 동일용사 분말재료에 의한 폭발용사피막과 플라즈마용사피막을 비교하면 플라즈마용사피막의 내에로전성이 크게 저하하고 있음을 보이고 있다. 또한 폭발용사시 동일재료의 경우 용사거리가 200mm에서 가

장 우수한 내어로전성을 보이고 있다. 또한 소지금속과의 어브레시브 에로전성을 비교하면 WC계 피막재료를 이용한 폭발용사피막은 소지금속보다 내어로전성이 우수하지만, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 폭발용사피막의 경우나 플라즈마용사피막은 소지금속보다 저하된 특성을 보이고 있다.

이상의 용사피막의 어브레시브 에로전특성은 피막의 경도 및 조직특성과 밀접한 관련을 갖고 있음을 알 수 있다. 즉 조직이 치밀하고 경도가 높은 피막은 어브레시브 에로전성이 그만큼 우수하여 WC계를 이용한 200mm 거리의 폭발용사피막이 가장 우수한 내어로전성을 보이고 있다.

한편, 소지금속과 용사피막 사이의 경도 특성과 어브레시브 에로전량과의 상관관계는 없음을 알 수 있다.

즉 소지금속의 경도와 용사피막의 경도는 Fig. 4에 보인 바와 같이 모든 용사조건에서 용사피막의 경도가 소지금속의 경도보다 2~3배 이상 높으나, 어브레시브 에로전량은 WC계 폭발용사피막이 소지금속의 50% 정도의 에로전량을 보이고 있을 뿐이고 여타의 피막은 모두 소지금속과 같거나, 더 큰 에로전량을 보이고 있다. 이것은 용사피막은 세라믹스 입자와 바인더 재료의 복합구조로서 소지금속표면에 적용되어 있어 치밀도가 낮은 반면, 소지금속은 단일구조로서 치밀도가 크기 때문이다. 따라서 용사피막의 경도가 소지금속보다 높음에도 불구하고 에로전량은 WC계 폭발용사 피막을 제외한 모든 조건의 피막에서는 크게 나타나는 것으로 판단된다.

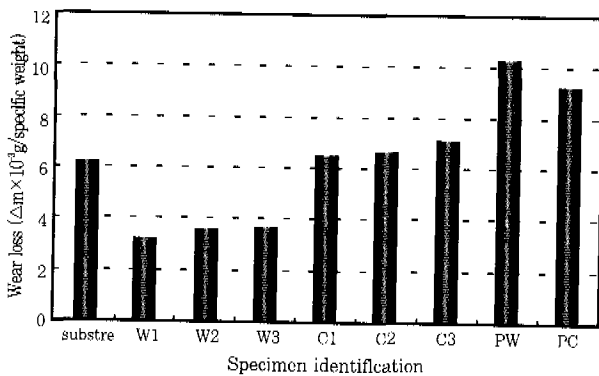


Fig. 8 Result of abrasive erosion test

Fig. 9은 캐비테이션 에로전 시험 결과를 나타낸 것이다. 이 결과는 자연해수 중에서 4시간 동안 캐비테이션 시험 후 무게감량을 측정하여 용사분말의 비중 값을 고려하여 계산한 값이다.

이 결과에 의하면 모든 용사피막에서 소지금속보다 큰 에로전이 나타나고 있으며, 어브레시브 에로전 시험 결과와는 반대로 WC계 폭발용사피막이 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>계 폭발용사피막보다 큰 에로전이 나타나고 있음을 보이고 있

다. 그리고 캐비테이션 에로전성에 있어서도 폭발용사의 경우가 플라즈마용사의 경우보다 더 우수한 특성을 보이고 있음을 알 수 있다.

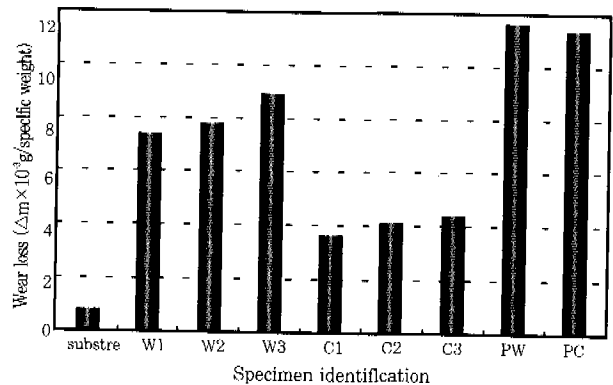
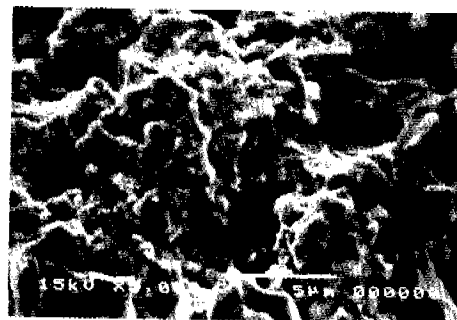


Fig. 9 Result of cavitation erosion test

WC계 폭발용사피막과 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>계 폭발용사피막 사이에 어브레시브 에로전성과 캐비테이션 에로전성에 있어서 서로 반대되는 결과를 나타내는 원인을 규명하기 위해 캐비테이션이 일어난 면의 SEM분석을 실시하였다. Photo. 2는 2종류의 피막에 대해 4시간 동안 캐비테이션 시험 후 촬영한 표면의 SEM 사진이다.



(a) WC-NiCr cermet coating



(b) Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr cermet coating

Photo. 2 SEM observations of cavitation erosion surfaces

WC계 폭발용사피막의 경우에는 탄화물이 떨어져 나가 생긴 다수의 보이드(void)가 많이 나타나 있는 반면 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>계 폭발용사피막에서는 보이드가 나타나 있지 않으며, 양쪽 모두에서 입자가 떨어져 나간 입계면과 시어 (shear lip)의 양상을 보이고 있다.

캐비테이션 에로전현상은 피로균열의 발생과 입계면을 따르는 전과저동에 의해 발생하는 현상으로 보고되고 있다<sup>16)</sup>. 따라서 캐비테이션 에로전은 피로균열의 발생장소인 미세한 응력집중부가 많으면 그 만큼 많이 일어난다고 생각할 수 있다. WC계 폭발용사 피막은 미용융 상태의 WC 입자와 용융상태의 NiCr 바인더재료가 소지금속표면에 복합된 구조로 적층되어 이 계면에서 응력집중이 일어나 캐비테이션 에로전이 많게 되나, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>계 폭발용사피막은 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 입자와 NiCr 바인더재료가 다 같이 완전용융되어 소지금속표면에 적층되어 그 계면에서의 응력집중효과가 나타나지 않기 때문에 에로전량이 작게 나타나는 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

내식, 내마모용으로 널리 사용되고 있는 WC계와 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>계의 탄화물 세라믹스 서멧 재료를 고강도, 고내식성의 SUS 329J1급 2상 스테인리스강 표면에 폭발용사법에 의해 피막을 형성하였다. 이 피막에 대한 용사조건과 용사분말에 따른 미세조직, 경도 특성, 내부식성, 어브레시브 에로전성 및 캐비테이션 에로전성을 평가하여 최적의 폭발용사조건을 확립하였다. 또한 폭발용사피막과 기존의 플라즈마용사피막과의 여러 가지 특성을 비교하여 폭발용사피막의 우수성을 증명하였다.

본 연구를 통해서 얻은 주요 결과들은 다음과 같다.

1. 폭발용사에 의한 WC계 서멧 피막은 용사공정 중 탄화물의 분해가 거의 일어나지 않으나 플라즈마용사에 의한 WC계 서멧 피막은 다량의 탄화물 분해가 일어난다. 그 결과 폭발용사피막에 비해 플라즈마용사피막의 특성이 크게 저하된다.

2. Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>계 서멧 피막의 경우에는 폭발용사시나 플라즈마용사시 다같이 탄화물 분해가 일어나며 완전 용융상태의 적층구조로 되어 있어 그 특성이 두 공정 사이에서 큰 차이가 나타나지 않는다.

3. 내식성은 소지금속인 STS 329J1급 2상 스테인리스강, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>계 서멧 피막, WC계 서멧 피막 순으로 향상된다.

4. 폭발용사시 산소와 연료와의 혼합비 1.4:1 혼합기체의 유량 48 l/min의 조건에서 용사거리는 200mm에서 가장 우수한 조직, 경도, 내부식성 및 내 에로전성을 갖는다.

5. 어브레시브 에로전성은 폭발용사에 의한 WC계 서멧 피막의 경우 소지금속보다 더 우수한 특성을 나타내나, WC계의 플라즈마용사피막과 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>계 폭발용사피막 및 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 플라즈마용사피막의 경우에는 소지금속

보다 더 저하된다.

6. 캐비테이션 에로전성은 모든 조건의 용사피막에서 소지금속보다 저하하며, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>계 폭발용사피막이 WC계 폭발용사피막보다 더 우수한 특성을 나타낸다.

#### 후 기

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소 주관으로 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. 表面改質技術總監編輯委員會 : 表面改質技術總監(1993), p 739
2. 熔接·接合 便覽 : 大韓熔接學會, p 743
3. 蓮井 淳, 森塚 脩 : 溶接全集 第15卷, 肉盛溶接·溶射, p 131
4. V. Kadyrov : Detonation Coating Technology, 日本溶射學會誌, Vol. 29, No. 4(1992), p 48
5. Robert B. Heimamm : Plasma-spray Coating, p 181
6. Tani K., Nakahira A. : Application of HVOF Sprayed WC Cermet Coating for Paper Mills. Proc. of the 15th International Thermal Sprays Conference(1998) Nice France, p 1097
7. Liu M., Wang D., Wang J., Dai M., Zhou K. : Study on the Spray Processes and Characteristics of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/NiCr Coating Proc. of the 15th International Thermal Spray Conf(1998) Nice France, p 683
8. 岡家, 李, 紀, 王 : フレーム溶射法によるCr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr皮膜の物性に及ぼす溶射條件の影響, (日本)溶接學會論文集, Vol. 16, No. 1(1998), p 25
9. 김영식, 김병희 : 티나니아 세라믹 용사피막의 強度向上에 관한 연구, 대한용접학회지, Vol. 10, No. 4(1992), p 181
10. Keiji Sonoya and Chang Jiu li : HVOF 溶射皮膜の皮膜性状と性能, 日本溶接學會全國大會講演概要, 第60集(1997), p 142
11. Y. Arata, A. Ohmori and E. Gofuku : WC-Co high Energy Thermal Sprayed Coating, Trans. of JWRI, Vol. 14, No. 2(1985), p 267
12. Lisbeth Jacobs and Margaret Hyland : Microstructure and Decarburization of Carbide Cermet Coatings Deposited by High Velocity Air-Fuel Spraying.
13. 실동욱, 김병희 : 분무건조법에 의한 용사용 WC-17%Co 복합 분말 제조 및 HVOF(High Velocity Oxy-Fuel)용사특성, 대한용접학회지, Vol. 14, No. 6(1996), p 436
14. 西蘭和博 : 透過形電顯による Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-7wt% NiCr系 溶射皮膜の觀察, 溶接學會全國大會講演概要, Vol. 57(1992), p 68
15. 김병희, 서동수 : H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 비에 따른 hybrid HVOF 용사된 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-7wt%(NiCr) 용사층의 특성 및 산화거동, 대한용접학회지, Vol. 15, No. 4(1997), p 352



16. Lester T., Kingerler D.J., etal : Thermally Spraycd Composite Coatings for Enhanced Corrosion Protection of steel Structures. Proc. of 15th International Thermal Spray Conf(1998) Nice France, p 49
17. Guilemany J.M., Depaco J.M., etal : Corrosion Resistance HVOF Coatings Based Upon TiC+NiTi and (Ti,W) C+Ni. Proc. of 15th International Thermal Spray Conf(1998) Nice France, p 57
18. Kreye H., Schwetzke R., Buschinell A., Boccanera L. : Cavitation Erosion Resistant Coating Produced by Thermal Spraying and by Weld Cladding. Proc. of the 15th International Thermal Sprays Conf(1998) Nice France, p 269