

**研究論文**

## 크롬탄화물 용사피막의 접착력 및 잔류응력측정에 관한 연구

金義炫\* · 金鍾榮\* · 權肅仁\*\*

### A Study on the Adhesion Strength and Residual Stress Measurement of Plasma Sprayed Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr Coating

E. H. Kim\*, C. Y. Kim\* and S. I. Kwun\*\*

**Key Words** : Plasma Spraying(플라즈마용사), Chromium Carbide Coating(크롬탄화물코팅), Residual Stress(잔류응력), X-ray Stress Measurement(X선응력측정), Bond Coating(접합코팅), Porosity(기공), Tensile Adhesion Test(접착강도시험)

#### Abstract

The plasma sprayed Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr coatings are widely used as wear-resistant and corrosion-resistant materials. The mechanical properties of the plasma sprayed Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr coatings were examined in this study. The distribution of the residual stress with the coating thickness was also examined by X-ray diffraction method.

The pore in the coatings could be classified into two types ; 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 coat and substrate or top coat and bond coat depending on the existence of bond coat.

It was found that the compressive residual stress near the interface decreased with the increase of the top coat thickness. The tensile adhesion strength of the coating without bond coat was higher than that with bond coat, because the coating with bond coat has higher horizontal crack density near the interface between bond coat and top coat.

\* 정회원, 한전 전력연구원 수 · 화력발전연구실

\*\* 정회원, 고려대학교 공학대학 재료 · 금속공학부

## 1. 서 론

용사법은 각종 부품표면에 여러 목적의 용사재료를 충돌, 적층시켜 내마모, 내부식, 내열특성 등을 향상시켜 주는 표면처리법 중 하나이다. 용사법에 의해 부품의 특성을 향상시키고자 할 때 특히 피막의 내구성이 중요시 되는데, 용사피막내의 잔류응력이 이러한 내구성에 큰 영향을 미친다.

잔류응력의 생성원인은 용사과정 및 냉각에 있어서 온도분포에 관계되는 열팽창 및 수축의 차이, 피막에서의 상변화, 형상학적 구속(geometrical restraint) 등이 있다<sup>1)</sup>. 또한 피막에 있어서 잔류응력은 모재크기 및 형상, 모재와 피막의 열팽창계수, 피막두께, 용사조건, 모재온도 및 피막내의 미세균열 발생여부 등에 의해 크게 좌우된다<sup>2,3)</sup>.

본 연구에서는 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr 플라즈마 용사피막에 대해 접합코팅 유, 무 및 피막두께에 따라 피막의 잔류응력을 측정하였고, 잔류응력 측정결과와 피막의 접착 강도결과를 피막의 미세조직과 관련하여 비교, 검토하였다.

한편 잔류응력 측정방법으로는 X선의 침투 깊이가 수  $\mu\text{m}$  에 불과하여 용사피막의 잔류응력 측정에 매우 효과적인 X선 측정법을 이용하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 시편준비

용사피막의 잔류응력측정 및 접착력측정을 위한 시편재질은 SM45C 이며 시편형상은 Fig. 1 (a) 에 서와 같이 잔류응력 측정용시편은 길이 55mm, 폭 10mm, 두께 4mm 이었고 접착력 측정용 시편은 Fig. 1 (b), (c) 처럼 직경 및 높이가 25.4mm 인 봉상 시편이었다.

한편 용사작업 전의 블라스팅조건은 Table 1 에, 용사분말의 조성 및 크기는 Table 2 에, 용사조건은 Table 3 에 나타내었다.

X선 잔류응력 측정용시편 및 접착력 측정용시편은 각각 두 가지 종류로 준비하였는데 하나는 모재에 접합코팅(bond coating) 한 후 그 위에 크롬탄화물의 최종코팅(top coating)을 한 시편과 다른 하나

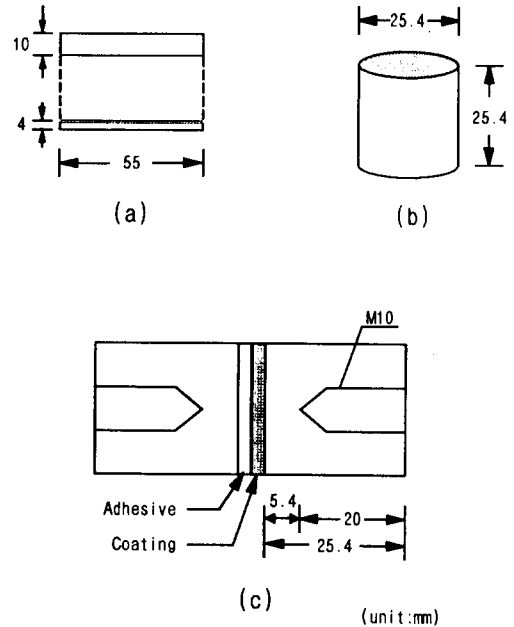


Fig. 1 Shape and dimensions of specimens  
(a) specimen for measurement of residual stress  
(b) substrate for tensile adhesion test  
(c) assembled specimen for tensile adhesion test

Table 1. Conditions of grit blasting process

Parameters	Condition
Distance	20 mm
Grit	Alumina (Metcolite "F")
Blasting pressure	7 kg/cm <sup>2</sup>
Grit size	440 $\mu\text{m}$
Roughness (Ra)	6.2 $\mu\text{m}$

는 접합코팅없이 크롬탄화물로 최종코팅한 시편이었다.

피막의 최종두께는 접합코팅두께 약 30 $\mu\text{m}$  를 포함해서 접합코팅 유, 무에 관계없이 150 $\mu\text{m}$  로 하였다. 또한 피막두께에 따른 잔류응력을 측정하기 위해 동일 두께로 코팅된 시편을 #800 사포까지 연마하여 접합코팅 유, 무에 따라 두께가 서로 다른

**Table 2.** Chemical composition and particle size of coating materials

Coating Material	Commercial Name	Composition	Average Particle Size (μm)
Bond Coat	Metco 450	95Ni-5Al	75.5
Top Coat	Metco 81	75Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> -25NiCr	65.7

**Table 3.** Conditions of plasma spraying process

Parameters	Condition
Gun type	9MB
Gas	
primary (Ar) pressure (psi)	100
flow (Flow Meter Reading)	80
Secondary (H <sub>2</sub> ) pressure (psi)	50
flow (FMR)	15
Power	
arc amperage (A)	500
arc voltage (V)	68
Spraying	
spray distance (mm)	100
spray rate for bond and top (kg/hr)	4.1 & 2.3
Gun travelling speed (cm/sec)	38.3

10개의 시편을 준비하였다.

그러나 피막두께를 다르게 하기 위한 시편제작에 있어 연마에 의한 영향은 없다고 한 보고<sup>4)</sup>도 있지만, 원래 코팅작업에 의해 두께를 달리하는 방법과 연마에 의해 피막두께를 조절하는 방법과는 잔류응력측정결과에 있어 다소의 차이가 있을 수 있다. 한편 접착력 측정용시편은 250μm 두께로 제작하였다.

### 2.2 피막 특성실험

코팅층의 두께측정은 Elcometer 사의 코팅두께 측정기를 이용하여 10<sup>3</sup>mm까지 측정하였고, 표면 거칠기는 Taylor-Hobson사의 Talysurf 6를 이용하였으며, 기공측정은 코팅층조직을 주사전자현미경(SEM)으로 촬영한 사진으로 Joyce Noeble사의 Magicscan Image Analyzer를 이용하였다. 한편 접

착력측정은 ASTM standard Method C 633-79를 기준으로 하여 Fig. 1 (b)에 나타낸 바와 같이 직경 및 길이가 25.4mm인 봉상시편에 3M사의 EC 2214 접착제를 바른 후 170℃ 온도의 Hot Plate 에서 15분 동안 경화시켜 두 시편을 붙인 후 Instron 사의 인장시험기를 이용하여 인장속도를 분당 1mm 로 하여 3번 측정하여 평균값을 취했다.

### 2.3 피막의 X선 잔류응력측정

본 실험에서는 잔류응력측정용 X선 회절기(Rigaku사, 모델 : MJ 200DE)를 사용하였고 분석은 sin<sup>2</sup>ψ법<sup>4,6,7)</sup>을 따랐으며 측정시 X선 회절조건은 Table 4 에 나타내었다.

**Table 4.** Conditions for X-ray diffraction

Parameters	Condition
Filter	Ni
Diffraction plane	Ni(420)
Tube voltage (KV)	30
Tube ampere (mA)	10
Irradiated area (mm <sup>2</sup> )	4×4
Scanning range (°)	146~161
Scan speed (°/min)	2
Incident beam angle (°)	0, 15(20), 30, 45
Time constant (sec)	5

### 2.4 X선적 탄성정수의 측정

X선회절방법으로 피막의 잔류응력 및 X선적 탄성정수를 측정하기 위해 Fig. 2 에 나타낸 시편휨장치를 이용하여 시편편의 코팅면에 스트레인 게이지(strain gauge)를 부착한 후 일정 변형상태에 있는 시편코팅면에 대해 X선회절시험을 행하였다.

한편 변형량측정은 우선 휨장치에 시편을 물리고 시편의 코팅면을 #1200 사포 로 연마한 후 아세톤으로 시편표면을 세척하고, 일본KYOWA社

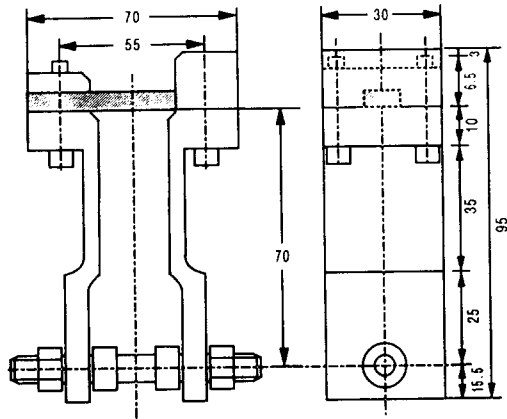


Fig. 2 Loading device for residual stress measurement under applied stresses

(type:KFG-5-120-CI-11)의 표점거리 5mm인 스트레인 게이지를 순간접착제 (type:CC-33A)로 시편 표면에 붙이고, 시편과 strain gauge 사이의 절연을 확인한 후, 스트레인 게이지의 출력단자를 독일 HBM社의 Multi-Point Strain Measuring Instrument(모델: UPM60)에 연결하여 부하상태의 변형량을 측정하고, 이후 일정 부하상태로 있는 코팅면에 대해 X선 회절시험을 행하였다.

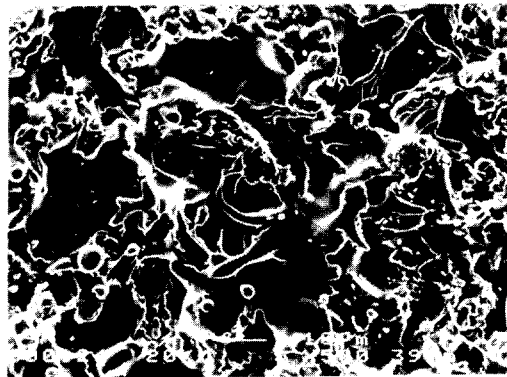
### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 피막의 미세조직

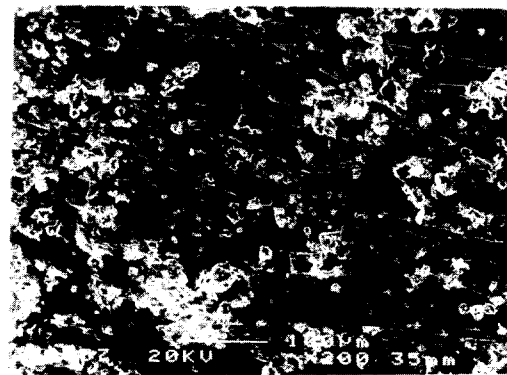
Photo. 1 (a), (b), (c)는 각각 용사피막의 미세조직 및 그 때의 표면상태, X선회절전에 #800 사포로 연마한 표면상태를 보여주고 있다. 용사후의 최종코팅을  $2\theta = 25^\circ \sim 160^\circ$  사이에서 Cu target으로 관찰한 결과가 Fig. 3에 나타나 있다.  $2\theta = 140^\circ$  상의 범위에서는  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  상이 나타나지 않은 반면 Ni 상이  $2\theta = 143^\circ, 153^\circ$  부근에서 나타났다. 잔류응력측정은  $\theta$ 가 큰 값에서 즉  $\theta$ 가  $90^\circ$ 에 가까울수록 큰 각도변화를 나타내어 검출감도가 높게 된다. 또한  $\text{Al}_2\text{O}_3$  및 NiAl의 복합용사피막의 잔류응력측정에서  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 와 NiAl 사이의 잔류응력은 비례관계가 있다는 Nishida 등<sup>8)</sup>의 결과에 따라  $2\theta = 153^\circ$  부근의 Ni(420)면을 X선 잔류응력측정의 기준



(a)



(b)



(c)

Photo. 1 SEM photographs of coating

- (a) cross section
- (b) as-coated surface
- (c) polished surface before X-ray diffraction

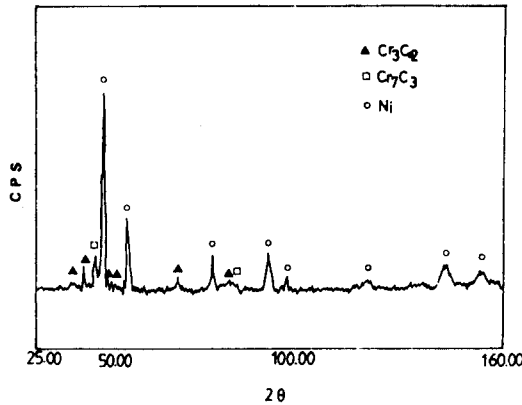


Fig. 3 Results of x-ray diffraction of coating

으로 하였다. 이때 회절각  $\theta$ 값은 반가폭법(半價幅法)<sup>7)</sup>에 의해 구했다.

### 3.2 피막특성

#### 3.2.1 기공측정 결과

코팅전 용사입자(Photo. 2)에 대해 EDS 분석결과 기공을 다수 포함한 입자는 탄화물입자이고, 반면 기공이 적고 매끄러운 입자는 결합금속(binder metal)입자임을 알 수 있었다. 한편 Photo. 1 (a)에서 피막 중에 존재하는 기공을 두 가지로 분류할 수 있는데 탄화물입자 내에 존재하는 기공과 층사이에 존재하는 기공이다. 탄화물



Photo. 2 The cross-section of  $Cr_3C_2$ -NiCr powder

입자 내에 존재하는 기공은 Photo. 2에 나타난 바와 같이 용사전 입자내에 존재하는 기공에 의한 것이며, 층사이에 존재하는 기공은 용사과정중 생성된 기공이다. 따라서 이전의 보고<sup>5)</sup>에서 용사전 즉 용사입자에 원래 존재하는 기공이 피막에 존재하는 것을 intrinsic pore, 용사과정 중에 입자의 적층에 의해 생성된 기공을 extrinsic pore로 분류하였는데, 기공의 형상을 구형으로 가정하여 intrinsic pore 및 extrinsic pore의 크기분포 및 기공분율 등을 Fig. 4 및 Table 5에 나타내었다. 기공의 수는 extrinsic pore가 intrinsic pore보다 2배 정도 많았으며 또한 기공 1개당 면적도 extrinsic pore가 intrinsic pore보다 5배 정도 큰 것을 알 수 있었다. 한편 intrinsic pore는 대부분 기공직경이  $10\mu m$  이하인 반면 extrinsic pore는  $0.7\mu m$ 에서  $200\mu m$ 까지 넓은 범위에 걸쳐 존재하였다.

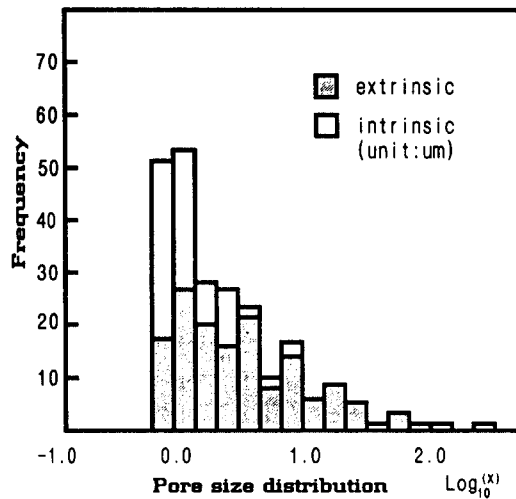


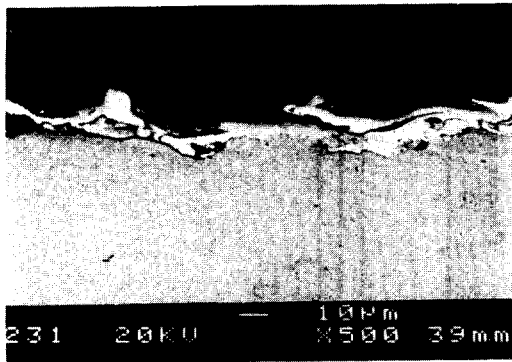
Fig. 4 The size distribution of intrinsic and extrinsic pore

Table 5 Fraction of extrinsic pore to intrinsic pore

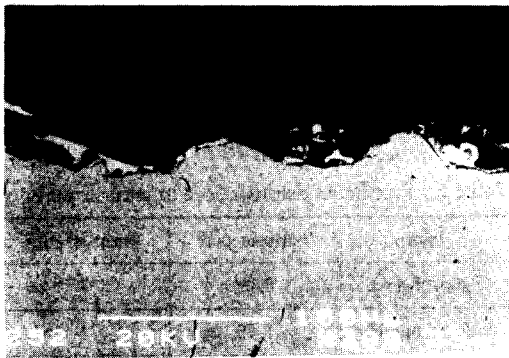
Item	Extrinsic pore	Intrinsic pore
Ratio of area	8.99	1
Ratio of number	1.79	1
Average area per one of pore	$10.18(\mu m^2)$	$2.20(\mu m^2)$

3.2.2 접착력 측정결과

접착력 측정결과 접합코팅이 없는 경우는 6.6 kg/mm<sup>2</sup> 로 접합코팅이 있는 경우 (4.5 kg/mm<sup>2</sup>) 보다 높은 값을 나타냈다. 한편 Photo. 3(a), (b)는 용사피막의 접착력 측정 후에 접합코팅 유, 무에 따른 파면 단면사진이고 한편 Photo. 3(c), (d)는 파면사진 및 그에 대한 EDS 결과이다. 즉 단면사진 및 EDS 분석결과에서와 같이 접합코팅이 있는 경우 및 접합코팅이 없는 경우에 파면의 주요성분이 각각 Cr, Ni, Al 인 것과 Cr, Ni, Fe 인 것에 비추어 접합코팅이 있는 경우는 접합코팅과 최종코팅의 최종코팅쪽 계면부위에서, 반면 접합코팅이 없는 경우는 모재와 최종코팅의 최종코팅쪽 계면부위에서 대부분의 파단이 일어남을 알 수 있었다.



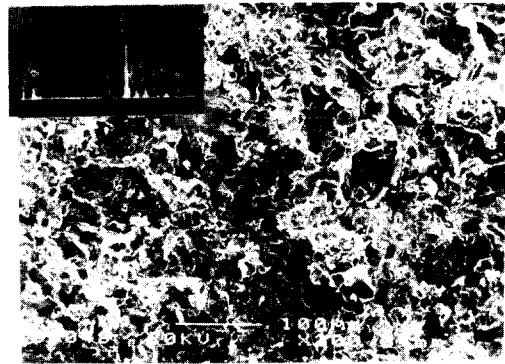
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

**Photo. 3** Fracture morphologies of tensile adhesion test specimens.

- (a) the cross section of coated specimen with bond coat
- (b) the cross section of coated specimen without bond coat
- (c) fracture surface of coated specimen with bond coat
- (d) fracture surface of coated specimen without bond coat
- (e) furrowed appearance in fracture surface of coated specimen with bond coat

한편 Photo. 3(e)에서는 파면 중 발고랑(furrow) 형상이 보였는데 이 주름진 부분에 대해 EDS로 성분을 확인한 결과 Cr, Ni 성분만이 나타난 것에 비추어 피막중의 결합금속(binder metal)이 심하게 변형되었음을 알 수 있었다. 이러한 양상은 접합 코팅이 있는 경우가 없는 경우보다 더욱 많이 관찰되었다.

### 3.3 X선적 탄성정수

X선적 탄성정수값측정은 변형량  $\epsilon_x = 0, 84, 187, 280 \times 10^{-6}$ 의 4개 인장조건에서 각  $\epsilon_x$ 에 대해  $\sin^2\psi$ 를 측정했다. Fig. 5는 피막시편에 대해 인장을 가한 후 X선 회절의 각  $\epsilon_x$ 에 대한  $\sin^2\psi$ 선도이다. 우선  $\epsilon_x = 0$ 에서의 기울기가 (+)인 것에 비추어 피막에는 압축잔류응력이 존재함을 알 수 있었다. 또한 기울기 M 및 종축과의 교점  $2\theta_{\psi=0}$ 를 정하여 이 값의  $\epsilon_x$ 에 대한 변화를 Fig. 6에 나타내었고 Fig. 6에서 최소자승법으로 직선을 구해 얻은 X선적 탄성정수값을 Table 6에 나타내었다.

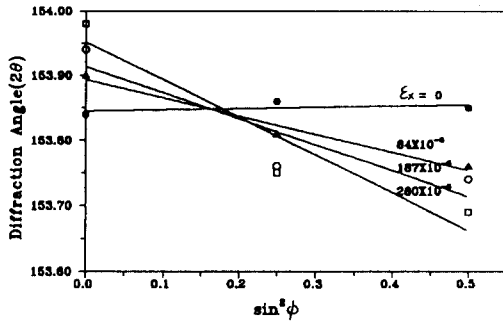
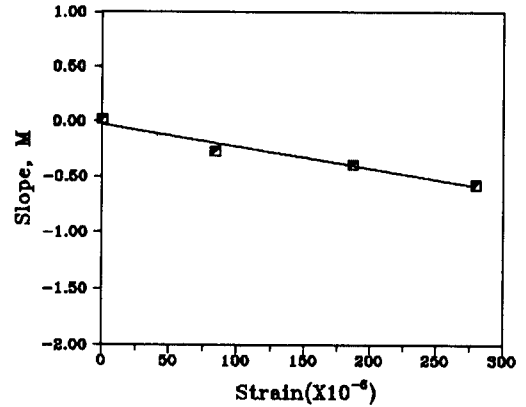
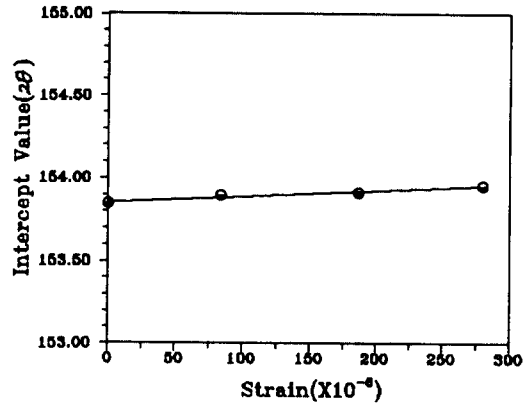


Fig. 5  $\sin^2\psi$  diagram under different applied strains



(a)



(b)

Fig. 6 Changes of slope and intercept with applied strain

- (a) slope vs applied strain
- (b) intercept vs applied strain

Table 6. X-ray compliance and elastic constant obtained from residual stress measurement

Condition	X-ray compliance		X-ray elastic constant			Stress constant
	$(1 + \nu_x)/E_x$	$\nu_x/E_x$	$E_x/(1 + \nu_x)$	$E_x$	$\nu_x$	K
Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> -NiCr coating	$(10^{-2}/\text{GPa})$	$(10^{-3}/\text{GPa})$	(GPa)	(GPa)		(MPa/deg)
	2.19	3.95	45.66	55.70	0.22	-86.14

### 3.4 잔류응력 측정결과

접합코팅 유, 무에 따라 피막두께를 변화시킨 코팅시편에 대해  $\psi$ 를 4개 각도로 변화시켜 X선 회절결과를 구한  $2\theta$  값으로  $2\theta - \sin^2\psi$ 를 그려 그 기울기값으로 코팅두께에 따른 잔류응력값을 구해<sup>7)</sup> 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 7에서 알 수 있는 바와 같이 접합코팅 유, 무 및 코팅두께에 관계없이 코팅에는 압축잔류응력이 존재함을 알 수 있었는데 그 이유로는 모재와 접합코팅의 열팽창계수값의 차이는 거의 없지만 모재-최종코팅, 접합코팅-최종코팅에서는 최종코팅의 열팽창계수값이 훨씬 작아 압축잔류응력이 존재하게 된다고 생각된다.

한편 잔류응력은 접합코팅이 없는 경우가 있는 경우보다 모든 피막두께 범위에서 컸다. 또한 접합코팅이 있는 경우는 접합코팅과 최종코팅의 계면부위에서, 접합코팅이 없는 경우에는 최종코팅과 모재의 계면부위에서 잔류응력값이 가장 큰 것으로 나타났다. 즉 접합코팅의 존재로 인해 동일 두께에서의 잔류응력값은 감소하였다.

일반적으로 금속이 세라믹보다 비교적 변형이 쉬우므로 세라믹에 존재하는 잔류응력이 금속에 존재하는 잔류응력보다 상대적으로 크다고 생각되지만 본 실험에서와 같이 탄화물피막내에 미세균열이 존재하는 경우(Photo. 4) 탄화물의 잔류응력은 그다지 크지 않다.

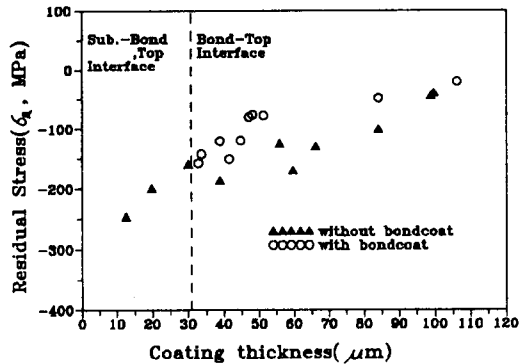


Fig. 7 Distribution of residual stress with the thickness of coating  
(a) with bond coat  
(b) without bond coat



Photo. 4 Morphology of cracks on the top coat

### 3.5 접착력과 실결합율의 관계

일반적으로 접합코팅은 모재와 최종코팅사이의 열팽창차를 줄이고 접착력을 증대시키는 역할을 하지만 본 연구에서는 이러한 경향과 다른 결과를 보여 피막의 잔류응력과 세라믹피막의 균열밀도에 대해 함께 고찰해 보았다.

한편 잔류응력 측정결과와 접착력측정 시험결과를 비교하면 잔류응력값이 가장 큰 부위에서 파단이 일어난 것은 일치하지만 접합코팅이 없는 경우가 더 큰 접착강도를 나타내고 있다. 즉 접합코팅이 없는 경우가 접합코팅이 있는 경우보다 파단이 일어난 계면부위에서 더 큰 압축잔류응력과 접착강도를 나타내고 있다.

접합코팅이 없는 경우가 접합코팅이 있는 경우보다 접착력이 크게 나타나는 이유를 알아보기 위해 모재와 최종코팅, 접합코팅과 최종코팅 계면사이의 실결합율(實結合率)을 Fig. 8에서 다음과 같이 정의했다<sup>8)</sup>.

$$\text{실결합율 (\%)} = \frac{\text{실결합길이 (BC + DE)}}{\text{겉보기 결합길이 (ABCDEF)}} \times 100$$

한편 접합코팅이 있는 경우 접합코팅과 최종코팅의 계면에서의 실결합율과, 접합코팅이 없는 경우 모재와 최종코팅사이의 계면에서의 실결합율을 조사하였다. 용사피막의 배율 1000배 조직사진하에서 접합코팅이 있는 경우는 접합코팅과 최종코



팅계면에 대해, 또한 접합코팅이 없는 경우는 모재와 최종코팅사이의 계면에 대해 결보기 결합길이 약 1mm 에 걸쳐 실결합률을 측정된 결과 접합코팅이 있는 경우의 접합코팅과 최종코팅사이의 실결합률은 약 78% 인 반면 접합코팅이 없는 경우의 모재와 최종코팅사이의 실결합률은 약 52% 로 큰 차이를 보였다.

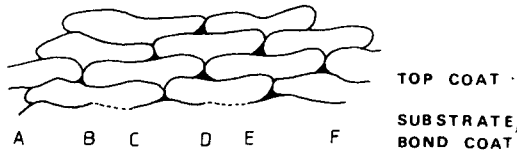


Fig. 8 Schematic diagram of the structure of a cross section of flattened particles

R. McPherson<sup>10)</sup>은  $Al_2O_3$  피막에 대한 TEM 관찰을 통해 적층입자 사이의 실결합률을 약 25% 라 했고, 또한 大森등<sup>9)</sup>도  $Al_2O_3$  피막에 대해 전기銅도금처리후 EDS 에 의한 Cu 농도 분석방법으로 적층입자사이의 실접촉면적을 측정하였는데 그때의 최대실결합율이 30% 라고 보고했다. 한편 본 연구와 기존의 보고와 큰 차이를 보이는 이유는 실결합율 측정방법 및 측정부위의 차이 때문이라 생각된다.

또한 접합코팅 후의 표면거칠기는  $Ra=12.0\mu m$  인 반면 접합코팅이 없는 경우 모재의 그릿블라스팅 후의 표면거칠기는  $Ra=6.2\mu m$  로 접합코팅이 있는 경우가 약 2배 큰 표면거칠기를 나타내므로 접합코팅이 있는 경우가 실접합면적이 더 크게 나타난다고 사료된다.

잔류응력, 실결합율, 표면거칠기 등의 결과로부터 접합코팅이 있는 경우가 계면에서 압축잔류응력이 작고 실결합율이 높음에도 불구하고 낮은 접착력값을 보이고 있다. 즉 큰 압축잔류 응력조건에서 큰 접착강도를 보이고 있다. 그 이유는 접합코팅과 최종코팅의 계면, 모재와 최종코팅의 계면에서의 실결합률이 클 수록 보다 높은 균열밀도를 나타냈기 때문이다. 따라서 접합코팅 유, 무에 따른 피막내의 균열밀도를 측정하기 위해 다음과 같은 조사를 하였다.

즉 접착력측정후 파단면을 조사한 결과 접합코

팅이 있는 경우에는 접합코팅과 최종코팅 계면으로부터  $55\mu m$  이내에서 파단이 일어났지만 접합코팅이 없는 경우에는 모재와 최종코팅  $25\mu m$  이내에서 파단이 일어났다. 따라서 피막조직시편에 대해 배율 1500배의 코팅시편 단면사진 중 접합코팅이 있는 경우는 접합코팅과 최종코팅 계면에서  $55\mu m$  까지 또한 접합코팅이 없는 경우는 모재와 최종코팅 계면에서  $25\mu m$  이내의 탄화물피막에 존재하는 균열밀도를 측정하였는데  $1000\mu m^2$  당 접합코팅이 있는 경우 균열수는 2.7개인 반면 접합코팅이 없는 경우는 2.4개가 존재함을 알 수 있었다.

이러한 결과는 실결합율이 클 수록 입자냉각에 따른 피막의 구속이 커지기 때문에 상대적으로 균열밀도가 증가하기 때문이다<sup>9)</sup>. 따라서 접합코팅이 없는 경우 모재와 최종코팅층부근의 최종코팅층에는 상대적으로 낮은 균열밀도로 인해 큰 압축잔류응력이 존재하며, 접합코팅이 있는 경우보다 큰 접착강도를 보인다고 생각된다.

#### 4. 결 론

크롬산화물 용사피막에 대해 접합코팅 유, 무 및 피막두께에 따른 잔류응력을 측정하여 피막의 접착강도 측정결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 크롬산화물 용사피막에 존재하는 기공을 intrinsic pore 와 extrinsic pore로 분류했는데 extrinsic pore 의 수가 intrinsic pore 보다 2배 정도 많았고 기공분포에 있어서 intrinsic pore는  $10\mu m$  이하에만 존재한 반면 extrinsic pore는  $0.7\mu m$  에서  $200\mu m$  까지 넓은 범위에 걸쳐 존재하였다.
2. 잔류응력측정결과 접합코팅의 유, 무에 관계없이 모두 압축잔류응력을 보였고 동일 두께에서는 접합코팅이 있는 경우가 더 작은 값을 보였다.
3. 접합코팅이 있는 경우가 실결합률이 높은 데도 불구하고 낮은 접착강도를 보인 이유는 파괴가 일어나는 부위에서 실결합율이 클 수록 입자냉각에 따른 피막의 구속이 커서 상대적으로 파단부근에서의 균열의 수가 증가

했기 때문이다.

### 참 고 문 헌

1. S. J. Harris, R. C. Cobb : Influence of wire composition and other process variables on the internal stress of arc sprayed steel coatings, DVS 80, pp.245-249
2. 戶部省吾 : 溶射皮膜의 内部應力, 表面技術, Vol. 43, No. 7, (1992), pp.650-655
3. M. Gudge, D. S. Rickerby : Residual stress in metallic and ceramic coatings, Proc. of 3rd NTSC, Long Beach, USA/20-25, May. (1990), pp.331-338
4. 田中啓介 : 爆發溶射アルシナ被膜의 X線殘留應力測定, 材料, 第40卷, 第448號, (1991), pp.96-101
5. 金義炫, 權肅仁 : 크롬탄화물 용사피막의 고온마모특성, 大韓熔接學會誌, 第11卷, 第4號 (1993) pp 91-102
6. 田中啓介 : セラシックス의 X線殘留應力測定, 機械の研究, 第40卷, 第2號, (1988) pp.265-272
7. 日本材料學會編 : X線應力測定法標準法, (1982)
8. M. Nishida, H. Fujiwara : X-Ray residual stress measurement of laminated coating layers produced by plasma spraying, Surf. and Coat. Technol. 61 (1993), pp.47-51
9. 荒田吉明, 大森明 : アルシナ溶射皮膜의 構造와 物性, 高溫學會誌, 第14卷, 第5號 (1988), pp.220-233
10. R. McPherson : A review of microstructure and properties of plasma sprayed ceramic coatings, Surf. and Coat. Technol. Vol.39/40 (1989), pp.173-181