

研 究 論 文
---------

大韓熔接學會誌  
 第7卷第4號 1989年12月  
 Journal of the Korean  
 Welding Society  
 Vol.7, No.4, Dec., 1989

## 플라즈마 용사법에 의한 지르코니아 코팅에서의 잔류응력에 대한 연구

류지호\* · 강춘식\*\* · 김중영\*\*\*

### Residual Stresses on Plasma Sprayed Zirconia Coatings

J.H. Ryu\*, C.S. Kang\*\*, J.Y. Kim\*\*\*

**Key Words** : Plasma Spraying(플라즈마용사), Zirconia Coatings(지르코니아코팅), Residual Stress(잔류응력), X-Ray Stress Measurement(X선응력측정), Coating Thickness(코팅두께), Thermal Barrier Coating(단열코팅), Thermal Expansion Coefficient(열팽창계수), Bond Coating(접합코팅), Composite Coating(복합코팅), Pickling Test(피클링시험)

#### Abstract

Zirconia coatings are performed by the plasma spraying on the substrate of Al-Si alloy. In case of plasma sprayed ceramic coatings, it is important to control properly residual stress occurred during cooling process. Residual stress in coating layer varies with sprayed conditions and is influenced greatly by the coating layer thickness.

Surface residual stress due to coating layer thickness is measured by X-ray diffraction method and the residual stress in coating layer is estimated by the deflection of coating layer when the restraint force in substrate was removed.

When zirconia was coated on the substrate, tensile residual stress remains on zirconia coated surface layer. The tensile stress is increased to 0.35mm thickness and after 0.45mm thickness it is decreased abruptly.

A thick bond and composite coating can reduce the zirconia surface stress and composite coating controls effectively the thick zirconia surface stress.

---

\* 학생회원, 서울대학교 대학원  
 \*\* 정회원, 서울대학교 공과대학  
 \*\*\* 한진기술연구원

1. 서 론

세라믹은 금속재료와 비교하여 부식, 산화, 마모에 대한 저항성이 높고, 고온에서도 낮은 열전도도와 화학적 열적으로 높은 안정성을 갖고 있어 단열성과 절연성이 뛰어나다는 장점을 갖고 있기는 하지만, 현저한 취성재료라는 단점도 갖고 있다<sup>1)</sup>.

공정 알루미늄합금(AC8A)은 양호한 주조성과 내식성을 가지고 있을 뿐만 아니라 내열성과 내마모성이 우수하며, 합금원소인 규소의 열팽창계수가 작고 인장강도가 높아 자동차나 디젤엔진용 피스톤합금으로 적당하다<sup>2)</sup>. 그러나 Table 1에서 볼 수 있듯이 AC8A의 열전도도가 크기 때문에 열방출로 인한 냉각이 쉽다는 장점을 갖고 있기는 하지만 연소실 내부의 온도가 낮아져 엔진의 효율을 떨어 트린다.

1970년대 중반이후 기존의 엔진에 사용되던 알루미늄 합금의 피스톤 표면에 열전도도가 금속보다 훨씬 작은 세라믹을 플라즈마용사로 단열코팅(thermal barrier coating)하여 피스톤을 통한 열방출을 줄여 준다면, 보다 높은 온도의 연소가스를 사용할 수 있어 열효율의 증대를 가져올 뿐만 아니라 엔진 냉각설비의 축소와 금속 소재의 사용 온도의 저하에 따른 수명 증대의 효과도 얻을 수 있다는 연구결과가 보고되어져 왔다<sup>3,4)</sup>.

단열코팅에서 코팅층의 두께가 두꺼울수록 금속으로의 열전달이 줄어들게 되므로 열효율을 높일 수 있으나, 파괴가 일어나지 않고 코팅할 수 있는 최대코팅두께는 용사시 발생하는 잔류응력과 관계가 있는 것으로 알려져 있다<sup>5)</sup>. 용사에 있어서 이러한 잔류응력의 발생기구를 밝히고자 하는 것은 이를 통하여 잔류응력을 가능한 한도내에서 제어

하고 용사작업에 대한 적절한 용사조건을 선정할 수 있기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 Al-Si 합금에 지르코니아를 플라즈마 용사에 의해 단열코팅한 직후의 코팅두께에 따른 잔류응력의 변화를 측정하고, 용사에 의해 발생하는 잔류응력을 제어할 수 있는 방법에 대하여 고찰해 보았다.

2. 실험 방법

2.1. 용사 작업

자동차 디젤엔진의 피스톤용으로 많이 쓰이는 12 wt.% Si가 함유된 알루미늄 합금인 AC8A를 모재로 사용하였다. 봉상시험편은 두께와 지름을 각각 1 in. 로, 각형시험편은 폭 10mm, 두께 13 mm, 길이 90mm로 기계가공하였다(Fig. 1).

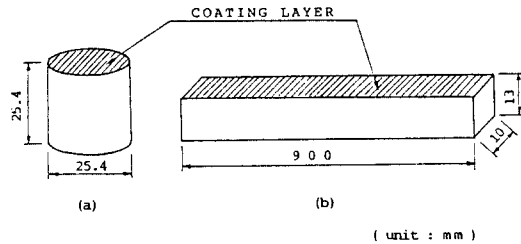


Fig. 1 Dimension of specimens for (a) X-ray residual stress measurement (b) pickling test

이들 시험편의 모서리는 모두 직각으로 가공하였고, 용사할 표면은 1200번 사포로 연마한 후 아세톤을 써서 초음파 세척을 한 후 건조하였다.

Table 2에 모재와 각 분말의 조성을 나타내었다. 이 세 종류의 분말은 용사하기 전에 6시간 동

Table 1 Material properties

Material	Young's Modulus (MPa)	Poisson's Ratio ( $\nu$ )	Thermal Expansion Coeff. ( $\mu$ in/in $\cdot$ °C)	Thermal Conduc. (W/mK)	REF.
AC8A	64*		19	1392	13)
METCO 461			13	23-28	6)
MK-91			11.5**		
METCO 204NS	50	0.2	10	1.3	11) 7)

\* pure aluminium

\*\* No data, First approximation based on the bond and ceramic thermal expansion coefficient

**Table 2 Material compositions**

(wt. %)

Material	Sign	Composition
Substrate	AC8A	Al-12Si
Bond	METCO 461	Ni-17.5Cr-5.5Al-2.5Co-0.5Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Composite	MK-91	50 ZrO <sub>2</sub> (8Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )-50Ni(20Cr)
Ceramic	METCO 204NS	ZrO <sub>2</sub> -8Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

안 건조로에서 65°C로 유지시켜 건조시켰다.

모재와 코팅층은 기계적인 접합이 매우 중요하므로 계면 면적을 크게 하기 위해 모재 표면에 그릿 블라스팅(grit blasting)을 하였다. 이때 그릿은 순도가 높은 METCOLITE "F"인 미세한 알루미나를 사용하였고, 모재 표면에 그릿이 박히지 않도록 블라스팅 압력을 45psi로 하였고, 표면이 산화되지 않도록 곧바로 용사를 했다.

접합코팅, 복합코팅, 세라믹코팅을 연속적으로 용사하였다. METCO MBN gun을 사용하여 플라즈마 용사를 하였으며, 용사조건은 대체로 추천조건<sup>6,7)</sup>을 따랐으며, 그 추천조건을 Table 3에 나타내었다. 플라즈마 발생 기체로는 순도 99.99%의 아르곤을, 분말송급 기체로는 수소를 사용하였다.

코팅층의 두께는 용사횟수로 조절하였는데 접합

코팅, 복합코팅, 세라믹코팅의 용사횟수당 코팅두께는 각각 0.020, 0.025, 0.025mm가 되도록 분말 송급량을 조절하였다.

## 2.2. 잔류응력측정 실험

용사된 시험편은 어떠한 가공도 하지 않은 상태에서 코팅표면의 잔류응력을 측정하였다. 잔류응력은 잔류응력측정장비를 부착할 수 있는 RIGAKU X선기로 측정하였다.

응력측정을 위한 X선기의 작업조건을 Table 4에 나타내었다. 회절선의 위치( $2\theta$ )는 회절선강도의 85% 이상의 세 점을 잡아 포물선법<sup>8)</sup>으로 결정하였다. 입사빔이 결정면의 방향과 0, 13, 19, 23도가 되도록 시편을 회전시켰고 보다 정확한 회절선의 위치를 결정하기 위하여 각각의 각도에 대해서 3회씩 측정하였다.

**Table 3 Conditions of plasma spraying procedure**

Parameters	Bond	Composite	Ceramic
Spray Gun			
type	MBN	MBN	MBN
nozzle	MBN 432	MBN 432	MBN 432
powder port	#2	#2	#2
gas distribution ring	MBN 65	MBN 65	MBN 65
Gas			
pressure-primary,psi	100	100	100
secondary,psi	50	50	50
flow primary,psi	80	80	80
secondary,psi	15	15	15
Power			
arc ampere,A	500	500	500
arc voltage,V	75	75	75
Powder feed			
feed rate indicator	65	60	50
vibrator air pressure,psi	5	5	5
carrier gas flow	37	37	37
Spraying			
spray distance,mm	140	120	80
spray rate,kg/hr	5.22	4.17	3.12
gun traverse rate,m/min.	0.9	0.9	0.6
linear velocity,cm/min.	102.5	102.5	47.1

**Table 4** Conditions of X-ray strain measurement

Characteristic X-RAY	CuK $\alpha$
Filter	Ni
Tube Voltage	30 kV
Tube Current	15 mA
Diffraction Plane	(331)
Scanning Speed	0.5°/min.
Chart Speed	20 mm/min.
Time Constant	20 sec
Count Range	1000 cps
Angle of Incident Beam	0°, 13°, 19°, 23°

2.3. 피클링 실험

용사 후 코팅층에 잔류하는 응력 중에 모재가 구속하고 있는 힘을 풀어주기 위하여 모재를 제거하는 실험을 하였다. 모재의 제거시 코팅층이 받는 영향을 최소한으로 줄이기 위해서 화학적인 제거 방법인 피클링(pickling)법을 사용하였다.

각형(10×13×90mm)의 시험편에 Table 3에서 표시한 조건으로 용사를 한 후 모재를 염산으로 녹여내어 순수한 코팅층만을 얻었다. 또한 이때의 각 시험편의 곡률을 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 잔류응력

용사는 금속모재 위에 고온의 용융입자가 충돌한 후 급냉하는 과정으로 상온으로 냉각된 후 세라믹과 모재의 열팽창계수의 차에 기인한 잔류응력이 생기게 된다<sup>9)</sup>. 이때 생기는 잔류응력은 다음과 같다.

$$\sigma_{\Delta T} = \frac{E}{1-\nu} \Delta\alpha \cdot \Delta T \quad (1)$$

여기서  $\Delta T$ 는 고온에서 응력이 없어지는 상태의 온도와 냉각 후 온도와와의 차,  $\Delta\alpha$ 는 세라믹과 금속의 열팽창계수의 차,  $E$ 와  $\nu$ 는 각각 탄성계수와 포아손비이다.

G.Fisher는 모재와 코팅하고자 하는 재료의 열팽창계수차가  $1 \times 10^{-6}$ in/in·°C 내에 있어야 코팅이 적절하게 된다고 하였다<sup>10)</sup>. 그러나 일반적으로 금속과 세라믹의 열팽창계수의 차는 이보다 훨씬 크다. 따라서 용사후 상온에서 코팅층과 모재의 일

부분에 잔류응력이 존재하게 되며, 또한 열팽창계수의 차는 코팅후 운전시의 가열 냉각의 열사이클에 의해 부가적인 응력이 발생하게 한다. 결국 용사시 발생한 잔류응력과 용사후 발생하는 부가적인 응력(즉, 열팽창계수의 차에 의한 부가적인 응력과 외부응력)의 중첩에 의해서 코팅재의 파괴강도는 저하하게 되며, 따라서 용사가 끝난 후 코팅층의 잔류응력이 크면 클수록 코팅층이 파괴가 될 수 있는 외부응력은 작아지게 된다.

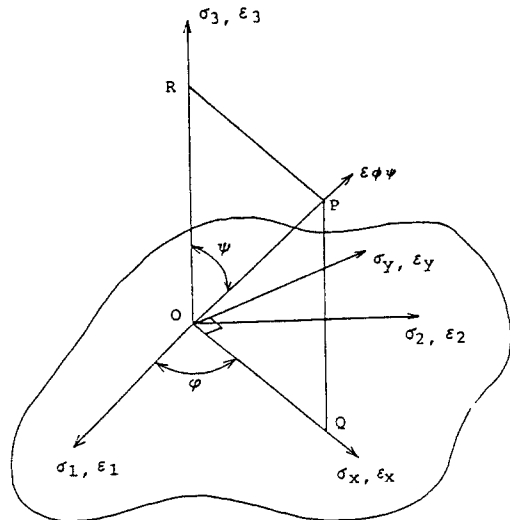
용사에 의한 세라믹코팅층은 매우 취약하기 때문에 기계적인 가공에 의한 응력측정방법은 코팅층의 응력분포와 크기에 영향을 끼치므로 비파괴적인 응력측정방법이 적절하다.

X선회절에 의한 응력 측정의 기본적인 원리는 응력을 받고 있는 재료의 결정면간 거리 변화와 Hook 법칙을 따르는 응력사이에 일정한 관계가 있다는 가정하에서 결정면간거리의 변화로부터 계산하는 방법이다.

Fig.2에서 OP 방향의 변형  $\epsilon_{\phi\psi}$ 로 부터 다음과 같은 응력계산식을 사용하였다.

$$\begin{aligned} \sigma_x &= -\frac{E}{2(1+\nu)} \cot\theta_0 \frac{\partial(2\theta)}{\partial(\sin^2\psi)} \\ &= K \cdot M \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 응력계수  $K = -(E \cot\theta_0)/2(1+\nu)$ ,  $M$ 은  $2\theta$ 와  $\sin^2\psi$  그래프의 기울기이다. 따라서 OP 방향의 응력 성분  $\sigma_x$ 는 응력계수  $K$ 와  $2\theta$ 와  $\sin^2\psi$  그래프의 기울기  $M$ 으로 부터 얻을 수 있다<sup>8)</sup>.



**Fig. 2** Directions of stresses and strains

Table 1의 지르코니아의 재료상수와 Table 4의 X선회절조건에 의한 입사각의 각도( $\psi$ )와 회절선의 위치( $2\theta$ )의 변화를 식(2)에 대입하여 잔류응력을 계산하였다.

이때 응력상수 K를 계산하는 과정에서 지르코니아의 탄성계수의 크기가 잔류응력 크기에 큰 영향을 끼치게 된다. 일반적으로 용사층에는 10% 정도의 기공이 존재한다고 알려져 있다<sup>7)</sup>. 따라서 용사된 재료는 어떤 주어진 외부의 응력에 대해 마치 지르코니아와 기공이 복합재료처럼 행동한다고 생각할 수 있다. 결국 용사된 지르코니아는 같은 크기의 외력에 대해 벌크(bulk)상태의 그것에 비해서 더 많이 변형을 하게 되므로, 용사된 지르코니아의 탄성계수는 벌크상태의 탄성계수보다 더 작게 된다. 벌크상태의 지르코니아의 탄성계수 E는 200 GPa이지만, 본 연구에서 사용한 용사된 상태의 탄성계수는 50 GPa이다<sup>11)</sup>.

### 3.2. 코팅 두께에 따른 잔류응력

#### 3.2.1. 모재에 세라믹만을 코팅했을 때

Fig. 3에는 Al-Si합금의 모재위에 지르코니아를 코팅했을 때(1층코팅) 지르코니아 코팅두께에 따른 잔류응력의 변화를 나타내었다.

0.15mm 두께의 코팅에 대해서 18.4 MPa의 인

장응력이 표면에 존재하였고, 0.25mm에 대해서는 31.8 MPa, 0.35mm에 대해서는 37.0 MPa의 인장응력이 존재하였다. 이것은 코팅을 두껍게 하기 위해서는 용사 시간이 길게 됨에 따라 열유입량이 증가하게 되어 모재는 더욱 많은 열을 받게 되며, 따라서 모재표면의 온도는 지르코니아 코팅을 두껍게 할수록 높게되어 계면부근의 모재에 큰 열응력이 존재하게 됨에 따라 계면부근의 지르코니아 코팅층에 더 큰 압축응력이 존재하게 되고, 탄성적으로 표면인장응력도 증가하게 되기 때문이다.

코팅두께가 0.45mm로 두꺼울 때는 응력이 3.4 MPa로 매우 작게 된다. 이처럼 코팅이 두꺼워짐에 따라 코팅층 표면의 인장응력이 작아지는 것은 유입된 열량에 의해 모재표면에 생긴 매우 큰 인장응력에 대응되는 큰 압축응력의 영역이 세라믹 코팅에 존재해야 하기 때문이다. 따라서 본 실험에서 0.45mm의 두께에서 오히려 표면응력이 줄어든 것으로 보아 코팅층이 전체적으로 압축응력으로 바뀌는 두께라고 생각된다.

#### 3.2.2. 접합코팅이 있을 때의 잔류응력

금속과 세라믹은 열팽창계수의 차가 크므로 용사후 냉각과정에서 열응력의 발생을 근본적으로 피할 수 없다. 따라서 Al-Si 합금 위에 지르코니

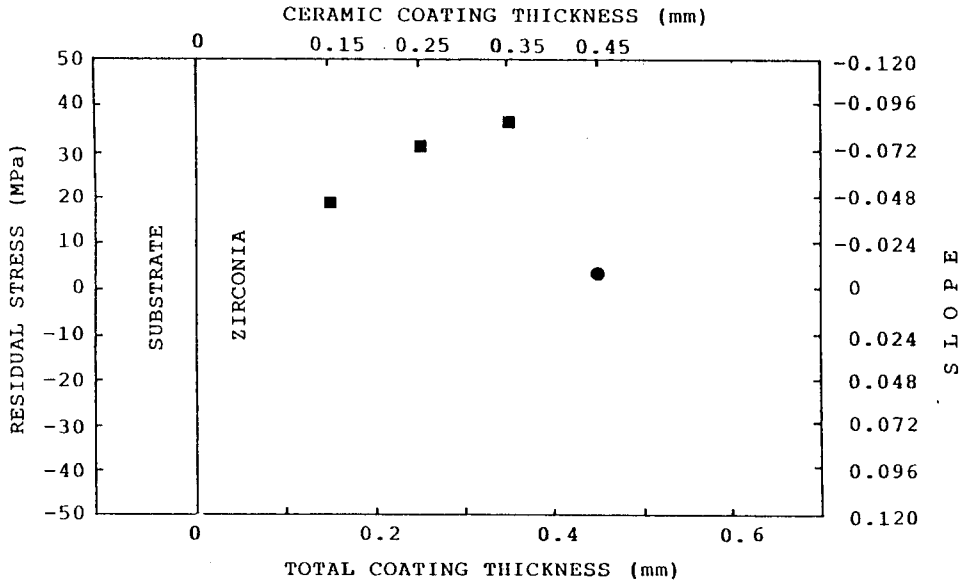


Fig. 3 Residual stress depending on the zirconia coating thickness; 1 layer coating

아를 직접 코팅하게 되면 두 재료가 갖는  $9\mu\text{in}/\text{in}\cdot^\circ\text{C}$ 나 되는 열팽창계수의 차에 의해 열응력이 발생하게 된다. 이런 모재와 코팅재의 열팽창계수의 차를 완화하기 위해서 단일코팅에서는 일반적으로 모재와 세라믹의 중간에 접합코팅을 두는 2층코팅을 하고 있다. 이 접합코팅은 이러한 열팽창계수의 차를 줄여주는 이외에도, 표면을 거칠게 하여 세라믹코팅의 기계적인 접합면을 늘려주는 역할도 하지만, 접합코팅의 표면이 지나치게 거칠게 되면 세라믹과의 계면의 요철부에 응력이 집중되어 코팅파괴를 촉진한다<sup>12)</sup>, Table 1에서 알 수 있듯이 접합코팅재인 METCO 461의 열팽창계수는  $13\mu\text{in}/\text{in}\cdot^\circ\text{C}$ 로 모재와 세라믹의 중간정도의 크기를 갖기 때문에 급격한 열팽창계수의 차를 완화할 수 있다.

접합코팅이 없을 때는 Fig. 3에서 처럼 지르코니아 표면에 인장응력이 존재하였다. 그러나 접합코팅이 있을 때는 Fig. 4에 나타난 것처럼 지르코니아 표면에는 압축잔류응력으로 되었다. 이것은 금속모재에 접합코팅을 할 때 모재와 접합코팅에 잔류응력이 존재하게 되며, 이것이 접합코팅 위에 세라믹을 용사할 때 생기는 응력에 영향을 주기 때문이라고 생각된다.

Fig. 4에서 0.15mm의 접합코팅위에 지르코니아의 코팅두께를 0.15, 0.25, 0.35mm로 두껍게 해

춤에 따라 표면에 존재하는 압축응력은 10.4, 16.8, 32.2 MPa로 증가한다. 또한 0.45mm로 더욱 두껍게 지르코니아를 코팅한 경우에는 이보다 얇은 두께일 때보다도 작은 8.25 MPa의 압축응력이 표면에 존재하였다. 이것은 코팅두께가 두껍게 되면 초기에는 표면층의 압축응력은 점점 커지나 어느 두께 이상에서는 인장응력으로 바뀐다는 Rickerby의 계산결과<sup>9)</sup>와 일치한다.

접합코팅의 두께도 세라믹코팅의 표면잔류응력에 영향을 미침을 Fig. 5에서 볼 수 있다. 세라믹코팅의 두께는 0.25mm로 일정할 때 접합코팅의 두께를 0.08, 0.15, 0.23, 0.30mm로 변화시켜 보았다. 접합코팅이 0.08mm인 a에 세라믹을 0.15mm 코팅한 표면 a는 31.5 MPa의 압축응력이, 접합코팅이 0.15mm인 b 점일 때는 16.8 MPa의 압축응력이 존재하는 반면, 접합코팅이 0.23mm인 c 점과 0.30mm인 d 점의 경우에는 각각 7.32, 3.03 MPa의 작은 인장응력이 존재하였다. 이로부터 접합코팅의 두께를 두껍게 하여 세라믹코팅층의 표면에 존재하는 압축잔류응력을 줄여 줄 수 있다고 생각된다.

### 3.2.3. 접합코팅과 복합코팅 그리고 세라믹코팅층이 있는 경우

접합코팅의 금속성분과 세라믹코팅의 세라믹성분이 한 입자로 구성된 복합분말(composite

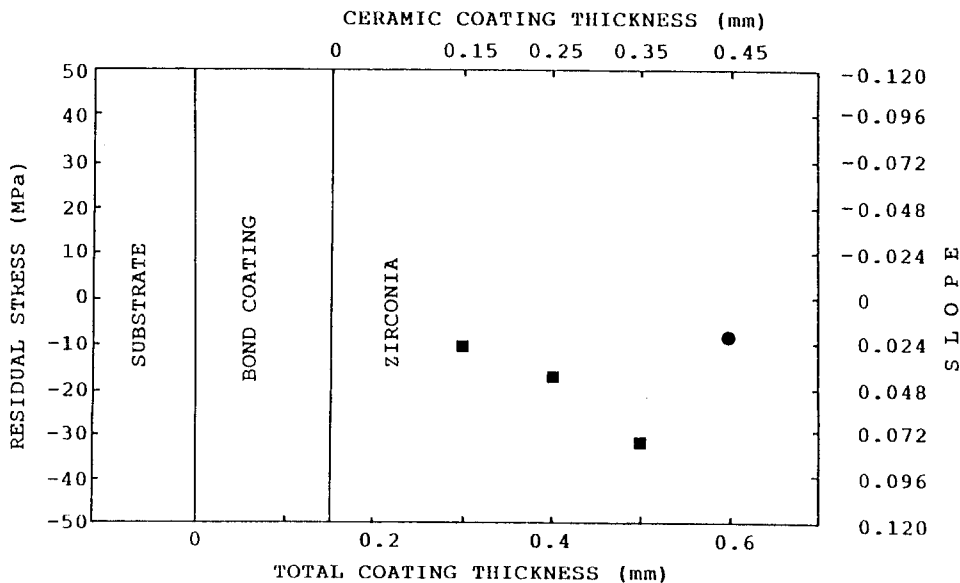


Fig. 4 Residual stress depending on the zirconia coating thickness; 2 layers coating

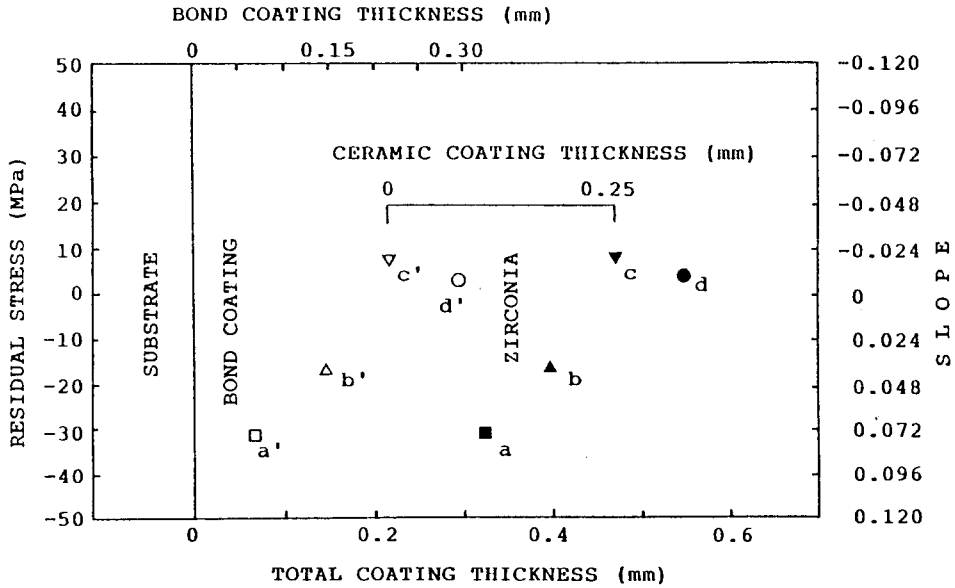


Fig. 5 Residual stress depending on the bond coating thickness of the zirconia coated surface; 2 layers coating

powder)을 사용하여 용사한 복합코팅층을 접합코팅과 세라믹코팅 사이에 두는 3층코팅법(graded coating)을 써서 급격한 열팽창의 차를 줄여 줄 수 있다. 따라서 열팽창의 차에 의해 발생하는 잔류응력의 크기에도 영향을 줄 수 있을 것이라고

생각된다.

Fig. 6은 3층코팅을 하였을 때 세라믹 두께의 증가에 따른 응력 변화를 측정된 결과이다. 0.15 mm의 접합코팅과 0.10mm의 복합코팅 위에 지르코니아의 두께를 0.15, 0.25, 0.35, 0.45mm로

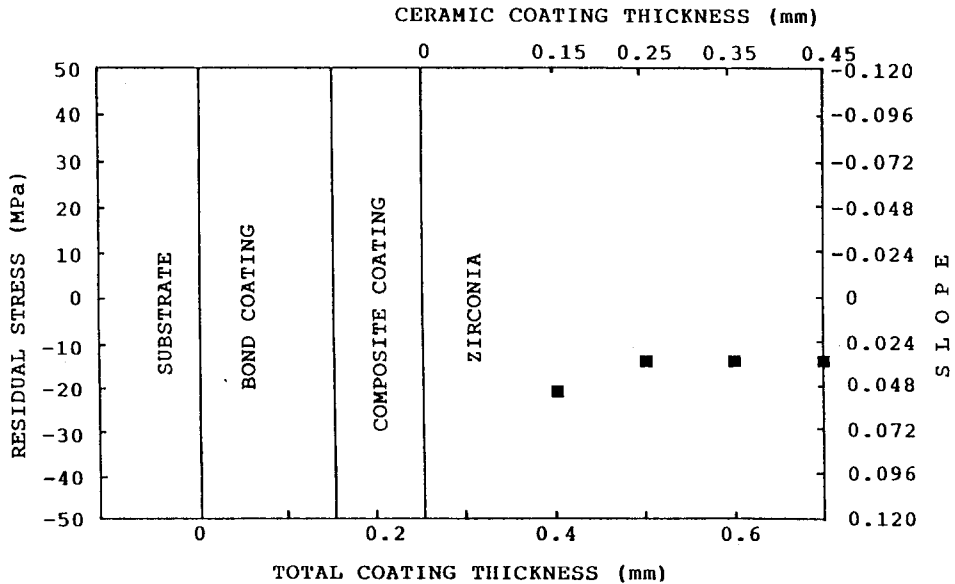


Fig. 6 Residual stress depending on the zirconia coating thickness; 3 layers coating

바꾸었다. 실험결과 지르코니아 두께가 0.15mm 일 때 21.1 MPa의 압축응력이, 코팅두께가 0.25 mm로 증가하면 14.6 MPa의 압축응력이, 코팅두께가 0.35, 0.45mm로 증가함에 따라 14.5, 14.2 MPa의 압축응력이 지르코니아 코팅층의 표면에 잔류하였다.

3층코팅에 대한 응력측정 결과 세라믹층의 두께가 0.25mm 이상으로 두꺼워져도 응력크기의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 이것은 복합코팅층의 존재에 따라 코팅층의 성질상의 급격한 변화가 줄어들었기 때문에 세라믹코팅층 응력의 급격한 변화가 관찰되지 않은 것이라고 생각된다.

### 3.3. 피클링 실험에 의한 코팅층 잔류응력 분포의 예측

용사시 모재와 코팅층의 상호작용에 의해 발생하는 잔류응력은 그 원인에 따라 다음과 같이 대별할 수 있다.

- 1) 금속 모재의 그릿 블라스팅시 모재 표면의 얇은 부분에 생기는 응력
- 2) 용사된 입자가 모재에 충돌하여 모재표면이 급속히 가열된 후 곧바로 급냉되어 모재표면에 생기는 잔류응력
- 3) 용사된 입자의 냉각에 따른 모재와 열팽창계수의 차에 의해 생기는 잔류응력

이러한 잔류응력 발생 기구는 모재에 의한 영향으로 생각할 수 있다. 따라서 만일 모재에 의한 영향을 제거하여 준다면 용사시 코팅층 자체의 냉각 특성에 의해 발생하는 잔류응력만을 구별할 수 있을 것이다.

지금까지 X선에 의한 응력측정을 위한 시험편처럼 원형일 때는 Fig. 2의 x와 y 방향의 응력은 같으므로 방향에 따라 응력은 변화가 없다고 볼 수 있다. 그러나 시험편이 원형이 아닌 경우에는 방향에 따라 응력이 같지 않게 된다. 폭 10mm, 두께 13mm, 길이 90mm의 각형 모재에 지르코니아를 용사에 의해 코팅한 경우에는 길이가 폭에 비하여 훨씬 크기 때문에 폭에 의한 응력 효과는 무시할 수 있다<sup>9)</sup>.

이런 각형 모재에 Table 3의 조건으로 용사한 후에 모재에 의한 구속을 제거하였다. 세라믹코팅은 취약하므로 모재를 기계적인 방법으로 제거한다면 코팅층에 영향을 줄 수 있으므로 화학적인

방법으로 모재를 녹여 내는 피클링(pickling)법을 사용하였다. Al-Si합금을 염산에서 녹여 내어 모재 부분을 제거한 후의 코팅층을 Fig. 7에 나타내었다.

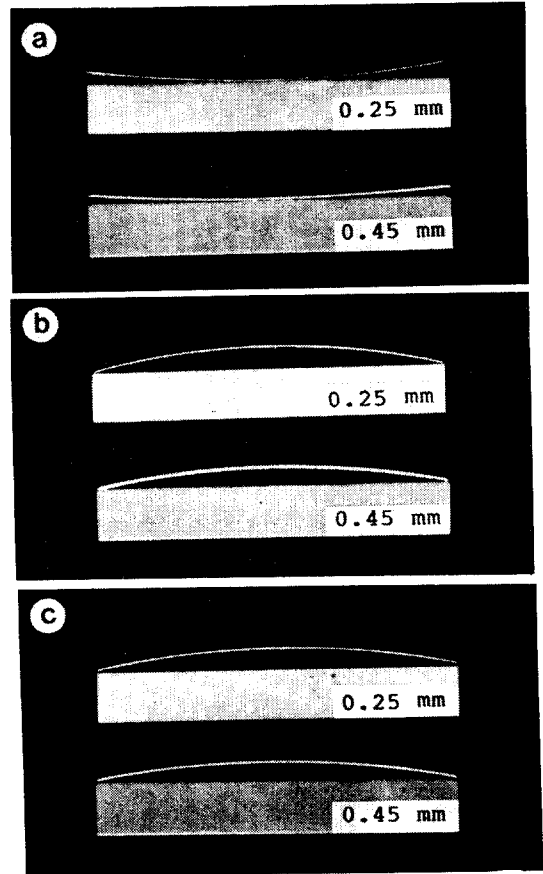


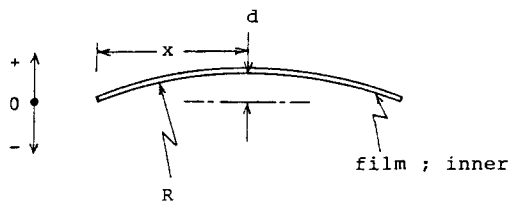
Fig. 7 Deflection of coated film after pickling (specimen length; 90mm)  
(a) 1 layers, (b) 2 layers, (c) 3 layers

Fig. 7의 (a)는 금속모재에 지르코니아를 각형 시험편에 0.25mm와 0.45mm로 코팅한 후 모재를 제거했을 때의 코팅층의 휨(deflection)을 보여주고 있다. 코팅층을 구속하고 있던 모재의 영향을 제거하고 난 후의 코팅층 자체는 계면에서 멀어질수록 인장응력의 경향으로 된다. 이것은 용사입자가 플라즈마 화염에서 충분히 가열된 후 모재에 충돌할 때 충돌면이 먼저 급냉되고, 반대면은 대류나 전도에 의해 보다 느리게 냉각될 때 이미 응고된 충돌면에 의해 구속되어 표면으로 갈수록 큰 인장잔류응력이 발생하는 것이라 생각된다.



Table 5 Curvature of coating layer after pickling

Classification	Coating Thickness	2x*	d*	Curvature, $\delta^*$
				( $\times 10^{-3}$ )
1 Layer Coat	0.25	89	3.1	313
	0.45	90	2.6	257
2 Layers Coat	0.25	88	-5.7	-586
	0.45	89	-4.9	-493
3 Layers Coat	0.25	89	-4.7	-473
	0.45	89	-4.3	-433



\* Dification of the curvature and d.

$$\frac{1}{\rho} = R = \frac{x^2 + d^2}{2d}$$

Fig. 7의 (b)는 0.15mm의 접합코팅 위에 0.25mm와 0.45mm로 지르코니아를 코팅한 후 모재를 녹여 냈을 때 접합코팅과 세라믹코팅 층의 휨을 나타내었다. 이때 접합코팅과 복합코팅층은 염산에 의해 제거되지 않았다. 모재를 제거한 후 코팅층에는 앞서 언급한 용사입자의 충돌면과 그 반대면의 냉각속도의 차에 의한 표면쪽으로의 인장응력과, 접합코팅과 세라믹코팅과의 열팽창계수의 차에 의한 표면쪽으로의 압축응력이 중첩되어 작용한다. 그런데 Fig. 7(b)에서 볼 수 있는 것처럼 접합코팅과 세라믹코팅의 열팽창계수의 차에 의한 응력이 훨씬 지배적임을 알 수 있다.

Fig. 7의 (c)는 복합코팅을 행한 3층코팅에 대한 피클링 후의 휨을 나타내었는데 이때도 (b)와 마찬가지로 두 코팅층 사이의 열팽창계수의 차에 의한 응력이 지배적이다.

이러한 용사조건에 따른 곡률을 측정하여 Table 5에 나타냈다. 2층코팅 보다 3층코팅의 곡률이 더 작다는 사실은 열팽창계수의 차가 복합코팅층을 씌움으로서 완화된 것으로 이것은 코팅두께가 변함에 따라서 2층코팅의 경우보다는 3층코팅의 곡률의 변화가 더욱 작다는 것으로 부터도 알 수 있다.

#### 4. 결 론

플라즈마 용사에 의해 접합코팅, 복합코팅, 지르코니아코팅을 하였을 때, 코팅층의 두께 변화에 따른 표면잔류응력을 X선회절법에 의해 측정하였고, 코팅층의 응력분포를 피클링법에 의해 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 코팅두께의 변화는 유입되는 열량을 변화시켜 코팅층의 잔류응력에 영향을 미치며, 지르코니아만을 금속모재에 용사했을 때는 표면인장 잔류응력이, 접합코팅층과 복합코팅층이 있을 때는 표면 압축잔류응력이 존재한다.
- (2) 두꺼운 접합코팅과 복합코팅에 의해 지르코니아 코팅층의 표면응력을 줄일 수 있으며, 특히 지르코니아를 두껍게 코팅할 경우 복합코팅층을 두는 것은 효과적인 응력제어 방법이다.
- (3) 잔류응력에 대한 모재의 영향을 제거하면, 코팅층에는 용사작업에 따른 냉각속도의 차에 의한 응력보다는 코팅재 상호간의 열팽창계수차에 의한 잔류응력의 효과가 더 크다.

#### 감사의 글

본 연구에 큰 도움을 주신 한국기계연구소 황선효 박사님, 이형근 선배님, 충남대학교 서동수 교수님 그리고 세원금속 안명구 사장님께 감사드립니다.

## 참고문헌

- 1) H.D.Steffens, U.Fischer : Characterization and thermal shock testing of yttria-stabilized zirconia coatings, 14th Int. Conf. on Metall. Coatings, San Diego, Mar. 23-27, (1987), pp. 327-338
- 2) JIS, Aluminum Alloy Castings, H 5202-1982, pp. 1-20
- 3) R.C.Hendricks, G.McDonald, R.L.Mullen : Residual stress in plasma-sprayed ceramic turbine tip and gas-path seal specimens, 7th Annual Conf. on Ceramics and Advanced Materials, Am.Ceram.Soc., Cocoa Beach, Florida, Jan. 16-23, (1983), pp.802-809
- 4) I.Kvernes : Ceramic coatings as thermal barriers in diesel and gas turbine engine components, High Tech. Ceramics, Elsevier Science Publishers, Amsterdamm, (1987), pp. 2519-2536
- 5) D.S.Rickerby, G.Eckold, K.T.Scott, I.M. Buckely - Golder : The interrelationship between internal stress, processing parameters and microstructure of physically vapour deposited and thermally sprayed coatings, 14th Int. Conf. on Metall. Coatings, San Diego, Mar. 23-27, (1987), pp. 125-141
- 6) METCO Technical Bulletin : METCO 461 Nickel Chromium-Aluminum-Cobalt-Yttria Composite Powder
- 7) METCO Technical Bulletin : METCO 204NS and 204B-NS
- 8) Bong Hee, Han : Basic X-ray Diffraction, Dong Myong Sa, Seoul, (1983), pp. 245-249
- 9) R.A.Miller, C.E.Lowell : Failure mechanisms of thermal barrier coatings exposed to elevated temperatures, Thin Solid Films, Vol. 95, (1982), pp. 265-273
- 10) G. Fisher : Ceramic coatings enhance performance engineering, Ceramic Bulletin, Vol.65, No. 2, (1986), pp. 283-287
- 11) P.Boch, P.Fauchais, D.Lombard, B.Rogeaux, M.Vardelle : Plasma - sprayed zirconia coatings, Science and Technology of Zirconia II, The American Ceramic Society, (1983), pp. 488-502
- 12) G.C.Chang, W.Phucharoen, R.A.Miller : Finite element thermal stress solutions for thermal barrier coatings, 14th Int. Conf. on Metall. Coatings, San Diego, Mar. 23-27, (1987), pp. 307-325
- 13) 輕金屬通信社編 : Aluminum Alloy Data Sheets, Japan, A332.2