

## 알루미나 세라믹(Alumina Ceramic) 코팅층의 機械的인 特性和 殘留應力の 解析에 관한 研究<sup>+</sup>

金 永 植\*  
(96년 4월 10일 접수)

A Study on the Mechanical Properties and Residual Stresses of the  
Thermally Sprayed Alumina Ceramic Coating Layer

Yeong-Sik Kim\*

**Key Words** : Alumina Ceramic(알루미나 세라믹), Residual Stress(잔류응력), Strengthening Heat Treatment(강화열처리), Finite Difference Method(유한차분법), Finite Element Method(유한요소법), Thermoelastic Analysis(열탄성해석)

### Abstract

The purpose of this study is to improve the mechanical properties and to evaluate the residual stresses of flame-sprayed Alumina ceramic coating layer.

The first work in this study is to investigate the effects of strengthening heat treatments on the mechanical properties of coating layer. Strengthening heat treatments for sprayed specimens were carried out in vacuum furnace. The mechanical properties such as microhardness, thermal shock resistance, adhesive strength and erosion resistance were tested for the sprayed specimens after strengthening heat treatments. And it was clear that the mechanical properties of coating layer were much improved by strengthening heat treatments.

The second work in this study is to evaluate the residual stresses in coating layer by numerical analysis. FDM and FEM were used to analyze temperature distribution and residual stresses in coating layer. It was proved that there are tensile stresses in coating layer and that residual stresses can be controlled by the appropriate selection of the spraying parameters such as preheat temperature, coating thickness and bond coat thickness.

+ 이 논문은 1994년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음

\* 정희원, 부산수산대학교 공과대학 자동차공학과

## 1. 緒 論

금속표면에 대한 세라믹 용사는 금속과 세라믹의 두가지 특성을 동시에 만족시키는 表面改質技術의 하나로서 최근 여러 공업분야에 있어 많은 각광을 받고 있다<sup>1) 3)</sup>.

용사에 사용되는 재료는 초기에는 금속 뿐이었으나 오늘날에는 금속이나 각종 합금은 플라스틱과 세라믹스(ceramics)에 이르기까지 용융가능한 거의 모든 재료가 여러가지 형태로서 사용되고 있다. 세라믹스는 뛰어난 열적, 기계적 특성으로 인해 그 자체로서도 기계구조물용 재료로 널리 사용되고 있을 뿐 아니라 금속 재료와의 복합화에 의한 異種接合 재료로서, 또한 봉상 또는 분말상의 용사용 재료로서도 널리 사용되고 있다<sup>4) 6)</sup>. 그중에서도 특히 알루미늄 세라믹은 耐磨耗性を 비롯한 耐熱, 耐蝕 등의 기계적 특성 뿐 아니라 電磁氣的, 生體的 특성이 뛰어나 가장 광범위하게 사용되는 대표적인 세라믹 용사 재료이다.

한편 용사법의 적용에 있어서 殘留應力の 제어가 매우 중요하다는 사실은 많은 연구자들에 의해 밝혀진 바 있는데<sup>7) 8)</sup>, 이러한 殘留應力으로 인한 코팅층의 기계적 특성 저하는 현재 용사법의 실용화에 있어서 해결해야 할 가장 시급한 과제로 남아 있다.

코팅층의 殘留應力 제어를 위해서 선행되어야 할 문제는 殘留應力の 평가이다. 실험적인 방법에 의해 殘留應力を 측정하고자 하는 연구는 많이 시도되었으나<sup>9) 11)</sup>, 방법 자체가 안고 있는 문제점으로 인해 어느 방법으로도 코팅층의 殘留應력을 제대로 평가하지는 못하였다.

본 연구에서는 알루미늄 세라믹 코팅층의 기계적 특성을 究明하고, 용사후의 強化熱處理가 코팅층의 기계적인 특성에 미치는 영향을 特性評價試驗을 통해 검토하였다. 또한 有限差分法(finite difference method)과 有限要素法(finite element method)을 이용하여 해석적인 방법으로 알루미늄 세라믹 코팅층의 殘留應력을 평가하였다. 이 해석 결과를 토대로 여러 용사변수, 즉 豫熱 온도, 코팅층의 積層 두께, 본드코팅층의 有無 등이 코팅층의 殘留應력에 미치는 영향도 아울러 검토하였다.

## 2. 實驗 및 方法

### 2.1. 코팅 시험편의 제작

코팅 시험편의 제작을 위한 용사장치로는 Eutectic사제의 플래임 용사장치(TeroDyn System 2000)를 사용하였다. 본드코팅 재료로는 Ni-5%Al 합금 분말을, 본코팅 재료로는 회색 알루미나(Grey Alumina) 세라믹 분말을 사용하였다.

용사에 앞서 30×40×6mm로 가공된 素地金屬平板(SS41)에 대해 前處理로서 #30 알루미나 그릿트에 의해 표면을 粗面化한 후, 아세톤으로 초음파 세척을 하였다. 이어 前處理한 素地金屬平板을 100℃로 예열하여 본드코팅층 100μm, 세라믹코팅층 400μm의 두께로 용사한 2층의 複合코팅 시험편을 제작하였다.

Table 1은 코팅 시험편을 제작하기 위해 사용된 알루미늄 세라믹 분말의 화학조성을, Table 2는 코팅 시험편을 제작하기 위한 용사 조건을 나타낸 것이다.

Table 1 Chemical compositions of Alumina ceramic powder used (wt %)

Aluminum Oxide	Titanium Oxide	Silicon Oxide	Iron Oxide	Other Oxides
94.0	2.5	2.0	1.0	Bal.

Table 2 Spraying conditions

	Bond coating	Main coating
Spraying distance (mm)	200	150
Oxy. gas pressure (MPa)	0.343	0.343
Acc. gas pressure (MPa)	0.098	0.098
Air pressure (MPa)	0.1	0.3
Spraying rate (kg/hr)	3.6	1.6
Preheat temperature (℃)	100	—

2.2. 強化熱處理

전술한 바와 같이 素地金屬 平板에 2층의 複合 코팅층을 작성하여 코팅 시험편을 제작하고, 이들 시험편에 대해 진공로중에서 強化熱處理를 실시하였다. 強化熱處理 온도는 700, 800, 900 및 1000℃로 하였고, 각각의 처리 온도에 있어서 유지시간은 10분으로 하였다. 상온에서부터 각각의 처리 온도에 이르기까지의 온도 상승 및 강하 속도는 20℃/min으로 하였다.

Table 3은 強化熱處理 조건을 나타낸 것이다.

Table 3 Strengthening treatment conditions

Temperature (°C)	Holding time (min)	Vacuum (torr)
700	10	$8 \times 10^{-1}$
800		
900		
1000		

2.3. 特性評價試驗

코팅 시험편에 대해 그 처리 조건을 달리하여 強化熱處理를 실시하고, 이러한 強化熱處理 조건이 코팅층의 기계적 특성에 미치는 영향을 검토하기 위해 처리 조건을 달리한 각각의 시험편에 대해 다음과 같은 特性評價試驗을 실시하였다.

(1) 組織試驗: 금속현미경을 이용하여 코팅층의 氣孔 및 단면의 미세조직 변화를 관찰하였다.

(2) 微小硬度試驗: 500gf의 압자를 이용한 마이크로비커스 경도시험기로써 코팅층 단면의 微小硬도를 측정하였다. 한 시험편당 측정 개소는 5개소로 하였다.

(3) 熱衝擊試驗: 1073K의 전기저항로중에서 시험편을 10분간 보지한 후, 실온의 청수중에 급랭시키는 방법으로 반복 熱衝擊을 가하고, 매회의 熱衝擊시마다 확대경을 통해 코팅층의 손상 거동을 관찰하여 코팅층의 耐熱衝擊성을 평가하였다.

(4) 密着強度試驗: 만능재료시험기에 3점굽힘시험용 지그를 제작, 부착하고 1mm/min의 變位制御速度로서 시험편에 하중을 가하는 3점굽힘시험을

행하여 素地金屬 재료와 코팅층과의 密着強度를 평가하였다.

(5) 블라스트 이로우전(Blast erosion)試驗: 6mm  $\phi$  노즐의 블라스트 장치를 이용하여 0.49MPa의 압력으로 #30 알루미나 그릿트 150g을 코팅층의 표면에 분사하고, 탈락된 코팅층의 무게를 0.001g 단위까지 측정하여 코팅층의 耐이로우전성을 평가하였다. 노즐 출구로부터 코팅층 표면까지의 거리는 100mm, 분사각도는 30°로 하였다.

3. 殘留應力解析

熱傳導 및 熱應力解析에 사용된 해석모델의 크기는 실제의 코팅 시험편과 동일하게 하였다.

有限差分法에 의한 熱傳導解析에 있어서 길이 방향 및 폭 방향의 길이는 두께 방향의 길이에 비해 충분히 크므로 이들 두 방향에 대한 온도구배를 무시하고 두께 방향에 대한 1次元 非定常 熱傳導解析을 하였다. 差分方程式은 陰的解法(implicit method)에 의한 식을 사용하였고, 差分網의 크기는 0.05mm로 하였다.

有限要素法에 의한 熱應力解析에 있어서는 熱傳導解析의 결과로서 구해진 해석모델의 온도분포를 입력데이터로 하여 폭 방향과 두께 방향에 대한 2次元 熱彈性解析을 하였다. 要素分割은 8節點의 isoparametric 要素를 사용하였고, 要素의 크기는 0.05×0.05mm로 하였다.

Table 4, 5는 熱傳導 및 熱應力解析에 사용된 素地金屬 재료와 코팅재의 材料定數를 나타낸 것이다.

Table 4 Physical properties of materials used for heat transfer analysis

	Specific heat [J/kg · K]	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Thermal cond. [W/m · K]
Substrate (SS41)	470	7800	42
Bond coating (Ni-5%Al)	480	8600	20
Main coating (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1250	3600	7.5

Table 5 Mechanical properties of materials used for thermal stress analysis

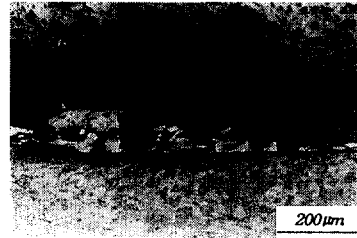
	Young's modulus [GPa]	Poisson's ratio	Thermal expansion coef. [ $\times 10^{-6}/K$ ]
Substrate (SS41)	210	0.28	12.0
Bond coating (Ni-5%Al)	75	0.31	12.8
Main coating ( $Al_2O_3$ )	25	0.25	8.0

#### 4. 結果 및 考察

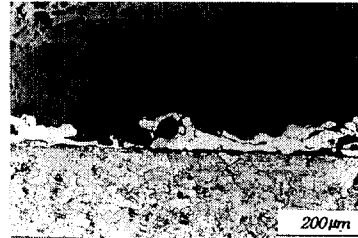
##### 4.1. 알루미늄 세라믹 코팅층의 기계적인 특성

Photo.1은 強化熱處理를 실시한 시험편의 단면 미세조직 변화를 나타낸 것이다. 強化熱處理를 실시하지 않은 시험편(a)의 경우 素地金屬과 본드코팅층 사이의 界面이 뚜렷하여 양자간의 결합이 용사전 素地金屬 표면의 粗面化에 의한 단순한 기계적인 결합임을 잘 알 수 있다. 800℃ 이상의 온도로 強化熱處理를 실시한 시험편(c, d, e)에 있어서는 온도 상승에 의한 素地金屬 結晶粒의 조대화화 함께 素地金屬과 본드코팅층 사이의 界面에서도 冶金學的인 변화가 나타나고 있음을 관찰할 수 있는데, 이러한 거동은 強化熱處理 온도가 높아짐에 따라 더욱 뚜렷하여 1000℃로 強化熱處理를 실시한 시험편(e)에 있어서는 素地金屬과 본드코팅층의 界面 구분도 명확히 나타나 있지 않다. 동일한 素地金屬과 본드코팅 재료를 사용한 저자의 이전 연구에서, 強化熱處理에 의한 界面에서의 이러한 거동은 素地金屬의 Fe와 본드코팅층의 Ni이 界面을 통해 相互擴散된 결과라는 것을 究明한 바 있다<sup>12)</sup>. 한편 強化熱處理에 의한 세라믹 코팅층의 氣孔의 변화는 관찰되지 않았다.

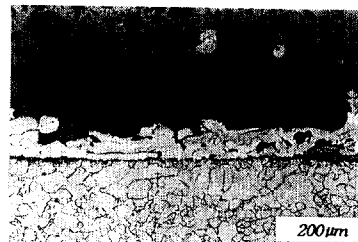
Fig.1은 強化熱處理를 실시한 코팅층의 斷面微小硬도를 나타낸 것이다. 強化熱處理에 의해 코팅층의 斷面微小硬도는 상당히 개선된 결과를 보이고 있는데, 800℃ 이상의 온도로 強化熱處理된 코팅 시험편에 있어서 그 개선효과가 뚜렷하다. 1000℃로 強化熱處理된 코팅 시험편의 경우 800-900℃로



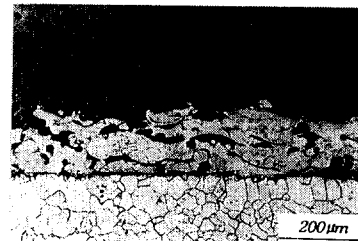
(a) as sprayed



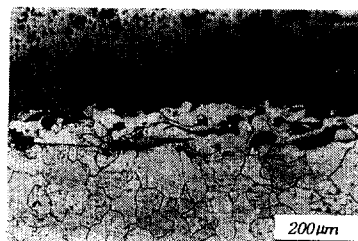
(b) 700°C treated



(c) 800°C treated



(d) 900°C treated



(e) 1000°C treated

Photo. 1 Microstructures of specimens after strengthening treatment

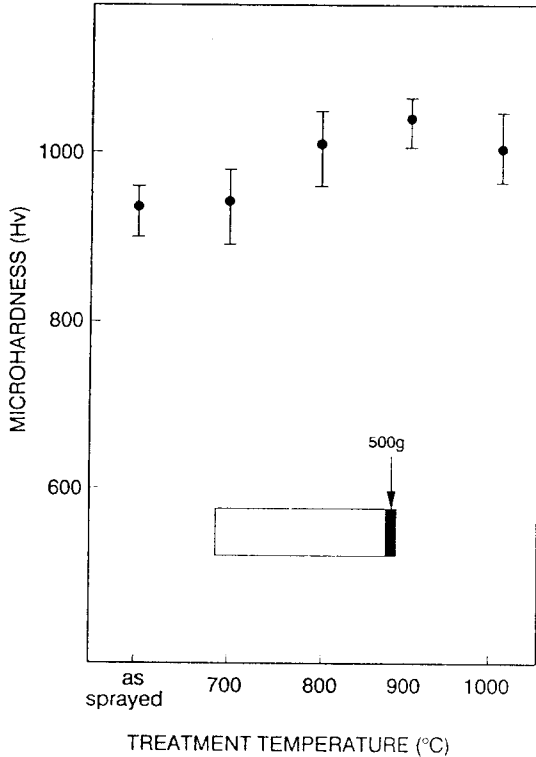


Fig. 1 Microhardness as to strengthening treatment conditions

強化熱處理된 코팅 시험편에 비해 상대적으로 낮은 硬度值를 보이고 있는 것은 이 強化熱處理 조건 하에서 세라믹 코팅층을 구성하고 있는 알루미늄 입자들 사이의 결합력이 취약해졌기 때문인 것으로 생각된다.

Fig.2는 強化熱處理를 실시한 코팅 시험편의 熱衝擊試驗 결과를 나타낸 것이다. 700°C로 強化熱處理된 시험편의 경우 괄목할만한 개선효과를 보이지 않으나 800°C이상의 온도로 強化熱處理된 시험편의 경우 耐熱衝擊性은 현저히 개선되었고, 특히 900°C의 온도로 強化熱處理된 시험편의 경우 40회의 반복 熱衝擊을 가하는 동안 코팅층의 薄리나 부풀음 등의 손상은 전혀 관찰되지 않았다. 이것은 앞서 언급한 組織試驗의 결과로부터도 알 수 있는 바와 같이 強化熱處理에 의해 素地金屬과 본드코팅층 사이의 界面에서 元素의 相互擴散에 의한 冶金學的인 結合이 이루어져 그 밀착력이 현저히 증

가되었기 때문인 것으로 판단된다.

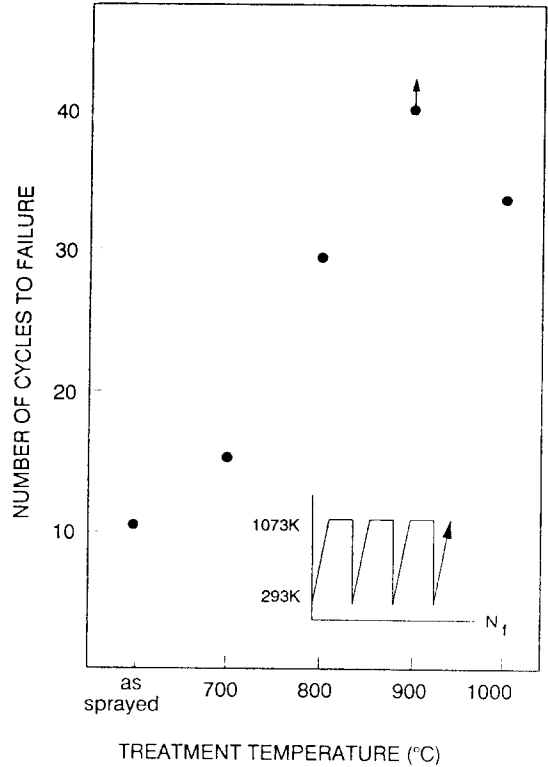


Fig. 2 Thermal shock resistance as to strengthening treatment conditions

회편 熱衝擊試驗의 결과 발생한 시험편의 손상 거동은 強化熱處理를 실시하지 않은 시험편 및 700-900°C로 強化熱處理된 시험편의 경우는 素地金屬과 본드코팅층 사이의 界面에서의 薄리로 나타났다. 그러나, 1000°C로 強化熱處理된 시험편의 경우는 33회의 반복 熱衝擊후 세라믹 코팅층이 국부적으로 파손되는 거동을 나타내었다.

Fig.3은 強化熱處理를 실시한 코팅 시험편의 密着強度試驗 결과를 나타낸 것이다. 700°C로 強化熱處理된 코팅 시험편의 경우 強化熱處理를 실시하지 않은 코팅 시험편에 비해 크게 개선된 결과를 보이지는 않으나, 800°C이상의 온도로 強化熱處理된 코팅 시험편의 경우 그 개선효과는 현저하고, 이 경우 6mm까지의 變位를 주어도 素地金屬과 코팅층 사이의 界面에서의 薄리는 관찰되지 않았다.

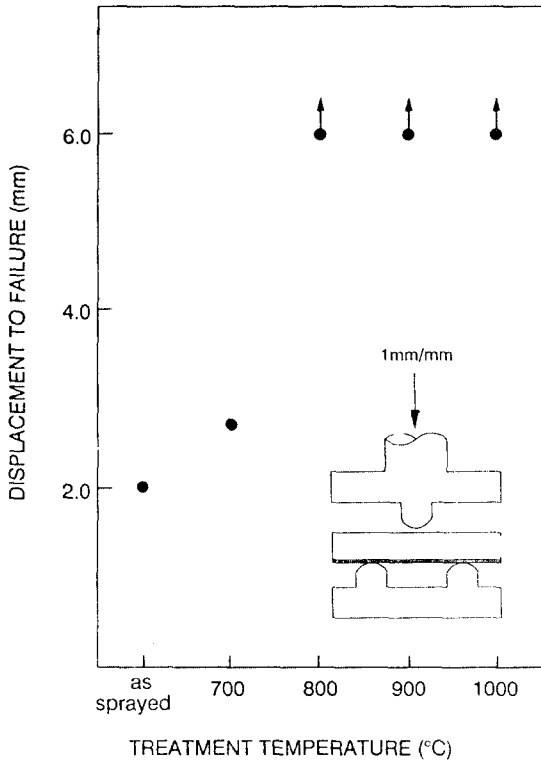


Fig. 3 Adhesive strength as to strengthening treatment conditions

그 원인은 앞서 熱衝擊試驗의 결과에서도 언급한 바와 같이 800°C 이상의 온도로 強化熱處理된 코팅 시험편의 경우 素地金屬과 본드코팅층 사이의 界面에서 冶金學的인 結合이 이루어져, 그 결과 양자 간의 密着强度가 현저히 증가되었기 때문인 것으로 판단된다.

Fig.4는 強化熱處理를 실시한 코팅 시험편의 블라스트 이로우전試驗 결과를 나타낸 것이다. 코팅층의 耐이로우전性은 強化熱處理에 의해서도 그다지 개선되지 않았는데, 이는 코팅층의 耐이로우전性이 코팅층을 구성하고 있는 입자와 입자 사이의 結合력에 의해 좌우되며, 이 結合력이 強化熱處理에 의해서도 크게 변화되지 않았기 때문인 것으로 생각된다. 한편 1000°C로 強化熱處理된 시험편의 경우 耐이로우전性은 強化熱處理를 실시하지 않은 시험편에 비해 오히려 떨어지는 경향을 보이고 있는데, 이는 앞의 微小硬度試驗의 결과에서도 언급

한 바와 같이 1000°C의 強化熱處理 조건하에서 세라믹 코팅층을 구성하고 있는 알루미늄 입자들 사이의 結合력이 취약해졌기 때문인 것으로 생각된다.

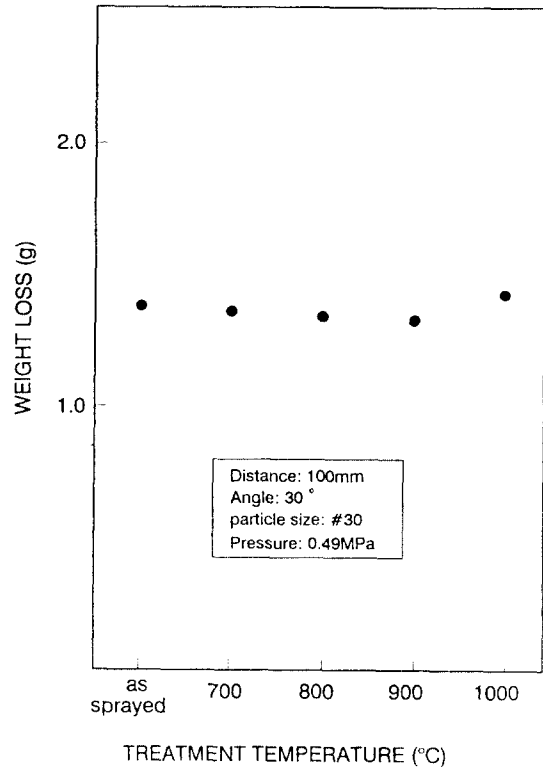


Fig. 4 Erosion resistance as to strengthening treatment conditions

이상의 결과로부터 코팅층의 기계적 특성은 용사후의 強化熱處理에 의해서 크게 개선될 수 있으며, 특히 素地金屬과 본드코팅층 사이의 界面에서 元素의 相互擴散에 의한 結合력의 증대는 코팅층의 耐熱衝擊性이나 密着强度의 개선에 크게 유용한 것으로 판단된다. 또한 본 特性評價試驗의 결과 알루미늄 세라믹 코팅층의 기계적 특성을 개선하기 위한 強化熱處理 온도는 800-900°C가 적절할 것으로 생각된다.

#### 4.2. 알루미늄 세라믹 코팅층의 殘留應力

Fig.5는 본드코팅층 없이 알루미늄 세라믹을 400 μm의 두께로 용사한 경우 코팅층에 발생하는 垂直

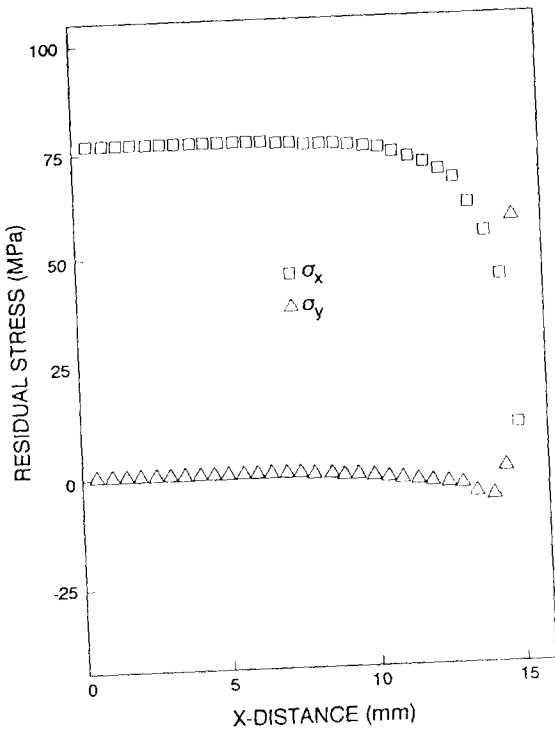


Fig. 5 Stress distribution in the direction of X

應力の 해석결과를 나타낸 것이다. 이 해석결과는 素地金屬 재료와 코팅층의 界面에서 가장 가까운 要素의 하부 3개 積分点들에 대한 값들을 plot한 것으로서, 이하의 그림은 모두 이 積分点들에 대한 해석결과를 나타낸 것이다.

Fig.5에 의하면 폭 방향의 應力  $\sigma_x$ 는 x 방향 전 반에 걸쳐 약 75MPa의 引張應力 상태로 존재하나 끝단에서는 0으로 수렴하며, 결국 용사후 코팅층에는 두께 방향의 應力  $\sigma_y$ 만이 끝단에서 약 60MPa 수준의 引張應力 상태로 존재하게 된다.

Fig.6은 본드코팅층 없이 알루미나 세라믹을 400  $\mu$ m의 두께로 용사한 경우, 豫熱이 코팅층의 殘留應력에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 해석결과에 의하면, 豫熱이 없는 경우 폭 방향 끝단에서의 最大引張應力 수준은 약 60MPa 정도이나, 100 $^{\circ}$ C의 豫熱이 있는 경우 最大引張應力 수준은 약 40MPa 정도인 것으로 나타났다. 또한 300 $^{\circ}$ C의 豫熱이 있는 경우 폭 방향 끝단에서의 應力 상태가 引張에서 壓縮으로 바뀌며, 이때 最大壓縮應力 수준은 약

30MPa 정도인 것으로 나타났다.

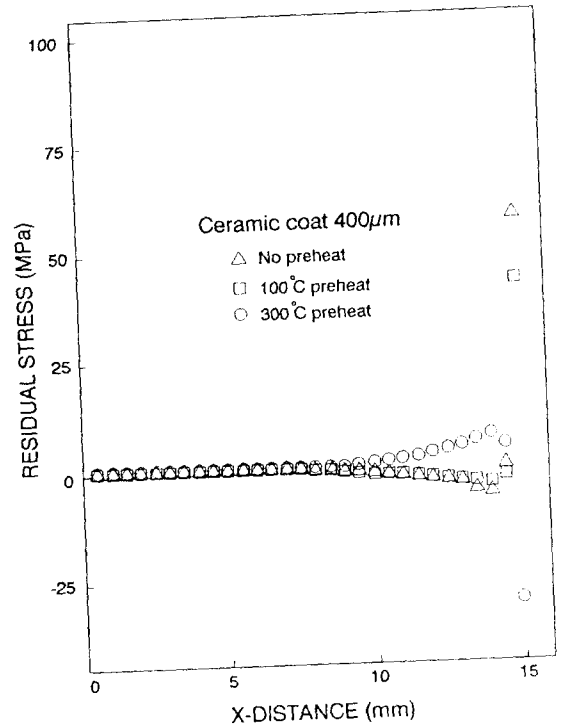


Fig. 6 Variation of residual stress as to preheat temperature

용사과정중 용사입자는 연속적으로 素地金屬 재료에 충돌하고, 충돌하는 순간 급냉되므로 코팅층은 수축하게 된다. 반면 素地金屬 재료는 용사입자가 積層됨에 따라 그 온도가 상승하므로 팽창하게 된다. 용사후의 냉각과정에 있어서는 코팅층과 素地金屬 재료는 모두 수축하게 된다. 즉, 용사와 냉각과정에 있어서 코팅층은 계속하여 수축하는 반면, 素地金屬 재료는 팽창과 수축을 반복하게 되므로 체적 변화가 거의 없고, 이러한 양재료의 거동이 界面에서 구속되어 있으므로 코팅층에는 引張, 素地金屬 재료측에는 壓縮의 熱應力이 발생한다.

한편 용사전 素地金屬 재료를 豫熱하면 용사과정중 코팅층의 수축량은 감소하게 되고, 반면 素地金屬 재료는 팽창량보다 수축량이 크게되므로 용사후 코팅층에 남게되는 殘留應力の 수준은 豫熱하지 않은 경우에 비해 낮게 된다. 豫熱 온도가 너

무 높게되면 양재료의 熱膨脹係數의 차가 재료의 변형 거동에 큰 영향을 미치게 되는데, 이때에는 素地金屬 재료의 수축량이 코팅층의 수축량보다 크게 되므로 素地金屬 재료측에는 引張, 코팅층에는 壓縮의 殘留應力이 남게 된다. Fig.6에서는 이러한 결과가 잘 나타나 있다. 한편 이 결과로부터 殘留應力을 최소화할 수 있는 豫熱 온도는 100-300℃의 범위내에 있을 것으로 생각된다.

Fig.7은 코팅층의 두께가 殘留應力에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 이 결과에 의하면 코팅층의 두께가 커질수록 殘留應力은 증대해지는 결과를 나타내고 있는데, 이것은 코팅층의 두께가 커질수록 용사과정중 코팅층의 온도가 높아지고, 따라서 냉각과정중의 수축량도 그만큼 커지기 때문인 것으로 생각된다.

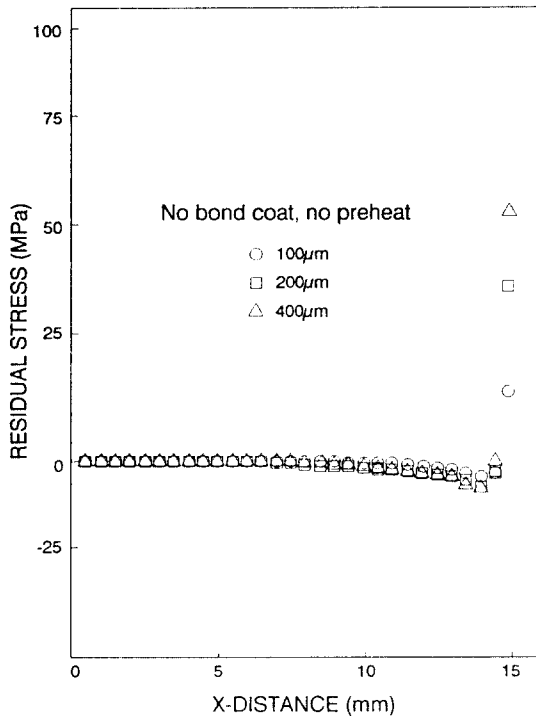


Fig. 7 Variation of residual stress as to coating thickness

Fig.8은 세라믹코팅층의 두께 400µm인 경우에 있어서 본드코팅층의 두께가 殘留應力에 미치는

영향을 나타낸 것이다. 이 결과에 의하면 본드코팅층이 있는 경우 應力 수준은 본드코팅층이 없는 경우에 비해 높아지고, 또한 본드코팅층의 두께가 증가할수록 應力 수준은 높아지고 있는데 그 원인은 다음과 같은 것으로 생각된다. 전술한 바와 같이 용사와 냉각과정에 있어서 素地金屬 재료는 체적 변화가 거의 없는 반면 세라믹코팅층은 계속적으로 수축하게 되는데, 이러한 양재료의 거동이 界面에서 구속되어 있으므로 세라믹코팅층에는 引張, 素地金屬 재료측에는 壓縮의 殘留應力이 남게 된다. 그런데 素地金屬 재료와 세라믹코팅층 사이에 본드코팅층이 있을 경우, 본드코팅층의 熱膨脹係數는 세라믹코팅층의 熱膨脹係數보다 크기 때문에 코팅층의 수축량은 본드코팅층이 없는 경우보다 더 크게 되고, 따라서 殘留應力의 수준도 더 높게 되는 것이다.

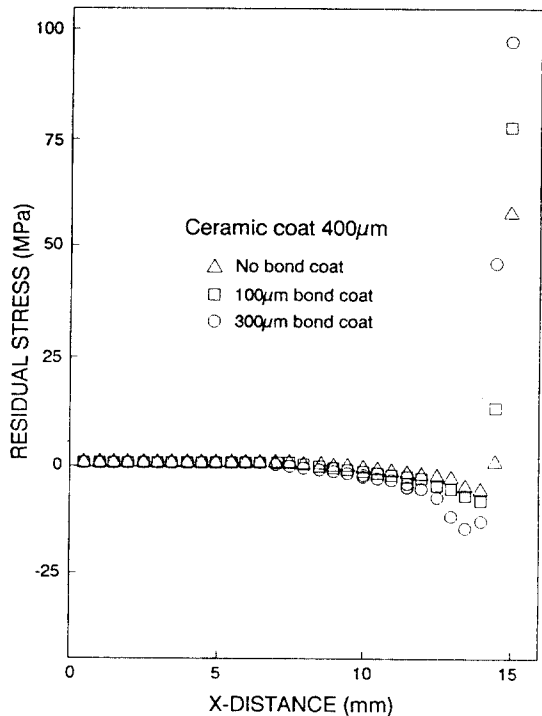


Fig. 8 Variation of residual stress as to bond coat thickness

Fig.9는 본드코팅층 100µm, 세라믹코팅층 400µm



인 경우에 있어서 豫熱 온도가 殘留應力에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 豫熱이 있는 경우 殘留應力의 수준은 豫熱이 없는 경우에 비해 훨씬 낮게 나타나고 있는데, 豫熱이 없는 경우 약 80MPa, 100℃의 豫熱이 있는 경우 약 50MPa의 引張應力이 존재하고, 300℃의 豫熱이 있는 경우 약 25MPa의 壓縮應力이 존재하는 것으로 나타나고 있다. 한편 이 결과로부터 본드코팅층 100 $\mu$ m, 세라믹코팅층 400 $\mu$ m인 경우 코팅층의 殘留應力을 최소화할 수 있는 적절한 豫熱 온도는 200℃ 내외인 것으로 판단된다.

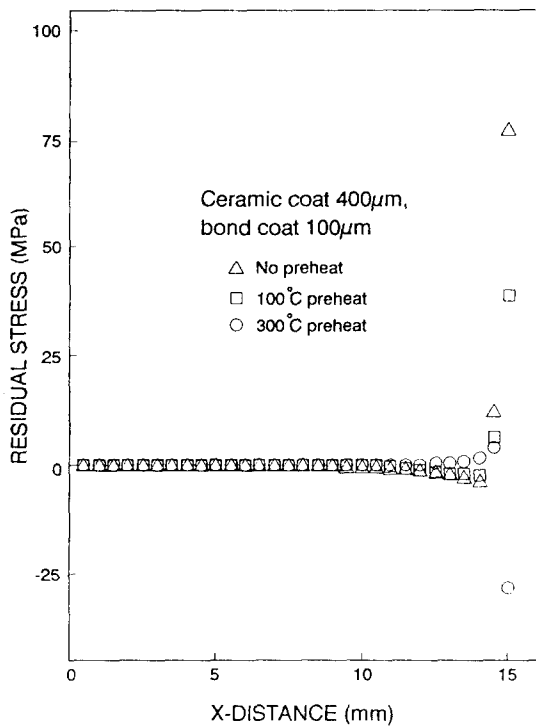


Fig. 9 Variation of residual stress as to preheat temperature in the case of 100 $\mu$ m-bond coat

이상의 해석결과로부터 코팅층의 殘留應力은 적절한 豫熱 온도와 積層 두께의 선정에 의해 크게 완화될 수 있을 것으로 생각되며, 또한 본드코팅층의 존재는 역학적으로는 殘留應力에 부정적인 영향을 미치므로 본드코팅층의 두께는 가급적 작

게 하는 것이 殘留應力의 완화에 유리할 것으로 판단된다. 한편 저자의 이전 연구 결과<sup>13)</sup>에서 본드코팅재로서 Ni-5%Al을 사용한 경우, 본드코팅층이 殘留應力의 완화에 기여하는 것으로 나타났는데, 熱彈性解析의 결과 그 원인은 본드코팅층의 존재가 力學的으로 殘留應力의 완화에 기여하기 때문인 것이 아니고, 본드코팅재 자체의 冶金學的인 성질에 기인하는 것으로 밝혀졌다.

## 5. 結 論

본 연구에서는 알루미나 세라믹 코팅층의 기계적 특성을 究明하고, 용사후의 強化熱處理가 코팅층의 기계적 특성에 미치는 영향을 特性評價試驗을 통해 검토하였다. 또한 有限差分法과 有限要素法을 이용하여 해석적인 방법으로 알루미나 세라믹코팅층의 殘留應力을 평가하였다.

본 연구에서 얻어진 주요한 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 強化熱處理에 의해 素地金屬과 본드코팅층 사이의 界面에서 相互擴散이 이루어져 양자간의 密着強度가 현저하게 증가하였다. 또한 코팅층의 耐熱衝擊性도 크게 개선되었다.

(2) 코팅층의 斷面微小硬度는 強化熱處理에 의해 상당히 개선되었으나, 耐이로우전性은 強化熱處理에 의해서도 그다지 개선되지 않았다.

(3) 코팅층의 기계적 특성을 개선하기 위한 적절한 強化熱處理 온도는 800-900℃임이 확인되었다.

(4) 본드코팅층 없이 알루미나 세라믹만을 용사한 경우, 코팅층에는 약 60MPa의 引張殘留應力이 존재하였다.

(5) 용사전의 적절한 豫熱은 코팅층의 殘留應力 완화에 크게 유효하며, 본드코팅층 100 $\mu$ m, 세라믹 코팅층 400 $\mu$ m인 경우 적절한 豫熱 온도는 200℃ 내외인 것으로 확인되었다.

(6) 코팅층의 殘留應力은 코팅층의 두께가 커질수록 증가하였다.

(7) 본드코팅재로서 Ni-5%Al을 사용한 경우, 본드코팅층의 존재가 力學的으로는 殘留應力의 완화에 부정적인 영향을 나타내었다.

参 考 文 献

- 1) 松田福久, 中田一博, “最近の表面改質技術の現状”, ジョイテック, 89-4, pp.99-106, 1989
- 2) 小林唯志 外, “多様化高度化する表面改質技術”, 溶接技術, Vol.37, No.6, pp.60-93, 1989
- 3) 尾崎義治, “セラミックス改質”, 材料, 第40巻, 第457号, pp.1253-1263, 1991
- 4) 奥田 博 外, “構造材料セラミックス”, オーム社, pp.1-2, 1987
- 5) 鈴木, 恩澤, “セラミックスと金属の複合化と接合技術”. 日本機械學會誌, 第8巻, 第811号, pp. 590-591, 1986
- 6) 森村利南, “最近の溶射材料”, 溶接技術, Vol.32, No.11, pp.25-28, 1984
- 7) I.Kvernes and M.Seiersten, “Developments and problems in the use of thermal barrier coatings on metals”, NACE's Int. Conf. on High Temperature Corrosion, Vol.NACE-6, pp.615-620, 1981
- 8) D.H.Harries, “Practical aspects of ultra-thick thermal barrier coatings”, ASM's Int. Conf. on Surface Modifications and Coatings, No. 8512-018, 1985
- 9) M.K.Hobbs and H.Reiter, “Residual stresses in  $ZrO_2-8\%Y_2O_3$  plasma-sprayed thermal barrier coatings”, Surface and Coating Technology, 34, pp.33-42, 1988
- 10) 納富 啓 外, “プラズマ溶射皮膜の残留応力測定に関する研究”, 日本溶接學會論文集, Vol.6, No.3, pp.29-35, 1988
- 11) S.Kuroda et al, “Simultaneous measurement of coating thickness and deposition stress during thermal spraying”, Thin Solid Films, 164, pp.157-163, 1988
- 12) 金永植, 金永植, “티타니아 세라믹 용射皮膜的 强度向上에 관한 研究 -强化處理條件이 皮膜 强度에 미치는 影響-”, 大韓熔接學會誌, 第10 巻, 第4号, pp.181-189, 1992
- 13) 김영식, 배차현, 김영식, “세라믹 용射皮膜的 强度向上에 관한 研究 -積層形態가 皮膜强度에 미치는 影響-”, 大韓熔接學會誌, 第9巻, 第3 号, pp.18-25, 1991