

## 경사기능성 지르코니아 용사피복층의 열 및 기계적특성

朴且桓, 吳東炫, 朴翊旻<sup>1</sup>, 曹敬穆<sup>2</sup>, 鄭明奎\*

부산대학교 공과대학 금속공학과

\*삼성항공 제조생산 기술부

<sup>1</sup>금속응고신소재연구센터, <sup>2</sup>항공재료연구센터Thermal and Mechanical Characteristics of Functionally Graded ZrO<sub>2</sub> Thermal Spray Coating

C. H. Park, D. H. Oh, I. M. Park, K. M. Cho and M. G. Jung

Dept. of Metall. Eng. Pusan University, Pusan 609-735

Dept. Manufacturing Eng., Samsung Areaspace Co.

## Abstract

NiCrAlY/YSZ (8wt%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub>) functionally graded thermal barrier coating (FGC) layers on a Co-base superalloy (HAYNESS 188) substrate were fabricated using Ar shielded single torch air plasma spraying method. Functional grading were produced with the stepwise compositional change throughout layer thickness. Microstructural observation revealed a successful fabrication of NiCrAlY/YSZ FGC. From the results of the curvature measurement, adhesive strength measurement and thermal shock test for the FGC, it was concluded that the optimum conditions of functionally graded coating layer thickness and compositional pattern exit to enhance the properties of FGC, which is closely related to the internal residual stress distribution within it.

## 1. 서 론

Gas turbine, diesel engine 등의 내연기관 고성능화를 위하여 플라즈마 용사법을 이용한 단열피복층(thermal barrier coating, TBC) 기술이 실용화되고 있다<sup>1,2)</sup>. 그러나 주로 금속모체에 세라믹을 피복하는 TBC는 우수한 단열성은 있으나, 금속모체와 세라믹 피복층의 열팽창계수 차이로 인한 계면 취약성의 문제점이 있다<sup>3,4)</sup>. 따라서 최근

금속모체와 세라믹층 사이에 조성 혹은 미세조직의 경사성을 부여한 계면을 삽입하여 열부하에 따른 내부응력을 완화하도록 설계 제조한 경사기능성 TBC (functionally graded TBC, FGC)에 관련된 연구가 일본, 미국 등 선진국을 중심으로 활발히 진행되고 있다<sup>5,6)</sup>.

플라즈마 용사법을 이용한 FGC 제조에는 single torch법 혹은 multiple torch법이 사용되고 있다. Single torch 법은 용점, 밀도, 형상이 다른 금속

분말과 세라믹분말을 동시에 공급하기 때문에 양호한 적층상태의 FGC를 제조하기에는 다소 어려운 점은 있으나 장치가 간단하여 경제적으로 FGC를 제조할 수 있다. 반면 multiple torch법은 다수의 plasma torch에 각각의 분말을 공급함으로써 plasma arc 전류, 열이력, 분말공급속도 등을 조절하여 분말입자의 이동경로를 제어할 수 있어 상대적으로 우수한 FGC를 얻을 수 있으나, 고가의 장치 설치비 등에 따른 경제성이 문제시 되고 있다. 이외의 플라즈마 용사법으로는 plasma torch와 원료 분말 공급기가 분리된 process combinations법, 진공분위기에서 용사하는 low pressure single torch법 등의 다양한 방법들이 개발되고 있다<sup>7)</sup>.

플라즈마 용사법을 이용한 FGC 제조에는 용접과 밀도가 크게 상이한 금속과 세라믹분말을 열흐름 방향에 따라 적절히 제어하여 원하는 조성분율로 균일하게 혼합시키는 것이 매우 중요한 관건으로 지적되고 있다<sup>8,9)</sup>. 최근에는 플라즈마 용사법으로 FGC를 제조하여 미세조직을 관찰하는 등 기초 연구결과가 보고되고 있으나<sup>10,11)</sup>, 아직까지 체계적인 연구는 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 single torch를 이용한 플라즈마 용사법으로 경사기능 계면을 갖는 FGC층을 제조하여 열 및 기계적 특성을 조사하고자 하였다. Co기 초합금 금속모재와 ZrO<sub>2</sub> 세라믹층 사이에 조성분포를 달리한 다층의 NiCrAlY/ZrO<sub>2</sub> 경사기능층을 제조 삽입하고 금속모재 두께, 경사기능층 두께, 경사기능층내 금속(NiCrAlY)과 세라믹(ZrO<sub>2</sub>)의 조성분포가 피복층의 미세조직과 열 및 기계적<sup>12)</sup>에 미치는 영향을 조사하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 소재 및 플라즈마용사

본 실험에서는 피용사 금속모재로서 항공기 엔진 연소실 소재로 사용되는 Co기 초합금인 HA-

YNESS 188을 사용하였으며, 단열용 피복재료는 8wt% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>로 부분 안정화시킨 ZrO<sub>2</sub> 분말(yttria stabilized zirconia, YSZ)을 사용하였다. 경사기능층은 내산화성이 강한 NiCrAlY 분말과 YSZ 분말의 부피분율을 달리하면서 혼합 용사시켜 제조하였다. 표 1에는 본 실험에서 사용한 분말들의 화학조성 및 물성을 나타내었다.

플라즈마 용사장비는 최대출력이 80 KW인 METCO 9MB장비를 사용하였다. 표 2는 본 실험에서 사용된 용사조건을 나타낸 것으로 장비 제작사인 METCO에서 권장하는 조건을 고려하여 결정하였다. 혼합된 NiCrAlY와 YSZ 분말의 용점과 비증차이에 의한 용사층의 불균일성을 최소화하기 위하여 경사기능층의 용사조건을 용점이 높은 YSZ용사조건으로 하였으며, 용사과정에서 1 pass당 두께측정을 통하여 각 층별 두께를 조절하였다.

표 3은 NiCrAlY와 YSZ의 혼합분율을 달리하면서 Co기 초합금 금속모재 상에 FGC층을 형성시킨 방법을 나타내었다. NiCrAlY와 YSZ로 구성된 피복층은 경사기능층이 존재하지 않은 TBC층(T

Table 1. Characteristics of powders used for plasma coating.

Kind	Composition (wt%)	Size ( $\mu\text{m}$ )	Melting Point (K)	Thermal Expansion Coeff.
Bond Powder	67Ni-22Cr-10Al-1Y	45-125	1623	$13.7 \times 10^{-6}/\text{K}$
Ceramic Powder	8Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -92ZrO <sub>2</sub>	10-106	2988	$7 \sim 10 \times 10^{-6}/\text{K}$

Table 2. Plasma spray conditions.

Parameter	Bond Layer	FGM Layer	Ceramic Layer
Arc Current (A)	500	600	600
Arc Voltage (V)	75	65	65
Ar (CFH)	80	90	90
H <sub>2</sub> (CFH)	20	20	20
Carrier Gas (CFH)	10	40	40
Feed Rate (g/min)	44	74	74
Spray Distance	100	100	100

Table 3. Composition and thickness design of NiCrAlY/YSZ coating systems (unit : mm)

Specimens	Composition (vol.%)							Thickness		Remark	
	100N	80N+Z	60N+Z	40N+Z	30N+Z	20N+Z	10N+Z	100N	Total Graded Layer		
T	0.15	—	—	—	—	—	—	0.25	0.4	—	TBC
F1	0.15	0.1	0.1	0.1	—	0.1	—	0.25	0.8	0.4	Symmetry
F2	0.05	0.05	0.05	0.05	—	0.05	—	0.15	0.4	0.2	Symmetry
F3	0.05	—	—	0.05	0.05	0.05	0.05	0.15	0.4	0.2	Ceramic rich

Note) N : NiCrAlY, Z : ZrO<sub>2</sub>-8wt%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

시편)과 경사기능층이 삽입된 3종류의 FGC층 (F1, F2, F3시편)을 제조하였다. 경사기능층의 두께에 따른 피복층의 특성변화는 F1(두께 0.4 mm, NiCrAlY/YSZ 혼합분율 : 80 : 20, 60 : 40, 40 : 60, 20 : 80), F2(두께 0.2mm, NiCrAlY/YSZ 혼합분율 : 80 : 20, 60 : 40, 40 : 60, 20 : 80)를 비교하였고, 경사기능층의 조성분포 영향은 F2와 F3 (두께 0.2mm, NiCrAlY/YSZ 혼합분율 : 40 : 60, 30 : 70, 20 : 80, 10 : 90)로 YSZ 세라믹재가 많이 제조하여 비교하였다.

2.2 미세조직관찰

플라즈마 용사법으로 제조한 피복층의 경사기능층 조성분포와 금속, 세라믹 혼합분말의 용착상태 등이 미세조직 관찰을 통하여 조사되었다. 한편 피복층의 접착강도시험을 행한 후 시편을 절단하여 파단면 하부조직에서의 파단양상을 조사하였다. 또한 열충격 시험후 피복층에서의 균열생성 및 전파 등에 대하여서도 관찰하였다.

2.3 열변형, 기계적특성 및 열충격특성 평가

FGC 시편의 열변형특성의 평가는 75L X 25W X (0.5, 1.0)T의 판상 Co기 초합금 금속모재에 피복층을 용사한 후 Almen Strip Test Gage(그림 1)에 steel ball 자석을 밀착시켜 다이얼 게이지로서 곡률반경을 측정하였다.

피복층의 접착강도는 ASTM C 633-99에 의거

평가하였으며<sup>12)</sup>, FGC 시편의 절단면에서 두께방향으로 각 부위의 경도값을 마이크로 누우프 경도기로 측정하였다.

FGC 시편의 열충격특성 평가는 경사기능화에 따른 피복층의 내열충격성만을 짧은 시간에 평가하기 위해 P.I.D 조절기가 부착된 전기로를 이용하여 평가하였다. 실험은 직경 25.4mm, 두께 6mm 시편으로 그림 2의 열싸이클 조건 (1000°C에서 4분간 유지한 후 3분간 수냉시키는 과정)을 반복하면서 육안으로 표면균열이 확인되는 열싸이클수와 시편에서 피복층 전체 표면적의 약 20%가 벗겨질 때까지의 열싸이클 수로서 평가하였다.

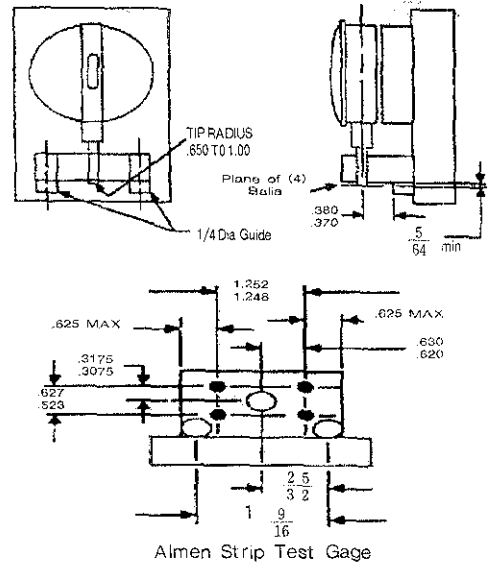


Fig. 1 Schematic of Almen Strip Test Gage for the measurement of curvature.

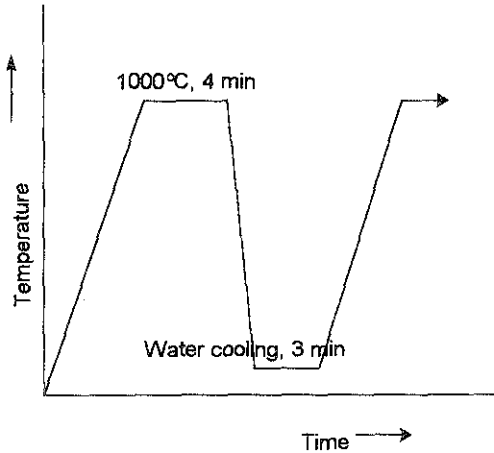


Fig. 2 Schematic representation of thermal shock test.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 미세조직

그림 3은 플라즈마 용사법으로 제조된 피복층들의 절단면 광학현미경 사진으로 그림 3(a)는 경사기능층이 없는 NiCrAlY(금속본드층)-YSZ(단열층)의 2층 구조 TBC(T 시편) 이고, 그림 3(b)와 그림 3(c)는 경사기능층의 NiCrAlY/YSZ 혼합분율이 대칭적 조성분포를 갖도록 한 FGC 구조(F1, F2)이며, 그림 3(d)는 경사기능층의 NiCrAlY/YSZ 혼합분율이 YSZ가 많도록 비대칭적 조성을 분포시킨 FGC 구조(F3 시편) 이다. 피복층의

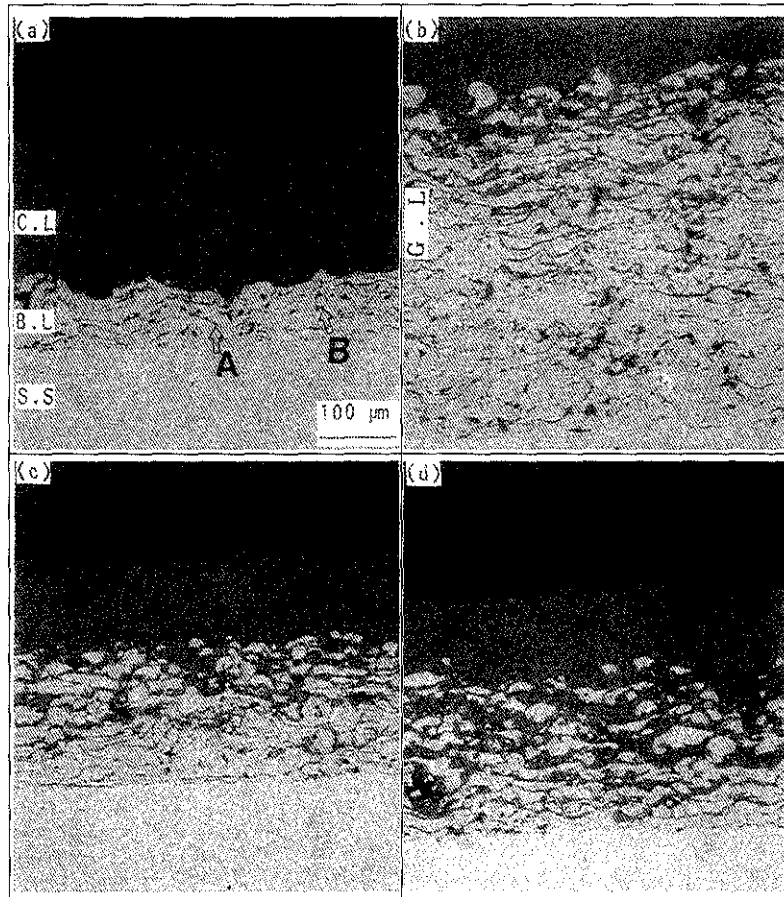


Fig. 3 Optical micrographs of sprayed layers. (a) TBC(T) (b) symmetry four-graded layer (F1) (c) symmetry four-graded layer(F2) (d) ceramic rich four-graded layer (F3)

전체 두께는 F1이 0.8mm이고 T, F2, F3는 0.4mm이다. 4종류의 용사 피복층은 모두 금속모재와의 접합상태는 비교적 양호하였다. FGC 층의 조성경사 정도는 그림 4의 EDS 분석결과로 확인하였다. 피복층의 NiCrAlY 금속본드층에는 알루미늄이나 산화물(A, 검은부위)과 일부 미용융입자(B) 등이 관찰된 바가 있었다<sup>12)</sup>.

3. 2 열변형특성

그림 3(a)의 경사기능층이 없는 TBC는 NiCrAlY 층과 YSZ층의 계면에서 이들의 열팽창계수 차이로 인하여 급격한 내부응력 변화가 존재하는 반면 그림3(b)-(d)의 FGC 층은 NiCrAlY/YSZ의 조성이 점진적으로 변하는 경사화를 형성시켰기 때문에 내부응력이 상당히 완화될 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 피복층의 내부 열응력은 플라즈마 용사과정에서 열변형 결과로 나타나는 곡률반경을 측정하여 간접적으로 유추할 수가 있다<sup>13)</sup>. 그림 5는 Co기 초합금 금속모재에 NiCrAlY/ YSZ의 FGC 층을 플라즈마 용사피복한 시편의 열변형 형상을 보여주고 있으며, 오목한 측이 피복층에 해당한다. 층상구조를 갖는 용사피복체를 비롯한 이중재료

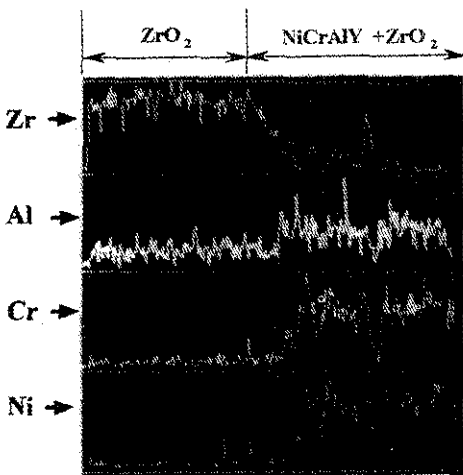


Fig. 4 EDS analysis of symmetry four-graded layer (F2).

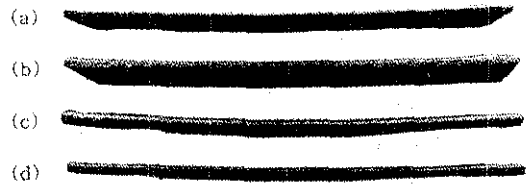


Fig. 5 The shape of specimens after spraying. (a) TBC(T) (b) symmetry four-graded layer (F1) (c) symmetry four-graded layer (F2) (d) ceramic rich four-graded layer (F3)

접합체의 열변형특성을 측정하는 방법으로는 X선-회절법, strain gage 부착법 그리고 다양한 접촉 및 비접촉법을 이용한 곡률측정법이 사용되고 있다<sup>13)</sup>. 이중에서 다이얼게이지를 이용한 접촉식 곡률측정법(Almen Strip Test Gage)은 정확도가 다소 떨어지지만 가장 간편하게 곡률반경을 측정할 수 있어 플라즈마 용사법으로 제조된 FGC의 곡률반경을 측정하기 위해 사용되었다. 표 4에는 그림 5의 각 시편의 곡률반경을 측정된 결과이다. 일반적으로 곡률반경이 커지면 열이력시 열변형과 동반하여 발생하는 내부응력의 완화가 많아서 시편 내부에 전반적으로 잔류응력이 낮아지게 된다<sup>13,14)</sup>.

플라즈마 용사체내의 잔류응력 발생원인은 2가지로 구분할 수 있는데<sup>13,15)</sup>, 첫째는 차가운 금속모재에 용착물이 응고되는 과정에서 발생하는 응고 수축력(quenching stress)이고, 두번째는 NiCrAlY와 YSZ의 열팽창계수 차이에 의한 열응력(thermal stress)이다. 피복체의 곡률반경은 이들 응력에 상응하여 나타나게 된다. 곡률반경 측정결과에

Table 4. Variations of curvature(x/m) with composition of graded layer(vol. %) and substrate thickness(mm).

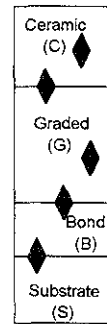
Specimens	T	F1	F2	F3	Remark
Curvature (x/m)	1.7261	1.7757	1.9541	1.8452	Substrate thick. (1.0mm)
	7.4249	10.8021	-	-	Substrate thick. (0.5mm)

의하면 금속모재 두께가 1.0mm보다 0.5mm일 경우 곡률반경이 크게 나타났다. 또한 금속모재의 두께가 1.0mm에서는 경사기능층이 없는 T시편에서와 경사기능층이 삽입된 F1시편의 곡률반경 차이가 거의 없으나, 금속모재 두께가 얇은 0.5mm의 경우 T시편 보다 F1시편의 곡률반경이 크게 나타났다. 피복체의 열변형에 의한 곡률반경은 시편 전체 두께에 반비례하여 금속모재의 두께가 얇은 경우 곡률반경이 커지게 된다.<sup>13)</sup> 경사기능층 삽입에 따른 내부 잔류응력 완화는 금속모재 두께가 얇을수록 크게 나타날 것으로 판단되고 곡률반경도 크게 나타난다. 따라서 금속모재 두께가 얇은 경우 응고수축력이 피복층내의 열팽창차이에 의한 열응력보다 훨씬 지배적임을 알 수 있다.

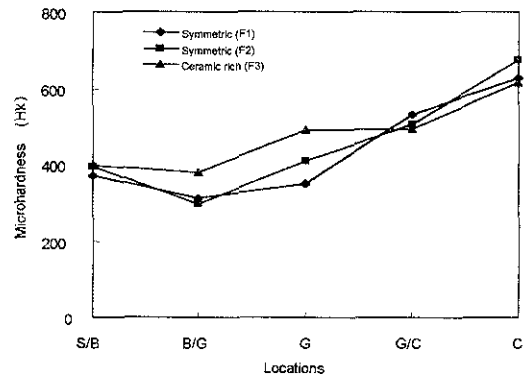
경사기능층 두께에 따른 곡률반경은 경사기능층이 두꺼울 경우(F1 시편)에는 용착물의 냉각으로 응고수축력이 상대적으로 커서 내부 잔류응력이 높게 나타나고, 응력완화 정도가 적어서 곡률반경도 작게 나타난 것으로 판단된다. 또한 경사기능층에서의 NiCrAlY/YSZ 혼합분율이 대청구조일 경우(F2 시편)가 YSZ 세라믹 혼합분율이 많은 경우(F3 시편)보다 곡률반경이 크게 나타나 잔류응력이 낮을 것으로 보인다. 세라믹분말은 금속분말에 비해 용점이 높고, 다각형이며, 밀도가 작기 때문에 용착효율이 금속분말의 1/3정도이다.<sup>15)</sup> 따라서 F3시편의 경우 동일한 피복층 두께를 만들기 위해서는 더욱 많은 세라믹 용사횟수가 필요하고, 열응력 또한 많이 받게 되어 곡률반경이 작게 나타난 것으로 사료된다.

### 3.3 기계적특성

그림 6은 피복층의 두께방향으로 미세경도를 측정된 결과이다. 그림 6(a)는 경도측정 위치로서 금속모재/금속본드층(S/B), 금속본드층/경사기능층(B/G), 경사기능층(G), 경사기능층/세라믹층(G/C), 세라믹층(C)을 나타내고 있다. S/B경도에



(a)



(b)

Fig. 6 The location(a) and microhardness variation(b) with graded layer thickness and composition.

비하여 B/G경도가 낮은 원인은 G층에서 금속과 세라믹이 복합화 되면서 생성된 기공 등의 결합에 의한 영향으로 판단된다. 그러나 B/G-G-G/C-C 간격에서는 대체로 세라믹 조성분율이 증가하는 방향으로 직선적인 경도 증가를 보이고 있다. 경도는 그림 6(b)에서와 같이 최외층인 YSZ 세라믹층으로 갈수록 증가하는 경향을 나타내었고, 전반적으로 경사기능층의 YSZ 세라믹 조성분율이 많은 경우(F3 시편)가 상대적으로 가장 높았다.

그림 7은 인장시험으로 피복층의 접착강도를 측정된 결과이다. 계면의 접착강도는 경사기능층이 0.2mm인 경우(F2 시편)가 경사기능층이 없는 경우(T 시편) 보다 다소 높아지고, 경사기능층 두께

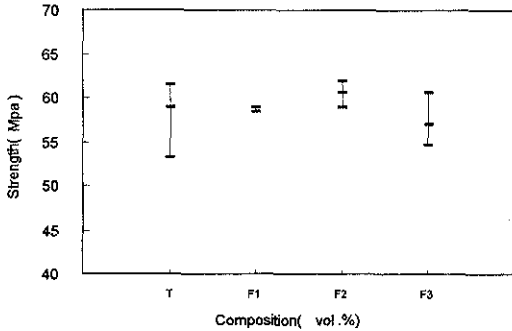


Fig. 7 Variation of bond strength of sprayed layers.

가 0.4mm로 증가하면 (F1 시편) 접착강도의 증가에는 효과가 크게 나타나지 않고 있으나 측정의 신뢰도는 높아지고 있다. 경사기능층의 삽입과 함께 내부응력의 완화가 접착강도를 증가 시키나<sup>16)</sup>, 경사기능층의 두께가 너무 커지면 제조과정에서 수축응력이 과도하게 발생되어 접착강도가 떨어지게 된다. 또한 YSZ 세라믹의 조성분율이 높은 경우 (F3 시편)에도 경사기능층이 없는 경우 (T 시편)에 비하여 접착강도의 개선효과는 크게 나타나지 않고 있다. 따라서 접착강도의 향상을 위한 적절한 두께의 경사기능층이 존재하는 것으로 판단된다. 이는 접착강도가 열변형에 의한 내부 잔류응력 상태와 연관이 있기 때문으로 알려져 있다<sup>13)</sup>.

그림 8은 접착강도 시험편의 수직 절단면이다. 그림 8(a)의 NiCrAlY-YSZ 2층구조 (T 시편)는 NiCrAlY 금속본드층과 YSZ 세라믹층 계면에서 파단이 일어났고, 그림 8(b), (c)의 경사기능층 삽입 구조 (F1, F2 시편)는 경사기능층의 중간지점에서, 그림 8(d)와 같이 경사기능층의 YSZ 세라믹 조성분율이 큰 경우 (F3 시편)는 금속본드층에 근접한 위치에서 파단이 일어났다. Liao등에 의하면 경사기능층이 없는 피복체의 파단은 NiCrAlY/YSZ 계면 취약부와 용사과정에서 계면 근처에 생성된 산화물(그림 3 참조)을 따라 파괴가 진행된다고 알려져 있다<sup>15)</sup>. 즉 제조과정에서 생성된 층상

의 알루미늄 산화물의 열팽창계수 값은  $7.0 \times 10^{-6} / ^\circ\text{K}$ 로 열팽창계수 값이  $1.0 \times 10^{-5} / ^\circ\text{K}$ 인 지르코니아 산화물 보다 더 작기 때문에 알루미늄 그리고 금속-세라믹 계면에서 전단응력이 발생하게 되고, 이로 인해 NiCrAlY 금속본드층과 YSZ 세라믹층 계면이 약화되어 층상형태의 파괴가 일어나는 것으로 보고되고 있다. 또한 일반적으로 세라믹층과 금속본드층의 직접 접합계면의 경우 열이력 동안에 열팽창계수 차이에 의한 계면에서의 급격한 응력변화가 계면전단응력을 발생시켜 계면에서 쉽게 파단이 일어난다. 그러나 NiCrAlY 금속본드층과 YSZ 세라믹층 사이에 NiCrAlY/YSZ 혼합분율의 경사기능층을 삽입시키면 세라믹과 금속본드층의 직접 접합계면이 제거되어 급격한 응력변화를 완화시키고 NiCrAlY 금속본드층과 YSZ 세라믹층 간에 기계적 상호 맞물림 (mechanical locking) 효과도 생겨 접착강도가 증가하게 된다. (그림 3, 7 참조). 한편 파단은 경사기능층내의 기공 등의 결합과 내부 잔류응력분포에 깊은 연관이 있게 된다.

### 3.4 내열충격성

그림 9는 용사피복체의 열충격 시험결과이며, 그림 10은 75 사이클 후 열충격 시험편의 피복면 형상이고, 그림 11은 60 사이클 후의 절단면 미세조직이다. 단일피복층의 내열충격성은 피복층의 수명과 직결되며, 금속모재와 피복층간의 열팽창계수 차이와 피복층의 두께 등에 의해 크게 영향을 받는다<sup>2,3)</sup>. 그림 9에서의 같이 경사기능층이 없는 경우 (T 시편) 보다 경사기능층을 0.2mm 대칭구조로 삽입 (F2 시편) 시키면 내열충격성이 향상됨을 알 수 있다. 그러나 경사기능층이 0.4mm의 대칭구조 (F1 시편)와 YSZ 세라믹 조성분율이 클 경우 (F3 시편)는 오히려 경사기능층이 없는 (T 시편)보다 내열충격성이 다소 떨어짐을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 그림 10의 열충격시험편 피복면 형상에서도 나타나고 있다.

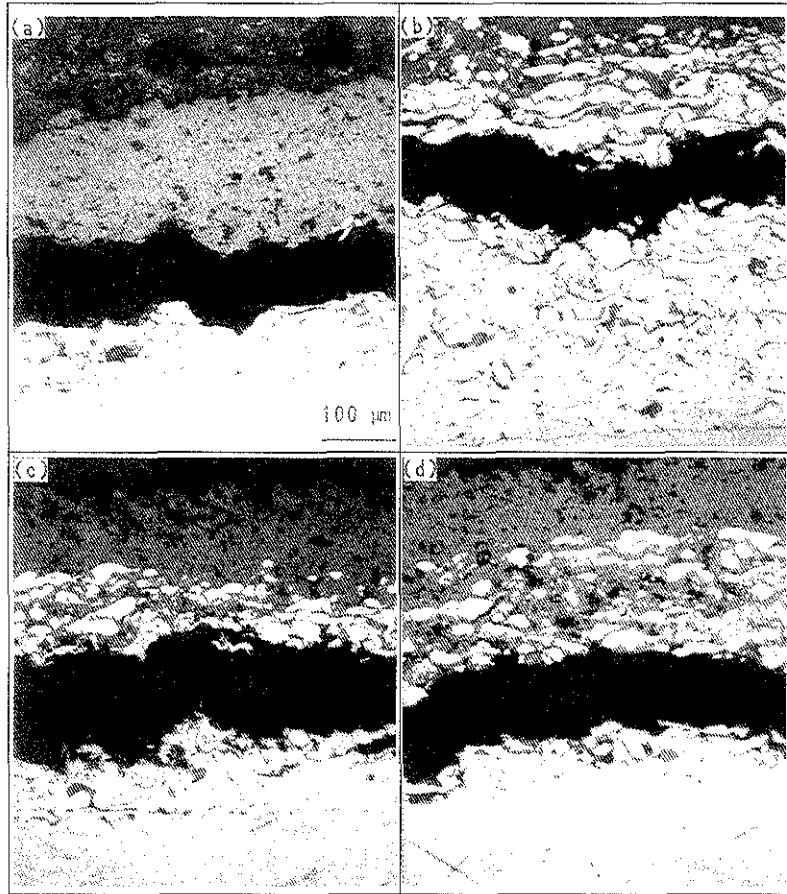


Fig. 8 Cross-section optical micrographs after tensile test. (a) TBC(T) (b) symmetry four-graded layer (F1) (c) symmetry four-graded layer (F2) (d) ceramic rich four-graded layer (F3).

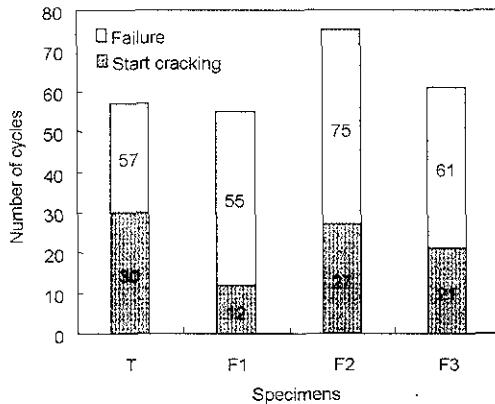


Fig. 9 The results of thermal shock tests.

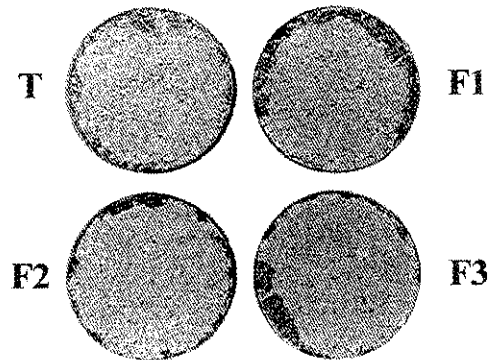


Fig. 10 Photographs of coatings after 75 cycles thermal shock test.



그림 11의 단면조직에서 T시편은 (그림 11(a)) 금속/세라믹의 열팽창차이와 세라믹층의 기공을 통하여 공급된 산소에 의해 계면산화가 발생하여 YSZ 세라믹층의 균열은 물론, NiCrAlY 금속본드층과 YSZ 세라믹층의 계면에서도 균열이 발생되었음을 관찰할 수 있다. 경사기능층 두께가 0.4 mm 인 F1 시편(그림 11(b))의 경우는 용사시 유발된 높은 응고수축력의 영향에 의해 발생된 것으로 판단되는 세라믹층에서의 수평 및 수직방향 균열이 나타나고 있다. 또한 경사기능층에서 YSZ 세라믹 조성분율이 높은 F3 시편(그림 11(d))의 경우는 경사기능화에 따른 열팽창차이 완화보다는 YSZ

세라믹층내에 상대적으로 많은 량의 열린기공을 통하여 공급된 산소에 의해 산화작용이 활발하게 일어난 결과 세라믹층, 경사기능층, 금속본드층까지 심한 균열전파가 일어나게 된다. 한편 경사기능층 두께가 0.2mm인 F2 시편(그림 11(c))의 경우에는 세라믹층의 박리를 일으키는 균열이 나타나지 않고 있다.

이상의 관찰 결과로부터 경사기능층의 삽입은 접착강도에서와 유사하게 적절한 두께로서 열변형에 의한 내부 잔류응력 상태를 조정함으로써 내열충격성을 향상시킬 수 있는 것으로 판단된다.

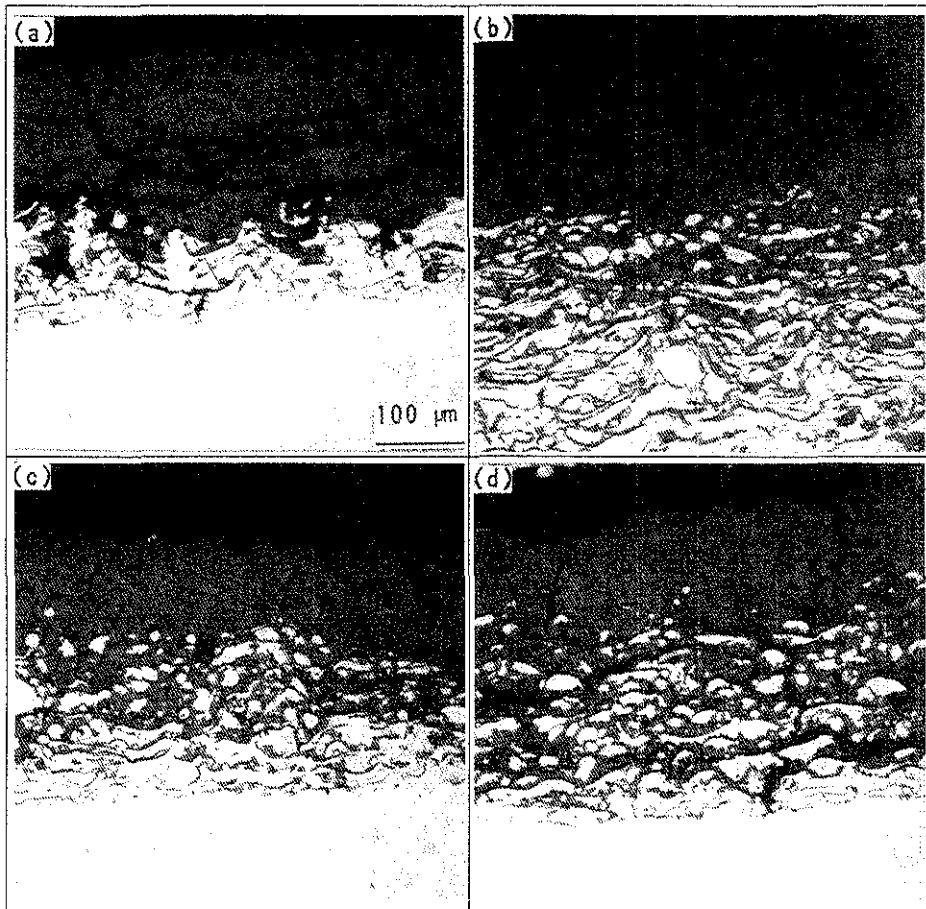


Fig. 11 The cross sectional microstructures of coating after 60 cycles. (a) TBC(T) (b)symmetry four-graded layer (F1) (c) symmetry four-graded layer (F2) (d) ceramic rich four-graded layer (F3).

#### 4. 결 론

플라즈마 용사법으로 Co기 초합금인 HAYNESS 188 금속모재에 NiCrAlY/YSZ 경사기능 피복층을 제조하여 미세조직을 관찰하고 피복체의 기계적특성, 열변형특성 및 열충격특성을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 금속모재와 용사피복층의 접합상태가 양호한 경사기능성 플라즈마 용사피복체를 제조할 수 있었다. 용사피복체의 열변형특성을 곡률반경 측정법으로 측정한 결과 간접적으로 경사기능층이 삽입된 피복체에서 잔류응력을 완화시킬 수 있는 것으로 판단되었다.

2) 용사피복체는 경사기능층의 삽입으로 내부응력이 완화되고 계면 접착강도가 높아지며 측정의 신뢰도도 높아지는 것으로 나타났으나, 접착강도의 향상을 위한 적절한 두께의 경사기능층이 존재하는 것으로 나타났다.

3) 용사피복체는 경사기능층의 삽입으로 접착강도에서와 유사하게 적절한 두께로서 열변형에 의한 내부 잔류응력 상태를 조정함으로써 내열충격성을 향상시킬 수 있는 것으로 판단되었다.

#### 참 고 문 헌

1. I.Kvernes and S.Forseth : Mater. Scie. and Eng., 88 (1987) 61
2. H.Herman : Mater. Scie. and Eng., 88 (1987) 69
3. H.W.Grunling, K.Schreider and L.Singaheiser : Mater. Scie. and Eng., 88(1987) 177
4. J.W.Fairbanks and R.J.Hecht : Mater. Soci. and Eng., 88 (1987) 321
5. B.H.Rabin and I.Shiota : Material Research Society, Bulletin (1995) 14
6. M.Koizumi and M.Niino : Material Research Society, Bulletin (1995) 19
7. 原嘉一, 田一路, 渡 龍三 : 日本複合材料學會誌, 5 (1991) 179
8. C.R.C. Lima and R.E.Trevisan : J. Thermal Spray Technology, 6 (1997) 199
9. T.W.Clyne and Y.C.Tsui : The 3rd International Symposium on Structural and Functional Gradient Materials, B.Ilschner and N. Cherra (Ed.) Lausanne (1994) 129
10. S.Sampath, H.Herman, N.Shimoda and T. Salito : Material Research Society, Bulletin (1995) 27
11. A.Salito and G.Barbezat : The 3rd International Symposium on Structural and Functional Gradient Materials, B.Ilschner and N. Cherra (Ed.) Lausanne (1994) 123
12. 박차환, 박익민, 조경목, 정명규 : 대한금속학회지, 35 (1997) 1540
13. T.W.Clyne and S.C.Gill : J. Thermal Spray Technology, 5 (1996) 401
14. S.J.Howard, Y.C.Tsui and T.V.Clyne : Acta. Metall. Mater., 42 (1994) 2823
15. H.Liao, P.Vaslin, Y.Yang and C.Coddet : J. Thermal Spray Technology, 6 (1997) 235
16. K. Cho and S. Suresh : "Transformation Toughened Ceramic Multilayers with Compositional Gradients : Part I. Theory", (1996), submitted to Journal of American Ceramic society.