

## 플라즈마 용사층의 피로거동 및 강의 피로수명 변화에 관한 연구

박만호, 한주철, 정 철, 송요승\*, 노병호, 이구현\*\*

\*한국항공대학교 항공재료공학과

\*\*한국기계연구원

## A Study on the Fatigue behavior of Plasma Sprayed Coating Layer and Fatigue Life Variation of Steel

M. H. Park, J. C. Han, C. Jung, Y. S. Song\*,  
B. H. Ro, G. H. Lee\*\*

\*Hankuk Aviation University Dept. Materials Engineering, Koyang, Kyunggi, Korea

\*\*Korea Institute of Machinery & Materials, Chang-won, Kyungnam, Korea

### Abstract

We studied on the fatigue property improvement of steel with parameters of spray distance and substrate rotating speed. In this study, all specimens are fatigue fractured before delamination of coating layer by Young's modulus difference between coating layer and substrate. Fatigue life of plasma sprayed steel increased with increasing of hardness of interface between substrate and coating layer and fatigue life varied with kinds of sprayed powder. We observed the texture of specimens with XRD for the analysis of fatigue life variety by spraying, and observed the fatigue fractured cross section with SEM. Also, we tested bonding strength of specimens having the longest and the shortest fatigue life, and we conclude the characteristics of sprayed coating layer with spraying parameters.

### 1. 서 론

플라즈마 용사는 분말상의 재료를 플라즈마를 이용하여 용융 및 반응용 상태로 만들고, 플라즈마의 높은 운동에너지를 이용하여 모재에 충돌시킴으로써 코팅이 이뤄지게 하는 코팅법이다. 플라즈마 용사는 고온의 플라즈마를 사용함으로써 고융점의 우수한 내식, 내마모특성을 가진 세라믹이

나 cermet등을 금속위에 보호코팅하는데 널리 사용되고 있다. 특히 디젤엔진 및 항공기 엔진에 플라즈마 용사로 세라믹을 코팅하여 연소실 내부의 단열효과를 높이고, 이로써 연료의 효율성을 높이는 연구를 선진국에서는 활발히 진행하고 있으며, 실제로 단열엔진을 장착한 디젤 차량을 시험운행 중에 있는 실정이다<sup>1-4)</sup>.

플라즈마 용사과정에서 고온의 플라즈마로부터

의 열전달과 고온의 용융 입자가 저온의 모재에 충돌하여 급냉되면서<sup>5-8)</sup> 모재표면은 열처리 효과를 얻을 수 있을 것이다. 이러한 표면조건의 변화는 피로크랙이 표면에서 발달한다는 것을 염두에 둘 때 모재의 피로수명에 영향을 미치게 될 것이라고 예상할 수 있다.

용사층을 항공기 엔진과 발전소의 터빈 블레이드 등의 고열부에 사용하게 되면 고열부의 가열, 냉각의 순환과정에 의해 반복적인 응력상태에 놓이게 된다.<sup>9)</sup> 특히 항공기 엔진 및 발전소의 터빈 블레이드에 적용되는 플라즈마 용사층은 일반재료와 마찬가지로 마모, 부식, 피로등의 복합적인 환경에서 사용되게 된다. 이중 용사층의 마모에 관한 연구는 상당히 많은 연구가 진행중에 있지만 용사에 의한 피로특성 및 용사층의 피로거동에 관한 연구는 미미한 실정이다.<sup>10-13)</sup>

본 연구에서는 플라즈마로 용사한 용사층 및 모재의 피로특성에 대한 이해를 명확히 하고자 하였다. 여러 용사조건에 따라 형성한 용사층이 코팅된 강도의 피로실험을 실시하여 피로파괴 거동을 관찰, 비교하였으며, 파단면의 미세조직 관찰을 통하여 피로크랙의 발달 및 전파, 피로파괴에 이르는 과정을 연구하였다. 또한 각 용사변수에 따른 용사층의 특성을 연구하였으며, 피로의 누적에 따른 용사층 내부의 변화형태 및 피로수명에 미치는 영향을 연구하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 용사 및 시편준비

용사용 모재는 지름 15mm, 길이 210mm의 실린더형 강재를 사용하였으며, 용사용 분말로는 YSZ (204NS)와 Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub>/NiCr (81VF), WC/Co (71VF)를 사용하였다. 분말의 성분과 형상을 XRD (Seifert, XRD 300PTS)와 SEM (Hitachi, S2400)으로 관찰하였다. 용사용 분말은 수분을 제거하기 위하

여 140℃의 오븐에서 건조시키고 믹싱하여 사용하였다. 용사에 앞서 모재 표면을 크리닝하고, 미세그릿 (fine grit)으로 그릿 블라스팅 한 후 160℃로 예열시켜 용사 하였다. Table 2.1에 용사조건을 나타내었으며, Table 2.2에 각 변수에 따른 용사시편의 분류를 나타내었다. Table 2.2에서 옆에 붙어 있는 숫자는 시편번호를 뜻한다.

본 연구에서는 용사거리의 변화에 따른 피로특성을 알아보기로 204NS의 경우 모재 회전속도를 700 (RPM)으로 고정시키고, 용사거리를 50, 65, 80 (mm)로 변화시키며 용사하였고, 81VF, 71VF의 경우 모재 회전속도를 500 (RPM)으로 고정시키고, 용사거리를 45, 60, 75 (mm) 및 60, 75, 90 (mm)로 변화시키며 용사하였다. 또한 모재 회전속도의 변화에 따른 피로특성을 알아보기 위하여 204NS의 경우 용사거리 65 (mm)에서 RPM을 300, 500, 700, 900으로 변화시키며 제작하였고, 81VF의 경우 용

Table 2.1 Conditions of plasma spraying process.

분단 조건	YSZ (204NS)	Cr <sub>2</sub> C <sub>3</sub> /NiCr (81VF)	WC/Co (71VF)
1차가스	100 psi 80 flow	100 psi 100 flow	100 psi 160 flow
2차가스	50 psi 15 flow	50 psi 10 flow	50 psi 80% flow
분말이송속도	5lbs/hr	5.5lbs/hr	8lbs/hr
Ampere	500	500	400
Voltage	65	70	50
용사거리 (mm)	50, 65, 80	45, 60, 75	60, 75, 90
Roating speed (rpm)	500, 700, 900	300, 500, 700	300, 500, 700

Table 2.2 Conditions of specimen preparation for this study.

YSZ (204NS)		CrC/NiCr (81VF)		WC/Co (71VF)	
700 RPM	50mm 1	500 RPM	45mm 7	500 RPM	60mm 13
	65mm 2		60mm 8		75mm 14
	80mm 3		75mm 9		90mm 15
65mm	500RPM 4	60mm	300RPM 10	60mm	300RPM 16
	700RPM 5		500RPM 11		500RPM 17
	900RPM 6		700RPM 12		700RPM 18
	300RPM 6-1				

사거리를 60(mm)로 고정시키고, RPM을 300, 500, 700으로 변화시키며 제작하였으며, 71VF의 경우 역시 용사거리를 75(mm)로 고정시키고, RPM을 300, 500, 700으로 변화시키며 제작하였다.

용사후 용사 변수에 따른 용사층의 특성을 관찰하고자 XRD로 용사층의 상변화를 관찰하였으며, 광학현미경으로 미세구조를 관찰하였다. 미세구조 관찰후 각 시편의 단면 미세경도(Matsuzawa, MXT- $\alpha$ )를 측정하였다. 단면 미세경도는 용사층과 용사층 바로 아래 모재와의 계면부근과 모재의 경도를 측정하였으며, 총 10회 측정후 가장 높은 값과 가장 낮은 값을 제외한 나머지 값의 평균으로 나타내었다.

2.2 피로실험

JT Toshi (Japan)사의 10Kgf-m 회전굽힘 피로 실험기 (FTO-10 모델)를 사용하여 피로실험을 실시하였다. Fig 2.1은 본 연구에서 사용된 피로실험기의 피로하중이 걸리는 부분의 대략적인 형상을 나타내고 있다. Fig 2.1에서 S1-S2 (20cm) = S3-S4=L(cm)라 하고, S5에서 걸리는 하중이 W(kg)이라면 S2와 S3사이의 굽힘 모멘트는  $\frac{WL}{2}$ 로 된다. 실험 하려는 시편의 지름을 d(cm)라하고 시편에 걸리는 응력을  $\sigma$ kg/cm<sup>2</sup>이라면

$$\sigma = \frac{16WL}{\pi d^3} \text{ (kg/cm}^2\text{)} \quad (1)$$

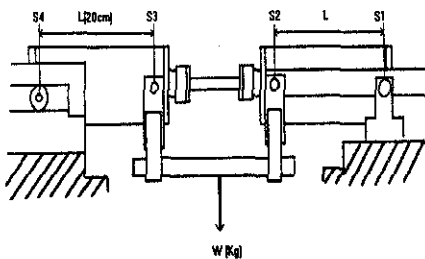


Fig. 2.1 Schematic diagram of rotary bending fatigue test machine.

이 된다.

L=20cm이며, 이것을 (1)에 대입하면

$$\sigma = \frac{16 \times W \times 20}{\pi d^3} = \frac{320W}{\pi d^3} \text{ (kg/cm}^2\text{)} \text{ 이 된다.}$$

피로실험은 R=-1인 조건으로 실시하였으며 피로하중의 적용은 500MPa과 400MPa로 실험 한 후 각 시편의 피로수명에 따라 하중을 점차적으로 줄이거나 높이는 Staircase method로 수행하였다. 피로실험은 완전 파괴가 발생할때까지 실시하였으며, 파괴가 발생하지 않을 경우 10<sup>7</sup>주기에서 실험을 정지하였다. 500MPa, 400MPa의 피로하중으로 피로실험한 시편의 경우 용사층과 모재의 피로 파 단면을 SEM으로 관찰하였다.

2.3 용사층의 접합력 실험

피로실험을 마친후 피로수명이 가장 좋은 시편과 가장 나쁜 시편의 접합력을 평가하였다. 접합력 평가 시험편은 직경 1인치, 길이 1인치의 원형 봉 윗면에 #3, #4, #7, #9, #13, #18의 조건으로 용사하여 제작하였다. 시편은 각 조건당 2개씩 준비하였다.

제작된 시편을 코팅되지 않은 동일한 크기의 원형봉에 에폭시로 접착하고 양끝단에 볼트를 연결하여 만능시험기 (Japan, Shimatz社)로 용사층이 분리 될 때까지 인장력을 가해 용사층의 접착강도를 측정하였다. 접착제는 Devcon 10240을 사용하였다. 시험 후 용사층이 분리된 시편의 단면을 광

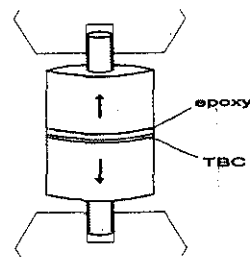


Fig. 2.2 Schematic diagram of bonding strength test

학현미경으로 관찰하여 피막의 파괴부위를 조사하였다. Fig. 2.2에 접합력 실험의 개략도를 나타내었다. 시험편의 제작과 시험방법은 ASTM C633-79에 의거하였고 접착강도의 계산은 다음에 따랐다.

$$\text{접착강도} = \frac{\text{인장과단하중} * 9.8}{\text{시험편의 부착면적}} \quad (MPa)$$

## 2.4 금속조직학적 차이 분석

피로실험을 실시한 후 피로수명에서 가장 큰 차이를 나타내었던 #7번, #13번 모재 내부의 금속조직학적 차이를 XRD를 이용하여 집합조직(texture)을 측정하여 분석하였다. 집합조직은 크롬타겟의  $K\alpha$ 선을 이용하여 40KV, 30mA의 조건에서 (110), (200), (211)의 세면을 2mm collimator를 이용하여 Pole figure를 측정하였으며, 각각의 면에서 측정된 Pole figure를 이용하여 ODF를 계산하였다.

먼저 철 분말을 이용하여 (110), (200), (211)의 세면의 Pole Figure를 측정하였으며, 기준 Correction Factor를 잡았다. 이후 피로가 가해지지 않은 #7, #13 시험편을 약 6-7mm 두께의 디스크 형태로 마련하여 시험편 표면으로부터 약 5mm 위치의 단면에서 Pole figure를 측정하여 ODF를 계산하였다. 계산된 ODF는 Euler 각도로 나타내었다.

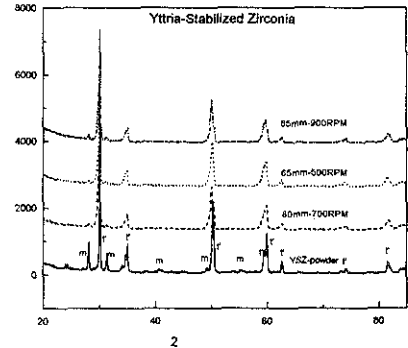
## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 용사 변수에 따른 용사층 특성

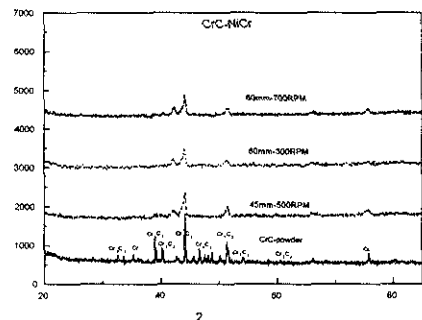
Fig. 3.1에 본 연구에서 사용된 분말과 용사후 용사층의 XRD회절 결과를 나타내었다.

Fig. 3.1 a)에서 볼 수 있듯이 YSZ 분말의 경우 용사전에는 비변태 정방정상( $t'$ )이 우세한 것으로 나타나고 있었으며 약간의 단사정도 포함 되어 있었지만, 용사후 단사정은 거의 사라진 것으로 나

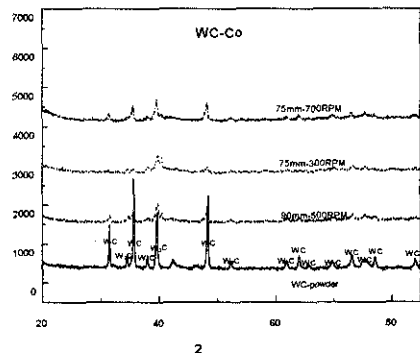
타나고 있다.  $Cr_2C_3/NiCr$  분말의 경우 Fig. 3.1 b)에서 볼 수 있듯이 용사전 분말에는  $Cr_3C_2$ 상과  $Cr_7C_3$ 상이 함께 공존하는 형태를 보이고 있었지만 용



a) XRD Pattern of YSZ powder and as-sprayed specimens



b) XRD Pattern of CrC/NiCr powder and as-sprayed specimens



c) XRD Pattern of WC/Co powder and as-sprayed specimens.

Fig. 3.1 XRD patterns with spraying parameters

사후에는  $Cr_2C_3$ 상이 우세해지는 것을 알수있다. WC/Co 분말의 경우 Fig. 3.1 c)에서 볼 수 있듯이 용사전 분말은 WC와  $W_2C$ 상이 함께 공존하고 있었으며, 용사후에도 이러한 경향은 지속되고 있었다. 또한 용사층의 경우 모든 XRD피크의 broadening이 발생한 것을 관찰할 수 있었다. 용사층에서 나타나는 이러한 상변화 및 피크의 broadening은 용사과정에서 고온의 플라즈마를 벗어난 용융입자가 저온의 모재에 닿고 급속히 냉각되면서 발생하는 불균일한 열응력 때문으로 생각된다. 하지만 모재 이송속도 및 용사거리등의 용사공정의 차이에 의한 XRD 회절 피크의 차이는 거의 없었다.

용사층의 단면경도는 WC/Co 용사층이 가장 우수한 것으로 나타났으며 YSZ 용사층과  $Cr_2C_3/NiCr$  용사층의 경우 비슷한 경도값을 나타내었다.

Fig. 3.2에는 용사층을 파단시켜 SEM으로 관찰한 YSZ 용사층의 미세구조를 도시하였다.

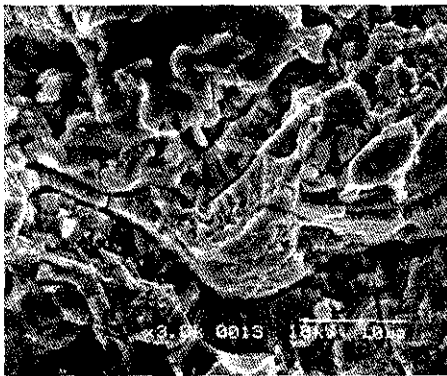


Fig. 3.2 Fractured cross sectional morphology of YSZ sprayed coating layer

Fig. 3.2에서 보는 바와 같이 YSZ 용사층의 경우 용사층 내부 스펙트마다 방향성 응고를 나타내는 컬럼너(columnar) 구조가 발달하여 있음을 알 수 있다. 이런 방향성 응고조직은  $Cr_2C_3/NiCr$  용사층에서도 관찰할 수 있었지만 WC 용사층에서는 방향성 응고조직은 관찰되지 않았다. 이런 방향성 응고 조직의 존재는 Hermasson<sup>1)</sup>등의 미세구조 관찰결과와 비슷한 결과라 할 수 있다.

Table 3.1에 용사층 및 용사층과 모재사이의 계면 부근의 경도와 모재의 경도를 나타내었다. 시편 모재 중앙부의 경도값은 거의 균일하게 270Hv에서 280Hv를 보이고 있었다. 하지만 YSZ, WC/Co 분말을 용사한 시편의 경우 용사층과 모재사이 계면 부근의 경도는 모재의 경도보다 높은 값을 나타내고 있었으나,  $Cr_2C_3/NiCr$  분말을 용사한 시편의 경우 계면 부근의 경도값이 다른 용사시편과 모재 중앙부위의 경도보다 떨어지는 현상을 나타내고 있었다.  $Cr_2C_3/NiCr$  용사시편의 용사층-모재간의 계면부근의 경도가 다른 용사분말을 용사한 시편보다 떨어지는 현상은 다른 시편들에 비해 용사거리가 가까워 플라즈마의 열에 영향을 받아 나타난 결과라 사료된다.

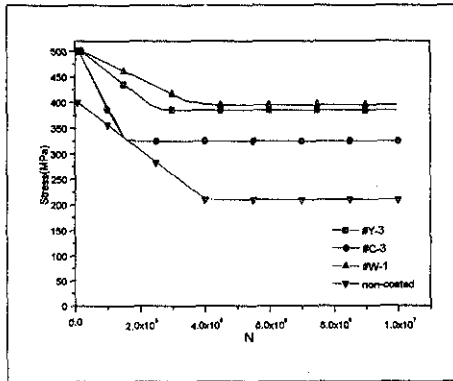
### 3.2 피로실험 결과

피로실험 결과 모든 시편이 용사층 박리없이 모재가 피로파괴 되었다.

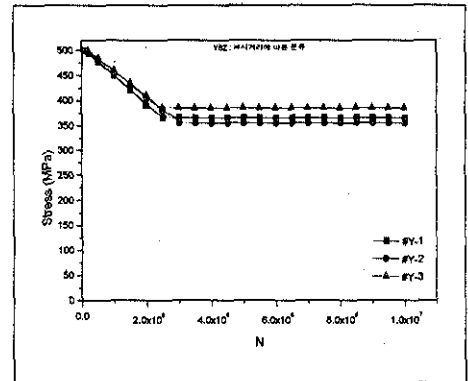
Fig. 3.3에 본 연구에서 사용된 모재의 피로실험 결과와 용사후 각 용사재별로 가장 높은 피로수명 및 가장 짧은 피로수명을 나타내었던 시편의 S-N

Table 3.1 Results of micro vickers hardness test. (dimension : Hv)

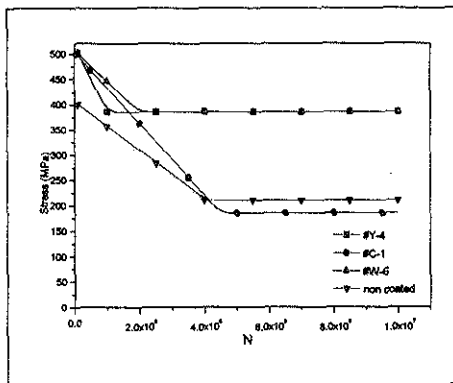
시편번호	YSZ						CrC/NiCr						WC/Co					
	1	2	3	4	6	6-1	7	8	9	10	12	13	14	15	16	18		
용사층경도	656	565	656	657	523	730	580	782	681	556	624	893	787	627	991	869		
계면경도	275	293	302	307	292	340	270	279	288	232	285	316	323	320	315	288		
모재경도	272	285	284	273	284	288	269	289	288	272	263	288	277	288	287	290		



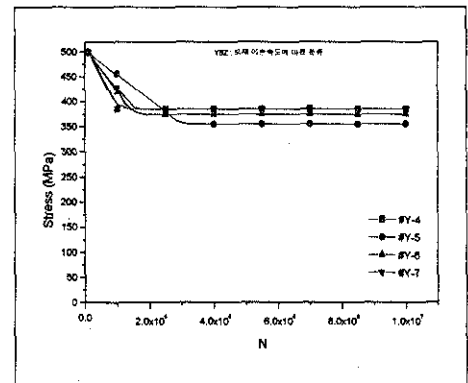
a) S-N curve of specimens of having maximum fatigue life



a) S-N curve of YSZ sprayed specimens with spraying distance



b) S-N curve of specimens of having minimum fatigue life



b) S-N curve of YSZ sprayed specimens with rotating speed

Fig. 3.3 S-N curve of specimens of having maximum and minimum fatigue life.

Fig. 3.4 S-N curve of specimens of sprayed YSZ powder

커브를 나타내었다. Fig. 3.3에서 볼 수 있는 바와 같이 표면층의 경도값이 낮았던  $\text{Cr}_2\text{C}_3/\text{NiCr}$ 이 용사된 시편의 피로수명은 모재의 피로수명 보다 저하된 것을 알 수 있다.

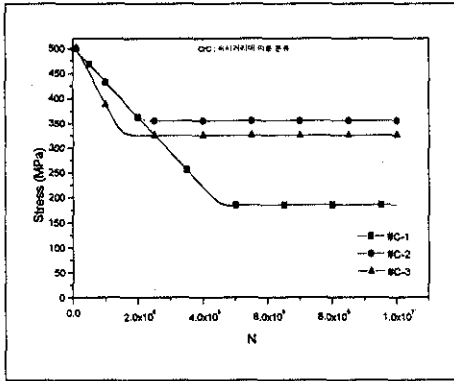
Fig. 3.4에 용사거리와, 모재 회전속도에 따른 YSZ를 용사한 시편의 S-N커브를 나타내었다. Fig. 3.4에서 볼 수 있는 바와 같이 YSZ를 용사한 시편의 경우 용사거리가 증가 할 수록 모재의 피로수명이 길어지는 것을 알 수 있으며 모재 회전속도가 작을수록 피로수명이 길어지는 것을 알 수

있다.

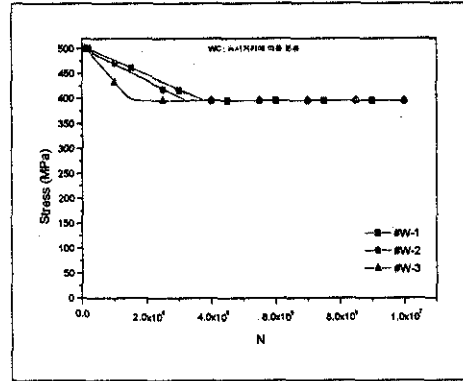
Fig. 3.5에  $\text{Cr}_2\text{C}_3/\text{NiCr}$ 을 용사한 시편의 S-N커브를 나타내었다. CrC를 용사한 시편의 경우 대부분 용사층의 피로수명이 다른 용사재를 용사한 시편의 경우보다 짧은 결과를 나타내고 있다.

Fig. 3.6에 WC/Co 용사층의 S-N 커브를 나타내었다. WC를 용사한 시편의 경우 가장 우수한 피로수명향상을 나타내고 있다.

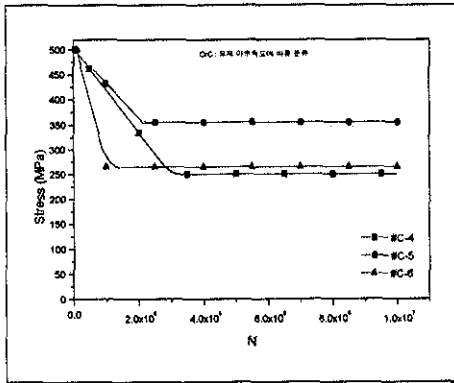
Fig. 3.4, Fig. 3.6에서 볼 수 있듯이 모재의 피로수명은 대부분 용사에 의해 향상되었으며, 특히



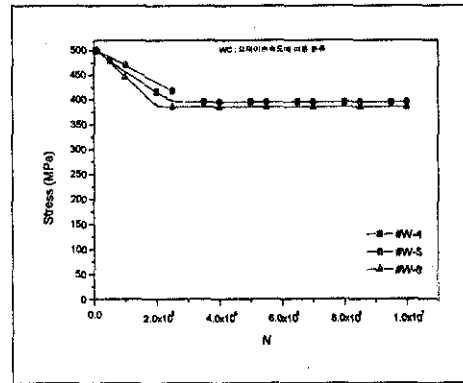
a) S-N curve of CrC sprayed specimens with spraying distance



a) S-N curve of WC sprayed specimens with spraying distance



b) S-N curve of CrC sprayed specimens with rotating speed



b) S-N curve of WC sprayed specimens with rotating speed

Fig. 3.5 S-N curve of specimens of sprayed CrC powder

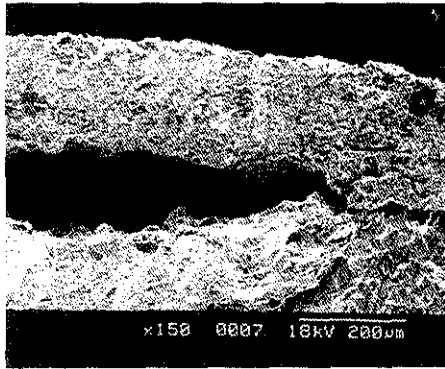
Fig. 3.6 S-N curve of specimens of sprayed WC powder

WC/Co를 용사한 시편의 경우 모재에 비해 월등한 피로수명 향상을 나타내고 있으며 Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub>/NiCr을 용사한 시편의 경우 용사하지 않은 시편의 피로수명과 비슷하게 나타나고 있다. 이런 결과는 H.D. Steffens<sup>16)</sup> 등이 발표한 내용과 비슷한 결과이며, 따라서 용사에 의해 강재의 피로수명은 변화한다고 할 수 있을 것이다.

Fig. 3.7에 400MPa의 하중으로 피로실험을 실시한 CrC를 용사한 시편의 피로 파단면을 SEM으로 관찰한 결과를 나타내었다. 500MPa에서 피로

실험을 한 시편의 경우 곳에 따라 용사층이 박리가 되기는 하였으나 여전히 모재에 부착되어 있는 부분이 넓게 존재했다. 이는 피로하중이 높아 용사층이 모재에서 박리가 발생할 만한 충분한 시간적, 에너지적인 여유를 가지지 못함으로써 나타나는 결과라 생각된다. 하지만 Fig. 3.7에서 볼 수 있는 바와 같이 저하중 고주기 피로의 경우 모재로부터 용사층이 상당히 분리된 것을 볼 수 있다.

SEM 관찰 과정에서 500MPa의 피로응력을 가한 저주기 피로실험을 거친 시편의 경우 거의 모



#8, 400MPa

Fig. 3.7 Fatigue fractured cross sectional morphology of CrC sprayed coating layer

든 용사층이 모재에 온전하게 붙어 있었으나, 피로하중이 400MPa 이하인 고주기 피로로 갈수록 피로파단면에서 박리된 부위가 넓게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 저주기 피로와 고주기 피로에서 용사층의 박리 양상이 차이는 저주기 피로의 경우 피로하중이 높아 용사층의 박리가 일어나기 전에 모재와 용사층이 모두 파괴되고, 고주기 피로의 경우 장기간 누적되는 피로로 인해 탄성계수의 차이가 나는 모재와 용사층 사이에서 박리가 발생하기는 하지만 용사 스프래트의 결합력이 피로로 인해 저하되지 않아 완전히 박리되지 않는 때문이라고 생각된다.

모재와 용사층이 함께 피로파단된 현상과 피로파단면 관찰결과를 토대로 판단해 볼 때, M. Hadfield<sup>10)</sup>, J.U.Hwang<sup>11)</sup>, T.Shiraishi<sup>12)</sup>, M. Sugano<sup>13)</sup>, H.D.Steffens<sup>16)</sup> 등의 용사층 내부에 존재하는 결합과 용사층과 모재의 계면등에서 발달한 피로크랙이 모재로 전파해 들어가 모재의 최종적인 피로파괴를 일으킨다는 주장보다는 용사층 내부나 계면등에서 시작된 크랙은 계면을 따라 전파되고, 최종적인 피로파괴는 모재의 표면에서 시작된 피로크랙에 의해 발생한다고 생각된다.

### 3.3 접합력 실험

Table 3.2 Results of bonding test

시편 번호	#3	#4	#9	#7	#13	#18
접합력 (MPa)	9.68	8.35	26.43	23.01	25.97	21.86

Table 3.2에 용사층의 접합력을 나타내었다.

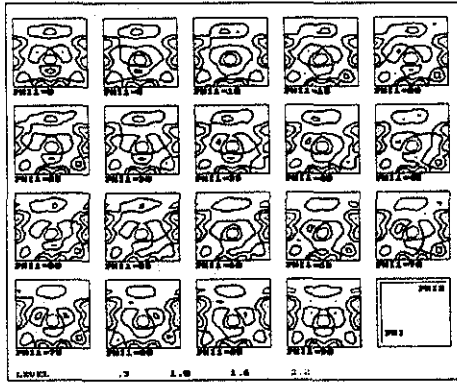
접합력 실험 중 YSZ 용사층의 경우 모재와 용사층 사이의 계면에서 파단이 발생하였던 반면 CrC, WC 용사층은 용사층 내부에서 파단이 발생하였다. 따라서 CrC와 WC 용사층의 경우 본 접합력 결과보다 더 우수한 접합력을 가지고 있으리라 생각된다.

저주기 피로파단면을 관찰하던중 YSZ를 용사한 시편의 경우 피로파단면의 박리부위가 넓었던 반면 WC/Co 용사층과 Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub>/NiCr 용사한 시편의 경우 피로파단면의 박리부위가 상당히 좁은 특이한 현상을 나타내어 접합력 실험결과와 이들 용사층의 박리의 정도를 비교하였고, 접합력이 열악한 YSZ 용사층의 경우 계면부근에서 박리부위도 넓었던 반면 CrC, WC 용사층 같이 접합력이 우수했던 용사층의 경우 박리부위가 적다는 결론을 얻을 수 있었다. 즉 용사층의 접합력이 우수할수록 피로에 의해 박리되는 정도가 적어진다는 것을 알 수 있었으며, 용사층의 계면에서의 피로크랙의 전파정도는 용사층의 접합력과 관계가 있다고 생각된다.

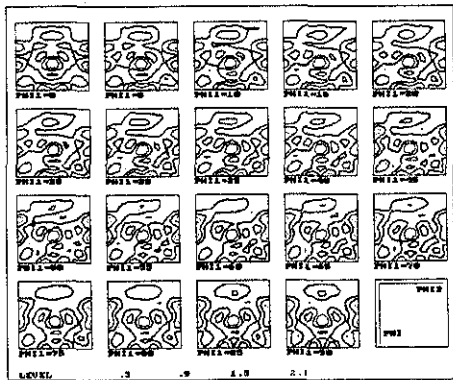
### 3.4 집합조직 관찰 결과

Fig. 3.8에 Euler각에 따른 #7, #13번 시편 단면의 ODF를 나타내었다. Fig. 3.8에서 볼 수 있듯이 두 시편 모두 강도가 특별하게 강한 특정 면이 검출되지 않고 있으며, 금속의 조직적 차이를 극명하게 드러낸다고 할 수 있는  $\alpha$ -화이버나  $\gamma$ -화이버도 나타나지 않고 있다. ODF를 분석한 결과 두 모재금속은 일반적인 열간가공에 의한 조직을





a) ODF of #7 specimen



b) ODF of #13 specimen

Fig. 3.8 ODF of having the maximum and minimum fatigue life specimens

나타내고 있으며, 두 모재의 금속조직학적 차이는 없다고 할 수 있다. 따라서 금속모재 내부의 조직학적 차이는 없다고 생각할 수 있고, 따라서 용사에 의한 피로수명의 향상 및 저하는 용사시 각 용사재의 특성과 용사공정의 차이로 인해 나타나는 모재금속의 표면층의 변화에 의해 나타나는 결과라 생각된다.

#### 4. 결 론

1) 용사변수에 따라 용사층의 미세경도가 변화하는 것을 보았을 때 용사거리와 모재이송속도에

따라 용사층의 특성이 변화함을 알 수 있었다.

2) 용사층의 피로수명은 용사재와 용사 조건에 따라 변화하였으며 WC를 용사한 경우 가장 우수한 피로수명을 나타내었으며, CrC를 용사한 시편의 경우 피로수명이 오히려 저하되는 경우도 나타났다.

3) 피로 파괴가 발생한 파단면의 미세구조 관찰 결과 용사층의 박리와 같은 용사층의 파괴를 유발하는 피로크랙은 용사층의 결합이나 기계적 물성이 변하는 용사층과 모재사이의 계면에서 발달하여 용사층과 모재사이의 계면으로 전파되었다. 하지만 모재의 최종적인 피로파괴는 모재에서 발달한 크랙에 의해 발생한 것으로 생각된다.

4) 피로수명이 가장 긴 시편과 가장 짧은 시편의 ODF 측정 결과 모든 시편의 집합조직의 차이는 없었다. 이를 피로실험 결과와 비교해 볼 때 용사에 의한 피로수명의 변화는 모재의 표면조건을 변화시킴으로써 가능하다고 생각된다.

#### References

1. Lech Pawlowski, John Wiley & Sons. "The science and engineering of thermal spray coatings"
2. A. Buffoli, M.Pesetti, Proceedings of the 8th National Thermal Spray Conference, September 1995, Houston, Texas
3. D.S. Suhr, H.R. Lee, J. of the Korean Inst. of Metals. Vol. 27. No 9, 1989
4. M.B.Jin, S.H.Lee, C.Y.Kim, and C.S.Kang, J of the Korean Inst. of Met. & Mater. Vol. 33, No 5, (1995)
5. H.K.Lee, D.H. Kim, S.H.Hwang, K.K.Chun, D.S.Suhr, J of the Korean Welding Soc. Vol.7, No.2, Jun.,1989

6. S.J.Howard, T.W.Clyne, Surface and Coatings Technology, 45 1991, 333-342
7. P.Yu.Pekshiev, S.V.Tvcherniakov, N.A. Arzhakin, V.V.Rutskin, Surface and Coatings Technology, 64. 1994, 5-9
8. J.D. Lee and H.Y.Ra, K.T.Hong and S.K. Hur, Surface and Coatings Technology, 56 (1992) 27-37
9. P.Scardi, E.Galvanetto, A.Tomasi, L.Bertamini, Surface and Coatings Technology, 68 (1994) 106-112
10. M. Hadfield, R.Ahmed and S.Tobe, Proceeding of ITSC '95 Kobe, May, 1995
11. J.U.Hwang, T.Ogawa and K.Tokaji, Proceeding of ITSC '95 Kobe, May, 1995
12. T.Shiraishi, H.Ogiyama and H.Tsukuda, Proceeding of ITSC '95 Kobe, May, 1995
13. M. Sugano, H. Masaki, J.Kishimoto, Y.Nasu and T.Satake, Proceeding of ITSC '95 Kobe, May, 1995
14. J.D.Lee and H.Y.Ra, K.T.Hong, S.K.Hur, Surface and Coatings Technology, 54, (1992) 64-69
15. Paul A Siemers and Richard L.Mehan, Ceramic engineering and Science Proceedings, 3, p828 ~ p840
16. H.D.Steffens, J.Wilden, K.Nassenstein, S. Mobus, Proceedings of the 8th National Thermal Spray Conference, 11-15 September 1995, Houston Texas