

**研究論文**

## 실험계획법에 의한 $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -7wt%NiCr 용사분말의 HVOF 용사변수 최적화

김 병 희\* · 서 동 수\*\*

### Optimization of HVOF Spray Parameters for $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -7wt%NiCr Coating Powder by Experimental Design Method

Byoung-Hee Kim\* and Dong-Soo Suhr\*\*

**Key Words** : experimental design, L9 orthogonal array, hybrid HVOF spraying,  
 $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -7wt%NiCr, optimum spraying condition

#### Abstract

This study was conducted by L9 orthogonal array to obtain optimum spray parameters for  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -7wt% (80wt%Ni-20wt%Cr) coating powder. The factors were hydrogen flow rate, oxygen flow rate, gun-to-work distance, powder feed rate. And evaluation methods for the coating were surface roughness, oxygen concentration, micro-hardness, pore size and distribution, low angle ( $30^\circ$ ) erosion rate, and microstructure of coating.

The optimum HVOF spray conditions were proved as follows : hydrogen flow rate ; 681 SLPM, oxygen flow rate ; 215 SLPM ( $\text{H}_2/\text{O}_2$  ratio= 3.16), gun-to-work distance ; 22 cm, powder feed rate ; 25 g/min. The hardness (Hv300) was 1147 and the erosion rate ( $30^\circ$  degree) was  $3.16 \times 10^{-4}$  g/g. It is believed that the optimized spray conditions can be improved the wear-resistance and anti-erosion characteristics of the coating.

#### 1. 서 론

WC-Co 및  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -NiCr의 서멧트 재료는 높은 경

도를 갖고 있기 때문에 우수한 내마모특성 및 anti-erosion 특성을 갖는다. 특히  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -NiCr계 용사재료는 500~800℃ 정도의 고온에서도 우수한 마모 및 erosion 특성을 갖고 있기 때문에 고온용사재료

\* 학생회원, 충남대학교 재료공학과

\*\* 정회원, 충남대학교 재료공학과

로써 주목 받고 있으며 gas turbine, turbocharger, nuclear power generator 등에 적용되고 있다<sup>1,2)</sup>. HVOF 용사법은 연료와 산소를 혼합하여 연소시킴으로써 2700℃ 정도의 고온을 얻을 수 있으며, 마하 5 이상의 hypersonic 가스속도를 얻을 수 있기 때문에 플라즈마 등의 다른 용사법으로 제조된 용사층 보다 경도가 높고, 낮은 기공율 및 결합력이 강한 용사층을 얻을 수 있다. 특히 고온에서 분해가 문제되는 탄화물계 용사재료(WC, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>)의 분해를 최소화 할 수 있는 장점이 있다. HVOF 용사법에서 사용되는 연료로는 프로필렌, 아세틸렌, 프로판, 수소 등이 사용되며, 사용하는 연료에 따라서 용사층의 특성이 상이하게 된다<sup>2,3)</sup>. 수소를 연료로 한 hybrid-HVOF system은 열손실이 적고(5~10%) 가스속도 및 입자속도가 빠르기 때문에 다른 HVOF system에 의해 제조된 용사층 보다 용사층에 기공이 적을 뿐만 아니라 접착력이 우수하여 용사층은 높은 접합강도와 경도값을 갖는다. 그러나 수소를 연료로 한 hybrid-HVOF system에 의한 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr계 용사분말에 대해서 용사변수들이 용사층에 미치는 영향 및 특성에 관한 연구 내용은 많이 보고되어 있지 않아 이들에 대한 체계적인 연구가 요구된다. 이러한 관점에서 볼 때 직교배열에 의한 실험계획법은 용사층의 특성에 미치는 용사변수들의 영향을 최소한의 실험으로 최적화할 수 있는 방법이라 할 수 있다.

본 연구에서는 hybrid-HVOF system (METCO DJ 2600)를 이용하여 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-7wt% (80wt%Ni-20wt%Cr) 용사분말에 대한 용사변수를 최적화하기 위해 용사층의 특성에 영향을 미치는 주인자(main factors)를 선정하여 실험계획법에 의해 용사변수(spray parameter)를 최적화하였다. 주인자 용사변수로는 수소유량과 산소유량, 용사거리, 분말송급량 등을 변화시켜 용사한 후, 용사층의 표면조도, 용사층에 존재하는 산소 농도, 경도, 30°저각의 erosion rate 및 용사층의 기공분포 등에 대한 분산분석을 통한 통계적분석과, 전자현미경에 의한 미세구조 분석을 통하여 용사층의 최적 용사조건을 구명하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 실험계획

최소한의 실험회수를 통하여 실험변수들의 영향을 고찰 할 수 있도록 하기위해 직교좌표 L9을 이용하였다<sup>4,5)</sup>. L9은 변수가 4개 수준수가 3인 경우 행할 수 있는 실험방법이다. 용사변수에 다른 용사층의 영향을 분석하여 최적의 용사 변수를 도출하기 위한 용사변수로는 용사층의 특성에 미치는 주인자를 수소유량(hydrogen flow rate), 산소유량(oxygen flow flow), 분말이송량(powder feed rate), 용사거리(gun-to-work distance) 4가지를 설정 하였으며, 각 수준의 수는 3가지로 하였다. Table 1 은 각 요인별 수준을 나타내었다. 여기서 수소의 유량은 681 SLPM을 기준으로 ±22 SLPM 변화 시켰으며, 산소의 유량은 229 SLPM을 기준으로 ±14 SLPM 변화시켰다. 그리고 용사거리는 22 cm를 기준으로 ±3 cm, 그리고 분말 송급량은 25 g/min을 기준으로 ±5 g/min 변화 시켰다. 그리고 gun 이송속도 및 시편의선속도는 각각 7800 mm/min, 226 m/min으로 고정하였다. Table 2 는 L9직교배열과 각 실험에 대한 조건을 나타내었다. 용사층의 특성평가는 표면조도 경도, 기공도, 용사층에 존재하는 산소의 양(wt%) 그리고 30°의 저각에서 erosion rate등 5가지로 하였다.

Table 1. Control factors and levels

Factor	Level					
	0	1	2	0	1	2
A. Hydrogen Flow Rate (SLPM)	H-22	H	H+22	659	681	703
B. Oxygen Flow Rate (SLPM)	O-14	O	O+14	215	229	243
C. Gun-to-Work Distance (cm)	G-3	G	G+3	19	22	25
D. Powder Feed Rate (g/min)	P-5	P	P+5	20	25	30

### 2.2 시편준비 및 분석

금속모재는 탄소강으로 직경 25.4 mm 및 50mm의 코인 형태로 하였으며 용사전 모재의 전처리로 250℃에서 1시간 탈지 후 아세톤으로 초음파 세척하여 모재 표면의 불순물을 제거 하였다. 이렇게 준비된 시편은 80 mesh (평균크기 :

**Table 2.** L9 orthogonal array and experimental conditions

Exp. No.	A	B	C	D	Hydrogen Flow Rate (SLPM)	Oxygen Flow Rate (SLPM)	G. W. Dist. (cm)	P. F. R. (g/min)
# 1	0	0	0	0	659	215	19	20
# 2	0	1	1	1	659	229	22	25
# 3	0	2	2	2	659	243	25	30
# 4	1	0	1	1	681	215	22	30
# 5	1	1	2	2	681	229	25	25
# 6	1	2	0	0	681	243	19	20
# 7	2	0	2	2	703	215	25	25
# 8	2	1	0	0	703	229	19	30
# 9	2	2	1	1	703	243	22	20

427 $\mu$ m)의 알루미늄으로 브라스팅 하여 모재표면에 요철을 만든 후 용사를 하였다. 용사조건은 Table 2의 실험조건으로 하였다. 본 연구에 사용된 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 용사용 분말은 결합제 금속분말 NiCr이 7wt% 혼합된 상용분말 (DIAMALLOY 3005, Metco) 을 사용하였다. 용사된 시편의 단면 및 파단면의 미세 조직 관찰은 전자현미경 (SEM; Scanning Electron Microscopy)으로 관찰분석 하였다. 실험조건별 용사층에 존재하는 산소농도를 알아 보기 위하여 EPMA (CAMECA Model SX-50)을 이용하였다. 표면조도측정은 Taylor-Hobson사의 Surftronic 3+으로 주사길이 (scan length) 7.5mm로 하였다. 용사층의 기공분포는 수은 주입법에 의해 주입압력 0.6~29400 psi 까지 하였으며,  $\theta=130^\circ$ 의 주입조건으로 Micromeritics Pore sizer 9305 를 이용하였다. 주입된 수은의 양을 %로 계산하여 용사층의 기공도와 기공분포를 조사했다. 용사층의 erosion 특성은 각형의 80 mesh (평균크기: 427 $\mu$ m) 알루미늄 입자를 사용하여 상온에서 평가하였다. 실험조건은 입자속도 60 m/sec, 입사각도 30°, 분말양 250 g, 입사시간 30분, 입사거리 (distance-to-workpiece) 는 5cm 하여 erosion rate 를 평가하였다. erosion장비는 자체 제작 하였으며, nozzle 은 스테인레스로 내경 6.35 cm, 길이 400 mm로 되어있다. 입자 속도는 Ruff가 제안한 time-to-flight 법에 의해 측정하였다<sup>9)</sup>.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 용사층의 특성분석

Table 3는 각 실험 수준에서의 측정값들을 정리한 표이며, Table 3의 실험 결과로부터 목적함수식에 대입하여 S/N비를 구하고 S/N비로부터 분산분석표를 작성한 것을 Table 4에 나타내었다. 본 연구에서 용사층 특성 평가분석에 사용된 목적함수 (objective function)는 다음과 같다.

$$\eta_0 = -10\log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n Ra_i^2(MSD)\right)$$

R : surface roughness ..... (1)

$$\eta_1 = -10\log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n O_i^2(MSD)\right)$$

O : oxygen concentration (%) ..... (2)

$$\eta_2 = -10\log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \frac{1}{Hv_i^2}\right)$$

H : microhardness ..... (3)

$$\eta_3 = -10\log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n P_i^2\right)$$

P : total porosity area ..... (4)

$$\eta_4 = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n E_i^2 \right)$$

E : erosion rate at 30 incident angle ..... (5)

여기서 MSD는 mean squared deviation 이다.

표면조도와 용사층의 산소량은 각 data에 대해서 MSD ( mean squared deviation) 값을 계산한 후 식 (1) 과 식 (2)에 대입하여 S/N 비를 구하였으며, 경도와 용사층의 porosity 그리고 erosion rate는 각각 식 (3), (4), (5)에 측정값들을 대입 하여 S/N 비를 구하였다. S/N 비의 단위는 데시벨이며 기호는  $\eta$ 로 쓴다. 표면조도와 용사층의 산소농도, erosion rate 그리고 porosity 는 특성치의 값이 낮을 수록 용사층의 특성에 좋은 것 즉, Smaller-the-Better인 경우이고, 용사층의 경도값은 특성치의 값이 클수록 용사층의 특성에 좋은 것 즉, Larger-the-Better 인 경우이다. 목적함수 식에 의해 얻어진 S/N 비로 부터 각각의 용사층의 특성에 미치는 인자들을 살펴보면 다음과 같다.

### 3.1.1 표면조도

용사층의 표면조도는 크롬카바이드와 같은 anti-erosion에 사용되는 재료에 있어서는 초기 erosion

거동에 크게 영향을 미치기 때문에 고려해야 할 중요한 특성중의 하나이다. 용사층의 표면조도는 사용한 분말의 입자크기, 입도분포, 용사변수등에 의해 영향을 받으며 또한 모재의 표면조도 그리고 용사층의 두께에도 영향을 받는다. Table 4.에서 보인 것 처럼 powder 송급량은 표면조도에 크게 기여하지 않음을 알수 있기 때문에 error 항에 풀링시켜 기여도 ( $p(\%)$ )를 구하여 본 결과 연소 가스인 수소의 유량이 가장 크게 표면조도에 영향을 미치는 변수였다. 그 다음은 산소의 유량이었으며, 용사거리도 용사층의 표면조도에 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 이것은 수소의 유량과 산소의 유량의 조합에 의해서 화염의 온도와 속도가 결정되기 때문이며 입자 속도가 빠를 경우에는 용융된 입자가 모재에 용착될 때 용융입자의 충돌에너지가 크기 때문에 퍼짐성 (spreadability)이 좋아져 용사층의 전체 표면조도는 낮은 값을 보이게 된다. Fig. 1-(a)는 분산분석표의 점추정값 (point estimation) 으로부터 표면조도에 미치는 각 요인의 효과를 나타낸 것으로 표면조도를 작게 하기 위한 각 변수들의 수준 조합은 수소의 유량 659 SLPM, 산소의 유량 215 SLPM 그리고 용사거리 25 cm 인 A0B0C2 일때 용사층의 표면조도를 낮게 할 수 있는 최적 수준 조합이다.

Table 3. Summary of experimental data.

Exp. No.	Ra ( $\mu\text{m}$ )			Hv ( $\text{Hv}_{300}$ )		O (wt%)			E ( $\times 10^{-4} \text{g/g}$ )	P (Total Pore Area)
# 1	2.97	3.50	3.50	1064.0	893.6	3.959	3.656	6.062	4.855	453.62
# 2	2.88	3.02	3.44	1203.0	965.8	1.094	5.362	7.819	5.030	316.08
# 3	2.94	3.14	3.56	1103.8	982.1	2.511	5.170	7.538	4.635	323.07
# 4	3.00	3.40	3.60	1144.2	897.2	2.669	5.216	7.268	3.825	238.04
# 5	2.92	3.20	3.84	1113.7	1024.7	4.282	5.725	8.718	4.440	314.30
# 6	3.76	4.06	4.88	1089.2	897.2	4.866	5.632	6.416	3.050	177.88
# 7	3.00	3.40	3.60	1070.0	911.0	4.819	4.869	5.150	2.935	257.58
# 8	3.66	3.94	4.16	1070.0	919.0	4.727	5.527	9.295	3.375	288.06
# 9	3.90	4.00	4.68	1118.7	970.0	4.377	4.825	7.401	5.530	298.44

**Table 4.** Analysis of variance sheet

Ra ( $\eta_0$ )	S/N ratio of Factor Level				S	$\phi$	V	Fo	$\rho(\%)$
	0	1	2	sum					
H <sub>2</sub>	15.17	12.14	10.85	38.15	3.28	2	1.64	24.34	36.97
O <sub>2</sub>	14.26	13.44	10.45	38.15	2.68	2	1.34	19.88	29.91
Dis.	10.76	12.83	14.56	38.15	2.41	2	1.21	17.91	26.79
F. R	12.26	12.73	13.16	38.15	0.13	2	0.07	-	-
				(e)	(0.13)	(2)	(0.07)	-	6.33
				Total	8.50	8			100.00

Oxygen ( $\eta_1$ )	S/N ratio of Factor Level				S	$\phi$	V	Fo	$\rho(\%)$
	0	1	2	sum					
H <sub>2</sub>	32.69	29.71	30.02	92.42	1.79	2	0.89	29.91	20.61
O <sub>2</sub>	33.76	27.92	30.74	92.42	5.67	2	2.83	94.82	66.91
Dis.	30.52	31.13	30.76	92.42	0.06	2	0.03	1.00	-
F. R	30.90	31.90	29.62	92.42	0.87	2	0.43	14.50	9.63
				(e)	(0.06)	(2)	(0.03)	-	2.85
				Total	8.38	8			100.00

Hv ( $\eta_2$ )	S/N ratio of Factor Level				S	$\phi$	V	Fo	$\rho(\%)$
	0	1	2	sum					
H <sub>2</sub>	180.6	180.4	180.1	541.0	0.05	2	0.02	-	-
O <sub>2</sub>	179.5	181.0	180.5	541.0	0.36	2	0.18	8.20	35.95
Dis.	179.4	180.9	180.7	541.0	0.43	2	0.22	9.83	44.08
F. R	180.6	180.2	180.2	541.0	0.04	2	0.02	-	-
				(e)	(0.09)	(4)	(0.04)	-	19.97
				Total	0.88	8			100.00

Porosity ( $\eta_3$ )	S/N ratio of Factor Level				S	$\phi$	V	Fo	$\rho(\%)$
	0	1	2	sum					
H <sub>2</sub>	-3.32	7.52	3.09	7.30	19.78	2	9.89	61.46	49.78
O <sub>2</sub>	1.11	0.87	5.31	7.30	4.16	2	2.08	12.94	-
Dis.	2.67	2.97	1.65	7.30	0.32	2	-	-	-
F. R	-2.58	6.78	3.09	7.30	14.82	2	7.41	46.06	37.10
				(e)	(0.32)	(2)	(0.16)	-	8.00
				Total	39.08	8			100.00

Erosion ( $\eta$ )	S/N ratio of Factor Level				S	$\phi$	V	Fo	$\rho$ (%)
	0	1	2	sum					
A. ( $H_2$ )	198.92	205.70	205.23	609.85	9.54	2	4.77	4.80	23.65
B. ( $O_2$ )	205.27	202.44	202.14	609.85	1.99	2	-	-3.90	-
C. (Dis.)	206.02	199.46	204.37	609.85	7.76	2	3.88	6.36	18.08
D. (F.R)	198.46	206.93	204.46	609.85	12.65	2	6.32	-	33.36
			(c)		(1.99)	(2)	(0.99)		
			Total		31.94	8			

S : Variation

V : Mean square (variation over degree of freedom)

 $\phi$  : Degree of freedom $\rho$ (%) : Rate of contribution

Fo : Variation over error mean square

Total : Total variation

sum : Summation of factor level

### 3. 1. 2 산소농도 (oxygen concentration)

용사층 내에 존재하는 산소는 크롬카바이드 중의 크롬원소가 고온의 화염중에서 산소와 반응하여 산화되었거나 결합제 금속인 NiCr의 산화에 기인한다. 이들 산화물은 용사제품을 고온에서 장시간 사용하는 경우에는 크롬카바이드 기지(matrix)와 열팽창계수차에 의해 용사층의 수명을 저해시키는 요인으로 작용할 수 있기 때문에 적절한 가스 조합을 통하여 용사층의 산화를 최소화 시킬 수 있는 용사변수가 요구된다. 위 분산분석표에서도 잘 나타나 있듯이 용사층의 산소농도는 산소유량의 기여도가 66%로 산소유량에 크게 영향을 받음을 알 수 있다. 따라서 용사층내에 존재하는 산소의 농도를 최소화 시키기 위해서는 Table 4의 분산분석표와 Fig. 1-(b)에 S/N 비의 점추정치(point estimation)와 95% 구간추정의 각 요인에 대한 효과에서 알 수 있듯이 수소의 유량 659 SLPM 과 산소의 유량 215 SLPM인 A0와 B0의 변수들의 수준 조합이 필요하며, 분말 송급량은 25 g/min인 D1이 된다. 그러므로 A0B0D1이 용사층에 존재하는 산소농도를 최소화 할 수 있는 최적수준 조합이다.

### 3. 1. 3 경도 (micro-hardness)

용사층의 경도는 미세구조 즉, 기공의 크기 및 분포와 적층된 splat간의 결합력에 좌우된다. hybrid-HVOF 용사는 가스속도가 2100m/sec로 매

우 바르기 때문에 splat간의 결합력은 일반 플라즈마 용사된 용사층의 접합강도 보다 1.5 배 이상의 값을 갖는다<sup>8)</sup>. 용사층의 경도 또한 플라즈마 용사된 경우와 일반 HVOF 경도값 보다 1.5배 높은 값을 보인다<sup>8)</sup>. 일반적으로 HVOF 용사층의 경도에 영향을 주는 용사변수로는 용사거리 그리고 연료 가스와 산소의 비(ratio)가 가장 큰 영향을 주는 변수이다. Table 4에 나타낸 분산분석의 결과에서도 마찬가지로 경도에 가장 크게 영향을 주는 인자는 용사거리이며, 이때의 용사층의 경도에 미치는 용사거리의 기여도( $\rho$ (%))는 44.08%임을 보이고 있다. 산소유량의 기여도 또한 35.95%로 두 인자에 의해 용사층의 경도값은 결정되고 있음을 알 수 있다. 수소유량과 분말송급량은 error항에 풀링시킬 정도로 작은 값을 보이고 있는데, 이것은 본 연구범위에서는 사용된 수소유량의 변화(659 SLPM~703SLPM) 정도가 크지 않기 때문에 용사층의 경도값에는 영향을 끼치지 않은 것으로 생각되며 용사층에 미치는 다른 특성들을 고려하여 수소의 유량은 결정할 필요가 있다. Fig. 1-(c)에 각 요인별 S/N 비의 점추정치(point estimation)와 95% 구간추정을 통해 알 수 있듯이 용사층의 경도값을 최대로 하는 각 변수들의 수준 조합은 산소의 유량 229 SLPM 과 용사거리 22 cm인 B1C1이 높은 경도값을 얻기 위한 조건임을 알 수 있다.

### 3. 1. 4 기공 (porosity)

용사층의 기공크기 및 기공의 분포는 용사층 특성에 영향을 주는 중요한 특성중에 하나로 용사층의 기공생성원인은<sup>9-11)</sup> splat의 적층구조 특이성에 기인하는데 불완전한 splat의 적층에 의해 splat과 splat사이에는 조대한 (coarse) 기공이 생기게 되고, 용융된 droplet가 모재에 충돌하여 퍼질 때 splat의 edge 부분에서 rebound되는 입자 위에 후속 droplet이 응고된 입자에 충돌하여 splat를 형성할 때, 중간크기의 기공이 생기게 된다. 또 다른 원인은 용융된 droplet에 entrapped 되어 있던 가스가 모재에 충돌하여 splat를 형성할 때, 가스가 evolution 되면서 splat 내에 미세한 크기의 기공이 고립되게 된다. 이와같이 생긴 기공의 크기와 분포는 용사변수들을 적절히 조절함에 따라 제어가 가능하며, 또한 용사층의 기계적특성에도 영향을 미치기 때문에 용사변수 최적화를 통하여 기공의 크기와 분포를 제어 하여야 한다. Table 4의 분산분석표와 Fig. 1-(d)의 factor effect에 보인 것처럼 기공의 분포를 제어 하는데는 연료가스의 유량과 분말의 송급량이 주 요소임을 알 수 있다. 추천 조건으로는 A1B1D1로써 수소의 유량은 681 SLPM, 산소의 유량 229 SLPM, 분말송급량을 25 g/min으로 하는 것이 용사층에 존재하는 기공의 크기 및 분포를 최소화할 수 있는 조건임을 알 수 있다. 용사거리는 본 연구범위내에서는 크게 영향을 받지 않았음을 알 수 있다.

### 3. 1. 5 Erosion rate

Erosion은 반복되는 입자충돌에 의해 발생하는 재료의 이탈 (removal)과 관계되는 표면현상으로 크롬카바이드와 같이 anti-erosion에 사용되는 재료에 있어서 erosion 거동에 미치는 용사변수들의 영향을 고찰하는 것은 매우 중요하다. erosion 특성에 미치는 인자는 erodent 입자의 속도, 입자의 모양, 크기, 입자의 내재적 특성 (경도, 파괴인성, 밀도), 충돌각도, 유체(가스 또는 액체)의 성질, 타겟재료의 성질 등에 따라 erosion 특성이 달라지게 된다<sup>13)</sup>. 타겟 재료의 성질로는 타겟재료의 표면형상, 표면 응력상태, 표면조도, 경도, 밀도, 파괴인성 등이며, 또한 부가적인 요소로는 사용 분위기와 사용 온도 등의 복합적인 요소들에 의해 erosion 특성은 좌우 된다<sup>14)</sup>. erosion은 기계부품에

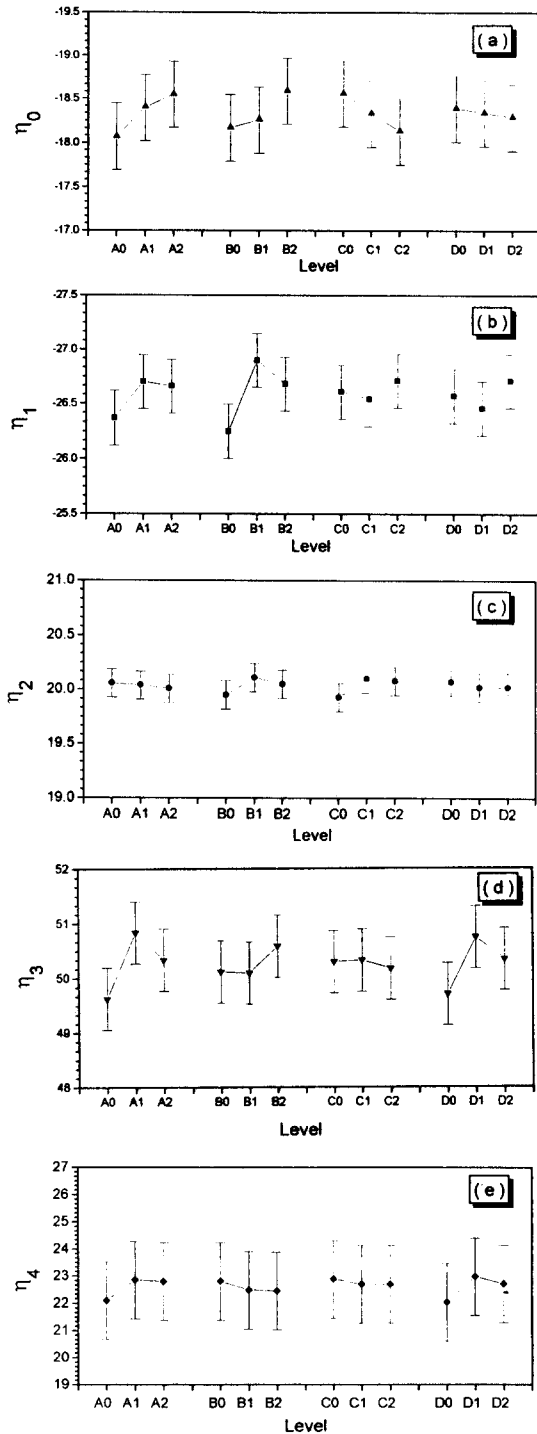


Fig. 1 Plot of factor effects.

있어서 사용상에 적면 하계되는 피할 수 없는 중요한 요소이며, 특히 용사층은 적층구조의 특이성 때문에 bulk 재료와는 매우 다른 erosion 거동을 보이게 된다. 용사층의 미세구조를 좌우하는 기공의 크기 및 기공의 분포, splat 과 splat간의 결합력 등은 erosion 거동에 영향을 주는 중요 요소이기 때문에 용사변수들의 적절한 조합으로 용사층의 미세구조를 제어 하여야만 한다. anti-erosion에 사용되는 크롬카바이드재료의 경우 최적의 용사변수를 도출하는데 있어서 재료의 erosion 거동을 고찰하는 것은 필수 요소이다.

Table 4 와 Fig. 1-(e) 에 각 수준별 분산분석 결과와 S/N비의 점추정값과 구간추정값을 나타내었다. Fig. 1-(e) 와 분산분석표에서 알 수 있듯이 30° 저각의 erosion특성에 영향을 주는 인자는 분말송급량이 크게 기여 하고 있음을 알 수 있는데, 분말송급량은 적층구조의 기공크기 및 분포에 영향을 주기 때문이라 생각된다. 연료가스인 수소유량은 화염의 온도와 속도를 결정하는 요소로 용사층의 표면조도와 용사층의 기공크기 및 기공분포를 좌우하기 때문이라 생각되며, 용사거리 또한 erosion 거동에 영향을 주는 인자임을 알 수 있는데, 용사거리는 용사층의 경도특성에 미치는 용사변수로서 위에서 언급 했듯이 적층구조의 splat 과 splat 사이의 결합력과 밀접한 관계가 있는 특성이기 때문이다. 따라서 30° 저각의 erosion 저항 특성을 향상 시키기 위해서는 다음과 같은 조건이 요구된다. 즉, 수소의 유량 681 SLPM, 용사거리 19 cm 그리고 분말송급량은 25g/min 인 A1C0D1 일때 가장 좋은 anti-erosion 특성을 나타냄을 알 수 있다.

### 3.2 최적 용사조건

본 연구에 사용한 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-7wt%NiCr 용사용 분말은 800℃ 정도에서의 내마모 및 anti-erosion 특성을 향상 시킨 용사용 분말이다<sup>8)</sup>. 그러므로 anti-erosion 특성을 향상시키기 위한 용사조건 최적화가 요구된다. HVOF 용사된 크롬카바이드의 용사층에는 약 6~8%<sup>15)</sup> 정도의 산소량이 용사층에 존재하고 있음을 감안할 때, 본 연구에서의 용사층 산소농도는 6% 이하이었고, 표면조도 역시 평균 표면조도값이 3.0 μm 정도로 일반적인 HVOF

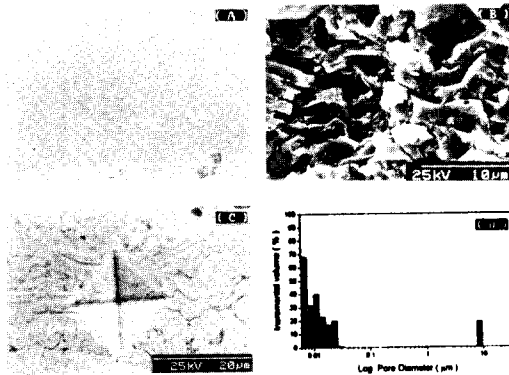
용사된 표면조도값 보다 조금 낮은 값을 보이고 있기 때문에 마모특성 및 고온의 erosion 저항성을 위해 사용되는 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-7wt%NiCr의 용사조건 최적화에는 용사층의 표면조도나 산소량은 크게 고려치 않아도 무방하리라 생각된다. 물론 용사층의 특성은 위와 같은 특성들이 복합적으로 작용하여 용사층의 수명을 결정하지만 용사층의 기계적 내구성에 더 중요한 특성들 즉, 용사층의 경도나 기공의 크기 및 분포 그리고 erosion 특성이 우선적으로 고려 되어져야만 한다. 따라서 연구결과로 부터 anti-erosion 향상을 주안점으로 고려하여 erosion에 영향을 크게 미치는 용사층의 경도와 기공의 크기 및 분포 그리고 erosion 특성에 대한 S/N비의 분산분석결과를 바탕으로 다음과 같은 최적의 크롬카바이드 용사조건을 구하였다. 수소의 유량은 681 SLPM, 산소의 유량은 229 SLPM 그리고 용사거리 22 cm, 분말 송급량 25 g/min인 A1B1C1D1 이 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-7wt%NiCr의 anti-erosion특성을 향상 시키기 위한 최적 용사조건이라 할 수 있다.

### 3.3 용사층의 특성 비교

Fig. 2 와 Fig. 3 은 본 연구에서 구명된 최적 HVOF용사조건과 추천 용사조건<sup>12)</sup>으로 용사된 용사층 단면 및 파단면 미세구조와 미소 경도의 압입자(indentor)의 압흔 그리고 기공의 분포를 나타냈다. 추천 용사조건은 수소의 유량 681 SLPM, 산소의 유량 229 SLPM으로 본 연구에서의 최적조건과 같지만 용사거리는 25 cm, 분말 송급량 30 g/min 이었다. 본 연구의 최적조건에서 용사층 미세구조의 특징은 용사층에 용융된 droplet 에 entrapped 되어 있던 가스가 evolution 되면서 splat 내에 고립되어 생긴 미세한 기공은<sup>9,10)</sup> 많지만, 용융된 droplet 이 모재에 충돌하여 퍼질 때, 생긴 중간크기의 기공은 관찰되지 않았다. 반면에 기존의 용사조건으로 용사된 용사층에는 중간 크기의 기공도 분포 하고 있음을 보이고 있으며, 또한 불완전한 splat의 적층에 의한 splat 과 splat 사이에 생긴 조대기공(coarse pore)<sup>11)</sup>도 존재하고 있는데, 파단면의 미세조직 사진에서도 관찰되듯이 추천 용사조건은 용사거리가 25 cm로 멀고 분말 송급량도 30 g/min으로 많았기 때문이라 생각된다. 또한 용사층의 경도값은 두 조건 모두 Hv 1100 정도의



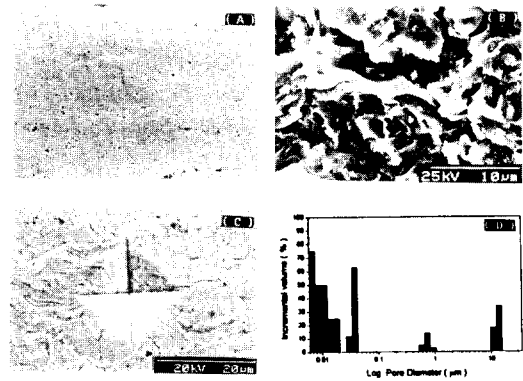
비교적 높은 경도값을 보이지만 추천용사조건으로 용사된 용사층에서는 splat 계면을 따라 균열 (crack)이 전파 되었음이 관찰된다. 이로부터 알 수 있는 것은 추천용사 조건은 본 연구에서의 최적 용사조건에서 용사된 용사층의 splat 과 splat의 결합강도 보다 낮음을 알 수 있다. 이와같이 두 조건 모두 높은 경도값을 보이면서도 splat 과 splat 계면을 따라 균열이 전파된 것은 추천조건에서의 용사거리가 최적조건에서의 용사거리보다 멀었기 때문이라 생각된다. 또한 두 조건의 30° 저각의 erosion rate 결과를 비교해 보면, 최적 용사조건에서 erosion rate는  $3.16 \times 10^{-4}$  g/g 인 반면, 추천 용사조건으로 용사된 용사층의 erosion rate는  $5.0 \times 10^{-4}$  g/g 로 최적 용사조건에서 erosion rate가 68% 이상 향상 되었음을 알 수 있다. 이와같이 30° 저각에서의 erosion 저항성이 향상된 것은 기공의 크기 및 분포 그리고 splat 강도에 기인한 것이라 생각된다.



**Fig. 2** The characteristics of the coating by the optimized spray condition.  
 A) SEM cross-sectional microstructure  
 B) Fractured microstructure  
 C) Indentor trace  
 D) Pore distribution

### 3. 결 론

Hybrid-HVOF system (METCO DJ2600)을 이용하여 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-7wt% (80wt%Ni-20wt%Cr) 용사분말에 대한 용사변수를 최적화하기 위하여 실험계획법의



**Fig. 3** The characteristics of the coating by the recommended spray conditions.  
 A) SEM cross-sectional microstructure  
 B) Fractured microstructure  
 C) Indentor trace  
 D) Pore distribution

로 실험을 행한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

적은 실험횟수로 최적의 실험변수와 특성들을 파악하는데 실험계획법에 의한 분석은 접근방법이 용이하여 공학적실험에 매우 유용함을 알 수 있었으며 통계분석적 방법으로 구한 최적 HVOF 용사 조건은 다음과 같이 요약할 수 있다. 연소가스인 수소의 유량은 681 SLPM, 산소의 유량은 229 SLPM, 용사거리 22 cm, 그리고 분말송급량 25 g/min 의 조건에서 용사층의 micro-hardness (Hv300) 1147의 매우 높은 값을 얻을 수 있었으며, 30° 저각에서 erosion rate는  $3.16 \times 10^{-4}$  g/g 으로 양호한 anti-erosion 특성을 나타내었다. 또한 추천 용사조건으로 용사된 용사층의 특성과 비교한 결과 기공의 크기 및 분포가 제어되었고, 경도값의 차이는 크지 않았으나, splat 강도는 향상 되었음을 알 수 있었다. 그리고 30° 저각의 erosion 에 대한 저항성은 68% 향상된 결과를 얻을 수 있었다.

### 참 고 문 헌

1. D. W Parker and G. L. Kutner., "HVOF Moves into the Industrial Mainstream" *Advanced Material & Processes.*, 7, 1994 pp 31-35

2. R. Elsing, O. Knotek and U. Bltin , Surf. Coat. Technol. , 41, 1990 pp. 147-156
3. J. Nerz, R. Kaufold, B. Kushner, A. Rotolico. , ASM Thermal Spray Conference Pittsburg 1991
4. M. S. Phadke. , "Quality engineering using robust design", Prentice Hall, New Jersey (1989)
5. 박 성 현, "응용실험계획법", 영지문화사, 1990
6. 박 성 현, "현대실험계획법," 민영사, 1995
7. A. W. Ruff and L. K. IVES. , Wear 35, 1975 pp. 195-199
8. Metco : HVOF Turbine Engine Premium Coatings Guide , Metco 2600 Hybrid performance
9. 清水保雄 : ジルユニア 溶射被膜の機械的性質に及ぼす溶射條件の 影響, 日本溶射協會誌, Vol 26, No. 3, 1989 , H1124~H1130
10. S. Safai : A microstructure investigation of plasma-sprayed metal and oxide coating, Ph. D. Dissertation, 1979, State University of New York.
11. R. McPherson : A review of microstructure and properties of plasma sprayed ceramic coatings, Surf. and Coat. Technol, Vol. 39/40 1989, pp. 173~181
12. Metco Technical Bulletin : Diamalloy 3005
13. P. H. Shipway, I. M. Hutchings : The role of properites in the erosion of brittle material, Wear 193, 1996, pp. 105~113
14. Bu Quan Wang and Kevin Luer : The erosion - oxidation behavior of HVOF Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr cermat coating, Wear, 174, 1994, pp. 177~185
15. Yasuo shimizu : Wear Behavior of HVOF Sprayed Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> -20%NiCr Coating, 日本 溶射協會第59回全國大會講演論文集 1994, pp 54~57