

다꾸찌방법에 의한 Ni-5%Al 합금 분말의 플라즈마 용사코팅 조건의 최적화

이 형 근*

*한밭대학교 신소재공학부 생산가공공학과

Optimization of the Plasma Spray Coating Parameters of Ni-5%Al Alloy Powder Using the Taguchi Experimental Method

Hyoung Keun Lee*

*Dept. of Welding and Production Engineering, Hanbat National University, Daejeon 305-719, Korea

Abstract

Ni-5%Al alloy powder is widely used as the bond coating powder to improve the adhesive strength between the substrate and coating. The important properties in the bond coating are the deposition efficiency and surface roughness. In this study, it was tried to optimize the plasma spray parameters to maximize the deposition efficiency and surface roughness. In the first step, spray current and hydrogen gas flow rate were optimized in order to increase the deposition efficiency. In the next step, the seven plasma spray variables were selected and optimized to improve both the deposition efficiency and surface roughness using the Taguchi experimental method. By these optimization, the deposition efficiency was improved from about 10 % at the first time to 51.2 % by the optimization of spray current and hydrogen gas flow rate and finally to 65.2 % by the Taguchi experimental method. The average surface roughness was increased from about 12.9 μm to 15.4 μm .

(Received July 23, 2002)

Key Words : Plasma spray coating, Ni-5%Al alloy, Bond coating, Deposition efficiency, Surface roughness, Taguchi method

1. 서 론

플라즈마 용사기술은 고융점의 금속이나 세라믹 분말을 고온, 고속의 플라즈마 화염 내에서 용융 분사시켜 넓은 모재 표면에 빠르고 효율적으로 코팅시킬 수 있는 방법이다. 플라즈마 용사 코팅에서 모재 표면과 용사 코팅층 사이의 결합력은 대부분 스플렛 (splat)의 냉각 과정에서 수축에 의한 용사 코팅층과 표면 요철(凹凸) 사이의 기계적인 결합 (mechanical anchorage)에 의해 일어난다¹⁾. 일반적으로 모재 표면에 적절한 표면 요철을 주기 위하여 전처리 과정으로서 그릿 블라스팅 (grit blasting)을 수행한다. 그러나 코팅층의 접합강도가 요구되거나, 세라믹 용사 코팅을 위해서는 그릿 블라스팅만으로는 만족스럽지 못하다. 이러한 경우 본

용사 코팅 전에 접합강도를 향상시키기 위하여 Ni-Al, Mo 등의 분말을 미리 용사 코팅하며, 이를 접합코팅 (bond coating)이라고 한다. 특히 Ni-5%Al 분말은 니켈 알루미늄아이드 (nickel aluminide)의 생성과정에서 발열반응을 일으키며 많은 합금 모재들과 어느 정도 금속학적인 결합을 얻을 수 있어서 접합코팅에서 가장 일반적으로 사용되는 재료이다²⁾.

Ni-5%Al 접합코팅층의 중요한 성능들은 접합강도, 용사코팅 효율과 표면거칠기이다. 접합강도는 측정시험의 오차가 너무 커서 이번 결과에서는 제외하였다. 용사코팅 효율은 용융 효율성의 척도로서 모재와의 접합강도에 큰 영향을 미치며, 생산단계에 직접적인 영향을 미친다. 표면거칠기는 후속의 용사코팅에 적합한 표면 요철을 제공하여 우수한 접합강도를 얻는 데 중요하다³⁾. 본 연구에서는 Ni-5%Al 접합코팅층의 플라즈마 용사

조건을 최적화하고자 하였다. 1 단계로 용사코팅 효율의 향상을 위해 용사전류와 수소가스 유량을 최적화하였으며, 2 단계로 통계적인 실험계획법인 다꾸찌 (Taguchi) 방법을 도입하여 최적 용사조건을 도출하였다.

2. 실험방법

2.1 실험재료 및 플라즈마 용사

모재로는 A319 알루미늄 합금을 사용하였다. A319 알루미늄 합금은 5~6% Si, 0.8% Fe, 4~5% Cu, 0.3% Mn, 0.1% Mg, 0.5% Zn, Al의 조성을 가지는 아공정 (hypoeutectic) 합금으로서 주조성이 매우 뛰어나며 자동차 엔진 부품에 많이 사용되고 있다⁴⁾. 모재는 20×80×4 mm 치수의 판상 시험편으로 가공하였다. 플라즈마 용사 분말로는 Ni-5%Al 조성의 용사 분말을 사용하였으며, Fig. 1에서는 분말의 형상을 보여주고 있다. 용사분말은 구형을 가지며, 입도는 45~90 μm를 가진다. 용사코팅 효율의 정확한 측정을 위해서는 분말송급속도를 정확히 조정할 수 있어야 한다. 분말송급장치는 Sulzer Metco사의 Twin-10 모델을 사용하였으며, 분말송급속도는 분말송급속도 설정치 (디스크의 최대 회전속도의 % 값)와 분말송급가스 유량에 의해 조정할 수 있다. Fig. 2에서 Ni-5%Al 분말의 분말송급특성을 보여준다⁵⁾. 분말송급속도는 분말송급가스 유량에는 거의 영향을 받지 않으며, 분말송급속도 설정치에만 의존한다. Fig. 2에 표시된 실험식에 의해 원하는 분말송급속도를 얻기 위한 분말송급속도 설정치를 정확히 계산할 수 있다.

A319 알루미늄 합금 모재 표면은 용사에 적합한 표면 요철을 주기 위하여 그릿 브라스팅을 수행하였다. 그릿 브라스팅은 20 mesh (850 μm) 치수의 알루미늄 그릿을 사용하여, 압력 5.5 kg/cm², 거리 200 mm의 조건에서 수행하였다.

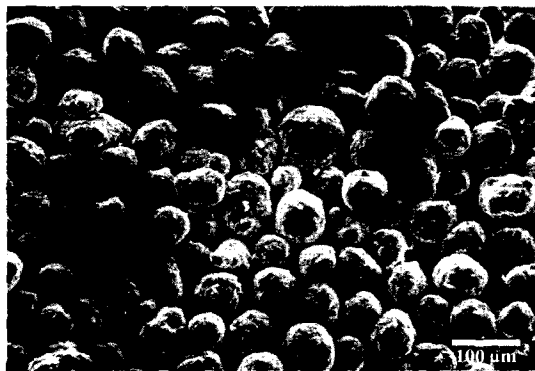
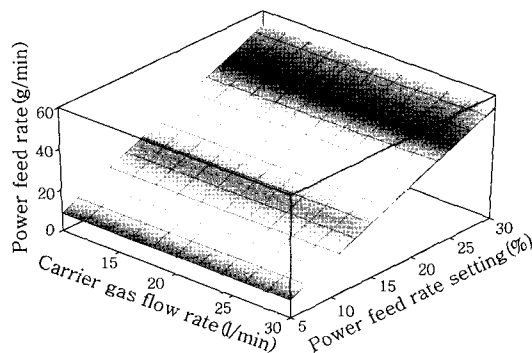


Fig. 1 Morphology of Ni-5%Al powder



$$\text{Power feed rate} = -0.4499 - 0.2458x + 0.0772x^2 + 1.8389y + 0.00833xy - 0.00182y^2$$

(x: Carrier gas flow rate, y: Power feed rate setting)

Fig. 2 Powder feeding characteristics of Ni-5%Al powder

그릿 브라스팅 후 즉시 플라즈마 용사를 수행하였으며, 플라즈마 용사는 Sulzer-Metco사의 M1100C 시스템과 F4 건 (gun)을 사용하였다. 한 패스 (pass)를 용사하기 위한 용사 건의 주사방법은 Fig. 3에서 보여준다. 20×80 mm 면적의 시험편에 용사 건을 120×28 mm의 면적으로 주사하여 20×28 mm의 용사 코팅 면적을 얻었다. 이러한 방식은 용사작업에서 일어나는 실제 용사코팅 효율을 측정할 수 있도록 한다. 용사코팅 효율은 용사 전·후 측정된 시료의 무게로부터 [용사코팅 효율=(단위 면적당 코팅층 무게)/(단위 면적당 분말 공급량)×100(%)]의 관계식을 사용하여 계산하였다. 표면거칠기의 측정은 Mitutoyo사의 SurfTest-402 표면거칠기 측정기를 사용하여 평균 표면거칠기 (arithmetic average surface roughness)를 측정하였다.

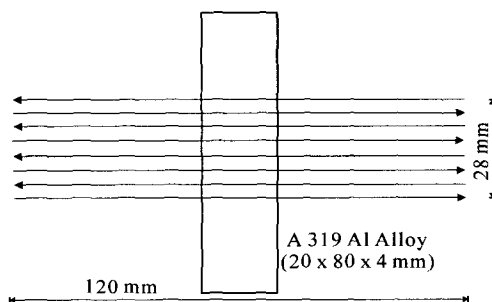


Fig. 3 Scanning method of the spray gun

2.2 용사전류와 수소가스 유량의 최적화

초기에 용사전류 500 A, 수소가스 유량을 8 l/min의 조건으로 플라즈마 용사하였으며, 이때 용사코팅 효율은 10% 이하로 매우 낮은 값을 얻었다. 예비실험에서 용사코팅 효율은 용사전류와 2 차 플라즈마 가스인 수소가스 유량에 크게 영향을 받았다. 따라서 먼저 용

사전류와 수소가스 유량의 변화가 용사코팅 효율에 미치는 영향을 분석하였다. 용사전류와 수소가스 유량은 전극의 수명, 냉각능력, 수소가스의 위험성 등을 고려하여 최대의 용사코팅 효율을 얻을 수 있는 조건으로 선정하였다.

2.3 용사조건 최적화를 위한 다꾸찌 실험계획

플라즈마 용사 코팅층의 성질은 50여 개의 변수들에 의해 매우 복잡하게 영향을 받는다⁶⁾. 따라서 앞서 용사 코팅 효율에 대해 최적화시킨 용사전류와 수소가스 유량을 제외하고 중요하다고 고려되는 몇 가지 용사변수들을 선정하였다. 플라즈마 용사변수들로는 1) 분말송급 위치(위(top) 혹은 아래(bottom)로부터 송급), 2) 인젝터(injector) 직경, 3) 인젝터 거리, 4) 용사거리, 5) Ar 플라즈마 가스 유량, 6) 분말송급가스 유량, 7) 분말송급속도를 선정하였다. Fig. 4에서는 선정된 플라즈마 용사변수들의 위치를 용사 건을 중심으로 도식적으로 보여 준다. 이들 용사변수들은 주로 용사 분말의 플라즈마 화염 내부로의 효율적인 공급과 용융에 영향을 미치는 변수들이다. 용사코팅 효율과 표면거칠기에 대해 이들 용사변수들을 최적화시키기 위해서 다꾸찌 실험계획법을 적용하였다. 용사변수들은 교호작용이 모든 열에 고르게 분산되어 교호작용의 영향이 가장 적고, 2수준과 3수준의 실험을 동시에 할 수 있는 L18 직교배열표를 사용하여 배치하였다⁷⁾. Table 2에서는 용사변수들과 수준을 보여주며, Table 3에서는 L18 직교배열표에 실험배치한 것을 보여 준다. 실험의 적합성을 판단하기 위하여 3수준의 1개의 열(column)에는 변수를 배치하지 않고 에러로 남겨 두었다. 분말송급속도가 달라질 때에도(18~36 g/min) 모든 실험에서 단위 면적 당 공급량 (0.5 g/cm²)이 동일하도록 용사 코팅의 패스 수를 조정하였다. 실험순서는 난수표를 이용하여 무질서하게 정하였다. 그릿 브라스팅에 의한 모재

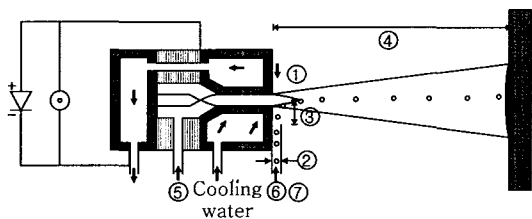


Fig. 4 Positions of the selected plasma spray coating parameters
 (1) Powder feeding position (2) Injector diameter (3) Injector distance (4) Spray distance (5) Plasma gas flow rate (6) Powder carrier gas flow rate (7) Powder feed rate

Table 1 Spray parameters and their levels

Chr.	Parameter	Level		
		1	2	3
A	Powder feeding position	Top	Bottom	
B	Injector diameter, (mm)	1.5	1.8	2.0
C	Injector distance, (mm)	4	6	8
D	Spray distance, (mm)	120	140	160
E	Primary plasma gas flow rate (Ar, l/min.)	41	48	55
F	Powder carrier gas flow rate (Ar, l/min.)	1.5	2.1	2.7
G	Powder feed rate, (g/min.) (number of passes)	18 (24)	27 (16)	36 (12)

표면 요철의 영향을 제거하기 위하여 충분한 두께로 코팅하였다. 용사코팅층의 두께는 용사코팅 효율에 따라 120~360 μm의 범위에 있었다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 용사전류 및 수소가스 유량의 최적화

용사전류와 수소가스 유량의 변화에 따른 용사코팅 효율의 측정결과는 Fig. 5에서 보여준다. 수소가스 유량이 10 l/min일 때 용사코팅 효율은 용사전류가 500A에서 650A로 증가함에 따라 급격히 증가하였다. 수소가스 유량을 13 l/min로 증가시켰을 때 용사코팅 효율은 용사전류가 500A에서 550A로 증가함에 따라 급격히 증가하였으나 600A에서 650A사이에는 거의 일정하였다. 용사 건의 수명과 수소가스 유량의 상한을 고려하여 용사전류 600A, 수소가스 유량 13 l/min으로 플라즈마 용사조건을 설정하였다. 이때 용사코팅 효율은 51.2%를 얻었다. 1단계로 용사전류와 수소가스 유량을 최적화하였으며, 2단계에서 다른 용사변수들을 다꾸찌방법을 사용하여 최적화하였다.

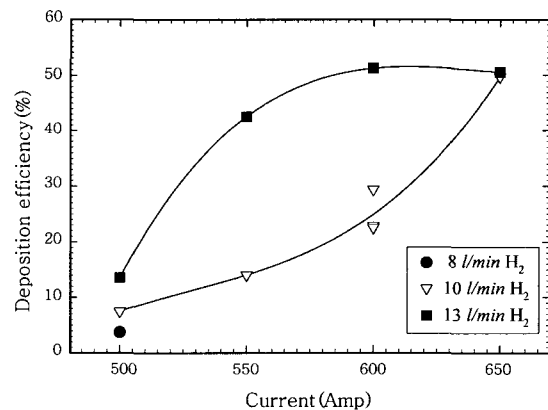


Fig. 5 Effects of the spray current and H₂ flow rate on the deposition efficiency

32 용사변수들이 용사코팅 효율에 미치는 영향

플라즈마 용사조건에 따른 용사코팅 효율의 측정결과들과 평균값, S/N 비(Signal to Noise Ratio)는 Table 2에서 보여준다. 용사코팅 효율은 클수록 좋기 때문에 망대특성 (Larger the Better type)에 따라 S/N 비는 다음의 식에 의해 계산하였다⁷⁾.

$$S/N \text{ Ratio} = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right)$$

n : 반복수, y_i : 측정치 (1)

용사변수들이 용사코팅 효율의 평균값과 S/N 비에 미치는 영향은 Fig. 6에서 그래프로 보여준다. 용사변수들이 평균값과 S/N 비에 미치는 영향은 거의 비슷한

Table 2 Experimental arrangement of the parameters on a L18 orthogonal array and the results for the deposition efficiency and surface roughness

No.	A	B	C	D	E	F	G	Deposition Efficiency (%)					Surface Roughness (μm)				
								1	2	3	Aver.	S/N	1	2	3	Aver.	S/N
1	Top	1.5	4	120	41	1.5	18	51.28	49.14	47.22	49.21	33.83	10.2	8.7	11.7	10.2	19.98
2	Top	1.5	6	140	48	2.1	27	63.47	61.52	61.02	62.00	35.84	12.0	12.5	9.7	11.4	20.97
3	Top	1.5	8	160	56	2.7	36	20.31	23.27	24.02	22.53	26.99	10.7	11.5	14.5	12.2	21.54
4	Top	1.8	4	140	48	2.7	36	37.78	39.64	39.26	38.89	31.79	12.2	12.7	14.7	13.2	22.33
5	Top	1.8	6	160	56	1.5	18	55.76	57.38	55.49	56.21	34.99	12.7	14.2	12.5	13.1	22.33
6	Top	1.8	8	120	41	2.1	27	45.33	44.23	46.60	45.39	33.13	15.7	16.0	10.5	14.1	22.46
7	Top	2.0	4	120	56	2.1	36	66.46	61.69	60.18	62.78	35.93	12.5	16.7	17.5	15.6	23.55
8	Top	2.0	6	140	41	2.7	18	59.34	56.90	58.18	58.14	35.29	13.5	14.0	14.0	13.8	22.81
9	Top	2.0	8	160	48	1.5	27	55.21	60.65	55.84	57.23	35.13	11.2	12.7	16.0	13.3	22.20
10	Btm	1.5	4	160	48	2.1	18	61.92	60.34	59.07	61.01	35.71	11.7	9.5	11.0	10.7	20.51
11	Btm	1.5	6	120	56	2.1	27	44.94	45.51	43.14	44.53	32.97	14.7	17.0	12.2	14.6	23.07
12	Btm	1.5	8	140	41	1.5	36	63.69	60.93	59.07	61.23	35.73	13.5	12.7	12.5	12.9	22.20
13	Btm	1.8	4	160	41	2.7	27	27.18	26.82	27.66	27.22	28.70	12.7	11.5	9.2	11.1	20.69
14	Btm	1.8	6	120	48	1.5	36	56.59	55.39	53.49	55.16	34.82	15.2	16.5	14.7	15.5	23.76
15	Btm	1.8	8	140	56	2.1	18	50.08	48.96	49.42	49.49	33.89	13.5	12.5	11.7	12.6	21.94
16	Btm	2.0	4	140	56	1.5	27	58.69	57.37	54.27	56.78	35.07	12.7	11.7	11.2	11.9	21.45
17	Btm	2.0	6	160	41	2.1	36	64.31	58.58	58.58	60.49	35.61	12.5	13.2	11.5	12.4	21.83
18	Btm	2.0	8	120	48	2.7	18	64.44	62.70	60.22	62.45	35.90	12.2	14.5	13.5	13.4	22.48

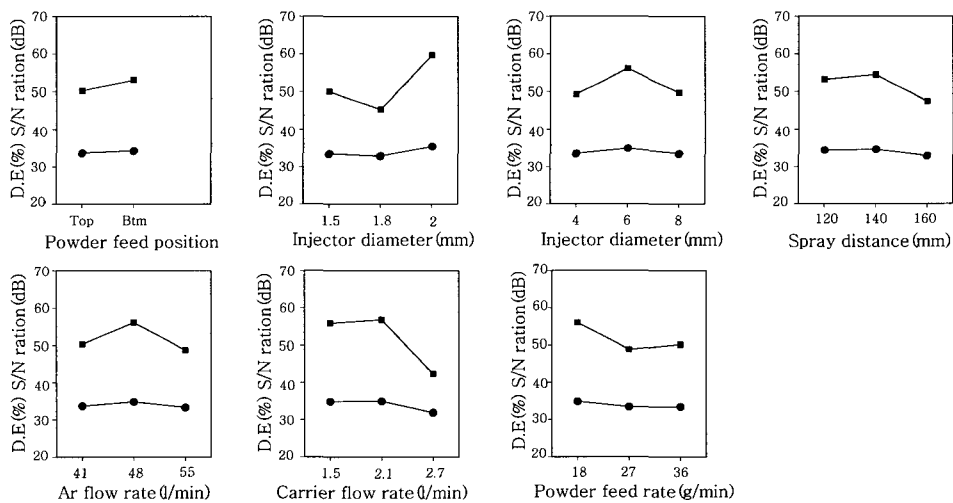


Fig. 6 Effects of the plasma spray conditions on the deposition efficiency and S/N ratio (■ : deposition efficiency, ● : S/N ratio)

경향을 보여준다. 용사변수들의 영향을 좀 더 정량적으로 분석하기 위하여 용사코팅 효율의 평균값과 S/N 비에 대한 분산분석(ANOVA, Analysis of Variance)을 수행하였다. 용사변수들의 평균값과 S/N 비는 유의성 면에서 큰 차이가 없었으며, 최적 용사조건 설정은 평균값보다는 잡음인자를 고려한 S/N 비를 최대화하는 조건을 우선적으로 선정하는 것이 바람직하다. Table 3에서는 S/N 비에 대한 분산분석 결과를 보여준다. 에러항(I열)의 분산이 상당히 작았으며 실험결과는 적합한 것으로 판단된다. 분산분석 결과에서 용사변수들의 $F_0 < 2$ 인 경우에는 영향이 거의 없는 것으로

판단되어 풀링 (pooling)시켰다⁷⁾. 분말송급가스 유량과 인젝터 직경이 용사코팅 효율에 가장 큰 영향을 미쳤으며, 다른 용사변수들은 용사코팅 효율에 거의 영향을 미치지 않았다. 분말송급가스 유량과 인젝터 직경은 모두 분말이 비행 중에 플라즈마 화염의 중심부를 통과하는 궤적에 큰 영향을 미치는 인자들이다. 용사코팅 효율은 분말이 플라즈마 화염에 의해 얼마나 효율적으로 가열될 수 있는지에 의존한다는 것을 의미한다. 용사코팅 효율을 높이기 위해서는 분말송급가스 유량 2.1 l/min, 인젝터 직경 2.0 mm으로 설정하는 것이 요구되며, 이때 용사코팅 효율의 기대치는 64.8%로 추정되었다.

Table 3 ANOVA for S/N ratios of the deposition efficiency

Chr.	Factor	Df	SS	V	F_0	R_0 (%)
A	Powder feed position	(1)	1.66	1.66	-	-
B	Injector diameter	2	22.12	11.06	2.88	13.24
C	Injector distance	(2)	8.28	4.14	-	-
D	Spray distance	(2)	11.14	5.57	-	-
E	Primary plasma gas flow rate	(2)	7.86	3.93	-	-
F	Powder carrier gas flow rate	2	36.89	18.45	4.80	26.79
G	Powder feed rate	(2)	8.50	4.25	-	-
I	ERROR	(2)	3.17	1.58	-	-
e	Error	(2)	9.39	4.69		
(e)	Pooled error	(13)	(50.00)	(3.85)		59.98
	Total	17	109.01			100.0

Df : Degree of freedom(parentheses mean pooled),
 SS : Sum of square, V : Variance, F_0 : F value,
 R_0 : Percentage contribution

3.3 용사변수들이 표면거칠기에 미치는 영향

플라즈마 용사조건에 따른 표면거칠기의 측정결과, 평균값, S/N 비는 Table 2에서 보여준다. 표면거칠기 역시 쿨수록 좋기 때문에 용사코팅 효율에서와 마찬가지로 망대특성에 따라 식(1)에 의해 S/N 비를 계산하였다. 용사변수들이 표면거칠기의 평균값과 S/N 비에 미치는 영향은 Fig. 7에서 그래프로 보여준다. 용사변수들이 평균값과 S/N 비에 미치는 영향은 거의 비슷한 경향을 보여준다. 용사변수들의 영향을 좀 더 정량적으로 분석하기 위하여 표면거칠기의 평균값과 S/N 비에 대한 분산분석을 수행하였다. 용사변수들의 평균값과 S/N 비 모두 유의성 면에서 거의 비슷하였으며, Table 4에서는 S/N 비에 대한 분산분석 결과를 보여준다. 에러항 (I열)의 분산값은 작으며 실험결과는 적합한 것으로 판단된다. 그러나 전반적으로 표면거칠기의 측정결과들의 편차가 크며, 분산분석 결과에서 표면거칠기에 두드러지게 영향을 미치는 용사변수들은 관찰

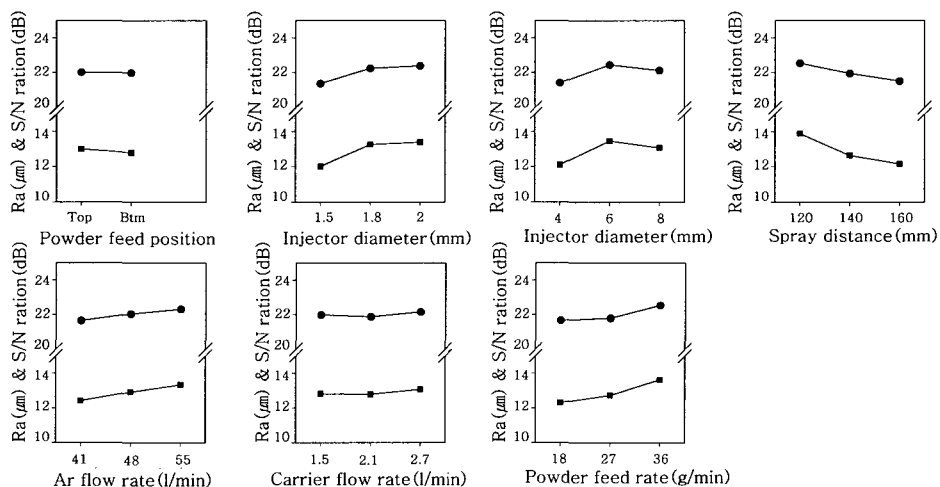


Fig. 7 Effects of the plasma spray conditions on the surface roughness and S/N ratio (■ : surface roughness, ● : S/N ratio)

되지 않았다. 이들 중에서는 인젝터 직경, 인젝터 거리, 용사거리, 분말송급속도가 약간의 영향을 미쳤다. 표면 거칠기의 관점에서는 인젝터 직경 2.0 mm, 인젝터 거리 6 mm, 용사거리 120 mm, 분말송급속도 36 g/min으로 설정하는 것이 바람직하며, 이때 표면거칠기의 기대치를 계산하여 보면 15.7 μm 로 추정되었다. 이것은 전 실험의 평균값이 12.9 μm 에 비하여 약간 높은 값으로 용사조건의 최적화에 의해 약간의 상승을 기대할 수 있다.

Table 4 ANOVA for S/N ratios of the surface roughness

Chr.	Factor	Df	SS	V	F ₀	R ₀ (%)
A	Powder feed position	(1)	0.003	0.003	-	-
B	Injector Diameter	2	3.59	1.79	3.34	14.27
C	Injector Distance	2	3.40	1.70	3.17	13.22
D	Spray Distance	2	3.22	1.61	3.00	12.18
E	Primary Plasma Gas Flow Rate	(2)	1.28	0.64	-	-
F	Powder Carrier Gas Flow Rate	(2)	0.23	0.12	-	-
G	Powder Feed Rate	2	2.56	1.28	2.38	8.42
I	ERROR	(2)	0.13	0.07	-	-
e	Error	(2)	3.20	1.60		
(e)	pooled error	(9)	(4.84)	(0.54)		51.90
	Total	17	17.61			100.0

Df : Degree of freedom(parentheses mean pooled),
 SS : Sum of square, V : Variance, F₀ : F value,
 R₀ : Percentage contribution

3.4 최적 플라즈마 용사조건 선정

용사코팅 효율과 표면거칠기의 분산분석 결과 용사코팅 효율은 분말송급가스 유량과 인젝터 직경에 주로 영향을 받았으며, 표면거칠기는 인젝터 직경, 인젝터 거리, 용사거리, 분말송급속도에 주로 영향을 받았다. 종합적으로 플라즈마 용사조건을 최적화하기 위하여 우선적으로 용사코팅 효율을 최대로 할 수 있는 조건을 고려하였으며, 다음으로 표면거칠기와 생산성을 고려하여 용사변수들을 선정하였다. 이러한 기준으로 최적 용사조건을 선정한 결과는 Table 5에서 보여준다. 선정된 최적 플라즈마 용사조건 하에서 3 회의 확인실험을 수

행하였다. 그 결과 최적 용사조건에서 용사코팅 효율은 65.2%를 얻었으며, 표면거칠기는 15.4 μm 를 얻었다. 표면거칠기는 상당히 실험 오차가 존재하였으나, 평균값 12.9 μm 에 비해서는 약간 향상된 결과이다. 표면거칠기는 용사조건보다는 초기 모재의 표면거칠기와 용사분말의 입도에 가장 큰 영향을 받으며, 용사조건에 의한 최적화에는 한계가 있는 것으로 보인다. 용사코팅 효율은 초기 용사조건에서 10%이하를 얻었으나, 1 단계로서 용사전류와 수소가스 유량을 최적화하여 약 51.2%까지 향상시킨 후, 2 단계로 일부 용사변수들을 최적화하여 65.2%까지 향상시킬 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 집합코팅으로 많이 사용되는 Ni-5%Al 용사분말의 용사코팅 효율과 표면거칠기를 향상시키기 위한 플라즈마 용사조건을 최적화하고자 하였다. 용사코팅 효율을 향상시키기 위하여 1 단계로 용사전류와 수소가스 유량을 최적화시켰다. 2 단계로 7 개의 용사변수들에 대한 다꾸찌방법을 적용하여 용사코팅 효율과 표면거칠기를 최적화하였다. 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) Ni-5%Al 용사분말의 용사코팅 효율은 용사전류와 수소가스 유량에 크게 영향을 받았으며, 600 A, 13 l/min에서 51.2%의 용사코팅 효율을 얻었다.
- 2) 용사코팅 효율에는 우선적으로 분말송급가스 유량과 인젝터 직경이 가장 큰 영향을 미쳤다.
- 3) 표면거칠기에는 용사조건에 따라 큰 영향은 없었으나, 인젝터 직경, 인젝터 거리, 용사거리, 분말송급가스 유량이 주로 영향을 미쳤다.
- 4) 최적의 플라즈마 용사조건을 산정한 후 확인실험 결과, 용사코팅 효율은 65.2%, 표면거칠기는 15.4 μm 를 얻었다.

참고문헌

1. R. B. Heimann : Plasma-Spray Coating, VCH, 1996, 167~168
2. C. P. Howes Jr. : Thermal Spraying : Processes, Preparation, Coating and Application, Welding

Table 5 Optimized plasma spray coating condition

Power	H ₂ flow rate (l/min)	Powder feeding position	Injector diameter (mm)	Injector distance (mm)	Spray distance (mm)	Ar flow rate (l/min)	Carrier gas flow rate (l/min)	Powder feed rate (g/min.)
600A, 64V	13	From bottom	2.0	6	120	48	2.1	36

- Journal, **73-3** (1994), 47~51
3. C. P. Bergmann : Influence of the substrate roughness on the adherence of plasma sprayed ceramic coating, Proc. the 7th National Thermal Spray Conference, Boston, **20~24** June 1994, 683~686
 4. J. R. Davis : Aluminum and aluminum alloys, ASM International, 1993, 714~715
 5. H. K. Lee : Development of aluminum surface modification technology by thermal spray coating to apply to Al engine cylinder, Report of MOST, 99-I-IC-01-C-055, 2001(in Korean)
 6. E. J. Kubel Jr. : Thermal spraying technology : From art to science, Advanced materials & Processes, **140** (1987), 69-80.
 7. 박성현 : 응용실험계획법, 영지문화사, 1990(in Korean)