

## 플라즈마 용사된 AISI 316 stainless steel 용사층의 특성에 관한 연구

### A study on the properties of the plasma-sprayed AISI 316 stainless steel coatings

임영우, 서동수

충남대학교 재료공학과, 대전

#### 1. 서론

용사기술(thermal spray coating technology)은 고속으로 흐르는 열원내에 분말이나 선재로 된 용사재료를 투입하여 가열·용융시키고, 고속으로 분사하여 용융입자를 모재 표면에 충돌, 적층시켜 피막을 형성하는 표면개질의 한 방법이다.[1] 용사법은 열원에 따라 arc spray, gas spray, plasma spray, detonation gun deposition, 그리고 HVOF(high velocity oxygen fuel) 용사법으로 분류한다.[2]

플라즈마 용사법은 15,000K이상의 온도를 갖는 고온의 플라즈마 화염중에 용사재료를 투입하여 용융시키고, 이를 Mach 2이상의 고속으로 가속시켜 모재표면에 강하게 접합시키는 표면처리기술로 다른 제조공정에 비하여 피막의 형성속도가 빠르고, 세라믹과 같은 고융점 재료의 피막형성이 가능하며, 모재와의 접합강도가 높은 피막층을 얻을 수 있으며, 특히 넓은 면적을 갖는 대형구조물에의 field작업이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 이러한 플라즈마 용사기술은 1960년대 초부터 항공기 엔진부품의 고온 내식성과 단열성을 증대시키기 위하여 응용되기 시작하였으며, 그 후 항공우주산업, 방직산업, 인쇄산업, 전자산업, 석유화학산업 등의 주요 기계부품에 내마모성, 내식성, 단열성, 내산화성, 윤활성, 전기절연성 등 다양한 기능을 부여하여 제품의 신뢰성 및 내구성을 증대시키게 되었다.

본 연구에서는 부식과 마모현상이 발생한 시스템의 성능유지, 보수에 적용하기 위해 내식, 내마모성이 우수한 316 stainless steel 용사층을 탄소강표면에 형성시켰으며, 플라즈마 용사 조건이 용사층의 특성에 미치는 영향을 실험계획법을 통해 분석하여 적정 용사조건을 확립하고자 하였다.

#### 2. 실험방법

##### 2-1. 금속모재 및 전처리

본 연구에서는 SM45C 탄소강을 재료로 하여 corrosion 실험용, erosion 실험용 그리고 인장시험용의 3가지 종류로 가공하여 사용하였다. corrosion 및 erosion 실험용은 직경이 각각 25mm, 40mm이고, 두께는 5mm의 coin 형태이며, 인장시험편은 JIS규격[3]에 준하여 가공하였다. 금속모재는 acetone을 이용한 초음파세척과정과 80mesh  $Al_2O_3$ 를 이용한 blasting 과정을 거쳤다.

##### 2-2. 용사분말

본 연구에서 사용된 AISI 316 stainless steel 분말은 Miller사(Miller Thermal Technologies, Inc., U.S.A.)의 상용화된 제품(model number ; AI-1082)을 사용하였다. 분말은 구형의 형태이며 입도는 50~100 $\mu m$ 의 분포를 갖고 있었다.

##### 2-3. 플라즈마 용사 (plasma thermal spray)

플라즈마 용사공정에서 제어해야 할 변수는 각 공정과 장치의 조합에 따라서는 약 30여가지 이상으로 알려져 있다.[4] 따라서, 이러한 모든 변수들이 각각 적절하게 고려되어 조합된 상태에서 좋은 특성을 갖는 coating층을 얻을 수 있다. 그러나, 이들 모든 변수에 대한 실험을 행한 결과로써 변수를 제어한다는 것은 현실적으로 불가능하므로, 공정개발 및 최적화, 장비개발 및 성능평가, 공정집적최적화 등에 널리 이용되고있으며 효과적인 실험계획법으로

알려져 있는 Taguchi법[5~7]을 이용하여 용사조건을 확립하고자 하였다.

본 연구에서는 이런 공정변수중 작업중 변화시킬 수 있는 플라즈마 출력(gun power,  $30 \pm 5\text{kW}$ ), 플라즈마 노즐과 모재사이의 거리(gun-to-substrate distance,  $9 \pm 3\text{cm}$ ), 플라즈마 노즐과 모재의 상대 표면속도(surface speed,  $200 \pm 50\text{m/min}$ ) 그리고, 용사분말의 송급량(powder feed rate,  $100 \pm 40\text{g/min}$ )의 4가지 변수들을 선정하였으며, 수준수는 3수준으로 설정하였다. 이렇게 하였을 경우 실험횟수를 가장 적게 하는 배열은 L9 직교배열(orthogonal array)이다. Table 1에 L9직교배열 및 그에 따른 실험조건표를 나타내었다.

#### 2-4. 용사층의 특성 평가

Table 1의 실험조건으로 9가지 종류의 coating층을 제조하여 용사변수의 영향을 분석하기 위해 pitting 전위(pitting potential, mV), 경도(micro-hardness, Hv<sub>200</sub>), 표면조도(surface roughness,  $\mu\text{m}$ ), 기공도(porosity, ml/g), 인장강도(tensile strength, N/cm<sup>2</sup>) 그리고, particle erosion(g/lg) 특성 등을 측정하였다. 그리고, 각 특성에 대한 목적함수(objective function)를 아래와 같이 도입하였다.[7]

$$\Pi = -10 \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{P_i^2}\right) \quad \Theta = -10 \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{H_i^2}\right) \quad \Psi = -10 \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i^2\right)$$

$$Y = -10 \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i^2\right) \quad T = -10 \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{T_i^2}\right) \quad \Omega = -10 \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i^2\right)$$

P ; pitting potential, H ; micro-hardness, F ; surface roughness  
R ; porosity, T ; tensile strength, E ; erosion rate

#### 3.결과

pitting 전위, 경도, 표면조도, 기공도, 인장강도 그리고, particle erosion의 특성측정결과와 S/N비를 Table 2에 나타내었다. 그리고, 각 특성치에 대한 분산분석표를 작성하였다.[Table 3] 각 조건, 수준에서의 영향을 평가한 결과 gun power는 35kW, gun-to-substrate distance는 12cm, surface speed는 150m/min, 그리고 powder feed rate는 100g/min의 조합이 가장 적절한 용사조건으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. D.Maejka and B.Benko, Plasma spraying of metallic and ceramic materials, John Wiley & Sons, 1989
2. 홍경태, 이주동, "분말 용사 기법에 의한 표면 코팅", 대한금속학회회보, Vol.5, (4), 1992, 352
3. Japanese Standards Association, JIS H 8664, 1990
4. A.Vardelle and P.Fauchais, "Influence of velocity and surface temperature of alumina particles on the properties of plasma sprayed coatings", Plasma Chemistry & Plasma Processing, Vol.2, (3), 1982, 255
5. 최경수, 박동화, "플라즈마용사공정에서의 최적조건 결정에 관한 연구", 한국요업학회, Vol.33, (2), 1996, 155
6. 전영진, 김창일, 구지근, 유형준, "Taguchi방법을 사용한 콘택 산화막 식각 공정 최적화 연구", 한국재료학회, Vol.5, (1), 1995, 63
7. 박성현, 현대실험계획법, 민영사, 1992

Table 1. L9 orthogonal array and experimental sheet

Expt. No.	A B C D				A B C D				A B C D			
	1	1	1	1	1	G+5	D+3	S+50	P+40	35	12	250
2	1	2	2	2	G+5	D	S	P	35	9	200	100
3	1	3	3	3	G+5	D-3	S-50	P-40	35	6	150	60
4	2	1	2	3	G	D+3	S	P-40	30	12	200	60
5	2	2	3	1	G	D	S-50	P+40	30	9	150	140
6	2	3	1	2	G	D-3	S+50	P	30	6	250	100
7	3	1	3	2	G-5	D+3	S-50	P	25	12	150	100
8	3	2	1	3	G-5	D	S+50	P-40	25	9	250	60
9	3	3	2	1	G-5	D-3	S	P+40	25	6	200	140

Table 2. Summary of experimental data and S/N ratio

Expt. No.	Experimental data						S/N ratio					
	P	H	F	R	T	E	$\Pi$	$\Theta$	$\Psi+30$	$\Upsilon$	$T$	$\Omega$
1	-118.77	196.12	17.28	0.00819	17267	0.0003020	41.49	45.85	5.25	41.73	84.75	70.40
2	-108.54	187.62	18.48	0.01005	16043	0.0003112	40.71	45.47	4.67	39.96	84.11	70.14
3	-223.55	203.76	19.40	0.01368	14042	0.0003340	46.99	46.18	4.24	37.28	82.95	69.53
4	-157.56	216.74	16.72	0.01594	12198	0.0003432	43.95	46.72	5.54	35.95	81.73	69.29
5	-108.54	208.84	22.44	0.01012	15323	0.0003792	40.71	46.40	2.98	39.90	83.71	68.42
6	-210.72	166.72	22.88	0.00918	10237	0.0004184	46.47	44.44	2.81	40.74	80.20	67.57
7	-195.23	193.10	25.88	0.01944	9093	0.0004888	45.81	45.72	1.74	34.23	79.18	66.22
8	-122.31	191.80	23.96	0.02459	6281	0.0004504	41.75	45.66	2.41	32.19	75.96	66.93
9	-96.87	186.82	26.48	0.02909	3759	0.0005196	39.72	45.43	1.54	30.73	71.50	65.69

Table 3. Data analysis and factor effects

pitting potential									
$\Pi$	Sum by Factor Level			S	$\varphi$	V	$\rho$ (%)		
	1	2	3						
A	129.19	131.13	127.28	2.47	2	1.24	-		
B	131.25	123.17	133.19	18.81	2	9.40	26.45		
C	129.72	124.38	133.51	14.01	2	7.01	18.68		
D	121.93	133.00	132.69	26.47	2	13.24	38.86		
(e)				(2.47)	(2)	(1.24)	-		
micro-hardness									
$\theta$	Sum by Factor Level			S	$\varphi$	V	$\rho$ (%)		
	1	2	3						
A	137.50	137.55	136.80	0.12	2	0.06	-		
B	138.28	137.52	136.05	0.86	2	0.43	21.42		
C	135.95	137.61	138.29	0.97	2	0.49	24.68		
D	137.68	135.62	138.56	1.51	2	0.76	40.33		
(e)				(0.12)	(2)	(0.06)	-		
surface roughness									
$\psi$	Sum by Factor Level			S	$\varphi$	V	$\rho$ (%)		
	1	2	3						
A	14.16	11.33	5.69	12.38	2	6.19	61.74		
B	12.53	10.06	8.60	2.63	2	1.32	7.45		
C	10.47	11.74	8.96	1.29	2	0.65	-		
D	9.77	9.22	12.19	1.67	2	0.83	2.09		
(e)				(1.29)	(2)	(0.65)	-		
porosity									
$r$	Sum by Factor Level			S	$\varphi$	V	$\rho$ (%)		
	1	2	3						
A	118.97	116.59	97.14	95.65	2	47.82	74.67		
B	111.91	112.04	108.75	2.32	2	1.16	-		
C	114.66	106.63	111.40	10.87	2	5.44	6.85		
D	112.36	114.93	105.41	16.14	2	8.07	11.06		
(e)				(2.32)	(2)	(1.16)	-		
tensile strength									
$T$	Sum by Factor Level			S	$\varphi$	V	$\rho$ (%)		
	1	2	3						
A	251.80	245.64	226.64	114.68	2	57.34	73.81		
B	245.65	243.77	234.65	23.05	2	11.53	13.61		
C	240.91	237.33	245.83	12.13	2	6.07	6.44		
D	239.95	243.48	240.63	2.34	2	1.17	-		
(e)				(2.34)	(2)	(1.17)	-		
particle erosion									
$Q$	Sum by Factor Level			S	$\varphi$	V	$\rho$ (%)		
	1	2	3						
A	210.06	205.28	198.83	21.18	2	10.59	88.15		
B	205.91	205.49	202.78	1.92	2	0.96	7.37		
C	204.90	205.11	204.17	0.17	2	0.09	-		
D	204.51	203.92	205.74	0.57	2	0.29	1.72		
(e)				(0.17)	(2)	(0.09)	-		