

# 실험계획법에 의한 INCONEL 625의 아크용사변수 최적화

## Optimization of Arc Spray Parameters for INCONEL 625 by Experimental Design Method

한명섭\*, 황중현, 김대영  
현대 중공업, 산업 기술 연구소

### 1. 서 론

최근 산업설비의 사용조건이 가혹해짐에 따라 부품에 사용되는 재료의 고온 부식이 문제가 되는데, 특히 보일러 내벽과 같이 직접 연소화염에 노출되어 고온 부식에 의한 침해가 크게 발생하게 된다.

이에 따라 본 연구에서는 고온산화 및 부식 방지를 위해 적용되고 있는 인코넬625 아크용사 코팅피막의 특성을 최적화하기 위해 실험계획법에 의해 용사변수의 영향을 규명하고자 한다.

### 2. 실험방법

최소한 실험 횟수를 통해 실험 변수들의 영향을 고찰할 수 있도록 하기 위해서 변수가 4개이며, 수준수가 3인 경우에 행하는 실험방법인 L9직교좌표를 이용하였다. 용사변수에 따른 코팅피막의 영향을 분석하여 최적의 용사변수를 도출하기 위한 용사변수로 코팅피막의 특성에 미치는 주요인자인 아크전류(arc current), wire 공급압력(wire feed pressure), 건 이동속도(gun travel

speed) 및 용사거리(standoff) 등의 4가지를 설정하였고, 각 수준 수를 3가지로 하였다. 즉, 아크전류는 150A를 기준으로  $\pm 50A$  변화시켰으며, wire 공급압력은 80psi를 기준으로  $\pm 10psi$  변화시켰다. 또한 건 이동속도는 850mm/min.을 기준으로  $\pm 150mm/min.$ , 용사거리는 160mm를 기준으로  $\pm 40mm$ 를 변화시켰다. 그리고 아크전압 및 공기압력은 각각 33V, 80psi로 고정하였다. Table 1은 L9 직교배열 및 각 실험에 대한 용사조건을 나타낸 것이다. 또한 용사시편은 25×25mm 평판형태로써 아세톤으로 초음파 세척하여 모재 표면의 불순물을 제거하고 80mesh(평균크기:427 $\mu$ m)의 알루미늄 블라스팅 전처리를 실시하였다. 본 연구에 사용된 인코넬625 wire( $\phi 1.6$ )는 SM8625(METECO)이다. 또한 용사시편의 단면조직 관찰은 전자현미경(SEM)으로 분석하였고, 코팅피막의 두께, 기공도 및 산화물 함량은 광학현미경에 부착되어 있는 화상분석 프로그램(image analysis program)을 이용하여 분석하였다. 코팅피막의 표면조도 측정은 Mitutoyu사의 Surf test 402 Analyser로 측정하였다.

Table 1 L9 orthogonal array and experimental conditions

Exp. No.	A ( $\alpha$ )	B ( $\beta$ )	C ( $\gamma$ )	D ( $\delta$ )	Arc Current (A)	Wire Feed Pressure (psi)	Travel Speed (mm/min.)	Standoff (mm)
#1	0	0	0	0	100	70	700	120
#2	0	1	1	1	100	80	850	160
#3	0	2	2	2	100	90	1000	200
#4	1	0	1	1	150	70	850	200
#5	1	1	2	2	150	80	1000	120
#6	1	2	0	0	150	90	700	160
#7	2	0	2	2	200	70	1000	160
#8	2	1	0	0	200	80	700	200
#9	2	2	1	1	200	90	850	120

### 3. 실험 결과 및 고찰

Table 2은 각 실험 수준에서 코팅피막에 대한 특성 분석을 통해 얻어낸 측정값을 정리한 것이며, 본 연구에서 코팅피막의 특성평가분석에 사용된 목적함수(objective function)는 코팅피막의 표면조도, 기공도 및 산화물 함량과 같이 특성치 값이 낮을수록 코팅피막의 특성에 좋은 것, 즉, smaller-the-better인 경우에는 식(1)을, 코팅피막의 두께 및 경도값과 같이 특성치 값이 클수록 코팅피막의 특성에 좋은 것 즉, larger-the-better인 경우에는 식(2)을 사용하여 각 특성요소에 맞는 목적함수에 대입하여 S/N비( $\eta$ )를 구하고 S/N비로부터 분석표를 작성하였다.

$$\eta_1 = -10 \log_{10} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n y_i^2 \right) \quad \text{식(1)}$$

$y_i$ ; Surface roughness(Ra), Porosity, Oxide rate

$$\eta_1 = -10 \log_{10} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \frac{1}{y_i} \right) \quad \text{식(2)}$$

$y_i$ ; Hardness, Coating thickness

Figure 1은 각 코팅피막의 특성, 즉, 표면조도, 경도, 기공도 및 산화물 함량에 미치는 각 인자의 S/N비에 대한 평균값과 전체 평균값을 계산하여 나타낸 것이다. 즉, 각 인자에 대한 코팅피막 특성의 변화를 보이는 것으로서 의존성을 가지는 것으로 볼 수 있는데, 표면조도의 경우에 Figure 1(a)에서 보는 바와 같이 아크전류가 증가할수록 표면조도가 증가하지만, wire 공급압력과 이송속도가 증가하면 반대로 표면조도가 감소하며, 용사거리는 영향이 없음을 알 수 있다. 또한 경도의 경우에 Figure 1(b)에서 보는 바와 같이 아크전류와 wire 공급압력이 증가하면 경도는 증가하나, 이송속도 및 용사거리는 영향이 없

을 알 수 있다. 또한 기공도의 경우 Figure 1(c)에서 보는 바와 같이 wire 공급압력이 증가하면 기공도는 감소하나, 아크전압, 이송속도 및 용사거리는 영향이 없음을 알 수 있다. 산화물 함량의 경우에 Figure 1(d)에서 보는 바와 같이 이송속도가 증가하면 산화물 함량은 감소하지만, 용사거리가 증가하면 반대로 산화물 함량이 증가하며, 아크전류, wire 공급압력은 영향이 없었다.

Table 3에서는 각 변수에 대한 특성 의존성을 전체를 100으로 보았을 때의 계산 값과 최적 변수 값을 나타내었는데, 경도는 높은 값을 원하므로 아크전류는 200A가 최적이고 82%의 의존성이 있으며, wire 공급압력은 90psi가 최적이고 10%의 의존성을 보이는 것을 알 수 있다. 또한 이송속도는 850mm/min.이 최적이고 7%의 의존성이 있으며, 용사거리는 120mm가 최적이고 1%의 의존성을 보이는 것을 알 수 있다. 한편, 표면조도, 기공도 및 산화물 함량은 낮은 값을 원하므로 낮은 값을 얻기 위한 최적 변수와 그에 의존성을 보이고 있다. 따라서 고온 내식성이 우수한 인코넬 625 재질의 코팅피막에 대한 최적 품질 즉, 높은 경도, 낮은 기공도, 그리고 낮은 산화물 함량을 가지는 코팅피막을 얻기 위해서는 아크전류는 200A, wire 공급압력은 90psi, 이송속도는 1000mm/min. 용사거리는 160mm가 인코넬 625에 대한 최적 용사조건인 것으로 확인되었다.

Figure 2는 본 연구에서 얻어진 최적 용사조건으로 제작된 코팅피막의 단면조직을 나타낸 것이며, 최적용사조건으로 제작된 용사피막은 기공도의 경우에 시험계획법에 의해 얻어진 결과들보다 낮은 최소값(0.74%)을 나타내었고 산화물 함량도 14.22%로 비교적 낮은값을 나타내었다. 또한 경도는 361 HV<sub>1</sub>로 최적은 보이지 않았으나 비교적 높은 값을 나타내었다.

Table 2. Summary of characterization results for INCONEL 625 arc spray coating

Exp. No.	Taguchi levels	Surface Roughness( $\mu\text{m}$ )	Hardness(HV1)	Porosity(%)	Oxide Content (%)
#1	0-0-0-0	14.60	316	1.80	15.40
#2	0-1-1-1	17.20	333	1.20	13.80
#3	0-2-2-2	18.50	330	0.80	17.60
#4	1-0-1-1	14.70	333	1.20	15.20
#5	1-1-2-2	15.50	334	1.00	12.20
#6	1-2-0-0	16.70	331	0.80	17.60
#7	2-0-2-2	16.70	350	1.60	18.60
#8	2-1-0-0	14.00	364	1.60	21.00
#9	2-2-1-1	13.70	378	1.40	20.60

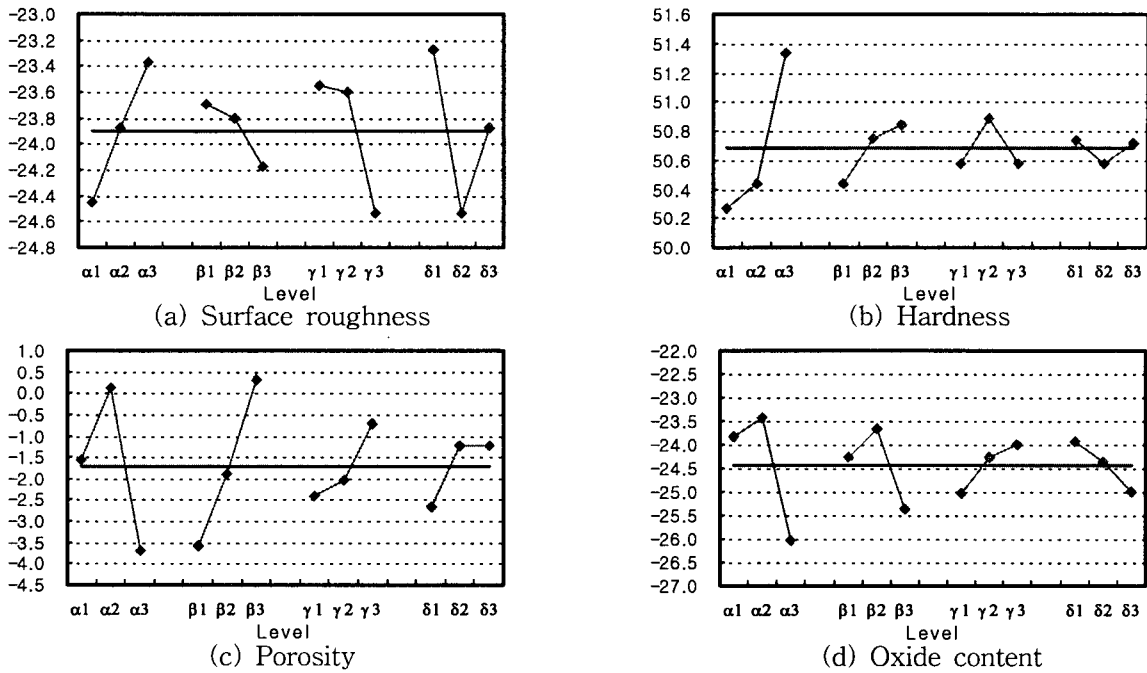


Fig. 1 The effect of factor level for INCONEL 625 arc spray coating

Table 3 Results of Taguchi experimental analysis of INCONEL 625 arc spray coating

Desired attributes	Processing factor(Variance / Optimum level)			
	Arc current (A)	Wire feed pressure(psi)	Travel speed (mm/min.)	Standoff (mm)
Roughness(low)	27.39 / 200	5.95 / 70	28.96 / 700	37.71 / 120
Hardness(high)	79.28 / 200	10.91 / 90	7.81 / 850	2.00 / 120
Porosity(low)	40.69 / 150	42.80 / 90	8.87 / 1000	7.63 / 160
Oxide Content(low)	59.76 / 150	22.65 / 80	8.74 / 1000	8.85 / 120

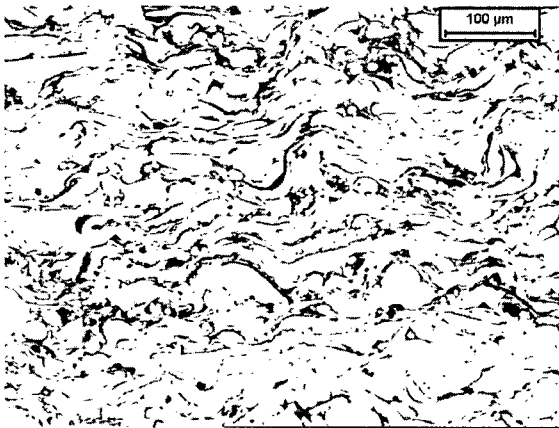


Fig. 2 Cross-sectional microstructure of INCONEL625 coating obtained from the optimized spray condition.

#### 4. 결 론

Arc spray system(TAFA 8830)을 이용하여 인코넬 625 용사 wire에 대한 용사변수를 최적화하

기 위하여 실험계획법에 의해 시험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 코팅피막의 정도에는 아크전류가 가장 중요한 인자로서 전류를 증가시킬수록 정도는 증가하게 되며, 기공도 측면에서 보면, wire 공급압력이 가장 주요한 인자로서 wire 공급압력을 증가할수록 기공도가 감소하게 된다. 또한, 코팅피막의 산화물 함량의 관점에서 보면, 건 이송속도 및 용사거리가 가장 중요한 인자로서, 건 이송속도를 증가하고 용사거리를 감소할수록 코팅피막의 산화물 함량은 감소하게 된다.

2 고온 내식성이 우수한 인코넬 625 재질의 코팅피막에 대한 최적 품질 즉, 높은 정도, 낮은 기공도 및 낮은 산화물 함량을 가지는 코팅피막을 얻기 위해서는 아크전류는 200A, wire공급압력은 90psi, 이송속도는 1000mm/min. 그리고 용사거리 160mm가 인코넬 625에 대한 최적 용사조건이다.