

# 니켈기 경질 용사코팅의 경도 및 마모율에 미치는 공정조건의 영향 Effect of Process Parameters on the Hardness and Wear Rate of Thermal Sprayed Ni-based Coatings

김균택 · 김재동 · 김영식

K. T. Kim, J. D. Kim and Y. S. Kim

(접수일 : 2010. 10. 15, 수정일 : 2010년 11월 11일, 채택확정 : 2010년 11월 11일)

**Key Words** : Ni-based Coating(니켈기 용사코팅), Hardness(경도), Wear Rate(마모율), Process Parameters(공정조건), Design of Experiments(실험계획법), Analysis of Variance(분산분석)

**Abstract** : The various process parameters of thermal spray process affects on quality of Ni-based coatings. Thus, there is need to analyze the effect of process parameters on quality of Ni-based coatings. In this paper, the effects of process parameters on hardness and wear rate of Ni-based coatings were investigated using design of experiments. First, the Ni-based coatings were fabricated according to  $L_9(3^4)$  orthogonal array. The hardness tests and the wear tests were performed on the Ni-based coatings. The analysis of variance for the hardness and wear rate were carried out. As a results, the acetylene gas flow and the powder feed rate were identified as main factors effected on the hardness and the oxygen gas flow and the acetylene gas flow were identified as main factors effected on the wear rate. The full factorial experiments design with different levels was applied for investigation of effect of these main factors.

## 1. 서 론

대부분의 재료들은 그 표면이 사용 환경에 노출되어 있기 때문에 재료의 표면특성은 매우 중요하다. 최근 각종 공업기술의 발달과 함께 탁월한 재료의 표면특성이 요구되고 있고, 이러한 요구에 부응하여 전자빔 표면개질법, PVD, 스퍼터링 증착법 및 용사법 등의 표면개질기술들이 개발·적용되고 있다<sup>1-4)</sup>. 그 중 용사법은 기재(substrate)에 대한 열영향이 적고, 다양한 용사코팅재료를 사용할 수 있으며, 기재의 형상이나 크기에 제약이 적어 여러 산업분야에 걸쳐 폭넓게 적용되고 있다<sup>5)</sup>.

니켈기 용사코팅은 뛰어난 내마모성, 내식성 및 내열성을 가지고 있으며 주로 산소와 연료가스에 의한 화염을 열원으로 하는 프레임(flame) 용사법으로 제조되고 있다. 프레임 용사법에서는 산소유량, 아세틸렌유량, 분말송급률 및 용사거리와 같은 공정

조건들이 용사코팅의 품질에 영향을 미친다. 따라서 산업현장에서 프레임 용사법을 적용할 때에는 이러한 공정조건들이 용사코팅의 품질에 미치는 영향을 분석하여 공정조건들을 제어해야 할 필요가 있다. 그러나 대부분의 산업현장에서는 용사코팅의 품질에 미치는 영향에 대한 정량적인 분석이 없이 현장 작업자의 경험과 시행착오에 의해서 공정조건을 결정하고 있다. 이러한 결과 용사코팅의 불량률이 자주 발생하고, 신뢰성이 떨어지는 등 생산성과 내구성에 많은 문제점을 안고 있다<sup>6)</sup>. 이러한 문제를 해결하기 위하여 용사코팅의 품질에 영향을 미치는 공정조건들의 영향에 대한 연구가 최근 활발히 수행되고 있다<sup>6-8)</sup>.

실험계획법(design of experiment)은 각각의 인자가 특성치에 미치는 영향을 분석할 수 있도록 인자와 수준을 적절히 배치하여 실험을 설계하는 방법이다. 이 중 직교배열표(orthogonal array)를 이용한 실험계획법은 최소한의 실험횟수로서 각각의 인자가 특성치에 미치는 영향에 대해 분석할 수 있으며, 용이하게 최적조건을 도출할 수 있어 산업 현장과 공학 및 과학 실험 분야 등에 널리 적용되고 있다<sup>7-10)</sup>.

김영식(교신저자) : 부경대학교 기계자동차공학과  
E-mail : yeongsik@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6155  
김재동 : 경상대학교 해양산업연구소  
김균택 : 부경대학교 대학원

Table 1 Control factors and their levels

Factors	Symbol	First level	Second level	Third level
Oxygen gas flow (ft <sup>3</sup> /h)	A	35	44	53
Acetylene gas flow (ft <sup>3</sup> /h)	B	44	55	66
Powder feed rate (lb/min)	C	24	30	36
Spray distance (mm)	D	160	200	240

국내에서 이러한 실험계획법을 적용하여 주요인자들의 영향을 분석한 연구는 그리 많지 않다. 저자들은 지난 연구에서 실험계획법을 적용하여 니켈기 경질 용사코팅의 공정조건이 용사코팅의 마모거동에 미치는 영향을 분석하였다<sup>11)</sup>.

본 연구는 지난 연구에 이어 니켈기 경질 용사코팅의 경도 및 마모율에 미치는 주요인자들의 영향을 분석한 것이다. 먼저 직교배열표를 이용하여 실험계획을 세우고 실험의 결과를 바탕으로 분산분석을 수행하여 니켈기 경질 용사코팅의 경도 및 마모율에 영향을 미치는 주요인자들을 도출하고, 도출된 주요인자들에 대하여 전체실험을 실시하여 주요인자의 수준에 따른 영향을 분석하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 실험계획 및 시험편 제작

본 연구에서는 용사코팅층의 품질에 영향을 미치는 인자로서 산소유량, 아세틸렌유량, 분말송급률 및 용사거리의 4가지를 선정하고, 인자의 수준을 다음과 같이 각각 3가지로 하였다. 산소유량은 35, 44 및 53 ft<sup>3</sup>/h, 아세틸렌유량은 44, 55 및 66 ft<sup>3</sup>/h, 분말송급률은 24, 30 및 36 lb/min, 용사거리는 160, 200 및 240 mm로 각각 20%의 간격을 두었다. 실험계획에 사용한 인자와 수준을 Table 1에 정리하였다. Table 2는 본 연구에서 사용된 4인자 3수준계의 L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>) 직교배열표이다. 이 직교배열표에 제시된 조건에 따라 경도측정용 시험편과 마모시험용 시험편을 다음과 같이 제작하였다.

코팅재료는 Sulzer Metco Co.의 니켈기 합금 분말인 16C-NS로서 그 조성은 Table 3과 같다. 기재는 5 mm 두께의 SS400 강판을 사용하였다. 경도

시험용으로는 20 mm × 40 mm, 마모시험용으로는 40 mm × 40 mm를 사용하였다. 용사 전 기재의 표면을 #23 알루미나 그릿트로 블라스트 처리를 하고 아세톤으로 초음파 세척을 하였다. 이와 같이 전처리된 기재의 표면에 Sulzer Metco Co.의 flame spray system(6P-II)을 사용하여 전술한 실험계획에 따라 경도시험용 시험편 1조와 마모시험용 시험편 3조를 제작하였다.

직교배열표에 따라 제작된 시험편의 특성치에 대해 분산분석을 실시하고 각각의 특성치에 대하여 큰 영향을 미치는 인자 2개를 선정하였다. 선정된 인자에 대해 전술한 3가지 수준을 적용하여 전체실험을 계획하였고, 그에 따라 경도시험용 시험편 1조와 마모시험용 시험편 3조를 제작하였다.

Table 2 L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>) orthogonal array

Experiment al No.	Factors			
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

### 2.2 특성치 및 분산분석

본 연구에서는 니켈기 경질 용사코팅의 특성치로서 경도와 마모율을 선택하였다. 제작된 시험편의

Table 3 Chemical compositions of Ni-based powder used(wt %)

Ni	Cr	Si	B	Cu	Mo	Fe	C
53.68	14.47	6.70	17.40	2.22	1.47	2.11	1.96

Table 4 Measured values of hardness and volumetric wear rate

Experimental No.	Factors				Hardness (Hv)	Volumetric wear rate (mm <sup>3</sup> /m)
	A	B	C	D		
1	1	1	1	1	627.7	4.52E-06
2	1	2	2	2	792.3	2.49E-06
3	1	3	3	3	771.5	1.59E-06
4	2	1	2	3	666.5	2.91E-06
5	2	2	3	1	801.6	5.31E-07
6	2	3	1	2	760.8	2.89E-06
7	3	1	3	2	753.9	8.77E-07
8	3	2	1	3	686.8	2.00E-07
9	3	3	2	1	795.2	2.14E-07

단면에 대해 마이크로 비커스 경도시험기(Akashi, MVK-H1)를 사용하여 경도를 측정하였다. 하중 500 g, 압입시간 10 sec의 시험조건으로 한 시험편 당 15회 경도를 측정하여 산포가 큰 5개의 측정치를 제외한 10개의 측정치에 대해 그 평균값을 취하였다. 제작된 시험편의 표면을 2000번 사포를 사용하여 조도를 일정하게 한 후 ball-on-disk 방식의 건식마모시험기(Neoplus, MPW-110)를 사용하여 각 조건당 3회의 마모시험을 실시하였다. 미끄럼 속도는 0.1 m/s, 하중은 20 N으로 하고, 상대마모재는 8 mm 직경의 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ball을 사용하였다. 마모거리는 1000 m로 하였고, 마모시험이 끝난 후 마모량을 측정하여 마모율을 계산하였다.

위의 실험에서 측정된 특성치를 바탕으로 분산분석을 실시하였다. 먼저 각각의 인자들의 특성치의 제곱합(S : sum of squares)을 구하고 제곱합이 가

장 적은 인자항을 오차항(error)으로 풀링(pulling)하였다. 각 인자들의 제곱합을 오차항의 자유도( $\phi$  : degree of freedom)로 나누어 각 인자들의 분산(V : variation)을 구하고 각 인자들의 분산을 오차항의 분산으로 나누어 분산비( $F_0$  : variance ratio)를 구하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 분산분석

직교배열표에 따라 제작된 니켈기 용사코팅의 경도와 마모율을 정리한 결과를 Table 4에 나타내었고 이를 바탕으로 분산분석을 실시한 결과를 Table 5와 6에 각각 나타내었다.

Table 5에 나타낸 바와 같이 산소유량의 제곱합(S)이 가장 작으므로 산소유량(A)을 오차항으로 하

Table 5 Results of the analysis of variance for hardness

Symbol	S	$\phi$	V	$F_0$	Contributions (%)
B	14924.9072	2	7462.4536	39.1569	47.16
C	11174.7330	2	5587.3665	29.3179	35.31
D	5547.4522	2	2773.7261	14.5543	17.53
Error(A)	381.1568	2	190.5784	1.00	1.20
Total	32028.2492	8			

Table 6 Results of the analysis of variance for volumetric wear rate

Symbol	S	$\phi$	V	$F_0$	Contributions (%)
A	9.32E-12	2	4.66E-12	22.23	52.16
B	4.55E-12	2	2.28E-12	10.87	25.50
D	3.57E-12	2	1.79E-12	8.52	19.99
Error(C)	4.19E-13	2	2.10E-13	1.00	2.35
Total	1.79E-11	8			

여 분산비를 계산하였다. 그 결과 경도에 대해 가장 큰 영향을 미치는 인자는 아세틸렌유량(B)이고, 나머지 인자들은 순서대로 분말송급률(C)과 용사거리(D)인 것으로 나타났다. Table 6에서는 분말송급률(C)의 제곱합이 가장 작다. 따라서 분말송급률을 오차항으로 하여 분산비를 계산하면, 마모율에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 산소유량(A)이고, 나머지 인자들은 순서대로 아세틸렌유량(B)과 용사거리(D)가 된다.

이상의 분산분석 결과로부터 경도에 큰 영향을 미치는 주요인자들은 아세틸렌유량과 분말송급률이 고, 마모율의 경우에는 산소유량과 아세틸렌유량인 것을 알 수 있다. 아세틸렌유량은 경도와 마모율 모두에 대해 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

### 3.2 주요인자들의 영향분석

위의 분산분석 결과로부터 도출한 주요인자들이 각각의 특성치에 미치는 영향을 파악하기 위해 주

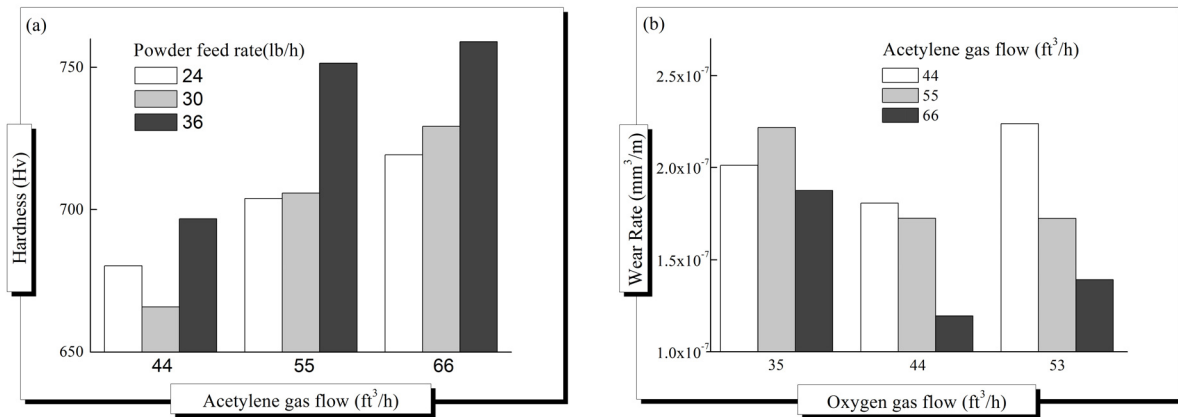


Fig. 1 Variation in hardness(a) and volumetric wear rate(b) of the Ni-based coatings according to main factors

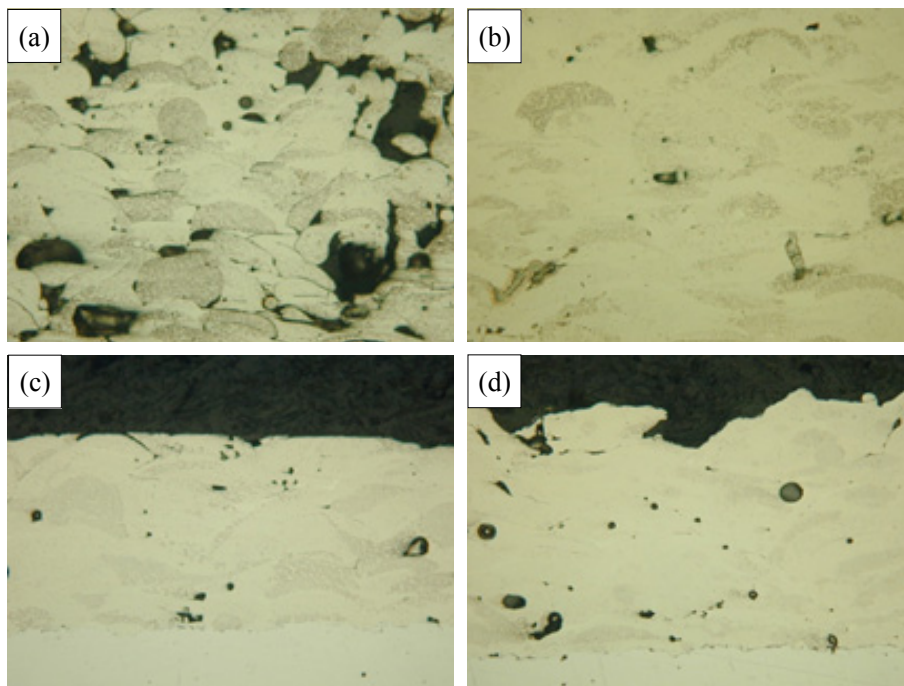


Fig. 2 Microstructures of Ni-based alloy coatings : (a) Acetylene gas flow 44 ft³/h, powder feed rate 30 lb/h, (b) Acetylene gas flow 66 ft³/h, powder feed rate 36 lb/h, (c) oxygen gas flow 35 ft³/h, acetylene gas flow 55 ft³/h, (d) oxygen gas flow 44 ft³/h, acetylene gas flow 66 ft³/h

요인자들을 제외한 나머지 인자들은 각 인자의 수준별 평균값을 통해 도출한 최적조건으로 고정하고 주요인자들을 Table 1에 나타낸 3가지 수준으로 하여 이에 대한 전체실험을 실시하였다.

Fig. 1은 주요인자에 대한 전체실험에서 측정된 정도 및 마모율을 나타낸 그래프이다. Fig. 1(a)에서 볼 수 있듯이 아세틸렌유량과 분말송급량이 증가함에 따라 정도가 증가한다. 특히 아세틸렌유량이 55 ft<sup>3</sup>/h 이상인 경우, 그리고 분말송급량이 36 lb/h인 경우 정도가 크게 증가한다. 이러한 정도의 변화는 용사코팅층의 미세구조로 설명될 수 있다. Fig. 2(a)와 (b)는 각각 주요인자들에 대한 전체실험에서 정도가 가장 낮은 경우(아세틸렌유량 44 ft<sup>3</sup>/h, 분말송급률 30 lb/h)와 가장 높은 경우(아세틸렌유량 66 ft<sup>3</sup>/h, 분말송급률 36 lb/h)의 용사코팅층 단면의 미세구조이다. 정도가 낮은 경우 스플랫(splat)의 경계가 뚜렷하고 둥근 형태를 보이고 있는데, 이것은 용사코팅 공정에서 코팅입자가 충분히 용융되지 못한 채로 적층된 결과이다. 이 경우 스플랫 간의 결합력이 매우 약하고, 코팅층 내부의 기공이나 스플랫간의 틈 등으로 밀도가 낮기 때문에 낮은 정도를 나타낸다. 반면 정도가 높은 경우 스플랫간의 계면은 거의 관찰되지 않으며 스플랫의 편평상태가 양호한 것을 볼 수 있다. 즉, 충분히 잘 용융된 입자가 매우 치밀하게 적층되어 코팅층의 밀도가 높기 때문에 높은 정도를 나타낸다. 아세틸렌유량과 분말송급률이 증가할수록 코팅층의 미세구조가 양호해진다.

Fig. 1(b)에서 알 수 있는 바와 같이 아세틸렌유량이 일정한 경우 산소유량의 증가에 따라 마모율은 감소했다가 다시 증가한다. 산소유량이 일정한 경우에는 아세틸렌유량이 증가함에 따라 마모율이 감소하는 경향을 보인다. Fig. 2(c)와 (d)는 각각 마모율이 가장 높은 경우(산소유량 35 ft<sup>3</sup>/h, 아세틸렌유량 55 ft<sup>3</sup>/h)와 가장 낮은 경우(산소유량 44ft<sup>3</sup>/h, 아세틸렌유량 66 ft<sup>3</sup>/h)의 용사코팅층의 미세구조이다. 마모율이 낮은 경우가 높은 경우보다 스플랫의 편평상태가 양호하고 조직이 치밀한 것을 볼 수 있다. 산소유량과 아세틸렌유량이 증가할수록 편평상태가 양호해진다.

아세틸렌유량이 일정한 경우 산소유량이 증가함에 따라 마모율은 감소했다가 다시 증가하는데, 이것은 저자들의 이전의 연구에서 밝힌 바와 같이 산소유량과 아세틸렌유량의 증가에 따라 코팅층의 미세구조는 양호해지나 코팅층의 마모거동이 응착마

모에서 연삭마모로 바뀔에 따라 연삭마모에 의한 마모량이 증가되었기 때문이다<sup>11)</sup>.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 직교배열표를 이용하여 실험계획을 세우고 실험의 결과를 바탕으로 분산분석을 수행하여 니켈기 경질 용사코팅의 정도 및 마모율에 영향을 미치는 주요인자들을 도출하였고, 도출된 주요인자들에 대하여 전체실험을 실시하여 주요인자의 수준에 따른 영향을 분석하였다. 주요한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 니켈기 용사코팅의 정도에 영향을 미치는 주요인자는 아세틸렌유량과 분말송급률이며, 마모율에 영향을 미치는 주요인자는 산소유량과 아세틸렌유량임을 확인하였다.
- 2) 주요인자들의 수준이 증가함에 따라 용사코팅층의 미세조직이 치밀해지고, 이에 따라 높은 정도와 낮은 마모율을 나타내었다.
- 3) 정도는 용사코팅층의 미세조직이 치밀해짐에 따라 증가하지만, 마모율은 용사코팅층의 미세조직보다 마모거동에 더 큰 영향을 받는다는 사실을 확인하였다.

#### 후 기

본 과제는 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 광역경제권 선도산업 인재양성사업의 연구결과입니다.

#### 참고 문헌

1. V. P. Rotshtein et al., 2004, "Surface modification and alloying of metallic materials with low-energy high-current electron beams", Surface and Coatings Technology, Vol. 180-181, pp. 377~381.
2. M. Åstrand et al., 2004, "PVD- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-coated cemented carbide cutting tools", Surface and Coatings Technology, Vol. 188-189, pp. 186~192.
3. L. A. Dobrzański, K. Lukaszewicz, 2004, "Erosion resistance and tribological properties of coatings deposited by reactive magnetron

- sputtering method onto the brass substrate”  
Journal of Materials Processing Technology,  
Vol. 157-158, pp. 317~323.
4. J. F. Li, L. Li and F. H. Stott, 2004,  
“Statistical approach for minimizing cracks in  
combined flame spraying and laser surface  
modification of refractory ceramics” Journal of  
the European Ceramic Society, Vol. 563,  
Issue2, pp. 249~255.
  5. K. Ghosh, T. Troczynski and A. C. D.  
Chaklader, 1998, “Aluminum-silicon carbide  
coating by plasma spraying”, J. of Thermal  
Spray Technology, No. 7, pp. 78~86.
  6. Kavian Cooke et al., 2007, “Optimisation of  
the electric wire arc-spraying process for  
improved wear resistance of sugar mill roller  
shells”, Surface & Coatings Technology, Vol.  
202, pp. 185~188.
  7. W. Fang et al., 2008, “Processing optimization,  
surface properties and wear behavior of  
HVOF spraying WC - CrC - Ni coating”, J.  
Mater. Process. Technol., Vol. 209, pp. 3561~  
3567.
  8. Christel Pierlot et al., 2008, “Design of  
experiments in thermal spraying: A review”,  
Surface & Coatings Technology, Vol. 202, pp.  
4483~4490.
  9. R. L. Mason, R. F. Gunst, J. L. Hess, 2003,  
“Statistical design and analysis of experiments  
with applications to engineering and science”,  
A John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New  
Jersey, pp. 109.
  10. J. Paulo Davim, 2003, “Design of optimisation  
of cutting parameters for turning metal matrix  
composites based on the orthogonal arrays”, J.  
Mater. Process. Technol., Vol. 132, pp. 340~  
344.
  11. KyunTak Kim, YeongSik Kim, 2010, “Effects  
of process parameters on the wear behavior of  
thermally sprayed Ni-based hard coatings”,  
Journal of the KSTLE, Vol. 26, No. 3, pp. 15  
7~161.