

다구찌 기법에 의한 코발트기 자용성합금 용사코팅의 최적공정 설계

Process Optimization for Co-based Self-flux Alloy Coating by Taguchi Method

이재홍* · 김영식**†

Jae-Hong Lee* and Yeong-Sik Kim**†

(접수일 : 2013년 02월 25일, 수정일 : 2013년 11월 06일, 채택확정 : 2013년 11월 08일)

Abstract: This paper describes process optimization for thermal-sprayed Co-based self-flux alloy coating by Taguchi method. Co-based self-flux alloy coatings were fabricated according to $L_9(3^4)$ orthogonal array using flame spray process. Hardness test and wear test were performed, the results were analyzed by analysis of variance(ANOVA) considering a multi response signal to noise ratio(MRSN). From the results of ANOVA, the optimal combination of the flame spray parameters on Co-based self-flux alloy coating could be predicted. The calculated hardness and wear rate of the coatings by ANOVA were found to be close to that of confirmation experimental result.

Key Words : Co-based Self-flux Coating(코발트기 자용성합금 코팅), Process Optimization(최적공정설계), Taguchi Method(다구찌 기법), Analysis of Variance(분산분석), MRSN(다중특성치), Hardness(경도), Wear Rate(마모율)

1. 서 론

화염 용사법(flame spray)은 산소-아세틸렌 화염을 열원으로 사용하는 비교적 간단한 구조를 가지고 있고, 또한 운용비용이 저렴하여 여러 산업 현장에서 널리 사용되고 있다. 특히 화염 용사법을 이용한 자용성합금 코팅은 기계구조물이나 그 부재에 대한 내마모성, 내부식성을 향상시키기 위한 용도로 많이 사용된다.

화염 용사법의 코팅층에 영향을 미치는 요인은 산소 유량, 아세틸렌 유량, 용사 거리, 분말 송급률, 온도, 습도, 용사각, 용사 속도 등으로 다양하

다.¹⁾ 그러나 실제 산업현장에서는 이러한 다양한 요인들에 대한 정량적인 분석 없이 경험과 시행착오로 공정조건을 결정하고 있어, 코팅의 품질이 일정하지 못하며 신뢰성에 대한 문제점이 발생한다. 따라서 이러한 문제점을 해결하고 용사법의 적용을 확대시키기 위해서는 용사코팅에 영향을 미치는 요인들의 정량적인 분석과 함께 공정을 최적화할 필요가 있다. 지금까지 이루어진 용사코팅 공정의 최적화에 대한 연구는 대부분 니켈기 자용성합금에 관한 것으로,²⁻⁶⁾ 코발트기 자용성합금에 대한 연구^{7,8)}는 그다지 이루어지지 않았다.

다구찌 기법(Taguchi method)은 품질특성치에

**† 김영식(교신저자) : 부경대학교 기계자동차공학과
E-mail : Yeongsik@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6155
*이재홍 : 부경대학교 대학원

**† Yeong-Sik Kim(corresponding author) : Department of Mechanical & Automotive Engineering, Pukyong National University
E-mail : Yeongsik@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6155
*Jae-Hong Lee : Graduate School, Pukyong National University

따른 손실함수(loss function)와 S/N비(signal-to-noise ratio)의 도입으로 산포를 줄임으로써 품질의 균일화가 가능하며, 직교배열표(orthogonal array)를 사용하고 있어 공정최적화를 위한 실험 횟수를 크게 줄일 수 있다. 이러한 장점으로 인해 산업현장에서는 품질의 균일화와 공정의 최적화를 위해 이 다구찌 기법을 적극적으로 활용하고 있다. 다구찌 기법을 적용할 경우 한가지 특성치를 고려하는 것이 일반적이지만, 실제 사용 환경이나 목적에 따라서는 2가지 이상의 특성치를 모두 고려해야 할 필요가 있다.

본 연구에서는 코발트기 자용성합금 코팅의 공정최적화를 위해 경도 및 마모율의 다중특성치에 대한 가중치를 고려하여 통계적 분석을 실시하였다. 이를 토대로 사용 환경이나 목적에 따른 코발트기 자용성합금 코팅의 최적공정 조건을 도출하고, 코팅의 품질에 영향을 미치는 인자들의 기여도를 분석하였다.

2. 실험방법

2.1 실험계획 및 시험편

용사코팅의 품질에 영향을 미치는 여러 인자들 중 본 연구에서는 산소 유량, 아세틸렌 유량, 분말 공급률 및 용사 거리의 4가지를 선정하고 각각의 인자에 대해 3가지 수준을 적용시켰다. 산소 유량은 35, 44 및 53 ft³/h, 아세틸렌 유량은 44, 55 및 66 ft³/h, 분말 공급률은 24, 30 및 36 lb/min, 용사

거리는 160, 200 및 240 mm로 하여 수준별로 각각 20%의 간격을 두었다. 4인자 3수준의 L₉(3⁴) 직교배열표에 따라 시험편을 제작하였다.

시험편 제작에 사용한 용사장치는 Sulzer Metco Co.의 flame spray system(6P-II)이고 용사재료는 Sulzer Metco Co.의 코발트기 자용성 합금 분말인 18C로서 그 화학적 조성은 Table 1과 같다. 기체는 일반 구조용강인 SS400 강관을 40×40 mm로 가공하여 사용하였고 용사전 기체의 표면을 #23 알루미늄 그릿트를 이용하여 블라스트처리를 하고 아세톤에서 초음파 세척을 하였다.

2.2 특성치 측정

본 연구에서는 코발트기 자용성합금 코팅의 경도와 마모율 2가지를 특성치로 선정하였다. 경도는 코팅의 단면을 절단하여 기체의 표면으로부터 100 μm 떨어진 위치의 값을 마이크로 비커스 경도시험기(Akashi, MVK-H1)를 사용하여 측정하였다. 작용하중 100 g, 압입시간 10 sec의 시험조건으로 10회 측정 후 그 평균값을 취하였다.

마모율을 구하기 위한 마모시험은 ball-on-disk 방식의 건식마모시험기(Neoplus, MPW-100)를 사용하였다. 코팅된 시험편을 #2000 사포를 이용하여 표면 조도를 일정하게 한 후 마모시험을 실시하였다. 마모시험 조건으로 하중 20 N, 미끄럼 속도 0.1 m/s, 마모거리 1000 m로 하였다. 상대마모재료는 Al₂O₃ ball을 사용하였다. 마모율은 마모거리 당 무게손실률로 구하였다.

Table 1 Chemical compositions of Co-based powder used(wt %)

Co	Ni	Cr	Mo	Si	B	Fe	C
Bal.	27	18	6	3.5	3	2.5	0.2

Table 2 Control factors and their levels

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

3. 결과 및 고찰

3.1 경도 혹은 마모율을 특성치로한 경우의 공정최적화

코발트기 자용성합금 코팅 시험편의 경도와 마모율의 S/N비를 Table 3에 나타내었다. Table 4 및 5는 각각 경도 및 마모율에 대한 분산분석 결과를 나타낸 것이다. 분산분석의 결과 코발트기 자용성합금 코팅의 경도에 영향을 많이 미치는 인자는 용사거리(76.0%)와 산소유량(22.3%)임을 알 수 있다. Fig. 1은 각각의 인자 및 수준별 경도의 S/N비를 나타낸 것으로, 이 그래프에서 가장 높은 값들의 조합이 최적공정 조건이다. 즉, A₃B₃C₂D₃가 본 연구에서 구해진 최적공정 조건으로 산소 유량 53 ft³/h, 아세틸렌 유량 66 ft³/h, 분말 송급률 30 lb/min, 용사 거리 240 mm이다. 경도를 특성치로한 경우의 최적조건의 S/N비 추정구간은 신뢰도 95% 수준에서 5.85±0.04이다.

분산분석의 결과로 얻어진 최적조건 A₃B₃C₂D₃가 직교배열표에 포함되어 있지 않으므로 확인을

위한 검증실험을 실시하였고, 그 결과 얻어진 S/N비는 5.86이었다. 이 값은 분산분석을 통해 얻은 추정구간 5.85±0.04를 잘 충족시키며, 직교배열표에 나타나 있는 어떠한 S/N비보다 높은 값을 나타내고 있다.

한편 마모율에 영향을 미치는 유효인자는 분말 송급률(66.4%)로 나타났다. Fig. 2는 각각의 인자 및 수준별 마모율을 나타낸 것이다. 마모율을 특성치로 했을 경우의 최적조건은 A₃B₂C₃D₃로 산소 유량 53 ft³/h, 아세틸렌 유량 55 ft³/h, 분말 송급률 36 lb/min, 용사 거리 240 mm이다. 마모율을 특성치로 한 경우의 최적조건에서의 S/N비 추정구간은 신뢰도 95% 수준에서 9.25±0.09이다.

분산분석의 결과로 얻어진 최적조건 A₃B₂C₃D₃가 직교배열표에 포함되어 있지 않으므로 역시 확인을 위한 검증 실험을 실시하였고, 그 결과 얻어진 S/N비는 9.30이었다. 이 값 또한 분산분석을 통해 얻은 추정구간 9.25±0.09를 잘 충족시키며, 직교배열표에 나타나 있는 어떠한 S/N비보다 높은 값을 나타내고 있다.

Table 3 Experimental lay out and results

Experimental No.	Factors				S/N Ratio of Hardness	S/N Ratio of Wear Rate
	A	B	C	D		
1	1	1	1	1	5.7128	9.1373
2	1	2	2	2	5.7810	9.0663
3	1	3	3	3	5.8317	9.2840
4	2	1	2	3	5.7923	9.0752
5	2	2	3	1	5.6481	9.2432
6	2	3	1	2	5.7499	9.0812
7	3	1	3	2	5.8017	9.2217
8	3	2	1	3	5.8480	9.2505
9	3	3	2	1	5.7396	9.1309

Table 4 Results of the analysis of variance on hardness

Symbol	D.O.F	S	V	F ₀	Contributions (%)
A	2	6.88E-3	3.44E-3	25.24**	22.3
D	2	2.34E-2	1.17E-2	86.13**	76.0
Error	4	5.45E-4	1.36E-4		
Total	8	3.09E-2			

Table 5 Results of the analysis of variance on wear rate

Symbol	D.O.F	S	V	F_0	Contributions (%)
A	2	6.94E-3	3.47E-3	2.63	12.0
C	2	3.83E-2	1.91E-2	14.50*	66.4
D	2	9.76E-3	4.88E-3	3.70	16.9
Error	2	2.64E-4	1.32E-3		
Total	8	5.76E-2			

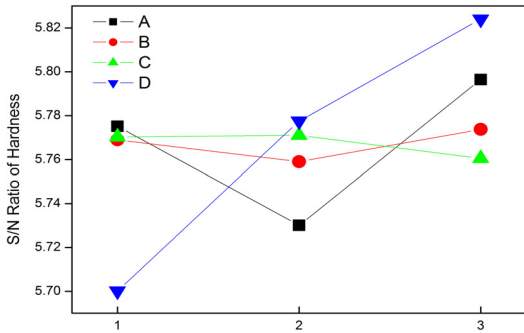


Fig. 1 Interaction plots for S/N ratio of hardness

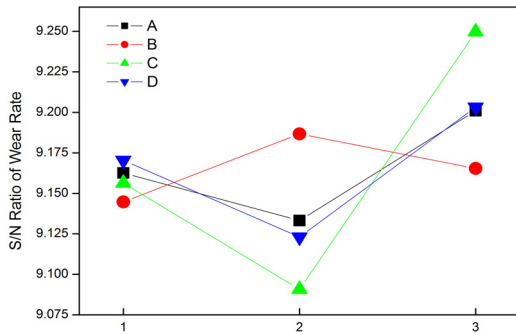


Fig. 2 Interaction plots for S/N ratio of wear rate

3.2 다중특성치를 고려한 경우의 공정최적화

마모율과 경도 2가지 특성치 모두를 고려한 경우의 최적조건을 도출하기 위해 실험에서 얻어진 결과에 손실함수를 적용하여 정규화하고, 각각의 특성치에 가중치를 적용한다. 이 값은 다음의 식으로 계산되었다.⁹⁻¹⁰⁾

$$TL_j = \sum_{i=1}^m w_i S_{ij} \quad (1)$$

여기서, TL_j 는 직교배열표상의 실험번호 j 의 가 중치를 적용한 정규화된 특성치, m 은 선정한 특성치의 수, w_i 는 특성치별 가중치, S_{ij} 는 직교배열표상의 실험번호 j 의 정규화된 손실함수이다. 이 TL_j 을 다음의 식을 이용하여 S/N비로 변환하여 분산분석을 실시한다.

$$MRSN = -10 \log(TL_j) \quad (2)$$

여기서, $MRSN$ (multi response signal to noise ratio)은 다중특성치를 고려한 S/N비이다.

Table 6은 경도와 마모율의 가중치를 각각 0.5로 했을 경우의 손실함수와 $MRSN$ 을 정리하여 나타낸 것이고, Table 7은 그 분산분석의 결과를 나타낸 것이다. 분산분석의 결과 용사거리, 산소 유량 및 분말 송급률이 유의한 인자로 밝혀졌다. 전술한 바와 같이 경도를 특성치로 한 경우의 유의인자는 산소 유량과 용사 거리, 마모율을 특성치로 한 경우의 유의인자는 분말 송급률이었다. 이 두 특성치의 가중치를 각각 0.5로 동일하게 두었을 경우에는 하나의 특성치만을 고려했을 경우의 유의인자들이 모두 유의한 결과를 나타내고 있다.

Fig 3에서 각 인자들의 최고값의 조합이 최적조건이다. 따라서 마모율과 경도에 각각 0.5의 가중치를 준 경우의 최적조건은 $A_3B_3C_3D_3$, 즉 산소 유량 53 ft^3/h , 아세틸렌 유량 66 ft^3/h , 분말 송급률 36 lb/min , 용사 거리 240 mm 이다. 이 조건은 Table 3에 포함되어 있지 않으므로 이 조건에 따라 확인을 위한 검증실험을 실시하였다. 검증실험의 결과 경도와 마모율에 대한 S/N비는 각각 5.8421, 9.1869이었다. 이 값들은 경도 또는 마모율

Table 6 MRSN ratio $w_1 \text{Hardness} = 0.5, w_2 \text{Wearrate} = 0.5$

Experimental No.	Loss function		Normalization		Weighting		TL	MRSN
	Hardness	Wear rate	Hardness	Wear rate	Hardness	Wear rate		
1	1.94E-06	7.29E-10	1.1231	1.0496	0.5615	0.5248	1.0863	-0.3597
2	1.66E-06	8.58E-10	0.9598	1.2361	0.4799	0.6180	1.0980	-0.4058
3	1.47E-06	5.20E-10	0.8541	0.7485	0.4270	0.3742	0.8013	0.9622
4	1.61E-06	8.41E-10	0.9351	1.2109	0.4676	0.6054	1.0730	-0.3060
5	2.25E-06	5.71E-10	1.3035	0.8224	0.6517	0.4112	1.0630	-0.2652
6	1.78E-06	8.29E-10	1.0309	1.1942	0.5155	0.5971	1.1126	-0.4634
7	1.58E-06	6.00E-10	0.9152	0.8643	0.4576	0.4321	0.8897	0.5075
8	1.42E-06	5.62E-10	0.8226	0.8087	0.4113	0.4044	0.8157	0.8848
9	1.82E-06	7.40E-10	1.0557	1.0652	0.5278	0.5326	1.0605	-0.2549

Table 7 Results of the analysis of variance on MRSN

Symbol	D.O.F	S	V	F_0	Contributions (%)
A	2	0.7909	0.3955	23.64**	29.4
C	2	0.7864	0.3932	23.51**	29.2
D	2	1.0832	0.5416	32.38**	40.2
Error	2	0.0334	0.0167		
Total	8	2.6940			

중 어느 하나의 특성치에 대한 최적조건으로 코팅 되었을 때보다는 낮은 값을 나타내지만, Table 3에 나타난 경도와 마모율에 대한 S/N비와 비교해보면 경도와 마모율에서 모두 평균 이상의 값을 나타내고 있다. 특히 경도는 최적조건에서의 값과 거의 비슷한 값을 나타내고 있다.

Table 8에 가중치에 따른 최적조건과 각 인자들의 기여도를 나타내었다. 가중치의 변화에 따라서 분말 송급률과 용사 거리는 기여도의 변화가 크지만 산소 유량과 아세틸렌 유량은 그다지 큰 변화가 없다. 마모율의 가중치가 높아짐에 따라 용사 거리의 기여도는 감소하고 대신 분말 송급률의 기여도가 증가한다.

전술한 바와 같이 본 연구에서는 코발트기 자용성합금 코팅에 있어서 경도와 마모율의 다중특성치에 대한 분산분석을 통해 최적공정 조건을 도출하였고, 각 인자들의 기여도를 분석하였다. 이러한 결과를 토대로 실제 산업현장에서 사용환경이나

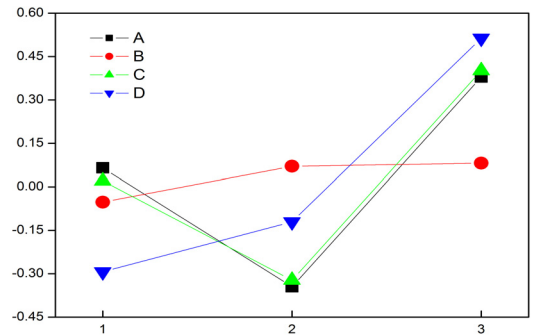


Fig. 3 Interaction plots for MRSN

목적에 따라 여러 특성치를 고려한 공정최적화가 가능할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 코발트기 자용성합금 코팅의 공

Table 8 Effect of weighting factor (w_1 Hardness, w_2 Wearrate)

Experimental No.	w_1	w_2	Optimum level of factors				Percentage contribution of factors			
			A	B	C	D	A	B	C	D
1	1	0	3	3	2	3	22.3	1.1	0.7	76.0
2	0.8	0.2	3	3	3	3	29.3	0.7	3.0	67.0
3	0.6	0.4	3	3	3	3	31.1	0.8	18.4	49.6
4	0.5	0.5	3	3	3	3	29.4	1.2	29.2	40.2
5	0.4	0.6	3	2	3	3	26.3	1.8	39.9	32.0
6	0.2	0.8	3	2	3	3	18.7	3.2	56.8	21.3
7	0	1	3	2	3	3	12.0	4.6	66.4	16.9

정최적화를 위해 경도 및 마모율의 다중특성치에 대한 가중치를 고려하여 통계적 분석을 실시하였다. 주요한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 코발트기 자유성합금 용사코팅의 경도에 영향을 미치는 인자는 산소 유량과 용사 거리이며, 마모율에 영향을 미치는 인자는 분말 송급률이다.

2) 경도를 특성치로 했을 경우의 최적공정조건은 산소 유량 53 ft³/h, 아세틸렌 유량 66 ft³/h, 분말 송급률 30 lb/min, 용사 거리 240 mm이고, 마모율을 특성치로 했을 경우 코팅의 최적공정조건은 산소 유량 53 ft³/h, 아세틸렌 유량 55 ft³/h, 분말 송급률 36 lb/min, 용사 거리 240 mm이다.

3) 경도와 마모율의 가중치를 각각 0.5로 한 다중특성치를 고려할 경우의 최적조건 코팅은 하나의 특성치만을 고려했을 때의 최적조건 코팅보다 낮은 S/N비를 나타내지만, 경도와 마모율 모두 평균 이상의 S/N비를 나타내는 양호한 코팅을 얻을 수 있다.

4) 가중치를 고려한 다중특성치에 대한 통계적 분석으로 사용환경이나 목적에 따른 최적공정조건 의 도출 및 각 인자의 기여도의 영향을 쉽게 분석 할 수 있다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2013년: C-D-2013-04734)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. J. R. Davis et al., 2004, "Handbook of Thermal Spray Technology", ASM International.
2. H. Akebono, J. Komotori and M. Shimizu, 2008, "Effect of coating microstructure on the fatigue properties of steel thermally sprayed with Ni-based self-fluxing alloy", International Journal of Fatigue, Vol. 30, pp. 814-821.
3. H. J. Kim, S. Y. Hwang, C. H. Lee and P. Juvanon, 2003, "Assessment of wear performance of flame sprayed and fused Ni-based coatings", Journal of Surface and Coatings Technology, Vol. 172, pp. 262-269.
4. H. Chen, C. Xu, J. Qu, I. M. Hutchings, P. H. Shipway and J. Liu, 2005, " Sliding wear behaviour of laser clad coatings based upon a nickel-based self-fluxing alloy co-deposited with conventional and nanostructured tungsten carbide-cobalt hardmetals", Journal of Wear, Vol. 259, pp. 801-806.
5. K. T. Kim and Y. S. Kim, 2007, "Effects of Counterpart Materials on Wear Behavior of Thermally Sprayed Ni-based Self-flux Alloy Coatings", Journal of The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 11 No. 4, pp. 92-97.
6. K. T. Kim and Y. S. Kim, 2010, "Effects of

Process Parameters on the Behavior of Thermally Sprayed Ni-based Hard Coatings", Journal of the KSTLE Vol. 26, No. 3, pp. 157-161.

7. J. H. Chang, J. M. Chou, R. I. Hsieh and J. L. Lee, 2009, "Influence of fusing temperature on microstructure, wear and corrosion resistance of induction melted bimetal of Co-based alloy and AISI 4140 steel", Journal of Materials Chemistry and Physics, Vol. 188, pp. 314-321.
8. K. Sakata, K. Nakano, Y. Matsubara and K. Ogi, 2007, "Microstructure Control of Thermally Sprayed Co-Based Self-fluxing Alloy Coatings by diffusion Treatment", Journal of Thermal Spray Technology, Vol. 16 No. 5-6, pp. 991-997.
9. S. Saravanan, G. Nagarajan and S. Sampath, 2012, "Combined effect of injection timing, EGR and injection pressure in NO_x control of a stationary diesel engine fuelled with crude rice bran oil methyl ester", Journal of Fuel, Vol. 104, pp. 409-416.
10. K. T. Kim and Y. S. Kim, 2012, "Optimization for Thermal spray Process by Taguchi Method", Journal of The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 16 No. 2, pp. 54-59.