한국동력기계공학회지 제16권 제2호 pp.54~59 2012년 4월

다구찌 기법을 이용한 용사코팅의 공정 최적화
Optimization for Thermal spray Process by Taguchi Method

김균택 · 김영식
K. T. Kim and Y. S. Kim

(접수일 : 2011년 07월 20일, 수정일 : 2011년 11월 23일, 채택확정 : 2012년 01월 20일)

Key Words : Thermal Spray(용사법), Process Optimization(최적공정설계), Taguchi Method(다구찌 기법), MRSN (다중응답변수)

Abstract : In the present study, process optimization for thermal-sprayed Ni-based alloy coating has been performed using Taguchi method and analysis of variance(ANOVA). Ni-based alloy coatings were fabricated by flame spray process on steel substrate, and the hardness test and wear test were performed. Experiments were designed as per Taguchi's L9 orthogonal array and tests were conducted with different Oxygen gas flow, Acetylene gas flow, Powder feed rate and Spray distance. Multi response signal to noise ratio (MRSN) was calculated for the response variables and the optimum combination level of factors was obtained simultaneously using Taguchi's parametric design.

1. 서 론

용사법(thermal spray process)은 부재의 표면에 빠른 속도로 원하는 기능을 가진 코팅을 형성하여 표면성능을 향상시키는 방법으로, 우주·항공, 자동차, 기계 등의 다양한 산업분야에 널리 적용되고 있다[1,2]. 용사법에는 다양한 공정변수들이 있으며, 이 공정변수들이 코팅의 특성에 많은 영향을 미친다. 따라서 양질의 코팅을 얻기 위해서는 공정변수가 특성치에 미치는 영향에 대한 객관적인 분석이 필요하며, 이 분석 결과를 바탕으로 최적공정설계를 실시하여야 한다.

다구찌 기법은 미리 만들어진 정형화된 방법에 따라 실험을 계획하고 진행할 수 있으며, 직교배열표를 사용한 일부실시법을 사용하고 있어 실험의 크기를 작게 할 수 있는 장점이 있다. 또한 손실함수와 S/N 비를 도입하여 품질을 일정하게 유지할 수 있는 인자를 찾아가는 최적공정설계가 가능하다[3]. 이러한 장점들 때문에 현재 다양한 분야에서 다구찌 기법을 적용한 연구가 이루어지고 있고[4,5], 용사코팅 분야에서도 이 기법을 적용한 연구 사례들이 많이 발표되고 있다[6,7]. 용사코팅은 그 적용대상과 용도에 따라 여러 가지 특성을 필요로 하며, 따라서 이들 특성들을 모두 고려한 공정설계가 필요하다. 그러나 지금까지 발표된 대부분의 연구들은 용사코팅의 품질을 결정하는 여러 특성 중 한 가지 특성만을 대상으로 한 것으로서, 이 경우 대상으로 한 특성치에 대해서는 최적의 결과를 나타내지만 다른 특성치에 대해서는 그렇지 못한 한계가 있다. 저자들은 니켈기 용사코팅에 대해 직교배열표를 이용한 최적공정설계를 수행한 바 있는데[8-10], 이들 연구 역시 경도와 마모율 중 어느 하나만을 특성치로 하여 최적공정설계를 한 것으로 이 경우 다른 특성치에 대해서는 최적공정이 되지 못하는 문제점이 노출되었었다.

본 연구에서는 다구찌 기법을 적용하여 니켈기 용사코팅을 제조함에 있어서 여러 가지 특성치를 함께 고려할 수 있는 다중응답변수를 적용하여 최적공정설계를 하고, 또한 이들 공정변수가 코팅의 특성에 미치는 영향을 분석하였다.

Y. S. Kim(corresponding author) : Department of Mechanical & Automotive Engineering, Pukyong National University.
E-mail : yeongsik@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6155
K. T. Kim : Department of Mechanical & Automotive Engineering, Pukyong National University.

2. 실험방법

다구찌 기법을 적용한 니켈기 용사코팅의 최적공

정설계에 있어서 코팅 품질에 영향을 미치는 여러 가지 공정변수들 중 산소유량, 아세틸렌유량, 분말송급량 및 용사거리의 4가지 변수를 인자로 선택하였다. 각 인자의 수준은 3수준으로 하였으며, 각각의 수준은 20%의 차이를 두었다.

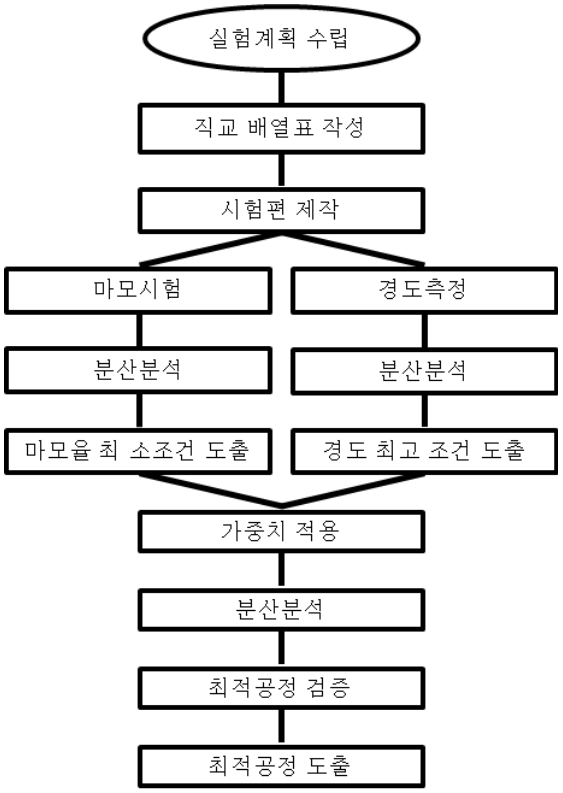

Fig. 1 Process flow chart

Table 1은 본 연구에서 채택한 인자 및 수준을, Table 2는 본 연구에 사용된 직교배열표를 나타낸 것이다. 4인자 3수준인 경우 전부실험에서는 총 81개의 조건에 대한 실험을 실시해야 하는 반면, 다구찌 기법에서는 Table 2의 직교배열표에 나타낸 바와 같이 9개의 조건에 대한 실험을 실시한다. 본 연구에서는 프레임 용사장치(Sulzer Metco Co. 6PII System)를 사용하여 직교배열표에 제시된 9개의 조건에 따라 각각 3회의 코팅을 실시하여 시험편을 제작하였다. 실험순서는 무작위로 하였다. 제작된 시험편의 응답변수로는 마모율과 경도 두 가지를 선택하였다.

마모시험에 있어서는 제작된 시험편을 #2000 사포로 연마하여 표면의 조도를 균일하게 한 후 ball-on-disk 방식의 건식마모시험기(Neo Plus, MPW 110)를 사용하여 시험을 실시하였다. 마모시험 시 미끄럼 속도는 0.1 m/s, 하중은 20 N으로 하고, 상대마모재로는 8 mm 직경의 Al2O3 ball을 사용하였다. 마모거리는 1000 m로 하였다. 경도시험에 있어서는 시험편의 단면에 대해 마이크로 비커스 경도 시험기(Akashi, MVK-H1)를 사용하여 하중 500 gf, 압입시간 10 sec의 조건으로 경도를 측정한 후 그 평균값을 취하였다. Fig. 1에 실험의 플로우 차트를 나타내었다.

3. 데이터 분석

측정된 마모율과 경도의 두 가지 응답변수 모두를 고려한 최적조건을 도출하기 위해 본 연구에서는 다음과 같이 데이터를 분석하였다.

먼저 구해진 마모율과 경도에 대해 손실함수를 적용하였다. 마모율에는 망소특성을, 경도에는 망대특성을 적용하였다. 망소특성과 망대특성에 대한 손실함수는 다음 식과 같다.

$$L_i = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\frac{1}{y_{ij}^2} \quad \text{망대특성 손실함수} \tag{1}$$

$$L_i = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} y_{ij}^2 \quad \text{망소특성 손실함수} \tag{2}$$

L_i에서 i는 직교배열표상의 실험번호, n은 i조건으로 반복실험을 한 총 반복실험횟수, j는 반복실험횟수, y_{ij}는 i조건의 j번째 실험의 응답변수이다. 구해진 응답변수는 각각 단위가 다르므로 정규화할 필요가 있다. 이를 위해 각각의 응답변수에 대해 다음의 식을 적용하여 정규화하였다.

Table 1 Factors with chosen levels

Factors	Symbol	Level of factors		
		1	2	3
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

Table 2 L9(3^4) orthogonal array

Experimental No.	Factors				Response variable	
	A	B	C	D	Wear rate [mm^3/m]	Hardness
1	1	1	1	1	4.52E-06	714.93
2	1	2	2	2	2.49E-06	807.57
3	1	3	3	3	1.59E-06	840.45
4	2	1	2	3	2.91E-06	863.65
5	2	2	3	1	5.31E-07	827.90
6	2	3	1	2	3.20E-06	888.93
7	3	1	3	2	4.02E-06	814.10
8	3	2	1	3	2.00E-07	940.28
9	3	3	2	1	2.14E-07	825.05

$$S_i = \frac{L_i}{L_{av}} \tag{3}$$

S_i는 직교배열표상의 실험번호 i의 정규화된 손실함수이고, L_i는 실험번호 i의 손실함수가 적용된 응답변수, L_{av}는 응답변수 전체의 평균값이다.

본 연구에서는 두 가지 응답변수를 모두 고려한 최적공정설계를 위해 마모율과 경도에 각각 가중치를 두었다. 가중치를 적용한 최종 응답변수는 다음의 식으로 계산되었다.

$$TL_i = \sum_{i=1}^{m} w_i S_i \tag{4}$$

TL_i는 최종 응답변수, m은 응답변수의 종류 수, w_i는 i종류의 가중치이다. TL_i는 최종 응답변수, m은 응답변수의 종류 수, w_i는 i종류의 가중치이다.

이 최종 응답변수는 다음의 식에 의해 다중응답 S/N비로 변환한다.

$$MRSN = -10\log(TL_i) \tag{5}$$

Table 3에 마모율과 경도의 가중치가 각각 0.5인 경우의 응답변수 및 최종 응답변수를 정리하였다.

4. 결과 및 고찰

Table 4는 마모율과 경도에 대한 가중치를 각각 0.5로 했을 경우의 분산분석표이다. 이 분산분석표에 의하면 산소유량, 아세틸렌유량, 분말송급률은 매우 유의한 인자이며, 기여도는 아세틸렌유량, 용사거리, 산소유량의 순이다. 또한 분말송급률의 영향은 매우

Table 3 MRSN rato for $w_{1\ Wear\ rate}$= 0.5, $w_{2\ Hardness}$= 0.5

Experimental No.	Lost function		Normalization		Weighting		TL	MRSN ratio
	Wear rate [mm^3/m]	Hardness						
1	1.96E-06	2.04E-11	1.3462	2.8548	0.6731	1.4274	2.1005	-0.3223
2	1.53E-06	6.21E-12	1.0551	0.8683	0.5275	0.4342	0.9617	0.0170
3	1.42E-06	2.52E-12	0.9741	0.3527	0.4871	0.1763	0.6634	0.1782
4	1.34E-06	8.46E-12	0.9225	1.1838	0.4613	0.5919	1.0532	-0.0225
5	1.46E-06	2.82E-13	1.0039	0.0395	0.5020	0.0197	0.5217	0.2826
6	1.27E-06	1.02E-11	0.8708	1.4290	0.4354	0.7145	1.1499	-0.0607
7	1.51E-06	1.62E-11	1.0382	2.2599	0.5191	1.1300	1.6491	-0.2172
8	1.13E-06	4.01E-14	0.7783	0.0056	0.3891	0.0028	0.3919	0.4068
9	1.47E-06	4.60E-14	1.0109	0.0064	0.5054	0.0032	0.5086	0.2936

Table 4 Results of ANOVA for $w_{1\ Wear\ rate}$= 0.5, $w_{2\ Hardness}$= 0.5

Factor	SS	DF	MS	F	F0 (0.01)	P	P(%)
Oxygen gas flow [ft3/h]	0.0850	2	0.0425	23.4891**	5.85	0.1476	14.7620
Acetylene gas flow [ft3/h]	0.3165	2	0.1583	87.4440**	5.85	0.5495	54.9549
Spray distance [mm]	0.1382	2	0.0691	38.1863**	5.85	0.2400	23.9985
Powder feed rate [lb/min]	0.0362	20	0.0018	1		0.0628	6.2846
total	0.5760	26					

Table 5 Factor effects on response variables for $w_{1\ Wear\ rate}$= 0.5, $w_{2\ Hardness}$= 0.5

Level	Oxygen gas flow [ft^3/h]	Acetylene gas flow [ft^3/h]	Powder feed rate [lb/min]	Spray distance [mm]
1	-0.0424	-0.1874	0.0079	0.0846
2	0.0665	0.2354	0.0960	-0.0870
3	0.1610	0.1371	0.0812	0.1875

미미한 것을 알 수 있다. Table 5는 마모율과 경도에 대한 가중치를 각각 0.5로 했을 경우의 응답변수에 미치는 인자의 영향을 정리한 것이다. 이 표에서 각각의 인자에 대해 응답변수가 가장 높은 경우의 수준을 선택하여 조합하면 최적조건을 도출할 수 있다. 이 표에 따라 최적조건을 조합하면 산소유량 3수준, 아세틸렌유량 2수준, 분말송급률 2수준, 그리고 용사거리 3수준이다.

Table 6은 가중치의 변화에 따른 최적조건 조합과 기여도의 변화를 나타낸 것이다. 이 표에서 알 수 있듯이 응답변수인 마모율이나 경도 중 어느 하나만을 고려한 경우의 최적조건은 매우 상이한 조합을 보이고 있다. 그러나 두 가지 응답변수를 모두 고려한 경우 최적조건은 가중치의 변화와 관계없이 동일한 조합을 나타내고 있다. 각 인자의 기여도는 가중치의 변화에 따라 달라지는데, 마모율만을 고려한 경우는 기여도가 B-A-D-C 즉, 아세틸렌유량, 산소유량, 용사거리, 분말송급률의 순으로 나타난다. 마모율과 경도, 두 인자에 대한 가중치를 고려하면 기여도는 B-D-A-C, 아세틸렌유량, 용사거리, 산소유량, 분말송급률의 순으로 나타나며, 경도만 고려한 경우에는 D-A-B-C, 용사거리, 산소유량, 아세틸렌유량, 분말송급률의 순이다. 가중치의 변화에 따른 기여도의 변화는 있지만 최적조건조합이 달라지지 않으며, 인자의 기여도 순서에는 변화가 없다.

응답변수로부터 도출된 3가지의 최적조건 조합은 Table 2에 나타낸 직교배열표에 없는 조건이므로 검증실험을 실시하고, 그 결과를 Table 7에 나타내었다. 비교를 위해 본 연구에서 사용한 용사장치의 제조사인 Sulzer Metco Co.에의해 제시되어 일반적으

Table 6 Effect of weighting factor ($w_{1\ Wear\ rate}$, $w_{2\ Hardness}$)

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	2	2	1	31.15	40.81	0.92	27.11
2	0.9	0.1	3	2	2	3	21.08	41.96	10.57	26.39
3	0.7	0.3	3	2	2	3	13.96	58.22	2.53	25.30
4	0.5	0.5	3	2	2	3	12.83	60.61	2.75	23.81
5	0.3	0.7	3	2	2	3	14.66	59.87	2.15	23.32
6	0.1	0.9	3	2	2	3	24.34	46.02	1.05	28.60
7	0	1	2	2	1	3	34.95	22.59	1.11	41.34

Table 7 Effect of optimization on response variables

Nomal condition			Optimized conditions			Differences [%]	
Combination	Wear rate [mm^3/m]	Hardness	Combination	Wear rate [mm^3/m]	Hardness	Wear rate [mm^3/m]	Hardness
2-2-2-2	8.31E-07	853.90	3-2-2-1	1.93E-07	878.26	-76.83	+2.85
			3-2-2-3	2.06E-07	948.27	-75.24	+11.05
			2-2-1-3	1.18E-06	962.58	+41.61	+12.73

로 사용하는 공정조건(Normal condition)인 산소유량 44 ft^3/h, 아세틸렌유량 55 ft^3/h, 분말송급률 30 lb/min, 용사거리 200 mm으로 시험편을 제작하여 마모율과 경도를 측정하였다.

이 표에서 알 수 있듯이 다구찌 기법으로 도출된 최적조건 조합으로 제작된 시험편이 일반적으로 사용되는 조건에 의해 제작된 시험편에 비해 마모율은 낮고 경도는 높다. 마모율만 고려한 조건에서는 마모율은 크게 감소하였지만 경도의 증가는 매우 적다. 마모율과 경도를 고려한 경우에는 경도만을 고려한 것보다 마모율의 감소는 적지만(76.83% : 75.24%), 경도는 11.05% 증가되었음을 알 수 있다. 경도만 고려한 경우는 일반적인 조건보다 경도의 증가는 12.73이나 마모율은 41.61%나 증가하였다.

본 연구에서는 마모율이 낮고 경도가 큰 두 가지 경우를 모두 고려한 최적조건 조합을 도출하고자 하였으므로, 마모율의 감소가 크고 경도의 증가가 큰 3-2-2-3 조건이 최적조건이다.

5. 결 론

본 연구에서는 다구찌 기법을 적용하여 니켈기 용사코팅을 제조함에 있어서 여러 가지 특성치를 함께 고려할 수 있는 다중응답변수를 적용하여 최적공정설계를 하고, 또한 이들 공정변수가 코팅의 특성에 미치는 영향을 분석하였다.

다구찌 기법에 의한 용사코팅의 공정설계에 있어서 다중응답변수를 고려한 최적공정설계는 매우 유효한 것을 확인할 수 있었다. 또한 각각의 응답변수에 대한 공정변수의 기여도 및 기여도에 대한 가중치의 영향을 손쉽게 분석할 수 있었다.

마모율과 경도를 함께 고려한 최적공정조건은 산소유량 53 ft^3/h, 아세틸렌유량 55 ft^3/h, 분말송급률 30 lb/min, 용사거리 240 mm로 확인되었다.

마모율과 경도에 각각 0.5의 가중치를 두어 도출된 최적공정조건에 의해 제작된 시험편의 경우 장치업체에서 제공한 코팅조건에 의해 제작된 시험편의 경우보다 마모율은 75.24 % 작고 경도는 11.05% 높은 매우 양호한 특성을 나타내었다.

후 기

이 논문은 2010학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임 (PK-2010-071).

참고 문헌

1. 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.
2. 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.
3. Robert L. Mason, Richard F. Gunst, James L. Hess, 2003, “Statistical Design and Analysis of Experiments, second Edition”, A John Wiley and Sons Publication, Hoboken, New Jersey, pp. 406-409.
4. Nooryusmiza Yusoff, M. Ramasamy, Suzana Yusup, 2011, “Taguchi′s parametric design approach for the selection of optimization variables in a refrigerated gas plant”, Chemical Engineering Research and Design, Volume 89, Issue 6, pp. 665-675.
5. Garima Kaushik, Indu Shekhar Thakur, 2009, “Isolation and characterization of distillery spent wash color reducing bacteria and process optimization by Taguchi approach”, International Biodeterioration & Biodegradation,

Volume 63, Issue 4, pp. 420- 426.
6. W. Fang et al., 2011, “Processing optimization, surface properties and wear behavior of HVOF spraying WC - CrC - Ni coating”, Journal of Materials Processing Technology, Volume 209, Issue 7, pp. 3561- 3567.
7. Poh Koon Aw et al., 2008, “Corrosion resistance of tungsten carbide based cermet coatings deposited by High Velocity Oxy-Fuel spray process”, Thin Solid Films, Volume 516, Issue 16, pp. 5710-5715.
8. K. T. Kim and Y. S. Kim, 2009, “Process Optimization for Thermal-sprayed Ni-based Hard Coating by Design of Experiments”, Journal of Korea society for Power System Engineering, Vol, 13, No. 5, pp. 89-94.
9. K. T. Kim and Y. S. Kim, 2010, “Process Optimization of Thermal-sprayed STS316 Coating”, Journal of Korean Society of Ocean Engineers, Vol. 24, No. 1, pp. 161-165.
10. K. T. Kim, J. D. Kim and Y. S. Kim, 2011, “Effect of Process Parameters on the Hardness and Wear Rate of Thermal Sprayed Ni-based Coatings”, Journal of Korea society for Power System Engineering, Vol, 15, No. 1, pp. 51-56.