

실험계획법을 이용한 ALBC3에 대한 고속화염용사의 최적 공정 설계

김영문¹, 임병철¹, 김민태¹, 박상흠^{2*}
¹공주대학교 기계공학과, ²공주대학교 기계자동차공학부

A Process Optimization of HVOF on ALBC3 by Experiments Design

Young-Moon Kim¹, Byung-Chul Lim¹, Min-Tae Kim¹, Sang-Heup Park^{2*}

¹Division of Mechanical Engineering, Graduate School, Kongju National University

²Division of Mechanical & Automotive Engineering, Kongju National University

요약 선박의 프로펠러나 임펠러와 같은 유체기기에서는 캐비테이션 현상으로 인해 마모와 침식이 발생한다. 이와 같은 기기손상은 소음과 진동을 발생시켜 기기수명을 단축시키는 문제점을 가지고 있다. 본 연구에서는 캐비테이션 현상에 대한 저항성을 높이기 위해 산업 현장에서 많이 사용되고 있는 고속화염용사코팅의 공정 최적화에 따른 각 요소별 중요도를 분석하였다. 다구찌 실험계획법을 적용하여 ALBC3 모재 표면에 비정질 분말을 코팅하였고 기공도 실험을 통해 각 요소별 특성을 분석하였다. 다구찌 실험계획법에 의해 고속 화염용사(HVOF) 코팅의 최적 공정을 찾아낸 결과 연소압이 80 psi, 코팅거리가 270 mm, 이송속도가 200 mm/s, 분말속도는 25 g/min으로 확인되었고, 그 결과, 연소압, 코팅거리 및 분말속도는 25% 이상으로 비슷한 기여도를 나타냈고 이송속도는 19%로 다소 떨어지는 수준을 나타내었다. 공정에 대한 각 인자별 기여도는 약간의 차이는 있지만 그 차이가 크지 않으므로 네 개의 인자 모두 고속 화염용사(HVOF) 코팅 공정에서 중요한 기여를 하였다.

Abstract Erosion and abrasion caused by cavitation damage occur in fluid equipment, such as ships or impellers. Similarly, the equipment damage from noise and vibration can shorten its life. This study analyzed the importance of the parameter characteristics of the process optimization of HVOF (High Velocity Oxygen Fuel spraying), which is generally used in a variety of industries for enhancing the resistibility from the cavitation phenomenon. The surface of the ALBC3 substrate was coated with an amorphous powder as a filler metal according to the experimental design using the Taguchi method, and then the characteristics with each parameter were analyzed using a porosity measurement test. The optimal process conditions was a combustion pressure of 80psi, coating distance of 270mm, gun speed of 200mm/s, and powder feed rate of 25g/min as a result of the HVOF coating by applying the experimental design. The combustion pressure, coating distance and powder feed rate were more than 25% and indicated a similar contribution rate, but the contribution rate of the gun speed was 19%, which was slightly less than the others. The contribution rate with each parameter was only slightly significant. On the other hand, all four parameters were found to be important in the contribution rate aspects of the HVOF coating process.

Keywords : Cavitation, HVOF, Surface hardening coating, Taguchi method, Experiments design

1. 서론

용사(Thermal Spray)란 분말 혹은, 선형재료를 고온

열원으로부터 용융액적으로 변화시켜 빠른 속도로 원하는 기능을 기체에 충돌시켜 급냉응고 적층한 피막을 형성하는 기술이다. 재료의 가열, 용융을 위해 에너지 밀도

*Corresponding Author : Sang-Heup Park(Kongju National University)

Tel: +82-10-8380-2400 email: weldpark@kongju.ac.kr

Received February 3, 2016

Revised April 6, 2016

Accepted April 7, 2016

Published April 30, 2016

가 높은 연소화염, Arc 및 플라즈마 등의 열원을 필요로 한다. 용사는 성질이 다른 재료로 기재표면에 피막을 형성하여 표면 성능을 향상시키는 표면처리법의 하나로 현재 조선, 플랜트, 항공, 자동차 및 기계 등의 산업분야에 널리 적용되고 있다[1-3].

용사법을 이용하면 고속으로 두꺼운 피막형성이 가능하며, 금속, 세라믹, 유리 및 플라스틱 등의 재료를 사용할 수 있다. 그리고 재료의 종류 및 용사공정의 독자적 특징을 잘 이용하는 것으로부터 다른 방법을 이용해서 얻을 수 없는 표면층을 만들어 낼 수 있다[4]. 표면코팅 기술은 해양산업에서 많이 적용되고 있지만 기계적 특성에 대한 연구보고는 그다지 많지 않다[5].

현재까지 표면코팅 방법에서 해양산업의 유체기기 적용은 미비한 실정이고, 기존소재와 달리 혁신적인 소재를 활용하여 유체기기의 내구성을 크게 향상시킬 수 있는 기술개발이 필요하다. 제품의 고급화 및 수명연장을 위하여 용사법, 장치구성, 용사공정 특징 및 현상, 사용된 재료와 피막의 성질에 대한 이해가 요구된다.

본 연구에서는 기계적·화학적 특성이 우수한 비정질 합금을 이용하여 유체기기의 내구성 향상을 위한 고속화염 용사의 표면처리 기술의 공정을 최적화 하고자 한다 [6].

2. 실험방법

2.1 실험장치

본 연구의 실험에 사용된 고속 화염용사(HVOF) 장비는 PRAXAIR 사의 JP-5000이며 20 MPa 이상의 액체산소와, 6 MPa 이상의 압축공기 그리고 등유(Kerosene), Ar 가스를 사용하였다. 총열은 4 inch, 6 inch, 8 inch 세 가지 종류가 있는데, 총열의 길이는 길어질수록 고온과 고압이 요구되기 때문에 장비에 무리가 갈 수 있으므로, 장비가 안정된 상태에서 코팅목적을 달성하기 위하여 4 inch 총열을 사용하였다. Powder feeder 장치는 MEC(Metallizing Equipment CO.) 사의 PF-700을 사용하였고, Ar 가스를 사용하였다.

2.2 실험방법

사용된 모재는 일반적으로 대형 선박의 프로펠러등에 많이 적용되고 있는 알루미늄 청동(ALBC3)을 사용하여

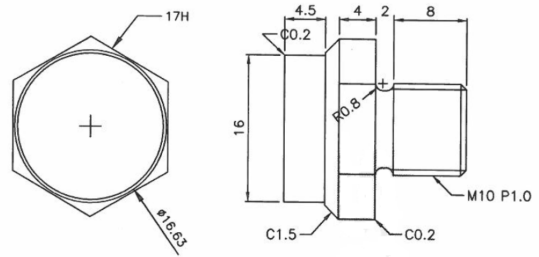


Fig. 1. Drawing of Specimen

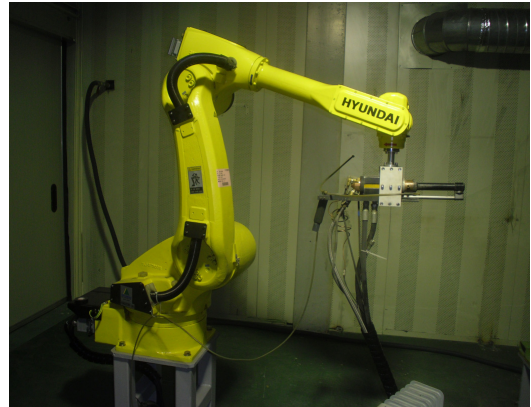


Fig. 2. Device of HVOF

코팅하였으며, 시편의 도면은 Fig. 1과 같다. G-32 실험에 적용하기 위해 $\varnothing 16$ 나사 머리 부분만 코팅하여 사용하였으며, 시편은 본 연구에서 실시된 실험에 동일하게 적용되었다. 산업 현장에서 일반적으로 사용되는 전처리 소재인 24 mesh 크기의 금강사(Brown fused alumina)를 이용해 분사(Blasting)하여 코팅 전 모재 표면의 이물질을 제거하고 요철을 만들어 고속 화염용사(HVOF) 코팅시 용융된 분말이 날아가 잘 용착될 수 있도록 표면적을 넓혀 전처리를 완료하고, 전처리 면에 코팅을 실시하였다. Ar 가스의 유량은 20 SCFH로 고정하여 사용하였으며, 10 g/min, 15 g/min, 20 g/min, 25 g/min으로 설정된 인자에 따라 실험을 진행하였다.

Fig. 2와 같이 실험의 공정성을 부여하고 오차를 최소한으로 줄이기 위해 모든 코팅 공정은 인력이 아닌 로봇으로 진행하였다.

2.3 기공도 측정 시험

코팅층의 단면을 관찰하기 위하여 시편절단기를 사용하여 시편을 절단한 뒤 Quick Cure Acrylic Powder와

Table 1. Evaluation characteristic with chosen parameters and level

Parameters	Symbol	Level			
		1	2	3	4
Combustion pressure (psi)	A	70	75	80	85
Coating distance (mm)	B	270	300	330	360
Gun speed (mm/s)	C	100	200	300	400
Powder feed rate (g/min)	D	10	15	20	25

Table 2. Orthogonal array (L16) for experiments

Trial No.	Parameters			
	A	B	C	D
1	1 (70psi)	1 (270mm)	1 (100mm/s)	1 (10g/min)
2	1 (70psi)	2 (300mm)	2 (200mm/s)	2 (15g/min)
3	1 (70psi)	3 (330mm)	3 (300mm/s)	3 (20g/min)
4	1 (70psi)	4 (360mm)	4 (400mm/s)	4 (25g/min)
5	2 (75psi)	1 (270mm)	2 (200mm/s)	3 (20g/min)
6	2 (75psi)	2 (300mm)	1 (100mm/s)	4 (25g/min)
7	2 (75psi)	3 (330mm)	4 (400mm/s)	1 (10g/min)
8	2 (75psi)	4 (360mm)	3 (300mm/s)	2 (15g/min)
9	3 (80psi)	1 (270mm)	3 (300mm/s)	4 (25g/min)
10	3 (80psi)	2 (300mm)	4 (400mm/s)	3 (20g/min)
11	3 (80psi)	3 (330mm)	1 (100mm/s)	2 (15g/min)
12	3 (80psi)	4 (360mm)	2 (200mm/s)	1 (10g/min)
13	4 (85psi)	1 (270mm)	4 (400mm/s)	2 (15g/min)
14	4 (85psi)	2 (300mm)	3 (300mm/s)	1 (10g/min)
15	4 (85psi)	3 (330mm)	2 (200mm/s)	4 (25g/min)
16	4 (85psi)	4 (360mm)	1 (100mm/s)	3 (20g/min)

Quick Cure Acrylic Liquid를 2:1 비율로 배합하여 냉간 마운팅(Cold mounting) 실시하였다. 폴리싱(Polishing) 장비를 사용하여 마운팅(Mounting)된 시편을 #100, #320, #600, #800, #1000, #1500, #2000 입도의 연마지를 사용하여 순차적으로 폴리싱한 뒤, 1 um 알루미늄 분말을 사용하여 경면 연마까지 완료하였다. 기공도 측정 실험은 KS D 8542 : 2005에 의거하여 이미지분석(Image analyzation)을 수행하였으며, 사용된 장비는 TOMORO 사의 금속현미경 GX41-N31 장비를 사용하였다.

3. 실험계획법을 이용한 공정변수 분석

고속 화염용사의 코팅 공정 최적화 실험 결과에서 가장 중요한 요소는 낮은 기공도이다. 사진 데이터를 점검해 볼 때 기공도가 낮은 코팅층에서는 높은 경도를 얻을

수 있었기 때문에 낮은 기공도에 중점을 두고 실험을 진행했다. Table 1은 최적화 실험에서 인자와 수준을 설정한 내용이다. 연소압, 코팅거리, 이송속도 및 분말속도의 4가지 변수를 인자로 설정하였다. Table 2는 본연구에 사용된 직교 배열표를 나타낸 것이다. 4인자 4수준인 경우 전부 실험에서는 총 256개의 조건에 대한 실험을 실시해야 하는 반면, 다구찌 기법에서는 Table 2의 직교 배열표에 나타낸 바와 같이 16개의 조건에 대한 실험을 실시하였다.

측정된 기공도의 응답변수를 고려한 최적조건을 도출하기 위해 먼저 구해진 기공도 데이터를 확인하여 식 (1)을 이용하여 망소특성 데이터를 분석하였다.

$$SN_i = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 \right) \quad (1)$$

Table 3. Comparison of vickers hardness with experimental conditions

Trial No.	Porosity (%)				S/N Ratio
	1st	2nd	3rd	Average	
1	1.20	1.21	1.50	1.30	-2.279
2	4.08	4.60	3.90	4.19	-12.444
3	3.56	3.84	4.33	3.91	-11.844
4	4.45	4.78	4.39	4.54	-13.141
5	1.16	1.20	1.18	1.18	-1.438
6	1.55	1.10	1.33	1.33	-2.477
7	6.18	5.90	6.15	6.08	-15.678
8	4.45	4.90	5.20	4.85	-13.715
9	0.45	0.61	0.45	0.50	6.021
10	2.78	2.55	2.10	2.48	-7.889
11	0.72	0.58	0.57	0.62	4.152
12	1.22	1.45	1.18	1.28	-2.144
13	1.18	1.30	1.29	1.26	-2.007
14	0.89	1.20	1.01	1.03	-0.257
15	0.57	0.60	0.65	0.61	4.293
16	6.87	5.89	5.55	6.10	-15.707

Table 4. Sum of response variables with level of factors

Level of factors	A	B	C	D
1	-39.708	0.297	-16.310	-20.358
2	-33.308	-23.067	-11.733	-24.014
3	0.140	-19.076	-19.795	-36.877
4	-13.677	-44.707	-38.716	-5.304
Total	-86.553	-86.553	-86.554	-86.553

Table 5. Optimum level of factors and the condition

	Combustion pressure	Coating distance	Gun speed	Powder feed rate
level	3	1	2	4
condition	80psi	270mm	200mm/s	25g/min

Table 6. Sum of squares and contribution rate analysis in optimum level of factors

	Combustion pressure	Coating distance	Gun speed	Powder feed rate
SS	-468.197	-468.128	-330.559	-440.082
P(%)	27.4286	27.4246	19.3653	25.7815

Table 7. Result of verification experiment

	Porosity (%)			
	1st	2nd	3rd	Average
Optimal condition	0.37	0.47	0.49	0.44

SN_i 는 i 행의 SN 비 값을 말하고 n 은 각행에서 의 반복수이다.

우선 인자 수준별로 SN 비의 합을 구하였다. SN 비에 대하여 분산분석을 실시하여 최적의 조건을 도출하고 그에 따른 기여도를 식 (2)를 이용하여 산출하였다. 도출된

최적의 조건에 의한 재현성 실험 및 평가특성을 확인하였다[7].

$$\rho = \frac{S}{\sum S} \times 100(\%) \quad (2)$$

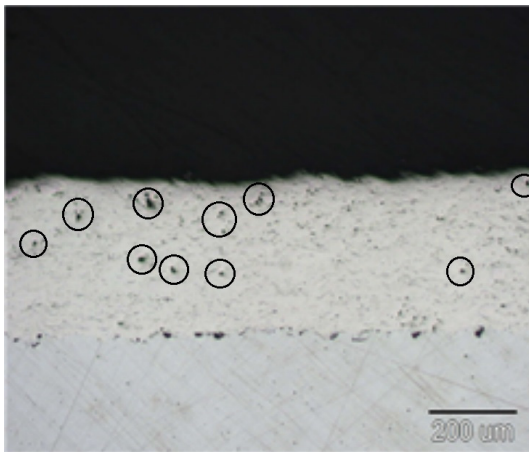


Fig. 2. Measurement of porosity

4. 결과 및 고찰

Table 3은 측정된 기공도에 대한 응답변수를 산출한 것이다. 직교배열표에 따라 인자 수준별로 응답변수의 합을 구하여 Table 4에 나타내었다. 각각의 인자에 대해 응답변수가 가장 높은 경우의 수준을 선택하여 최적의 조건을 도출하였다. Table 5와 같이 최적의 조건을 조합하면 연소압 3수준, 코팅거리 1수준, 이송속도 2수준, 그리고 분말속도 4수준으로 나타났다.

Table 6은 인자별 최대값의 제곱합에 따른 기여도를 나타낸 것이다. 이 표에서 알 수 있듯이 각 인자의 기여도는 A-B-D-C 즉, 연소압, 코팅거리, 분말속도, 이송속도의 순으로 나타났다. 그 결과, 연소압, 코팅거리 및 분말속도는 25% 이상으로 비슷한 기여도를 나타냈고 이송속도는 19%로 다소 떨어지는 수준을 나타내었다.

응답변수로부터 도출된 4가지의 최적조건 조합은 Table 1에 나타난 직교배열표에 없는 조건이므로 검증 실험을 실시하고, 그 결과를 Table 7에 나타내었다. 비교를 위해 본 연구에서 실험한 결과 값 중 기공도가 가장 낮게 나타났던 Trial No. 9의 측정된 값과 비교하였다.

다구찌 기법으로 도출된 최적조건 조합으로 제작된 시험편의 기공도는 평균 0.44%로 나타났으며 Trial No. 9 조건에 의해 제작된 시험편보다 기공도는 12% 낮게 나타났다. 본 연구에서는 기공도가 낮은 최적조건 조합을 도출하고자 하였으므로, 3-1-2-4조건이 최적 조건이다.

5. 결론

본 연구에서는 고기능성 코팅소재의 기계적 특성을 향상시키기 위한 고속화염용사 코팅공정의 최적화를 위해 다구찌 실험계획법을 적용하여 기공도에 대한 측정값의 응답변수를 적용하여 공정 최적화를 하고, 이 공정변수가 코팅공정의 특성에 미치는 영향을 분석하였다.

다구찌 실험계획법에 의한 용사코팅의 공정설계에 있어서 응답변수를 고려한 최적공정설계는 매우 유효하다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 각각의 응답변수에 대한 기여도 및 영향을 손쉽게 분석할 수 있었다.

용사코팅에서 가장 중요한 기계적 특성 요소인 경도 값을 고려한 기공도 측정을 통해 최적공정 조건은 연소압이 80psi, 코팅 거리가 270mm, 이송속도가 200mm/s, 분말속도는 25g/min의 결과를 얻었다.

다구찌 실험계획법을 통해 얻은 최적의 조건에서 재현성 실험을 통해 얻은 결과 Trial No. 9의 기공도 측정값 보다 12% 낮은 양호한 특성을 나타내었다. 이와 같이 고속화염용사 코팅 공정을 수행하는 산업현장에서 다구찌 실험계획법을 이용한다면 품질적인 측면에서 단시간 내에 최적의 조건을 도출하는 부분에서 많은 경제적 효과를 얻을 수 있다고 사료된다.

References

- [1] K. C. Kang, H. K. Park and C. H. Lee, "Property Evaluation of HVOF Sprayed Multi-walled Carbon Nanotube Aluminum Composite Coatings", JKISE, Vol. 45, No. 01, pp. 01-07, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5695/JKISE.2012.45.1.001>
- [2] Kavian Cooke et al., "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, 2007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.05.015>
- [3] J. R. Davis et al., "Handbook of Thermal Spray Technology", ASM International, 2004.
- [4] H. I. Lee, M. S. Han, K. K. Baek, C. H. Lee, C. H. Shin and M. K. Chung, "Study on new candidate coating materials to challenge rudder cavitation damage", Corrosion Science and Technology, Vol. 7 No. 5, pp. 274-282, 2008.
- [5] J. H. Lee and Y. S. Kim, "Effect of Applied Load and Sliding Speed on Wear Behavior of Thermally Sprayed STS316 Coating", JKPSE, Vol. 18, No. 5, pp. 74-79, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.9726/kspse.2014.18.5.074>

[6] J. J. Lee and Y. S. Son, "A Study on the Fabrication of Fe Based Alloy Powder for Laser Welding", KAIS, Vol. 13, No. 8, pp. 3315-3318, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/kais.2012.13.8.3315>

[7] G. Taguchi, "System of experimental design", English Trans. by L. W. Tung, Vols. 1 and 2, New York : UNIPUB / Kraus International Publications and Michigan : American Supplier Institute, pp. 165-222, 1987

김 영 문(Young-Moon Kim) [준회원]



- 2010년 2월 : 군산대학교 전기전자제어공학 (공학사)
- 2015년 3월 : 공주대학교 일반대학원 기계공학과 (석사과정)
- 2015년 9월 ~ 현재 : 범한정수 선임 연구원

<관심분야>
플랜트 시공 및 용접, 비파괴 검사

김 민 태(Min-Tae Kim) [준회원]



- 2010년 2월 : 공주대학교 기계시스템공학과 (공학사)
- 2015년 2월 : 공주대학교 일반대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2012년 10월 ~ 현재 : 한국코팅 선임연구원

<관심분야>
육성용접, 용사코팅, 표면처리

임 병 철(Byung-Chul Lim) [준회원]



- 2010년 2월 : 공주대학교 기계시스템공학과 (공학사)
- 2012년 8월 : 공주대학교 일반대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 일반대학원 기계공학과 (박사과정)

<관심분야>
육성용접, 레이저용접

박 상 흡(Sang-Huep Park) [정회원]



- 1984년 2월 : 단국대학교 기계공학과 (공학사)
- 1986년 2월 : 단국대학교 일반대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2000년 2월 : 홍익대학교 일반대학원 기계공학과 (공학박사)
- 2005년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계자동차공학부 교수

<관심분야>
용접시공 및 용접 자동화, 비파괴 검사