

실험계획법에 의한 알루미나 세라믹의 플라즈마 용사코팅 최적화

이형근* · 김대훈* · 윤충섭*

* 대전산업대학교 신소재공학부 소재생산가공공학과

Optimization of Plasma Spray Coating Parameters of Alumina Ceramic by Taguchi Experimental Method

Hyoung-Keun Lee*, Dae-Hoon Kim* and Choong-Sup Yoon*

* Dept. of Welding and Production Engineering, Taejon National University of Technology, Taejon 305-719, Korea

Abstract

Sintered alumina ceramic substrate has been used for the insulating substrate for thick Hybrid IC owing to its cheapness and good insulating properties. Some of thick HIC's are important to eliminate the heat emitted from the parts that are mounted on the ceramic substrate. Sintered ceramic substrate can not transfer and emit the heat efficiently. It's been tried to do plasma spray coating of alumina ceramic on the metal substrates that have a good heat emission property. The most important properties to commercialize this ceramic coated metal substrate are surface roughness and deposition efficiency. In this study, plasma spray coating parameters are optimized to minimize the surface roughness and to maximize the deposition efficiency using Taguchi experimental method. By this optimization, the deposition efficiency was greatly improved from 35 % at the first time to 75 % finally.

(Received September 8, 2000)

Key Words : Plasma spray coating, Alumina ceramic, Thick hybrid IC, Deposition efficiency, Surface roughness, Taguchi experimental method

1. 서 론

플라즈마 용사기술은 고용점 세라믹 분말을 고온, 고속의 플라즈마 화염 내에서 용융 분사시켜 넓은 금속 표면에 빠르게 효율적으로 코팅시킬 수 있는 방법이다. 최근 들어 플라즈마 용사기술을 활용하여 후막 Hybrid IC(HIC)에 사용되는 절연 세라믹 코팅 금속 기판을 제조하려는 연구가 진행되어 왔다¹⁾.

현재 후막 HIC용 전기절연 기판은 대부분 소결 알루미나(sintered alumina, Al_2O_3) 기판을 사용하고 있다. 소결 알루미나 기판은 값이 싸고 전기절연 특성이 우수하나, 방열특성이 나쁘기 때문에 일부 후막 HIC에서는 큰 문제점으로 남아 있다. 우수한 방열특성이 요구되는 일부 HIC에서는 AlN, SiC, BeO와 같

은 열전도성이 우수한 세라믹을 소결 제조한 기판을 개발하여 사용하고 있다. 그러나 이들 세라믹 소결 기판들은 제조가 어렵고, 가격이 비싸며, Ag 혹은 Cu 패턴 사이의 결합력 부족 등으로 인하여 아직 일반적으로 널리 사용되기에는 어려움이 있다.

후막 HIC용 절연기판의 방열특성을 개선시킬 수 있는 또 다른 방법으로서 Fig. 1(b)과 같이 방열특성이 우수한 금속 판재(Al, Cu, Mo 등) 위에 전기절연 특성이 우수한 알루미나 세라믹을 코팅한 기판을 사용하는 것이다²⁾. 전기절연 특성을 유지하는 범위 내에서 알루미나 세라믹 코팅층의 두께를 최소화시킨다면 요구되는 방열특성과 절연특성을 동시에 얻을 수 있다. 세라믹 코팅 방법으로는 알루미늄 합금의 아노다이징(anodizing) 방법과 용사코팅 방법이 있다.

본 연구에서는 알루미나 세라믹을 코팅하는 방법으

로서 플라즈마 용사 기술을 사용하였다. 알루미늄 세라믹 코팅 기판의 실용화와 적용 범위를 넓히기 위해서는 알루미늄 세라믹 코팅층 표면거칠기의 최소화과 용사코팅 효율의 극대화가 가장 중요하다. 따라서 본 연구의 목적은 표면거칠기를 최소화시키고, 용사코팅 효율의 최대화를 위한 플라즈마 용사 코팅 조건을 최적화하는데 있다.

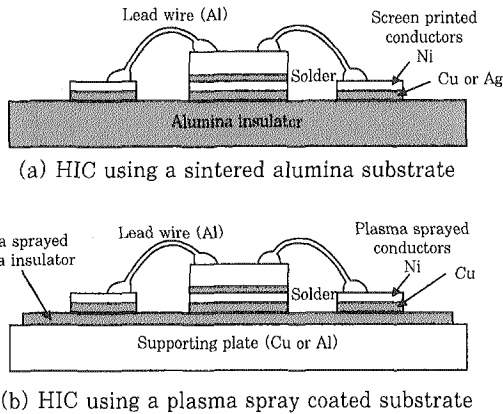


Fig. 1 Schematic comparison of a sintered and plasma spray coated substrate for HIC

2. 실험방법 및 실험재료

플라즈마 용사를 위한 모재로는 Al 7075 합금을 사용하였다. Al 7075 합금은 가볍고 열전도도가 우수하며, 인장강도와 경도가 비교적 높아서 아노다이징된 후막 HIC의 기판 소재로도 사용하고 있다.

절연 세라믹 코팅은 입도 5~20 μ m로 용융 분쇄한 순도 99.5%의 미세한 알루미늄 세라믹 분말을 사용하였다. 알루미늄 세라믹 용사 코팅층과 Al 7075 모재와의 결합력을 높이기 위해서 세라믹 용사코팅 전에 본드 코팅(bond coating)을 하였다. 본드 코팅용 분말은 입도 11~45 μ m의 아노다이징 처리된 Ni-5Al 조성의 금속 분말을 사용하였다. 사용된 분말들의 특성과 알루미늄 세라믹 분말의 입도 및 형상을 Table 1과 Photo. 1에서 보여 준다.

플라즈마 용사를 위한 전처리 과정으로서 그릿 블라스팅(grit blasting)을 수행하였다. 20mesh(850 μ m)

Table 1 Characteristics of powder used in the experiment

Property Powder	Chemical composition (wt%)	Size (μ m)	Manufacturing method
Alumina ceramic	99.5 Al ₂ O ₃	-20 +5	melting & crushing
Bond coating	Ni - 5Al	-45 +11	atomizing

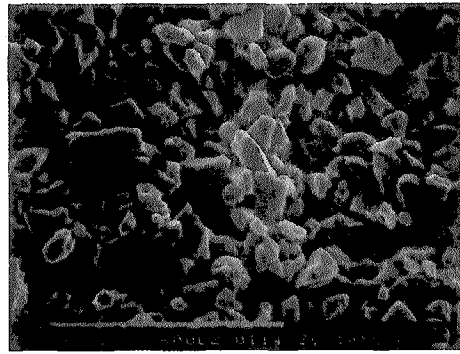


Photo. 1 Shape and size distribution of alumina ceramic powder for plasma spraying

치수의 알루미늄 그릿을 사용하여, 압력 5.5kg/cm², 거리 200mm의 조건에서 수행하였다. 그릿 블라스팅 후 Al 7075 표면은 약 7 μ m의 양호한 표면거칠기(Ra)를 얻을 수 있었다.

플라즈마 용사 장비는 Sulzer-Metco사의 M1100C 시스템과 F4 gun을 사용하였으며, Photo. 2에 본 연구에서 사용한 플라즈마 용사 시스템을 보여 준다.

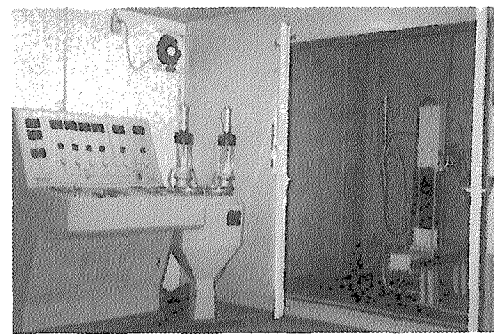


Photo. 2 Plasma spray coating system

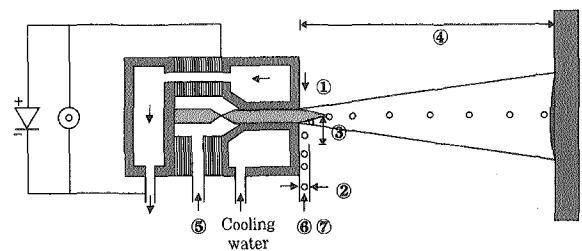


Fig. 2 Position of the selected plasma spray coating parameters

- (1) Powder feeding position (2) Injector diameter (3) Injector distance (4) Spray diameter (5) Plasma gas flow rate (6) Powder carrier gas flow rate (7) Powder feed rate

후막 HIC용 절연기판으로서 사용 가능성을 검토하기 위하여 플라즈마 용사된 알루미늄 세라믹 코팅층의 유전강도(dielectric strength)를 측정하였다. 유전강

도는 플라즈마 용사조건에 따라 큰 변화가 없기 때문에, 하나의 용사조건에서 얻어진 알루미늄 세라믹 코팅층에 대해서만 유전강도를 측정하였다.

플라즈마 용사 코팅층의 성질은 50여개의 변수에 의해 매우 복잡하게 영향을 받기 때문에³⁾ 예비실험을 통하여 몇 가지 중요한 용사변수를 선정하였다. 중요한 용사변수 중의 하나인 플라즈마 전력(power)은 예비실험을 통하여 전극의 수명과 냉각능력 등을 고려하여 600A, 64V로 고정하였다. 최종적으로 선정된 알루미늄 세라믹의 플라즈마 용사변수로서는 1) 분말송급 위치(위(up) 혹은 아래(btm)로부터 송급), 2) 인젝터(injector) 직경, 3) 인젝터 거리, 4) 용사 거리, 5) Ar 플라즈마 가스 유량, 6) 분말 송급가스 유량, 7) 분말 송급속도를 선택하였다. Fig. 2에서는 선택된 플라즈마 용사변수들의 위치를 용사 건을 중심으로 도식적으로 보여 준다. 이 용사변수들은 용사 분말의 플라즈마 화염 내부로의 효율적인 공급과 용융에 주로 영향을 미치는 변수들이다. 용사변수들의 최적화를 위해서는 다꾸찌(Taguchi) 실험계획법을 적용하였으며, 실험변수들의 배열은 교호작용이 가장 적고, 2 수준과 3 수준의 실험을 동시에 할 수 있는 L18 직교배열표

를 사용하였다⁴⁾. Table 2에서는 용사변수들과 조건범위 및 실험배열을 보여 준다. 실험순서는 난수표를 이용하여 무질서하게 정하였다. 본드 코팅층의 플라즈마 용사조건은 이전의 연구에서 결정된 최적 용사조건을 사용하였다.

분말 송급속도가 달라질 때에도(16~32g/min) 모든 실험에서 동일한 양의 분말이 공급되도록 세라믹 코팅의 패스(pass) 수를 조정하였다. 한 패스를 용사하기 위한 용사 건의 주사방법은 Fig. 3에서 보여 준다. 시험편 55 × 85mm의 면적에 용사 건의 주사면

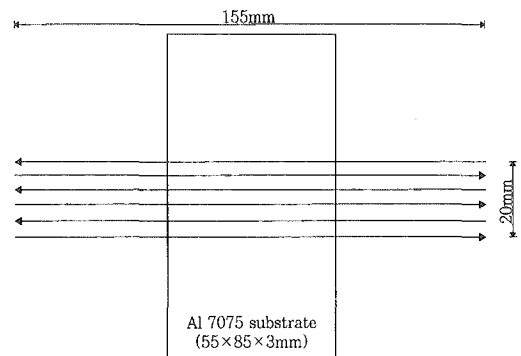


Fig. 3 Scanning method of plasma spray gun

Table 2 Experimental arrangement of plasma spray coating parameters

No.	Powder feeding position	Injector diameter (mm)	Injector distance (mm)	Spray distance (mm)	Ar flow rate (SLPM)	Carrier gas flow rate (SLPM)	Powder feed rate (g/min.)
1	Btm	1.8	8	115	52	3.5	16
2	Top	1.5	4	100	40	2.8	16
3	Btm	2	4	115	52	2.8	24
4	Btm	1.8	6	100	46	2.8	32
5	Btm	1.8	4	130	40	4.2	24
6	Top	2	8	130	46	2.8	24
7	Btm	2	8	100	46	4.2	16
8	Btm	1.5	4	130	46	3.5	16
9	Top	1.5	6	115	46	3.5	24
10	Btm	1.5	6	100	52	4.2	24
11	Top	2	4	100	52	3.5	32
12	Btm	1.5	8	115	40	2.8	32
13	Top	1.8	6	130	52	2.8	16
14	Top	1.8	4	115	46	4.2	32
15	Top	1.5	8	130	52	4.2	32
16	Top	2	6	115	40	4.2	16
17	Top	1.8	8	100	40	3.5	24
18	Btm	2	6	130	40	3.5	32

적은 20×155mm로 하여 용사코팅 효율의 측정에 정확성을 기하였다. 최종 세라믹 코팅층의 두께는 초기 용사조건인 #14의 조건에서 약 200 μ m가 되도록 설정하였다. 용사코팅 효율은 용사 전·후 측정된 시료의 무게로부터 [용사코팅 효율 = (단위면적당 코팅층 무게)/(단위면적당 분말 공급량)×100 (%)]의 관계식을 사용하여 계산하였다. 표면거칠기의 측정은 Mitutoyo사의 SurfTest-402 표면거칠기 측정기를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

알루미늄 세라믹 용사 코팅층의 유전강도는 약 18.2KV/mm로 측정되었다. 이 값은 후막 HIC용으로 일반적으로 사용되는 표준 96% 알루미늄 소결기판의 유전강도가 23.6 KV/mm인 것과 비교하여 약간 낮았다⁵⁾. 유전강도의 측면에서 보면 후막 HIC용 절연기판으로 사용하기에는 문제가 없는 것으로 판단되었다. 그러나 99.5%의 고순도 알루미늄을 소결한 기판의 경우에는 유전강도가 30KV/mm인 것에 비해

서 플라즈마 용사 코팅한 기판의 유전강도가 다소 떨어진다. 이것은 소결한 알루미늄 기판의 결정구조는 α -알루미나이고, 플라즈마 용사 코팅한 알루미늄 기판의 결정구조는 γ -알루미나이기 때문인 것으로 알려져 있다⁶⁾.

플라즈마 용사조건에 따른 표면거칠기와 용사코팅 효율의 측정결과는 Table 3에서 보여 준다.

표면거칠기는 낮을수록 좋기 때문에 측정결과를 망소특성(smaller-the-better-type)에 따른 SN비(signal to noise ratio)를 구하여 분석하였다. 그 결과는 표면거칠기 절대값에 의한 분석결과와 거의 같은 경향을 나타내었다. 따라서 Fig. 4에서 보여 주는 플라즈마 용사조건이 표면거칠기에 미치는 영향은 표면거칠기의 절대값으로 나타내었다. 표면거칠기는 전반적으로 3.5~4.5 μ m의 범위에 있었다. 플라즈마 용사 변수 중에서는 인젝터 직경, 용사거리, 분말 송급가스 유량은 표면거칠기에 약간 영향을 미쳤으나 분말 송급 위치, Ar 플라즈마 가스 유량, 인젝터 거리, 분말 송급 속도는 거의 영향을 미치지 않았다. 전반적으로 본 연구에서 사용한 플라즈마 용사조건은 세라믹 코팅층의

Table 3 Surface roughness and deposition efficiency results

Property \ No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Surface Roughness (μ m)	3.7	3.7	4.2	4.0	4.0	4.7	5.2	3.7	3.5	3.7	4.5	4.0	5.0	3.7	4.0	3.5	4.0	4.5
	3.5	4.2	5.0	4.0	4.5	5.0	4.0	4.0	3.5	4.2	4.0	4.0	5.2	4.2	3.2	3.5	4.5	4.2
	3.5	4.5	3.7	4.5	3.5	4.7	4.0	4.0	3.2	3.2	4.7	3.5	4.5	3.7	4.0	4.2	3.7	4.2
Deposition Efficiency (%)	26.9	57.5	13.9	27.5	55.9	14.0	38.9	52.8	50.4	51.2	16.9	34.8	12.9	35.2	39.9	50.7	41.0	36.6

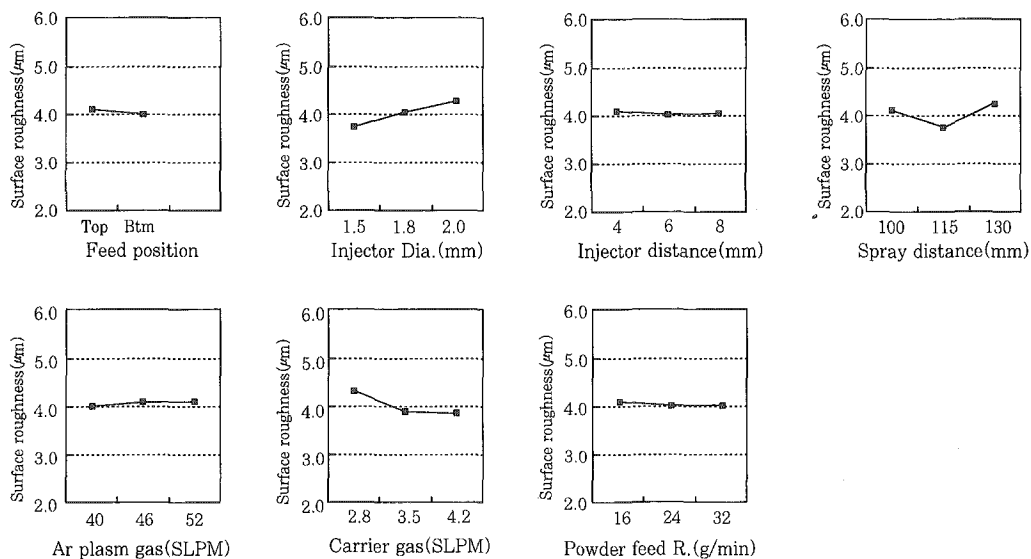


Fig. 4 Effect of the plasma spray conditions on surface roughness

표면거칠기에는 큰 영향이 없었으며, 세라믹 코팅층의 표면거칠기는 본드 코팅층의 표면거칠기와 세라믹 분말의 입도에 의해서 거의 결정되었다. 특히 세라믹 코팅층이 두꺼워지면 세라믹 분말의 입도에 의해 거의 결정되며, 플라즈마 용사조건을 변화시켜 표면거칠기를 조절하는 것은 큰 의미가 없다.

플라즈마 용사조건에 따른 알루미늄 세라믹의 용사코팅 효율을 분석한 결과는 Fig. 5에 정리하여 보여준다. 용사코팅 효율은 인젝터 직경, Ar 플라즈마 가스 유량과 분말 송급가스 유량에 매우 큰 영향을 받았다. 인젝터 거리와 분말 송급속도에도 약간의 영향을 받았으나 분말 송급위치와 용사거리에는 거의 영향을 받지 않았다. 이 결과로부터 용사코팅 효율을 높이기 위해서는 인젝터 직경은 1.5mm, Ar 플라즈마 가스 유량은 40 SLPM, 분말 송급가스 유량은 4.2 SLPM이 적합함을 알 수 있었다.

실험결과에서 표면거칠기는 용사조건에 거의 영향을 받지 않으나 용사코팅 효율은 일부 용사조건에 크게 영향을 받는다. 따라서 용사코팅 효율을 최대로 얻을 수 있는 용사조건을 최적의 플라즈마 용사조건으로 선택하는 것이 바람직하다. Table 4에서는 결과를 종합

하여 얻어진 최적의 플라즈마 용사조건을 보여 준다. Table 4의 최적 용사조건에서 인젝터 직경은 1.5 mm, Ar 플라즈마 가스 유량은 40 SLPM, 분말 송급 가스 유량은 4.2 SLPM으로 반드시 고정하여야 하나 다른 용사변수들은 사용하기 편리한대로 바꾸더라도 크게 영향을 받지 않는다. Table 4의 최적 용사조건으로 추가의 확인 용사실험을 수행하였다. 확인실험에서 75%의 매우 높은 용사코팅 효율을 얻을 수 있었다. 초기의 출발 용사조건인 #14에서 35%의 용사코팅 효율을 얻는데 비하면 2배가 넘는 용사코팅 효율의 향상을 가져왔다.

T. J. Steeper⁷⁾ 등은 L8 직교배열표를 사용한 다꾸찌 실험계획법에 의해 알루미늄 세라믹의 플라즈마 용사조건의 최적화 연구를 수행하였다. 용사코팅 효율에는 Ar 플라즈마 가스 유량과 분말 송급가스 유량이 가장 큰 영향을 미친다고 보고하였으나 그 경향은 본 연구결과와 반대로 나타났다. 즉 플라즈마 가스 유량이 높을수록, 분말 송급가스 유량이 낮을수록 더 높은 용사코팅 효율을 얻었다. 이것은 그들이 사용한 플라즈마 용사 시스템이 다르고, 입도가 15~53 μ m로서 큰 알루미늄 분말을 사용하였으며, 출발 플라즈마 용사조

Table 4 Optimized plasma spray coating condition

Power	Ar flow rate (SLPM)	H ₂ flow rate (SLPM)	Powder feeding position	Injector diameter (mm)	Injector distance (mm)	Spray distance (mm)	Carrier gas flow rate (SLPM)	Powder feed rate (g/min.)
600A, 64V	40	12	From bottom	1.5	6	115	4.2	24

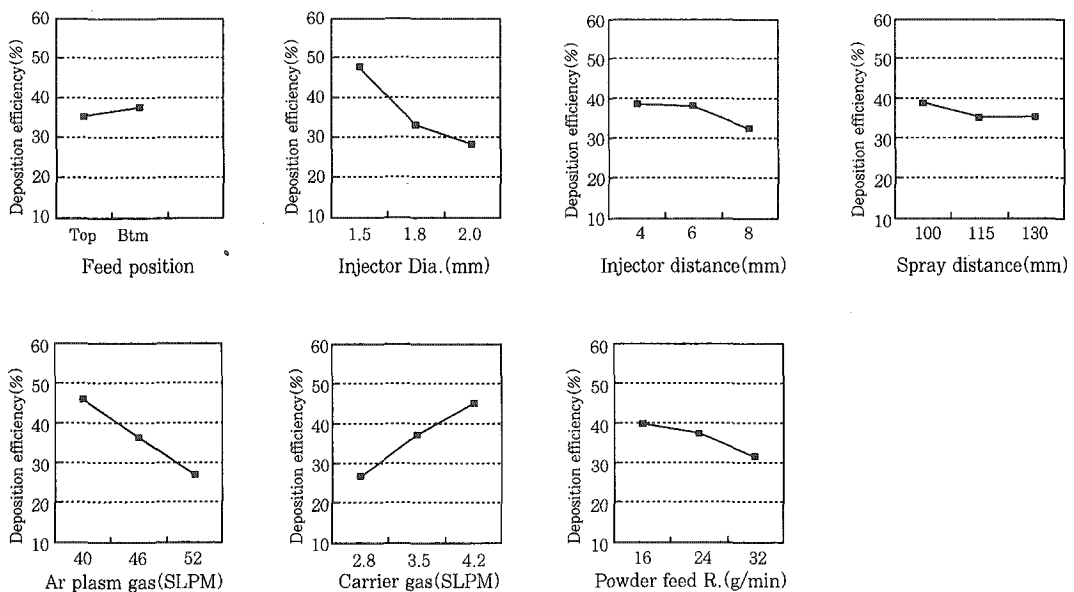


Fig. 5 Effect of the plasma spray conditions on deposition efficiency

건도 본 연구에서와 달랐기 때문으로 판단된다. 그들은 용사조건의 최적화를 통해서 최대 58.3%의 용사코팅 효율을 얻었다고 보고하였으나 본 연구결과의 75%에 비해 상당히 낮은 값에 해당한다. 이것은 인젝터 직경의 효과를 최적화하지 않은 때문으로 판단된다.

현재의 결과만으로 최적의 플라즈마 용사조건에서 용사코팅 효율이 크게 증가한 원인을 예측하기는 매우 어렵다. 본 연구에서 사용한 알루미늄 세라믹 분말은 비중과 입도가 작기 때문에 플라즈마 화염의 중앙에 효과적으로 공급하기 어렵다. 인젝터 직경, 분말 송급가스 유량, Ar 플라즈마 가스 유량을 최적화함으로써 알루미늄 세라믹 분말을 플라즈마 화염의 중앙에 효과적으로 공급하는데 기여한 때문으로 생각된다. 그러나 자세한 원인에 대해서는 플라즈마 용사과정에서 세라믹 분말의 플라즈마 화염 내에서의 분포상태, 분말의 궤적에 따른 가열 및 가속의 효율성 등에 대한 추가의 분석이 따라야 할 것으로 보인다. 현재의 결과로서 인젝터 직경, Ar 플라즈마 가스 유량, 분말 송급가스 유량만을 최적화하여 용사코팅 효율을 2배 이상 증가시킬 수 있었으며, 이러한 원인을 분석하기 위해서는 추가적인 연구를 필요로 한다.

4. 결 론

1. 알루미늄 세라믹 용사 코팅층의 유전강도는 약 18.2KV/mm로 측정되었으며, 보통의 후막 HIC용 기관으로 사용하기에 적합한 것으로 판단되었다.
2. 표면거칠기는 본 연구에서 사용한 플라즈마 용사조건에는 거의 영향을 받지 않았다.
3. 용사코팅 효율은 인젝터 직경, Ar 플라즈마 가스 유량, 분말 송급가스 유량에 크게 영향을 받았으며, 인젝터 직경 1.5mm, Ar 플라즈마 가스 유량 40

SLPM, 분말 송급가스 유량 4.2 SLPM에서 가장 높은 용사코팅 효율이 얻어졌다.

4. 초기의 출발 플라즈마 용사조건에서 약 35%의 용사코팅 효율을 얻었으나 실험계획법을 사용한 플라즈마 용사조건의 최적화에 의해 용사코팅 효율을 75%까지 높일 수 있었다.

후 기

본 연구는 과학기술부 특정연구개발사업비에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. J. Brunt and D. Harvey : High velocity spraying for electronic substrates, TWI Connect, 40(1992), 1.
2. 清水 勉 : セラミック・サーメット溶射技術の自動車への應用, 溶射技術, 9(1990), 49-56.
3. E. J. Kubel Jr. : Thermal spraying technology : From art to science, Advanced materials & Processes, 140(1987), 69-80.
4. M. S. Phadke : Quality engineering using robust design, Prentice Hall, New Jersey(1989).
5. S. J. Schneider, Jr. : Engineering materials handbook vol.4 : Ceramics and glasses, ASM international(1991).
6. L. Pawlowski : Structure-dielectric properties-relationship in plasma sprayed alumina coatings, Proc. National Thermal Spray Conference, Orlando, 14-17 Sept(1987), 277-284.
7. T. J. Steeper, W. L. Riggs II, A. J. Rotolico, J. E. Nerz, D. J. Varacalle, Jr. and G. C. Wilson : A Taguchi design of experiment study of plasma sprayed alumina coatings, Proc. the 5th National Thermal Spray Conference, Anaheim, 7-11 June (1993), 31-36.