

플라즈마용사공정에서의 최적조건 결정에 관한 연구

최경수 · 박동화

인하대학교 공과대학 화학공학과

(1995년 9월 11일 접수)

Determination of Optimum Condition in Plasma Spraying Process

Kyung-Soo Choi and Dong-Wha Park

Dept. of Chemical Eng., Inha Univ., Incheon 402-751, Korea

(Received September 11, 1995)

요 약

다구치(Taguchi)법을 사용하여 플라즈마 용사(spraying)에 의한 단열코팅층의 특성을 분석한 후 코팅층에 영향을 미치는 용사공정변수에 대하여 검토하였다. 실험변수들은 L8형 직교배열표를 사용하여 배치하였고, 이트리아로 부분안정화된 지르코니아를 TiAl 합금으로 된 모체에 용사를 행하였다. 코팅층의 특성은 SEM 및 영상분석기를 사용하여 두께, 미세조직 그리고 기공도를 측정하였으며, 코팅층의 품질은 단열효과측정, 열충격시험, 접착력시험의 결과로서 평가하였다. 고품질의 단열코팅을 위한 최적의 용사 조건을 다구치 분석으로부터 찾을 수 있었다.

ABSTRACT

A Taguchi methodology study of the plasma spraying thermal barrier coating (TBC) layer is presented. The experiment parameters were designed by a L8-style orthogonal arrays approach. A Taguchi analysis was conducted through the results of the coating properties which were affected by plasma spraying parameters. Zirconia (partially stabilized with yttria: PSZ) was sprayed on TiAl intermetallic compound substrates. The coating layer was characterized by thickness, microstructure and porosity using SEM and Image analyzer. The coating qualities are discussed with respect to thermal barrier effect. Thermal cycling test and adhesion strength test. An optimum condition of plasma spraying process which are derived from the Taguchi analysis could be found for high quality TBC.

Key words: Taguchi, TBC, PSZ, TiAl, Plasma spraying

1. 서 론

물질의 제4의 상태라고 불리는 플라즈마는 분자, 원자, 이온(기저 또는 여기 상태), 전자, 양성자 등을 포함한 전리 기체로서, 전기적으로 중성인 성질을 갖고 있다. 일반적으로 플라즈마는 열평형플라즈마(열플라즈마)와 비평형플라즈마(저온플라즈마)의 두 가지로 대별할 수 있으며, 이 두 가지 플라즈마는 산업적 응용 뿐만 아니라 실험실에서도 광범위하게 이용되고 있다¹⁾. 플라즈마 용사(spraying)는 산업적인 공정에서 열플라즈마의 고온(1.0~1.5×10⁴ K)을 이용한 분야중 하나로서 플라즈마 제트(jet)를 이용한 공정이다. 플라즈마 용사에서는 모체를 향해 분사되는 액적이 렌즈 모양의 얇은 층들로 겹쳐

지면서 코팅층을 형성하고, 분해되지 않으면서 녹일 수 있는 물질의 거의 대부분이 용사 재료로서 이용될 수 있다. 플라즈마 용사공정의 중요한 이점은 첫째 약 500 m/s에 달하는 높은 입자 속도를 갖고 있기 때문에 코팅층 자체와 모재간의 좋은 접착력을 얻을 수 있으며, 둘째 플라즈마 중심부의 온도가 약 15000 K에 달하는 고온이므로 용사 재료로서 각종 세라믹등 특히 고용점 물질의 코팅층 제조에 매우 유용하다는 점이다. 따라서 각종 세라믹의 우수한 특성을 이용하여 내열성, 내마모성, 내부식성등 특수한 성질이 요구되는 기계 부품 등의 재료 손상을 방지하기 위하여 많이 사용되고 있으며, 그 응용 분야는 항공, 조선, 전기, 핵공학등 첨단 산업 분야를 포함한 산업계 전반적으로 골고루 이용되고 있다. 특히

산업계에서 주목받고 있는 플라즈마 용사코팅의 대표적인 예는 단열코팅(Thermal Barrier Coating)을 들 수 있으며, 이는 고온에서 사용되는 부품을 보호하고 에너지 효율을 증대시키기 위하여, 열전도도가 낮은 세라믹을 모재표면에 코팅하는 것으로서 항공기 제트엔진, 가스 터빈, 자동차 부품 및 보일러 튜브등에 실용화되어 가고 있다.

본 연구는 플라즈마 용사를 이용한 단열코팅의 기초적 연구로서 고품위의 코팅층을 형성하는데 그 최종목적이 있다. 따라서 용사 재료로서 단열코팅에 사용될 세라믹계 용사재료의 특성은 낮은 열전도도, 상대적으로 고온 환경에서 우수한 열팽창계수를 갖는 열적 안정성, 열충격에 대항하는 기계적 안정성이 요구된다고 하겠다. 본 연구에서는 상기한 특성의 우수한 물성을 가진 이트리아로 안정화된 지르코니아를 사용하였다. 한편 사용될 모재로서는 현재 항공기 및 자동차 경량화에서 주목받고 있는 TiAl계 합금을 사용하여, 가볍고 단열성이 큰 부품의 개발에 기대를 하고 있다.

지금까지의 플라즈마 용사는 주로 실험적인 면에서 발전되어져 왔으며, 논리적인 접근으로는 플라즈마만의 상태 또는 특정한 몇몇 입자만의 플라즈마내에서의 거동에 대한 연구^{2,3)}가 보고되고 있으나, 코팅층의 형성 메카니즘, 구조, 특성치등에 영향을 미치는 요인의 조절⁴⁾ 등에 대한 과학적이고 논리적인 접근은 거의 없었다. 플라즈마 용사 공정에서 제어해야 할 변수는 각 공정과 장치의 조합에 따라서는 약 50여가지 이상으로 알려져 있다⁵⁾. 따라서 이러한 모든 변수들이 각각 적절하게 고려되어 조합된 상태에서 좋은 품질을 가진 코팅층의 생성이 가능하다. 그러나 이들 모든 변수에 대한 실험을 행한 결과로서 변수를 제어하여 우수한 코팅층을 제조한다는 것은 현실적으로 불가능하다. 그러므로 더 좋은 코팅층의 제조를 위해서는 공정에 대한 올바른 이해가 필요하며, 본 연구에서는 세라믹 코팅층의 구조와 특성치에 영향을 주는 공정 변수를 다구치 법⁶⁾을 사용하여, 요구되는 품질을 갖는 코팅층 제조를 위한 최적의 공정 변수를 결정하였다. 다구치법은 요구되는 특성치에 가장 커다란 영향을 주는 주된 변수(main parameter)를 확인하고, 확인된 공정 변수가 특성치의 분산을 최소화할 수 있도록 공정 변수를 포함하는데 그 목적을 두고 있다. 다구치법에는 S/N 비(Signal to Noise ratio), 안정성(robustness)등 전통적인 실험계획법⁷⁾과 비교할 때 새로운 개념을 포함하고 있으며, 실험특성치에 대한 분석적 의미를 통계적 기법을 이용하여 알아낼 수 있기 때문에 공학적으로 매우 실용적이다.

2. 실험

2.1. 실험 방법

본 연구에서는 항공기 제트 엔진, 가스 터빈, 자동차 부품 및 보일러 튜브 등 고온 분위기에서 사용되는 장치의 금속 부품에 대하여 재료의 안정성 및 열효율의 증대를 꾀하는데 주로 사용되고 있는 지르코니아를 선택하여 용사를 행하였으며, 모재로서는 항공기 및 자동차 경량화에서 주목받고 있는 재료인 TiAl계 합금을 사용하였다. 지르코니아 분말은 용사 장비 제조업체인 Metco사에서 제조하여 상업적으로 사용되고 있는 Metco 204NS(Zirconia-8 wt% Yttria)를 이용하였으며, 분말의 입경분포는 $-75 \sim +45 \mu\text{m}$ 이다. 플라즈마 발생 기스와 분말 이송 가스로는 Ar을 사용하였으며, 보조가스로는 H₂를 사용하였다. 분말은 플라즈마 제트 외부에서 제트 흐름의 수직 방향으로 주입하였다. 플라즈마 용사 장치의 개략도와 플라즈마 건(gun)은 Fig. 1에 나타내었다. 기관은 직경 15 mm, 두께 5 mm를 사용하였으며, 기관과 코팅층간의 접착력을 측정하기 위하여 직경 25.4 mm, 두께 25.4 mm의 STD61을 재료로 한 시편을 사용하였는데, 이는 TiAl계 합금의 제조와 가공이 ASTM c633-69에 의한 접착력 시험 규격을 정확하게 맞추기 어려웠기 때문에 간접적인 측정을 시도한 것이다. 한편 기관과 코팅층의 결합력은 주로 기계적 결합에 의존하므로 표면에 거칠기와 표면적을 넓혀야 한다. 이를 위하여 기관은 플라즈마 용사를 행하기 전 아세톤으로 초음파 세척 후 약 6 kg/cm²의 압축공기를 사용하여 알루미늄과 알루미늄으로 블라스팅을 행하였다. 한편 금속과 세라믹은 서로 커다란 열팽창계수의 차이를 가지고 있기 때문에 접합이 어렵고, 고온에서 사용할 경우 두 물질간에 응력이 발생하여 계면에서 박리가 일어날 수 있으며, 플라즈마 용사시 금속기관은 플라즈마의 고온으로 인한 기관 자체의 산화와 부식이 일어날 수 있다. 따라서 내산화성 및 내열성이 강한 NiCrAlY계 합금으로 본드코팅(bond coating)을 행하여 금속 기관과 세라믹 재료 코팅간의 접착 강도를 증대시키고, 열팽창계수 차이에 의한 응력을 완화시켰다. 이 후 세라믹 재료인 지르코니아 코팅을 행하였다.

요구되는 최적의 특성치를 가진 단열코팅(TBC)을 얻기 위해 다구치법을 사용하였다. 다구치법의 가장 큰 특징 중에 하나는 조절 가능한 변수(controllable parameter)로서 조절 불가능한 변수(uncontrollable parameter)를 고려하여 목적하는 특성치를 제어하자는 것이다. 이를 위하여 신호대 잡음비(S/N : Signal to Noise ratio)

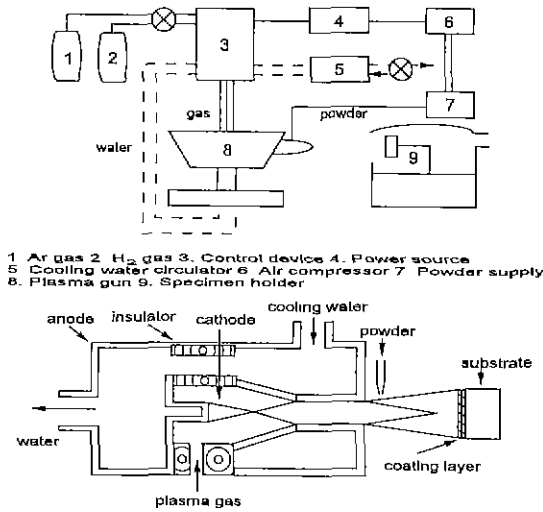


Fig. 1. Schematic representation of plasma spraying apparatus and a spray gun

즉 조절 불가능한 변수를 고려한 조절 가능한 변수가 목적하는 특성치에 얼마나 큰 영향을 미치는가를 수치로 표현한 후 이러한 변수에 따라 가장 우수한 특성치를 나타낼 수 있도록 변수들의 조합을 도출하는 것이다.

코팅층의 형성에 주로 영향을 미치는 것으로 알려진 주요 공정 변수(조절 가능한 변수)로는 플라즈마 발생 가스, 보조 가스, 용사 거리를 선정하였다⁸⁾. 그 이외의 공정 변수인 전류, 분말이송가스흐름량등은 용사장치 제조업체에서 추천한 수준으로 고정시켰다. 한편 조절 불가능한 변수로서는 분말 공급량과 모재표면의 거칠기를 선정하였다. 분말 공급량은 분말공급기, 공급가스등의 상태에 따라 불안정한 양을 공급하기 때문이고, 모재표면의 거칠기는 블라스팅 과정에서 조절이 불가능하기 때문이다. 이에 대한 내용은 Table 1에 나타내었다. 한편

Table 1. Experiment Parameters

Control parameters		Level 1	Level 2
A	Primary gas flow rate(scfh)	60	80
B	Secondary gas flow rate(scfh)	9	15
C	Spraying distance(inches)	3	4
Interactions			
A×B	Primary gas flow rate(scfh)× Secondary gas flow rate(scfh)		
B×C	Secondary gas flow rate(scfh)× Spraying distance(inches)		
Noise parameter		Level 1	Level 2
N ₁	Powder feed rate(gauge shown)	4	6
N ₂	Surface roughness	less	more

이러한 변수들은 Table 2에서와 같이 L8형 직교배열표를 사용하였고, 배치는 각 요인간에 교호(交互 : interaction) 작용은 없다고 가정하였으며, 6요인 2수준으로 배치하였다. 여러 가지 특성 분석을 통해서 얻은 코팅의 특성치에 대한 각 플라즈마 용사 공정 변수의 영향을 다구치 분석을 통하여 가장 적합하다고 생각되는 공정변수의 수준을 찾아내었다.

2.2. 코팅층의 특성분석

코팅층에 대한 각각의 특성 분석결과를 Table 3에 나타내었다. 이 중 코팅층의 특성은 두께, 기공도, 단열효과 그리고 미세조직관찰후의 평가치에 대해 측정하였다. 코팅층의 두께와 기공도는 SEM 사진의 분석과 영상분석기(Image Analyzer)를 사용하였다. 이때 영상분석기의 배율은 300배로 고정하였으며, 기공과 코팅주변과의 명

Table 2. Experiment Design and Data [Thickness (μm)]

Run #	A	B	A×B	C	A×C	B×C	e	N ₁		N ₂	
								1	2	1	2
Z01	1	1	1	1	1	1	1	10.8	11.4	13.7	15.6
Z02	1	1	1	2	2	2	2	11.5	12.8	15.4	18.0
Z03	1	2	2	1	1	2	2	9.3	11.0	12.6	12.0
Z04	1	2	2	2	2	1	1	8.6	11.6	14.3	14.2
Z05	2	1	2	1	2	1	2	9.8	12.3	16.7	18.1
Z06	2	1	2	2	1	2	1	9.7	7.6	17.3	17.9
Z07	2	2	1	1	2	2	1	13.2	16.5	12.6	13.0
Z08	2	2	1	2	1	1	2	8.4	11.3	13.3	12.0

Table 3. The Coating Characterization Results

		Z01	Z02	Z03	Z04	Z05	Z06	Z07	Z08	
Thickness (μm)	N ₁	1	430	300	400	540	300	740	540	750
		2	630	750	320	720	540	900	430	820
	N ₂	1	760	620	520	750	860	380	400	410
		2	440	500	630	760	460	450	320	350
Porosity (%)	N ₁	1	10.8	11.5	9.3	8.6	9.8	9.7	13.2	8.4
		2	11.4	12.8	11.0	11.6	12.3	7.6	16.5	11.3
	N ₂	1	13.7	15.4	12.6	14.3	16.7	17.3	12.6	13.3
		2	15.6	18.0	12.0	14.2	18.1	17.9	13.0	12.0
Thermal Barrier Effect (°C)	N ₁	1	62	63	68	61	54	58	62	63
		2	61	58	62	65	67	60	66	65
	N ₂	1	61	57	63	65	63	64	56	60
		2	55	59	59	59	65	62	60	57
Grade	N ₁	1	30	40	50	80	50	80	70	60
		2	50	40	40	60	80	70	60	70
	N ₂	1	60	40	30	80	70	40	30	30
		2	60	30	70	60	30	30	40	30

암은 결과의 명확성을 위하여 기공의 크기를 충분히 확인할수 있도록 최대로 하였다. 영상분석을 세라믹에 적용할 때는, 빛의 반사가 충분치 못하여 확연한 영상을 취하기 어렵기 때문에, 기공도 측정의 경우는 동일한 시편의 서로 다른 부위를 SEM 사진과 광학현미경으로 취한 영상을 각각 5회 반복 측정하여 평균값을 구하였다. 단일효과를 측정하는 장치는 열전도도측정장치를 응용하여 자체 제작하였다. 이때 단일효과는 지르코니아 코팅층 상층부의 온도와 기판 하층부 온도의 차이로서 정의 하였다. 미세조직 관찰 후의 평가치는 1mm²의 grid로 나뉜 무명한 용지를 사용하여 코팅층의 SEM 및 광학 현미경 사진을 관찰하였다. 이때 기판과 각 코팅층간의 계면의 결합상태, 녹은 입자의 크기 또는 용융되지 않은 입자의 포함정도, 기공분포의 균일도, 라멜라 구조등 미세조직을 전반적으로 관찰 후 이를 평가하여 100점을 기준으로 10점씩의 차이를 두어 10단계로 나눈 값이다. 한편 기판과 코팅층간의 접착력 시험은 ASTM c633-69에 따라 측정하였다. 열 충격시험은 750°C에서 10분 유지 후 상온으로 강제 수냉시켜 2분간 유지시키는 실험을 반복하여 육안으로 코팅층의 박리가 일어남을 확인할 때까지의 반복횟수를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

다구처법에 의한 특성치의 분석에는 신호 대 잡음비

(S/N)라는 중요한 개념을 갖고 있다. S/N비는 특성치에 대한 공정변수의 영향의 정도를 수치화 한 것으로서 중요한 몇몇 공정변수의 설계에 있어서 공정변수에 대한 특성치의 안정성(robustness)을 측정하는 도구가 된다. 본 연구에서는 S/N비는 잡음으로 표현한 조절 불가능한 변수가 분석특성치에 줄 수 있는 영향의 기준으로 설정하였다. S/N비는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

* Smaller-the-Better : 특성치의 값이 작을수록 좋은 경우

$$S/N = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \tag{1}$$

* Larger-the-Better : 특성치의 값이 클수록 좋은 경우

$$S/N = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \tag{2}$$

* Nominal-the-Better : 특성치가 원하는 일정한 값인 경우

$$S/N = 10 \log \left[\frac{\bar{y}^2}{S^2} \right] \tag{3}$$

단, 식 (3)에서 괄호안의 S는 분산(variance)을 나타낸다.

코팅층의 특성 분석결과(Table 3) 두가지 그룹으로 나

Table 4. The S/N Response Table for Thickness

		S/N response						
		A	B	A×B	C	A×C	B×C	e
Thickness (μm)	Level 1	-55.27	-55.49	-54.73	-54.21	-55.27	-55.80	-55.28
	Level 2	-54.99	-54.78	-55.52	-56.03	-54.98	-54.43	-54.94
	$\Delta(\text{delta})$	0.28	0.71	0.79	1.82	0.29	1.37	0.34
Porosity (%)	Level 1	-22.13	-22.94	-22.40	-22.38	-21.83	-22.15	-22.47
	Level 2	-22.54	-21.73	-22.27	-22.29	-22.84	-22.52	-22.20
	Δ	0.41	1.21	0.13	0.09	1.01	0.37	0.27
Thermal Barrier Effect ($^{\circ}\text{C}$)	Level 1	35.70	35.61	35.58	35.73	35.71	35.72	35.69
	Level 2	35.71	35.80	35.83	35.68	35.70	35.69	35.72
	Δ	0.01	0.19	0.25	0.05	0.01	0.03	0.03
Grade	Level 1	33.23	32.56	32.10	33.01	32.43	33.63	33.72
	Level 2	32.60	33.30	33.77	33.11	33.44	32.24	32.15
	Δ	0.63	0.74	1.67	0.1	1.01	1.39	1.57

눌 수 있다. 한가지는 Smaller-the-Better 즉 특성치의 값이 작을 수록 좋은 경우로서 코팅층의 두께, 기공도 등은 그 값이 작을수록 좋다. 만약 지르코니아 분말들이 플라즈마 불꽃안에서 최고온도에 도달할 수 있는 궤적을 갖고 잘 용융되어 있고, 치밀한 라멜라 구조를 만들 수 있기에 충분한 증돌 속도를 갖는다면 코팅층의 두께는 더욱 얇아질 것이다. 한편 코팅층의 구조가 치밀하다면 코팅층내에 존재하는 기공의 크기는 작아지고 그 분포도 균일할 것으로 판단된다. 기공도의 값이 큰 경우는 작은 기공이 매우 많은 경우도 생각될 수 있지만, 분말의 용융이 용이하지 않거나 입자의 속도가 충분치 않은 경우 용융되지 않은 입자가 모재 또는 또 다른 지르코니아층에 정착하여 치밀한 라멜라 구조의 형성을 방해 하여 매우 크고 불안정한 기공으로 남게 되어 고온 분위기나 열충격을 받을 경우 코팅층의 균열에 중대한 영향을 미치게 된다. 따라서 기공의 경우 단열효과에는 어느정도 영향을 주는 것으로 판단되지만 지르코니아 자체의 낮은 열전도도에 비교하면 상대적으로 그 값이 매우 작게 되므로 코팅층의 균열등에 영향을 줄 수 있는 불안정한 기공을 배제하는 것이 좋다.

그리고 또 다른 하나는 특성치의 값이 클수록 좋은 Larger-the-Better 그룹이다. 즉 단열효과와 미세조직 관찰 후 평가치의 두가지 특성치 모두 단열코팅이 필수적으로 지녀야 하는 사항이므로 그 값이 클수록 좋다.

Table 3의 결과로부터 식(1), (2)를 이용하여 각 변수와 상호작용의 수준을 알아내고, 응답표(response table)를 작성할 수 있도록 평균 S/N 값을 식(1)과 (2)를 이용하여

계산하였다. 각 특성결과로부터 계산된 S/N비의 값을 Table 4에 나타내었다. Table 4에서 각 변수의 영향인 Δ (delta)의 값은 다음과 같이 수준 1과 수준 2의 평균 S/N비의 차로써 정의하였다.

$$\text{Effect of A} = |\bar{A}_1 - \bar{A}_2|$$

where, \bar{A} = average S/N

1 = level 1

2 = level 2

Table 4로부터 각 변수의 영향을 조사해 본 결과 코팅층의 두께에는 용사거리(C)가 가장 큰 영향($\Delta=1.82$)을 나타내었다. 두번째로는 보조가스와 용사거리의 상호작용($B \times C, \Delta=1.37$)이 큰 영향을 주었다. 그리고 플라즈마 발생가스와 보조가스의 상호작용($A \times B$). 보조가스의 유량순이었다. 위의 분석으로부터 각 변수의 적절한 수준은 용사거리의 수준 1 즉 3 in이고, 보조가스의 유량은 수준 2 즉 15 scfh였다. 그러나 두번째로 큰 영향을 주는 것으로 판단된 보조가스와 용사거리의 상호작용($B \times C$)과 플라즈마 발생가스와 보조가스의 상호작용($A \times B$)의 경우는 각각의 두가지 변수에 대한 상호작용에 대한 S/N 비로부터 2×2 의 간단한 행렬표를 만든 후 그래프를 작성하여 상호작용의 정도를 파악해야 한다. 행렬표와 그래프는 Fig. 2에 나타내었다. 상호작용 $B \times C$ 의 경우, 평균값 B_2 와 C_1 이 그래프상에서 가장 높은 값을 갖고 있으므로 그림에서 판단해 볼 때 상호작용 $B \times C$ 의 가장 좋은 조합은 B_2C_1 로 판단해 볼 수 있으나 그래프에서 볼 수 있는 바와 같이 두 선 사이에 교차되는 곳이 없

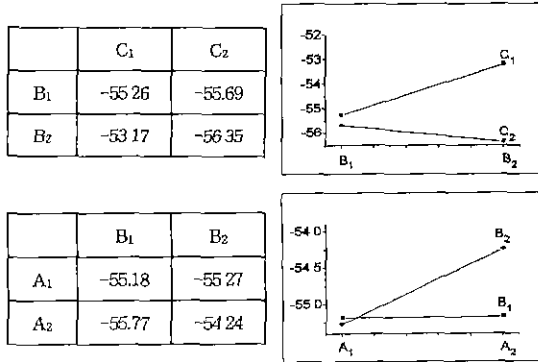


Fig. 2. The interaction matrix and graph for thickness

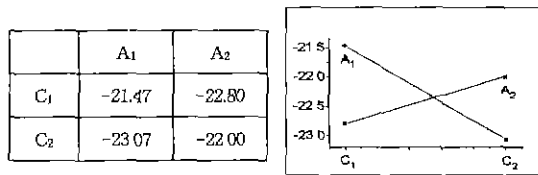


Fig. 3. The interaction matrix and graph for porosity

으므로 상호작용은 무시할 수 있다. 또한 상호작용 A×B는 그래프상에서 교차점이 있으므로 상호작용을 하는 것으로 판단할 수 있다. 그래프에서 평균값 A₂와 B₂의 평균값이 가장 높은 값을 갖고 있기 때문에 A₂B₂가 가장 좋은 조합이라고 판단된다. 그러므로 위의 주된 변수들의 분석으로부터 코팅층의 두께에 가장 큰 영향을 주는 변수는 용사거리, A×B의 상호작용 그리고 보조가스의 유량이었다: C₁B₂A₂

기공도는 Table 4로부터 보조가스의 유량(B)이 가장 큰 영향을 미치는 요인이었으며, 다음으로 상호작용 A×C가 두번째였다. 다른 변수들은 그다지 영향을 주지 않았다. 두께에 대한 영향을 살펴 본 바와 같은 분석방법으로 기공도에 대한 S/N비를 고찰해 본 행렬표와 그래프를 Fig. 3에 나타내었다. 그래프에서 평균값 C₁과 A₁이 가장 높은 값을 갖고 있으므로 가장 좋은 조합은 C₁A₁으로 판단되며, 각 변수들의 적절한 수준은 B₂C₁A₁이다. 이상으로 smaller-the-better 그룹이 두께와 기공도에 영향을 미치는 공정변수의 조합을 살펴본 결과, 두께는 용사거리가 3 inch인 경우 좋은 특성치 즉 두께가 얇아지는 경향을 나타내었다. 본 실험조건에서는 용사거리가 4 inch인 경우보다 플라즈마와 입자간에 열전달이 플라즈마 속도와 비행거리의 조화가 잘 이루어 졌기 때문이다. 한편 기공도의 경우 보조가스인 수소의 유량이

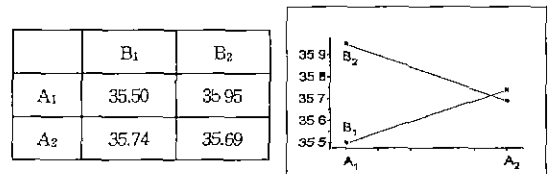


Fig. 4. The interaction matrix and graph for thermal barrier effect

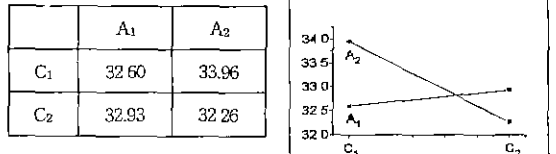
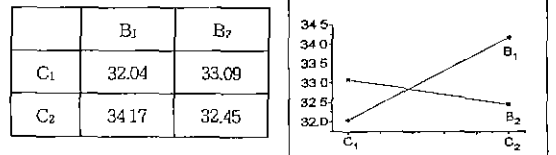
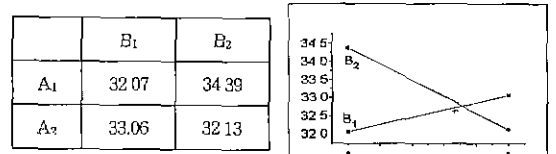


Fig. 5. The interaction matrix and graph for grade

클수록 기공도가 적어지는 경향을 나타내는 이유는 수소는 열전도도가 높은 기체이기 때문에 플라즈마의 열량 증가에 크게 기여를 하여 분말이 잘 용융되고 이에 따라 치밀한 라멜라 구조를 형성했기 때문에 기공이 감소한 것으로 판단된다. 두번째로 A₁×C₁의 상호작용이 큰 영향을 주었는데, 이것은 플라즈마와 입자간의 열전달에 있어 플라즈마내에서 입자의 체류시간에 영향을 주는 요인으로서 플라즈마 발생가스의 유량이 적으면 플라즈마의 속도가 느려지므로 입자의 체류시간이 증가하여 열전달에 기여하는 것으로 생각된다.

단열효과에 가장 큰 영향을 주는 변수는 Table 4로부터 플라즈마 발생가스와 보조가스의 상호작용(A×B)이었으며, 두번째로는 보조가스의 유량이었다. S/N비 상호작용에 대한 행렬표와 그래프는 Fig. 4에 나타내었다. 이 경우 S/N비 평균값의 차가 다른 특성치의 값들의 경우보다 매우 작으므로, "단열효과는 잡음(조절불가능한 변수)에 대해 안정성(robustness)을 가지고 있다."라고 말할 수 있다. 각 변수들의 수준의 조합을 추천한다면 A₁B₁C₂이다. 단열효과는 지르코니아 자체의 열전도도에 지배

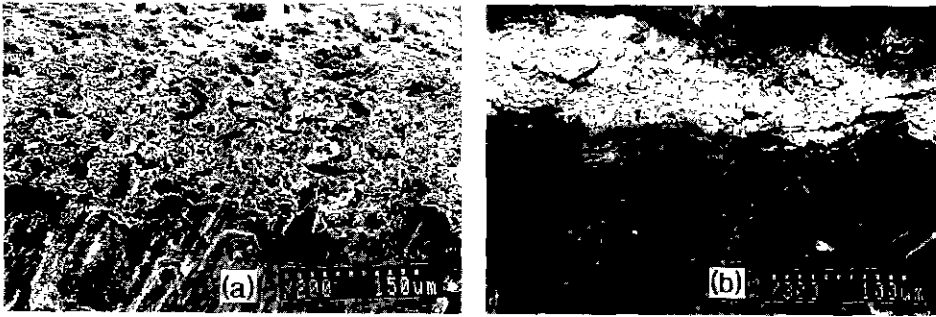


Fig. 6. SEM cross-sectional microstructure after thermal cyclic test (a) before test (Z04) (b) after test (Z04)

적으로 영향을 받지만 코팅층내에서의 기공도와 분포에도 무시할 수 없는 영향을 받게 된다. 따라서 가장 커다란 영향을 준 인자가 플라즈마의 속도에 영향을 주는 플라즈마 발생가스 유량과 플라즈마의 열용량을 증가시키는 요인인 수소가스 유량의 상호작용인데 이의 조합은 플라즈마와 입자간의 열전달을 용이하지 않게 하는 경우이다.

미세조직 관찰 후 평가치에 가장 커다란 영향을 주는 변수는 Table 4로부터 플라즈마 발생가스와 보조가스의 상호 작용(A×B), 그리고 상호 작용 B×C, A×C의 순이다. 행렬표와 그래프는 Fig. 5에 나타내었고 이때 추천할 만한 적절한 조합은 B₂A₁C₂이다. 미세 조직 관찰 후의 평가치는 여러가지의 평가 항목이 포함되어 있던 경우이기 때문에 모두 상호작용의 영향을 주로 받았다.

열 cycle 시험을 행한 결과 모든 시편이 30회 이상의 시험에서도 육안으로 박리를 관찰할 수 없었기 때문에 단면을 SEM으로 관찰하였으며, 사진은 Fig. 6에 나타내었다. 그 결과 세라믹 코팅층과 bond 코팅층 모두 박리가 일어났다. 이는 기판과 각 코팅층간의 열팽창 계수의 차이에서 오는 열응력과 코팅층 자체의 균열(crack)에 의존한다. 사진에서 관찰된 바와 같이 미세적 박리가 일어났음에도 결합력을 유지하고 있었다.

접착력 시험 결과 분석가능한 경향성은 보이지 않았다. 접착강도는 약 10~40 MPa의 범위에서 값을 갖고 있었으며, 기판과 코팅층간의 계면이 아닌 지르코니아 코팅층 자체에서 박리가 일어났다. 이것은 엄밀한 의미에서는 adhesion strength가 아닌 cohesion strength를 측정된 결과이다. 또한 bond 코팅층과 지르코니아 코팅층과의 박리도 발견할 수 없었다. 그러나 현재 갖고 있는 세라믹 분말의 코팅 후 기판과의 접착 성능을 월등히 향상시키는 방법이 알려져 있지 않으므로 bond 코팅을 행하지 않고 바로 세라믹 코팅을 행한다는 것은 무의미하다고 판단된다. 그러므로 TBC(단열코팅)로서의 코팅층은 직접적인

충격이 가해지지 않는 부위에 사용하게 된다면 성능에 큰 영향은 없을 것으로 판단된다.

4. 결 론

플라즈마 용사에 의하여 TiAl계 합금을 기판으로 하여 단열코팅을 수행하였다. 실험은 다구치법을 이용하여 실행하였으며, 다구치 분석을 통하여 적절한 공정변수들의 조합을 찾아낼 수 있었다. 특성치의 분석은 코팅층의 두께, 기공도등을 살펴보았으며, 품질의 측면에서는 단열효과, 미세조직관찰 후 평가치, 열충격시험, 접착력 시험등을 통하여 평가하였다.

코팅층의 두께는 용사거리가 가장 주된 영향을 주었으며, 보조가스유량과 용사거리의 상호작용(B×C) 그리고 플라즈마 발생가스유량과 보조가스유량의 상호작용(A×B), 보조가스유량의 순이었다. 이에 따른 적절한 공정변수의 조합은 C₂B₂A₁이다. 보조가스의 유량은 기공도에 가장 큰 영향을 끼쳤고, 다음으로 플라즈마 발생가스유량과 용사거리의 상호작용(A×C)의 순이었다. 추천할만한 변수의 조합은 B₂A₁C₁이다. 단열효과에 영향을 준 변수는 상호작용 플라즈마 발생가스유량과 보조가스유량의 상호작용(A×B) 그리고 보조가스유량의 순이다. 적절한 조합은 A₁B₁C₂이다. 미세조직 관찰 후 평가치는 상호작용 플라즈마 발생가스유량과 보조가스유량의 상호작용(A×B)에 의하여 가장 많은 영향을 받았다. 다음으로 보조가스유량과 용사거리의 상호작용(B×C), 플라즈마 발생가스유량과 용사거리의 상호작용(A×C)의 순이었다. 추천할만한 적절한 변수들의 조합은 B₁A₁C₂이다.

감 사

본 연구는 학술진흥재단의 '92 대학부설 연구소 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. E. Pfender, INTERNATIONAL SUMMER SCHOOL ON PLASMA CHEMISTRY, ATAMI, JAPAN, August 27-29 (1987).
2. A. Vardelle, M. Vardelle, and P. Fauchais, Influence of Velocity and Surface Temperature of Alumina Particles on the Properties of Plasma Sprayed Coatings, Plasma Chemistry and Plasma Processing, Vol. 2, No. 3 (1982).
3. Dong-Wha Park, Takuya Honda, and Atsushi Kanzawa, "Experimental Study of Effective Particle Heating by a Thermal Plasma Flow Confined in a Porous Ceramic Tube," *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 8(2), 159 (1988).
4. T.J. Steeper, A.J. Rotolico, J.E. Nerz, W.L. Riggs II, D.J. Varacalle, Jr. and G.C. Wilson, A Taguchi Design of Experiment Study of Plasma Sprayed Alumina Coatings., Proceedings of the 1993 National Thermal Spray Conference, Anaheim, CA, 7-11 June (1993).
5. M. Lynn, S. Lynn, D.J. Varacalle, Jr., W.L. Riggs II: An Experimental/Analytical Investigation of Plasma-Sprayed Alumina Coatings., Proceedings of the 1993 National Thermal Spray Conference, Anaheim, CA, 7-11 June (1993).
6. Douglas C. Montgomery, Design and Analysis of Experiments, 3rd edition. JOHN WILEY & SONS (1991).
7. 박성린, "현대실험계획법," 민영사 (1992).
8. 최경수, 박동화, "실험계획법을 이용한 플라즈마 단열코팅에 관한 연구," *공업화학*, 6(2), 826 (1995).