

저출력 펄스형 Nd:YAG 레이저를 사용한 클래딩에서 클래딩 변수들이 용착효율에 미치는 영향 분석 및 최적화

이 형 근*

*한밭대학교 신소재공학부 생산가공공학전공

Analysis and Optimization of the Cladding Parameters for Improving Deposition Efficiency in Cladding using a Low Power Pulsed Nd:YAG Laser

Hyoung-Keun Lee*

*Dept. of Welding and Production Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 305-719, Korea

Abstract

The optimization of the cladding parameters was studied to maximize the deposition efficiency in the laser cladding using a low power pulsed Nd:YAG laser. STS304 stainless steel plate and Co alloy powder were used as a substrate and powder for cladding, respectively. The six cladding parameters were selected through preliminary experiments and their effects on the deposition efficiency were analyzed statistically. Experiments were designed and carried out using the Taguchi experimental method using a L18 orthogonal array. It was found from the results of analysis of variance(ANOVA) that the powder feed position and powder feed angle had the most significant effects on the deposition efficiency, but the powder feed rate and laser focal position had nearly no effects. The deposition efficiency could be maximized at 0mm of the powder feed position and 50° of the powder feed angle in the experimental range. From this experimental analysis, a new laser cladding head with 20° of the powder feed angle was designed and manufactured. With a new laser cladding head, the highest deposition efficiency of 12.2% could be obtained.

*Corresponding author : leehk@hanbat.ac.kr

(Received May 30, 2007)

Key Words : Laser cladding, Cladding parameters, Deposition efficiency, Taguchi method, Optimization

1. 서 론

소재의 표면에 내마모 및 내부식성을 부여하기 위한 클래딩 방법으로서 레이저 클래딩 방법이 많은 관심을 받아 왔다^{1,2)}. 레이저 클래딩 방법은 전자기장의 방해를 받지 않으며, 클래딩 분말과 모재에 에너지의 적절한 분배에 의해 과도한 모재의 회석을 줄일 수 있으며, 모재와의 작업거리를 확보할 수 있는 등 많은 장점들을 가지고 있다. 특히 최근 들어 CAD/CAM을 활용한 다양한 레이저 클래딩 방법들이 연구되고 있다^{3,4)}. 그러

나 레이저 클래딩은 비교적 최근 들어 광범위하게 사용되기 시작한 기술이기 때문에 각 산업현장에 적합한 상용화된 레이저 클래딩 헤드를 이용하기가 어려우며, 레이저 클래딩 조건이 표준화되어 있지 않은 단점이 있다. 레이저 클래딩의 적용 환경은 매우 다양하게 변화하며, 각 환경에 따라 레이저 클래딩 변수들의 최적화가 요구된다.

일반적으로 효율적인 레이저 클래딩을 위해서는 2kW 이상의 고출력 연속 레이저가 요구되고 있다⁵⁾. 레이저 출력이 어느 수준 이상이어야 적절한 레이저 클래딩 효율을 확보할 수 있기 때문이다. 본 연구에서는 최대 평

균출력 400W의 저출력 펄스형 Nd:YAG 레이저를 사용하여 Co 합금의 레이저 클래딩을 목적으로 하고 있다. 펄스 레이저는 많은 장점을 제공한다. 예를 들면 연속 레이저에 비해 열의 누적이 작기 때문에 열영향부가 작으며, 희석율을 작게 할 수 있으며, 균열의 경향을 줄일 수 있다⁶⁾. 그러나 2 개의 인접 레이저 펄스 사이에서 레이저가 꺼져 있는 시기에는 레이저 클래딩이 일어나지 않기 때문에, 낮은 용착효율을 초래할 수 있다. 특히 저출력 펄스 레이저 클래딩에서는 용착효율을 증가시키는 것이 매우 중요한 과제이다.

본 연구에서는 용착효율을 높이기 위하여 레이저 클래딩 변수들이 용착효율에 미치는 영향을 분석하였으며, 클래딩 변수들의 최적화를 수행하였다. 레이저 클래딩 변수들은 매우 다양하며, 많은 변수들의 영향을 적은 실험으로 체계적으로 분석하기 위하여 통계적인 실험 및 분석기법인 다꾸찌(Taguchi) 실험계획법을 사용하였다. 분석된 결과들을 바탕으로 새로운 레이저 클래딩 헤드를 설계 제작하였으며, 새 클래딩 헤드를 사용하여 용착효율을 크게 향상시킬 수 있었다.

2. 실험방법

2.1. 시험편, 분말 재료 및 레이저 장치

레이저 클래딩을 위한 모재로는 STS304 스테인레스강 판재를 25mm^w × 50mm^l × 3.0mm^t의 치수로 절단하여 사용하였다. 클래딩용 합금 분말은 고온에서 내

Table 1 Chemical composition of the substrate and Co alloy powder(wt, %)

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Co	Cr	W
STS304	0.08	1.0	2.0	<0.05	<0.03	9.2	-	19.0	-
Co alloy powder	0.5	-	-	-	-	10.5	56.0	25.5	7.5

마모 및 내부식성이 우수한 Co계 합금 분말을 사용하였다. Co 합금 분말은 water atomizing에 의해 제조되어 구형형상이며, 입도는 45 ~ 75 μ m의 범위에 있었다. Co 합금 분말은 W을 다량 함유하여 고온에서 내부식성과 연삭마모(abrasive wear)에 강한 특성을 가진 재료이다. 모재와 Co 합금 분말의 화학조성은 Table 1에 수록하였다.

클래딩을 위한 레이저 장치는 flash lamp pumping에 의한 펄스형 Nd:YAG 레이저(한빛레이저 모델 510PW)를 사용하였으며, 최대 400W의 평균출력을 갖는다. 공진기로부터 발생된 레이저 빔은 코어 직경 600 μ m의 광섬유(optical fiber)에 집속되어 전송되며, collimator와 집속렌즈를 통하여 시험편의 표면 혹은 표면 위의 정해진 위치에 집속된다. 집속렌즈의 유효초점거리는 203mm를 갖는다. 레이저 클래딩 장치의 대략적인 구성은 Fig. 1에서 보여준다.

레이저 빔의 초점위치(focal position; 시험편의 표면에서 초점(focal spot)까지의 거리, 즉 Fig. 1에서 F)가 변화함에 따라 시험편 표면에서 레이저 빔의 직경

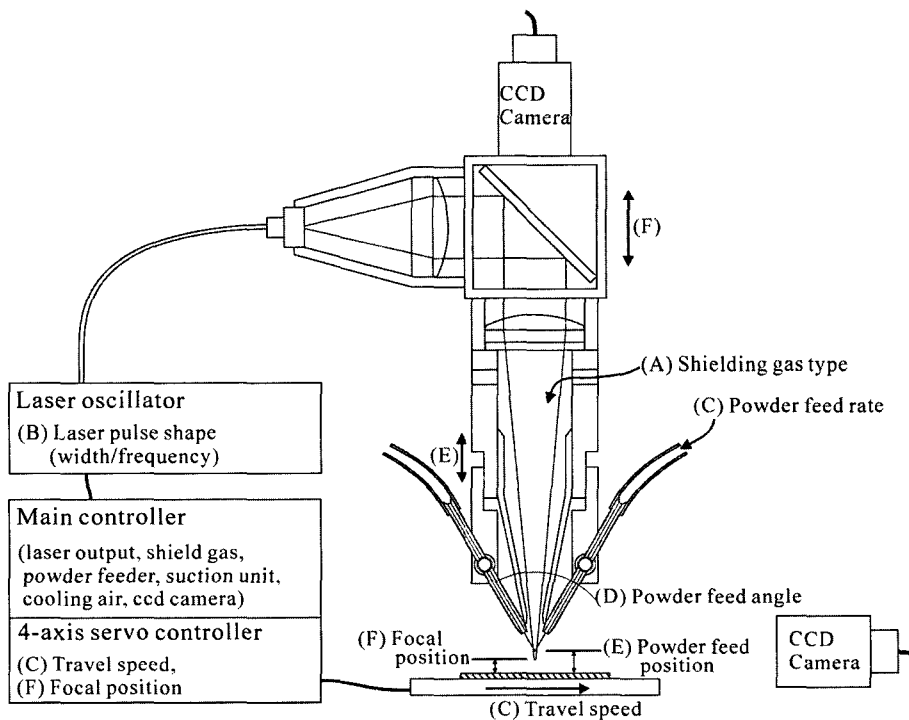


Fig. 1 Schematic diagram showing the laser cladding parameters used in this study

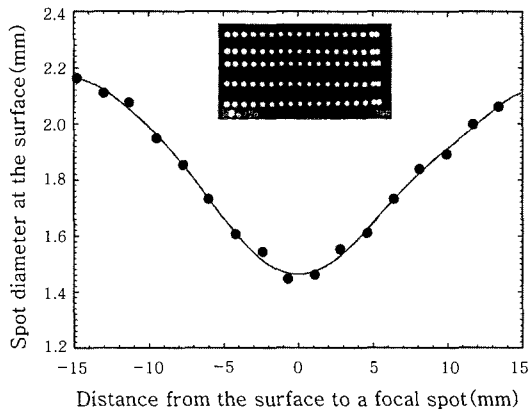


Fig. 2 Changes of the spot diameter at the surface with focal positions

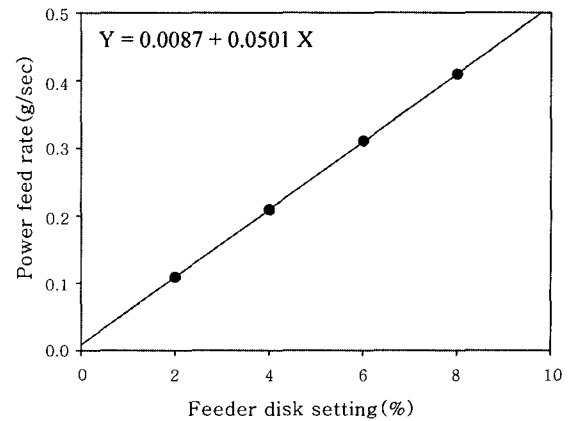


Fig. 3 A graph showing a good linear relationship between the powder feed rate and the revolution setting of the feeder disk

이 변화하게 된다. 레이저 빔의 직경은 레이저 강도 (intensity; $J \cdot cm^{-2} \cdot sec^{-1}$)에 영향을 미치기 때문에, 초점위치에 따른 레이저 빔의 직경 변화를 관찰하기 위한 실험을 수행하였다. 클래딩 헤드를 일정한 속도로 위쪽으로 이동시키면서(즉 초점위치를 -15mm에서 +15mm로 변화시키면서), 동시에 수평으로 이동하는 양극산화된(anodizing) Al 판재 위에 레이저 펄스를 연속으로 조사하여 조사흔적의 직경을 측정하였다. 조사흔적의 직경을 간접적으로 레이저 빔의 직경으로 고려하였다. 광섬유를 통과한 레이저 빔의 강도분포는 전형적인 top hat 형상을 보여 준다. 즉 레이저 빔의 주변 경계 영역에서 강도가 급격히 감소하기 때문에 레이저 빔의 직경과 조사흔적 사이에 큰 차이가 없을 것으로 보인다. Fig. 2는 조사흔적의 사진과 초점위치에 따른 조사흔적의 직경 변화를 그래프로 보여 준다. 초점에서 조사흔적의 직경은 1.45mm를 가졌다.

분말송급장치는 Sulzer Metco사의 Twin-10 모델을 사용하였으며, 디스크 회전속도에 의해 분말송급량을 조절할 수 있다. 균일한 분말송급속도를 유지하기 위하여 분말 hopper에 추가적으로 예열장치를 부착하여 50°C로 일정하게 유지하였다. Co 합금 분말의 분말송급속도를 측정하였으며, Fig. 3에서는 디스크 회전속도 설정값과 분말송급속도 사이의 관계를 보여 준다. (분말송급속도, g/sec) = $0.0087 + 0.0501 \cdot (\text{회전속도 설정값})$ 의 직선적인 관계식을 얻었으며, 이때 결정계수, $r^2 = 0.99997$ 으로 매우 직선적인 관계가 잘 만족하였다. 이것은 회전속도 설정값에 의해 분말 송급속도를 정밀하게 설정할 수 있다는 것을 의미한다.

클래딩 헤드의 위치와 시험편의 이송속도는 4축 직교 robot를 사용하여 정확히 조절하였다. 또한 실험의 오차를 줄이기 위하여 시험편의 이송, 모든 가스의 공급, 레이저의 발진, 분말의 송급 등 모든 클래딩 실험은

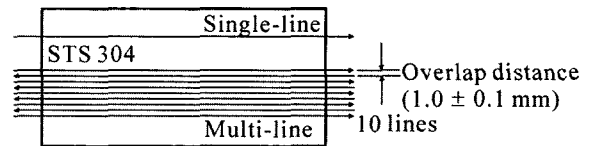


Fig. 4 Laser cladding method

NC 프로그램을 사용하여 자동으로 이루어지도록 하였다. 클래딩 실험은 (1) single-line 클래딩과 (2) 10 회의 multi-line 클래딩의 2 종류를 수행하였으며, Fig. 4에서 클래딩 방법을 보여준다. multi-line 클래딩 실험에서 중첩간격은 $1.0 \pm 0.1\text{mm}$ 로 설정하였다. $\pm 0.1\text{mm}$ 의 오차인자는 산업현장에서 클래딩하는 경우 중첩간격은 다소 변화될 수 있음을 고려하였다. 레이저 클래딩 실험결과를 평가하기 위한 특성치로는 용착효율을 사용하였다. 용착효율은 ((클래딩된 분말의 양)/(공급한 분말의 양)) * 100 으로 정의된다.

2.2. 레이저 클래딩 변수들의 선택과 다꾸찌 실험계획

레이저 클래딩 변수들로서는 예비실험을 통해 레이저 클래딩의 용착효율에 영향을 많이 미친다고 생각되는 ① 보호가스 종류, ② 레이저 발진조건, ③ 분말송급속도, ④ 분말송급각도, ⑤ 분말송급위치, ⑥ 레이저 초점 위치의 6 종류를 선택하였다. Fig. 1에서는 레이저 클래딩 변수들의 위치를 도식적으로 보여준다. 각 클래딩 변수들에 대한 실험조건 범위에 대해서도 예비실험을 통해 적절한 범위를 결정하였다.

레이저 클래딩 실험은 L18 직교배열표를 사용한 다꾸찌 실험계획법을 사용하였다. L18 직교배열표는 1 개의 2 수준 변수와 7 개의 3 수준 변수를 동시에 실

험할 수 있으며, 교호작용이 모든 열에 고르게 분산되어 교호작용의 영향이 가장 적은 직교배열표이다⁷⁾. Table 2에서는 실험에 사용된 레이저 클래딩 변수들과 이들의 수준을 보여준다. 보호가스 종류를 2 수준에 배치하고, 나머지 5 개의 변수들은 3 수준에 배치하였다. Table 3에서는 L18 직교배열표에 배치된 각 실험조건을 보여준다. 실험의 적합성을 판단하기 위하여 3 수준의 2 개 열(column)에는 변수를 배치하지 않고 에러(error)로 남겨 두었다. 실험순서는 난수표를 사용하여 무질서하게 하였다. L18 직교배열표에서 한 조의 실험은 18 회의 클래딩 실험으로 이루어진다. 클래딩 실험

은 한 조의 single line 클래딩과 한 조의 multi-line 클래딩으로 구성되었다.

모든 실험에서 보호가스의 유량은 25l/min로 일정하게 하였다. 분말송급 노즐의 내경은 1.4mm를 가지며, 분말송급 가스로는 Ar 가스를 사용하였다. 이때 분말송급을 위한 Ar 가스의 유량은 모든 실험에서 2.5l/min을 사용하였다. 분말송급속도는 0.4, 0.6, 0.8g/sec를 사용하였다. 그러나 클래딩 단위길이당 분말송급량을 0.06g/mm로 일정하게 유지하기 위하여, 각 분말송급 속도에 대하여 시험편의 이송속도를 각각 6.7, 10.0, 13.3mm/sec로 달리 설정하였다. 레이저 출력은 펄핑

Table 2 Laser cladding parameters and their levels

Character	Parameter	Level		
		1	2	3
A	Shielding gas type	Ar	He	
B	Laser pulse shape (ms/Hz)	1.2/92	1.7/60	2.4/40
C	Powder feed rate (g/s)(Travel speed (mm/s))	0.4 (6.7)	0.6 (10.0)	0.8 (13.3)
D	Powder feed angle (degree)	50	60	70
E	Powder feed position (mm)	0	+2	+4
F	Focal position (mm)	0	+2	+4

Table 3 Experimental assignments of the cladding parameters to the L18 orthogonal array, and the results of the deposition efficiency

No.	Cladding parameter						Deposition efficiency			
	A	B	C	D	E	F	Raw data (%)			S/N ratio (dB)
							Single	Multi	Average	
1	Ar	1.2/92	0.4 (6.7)	50	0	0	10.20	11.73	10.96	20.73
2	Ar	1.2/92	0.6 (10.0)	60	2	2	6.08	8.65	7.36	16.94
3	Ar	1.2/92	0.8 (13.3)	70	4	4	2.49	2.96	2.73	8.62
4	Ar	1.7/60	0.6 (10.0)	60	4	4	3.23	3.52	3.38	10.54
5	Ar	1.7/60	0.8 (13.3)	70	0	0	4.58	6.99	5.78	14.67
6	Ar	1.7/60	0.4 (6.7)	50	2	2	6.67	8.22	7.45	17.30
7	Ar	2.4/40	0.4 (6.7)	70	2	4	4.05	4.59	4.32	12.66
8	Ar	2.4/40	0.6 (10.0)	50	4	0	4.16	4.29	4.23	12.52
9	Ar	2.4/40	0.8 (13.3)	60	0	2	6.53	10.54	8.54	17.90
10	He	1.2/92	0.8 (13.3)	60	2	0	4.31	4.76	4.53	13.10
11	He	1.2/92	0.4 (6.7)	70	4	2	3.16	3.29	3.22	10.16
12	He	1.2/92	0.6 (10.0)	50	0	4	8.54	12.46	10.50	19.97
13	He	1.7/60	0.8 (13.3)	50	4	2	3.31	3.18	3.25	10.22
14	He	1.7/60	0.4 (6.7)	60	0	4	5.94	6.06	6.00	15.56
15	He	1.7/60	0.6 (10.0)	70	2	0	4.96	5.33	5.14	14.21
16	He	2.4/40	0.6 (10.0)	70	0	2	1.36	1.53	1.44	3.15
17	He	2.4/40	0.8 (13.3)	50	2	4	6.62	8.21	7.41	17.25
18	He	2.4/40	0.4 (6.7)	60	4	0	2.62	3.00	2.81	8.92

전압, 펄스 폭 및 펄스 주파수를 조합하여 조절할 수 있다. 레이저 발진조건은 펌핑 전압은 260V로 일정하게 두고, 레이저 펄스 폭과 펄스 주파수를 상대적으로 변화시켰다. Table 2에서 3 개의 레이저 발진조건은 펄스 폭과 펄스 주파수의 조합에 무관하게 평균출력이 약 293W로 일정하도록 설정하였다. 레이저 평균출력의 측정은 Ophir Optornics사의 레이저 빔 분석기인 BA500-V1 모델을 사용하였다. Fig. 5에서는 각 레이저 발진조건에서 출력 펄스의 형상을 보여 준다. 260V/1.2ms/92Hz에서 펄스 사이의 간격은 16.7ms이며, 펄스 한 개의 첨두출력(peak power)은 2.9kW이었다. 260V/1.7ms/60Hz에서 펄스 사이의 간격은 16.7ms, 펄스 한 개의 첨두출력은 2.9kW이며, 260/2.4ms/40Hz에서는 펄스 사이의 간격은 25ms, 펄스 한 개의 첨두출력은 3.1kW이었다. 그러나 3 조건 모두에서 평균 출력은 292-294W로 거의 비슷하게 측정되었다.

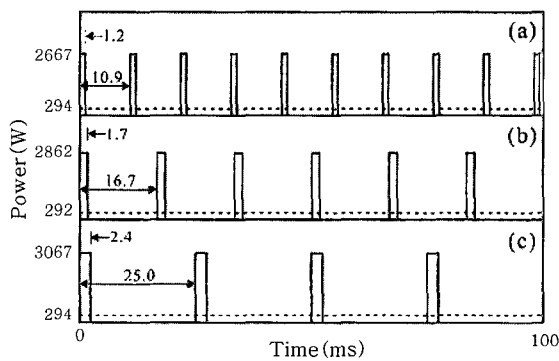


Fig. 5 Laser output pulses for the laser oscillating conditions used in the experiments (a) 260V/1.2ms/92Hz, (b) 260V/1.7ms/60Hz, (c) 260/2.4ms/40Hz

3. 실험결과 및 검토

3.1 실험결과의 분산분석

레이저 클래딩 용착효율은 single-line과 multi-line 클래딩에 대해 독립적으로 혹은 평균값에 대해 분석하였으며, 이들에 대한 S/N 비(signal to noise ratio)를 분석하였다. 용착효율은 클수록 좋기 때문에 S/N 비는 망대특성에 따라 다음의 식에 의해 분석하였다.

$$S/N \text{ Ratio} = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right)$$

(n : 반복수, y_i : 측정치)

용착효율의 분석결과들은 Table 4에서 보여준다. Fig. 6에서는 Table 4의 결과들을 정리하여 single-line 및 multi-line 클래딩에 대한 용착효율과 S/N 비를 각 레이저 클래딩 변수의 영향으로 표시하였다. Fig. 6의 그래프에서 S/N 비가 클수록 오차 대비 용착효율이 크다는 것을 의미한다. 즉 S/N 비가 큰 레이저 클래딩 조건이 오차에 덜 민감하며, 용착효율이 우수한 조건에 해당한다. 용착효율과 S/N 비 모두 분말의 분사노즐각도와 분말송급위치에 큰 영향을 받는 반면, 분말송급속도와 레이저 초점위치에는 거의 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다. multi-line 클래딩에서의 용착효율이 항상 single-line 클래딩에서보다 높은 데 이것은 multi-line 클래딩에서의 예열효과 때문으로 보인다.

Fig. 6의 그래프에서는 클래딩 변수들의 영향을 정성적으로 보여 준다. 각 클래딩 변수들이 용착효율에 미치는 영향을 좀 더 통계학적이고 정량적으로 분석하기

Table 4 ANOVA for the average deposition efficiency and its S/N ratio

Character	Parameter	Average deposition efficiency					S/N Ratio				
		Φ	SS	V	Fo	F,10%	Φ	SS	V	Fo	F,10%
A	Shielding gas type	1	6.04	6.04	1.71	3.78	1	20.82	20.82	1.56	3.78
B	Laser pulse shape	2	10.32	5.16	1.46	3.46	2	24.74	12.37	0.93	3.46
C	Powder feed rate	2	0.77	0.38	0.11	3.46	2	5.37	2.68	0.20	3.46
D	Powder feed angle	2	37.31	18.65	5.28	3.46	2	99.79	49.90	3.74	3.46
E	Powder feed position	2	49.03	24.52	6.94	3.46	2	104.99	52.50	3.93	3.46
F	Focal position	2	0.84	0.42	0.12	3.46	2	8.44	4.22	0.32	3.46
e	ERROR	6	21.19	3.53			6	80.10	13.35		
Total		17	125.5	7.38			17	344.26	20.25		

Φ : degree of freedom SS: sum of square V: variance Fo: F value $F(1, 6; 0.1)=3.78$ $F(2, 6; 0.1)=3.46$.

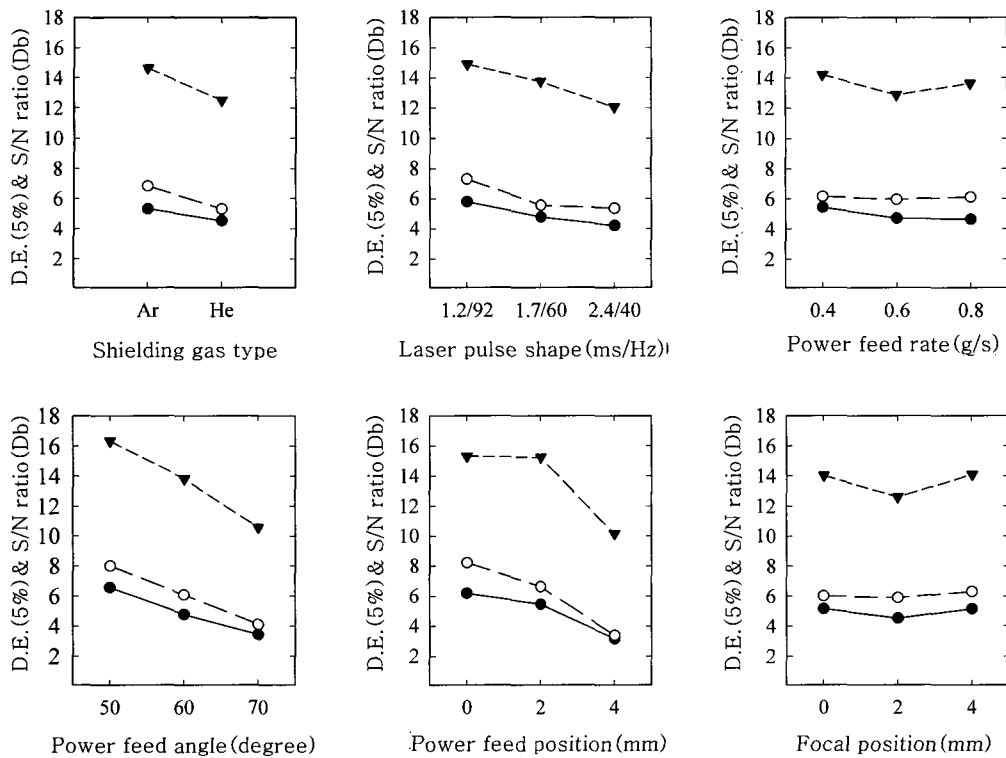


Fig. 6 The effects of the laser cladding parameters on the deposition efficiency and S/N ratio
 ● : deposition efficiency for single-line, ○ : deposition efficiency for multi-line
 ▼ : S/N ratio for average deposition efficiency

위하여 분산분석(ANOVA, analysis of variance)을 실시하였다. Table 5에서는 용착효율의 평균값과 S/N 비에 대해 분산분석한 결과를 나타낸다. 레이저 클래딩 변수들에 대한 분산값(V)과 F₀ 값이 클수록 그 변수가 용착효율에 미치는 영향이 크다는 것을 의미한다.

F 분포표로부터 $F(1, 6; 0.1) = 3.78$, $F(2, 6; 0.1) = 3.46$ 이다. 각 변수들에 대한 F₀ 값이 유의수준(α) 10% 에서의 F 값보다 클 때 그 변수의 영향이 크다고 말할 수 있다⁷⁾. 이러한 관점에서 용착효율의 평균값의 분산분석 결과를 보면 분말 송급각도와 분말송

급위치가 가장 영향이 크며, 분말송급속도와 레이저 초점위치는 거의 영향이 없다는 것을 알 수 있다. 그러나 현재의 실험에서 용착효율의 평균값은 single-line과 multi-line 클래딩 사이의 평균이며, multi-line 클래딩에서 중첩간격의 설정시 $\pm 0.1\text{mm}$ 의 오차인자를 사용한 점을 고려한다면, F₀ 값이 F 값보다 작지만 보호가스 와 레이저 발진조건도 약간의 영향이 있다고 보아야 한다. S/N 비의 분산분석결과는 오차 대비 변수들의 영향이 큰 변수들을 찾아 낼 수 있게 하며, 다꾸찌 실험계획법에서 평균값보다 더 중요하게 취급된다. S/N 비의 분산분석 결과는 용착효율의 분산분석 결과와 비교하여 큰 차이는 보이지 않았다. 역시 분말송급각도와 분말송급위치가 가장 영향을 미쳤으며, 보호가스 종류와 레이저 발진조건은 약간 영향을 미쳤으며, 분말 송급속도와 초점위치는 현재의 실험조건 범위 내에서 거의 영향이 없었다.

Table 5 The laser cladding conditions optimized from Taguchi experimental analysis

Parameter	Optimized condition
Shielding gas type	Ar
Laser pulse shape (V/ms/Hz)	260/1.2/92
Powder feed rate (g/s) (Travel speed (mm/s))	0.31 (2.0)
Powder feed angle (degree)	20°
Powder feed position (mm)	0
Focal position (mm)	0

3.2 분석결과의 검토

분말송급위치가 모재의 표면에 있고, 분말송급각도가 50°로 가장 작은 경우 용착효율이 가장 큰 것으로 나타났다. 반면 분말송급위치가 모재 표면에서 가장 멀리

4mm에 위치하며, 분말송급각도가 70°로 가장 큰 경우 용착효율이 가장 작은 것으로 나타났다. Fig. 7에서는 두 경우에 대해서 분말송급위치와 분말송급각도를 도식적으로 나타내었다. 비행 분말이 모재에 용착되기 위해서는, 비행 분말이 모재 표면과 충돌 후 반발이 일어나기 전에 레이저 빔에 의해 용융되어야 한다. 따라서 모재 표면에서 반발되어 나가기 전에 비행 분말이 레이저 빔 내에 얼마나 오래 유지되는가가 매우 중요할 것으로 보인다. Fig. 7(a)에서는 분말송급위치가 바로 모재 표면에 위치하며, 분말송급각도는 50°로 가장 작은 경우이다. 이때는 양 쪽의 노즐에서 분사되어 나온 분말의 대부분이 레이저 빔의 중심부에서 모재 표면에 충돌한다. 이 조건에서 비행 분말과 모재의 표면은 레이저 빔에 의해 급격히 가열되며, 고온의 분말이 고온의 모재 표면에 충돌할 때 분말과 모재 표면은 모두 상당한 소성을 가지기 때문에, 분말이 모재 표면과 가장 긴 시간 동안 접촉하고 있으며 레이저 빔에 가장 오래 동안 조사될 것으로 판단된다. 따라서 분말이 반발되어 나가기 전에 레이저 빔에 의해 용융되어 용착될 가능성이 더 커서 용착효율이 높아진 것으로 판단된다. Table 3의 1번과 12번의 조건이 여기에 해당하며, 용착효율이 약 10%로 상당히 크다는 것을 알 수 있다. Fig. 7(b)에서는 분말송급위치가 모재 표면에서 +4mm 떨어져 있으며, 분말송급각도가 70°로 가장 큰 경우이다. 이때는 양 쪽의 노즐로부터 분사되어 나온 분말의 일부는 모재의 표면 위쪽에서 서로 충돌하여 아래쪽으로 향한다. 그러나 대부분의 분말들은 서로 충돌없이 어긋나게 지

나가며, 모재 표면과의 충돌 지점은 레이저 빔의 중심부로부터 벗어나서 모재의 가열이 거의 없는 지역이다. 따라서 대부분의 분말은 모재에 용착되지 않고 반발되어 나가며, 용착효율이 낮은 원인이 된 것으로 보인다. 이것은 single-line 클래딩에서 클래딩 층의 주위의 모재에는 거의 용착된 분말이 존재하지 않는 것으로도 간접적으로 입증된다. Table 3의 3번과 11번의 조건이 여기에 해당하며, 용착효율이 약 3%로 매우 적음을 알 수 있다. Table 3의 16번과 18번의 조건에서 용착효율이 가장 낮은 것은 보호가스 종류와 레이저 발전조건 및 오차의 영향이 복합된 것이라고 볼 수 있다.

용착효율에 레이저 초점위치의 영향은 거의 없었다. Fig. 7(b)과 Fig. 2에서 보듯이 초점위치가 0 ~ 4mm 변하더라도 조사흔적의 직경은 1.46 ~ 1.59mm로 거의 차이가 나지 않는다. 본 연구에서와 같이 유효초점거리가 203mm로 매우 긴 집속렌즈를 사용한 경우에는 초점위치가 0 ~ 4mm 변하더라도 레이저 빔의 강도 변화는 1% 미만으로 거의 변화하지 않기 때문이다.

4. 레이저 클래딩 헤드의 설계 및 확인실험

분산분석 결과들을 바탕으로 레이저 클래딩에서 가장 중요한 변수는 분말송급각도와 분말송급위치임을 알 수 있었다. 분말송급위치는 가능한 모재의 표면에 일치시킬 때 용착효율이 가장 높았으며, 분말송급각도는 작을수록 용착효율이 높았다. 보호가스는 Ar을 사용하고, 레이저 발전조건은 260V/1.2ms/92Hz를 사용하는 것이 용착효율을 높이는 데 유리하였다. 나머지 이송속도

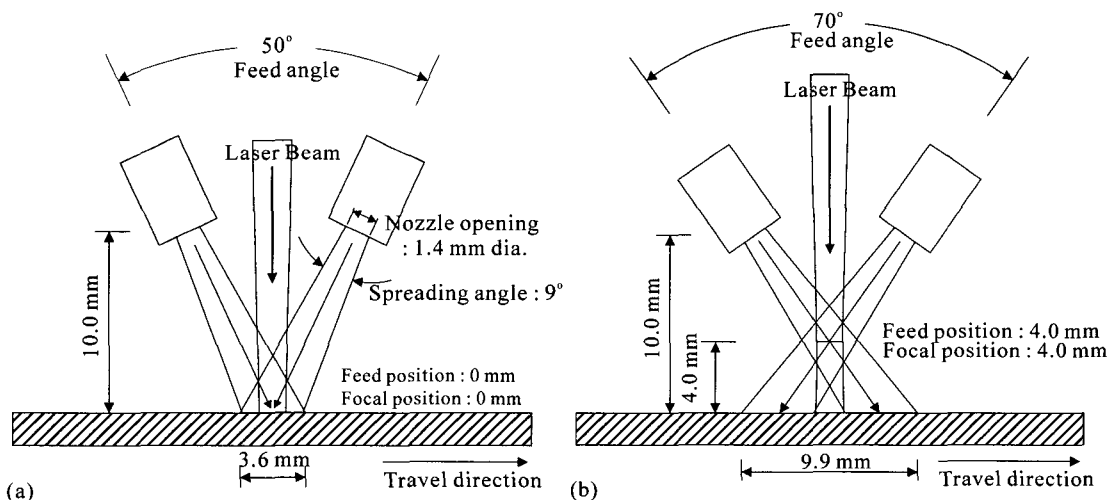


Fig. 7 Schematic diagram showing the positions of the powder feed position, powder feed angle and focal position for two extreme cladding conditions

(a) powder feed angle/powder feed position/focal position: 50° / 0 mm / 0 mm

(b) powder feed angle/powder feed position/focal position: 70° / +4 mm / +4 mm

Table 6 Results of the confirmation experiments using the optimized cladding conditions with a new laser cladding head

Run	1	2	3	4	5	Average	Standard Deviation
Deposition efficiency (%)	12.01	12.30	12.28	12.04	12.29	12.18	0.14

와 초점위치는 사용하기 편리한 데로 설정하면 된다. 현재 사용하는 레이저 클래딩 헤드는 분말송급각도를 40° 이하로 설정하기 어려웠다. 따라서 분말송급각도를 20° 로 더욱 작게 설정할 수 있는 레이저 클래딩 헤드를 새로이 설계 제작하였다. Fig. 8에서는 새로이 설계 제작된 레이저 클래딩 헤드의 간략한 도면을 보여 준다. Table 5에서는 분산분석 결과와 새로운 레이저 클래딩 헤드를 사용하여 설정한 최적의 클래딩 조건을 보여 준다. 새로운 클래딩 헤드를 사용한 확인실험은 single-line 클래딩에 대해서만 수행하였다. 앞의 실험결과에서 용착효율은 multi-line 클래딩이 single-line 클래딩에 비해 전체적으로 약간 높았으나, 각 클래딩 변수의 효과는 single-line 클래딩과 거의 같은 경향을 보였다. Table 6에서는 새 클래딩 헤드를 사용하여 얻어진 용착효율을 보여 준다. 용착효율은 평균 12.2%로

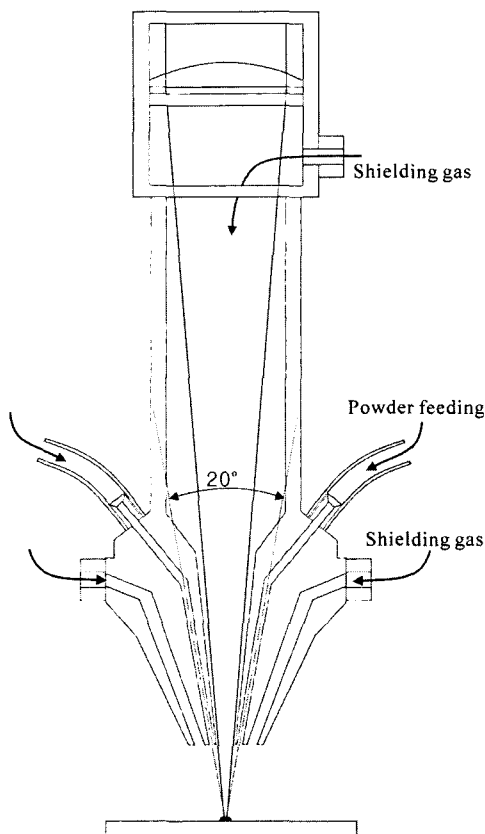


Fig. 8 A new laser cladding head having very small powder feed angle of 20 degrees

상당히 높은 결과를 얻었으며, 표준편차도 0.14%로 매우 낮았다. 이것은 Table 3에서 얻어진 어떠한 single-line 클래딩 조건에 대한 용착효율보다도 높은 값에 해당한다.

5. 결 론

본 연구에서는 저출력 펄스형 Nd:YAG 레이저를 사용한 레이저 클래딩의 가능성을 확인하였으며, 용착효율에 미치는 변수들의 영향을 분석하였다. 실험결과를 바탕으로 새로운 레이저 클래딩 헤드를 설계 제작하였으며, 용착효율을 높이기 위한 최적조건을 도출하였다. 연구결과 도출된 내용을 요약하면 다음과 같다.

1) 저출력 펄스형 Nd:YAG 레이저를 사용한 클래딩 과정에서 용착효율에 미치는 변수들의 영향을 통계적인 분석기법인 다꾸찌 방법을 사용하여 정량적으로 분석하였다.

2) 레이저 클래딩 용착효율에는 분말송급위치가 가장 큰 영향을 미쳤으며, 다음으로 분말송급각도가 큰 영향을 미쳤다. 분말송급위치를 시편 표면에 위치시키고, 분말송급각도는 작게 할수록 용착효율을 증가시킬 수 있었다. 분말송급속도(레이저 이송속도에 의해 나눈 값)와 레이저 초점위치는 용착효율에 거의 영향을 미치지 않았다.

3) 분석결과를 바탕으로 새로이 설계 제작한 레이저 클래딩 헤드를 사용하여 용착효율을 12.2%로 크게 향상시킬 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업자원부와 신한다이아몬드공업(주)이 지원한 신기술실용화사업으로 수행된 내용의 일부임.

참 고 문 헌

1. F. Vollertsen, K. Partes, J. Meijer: Lasers in Manufacturing 2005, Proceeding of the third international WLT-conference on lasers in manufacturing 2005, Munich, June 2005, 281~305
2. S. H. Wang, J. Y. Chen, L. Xue: A study of the abrasive wear behavior of laser-clad tool steel

- coatings, Surf. Coat. Technol. **200** (2006) 3446~3458
3. C. P. Paul, A. Jain, P. Ganesh, J. Negi, A. K. Nath: Laser rapid manufacturing of colmonoy-6 components, Optics and Lasers in Engineering, **44** (2006) 1096~1109
 4. G. Bi, B. Schurmann, A. Gasser, K. Wissenbach, R. Poprawe: Int. J. Machine Tools & Manufacture **47** (2007) 555-561
 5. J. C. Ion, Laser processing of engineering materials, Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, 2005, 296-326
 6. S. Sun, Y. Durandet, M. Brandt, Parametric investigation of pulsed Nd:YAG laser cladding of stellite 6 on stainless steel, Surf. Coat. Technol. **194** (2005) 225-231
 7. P. J. Ross, Taguchi techniques for quality engineering, second ed., McGraw-Hill, New York, 1996