

# 박판 A3003 Al합금의 Nd : YAG 레이저빔 용접에 관한 연구

허인석 · 김병철 · 김도훈 · 김진수\* · 이한용\*

연세대학교 재료공학부

삼성 SDI(주) 기술본부 기술응용 TF\*

## A Study on the Welding Behavior of A3003 Aluminium Alloy Thin Sheet by Nd : YAG Laser Beam

I. S. Heo, B. C. Kim, T. H. Kim, J. S. Kim\*, H. Y. Lee\*

### ABSTRACT

This work was carried out to investigate the welding behavior of thin A3003 Al alloy sheets by Nd : YAG laser beam. Considering bead shape and mechanical properties, the laser pulse shapes selected were two kinds of 2-division and 3-division by varying power level and pulse duration. In order to obtain optimum conditions, the factorial design method and central composite design method were applied.

Tensile test, optical microscopy, micro hardness test and TEM analysis were performed. Due to the annealing caused by thermal effect during laser welding, precipitates were coarsened. The HAZ was softened and failed during tensile test. The hardness of HAZ was lower than that of base metal, since the heat input relieved the work hardening effect and caused grain growth.

Key Word : Nd : YAG laser, A3003 Al alloy, factorial design method, central composite design method, laser welding, HAZ, work hardening, annealing, pulse shape of laser beam

### 1. 서론

알루미늄합금은 경량화 소재로서 중요한 위치를 차지하고 있으며 최근에는 다양한 종류의 알루미늄합금들에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.<sup>1)</sup> 알루미늄 합금은 비강도가 높으며, 내식성이 우수하여, 각종 구조용 재료, 기능성 재

료 등에 사용되고 있으나<sup>2)</sup>, 가공이 어려운 단점이 있다. 알루미늄 합금의 접합시 일반적으로 적용되고 있는 아크용접의 경우 장치가격이 저렴하나, 용접부의 기계적 성질이 열화되는 영역이 넓고, 변형량이 큰 단점이 있다. 이에 반하여 레이저 용접은 장치비가 고가이며 정밀한 용접

어음부 준비가 필요하나, 빠른 용접속도와 적은 변형량, 급냉에 의한 용융부 조직 미세화, 좁은 열영향부등 유리한 특성이 있으며, 레이저 용접부의 기계적 성질은 아크 용접부에 비하여 우수한 것으로 알려져 있다.

그러나, 알루미늄 합금은 레이저빔에 대한 흡수율이 낮으며, 온도에 따른 열팽창과 수축이 크므로 용접시 결합이 발생하기 쉽다. 펄스 Nd : YAG레이저의 경우 연속과 레이저에 비하여 첨두파워를 크게 할 수 있어 알루미늄 합금 용접시 유리하며, 펄스 형태 용접은 각각의 용접점(spot)이 일정한 중복도(overlap)를 가지고 연속적인 용접을 하게 된다. 펄스 레이저의 경우, 펄스 형태를 제어할 수 있는 기술이 개발되어, 사인파, 삼각파, 단현파등의 펄스 파형이 용접에 도입되었으며<sup>3)</sup>, 최근 펄스의 형태를 더욱 다양하게 제어가 가능하게 되었다. 그러나, 각 펄스 형태가 용접 형상 및 강도에 미치는 영향은 많이 연구되지 못하였다.

본 연구에서는 펄스 형태를 제어 가능한 Nd : YAG레이저를 사용하여 펄스 파형에 따른 용접특성에 관한 기초연구를 수행하였다. 또한 공정의 최적화를 위한 레이저 용접의 최적조건을 잡기 위하여 여러 가지의 변수를 복합적으로 고려하면서 실험의 양을 줄이고 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해 FD법(factorial design method), CCD법(central composite design method)과 같은 실험계획법을 사용하였다.<sup>4)</sup> 일반적인 실험계획법이 있으나, 대부분의 실험계획법은 실험횟수는 적으나, 혼동되는 인자가 존재하지만, CCD법 같은 경우 혼동되는 인자가 없다. CCD법은 반응표면분석을 통해 가능한 모든 범위의 영향을 고찰할 수 있다. 최근 표면분석법을 이용한 용접분석 및 실험에 적용되는 사례가 증가하고 있다.<sup>5),6),7),8)</sup> 본 연구는 알루미늄 합금의 레이저 용접의 기초 연구단계로서 0.3mm의 동종 두께 용접에 대해서 실험계획법을 이용하여 펄스 파형에

따른 용접 특성을 분석하고 최적의 용접 조건을 도출하였다. 또한 금속학적인 측면에서 용접부상을 예측하고, 기계적 특성을 측정하였다.

## 2. 실험 방법

본 실험에 사용된 재료는 A3003 H18 알루미늄 합금으로서 가공경화 전처리된 시편이다. 두께는 0.3mm이며, 이 재료의 조성은 Table 1과 같다. 화학적 조성은 발광 분석 분석기(emission spectroscopy)를 사용하여 분석하였다. 용접 실험은 재료를 35mm×55mm의 크기로 절단한 후 맞대기 용접시 허용간격을 최소화하기 위하여 용접되는 면을 연마하여 가능한 한 용접면의 평평도를 유지한 후 수행하였다.

Table 1 Chemical composition of A3003 Al alloy

Si	Fe	Cu	Mn	Ni	Pb	Al
0.230	0.628	0.182	1.100	0.006	0.006	97.82

실험에 사용된 레이저는 최대출력 200W인 펄스파 Nd : YAG레이저이다. 이 레이저는 펄스 파형의 모양을 조절 할 수 있으며, 10개의 구간을 첨두출력과 펄스폭 입력을 통하여 제어할 수 있다. 용접은 맞대기 용접(butt welding)으로 용가재(filler metal)를 사용하지 않는 용접을 수행하였다. 펄스 파형에 따라 용접특성을 알아보고자 두 번째 구간과 세 번째 구간의 펄스폭과 첨두출력을 변화시키며 용접을 수행하였으며, 대략적인 펄스형상을 Fig. 1에 나타내었다. 2-구간의 경우 Fig. 1(a)와 같이 첫 번째 구간의 첨두출력을 7kw의 63%, 펄스폭을 0.3msec로 고정하고 두 번째 구간의 첨두출력과 펄스폭을 변화시키며 용접을 수행하였고, 3-구간의 경우 Fig. 1(b)와 같이 첫 번째 구간의 첨두출력을 7kw의 63%, 펄스폭을 0.3msec, 두 번째 구간의 첨두출력을 7kw의 38%, 펄스폭을 1.0msec로 고정하고, 세 번째 구간의 첨두출력과 펄스폭을 변화시키며 용접을 수행하였다.

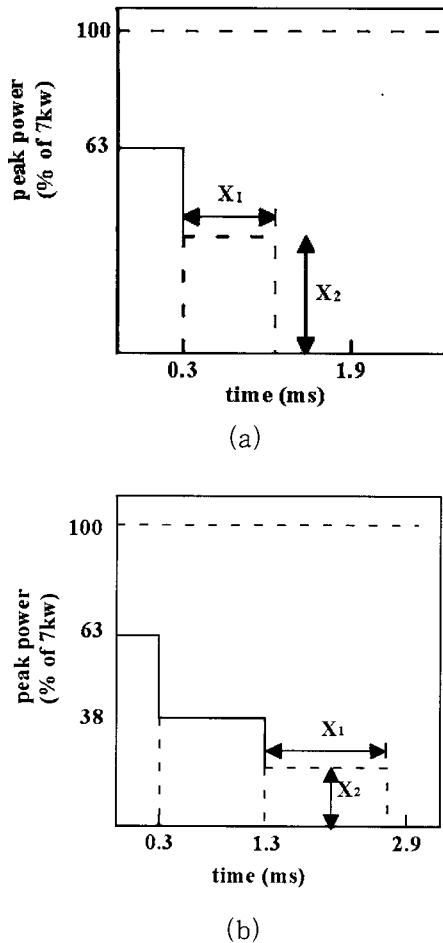


Fig. 1 Pulsed shape of laser  
 (a) Pulsed shape of laser for 2-division  
 (b) Pulsed shape of laser for 3-division

펄스 제어에 따른 최적의 용접조건을 얻기 위하여 본 실험에서는 실험계획법을 적용하여 실험하였다. 특성치(response)는 용접폭과 용입 깊이, 인장강도와 연신율이다. 보조가스는 질소 가스를 사용하여 초점위치에 맞춰 침투출력, 펄스폭, 주사속도, 주파수를 변화시키며 용접을 수행하였다.

본 실험에 사용된 재료의 기계적 특성을 알아보기 위해 인장 시험을 수행하여 용접된 시편의 파단 위치 관찰과 인장강도, 연신율을 측정하였고, 모재에 대해서도 시험을 수행하였다. 인장 시편은 소형 판상(ASTM subsize type E8-78)으로 제작하였으며, 용접부가 인장 시편의 중앙

에 수직하게 위치되도록 하였다. 인장 시험기는 최대 하중 1500kg이고 MTS사의 인장기로서 인장속도(crosshead speed)는 2mm/min로 시험하였다.

레이저빔으로 용접한 시편의 모재, 열영향부 및 용융부의 경도 변화를 알아보기 위하여 시편을 미세 연마하여 미소경도(knoop microhardness)를 측정하였다. 시험 방법은 용융부, 열영향부, 모재를 지나면서 0.1mm 간격씩 10g의 하중을 주었다.

용접부 형상과 용접부 조직의 상을 관찰하기 위하여 용접 시편의 단면을 채취하여 기계적인 연마를 수행한 후 켈러(keller) 에칭액으로 에칭하고 광학 현미경을 이용하여 ×40, ×100, ×200, ×400의 배율로 관찰하였다.

또한, 용접부와 모재에서 석출상의 차이를 알아보기 위하여 투과 전자 현미경 분석을 수행하였다. 이온연마기(ion miller)를 이용하여 시편을 준비하였는데 연마기의 인가전압을 5kV로 하여 시편을 제조하였다.

### 3. 결과 및 고찰

FD법이나 CCD법은 ANOVA를 통하여 신뢰성을 확인하고, 수학적 모델링을 통해 회귀하여 반응표면분석을 구현할 수 있어 주변의 실험을 하지 않은 조건의 특성치를 나타낼 수 있으며, 시뮬레이션(simulation)을 통한 반복실험을 할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 첫 번째 구간의 경우 변화에 따라 용접특성이 매우 크게 변화되어, 첫 번째 구간의 예비실험을 통하여 고정하고 전술한 바와 같이 두 번째 구간과 세 번째 구간을 각각 변화시키며 실험하여 각 조건에 대한 변화양상을 관측하였다.

먼저 FD법을 이용하여 실험 방향을 설정하고, 변화시킨 실험 변수로는 각 구간에 대한 침투출력, 펄스폭, 주사속도, 주파수이다.

FD법은 4개의 인자(factor)와 용융부의 폭과 깊이를 특성치를 이용하고, CCD법 특성치는 인장강도와 연신율로 분석을 수행하였다. FD법에서 특성치를 용융부 형상으로 잡은 이유는 용접 설계치에 근접하는 용융폭과 깊이를 얻고, 각 인자들의 영향을 파악하여, CCD법의 실험방향 및 중심점을 결정하기 위함이다.

### 3.1 FD법에 의한 인자의 영향 분석

FD법에 의한 실험계획법에 따라 레이저 주사 후 용융부 형상을 측정하여 통계프로그램(SAS)을 이용하여 분산분석(ANOVA) 및 수학적 모델을 얻을 수 있다. 분산분석을 통하여 실험에 따른 신뢰성을 확인하고, 수학적 모델을 통하여 반응표면분석을 수행하였다.

FD법에 따른 각 조건에서 레이저 주사 후 용접 양상을 분산분석을 통하여 유의 인자를 판별하였는데 용접폭은 펄스폭과 첨두출력, 용입깊이는 모든 인자가 유의 한 인자로 나타났다. Fig. 2와 Fig. 3은 유의인자에 대한 수학적 모델링을 통하여 도식한 결과를 보여준다.

2-구간의 경우 펄스폭과 첨두출력의 증가에 따라 용접폭은 증가하며, 용입깊이의 경우는 펄스폭, 첨두출력, 주파수 증가에 따라 증가하며, 주사속도 증가에 따라 감소한다.

용접폭은 주사되는 에너지 총량과 열확산에 의하여 결정되며, 상대적으로 주파수와 주사속도에 대한 영향을 덜 받으나, 용입깊이의 경우 레이저빔이 표면열원이므로 용입깊이는 펄스의 첨두출력에 크게 영향을 받는다.

따라서 주사속도가 증가할수록 레이저빔 에너지 밀도가 낮아지며 용입깊이가 감소하게 된다. 주파수를 증가시킨 경우 중첩도의 증가에 의한 표면 레이저빔 흡수율이 증가된 결과로 사료된다.

Fig. 3은 3-구간에 대한 레이저 주사조건에 따른 용융폭과 용입깊이에 대한 영향을 보여준다.

3-구간은 2-구간과 비교하여 볼 때, 각 레이저 주사 조건에 비하여 영향이 적어짐을 알 수 있으며, 만일 정밀한 용접의 경우 3-구간 이상의 펄스를 제어함이 바람직하다. 3-구간의 경우 펄스폭과 첨두출력의 증가에 따라 용접폭은 증가하며, 2-구간과 달리 주사속도의 증가에 따라 감소하고 주파수에는 영향을 받지 않는다.

용입 깊이는 2-구간과 같은 영향을 보여주고 있는데, 3-구간의 경우 첨두 출력 범위를 2-구간의 구역보다 낮음에도 용입깊이의 변화가 상대적으로 큰 것을 볼 수 있으며, 1-구간과 2-구간을 통하여 용융층의 온도상승에 따른 레이저빔 흡수율의 증가 때문이라 사료된다. 2-구간과 달리 용접폭이 주사속도 증가에 따라 감소하였으며, 첨두출력 저하에 따른 에너지 총량의 감소로 주사속도의 증가의 효과가 나타난 것으로 사료된다.

Fig. 2와 Fig. 3을 통하여, 2-구간, 3-구간 모두가 가장 큰 변수로 첨두출력으로 나타났으며, 펄스폭, 주사속도, 주파수 순으로 용융폭과 용입깊이에 영향을 주었다.

첨두출력과 펄스폭, 첨두출력과 주파수 등 각 레이저 주사조건들의 상호 영향으로 직선적인 관계가 아닌 곡선을 유지하고 있음을 보여주고 있다. 첨두출력이 증가할수록 용입깊이와 용융폭이 초기에는 급격히 변하나 일정 첨두출력 이후에는 증가율이 감소되는 경향을 보여주고 있다.

FD법을 통하여 얻은 수학적 모델을 이용하여 용접 설계치에 근접하는 주사조건을 얻을 수 있었으며, 용접 목표치에 부합되는 조건으로 실험 방향을 결정 가능하게 되었다. 이를 바탕으로 인장강도와 연신율을 특성치로 하는 CCD법을 수행하였다.

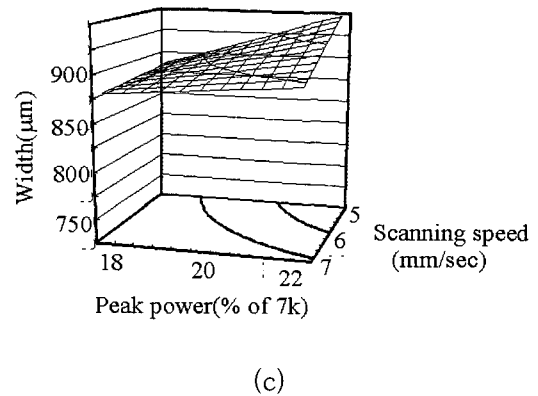
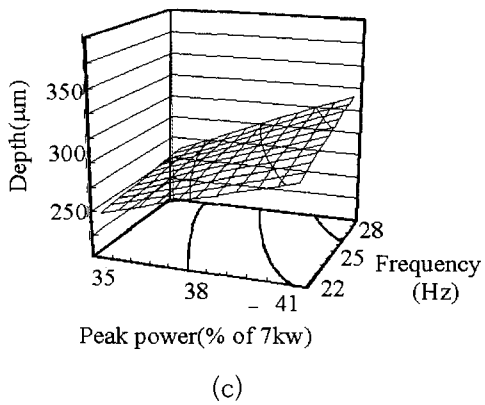
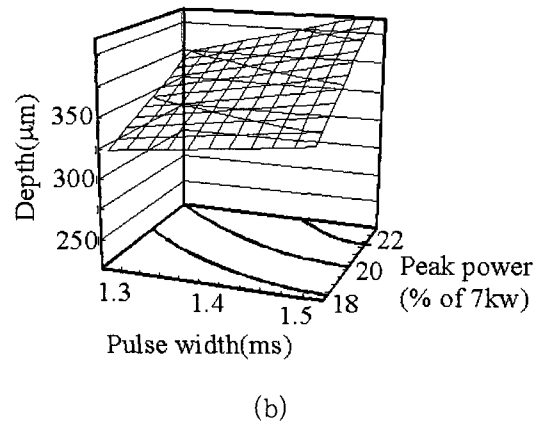
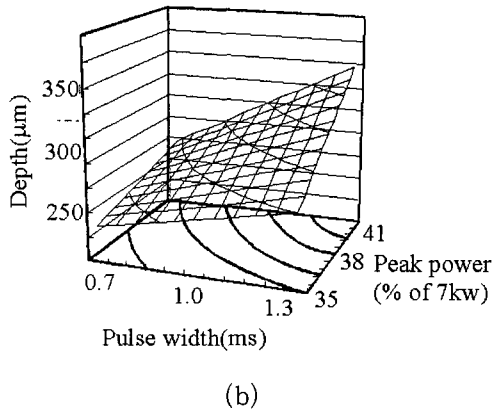
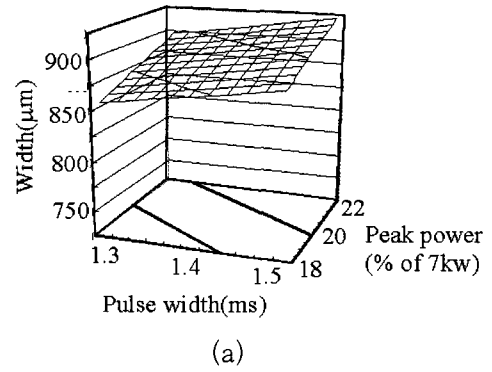
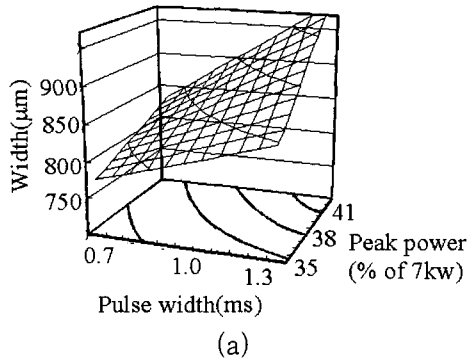


Fig. 2 Contour plot in 2-division of factorial design  
 (a) Interaction effect of pulse width and peak power for width  
 (b) Interaction effect of pulse width and peak power for depth  
 (c) Interaction effect of peak power and frequency for depth

Fig. 3 Contour plot in 3-division of factorial design  
 (a) Interaction effect of pulse width and peak power for width  
 (b) Interaction effect of pulse width and peak power for depth  
 (c) Interaction effect of peak power and scanning speed for width

3.2 CCD법에 의한 최적조건 설정

CCD법은 FD법을 확장한 실험계획법으로서 FD법이 1차원적 모델로만 구성한 반면, CCD법은 2차원적 모델까지 구성되어 더 넓은 영역에 대해 관찰할 수 있다.

FD법으로 구한 구역 중 최적의 조건을 중심점으로 잡아 CCD법을 수행하고, FD법과 마찬가지로 분산분석을 통해 신뢰성을 분석하며, 수학적 모델을 통해 반응표면분석을 하였다.

CCD법에 따른 각 조건에서 레이저 주사 후 인장강도와 연신율을 수학적 모델링을 통하여 도식한 결과를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 4는 2-구간에 대한 레이저 주사조건에 따른 인장강도와 연신율에 대한 영향을 보여주고 있는데, 2-구간의 경우 펄스폭과 첨두출력의 증가에 따라 인장강도는 증가하며, 주사속도와 주파수에는 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 1-구간을 통하여 용융부의 용융을 위한 적절한 가열만이 이루어졌기 때문에 2-구간 펄스폭과 첨두출력에 의하여 인장강도와 연신율이 크게 변화됨을 볼 수 있다. 2-구간을 통하여 최대 인장강도 약 140Mpa를 얻을 수 있으며, 첨두출력이 큰 경우에는 인장강도는 오히려 감소하였다. 이는 첨두출력 증가에 따른 기포나 크랙과 같은 용융부의 결함과 증발에 의한 표면 함몰로 인한 단면적 감소에 의한 것으로 판단된다. 연신율의 경우 펄스폭과 첨두출력이 증가함에 따라 증가하는데, 3-구간에 비하여 전반적으로 짧은 펄스폭을 가져 열화 효과가 적게 나타난 것으로 사료된다. Fig. 5는 3-구간에 대한 레이저 주사조건에 따른 인장강도와 연신율에 대한 영향을 나타내었다. Fig. 5(a)는 3-구간에 대한 인장강도를 나타낸 것으로 2-구간 용접에 의하여 약 100Mpa 이상의 용접 강도를 보여 주고 있다. Fig. 4(a)의 2-구간에 비하여 인장강도의 변화에 민감하지 않은데 3-구간 첨두출력 범위가 2-구간에 비하여 적기 때문이다. 2-구간과 달리 펄스폭 증가에 따른 인장강도와 연신율의 저하가

관찰되며, 일정 첨두출력에서 펄스폭의 증가는 완전한 용접이 된 상태에서 에너지 총량이 증가함에 따라 열화부폭이 증가되어 감소한 것으로 사료된다.

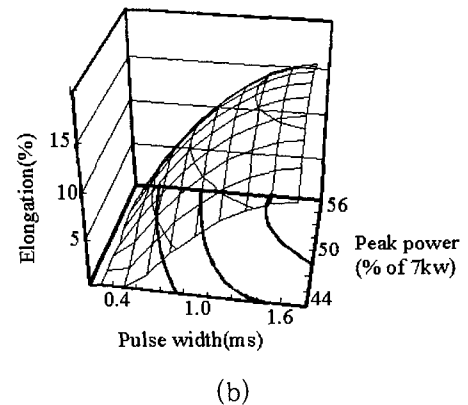
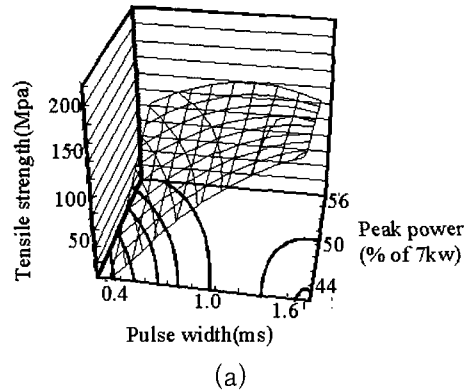
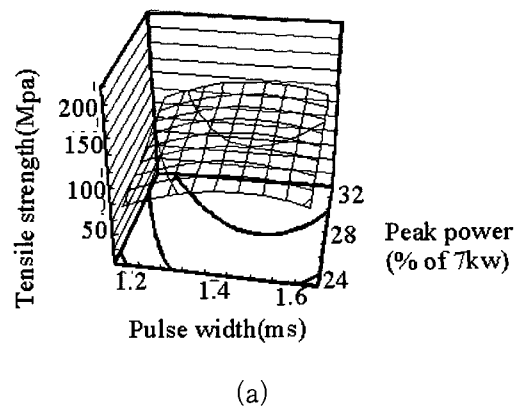


Fig. 4 Contour plot in 2-division of central composite design  
 (a) Interaction effect of pulse width and peak power for tensile strength  
 (b) Interaction effect of pulse width and peak power for elongation



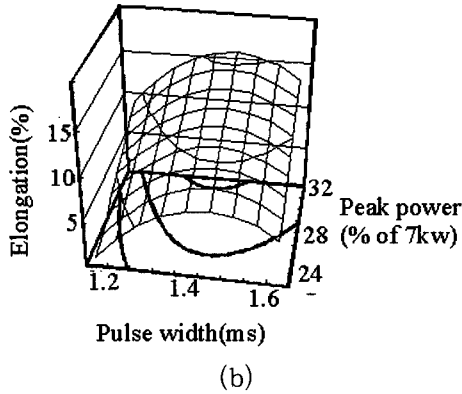


Fig. 5 Contour plot in 3-division of central composite design  
 (a) Interaction effect of pulse width and peak power for tensile strength  
 (b) Interaction effect of pulse width and peak power for elongation

따라서 적절한 조건에서 레이저 주사할 때, 완전한 용접이 이루어지고, 최소의 열화부족을 얻을 수 있다. Table 2와 Table 3은 각각 2-구간과 3-구간의 CCD법에 의한 인장시험 결과를 나타내었다. Table 3.에서 보듯이 3-구간의 20번째 조건에서 가장 양호한 용접조건이라 할 수 있다.

Table 2 Design point for 2-division in central composite design

Run	Factor				Response	
	w (ms)	P (% of 7kw)	S (m m/sec)	F (Hz)	Stress (Mpa)	Strin (%)
1	0.7	47	6	28	55.65	2.0
2	0.7	47	6	34	53.92	1.5
3	0.7	47	8	28	66.73	2.5
4	0.7	47	8	34	67.11	2.5
5	0.7	53	6	28	104.90	5.1
6	0.7	53	6	34	98.04	5.3
7	0.7	53	8	28	84.40	3.8
8	0.7	53	8	34	95.54	4.6
9	1.3	47	6	28	140.22	13.5
10	1.3	47	6	34	141.29	14.0
11	1.3	47	8	28	137.97	10.2
12	1.3	47	8	34	136.65	12.7
13	1.3	53	6	28	137.01	12.4
14	1.3	53	6	34	134.17	13.3
15	1.3	53	8	28	140.25	14.6
16	1.3	53	8	34	136.05	13.5
17	0.4	50	7	31	85.22	3.5

18	1.6	50	7	31	133.05	12.7
19	1.0	44	7	31	105.87	5.6
20	1.0	56	7	31	141.49	11.6
21	1.0	50	5	31	134.74	7.8
22	1.0	50	9	31	117.15	7.3
23	1.0	50	7	25	127.96	5.8
24	1.0	50	7	37	124.98	7.1
25	1.0	50	7	31	128.37	11.8
26	1.0	50	7	31	128.78	12.1
27	1.0	50	7	31	127.96	11.6
28	1.0	50	7	31	127.54	11.9
29	1.0	50	7	31	129.43	11.3
30	1.0	50	7	31	129.56	12.6
31	1.0	50	7	31	130.54	12.9

Table 2 Design point for 2-division in central composite design

Run	Factor				Response	
	w (ms)	P (% of 7kw)	S (m m/sec)	F (Hz)	Stress (Mpa)	Strin (%)
1	1.3	26	6	28	85.86	4.6
2	1.3	26	6	34	101.08	5.6
3	1.3	26	8	28	83.25	4.4
4	1.3	26	8	34	110.2	6.6
5	1.3	30	6	28	122.45	9.6
6	1.3	30	6	34	121.68	10.0
7	1.3	30	8	28	101.22	5.3
8	1.3	30	8	34	122.78	8.7
9	1.5	26	6	28	108.96	6.4
10	1.5	26	6	34	126.77	11.6
11	1.5	26	8	28	92.86	4.9
12	1.5	26	8	34	100.51	6.0
13	1.5	30	6	28	101.97	5.8
14	1.5	30	6	34	117.06	9.3
15	1.5	30	8	28	117.58	7.8
16	1.5	30	8	34	125.81	14.7
17	1.2	28	7	31	89.61	5.3
18	1.6	28	7	31	128.45	11.6
19	1.4	24	7	31	108.45	6.4
20	1.4	32	7	31	138.04	19.5
21	1.4	28	5	31	110.37	8.4
22	1.4	28	9	31	102.50	7.1
23	1.4	28	7	25	117.78	6.9
24	1.4	28	7	37	123.47	9.8
25	1.4	28	7	31	125.55	11.5
26	1.4	28	7	31	125.98	11.9
27	1.4	28	7	31	124.46	12.5
28	1.4	28	7	31	123.91	12.1
29	1.4	28	7	31	127.12	11.0
30	1.4	28	7	31	126.43	10.5
31	1.4	28	7	31	127.28	10.8

Table 4 TEM EDS of precipitate in HAZ

Element	Peak Area	Element(%)	Atomic(%)
Al	Si	Mn	Fe
10198	789	1336	941
72.61	5.45	10.93	7.82
82.19	5.93	6.08	4.2

3.3 용접부의 금속학적 고찰

Fig. 6은 용접부의 거시조직 사진으로 응고하는 결정립들은 열원인 레이저빔의 이동으로 인해 최대 온도구배를 따라 연속적으로 용융부 중심부로 성장한다. 또한 전체적으로 균열(crack)이 없는 양호한 용융부를 얻었으며, 용융 선단부의 조직이 용융 중심부보다 미세화된 것을 볼 수 있고, 온도 구배가 용융 선단부가 중심부보다 큰 것에 기인한다.

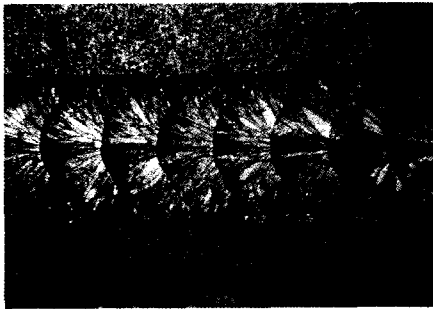


Fig. 6 Macrography of bead surface welded

Fig. 7는 파단된 부분을 나타낸 사진으로, 용접한 시편의 인장시험을 통하여 얻은 것이다. 사진을 통하여 모재 부분에서는 연신이 거의 일어나지 않았으며, 용융부와 HAZ부분에서 일어난 것을 알 수 있다.

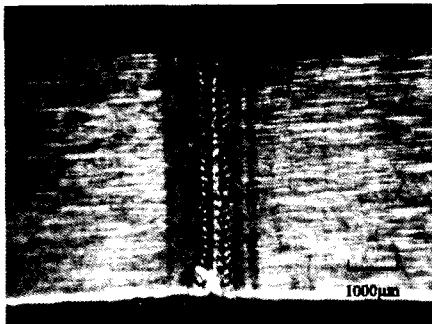


Fig. 7 Photographic result of tensile test

사용된 시편은 가공경화 전처리되어 용접중 용융구역이 가공경화 효과가 소멸된 것으로 사료되며, HAZ부분에서는 높은 용접열에 의해 열화되어 모재에서 석출상 및 결정립 성장이 일어나게 되어 강도가 모재에 비해 저하된 것으로 사료된다.9) 용접후의 열화정도를 확인하기 위해 용접하지 않은 시편과 용접한 시편을 각각 인장 시험하였다.가공경화 전처리된 A3003 알루미늄 합금을 용접부에 수직한 방향으로 주변형이 되게 하였다.

그 결과 모재의 경우 270~290Mpa이었고, 연신율은 1.7~2.5%였으며, 용접된 시편의 경우는 인장강도는 약 140Mpa이었고, 연신율은 약 19%정도였다. 인장시험시 양호한 접합이 이루어진 경우 모두 HAZ부에서 파단이 일어났다.

최적조건으로 용접된 시편을 가지고 용융부, HAZ부, 모재에 이르기까지의 미소경도(knoop hardness) 경도를 찍어 경도를 측정하였으며, 이 결과를 Fig. 8에 나타내었다. HAZ, 용융부, 모재 순으로 증가되며, 인장시험 결과와 동일한 결과를 보여주고 있다. 열화의 원인을 분석하기 위하여 TEM분석을 수행하였다.

Fig. 9(a)에서 모재의 석출상은 미세하고 균일한 반면, Fig. 9(b)의 HAZ에서는 석출물이 상당히 성장하였음을 볼 수 있다.

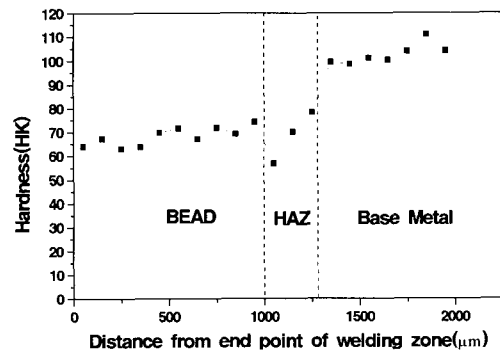
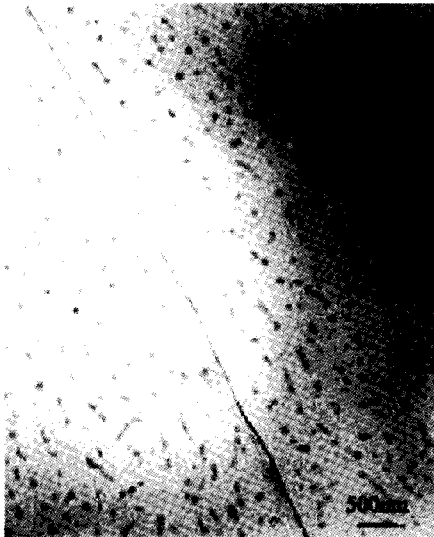


Fig. 8 Microhardness profile traversing the welding line





(a)



(b)

Fig. 9 TEM Microstructure  
(a) base metal, (b) HAZ

Table 4.는 HAZ부의 석출물조성을 알아보기 위해 EDS로 분석한 결과이다. A3003 알루미늄 합금의 경우 온도와 시간에 따라  $Al_6(Mn,Fe)$ 와  $\alpha(Mn,Fe)_3SiAl_{12}$ 가 우선적으로 석출되는 것으로 보고되고 있다.<sup>10)11)12)</sup> Table 4.의 조성분포를 보면 HAZ부의 석출물은  $\alpha(Mn,Fe)_3SiAl_{12}$ 로 사료된다. 용접부 강도저하는 레이저빔 열원에 의하여 가공경화 효과가 소멸된 것이며, 용융부는

HAZ부에 비하여 인장강도, 경도 및 연신율이 크며, 2~3회 레이저 펄스 중첩조사에 의하여 용융 및 응고를 반복하여, HAZ부에 비하여 열화 효과가 적게 나타난 결과이다.

#### 4. 결 론

Nd : YAG 레이저에 의한 가공경화 전처리된 두께 0.3mm A3003 알루미늄 합금의 맞대기 용접 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 실험계획법(FD법, CCD법)을 통해 최적 조건을 얻었다. 최적조건은 첫 번째 구간과 두 번째 구간이 고정된 상태에서 세 번째 구간의 펄스폭은 1.4ms, 침투출력은 7kw의 32%, 주사속도는 7mm/sec, 주파수는 32Hz이다.
2. 2-구간과 3-구간을 변화시켜 펄스 파형을 고려하였다. 2-구간의 경우가 3-구간의 경우보다 조건 변화에 따라 특성치인 인장강도와 연신율의 변화양상이 뚜렷하였다.
3. 금속학적 분석을 통하여 HAZ, 용융부, 모재 순으로 인장강도 및 미소경도가 높았으며, 용접시 응고조직 상태로 존재하는 용융부와 열화 효과를 받은 HAZ 부의 가공경화 효과가 소멸하였기 때문이라 사료된다.
4. TEM분석을 통해 모재에 비해 HAZ부의 석출물과 결정립이 조대화되었음을 알 수 있었으며, HAZ부의 석출물은  $\alpha(Mn,Fe)_3SiAl_{12}$ 로 사료된다.

#### 5. 참고문헌

1. H.Liebermann ; Metallurgical and Materials, Transaction B, Volume 15B, pp 155-161, 1984
2. I. Sarady, Th. Beck, G. Bostanjoglo, K. Richter and H. weber ; Division of Materials Processing, Lulea University of Technology, s-971 87 Lulea, sweden
3. Akira Matsunwa, Jong-Do Kim and Seiji Katayama ; Joining and Welding Research

- Institute, Osaka University 11-1 Mihogaoka,  
Ibaraki, Osak 567, Japan
4. Montgomery ; Design and Analysis of Experiments : pp 290 - 340, 1997
  5. Sebastien Branchu, Robert T. Forbes, Peter York, and Hakan Nygrist ; Pharmaceutical Research, Vol. 16, no. 5, 1999
  6. S. M. Darwish, S. D. Al-Dekhial ; International Journal of Machine Tools & Manufacture 39, pp 1588 - 1610, 1999
  7. V. Gunaraj, N. Murugan ; Journal of Materials Processing Technology 88, pp 266 - 275, 1999
  8. Lautenschlager, U ; Eschenauer, H. A. ; Mistree, F. ; [Design-of Experiments Methods and their Application to, Rubust Multicriteria Optimization Problems]
  9. 레이저 기술, 통권 81호 pp 78 - 85, 2000
  10. Aruna Bahadur ; Journal of Materials Science 23, pp 48-54, 1988
  11. Ney Jose Luiggi ; Metallurgical and Materials, Transaction B, Volume 28B, pp 148-159, 1997
  12. Ney Jose Luiggi ; Metallurgical and Materials, Transaction B, Volume 28B, pp 125-133, 1997