

# 용가 와이어를 이용한 알루미늄 레이저 용접부의 용접 특성에 관한 연구

박 영 환\* · 박 현 성\*\* · 이 세 헌\*\*\*

한양대학교 정밀기계공학과

\* 기아자동차 (주) 차체생기팀

\*\* 한양대학교 기계공학부

## Study on the welding characteristic of aluminum laser weld using filler wire

**Young Whan Park, Hyunsung Park\* and Sehun Rhee\*\***

\* Department of Precision Mechanical Engineering, Hanyang University

\*\* Body Manufacturing Engineering Team, Kia Motors

\*\*\* School of Mechanical Engineering, Hanyang University

### Abstract

In automotive industry, light weight vehicle is one of issues because of the air pollution and the protection of environment. Therefore, automotive manufacturers have tried to adopt light materials such as aluminum alloy to production line. Aluminum welding using laser has some advantages high energy density and high productivity. It is very important to understand weld characteristic according to welding condition in order to determine the possibility of application to car body.

In this study, Nd:YAG laser welding of 5182 aluminum alloy with filler wire AA5356 was carried out through experimental design according to wire feed rate, laser power and welding speed. Weld bead shape in terms of cross section photo, bead with, height of reinforcement and penetration depth and mechanical property in terms of tensile strength and formability was investigated. Analysis of variation (ANOVA) was performed to know the effect of weld parameter for weldability, laser power was statistically most significance factor of three variables.

**Key words** : Aluminum Alloy, Laser Welding, Filler Wire, Bead Shape, Tensile Test, Erichsen Ratio, Analysis of Variance (ANOVA)

## 1. 서 론

전 세계적으로 환경 보호에 대한 관심이 높아지고 있으며 세계 환경기구와 같은 단체에서는 차량용 배기가스의 규제가 심해지고 있다. 전 세계의 자동차 업체는 자동차의 연비 향상을 위한 차체의 경량화가 큰 이슈로 대두되고 있다. 차량 경량화를 위하여 고장력강이나 알루미늄과 같은 경량화 소재를 이용하여 차체를 생산 중에 있다. 그러나 알루미늄의 특성상 강재 보다 용접이 어렵고, 단가가 높기 때문에 아직까지는 제한적으로 사용하고 있다. 그러나 차량 경량화에 있어서 반드시 필요한 재료이므로 자동차 업체들은 알루미늄 용접 기술개발에 많은 연구를 하고 있다.

알루미늄을 용접하는 경우 고 밀도 열원이 필요하기 때문에 레이저를 이용한 용접은 매우 유효한 방법으로 판단되고 있다. 레이저 용접은 생산성 향상은 물론 고정밀, 고품질의 용접, 그리고 깊은 용입 깊이라는 장점 때문에 자동차 산업을 비롯한 많은 수송기기 산업에서의 적용이 점점 확대되고 있다.<sup>1)</sup>

레이저만을 이용하여 알루미늄 5000계열의 합금을 용접하는 경우, 용접후 강도 저하 현상이 발생하는 데 T. Debroy 등<sup>2)</sup>은 용접중에 발생하는 기공 (porosity), 용착 부족 (underfill), 그리고 마그네슘의 손실 (magnesium loss) 에 의하여 발생한다고 연구 하였다. 그러므로 이를 극복 할 수 있는 방법으로 용가 와이어 (filler wire) 를 이용하여 알루미늄 합금을 용접하는 방법과<sup>3)</sup> 레이저와 아크 용접을 결합한 하이브리드 용접<sup>4)</sup>이 제시되고 있다. 알루미늄의 합금의 레이저 용접은 레이저 출력, 용접속도, 보호

가스 등에 의하여 많은 영향을 받는다.<sup>5, 6, 7)</sup> 그리고 용가 와이어를 이용하는 경우 위와 같은 변수 이외에 와이어 송급속도 또한 매우 중요한 변수로 작용한다.<sup>3)</sup> 그러므로 용가 와이어를 이용한 레이저 용접에서 용접부 특성이 어떻게 변하는지를 앞으로 자동차 차체에 알루미늄 5000 계열 판재의 적용 가능성을 판단 할 수 있다.

본 연구에서는 알루미늄 합금인 AA5182 판재에 대하여 용가 와이어 AA5356 을 이용한 Nd:YAG 레이저 용접에서 용접 공정 변수인 레이저 출력, 용접속도, 그리고 와이어 송급속도에 따른 용입형태, 용접 비드 형상, 인장강도와 성형성의 특성 변화를 관찰하였다. 분산 분석을 통하여 각 용접 제어 인자가 용접 특성에 미치는 영향을 정량적으로 살펴보았다.

## 2. 실험

용가 와이어를 이용한 AA5182의 Nd:YAG 레이저 용접 실험 시스템은 Fig. 1과 같다.

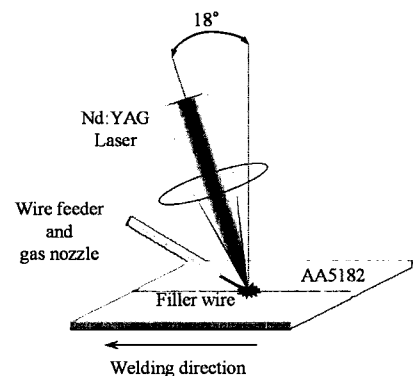


Fig. 1 Schematic illustration of experimental setup

실험에 사용된 레이저는 최대 출력이 4.4 kW인 연속 발진 Nd:YAG 레이저이고, 레이저 빔의 단면 출력을 나타내는 TEM mode는 TEM<sub>00</sub> 이었다. 초점 거리는 250 mm, 레이저 빔의 초점 지름은 0.4 mm 였다. 보호가스 (shielding gas)는 아르곤 (Ar) 를 이용하여 용접 방향의 앞에서 와이어가 공급되는 것과 같은 축으로 공급하였고, 판재의 하부에서 채널을 이용하여 공급하였다. 레이저는 직각으로부터 18° 를 기울였다. 그 이유는 알루미늄은 레이저의 반사율이 높아 레이저가 알루미늄 판재에 조사 될 때, 역반사 (back reflection) 된 레이저 빔에 의하여 레이저 시스템과 광학계에 영향을 주는 것을 방지하기 위해서 이다.

용접 방법은 맞대기 용접을 하였다. 실험에 사용된 판재는 AA5182 로 합금의 화학적 조성은 Table 1과 같다. 시편의 두께는 1.4 mm 였고, 용접 길이는 280 mm 였다. 용가 와이어는 AA5356으로 직경 1.2 mm 였다. 용가 와이어의 화학적 조성을 Table 2 와 같다. 용접 방법은 맞대기 용접으로 그르부 면 (groove face)을 밀링가공하여 일정한 상태를 유지였고, 용접 직전에 아세톤으로 모재를 닦아 알루미늄 산화막 제거와 용접부 청결 상태를 유지하였다. 그리고 두 모재간의 갭 (gap)은 0으로 하여 실험을 수행하였다.

레이저 용접에서 제어인자로는 레이저 출력 (laser power : LP), 용접속도 (welding

speed : WS), 그리고 용가 와이어 송급속도 (wire feed rate : WFR) 로 하였다. 실험은 레이저 출력을 4, 3.5, 3 kW, 용접속도를 6, 7.5, 9 m/min 그리고 와이어 송급속도를 2, 3, 4 m/min 으로 각각 3수준으로 나누어 수행하였다. 총 용접조건은 27개 였고, 반복 회수는 3회로 하여 전체 실험의 회수는 81 회 였다. 레이저 용접 실험의 고정인자로는 초점의 위치는 0, 보호 가스 유량은 상부에서 20, 하부에서 10 l/min 이었다.

용가 와이어를 이용한 알루미늄 레이저 용접의 용접 특성을 평가하였다. 이를 위하여 용접부의 형상을 알 수 있도록 단면 사진을 이용하여 표면 비드 폭 (surface bead width), 이면 비드 폭 (back bead width), 용접 덧살 (weld reinforcement) 의 높이, 그리고 용입 깊이 (penetration depth)를 측정하였다. 용접부의 강도를 평가하기 위하여 인장시험을, 용접부 성형성의 평가를 위해 에릭슨 시험을 수행하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 용접부 단면 사진 및 형상

용가 와이어 송급속도에 따른 각 용접영역에서, 용접부의 단면사진은 Fig. 2 와 같다. 용접 입열이 큰 경우, 용접부가 크고 완전 용입이 발생한 반면, 입열이 작은 경우는 용가 와이어만 녹아서 모재의 위에 덧살 (reinforcement) 만을 형성한 비드모습을 보여주고 있다. 용접부 단면에 있어서는 용착 부족 (underfill)과 언더컷 (undercut)과 같은 결함이 발생되지 않고 있다. 이것은 용가 와이어의 공급에 의해 용착 금속의 양이 많아지기 때문이다. 기공은 용접부 내에서 발견되고 있다.

표면 비드와 이면 비드의 폭은 Fig. 3과 4와 같다. 표면 비드의 폭은 대체적으로 입

Table 1 Chemical composition of AA5182 (wt%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	other	Al
0.06	0.19	0.02	0.24	4.46	0.03	0.03	0.01	0.02	bal.

Table 2 Chemical composition of AA5356 filler wire (wt%)

Mg	Mn	Cr	Ti	Al
5.00	0.35	0.10	0.15	bal.

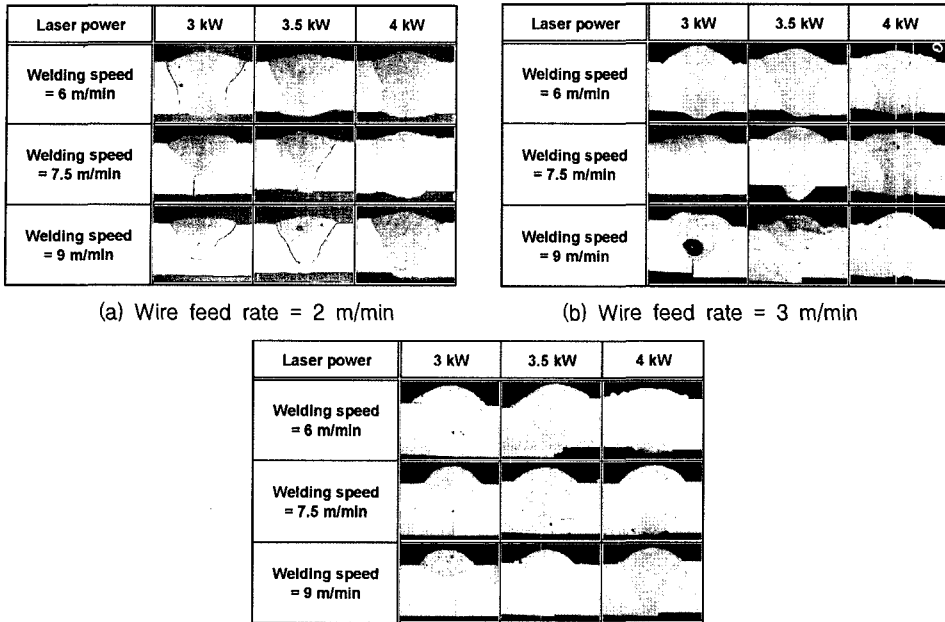


Fig. 2 Cross section of weldment

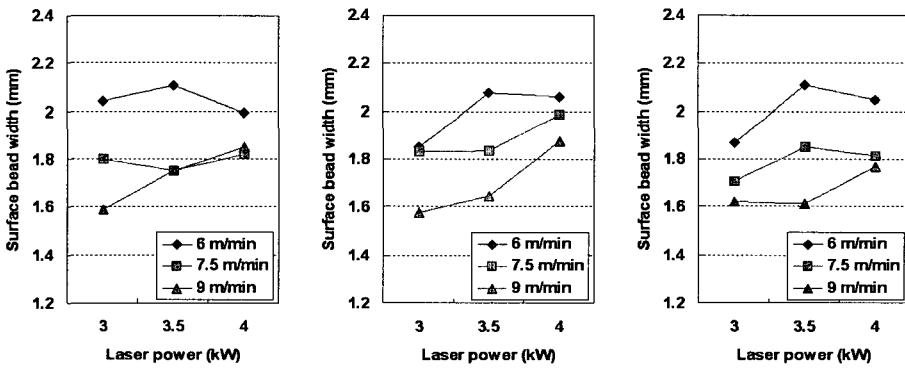


Fig. 3 Surface bead width according to welding condition

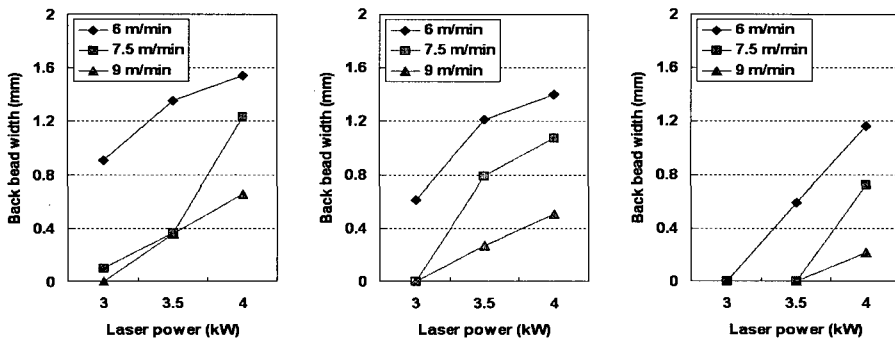


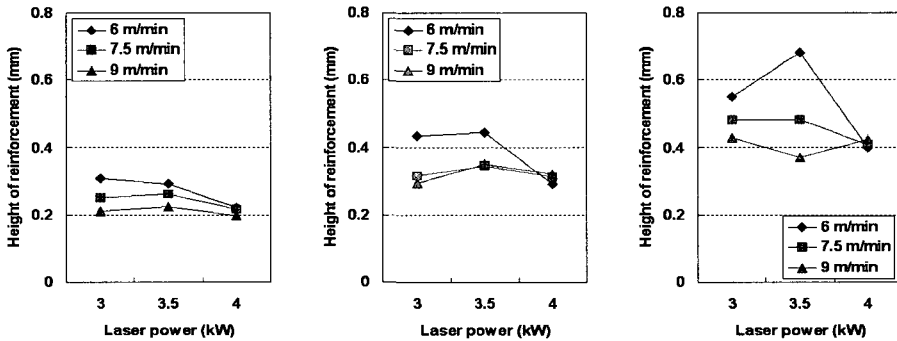
Fig. 4 Back bead width according to welding condition

열이 많아 지는 조건에 따라 커지고 있다. 반면 이면 비드에 있어서는 입열 조건과 완전하게 비례하는 경향을 갖고 있다. 다시 말하면 입열이 커지는 조건인 레이저 출력이 커지고, 용접 속도가 작아지는 경우에 대해서 커지고 있으며, 용가 와이어의 송급 속도가 적어질수록 그 값이 커지고 있다. 이면 비드의 크기가 0인 조건들이 있는데 이것은 Fig. 2 에서 보는 바와 같이 완전 용입이 발생되지 못하여 이면비드가 형성되지 않는 조건이다.

용접 덧살의 높이의 경우는 다른 용접 조건 보다 와이어 송급속도 가장 크게 영향을 받고 있다. 용접속도가 낮을수록 덧살의 높이가 커지는 데 이것은 단위 길이당 공급되는 용가 와이어의 양이 많아지기 때문이다. 그러나 레이저 출력에 대해서는 큰 경향성

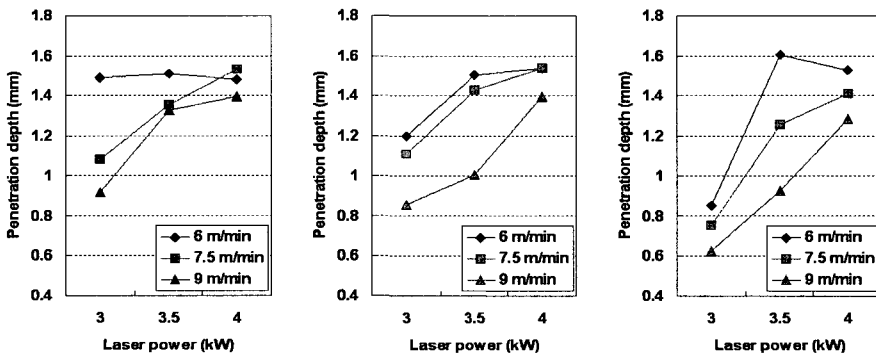
을 가지고 있지는 않지만 레이저 출력이 큰 경우에 대해서는 와이어 공급량에 따라 용접 속도에 관계없이 일정한 값에 수렴하고 있다. 용입 깊이는 모재의 표면으로부터 용접 금속의 가장 아래 부분의 거리를 측정하였다. 모재의 두께가 1.4 mm 이므로 1.4 mm 이상인 경우 완전 용입이 그렇지 않은 경우는 부분용입이 형성되었다. 와이어의 공급이 많아 질수록 용접입열이 와이어를 용융시키는 부분으로 분산되기 때문에 모재를 녹일 수 있는 에너지가 줄어들게 된다. 그러므로 용입 깊이가 작아지고 완전 용입이 일어나는 용접 범위가 줄어들게 된다.

결론적으로 용접 입열이 완전 용입을 이루는 조건에서, 용가 와이어의 공급이 용접 비드의 높이를 크게 하였다. 그러나 와이어 공급이 많아 질수록 입열 조건의 범위가 줄



(a) Wire feed rate = 2 m/min (b) Wire feed rate = 3 m/min (c) Wire feed rate = 4 m/min

Fig. 5 Height of reinforcement according to welding condition



(a) Wire feed rate = 2 m/min (b) Wire feed rate = 3 m/min (c) Wire feed rate = 4 m/min

Fig. 6 Penetration depth according to welding condition

어 들고 있으며, 따라서 용접부의 이면 비드 폭과 용입 깊이가 작아지고 있음을 알 수 있다.

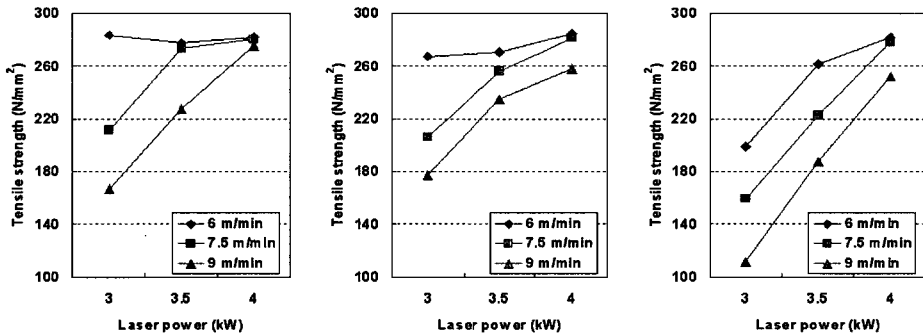
### 3.2 인장강도

용가 와이어를 이용한 레이저 용접의 인장 실험 결과는 Fig. 7과 같다. AA5812 합금의 모재의 인장강도는 277 N/mm<sup>2</sup> 이다. 파단의 형태는 크게 2가지 형태로 나눌 수 있으며 그 형태는 Fig. 8과 같다. 인장강도에 있어서 277 N/mm<sup>2</sup> 보다 높은 인장강도에서는 Fig. 8의 (a)와 같이 모재에서, 그렇지 않은 경우는 (b)와 같이 용접부에서 파단이 일어났다. Fig. 7에서 보는 바와 같이, 모재의 인장강도를 기준으로 볼 때, 용가 와이어의 공급량이 많아질수록 적정 용접의 범위가 줄어들음을 알 수 있는데 이것은 같은 입열인 경우 용가 와이어 (filler wire)의 공급으로 인하여 입열이 용가 와이어 (filler wire)를 녹이는데 많이 분산되므로 모재를

녹이는데 필요한 열량이 줄어들기 때문으로 사료된다. 그리고 용접조건에 따라 약간의 기공이 형성됨을 알 수 있었으나, 용가 와이어에 의한 용착 부족과 언더컷과 같은 결함이 줄어들고, 용접부의 덧살에 의해 단면적이 커지므로 이를 보완하는 것으로 사료된다.

### 3.3 성형성

용가 와이어를 이용한 에릭슨 실험의 결과는 Fig. 9와 같다. 각 와이어 송급속도에 대하여 용접속도와 레이저 출력에 따라 에릭슨 시험 시편의 파단형태, 펀치가 상승한 값으로 측정되는 에릭슨 값 그리고 모재의 에릭슨 값에 대한 용접 시편의 에릭슨 값의 비인 에릭슨 비 (Erichsen ratio) 를 나타내었다. 파단 형태는 Fig. 10과 같으며, 용접부에 수직으로 파단되는 형태와, 수평으로 파단되는 형태로 나눌 수 있다. 수평과 수직 파단의 형태는 에릭슨 비가 0.75를 기준

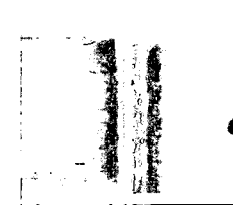


(a) Wire feed rate = 2 m/min (b) Wire feed rate = 3 m/min (c) Wire feed rate = 4 m/min

Fig. 7 Tensile test according to welding condition

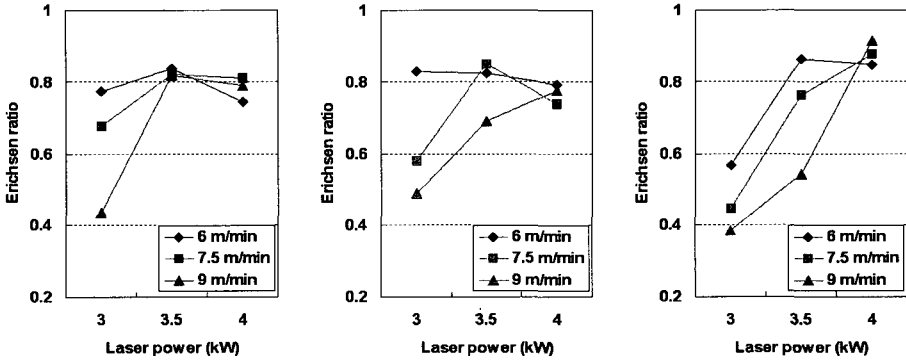


(a) Fracture at base metal



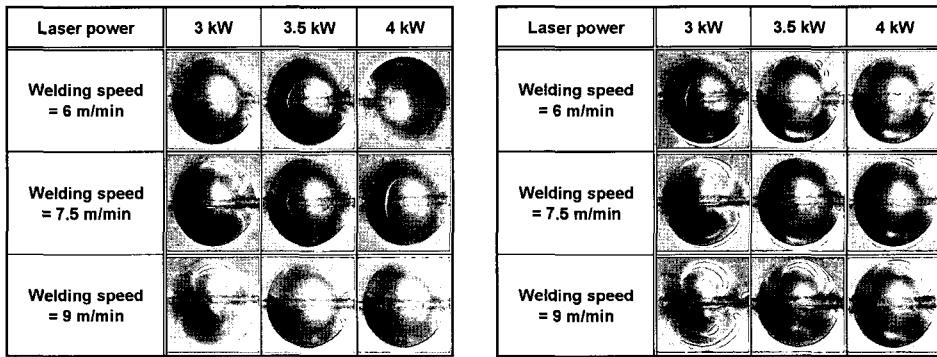
(b) Fracture at weld or HAZ

Fig. 8 Fracture type of tensile test



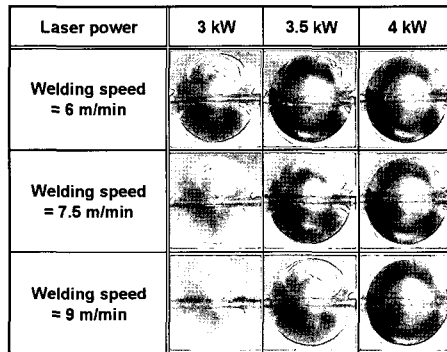
(a) Wire feed rate = 2 m/min (b) Wire feed rate = 3 m/min (c) Wire feed rate = 4 m/min

Fig. 9 Erichsen ratio according to welding condition



(a) Wire feed rate = 2 m/min

(b) Wire feed rate = 3 m/min



(c) Wire feed rate = 4 m/min

Fig. 10 Fracture type of Erichsen test

으로 나뉘게 된다. 완전 용입이 발생하는 입열량에 대해서는 대체적으로 와이어의 송급속도가 클수록 에릭슨 값이나 모재에 대한 비가 커지고 있다. 이것은 와이어에 의하여 충분한 덧살 높이가 형성되기 때문이다. 결과적으로 와이어 송급속도가 증가 할수

록 레이저에 의해 입사되는 입열을 분산시키고 이것은 높은 와이어 송급속도에서 적정의 용접조건의 범위가 적어짐을 알 수 있다. 그리고 와이어 송급속도가 낮은 경우는 완전 용입되는 범위는 커지나 와이어 공급에 의한 효과가 작아지고 있음을 알 수 있

었다. 그러므로 적절한 용접조건이 존재함을 알 수 있었다.

#### 4. 분산 분석을 이용한 제어 인자의 영향력 평가

각 공정 변수가 용접 특성에 얼마나 큰 영향을 주는지를 정량적으로 파악하기 위하여 분산분석을 수행하였다. 분산 분석이란 실험 결과의 제곱합 (sum of square)을 인자 (factor), 오차 (error)와 교호 작용 (interaction)을 포함한 요인 (source) 별로 분해하고, 오차에 대한 각 요인의 상대적인 값을 비교하여 어떤 요인이 오차에 비해 결과에 큰 영향을 주는가를 규명하는 방법이다. 분산 분석은 Table 3 와 같고 에릭슨 비에 대한 분산 분석은 Table 4와 같다. Table 4와 5에서 WFR 은 와이어 송급속도 (wire feed rate)를 LP는 레이저 출력 (laser power)을

그리고 WS는 용접속도 (welding speed)를 의미한다. 분산 분석에서 '×' 는 교호 작용을 의미한다. 교호 작용이란 인자 수준의 조합에서 일어나는 효과를 의미한다.  $F_0$  는 평균 제곱의 비로서 에러의 평균 제곱에 대한 인자의 제곱합의 비로서 나타내고, 이 값이 클수록 영향력이 크다는 것을 의미한다. 그리고  $F(0.01)$  은 F-검정 (F-test) 의 유의 수준 (level of significance)을 나타내는 것으로 99.9 % 의 유의 수준을 의미한다. 그러므로  $F_0$  가  $F(0.01)$ 보다 큰 경우, 요인이 결과에 영향을 주는 인자라는 것을 통계적으로 검증하게 된다.<sup>8)</sup>

분산분석의 결과에서 보는 바와 같이 인장강도와 에릭슨 비에 가장 큰 영향력을 주고 있는 것은 여러 개의 요인 중에서 용접 입열을 나타내는 레이저 출력과 용접속도였다. 다시 말하면 입열의 변화에 의한 완전 용입의 발생 여부가 인장강도와 에릭슨 비에 주요한 요인으로 작용한다는 것을 의미

Table 3 ANOVA for tensile strength about welding parameters

Factor	Sum of square	Degree of freedom	Mean square	$F_0$	$F(0.01)$
WFR	38868.6	2	19434.3	60.5	0
LP	161253.4	2	80626.7	251.1	0
WS	83573.2	2	41786.6	130.2	0
WFR × LP	18530.2	4	4632.6	14.4	9.72E-10
WFR × WS	905.9	4	226.5	0.71	0.59
LP × WS	28051.7	4	7012.9	21.8	9.81E-14
WFR × LP × WS	5742.4	8	717.8	2.2	0.03
Error	40775.39	127	321.1		
Total	9208421.7	154			

Table 4 ANOVA for Erichsen ratio about welding parameters

Factor	Sum of square	Degree of freedom	Mean square	$F_0$	$F(0.01)$
WFR	4.71	2	2.35	3.77	0.03
LP	90.89	2	45.44	72.85	0
WS	26.82	2	13.41	21.49	0
WFR × LP	23.6	4	5.9	9.46	0
WFR × WS	1.72	4	0.43	0.69	0.61
LP × WS	25.56	4	6.39	10.24	0
WFR × LP × WS	13.65	8	1.07	2.74	0.01
Error	31.81	51	0.62		
Total	4886.2	78			



한다. 이외에 와이어 송급속도가 인장강도에 영향을 주는 것으로 나타났다. 와이어 송급속도와 레이저 출력, 그리고 레이저 출력과 용접속도에 대하여 교호 작용에 있다고 할 수 있다. 이것은 레이저 출력은 커질수록 입열이 증가되는 요소이지만, 와이어 송급속도와 용접속도는 증가할수록 입열을 감소시키는 요인으로 작용하기 때문이다. 그러나 이러한 교호 작용은 영향력은 각각의 인자에 비해 상대적으로 매우 작음을 알 수 있다.

## 5. 결 론

알루미늄 합금인 AA5182 판재에 대하여 용가 와이어 AA5356 을 이용한 Nd:YAG 레이저 용접에서 용접 공정 변수인 레이저 출력, 용접속도, 그리고 와이어 송급속도에 따른 용입형태, 용접 비드 형상, 인장강도와 성형성의 특성 변화를 관찰하였다. 용가 와이어 송급에 따라 용접부의 완전 용입조건이 줄어들고 있음을 알 수 있었다. 이것은 와이어의 공급이 용접 입열을 분산시키기 때문이다. 인장강도의 경우 완전 용입이 일어나는 경우에 대해서는 모재부에서 파단이 발생하였다. 이것은 용가 와이어에 의하여 용착 금속의 결합을 완화 시키고 덧살의 효과에 의한 강도 향상의 효과 때문으로 사료된다. 에릭슨 실험을 통해 성형성을 판단하였다. 성형성에 있어서도 모재 대비 0.75 이상의 에릭슨 값에 대해서는 용접부를 가로질러 파단이 발생함을 알 수 있었다. 그러므로 용가 와이어를 이용한 레이저 용접의 용접성은 매우 우수함을 알 수 있었다. 그리고 분산 분석을 통하여 각 용접 제어 인자가 용접 특성에 미치는 영향을 정량적으로 살펴보고, 레이저의 출력이 가장 영향력 있는 인자임을 알 수 있었다.

## 참고문헌

1. Mather G., "The Welding of Aluminum and Its Alloy", Woodhead Publishing Ltd, 2002.
2. Pastor M., Zhao H., Martukanitz R. P. and Debroy T., "Porosity, Underfill and Magnesium Loss during Continuous Wave Nd:YAG Laser Welding of Thin Plates of Aluminum Alloys 5182 and 5754", Welding Journal, Vol. 78, No. 6, pp.207s-216s, 1999.
3. Naeem M. and Jessett R., "Aluminum Tailored Blank Welding with and without Wire Feed Using High Power Continuous Wave Nd:YAG Laser", SAE Conference Proceedings, P (334), pp.247-256, 1998.
4. Uchiumi S., Wang J., Katayama S., Mizutani M., Hongu T. and Fujii K., "Penetration and Welding Phenomena in YAG Laser-MIG Hybrid Welding of Aluminum Alloy", Proceedings of the 23rd International Conference on Application of Lasers and Electro-Optics 2004, 2004.
5. Leong K. H., Sabo K. R., Altshuller B., Wilkinson T. L. and Albright C. E., "Laser Beam Welding of 5182 Aluminum Alloy Sheet", Journal of Laser Applications, Vol. 11, No. 3, pp.109-118, 1999.
6. 윤종원, 이윤상, 박현성, 신현일, "알루미늄 합금 레이저 용접부의 기계적 성질에 영향을 미치는 인자", 대한용접학회 춘계 학술발표대회 개요집, Vol. 42, pp. 131-133, 2004.
7. 윤종원, 이윤상, 이문용, 정병훈 "5052 알루미늄 합금 레이저 용접부의 기계적 성질에 관한 연구", 한국레이저가공학회지, Vol. 6, No. 1, pp.25-31, 2003.
8. 박성현, "현대실험계획법", 민영사, 2003.