

알루미늄 레이저 용접에서 용접부 성형성 평가와 성형성 예측 모델 개발에 대한 연구

박영환

국립부경대학교 기계공학과

Weld Formability Evaluation and Formability Estimation Model Development in Aluminum Laser Welding

Young Whan Park

Pukyong National University, Department of mechanical engineering

Abstract

In this study, laser welding of aluminum AA5182 with AA5356 filler wire was carried out and the formability of the weld joint was evaluated through Erichsen test according to laser power, welding speed and wire feed rate. Fracture was occurred in both directions, perpendicular and parallel to the weld line at 0.75 of Erichsen ratio. Second order Regression model to estimate Erichsen ratio with experimental variables was proposed and the performance of model was evaluated with F-test and average error rate.

Keywords: Aluminum laser welding, formability, Erichsen ratio, regression model

1. 서 론

전 세계적으로 환경오염에 대한 관심이 급증하고 있으며, 지구 온난화와 같은 문제는 전 인류가 공조하여 극복해야 할 문제고 대두되고 있다. 특히 온실가스에 대하여 선진국을 비롯한 각 나라는 자동차 배기가스를 주요 원인으로 삼고 있으며, 이를 무역의 규제조건으로 강화하고 있다. 그러므로 자동차 회사는 고효율의 자동차 개발에 힘쓰고 있으며, 대표적인 방법 중에 하나가 차체를 경량화 하여 연비를 향상시키는 것이다. 이를 위해 알루미늄과 같은 경량금속을 차체에 적용하고자 노력 중에 있다.¹

차체에 새로운 소재가 적용되기 위해서는 재료의 용접성, 성형성 및 도장성 등에 대한 평가가 필요하다. 그러므로 알루미늄을 차체에 적용하기 위해 필요한 여러 특성 중, 용접성에 대한 평가와 성형성에 대한 평가가 반드시 필요하다. 일반적으로 알루미늄은 높은 열전도도와 같은 물성적 특성에 의해 고밀도 열원의 용접이 효과적이다.² 그러나 레이저만을 이용하는 5000 계열의 알루미늄 합금을 용접하는 경우, 용접 후에 강도의 저하 현상이 발생하는데 그 원인은 합금원소의 손

실, 언더컷, 기공 그리고 용착 금속의 부족과 같은 현상에 의해서 이다.³ 그러므로 이를 극복 할 수 있는 방법으로 용접 와이어(filler wire)를 이용하여 알루미늄 합금을 용접하는 방법과^{4,5} 레이저와 아크 용접을 결합한 하이브리드 용접⁶이 제시되고 있다. 알루미늄의 합금의 레이저 용접은 레이저 출력, 용접속도, 보호가스 등에 의하여 많은 영향을 받는다.^{7,8} 그리고 용접 와이어를 이용하는 경우 위와 같은 변수 이외에 와이어 송급속도 또한 매우 중요한 변수로 작용한다.⁹ 그러므로 용접 와이어를 이용한 레이저 용접에서 용접부 특성이 어떻게 변하는지를 알아서 자동차 차체에 알루미늄 5000계열 판재의 적용 가능성을 판단 할 수 있다.

그러므로 본 연구에서는 5000계열 알루미늄 소재인 AA5182 판재의 자동차 차체 적용 가능성을 판단하기 위하여 AA5356 와이어를 이용한 레이저 용접 시, 용접 공정변수인 레이저 출력, 용접속도, 그리고 와이어 송급속도에 따른 성형성을 평가하였다. 성형성을 평가하는 방법으로는 에릭슨 시험을 이용하였고, 다양한 용접 공정변수에 따른 효과를 파악하였다. 또한 에릭슨 비를 예측할 수 있는 회귀모델을 제안하였으며, 이를 통해

용접 공정변수와 성형성과의 상관관계를 정량적으로 판단할 수 있었다.

2. 레이저 용접 시스템 및 실험 조건

AA5182 판재의 레이저 용접성 및 용접부 성형성을 판단하기 위하여 용접 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 레이저는 독일 R사의 4kW급 Nd:YAG 레이저를 사용하였다. 사용된 레이저의 스펙은 초점거리는 초점 거리는 250mm, 레이저 빔의 초점 지름은 0.4mm이다. 레이저 빔의 초점 위치는 모재의 표면에 와이어어의 끝점과 맞닿을 수 있도록 세팅하였다. 실험에 사용된 레이저는 직각으로 조사하지 않고, 진행되는 방향으로 18°를 기울였다. 알루미늄 판재의 경우, 레이저에 대한 반사율이 매우 높으므로 판재의 표면에서 반사된 레이저가 레이저 시스템의 광학계를 손상시킬 수 있으므로 이를 방지하기 위하여 각도를 주어 실험을 수행하였다.

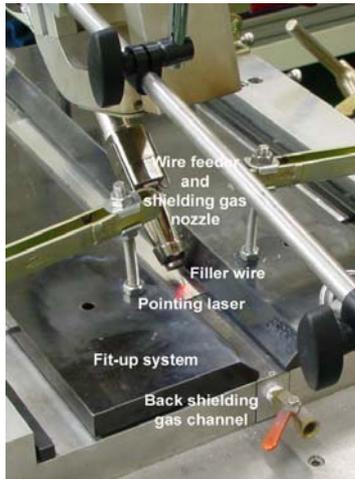


Fig. 1 Laser welding system.

알루미늄 레이저 용접을 위해 Fig. 1과 같은 시스템을 구성하였다. 그림에서 보는 바와 같이 알루미늄 판재가 고정되고, 그 상판위에 레이저가 조사되며, 와이어는 레이저의 진행방향의 앞부분에서 공급된다. 보호가스는 와이어가 공급되는 방향에서 토치 내부의 노즐을 통해 공급되고, 하부는 보호가스 채널을 이용하여 공급된다. 하부의 보호가스 채널은 시편이 닿는 부분은 개방되어 있고, 그렇지 않은 부분은 덮개로 밀봉을 하여, 보호가스가 용접되는 부분을 효과적으로

보호할 수 있게 장착하였다.

용접와이어를 이용한 레이저 용접에서는 레이저 출력, 용접 속도, 초점의 위치, 보호가스, 재료의 갭, 와이어 송급속도, 와이어의 위치 등 다양한 용접 공정 변수들이 있다. 본 실험에서는 이 중에서 레이저 입열 인자인 레이저 출력(laser power: LP), 용접속도(welding speed: WS), 그리고 용접 와이어 송급속도(wire feed rate: WFR)로 하였다. 실험 계획은 3³ 요인배치법을 이용하여 실험하였고, 실험의 조건은 Table 1과 같다. 그러므로 각 요인당 3개의 수준으로 3회 반복 실험을 수행하여 실험의 회수는 총 81회였다. 실험은 실험 계획법에 따라 무작위(random)로 실험을 수행하였다. 실험의 용접은 I형 그루브의 맞대기 용접을 이용하였다. 용접면(weld face)는 밀링가공을 하여 90°를 유지하였다.

Table 1 Laser weld experiment condition

Level	-1	0	0
Laser power (kW)	3	3.5	4
Welding speed (m/min)	6	7.5	9
Wire feed rate (m/min)	2	3	4

실험에 사용된 판재로서는 AA5182 판재를 사용하였다. 두께는 1.4t를 이용하였다. 용접 와이어는 AA5356로 직경은 1.2mm인 것을 사용하였다. 두 소재의 화학적 조성은 Table 2, 3과 같고, 두 재료는 모두 5000계열로 주요 합금은 마그네슘이다.

Table 2 Chemical composition of AA5182 base metal (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	Val.

Table 3 Chemical composition of AA5356 filler wire (wt%)

Mg	Mn	Cr	Ti	Al
5.00	0.35	0.10	0.15	Val.

보호가스는 아르곤(Ar)을 사용하였고, 상부의 노즐에서는 20 l/min, 하부의 보호가스 채널에는 10 l/min의 유량으로 보호가스를 공급하였다. 실험의 용접 방법은 I형 맞대기 용접으로 수행하였고, 각 판재의 루트간격은 0mm로 설정하였다.

알루미늄의 그루브 면은 밀링 가공하여 일정하게 유지하였다. 용접 직전에 아세톤을 이용하여 모재를 닦아 용접 시편의 청결을 유지하였다.

3. 성형성 평가

AA5182 알루미늄 합금의 AA5356 용접 와이어를 이용한 레이저 용접의 용접성 평가는 에릭슨 시험을 이용하여 수행하였다. 시험의 수행은 KS B0812에 의해 실험을 수행하였다. 에릭슨 시험에서 그 결과 치는 에릭슨 값(Erichsen value)으로 표현이 되는데, 에릭슨 값이란 에릭슨 시험에서 시험 후 판재의 높이를 말한다. 각 용접조건에서의 에릭슨 값의 평균은 Table 4와 같다. 모재의 에릭슨 값은 10.64mm이다. 에릭슨 테스트에서 에릭슨 비를 모재의 에릭슨 값에 대한 시험편의 에릭슨 비로 정의하고 있다. 각 실험 조건에 대한 에릭슨 비와 대표적인 시편의 단면사진은 Fig. 2와 같다. 파단 형태는 Fig. 3과 같으며, 용접부에 수직으로 파단되는 형태와, 수평으로 파단되는 형태, 그리고 저입열의 경우 용접부나 혹은 HAZ (Heat Affected Zone)에서 파단되는 것으로 나눌 수 있다. 수평으로 파단되는 경우는 에릭슨 비가 0.75보다 작은 경우이고, 수직 파단의 형태는 에릭슨 비가 0.75보다 클 때 형성된다.

Table 4 Erichsen value of welded part (mm)

Welding speed (m/min)		6	7.5	9
Laser power 3 kW				
Wire feed rate (m/min)	2	8.232	7.192	4.630
	3	8.824	6.169	5.217
	4	6.033	4.747	4.087
Laser power 3.5 kW				
Wire feed rate (m/min)	2	8.894	8.731	8.698
	3	8.771	9.054	7.329
	4	9.181	8.108	5.780
Laser power 4 kW				
Wire feed rate (m/min)	2	7.898	8.628	8.405
	3	8.418	7.862	8.251
	4	9.009	9.337	9.721

Fig. 2에서 보는 바와 같이 낮은 입열의 조건인 3kW에서는 와이어 공급이 많아질수록 용접부의 성형성이 떨어지고 있다. 그러나 입열이 충분한 조건인 4kW에서는 와이어의 공급이 많아질수록 용접부

의 성형성이 향상되고 있음을 알 수 있다. 용접 와이어를 이용한 레이저 용접에서, 용접의 입열은 용접시 모재와 와이어를 동시에 녹여야 한다. 그러나 입열이 적어 와이어와 모재를 동시에 충분히 가열하지 못한 경우에 있어서는 와이어를 녹이지만, 모재는 충분히 용융시키지 못하기 때문에 불완전 용입이 형성된다. 이것은 와이어의 양이 많아질수록 이러한 경향이 커지게 된다. 그러나 용접 입열이 충분한 경우는 와이어와 모재를 충분히 녹여 완전 용입을 얻을 수 있다. 이 경우는 와이어의 양이 많아질수록 용접 특성이 강화되어 성형성을 높일 수 있게 된다.

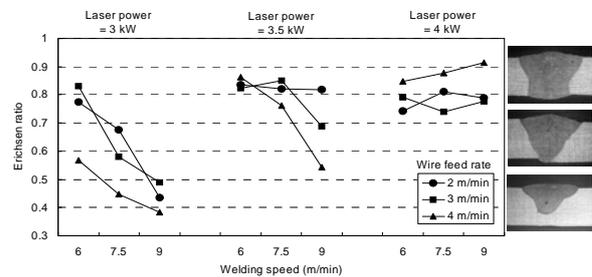
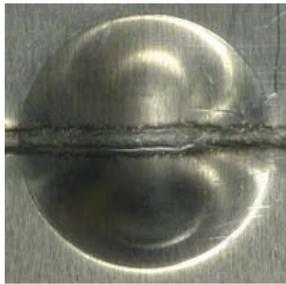


Fig. 2 Erichsen ratio for each welding condition.

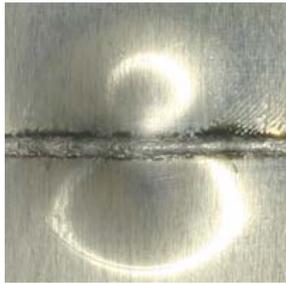
5000계열의 알루미늄 레이저 용접에, 5000계열의 주요 합금원소인 마그네슘이 기화하여 용접부의 강도를 약화시키는 현상이 발생한다. 그러나 5000계열의 와이어 공급을 통해 이를 보완하고, 용접부의 강도 향상을 얻을 수 있다. Table 2,3에서 보는 바와 같이 AA5356이 AA5182보다 마그네슘의 함량이 많다. 용접 와이어에 의한 강도 향상은 건전한 용접부의 형상에 의해서도 얻을 수 있다. 다시 말하여 용착 부족 (underfill), 언더컷 (undercut)과 같은 결함을 줄일 수 있고 덧살 (reinforcement)의 형성에 의해서 용접부의 성형 특성이 향상될 수 있었다.¹⁰



(a) Perpendicular to the weld line



(b) Parallel to the weld line



(c) Fracture at the weld

Fig. 3 Fracture type of Erichsen test.

4. 성형성 예측을 위한 회귀모델 개발

용접 공정변수를 이용한 성형성 예측 모델에 있어서 다양한 방법 예를 들면 열전달 방정식을 이용한 미분 방정식과 그 해를 구하는 해석적 모델을 구할 수 있으며, 또한 통계적 회귀모델과 신경회로망 모델을 이용하여 예측 모델을 구성할 수 있다. 본 연구에서는 통계적 회귀모델을 이용하여 알루미늄 레이저 용접부의 성형성을 예측할 수 있는 모델을 개발하였다. 실험 결과를 바탕으로 하여 시스템을 모델링하면, 실험의 공정변수에 대한 영향력을 파악할 수 있으며, 실험점이 아닌 영역에서의 값도 입력에 대한 출력의 값을 근사적으로 구할 수 있다. 그러므로 모델링 결과는 다양하게 사용 가능하다.

회귀모델은 변수의 차수(order)와 비선형(nonlinear) 방법에 따라 다양하게 구성될 수 있다.^{15,16} 그러므로 본 논문에서는 인장강도를 예측할 수 있는 회귀모델로 2차 다항 회귀모델(second order polynomial regression model)을 이용하였으며 그 식은 식 (1)과 같다.

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_4x_1x_2 + \beta_5x_1x_3 + \beta_6x_2x_3 + \beta_7x_1^2 + \beta_8x_2^2 + \beta_9x_3^2 \quad (1)$$

여기서 x_1, x_2, x_3 는 입력인자로 각각 레이저 출력, 용접속도, 와이어 송급속도를 나타낸다. \hat{y} 는 출력인자로 모델에 의해 예측된 에릭슨 비이다. 그리고 β_0 는 세로축의 절편이고, β_1 에서 β_9 까지는 각각 입력인자의 계수 값이다. 각 계수 값은 Table 5와 같으며, 최소제곱법(least mean square)으로 구한다.

회귀모델의 예측성능은 Fig. 4와 같다. 가로축은 실제 에릭슨 실험을 통해 얻어진 에릭슨 비이며, 세로축은 예측 모델에 의하여 계산된 에릭슨 비의 값이다. 그림 내에 있는 직선 라인에 가까울수록 예측 성능이 우수한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 전체적으로 예측성능이 우수함을 알 수 있다.

Table 5 Coefficients of regression model

β_0	β_1	β_2	β_3	β_4
-0.207	1.1446	-0.318	-0.354	0.107
β_5	β_6	β_7	β_8	β_9
0.13	-0.007	-0.343	-0.005	-0.013

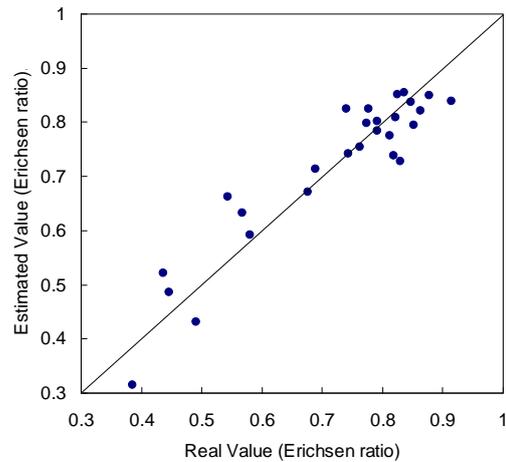


Fig. 4 Performance of estimation model.

일반적으로 추정된 회귀모델의 정도(precision)는 분산분석에 의한 F-검증(F-test), 결정계수(coefficient of determination), 잔차 평균제곱(mean square error: MSE) 등으로 판단할 수 있다.¹¹ 본 논문에서는 분산분석(analysis of variation: ANOVA)을 이용하여 각 회귀모델의 통계적 유의성을 평가하였고, 평균 오차율을 통하여 회귀모델의 예측 정확도를 정량적으로 평가하였다.

회귀모델에 대한 분산분석은 각 회귀모델에 대

하여 회귀모델에 의해 설명되는 값과 그렇지 않은 값으로 나누어 이 두 값의 비를 F 검정하므로 통계적 유의성을 판단하게 된다. Table 6은 본 회귀모델의 분산분석 표이다. 여기서 DOF는 자유도(Degree of Freedom)를 SS는 제곱합(Sum of Square)을, MS는 제곱 평균(Mean Square)을, F0는 회귀의 제곱 평균화 잔차의 제곱 평균의 비를 나타낸다. F(0.05)는 유의 수준 95%에 대한 F 검정의 기각치(critical value)이므로 Table 6에서보는 바와 같이 F0가 F(0.05)보다 크므로 예측 회귀 모델은 통계적으로 유의한 모델이며, 입력변수에 대하여 출력 변수의 관계를 통계적으로 잘 설명해 주고 있다고 표현할 수 있다.

Table 6 ANOVA table for regression model

	DOF	SS	MS	F ₀	F(0.05)
Regression	9	0.5198	0.0578	12.631	2.49
Residual	17	0.0778	0.0046		
Total	26	0.5975			

예측 모델의 정확도를 정량적으로 판단하기 위하여 평균 오차율(AER: Average Error Rate)을 이용하여 평가하였다. 평균 오차율은 식 (2)와 같다.

$$AER(\%) = \frac{|y - \hat{y}|}{y} \times 100 \quad (2)$$

여기서 y 는 실험에서 얻어진 에릭슨 비이고, \hat{y} 는 모델에 의해 예측된 에릭슨 비이다. 이를 통해 얻어진 평균 오차율은 6.67%로 성형성 예측 모델의 성능이 우수함을 정량적으로 판단할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 알루미늄 합금인 AA5182에 대하여 AA5356 용접 와이어를 이용한 Nd:YAG 레이저 용접의 차체 용접공정 적용가능성을 판단하기 위하여, 공정변수인 레이저 출력, 용접속도, 그리고 와이어 송급속도에 따른 용접부의 성형성을 관찰하였다.

성형성은 에릭슨 시험법의 결과를 이용하여 정

량화 하였다. 그 결과 파단 형태는 용접부에 수직으로 파단되는 형태와, 수평으로 파단되는 형태, 그리고 저입열의 경우 용접부나 혹은 HAZ (Heat Affected Zone)에서 파단되는 것으로 나눌 수 있다. 수직과 수평 파단의 형태는 에릭슨 비가 0.75를 기준으로 나뉘게 되었다. 레이저 입열이 충분한 경우는 와이어의 송급이 성형성을 증대시키는 요인으로 작용하지만, 입열이 충분하지 않는 경우는 입열을 분산시켜 와이어의 송급이 성형성 및 용접성을 악화시키는 요인으로 작용하였다.

또한 용접부 성형성을 예측하기 위하여 2차 회귀모델을 이용하여 에릭슨 비를 예측할 수 있는 모델을 제시하였다. 모델의 성능은 분산분석과 평균 오차율을 이용하여 판단하였고, F 검증결과 통계적으로 유의한 모델이며, 평균 오차율은 6.67%로 성형성 예측모델의 성능이 우수함을 정량적으로 판단할 수 있다.

후 기

이 논문은 2010년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임. (No.2010-0003259)

참고문헌

- 1) Irving, B., "The auto industry gears up for aluminum," *Welding Journal*, Vol. 79, No. 11, pp. 63-68, 2000.
- 2) Mather G., "The Welding of Aluminum and Its Alloy," Woodhead Publishing Ltd, 2002.
- 3) 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.
- 4) 윤종원, 이윤상, 박현성, 신현일, "알루미늄 합금 레이저 용접부의 기계적 성질에 영향을 미치는 인자," 대한용접학회 춘계 학술발표대회 개요집, Vol. 42, pp. 131-133, 2004.

- 5) 윤종원, 이윤상, 이문용, 정병훈, “5052 알루미늄 합금 레이저 용접부의 기계적 성질에 관한 연구,” 한국레이저가공학회지, Vol. 6, No. 1, pp. 25-31, 2003.
- 6) 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.
- 7) Salminen, A. S. and Kujanpää, V. P., “Effect of wire feed position on laser welding with filler wire,” Journal of Laser Applications, Vol. 15, No. 1, pp. 2-10, 2003.
- 8) Salminen, A. S., “Effect of welding parameters on the efficiency and energy distribution during laser welding with filler wire,” Laser Material Processing Proceedings, Section C, 1704, ICALEO 2001, 2001.
- 9) 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.
- 10) 박영환, 이세현, 박현성, “용가 와이어를 이용한 알루미늄 레이저 용접부의 용접 특성에 관한 연구,” 한국레이저가공학회지, Vol. 8, No. 3, pp. 9-17, 2005.
- 11) 박성현, “현대실험계획법,” 민영사, 2003.