

포토 다이오드를 이용한 6000계열 알루미늄 합금의 레이저 용접에서 키홀 및 플라즈마의 거동 해석

박영환 · 박현성* · 이세현**

한양대학교 정밀기계공학과

*기아자동차 (주) 차체생기팀

**한양대학교 기계공학부

Analysis on behavior of keyhole and plasma using photodiode in laser welding of aluminum 6000 alloy

Y. W. Park, H. S. Park* and S. H. 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 apply light materials such as aluminum to car body. Aluminum welding using laser has some advantages high energy density and high productivity. It is very important to understand behavior of plasma and keyhole in order to improve weld quality and monitor the weld state.

In this study, spectral analysis was carried out to verify the spectrum for plasma which is generated in laser welding of A 6000 aluminum alloy. Two photodiodes which cover the range of plasma wavelength was used to measure light emission during laser welding according to assist gas flow rate and welding speed. Analysis of relationship between sensor signals of welding variables and formation of keyhole and plasma is performed. To determine the level of significance, analysis of variation (ANOVA) was carried out.

Key words : Aluminum, Laser Welding, Keyhole, Plasma, Photodiode, Spectral Analysis, Analysis of Variance (ANOVA)

1. 서 론

전 세계적으로 환경 보호에 대한 관심이 높아지고 있으며 그로 인해 세계 환경기구와 같은 단체에서는 차량용 배기가스의 규제가 심해지고 있다. 그러므로 전세계의 자동차 업체는 자동차의 연비 향상을 위한 차체의 경량화가 큰 이슈로 대두되고 있다. 차량 경량화의 일환으로 알루미늄과 같은 경량화 소재를 이용하여 차체 조립에 투입하고자 자동차 업체들은 기술개발에 많은 투자를 하고 있다. 그러나 알루미늄의 용접 특성 때문에 아직까지는 많은 업체에서 생산라인에 적용하지 못하고 있다.

레이저 용접은 생산성 향상은 물론 고정밀, 고품질의 용접, 그리고 깊은 용입깊이라는 장점 때문에 산업체에서의 적용이 점점 확대되고 있다. 또한 경량화 소재인 알루미늄은 용접시 열원에서의 입열 밀도가 커야 하므로 레이저 용접이 많이 이용될 것으로 예상되고 있다.

레이저 가공에 있어서 발생하는 현상으로는 음향과 빛의 방출, 화상 (image), 스트레스 웨이브 (stress wave) 등이 있다. 음향 변화를 위한 마이크로 폰 (microphone), 키홀 및 플라즈마의 거동을 계측하기 위한 자외선 영역의 포토 다이오드 (photodiode), 용융금속의 온도 계측을 위한 적외선 영역의 포토 다이오드 (photodiode), 그리고 용융부와 키홀의 형상을 화상으로 계측하기 위한 CCD 혹은 CMOS 카메라 등이 사용되고 있으며 스트레스 웨이브의 계측에는 음향 방출 트랜스듀서 (acoustic emission transducer) 등이 사용되고 있다. 이와 같은 방법을 이용하여 많은 연구자들이 레이저 용접현상의 모니터링 기법 및 신호와 용접 조건과의 상관관계를 규명하고자 하였다.

Jon¹⁾ 은 압전 트랜스듀서 (piezoelectric transducer)를 이용하여 플라즈마에 의해 생기는 증기압 변동을 계측 하였고, Chen 등²⁾ 은 용접부에서 나오는 자외선 (UV) 신호와 적외선 (IR) 신호를 동시에 계측하여 용접조건에 따른 신호의 거동을 연구하였다. Beyer 등^{3,4)} 은 레이저 용접 중 플라즈마 신호와 소리 (sound) 신호를 계측하여 비교하였으며, 용접부의 상부와 하부에서 각각 플라즈마 신호를 계측하여 완전 용입과의 관계도 연구하였다. Miyamoto 등⁵⁻⁷⁾ 은 최대 파장감도가 적외선 파장대 (950nm)인 포토 다이오드 두 개를 각도가 서로 다르게 배치하여 플라즈마를 계측한 후 용접품질을 판단하는 연구와 용입깊이를 예측하는 수식을 유도하는 연구를 수행하였다. Farson 등⁸⁾ 은 광신호와 음향신호를 계측, ARMA모형을 사용하여 두 신호의 관계를 규명하였다. 한편 Rhee 등⁹⁾ 은 포토다이오드를 사용하여 플라즈마와 스파터의 신호들과 용접변수의 변화에 따른 용접품질과의 관계를 규명하였다. 또한 이 신호들과 품질과의 상관관계를 통해 다중회귀분석과 신경회로망을 이용하여 용접비드의 용입깊이와 폭을 예측하는 연구¹⁰⁾를 수행하였고, 이를 퍼지 패턴인식 방법으로 품질을 판단하는 알고리즘¹¹⁾을 구현하였다. 레이저 가공 공정에 대한 모니터링 기술로는 색변조 기술을 이용하여 RGB의 다른 종류의 포토다이오드를 사용하였다¹²⁾. 레이저 용접의 분석에 있어서 분산분석을 사용한 예로는 분산분석을 이용하여 특정 영역에 있어서의 용접품질에 대해 정량적 기준을 제시할 수 있는 방법에 대한 연구 등이 있다¹³⁾.

본 연구에서는 6000계열 알루미늄 합금의 레이저 용접시 발생하는 현상 중에서

플라즈마와 키홀의 거동을 정량적으로 예측할 수 있는 시스템을 구축하였고, 이를 통해 보조가스 유량 및 용접 속도와 계측 신호의 상관관계를 분석하였다. 또한 분산 분석을 통해 통계적으로 예측된 신호의 유의성을 판단하였다.

2. 레이저 용접현상의 광계측 원리

금속 표면상에 고출력 레이저를 조사하는 경우, 고밀도의 레이저 빔에 의하여 중심부 구역에서는 금속의 증발이 일어나고, 그 외각지역에서는 용융이 일어난다. 따라서 중심부 구역의 큰 증기압은 용융금속을 레이저 빔이 조사되는 중심부 구역으로부터 용융된 금속을 옆으로 밀어내므로, 재료 내부에는 좁고 깊은 형상의 구멍이 생기게 되는데 이를 키홀(keyhole) 이라한다.

키홀이 형성되면, 키홀 내의 레이저 빔의 난반사에 의해 재료는 더 많은 에너지를 흡수한다. 이로 인해 용융된 금속은 기화하여 플라즈마를 형성하게 되고 이것은 레이저 빔이 키홀 내로 들어가는 것을 방해하게 된다. 따라서 피용접재 위에 발생하는 플라즈마는 보조가스 (assist gas)를 이용하여 적절히 제거 되어야 한다. 그러나 키홀 내부의 플라즈마는 키홀을 유지시키고 금속을 용융시키는 작용을 하므로 레이저 용접시 매우 중요한 역할을 한다¹⁷⁾. 레이저 빔이 지나가면 키홀 주변의 용융된 금속이 다시 키홀을 메우면서 용접의 과정이 수행된다. 그러므로 레이저 용접에서 키홀의 형성과 플라즈마의 생성은 용접 품질에 큰 영향을 주게 된다^{5,8,9)}. 그러므로 적절한 광센서의 사용으로 이를 예측하면 용접부에 대한 많은 정보를 얻을 수 있다.

대기압보다 높은 압력에서 플라즈마는 전기적으로 준중성이고, 국부적으로 열평형 상태에 있다고 알려져 있다¹⁴⁾. 레이저 용

접에서는 단면의 위치에 따라 온도가 다르기 때문에 열평형 상태는 아니지만 한정된 작은 부분에서는 전자와 이온과 중성 입자들 간에 존재하는 열평형이 있어 이를 국부적 열평형 상태(local thermal equilibrium, LTE)에 있다고 한다. 레이저 용접 시 발생하는 플라즈마는 이와 같은 국부적 열평형 상태에 있다고 알려져 왔고¹⁴⁾, 이 경우에 흑체의 스펙트럼 방출과 유사하다.

그러므로 플라즈마는 플랑크 (Plank)의 방사 법칙을 따르게 되는데 이때 생기는 온도와 방사 파장의 관계는 식 (1)과 같다.

$$E(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2 \lambda^{-5}}{\exp(hc/\lambda kT) - 1} \quad (1)$$

이때 복사곡선의 최대점은 다음과 같은 Wien의 변위법칙(displacement law)을 따르게 되고 최대점의 식은 식 (2)와 같다.

$$\lambda_{\max} T = 2897.8 [\mu\text{m} \cdot \text{K}] \quad (2)$$

알루미늄의 용융점 (melting point)은 933.4 K 이고 끓는점 (boiling point)은 2740 K 이므로 변위법칙에 의해 용융된 알루미늄이 방사하는 빛의 최대 파장 영역은 약 1.06 ~ 3.1 μm 이다. 플라즈마의 경우 용융금속 보다 온도가 높으므로 알루미늄 용접에서 방사되는 플라즈마의 파장대는 1.06 μm 이하의 가시광에서 자외선 영역으로 추정된다.

Fig. 1은 6000계열 알루미늄 합금의 레이저 용접시 발생하는 플라즈마로부터의 광방사 (light emission)에 대한 분광 분석 결과이다. 이 실험에서 사용된 분광기의 블레이즈(blaze) 파장은 400nm 이다. 일반적으로 분광분석은 선 스펙트럼의 파장을 이용하여 여기되는 재료의 성분을 분석하는데 사용된다^{15,16)}. 그러나 본 논문에서

는 단순히 레이저 용접시 발생하는 플라즈마의 발광 파장대를 검토하기 위한 방법으로 분광 분석을 행하였으며, 그 파장대는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 380 nm에서 640 nm 정도임을 알 수 있다. 그러므로 레이저 용접시 발생하는 플라즈마의 발광 영역에 적합한 광센서를 이용하여 계속하면 레이저 용접시 플라즈마와 킥홀의 거동을 분석할 수 있으며 이것을 통해 용접부 품질을 예측할 수 있다.

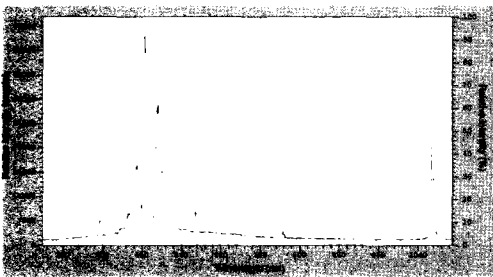


Fig. 1 Spectral analysis of light emission in laser welding of aluminum alloy A6000

3. 실험

3.1 실험장치

레이저 용접에서 발생하는 플라즈마를 계속하기 위한 시스템은 용접시 발생하는 광신호를 계속하는 센서와 계속된 신호를 증폭할 수 있는 증폭기, 그리고 데이터를 수집할 수 있는 DAQ보드와 신호처리를 위한 DSP 시스템으로 구성되어 있다.

알루미늄 합금의 레이저 용접을 수행하기 위한 시스템과 모니터링 시스템의 개략도는 Fig. 2와 같다. 레이저는 직각으로부터 18°를 기울였다. 그 이유는 레이저를 알루미늄에 조사할 때, 알루미늄으로부터의 정 반사에 의해 레이저 시스템이 작동을 멈추는 경우가 발생하였으므로 각도를 주어 실험을 수행하였다.

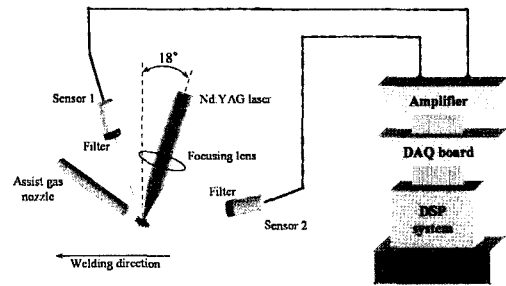


Fig. 2 System setup for measuring light emission of plasma

용접부 모니터링을 위한 센서는 2개가 사용되었다. 각 센서의 용접부에 대한 거리와 각도는 Table 1 과 같다. 본 논문에서는 편의상 각도가 높은 센서를 센서 1로, 각도가 낮은 센서를 센서 2로 하였다. 센서의 각도에 따라 관측되는 대상이 다른데 7) 센서 1은 높은 각도를 이용하여 레이저 용접부내의 킥홀과 상판위의 플라즈마를 동시에 계속할 수 있고, 각도가 낮은 센서 2는 상판 위에 발생하는 플라즈마를 계속하기 위해 사용되었다. 실험에서 사용된 센서 반응 범위는 190 nm ~ 680 nm이며 최대 반응 파장은 610 nm 이다. Fig. 1에서 보는 바와 같이, 계속 센서의 반응대 내에 플라즈마의 발광 파장대가 있으므로 모니터링에 사용되는 센서가 유효함을 알 수 있다.

포토 다이오드는 반응영역대의 빛을 받으면 광전류라는 것으로 반응하게 되는데, 이 전류는 μA 단위의 미세한 전류이다. 이 전류를 계속하기 쉬운 전압으로 바꾸고 이를 일반적으로 사용하기 쉬운 전압까지 증폭기를 이용하여 증폭하였다. 이 신호를

Table 1 Distance and angle of each sensor

Sensor	Distance	Angle
1	290 mm	95 °
2	360 mm	8 °

컴퓨터로 받아들이기 위해서 데이터 수집 장치 (DAQ : data acquisition board)가 사용되었다. 이 장치의 분해능 (resolution)은 12 bit 이고 샘플링 속도는 초당 1000 개의 데이터를 받아 들이도록 되어 있다.

3.2 실험조건

맞대기 레이저 용접에 있어서 제어 인자로 레이저의 출력, 용접속도, 보조가스의 유량 및 방향, 판재의 갭 (gap) 등이 있다. 본 연구에서는 많은 용접 변수 중 용접 속도와 보조가스를 제어인자로 사용하여 실험 하였다. 실제 생산 현장에 도입된 레이저 용접의 경우, 일반적으로 레이저의 출력을 고정시키고 용접속도를 최대한 빨리 하여 높은 생산속도를 내기 때문에 용접속도를 변화시키며 실험을 수행하였다.

실험에 사용된 레이저는 4kW급 Nd:YAG 레이저로 TEM00 모드를 사용하였다. 초점거리는 200 mm, 초점 위치에서 빔의 크기는 0.4 mm 이다. 발전기의 출력 방법은 CW 모드이고 보조가스는 아르곤 (Ar) 가스를 사용하였다. 실험에 사용된 판재는 6000계열 알루미늄 합금으로 두께는 1.2 mm, 용접 길이는 250 mm 였다. 6000계열 알루미늄 합금의 화학적 조성은 Table 2과 같다

실험은 2가지 종류로 수행되었다. 첫째로 보조가스가 용접부에 미치는 영향을 파악하고 이에 따른 신호변화를 관찰하기 위한 실험을 수행하였다. 보조가스는 별도의 노즐을 이용하여 용접 진행 방향의 앞쪽에서 취입하였다. 용접부에서 발생하는 플라즈마가 레이저의 입사를 방해하지 않도록

하기 위하여, 키홀이 형성되는 부분에 취입하였다. 보조가스를 사용하지 않는 조건에서 완전 용접이 되는 9 m/min의 용접속도에서 상부의 아르곤 가스의 유량을 0, 10, 15, 그리고 20 l/min으로 하고 하부의 가스는 10 l/min으로 하여 수행하였다.

또 다른 실험은 입열에 따른 신호 변화를 분석하기 위한 실험을 수행하였다. 입열을 조정하는 방법으로는 레이저의 출력을 4kW로 일정하게 하고 용접 속도를 조정하는 방법을 이용하였다. 속도를 9, 10, 11, 12, 그리고 13 m/min 까지 5단계로 나누어 실험을 수행하였다. 각 경우에 대하여 단위 길이당 입열 에너지는 26.7, 24, 21.8, 20, 그리고 18.5 J/mm 이다.

4. 실험 결과 및 고찰

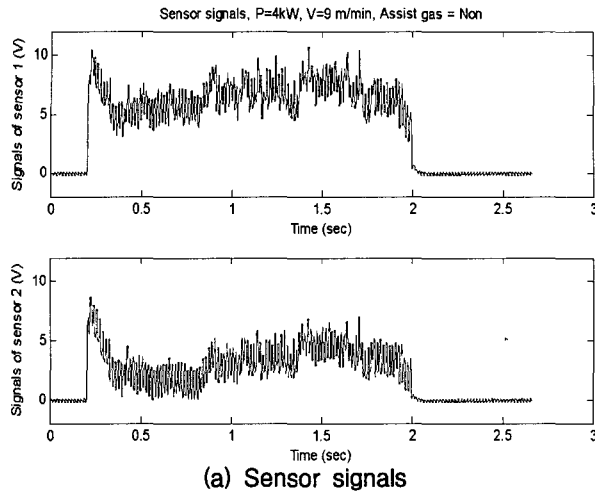
4.1 보조가스 유량에 따른 광신호의 변화

Fig. 3과 Fig. 4는 6000계열 알루미늄 합금의 레이저 용접시 발생하는 플라즈마의 빛을 계측한 신호와 그에 따른 비드의 예이다. 상단의 그래프는 계측된 센서 신호이고 밑의 그림 중 위의 그림은 표면 비드의 모습, 아래의 그림은 이면 비드의 모습이다.

Fig. 3은 보조가스를 사용하지 않는 경우의 신호와 이에 따른 비드의 모습이다. 이 경우에는 플라즈마를 제거하거나 용접부를 보호하는 가스를 사용하지 않고 있다. 그러므로 용접부에 발생하는 플라즈마와 키홀의 불안정성으로 인하여 계측된 신호가 매우 불안정함을 알 수 있다. 이 때 얻

Table 2 Chemical composition of aluminum alloy A6000 (wt%)

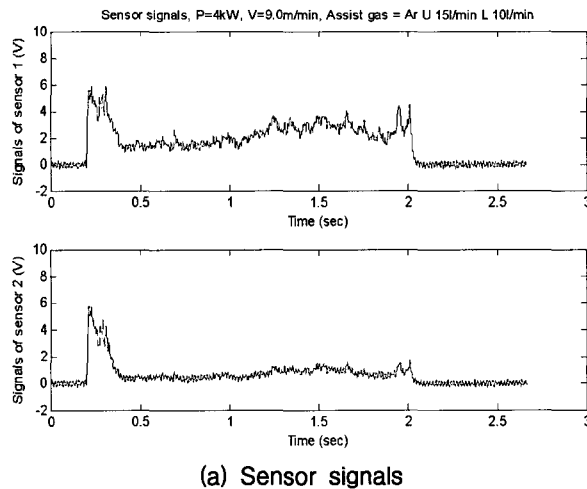
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	other	Al
0.98	0.17	0.84	0.07	0.33	0.02	0.02	0.01	0.01	Re



Surface bead			
Back Bead			
Time (sec)	0.2 ~ 0.67	0.93 ~ 1.33	1.58 ~ 2.05

(b) Bead appearance

Fig. 3 Sensor signals and the bead shape without assist gas at 9m/min welding speed



Surface bead			
Back Bead			
Time (sec)	0.2 ~ 0.67	0.93 ~ 1.33	1.58 ~ 2.05

(b) Bead appearance

Fig. 4 Sensor signals and the bead shape with Ar assist gas at 9 m/min welding speed

어지는 표면 비드의 모습이 매우 불규칙적인 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 아르곤 가스를 이용하여 상부에서 15 l/min, 하부에 10 l/min를 분사하는 경우의 센서 신호와 비드의 모습이다. 그림에서 보는 바와 같이 레이저 용접부의 비드 모양은 매우 안정적이고 이면 비드가 양호함을 알 수 있다. 측정된 신호 역시 매우 안정적이고 일정한 신호를 얻고 있음을 알 수 있다. 이것은 레이저 용접 시 발생하는 상판위에 발생하는 유기 플라즈마가 안정적으로 제거되고 그러므로 인해 키흔의 형성이 균형있게 형성됨을 표현한다.

Fig. 5와 Fig.6은 가스 유량의 변화에 따라 측정된 센서의 평균값과 표준 편차값의 변화를 보여주고 있다.

Fig. 5와 Fig. 6에서 보는 바와 같이, 보조가스의 유량이 증가할 수록 센서 신호의 평균값과 표준 편차값은 적어지고 있다. 센서의 신호는 광량과 비례적인 관계를 가지

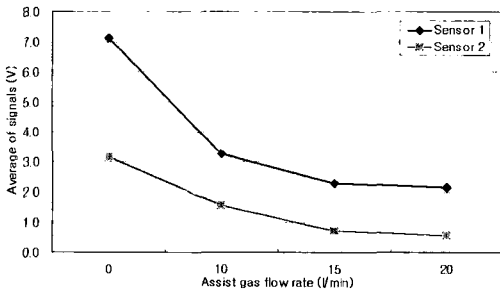


Fig. 5 Average of sensor signals according to assist gas flow rate

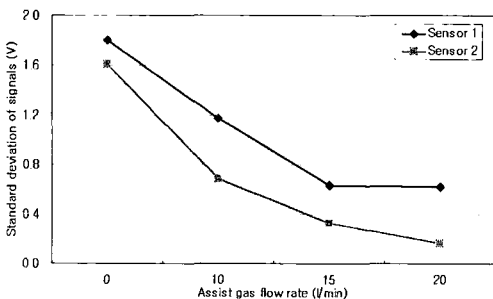


Fig. 6 Standard deviation of sensor signals according to assist gas flow rate

고 있는데 센서 신호의 평균값이 작다는 것은 레이저가 모재에 조사될 때 발생하는 플라즈마에 의한 광량이 적다는 것을 의미한다. 보조가스로 분사되는 아르곤 가스는 불활성 가스로 대기중의 공기보다 높은 이온화 에너지를 보유하고 있으므로 공기보다 플라즈마의 발생이 적다. 보조가스가 없는 경우, 모재가 증발하여 발생하는 플라즈마와 공기의 이온화에 의해 발생하는 플라즈마 등에 의해 광량이 많아진다. 그러나 보조가스가 있는 경우에는 보조가스가 용접부를 대기의 공기로부터 차단하고, 모재로부터 발생하는 플라즈마를 밀어내는 역할¹⁷⁾을 하므로 모재 위로 플라즈마가 축적되는 것을 막는다. 그러므로 플라즈마의 발생량이 감소함에 따라 광량도 줄게 되고, 이로 인해 광센서에 반응하여 평균값이 변화하게 된다. 보조가스 유량이 일정 유량 이상이 될 때, 신호의 평균값이 일정하게 됨을 알 수 있다. 이것은 일정 유량 이상이 되는 경우, 보조가스 유량에 관계없이 모재 위에 발생하는 플라즈마를 적절하게 제거함을 알 수 있다.

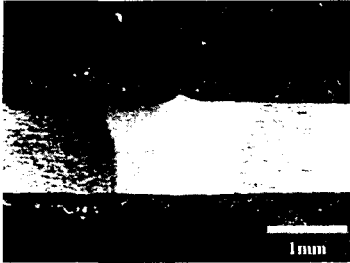
Fig. 6 에서와 같이, 센서 신호의 표준 편차는 보조가스가 증가함에 따라 작아짐을 알 수 있다. 보조가스가 없는 경우, 판재 위로 발생하는 플라즈마에 의해 레이저의 입사가 방해되어 모재에서 방출되는 플라즈마의 양이 작아진다. 플라즈마의 밀도가 작아지면 다시 레이저의 입사가 커져 모재로부터 플라즈마의 형성이 반복되어 커지게 된다¹⁷⁾. 그러므로 플라즈마의 형성이 불안정하게 일어나며, Fig. 3에서 보는 바와 같이 센서의 신호 또한 매우 불안정하여 진다. 그러나 보조가스가 모재 위에 형성된 플라즈마를 적절하게 제거함으로써, 레이저빔이 모재에 안정적으로 조사되고 키흔의 형성이 잘 이루어진다. 그러므로 발생하는 신호는 보조가스가 없는 경우 보다 안정적이고 적은 신호가 측정된다.

Fig. 7은 보조가스의 유무에 따른 용접부의 매크로 단면 사진을 나타낸다. 보조가

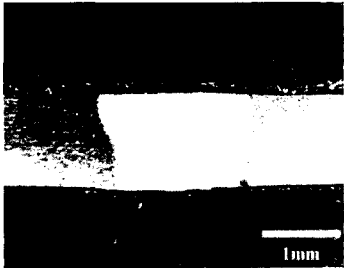
스가 없는 경우 시험편 위에 발생하는 플라즈마와 키흐의 불안정성에 의해 표면의 비드 모양이 일정하지 않음을 보여주고 있다.

4.2 용접 속도에 따른 광신호의 변화

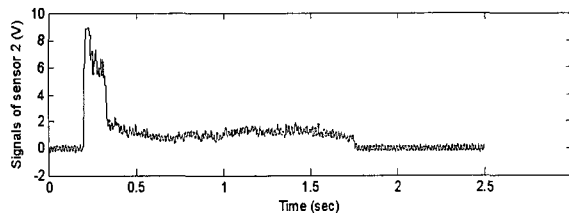
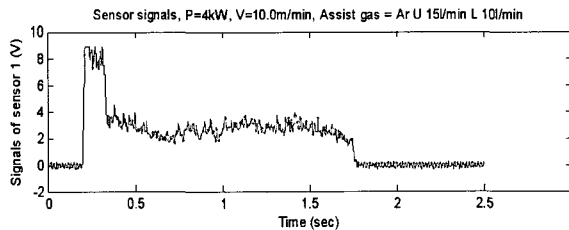
Fig. 8 ~ Fig. 11 은 속도에 따른 센서 신호와 그에 따른 표면 및 이면 비드의 모습이다. 3.1절의 Fig. 4 와 본 절의 Fig. 8 은 용접 속도와 단위 길이당 입열량은 각각 9 와 10 m/min, 그리고 26.7 과 24 J/mm 이다. 용접부에 충분하게 열량이 주어 졌으며, 그림에서 보는 바와 같이 용접부 전체에 이면 비드가 형성 되었다. 이 때 계측된 신호는 작고 안정적인 신호가 계측 되었다. Fig. 9 와 Fig. 10 은 용접 속도가 11 및 12 m/min 으로 각각의 입열량은 21.8 과 20 J/mm 이다. 그림에서 보는 바와 같이 용접부는 완전 용입 (full penetration) 과 부분 용입 (partial penetration) 이 섞여 있는 모습을 하고 있다. 계측된 신호는 Fig. 4 와 Fig. 8 에서 보다는 상대적으로 높고 불안정한 신호를 보여주고 있다. Fig. 11 의 용접 조건은 용접 속도가 13m/min



(a) Cross sectional shape without assist gas



(b) Cross sectional shape with Ar assist gas
Fig. 7 Photos of weld bead by assist gas

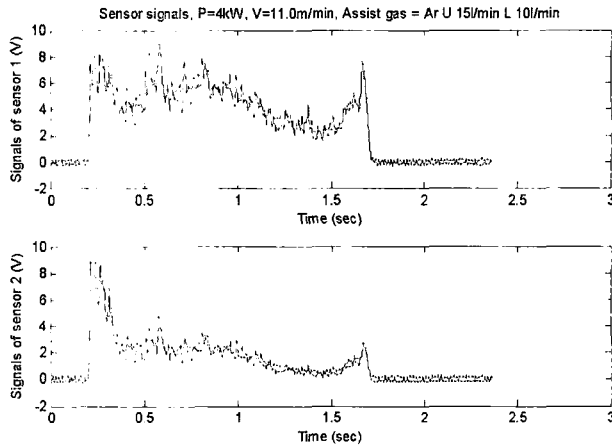


(a) Sensor signals

Surface bead			
Back Bead			
Time (sec)	0.2 ~ 0.63	0.8 ~ 1.16	1.33 ~ 1.76

(b) Bead appearance

Fig. 8 Sensor signals and the bead shape at the weld speed of 10 m/min

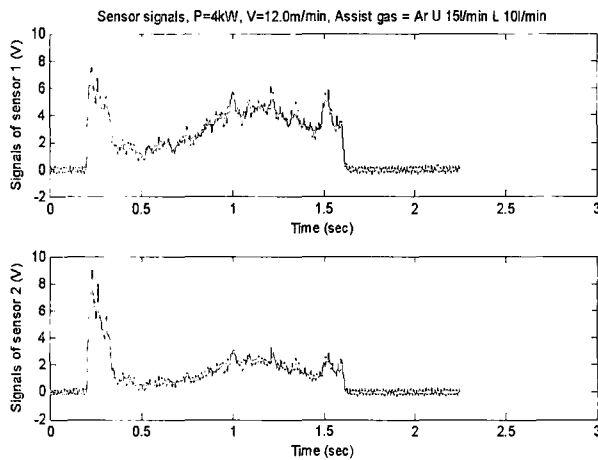


(a) Sensor signals

Surface bead			
Back Bead			
Time (sec)	0.2 ~ 0.6	0.78 ~ 1.12	1.31 ~ 1.7

(b) Bead appearance

Fig. 9 Sensor signals and the bead shape at the weld speed of 11 m/min

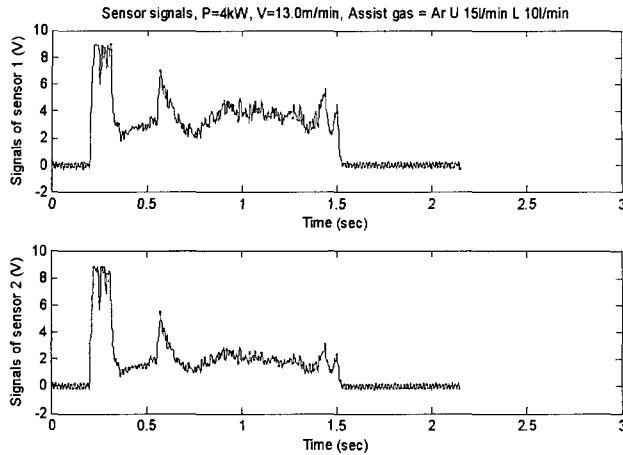


(a) Sensor signals

Surface bead			
Back Bead			
Time (sec)	0.2 ~ 0.57	0.75 ~ 1.05	1.27 ~ 1.61

(b) Bead appearance

Fig. 10 Sensor signals and the bead shape at the weld speed of 12 m/min



(a) Sensor signals

Surface bead			
Back Bead			
Time (sec)	0.2 ~ 0.56	0.71 ~ 0.99	1.15 ~ 1.5

(b) Bead appearance

Fig. 11 Sensor signals and the bead shape at the weld speed of 13 m/min

이고 입열량은 18.5 J/min 이다. 그림과 같이 표면 비드의 폭도 적으며 완전 용입이 되지 않아 전체적으로 이면 비드가 형성되지 못했다. 앞의 조건과 비교하여 볼 때, 계측된 신호는 상대적으로 적었다. 센서 신호중 약 0.6초 부분에서 신호가 급격하게 변하는 모습을 보여주고 있으며 표면 비드와 이면 비드에 순간적으로 피트 (pit)와 같은 모양이 발생된 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 12 와 Fig. 13 은 각 용접 변수 별 센서 신호의 평균값과 표준 편차값을 나타낸 그림이다. 기존에 발표된 논문에 의하면 레이저 용접시 발생하는 플라즈마의 광량은 입열량에²⁾. Fig. 12 에서 보는 바와 같이, 13 m/min 에서 11 m/min 까지는 입열량이 커질수록 센서의 신호가 증가한다. 그러나 9와 10 m/min 에서는 입열량이 커지지만 오히려 센서의 신호는 작아짐을 알 수 있다. 이것은 완전 용입이 발생하는

것과 관계가 있는 것으로 알려져 있다⁹⁾.

입열이 작은 조건에서 발생하는 플라즈마의 양은 상대적으로 작고 키홀의 형성이 제대로 이루어 지지 않으므로 계측되는 신호의 값 또한 낮다. 그러나 입열이 완전 용입이 되는 조건에서는 플라즈마의 생성과 키홀이 안정적으로 이루어 지므로 신호가 안정적이고 일정한 신호가 나온다. 그러나 완전 용입과 불완전 용입이 반복되어 나타나는 입열 구간에 대해서는 완전 용입 구간보다 입열이 작음에도 불구하고 신호가 크고 불안정한 신호가 발생된다. 이것은 레이저에 의한 입열이 충분한 경우, 키홀 내에 발생하는 금속 증기와 플라즈마의 압력이 커져 키홀 하부의 구멍이 커지게 되며 이를 통하여 키홀 내에 발생하는 플라즈마의 일부가 누출되기 때문이다. 그러므로 완전 용입이 이루어지는 구간에서는 불완전 용입에 비해 플라즈마에 의한 광량이 작아지는 것이다. 불완전 용입이 발생하는 구간

에 대해서, 키홀의 형성이 불안정하며, 모재에 발생하는 플라즈마는 대부분 모재 위로 분출되므로 시험편 위에 발생하는 플라즈마는 완전 용입에 비해 상대적으로 많아지게 된다. 그러므로 불완전 용입이 일어나는 구간인 11과 12 m/min 이 완전 용입이 되는 조건인 9나 10 m/min 보다 계측 신호의 크기가 크게 나타나고 있다.

Fig. 13 에서 보는 바와 같이 용접 속도가 커짐에 따라 센서 신호의 표준편차가 커짐을 알 수 있다. 입열이 큰 조건인 9 m/min 과 10 m/min 에서는 키홀과 플라즈마가 안정적으로 형성되기 때문에 계측 신호도 안정적이고 표준 편차의 값도 작다. 그러나 완전 용입과 부분 용입이 함께 형성되는 11과 12m/min 에는 앞에서 설명한 바와 같이 키홀의 형성과 플라즈마가 불안정하여 센서 신호의 표준 편차값이 상대적으로 크다. 그러나 입열이 가장 적은 13 m/min 의 조건에서는 센서 1의 경우

는 표준 편차가 크지만 센서 2에서는 표준 편차 값이 적다. 이것은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 센서 1의 위치는 각도가 높고 센서 2는 각도가 낮기 때문으로 사료된다. 센서 1의 위치에서는 용접부의 위에서 계측하며 용접부 전체를 보며, 센서 2에서는 측면에서 보기 때문에 용접부 보다는 시험편 위에 올라오는 플라즈마를 계측한다. 그러므로 센서 1에서는 용접부가 전체적으로 보여 발생하는 플라즈마의 불안정성이 직접적으로 계측된다. 그러나 용접 입열이 적기 때문에 모재위로 올라오는 플라즈마의 광량이 매우 적어 지므로, 센서 2에서 계측되는 신호가 작아지고, 그 결과 표준 편차 값도 작아진다.

Fig. 14는 용접속도에 따른 각 용접부의 단면 모습이다. Fig. 14에서 보는 바와 같이 용접이 잘 된 경우에 대해서는 안정적으로 표면 비드와 이면 비드가 발생한 반면 그렇지 않은 경우에 대해서는 부분 용입이 발생되고 내부의 기공도 관찰된다.

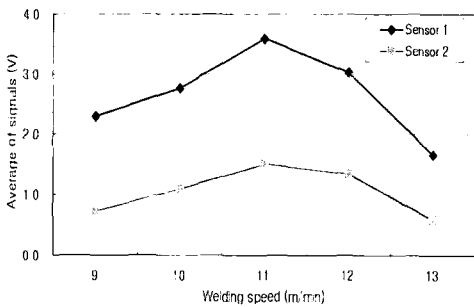


Fig. 12 Average of sensor signals according to welding speed

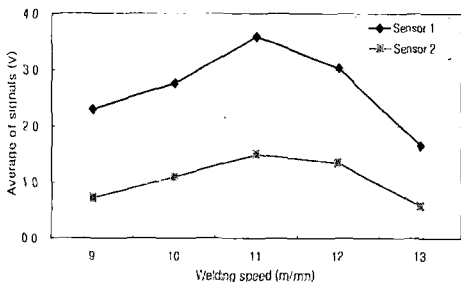


Fig. 13 Standard deviation of sensor signals according to welding speed

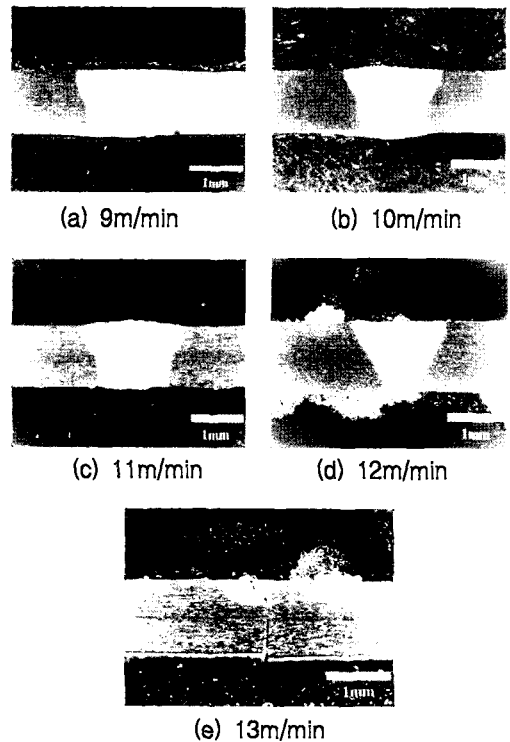


Fig. 14 Photos of weld bead by welding speed

5. 분산분석

각 신호의 평균 및 표준편차에 대한 레이저 용접의 상관관계는 앞 절에서 살펴 보았다. 그러나 실제 이 신호가 실험의 재현성에 대해서 얼마만큼이나 신뢰성을 보일 수 있는 지에 대해 분산분석을 통하여 그 유의성을 판단하여 보았다. 이를 위하여 분산분석 표를 작성하고 F검정을 수행하였다.

이를 위해 "레이저 용접실험에서 변인인 보조가스 유량과 용접 속도에 대한 수준 변화에 따라 얻어지는 특성의 변화가 없다"라는 가설을 설정하였다. 그리고 가설 검증을 위해 용접 실험의 변수인 보조가스 유량에 대한 귀무가설(null hypothesis)과 대립가설(alternative hypothesis)을 다음과 같이 구하였다.

$$H_0 : a_1 = a_2 = a_3 = a_4 = 0 \quad (3)$$

$$H_1 : a_1 \neq 0 \text{ and } a_2 \neq 0 \text{ and } a_3 \neq 0 \text{ and } a_4 \neq 0 \quad (4)$$

여기서 a는 보조가스 유량에 대한 변수로 실험상에서 나타난 수준을 의미한다. 그러므로 귀무가설 H0에 대해 F 검증을 함으로써 귀무가설의 기각 혹은 채택 여부를 판단할 수 있다.

Table 3 과 Table 4는 센서 1번과 2번의 반복된 실험에 따른 평균값을 유량 변화에 따라 분산 분석한 결과이다. 각 센서의 평균값에 대한 F값이 54.1과 29.5이므로 유의 수준 0.05에 대한 F 기각치 3.2보다 큰 값을 가지고 있다. 그러므로 위에서 제시된 귀무가설이 기각된다. 이것은 보조가스 유량변화는 각 센서에서 계측된 신호에 대해 강도의 영향을 미치고 있다는 것을 의미하며 이것은 유량변화에 따라 95% 이상의 유의성이 있음을 알 수 있다.

Table 5 와 Table 6 은 센서 1번과 2번의 평균값의 용접속도에 따라 분산 분석한 결과 이다. 센서 1과 센서 2의 평균값에 대한 F 값은 각각 4.23과 4.67로 F 기각치 3.63 보다 높으므로 센서 신호의 유의적 검증 수준이 95% 이상임을 알 수 있다.

Table 3 ANOVA for average of sensor 1 according to assist gas flow rate

Factor	Sum of square	Degree of freedom	Mean square	F ₀	F(0.05)
Average	109.19	3	36.39	54.15	3.2
Error	11.42	17	0.67		
Total	120.61	20			

Table 4 ANOVA for average of sensor 2 according to assist gas flow rate

Factor	Sum of square	Degree of freedom	Mean square	F ₀	F(0.05)
Average	27.81	3	9.27	29.46	3.2
Error	5.35	17	0.32		
Total	33.17	20			

Table 5 ANOVA for average of sensor 1 according to welding speed

Factor	Sum of square	Degree of freedom	Mean square	F ₀	F(0.05)
Average	7.08	4	1.77	4.23	3.63
Error	3.77	9	0.42		
Total	10.85	13			

Table 6 ANOVA for average of sensor 2 according to welding speed

Factor	Sum of square	Degree of freedom	Mean square	F0	F(0.05)
Average	1.85	4	0.46	4.67	3.63
Error	0.89	9	0.1		
Total	2.74	13			

6. 결 론

참고문헌

본 논문에서는 6000계열 알루미늄 합금의 레이저 용접시 발생하는 플라즈마와 키홀의 거동을 분석하기 위한 계측시스템을 구축하고자 하였다. 이를 위하여 분광 분석기를 이용하여 플라즈마에서 발생하는 광방사 (light emission)의 파장 분포를 계측하였고 플라즈마의 파장대가 380 nm에서 640 nm 정도임을 알 수 있다. 이 결과를 이용하여 6000 계열 알루미늄 레이저 용접의 플라즈마 계측을 위하여 적정 반응영역을 갖는 포토 다이오드를 선정하여 계측에 이용하였다.

보조가스 유량과 용접속도의 변화에 따른 실험을 통해 각 센서에서 얻어지는 신호의 변화를 관찰하였다. 보조가스는 플라즈마의 형성에 큰 영향을 주며 보조가스의 유량이 커짐에 따라 평균 신호와 표준 편차가 줄어들는데 이것은 플라즈마의 안정성과 관련이 있는 것으로 사료된다. 또한 속도에 따라 입열이 충분한 경우, 작고 안정적인 신호가 형성 되지만 입열이 커지면 발생하는 센서의 평균값과 표준 편차가 커짐을 알 수 있었다. 이것은 입열에 따른 키홀의 형성과 플라즈마의 발생에 따라 변화하기 때문이다. 그러므로 계측된 신호는 플라즈마와 키홀의 거동과 관계가 있음을 분석하였다.

또한 계측된 신호의 유의성을 분산분석으로 판단하였다. 계측된 신호의 경우 신호의 평균값은 95% 이상의 신뢰성이 있고 이를 통해 계측된 신호가 품질 판단에 대한 예측에 적용될 수 있다.

1. Jon M. C., " Noncontact Acoustic Emission Monitoring of Laser Beam Welding", Welding Journal, Vol.63, No.9, pp.43-48, 1985.
2. Chen H. B., Li L., Brookfield D. J., Williams K. and W. M. Steen, "Laser Process Monitoring with Dual Wavelength Optical Sensors", Proceeding of ICALEO '91, pp.113-122, 1991.
3. Gatzweiler W., Maischner D. and Beyer E., "On-line Diagnostics for Process-control in Welding with CO₂ Lasers", High Power CO₂ Laser System & Applications, SPIE 1020, pp.142-148, 1988.
4. Maischner D., Drenker A., Seidel B., Abels P. and E. Beyer, "Process Control During Laser Beam Welding", Proceeding of ICALEO' 91, pp.150-155, 1991.
5. Mori K., Sakamoto H. and Miyamoto I., "Detection of Weld Defects in Tailored Blanks", Journal of Japan Welding Society, Vol.14, No. 4, pp.689-693, 1996.
6. Miyamoto I., Kamimuki K., Maruo H., Mori K. and Sakamoto M., "In-Process Monitoring in Laser Welding of Automotive Parts", Proceeding of ICALEO'93, pp.413-424, 1993.

7. Miyamoto I. and Mori K., "Development of In-process Monitoring System for Laser Welding", *Proceeding of ICALEO'95*, pp.759-767, 1995.
8. Farson D., Ali A. and Sang Y., "Relationship of Optical and Acoustic Emission to Laser Weld Penetration", *Welding Journal*, Vol.77, No.4, pp.142s-148s, 1998.
9. 박현성, 이세현, 정경훈, 박인수, "고출력 CO₂레이저 용접시 포토 다이오드를 이용한 플라즈마와 스펙터 모니터링", *한국레이저가공학회지*, 제2권, 제1호, pp.30-37, 1999.
10. Park H. and Rhee S., "Estimation of Weld Bead Size in CO₂ Laser Welding by Using Multiple Regression and Neural Network," *Journal of Laser Applications*, Vol.11, No.3, pp.143-150, 1999.
11. Park H. and Rhee S., "Development of a Weld Quality Monitoring System in CO₂ Laser Welding by Using Photodiode", *Journal of Laser Applications*, Vol.13, No.1, pp.12-18, 2001.
12. 이종명, "색변조 기술을 이용한 레이저 가공공정 모니터링 시스템", *한국레이저가공학회지*, 제4권, 제2호, pp.29-38, 2001.
13. 이경돈, "특징영역별 분산분석에 의한 이중두께 접치기 CO₂ 레이저 용접에 대한 연구", *대한용접학회지*, 제20권, 제3호, pp.122-128, 2002.
14. 김동익, 고인용, "플라즈마 금속학", 반도출판사, 1992.
15. Palanco S., Klassen M., Skupin J., Hansen K., Schubert E., Sepold G. and Laserna J. J., "Spectroscopic Diagnostics on CW-Laser Welding Plasmas of Aluminum Alloys", *Spectrochimica Acta Part B : Atomic Spectroscopy*, Vol.56, No.6, pp.641-659, 2001.
16. Ferrara M., Ancona A., Lugara P. M. and Sibilano M., "On-line Quality Monitoring of Welding Process by Means of Plasma Optical Spectroscopy", In *High-Power Lasers in Manufacturing*, *Proceedings of SPIE*, Vol. 3888, pp.750-758, 2000.
17. 김도훈, "레이저 가공학", 경문사, 1990.