

# 광센서를 이용한 레이저 가공공정의 모니터링과 인장강도 예측모델 개발

박영환\*, 이세현<sup>+</sup>

(논문접수일 2007. 10. 10, 심사완료일 2007. 12. 14)

## Monitoring of Laser Material Processing and Developments of Tensile Strength Estimation Model Using photodiodes

Young Whan Park\*, Sehun Rhee<sup>+</sup>

### Abstract

In this paper, the system for monitoring process of aluminum laser welding was developed using the light signal emitted from the plasma which comes from interaction between material and laser. Photodiode for monitoring system was selected based on the spectrum analysis of light from plasma and keyhole. Behavior of plasma and keyhole was analyzed through the sensor signals. Value of sensor signal represented the light intensity and fluctuation of signal indicated the stability of plasma and keyhole. For the relation between welding condition and sensor signals, the input power and weld geometry greatly effected on the average of each sensor signals. Using the feature values of signals, estimation model for tensile strength of weld was formulated with neural network algorithm. Performance of this model was verified through coefficient of determination and average error rate.

**Key Words** : Aluminum laser welding(알루미늄 레이저 용접), Plasma(플라즈마), Photodiode(포토다이오드), Monitoring(모니터링), Neural network model(신경 회로망 모델)

## 1. 서론

생산공정에 있어서 생산자 혹은 소비자가 원하는 품질을 확보하는 것은 매우 중요하다. 이를 위하여 여러 가지 검사

가 이루어진다. 일반적으로 검사는 온라인 검사와 오프라인 검사로 구분된다. 생산 공정을 모니터링 하여 실시간으로 온라인 검사를 수행하기 위해서는 측정 가능한 공정변수 및 현상들을 계측하고 이 결과가 생산품의 품질 특성 사이에 원인과 결과

\* 한양대학교 대학원 기계공학과  
<sup>+</sup> 교신저자, 한양대학교 기계공학부 (srhee@hanyang.ac.kr)  
주소: 133-791 서울시 성동구 행당동 17번지

의 관계가 성립되어야 한다. 이러한 상관관계를 규명하고 적절한 모델을 만드는 것은 생산공정을 자동화하기 위해서는 반드시 필요하며 매우 중요하다. 또한 이러한 상관관계를 이용하여 실시간으로 예측되는 정보를 피드백 하여 공정 제어에 사용할 수 있다.

레이저 가공공정의 자동화에 있어서 일반적으로는 오프라인 혹은 공정후 검사가 일반적 이었다. 왜냐하면, 레이저는 그 가공공정 특성상 레이저 빛을 이용하므로 사람이 가공부를 육안으로 관찰하는 것이 불가능 하기 때문이다. 그리고 레이저 가공은 고속으로 진행되므로 생산성 확보를 위해서는 용접 공정 중에 실시간으로 모니터링 하는 시스템이 필요하고 자동화를 위해서는 예측된 신호와 용접성 간의 특성을 규정할 수 있는 모델이 필요하다.

레이저 가공에 있어서 발생하는 현상으로는 음향과 빛의 방출, 스트레스 웨이브(stress wave)등이 있다. 음향 변화를 위한 마이크로 폰(microphone), 키흔 및 플라즈마의 거동을 예측하기 위한 자외선 영역의 포토 다이오드(photodiode), 용융금속의 온도 계측을 위한 적외선 영역의 포토 다이오드, 그리고 용융부와 키흔의 형상을 화상으로 예측하기 위한 CCD 혹은 CMOS 카메라 등이 사용되고 있으며 스트레스 웨이브의 계측에는 음향 방출 트랜스듀서(acoustic emission transducer) 등이 사용되고 있다<sup>(1)</sup>. 이와 같은 방법을 이용하여 많은 연구자들이 레이저 용접현상의 모니터링 기법 및 신호와 용접조건과의 상관관계를 규명하고자 하였다.

Jon<sup>(2)</sup>은 압전 트랜스듀서(piezoelectric transducer)를 이용하여 플라즈마에 의해 생기는 증기압 변동을 계측 하였고, Chen<sup>(3)</sup>은 용접부에서 나오는 자외선(UV) 신호와 적외선 신호를 동시에 계측하여 용접조건에 따른 신호의 거동을 연구 하였다. Beyer<sup>(4,5)</sup>은 레이저 용접 중 플라즈마 신호와 소리 신호를 계측하여 비교하였으며, 용접부의 상부와 하부에서 각각 플라즈마 신호를 계측하여 완전 용입과의 관계도 연구 하였다. Miyamoto<sup>(6-8)</sup>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<sup>(9)</sup>은광신호와 음향신호를 계측, ARMA모델을 사용하여 두 신호의 관계를 규명하였다. 한편 Rhee<sup>(10)</sup>은 포토다이오드를 사용하여 플라즈마와 스펙터의 신호들과 용접변수의 변화에 따른 용접품질과의 관계를 규명하였다. 또한 이 신호들과 품질과의 상관관계를 통해 다중회귀분석과 신경회로망을 이용하여 용접 비드의 용입깊이와 폭을 예측하는 연구<sup>(11)</sup>를 수행하였고, 이를 퍼지 패턴인식 방법으로 품질을

판단하는 알고리즘<sup>(12)</sup>을 구현하였다.

본 논문에서는 레이저 가공에서 발생하는 여러가지 신호 중 플라즈마의 광신호를 이용하여 공정을 모니터링 할 수 있는 시스템을 구축하였다. 레이저와 알루미늄 합금간의 상호작용에서 발생하는 플라즈마의 발광특성을 파악하기 위하여 분광분석을 수행하였고, 이 결과를 바탕으로 모니터링에 적합한 포토다이오드를 선정하였다. 또한 실험을 통해 공정변수와 모니터링 신호와의 상관관계를 규명하였다. 이 결과를 이용하여 레이저 용접부의 인장강도를 예측할 수 있는 모델을 신경 회로망 알고리즘을 이용하여 구성하였다. 그리고 모델의 예측 성능을 결정계수와 평균오차율을 이용하여 판단하였다.

## 2. 플라즈마의 발광특성 해석

레이저 용접에서 발생하는 플라즈마는 재료와 레이저간의 상호작용으로 발생하는 것이다. 레이저 용접에서 키흔의 형성과 플라즈마의 생성은 용접 품질에 큰 영향을 주게 된다<sup>(5,8,9)</sup>. 그러므로 적절한 광센서의 사용으로 이를 계측하면 용접부에 대한 많은 정보를 얻을 수 있다.

플라즈마를 계측하기 위해서는 플라즈마의 발광 파장을 알아야 한다. 본 논문에서는 분광분석 기법을 이용하여 플라즈마의 발광 파장대를 알아보았다. 분광분석에 사용된 분광기(spectrometer)의 측광 영역은 280nm 에서 1117nm이고 분해능은 0.4nm 이다. 분광기의 감도를 나타낼 수 있는 블레이즈(blaze) 파장은 400nm이다.

Fig. 1은 AA5182 알루미늄 합금에 Nd:YAG 레이저가 조사될 때 발생하는 플라즈마의 광방사(light emission)에

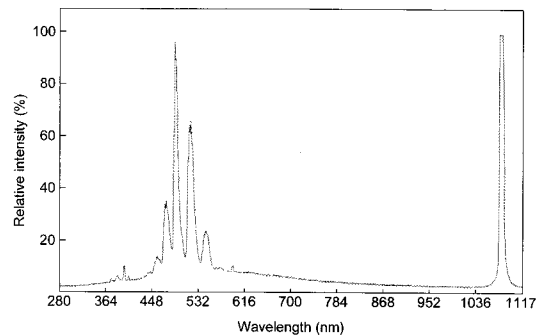


Fig. 1 Wavelength of plasma during AA5182 laser welding with filler wire

대한 분광 분석 결과이다. 그 파장대는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 370nm에서 710nm 이었다. 또한 발광 영역내에 10개의 선스펙트럼이 존재하였다. 그래프의 오른쪽에도 선스펙트럼이 존재하는데 이것은 Nd:YAG 레이저에 의한 선스펙트럼으로 1064nm에서 피크의 값을 갖는다.

### 3. 실험

#### 3.1 실험 장치 및 모니터링 시스템

레이저 가공공정에서 공정변수에 따른 모니터링 신호 변화를 관찰하기 위한 모니터링 실험을 수행하였다. 용접 로봇에 모니터링 장비를 Fig. 2와 같이 설치하여 모니터링 실험을 수행하였다. 본 실험에 사용된 레이저는 4.4kW 급 Nd:YAG 레이저이다. 레이저는 연속파(continuous wave) 발진으로 출력된다. 레이저는 직각으로부터 18°를 기울였다. 그 이유는 레이저가 알루미늄에 조사될 때, 알루미늄 표면에서 역 반사(back reflection)에 의해 레이저 시스템이 영향을 받는 것을 방지하기 위하여 각도를 주어 실험을 수행하였다. 레이저와 와이어 공급 장치와는 45°의 각도를 가지고 있다. 보호가스는 용접부 상부와 하부에서 동시에 공급하였다.

모니터링 시스템은 센서와 데이터 획득 그리고 신호처리 부분의 3가지로 구성된다. 계측센서는 3개를 이용하였고, 각 센서는 서로 다른 각도를 가지고 있다. 각도가 낮은 센서는

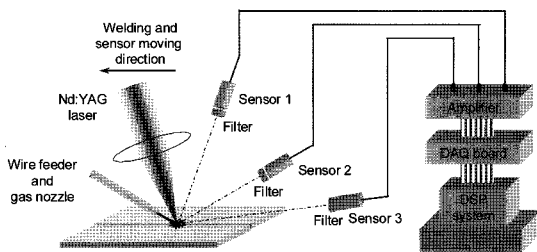


Fig. 2 Schematic illustration of experimental setup

Table 1 Distance, angle and ND filter values for each sensor

Sensor	Distance(mm)	Angle(°)	ND filter
1	280	70	4
2	235	30	8
3	315	4	4

시편위에 생기는 플라즈마를 계측하기 위한 것이고, 각도가 높은 센서는 키홀내에 생기는 플라즈마를 계측하기 위한 것이다. 발생하는 플라즈마의 광 강도가 용접 조건에 따라 달라지므로 이를 보상하기 위하여 센서 앞에 ND(neutral density) 필터를 사용하였다. 실험에 사용된 각 센서의 거리와 각도 그리고 ND 필터의 값은 Table 1과 같다.

용접시 발생하는 플라즈마와 키홀의 광강도를 계측하기 위한 센서로는 포토다이오드가 사용되었다. 센서의 반응 범위는 190nm에서 680nm이고 최대 반응 파장(peak response wavelength)은 610nm 이다. Fig. 1의 분광분석 결과에서 얻어진 플라즈마의 발광 파장대가 370nm에서 710nm이므로, 사용된 센서가 는 알루미늄 용접시 발생하는 플라즈마를 계측하기에 적합한 센서이다. 또한 분광분석에서 얻어진 플라즈마의 첨두 파장(peak wavelength)이 450nm에서 550nm의 영역으로 계측 센서의 반응영역내에 있기 때문에, 계측 센서로서 적합함을 알 수 있다.

이 신호를 컴퓨터로 받아들이기 위해서 증폭기와 데이터 수집 장치(DAQ : data acquisition board)가 사용되었다. 데이터 수집장치의 분해능은 12bit이고 샘플링 속도는 초당 10,000개의 데이터를 받아 들이도록 설정하였다.

#### 3.2 실험 조건

본 연구에서는 다양한 용접 공정 변수 중 레이저 출력, 용접속도 그리고 와이어 송급속도를 제어인자로 사용하여 실험하였다. 실험에 있어서 레이저는 3, 3.5, 4kW로 변화시켰고, 용접속도는 6, 7.5, 9m/min이었다. 그리고 와이어 송급속도는 2, 3, 4m/min으로 설정하였다. 실험 영역의 설정은 기초 실험을 통하여 정하였다. 각 용접 제어인자의 조합에 대하여 모두 실험을 수행하였고 반복은 3회를 하였다. 그러므로 총 용접조건은 27개이며, 총 용접 실험의 수는 81회였다. 모든 81회의 실험 순서는 실험계획법에 의하여 무작위로 수행하였다.

실험에서 보호가스는 아르곤(Ar) 을사용하였고, 상부의노즐에서는 20l/min, 하부의 보호가스 채널에는 10l/min의 유량으로 보호가스를 공급하였다. 실험의 용접방법은 I 형 맞대기 용접으로 수행하였고, 각 판재의 겹은 0 mm로 설정하였다.

실험에 사용된 판재는 AA5182로 두께는1.4mm, 용접 길이는 280mm 였고, 용가 와이어(filler wire)는 직경 1.2mm 의 AA5356 용접봉이었다. 각각의 재료의 조성은 Table 2 와 Table 3 과 같다.

Table 2 Chemical compositions 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	Val.

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

Mg	Mn	Cr	Ti	Al
5.00	0.35	0.10	0.15	Val.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 용접부의 인장강도

AA5182 판재의 레이저 용접에서 용접성을 평가하기 위하여 인장시험을 수행하였고 그 결과는 Fig. 3과 같다. 실험에서 사용된 AA5182 판재의 인장강도는 277N/mm<sup>2</sup>이다. Fig. 3에서 277N/mm<sup>2</sup> 이상의 인장강도를 갖는 용접부는 모재에서 파단이 발생하였으며, 그렇지 않은 경우에는 열영향부나 용접부에서 파단이 발생하였다.

Fig. 3에서 보는 바와 같이 입열이 클수록 인장강도가 커진다. 그러나 와이어의 송급 속도가 커질수록 단위 길이당 공급되는 와이어의 양이 많아지고, 이로 인해 레이저의 입열이 와이어와 모재를 녹이는데 분산되기 때문에 모재의 용입 깊이를 낮추는 결과를 얻는다. 그러므로 와이어 송급이 커질수록 인장강도는 떨어지나, 4kW와 같이 입열이 와이어와 모재를 충분히 녹일 수 있을 만큼 충분한 경우에 있어서는, 모재보다 더 큰 인장강도를 얻는다. 그러나 입열이 충분하지 못하여, 완전 용입이 발생하지 못하는 경우는 용접부의 강도가 낮아진다. 이와 같이 용접부의 인장강도는 용접 입열과 매우 밀접한 관계가 있다.

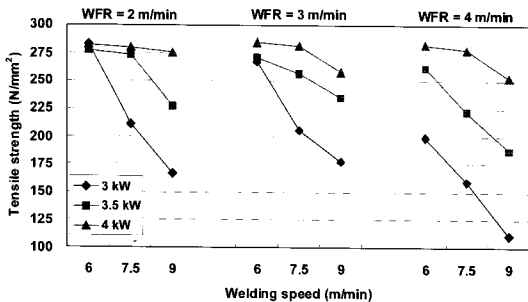


Fig. 3 Results of tensile test

### 4.2 모니터링 신호

AA5182 판재에 AA5356의 용가와이어를 이용한 레이저 용접에서, 용접부 모니터링 시스템을 이용한 계측신호는 Fig. 4 그리고 5와 같다. Fig. 4은 레이저 출력(LP)이 4kW, 와이어 송급속도(WFR)는 3m/min, 그리고 용접속도(WS)가 6m/min 일 때의 계측신호이다. Fig. 5는 레이저 출력, 3kW, 와이어 송급 속도, 3m/min, 그리고 용접속도, 6 m/min 일 때의 계측신호를 나타내고 있다. 각각의 용접 조건에 대하여 센서 1, 2, 3의 신호를 시간에 따라 나타내었다.

센서 신호에 있어서 Fig. 4는 Fig. 5와 비교할 때, 신호가

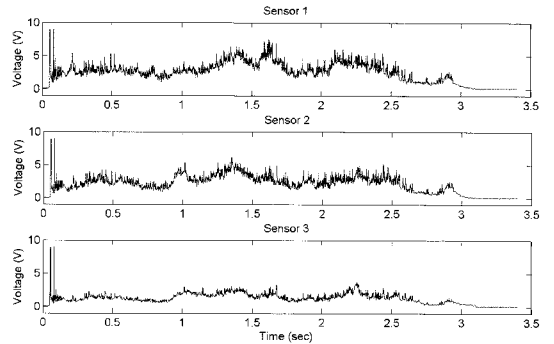


Fig. 4 Signals obtained from three photodiodes (LP = 4kW, WFR = 3m/min, WS = 6m/min)

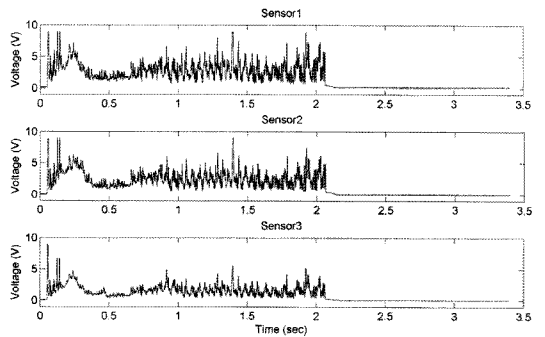


Fig. 5 Signals obtained from three photodiodes (LP = 3kW, WFR = 3m/min, WS = 9m/min)

안정적임을 알 수 있다. 이것을 통하여 레이저 용접시 발생하는 플라즈마와 키흔의 형성이 일정하며, 안정적으로 형성됨을 알 수 있다. 이것은 용접입열이 충분하여 안정적으로 키흔과 용융풀(molten pool)을 형성하고 있음을 표현하는 것이다. 계측된 신호가 플라즈마와 키흔의 안정성을 나타낸다<sup>(14)</sup>.

그러나 Fig. 5는 상대적으로 전체적인 신호의 요동이 매우 크다. 이것은 패스트 푸리에 변환(Fast Fourier Transform: FFT)을 이용하여 주파수 성분을 해석하면 쉽게 알 수 있다. 각 신호에 대한 FFT의 결과는 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다. 신호의 요동이 증가하는 이유는 레이저 용접에서는 모재의 표면 오염<sup>(10,14)</sup>이나 부분 용입에서 발생하는 용접 조건에서 플라즈마와 키흔의 불안정성에 기인된다<sup>(14)</sup>. 본 논문에서는 이 두 인자 이외에 용가와이어의 공급에 의해서도 센서 신호의 변동이 발생하는 것으로 사료된다. Fig. 6는 Fig. 5의 1초에서 1.4초까지 상면비드의 모습을 나타낸 그림이다.

각 그림의 같은 구간을 살펴보면, 신호의 변동 부분과 상면 비드에서 용착 금속이 뭉쳐있는 부분이 일치한다. 다시 말하면 용착금속이 많이 녹는 부분에서는 플라즈마의 발생도 많아져 센서의 신호가 커지고 용착 금속이 작은 부분에서는 플라즈마가 소멸되며 센서의 신호가 작아지고 있음을 알 수 있다. 그러므로 용가와이어와 모재의 불규칙적인 용융 및 기화 또한 불완전 용입의 입열 조건에서 요동을 증가시키는 요인이 된다.

레이저 가공공정에서 공정을 모니터링한 신호와 공정변수간의 상관관계를 살펴보았다. Fig. 9는 레이저 출력, 와이어 송급속도, 용접속도에 따른 센서 1 신호의 평균값을 나타낸 그래프이다. Fig. 10과 11은 각각 센서 2와 3의 평균값을 나타내었다.

각 센서 신호 평균값에서 보는 바와 같이 레이저의 출력이 커짐에 따라 신호의 광강도가 커지고 있음을 알 수 있다. 레이저의 출력이 4kW인 경우, 용접속도가 빨라짐에 따라 광강도가 증가함을 알 수 있다. 용접속도가 빨라지면 입열이 감소 함에도 불구하고 광강도가 증가하는 이유는 이면비드의 폭이 급격히 적어짐에 의하여 키흔의 아래방향으로 빠져나가는 플라즈마가 줄고, 용접 시편 위로 분출되는 플라즈마



Fig. 6 Bead shape of upper side between 1sec. and 1.4 sec. of Fig. 4

의 양이 많아지므로 이러한 현상이 발생된다<sup>(10,14)</sup>. 그러나 입열이 충분하지 않는 3kW의 경우에는 용접속도에 관계 없이 적은 양의 플라즈마가 형성되는 것을 알 수 있다. 이와 같은

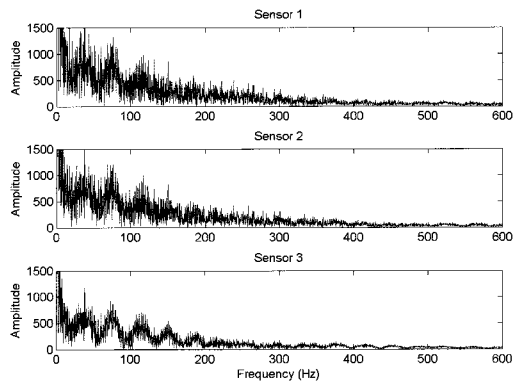


Fig. 7 FFT of sensor signals (LP = 4kW, WFR = 3m/min, WS = 6m/min)

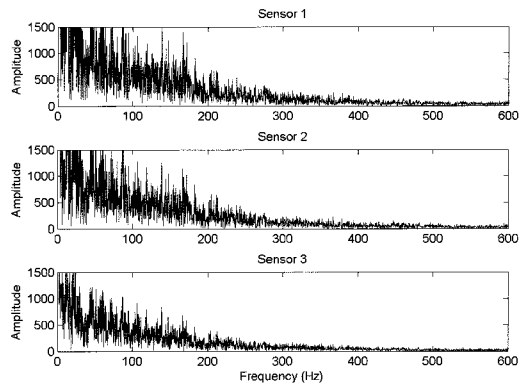


Fig. 8 FFT of sensor signals (LP = 3kW, WFR = 3m/min, WS = 6m/min)

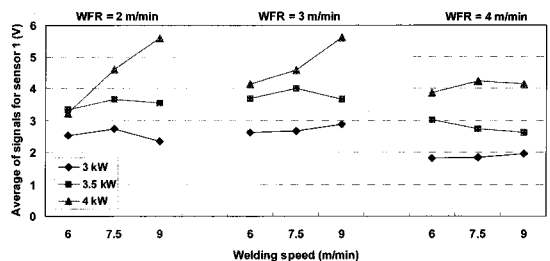


Fig. 9 Average of signals for sensor 1 according to welding conditions

입열 변화는 킷홀과 용융풀에 영향을 주어 용접부의 품질에 영향을 준다. 이러한 현상은 센서 신호 및 용접부의 인장강도에 영향을 주게되며, 결과적으로 이 두 결과간에는 용접 입열을 매개로한 상관관계가 존재한다.

와이어의 공급에 대해서는 송급속도가 2m/min 일 때 보다 3m/min 인 경우가 같거나 높다. 그리고 4m/min으로 빨라지면 센서의 값은 줄어들게 된다. 이것은 와이어의 공급이 2m/min에서 3m/min 이 되면, 용융되는 와이어의 양이 많아 지므로 플라즈마의 형성이 용이하며, 그 양도 많아진다. 그러나 공급이 3m/min에서 4m/min 로 변하면, 레이저의 입열에서 많은 부분이 와이어를 녹이는데 사용되므로 완전한 킷홀을 형성하지 못하게 되며, 이로 인해 플라즈마의 양이 줄어들기 때문에 계속되는 신호 역시 줄어들게 된다.

본 장에서 설명된 바와 같이, 레이저 가공공정의 모니터링 신호는 용접시 발생하는 플라즈마와 밀접한 관계를 가지고 있다. 또한 플라즈마는 공정변수에 따라 선형적으로 혹은 비선형적으로 변한다. 그러므로 모니터링을 통해 얻어지는 신호는 공정변수와 큰 상관관계를 가지고 있으며, 공정변수에 의한 용접부의 기계적 특성과 연결시킬 수 있다. 이를 이용하면 계속 신호를 이용하여 레이저 용접부의 성능을 평가할 수 있는 인장강도를 예측할 수 있는 모델을 구성할 수 있다.

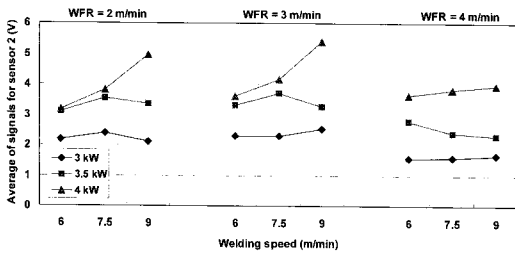


Fig. 10 Average of signals for sensor 2 according to welding conditions

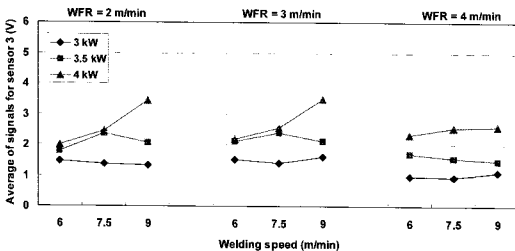


Fig. 11 Average of signals for sensor 3 according to welding conditions

## 5. 광신호를 이용한 인장강도 예측모델 개발

4장의 실험 결과에서 보는 바와 같이 레이저 용접 특히 용가와이어를 이용한 레이저 용접은 레이저 출력과 와이어의 송급속도가 매우 복잡하게 연결되어 있고, 그 인장강도와 신호가 매우 비선형적임을 알 수 있다. 그러므로 전체 조건을 모두 포함 할 수 있는 인장강도 예측모델을 구성하는 것은 불가능하다. 그러므로 본 연구에서는 용접속도가 7.5m/min 인 특정 영역에서의 인장강도 예측모델을 구성하였다.

인장강도 예측모델로 학습능력을 갖춘 신경회로망 모델을 이용하였다. 구성된 모델은 Fig. 12와 같다. Fig. 12에서 보는 바와 같이 1개의 입력층(input layer)와 2개의 은닉층(hidden layer) 그리고 1개의 출력층(output layer)으로 구성되어 있으며 각각의 층에는 6개, 7개, 5개, 1개의 노드를 가지고 있다.

구성한 신경회로망 모델의 입력노드는 각각 센서 신호의 평균값과 표준편차 값을 이용하였다. 출력노드는 인장강도로 하였다. 학습에 사용된 데이터는 각 실험으로부터 얻은 결과를 평균한 값을 이용하였다. 그러므로 총 학습에 사용된 데이터의 수는 27개 였다. 각 노드의 연결 강도를 학습시키기 위한 알고리즘으로 오류 역전파(error back propagation) 알고리즘을 사용하였다. 사용된 알고리즘의 학습율(learning rate)은 0.05로, 모멘텀 계수(momentum parameter)는 4로, 최소 학습오차는 10이하로 설정하였고 최대 학습수는 10만 회로 하였다. 각 레이어를 연결하는 전달함수는 로그 시그모이드(log-sigmoid) 전달함수와 탄젠트 시그모이드(tangent-sigmoid) 전달함수와 1차 선형(linear) 전달함수를 사용하였다.

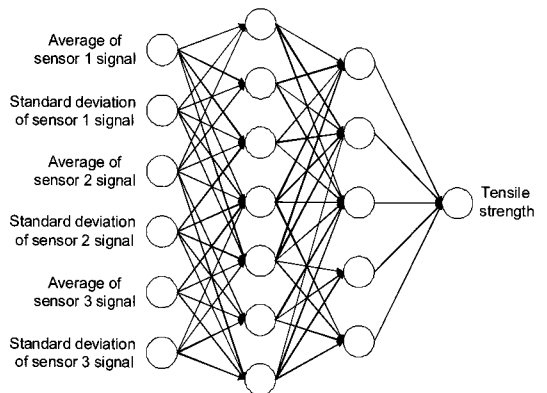
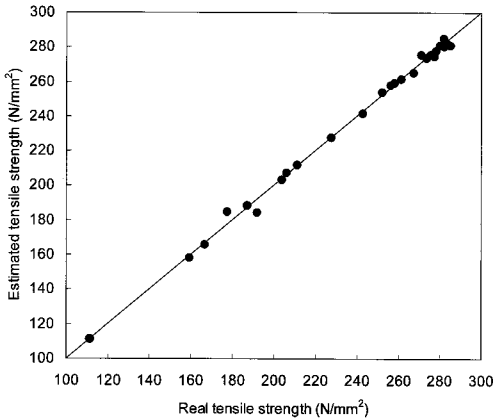


Fig. 12 Tensile strength estimation model using sensor signals



**Fig. 13 Comparison of real and estimated values in tensile strength estimation using sensor signals**

Fig. 13은 신경회로망 모델의 예측 결과를 보여주고 있다. Fig. 13에서 보는 바와 같이 전체적으로 좋은 예측 성능을 보여주고 있다. 예측모델의 성능을 결정계수(coefficient of determination)와 평균 오차율(average error rate: AER)을 이용하여 평가하였다. 결정계수와 평균 오차율에 대한 식은 식 (1)과 (2)와 같다.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2} \quad (1)$$

$$AER = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \quad (2)$$

여기서  $R^2$ 은 결정계수 이고,  $i$ 는 데이터의 번호이다.  $n$ 은 데이터의 총 수로 본 논문에서는 27이다.  $y$ 는 실제 측정된 인장강도 값이고,  $\bar{y}$ 는  $y$ 의 평균 값이다. 그리고  $\bar{\hat{y}}$ 는 예측 모델에 의해 계산된 값이고,  $\bar{y}$ 는  $\bar{\hat{y}}$ 의 평균값이다. 센서 신호를 이용한 인장강도 예측모델의 결정 계수는 0.9967이고, 평균 오차율은 0.008이다. 각 결정계수와 평균오차율에서 보는 바와 같이 신경망 모델이 정량적으로 예측 성능이 우수함을 알 수 있다.

## 6. 결론

본 논문은 레이저 가공에서 발생하는 광신호를 이용하여 공정을 모니터링 할 수 있는 시스템을 구축하였고 용접 조건

에 따른 계측된 신호의 특성을 분석하였다. 또한 계측된 신호를 이용하여 인장강도를 예측할 수 있는 모델을 개발하였다. 그러므로 본 논문을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 레이저 가공공정에서 발생하는 플라즈마에 대하여 분광 분석을 수행하였고, 이를 통해 발광 파장의 영역이 370 nm에서 710nm까지 이었다. 또한 10개의 선스펙트럼이 발광 영역내에 존재함을 알 수 있다. 이를 이용하여 신뢰성 있는 모니터링 시스템을 구성하였다.
- (2) 계측된 신호를 통하여 플라즈마와 키흐의 거동을 분석하였다. 계측된 신호에서 절대값은 강 광도를 나타내며 신호의 요동(fluctuation)은 플라즈마의 안정도를 표현하는 것을 알 수 있었고, FFT 분석을 통하여 이를 정량적으로 파악하였다. 레이저의 입열과 와이어 공급 조건에 따라 플라즈마의 양이 변하고, 플라즈마와 키흐의 안정도가 변화하는 것을 알 수 있었다.
- (3) 계측된 신호의 평균값과 공정 조건간의 상관관계에 있어서 용접 입열이 커질수록 평균값이 증가하였고, 이것은 용접부의 기계적 특성에 특히 인장강도와 매우 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다.
- (4) 광 신호를 이용하여 용접부의 인장강도를 예측할 수 있는 신경 회로망 모델을 구성하였다. 모델의 예측 결과를 결정계수와 평균 오차율을 이용하여 성능을 평가하였고, 그 값은 각각 0.9967과 0.008 이었다. 그러므로 정량적으로 예측 모델의 성능이 우수함을 판단할 수 있었다.

## 후 기

본 논문은 “서울시 산학연 협력사업”을 통해 연구비를 지원받아 수행하였습니다.

## Reference

- (1) Sun, A., and Kannatey-Asibu, Jr., E., 2001, “Sensor System for Real-time Monitoring of Laser Weld Quality,” *Journal of Laser Applications*, Vol. 11, No. 4, pp. 153~168.
- (2) Jon, M. C., “Noncontact Acoustic Emission Monitoring of Laser Beam Welding,” *Welding Journal*, Vol. 63, No. 9, pp. 43~48.
- (3) Chen, H. B., Li, L., Brookfield, D. J., Williams, K.,

- and Steen, W. M., 1991, "Laser Process Monitoring with Dual Wavelength Optical Sensors," *Proceeding of ICALEO '91*, pp. 113~122.
- (4) Gatzweiler, W., Maischner, D., and Beyer, E., 1988, "On-line Diagnostics for Process-control in Welding with CO<sub>2</sub> Lasers," *High Power CO<sub>2</sub> Laser System & Applications*, SPIE 1020, pp. 142~148.
- (5) Maischner, D., Drenker, A., Seidel, B., Abels, P., and Beyer, E., 1991, "Process Control During Laser Beam Welding," *Proceeding of ICALEO'91*, pp. 150~155.
- (6) Mori, K., Sakamoto, H., and Miyamoto, I., 1996, "Detection of Weld Defects in Tailored Blanks," *Journal of Japan Welding Society*, Vol. 14, No. 4, pp. 689~693.
- (7) Miyamoto, I., Kamimuki, K., Maruo, H., Mori, K., and Sakamoto, M., 1993, "In-Process Monitoring in Laser Welding of Automotive Parts," *Proceeding of ICALEO'93*, pp. 413~424.
- (8) Miyamoto, I., and Mori, K., 1995, "Development of In-process Monitoring System for Laser Welding," *Proceeding of ICALEO'95*, pp. 759~767.
- (9) Farson, D., Ali, A., and Sang, Y., 1998, "Relationship of Optical and Acoustic Emission to Laser Weld Penetration," *Welding Journal*, Vol. 77, No. 4, pp. 142s~148s.
- (10) Park, H., and Rhee, S., 1999, "Analysis of Mechanism of Plasma and Spatter in CO<sub>2</sub> Laser Welding," *Optics and Laser Technology*, Vol. 31, No. 2, pp. 119~126.
- (11) Park, H., and Rhee, S., 1999, "Estimation of Weld Bead Size in CO<sub>2</sub> Laser Welding by Using Multiple Regression and Neural Network," *Journal of Laser Applications*, Vol. 11, No. 3, pp. 143~150.
- (12) Park, H., and Rhee, S., 2001, "Development of a Weld Quality Monitoring System in CO<sub>2</sub> Laser Welding by Using Photodiode," *Journal of Laser Applications*, Vol. 13, No. 1, pp. 12~18.
- (13) Park, Y. W., Rhee, S., and Lee, C., 2007, "Effect of Filler Wire for the Weld Characteristic in Nd:YAG Laser Welding of AA5182 Aluminum Alloy," *Proceedings of International Welding and Joining Conference - Korea*, pp. 392.
- (14) Park, Y. W., Park, H. S., and Rhee, S., 2004, "Analysis on Behavior of Keyhole and Plasma using Photodiode in Laser Welding of Aluminum 6000 Alloy," *Journal of Korean Society of Laser Processing*, Vol. 7, No. 3, pp. 11~24.