

광 센서를 이용한 레이저 가공공정의 모니터링

박영환^{1*}

¹부경대학교 기계공학부

Monitoring of Laser Material Processing Using Photodiodes

Young Whan Park^{1*}

¹Division of Mechanical Engineering, Pukyong National University

요약 본 논문에서는 알루미늄 레이저 용접에서 발생하는 플라즈마의 빛을 계측하여 용접공정을 모니터링할 수 있는 시스템을 개발하였다. 분광분석을 통해 용접 시 플라즈마의 파장대를 계측하고 이를 근거로 하여 모니터링 시스템에 적합한 포토다이오드를 선정하였다. 이를 다양한 용접 조건에 대하여 적용하였고, 센서 신호의 특성은 플라즈마의 강도와 안정성에 밀접하게 연관되어 있음을 신호의 평균값과 FFT 분석을 통하여 알 수 있었다. 이러한 신호 변동의 원인은 플라즈마와 키홀의 거동과 용접 비드의 형상과도 밀접한 관계가 있음을 분석하였다.

Abstract In this paper, the monitoring system was developed measuring the light signal emitted from the plasma in aluminum laser welding. Spectrum of plasma was measured using a spectrometer, and the photodiode was selected based on the spectrum analysis. The sensor signals for various welding conditions could be obtained, the characteristic of signal was closely related to the intensity and stability of plasma through mean value of signal and FFT analysis. The reason of signal fluctuation was behavior of plasma and keyhole and it was also connected with the surface bead shape of weld.

Key Words : Process automation, Laser welding, Keyhole, Plasma, Photodiode, Monitoring

1. 서론

생산공정에 있어서 생산자 혹은 소비자가 원하는 품질을 확보하는 것은 매우 중요하다. 이를 위하여 여러 가지 검사(inspection)가 이루어진다. 일반적인 검사는 온라인(on-line) 검사와 오프라인(off-line) 검사로 구분되며, 생산 공정에서는 온라인 검사가 생산성에 크게 도움이 된다. 생산 공정을 모니터링 하고 검사하기 위해서는 측정 가능한 공정변수와 품질특성 사이의 원인과 결과의 관계가 성립되어야 한다. 이러한 상관관계를 규명하는 것은 생산공정을 자동화하기 위해서는 반드시 필요하며 매우 중요하다.

레이저 용접의 모니터링에 있어서 가공공정 특성상 레이저 빛을 이용하므로 사람이 가공부를 육안으로 관찰하는 것이 불가능하다. 그리고 레이저 가공은 고속으로 진행되므로 생산성 확보를 위해서는 용접공정을 모니터링

하는 시스템이 필요하다. 본 연구에서는 알루미늄 레이저 용접에서 품질의 신뢰성 확보를 위한 모니터링 시스템의 개발과 이를 통한 공정 변수와 센서 신호의 관계를 분석하여 용접부 검사 시스템에 활용하고자 한다.

레이저 가공에 있어서 발생하는 현상으로는 음향과 빛의 방출, 스트레스 웨이브(stress wave)등이 있으며 이는 마이크로폰(microphone), 키홀 및 플라즈마의 계측을 위한 자외선 영역의 포토다이오드(photodiode), 용융금속의 온도 계측을 위한 적외선 영역의 포토다이오드(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[1]. Jon[2]은 압전 트랜스듀서(piezoelectric transducer)를 이용하여 플라즈마에 의해 생기는 증기압 변동을 계측하였고, Chen[3]은 용접부에서 나오는 자외선(UV) 신호와 적

*교신저자: 박영환(parkyw@pknu.ac.kr)

외선(IR) 신호를 동시에 계측하여 용접조건에 따른 신호의 거동을 연구하였다. Beyer[4,5]은 레이저 용접 중 플라즈마 신호와 소리(sound) 신호를 계측하여 비교하였으며, 용접부의 상부와 하부에서 각각 플라즈마 신호를 계측하여 완전 용입과의 관계도 연구하였다. Miyamoto[6,7,8]은 최대 파장감도가 적외선 파장대(950nm)인 포토다이오드 두 개를 각도가 서로 다르게 배치하여 플라즈마를 계측한 후 용접품질을 판단하는 연구와 용입깊이를 예측하는 수식을 유도하는 연구를 수행하였다. Farson[9]은 광신호와 음향신호를 계측, ARMA모델을 사용하여 두 신호의 관계를 규명하였다. 한편 Rhee[10]는 포토다이오드를 사용하여 플라즈마와 스펙터의 신호들과 용접변수의 변화에 따른 용접품질과의 관계를 규명하였다. 또한 이 신호들과 품질과의 상관관계를 통해 다중회귀분석과 신경회로망을 이용하여 용접 비드의 용입 깊이와 폭을 예측하는 연구[11]를 수행하였고, 이를 퍼지 패턴인식 방법으로 품질을 판단하는 알고리즘[12]을 구현하였다.

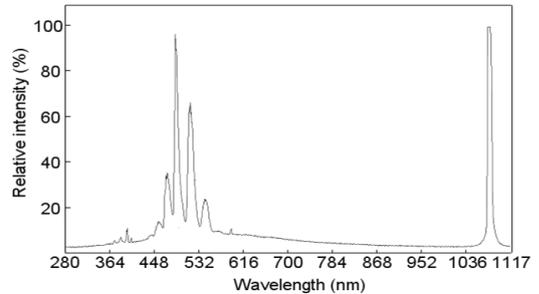
본 연구에서는 알루미늄 레이저 용접에 대한 모니터링 시스템을 구축하였다. 앞에서 언급한 기존 연구의 경우 대부분 철강재에 대한 것으로 본 연구에서 사용된 알루미늄 소재에 대하여, 기존의 센서를 직접적으로 적용이 불가능하다. 이것을 레이저와 알루미늄간의 상호 작용과 이에 발생하는 플라즈마의 발광 영역이 다르기 때문이다. 그러므로 본 논문에서는 레이저와 알루미늄 합금간의 상호작용에서 발생하는 플라즈마의 발광특성을 파악하기 위하여 분광분석을 수행하였고, 이 결과를 바탕으로 모니터링에 적합한 포토다이오드(photodiode)를 선정하였다. 또한 실험을 통해 공정변수와 모니터링 신호와의 상관관계를 규명하였다.

2. 플라즈마의 발광특성 해석

레이저 용접에서 발생하는 플라즈마는 재료와 레이저 간의 상호작용으로 발생하는 것이다. 레이저 용접에서 키홀의 형성과 플라즈마의 생성은 용접 품질에 큰 영향을 주게 된다[5,8,9]. 그러므로 발광 파장에 맞는 광 센서를 사용하여 계측하면 용접부에 대한 많은 정보를 얻을 수 있다. 플라즈마의 발광 파장대를 계측하기 위해 분광기(spectrometer)를 이용하였고, 이것의 측광 영역은 280nm에서 1117nm였으며, 분해능은 0.4nm 이다.

그림 1은 AA5182 알루미늄 합금에 Nd:YAG 레이저가 조사될 때 발생하는 플라즈마의 광방사(light emission)의 분광분석 결과이다. 그 파장대는 370nm에서 710nm 이었다. 또한 발광 영역내에 10개의 선 스펙트럼이 존재하였

다. 1064nm에서 또 하나의 선 스펙트럼이 존재하는데, 이것은 Nd:YAG 레이저의 파장을 의미한다.

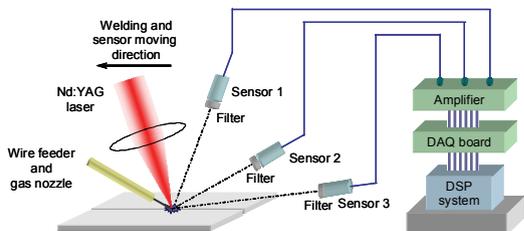


[그림 1] AA5182의 Nd:YAG 레이저 용접에서 플라즈마의 발광 파장의 영역

기존 연구에서 일반적으로 플라즈마 계측을 위한 자외선 센서나 용융물 계측을 위한 적외선 센서가 사용되었다. 그러나 본 연구에서는 알루미늄 레이저 용접의 플라즈마 발광영역을 분석한 결과를 바탕으로 이에 적합한 센서를 선정하였다. 이것은 기존에 사용된 센서와는 다른, 플라즈마의 발광 영역에 가장 잘 반응하는 센서의 선택함으로써 알루미늄 레이저 용접에서 발생하는 플라즈마의 거동을 효과적으로 계측할 수 있다.

3. 실험

레이저 가공공정에서 공정변수에 따른 모니터링 신호 변화를 관찰하기 위한 모니터링 실험을 수행하였다. 실험을 위한 개략도는 그림 2와 같다. 레이저는 최대출력 4.4 kW의 Nd:YAG 레이저로 연속파(continuous wave) 발진으로 출력된다. 레이저는 직각으로부터 18°를 기울여 알루미늄 표면에서 역 반사(back reflection)에 의해 레이저 시스템이 영향을 받는 것을 방지하였다. 레이저와 와이어 공급 장치와는 45°의 각도를 가지고 있다. 보호가스는 용접부 상부와 하부에서 동시에 공급하였다.



[그림 2] 실험장치의 개략도

[표 1] 각 센서의 설정값

센서	거리 (mm)	각도 (°)	ND 필터
1	280	70	4
2	235	30	8
3	315	4	4

모니터링 시스템은 센서와 데이터 획득(data acquisition) 그리고 신호처리(signal processing) 부분의 3가지로 구성된다. 계측센서는 3개를 이용하였고, 센서의 설정은 표 1과 같다. 각도가 낮은 센서는 시편 위에 생기는 플라즈마를 계측하기 위한 것이고, 각도가 높은 센서는 키홀(keyhole) 내에 생기는 플라즈마를 계측하기 위한 것이다. 거리에 따른 광 강도의 변화를 보상하기 위해 센서 앞에 ND(neutral density) 필터를 사용하였다.

플라즈마의 광 강도를 계측하기 위한 센서로는 포토다이오드(photodiode)로 반응 범위(response range)는 190nm 에서 680nm이고, 최대 반응 파장(peak response wavelength)은 610nm 이다. 2장의 플라즈마의 발광 파장대가 370nm에서 710nm 이므로, 사용된 센서는 알루미늄 용접시 발생하는 플라즈마를 계측하기에 적합한 센서이다.

포토다이오드의 미세 전류를 전압으로 바꾸고 이 데이터를 획득하기 위해, 증폭기와 데이터 수집 장치(DAQ : data acquisition board)를 사용하였다. 이것의 분해능(resolution)은 12 bit 이고 샘플링 속도는 초당 10,000개의 데이터를 받아들일도록 설정하였다.

실험의 공정변수로는 레이저 출력, 용접속도 그리고 와이어 송급속도를 이용하였다. 실험 조건은 표 2와 같고, 실험 영역은 기초 실험을 통하여 정하였다. 각 실험은 반복은 3회를 하였으며, 실험 순서는 실험계획법에 의하여 무작위로 수행하였다.

[표 2] 실험 조건

용접 변수	수 준		
레이저 출력 (kW)	3	3.5	4
용접속도 (m/min)	6	7.5	9
와이어 송급속도 (m/min)	2	3	4

보호가스는 아르곤(Ar) 을 사용하였고, 상부의 노즐에서는 20l/min, 하부의 보호가스 채널에는 10l/min의 유량으로 보호가스를 공급하였다. 실험의 용접 방법은 I 형 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

[표 3] AA5182의 화학적 조성 (wt%)

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

[표 4] AA5356의 화학적 조성 (wt%)

Mg	Mn	Cr	Ti	Al
5.00	0.35	0.10	0.15	Val.

실험에 사용된 판재는 AA5182로 두께는 1.4mm, 용접 길이는 280mm 였고, 용접용 와이어(filler wire)는 직경 1.2mm 의 AA5356 용접봉이었다. 각각의 재료의 조성은 표 3과 표 4와 같다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 플라즈마와 센서의 신호

AA5182 판재에 AA5356의 용접용 와이어를 이용한 레이저 용접에서, 그림 3은 레이저 출력이 4 kW, 와이어 송급속도는 3m/min, 그리고 용접속도가 6m/min 일 때의 계측신호이다. 그림 4는 레이저 출력이 3kW, 와이어 송급속도는 3m/min, 그리고 용접속도가 6m/min 일 때의 계측신호이다. 각각의 용접조건에 대하여 센서 1, 2, 3의 신호를 시간에 따라 나타내었다.

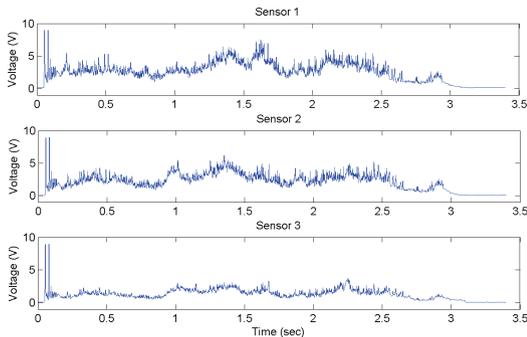
그림에서 계측 신호가 초기에 급격하게 상승하는 구간이 존재한다. 이것은 초기에 플라즈마의 발생이 정상상태(steady state)로 도달 전의 과도상태(transient state)구간이기 때문이다. 그리고 로봇의 교시(teaching) 특성상 용접 시작점에 도착한 후, 잠시 멈춘 후에 로봇 암(robot arm)이 움직이므로, 지정된 속도까지 이르기 위한 가속구간이 존재한다. 그러므로 이와 같은 이유에 의하여 신호가 급격하게 상승하게 된다.

센서 신호에 있어서 그림 3은 그림 4와 비교할 때, 신호가 안정적이고 있음을 알 수 있다. 이것을 통하여 레이저 용접시 발생하는 플라즈마와 키홀의 형성이 일정하며, 안정적으로 형성됨을 알 수 있다. 이것은 용접입열이 충분하여 안정적으로 키홀과 용융 풀(molten pool)을 형성하고 있음을 표현하는 것이다. 계측된 신호가 플라즈마와 키홀의 안정성을 나타낸다[13].

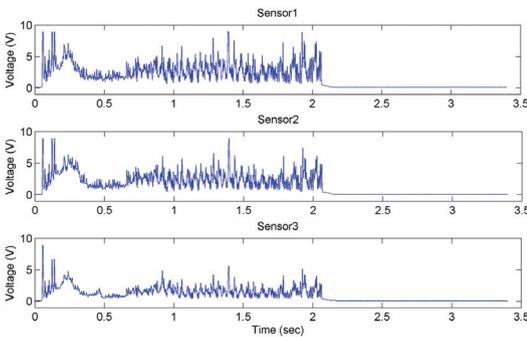
그러나 그림 4는 상대적으로 전체 적인 신호의 요동(fluctuation)이 매우 크다. 이것은 FFT(Fast Fourier

Transform)을 이용하여 주파수 성분을 해석하면 쉽게 알 수 있다. 각 신호에 대한 FFT의 결과는 그림 6과 그림 7에 나타내었다. 신호의 요동(fluctuation)이 증가하는 이유는 레이저 용접에서는 모재의 표면 오염[14]이나 부분 용입에서 발생하는 용접조건에서 플라즈마와 키흐의 불안정성에 기인된다[13,14]. 본 논문에서는 이 두 인자 이외에 용접용 와이어의 공급에 의하여도 센서 신호의 변동이 발생하는 것으로 사료된다.

그림 5는 그림 4의 1초에서 1.4초까지 상면 비드의 모습을 나타낸 그림이다. 각 그림의 같은 구간을 살펴보면, 신호의 변동 부분과 상면 비드에서 용착금속이 뭉쳐있는 부분이 일치한다. 다시 말하면 용착금속이 많이 녹는 부분에서는 플라즈마의 발생도 많아져 센서의 신호가 커지고 용착금속이 작은 부분에서는 플라즈마가 소멸되며 센서의 신호가 작아지고 있음을 알 수 있다. 그러므로 용접용 와이어와 모재의 불규칙적인 용융 및 기화 또한 불안정한 용입의 입열조건에서 요동(fluctuation)을 증가시키는 요인이 된다.



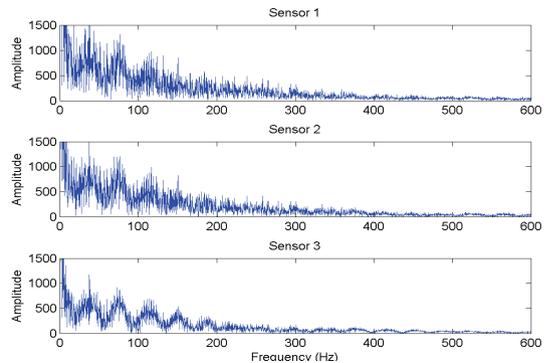
[그림 3] 센서 신호 (용접조건 : 레이저 출력 4kW, 용접용 와이어 공급속도 3m/min, 용접속도 6m/min)



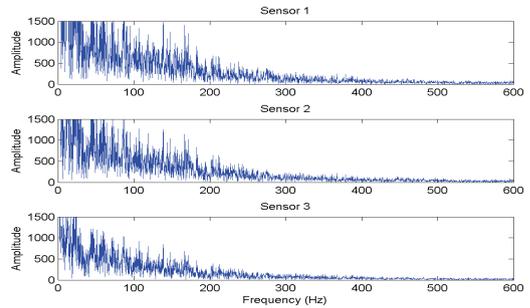
[그림 4] 센서 신호 (용접조건 : 레이저 출력 3kW, 용접용 와이어 공급속도 3m/min, 용접속도 9m/min)



[그림 5] 그림 4의 조건에서 1초 ~ 1.4초 사이의 표면 비드 형상



[그림 6] 센서 신호의 FFT 변환 그래프 (용접 조건 : 레이저 출력 4kW, 용접용 와이어 공급속도 3m/min, 용접속도 6m/min)



[그림 7] 센서 신호의 FFT 변환 그래프 (용접 조건 : 레이저 출력 3kW, 용접용 와이어 공급속도 3m/min, 용접속도 9m/min)

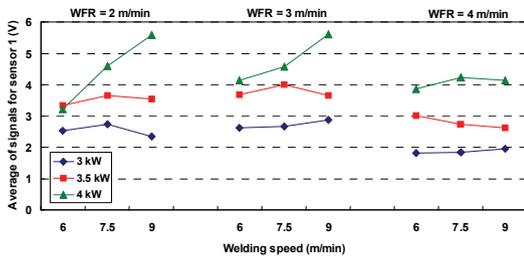
4.2 공정변수에 따른 센서의 신호

레이저 가공공정에서 공정을 모니터링한 신호와 공정 변수간의 상관관계를 살펴보았다. 그림 8는 레이저 출력, 와이어 공급속도, 용접속도에 따른 센서 1 신호의 평균값을 나타낸 그래프이다. 그림 9와 그림 10은 센서 2와 3의 평균값이다.

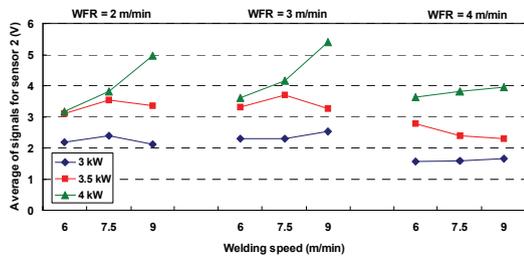
각 센서 신호 평균값에서 보는 바와 같이 레이저의 출력이 커짐에 따라 신호의 광 강도가 커지고 있음을 알 수 있다. 레이저의 출력이 4kW인 경우, 용접속도가 빨라짐에 따라 광 강도가 증가함을 알 수 있다. 용접속도가 빨라지면 입열이 감소 함에도 불구하고 광 강도가 증가하는 이유는 이면비드의 폭이 급격히 적어짐에 의하여 키

홀의 아래방향으로 빠져나가는 플라즈마가 줄고, 용접 시편 위로 분출되는 플라즈마의 양이 많아지므로 이러한 현상이 발생된다[10,13]. 그러나 입열이 충분하지 않은 3kW의 경우에는 용접속도에 관계 없이 적은 양의 플라즈마가 형성되는 것을 알 수 있다.

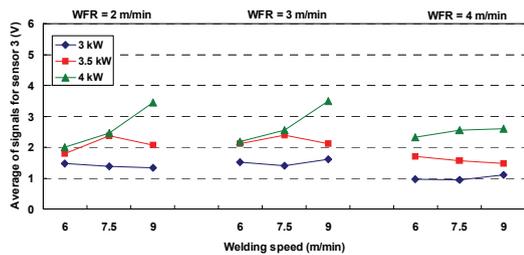
와이어의 공급에 대해서는 송급속도가 2m/min 일 때 보다 3m/min 인 경우가 같거나 높다. 그리고 4m/min으로 빨라지면 센서의 값은 줄어들게 된다. 이것은 와이어의 공급이 2m/min에서 3m/min 이 되면, 용융되는 와이어의 양이 많아지므로 플라즈마의 형성이 용이하며, 그 양도 많아진다. 그러나 공급이 3m/min에서 4m/min 로 변하면, 레이저의 입열에서 많은 부분이 와이어를 녹이는데 사용되므로 완전한 키홀을 형성하지 못하게 되며, 이로 인해 플라즈마의 양이 줄어들기 때문에 계측되는 신호 역시 줄어들게 된다.



[그림 8] 용접조건에 따른 센서 1 신호의 평균



[그림 9] 용접조건에 따른 센서 2 신호의 평균



[그림 10] 용접조건에 따른 센서 3 신호의 평균

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 특성과 간접적으로 연결시킬 수 있다.

5. 결론

본 논문은 레이저 가공에서 발생하는 광신호를 이용하여 공정을 모니터링 할 수 있는 시스템을 구축하였고 용접조건에 따른 계측된 신호의 특성을 분석하였다. 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 레이저 가공공정에서 발생하는 플라즈마에 대하여 분광분석을 수행하였고, 이를 통해 발광 파장의 영역이 370nm에서 710nm 까지 이었다. 또한 10개의 선스펙트럼이 발광 영역내에 존재함을 알 수 있다. 이를 이용하여 신뢰성 있는 모니터링 시스템을 구성하였다.
- 2) 계측된 신호를 통하여 플라즈마와 키홀의 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.
- 3) 계측된 신호의 평균값과 공정 조건간의 상관관계에 있어서는 레이저의 출력이 커질수록 평균값이 증가하였고, 와이어의 공급에 대해서는 송급속도가 2m/min일 때 보다 3m/min인 경우가 용접부 이면쪽의 키홀이 닫힘에 의해 센서 신호의 평균값이 높거나 같았고, 4m/min로 빨라지면 입열량 부족에 의해 센서의 평균값은 줄어들게 됨을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] A. Sun and E. Kannatey-Asibu, Jr., "Sensor System for Real-time Monitoring of Laser Weld Quality," *Journal of Laser Applications*, Vol. 11, No. 4, pp. 153-168, 2001.
- [2] M. C. Jon, "Noncontact Acoustic Emission Monitoring of Laser Beam Welding," *Welding Journal*, Vol. 63, No. 9, pp. 43-48, 1985.
- [3] H. B. Chen, L. Li, D. J. Brookfield, K. Williams and W. M. Steen, "Laser Process Monitoring with

- Dual Wavelength Optical Sensors", Proceeding of ICALEO '91, pp. 113-122, 1991.
- [4] W. Gatzweiler, D. Maischner and E. Beyer, "On-line Diagnostics for Process-control in Welding with CO₂ Lasers," High Power CO₂ Laser System & Applications, SPIE 1020, pp. 142-148, 1988.
- [5] D. Maischner, A. Drenker, B. Seidel, P. Abels and E. Beyer, "Process Control During Laser Beam Welding," Proceeding of ICALEO'91, pp. 150-155, 1991.
- [6] K. Mori, H. Sakamoto and I. Miyamoto, "Detection of Weld Defects in Tailored Blanks," Journal of Japan Welding Society, Vol. 14, No. 4, pp. 689-693, 1996.
- [7] I. Miyamoto, K. Kamimuki, H. Maruo, K. Mori and M. Sakamoto, "In-Process Monitoring in Laser Welding of Automotive Parts," Proceeding of ICALEO'93, pp. 413-424, 1993.
- [8] I. Miyamoto and K. Mori, "Development of In-process Monitoring System for Laser Welding," Proceeding of ICALEO'95, pp. 759-767, 1995.
- [9] D. Farson, A. Ali and Y. Sang, "Relationship of Optical and Acoustic Emission to Laser Weld Penetration," Welding Journal, Vol. 77, No. 4, pp. 142s-148s, 1998.
- [10] H. Park and S. Rhee, "Analysis of Mechanism of Plasma and Spatter in CO₂ Laser Welding," Optics and Laser Technology, Vol. 31, No. 2, pp. 119-126, 1999.
- [11] H. Park and S. Rhee, "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.
- [12] H. Park and S. Rhee, "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.
- [13] Y. W. Park, H. Park and S. Rhee, "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, 2004.
- [14] K. H. Leong, "Low Cost Laser Weld Monitoring System," Proceeding of Automotive Laser Applications Workshop, University of Michigan Press, pp. 26-35, 1997.

박 영 환(Young Whan Park)

[정회원]



- 2001년 2월 : 한양대학교 대학원 정밀기계공학과 (공학석사)
- 2006년 8월 : 한양대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 2006년 10월 ~ 2007년 6월 : 한양대학교 BK21 Post Doc.
- 2007년 7월 ~ 2008년 8월 : 포스코 기술연구소 (선임 연구원)
- 2008년 9월 ~ 현재 : 부경대학교 기계공학부 전임강사

<관심분야>

레이저 가공, 생산자동화, 공정 모니터링, 신호처리, 인공지능 알고리즘(퍼지, 신경망, 유전알고리즘)