

# 자동차용 강판의 겹치기 CO<sub>2</sub> 레이저 용접에서 발생되는 플라즈마 특성에 관한 연구

## Study on the characteristics of the plasma induced by lap-joint CO<sub>2</sub> laser welding of automotive steel sheets

고등기술연구원 시스템제어/레이저응용센터 남기중, 우미혜, 김주관, 박기영, 이경돈

### I. 서 론

CO<sub>2</sub> 레이저는 높은 에너지 밀도를 제공하고 뛰어난 용접 품질 때문에 자동차 판재등의 레이저 용접 광원으로 널리 사용되고 있다. 레이저는 뛰어난 가간섭성(coherence)의 빛이므로 렌즈를 이용하여 집속하면 10<sup>6</sup> W/cm<sup>2</sup> 이상의 에너지 밀도를 제공하고 이러한 에너지가 판재에 조사되면 표면에서 매우 빠르게 금속 증기(vaporization)가 발생하며 플라즈마 상태가 된다. 이와 같은 과정은 계속해서 판재 하부로 진행이 되어 결국 판재에 키홀(keyhole)이 만들어지며 키홀 주변은 플라즈마의 높은 온도 때문에 금속이 용융된다. 키홀의 형성은 기존의 아크용접과는 달리 레이저 용접에서는 용접품질과의 밀접한 관계 때문에 이에 대한 생성 메커니즘에 많은 관심이 집중되고 있다. 또한 생성된 플라즈마 가스는 입사되는 레이저 빔을 재 흡수하기 때문에 키홀에서 발생하는 플라즈마의 거동은 매우 중요한 요소이다.

레이저 용접 품질을 용접 현장에서 모니터링하는 기술은 판재의 절약과 용접 시간의 단축등의 이점 때문에 많은 연구가 진행되었다. 지금까지 레이저 용접 품질을 모니터링하는 기술은 주로 레이저 유도 플라즈마 광 측정,<sup>1-3)</sup> 음향 신호 측정,<sup>4-5)</sup> 레이저의 반사광 강도 측정과<sup>6)</sup> 플라즈마 전계 강도(electric field intensity) 측정<sup>7)</sup> 등에 대한 연구가 수행되어 왔다. 특히 플라즈마 광의 세기 측정은 측정 장치의 단순성과 용접 조건과의 상관성이 뛰어나 많은 연구가 이루어졌다. 포토다이오드를 이용하여 적외선 영역에서 자외선 영역대의 광의 세기 및 주파수 영역대의 분석을 통하여 용융 풀(pool) 및 키홀의 특성과 용접 깊이에 대한 상관성 연구가 이루어졌으며 분광 분석을 통하여 플라즈마의 온도 및 키홀 거동에 대한 연구가 수행되었다.<sup>8-9)</sup>

본 연구에서는 자동차용으로 많이 사용되는 1mm 두께의 390MPa 급의 고장력 강판에 대하여 키홀에서 발생하는 플라즈마의 특성을 확인하기 위하여 겹치기 용접시 품질에 영향을 주는 주요 변수인 용접 속도, 차폐가스의 유량, 판재사이의 간격 및 레이저광의 초점거리 변화등에 따른 판재 상단에서 측정된 플라즈마광의 세기 특성과의 연관성을 연구하였다. 특히 각 용접 조건에서의 완전 용입과 부분 용입시에 발생하는 광의 세기의 특성을 알아봄으로써 자동차용 고장력 강판의 겹치기 용접 품질을 추정하는데 플라즈마 광의 세기 특성치가 유용함을 확인하였다.

### II. 실험 방법

전체 실험 장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 레이저광이 렌즈에 집속된 후 판재의 표면에서 발생하는 플라즈마 광을 측정하기 위해서 파이버를 주입가스 노즐 상단(용접 진행 방향에 위치하며 약 45°의 경사각)에 부착하여 측정하였다. 파이버에서 나온 광은 플라즈마 광 투과를 위하여 측정된 분광 스펙트럼 결과 가시광선 영역대의 간섭 필터(Center Wavelength:530nm, FWHM 10nm)를 사용하였으며 투과된 광

신호는 포토다이오드에 집속되었다. 측정된 아날로그 신호는 A/D 변환기를 통하여 분석되었다. 레이저는 일정한 속도를 갖고 판재에 조사되었고, 차폐가스는 Ar 가스를 이용하였다. 플라즈마 화염 패턴 측정은 고속디지털 카메라(KODAK EktaPro HG Imager Model 2000)를 이용하여 초당 1000 frame 속도로 측정하였다.

용접 품질에 중요한 요인이 되는 용접 공정의 변수인 용접속도, 차폐가스 양, 레이저광의 초점거리 변화등은 최적 용접 조건 전후로 측정하였다. 겹침(Lab Joint) 용접시에는 판재사이의 간격을 얇은 스페이서(spacer)를 삽입하여 측정하였다.

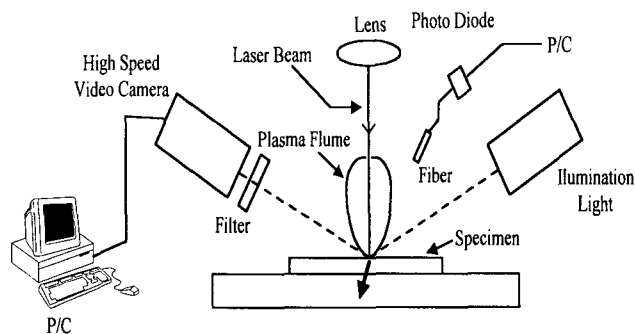


Fig. 1 The schematic diagram of CO<sub>2</sub> laser welding experiment

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 용접조건에 따른 단면 형상, 플라즈마 광 세기(PI) 및 플라즈마 패턴의 특성

실험조건에 따른 단면 형상, PI 및 플라즈마 패턴 특성의 상관 관계를 나타내기 위하여 본 실험에서 측정된 2차원 플라즈마 형상 그리고 포토다이오드에서 측정된 용접길이에 따른 PI의 특성을 하나의 실험조건인 용접 속도에 따라 측정하였다. 완전 용입에서 부분 용입으로 전환되면서 2차원 플라즈마 영상에서는 같이 플라즈마 가스가 상부쪽으로 분출이 되면서 화염의 크기가 상대적으로 커지고 PI도 강해지는 모습을 확인 할수 있었다. PI의 세기는 용융풀에서 방출되는 광에 비하여 상대적으로 매우 강하게 나타내었다. 플라즈마 영상에서 나타나는 키홀에서 발생된 플라즈마 광을 광파이버를 통하여 측정한 결과, 2차원 영상과 같이 플라즈마 화염의 강도와 크기가 커짐에 따라 PI도 증가하는 결과를 보여주었다.

#### 2 용접 조건에 따른 플라즈마 광 세기의 특성

##### 2.1 Bead-on-plate에서의 용접속도에 따른 PI의 특성

전 논문<sup>10)</sup>에서도 언급했듯이 Bead-on-plate 용접에서는 3.0m/min의 용접속도까지는 완전 용입이 일어나나 3.3m/min에서는 부분 용입으로 가는 과도기적 현상이 관찰되고 그 이상에서는 부분 용입이 일어난다. 이때 완전 용입의 한계는 3.3m/min으로 볼 수 있다.

이러한 용접 속도에 따른 PI의 변화도 완전 용입과 부분 용입 상태에서 다르게 나타남을 Fig. 2에서 확인 할 수 있다. 완전 용입이 일어나는 3.3m/min 이하에서는 거의 변화가 일어나지 않으나 부분 용접이 일어나는 3.6m/min서 부터는 PI의 변화가 1.5배에서 2배까지 증가하였다.

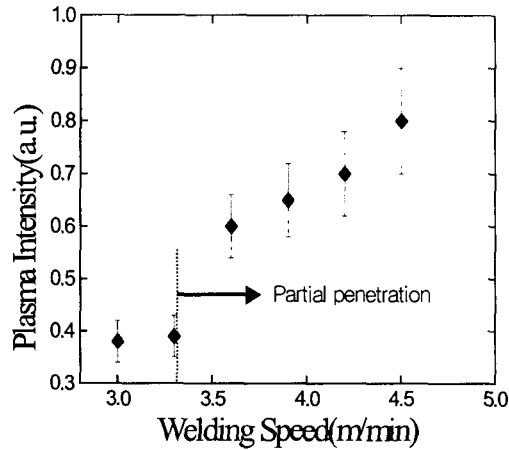


Fig. 2 The plasma light intensity measured during Bead-on-plate(2mm SPCEM) laser welding

## 2.2 겹치기 용접에서의 용접조건에 따른 PI의 특성

### (1) 용접속도에 따른 PI의 특성

Fig. 3은 레이저광의 겹치기 용접시 판재사이의 간격이 0mm 인 경우에 용접속도에 따른 플라즈마 광의 세기를 나타낸다. 각 광의 세기에서 침투 신호의 변화는 플라즈마 광의 세기 변화에 기인한 것이다. 이와 같은 침투 출력의 변화는 키홀 내부의 플라즈마 가스의 요동에 의해서 발생된 것으로 보인다. 용접속도가 증가함에 따라 용접 단면에서 보면 용접깊이가 작아짐을 알 수가 있다.

본 실험에서는 겹치기 용접시 3.3m/min의 속도에서부터 완전 용입이 깨지기 시작하였다. 이러한 완전 용입 한계속도는 전 논문<sup>10)</sup>에서 밝힌바와 같이 Bead-on-plate에서의 3.3m/min에 비하여 판재간격이 0mm인 경우 1mm/1mm의 겹치기 용접에서는 3.15m/min 정도가 된다. 이 용접속도 이상에서부터 플라즈마 광의 세기는 Fig. 3에서와 같이 상부에서 비드가 형성되는 속도까지 지속적으로 증가함을 보여주었다. 이것은 용접 침투 깊이가 낮기 때문에 키홀의 형성이 완전히 판재를 관통해서 형성되지 못하는 것을 보여주고 있다. 따라서 키홀 내부에서 발생된 플라즈마 가스는 판재 상부로 분사되어 위쪽에서 측정된 플라즈마 광의 세기가 강하게 측정되었다. PI의 변화는 완전 용입의 PI보다 Bead-on-plate에서와 같이 약 2배까지 증가하였다.

### (2) 판재 간격에 따른 PI의 특성

판재 겹침 용접은 두 개의 판재를 겹치기 용접을 하는데 있어 판재의 겹침 면이 고르지 않기 때문에 실제 용접에서는 판재사이의 간격으로 인하여 일정한 용접 품질을 나타내지 않는다. 따라서 판재 사이의 간격의 변화에 의하여 용접 품질은 큰 영향을 받을 수 있다. 실험에서의 용접속도는 앞의 용접 단면 그림에서 보듯이 하부 비드가 형성되기 전의 3.6m/min에서 실험하였다. 이것은 플라즈마 가스가 하부로 빠져나가지 못하고 상부로 나올때의 조건이며 만약 판재 사이의 간격이 이와 같은 플라즈마 가스에 어떤 영향을 미치는지를 측정하기 위해서이다.

Fig. 4에서 판재사이의 간격을 인위적으로 0mm에서 0.3mm까지 변화시키면서 플라즈마 광의 세기를 측정할 결과 간격이 커지면서 상부에서 측정되는 플라즈마 광의 세기도 감소함을 보여주었다. 이것은 용접 단면에서도 볼수 있는 바와 같이 판재 사이의 간격으로 플라즈마 가스 분출이 되면서 상부로 나오는 플라즈마 가스의 양이 감소했기 때문이다.

### (3) 차폐가스 양에 따른 PI의 특성

일반적으로 차폐가스는 반응성이 없는 He이나 Ar 가스를 많이 사용한다. 본 실험에서는 CO<sub>2</sub> 레이저 용접에서 안정성 때문에 많이 사용되는 He 가스 대신 경제성 측면에서 보다 유리한 Ar 가스를 사용하였다. 판재 간격은 0mm이고 완전 용입 조건인 용접속도 3.0m/min에서 수행하였다. Fig. 5의 결과는 예상과 같이 주입가스의 유량이 50CFH이하에서는 발생된 플라즈마 가스에 의한 레이저광의 차단 효과로 완전 용입이 형성되지 않기 때문에 플라즈마 가스가 위로 분출이 되어 광의 세기가 증가함을 보여준다.

### (4) 레이저광 초점거리 변화에 따른 PI의 특성

Fig. 6은 레이저 광이 판재에 입사될 때 최적 용접 조건을 나타내는 위치에서 초점거리를 변화 시켰을 때 나타나는 PI의 변화를 측정함으로써 레이저광 초점거리 변화 효과를 나타낸다. 이와 같은 초점거리 변화 효과는 결국 판재에 단위 면적 당 입사되는 에너지가 달라지기 때문에 키홀 형성에 큰 영향을 미친다. 최적 조건을 0으로해서 상대적인 초점거리 변화 값을 -(최적 위치에서 판재 상단쪽 방향)와 +(판재 하단 방향) 방향으로 1mm씩 변화시키며 측정하였다. 용접속도는 완전 용입이 형성되는 3.0m/min에서 수행하였다.

용접 단면에서도 확인된바와 같이 초점거리가 -2에서 +2까지는 완전 용입이 형성되기 때문에 플라즈마 광의 세기는 낮게 측정이 되었다. 그러나 완전 용입이 형성되지 않는 -3이상과 +3이상에서부터는 플라즈마 광의 세기가 급격히 커짐을 알 수 있다. 이것은 앞에서도 확인된 것과 같이 완전 용입이 형성되지 않을 때 플라즈마 가스가 위로 분출이 되면서 측정되는 광의 세기가 증가되는 것을 볼 수 있다.

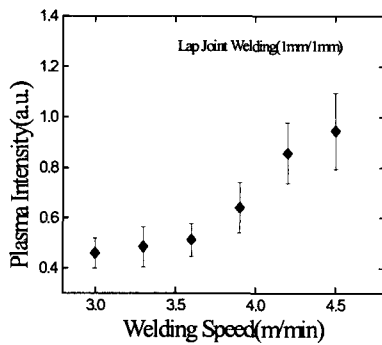


Fig. 3 Effect of welding speed on the plasma light intensity during CO<sub>2</sub> lap-joint welding

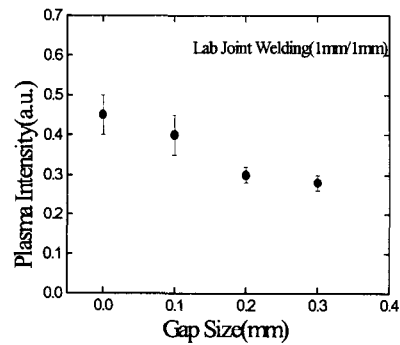


Fig. 4 Effect of gap size on the plasma light intensity during CO<sub>2</sub> lap-joint welding

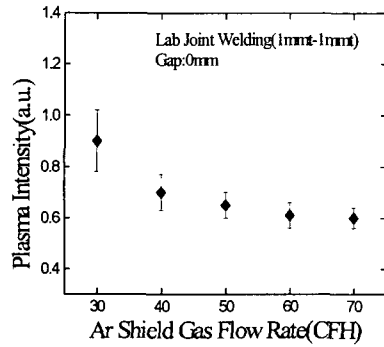


Fig. 5 Effect of Ar shield gas flow rate on the plasma light intensity during CO<sub>2</sub> lap-joint welding( gap size: 0mm )

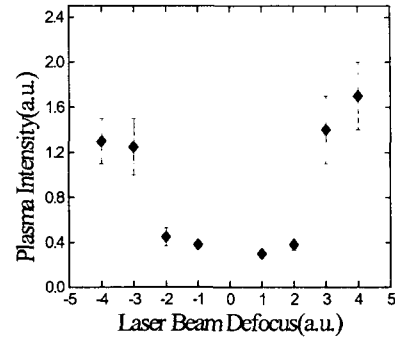


Fig.6 Effect of laser beam defocus on the plasma light intensity during CO<sub>2</sub> lap-joint welding( gap size: 0mm )

#### IV. 결 론

자동차용 강판의 겹치기 CO<sub>2</sub> 레이저 용접에서 만들어진 키홀의 플라즈마 광 특성과 용접 조건과의 상관성을 연구하였다. 연구결과 다음과 같은 몇 가지 상관성을 나타내는 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 용접속도가 빠를수록 상단에서 발생하는 플라즈마 광의 세기는 커졌으며 완전 용입 조건에서는 변화가 없으나 부분 용입이 형성되는 3.3m/min 이상에서는 용접속도가 증가함에 따라 약 2배까지 지속적으로 증가함을 보여주었다. 이것은 키홀이 관통되는 3.3m/min이하에서의 PI의 변화가 거의 없는 것에 비하여 판재 내부에서 용접 깊이가 작을수록 생성된 플라즈마 가스가 상부로 분출되는 것으로 보인다.
- (2) 판재 사이의 간격이 넓을수록 발생된 플라즈마가 판재 사이로 분출이 되면서 그 세기가 감소되는 현상을 보여주었다. 이러한 결과는 용접 길이에 따른 PI 세기를 나타내는 그래프에서도 확인되었다. 본 연구에서는 판재 사이의 간격이 0.3mm 이상에서부터 PI 신호가 판재사이의 간격이 0mm에서의 완전 용입일때의 PI 신호와 유사하게 나타내었다.
- (3) 차폐가스의 PI에 대한 효과는 가스 유량이 적을수록 플라즈마 광의 세기가 강하게 측정되었다. 이러한 현상은 예상했던 바와 같이 키홀에서 형성된 플라즈마 가스를 없애 줌으로써 이온 가스에 의한 레이저광의 재 흡수등의 차단 효과를 감소시켜 보다 많은 레이저광 에너지가 키홀 내부로 입사되었다. 따라서 용접 깊이가 증가하여 상부로 발산되는 PI가 줄어드는 효과를 나타내었다.
- (4) 레이저광의 초점거리 변화에 따른 PI 변화는 완전 용입이 되는 최적 용접 위치에서 ±2mm에서는 PI의 변화가 크게 나타나지 않았으나 완전 용입이 깨지는 ±3mm 이상에서는 PI 신호가 급격히 증가하였다. 이것은 레이저광의 1mm 정도의 초점거리 변화가 본 용접 조건에서는 매우 민감하게 영향을 미치는 것을 알수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 '국가지정연구실 사업'에 의한 연구비 지원과 고등기술연구원의 후원에 의하여 수행되었다. 관계자 여러분께 깊은 감사를 드린다.

## 참 고 문 헌

1. E. Beyer and P. Abels, "Process Monitoring in Laser Materials Processing", Laser Advanced Materials Processing(LAMP92), pp433-438, 1992.
2. A. Matsunawa, J.D. Kim, Takemoto and S. Katayama, "Spectroscopic Studies on Laser-Induced Plume of Aluminium Alloy", ICALEO '95. Laser Institute of America, 80, pp719-728, 1995.
3. W. Gatzweiler, D.Maischner, E. Beyer, "On-line Plasma Diagnostics for Process-control in Welding with CO<sub>2</sub> Laser", SPIE, 1020, pp142-148, 1998
4. L. Li, W. M. Steen, "Non-Contact Acoustic Emission Monitoring During Laser Processing", ICALEO '92, Laser Institute of America, pp719-728, 1992.
5. H. Gu and W.W. Duley, "Resonant Acoustic Emission During Laser Welding of Metals", J. of Phys. D : Appl. Phys., 29, pp550-555, 1996.
6. T. Ishide et al, "High Power YAG Laser Welding and Its In-Process Monitoring Using Optical Fibers", Proc. ECLAT, pp183-192, 1994.
7. M. Watanabe, H. Okado, T.Inoue, S. Nakamura and A. Matsunawa, "Features of Various In-Process Monitoring Methods and Their Applications to Laser Welding", ICALEO '95, Laser Institute of America, 80, pp719-728, 1992.
8. J. Beersiek, R. Poprawe, W. Schulz, Hongping Gu, R. E. Mueller, and W.W. Duley "On-line Monitoring of Penetration Depth in Laser Beam Welding", ICALEO '96,
9. Jurgen Griebisch, Ludwig Schlichtermann, "Quality Assurance of Industrial Spot Welding with a Pulsed Nd:YAG Laser", ICALEO '96, Laser Institute of America, 1996.
10. 이경돈, 박기영, 김주관, "자동차용 강관의 접치기 CO<sub>2</sub> 레이저 용접에서 용접속도와 판재 간격에 따른 용접 특성 연구", 용접학회지 (to be published).