

자동차용 강판의 겹치기 CO₂ 레이저 용접에서 발생하는 플라즈마 특성에 관한 연구

남기중*, 박기영, 이경돈
고등기술연구원 시스템제어/레이저응용센터

Study on the characteristics of the plasma induced by lap-joint CO₂ laser welding of automotive steel sheets

Gi Jung Nam*, Ki Young Park, Kyoung Don Lee
Center for System Control and Laser Applications,
Institute for Advanced Engineering

ABSTRACT

In order to investigate the characteristics of the plasma induced by lap-joint CO₂ laser welding of automotive steel sheets, the effects of welding speed, shield gas flow rate, gap size, and laser beam defocus to plasma intensity emitted from keyhole have been investigated. The plasma light is measured by fiber and photodiode. Also, the plasma images were captured by the high speed digital camera in 1000frames/sec in order to correlate the plasma light signal with plasma pattern.

From the results, it is observed that the difference of the plasma intensity for between the deep penetration and partial penetration exists from 1.2 to 2 times. The plasma light intensity decreased in case of the deep penetration is observed due to the exhausting of the plasma gas under the sheet. On the other hand, under the conditions of the deep penetration, the plasma intensity is significantly increased by controlling the conditions decreasing the penetration depth. It was specially founded that the effect of 0.3mm gap size at partial penetration condition is approximately similar to deep penetration in 0mm gap. It is concluded that the plasma intensity is able to evaluate the penetration depth in lap-joint welding and appears to offer the most straightforward correlation to the welding process.

Key Words : CO₂ laser welding, Lap-joint welding, Plasma intensity, Deep penetration welding, Keyhole

1. 서 론

CO₂ 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 10⁶ W/cm² 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.¹⁻³⁾ 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,¹⁻³⁾ 음향 신호 측정,⁴⁻⁵⁾ 레이저의 반사광 강도 측정과⁶⁾ 플라즈마 전기 강도(electric field intensity) 측정⁷⁾ 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 분석

을 통하여 용융 풀(pool) 및 키홀의 특성과 용접 깊이에 대한 상관성 연구가 이루어졌으며 분광 분석을 통하여 플라즈마의 온도 및 키홀 거동에 대한 연구가 수행되었다. J. Beersiek는⁸⁾ 플라즈마 광의 세기 측정을 통하여 겹치기 용접에서 1mm 정도의 용접깊이를 ±12% 정도 내에서 측정 가능함을 보였다. M.C. Jon은⁹⁾ 방출되는 음파를 비접촉식으로 모니터링하여 음파의 발생 원인을 키홀 형성 때 플라즈마의 변동에 의한 것이라고 밝힌 후 이에 대한 연구가 많이 수행되었다. 그러나 음향 신호의 측정은 주위 잡음에 영향을 많이 받기 때문에 실제 현장 적용의 어려움이 있다.

최근에는 상기 측정 기술들을 복합적으로 결합된 모니터링 장치들이 용접 현장에 시도되고 있으며 필립스사에서는 브라운관 용접시 발생하는 적외선 영역대 및 플라즈마 광 신호 측정과 레이저 빔의 반사되는 광의 세기를 측정하는 모니터링 시스템을 적용하여 용접 불량률이 거의 0에 가까운 결과를 얻었다.¹⁰⁾ 또한 자동차 차체의 겹치기 용접에도 레이저가 확대 적용되는 추세이기 때문에 이러한 기술들을 이용한 용접 모니터링이 시도되고 있으나 테일러드블랭크의 맞대기 용접에 비하여 겹치기 용접에 대하여는 아직 많은 연구가 발표되지 않고 있다.

따라서 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 용접속도, 차폐가스의 유량, 판재사이의 간격 및 레이저

광의 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.

2. 실험 방법

2.1 용접조건 및 시험 내용

본 실험에서 사용된 판재는 두가지로 겹치기 용접용으로 사용한 고장력강은 자동차의 차체에 많이 쓰이는 저탄소강의 390MPa 급으로서 APFC390이며 두께가 1mm의 판재이고 Bead-On-Plate 실험에 사용한 판재는 두께 2mm의 SPCC이다. 사용된 레이저는 4kW CW CO₂ 레이저(RofinSinar co. model RS 840HF)이며 집속된 레이저 빔의 직경은 약 0.43mm이다.

본 연구에서는 용접 품질에 주요 요인이 되는 키홀 생성을 파악하기 위하여 키홀 형성시 발생하는 플라즈마 광의 세기 특성을 측정하여 용접 조건과의 상관성을 파악하기 위하여 다음과 같은 실험내용을 수행하였다.

- 용접속도에 따른 PI(Plasma Intensity) 세기의 변화
- 판재 간격에 따른 PI 세기의 변화
- 차폐가스 유량에 따른 PI 세기의 변화
- 레이저 Defocusing에 따른 PI 세기의 변화

실험에 사용된 공정조건에 대한 전체적인 시험조건을 Table 1에 정리하였다.

Table 1. Contents and Conditions of the experiment

Experimental contents	Experimental parameters
- Bare 390 steel lap joint welding: 1mm/1mm	- Welding speed : 2.4, 2.7, 3.0, 3.3, 3.6, 3.9, 4.2, 4.5(m/min)
-SPCCEN bead -on-plate: 2mm	- Gap size : 0, 0.1, 0.2, 0.3(mm)
	- Shield gas flow rate: 30~70 CFH
	- Laser defocus: +4~-4

2.2 실험장치

전체 실험 장치의 개략도는 Fig. 1과 같다.

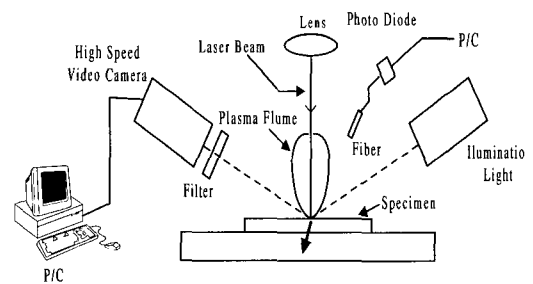


Fig. 1 The schematic diagram of CO₂ laser welding experiment

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 측정한 분광 스펙트럼 결과(Fig. 2) 가시광선 영역대의 간섭 필 (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, 차폐 가스는 Ar 가스를 이용하였다. 플라즈마 화염 패턴 측정은 고속디지털 카메라(KODAK EktaPro HG Imager Model 2000)을 이용하여 초당 1000 frame 속도로 측정하였다.

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

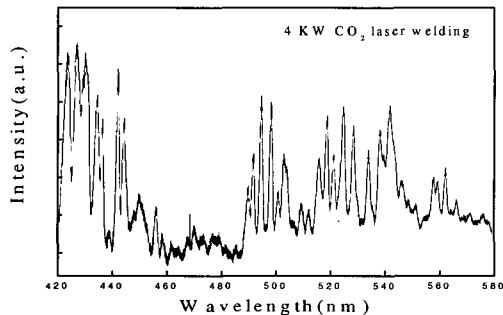


Fig. 2 The spectrum of the plasma induced by CO₂ laser steel welding

2.3 데이터 처리

본 연구에서는 플라즈마 광신호를 포토다이오드를 통하여 전기적 신호로 변환하며 DAQ 장치로 NI사의 SCB-100과 AT-MIO-16DE-10 보드를 이용하여 최종적으로 LabVIEW 상에서 데이터를 처리하였다.

데이터 처리 시스템을 이용한 측정 결과의 일부를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3의 하단은 CO₂ 레이저에 의해 용접된 판재를 측정 한 사진으로 형성된 비드와 용접 특성을 보여주고 있다. 용접속도는 3.3m/min이며 좌에서 우로 레이저 빔을 이동시키며 용접하였다.

전체 용접 길이는 약 220mm이다. 레이저

빔과 같은 속도와 방향으로 이동하는 광파이버에 의하여 측정된 용접 표면에서 발생된 거리에 따른 플라즈마 광 세기의 특성을 보여주는 상단의 그래프와 비교하면 위치에 따른 용접 특성에 따라 플라즈마 광의 세기 차이를 보여준다. 데이터 처리속도는 200 scans/sec이며 본 실험에서 전체 용접 길이 동안 들어오는 광신호 처리시간은 약 7초 정도이다.

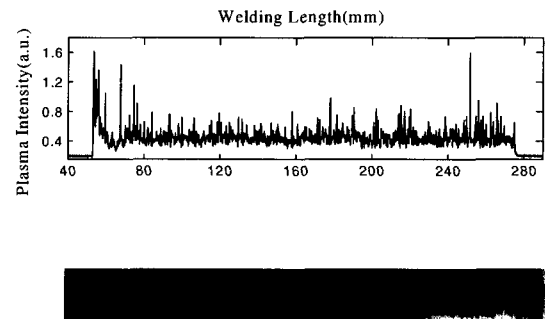


Fig. 3 The plasma light intensity along the welding distance measured by fiber and photodiode

3. 결과 및 고찰

3.1 용접조건에 따른 단면 형상, 플라즈마

광 세기(PI) 및 플라즈마 패턴의 특성

위의 각 실험조건에 따른 단면 형상, PI 및 플라즈마 패턴을 Table 2와 Table 3, Table 4에 정리하였다. 단면 형상은 겹치기 용접에서의 용접 속도, 판재 간격, 레이저광의 초점거리 변화에 따른 용접깊이를 잘 보여주고 있다. 이와 같은 단면과 본 실험에서 측정된 2차원 플라즈마 형상 그리고 포토다이오드에서 측정된 용접길이에 따른 PI의 특성을 하나의 실험조건인 용접 속도에 따라 측정된 결과가 Table 3이다. 완전 용입에서

부분 용입으로 전환되면서 2차원 플라즈마 영상에서 확인 할 수 있는바와 같이 플라즈마 가스가 상부쪽으로 분출이 되면서 화염의 크기가 상대적으로 커지고 PI도 강해지는 모습을 확인 할수 있다. PI의 세기는 용융풀에서 방출되는 광에 비하여 상대적으로 매우 강하게 나타나고 있다. Table 3의 하단은 플라즈마 영상에서 나타나는 키크에서 발생된

플라즈마 광을 광파이버를 통하여 측정 한 결과이다. 2차원 영상과 같이 플라즈마 화염의 강도와 크기가 커짐에 따라 PI도 증가하는 결과를 보여주고 있다. Table 4는 본 실험에서 수행한 각 시험조건에서 측정 한 PI 특성이다. 이에 대한 분석은 뒤에서 하고자 한다.

Table 2. Cross-sections of lap-joint weld sheets(1mm/1mm) at several welding parameters(Bare 390 steel)

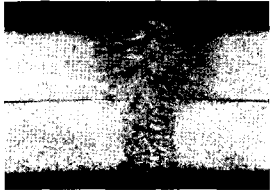
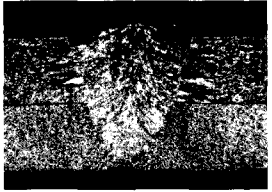

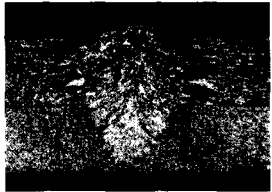
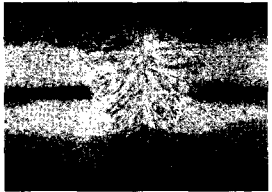
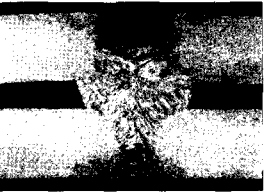
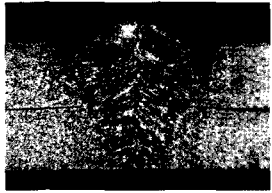
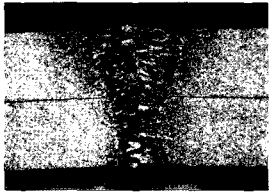
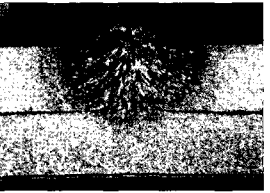
		
1. Welding speed : 2.7m/min	2. Welding speed : 3.3m/min	3. Welding speed : 3.9m/min
Cross-sections of lap joint welding with gap=0mm at several welding speeds		
		
1. Gap size : 0.0mm	2. Gap size : 0.1mm	3. Gap size : 0.2mm
Cross-sections of lap joint welding at several gap sizes		
		
1. Defocus : +3	2. Defocus : 0	3. Defocus : -3
Cross-sections of lap joint welding at several laser beam defocus positions		

Table 3. Cross-sections, plasma images captured by high speed digital camera at 1000 frames/sec speed and plasma light intensity measure by fiber and photodiode at several welding speeds

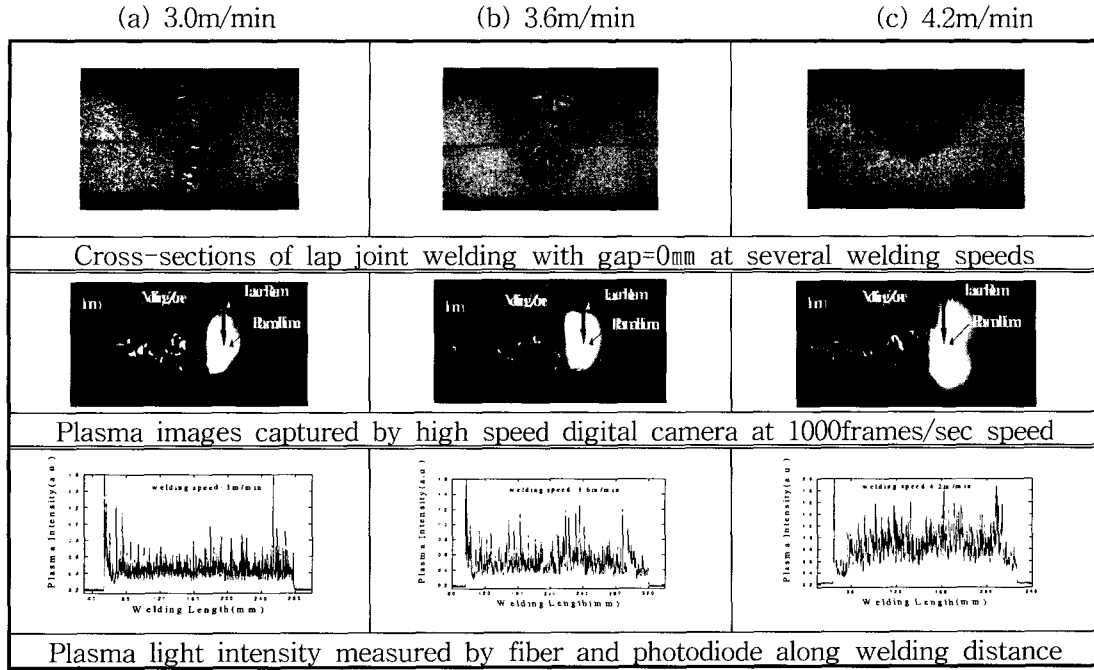
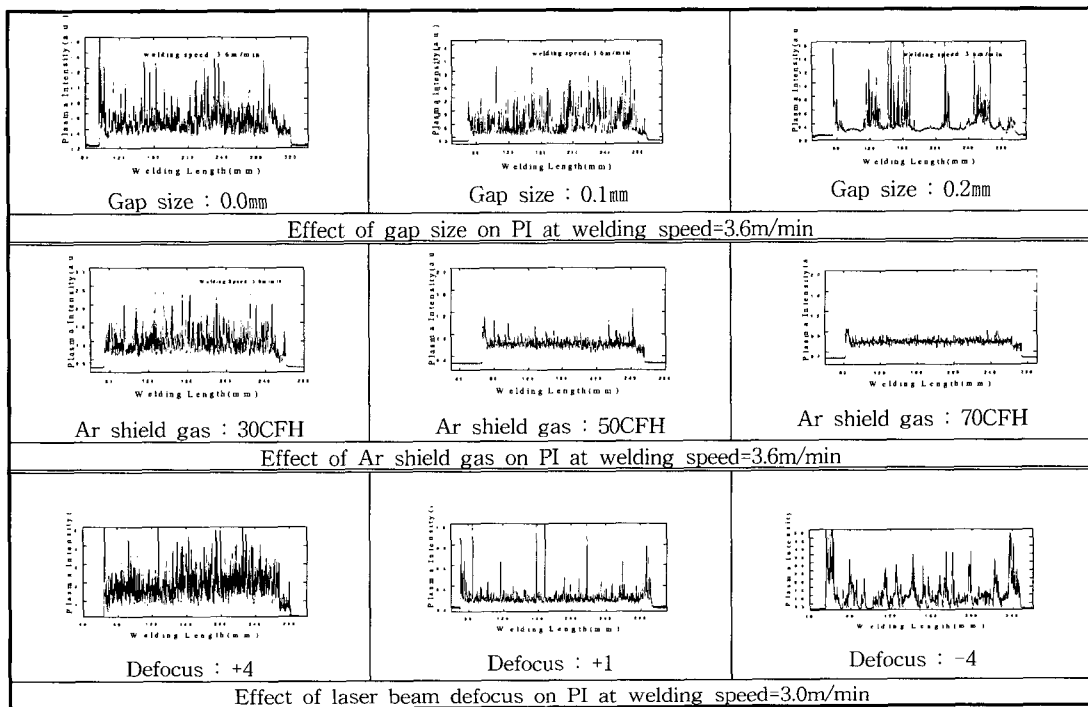


Table 4. Effects of welding parameters such as gap size, shield gas flow rate and laser beam defocus on plasma light intensity



3.2 용접 조건에 따른 플라즈마 광 세기의 특성

3.2.1 Bead-on-plate에서의 용접속도에 따른 PI의 특성

전 논문¹¹⁾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. 4에서 확인 할 수 있다. 완전 용입이 일어나는 3.3m/min 이하에서는 거의 변화가 일어나지 않으나 부분 용입이 일어나는 3.6m/min서 부터는 PI의 변화가 1.5배에서 2배까지 증가하였다.

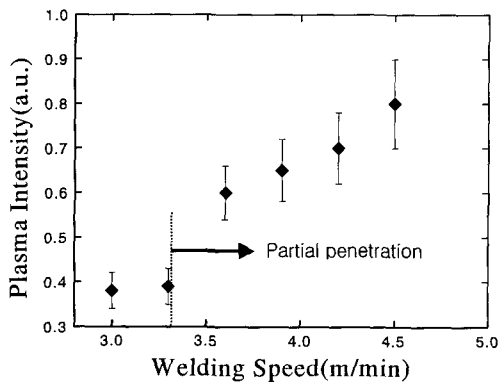


Fig. 4 The plasma light intensity measure during Bead-on-plate(2mm SPCEN) laser welding

3.2.2 겹치기 용접에서의 용접조건에 따른 PI의 특성

(1) 용접속도에 따른 PI의 특성

Fig. 5는 레이저광의 겹치기 용접시 판재 사이의 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 Table 2의 용접 단면에서 보면 용접깊이가 작아짐을 알 수 가 있다.

본 실험에서는 겹치기 용접시 3.3m/min의 속도에서부터 완전 용입이 깨지기 시작하였다. 이러한 완전 용입 한계속도는 전 논문¹¹⁾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. 5에서와 같이 상부에서 비드가 형성된 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.

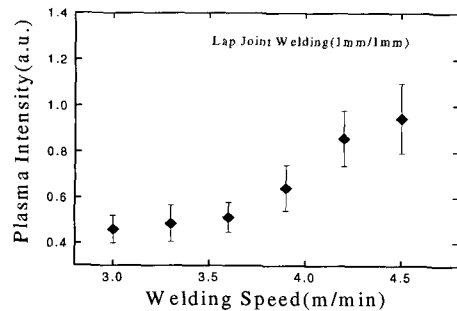


Fig. 5 Effect of welding speed on the plasma light intensity during CO₂ lap-joint welding

(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. 6에서 판재사이의 간격을 인위적으로 0mm에서 0.3mm까지 변화시키면서 플라즈마 광의 세기를 측정된 결과 간격이 커지면서 상부에서 측정되는 플라즈마 광의 세기도 감소함을 보여주었다. 이것은 용접 단면의 그림에서도 볼수 있는 바와 같이 판재 사이의 간격으로 플라즈마 가스 분출이 되면서 상부로 나오는 플라즈마 가스의 양이 감소했기 때문이다. 이와 같은 사실은 Fig. 7에서도 확인할 수 있듯이 (a)는 간격이 0.1mm이고 (b)는 간격이 0.2mm이다. 평균 플라즈마 광세기는 간격이 0.1mm일 때 전체 용접 길이에서 높게 측정되고 있다. 그러나 (a)와 (b)에서 공통적으로 특이하게 나타나는 신호의 변화가 있다. 특히 (b)에서 일정 위치에서 간격 0mm에 해당되는 광 세기가 측정됨을 보여주고 있다. 이것은 인위적으로 판재사이의 간격을 일정하게 유지하기 위하여 간격 두께에 해당되는 얇은 스페이서 조각을 겹침 면 사이에 일정한 거리에 부착시킨 효과로 보여진다. 즉 용접선에 따라 용접이 진행되는 동안 발생된 플라즈마 가스는 높은 압력 상태이기 때문에 판재사이의 갭으로 분출이 되다 간격을 유지시켜주기 위해 일정 위치에 놓여져 있는 판재 조각에 의해 그 분출이 차단되어 다시 상부로 분출되어 간격이 0인 신호의 세기로 나타난 것으로 보인다. 이것은 (a)와 (b) 두 그림에서 공통적으로 나타난 결과로 확인할 수

있었다. 간격이 0.3mm 이상에서는 하부 비드가 형성된 것과 같은 효과로 간격사이로 플라즈마 가스가 분출이 되어 완전 용입과 비슷한 세기를 보여주고 있다.

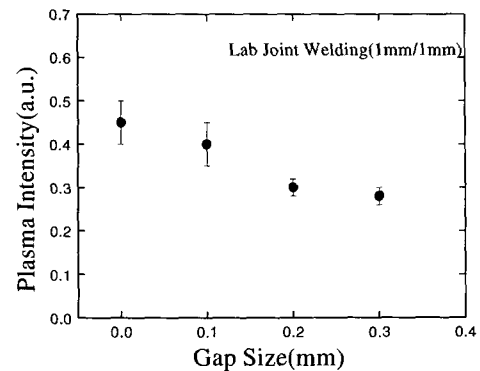


Fig. 6 Effect of gap size on the plasma light intensity during CO₂ lap-joint welding

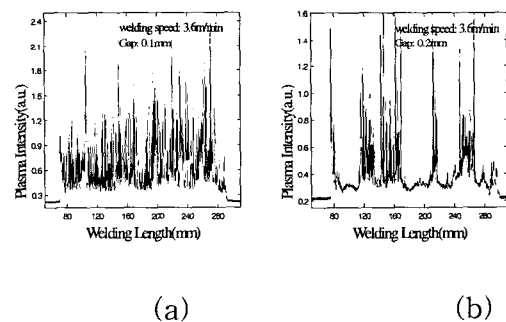


Fig. 7 The plasma light intensity at gap sizes during CO₂ lap-joint welding (a) gap=0.1mm, (b) gap=0.2mm (welding speed: 3.6m/min)

(3) 차폐가스 양에 따른 PI의 특성

일반적으로 차폐가스는 반응성이 없는 He 이나 Ar 가스를 많이 사용한다. 본 실험에서는 CO₂ 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. 8의 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.

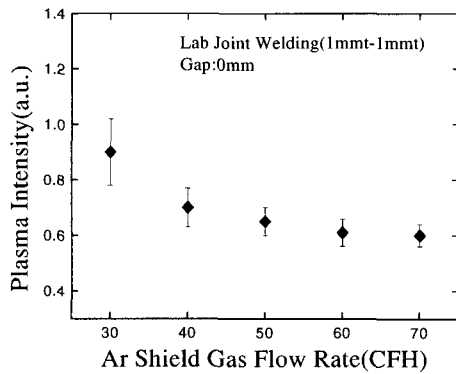


Fig. 8 Effect of Ar shield gas flow rate on the plasma light intensity during CO₂ lap-joint welding (gap size: 0mm)

(4) 레이저광 초점거리 변화에 따른 PI의 특성

Fig. 9는 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 형성이 되지 않는 -3이상과 +3이상에서부터는 플라즈마 광의 세기가 급격히 커짐을 알 수 있다. 이것은 앞에서 확인된 것과 같이 완전 용입이 형성되지 않을 때 플라즈마 가스가 위로 분출이 되면서 측정되는 광의 세기가 증가되는 것을 볼 수 있다.

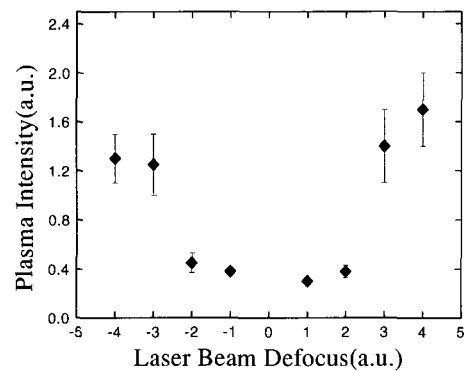


Fig.9 Effect of laser beam defocus on the plasma light intensity during CO₂ lap-joint welding (gap size: 0mm)

4. 결 론

자동차용 강판의 겹치기 CO₂ 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 작

을수록 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 $\pm 2\text{mm}$ 에서는 PI의 변화가 크게 나타나지 않았으나 완전 용입이 깨지는 $\pm 3\text{mm}$ 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 고등기술연구원 의 후원에 의하여 수행되었다. 관계자 여러분께 깊은 감사를 드린다.

참고 문헌

1. E. Beyer and P. Abels, "Process Monitoring in Laser 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 CO₂ 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, Laser Institute of America, 1996.
9. M.C. Jon, "Noncontact Acoustic Emission Monitoring of Laser Beam Welding", Welding Journal September, pp43-48, 1985.
10. Jurgen Griebisch, Ludwig Schlichter-mann, "Quality Assurance of Industrial SpotWelding with a Pulsed Nd:YAG Laser", ICALEO '96, Laser Institute of America, 1996.
11. 이경돈, 박기영, 김주관, "자동차용 강판의 겹치기 CO₂ 레이저 용접에서 용접속도와 판재 간격에 따른 용접 특성 연구", 용접학회지 (to be published).