

CO₂ 레이저를 이용한 용접튜브 제조공정에서의 용접선 추적 및 용접품질 모니터링

서 정* · 이재훈* · 김정오* · 강희신* · 이문용** · 정병훈**

*한국기계연구원 레이저응용시스템그룹

** (주) 성우하이텍 기술연구소

Weld Quality Monitoring and Seam Tracking in Making of Welded Tube using CO₂ Laser

Jeong Suh*, Jae-Hoon Lee*, Jeng-O Kim*, Hee-Shin Kang*, Moon-Yong Lee** and Byung-Hun Jung**

*Laser Application Group, Korea Institute of Machinery & Materials, Daejeon 305-343, Korea

**Technical Institute of Sungwoo Hitech Co., LTD, Pusan 619-960, Korea

Abstract

Weld quality monitoring and seam tracking along the butt-joint lengthwise to the tube axis are studied. The material of tube is 60kg/mm² grade steel sheet, and the longitudinal butt-joint is shaped by 2 roll bending machine. The tube with a thickness of 1.5mm, diameter of 105.4mm and length of 2000mm is successfully obtained by the CO₂ laser welding system equipped with a seam tracker and plasma sensor. Experimental results show that the developed welding system can be used for the precision seam tracking and the real-time monitoring of weld quality, and the laser welded tube can be used for car body and component after tubular hydroforming.

* Corresponding author : jsuh@kimm.re.kr

(Received August 9, 2003)

Key Words : CO₂ Laser welded tube, Seam tracking, Plasma intensity, Weld quality monitoring

1. 서 론

복잡한 형상의 부품제작을 1회의 공정에 의해 최종형상으로 생산할 수 있는 일체화 성형기술중에 대표적으로 관액압성형(tubular hydroforming)기술이 있다. 관액압성형의 원재료인 튜브(tube)는 현재 주로 고주파전기저항용접(HF-ERW, high frequency electric resistance welding)으로 제조하여 사용하고 있으며, 자동차 샤시류에 적용되고 있다. 그 예로 engine cradle 과 instrumental panel beam 등이 있다.

최근에는 액압성형에 의한 자동차 부품의 개발을 점차 샤시류에서 차체류로 확대시키기 위한 연구가 시도되고 있으며, 박육대경(thin thickness and large

diameter)의 튜브가 사용될 것으로 예상된다. 따라서, ERW 방식에만 의존하던 튜브 제조방법으로는 요구되는 조건을 만족시키기에 충분하지 않다. 더욱이 구조와 기능을 한단계 발전시킨 원추형 튜브(conical tube)와 테일러 튜브(tailor tube)등을 제조하기 위해서는 기존의 ERW 방식으로는 불가능하며, 이들 복합형상형 튜브를 제조하기 위해서 레이저 용접 튜브 제조는 필수적이라고 할 수 있다. Fig. 1은 레이저 용접된 테일러드 블랭크를 성형하여 테일러 튜브를 제작하고 이를 일체화 성형하여 자동차의 범퍼빔을 제작하는 공정을 보여주고 있다.

판재를 튜브로 조관하는 용접전 공정(pre-welding)인 성형공정에는 UO-벤딩, 프레스 절곡(bending on press brake), 연속 롤포밍, 3 또는 2 roll 벤딩 등이

있다. Fig. 1의 범퍼빔의 경우에서와 같이 이종재료 또는 이종두께를 갖는 튜브를 제조하고자 하는 경우, 레이저 용접을 실시해야 하는 길이 방향의 맞대기(butt) 조인트(Fig. 1(b))의 진직도가 매우 중요하다. 박판(<2mm, 주로 1mm)의 CO₂ 레이저 용접 또는 Nd:YAG 레이저 용접의 경우 레이저 빔의 초점 위치와 용접선과의 오차가 200 μ m 이내로 유지되어야 양호한 용접결과를 얻을 수 있기 때문이다¹⁾. 길이 방향의 판재 절단 정밀도, 고강도 및 박육대경 등에 의한 성형이 어렵기 때문에 Fig. 2와 같이 맞대기 조인트부가 일직선이 아닌 약간 틀어진 경우도 있으며, 용접중에는 열에 의해 변형되는 경우도 있다. 따라서, 용접불량을 최소화하기 위해서는 튜브 용접지그의 고강성구조와 더불어 Fig. 3과 같이 용접중 용접선의 진직도 오차를 검출하여 레이저 용접 헤드의 위치를 제어함으로써 레이저 빔이 실제의 용접선을 추적하는 기술이 필요하다. 레이저 용접시 용접선 추적에 관한 논문들은^{1,2)} 평판의 경우에 국한되어 있으며, 고장력 강판으로 된 튜브의 경우에 대해서는 발표되지 않고 있다.

한편, 레이저 용접 품질을 용접 현장에서 모니터링하기 위해 주로 레이저 유도 플라즈마 광 측정³⁻⁷⁾ 음향 신호 측정,^{8,9)} 레이저의 반사광 강도 측정과¹⁰⁾ 플라즈마 전계 강도(electric field intensity) 측정¹¹⁾ 등에 대한 연구가 수행되어 왔다. 특히 플라즈마 광의 세기

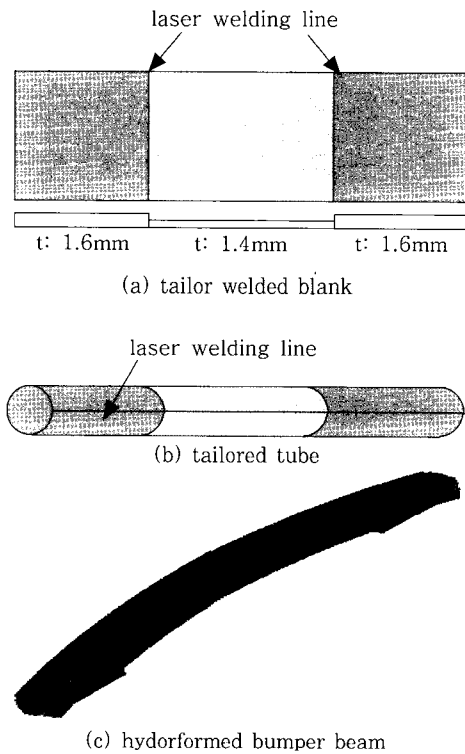


Fig. 1 One body forming process for bumper beam

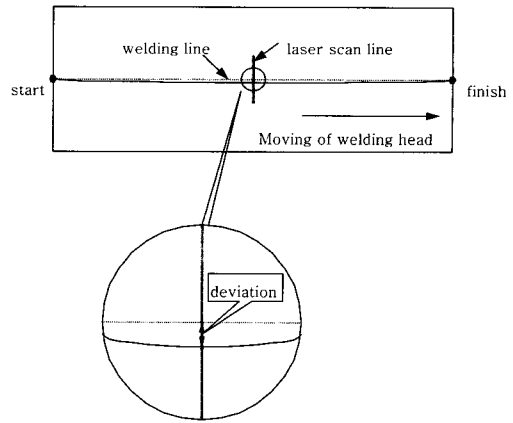


Fig. 2 Error and deviation in longitudinal welding line of tube

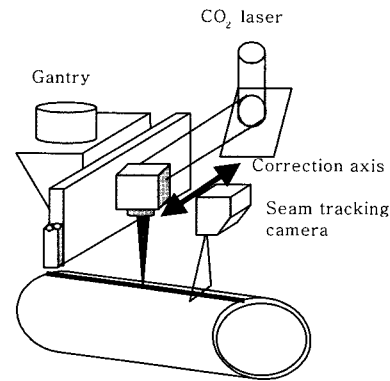


Fig. 3 Schematic diagram of seam tracking of tube

측정은 측정 장치의 단순성과 용접 조건과의 상관성이 뛰어나 많은 연구가 이루어졌으나, 주로 판재를 이용하였으며 튜브의 경우에 대한 연구결과는 보고 되지 않고 있다.

따라서, 본 연구에서는 용접선 추적 및 플라즈마 센서가 부착된 CO₂ 레이저 용접장치를 구성하고 자동차용 60kg/mm²급 고강도강판을 사용한 튜브 제작시 용접불량을 최소화하는 기술을 확보하고자 하였다.

2. 실험 방법 및 장치 구성

2.1 용접 튜브형 샘플 제작

용접용 튜브 샘플을 제작하기 위해 Photo 1의 2 roll 벤딩장치를 사용하였으며, 인장강도 60kg/mm², 두께 1.5mm의 강판 소재를 직경 105.4mm, 길이 2000mm의 튜브 형상으로 성형하였다. 실험에 사용된 재료는 자동차용 강판으로 사용되는 냉연고장력강판(SPF590)이다. Table 1에서와 같이 60kg/mm² 튜브의 경우, 스프링 백(spring back) 영향으로 성형이 매우 어려우며 용접할 조인트부의 간극(gap)은

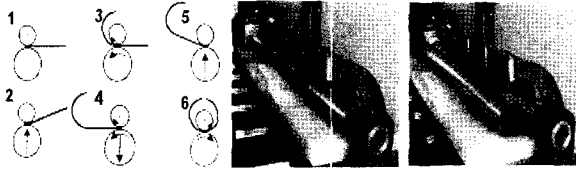


Photo 1 2 roll bending process

Table 1 Gap size of longitudinal joint by 2 roll bending

Material	Gap size(mm)	Tube shape before welding
60kg/mm ²	45	
35kg/mm ²	4	

45mm이다. 이에 비해 35kg/mm²급 튜브에서는 간극이 4mm로 매우 성형이 잘됨을 알 수 있으며, 용접지그 없이도 맞대기 조인트가 완벽히 맞대어졌다. 본 연구의 60kg/mm²급 튜브의 맞대기 조인트가 레이저 용접에 적합하기 위해서는 간극이 200 μ m 이내로 유지되어야 하므로 고강성을 갖고 회전하는 롤러에 의해 맞대기 조인트부가 강력하게 맞대어 지도록 하는 용접지그(Photo 2 참조)를 제작하여 사용하였다.

2.2 실험장치의 구성

튜브의 맞대기 용접 조인트부를 레이저 용접하기 위한 장치의 개략도는 Fig. 4와 같다. 용접 jig에 의해 튜브형 소재가 이동하면서 용접 작업이 이루어진다. 용접 지그에 투입되는 튜브형 소재의 용접 위치가 정확하게 레이저빔과 일치하지 않는 경우가 발생하므로(Fig. 2참조) 이를 보상하기 위해 용접선 추적 센서가 용접 헤드에 장착되었다. 또한, 용접중 용접 품질을 모니터링하기 위해 용접 품질 검사 장치인 플라즈마 검출기가 장착되어 있다. 용접선 추적 센서 및 용접 품질

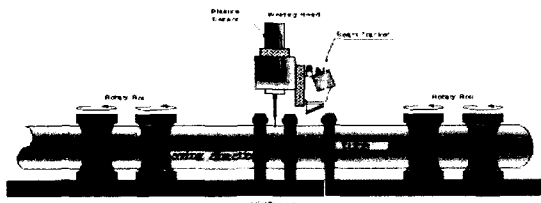


Fig. 4 Schematic diagram for laser welding head

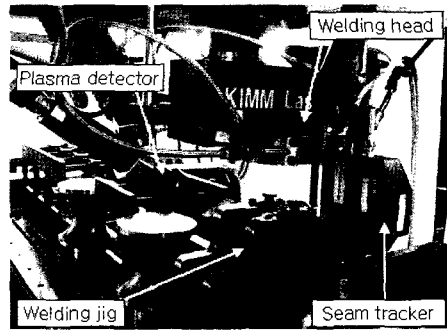


Photo 2 Laser welding head and fixture

검사 장치의 장착을 위한 용접 헤드와 용접 지그를 Photo 2에서 보여주고 있다.

Fig. 5는 레이저 용접장치의 제어를 위한 전체 구성도를 보여주고 있다. 레이저 용접 장치의 각 축 제어와 용접선 추적장치로부터 받은 입력 신호에 의해 용접 헤드의 위치 보상을 위하여 CNC를 사용하였다. 용접지그부에는 speed controller가 부착되어 회전 롤러의 회전속도에 의해 용접속도를 제어한다. 용접 위치의 보상을 위한 용접선 추적 장치에서 출력되는 아날로그 신호는 V/F converter에 의해 CNC의 입력 신호 형태에 맞도록 변환된다. 용접선 추적을 위한 레이저 비전 센서는 MVS사의 MVS-5 (laser emitter와 CCD camera 조합형)이다. 레이저 비전센서의 관측 범위는 수평 5mm, 수직 7mm, 분해능은 수평 0.01mm, 수직 0.013mm이다. 사용된 플라즈마 측정장치는 독일 JURCA사의 LWM900이며, 자기 교시 실시간 감시 시스템(self-learning real-time monitoring system)이다. 플라즈마는 국부적 열평형 상태에 있다고 알려져 왔고, 이 경우에 흑체의 스펙트럼 방출과 유사하며 Plank의 방사 법칙을 따르게 된다. 이때 복사곡선의 최대점은 Wien의 변위법칙(displacement law)을 따르며 플라즈마에서 방출되는 빛의 파장범위는 약 190~400nm¹²⁾이다. 따라서, 본 연구에서도 이 파장대에 적합한 UV 센서를 사용하여 플라즈마 세기(Plasma intensity)를 측정하였다.

이상의 튜브 레이저 용접 및 모니터링 조건은 Table 2와 같으며, 플라즈마 센서의 설치 위치는 Fig. 6과 같다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 용접선 추적기능

Photo 3은 용접선 추적 센서에 의해 추적 검출된 튜브의 용접 조인트부의 프로파일이다. 튜브의 용접선 중

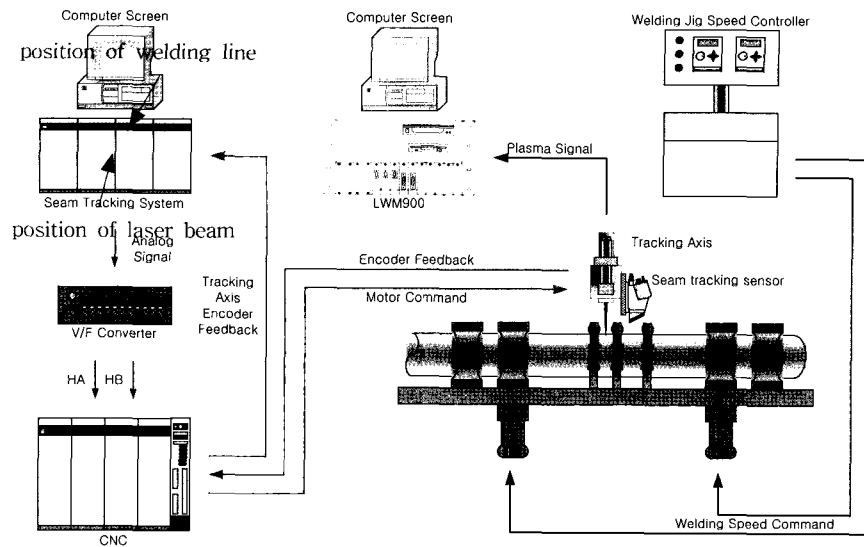


Fig. 5 Interfacing and control system for laser welding of tube

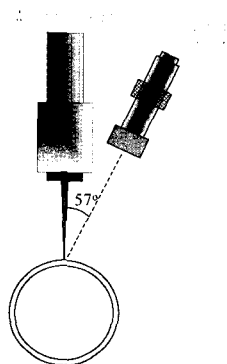


Fig. 6 Position of plasma sensor

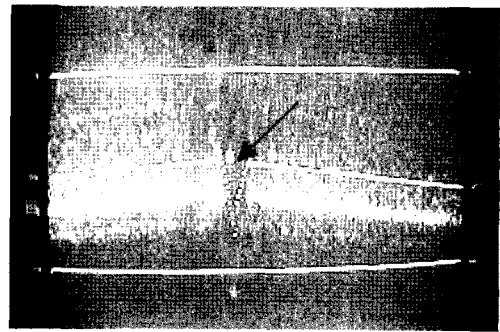


Photo 3 Segments profile of tube joint

Table 2 Experimental condition

welding distance	1600mm	
welding speed	2000mm/min	
CO ₂ laser power	2.8kW	
focal length	200mm	
focused beam diameter	500μm	
beam mode	muti-mode	
shielding gas	Ar(30 l/min)	
distance from laser beam and laser vision sensor	110mm	
sampling frequency	60Hz	
plasma sensor(see Fig. 6)	distance	180mm
	angle	57°

심 위치(→)를 정확히 보여주고 있다.

튜브 소재를 용접 지그에 투입하여 이동시키면 소재의 진행 방향에 대해 용접선이 약간 회전하는 경우가

발생하였다. 이러한 경우, 레이저빔과 용접선의 위치가 Fig. 7과 같이 일치하지 않게 되어 용접이 되지 않으며, 레이저빔의 위치 변화가 미세하게 발생하는 이유는 추적장치와 인터페이스가 되지 않은 상태에서 자체 노이즈가 발생하기 때문이다. 용접선 위치 보상 기능을 작동시킨 후에는 Fig. 8에서 알 수 있듯이 레이저빔 위치와 용접선 위치가 잘 일치함을 알 수 있으며, 약간의 오차가 있는 것은 motion loop의 응답성과 관련이 있으며 레이저빔의 직경과 비교해 보면 무시할 수 있는 오차이다.

3.2 플라즈마 측정

레이저 용접에 있어서 용접품질을 보증하기 위해서는 레이저 용접부에 대한 품질을 예측할 수 있는 정량적인 평가방법이 매우 중요하다. 본 연구에서는 레이저의 용접시 발생하는 플라즈마를 측정하는 방법을 선택하였다. Table 3은 플라즈마 센서의 사양이다.

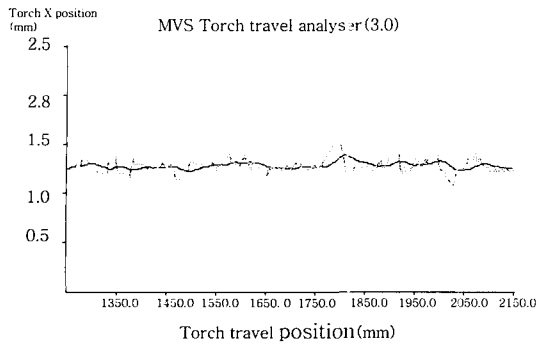


Fig. 7 Deviation of laser beam and welding line

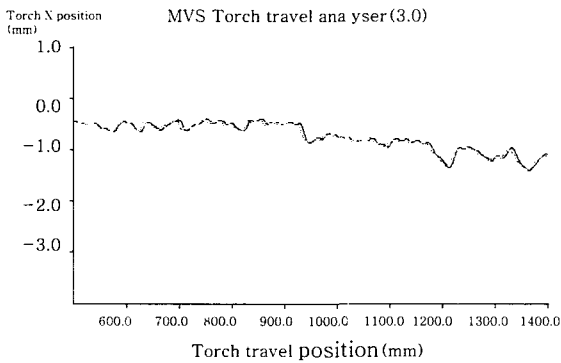


Fig. 8 Seam tracked welding line

용접 품질 검사를 하기 위해 먼저 판단을 위한 플라즈마 강도의 기준값을 설정하여야 한다. 실험에 사용한 플라즈마 센서는 같은 조건의 실험을 5번 반복하여 그 값의 평균값을 기준값(reference)으로 설정하도록 시스템이 구성되어 있다. 그래서 많은 용접을 수행하여 얻은 용접실험결과(예로 Fig. 9의 실험 데이터)를 가지고 그중에서 양호한 5개의 표본을 추출하여 평균을 내어 플라즈마 센서 신호의 기준(reference)으로 설정하였다. Fig. 9는 기준값을 설정하기 위한 플라즈마 신호 검출 그래프들이다. Fig. 9의 5개의 표본으로부터 기준값을 설정한다. 기준값의 상한과 하한은 반복 실험을 통해 튜브를 용접한 후 용접부를 검사하여 용접결함, 용입불량 등을 판별하여 결정하였다. 불완전 용입, 용접결함 등이 발생하는 튜브의 플라즈마 강도값과 양호한 조건의 플라즈마 강도값을 둘다 평가하여 용접결함이 발생하지 않는 완전용입이 되는 조건의 기준영역을 찾았다. 반복 실험을 통해 용접불량이 발견되지 않는 영역과 일치하는 변동폭이 기준값의 $\pm 30\%$ 영역이었다. 기준값의 상한과 하한은 -30% 에서 $+30\%$ 로 설정하였고 그 결과는 Fig. 10과 같다. Fig. 10에서 플라즈마 강도의 기준값과 상한 및 하한을 볼 수 있다. 플라즈마

Table 3 Specification of plasma sensor

Item	Specification
Light wavelength of UV-measuring range	< 400nm(for CO ₂ -Lasers)
Real time signal processing	DC up to 20kHz
Line voltage (standard)	120-230Vac 50-60Hz $\pm 10\%$
Connections to laser welding machine	24Vdc (isolated)
Dimensions of LWM (length/height/dept./weight)	480/310/460mm/35kg (19" industrial rack)
Dimensions of detector heads(length/diameter)	160/30mm or customer specific

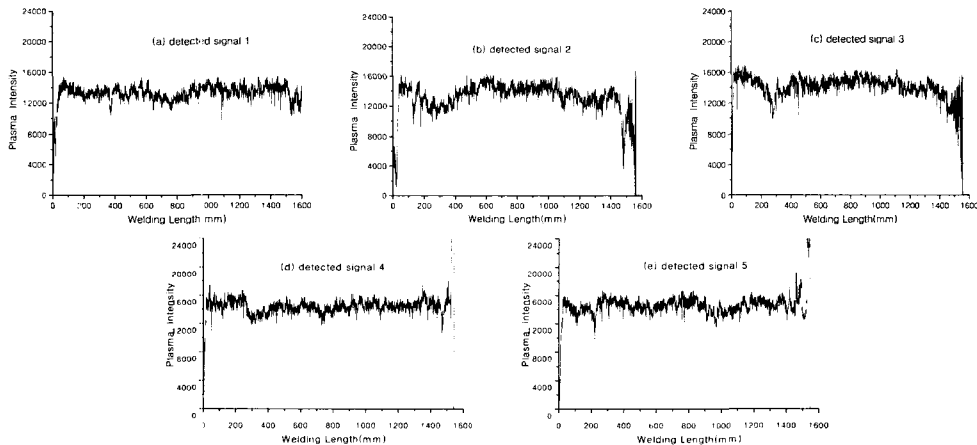


Fig. 9 Experimental data for reference value of plasma intensity

강도가 최대 및 최소값 영역 내부에 존재하면 양호한 용접결과를 보여주게 된다.

튜브의 맞대기 조인트상에 약 250mm 간격으로 5개의 인위적인 불규칙한 홀(직경<1mm) 결합을 형성시켜 용접을 실시한 결과 플라즈마 신호는 Fig. 11과 같이 나타났다. 홀이 있는 위치에서 플라즈마 신호가 5번 급격하게 변화하는 것을 볼 수 있으며 이는 플라즈마가

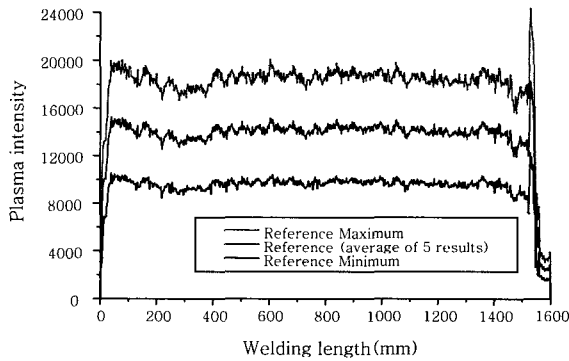


Fig. 10 Reference Max. and Min. values of plasma intensity

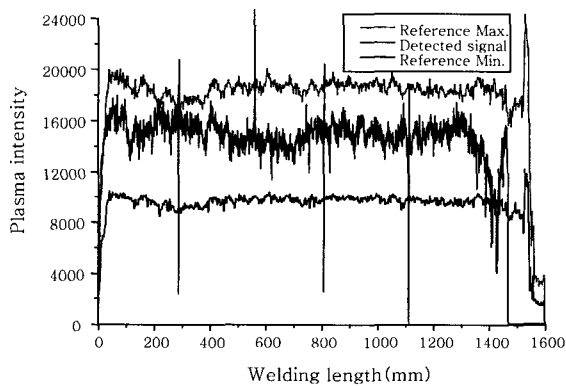


Fig. 11 Plasma intensity variation at 5 hole defects

불안정한 상태로 용접결합부를 의미한다. 그래프상에서 1~4번째는 플라즈마 신호가 짧은 시간 동안 급격히 떨어졌다 상승하면서 수직선처럼 보인다. 1~5번째 모두 안정영역을 이탈하여 용접품질에 문제가 있음을 보여 준다. 1번째, 3번째, 4번째 플라즈마 신호는 홀에서 키홀이 소멸되면서 급격히 플라즈마 강도가 하한 아래로 떨어졌다 다시 키홀이 생성되면서 불완전용입이 되고 플라즈마가 불안정한 상태여서 급격히 상한으로 상승하였다 안정한 상태로 유지되는 부분이다. 2번째 피크는 키홀이 어느 정도 유지가 되고 불완전용입이 되어 불안정한 상태로 급격히 플라즈마 강도가 상한 위로 상승하였다가 키홀이 안정화 되면서 안정영역으로 떨어진 경우로 홀을 기계가공하지 않고 줄을 가지고 인위적으로 발생시켜서 홀 부분에서 키홀이 계속 유지가 된 경우이다. 5번째의 경우는 성형된 튜브의 앞부분이 용접이 되어 지그에 의해 앞으로 배출이 되고 나면 뒤부분은 지그에 의해 용접부의 맞물림이 잘 되질 않아 갭이 크게 벌어져 급격히 하한으로 플라즈마 강도가 감소한 경우이다. 용접이 불완전하게 이루어진 홀 결합에서의 용접 형상은 Photo 4와 같다.

용접선 추적 기능 및 플라즈마 센서를 작동시키면서 레이저 용접을 수행하는 장면을 Photo 5에서 보여주고 있으며, 용접불량이 전혀 감지되지 않은 상태에서 용접된 튜브를 Photo 6에서 볼 수 있다. 본 연구에서 제작된 레이저 용접튜브(Korea)와 동일한 강판을 사용한 외국사(Germay) 제품의 마이크로 비커스 경도값(하중: 100g)의 비교를 Fig. 12에서 보여주고 있다. 최대 경도값의 차이는 있으나 용접부에서 경도값의 분포 형상은 유사하다. 하이드로포밍 장치를 이용한 튜브의 내압성형 실험결과인 Photo 7을 보면 본 연구에서 제작된 레이저 용접튜브(K)와 외국사(G) 제품은 모두 용

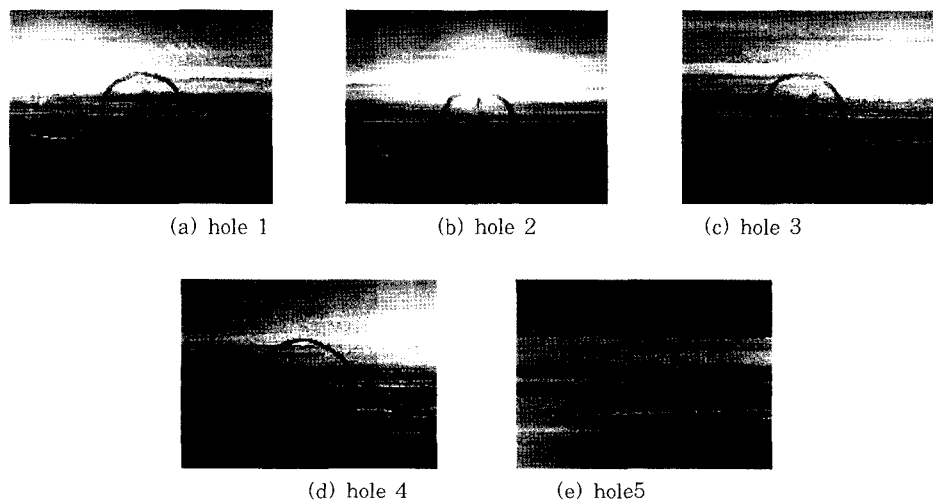


Photo 4 Poor welding quality at hole defects



Photo 5 Laser welding of tube

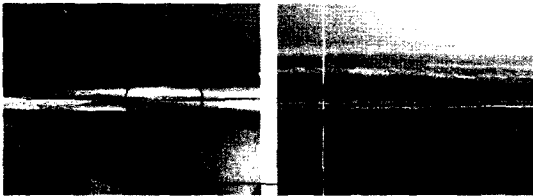


Photo 6 Laser welded tube with good welding quality

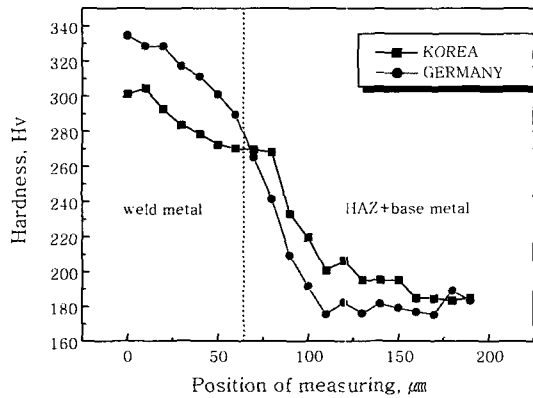


Fig. 12 Comparison of hardness distribution

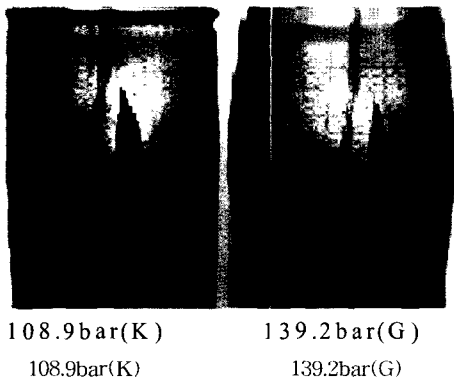


Photo 7 Fractured tubes by hydroforming

접부가 아닌 모재에서 파괴가 일어나므로 용접부는 매우 양호하다고 할 수 있으며 외국제품이 좀 더 높은 내압에서 파괴가 일어났다. 외국제품의 튜브 성형방법과 레이저 용접조건이 본 연구와 다르며 그 쪽에서 알려주지 않아 본 연구에서 제작한 튜브와 외국제품을 비교하기 위해 용접부를 절단하였다. 용접한 튜브를 절단하여 간극을 측정하여 본 연구에서 제작한 튜브

의 간극 보다 작았다. (용접전 간극: 45mm(K), 25mm(G))

4. 결론 및 추후 방안

본 연구에서는 CO₂ 레이저를 이용한 용접 튜브 제조 공정 중 튜브의 길이 방향으로의 맞대기 조인트부의 용접선 추적 및 용접 품질 모니터링에 관하여 연구하였으며, 그 결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

1) 튜브의 길이 방향의 맞대기 조인트 용접을 위해 용접선 추적장치와 플라즈마 센서를 부착한 CO₂ 레이저 용접장치를 구성하였다.

2) 용접선 추적장치에서 나오는 위치 신호를 레이저 용접헤드 구동축을 제어하는 CNC로 보내어 용접선과 레이저 빔의 위치를 일치화시키도록 하여 정밀하게 용접선을 추적할 수 있었으며, UV 파장대의 플라즈마 강도를 측정된 신호로부터 인위적 결함(φ1mm)을 감지하여 용접품질을 모니터링할 수 있었다.

3) 2 roll 벤딩공법과 CO₂ 레이저 용접에 의해 두께 1.5mm, 지름 105.4mm, 길이 2000mm인 자동차 범퍼비용 60kgf/mm²급 고강도 레이저 용접 튜브 제조기술을 확보하였다.

후 기

본 연구는 21C 프론티어 연구개발 사업(차세대 소재 성형기술)의 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. F. Coste, P. Aubry, R. Fabbro, T. Dubois, "A Rapid Seam Tracking device for YAG and CO₂ high speed Laser Welding," Section F-ICALEO 1998, 217-223, 1998
2. P. Aubry, F. Coste, R. Fabbro, D. Frechett, "2D YAG welding on non-linear trajectories with 3D camera seam tracker following for automotive applications," Laser Appls. Auto Industry, Section F-ICALEO 2000, 21-27, 2000
3. E. Beyer and P. Abels, "Process Monitoring in Laser Materials Processing", Laser Advanced Materials Processing(LAMP92), 433-438, 1992
4. 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(1995), 719-728,
5. W. Gatzweiler, D.Maischner, E. Beyer, "On-line Plasma Diagnostics for Process-control in Welding with CO₂ Laser", SPIE, 1020, 142-148, 1998
6. 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.
7. Gi-Jung Nam, Ki-Young Park and Kyoung-Don Lee, "Study on the Characteristics of the Plasma Induced by Lap-joint CO₂ Laser Welding of Automotive Steel Sheets", Journal of KSLP, 5-1 (2002), 33-42 (in Korean)
 8. L. Li, W. M. Steen, "Non-Contact Acoustic Emission Monitoring During Laser Processing", ICALEO '92, Laser Institute of America, 719-728, 1992.
 9. H. Gu and W.W. Duley, "Resonant Acoustic Emission During Laser Welding of Metals", J. of Phys. D :Appl. Phys., 29, 550-555, 1996
 10. T. Ishide et al, "High Power YAG Laser Welding and Its In-Process Monitoring Using Optical Fibers", Proc. ECLAT, 183-192, 1994
 11. 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, 719-728, 1992
 12. M. Ono, K. Nakada, and S. Kosuge, " An Investigation on CO₂ Laser-Induced Plasma," Journal of JWS, 10-2(1992), 239-245 (in Japanese)