

레이저 용접튜브를 이용한 자동차 범퍼빔 개발

서 정* · 이재훈* ·
이문용** · 정병훈**

*한국기계연구원 레이저용접시스템그룹
** (주)성우하이텍 기술연구소

1. 서 론

일체화 성형기술중 관액압성형(tubular hydroforming)기술은 복잡한 형상의 부품 제작을 1회의 공정에 의해 최종형상으로 생산할 수 있다. 이 기술의 소재인 튜브(tube)는 고주파전기저항용접(HF-ERW, high frequency electric resistance welding)으로 제조되어 engine cradle과 instrumental panel beam 등 자동차 샤시류에 적용되고 있다.

최근에는 액압성형에 의한 자동차 부품의 개발이 점차 샤시류에서 차체류로 확대될 전망이다. 박육대경(thin thickness and large diameter)의 튜브가 요구되고 있다. 따라서, ERW 방식에만 의존하던 튜브 제조방법으로는 요구되는 조건을 만족시키기 어렵다. 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 용접튜브(Laser Welded Tube) 제조는 필수적이라고 할 수 있다. 또한, 프레스 공법으로 만들어진 부분품을 용접으로 접합하여 제품으로 조립하는 기존의 공정에 비해 일체화 성형기술은 1회의 단순공정으로 부품 성형함으로써 경량화 및 부품수 감소가 가능하며 소요 제작비를 동시에 줄일 수 있는 장점이 있다.

이상의 장점이 예측되는 자동차 부품으로는 범퍼빔이 그 대상이 될 수 있다. 한국기계연구원과 (주)성우하이텍은 레이저 용접튜브 생산공정 최적화를 연구중에 있으며, 본 연구는 일체화 성형용 자동차 범퍼빔용 레이저 용접튜브 제조기술 및 장치에 관한 기술 개발현황에 관한 것이다.

2. 일체화 성형 튜브 사양 및 제조공정

일반적으로 자동차 범퍼의 구조는 Fig. 1과 같이 범퍼 커버(bumper cover), 충격 흡수재(energy absorber), 범퍼빔(bumper beam), 차체연결부(stay) 등으로 구성되며, 각 부품들은 프레스공법으로 제작된다. 한편, 일체화 성형용 튜브를 사용하게 되면 범퍼의 구조는 Fig. 2와 같이 매우 단순화되며, 부품수의 절감 및 경량화를 추구할 수 있게 된다. 특히, 범퍼빔의 형상은 Fig. 2의 상부그림과 같이 된다.

범퍼에 대한 기본설계를 바탕으로 center pendulum 충돌해석을 통하여 범퍼빔의 최적 단면형상을 찾아내고 성능만족 여부를 평가하였다. 복미 법규 FMVSS(REG, 581)에 근거하여 차량중량

실제 시험속도보다 약간 높은 5.2km/h의 1,350kg을 범퍼시스템 및 진자에 부여하고, 초기속도를 충격 진자의 모든 절점에 적용시켰다. 범퍼빔의 재료는 인장강도 60kgf/mm²급인 냉간고장력강판이다. 해석결과, 본 연구의 범퍼빔 성형에 필요한 레이저 용접 튜브는 직경(ϕ) 105.4mm, 두께(t) 1.4mm, 길이(ℓ) 2000mm로 결정될 수 있었다.

튜브 형상으로 성형하는 공정에는 UO-벤딩, 프레스 절곡(bending on press brake), 연속 롤포밍, 3 또는 2 roll 벤딩 등이 있다. 레이저 용접시 성형된 튜브 형상이 매우 중요하며 레이저 용접 품질을 결정하는 중요한 변수중 하나이다. 레이저 용접을 실시하는 조인트부의 대표적인 문제점은 Fig. 3과 4로 요약될 수 있다. 튜브 단면의 정형화 및 길이 방향의 맞대기(butt) 조인트의 진직도가 매우 중요하다.

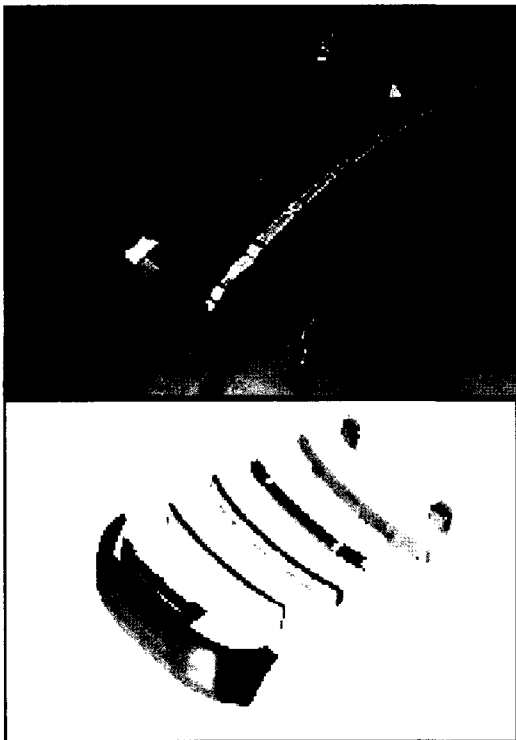


Fig. 1 Press-formed bumper

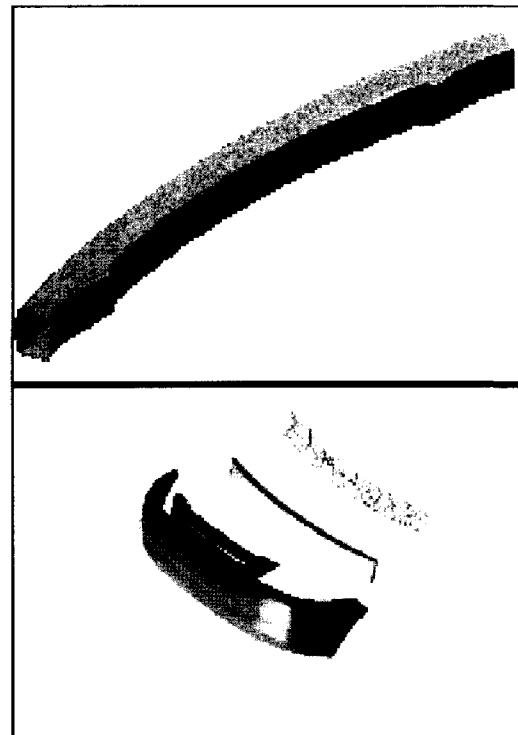


Fig. 2 One-Body formed bumper

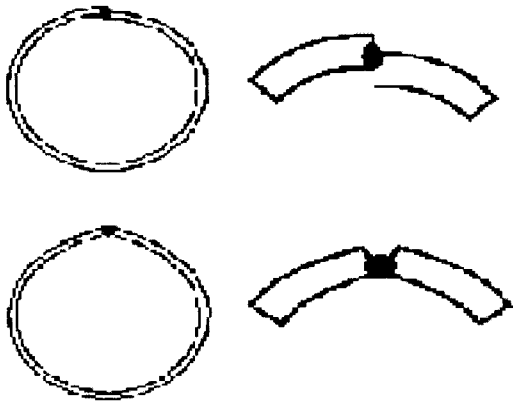


Fig. 3 Welding joints

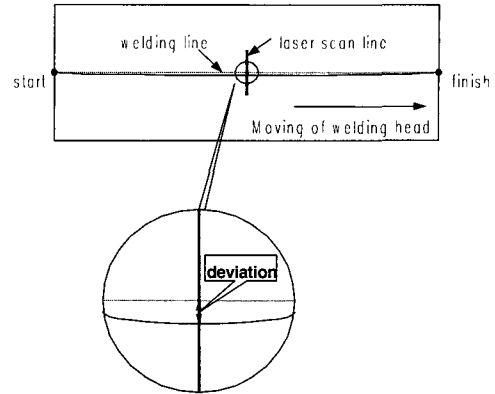


Fig. 4 Error and deviation in longitudinal welding line of tube

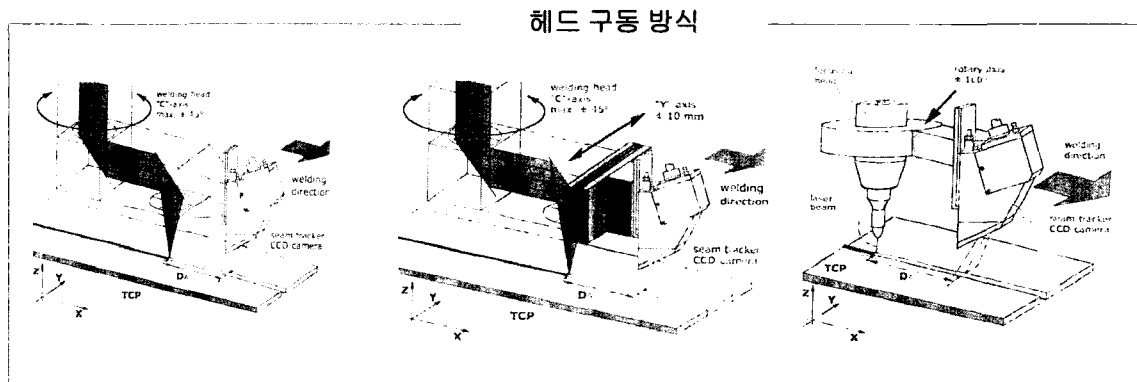


Fig. 5 Various moving types of laser welding head

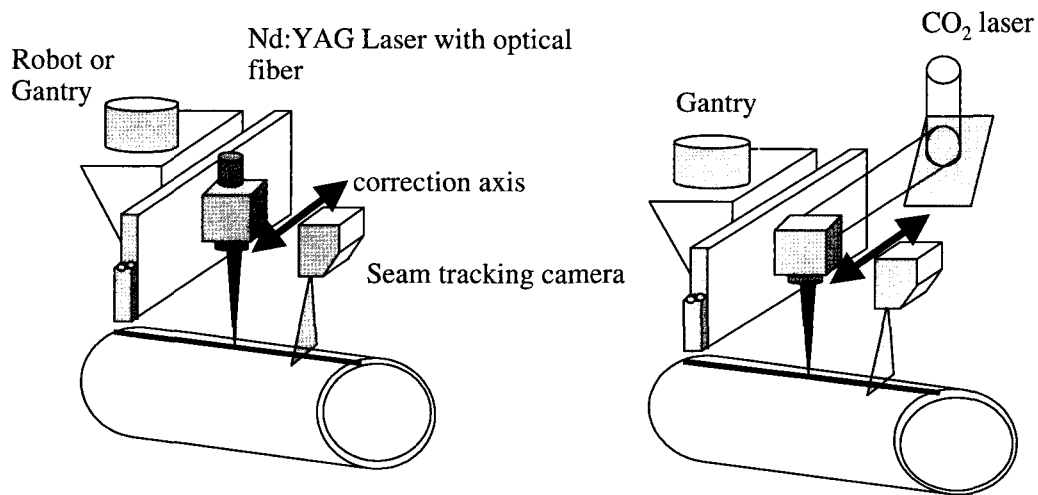


Fig. 6 Schematic diagram of seam tracking of tube

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 때문이다.¹⁾ 길이 방향의 판재 절단 정밀도, 고강도 및 박육대경 등에 의한 난성형성으로 Fig. 4와 같이 맞대기 조인트부가 일직선이 아닌 약간 틀어진 경우도 있으며, 용접중에는 열에 의해 변형하는 경우도 있다. 따라서, 이러한 조인트 문제점을 극복할 수 있는 튜브 성형장치 및 용접장치의 개발이 필요하다. 용접불량을 최소화하기 위해서는 튜브 용접지그의 고강성구조와 더불어 용접중 용접선의 진직도 오차를 검출하여 레이저 용접 헤드의 위치를 제어함으로써 레이저 빔이 실제의 용접선을 추적하는 기술이 필요하다. 용접선 추적방식에는 Fig. 5와 같이 여러 가지 구성방식이 있을 수 있으며, 튜브를 레이저 용접하는 경우 Fig. 6과 같이 구성될 수도 있을 것이다.

레이저 용접시 용접선 추적에 관한 논문들은^{1,2)} 평판의 경우에 국한되어 있으며, 고강력 강판으로된 튜브의 경우에 대해서는 발표되지 않고 있다. 한편, 레이저 용접 품질을 용접 현장에서 실시간으로 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 측정은 측정 장치의 단순성과 용접 조건과의 상관성이 뛰어나 많은 연구가 이루어졌으나, 주로 판재를 이용하였으며 튜브의 경우에 대한 연구결과는 보고 되지 않고 있다.

3. 성형장치 개발 현황

Fig. 7~10은 튜브 형상으로 성형하는 공정인 UO-벤딩, 프레스 절곡(bending on press brake), 연속 롤포밍, 3 또는 2 roll 벤딩에 관한 금형 및 장치를 보여주고 있으며, 튜브 성형한 결과는 Table 1과 같다. UO-벤딩 금형을 사용하는 경우, 1차 성형한 후 추가적으로 다단 프레스링 공정이 필요하였으며, 특히, 60kgf/mm²급 튜브는 UO-벤딩 공정 금형의 제작이 매우 어려워 적용할 수 없었다. 다단 연속 롤포밍 방식은 강판 코일로부터 연속적인 조관작업이 가능하다. 연속 생산성(동일 두께의 직관형 튜브)에 적합한 다단 롤포밍으로 성형된 60kgf/mm²급 튜브의 간극은 press brake 절곡결과와 유사한 50mm의 간극을 보이나, 외국의 WEIL사 제품의 간극 20mm보다는 큼을 알 수 있었다. 3 roll bending에서는 60kgf/mm²급 튜브는 스프링 백의 영향으로 간극이 57mm로 큼을 알 수 있다. UO 벤딩, 프레스 절곡, 다단 연속롤 포밍, 3 roll bending 공법에서 35kgf/mm²급 튜브 성형에서는 최소 15mm의 간극을 확보할 수 있었으며, 60kgf/mm²급 튜브 성형에서는 최소 50mm의 간극을 얻을 수 있었다. 성형 간극을 축소시키기 위해 3 roll 벤딩 장치를 수정하여 Fig. 10과 같이 2 roll 벤딩 공법을 개발하였다.

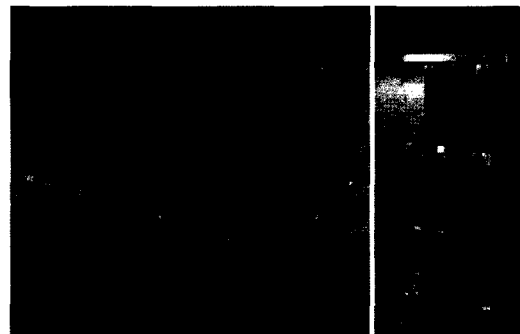


Fig. 7 UO-Bending Jig

인장강도 60kgf/mm², 두께 1.4mm의 강판 소재를 직경 105.4mm, 길이 2,000mm의 튜브 형상으로 2 roll 성형한 결과 60kgf/mm² 튜브의 경우, 스프링 백(spring back) 영향으로 조인트부의 간극(gap)은 45mm이다. 이에 비해 35kgf/mm²급 튜브에서는 간극이 4mm로 매우 성형이 잘됨을 알 수 있으며, 용접지

그 없이도 맞대기 조인트가 완벽히 맞대어 졌다. 본 연구의 60kgf/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 용접지그를 제작하여야 한다.



Fig. 8 Continuous roll forming

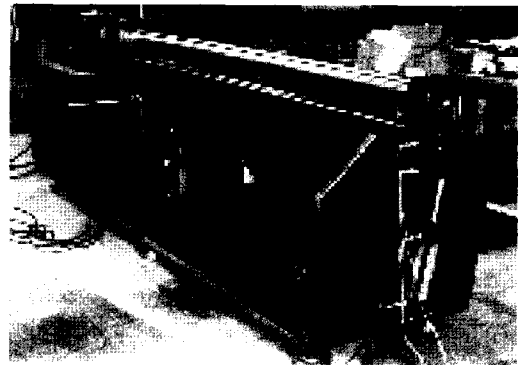


Fig. 9 Three roll bending system



Fig. 10 2 roll bending process

Table 1 Gap sizes of longitudinal joint by various processes

material	process	gap size(mm)	tube shape by 2 roll bending
60kgf/mm ²	continuous roll forming	50-65	
	press brake	55-60	
	3 roll bending	57	
	2 roll bending	45	
35kgf/mm ²	U0 bending	15	
	press brake	25-30	
	3 roll bending	25	
	2 roll bending	4	

4. 용접장치 개발 현황

튜브의 맞대기 용접 조인트부를 레이저 용접하기 위한 장치의 구성 및 제어를 위한 전체 구성도는 Fig. 11과 같다. 용접지그의 회전롤러에 의해 튜브 소재가 이동하면서 용접 작업이 이루어진다. 용접 지그에 투입되는 튜브형 소재의 용접 위치가 정확하게 레이저빔과 일치하지 않는 경우가 발생하므로 이를 보상하기 위해 용접선

추적 센서가 용접 헤드에 장착되었다. 또한, 용접중 용접 품질을 모니터링하기 위해 용접 품질 검사 장치인 플라즈마 검출기가 장착되어 있다.

레이저 용접 장치의 각 축 제어와 용접선 추적장치로 부터 받은 입력 신호에 의해 용접 헤드의 위치 보상을 위하여 CNC를 사용하였다. 용접 위치의 보상을 위한 용접선 추적 장치에서 출력되는 아날로그 신호는 V/F converter에 의해 CNC의 입력

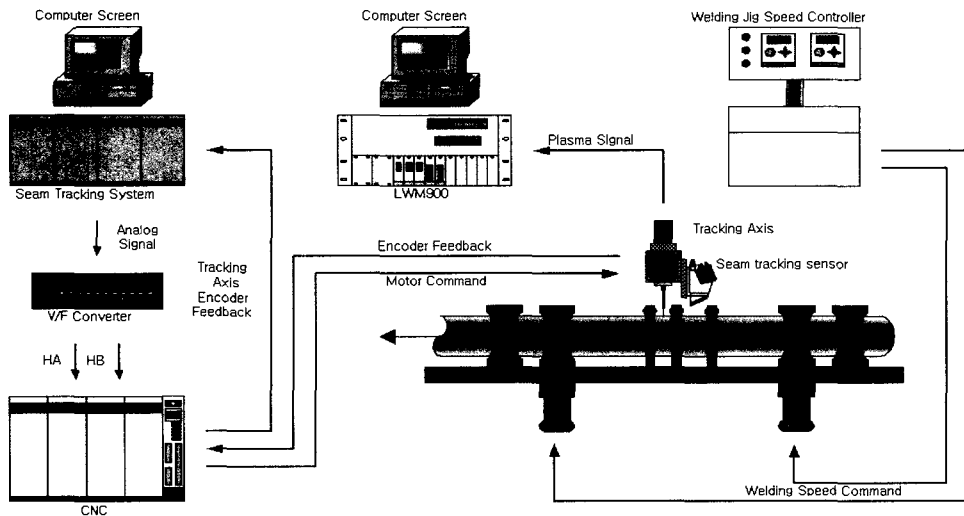


Fig. 11 Interfacing and control system for laser welding

Table 2 Experimental condition.

welding distance	1600mm	
welding speed	2000mm/min	
CO ₂ laser power (max. 4kW)	2.8kW	
focal length	200mm	
focused beam diameter	500 μ m	
beam mode	muti-mode	
shielding gas	Ar(30 l/min)	
distance from laser beam and laser vision sensor	110mm	
sampling frequency	60Hz	
plasma sensor	distance	180mm
	angle	57°

신호 형태에 맞도록 변환된다. 용접선 추적
을 위한 레이저 비전 센서로는 MVS사의
MVS-5(laser emitter와 CCD camera 조합
형)를 사용하였다. 플라즈마 측정장치는 독
일 JURCA사의 LWM900이다. 레이저 용
접시 플라즈마는 흑체의 스펙트럼 방출과
유사하며 Plank의 방사 법칙을 따르게 된
다. 이때 복사곡선의 최대점은 Wien의 변
위법칙(displacement law)을 따르며 플라즈
마에서 방출되는 빛의 파장범위는 약 19
0~400nm¹²⁾이다. 따라서, 이 파장대에 적
합한 UV 센서를 사용하여 플라즈마 세기
(Plasma intensity)를 측정할 수 있다. 튜브
의 레이저 용접 및 모니터링 조건은 Table
2와 같다.

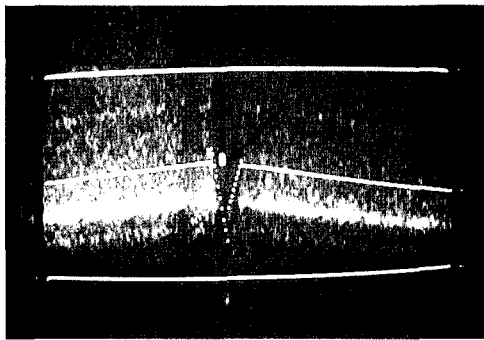


Fig. 12 Segments profile of tube joint

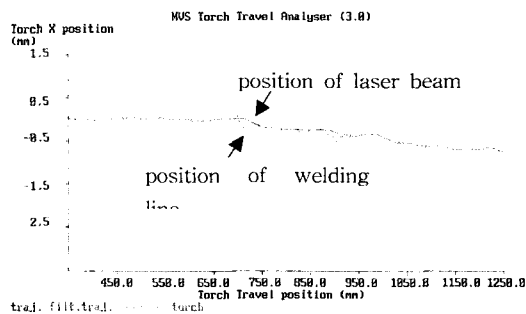


Fig. 13 Deviation of laser beam and welding line

Fig. 12는 용접선 추적 센서에 의해 추
적 검출된 튜브의 용접 조인트부의
Segments Profile이다. Segments Profile은
Rounding Profile에서 특징점을 추출하여
특징점을 서로 연결한 형태로 프로파일을
얻는다. 튜브의 용접선 중심 위치(→)를
정확히 보여주고 있다. 튜브 소재가 용접
지그에 투입하여 이동시키면 소재가 진행
방향에 대해 용접선이 약간 회전하는 경우
가 발생하였다. 이러한 경우, 레이저빔과
용접선의 위치가 Fig. 13과 같이 일치하지
않게 되어 용접이 되지 않는다. 용접선 위
치 보상 기능을 작동시킨 후에는 Fig. 14에
서 알 수 있듯이 레이저빔 위치와 용접선
위치가 잘 일치함을 알 수 있다. 약간의 오
차가 있는 것은 motion loop의 응답성과
관련이 있으며 레이저빔의 직경과 비교해
보면 무시할 수 있는 오차이다.

레이저 용접시 플라즈마를 이용한 용접
품질 모니터링을 위해서는 먼저 판단을 위
한 플라즈마 강도의 기준값을 설정하여야
한다. 기준값을 설정하기 위해 5회에 걸쳐
용접을 실행하였다. 5개의 표본으로부터 기
준값의 상한과 하한은 일반적으로 -30%에
서 +30%로 설정되는 것이 실험적으로 검
증되었으며, 그 결과는 Fig. 15와 같다. 용

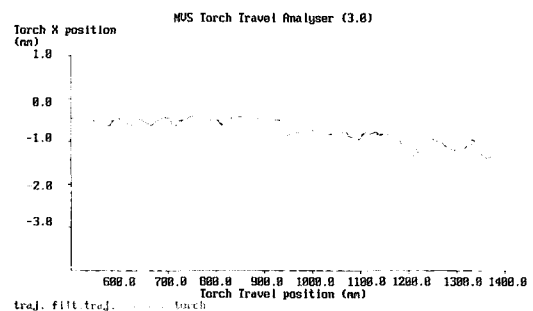


Fig. 14 Seam tracked welding line

접중 발생하는 플라즈마 강도가 최대 및 최소값 영역 내부에 존재하면 양호한 용접 결과를 보여주게 된다. 용접불량시 플라즈마 강도 변화를 측정하기 위하여 튜브의 맞대기 조인트상에 약 250mm 간격으로 5개의 인위적인 홀(직경<1mm) 결함을 형성시켜 용접을 실시하였으며, 그 결과 플라즈마 신호는 Fig. 16과 같이 나타났다. 홀이 있는 위치에서 플라즈마 신호가 5번 급격하게 변화하는 것을 볼 수 있으며 이는 용접이 제대로 되지 않은 플라즈마가 단락됨

으로써 나타나는 것으로 용접결합부를 의미한다. 일반적으로 플라즈마 강도가 최소값보다 아래로 내려가는 경우는 기공 또는 seam contraction에 의한 것이며, 최대값보다 크게 나타나는 것은 용융부족 또는 splash 현상에 기인한다. 용접선 추적 기능 및 플라즈마 센서를 작동시키면서 레이저 용접을 수행하는 장면을 Fig. 17에서 보여주고 있으며, 용접된 튜브에서 용접부의 단면을 광학현미경으로 조사한 결과 매우 양호함을 알 수 있었다.

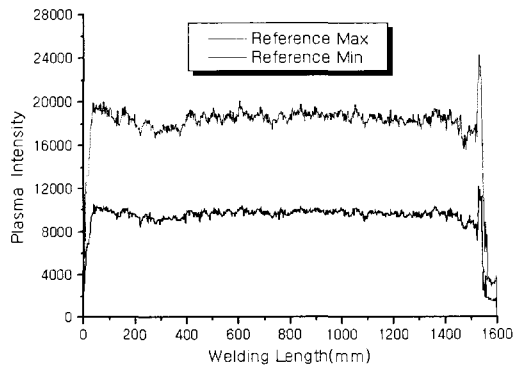


Fig. 15 Reference Max. and Min. values of plasma intensity

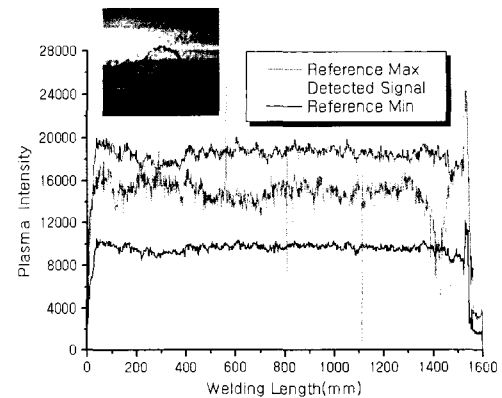
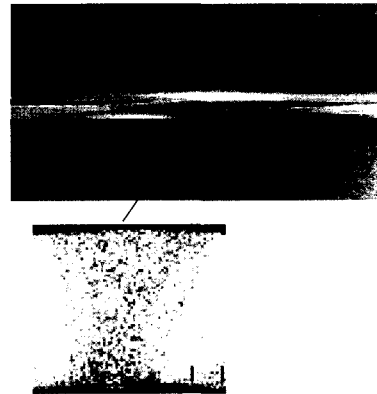


Fig. 16 Plasma intensity variation at 5 hole defects



Fig. 17 Laser welded tube with good welding quality



5. 고찰

일체화 성형 범퍼빔 개발을 위하여 인장강도 60kgf/mm²급 강판에서 레이저 용접 튜브를 제조하는 기술 및 장치개발에 중점을 두고 연구를 수행하고 있으며, 용접 불량률 최소화를 위한 기초자료를 확보할 수 있었다.

본 연구를 통하여 제작된 레이저 용접 튜브를 일체화 성형한 범퍼빔 시제품(Fig. 18)으로부터 개발된 레이저 용접 튜브는 자동차용 일체화 성형부품용 원재료로 사용될 수 있음을 제시하고 있으며, 구성된 레이저 용접 장치는 레이저 용접튜브의 용접불량을 최소화하는데 적합함을 알 수 있다.

고강도강의 스프링백 영향으로 용접할 맞대기 조인트부의 간극의 크기는 용접후의 잔류응력에 영향을 주므로 이는 곧 액압성형성을 감소시키게 된다. 따라서, 조인

트 간극을 좀더 줄일 수 있는 기술이 필요하다. 기존 양산중인 범퍼빔을 기본 모델로 하여 이와 비교해 보았을 때, 일체화 성형된 범퍼빔은 구조성능이 동등이상이고 경량화가 가능하였다. 즉, 내부 보강부품을 줄여 부품수가 5개에서 1개로 감소했으며, 전체 빔 중량 또한 기존 제품보다 13% 정도 감량되는 효과와 원가적인 측면에 있어서도 약 6%의 절감효과를 볼 수 있을 것으로 기대된다. 이러한 외형적 요소뿐만 아니라 조립품질 향상 및 생산성 측면에서도 상당한 시너지 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 21C 프론티어 연구개발사업 “차세대소재성형기술개발사업”의 지원하에 수행되었습니다.

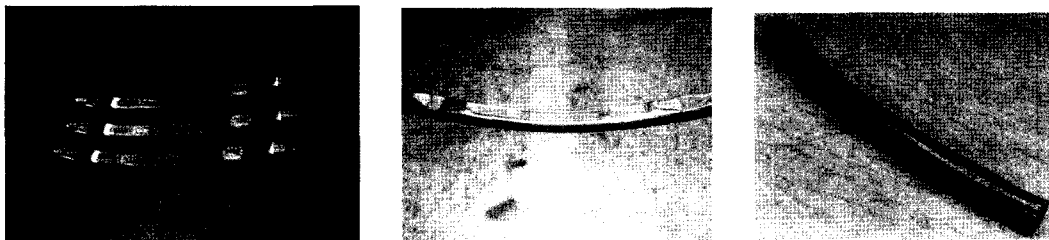


Fig. 18 One-body formed bumper beam

참고 문헌

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, pp.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, pp.21~27 (2000).
3. E. Beyer and P. Abels, "Process Monitoring in Laser Materials Processing", Laser Advanced Materials Processing(LAMP92), pp433-438 (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, pp719-728 (1995).
5. W. Gatzweiler, D.Maischner, E. Beyer, "On-line Plasma Diagnostics for Process-control in Welding with CO₂ Laser", SPIE, 1020, pp142-148 (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. 남기중, 박기영, 이경돈, "자동차용 강판의 겹치기 CO₂ 레이저 용접에서 발생하는 플라즈마 특성에 관한 연구", 한국레이저가공학회지 제5권 제1호 pp.33~42 (2002)
8. L. Li, W. M. Steen, "Non-Contact Acoustic Emission Monitoring During Laser Processing", ICALEO '92, Laser Institute of America, pp719-728 (1992).
9. H. Gu and W.W. Duley, "Resonant Acoustic Emission During Laser Welding of Metals", J. of Phys. D : Appl. Phys., 29, pp550-555, 1996.
10. T. Ishide et al, "High Power YAG Laser Welding and Its In-Process Monitoring Using Optical Fibers", Proc. ECLAT, pp183-192 (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, pp719-728 (1992).
12. M. Ono, K. Nakada, and S. Kosuge, "An Investigation on CO₂ Laser-Induced Plasma," 日本溶接學會論文集, Vol. 10, No. 2 pp.239~245, (1992)