한국정밀공학회지 제21권 제7호 (2004년 7월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 21, No. 7, July 2004.

60kgf/㎟급 자동차 범퍼빔용 레이저 용접 튜브 제조기술 및 장치연구

서 정*, 이제훈*, 김종수*, 김정오*, 강희신#, 이문용**, 정병훈**

Production of Laser Welded Tube for Automobile Bumper Beam from 60kgf/㎟ Grade Steel Sheet

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

ABSTRACT

Optimal process and system to produce the laser welded tube for one body formed bumper beam are studied. The calculated size of tube is a thickness of 1.4㎜, diameter of 105.4㎜ and length of 2000㎜. The tube is shaped from a cold rolled high strength steel sheet(tensile strength: 60kgf/㎟ grade). Two roll bending method is the optimal tube shaping process compared to UO-bending, bending on press brake, multi-step continuous roll forming and 3 roll bending methods. Weld quality monitoring and seam tracking along the butt-joint lengthwise to the tube axis are also studied. The longitudinal butt-joint is welded by the CO_2 laser welding system equipped with a seam tracker and plasma sensor. The constructed CO_2 laser tube welding system can be used for the precision seam tracking and the real-time monitoring of weld quality. Finally, the obtained laser welded tube can be used for one-body formed automobile bumper beam.

Key Words : Laser welded tube, Bumper beam, Seam tracking, Real-time quality monitoring

1. 서론

일체화 성형기술 중 관액압성형 (tubular hydro-forming) 기술은 복잡한 형상의 부품제작을 1회의 공정에 의해 최종형상으로 생산할 수 있다. 이 기술의 소재로 쓰이는 튜브(tube)는 고주파 전기 저항용접(HF-ERW, high frequency electric resistance welding)으로 제조되어 엔진 크래들(engine cradle)과 인스트루멘털 패널 빔(instrumental panel beam) 등 자동차 샤시류에 적용되고 있다.

최근에는 액압성형에 의한 자동차 부품의 개발이 점차 샤시류에서 차체류로 확대될 전망이며, 박육대경(thin thickness and large diameter)의 튜브가 요구되고 있다. 따라서, ERW 방식에만 의존하던 튜브 제조방법으로는 요구되는 조건을 만족시키기에 충분하지 않다. 더욱이 구조와 기능을 한단계

접수일:2003년 8월 11일; 게재승인일:2004년 4월 9일
* 한국기계연구원
# 교신저자, 한국기계연구원
Email khs@kimm.re.kr Tel. (042) 868-7456
** (주) 성우하이텍 기술연구소

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(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. 따라서, 본 연구는 일체화 성형 자동차 범퍼빔 개발을 위한 기초연구로써, 인장강도 60kgf/㎟ 강판에서 레이저 용접튜브를 제조하는 기술 및 장치 개발에 중점을 두고 용접불량률 최소화 방안을 마련하고자 하였다.

2. 일체화 성형 범퍼용 튜브 사양 및 제조공정

일반적으로 자동차 범퍼의 구조는 Fig. 1과 같이 범퍼 커버(bumper cover), 충격흡수재(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 상부 그림과 같이 된다.

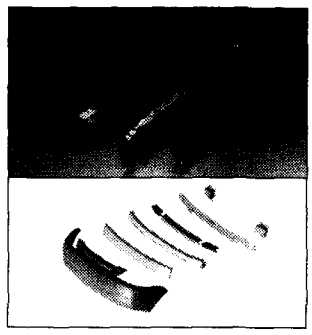


Fig. 1 Press-formed bumper

범퍼에 대한 기본설계를 바탕으로 센터 펜들럼(center pendulum) 충돌해석을 통하여 범퍼빔의 최적 단면 형상을 찾아내고 성능만족 여부를 평가하였다. 본 해석에서는 차량중량 1,350kg을 범퍼시스템 및 진자에 부여하고, 실제 시험속도보다 약간 높은 5.2㎞/h의 초기속도를 충격 진자의 모든 절점에 적용시켰다. 범퍼빔의 재료는 인장강도 60kgf/㎟급인 냉간고장력강판이며, 재료특성은 Table 1과 같다. Fig. 3과 4는 해석결과를 보여주고 있으며, 두께(t) 차이의 두 범퍼빔 중 두께(t) 1.4mm의 범퍼빔이 두께(t) 1.2mm의 범퍼빔 보다 안전하다는 결과를 얻었다. 본 연구의 범퍼빔 성형에 필요한 레이저 용접 튜브는 직경(ø) 105.4㎜, 두께(t) 1.4㎜, 길이(ℓ) 2000㎜로 결정되었다.

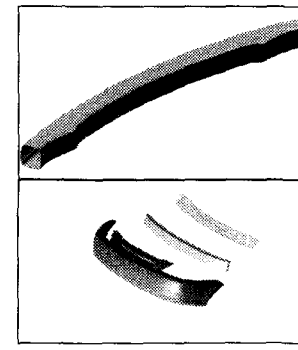


Fig. 2 One-Body formed bumper

Table 1 Mechanical properties for 60kgf grade steel

60kgf/㎟ grade steel		YS (kgf/㎟)	TS (kgf/㎟)	EL (%)	r15%	n10-20%
rolling direction.	0°	46.3	62.8	23.1	0.65	0.168
	45°	44.8	60.5	25.7	1.13	0.168
	90°	46.8	63.2	21.1	0.95	0.163
	mean	45.7	62.1	23.9	0.97	0.167

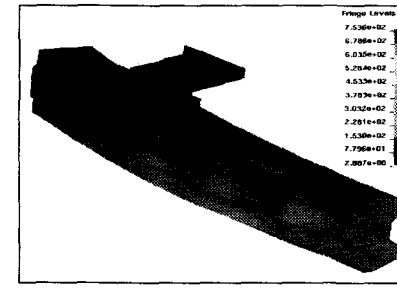


Fig. 3 Calculated results (ø)105.4㎜ (t)1.2㎜

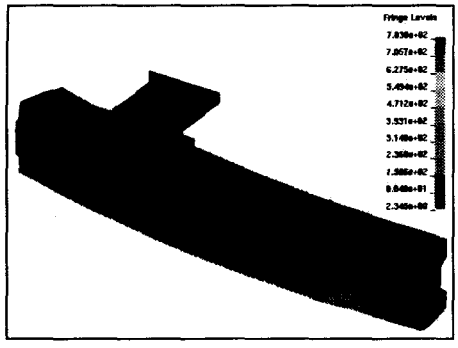


Fig. 4 Calculated results (ø)105.4㎜ and (t) 1.4㎜

튜브 형상으로 성형하는 공정에는 UO-벤딩, 프레스 절곡(bending on press brake), 연속 롤포밍, 3 또는 2 roll 벤딩 등이 있다. 레이저 용접 시 성형된 튜브 형상이 매우 중요하며 레이저 용접 품질을 결정하는 중요한 변수 중 하나이다. 레이저 용접을 실시하는 조인트부의 대표적인 문제점은 Fig. 5의 위와 같이 용접할 조인트가 어긋나거나(정형화 부족) Fig. 6과 같이 용접 조인트 간극의 위치가 계속 변화 되는 것(직진도 문제)으로 요약될 수 있다. 튜브 단면의 정형화 및 길이 방향의 맞대기(butt) 조인트의 진직도가 매우 중요하다. CO_2 레이저를 사용하는 경우, 레이저 빔의 초점 위치와 용접선과의 오차가 200㎛이내로 유지되어야 양호한 용접결과를 얻을 수 있다. 길이 방향의 판재 절단 정밀도, 고강도 및 박육대경 등에 의한 난성형성으로 Fig. 6과 같이 맞대기 조인트부가 일직선이 아닌 약간 틀어진 경우도 있으며, 용접 중에는 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. 레이저 용접시 용접선 추적에 관한 논문들은[1,2] 평판의 경우에 국한되어 있으며, 고장력 강판으로된 튜브의 경우에 대해서는 발표되지 않고 있다. 한편, 레이저 용접 품질을 용접 현장에서 실시간으로 모니터링하기 위해 주로 레이저 유도 플라즈마 광 측정[3-6] 음향 신호 측정[7,8], 레이저의 반사광 강도 측정과[9] 플라즈마 전계 강도(electric field intensity) 측정[10] 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.

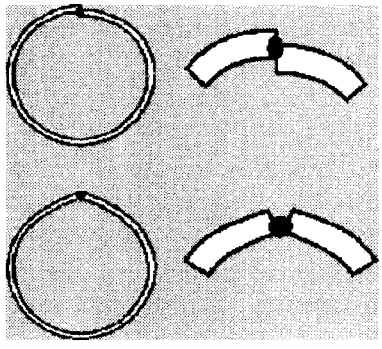


Fig. 5 Welding joints

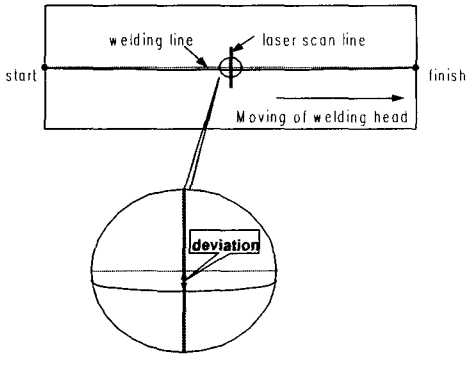


Fig. 6 Error and deviation in longitudinal welding line of tube

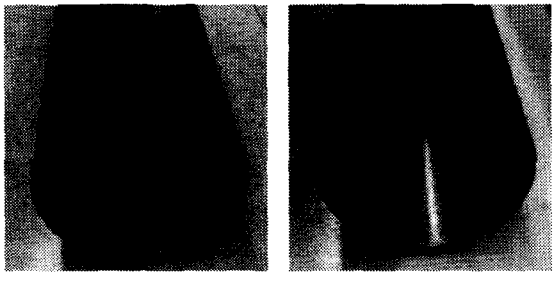
3. 성형장치 구성 및 실험

본 연구의 인장강도 60kgf/㎟급 냉간고장력강판의 튜브 성형과 비교하기 위하여 인장강도 35kgf/㎟급 강판을 추가로 사용하였다.

Fig. 7은 UO-벤딩 금형을 사용하여 1차 성형한 후 추가적으로 다단 프레싱 공정을 통하여 성형한 35kgf/㎟급 튜브 샘플을 보여 주고 있다. 성형후 간극(gap)은 약 15mm로 레이저 용접에 적합한 수준이나 1차 성형후 다단 프레싱 공법이 추가됨으로 대량생산에는 불리하며 2m 정도의 튜브를 성형하기 위해서는 약 600~800ton의 프레스가 필요하였

다. 특히, 60kgf/㎟급 튜브는 UO-벤딩 공정 금형의 제작이 매우 어려워 적용할 수 없었다.

Fig. 7 UO-bending jig and bended tube



(a) 35kgf/㎟ grade (b) 60kgf/㎟ grade

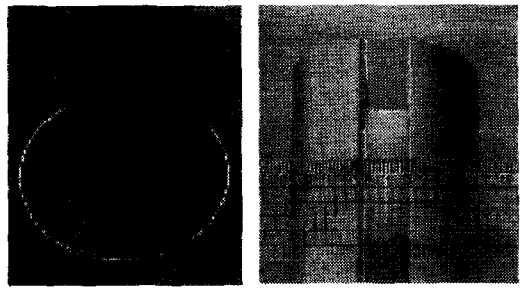
Fig. 8 Press bended tubes

Fig. 8은 프레스 벤딩공법(bending on press brake)으로 5회의 프레싱으로 성형한 튜브샘플을 보여주고 있다. 35kgf/㎟급 튜브는 25~30mm의 간극을 가지나, 60kgf/㎟급 튜브는 스프링 백(spring back)의 영향으로 간극이 55~60mm이며 35kgf/㎟급 튜브에 비해 약 2배임을 알 수 있다.

Fig. 9는 다단 연속 롤포밍 방식을 보여주고 있으며, 강판 코일을 사용하여 연속적인 조관작업이 가능하다. 연속 생산성(동일 두께의 직관형 튜브)에 적합한 다단 롤포밍으로 성형된 60kgf/㎟급 튜브의 간극은 Fig. 8의 press brake 성형결과와 유사한 50mm의 간극을 보이나, 외국의 WEIL사 제품의 간극 20mm보다는 큼을 알 수 있다.

Fig. 10는 3 롤 벤딩(roll bending) 장치와 성형된 튜브를 보여주고 있다. 35kgf/㎟급 튜브는 25mm의 간극을 가지나, 60kgf/㎟급 튜브는 스프링백의 영향으로 간극이 57mm로 큼을 알 수 있다. UO 벤딩, press brake 성형, 다단 연속롤 포밍, 3 roll bending 공법에서 35kgf/㎟급 튜브 성형에서는 최소 15㎜의 간극을 확보할 수 있었으며, 60kgf/㎟급 튜브 성형에서는 최소 50㎜의 간극을 얻을 수 있었다. 성형

(a) Multi-step roll forming



(b) formed tube (c) tube of WEIL co.

Fig. 9 Multi-step roll forming system and tubes

(b) 35kgf/㎟ grade tube (c) 60kgf/㎟ grade tube

Fig. 10 3 roll bending system and tubes

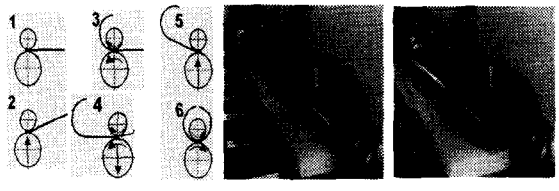


Fig. 11 2 roll bending process

간극을 축소시키기 위해 3 롤 벤딩 장치를 수정한 Fig. 11과 같이 2 롤 벤딩 공법을 개발하였다.

2 롤 벤딩을 포함한 여러 성형 공법으로 성형한 튜브의 간극의 크기를 Table 2에 정리하였다. 인장강도 60kgf/㎟, 두께 1.4㎜의 강판 소재를 직경 105.4㎜, 길이 2000㎜의 튜브 형상으로 성형한 결과

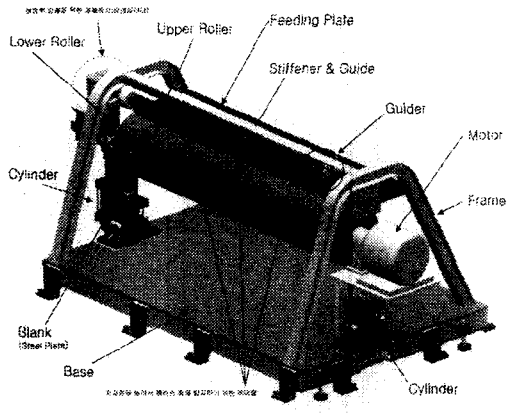


Fig.12 3D design concept of 2 roll bending machine

60kgf/㎟ 튜브, 2 롤 벤딩의 경우, 조인트부의 간극(gap)이 45㎜로 최소이다. 이에 비해 35kgf/㎟급 튜브, 2 롤 벤딩에서는 간극이 4㎜로 최소이고 매우 성형이 잘됨을 알 수 있었으며, 용접지그 없이도 맞대기 조인트가 완벽히 맞대어졌다. 최소 간극을 얻은 2 롤 간이 장치에서의 결과를 토대로 2 롤 정밀 벤딩장치를 설계, 개발하여 튜브를 성형하였으며, Fig. 12는 3차원 개념도를 보여주고 있다. 본 연구의 60kgf/㎟급 튜브의 맞대기 조인트가 레이저 용접에 적합하기 위해서는 간극이 200㎛ 이내로 유지되어야 하므로 고강성을 갖고 회전하는 롤러에 의해 맞대기 조인트부가 강력하게 맞대어 지도록 하는 용접지그를 제작하였다.

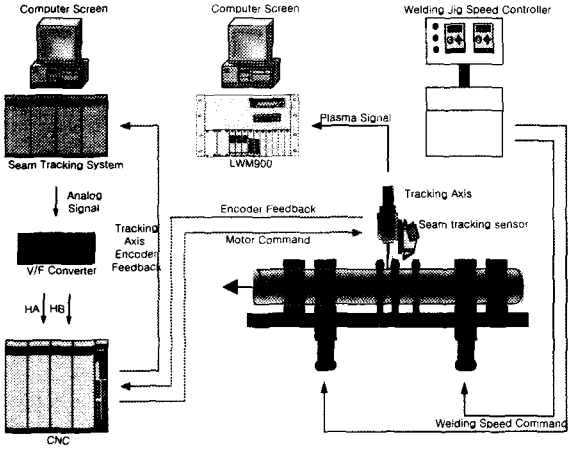


Fig. 13 Schematic diagram for construction and control

Table 2 Gap of joint by various processes

material	process	gap (㎜)	tube shape by 2 roll bending
60kgf/㎟	continuous roll forming	50-65	
	press brake	55-60	
	3 roll bending	57	
	2 roll bending	45	
35kgf/㎟	UO bending	15	
	press brake	25-30	
	3 roll bending	25	
	2 roll bending	4	

4. 용접장치 구성

튜브의 맞대기 용접 조인트부를 레이저 용접하기 위한 장치의 구성 및 제어를 위한 개략도는 Fig. 13과 같다. 용접지그의 회전롤러에 의해 튜브 소재가 이동하면서 용접 작업이 이루어진다. 용접지그에 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.(Fig. 14 참조)

레이저 용접 장치의 각 축 제어와 용접선 추적 장치로부터 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 신호 형태에 맞도록 변환된다. 용접선 추적을 위한 레이저 비전 센서로는 MVS사의 MVS-5(laser emitter와 CCD camera 조합형)를 사용하였다. 이 레이저 비전센서의 관측 범위는 수평 5㎜, 수직 7

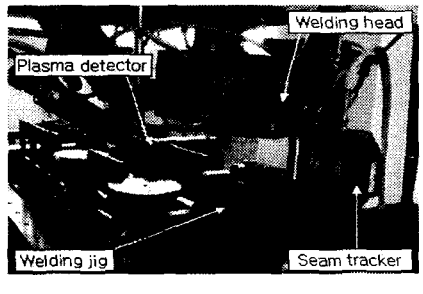


Fig. 14 Laser welding head and fixture

㎜, 분해능은 수평 0.01㎜, 수직 0.013㎜이다. 플라즈마 측정장치는 독일 JURCA사의 LWM900이다. 레이저 용접시 플라즈마는 흑체의 스펙트럼 방출과 유사하며 Plank의 방사 법칙을 따르게 된다. 이때 복사곡선의 최대점은 Wien의 변위법칙(displacement law)을 따르며 플라즈마에서 방출되는 빛의 파장범위는 약 190~400nm이다[11]. 따라서, 이 파장대에 적합한 UV 센서를 사용하여 플라즈마 세기(Plasma intensity)를 측정하였다. 이상의 튜브 레이저 용접 및 모니터링 조건은 Table 3과 같으며, 플라즈마 센서의 설치 위치는 Fig. 15와 같다.

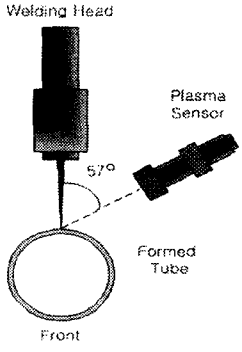


Fig. 15 Position of plasma sensor

Table 3 Experimetal condition

welding distance		1600㎜
welding speed		2000㎜/min
CO_2 laser power		2.8㎾
shielding gas		Ar(30 *l*/min)
distance from laser beam and laser vision sensor		110㎜
sampling frequency		60Hz
plasma sensor (see Fig. 15)	distance	180㎜
	angle	57°

5. 용접 실험 결과 및 고찰

Fig. 16은 용접선 추적 센서에 의해 추적 검출된 튜브의 용접 조인트부의 세그먼트 프로파일(Segments Profile)이다. 세그먼트 프로파일은 라운딩 프로파일(Rounding Profile)에서 특징점을 추출하여 특징점을 서로 연결한 형태로 프로파일을 얻는다. 튜브의 용접선 중심 위치(→)를 정확히 보여주고 있다.

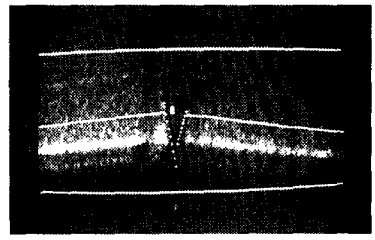


Fig. 16 Segments profile of tube joint

최종 개발한 2 롤 벤딩 장치로 성형한 튜브 소재를 용접 지그에 투입하여 이동시키면 소재 진행 방향에 대해 용접선이 약간 회전하는 경우가 발생하였다. 이러한 경우, 레이저빔과 용접선의 위치가 Fig. 17과 같이 일치하지 않게 되어 용접이 되지 않는다. 용접선 위치 보상 기능을 작동시킨 후에는 Fig. 18 에서 알 수 있듯이 레이저빔 위치와 용접선 위치가 잘 일치함을 알 수 있다. 약간의 오차가 있는 것은 폐회로의 응답성과 관련이 있으며 레이저빔의 직경과 비교해 보면 무시할 수 있는 오차이다.

레이저 용접시 플라즈마를 이용한 용접 품질 모니터링을 위해서는 먼저 판단을 위한 플라즈마 강도의 기준값을 설정하여야 한다. 실험에 사용한 플라즈마 센서는 같은 조건의 실험을 5번 반복하여

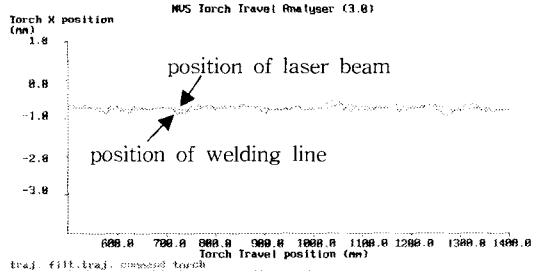


Fig. 17 Deviation of laser beam and welding line

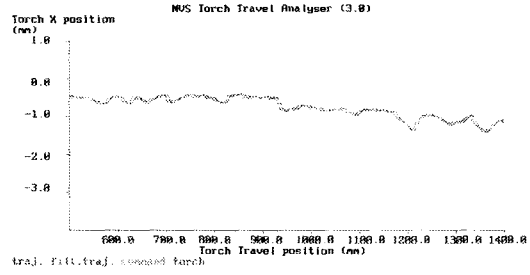


Fig. 18 Seam tracked welding line

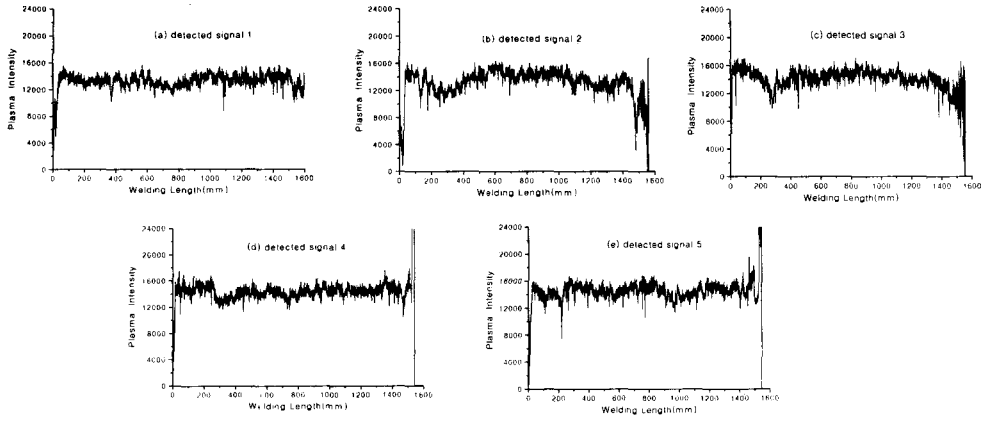


Fig. 19 Experimental data for reference value of plasma intensity

그 값의 평균값을 기준값(reference)으로 설정하도록 시스템이 구성되어 있다. 그래서 많은 용접을 수행하여 얻은 용접실험결과(예로 Fig. 19의 실험 데이터)를 가지고 그 중에서 양호한 5개의 표본을 추출하여 그 값들의 평균을 구해 플라즈마 센서의 기준

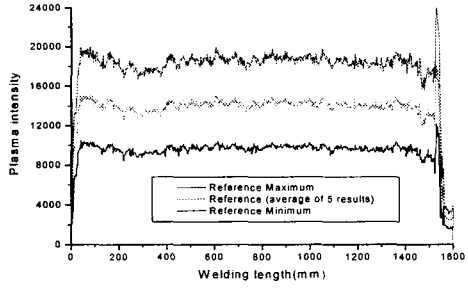


Fig. 20 Reference Max. and Min. values of plasma intensity

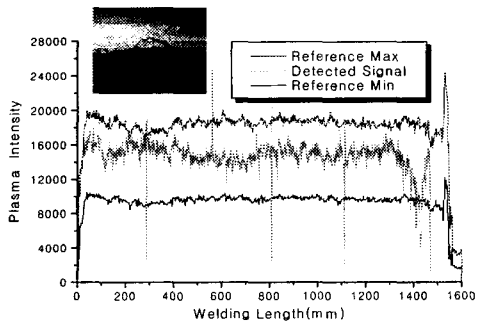


Fig. 21 Plasma intensity variation at 5 hole defects

신호로 설정하였다. 그 결과는 Fig. 20과 같다. Fig. 20에서 기준값의 상한과 하한은 용접결함이 발생하지 않는 완전용입이 되는 조건과 일치하는 영역을 찾은 것이다. 반복 실험을 통해 용접불량이 발견되지 않은 영역과 일치하는 영역이 기준값의 ±30%이다. 즉, 용접 중 발생되는 플라즈마 강도가 Fig. 20의 최대 및 최소값 영역 내부에 존재하면 양호한 용접결과를 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. 21과 같이 나타났다. 홀이 있는 위치에서 플라즈마 신호가 5번 급격하게 변화하는 것을 볼 수 있으며 이는 용접이 제대로 되지 않은 플라즈마가 단락됨으로써 나타나는 것으로 용접결함부를 의미한다.

용접선 추적 기능 및 플라즈마 센서를 작동시키면서 레이저 용접을 수행하는 장면을 Fig. 22에서 보여주고 있으며, 용접된 튜브에서 용접부의 단면을 광학현미경으로 조사한 결과 매우 양호함을 알 수 있었다. 본 연구에서 제작된 레이저 용접 튜브는 하이드로 포밍장치에서 성형되며, 범퍼 제작용 금형을 사용하여 일체화 성형 범퍼를 제작하였다. Fig. 23은 일체화성형 범퍼빔 시작품을 보여주고 있다. 기존 양산중인 범퍼빔을 기본 모델로 하여 이와 비교해 보았을 때, 일체화 성형된 범퍼빔은 구조성능이 동등이상이고 경량화가 가능하였다. 즉,

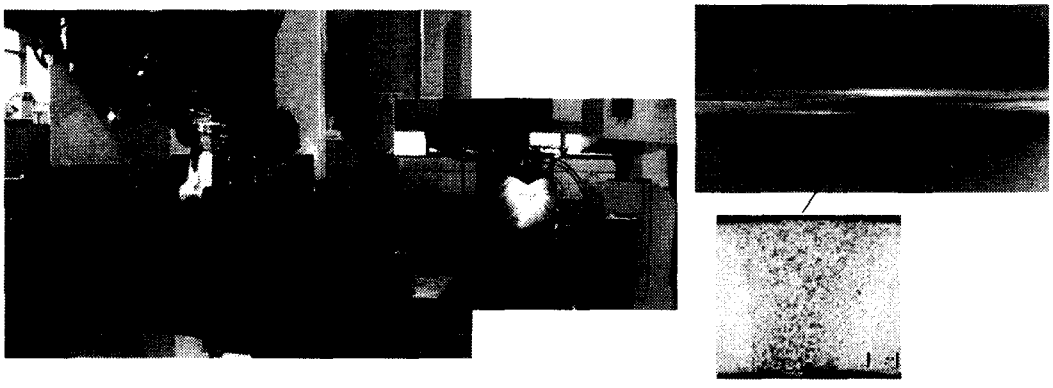


Fig. 22 Laser welded tube with good welding quality

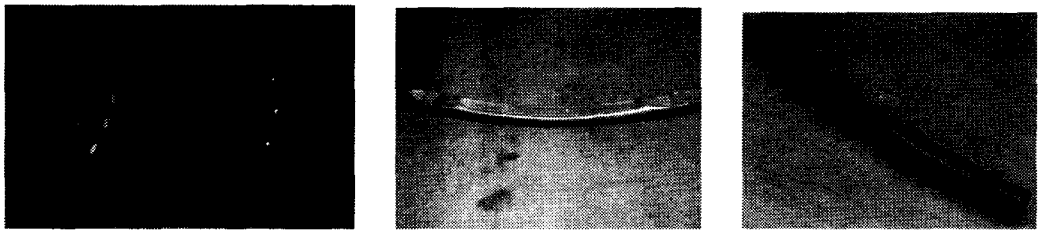


Fig. 23 One-body formed bumper beam

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.

6. 결론 및 추후 방안

본 연구에서는 일체화 성형 범퍼빔 개발을 위하여 인장강도 60kgf/㎟급 강판에서 레이저 용접튜브를 제조하는 기술 및 장치개발에 중점을 두었으며, 용접 불량률 최소화를 위한 자료를 확보하고자 하였다. 그 결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

(1) 인장강도 60kgf/㎟, 두께 1.4㎜의 강판 소재를 직경 105.4㎜, 길이 2000㎜의 튜브 형상으로 성형하기 위해 UO-벤딩, press brake 절곡, 다단 연속롤 포밍, 3 roll 벤딩, 2 roll 벤딩공법을 활용하였다. 2 roll 벤딩 공법으로부터 맞대기 조인트의 최소 간극(gap) 45㎜을 얻을 수 있었으며, 용접결과도 양호하였다. 또한, 결과를 토대로 2 roll 정밀 벤딩 장치의 3차원 설계자료를 확보할 수 있었다.

(2) 튜브의 길이 방향의 맞대기 조인트 용접을 위해 CO_2 레이저 용접장치를 구성하였으며, 용접장치에는 용접선 추적장치와 플라즈마 센서가 부착하였다. 특히, 용접선 추적장치에서 나오는 위치 신호를 레이저 용접헤드 구동축을 제어하는 CNC로 보내어져 용접선과 레이저 빔의 위치를 일치화시키도록 구성하였다.

(3) 레이저 비젼 센서를 이용하여 정밀 위치 허용치인 200㎛ 이내로 레이저 빔과 용접선을 일치시킬 수 있었으며, 400㎚보다 적은 UV 파장대의 플라즈마 강도를 측정한 신호로부터 인위적 결함(<ø1㎜)을 감지할 수 있었다.

(4) 본 연구의 레이저 용접 튜브는 자동차용 일체화 성형부품용 원재료로 사용될 수 있음을 제시하고 있으며, 구성된 레이저 용접 장치는 레이저 용접튜브의 용접불량을 최소화하는데 적합함을 알 수 있다. 스프링백이 큰 고강도강의 경우 용접할 맞대기 조인트부의 간극을 좀더 줄일 수 있는 기술이 필요하다.

후 기

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

참 고 문 헌

1. Aubry, P., Coste, F., Fabbro, R., Frechett, D., "2D YAG welding on non-liner trajectories with 3D camera seam tracker following for automotive applications," Laser Appls. Auto Industry, Section F-ICALEO 2000, pp. 21-27, 2000.
2. Coste, F., Aubry, P., Fabbro, R., Dubois, T., "A Rapid Seam Tracking device for YAG and CO_2 high speed Laser Welding," Section F-ICALEO 1998, pp. 217-223, 1998.
3. Beyer, E. and Abels, P., "Process Monitoring in Laser Materials Processing," Laser Advanced Materials Processing(LAMP92), pp. 433-438, 1992.
4. Matsunawa, A., Kim, J. D., Takemoto and Katayama, S., "Spectroscopic Studies on Laser-Induced Plume of Aluminium Alloy," ICALEO '95 Laser Institute of America 80, pp. 719-728, 1995.
5. Gatzweiler, W., Maischner, D., Beyer, E., "On-line Plasma Diagnostics for Process-control in Welding with CO_2 Laser," SPIE 1020, pp. 142-148, 1998.
6. Beersiek, J., Poprawe, R., Schulz, W., Gu Hongping, Mueller, R. E. and Duley, W. W., "On-line Monitoring of Penetration Depth in Laser Beam Welding," ICALEO '96 Laser Institute of America, 1996.
7. Li, L., Steen, W. M., "Non-Contact Acoustic mission Monitoring During Laser Processing," ICALEO '92 Laser Institute of America, pp. 719-728, 1992.
8. Gu, H. and Duley, W. W., "Resonant Acoustic Emission During Laser Welding of Metals," J. of Phys. D : Appl. Phys., Vol. 29, pp. 550-555, 1996.
9. Ishide, "High Power YAG Laser Welding and Its In-Process Monitoring Using Optical Fibers," Proc. ECLAT, pp. 183-192, 1994.
10. Watanabe, M., Okado, H., Inoue, T., Nakamura, S. and Matsunawa, A., "Features of Various In-Process Monitoring Methods and Their Applications to Laser Welding," ICALEO '95 Laser Institute of America 80, pp. 719-728, 1992.
11. Ono, M., Nakada, K. and Kosuge, S., "An Investigation on CO_2 Laser-Induced Plasma," 日本溶接學會 論文集, Vol. 10, No. 2, pp. 239-245, 1992.