강판의 레이저 용접시 공정변수의 영향에 관한 연구

A study on the influence of process parameters during laser welding of sheet steels

박영수*, 이윤식, 김형식, 김 찬
현대중공업 산업기술연구소

Y. S. Park*, Y. S. Lee, H. S. Kim, C. Kim
HYUNDAI INDUSTRIAL RESEARCH INSTITUTE

Key Words : Weldability, CO_2 laser, Multi-mode, Laser welding, Welding parameter, Plasma plume, Deep penetration

ABSTRACT

This paper describes the weldability of carbon steel and stainless steel using 5kW CO_2 laser system with nearly multi-mode beam and a parabolic focusing mirror. In the laser welding of steels, major welding parameters are focal point, travel speed, beam power, shield gas and gap tolerance, etc.. Two kinds of gases(Ar, He) were used as a assist gas and supplied through the external nozzle. It is very important for optimum condition to remove plasma plume which absorbs laser beam and to obtain deep penetration and sound weld bead. Bead-on-plate welding tests were carried out for the experiments. Penetration data were obtained with various welding parameters and the effects of welding parameters were discussed. Butt welding tests were performed with various conditions. Only the optimum laser parameters assured good weld quality. As a result of this study, We achieve the fundamental weldabilities using a high power CO_2 laser for carbon steel and stainless steel.

1. 서 론

레이저용접은 고밀도의 집속된 에너지를 열원으로 하는 광응용기술의 하나로 다른 용접방법에 비해 용접속도가 빠르고 입열량이 적어 재료의 변형이 거의 없는 장점이 있으며, 용접비드와 열영향부가 매우 좁아 접합이 어려운 형상이나 재료도 용접이 가

능한 유연성을 갖고 있다. 뿐만 아니라 같은 장비로 열처리 등의 여러 작업을 할 수 있는 특성으로 인해 산업고도화에 따라 점차 그 응용이 확대되고 있으며 중요성도 증대되고 있다[1]. 이에 따라 일반용접분야 및 전자, 정밀기계, 자동차, 항공 등 첨단산업에서 이용이 증가되고 있으며 레이저의 고출력화와 가공시스템의 안정화로 최근에는 10~20 ㎜두께의 강판을 주로 사용하는 중공업이나 조선 등에서 10㎾급 이상의 용접시스템이 많은 적용시험을 거쳐 현장에 설치되고 있다[2,3].

조선산업에서 여객선이나 유람선, 특수선들은 경량화를 목적으로 박판을 주로 용접하기 때문에 종래의 용접방법들(TIG, MIG)을 사용할 때 변형문제로 생산성 및 품질에 영향을 미치므로 이러한 부분에 레이저용접을 적용한다면 레이저의 장점을 충분히 활용할 수 있을 것이다. 이러한 관점에서 실제로 생산라인에 레이저용접시스템의 적용이 가능하도록 하기 위해서는 용접변수들의 변화에 대한 많은 실험을 통해 용접정보를 알아보는 것이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 레이저용접적용을 위한 기초적인 실험으로 용접변수에 변화를 주며 용입에 어떤 영향을 미치는가를 조사하였으며, 또한 실제 맞대기 용접을 수행한 후 물성시험을 통해 용접부의 품질을 평가하였고 그 결과를 이용해 최적의 용접조건을 알아보고자 하였다.

2. 실 험

2.1 시스템 구성

레이저 발진기는 최대출력 5㎾인 다중모드 출력분포를 갖는 횡류형(transverse flow type) CO_2레이저를 사용하였고 가공헤드는 고정이며 테이블이 움직이는 테이블이송형으로 용접실험시 X, Y, Z 3축을 이용하였다. 가공헤드에서 집속광학계는 초점거리 7.5″ 의 반사형광학계(parabolic focusing reflector)를 사용하여 용접에 적절한 출력밀도의 빔을 형성한 후 용접이 이루어지도록 하였다. 또한 보호가스 취입장치를 제작하여 레이저 용접시 발생된 플라즈마를 불어내고 산화방지 및 용접스패터로부터 광학계를 보호하였으며 노즐은 용접후면에서 가스를 불어주는 trailing side tube를 사용했다.

2.2 재료

용접조건별 용입시험에는 8mm의 탄소강(SS400)을 사용하였고 맞대기 용접에는 4.5mm의 탄소강과 5mm의 스테인레스강(SUS304)을 사용하였으며, 이들 재료의 화학조성을 표 1에 나타냈다. 실험에 사용된 재료는 탄소강의 경우 탄소의 함량이 0.16%로 일반적으로 레이저용접성이 우수하다고 알려져 있으며 시험편은 BOP(bead on plate)시편의 경우 8(t)×50(w)×100(L)의 크기로 하였으며 맞대기 용접시편은 인장 및 굽힘 시험을 위해 탄소강과 스테인레스강 각각 4.5(t), 5.0(t)×200(w)×200(L)의 크기로 제작하였고 또한 허용간극에 대한 시험에서는 탄소강을 모재로 실험하였다.

2.3 실험방법

레이저빔은 일정하게 고정된 위치에서 조사되는 동안 시편이 놓여있는 가공테이블이 이동하는 방법을 사용했으며, 용접선 이동은 구동테이블의 X, Y축을 이용하였고 초점위치를 조절하기 위해 집속헤드가 부착된 Z축을 변화시켜 정확한 초점위치를 맞추고 He-Ne레이저로 용접선을 추적한 후 용접을 수행하였다. 표 2에 용접시험의 BOP와 Butt 용접 각각에 대한 조건들을 나타냈으

며 용입시험으로 초점위치, 용접속도, 출력 변화를 주는 조건으로 BOP시험을 하였고 허용간극시험에는 맞대는 부분의 간극을 거의 없는 상태에서부터 0.05mm씩 증가시키면서 0.25mm까지 맞대기 용접을 하였다. 용입시험시 보조가스는 He과 Ar을 사용하였으며 유량은 예비실험을 통해 적당한 값인 분당 20ℓ정도로 정한 후 용입특성을 알아보았다.

탄소강과 스테인레스강에 대한 맞대기 용접은 먼저 각각의 시편에 대해 BOP test를 하여 적정조건을 확보한 후 두시편의 맞대는 부분은 밀링작업을 거쳐 간극이 거의 없는 상태로 하고 양쪽 끝부분을 TIG로 가접한 후 맞대기 용접시험을 하였다. 용입시험 후 용접부 단면을 Sand paper(#600, 800, 1000, 1200)로 연마하고 10% 나이탈로 에칭한 후 용접부를 조사하였고 맞대기 시험편은 용접 후 비파괴검사(PT, RT)를 하였으며 이후 시편을 가공하여 인장, 굴곡, 경도 등의 물성시험을 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 용입실험

일반적인 용접방법에 비해 레이저 용접 변수는 상당히 많고 또한 변수들간의 상호작용이 복잡하기 때문에 최적의 조건을 찾는 것은 쉽지 않다. 레이저의 출력, 빔의 상태, 빔 전송방법, 집속된 빔의 초점크기와 위치, 이송속도, 가공물의 재질 및 표면상태, 재료의 흡수상태에 따라 여러 가지 다른 용입 특성을 보일 수 있기 때문에 각각의 시스템에 맞는 조건을 찾기 위해 많은 실험과 해석을 통해 변수에 대한 용입깊이의 경향성을 찾을 수 있으며 또한 적용시스템에서 가장 용입이 깊으며 양호한 용접부를 얻을 수 있는 용접 조건을 얻을 수 있다[4].

3.1.1 초점위치의 변화에 대한 용입 특성

최적의 초점위치는 일반적으로 초점이 시편표면 약 1mm하부에 위치할 때 깊은 용입을 얻을 수 있다고 알려져 있으나[5] 여러 변수들의 영향으로 시스템마다 약간씩은 다르지만 주된 경향성은 알아볼 수 있다. 모재를 용융시키기 위해서는 키홀(keyhole)형성이 가능한 출력밀도(10^6~10^7 W/㎠) 의 에너지가 필요하며 이는 집속기구에 의해 집속된 빔의 크기에 따라 다르며 또한 초점깊이와 관련된다. 집속된 빔의 초점크기는 초점의 위치에서 가장 작고, 가장 높은 출력밀도를 낼 수 있으며 초점의 위치가 시편표면 상부나 하부로 약간씩 이동될 때마다 초점의 크기가 비례적으로 커지고 출력밀도도 상대적으로 줄어들게 된다[6]. 그림 1은 출력 4.5kW, 이송속도 1000mm/min으로 일정하게 한 후 초점위치의 변화에 대한 용입부의 단면을 보여주고 있는데 약간씩 다른 용입깊이와 형태를 보여주고 있으며, 그림 2는 용입깊이와 비드폭을 그래프로 나타냈는데 용입깊이는 초점위치에 따라 3.5mm에서 5.4mm까지 얻었고 비드폭은 3.1mm에서 4.4mm까지 얻었다.

실험결과 각각의 시편에 대해 초점이 약 2~4mm하부에 위치할 때 깊은용입을 얻을 수 있었으며 비드폭을 비교해보면 -2mm에서 비드폭이 좁았고 -4mm에서는 용입이 깊어지며 비드폭도 다소 넓어지고 있는 것을 보여준다. 용입깊이와 비드폭의 비(용입비)를 비교해보면 표면에서 약 2~4mm하부에 위치할 때 깊은 용입비를 얻을 수 있었으며 이는 키홀을 형성하는 mechanism이 약간씩 다르지만 일반적으로 레이저빔을 모재의 표면 하부로 집속시킬 때 키홀을 형성하는 출력밀도 이내의 빔직경을 형성하는

초점위치에서 가장 깊은 용입을 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 이것은 시스템에 따라 빔모드와 초점거리, 집속광학계, 그 외의 변수들이 다르기 때문에 각 조건에 따라 변화될 수 있다.

보호가스의 변화에 따라 약간씩 용입깊이의 차이가 있는데 이는 키홀(keyhole)에서 발생한 플라즈마를 얼마나 제어[7] 하느냐에 따라 다를 수 있으며 본 실험에 사용된 시스템의 출력과 이송속도에서는 근소한 차이지만 같은 유량의 취입가스를 불어줄 때 아르곤가스를 사용한 경우 용입이 다소 깊어짐을 보이며 이는 사용하는 가스의 종류에 따라 플라즈마의 제어능력이 변한다는 것을 보여준다. 일반적으로 플라즈마의 형성에 기인하는 요소로 취입가스의 분자질량, 열전도도, 이온화에너지, 공기에 대한 상대적 밀도 등이 서로 복합적으로 작용하여 레이저의 흡수를 높이기도 하고 플라즈마에 의해 빔의 초점거리가 변해 출력밀도의 감소로 용입이 감소되기도 한다. 이와 같이 보호가스의 변화에 따라 용입성에 차이가 발생하는 근원적인 이유에 대해서는 플라즈마 모니터링에 관한 연구를 통해 계속적으로 진행하고 있다.

3.1.2 이송속도의 변화에 대한 용입 특성

그림 3은 출력, 초점위치, 가스유량을 일정하게 한 후 용접속도는 분당 500mm에서 2500mm까지 변화를 주며 실험한 용입부의 단면을 보여주며, 그림 4는 이에 대한 용입깊이와 비드폭을 보여준다. 용입깊이는 단위시간당 입열량에 비례하므로[5,8] 일반적으로 저속의 경우 용입깊이가 깊고 폭이 넓은 용융풀(welding pool)을 얻을 수 있었고 속도가 증가할수록 키홀용접보다는 전도용접의 특성을 보이며 용입깊이와 비드폭이 감소함을 보여준다. 용입깊이는 속도가 500mm/min일 때 약 6mm의 용입을 얻었고 2500mm에서는 3mm의 용입을 얻었다.

보호가스의 변화에 따라서 1000mm/min을 기점으로 저속용접시에는 아르곤가스를 사용할 경우 용입이 약간 깊었고 고속용접시에는 헬륨가스를 사용할 때 용입이 깊었는데 이는 저속일 때 입사에너지의 증가로 상당히 많은 플라즈마가 발생되며 이를 제어하기 위해서는 아르곤가스가 약간 우세하고 고속용접시에는 헬륨가스가 우세함을 보인다.

3.1.3 출력 변화에 대한 용입 특성

용접의 주된 문제점은 일정한 두께의 용접시 출력부족에 따른 용입감소와 과출력에 의한 용락으로 용접불량을 야기시키는 경우가 있으므로 용입두께에 맞는 적정한 출력의 사용으로 최적의 용입조건을 얻을 수 있다. 그림 5는 용접속도, 초점위치를 고정하고 출력의 변화(3~4.5kW)를 주며 실험한 용입부의 단면을 보여주며 그림 6은 용입깊이와 비드폭을 보여주고 있다. 그래프에서 나타난 바와 같이 일정한 속도에서 출력증가에 따른 용입깊이는 직선적으로 증가하고, 출력에 비례한 용입깊이가 얻어지며, 용입증가와 함께 비드폭도 직선적으로 증가되는 것을 보여주고 있다. 그림 7은 출력, 용접속도, 초점깊이가 일정한 조건에서 보호가스의 변화에 따라 비드폭과 비드모양이 다름을 보여주고 있으며 헬륨가스를 사용한 경우가 아르곤가스보다 비드폭이 넓으나 비드모양이 양호한 것으로 나타났는데 이는 헬륨이 아르곤보다 열전도도와 이온화에너지가 높아 용융부가 넓게 퍼지며, 또한 공기에 대한 상대적인 밀도도 낮아 용융풀의 유동이 안정적으로 비드모양이 양호한 것을 보여준다.

3.1.4 허용간극 시험

그림 8은 출력 4.0kW, 이송속도 1500mm/min,

초점위치 -2mm 인 용접조건에서 4.5mm두께의 탄소강을 모재로 허용간극의 변화에 대한 용입부의 단면을 보여준다. 갭이 거의 없는 완전밀착상태나 0.05mm이하에서는 함몰이 거의 없는 양호한 용접비드를 형성하였으나 0.1mm에서 비드의 함몰이 시작되고 그 이상 갭의 증가에 따라 매우 큰 함몰을 볼 수 있었는데 이는 레이저빔이 간극사이로 빠져나가고 또한 용융금속이 갭을 채우며 중력에 의해 간극사이로 흘러내리기 때문이다[9]. 일반적으로 맞대기용접시 갭은 모재두께의 1/10이하[10] 또는 빔직경의 1/2정도보다 작아야 한다고 많은 연구논문에서 보고되고 있으나 실제 실험에서는 그보다 작은 갭을 유지해야 하는 것으로 나타났다. 이는 모재의 종류와 두께, 집속광학계의 구성방법에 따라 약간의 차이가 있으나 일반적으로 맞대는 부분이 거의 간극이 없는 정도로 용접조건을 맞추어야 양호한 용접부를 얻을 수 있었다.

실제적인 용접적용시 상부비드의 함몰이 없는 양호한 용접을 얻기 위해서는 용접부위의 정확한 맞춤이 선행되야 하지만 용접장이 긴 용접재의 경우 더욱 어려워지며 이를 극복하기 위해서는 함몰된 부분을 채워주기 위한 용가재등을 사용하여 비드함몰의 단점을 극복할 수도 있을 것이다.

3.2 맞대기 용접 시험

탄소강과 스테인레스강 각각에 대한 맞대기 용접에서 4.5㎜의 탄소강은 출력 4㎾, 용접속도 1500mm/min일 때 스테인레스강은 1300mm/min에서 양호한 비드를 형성하며 완전용입 되었다. 집속된 레이저빔의 크기가 작은 국소부위의 저입열이기 때문에 탄소강 및 스테인레스강의 상부와 하부비드폭은 상당히 좁게 나타났으며 그림 9(a)에는 탄소강의 상부와 하부비드면으로 기존의 용접방법과 비교할 때 매우 좁은 용접부를 보여준다.

용접된 시편을 가지고 액체침투탐상시험(PT)과 방사선투과시험(RT)의 비파괴검사를 실시하였으며 검사결과는 모두 합격하였다. 또한 비파괴검사후에 ASTM규격(규격번호 : A370)에 의해 가공하여 인장, 굴곡, 마크로, 경도를 조사하였고 탄소강에 대해서는 충격시험을 하였으며 각각의 값은 표 3에 나타냈다.

인장시험시 인장 값은 탄소강의 경우 약 412N/㎟, 스테인레스강은 약 686N/㎟정도로 모재보다 우수하였으며 파단위치는 그림 9(b)와 같이 모두 모재에서 파단되었다. 굴곡시험은 3.5t former(Dia. 16mm)를 사용했는데 각 시편 모두 180° 시험시 합격하였고 경도는 급열급냉에 의한 경화로 모재에서 보다 열영향부, 용착금속의 순으로 경도가 증가한 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

고출력 레이저빔을 이용한 강판의 용접시 용접조건 변화에 대한 용입실험 및 평판의 맞대기 용접실험을 하여 다음의 결론을 얻었다.

1. 탄소강을 모재로 용접변수에 대한 용입시험에서 아래의 결과를 얻었다.
   1) 초점위치의 변화에 따라 집속된 레이저빔이 가장 효율적으로 입사되는 위치는 시편의 두께에 따라 차이가 있으나 시편표면에서 약 2~4mm하부에 위치할 때 용입이 깊으면서 비드폭이 적은 양호한 용입을 얻었다.
   2) 이송속도 및 출력 변화에서 용입깊이는 단위시간당 입열량에 비례하므로 저속에서는 용입이 깊고 비드폭이 넓었으며 고속에서는 용입이 적고 비드폭도 적

었다.

3) 출력변화에서 출력 증가에 따라 용입깊이는 직선적으로 증가하였고, 4.5kW의 출력으로 6mm두께의 양호한 용접을 얻는 조건은 용접속도 500mm/min, 초점위치 -3mm, 보호가스 Ar 20ℓ/min이었다.

4) 허용간극시험에서는 탄소강 4.5mm의 경우 간극이 거의 없는 정도로 용접을 수행해야 용락이 없는 양호한 비드를 형성하였다.

2. 맞대기 용접시험을 통해 양호한 비드형성과 완전용입조건을 얻었으며 각각의 시편에서 비파괴검사와 인장, 굴곡, 충격시험을 통해 용접부의 물성을 확보하였다.

참 고 문 헌

[1] J.K. Kristensen "potential and challenges in laser welding structural steels", The Industrial Laser Handbook, pp.74-80, 1993.

[2] Dr. Ing. Frank Roland "조선산업에서 레이저 용접 전망과 장애요소", 레이저기술 제50호, pp.37~47, 1998.

[3] John Powell, Klas Nilsson, and Claes Magnusson "CO_2 laser welding - Mechanism and techniques", Industrial Laser Review, March, pp.10~14, 1994.

[4] K.W. Carlson "The role of heat input in deep penetration laser welding", Laser welding, Machining and Material processing, pp.49~57, 1985.

[5] G.J. Bruck, J.E. Smith and R.D.O' Brokta "A study of the effect of essential variables on high power laser beam welding of Inconel 600", Laser welding, Machining and Material processing, pp.11~18, 1985.

[6] William M. Steen "Laser Material Processing", pp.108-144, 1991.

[7] Miyamoto, Maruo "Spatial and Temporal Characteristics of Laser-Induced Plasma in CO_2 Laser Welding", LAMP92, pp. 311~322, 1992.

[8] Hu Lunji, Xiong Lasen, Li Zhiyuan and Hu Xiyuan, "Experimental Design for Weld Bead Quality of Laser Welding", LAMP 92, pp.483~485, 1992.

[9] 김기철, 이기호, 이목영 "테일러드 블랭크용 박판 강재의 레이저 용접성(Ⅰ)", 대한용접학회지 제 16권 제1호, pp.77~87, 1998.

[10] 한유희 "레이저 가공기술(7회)", 기계기술 1월호, pp.41~50, 1991.

Table 1. Chemical compositions of test materials (wt. %)

조성 / 모재	C	S	P	Mn	Si	Cr	Ni	Fe
SS 400	0.16	0.003	0.014	0.79	0.24	-	-	Rem.
SUS 304	0.13	0.01	0.025	0.34	0.55	18.33	8.99	Rem.

Table 2. Laser welding conditions

	BOP	Butt
Material	SS400 8mm	SS400 4.5mm SUS304 5mm
Power (kW)	3.0~4.5	4.0
Focal point (mm)	-6~+4	-2
travel speed (mm/min)	500~2500	1300, 1500
Gap (mm)		0~0.25
Gas (flow rate)	Ar, He (20ℓ/min)	

Table 3. Mechanical properties of laser welded sheet steels

시험 \ 재질		탄소강	스테인레스강
인장	인장강도(N/㎟)	412	686
	파단위치	모재	모재
충격	흡수에너지 0° C (J)	49	-
굴곡 (180°)	Face - 1, 2	Accept	Accept
	Root - 1, 2	Accept	Accept
경도 (HV5)	모재	115	205
	용착금속	196	221
	열영향부	146	214

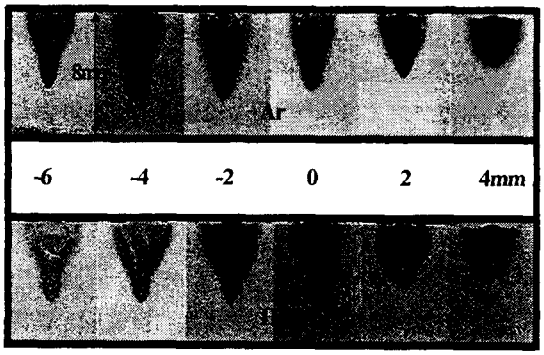

Fig. 1 Penetration shapes by laser welding in various focal point(P : 4.5kW, V : 1000mm/min, Gas : upper(Ar), lower (He)20 ℓ/min)

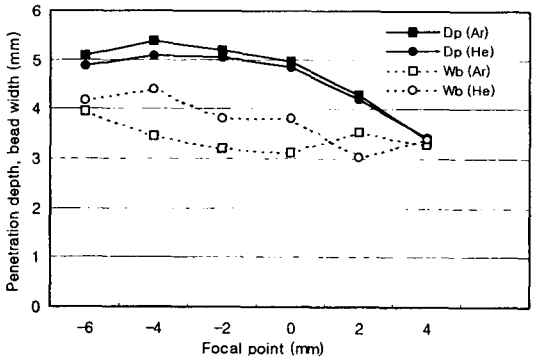

Fig. 2 Effect of focal point on penetration depth and bead width

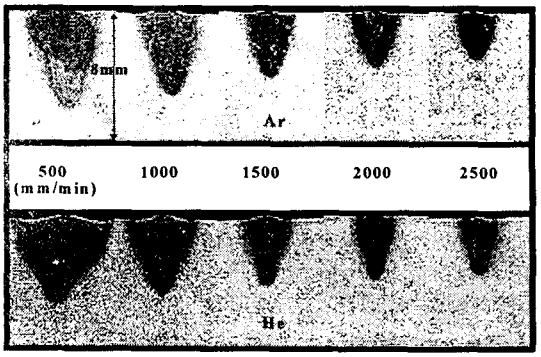

Fig. 3 Penetration shapes by laser welding in various travel speed(P : 4.5kW, F.p : -3mm, Gas : upper(Ar), lower(He)20 ℓ/min)

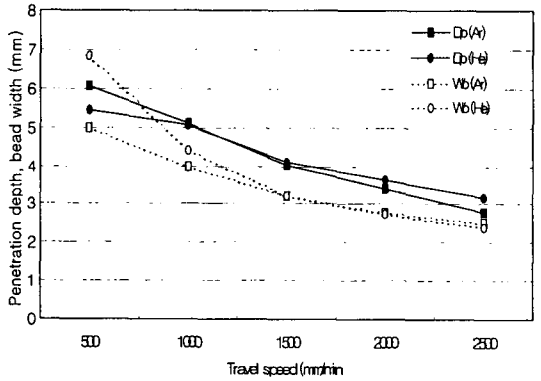

Fig. 4 Effect of travel speed on penetration depth and bead width

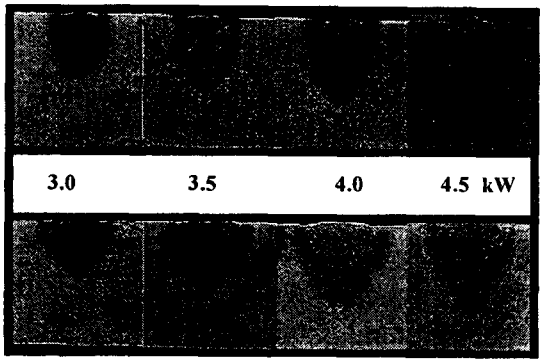

Fig. 5 Penetration shapes by laser welding in various beam power(V : 500mm/min, F.p : -3mm, Gas : upper(Ar), lower(He)20 ℓ/min)

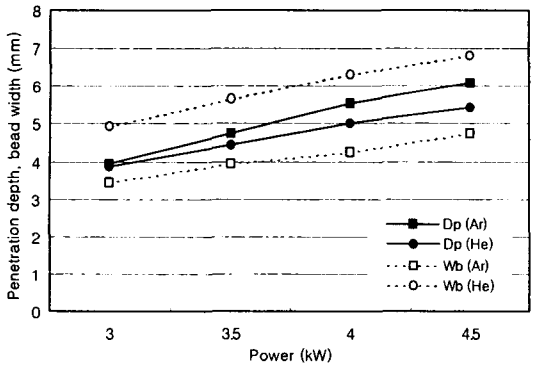

Fig. 6 Effect of beam power on penetration depth and bead width

용접조건 (보호가스)	비드형상
P : 4.5kW V : 1000mm/min F.p : -2mm (Ar 20 ℓ/min)	
(He 20 ℓ/min)	

Fig. 7 Weld bead profiles of different shield gas

0 0.05 0.1 0.15 0.2 0.25mm

Fig. 8 Cross sections of changing the gap distance in butt welding of carbon steel

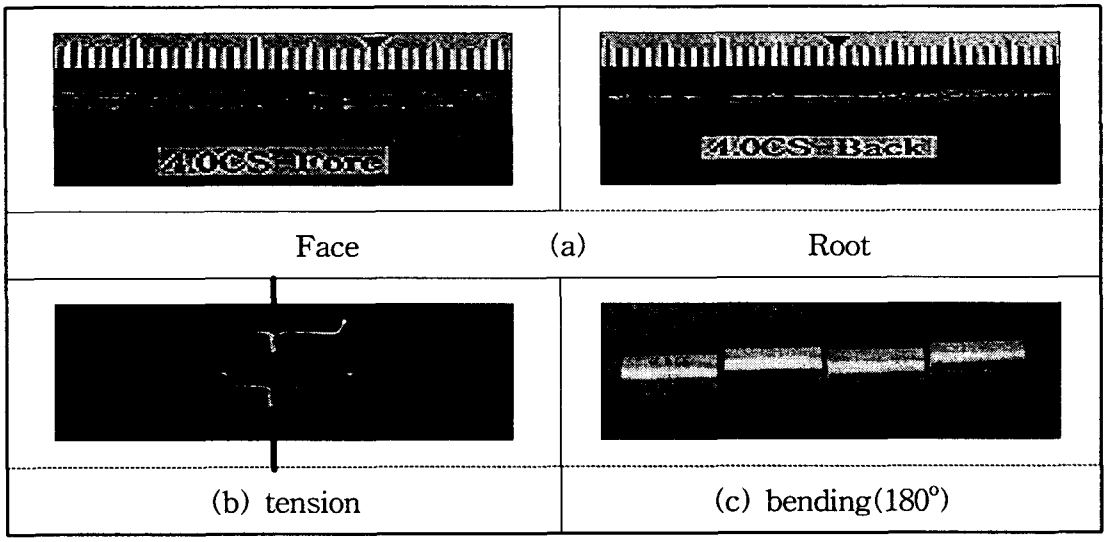

Fig. 9 (a)bead shapes, (b)tension specimens, (c)bending specimens of laser weldments of carbon steels