

고장력강 파이버 레이저 용접부의 HAZ 연화 특성에 관한 연구

박민호* · 김일수*[†] · 이종표* · 진병주* · 김도형* · 김인주* · 김지선*

*목포대학교 기계공학과

**한국생산기술연구원 그린몰드기술센터

A Study on HAZ Softening Characteristics of Fiber Laser Weldment
for High-Strength SteelMin-Ho Park*, Il-Soo Kim*[†], Jong-Pyo Lee*, Byeong-Ju Jin*, Do-Hyeong Kim*,
In-Ju Kim** and Ji-Sun Kim**

*Department of Mechanical Engineering, Mokpo University, Mokpo 534-729, Korea

**Green mold Technology Center, Korea Institute of Industrial Technology, Gwangju 500-460, Korea

†Corresponding author : ilsookim@mokpo.ac.kr

(Received March 30, 2015 ; Revised April 20, 2015 ; Accepted November 9, 2015)

Abstract

Laser welding sector in the automotive industry has been widely recognized as one of the most important bonding processes, such as parts welding. Efforts to improve productivity and weld quality have been progressing steadily. In addition, laser welding is suitable for welding process that can produce high-quality welds suitable for flexible production and small quantity batch productions. In order to ensure the rigidity of the material, high strength material are applied to more than 1 GPa class body parts and automotive bumper beams. However, not only the situation is that the trend of domestic research, but also development is based on product molding considering freedom of shape where reinforcement is applied to meet the safety regulations and high-speed crash performance, despite the use of high strength materials. The tendency for heat-affected zone (HAZ) softening phenomenon common in areas of laser welded high tensile steel welding confirmed the occurrence of weld softening effect according to the process parameters. Based on this, range of process parameters could be selected for ensuring weld quality.

Key Words : Fiber laser weld, High-strength steel, Heat affected zone, Softening effect, Penetration aspect

1. 서 론

현재 제조업에서 접합이 차지하는 비중은 대단히 크며, 완성품 조립공정에서는 거의 절대적이라 할 수 있다. 특히 완성품 조립 등에서 용접이 차지하는 비중은 대략 50%이상으로 제조업에서 중요한 접합공정의 하나로 발전되어 왔다. 또한 다품종 소량생산에 적합한 유연생산과 고품질의 요구가 높아짐에 따라 독일, 미국, 일본 등에서 레이저 용접이 자동차 관련 산업뿐만 아니라 조선, 항공 산업까지 다양하게 적용되고 있다. 자동

차 산업에서의 레이저 용접 분야는 대략적으로 부품용접, 차체용 강판 용접, 이종재료(Tailored blank)용접 등으로 분류할 수 있다¹⁻⁴⁾. 특히 용접 후 소재에 발생하는 열변형은 주행시 진동 및 소음 발생의 원인이 되므로 용접 후 열변형이 극소화되어야 한다. 이러한 측면에서 자동차용 기어소재를 사용함과 동시에 고밀도에너지 열원에 의해 용접을 실시하고 있다. 자동차 차체 부품 개발에서는 경량화 및 성능 강화의 목적으로 보강재를 제거하고 소재의 강성을 확보하기 위해 고강도 소재를 이용한 1000MPa급 이상의 차체부품 및 자동차용 범퍼 빔이 적용되고 있다. 유럽선진 자동차 업체를

중심으로 차체부품에 이러한 소재들이 활용되어 왔고 국내에서도 최근에 봉소가 첨가된 강판을 이용하여 1400MPa급 이상의 강도를 가지는 차체부품 및 범퍼 빔 역시 개발되고 있는 추세이다. 그러나 국내의 연구 개발 추세는 제품 성형 위주로서 형상 자유도를 감안하여 이루어지고 있기 때문에, 고강도 소재임에도 불구하고 안전법규와 고속 충돌성능의 만족을 위해서 보강재가 적용되고 있는 실정이다. 파이버 레이저는 1990년대 이전까지는 주로 광통신용 레이저로 활용되었으나, 1990년대 이후 파이버 레이저가 갖고 있는 고효율과 좋은 열 특성을 이용한 기존의 고출력 고체 레이저를 대체할 수 있는 새로운 레이저의 개발이 시작되어, 2000년 100W급 고출력 파이버 레이저가 상용화 되었다⁵⁻⁶⁾. 자동차 부품시장에서 고장력강의 사용이 증가하면서 레이저 용접 기술 또한 꾸준한 발전을 거듭하여 부품 접합에 그 적용이 증가하고 있으며, 고장력강의 레이저 용접 특성에 관한 많은 연구가 수행되어 왔다. R. R. G. M. Pieters 등은 DP 600 과 H360LA의 소재를 가지고 레이저 출력과 용접속도를 바꿔 입열량 변화에 따른 경도 변화와 미세조직을 관찰하는 연구를 수행하였다. Z. Liu 등은 780MPa 강도의 UHSS 소재를 가지고 Focus Position에 따라 용입의 변화를 관찰하였으며, 펄스레이저를 이용하여 Duty cycle과 Pulse frequency의 영향에 대한 연구를 수행하였다. S. G. Shi 등은 DP, TRIP, Usibor 등과 같은 다양한 UHSS 소재를 이용하여 레이저 출력과 레이저 빔 직경에 따른 실험을 수행하였으며, 저탄소강과 이중 용접을 통해 탄소함량의 영향을 알아보는 연구를 수행하였다⁷⁻⁹⁾.

최근에는 높은 연신율과 성형성을 겸비한 600MPa급 TRIP 및 DP형 고강도 강판에 대하여 용접조건을 선정하고, 인장시험 및 Erichsen, 성형성 시험을 통해 레이저 용접부의 기계적 성질 및 성형성 평가에 그치기 때문에 파이버 레이저를 이용한 고장력강의 용접부 특성을 전반적으로 평가해 용접공정 변수에 대해 예측하기 위한 알고리즘은 매우 미흡한 실정이다¹⁰⁻¹¹⁾. 본 연구에서는 자동차 산업에 많이 사용되는 고장력강을 사용하여 파이버 레이저 용접시 획득한 데이터를 기반으로 용접부의 열영향부 연화 특성을 규명하고자 하였다.

2. 파이버 레이저 용접실험

고장력강의 열영향부 연화 특성을 비교·분석하기 위하여 파이버 레이저 용접실험을 실시하였다. 실험을 위하여 MIYACHI社 ML-6950A모델의 5kW급 파이버 레이저 용접기를 사용하였으며, YASKAWA社 DX100 모델의 MOTOMAN을 이용하여 전체시스템을 구성하

였다. Fig. 1은 파이버 레이저 용접장치 전체시스템을 나타낸다. 정밀한 용접과 시험편의 열변형을 방지하기 위하여 겹치기 용접시험편의 고정용 JIG를 제작하였으며, Fig. 2는 파이버 레이저 용접실험에 사용된 JIG를 보여준다. 또한 파이버 레이저 용접실험에 사용된 보호가스는 Ar, N₂, He으로 총 3가지를 사용하였으며, 광학 전송계 레이저의 특성인 빔의 초점거리(100 - 420mm) 및 초점위치는 MIYACHI社에서 설정한 최적값(250mm)을 적용해 파이버 레이저 용접실험을 수행하였다. 용접실험에 사용된 모재는 자동차 차체용 강판인 DP 980과 TRIP 1180재질의 평판을 사용하였으며, 두 종류의 모재 모두 100×50×1.4mm 규격의 겹치기 시험편을 제작하였다. 본 연구는 기존의 저항 점 용접을 대체하여 자동차 부품제작에 사용되는 레이저 용접공정의 최적화를 목표로 하였기 때문에 겹치기 용접실험을 수행하였으며, TRIP강에 비해 비교적 산화가 자주 발생하는 DP강에 아연도금을 하여 부식방지 효과를 고려하였다.

Fig. 3은 파이버 레이저 용접공정의 개략도를 나타내고 Fig. 4는 본 실험에 사용된 겹치기 용접 시험편의 규격을 나타내었으며, 시험편의 기계적 성질은 Table 1에 각각 나타내었다. 일반적인 실험계획법으로 알려진 완전요인설계의 경우 각각의 입력변수들의 수준을 일정간격으로 배치하여 모든 입력변수들간 수준의 조합에 의해 실험이 이루어지게 된다. 입력변수의 수가 n개이고, 수준의 수가 k개인 경우 총 Kⁿ개의 실험횟수를 수립할



Fig. 1 Experimental setup for fiber laser welding

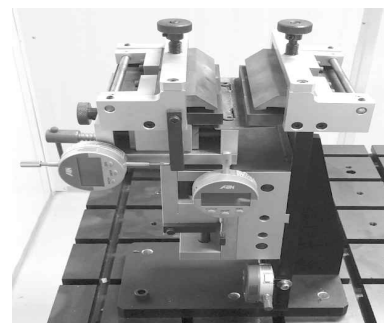


Fig. 2 JIG for specimens of lap weld joints

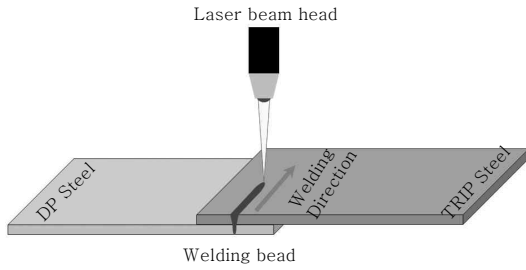


Fig. 3 A schematic diagram for fiber laser welding process

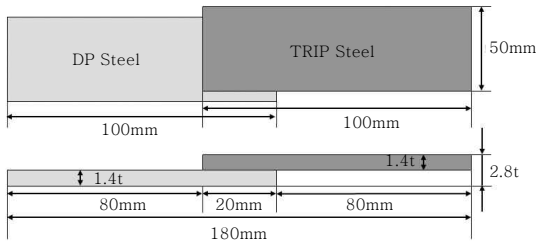


Fig. 4 Configuration of welding specimen

Table 1 Mechanical properties of base metal

Material	DP 980 steel	TRIP 1180 steel
Yield strength(MPa)	730	990
Tensile strength(MPa)	990	1204
Elongation(%)	13	16
Hardness(HV)	337	346

수 있으며, 이와 같은 완전요인배치법은 실험수행을 위한 시간 및 비용이 늘어나고 반응의 비선형적 변화감지가 다소 부족한 단점을 가지고 있으나 각각의 변수 특성치에 대한 공정의 여러 가지 요인 해석이 가능하다.

따라서, 본 실험에서는 입력변수 변화에 따른 출력변수 반응의 모든 요인효과를 추정할 수 있고 고차의 교호작용 효과를 검출하기 위하여 완전요인배치법(FFD)을 적용하였다. 입력변수(레이저 출력, 용접속도, 보호가스)의 적정수준 및 범위는 예비실험을 통하여 정하였으며, 입력변수의 수는 3개이고 수준의 수는 3으로써 총 27회의 실험조건이 생성되었다. Table 2는 입력변수의 실험변수 및 수준을 나타낸다.

Table 2 Fiber laser welding parameters and their levels

Welding parameter	Symbol	Unit	Limit
Laser power	P	kW	3.5~4.5
Welding speed	W/S	mm/sec	30~50
Shielding gas	S	(ℓ/min)	Ar, N ₂ , He

TRIP 및 DP 강판에 대한 겹치기 파이버 레이저 용접시 용접부의 앞면과 뒷면에서 완전한 용입이 이루어졌으며, 실험결과 전반적으로 양호한 용입을 형성함으로써 외관상 결함이 발생되지 않음을 확인하였다. 또한 파이버 레이저 용접조건에 따라 용융부의 형상에 미치는 영향을 판별하기 위해 단면형상(Macro)를 촬영하여 특성을 분석하였다. 겹치기 용접부의 단면형상을 측정하기 위하여 용접이 완료된 시험편의 가로축 중간부분을 Wire Cutting을 사용하여 80mm×80mm의 크기로 절단하고 단면부를 연삭한 후 폴리싱(Polishing) 하였다. 시험편의 단면형상을 잘 나타내기 위해 90% Ethanol + 10% Nitric 용액을 혼합하여 단면부에 대해 (Etching) 작업을 수행한 후 정확한 비드크기 측정을 위하여 광학현미경 시스템을 이용하였다.

3. 파이버 레이저 용접부 경도실험

3.1 고장력강 레이저 용접부 경도실험

파이버 레이저 용접으로 인한 강도저하 또는 상승의 가능성 등을 알아보기 위하여 용접공정 변수의 변화에 따라 용접을 수행한 시험편의 일부를 절단(8mm × 8mm)하여 경도시험을 실시하였으며, SHIMADZU社의 비커스경도계를 사용하였다. 이 때 사용된 하중은 0.5N 이었으며, 열영향부의 경도특성을 확인하기 위하여 시험편의 중앙에서부터 양쪽으로 0.15mm간격으로 측정하였다.

0.15mm의 간격은 경도 측정시 발생하는 미세표시에 의한 상대 경도들에 영향을 주지 않는 최적의 범위를 적용하였다. 또한 경도 측정결과의 정확성을 높이기 위하여 용접부 중앙을 포함하여 양쪽으로 2곳씩 총 5곳의 경도를 측정하여 평균치를 비교하였으며, Fig. 5는 시험편의 경도측정 위치를 나타낸 그림이다. 위와 같은 방법으로 파이버 레이저 용접부의 경도실험을 수행한

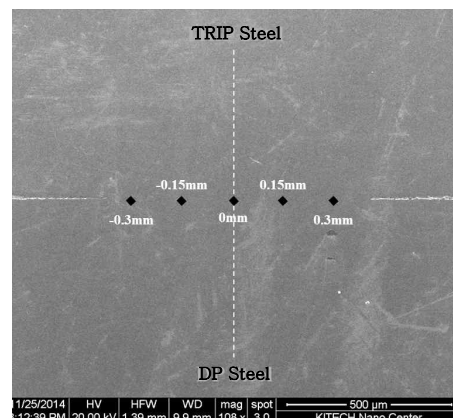


Fig. 5 Measured location of hardness for weldment

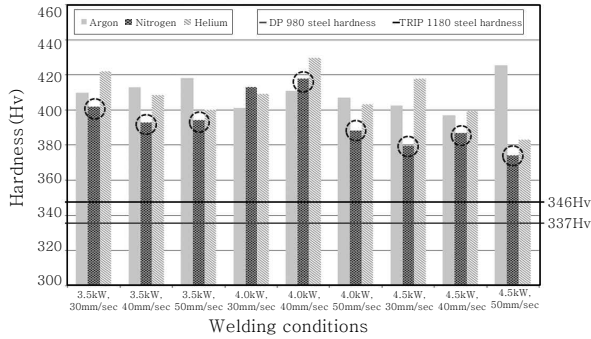


Fig. 6 Variation of hardness for welding conditions

결과, 전반적으로 질소 보호가스를 사용할 경우 파이버 레이저 용접시험편의 경도가 다소 낮은 것으로 확인되었으며, Fig. 6은 파이버 레이저 용접부의 경도실험 결과를 나타낸다. 일반적으로 파이버 레이저 용접에 있어서 급속가열과 급속냉각이 발생되어 용접 용융부 중심보다 온도가 낮은 모재부분에서부터 응고가 시작되어 중심 방향으로 조직이 성장하여 용접부를 형성한다. 부수적으로 조직 성장에 영향을 미치는 보호가스의 경우 종류에 따라 용융급속을 산화로부터 보호하는 차단막의 역할을 하여 용접부에 산화물형의 비금속 개재물과 기공 등 용접결함의 형성정도가 달라져 용융부의 생성에 영향력을 발휘한다¹²⁾. 이러한 선행연구들을 기반으로 아르곤, 헬륨 보호가스보다 질소 보호가스의 차단막 효과가 비교적 낮다는 것을 확인할 수 있었다.

3.2 고장력강 열영향부 경도실험

고장력강의 레이저 용접부는 열영향부의 연화가 아주 클 뿐만 아니라, 보호가스의 종류에 따라 용접성이 매우 달라지기 때문에 보호가스별 데이터 그룹을 선정하여 경도분포를 확인하였다. 고장력강 열영향부 경도실험의 경우 용접부 경도실험과 같은 방법으로 측정하였으나, 실험범위는 용접부에 국한된 것이 아닌 전체적인 범위에서 수행하였으며, Fig. 7은 열영향부 경도실험을 위한 개략적인 측정위치를 나타내고 있다. 일반적인 고장력강의 경도분포는 다른 강종과 달리 용융부에서만 최고

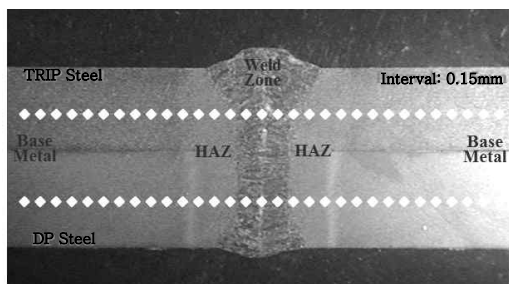


Fig. 7 Measured location of hardness

Table 3 Result of softening HAZ according to data group

Data group	Test No.	TRIP steel softening (HV)	TRIP steel softening ratio(%)	DP steel softening (HV)	DP steel softening ratio(%)
Group Ar	1	255.95	26.03	260.07	22.83
		3.5kW / 30mm/sec			
	2	251.64	27.27	266.74	20.85
		3.5kW / 40mm/sec			
	3	265.13	23.37	282.07	16.30
		3.5kW / 50mm/sec			
	4	235.47	31.95	274.75	18.47
		4.0kW / 30mm/sec			
	5	241.32	30.25	255.20	24.27
4.0kW / 40mm/sec					
6	257.63	25.54	258.46	23.31	
	4.0kW / 50mm/sec				
7	260.93	24.59	273.864	18.73	
	4.5kW / 30mm/sec				
8	250.45	27.62	274.75	18.47	
	4.5kW / 40mm/sec				
9	248.61	28.15	272.09	19.26	
	4.5kW / 50mm/sec				
Group N ₂	10	266.84	22.88	265.05	21.35
		3.5kW / 30mm/sec			
	11	234.36	32.27	238.64	29.19
		3.5kW / 40mm/sec			
	12	243.46	29.64	260.93	22.57
		3.5kW / 50mm/sec			
	13	263.47	23.85	280.23	16.85
		4.0kW / 30mm/sec			
	14	247.35	28.51	268.58	20.30
4.0kW / 40mm/sec					
15	248.90	28.06	256.83	23.79	
	4.0kW / 50mm/sec				
16	247.64	28.01	241.34	28.39	
	4.5kW / 30mm/sec				
17	254.40	26.47	263.44	21.83	
	4.5kW / 40mm/sec				
18	252.83	26.93	270.15	19.84	
	4.5kW / 50mm/sec				
Group He	19	259.27	25.07	236.96	29.69
		3.5kW / 30mm/sec			
	20	241.33	30.25	246.58	26.83
		3.5kW / 40mm/sec			
	21	247.33	28.52	260.92	22.58
		3.5kW / 50mm/sec			
	22	258.43	25.31	240.60	28.61
		4.0kW / 30mm/sec			
	23	246.59	28.73	268.58	20.30
4.0kW / 40mm/sec					
24	255.21	26.24	268.54	20.31	
	4.0kW / 50mm/sec				
25	238.34	31.12	268.54	20.31	
	4.5kW / 30mm/sec				
26	272.08	21.36	270.29	19.80	
	4.5kW / 40mm/sec				
27	257.66	25.53	242.82	27.95	
	4.5kW / 50mm/sec				

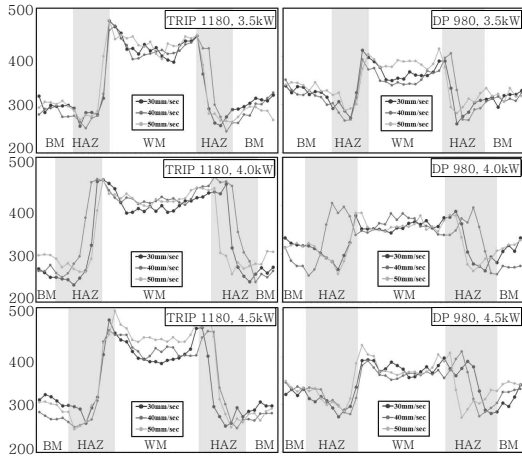


Fig. 8 Hardness distributions of data group Ar according to welding speed

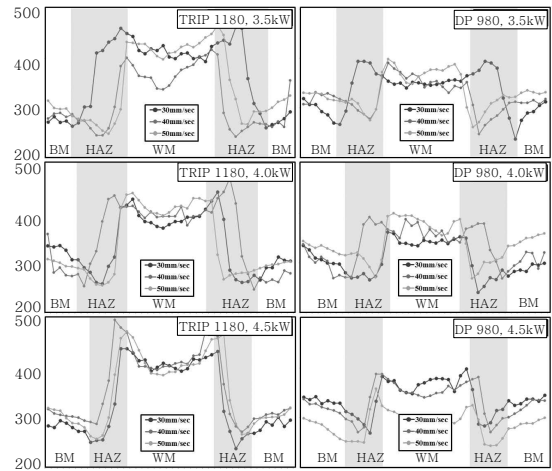


Fig. 10 Hardness distributions of data group He according to welding speed

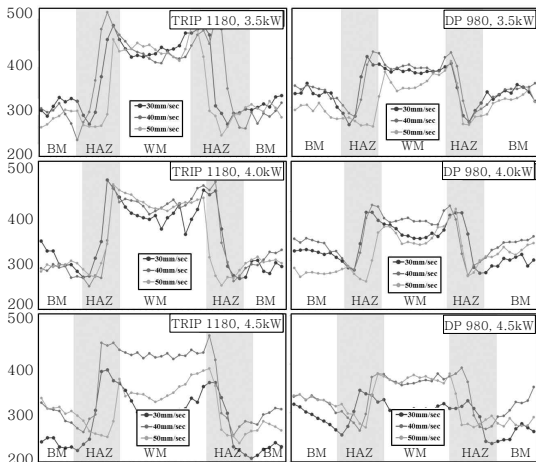


Fig. 9 Hardness distributions of data group N2 according to welding speed

경도값을 가지고, 용접부에서부터 바로 모재 쪽으로 갈수록 급격히 감소하는 성향을 보이기 때문에 Figs. 8~10과 Table 3에 나타난 바와 같이 열영향부에서 최대 32.27%가 넘는 연화현상이 발생하였다.

4. 용입 면적에 따른 열영향부 연화 특성

고장력강의 용접에는 흔히 열영향부의 연화현상이 발생되는데 종래의 연구들은 입열량에 따라 열영향부의 연화 및 강도 특성을 분석하고 있으나, 본 논문에서는 데이터 그룹 즉, 보호가스 종류에 따른 용접성이 일관적인 성향을 보이고 있어 용입 면적과 보호가스의 영향을 고려한 열영향부 연화 특성을 분석하고자 하였다. 고장력강 레이저 용접부의 단면형상 정보를 기반으로 용입 면적을 도출하여 용입 특성이 열영향부에 미치는 영향을 확인하고자 하였으며, 용입 면적은 Fig. 11에 나타난

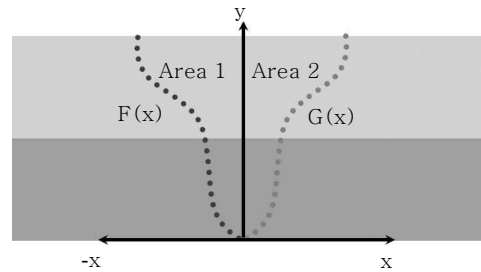


Fig. 11 A schematic diagram for calculating penetration area

것과 같이 Area 1, 2를 나누고 곡선 근사법을 이용해 용입 특성을 표현하는 함수를 정의하여 두 함수간의 적분으로 면적을 도출하였다.

용입 면적을 도출하기 위한 함수는 실제 데이터와 얻어지는 직선이나 곡선사이의 오차를 최소화 할 수 있는 곡선 근사법을 사용하였으며, 용입이 이루어진 Data를 가우시안 형태로 가정하고 곡선 근사방법 중 출력값의 평균제곱오차를 최소화하는 General gaussian model로 함수를 도출하는 방법을 사용하였다. 용접공정 변수 변화에 따른 용입 면적을 도출하기 위해 용입 특성을 광학현미경을 통해 20곳의 위치를 측정하고 x, y 좌표 상에 나타내어 이들 사이의 관계식을 아래와 같이 식 (1) 과 식 (2)로 표현할 수 있다.

$$F(x) = a_1 \cdot e^{-\left(\frac{x-b_1}{c_1}\right)^2} + a_2 \cdot e^{-\left(\frac{x-b_2}{c_2}\right)^2} \quad (1)$$

$$G(x) = d_1 \cdot e^{-\left(\frac{x-e_1}{f_1}\right)^2} + d_2 \cdot e^{-\left(\frac{x-e_2}{f_2}\right)^2} \quad (2)$$

여기서, $G(x), F(x)$ 는 왼쪽면과 오른쪽면의 용입부

형상을 나타내는 함수이고, $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2, d_1, e_1, f_1, d_2, e_2, f_2$ 는 함수를 표현하는 계수로서 위와 같은 함수 및 계수들은 MATLAB을 이용하여 Curve fitting tool에서 일반적인 Gaussian 2차 모델을 사용하여 도출하였으며, Table 4는 용입부 형상을 나타내는 함수를 제시하고 있다.

개발된 용입부 형상을 표현하는 함수를 기반으로 시

Table 4 Function result of representing for penetration aspect

Test no.	Area	Function of penetration aspect
1	1	$0.4242 \cdot e^{-\left(\frac{x-1.783}{0.9881}\right)^2} + 0.259 \cdot e^{-\left(\frac{x-0.6766}{0.4469}\right)^2}$
	2	$5.658 \times 10^{20} \cdot e^{-\left(\frac{x+127.7}{18.53}\right)^2} + 5.917 \times 10^{12} \cdot e^{-\left(\frac{x-135.1}{24.46}\right)^2}$
2	1	$0.5708 \cdot e^{-\left(\frac{x-1.966}{1.291}\right)^2} + 1.111 \times 10^7 \cdot e^{-\left(\frac{x-14.22}{2.66}\right)^2}$
	2	$1.429 \cdot e^{-\left(\frac{x+1.083}{1.765}\right)^2} + 5.932 \cdot e^{-\left(\frac{x-14.87}{9.902}\right)^2}$
3	1	$0.5257 \cdot e^{-\left(\frac{x-2.052}{1.219}\right)^2} + 0.2505 \cdot e^{-\left(\frac{x-0.7645}{0.4412}\right)^2}$
	2	$1.795 \times 10^{22} \cdot e^{-\left(\frac{x+118.5}{16.57}\right)^2} + 5.966 \times 10^7 \cdot e^{-\left(\frac{x-107.3}{24.87}\right)^2}$
4	1	$0.5371 \cdot e^{-\left(\frac{x-2.188}{1.633}\right)^2} + 0 \cdot e^{-\left(\frac{x+6.786}{0.2467}\right)^2}$
	2	$-245.9 \cdot e^{-\left(\frac{x-0.2946}{0.01742}\right)^2} + 1.226 \times 10^{20} \cdot e^{-\left(\frac{x+508.1}{75.08}\right)^2}$
5	1	$-13.82 \cdot e^{-\left(\frac{x-0.8767}{0.07623}\right)^2} + 0.5282 \cdot e^{-\left(\frac{x-1.504}{1.095}\right)^2}$
	2	$2.302 \cdot e^{-\left(\frac{x+1.035}{2.203}\right)^2} + 1.495 \cdot e^{-\left(\frac{x-3.31}{1.48}\right)^2}$
6	1	$0.5441 \cdot e^{-\left(\frac{x-1.404}{0.9431}\right)^2} + 0.5369 \cdot e^{-\left(\frac{x-2.933}{0.8026}\right)^2}$
	2	$5.265 \times 10^{22} \cdot e^{-\left(\frac{x+3.579}{0.4898}\right)^2} + 4.381 \times 10^8 \cdot e^{-\left(\frac{x+242.9}{55.09}\right)^2}$
7	1	$0.5285 \cdot e^{-\left(\frac{x-1.921}{1.45}\right)^2} + 1.368 \times 10^8 \cdot e^{-\left(\frac{x-3.067}{0.05689}\right)^2}$
	2	$6.768 \times 10^{13} \cdot e^{-\left(\frac{x+528}{94.17}\right)^2} + 0.3907 \cdot e^{-\left(\frac{x-2.721}{0.4704}\right)^2}$
8	1	$0.449 \cdot e^{-\left(\frac{x-1.515}{0.8148}\right)^2} + 2.998 \times 10^{14} \cdot e^{-\left(\frac{x-84.52}{13.92}\right)^2}$
	2	$1.9 \times 10^{15} \cdot e^{-\left(\frac{x+31.68}{5.329}\right)^2} + 5.781 \cdot e^{-\left(\frac{x-32.83}{24.74}\right)^2}$
9	1	$0.2934 \cdot e^{-\left(\frac{x-1.38}{0.1005}\right)^2} + 0.3509 \cdot e^{-\left(\frac{x-2.187}{1.639}\right)^2}$
	2	$1.091 \cdot e^{-\left(\frac{x-0.3054}{1.514}\right)^2} + 1.814 \cdot e^{-\left(\frac{x-5.608}{4.266}\right)^2}$
10	1	$0.4835 \cdot e^{-\left(\frac{x-2.294}{0.7917}\right)^2} + 0.321 \cdot e^{-\left(\frac{x-0.9334}{0.716}\right)^2}$
	2	$1.224 \cdot e^{-\left(\frac{x-0.4636}{1.668}\right)^2} + 14.7 \cdot e^{-\left(\frac{x-10.57}{5.0419}\right)^2}$
11	1	$-0.08415 \cdot e^{-\left(\frac{x-0.08433}{0.2064}\right)^2} + 0.4148 \cdot e^{-\left(\frac{x-3.342}{2.517}\right)^2}$
	2	$1.462 \cdot e^{-\left(\frac{x-0.7401}{2.93}\right)^2} + 1.21 \times 10^9 \cdot e^{-\left(\frac{x-23.17}{4.333}\right)^2}$
12	1	$0 \cdot e^{-\left(\frac{x+9.956}{0.1115}\right)^2} + 0.4746 \cdot e^{-\left(\frac{x-1.97}{1.374}\right)^2}$
	2	$2.064 \times 10^{10} \cdot e^{-\left(\frac{x+118.2}{24.48}\right)^2} + 9.329 \times 10^{24} \cdot e^{-\left(\frac{x-141.9}{18.3}\right)^2}$

Test no.	Area	Function of penetration aspect
13	1	$0.5361 \cdot e^{-\left(\frac{x-1.463}{1.05}\right)^2} + 0.2305 \cdot e^{-\left(\frac{x-2.775}{1.388}\right)^2}$
	2	$8.316 \times 10^{54} \cdot e^{-\left(\frac{x+364.5}{32.49}\right)^2} + 5.86 \times 10^{69} \cdot e^{-\left(\frac{x-333.8}{26313}\right)^2}$
14	1	$0.3511 \cdot e^{-\left(\frac{x-2.623}{0.664}\right)^2} + 0.457 \cdot e^{-\left(\frac{x-1.498}{1.062}\right)^2}$
	2	$1.751 \cdot e^{-\left(\frac{x+1.582}{4.598}\right)^2} + 4.683 \times 10^{14} \cdot e^{-\left(\frac{x-55.81}{9.046}\right)^2}$
15	1	$-13.72 \cdot e^{-\left(\frac{x-15.31}{6.365}\right)^2} + 0.6374 \cdot e^{-\left(\frac{x-2.431}{1.523}\right)^2}$
	2	$1.151 \cdot e^{-\left(\frac{x-0.3305}{1.44}\right)^2} + 2.173 \cdot e^{-\left(\frac{x-5.187}{3.708}\right)^2}$
16	1	$0.4375 \cdot e^{-\left(\frac{x-2.06}{1.171}\right)^2} + 0.2028 \cdot e^{-\left(\frac{x-8056}{0.5375}\right)^2}$
	2	$2.2821 \cdot e^{-\left(\frac{x+4.196}{5.66}\right)^2} + 303.2 \cdot e^{-\left(\frac{x-12.11}{3.817}\right)^2}$
17	1	$0.4375 \cdot e^{-\left(\frac{x-2.06}{1.171}\right)^2} + 0.2028 \cdot e^{-\left(\frac{x-8056}{0.5375}\right)^2}$
	2	$2.2821 \cdot e^{-\left(\frac{x+4.196}{5.66}\right)^2} + 303.2 \cdot e^{-\left(\frac{x-12.11}{3.817}\right)^2}$
18	1	$0.4628 \cdot e^{-\left(\frac{x-2.148}{1.006}\right)^2} + 0.20692 \cdot e^{-\left(\frac{x-1.113}{0.6904}\right)^2}$
	2	$2.989 \cdot e^{-\left(\frac{x+5.509}{6.979}\right)^2} + 8.777 \times 10^{14} \cdot e^{-\left(\frac{x-60.08}{9.699}\right)^2}$
19	1	$0.3941 \cdot e^{-\left(\frac{x-2.447}{0.9203}\right)^2} + 0.1669 \cdot e^{-\left(\frac{x-0.9054}{0.6949}\right)^2}$
	2	$0.9933 \cdot e^{-\left(\frac{x+0.02469}{2.386}\right)^2} + 2.009 \cdot e^{-\left(\frac{x-7.165}{5.729}\right)^2}$
20	1	$0.1857 \cdot e^{-\left(\frac{x-1.377}{0.3262}\right)^2} + 0.873 \cdot e^{-\left(\frac{x-2.303}{1.384}\right)^2}$
	2	$6.852 \times 10^{15} \cdot e^{-\left(\frac{x+32.53}{5.38}\right)^2} + 19.98 \cdot e^{-\left(\frac{x-74.77}{44.28}\right)^2}$
21	1	$0.4886 \cdot e^{-\left(\frac{x-2.253}{1.076}\right)^2} + 0.1904 \cdot e^{-\left(\frac{x-1.043}{0.6519}\right)^2}$
	2	$0.5151 \cdot e^{-\left(\frac{x-0.08508}{0.7014}\right)^2} + 1.893 \times 10^6 \cdot e^{-\left(\frac{x-246.4}{64.91}\right)^2}$
22	1	$-0.1914 \cdot e^{-\left(\frac{x-2.647}{0.1482}\right)^2} + 0.5431 \cdot e^{-\left(\frac{x-2.879}{2.073}\right)^2}$
	2	$1.535 \cdot e^{-\left(\frac{x-0.7813}{3.09}\right)^2} + 0.8196 \cdot e^{-\left(\frac{x-2.672}{0.1773}\right)^2}$
23	1	$-0.1914 \cdot e^{-\left(\frac{x-2.647}{0.1482}\right)^2} + 0.5431 \cdot e^{-\left(\frac{x-2.879}{2.073}\right)^2}$
	2	$1.535 \cdot e^{-\left(\frac{x-0.7813}{3.09}\right)^2} + 0.8196 \cdot e^{-\left(\frac{x-2.672}{0.1773}\right)^2}$
24	1	$-6.158 \cdot e^{-\left(\frac{x-3.515}{1.78}\right)^2} + 6.217 \cdot e^{-\left(\frac{x-3.412}{1.797}\right)^2}$
	2	$-6.158 \cdot e^{-\left(\frac{x-3.515}{1.78}\right)^2} + 6.217 \cdot e^{-\left(\frac{x-3.412}{1.797}\right)^2}$
25	1	$0.1051 \cdot e^{-\left(\frac{x-2.095}{0.1191}\right)^2} + 0.585 \cdot e^{-\left(\frac{x-1.929}{1.571}\right)^2}$
	2	$2.195 \times 10^6 \cdot e^{-\left(\frac{x+95.07}{25.35}\right)^2} + 0.7977 \cdot e^{-\left(\frac{x-3.302}{1.425}\right)^2}$
26	1	$0 \cdot e^{-\left(\frac{x-1.135}{0.01447}\right)^2} + 0.05393 \cdot e^{-\left(\frac{x-1.919}{1.261}\right)^2}$
	2	$6.617 \times 10^{29} \cdot e^{-\left(\frac{x+177.8}{21.51}\right)^2} + 1.063 \times 10^{15} \cdot e^{-\left(\frac{x-181.6}{30.51}\right)^2}$
27	1	$0.5266 \cdot e^{-\left(\frac{x-1.395}{1.072}\right)^2} + 0.2033 \cdot e^{-\left(\frac{x-3.727}{1.745}\right)^2}$
	2	$271.3 \cdot e^{-\left(\frac{x+25.43}{11.28}\right)^2} + 0.9218 \cdot e^{-\left(\frac{x-3.134}{1.224}\right)^2}$

험편 두께인 2.8t를 입력하여 입력변수 변화에 따른 용입 면적의 적분을 통해 산출하였으며, Table 5는 데이터 그룹에 따른 용입 면적을 나타내었다. 전체적인 용접조건에서 산출된 용입 면적과 용접 열영향부의 연화 특성을 비교한 결과 TRIP 및 DP강의 연화 특성은 뚜렷한 성향을 띄지 않았다. 이는 용입 면적이 증가하게 되면 입 열량도 동시에 상승하는 것을 의미하기 때문에 더욱 세부적 조건인 레이저 출력 조건의 값을 고정시켜 용접속도별 연화 성향을 분석해 보았다. 그 결과 동일 조건의 레이저 출력에서 용입 면적이 증가하면 DP강의 열영향

부 연화성이 증가하는 성향을 확인하였으나, TRIP강 열영향부 연화성은 증가하거나 감소하는 패턴은 발생되지 않음을 확인하였다. Figs. 12~14는 레이저 출력별 용입 면적에 따른 DP강 연화 현상의 성향을 보여주고 있다.

Table 5 Result of penetration area according to data group

Data group	Test No.	Area 1 (mm ²)	Area 2 (mm ²)	Total area (mm ²)
Group Ar	1	1.188	1.359	2.547
	2	1.476	0.945	2.421
	3	1.434	0.936	2.370
	4	1.071	1.302	2.373
	5	1.527	1.014	2.541
	6	1.543	0.883	2.426
	7	1.229	1.487	2.716
	8	1.687	0.943	2.630
	9	0.772	2.174	2.946
Group N ₂	10	1.499	0.922	2.421
	11	1.157	2.152	3.309
	12	1.291	1.619	2.910
	13	0.973	1.358	2.741
	14	1.061	1.896	2.957
	15	1.302	1.835	3.137
	16	1.398	1.239	2.637
	17	1.639	1.190	2.829
	18	1.210	1.205	2.415
Group He	19	1.112	2.037	3.149
	20	1.203	1.865	3.068
	21	1.281	1.246	2.527
	22	1.552	1.814	3.366
	23	1.283	1.272	2.555
	24	1.506	0.615	2.121
	25	1.082	1.447	2.529
	26	1.193	0.901	2.094
	27	1.396	1.350	2.746

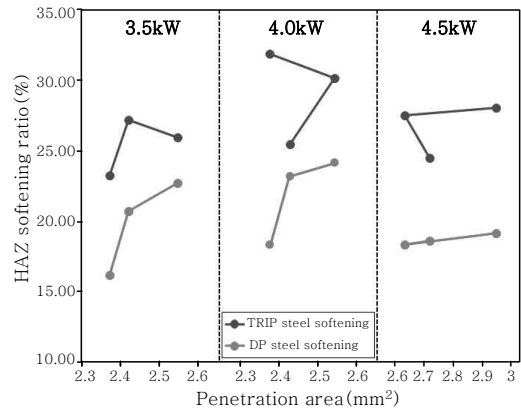


Fig. 12 Influence of penetration area on the HAZ softening ratio for laser power (Data group Ar)

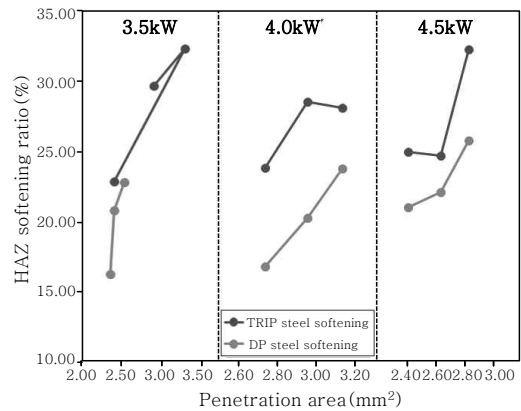


Fig. 13 Influence of penetration area on the HAZ softening ratio for laser power (Data group N₂)

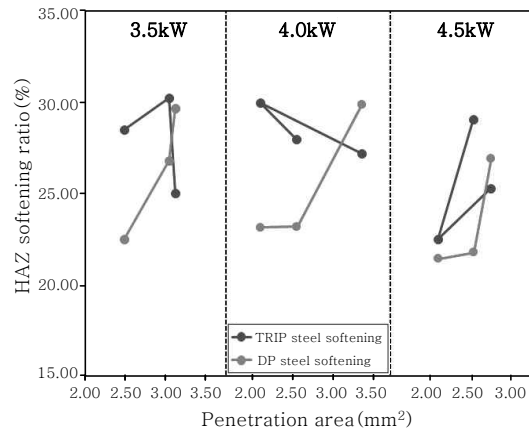


Fig. 14 Influence of penetration area on the HAZ softening ratio for laser power (Data group He)

5. 연화 특성과 기계적 특성의 상관관계

고장력강의 용접부 열영향부 연화 특성은 미세조직과 용접프로세스, 용접조건 등에 의해 결정되며, 위에서 기술한 바와 같이 용접프로세스 및 용접조건에 따라 연화 정도가 달라지고 있기 때문에 데이터 그룹 및 DP강 열영향부의 연화 정도에 따라 기계적 특성에 영향이 미치는지를 확인하고자 하였다. 영향력을 확인하기 위하여 연화 정도에 따라 전단 인장 강도가 변화하는 추세를 파악하여 열영향부 연화 정도의 적정 범위를 제시하였다. Table 6은 데이터 그룹별 전단인장강도와 연화 정도를

Table 6 Mechanical characteristics for tensile shear strength and HAZ softening ratio

Data group	Test No.	Tensile shear strength (MPa)	DP steel softening ratio (%)
Group Ar	1	762.745	22.83
	2	844.61	20.85
	3	812.45	16.30
	4	838.57	18.47
	5	749.98	24.27
	6	755.32	23.31
	7	875.74	18.73
	8	805.59	18.47
	9	802.05	19.26
Group N ₂	10	865.07	21.35
	11	599.11	29.19
	12	837.40	22.57
	13	901.48	16.85
	14	911.37	20.30
	15	774.87	23.79
	16	680.18	28.39
	17	860.95	21.83
	18	949.94	19.84
Group He	19	681.84	29.69
	20	754.11	26.83
	21	802.05	22.58
	22	688.91	28.61
	23	826.27	20.30
	24	862.42	20.31
	25	813.35	20.31
	26	978.32	19.80
	27	692.25	27.95

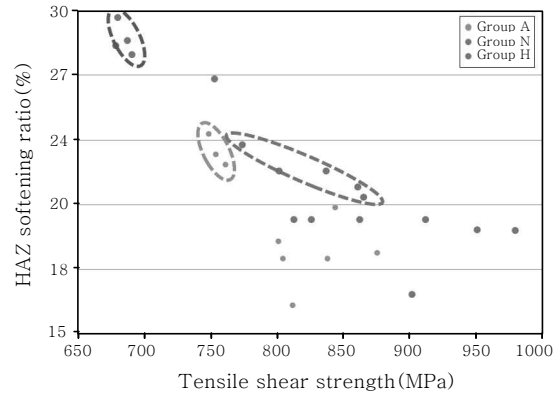


Fig. 15 Relation between tensile shear strength and HAZ softening ratio

보여주고 있으며, Fig. 15는 전단 인장 강도의 변화 추세를 나타내어 연화 정도의 적정 범위를 보여준다.

Fig. 15의 결과를 보면 데이터 그룹 A에서 800MPa~900MPa의 범위는 연화 정도와의 관계가 상당히 분산되어 관련성을 규명하기에는 어려움이 있으나, 800Mpa 이하의 범위에서는 연화 정도에 따라 전단 인장 강도가 현저히 감소되는 성향을 보인다. 본 논문에서 수행한 레이저 용접시험편은 겹치기 이음으로써, 전단력이 가해져 균열이 진전되는 영역이 용접부와 밀접해 있는 열영향부에서 균열이 시작되기 때문에 HAZ부의 연화 정도와 맞물려 전단 인장 강도가 현저하게 감소하는 것으로 판단된다. 또한 데이터 그룹 N₂과 He에서도 비슷한 성향들이 발생되는데 분포영역들이 광범위하게 나타나 전체적인 용접공정 변수에 대해서는 공학적인 판단기준에 근거를 두기에는 매우 어려움이 많다. 이러한 추론들을 기반으로 데이터 그룹 Ar는 연화 정도가 22% 이상, 데이터 그룹 N₂은 21% 이상 그리고 데이터 그룹 He는 27% 이상 일 때 전단 인장 강도가 현저하게 감소되므로 언제나 이와 같은 연화 정도를 대응하도록 하여 주의의 필요성이 제기된다.

6. 결 론

본 연구에서는 차체 제작용 고장력강인 TRIP 1180 Steel 및 DP 980 Steel의 겹치기 이음부 형태를 갖는 시험편을 제작하여 파이버 레이저 용접시 획득한 데이터를 기반으로 용접부의 열영향부 연화 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 파이버 레이저 용접으로 인한 강도저하 또는 상승의 가능성 등을 알아보기 위하여 용접 시험편의 일부를 절단하여 경도시험을 실시하였으며, 그 결과 전반적으로 질소 보호가스를 사용할 경우 파이버 레이저 용접시험편의 경도가 다소 낮은 것으로 확인되었다. 이는 보호

가스의 종류에 따라 용융금속을 산화로부터 보호하는 차단막의 역할을 하여 용접부에 산화물형의 비금속 개재물과 기공 등 용접결합의 형성정도가 달라져 용융부의 생성에 영향을 미치기 때문에 아르곤, 헬륨 보호가스보다 질소 보호가스의 차단막 효과가 비교적 낮다는 것을 확인할 수 있었다.

2) 고장력강 레이저 용접부는 보호가스의 종류에 따라 용접성이 매우 달라지기 때문에 보호가스별 데이터 그룹을 선정하여 경도분포를 확인한 결과, 최소 16.30%에서 최대 32.27%까지 연화현상에 의한 열영향부 경도값을 확인할 수 있었다.

3) 데이터 그룹별 용입 면적에 따른 용접 열영향부 연화 특성은 용입 면적이 증가하게 되면 입열량도 동시에 상승하는 것을 의미하기 때문에 레이저 출력 조건의 값을 고정시켜 용접속도별 연화 성향을 분석한 결과, 용입 면적이 증가하면 DP강의 열영향부 연화성이 증가하는 성향을 확인하였으나, TRIP강 열영향부 연화성은 증가하거나 감소하는 패턴은 발생되지 않음을 확인하였다.

4) 고장력강의 용접부 열영향부 연화 특성은 용접프로세스 및 용접조건에 따라 연화 정도가 달라지고 있기 때문에 열영향부 연화 특성이 발생하는 DP강의 열영향부 연화 특성과 기계적 특성의 상관관계를 확인하고자 하였다. 그 결과 DP강의 연화 정도에 따라 데이터 그룹 Ar는 연화 정도가 22% 이상, 데이터 그룹 N₂은 21% 이상 그리고 데이터 그룹 He는 27% 이상 일 때 전단 인장 강도가 현저하게 감소되므로 언제나 이와 같은 연화 정도를 대응하도록 하여 주의의 필요성이 제기됨을 확인하였다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임. (No. 2013H1B8A2032082)

Reference

1. T. Kitamura, et. al., Effect of Strength of Steel Plate and Patterns of Welded Bead for Static Strength of Laser Welded Lap Joint, *Preprints of the National Meeting of the Japan Welding Society*, 20 (2007), 42-43
2. J. Lee, K. Asim and J. Pan, Modeling of Failure Mode of Laser Welds in Lap-shear Specimens of HSLA Steel Sheets, *Engineering and Fracture Mechanics*, 78 (2011), 374-396
3. R. Sharma, P. Molian and F. Peters, Geometric Variability and Surface Finish of Weld Zones in Yb: YAG Laser Welded Advanced High Strength Steels, *Journal of Manufacturing Processes*, 12 (2010), 73-84
4. M. Uchihara and K. Fukuki, The Formability of Tailor Welded Blanks Using High Strength Steel Sheets, *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 23-4 (2005), 541-548
5. T. Otani, S. Tsukamoto, G. Arakane and A. Omori : HAZ Properties of Ultra-fine Grained High Strength Steels Welded by High Power Laser, *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 21-2 (2003), 267-273
6. M. Han, Y. Lee, Fatigue Characteristics of SPFC590 Laser Welded Sheet Metal for Automobile Body Panel, *Transactions of KSAE*, 11-1 (2003), 143-150
7. R. R. G. M. Pieters, M. Y. Krasnoperov, I. M. Richardson, Laser Welding of High Strength Steels, *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, Laser Material Processing Conference*, 522 (2003), 294-303
8. Z. Liu, M. Kutsuna, G. Xu, Fiber Laser Welding of 780MPa High Strength Steel, *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, Laser Material Processing Conference*, 1101 (2006), 562-568
9. S. G. Shi, S. Westgate, Fiber-Delivered Laser Welding of Ultra-High Strength Steels for Automotive Applications, *TWI Report*, (2007), 865-866
10. C. Y. Kang, Hardening Characteristics and Carbon Equivalent in Laser, *Journal of KWJS*, 29-6 (2011), 11-25 (in Korean)
11. J. P. Lee, I. S. Kim, M. H. Park, C. K. Park, B. Y. Kang, J. Y. Shim : A Study on Development of STACO Model to Predict Bead Height in Tandem GMA Welding Process, *Journal of KWJS*, 32-6 (2014), 8-13 (in Korean)
12. K. C. Kim, K. H. Lee, E. P. Yoon: Effect of welding parameters on weld quality of laser welded structural steels, *Joining of Materials*, 4-1 (1992), 29