

CO₂ 레이저 용접 이종재료강의 피로파괴거동에 관한 연구

한문식* · 서 정** · 이제훈** · 김정오** · 전성민***

*계명대학교 기계·자동차공학부

**한국기계연구원 정보장비연구센터

***(주)평화산업 기술연구소

A Study on Fatigue Fracture Behavior of Laser Beam Welding and Steel with Different Materials

M. S. Han*, J. Suh**, J. H. Lee**, J. O. Kim** and S. M. Jeon***

*Faculty of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung University

**IT Machinery Technology Research Center, KIMM

***Institute of Technology, Pyung Hwa Industrial Co., LTD

Abstract

In this paper, we investigated the characteristics of fatigue fracture on TB(Tailored Blank) weldment by comparing the fatigue crack propagation characteristics of base metal with those of TB welded sheet used for vehicle body panels. We also investigated the influence of center crack on the fatigue characteristic of laser weld sheet of same thickness. We conducted an experiment on fatigue crack propagation on the base metal specimen of 1.2mm thickness of cold-rolled metal sheet(SPCSD) and 2.0mm thickness of hot-rolled metal sheet(SAPH440) and 1.2+2.0mm TB specimen. We also made an experiment on fatigue crack propagation on 2.0+2.0mm and 1.2+1.2mm thickness TB specimen which had center crack. The characteristics of fatigue crack growth on the base metal were different from those on 1.2+2.0mm thickness TB specimen. The fatigue crack growth rate of the TB welded specimens is slower in low stress intensity factor range(ΔK) region and faster in high ΔK region than that of the base metal specimens. The slant crack angle slightly influenced the crack propagation of the TB specimen of 2.0+2.0mm thickness.

Key words : Laser weldment(레이저용접부), Tailored blank(테일러드블랭크), Different Materials(이종재료), Different thickness(이종두께), Fatigue crack propagation(피로균열전파), Heat affected zone(열영향부)

1. 서 론

레이저 용접은 매우 작은 점으로 집중된 레이저광에서 변환되는 높은 밀도의 에너지를 재료의 두께 방향으로 직접투입하는 고속 용접법으로 용접속도가 빠르고, 용입 깊이가 깊으며, 열에 의한 변형이 적고, 어떠한 환경에서도 용접이 가능하다¹⁻³⁾. 레이저 용접의 응용분야 중 가장 주목받고 있는 분야는 TB 용접이다. TB 용접이란 소요 부품의 요구특성과 용도에 따라 동종 또는 이종의 판재를 2매 이상 조합하여 레이저 또는 매쉬 심(mash seam) 용접 등을 통해 하나의 판재로 만든 다음 블랭킹(blanking) 또는 드로잉(drawing)하는 성형 공정을 말한다. TB 용접의 장점으로는 일체화 성형으로 인해 프레스 공정수를 단축할 수 있고, 외관이 양호하며, 조립정밀도가 높으며, 강성이 우수한 특성 등을 가지고 있다⁴⁾. 최근 원가절감, 경량화, 강성향상 등을 위해 미국, 유럽, 일본 등의 자동차회사들은 일찍이 TB 레이저 용접 기술의 적용을 활발히 추진하고 있다⁵⁾. 현재 자동차에 적용하고 있는 저항 점용접을 기초로 한 설계 및 생산방식을 TB 레이저 용접 적용방식으로 대체하게 되면 자동차 경량화에 의한 연비향상(중량 1% 감소는 연비1% 개선)과 공정단축 및 생산라인 단순화로 에너지절약 효과를 달성할 수 있다. 이러한 TB 레이저용접에 대한 장점이 있음에도 불구하고 용접부의 성형성과 구조적 안정성에 관한 검토는 필수적이다. 차량의 구조체 및 부품은 정적하중과 충격 하중을 반복적으로 받게 되고, 특히 용접부의 피로거동을 파악하는 것은 차체안전설계 및 수명을 예측하는데 있어서 필수적이라 할 수 있다^{6,7)}. 그러므로 본 연

구에서는 차량 소재로 사용되고 있는 열간압연강 및 냉간압연강의 Laser 용접에 대한 용접부의 구조적 안정성을 고찰하기 위해 외부하중에 대한 정적 및 피로파괴특성을 고찰하였다. 레이저 용접부의 기계적 특성 변화를 검토하기 위해 용접부의 조직변화를 관찰하였고, 모재부와 열 영향부 그리고 비드부의 경도를 측정하였다. 현재 자동차 제작사에서 적용되고 있는 용접형태로 시험편을 제작하여 이종두께로 용접하였을 때 용접부위의 피로균열 전파특성을 모재의 경우와 비교함으로써 TB 레이저 용접의 접합부위에 대한 파괴역학적 특성을 고찰하였다. 또한, 동종두께 레이저 용접판재의 경사균열에 대한 파괴역학적 특성을 고찰하기 위하여 모재시험편과 비교하였다.

2. 실험 및 실험방법

2.1 실험 개요

본 연구에서는 이종재료, 이종두께를 가지는 자동차 구조용 2.0mm 두께인 열간압연강판(SAPH440) 및 1.2mm 두께의 냉간압연강판(SPCSD)을 레이저 용접한 시험편에 대하여 용접부의 구조적 안정성을 고찰하기 위하여 두께가 1.2와 2.0 mm인 모재, 그리고 1.2+2.0mm, 1.2+1.2mm 및 2.0+2.0mm를 레이저 용접한 시험편(이하 TB시험편)에 대하여 각각 다음과 같은 실험을 하였다.

- (1) 제 1 실험 - 각 시험편에 대한 인장실험
- 1) 두께가 1.2mm 모재인 경우
 - 2) 두께가 2.0mm 모재인 경우
 - 3) 두께가 1.2+2.0mm(TB시험편)인 경우
 - 4) 두께가 1.2+1.2mm(TB시험편)인 경우

- 5) 두께가 2.0+2.0mm(TB시험편)인 경우
- (2) 제 2 실험 - 초기 균열 경사각 $\beta=0^\circ$ 일 때 각 시험편에 대한 피로균열 전파 거동을 고찰하기 위한 피로균열 전파 실험
- 1) 두께가 1.2mm일 때 중앙균열(center crack)을 낸 경우
 - 2) 두께가 2.0mm일 때 중앙균열을 낸 경우
 - 3) 두께가 1.2+1.2mm(TB시험편)일 때 비드부에 중앙 균열을 낸 경우
 - 4) 두께가 2.0+2.0mm(TB시험편)일 때 비드부에 중앙 균열을 낸 경우
 - 5) 두께가 1.2+2.0mm(TB시험편)일 때 비드부에 중앙 균열을 낸 경우
 - 6) 두께가 1.2+2.0mm(TB시험편)일 때 1.2mm 방향의 열 영향부(HAZ)에 중앙균열을 낸 경우
 - 7) 두께가 1.2+2.0mm(TB시험편)일 때 2.0mm 방향의 열 영향부(HAZ)에 중앙균열을 낸 경우
- (3) 제 3 실험 - 각 시험편에 초기 균열 경사각이 존재할 때 피로균열 전파 거동을 고찰하기 위한 피로균열 전파 실험
- 1) 두께 2.0mm 모재 시험편일 때 22.5°의 경사균열(slant crack)을 낸 경우
 - 2) 두께 2.0mm 모재 시험편일 때 45°의 경사균열을 낸 경우
 - 3) 두께 2.0mm 모재 시험편일 때 67.5°의 경사균열을 낸 경우
 - 4) 두께 2.0+2.0mm(TB시험편)일 때 22.5°의 경사균열을 낸 경우
 - 5) 두께 2.0+2.0mm(TB시험편)일 때 45°의 경사균열을 낸 경우
 - 6) 두께 2.0+2.0mm(TB시험편)일 때 67.5°의 경사균열을 낸 경우

2.2 시험편의 제작

본 연구에 사용된 시험편의 재질은 자동차 차체 제작에 사용되는 열간압연강판 및 냉간압연강판 재료로서 제품명은 SPCSD

(1.2mm)와 SAPH440(2.0mm)이며, 사용된 재료의 화학적 조성은 Table 1과 같다. 레이저 용접한 시험편은 용접선의 방향이 하중과 수직인 방향으로 되도록 제작하였다^{8,9)}. Fig. 1은 인장 시험편과 피로균열 전파 거동을 고찰하기 위한 시험편으로 KS B0801 5호 규격으로 제작하였으며, 중앙균열은 시험편의 중앙부에 레이저를 이용하여 폭 0.3mm, 길이 2mm의 크기의 노치를 낸 후 약 1mm 정도의 예비균열을 내어 완성하였다. 또한, 레이저 용접된 시험편에 대한 열 영향부(HAZ)의 영향을 고찰하기 위하여 두께 1.2mm와 2.0mm 방향으로 각각 열 영향부(비드부 중앙에서 약 0.4mm 거리)에 중앙균열을 내었다. 그리고 두께 2.0mm를 레이저 용접한 시험편과 2.0mm모재 시험편에 대하여 초기 균열 경사각 $\beta=22.5, 45, 67.5^\circ$ 일 때의 피로 균열진전 특성을 각각 비교하였다.

2.3 용접 조건

인장 및 피로균열 시험에 사용될 레이저 용접 시험편을 제작하는데 사용한 CO₂ 레이저 발전기는 연속 출력파이며 정격 출력 4kW의 횡여기 방식(transverse flow type)으로서 빔 모드는 다중모드(multi-mode)이다¹⁰⁾. 기초실험을 통하여 빔의 초점은 시험편 표면으로부터 1mm 아래로 설정하고, 피로균열 전파시험에 사용된 레이저 용접조건은 출력 2.7kW, 용접속도 2.5m/min, 보조가스는 아르곤(30 l/min)을 이용하여 맞대기 용접으로 시험편을 제작하였다. 용접에 사용된 장비는 ROFIN-SINAR사(社)의 RS-840을 사용하였다. Table 2는 용접조건을

Table 1. Chemical composition of specimens (wt.%)

Material	C	Si	Mn	P	S
SPCSD	0.00148	0.0367	0.106	0.0057	0.00633
SAPH440	0.08197	0.0118	1.45	0.0165	0.00455

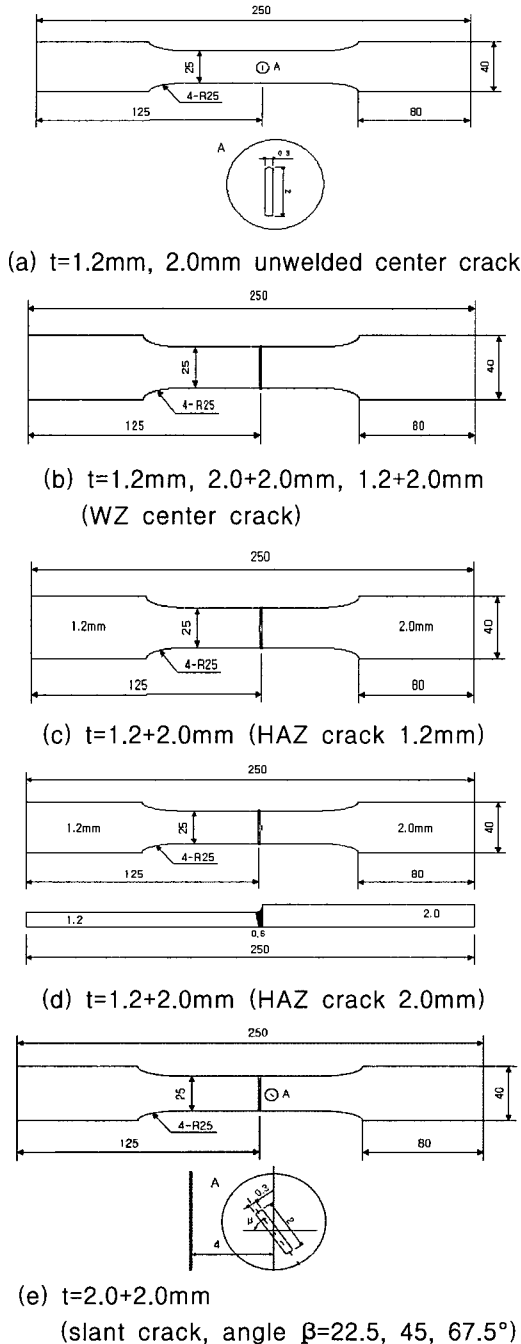


Fig. 1 Geometry of specimens for fatigue crack propagation test

나타내고 있다. Fig. 2는 용접실험에 사용된 레이저 용접 장치의 헤드(head)와 용접블랭크용 용접치구(jig)를 보여주고 있다.

Table 2. Welding Condition

Material	Test	Power (kW)	Speed (m/min)	Thickness (mm)	Shield gas
SPCSD+SAPH440	Crack Growth	2.7	2.5	1.2+2.0	Ar 30 l/min
SAPH440+SAPH440	Crack Growth	2.7	2.5	2.0+2.0	Ar 30 l/min



Fig. 2 Photograph of laser welding head and jig

2.4 실험 장치 및 방법

2.4.1 인장실험

인장실험은 최대용량 100kN인 유압식 만능재료 시험기(MTS810 Material Test System)를 사용하였으며, ASTM E8에 준하여 상온에서 실험을 수행하였다¹¹⁾. 부속장치로서 변형률 게이지(Extensometer)를 장착하여 변위제어(Stroke Control)방식으로 하중속도 3mm/min로 실험하였다. Fig. 3은 인장실험 과정에서 변형률을 측정하기 위해 시험편에 변형률 게이지를 장착한 모습을 보여 주고 있다.

2.4.2 피로균열 전파실험

피로균열 전파실험도 인장실험과 동일한

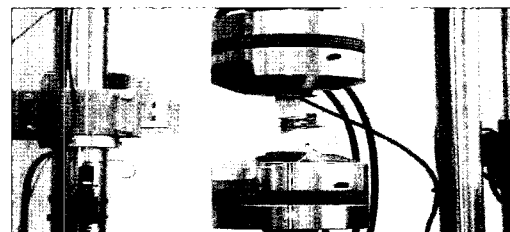


Fig. 3 Photograph of tension test

시험기를 사용하였다. 실험은 하중제어(load control)방식으로 응력비 0.1에서 실시하였으며, 파형은 정현파(sine wave)로 하였다. 또한 시험 주파수는 15Hz로 하였고, 최대하중은 인장강도의 45% 범위에서 일정 하중의 진폭시험(constant load amplitude test)을 하였다. 균열 전파거동을 명확히 관찰하기 위하여 시험편의 표면을 경면 연마하였고, 균열 길이 측정은 약 0.5mm 정도 진전할 때마다 시험기를 중지하고 최대 피로하중의 80%를 가한 상태에서 광학 배율이 500X의 CCD MICRO SCOPE(inf-500)와 화상처리장치(BMI plus SE)를 이용하여 ASTM E 647에 준하여 균열 길이를 측정하였다¹²⁾. Fig. 4는 피로균열전파 실험 장치를 나타낸 그림이다.

2.4.3 경도시험

용접부 주위의 기계적 물성치의 변화를 고찰하기 위하여 Mitutoyo사(社)의 Mvk-H1 인 Micro-Vickers 경도기를 이용하여 용접부의 경도 변화를 고찰하였으며, 용접부 주위의 금속학적 고찰과 파단면에 대한 분석은 금속현미경(ZEISS 社)을 이용하여 용접부의 조직 변화 사진을 얻었다.

3. 실험 결과 및 고찰

마이크로비커스 경도기를 이용하여 200g의 하중을 0.1mm간격으로 측정한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 레이저 용접부는 매우

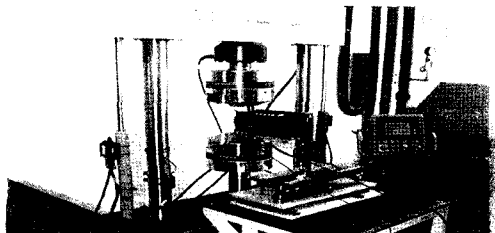


Fig. 4 Photograph of fatigue test

급격한 가열 및 냉각과정을 받고있기 때문에 열 영향부를 포함한 비드부의 경도값은 매우 높다. 각 두께 방향 모재의 마이크로비커스 경도값은 각각 Hv=133(2mm방향), Hv=88(1.2mm방향) 전후였는데 반해 용접 비드 부분의 경도는 모재보다 약 1.8 및 2.7 배 가량 높은 Hv=245(2mm방향), Hv=235(1.2mm방향)으로 변화하고 있다. 각 재료별 모재부 경도값의 차이보다 비드부의 경도값의 차이가 매우 적은 것은 용접시 모재부가 녹으면서 서로 다른 재료가 혼합되어 다른 재료로 변화하여 나타난 것으로 사료된다. 그리고 경도측정에서 일반용접 등에서는 명확히 나타나는 열 영향부(HAZ)가 레이저 용접시에는 극소화됨을 나타내고 있다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 모재 부분에서 경도값이 일정하다가 용접부에서는 경도값이 급격히 상승되는 것을 알 수 있다. 이것은 레이저 용접이 기존의 용접과 같은 열전도에 의존하는 것이 아니라 접합 부위에 직접 고밀도의 열 에너지를 가하기 때문이라 생각된다. 이와 같은 현상은 금속 현미경을 이용하여 금속조직을 관찰한 결과에서도 잘 나타나고 있

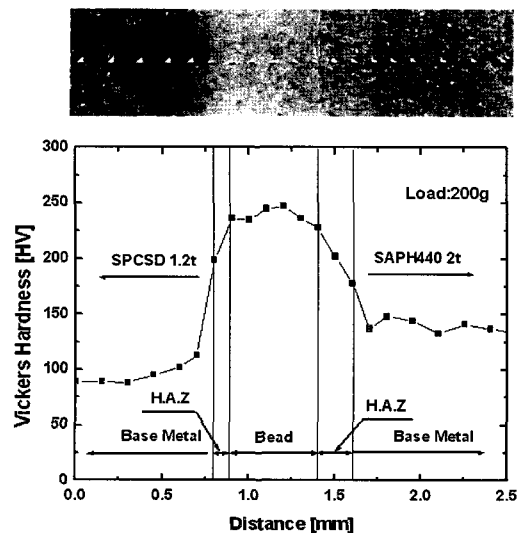


Fig. 5 Microhardness (200g load) distribution across the laser weldment

다. Fig. 6은 금속현미경을 이용하여 용접부 단면을 3% 나이탈로 부식시켜 얻은 금속조직 사진으로 모재 부분과 열 영향부, 그리고 비드 부분을 나타낸다. Fig. 6 (a)는 가로방향으로 압연된 SPCSD 강판의 일반적인 조직의 형태를 보이고 있는 반면, Fig. 6 (b)의 용접 비드 부분에서는 냉각속도가 빠르기 때문에 표면화 에너지가 증가하여 결정립이 작게 나타나는 것을 볼 수가 있다. Fig. 6 (a)에서 열 영향부의 조직의 형태가 거의 극소화 영역으로 나타나고 있다. 이와 같은 현상은 Fig. 5의 경도 변화에 대한 결과에서도 알 수 있듯이, 일반 용접과는 달리 레이저용접은 고밀도 에너지를 국부적인 위치에 가함으로 열전달에 의한 열 영향부를 극소화 할 수 있다는 사실을 나타낸다. Fig. 7은 서로 다른 두께(1.2mm+2.0mm)를 레이저 용접했을 때의 용접부 단면 형상을 나타내고 있다. 중간 부분에 용접선이 뚜렷이 나타나고 있고, 비교적 양호한 용접부 형상을 가짐을 알 수 있다.

SPCSD 및 SAPH440 강판의 모재 및 레이저용접 경우에 따른 인장시험의 결과를 Table

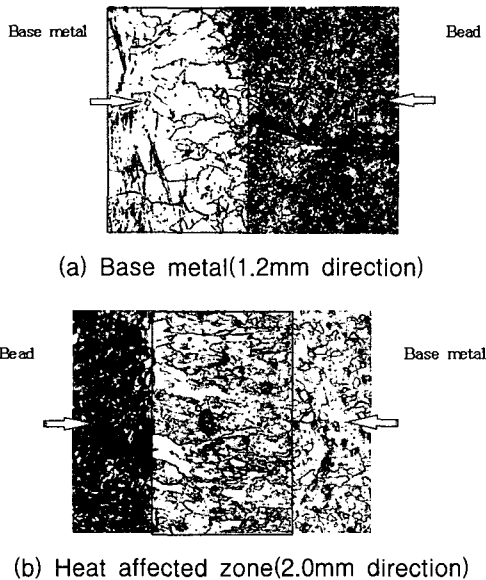


Fig. 6 The micro-structures of weldment (x500)

3에 나타내었다. 항복강도는 0.2%오프셋을 하여 각각 구하였다. Table 3에서 알 수 있듯이 1.2mm 시험편은 동종 두께를 용접한 시험편과 비교하였을 때 항복강도와 인장강도는 대략 10% 상승하였으며 연신률은 약 40% 감소하였다. 두께 2.0mm 시험편은 동종두께를 레이저 용접한 시험편과 비교했을 때 항복강도나 인장강도는 비슷하게 나타났으며 연신률은 약 25% 정도 감소하였다. 1.2+2.0mm의 레이저 용접 시험편의 경우 항복강도 및 인장강도가 1.2mm 모재시험편과 거의 같게 나왔으며 연신률만 다소 줄어들었다. 연신률은 용접할 경우용접부의 강도 및 경도 증가로 인하여 TB시험편들이 작게 나타난 것으로 판단된다.

용접부의 피로파괴 특성을 고찰하기 위해 상온에서 피로균열 전파실험을 수행하였다. Fig. 8은 1.2mm+2.0mm 레이저 용접한 시험편에 대해 비드부의 균열 전파거동을 100배의 배율로 나타낸 그림이다. Fig. 8 (a)와 (b)의 화살표는 균열의 진행 방향을 나타내



Fig. 7 Welding cross sections with combination of SPCSD(1.2mm) and SAPH440(2.0mm)

Table 3. Tensile Properties of specimens

Thickness (mm)	Yielding Stress (MPa)	Tensile Stress (MPa)	Elongation. (%)
1.2	131.83	262.63	55.2
2.0	332.48	455.48	36.7
1.2+2.0(TB)	134.38	264.31	33.2
1.2+1.2(TB)	172.82	301.05	48.8
2.0+2.0(TB)	311.06	457.47	28.2

고 있다. 초기 균열은 두께가 얇은 1.2mm 모재부의 방향으로 전파되는데 이것은 용접으로 인한 경도 및 강도 증가로 균열이 용접부로 전파되지 못하는 것으로 판단된다.

용접부의 피로파괴 특성을 고찰하기 위해 상온에서 피로균열 전파실험을 수행하였다. Fig. 8은 1.2mm+2.0mm 레이저 용접한 시험편에 대해 비드부의 균열 전파거동을 100배의 배율로 나타낸 그림이다. Fig. 8 (a)와 (b)의 화살표는 균열의 진행 방향을 나타내고 있다. 초기 균열은 두께가 얇은 1.2mm 모재부의 방향으로 전파되는데 이것은 용접으로 인한 경도 및 강도 증가로 균열이 용접부로 전파되지 못하는 것으로 판단된다. 일정하중 진폭시험(constant load amplitude test)을 통하여 얻은 자료로부터 피로균열의 전파거동에 대한 파괴역학적인 평가를 하였다. 균열 전파속도의 계산은 ASTM E647에 의거하여 균열진전속도 da/dN , 응력확대계수 ΔK 를 계산하였다¹²⁾.

각 시험편에 대한 Paris's Equation식의 재료상수 m, C 값은 Table 4와 같다¹³⁾. m, C 값은 최소자승법으로 계산하였다. 서로 다른 두께의 재료를 용접한 시험편에서 용접에 대한 피로특성을 검토하기 위하여 각 방향 열영향부와 비드부에 대한 피로균열 전파 시험을 하였고, 각 두께 모재 시험편 및 이종두께 재료 용접시험편과 비교하면서 함께 검토하였다. Fig. 9에서 전체적인 균열 진전 특성이 많은 차이를 나타내는데 이것은 용접으로 인한 열변형으로 서로 다른 재료로 변했기 때문이며 저영역의 ΔK 에서는 모재시험편이 용접시험편보다 균열진전속도가 더 크게 나타나다가 고영역의 ΔK 에서는 용접시험편에서 빠르게 나타났다. Fig. 10에서 균열 경사각 $\beta=22.5^\circ$ 일 때 저영역의 ΔK 에서는 모재시험편의 균열 진전율이 더 높다가 고영역의 ΔK 로 갈수록 피로 균열 특성이 유사해졌으며, Fig. 4.20와 Fig. 4.21은 전체적인 피로특성 변화가 없었다. 이것은 균열이 모두 모재부에서만 진전했기 때문에

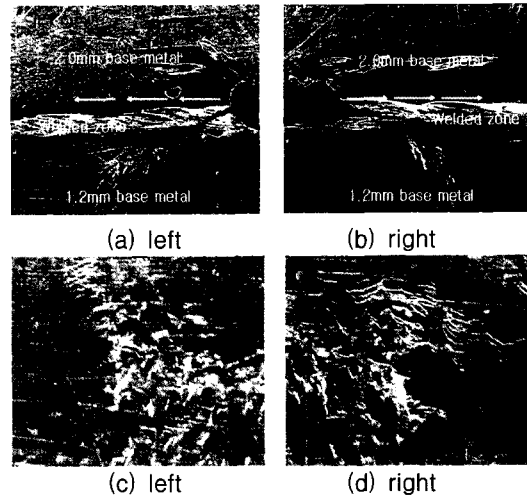


Fig. 8 Crack behavior of 1.2+2.0mm weld metal (WZ crack)

Table 4. C and m in Paris's Equation

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \text{ of specimens}$$

Specimens	C	m
1.2mm Base metal	2.53×10^{-7}	2.15
2.0mm Base metal	1.59×10^{-9}	4.15
1.2+1.2mm (WZ crack)	1.78×10^{-10}	4.97
2.0+2.0mm (WZ crack)	9.01×10^{-10}	4.20
1.2+2.0mm (WZ crack)	3.87×10^{-11}	5.95
1.2+2.0mm (HAZ crack 1.2mm)	8.82×10^{-10}	5.03
1.2+2.0mm (HAZ crack 2.0mm)	3.39×10^{-11}	7.31
2.0mm Base metal (Slant crack, $\beta=22.5^\circ$)	5.13×10^{-9}	3.79
2.0mm Base metal (Slant crack, $\beta=45^\circ$)	4.38×10^{-11}	5.48
2.0mm Base metal (Slant crack, $\beta=67.5^\circ$)	8.13×10^{-11}	5.17
2.0+2.0mm (Slant crack, $\beta=22.5^\circ$)	3.82×10^{-10}	4.72
2.0+2.0mm (Slant crack, $\beta=45^\circ$)	1.22×10^{-10}	5.21
2.0+2.0mm (Slant crack, $\beta=67.5^\circ$)	4.47×10^{-11}	5.53

용접의 유무와 관계 없이 피로특성이 유사한 것으로 판단된다. 초기 균열 경사각 $\beta=22.5, 45, 67.5^\circ$ 에 따라 균열진전특성을 비교한 결과 모재부 시험편에서 경사각이 존재할 때 초기 저영역의 ΔK 에서는 균열 경

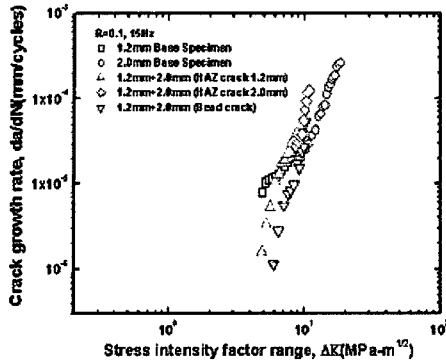


Fig. 9 Comparison of da/dN - ΔK curve for location of crack for weld joint

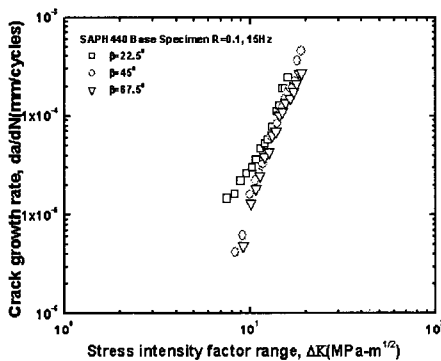


Fig. 10 Comparison of da/dN - ΔK curve for angle of slant crack(Base specimen)

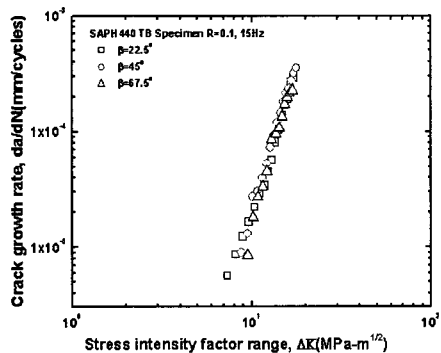


Fig. 11 Comparison of da/dN - ΔK curve for angle of slant crack(TB specimen)

사각이 작을수록 균열진전이 가장 빠르게 진행되었으나 Fig. 11에서 보인 바와 같이 용접시험편에서는 모두 비슷하게 나타났다.

4. 결 론

현재 자동차의 차체제작에 널리 사용되고 있는 열간압연강판(SAPH440) 및 냉간압연강판(SPCSD)에 대해 이종재료, 이종두께를 레이저 용접을 한 후에 용접부의 구조적 안정성을 고찰하기 위해 경도시험, 인장시험 및 피로균열 전파실험을 수행하였다. 그리고, 동종재료, 동종두께의 용접시험편에 경사균열이 존재할 때의 피로특성을 관찰하기 위하여 피로균열전파실험을 하였다. 이상의 실험결과로부터 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

인장시험의 결과 동종두께 및 이종두께를 레이저 용접한 TB 시험편의 항복강도와 인장강도가 모재보다 크게 나타났다. 레이저 용접부를 절단하여 현미경으로 관찰한 결과 일반 용접 등에서 명확히 나타나는 열영향부(HAZ)는 극소화되었고, 용접부의 경도를 측정된 결과 비드부의 경도는 모재보다 약 1.8~2.7배 가량 증가하였다. 모재부(2.0mm base metal) 시험편에 경사각이 존재할 때 경사각이 작을수록 저영역의 ΔK 에서 균열진전속도가 크다가 고영역의 ΔK 로 갈수록 작아짐을 볼 수 있었고 2.0+2.0mm 레이저 용접시험편에 대한 경사각의 영향은 미소하게 나타났다. 모재시험편 및 1.2+2.0mm 용접시험편의 비드부와 각 방향 열영향부에 대한 피로균열진전속도와 파괴강도 특성은 모재부와 용접부는 서로 다른 양상을 보이고 있으나 용접부에서는 모두 비슷한 경향이 나타났다.

참고문헌

1. Prange, W., Schnelder, C. and Selge, A. J., 1989, "Application of laser-beam-welded sheet metal," SAE NO.890853.
2. Selige, A. J. and Prange, W., 1997, "Production and usage of laser beam

- welded sheet metal," SAE NO.970413.
3. Hanicke, L. and Strandberg, O., 1993, "Roof laser welding in series productions," SAE NO.930021.
 4. Roessler, D. M., 1991, "Update on laser processing in the automotive industry," Int. Conf. on Lasers'91, San Diego, pp. 9~13.
 5. Lee, A. P., Feltham, E. and Deventer, J. V., 1996, "Tailor welded blank technology for automotive applications," SAE NO.960817.
 6. Hwang, J. R., Doong, J. L. and Chen, C. C., 1996, "Fatigue crack growth in laser weldments of cold rolled steel," Materials Transactions, JIM, Vol. 37, No. 8, pp. 1443~ 1446.
 7. Wang, P. C. and Ewing, K. M., 1991, "A comparison of fatigue strengths: laser beam vs. resistance spot welds," Welding Journal, October, pp. 43~47.
 8. Dawes, C., 1992, Laser welding-A practical guide, Abington Publishing, pp. 117.
 9. Leonard Migliore, 1996, Laser materials processing, Marcel Dekker Inc., pp. 165~170.
 10. Miyamoto, I. and Maruo, H., 1992, "Spatial and temporal characteristics of laser induced plasma in CO₂ laser welding," LAMP-92, pp. 311.
 11. Standard methods of tension testing of metallic materials, ASTM E8-79a.
 12. Standard practice for conducting force controlled constant amplitude axial fatigue tests of metallic materials, ASTM Designation E 647.
 13. P.C. Paris, F. Erdogan, 1963, "Critical Analysis of Crack Propagation Laws. J. Basic Engng," ASTM, Series D, Vol.85, No.4, pp.528-534.