

## 자동차 차체용 SPFC590강 레이저 용접판재의 피로특성

한 문 식\* · 이 양 섭

계명대학교 기계·자동차공학부

### Fatigue Characteristics of SPFC590 Laser Welded Sheet Metal for Automobile Body Panel

Moonsik Han\* · Yangsub Lee

Department of Automotive Engineering, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

(Received 17 September 2002 / Accepted 20 November 2002)

**Abstract** : Experimental research has been carried out to investigate the characteristics of the fatigue crack initiation and propagation behavior of Tailor Welded Blank(TB) sheet used for vehicle body. We used three types of specimens which were machined of the same base metal: one is 1.4mm thick, another is 1.6mm thick, and the third(TB specimen) is laser-welded of two specimens(1.4mm and 1.6mm thick ones). The results of tensile and hardness test indicate that the yield strength of the TB specimen is the highest, and the hardness around welding bead is higher than that of base metal. Fatigue strength and fatigue limit of the TB specimen are much superior to those of the base metal up to  $10^6$  cycles. The fatigue crack propagation of the heat-affected zone of the TB specimen is slower than that of the base metal. Welding bead has the fastest crack Propagation in the low stress intensity factor range( $\Delta K$ ) region, but the slowest in the high  $\Delta K$  region. The fatigue propagation characteristic of the TB specimen is relatively stable in comparison with that of the base metal in the high  $\Delta K$  region around over  $28\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ .

**Key words** : Fatigue crack initiation(피로크랙 발생 및 전파), Laser weld(레이저 용접), Tailored Blank(테일러 블랭크), Different thickness(이종두께), Stress intensity factor range(응력확대계수 범위)

#### 1. 서론

최근 각종 환경규제와 연비기준이 강화됨에 따라 자동차업계는 연비가 높고, 공해를 최소화 할 수 있는 차세대 자동차를 개발하기 위해 다각도로 노력하고 있다. 또한 자동차의 충돌 안정성에 대한 고객들의 요구가 증대되면서 고장력강을 이용한 차체의 경량화 기술은 자동차 관련 기술의 핵심이 되고 있으며 1994년에 시작한 ULSAB(Ultra Light Steel Auto Body)프로젝트는 이러한 목적 달성을 위한 기술 개

발이 예이며, 레이저 용접을 이용한 테일러드 블랭크(Tailored Blank) 기술은 이 프로젝트의 핵심 기술이다. 현재 자동차 산업에서 레이저를 이용한 테일러드 블랭크 기술은 이미 보편화되어 있고, 자동차용 판재의 테일러드 블랭크는 기존의 점 용접 기술에 비해 자동차의 경량화, 재료비의 절감, 차체강성의 증가등 많은 장점을 가지고 있어 테일러드 블랭크가 적용이 급속히 증가하는 추세이다.<sup>1,2)</sup>

테일러드 블랭크 기술에 사용되는 레이저 용접은 매우 작은 점으로 집중된 레이저광에서 변환되는 높은 밀도의 에너지를 재료의 두께방향으로 직접 투입하는 고속 용접법으로 용접속도가 빠르고, 용

\*To whom correspondence should be addressed.  
shefthan@kmu.ac.kr

입 깊이가 깊으며, 열에 의한 변형이 적고, 어떠한 환경에서도 용접이 가능하므로 생산의 유연성이 매우 높다는 장점이 있음에도 불구하고 용접부의 성형성과 구조적 안정성에 관한 검토가 필수적이다. 먼저, 성형성의 확보를 위해서 둘 이상의 동종 또는 이종의 소재를 레이저 용접에 의해 결합한 후 일체로 프레스 성형이 가능하게 하기 위한 용접방법과 소성가공 방법이 복합적으로 이루어져야 한다. 또한, 구조적 안정성을 확보하기 위해서는 레이저 용접부의 역학적 안정성 검토가 우선적으로 선행되어야 된다.<sup>3)</sup> 현재까지는 성형성의 확보에 관한 연구가 조종을 이루고 있는데, 레이저 용접 조건에 따른 금속 조직의 변화,<sup>4)</sup> 용접조건에 따른 스트레인의 한계 및 접합되는 강판의 두께 한계 규명,<sup>5)</sup> 시임(seam), 전자 빔 등을 이용한 테일러드 블랭크 용접과 비교하여 레이저를 이용한 테일러드 블랭크 용접의 우수성을 규명,<sup>6)</sup> 성형성을 위한 판과 판사이의 간격을 변수로 고찰<sup>7)</sup> 등 주로 성형성을 개선하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있는데 비해 구조 안정성에 관한 연구, 특히 피로 및 파괴역학 관련 연구는 매우 부족한 실정이며, 현재 접 용접과 관련된 연구는 많이 진행되고 있으나 레이저 용접과 관련된 연구는 극히 부족한 실정에 있다.<sup>8-10)</sup>

따라서 본 연구에서는 차량 소재로 사용되고 있는 고장력 SPFC590 강판의 레이저 용접에 대한 용접부의 구조적 안정성을 고찰하기 위해 외부하중에 대한 정적 및 피로특성을 고찰하였다. 또한 레이저 용접부의 기계적 특성 변화를 검토하기 위해 용접부의 조직 변화를 관찰하였고, 모재부와 열영향부 그리고 비드부의 경도를 측정하였으며 현재 자동차 제작사에서 적용되고 있는 용접형태로 시험편을 제작하여 이중두께로 용접하였을 때 용접부위의 피로강도 및 피로균열 진전 특성을 모재의 경우와 비교함으로써 테일러드 블랭크 용접의 접합부위에 대한 피로 안전성을 규명하였다.

## 2. 실험 및 실험방법

### 2.1 시험편 제작 및 용접조건

본 연구에 사용된 시험편이 재질은 자동차 차체

제작에 사용되는 냉간압연 고장력 강판재료로 SPFC590(이하 SPFC라고 한다.) 1.4mm 두께의 재료와 1.6mm 두께의 재료가 사용되었다. 사용된 재료의 화학적 조성은 Table 1과 같다. 인장 시험편과 피로강도 시험편은 KS B0810 13B호 규격으로 제작하였으며 그 형상은 Fig. 1에 나타내었다. 레이저 용접한 시험편은 용접선의 방향이 하중방향과 수직인 방향으로 제작하였다. Fig. 2는 피로 균열 진전거동을 고찰하기 위한 시험편으로 JIS 5호 규격으로 제작하였으며, 중앙크랙(center crack)은 시험편의 중앙부에 레이저를 이용하여 폭 0.3mm, 길이 2mm의 크랙을 낸후 약 1mm 정도의 예비크랙(pre-crack)을 내어 완성하였다. 또한, 레이저 용접된 시험편에 대한 열영향부(HAZ)의 영향을 고찰하기 위해 CCD 카메라를 이용하여 두께 1.4mm와 1.6mm 방향으로 각각 열영향부(비드부 중앙에서 약 0.4mm 거리)에 중앙크랙을 내었다.

인장 및 피로강도 시험에 사용된 레이저 용접 시험편을 제작하기 위한 CO<sub>2</sub> 레이저 발전기는 연속 출력 파이며 정격 출력 4kW의 횡여기 방식(transverse flow type)으로서 빔 모드는 멀티모드(multi-mode)이다. 기초실험을 통하여 빔의 초점은 시험편 표면으로부터 1mm 아래로 설정하고, 레이

Table 1 Chemical composition of specimen

Material	C	Si	Mn	P	S
SPFC590	0.09	0.52	1.75	0.02	0.003

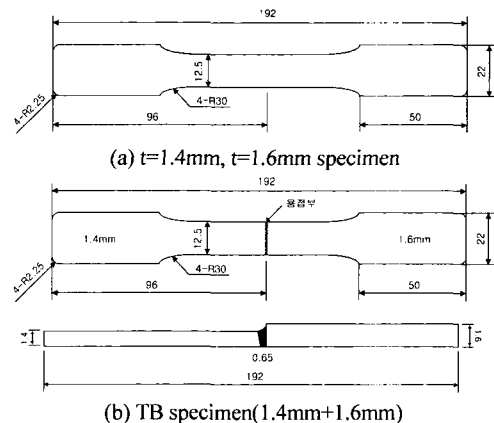


Fig. 1 Geometry of specimens for tension and fatigue strength test

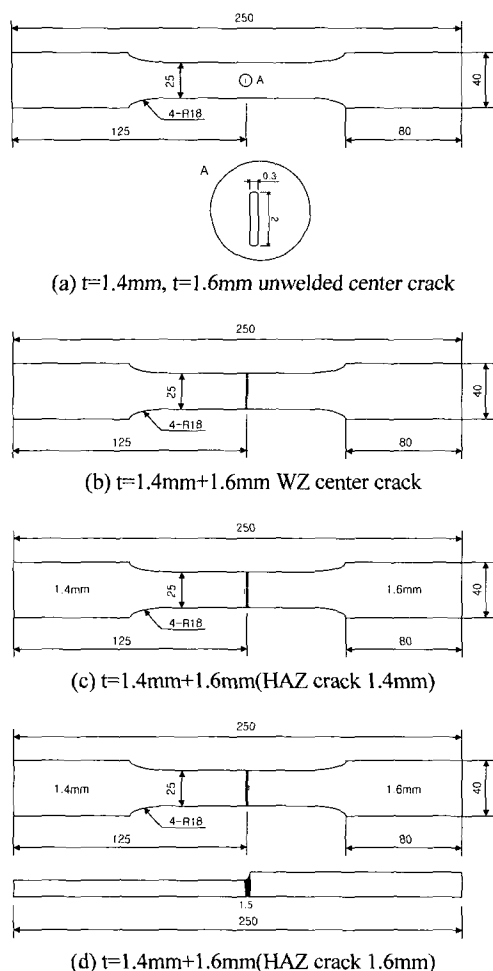


Fig. 2 Geometry of specimens for fatigue crack propagation test

Table 2 Welding condition

Material	Test	Power (kW)	Speed (m/min)	Thickness (mm)	Shield gas
SPFC590	Tension, fatigue strength	3.5	4	1.4+1.6	Ar
SPFC590	Crack growth	2.2	2.5	1.4+1.6	Ar

저 출력은 3.5kW로 고정하였으며, 빔 조사 속도는 4m/min이고 보조 가스로 아르곤(Ar)을 사용하였다. 피로균열 전파시험에 사용된 레이저 용접조건은 출력 2.2kW, 용접 속도 2.5m/min, 보조가스는 아르곤(30 l/min)을 이용하여 맞대기 용접으로 시험편을 제작하였다. 용접에 사용된 장비는 ROFIN-SINAR

사(社)의 RS-840을 사용하였다. Table 2는 용접조건을 나타내고 있다.

## 2.2 실험장치 및 실험방법

인장시험 및 피로시험은 최대용량 100kN인 유압식 만능재료 시험기(MTS810 Material Test System)를 사용하였다. 인장시험은 ASTM E8에 준하여 상온에서 시험을 수행하였다. 부속장치로 변위측정장치(Extensometer)를 장착하여 스트로크 제어방식으로 하중속도 3mm/min로 실험하였다. 피로강도시험은 ASTM E466-96에 의하여 상온에서 인장-인장 하중으로 응력비는 0.1로 하였으며, 파형은 정현파(sine wave), 시험주파수는 20Hz로 하여 고주기 피로 시험(high-cycle fatigue test)을 하였다. 시험편이 완전히 분리되는 순간을 파손으로 간주하였고, 시험편이 파손되지 않는 경우  $10^7$  cycles까지 시험을 수행하였다.

피로크랙 전파시험은 피로강도 시험과 동일한 응력비, 하중파형, 주파수로 실시하였으며 시험 최대 하중은 인장강도의 45%범위에서 일정하중 진폭시험(constant load amplitude test)을 하였다. 크랙 진전 거동을 명확히 관찰하기 위하여 시험편이 표면을 경면 연마하였고, 균열 길이 측정은 약 0.5mm 정도 진전할 때 마다 최대 피로하중의 80%를 가한 상태에서 광학 배율이  $\sim 500\times$ 의 CCD MICRO SCOPE (inf-500)와 화상처리장치(BMI plus SE)를 이용하여 ASTM E 647에 준하여 크랙 길이를 측정하였다. Photo. 1은 피로크랙 전파시험 모습을 나타낸 그림

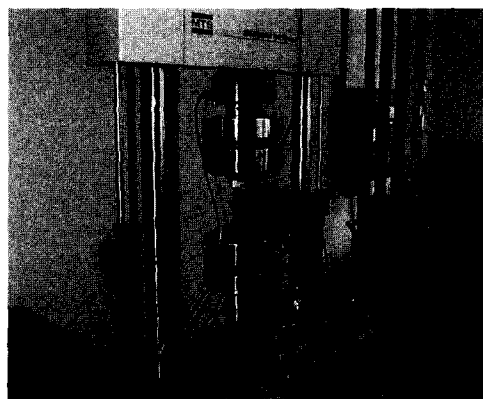


Photo. 1 View of fatigue crack propagation test

이다. 또한 용접부 주위의 경도변화를 고찰하였으며, 용접부 주위의 금속학적 고찰과 파단면에 대한 분석은 금속현미경(ZEISS 社)과 CCD MICROSCOPE(inf-500)을 사용하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 용접부 주위의 경도 및 조직 변화

마이크로 비커스 경도기를 이용하여 200g의 하중을 0.25mm 간격으로 측정한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 레이저 용접부는 매우 급격한 가열 및 냉각과정을 받고 있기 때문에 열 영향부를 포함한 비드부의 경도값은 매우 높다. 모재의 마이크로 비커스 경도값은 Hv=210 전후였는데 반해 열 영향부 및 용접 비드 부분의 경도는 모재보다 약 1.8배 가량 높은 Hv=390으로 변화하고 있다. 그리고 일반용접 등에서는 명확히 나타나는 열 영향부(HAZ)가 레이저 용접시 경도측정에서는 극소화 됨을 나타내고 있다. Fig. 3에서 알수 있듯이 모재 부분에서 경도값이 일정하다가 용접부에서는 경도값이 급격히 향상되는 것을 알 수 있었다.<sup>11)</sup> 이것은 레이저 용접이 기존의 용접과 같은 열전도에 의존하는 것이 아니라 접합 부위에 직접 고밀도의 열에너지를 가하기 때문이라 사료된다. 이와같은 현상은 금속 현미경을 이용하여 금속 조직을 관찰한 결과에서도 잘 나타나고 있는데 Photo. 2는 금속현미경을 이용하여 3% 나이탈

로 부식시켜 얻은 금속조직 사진으로 모재 부분과 열 영향부, 그리고 비드부분을 나타낸다. Photo. 2 (a)는 가로방향으로 압연된 SPFC590강의 일반적인 조직의 형태를 보이고 있는 반면, (c)의 용접 비드 부분에서는 냉각 속도가 빠르기 때문에 표면화 에너지가 증가하여 결정립이 작게 나타나는 것을 볼 수가 있다. (b)는 열 영향부를 나타내는데, 열 영향부의 조직의 형태가 거의 극소화 영역으로 나타나고 있다. 이와 같은 현상은 Fig. 3의 경도 변화에 대한 결과에서도 나타나듯이, 일반 용접과는 달리 레이저 용접은 고밀도 에너지를 국부적인 위치에 가함으로 열전달에 의한 열 영향부를 극소화 할 수 있다는 사실을 보여주는 결과라고 판단된다.

Photo. 3은 서로 다른 두께(1.4mm+1.6mm)를 레이저 용접했을때의 용접부 단면 형상을 나타내고 있다. 중간 부분에 용접선이 뚜렷이 나타나고 있고, 비교적 양호한 용접부 형상을 가짐을 알 수 있다.

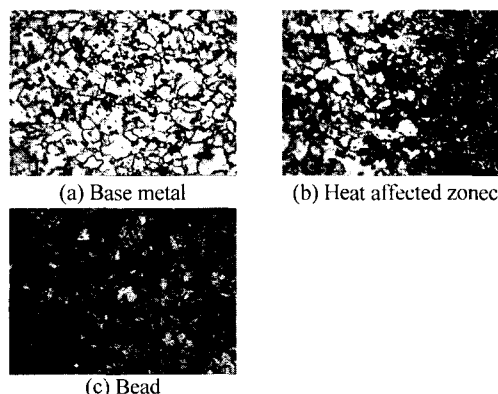


Photo. 2 The micro-structures of weldment

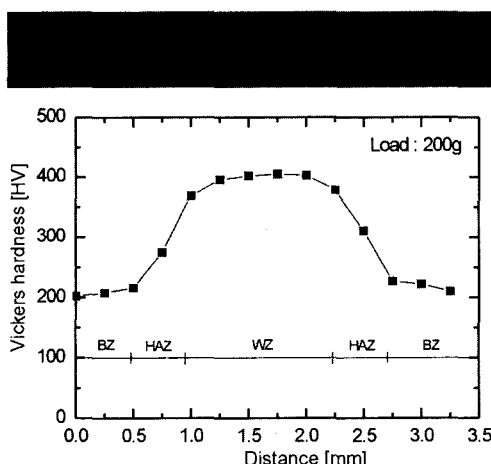


Fig. 3 Microhardness(200g load) distribution across the laser weld



Photo. 3 Welding cross sections with combination of SPFC(1.4mm) and SPFC(1.6mm)

Table 3 Tensile properties of specimens

Thickness(mm)	Y.S(MPa)	U.T.S(MPa)	Elong. (%)
1.4	461.06	584.89	20.0
1.6	439.50	566.67	24.6
1.4+1.6(TB)	465.03	562.45	14.0

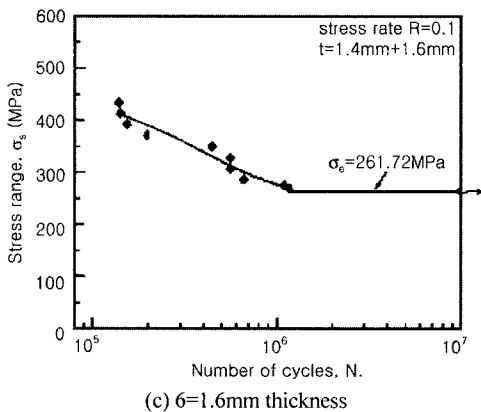
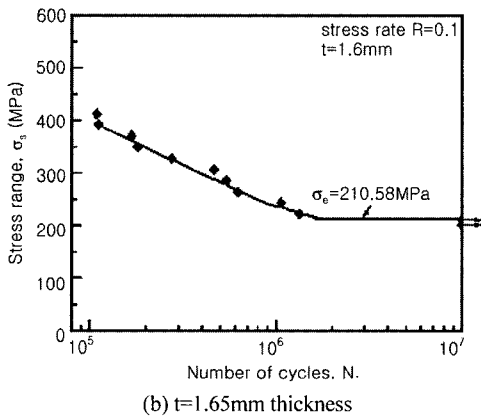
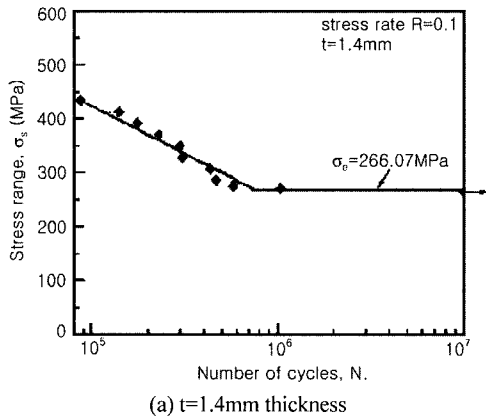


Fig. 4 S-N curves according to each thickness

### 3.2 인장 및 피로강도 시험 결과

SPFC590강의 두께에 따른 인장시험의 결과를 Table 3에 나타내었다. Table 3에서 알 수 있듯이 항복강도는 레이저 용접한 TB 시험편이 가장 크게 나타났으며, 극한강도는 두께 1.4mm일 때, 연신율은 1.6mm일 때 보다 항복강도 및 인장강도가 크게 나타났으며 연신율은 용접부의 강도증가로 인해 레이저 용접한 TB 시험편이 가장 적게 나타내었다.

Fig. 4는 두께가 1.4mm, 1.6mm 그리고 1.4mm+1.6mm 레이저 용접한 시험편에 대한 응력-수명선도를 나타낸 그림이다. 각각의 시험편에 따라 응력과 수명의 형태로 최소자승법으로 보간하였다. Fig. 5는 각 두께에 따른 응력-수명선도를 비교한 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 수명이  $10^6$  cycles 이전에 각 시험편에 대한 피로강도(fatigue strength)와 피로수명(fatigue life)을 비교해 보면, 레이저 용접한 1.4mm+1.6mm 시험편이 가장 크게 나타났으며, 다음으로 두께가 1.4mm, 1.6mm 순으로 나타났다.

피로한도는 1.4mm+1.6mm의 시험편일 경우 인장강도 562MPa에 약 46%수준인 260MPa 정도로 두께가 1.4mm인 시험편과 거의 비슷하게 나타나고 있는 것을 알 수 있다.<sup>12)</sup>

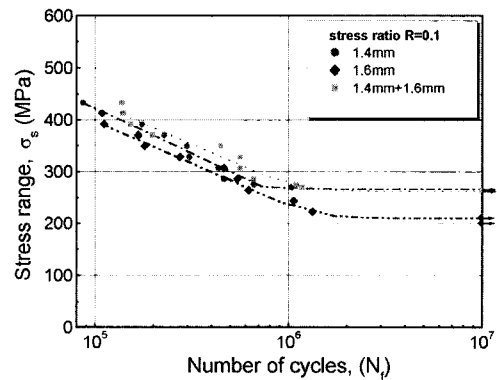


Fig. 5 Fatigue strength test results according to each thickness

### 3.3 피로크랙 전파 거동

용접부의 피로 안전성과 피로크랙의 전파 특성을 고찰하기 위해 상온에서 피로크랙 전파 시험을 수행하였다.

3.3.1 피로크랙 전파 거동의 관찰

Photo. 4는 1.4mm+1.6mm 레이저 용접한 시험편에 대해 두께 1.4mm 방향 열 영향부의 크랙 진전 거동을 100배의 배율로 나타낸 그림이다. Photo. 4 (a), (b)의 사진상의 화살표는 중앙크랙의 진행방향을 나타내고 있다. (c), (d)는 약 108000cycle에서 중앙크랙 좌우방향의 크랙선단 모습이며 모재부쪽으로 약간 휘어지는 것을 알 수 있다. 이것은 비드부의 강도가 모재보다 크기 때문에 최종적으로 모재부에서 파단이 일어난 것으로 판단된다. 두께 1.6mm방향 열 영향부의 크랙 전파 거동도 같은 결과로 나타났다.

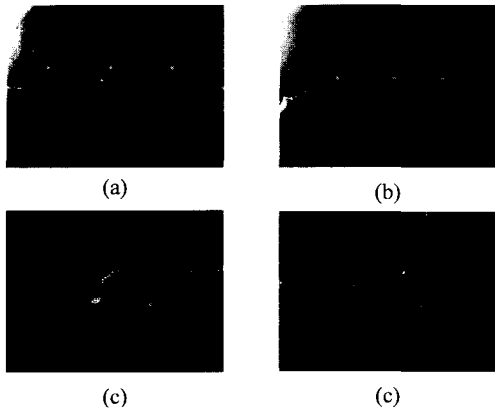


Photo. 4 Crack behavior of 104mm+1.6mm weld metal (HAZ crack 1.4mm) (×100)

3.3.2 2a-N 곡선의 특성

Fig. 6~Fig. 7은 크랙의 전파 거동을 CCD 카메라를 이용하여 200배의 배율로 측정된 크랙길이(2a)와 반복변수(N)와의 관계를 나타낸 그림이다. Fig. 6과 Fig. 7에서 알 수 있듯이 두께가 1.4mm인 모재가 두께가 1.6mm인 모재보다 크랙 전파 속도가 빠르게 나타났고, 비드부에 크랙이 존재할 경우가 크랙 진전이 가장 빠른 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 앞에서 고찰한 바와 같이 용접 비드 부분은 모재보다 경도가 약 1.8배 증가했는데, 경도의 증가는 강도의 증가를 의미하며 크랙이 존재하는 고강도 강에서는 강도가 증가함에 따라 파괴인성이 저하되어 취약해지는 경향이 있기 때문에 비드부의 크랙 전파가 가장 빠르게 나타난 것으로 판단된다. Fig. 8은 두께가 1.4mm, 1.6mm 모재와 1.4mm+1.6mm 레이저 용접한 비드부

및 각 두께 방향의 열 영향부에 대한 피로 크랙 전파 거동을 동일 그래프 상에 나타낸 그림이다.

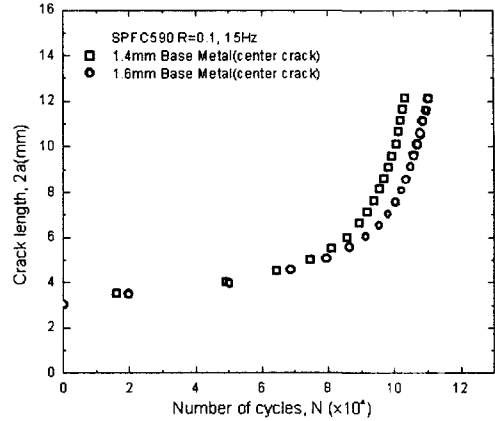


Fig. 6 Fatigue crack growth behavior for base metal

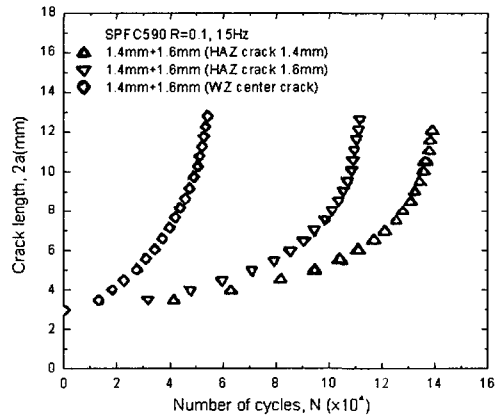


Fig. 7 Fatigue crack growth behavior for weld metal

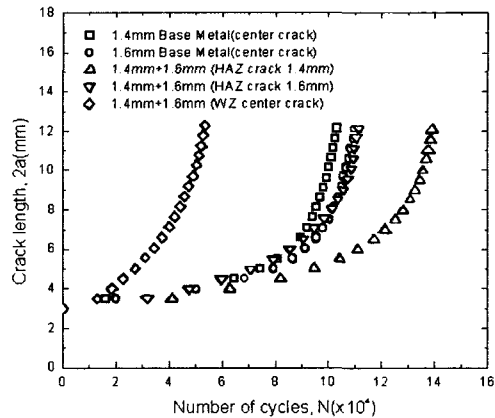


Fig. 8 Fatigue crack growth behavior for experimental metal

3.3.3 da/dN-ΔK 선도의 추정

일정하중 진폭시험(constant load amplitude test)을 통하여 얻은 자료로부터 피로크랙의 전파 거동에 대한 파괴역학적인 평가를 하였다. Fig. 9~Fig. 10은 각 시험편에 대한 피로크랙 전파 거동을 ASTM E647에 의거 피로크랙 전진속도(da/dN)와 응력확대계수 범위(ΔK)로 정리하여 양대수(log-log) 좌표계로 나타낸 결과이다.

Fig. 9에서 보는 바와 같이 두께가 1.4mm와 1.6mm 모재의 응력확대계수 범위에 대한 크랙 전파속도는 거의 유사하게 나타나지만, 두께가 1.4mm인 모재가 조금 빠른 전파속도를 보여준다.

Fig. 10은 두께가 1.4mm, 1.6mm 모재와 1.4mm + 1.6mm 레이저 용접한 비드부 및 각 두께 방향의 열영향부에 대한 da/dN-ΔK 관계를 동일 그래프 상에 나타낸 그림이다. 각 시험편에 대한 da/dN-ΔK 관계식을 Paris's Equation식으로 나타내면 다음 식과 같다.

$$\frac{da}{dN} = 1.29 \times 10^{-11} (\Delta K)^{4.94} \quad (1)$$

1.4mm Base Metal

$$\frac{da}{dN} = 7.85 \times 10^{-12} (\Delta K)^{5.07} \quad (2)$$

1.6mm Base Metal

$$\frac{da}{dN} = 4.22 \times 10^{-12} (\Delta K)^{5.18} \quad (3)$$

1.4mm + 1.6mm(HAZ crack 1.4mm)

$$\frac{da}{dN} = 8.86 \times 10^{-12} (\Delta K)^{5.0} \quad (4)$$

1.4mm + 1.6mm(HAZ crack 1.6mm)

$$\frac{da}{dN} = 4.0 \times 10^{-9} (\Delta K)^{3.12} \quad (5)$$

1.4mm + 1.6mm(WZ crack)

Fig. 11은 Fig. 10의 실험결과로부터 최소자승법(least square method)을 이용하여 구한식 (1)~(5)의 da/dN-ΔK 관계를 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 비드부를 제외한 나머지 시험편은 거의 유사한 ΔK에 대한 크랙 전파를 나타내지만 좀더 구체적으로 살펴보면, 크랙 전파속도는 두께가 1.4mm인 모재, 1.6mm인 모재, 두께 1.6mm 방향의 열영향부, 1.4mm 방향의 열영향부의 순서로 나타났다. 비

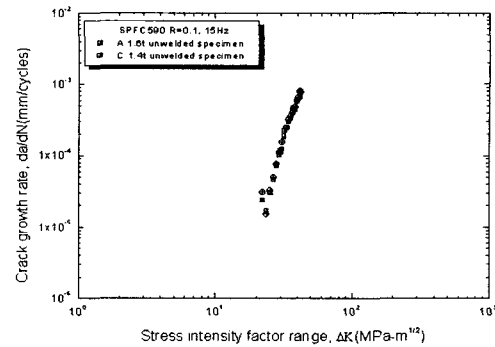


Fig. 9 Relationship between fatigue crack growth rate, da/dN and stress intensity factor range, ΔK for Base Metal

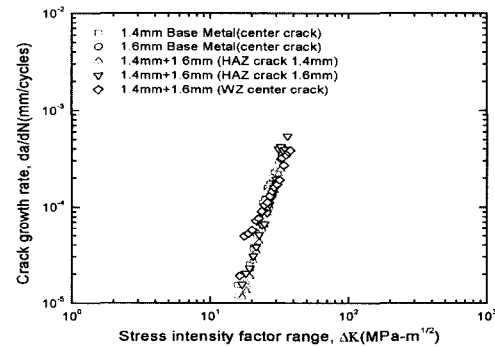


Fig. 10 Relationship between fatigue crack growth rate, da/dN and stress intensity factor range, ΔK for experimental data

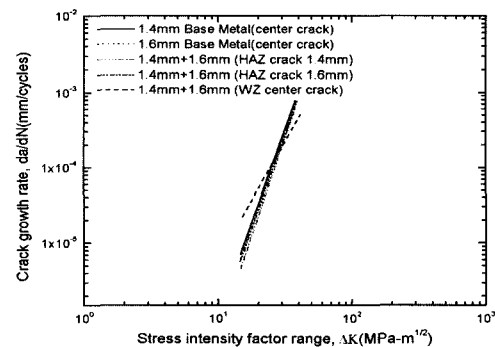


Fig. 11 Straight lines by the least square method from experimental data

드부는 레이저 용접으로 인한 금속조직의 변화로 인해 저 ΔK 영역에서는 크랙 전파속도가 가장 빠르나, 고 ΔK 영역으로 가면 크랙 전파속도가 가장 늦어지는 것을 알 수 있다. 따라서, 이중두께

(1.4mm, 1.6mm)를 레이저 용접한 SPFC590 강을 두께 1.4mm, 1.6mm의 모재와 피로크랙 전파거동의 관점에서 비교해보면 높은  $\Delta K$  영역에서는 비교적 안정적이라고 사료된다.

#### 4. 결론

자동차 차체제작에 사용되는 냉간압연고장력강판(SPFC590)에 대해 이중두께를 레이저 용접을 한 후 용접부의 구조적 안정성을 고찰하기 위해 경도 및 인장시험, 피로 및 크랙 전파시험을 수행하였다. 실험 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 레이저 용접부를 절단하여 현미경으로 관찰한 결과 일반 용접 등에서 명확히 나타나는 열영향부(HAZ)는 극소화됨을 나타내었고, 용접부의 경도를 측정한 결과 비드부의 경도는 모재보다 약 1.8배 높은 경도값을 나타내었다.

2) 인장시험의 결과 이중두께(1.4mm+1.6mm)를 레이저 용접한 테일러드 블랭크 시험편이 항복강도가 모재보다 크게 나타났으며, 레이저 용접시험편(1.4mm+1.6mm)이 모재 시험편보다 정적 강도 측면에서 우수하게 보였다.

3) 피로강도시험의 결과  $10^6$  cycles 이전에서 이중두께(1.4mm+1.6mm)를 레이저 용접한 테일러드 블랭크 시험편의 피로강도 및 피로한도가 모재보다 크게 나타났으며 두께가 1.6mm 모재의 피로한도는 다른 두 시험편에 비해 약 20% 저하를 나타내었다.

4) 이중두께(1.4mm+1.6mm)를 레이저 용접한 각 두께 방향의 열 영향부 크랙 전파속도는 두께가 1.4mm, 1.6mm 모재 보다 느리게 나타났고, 비드부는 저  $\Delta K$  영역에서는 크랙 전파속도가 모재보다 빠르나, 고  $\Delta K$  영역으로 가면 크랙 전파속도가 모재보다 늦어지는 것을 알 수 있었다. 따라서 이중두께(1.4mm+1.6mm)를 레이저 용접한 TB 시험편은 두께 1.4mm, 1.6mm 모재에 비해 피로균열 전파거동의 관점에서 높은  $\Delta K$ (약  $28\text{Mpa}\sqrt{m}$  이상) 영역에서는 비교적 안정적으로 나타났다.

#### References

1) K. Shibata, Lasers and Electrooptics for Automotive Manufacturing, Proc. Conf., LIA, 11, 1996.

2) H. Ponschab, R. Corrodi, Automotive Body Materials, IBEC '97, pp.113-122, 1997.

3) J. O. Kim, J. Suh, Y. H. Han, H. Y. Kim, "Laser Beam Welding and Formability of Steel Plate for Automobile," Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol.4, No.5, pp.59-69, 1996.

4) J. R. Hwang, J. L. Doong, C. C. Chen, "Fatigue Crack Growth in Laser Weldments of Cold Rolled Steel," Materials Transactions, JIM, Vol.37, No.8, pp.1443-1446, 1996.

5) M. F. Shi, "Effects of Strain Gradient and Curvatures on Forming Limits Diagram for Anisotropic Sheets," J. Mat. Shaping Technol., Vol.9, 1991.

6) A. P. Lee, E. Feltham, J. Van Deventer, "Tailor Welded Blank Technology for Automotive Applications," SAE 960817, 1996.

7) W. Prange, C. Schnelder, A. J. Sellge, "Application of Laser-beam-welded Sheet Metal," SAE 890853, 1989.

8) P. C. Wang, K. M. Ewing, "A Comparison of Fatigue Strengths : Laser Beam vs. Resistance Spot Welds," Welding Journal, pp.43-47, 1991.

9) C. S. Lin, "Fracture Mechanics Characteristics of Laser-welded Aluminum-lithium Sheet Joints," SAE 881405, 1988.

10) D. S. Kwak, Y. K. Kwon, T. Y. Oh, K. Y. Rhee, Y. S. Kang, "The Characteristic of Fatigue Crack Propagation of Laser Welded Sheet Metal for Automobile Body Panel," Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol.9, No.3, pp.181-189, 2001.

11) J. Suh, Y. H. Han, J. O. Kim, M. Y. Lee, K. H. Lee, T. I. Kim, "Application of Laser Welded Tailored Blank for Weight Reduction of Automobile Bumper Beam," Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol.7, No.2, pp.217- 227, 1999.

12) J. A. Bannantine, J. J. Comer, J. L. Handrock, "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis," Prentice-Hall Inc., pp.1-10, 1990.