

## 레이저 용접 판재의 피로거동

오택열\*, 권윤기\*\*, 이종재\*\*\*, 광대순\*\*\*

### The Fatigue Behavior of Laser Welded Sheet Metal

Taek-Yul Oh\*, Yun-Ki Kwon\*\*, Chong-Jae Lee\*\*\*, Dai-Soon Kwak\*\*\*

Key words : Fatigue Behavior(피로거동), Laser Weld(레이저 용접), Tailored Blank weld(테일러드 블랭크 용접), Pre-strain(선변형), Strain Constrain(변형률 구속)

#### Abstract

For the Tailor Welded Blank sheet used for automobile body panel, the characteristics of fatigue strength and crack propagation behavior were studied. The thickness of specimen was machined to be same (0.9mm+0.9mm) and different (0.9mm+2.0mm). As a base test, mechanical properties around welding zone were examined. The results indicated that there were no significant decreases in mechanical properties, but hardness around welding bead is 2.3 times greater than base material. The fatigue strength was the highest when the loading direction was parallel to the welding direction, which was about 85% of tensile strength of base material. It was decreased by 8.5% when the thickness of specimen and base material was different, and it is increased by 25% when pre-strain was applied. The crack propagation rate was noticeably decreased around welding line and rapidly increased as it passed by welding line. Reviewing the shape of the crack propagation, crack width around welding line was wide around the welding zone due to retardation of crack growth, but it became narrow passing welding line due to decreased toughness.

#### 1. 서론

레이저 용접은 높은 에너지 밀도의 열을 이용하는 용접이기 때문에 기존의 용접법처럼 용접 에너지를 재료에 전달함에 있어 표면을 기점으로 점진적인 열전달이 아니라 재료의 두께 방향으로 직접 투입하는 형식의 고속 용접법이다.

따라서 레이저 용접은 다양한 분야에 적용되고 있으며, 70년대초 GM (General Motors) 사가 생산라인에 처음으로 레이저를 도입한 이래로 자동차 분야에서의 레이저 응용은 비약적인 발전을 이루고 있다. 현재 레이저 용접이 자동차 산업에 응용되는 분야로는 대략적으로 차체용 강판용접, 부품용접, 그리고 최근 새롭게 각광 받고 있는 Tailored Blank 용접 등을 들 수 있다. 특히 Tailored Blank 용접은 자동차 차체 (Body Panel) 제조공정에 있어서 둘 이상의 부품을 일체화하여 프레스 작업을 수행하기 위한 것으로 생산성 및 정밀도의 향상에 매우 효과적인 방법으로 알려져 있다.<sup>(1)</sup> 이 방법의 장점을 구체적으로 살펴보면, Tailored Blank 용접은 용접속도가 빠르고, 용입깊이가 깊으며, 열에 의한 변형이 적고, 어떤 환경에서도 용접이 가능하므로 생산의 유연성이 매우 높다.<sup>(2) (3)</sup> 그러나 이런 많은 장점에도 불구하고 Tailored Blank 용접은 해결해야 할 문제점들을 안고 있는데, 우선적으로 해결되어야 할 문제가 가공의 성형성과, 구조적 안정성의 확보라고 할 수 있다. 현재 이 분야에 대한 연구들을 종합해 보면 아직은 성형성에 대한 연구가 주종을 이루고 있는데, 레이저 용접 조건에 따른 금속 조직의 변화나,<sup>(6)</sup> 이종의 얇은 판을 용

\* 경희대 기계산업시스템공학부

\*\* 두원공대 컴퓨터응용설계과

\*\*\* 경희대 대학원 기계공학과

접했을 때의 성형성을 고찰한 것,<sup>(7)</sup> 그리고 성형성을 극대화하기 위한 용접 조건중 판과 판 사이의 간격을 변수로 고찰한 것<sup>(2)</sup> 등 주로 성형성을 개선하기 위한 용접조건에 대한 연구가 주종을 이루고 있다고 할 수 있다. 성형성의 개선에 관한 연구는 매우 다양하게 진행되고 있는데 비해 구조적 안정성에 관한 연구는 매우 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 Tailored Blank 용접부의 구조적 안정성을 고찰하기 위해 접합 부위에서의 외부하중에 의한 피로 강도 특성을 고찰했다. 현재 자동차 제작사에서 적용되고 있는 형태로 시험편을 제작하여 이중 두께로 용접되었을 때 용접 부위의 피로 강도 특성을, 동일 두께의 경우와, 모재의 경우를 비교함으로써 Tailored Blank 용접의 접합 부위에서 피로 안전성을 규명했다. 또한 소성가공시 역학적 상황 변화에 대한 피로 강도 특성을 고찰하기 위하여 선변형(Pre-strain)을 부하 한 후, 각각의 조건에서 피로 강도 특성을 고찰하였다.

## 2. 실험 및 실험방법

### 2-1 시험편 제작 및 용접조건

본 연구에 사용된 시험편의 재질은 냉간 압연 강판재로 SPEN(KS D 3512) 0.9mm 두께의 재료와 2.0mm 두께의 재료가 사용되었다. 사용된 재료의 화학적 성분은 Table 1 과 같다.

Table 1 Chemical composition

Material	C	Mn	Si	P	S
SPEN	0.016	0.19	0.029	0.019	0.006

모재의 기계적 성질과 레이저 용접된 후 시험편의 기계적 성질은 Table 2 와 같다. 모재의 경우 인장강도는 약 339MPa 이었고, 용접재의 경우는 약 374MPa로 레이저 용접을 행한 후 기계적 성질은 모재와 비교하여 약 10%의 인장강도가 증가하였다.

Table 2 Mechanical Properties of Specimens

Specimen	Yield Stress (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
Non-Weld	215.7	339.3	39
Laser Weld	261.3	374.2	25

Fig. 1은 피로강도 평가를 위한 시험편으로 용접선의 방향이 하중 방향과 평행한 방향과 수직인 방향으로 제작하였다. 용접된 부재가 실제 운전상황에서는 다양한 방향의 하중에 놓일 것으로 판단되어지지만, 본 연구에서는 우선적으로 극단적인 두 가지 경우의 방향에 대해 고찰하였다. Fig. 2는 피로균열 전파 거동을 고찰하기 위한 시험편으로 용접선의 방향이 하중방향과 평행하도록 제작하였다. 그리고 피로균열 발생의 재현성을 높이기 위하여 시험편 측면에 와이어 커터를 사용하여 13mm의 균열 (Pre-crack)을 생성하였다.

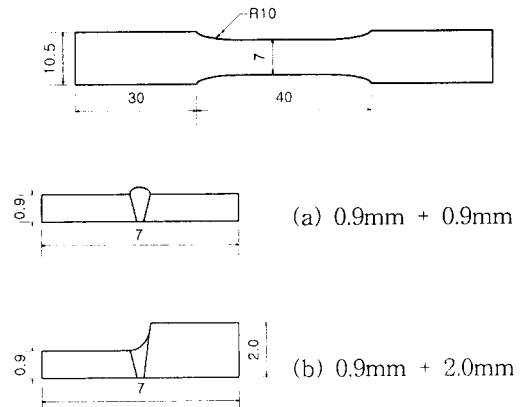


Fig. 1 Dimension of Specimens for fatigue strength test

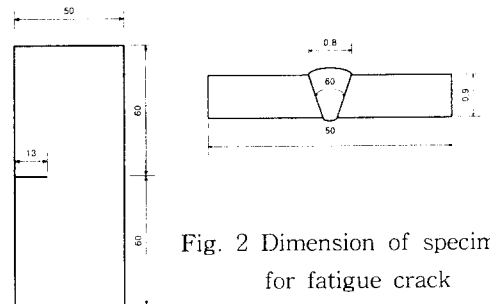


Fig. 2 Dimension of specimen for fatigue crack propagation test

이상의 시험편 이외에 선변형(Pre-strain)을 7.5%, 15%로 가하여 시험편을 제작하여 선변형량의 크기에 따른 피로강도의 변화를 고찰했다. 한편 본 연구에 사용한 용접조건은 현재 자동차사에서 차체 제작에 사용되고 있는 용접조건을 사용하였는데, 레이저 용접된 시편 Fig. 1(a)는 0.9mm 강판을 4kW의 출력으로 6m/min의 속도로 맞대기 용접하였고 (b)는 0.9mm 강판과 2.0mm 강판을 5m/min의 속도로 맞대기 용접하였다. 레이저는 CO<sub>2</sub> 레이저를 사용하였고, 보조가스(Assist gas)로는 헬륨(He) 가스를 사용하였다. Table 3 에 용접조건을 나타냈으며, 이는 육안검사와 비파괴 검사 결과 양호한 상태를 나타냈다.

Table 3 Welding Condition

Material	Power (kW)	Speed (m/min)	Thickness (mm)
SPCEN	4	6	0.9+0.9
SPCEN	4	5	0.9+2.0

### 2-2. 피로강도실험

제작된 시험편은 실온에서 완전편진 인장하중(응력비 R=0) 상태로 서보 유압식 피로시험기인 Instron 8501 시험기에 의해 실험되었다. 모든 피로강도실험은 30Hz의 하중 주파수로 실온에서 시행하였으며, 시험편이 완전히 분리되는 순간을 파손으로 간주하였고, 시험편이 파손되지 않는 경우 10<sup>6</sup> 반복수 까지 실험을 수행하였다. 피로균열 전파실험도 피로강도 실험과 동일한 시험기로 수행하였으며, 완전편진 인장하중(응력비 R=0) 형태의 하중을 10Hz로 작용시켰다. 균열전파 거동을 명확히 관찰하기 위해 시험편의 양쪽 표면은 경면 연마하였고, 균열 길이 측정은 광학적 직접 측정법으로 광학배율 100X의 이동현미경을 시험기에 부착하여 1/100mm 까지 측정 가능한 접안 마이크로미터를 사용 ASTM E 647에 의거 측정하였다. 한편 용접부 주위의 금속학적 고찰과 파면에 대한 분석은 금속현미경을 사용하여 관찰하였다. 또한 용접부 주위의 기계적 물성의 변화를 고찰하기 위하여 마이크로 비커스 경도계를 이용하여 용접부의 경도 변화를 고찰하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3-1. 용접부 주위의 경도

마이크로 비커스 경도계를 사용하여 300g의 하중으로 0.25mm 간격으로 측정된 결과를 Fig. 3에 나타냈다. 모재의 마이크로 비커스 경도는 평균 H<sub>v</sub>=85 였는데, 용접 비드 부분에서는 모재보다 약 2.3배 가량 높은 H<sub>v</sub>=192를 나타냈다. 그리고 일반용접 등에서는 명확히 나타나는 열 영향부가 레이저 용접시 경도측정에서는 거의 나타나지 않았다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 모재 부분에서는 일정한 경도값을 나타내다가 용접부에서 급격한 경도값의 향상을 보이고 있다. 이것은 레이저 용접의 장점으로 열전도에 의존하여 용접이 행하여지지 않고 좁은 부분에 직접 열에너지를 가하는 레이저 용접의 특성을 잘 반영하는 것으로 판단된다.

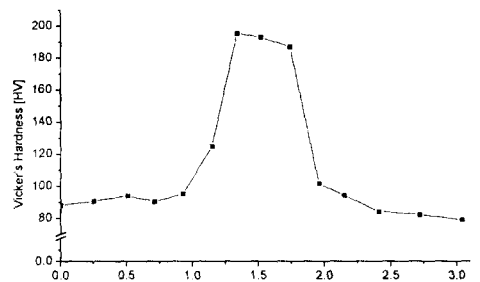
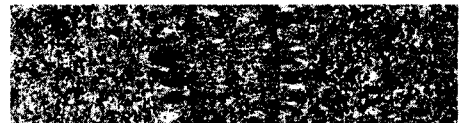


Fig. 3 Micro Vicker's Hardness

### 3-2. 용접 조건에 따른 피로강도의 변화

두께가 같은 강판과 두께가 다른 강판의 맞대기 레이저 용접 시험편의 피로실험 결과를 Fig. 4에 나타냈으며, 각각의 시험편에 따라 수명과 하중의 형태로 최소자승법으로 보간하였다. 용접방향은 하중방향과 평행이 되도록 시험편의 길이방향으로 용접하였다. 두께가 동일한 0.9mm+0.9mm 시험편의 경우 피로한도가 모재의 인장강도인 339MPa에 약 85% 수준인 290MPa 정도로 나타나고 있는 것을 볼 수 있다. 또한

0.9mm+2.0mm인 경우에는 피로한도가 약 265MPa로 0.9mm+0.9mm의 경우보다 약 25MPa 정도의 피로강도 저하를 나타내고 있는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 피로한도는 동일 응력수준에서 단면적의 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내는데 0.9mm+2.0mm의 경우도 상대적인 단면적 증가가 피로한도를 감소시키는 요인으로 작용했을 것으로 판단된다. 또한 용접접합부에 두께 변화에 의한 형상의 불연속면이 생기게 되는데, 이 경계면에서 노치 효과에 의한 응력집중이 발생하게 되어 피로한도를 저하시킬 수 있는 요인으로 작용했을 것으로 판단된다.

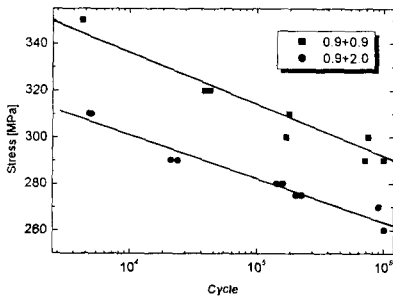


Fig. 4 Fatigue test results of laser weld (0.9+0.9, 0.9+2.0 thickness, longitudinal direction)

Fig. 5는 용접방향에 따른 피로한도 변화에 대한 결과로 용접방향과 하중방향이 수직인 경우와 수평인 경우의 피로한도 변화를 나타낸 것이다. 시험편의 단방향으로 용접된 경우의 피로한도는 모재의 인장강도에 약 68% 수준인 230 Mpa로 철계 금속에서 나타나는 피로한도의 일반적인 수준을 약간 상회하는 수준으로 나타나고 있는데, 이 경우에는 피로균열이 용접부에서나 열 영향부가 아닌 모재부분에서 발생한다. 즉 용접방향에 수직하게 하중을 받을 경우 용접부는 모재에 비하여 피로 저항성이 높기 때문에 용접부분의 피로파괴에 대한 고려는 무시할 수 있을 것으로 판단된다. 이상의 결과에서 알 수 있듯이 균열의 발생 방향은 용접 방향이 하중의 방향과 평행할 때는 용접부에서 발생하게 되고, 수직으로 될 때는 모재부분에서 발생하게 된다. 이는 피로하중이 가해짐에 따라 용접부에 경도값의 증가로 인한 강도의 불일치가 나타나게 되어 하중의

작용에 의해 나타나는 모재의 변형을 용접부에서 구속하게 되는 변형을 구속현상에 기인된다고 판단된다.

따라서 하중의 부하와 함께 모재에는 별 영향이 없고, 용접부에만 집중적으로 영향을 받게 되어 결국 용접부에서 균열이 발생하게 되고 이후 빠른 속도로 모재부분으로 전파하게 된다.

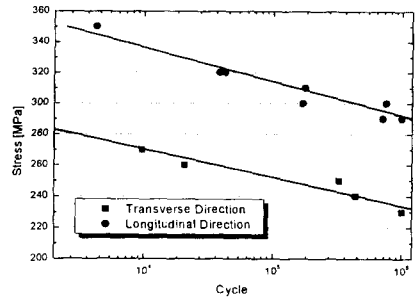


Fig. 5 Fatigue test results of laser weld (0.9+0.9 thickness, transverse, longitudinal direction)

Fig. 6 (a)는 0.9mm+0.9mm에서의 파단면 형상으로 가운데 용접부에서 균열이 발생하여 양쪽 모재부분으로 진전했음을 보여주고 있고, (b)는 균열 발생부분이 큰 변형을 구속효과에 의해 2.0mm 부분으로 치우쳐져 균열이 발생하여 모재 쪽으로 진전한 것을 보여주고 있다. 전체적으로 균열은 용접부 비드 부분에서 발생하여 어느 정도 진전하다 모재부분에 와서는 취성의 형태로 최종 파단 되었음을 알 수 있다.

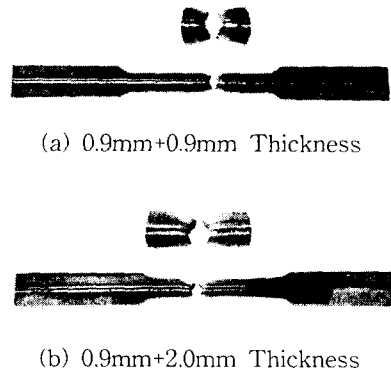


Fig. 6 Fractured specimens by fatigue test  
Fig. 7은 하중방향과 평행하게 시험편의 길이

방향으로 레이저 용접한 후 7.5%, 15% 선변형 (Pre-Strain)을 가한 후 피로실험한 결과이다.

레이저 용접의 중요한 응용분야중 하나인 Tailored Blank 가공과 같은 경우 용접된 후 성형이 이루어지는 경우가 많으므로 선변형이 피로 강도에 미치는 영향은 매우 중요한 인자라 할 수 있다. Fig. 7은 선변형을 가했을 때의 피로한도 변화를 고찰하기 위해 선변형 양의 변화에 따른 피로한도의 변화를, 선변형을 가하지 않은 경우에 대해 무차원화 시켜 변화를 살펴보았다. 동일한 두께의 강판이 용접된 경우 선변형을 가하지 않은 시험편의 피로한도는 290MPa 이지만 7.5% 선변형을 가한 후 피로한도는 330MPa로 약 13.7% 증가하였으며, 15% 선변형을 가한 후 피로한도는 350MPa로 약 20%의 비교적 큰 향상을 보였다. 이중 두께의 강판이 용접된 경우 선변형을 가하지 않은 경우의 피로한도는 265MPa 이지만, 7.5% 선변형을 가한 후 290MPa로 약 9.5% 증가하였고, 15% 선변형을 가한 후 330MPa로 약 25% 증가하였다. 선변형을 가하게 되면 레이저 용접의 특징인 유연한 용접부가 더욱 유연하게 되어 모재와 용접부의 강도 차이가 적어지고, 용접 잔류응력이 해소되는 등의 효과로 인하여 피로강도의 향상이 이루어지는 것으로 생각된다.

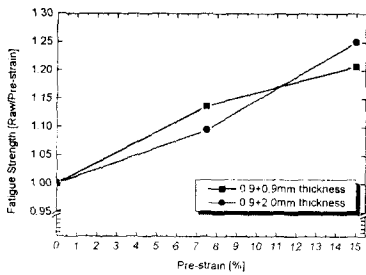


Fig. 7 Fatigue resistance of pre-strained specimen

### 3-3. 용접부에서 피로균열 전파 거동

용접부의 피로 안정성과 피로균열의 전파 특성을 고찰하기 위해 피로균열전파 거동을 살펴 보았다. Fig. 9는 피로균열전파 거동을 나타내는 결과로, 모재의 경우 전형적인 균열전파 형태를 나타내고 있으나, 레이저 용접된 시험편의 경우 균열전파 속도가 용접 비드 부분에서 큰 폭으로

변화하는 것을 관찰할 수 있었다. 또한 균열이 용접 비드 부분에서는 성장속도가 매우 둔화되어 정지 상태에 가까울 정도로 감소하며, 이후 용접 비드를 지나면서 균열 전파속도는 큰 폭으로 증가하여 용접부분을 벗어나게 되면 모재와 동일한 양상으로 균열이 전파하게 된다. 이와 같은 현상은 Fig. 8의 균열의 전파 형상을 나타낸 결과에서도 잘 나타나고 있는데, 균열이 발생하여 용접 비드 부분까지는 일반적인 저 탄소강에서 나타나는 균열 전파 형상을 나타내고 있는 것을 볼 수 있으며, 균열전파가 더욱 진전되어 균열선단이 용접 비드 부분에 이르면 균열 성장속도가 현저하게 둔화되면서 성장하는 균열의 폭이 모재의 균열 폭 보다 넓게 성장하는 것을 볼 수 있다. 용접 비드 부분에서는 파괴 인성치의 감소로 인해 균열의 전파속도가 급격히 증가하게 되고 피로균열의 형상도 이전 보다 가늘게 나타나고 있다. 그러나 이런 현상은 균열성장이 계속 진행되어 비드 부분을 통과하게 되면, 다시 용접 비드를 통과하기 직전의 형태로 나타나는 것을 볼 수 있다.

이와 같은 현상은 용접 비드 부분과 모재부분의 강도값의 차이에서 기인된 것으로 판단된다. 앞에서 고찰한 바와 같이 용접 비드 부분은 모재부분 보다 경도값이 약 2.3배 증가했는데, 경도의 증가는 강도의 증가를 의미하며 또한 파괴 인성치의 감소를 의미한다. 따라서 모재부분에서 균열이 전파하다 용접 비드 부분에 이르면 일단 비드 부분의 증가한 강도값에 의해 일정 시간 균열 성장이 지연되게 되고, 이후 균열이 조금씩 성장함에 따라 용접 비드 부분에 다다르면 결국 비드 부분의 감소된 파괴인성치로 인해 균열전파가 급격히 진행되게 된다고 판단된다.

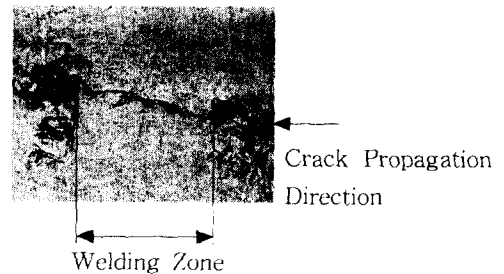


Fig. 8 The shape of fatigue crack around welding zone.

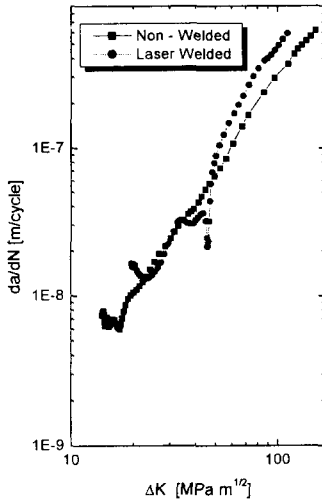


Fig. 9 Fatigue crack propagation

#### 4. 결 론

자동차 차체제작에 이용되는 냉간 압연강판에 대해 레이저 용접을 수행한 후 용접부의 구조 안정성을 고찰하기 위해 인장실험과 피로시험을 수행하였다. 시험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 하중방향과 평행으로 레이저 용접되었을 경우가 모재보다 약 10% 인장강도가 증가하였으며, 용접부분의 경도실험 결과 열 영향부 등의 기계적 성질 저하는 거의 나타나지 않았으며 용접 비드 부는 모재부보다 약 2.3배 높은 경도값을 나타냈다.
2. 피로실험 결과 두께가 동일하고 용접선 방향이 하중방향과 평행한 경우가 가장 높은 피로한도를 나타냈으며, 이는 모재 인장강도의 약 85% 수준으로 상당히 우수한 피로저항성을 나타냈다. 또한 서로 다른 두께의 강판이 레이저 용접되는 경우 동일한 두께의 용접시보다 약 25MPa 정도의 피로강도 저하를 나타낸다.
3. 균열의 발생은 변형률 구속 효과에 의해 시험편 중앙부인 용접부 비드에서 발생하여 일정 크

기만큼 성장하다가 모재로 전파되면서 취성파괴의 형태로 파손되었다.

4. 레이저 용접된 강판에 선변형(Pre-strain)을 가했을 때 이중두께의 경우 최고 25%의 피로강도 향상을 보였다.

5. 피로 균열의 전파형태는 모재 부분에서는 일반적인 거동 형태를 보이다가 용접 비드 부분에서는 강도의 증가로 인한 일정부분의 균열 성장 지연 현상을 나타낸다. 이후 균열이 성장함에 따라 용접 비드 부분에서는 감소한 파괴인성치로 인해 전파속도가 급격히 빨라지고 균열의 형상도가늘게 나타난다.

#### 5. 참고문헌

1. Tailor Welded Blank Technology for Automotive Applications, Andy P. Lee, Erick Feltham, Jon Van Deventer, SAE 960817
2. Application of Laser-Beam-Welded Sheet Metal, Wilfried Prange, Christoph Schnelder, Albrecht J. Selge, SAE 890853
3. Production and Usage of Laser Beam Welded Sheet Metal, Albrecht J. Selige, Wilfried Prange, SAE 970413
4. Roof Laser Welding in Series Productions, SAE 93002
5. 이중두께 강판의 CO<sub>2</sub> 레이저 용접 및 성형성, 서정, 대한용접학회지, 제 14권 1호, 1996
6. Fatigue Crack Growth in Laser Weldments of Cold Rolled Steel, Jiun-Ren Hwang, Ji-Liang Doong, Chee-Chang Chen, Materials Transactions, JIM, Vol. 37, No. 8, 1996 P. 1443-1446
7. M.F.Shi, "Formability Issues in the Application of Tailor Welded Blank Sheets", SAE 930278