

# 과대하중에 의한 레이저 용접 판재의 피로균열 전파거동

조우강\*(경희대 대학원 기계공학과), 오택열(경희대 기계공학과),  
곽대순(경희대 기계공학과 대학원)

## The Fatigue Crack Growth Behavior of Laser Welded Sheet Metal Due to Single Overload

W. K. Cho(Mech. Eng. Dept., KHU), T. Y. Oh(Mech. Eng. Dept., KHU),  
D. S. Kwak(Mech. Eng. Dept., KHU)

### ABSTRACT

In this study, Fatigue crack growth behavior of the laser welded sheet metal due to a single overload was investigated. From Fatigue crack propagation test, it was observed that the retardation of fatigue crack growth has been more effective in the welded specimen than in the base metal. And if the distance between the welded part and the position of overload is too close the retardation of fatigue crack growth at the welded part has been decreased. From FEM analysis, it was observed the retardation has been more effective compressive residual stress than plastic zone.

**Key Words** :Fatigue Crack Growth (피로균열 전파), Laser Weld (레이저 용접), Single Overload (단일 과대하중), Over Load Ratio (과하중비), Fatigue Behavior (피로거동)

### 1. 서론

레이저용접은 고밀도의 집중된 레이저빔이 용접 대상물에 흡수되고 열로 변화되어 용융이 일어난다. 레이저 용접의 특성은 용접속도가 빠르고 용입이 깊으며 입열량이 적은 관계로 열변형이 적고 비접촉식 이어서 박판용접시 기계적 변형을 주지 않는다. 또한 고강도 열원이므로 물리적이 성질이 상이한 금속의 접합이 가능하다.<sup>(1)</sup>

레이저 용접의 응용분야중 최근에 가장 각광받는 기술은 레이저 용접된 소재를 목적에 맞추어 프레스(press)성형하는 Tailed blank 용접을 들수 있다. 특히 자동차 차체(body panel) 제조 공정에 있어서 둘 이상의 부품을 일체화하여 프레스 작업을 하는 것으로 생산성 및 정밀도 향상에 유효한 방법으로 알려져 있다.<sup>(2)</sup> 또한 일체화된 형태로서 용접할 경우, 강도, 강성, 내부식성 등의 차체 각 부의 요구성능에 따라 판 두께, 재질 등의 변경요구 조건에 대응할 수 있으므로 원료에 대한 제품의 비율이 증가되

고 생산공정을 줄일 수 있다.<sup>(3)</sup>

현재 이 분야에서의 연구활동을 살펴보면 레이저 용접을 위한 적정 용접조건과 용접품질의 신뢰성을 평가한 연구<sup>(4)</sup>, 맞대기 용접시 이음부의 최대 허용간격에 관한 연구<sup>(5)</sup>, 용접성에 미치는 각종 용접 공정변수의 영향과 이를 이용한 적정 용접조건 설정을 위한 연구<sup>(5)</sup>, 이종의 얇은 판을 용접했을 때의 성형성을 고찰한 연구<sup>(6)</sup>등 주로 성형성에 관한 연구가 주종을 이루고 있다고 하겠다. 이렇게 용접 성형성에 관한 연구는 활발히 이루어지는데 이에 반해 아직까지 구조적 안정성에 관한 연구는 극히 미약해서 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다. 현재 연구되어진 구조적 안정성 관련 연구들도 일진진폭하중에서의 용접부의 거동을 관찰했을 뿐이다.<sup>(7)</sup>

실제 사용 중에 만나는 하중은 변동진폭하중으로써 과하중(overload)을 포함하는데 이러한 하중 조건에서는 균열 끝의 미시적 변화와 균열형상의 변화로 인해 균열전파 지연이 일어난다고 알려져 있고<sup>(8)</sup> 특히 아직까지 레이저 용접부에 대한 과하중효과

에 관한 안정성 연구는 전부하다하겠다.

따라서 본 연구에서는 Tailored Blank 용접부에서의 구조적 안정성을 확보하기 위하여 용접부에 단일 과대하중을 부여하여 피로균열 전파특성을 고찰하였다. 현재 자동차 제작사에서 사용하고 있는 재료와 용접조건을 이용하여 시험편을 제작하고 과하중의 부여시기와 과하중비에 따른 Tailored Blank 용접부의 피로균열 전파특성과 균열전파의 지연을 고찰하였다.

또한 FEM 해석을 통하여 소성역이 균열전파특성에 미치는 영향을 검토해서 균열전파지연의 기구를 규명하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 시험편 및 용접조건

본 연구에서 사용된 시험편은 실제 자동차 차체 제작에 사용되는 냉간 압연 강판재 SPEN(KS D 3512)로 두께 0.9mm와 2mm의 재료가 사용되었으며 재료의 화학적 성질은 Table 1과 같고 기계적 성질은 Table 2와 같다. 시험편의 형상은 피로균열 전파 거동을 고찰하기 위해 Fig 1에 나타내듯이 레이저 용접선의 방향이 하중방향과 평행하도록 제작하였으며 각각의 시험편에 13mm의 예균열(Pre-crack)을 와이어 커터를 이용하여 생성하였다.

본 연구에는 현재 차체 제작에 사용되고 있는 용접 조건을 사용하여 4kW 출력으로 6 m/min 속도로 용접하였다.

시험편 용접에 사용된 장비는 Laser welding machine DLW400 기종을 사용하였으며 레이저의 종류는 CO2 레이저를 사용했고 보조가스로는 헬륨을 사용하였다.

Table 1 Chemical composition

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

Table 2 Mechanical Properties of Specimens

Specimen	Yield Stress (Mpa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
Base Metal	215.7	339.3	39
Laser Weld	261.3	374.2	25

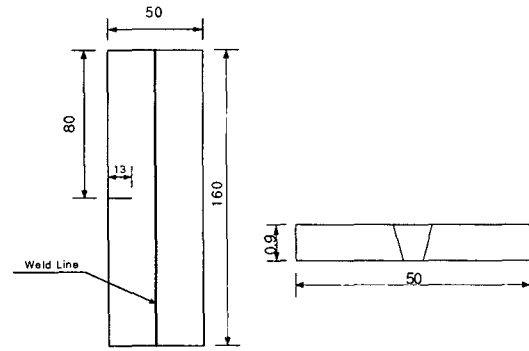


Fig. 1 Dimension of specimens for fatigue crack propagation

### 2.2 피로균열전파실험

기본적으로 피로균열 전파 실험은 서보 유압식 피로시험기인 Instron 8516을 사용하여 상온에서 완전편진 인장하중(응력비 R=0)을 Sine파의 형태로 10Hz의 하중 주파수로 피로균열 전파 시험편에 부하하여 실험을 수행하였다. 먼저 용접부에서의 과대하중의 효과를 비교하기 위해 용접되지 않은 시편과 용접된 시편에 대해서 균열진전길이 21mm에서 단일 과대하중을 과하중비 2로 부하하여 각 경우의 균열 길이와 반복수를 측정하였다.

또한 단일 과대하중의 부하 위치에 따른 크랙지연거동을 관찰하기 위해 균열전파 길이가 21mm, 23mm일 때 각각 단일 과대하중을 과하중비 2로 부하하였고 각 경우에 대해 균열길이와 반복수를 측정하였다.

### 2.2 피로균열전파실험

기본적으로 피로균열 전파 실험은 서보 유압식 피로시험기인 Instron 8516을 사용하여 상온에서 완전편진 인장하중(응력비 R=0)을 Sine파의 형태로 10Hz의 하중 주파수로 피로균열 전파 시험편에 부하하여 실험을 수행하였다. 먼저 용접부에서의 과대하중의 효과를 비교하기 위해 용접되지 않은 시편과 용접된 시편에 대해서 균열진전길이 21mm에서 단일 과대하중을 과하중비 2로 부하하여 각 경우의 균열 길이와 반복수를 측정하였다.

또한 단일 과대하중의 부하 위치에 따른 크랙지연거동을 관찰하기 위해 균열전파 길이가 21mm, 23mm일 때 각각 단일 과대하중을 과하중비 2로 부하하였고 각 경우에 대해 균열길이와 반복수를 측정하였다.

피로균열 전파거동의 관찰은 광학배율 100X의 이동현미경을 실험기에 부착하여 CCD 카메라를 통해 피로균열 전파거동을 관찰하였으며 균열길이 측정은 1/100 mm까지 측정 가능한 접안 마이크로미터

를 이용하여 측정하였고 피로균열 전파거동의 관찰이 용이하도록 시험편의 표면을 경면연마 하였다. 전반적인 실험은 ASTM E 647을 참고로 하여 수행하였다.

### 2.3 적용하중하에서의 소성역과 잔류응력(유한요소 해석)

소성역을 계산하기 위해 유한요소 해석을 위해 상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 수행했다. 기본적인 유한요소 모델은 모재인 SPEN과 용접비드로 나누어서 모델링을 했고 각각의 경우 다른 재료특성을 부여하여 해석했다. 해석은 일정반복하중 그리고 과하중비 1.5, 2를 가하였을 때의 소성역과 하중을 가하였다가 제거했을 때의 압축잔류응력을 검토하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 피로균열전파거동

과대하중에 의한 레이저 용접부의 피로균열 전파거동을 관찰하기 위하여 피로균열전파실험을 수행하였다. Fig. 2는 용접된 시편과 용접되지 않은 시편에 같은 조건으로 과대하중을 가한 경우의 균열전파거동을 균열진전속도와 균열길이의 관계로 나타낸 그림이다. 용접되지 않은 시편의 경우 균열진전속도가 증가하다가 21mm에서 과대하중을 가한 직후에 일반적인 균열진전지연현상을 보이고 있다. 용접된 시편의 경우 일반적인 균열진전을 보이다가 21mm에서 과대하중을 가한 직후 용접비드까지 일반적인 균열진전지연현상을 보이다가 용접비드에 이르러서 급격한 균열진전속도감소를 보이고 있다. 이것은 과대하중에 의해 균열진전지연효과를 보이다가 용접부에 이르러서는 용접부의 강도증가로 인한 균열전파속도의 감소와 과대하중에 의한 균열진전지연이 복합적으로 작용해서 급격한 균열진전속도감소를 보인다고 판단된다. 이후 용접비드를 지나면서 급격한 균열전파속도 증가를 보이면서 거의 용접되지 않은 시편과 비슷한 수준의 균열전파속도를 보여준다. 이것은 용접부의 강도증가로 인한 용접비드의 파괴인성치 감소에 기인한 것으로 판단된다. 균열진전지연의 거리는 두 경우 모두 비슷하게 약6mm정도로 나타나고 있는데 이는 용접비드를 지난 이후에는 다시 원래의 균열진전속도를 회복한다는 연구와 일치하는 것으로 판단된다.

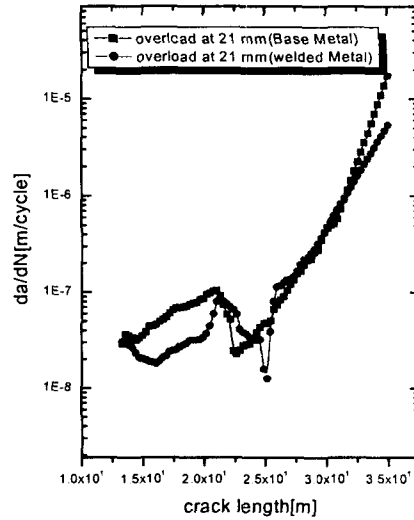


Fig. 2 Fatigue Crack Propagation with Crack Length (Comparison between base metal and welded metal)

Fig. 3은 과대하중의 부여시기를 달리하였을 때의 균열전파거동을 균열진전속도와 균열길이의 관계로 나타낸 그림이다.

그림에서 보여지듯이 21mm에서 과대하중을 부여한 경우 용접비드부분까지 일정하게 균열진전속도가 줄어들다가 용접비드에 이르러서 급격하게 균열진전속도가 감소하는 것을 관찰 할 수 있다.

그리고 이후 용접비드에서 약간의 균열진전속도 증가가 있는 후 용접비드를 지나면서 다시 급격하게 속도가 증가하는 것을 알 수 있다.

용접비드를 지나서는 일반적인 과대하중을 부여했을 때의 완만한 균열진전속도증가를 보여준다. 23mm에서 과대하중을 부여한 경우 과대하중을 부여한 직후 급격하게 균열진전속도가 감소하고 용접비드에 이르러서 최저속도를 보이며 용접비드를 지나면서 속도가 증가해서 용접비드를 지나서는 완만한 균열진전속도 증가를 보인다.

21mm에서 과대하중을 부여한 경우가 23mm에서 과대하중을 부여한 경우보다 균열진전속도감소가 더 큰 것을 볼 수 있는데 21mm 경우에는 모재와 용접비드사이에 약 3.5mm의 간격이 있어서 과대하중에 의한 균열지연효과가 충분히 나온 이후에 용접비드에 도달하고 또한 과대하중이후에 볼 수 있는 crack branching이 용접비드까지 이르지 않아서 용접비드경계에서 크랙이 장시간 지연되는 효과를 본 것이고 23mm의 경우는 crack branching이 용접비드 경계를 통과해서 용접부에서의 급격한 균열진전지연효과를 크게 보지 못한 것으로 판단된다.

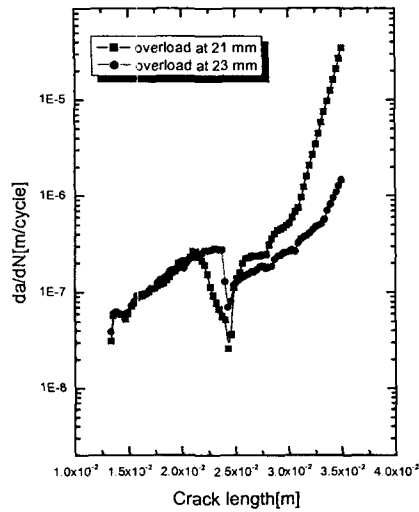
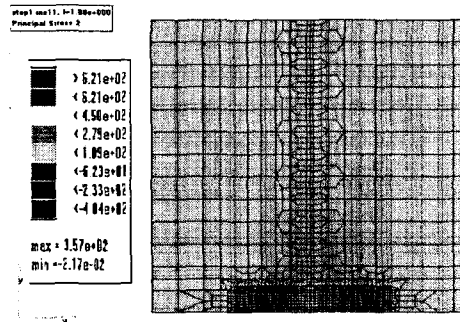


Fig. 3 Fatigue Crack Propagation with Crack Length (Comparison of a position of overload)

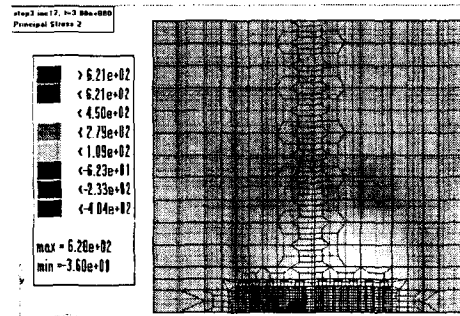
### 3.2 FEM 해석에 의한 소성역과 잔류응력

Fig. 4(a)는 일정진폭하중을 가했을 때의 응력장을 나타내고 (b)는 과하중비 2로 하중을 가했을 때의 응력장을 나타내고 있다. 그림을 비교해 보면 (a)는 크랙선단에서 약 6mm까지 소성영역을 보이고 있고 (b)는 크랙선단에서 약 18mm까지 소성영역을 보이고 있다. 이 값은 Iwin의 소성역 모델보다 약간 크지만 거의 비슷한 값을 보이고 있다. 여기서 Wheeler 균열진전지연모델을 고려해보면 6mm의 소성영역이 18mm의 소성영역을 통과하기 전까지인 약 12mm의 균열진전지연을 보일 것이라고 판단할 수 있다. 그러나 실제 실험결과에서는 약 7mm 정도의 균열진전지연이 일어나는 것으로 보아 Wheeler의 균열진전지연모델이 과하중에 의한 균열진전지연현상을 설명해 주지는 못한다고 판단된다.

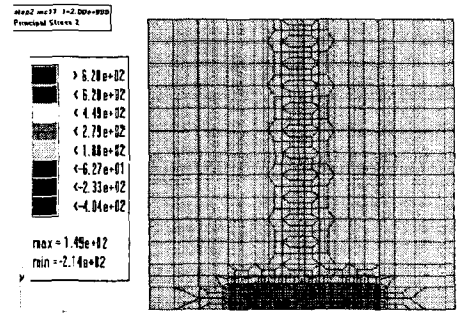
(c)는 균열이 21mm까지 진전된 상태에서 일정진폭하중을 가하고 나서 하중을 제거했을 때의 응력장을 나타내고 (d)는 과하중비 2로 하중을 가하고 나서 하중을 제거했을 때의 응력장을 나타내고 있다. 그림을 비교해 보면 (c)는 크랙선단으로부터 2.5mm까지 압축잔류응력장을 보이고 있고 (d)는 크랙선단에서 4.5mm까지 압축잔류응력장을 보이고 있었으며 그 크기는 약 두배로 (d)의 경우가 크게 나타났다. 압축잔류응력은 크랙선단에서 가장 크게 나타나고 크랙선단에서 멀어질수록 점점 감소하다가 용접비드부위에서 다시 증가하는 것을 보였다. 즉 과하중을 가한 직후 재료는 크랙선단의 넓은 영역에서 큰 압축



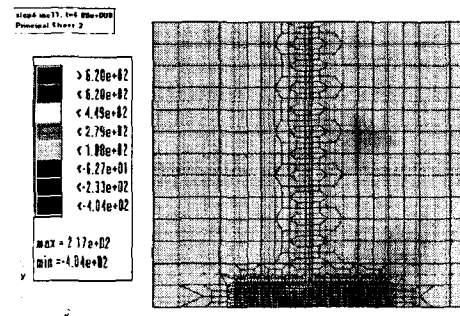
(a) Stress contour in constant load



(b) Stress contour in overload



(c) Stress contour in unloading of constant load



(d) Stress contour in unloading of overload

Fig. 4 Stress contour at crack length 21mm

잔류응력을 받아서 크랙이 잔류응력장의 영향을 벗어날 때까지 균열진전지연현상이 발생한 후 다시

크랙선단이 용접 비드 부분에 이르면 압축잔류응력에 의해 균열진전지연현상이 일어난다고 예상할 수 있다. 특히 용접 비드 부분에서는 강도차로 인한 균열진전지연현상이 보고되어 있으므로 더 큰 폭의 균열진전지연현상이 일어날 것으로 판단된다. 이는 피로균열전파실험결과에서도 잘 나타나 있어서 비교적 잘 맞는 결과라고 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 과대하중에 의한 레이저 용접부의 안전성 평가를 위해 유한 요소 해석 및 피로균열 전파거동을 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 피로균열 전파실험 결과 용접되지 않은 시편에 과대하중을 부여했을 때 보다 용접된 시편에 과대하중을 부여했을 때 더 큰 균열진전지연현상을 보이고 특히 용접비드에서 균열성장이 거의 멈추는 효과를 보였는데 이는 과대하중에 의한 균열진전지연효과와 용접비드의 강도증가가 복합적으로 작용한 것으로 보인다.

또한 용접비드에서 아주 가까운 거리에서 과대하중을 부여하는 것은 crack branching이 용접비드를 통과해서 용접비드에서의 균열진전지연효과가 감소하는 것으로 판단된다.

2. 과대하중을 가했을 때의 균열진전지연의 거리는 용접되지 않은 시편과 용접된 시편에서 거의 비슷하게 나타나는데 이는 용접부의 증가된 강도가 용접비드 전방에서만 적용되고 일단 용접부를 지나면 급격히 모재에서의 균열진전속도로 회복하는 것으로 판단된다.

3. 유한요소 해석결과 소성역에 의한 균열진전지연보다는 과대하중을 부여한 후 제거했을 때 나타나는 압축잔류응력이 균열진전지연에 더 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다.

#### 참고문헌

1. 한유희, R. Andreas Matzeit, "레이저 가공과 구조경량화 설계," 대한기계학회지, 제34권, 제7호, pp. 539-545, 1994
2. Andy P. Lee, Erick Feltham, Jon Van Deventer, "Tailor Welded Blank Technology for Automotive Applications," SAE, 960817.
3. 서정, 한유희, 김정오, 이영신, "이종두께 강판의 CO<sub>2</sub> 레이저 용접 및 성형성," 대한용접학회지, 제14권, 제1호, pp. 45-54, 1996.
4. 이희석, 배동호, "박판의 CO<sub>2</sub> 레이저 빔 용접과 소재접합일체성형에 관한 연구," 대한용접학회지, 제15권, 제2호, pp. 122-131, 1997.

5. 김기철, 이기호, 이목영, "테일러드 블랭크용 박판 강재의 레이저 용접성(I)," 대한용접학회지, 제16권, 제1호, PP.26-36, 1998.
6. M.F.Shi, "Formability Issues in the Application of Tailor Welded Blank Sheets," SAE, 930278.
7. 오택열, 권윤기, 이종재, 팍대순, "레이저 용접 판재의 피로거동," 한국공작기계학회 '99년도 추계학술대회 논문집, pp.339-344, 1999.
8. 이택순, 김상태, 김인식, "고강도 알루미늄 합금 용접부에 있어서의 피로균열전파에 미치는 과하중 효과," 대한용접학회지, 제6권, 제1호, 1988.