한국정밀공학회지 제21권 제 4호 (2004년 4월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 21, No. 4, April 2004.

단일 과대하중에 의한 레이저 용접 판재의 피로균열 전파거동

곽대순*, 김석환*, 오택열#

Effect of Single Overload on the Fatigue Crack Growth Behavior of Laser Welded Sheet Metal

Dai-Soon Kwak*, Seok Whan Kim* and Taek Yul Oh#

ABSTRACT

In this study, we investigated fatigue crack growth behavior of laser welded sheet metal due to a single overload. Fatigue specimens were made using butt joint of cold rolled sheet metal that was welded by CO_2 laser. The fatigue crack propagation tests were performed in such a way that fatigue loading was parallel to the weld line while crack propagation was perpendicular to the weld line. Single overload was applied when fatigue crack tip was arrived near the weld line. The distances between the crack tip and the weld line at which a single overload was applied were 6, 4 and 2 mm. The effect of specimen thickness and overload ratio on the fatigue behavior was determined. The plastic zone size of crack tip due to the single overload was determined from the finite element analysis. For investigating fatigue crack growth behavior, we used different thickness specimen 0.9mm and 2.0mm, and variable overload ratio applied fatigue crack propagation test. Also we used finite element analysis for investigating the plastic zone size of crack tip when single overload applied

Key Words : Fatigue crack(피로균열), Overload(과대하중), Laser weld(레이저 용접), Plastic zone(소성역), Crack growth rate(균열진전속도), Stress intensity factor(응력확대계수) , Nano Indentation(미세 압입)

1. 서론

레이저 용접의 특성은 용접속도가 빠르고 용입이 깊으며 가열부가 좁은 관계로 열변형이 적고 비접촉식이어서 박판용접시 기계적 변형이 적게 나타난다. 또한 고강도 열원이므로 물리적이 성질이 상이한 금속의 접합이 가능하다.[1,2]

레이저 용접의 응용분야중 최근에 가장 각광받는 기술은 레이저 용접된 소재를 목적에 맞추어 프레스 성형하는 Tailored blank 용접을 들수 있다. 특히 자동차 차체(body panel) 제조 공정에 있어서 둘 이상의 부품을 일체화하여 프레스 작업을 하는 것

☞ 접수일: 2004년 1월 9일; 게재승인일: 2004년 2월 20일
교신저자: 경희대학교 테크노공학대학
E-mail : tyoh@khu.ac.kr Tel. (031) 201-2511
* 경희대학교 대학원 기계공학과

으로 경량화, 생산성 및 정밀도 향상에 유효한 방법으로 알려져 있다.[3] 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 생산비율이 증가되고 생산공정을 줄일 수 있다. 현재 이 분야에서의 연구활동을 살펴보면 레이저 용접 조건에 따른 금속조직의 변화나[4], 용접조건에 따른 스트레인의 한계 그리고 용접되는 강판의 두께 한계 등을 규명한 것[5], 이종의 얇은 판을 용접했을 때의 성형성을 고찰한 것[6] 그리고 성형성을 극대화하기 위한 용접 조건중 판과 판 사이의 간격을 변수로 고찰한 것[1] 등 주로 성형성을 개선하기 위한 용접조건의 도출에 대한 연구가 주종을 이루고 있다. 용접 성형성에 관한 연구는 활발히 이루어지는데 이에 반해 아직까지 구조적 안정성에 관한 연구는 미약하게 이루어지고 있는 실정이다. 현재 연구되어진 구조적 안정성 관련 연구들도 정하중(monotonic) 또는 일정진폭하중에서의 용접부의 거동을 관찰했을 뿐이다.[7] 실제 사용 중에 만나는 하중은 변동진폭하중으로써 과하중(overload)을 포함하는데 이러한 하중 조건에서는 균열 성장 거동에 관한 연구는 매우 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 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 용접부의 피로균열 전파특성과 균열전파의 지연을 고찰하였다. 또한 FEM해석을 통하여 소성역이 균열전파특성에 미치는 영향을 검토해서 균열전파지연의 기구를 설명하고자 한다. 레이저 용접은 극히 좁은 영역의 비드를 형성하므로 비드부와 열영향부의 기계적 물성 실험이 매우 어려운 문제가 있다. 본 연구에서는 Nano indentation 실험법을 사용하여 레이저 용접 비드와 열 영향부의 기계적 물성을 측정하고, 이를 적용하여 균열 선단의 과하중에 대한 응력 분포를 해석하였다.

2. 실험 및 해석

2.1 시험편 및 용접조건

본 연구에 사용된 시험편의 재질은 냉간 압연 강판재(KS D 3512 SPCEN) 두께 0.9mm 의 재료가 사용되었다. 사용된 재료의 화학적 성분은 Table 1과 같다.

Table 1 Chemical composition(Weight Percent)

Elements	C	Mn	Si	P	S
Weight %	0.016	0.019	0.029	0.019	0.006

연구에 사용한 용접조건은 현재 자동차 제작사에서 차체 제작에 사용되고 있는 용접조건을 사용하였는데, 0.9mm 두께의 강판을 4kW의 출력으로 6m/min의 속도로 맞대기 용접하였다. 레이저는 CO_2 레이저를 사용하였고, 보조가스(assist gas)로는 헬륨(He) 가스를 사용하였다. Table 1의 조건을 적용하여 용접을 시행한 결과 육안검사와 비파괴 검사 결과 양호한 상태를 나타냈다.

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

Table 2 Mechanical properties of specimens (Loading direction was parallel to the weld line)

Specimen	Yield Strength [MPa]	Tensile Strength [MPa]	Elongation [%]
Base Metal	215.7	339.3	39
Laser* Weld	261.3	374.2	25

레이저 용접 비드 부분이 인장강도 증가에 역할을 한 것으로 판단되어 비드 부분의 물성 변화를 측정하기 위해 마이크로 비커스 경도계를 사용하여 용접 비드부를 관통하는 방향으로 지그재그 형상으로 0.05mm 간격으로 측정하였다. 측정된 결과를 Fig. 1에 나타냈다. 모재의 비커스 경도는 106으로 측정되었고, 용접된 비드는 217로 측정되어 비드부

는 모재보다 약 2배 정도 향상된 경도값을 나타냈다.

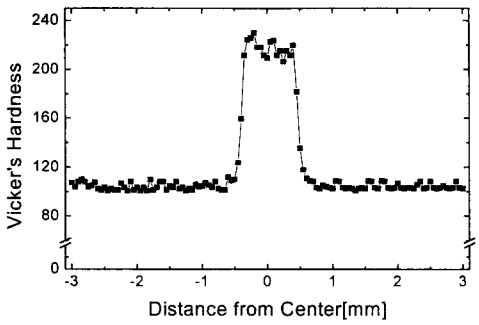


Fig. 1 Variation of micro Vicker's Hardness

2.2 피로균열전파실험

피로균열 전파 실험은 서보 유압식 피로시험기인 Instron 8516을 사용하여 상온에서 완전편진 인장하중(응력비 R=0)을 Sine파의 형태로 10Hz의 하중 주파수로 피로균열 전파 시험편(Fig. 2)에 부하하여 실험을 수행하였다. 먼저 용접부에서의 과대하중의 효과를 비교하기 위해 용접되지 않은 시편과 용접된 시편에 대해서 균열진전길이 21mm에서 단일과대하중을 과하중비 2로 부하하여 각 경우의 균열길이와 반복수를 측정하였다. 또한 단일 과대하중의 부하 위치에 따른 균열 전파속도 지연거동을 관찰하기 위해 균열 전파 길이가 19mm, 21mm, 23mm일 때 각각 단일 과대하중을 과하중비 2로 부하하였고 각 경우에 대해 균열길이와 반복수를 측정하였다. 과대하중의 크기에 따른 균열 전파 거동을 관찰하기 위해 과대하중비는 1.5. 2.0으로 설정하여 각각의 경우를 실험하였고, 시험편의 두께 변화에 따른 거동 관찰을 위해 0.9mm 두께의 시험편과 2.0mm 두께의 시험편이 사용되었다. 피로균열 전파거동의 관찰은 광학배율 100X의 이동현미경을 실험기에 부착하고 CCD 카메라를 통해 피로균열 전파거동을 관찰하였으며 균열길이 측정은 1/100 mm까지 측정 가능한 접안 마이크로미터를 이용하여 측정하였고 피로균열 전파거동의 관찰이 용이하도록 시험편의 표면을 경면연마 하였다. 전반적인 실험은 ASTME 647을 참고로 하여 수행하였다.

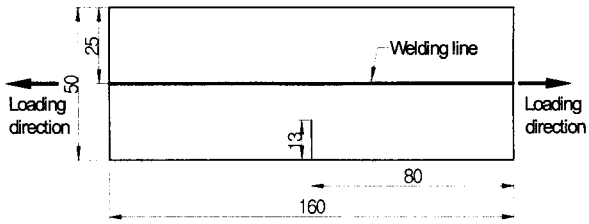


Fig. 2 Schematic diagram of test sample

2.3 나노 인덴테이션 테스트

레이저 용접부의 물성 변화를 보다 정밀하게 측정하기 위해 나노 인덴터를 사용하여 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 용접부를 관통하는 방향으로 0.05mm 간격으로 연속 압입 시험을 하였다. 실험에 사용된 장비는 MTS Nano Indenter/XP 장비가 사용되었다.

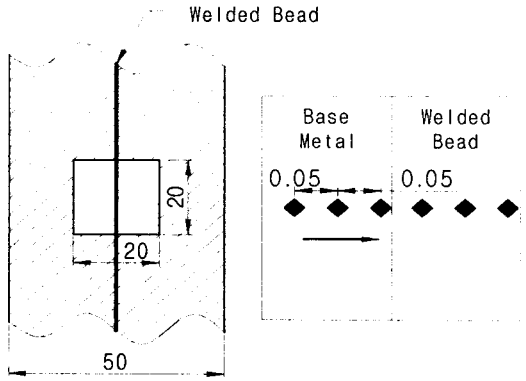


Fig. 3 Schematic diagram of nano indentation test

2.4 균열선단의 응력분포 해석

균열선단에서의 응력 분포 및 소성역 형상을 해석하기 위해 상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 모델은 모재, 용접비드, 열 영향부로 나누어서 모델링을 했고 각각의 경우 다른 재료특성을 부여하여 해석했다. 해석은 일정하중 그리고 과하중비 1.5, 2를 가하였을 때의 균열 선단의 응력 분포와 소성역의 크기를 검토하였다.

3. 실험 및 해석 결과

3.1 피로균열 전파 거동

과대하중에 의한 레이저 용접부의 피로균열 전파거동을 관찰하기 위하여 피로균열 전파실험을 수

행하였다. Fig. 4는 용접된 시편과 용접되지 않은 시편에 같은 조건으로 과대하중을 가한 경우의 균열 전파거동을 나타낸 그림이다.

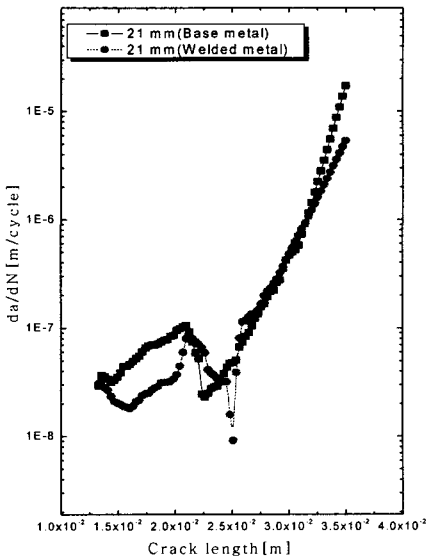


Fig. 4 Comparison of fatigue crack propagation with crack length between base metal and welded metal

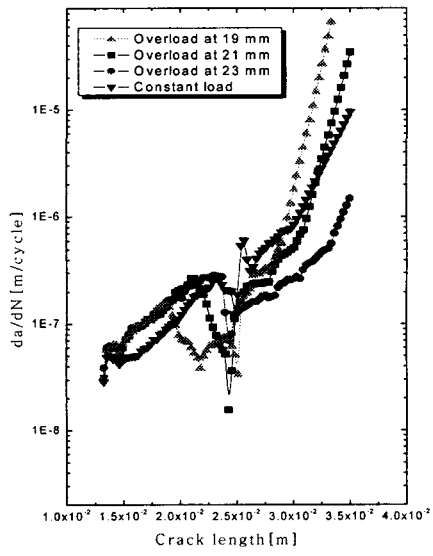


Fig. 5 Effect of overload location on the crack length

용접되지 않은 시험편의 경우 균열 진전속도가 증가하다가 균열길이 21mm에서 과대하중을 가한 직후에 과대하중에 의한 균열진전 지연현상을 보이고 있다. 용접된 시험편의 경우 균열길이 21mm에서 과대하중을 가한 직후 용접비드까지 균열진전 지연현상을 보이다가 용접비드에 이르러서 급격한 균열 진전 속도 감소를 보이고 있다. 이것은 과대하중에 의해 균열 진전 지연효과를 보이다가 용접부에 이르러서는 용접부의 강도증가로 인한 균열전파속도의 감소와 과대하중에 의한 균열진전지연이 복합적으로 작용해서 급격한 균열 진전 속도 감소를 보이는 것으로 판단된다.

과대하중의 부하 위치에 따른 피로균열 전파거동을 관찰하기 위해 균열 진전 길이 19mm, 21mm, 23mm에서 과대하중을 과대하중비 2로 부하하여 실험된 결과를 Fig. 5 나타냈다. 균열진전 길이 19mm에서 과대하중을 가한 경우에는 과대하중을 가한 직후에 균열길이 22mm까지 균열진전 지연거동을 보이다가 이후 균열진전 속도가 증가하고 용접비드 전방에서 다시 속도가 감소하는 것을 보인다. 이후 용접비드에서 급격하게 속도가 증가하고 용접비드를 지나서는 완만하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 균열진전길이 21mm에서 과대하중을 가한 경우에는 과대하중을 가한 직후 용접비드 부분까지 연속적인 균열진전 지연거동을 보이다가 용접비드 전방에서 급격하게 속도가 감소하고 용접비드를 지나면서는 급격하게 속도가 증가해서 다시 모재에 접어들면 완만한 속도증가를 보이다가 이후 과대하중을 가하기 전의 기울기를 회복한다. 균열진전길이 23mm에서 과대하중을 가한 경우에는 과대하중을 가한 직후 급격하게 균열진전지연을 보이면서 용접비드를 통과하고 그 이후 모재에서 완만한 속도로 균열이 전파되는 것을 보인다. 과대하중을 가한 직후의 균열진전 지연속도의 기울기는 과대하중의 부하 위치가 용접비드에 가까울수록 급하게 나타났고 용접비드를 지나 모재에 이르러서는 과대하중의 부하위치가 용접비드에 가까울수록 완만하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 균열진전 지연 구간의 길이는 과대하중의 부하 위치가 23mm일 때가 21mm일 때보다 약 5% 19mm일 때보다 약 14%정도 증가하며, 용접비드 부근에서의 균열전파속도를 비교해 보면 과대하중의 부하위치가 21mm일 때가 가장 속도가 낮고 19mm, 23mm 순서로 속도가 늘어나는데 이는 21mm에서 과대하중을 가한

경우 과대하중에 의한 균열진전지연의 효과와 용접 비드의 강도 증가로 인한 용접비드 전방의 균열진전 지연효과가 더해져서 가장 속도가 낮게 나오는 것으로 판단된다. 과대하중의 부하위치 23mm의 경우에는 과대하중에 의해 균열전파속도 감소 현상이 지배적이며 용접 비드부의 저항에 의한 속도 감소 현상은 미비하게 나타나는 것으로 판단된다. 과대하중 부하위치 19mm의 경우 과대하중에 의한 균열진전지연을 보이다가 용접비드 전방에 도달하면 용접비드에 의한 균열진전지연을 보이는데 용접비드 전방에서의 균열진전지연의 폭이 과대하중을 가하지 않았을 때 나타나는 균열진전지연의 폭과 비슷한 것을 볼 수 있다.

Fig. 6은 균열진전길이 21mm 에서 과대하중를 1, 1.5, 2로 서로 다르게 가했을 때의 피로균열 전파거동을 나타낸 그림이다. 모든 경우에 있어 과대하중을 가한 직후 완만하게 균열진전 지연거동을 보이다가 균열이 용접 비드 전방에 이르면 급격하게 균열전파속도가 감소했다가 용접비드를 통과하면서 급격하게 속도가 증가하고 이후 약간의 속도 감소 후 일반적인 균열전파거동을 보이고 있다. 과대하중을 가하지 않은 경우(과하중비 1)는 용접 비드의 저항에 의한 균열진전속도 저하 현상만을 나타내고 있으며, 과하중을 가한 경우 과하중비가 클수록 균열 진전속도 저하폭이 크게 나타났다.

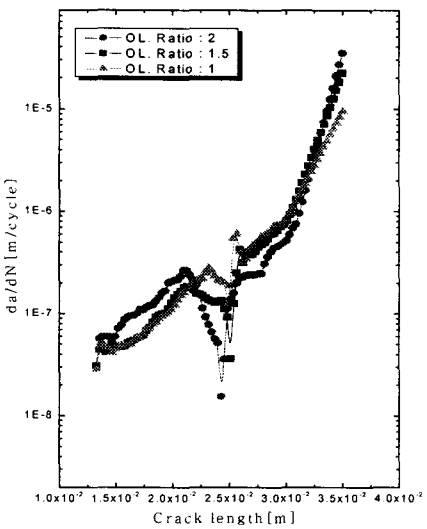


Fig. 6 Effect of overload ratio on the fatigue behavior of welded specimen

과하중비 1.5인 경우 과하중에 의한 균열진전속도 저하 현상과 용접 비드부분의 저항으로 인한 균열진전속도 저하 현상이 구분되어 관찰되었으나 과하중비 2인 경우 균열이 용접 비드부분을 통과 할 때까지 전체적인 균열진전속도 저하현상을 나타냈다.

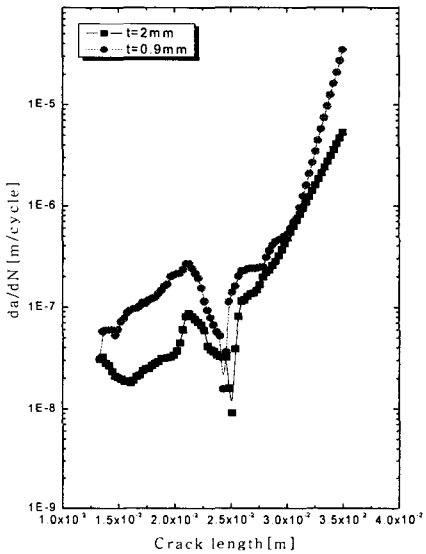


Fig. 7 Effect of specimen thickness on the fatigue behavior of welded specimen

시험편 두께에 따른 영향을 살펴보기 위해 두께 0.9mm의 시험편과 2.0mm의 시험편을 균열길이 21mm에서 과하중비 2로 실험한 결과를 Fig. 7에 도시하였다. 과대하중을 가하기 직전까지는 일반적인 균열전파형태를 보이고 과대하중을 가한 직후 역시 과하중에 의한 균열진전지연을 보이다가 용접비드 전방에서 급격하게 속도가 감소하고 용접비드를 지나면서 다시 급격하게 속도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 두께가 다른 두 경우를 비교해 보면 균열전파속도의 경우 두꺼운 시편이 약간 균열전파속도가 낮은 것을 볼 수 있다. 균열진전속도 감소의 폭은 두께가 얇은 시험편이 크게 나타났다.

3.2 나노 인덴테이션 실험 결과

레이저 용접을 사용하여 맞대기 용접된 냉간압연강판(SPCEN)의 나노 인덴테이션 실험 결과 얻어진 하중-변위 선도를 Fig. 8 에 나타냈다. 그림에서 보이는 바와 같이 모재, 용접 비드, 열영향부의 특

성이 뚜렷하게 나타나고 있다. Fig. 9 는 용접 비드를 관통하는 방향으로 탄성계수를 측정한 결과이다. 레이저 용접은 매우 좁은 폭의 비드를 형성하게 되는데 실험에 사용된 시험편의 경우 약 1mm 정도의 비드 폭을 보였으며, 용접 비드 부분은 모재 부분 보다 향상된 탄성계수값을 나타냈다. 모재의 탄성계수 값은 단축 인장 실험에서 얻어진 값과 거의 유사한 191GPa의 값을 나타냈으며, Fig. 1의 미소 경도 실험 결과 존재 여부가 불명확했던 열영향부도 나노 인덴테이션 실험 결과 Fig.10에서 명확하게 나타나고 있다. 열 영향부의 탄성계수는 220Gpa,용접 비드 부분의 탄성계수는 238GPa 정도를 나타냈으며 열 영향부는 비드 측면에 약 1mm 내외의 폭을 가지고 좁게 나타남을 알 수 있다.

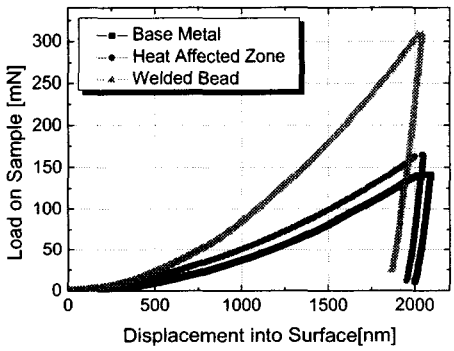


Fig. 8 Load-displacement curve of laser welded specimen

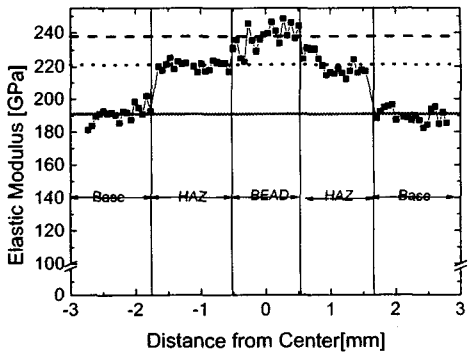


Fig. 9 Variation of elastic modulus at base metal, HAZ, weld bead

3.3 균열선단의 소성역과 응력해석

과대하중 부하시 균열 선단에서의 소성역 크기와 응력 분포 해석을 위해 Fig.10 의 유한요소 모델을 사용하였다. 해석은 상용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하였으며, Nano indentation 실험결과 얻어진 기계적 물성치를 적용하였다. Fig. 10에서 보이는 바와 같이 열영향부와 용접 비드부를 별도의 물성을 적용하였고, 열영향부의 폭은 Fig. 9에서 얻어진 결과에 의해 비드 좌우측 1mm로 표현하였다.

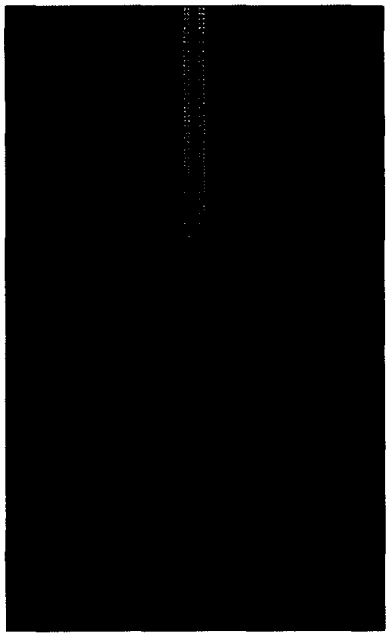


Fig. 10 Modeling of finite element analysis

Fig.11은 피로균열 전파 시험에 사용된 피로하중의 크기를 정하중으로 1회 부하했을 때 균열선단의 응력 분포를 나타낸 그림이다. 용접 비드 부분과 열영향부 부분의 향상된 강도 값으로 인해 외부 하중에 저항하는 결과를 볼 수 있다.

Fig.12은 시험편에 과하중비를 다르게 설정하여 과하중을 부하 한 후 하중을 제거하였을 때 균열선단의 소성영 형상을 나타낸 것으로,(a)는 일정진폭하중을 가했을 때의 결과를 나타내고 (b)는 과하중비 1.5로 하중을 가했을 때, (c)는 과하중비 2로 하중을 가한 후 하중을 제거하였을 때 균열 선단에

서의 응력분포를 나타내고 있다.

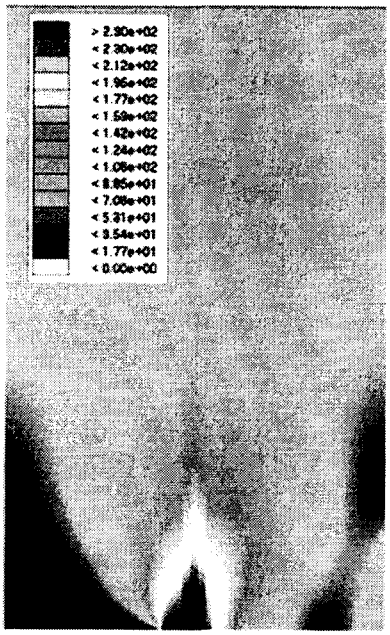
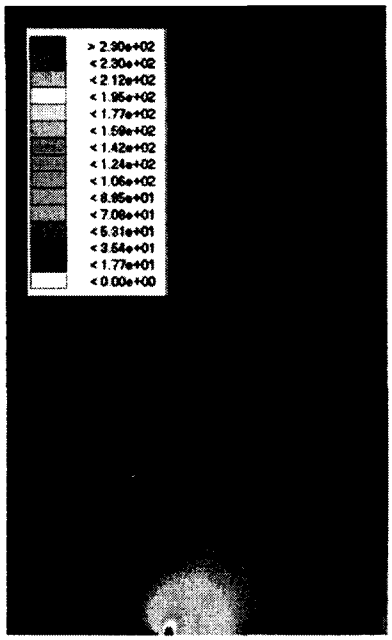
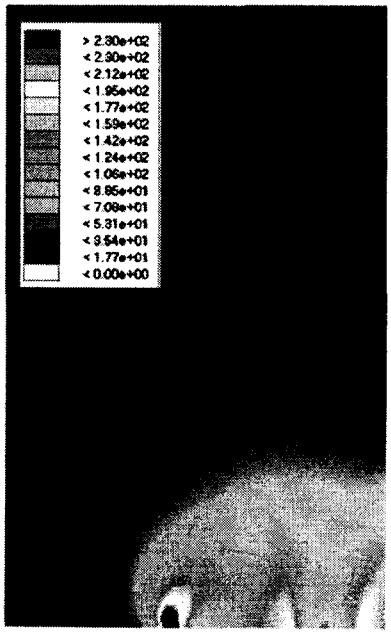


Fig. 11 Stress distribution at the crack tip where crack length 21 mm

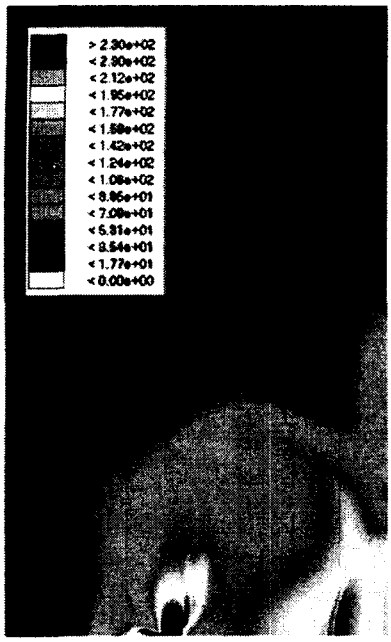
과하중비를 1.5로 설정하여 하중을 부하하였을 경우 소성역의 크기는 균열 진전방향으로 약 1.7mm의 크기를 보이고 있으며, 과하중비 2로 설정한 경우에는 균열진전방향으로 약 2.5mm의 크기를 보이고 있다. 이는 Fig.7 에 나타낸 균열진전속도 감소 현상이 나타나는 구간의 크기와 연관지어 생각해볼 수 있다. 과하중비 1.5로 과하중을 부하한 경우 과하중으로 발생한 소성영역의 구간에서 균열 진전 속도 감소 현상을 보였고, 이후 일정 속도로 균열 성장 거동을 나타내며 용접 비드부에 접근하면서 비드부의 향상된 강도값으로 인해 균열진전속도 감소 현상을 보인다. 과하중비 2.0으로 과하중을 부하한 경우는 균열이 용접 비드 부분을 통과할 때까지 연속적으로 균열진전속도 감소 현상을 보이는데 이는 과하중으로 인해 발생한 소성역의 용접 비드부 전방까지 넓게 위치하여 균열이 소성역 부분을 통과하는 동안 연속적으로 진전속도 감소 현상이 발생한 것으로 판단된다.



(a) Overload Ratio = 1.0



(b) Overload Ratio = 1.5



(c) Overload Ratio = 2.0

Fig.12 The shape of plastic zone in unloading condition after overload

4. 결론

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

1. 레이저 용접된 비드 부분은 급격한 경도 향상을 나타내는데 모재와 비교하여 약 2배 정도의 경도값 향상을 보였다.
2. 레이저 용접시 용접 비드 측면에 약 1mm 정도의 폭으로 열영향부가 발생하며, 탄성계수는 모재와 비교하여 열영향부는 12.8%, 용접 비드는 20%의 증가를 보였다.
3. 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 판단된다.
4. 과대하중 부하 후 균열선단에 형성되는 소성영역이 용접 비드부에 도달하지 않는 지점에서 과대하중이 작용할 경우 최대의 균열진전지연효과를 나타내며, 과하중비가 클수록, 시험편의 두께가 얇을수록 큰 균열 진전 지연효과를 보인다.
5. 유한요소 해석결과 과하중 부하 후 균열 선단의 소성역의 크기와 균열전파속도 실험 결과 균열진전속도 지연 현상이 나타나는 구간의 길이가 잘 일치하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 지역대학우수과학자 지원사업의 지원으로 수행되었습니다.
[과제번호 R05-2003-000-11383-0]

참고문헌

1. Wllfried, Prange, Christoph, Schnelder and Albrecht, J. Sellge, "Application of Laser - Beam-Welded Sheet Metal," SAE 890853.
2. Albrecht, J. Selige and Wilfried, Prange, "Production and Usage of Laser Beam Welded Sheet Metal," SAE 970413.
3. Lee, P. Andy, Erick, Feltham, Jon Van Deventer, "Tailor Welded Blank Technology for Automotive Applications," SAE 960817.
4. Hwang, Jiun-Ren, Doong, Ji-Liang, Chen, Chee-Chang, "Fatigue Crack Growth in Laser Weldments of Cold Rolled Steel," Materials Transactions, JIM, Vol. 37, No. 8, pp. 1443-1446 1996.
5. Shi, M.F., "Effects of Strain Gradient and Curvatures on Forming Limits Diagram for Anisotropic Sheets," J. Mat. Shaping Technol., Vol. 9, 1991.
6. Shi, M.F., "Formability Issues in the Application of Tailor Welded Blank Sheets," SAE 930278.
7. Rhee, Kyong Y., Kwak, Dai-soon and Oh, Teak-yul, "Fatigue Behavior Characterization of Laser - welded Cold rolled Sheet Metal(SPCEN)," Journal of materials science Vol. 37 pp.1019-1025 2002.
8. 구본영,금영탁, "CO_2 레이저 합체박판 용접부의

기계적 물성평가," 한국정밀공학회지 Vol.18, No.4, pp.142-150, 2001.
9. 곽대순,김석환,오택열, "이종 재료 레이저 용접부 균열 선단의 응력 분포," 한국정밀공학회 추계학술대회논문집, pp.577-580, 2003.