

## 연구논문

## 레이저용접부의 파괴에 미치는 잔류응력의 영향

조성규\*, 양영수\*\*, 노영진\*\*\*

\*현대제철 후판개발팀

\*\*전남대학교 기계시스템공학부

\*\*\*전남대학교 대학원 기계공학과

## The Effect of residual stress on fracture behavior in the laser weldment

Cho, Sung Kyu\*, Yang, Young Soo\*\*, Noh, Young Jin\*\*\*

\*Hyundai Steel

\*\*Chonnam National University, School of Mechanical Systems Engineering

\*\*\*Chonnam National University Graduate School, Mechanical Engineering

## ABSTRACT

The integrity of laser welded structures is decided in fracture strength and fatigue strength. This study made an effort to understand the fracture behavior considering residual stress. Experiments are conducted and analyses are performed to explore the influence of residual stress on fracture behavior of bead-on laser welded compact specimen. Fracture experiments are performed using ASTM 1820. The performed analyses included thermo-elasto-plastic analyses for residual stress and subsequent J-integral calculation. A modified J integral is calculated in the presence of residual stresses. The J-integral is path-independent for combination of residual stress field and stress due to mechanical loading. The results indicates that the tensile residual stress near crack front bring the low fracture load while the compressive residual stress bring the high fracture load compared to no residual stress specimen. These results quantitatively understand the influence of residual stress on fracture behavior.

**Key Words** : Laser welding, J-integral, residual stress, fracture, DCPD

## 1. 서론

고밀도 에너지를 갖는 레이저 빔은 좁은 면적에 집중된 열에너지를 전달하는 특성을 갖기 때문에 산소-아세틸렌 열원이나 전기 아크 열원과 비교할 때, 가공부에 제한된 열 영향을 끼치면서 용접, 절단, 표면처리 등 여러 생산공정에 효과적으로 이용될 수 있다. 레이저 용접은 용접 속도가 다른 용접법 보다 빠르고 정교하며 용입 깊이가 깊고 입열량이 적기 때문에 열에 의한 변형이 적고 열영향부가 매우 좁다는 등 많은 장점을 가지고 있어 자동차, 항공기, 선박 등의 기계 구조물의 제작에 있어

서 많이 사용되고 있다. 이에 따라 오랜 기간 동안 레이저 용접기술을 적용하기 위한 연구를 수행하고 있고 또한 실 생산에 적용해 높은 생산성 향상 효과를 거두고 있다<sup>1-4)</sup>. 그러나 레이저용접공정은 국부적인 곳에 열이 가해짐으로써 불균일한 온도분포를 갖게 되며 이로 인해 열응력이 발생한다. 온도에 따른 재료물성치의 변화로 인하여 열응력은 용접 후 비선형 소성변형으로 최후에 모재의 항복강도에 이르는 인장 잔류응력이 필연적으로 존재하게 된다. 이와 같은 인장잔류응력은 저응력에서 파괴를 발생시키므로 레이저를 이용하여 제작된 용접구조물

의 강도적 신뢰성 및 내구성을 감소시키는 원인이 된다. 그러므로 용접구조물의 역학적인 지표로서 신뢰성을 나타내는 파괴강도에 있어서 잔류응력을 고려한 파괴역학적인 해석이 필요하다<sup>[5]</sup>. 균열선단 부에서의 응력과 변형상태가 특정한 조건에 달하면 균열이 생성 및 성장하여 재료가 파단된다. 이와 같은 특정한 조건을 나타내는 지표로서 파괴인성치가 이용되고 있다. 취성재료에 적용되는 선형탄성 파괴역학에서는 임계응력확대계수(Kc)가 널리 적용되고, 연성재료 및 탄소성 조건에 있어서는 Kc는 더 이상 적용할 수 없고 소성변형을 고려하는 탄소성 파괴인자로 Jc가 적용된다. 용접부의 균열선단 부근에서는 항복강도에 이르는 인장잔류응력과 소성변형이 존재하므로 탄소성 파괴인자인 Jc로서 평가되어야 한다<sup>[6]</sup>.

본 연구에서는 잔류응력이 있는 경우와 없는 경우에 대해 탄소성 파괴인자인 J를 고려하여 파괴에 이르는 응력을 산출하여 레이저용접부의 파괴에 미치는 잔류응력의 효과에 대해 검토하였다. 잔류응력 및 초기소성변형으로 인하여 J적분이 경로 독립성의 성질을 상실하므로 영역적분법을 이용하여 경로독립성을 유지하도록 수정된 J적분을 계산하는 프로그램을 개발하였다<sup>[7,8]</sup>. 잔류응력이 있는 경우와 없는 경우 모두 파괴에 이르는 응력을 직류전위차법(DCPD)을 이용해 실험적으로 구하고, 용접부의 열유동 및 열응력을 시간 변화에 따라 계산하여 최후의 잔류응력 및 외력에 대한 응력분포는 상용유한요소프로그램인 ABAQUS를 이용하여 계산하였다. 유한요소해석 결과를 수정된 3차원 J적분 계산 프로그램에 대입하여 잔류응력이 없는 경우, 잔류응력과 외력이 동시에 작용하는 경우에 대하여 J적분을 계산하여 잔류응력의 영향을 고찰하였다.

## 2. 파괴실험

### 2.1 재료 및 시편

용접부의 잔류응력의 효과를 비교하기 위해 파괴 실험은 직류전위차법을 이용해 수행하였다. 시험편은 연성재료인 일반구조용강 연강(SS400)으로 Jc측정실험 (ASTM E1820)과 동일하게 소형인장 시편(CT, 두께: 6.35mm)을 제작하였다. 시편의 화학 성분은 Table 1, 기계적 성질은 다음 Table 2와 같다. 시편에 피로예비균열(2mm)을 삽입한 후, 12kW급의 연속 출력과 CO<sub>2</sub>레이저를 이용하여 한번에 깊이 방향까지 키홀(keyhole) 용접하였으며, 레이저 용접 조건은 Table 3에 나타내었다. 파괴거동에 있어서 압축잔류응력의 영향을 고찰하기 위하여 Fig. 1과 같이 피로예비균열의 수직방향으로 균열선단에서 3mm 떨어져서 레이저 용접하였고, 인장잔류응력 영향을 고찰하기 위하여 균열선단에 용접을 하였다<sup>[9]</sup>.

Table 1. Chemical composition of SS400

| Material | Chemical composition (wt, %) |       |      |       |       |
|----------|------------------------------|-------|------|-------|-------|
|          | C                            | Si    | Mn   | P     | S     |
| SS400    | 0.142                        | 0.171 | 0.85 | 0.015 | 0.004 |

Table 2. Mechanical properties of SS400

| Material | Mechanical properties |                   |                 |                 |                    |                    |
|----------|-----------------------|-------------------|-----------------|-----------------|--------------------|--------------------|
|          | Yield strength        | Ultimate strength | Young's modulus | Poisson's ratio | Hardening exponent | Hardening constant |
| SS400    | 256 MPa               | 441 MPa           | 200 GPa         | 0.3             | 4.37               | 7.9                |

Table 3. Laser welding processing parameter

| Material            | Laser welding processing parameter |               |              |
|---------------------|------------------------------------|---------------|--------------|
|                     | Power                              | Welding speed | Shield gas   |
| CT specimen (SS400) | 12 kW                              | 1 m/min       | He, 12 l/min |

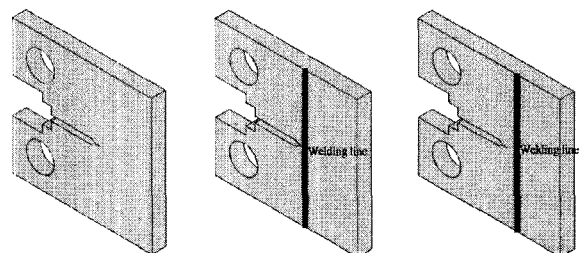


Fig. 1 The bead-on laser welded compact specimen.

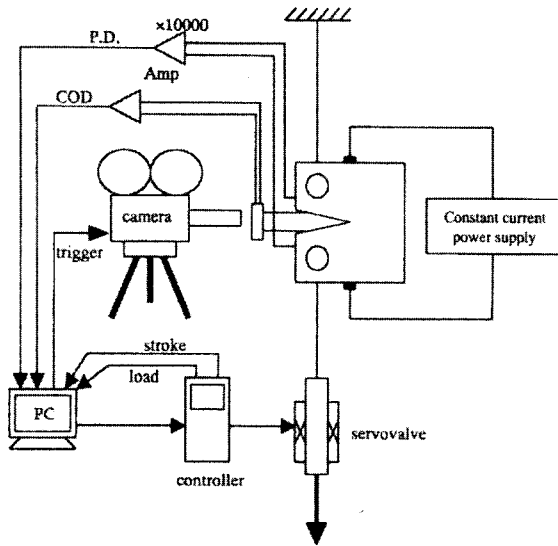


Fig. 2 Schematic of experiment apparatus.

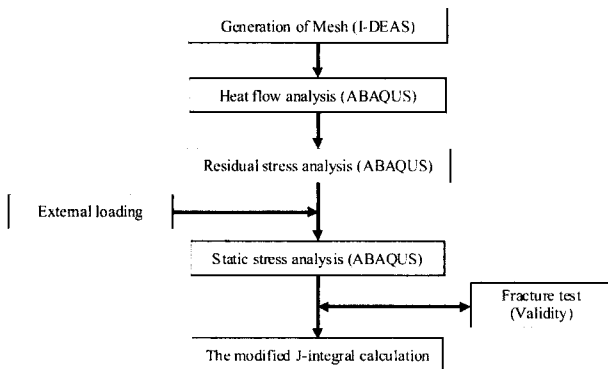


Fig. 3 The flowchart of J-integral calculation.

## 2.2 실험 절차

잔류응력의 영향을 고찰하기 위해 압축잔류응력, 인장잔류응력이 걸리는 경우와 용접을 하지 않은 경우 이렇게 세가지 경우에 대하여 실험을 하였다. 직류전위차법(DCPD)은 Fig. 2와 같이 시험편 상하면에 정전류를 통전하여, 진전하는 균열 길이에 따라 시험편의 단면적이 감소하면서 발생하는 전위차의 변화를 측정하여 이를 균열 길이로 환산하는 방법이다. 본 연구에서 균열길이 계산은 Johnson식을 사용하였다<sup>[10]</sup>. Power supply에서 20V의 전압과 60A의 전류를 일정하게 공급하고 균열 진전에 따른 전압변화를 측정하기 위해 신호증폭기를 이용하여 전압신호를 10000배를 증폭하였다.

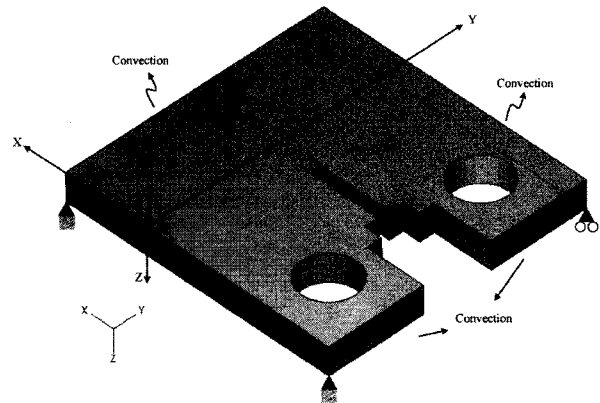


Fig. 4 Boundary condition of thermal flow and residual stress analysis.

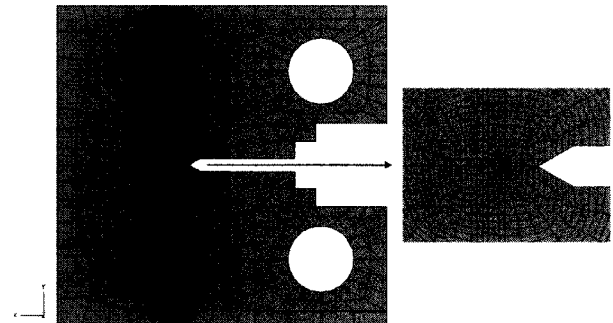


Fig. 5 Finite element mesh of welding line overlapped from crack front.

DAQ보드를 사용하여 시험 중 자동적으로 하중, COD, 전압변화, 변위의 신호를 PC에 저장하였다. 파괴시험시 균열개시점을 보기 위해 비디오카메라로 저장하여 균열개시 시각과 비교하여 균열개시 응력을 측정하였다<sup>[11,12]</sup>.

## 3. 잔류응력해석 및 J적분

잔류응력은 재료의 파괴에 지대한 영향을 미치므로 정확한 잔류응력의 크기와 분포상황을 파악하는 것은 매우 중요하다. Fig. 3은 잔류응력과 J적분의 해석의 전체적인 절차를 나타낸 것으로, 열유동해석과 잔류응력을 해석한 후, 외력을 잔류응력과 동시에 주어지는 경우에 대하여 수정된 J적분을 계산하였다.

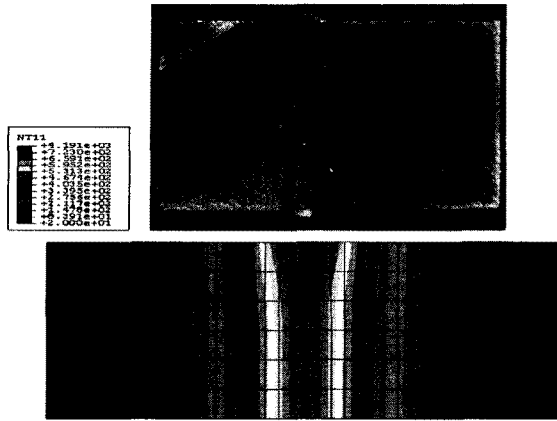


Fig. 6 Comparison of microstructure with heat flow analysis.

3.1 잔류응력해석

해석을 위한 유한요소 프로그램으로 ABAQUS를 사용하여 용접부의 열유동 및 잔류응력을 계산 하였다<sup>[13]</sup>. Fig. 4는 유한요소 해석에 사용한 경계조건을, Fig. 5는 유한요소 격자를 보여주고 있다. 모델은 3차원 해석을 하였고, 레이저 용접부는 매우 급격한 가열과 냉각과정을 받기 때문에 온도구배가 급격하게 변화하고, 균열 선단에서 J적분을 계산하기 위해 용접부와 균열주위의 유한요소격자를 더 작게 나누었다. Fig. 6은 열유동 해석결과와 매크로조직과의 비교 사진이다. 용융부와 열영향부의 열유동해석 결과는 실험적인 결과와 잘 일치하고 있다.

3.2 잔류응력을 고려한 J적분

레이저용접부의 잔류응력의 영향을 파괴거동에 있어서 정량적으로 고찰하기 위하여 잔류응력을 고려한 J적분을 계산하였다. 레이저용접부는 잔류응력과 소성변형에 의해서 J적분값이 적분경로에 따라 다른 값을 갖게 된다. 따라서 레이저용접에 의한 초기소성 변형률과 초기소성변형에너지 고려한 경로에 무관한 수정된 J적분식이 필요하다. 잔류응력과 외력이 주어지는 경우에 영역적분법을 이용하면 식(1)과 같다<sup>[14]</sup>.

$$J = \frac{1}{A_q} \left( \int (\sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - w) \frac{\partial q}{\partial x_1} dV + \int W_{initial state}^p \frac{\partial q}{\partial x_1} dV \right) \quad (1)$$

Fig. 7은 J적분 계산시 사용한 Mesh와 Contour를 보여주고 있다.

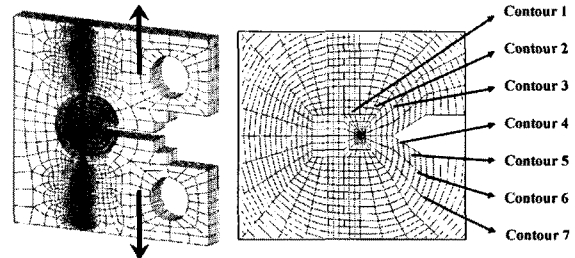


Fig. 7 Contours of J-integral calculation.

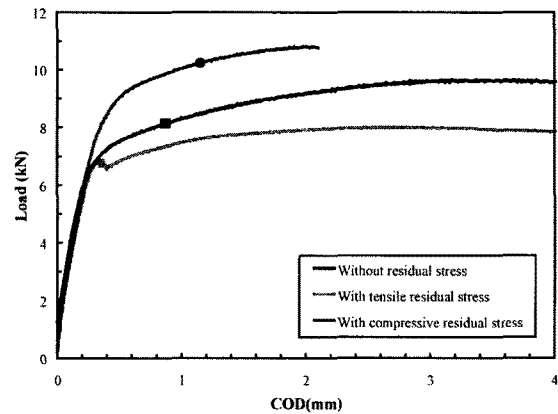


Fig. 8 Curve of Load versus COD.

4. 결과 및 고찰

탄소성 파괴인성치 Jc를 고려하여, 파괴가 개시 될 때의 응력을 산출하여 레이저용접부의 파괴에 미치는 잔류응력의 영향 및 수정된 J 적분 계산프로그램의 검증을 위하여 ASTM 1820과 동일하게 파괴실험을 수행하였다. Fig. 8은 시편에 잔류응력이 존재하는 경우와 존재하지 않은 경우에 대해 직류전위차법으로 파괴실험을 한 결과를 나타낸다. 시편에 인장 잔류응력이 존재하는 경우 균열선단에 6.65kN의 하중에 파괴가 일어나고, 압축잔류응력이 존재하는 경우 균열선단에 10.232kN의 하중에 파괴가 일어나며 잔류응력이 존재하지 않은 경우 8.314kN의 하중에

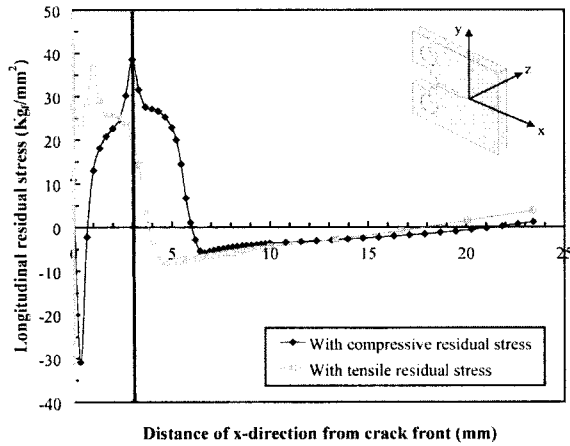


Fig. 9 Longitudinal residual stress distribution of x-direction.

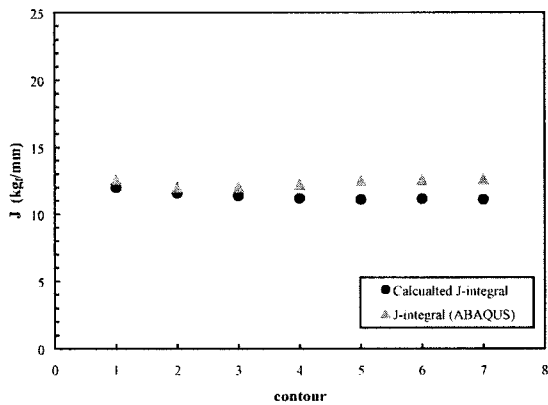


Fig. 10 J-integral for no residual stress when specimen fractures.

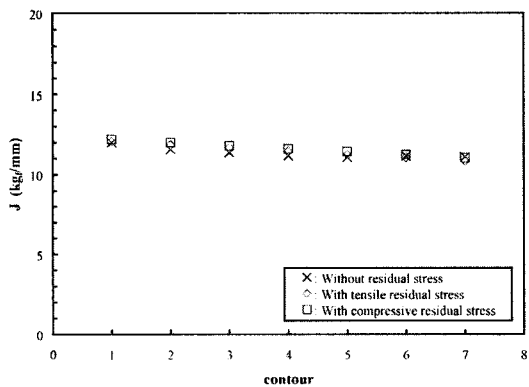


Fig. 11 Comparison of J-integral when specimen fractures.

파괴가 일어나는 것을 볼 수 있다. 잔류응력이 존재하지 않은 시편과 비교하여, 균열 선단에 인장잔류응력이 있는 경우 낮은 하중에서 균열이 발생하고 균열선단에 압축잔류응력이 있는 경우 높은 하중에서 균열이 발생함을 알 수 있다. 파괴실험의 결과

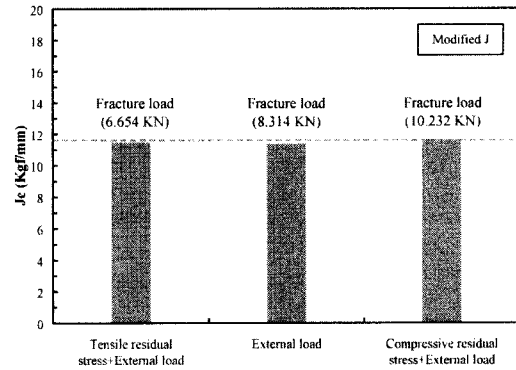


Fig. 12 Comparison of fracture load in respect of residual stress and no residual stress.

균열이 개시 될 때, 균열선단에서의 응력상태는 동일하나 파괴하중은 상이하다. 균열선단에서의 잔류응력 분포 상태에 따라 파괴거동에 미치는 영향이 크다고 사료된다. 잔류응력과 외력이 동시에 주어지는 경우에 대한 J적분을 계산하기 위하여, 먼저 열유동 해석의 결과로 얻어진 열이력을 이용하여 잔류응력을 계산하였다. Fig. 9는 열탄소성해석 결과 종방향의 잔류응력 분포를 나타내고 있다. 그래프의 0mm와 3mm 선은 균열 선단에서의 레이저 용접부 거리를 나타내며, 전자는 균열선단에 인장잔류응력이 분포하는 시편과 후자는 균열선단에 압축잔류응력이 분포하는 시편이다. 균열선단에서 용접한 경우는 균열선단에 모재의 항복강도에 이르는 인장잔류응력이 분포하고, 균열에서 3mm 떨어져서 용접한 경우는 균열선단에 압축잔류응력이 분포하고 있다. 잔류응력 및 초기소성변형으로 인해 J적분이 경로의 독립성의 성질을 상실하므로 초기소성변형률과 초기소성변형에너지를 고려한 경로에 무관한 수정된 J적분 식으로 계산하는 프로그램을 개발하였다. 수정된 J적분 계산프로그램의 검증은 위해서 잔류응력이 균열선단에 분포하지 않은 경우에 대하여 파괴실험의 결과를 이용하여, 균열이 생성되는 외력하중(8.314kN)으로 ABAQUS와 수정 J적분 계산프로그램을 이용하여 계산하였다. Fig. 10에서 보이는 바와 같이 서로 잘 일치하고 있다. 검증된 수정 J적분 계산프로그램을 이용하여 잔류응력을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대하여 계산하였다. Fig. 11과

Fig. 12를 살펴보면 잔류응력이 있는 경우와 잔류응력이 없는 경우 모두 균열을 생성하는 파괴인성치는 거의 같다. 그러나 균열선단에 인장잔류응력이 존재하는 경우 파괴하중은 6.654kN으로 균열선단에 압축잔류응력이 있는 경우의 파괴하중 10.232kN 보다 작다.

## 5. 결론

구조물의 건전성은 파괴강도와 피로강도에 의해 결정된다. 특히 용접구조물에서 잔류응력의 영향을 무시할 수 없다. 따라서 용접부의 잔류응력을 고려한 파괴거동에 대해 연구할 필요가 있다. 최근 구조물은 점차 고연성, 고강도의 재료로 만들어지고 있어, 이러한 상황에서 용접 구조물의 건전성평가 또한 소성변형에 대해 고려해야 한다. 그러므로 J적분은 용접구조물에서 피로와 파괴 평가에 있어서 중요한 요소이다. 본 연구에서는 레이저용접을 한 시편의 파괴거동에서 잔류응력이 미치는 영향에 대해 분석하였다.

파괴실험 시편은 ASTM 1820에 준하여 제작하였으며, 열탄소성 잔류응력 해석을 수행하였으며, 경로에 무관한 J적분을 계산하였다. 재료적인 관점이 아닌 역학적인 관점에서 파괴실험과 J적분 해석 프로그램의 결과를 고찰해보면 균열선단에서 잔류응력이 있는 경우와 없는 경우 모두 균열이 발생하는 파괴인성치(Jc)는 약간의 차이는 있으나 거의 같음을 알 수 있다. 잔류응력이 존재하지 않은 시편과 비교하여, 균열 선단에 인장잔류응력이 있는 경우 낮은 하중에서 균열이 발생하고 균열선단에 압축잔류응력이 있는 경우 높은 하중에서 균열이 발생함을 알 수 있다. 균열선단에 잔류응력이 없는 상태와 비교하여 균열선단에 인장잔류응력이 존재하는 경우 외력에 더하여 낮은 하중에서 파괴가 발생되고, 균열선단에 압축 잔류응력이 존재하는 경우에는 외력에 반대로 작용하여 높은 하중에서 파괴가 발생하는 것으로

사료된다. 따라서 레이저 용접부의 잔류응력이 파괴거동에 있어서 매우 큰 영향을 미치는 인자임을 알 수 있다.

## 참고문헌

- 1) J.K. Baysore, M.S. Williams, Laser Beam Welding and Formability of Tailored Blanks, Welding Journal, pp. 345s-351s, Mar.1992.
- 2) P Lazzrin, E Rabino, Fatigue Behavior of Laser and Resistance Seam Welds in the Auto-motive Industry, Welding Journal, pp. 19-25, Sep.1995.
- 3) W.M. Steen, Laser Material Processing, 2nd Edition, Springer, 1998, pp. 108-144.
- 4) J. Mommsen and M. Stuermer, Recent Development in Process Monitoring and Data Management for Laser Welding, European Automotive Laser Application, 2001.
- 5) T.L. Anderson, Fracture Mechanics (3th Edition), CRC Press, 2005, pp. 103-171.
- 6) K. Masubuchi, Analysis of Welded Structures, Pergamon Press, 1980.
- 7) D.M. Parks, The Virtual Crack Extension Method for Nonlinear Material Behavior, Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 12, pp. 353-364.
- 8) C.F. Shih, B. Moran, and T. Nakamura, Energy Release Rate along a Three-dimensional Crack Front in a Thermally Stressed Body, International Journal of Fracture, Vol. 30, 1986, pp. 79-102.
- 9) ASTM E1820 Standard test method for JIC, A Measure of Fracture Toughness.
- 10) H. H. Johnson, Materials Research and Standards, 1965, Vol. 5, No. 9, pp. 442-445.
- 11) 김현중, 김시영, 강기주, 정대율, 대규모항복 조건하에서 페라이트강의 파괴거동에 대한 하중속도의 영향, 대한용접학회 특별강연 및 학술발표대회 개요집 2000년 제2권, 2000. 1,

pp. 155-158.

- 12) 김시영, 강기주, 정대율, 연성재료의 동적 파괴시험 시 직류전위차법에 의한 균열개시점의 결정, 대한기계학회 춘추학술대회 1999년 제 2권 제1호, 1999. 1, pp. 147-152.
- 13) Habbitt, Karlsson and Sorensen, ABAQUS theory and user's manual, Habbit, Karlsson and Sorenson, inc, province, Rhode Island, 1987.
- 14) Wade A. Meith, Michael R. Hill, Domain-independent Values of the J-integral for Cracks in Three-dimensional Residual Stress Bearing Bodies, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 69, 2002, pp. 1301-1314.