레이저용접부의 파괴에 미치는 잔류응력의 영향

The Effect of residual stress for fracture behavior in the laser weldment

전남대학교 대학원 기계공학과 조성규*

전남대학교 기계시스템공학부 양영수

ABSTRACT

The integrity of laser welded structures is decided with fracture strength and fatigue strength. This study presents fracture behavior considering residual stress in the laser welding. 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 Word

Laser welding, J-integral, Residual stress, Fracture mechanics

1. 서론

고밀도 에너지를 갖는 레이저 빔은 비교적 최근에 개발된 재료가공수단으로 좁은 면적에 집속된 열에너지를 전달하는 특성을 갖기 때문에 산소-아세틸렌 열원이나 전기 아크 열원등과 비교할 때, 가공부에 제한된 열 영향을 끼치면서 용접, 절단, 드릴링, 표면처리, 등 여러 생산공정에 효과적으로 이용 될 수 있다. 이에 따라 자동차, 항공기, 선박등 기계구조물의 제작에 있어서 오랜 기간동안 레이저용접기술을 적용하기 위한 연구를 수행하고 있다. 또한 실 생산에 적용해 높은 생산성 향상효과를 거두고 있다. 그러나 레이저용접공정은 국부적인 곳에 열이 가해짐으로서 불균일한 온도분포를 갖게 되며 이로 인하여 열응력이 발생한다. 온도에 따른 재료물성치의 변화

로 인하여 열응력은 용접 후 비선형 소성변형으로 최후에 모재의 항복강도에 이르는 인장잔류응력이 필연적으로 존재하게 된다. 이와 같은 인장잔류응력은 외부하중과 중첩되어 저응력에서 파괴를 발생시키므로 레이저를 이용하여 제작된 용접구조물의 강도적 신뢰성 및 내구성을 감소시키는 원인이 된다. 그러므로 용접구조물의 역학적인 지표로서 신뢰성을 나타내는 파괴강도에 있어서 잔류응력을 고려한 파괴역학적인 해석이 필요하다.[1] 균열선단부에서의 응력과 변형상태가 특정한 조건에 달하면 균열이 생성 및 성장하여 재료가 파단된다. 이와 같은 특정한 조건을 나타내는 지표로서 파괴인성치가 이용되고 있다. 취성재료에 적용되는 선형탄성파괴역학에서는 임계응력확대계수(K_c)가 널리 적용되고, 연성재료 및 탄소성 조건에 있어서는 K_c는 더 이상 적용할 수 없고 소성변형을 고려하는 탄소성 파괴인자로 J_c가 적용된다[2]. 용접부의 균열선단부근에서는 항복강도에 이르는 인장잔류응력과 소성변형이 존재하므로 탄소성 파괴인자인 J_c로서 평가되어야 한다.

본 연구에서는 잔류응력 및 초기소성변형으로 인하여 J적분이 경로 독립성의 성질을 상실하므로 영역적분법을 이용하여 경로독립성을 유지하도록 수정된 J적분을 계산하는 프로그램을 개발하였다[3-4]. 용접부의 잔류응력 및 외력에 대한 응력분포는 상용유한요소프로그램인 ABAQUS을 이용하여 계산하였다. 유한요소해석 결과를 수정된 3차원 J적분 계산프로그램에 대입하여 잔류응력이 없는 경우, 잔류응력과 외력이 동시에 작용하는 경우에 대하여 J적분을 계산하여 잔류응력의 영향을 고찰한다.

2. 실험 및 유한요소해석

시험편은 연성재료인 일반구조용강 연강(SS400)으로 J_{IC}측정실험(ASTM E1820)과 동일하게 소형인장시편(CT, 두께: 6.35㎜)을 제작하였다. 피로예비균열(2㎜)을 삽입한 후, 12kW급의 연속출력파 CO_2레이저를 이용하여 한번에 깊이 방향까지 Key hole 용접하였다. 파괴거동에 있어서 압축잔류응력의 영향을 고찰하기 위하여 Fig. 1과 같이 피로예비균열의 수직방향으로 균열선단에서 3㎜떨어져서 레이저용접 하였다. 또한 인장잔류응력 영향을 고찰하기 위하여 균열선단을 덮어서 용접을 한 경우와 용접을 하지 않은 경우에 대하여 파괴실험 및 유한요소해석을 실시하였다.[5] 실제적인 용접을 모사하기 위해서 2차원 해석이 아닌 3차원해석을 수행하였다. 열유동해석에서 구해진 열이력을 이용하여, 열유동에서 사용된 동일한 유한요소모델을 적용하여 열탄소성 응력해석으로 잔류응력을 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 열탄소성해석 결과 종방향의 잔류응력 분포를 나타내고 있다. 균열을 덮어서 용접한 경우는 균열선단에 인장잔류응력이 존재하고, 균열에서3㎜ 떨어져서 용접한 경우는 압축잔류응력이 존재한다. Fig. 3은 파괴실험 결과를 나타낸다. 잔류응력이 존재하지 않은 시편과 비교하여, 균열선단에 인장잔류응력이 있는 경우 낮은 하중에서 균열이 발생하고 균열선단에 압축잔류응력이 있는 경우 높은 하중에서 균열이 발생함을 알 수 있다. 레이저용접부의 잔류응력의 영향을 파괴거동에 있어서 정량적으로 고찰하기 위하여 잔류응력을 고려한 J적분을 계산하였다. 그러나 레이저용접부위에서는 잔류응력과 소성변형에 의해서 J적분값이 적분경로에 따라 다른 값을

갖게 된다. 따라서 레이저용접에 의한 초기소성변형률과 초기소성변형에너지를 고려한 경로에 무관한 수정된 J적분식이 필요하다. 잔류응력과 외력이 주어지는 경우에 영역적분법을 이용하면 식 (1)과 같다.

$$J = \frac{1}{A_q}\left(\int_V \left(\sigma_{ij}\frac{\partial u_j}{\partial x_1}\frac{\partial q}{\partial x_i} - w\frac{\partial q}{\partial x_1}\right)dV + \int_V \sigma_{ij}\left(\frac{\partial(\varepsilon_{ij}^0 + \varepsilon_{ij}^{th} - C_{ijkl}^{-1}\sigma_{kl}^0)}{\partial x_1}\right)dV + \int_V W^p_{\text{initial state}}\frac{\partial q}{\partial x_1}dV\right) \quad (1)$$

해석프로그램의 검증을 위해서 용접을 하지 않은 경우에 대하여 파괴실험에 의한 균열이 생성되는 하중(8.134kN)으로 ABAQUS의 결과와 프로그램의 결과를 비교하였다. Fig.4에서 보이는 바와 같이 서로 잘 일치하고 있다. 검증된 수정J적분계산프로그램을 이용하여 잔류응력을 고려한 경우와 잔류응력을 고려하지 않은 경우에 대하여 계산하였다. Fig. 3와 Fig. 5를 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.

4. 결 론

재료적인 관점이 아닌 역학적인 관점에서 파괴실험과 J적분해석프로그램의 결과를 고찰해 보면 균열선단에서 잔류응력이 있는 경우와 없는 경우 모두 균열이 발생하는 파괴인성치(J_c)은 약간의 차이는 있으나 거의 같음을 알 수 있다. 그러나 균열선단에 잔류응력이 없는 상태와 비교하여 균열선단에 인장잔류응력이 존재하는 경우에는 낮은 하중에서 파괴가 발생되고, 균열선단에 압축잔류응력이 존재하는 경우에는 높은 하중에서 파괴가 발생한다. 레이저 용접부의 잔류응력이 파괴거동에 있어서 매우 큰 영향을 미치는 인자임을 알 수 있다.

논문 후기

이 논문은 산업자원부 한국산업기술평가원지정 지역협력연구센터인 조선대학교 산학협력단 레이저응용 신기술개발 연구센터의 연구비 지원에 의해 연구되었음.

참고문헌

1. T.L. Anderson, Fracture Mechanics (3th Edition), CRC Press, 2005, pp. 103-171
2. K. Masubuchi, Analysis of Welded Structures, Pergamon Press, 1980
3. D.M. Parks, The virtual crack extension method for nonlinear material behavior, Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 12, pp. 353-364
4. 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
5. ASTM E1820 Standard test method for JIC, A Measure of Fracture Toughness

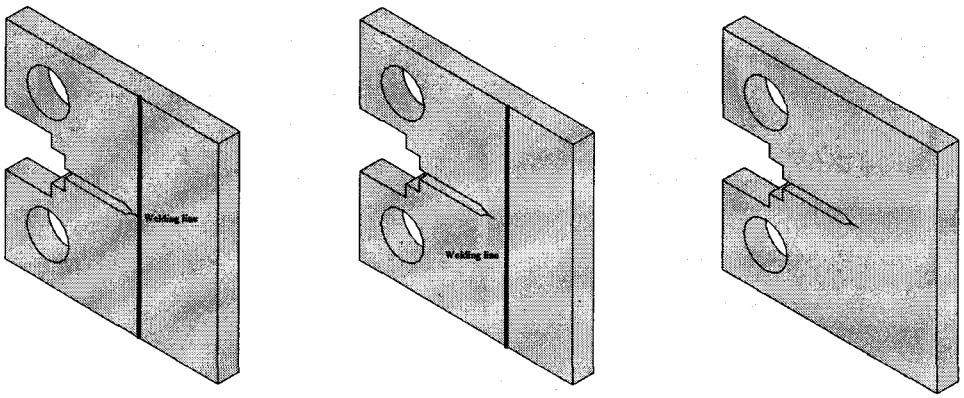

Fig. 1 The bead on laser welded compact specimen

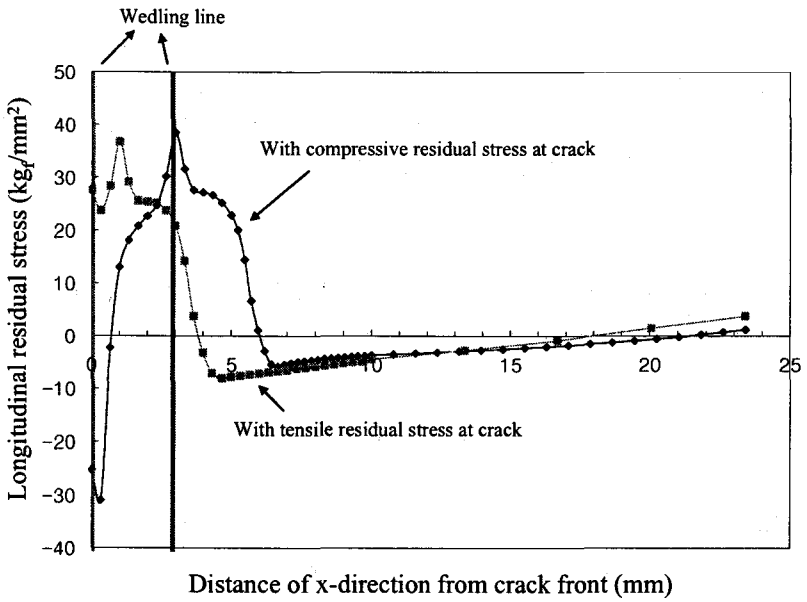

Fig. 2 Longitudinal residual stress distribution

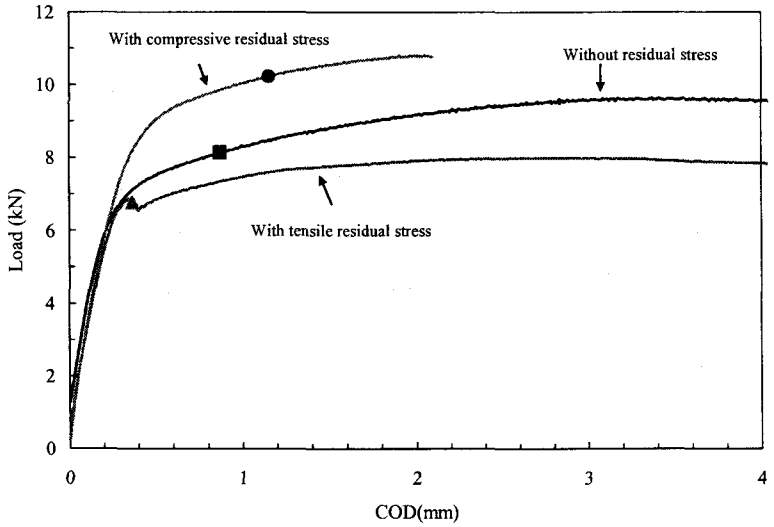

Fig. 3 Curve of Load versus COD

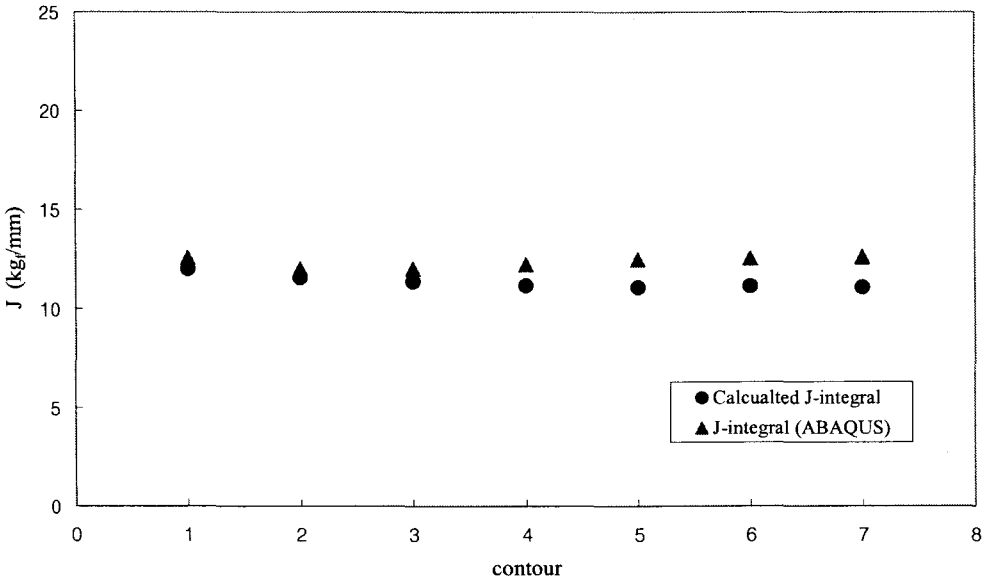

Fig. 4 J-integral for no residual stress when specimen fractures

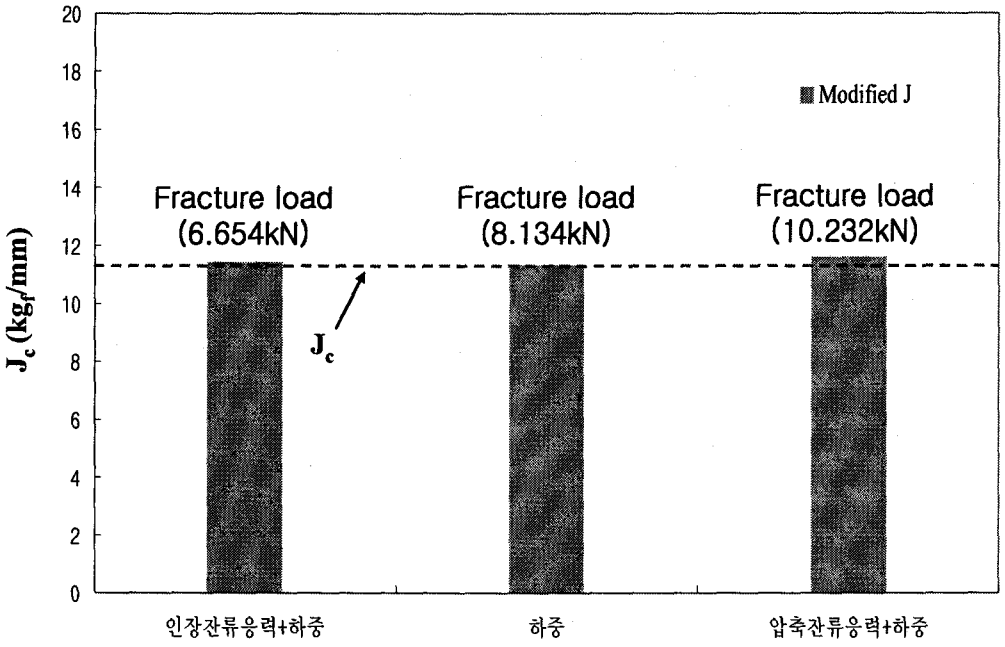

Fig. 5 Comparison of fracture load in respect of residual stress and no residual stress