

## 잔류응력을 고려한 용접부의 파괴역학적 해석

### Fracture analysis of weldment considering residual stress

조성규\*, 양영수\*\*, 강대현\*\*\*

\* 전남대학교 대학원 기계공학과

\*\* 전남대학교 기계시스템공학부

\*\*\* 위아주식회사 차량부품연구부

#### 1. 서 론

자동차, 항공기, 선박등 기계구조물의 제작에는 재료의 절약, 간단한 공정, 접합효율의 우수성등으로 인하여 용접공정이 매우 광범위하게 적용되고 있다. 그러나 용접공정은 국부적인 곳에 열이 가해짐으로서 불균일한 온도분포를 갖게 되며 이로 인하여 열응력이 발생한다. 온도에 따른 재료 물성치의 변화로 인하여 열응력은 용접 후 비선형 소성변형으로 최후에 모재의 항복강도에 이르는 인장잔류응력이 필연적으로 존재하게 된다. 이와 같은 인장잔류응력은 외부하중과 중첩되어 저응력에서 취성파괴를 발생시키므로 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 성장하여 재료가 파단된다. 이와 같은 특정한 조건을 나타내는 지표로서 파괴인성치가 이용되고 있다. 취성재료에 적용되는 선형탄성파괴역학에서는 임계응력확대계수( $K_{Ic}$ )가 널리 적용되고, 연성재료 및 탄소성 조건에 있어서는  $K_{Ic}$ 는 더 이상 적용할 수 없고 소성변형을 고려하는 탄소성 파괴인자로  $J_c$ 가 적용된다[2]. 용접부의 균열선단부근에서는 항복강도에 이르는 인장잔류응력과 소성변형이 존재하므로 탄소성 파괴인자인  $J_c$ 로서 평가되어야 한다.

본 연구에서는 잔류응력 및 초기소성변형으로 인하여 J적분이 경로 독립성의 성질을 상실하므

로 영역적분법을 이용하여 경로독립성을 유지하도록 해석하는 프로그램을 개발하였다.[3-4] 용접부의 잔류응력 및 외력에 대한 응력분포는 상용 유한요소프로그램인 ABAQUS을 이용하여 계산하였다. 유한요소해석 결과를 수정된 3차원 J적분 해석프로그램에 대입하여 잔류응력이 없는 경우, 잔류응력만 있는 경우, 잔류응력과 외력이 동시에 작용하는 경우에 대하여 에너지해방률을 계산하여 잔류응력의 영향을 고찰한다.

#### 2. 실험 및 유한요소해석

시험편은 연성재료인 일반구조용강 연강(SS400)으로  $J_{Ic}$  측정실험(ASTM E813)과 동일하게 소형인장시험편(CT, 두께:12.7mm)을 제작한 후 피로예비균열(1.5mm)을 삽입한 후, Fig.1과 같이 잔류응력의 영향을 고찰하기 위하여 피로예비균열의 수직방향으로 레이저용접을 한 경우와 용접을 하지 않은 경우에 대하여 파괴실험 및 유한요소해석을 실시하였다.[5]

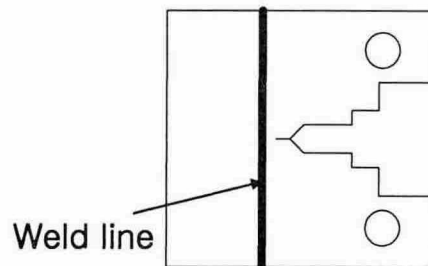


Fig.1 Schematic of Compact specimen

실제적인 용접을 모사하기 위해서 2차원 해석이 아닌 3차원해석을 수행하였다. 열유동해석에서 구해진 열이력을 이용하여, 열유동에서 사용된 동일한 유한요소모델을 적용하여 열탄소성을 고려한 정적응력해석으로 잔류응력을 계산하였다. Fig.2는 종방향의 잔류응력 분포를 나타내고 있다. 균열선단을 제외한 용접선을 따라서는 인장 잔류응력이 분포하나 피로예비균열을 삽입한 후 용접했기 때문에 자유표면인 균열선단 부위에서는 응력집중으로 인하여 매우 큰 압축잔류응력이 존재하고 있다.

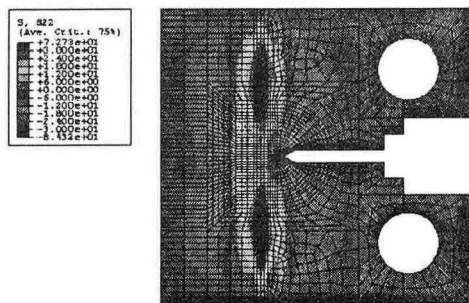


Fig.2 Distribution of longitudinal residual stress

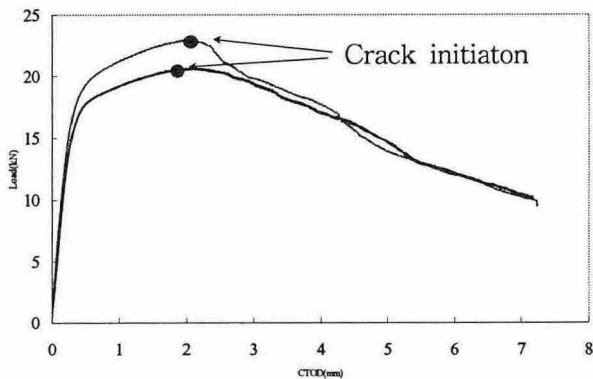


Fig.3 Load-CTOD curve

Fig.3에서 용접을 한 경우가 용접을 하지 않은 경우보다 높은 하중에서 균열이 발생함을 알 수 있다. 용접을 한 경우에는 균열선단의 잔류응력 분포가 자유표면인 피로예비균열로 인하여 평형 상태를 유지하기 위한 압축잔류응력의 결과이다.

### 3. 영역적분

용접부위에서는 잔류응력과 소성변형에 의해서 J적분 값이 적분경로에 따라 다른 값을 갖게 된다. 그러므로

용접에 의한 초기소성변형물과 초기소성변형에너지를 고려한 경로에 무관한 J적분식이 필요하다. 잔류응력과 외력이 주어지는 경우에 영역적분법을 이용하면 식(1)과 같다.

$$\int_V \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} q dV + \int_V W_{initialstate} \frac{\partial q}{\partial x_1} dV \quad (1)$$

J적분 해석프로그램의 검증을 위해서 용접을 하지 않은 경우에 대하여 균열이 발생하는 하중(20kN)으로 ABAQUS의 결과와 프로그램의 결과를 비교하였다. Fig.4에서 보이는 바와 같이 서로 잘 일치하고 있다.

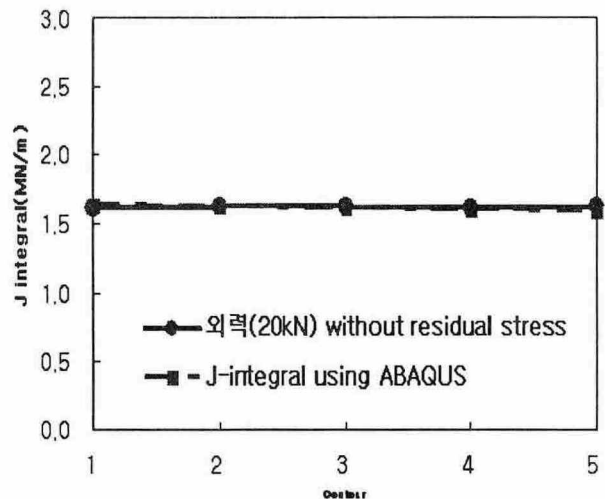


Fig.4 J-integral vs contour for cracked compact specimen

### 4. 결 론

용접부의 파괴역학적 해석에서는 잔류응력의 영향이 크게 작용하고 있음을 알 수 있다. Fig.3와 Fig.5를 살펴보면 잔류응력만 있는 경우에는 피로예비균열로 인한 균열선단의 압축잔류응력에 기인하여 J적분값은 -0.4MN/m으로 균열이 발생하는 데 큰 하중이 필요하다. 파괴실험과 J적분 해석프로그램의 결과를 종합해보면 잔류응력이 있는 경우와 없는 경우 모두 균열이 발생하는 에너지해방율(J-integral)은 같음을 알 수 있다. 그러나 피로예비균열로 인한 균열선단의 압축잔류

응력에 기인하여 잔류응력이 있는 경우에는 더 높은 하중에서 균열이 발생함을 알 수 있다. 역으로 균열선단에 인장잔류응력이 존재한다면 저응력에서 균열이 발생함을 유추 할 수 있다.

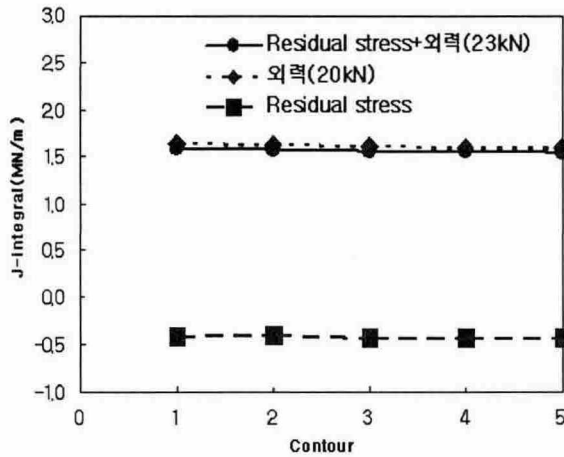


Fig.5 J-integral vs contour for cracked compact specimen

## 후 기

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

## 참 고 문 헌

1. T.L. Anderson: Fracture Mechanics(3th Edition), CRC Press, 2005, 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, 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, 1986, 30, pp79-102
5. ASTM E813-89: Standard test method for  $J_{IC}$ , A Measure of Fracture Toughness, 1991