

## J-적분을 이용한 이종강재 용접접합부 균열의 파괴역학적 해석

### Fracture mechanics analysis of a crack in a weld of dissimilar steels using the J-integral

이 진형\*, 장 경호\*\*

\* 중앙대학교 공과대학 토목공학과

\*\* 중앙대학교 공과대학 건설환경공학과

**ABSTRACT** For the fracture mechanics analysis of a crack in a weld of dissimilar steels, residual stress analysis and fracture analysis must be performed simultaneously. The standard definition of the J-integral leads to a path dependent value in the presence of a residual stress field. And unlike cracks in homogeneous materials, a bimaterial interface crack always induces both opening and shearing modes of stress in the vicinity of the crack tip. Therefore, it is necessary to develop a path independent J-integral definition for a crack in a residual stress field generated by welding of dissimilar steels. This paper addresses the modification of the Rice-J-integral to produce a path-independent J-integral when residual stresses due to welding of dissimilar steels and external forces are present. The residual stress problem is treated as an initial strain problem and the J-integral proposed for this class of problems is used. And a program which can evaluate the J-integral for a crack in a weld of dissimilar steels is developed using proposed J-integral definition.

### 1. 서 론

구조물의 용접중에는 용접아크에 의해 높은 열이 발생되므로 불균일한 온도분포와 이로 인한 소성변형 등으로 용접잔류응력과 용접변형이 필연적으로 발생한다. 이러한 잔류응력과 변형은 구조물의 강도적 신뢰성 및 사용성을 떨어뜨리는 원인이 되므로 건전한 구조물을 설계하고 제작·보수 관리하는데 반드시 고려해야 할 중요한 문제이다. 또한 용접중심부의 인장잔류응력은 균열 전파력을 증가시켜 피로강도를 감소시키며 취성 파괴에 대한 구조물의 저항력을 감소시켜 용접구조물의 파괴거동에 크게 영향을 미치게 된다. 따라서 이러한 용접잔류응력의 정확한 예측과 잔류응력이 구조물의 파괴거동에 미치는 영향을 정확히 파악하는 것은 용접구조물의 피로 및 파괴해석에 있어서 매우 중요하다. 균열선단의 특이성을 나타내는 지표로서 선형 탄성체에서는 응력확대계수(K)가 널리 이용되며 잔류응력에 대한 영향은 중첩법으로 쉽게 고려할 수 있다<sup>1)</sup>. 그러나 탄소성 해석에 있어서는 응력확대계수는 더 이상 적용할 수 없고 적절한 탄소성 인자가 사용되어야 한다. 현재 대부분의 결합평가 절차들이 탄

소성 파괴인자로 에너지 해방율(J-적분)<sup>2)</sup>을 채택하고 있으나, 잔류응력 혹은 잔류응력과 외력이 동시에 존재하는 균열에 있어서 이를 고려할 수 있는 경로 독립성의 J-적분에 대한 이해와 연구는 부족한 실정이다.

최근에는 강구조물의 초고층·장스팬화와 더불어 고성능·고강도 강재의 개발이 요구되어 추진되고 있으며, 또한 구조물의 경량화 및 경제성을 위해서는 강도가 서로 다른 이종강재를 접합해서 사용할 필요가 있다. 그러나 이러한 이종강재의 용접시에는 용접부에서 강도가 균일한 동종강재와는 다른 잔류응력이 발생하며<sup>3)</sup>, 또한 이종강재 용접부에서의 균열은 필연적으로 균열선단에서 두가지 응력 모드(Mode I 과 Mode II)가 발생하게 된다.<sup>4)</sup>

따라서 본 연구에서는 상당영역적분(Equivalent Domain Integral) 방법을 이용하여 이종강재 접합시 발생하는 잔류응력과 외력이 동시에 작용하는 이종강재 용접부 균열선단에서의 에너지 해방율을 계산할 수 있는 해석 프로그램을 개발하였다. 자체개발한 탄소성 해석프로그램을 이용하여 이종강재 용접시 잔류응력과 외력에 대한 응력분포를 계산하였으며, 이를 이용하여 잔류응력과

외력의 복합하중에 대한 이중강재 용접부의 에너지 해방율을 계산하였다.

2. 에너지 해방율의 평가

Rice에 의해 비선형 탄성체에서 균열 주위에서의 변형에너지 해방율(Strain energy release rate)로 제안된 J-적분은 균열선단에서의 변형에너지 밀도와 표면작용력에 의한 에너지의 경로적분값이다. J-적분은 경로에 무관하며 균열길이에 따른 포텐셜에너지의 변화율과 같다. 이러한 J-적분을 수치적으로 구하기 위해서 등가영역적분법이 도입되었다<sup>6)</sup> 영역적분시에 필요한 값들은 유한요소해석상에서 바로 구할 수 있으므로 선적분의 영역적분으로의 변환은 매우 유리하다. 등가영역적분은 Mode I, Mode II 그리고 Mixed Mode 문제에 대한 J-적분값을 구하는데 있어서 정확한 결과값을 가짐을 보여왔다.<sup>7)</sup>

외력이 작용하는 용접부의 J-적분 해석을 위해서는 먼저 용접부의 잔류응력해석이 선행되어야 하며 잔류응력과 외력이 동시에 작용하는 경우에 대한 J-적분 해석을 수행해야 한다. 용접부의 잔류응력은 불균일한 온도분포와 이로인한 소성변형 등에 의해 발생하므로 잔류응력의 문제는 초기소성변형을 문제로 고려될 수 있다. 초기 변형률이 존재하는 경우 적분경로에 무관한 J-적분식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J = \int_{\Gamma} \left( W \delta_{1i} - \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_1} + \sigma_{ij} \epsilon_{ij}^0 \delta_{1i} \right) n_i d\Gamma \quad (1)$$

여기서  $\epsilon_{ij}^0$  는 초기 용접 소성변형률이며  $\delta_{1i}$  는 Kroneker delta 이다.

앞서 언급한 바와 같이 이중강재 용접부의 균열 문제에서는 Mode I 과 Mode II 가 연계(coupled) 되어 발생한다. 그러므로 식 (1)에서 구한 J-적분을 이용하여 Mode I 에 대한 적분값  $J_I$  과 Mode II 에 대한 적분값  $J_{II}$  를 각각 모드를 분리한 후 산출하여야 한다. 이때 모우드 분리를 위해 분해법(decomposition method)이 사용되었다. 연구<sup>10)</sup>에 의하면 균열선(crack line)을 중심으로 대칭인 두 점에서 발생하는 변위, 응력, 변형률 등은 Mode I 과 Mode II 의 성분으로 나누어 나타낼 수 있다. 즉,

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^I + \sigma_{ij}^{II}$$

$$u_i = u_i^I + u_i^{II}$$

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^I + \epsilon_{ij}^{II}$$

여기서,

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11}^I \\ \sigma_{22}^I \\ \sigma_{12}^I \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \sigma_{11} + \sigma'_{11} \\ \sigma_{22} + \sigma'_{22} \\ \sigma_{12} - \sigma'_{12} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11}^{II} \\ \sigma_{22}^{II} \\ \sigma_{12}^{II} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \sigma_{11} - \sigma'_{11} \\ \sigma_{22} - \sigma'_{22} \\ \sigma_{12} + \sigma'_{12} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} u_1^I \\ u_2^I \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} u_1 + u'_1 \\ u_2 - u'_2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} u_1^{II} \\ u_2^{II} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} u_1 - u'_1 \\ u_2 + u'_2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \epsilon_{11}^I \\ \epsilon_{22}^I \\ \epsilon_{12}^I \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \epsilon_{11} + \epsilon'_{11} \\ \epsilon_{22} + \epsilon'_{22} \\ \epsilon_{12} - \epsilon'_{12} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \epsilon_{11}^{II} \\ \epsilon_{22}^{II} \\ \epsilon_{12}^{II} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \epsilon_{11} - \epsilon'_{11} \\ \epsilon_{22} - \epsilon'_{22} \\ \epsilon_{12} + \epsilon'_{12} \end{pmatrix}$$

그리고 (')은 균열선을 중심으로 점  $p(x_1, x_2)$  에 대칭인 점  $p'(x_1, x_2)$ 에서의 값을 나타낸다. 복합 응력 모드에 대한 J-적분값은 아래와 같이 각각의 모드에 대한 J-적분값들의 합으로 나타낼 수 있다.

$$J_{total} = J_I + J_{II}$$

3. 파괴해석

잔류응력이 작용하는 이중강재(SM400/SM490, SM400/SM520, SM400/SM570) 용접부에, 용접선에 평행한 계면균열을 도입하여 잔류응력과 외력이 동시에 작용하는 경우에 대한 J-적분값을 계산하였다. 균열선단의 형상은 그림 1에 나타내었다. 그림2에 잔류응력에 대한 J-적분 해석 결과를 나타내었다. 결과를 보면 잔류응력에 대한 J-적분값은 3가지 경우 모두 거의 같음을 알 수 있다. 이것은 Mode I, Mode II를 발생시키는 균열 직각

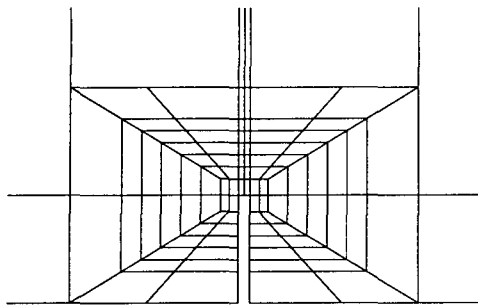


그림 1. 균열선단의 요소분할

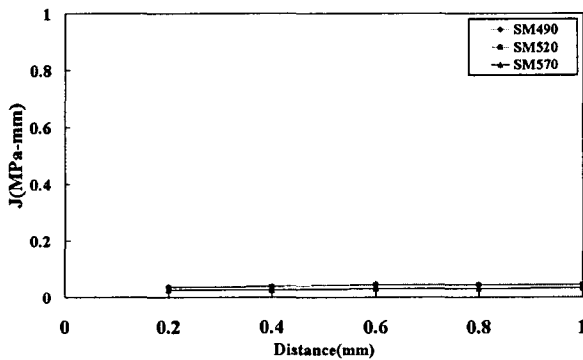


그림 2. 잔류응력장에서의 J-적분 해석 결과

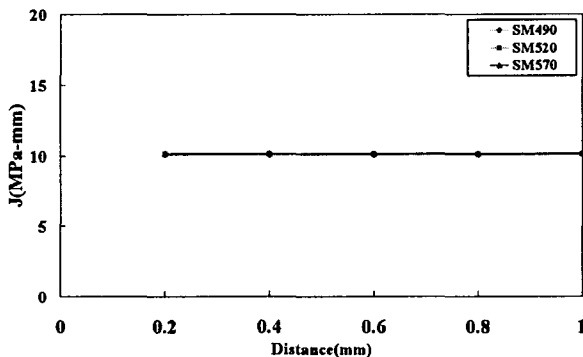


그림 3. 복합하중에 대한 J-적분 해석 결과

방향의 잔류응력의 크기가 3가지 이중강재의 경우 거의 같기 때문에 사료된다. 잔류응력과 외력(100MPa)이 동시에 작용하는 복합하중에 대한 J-적분 해석 결과를 그림 3에 나타내었다. 결과를 보면 5개 경로에 대해 J-적분값이 일정함을 알 수 있고 J-적분값도 잔류응력의 결과와 같이 3가지 이중강재에 대해 거의 같음을 알 수 있다

4. 결론

용접구조물의 파괴거동을 분석하기 위해서는 용접시에 발생하는 잔류응력 해석과 파괴해석이 같

이 병행되어야 한다. 본 연구에서는 J-적분을 이용하여 이중강재 용접부 중심 계면균열에 대한 탄소성 파괴해석을 수행하였다. 자체개발한 해석 프로그램을 이용하여 이중강재 용접시 잔류응력과 외력에 대한 응력분포를 계산하였으며 잔류응력과 외력의 복합하중에 대한 J-적분을 계산하였다. 결과에 의하면 3가지 이중강재 모두 잔류응력 및 복합하중에 대한 J-적분값이 거의 같음을 알 수 있었다. 이것은 Mode I, Mode II를 발생시키는 균열 직각방향의 잔류응력의 크기가 3가지 이중강재의 경우 약간의 차이는 있으나 그 절대치의 크기는 거의 같기 때문에 사료된다.

참고문헌

1. Anderson, T.L., (1995), "Fracture Mechanics Fundamentals and Applications", CRC Press, 2nd edition
2. Rice, J.R., (1968), "A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and crack", J. Appl. Mech vol 35, pp.379-386
3. 장경호, 이진형, (2003), "동종강재 및 이중강재 용접접합부의 잔류응력 특징", 한국강구조학회 논문집 제 15권 3호, pp.241-250
4. T. IKEDA and C.T. SUN, (2001), "Stress intensity factor analysis for an interface crack between dissimilar isotropic materials under thermal stress, International Journal of Fracture, Vol. 111, pp. 229-249
5. F.Z. LI, C.F. SHIH and A. NEEDLEMAN, (1985), "A comparison of methods for calculating energy release rates", Engineering Fracture Mechanics, Vol.21, No.2, pp.405-421
6. K.S.Woo, C.H. Hong and Y.S. Shin, (1998) "An extended equivalent domain integral method for mixed mode fracture problems by the p-version of FEM", Int. J. Meth. Engng, vol 42, pp.857-884
7. Raju, I.S. and Shivakumar, K.N., (1990), "An equivalent domain integral method in the two-dimensional analysis of mixed mode crack problems", Engineering Fracture Mechanics, Vol.37, pp.707-725
8. S. Mukherjee, C.R. Ananth and N. Chandra, (1997), "Effect of residual stresses on the interfacial fracture behavior of metal-matrix composites", Composites Science and Technology, Vol.57, pp.1501-1512