

J-적분을 이용한 이종강재 용접접합부 계면균열의 파괴역학적 해석

Fracture Mechanics Analysis of a Interface Crack in the Weld of Dissimilar Steels using the J-integral

장 경 호†

이 진 형*

Chang, Kyong-Ho

Lee, Chin-Hyung

(논문접수일 : 2004년 7월 10일 ; 심사종료일 : 2004년 12월 3일)

요 지

용접접합부 균열의 파괴역학적 해석을 위해서는 용접중에 발생하는 잔류응력해석과 파괴해석이 병행되어야 한다. 잔류응력이 존재하면 J 적분은 더 이상 적분경로에 관계없이 일정한 값을 갖는 특성을 잃어버리게 된다. 또한 균질한 재료와는 달리 이종재료 계면균열에서는 균열선단에서 Mode I과 Mode II의 파괴거동이 동시에 발생한다. 그러므로 이종강재 용접접합부 균열의 J 적분 해석을 위해서는 이종강재 용접시 발생하는 잔류응력이 존재하는 경우에도 적분경로에 관계없이 일정한 값을 갖는 새로운 J 적분식이 도입되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 기존의 J-적분을 수정하여, 이종강재 용접시 발생하는 잔류응력이 존재하는 경우에 경로 독립성을 유지하는 J 적분을 고찰하고, 이를 이용하여 잔류응력과 외력이 동시에 작용하는 균열선단에서의 J 적분을 해석할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 자체개발한 탄소성 해석프로그램을 이용하여 이종강재 용접시 잔류응력과 외력에 대한 응력분포를 계산하였으며, 이를 이용하여 잔류응력과 외력의 복합하중에 대한 J-적분을 계산하였다.

핵심용어 : J-적분, 이종강재, 용접접합부, 균열, 파괴역학, 잔류응력

Abstract

For the fracture mechanics analysis of cracks in welds 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.

keywords : J-integral, dissimilar steels, crack, fracture mechanics, residual stresses

1. 서 론

구조물의 용접중에는 용접아크에 의해 높은 열이 발생되므로 불균일한 온도분포와 이로 인한 소성변형 등으로 용접

잔류응력과 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 용

† 책임저자, 정회원 · 중앙대학교 공과대학 건설환경공학과 교수

전화: 02-820-5337 ; Fax: 02-823-5337

E-mail: changkor@cau.ac.kr

* 중앙대학교 공과대학 토목공학과 박사수료

• 이 논문에 대한 토론을 2005년 3월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2005년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

접중심부의 인장잔류응력은 균열전파력을 증가시켜 피로강도를 감소시키며, 취성파괴에 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 지표로써, 선형 탄성체에서는 응력확대계수(K)가 널리 이용되며, 잔류응력에 대한 영향은 중첩법으로 쉽게 고려할 수 있다.¹⁾ 그러나 탄소성 해석에 있어서는 응력확대계수는 더 이상 적용할 수 없고 적절한 탄소성 인자가 사용되어야 한다. 현재 대부분의 결함평가 절차들이 탄소성 파괴인자로 에너지 해방율(J-적분)²⁾을 채택^{3),4)}하고 있으나, 잔류응력 혹은 잔류응력과 외력이 동시에 존재하는 균열에 있어서 이를 고려할 수 있는 경로 독립성의 J-적분에 대한 이해와 연구는 부족한 실정이다.

최근에는 강구조물의 초고충·장스팬화와 더불어 고성능·고강도 강재의 개발이 요구되어 추진되고 있으며, 또한 구조물의 경량화 및 경제성을 위해서는 강도가 서로 다른 이중강재를 접합해서 사용할 필요가 있다. 그러나 이러한 이중강재의 용접시에는 용접부에서 강도가 균일한 동종강재와는 다른 잔류응력이 발생하며,^{6),7)} 또한 이중강재 용접부에서의 균열은 필연적으로 균열선단에서 두가지 응력 모드(Mode I 과 Mode II)가 발생하게 된다.¹⁰⁾

따라서 본 연구에서는 등가영역적분(Equivalent domain integral) 방법을 이용하여 이중강재 접합시 발생하는 잔류응력과 외력이 동시에 작용하는 이중강재 용접부 균열선단에서의 에너지 해방율을 계산할 수 있는 해석 프로그램을 개발하였다. 자체개발한 탄소성 해석프로그램^{5)~9)}을 이용하여 이중강재 용접시 발생하는 잔류응력과 외력에 대한 응력분포를 계산하였으며, 이를 이용하여 잔류응력과 외력의 복합하중에 대한 이중강재 용접부의 에너지 해방율을 계산하였다.

2. 혼합모드의 J-적분 해석

2.1 에너지 해방율의 평가

균열선단에서의 에너지 해방율을 평가하기 위하여 가상 균열 닫힘 해석(Virtual crack closure technic), 경로적분(Contour integral), 등가영역적분(Equivalent domain integral) 등과 같은 여러 가지 방법들이 이용되어 왔다. 경로적분법은 상대적으로 체눈밀도(Mesh density)에는 무관하나 균열선단부에 특이요소(Singular element)를 위치시켜야 한다. 이에 반해 등가영역적분법은 에너지 해방율을 계산하는데 있어서 특이요소를 사용하지 않아도 되므로 균열전진을 해석하는데 있어서 가장 이상적이다.¹¹⁾

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 균열 길이에 따른 포텐셜에너지의 변화율과 같다. 이러한 J-적분을 수치적으로 구하기 위해서 등가영역적분법이 도입되었다.^{12),13)} 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.¹⁴⁾

균열선단에서의 임의의 적분경로 Γ 에 대하여 J-적분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_{x_k} = - \frac{d\Pi}{da} = \int_{\Gamma} \left(W n_k - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) d\Gamma \quad (1)$$

여기서 $k=1,2$ 그리고 Π 는 위치 에너지(Potential energy), T_i 는 표면 작용력(Traction force), u_i 는 변위성분, a 는 균열길이, Γ 는 적분경로, n_k 는 적분경로에 수직인 단위벡터, W 는 변형에너지 밀도(Strain energy density)로써 다음과 같이 정의된다.

$$W = \int_0^{\epsilon_{ij}^m} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}^m \quad (2)$$

J_{x_1} 과 J_{x_2} 는 각각 균열방향과 균열직각방향으로의 변형에너지 방출율을 나타내는 경로에 무관한 독립된 적분값들이다. J_{x_1} 은 일반적으로 잘 알려진 J-적분이며, J_{x_2} 는 승적분(Product integral)으로써 응력, 변위 텐서의 대칭과 역대칭의 속성 때문에 서로 상쇄되어 실제적으로 '0'이 된다.¹⁵⁾

순수 외력만 작용하고 체적력과 균열면 건인력이 없는 경우 식 (1)은 적분경로에 무관한 특성을 갖는다. 하지만 용접구조물에서는 용접중에 발생하는 잔류응력과 소성변형으로 인하여 J-적분이 적분 경로에 관계없이 일정한 값을 갖는 특성을 잃게 되므로 식 (1)을 바로 적용할 수 없다. 따라서 용접구조물의 균열선단에서의 J-적분을 구하기 위해서 균열주위에 작은요소를 사용하여 균열선단에서의 J-적분값을 근사적으로 이용할 수도 있으나 정확한 J-적분을 구하기 위해서는 용접에 의한 초기소성변형률을 고려한 J-적분식의 도입이 필요하다.

2.2 등가영역 적분법

그림 1(a)의 경로적분은 발산정리(Divergence theorem)을 이용하여 영역적분으로 변환시킬 수 있다. 그림 1(b)의

균열선단에서의 두 경로 Γ_0 (OABCO)와 Γ_1 (ODEFO)은 면적 DEFGBAD를 둘러싸게 된다. 경로 Γ_0 에 대한 적분값에 '1'을 곱하고 경로 Γ_1 에 대한적분값에 '0'을 곱함으로써 J-적분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J = 1 \int_{\Gamma_0} Q d\Gamma - 0 \int_{\Gamma_1} Q d\Gamma \quad (3)$$

여기서 $Q = \int_{\Gamma} \left(W n_1 - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x_1} \right) d\Gamma$ 이다.

경로 Γ_1 에서는 '0'의 값을 갖고 경로 Γ_0 에서는 '1'의 값을 갖는 임의의 연속함수 $S = S(x_1, x_2)$ 을 도입하면 식 (3)은 다음과 같이 확장 될 수 있다.

$$J = 1 \left[- \int_{CBA} QS d\Gamma - \int_{DEF} QS d\Gamma \right] + \int_{CO} Q d\Gamma + \int_{OA} Q d\Gamma \quad (4)$$

발산정리를 적용하면 선적분은 아래와 같이 영역적분으로 변환된다.^{12)~14)}

$$\begin{aligned} J &= - \int_{DEFGBAD} QS d\Gamma \\ &= - \int_{DEFGBAD} \left[W n_1 - \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_1} n_j \right] S d\Gamma \\ &= - \int_A \left[\frac{\partial (WS)}{\partial x_1} - \frac{\partial (\sigma_{ij} (\partial u_i / \partial x_1) S)}{\partial x_j} \right] dA \\ &= - \int_A \left[\frac{\partial W}{\partial x_1} S + \frac{\partial S}{\partial x_1} W - \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_1} S - \sigma_{ij} \frac{\partial (\partial u_i / \partial x_1)}{\partial x_j} S - \sigma_{ij} \frac{\partial S}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_1} \right] dA \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 체적력과 가속도가 없는 경우 $\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_1} S$ 의 값은 '0'이 된다. 그리고 $\frac{\partial (\partial u_i / \partial x_1)}{\partial x_j} = \frac{\partial \epsilon_{ij}}{\partial x_1}$ 이다. 식 (5)를 다시 정리하면 최종적인 영역적분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(J)_{domain} = - \int_A \left[W \frac{\partial S}{\partial x_1} - \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_1} \frac{\partial S}{\partial x_j} \right] dA - \int_A \left[\frac{\partial W}{\partial x_1} - \sigma_{ij} \frac{\partial \epsilon_{ij}}{\partial x_1} \right] S dA$$

2.3 용접부에서의 에너지 해방을

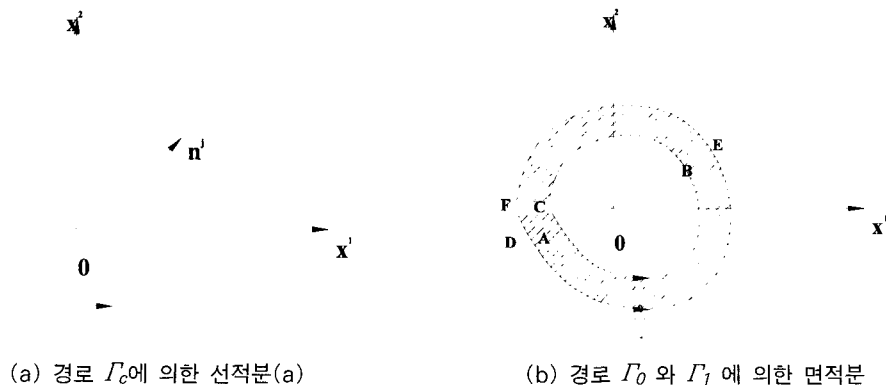
외력이 작용하는 용접부의 J-적분 해석을 위해서는 먼저 용접부의 잔류응력해석이 선행되어야 하며 잔류응력과 외력이 동시에 작용하는 경우에 대한 J-적분 해석을 수행해야 한다. 용접부의 잔류응력은 불균일한 온도분포와 이로인한 소성변형 등에 의해 발생하므로 잔류응력의 문제는 초기소성변형률 문제로 고려될 수 있다.¹⁶⁾ 식 (6)에서

$$\frac{\partial W}{\partial x_1} = \frac{\partial W}{\partial \epsilon_{ij}^m} \frac{\partial \epsilon_{ij}^m}{\partial x_1} = \sigma_{ij} \frac{\partial \epsilon_{ij}^m}{\partial x_1} \quad (7)$$

따라서 초기소성변형률이 없는 경우 식 (6)의 우측식의 두 번째 항은 '0'이 된다.¹³⁾ 그러나 초기소성변형률이 존재하는 경우에는 식 (2)의 ϵ_{ij}^m 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_{ij}^m = \epsilon_{ij}^e + \epsilon_{ij}^p - \epsilon_{ij}^0 \quad (8)$$

여기서 ϵ_{ij}^e 와 ϵ_{ij}^p 는 각각 탄성변형률과 소성변형률값이며 ϵ_{ij}^0 는 초기소성변형률값이다. 식 (7)과 (8)을 식 (6)에 대입하면 초기소성변형률을 고려한 영역적분값을 다음과 같이



(a) 경로 Γ_0 에 의한 선적분(a) (b) 경로 Γ_0 와 Γ_1 에 의한 면적분

그림 1 균열선단에서의 경로

얻을 수 있다.

$$(J)_{domain} = - \int_A \left[W \frac{\partial S}{\partial x_1} - \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_1} \frac{\partial S}{\partial x_j} \right] dA + \int_A \sigma_{ij} \frac{\partial \epsilon_{ij}^0}{\partial x_1} S dA \quad (9)$$

여기서 초기소성 변형률이 존재하는 경우의 변형에너지 밀도는 아래와 같이 수정되어야 한다.¹⁶⁾

$$W = W^{total} - W^{pl}_{initial state} \quad (10)$$

여기서 $W^{pl}_{initial state}$ 은 초기상태의 소성일값이다.

2.4 등가영역적분법에 의한 용접부에서의 에너지 해방의 평가

식 (9)를 정리해서 최종적으로 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$J = \int_A \left[\left(\sigma_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_1} - W \delta_{1i} \right) \frac{\partial S}{\partial x_i} + \sigma_{ij} \frac{\partial \epsilon_{ij}^0}{\partial x_1} S \right] dA \quad (11)$$

식 (11)을 4절점 Isoparametric 요소를 이용한 유한요소식으로 변환시킬 수 있다. 요소내에서의 위치와 변위는 다음과 같다.

$$x_i = \sum_{k=1}^4 N_k X_k$$

$$u_i = \sum_{k=1}^4 N_k U_k, \quad i=1,2 \quad (12)$$

여기서 N_k 는 형상함수(Shape function)이며 X_k 와 U_k 는 절점에서의 좌표 및 변위이다. 함수 S와 그 편미분은 형상함수와 Jacobian matrix를 사용하여 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$S = \sum_{m=1}^4 N_m S_m$$

$$\frac{\partial S}{\partial x_i} = \sum_{m=1}^4 \sum_{k=1}^2 \frac{\partial N_m}{\partial \eta_k} \frac{\partial \eta_k}{\partial x_j} S_m \quad (13)$$

여기서 S_m 은 m 번째 절점에서의 함수 값이며 $\partial \eta_k / \partial x_j$ 은 Jacobian matrix의 역행렬이다. 앞서 언급한 바와 같이 함수 S는 연속성을 가져야 하고 Γ_1 에서 0의 값을 Γ_0 에서 1의 값을 가지는 성질이 있다. 이론상 균열선단의 두 개의 적분경로내에는 여러개의 요소를 포함할 수 있으나 해석상의 편의를 위하여 적분경로는 일련의 연속된 요소만을 지나도록하여 두개의 적분경로 Γ_0 와 Γ_1 사이에는 1개의 요소만

이 존재하도록 하였다. 마찬가지로 요소내의 초기 소성변형률과 그 편미분도 형상함수와 Jacobian matrix를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_{ij}^0 = \sum_{m=1}^4 N_m \epsilon_{ijm}^0$$

$$\frac{\partial \epsilon_{ij}^0}{\partial x_i} = \sum_{m=1}^4 \sum_{k=1}^2 \frac{\partial N_m}{\partial \eta_k} \frac{\partial \eta_k}{\partial x_j} \epsilon_{ijm}^0 \quad (14)$$

여기서 ϵ_{ijm}^0 는 m 번째 절점에서의 초기 소성변형률값이다. 식 (12), (13), (14)를 이용하면 식 (11)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J = \sum_{elements} \sum_{Gauss Points} \left\{ \left[\left(\sigma_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_1} - W \delta_{1i} \right) \frac{\partial S}{\partial x_i} + \sigma_{ij} \frac{\partial \epsilon_{ij}^0}{\partial x_1} S \right] |J| \right\} w_p \quad (15)$$

여기서 $|J|$ 는 Jacobian matrix의 determinant이며, w_p 는 가우스 적분점에서의 가중계수(weight factor)이다.

2.5 분해법(Decomposition method)에 의한 모드 분리

앞서 언급한 바와 같이 이중강재 용접부의 균열문제에서는 Mode I과 Mode II가 연계되어 발생한다. 그러므로 식 (11)에서 구한 J-적분을 이용하여 Mode I에 대한 적분값 J_I 과 Mode II에 대한 적분값 J_{II} 를 각각 모드를 분리한 후 산출하여야 한다. 이때 모드 분리를 위해 분해법(Decomposition method)이 사용되었다. 연구¹⁵⁾의하면 균열선(Crack line)을 중심으로 대칭인 두 점에서 발생하는 변위, 응력, 변형률 등은 Mode I과 Mode II의 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,

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

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

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

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

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.

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

2.6 해석프로그램의 타당성 검증

본 연구에서 사용한 해석 프로그램은 재료의 물리정수 및 기계적 제성질의 온도의존성을 포함하는 재료학적 비선형을 고려한 2차원 열탄소성 평면응력 해석프로그램⁵⁾으로써, 그 타당성 검증은 수차례 기발표 논문을 통해 이루어졌으며^{6)~9)} 추가로 잔류응력해석과 파괴해석을 수행하여 그 결과를 바탕으로 프로그램의 타당성을 다시 한번 검증하였다. 해석 모델은 두께가 7mm이고 폭과 길이가 각각 500mm, 1000

mm인 두 연강(SM400)판을 입열량 $Q=1200(J/mm)$, 용접속도 $v=6(mm/s)$ 로 1pass 맞대기 용접하는 것으로 하였다. 온도변화에 따른 연강의 기계적 제성질은 그림 2에 나타내었다.

그림 3에 용접시 발생하는 잔류응력의 결과를 나타내었다. 잔류응력은 용접판 중심에서 용접선직각방향으로의 잔류응력에 주목하였다. 용접부에서 높은 용접선 방향의 인장 잔류응력이 발생함을 알 수 있다.

그림 4에 잔류응력이 작용하지 않는 해석모델에 대해 용접선에 직각방향으로 2.5mm의 중심균열을 도입하여 탄성 상태인 외력 90MPa에 대한 J-적분값을 구하였으며, 그 결과를 선형탄성파괴역학(LEFM)에 의한 계산치^{18)~21)}와 비교하였다. 5개의 적분경로에 대해 각각 J-적분값을 계산하였으며 식 (13)의 S에 대해서는 I_7 에서 0의 값을, I_0 에서 1의 값을 갖는 조건을 만족하기 위하여 균열선단 안쪽 적분 경로에 해당하는 요소의 절점에서는 '1', 균열선단 바깥쪽 적분 경로에 해당하는 요소의 절점에서는 '0'의 값을 가지도록 하였다. 결과를 보면 각 경로에서의 J-적분값이 선형탄성파괴역학에 의한 값과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

다음으로 용접에 의한 잔류응력이 작용하는 판에 용접선에 직각방향으로 2.5mm의 중심균열을 도입하여 J-적분 해석을 수행하였다. 잔류응력해석에서 구한 잔류응력과 소

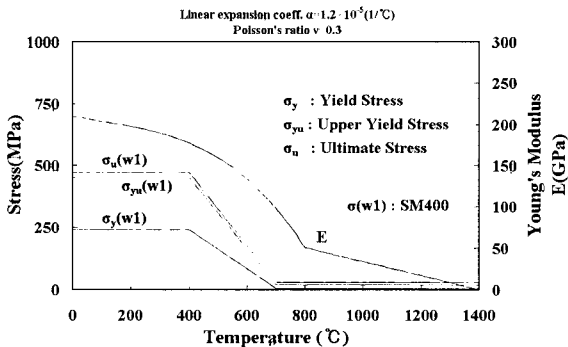


그림 2 기계적 제성질

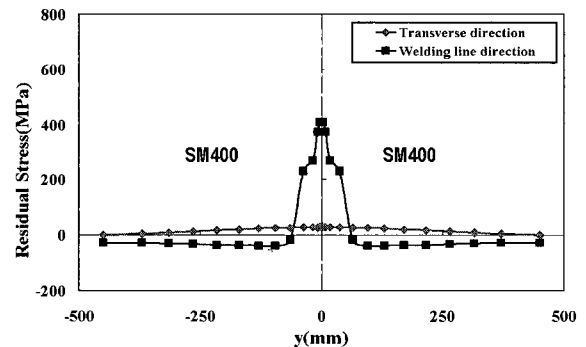


그림 3 용접선직각방향으로의 잔류응력

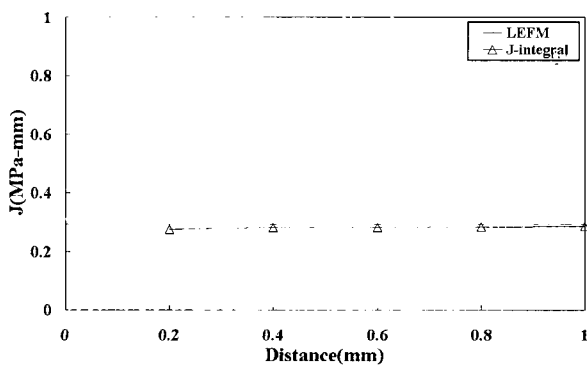


그림 4 J-적분값과 LEFM값과의 비교

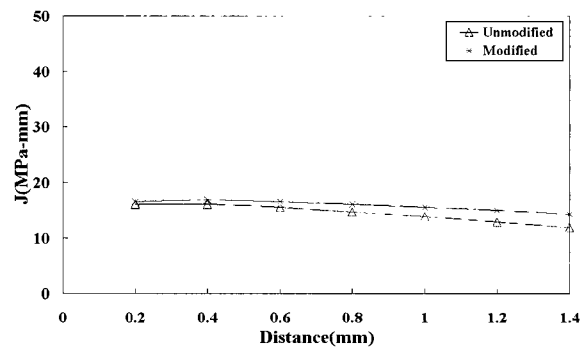


그림 5 잔류응력장에서의 J-적분 해석결과

성변형률을 초기치로 넣어서 J-적분값을 구하였다. 그림 5에 잔류응력에 의한 J-적분 계산결과를 나타내었다. 초기소성변형률을 고려하지 않은 경우에는 균열선단에서 멀어질수록 J-적분값이 경로독립성을 잃는 반면에 초기소성변형률을 고려한 경우의 결과는 경로에 관계없이 일정한 값을 가짐을 알 수 있다.

3. 이종강재 용접접합부의 잔류응력 해석

3.1 해석조건

본 연구에 사용된 해석 모델은 그림 6에 나타난 것과 같다. 각각 두께가 7mm인 연강(SM400)과 용접 구조용강재(SM490, SM520, SM570)로 이루어진 500mm×1000mm 크기의 두 평면 플레이트를 입열량 $Q=1200(J/mm)$, 용접속도 $v=6(mm/s)$ 로 1pass맞대기 용접하는 것으로 하였다. 먼저 용접시 입열에 의한 온도분포를 얻기 위해서 용접패스의 진행속도를 고려한 시간에따른 이동열원을 이용하여 2차원 비정상열전도 해석을 전체모델(full model)로 수행하였다. 그리고 열전도해석으로부터 구한 시간에 따른 각 질점에서의 온도를 하중으로 도입하여 2차원 열탄소성해석을 통해서 잔류응력을 구하였다. 2차원 비정상 열전도 해석시 공기와 접하는 면에서 열은 대류가 되고 내부에서 열은전도되는 것으로 하였다. 그리고 용착부를 모델링하기 위하여 용접이 진행되지 않은 요소는 강성이 없게 처리하고 용접이 끝난 후 온도에 따라 강성을 회복하는 것으로 하였으며 강제운동이 발생하지 않도록경계조건을 설정하였다. 또한 2차원 열탄소성 해석은 재료의 물리정수(밀도, 비열, 열전달계수, 열전도율 등) 및 기계적 제성질(선팽창계수, 포아송 비, 인장강도, 영률등)의 온도 의존성을 고려하였다. 온도 변화에 따른 재료의 물리정수 및 기계적 제성질^{6)~9)}은 그림 7(a)와 그림 7(b)에 나타내었다.

3.2 온도분포

2차원 비정상 열전도 해석을 상기와 같은 조건하에서 수행하여 온도이력을 구하였으며, 시간(t)에 따른 온도분포의 한 예를 그림 8에 나타내었다.

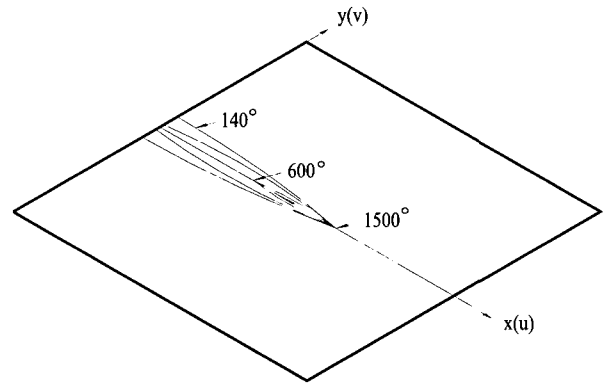


그림 8 온도분포

3.3 잔류응력

그림 9에 이종강재를 접합한 평판의 경우 평판 중앙($x=500$)의 용접선방향축에서 직각방향으로의 잔류응력을 나타내었다. 잔류응력은 용접선방향(weld line direction)과 용접선직각방향(transverse direction)의 잔류응력에 주목하였다. 그림 9(a)는 SM400과 SM490을 용접했을 때 잔류응력을 나타낸 것이고 그림 9(b)는 SM400과 SM520을 용접했을 때 잔류응력을 나타낸 것이다. 그리고 그림 9(c)는 SM400과 SM570을 용접했을 때 잔류응력의 결과를 나타낸 것이다. 그림 9(a) 결과를 보면 접합부에서 SM400의 인장잔류응력값이 406MPa로써 원래의 인장응력(410MPa)보다 상대적으로 작다. 이것은 용접시 SM490에서 SM400보다 큰 인장이 발생 하므로 즉, 수축이 더 크므로, SM400에서 수축을 구속시키는 힘이 발생했기 때

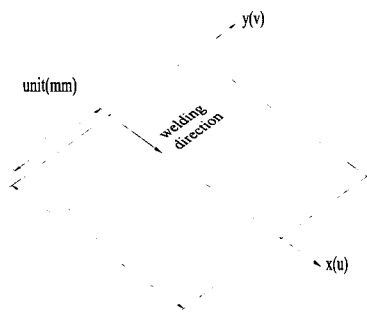


그림 6 해석모델

그림 7(a) 재료의 물리정수

그림 7(b) 기계적 제성질

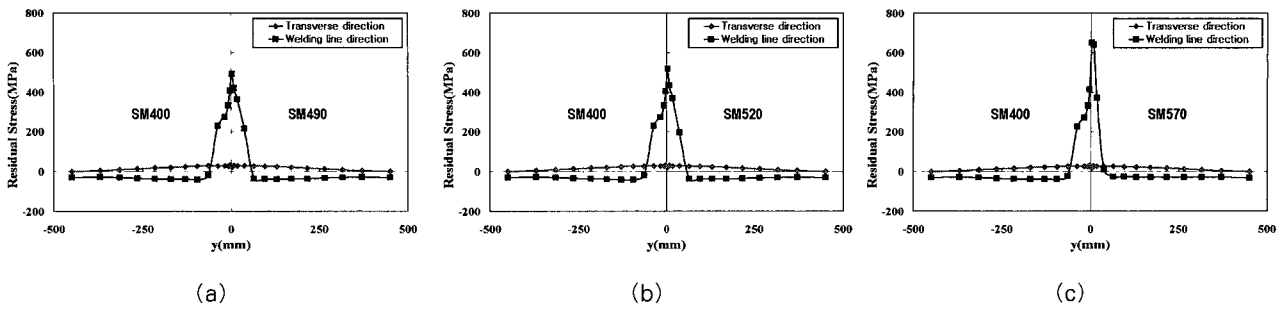


그림 9 용접선직각방향으로의 잔류응력

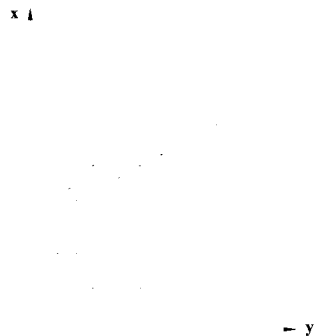


그림 10 균열선단의 요소분할

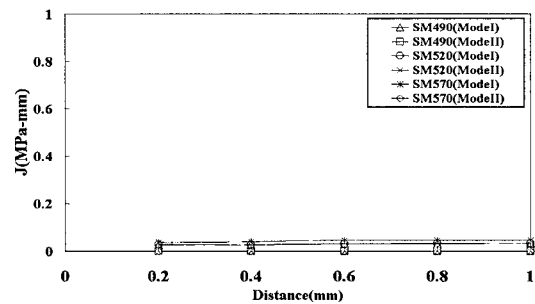


그림 11 잔류응력장에서의 J-적분 해석 결과

문으로 사료된다. 그림 9(b)의 결과는 그림 9(a)와 같은 양상을 보이지만 접합부에서의 잔류응력의 크기의 차이가 그림 9(a)의 경우보다 약 30MPa정도 더 커짐을 알 수 있다. 그림 9(c)의 결과도 그림 9(a), 그림 9(b)의 경우들과 같은 양상을 보이지만 접합부에서의 잔류응력의 크기의 차이가 그림 9(b)의 경우 보다 약 120MPa 정도 더 커짐을 알 수 있다.

4. 파괴해석

4.1 해석모델

잔류응력이 작용하는 3.1절의 해석모델에 용접선에 평행한 계면균열을 도입하여 잔류응력과 외력이 동시에 작용하는 경우에 대한 J-적분값을 계산하였다. 대칭조건을 이용하여 용접선방향(x방향)으로 2분의 1모델에 대하여 모델링을 하였으며 잔류응력해석에서 구한 잔류응력과 소성변형률을 초기치로 넣어서 용접선 직각방향으로 하중을 재하하였다. 균열선단의 형상은 그림 10에 나타내었다. 5개의 적분경로에 대해 각각 J-적분을 계산하였으며 식 (13)의 S에 대해서는 I_1 에서 0의 값을, I_0 에서 1의 값을 갖는 조건을 만족하기 위하여 균열선단 안쪽 적분경로에 해당하는 요소의 절점에서는 '1'의 값을, 균열선단 바깥쪽 적분경로에 해당하는 요소의 절점에서는 '0'의 값을 가지도록 하였다.

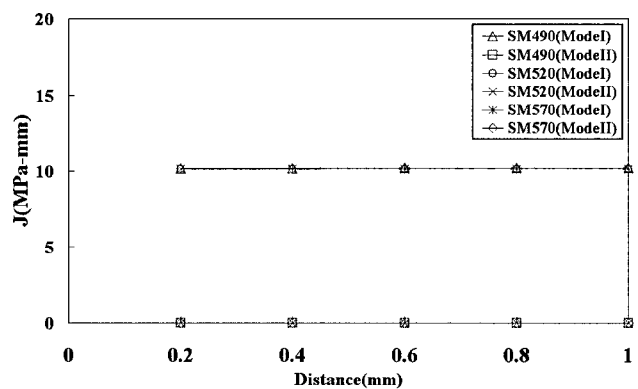


그림 12. 복합하중에 대한 J-적분 해석 결과

4.2 해석결과

잔류응력이 작용하는 이중강재 계면 균열에 대한 균열선단에서의 J-적분 해석 결과를 그림 11에 나타내었다. 결과를 보면 잔류응력에 대한 J-적분값은 3가지 경우 모두 거의 같으며 Mode II에 대한 J-적분값은 '0'에 가까운 작은 값을 알 수 있다. 이것은 Mode I과 Mode II를 발생시키는 균열 직각방향의 잔류응력의 크기가 3가지 이중강재의 경우 약간의 차이는 있으나 그 절대치의 크기는 거의 같으며, 경로내 요소들의 균열선을 중심으로 대칭인 두 점에서 발생하는 균열직각방향의 잔류응력, 변위, 변형률 등의 차이가 거의 없기 때문에 사료된다. 잔류응력과 외력(100MPa)이

동시에 작용하는 복합하중에 대한 J-적분 해석 결과를 그림 12에 나타내었다. 결과를 보면 5개 경로에 대해 J-적분값이 일정한 값을 가지며 그 크기도 잔류응력의 결과와 같이 3가지 이중강재에 대해 거의 같음을 알 수 있다.

5. 결 론

용접구조물의 파괴거동을 분석하기 위해서는 용접시에 발생하는 잔류응력 해석과 파괴해석이 같이 병행되어야 한다. 본 연구에서는 J-적분을 이용하여 이중강재 용접부 계면 균열에 대한 탄소성 파괴해석을 수행하였다. 잔류응력이 존재하면 J-적분은 적분경로에 관계없이 일정한 값을 갖는 특성을 잃게되며 또한 이중강재 용접부에서의 균열은 필연적으로 균열선단에서 두가지 응력 모드(Mode I 과 Mode II)가 발생하게 되므로 균열선단에서의 J-적분을 계산하기 위한 이론식 및 프로그램을 개발하였다. 자체개발한 해석프로그램을 이용하여 이중강재 용접시 발생하는 잔류응력과 외력에 대한 응력분포를 계산하였으며 잔류응력과 외력의 복합하중에 대한 J-적분을 계산하였다. 프로그램의 검증을 위하여 탄성상태인 외력을 가하여 이에 대한 J-적분값을 선형탄성파괴역학(LEFM)에 의한 값과 비교하였다. 잔류응력에 대한 J-적분 해석결과 그 크기는 3가지 이중강재 모두 거의 같으며 Mode II에 대한 J-적분값은 '0'에 가까운 작은 값을 알 수 있다. 이것은 Mode I 과 Mode II를 발생시키는 균열 직각방향의 잔류응력의 크기가 3가지 이중강재의 경우 약간의 차이는 있으나 그 절대치의 크기는 거의 같으며, 경로내 요소들의 균열선을 중심으로 대칭인 두 점에서 발생하는 균열직각방향의 잔류응력, 변위, 변형률 등의 차이가 거의 없기 때문에 사료된다. 잔류응력과 외력(100MPa)의 복합하중에 대한 J-적분 해석 결과도 잔류응력에 대한 결과와 마찬가지로 3가지 이중강재 모두 거의 같음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Anderson, T.L., "Fracture Mechanics Fundamentals and Applications", CRC Press, 2nd edition, 1995
2. Rice, J.R., "A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and crack", *J. Appl. Mech* Vol 35, 1968, pp.379~386
3. BSI, Guide on methods for assessing the acceptability of flaws in structure, Guide B57910-1999
4. Kumar, V.J., Schumacher, B.I., German, M.D.,

Development of a procedure for incorporation secondary stress in the engineering approach, Section 7 in EPRI Report EPRI NP-3607, 1984

5. 장경호, 이상형, 이진형, 강재훈, "2차원과 3차원 FEM 해석에 의한 절단응력의 해석 및 정도", 한국전산구조공학회 논문집 제16권 제3호, 2003, pp.261~269
6. 장경호, 이진형, "인장력을 받는 이중강재 용접접합부의 잔류응력 해석", 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제22권, 2-A호, 2002, pp.201~210
7. 장경호, 이진형, "동중강재 및 이중강재 용접접합부의 잔류응력 특징", 한국강구조학회 논문집 제15권 3호, 2003, pp.241~250
8. Kim, Y.C., Chang, K.H. Horikawa, K., すみ肉溶接で生じる面外變形の防止, 일본강구조학회 논문집, 1999, pp.11~16
9. Y.C.Kim, K.H. Chang, and K. Horikawa, すみ肉溶接で生じる面外變形の生成機構と普遍性の檢證, 일본용접학회 논문집, 일본 용접학회, 1999, pp.294~300
10. Ikeda T., Sun, C.T., "Stress intensity factor analysis for an interface crack between dissimilar isotropic materials under thermal stress, *International Journal of Fracture*, Vol.111, 2001, pp.229~249
11. Li, F.Z., Shin, C.F., Needleman, A., "A comparison of methods for calculating energy release rates", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.21, No.2, 1985, pp.405~421
12. Nikishkov, G.P., Atluri, S.N., An equivalnet domain integral methodfor computing crack-tip integral parameters in non-elastic, thermal mechanical fracture, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.26, 1987, pp.851~867
13. Woo, K.S., Hong, C.H., Shin, Y.S., "An extended equivalent domain integral method for mixed mode fracture problems by th p -version of FEM", *Int. J. Meth. Engng*, Vol.42, 1998, pp.857~884
14. Raju, I.S., Shivakumar, K.N., "An equivalnet domain integral method in the two-dimensional analysis of mixed mode crack problems", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.37, 1990, pp.707~725
15. Mukherjee, S., Ananth, C.R., Chandra, N., Effect of residual stresses on the interfacial fracture behavior of metal-matrix compo- sites, *Composites Science and Technology*, Vol.57, 1997, pp.1501~1512
16. Lei, Y., O'dowd, N.P., Webster, G.A., Frac- ture mechanics analysis of a crack in a resi-

- dual stress field, *International Journal of Frcture*, Vol.106, 2000, pp.195~216
17. Ainsworth, R.A., Neale, B.K., Price, R.H., Fracture behaviour in the presence of thermal strains, *Proc. Int. Conf. on Tolerance of Flaws in Pressurised Components*, 1978, pp.171~178
 18. Buecker, H.F., Weight function for the notched bar, *Z. Angewandte Mathemat. Mechan.*, Vol. 51, 1971, pp.97~109
 19. Ng, S.W., Lau, K.J., A new weight function expression for through cracks, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.64, 1999, pp.515~537
 20. Fett, T., Bahr, H-A., "Mode I stress intensity factors and weight fucntions for short plates under different boundary conditions," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.62, 1999, pp.593~606
 21. Wang, Q.Z., "Some simple mode I SIF expressions of finite width strip with a center cdrack derived by using an approximate weight function", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.60, 1998, pp.37~45
 22. 신성진, 홍종현, 신병천, 우광성, 2차원 균열판에서 등가영역적분법에 의한 p-version 유한요소모델, 대한토목학회 논문집, 제17권 제1-2호, 1997, pp.137~147
 23. 김석, 심용래, 배성인, 송정일, 후판 부분용입 다층용접의 잔류응력 및 파괴해석, 대한용접학회 논문집, Vol.19, No.6, 2001, pp.636~642
 24. Lei, Y., Ainsworth, R.A., "A J-integral estimation method for cracks in welds with mismatched mechanical properties", *Int. J. Pres. Ves. & Piping*, Vol.70, 1997, pp.237~245
 25. Lei, Y., Tao, J., Li, P.N., "Limits load and J estimation of a centre cracked plate with an asymmetric crack in a mismatched weld", *Int. J. Pres. Ves. & Piping*, Vol.76, 1999, pp.747~757
 26. Kim, J.H., Paulino, G.H., "Finite element evaluation of mixed mode stress intensity factors in functionally graded materials", *Int. J. Num. Meth*, Vol.53, 2002, pp.1903~1935