

J-적분을 이용한 용접접합부 균열의 파괴 역학적 해석

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

장 경 호¹⁾ · 이 진 형²⁾

Chang, Kyong Ho · Lee, Chin Hyung

요 약 : 용접접합부 균열의 파괴 역학적 해석을 위해서는 용접 중에 발생하는 잔류응력을 고려하여 해석이 수행되어야 한다. 잔류응력이 존재하면 J-적분은 더 이상 적분경로에 관계없이 일정한 값을 갖는 특성을 잃어버리게 된다. 그러므로 용접접합부 균열의 J-적분 해석을 위해서는 잔류응력이 존재하는 경우에도 적분경로에 관계없이 일정한 값을 갖는 새로운 J-적분식이 도입되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 기존의 J-적분을 수정하여 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 해석 프로그램을 이용하여 용접 시 잔류응력과 외력에 대한 응력분포를 계산하였으며, 이를 이용하여 잔류응력과 외력의 복합하중에 대한 J-적분을 계산하였다.

ABSTRACT : The fracture mechanics analysis of a crack in a weld must consider residual stress generated during welding. The standard definition of the J-integral requires a path dependent value in the presence of a residual stress field. Therefore, it is necessary to develop a path independent J-integral definition for a crack in a residual stress field. This paper addresses the modification of the Rice-J-integral to produce a path-independent J-integral when residual stresses and external forces are present. The residual stress problem is treated as an initial strain problem and the J-integral proposed for this type of problems is used. A program which can evaluate the J-integral for a crack in a weld is developed using the proposed J-integral definition. The situation when only residual stress is present is examined as is the case when mechanical stresses are applied in conjunction with a residual stress.

핵심용어 : 파괴역학, 용접부, 균열, J-적분, 잔류응력

KEYWORDS : Fracture Mechanics, Weld, Crack, J-integral, Residual stress

1. 서론

강구조물의 용접부에는 용접 중에 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 인장 잔류응력은 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 파괴 해석에 있

어서 매우 중요하다. 균열선단의 특이성을 나타내는 지표로써 선형 탄성체에서는 응력확대계수(K)가 널리 이용되며 잔류응력에 대한 영향은 중첩법으로 쉽게 고려(Anderson, 1995)할 수 있다. 그러나 탄소성 해석에 있어서는 응력확대계수는 더 이상 적용할 수 없고 적절한 탄소성 인자가 사용되어야 한다. 현재 대부분의 결함평가 절차들이 탄소성 파괴인자로 J-적분(Rice, 1968)을 채택(BSI, 1999; Kumar 등, 1984)하고 있으나, 잔류응력 혹은 잔류응력과 외력이 동시에 존재하는 균열에 있어서 이를 고려할 수 있는 경로 독립성의 J-적분에 대한 이해와 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 기존의 J-적분을 수정하여 잔류응력이 존재하는 경우에 경로 독립성을 유지하는 J-적분을 고찰

1) 정회원, 중앙대학교 건설환경공학과 교수, 공학박사
(Tel:02-820-5337, Fax:02-823-5337, E-mail:changkor@cau.ac.kr)
2) 중앙대학교 기술과학연구소, 공학박사(ifinder@hanmail.net)

본 논문에 대한 토의를 2005년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

하고, 이를 이용하여 잔류응력과 외력이 동시에 작용하는 균열선단에서의 J-적분을 해석할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 자체개발한 탄소성 해석 프로그램(Kim 등, 1999; 장경호 등, 2002; 장경호 등, 2003)을 이용하여 용접 시 잔류응력과 외력에 대한 응력분포를 계산하였으며, 이를 이용하여 잔류응력과 외력의 복합하중에 대한 J-적분을 계산하였다.

2. 복합응력상태에서의 J-적분 해석

2.1 J-적분

단일인자 파괴 역학적 접근에 있어서 J-적분은 비선형 탄성체에서 균열선단에서의 에너지 방출율로 정의되며 균열선단에서의 변형에너지 밀도와 표면 작용력에 의한 에너지의 경로적분값이다. J-적분은 경로에 무관하며 균열 길이에 따른 포텐셜 에너지의 변화율과 같다. 이러한 J-적분을 수치적으로 구하기 위해서 등가영역적분법(Woo 등, 1998; Nikishkov 등, 1987)이 도입되었다. 영역적분시에 필요한 값들은 유한요소 해석상에서 바로 구할 수 있으므로 선적분의 영역적분으로의 변환은 매우 유리하다.

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

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

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 단위 벡터, W 는 변형에너지 밀도(Strain energy density)로써 다음과 같이 정의된다.

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

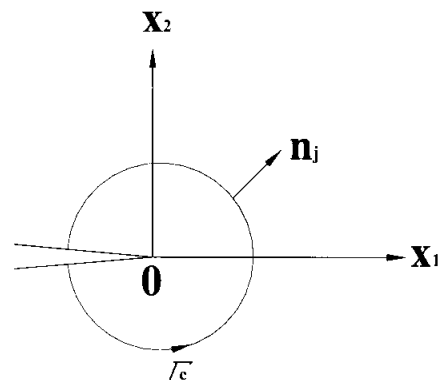
J_{x_1} 과 J_{x_2} 는 각각 균열방향과 균열 직각방향으로의 변형 에너지 방출율을 나타내는 경로에 무관한 독립된 적분값들이다. J_{x_1} 은 일반적으로 잘 알려진 J-적분이며, J_{x_2} 는 승적분(Product integral)으로써 응력, 변위 텐서의 대칭과 역대칭의 속성 때문에 서로 상쇄되어 실제적으로 '0'이 된다. (Mukherjee 등, 1997)

순수 외력만 작용하고 체적력과 균열면 전인력이 없는 경

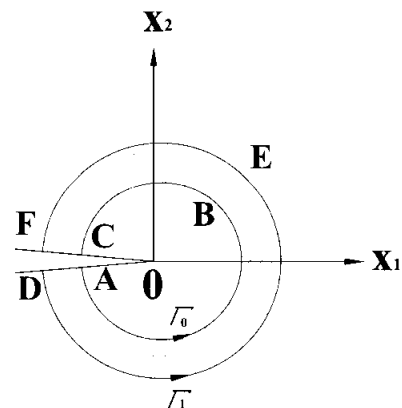
우 식 (1)은 적분경로에 무관한 특성을 갖는다. 하지만 용접 구조물에서는 용접 중에 발생하는 잔류응력과 소성변형으로 인하여 J-적분이 적분 경로에 관계없이 일정한 값을 갖는 특성을 잃게 되므로 식 (1)을 바로 적용할 수 없다. 따라서 용접구조물의 균열선단에서의 J-적분을 구하기 위해서 균열 주위에 작은 요소를 사용하여 균열선단에서의 J-적분값을 근사적으로 이용할 수도 있으나 정확한 J-적분을 구하기 위해서는 용접에 의한 초기 소성변형율을 고려한 J-적분식의 도입이 필요하다.

2.2 등가영역적분법

그림 1(a)의 경로적분은 발산정리(Divergence Theorem)를



(a) 경로 Γ_c 에 의한 선적분



(b) 경로 Γ_0 와 Γ_1 에 의한 면적분

그림 1. 균열선단에서의 적분경로

를 이용하여 영역적분으로 변환시킬 수 있다. 그림 1(b)의 균열선단에서의 두 경로 Γ_0 (OABCO)와 Γ_1 (ODEFO)은 면적 DEFBCBAD를 둘러싸게 된다. 경로 Γ_0 에 대한 적분 값에 '1'을 곱하고 경로 Γ_1 에 대한 적분 값에 '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 $S = S(x_1, x_2)$ 를 도입하면 식 (3)은 다음과 같이 확장될 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 변환(Nikishkov 등, 1987; Raju 등, 1990)된다.

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

여기서 체적력과 가속도가 없는 경우 $\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_1} S = 0$ 을 만족한다. 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.

$$\begin{aligned} (J)_{domain} &= - \int_A \left[W \frac{\partial S}{\partial x_1} - \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_1} \frac{\partial S}{\partial x_j} \right] dA \\ &\quad - \int_A \left[\frac{\partial W}{\partial x_1} - \sigma_{ij} \frac{\partial \epsilon_{ij}}{\partial x_1} \right] S dA \quad (6) \end{aligned}$$

2.3 용접부에서의 J-적분

외력이 작용하는 용접부의 J-적분 해석을 위해서는 먼저 용접부의 잔류응력 해석이 선행되어야 하며 잔류응력과 외력이 동시에 작용하는 경우에 대한 J-적분 해석을 수행해야 한

다. 용접부의 잔류응력은 불균일한 온도분포와 이로 인한 소성변형 등에 의해 발생하므로 잔류응력의 문제는 초기 소성변형을 문제로 고려(Lei 등, 2000)될 수 있다. 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 초기 소성변형이 없는 경우 식 (6)의 우측식의 두 번째 항은 '0'이 된다(Woo 등, 1998). 그러나 초기 소성변형이 존재하는 경우에는 식 (2)의 ϵ_{ij}^m 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 ϵ_{ij}^e 와 ϵ_{ij}^b 는 각각 탄성변형률과 소성변형률 값이며 ϵ_{ij}^0 는 초기 소성변형률 값이다. 식 (7)과 (8)을 식 (6)에 대입하면 초기 소성변형률을 고려한 영역적분 값을 다음과 같이 얻을 수 있다.

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

여기서 초기 소성변형률이 존재하는 경우의 변형에너지 밀도는 아래와 같이 수정되어야 한다(Lei 등, 2000).

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

여기서 $W^{pl} \text{ initial state}$ 은 초기상태의 소성일 값이다.

2.4 등가영역적분법에 의한 용접부에서의 J-적분의 평가

식 (9)를 정리해서 최종적으로 아래와 같이 나타낼 수 있다.

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

식 (11)을 4절점 Isoparametric 요소를 이용한 유한요소 식으로 변환시킬 수 있다. 요소 내에서의 위치와 변위는 다음과 같다.

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

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

여기서 N_k 는 형상함수(shape function)이며 X_{ik} 와 U_{ik} 는 절점에서의 좌표 및 변위이다. 함수 S 와 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 S 값이며 $\partial \eta_k / \partial x_j$ 은 Jacobian matrix의 역행렬이다. 앞서 언급한 바와 같이 함수 S 는 연속성을 가져야 하고 Γ_1 에서 0의 값을 Γ_0 에서 1의 값을 가지는 성질이 있다. 이론상 균열선단의 두개의 적분경로 내에는 여러개의 요소를 포함할 수 있으나 해석상의 편의를 위하여 적분경로는 일련의 연속된 요소만을 지나도록하여 두개의 적분경로 Γ_0 와 Γ_1 사이에는 1개의 요소만이 존재하도록 하였다. 마찬가지로 요소내의 초기 소성변형율과 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 소성변형율 값이다. 식 (12), (13), (14)를 이용하면 식 (11)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J = \sum_{Element} \sum_{Gauss\ Points} \left\{ \left[\left(\sigma_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - W \delta_{1i} \right) \frac{\partial S}{\partial x_i} \right. \right.$$

$$\left. \left. + \sigma_{ij} \frac{\partial \epsilon_{ij}^0}{\partial x_1} S \right] |J| \right\} w_p \quad (15)$$

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

2.5 해석 프로그램의 타당성 검증

본 연구에서 사용한 해석 프로그램의 타당성을 검증하기 위하여 잔류응력해석과 파괴해석을 수행하였다. 해석모델은 그림 2에 나타난 것과 같이 두께가 7mm 이고 폭과 길이가 각각 500mm, 1000mm인 두 연강(SM400)판을 입열량 $Q = 1200(J/mm)$, 용접속도 $v = 6(mm/s)$ 로 1 pass 맞대기 용접하는 것으로 하였다. 온도변화에 따른 연강의 물리정수 및 기계적 제성질은 그림3에 나타내었다.

그림 4에 용접판 중심에서 용접선 직각방향을 따라가며 잔류응력을 나타내었다. 용접부에서 높은 용접선방향의 잔류응력이 발생함을 알 수 있다.

그림 5와 표 1에 잔류응력이 작용하지 않는 해석모델에 대해 용접선에 직각방향으로 2.5mm의 중심균열을 도입하여 탄성 상태인 외력 90MPa에 대한 J-적분값을 구하였으며 그

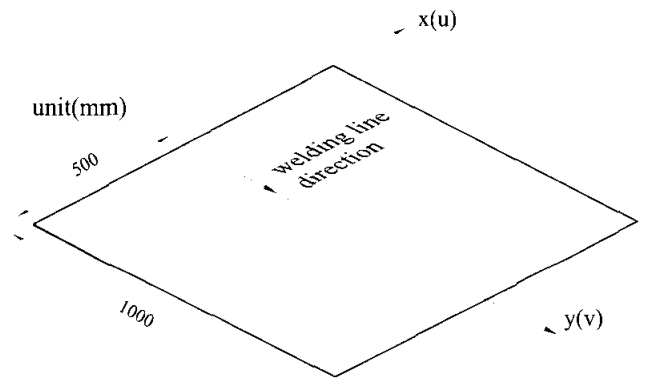


그림 2. 해석모델

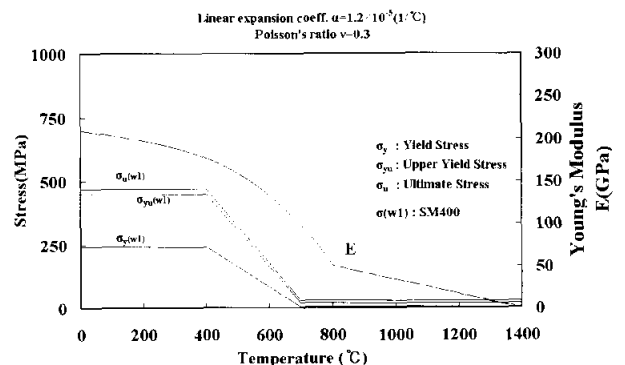


그림 3. 기계적 제성질

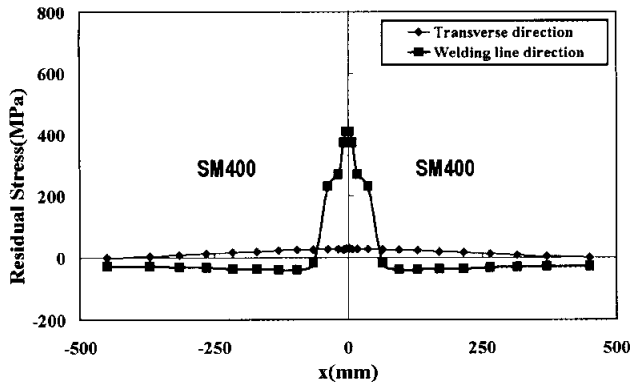


그림 4. 용접선 직각방향에서의 잔류응력

결과를 선형 탄성 파괴역학(LEFM)에 의한 계산치(Buecker 등, 1971; Ng 등, 1999; Fett 등, 1999)와 비교하였다. 또한 적분경로 내의 유한요소 크기의 영향을 보기 위하여 요소 크기를 달리하여 해석을 수행하였다. 그림 5의 가로축은

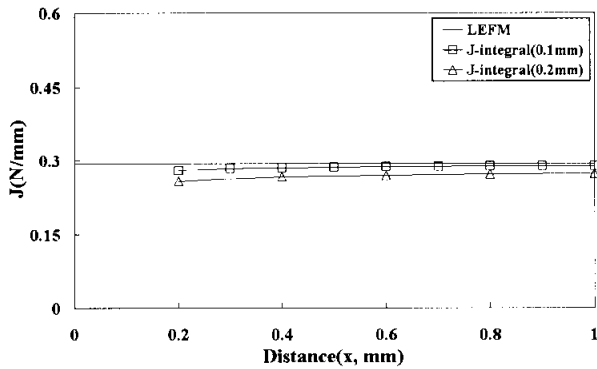


그림 5. J-적분값과 LEFM값과의 비교

표 1. J-적분값과 LEFM값과의 비교

	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
LEFM	0.294	0.294	0.294	0.294	0.294	0.294	0.294	0.294	0.294
J-integral (0.1mm)	0.280	0.283	0.284	0.286	0.287	0.287	0.288	0.289	0.289
J-integral (0.2mm)	0.258		0.267		0.270		0.271		0.272

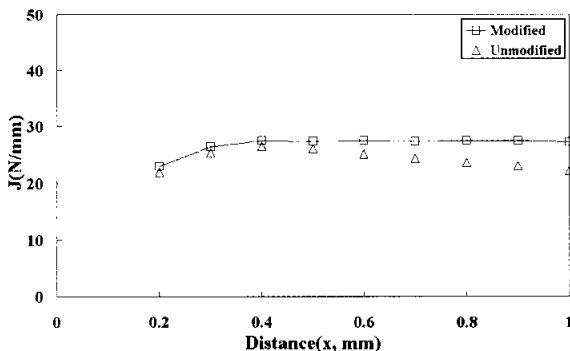


그림 6. 잔류응력장에서의 J-적분 해석결과

균열선단으로부터 각 적분 경로까지의 거리를 나타낸다. 각각의 적분경로에 대해 J-적분값을 계산하였으며 식 (13)의 S에 대해서는 Γ_1 에서 0의 값을, Γ_0 에서 1의 값을 갖는 조건을 만족하기 위하여 균열선단 안쪽 적분경로에 해당하는 요소의 절점에서는 '1', 균열선단 바깥쪽 적분경로에 해당하는 요소의 절점에서는 '0'의 값을 가지도록 하였다. 결과를 보면 요소 크기가 0.1mm인 경우 각 경로에서의 J-적분값이 선형 탄성 파괴역학에 의한 값과 3% 미만의 오차로 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 소성변형율을 초기치로 넣어서 J-적분값을 구하였으며 적분경로 내의 요소 크기는 0.1mm로 하였다. 그림 6에 잔류응력에 의한 J-적분 계산결과를 나타내었다. 초기 소성변형율을 고려하지 않은 경우에는 용접 중에 발생한 잔류응력과 소성변형으로 인하여 J-적분값이 균열선단에서 멀어질수록 경로에 무관하게 일정한 값을 갖는 경로 독립성을 잃는 반면에 초기 소성변형율을 고려한 경우의 결과는 균열선단에서의 응력집중과 이에 따른 대규모 소성변형에 의한 특이점의 영향을 크게 받는 적분 경로를 제외하면 경로에 관계없이 일정한 값을 가짐을 알 수 있다. 따라서 용접구조물의 균열선단에서의 J-적분을 구하기 위해서는 균열주위에 작은 요소를 사용하여 균열선단에서의 J-적분값을 근사적으로 이용할 수도 있으나 정확한 J-적분을 구하기 위해서는 용접에 의한 초기 소성변형율을 고려한 J-적분식의 도입이 필요하다는 것을 알 수 있다.

3. 잔류응력해석

3.1 해석조건

본 연구에 사용된 해석모델의 형상은 그림 2와 같다. 각각 두께가 7mm인 용접구조용 강재(SM490, SM520, SM570)로 이루어진 500mm×1000mm 크기의 두 평면 플레이트를 입열량 $Q = 1200(J/mm)$, 용접속도 $v = 6(mm/s)$ 로 1pass 맞대기 용접하는 것으로 하였다. 해석에 사용된 프로그램은 4 절점 Isoparametric 유한요소를 도입한 2차원 평면응력 해석 프로그램이다. 먼저 용접 시 입열에 의한 온도분포를 얻기 위해서 용접패스의 진행속도를 고려한 시간에 따른 이동열원을 이용하여 2차원 비정상 열전도 해석을 전체모델(full model)로 수행하였다.

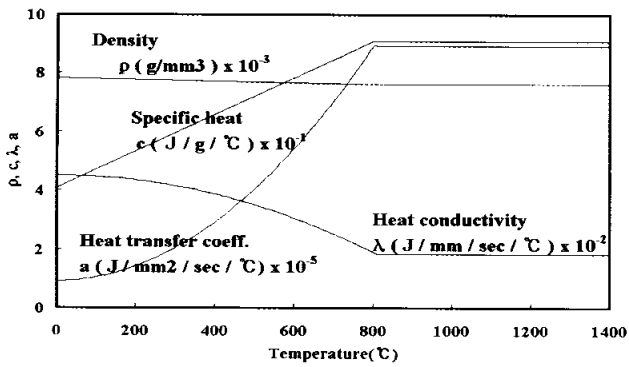


그림 7.(a) 재료의 물리정수

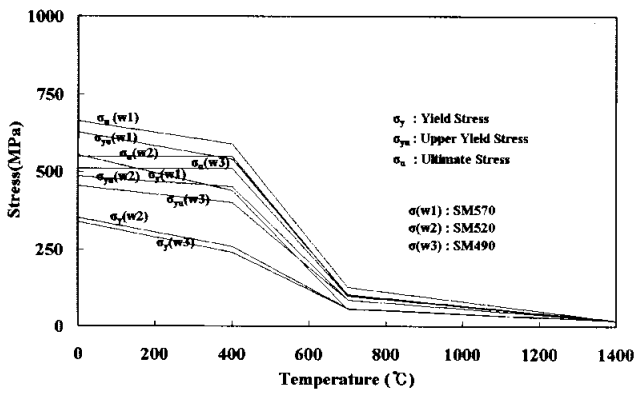


그림 7.(b) 기계적 제성질

그리고 열전도 해석으로부터 구한 시간에 따른 각 절점에서의 온도를 하중으로 도입하여 2차원 열탄소성 해석을 통해서 잔류응력을 구하였다. 2차원 비정상 열전도 해석 시 공기와 접하는 면에서 열은 대류가 되고 내부에서 열은 전도되는 것으로 하였다. 그리고 용착부를 모델링하기 위하여 용접이 진행되지 않은 요소는 강성이 없게 처리하고 용접이 끝난 후 온도에 따라 강성을 회복하는 것으로 하였으며 강체운동이 발생하지 않도록 경계조건을 설정하였다. 또한 2차원 열탄소성 해석은 재료의 물리정수(밀도, 비열, 열전달계수, 열전도율 등) 및 기계적 제성질(선팽창계수, 포아송 비, 인장강도, 영율 등)의 온도 의존성을 고려하였다. 온도변화에 따른 재료의 물리정수 및 기계적 제성질(Kim 등, 1999; 장경호 등, 2002; 장경호 등, 2003)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. 이동 열입력이 끝나는 부분의 온

도는 1500°C 정도이고 열원에서 멀어질수록 온도가 작아지는 열분포 현상을 보이고 있다.

3.3 잔류응력

그림 9에 용접구조용 강재를 접합한 평판의 경우 평판중앙 ($y=500$)에서 용접선에 직각인 방향을 따라가며 잔류응력을 나타내었다. 잔류응력은 용접선방향(weld line direction)

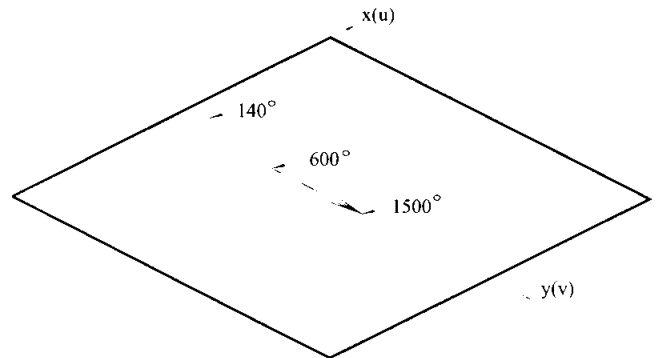
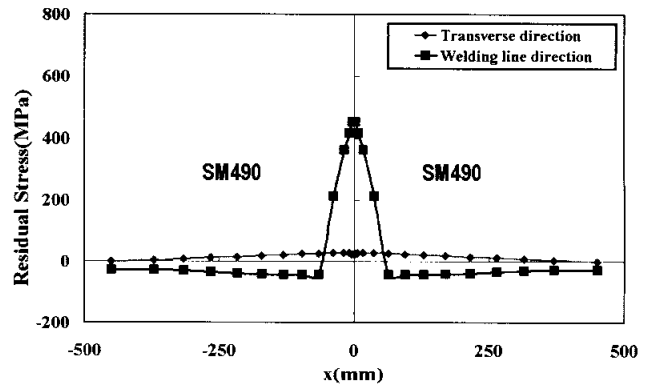
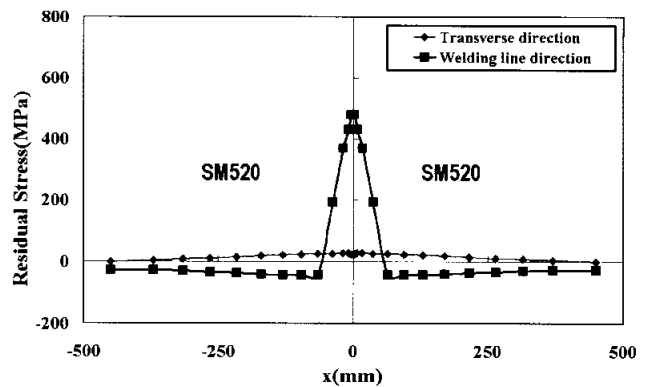


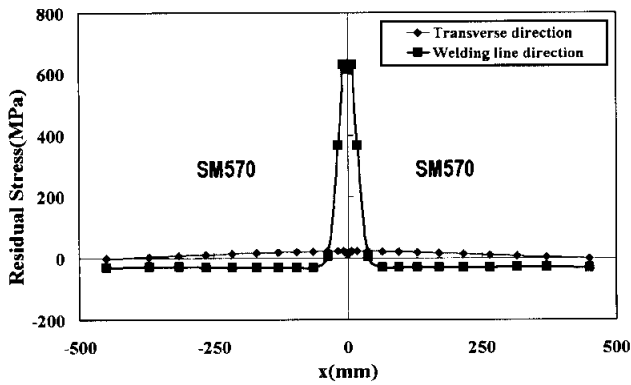
그림 8. 온도분포



(a)



(b)



(c)

그림 9. 용접선직각방향에서의 잔류응력

의 잔류응력과 용접선 직각방향(transverse direction)의 잔류응력을 구하였다. 그림 9(a), (b), (c)는 각각 SM490, SM520, 그리고 SM570을 용접한 경우의 잔류응력을 나타낸 것이다. 이상에서 용접구조용 강재의 인장강도가 클수록 (SM490 < SM520 < SM570) 용접부의 잔류응력은 증가 (453MPa < 478 MPa < 615MPa)함을 알 수 있다.

4. 파괴해석

4.1 해석모델

잔류응력이 작용하는 3.1절의 해석모델에 용접선에 직각방향으로 2.5mm 크기의 중심균열을 도입하여 잔류응력과 외력이 동시에 작용하는 경우에 대한 J-적분값을 계산하였다. 대칭조건을 이용하여 4분의 1모델에 대하여 모델링을 하였으며 잔류응력해석에서 구한 잔류응력과 소성변형율을 초기치로 넣어서 하중을 재하 하였다. 파괴 해석모델 및 균열선단의 형상은 그림 10에 나타내었다. 9개의 적분경로에 대해 각각 J-적분을 계산하였으며 식 (13)의 S에 대해서는 Γ_1 에서 0의 값을, Γ_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. 적분경로 내의 요소 크기는 2.5절과 마찬가지로 0.1mm로 하였다.

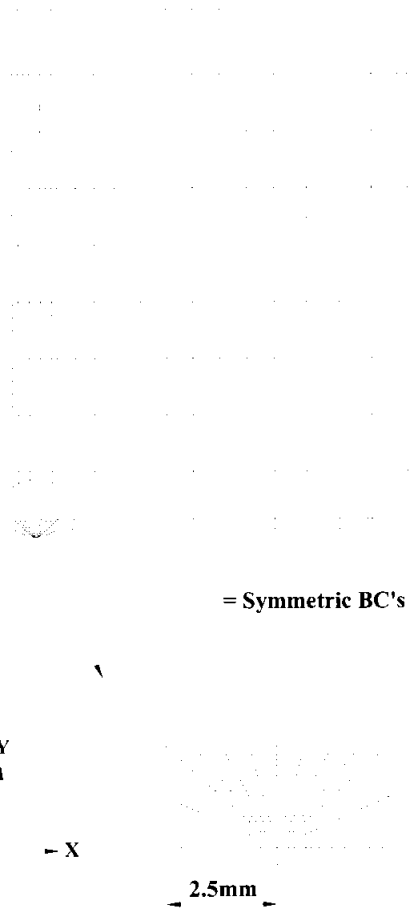


그림 10. 파괴 해석모델 및 균열선단의 요소분할

4.2 해석결과

잔류응력이 작용하는 중심균열에 대한 균열선단에서의 J-적분 해석결과를 그림 11에 나타내었다. 결과를 보면 용접구조용 강재의 인장강도가 클수록(SM490 < SM520 < SM570) J-적분값이 커짐을 알 수 있다. 이것은 용접구조용 강재의 인장강도가 클수록(SM490 < SM520 < SM570) 용접부에서 더 큰 인장 잔류응력이 발생하기 때문이다. 그림 12에 잔류응력과 외력(100MPa)이 동시에 주어지는 복합하중에 대한 J-적분 해석결과를 나타내었다. 결과를 보면 용접구조용 강재의 인장강도가 클수록(SM490 < SM520 < SM570) J-적분값이 더 커지며 그 값은 잔류응력만이 존재하는 경우보다 더 큼을 알 수 있다. 이것은 용접 시 발생한 인장 잔류응력에 외력에 의한 인장응력이 추가되어 균열진전력이 더 커졌기 때문이다.

5. 결 론

용접구조물의 파괴거동을 분석하기 위해서는 용접 시에 발

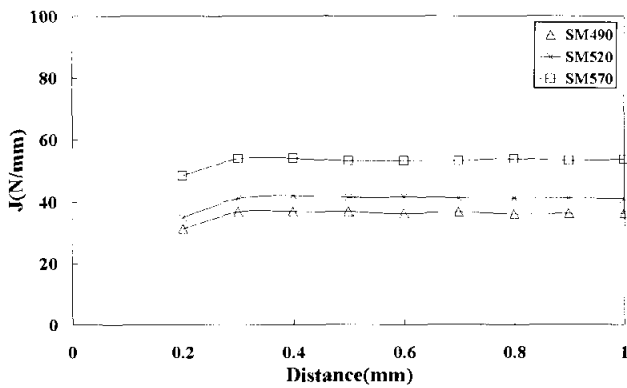


그림 11. 잔류응력장에서의 J-적분 해석 결과

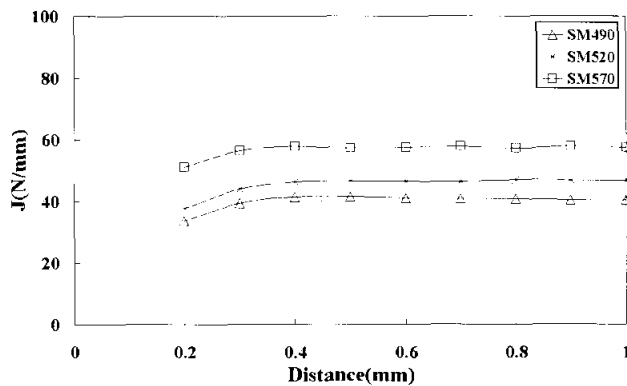


그림 12. 복합하중에 대한 J-적분 해석 결과

생하는 잔류응력해석과 파괴해석이 같이 병행되어야 한다. 본 연구에서는 J-적분을 이용하여 용접부 중심균열에 대한 탄소성 파괴해석을 수행하였다. 잔류응력이 존재하면 J-적분은 적분경로에 관계없이 일정한 값을 갖는 특성을 잃게 되므로 균열선단에서의 J-적분을 계산하기 위한 이론식 및 프로그램을 개발하였다. 자체개발한 해석프로그램을 이용하여 잔류응력과 외력에 대한 응력분포를 계산하였으며 잔류응력과 외력의 복합하중에 대한 J-적분을 계산하였다. 해석 결과 초기 소성변형형을 고려하지 않은 경우에는 용접 중에 발생한 잔류응력과 소성변형으로 인하여 J-적분값이 균열선단에서 멀어질수록 경로에 무관하게 일정한 값을 갖는 경로 독립성을 잃는 반면에 초기 소성변형형을 고려한 경우의 결과는 균열선단에서의 응력집중과 이에 따른 대규모 소성변형에 의한 특이점의 영향을 크게 받는 적분 경로를 제외하면 경로에 관계없이 일정한 값을 가짐을 알 수 있었다. 따라서 용접구조물의 균열선단에서의 J-적분을 구하기 위해서는 균열주위에 작은 요소를 사용하여 균열선단에서의 J-적분값을 근사적으로 이용할 수도 있으나 정확한 J-적분을 구하기 위해서는 용접에 의한 초기 소성변형형을 고려한 J-적분식의 도입이 필요하다는 것을 알 수 있었다. 그리고 용접구조용 강재의 잔류응력에 대한 J-적

분 해석결과 용접구조용 강재의 인장강도가 클수록(SM490 < SM520 < SM570) J-적분값이 커짐을 알 수 있었다. 이것은 용접구조용 강재의 인장강도가 클수록(SM490 < SM520 < SM570) 용접부에서 더 큰 인장 잔류응력이 발생(453MPa < 478MPa < 615MPa)했기 때문이다. 잔류응력과 외력의 복합하중에 대한 J-적분 해석결과 용접구조용 강재의 인장강도가 클수록(SM490 < SM520 < SM570) 균열선단에서의 J-적분값이 더 커지며 그 값은 잔류응력만이 존재하는 경우보다 더 큼을 알 수 있다. 이것은 용접 시 발생한 인장 잔류응력에 외력에 의한 인장응력이 추가되어 균열선단에서의 J-적분값이 더 커졌기 때문이다.

참고 문헌

Anderson, T.L., (1995) Fracture Mechanics Fundamentals and Applications, CRC Press, 2nd edition.

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.

BSI, (1999) Guide on methods for assessing the acceptability of flaws in structure, Guide B57910-1999.

Kumar, V.j Schumacher, B.I. and German, M.D., (1984) Development of a procedure for incorporation secondary stress in the engineer-ring approach, Section 7 in EPRI Report EPRI NP-3607.

Y.C.Kim, K.H. Chang, and K. Horikawa, すみち溶接で生じる面外変形の防止, 일본강구조학회 논문집, 1999, pp. 11-16.

Y.C.Kim, K.H. Chang, and K. Horikawa, すみち溶接で生じる面外変形の生成機構と普適性の検証, 일본용접학회 논문집, 일본 용접학회, 1999, pp.294-300.

장경호, 이진형, 인장력을 받는 이중강재 용접접합부의 잔류응력 해석, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제22권, 2-A호, 2002, pp.201-210.

장경호, 이진형, 동종강재 및 이중강재 용접접합부의 잔류응력 특징, 한국강구조학회 논문집, 제15권 3호, 2003, pp.241-250.

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.

- Nikishkov, G.P. and Atluri, S.N., (1987) An equivalent domain integral method for computing crack-tip integral parameters in non-elastic, thermal mechanical fracture, *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 26, pp.851-867.
- Y. Lei, N.P. O’ Dowd and G.A. Webster (2000) Fracture mechanics analysis of a crack in a residual stress field, *International Journal of Fracture*, vol. 106, pp.195-216.
- R.A. Ainsworth, B.K. Neale and R.H. Price (1978) Fracture behaviour in the presence of thermal strains, *Proc. Int. Conf. on Tolerance of Flaws in Pressurised Components*, pp.171-178.
- 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.
- S.Mukherjee, C.R.Ananth and N.Chandra (1997) Effect of residual stresses on the interfacial fracture behavior of metal-matrix composites, *Composite Science and Technology*, Vol. 57, pp.1501-1512.
- Buecker, H.F., (1971) Weight function for the notched bar, *Z. Angewandte Mathemat. Mechan*, Vol. 51, pp.97-109.
- S.W. Ng, K.J. Lau (1999) A new weight function expression for through cracks, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 64, pp.515-537.
- T. Fett, H-A. Bahr, (1999), Mode I stress intensity factors and weight functions for short plates under different boundary conditions, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 62, pp.593-606.
- QI-ZHI WANG (1998) SOME SIMPLE MODIFIED EXPRESSIONS OF FINITE WIDTH STRIP WITH A CENTER CRACK DERIVED BY USING AN APPROXIMATE WEIGHT FUNCTION, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 60, pp.37-45.
- 신성진, 홍종현, 신병천, 우광성 (1997) 2차원 균열판에서 등가 영역적분법에 의한 p-version 유한요소모델, *대한토목학회 논문집*, 제17권 제1-2호, pp.137-147.
- 김석, 심용래, 배성인, 송정일 (2001) 후판 부분용입 다층용접의 잔류응력 및 파괴해석, *대한용접학회 논문집*, Vol. 19, No. 6, pp.636-642.
- Y. Lei, R.A. Ainsworth (1997) A J integral estimation method for cracks in welds with mismatched mechanical properties, *Int. J. Pres. Ves. & Piping*, Vol. 70, pp.237-245.
- Y. Lei, J. Tao, P.N. Li (1999) 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, pp.747-757.
- Jeong-Ho Kim and Glaucio H. Paulino (2002) Finite element evaluation of mixed mode stress intensity factors in functionally graded materials - , *Int. J. Num. Meth*, Vol. 53, pp.1903-1935.
- (접수일자 : 2004. 10. 15 / 심사일 2004. 10. 26 / 심사완료일 2005. 2. 4)