

< 논문 >

하중-균열열림변위를 이용한 굽힘하중이 작용하는 원주방향 관통균열 배관의 새로운 J 실험법

허남수* · 김윤재† · 김영진**

(2005년 7월 27일 접수, 2005년 12월 2일 심사완료)

New J Testing Method Using Load-COD Curve for Circumferential Through-Wall Cracked Pipes under Bending

Nam-Su Huh, Yun-Jae Kim and Young-Jin Kim

Key Words : Circumferential Through-Wall Crack(원주방향 관통균열), Crack Opening Displacement(균열열림변위), J-Testing(J-실험), Plastic η -Factor(소성 η -계수)

Abstract

The present paper provides experimental J estimation equation for the circumferential through-wall cracked pipe under four-point bending, based on the load-crack opening displacement (COD) record. Based on the limit analysis and the kinematically admissible rigid-body rotation field, the plastic η -factor for the load-COD record is derived and is compared with that for the load-load line displacement record. Comparison with the J results from detailed elastic-plastic finite element (FE) analysis shows that the proposed method based on the load-COD record provides reliable J estimates even for shallow cracks, whereas the conventional approach based on the load-load line displacement record gives erroneous results for shallow cracks. Thus, the proposed J estimation method could be recommended for testing the circumferential through-wall cracked pipe, particularly with shallow cracks.

1. 서 론

균열 배관에 대한 파괴역학적 건전성 평가법의 타당성을 검증하고 실제 균열 배관의 거동을 이해하기 위해서는 실패관(full-scale pipe) 실증실험이 매우 중요하다. 특히 원자력 배관에 대한 파단전 누설(Leak-Before-Break; LBB) 해석⁽¹⁾의 경우에는 균열 배관의 하중지지능력(load carrying capacity)과 파괴저항특성을 구하기 위해 4점 굽힘 하중(4-point bending)이나 내압과 굽힘 하중이 동시에 작용하는 원주방향 관통균열(circumferential through-wall crack) 배관에 대한 실험이 일반적으로 수행된다.⁽²⁻⁴⁾

실패관 실험이나 시편을 이용하여 J -적분을 실험적으로 구하기 위해 일반적으로 하중-하중선 변위 선도(load-load line displacement)를 이용한 소성

η -계수가 사용된다.⁽⁵⁾ 그러나 최근의 연구 결과⁽⁶⁻¹⁰⁾에 의하면 하중선 변위 선도 대신 균열선단 개구 변위(crack mouth opening displacement)를 이용하면 보다 정확한 J -적분값을 얻을 수 있는 것으로 알려져 있으며, 특히 균열길이가 짧은 경우에 정확성이 크게 향상되는 것으로 알려져 있다. LBB 해석시 주로 고려되는 관통균열의 길이는 배관 원주의 10%~25% 정도이며, 이는 균열길이가 짧은 경우에 해당한다. 일반적으로 실패관 실험에서는 하중선 변위 선도 외에 균열열림변위(Crack Opening Displacement; COD)도 함께 측정되므로, 실패관 실험의 경우도 하중선 변위 선도 대신 COD 선도를 이용하여 J -적분을 구할 수 있으며, 이를 위해서는 COD를 이용한 경우에 대한 소성 η -계수가 제시되어야 한다.

따라서 본 논문의 목적은 하중-COD 선도를 이용하여 실험적으로 J -적분을 구하기 위해 굽힘 하중이 작용하는 원주방향 관통균열 배관에 대한 소성 η -계수를 제시하는 것이다. 소성 η -계수는 한계해석(limit analysis)을 기반으로 한 해석적 방법으로 유도되었으며, 3차원 유한요소해석 결과와 비교하여 타당성을 검증하였다.

* 회원, MPA Stuttgart, University of Stuttgart, Germany

† 책임저자, 회원, 고려대학교 기계공학과

E-mail: kirmy0308@korea.ac.kr

TEL: (02) 3290-3372 FAX: (02) 926-9290

** 회원, 성균관대학교 기계공학부

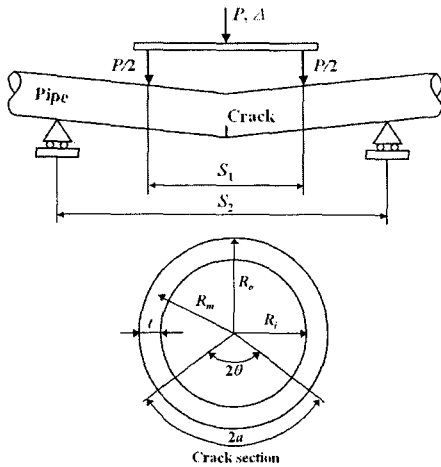


Fig. 1 Circumferential through-wall cracked pipe in four-point bending and relevant variables

2. 하중-COD 선도를 이용한 J 실험법

2.1 하중-하중선 변위 선도를 이용한 기존 J 실험법

Fig. 1은 4점 굽힘 하중이 작용하는 원주방향 관통균열이 존재하는 배관을 도식적으로 나타낸 것이다. 하중(P)-하중선 변위(Δ) 선도를 이용한 기존의 실패관 실험법에서 J -적분은 다음과 같이 구한다.⁽¹¹⁾

$$J = J_{el} + J_{pl} \quad (1)$$

여기서, J_{el} 는 J -적분의 탄성 성분이며, J_{pl} 는 J -적분의 소성 성분이다. J_{el} 은 탄성 응력확대계수 (stress intensity factor) K 를 이용하여 다음과 같이 정의된다.

$$J_{el} = \frac{K^2}{E'} \quad (2)$$

여기서, 평면 응력의 경우 탄성계수 $E'=E$ 이고, 평면 변형률의 경우 $E'=E/(1-\nu^2)$ 이다. ν 는 포아송의 비(Poisson's ratio)이다.

또한 J_{pl} 은 다음과 같이 계산된다.

$$J_{pl} = \int_0^{\Delta_{pl}} P d\Delta_{pl} + R_m \int_{\theta_0}^{\theta} \gamma J_{pl} d\theta \quad (3)$$

여기서,

$$\eta_{pl} = \eta_{pl}(\theta) = -\frac{h'(\theta)}{2R_m h(\theta)} ; \gamma = \gamma(\theta) = \frac{h^*(\theta)}{R_m h'(\theta)} \quad (4)$$

$$h(\theta) = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) - \frac{1}{2}\sin\theta ; h'(\theta) = \frac{dh(\theta)}{d\theta} ; h^*(\theta) = \frac{d^2h(\theta)}{d\theta^2}$$

식 (3)과 식 (4)에서 θ 와 θ_0 는 균열각의 1/2과 초기 균열각의 1/2을 의미한다. 또한 하중선 변위의 소성 성분(Δ_{pl})은 측정된 전체 하중선 변위(Δ)에서 균열이 없는 경우의 탄성 변위($\Delta_{el,uc}$), 균열에 의한 탄성 변위($\Delta_{el,c}$), 그리고 실험기의 컴플라이언스에 의한 탄성 변위($\Delta_{el,m}$)를 아래와 같이 고려하여 구한다.

$$\Delta_{pl} = \Delta - \Delta_{el,uc} - \Delta_{el,c} - \Delta_{el,m} \quad (5)$$

또한, 실험 보정 계수인 η_{pl} 과 γ 는 실험 대상의 소성한계하중(plastic limit load, P_L)을 이용하여 다음과 같이 정의된다.^(11,12)

$$\eta_{pl} = -\frac{\partial P_L}{\partial A} \frac{1}{P_L} ; \gamma = \frac{\partial^2 P_L / \partial a^2}{\partial P_L / \partial a} \quad (6)$$

여기서, A 는 균열면의 면적으로 $A=2R_m t \theta$ 이며, a 는 균열길이의 1/2로 $a=R_m \theta$ 이다.

Fig. 1과 같은 4점 굽힘 하중이 작용하는 원주방향 관통균열 배관의 소성한계하중은 다음과 같이 표현된다.

$$P_L = \frac{16\sigma_o R_m^2 t}{(S_2 - S_1)} \left(\cos\frac{\theta}{2} - \frac{1}{2}\sin\theta \right) \quad (7)$$

여기서, σ_o 는 항복강도(yield strength)이다. 식 (6)과 식 (7)을 이용하면 식 (4)가 유도됨을 확인할 수 있다.

특히 식 (3)의 우측 첫번째 항은 최종 균열 성장량까지의 소성 J -적분과 관계되며, 두번째 항은 균열성장 보정항이다. 본 논문에서는 첫번째 항인 최종 균열 성장량까지의 소성 J -적분만 고려되었다.

2.2 하중-COD 선도를 이용한 새로운 J 실험법

굽힘 하중이 작용하는 원주방향 관통균열 배관의 균열면에서의 정적 가용 응력장(statically admissible stress field)을 Fig. 2(a)에 나타내었다. 또한 Fig. 2(b)와 Fig. 2(c)에 나타낸 바와 같이 배관이 강체 회전(rigid body rotation)을 한다고 가정하면, 하중선 변위(Δ)와 COD(δ)를 회전각(φ)과 중립축 각도(β)의 함수로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta = \frac{1}{2}(S_2 - S_1)\varphi \quad (8)$$

$$\frac{\delta}{2} = R_m(1 + \cos\beta)\varphi \quad (9)$$

굽힘 하중이 작용하는 원주방향 관통균열 배관의 경우 중립축 각도(β)는 균열각(θ)를 이용하여 다음과 같이 정의된다.

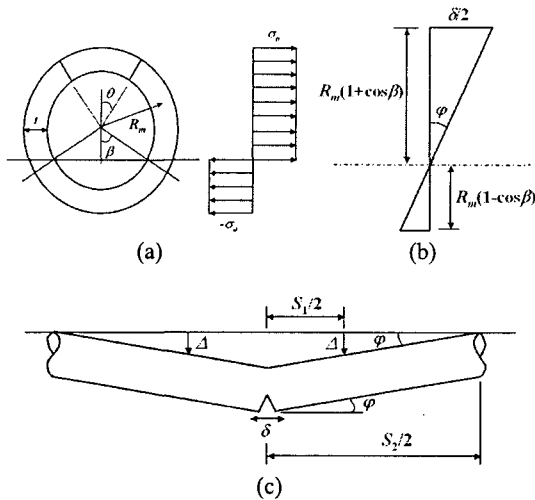


Fig. 2 Kinematically admissible deformation fields

$$\beta = \frac{\pi - \theta}{2} \quad (10)$$

강체-완전 소성 재료의 경우, J -적분은 다음과 같이 표현된다.

$$J = \eta_{pl}^{COD} \cdot \frac{P_L \cdot \delta}{2R_m(\pi - \theta)} = \eta_{pl} \cdot \frac{P_L \cdot \Delta}{2R_m(\pi - \theta)} \quad (11)$$

따라서, 식 (4)와 식 (8)~식 (11)을 이용하면 하중-COD 선도에 대한 소성 η -계수 (η_{pl}^{COD})를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\eta_{pl}^{COD} = \frac{(S_2 - S_1)}{2R_m} \frac{1}{2 \left[1 + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \right]} \eta_{pl} \quad (12)$$

식 (12)에서 알 수 있는 바와 같이 COD를 이용한 소성 η -계수 (η_{pl}^{COD})는 배관과 균열 형상 (R_m , t and θ) 뿐만 아니라 하중 작용점과 지지점 사이의 거리 (S_2 and S_1)에 의존한다. 최종적으로 굽힘 하중이 작용하는 관통균열 배관의 J -적분은 하중-COD 선도를 이용하여 다음과 같이 구한다.

$$J = \frac{K^2}{E'} + \int_0^{\delta_{pl}} \eta_{pl}^{COD} P d\delta_{pl} \quad (13)$$

여기서, δ_{pl} 은 COD의 소성성분을 의미한다. δ_{pl} 결정법은 다음 절에 자세하게 기술하였으며, 식 (12)로 구한 결과는 하중-하중선 변위 선도를 이용한 식 (3)의 우측 첫번째 항으로 구한 결과와 비교될 수 있다.

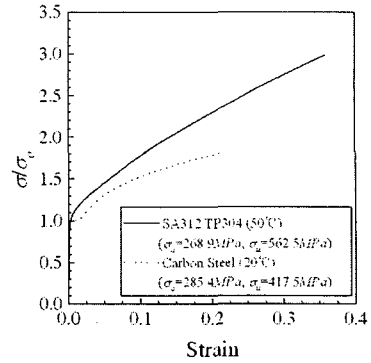


Fig. 3 True stress-strain curve for two materials, SA312 TP304 stainless steel and carbon steel

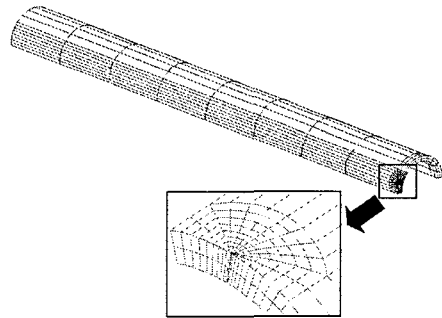


Fig. 4 A 3-D FE mesh for the circumferential through-wall cracked pipe

3. 유한요소해석을 이용한 타당성 검증

3.1 3차원 유한요소해석

본 논문에서 새롭게 제시한 하중-COD 선도를 이용한 J -적분 계산법의 타당성을 검증하기 위해 Fig. 1에 나타낸 4점 굽힘 하중이 작용하는 원주방향 관통균열 배관에 대한 3차원 유한요소해석으로 구한 J -적분과 하중선 변위 선도와 COD 선도에 대한 소성 η -계수로 구한 J -적분 결과를 비교하였다.

재료물성치는 가공경화거동의 영향을 고려하기 위해 2가지를 고려하였다. 첫번째 재료는 연속적인 가공경화거동(continuous hardening)을 보이는 SA312 TP304 스테인리스강이며, 두번째 재료는 불연속적인 가공경화거동(discontinuous hardening)을 보이는 탄소강(carbon steel)이다. 두 경우 모두 상온에서 수행된 실험결과를 사용하였으며, Fig. 3에 각각의 재료에 대한 실제 응력-변형률 곡선을 나타내었다.

배관과 균열길이의 영향을 고려하기 위해서, 배관의 R_m/t 값은 10과 30의 두가지 경우를 고려하였으며, 관통균열의 길이는 배관 원주의 12.5% ($\theta/\pi=0.125$), 25% ($\theta/\pi=0.25$), 그리고 50% ($\theta/\pi=0.5$)의 3가지 경우를 고려하였다.

Fig. 4는 해석에 사용된 대표적인 3차원 유한요소 모델을 나타낸 것이다. 해석 모델의 대칭성을 고려하여 전체의 1/4만을 모델링하였다. 해석에는 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 프로그램⁽¹³⁾을 사용하였으며, 20절점 등계수 사각주요소 (20-nodes isoparametric brick reduced integration element)를 사용하였다. 배관 모델에 사용된 요소의 수는 936개이다. 배관의 두께 방향으로 2개의 요소가 사용되었다.

중분소성이론에 입각한 탄소성(elastic-plastic) 유한요소해석이 수행되었으며, Fig. 3에 나타낸 실제 응력-변형률 데이터를 직접 입력조건으로 사용하였다. 또한 소규모 변형률 해석(small strain analysis)을 적용하였다.

J -적분은 유한요소해석 결과로부터 하중의 함수로 쉽게 계산되며, 앞서 기술한 바와 같이 소성 η -계수를 이용하여 실험적인 방법으로 J -적분을 구하기 위해 하중, 하중선 변위, 그리고 COD값도 유한요소해석으로 결정하였다. 이때 COD는 배관 두께의 중심에서 결정하였다.

3.2 해석결과

전술한 바와 같이 유한요소해석으로 구한 하중, 하중선 변위, 그리고 COD를 이용하여 J -적분을 구하는 방법은 다음과 같이 2가지로 구분할 수 있다. 첫번째 방법은 하중-하중선 변위 선도와 식 (3)을 이용한 기존의 방법이며, 두번째 방법은 본 논문에서 새롭게 제시한 방법으로 하중-COD 선도와 식 (13)을 이용하는 것이다. 하중-COD 선도를 이용하여 본 논문에서 새롭게 제시한 방법의 경우, J -적분은 다음과 같이 구한다.

먼저 유한요소해석으로 구한 전체 COD(δ)는 탄성 성분(δ_{el})과 소성 성분(δ_{pl})을 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$\delta = \delta_{el} + \delta_{pl} \quad (14)$$

탄성 COD는 다음과 같이 정의된다.

$$\delta_{el} = \frac{a}{E} \frac{P(S_2 - S_1)}{\pi R_m^2} V_1 \quad (15)$$

여기서, V_1 은 무차원 형상함수로 참고문헌 (14) 등에서 구할 수 있다. 그러나 R_m/t 가 30인 경우는 형상함수가 주어지지 않기에 탄성 유한요소해석을 수행하여 정의하였으며, 본 논문에서 구한 무차원 형상함수의 타당성을 입증하기 위해 R_m/t 가 10인 경우에 대한 유한요소해석 결과를 기존의 결과⁽¹⁴⁾와 비교하여 Table 1에 나타내었다. Table 1에 나타낸 바와 같이 본 논문에서 구한 무차원 형상함수는 기존의 결과와 0.3% 내에서 잘 일치하여 타당성이 검증되었다.

Table 1 Comparison of the elastic shape factor V_1 from the present FE analysis with existing GE/EPRI solutions⁽¹⁴⁾ for $R_m/t=10$

$\theta\pi$	V_1		
	Present FE results	GE/EPRI	Differences (%)
0.125	1.297	1.301	0.3
0.25	2.109	2.111	0.1
0.5	6.499	6.494	0.1

하중선 변위의 경우는 식 (5)에 나타낸 바와 같이 균열이 없는 경우의 탄성 변위와 실험기의 컴플라이언스에 의한 탄성 변위가 중요할 수 있다. 그러나 COD의 경우는 균열 선단 근처에서 측정되는 값이기 때문에 이와 같은 탄성 성분은 무시할 수 있다.

식 (14)와 식 (15)를 이용하여 δ_{pl} 이 결정되면 J -적분은 식 (12)와 식 (13)으로부터 쉽게 구할 수 있다. 하중-하중선 변위 선도를 이용한 기존의 방법도 COD를 이용한 경우와 같은 절차로 계산된다.

유한요소해석으로 구한 J -적분과 두가지 실험적 방법으로 구한 값의 차이를 평가하기 위해 유한요소 J -적분값과 식 (3)과 식 (13)으로 구한 J -적분의 차이를 다음과 같이 정의하였다.

$$E(\%) = \frac{J^{est} - J^{FE}}{J^{FE}} \times 100 \quad (16)$$

여기서, 상첨자 “est”와 “FE”는 각각 계산식으로 구한 J -적분과 유한요소해석으로 구한 J -적분을 의미한다.

Fig. 5와 Fig. 6은 각각 R_m/t 가 10과 30인 경우에 대해 3가지 다른 균열길이에 대한 J -적분값의 차이를 소성한계하중으로 무차원화된 하중의 함수로 나타낸 것이다. Fig. 5와 Fig. 6에 나타난 바와 같이 하중선 변위 선도를 이용한 기존의 방법(Fig. 5(a) and Fig. 6(a))은 균열길이가 긴 경우에는 정확하였으나 균열길이가 짧아질수록 오차가 커졌다. 그러나 본 논문에서 새롭게 제시한 COD를 이용한 J -적분 계산 결과(Fig. 5(b) and Fig. 6(b))는 균열길이에 따라 오차의 정도가 매우 작은 범위에서 변화하였으며, 균열길이에 관계없이 정확하였다. 이와 같이 하중선 변위 선도를 이용한 기존의 방법이 짧은 균열에 대해 부정확한 이유는 하중선 변위 선도에 대한 소성 η -계수는 가공경화거동의 영향을 받기 때문이다.^(6,9,10) 그러나 COD는 균열 선단에서 정의가 되기 때문에 하중선 변위에 비해 가공경화거동의 영향을 줄일 수 있다. 즉, 실험 도중 발생할 수 있는 시편 후면(back surface)의 변형과 전영역 항복(gross section yielding)에 따른 가공경화현상의 영향으로 인해 하중선 변위 선도를 이용한 소성 η -계수는 부정확한 J -적분 계산 결과를 나타내며, 그 영향은 균열 길이가 짧은 경우에 커진다.

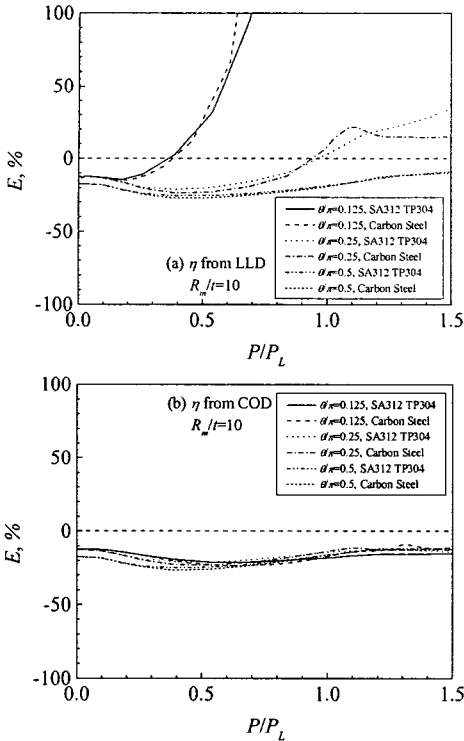


Fig. 5 Variation of the error $E(\%)$ in J estimation for $R_m/t=10$ (a) based on load-load line displacement records and (b) based on load-COD records

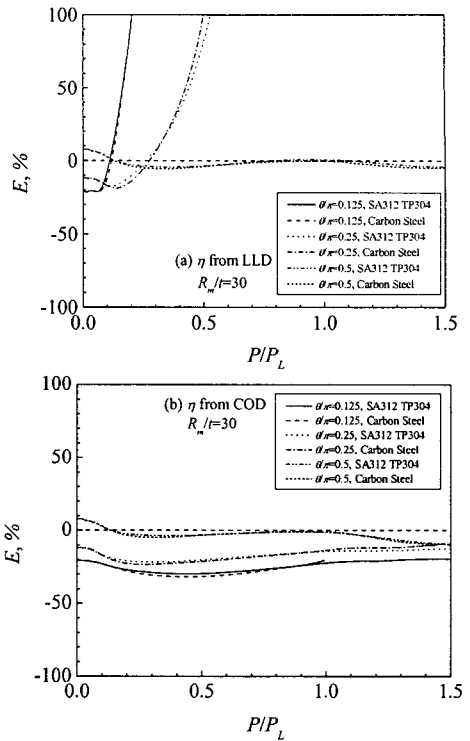


Fig. 6 Variation of the error $E(\%)$ in J estimation for $R_m/t=30$ (a) based on load-load line displacement records and (b) based on load-COD records

4. 결론

본 논문에서는 하중-COD 선도를 이용하여 실험적으로 J -적분을 구하기 위해 굽힘 하중이 작용하는 원주방향 관통균열 배관에 대한 소성 η -계수를 새롭게 제시하였다. 또한 제시된 방법의 타당성을 검증하기 위해 3차원 유한요소해석 결과와 비교하였으며 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 굽힘 하중이 작용하는 원주방향 관통균열 배관에 대한 하중-COD 선도 기반의 소성 η -계수를 한계해석과 정적 가용 응력장, 그리고 강체 회전 가정으로부터 새롭게 제시하였다.

(2) 3차원 유한요소해석을 이용한 타당성 검증 결과, 본 논문에서 새롭게 제시한 방법은 균열길이에 관계없이 안정적이고 정확한 J -적분 계산 결과를 제시하였으나, 하중-하중선 변위를 이용한 기존의 방법은 균열길이가 긴 경우에는 정확하였으나 균열길이가 짧아질수록 오차가 매우 커졌다.

(3) 이상과 같이 본 논문에서 새롭게 제시한 하중-COD 선도 기반의 방법을 이용하면 실패관 실험시 정확하게 J -적분을 구할 수 있으며, 본 논문의 결과는 특히 짧은 균열의 경우에 유용하게 적용될 수 있다.

참고문헌

- (1) USNRC, 1984, "Evaluation of Potential for Pipe Break," NUREG-1061, Vol. 3.
- (2) Wilkowski, G.M., Zahoor, A. and Kanninen, M.F., 1981, "A Plastic Fracture Mechanics Prediction of Fracture Instability in a Circumferentially Cracked Pipe in Bending - Part II. Experimental Verification on a Type 304 Stainless Steel Pipe," *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 103, pp. 359-365.
- (3) Moulin, D. and Le Delliou, P., 1996, "French Experimental Studies of Circumferentially Through-Wall Cracked Austenitic Pipes under Static Bending," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 65, pp. 343-352.
- (4) Miura, N. and Wilkowski, G.M., 1998, "J-R Curves from Circumferentially Throughwall Cracked Pipe Tests Subjected to Combined Bending and Tension - Part II. Experimental and Analytical Validation," *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 120, pp. 412-417.
- (5) Zahoor, A. and Kanninen, M.F., 1981, "A Plastic Fracture Mechanics Prediction of Fracture Instability in a Circumferentially Cracked Pipes in Bending - Part I. J-Integral Analysis," *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 103, pp. 352-358.
- (6) Kirk, M.T. and Dodds, R.H.Jr., 1993, "J and CTOD

- Estimation Equations for Shallow Cracks in Single Edge Notch Bend Specimens," *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 21, No. 4, pp. 228~238.
- (7) Wang, Y.Y. and Gordon, J.R., 1992, "The Limits of Applicability of J and CTOD Estimation Procedures for Shallow-Cracked SENB Specimens," In: *Shallow Crack Fracture Mechanics, Toughness Test and Applications* (Editor: Dawes, M.G.), Cambridge, U.K.
- (8) Kim, Y.J. and Budden, P.J., 2001, "Plastic η -factor Solutions of Homogeneous and Bi-Material SE(T) Specimens for Toughness and Creep Crack Growth Testing," *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 24, pp. 751~760.
- (9) Kim, Y.J. and Schwalbe, K.H., 2001, "On Experimental J Estimation Equations based on CMOD for SE(B) Specimens," *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 29, pp. 67~71.
- (10) Kim, J.S., Cho, S.M., Kim, Y.J. and Kim, Y.J., 2003, "Specimen Thickness and Crack Depth Effects on J Testing and Crack Tip Constraint for Non-Standard Specimen," *Transactions of the KSME(A)*, Vol. 27, No. 9, pp. 1531~1538.
- (11) Chattopadhyay, J., Dutta, B.K. and Kushwaha, H.S., 2001, "Derivation of γ Parameter from Limit Load Expression of Cracked Component to Evaluate J - R Curve," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 78, pp. 401~427.
- (12) Roos, E., Eisele, U. and Silcher, H., 1986, "A Procedure for the Experimental Assessment of the J -Integral by means of Specimens of Different Geometries," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 23, pp. 81~93.
- (13) "ABAQUS User's manual," ABAQUS, Inc., 2003.
- (14) Kumar, V. and German, M.D., 1988, "Elastic-Plastic Fracture Analysis of Through-Wall and Surface Flaws in Cylinders," EPRI NP-5596.