

원주방향 관통균열이 존재하는 배관의 새로운 J -적분 및 COD 계산식 - 인장하중과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 경우

허남수*, 김윤재*, 김영진*

New Engineering J and COD Estimation Method for Circumferential Through-Wall Cracked Pipes - Combined Tension and Bending Load

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

ABSTRACT

In order to apply the Leak-Before-Break (LBB) concept to nuclear piping, accurate estimation of J -integral and crack opening displacement (COD) is essential for complex loading, such as combined tension and bending. This paper proposes a new engineering method to estimate J -integral and the COD for circumferential through-wall cracked pipes subject to combined tension and bending loading. The proposed method to estimate the COD is validated against three published pipe test data, generated from a monotonically increasing bending load with a constant internal pressure, which shows excellent agreements.

Key Words : Circumferential Through-Wall Crack (원주방향 관통균열), Crack Opening Displacement (균열개구변위), Enhanced Reference Stress Method (개선된 참조응력법), J -integral (J -적분), Leak-Before-Break (파단전누설)

1. 서론

원자력발전소 배관에는 압력(인장하중)과 굽힘모멘트가 동시에 작용한다. 따라서 원자력발전소 배관의 파단전누설(Leak-Before-Break; LBB) 개념 적용이나 균열 안정성 평가를 위해서는 압력과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 경우에 대해 J -적분과 균열개구변위(Crack Opening Displacement; COD)를 정확하게 계산하여야 한다.

이를 위해 지난 20여년간 미국 원자력규제위원회(USNRC) 주도의 연구를 통해 원주방향 관통균열(circumferential through-wall crack)이 존재하는

배관에 대한 다수의 공학적 J -적분 및 COD 계산식이 제시된 바 있다^(1,2). 이 가운데 GE/EPRI법이 배관 균열 안정성 평가에 가장 일반적으로 사용되고 있으나 GE/EPRI법은 해석 대상이나 배관 재질 등에 따라 계산 결과가 크게 달라져 신뢰성에 문제가 있다는 것이 계속 지적되어 왔다. 또한 입력 조건으로 사용되는 Ramberg-Osgood 상수가 응력-변형을 곡선의 곡선 적합 구간 및 방법에 따라 변하며 이로 인해 해석 결과도 크게 영향을 받는다는 문제점도 있다. 더욱 중요한 문제 가운데 하나는 GE/EPRI법은 원자력발전소 배관의 가장 일반적인 하중 조건인 압력과 굽힘모멘트가 동시에 작

용하는 경우에 대한 계산식이 제대로 제시되어 있지 않다는 것이다. 뿐만 아니라 새로운 GE/EPRI법의 해를 만들기 위해서는 막대한 유한요소해석이 필요하므로 많은 비용과 시간이 소요되어 현실적으로 거의 불가능한 실정이다. 현재에는 GE/EPRI법이 규제 기관의 인증 하에 누설균열길이(leakage crack length) 계산을 위한 PICEP 프로그램⁽³⁾ 등에 적용되고 있으나 단순히 인장하중의 결과와 굽힘모멘트의 결과를 더하여 J -적분과 COD를 계산하기 때문에 결과가 매우 부정확하다. 따라서 실제적인 하중 조건 하에서 정확하게 J -적분과 COD를 계산할 수 있는 새로운 공학적 계산식(engineering estimation scheme)이 필요하다.

저자들은 최근 순수 인장하중이나 굽힘모멘트가 작용하는 원주방향 관통균열이 존재하는 배관에 대한 새로운 공학적 계산식인 개선된 참조응력(Enhanced Reference Stress; ERS)법을 제안한 바 있다⁽⁴⁾. 또한 실패관 실험 결과와 3차원 유한요소 해석을 이용하여 제안된 공학적 계산식의 타당성도 입증한 바 있다^(4,5). ERS법은 Ramberg-Osgood 곡선 적합을 수행할 필요가 없기 때문에 이로 인한 오차를 줄일 수 있으며, 해석 대상에 대한 최적참조하중(optimized reference load)만 정의되면 간단하고도 정확하게 J -적분과 COD를 구할 수 있기 때문에 확대 적용이 용이하다. 저자들은 이미 ERS법을 복합균열(complex crack)이 존재하는 배관에도 적용하여 ERS법의 확장성과 정확성을 입증한 바 있다⁽⁶⁾.

본 논문의 목적은 ERS법을 인장하중과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 경우에 대해 확대 적용하기 위해 이에 대한 최적참조하중을 제시하고, 이를 이용하여 J -적분과 COD를 계산하는 것이다. 또한 실패관 실험 결과와 비교하여 새롭게 제시하는 공학적 계산식의 타당성을 입증하는 것이다.

2. 인장하중과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 경우의 J -적분 및 COD 계산식

2.1 J -적분 및 COD 계산식

ERS법의 장점은 해석 대상에 대한 탄성 성분과 최적참조하중만 정의하면 J -적분과 COD를 계산할 수 있다는 것이다. 따라서 Fig. 1에 나타낸 바와 같은 인장하중과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 원주방향 관통균열이 존재하는 배관의 J -적분과

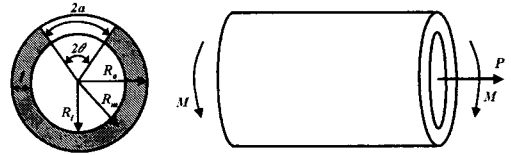


Fig. 1 Circumferential through-wall cracked pipes under combined tension and bending

COD 계산식도 단순 하중(순수 인장하중 또는 굽힘모멘트)이 작용하는 경우의 계산식과 동일하며 J -적분의 경우 다음과 같이 표현된다⁽⁴⁾.

$$\frac{J}{J_e} = \frac{E\varepsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} + \frac{1}{2} \frac{L_r^2 \sigma_{ref}}{E\varepsilon_{ref}} \quad (1)$$

여기서, J_e 는 J -적분의 탄성 성분이며 ε_{ref} 는 참조응력(σ_{ref})에서 정의되는 진 변형률(true strain)이다. L_r 은 소성붕괴 또는 소성역의 성장정도를 나타내는 매개변수로 다음과 같이 정의된다.

$$L_r = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_y} = \frac{Q}{Q_{OR}^c} \quad (2)$$

여기서, σ_y 는 항복강도이며, Q 는 일반화된 작용하중(generalized load, 인장하중 또는 굽힘모멘트)을 의미한다. 또한 Q_{OR}^c 는 인장하중과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 경우의 최적참조하중 또는 최적참조모멘트를 의미한다.

인장하중과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 경우의 COD 계산식은 다음과 같이 표현된다⁽⁴⁾.

$$\frac{\delta}{\delta_e} = \begin{cases} \frac{E\varepsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} + \frac{1}{2} \frac{L_r^2 \sigma_{ref}}{E\varepsilon_{ref}} & \text{for } 0 \leq L_r \leq 1 \\ \left(\frac{\delta}{\delta_e} \right)_{L_r=1} (L_r)^{n_1-1} & \text{for } 1 < L_r \end{cases} \quad (3)$$

여기서, δ_e 는 COD의 탄성 성분이며, $(\delta/\delta_e)_{L_r=1}$ 은 $L_r=1$ 에서 정의되는 (δ/δ_e) 를 의미한다. 또한 식 (3)에서 재료의 가공경화지수(strain hardening exponent)는 다음의 식으로 구한다.

$$n_1 = \frac{\ln[(\varepsilon_{u,t} - \sigma_{u,t}/E)/0.002]}{\ln[\sigma_{u,t}/\sigma_y]} \quad (4)$$

여기서, $\sigma_{u,t}$ 와 $\epsilon_{u,t}$ 는 진 인장강도(true tensile strength)와 그때의 변형률을 의미한다. 식 (4)는 0.2% 순수 소성응력과 인장강도 사이의 응력-변형률 곡선을 곡선 적합한 것이다(4).

식 (1)과 식 (3)을 이용하여 인장하중과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 원주방향 관통균열이 존재하는 배관의 J-적분과 COD를 계산하기 위해서는 앞서 언급한 바와 같이 각각의 탄성 성분 (J_e, δ_e)과 최적참조하중 (Q_{oR}^c)을 정의해 주어야 한다. 따라서 본 논문에서는 인장하중과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 경우에 대한 최적참조하중을 새롭게 제시하였으며 이에 대해서는 2.3절에 자세히 기술한다.

2.2 J-적분과 COD의 탄성 성분

인장하중과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 경우의 J-적분의 탄성 성분은 각각의 하중 조건에 대한 탄성 성분을 다음과 같이 중첩(superposition)하여 구한다.

$$J_e = \frac{(K_I^{T+B})^2}{E} = \frac{(K_I^T + K_I^B)^2}{E} \quad (5)$$

여기서, 상첨자 T와 B는 각각 인장하중과 굽힘모멘트를 의미하며, K_I 과 E 는 각각 응력확대계수(stress intensity factor)와 탄성 계수이다. 응력확대계수는 하중 조건에 따라 핸드북(7-9)으로 제시되어 있으며 다음과 같다.

$$K_I^T = \frac{P}{2\pi R_m t} \cdot \sqrt{\pi a} \cdot F^T \left(\frac{\theta}{\pi}, \frac{R_m}{t} \right) \quad (6)$$

$$K_I^B = \frac{M}{\pi R_m^2 t} \cdot \sqrt{\pi a} \cdot F^B \left(\frac{\theta}{\pi}, \frac{R_m}{t} \right) \quad (7)$$

여기서, F^T 와 F^B 는 배관과 균열의 형상에 의존하는 무차원 상수이며(7-9), a 는 균열길이이다. 또한 R_m 은 배관의 평균 반경이며, t 는 배관 두께, 그리고 θ 는 균열각을 의미한다(Fig. 1).

COD의 탄성 성분도 J-적분과 동일하게 각각의 하중 조건에 대한 탄성 성분을 다음과 같이 중첩하여 구한다.

$$\delta_e = (\delta_e)^T + (\delta_e)^B \quad (8)$$

여기서, $(\delta_e)^T$ 와 $(\delta_e)^B$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$(\delta_e)^T = \frac{2a}{\pi R_m t} \cdot V_1^T \left(\frac{\theta}{\pi}, \frac{R_m}{t} \right) \cdot \frac{P}{E} \quad (9)$$

$$(\delta_e)^B = \frac{4a}{\pi R_m^2 t} \cdot V_1^B \left(\frac{\theta}{\pi}, \frac{R_m}{t} \right) \cdot \frac{M}{E} \quad (10)$$

여기서, V_1^T 와 V_1^B 는 배관과 균열의 형상에 의존하는 무차원 상수이다(7-9).

2.3 최적참조하중

최적참조하중은 소성 한계 하중(plastic limit load)과 관계가 있다. 순수 인장하중이나 순수 굽힘모멘트가 작용하는 배관의 최적참조하중은 소성 한계 하중과 소성 한계 모멘트(plastic limit moment)를 이용하여 다음과 같이 정의된다(4).

$$P_{oR} = \gamma \cdot P_L ; M_{oR} = \gamma \cdot M_L \quad (11)$$

여기서, 소성 한계 하중과 소성 한계 모멘트는 다음과 같이 정의된다.

$$P_L = 2R_m t \sigma_y \left[\pi - \theta - 2 \sin^{-1} \left(\frac{1}{2} \sin \theta \right) \right] \quad (12)$$

$$M_L = 4R_m^2 t \sigma_y \left[\cos \left(\frac{\theta}{2} \right) - \frac{1}{2} \sin \theta \right] \quad (13)$$

또한 식 (11)에서 무차원 상수인 γ 는 균열 길이의 함수로 다음과 같이 정의된다(4).

$$\gamma(\theta) = 0.82 + 0.75 \left(\frac{\theta}{\pi} \right) + 0.42 \left(\frac{\theta}{\pi} \right)^2 \quad \text{for } \theta/\pi \leq 0.5 \quad (14)$$

식 (14)는 유한요소해석 결과를 바탕으로 제시된 것으로서, 이를 산출하는 방법은 참고문헌(10)에 자세히 기술되어 있다.

인장하중과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 경우에 대한 최적참조하중을 정의하기 위해서는 먼저 항복 궤적(yield locus)이 정의되어야 한다. 인장하중과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 경우에 대해서는 여러 가지 항복 궤적이 제시되어 있으며(7,11), 각 항복 궤적은 서로 결과가 유사하다. 본 논문에서는 인장하중과 굽힘모멘트가 동시에 작용

하는 경우의 최적참조하중을 제시하기 위해 다음의 항복 궤적을 이용하였으며, 이는 유한요소해석을 통해 타당성이 입증되어 다양한 경우에 적용되고 있다⁽⁷⁾.

$$\left(\frac{P}{P_{OR}}\right)^2 + \frac{M}{M_{OR}} = 1 \quad (15)$$

여기서, P_{OR} 과 M_{OR} 은 식 (11)에서 정의된 단순하중인 경우의 최적참조하중이다. 이러한 항복 궤적을 이용하여 인장하중과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 경우의 최적참조하중을 구하는 방법을 서술하면 다음과 같다.

인장하중과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 경우는 하중의 작용 상태에 따라 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 첫 번째는 인장하중과 굽힘모멘트가 같은 비율로 동시에 작용하는 경우(proportional loading)로 이때 작용 하중비는 다음과 같이 정의된다.

$$\lambda = \frac{M}{P \cdot R_m} \quad (16)$$

식 (16)을 식 (15)의 항복 궤적에 대입하면 첫 번째 경우에 대한 최적참조모멘트를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Q_{OR}^c = M_{OR}^c = \frac{1}{2} \left[-\frac{\lambda^2 R_m^2 P_{OR}^2}{M_{OR}} + \sqrt{\left(\frac{\lambda^2 R_m^2 P_{OR}^2}{M_{OR}}\right)^2 + 4\lambda^2 R_m^2 P_{OR}^2} \right] \quad (17)$$

또한 인장하중의 함수로 J -적분과 COD를 계산할 경우에는 식 (16)의 관계를 이용하여 최적참조하중을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Q_{OR}^c = P_{OR}^c = \frac{M_{OR}^c}{\lambda \cdot R_m} \quad (18)$$

두 번째는 하나의 하중은 고정되어 있고, 다른 하나의 하중만 증가하는 경우(non-proportional loading)이다. 원자력발전소 배관은 일정 운전 압력이 가해진 상태에서 굽힘모멘트가 증가하게 되므로 만약 압력(인장하중)이 고정되어 있다면, 식

(15)의 항복 궤적에 압력에 의한 작용하중(P_{app})을 대입하여 다음과 같이 최적참조모멘트를 구할 수 있다.

$$Q_{OR}^c = M_{OR}^c = M_{OR} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{P_{app}}{P_{OR}} \right)^2 \right\} \quad (19)$$

3. 실패관 실험 결과와의 비교

3.1 배관 실험 데이터

본 논문에서 새롭게 제시한 인장하중과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 경우에 대한 COD 계산식의 타당성을 입증하기 위해서 미국 Battelle 연구소에서 손상 배관 프로그램(degraded piping program)과 제2차 배관 건전성 국제공동연구(second international piping integrity research group program)의 일환으로 수행한 실패관 실험 결과⁽¹²⁾와 비교하였다. 전체 3개의 실험 데이터와 비교하였으며 이를 정리하여 Table 1에 나타내었다. 배관에 존재하는 관통균열의 길이는 원주의 12%~37%이며, 실험은 모두 가압경수로형 원자력발전소의 정상운전온도인 288°C에서 수행되었다.

실험에서 하중은 Table 1에 나타난 바와 같이 먼저 내압(p_a)이 가해진 후에 4점 굽힘법(4-point bending method)을 이용하여 굽힘모멘트가 작용되었다. 배관의 재료물성치는 Table 2에 정리하였다.

3.2 비교 결과

앞서 언급한 바와 같이 실패관 실험에서는 압력은 일정하게 고정되어 있고, 굽힘모멘트를 증가시켰다. 따라서 식 (3)을 이용하여 COD를 구할 때에는 식 (19)의 최적참조모멘트를 식 (2)에 대입하였다. 식 (4)의 가공경화지수는 Table 2에 정리하여 나타내었다. 또한 COD의 탄성 성분은 참고문헌(7)에 제시되어 있는 결과를 사용하였다. 앞서 언급한 바와 같이 탄성해는 여러 문헌⁽⁷⁻⁹⁾에 제시되어 있으나 해의 차이가 매우 작기 때문에 해석 결과에는 영향을 미치지 않는다.

Fig. 2~Fig. 4는 ERS법으로 구한 결과와 실패관 실험 결과를 비교하여 나타난 것이다. 해석 결과에 나타난 바와 같이 본 논문에서 새롭게 제시하는 ERS법으로 구한 COD는 실패관 실험 결과와 잘 일치하였다.

Table 1 Summary of published pipe test data for combined pressure (tension) and bending⁽¹²⁾

Test	Material	p_a (MPa)	$2R_o$ (mm)	t (mm)	θ/π
4131-1	SA376 TP304	17.2	166.4	13.4	0.37
4131-3	SA333 Gr. 6	12.4	274.1	18.7	0.37
1-8	A106 Gr. B	15.5	399.3	26.2	0.12

Table 2 Summary of material data used in the pipe test, and relevant ERS method

Test	E (GPa)	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	ERS Parameters	
				ϵ_u	n_1
4131-1	179.3	130	450	0.42	3.24
4131-3	179.3	239	600	0.17	4.03
1-8	193.1	216.5	506.1	0.15	4.27

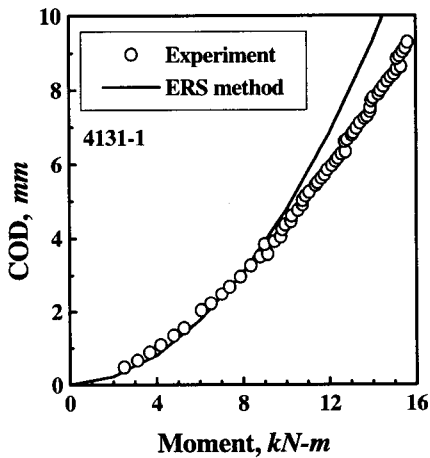


Fig. 2 Comparison of the CODs from pipe test data, 4131-1 (See Table 1), with those estimated using the proposed ERS method

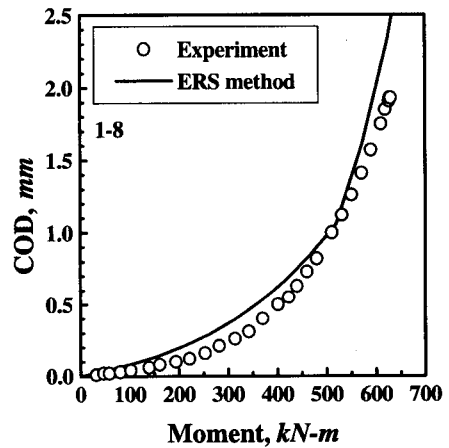


Fig. 4 Comparison of the CODs from pipe test data, 1-8 (See Table 1), with those estimated using the proposed ERS method

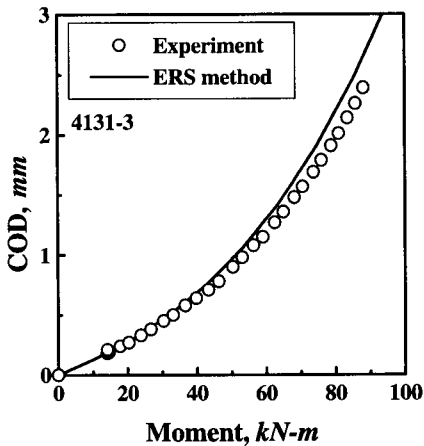


Fig. 3 Comparison of the CODs from pipe test data, 4131-3 (See Table 1), with those estimated using the proposed ERS method

기존의 공학적 계산식으로 구한 결과와 실험 결과와의 비교는 참고문헌 (13)에 제시되어 있으며, 그 결과를 보면 계산 결과가 매우 부정확하다는 것을 알 수 있다. 그리고 현재 가장 일반적으로 사용되고 있는 GE/EPRI법은 이와 같은 일정 압력 하에서 굽힘모멘트가 작용하는 실제 원자력 발전소 하중 조건에 대한 계산식이 제시되어있지 않기 때문에 적용이 불가능하다. 그러므로 본 논문에서 새롭게 제시된 ERS법을 사용하면 매우 정확하게 COD를 계산할 수 있으며 향후 원자력발전소 배관의 정확한 LBB 해석을 위해 ERS법이 널리 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

J-적분의 경우는 실험적으로 측정할 수 없기 때문에 본 논문에서는 계산식만을 제시하고 타당성은 입증하지 않았으며, 별도의 논문⁽¹⁴⁾에서 3차원 유한요소해석을 이용하여 J-적분 계산식의 타

당성을 입증하고 COD 계산식의 타당성도 추가로 입증하였다.

4. 결론

본 논문에서는 저자들이 새롭게 제시한 ERS 법⁴⁾을 확대 적용하여 인장하중과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 경우에 대한 새로운 공학적 J-적분 및 COD 계산식을 제시하였으며, 계산 결과를 실패관 실험 결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 인장하중과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 원주방향 관통균열이 존재하는 배관의 J-적분과 COD를 정확하게 계산할 수 있는 공학적 계산식을 ERS법을 기반으로 제시하였다.

(2) ERS법으로 구한 COD는 실패관 실험 결과와 잘 일치하여 제시된 계산식의 타당성이 입증되었다.

(3) 기존의 공학적 계산식들은 원자력발전소 배관의 기본 하중 조건인 인장하중과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 경우를 고려할 수 없으나 본 논문에서 새롭게 제시한 계산식은 이를 정확하게 고려할 수 있으므로 향후 LBB 해석에 널리 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

후기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- Rahman, S., Brust, F.W., Ghadiali, N., and Wilkowski, G., "Crack-Opening-Area Analyses for Circumferential Through-Wall Cracks in Pipes - Part I : Analysis Models," International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 75, pp. 357~373, 1998.
- Brust, F.W., "Approximate Methods for Fracture Analyses of Through-Wall Cracked Pipes," NUREG/CR-4853, 1987.
- Norris, D.M., and Chexal, B., "PICEP : Pipe Crack Evaluation Program," EPRI NP-3596-SR, 1987.
- 김윤재, 허남수, 김영진, "원주방향 관통균열이 존재하는 배관의 J-적분 및 COD 계산을 위한 새로운 공학적 계산식," 대한기계학회 논문집 A권, 제25권, 제3호, pp. 548~553, 2001.
- 허남수, 김윤재, 김영진, "원자력배관의 파단전누설 해석을 위한 개선된 참조응력법의 수치해석적 검증," 대한기계학회 논문집 A권, 제25권, 제4호, pp. 741~747, 2001.
- 허남수, 김윤재, 김영진, "복합균열이 존재하는 배관의 균열개구변위 계산을 위한 새로운 공학적 계산식," 대한기계학회 논문집 A권, 투고중, 2001.
- Kumar, V., and German, M.D., "Elastic-Plastic Fracture Analysis of Through-Wall and Surface Flaws in Cylinders," EPRI NP-5596, 1988.
- Zahoor, A. "Ductile Fracture Handbook," Novetech Corp., 1991.
- France, C.C., Hooton, D.G., and Sharples, J.K., "New Stress Intensity Factor and Crack Opening Area Solutions for Through-Wall Cracks in Pipes and Cylinders," AEA Technology Report AEAT-0643, 1996.
- Kim, Y.J., "Reference Stress Approximations for J and COD of Circumferential Through-Wall Cracked Pipes," EPD/GEN/REP/0462/99, British Energy Generation Ltd., 2000.
- Miller, A.G., "Review of Limit Loads of Structures Containing Defects," International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 32, pp. 191~327, 1998.
- "Pipe Fracture Test Data," Pipe Fracture Encyclopedia, Vol. 3, Battelle, 1997.
- Rahman, S., Brust, F.W., Ghadiali, N., and Wilkowski, G., "Crack-Opening-Area Analyses for Circumferential Through-Wall Cracks in Pipes - Part II : Model Validations," International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 75, pp. 375~396, 1998.
- 허남수, 김윤재, 김영진, "복합하중이 작용하는 원자력 배관의 파단전누설 해석을 위한 개선된 참조응력법의 수치해석적 검증," 한국정밀공학회지, 제18권, 제6호, pp. 67~73, 2001.