

개선된 참조응력법을 이용한 복합균열이 존재하는 배관의 균열개구변위 계산

허남수* · 김윤재* · 김영진†

Crack Opening Displacement Analysis of Complex Cracked Pipes based on Enhanced Reference Stress Method

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

Key Words : Crack Opening Displacement (균열개구변위), Complex Cracked Pipe (복합균열이 존재하는 배관), Leak-Before-Break (파단전누설), Enhanced Reference Stress Method (개선된 참조응력법)

Abstract

An engineering estimation equation for the crack opening displacement (COD) is proposed for a complex cracked pipe, based on the reference stress approach. To define the reference stress, a simple plastic limit load analysis for the complex cracked pipe subjected to combined bending and tension is performed considering the crack closure effect in the compressive-stressed region. Comparison with ten published test data and the results from existing method shows that the present method not only reduces non-conservatism associated with the existing method, but also provides consistent and overall satisfactory results.

1. 서 론

복합균열(complex crack)은 주로 부식 배관에서 발견되며,⁽¹⁾ 전체 원주에 발생한 표면균열(surface crack)과 부분 관통균열(through-wall crack)로 이루어져 있다. 파단전누설(Leak-Before-Break; LBB) 개념을 복합균열이 존재하는 배관에 적용하기 위해서는 배관의 하중 지지 능력(load-carrying capacity)과 감지가 가능한 누설균열길이(detectable leakage crack length)를 예측하여야 한다. 이를 위해서는 탄소성 파괴역학 매개변수인 J-적분과 균열개구변위(Crack Opening Displacement; COD)를 정확하게 계산하는 것이 필수적이다.

최근에는 3차원 유한요소해석이 J-적분 및 COD 계산을 위해 사용되고 있으나 복합균열의 경우는 형상이 매우 복잡하기 때문에 유한요소해석이 거

의 불가능하다. 따라서 쉽게 사용이 가능하면서도 정확한 공학적 계산식(engineering estimation scheme)이 요구되고 있다.

기존에는 전체 원주에 존재하는 표면균열의 깊이만큼 두께가 감소된 배관에 단순 관통균열이 존재한다고 가정하여 관통균열에 대한 공학적 계산식을 적용해 왔으나 해석 결과가 매우 부정확하다. 또한 Rahman등⁽²⁾이 제안한 LBB.ENG2법이 비교적 정확한 것으로 알려져 있으나 이 방법 역시 압축 하중 작용부의 균열 닫힘 효과(crack closure effect) 등을 무시하기 때문에 COD가 지나치게 크게 계산되며, 계산결과가 입력조건인 Ramberg-Osgood 상수에 크게 영향을 받는다는 문제도 있다.⁽³⁾ 저자들은 전보⁽⁴⁾에서 J-적분 및 COD 계산을 위한 새로운 공학적 계산식인 개선된 참조응력(Enhanced Reference Stress; ERS)법을 기존의 참조응력법⁽⁵⁾을 수정하여 제시하고, 실패관 실험 결과 및 3차원 유한요소해석 결과와 비교하여 그 타당성도 입증한 바 있다. ERS법은 Ramberg-Osgood 곡선 적합을 수행할 필요가 없기 때문에 이로 인한 오차를 줄일 수 있으며, 해석 대상에 대한 최적참조하중

* 회원, 성균관대학교 기계공학부

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail : yjkim@yurim.skku.ac.kr

TEL : (031)290-5274 FAX : (031)290-5276

(optimised reference load)만 정의되면 간단하고도 정확하게 J -적분과 COD를 구할 수 있기 때문에 확대 적용이 용이하다.

본 논문의 목적은 ERS법을 확대 적용하기 위해 복합균열이 존재하는 배관의 최적참조하중식을 제시하고, 이를 이용하여 COD를 계산하는 것이다. 또한 실패관 실험 결과 및 LBB.ENG2법으로 계산한 결과와 비교하여 복합균열에 대해 새롭게 제시된 COD 계산식의 타당성을 입증하는 것이다.

2. 복합균열이 존재하는 배관의 COD 계산식

2.1 COD 계산식

ERS법의 장점은 J -적분이나 COD 계산식은 해석 대상에 관계없이 동일하며, 최적참조하중만 새롭게 정의하면 COD를 계산할 수 있다는 것이다. 따라서 복합균열에 대한 ERS법의 COD 계산식도 단순 관통균열의 경우와 동일하며 다음과 같이 표현된다.⁽⁴⁾

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

여기서, δ_c 는 COD의 탄성 성분이며, $(\delta/\delta_c)_{L_r=1}$ 은 $L_r=1$ 에서 정의되는 (δ/δ_c) 를 의미한다. L_r 은 소성봉괴 또는 소성역의 성장 정도를 나타내는 매개변수로 참조 응력인 σ_{ref} 와 다음과 같은 관계가 있다.

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

식 (2)에서 σ_y 는 항복강도이며 Q 는 작용 하중(인장 하중 혹은 굽힘 모멘트)을 의미한다. Q_{OR}^* 는 최적참조하중을 의미하며, Fig. 1에 나타난 바와 같은 복합균열에 대해 ERS법을 확대 적용하기 위해서는 이를 새롭게 제시하여야 한다. 복합균열에 대한 최적참조하중식의 유도는 2.2절에 자세하게 기술하였다. 또한 식 (1)에서 가공경화지수 n_1 은 다음의 식으로부터 구한다.

$$n_1 = \frac{\ln[(\varepsilon_{u,t} - \sigma_{u,t}/E)/0.002]}{\ln[\sigma_{u,t}/\sigma_y]} \quad (3)$$

여기서, $\sigma_{u,t}$ 와 $\varepsilon_{u,t}$ 는 진 인장강도(true tensile strength)와 그때의 변형률을 의미한다. 식 (3)은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 0.2% 항복강도와 인장강도 사이의 응력-변형률 곡선을 멱승법(power-law method)으로 곡선 적합한 것이다.

2.2 복합균열의 최적참조하중식

인장 하중(P)이나 굽힘 모멘트(M)가 작용하는 원주방향 관통균열이 존재하는 배관의 최적참조하중은 소성 한계 하중(plastic limit load)과 다음과 같은 관계가 있다.⁽⁴⁾

$$M_{OR}^* = \gamma(\theta) \cdot M_{OR} \quad \text{for pure bending moment} \quad (4)$$

$$P_{OR}^* = \gamma(\theta) \cdot P_{OR} \quad \text{for axial tension} \quad (5)$$

여기서, M_{OR} 과 P_{OR} 은 각각 소성 한계 모멘트와 소성 한계 하중이며, M_{OR}^* 와 P_{OR}^* 는 각각 최적참조모멘트와 최적참조하중이다. 복합균열에 대한 최적참조하중식을 정의하기 위해서는 식 (4)와 식 (5)에 나타난 바와 같이 γ 와 소성 한계 하중을 유도해야 한다.

원주방향 관통균열이 존재하는 배관의 경우 무차원 상수인 γ 는 균열 길이의 함수로 다음과 같이 정의된다.⁽⁴⁾

$$\gamma(\theta) = 0.82 + 0.75 \left(\frac{\theta}{\pi} \right) + 0.42 \left(\frac{\theta}{\pi} \right)^2 \quad \text{for } \theta/\pi \leq 0.5 \quad (6)$$

식 (6)은 실패관 실험 결과 및 유한요소해석 결과와 비교하여 타당성이 입증된 바 있으며,^(4,6) 복합균열이 존재하는 배관의 경우도 기본적으로 관통균열이 존재하는 배관의 경우와 형상이 같기 때문에 본 논문에서는 식 (6)이 복합균열에도 적용될 수 있다고 가정하였다. 이에 대한 타당성은 3장에서 실제 실험 결과와의 비교를 통해 입증하였다.

복합균열에 대한 소성 한계 하중식을 유도하기 위해서는 압축하중에 의한 균열 닫힘 현상을 고려해야 한다. Fig. 3은 소성 한계 하중식을 정의하기 위해 본 논문에서 고려된 복합균열부의 응력 상태를 나타낸 것으로 인장 하중이 작용하는 부분에서는 표면균열부가 하중 지지 능력과 무관하기 때문에 이의 영향을 무시하고 잔여 두께인 t_n 이 사용되었으며, 압축 하중이 작용하는 부분에서는 표면균열부의 하중 지지 능력을 고려하여 전체 배관 두께인 t 가 사용되었다. Fig. 3에 나타난 응력 상태

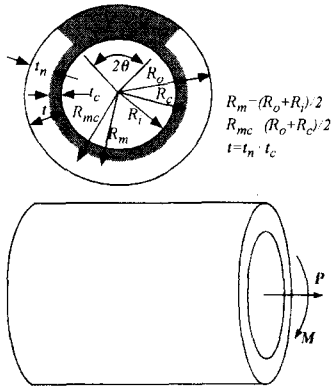


Fig. 1 Geometry and relevant dimensions for a complex cracked pipe in tension and bending

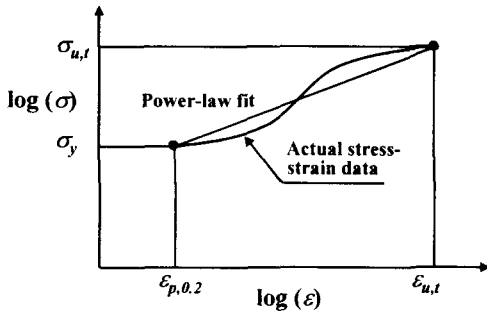


Fig. 2 Schematic illustration to determine the strain hardening exponent for the proposed COD estimation ($\epsilon_{p,0.2}$ denotes 0.2% plastic strain)

에서 힘과 모멘트의 평형을 고려하면 다음의 식이 유도된다.

$$\frac{P}{2} = R_{mc} \sigma_y t_n [\pi - \theta - (1 + \eta) \xi] \quad (7)$$

$$\frac{M}{2} = R_{mc}^2 \sigma_y t_n [(1 + \eta) \sin \xi - \sin \theta] \quad (8)$$

여기서, ξ 는 중립축(neutral axis)의 위치를 정의하기 위한 매개변수(Fig. 3)이며, R_{mc} 는 유효 평균 반경(effective mean radius)이다. 본 논문에서는 해석의 편의성을 고려하여 R_{mc} 를 하중 상태와 관계없이 배관의 평균 반경으로 가정하였다. 또한 η 는 배관 전체 두께와 잔여 두께의 비로 다음과 같이 정의된다.

$$\eta = \frac{t}{t_n} (\geq 1) \quad (9)$$

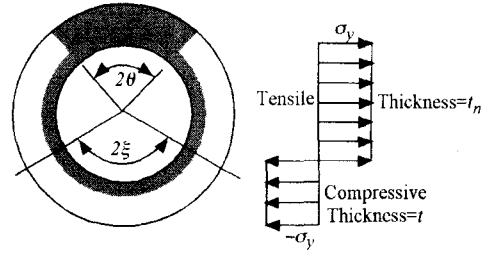


Fig. 3 Assumed stress distribution for the limit load analysis of complex cracked pipes in combined bending and tension. Other relevant dimensions are shown in Fig. 1

식 (7)과 식 (8)에서 ξ 를 소거하면 인장 하중과 굽힘 모멘트가 작용하는 복합균열이 존재하는 배관의 항복 궤적(yield locus)은 다음과 같이 정의된다.

$$\hat{m} = -\frac{1}{2} \sin \theta + \frac{1}{2} (1 + \eta) \sin \left(\frac{\pi(1 - \hat{n}) - \theta}{1 + \eta} \right) \quad (10)$$

여기서, \hat{n} 과 \hat{m} 은 다음과 같이 정의된다.

$$\hat{n} \equiv \frac{P}{2\pi R_m \sigma_y t_n} ; \quad \hat{m} \equiv \frac{M}{4R_m^2 \sigma_y t_n} \quad (11)$$

위 식에서 표면균열이 없다고 가정하면 ($t_n = t, \eta = 1$) 식 (10)은 다음과 같이 표현되며 이는 Miller⁽⁷⁾가 제시한 순수 관통균열에 대한 항복 궤적과 일치한다.

$$\hat{m} = -\frac{1}{2} \sin \theta + \cos \left(\frac{\pi \hat{n} + \theta}{2} \right) \quad (12)$$

따라서 식 (10)과 식 (11)을 이용하면 순수 인장 하중이 작용하는 경우($\hat{m} = 0$)와 순수 굽힘 모멘트가 작용하는 경우($\hat{n} = 0$)에 대한 최적참조하중식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Q_{oR}^* = P_{oR}^* = \gamma(\theta) \cdot 2\pi R_{mc} \sigma_y t_n \left[1 - \frac{\theta}{\pi} - \frac{(1 + \eta)}{\pi} \sin^{-1} \left[\frac{\sin \theta}{(1 + \eta)} \right] \right] \quad (13)$$

$$Q_{oR}^* = M_{oR}^* = \gamma(\theta) \cdot 4R_{mc}^2 \sigma_y t_n \left[-\frac{1}{2} \sin \theta + \frac{(1 + \eta)}{2} \sin \left(\frac{\pi - \theta}{1 + \eta} \right) \right] \quad (14)$$

식 (13)과 식 (14)에 제시된 최적참조하중을

Table 1 Summary of pipe test data⁽⁸⁾

Test I.D.	Material	D_o (mm)	t (mm)	t_e/t	R_m/t	θ/π
4113-1	TP304	168	14.48	0.32	5.3	0.37
4113-2	TP304	168	14.48	0.63	5.3	0.37
4113-3	Inconel 600	168	11.05	0.34	7.1	0.37
4113-4	Inconel 600	168	11.05	0.61	7.1	0.37
4113-5	A106 Gr. B	168	14.22	0.31	5.41	0.37
4113-6	A106 Gr. B	168	14.22	0.64	5.41	0.37
4114-1	A106 Gr. B	165	12.73	0.47	5.98	0.37
4114-2	TP304	166	13.46	0.32	5.67	0.37
4114-3	TP304	413	26.16	0.34	7.39	0.373
4114-4	TP304	413	26.16	0.34	7.39	0.373

*4114-3과 4114-4는 반복 실험(duplicate test)임.

식 (1)과 식 (2)에 적용하면 복합균열이 존재하는 배관의 COD를 계산할 수 있다.

3. 실패관 실험 결과와의 비교 및 토의

3.1 배관 실험 데이터

본 논문에서 제시한 복합균열에 대한 COD 계산식의 타당성을 입증하기 위해서 미국 Battelle 연구소에서 손상 배관 프로그램(degraded piping program)의 일환으로 수행한 복합균열이 존재하는 배관에 대한 실패관 실험 결과⁽⁸⁾와 비교하였다. 전체 10개의 실험 데이터와 비교하였으며 이를 정리하여 Table 1에 나타내었다. 전체 배관 원주에 존재하는 표면균열의 길이는 배관 두께의 약 31%~64%이며, 관통균열의 길이는 모두 원주의 37%이다. 또한 실험은 모두 가압경수로형 원자력 발전소의 정상운전온도인 288°C에서 수행되었으며, 4점 굽힘법(4-point bending method)을 이용하여 순수 굽힘 모멘트가 작용되었다. 배관의 인장 물성치는 Table 2에 정리하였다.

3.2 ERS 법을 이용한 COD 계산

본 논문에서 제시한 ERS법으로 COD를 계산하는 경우에는 식 (1)을 사용하여 구하였으며, 가공

Table 2 Summary of the material tensile data

Test I.D.	E (GPa)	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	R-O Parameters		ERS Parameters	
				α	n	ϵ_u	n_1
4113-1	183.3	139	450	5.3	3.8	0.41	3.26
4113-2							
4114-2							
4113-3	221.4	197	610	5.4	3.9	0.39	3.48
4113-4							
4113-5	198.4	320	621	1.2	5.9	0.13	5.20
4113-6							
4114-1							
4114-3	179.5	186	461	2.8	5.5	0.39	3.98
4114-4							

경화지수는 식 (3)으로 구하였다. 계산된 가공경화 지수를 Table 2에 정리하여 나타냈으며, 최적참조 하중은 식 (14)를 사용하여 구하였다. 또한 COD의 탄성 성분은 연성 파괴 핸드북⁽⁹⁾의 결과를 사용하였다.

3.3 비교 결과

Fig. 4~Fig. 13은 실패관 실험 결과와 본 논문에서 제시하는 복합균열에 대한 ERS법으로 구한 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 참고로 Fig. 4~Fig. 13에 현재 복합균열 배관 해석에 가장 정확한 값을 준다고 알려진 LBB.ENG2법으로 계산된 COD 값들도 같이 나타내었다. LBB.ENG2법은 균열로 인한 배관의 콤플라이언스를 모사하기 위해 두께가 감소된 상당배관에 대한 공학적 에너지 해석을 통해 J -적분과 COD를 구하는 간략 해석법이며, 더욱 상세한 설명과 식은 참고문헌 (2)에 잘 정리되어 있다. Fig. 4~Fig. 13에 나타낸 LBB.ENG2법에 의한 COD값들은 저자들이 계산한 값이 아니고, 참고문헌⁽³⁾에 제시된 결과를 그대로 인용하였다. 참고로 LBB.ENG2법으로 COD를 계산할 때에는 Ramberg-Osgood 상수를 구하기 위해 응력-변형률 곡선에서 1% 변형률부터 $0.8\epsilon_u$ 까지의 구간을 이용하여 곡선 적합이 수행되었으며,⁽³⁾ 각각의 재료에 대한 Ramberg-Osgood 상수(R-O Parameters)를 Table 2에 정리하였다.

그림에 나타난 바와 같이 LBB.ENG2법으로 구한 결과보다 ERS법으로 구한 결과가 실험 결과와 더 잘 일치하였다. 또한 LBB.ENG2법으로 구한 결과는 해석 조건에 따라 실험 결과와의 편차가

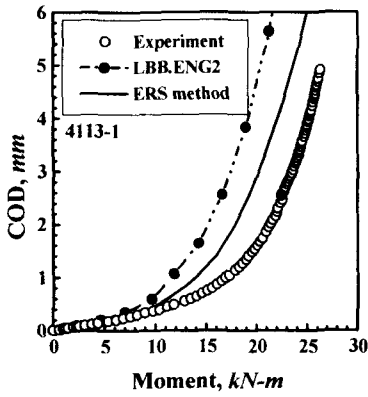


Fig. 4 Comparison of the CODs from pipe test data, 4113-1, with those estimated from the proposed ERS method and the LBB.ENG2 method (extracted directly from (3))

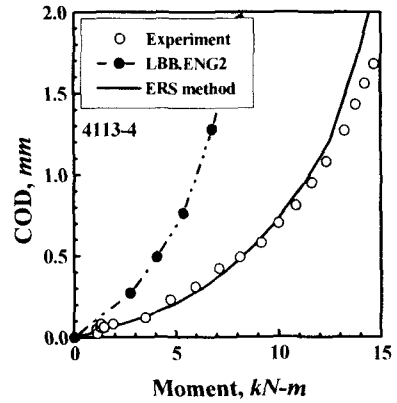


Fig. 7 Comparison of the CODs from pipe test data, 4113-4, with those estimated from the proposed ERS method and the LBB.ENG2 method (extracted directly from (3))

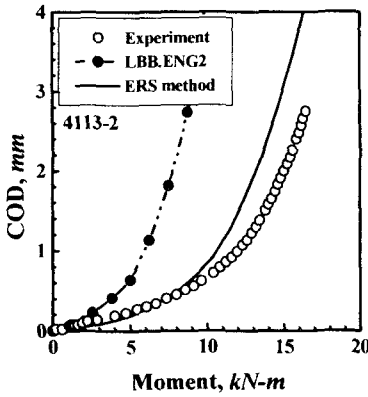


Fig. 5 Comparison of the CODs from pipe test data, 4113-2, with those estimated from the proposed ERS method and the LBB.ENG2 method (extracted directly from (3))

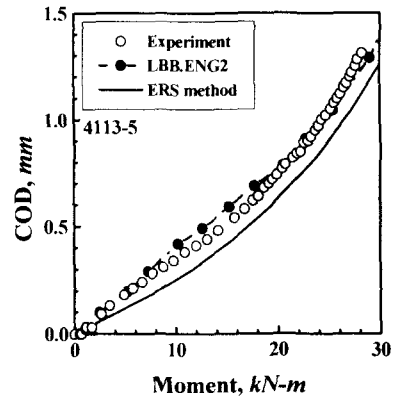


Fig. 8 Comparison of the CODs from pipe test data, 4113-5, with those estimated from the proposed ERS method and the LBB.ENG2 method (extracted directly from (3))

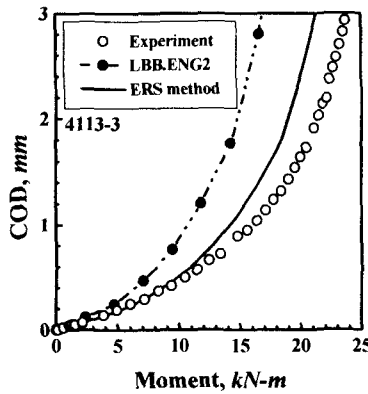


Fig. 6 Comparison of the CODs from pipe test data, 4113-3, with those estimated from the proposed ERS method and the LBB.ENG2 method (extracted directly from (3))

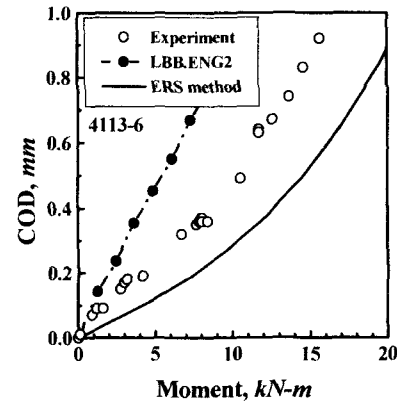


Fig. 9 Comparison of the CODs from pipe test data, 4113-6, with those estimated from the proposed ERS method and the LBB.ENG2 method (extracted directly from (3))

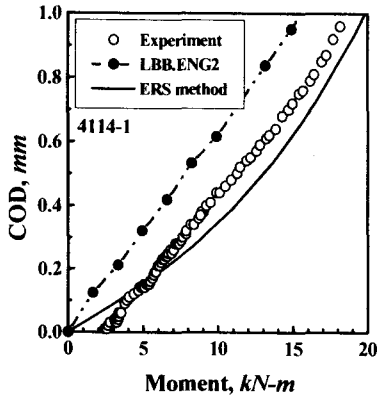


Fig. 10 Comparison of the CODs from pipe test data, 4114-1, with those estimated from the proposed ERS method and the LBB.ENG2 method (extracted directly from (3))

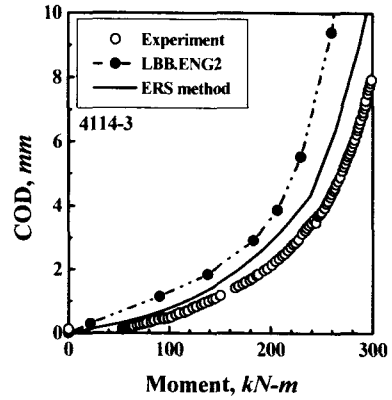


Fig. 12 Comparison of the CODs from pipe test data, 4114-3, with those estimated from the proposed ERS method and the LBB.ENG2 method (extracted directly from (3))

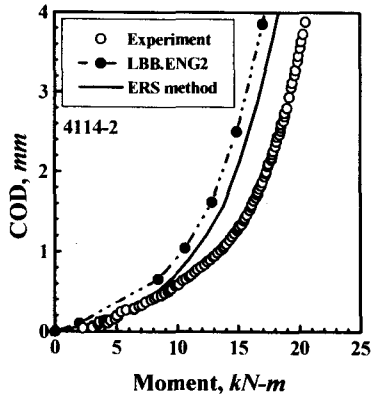


Fig. 11 Comparison of the CODs from pipe test data, 4114-2, with those estimated from the proposed ERS method and the LBB.ENG2 method (extracted directly from (3))

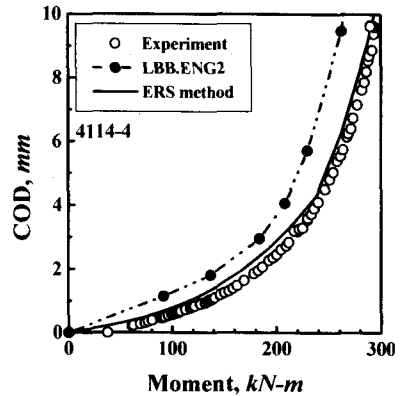


Fig. 13 Comparison of the CODs from pipe test data, 4114-4, with those estimated from the proposed ERS method and the LBB.ENG2 method (extracted directly from (3))

매우 심하였으나 ERS법으로 구한 결과는 해석 조건에 관계없이 거의 일관적인 경향을 보였다.

LBB 해석 측면에서는 누설률이 작게 계산되는 것이 보수적이므로, COD는 주어진 하중에서 작게 계산되어야 보수적이다. 따라서, 두 방법(ERS법과 LBB.ENG2법) 모두 전반적으로 COD 계산 결과가 비보수적(non-conservative)인 것으로 나타났으나, ERS법이 LBB.ENG2법 보다는 비보수성의 정도가 작았다. 따라서 향후 복합균열에 대한 COD 계산 시 본 논문에서 새롭게 제시한 COD 계산식을 사용하면 기존의 방법에 비해 정확한 계산이 가능하다.

4. 결론

본 논문에서는 저자들이 진보⁽⁴⁾에서 제시한

ERS법을 확대 적용하여 복합균열에 대한 공학적 COD 계산식을 제시하였으며, 실패관 실험 결과 및 기존의 계산식을 이용한 결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 인장 하중과 굽힘 모멘트가 작용하는 복합균열이 존재하는 배관의 COD를 정확하게 계산할 수 있는 공학적 계산식을 ERS법을 기반으로 제시하였다.

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

(3) LBB.ENG2법으로 계산된 COD를 실패관 실험 결과와 비교한 결과 ERS법에 비해 매우 부정확하였다. 따라서 향후 복합균열에 대한 LBB 해석 시 본 논문에서 새롭게 제시한 ERS법이 널리

적용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Kramer, G. and Papaspyropoulos, V., 1986, "An Assessment of Circumferentially Complex-Cracked Pipe Subjected to Bending," NUREG/CR-4687.
- (2) Rahman, S., Brust, F.W., Ghadiali, N. and Wilkowski, G., 1998, "Crack-Opening-Area Analyses for Circumferential Through-Wall Cracks in Pipes – Part I : Analytical Models," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 75, pp. 357~373.
- (3) Rahman, S., Brust, F.W., Ghadiali, N. and Wilkowski, G., 1998, "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.
- (4) 김윤재, 허남수, 김영진, 2001, "원주방향 관통 균열이 존재하는 배관의 J-적분 및 COD 계산을 위한 새로운 공학적 계산식," 대한기계학회 논문집 A권, 제25권, 제3호, pp. 548~553.
- (5) Ainsworth, R.A., 1984, "The Assessment of Defects in Structures of Strain Hardening Materials," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 19, pp. 633~642.
- (6) 허남수, 김윤재, 김영진, 2001, "원자력 배관의 파단전누설 해석을 위한 개선된 참조응력법의 수치해석적 검증," 대한기계학회 논문집 A권, 제25권, 제4호, pp. 741~747.
- (7) Miller, A.G., 1988, "Review of Limit Loads of Structures Containing Defects," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 32, pp. 191~327.
- (8) Battelle, 1997, "Pipe Fracture Test Data," *Pipe Fracture Encyclopedia*, Vol. 3.
- (9) Zahoor, A., 1991, "Ductile Fracture Handbook," Novetech Corp.