

〈 논문 〉

소성거동을 고려한 원주방향 관통균열 열림에 미치는 압력유기굽힘의 구속효과 평가 모델

김진원*

(2006년 4월 14일 접수, 2006년 6월 16일 심사완료)

Evaluation Model for Restraint Effect of Pressure Induced Bending on the Circumferential Through-Wall Crack Opening Considering Plastic Behavior

Jin-Weon Kim

Key Words: Pressure Induced Bending(압력유기굽힘), Restraint Effect(구속효과), Crack Opening (균열열림), Plastic Behavior(소성거동), Evaluation Model(평가모델)

Abstract

This paper presents the model for evaluating restraint effect of pressure induced bending (PIB) on the circumferential through-wall crack opening displacement (COD), which considers plastic behavior of crack. This study performed three-dimensional elastic-plastic finite element (FE) analyses for different crack angle, restraint length, pipe geometry, stress level, and material conditions, and evaluated the influence of each parameter on the PIB restraint effect on COD. Based on these evaluations and additional perfectly-plastic FE analyses, a closed-form model to evaluate the restraint effect of PIB on the plastic crack opening of circumferential through-wall crack, was proposed as functions of crack angle, restraint length, radius to thickness ratio, axial stress corresponding to an internal pressure, and normalized COD evaluated from linear-elastic crack opening condition.

1. 서론

기존의 원주방향 관통균열에 대한 균열열림 평가는 배관의 압력유기굽힘(Pressure Induced Bending, PIB)에 대한 구속 효과를 고려하지 않고 있다.^(1,2) 이러한 평가 절차는 회전이 구속된 실제 배관계통의 관통균열에 대한 균열열림크기(Crack Opening Displacement, COD)를 과대평가하게 된다.⁽³⁾ 기존의 평가 방법에서 COD에 대한 과대평가는 고에너지 배관의 파단전누설(Leak-Before-Break, LBB) 평가에서 결과의 신뢰성을 저하시키는 원인으로 지적되고 있다.^(3~5) 왜냐하면, 원주방향 관통균열에 대한 COD의 과대평가는 LBB 평가에서 누설허용

균열크기를 작게 평가하고, 누설허용 균열크기의 과소평가는 균열의 안정성을 실제보다 높게 예측하기 때문이다.

따라서, 원주방향 관통균열의 균열열림에 미치는 PIB의 구속효과를 정확히 파악하는 것은 LBB 평가의 신뢰성 확보 측면에서 매우 중요하며, 이를 정량적으로 평가하기 위한 모델 개발에 노력이 집중되고 있다. 국제공동연구로 수행된 IPIRG-2⁽⁵⁾와 BINP 프로그램⁽⁶⁾에서는 다양한 결함크기와 배관형상 및 구속조건에서 탄성 유한요소 해석을 수행하고, 이를 바탕으로 closed-form 형태의 평가 모델을 제안하였다.^(6,7) 제안된 평가 모델에서는 PIB에 의한 균열열림을 탄성거동으로 가정하고, 균열열림에 미치는 구속 효과를 균열크기와 구속거리의 함수로 나타내었다. 그러나, 원전 배관에서 원주방향 관통균열의 열림은 운전하중 조건에서 탄소성 거동을 보이며, 실제 LBB

* 회원, 조선대학교 원자력공학과

E-mail : jwkim@chosun.ac.kr

TEL : (062)230-7109 FAX : (062)232-9218

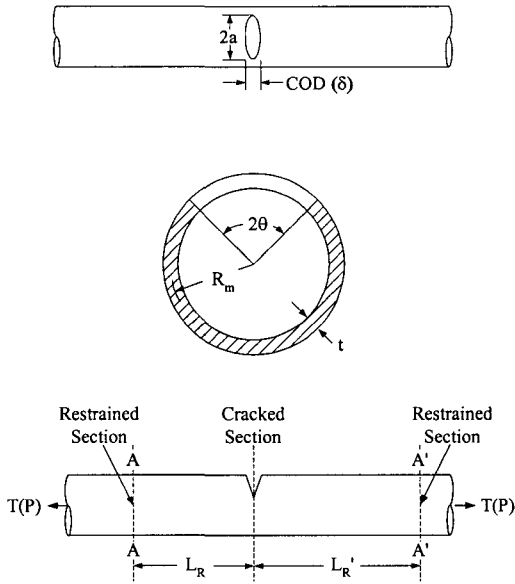


Fig. 1 Schematics of a through-wall cracked pipe under conditions of PIB restrained

해석에서도 누설허용 균열크기는 탄소성 균열 거동을 고려하여 평가되고 있다.⁽⁸⁾ 최근 수행된 연구 결과에 의하면 균열의 탄소성 거동을 고려하는 경우, 원주방향 관통균열의 열림에 미치는 PIB 구속 효과가 탄성 거동을 고려하는 경우에 비해 더욱 큰 것으로 평가되었다.^(9,10) 또한, 균열 열림에 미치는 구속 효과는 작용 내압의 크기에 영향을 크게 받는 것으로 나타났다.

따라서, 본 연구에서는 균열의 소성거동이 고려된 원주방향 관통균열의 열림에 미치는 PIB 구속 효과 평가 모델을 제시하고자 한다. 이를 위해 다양한 조건에서 탄소성 유한요소해석을 수행하여, 균열크기, 구속조건, 배관 형상, 그리고 재료물성치에 따른 PIB의 구속 효과를 파악하였다. 이들 결과와 탄성-완전소성 조건에서 수행된 유한요소해석 결과를 기초로 closed-form의 평가 모델을 제시하였다.

2. PIB 구속효과 평가를 위한 한요소해석

2.1 평가 방법 및 절차

소성거동이 고려된 균열열림에 미치는 PIB 구속효과를 평가하기 위해서 Fig. 1과 같이 평균 반

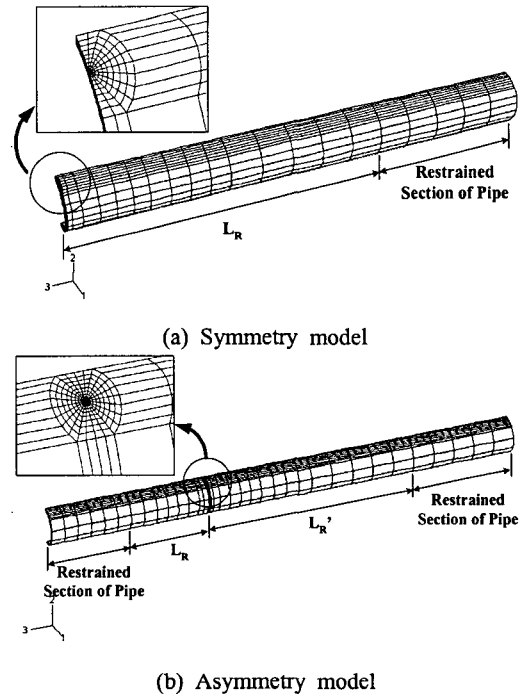


Fig. 2 Finite element models for COD calculation

지름이 R_m 이고, 두께가 t 인 배관에 균열크기가 2θ 인 관통균열이 존재하고, 균열을 중심으로 임의의 거리(L_R, L_R')에서 회전이 구속된 직관을 고려하였다. 균열열림에 미치는 PIB 구속효과는 식 (1)에 나타난 것과 같이 배관이 구속된 상태에서 평가된 COD(δ_R)를 구속되지 않은 상태에서 평가된 COD(δ_F)로 무차원화한 값($r_{COD,P}$)으로 정량화

$$r_{COD,P} = \delta_R / \delta_F \quad (1)$$

하였다. 따라서, $r_{COD,P}$ 가 감소할수록 COD에 미치는 PIB 구속효과가 크고, $r_{COD,P}$ 가 1에 접근할수록 구속효과가 미미한 것을 의미한다. 구속 상태에 따른 COD는 탄소성 유한요소해석을 이용하여 각각 평가하였다. 여기서, δ_F 는 기존의 평가 방법과 같이 회전이 자유로운 상태에서 배관 단면 (Fig. 1의 A-A & A'-A')에 인장응력만을 작용시켜 계산하였다. δ_R 은 균열로부터 구속거리(L_R 과 L_R') 밖의 배관부를 직접 구속한 상태에서 배관 단면에 인장응력을 작용시켜 계산하였다. 작용하중으로는 내압에 등가한 축방향 인장응력만을 고려하였으며, 균열 면에 작용되는 압력, 반경 방향의 압력, 그리고 굽힘하중은 배제하였다.

2.2 유한요소해석

각 구속 조건에 대한 COD 평가에는 Fig. 2에 나타난 것과 같이 균열을 중심으로 구속거리가 동일한 경우($L_R=L_R'$)와 동일하지 않는 경우($L_R \neq L_R'$)의 2종류 유한요소모델이 적용되었다. 대칭모델의 경우[Fig. 2(a)], 균열 잔여면(대칭면)에서 축방향의 변위를 구속하고, 균열에서 L_R 만큼 떨어진 위치의 요소 면(A-A)에 인장응력을 작용시켰다. 비대칭 모델[Fig. 2(b)]에서는 균열에서 L_R 과 L_R' 만큼 떨어진 위치의 요소 면(A-A & A'-A')에 인장응력을 동시에 작용시켰다. 두 모델에서 회전에 대한 배관의 구속은 균열에서 구속거리(L_R 과 L_R') 밖의 일정 길이 부분에서 모든 절점의 축방향 변위를 제외한 모든 자유도를 구속함으로써 모사하였다. 구속 경계조건을 적용하기 위한 배관의 길이는 Fig. 2에 나타난 것과 같이 $10D_m$ 으로 구속부 길이가 δ_R 에 영향을 미치지 않도록 충분히 길게 고려하였다. 두 모델 모두 20 절점의 육면체요소가 적용되었으며, 두께 방향으로 2개의 요소를 배열하였다. 해석에는 범용 유한요소 프로그램인 ABAQUS code⁽¹¹⁾를 사용하였으며, COD는 균열 중앙부 중심 절점의 축방향 변위로부터 계산하였다.

3. PIB 구속효과에 미치는 주요 영향 인자 분석

탄소성 균열거동 고려시 COD에 미치는 PIB 구속 효과 평가에서 각 인자들에 대한 영향을 파악하기 위해서, 다양한 균열크기, 구속길이, 배관

형상, 그리고 재료물성치 조건에서 탄소성 유한요소해석이 수행되었다. Table 1은 해석에서 고려된 배관 형상, 균열크기, 구속길이를 정리한 것이다. 배관 형상, 균열크기, 구속길이에 대한 영향 평가에는 재료물성치로 Fig. 3의 Ref. 곡선이 적용되었으며, 재료물성치에 따른 영향 평가에는 Fig. 3의 각 곡선들이 적용되었다. Fig. 3의 진응력-진변형률 곡선에는 원전 배관 재료로 사용되는 오스테나이트 스테인리스강, 주조 스테인리스강, 그리고 페라이트강의 모재와 용접재 등이 모두 포함되어 있다. 탄성-완전소성 조건의 해석에는 Ref. 곡선과 같은 영률 (200GPa)과 항복응력 (200MPa)을 갖는 완전소성 곡선이 고려되었다.

3.1 해석 인자에 따른 PIB 구속효과 평가

Fig. 4는 서로 다른 균열크기와 구속길이에서 작용응력에 따른 $r_{COD,P}$ 를 나타낸 것이다. 전체적

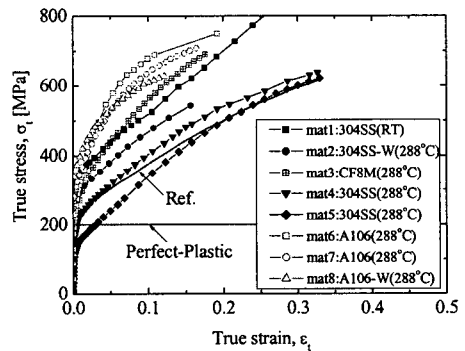


Fig. 3 True stress - true strain curves used in FE analysis

Table 1 Analysis matrix considered in the present study

D_m (mm)	R_m/t	Crack Length(θ/π)			Restraint Length(L_R/D_m)				L_R/D_m
					1	5	10	20	
323.9	5	1/8	1/4	1/2	✓	✓	✓	✓	1
323.9	5	1/8	1/4	1/2		✓	✓	✓	5
323.9	5	1/8	1/4	1/2			✓	✓	10
323.9	5	1/8	1/4	1/2				✓	20
323.9	10	1/8	1/4	1/2	✓		✓	✓	1
323.9	10	1/8	1/4	1/2		✓	✓	✓	5
323.9	10	1/8	1/4	1/2			✓	✓	10
323.9	10	1/8	1/4	1/2				✓	20
323.9	20	1/8	1/4	1/2	✓	✓	✓	✓	1
323.9	20	1/8	1/4	1/2		✓	✓	✓	5
323.9	20	1/8	1/4	1/2			✓	✓	10
323.9	20	1/8	1/4	1/2				✓	20

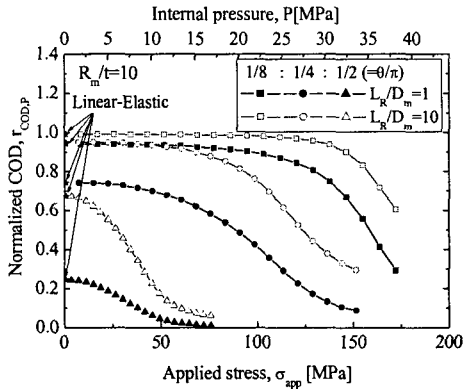


Fig. 4 Effect of crack length, restraint length, and applied stress on the normalized COD

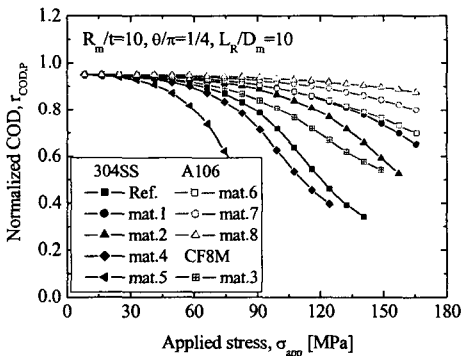


Fig. 5 Effect of tensile properties of material on the normalized COD

으로 $r_{COD,P}$ 는 균열이 클수록, 구속길이가 짧을수록 작은 값을 보였다. 즉, 탄소성거동 균열에서 COD에 미치는 PIB 구속효과는 균열이 크고 구속길이가 짧을수록 크게 나타났다. 균열크기와 구속길이에 따른 이러한 경향은 탄성거동 균열에 대한 기존의 연구 결과와 같은 경향이다.^(3,5,6) 다만, 탄소성 균열 거동이 고려됨에 따라 탄성 거동 균열과 달리 작용응력의 크기에 따라 $r_{COD,P}$ 가 변하며, 일정 수준 이상의 응력이 작용하는 경우에 $r_{COD,P}$ 가 크게 감소하였다. 즉, 균열의 소성거동을 고려하는 경우에는 작용응력이 증가함에 따라 COD에 미치는 PIB의 구속효과가 크게 증가하였다. 또한, $r_{COD,P}$ 가 감소하기 시작하는 응력의 크기는 균열이 클수록 낮아졌으나, 구속길이에

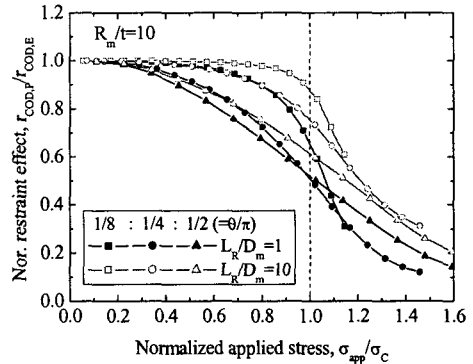


Fig. 6 Effect crack length and restraint length on σ_{app}/σ_C vs. $r_{COD,P}/r_{COD,E}$

거의 영향을 받지 않았다. 한편, Fig. 4에서 작용응력이 영(0)에 접근함에 따라 $r_{COD,P}$ 는 탄성 균열 거동 조건에서 평가된 무차원 COD($r_{COD,E}$) 값에 수렴하였다.

Fig. 5는 PIB 구속효과에 미치는 재료물성치의 영향을 살펴보기 위해, Fig. 3의 진응력-진변형률 곡선에 따른 $r_{COD,P}$ 를 작용응력에 따라 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 $r_{COD,P}$ 는 해석에서 고려된 진응력-진변형률 곡선에 따라 큰 차이를 보였다. 일정한 작용응력 조건에서 $r_{COD,P}$ 의 크기를 비교해보면, 재료의 항복응력 크기에 거의 비례하는 것을 알 수 있다.

선행 연구결과에 의하면, 탄소성 해석 결과에서 작용응력과 균열크기에 따른 이러한 거동은 $r_{COD,P}$ 가 균열 잔여면의 응력상태에 직접적으로 영향을 받기 때문이다.⁽¹⁰⁾ 즉, 균열 잔여면의 응력상태가 탄성영역에서 소성영역으로 천이할 때, 균열부의 강성이 크게 저하되어 $r_{COD,P}$ 가 크게 감소하는 것이다. 일정한 조건에서 $r_{COD,P}$ 의 크기가 재료의 항복응력 크기와 비례하는 것도 이러한 설명을 잘 뒷받침해 주고 있다.

3.2 무차원화를 통한 영향 인자 간략화

해석 결과에서 균열의 탄소성 거동을 고려하는 경우에는 COD에 미치는 PIB의 구속효과가 균열 잔여면의 응력상태에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한, 작용응력이 감소함에 따라 $r_{COD,P}$ 가 $r_{COD,E}$ 에 접근하였다. 따라서, 여기서는 작용응력을 식 (2)와 같이 정의되는 원주방향 관통균열 배관에 대한 한계응력 (σ_C)으로 무차원화하고,

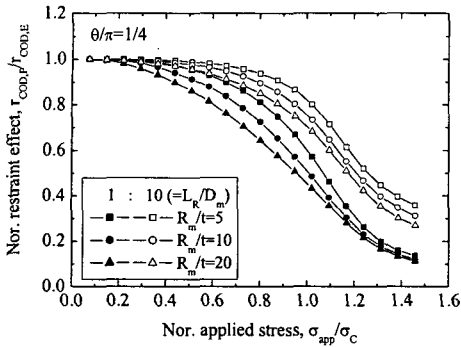


Fig. 7 Effect of radius to thickness ratio on σ_{app}/σ_C vs. $r_{COD,P}/r_{COD,E}$

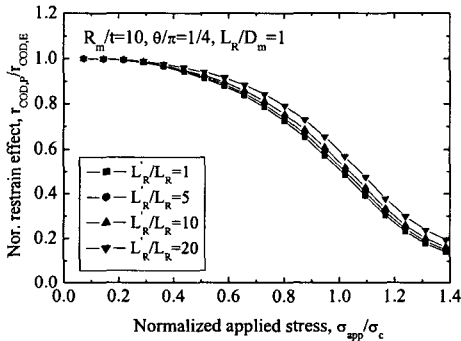


Fig. 8 Effect of asymmetry restraint length on σ_{app}/σ_C vs. $r_{COD,P}/r_{COD,E}$

$r_{COD,P}$ 를 $r_{COD,E}$ 로 나누어 줌으로써 탄소성 조건에

$$\sigma_C = \frac{\sigma_y}{\pi} [\pi - \theta - 2\sin^{-1}(0.5\sin\theta)] \quad (2)$$

서 평가된 COD에 미치는 PIB의 구속효과를 탄성 거동 균열의 COD에 미치는 PIB의 구속효과에 대한 상대적인 값으로 나타내었다. 여기서, σ_y 는 재료의 항복응력, θ 는 Fig. 1에서 정의된 균열의 반각이다. Figs. 6~8은 무차원화 후 균열 크기와 구속길이, 배관의 R_m/t , 그리고 비대칭 구속길이에 따른 COD에 미치는 PIB 구속효과를 무차원 작용응력(σ_{app}/σ_C)에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 무차원화를 통해 균열크기와 구속길이에 따른 데이터의 편차는 크게 감소하였다. Figs. 6과 7에서 σ_{app}/σ_C 에 따른 $r_{COD,P}/r_{COD,E}$ 의 전체적인 변화 경향은 균열 크기

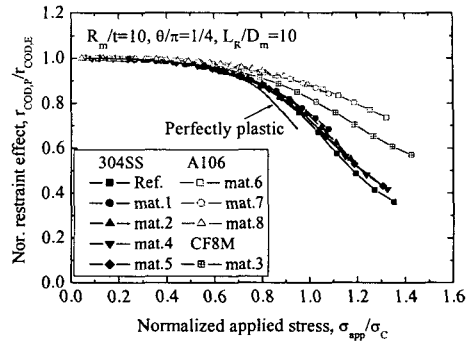


Fig. 9 Effect of tensile properties of material on σ_{app}/σ_C vs. $r_{COD,P}/r_{COD,E}$

에 의해 지배되었으며, 구속길이와 R_m/t 에 따라 정량적인 크기 차이만을 보였다. 비대칭 구속길이에 따른 차이는 무차원화를 통해 크게 감소하였다 (Fig. 8). 따라서, 균열열림에 미치는 PIB 구속효과 평가 모델에서 무차원 작용응력, 균열크기, 구속길이, 그리고 R_m/t 는 주요 인자로 고려하여야 하며, 비대칭 구속길이의 영향은 무시될 수 있을 것이다.

한편, Fig. 9에서 알 수 있는 것과 같이 재료물성치에 따른 차이는 무차원화를 통해 크게 감소하여, 동종 재료의 경우에는 진응력-진변형을 곡선의 차이가 클지라도 거의 유사한 $r_{COD,P}/r_{COD,E}$ 를 보였다. 그러나, 재료의 종류가 다른 경우에는 작용응력이 증가됨에 따라 $r_{COD,P}/r_{COD,E}$ 의 차이가 뚜렷하였다. 이러한 차이는 재료 종류에 따른 가공경화 특성의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 재료의 소성거동을 완전소성으로 가정함으로써 재료의 가공경화 특성에 따른 영향을 배제하고자 한다. Fig. 9에 나타낸 것과 같이 작용응력이 작은 경우 ($\sigma_{app}/\sigma_C < 0.5$)에는 재료의 소성거동을 완전소성으로 가정할지라도 가공경화 거동을 고려하여 평가한 결과와 거의 유사한 값을 보였다. 작용응력이 증가함에 따라 완전소성 가정에 따른 차이가 증가하였으나, 균열크기, 구속길이, 그리고 R_m/t 에 따른 $r_{COD,P}/r_{COD,E}$ 의 의존성은 가공경화를 고려한 경우와 같았다. 또한, 모든 조건에서 항상 낮은 $r_{COD,P}/r_{COD,E}$ 를 보였다. 따라서, $r_{COD,P}/r_{COD,E}$ 평가에서 재료의 소성거동을 완전소성으로 가정

하는 경우, PIB 구속효과에 미치는 각 인자들의 영향은 적절히 고려되면서 항상 보수적인 평가 결과를 줄 수 있을 것이다.

4. PIB 구속효과 평가 모델

4.1 평가 모델의 유도

앞 절에서 $r_{COD,P}$ 를 $r_{COD,E}$ 로 나누고 내압에 등가한 작용응력을 균열 배관에 대한 한계응력으로 무차원화 함으로써, 작용응력, 균열크기, 구속길이, R_m/t 가 PIB 구속효과에 영향을 미치는 주요 인자인 것으로 확인되었다. 또한, 재료의 인장물 성치에 따른 영향은 작용응력에 대한 무차원화와 재료의 소성 거동을 완전소성으로 가정함으로써 단순화되었다. 따라서, 탄소성 거동이 고려된 COD에 미치는 PIB 구속효과는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_{COD,P}/r_{COD,E} = f\left(\frac{\sigma_{app}}{\sigma_C}, \frac{\theta}{\pi}, \frac{L_R}{D_m}, \frac{R_m}{t}\right) \quad (3)$$

여기서, $r_{COD,P}/r_{COD,E}$ 와 영향 인자 간의 상관관계는 탄성-완전소성 조건에서 수행된 유한요소해석 결과를 curve-fitting하여 구할 수 있다. 따라서, 다양한 조건에서 탄성-완전소성 해석을 수행하였다. 해석 조건은 비대칭 구속조건을 고려하지 않고 구속길이를 $L_R/D_m=40$ 을 추가한 것을 제외하면, 앞서 수행된 Table 1의 조건과 동일하다.

식 (4)는 해석 결과의 curve-fitting을 통해 얻은 평가 모델을 나타낸 것이다.

$$\frac{r_{COD,P}}{r_{COD,E}} = 2 - \exp\left[A\left(\frac{\sigma_{app}}{\sigma_C}\right)^B\right] \quad \text{for } \frac{\sigma_{app}}{\sigma_C} \leq 1.0 \quad (4)$$

$$\frac{r_{COD,P}}{r_{COD,E}} = 0 \quad \text{for } \frac{\sigma_{app}}{\sigma_C} > 1.0$$

여기서, 상수 A 와 B 는 균열크기, 구속길이, R_m/t 의 함수로 각각 curve fitting을 통해 다음과 같이 주어졌다.

$$A = \alpha_0 + \alpha_1\left(\frac{\theta}{\pi}\right) + \alpha_2\left(\frac{\theta}{\pi}\right)^2 \quad (5)$$

$$\alpha_i = \alpha_{i0} + \alpha_{i1}\ln\left(\frac{L_R}{D_m}\right) + \alpha_{i2}\ln^2\left(\frac{L_R}{D_m}\right) \quad i = 0, 1, 2$$

$$\alpha_{ij} = a_{ij} + b_{ij}\left(\frac{R_m}{t}\right) + c_{ij}\left(\frac{R_m}{t}\right)^2 \quad i, j = 0, 1, 2$$

$$B = 1/\left(\beta_0 + \beta_1\left(\frac{\theta}{\pi}\right) + \beta_2\left(\frac{\theta}{\pi}\right)^2\right) \quad (6)$$

Table 2 Constants of α_{ij} and β_{ij} in Eq. (5) and Eq. (6)

Parameter	Constant		
a_{00}, b_{00}, c_{00}	-0.21508,	0.06082,	-0.00147
a_{01}, b_{01}, c_{01}	-0.03544,	-0.01256,	5.77533×10^{-4}
a_{02}, b_{02}, c_{03}	0.02114,	-0.00120,	-3.18667×10^{-5}
a_{10}, b_{10}, c_{10}	3.02600,	-0.16596,	0.00337
a_{11}, b_{11}, c_{11}	-0.43042,	0.11201,	-0.00418
a_{12}, b_{12}, c_{12}	-0.10104,	-0.00463,	5.14067×10^{-4}
a_{20}, b_{20}, c_{20}	-3.90640,	0.18586,	-0.00356
a_{21}, b_{21}, c_{21}	1.05512,	-0.17493,	0.00615
a_{22}, b_{22}, c_{22}	0.03891,	0.01553,	-9.32933×10^{-4}
u_{00}, v_{00}, w_{00}	0.01754,	-0.00138,	1.23000×10^{-4}
u_{01}, v_{01}, w_{01}	0.00613,	-0.01483,	2.21200×10^{-4}
u_{02}, v_{02}, w_{02}	0.00364,	-0.01261,	4.84133×10^{-4}
u_{10}, v_{10}, w_{10}	0.67554,	-0.01968,	4.05200×10^{-4}
u_{11}, v_{11}, w_{11}	0.08664,	0.29072,	-0.00608
u_{12}, v_{12}, w_{12}	-0.13326,	-0.00234,	1.81800×10^{-4}
u_{20}, v_{20}, w_{20}	-0.43146,	0.11374,	-0.00274
u_{21}, v_{21}, w_{21}	0.00810,	-0.48323,	0.01035
u_{22}, v_{22}, w_{22}	-0.27404,	0.00883,	-1.10867×10^{-4}

$$\beta_i = \beta_{i0} + \beta_{i1}\exp\left[\beta_{i2}\left(\frac{L_R}{D_m}\right)\right] \quad i = 0, 1, 2$$

$$\beta_{ij} = u_{ij} + v_{ij}\left(\frac{R_m}{t}\right) + w_{ij}\left(\frac{R_m}{t}\right)^2 \quad i, j = 0, 1, 2$$

여기서, 상수 $a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, u_{ij}, v_{ij}, w_{ij}$ 는 Table 2로 주어지며, $0.125 \leq \theta/\pi \leq 0.5$, $1.0 \leq L_R/D_m \leq 40$, $5 \leq R_m/t \leq 20$ 의 범위에서 구한 것이다. 따라서, 균열의 소성거동을 고려한 COD에 미치는 PIB의 구속효과 ($r_{COD,P}$)는 식 (4)에 $r_{COD,E}$ 를 대입하여 구할 수 있고, $r_{COD,E}$ 는 탄성 균열거동을 가정하여 유도된 기존의 평가 모델로부터 계산될 수 있다.⁽⁶⁾

4.2 평가 모델의 검증

4.2.1 평가 모델의 신뢰성 확인

제안된 평가 모델의 신뢰성을 확인하기 위해서, 모델에 의해 예측된 결과와 유한요소해석 결과를 비교하였다. Fig. 10은 각각의 영향 인자에 따른 비교 결과를 나타낸 것이다. 균열크기, 구속길이, R_m/t 등에 관계없이 전체적으로 $\sigma_{app}/\sigma_C=0 \sim 1.0$ 범위에서 모델에 의해 예측된 결과가 해석 결과와 상당히 정확하게 일치하는 것을 알 수 있다. 이 정도의 정확도는 평가 모델의 개발에 고

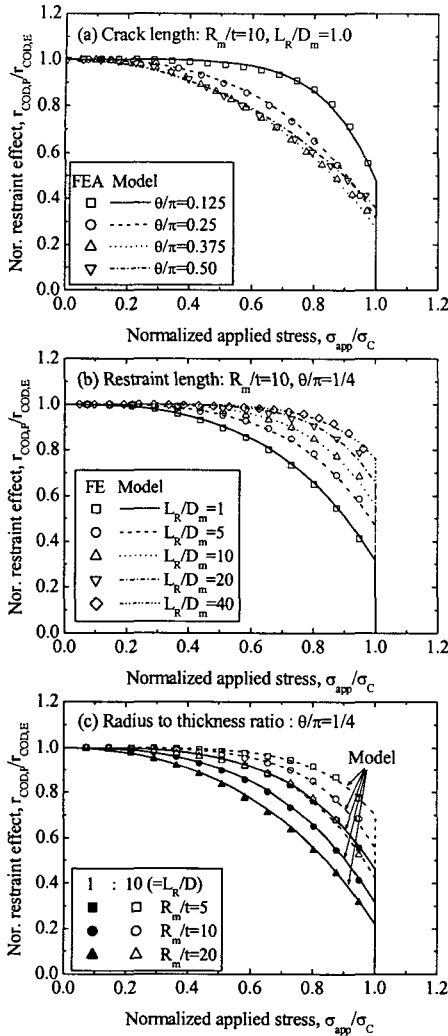


Fig. 10 Comparison between the results obtained from proposed model and FE analysis

려된 $0.125 \leq \theta/\pi \leq 0.5$, $1.0 \leq L_R/D_m \leq 40$, $5 \leq R_m/t \leq 20$ 범위에서 거의 유사한 것으로 확인되었다.

4.2.2 영향 인자에 따른 평가 모델의 의존성

평가 모델이 각 영향 인자에 대한 영향을 적절히 고려하고 있는지 그리고 적용 범위 내에서 평가식이 연속성과 신뢰성을 갖는지 확인하기 위해, 일정 하중조건에서 각 인자들에 따른 $r_{COD,P}/r_{COD,E}$ 의 변화 경향을 살펴보았다. Fig. 11

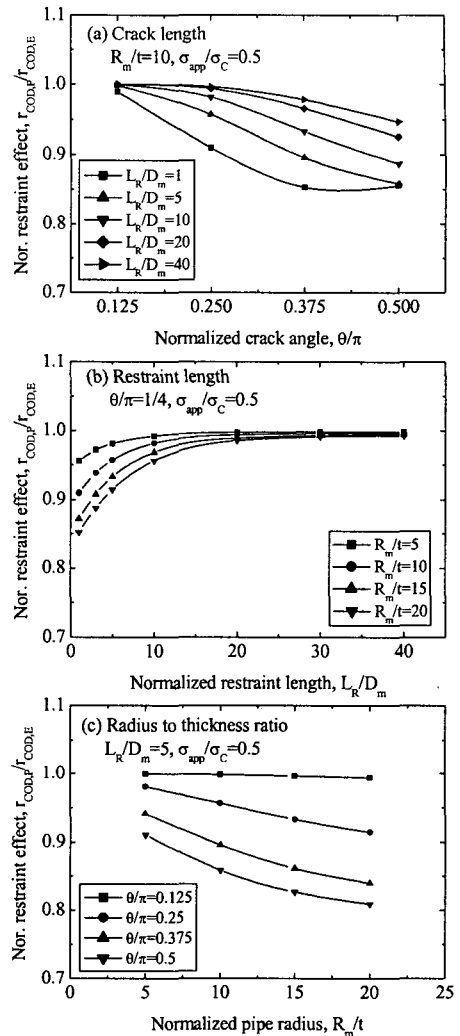


Fig. 11 Dependence of proposed evaluation model on each parameter

은 $\sigma_{app}/\sigma_C=0.5$ 인 조건에서 균열크기, 구속길이, 그리고 Rm/t 에 따른 $r_{COD,P}/r_{COD,E}$ 의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 모델에서 고려하고 있는 적용 범위 내에서 평가식의 불연속성은 관찰되지 않았다. Fig. 11(a)는 균열크기에 대한 $r_{COD,P}/r_{COD,E}$ 의 의존성을 나타낸 것이다. 균열크기가 작은 경우에 $r_{COD,P}/r_{COD,E}$ 는 구속길이에 관계없이 거의 1에 근사한 값을 보였다. 균열크기에 따른 $r_{COD,P}/r_{COD,E}$ 의 감소는 구

속길이가 짧을수록 크게 나타났다. 일정한 균열 크기에서 구속길이에 대한 $r_{COD,P}/r_{COD,E}$ 의 의존성을 살펴보면 [Fig. 11(b)], 구속길이가 증가함에 따라 $r_{COD,P}/r_{COD,E}$ 은 초기에 크게 증가하다가 일정한 값에 수렴하는 경향을 보였다. 구속길이에 따른 $r_{COD,P}/r_{COD,E}$ 의 수렴은 Rm/t 가 작을수록 구속길이가 짧은 조건에서 시작되었다. 또한, 배관의 Rm/t 에 따른 $r_{COD,P}/r_{COD,E}$ 의 변화 경향을 살펴보면 [Fig. 11(c)], 전체적으로 Rm/t 의 증가에 따라 $r_{COD,P}/r_{COD,E}$ 이 거의 선형적으로 감소하였다. 균열이 작은 경우 ($\theta/\pi=0.125$), Rm/t 에 대한 $r_{COD,P}/r_{COD,E}$ 의 의존성은 무시할 정도이며, 균열이 증가함에 따라 Rm/t 에 대한 의존성이 크게 증가하였다. 각 영향 인자에 따른 이와 같은 의존성은 앞서 수행된 유한요소해석 결과와 잘 일치하는 것이다.^(9,10) 따라서, 본 연구에서 제시한 모델이 COD에 미치는 PIB 구속효과 평가에 대한 각 영향 인자들의 의존성을 적절히 반영하고 있다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 균열의 소성거동이 고려된 균열 열림에 미치는 PIB 구속효과를 예측하기 위한 평가 모델을 제시하였다. 이를 위해 다양한 조건에서 탄소성 및 탄성-완전소성 유한요소해석을 수행하였으며, 이들 결과를 바탕으로 영향 인자를 파악하고 탄성-완전소성 기반의 평가 모델을 유도하였다. 유한요소해석과 비교 결과, 제시된 평가 모델은 $0.125 \leq \theta/\pi \leq 0.5$, $1.0 \leq L_R/D_m \leq 40$, $5 \leq R_m/t \leq 20$ 의 범위에서 신뢰성 있는 예측 결과를 보였으며, 각 영향 인자에 대한 의존성을 적절히 반영하고 있는 것으로 확인되었다.

따라서, 여기서 제시된 평가 모델은 균열의 탄소성 거동을 고려하는 파단전누설 해석의 누설허용균열 크기 평가에 적용될 수 있을 것으로 판단되며, 이를 통해 누설허용균열 크기 평가에 미치는 압력유기굽힘의 구속효과에 기인한 불확실성을 제거할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전략연구원(R-2004-B-202) 주관으로 수행된 과제임.

참고문헌

- (1) Pipe Break Task Group, 1984, "Evaluation of Potential for Pipe Breaks," *NUREG-1061*, Vol. 3.
- (2) Zahoor, A., 1989, "Ductile Fracture Handbook," EPRI NP-6301-D.
- (3) Rahman, S., Ghadiali, N., Wilkowski, G., Moberg, F., Brickstad, B., 1998, "Crack-opening-area Analyses for Circumferential Through-wall Cracks in Pipes - Part III : Off-center Cracks, Restraint of Bending, Thickness Transition and Weld Residual Stresses," *Int. J. Press. Ves. & Piping*, Vol. 75, pp. 397-415.
- (4) Ghadiali, S., Rahman, S., Choi, Y.H., and Wilkowski, G.M, 1996, "Deterministic and Probabilistic Evaluations for Uncertainty in Pipe Fracture Parameters in Leak-Before-Break and In-Service Flaw Evaluations," *NUREG/ CR-6443*.
- (5) Wilkowski, G., Olson, R., Scott, P., 1997, "State-of the-Art Report on Piping Fracture Mechanics," *NUREG/CR-6540*.
- (6) Scott, P., Olson, R., Bockbrader, J., Wilson, M., Gruen, B., Morbitzer, R., Yang, Y., Williams, C., Burst, F., Fredette, L., Ghadiali, N., 2005, "The Battelle Integrity of Nuclear Piping (BINP) Program Final Report," *NUREG/CR-6837*.
- (7) Miura, N., 2001, "Evaluation of Crack Opening Behavior for Cracked Pipes Effect of Restraint on Crack Opening," *ASME-PVP*, Vol.423, pp. 135-143.
- (8) Norris, D.M. and Chexal, B., 1987, PICEP : Pipe Crack Evaluation Program (Revision 1), EPRI NP-3596-SR, Rev.1.
- (9) Kim, J.W. and Park, C.Y., 2001, "Effect of Restraint of Pressure Induced Bending on Crack Opening Evaluation for Circumferential Through-Wall Cracked Pipe," *Trans. of KSME (A)*, Vol.25, No.11, pp.1873-1880.
- (10) Kim, J.W., 2004, "Evaluation of Restraint Effect of Pressure Induced Bending on the Elastic-Plastic Crack Opening Behavior," *Int. J. Press. Ves. & Piping*, Vol. 81, pp. 355-362
- (11) ABAQUS Users Manual, Version 6.3, Hibbitt, Karlson & Sorensen, 2000.