

< 논문 >

내부 감육 배관의 손상압력 평가 모델 개발

김진원[†] · 나만균^{*} · 박치용^{**}
(2004년 12월 9일 접수, 2005년 5월 30일 심사완료)

Development of Failure Pressure Evaluation Model for Internally Wall Thinned Piping Components

Jin-Weon Kim, Man-Gyun Na and Chi-Yong Park

Key Words: Internally Wall Thinning(내부감육), Failure Pressure(손상압력), Evaluation Model(평가모델), Nuclear Piping Component(원전 배관 기기)

Abstract

The purpose of this study is to develop failure pressure evaluation models, which are applicable to straight pipes and elbows containing an internally wall thinning defect induced by flow-accelerated-corrosion (FAC). In this study, thus, three dimensional finite element (FE) analyses are performed to investigate the dependences of failure pressure of internally wall thinned pipe on the defect shape, the pipe geometry, and the defect location and bend radius of elbow. Also, the existing failure pressure assessment models for externally wall thinned pipes are examined. Based on these, the new models for assessing failure pressure of piping components with an internally wall thinning defect are proposed. Comparison of failure pressure, predicted by proposed models, with FE analysis result shows good agreement regardless of pipe type, defect shape, and defect location and bend radius.

1. 서 론

발전소나 기타 플랜트의 배관 또는 Oil과 Gas 배관에서 발생하는 국부적인 두께감소 (감육, 減肉) 현상은 이들 배관의 건전성을 저하시키는 주된 손상원인으로 알려져 있다.^(1~5,8) 특히, 발전소나 화학 플랜트 배관에서는 유동가속부식 (FAC, Flow Accelerated Corrosion)에 의해 배관 내부에서 감육결함이 발생되며, 이들 결함은 발견이 어렵고 손상에 대한 예비 장후가 거의 나타나지 않는 특징을 가진다.⁽¹⁾ 따라서, 원자력발전소의 경우, 감육결함이 배관의 건전성 확보를 위한 중요한 관리 항목으로 대두되고 있으며, 감육 배관에 대한 계속 사용, 교체, 정비 등을 결정할 수 있는

평가 방법에 대한 요구가 증가되고 있다.

감육결함에 대한 건전성 평가 연구는 1980년대 부터 Oil과 Gas 배관을 대상으로 수행되었으며,^(3,4) 원자력 배관에 대한 연구는 1990년대 초부터 활발히 진행되었다.^(5~9) 이들 연구를 바탕으로 여러 형태의 평가식이 제시되었으며, 일부 결과 들은 ANSI/ASME⁽¹⁰⁾과 ASME Code Case^(11,12)의 기준으로 채택되었다. 그러나, 이러한 노력에도 불구하고 이들 기준이 원자력 배관에 적용되기에는 여전히 많은 불확실성을 포함하고 있다. 왜냐하면, 원자력 배관의 경우에는 Oil이나 Gas 배관과 달리 내압과 굽힘의 복합하중이 작용되며, 결함이 배관 내벽에 형성되기 때문이다. 따라서, 원자력 배관의 감육결함에 대한 적절한 평가를 위해서는, 이러한 원전 배관의 결함 특징이 충분히 고려된 평가 방법의 개발이 필요하다.

본 논문에서는 이러한 연구의 일부로 배관 내부에 존재하는 감육결함의 손상압력 평가에 적합한 평가식을 제시하고자 한다. 내압에 대한 손상 압력 평가는 감육배관의 건전성 확보를 위한 가

[†] 책임저자, 회원, 조선대학교 원자력공학과

E-mail : jwkim@chosun.ac.kr

TEL : (062)230-7109 FAX : (062)232-7243

^{*} 회원, 조선대학교 원자력공학과

^{**} 회원, 한전 전력연구원 원자력연구실

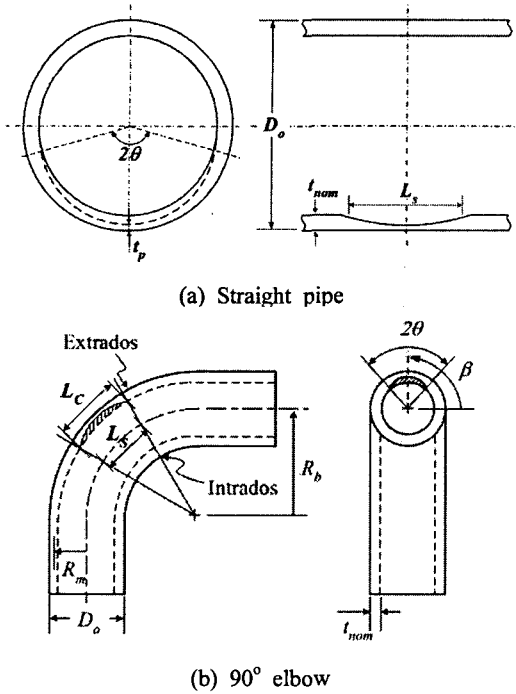


Fig. 1 Definition of geometries of wall thinning defect

장 기본적으로, 중요한 평가 사항이다. 그러나, 아직까지 내부 감육결함에 대한 손상압력 평가 모델은 제시된 바가 없다. 따라서, 본 연구에서는 배관 내부에 다양한 감육결함을 가정한 3차원 유한요소해석을 수행하여 손상압력을 평가하고, 손상압력에 미치는 결함의 형상과 위치, 그리고 배관의 기하학적 형상에 대한 영향을 파악하고자 한다. 또한, 이를 바탕으로 내부 감육결함에 적합한 새로운 손상압력 평가식을 제시하고자 한다.

2. 유한요소해석

2.1 유한요소모델

내벽에 감육결함이 존재하는 배관의 손상압력을 평가하기 위해 본 연구에서는 Fig. 1에 나타난 것과 같은 직경 (D_o)이 400mm이고 공칭두께 (t_{nom})가 20mm인 직관과 굽힘각이 90°인 엘보우를 고려하였다. 엘보우의 경우, 평가 결과에서 엘보우의 기하학적 특성과 결함의 위치에 따른 영향을 파악하기 위해 곡률반경 (R_b)이 배관 평균반경 (R_m)의 3배 ($R_b/R_m = 3$)와 6배 ($R_b/R_m = 6$)인 엘보우의 외호면 (extrados)과 내호면 (intrados)에 존재하는 감

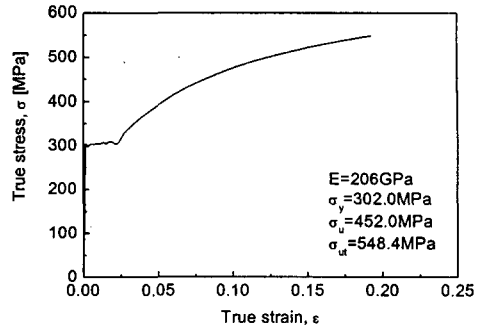


Fig. 2 True stress-strain curve used in FE analysis

육결함을 각각 가정하였다. 해석에서 고려된 결함의 형상은 원형이고, 결함의 크기는 Table 1과 2에 정리된 바와 같다. 엘보우의 경우, Fig. 1에 나타난 것과 같이 L_c 는 엘보우 외호면 또는 내호면에서 결함의 실제 길이이며, L_s 는 L_c 에 해당하는 엘보우 측면에서의 등가길이이다. 본 연구에서는 결과의 정량적 비교를 위해 L_s 가 직관의 결함길이와 같도록 L_c 값을 고려하였다.

해석에 적용된 3차원 유한요소모델은 직관과 엘보우 모두 대칭성을 고려하여 1/4만을 모델하였다. 엘보우 모델의 경우에는 해석 결과에 미치는 엘보우 끝단의 영향을 배제하기 위해서 양단에 충분히 긴 직관($10R_m$)이 연결된 엘보우를 가정하였다. 배관의 1/4만을 모델함에 따라 대칭 경계조건이 적용되었으며, 내압은 분포하중 형태로 내면에 작용되었다. 해석은 범용유한요소해석 프로그램인 ABAQUS⁽¹³⁾를 사용하여 탄소성 해석을 수행하였다. Fig. 2는 해석에 적용된 배관 재료의 응력-변형률 곡선과 재료물성치를 나타낸 것이다. 여기서, E 는 영률, σ_y 는 항복응력, σ_u 는 공칭 인장강도, σ_{ult} 는 진 인장강도이다.

2.2 감육 배관의 손상기준

유한요소해석 결과로부터 손상압력을 결정하기 위한 조건으로 식 (1)과 같이 국부응력기준을 적용하였다. 즉, 감육부의 가장 얇은 부분에서 두께 방향 평균 등가응력 ($\bar{\sigma}_{eq,app}$)이 재료의 공칭 인장강도를 초과할 때 손상이 발생하는 것으로 가정하였다. 이러한 국부응력기준은 고인성 배관의 소성붕괴에 대한 적절한 손상기준인 것으로 알려져 있다⁽⁸⁾. 또한, 본 연구의 선행연구에서도 식 (1)의 국부응력기준이 적절한 보수성을 가지고 내압

Table 1 Matrix for FE analysis of wall thinned straight pipe

Straight pipe	Thinning length, L_s/D_o		Thinning angle, θ/π	Thinning depth, $(t_{nom}-t_p)/t_{nom}$
	0.25, 0.5, 1.0, 2.0		0.25	0.534
	1.0		0.0625, 0.125, 0.25, 0.5	0.534
	1.0		0.25	0.301, 0.534, 0.767

Table 2 Matrix for FE analysis of wall thinned elbow

Location	R_b/R_m	Thinning length		Thinning angle, θ/π	Thinning depth, $(t_{nom}-t_p)/t_{nom}$		
		L_s/D_o	L_c/D_o				
Elbow	Extrados	3	0.25, 0.5, 1.0, 2.0	0.334, 0.667, 1.334, 2.667	0.25	0.534	
				1.0	1.334	0.0625, 0.125, 0.25, 0.5	0.534
				1.0	1.334	0.25	0.301, 0.534, 0.767
	Intrados	6	0.25, 0.5, 1.0, 2.0	0.292, 0.583, 1.167, 2.334	0.25	0.534	
				1.0	1.167	0.0625, 0.125, 0.25, 0.5	0.534
				1.0	1.167	0.25	0.301, 0.534, 0.767

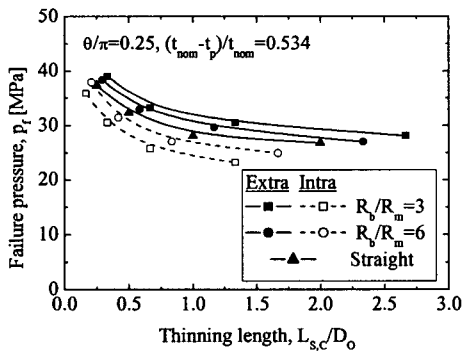


Fig. 3 Effects of pipe type, defect location and bend radius on the failure pressure of wall thinned pipe

과 압힘하중 조건에서 감육 배관의 손상을 비교적 정확히 예측하는 것으로 확인되었다.^(14,15)

$$\bar{\sigma}_{eq, app} \geq \sigma_u \quad (1)$$

3. 내부 감육 배관의 손상압력

3.1 배관 형상과 결함 위치에 따른 손상압력

Fig. 3은 유한요소해석 결과로부터 손상압력에 미치는 배관의 형상과 엘보우에서 결함 위치와

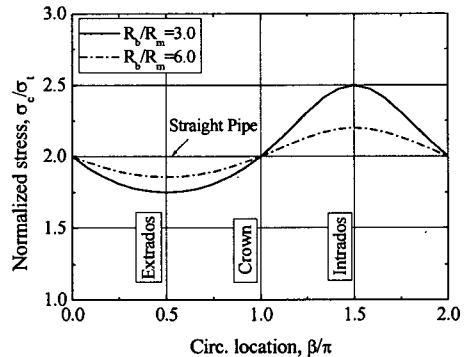


Fig. 4 Dependence of normalized circumferential stress distribution on the defect location and bend radius of pipe

곡률반경에 대한 영향을 살펴보기 위해, 직관과 곡률반경이 $R_b/R_m = 3$ 과 6 인 엘보우의 외호면과 내호면에 깊이와 폭이 각각 $(t_{nom}-t_p)/t_{nom} = 0.534$, $\theta/\pi = 0.25$ 인 결함을 가진 배관의 손상압력을 평가하여 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 일정한 깊이와 폭을 갖는 감육결함의 경우, 결함의 길이에 관계없이 직관의 손상압력은 내호면과 외호면 감육 엘보우의 중간 값을 보였다.

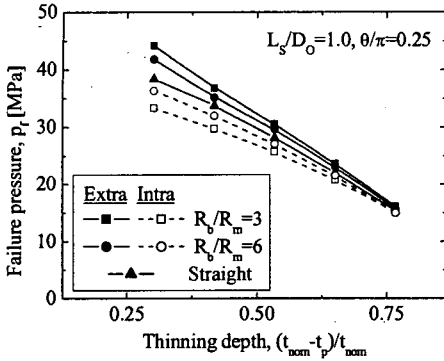


Fig. 5 Dependence of failure pressure on thinning depth of wall thinned pipe

한편, 엘보우에서 동일한 크기의 결함이 외호면에 존재하는 경우에는 곡률반경이 증가할수록 손상압력이 감소하는 반면, 결함이 내호면에 존재하는 경우에는 곡률반경이 증가할수록 손상압력이 증가하는 경향을 보였다.

배관의 기하학적 형상과 결함의 위치에 따른 이러한 경향은 내압에 의한 벽면의 응력상태가 배관 형상과 위치에 따라 결정되며, 손상압력이 이러한 응력상태에 직접적으로 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다. 식 (2)와 (3)은 내압에 따른 건전 엘보우 곡관부의 원주방향(σ_c)과 축방향(σ_t) 응력 분포를 나타낸 것이다.⁽¹⁶⁾

$$\sigma_c = \frac{P_m R_m}{2t_{nom}} \frac{2R_b + R_m \sin\beta}{R_b + R_m \sin\beta} \quad (2)$$

$$\sigma_t = \frac{P_m R_m}{2t_{nom}} \quad (3)$$

여기서, β 는 Fig. 1에 나타난 것과 같이 엘보우에서 원주방향 위치이고, P_m 은 내압이다. 식에서 알 수 있는 것과 같이 곡관부에서 축방향 응력은 일정하고, 원주방향 응력은 원주방향 위치와 곡률반경의 함수로 주어진다. Fig. 4는 원주방향 응력을 축방향 응력으로 무차원화한 것으로, 원주방향 응력이 엘보우 외호면에서 가장 낮고 내호면에서 가장 높게 나타났다. 또한, 외호면에서 원주방향 응력은 곡률반경이 증가할수록 증가하지만, 내호면에서는 곡률반경이 증가할수록 원주방향 응력이 감소하였다. 엘보우 형상과 위치에 따른 이러한 응력 변화는 손상압력의 변화와 일치하며, 감육 배관의 손상압력이 내압에 의한 원주

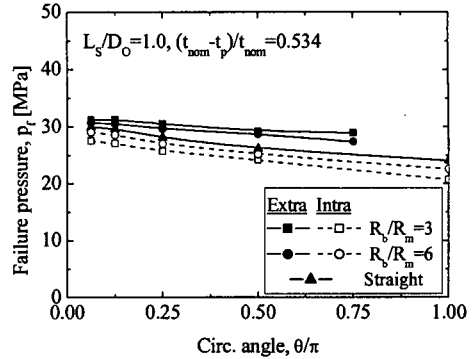


Fig. 6 Dependence of failure pressure on circumferential thinning angle of wall thinned pipe

방향 응력 분포에 지배되는 것을 알 수 있다.

3.2 결함 형상에 따른 손상압력

감육 배관의 손상압력에 미치는 결함 형상에 대한 영향을 파악하기 위해서, 결함의 길이, 깊이, 그리고 원주방향 폭에 따라 유한요소해석을 수행하여 손상압력을 평가하였다. Figs. 3, 5, 6은 결함 형상에 따른 손상압력의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 3에 나타난 것과 같이 결함의 폭과 깊이가 일정한 경우, 손상압력은 배관의 형상에 관계없이 결함 길이가 증가함에 따라 초기에는 크게 감소하다, 일정한 값 이상에서는 완만한 감소를 보였다. 감육 깊이에 따른 손상압력의 변화는 Fig. 5에 나타난 것과 같이 결함부의 깊이 증가에 따라 손상압력이 거의 선형적으로 감소하였으나, 결함이 엘보우의 내호면에 존재하는 경우에는 감육부 깊이에 따른 변화가 선형성에서 약간씩 벗어나는 경향을 보였다.

또한, 감육결함의 원주방향 폭에 따른 손상압력 변화는 결함 길이와 깊이에 따른 변화에 비해 크지 않았다. 그러나, Fig. 6에서 알 수 있는 것과 같이 일정한 결함 길이와 깊이에서 결함 폭의 증가에 따라 손상압력이 완만하게 감소하였다. 특히, 감육결함이 직관과 엘보우 내호면에 존재하는 경우에는 원주방향 결함 폭에 따른 손상압력의 감소 경향이 비교적 크게 나타났다. 따라서, 감육배관의 손상압력 평가시 결함의 길이와 깊이 뿐 아니라 결함의 원주방향 폭에 대한 영향도 적절히 고려되어야 할 인자인 것을 알 수 있다.

4. 감육 배관의 손상압력 평가 모델

4.1 기존의 손상압력 평가 모델

감육 결함에 대한 기존의 손상압력 평가식은 주로 Gas와 Oil 배관을 대상으로 개발되었다. 따라서, 이들 평가식은 배관 외부에 존재하는 피팅형 감육결함에 대한 파열시험이나 유한요소해석 결과에 기초하고 있다. 일반적으로 널리 알려진 감육 배관의 손상압력 평가식은 다음과 같다.

4.1.1 직관

직관에 존재하는 감육결함에 대한 손상압력 평가식으로는 Modified B31G⁽⁴⁾식이 가장 잘 알려져 있다. Modified B31G에서는 식 (4)와 같이 손상압력에 미치는 감육결함의 영향을 두께 감소에 따른 결함부의 잔여강도 감소로 고려하고 있다.

$$P_f = \frac{\sigma_f t_{nom}}{R_m} \left(\frac{1 - 0.85x}{1 - 0.85xM^{-1}} \right) \quad (4)$$

여기서, $\sigma_f = \sigma_y + 68.95MPa$, $x = (t_{nom} - t_p)/t_{nom}$, M 은 Modified Folias 인자로 다음과 같이 결함길이의 함수로 주어진다.

$$M = \begin{cases} \sqrt{1 + 0.6275L - 0.003375L^2} & \text{for } L \leq 50 \\ 3.3 + 0.032L & \text{for } L \geq 50 \end{cases}$$

$$L = \left(\frac{L}{D_o} \right)^2 \left(\frac{D_o}{t_{nom}} \right)$$

여기서, L 은 결함길이, D_o 는 배관의 외경이다.

최근 Battelle은 잔여강도를 이용한 손상압력 평가식의 대체 방법으로 식 (5)와 같은 평가식을 제안하였다. 이 식은 감육결함 평가용 프로그램인 PCORRC의 결함 허용기준으로 적용되고 있으며,⁽¹⁷⁾ 현재 준비중인 ASME Sec.XI App.X (Draft)의 축방향 감육결함 평가에 적용되고 있다.⁽¹²⁾

$$P_f = \frac{\sigma_u t_{nom}}{R_m} \left[1 - x \left(1 - \exp \left(-0.157 \sqrt{\frac{L}{R_o t_p}} \right) \right) \right] \quad (5)$$

이외에도 직관에 존재하는 감육결함의 손상압력을 평가하기 위해서 여러 가지 식들이 제안되었으나, 대부분 식 (4)와 유사한 형태를 갖는다.

4.1.2. 엘보우

최근까지 엘보우 감육결함을 위한 별도의 손상압력 평가식은 제안되지 않았으며, 직관의 손상

압력 평가식을 엘보우의 감육결함 평가에 사용하였다. 최근 Zhang et al.⁽¹⁶⁾에 의해 외부 감육결함을 가진 엘보우의 손상압력 평가식이 제안되었다. 이 식은 Modified B31G 평가식을 기초로 식 (2)로 주어지는 곡관부의 원주방향 응력분포를 고려하고, 유동응력에 대한 정의와 일부 계수를 수정한 것으로 식 (6)과 같이 제시되었다.

$$P_f = \frac{\sigma_f t_{nom}}{R_m} \left(\frac{1-x}{1-xM^{-1}} \right) \left(\frac{\frac{R_b}{R_m} + \sin\beta}{\frac{R_b}{R_m} + \frac{\sin\beta}{2}} \right) \quad (6)$$

여기서, $\sigma_f = (\sigma_y + \sigma_u)/2$ 이고, M 은 Modified B31G 식의 Folias 인자이다.

4.2 내부 감육배관의 손상압력 평가 모델 제안

4.2.1 기존 평가식에 대한 검토

본 논문에서는 내부에 감육결함을 가진 배관에 대한 적절한 손상압력 평가 모델을 제시하기 위해서, 먼저 앞서 소개한 기존의 손상압력 평가식과 유한요소해석 결과를 비교·검토하였다.

Fig. 7은 식 (4)와 (5)의 평가 결과를 감육 직관에 대한 유한요소해석 결과와 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 일부 조건을 제외하면 전체적으로 Modified B31G의 결과는 유한요소해석 결과보다 낮은 손상압력을 보였다. Battelle의 평가식은 전반적으로 Modified B31G 보다 유한요소해석 결과를 근사적으로 예측하였다. 그러나, 결함의 폭이 $\theta/\pi = 0.25$ 보다 크거나, 결함 길이가 $L/D_o = 1$ 보다 짧은 조건에서 유한요소해석 결과를 과대 평가하였다. 두 평가식 모두 결함의 원주방향 폭에 따른 손상압력의 변화 경향은 예측하지 못했으며, 결함 길이에 따른 손상압력의 변화 경향은 Modified B31G 식이 Battelle 식 보다 유한요소해석 결과를 잘 예측하는 것으로 나타났다. 그러나, 결함 깊이에 따른 손상압력의 변화 경향에 대해서는 Battelle 식이 Modified B31G보다 정확한 예측 결과를 보였다.

한편, 감육 엘보우의 손상압력 평가식에 대한 비교 결과, Figs. 8과 9에서 알 수 있는 것과 같이 식 (6)은 유한요소해석 결과와 비교하여 전체적으로 낮은 손상압력 평가 결과를 보였다. 또한, 직관에서와 같이 식 (6)은 결함의 원주방향 폭에 따른 손상압력의 변화 경향을 예측하지 못했다. 그

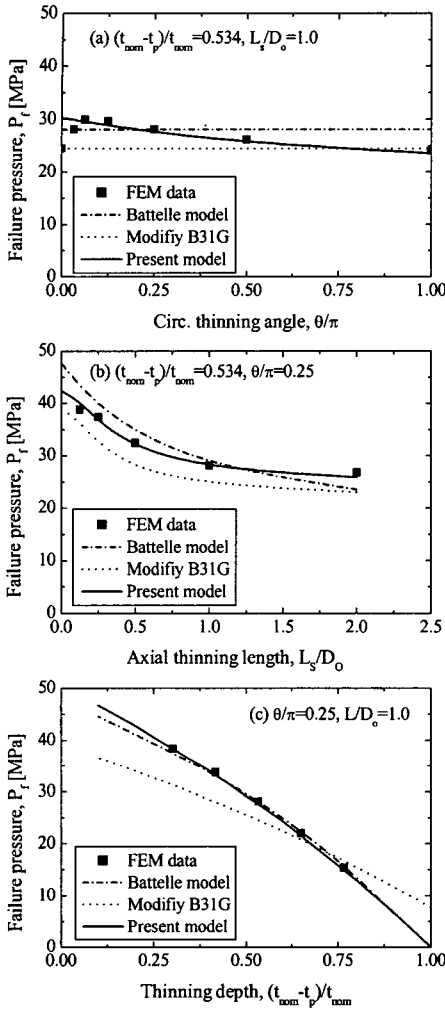


Fig. 7 Comparisons of failure pressure evaluated by models and FE analysis results for a straight pipe with wall thinning defect

러나, 결함의 위치와 엘보우의 곡률반경에 따른 영향, 그리고 결함 길이와 깊이에 따른 손상압력의 변화 경향은 비교적 잘 예측하였다.

4.2.2 내부 감육배관의 손상압력 평가 모델

감육 배관에 대한 기존의 손상압력 평가식과 유한요소해석 결과의 비교에서 알 수 있는 것과 같이 외부 감육결함을 대상으로 개발된 기존의 평가식은 손상압력에 미치는 원주방향 결함 폭에 대한 영향을 고려하지 못하고 있다. 그러나, 결함의 길이와 깊이에 대한 영향은 어느 정도 잘 고

Table 3 Coefficient (C_i) of Equation (9)

Pipe type & Defect location	C ₀	C ₁	C ₂
Straight pipe	1.1605	-0.4516	0.1935
Extrados (elbow)	1.1006	-0.2349	0.1285
Intrados (elbow)	1.2102	-0.4755	0.1788

려하고 있는 것을 알 수 있다. 또한, 감육 엘보우에 대한 손상압력 평가에서 결함의 위치와 엘보우의 곡률반경에 따른 영향도 적절히 반영하고 있는 것을 확인하였다. 따라서, 이들 외부 감육결함에 대한 손상압력 평가식을 수정함으로써, 내부 감육배관에 대한 손상압력 평가식을 개발할 수 있을 것으로 판단된다.

따라서, 직관의 경우는 Modified B31G의 식 (4), 그리고 엘보우의 경우는 식 (6)을 기초로 내부 감육 배관에 대한 손상압력 평가 모델을 제시하였다. 먼저, 식 (4)와 (6)의 유동응력, σ_f 대신 극부 손상기준으로 적용된 재료의 공칭 인장강도, σ_u를 적용하고, 해석 결과를 기초로 Folias 인자, M과 식 (4)의 계수들을 일부 수정하였다. 또한, 기존의 평가식에서 무시된 원주방향 결함 폭에 대한 영향을 추가로 고려하였다. 식 (7)과 (8)은 본 논문에서 제안한 감육 직관과 엘보우에 대한 손상압력 평가식을 나타낸 것이다.

$$P_f = \frac{\sigma_u t_{nom}}{R_m} \left(\frac{1-x}{1-x \widehat{M}^{-1}} \right) \Omega(\theta) \tag{7}$$

$$P_f = \frac{\sigma_u t_{nom}}{R_m} \left(\frac{1-x}{1-x \widehat{M}^{-1}} \right) \left(\frac{\frac{R_b}{R_m} + \sin \beta}{\frac{R_b}{R_m} + \frac{\sin \beta}{2}} \right) \Omega(\theta) \tag{8}$$

여기서, 수정된 Folias 인자 \widehat{M} 은 아래와 같다.

$$\widehat{M} = \begin{cases} \sqrt{1.44 + 0.6275L - 0.003375L^2} & \text{for } L \leq 50 \\ 3.3 + 0.032L & \text{for } L \geq 50 \end{cases}$$

$$L = \left(\frac{L}{D_o} \right)^2 \left(\frac{D_o}{t_{nom}} \right)$$

Ω(θ)는 원주방향 결함 폭에 대한 영향을 고려하기 위한 항으로, 유한요소해석 결과를 회귀 분석하여 식 (9)와 같이 유도하였다.

$$\Omega(\theta) = C_0 + C_1 \left(\frac{\theta}{\pi} \right) + C_2 \left(\frac{\theta}{\pi} \right)^2 \tag{9}$$

여기서, 상수 C_i는 배관의 형상과 결함의 위치

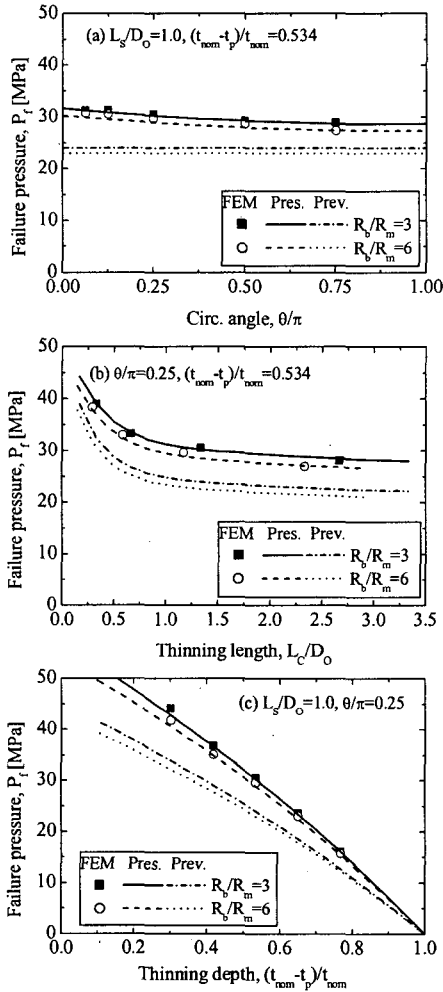


Fig. 8 Comparisons of failure pressure evaluated by models and FE analysis results for an elbow with extrados wall thinning defect

에 따라 Table 3과 같이 주어진다.

본 논문에서 제시된 평가 모델에 대한 신뢰성을 확인하기 위해서 유한요소해석 결과와 평가식의 결과를 각각 비교하였다. Figs. 7, 8, 9에서 알 수 있는 것과 같이 직관과 엘보우의 내부 감육결함에 대한 손상압력 평가에서 결함의 폭이 매우 작거나 길이가 매우 짧은 경우를 제외하면, 본 논문에서 제안된 평가식은 유한요소해석 결과를 상당히 정확하게 예측하는 것으로 확인되었다. 따라서, 식 (7)과 (8)을 이용하여 원전 배관과 같이 배관 내부에 존재하는 감육결함에 대한 손상

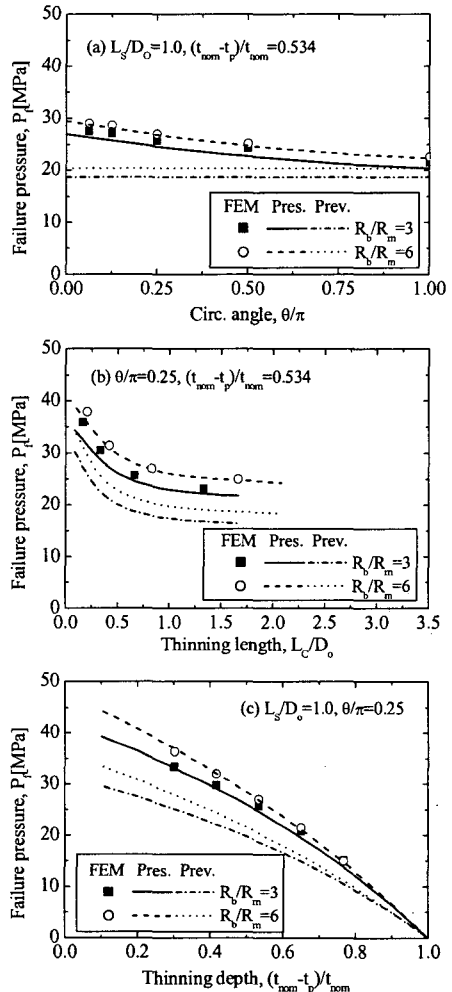


Fig. 9 Comparisons of failure pressure evaluated by models and FE analysis results for an elbow with intrados wall thinning defect

압력을 정확히 예측하는 것이 가능하다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 배관 내부에 형성된 감육결함에 대한 손상압력 평가 모델을 제시하기 위해서, 다양한 형상의 내부 감육결함을 가정한 직관과 엘보우에 대한 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 해석 결과로부터 손상압력에 미치는 각 인자들의 의존성을 파악하고, 기존의 외부 감육결함에

대한 손상압력 평가 모델을 비교·검토하였다. 이들 결과를 바탕으로 내부 감육결함을 갖는 직관과 엘보우에 대한 간단한 형태의 손상압력 평가 모델을 제안하였다. 유한요소해석과 비교 결과, 제안된 평가 모델은 배관 형상, 결함 크기, 그리고 결함 위치 등에 관계없이 상당히 정확한 예측 결과를 보였다.

따라서, 본 논문에서 제안된 평가 모델은 원전 배관과 같이 유동가속부식에 의해 배관 내부에 생성된 감육결함의 손상압력 평가에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) Chexal, B., Horowitz, J., Dooley, B., Millett, P., Wood, C. and Jones, R., 1998, "Flow-Accelerated Corrosion in Power Plant," *EPR/TR-106611-R2*.
- (2) Frank, M., Hans, R. and Helmut, S., 2001, "Experience with Piping in German NPPs with Respect to Ageing-Related Aspects.," *Nucl. Eng. & Des.*, Vol. 207, pp. 307~316.
- (3) Coulson, K.E.W. and Worthington, R.G., 1990, "New Guidelines Promise More Accurate Damage Assessment," *Gas & Oil J.*, Vol. 32, pp. 41~44.
- (4) Kiefner, J.F. and Vieth, P.H., 1990, "New Method Corrects Criterion for Evaluating Corroded Pipe," *Gas & Oil J.*, Vol. 32, pp. 56~59.
- (5) Deardorff, A.F. and Bush, S.H., 1990, "Development of ASME Section XI Criteria for Erosion-Corrosion Thinning of Carbon Steel Piping," *Proc. of ASME Press. Ves. & Piping Conf.*, PVP-Vol-186, NDE-Vol.7, pp. 71~75
- (6) Japan Atomic Energy Research Institute, 1993, "Technical Report on the Piping Reliability Tests at the Japan Atomic Energy Research Institute (Japanese)," *JAERI-M*, 93-074, pp. 104~115.
- (7) Miyazaki, K., Kanno, S., Ishiwata, M., Hasegawa, K., Ahn, S. H. and Ando, K., 1999, "Fracture Behavior of Carbon Steel Pipe with Local Wall Thinning Subjected to Bending Load," *Nucl. Eng. & Des.*, Vol. 191, pp. 195~204.
- (8) Wilkowski, G., Stephens, D., Krishnaswamy, P., Leis, B. and Rudland, D., 2000, "Progress in Development of Acceptance Criteria for Local Thinned Areas in Pipe and Piping Components," *Nucl. Eng. & Des.*, Vol. 195, pp. 149~169.
- (9) Lim, H., Shim, D.J., Kim, Y.J. and Kim, Y.J., 2003, "Development of Assessment Methodology for Locally Corroded Pipe Using Reference Stress Concept," *Trans. of KSME (A)*, Vol. 27, No. 7, pp. 1200~1209.
- (10) American National Standards Institute/American Society of Mechanical Engineer, B31G, 1991ed., "Manual for Determinating the Remaining Strength of Corroded Pipelines"
- (11) American Society of Mechanical Engineer, ASME B&PV Sec.XI, Div.1, ASME Code Case N-597, 1998ed., "Requirement for Analytical Evaluation of Pipe Wall Thinning"
- (12) Draft for ASME Sec.XI, App.X, 2003, rev.8, "Analytical Evaluation of Internal or External Wall Thinning in Piping Systems"
- (13) Hibbit, Karlson and Sorensen Inc., 2001, "ABAQUS ver. 6.2 User's Manual"
- (14) Kim, J.W. and Park, C.Y., 2002. "An Evaluation of Failure Behavior of Pipe with Local Wall Thinning by Pipe Experiment," *Trans. of KSME (A)*, Vol. 26, No. 4, pp. 731~738.
- (15) Kim, J.W. and Park, C.Y., 2003. "Criterion for Failure of Internally Wall Thinned Pipe under a Combined Pressure and Bending Moment," *Proc. of Trans. of 17th SMiRT*, Prague, Czech, Aug. 17-22, #07-5.
- (16) Zhang, L., Wang, Y., Chen, J. and Liu, C., 2001, "Evaluation of Local Thinned Pressurized Elbow," *Int. J. Press. Ves. & Piping*, Vol. 78, pp. 697~703.
- (17) Leis, N. and Stephens, D.R., 1997, "An Alternative Approach to Assess the Integrity of Corroded Line Pipe. Part I Current Status and II Alternative Criterion," *Proc. of 7th Int. Offshore and polar Eng. Conf.*, Honolulu, USA, May 25-30, pp. 624~641.