

곡관의 손상압력에 미치는 내부 감육결함의 영향 평가

김진원[†] · 김태순* · 박치용*

조선대학교 원자력공학과 · *한전 전력연구원 원자력연구실
(2003. 7. 2. 접수 / 2003. 11. 27. 채택)

An Evaluation of the Effect of Internal Thinning Defect on the Failure Pressure of Elbow

Jin-Weon Kim[†] · Tea-Soon Kim* · Chi-Yong Park*

Department of Nuclear Engineering, Chosun University

*Nuclear Laboratory, Korea Electric Power Research Institute

(Received July 2, 2003 / Accepted November 27, 2003)

Abstract : In the present study, three-dimensional finite element analysis was performed to investigate the effects of internal wall thinning defect on the failure pressure of elbow in the piping system and to develop the failure pressure evaluation model. From the results of finite element analysis, the failure pressure was derived by employing local stress criteria, and the effects of thinning location, bend radius, and defect geometry on the failure pressure of internally wall thinned elbow were investigated. Also, based on these investigations and previous model developed to estimate the failure pressure of elbow with an external pitting defect, the failure pressure evaluation model to be applicable to the elbow containing an internal thinning defect was proposed and compared with the results of finite element analysis. The failure pressure calculated by the model agreed well with the results of finite element analysis.

Key Words : wall thinning elbow, failure pressure, finite element analysis, internal thinning defect

1. 서 론

발전소나 화학공장의 배관 또는 Oil과 Gas 배관에서 발생하는 국부적인 두께감소(감육, 減肉) 현상은 이들 배관의 건전성을 저하시키는 대표적인 결함으로 알려져 있다. 특히, 유동가속부식(FAC, Flow Accelerated Corrosion)에 의해 배관 내부에서 발생하는 결함의 경우에는 발견이 어렵고 손상에 대한 예비 징후가 거의 나타나지 않는 특징을 가진다. 따라서, 안전성을 중요하게 고려하는 원자력발전소에서는 배관의 감육현상을 중요한 관리 사항으로 고려하고 있으며¹⁾, 최근에는 감육결함에 대한 예측과 검사 뿐 아니라 감육배관의 계속 사용, 교체, 정비 등을 결정하기 위한 적절한 건전성 평가 방법을 요구하고 있다.

원전 배관에 대한 감육결함 건전성 평가와 관련

한 연구는 1990년대 이후부터 활발히 진행되었으며^{2,3)}, 이들 연구 결과를 바탕으로 ASME Code Case N-480⁴⁾과 ASME Code Case N-597⁵⁾ 등이 발간되었다. 또한, 일본원자력연구소(JAERI)와 Hitachi 등도 배관 실험에 기초한 건전성 평가식을 제안한 바 있다^{6,7)}. 또한, 최근에는 이들 연구결과를 바탕으로 감육결함에 대한 평가식을 ASME Sec.XI의 부록에 포함시키기 위한 노력이 진행되고 있다⁸⁾. 그러나, 이러한 노력에도 불구하고 대부분의 평가 방법이 직관에 존재하는 감육결함을 대상으로 하고 있으며, 실제 배관계통에서 흔히 발견되는 곡관부 결함에 대한 적절한 평가 방법은 제시하지 못하고 있는 실정이다. 따라서, 감육결함에 대한 배관의 건전성 확보를 위해서는 직관뿐 아니라 곡관에 존재하는 결함을 적절히 평가할 수 있는 방법의 개발이 필요하며, 이를 위해서는 곡관부에 작용되는 하중과 결함의 형상에 따른 손상거동과 손상기준 등에 대한 파악이 선행되어야 한다.

[†]To whom correspondence should be addressed.
jwkim@chosun.ac.kr

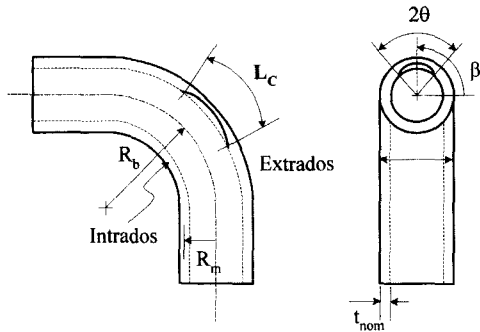


Fig. 1. Definition of elbow and wall thinning geometry

본 논문에서는 원전 운전조건에서 감육 엘보우의 가장 기본적인 손상 형태인 내압에 의한 손상에 미치는 감육결합의 영향을 파악하고, 결합에 따른 손상압력 평가식을 제시하고자 한다. 특히, 감육결합이 엘보우 내부에 존재하는 경우의 손상압력 평가는 아직까지 수행되지 않은 상태로, 본 연구에서는 내부 감육 엘보우에 대한 손상압력 평가에 초점을 맞추고자 한다. 이를 위해서 곡관 내부에 다양한 형태의 감육결합을 가정한 3차원 탄소성 유한요소해석을 수행하여 결합형상, 결합의 위치 및 곡관의 형태에 따른 손상압력을 평가하고, 이들 결과로부터 감육 엘보우에 대한 손상압력 평가식을 제시하였다.

2. 유한요소해석

2.1. 곡관 모델

감육결합에 따른 손상압력을 평가하기 위해 본 연구에서는 Fig. 1에 나타난 것과 같은 직경(D_0)이

400mm이고 공칭두께(t_{nom})가 20mm인 90° 엘보우를 고려하였다. 평가 결과에서 곡관의 기하학적 특성과 결합의 위치에 따른 영향을 살펴보기 위해 엘보우의 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 감육결합을 각각 가정하였다. 해석에서 고려된 결합의 형상은 Table 1에 정리된 바와 같다. Table 1에 나타난 감육결합의 크기는 배관 두께가 설계코드의 최소 설계요구두께(t_{min}) 이하인 부분의 형상이며, L_c 는 곡관 상태에서의 등가길이이고, L_c 는 곡관 상태에서 실제 결합 길이를 나타낸 것이다. 여기서, t_{min} 은 18.6mm로 가정하였다.

Fig. 2는 해석에 적용된 3차원 유한요소모델을 나타낸 것으로, 그림에서 보는 바와 같이 엘보우의 대칭성을 고려하여 1/4만을 모델하였다. 본 모델은 내

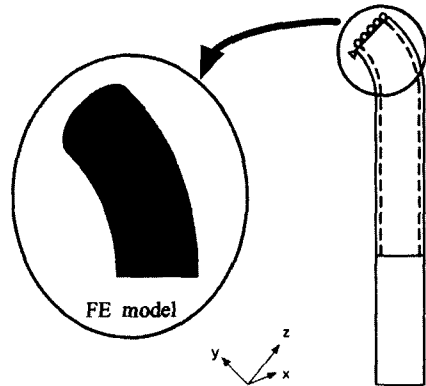


Fig. 2. FE model and boundary condition

Table 1. Matrix for FE analysis of wall thinned elbow

Location	R_b/R_m	Thinning length		Thinning angle, θ/π	Minimum thickness, t/t_{min}
		L_s/D_0	L_c/D_0		
Extrados	3	0.25, 0.5, 1.0, 2.0	0.334, 0.667, 1.334, 2.667	0.25	0.5
		1.0	1.334	0.0625, 0.125, 0.25, 0.5	0.5
		1.0	1.334	0.25	0.25, 0.5, 0.75
	6	0.25, 0.5, 1.0, 2.0	0.292, 0.583, 1.167, 2.334	0.25	0.5
		1.0	1.167	0.0625, 0.125, 0.25, 0.5	0.5
		1.0	1.167	0.25	0.25, 0.5, 0.75
Intrados	3	0.25, 0.5, 1.0, 2.0	0.167, 0.334, 0.667, 1.334	0.25	0.5
		1.0	0.667	0.0625, 0.125, 0.25, 0.5	0.5
		1.0	0.667	0.25	0.25, 0.5, 0.75
	6	0.25, 0.5, 1.0, 2.0	0.227, 0.454, 0.909, 1.828	0.25	0.5
		1.0	0.909	0.0625, 0.125, 0.25, 0.5	0.5
		1.0	0.909	0.25	0.25, 0.5, 0.75

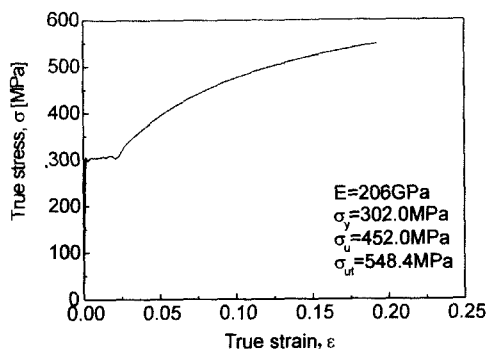


Fig. 3. True stress-strain curve used in FE analysis

압에 대한 손상압력 평가뿐만 아니라 굽힘에 의한 붕괴모멘트 평가에도 적용할 수 있도록 하기 위해서 배관부를 충분히 길게 모델($10 \times R_m$)하였으며, 배관의 끝단부($5 \times R_m$)는 빔으로 가정하여 굽힘모멘트 작용시 집중하중을 작용시킬 수 있도록 하였다. 곡관의 1/4만을 모델함에 따라 Fig. 2에서 보는 것과 같은 대칭 경계조건이 적용되었으며, 내압은 분포하중 형태로 배관의 내면에 작용시켰다. 해석은 범용유한요소해석 프로그램인 ABAQUS⁹⁾를 사용하여 탄소성 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 3은 해석에 적용된 배관 재료의 응력-변형률 곡선과 재료물성치를 나타낸 것이다. 여기서, E 는 영률, σ_y 는 항복응력, σ_u 는 공칭 인장응력, σ_w 는 진 인장응력이다.

2.2. 감육 배관의 손상기준

유한요소해석 결과로부터 감육부의 손상압력을 결정하기 위한 기준으로 식 (1)에 나타낸 것과 같이 감육부의 가장 얇은 부분에서 두께방향 평균 등가응력(von Mises Stress)이 재료의 공칭 인장응력을 초과할 때 손상이 발생하는 것으로 가정하였다. 이러한 국부응력기준은 인성이 높은 배관이 소성붕괴에 의해 손상되는 경우에 적절한 기준인 것으로 알려져 있다¹⁰⁾.

$$\sigma_{eq,app}(sect. avg.) \geq \sigma_u(mat.) \quad (1)$$

3. 결함 형상, 위치, 그리고 엘보우 형상의 영향

3.1. 결함의 위치와 곡관의 곡률반경에 따른 손상압력

손상압력에 미치는 결함 위치와 곡관의 곡률반경에 대한 영향을 살펴보기 위해, 외호면과 내호면에 깊이와 폭이 각각 $t/t_{min} = 0.5$, $\theta/\pi = 0.25$ 인 감육결함이 존재하는 $R_o/R_m = 3$ 과 6인 엘보우의 손상압력을 유한요소해석을 이용하여 평가하였다. Fig. 4는 해석 결과 주어진 손상압력을 결함의 길이에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 동일한 깊이와 폭을 가진 감육결함의 경우, 결함 길이에 관계없이 결함이 곡관의 내호면에 존재하는 경우가 외호면에 존재하는 경우에 비해 낮은 손상압력을 보였다. 한편, 동일한 결함 조건에서 곡관의 곡률반경에 따른 엘보우의 손상압력을 살펴보면, 결함이 외호면에 존재하는 경우에는 곡률반경이 증가할수록 손상압력이 감소하는 반면, 결함이 내호면에 존재하는 경우에는 곡률반경이 증가할수록 손상압력이 증가하는 경향을 보였다.

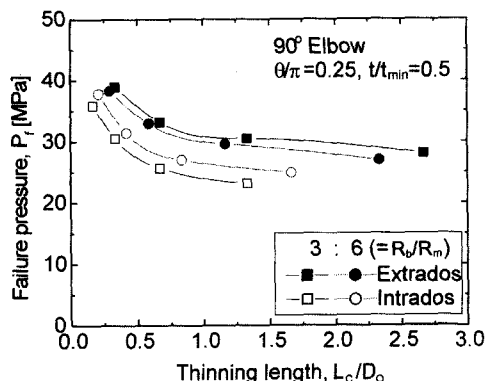


Fig. 4. Effects of defect location and bend radius on failure pressure of wall thinned elbow

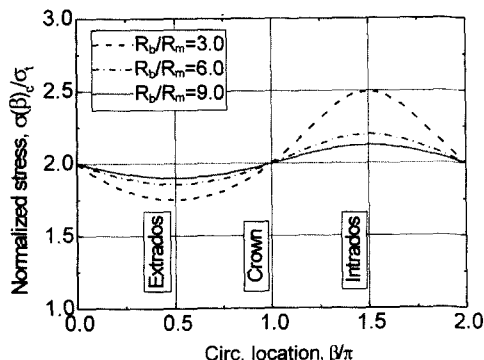


Fig. 5. Dependence of circumferential location and bend radius of elbow on the hoop stress

이러한 거동은 외부에 피딩형 감육결합이 존재하는 엘보우의 손상압력 평가 결과와도 일치하는 것으로¹¹⁾, 내압에 의한 곡관부의 응력상태가 곡관의 형상과 결함의 위치에 의존하기 때문인 것으로 판단된다. 식 (2)와 (3)은 내압에 의한 건전 엘보우의 원주방향과 길이방향의 응력 분포를 나타낸 것으로, 원주방향 Hoop 응력(σ_c)은 원주방향 위치와 곡률반경에 의존하는 반면, 길이방향 응력(σ_l)은 일정한 것을 알 수 있다. 원주방향 위치와 곡률반경에 따른 Hoop 응력은 Fig. 5에서 알 수 있는 것과 같이 원주방향 위치에 따라 외호면에서 가장 낮고 내호면에서 가장 높은 값을 보였다. 또한, 엘보우의 외호면에서 Hoop 응력은 곡률반경이 증가할수록 증가하는 반면, 내호면에서는 곡률반경이 증가할수록 감소하는 것을 알 수 있다.

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

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

여기서, β 는 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 곡관에서 원주방향 위치이고, P_m 은 작용 내압이다.

따라서, 결함의 위치와 곡률반경에 따른 감육엘보우의 손상압력은 내압에 의한 원주방향 응력분포에 크게 의존하고 있는 것을 알 수 있다.

3.2. 결함 형상에 따른 손상압력

감육 엘보우의 손상에 미치는 결함형상의 영향을 살펴보기 위해서 결함의 길이, 원주방향 폭, 깊이에 따라 손상압력을 평가하고, 그 결과를 Fig. 4, 6, 7에 각각 나타내었다. Fig. 4에 나타낸 것과 같이 결함의 폭과 깊이가 일정한 경우, 곡률반경에 관계없이 결함이 내호면에 존재하는 경우에는 결함 길이가 $L_c = 0.6 D_o$ 정도까지, 그리고 외호면에 존재하는 경우에는 결함길이가 $L_c = 0.8 D_o$ 정도까지 급격히 감소하고, 그 이상에서는 완만하게 감소하는 경향을 보였다. 감육 깊이에 따른 손상압력의 변화는 Fig. 6에 나타낸 것과 같이 결함의 위치에 따라 차이는 있으나, 곡관의 곡률반경에 관계없이 감육부 두께가 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 또한, 감육결합의 원주방향 폭에 따른 손상압력의 변화는 결함의 깊이와 길이에 따른 변화에 비해 크지 않지만, 일정한 결함길이와 깊이에서 결함

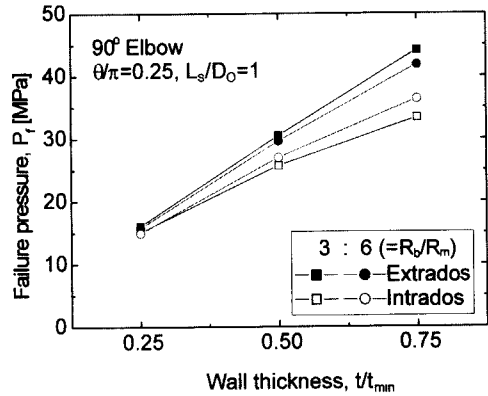


Fig. 6. Dependence of failure pressure on local minimum thickness of wall thinned elbow

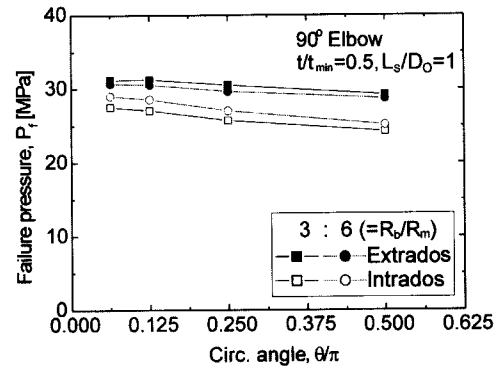


Fig. 7. Dependence of failure pressure on circumferential thinning angle of wall thinned elbow

의 폭이 증가함에 따라 손상압력이 완만하게 감소하였으며, 결함이 내호면에 존재하는 경우에는 감소 경향이 보다 큰 것으로 나타났다(Fig. 7).

따라서, 기존의 외부 감육 엘보우에 대한 손상압력 평가식에서는 결함의 폭에 대한 영향이 무시되고 있지만¹¹⁾, Fig. 7에 나타낸 것과 같이 엘보우 내부에 원주방향으로 넓게 형성되는 유동기속부식에 의한 감육 결함의 경우에는 정확한 손상압력 평가를 위해서 원주방향 결함 폭에 대한 영향이 고려되어야 한다는 것을 알 수 있다.

4. 감육 엘보우의 손상압력 평가식

앞 절에서 살펴본 결함의 위치와 곡관의 곡률반경, 그리고 결함 크기에 따른 손상압력 평가 결과를 바탕으로 내부 감육 엘보우에 적절한 손상압력 평가식을 제시하고자 한다.

4.1. 기존의 외부 감육 엘보우 손상압력 평가식

현재까지 감육 엘보우에 대한 손상압력 평가식은 거의 보고되지 않았으며, 최근 피팅형 외부 감육 결합이 존재하는 엘보우에 대한 손상압력 평가식이 식 (4)와 같이 제안되었다¹¹⁾. 이 평가식에서는 엘보우의 손상압력이 곡관부의 원주방향 Hoop 응력 변화에 직접적으로 영향을 받는다는 사실에 기초하여, 기존의 외부감육 직관에 대한 잔류강도 평가식¹²⁾에 식 (2)로 주어지는 곡관부의 원주방향 Hoop 응력 변화를 고려하였다.

$$P_f = \frac{\sigma_f t_{nom}}{R_m} \frac{1-\chi}{1-\chi M^{-1}} \frac{\frac{R_b}{R_m} + \sin\beta}{\frac{R_b}{R_m} + \frac{\sin\beta}{2}} \quad (4)$$

여기서, $\sigma_f = (\sigma_y + \sigma_u) / 2$, $\chi = (t_{nom} - t) / t_{mon}$ 그리고 M은 Modified Folias 인자로 다음과 같이 주어진다¹²⁾.

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

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

이 평가식에서는 식 (4)에서 알 수 있는 것과 같이 손상압력에 미치는 결합 길이 및 길이와 같은 결합 형상에 대한 영향과 함께 엘보우에서 결합의 위치와 곡률반경의 영향이 모두 고려되어 있는 것을 알 수 있다.

4.2. 내부 감육 엘보우에 대한 손상압력 평가식

본 논문에서는 유동가속부식에 의해 발생하는 내부 감육결합을 가진 엘보우에 대한 적절한 손상압력 평가식을 제시하기 위해서, 먼저 외부 감육 엘보우를 대상으로 개발된 식 (4)의 적용 가능성을 살펴 보았다. 이를 위해서 식 (4)의 결과와 앞서 수행된 유한요소해석 결과를 비교하였다. 식 (4)의 평가에서 결합 크기는 Table 1에서 정의된 값들이 사용되었으며, 유동응력(σ_f)은 식(4)에서 정의된 값을 적용하였다. 비교 결과 Fig. 8과 9에서 알 수 있는 것과 같이 식 (4)에 의한 평가 결과가 유한요소해석 결과

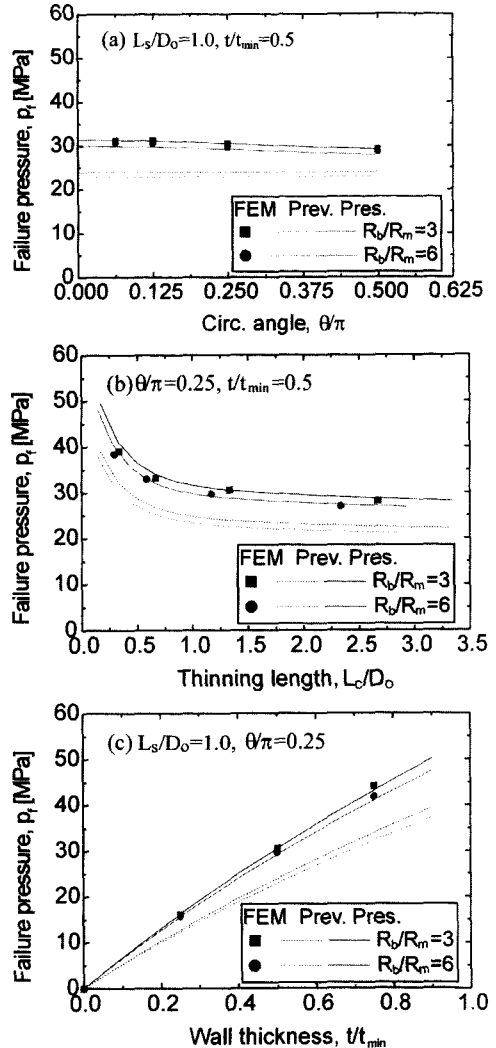


Fig. 8. Comparisons of failure pressure evaluated by models and FE analysis results for an elbow with extrados wall thinning defect

를 전체적으로 크게 과소 평가하고 있지만, 결합의 위치와 곡관의 곡률반경에 따른 영향과 결합 길이와 깊이에 따른 손상압력의 변화 경향은 비교적 잘 예측하는 것으로 나타났다. 다만, 결합의 원주방향 폭에 따른 손상압력의 변화 경향을 예측하지 못하는 한계를 보였다.

따라서, 여기서는 식 (4)의 평가식을 개선함으로써 내부 감육 엘보우에 대한 손상압력 평가식을 제시하고자 한다. 즉, 식 (4)에 유동응력 대신 유한요소해석 결과에서 손상기준으로 적용한 공칭 인장응력(σ_u)을 적용하고, 결합의 원주방향 폭에 대한 영

항을 고려할 수 있는 항을 추가하여 식 (5)와 같이 제시하였다.

$$P_f = \frac{\sigma_u t_{nom}}{R_m} \frac{1-x}{1-xM^{-1}} \frac{\frac{R_b}{R_m} + \sin\beta}{\frac{R_b}{R_m} + \frac{\sin\beta}{2}} \Omega(\theta) \quad (5)$$

여기서, $\Omega(\theta)$ 이 원주방향 결함 폭에 대한 영향을 고려하기 위한 함수이며, 유한요소해석 결과로 주어진 손상압력을 회귀분석하여 구한 것으로 식 (6)과 같이 주어진다.

$$\Omega(\theta) = \frac{C_0 + C_1 \cos\left(C_2 \frac{\theta}{\pi}\right)}{C_3} \quad (6)$$

$C_i = 30.15756; 1.20833; 4.97984; 28.85819;$
for Extrados
 $C_i = 27.16682; 2.03829; 6.55069; 23.75084;$
for Intrados

본 연구에서 제시된 평가식의 타당성을 살펴보기 위해서 식 (5)에 의해 평가된 곡관의 손상압력을 유한요소해석 결과와 비교하였다. Fig. 8과 9는 비교 결과를 나타낸 것으로 그림에서 알 수 있는 것과 같이 외호면에 결함이 존재하는 경우는 결함이 짧고 감육부의 두께가 두꺼운 경우를 제외하면, 곡관의 곡률반경과 결함의 폭, 길이, 깊이에 관계없이 식 (5)에 의해 평가된 손상압력이 유한요소해석 결과를 거의 정확하게 예측하였다. 한편, 내호면에 결함이 존재하는 경우에는 곡률반경이 $R_b/R_m = 3$ 인 조건에서 유한요소해석 결과를 약간 과소평가하는 경향이 있으나, 비교적 정확한 예측을 보였다. 따라서, 평가식 (5)는 결함의 형상과 위치, 그리고 곡관의 형상 등에 관계없이 내부에 감육결합이 존재하는 엘보우의 손상압력을 잘 예측하는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 곡관의 손상압력에 미치는 내부 감육결합의 영향을 파악하기 위해 탄소성 유한요소 해석을 수행하고, 결함의 위치, 곡관의 형상, 그리고 결함의 형상에 따른 영향을 평가하였다.

평가 결과, 결함이 내호면에 존재하는 경우가 외호면에 존재하는 경우에 비해 낮은 손상압력을 보였으며, 결함이 내호면에 존재하는 경우에는 곡률반경이 증가함에 따라, 그리고 외호면에 존재하는 경우에는 곡률반경이 감소함에 따라 손상압력이 증가하였다. 또한, 결함 길이가 배관 직경의 0.6 ~ 0.8배 정도까지는 손상압력이 크게 감소하다 그 이상에서는 완만히 감소하는 경향을 보였다. 결함 깊이에 따른 손상압력의 변화는 거의 선형적으로 변화하였으며, 결함의 원주방향 폭에 따른 손상압력의 감소는 결함의 길이와 깊이 변화에 따른 영향에 비해 미약하지만 완만하게 감소하는 경향을 보였다.

한편, 이들 유한요소해석 결과를 바탕으로 외부 감육 엘보우에 대한 손상압력 평가식을 개선한 내

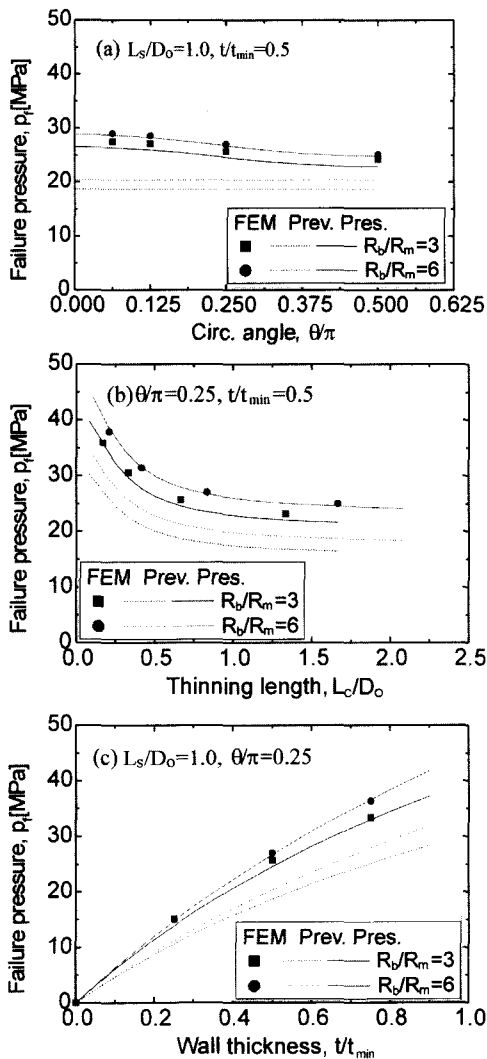


Fig. 9. Comparisons of failure pressure evaluated by models and FE analysis results for an elbow with intrados wall thinning defect

부 감육 엘보우의 손상압력 평가식을 제안하였다. 제안된 평가식을 유한요소해석 결과와 비교한 결과, 결함의 위치, 곡관의 곡률반경, 결함의 크기 등에 관계없이 내부 감육 엘보우의 손상압력을 비교적 정확히 예측하는 것으로 확인되었다.

감사의 글 : 본 연구는 산업자원부의 자원에 의하여 기초전력공학공동연구소(R-2003-0-290) 주관으로 수행된 과제임.

참고문헌

- 1) Chexal, B., Horowitz, J., Dooley, B., Millett, P., Wood, C., and Jones, R., "Flow-Accelerated Corrosion in Power Plant", EPRI/TR-106611-R2, 1998.
- 2) Deardorff, A.F. and Bush, S.H., "Development of ASME section XI criteria for erosion-corrosion thinning of carbon steel piping", Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Conference, PVP-Vol-186, NDE-Vol.7, pp. 71~75, 1990.
- 3) Merz, K. L. and Ibanez, P., "Seismic and Dynamic Reliability of Eroded/Corroded Piping Components", EPRI TR-102066, 1993.
- 4) American Society of Mechanical Engineer, ASME B&PV Sec.XI, Div.I, ASME Code Case N-480, "Examination Requirements for Pipe Wall Thinning Due to Single Phase Erosion and Corrosion", 1990ed.
- 5) American Society of Mechanical Engineer, ASME B&PV Sec.XI, Div.1, ASME Code Case N-597, "Requirement for Analytical Evaluation of Pipe Wall Thinning", 1998ed.
- 6) Japan Atomic Energy Research Institute, "Technical Report on the Piping Reliability Tests at the Japan Atomic Energy Research Institute (Japanese)", JAERI-M, 93-074, pp. 104~115, 1993.
- 7) Miyazaki, K., Kanno, S., Ishiwata, M., Hasegawa, K., Ahn, S. H., and Ando, K., "Fracture behavior of carbon steel pipe with local wall thinning subjected to bending load", Nucl. Eng. & Des., Vol. 191, pp. 195~204, 1999.
- 8) Draft for ASME Sec.XI, App.X, "Analytical evaluation of internal or external wall thinning in piping systems", 2003, rev.8.
- 9) "ABAQUS User's manual", Hibbitt, Karlson & Sorensen, Inc., 2001.
- 10) Wilkowski, G., Stephens, D., Krishnaswamy, P., Leis, B., and Rudland, D., "Progress in Development of Acceptance Criteria for Local Thinned Areas in Pipe and Piping Components", Nucl. Eng. & Des., Vol. 195, pp. 149~169, 2000.
- 11) Zhang, L., Wang, Y., Chen, J., and Liu, C., "Evaluation of local thinned pressurized elbow", Int. J. Press. Ves. & Piping, Vol. 78, pp. 697~703, 2001.
- 12) Kiefner, J.F. and Vieth P.H., "New method corrects criterion for evaluating corroded pipe", Oil Gas J, Vol. 32, pp. 56~59, 1988.