

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2008.32.12.1063

유한요소해석에 기초한 감육곡관 손상압력 평가 모델 개발

김진원* · 박종선*

(2008년 5월 6일 접수, 2008년 6월 19일 수정, 2008년 10월 14일 심사완료)

Development of Failure Pressure Evaluation Model for Local Wall-Thinned Elbows Based on Finite Element Analysis

Jin-Weon Kim and Jong-Sun Park

Key Words: Failure Pressure(손상압력), Wall-Thinned Elbow(감육 엘보우), Evaluation Model(평가 모델), Finite Element Analysis(유한요소해석)

Abstract

This paper provides a failure pressure evaluation model for local wall-thinned elbows. In this study, parametric finite element analyses are performed on the elbows containing local wall-thinning defect at their intrados and extrados, and the failure pressures are obtained from the analysis results by applying a local failure criterion that was validated by real-scale pipe tests. An evaluation model including the effects of thinning depth, length, circumferential angle, thinning location, and elbow geometries on the failure pressure is derived based on the evaluated failure pressures. The proposed model agrees well with the results of finite element analyses and reasonably estimates the dependence of failure pressure on the wall-thinning dimensions and elbow geometries. Also, the comparison with experimental data demonstrates that the proposed evaluation model can accurately predict the failure pressure of local wall-thinned elbows.

1. 서론

발전소의 배관 또는 지하에 매설된 송유관이나 가스관에서 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 감육 결함은 발견이 어렵고 손상에 대한 예비 징후가 나타나지 않는 특징을 가진다. 따라서, 고온·고압 조건에서 운전되고 있는 원자력발전소 배관의 감육 결함 발생은 원전의 안전성과 운전성 측면에서 중요한 관리 대상으로 대두되고 있다.⁽¹⁾ 최근에는 감육 결함의 예

측과 검사 뿐 아니라 감육 결함에 의한 배관 계통의 건전성 저하를 평가하기 위한 절차와 허용 기준을 확립하기 위한 노력들이 진행되고 있다.

원전 감육 배관의 건전성 평가와 관련한 연구는 1990년대 이후부터 활발히 진행되었으며,^(2~4) 이들 연구를 바탕으로 몇몇 평가 절차와 방법들이 제시되었다.^(5,6) 그러나, 실제 원전 배관에서 감육 결함은 곡관부나 연결부에서 주로 발생됨에도 불구하고, 대부분의 평가 방법이 직관에 존재하는 감육 결함을 대상으로 개발되었다. 따라서, 아직까지 곡관부나 연결부에 존재하는 감육 결함의 건전성 평가에 적합한 절차와 방법은 제시되어 있지 않은 실정이며, 이들 배관에 대한 건전성 평가 방법의 개발이 요구되고 있다.

본 논문에서는 유한요소해석을 통해 원전 배관 계통에 작용되는 가장 기본적인 하중인 단순내압 조건에서 곡관의 손상에 미치는 감육 결함의 영향을 파악하고, 감육 결함이 존재하는 곡관에 대한 손상압력 평가식을 제시하고자 한다. 감육 결

† 책임저자, 회원, 조선대학교 원자력공학과

E-mail : jwkim@chosun.ac.kr

TEL : (062)230-7109

* 조선대학교 대학원 원자력공학과

Table 1 Matrix for FE analysis of wall thinned elbow

R_o/t_{nom}	Location	R_b/R_m	Equivalent thinning length, L/D_o	Thinning angle, Θ/π	Thinning depth, $(t_{nom}-t_p)/t_{nom}$
10, 15, 20	Extrados	3	0.25, 0.5, 1.0, 1.5 2.0	0.0625, 0.125, 0.25, 0.5	0.25, 0.5, 0.75
	Intrados	3	0.25, 0.5, 1.0, 1.5 2.0	0.0625, 0.125, 0.25, 0.5	0.25, 0.5, 0.75
	Full Circ.	3	0.25, 0.5, 1.0, 1.5 2.0	1.0	0.25, 0.5, 0.75

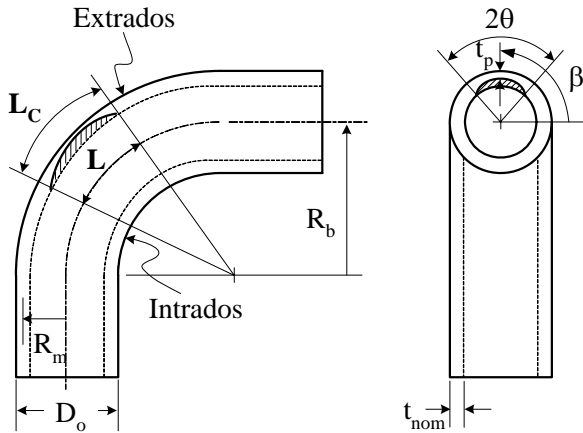


Fig. 1 Definition of elbow and wall thinning geometry

함이 존재하는 직관의 손상압력 평가를 위한 연구는 최근까지 많이 수행되었다.^(7~9) 그러나, 감육 곡관의 손상압력 평가를 위한 모델은 유한요소해석에 기초한 Li⁽¹⁰⁾와 Kim⁽¹¹⁾의 모델뿐이다. 이들 모델조차도 최근 수행된 감육 곡관에 대한 손상시험 결과와 비교한 결과, 지나치게 보수적인 예측 결과를 주는 것으로 확인되었다.⁽¹²⁾ 따라서, 본 논문에서는 3차원 탄소성 유한요소해석을 이용한 변수 해석을 수행하여, 다양한 결함 형상, 위치, 그리고 곡관 형상 조건에서 손상압력을 평가하였다. 이들 결과를 바탕으로 단순 내압조건에서 감육 곡관의 손상압력 평가에 적합한 평가식을 제시하였다.

2. 유한요소해석

2.1 유한요소모델

감육 결함에 따른 곡관의 손상압력을 평가하기 위해 본 연구에서는 Fig. 1에 나타낸 것과 같은 직경이 $D_o (= 2 \times R_o)$ 이고 공칭두께 (t_{nom})가 20 mm 인 90° 곡관을 고려하였다. 곡관의 곡률반경(R_b)은

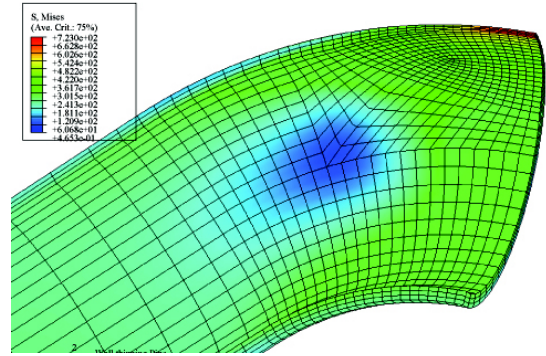


Fig. 2 Finite element model used in the analysis

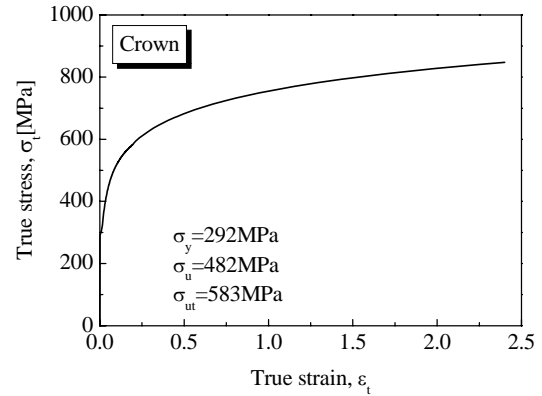


Fig. 3 True stress-strain curve used in FE analysis

배관 평균반경 (R_m)의 3배 ($R_b/R_m = 3$)이고, 반경 대 두께 비 (R_o/t_{nom})가 10, 15, 20인 경우를 고려하였다. 여기서, 곡관의 형상은 실제 감육 결함이 발생하는 원전 2차측 배관 계통에서 표준 곡관의 곡률반경과 R_o/t_{nom} 을 고려하여 결정하였다. 곡관의 외호면(extrados)과 내호면(intrados) 그리고 원주방향 전체가 감육된 경우가 고려되었으며, Table 1은 해석에 고려된 결함의 형상을 정리한 것이다. Table 1에서 결함 크기에 대한 정의는 Fig. 1에 표시된 것과 같으며, 원주방향과 길이방향의 결함 형상은 원형인 것으로 가정하였다. Fig. 1에

나타낸 것과 같이 결함의 등가길이 (L)는 곡관의 측면에서 정의된 것으로 실제 결함길이 (L_c)는 결함의 원주방향 위치에 따라 서로 다른 값을 갖는다.

Fig. 2는 해석에 적용된 3차원 유한요소모델을 나타낸 것으로, 대칭성을 고려하여 곡관의 1/4만 모델링하였다. 곡관의 거동에 미치는 끝단 효과를 배제하기 위해서 곡관의 양단에는 길이가 곡관 반경의 10배 ($10 \times R_m$)인 직관이 연결된 것으로 가정하였다. 곡관의 1/4만을 모델링함에 따라 대칭 경계조건이 적용되었으며, 내압은 분포하중 형태로 배관의 내면에 작용되었다. 범용유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS⁽¹³⁾를 사용하여 탄소성 유한요소해석을 수행하였으며, 결함부에서 대변형을 고려하기 위해 기하학적 비선형 옵션을 적용하였다. Fig. 3은 해석에 사용된 곡관의 응력-변형률 곡선과 재료물성치를 나타낸 것이다. 여기서, σ_y 는 항복장도, σ_u 는 공칭 인장장도, σ_m 는 진인장장도이다.

2.2 국부손상기준

유한요소해석 결과로부터 손상압력을 결정하기 위해서는 적절한 형태의 손상기준이 적용되어야 한다. 본 논문에서는 식 (1)로 주어지는 국부손상기준을 적용하였다.

$$\overline{\sigma_{eq}} \geq \sigma_{ut} \quad (1)$$

즉, 감육부의 가장 얇은 부분에서 두께방향의 평균 등가응력 ($\overline{\sigma_{eq}}$)이 재료의 진인장장도를 초과할 때 손상이 발생하는 것으로 가정하였다. 만약, 감육부 이외의 영역에서 두께 방향의 평균 등가응력이 결함부보다 높은 값을 보이는 경우에는 그 부위의 응력을 기준으로 손상압력을 결정하였다. 식 (1)의 손상기준은 선행 연구를 통해 제시된 것으로 감육 배관에 대한 실패관 시험과 유한요소 시뮬레이션 결과의 비교를 통해 감육 배관의 손상압력 평가에 적합한 것으로 확인되었다.^(14,15)

3. 손상압력 평가 결과

3.1 결함 형상에 따른 감육 곡관의 손상압력

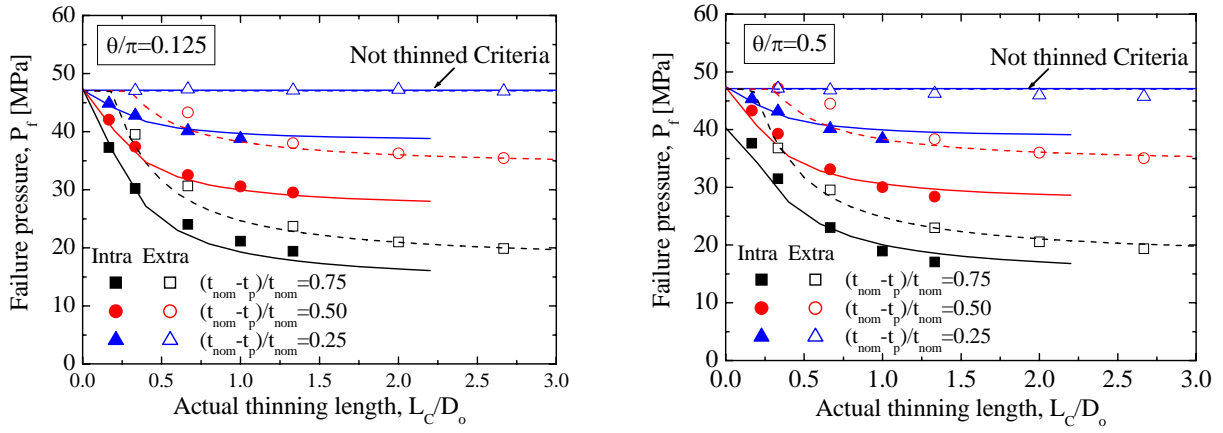
Fig. 4는 유한요소해석을 통해 구한 감육 곡관의 손상압력을 결함의 길이, 깊이, 원주방향 결함 폭에 따라 나타낸 것이다. 그림에 나타낸 것과

같이 내호면 결함과 외호면 결함 모두 감육 결함의 길이가 증가함에 따라 전체적으로 손상압력이 지수 함수적으로 감소하다 일정한 값으로 수렴하는 경향을 보였다. 다만, 깊이가 얇은 외호면 결함의 경우 ($(t_{nom} - t_p)/t_{nom} = 0.25$)에는 결함 길이에 무관하게 일정한 손상압력을 보였다. 결함 깊이가 얇은 외호면 결함에서 일정한 손상압력을 보이는 것은 결함부보다 결함이 없는 내호면 영역에서 등가응력이 높게 나타나므로, 손상압력이 결함에 관계없이 내호면의 응력에 의해 결정되기 때문이다.

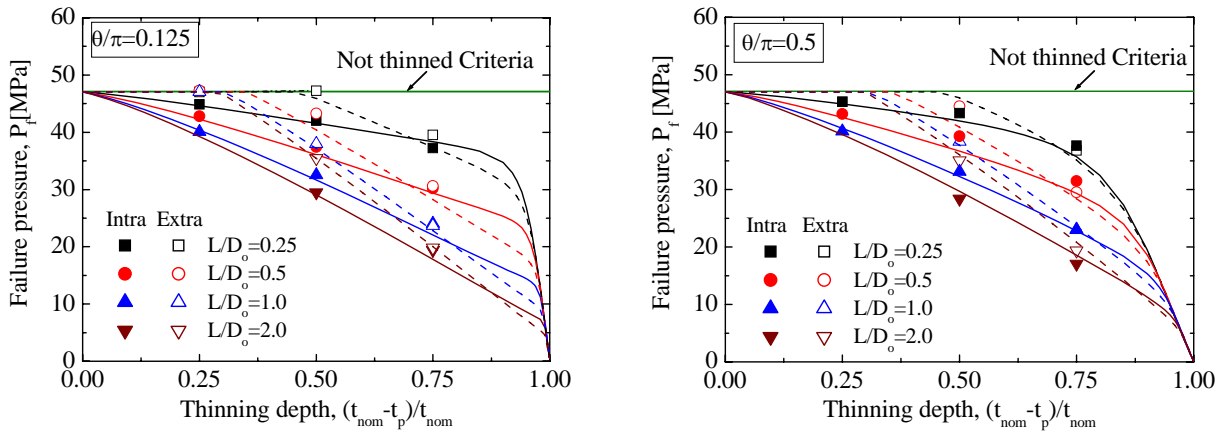
감육 결함의 깊이에 따른 손상압력의 변화를 살펴보면, 내호면 결함과 외호면 결함 모두 결함 깊이에 따라 손상압력은 거의 선형적으로 감소하였으며 감육부 길이가 길수록 손상압력의 감소가 뚜렷하였다(Fig. 4(b)). 외호면 결함의 경우에는 전술한 바와 같이 일정한 결함 깊이 이하에서 곡관부의 손상압력이 결함부가 아닌 내호면의 응력에 의해 지배되므로 일정한 손상압력을 보였으며, 일정한 손상압력을 보이기 시작하는 결함 깊이는 결함이 짧을수록 깊게 나타났다.

감육 곡관의 손상압력에 미치는 원주방향 결함 폭의 영향은 Fig. 4(c)에 나타낸 것과 같이 결함의 길이에 따라 다른 거동을 보인다. 감육부 길이가 긴 경우($LD_o = 2.0$)에는 원주방향 결함 폭에 따라 손상압력이 약간씩 감소하는 반면, 깊이가 짧은 경우($LD_o = 0.25$)에는 원주방향 폭에 따라 손상압력이 증가하다 감소하는 경향을 보였다. 또한, 감육부 길이가 $LD_o = 0.5$ 와 1.0 인 경우에는 원주방향 결함 폭에 따라 거의 변화가 없었다. 이와 같은 원주방향 결함 폭에 따른 손상압력의 변화는 결함의 깊이가 깊을수록 뚜렷하였다.

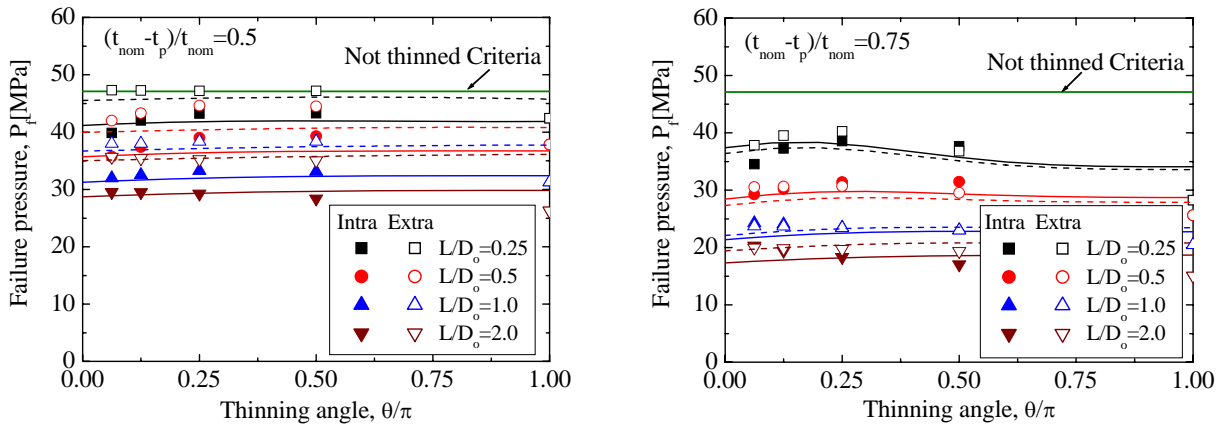
Fig. 5는 원주방향 전체가 감육된 경우($2\theta = 360^\circ$)의 손상압력을 결함 길이에 따라 나타낸 것이다. $2\theta = 360^\circ$ 인 경우에는 내호면, 측면, 외호면에서 결함 길이가 서로 다르기 때문에 Fig. 5는 곡관의 측면에서 정의된 등가길이를 기준으로 손상압력을 나타내었다. Fig. 5에서 알 수 있는 바와 같이 $2\theta = 360^\circ$ 인 경우 결함의 길이와 깊이에 따른 손상압력의 변화는 내호면 결함에서와 거의 유사하였다. 다만, 결함 깊이와 길이에 따라 최대 등가응력이 나타나는 원주방향 위치가 변화하였다. 대부분의 경우에는 내호면에서 최대 등가응력이 나타나지만, 결함이 깊고 축방향 길이가 짧



(a) Thinning length



(b) Thinning depth



(c) Circumferential thinning angle

Fig. 4 Dependence of failure pressure on the length, depth, and circumferential angle of defect for intrados and extrados wall-thinned elbows

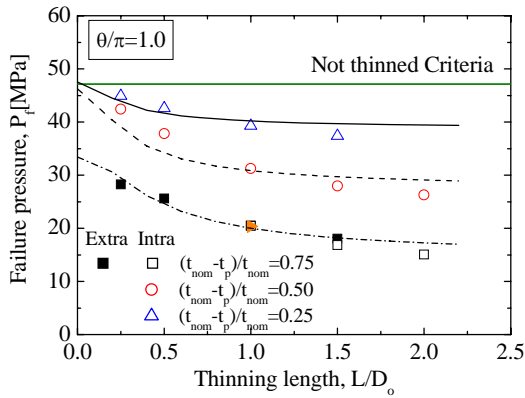


Fig. 5 Dependence of failure pressure on the defect length for full circumferential wall-thinning case

은 경우에는 외호면에서 최대 등가응력이 나타났다. $2\theta = 360^\circ$ 인 감육 곡관에서 최대 등가응력이 나타나는 원주방향 위치가 결함 길이에 따라 변화하는 것은 감육 곡관에 대한 실패관 파열시험 결과에서 결함 길이에 따라 손상발생 위치가 변화하는 것과 일치한다.⁽¹²⁾ 따라서, 본 논문에서 수행된 유한요소해석 결과가 실제 감육 곡관의 손상을 상당히 정확하게 예측하고 있다는 것을 간접적으로 보여주고 있다.

3.2 곡관 형상에 따른 손상압력

Fig. 6은 손상압력에 미치는 곡관의 형상에 대한 영향을 파악하기 위해서, 일정한 두께 조건에서 곡관의 R_o/t_{nom} 에 따른 감육 곡관의 손상압력을 결함 길이, 깊이, 그리고 원주방향 폭에 따라 나타낸 것이다. 일정한 두께 조건에서 R_o/t_{nom} 가 증가함에 따라 결함의 형상에 관계없이 전체적으로 손상압력이 감소하였다. 그러나, 곡관의 R_o/t_{nom} 가 증가할지라도 결함 길이, 결함 깊이, 그리고 원주방향 결함 폭에 따른 손상압력의 변화 경향은 거의 유사한 것을 알 수 있다. 즉, 감육 곡관에서 손상압력에 미치는 결함 길이, 결함 깊이, 그리고 원주방향 결함 폭의 영향은 곡관의 R_o/t_{nom} 에 무관하였다.

3.3 기존 손상압력 평가 모델과의 비교

감육 곡관 손상압력 평가 모델의 특징과 기존 모델의 개선 사항을 파악하기 위해서, 기존의 평가 모델을 해석 결과와 비교·검토하였다. 여기서

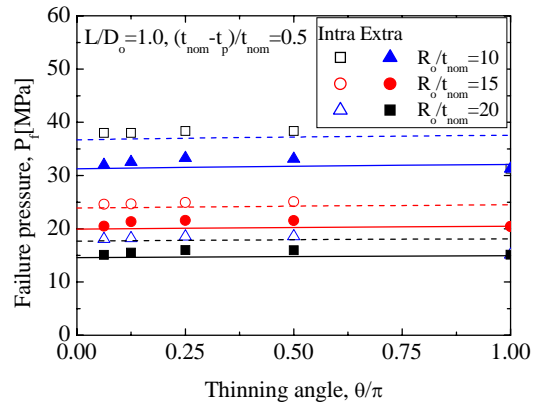
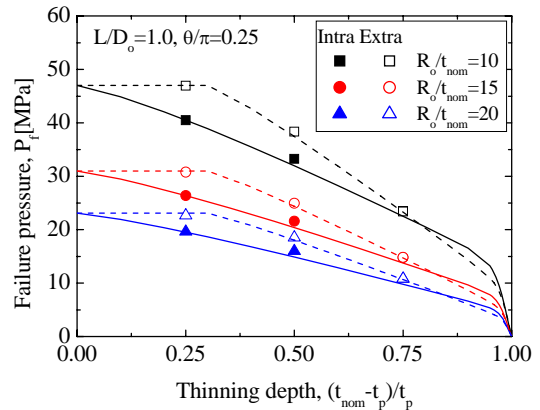
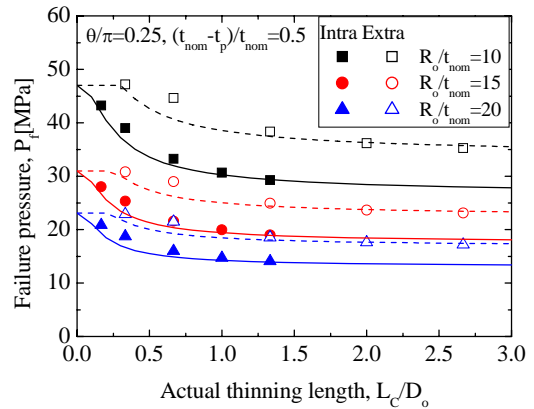


Fig. 6 Effect of radius to thickness ratio on the failure pressure of wall-thinned elbow

는 식 (2)와 (3)으로 주어지는 Li⁽¹⁰⁾과 Kim⁽¹¹⁾의 모델을 각각 살펴보았다. 두 모델 모두 유한요소해석에 기초한 것으로 식 (2)는 곡관 외부에 존재하는 감육 결함을 대상으로 제안된 것이다.

$$P_f = \frac{\sigma_f t_{nom}}{R_o} \left\{ \frac{1 - \left(\frac{t_{nom} - t_p}{t_{nom}} \right)}{1 - \left(\frac{t_{nom} - t_p}{t_{nom}} \right) M^{-1}} \right\} \times GF \quad (2)$$

여기서, 각 변수들은 다음과 같이 정의된다.

$$GF = \frac{R_b/R_m + \sin \beta}{R_b/R_m + \frac{\sin \beta}{2}}$$

$$M = \sqrt{1.0 + 0.6275\tilde{L} - 0.003375\tilde{L}^2}$$

$$\tilde{L} = (L_C/D_o t_{nom})^2$$

식 (3)은 곡관 내부에 존재하는 감육 결함을 대상으로 식 (2)을 일부 수정하여 제안된 것이다.

$$P_f = \frac{\sigma_u t_{nom}}{R_o} \left\{ \frac{1 - \left(\frac{t_{nom} - t_p}{t_{nom}} \right)}{1 - \left(\frac{t_{nom} - t_p}{t_{nom}} \right) \widehat{M}^{-1}} \right\} \times GF \times \Theta(3)$$

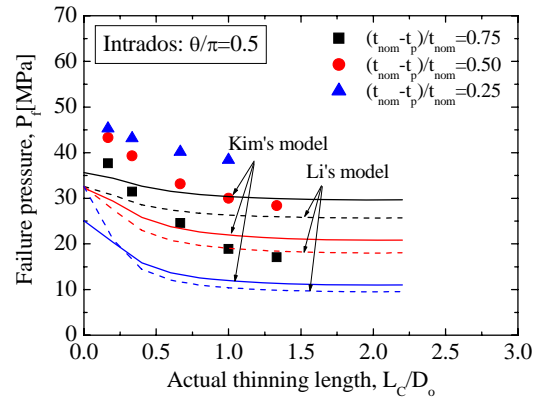
여기서, 각 변수들은 다음과 같다.

$$\widehat{M} = \sqrt{1.44 + 0.6275\tilde{L} - 0.003375\tilde{L}^2}$$

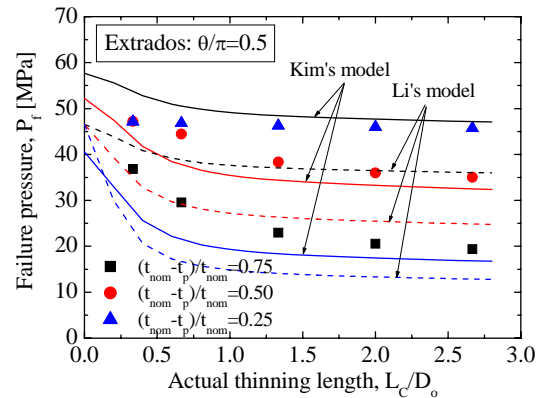
$$\Theta = C_o + C_1 \left(\frac{\theta}{\pi} \right) + C_2 \left(\frac{\theta}{\pi} \right)^2$$

여기서, σ_f 는 재료의 유동응력이고, β 와 2θ 는 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 각각 결함의 원주방향 위치와 결함의 원주방향 폭이다.

이들 손상압력 평가 모델을 살펴보면, 결함 길이가 영(0)으로 접근하면 손상압력은 결함이 없는 건전 배관의 손상압력으로 접근하며, 손상압력이 감육 결함부에서의 후프응력에 의해 지배되고 있다. 또한, Li의 모델은 손상압력에 미치는 원주방향 결함 폭의 영향을 고려하지 않고 있다. Fig. 7은 결함의 원주방향 폭이 $\theta/\pi = 0.5$ 인 감육 곡관에 대한 해석 결과와 모델에 의한 예측 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 두 모델 모두 전체적으로 해석 결과보다 손상압력을 낮게 평가하였으며, 특히 결함이 깊고 길이가 짧은 경우에는 큰 보수성을 보였다. 깊이가 얇은 외호면 결함의 경우에는 Kim의 모델이 손상압력을 높게(비보수적으로) 예측하였다. 이것은 결함 깊이가 얇은 경우에 결함부가 아닌 곡관 내호면의 응력이 손상을 지배하는데, 평가 모델이 이러한 현상을 적절히 반영하지 못하기 때문이다. 뿐만 아니라 실제 감육 결함은 원주방향 폭이 영(0)으로 접근하면 손상압력은 축방향 균열 배관의 손상압력에 접근하고, 감육 결함의 축방향 길이가 영(0)으로 접근하



(a) Intrados



(b) Extrados

Fig. 7 Comparison of existing models and FE results

면 원주방향 균열 배관의 손상압력에 접근하여야 할 것이다. 또한, 감육부의 손상모드가 연성 파괴이므로 손상압력이 후프응력보다 등가응력에 의해 지배되어야 한다. 기존의 손상압력 평가 모델에서는 이러한 감육 결함의 특징을 고려하지 못하고 있기 때문에 해석 결과를 적절히 예측하지 못하는 것으로 판단된다.

4. 감육 곡관 손상압력 평가 모델 제시

4.1 손상압력 평가 모델의 유도

앞서 살펴본 기존 모델들의 한계와 감육 결함의 특성을 고려하여, 본 논문에서는 감육 곡관에 대한 손상압력 평가 기준을 식 (4)와 같이 간단히 제시하였다. 식 (4)에서 감육부의 평균 등가응력은 곡관의 형상, 내압, 결함의 형상, 그리고 결함 위

치의 함수로 주어지야 하며, 임계응력 (σ_{crit})은 재료물성치로 주어진다. 따라서, 곡관과 감육부 형상에 대한 영향을 적절히 반영한 $\overline{\sigma_{eq}}$ 와 손상기준으로 적용할 수 있는 재료물성치가 적절히 제시된다면, 식 (4)로부터 감육 곡관에 대한 손상압력을 계산할 수 있을 것이다.

$$\sigma_{crit} \leq \max \begin{cases} \overline{\sigma_{eq}} & \text{at wall-thinned area} \\ \overline{\sigma_{eq}} & \text{at intrados} \end{cases} \quad (4)$$

식 (4)에서 σ_{crit} 에는 식 (1)과 같이 재료의 진인장강도를 적용하였으며, $\overline{\sigma_{eq}}$ 은 von Mises 등가응력 개념을 적용하여 식 (5)와 같이 결함부에서의 축방향 (σ_a), 원주방향 (σ_c), 그리고 두께방향 (σ_r) 응력성분의 조합으로 나타내었다.

$$\overline{\sigma_{eq}} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_c - \sigma_a)^2 + (\sigma_a - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_c)^2]^{0.5} \quad (5)$$

식 (5)에서 감육 결함과 곡관 형상에 대한 영향을 적절히 반영하기 위해서, σ_a 와 σ_c 는 각각 곡관의 원주방향 균열과 축방향 균열의 균열 잔여면에서 평균응력으로 가정하여 식 (6)과 (7)로 나타내었다.

$$\sigma_a = \frac{PR_m}{2t_{nom}} \left(\frac{1 - x^\alpha \cdot M_a}{1 - x^\alpha} \right) \quad (6)$$

$$\sigma_c = \kappa \frac{PR_m}{t_{nom}} \left(\frac{R_b/R_m + \frac{\sin\beta}{2}}{R_b/R_m + \sin\beta} \right) \left(\frac{1 - x^\alpha/M_c}{1 - x^\alpha} \right) \quad (7)$$

여기서,

$$M_a = 1 - \left[\theta - 2\sin^{-1} \left(\frac{\sin\theta}{2} \right) \right] / \pi$$

$$M_c = \sqrt{1 + 0.8 \left(\frac{L_C}{\sqrt{R_m t_{nom}}} \right)^2}$$

$$x = (t_{nom} - t_p) / t_{nom}$$

식(6)과 (7)에서 σ_a 은 원주방향 표면균열에 대한 Chell의 손상압력 평가식⁽¹⁶⁾에 유한요소해석 결과를 반영하여 보정계수 a 를 추가하였으며, σ_c 역시 축방향 표면균열에 대한 Battelle의 손상압력 평가식⁽¹⁶⁾에 후프응력에 미치는 곡관의 기하학적

영향을 고려하고 유한요소해석 결과를 반영하기 위한 보정계수 a 와 κ 를 추가하였다. σ_r 은 내압에 의한 반경방향의 응력으로 식 (8)과 같이 주어진다.

$$\sigma_r = -\frac{P}{2} \quad (8)$$

따라서, 곡관과 결함의 형상이 주어지면 식 (6), (7), (8)은 내압만의 함수로 표시되므로, 식 (5)에 대입하면 감육 결함에서의 $\overline{\sigma_{eq}}$ 이 내압만의 함수로 주어진다. 이것을 식 (4)에 적용하면 주어진 감육 곡관에 대한 손상압력이 계산된다. 식 (4) ~ (8)을 살펴보면 손상압력이 결함부의 평균 등가응력에 의해 지배되며, 결함부의 평균 등가응력은 결함의 길이, 깊이, 폭에 대한 영향을 모두 반영하고 있다. 또한, $\overline{\sigma_{eq}}$ 는 감육 결함의 길이와 깊이가 영(0)으로 접근하는 경우에 각각 원주방향과 축방향 표면균열의 평균 등가응력으로 표시될 수 있다. 따라서, 제안된 감육 곡관에 대한 손상압력 평가 모델에서는 기존 모델의 문제들이 적절히 개선되었다는 것을 알 수 있다.

4.2 제안된 평가 모델의 신뢰성 확인

Figs. 4 ~ 6에서 실선과 점선은 각각 내호면 결함과 외호면 결함에 대한 손상압력을 식 (4)의 손상압력 평가식을 적용하여 예측한 결과이다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 예측된 손상압력은 결함의 위치에 관계없이 해석 결과와 거의 일치하였으며, 결함 길이, 깊이, 그리고 원주방향 결함 폭에 따른 손상압력의 변화 경향을 적절히 예측하였다. 다만, 결함이 깊고 긴 조건에서 원주방향 결함 폭이 매우 작거나 매우 큰 경우에는 예측 결과가 유한요소해석 결과와 다소 차이를 보였다. Fig. 6에서 알 수 있는 것과 같이 제시된 평가 모델은 곡관의 R_o/t_{nom} 에 따른 영향도 적절히 반영하고 있는 것을 알 수 있다.

한편, Fig. 8은 선행 연구⁽¹²⁾에서 수행된 감육 곡관에 대한 파열시험 결과와 제시된 평가 모델에 의해 예측된 손상압력을 비교한 것으로, 기존의 Li 모델과 Kim 모델에 의해 예측된 결과를 함께 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 기존의 평가 모델들은 모든 시험 조건에서 감육 곡관의 손상압력을 큰 보수성 가지고 예측하였다. Li의 모델은 최고 100% 이상, Kim의 모델은 최

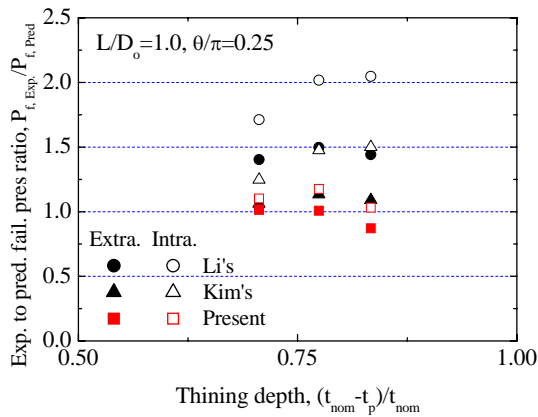
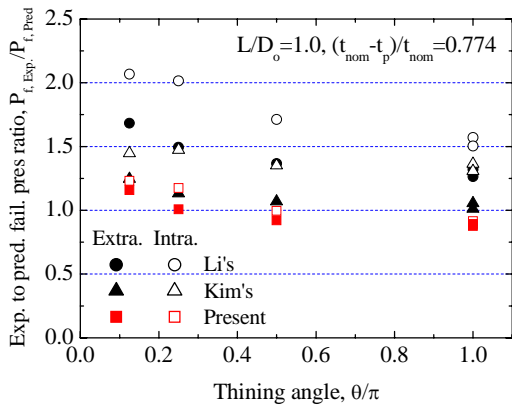
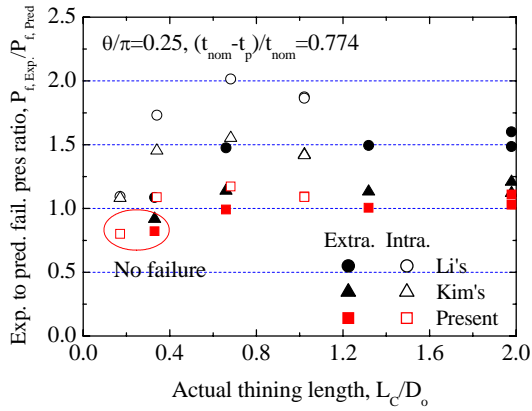


Fig. 8 Comparison of failure pressures obtained from burst tests and predicted by models

고 55% 정도 보수적으로 시험 결과를 예측하였다. 이러한 기존 모델의 보수성은 전체적으로 내호면 결함에서 크게 나타났다. 이에 반해 본 논문에서 제안된 감육 곡관 손상압력 평가 모델은 시험 결과를 최대 17% 이내의 오차 범위에서 예측하였으며, 외호면 결함과 내호면 결함의 오차

정도가 비슷한 것을 알 수 있다. 다만, 본 모델은 결함의 원주방향 폭이 큰 조건($\theta/\pi \geq 0.5$)과 결함 깊이가 깊은 외호면 결함에서 비보수적인 손상압력 예측 결과를 보였다(최대 -13% 정도).

따라서, 기존의 감육 곡관에 대한 손상압력 평가 모델과 비교하여, 본 논문에서 제시된 손상압력 평가 모델은 곡관의 형상이 $R_o/t_{nom} = 10 \sim 20$, $R_b/R_m = 3$ 이고 감육 결함의 형상이 $L/D_o = 0.25 \sim 2.0$, $\theta/\pi = 0.0625 \sim 1.0$, $(t_{nom}-t_p)/t_{nom} = 0.25 \sim 0.75$ 인 범위에서 감육 곡관의 손상 압력을 상당히 정확히 예측하는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 내부에 감육 결함이 존재하는 곡관의 손상압력을 예측하기 위한 평가 모델을 제시하였다. 이를 위해 다양한 결함 형상과 위치, 그리고 곡관 형상을 고려하여 탄소성 유한요소해석을 수행하고, 해석 결과를 바탕으로 감육 곡관에 대한 손상압력 평가 모델을 제시하였다.

유한요소해석 결과와 비교한 결과, 제안된 평가 모델은 감육 곡관의 손상압력을 정확히 예측하였으며 결함 형상과 곡관의 형상에 따른 손상압력의 변화 경향을 정확히 예측하였다. 또한, 제안된 모델을 이용하여 감육 곡관에 대한 파열 시험 결과를 예측한 결과, 기존의 모델에 비해 손상압력을 정확히 예측하였다. 따라서, 본 논문에서 제안된 손상압력 평가 모델은 시험 결과를 기초로 적절한 안전 여유도를 추가한다면 실제 원전 감육 곡관의 손상압력 예측에 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," EPRI/TR-106611-R2.
- (2) Dearnorff, A.F. and Bush, S.H., 1990, "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.

- (3) Japan Atomic Energy Research Institute, 1993, "Technical Reprt on the Piping Reliability Tests at the Japan Atomic Energy Research Institute (Japanese)," JAERI-M, 93-074, pp. 104~115.
- (4) 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.
- (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) Draft for ASME Sec.XI, App.X, "Analytical Evaluation of Internal or External Wall Thinning in Piping Systems," 2003, rev.8.
- (7) Kiefner, J.F. and Vieth P.H., 1988, "New Method Corrects Criterion for Evaluating Corroded Pipe," *Oil Gas J*, Vol. 32, pp. 56~59.
- (8) 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.
- (9) Kamaya, M., Suzuki, T., and Meshii, T., 2008, "Normalizing the Influence of Flow Length on Failure Pressure," *Nucl. Eng. & Design*, Vol. 238, pp. 8~15.
- (10) Li, Z., Yinpei, W., Jin, C. and Cengdian, L., 2001, "Evaluation of a local thinned pressurized elbow," *Int. J. Press. Ves. Piping*, Vol. 78, pp. 697~703.
- (11) Kim, J.W, Na, M.G. and Park, C.Y., 2005, "Development of Failure Pressure Evaluation Model for Internally Wall Thinned Piping Components," *Trans. KSME (A)*, Vol. 29, pp. 947~954.
- (12) Kim, J.W, Na, Y.S, Lee, S.H., and Park, C.Y., 2007, "Evaluation of Failure Pressure of Locally Wall-Thinned Elbow by Real Scale Pipe Tests," ASME PVP-2007, PVP-93444.
- (13) ABAQUS Users manual, version 6.8, Hibbit, Karlson & Sorensen, 2007
- (14) Kim, J.W., Kim, D.H., Park, C.Y. and Lee, S.H., 2007, "Development of Local Failure Criteria for Wall Thinning Defect by Simulated Specimen Tests," *Trans. of KSME (A)*, Vol. 31, No. 3, pp. 304~312
- (15) Park, J.S., Na, Y.S., Kim, J.W., Lee, S.H., 2007, "Validation of a Local Failure Criterion using Results of Failure Test on the Wall-Thinned Elbows," *Proc. of KSME Spring Meeting for Material and Fracture*, pp. 123~128
- (16) Miller, A.G., 1988, "Review of Limit Loads of Structures Containing Defects," *Int. J. of Press. & Piping*, Vol. 32, pp. 197~327.