

〈 논문 〉

직관 배관의 국부 감육결함에 대한 건전성 평가 모델

김진원[†] · 박치용^{*}

(2004년 11월 10일 접수, 2005년 3월 4일 심사완료)

Integrity Evaluation Model for a Straight Pipe with Local Wall Thinning Defect

Jin-Weon Kim and Chi-Yong Park

Key Words: Wall Thinning Defect(감육결함), Integrity Evaluation Model(건전성 평가 모델), Finite Element Analysis(유한요소해석), Nuclear Piping(원자력 배관)

Abstract

The present study proposes the integrity evaluation model for a straight pipe with local wall thinning defect, which reflects the characteristics of thinning shape and loading condition in the piping of nuclear power plant. For this purpose, a series of finite element analyses are performed under various defect geometries and loading conditions, and real pipe experiment data performed previously is employed. The model includes the effect of thinning length as well as thinning depth and width, and also it considers the combined loading effect between internal pressure and bending moment. The proposed model has been validated using the results of finite element analysis and pipe experiment data. The results indicate that the proposed model provides more reliable predictions of pipe failure than the current existing model, in terms of accuracy, consistency, and conservativeness of results.

1. 서론

유동가속부식 (Flow Accelerated Corrosion, FAC)에 의한 배관의 두께 감소(감육, 減肉) 현상은 탄소강 배관의 건전성을 저하시키는 주요 손상 메커니즘중 하나로 알려져 있다.^(1,2) 따라서, 탄소강 배관에서 감육결함은 원전 배관의 건전성 확보 측면에서 중요한 관리 항목으로 대두되고 있으며, 배관계통에서 감육 결함을 예측하고 검출된 결함을 평가할 수 있는 적절한 절차와 방법이 요구되고 있다.

원전 배관의 감육결함에 대한 건전성 평가 절차와 허용 기준을 개발하기 위한 많은 연구들이 국내·외적으로 진행되고 있으며,⁽³⁻⁸⁾ 이들 연구를 바탕으로 간단한 형태의 감육결함 평가 모델이 제시되고 있다.^(4,5,7,8) 또한, ASME B&PV Code

Committee에서는 감육결함에 대한 평가 절차와 평가식을 ASME B&PV Sec.XI의 부록으로 추가하기 위한 노력이 진행되고 있다.⁽⁹⁾ 그러나, 아직까지 감육결함 평가 모델은 대부분 Oil과 Gas 배관을 대상으로 한 내압에 의한 피팅형 외부 감육결함의 손상이나 배관의 면상 균열에 대한 안정성 평가 모델에 기초하고 있다. 따라서, 이들 모델은 하중으로 내압뿐 아니라 굽힘하중이 고려되어야 하고, 결함이 3차원적으로 배관 내면에 넓게 형성되는 원전 감육 배관의 특징을 적절히 고려하지 못하고 있다.⁽⁶⁾

따라서, 본 연구에서는 원전 배관에서 발생하는 감육 결함의 형상과 배관의 하중조건이 적절히 반영된 감육결함 평가 모델을 제시하고자 한다. 특히, 감육결함의 건전성 평가 모델에 감육 길이에 대한 영향과 내압과 굽힘의 복합하중에 대한 영향을 고려함으로써 기존 평가 모델의 한계를 개선하고자 한다. 이를 위해 다양한 결함 형상과 하중 조건에서 유한요소해석을 수행하였으며, 선행연구에서 수행된 감육결함에 대한 실험 배관 실험 결과를 활용하였다.⁽³⁾

[†] 책임저자, 회원, 조선대학교 원자력공학과
E-mail : jwkim@chosun.ac.kr
TEL : (062)230-7109 FAX : (062)230-7763
^{*} 회원, 한전 전력연구원 원자력연구실

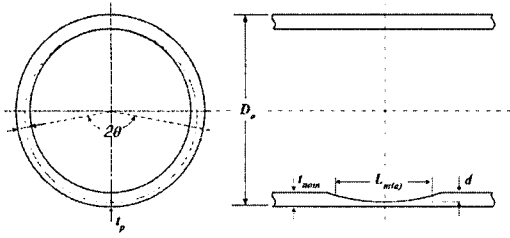


Fig. 1 Definitions of wall thinning defect in a pipe

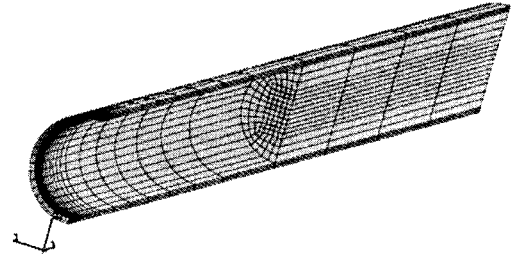


Fig. 2 Finite element model used for analysis

Table 1 Parametric analysis conditions used for finite element analysis

Outer radius, \$R_o\$[mm]	Thickness, \$t_{nom}\$[mm]	Bending type	Pressure, P[MPa]	Thinning depth, \$d/t_{nom}\$	Thinning angle, \$\theta/\pi\$	Thinning length, \$L_{m(a)}/D_o\$
200	20, 40	tension, compression	5, 10, 15	0.301, 0.534, 0.767	0.125, 0.25, 0.5, 1.0	0.1, 0.5, 1.0, 2.0

2. 유한요소해석 결과

2.1 유한요소모델

감육 배관의 손상거동에 미치는 결합 형상과 작용하중의 영향을 파악하기 위해서, 다양한 결합 형상과 하중 조건에서 유한요소해석을 수행하였다. Table 1은 유한요소해석에서 고려된 결합형상과 하중조건을 나타낸 것이다. Fig. 1에 나타낸 것과 같이 감육결합의 형상은 길이 방향과 원주 방향으로 원형인 것을 가정하였다.

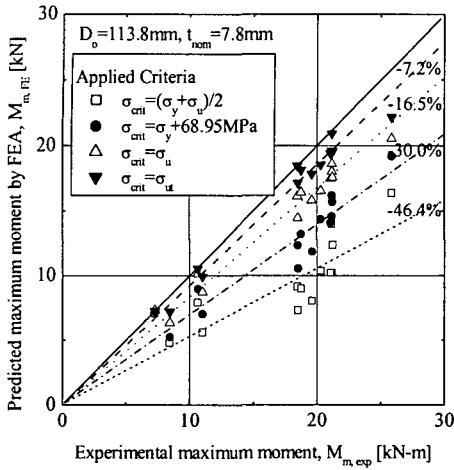
유한요소해석에는 Fig. 2의 3차원 모델이 사용되었으며, 20절점의 Brick 요소가 적용되었다. 작용 하중으로는 내압과 굽힘하중이 동시에 고려되었으며, 굽힘하중은 감육부에 인장응력이 작용되는 경우와 압축응력이 작용되는 경우를 각각 고려하였다. 굽힘하중은 변위제어형태의 4점 굽힘으로 작용되었으며, 작용점의 응력집중 효과를 최소화하기 위해서 하중이 작용되는 부분은 빔으로 모델링하였다. 범용유한요소 프로그램인 ABAQUS⁽¹⁰⁾를 이용하여 탄소성 해석을 수행하였으며, 대변형 옵션을 적용하였다. 해석에 적용된 배관은 원전 2차측에 사용되는 ASTM A333Gr.6 탄소강으로 재료의 영률 (E)은 206.0 GPa, 항복응력 (\$\sigma_y\$)은 302.0 MPa, 공칭 인장응력 (\$\sigma_w\$)은 452.0 MPa, 진 인장응력 (\$\sigma_u\$)은 548.4 MPa이다.

2.2 배관 감육부 손상 기준

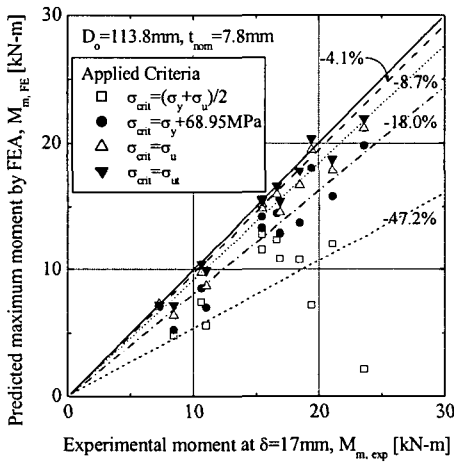
유한요소해석 결과로부터 감육 배관의 최대 굽힘모멘트를 결정하기 위해서는 감육부 손상에 대

한 적절한 기준이 적용되어야 한다. 일반적으로 연성과 인성이 높은 배관의 경우, 결합부의 국부 응력이 감육 배관의 손상을 적절히 예측하는 것으로 보고하고 있다.^(4,6) 따라서, 본 연구에서도 감육부의 가장 얇은 부분에서 등가응력의 두께 방향 평균 값 (\$\overline{\sigma_{eq,app}}\$)이 특정 응력기준을 초과할 때 손상이 발생하는 것으로 가정하였다.

본 논문에서는 재료물성치로 주어지는 응력기준을 실패관 실험과 유한요소해석 결과의 비교를 통해 결정하였다. 즉, 유한요소해석을 이용하여 실패관 실험⁽³⁾을 시뮬레이션하고, 그 결과를 실험 결과와 비교하여 감육 배관의 최대 굽힘모멘트가 가장 적절히 예측하는 값을 응력기준으로 결정하였다. Fig. 3은 실패관 실험을 통해 구한 감육배관의 최대 굽힘모멘트 (\$M_{m,exp}\$)와 유한요소해석 결과로부터 각 기준에 의해 결정된 최대 굽힘모멘트 (\$M_{m,FE}\$)를 비교한 것이다. 압축응력이 작용되는 경우 [Fig. 3(b)]에는 손상 특성상 실패관 실험 결과에서 최대 굽힘모멘트를 명확히 정의하는 것이 어렵다. 따라서, 실험 결과의 하중-변위 곡선에서 하중이 수렴하기 시작하는 변위 (\$\delta=17\text{mm}\$)에 해당하는 굽힘모멘트를 최대 굽힘모멘트로 정의하였다.⁽³⁾ 그림에서 알 수 있는 것과 같이 감육부에 작용되는 응력 형태에 관계없이 재료의 진 인장응력이 가장 정확한 예측 결과를 보였으며, 공칭 인장응력은 진 인장응력에 비해 오차가 크지만 모든 조건에서 보수적이고 일관된 예측 결과를 보였다. 따라서, 본 논문에서는 원전 배관 건전성



(a) Tension



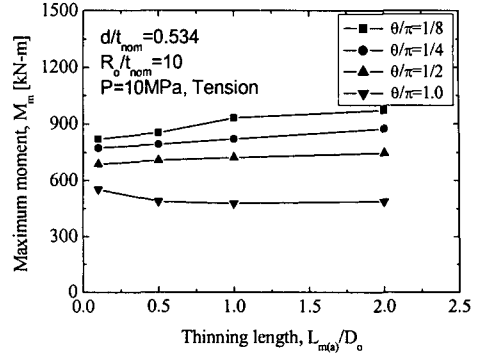
(b) Compression

Fig. 3 Comparison of experimental and predicted maximum moments for each failure criterion

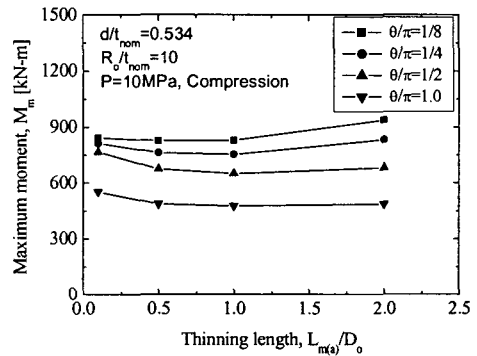
에 대한 보수성을 고려하여, 식 (1)과 같이 공칭 인장응력을 응력기준으로 적용하였다.

$$\sigma_{eq, app} \geq \sigma_u \quad (1)$$

2.3 결함 형상과 하중에 따른 최대 굽힘모멘트
 감육 배관의 손상에 미치는 결함 형상과 작용 하중의 영향을 파악하기 위해서, Table 1의 조건에서 수행된 유한요소해석 결과에 식 (1)의 기준



(a) Tension



(b) Compression

Fig. 4 Dependence of maximum moment of wall thinned pipe on the length of defect

을 적용하여 최대 굽힘모멘트를 구하고 해석 인자에 따라 살펴보았다. Fig. 4는 결함 길이 ($L_{m(a)}$)에 따른 최대 굽힘모멘트의 변화를 나타낸 것으로 결함부에 작용되는 응력의 형태에 따라 서로 다른 결함 길이 의존성을 보였다. 감육부에 인장 응력이 작용되는 경우 [Fig. 4(a)], 결함의 폭이 $\theta/\pi \leq 0.5$ 에서는 결함 길이에 따라 최대 굽힘모멘트가 증가하지만, $\theta/\pi = 1.0$ 에서는 결함 길이에 따라 감소하는 경향을 보였다. 감육부에 압축 응력이 작용되는 경우 [Fig. 4(b)]에는 전반적으로 결함 길이에 따라 최대 굽힘모멘트가 감소하다 일정한 값에 수렴하지만, 결함 폭이 작고 그림에는 나타내지 않았지만 결함 깊이가 작은 경우에는 최대 굽힘모멘트가 결함 길이에 따라 감소하다 증가하는 경향을 보였다. 이러한 경향은 선행연구들의 실험 및 해석 결과와 일치하는 것이다.^(3,4)

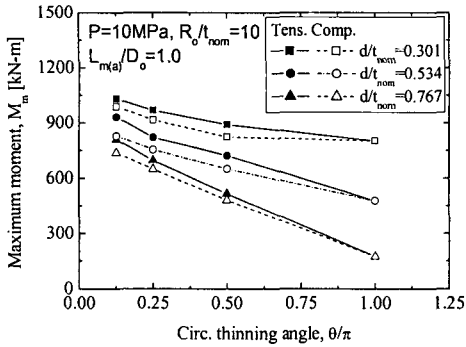


Fig. 5 Dependence of maximum moment on the thinning depth and angle

결합 길이에 따른 이와 같은 거동은 결합부에 작용되는 응력과 결합형상에 따라 서로 다른 손상모드를 보이기 때문이다. 감속부에 인장응력이 작용하는 경우는 결합부에서 균열 발생 또는 단면변형 형태의 손상이 발생한다.^(3,4) 따라서 결합 길이가 짧을수록 응력집중에 의한 균열 발생 가능성이 증가하여 최대 굽힘모멘트가 감소하고, 일정한 결합 길이 이상에서는 응력 집중 효과가 작아져 거의 일정한 최대 굽힘모멘트를 보이는 것으로 판단된다. 한편, 압축응력이 작용되는 경우는 주요 손상모드가 국부좌굴이다.^(3,4) 따라서, 결합 길이에 따른 최대 굽힘모멘트 감소는 결합 길이 증가에 따른 국부좌굴의 용이성에 기인한다.^(3,7) 그러나, 결합의 폭과 깊이가 작은 경우, 결합 길이에 따라 최대 굽힘모멘트가 감소하다 증가하는 경향은 해석 결과만으로 명확히 설명하기 어렵다. 다만, 결합의 폭과 깊이가 작은 경우에는 압축응력이 작용될지라도 결합부에서 국부좌굴에 의한 변형이 크지 않고, 감속부가 약간 팽창하는 형태의 단면변형이 발생한다. 따라서, 단면변형이 굽힘에 대한 배관의 단면계수를 변화시키므로 최대 굽힘모멘트에 영향을 미칠 수 있는 것으로 예측된다. 그러나, 이를 확인하기 위해서는 배관 실험을 통한 검토가 필요하다. 원주방향 전체가 감속된 경우 ($\theta/\pi = 1$)는 결합부에 인장응력과 압축응력이 동시에 작용되며, 결합 길이가 증가됨에 따라 감속부의 손상이 압축응력에 의해 지배되는 것으로 알려져 있다.^(3,7) 따라서, 결합 길이에 따른 변화 경향이 압축응력이 작용되는 경우

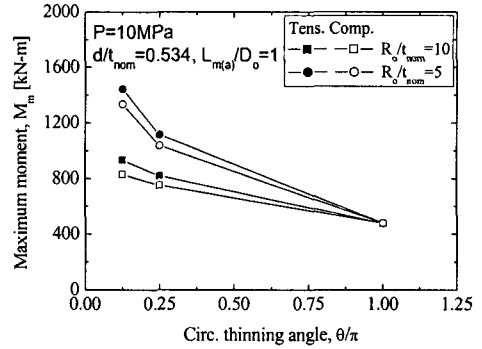


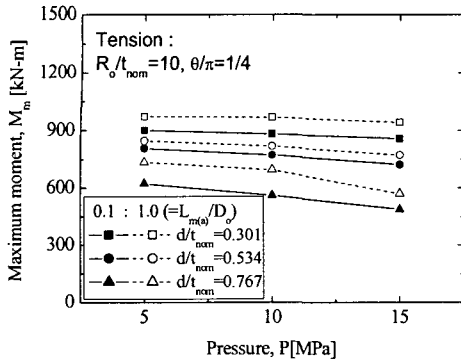
Fig. 6 Dependence of maximum moment on the outer radius to thickness ratio

와 유사하게 나타나는 것으로 판단된다.

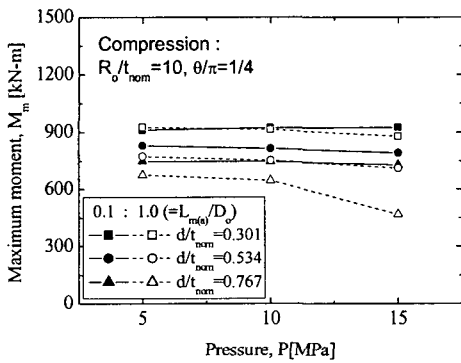
감속결합의 깊이와 폭에 따른 최대 굽힘모멘트를 살펴보면, Fig. 5에서 알 수 있는 것과 같이 결합 깊이와 폭이 증가함에 따라 최대 굽힘모멘트는 거의 선형적으로 감소하며, 감속부에 압축응력이 작용되는 경우에 비해 인장응력이 작용될 때 원주방향 폭에 따른 최대 굽힘모멘트의 감소가 크게 나타났다. 결합 깊이에 따른 감속 배관의 최대 굽힘모멘트 역시 거의 선형적으로 감소하였다. 결합 깊이와 원주방향 폭에 따른 최대 굽힘모멘트 감소는 각각 원주방향 폭과 깊이가 증가할수록 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

한편, 감속 배관의 형상에 따른 영향을 살펴보기 위해서, 일정한 깊이 ($d/t_{nom} = 0.534$)와 길이 ($L_{m(a)}/D_o = 1$)의 결합을 갖는 외반경 대 공칭두께 비 (R_o/t_{nom})가 5와 10인 배관의 최대 굽힘모멘트를 원주방향 결합 폭에 따라 비교하였다 (Fig. 6). 그림에서 알 수 있는 것과 같이 R_o/t_{nom} 가 증가함에 따라 최대 굽힘모멘트는 감소하였고, 결합의 원주방향 폭이 작을수록 R_o/t_{nom} 에 따른 차이가 크게 나타났다. 이러한 경향은 감속부에 작용되는 응력 조건에 관계없이 유사하였다.

감속 배관의 손상에 미치는 내압의 영향을 파악하기 위해서 내압이 5, 10, 15 MPa인 조건에서 최대 굽힘모멘트를 비교하였다. Fig. 7에서 알 수 있는 것과 같이 감속부에 작용되는 응력의 형태에 관계없이 내압이 증가됨에 따라 최대 굽힘모멘트는 감소하였다. 그러나, 결합의 깊이와 길이가 작은 경우에는 감소 정도가 크지 않았으며, 결합의 깊이와 길이가 증가됨에 따라 내압의 영



(a) Tension



(b) Compression

Fig. 7 Dependence of maximum moment of wall thinned pipe on the internal pressure

향이 크게 증가하였다. 또한, 내압이 5 MPa에서 10 MPa로 증가하는 경우에 비해 10 MPa에서 15 MPa로 증가할 때 최대 굽힘모멘트의 감소가 크게 나타났다.

3. 감육 배관의 건전성 평가 모델

3.1 감육 배관의 건전성 평가 모델 제안

앞서 살펴본 바와 같이 감육 배관의 최대 굽힘모멘트는 결함의 깊이, 원주방향 폭, 뿐만 아니라 길이에 영향을 받았다. 또한, 결함 길이의 영향은 감육부에 작용되는 응력 형태와 결함 형상에 따라 다른 경향을 보였다. 하중으로 내압과 굽힘하중이 동시에 작용되는 경우, 내압의 크기가 일정한 값 이하에서는 감육 배관의 최대 굽힘모멘트에 거의 영향을 미치지 않았지만, 내압이 일정한

값 이상으로 증가하면 최대 굽힘모멘트가 크게 감소하는 것을 알 수 있었다.

따라서, 본 연구에서는 감육 배관에 대한 건전성 평가 모델의 기본 형태를 식 (2)와 같이 제시하였다. 즉, 일정 내압 이하에서는 감육 배관의 최대 굽힘모멘트에 미치는 내압의 영향이 무시되었으며, 일정 압력 이상에서는 내압에 따라 최대 굽힘모멘트가 타원형 함수를 따라 감소하는 것으로 가정하였다. 이때, 기준 내압의 크기는 배관 감육부 손상압력의 75%로 유한요소해석 결과를 기초로 결정되었다.

$$M_m/M_f = 1.0 \text{ for } (0.0 \leq P_m/P_f \leq 0.75)$$

$$\left(\frac{M_m}{M_f}\right)^2 + \left(4\frac{P_m}{P_f} - 3\right)^2 = 1.0 \quad (2)$$

$$\text{for } (0.75 \leq P_m/P_f \leq 1.0)$$

여기서, M_f 는 손상 굽힘모멘트, P_f 는 손상 압력, M_m 은 최대 굽힘모멘트, P_m 은 최대 작용내압이다.

3.2 감육 배관의 손상 굽힘모멘트

식 (2)에서 손상 굽힘모멘트 (M_f)는 감육부에 작용되는 응력의 형태에 따라 인장응력이 작용되는 경우는 식 (3), 압축응력이 작용되는 경우는 식 (4)로 주어진다. 식 (3)과 (4)는 본 연구에서 제안된 것으로 감육 배관의 건전성 평가를 위해 Hitachi model⁽⁴⁾에서 적용하고 있는 순단면 붕괴모멘트 (M_{NSC}) 평가식에 감육부 길이의 영향을 추가한 것이다. 감육부 길이에 대한 영향은 본 연구에서 수행된 유한요소해석 결과를 기초로 유도되었다.

$$M_f = M_{NSC} (1 + X_T) \left\{ \frac{L_m(a)}{\sqrt{R_o t_{nom}}} \right\}^{\frac{\sqrt{2}}{10} x \left(1 - \frac{2\theta}{\pi}\right)} \quad (3)$$

$$M_f = M_{NSC} (1 + X_C) \left\{ 1 - \frac{x}{\sqrt{2}} \frac{10 t_{nom}}{R_o} \frac{\theta}{\pi} \left[1 - \exp\left(-\frac{L_m(a)}{\sqrt{2} R_o t_{nom}}\right) \right] \right\} \quad (4)$$

여기서, 원주방향 표면균열에 대한 순단면 붕괴모멘트, M_{NSC} 는 결함의 원주방향 폭에 따라 각각 다음과 같이 주어진다.^(4,11)

$$M_{NSC} = 2\sigma_f R_m^2 t_{nom} (2\sin\beta - x\sin\theta)$$

$$\text{for } (\theta + \beta) \leq \pi$$

$$\beta = 0.5 \left[\pi - x\theta - \frac{\pi P_m}{\sigma_f} \right]$$

$$M_{NSC} = 2\sigma_f R_m^2 t_{nom} [2(1-x)\sin\beta - x\sin\theta] \quad \text{for } (\theta + \beta) > \pi$$

$$\beta = x + \frac{1}{1-x} \left[\frac{x\theta - \pi}{2} - \frac{\pi R_m P_m}{4\sigma_f t_{nom}} \right]$$

여기서, σ_f 는 유동응력으로 항복응력과 공칭인장응력의 평균이며, R_m 은 배관의 평균반경이고, β 는 굽힘에 대한 중립축의 반각이고, x 는 다음과 같이 정의되는 결합 깊이이다.

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

식 (3)과 (4)에서 X_T 와 X_C 는 결합의 폭과 깊이에 관한 함수로 유한요소해석 결과를 curve fitting하여 유도된 것으로 다음과 같다.

$$X_T = A_0 + A_1 \left(\frac{\theta}{\pi} \right) + A_2 \left(\frac{\theta}{\pi} \right)^2 + A_3 \left(\frac{\theta}{\pi} \right)^3$$

$$X_C = B_0 + B_1 \left(\frac{\theta}{\pi} - \frac{1}{4} \right)$$

여기서, 계수 A_i 와 B_i 는 각각 다음과 같다.

$$A_0 = [a_{00} + a_{01}x + a_{02}x^2] \exp\left(\frac{P_m - 10}{10\pi}\right)$$

$$A_1 = a_{10} + a_{11}x + a_{12}x^2$$

$$A_2 = a_{20} + a_{21}x + a_{22}x^2$$

$$A_3 = a_{30} + a_{31}x + a_{32}x^2$$

$$B_0 = [b_{00} + b_{01}x] \exp\left(1 - \frac{P_m}{10}\right)$$

$$B_1 = [b_{10} + b_{11}x] \frac{R_o}{t_{nom}}$$

여기서, 상수 a_{ij} 와 b_{ij} 는 각각 다음과 같다.

$$a_{ij} = \begin{cases} 0.20682; & -1.15265; & 0.76300; \\ -1.65139; & 8.55213; & -8.95697; \\ 2.00991; & -11.61622; & 16.90202; \\ -0.40228; & 4.03723; & -8.24105; \end{cases}$$

$$b_{ij} = \begin{cases} -0.00374; & 0.02197; \\ -0.05271; & 0.24125; \end{cases}$$

3.3 감육 배관의 손상 압력

식 (2)에서 감육부에 대한 손상 압력 (P_f)은 결합 형상과 재료물성치에 따라 식 (5)로 주어진다. 식

(5)는 내부 감육 결합에 대한 손상압력 평가식으로 내압에 대한 유한요소해석 결과를 바탕으로 외부 감육 결합에 대한 Modified B31G⁽¹²⁾의 손상압력 평가식을 본 연구에서 수정한 것이다. 즉, 기존의 Modified B31G 평가식에 결합 폭에 대한 영향을 추가하고, σ_f 대신 σ_u 를 응력기준으로 적용하였으며, Folias factor (M)의 일부 계수를 수정하였다.

$$P_f = \frac{\sigma_u t_{nom}}{R_m} \left(\frac{1-x}{1-xM^{-1}} \right) \Omega(\theta) \quad (5)$$

여기서, 결합 폭에 대한 영향 함수, $\Omega(\theta)$ 는

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

$$C_i = 1.16050; -0.45162; 0.19352;$$

이고, 수정된 Folias factor (M)은 다음과 같다.

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

$$L = \frac{L_m^2(a)}{D_o t_{nom}}$$

3.4 감육결합 건전성 평가 모델의 검증

본 연구에서 제안된 감육 결합에 대한 건전성 평가 모델의 타당성을 검토하기 위해서, 2가지 형태의 비교 검증을 수행하였다. 먼저, 유한요소해석 결과와 비교하였으며, 감육 배관의 실험 결과와 비교하였다.

Fig. 8은 식 (2)의 평가 모델에 의해 예측된 감육 배관의 최대 굽힘모멘트와 유한요소해석에서 주어진 최대 굽힘모멘트를 비교한 것이다. 그림에는 Hitachi model⁽⁴⁾에서 적용하고 있는 순간면붕괴식에 의한 예측 결과를 함께 나타내었다. 비교 결과, 제안된 평가식은 전체적으로 해석 결과를 잘 예측하였다. 다만, 감육부에 인장응력이 작용되는 경우에는 결합의 깊이가 작고, 원주방향 폭이 크고, 길이가 짧은 조건에서 평가 결과의 오차가 증가하였으며, 압축응력이 작용되는 경우에는 결합의 깊이가 작고, 길이가 긴 조건에서 평가 모델의 오차가 증가하였다. 그림에는 나타내지 않았지만, $R_o/t_{nom} = 5$ 인 배관이 $R_o/t_{nom} = 10$ 인 배관에 비해 큰 오차를 보였다. 순간면붕괴식을 적용하고 있는 기존의 Hitachi model 역시 유한요

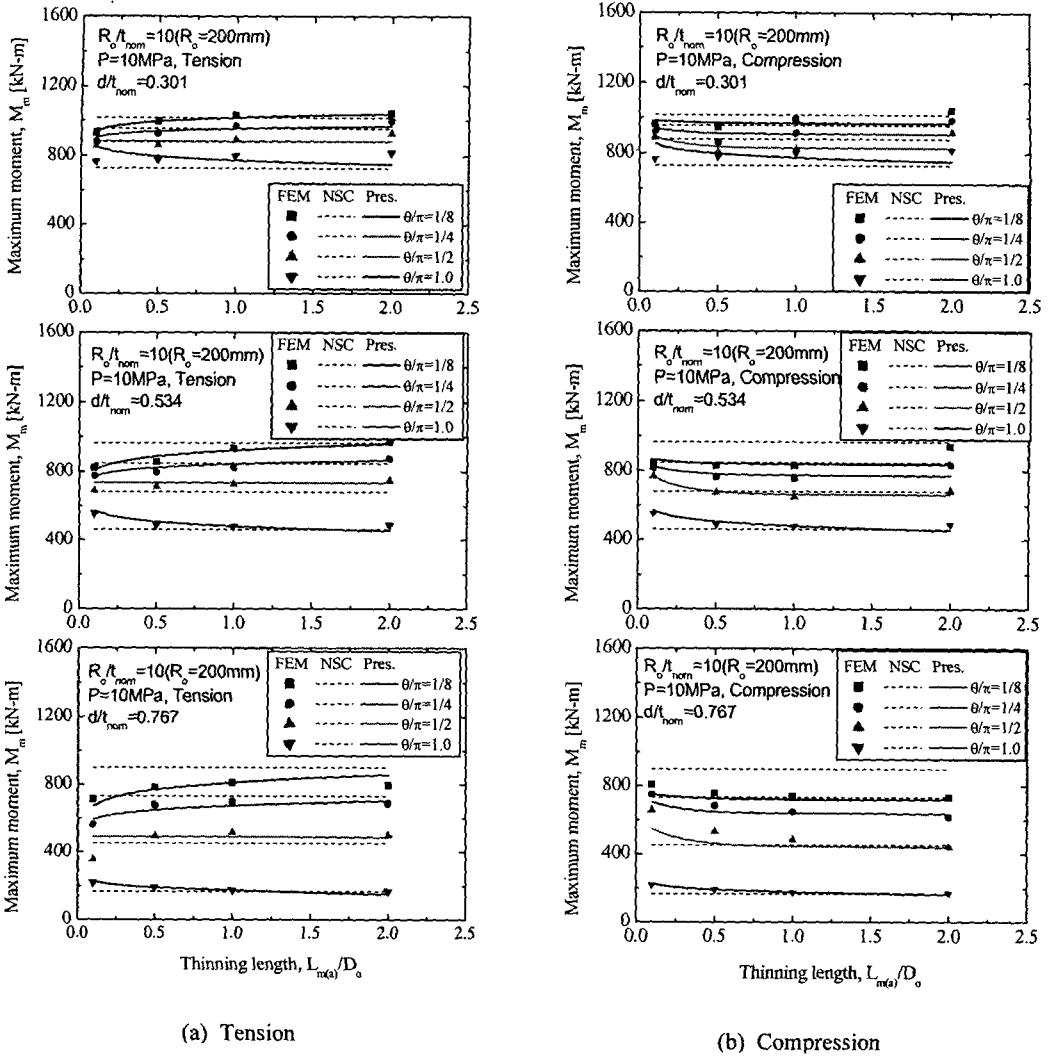
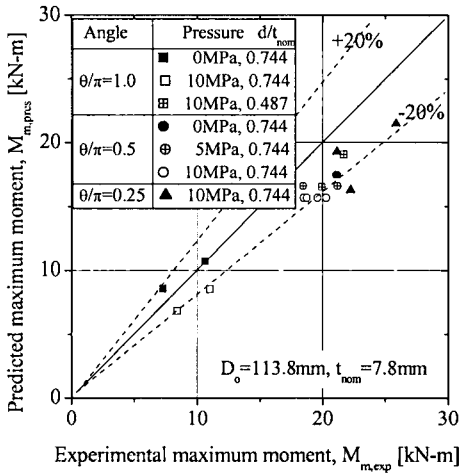


Fig. 8 Comparisons of maximum moments predicted by proposed model and FE results

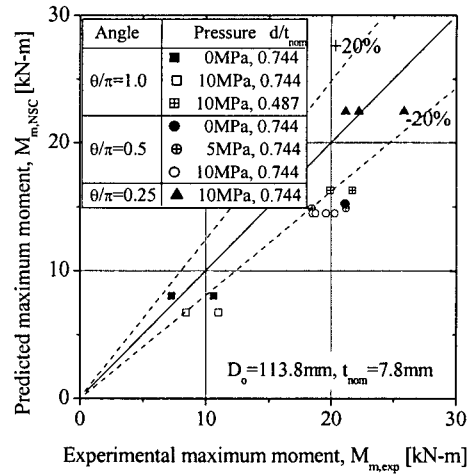
소해석 결과를 어느 정도 예측하였다. 그러나, 본 논문에서 제안된 평가식에 비해 결함 길이에 따른 오차가 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 이것은 Hitachi model에서 적용하고 있는 순단면붕괴식이 배관의 원주방향 현상 균열에 대한 평가식으로 감속 결함의 길이에 대한 영향을 반영하지 못하기 때문인 것으로 판단된다.

한편, 본 논문에서 제안된 평가 모델을 이용하여 선행연구⁽³⁾에서 수행된 배관 실험결과를 예측하고, 결과를 비교하였다. Fig. 9에서 알 수 있는 것과 같이 $\theta/\pi = 1.0$, $P = 0$ MPa인 조건을 제외한

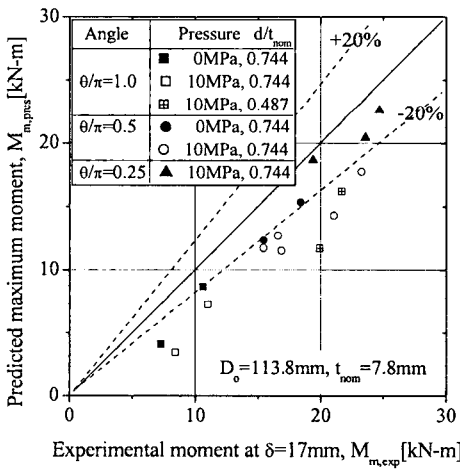
모든 실험 조건에서 약 20% 정도의 보수성을 가지고 실험 결과를 잘 예측하였으며, 오차 정도는 감속부에 작용되는 응력의 형태에 관계없이 유사하였다. 이들 결과는 Fig. 10의 Hitachi model에 의한 실험 결과의 예측과 비교할 때, 최대 굽힘모멘트 평가 결과의 일관성, 데이터의 분산, 그리고 보수성 측면에서 우수한 결과인 것을 알 수 있다. 본 연구에서 제안된 모델의 이러한 특성은 기존의 모델과 달리 결함 길이에 대한 영향과 내압에 의한 영향이 평가 모델에 적절히 반영되었기 때문으로 판단된다.



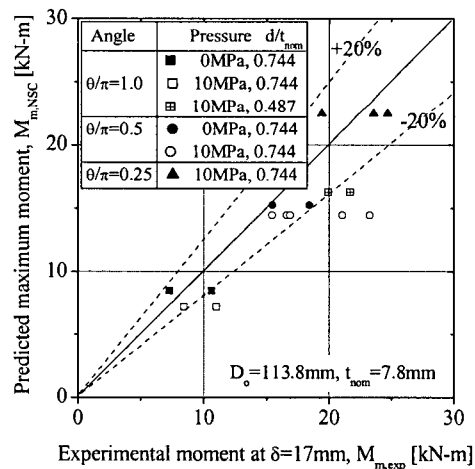
(a) Tension



(a) Tension



(b) Compression



(b) Compression

Fig. 9 Comparisons of maximum moments predicted by present model and pipe experiment

Fig. 10 Comparisons of maximum moments predicted by Hitachi model and pipe experiment

4. 결론

본 논문에서는 직관에 존재하는 감육 결합에 대한 건전성 평가 모델을 개발하기 위해서, 다양한 결합 형상과 하중 조건에서 감육 배관에 대한 유한요소해석을 수행하고, 이를 바탕으로 새로운 평가 모델을 제시하였다. 이들 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 감육 배관의 최대 굽힘모멘트는 결합의 깊

이와 원주방향 폭 뿐 아니라 결합의 길이에 영향을 받으며, 최대 굽힘모멘트에 미치는 결합 길이의 영향은 감육부에 작용되는 응력형태, 결합의 폭과 깊이에 의존하였다.

(2) 감육 배관의 최대 굽힘모멘트는 결합의 깊이와 원주방향 폭이 증가함에 따라 거의 선형적으로 감소하였으며, 결합 깊이와 폭에 따른 최대 굽힘모멘트의 감소 정도는 각각 결합 폭과 깊이가 증가할수록 크게 나타났다.

(3) 감육부의 손상압력에 대한 작용 내압의 비가 일정한 값 이하에서는 감육 배관의 최대 굽힘 모멘트에 미치는 내압의 영향이 거의 없었으나, 그 이상에서는 내압의 증가에 따라 최대 굽힘모멘트가 급격히 감소하였다.

(4) 유한요소해석 및 배관실험 데이터와 비교한 결과, 제안된 모델은 감육 배관 손상 예측의 일관성, 데이터 분산, 그리고 결과의 보수성 측면에서 기존의 평가 모델에 비해 우수한 결과를 보였다. 이것은 제안된 모델이 결함 길이와 내압에 대한 영향을 반영하고 있기 때문으로 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) 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) 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.
- (4) 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.
- (5) JAERI, 1993, "Technical Reprt on the Piping Reliability Tests at the Japan Atomic Energy Research Institute (Japanese)," JAERI-M, 93-074, pp. 104~115.
- (6) Wilkowski, G, Stepens, 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.
- (7) 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.
- (8) Iyer, S. and Kumar, R., 2002, "Application of Code Case N-597 for Local Thinning Assessment for Class 1 Piping," ASME PVP-Vol. 440, pp. 93~101.
- (9) American Society of Mechanical Engineer, ASME B&PV Sec.XI, App.X (Draft), 2003 (Rev.8), "Analysis Evaluation of Internal or External Wall Thinning in Piping Systems."
- (10) Hibbitt, Karlson and Sorensen Inc., 2001, "ABAQUS ver. 6.2 User's Manual"
- (11) Kenninen, M.F., Zahoor, A., Wilkowski, G., Abousayed, I., Msrschall, C., Broek, D., Sampath, S., Rhee, H. and Ahmad, J., 1982, "Instability Predictions for Circumferentially Cracked Type-304 Stainless Steel Pipes under Dynamic Loading," EPRI NP-2347, Vol. 1&2.
- (12) Kiefner, J.F and Vieth, P.H., 1990, "New Method Corrects Criterion for Evaluating Corroded Pipe," *Oil and Gas Journal*, pp. 56~59.