

< 논문 >

복합하중이 작용하는 국부감육배관 평가법 개발

심도준* · 김윤재† · 김영진** · 박치용***
(2005년 6월 9일 접수, 2005년 9월 16일 심사완료)

Development of Assessment Methodology for Locally Wall-Thinned Pipe Under Combined Loading

Do-Jun Shim, Yun-Jae Kim, Young-Jin Kim and Chi-Yong Park

Key Words : Wall-Thinned Piping(감육배관), Reference Stress Approach(참조응력법), Finite Element Analysis(유한요소해석), Combined Loading(복합하중)

Abstract

Recently authors have proposed a new method to estimate failure strength of a pipe with local wall thinning subject to either internal pressure or global bending. The proposed method was based on the equivalent stress averaged over the minimum ligament in the locally wall thinned region, and the simple scheme to estimate the equivalent stress in the minimum ligament was proposed, based on the reference stress concept. This paper extends the new method to combined internal pressure and global bending. The proposed method is validated against FE results for various geometries of local wall thinning under combined loading. The effect of internal pressure is also investigated in the present study. Comparison of maximum moments, predicted according to the proposed method, with published full-scale pipe test data for locally wall-thinned pipes under combined internal pressure and global bending, shows good agreement.

1. 서 론

침부식에 의한 배관의 감육은 원자력배관의 건전성평가에 있어서 중요한 현안이다.⁽¹⁻³⁾ 이와 관련하여 지난 몇년간 감육배관의 파손강도를 예측하기 위한 다양한 평가방법들이 제안되었다.⁽¹⁻¹⁰⁾ 현재까지 개발된 대부분의 평가방법들은 한계하중법(실단면붕괴)에 기초하고 있다. 한계하중법은 결함이 존재하는 배관의 최대지지하중을 예측할 수 있는 유용한 방법이나, 많은 경우에 있어서 실험적인 검증(실배관 실험)이 수반되어야 한다는 단점이 있다.

최근 저자들은 참고문헌 (11)에서 단일하중(내압

또는 굽힘모멘트)이 작용하는 국부감육배관의 파손강도를 예측하기 위한 새로운 평가법을 제안하였다. 이 평가법은 참조응력법⁽¹²⁻¹⁴⁾에 기초한 방법으로서, 감육부 최심점에서의 등가응력을 예측하고 이를 재료강도(유동응력, 인장강도, 진인장강도 등)와 비교함으로써 국부감육배관의 최대지지하중을 예측하는 방법이다. 이 평가법은 배관형상, 감육형상, 배관재질에 무관하게 적용이 가능한 공학적인 평가법이다. 하지만, 가동중인 대부분의 원전 배관은 내압과 자중에 의한 굽힘모멘트를 동시에 받고 있다. 따라서, 이와 같은 하중을 받는 배관에 존재하는 감육부에 대한 평가를 수행하기 위해서는, 내압과 굽힘모멘트를 동시에 고려하는 평가법이 필요하다.

따라서, 본 논문의 목적은 내압과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 국부감육배관에 대한 평가법을 개발하는 것이다. 본 평가법은 참고문헌 (11)에서 단일하중에 대하여 제시한 평가법에 기초한 방법이다. 본 논문에서는 제시한 평가식의 타당성을 검증하기 위해 다양한 배관형상, 감육형상 및 내압

† 책임저자, 회원, 고려대학교 기계공학과
E-mail : kimy0308@korea.ac.kr
TEL : (02)3290-3372 FAX : (02)926-9290

* 회원, University of Illinois, Urbana-Champaign

** 회원, 성균관대학 기계공학부

*** 회원, 한전 전력연구원 원자력연구실

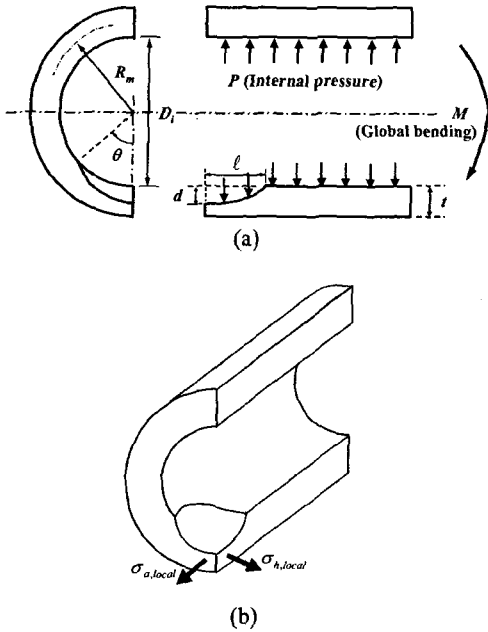


Fig. 1 Schematic illustration of a pipe with idealized local wall thinning, under combined internal pressure P and global moment M

을 고려하여 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 또한, 본 평가식의 유용성을 입증하기 위해 평가식으로부터 도출한 감육배관의 최대 모멘트를 실험실 실험결과와 비교하였다.

2. 실단면 한계하중 접근법

Fig. 1(a)는 내압과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 감육배관을 도시한 것으로서, D_i 는 배관내경, R_m 은 배관의 평균반경, t 는 배관두께이다. 감육부의 주요변수로 d 는 최대감육깊이, l 은 감육길이, θ 는 감육각도(원주방향감육길이)이다.

국부감육배관의 파손강도를 평가하는 기존의 평가법에서는 일반적으로 실단면 한계하중해석 (net-section limit load analysis)법을 사용한다. 예를 들면, 반타원 표면균열배관에 내압과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 경우에 대한 한계하중식은 다음과 같이 표현된다.⁽¹⁵⁾

$$\frac{PR_m}{2t\sigma_f} = 1 - \frac{d}{t} \frac{\sin^{-1}\left(\frac{M}{4R_m^2 t \sigma_f} + \frac{d f(\theta)}{t 2\theta}\right)}{\pi} \quad (1)$$

$$f(\theta) = 0.7854\theta^2 - 0.0982\theta^4 + 0.0041\theta^6 - 0.000085\theta^8 \quad (2)$$

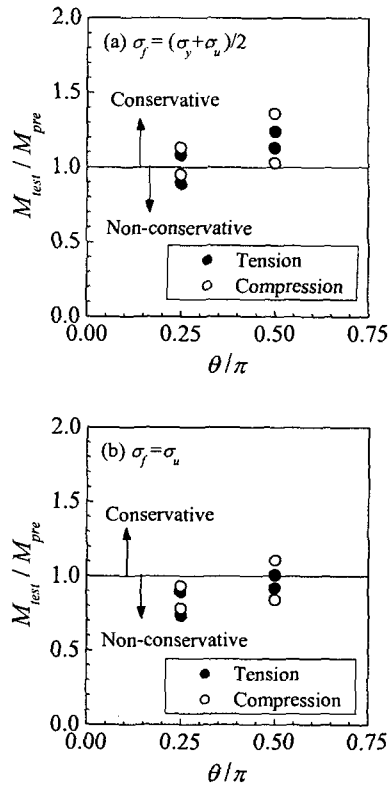


Fig. 2 Comparison of maximum moment from full-scale pipe test data with those from existing limit load solution for pipes with local wall thinning under combined internal pressure and global bending using (a) $\sigma_f = (\sigma_y + \sigma_u)/2$ and (b) $\sigma_f = \sigma_u$. Detailed information on pipe test data is given in Table 1

식 (1)은 평형응력장으로부터 유도된 식으로 하한계(lower bound) 한계하중을 나타낸 것이다. 식 (1)에서 σ_f 는 유동응력(flow stress)으로서 항복강도(σ_y)와 (공칭)인장강도(σ_u)의 평균, $(\sigma_y + \sigma_u)/2$ 또는 인장강도로 정의될 수 있다.⁽³⁾

Fig. 2는 내압과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 실험실 실험⁽¹⁰⁾으로부터 얻은 최대 모멘트와 식 (1)을 이용해서 예측한 결과를 비교한 것으로, $\sigma_f = (\sigma_y + \sigma_u)/2$ 인 경우와 $\sigma_f = \sigma_u$ 인 경우에 대한 결과를 나타내고 있다. Table 1은 실험실 실험에 대한 결과를 정리한 것이다. 실험에 사용된 배관재료는 원자력발전소 2차계통에서 널리 사용되고 있는 ASTM A333 Gr. 6이었다. 실험에 사용된 배관의 외경(D_o)과 두께(t)는 각각 113.8mm와 7.8mm이었다. 4 가지 감육형상을 고려하였으며, 모든 경우에 대해 감육부의 형상은 원형으로 가공되었다. Table 1에 나타낸 바와 같이 감육부의 위치에 따라 감육부에는 인장응력 또는 압축응력이 작용하게 된다.

Table 1 Descriptions of experimental data for pipes with local wall thinning, under combined internal pressure and global bending

| Specimen | d/t | θ/π | $\rho = \frac{\ell}{\sqrt{R_m t}}$ | P (MPa) | Loading type ¹ | $\frac{M_{test}}{M_{pre}^a}$ | $\frac{M_{test}}{M_{pre}^b}$ | $\frac{M_{test}}{M_{pre}^c}$ | $\frac{M_{test}}{M_{pre}^d}$ |
|----------|-------|--------------|------------------------------------|-----------|---------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| SP-12 | 0.74 | 0.25 | 0.79 | 10 | Tension | 0.89 | 0.74 | 1.00 | 0.82 |
| SP-13 | 0.74 | 0.25 | 6.52 | 10 | Tension | 1.08 | 0.89 | 1.14 | 0.94 |
| SP-1 | 0.74 | 0.5 | 0.79 | 10 | Tension | 1.13 | 0.92 | 1.29 | 1.07 |
| SP-4 | 0.74 | 0.5 | 6.52 | 10 | Tension | 1.24 | 1.01 | 1.34 | 1.11 |
| SP-15 | 0.74 | 0.25 | 0.79 | 10 | Compression | 1.13 | 0.93 | 1.34 | 1.09 |
| SP-16 | 0.74 | 0.25 | 6.52 | 10 | Compression | 0.95 | 0.78 | 1.40 | 1.08 |
| SP-5 | 0.74 | 0.5 | 0.79 | 10 | Compression | 1.36 | 1.11 | 1.65 | 1.35 |
| SP-8 | 0.74 | 0.5 | 6.52 | 10 | Compression | 1.03 | 0.84 | 1.57 | 1.21 |

Pipe geometry : $D_o=113.8mm, t=7.8mm$

Material properties (ASTM A333 Gr.6): $\sigma_y=302 MPa, \sigma_u=449.8MPa, (\sigma_y + \sigma_u)/2=376MPa$

For all cases, defect has a circular shape.

- 1 Type of loading acting on the section of wall thinned area.
- a Predicted maximum moment based on net-section limit load analysis using $(\sigma_y + \sigma_u)/2$.
- b Predicted maximum moment based on net-section limit load analysis using σ_u .
- c Predicted maximum moment based on $\sigma_{local}^c = \sigma_u$ criterion.
- d Predicted maximum moment based on $\sigma_{local}^d = \sigma_{u,d}$ criterion.

Fig. 2(a)에 나타난 바와 같이 식 (1)과 $\sigma_f = (\sigma_y + \sigma_u)/2$ 를 사용하여 예측한 최대 모멘트는 실험결과에 비해 보수적인 경향을 나타내었다. 반면, Fig. 2(b)에 나타난 바와 같이 $\sigma_f = \sigma_u$ 를 사용한 결과는 비보수적인 경향을 나타내었다. 따라서, 감육배관의 파손강도를 예측하기 위해서는 $\sigma_f = (\sigma_y + \sigma_u)/2$ 를 이용한 실단면 한계하중해석이 가능할 것으로 판단된다.

위에서 나타난 바와 같이 실단면 한계하중해석에는 장점과 단점이 있다. 즉, 식 (1)과 같은 평가식을 쉽게 개발할 수 있으나, 재료에 대한 적절한 유동응력을 선택하여 개발된 평가식을 검증하기 위해서는 실패관 실험결과가 필요하다.

3. 참조응력 접근법

저자들은 참고문헌 (11)에서 내압 또는 굽힘모멘트가 작용하는 감육배관에 대한 공학적 평가방법을 새롭게 제안한 바 있다. 이 방법은 참조응력 개념을 이용하여 감육부 최심점에서의 평균등가응력을 예측함으로써 배관의 파손강도를 평가하는 방법이다. 본 장에서는 저자들이 참고문헌 (11)에서 감육배관평가를 위해 제안한 방법을 복합하중이 작용하는 경우에 대하여 적용하였다.

배관두께가 배관평균반경에 비해 상대적으로 작은 경우, 즉 R_m/t 가 큰 경우에는, Fig. 1(b)에 도시

한 바와 같이 감육부에 작용하는 주응력 성분은 축방향응력($\sigma_{a,local}$)과 원주방향응력($\sigma_{h,local}$)으로 분리된다. 따라서, 감육부에 작용하는 등가응력(σ_{local})은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{local} = \sqrt{\sigma_{a,local}^2 - \sigma_{a,local}\sigma_{h,local} + \sigma_{h,local}^2} \quad (3)$$

복합하중(내압과 굽힘모멘트)이 작용하는 경우, 감육부에 작용하는 원주방향응력은 내압에 의한 영향만 받는다. 따라서, 참고문헌 (11)에서 내압만 작용하는 경우에 대하여 제시한 식을 사용할 수 있다.

$$\sigma_{h,local} = \frac{P}{(P_L/\sigma_y)} \quad (4)$$

여기서, P_L 은 축방향 표면균열이 존재하는 배관에 대한 소성한계하중⁽¹⁶⁾이다.

$$\frac{P_L}{\sigma_y} = \frac{t}{R_m} \left(1 - \frac{d}{t} + \frac{d}{t} \varphi \right); \varphi = \sqrt{1 + \frac{1.61\ell^2}{R_m t}} \quad (5)$$

한편, 내압과 굽힘모멘트가 작용하는 경우, 축방향응력은 내압에 의한 성분($\sigma_{a,local}^p$)과 굽힘모멘트에 의한 성분($\sigma_{a,local}^b$)으로 분리된다. 내압에 의한

성분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽¹¹⁾

$$\sigma_{a,local}^P = \frac{PR_i}{2t} \quad (6)$$

굽힘모멘트에 의한 성분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{a,local}^B = \frac{M}{(M_{ref}^C / \sigma_y)} \quad (7)$$

여기서, M_{ref}^C 는 식 (1)과 참고문헌 (11)에서 굽힘모멘트만 작용하는 경우에 대하여 제시한 식을 사용하여 도출한 식으로서 다음과 같이 표현된다.

$$M_{ref}^C = 3R_m^2 t \sigma_y \left[\cos\left(\frac{\pi d \theta}{8t} + \frac{\pi PR_m}{4t \sigma_y}\right) - \frac{d}{t} \frac{f(\theta)}{2\theta} \right] \quad (8)$$

굽힘모멘트에 의한 축방향응력($\sigma_{a,local}^B$)은 감육부의 위치에 따라 인장 또는 압축응력이 될 수 있다. 따라서, 감육부에 작용하는 축방향응력($\sigma_{a,local}$)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{a,local} = \sigma_{a,local}^P + \sigma_{a,local}^B \quad (9)$$

$$\sigma_{a,local} = \sigma_{a,local}^P - \sigma_{a,local}^B \quad (10)$$

식 (9), (10)은 감육부가 각각 인장응력과 압축응력을 받는 경우에 대한 식이다.

식 (4), (9) 또는 (10)을 식 (3)에 대입하면 복합하중이 작용하는 감육부의 등가응력(σ_{local}^c)을 도출할 수 있다. 예를들면, 감육부에 인장응력이 작용하는 경우에 대한 등가응력은 다음과 같다.

$$\sigma_{local}^c = \sqrt{\left(\frac{PR_i}{2t} + \frac{M}{M_{ref}^C / \sigma_y}\right)^2 - \left(\frac{PR_i}{2t} + \frac{M}{M_{ref}^C / \sigma_y}\right) \left(\frac{P}{P_i / \sigma_y}\right) + \left(\frac{P}{P_i / \sigma_y}\right)^2} \quad (11)$$

식 (11)은 참고문헌 (11)에서 제시한 방법에 기초한 식이므로 다양한 배관형상, 감육형상 및 배관재료에 적용이 가능하다. 이를 검증하기 위하여 복합하중이 작용하는 감육배관에 대한 3차원 유한요소해석을 수행하였다.

4. 유한요소해석

복합하중이 작용하는 감육부의 최심점에서의 등가응력을 계산하기 위해 범용 해석 프로그램인

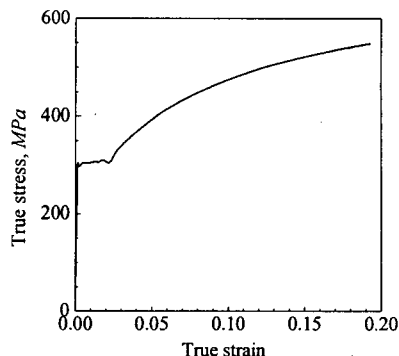


Fig. 3 True stress and strain data for A333 Gr. 6 steel used for FE analyses in the present work

ABAQUS⁽¹⁷⁾를 이용하여 감육배관에 대한 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 해석에 사용된 유한요소모델은 대칭성을 고려하여 1/4모델링하였다. Fig. 1에 도시한 바와 같이 감육부의 형상은 축방향과 원주방향 모두 원형으로 이상화하여 모델링하였다. 축방향 감육길이(ℓ)는 다음과 같이 무차원화하여 나타내었다.

$$\rho = \frac{\ell}{\sqrt{R_m t}} \quad (12)$$

배관형상 및 감육형상과 관련된 무차원 변수($d/t, \rho, \theta/\pi, R_m/t$)를 체계적으로 고려하여 유한요소해석을 수행하였다. 본 논문에서 고려한 무차원 변수의 범위는 다음과 같다.

$$0.35 \leq d/t \leq 0.75, \quad 1.23 \leq \rho \leq 4.92$$

$$0.125 \leq \theta/\pi \leq 0.5, \quad 6.8 \leq R_m/t \leq 20$$

해석에 사용된 유한요소모델은 참고문헌 (10)의 Fig. 3에 나타낸 모델을 사용하였다.

Fig. 3은 ASTM A333 Gr. 6의 진응력-진변형률 선도를 나타낸 것으로서, 이를 재료물성으로 입력하였다. ASTM A333 Gr. 6의 탄성계수 $E=204GPa$, 항복강도 $\sigma_y=302MPa$, 인장강도 $\sigma_u=449.8MPa$, 진인장강도 $\sigma_{u,i}=\sigma_u(1+\epsilon_u)=548MPa$ 이다. 참고문헌 (11)에서 제시한 바와 같이 본 논문에서 개발한 평가법은 배관재료에 무관하게 적용가능하므로 본 논문에서는 한가지 배관재료만 고려하였다.

내압과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 복합하중을 고려하기 위해 먼저 유한요소모델에 내압을 작용시켰으며, 내압에 의해 발생하는 등가축방향응력을 배관의 양끝단에 작용시켰다. 그 이후, 유한요소모델에 굽힘모멘트를 작용시켰으며, 굽힘모멘트의 크기는 감육부에서의 등가응력이 인장강도

보다 클 수 있도록 충분히 크게 작용시켰다. 또한, 내압의 영향을 분석하기 위해 특정 형상 ($d/t=0.5$, $\rho=2.46$, $\theta/\pi=0.5$ and $R_m/t=6.8$)에 대하여 3가지 내압 ($P_i=5\text{ MPa}$, 10 MPa , 15 MPa)을 고려하였으며, 이는 원전 2차계통 배관의 운전압력을 고려하여 선정한 값이다.

감육부에서 발생하는 대규모변형을 모사하기 위해 ABAQUS내의 대규모변형률해석(NLGEOM)을 사용하였다. 최심점에서의 등가응력, 즉 von Mises 응력의 평균값을 하중의 증가에 따라 계산하였다. 모든 해석결과에서 잔여두께에서의 응력구배는 크지 않았고, 잔여두께에서의 최대응력도 평균응력과 유사하였다.

5. 해석결과

Fig. 4와 Fig. 5는 식 (11)을 이용하여 도출한 등가응력을 유한요소해석 결과와 비교한 것으로서, 내압이 10 MPa 로 고정되고 다양한 형상을 고려한 경우에 대한 결과를 나타내고 있다. Fig. 4는 감육부에 인장응력이 작용하는 경우를, Fig. 5는 감육부에 압축응력이 작용하는 경우를 각각 나타내고 있다. Figs. 4-5에서는 유한요소해석으로부터 얻어진 σ_{local}^C 과 작용모멘트 M 을 각각 재료의 항복강도와 M_{ref}^C [식 (8)]로 무차원하였다. 식 (11)도 이와 같은 방법으로 무차원화 시켰으며, Figs. 4-5에 나타난 바와 같이 배관형상 및 감육형상에 무관하게 선형적인 관계를 나타내는 것을 볼 수 있다. Figs. 4-5에서는 내압의 영향보다 굽힘모멘트의 영향이 지배적이므로, 등가응력과 작용하중의 관계가 참고문헌 (11)에서 굽힘모멘트만 작용하는 경우의 결과와 유사하다. 즉, 등가응력이 모멘트에 따라 선형적으로 증가하다가 항복강도에 도달해서는 모멘트가 증가하더라도 감육부 전체가 항복에 이를 때까지 등가응력이 변화하지 않는 형태를 나타낸다. 그 이후, 다시 모멘트의 증가에 따라 등가응력이 증가한다.

감육배관의 파손은 감육부의 잔여두께가 완전소성 상태에 도달했을 때 발생하므로, 항복강도 이상의 범위에서의 결과가 중요하다. A333 Gr. 6의 경우 $\sigma_u/\sigma_y=1.49$ 이고 $\sigma_{u,t}/\sigma_y=1.81$ 이다. 이 범위 내에서의 등가응력이 중요하므로, 이 범위를 Figs. 4-5에 나타내었다. 한편, 이 범위 내에서 식 (11)의 결과는 유한요소해석결과와 모든 경우에 대하여 비교적 잘 일치하고 있다. 또한, 식 (11)에 의한 결과가 유한요소해석결과 보다 보수적인 경향을 나타내었다.

Fig. 6은 내압이 등가응력에 미치는 영향을 분석

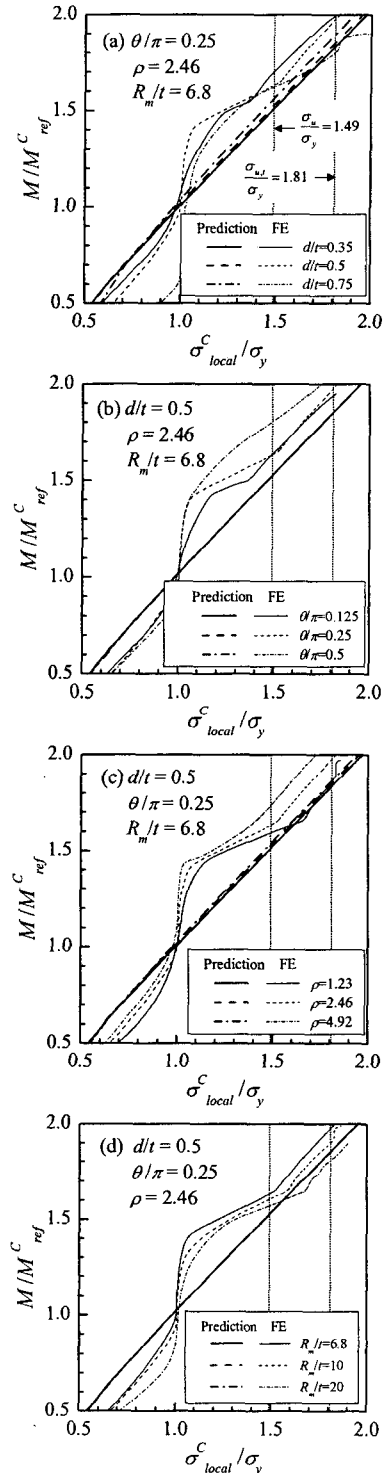


Fig. 4 Comparison of σ_{local}^C with FE results. The defect is located in the tensile stressed region and the internal pressure P is fixed to 10 MPa

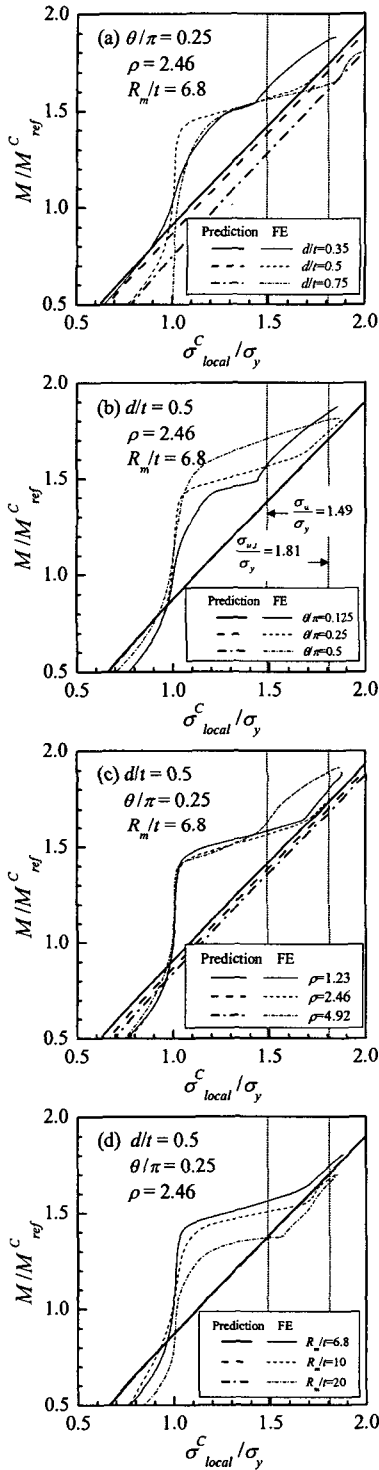


Fig. 5 Comparison of σ_{local}^C with FE results. The defect is located in the compressive stressed region and the internal pressure P is fixed to 10MPa.

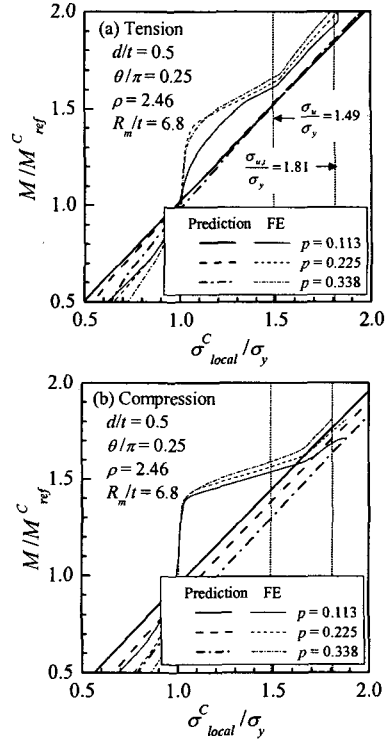


Fig. 6 Effect of internal pressure on estimated σ_{local}^C compared with FE results: (a) for the case when the defect is subject to tension, and (b) for the case when the defect is subject to compression. Note that $p = (PR_m)/(\sigma_y t)$.

한 것이다. 식 (11)에 의한 결과와 유한요소해석결과가 대부분 잘 일치하였으나, 감육부에 압축응력이 작용하고 내압이 상대적으로 작은 경우에는 두 결과가 약간의 차이를 나타내었다. Figs. 4-6에 나타난 바와 같이 식 (11)은 공학적인 측면에서 배관형상, 감육형상, 감육위치 및 하중(내압)크기에 무관하게 적용이 가능하다.

6. 실패관 실험결과와의 비교

참고문헌 (11)에서는 단일하중이 작용하는 경우에 대한 평가식의 타당성을 검증하기 위하여 그 결과를 실패관 실험결과와 비교하였으며, 다음과 같은 기준을 사용하였다.

$$\sigma_{local} = \sigma_{mat} \tag{13}$$

여기서, σ_{mat} 은 재료의 강도로서, 감육부의 응력상태(stress state)에 따라 (공칭)인장강도 σ_u 또는 진인장강도 $\sigma_{u,t}$ 이다.

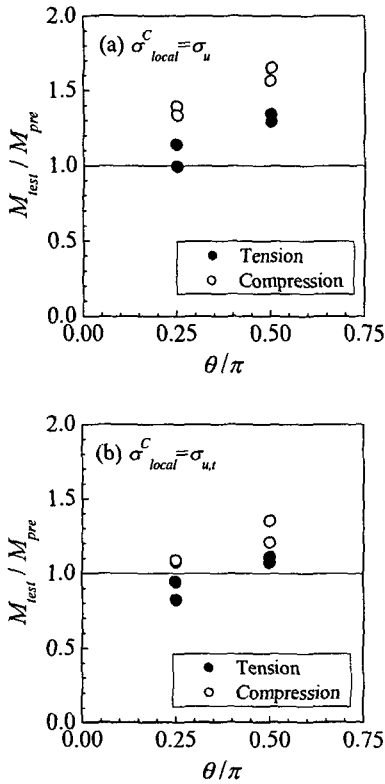


Fig. 7 Comparison of maximum moment from full-scale pipe test data under combined internal pressure and global bending with those from the proposed method based on both ultimate tensile stress and true ultimate tensile stress. Detailed information on pipe test data is given in Table 1

본 논문에서 제시한 복합하중에 대한 평가식을 검증하기 위해 Table 1에 정리된 실패관 실험결과를 사용하였다. 단일하중의 경우와 동일하게 두개의 기준($\sigma_{local}^c = \sigma_u$ 와 $\sigma_{local}^c = \sigma_{u,t}$)을 사용하였다. 두 기준을 식 (11)에 적용하여 복합하중이 작용하는 감육배관의 최대 모멘트를 예측하였으며, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 감육부에 인장응력이 작용하고 $\sigma_{local}^c = \sigma_u$ 기준을 사용하였을 경우[Fig. 7(a)], 예측된 최대 모멘트가 실험결과보다 작아 보수적인 결과를 나타내었다. θ/π 가 증가할수록 예측결과와 실험결과와의 차이가 증가하였다 (최대 30%). 감육부에 압축응력이 작용하는 경우에도 동일한 경향을 나타내었으나, 두 결과의 차이가 더 크게 (최대 70%) 나타났다. 비록 최대 70%의 차이가 나타나지만, Fig. 2의 결과와 비교했을 경우, 보수성을 고려한 측면에서는 Fig. 7의 결과가 뚜렷한 경향을 나타내었다. Fig. 7(b)는 $\sigma_{local}^c = \sigma_{u,t}$ 기준을

사용한 결과를 나타낸 것이다. 예측된 결과의 보수성이 감소하는 경향을 나타내었으나, 감육부에 인장이 작용하고 감육부의 원주방향길이가 상대적으로 작은 경우($\theta/\pi=0.25$)에는 예측된 결과가 실험 결과보다 20% 높게 예측되어 비보수적인 결과를 나타내었다.

앞서 서술한 바와 같이 어느 기준을 사용할 것인지에 대한 판단은 감육부의 응력상태에 따라 결정된다. 감육부에 인장응력이 작용하는 경우, 감육부는 인장응력과 내압에 의한 원주방향응력이 동시에 작용하는 이축응력상태(biaxial stress state)가 된다. 하지만, 내압에 의한 원주방향응력의 크기는 상대적으로 작기 때문에 낮은 이축응력상태를 나타낸다. 따라서, 감육배관 파손시의 국부응력은 $\sigma_{local}^c = \sigma_u$ 와 $\sigma_{local}^c = \sigma_{u,t}$ 사이가 될 것이다. 반면, 감육부에 압축응력이 작용하는 경우에는 축방향 압축응력이 지배적으로 작용하는 단축응력상태(uniaxial stress state)가 되어 $\sigma_{local}^c = \sigma_{u,t}$ 기준이 더 적합하다.

한편, Fig. 7에서 θ/π 가 감소할수록 예측결과와 보수성이 감소하는 경향을 나타내며, 이 결과를 외삽(extrapolate)해보면 $\theta/\pi < 0.25$ 인 경우에는 비보수적인 결과를 나타낼 수 있다. 하지만, $\theta/\pi \rightarrow 0$ 이면 감육부는 축방향 표면균열에 가까워진다. 축방향 균열이 존재하는 배관의 소성분포는 굽힘모멘트의 영향을 받지 않으며 원주방향응력에 의해서만 발생한다.⁽¹⁶⁾ 따라서, $\theta/\pi \rightarrow 0$ 이면 최대 모멘트는 균열이 존재하지 않은 배관의 한계모멘트와 유사할 것이다. 본 논문에서 제시한 평가식은 한계하중법과 유사한 방법이므로, $\theta/\pi < 0.25$ 인 경우에 대한 감육부의 최대 모멘트는 $\theta/\pi = 0.25$ 인 경우의 결과와 비슷할 것이다.

7. 결론

본 논문에서는 복합하중(내압+굽힘모멘트)이 작용하는 감육배관의 파손강도를 평가할 수 있는 공학적 평가법을 제시하였다. 본 논문에서 제시한 평가법은 참고문헌 (11)에서 단일하중(내압 또는 굽힘모멘트)에 대하여 제시한 평가법에 기초한 방법으로서, 감육부 최심점에서의 등가응력을 평가 기준으로 사용한다. 다양한 배관형상, 감육형상 및 내압을 고려하여 3차원 유한요소해석을 수행하였으며, 그 결과를 평가식으로부터 얻은 결과와 비교하여 평가식의 유용성과 보수성을 입증하였다. 또한, 실패관 실험결과와 평가식의 결과를 비교하여 평가법의 타당성을 검증하였다.

후 기

본 논문은 한국과학기술원 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) American Society of Mechanical Engineer, 1998, "Requirement for Analytical Evaluation of Pipe Wall Thinning," ASME B&PV Code Sec. XI, Division 1, Code Case N-597.
- (2) 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 Subject to Bending Load," *Nuclear Engineering Design*, Vol. 191, pp. 195~204.
- (3) Miyazaki, K., Kanno, S., Ishiwata, M., Hasegawa, K., Ahn, S.H. and Ando, K., 2002, "Fracture and General Yield for Carbon Steel Pipes With Local Wall Thinning," *Nuclear Engineering Design*, Vol. 211, pp. 61~68.
- (4) American Society of Mechanical Engineer, 1991, "Manual for Remaining Strength of Corroded Pipelines," ANSI/ASME B31.G.
- (5) Roy, S., Grigory, S., Smith, M., Kanninen, M.F. and Anderson, M., 1997, "Numerical Simulations of Full-Scale Corroded Pipe Tests with Combined Loading," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 119, pp. 457~466.
- (6) Smith, M.Q. and Waldhart, C.J., 2000, "Combined Loading Tests of Large Diameter Corroded Pipelines," *Proc. Int. Pipeline Conf.*, Vol. 2, pp. 769~779.
- (7) Stephens, D.R. and Lei, B.N., 2000, "Development of Alternative Criterion for Residual Strength of Corrosion Defects in Moderate-to High-Toughness Pipe," *Proc. Int. Pipeline Conf.*, Vol. 2, pp. 781~792.
- (8) Cronin, D. and Pick, R.J., 2000, "Experimental Database for Corroded Pipe: Evaluation of RSTRENG and B31G," *Proc. Int. Pipeline Conf.*, Vol. 2, pp. 757~767.
- (9) Stephens, D.R. and Francini, R.B., 2000, "A review and Evaluation of Remaining Strength Criteria for Corrosion Defect in Transmission Pipelines," *Proc. ECTE/OMAE Joint Conference*, pp. 1~11.
- (10) Shim, D.J., Lim, H., Choi, J.B., Kim, Y.J., Kim, J.W. and Park, C.Y., 2003, "Effect of Wall Thinned Shape and Pressure on Failure of Wall Thinned Nuclear Piping Under Combined Pressure and Bending Moment," *Transaction of the KSME (A)*, Vol. 27, No. 5, pp. 742~749.
- (11) 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," *Transaction of the KSME (A)*, Vol. 27, No. 7, pp. 1200~1209.
- (12) Ainsworth, R.A., 1984, "The Assessment of Defects in Structures of Strain Hardening Materials," *Eng. Fract. Mech.*, Vol. 19, pp. 633~642.
- (13) Penny, R.K. and Marriott, D.L., 1995, *Design for Creep*, 2nd Ed., Chapman & Hall.
- (14) R5, 1998, "An Assessment Procedure for the High Temperature Response of Structures," Revision 2, British Energy Generation Ltd.
- (15) Shim, D.J., Kim, Y.J., Kim, Y.J., Hwang, S.S. and Kim, J.S., 2003, "Plastic Limit Load Solutions for Circumferential Surface Cracked Cylinders Under Combined Loading," *Transaction of the KSME (A)*, Vol. 27, No. 9, pp. 1469~1476.
- (16) Miller, A. G., 1988, "Review of Limit Loads of Structures Containing Defects," *Int. J. Pressure Vessels Piping*, Vol. 32, pp. 191~327.
- (17) ABAQUS, 2004, *ABAQUS User's Manual*, Hibbitt, Karlson & Sorensen, Inc.