

참조응력개념을 이용한 국부감육배관 평가법 개발

임환* · 심도준* · 김운재** · 김영진†

(2003년 2월 12일 접수, 2003년 6월 7일 심사완료)

Development of Assessment Methodology for Locally Corroded Pipe Using Reference Stress Concept

Hwan Lim, Do-Jun Shim, Yun-Jae Kim and Young-Jin Kim

Key Words : Locally Corroded Pipe(국부감육배관), Reference Stress Approach(참조응력법), Finite Element Analysis(유한요소해석)

Abstract

In this paper, a unified methodology based on the local stress concept to estimate residual strength of locally thinned pipes. An underlying idea of the proposed methodology is that the local stress in the minimum section for locally thinned pipe is related to the reference stress, popularly used in creep problems. Then the problem remains how to define the reference stress, that is the reference load. Extensive three-dimensional finite element (FE) analyses were performed to simulate full-scale pipe tests conducted for various shapes of wall thinned area under internal pressure and bending moment. Based on these FE results, the reference load is proposed, which is independent of materials. A natural outcome of this method is the maximum load capacity. By comparing with existing test results, it is shown that the reference stress is related to the fracture stress, which in turn can be posed as the fracture criterion of locally thinned pipes. The proposed method is powerful as it can be easily generalised to more complex problems, such as pipe bends and tee-joints.

1. 서 론

가스산업 및 원자력발전소등의 많은 배관산업계에서는 감육배관에 대한 잔여강도 평가가 중요하다. 감육배관에 대한 평가를 수행하기 위해 다양한 평가기준이 제정되어왔다.^(1~8) 하지만 기존의 평가기준은 잔여강도 예측의 측면에서 매우 큰 보수성을 내포하고 있다. 또한 대부분의 기존 평가기준은 배관에 내압이 작용하는 경우만을 고려하고 있다. 하지만, 대부분의 배관, 특히 원자력 배관은 내압과 자중에 의한 굽힘모멘트를 동시에 받고 있기 때문에 복합하중을 받는 감육배관에 대한 평가법이 필요하다.^(3~5) 내압만을 고려한 기존의 평가기준을 복합하중이 작용하는 경우에 적용하면

경우에 따라 비보수적인 결과를 나타낼 수도 있다.⁽³⁾ 따라서, 실제문제에 적용이 가능한 복합하중이 작용하는 감육배관에 대한 평가기준이 필요하다.

저자들은 복합하중이 작용하는 원전 감육배관에 대해 수행된 실패관 실험⁽⁹⁾에 대한 3차원 유한요소해석을 수행하여 감육깊이, 길이, 폭 등의 감육형상이 감육배관의 잔여강도에 미치는 영향에 대한 연구를 수행한 바 있다.⁽¹⁰⁾ 참고문헌 (10)에서 최대굽힘모멘트는 감육부 최심점에서의 등가응력(equivalent stress)이 재료의 인장강도와 같아지는 시점에서의 굽힘모멘트로 정의하였다. 참고문헌 (3)에서는 복합하중이 작용하는 송유관에 감육부가 존재하는 경우에 대해서 동일한 접근방법을 적용한바 있다.

이와 같이 감육배관에 대한 잔여강도를 평가하기 위해 3차원 유한요소해석은 유용한 방법으로 검증되었지만, 모든 경우에 대해 유한요소해석을 수행하는 것은 어려운 일이다. 따라서, 실제 문제

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부
E-mail : yjkim50@skku.edu

TEL : (031)290-5277 FAX : (031)290-5276

* 회원, 성균관대학교 기계공학부

** 성균관대학교 기계공학부

Table 1 Descriptions of experimental data for pipes with local wall thinning, under internal pressure loading⁽¹⁴⁾

Specimen ID	Material		Geometry				P_{test} (MPa)
	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	D_o (mm)	d (mm)	t (mm)	2ℓ (mm)	
Case28	418.9	520	762	2.921	9.525	114.3	13.06
Case51	379.6	520.9	508	5.334	7.925	266.7	8.06
Case73	438.9	520	762	2.794	9.601	838.2	13.20
Case78	405.8	520	762	2.794	9.474	228.6	12.68
Case84	505.8	614	914.4	5.537	8.382	406.4	5.34
Case97	443.4	598.1	508	2.616	6.35	381	11.24
Case99	437.1	570.5	508	2.565	6.35	152.4	13.04
Case119	429.6	570	508	3.404	6.35	990.6	7.99
Case124	434.8	570	508	3.2	6.35	1000	8.39

* Defect has a rectangular shape. For other data, defect has a semi-elliptical shape.

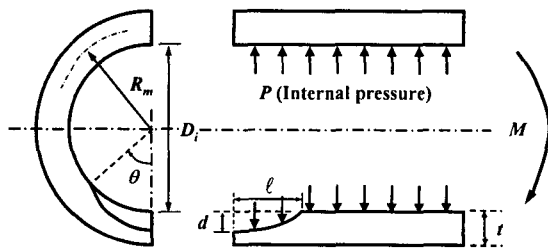


Fig. 1 Schematic illustration of a pipe with idealized local wall thinning, under internal pressure P or global moment M

Table 2 Descriptions of experimental data for pipes with local wall thinning, under internal pressure⁽¹⁵⁾

Specimen ID	Geometry (mm)				P_{test} (MPa)
	D_o	d	t	2ℓ	
DA	762	4.2	17.5	200	24.1
DB		8.9		200	21.8
DC		13.1		200	17.2
LA		8.4		100	24.3
LC		8.5		300	19.8
CB		8.4		200	23.4
CC		9		200	22.6

For all cases, defect has a rectangular shape.

Material properties : $\sigma_y=474.1\text{MPa}$, $\sigma_u=556.2\text{MPa}$

에 적용이 용이한 공학적 평가법이 필요하다.

본 논문에서는 내압과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 감육배관의 잔여강도 평가법을 개발하기 위한 일차적인 연구단계로, 내압과 굽힘모멘트가 각각 작용하는 경우에 대한 새로운 공학적 평가방법을 제시하였다. 제시된 평가방법에서는 감육부 중심점에서의 평균등가응력을 예측함으로써 배관의 잔여강도를 평가한다. 본 논문에서는 제시된 평가법을 기존의 평가법, 실험실 실험결과 및 유한요소해석결과와 비교하였다.

2. 새로운 방법론 제시

2.1 기존 평가방법과 단점

Fig. 1은 내압 또는 굽힘모멘트가 작용하는 감육배관을 도시한 것으로서, D_i 는 배관내경, R_m 은 배관의 평균반경, t 는 배관두께이다. 감육부의 주요 변수로 d 는 최대감육깊이, ℓ 은 감육길이, θ 는 감육각도(원주방향감육길이)이다. 국부감육배관의 잔여강도를 평가하는 기존의 평가법에서는 일반적으로 한계하중해석(Limit load analysis)법을 사용한다. 예를 들면, 내압이 작용하는 감육배관에 대해 RSTRENG 0.85^(8,11)는 다음과 같은 기준식을 제시하였다.

$$P_f = (\sigma_y + 68.95\text{MPa}) \frac{2t}{D_i} \left[\frac{1 - 0.85(d/t)}{1 - 0.85(d/t)F^{-1}} \right] \quad (1)$$

$$F = \begin{cases} \left(1 + 0.6275 \frac{\ell^2}{D_i t} + 0.003375 \frac{\ell^4}{D_i^2 t^2} \right)^{0.5} & \text{for } \frac{\ell^2}{D_i t} \leq 50 \\ 0.032 \frac{\ell^2}{D_i t} + 3.3 & \text{for } \frac{\ell^2}{D_i t} > 50 \end{cases}$$

식 (1)은 내압이 작용하는 균열배관에 대한 소성한계해석으로부터 유도된 한계하중해이다. 한편, PCORRC 소성붕괴기준^(8,12)은 다음과 같다.

$$P_f = \sigma_u \frac{2t}{D_i} \left[1 - \frac{d}{t} \left(1 - \exp \left(-0.157 \frac{\ell}{\sqrt{R(t-d)}} \right) \right) \right] \quad (2)$$

식 (2)도 소성한계해석을 통해 유도된 것이다. 식 (1)과 (2)에서 σ_y 와 σ_u 는 배관재료의 항복응력과 인장강도이다.

감육배관에 굽힘모멘트가 작용하는 경우에 적용되는 한계모멘트식은 Kanninen^(4,13)에 의해 다음과 같이 제시되었다.

Table 3 Descriptions of experimental data for pipes with local wall thinning, under global bending⁽⁴⁾

Specimen ID	Geometry			M_{test} (kN-m)
	d (mm)	2ℓ (mm)	2θ	
TP-1	1.7	100	π	39.6
TP-2	4.3		π	38.4
TP-3	6.9		π	29.5
TP-4	6.9		$\pi/2$	33.5
TP-5	3		π	38.8
TP-6	4.3		$\pi/2$	37.5
TP-7	4.3		$\pi/3$	38.6
TP-8	6.9		$\pi/3$	38.1
LWT-09*	4	25	0.26π	28.8
LWT-10*	6	102	0.32π	26.6
LWT-17**	5	37.5	0.27π	26.2
LWT-18**	6	41	0.30π	24.4
LWT-19**	7	44	0.32π	22.3

The defect is located in the tensile stressed region.

* External rectangular shape

** External semi-elliptical shape

TP-X : $\sigma_y=326MPa$, $\sigma_u=490MPa$, $D_o=114.3$, $t=8.6$

LWT-X : $\sigma_y=227MPa$, $\sigma_u=406MPa$, $D_o=102$, $t=8.1$

Table 4 Descriptions of experimental data for pipes with local wall thinning, under global bending⁽⁴⁾

Specimen ID	Geometry			M_{test} (kN-m)
	d (mm)	2ℓ (mm)	2θ	
TP-9	4.3	100	π	33.7
TP-11	6.9	100	π	28.2
LWT-11*	4	102	0.26π	27.0
LWT-12*	6	102	0.32π	25.4
LWT-14**	5	37.5	0.27π	25.8
LWT-15**	6	41	0.30π	25.5
LWT-16**	7	44	0.32π	26.1

The defect is located in the compressive stressed region.

* External rectangular shape

** External semi-elliptical shape

TP-X : $\sigma_y=326MPa$, $\sigma_u=490MPa$, $D_o=114.3$, $t=8.6$

LWT-X : $\sigma_y=227MPa$, $\sigma_u=406MPa$, $D_o=102$, $t=8.1$

$$M_f = \frac{(\sigma_y + \sigma_u)}{2} (2R_m^2 t) \left[2 \sin \left(\frac{1}{2} \left(\pi - \frac{d}{t} \theta \right) \right) - \frac{d}{t} \sin \theta \right] \quad (3)$$

Table 1, 2는 참고문헌 (14)와 (15)에서 내압이 작용하는 감육배관에 대해 수행한 파열실험에 대한 내용을 정리한 것이며, Fig. 2는 파열실험으로부터 얻은 파손압력을 식 (1), (2)와 비교한 것이다. RSTRENG 0.85기준은 감육깊이비 d/t 와 관계없이 보수성이 매우 큰 반면 PCORRC기준은 식 (1)보다 보수성이 작았으며, 특히 d/t 가 큰 경우에 보수성이 더 작았다. Table 3, 4는 참고문헌 (4)에서 수행한 실패관 굽힘실험에 대한 결과를 정리한 것이

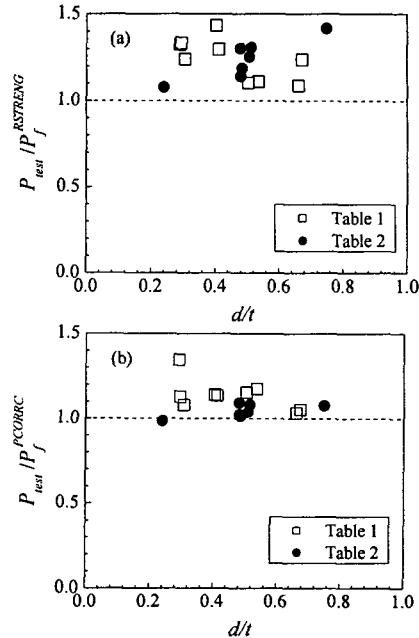


Fig. 2 Comparison of failure pressure from test data with those from two existing estimation schemes for pipes under internal pressure (Detailed test data is given in Tables 1 and 2)

다. Table 3은 굽힘모멘트가 감육부에 인장력으로 작용하는 경우이고, Table 4는 굽힘모멘트가 감육부에 압축력으로 작용하는 경우에 대한 결과를 정리한 것이다. Fig. 3은 실험으로부터 얻은 최대굽힘모멘트를 식 (3)과 비교한 것으로, 식 (3)에 의해 예측된 최대굽힘모멘트가 모두 보수적인 결과를 나타냈다.

2.2 감육부 최심점의 응력에 기초한 접근방법

앞서 서술한 한계하중법에 기초한 접근법은 광범위적인 접근법(global approach)으로 볼 수 있다. 이와 다른 접근법으로 국부적인 접근법(local approach)이 있다. 예를 들면, 감육부 최심점에서의 등가응력이 재료의 임계응력과 같아지는 시점에서 배관의 파손이 발생한다고 정의할 수 있을 것이다. 참고문헌 (10)에서는 재료의 임계응력을 진인장강도로 정의하여 실패관 실험결과와 유한요소해석 결과를 비교하여, 두 결과가 잘 일치하는 것을 입증하였다. 하지만, 이와 같은 방법에서 가장 중요한 것은 최심점에서의 등가응력을 정확히 예측하는 것으로, 유한요소해석이 아닌 다른 방법을 이용하여 작용하중의 함수로 나타낼 수 있어야 한다.

일반적으로 감육부 최심점에서의 등가응력 σ_{local} 은 다음과 같은 함수로 나타낼 수 있다.

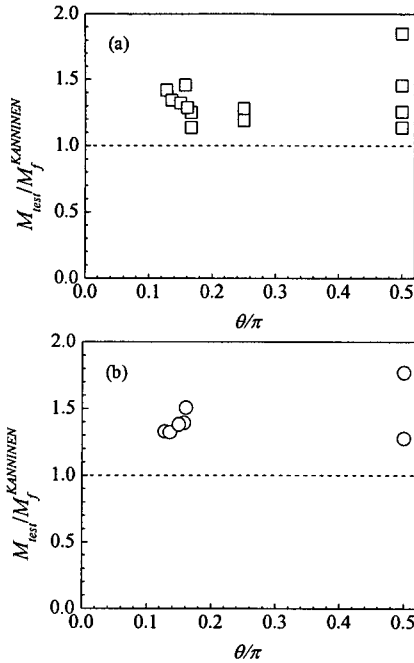


Fig. 3 Comparison of failure moment from test data for pipes under global bending: (a) defective region subject to tensile stresses (b) defective region subject to compressive stresses (Detailed test data is given in Tables 3 and 4)

$$\sigma_{local} = \bar{\sigma}_{local} \left(\frac{R_m}{t}; \frac{\theta}{\pi}, \frac{d}{t}, \frac{\ell}{\sqrt{R_m t}}; \text{material, load} \right) \quad (4)$$

일반적으로 위와 같은 관계는 비선형적일 수도 있기 때문에 명확하게 도출하기가 어렵다. 따라서, 본 논문에서는 참조응력법⁽¹⁶⁻¹⁸⁾을 이용하여 다음과 같은 식을 가정하였다.

$$\frac{\sigma_{local}}{\sigma_o} = \alpha \frac{Q}{Q_o} \quad (5)$$

$$\alpha = \bar{\alpha} \left(\frac{R_m}{t}; \frac{\theta}{\pi}, \frac{d}{t}, \frac{\ell}{\sqrt{R_m t}}; \text{material, load} \right)$$

여기서, σ_{local} 은 감육부 최심점에서의 등가응력이고, σ_o 와 Q_o 는 각각 무차원화 응력과 무차원화 하중으로, σ_o 는 재료의 σ_y 로, Q_o 는 σ_y 로 표현되는 한계하중으로 사용하는 것이 일반적이다.⁽¹⁶⁻¹⁸⁾

$$\frac{\sigma_{local}}{\sigma_y} = \alpha \frac{Q}{Q_L(\sigma_y)} \quad (6)$$

식 (6)에서의 α 는 배관 및 감육형상, 배관재질, 하중의 영향을 받을 수 있는 변수이며, 이와 같은 경우에는 식 (6)은 간단한 형태로 표현하기가 어렵다. 하지만, α 가 배관 및 감육형상, 배관재질, 하중에 큰 영향을 받지 않는다면 α 를 상수로 결정할 수 있으며, 식 (6)을 이용하여 배관 감육부 최심점에서의 등가응력을 간단하게 예측할 수 있을 것이다. 따라서, 본 논문에서는 배관 및 감육형상, 배관재질, 하중이 α 에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하기 위해 다양한 변수들을 체계적으로 고려하여 3차원유한요소해석을 수행하였다.

3. 유한요소해석

3.1 형상과 하중

감육부 최심점에서의 등가응력을 계산하기 위한 식(식 (6))을 완성하기 위해 범용 해석프로그램인 ABAQUS⁽¹⁹⁾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.

$$\rho = \frac{\ell}{\sqrt{R_m t}} \quad (7)$$

배관과 감육부의 형상과 관련된 무차원화 변수($d/t, \rho, \theta/\pi, R_m/t$)를 체계적으로 고려하여 유한요소 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 유한요소모델은 참고문헌 (10)의 Fig. 3에 나타난 모델을 사용하였다.

하중형태는 내압과 굽힘모멘트가 각각 작용하는 경우를 고려하였다. 내압의 경우에는 내압에 의해 발생하는 등가축방향 응력을 배관의 양끝단에 작용시켰다. 반면, 굽힘모멘트는 감육부에 인장력이나 압축력으로 각각 작용하는 경우를 고려하였다.

3.2 재료물성치

본 논문에서는 재료의 영향을 분석하기 위해 두 가지 배관재료, ASTM A333 Gr. 6과 API X65를 고려하였다. A333 Gr. 6은 원자력발전소 2차계통에서 널리 사용되며, API X65는 가스산업계에서 사용된다. Fig. 4는 두 가지 배관재료의 진응력-진변형율 선도를 타낸 것이며, A333 Gr.6는 $E=204GPa, \sigma_y=300$

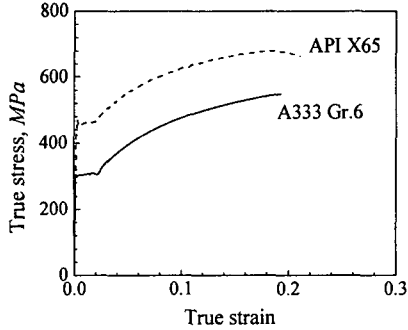


Fig. 4 True stress and strain data for two materials, the A333 Gr. 6 steel and the API X65 steel, used for FE analyses in the present work

MPa, $\sigma_{u,e}=452\text{MPa}$, $\sigma_{u,r}=548\text{MPa}$ 이며, API X65는 $E=209\text{GPa}$, $\sigma_y=448\text{MPa}$, $\sigma_u=573\text{MPa}$, $\sigma_{u,r}=666\text{MPa}$ 이다.

3.3 해석

감육부에서 발생하는 대규모변형을 모사하기 위해 ABAQUS내의 대규모변형률해석(NLGEOM)을 사용하였다. 해석을 위해 Fig. 4에 도시한 진응력-진변형률 데이터를 배관의 재료물성으로 입력하였다. 작용하중(내압이나 굽힘모멘트)의 크기는 감육부에서의 등가응력이 인장강도보다 클 수 있도록 충분히 크게 가하였다. 최심점에서의 등가응력, 즉 von Mises응력의 평균값을 하중의 증가에 따라 측정하였다. 모든 해석경우에서 잔여두께에서의 응력구배는 크지 않았고, 잔여두께에서의 최대응력도 평균응력과 유사하였다.

4. 해석결과

4.1 내압이 작용하는 경우

내압이 작용하고 축방향 표면균열이 존재하는 배관에 대한 한계압력식은 다음과 같다.⁽²⁰⁾

$$\frac{P_L}{\sigma_y} = \frac{t}{R_m} \left(1 - \frac{d}{t} + \frac{d}{t} \frac{1}{\varphi} \right) \quad (8)$$

여기서,

$$\varphi = \sqrt{1 + \frac{1.61\ell^2}{R_t t}} \quad (9)$$

내압이 작용하는 경우, 소성붕괴는 주로 원주방향 응력(hoop stress)에 의해 발생하며, 식 (8)을 이용

하여 감육부 최심점의 원주방향응력 $\sigma_{h,local}$ 을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{h,local} = \alpha \left(\frac{P}{P_L/\sigma_y} \right) \quad (10)$$

감육부 최심점에서의 축방향응력(axial stress) $\sigma_{a,local}$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{a,local} = \alpha \frac{PR_i}{2t} \quad (11)$$

여기서, R_i 는 배관의 내부 반경이다. 얇은배관(thin-wall) 가정하에서의 주응력요소는 원주방향응력과 축방향응력 뿐이므로, 감육부 최심점에서의 등가응력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{local} = \alpha \left(\frac{P}{P_L^*/\sigma_y} \right) \quad (12)$$

여기서,

$$\frac{P_L^*}{\sigma_y} = \frac{t}{R_m} \frac{1}{\sqrt{A^2 - AB + B^2}} \quad (13)$$

$$A = \frac{1}{\left(1 - \frac{d}{t} + \frac{d}{t} \frac{1}{\varphi} \right)} ; B = \frac{R_i}{2R_m} ; \varphi = \sqrt{1 + \frac{1.61\ell^2}{R_t t}}$$

유한요소해석결과와 식 (12)로 계산된 감육부 최심점에서의 등가응력을 비교하여 무차원 변수 α 가 배관재질, 배관형상, 감육형상과 내압크기에 독립적인 값이며 $\alpha=1$ 이라는 결론을 도출하였다. 따라서, 내압이 작용하는 경우의 등가응력 예측식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{local} = \left(\frac{P}{P_{ref}/\sigma_y} \right) \quad (14)$$

여기서, $P_{ref}=P_L^*$ 이다.

Fig. 5는 식 (14)에 의해 계산된 σ_{local} 을 유한요소 해석결과와 비교한 것으로서 A333 Gr. 6배관에 다양한 형상의 감육부가 존재하는 경우를 고려한 것이다. Fig. 5에서 σ_{local} 은 재료의 항복응력으로 무차원화였고, 작용하중 내압 P 는 식 (13)의 P_{ref} 로 무차원하여 나타내었다. 제시된 예측식 (14)에서 σ_{local}/σ_y 와 P/P_{ref} 는 선형적인 관계를 나타내고, 배

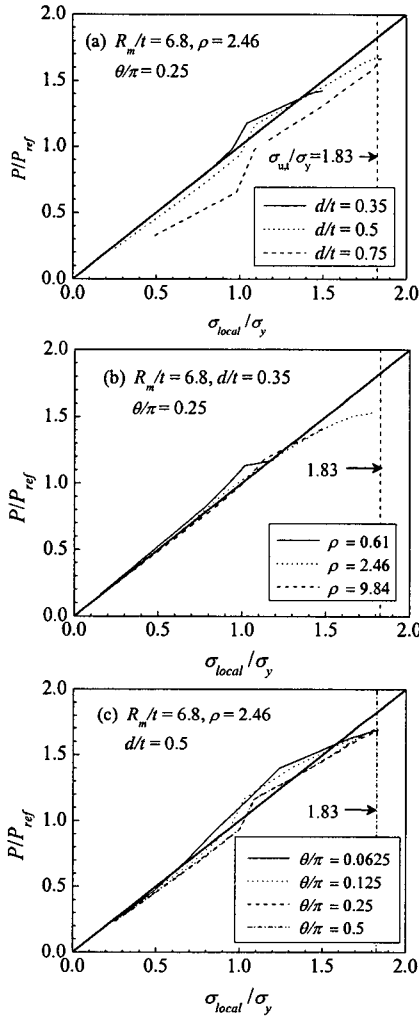


Fig. 5 Comparison of σ_{local} , estimated according to Eq. (12), with FE results for pipes with local wall thinning under internal pressure

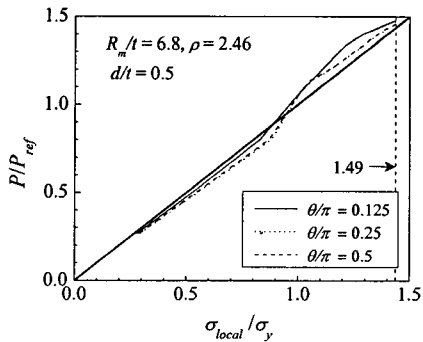


Fig. 6 Effect of material on estimated σ_{local} , according to Eq. (12), with FE results for pipes with local wall thinning under internal pressure

관재질, 배관형상, 감속형상에 독립적이다. Fig. 5에 나타낸 바와 같이 A333 Gr. 6배관의 진인장강도와 항복응력의 비(σ_u/σ_y)는 1.83이다. Fig. 6은 재료의 영향을 분석하기 위해 API X65배관에 대한 유한요소해석결과를 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 5와 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 감속깊이가 상대적으로 깊은 경우($d/t=0.75$)를 제외하고는 배관형상, 감속형상, 내압크기, 배관재질에 관계없이 식 (14)에 의한 결과가 유한요소해석결과와 잘 일치하였다.

4.2 굽힘모멘트가 작용하는 경우

굽힘모멘트가 작용하고 원주방향 반타원 표면 균열이 존재하는 배관에 대한 한계굽힘모멘트 M_L 은 다음과 같다.⁽²¹⁾

$$M_L = 4\sigma_y R_m^2 t \left[\cos\left(\frac{\pi d}{8t}\theta\right) - \frac{d}{t} \frac{f(\theta)}{2\theta} \right] \quad (15)$$

여기서,

$$f(\theta) = 0.7854\theta^2 - 0.09817\theta^4 + 0.0040906\theta^6 - 0.000085\theta^8$$

식 (15)는 등가응력장에 기초하여 유도되었고 균열문제에서는 하한계(lower bound)값을 나타내지만, 감속부가 존재하는 경우에는 배관의 한계굽힘모멘트를 비교적 정확하게 예측할 수 있을 것이다 한편, 축방향 균열길이는 굽힘모멘트에 의한 소성붕괴에 영향을 미치지 않으므로 식 (15)는 축방향 감속길이(ℓ)의 영향을 받지 않는다. 식 (15)를 식 (6)에 적용하면 감속부 최심점에서의 등가응력식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{local} = \alpha \left(\frac{M}{M_L/\sigma_y} \right) \quad (16)$$

유한요소해석결과와 식 (16)으로 계산된 σ_{local} 을 비교하여 무차원 변수 α 를 배관형상, 감속형상 배관재질에 무관하게 $\alpha=1.333$ 으로 결정하였다. 따라서, 굽힘모멘트가 작용하는 경우에 대한 최종적인 등가응력식은 다음과 같다.

$$\sigma_{local} = \left(\frac{M}{M_{ref}/\sigma_y} \right) ; M_{ref} = \frac{M_L}{1.333} \quad (17)$$

여기서, M_L 은 식 (15)에 나타내었다.

Fig. 7과 Fig. 8은 식 (17)에 의해 계산된 σ_{local} 을 유한요소해석결과와 비교한 것으로서, A333 Gr. 6

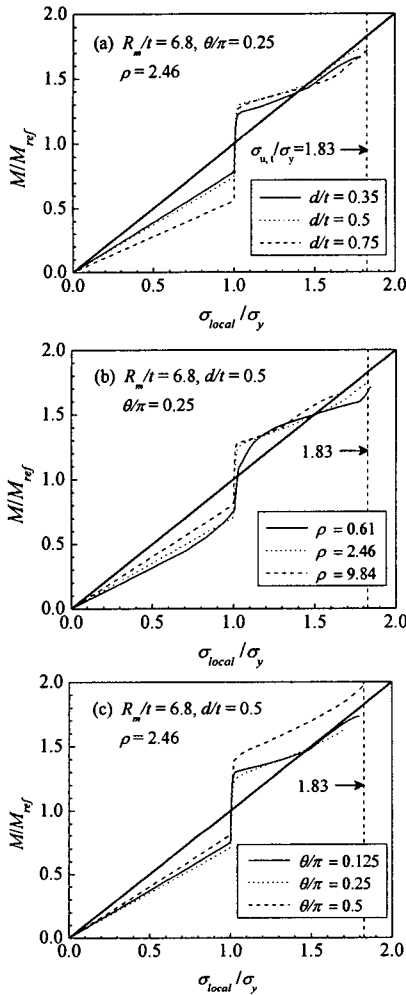


Fig. 7 Comparison of σ_{local} , estimated according to Eq. (17), with FE results for pipes with local wall thinning under global bending (The defect is located in the tensile stressed region)

배관에 다양한 형상의 감육부가 존재하는 경우를 고려한 것이다. Fig. 7의 결과는 굽힘모멘트가 감육부에 인장력으로 작용하는 경우에 대한 결과이고, Fig. 8은 굽힘모멘트가 감육부에 압축력으로 작용하는 경우에 대한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 9는 배관재질에 따른 영향을 분석하기 위해 API X65에 대한 결과를 나타낸 것이다. 먼저 주목할만한 점은 국부응력과 작용하중의 관계가 내압이 작용하는 경우와 굽힘모멘트가 작용하는 경우가 상이하다는 것이다. 내압이 작용하는 경우에는 내압의 크기와 무관하게 내압과 국부응력이 선형적인 관계를 나타내었지만, 굽힘모멘트가 작용하는 경우에는 국부응력이 모멘트에 따라 선형적으로 증가하다 항복응력에 이르러서는 모멘트의 증가에도

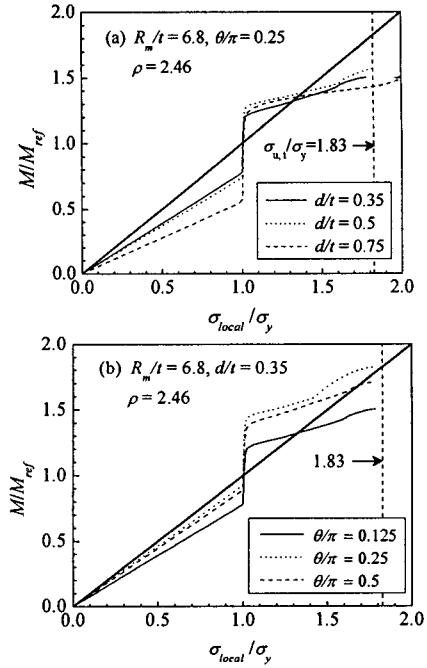


Fig. 8 Comparison of σ_{local} , estimated according to Eq. (17), with FE results for pipes with local wall thinning under global bending (The defect is located in the compressive stressed region)

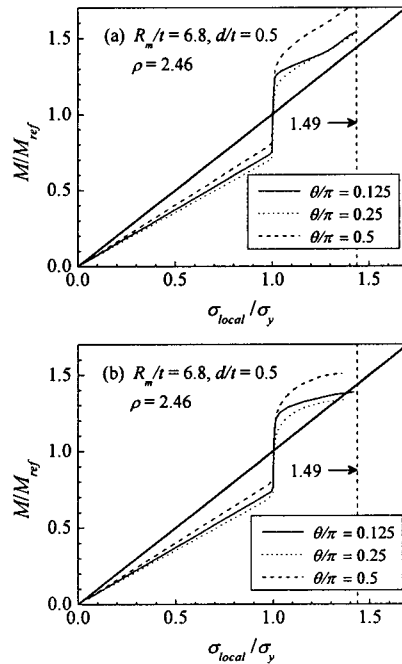


Fig. 9 Effect of material on estimated σ_{local} according to Eq. (17), with FE results for pipes with local wall thinning under global bending: (a) defect subject to tension (b) defect subject to compression

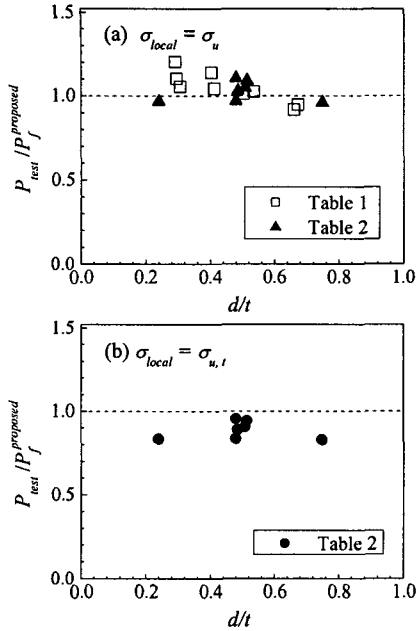


Fig. 10 Comparison of failure pressure from test data for pipes under internal pressure with those from the proposed method based on (a) ultimate tensile stress and (b) true ultimate tensile stress (Detailed test data is given in Tables 1 and 2)

불구하고 감육부 전체가 항복에 이를 때까지 국부 응력이 변화하지 않는 형태를 나타내었다. 그 후 다시 모멘트의 증가에 따라 국부응력이 증가하였다. 감육배관의 파손은 감육부의 잔여부가 완전소성된 후 발생하므로, 항복응력 이상의 범위에서의 결과가 중요하다. Fig. 7~9에 나타난 바와 같이 식 (17)은 배관형상, 감육형상, 감육위치, 배관재질에 무관하게 감육부 최심점에서의 등가응력을 비교적 잘 예측하였다.

5. 감육배관의 건전성평가에 적용

앞 장에서는 유한요소해석을 통해 결정된 상수 α 를 식 (12)과 (16)에 적용하여 내압이나 굽힘모멘트가 작용하는 배관의 감육부 최심점에서의 등가응력을 예측하는 평가법을 제시하였다. 이 평가법은 내압이나 굽힘모멘트가 작용하는 감육배관의 잔여강도를 예측하는데 사용할 수 있다. 예를 들면, 파손기준을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\sigma_{local} = \sigma_{mat} \quad (18)$$

여기서, σ_{mat} 은 재료의 강도를 나타낸다. 식 (18)에서 σ_{local} 은 배관형상, 감육형상 및 하중크기(내압

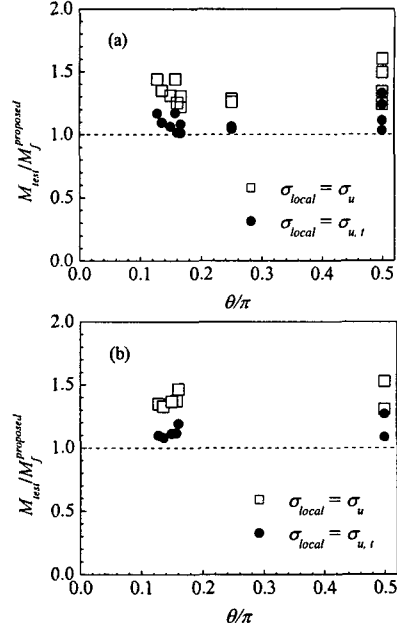


Fig. 11 Comparison of failure moment from test data for pipes under global bending with those from the proposed method based on ultimate tensile stress and true ultimate tensile stress: (a) defect subject to tension (b) defect subject to compression (Detailed test data is given in Tables 3 and 4)

이나 굽힘모멘트)에 따라 결정되며, σ_{mat} 은 재료의 저항력(resistance)을 나타낸다. 특히, 고인성 재료의 경우에는 σ_{mat} 을 인장강도 σ_u 나 진인장강도 $\sigma_{u,t}$ 로 정의할 수 있다.

본 논문에서 제시한 잔여강도 평가법을 검증하기 위해 Table 1~4의 실패관 실험결과를 재해석하였다. 먼저 다음과 같은 기준에 따라 감육배관의 잔여강도를 평가하였다.

$$\sigma_{local} = \sigma_u \quad (19)$$

Fig. 10(a)에서는 내압이 작용하는 경우, 감육배관에 대한 파열실험 결과와 식 (14)에 의해 계산된 σ_{local} 을 비교하여 나타내었다. Fig. 11(a)는 굽힘모멘트가 감육부에 인장력으로 작용하는 경우, 굽힘시험 결과와 식 (17)에 의해 계산된 σ_{local} 을 비교한 것이고, Fig. 11(b)는 굽힘모멘트가 감육부에 압축력으로 작용하는 경우에 대한 결과를 나타낸 것이다. 내압이 작용하는 경우, 제시된 방법은 전체적으로 감육배관의 잔여강도를 잘 예측하였다. Fig 2에 나타난 결과와 비교해서, 본 논문에서 제시한 방법은 PCORRC 방법보다 잔여강도를 정확히 예측하였으나 약간의 비보수성을 나타내었다.

RSTRENG 방법에 비해서는 보수성이 크게 줄어들었다. 굽힘모멘트가 작용하는 경우에 대해서도 제시된 방법이 기존의 한계하중접근법에 비해 보수성이 줄어들었다.

다른 기준으로는 감육부 최심점에서의 등가응력이 진인장강도와 같아지는 경우를 파손기준으로 정의할 수 있다.

$$\sigma_{local} = \sigma_{u,t} \quad (20)$$

Fig. 10(b)는 내압이 작용하는 경우의 예측결과를 나타낸 것이고, Fig. 11은 굽힘모멘트가 작용하는 경우의 결과를 나타낸 것이다. Table 1의 실험결과에서는 진인장강도를 제공하지 않았기 때문에 진인장강도를 제공하고 있는 Table 2의 결과와만 비교하였다. 내압이 작용하는 경우, 제시된 방법은 실험결과보다 파손압력을 크게 예측하여 항상 비보수적인 결과를 나타내었다. 반면 굽힘모멘트가 작용하는 경우에는 제시된 방법이 기존의 평가법에 비해 낮은 보수성을 나타내었으며, 시험결과와 잘 일치하였다. 이러한 결과는 하중에 따른 응력상태로 설명할 수 있다. 굽힘모멘트가 작용하는 경우에는 축방향응력만이 작용하므로 감육부의 응력상태가 단축응력상태(uniaxial stress state)가 된다. 반면, 내압이 작용하는 경우에는 축방향응력과 원주방향응력이 동시에 작용하는 이축응력상태(biaxial stress state)가 되기 때문에 단축응력상태보다 더 낮은 압력에서 파손이 발생하게 된다.

본 논문에서 제시한 방법은 기존의 평가법에 비해 몇 가지 장점이 있다. 첫째, 제시된 방법은 간단한 참조응력개념에 기초하였기 때문에 복잡하중이 작용하는 경우 또는 다른 재료물성, 다른 형상에도 쉽게 확대하여 적용할 수 있다. 두번째 장점은 배관이 중·저인성 강일 경우, 실패관 시험을 수행하지 않고 간단한 노치시험을 통해 σ_{mat} 을 적절히 선택하면 배관의 잔여강도를 평가할 수 있다는 것이다. 또한 제시된 평가법은 곡관이나 분지관에 대해서도 적용이 가능할 것이다. 제시된 방법의 더욱 중요한 장점은 평가의 정확성이다. 본 논문에서 제시된 평가방법은 간단함에도 불구하고, 그 결과가 감육 실패관 실험결과와 매우 잘 일치함을 볼 수 있었다.

6. 결 론

본 논문에서는 감육배관의 잔여강도를 평가할 수 있는 새로운 공학적 평가법을 제시하였다. 제

시된 평가법은 감육부 최심점에서의 등가응력을 이용한 평가법으로 참조응력개념을 적용하여 간단한 형식으로 표현된다. 제시된 평가법은 배관형상, 감육형상 및 배관재질에 무관하게 적용이 가능하며 평가법으로부터 얻어진 파손하중은 실패관 실험결과와 잘 일치하였다. 마지막으로, 제시된 평가법은 개념적으로 간단하기 때문에 복잡하중이 작용하는 경우와 같은 복잡한 문제에 대해서도 적용이 용이할 것으로 판단된다.

후 기

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

참고문헌

- (1) American Society of Mechanical Engineer, 1991, "Manual for Remaining Strength of Corroded Pipelines," ANSI/ASME B31.G.
- (2) 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.
- (3) Roy, S., Grigory, S., Smith, M., Kanninen, M.F. and Anderson, M., 1997, "Numerical Simulations of Full Scale Corroded Pipe Tests with Combined Loading," *ASME J. Pressure Vessel Technology*, Vol. 119, pp. 457 ~ 466.
- (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 Subject to Bending Load," *Nuclear Engineering Design*, Vol. 191, pp. 195 ~ 204.
- (5) 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
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) Kim, J.W., Park, C.Y., Lee, S.H. and Kang, T.Y., 2001, "Effects of Thinning Length on Failure Mode of Local Wall Thinned Pipe," *Proc. KSME Spring Annual Meeting A.*, pp. 357 ~ 362.

- (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) Kiefner, J.F. and Vieth, P.H., 1989, "A Modified Criterion for Evaluating the Remaining Strength of Corroded Pipe," American Gas Association, Catalog No. L51609, PR3 ~ 805.
- (12) Leis, B.N. and Stephens, D.R., 1997, "An Alternative Approach to Assess the Integrity of Corroded Line Pipe-Part I: Current Status," and "Part II: Alternative Criterion," *Proc. 7th Int. Offshore Polar Engineering Conference*.
- (13) Kanninen, M.F., Broek, D., Marschall, C.W., Rybicki, E.F., Sampath, S.G., Simonen, F.A. and Wilkowski, G.M., 1976, "Mechanical Fracture Predictions for Sensitized Stainless Steel Piping with Circumferential Cracks," Final Report, EPRI NP-192, USA.
- (14) Vieth, P.H. and Kiefner, J.F., 1994, "Database of Corroded Pipe Tests," Pipeline Research Supervisory Committee, PRC International, AGA Catalog Number L51689.
- (15) Kim, Y.P., Baek, J.H., Kim, W.S. and Kho, Y.T., 2002, "The Evaluation of Burst Pressure for Corroded Pipeline by Full Scale Burst Test," *Proc. KSME Spring Annual Meeting A.*, pp. 203 ~ 210.
- (16) Ainsworth, R.A., 1984, "The Assessment of Defects in Structures of Strain Hardening Materials," *Eng. Fract. Mech.*, Vol. 19, pp. 633 ~ 642.
- (17) Penny, R.K. and Marriott, D.L., 1995, *Design for Creep*, 2nd Ed., Chapman & Hall.
- (18) R5, 1998, "An Assessment Procedure for the High Temperature Response of Structures," Revision 2, British Energy Generation Ltd.
- (19) ABAQUS, 2001, *ABAQUS User's Manual*, Hibbit, Karlson & Sorensen, Inc.
- (20) Miller, A. G., 1988, "Review of Limit Loads of Structures Containing Defects," *Int. J. Pressure Vessels Piping*, Vol. 32, pp. 191 ~ 327.
- (21) Shim, D.J., Kim, Y.J., Kim, Y.J., Hwang, S.S. and Kim, J.S., 2002, "Plastic Limit Load Solutions for Circumferential Surface Cracked Cylinders Under Combined Loading," Submitted to *Transaction of the KSME (A)*.