

< 논문 >

## 인장하중을 받는 직선 배관 감육부의 국부 탄소성 변형을 평가 방법

마영화<sup>†</sup> · 안중혁\* · 김윤재\*\* · 윤기봉\*\*\*  
(2005년 9월 8일 접수, 2006년 2월 27일 심사완료)

### Estimation Method of Local Elastic-Plastic Strain at Thinning Area of Straight Pipe Under Tension Loading

Young Wha Ma, Joong Hyok An, Yun Jae Kim and Kee Bong Yoon

**Key Words :** Local Wall Thinning(국부 감육), Local Elastic-Plastic Strain(국부 탄소성 변형률), Finite Element Analysis(유한요소해석), Erosion Assisted Corrosion(침부식)

#### Abstract

In order to assess the integrity of pipes with local thinning area, the plastic strain as well as the elastic strain at the root of thinned region are required particularly when fluctuating load is applied to the pipe. For estimating elastic-plastic strain at local wall thinning area in a straight pipe under tensile load, an estimation model with idealized fully circumferential constant depth wall thinning area is proposed. Based on the compatibility and equilibrium equations a nonlinear estimation equation, from which local elastic-plastic strain can be determined as a function of pipe/defect geometry, material and the applied strain was derived. Estimation results are compared with those from detailed elastic-plastic finite element analysis, which shows good agreements. Noting that practical wall thinning in nuclear piping has not only a circular shape but also a finite circumferential length, the proposed solution for the ideal geometry is extended based on two-dimensional and three-dimensional numerical analysis of pipes with circular wall thinning.

#### 기호설명

$A_1, A_2$  : 배관의 감육부, 비감육부 단면적  
 $d$  : 감육부의 최대 깊이  
 $D_o$  : 배관의 외경(=2 $R_o$ )  
 $E$  : 탄성 계수  
 $L, L_1$  : 배관, 감육부의 축방향 1/2 길이  
 $L_{eq}$  : 감육부의 등가 축방향 1/2 길이  
 $n$  : 변형률 경화지수 ( $1 \leq n < \infty$ )  
 $R_o, R_m$  : 배관의 외부, 평균 반경

$t$  : 배관 벽 두께  
 $\delta$  : 부하된 축방향 변위  
 $\epsilon, \epsilon_o$  : 변형률, 항복 변형률( $\epsilon_o = \sigma_o/E$ )  
 $\theta$  : 원주방향 결함 1/2 각도  
 $\sigma, \sigma_o$  : 응력, 항복 강도  
 $\epsilon_1, \sigma_1$  : 감육부에서의 국부 변형률, 국부 응력

#### 1. 서론

침부식에 의해 발생하는 배관 국부 감육부의 건전성 여부는 원자력산업에서 구조 건전성에 있어서 매우 중요한 문제이다. 국부 감육부의 건전성 평가를 위해서는 2 가지 사항을 점검해야 한다. 첫째는 감육 배관의 국부 감육부가 단일 부하하중에 대해 견딜 수 있을 정도의 파손강도를 가지고 있는지 점검하는 것이다. 많은 해석적인 표현식들이 이러한 정하중의 파손강도를 평가하기 위해 제안

\*\*\* 회원, 중앙대학교 기계공학부

E-mail : kbyoon@cau.ac.kr

TEL : (02)820-5328 FAX : (02)812-6474

† 책임저자, 회원, 중앙대학교 대학원 기계공학부

\* 회원, 고려대학교 대학원 기계공학부

\*\* 회원, 고려대학교 기계공학부

되었다.<sup>(1-7)</sup> 예를 들어, ASME Code Case N-597<sup>(8)</sup>에 따르면 배관의 실제 벽 두께가 코드의 해석적 평가식에 의해 요구되어지는 최소 벽 두께 보다 크면, 국부 감육 손상이 용인되고 플랜트는 가동을 지속할 수 있다. 점검해야 할 두 번째 사항은 피로하중에 대한 건진성이다. 국부 감육부는 응력 집중을 유발하므로 감육부에서 발생하는 최대 국부 응력은 배관의 공칭응력 보다 상당히 클 수 있다는 점에 주목해야 한다.<sup>(9)</sup> 따라서 이러한 국부 감육 부위에서 피로 손상을 평가하기 위해서는 응력집중계수(또는 피로노치 계수)를 결함 형상, 배관 형상, 부하 하중의 함수로 나타낼 필요가 있다. 최근에 응력집중계수 값들이 내압과 굽힘하중 하에서 국부 감육이 존재하는 배관의 3 차원 탄성 유한요소해석을 통해 보고 되고 있다.<sup>(10)</sup> 이러한 값들은 국부 탄성 응력을 평가하므로 국부 감육이 존재하는 배관에 대해 피로해석을 수행하는데는 유용하다. 반면에 국부 감육 중 특히 깊고 좁은 국부 감육이 존재할 때에는 소성 변형이 국부 감육 루트부에서 발생할 수 있다. 이러한 소성 변형은 정상적인 가동조건 뿐 아니라 플랜트 기동-정지 조건에서 특히 발생할 수 있다. 기동-정지 시에는 온도도 변하므로 소성 변형률이 국부 감육부에서 발생할 가능성이 더욱 높다. 따라서 배관 감육 부에서의 국부 탄소성 변형률을 평가하기 위한 공학적인 예측 방법을 개발하는 것은 피로해석 뿐만 아니라 파손평가를 위해서도 매우 중요하다.

본 논문에서는 배관의 국부 감육부에서 국부 탄소성 변형률(또는 과도 변형률)의 평가 방법을 연구하였다. 단순화를 위해, 인장하중을 받는 직관만을 우선 고려하였다. 2 절에서는 근사적 two-bar 모델에 기초한 국부 과도 변형률을 평가하기 위한 단순 평가식을 제안하였다. 제안한 평가 모델을 검증하기 위해 결과들을 탄소성 유한요소해석 결과와 비교하였다. 3 절은 탄소성 유한요소해석에 기초하여 단순 모델 해석을 보다 현실적인 국부 감육 형상 모델에 대한 해석으로 확장하였다.

## 2. 국부 탄소성 변형률 평가 모델

### 2.1 근사적 two-bar 모델

감육부에서의 국부 탄소성 변형률을 평가하기 위한 단순 모델로서 먼저 Fig. 1(a)에 나타난 이상적인 국부 감육 형상을 고려한다. 배관에서 결함은 축방향을 따라 일정한 깊이를 가지며(직사각형 감육), 360° 원주방향으로 감육이 발생한 경우 즉, 완전한 원주방향 감육으로 가정한다. 배관의 외부 반경, 두께, 길이는 각각  $R_o(D/2)$ ,  $t$ ,  $2L$  로 표시하

였다. 또한, 결함의 깊이와 결함의 길이는  $d$  와  $2L_1$  로 표시하였다. 감육이 존재하지 않는 부위의 배관 길이는  $2L_2 (=2L-2L_1)$ 이다. 비감육부 배관의 단면적은  $A_2$  이고, 감육부 배관의 최소 단면적은  $A_1$ 이다.

배관에 축방향 응력을 유발하는 축방향 변위  $2\delta$  가 작용할 때, 배관의 감육부 단면과 비감육부 단면에서의 평균응력은 각각  $\sigma_1$  과  $\sigma_2$ , 평균 변형률은 각각  $\varepsilon_1$  과  $\varepsilon_2$  로 표시하였다. 힘 평형식 및 적합 조건식은 각각 식 (1), (2)와 같다.

$$A_1\sigma_1 = A_2\sigma_2 \quad (1)$$

$$L_1\varepsilon_1 + L_2\varepsilon_2 = \delta \quad (2)$$

재료가 다음 식(3)의 응력-변형률 곡선을 따른다고 가정하면,

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma_o}{E} \left( \frac{1}{\sigma_o} \right)^n \sigma^n = \frac{\sigma}{E} + B\sigma^n \quad (3)$$

여기서  $\sigma_o$  는 항복강도이고,  $B = (\sigma_o/E)(1/\sigma_o)^n$  이다. 식 (1) ~ (3)으로부터 다음과 같은  $\sigma_1$  에 관한 비선형 방정식을 얻을 수 있다.

$$\left[ L_1B + L_2B \left( \frac{A_1}{A_2} \right)^n \right] \sigma_1^n + \left[ L_1 + L_2 \frac{A_1}{A_2} \right] \frac{\sigma_1}{E} = \delta \quad (4)$$

이때 항복 변형률은  $\varepsilon_o = (\sigma_o/E)$  이므로 식 (4)를 다음과 같이 무차원화할 수 있다.

$$\left[ \frac{L_1}{L} + \frac{L_2}{L} \left( \frac{A_1}{A_2} \right)^n \right] \left( \frac{\sigma_1}{\sigma_o} \right)^n + \left[ \frac{L_1}{L} + \frac{L_2}{L} \frac{A_1}{A_2} \right] \frac{\sigma_1}{\sigma_o} = \frac{(\delta/L)}{\varepsilon_o} \quad (5)$$

단면적비  $A_1/A_2$ 는 식 (6)에 주어진 바와 같다.

$$\frac{A_1}{A_2} = \left[ 1 - \frac{1}{2} \frac{(d/t)}{(R_m/t)} \right] \left( 1 - \frac{d}{t} \right) \quad (6)$$

여기서  $R_m$  은 배관의 평균 반경이다. 주어진  $R_m/t$ ,  $d/t$ ,  $L_1/L$ ;  $\sigma_o$ ,  $\varepsilon_o$ ,  $n$ ;  $\delta/L$  조건에서 식 (5), (6)을 풀면 감육부 최소 단면부에서  $\sigma_1/\sigma_o$  를 계산할 수 있고, 계산된 값을  $\sigma_1/\sigma_o$  에 대해서 나타낸 탄소성 변형률에 관한 식 (7)에 대입하면  $\varepsilon_1$  을 얻을 수 있다.

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} + \frac{\sigma_o}{E} \left( \frac{\sigma_1}{\sigma_o} \right)^n \quad (7)$$

여기서 변형률  $\varepsilon_1$  은 감육부 최소 단면부에서의 국부 변형률로 간주할 수 있다. 식 (5)로부터 국부 탄소성 변형률  $\varepsilon_1$  은 배관 형상( $R_m/t$ ), 결함 형상( $d/t$  와  $L_1/L$ ), 재료상수 ( $\varepsilon_o$  와  $n$ ), 부하 변형률( $\delta/L$ )에 의존함을 알 수 있다.

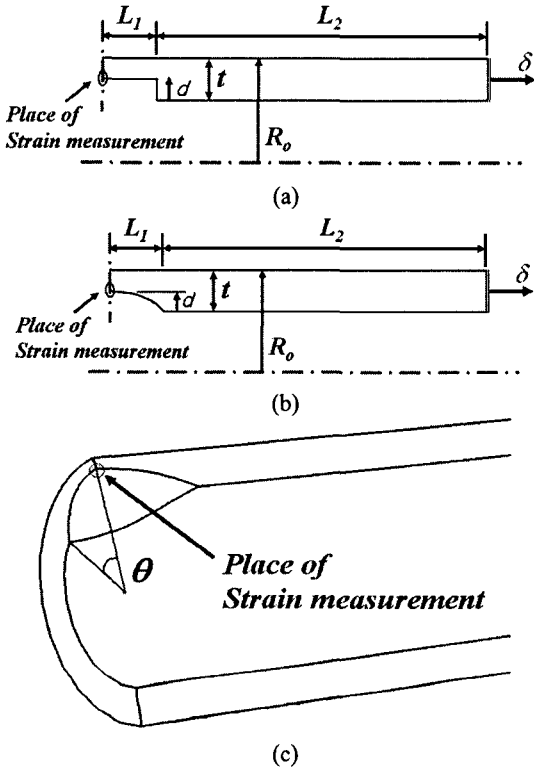


Fig. 1 Schematic illustrations of a pipe with local wall thinning: (a) fully circumferential thinning with a rectangular shape, (b) fully circumferential thinning with a circular shape and (c) general thinning with a circular shape

### 2.2 유한요소해석

감육부에서의 탄소성 변형률을 평가하기 위해 앞 절에서 제안한 평가식을 검증하기 위해서 탄소성 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 1 에 나타낸 바와 같이 이상적인 결함 형상인 직사각형 감육부를 가지는 배관을 축대칭 조건을 사용하여 모델링 하였다. 배관 및 국부 감육과 관련한 무차원 기하 변수인  $R_m/t$ ,  $d/t$ ,  $L_1/L$  (또는  $L_1/D_o$ ) 들을 체계적으로 변화시키면서 해석하였다. 즉, 본 연구에서 이들 변수 값들을  $R_m/t = 10, 20$ ;  $d/t = 0.3, 0.5, 0.7$ ;  $L_1/D_o = 0.5, 1, 2$  의 조합으로 변화시켰다. 모든 조건들에 대해서 효율적인 계산을 위해 대칭 조건을 사용하였다. 또한, 비방축성과 관련한 문제를 피하기 위해서 ABAQUS<sup>(11)</sup> 내에 감차적분요소(reduced integration element)를 사용하였다. 사용된 유한요소 메시는 요소/절점 수가 2 차원 계산에서는 각각 1500/4919 ~ 6600/22103 개를 사용하였고, 3 차원 계산에서는 1216/6359 개를 각각 사용하였다. 모든 해석에서 두계방향으로 6 개의 요소를 사용하였다.

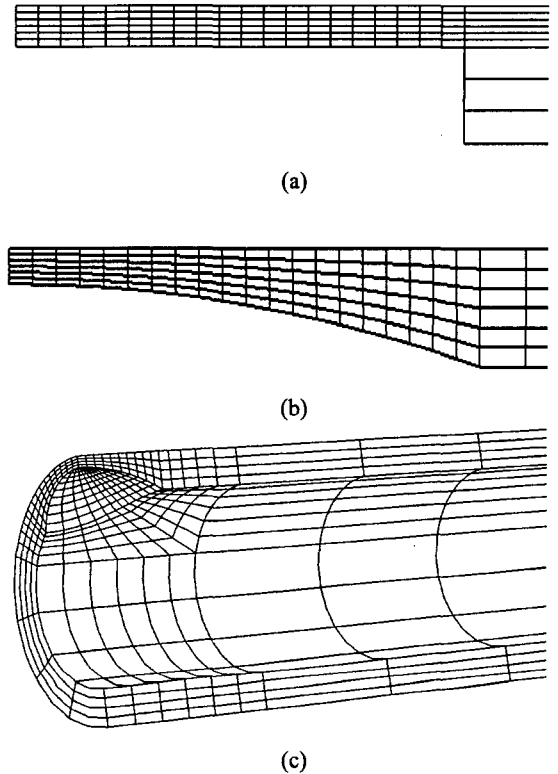


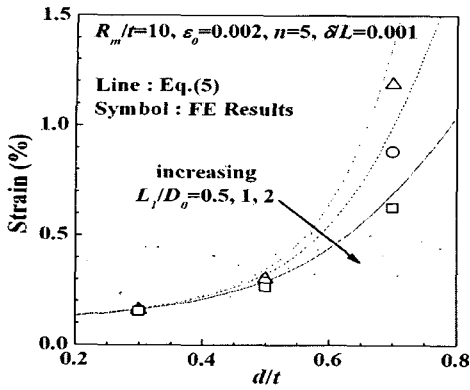
Fig. 2 Typical FE meshes for (a) fully circumferential thinning with a rectangular shape, (b) fully circumferential thinning with a circular shape and (c) general thinning with a circular shape

본 연구에서 사용된 전형적인 유한요소 메시지를 Fig. 2(a)에 나타내었다.

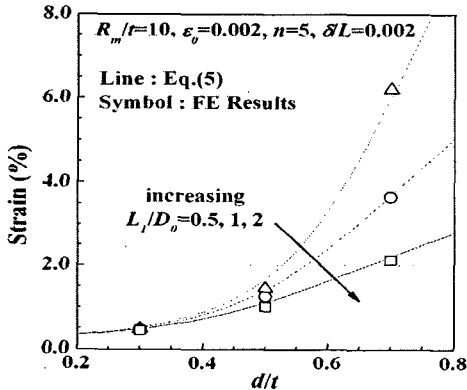
재료거동은 소성변형 옵션을 사용한 식(3)에 의해 기술된 탄소성으로 가정하였다. 재료 상수인  $\epsilon_0$  와  $n$  은 식 (5)에 보인 바와 같은 관계식에 의해 국부 변형률  $\epsilon_f$  을 결정하는데 영향을 줄 것이다. 본 연구에서 해석 결과들은 무차원화하여 표시하였기 때문에  $E$  와  $\sigma_0$  의 절대값은 크게 중요하지 않다. 본 연구에서  $\epsilon_0$  는 3 가지 값 ( $\epsilon_0=0.001, 0.0015, 0.002$ ),  $n$  은 2 가지 값 ( $n=5, 10$ )을 사용하였다. 푸아송 비는  $\nu=0.3$  으로 가정하였다.

부하 조건으로 축방향 변위를 배관의 끝 단에 부과 하였다. 공칭 변형률  $\epsilon_a$  는 축방향 부하 변위와 배관 길이의 비( $\delta/L$ )로서 정의하였다. 본 연구에서 공칭 변형률은 두 경우의 값( $\epsilon_a=0.001, 0.002$ )을 사용하였다. 식 (5)의 우측 항을 보면 공칭 변형률과 항복 변형률의 비( $\epsilon_a/\epsilon_0$ )가 중요한 변수가 됨을 알 수 있다.

과손이 발생하기 전에 나타나는 비탄성 대변형을 모사하기 위해 ABAQUS<sup>(11)</sup> 내에 비선형 기하



(a)



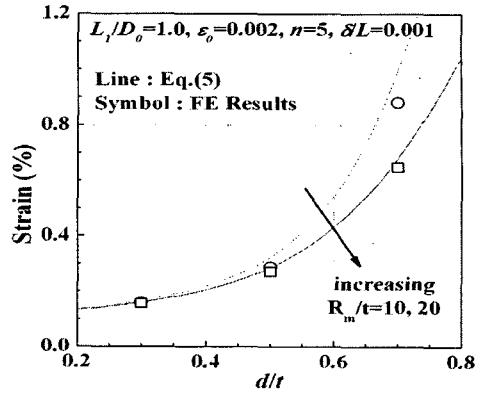
(b)

Fig. 3 Comparison of the estimated local strains according to Eq. (5) with the FE results for a pipe with idealized wall thinning with  $R_m/t=10$ ,  $\epsilon_0=0.002$ ,  $n=5$ : (a)  $\delta L=0.001$  and (b)  $\delta L=0.002$

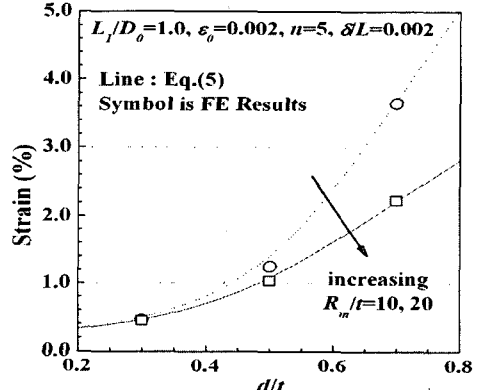
옵션 'NLGEOM'을 유한요소모델에 사용하였다. 유한요소해석으로부터 전체 등가 변형률은 Fig. 1(a)에 나타난 바와 같이 결함의 정중앙면의 값을 측정하였다.

2.3 비교 검증

유한요소해석 결과 얻은 감육부에서의 등가 변형률 값과 식 (5)로부터 평가된 등가 변형률 값을 비교하여 Fig. 3 에 도시하였다. Fig. 3(a)는  $\delta L=0.001$  인 경우이고 Fig. 3(b)는  $\delta L=0.002$  인 경우이다. 변형률 값은 주어진 조건인  $R_m/t=10$ ,  $n=5$ ,  $\epsilon_0=0.002$  에서 상대적인 결함 깊이 값( $d/t$ )과 결함 길이 값( $L_1/D_0$ )이 각각 변화할 때의 결과값을 보여 준다. 감육부에서 탄소성 변형률의 크기는  $d/t$  가 증가함에 따라,  $L_1/D_0$  가 감소함에 따라 그리고  $\delta L$  이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 또한 이 결과들을 보면 특히 상대적으로 깊은 감육에 대해  $d/t$  의 효과가 매우 큼을 알 수 있다. 이는



(a)



(b)

Fig. 4 Effect of  $R_m/t$  on local strains for a pipe with idealized wall thinning and comparison with the FE results: (a)  $\delta L=0.001$  and (b)  $\delta L=0.002$

변형률이  $d/t$  가 증가함에 따라 급격하게 증가하는 현상을 통해 알 수 있다.  $L_1/D_0$  와  $\delta L$  의 효과 역시 크게 나타났다. 예를 들면,  $d/t=0.7$ ,  $L_1/D_0=0.5$ ,  $\delta L=0.002$  일 때의 변형률 크기는  $d/t=0.7$ ,  $L_1/D_0=2.0$   $\delta L=0.002$  일 때의 변형률 크기의 약 3 배 정도이고,  $d/t=0.7$ ,  $L_1/D_0=0.5$ ,  $\delta L=0.001$  일 때의 변형률 크기와 비교해서는 약 5 배 정도 크다. 식 (5)를 사용하여 평가된 변형률은 유한요소해석 결과와 비교해서 만족할 만한 일치를 보였다. 즉, 예측된 평가 값들은  $\delta L=0.001$  일 때는 유한요소해석 결과 값 보다 약간 높아 보수적인 평가 결과를 보였으나,  $\delta L=0.002$  일 때는 유한요소해석 결과와 잘 일치하였다.

감육부에서의 국부 변형률에 대한  $R_m/t$  의 효과를 Fig. 4 에 나타내었다. 감육부에서의 변형률은  $R_m/t$  가 증가할수록 감소하며,  $R_m/t$  의 효과는  $d/t$  와  $\delta L$  의 값이 클수록 더 커진다는 것을 알 수 있다.

Fig. 4 를 보면 제안된 평가식인 식 (5)가  $R_m/t$  의

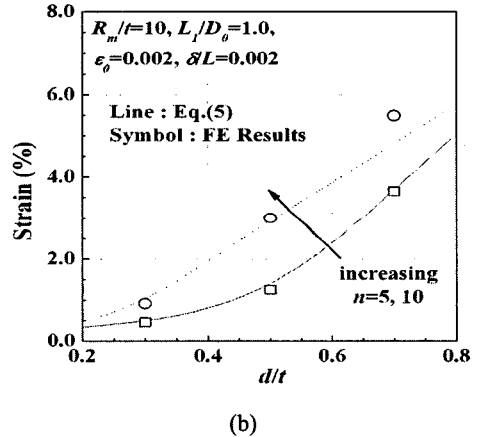
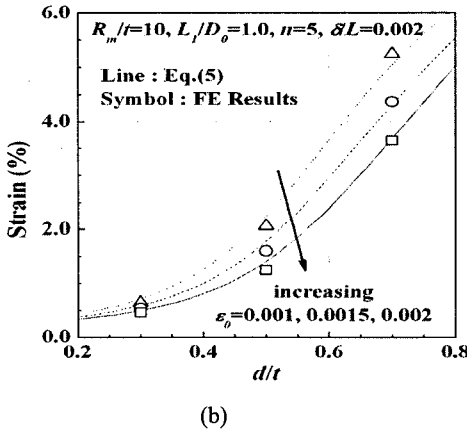
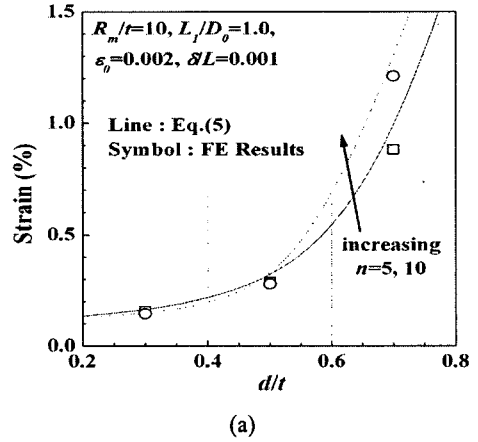
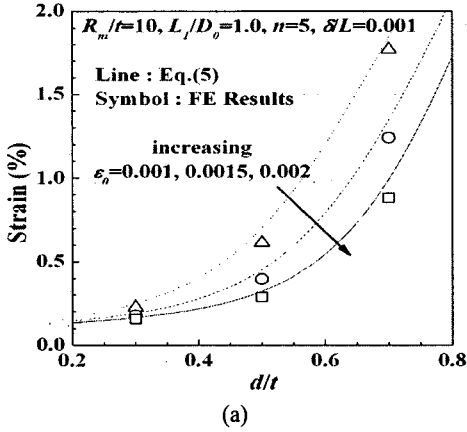


Fig. 5 Effect of  $\epsilon_0$  on local strains for a pipe with idealized wall thinning and comparison with the FE results: (a)  $\Delta L=0.001$  and (b)  $\Delta L=0.002$

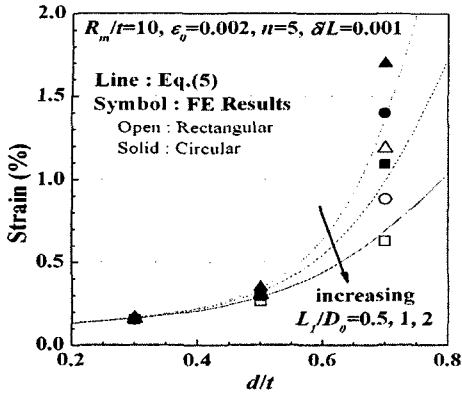
Fig. 6 Effect of  $n$  on local strains for a pipe with idealized wall thinning and comparison with the FE results: (a)  $\Delta L=0.001$  and (b)  $\Delta L=0.002$

효과를 잘 예측할 수 있음을 보여준다. 국부 변형률에 대한 항복 변형률  $\epsilon_0(=\sigma_0/E)$ 의 효과를 Fig. 5에 나타내었다. 이 결과로부터 감육부에서의 변형률이  $\epsilon_0$ 가 증가함에 따라 감소함을 알 수 있다. 따라서, 식 (5)는 감육부에서 국부 변형률에 대한  $\epsilon_0$ 의 효과도 보여줄 수 있다. 마지막으로 국부 변형률에 대한 변형률 경화지수  $n$ 의 효과를 Fig. 6에 나타내었다. 국부 변형률은  $n$  값이 증가함에 따라 증가하였고,  $n$ 의 효과는  $d/t$ 와  $\Delta L$  값들이 클수록 보다 더 커진다는 것을 알 수 있다. 식 (5)를 사용하여 평가된 변형률 값들은 유한요소해석 결과와 매우 잘 일치하였다.

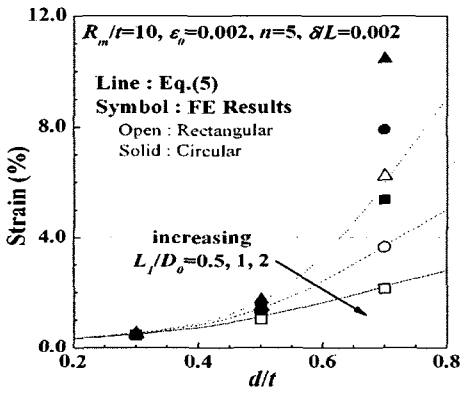
### 3. 제안된 모델의 일반화

앞 절에서는 감육부에서의 국부 탄소성 변형률을 평가하기 위한 모델식을 제안하였고, 평가 결과들을 유한요소해석 결과와 비교하였다. 비교 결

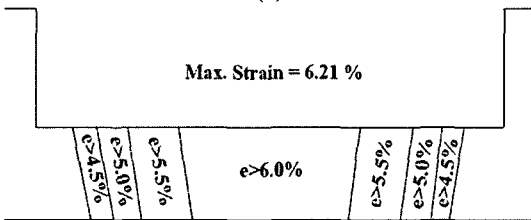
과 Fig. 3 ~ 6에서 보여진 바와 같이 유한요소해석 결과와 전체적으로 잘 일치하였다. 이는 감육부에서의 변형률을 평가하기 위해 제안한 모델에 신뢰성을 부여할 수 있다는 것을 보여준다. 하지만, 제안한 모델이 두 가지 중요한 가정에 기초하여 개발되었다는 점을 유의해야만 한다. 첫 번째 가정은 Fig. 1(a)에 보인 바와 같이 일정한 깊이를 가지는 이상적인 감육 형상이었다. 이에 반해, Fig. 1(b)의 원형 감육이 실제 상태면에서 보다 더 현실적일 것이다. 두 번째 가정은 모델에 고려된 감육부가 원주방향 전체에 걸친 결함이었다는 것이다 [Fig. 1(c)에서  $\theta/\pi=1.0$ ]. 이와는 달리 실제 결함은 유한한 원주방향 길이를 가지게 될 것이다 ( $\theta/\pi<1.0$ ). 따라서, 앞 절에서 제안한 모델은 본 절의 논제인 결함 형상과  $\theta/\pi$ 의 효과를 포함하기 위해 수정하여야 할 것이다. 본 연구에서는 결함 형상과  $\theta/\pi$ 의 효과를 포함하기 위해 다음 과정들을 수행하였다. 먼저 축방향으로 원형 형상을 가지는



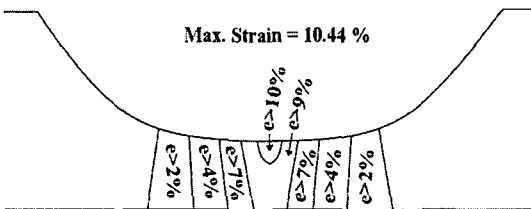
(a)



(b)



(c)



(d)

**Fig. 7** Effect of the defect shape on local strains for a pipe with wall thinning, rectangular vs. circular shapes, (a)  $\delta L=0.001$  and (b)  $\delta L=0.002$ ; strain contours from FE analysis of (c) the rectangular shape and (d) the circular shape for  $R_m/t=10$ ,  $\epsilon_o=0.002$ ,  $d/t=0.7$ ,  $L_i/D_o=0.5$  and  $\delta L=0.002$

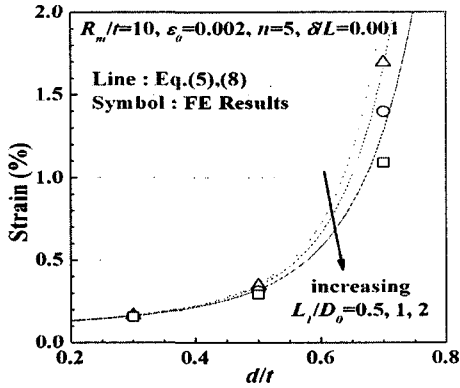
국부 감육에 대해 체계적인 탄소성 유한요소해석을 수행하였다. 이때 원주방향으로는 완전한 감육과 원형의 유한한 길이를 가지는 감육을 고려하였다. 유한요소해석에 기초하여 이상적인 감육에 대해 제안한 평가식인 식 (5)는 실제 3 차원 결함들에 대한 국부 변형률을 평가하기 위해 수정하는 방안을 제시 하였다.

3.1 유한요소해석

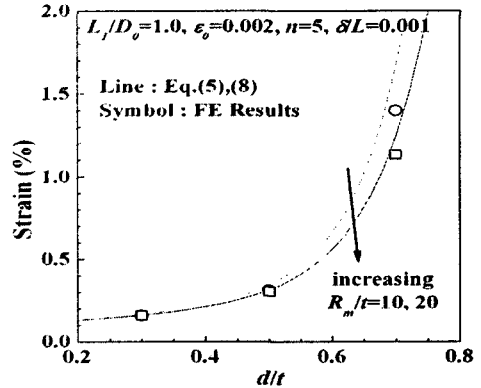
감육 단면에서 변형률에 관한 결함 형상과  $\theta/\pi$ 의 효과를 연구하기 위해 2 차원 및 3 차원 상세 탄소성 유한요소해석을 수행하였다. 먼저, 결함 형상의 효과를 살펴보기 위해 2.2 절에서와 유사한 축대칭 유한요소해석을 수행하였다. 이전 해석과의 차이점은 결함 형상의 차이이다. 결함은 Fig. 1(b)에 나타낸 바와 같이 축방향 원형으로 모델링 하였다. 유한요소 메시를 Fig. 2(b)에 나타내었다. 유한요소해석에서 고려한 변수들은 2.2 절에서 고려한 변수들과 같다. 다음으로 Fig. 1(c)에 나타낸 바와 같이 결함이 축방향 및 원주방향 상에 원형으로 모델링된 감육부를 고려하였다. 이 경우에는 부가적인 변수를 고려하여야 하므로 본 연구에서는 4 가지의  $\theta/\pi$  값( $\theta/\pi=0.125, 0.25, 0.5, 0.75$ )들에 대해 해석하였고, Fig. 2(c)에 나타낸 메시를 갖는 3 차원 유한요소해석을 수행하였다.

3.2 결함 형상의 효과

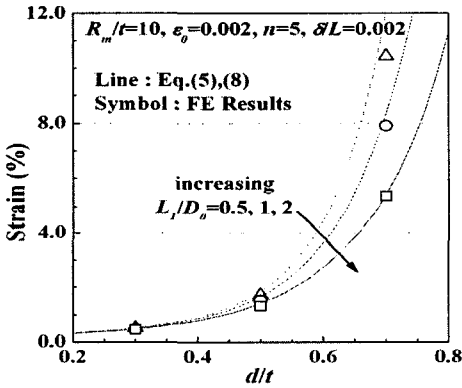
원형 결함과 결함 깊이가 일정한 직사각형 결함에 대한 유한요소해석 결과 얻은 국부 탄소성 변형률을 비교하여 Fig. 7(a), (b)에 나타내었다. 또한 국부 탄소성 변형률 평가식인 식 (5)를 사용한 예측 결과도 함께 도시하였다. 이 결과를 보면 원형 결함의 국부 변형률이 직사각형 결함의 국부 변형률 보다 높음을 알 수 있다. 또한, 이 변형률의 차이는  $d/t$  및  $\delta L$  가 증가할수록 크게 증가하였다. 즉,  $d/t=0.7$  이고  $\delta L=0.002$  인 경우, 원형 결함의 변형률들은 직사각형 결함의 변형률과 비교해서 약 2~3 배 정도 높았다. 이러한 원형 결함의 높은 변형률은 결함의 가장 깊은 지점에서 변형률이 집중되는 반면, 직사각형 결함의 경우는 변형률이 Fig. 7의 결과들로부터 제안한 국부 탄소성 변형률 평가식인 식 (5)가 수정되어야 함을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 원형 결함에 대한 변형률 집중 효과를 감육의 축방향 길이를 조정함으로써 반영할 수 있음을 고려하여, 원형 결함에 대해서는 등가 축방향 길이를 나타내는 식 (8)을 제안 한다.



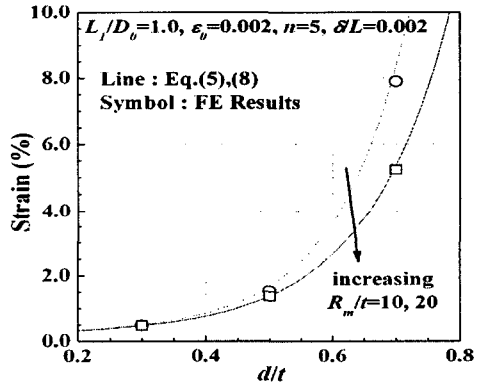
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 8 Comparison of the estimated local strains according to Eqs. (5) and (8) with the FE results for a pipe with circular wall thinning with  $R_m/t=10$ ,  $\epsilon_0=0.002$ ,  $n=5$ : (a)  $\delta L=0.001$  and (b)  $\delta L=0.002$

Fig. 9 Effect of  $R_m/t$  on local strains for a pipe with circular wall thinning and comparison with the FE results: (a)  $\delta L=0.001$  and (b)  $\delta L=0.002$

$$L_{eq} = \left(1 - \frac{d}{t}\right) L_1 \quad (8)$$

여기서  $L_1$  은 원형 결함의 축방향 길이,  $L_{eq}$  는 원형 결함의 축방향 등가 길이이다. 주어진  $L_1$  에 대해  $L_{eq}$  는 식 (8)로부터 얻을 수 있고, 감육부에서의 탄소성 변형률을 얻기 위해  $L_1$  대신  $L_{eq}$  를 식 (5)에 사용하면 된다. 축방향 등가 길이  $L_{eq}$  에 관한 식 (8)을 대입한 식 (5)로부터 얻어진 변형률을 유한요소해석 결과와 비교하여 Fig. 8 에 나타내었다. 결과는 만족할 만한 일치율을 보였다. 직사각형 결함과 이에 상응하는 원형 결함에 대한 결과( $L_1/D_0$  및  $d/t$  효과)를 비교해 보면, 국부 변형률에 대한  $L_1/D_0$  의 효과가 직사각형 결함과 비교해서 원형 결함의 경우가 더 작다는 사실이 주목할 만하다. 이 이유는 식 (8)에서 명확히 확인할 수 있다.  $d/t$  의 효과는 직사각형 결함과 비교해서 원형 결함의 경우가 더 크게 나타난다.

원형 결함에 대해 국부 탄소성 변형률에 관한  $R_m/t$  와  $\epsilon_0$  의 효과를 Fig. 9 와 Fig. 10 에 각각 나타내었다. 이 경향들은 Fig. 4 ~ 5 에서 나타낸 직사각형 결함에 대한 경향들과 상당히 유사하였고, 또한 이 유한요소해석 결과는 제안된 평가식인 식 (5)와 식 (8)을 사용한 예측 결과와도 잘 일치하였다.  $R_m/t$  의 효과는 원형 감육인 경우가 직사각형 감육 보다 더 작은 반면,  $\epsilon_0$  의 효과는 원형 결함의 경우와 직사각형 결함의 경우가 유사하였다. 원형 결함에 대해 국부 탄소성 변형률에 관한  $n$  의 효과를 Fig. 11 에 나타내었다.  $n$  의 효과는  $\epsilon_0$  의 효과와 마찬가지로 직사각형 결함인 경우와 유사한 경향을 보였다. 결론적으로 원형 감육에 대한 국부 변형률은 등가 결함 길이인 식 (8)과 제안한 평가식 식 (5)를 사용해서 평가 될 수 있다고 볼 수 있다.

3.3 결함의 원주방향 길이 효과

$\theta/\pi$ 를 단계적으로 변화시킨 일반적인 감육( $\theta/\pi$

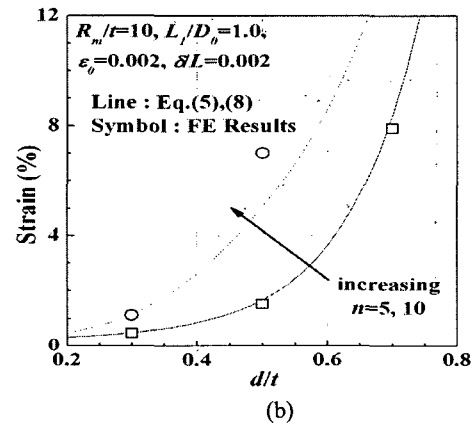
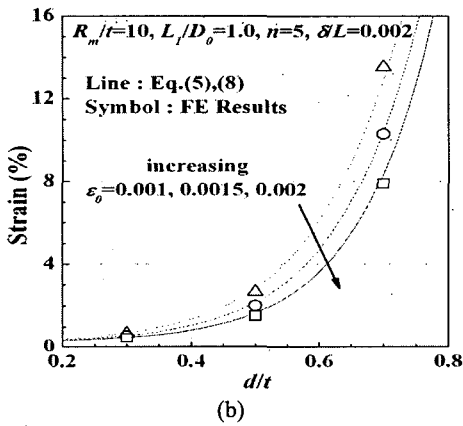
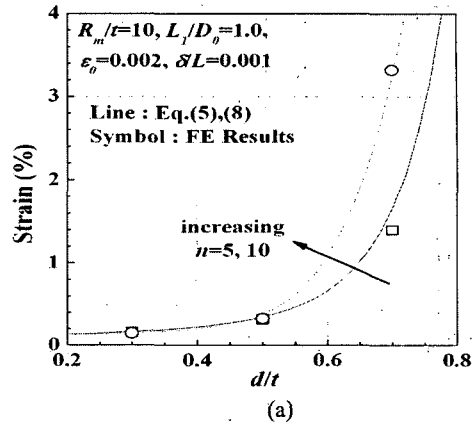
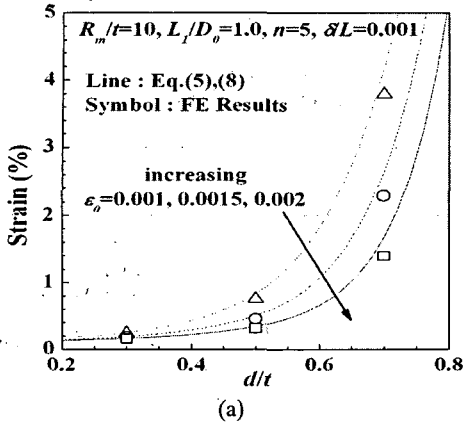


Fig. 10 Effect of  $\epsilon_0$  on local strains for a pipe with circular wall thinning and comparison with the FE results: (a)  $\delta L=0.001$  and (b)  $\delta L=0.002$

Fig. 11 Effect of  $n$  on local strains for a pipe with circular wall thinning and comparison with the FE results: (a)  $\delta L=0.001$  and (b)  $\delta L=0.002$

0.125, 0.25, 0.5, 0.75)에 대한 국부 탄소성 변형률의 유한요소해석 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 비교를 위해 유한한 원주방향 감육의 해석 조건에 상응하는 완전한 원주방향 원형 감육( $\theta/\pi=1.0$ )에 대한 결과도 함께 나타내었다. 국부 변형률 크기는  $\theta/\pi$ 가 감소함에 따라 감소하였다. 또한, 국부 변형률과  $\theta/\pi$ 사이의 관계는 거의 선형적인 관계를 보였다. 특이한 점은  $\theta/\pi=1.0$ 인 경우 변형률 값이  $\theta/\pi<1.0$ 인 경우의 결과로부터 외삽된 변형률 값보다 높다는 것이다. 이는 완전한 원주방향 결함( $\theta/\pi=1$ )에 대한 결과들이  $\theta/\pi \rightarrow 1$ 로 접근하는 경우에 대한 국부 변형률들을 과대 평가하였기 때문이다.

국부 변형률  $\epsilon_n$ 은  $\theta/\pi$ 와 선형적인 관계를 가지므로 일반적인 감육에 대한 국부 변형률 평가식은 식 (9)로 표현할 수 있다.

$$\epsilon = B \left( \frac{\theta}{\pi} - 1 \right) + \epsilon_1 \quad (9)$$

여기서  $\epsilon_1$ 은 식 (5)로부터 평가된 국부 변형률이다 즉, 식 (9)에서  $\epsilon_1$ 은 원형 결함이 아닌 이상적인 직사각형 결함에 대한 국부 변형률이다. 따라서 식 (8)에서 정의된  $L_{eq}$ 를  $\epsilon_1$ 을 평가하기 위해 사용하지는 않았다. 이것은 위에 설명했듯이 완전한 원주방향 결함( $\theta/\pi=1$ )에 대한 결과들이  $\theta/\pi \rightarrow 1$ 로 접근하는 경우에 국부 변형률들을 과대 평가하는 경향을 보이기 때문이다. 식 (9)에서 변수  $B$ 는  $d/t$ 와  $\delta L$ 의 함수이다. 유한요소해석 결과의 고찰로부터 식 (10)과 같은 간단한  $B$ 의 형태를 제안할 수 있다.

$$B = 3.7 \times 10^6 \left( \frac{\delta}{L} \right)^2 \left( \frac{d}{t} \right)^4 \quad (10)$$

식 (9), (10)을 사용하여 예측한 변형률들을 유한요소해석 결과와 비교하여 Fig. 12에 나타내었다. 비교 결과 예측한 값과 유한요소해석 결과 얻은 값들이 만족할 만한 일치를 보였다.  $\theta/\pi \rightarrow 0$ 로 접근하는 경우에 국부 변형률  $\epsilon_n$ 은 이론적으로 공칭



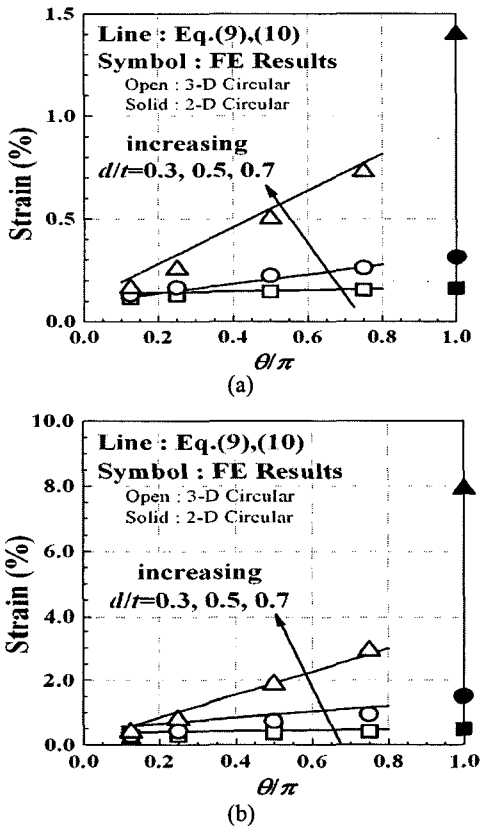


Fig. 12 Comparison of the estimated local strains according to Eqs. (9) and (10) with the FE results for a pipe with finite circumferential wall thinning with  $R_m/t=10$ ,  $\epsilon_0=0.002$ ,  $n=5$ ,  $L_1/D_0=1.0$ : (a)  $\Delta L=0.001$  and (b)  $\Delta L=0.002$

변형률  $\epsilon_a(=\Delta L)$ 이어야 한다.  $\theta/\pi \rightarrow 0$  로 접근하는 경우에 식 (9)에서  $\epsilon_1$ 은 식 (4)로부터  $\epsilon_a$ 에 도달하므로  $B$ 의 값은  $B=0$ 이 될 것이다. 따라서 식 (9), (10)은  $\theta/\pi < 0.125$ 인 조건에서는 적용할 수 없다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 인장하중을 받는 직선 배관의 감육부에서 국부 탄소성 변형률의 평가방법을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 단순 평가식을 유도하기 위해서 먼저 단순화된 직사각형 결함인 이상적인 국부 감육을 고려하였다. 유도된 평가식은 국부 변형률이 감육 형상(상대적인 결함 깊이와 무차원화된 축방향 길이)과 부하한 축방향 변형률에 크게 의존함을 보여주었다. 또한, 항복 변형률, 배관 반경/두께 비

그리고 변형률 경화지수에도 의존함을 보여주었다. 단순 평가식으로부터 얻어진 결과들은 상세 탄소성 유한요소해석으로부터 얻어진 결과와 잘 일치하였다.

(2) 실제 감육은 원형이고 유한한 원주방향 길이를 갖는다. 따라서 그러한 효과들을 반영하기 위해 이상적인 감육에 대해서 제안한 평가식들을 수정하였다. 수정된 국부 탄소성 변형률 평가식으로부터 예측한 결과들을 유한요소해석 결과와 비교해서 만족할 만큼 일치함을 보였다. 이는 감육부에 대한 국부 탄소성 변형률을 평가하기 위해 본 논문에서 제안된 방법을 사용함에 있어서 충분한 신뢰성을 가질 수 있음을 입증하는 것이다.

(3) 본 연구는 축방향 인장하중을 받는 직선 배관의 경우만을 고려하였다. 향후 유사한 공학적 평가식이 굽힘을 받는 직관과 국부 감육이 존재하는 엘보우나 브랜치와 같은 보다 복잡한 형상에 대해서 개발되어야 한다. 이를 위해 먼저 본 논문의 접근 방법인 two-bar 모델이 이러한 복잡한 문제들로도 확장될 수 있는 지에 대한 연구가 필요하다.

#### 후기

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2005-B-125)주관으로 수행된 전력선행과제의 연구비로 수행되었습니다. 이의 지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) American Society of Mechanical Engineer, 1991, "ANSI/ASME B31.G: Manual for Remaining Strength of Corroded Pipelines"
- (2) Roy, S., Gregory, S., Smith, M., Kanninen, M. F. and Anderson, M., 1997, "Numerical Simulations of Full-Scale Corroded Pipe Tests with Combined Loading," *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 119 pp.457-466.
- (3) Ahn, S. H., Nam, K. W., Yoo, Y. S., K. Ando, Ji, S. H., Ishiwata, M. and Hasegawa, K., 2002, "Fracture Behavior of Straight Pipe and Elbow with Local Wall Thinning," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 211, Issue 2-3, pp. 91-103.
- (4) Kim, Y. J., Shim, D. J., Lim, H. and Kim, Y. J., 2004 "Reference Stress Based Approach to Predict Failure Strength of Pipes with Local Wall Thinning under Single Loading," *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 126, No. 2, pp. 194-201.
- (5) Shim, D. J., Choi, J. B. and Kim, Y. J., 2004, "Failure Strength Assessment of Pipes with Local Wall Thinning under Combined Loading Based on Finite

- Element Analyses." *Accepted Publication to ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 126, No. 2, pp. 179~183.
- (6) Kim, Y. J., Shim, D. J., Lim, H. and Kim, Y. J., 2005, "Reference Stress Based Approach to Predict Failure Strength of Pipes with Local Wall Thinning under Combined Loading," *ASME Pressure Vessel and Technology*, Vol. 127, No. 1, pp. 76~83.
- (7) American Society of Mechanical Engineer, 2003. "Analytical Evaluation of Internal of External Wall Thinning in Piping Systems," ASME Sec. XI, Appendix X (draft).
- (8) 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.
- (9) Peterson, R. E., 1974, "Stress Concentration Factors," John Wiley & Sons, Inc.
- (10) Kim, Y. J., Son, B. G. and Kim, Y. J., 2004, "Finite Element Based Stress Concentration Factors for Pipes with Local Wall Thinning," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 81, Issue 12, pp. 897~906.
- (11) ABAQUS User's Manual (2001). Hibbitt, Karlson & Sorensen, Inc.