

< 논문 >

## 굽힘하중을 받는 배관의 파손에 미치는 감육의 영향

안 석 환\* · 남 기 우†

(2004년 10월 29일 접수, 2005년 2월 24일 심사완료)

### Effect of Wall Thinning on the Failure of Pipes Subjected to Bending Load

Seok-Hwan Ahn and Ki-Woo Nam

**Key Words:** Bending Load(굽힘하중), Wall Thinning(감육), Finite Element Analysis(유한요소해석), Pipe(배관), True Fracture Ductility(진과괴연성), Equivalent Strain(상당변형률)

#### Abstract

Effects of circumferentially local wall thinning on the fracture behavior of pipes were investigated by monotonic four-point bending. Local wall thinning was machined on the pipes in order to simulate erosion/corrosion metal loss. The configurations of the eroded area included an eroded ratio of  $d/t=0.2, 0.5, 0.6,$  and  $0.8,$  and an eroded length of  $\ell=10\text{mm}, 25\text{mm},$  and  $120\text{mm}.$  Fracture type could be classified into ovalization, local buckling, and crack initiation depending on the eroded length and eroded ratio. Three-dimensional elasto-plastic analyses were also carried out using the finite element method, which is able to accurately simulate fracture behaviors excepting failure due to cracking. It was possible to predict the crack initiation point by estimating true fracture ductility under multi-axial stress conditions at the center of the thinned area.

#### 1. 서 론

고압용 탄소강배관은 발전플랜트의 배관시스템에 광범위하게 사용되고 있다. 이와 같은 배관은 그 사용기간 중에 고온, 고압 및 고압 증기의 유동이 고속으로 작용하는 환경에 항상 노출되고 있다.

이들 배관은 erosion-corrosion에 의한 내부 벽에서의 두께감소(이하 감육이라 한다)가 발생한다. 그러므로 배관시스템의 안전을 유지하기 위해서 감육(wall thinning)이 발생한 배관들에 대하여 강도와 파괴거동을 평가하는 것은 매우 중요하다. 몇몇 연구자들에 의하여 감육을 가지는 직관, 곡관 및 T-이음배관의 소성붕괴거동 및 강도 특성

에 대한 다양한 연구가 실시되고 있다.<sup>(1-8)</sup>

본 연구에서는 정적 굽힘하중을 받는 감육된 탄소강배관의 손상거동과 강도를 실험에 의하여 평가하였다. 그리고 이들 배관에 대하여 ANSYS를 이용하여 탄소성해석을 실시하여 실험결과와 비교 분석하였다. 더욱이, 균열발생점이 감육된 면적의 중앙부에서 다축 응력 조건하에서 상당변형률(equivalent strain)과 진과괴연성(true fracture ductility)으로 예측 가능함을 나타내었다.

#### 2. 재료 및 실험과 해석방법

##### 2.1 재료 및 실험방법

본 연구에 사용된 재료는 직경 48.6mm인 Schedule 80 STS370 고압탄소강배관(Carbon Steel Pipes for High Pressure Service; JIS Standard G3455)이다. 시험편의 형상을 Fig. 1에 나타낸다. 실제로 감육현상은 대개 배관의 내부에서 발생한다. 그러나 본 연구에서는 감육결함을 배관의 외

† 책임저자, 회원, 부경대학교 신소재공학부

E-mail : namkw@pknu.ac.kr

TEL : (051)620-1640 FAX : (051)624-0746

\* 회원, 부경대학교 기계공학부

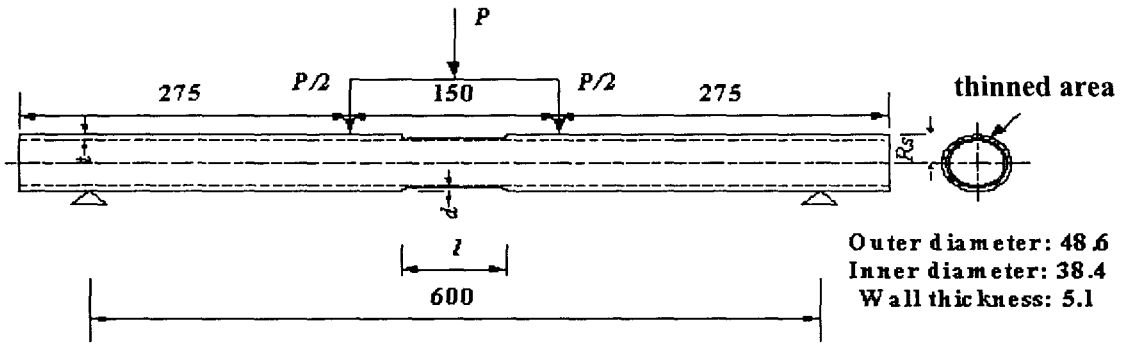


Fig. 1 Shape and dimensions of a pipe specimen with wall thinning

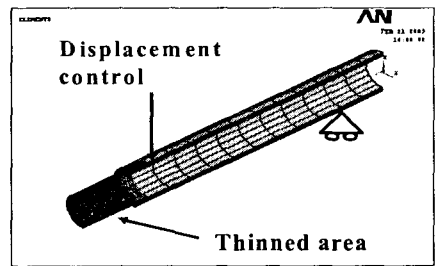
Table 1 Specimen geometries and test results

Specimen No.	Thinned ratio d/t	Thinned length $\ell$ (mm)	Failure mode	Crack initiation point, $\delta_c$ (mm)	
				Experimental	Estimated
WTP-1	0	0	Ovalization	-	-
WTP-2	0.8	10	Crack initiation	11	6
WTP-3	0.8	25	Buckling	-	-
WTP-4	0.8	120	Buckling	-	-
WTP-5	0.6	10	Crack initiation	13	8
WTP-6	0.5	10	Crack initiation	20	10
WTP-7	0.2	10	Ovalization	-	-

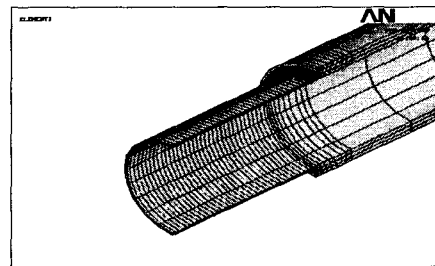
측에 기계적으로 가공하였다. 그것은 배관 외측에 감육결함을 가공한 배관의 파괴거동과 내측에 감육결함을 가공한 배관의 파괴거동에서 거의 동일한 결과를 나타내기 때문이다.<sup>(1,2)</sup> 시험편의 건전부와 감육부의 경계부분은 응력집중을 피하기 위해 rounding 하였다. 대표적인 감육의 형상을 Fig. 1에 나타낸다. Fig. 1에서 d는 감육깊이,  $\ell$ 은 감육길이, t는 배관의 두께, 그리고  $R_s$ 는 배관의 외측반경을 각각 나타낸다. 이와 같이 가공된 배관 시험편에 Fig. 1과 같이 실은 대기 중에서 내압을 고려하지 않은 상태로 4점 굽힘시험을 행하였다. 이때 부하 스패ん 길이는 150mm, 지지 스패ん 길이는 600mm로 하였다. 굽힘시험은 크로스헤드 변위속도 1mm/min의 변위제어로 행하였다. 이용된 시험편의 치수 및 실험으로부터 얻어진 결과는 Table 1에 나타내었다.

2.2 해석 방법

Fig. 2(a) 와 (b)는 FEM 모델의 한 예를 나타낸다. FEM 해석은 FEM Code ANSYS Ver.7.0을 이용하여 탄소성해석을 수행하였다. 배관모델링은



(a) 1/4 modelling



(b) Detail of thinned area

Fig. 2 An example of the FEM analysis model

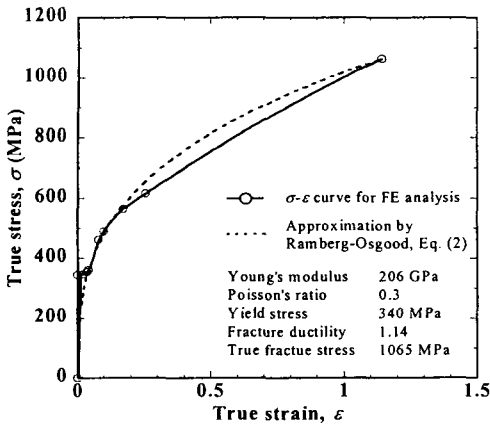


Fig. 3 True stress-true strain curve for FEM

isoparametric 20절점 육면체요소를 사용하여, 대칭성을 고려해서 1/4 배관모델을 작성하였다. 해석에는 Von Mises의 항복조건을 사용하고, 내압이 없는 조건하에서 변위제어로 하였다.

Fig. 3의 실선은 FEM 해석에 이용된 진응력-진변형률 곡선을 나타낸다. 영률은 206 GPa, 포아송비는 0.3으로 하였다. 대변형상태의 변형률을 고려하여 인장시험으로부터 파단시의 진과피응력을 구하고, 단면수축률을 이용하여 진과피연성값을 산출하였고, 해석에는 다직선 선형근사를 이용하였다.

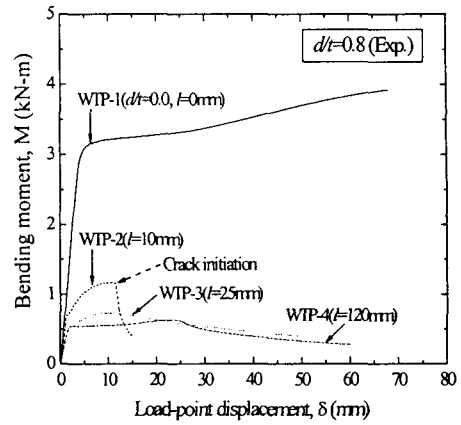
### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 감육부의 손상모드

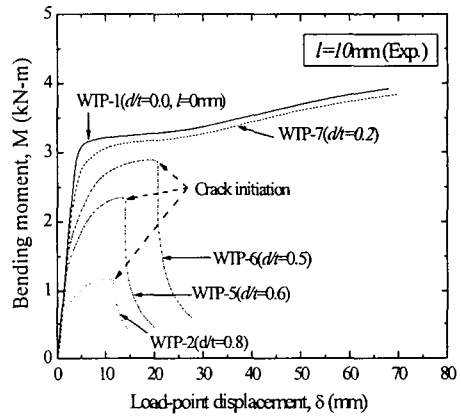
본 실험에서 발생한 손상모드는 편평화(ovalization), 좌굴(buckling) 및 균열발생(crack initiation)의 3가지 type으로 나타났다. 이들 결과는 감육의 깊이 및 길이에 의존하고 있다.

Fig. 4는 본 실험으로부터 구해진 전형적인 모멘트-변위선도(M-δ curve)를 나타낸다. Fig. 4의 그림 속에는 감육결함이 없는 건전한 배관인 WTP-1(d/t=0, ℓ=0mm)의 결과를 함께 나타내었다.

Fig. 4(a)는 감육비 d/t=0.8에 대한 M-δ 선도이다. 감육결함이 없는 건전한 배관인 WTP-1은 편평화에 의하여 파손되었다. 감육길이 ℓ=10mm인



(a)



(b)

Fig. 4 Relationship between bending moment and displacement obtained from experimental results

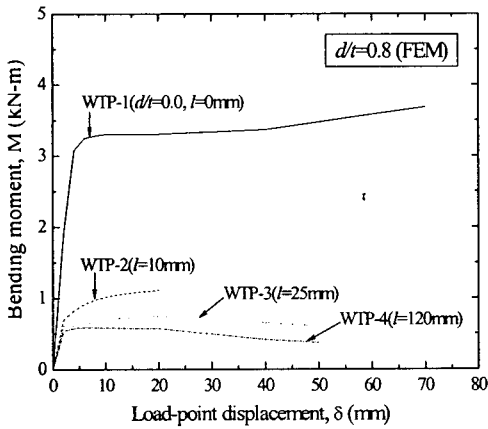
WTP-2는 최대굽힘모멘트에서 균열이 발생하였고, 굽힘모멘트는 균열이 진전함에 따라 급속하게 저하되었다. 이때 균열은 하중 부하방향에 대해 인장축에서 발생하였다. 감육길이가 각각 ℓ=25 및 120인 WTP-3과 4는 국부적인 좌굴에 의하여 파손되었다. 모멘트는 좌굴 발생 후 약간 증가하는 경향을 나타내었지만, 최대모멘트를 나타낸 후 점차적으로 감소하는 경향을 나타내었는데 충분한 연성을 나타내고 있다. 이때 좌굴은 하중 부하방향에 대해 압축축에서 발생하였다.

Fig. 4(b)는 감육길이  $\ell=10\text{mm}$ 일 때, 감육비 ( $d/t$ )의 변화에 따른 각 시험편에서의 M- $\delta$  선도를 나타낸다.  $d/t=0.2$ 인 WTP-7는 편평화에 의하여 파손하였다. 그러나  $d/t=0.6$ 인 WTP-5와  $d/t=0.5$ 인 WTP-6은 균열에 의하여 파손하고, 균열발생 후 균열진전과 함께 모멘트가 급속하게 저하하였다. 균열은 모두 하중 부하방향에 대하여 인장측에서 발생하였다. 이 결과로부터 감육비가 배관의 손상에 영향을 미친다고 판단된다. 뿐만 아니라, Fig. 4(a)에 나타낸 것처럼 감육길이의 영향도 있

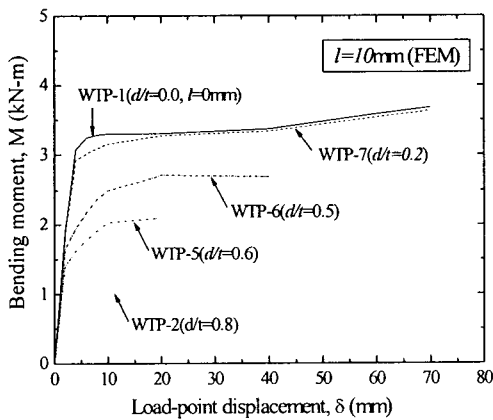
음을 알 수 있다. 특히, 비교적 짧은 감육길이를 가진 배관은 균열에 의하여 파손된다는 것은 중요한 사실이다. 3.3절에서 이에 대한 고찰을 실시하였다.

3.2 유한요소 해석

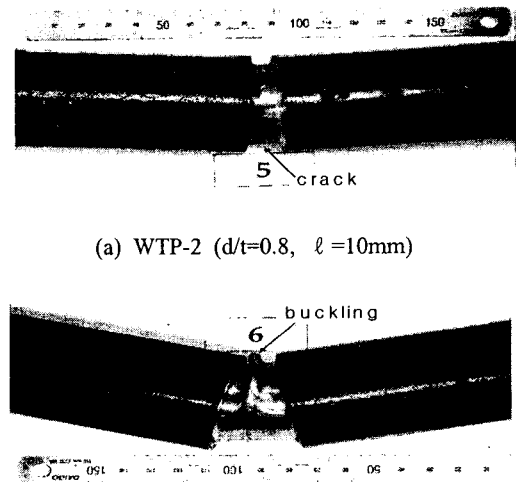
Fig. 5(a)와 (b)는 감육비  $d/t=0.8$  및 감육길이  $\ell=10\text{mm}$ 에 대하여 각각 FEM 해석으로부터 구한 M- $\delta$  선도를 나타낸다. Fig. 5의 그림 속에는 감육 결함이 없는 건전한 배관인 WTP-1( $d/t=0, \ell=0\text{mm}$ )의 FEM해석으로부터 구한 결과 값을 함께 나타내었다. FEM 해석으로부터 구한 결과들은 WTP-2, 5, 6을 제외하고는 좋은 일치를 보이고 있다. Fig. 6에 배관굽힘실험으로부터 나타난 손상모드의 예를 나타내고, Fig. 7에 FEM에 의한 대표적인 해석결과의 예를 나타낸다. Fig. 4에 나타낸 것처럼 WTP-2, 5, 6의 실험의 경우는 굽힘 모멘트가 인장측 중앙에서 발생된 균열에 의하여 급속히 저하되었다. 해석에 있어서는, 대조적으로, 균열은 발생되지 않았고 굽힘모멘트도 저하되지 않았다. 균열에 의하여 배관이 파손되었을



(a)



(b)

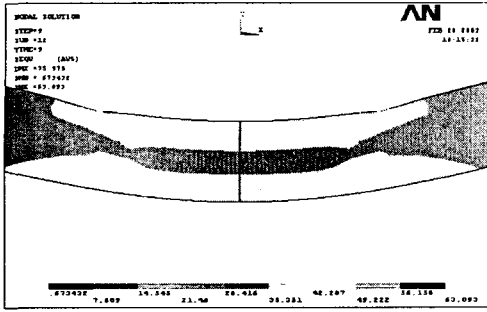


(a) WTP-2 ( $d/t=0.8, \ell=10\text{mm}$ )

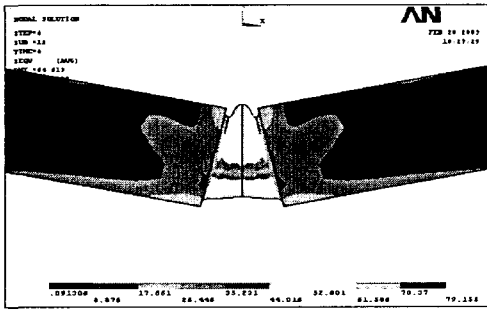
(b) WTP-3 ( $d/t=0.8, \ell=25\text{mm}$ )

Fig. 5 Relationship between bending moment and displacement obtained from FE analyzes

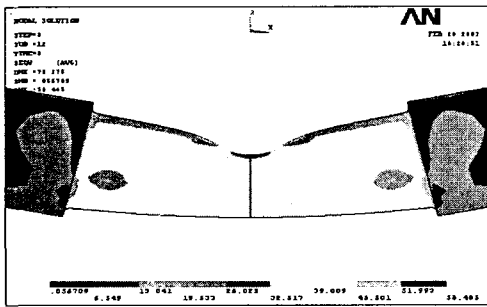
Fig. 6 Failure mode occurred in pipes with locally thinned area by experiment



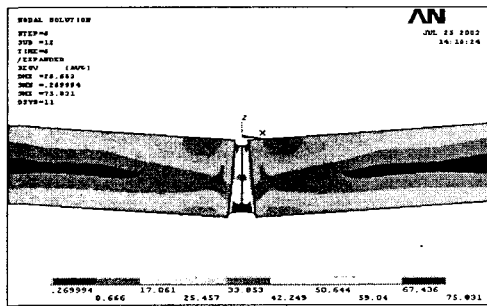
(a) WTP-1 (d/t=0.0, l=0mm)



(b) WTP-3 (d/t=0.8, l=25mm)



(c) WTP-4 (d/t=0.8, l=120mm)



(d) WTP-6 (d/t=0.5, l=10mm)

Fig. 7 Shapes of specimens simulated by FEM

때, 파괴거동은 FEM으로 만족하게 예측할 수 없었다. 그래서 Miyazaki 등<sup>(8)</sup>에 의해 제안된 평가 방법을 이용하여 균열발생을 예측하였다.

3.3 감육부에서의 균열발생의 예측

Miyazaki 등<sup>(8)</sup>은 다축응력조건하에서 진과괴연성( $\epsilon_{mf}$ )을 평가하기 위해서 아래의 식 (7)과 같이 Weiss의 이론<sup>(9)</sup>을 확대 전개하였다. Weiss는 다축응력상태에서 진과괴연성을 수식화하고 있는데, 응력과 변형률의 관계를 n승경화칙에 따른다고 가정하여 Mises의 상당응력,  $\sigma_{ms}$ 와 상당변형률,  $\epsilon_{ms}$  사이에는 식 (1)이 성립한다고 가정하였다.

$$\sigma_{ms} = k\epsilon_{ms}^n \quad (1)$$

여기서, k 및 n은 재료정수이다. 또한,  $\sigma_{ms}$  및  $\epsilon_{ms}$ 는 아래 식 (2) 및 (3)과 같다.

$$\sigma_{ms} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \right) \quad (2)$$

$$\epsilon_{ms} = \frac{\sqrt{2}}{3} \left( \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2} \right) \quad (3)$$

식 (2) 및 (3)에서  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  및  $\sigma_3$ 는 주응력들을,  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  및  $\epsilon_3$ 는 주변형률을 각각 나타낸다. Weiss이론이 성립한다고 가정하면, 단축응력상태에서는 식 (1)로부터 아래의 식이 성립한다.

$$\sigma_{uf} = k\epsilon_{uf}^n \quad (4)$$

여기서,  $\sigma_{uf}$ 와  $\epsilon_{uf}$ 는 각각 단축응력조건하에서의 진과괴응력과 진과괴연성을 각각 나타내며, 본 연구에서는  $\sigma_{uf}=1,065\text{Mpa}$ ,  $\epsilon_{uf}=1.14$ 이다.

이상과 같이, Weiss의 이론이 성립한다면 다축응력상태에서의 진과괴연성( $\epsilon_{mf}$ )은 아래 식 (5)와 같이 주어진다.

$$\epsilon_{mf} = \left( \frac{\sigma_{ms}}{3\sigma_m} \right)^{\frac{1}{n}} \epsilon_{uf} \quad (5)$$

where.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$

이 평가에서 진파괴연성에 달하는 넓은 진변형을 영역에서의 진응력과 진변형률 사이의 관계를 Ramberg-Osgood 식<sup>(10)</sup>의 근사에 의해, Weiss의 이론을 적용하면 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$\left( \frac{\epsilon_{ms}}{\sigma_0/E} \right) = \left( \frac{\sigma_{ms}}{\sigma_0} \right) + \lambda \left( \frac{\sigma_{ms}}{\sigma_0} \right)^n \quad (6)$$

여기서,  $\sigma_0$ 는 항복응력이다.  $E=206\text{GPa}$ ,  $\sigma_0$ 는  $340\text{MPa}$ 이다.

Fig. 3에 나타낸 점선은 Ramberg-Osgood 식에 의한 대략적인 진응력-진변형률 사이의 관계를 나타낸다. 식 (1)과 아래에 나타낼 식 (7)로부터  $\lambda=20.4$ ,  $n=3.11$ 이다.

식 (6)에서  $\epsilon_{ms}$ 를 다축응력상태일 경우  $\epsilon_{mf}$ 로, 단축응력상태일 경우  $\epsilon_{uf}$ 로 각각 대체하고, 단축응력상태의 인장시험의 결과에 Weiss의 이론을 적용하면 다축응력상태에서의 진파괴연성( $\epsilon_m$ )은 최종적으로 아래의 식 (7)로서 표현이 가능하다.

$$\epsilon_{mf} = \frac{\left( \frac{\omega m \sigma_{uf}}{\sigma_0} \right) + \lambda \left( \frac{\omega m \sigma_{uf}}{\sigma_0} \right)^n}{\left( \frac{\sigma_{uf}}{\sigma_0} \right) + \lambda \left( \frac{\sigma_{uf}}{\sigma_0} \right)^n} \epsilon_{uf} \quad (7)$$

where,

$$m = \sqrt{(1 + \alpha + \beta)^2 - 3(\alpha + \beta + \alpha\beta)}$$

$$\omega = \frac{1}{1 + \alpha + \beta}$$

$$\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}, \beta = \frac{\sigma_3}{\sigma_1}$$

여기서,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  및  $\sigma_3$ 는 주응력들을, 항복응력  $\sigma_0$ 는  $340\text{MPa}$ 이다.

다축응력의 정도는 배관의 변형에 의존한다. 그런 까닭으로, 감육부의 중앙부에서의 진파괴연성( $\epsilon_m$ ) 또한 변형에 의존한다. 게다가, 상당변형률( $\epsilon_{ms}$ )은 배관의 변형과 더불어 증가한다. 즉,

Weiss의 이론에 근거하여 균열은 감육부에서 발생하는 상당변형률이 식 (7)로 주어지는 진파괴연성을 능가하는 점에서 발생한다고 가정한다.

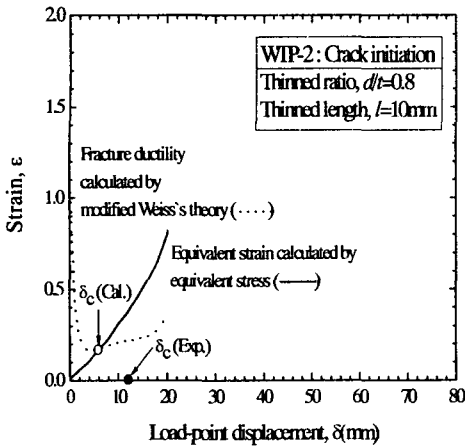
본 연구에서는,  $\epsilon_{mf}$ 의 값은 식 (7)에서 FEM 해석으로부터 얻어진 감육부의 중앙에서의 주응력들을 대체함으로써 평가되었고,  $\epsilon_{ms}$ 의 값은 FEM해석으로부터 얻어졌다.

균열발생점( $\delta_c$ ), 즉 균열이 발생한 하중점 변위는 이상의 방법에 의해 평가되어졌다. Table 1에는 실험과 해석으로부터 얻어진 균열발생점을 나타낸다.

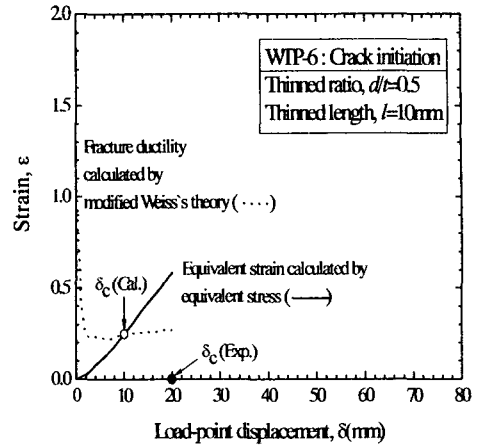
Fig. 8(a)와 (b)는 각각 WTP-2와 WTP-3에 대하여 하중점 변위( $\delta$ )의 함수로서 식 (7)에 의하여 계산된 상당변형률과 파괴연성을 나타낸다. Fig. 8과 9에서 점선은 파괴연성을, 실선은 상당변형률을 각각 나타낸다.

Fig. 8은 감육비  $d/t=0.8$ 인 WTP-2와 WTP-3의 결과이다. WTP-2는 균열에 의하여 파손하였고, WTP-3은 좌굴에 의해 파손하였다. 실험으로부터, 좌굴에 의하여 파손된 WTP-3은 균열이 발생하지 않았다. 우선, Fig. 8(b)는 파괴연성과 상당변형률이 교차되지 않았기에 균열의 발생이 없음을 의미한다. 해석 결과는 실험 결과와 좋은 일치를 나타내었다. 이에 반해, Fig. 8(a)의 WTP-2의 경우는 실험결과에 있어서는 균열은  $\delta_c=11\text{mm}$ 에서 발생한 반면, 해석에 있어서는  $\delta_c=6\text{mm}$ 에서 균열이 발생하여 파괴연성과 상당변형률이 교차한다.  $\ell=10\text{mm}$ 인 WTP-2에 대한  $\epsilon_{mf}$ 의 값은  $\ell=25\text{mm}$ 인 WTP-3 보다도 더 낮다. 게다가, WTP-2에 대한  $\epsilon_{ms}$ 의 값은 WTP-3보다도 더 크다. 그러므로 감육길이가 짧을 경우에 배관시험편은 균열에 의해 파손되는 경향을 나타낸다는 것을 알 수 있다. 이것은 감육부에서 다축성이 응력 억제에 의해 증가하기 때문이다.

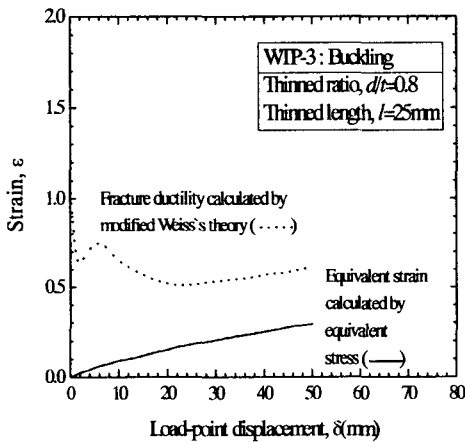
Fig. 9(a)와 (b)는 감육길이  $\ell=10\text{mm}$ 인 WTP-6과 WTP-7에 대한 결과이다. 실험에서 WTP-7은 편평화에 의하여 손상되었고, 균열이 발생하지 않았다. Fig. 9(b)는 파괴연성과 상당변형률이 교차하지 않아서 균열이 발생하지 않는다. 반면, Fig. 9(a)에 나타낸 WTP-6의 실험결과는 균열에 의한 파손이 발생하였고, 이때 균열은  $\delta_c=20\text{mm}$ 에서 발생하였다. 해석에 있어서는  $\delta_c=10\text{mm}$ 에서 파괴연성과 상당변형률이 교차하고 있다. Fig. 8 및 9에서 모두 실험에 비해 해석에서 균열이



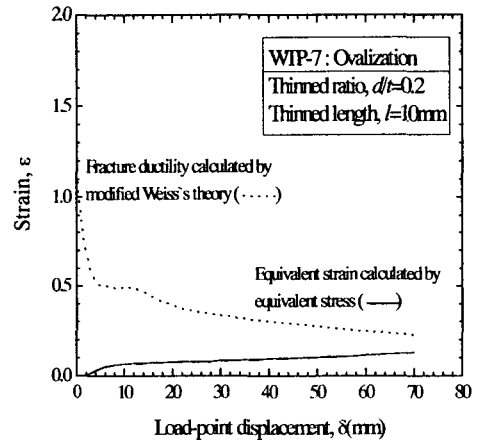
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 8 Relationship between equivalent strain and fracture ductility as a function of displacement(cases of crack initiation and buckling)

Fig. 9 Relationship between equivalent strain and fracture ductility as a function of displacement(cases of crack initiation and ovalization)

빨리 발생하는 것으로 나타났다. 균열발생점에 대한 실험치와 해석치 사이에서의 오차는 해석에 있어서 진응력과 진변형률 사이의 관계를 Ramberg-Osgood 식에 다직선근사하고 Weiss의 이론을 적용하였기 때문에 발생된 것으로 생각된다. 여기에 대해서는 금후 추가적으로 검토해 볼 여지가 있는 것으로 사료된다.

이상으로부터, 결과적으로 식 (7)에 의하여 표현된 진과괴연성과 상당변형률을 사용함으로써 균열 발생점을 평가하는 것이 가능하다고 판단된다.

4. 결 론

(1) 감속비  $d/t=0.8$ 의 경우, 감속길이  $l=25$  및  $120\text{mm}$ 으로 비교적 긴 경우에는 배관은 충분한

연성을 나타내었다. 그러나 감육길이가  $\ell=10\text{mm}$ 로서 비교적 짧은 경우에는 균열에 의해 파손되었다. 그러므로 비교적 짧은 감육길이를 가진 배관은 균열에 의해 파손된다는 것을 알 수 있다.

(2) 감육길이  $\ell=10\text{mm}$ 인 경우, 감육비  $d/t=0.5$  및 0.6일 때 배관은 균열에 의해 파손되었다. 그러므로 비교적 짧은 감육길이를 가지는 경우에는 감육비  $d/t$ 가 작더라도 균열에 의해 파손된다는 것을 알 수 있다.

(3) 다축 조건하에서 진파피연성에 대한 평가를 이용함으로써 감육부 중앙에서 균열의 발생이 예측 가능하다는 것을 나타내었다.

(4) 결론 (1)과 (2)로부터 배관의 파손에 미치는 감육의 영향은 감육길이 및 감육비에 의존한다.

### 참고문헌

- (1) Ahn, S. H., Nam, K. W., Yoo, Y. S., Ando, K., Ji, S. H., Ishiwata, K. and Hasegawa, K., 2002, "Fracture Behavior of Straight Pipe and Elbow with Local Wall Thinning," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 211, pp. 91~103.
- (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 Subjected to Bending Load," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 191, pp. 195~204.
- (3) Ahn, S. H., Nam, K. W., Kim, S. J., Kim, J. H., Kim, H. S. and Do, J. Y., 2003, "Failure Mode and Fracture Behavior Evaluation of Pipes with Local Wall Thinning Subjected to Bending Load," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 27, No. 1, pp. 8~17.
- (4) Nam, K. W. and Ahn, S. H., 2004, "Fracture Behaviors and Acoustic Emission Characteristics of Pipes with Local Wall Thinning," *Key Engineering Materials*, Vol. 270-273, pp. 461~465.
- (5) Kim, J. W., Nam, K. W. and Ahn, S. H., 2004, "Nondestructive Evaluation of Pipes with Local Wall Thinning by Wavelet Analysis of Elastic Wave," *Key Engineering Materials*, Vol. 270-273, pp. 954~958.
- (6) Kim, J. W. and Park, C. Y., "An Evaluation of Failure Behavior of Pipe with Local Wall Thinning by Pipe Experiment," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 26, No. 4, pp. 731~738.
- (7) Son, B. G., Kim, Y. J. and Kim, Y. J., 2004, "Finite Element Based Stress Concentration Factors for Pipes with Local Wall Thinning," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 28, No. 7, pp. 1014~1020.
- (8) Miyazaki, K., Nebu, A., Kanno, S., Ishiwata, M. and Hasegawa, K., 2002, "Study on Fracture Criterion for carbon steel pipes with Local Wall Thinning," *J. of High pressure Institute of Japan*, Vol. 40, No. 2, pp. 62~72.
- (9) Weiss, V., 1972, *Proceeding 1st Int. Conf. on Mechanical Behavior of Materials*, pp. 159.
- (10) Ramberg, W. and Osgood, W. R., 1943, "Description of Stress-Strain Curves by Three," *NACA Technical Note*, No. 902.