

# 굽힘하중을 받는 배관의 파손에 미치는 감육의 영향

안석환\* · 이수식\*\* · 남기우\*\*\*

\*부경대학교 기계공학부

\*\*부경대학교 신소재공학부 대학원

\*\*\*부경대학교 신소재공학부

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

SEOK-HWAN AHN\* , SOO-SIG LEE\*\* AND KI-WOO NAM\*\*

\*School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

\*\*Graduate School of Materials Science and Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

\*\*\*Division of Materials Science and Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

**KEY WORDS:** Bending Load 굽힘하중, Wall Thinning 감육, Finite Element Analysis 유한요소해석, Pipe 배관

**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  $l=10\text{ mm}, 25\text{ mm},$  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 eroded area.

### 1. 서 론

고압용 탄소강배관은 발전플랜트의 배관시스템에 광범위하게 사용되고 있다. 이와 같은 배관은 그 사용기간 중에 고온과, 고압수 및 고압증기의 유동이 고속으로 작용하는 환경에 항상 노출되고 있다.

때때로, 이들 배관은 erosion-corrosion에 의한 내부 벽에서의 두께감소(이하 감육이라 한다)가 발생한다. 그러므로, 배관시스템의 보전을 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 특성에 대한 연구가 행하여지고 있다(Ahn et al, 2002).

본 연구에서는 정적굽힘하중을 받는 감육된 탄소강배관의 손상거동과 강도를 실험에 의하여 평가하였다. 게다가, 이들 배관에 대하여 유한요소 코드인 ANSYS를 이용하여 탄소성해석을 행하여 계산을 하고 실험결과와 해석결과를 상호 비교 분석하였다. 더욱이, 균열발생점이 감육된 면적의 중앙부에서 다축 응력 조건하에서 상당변형률(equivalent strain)과 진파괴연성

(true fracture ductility)으로부터 예측되어짐을 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. 실제, 감육현상은 대개 배관의 내부에서 발생한다. 하지만, 본 연구에서는 감육결함을 배관의 외측에 기계적으로 가공하였다. 그것은 배관 외측에 감육결함을 가공한 배관의 파괴거동의 결과와 내부에 감육결함을 가공한 배관의 파괴거동에서 거의 동일한 결과를 나타내기 때문이다(Ahn et al, 2002; Miyazaki et al 1999). 시험편의 건전부와 감육부는 응력집중을 피하기 위해 rounding 하였다. 이와 같이 가공된 배관 시험편에 Fig. 1과 같이 실은 대기 중에서 내압을 고려하지 않은 상태로 4점 굽힘시험을 행하였다. 이때 부하 스패 길이는 150mm, 지지 스패 길이는 600mm로 하였다. 굽힘시험은 크로스헤드 변위속도 2mm/min의 변위제어로 행하였다.

#### 2.2 해석방법

Fig. 2(a) 와 (b)는 FE 모델의 한 예를 나타낸다. FE해석에 있어서는 탄소성 해석이 FE Code ANSYS Ver.6.1에 의해 수행되

제1저자 남기우 연락처: 부산 남구 용당동 산 100

051-620-1640 namkw@pknu.ac.kr

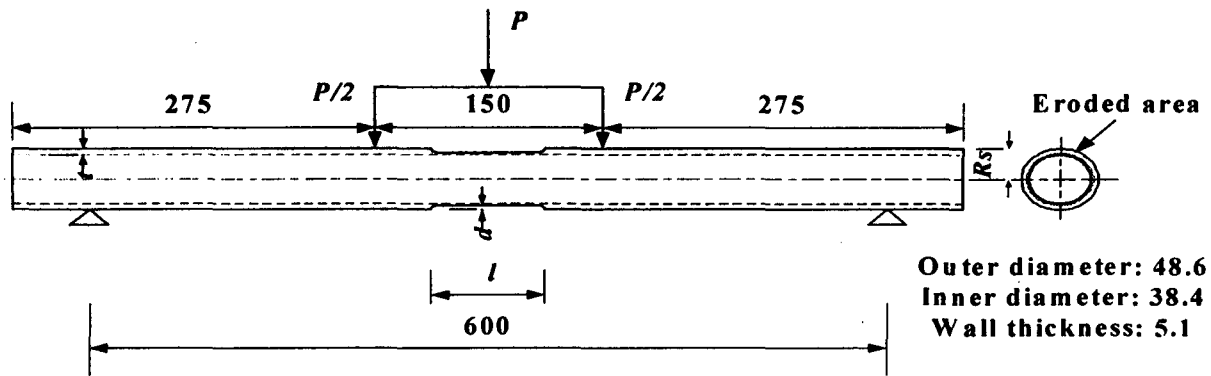
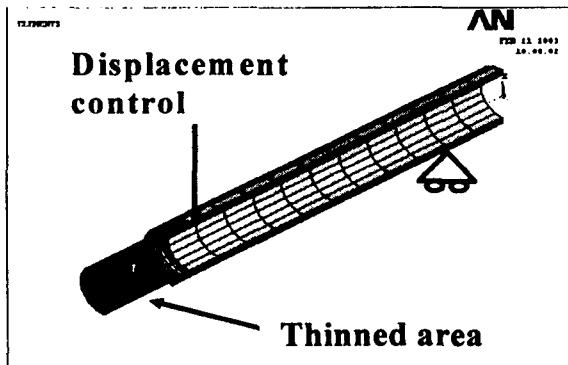


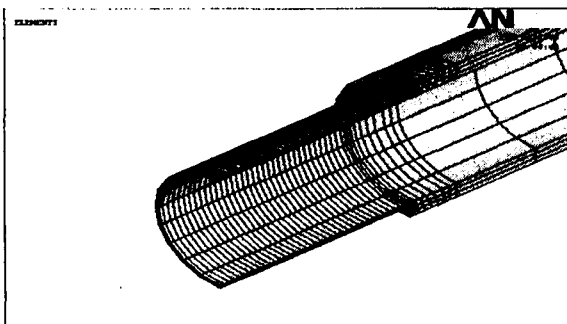
Fig. 1 Shape and dimensions of a pipe specimen with wall thinning

Table 1 Specimen geometries and test results

Specimen No.	Thinned ratio (d/t)	Thinned length $l$ (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	-	-



(a) 1/4 modelling



(b) Detail of thinned area

Fig. 2 An example of the FE analysis model

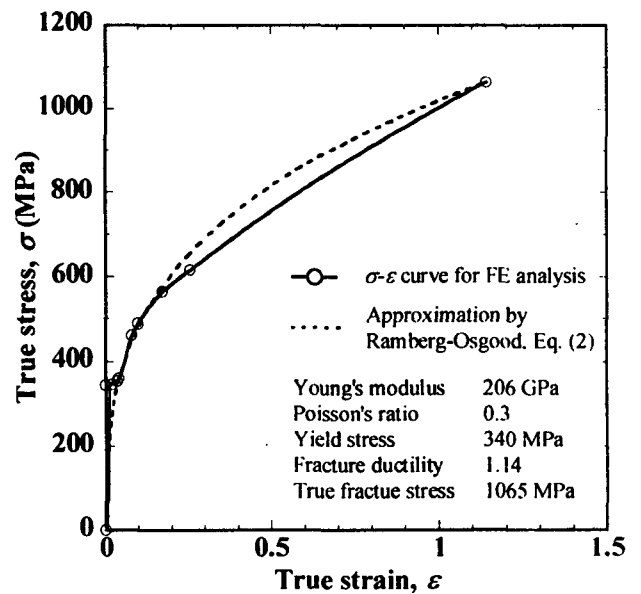


Fig. 3 True stress-true strain curve for FE analysis

어졌다. isoparametric 20절점 육면체요소로서 메쉬를 구성하여 모델링하였다. 대칭성을 고려해서 1/4 배관모델을 작성하였다. 해석에는 Von Mises의 항복조건을 사용하였다. 해석은 내압이 없는 조건하에서 변위제어로 행하였다. Fig. 3의 실선은 FE해

석에 이용된 진응력-진변형을 곡선을 나타낸다. 영률은 206Gpa, 포아송비는 0.3으로 했다.

### 3 결과 및 고찰

#### 3.1 감육부의 손상모드

실험으로부터 얻어진 손상모드는 Table 1에 나타내었다. 본 실험에 있어서 나타난 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- $\delta$  curve)를 나타낸다.

Fig. 4(a)는 감육비  $d/t=0.8$ 에 대한 M- $\delta$  선도이다. 감육결합이 없는 건전한 배관인 WTP-1은 편평화에 의하여 파손되었다. 감육길이  $l=10\text{mm}$ 인 WTP-2는 최대굽힘모멘트에서 균열이 발생하였고 굽힘모멘트는 균열이 진전함에 따라 급속하게 저

하되었다. 이때 균열은 하중 부하방향에 대해 인장측에서 발생하였다. 감육길이가 각각  $l=25$  및  $120\text{mm}$ 인 WTP-3 과 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 압축측에서 발생하였다.

Fig. 4(b)는 감육길이  $l=10\text{mm}$ 일 때, 감육비( $d/t$ )의 변화에 따른 각 시험편에서의 M- $\delta$ 선도를 나타낸다.  $d/t=0.2$ 인 WTP-7에서는 편평화에 의한 파손을 하고 있다. 그러나,  $d/t=0.6$ 인 WTP-5와  $d/t=0.5$ 인 WTP-6은 균열에 의한 파손을 나타내고 있고 균열발생 후 진전과 함께 모멘트가 급속하게 저하하고 있다. 균열은 모두 하중 부하방향에 대해 인장측에서 발생하였다. 이 결과로부터 감육비가 배관의 손상에 영향을 미친다고 판단된다. 뿐만 아니라, Fig. 4(a)에 나타낸 결과에서처럼 감육길이의 영향도 있음을 알 수 있다.

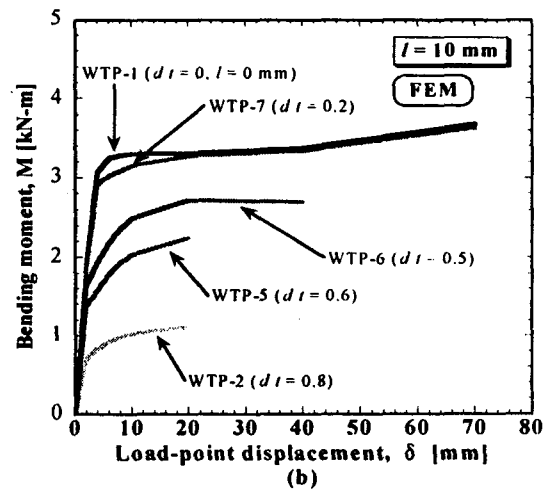
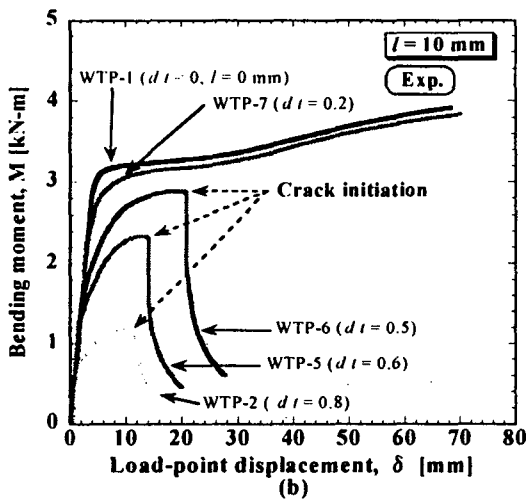
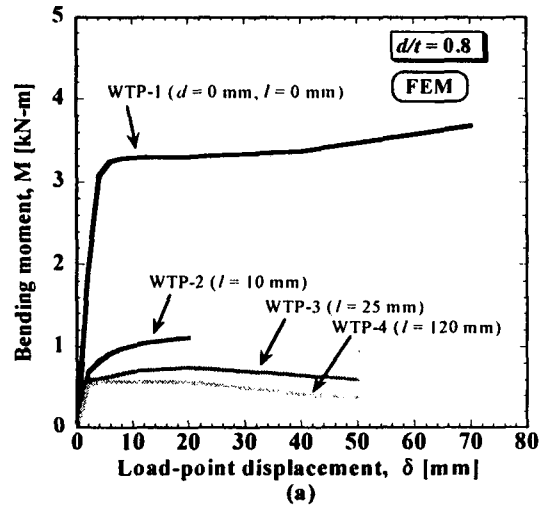
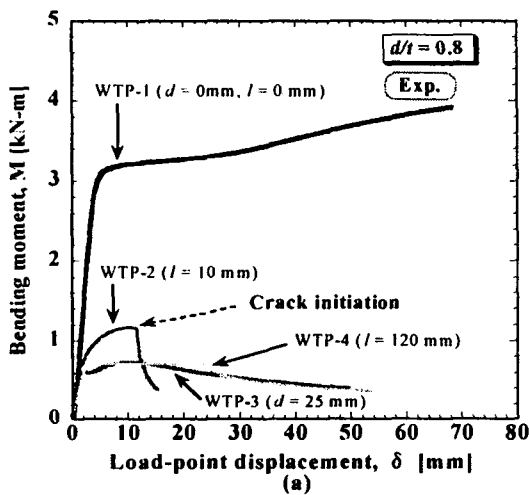


Fig. 4 Relationship between bending moment and displacement obtained from experimental results

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

특히, 비교적 짧은 감육길이를 가진 배관은 균열에 의하여 파손된다는 것은 중요한 사실이다. 따라서, 3.3절에서는 이에 대한 고찰을 실시하였다.

### 3.2 유한요소 해석

Fig. 5(a)와 (b)는 감육비  $d/t=0.8$  및 감육길이  $l=10\text{mm}$ 에 대해 각각 FE 해석으로부터 구한 M- $\delta$ 선도를 나타낸다. FE 해석으로부터 구한 결과들은 WTP-2, 5, 6을 제외하고는 좋은 일치를 보이고 있다. Fig. 4에 나타난 것처럼 WTP-2, 5, 6의 실험의 경우는 굽힘모멘트가 인장축 중앙에서 발생한 균열에 의하여 급속히 저하되었다. 해석에 있어서는, 대조적으로, 균열은 발생되지 않았고 굽힘모멘트도 저하 되지 않았다. 균열에 의해 배관이 파손되었을 때, 파괴저항은 FE 만족하게 예측되어질 수 없었다. 그래서, Miyazaki(Miyazaki et al, 2002) 등에 의해 제안된 평가방법을 이용하여 균열발생을 예측하였다.

### 3.3 감육부에서의 균열발생의 예측

Miyazaki 등은 식 (1)에 의해 표현된 다축응력조건( $\epsilon_{mf}$ )하에서 진파괴연성을 평가하기 위해서 Weiss의 이론(Weiss, 1972)을 확장했다.

$$\epsilon_{mf} = \frac{\left(\frac{\omega m \sigma_{uf}}{\sigma_0}\right) + \lambda \left(\frac{\omega m \sigma_{uf}}{\sigma_0}\right)^n}{\left(\frac{\sigma_{uf}}{\sigma_0}\right) + \lambda \left(\frac{\sigma_{uf}}{\sigma_0}\right)^n} \epsilon_{uf} \quad (1)$$

where,

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

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

$$\alpha = \sigma_2 / \sigma_1, \quad \beta = \sigma_3 / \sigma_1$$

여기서,  $\sigma_1, \sigma_2$  및  $\sigma_3$ 는 주응력들이다. 항복응력  $\sigma_0$ 는 340MPa이다.  $\sigma_{uf}$ 와  $\epsilon_{uf}$ 는 각각 등축 조건하에서의 진파괴응력과 진파괴연성으로서,  $\sigma_{uf}=1065\text{MPa}$ ,  $\epsilon_{uf}=1.14$ 이다.  $\lambda$ 와  $n$ 은 아래에 정의된 재료상수이다.

이 평가에 있어서, 진파괴연성에 달하는 넓은 진변형율 영역에서의 진응력과 진변형율 사이의 관계는 Ramberg-Osgood 식(Ramberg-Osgood, 1943), (2)에 의해 대략적으로 구해졌다.

$$\left(\frac{\epsilon_{ms}}{\sigma_0 / E}\right) = \left(\frac{\sigma_{ms}}{\sigma_0}\right) + \lambda \left(\frac{\sigma_{ms}}{\sigma_0}\right)^n \quad (2)$$

여기서,  $\sigma_{ms}$ 는 상당응력,  $\sigma_0$ 는 항복응력이다.  $E=206\text{GPa}$ ,  $\sigma_0$ 는 340MPa이다. Fig. 3에 나타난 점선은 Ramberg-Osgood 식에 의한 대략적인 진응력-진변형율 사이의 관계를 나타낸다. 식(1)과

(2)로부터  $\lambda=20.4$ ,  $n=3.11$ 이다.

다축응력의 정도는 배관의 변형에 의존한다. 그런 까닭으로, 감육부의 중앙부에서의 진파괴연성( $\epsilon_{mf}$ ) 또한 변형에 의존한다. 게다가, 상당변형율( $\epsilon_{ms}$ )은 배관의 변형과 더불어 증가한다. 균열은 상당변형율이 진파괴연성을 능가하는 점에서 발생한다는 것이 가정되어진다.

본 연구에서는,  $\epsilon_{mf}$ 의 값은 식 (1)에 FE 해석으로부터 얻어진 감육부의 중앙에서의 주응력들을 대체함으로써 평가되어졌고,  $\epsilon_{ms}$ 의 값은 FE 해석으로부터 얻어졌다.

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

Fig. 6(a)와 (b)는 각각 WTP-2와 WTP-3에 대해 하중점 변위( $\delta$ )의 함수로서 식 (1)에 의해 계산된 상당변형율과 파괴연성을 나타낸다. Fig. 6과 7에서 점선은 파괴연성을, 실선은 상당변형율을 각각 나타낸다. WTP-2는 균열에 의해 파손하였고,

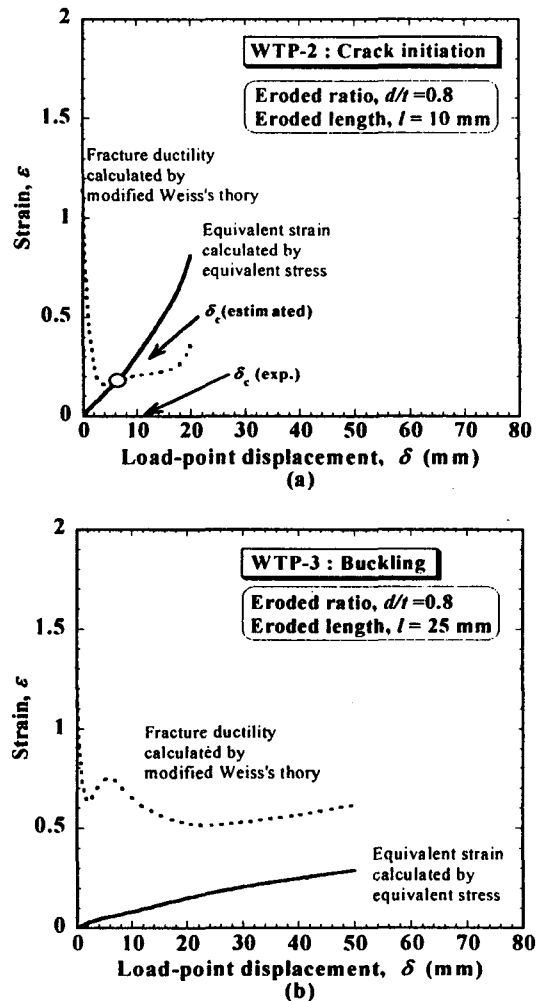


Fig 6 Relationship between equivalent strain and fracture ductility as a function of displacement (cases of crack initiation and buckling)

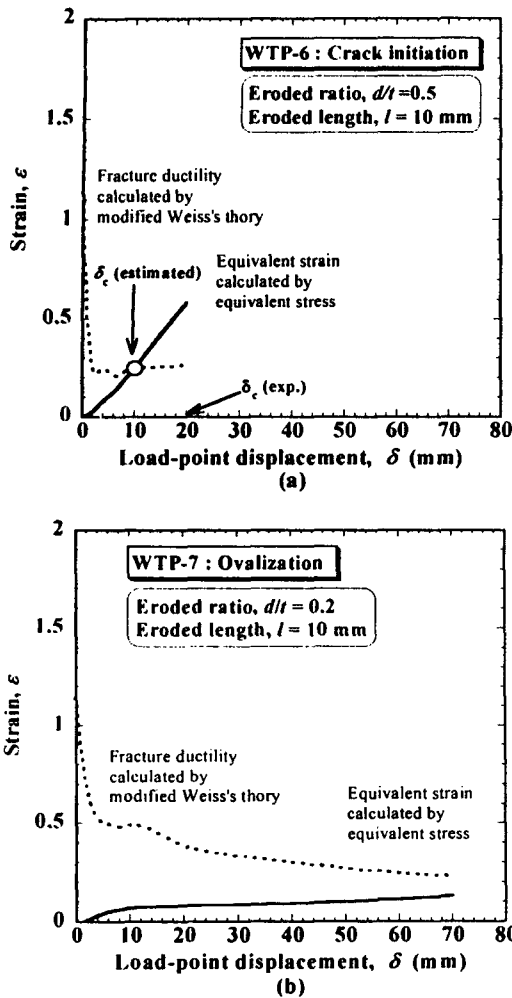


Fig 7 Relationship between equivalent strain and fracture ductility as a function of displacement (cases of crack initiation and ovalization)

WTP-3은 좌굴에 의해 파손하였다. 실험으로부터, 좌굴에 의해 파손된 WTP-3은 균열이 발생하지 않았다.

Fig. 6(b)에서는 파괴연성과 상당변형율이 교차되지 않는데, 균열의 발생이 없음을 나타낸다. 그러므로 평가 결과는 실험 결과에 일치하였다. 이에 반해, Fig. 6(a)에서는  $\delta_c=6\text{mm}$ 에서 파괴연성과 상당변형율이 교차한다. 따라서 균열이 이 점에서 발생하였다.  $l=10\text{mm}$ 인 WTP-2에 대한  $\epsilon_{mf}$ 의 값은  $l=25\text{mm}$ 인 WTP-3보다도 더 낮다. 게다가, WTP-2에 대한  $\epsilon_{ms}$ 의 값은 WTP-3보다도 더 크다. 그러므로 감육길이 짧은 경우에 배관시험편은 균열에 의해 파손되는 경향을 나타낸다. 이것은 감육부에서의 다축성이 응력 억제에 의해 증가하기 때문이다.

Fig. 7(a)와 (b)는 감육길이  $l=10\text{mm}$ 인 WTP-6과 WTP-7에 대한 결과이다. 실험에서 WTP-7은 편평화에 의해 손상되었다. Fig. 7(b)에 나타난 것처럼 파괴연성과 상당변형율은 교차하지 않았다. 역시, 균열이 발생하지 않았음을 나타낸다. 이에 반해, Fig. 7(a)에서는 WTP-6의 실험결과는 균열에 의한 파손을 나타내었

고, 균열은  $\delta_c=20\text{mm}$ 에서 발생하였다. 해석에서는  $\delta_c=10\text{mm}$ 에서 파괴연성과 상당변형율이 교차하고 있다.

그러므로, 결과적으로는 식(1)에 의해 표현된 진파파괴연성과 상당변형율을 사용함으로써 균열발생점을 평가하는 것이 가능하다고 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 감육이 배관의 파손에 어떠한 영향을 미치는가를 정적인 4점 굽힘시험과 FE 해석에 의한 실험과 해석을 비교 분석한 결과로서 다음과 같은 결론이 얻어졌다.

- (1) 감육비  $d/t=0.8$ 의 경우에 있어서, 감육길이  $l=25$  및  $120\text{mm}$ 으로 비교적 긴 경우에는 배관은 충분한 연성을 나타내었다. 그러나 감육길이  $l=10\text{mm}$ 로서 비교적 짧은 경우에는 균열에 의해 파손되었다. 그러므로 비교적 짧은 감육길이를 가진 배관은 균열에 의해 파손된다는 것을 알 수 있다.
- (2) 감육길이  $l=10\text{mm}$ 인 경우에 있어서, 감육비  $d/t=0.5$  및  $0.6$ 일 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 진파파괴연성에 대한 평가를 이용함으로써 감육부 중앙에서의 균열발생을 예측 가능하다는 것을 나타내었다.
- (4) 결론 (1)과 (2)로부터 배관의 파손에 미치는 감육의 영향은 감육길이 및 감육비에 의존한다.

#### 참 고 문 헌

- 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 211, pp. 91-103.
- 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 191, pp. 195-204.
- Miyazaki, K., Nebu, A., Kanno, S., Ishiwata, M. and Hasegawa, K., (2002). "Study on Fracture Criterion for carbon steel pipes with Local Wall Thinning", Jour. of High pressure Institute of Japan, Vol. 40, No. 2, pp. 62~72.
- Ramberg, W. and Osgood, W. R. (1943). NASA Technical Note
- Weiss, V. (1972). Proceeding 1st Int. Conf. on Mechanical Behavior of Materials, pp. 159.