

침식-부식에 의해 감육된 배관의 파손거동에 미치는 감육위치의 영향

안석환* · 석금철** · 남기우***

*부경대학교 기계공학부

**부경대학교 대학원 기계공학학연협동과정

***부경대학교 신소재공학부

Effect of Local Wall Thinned Location due to Erosion-Corrosion on Fracture Behavior of Pipes

SEOK-HWAN AHN*, KUM-CHEOL SEOK** AND KI-WOO NAM***

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

**Department of UR Interdisciplinary Program of Mechanical Engineering Graduate School, Pukyong National University, Busan, Korea

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

KEY WORDS: Fracture behavior 파손거동, Erosion/Corrosion, 침식/부식, Finite element analysis, 유한요소해석, Pipe 배관, Inner wall thinning, 내부감육, Outer wall thinning, 외부감육, Local wall thinned location, 국부감육위치

ABSTRACT: This study on the effects of local wall-thinned location on the fracture behavior of pipes was carried out, and the results were compared with the analytical results. Local wall-thinning for the bending test was machined with various sizes on the outside of pipes, in order to simulate the metal loss due to erosion/corrosion. In addition, we had carried out FE analysis for the pipes with local wall thinning on the inside, and its results were comparatively studied with that of the outside. Three-dimensional elasto-plastic analyses were able to accurately simulate fracture behaviors of inner or outer wall thinning. Fracture types, obtained from the experiments and analyses, could be classified into ovalization, local buckling and crack initiation, depending on the thinned length and thinned ratio. Based on the results, the fracture behaviors of pipes with the outer wall thinning can be applied to estimate the fracture behaviors of pipes with the inner wall thinning.

1. 서 론

현대 산업사회의 에너지 수요는 날이 가일층 증가하고 있는 경향이다. 특히, 우리나라는 에너지의 수급을 원자력 발전에 크게 의지하고 있는 실정이다. 원자력 플랜트의 건설비용에 막대한 재원이 필요하기 때문에, 이에 원자력 플랜트에 사용되는 기기들의 경년열화에 대해 대체방안을 수립함으로써 사용 기기들의 수명연장을 가져 올 필요성이 있다. 여러 가지 기기들 중 배관은 상당부분을 차지하고 있다. 따라서 배관에 대한 건전성평가를 통하여 플랜트의 안전성을 확보해야만 한다. 그러나 원자력발전 플랜트 배관은 고온고압수나 증기가 고속으로 흐르기 때문에 Erosion/Corrosion 현상에 의한 국소 감육이 발생할 가능성이 많다. 이러한 국소 감육의 발생으로 인하여 배관시스템의 전체의 신뢰성이 떨어질 가능성이 농후하다. 감육에 의해 발생한 대표적인 원전사고로는 1986년에 발생한 미국의 Surry 원자력발전소 사고를 비롯하여 가장 최근에 발생한 일본 Mihama 원자력발전소 사고 등이 보고되고 있다(CNN. com, 2004; Virginia Electric and

Power Co., 1987). 최근 이러한 사고를 계기로 감육에 대한 허용기준안 마련을 위한 연구가 국내외적으로 활발하게 진행되고 있는 실정이다(김진원과 박치용, 2005; 안석환 등, 2003; 2005; 안석환과 남기우, 2005; Ahn et al., 1998; 2002; Deardorff and Bush, 1990; Mathonet et al., 1995; Miyazaki et al, 1999).

감육은 일반적으로 유체의 이동통로인 배관의 내면에 발생한다. 그러나 이와 같이 배관의 내면에 감육형상을 기계가공으로 도입하는 것이 상당히 어렵고 기타 다른 문제점들로 인하여 지금까지 대체로 배관의 외면에 감육형상을 도입하고 실험 및 해석을 실시하여 오고 있다(안석환 등, 2003; 2005; 안석환과 남기우, 2005; Ahn et al., 1998; 2002).

따라서, 본 연구에서는 배관시스템에 발생하는 감육을 형상화하여 배관 외부에 기계가공에 의해 상정한 다음 감육배관의 파손거동 실험을 실시하였다. 그리고 동일한 형상의 감육을 모의한 유한요소해석을 실시하여 실험결과와 비교에 의해 유한요소해석에 의한 타당성을 검증하였다. 또한 유한요소 해석을 통한 내부 및 외부 감육배관의 균열발생을 예측하고 상호 비교하였다. 더욱이, 내부에 감육을 가지는 배관의 유한요소 해석을 통하여 외부에 감육을 가지는 배관의 유한요소 해석을 통한 파손거동과 비교함으로써 배관 외부 및 내부에 발

교신저자 남기우: 부산 남구 용당동 산 100번지

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

생한 감육에 의한 파손거동의 차이를 검토하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 재료

본 연구에 사용한 배관은 전장 700mm, 외경 48.6mm인 Schedule 80(두께 5.1mm)의 STS370 탄소강배관(JIS 규격)이다. 이와 같은 배관에다 깊이 및 길이가 각각 다른 전주감육을 배관의 외부에 기계적으로 가공하였다.

전주감육을 갖는 배관시험편의 개략도를 Fig. 1에 나타낸다. Fig. 1의 (a)는 배관의 외부에 감육형상을 모의한 경우로 실험 및 해석에 이용하였다. Fig. 1의 (b)는 배관의 내부에 감육을 상정한 경우로 해석에 이용하였다.

배관에 모의된 여러 가지 감육치수를 Table 1에 나타낸다. 여기서 공칭두께 t 에 대한 감육된 깊이 d 의 비를 감육비 d/t 로서 나타내었다.

Table 1 Mechanical properties

Material	Tensile strength		Yield strength	Elongation
	σ_u [MPa]	σ_y [MPa]		[%]
STS370	402	273		28

Table 2 Chemical composition [wt%]

Material	C	Si	Mn	P	S
STS370	0.25	0.17	0.5	0.035	0.035

Table 3 Specimen geometries

	Specimen No.	Thinned length l (mm)	Thinned ratio d/t
Sound pipe (EXP. & FEA)	WIP-1	0	0
	OWT-2	10	
Outer wall thinning (EXP. & FEA)	OWT-3	25	0.8
	OWT-4	120	
	OWT-5		0.6
	OWT-6	10	0.5
	OWT-7		0.2
Inner wall thinning (FEA)	IWT-2	10	
	IWT-3	25	0.8
	IWT-4	120	
	IWT-5		0.6
	IWT-6	10	0.5
IWT-7		0.2	

2.2 실험 및 해석방법

외부감육을 가지는 배관에 정적하중을 부하하여 4점 굽힘시험을 행하였다. 이때, 부하스팬 길이는 150mm, 지지스팬 길이는 600mm로 하였다. 실험은 크로스헤드 변위속도 1mm/min의 변위제어로 실온 대기 중에서 실시하였다. 단, 내압은 고려하지 않았다.

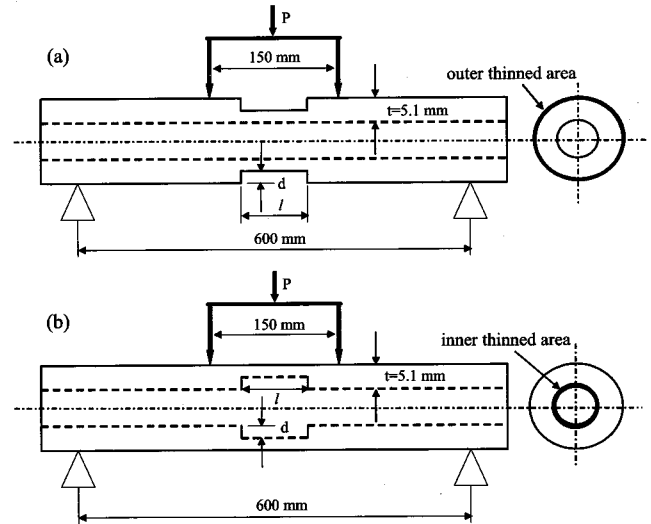
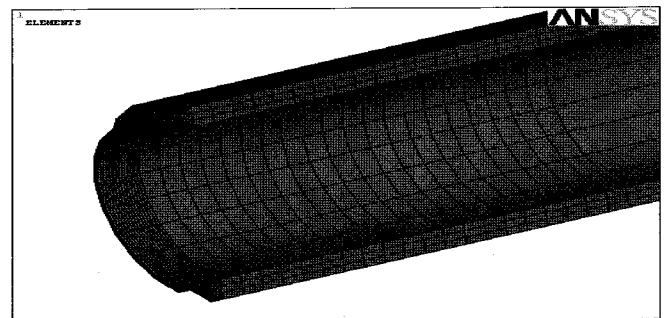
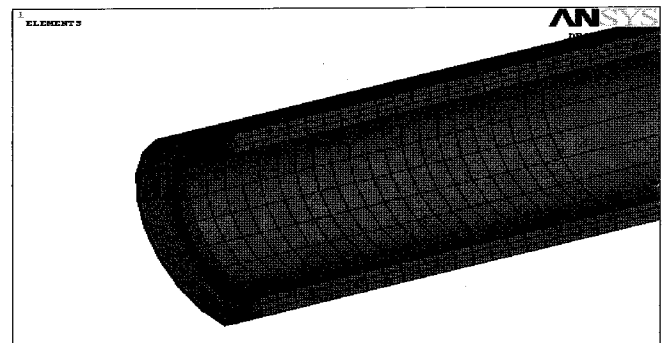


Fig. 1 Schematic of dimensions of a wall thinned pipe specimen and four-point bending test system



(a) Outer wall thinning



(b) Innerer wall thinning

Fig. 2 Examples of FEM model

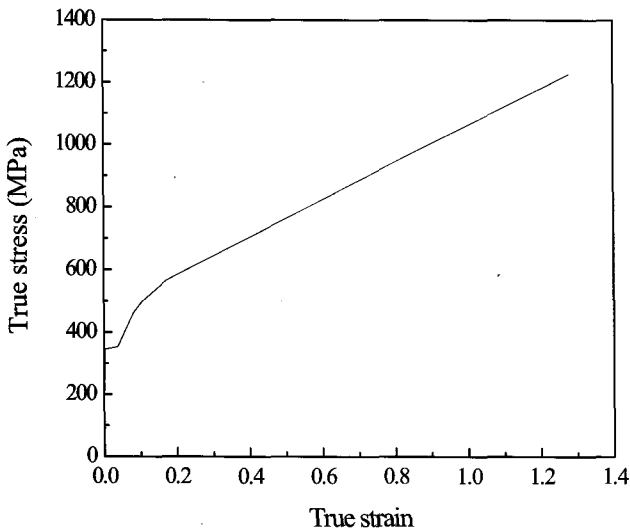


Fig. 3 True stress-true strain curve used in FE analysis

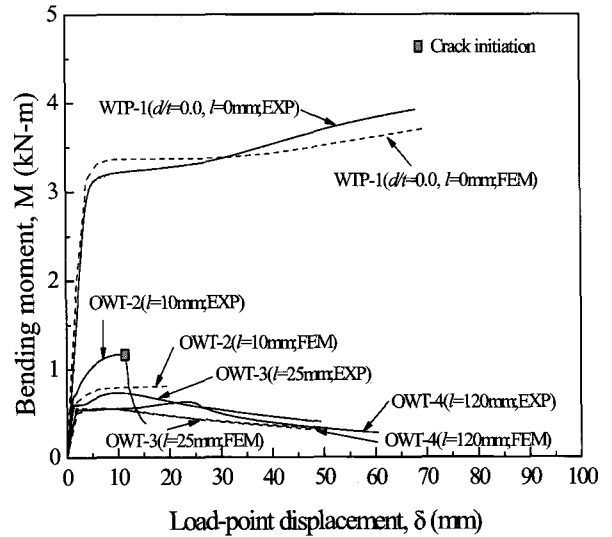
또한, 외부 및 내부에 감육을 가지는 배관시험편에 대해 유한 요소해석을 실시하였다. 해석은 ANSYS Ver. 7.0을 이용하였다. Mesh model은 육면체 20절점요소와 4면체 10절점요소를 사용하였다. 해석에 있어서는 하중점 위치에서 변위를 제어하고 그 점의 반력해를 부하하중으로 하였다. 해석모델은 대칭성을 고려하여 1/4로 하여 해석하였다. 이때, 영율은 206GPa, 항복응력은 340MPa이다. Mesh modelling의 예를 Fig. 2(a) 및(b)에 각각 나타낸다. Fig. 3에는 해석에 이용된 진응력-진변형률 곡선을 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

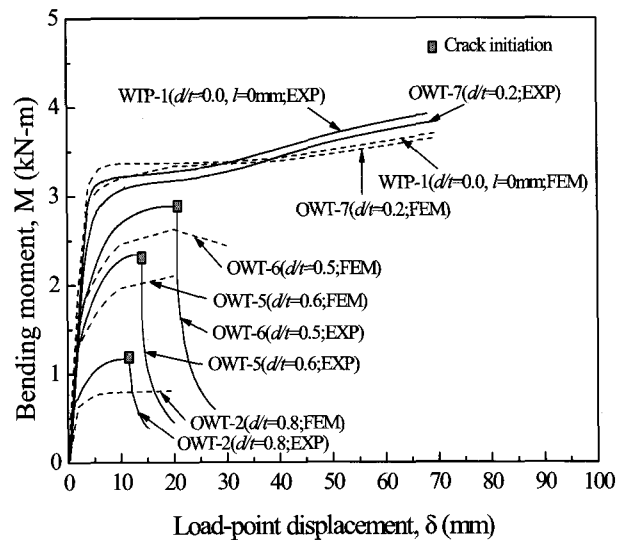
3.1 외부감육배관의 강도에 대한 실험과 해석결과의 비교

각 감육배관의 파손형태는 편평화(Ovalization), 좌굴(Buckling), 균열발생(Crack initiation)으로 분류되었다. Fig. 4(a)는 감육비 $d/t=0.8$ 및 (b)는 감육길이 $l=10\text{mm}$ 인 외부감육배관의 실험과 FE해석으로부터 얻어진 굽힘모멘트-변위선도를 각각 나타낸다. 결과 속에는 감육결함을 상징하지 않은 건전한 배관(sounded pipe, WTP-1)의 결과를 함께 나타내었다. 그림 속에서 실선은 실험결과, 파선은 해석결과를 각각 나타낸다. 감육비 $d/t=0.8$ 로 고정하고 감육길이를 다르게 한 Fig. 4(a)에 있어서, 동일한 감육비를 가지는 경우 감육길이의 변화에 따라 파손의 양식은 다르게 나타났다. 즉, 감육이 되지 않은 $l=0\text{mm}$ 의 건전한 배관의 경우에는 편평화 파괴가 나타났고, $l=25\text{mm}$ 이상인 경우에는 좌굴에 의해 파괴되었다. 특히, $l=10\text{mm}$ 일 경우에는 균열이 발생하였다.

감육길이를 $l=10\text{mm}$ 로 고정하고 감육비를 다르게 한 Fig. 4(b)에 있어서, 동일한 감육길이를 가지는 경우 감육비의 변화에 따라 파손의 양식은 다르게 나타났다. 즉, 감육이 되지 않은 $l=0\text{mm}$ 의 건전한 배관의 경우와 $d/t=0.2$ 까지는 편평화 파괴가 나타났고, $d/t=0.5, 0.6$ 및 0.8 에서는 균열에 의해 파괴되었다. 이상의 결과로부터 동일한 감육비를 갖는 경우, 감육



(a) Thinned ratio, $d/t=0.8$



(b) Thinned length, $l=10\text{ mm}$

Fig. 4 Relationship between moment and displacement obtained from experimental and analysis of pipes with outer wall thinning

길이가 짧은 경우 에는 균열에 의해, 또 감육길이가 긴 경우에는 좌굴에 의해 파손의 양식이 결정되고 있음을 알 수 있다. 또한, 동일한 짧은 감육길이를 가지는 경우, 감육비가 깊어질수록 균열에 의해 파손이 결정되어졌다. 짧은 감육길이 ($l=10\text{mm}$) 및 깊은 감육비($d/t=0.8$)를 대상으로 정리된 Fig. 4(a) 및 (b)의 결과로부터 전체적으로 실험결과와 해석의 결과가 좋은 일치를 나타냄으로서, 긴 감육길이에 대한 여러 가지 감육비 및 얇은 감육비에 대한 여러 가지 감육길이에 있어서도 동일한 양상의 결과가 추정된다. 그러므로 감육을 가지는 배관에 대해 감육비 및 감육길이가 영향을 미치는 파라미터라는 것을 알 수 있다.

단, 실험의 결과에서 균열이 발생한 경우에 대해 해석에서는 균열 발생 후 하중의 급격 저하가 나타나는 현상이 발생하지 않고 있다. 이것은 FE해석에 있어서 해의 발산이 일어났기 때문으로 생각된다. 그래서 뒤에 나타내었듯이 FE해석에 의한 균열예측에 대한 시도를 실시하였다.

3.2 내부 및 외부감육의 위치의 영향

사실, 배관의 감육문제는 대개 유체의 통로가 되는 배관 내부에서의 침식/부식에 의해 야기되는 문제이다. 그러나 배관 내부에 감육결함을 상정하기가 까다로운 점을 들어 배관 외부

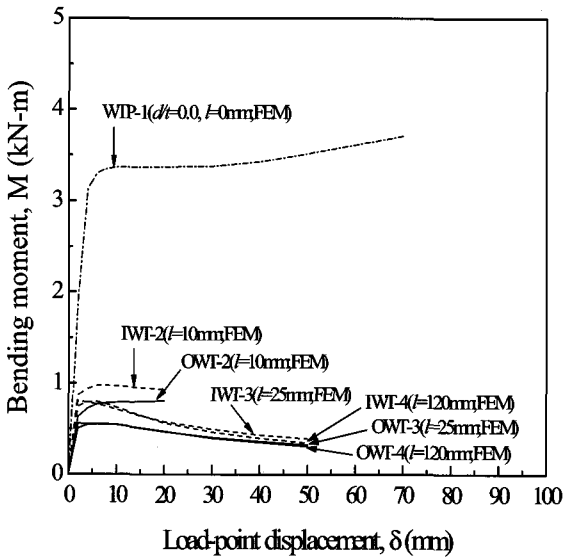
에 감육결함을 가공하고 결과를 도출하였다. 따라서 외부에 감육결함을 가공한 외부감육의 결과를 실제 발생하는 배관 내부 감육의 대응으로 적용 가능한 지의 여부를 알 필요가 있다.

그래서 Fig. 5에는 상기 Fig. 4에 나타낸 외부감육에 대한 내부감육의 결과를 비교하여 나타내었다. 이미 Fig. 4에서 외부감육의 결과가 실험과 해석에 있어서 좋은 일치를 나타내었고 상기와 같은 이유에 의해서 외부감육의 해석결과에 대한 내부감육의 해석결과를 비교하는 것으로 하였다.

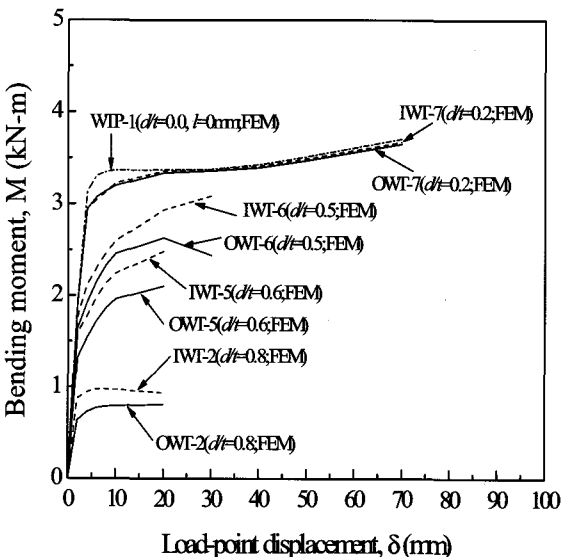
Fig. 5(a)는 감육비 $d/t=0.8$ 로 일정하게 하여 감육길이를 달리한 경우이고, (b)는 감육길이 $l=10\text{mm}$ 로 일정하게 하고 감육비를 여러 가지로 달리한 경우의 굽힘모멘트-변위 선도 결과들이다. 그림 속에는 건전배관의 결과도 함께 나타내었다 (일점쇄선). 실선은 외부감육의 결과를 파선은 내부감육의 결과를 각각 나타낸다. 결과로부터 내부감육의 해석결과가 외부감육의 해석결과와 거의 비슷한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 외부감육의 최대모멘트보다 내부감육의 최대모멘트가 다소 높게 나타나는 양상을 보였지만 전반적으로 외부감육의 결과와 내부감육의 거동결과가 양호한 일치를 나타내고 있고 따라서, 외부감육의 결과를 내부감육의 결과로서 적용 가능하다고 판단된다. 단, 여러 가지 배관구경(diameter), 감육비 및 감육길이에 대해서 더 많은 실험과 해석에 대한 결과의 도출이 요구되며 금후 검토해 볼 여지가 있다.

Fig. 6, 7 및 8에는 유한요소해석으로부터 구한 건전배관과 외부 및 내부감육배관의 감육부에 나타난 시험종료 시의 변형에 따른 파손모드의 양상을 각각 나타낸다.

Fig. 6은 감육을 가지지 않는 건전한 배관의 변형을 나타낸다. Fig. 7(a)~(f)는 외부감육부의 결과를, Fig. 8(a)~(f)는 내부감육부의 결과를 각각 나타낸다.



(a) Thinned ratio, $d/t=0.8$



(b) Thinned length, $l=10\text{ mm}$

Fig. 5 Comparison between inner and outer wall thinning for moment and displacement obtained from FE analysis of pipes with local wall thinning

3.3 내부 및 외부감육부에서의 균열발생의 예측

전절에서도 나타내었듯이 외부감육의 경우 실험에 있어서 균열이 발생하여 하중의 급격한 저하가 나타났지만 동일 치수의 해석에 있어서는 균열발생에 의한 하중의 저하가 나타나지 않아 균열 발생여부를 판단하기가 어려웠기 때문에 이러한 균열길이 발생의 원인을 명확히 규명하기위해서 외부 및 내부감육에 대해서 균열발생에 대한 예측을 시도하였다.

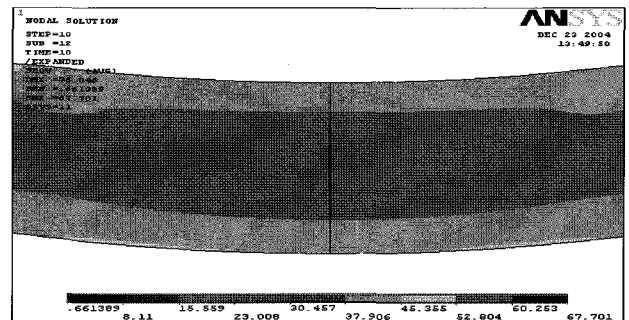
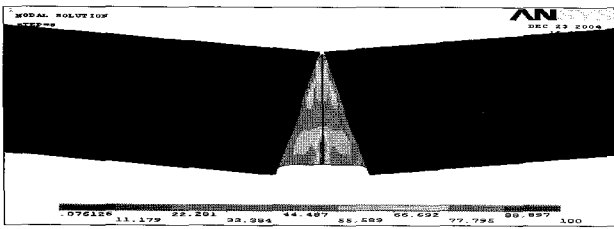
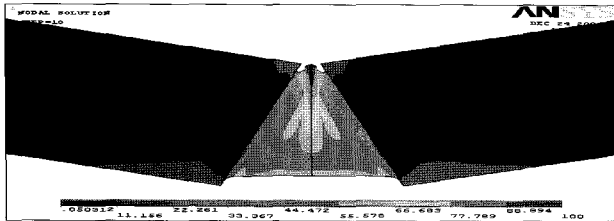


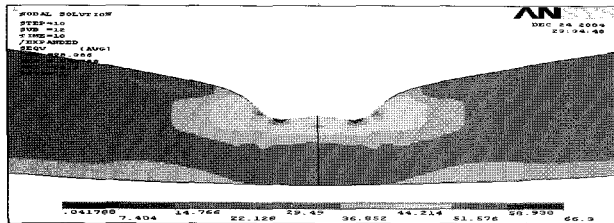
Fig. 6 Stress distribution and failure mode occurred in a sound pipe



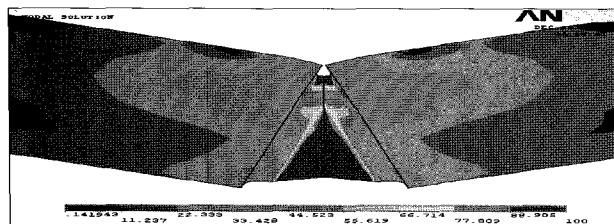
(a) Outer wall thinning; $d/t=0.8$ and $l=10$ mm



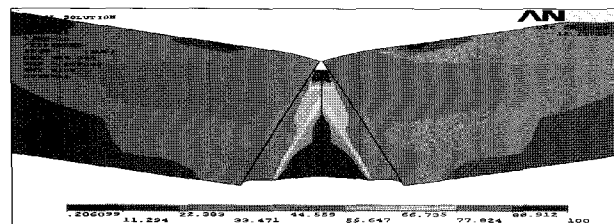
(b) Outer wall thinning; $d/t=0.8$ and $l=25$ mm



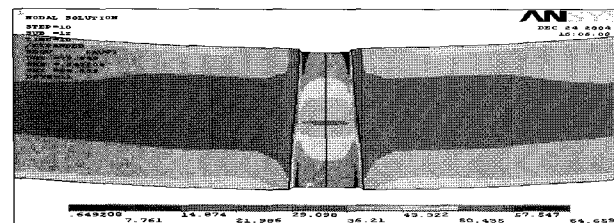
(c) Outer wall thinning; $d/t=0.8$ and $l=120$ mm



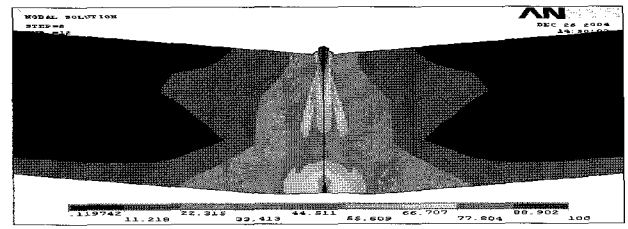
(d) Outer wall thinning; $d/t=0.6$ and $l=10$ mm



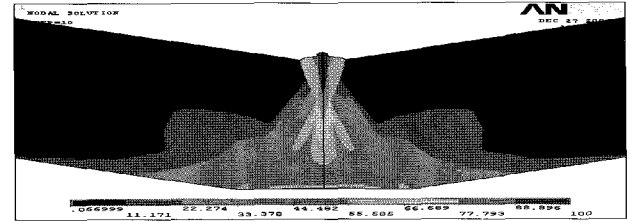
(e) Outer wall thinning; $d/t=0.5$ and $l=10$ mm



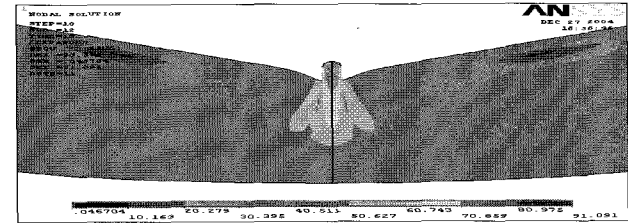
(f) Outer wall thinning; $d/t=0.2$ and $l=10$ mm



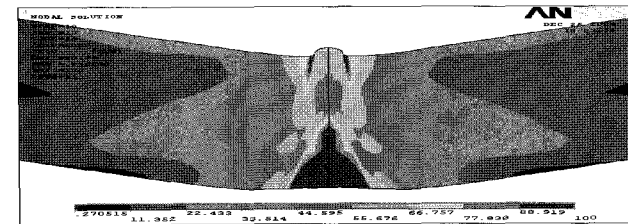
(a) Inner wall thinning; $d/t=0.8$ and $l=10$ mm



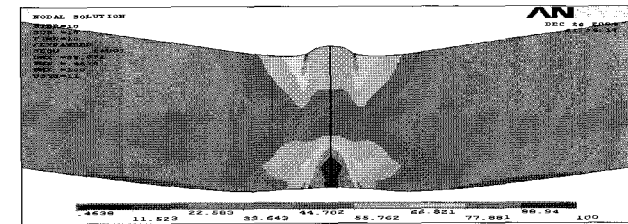
(b) Inner wall thinning; $d/t=0.8$ and $l=25$ mm



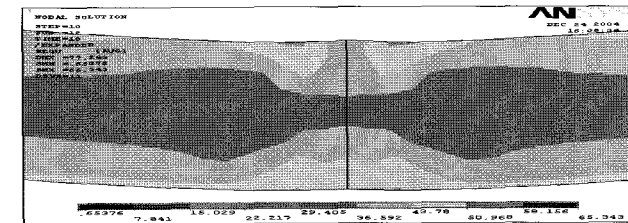
(c) Inner wall thinning; $d/t=0.8$ and $l=120$ mm



(d) Inner wall thinning; $d/t=0.6$ and $l=10$ mm



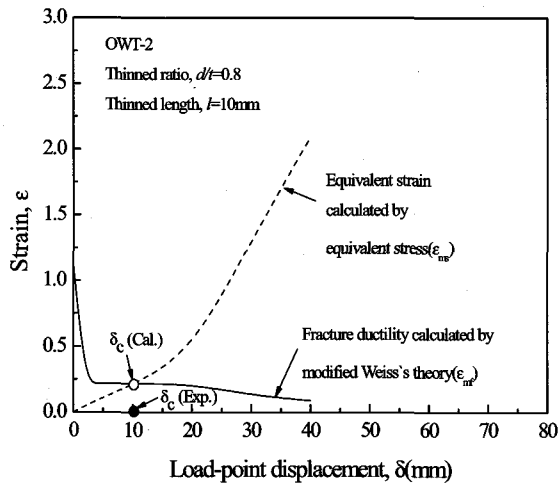
(e) Inner wall thinning; $d/t=0.5$ and $l=10$ mm



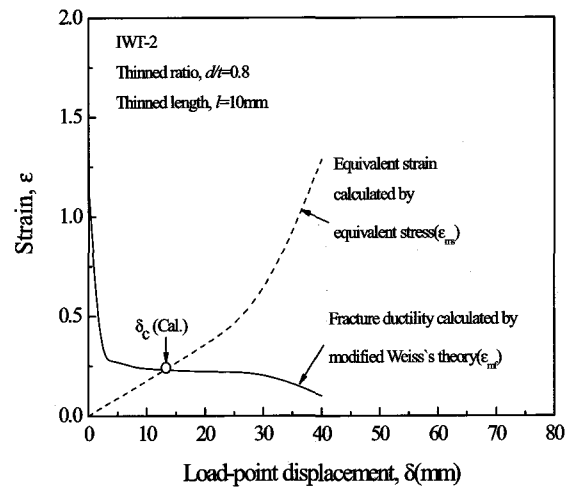
(f) Inner wall thinning; $d/t=0.2$ and $l=10$ mm

Fig. 7 Stress distribution and failure mode occurred in the outer wall thinning

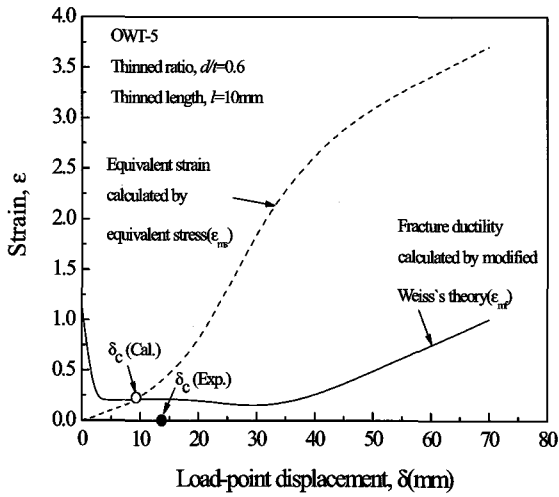
Fig. 8 Stress distribution and failure mode occurred in the inner wall thinning



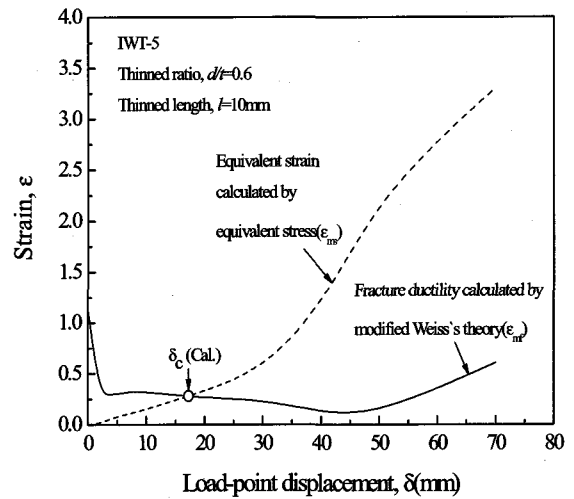
(a) Outer wall thinning (OWT-2)



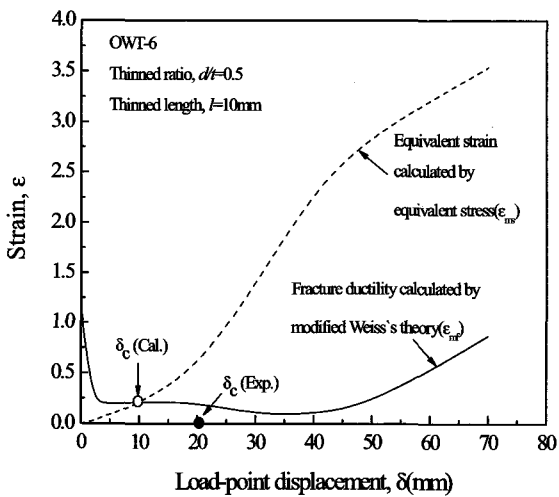
(b) Inner wall thinning (IWT-2)



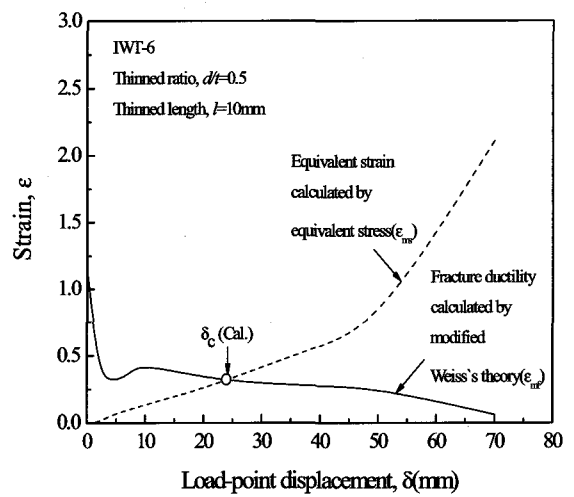
(c) Outer wall thinning (OWT-5)



(d) Inner wall thinning (IWT-5)



(e) Outer wall thinning (OWT-6)



(f) Inner wall thinning (IWT-6)

Fig. 9 Relationship between equivalent strain and fracture ductility as a function of displacement for the prediction of crack initiation

Miyazaki 등(2002)은 Weiss 이론(1972)을 확장하여 다축응력장의 진파괴연성(ϵ_{mf})의 변화로부터 균열을 예측하는 방법을 제안하였다. 이 예측방법은 최대 감육부에 발생한 상당변형률(ϵ_{ms})이 다축응력하의 진파괴연성보다 클 때 최대 감육부에 균열이 발생한다고 평가한다.

아래에 나타내는 식 (1)은 Miyazaki 등에 의해 제안된 진파괴연성을 구하는 식이다.

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

where,

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

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

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

여기서, σ_1 , σ_2 및 σ_3 는 주응력들을, ω 는 항복응력을 각각 나타낸다. ω 는 340MPa이다.

α_{mf} 는 단축응력조건하에서의 진파괴응력을 나타내며, 여기서는 $\alpha_{mf}=1,065\text{MPa}$ 이다. Ramberg-Osgood식(1943)의 계수로서 $\lambda=20.4$, $n=3.11$ 이다.

다축응력의 정도는 배관의 변형에 의존한다. 그런 까닭으로, 감육부의 중앙부에서의 진파괴연성(ϵ_{mf}) 또한 변형에 의존한다. 게다가, 상당변형률(ϵ_{ms})은 배관의 변형과 더불어 증가한다. 따라서 Weiss의 이론에 근거하여 균열은 감육부에서 발생하는 상당변형률이 식 (1)로 주어지는 진파괴연성을 능가하는 점에서 발생한다고 가정한다.

Fig. 9에는 외부감육(a, c, e) 및 내부감육(b, d, f)에서 각각 균열발생을 예측한 결과를 나타내었다. 그림에서 점선은 파괴연성을, 실선은 상당변형률을 각각 나타낸다.

Fig. 9(a)와 (b)는 감육비 $d/t=0.8$, 감육길이 $\ell=10\text{mm}$ 인 OWT-2와 IWT-2에 대하여 하중점 변위(δ)의 함수로서 식 (1)에 의하여 계산된 상당변형률과 파괴연성을 각각 나타낸다.

Fig. 9(a)의 외부감육 OWT-2의 경우는 실험결과에 있어서는 균열은 $\delta_c=11\text{mm}$ 에서 발생한 반면, 해석에 있어서는 $\delta_c=10\text{mm}$ 에서 파괴연성과 상당변형률이 교차하여 균열발생이 예측되었다. Fig. 9(b)의 내부감육 IWT-2의 경우에는 해석에 있어서 $\delta_c=13\text{mm}$ 에서 파괴연성과 상당변형률이 교차하여 균열발생이 예측되었다.

감육길이가 짧은 경우에 배관시험편은 균열에 의해 파손된

는 경향을 나타낸다는 것을 알 수 있다. 이것은 감육부에서 다축성이 응력 억제에 의해 증가하기 때문이다.

Fig. 9(c)와 (d)는 감육비 $d/t=0.6$, 감육길이 $\ell=10\text{mm}$ 인 OWT-5와 IWT-5에 대한 결과이다. 또한, Fig. 9(e)와 (f)는 감육비 $d/t=0.5$, 감육길이 $\ell=10\text{mm}$ 인 OWT-6과 IWT-6에 대한 결과이다. Fig. 9(c) 및 (e)에 나타난 OWT-5 및 6의 실험결과는 균열에 의한 파손이 발생하였고, 이때 균열은 $\delta_c=13\text{mm}$ 및 $\delta_c=20\text{mm}$ 에서 각각 발생하였다. 이에 대해, 해석에 있어서는 Fig. 9(c)와 (e)의 외부감육에 있어서는 각각 $\delta_c=10\text{mm}$ 에서 파괴연성과 상당변형률이 교차하고 있다. 반면, Fig. 9(d)와 (f)의 내부감육에 있어서는 각각 $\delta_c=18\text{mm}$ 및 $\delta_c=23\text{mm}$ 에서 파괴연성과 상당변형률이 교차하고 있다.

Fig. 9에서 거의 실험에 비해 해석에서 균열이 빨리 발생하는 것으로 나타났고, 해석치가 실험치에 비해 더 보수적으로 나타나고 있다. 특히, 감육비 d/t 가 작아질수록 균열발생점에 대한 실험과 해석에서의 오차는 커졌다. 이와 같이 균열발생점에 대한 실험치와 해석치 사이에서의 오차는 해석에 있어서 진응력과 진변형률 사이의 관계를 Ramberg-Osgood식에 다직선 근사한 후 Weiss의 이론을 적용하였기 때문에 발생한 것으로 생각된다. 또한, 외부감육에 비해 내부감육의 균열예측 결과가 오히려 외부감육의 실험결과에 근접하고 있다.

여기에 대해서는 금후 여러 가지 경우들에 대해서 좀더 세밀하게 추가적으로 검토해 볼 여지가 있는 것으로 사료된다.

이상으로부터, 결과적으로 식 (1)에 의하여 표현된 진파괴연성과 상당변형률을 사용함으로써 균열발생점을 평가하는 것이 가능하다고 판단된다.

4. 결 론

일반적으로 감육현상은 배관의 내부에서 발생하나, 실제 가공상의 어려움 때문에 본 연구에서는 배관의 외부에 결함을 가공하여 그 결과를 내부 감육으로의 적용 가능성 여부를 알아보고자, 배관의 외부와 내부에 감육결함을 모의하고 실험 및 해석을 통해서 비교, 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

비교적 짧은 감육길이를 가진 배관은 균열에 의해 파손된다는 것을 알 수 있었고, 배관의 파손에 미치는 감육의 영향은 감육길이 및 감육비에 의존하였다. 또한, 다축 조건하에서 진파괴연성에 대한 평가를 이용함으로써 감육부 중앙에서 균열의 발생이 예측 가능하다는 것을 나타내었다. 외부감육과 내부감육의 결과가 거의 일치하는 경향을 나타냄으로서 외부감육의 결과를 내부감육의 결과로 대체 적용 가능함을 나타내었다. 단, 균열발생의 예측에 있어서는 금후 다양한 각도에서의 추가적인 검토가 필요하다.

참 고 문 헌

김진원, 박치용 (2005). "직관 배관의 국부 감육결함에 대한

- 건전성 평가 모델" 대한기계학회논문집, 제29권, 제5호, pp 734-742.
- 안석환, 남기우, 김선진, 김진환, 김현수, 도재윤 (2003). "감육배관의 굽힘하중에 의한 손상모드와 파괴거동 평가" 대한기계학회논문집, 제27권, 제1호, pp 8-17.
- 안석환, 남기우 (2005). "굽힘하중을 받는 배관의 파손에 미치는 감육의 영향" 대한기계학회논문집 A권, 제29권, 제4호, pp 606-613.
- 안석환, 이수석, 김진욱, 윤자문, 남기우 (2005). "감육배관의 유한요소해석에 의한 변형 및 강도 평가" 한국해양공학회, 제19권, 제5호, pp 65-70.
- Ahn, S. H., Ando, K., Ishiwata, M. and Hasegawa, K. (1998). "Plastic Collapse behavior of Pipes with Local Wall Thinning Subjected to Bending Load Allowable Limit", JHPI, Vol 36, No 4, pp 225-234.
- Ahn, S. H., Nam, K. W., Yoo, Y. S., Ando, K., Ji, S. H., Ishiwata, M. and Hasegawa, K. (2002). "Fracture Behavior of Straight Pipe and Elbow with Local Wall Thinning", Nuclear Engineering and Design 211, pp 91-103.
- ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III. (1992)
- ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section XI. (1998)
- CNN. com (2004). "Japan to probe nuclear accident".
- Deardorff, A. F. and Bush, S. H. (1990). "Development of ASME Section Criteria for Erosion-Corrosion Thinning of Carbon Steel Piping", ASME PVP, PVP-Vol-18, NDE-Vol 7, pp 71-75.
- Mathonet, J. F., Cherasse, J. M., Leblois, C. L. and Guyette, M. A. (1995). "Belgian Methodology for Evaluation of Frosion Corrosion Phenomena in Unit 1; 2; 3 & 4 of the DOEL Nuclear Power Plant(NPP)", ASME PVP, PVP-Vol-303, pp 393-399.
- 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 cabon steel pipes with Local Wall Thinning", J. of High pressure Institute of Japan, Vol 40, No 2, pp 62-72.
- Ramberg, W. and Osgood, W.R. (1943). "Description of Stress-Strain Curves by Three", NACA Technical Note, No 902.
- Virginia Electric and Power Co. (1987). "Surry Unit 2 Reactor Trip and Feedwater Pipe Failure Report".
- Weiss, V. (1972). Proceeding 1st Int. Conf. on Mechanical Behavior of Materials, pp 159.

2006년 10월 30일 원고 접수
2006년 12월 14일 수정본 채택