

# 내압을 받는 내/외부 국부 감육 곡관의 파손거동 Damage Behavior of Elbow Pipe with Inner or Outer Local Wall Thinning under Internal Pressure

김수영\* · 남기우\*\*\*†

Soo-Young Kim\* and Ki-Woo Nam\*\*\*†

(접수일 : 2013년 9월 17일, 수정일 : 2014년 8월 7일, 채택확정 : 2014년 8월 7일)

**Abstract:** This study was considered to occur the local wall thinning at elbow which is flowing the steam and high-pressure water of high-temperature. The angle of elbow is  $\Theta=45^\circ$  and  $67.5^\circ$ . The damage behaviors of inner or outer wall thinning elbow under internal pressure were calculated by FEA(finite element analysis). We compared the simulated results by FEA with experimental data. The FEA results are as follows: In the FEA results of three types of wall thinning ratio, the circumferential and longitudinal stresses show the similar values regardless of the angle of elbow, respectively. The circumferential strain was greater at elbow of small angle, but the longitudinal strain was nearly same. The FEM stress of outer wall thinning elbow was slightly higher than that of the inner wall thinning elbow, and strain was also slightly higher. In the experiments, the circumferential strain was increased with the increase in the internal pressure, and increased rapidly on about 0.2% of strain. The longitudinal strain was small. The strain at break was much smaller than 0.2%. In the relation between pressure and eroded ratio, the criteria that can be used safely under operating pressure and design pressure were obtained. The results of FEA were in relatively good agreement with those of the experiment.

**Key Words :** Elbow Pipe, Inner/Outer Wall Thinning, Damage Behavior, Circumferential Strain, Longitudinal Strain, FEA

## 1. 서 론

에너지 관련 플랜트는 내부 유체인 고온·고압수나 고온증기가 고속으로 흐르기 때문에, 사용 중에 다양한 열화·손상을 받을 가능성이 있다. 열화부를 갖는 배관의 건전성 평가에 관한 연구는 지금까지 균열이 가공된 배관에 대하여 많이 실

시되었다.<sup>1,2)</sup> 이러한 연구에 의하여 배관의 강도와 파괴 거동에 미치는 균열의 영향을 규명하였다. 한편, 1986년 12월에 발생한 미국 surry 원자력 발전소 2호기의 배관 국부감육화가 원인인 급수계 배관의 파단을 계기로, 감육에 관한 연구가 시작되었다.<sup>3)</sup> 또 감육과 비슷한 형상을 기계 가공한 감육 배관은 파괴 시험을 실시하여 최대 모멘트

\*\*\* 남기우(교신저자) : 부경대학교 재료공학과

E-mail : namkw@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6358

\*김수영 : 부경대학교(원) 학연협동기계공학과

\*\*\* Ki-Woo Nam(corresponding author) : Materials Science and Engineering, Pukyong National University

E-mail : namkw@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6358

\* Soo-Young Kim : UR Interdisciplinary program of Mechanical Engineering, Pukyong National University

평가법으로 검토하였다.<sup>6)</sup> 그 외에도 축방향 길이가 다른 감육을 유한요소법에 의한 소성붕괴거동의 검토나 실제 플랜트에서 침식·부식의 발생 확률 조사 등 다양한 관점에서 연구가 실시되었다.<sup>7,8)</sup> 그러나 국부 감육을 가지는 직관<sup>9)</sup> 및 곡관의 내압과 굽힘을 받는 영향에 대하여 일부 연구가 실시되고 있지만,<sup>10)</sup> 내압을 받는 감육 곡관의 파손 거동 한계에 미치는 연구 예는 찾아 볼 수 없다.

따라서 본 연구에서는 내압을 받는 내/외부 감육 곡관의 파손거동을 실험과 유한요소법으로 평가하고, 감육 곡관의 파손 거동 한계를 제시하였다.

## 2. 시험편 및 실험방법

### 2.1 시험편

본 연구에 사용된 재료는 외경 48.6mm, 두께 5.1 mm인 SPPH370 고압탄소강배관(Carbon Steel Pipes for High Pressure Service; KS D 3564)이다. 곡관시험편의 형상과 치수를 Fig. 1에 나타낸다. 또 곡관시험편의 감육 치수를 Table 1에 나타낸다. 여기서 두께 $t$ 에 대한 감육 깊이 $d$ 의 비율을 감육비 $d/t$ 로 정의하였다. 실제로 감육 현상은 대개 배관의 내부에서 발생한다. 그러나 본 연구에서는 곡관의 외측에 기계적으로 가공하였다. 그것은 외부 감육 배관의 파괴거동은 내부 감육 배관의 파괴거동과 거의 동일한 결과를 나타내기 때문이다.<sup>11)</sup>

### 2.2 해석 및 실험 방법

본 연구에서는 발전 플랜트의 2차 냉각수 계통의 운전압력과 설계압력을 각각 6.2 MPa, 15 MPa로 가정하였다. Fig. 2(a)와 (b)는  $\Theta=45^\circ$  곡관의 FEM 모델의 한 예를 나타낸다. (a)는 외부 감육 곡관을 나타내고, (b)는 내부 감육 곡관을 나타낸다. FEM 해석은 ANSYS Ver.11.0으로 탄소성 해석을 수행하였다. 모델링은 육면체 20절점 요소와 사면체 10절점 요소로서, 대칭성을 고려하여 1/4 배관모델을 만들었다. 해석은 Von Mises의 항복조건을 사용하였다. 해석은 내압을 변화시키면서,

곡관부 외부의 변위를 구하였다. Fig. 3은 FEM 해석에 사용된 진응력-진변형률 곡선을 나타낸다.<sup>9)</sup> 영률은 206 GPa, 포아송비는 0.3으로 하였다.

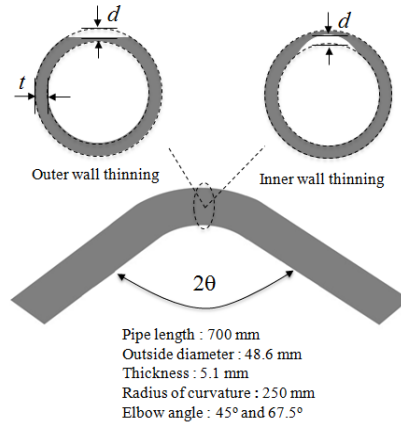


Fig. 1 Shape and dimensions of elbow pipe specimen

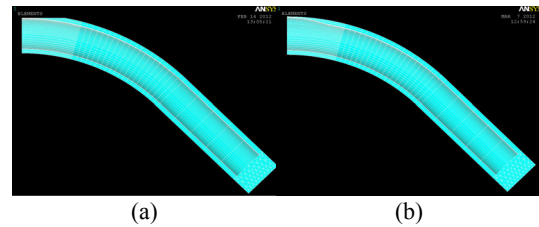


Fig. 2 Two types of the FEM analysis model. (a) Outer wall thinning, (b) Inner wall thinning

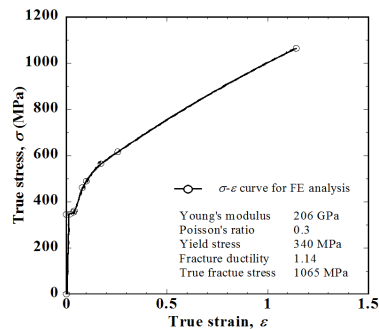


Fig. 3 True stress-true strain curve for FEM

실험에서 외부 감육된 곡관시험편은 밀봉을 하고, 실온 대기 중에서 수동 펌프로 내압을 16 MPa까지 가하여 실험을 실시하였다. 배관의 내압은 압력 게이지로 조절하였으며, 감육부의 변형률

은 2축 스트레인 게이지를 사용하여 곡관부 외부의 원주방향 및 종방향으로 측정하였다. 이때 변형률과 압력은 1초당 10개의 데이터를 계측하여 저장하였다. 이때 배관 길이는 700 mm이고, 내압에 의한 배관의 움직임을 방지하기 위하여 양단에서 각각 30 mm 위치에서 구속하였다.

Table 1 Specimen geometries

Specimen		Eroded ratio d/t	Elbow angle $\alpha(o)$
Outer & Inner local wall thinning	FEM	0.00	45.0
		0.80	
		0.88	
		0.92	
	Exp.	0.00	67.5
		0.80	
		0.88	
Exp.	0.788	45.0	
	0.895		
	0.916	67.5	
	0.788		
	0.869		
	0.921		

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 4(a), (b)는 각각 곡관 각도  $\theta=45^\circ$  및  $67.5^\circ$ 에 대한 원주방향과 종방향의 응력-변형률 선도를 나타낸다. 이것은 다양한 감육비의 곡관에 대하여 유한요소 해석을 실시하여 얻어진 것이다. 비교하기 위하여 감육하지 않은 곡관의 유한요소 해석 결과도 같이 나타내었다. 이 때 내압은 설계압력 15 MPa까지 부하하였다. (a)는 곡관 각도  $\theta=45^\circ$ 의 결과이며, (b)는 곡관 각도  $\theta=67.5^\circ$ 의 결과이다. 그림에서 확대한 실선은 무감육 곡관의 종방향과 횡방향의 응력-변형률을 나타낸다. 이 그림에서 원주방향의 응력-변형률은 종방향보다 큰 값을 보이고 있다.

곡관 각도  $\theta=45^\circ$ 인 (a)의 원주방향 응력은 감육비에 관계없이 약 300 MPa까지 선형적으로 증가하고, 원주방향의 변형률 약 0.2%를 지나면서 급

격하게 변형하여 파열하였다. 급격한 변형률의 증가는 곡관에 항복이 발생하기 시작하는 것을 의미하고, 탄성영역을 지나서 항복이 발생하였기 때문에 구조물은 안전성과 신뢰성을 잃고 파손이 시작되었다고 판단된다. 그리고 (a)의 종방향 응력은 감육비에 관계없이 약 150 MPa까지 선형적으로 증가하고, 변형률 약 0.02%에서 급격하게 변형하여 파손하였다. 여기서 항복점에서 원주방향의 응력 및 변형률은 종방향보다 각각 약 2배 및 10배 크게 나타났다.

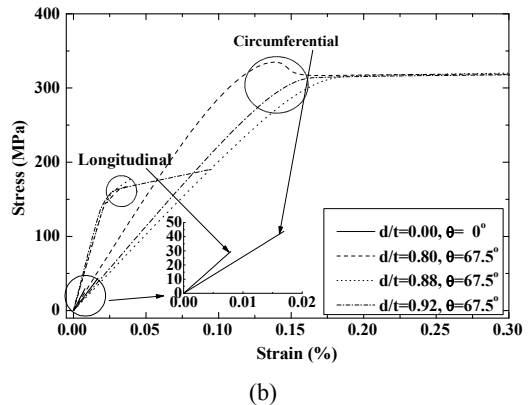
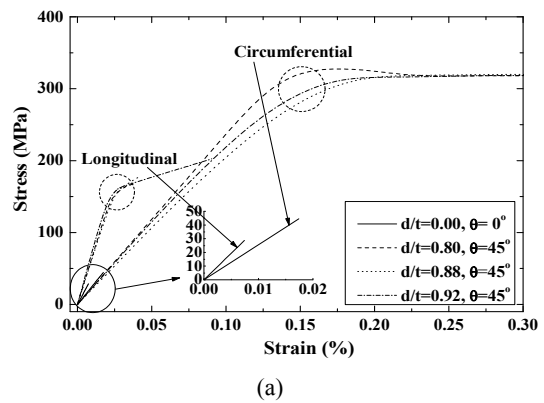


Fig. 4 Stress-strain according to wall thinning ratio of outer wall thinning elbow pipe. (a) Elbow angle  $\theta=45^\circ$ , (b) Elbow angle  $\theta=67.5^\circ$

한편 곡관 각도  $\theta=67.5^\circ$ 인 (b)의 원주방향 응력은 감육비에 관계없이 약 300 MPa까지 선형적으로 증가하였으나, 원주방향의 변형률은 약 0.16%

를 지나면서 급격하게 변형하여 파열하였다. (b)의 종방향 응력은 감육비에 관계없이 약 150 MPa까지 선형적으로 증가하고, 변형률 약 0.02%에서 급격하게 변형하여 파손하였다. 여기서 원주방향의 응력은 종방향보다 2배 크게 나타났으나, 변형률은 약 8배 크게 나타났다.

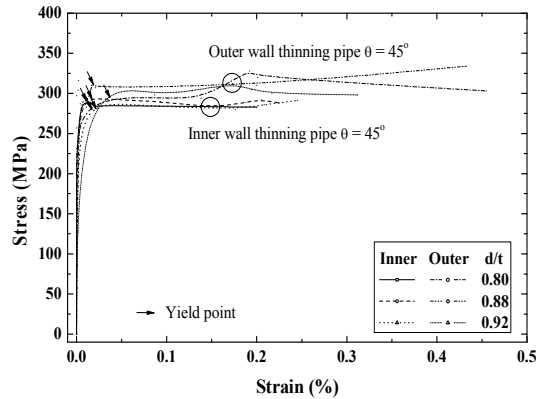
무감육 곡관의 응력 및 변형률은 원주방향이 약 45 MPa 및 0.017%, 종방향이 약 30 MPa 및 0.007%를 나타내어, 감육 곡관에 비하여 매우 작은 값을 나타내었다. (a), (b)에서 곡관에 변형이 발생하는 응력은 곡관 각도에 관계없이 약 300 MPa로서 같다. 그러나 원주 방향 변형률은 곡관 각도가 커짐에 따라서 작아지고, 종방향 변형률은 동일하게 나타났다.

또한, 감육비  $d/t=0.80, 0.88$  및  $0.92$ 에 대하여 비교하면, 각각의 감육비에서 원주방향 및 종방향의 응력은 곡관 각도에 관계없이 비슷한 값을 나타내었다. 그러나 원주 방향 변형률은 곡관 각도가 작은 것이 크게 나타났으나, 종방향 변형률은 같게 나타났다. 그리고 무감육 곡관의 응력과 변형률은 감육 곡관들에 비하여 아주 작은 값을 나타내었다.

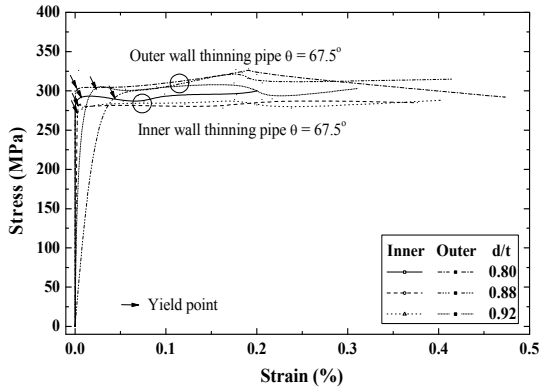
Fig. 5는 von Mises 항복 조건에서 얻어진 내/외부 감육 곡관의 응력-변형률 선도를 곡관 각도에 대하여 감육비를 변수로 나타낸 것이다. (a)는 곡관 각도  $\theta=45^\circ$ 의 결과이며, (b)는  $\theta=67.5^\circ$ 의 결과이다. 그림에서  $\rightarrow$ 는 선형 영역을 벗어나는 항복점을 나타낸다. (a)와 (b)에서 외부 감육 곡관의 응력이 약간 높게 나타났으며, 변형률도 크게 나타났다. 이것은 감육부의 형상이 원인이라 판단된다. 즉, 외부 감육은 곡관 내부가 평탄하여 감육이 없는 부분과 같은 내압을 받지만, 내부 감육은 감육부의 내압에 의한 응력 집중이 더 많이 작용하여 낮은 응력에서 파단하였다고 판단된다.

내/외부 감육 곡관의 응력-변형률 선도 Fig. 5에서, 항복점의 응력을 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. 외부 감육 곡관의 항복점 응력은 곡관 각도  $\theta=45^\circ$ 와  $67.5^\circ$ 에서 내부 감육 곡관보다 각각 약 4.9~6% 및 6.4~7% 정도 크게 나타났다. 이것은 내부 감육 가공이 어려우므로 외부 감육한 배관의

굽힘 연구에서 내/외부 감육 배관의 굽힘 응력이 거의 비슷하다는 연구와 유사한 결과를 얻었다.



(a)



(b)

Fig. 5 Comparison between stress and strain of outer/inner wall thinning elbow pipe from von Mises yield criterion. (a) Elbow angle  $\theta=45^\circ$ , (b) Elbow angle  $\theta=67.5^\circ$

Fig. 7은 내/외부 감육 곡관의 내압과 변형률과의 관계를 나타낸다. 압력에 대한 변형률은 감육 각도에 관계없이 감육비의 의존성을 나타내고 있다. 즉, 동일한 감육비는 비슷한 변형률을 나타내고 있으며, 감육비가 적을수록 동일한 변형에 큰 내압이 필요하다는 것을 알 수 있다. 그러나 동일 감육비에서 내부 감육 곡관의 압력이 외부 감육 곡관보다 약간 높게 나타났다. 이

것은 내/외부의 감육 면적의 차이가 원인이라 판단된다. 그리고 그림에서 압력과 변형률의 관계는 감육비가 증가함에 따라서 내압이 작아지고, 변형률은 약간씩 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 4의 원주방향 응력-변형률 선도에서 변형률 0.2% 전후에서 응력에 변곡점이 나타나는 것으로 관찰되었다. 그러나 압력-변형률 선도에서 감육비가 증가할수록 압력은 저하하며, 변형률은 약간 증가하는 경향을 나타내었다. 이러한 경향은 외부 감육 곡관이 크게 나타났다. 그러나 감육 각도의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.

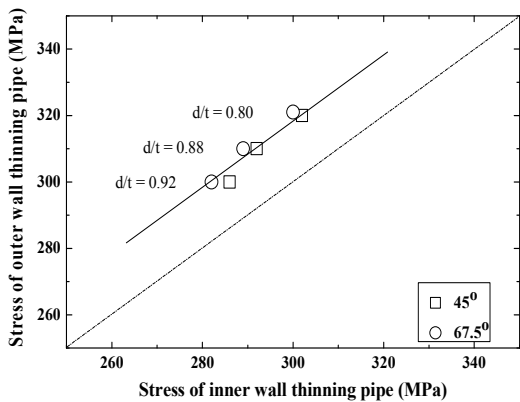


Fig. 6 Stress between outer and inner wall thinning elbow pipe at inflection point

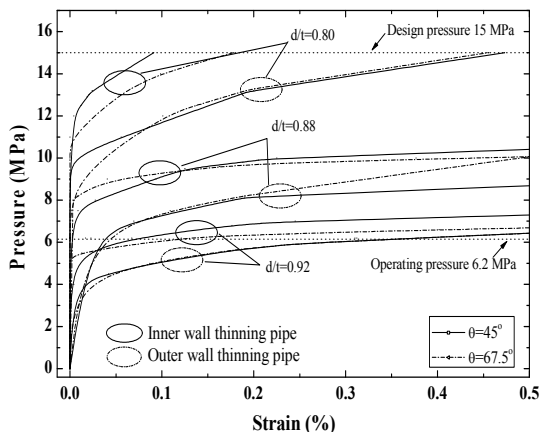


Fig. 7 Relationship of between strain and pressure from wall thinning ratio and wall thinning angle of two types of elbow pipe

감육비  $d/t=0.92$ 는 내/외부 감육 곡관에 관계없이 운전압력 6.2 MPa 이하에서 모두 파괴가 발생하는 것을 알 수 있다. 외부 감육 곡관  $d/t=0.88$ 은 운전압력 6.2 MPa에서 파괴가 발생하였으나, 내부 감육 곡관은 파괴가 발생하지 않았다. 외부 감육 곡관  $d/t=0.80$ 은 운전압력 6.2 MPa에서 파괴가 발생하지 않으나, 그 이상의 압력에서는 파괴가 발생하였다. 즉, 3종류의 시험편은 설계 압력 15 MPa 이하에서 모두 파괴가 발생하였다.

Fig. 8은 감육비  $d/t=0.80, 0.88$  및  $0.92$ 의 경우, 감육 길이에 따르는 변형률 0.2%에서의 변형 모습을 나타낸다. (a)는  $\theta=45^\circ$ , (b)는  $\theta=67.5^\circ$ 의 결과이다. 그림은 100배 확대한 것을 나타낸 것이며, 각 감육비에서 위의 그림은 종단면을, 아래 것은 횡단면을 나타낸다. 이 그림에서 감육부의 종단면은 큰 변형이 나타나 있으며, 횡단면도 타원으로 변형된 것을 알 수 있다.

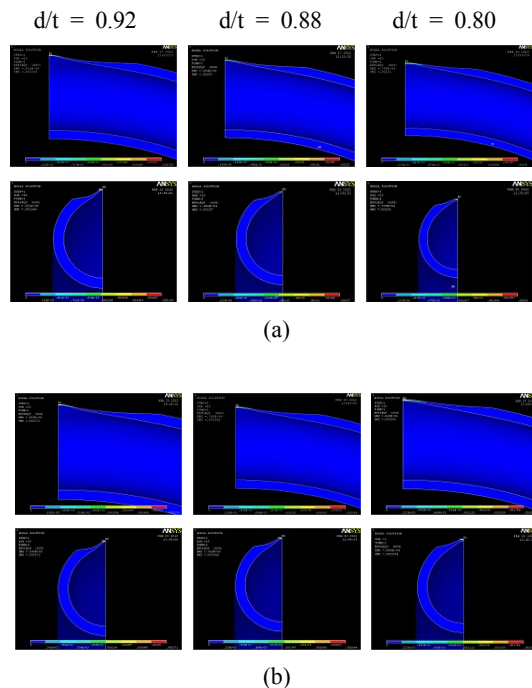


Fig. 8 Pipe shapes of 100 times at strain 0.2% from outer wall thinning pipe by FEM. (a) Elbow angle  $\theta=45^\circ$ , (b) Elbow angle  $\theta=67.5^\circ$

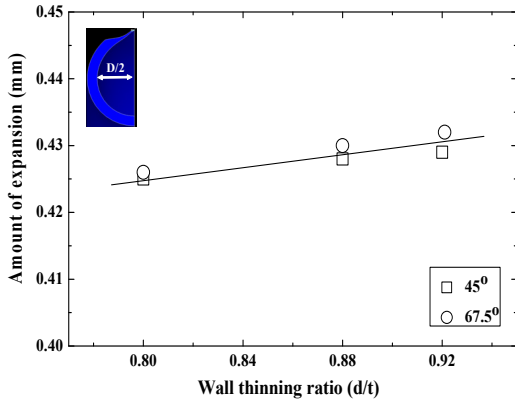


Fig. 9 Relationship of between the amount of expansion and wall thinning ratio at strain 0.2 % from Elbow angle of two types of elbow pipe

곡관 각도  $\theta=45^\circ$  및  $67.5^\circ$ 의 감육 배관 유한요소 계산에서 얻어진 변형률 0.2%의 팽창량과 감육비와의 관계를 Fig. 9에 나타낸다. 이 그림에서 감육비가 증가할수록 팽창량은 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 팽창량은 곡관 각도  $67.5^\circ$ 가 약간 크게 나타나고 있으나, 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.

유한요소 계산에서 얻어진 변형률 0.2%의 내압과 감육비와의 관계에서 한계 감육 두께를 구하여 Table 2에 나타낸다. 운전 압력과 설계 압력에서 감육 곡관 각도에 대한 한계 감육비는 거의 비슷한 것을 알 수 있었다. 따라서 운전 압력에 대한 배관의 안전성은 감육 곡관 각도보다는 감육 깊이에 의존성이 크다는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 실험에서 얻어진 응력-변형률 곡선을 나타낸 것이다. (a)는 곡관 각도  $\theta=45^\circ$ 이며, (b)는 곡관 각도  $\theta=67.5^\circ$ 의 결과이다. 이 그림에는 원주

Table 2 Wall thinning limit thickness from pressure and wall thinning ratio at strain 0.2 %

$\theta$ (°)	P (MPa)	d/t	d (mm)
45	15	0.78	3.98
	6.2	0.91	4.64
67.5	15	0.77	3.93
	6.2	0.91	4.64

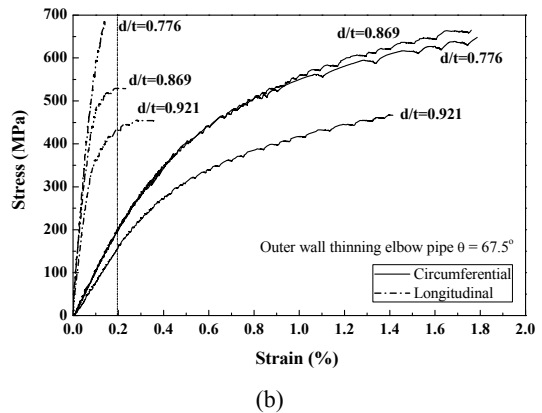
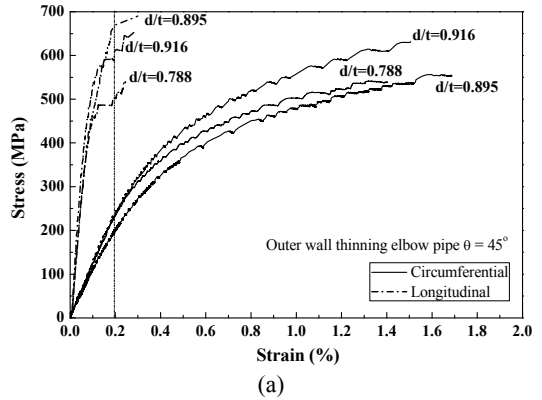


Fig. 10 Stress-strain according to wall thinning ratio from experimental. (a) Elbow angle  $\theta=45^\circ$ , (b) Elbow angle  $\theta=67.5^\circ$

방향과 종방향의 결과를 같이 나타내었다. 원주방향의 응력은 유한요소 계산과 달리 완만하게 증가하여, 큰 변형 후에 파괴하였다. 그러나 종방향은 파단 시에도 0.2% 변형률에 미치지 않았다. 원주방향 및 종방향의 유한요소 계산은 von Mises의 항복 조건에 의한 3개의 주응력 크기에 의존하는 값이다. 반면, 실험은 원주 및 종방향으로 부착한 스트레인 게이지에 의하여 측정된 값이다. 따라서 실험과 유한요소 계산의 차이는 구속 조건이 다르기 때문에 발생한 것이라 판단된다. 그러나 유한요소 계산과 실험의 결과에서 내압이 작용하는 곡관의 안전성은 원주방향의 변형 거동을 파악하면 확보될 것이라 판단된다. 이것은 재료역학에서 얇은 벽의 내압용기가 내압을 받는 경우, 횡방향

(원주방향)의 응력이 종방향의 응력보다 2배 크게 작용하는 것과 일치한다.

유한요소 계산이 실험보다 약간 크게 평가되고 있으나, 실험과 비교적 잘 일치하고 있다고 판단 된다.

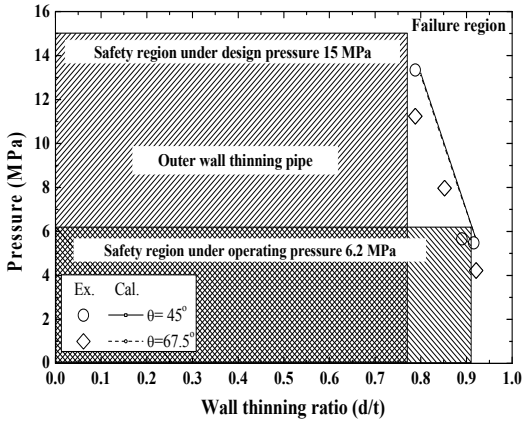


Fig. 11 Criterion of safety evaluation by pressure and wall thinning angle

내압과 감육비와의 관계를 Fig. 11에 나타낸다. 그림에서 실선 및 점선은 유한요소 계산에서 얻어진 변형률 0.2%에서의 내압과 감육비와의 관계이다. 여기서, 실선은 곡관 각도  $\theta=45^\circ$ 이며, 점선은 곡관 각도  $\theta=67.5^\circ$ 의 결과이다. 이러한 실선과 점선에서 구한 것이 Table 2에 나타내는 운전 압력과 설계 압력의 한계 감육비이다. 이것을 운전 압력과 설계 압력에서 안전하게 사용할 수 있는 범위를 나타낸 것이 빗금친 부분이다. 빗금친 부분에 해당하는 감육비를 가지는 곡관이면, 운전 압력과 설계 압력에서 각각 파손 또는 파괴없이 안전하게 사용할 수 있다. 실험에서 얻어진 변형률 0.2% 결과를 Fig. 11에 같이 나타내었다. 그림에서  $\circ$ 는 곡관 각도  $\theta=45^\circ$ 이고,  $\diamond$ 는 곡관 각도  $\theta=67.5^\circ$ 이다. 실험에서  $\theta=45^\circ$ 의 감육비  $d/t=0.788$ ,  $\theta=67.5^\circ$ 의 감육비  $d/t=0.788$ 과  $0.852$ 는 운전압력 6.2 MPa 이하에서는 파손 또는 파괴가 발생하지 않았고, 그 이후의 압력에서 파괴가 발생하였다. 그러나  $\theta=45^\circ$ 의 감육비  $d/t=0.89$ 는 운전 압력 6.2 MPa 이하에서 파손이 발생하였다.  $\theta=45^\circ$ 의 감육비  $d/t=0.916$ 과  $\theta=67.5^\circ$ 의 감육비  $d/t=0.921$ 은 그림의 빗금친 안전 영역을 벗어난 감육비를 가지는 배관이었기 때문에 파괴가 발생하였다. 그림에서

#### 4. 결 론

본 연구는 고온·고압수, 증기가 고속으로 흐르는 곡관이 유속에 의한 침식/부식에 의하여 국부적으로 감육이 발생하기 쉬운 것을 고려하였다. 내압을 받는 내/외부 감육 곡관의 파손거동을 유한요소법으로 계산하고, 외부 감육 곡관은 실험과 비교·평가하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) 원주방향 및 종방향의 응력은 각각의 감육비에서 곡관 각도에 관계없이 비슷한 값을 나타내었다. 그러나 원주 방향 변형률은 곡관 각도가 작은 것이 크게 나타났으나, 종방향 변형률은 같게 나타났다.

(2) 외부 감육 곡관의 계산 응력은 내부 감육 곡관보다 약간 높게 나타났으며, 변형률도 크게 나타났다.

(3) 내/외부 감육 곡관은 압력에 대하여 변형률은 감육 각도에 관계없이 동일한 감육비에서는 비슷한 변형률을 나타내고 있으며, 감육비가 적을수록 큰 내압이 필요하다. 그러나 동일 감육비에서 내부 감육 곡관의 압력이 외부 감육 곡관보다 약간 높게 나타났다. 또한 압력과 변형률의 관계는 감육비가 증가함에 따라서 내압이 작아지고, 변형률은 약간씩 증가하였다.

(4) 실험에서 원주 방향의 변형률은 내압이 증가함에 따라서 급격하게 증가하였으나, 종방향은 파단 시에도 0.2% 변형률에 미치지 않았다. 따라서 곡관의 경우는 내압에 의한 파손은 원주방향의 변형 거동을 파악하면, 안전성이 확보될 것이다.

(5) 운전 압력에 대한 배관의 안전성은 감육 곡관 각도보다 감육 깊이에 의존성이 크다.

(6) 내압과 감육비의 관계에서 운전 압력 및 설계 압력에서 안전하게 사용할 수 있는 범위를 유한요소 계산에서 도출하였으며, 실험과 비교적 잘 일치하였다.

## Reference

1. K. W. Nam, S. H. Ahn, Y. S. Yoo, K. Ando, 2002, "Crack opening behavior of penetrated crack under cyclic or monotonic loading", Nuclear Engineering and Design, Vol. 214, pp. 221-229.
2. Y. S. Yoo, H. Shimano, S. H. Ji, K. Ando, A. Okamoto, 1999, "The Evaluation of LBB Behavior and Crack Opening Displacement on Statically Indeterminate Piping System Subjected to Monotonic Load", Journal of High Pressure Institute of Japan, Vol. 37, pp. 418-426.
3. S. Miyazono, S. Ueda, K. Shibata, T. Isozaki, K. Onizawa, R. Kurihara, 1987, "Pipe rupture accident on Surry Nuclear Power Plant" Japan Atomic Energy Agency, Vol. 29, pp. 952-969.
4. K. Hasegawa, S. Kanno, A. Hirano, M. Ishiwata, N. Gotoh, 1991, "Acceptance Criteria of Local Wall Thinning in Carbon Steel Pipe Subjected to Axial Force" Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series A, Vol. 57, pp. 1470-1474.
5. J. F. Mathonet, J. M. Cherasse, Leblois, C. L. and Guyrtee, M. A., 1995, "Belgian Methodology for Evaluation of Erosion Corrosion Phenomena in Units 1 ; 2 ; 3&4 of the Doel Nuclear Power Plant(NPP)", ASME PVP, Vol. 304, pp. 393-399.
6. S. W. Ahn, K. Ando, M. Ishiwata, K. Hasegawa, 1988, "Plastic Collapse Behavior of Pipes with Local Wall Thinning Subjected to Bending Load and Allowable Limit 1st report : Plastic Collapse Behavior of Pipes with Local Wall Thinning" Journal of High Pressure Institute of Japan, Vol. 36, pp. 225-233.
7. L. Han, S. He, Y. Wang, C-Liu, 1999, "Limit moment of local wall thinning in pipe under bending", Internal Journal of Pressure Vessel & Piping. Vol. 76, pp. 539-542.
8. K. Ting, Y. Pang, 1999, "The evaluation of erosion/corrosion problems of carbon steel piping in Taiwan PWR nuclear power plant", Nuclear Engineering and Design, Vol. 191, pp. 231-243.
9. S. H. Ahn, J. W. Lee, S. Y. Kim, J. Y. Do, K. W. Nam, 2013, "Failure Criterion of Straight Pipe with Outer Local Wall Thinning under Internal Pressure" Journal of the Korean Society for Power System Engineering, (in printing)
10. S. H. Lee, J. K. Lee, C. Y. Park, 2010, "Behavior of Elastic and Plastic Limit Load of Thinned Elbow in Real Scale Failure Test under Combined Load", Proceeding of 2010 KSME 10RE016, pp. 52-57.
11. S. H. Ahn, K. W. Nam, Y. S. Yoo, K. Ando, S. H. Ji, M. Ishiwata and K. Hasegawa, 2002, "Fracture Behavior of Straight Pipe and Elbow with Local Wall Thinning", Nuclear Engineering and Design, Vol. 211, pp. 91-103.