

내압을 받는 외부 국부 감육 직관의 파손 기준

Failure Criterion of Straight Pipe with Outer Local Wall Thinning under Internal Pressure

김수영* · 남기우***

Soo-Young Kim* and Ki-Woo Nam***

(접수일 : 2013년 06월 07일, 수정일 : 2013년 08월 02일, 채택확정 : 2013년 08월 06일)

Abstract: This study was carried out an experimental and finite element analysis on the fracture behavior of straight pipes with local wall thinning under internal pressure. Local wall thinning was machined on the pipes in order to simulate erosion/corrosion metal loss. The configurations of the eroded area has an eroded ratio of $d/t=0.80\sim 0.92$ and an eroded length of $l=25, 50$ and 102 mm. Three-dimensional elastic-plastic analyses were also carried out using the finite element method, which is able to accurately simulate failure behaviors. In regards to the relation ship between pressure and eroded ratio, the criterion that can be used safely under operating pressure and design pressure were obtained from this calculation. The results of this calculation were in relatively good agreement with that of the experiment.

Key Words : Straight Pipe, Outer Wall Thinning, Failure Criterion, Internal Pressure, Finite Element Method

1. 서 론

현대 사회는 에너지 수요가 증가하고 있다. 그 중에서 원자력발전은 석유 대체 에너지로서 주목을 받고 있으므로, 중요성은 점점 증가하고 있고, 안전성은 피할 수 없는 상황이다.

그런데 에너지 관련 플랜트는 높은 수준의 안전성 및 건전성이 확보되어야 한다.^{1,2)} 그 때문에 장기간 사용한 구조물에 발생할 가능성이 있는 결함을 고려한 경우에도 충분한 안전성을 확보할 필요가 있다. 그러나 에너지 관련 플랜트의 배관은 사용 중에 다양한 종류의 열화, 손상을 받을 가능성이 많다. 이러한 결함으로서 균열 또는 칩/부식에

의하여 발생하는 감육을 생각할 수 있다. 균열에 대한 연구³⁻⁶⁾는 배관의 강도와 파괴거동에 미치는 영향을 보고하였고, 칩/부식을 모의한 감육 배관의 건전성 실증 시험을 실시하였다.⁷⁻⁹⁾ 또, Mathonet 등은 두께가 다른 부위의 응력평가에 의하여 감육 허용기준을 마련하였다.¹⁰⁾ Hasegawa 등은 감육부를 균열형상으로 보고, 소성붕괴기준에 의하여 허용 감육 치수를 검토하였다.¹¹⁾ 국부적 감육 배관의 강도와 파괴기구¹²⁻¹⁵⁾ 및 내압이 작용하는 감육배관의 연구를 실시하고 있다.¹⁶⁾

본 연구에서는 국부 감육부를 가지는 탄소강 배관을 사용하여, 감육부의 형상 및 감육 정도가 내압을 받는 배관의 강도와 파괴기구에 어떠한 영향

*** 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

을 미치는가를 유한요소법으로 조사하였다. 또 유한요소법과 실험결과를 비교함으로써 내압을 받는 국부 감육 배관의 강도평가에서 유한요소법의 유용성을 평가하였다.

2. 시험편 및 실험 방법

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. 직관시험편의 형상과 치수를 Fig. 1에 나타낸다. 또 직관시험편의 감육 치수를 Table 1에 나타낸다. 여기서 두께에 대한 감육 깊이d의 비율을 감육비d/t로 정의하였다. 실제로 감육은 대개 배관의 내부에서 발생한다. 그러나 본 연구에서는 감육결함을 배관의 외측에 기계적으로 가공하였다.¹⁷⁾ 그것은 배관 외측에 감육결함을 가공한 배관의 파괴거동의 결과와 내부에 감육결함을 가공한 배관의 파괴거동에서 거의 동일한 결과를 나타내기 때문이다.

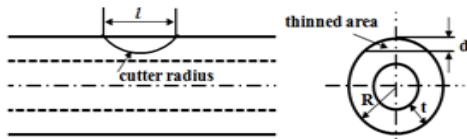


Fig. 1 Shape and dimensions of a straight pipe specimen

2.2 해석 및 실험 방법

본 연구에서는 원자력 발전 플랜트의 2차 냉각수 계통의 운전압력과 설계압력을 각각 6.2 MPa, 15 MPa로 가정하였다. Fig. 2는 FEM 모델의 한 예를 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, 그 때의 변위를 구하였다. Fig. 3은 FEM 해석에 사용된 진응력-진변형률 곡선을 나타낸다. 영

Table 1 Specimen geometries

Specimen No.	Eroded ratio (d/t)	Eroded length l (mm)	
FEM	SP-1	0.80	
	SP-2	0.88	
	SP-3	0.92	
	SP-4	0.92	50
	SP-5	0.80	
	SP-6	0.88	
	SP-7	0.92	102
Exp.	SP-8	0.906	
	SP-9	0.912	
	SP-10	0.930	
	SP-11	0.941	50
	SP-12	0.818	
	SP-13	0.822	
	SP-14	0.920	
	SP-15	0.931	102

률은 206 GPa, 포아송비는 0.3으로 하였다.

실험에서 외부 감육된 직관 시험편은 밀봉을 하고, 실온 대기 중에서 수동 펌프로 내압을 30 MPa까지 가하여 실험을 실시하였다. 배관의 내압은 압력 게이지를 조절하였으며, 감육부의 변형률은 2축 스트레인 게이지를 사용하여 원주방향 및 종방향으로 측정하였다. 이때 변형률과 압력은 1초당 10개의 데이터를 계측하여 저장하였다¹²⁾. 이때 배관 길이는 700 mm이고, 내압에 의한 배관의 움직임을 방지하기 위하여 양단에서 각각 30 mm 위치에서 구속하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 감육 길이 l=25 및 102 mm이며, 감육비가 다른 직관에 대하여 유한요소 해석을 실시하여 얻어진 응력-변형률 선도를 나타낸다. 비교하기 위하여 감육하지 않은 배관의 해석 결과도 같이 나타내었다. 이 때 내압은 설계압력 15 MPa까지 부하하였다. Fig. 4(a)는 감육 길이 l=25 mm의 결

과이며, Fig. 4(b)는 감육 길이 $l=102$ mm의 결과이다. 그리고 Fig. 4(a), (b)에는 원주방향과 종방향의 응력-변형률 선도를 나타내었다. 원주방향의 응력-변형률은 종방향보다 큰 값을 나타내었다.

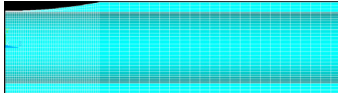


Fig. 2 An example of 1/4 modelling for the FEM analysis model

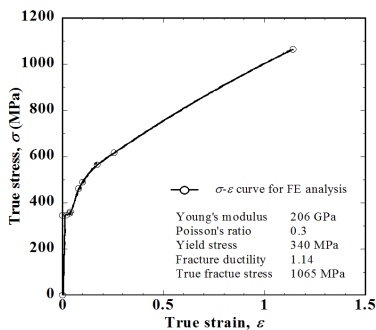
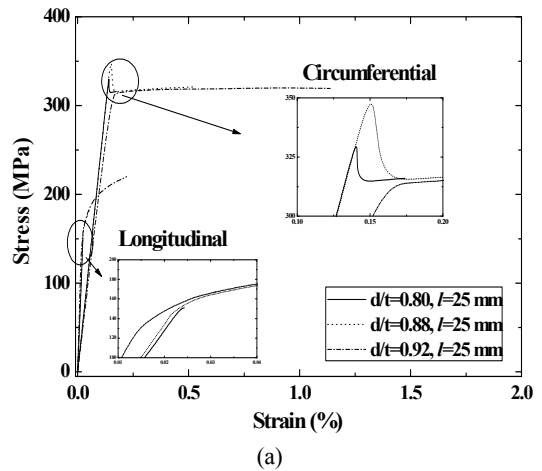


Fig. 3 True stress-true strain curve for FEM

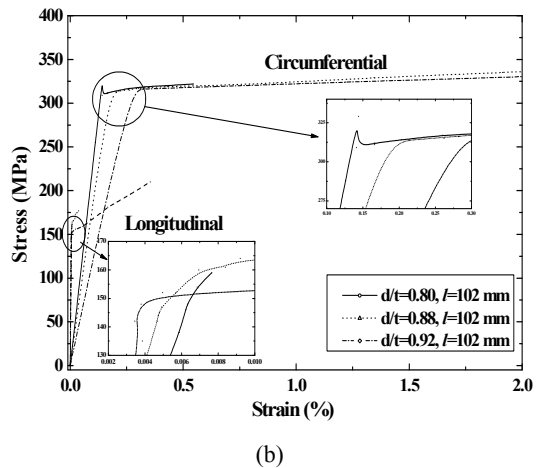
감육 길이 $l=25$ mm인 Fig. 4(a)의 원주방향 응력은 감육비 0.80, 0.88 및 0.92에 대하여 각각 약 340, 360 및 315 MPa까지 선형적으로 증가하였다. 이 때, 원주방향의 변형률은 약 0.14, 0.15 및 0.17%를 나타내고, 급격하게 변형하여 파열하였다. 급격한 변형률의 증가는 배관에 항복이 발생하기 시작하는 것을 의미하고, 탄성영역을 지나서 항복이 발생하였기 때문에 구조물은 안전성과 신뢰성을 잃고 파손이 되었다고 판단된다. 그리고 Fig. 4(a)의 종방향 응력은 감육비 0.80, 0.88 및 0.92에 대하여 약 146, 144 및 130 MPa까지 선형적으로 증가하고, 변형률 약 0.023, 0.022 및 0.015%에서 급격하게 변형하여 파손하였다. 원주방향의 응력 및 변형률은 종방향보다 각각 약 230~250% 및 610~1130% 크게 나타났다.

한편 감육 길이 $l=102$ mm인 Fig. 4(b)의 원주방향 응력은 감육비 0.80, 0.88 및 0.92에 대하여 각각 약 330, 290 및 260 MPa까지 선형적으로 증가하였다. 이때, 원주방향의 변형률은 약 0.15, 0.16

및 0.24%를 나타내고, 급격하게 변형하여 파열하였다. Fig. 4(b)의 종방향 응력은 감육비 0.80, 0.88 및 0.92에 대하여 약 150, 145 및 136 MPa까지 선형적으로 증가하고, 변형률 약 0.0066, 0.0046 및 0.0036%에서 급격하게 변형하여 파손하였다. 원주방향의 응력은 감육비에 관계없이 종방향보다 약 190~220% 크게 나타났으나, 변형률은 약 2270~6660% 크게 나타났다.



(a)



(b)

Fig. 4 Relationship of stress and strain according to wall thinning ratio from FEM. (a) $l=25$ mm, (b) $l=102$ mm

Fig. 4(a), (b)에서 각각의 감육길이에서 감육비가 증가할수록 선형적으로 증가하는 원주방향 및

종방향의 응력은 작게 나타났으나, 변형율은 원주 방향은 증가하고, 종방향은 감소하였다. 또한 원주 방향의 응력은 감육 길이가 긴 것이 약간 작게 나타났으나, 종방향의 응력은 감육 길이에 관계없이 각각의 감육비에 대하여 비슷하게 나타났다. 그러나 $l=102$ mm에 대하여 $l=25$ mm의 원주 방향의 변형율은 약 70~93% 나타났으며, 종방향의 변형율은 약 348~478%를 나타내었다. 따라서 감육 길이가 증가할수록 변형율은 원주 방향이 약간 증가하나, 종방향은 매우 작게 나타나는 것을 알 수 있다.

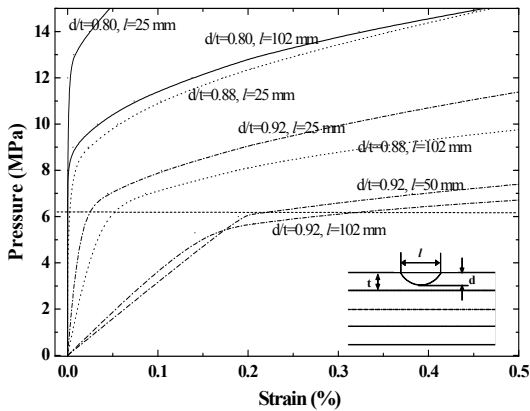


Fig. 5 Relationship of between pressure and strain from wall thinning ratio and wall thinning length

Fig. 5는 계산에서 얻어진 내압과 변형률과의 관계를 나타낸다. 압력에 대한 변형률은 감육 길이에 관계없이 감육비의 의존성을 나타내고 있다. 즉, 감육비가 클수록 파손에 필요한 내압이 작은 것을 알 수 있다. 그림에서 압력과 변형률의 관계는 감육비가 증가함에 따라서 변형률이 증가하는 것을 알 수 있다. 변형율의 변곡이 나타나는 압력은 감육 길이가 짧고, 감육비가 작은 것이 높게 나타났다. 또한 운전압력 6.2 MPa 이하에서는 3종류의 감육 길이 $l=25$, 50 및 102 mm의 $d/t=0.92$ 와 $l=102$ mm의 $d/t=0.88$ 은 모두 파손이 발생하는 것을 알 수 있다. $l=25$ mm의 $d/t=0.80$ 과 0.88, $l=102$ mm의 0.80은 운전압력 6.2 MPa에서 파손이 발생

하지 않으나, 그 이상의 압력에서는 파손이 발생하였다. 그러나 3종류의 시험편은 설계압력 15 MPa 이하에서 모두 파괴 또는 파손이 발생하였다. Fig. 6은 감육비 $d/t=0.92$ 의 경우, 계산에서 얻어진 감육 길이에 따르는 변형률 0.2%에서의 응력 분포 및 변형 모습을 나타낸다. (a)는 $l = 25$ mm, (b)는 $l = 50$ mm, (c)는 $l = 102$ mm의 결과이다. 각 그림의 첫 번째는 실제 치수를 나타내고, 두 번째는 100배 확대한 것이며, 세 번째는 100배 확대한 것의 횡단면을 나타낸 것이다. 실제 치수에서 감육부의 중앙 부분은 큰 응력의 분포를 나타내고 있으며, 이것은 100배 확대한 그림에서 감육부의 중앙부에 큰 변형을 관찰할 수 있다. 또한 횡단면은 진원에서 많은 변형이 발생한 것을 알 수 있다.

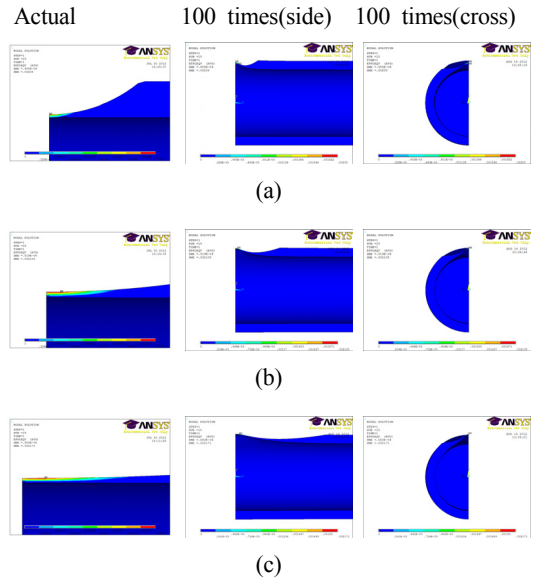


Fig. 6 Distribution of stress and deformation at strain 0.2 % from wall thinning pipe by FEM. (a) $l = 25$ mm, $d/t = 0.92$, (b) $l = 50$ mm, $d/t = 0.92$, (c) $l = 102$ mm, $d/t = 0.92$

감육 길이 $l = 25$, 50 및 102 mm의 감육 직판에서 계산에서 얻어진 변형률 0.2%의 팽창량과 감육비와의 관계를 Fig. 7에 나타낸다. 그림에서 감육 길이에 관계없이 감육비가 큰 배관의 팽창량이 약간 증가하는 것을 알 수 있다. 팽창량은 감육비

$d/t=0.80$ 에서 0.235 mm ($l=102$ mm), $d/t = 0.88$ 에서 0.224 mm ($l=22$ mm)와 0.242 mm ($l=102$ mm), $d/t=0.92$ 에서 0.228 mm ($l=25$ mm), 0.239 mm ($l=50$ mm) 및 0.245 mm ($l=102$ mm)를 나타내었다. 따라서 파손까지의 팽창량은 감육 길이 및 감육비의 의존성을 나타내는 것으로 나타났다.

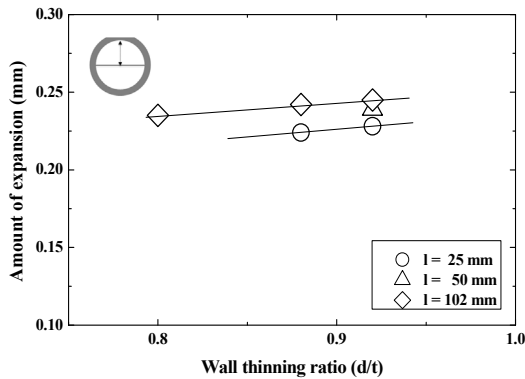


Fig. 7 Relationship of between the amount of expansion and wall thinning ratio at strain 0.2 % from FEM

Fig. 8은 실험에서 얻어진 응력-변형을 곡선을 나타낸 것이다. (a)와 (b)는 각각 감육 길이 $l = 25$ 및 102 mm의 결과이다. (a)에는 비교하기 위하여 50 mm의 결과를 같이 나타내었다. 그림에서 원주방향의 응력은 변형을 약 0.2%에서 변곡이 나타나고 있다. 원주방향의 0.2% 변곡점 응력은 그림(a)에서 감육비 $d/t=0.906, 0.912$ 및 0.930에서 각각 약 340, 410, 400 MPa, 그림(b)에서 감육비 $d/t=0.941$ 에서 180 MPa, 그림 (c)에서 $d/t=0.818, 0.822, 0.920$ 에서 각각 약 180, 235, 150 MPa를 나타내었다. 계산은 감육 길이 및 감육비에 관계없이 변형을 0.2%에서 약 273 MPa를 나타내었다. 그리고 실험에서 변형을 0.2%의 응력은 감육 길이가 길어질수록 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이와 같이 변형을 0.2%에서 응력이 차이가 나는 것은 계산 결과가 von Mises의 항복 조건에 의하여 얻어진 것으로, 3개의 주응력 크기에 의존하여 얻어진 값이며, 실험은 원주방향의 응력을 나타낸 것이다. 한편 길이방향의 응력은 파단까지 선형을 유지하며,

변형율은 감육길이 $l=25, 50$ 및 102 mm에서 각각 0.08~0.1%, 0.094% 및 0.02~0.05%를 나타내었다. 이와 같이 감육 배관의 길이방향은 파단 할 때까지 응력은 증가하지만, 변형은 거의 없는 것을 알 수 있다.

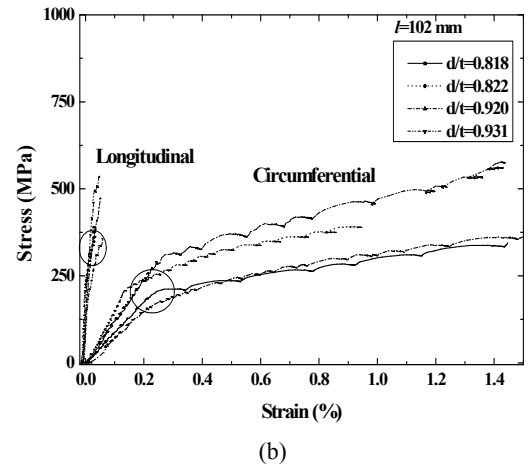
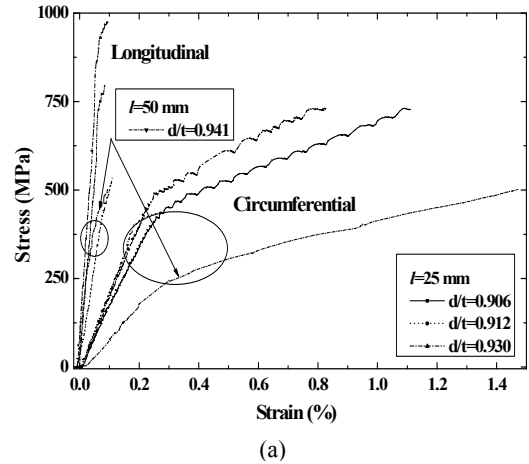
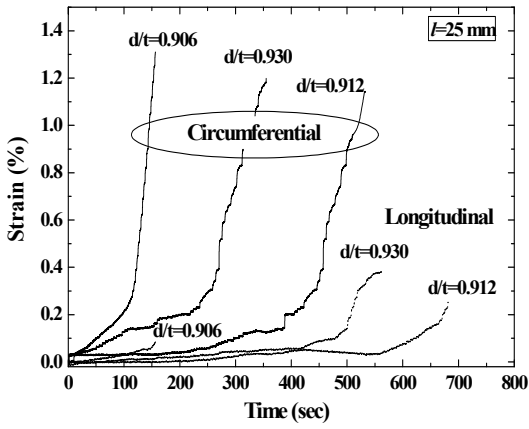


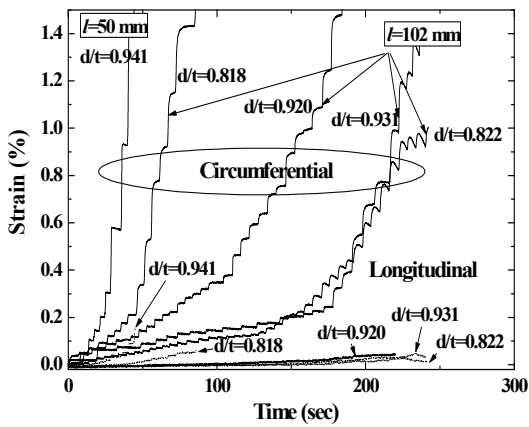
Fig. 8 Relationship of stress and strain according to wall thinning ratio and wall thinning length from experimental. (a) $l=25$ and 50 mm, (b) $l=102$ mm

Fig. 9는 실험에서 얻어진 변형율과 시간과의 관계를 나타낸다. 감육 길이 및 감육비에 관계없이 원주방향의 변형율은 급격하게 증가하고 있지만, 길이방향의 변형율은 파손이 발생 할 때까지

0.2%에 미치지 않는 아주 작은 변형을 나타내고 있다. 따라서 감육 직관은 뒤에서 보여주는 파손 사진과 같이 길이 방향으로 파열되면서 원주방향의 큰 변형이 나타난다.



(a)



(b)

Fig. 9 Relationship of strain and time according to wall thinning ratio and wall thinning length from experimental. (a) $l=25$ mm, (b) $l=50$ and 102 mm

계산에서 얻어진 변형률 0.2%의 내압과 감육비와의 관계에서 한계 감육 두께를 구하여 Table 2에 나타낸다. 운전 압력과 설계 압력에서 감육 길이에 대한 한계 감육비는 거의 비슷한 것을 알 수

있었다. 따라서 운전 압력에 대한 배관의 안전성은 감육 길이보다는 감육 깊이에 의존성이 크다는 것을 알 수 있다.

Table 2 Wall thinning limit thickness from relationship between internal pressure and wall thinning ratio at 0.2% strain from FEM

l (mm)	P (MPa)	d/t	d (mm)
25	15	0.764	3.90
	6.2	0.904	4.61
102	15	0.752	3.83
	6.2	0.903	4.60

내압과 감육비와의 관계를 Fig. 10에 나타낸다. 그림에서 실선 및 점선은 Table 2에서 변형률 0.2%에서의 내압과 감육비와의 관계이다. 여기서, 실선은 감육 길이 $l=25$ mm이고, 점선은 감육 길이 $l=102$ mm이다. 이것을 운전 압력과 설계 압력에서 안전하게 사용할 수 있는 범위를 나타낸 것이 빗금친 부분이다. 빗금친 부분에 해당하는 감육비를 가지는 배관이면, 운전 압력과 설계 압력에서 각각 파손 또는 파괴없이 안전하게 사용할 수 있다. 실험에서 얻어진 변형률 0.2%에서의 내압과의 관계를 Fig. 10에 ○, ◇ 및 △로 나타내었다. 그림에서 ○, ◇ 및 △은 각각 감육 길이 $l = 25, 50$ 및 102 mm의 결과를 나타낸다. 감육 길이 $l=25$ mm의 감육비 $d/t=0.906, 0.912$ 및 0.93 , $l=50$ mm의 감육비 $d/t=0.941$ 은 운전 압력 6.2 MPa의 안전영역 한계 조건을 벗어나므로 모두 파손 또는 파괴되었다. 감육 길이 $l=102$ mm의 $d/t=0.822$ 및 0.818 은 운전압력 6.2 MPa 이하에서는 파손 또는 파괴가 발생하지 않았고, 그 이후의 압력에서 파괴가 발생하였다. 그러나 감육 길이 $l=102$ mm의 감육비 $d/t=0.92$ 는 파괴가 발생하였다. 그림에서 변형률 0.2%에서의 내압은 계산이 실험보다 약간 크게 위험측으로 평가하고 있으나, 실험상의 제반 조건 등을 고려하면 내압이 작용하는 감육 배관의 안전성을 평가할 수 있다고 판단된다.

Fig. 11은 감육 길이 $l=25, 50$ 및 102 mm 직관의 대표적인 파손 상황을 나타낸 것이다. (a)는 감육 길이 $l=25$ mm의 감육비 $d/t=0.930$ 으로 감육부의 중앙부에 부풀음이 발생하여 파손하였다. (b) 및 (c)는 감육 길이 $l=25$ 및 102 mm의 감육비 $d/t=0.941$ 및 0.920 으로 감육부 중앙부에 길이 방향으로 균열이 발생하여 원주 방향으로 큰 변형을 동반하며 파손하였다.

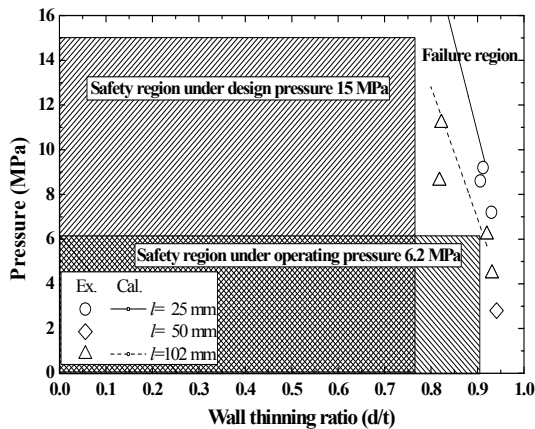


Fig. 10 Criterion of safety evaluation by pressure and wall thinning ratio on straight pipe

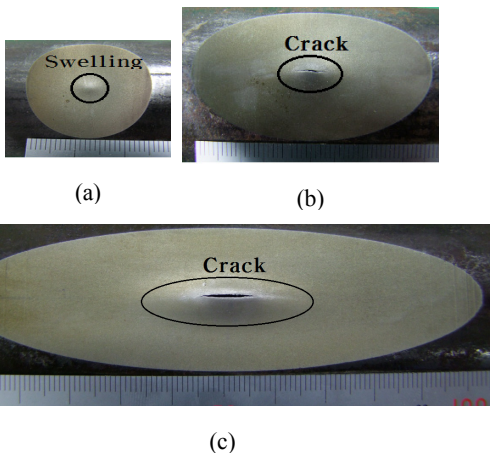


Fig. 11 Appearance of ruptured pipes. (a) SP-10 ($l=25$ mm, $d/t=0.930$), (b) SP-11($l=50$ mm, $d/t=0.941$), (c) SP-15($l=102$ mm, $d/t=0.920$)

4. 결 론

본 연구에서는 고온·고압수나 증기가 고속으로 흐르는 배관은 침식/부식에 의하여 국부적으로 감육하기 쉽다. 이러한 상황을 고려하여, 내압을 받는 외부 감육 직관의 파손거동을 계산 및 실험으로 평가하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

- (1) 내압과 변형률의 관계는 감육 길이에 관계없이 감육비의 의존성을 나타내어, 감육비가 클수록 파손에 필요한 내압이 작은 것을 알 수 있었다.
- (2) 팽창량은 감육 길이에 관계없이 감육비가 큰 배관이 약간 증가하는 것을 알 수 있었고, 파손까지의 팽창량은 감육 길이 및 감육비의 의존성을 나타내는 것으로 나타났다.
- (3) 실험에서 얻어진 응력-변형률 곡선에서 원주방향의 응력은 감육 길이가 길어질수록 작아지는 경향을 나타내었다. 길이방향의 응력은 파단까지 선형을 유지하며, 파단 할 때까지 응력은 증가하지만, 변형은 거의 없었다.
- (4) 운전 압력과 설계 압력에서 감육 길이에 대한 한계 감육비는 거의 비슷하였으며, 운전 압력에 대한 배관의 안전성은 감육 길이보다는 감육 깊이에 의존하였다.
- (5) 내압과 감육비의 관계에서 운전 압력 및 설계 압력에서 안전하게 사용할 수 있는 범위를 도출하였다.

References

1. S. K. Park and Y. H. Lee, 2008, "Application of Thin-Walled Tubes Using Guided Wave", Journal of the Korea Society For Power System Engineering, Vol. 12, pp. 58-65.
2. M. S. Sohn, W. R. Lee, S. K. Lee, J. S. Lee and S. K. Lee, 2003, "Identification of noise source from main steam line in power plant", Journal of the Korea Society For Power System Engineering, Vol. 7, pp. 23-28.
3. K. W. Nam, S. H. Ahn, Y. S. Yoo and K. Ando, 2002, "Crack opening behavior of penetrated

- crack under cyclic or monotonic loading”, Nuclear Engineering and Design, Vol. 214, pp. 221-229.
4. Y. S. Yoo, H. Shimano, S. H. Ji, K. Ando, A. Okamoto and K. Asao, 1999, "The Evaluation of LBB Behavior and Crack Opening Displacement on Statically Indeterminate Piping System Subjected to Monotonic Load", J. of High Pressure Institute of Japan, Vol. 37, No. 6, pp. 418-426.
 5. K. Matsumoto, S. Nakamura and N. Gotoh, 1991, "Study on Crack Opening Area and Coolant Leak Rates on Pipe Cracks", Int. J. Pres. ves. & Piping. Vol. 46, pp. 35-50.
 6. K. Hasegawa, A. Okamoto, H. Yokota, Y. Yamamoto, K. Shibata, T. Oshibe and K. Matsumura, 1991, "Crack Opening Area of Pressurized Pipe for Leak-Before-Break Evaluation", JSME. International Journal, Vol. 34, pp. 332-338.
 7. K. W. Nam, S. H. Ahn, 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.
 8. K. Miyazaki, A. Nebu, S. Kanno, M. Ishiwata and K. Hasegawa, 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. 8-18.
 9. M. Shiratori, M. Yakura, N. Ogasawara, I. Nakamura and A. Otani, 2001, "Failure Analysis of Degraded Piping Against Seismic Loading", Trans. Japan Soc. Mech. Eng. A, Vol. 67, No. 654, pp. 209-215.
 10. J. F. Mathonet, J. M. Cherasse, C. L. Leblois and M. A. Guyrtee, 1995, "Belgian Methodology for Evaluation of Erosion Corrosion Phenomena in Units 1, 2, 3 and 4 of the Doel Nuclear Power Plant(NPP)", ASME PVP, Vol. 304, pp. 393-399.
 11. K. Hasegawa, S. Kanno, A. Hirano, N. Gotoh and T. Saito, 1992, "Acceptance Size of Erosion Thinning in Carbon Steel Pipes Subjected to Internal Pressure and Tensile Load", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.29, No. 11, pp. 1080-1085.
 12. S. H. Ahn, K. Ando, M. Ishiwata and 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, No. 4, pp. 225-233.
 13. S. H. Ahn, K. C. Seok and K. W. Nam, 2007, "Study on Experimental Evaluation for Fracture Behavior of Carbon Steel Pipes for High Pressure Service with Local Wall Thinning", Key Engineering Materials, Vols. 345-346, pp. 1349-1352.
 14. S. H. Ahn, G. C. Seok and K. W. Nam, 2007, "Characteristics of Strength and Deformation of Inner/Outer Local Wall Thinned Straight Pipes", Key Engineering Materials, Vols. 353-358, pp. 559-562.
 15. S. H. Ahn, K. C. Seok and K. W. Nam, 2007, "Effect of Local Wall Thinned Location due to Erosion-Corrosion on Fracture Behavior of Pipes", J. Ocean Engineering and Technology of Korea, Vol. 21, No. 1, pp. 75-80.
 16. M.S. Yoon, J. W. Kim and J. S. Kim, 2012, "Fatigue Failure Behavior of Pipe Bends with Local Wall-Thinning Under Cyclic Bending Condition", Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 36, No. 10, pp. 1109-1295.
 17. K. Miyazaki, S. Kanno, M. Ishiwata, K. Hasegawa, S. H. Ahn and K. Ando, 1999, "Fracture behavior of carbon steel pipe with local wall thinning subjected to bending load" Nuclear Engineering and Design, Vol. 191, pp. 195-204.