

내압을 받는 외부 국부 감육 T-joint 배관의 파손거동 Failure Behavior of T-joint Pipe with Outer Local Wall Thinning under Internal Pressure

김수영* · 남기우***†

Soo-Young Kim* and Ki-Woo Nam***†

(접수일 : 2014년 4월 14일, 수정일 : 2014년 8월 21일, 채택확정 : 2014년 8월 22일)

Abstract: The pipelines are apt to erosion or corrosion because of the high-speed flow of water and steam with high temperatures or high pressures. This study was carried out a finite element analysis (FEA) and an experimental for the fracture behavior of T-joint pipes with local wall thinning under internal pressure. Local wall thinning was machined on the pipes in order to simulate erosion and corrosion of the metal. The configurations of the eroded area included an eroded ratio of $d/t=0.80\sim 0.963$ and an eroded length of $l=25$ mm, 50 mm, and 102 mm. Three-dimensional elastic-plastic analyses were also carried out using FEA, which accurately simulates failure behaviors. In regards to the relationship between pressure and eroded, the criterion that indicates what can be used safely under operating pressure and design pressure were obtained from FEA. The FEA results were in relatively good agreement with that of the experiment.

Key Words : Internal pressure, Outer wall thinning, T-joint pipe, FEA, Erosion/corrosion, Failure behavior

1. 서 론

현대 사회는 생활 및 산업 용수를 사용하기 위하여 수 많은 배관을 사용하고 있다. 이러한 배관은 냉·온수를 장시간 사용함으로써 오염된 용수에 의하여 부식, 감육 및 파손이 빈번하게 발생하고 있다. 이와 같이 배관에서 자주 발견되는 감육 현상은 유동가속부식(FAC, Flow Accelerated Corrosion)에 의하여 발생되며, 배관의 건전성을 저해하는 중요한 원인 중 하나이다.¹⁻³⁾ 특히 대형 선박 및 발전 플랜트의 배관은 고온·고압수나 증기가 고속으로 흐르고 있기 때문에, 침식/부식

에 의하여 국부적인 감육이 발생하기 쉽다.⁴⁾ 이러한 국부적인 감육에 의하여 배관 시스템의 신뢰성이 저하할 가능성이 많다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 배관의 감육에 대하여 많은 연구가 실시되고 있다.⁵⁻⁷⁾ 지금까지, 국부 감육 탄소강 배관의 연구는 배관의 소성 붕괴 거동과 강도를 평가하기 위하여 실시되었으나,⁸⁻¹⁰⁾ 내압이 작용하는 감육 배관의 파손 거동에 관한 연구는 많지 않다.¹¹⁾ 감육은 일반적으로 배관 내부에 발생한다. 그러나 감육을 인공적으로 배관 내부에 가공하는 것은 쉽지 않기 때문에, 외부를 감육하여 실험을 실시하고 있다.

*** 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 Nat'l Univ.

본 연구는 내압을 받는 T-joint 배관에서 감육이 발생한 경우를 고려하여, 파손거동을 유한요소해석 및 실험으로 평가하고, 감육 T-joint 배관의 안전 운전 범위를 제시하였다.

2. 시험편 및 실험과 해석방법

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. T-joint 배관시험편의 형상과 치수를 Fig. 1에 나타낸다. 또 T-joint 배관시험편의 감육 치수를 Table 1에 나타낸다. 여기서 두께t에 대한 감육깊이d의 비율을 감육비d/t로 정의하였다. 실제로 감육현상은 대개 배관의 내부에서 발생한다. 그러나 본 연구에서는 감육결함을 배관의 외측에 기계적으로 가공하였다. 이것은 배관 외부 및 내부에 감육결함을 가공한 배관의 파괴거동에서 거의 동일한 결과를 나타내기 때문이다.

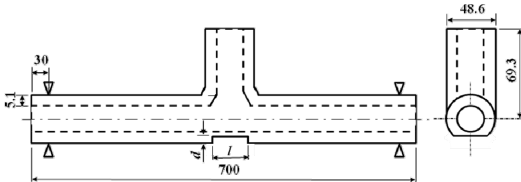


Fig. 1 Shape and dimensions of T-joint pipe specimen

2.2 유한요소해석 및 실험 방법

본 연구의 해석 모델은 실험에 사용한 국부 감육 T-joint 배관이다. 모델 작성 및 요소 분할 전처리, 실제로 계산하는 해석은 ANSYS ver 11.0을 사용하였다. 모델링은 육면체 20절점 요소와 사면체 10절점 요소로서, 대칭성을 고려하여 1/4 배관 모델을 만들었다. 감육부의 모델 요소는 상세하게 분할하였다. T-joint 배관의 1/4 해석 모델 예를 Fig. 2(a)에 나타내고, 감육부의 확대를 Fig. 2(b)에 나타내었다. 탄소성해석에 사용한 항복조건은 von Mises의 항복 조건을 사용하였다. 해석은 내압을 변화시키면서, 변위를 구하였다. 입력한 재료 데

Table 1 Specimen geometries

Specimen No.	Wall thinning ratio, d/t	Eroded length l (mm)
FEA	TP-1	0.00
	TP-2	0.80
	TP-3	0.88
	TP-4	0.92
	TP-5	0.92
	TP-6	0.80
	TP-7	0.88
	TP-8	0.92
Exp.	TP-9	0.856
	TP-10	0.917
	TP-11	0.963
	TP-12	0.957
	TP-13	0.844
	TP-14	0.933
	TP-15	0.943

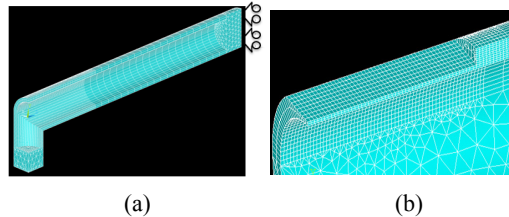


Fig. 2 An example of the FEA model. (a) 1/4 modelling, (b) Detail of thinning part

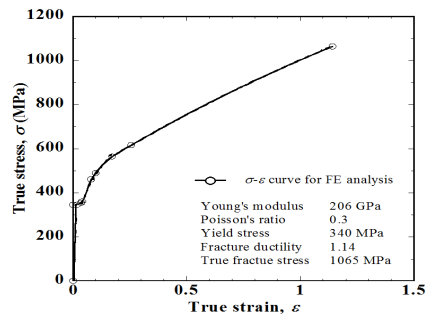


Fig. 3 True stress-true strain curve for FEA

이터는 실험에 사용한 SPPH370 고압탄소강 배관이고, 진응력과 진스트레인의 관계를 다직선 근사한 그래프를 Fig. 3에 나타내었다. 인장 시험에서 균일 연신 영역에서는 체적 일정 조건을 가정하여 공칭 응력에서 진응력을 계산하였다. 마찬가지로

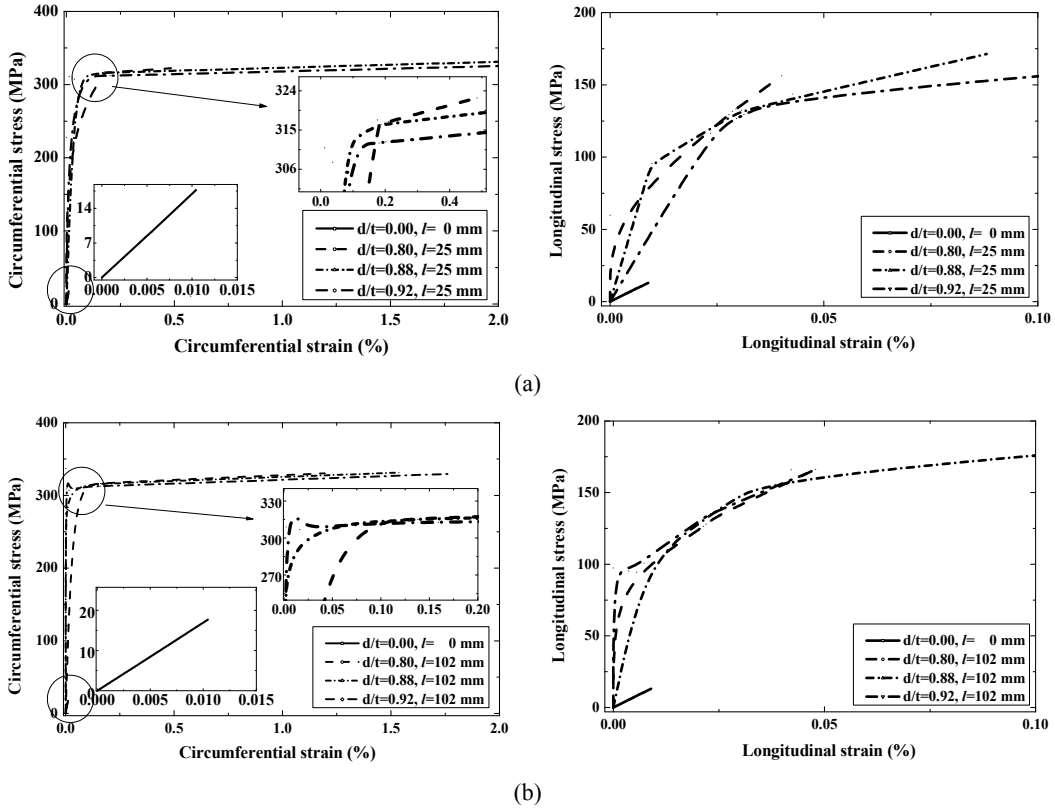


Fig. 4 Relationship of stress and strain according to wall thinning length from FEA. (a) Wall thinning length $l=25$ mm, (b) Wall thinning length $l=102$ mm

로 대수 스트레인 은 진스트레인으로 하였다. 또한, 본 해석에서는 등방 경화 법칙을 이용하였다. 영률은 206 GPa, 포아송비는 0.3으로 하였다.

실험은 외부 감육 T-joint 배관 시험편을 밀봉하고, 실온 대기 중에서 수동 펌프로 내압을 16 MPa 까지 가하였다. 배관의 내압은 압력 게이지를 조절 하였으며, 감육부의 변형률은 2축 스트레인 게이지를 사용하여 원주방향 및 종방향으로 측정하였다. 이때 변형률과 압력은 1초당 10개의 데이터를 계속하여 저장하였다. 이때 배관 길이는 700 mm 이고, 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, 감육

비가 다른 T-joint 배관에 대하여 유한요소해석을 실시하여 얻어진 원주방향의 응력-변형률 선도를 나타낸다. 응력-변형률은 감육부 중앙에서 0.0002 mm 위치의 값이다. 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 결과이며, Fig. 4(b)는 감육 길이 $l=102$ mm의 결과이다. 감육 길이 $l=25$ mm인 Fig. 4(a)의 원주방향 응력은 감육비에 관계 없이 약 310 MPa까지 선형적으로 증가하고, 이때의 변형률은 약 0.075%였다. 그 후 급격하게 변형하여 과열하였다.

급격한 변형률의 증가는 배관에 항복이 발생하기 시작하는 것을 의미하고, 탄성영역을 지나서 항복이 발생하였기 때문에 구조물은 안전성과 신뢰성을 잃고 파손이 시작되는 영역이다. 종방향의

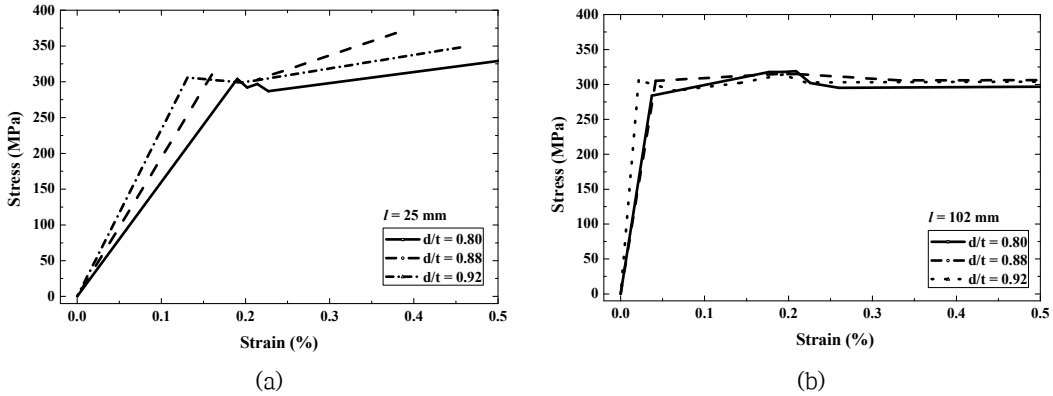


Fig. 5 Relationship of stress and strain according to wall thinning length from von Mises yield criterion.
 (a) Wall thinning length $l=25$ mm, (b) Wall thinning length $l=102$ mm

응력 및 변형률은 각각 130 MPa 및 0.03%까지 선형적으로 증가한 후 파손하였다. 이것은 원주방향에 비하여 응력은 42%, 변형률은 40%였다. 한편 감육 길이 $l=102$ mm인 Fig. 4(b)의 원주방향 응력은 감육비에 관계없이 감육 길이 $l=25$ mm와 같이 약 310 MPa까지 선형적으로 증가하였으나, 원주방향의 변형률은 각각 약 0.01%($d/t=0.92$), 0.025%($d/t=0.88$) 및 0.1%($d/t=0.80$)를 지나면서 급격하게 변형하여 파열하였다. 그러나 종방향의 응력은 약 100 MPa이며, 이때의 변형률은 모두 약 0.01%였다. 무감육 배관은 원주방향 및 종방향의 응력 및 변형률은 각각 약 18 MPa 및 0.01%, 약 12MPa 및 0.009%를 나타내어, 감육 배관에 비하여 매우 작은 값을 나타내었다. Fig. 4(a), (b)에서 항복 응력은 감육 길이에 관계없이 원주방향은 약 310 MPa, 종방향은 약 100 MPa로서 거의 같았다. 그러나 변형률은 감육 길이가 길어짐에 따라서 작아지고, 동일한 감육 길이에서 감육비가 커질수록 작아졌다. 이 결과에서 내압이 작용하는 감육 배관의 파손은 종방향보다 원주방향의 응력과 변형률에 크게 의존하였다.

Fig. 5는 Mises 항복 조건에서 얻어진 응력-변형률을 감육 길이에 대하여 감육비를 변수로 나타낸 것이다. (a)와 (b)에서 감육 길이가 작은 경우에는 감육비가 클수록 변형률이 약간 작아지는 경향을 나타내고 있으나, 감육 길이가 긴 경우는 감

육비의 영향이 거의 없었다. 그리고 항복이 발생하는 응력은 (a)와 (b)가 비슷하였으나, 변형률은 (a)가 크게 나타났다. 이것은 짧은 감육 길이는 국부적으로 응력이 크게 집중하여 발생하고, 긴 것은 응력의 분산이 많은 것이다.

Fig. 6은 내압과 변형률과의 관계를 나타낸다. 그림에서 점선은 운전압력 6.2 MPa를 나타낸다.

압력에 대한 변형률은 감육 길이에 관계없이 감육비의 의존성을 나타내고 있다. 즉, 감육비 $d/t=0.80$ 및 0.88은 감육 길이에 관계없이 비슷한 변형률을 나타내고 있다. 그러나 $d/t=0.92$ 에서 감육 길이 $l=25$ 와 50 mm는 비슷한 변형율을 나타내지만, $l=102$ mm는 매우 작은 변형율을 나타내었

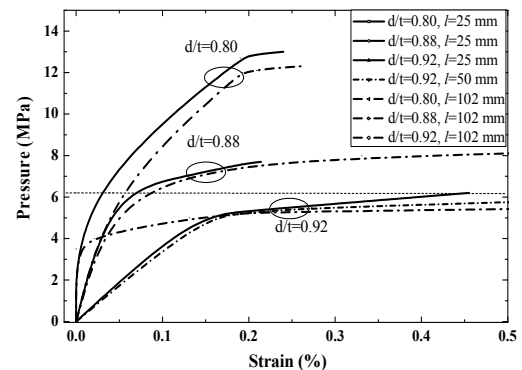


Fig. 6 Relationship of between strain and pressure from wall thinning ratio and wall thinning length

다. 동일한 감육 길이에서는 감육비가 적을수록 파손에 큰 내압이 필요하였다. 또한, 압력과 변형률의 관계는 감육비가 증가함에 따라서 변형률이 증가하였다. 그러나 감육 길이 $l=102$ mm의 $d/t=0.92$ 는 매우 작은 변형을 나타내었다. 이것은 어떤 일정한 길이 이상으로 감육되면, 작은 변형율에서 파손이 발생한다는 것을 의미한다.

감육비 $d/t=0.92$ 는 운전압력 6.2 MPa 이하에서 모두 파괴가 발생하였다. $d/t=0.80$ 과 0.88은 운전압력 6.2 MPa에서 파괴가 발생하지 않으나, 그 이상의 압력에서는 파괴가 발생하였다. 3종류의 시험편은 설계압력 15 MPa 이하에서 모두 파괴가 발

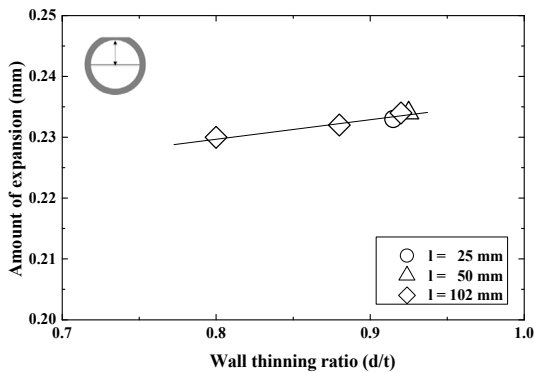
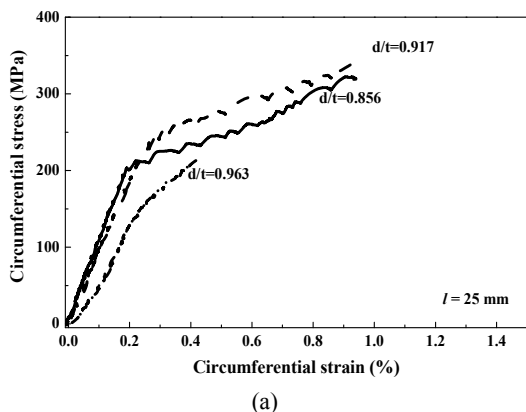


Fig. 7 Relationship of between the amount of expansion and wall thinning ratio from FEA.



생하였다.

감육 길이 $l = 25, 50$ 및 102 mm의 T-joint 배관의 팽창량과 감육비와의 관계를 Fig. 7에 나타낸다. 이것은 내압을 약 5.4 MPa 가했을 때, 응력이 약 308 MPa로 나타난 경우이다. 이 그림에서 감육비가 증가할수록 팽창량은 선형적으로 증가하였다. $l = 102$ mm의 팽창량은 감육비 $d/t = 0.80$ 에서 0.23 mm, $d/t = 0.88$ 에서 0.232 mm, $d/t = 0.92$ 에서 0.234 mm를 나타내었다. 그리고 $l = 25$ 및 50 mm의 팽창량은 $d/t = 0.92$ 에서 각각 0.233 mm와 0.234로 나타나, 감육 길이에 관계없이 감육비에 따라서 비슷한 팽창량을 나타내었다.

Fig. 8은 T-joint 배관의 실험에서 얻어진 응력-변형률 곡선을 나타낸 것이다. (a), (b)는 각각 감육 길이 $l = 25, 50$ 및 102 mm의 결과이다. 항복은 변형률 약 0.2% 전후에서 나타나고 있으며, 응력은 약 200 MPa 전후를 나타내었다. 그리고 항복점의 응력은 감육비가 클 경우, 약간 저하는 경향을 나타내고 있다. 이와 같이 항복점의 응력이 차이가 나는 것은 유한요소해석은 Mises 항복 조건에 의하여 얻어진 것으로, 3개의 주응력 크기에 의존하여 얻어진 값이며, 실험은 원주방향의 응력을 나타낸 것이다.

Fig. 9는 계산과 실험에서 얻어진 항복점에서의 응력과 변형률을 나타낸다. 계산은 Mises 항복 조

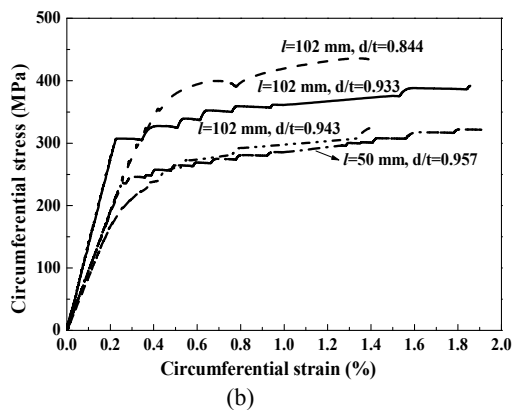


Fig. 8 Relationship of circumferential stress and circumferential strain according to wall thinning ratio and wall thinning length from experimental. (a) Wall thinning length $l=25$ mm, (b) Wall thinning length $l=50$ and 102 mm

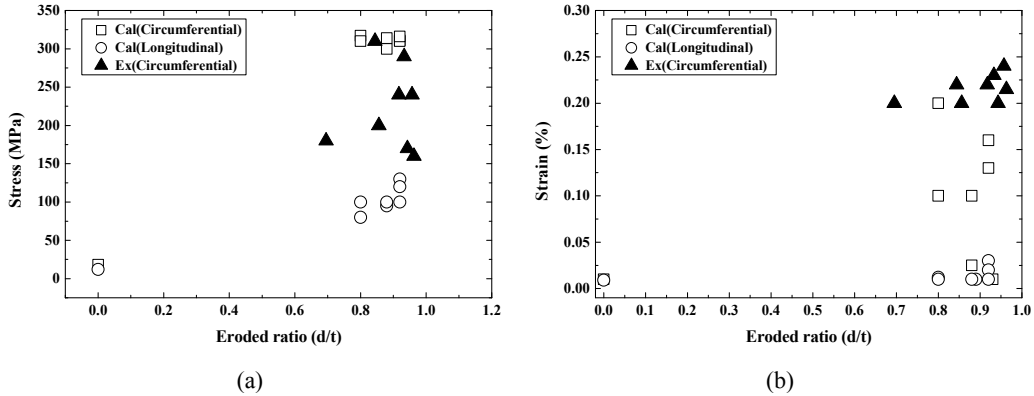


Fig. 9 Stress and strain at yield point from calculation and experiment. (a) Stress vs eroded ratio, (b) Strain vs eroded ratio

건에서 얻어진 것이다. 계산에서 응력은 원주 방향 약 310 MPa, 종방향 약 100 MPa이었으나, 실험에서 원주 방향의 응력은 160~310 MPa이었다. 그러나 변형률은 실험이 계산보다 크게 나타났다. 즉, 실험의 원주 방향은 0.2~0.24%, 계산의 원주 방향 0.01~0.2%, 종방향 0.01~0.03%였다. 이것은 계산과 실험의 방법상의 차다. 즉, 계산은 구속 조건에서 배관이 움직이지 못하고, 감육부의 변형만 나타났으나, 실험은 양단을 구속하였지만, 배관이 전체적으로 변형이 발생하기 때문에 차이가 나타났다.

항복점의 내압과 감육비와의 관계에서 유한요소해석으로 한계 감육 두께를 구하여 Table 2에 나타내었다. 운전 압력과 설계 압력에서 감육 길이에 대한 한계 감육비는 거의 비슷하였다. 따라서 운전 압력에 대한 배관의 안전성은 감육 길이보다는 감육 깊이에 의존성이 크다.

내압과 감육비와의 관계를 Fig. 10에 나타낸다. 그림에서 실선 및 점선은 계산에서 얻어진 항복

점에서의 내압과 감육비와의 관계이다. 여기서, 실선은 감육 길이 $l=25$ mm이고, 점선은 감육 길이 $l=102$ mm이다. 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 T-joint 배관이면, 운전 압력과 설계 압력에서 각각 파손 또는 파괴없이 안전하게 사용할 수 있다. 실험에서 얻어진 항복점에서의 내압을 Fig. 10에 나타내었다. 그림에서 ○, ◇ 및 △는 각각 감육 길이 $l = 25, 50$ 및 102 mm의 결과를 나타낸다.

Table 2 Wall thinning limit thickness at yield point from relationship between internal pressure and wall thinning ratio

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

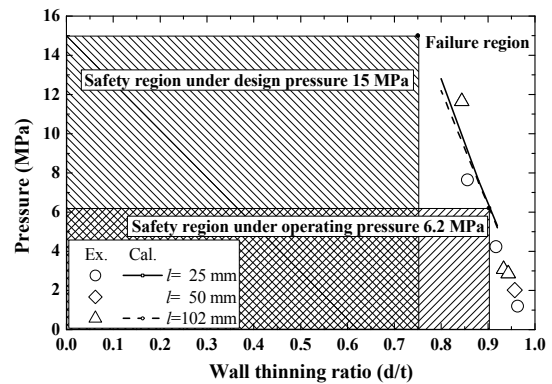


Fig. 10 Criterion of safety evaluation by pressure and wall thinning ratio

감육 길이 $l=25$ mm 및 102 mm에서 감육비 $d/t=0.856$ 및 0.844 는 운전압력 6.2 MPa 이하에서는 파손 또는 파괴가 발생하지 않았고, 그 이후의 압력에서 파괴가 발생하였다. 그리고 감육 길이 $l=50$ mm에서 감육비 $d/t=0.695$ 는 설계압력 15 MPa에서도 파손 또는 파괴가 발생하지 않았다. 그러나 나머지 시험편들은 그림의 안전 영역을 벗어난 곳에서 파괴가 발생하였다. 그림에서 항복점에서의 내압은 유한요소해석이 실험보다 약간 크게 위험측으로 평가하고 있으나, 실험상의 제반 조건 등을 고려하면 내압이 작용하는 T-joint 감육 배관의 안전성을 평가할 수 있다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 냉·온수를 장시간 사용함으로써 오염된 용수에 의하여 침식 또는 부식에 의하여 배관이 국부적으로 감육하기 쉬운 것을 고려하여, 내압을 받는 외부 국부 감육 T-joint 배관의 파손 거동을 유한요소해석 및 실험으로 평가하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

- (1) 내압이 작용하는 감육 배관의 파손은 원주방향의 응력과 변형률에 크게 의존하였다.
- (2) 변형률은 감육 길이에 관계없이 감육비가 큰 것이 변형률이 증가하였고, 동일 감육 길이는 감육비가 적은 것이 파손에 큰 내압이 필요하였다.
- (3) 운전 압력과 설계 압력에서 감육 길이 $l=25$ 및 102 mm에 대한 한계 감육비는 거의 비슷하였으며, 배관의 안전성은 감육 길이에 의존하였다.
- (4) 운전 압력과 설계 압력에서 감육 길이 $l=25$ 및 102 mm를 가지는 T-joint 배관의 안전 운전 범위를 얻었다.

References

1. V. K. Chexal, J. Horowitz, R. B. Dooley, P. Millett, C. Wood and R. Jones, 1998, "Flow-Accelerated Corrosion in Power

- Plant," EPRI/TR-106611-R2.
2. R. B. Dooley and V. K. Chexal, 2000, "Flow-accelerated corrosion of pressure vessels in fossil plants", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 77, pp. 85-90.
3. F. Michel, H. Reck and H. Schulz, 2001, "Experience with piping in German NPPs with Respect to Ageing-Related Aspects.," Nuclear Engineering and Design, Vol. 207, pp. 307-316.
4. K. W. Nam, S. H. Ahn and J. Y. Do, 2010, "Analysis of Weld Beads for Wall Thinning Defects in the Weld Zone of the Boost Pump Recirculation Pipe for Power Plants and Evaluation of Their Integrity" Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 24, pp. 38-46.
5. K. W. Nam, 2010, "Leak Before Break Behavior and Crack Opening Displacement on Piping under Bending Load", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 34, pp. 725-730.
6. S. H. Ahn, K. W. Nam, Y. S. Yoo, K. Ando, S. H. Ji, K. 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.
7. M. Ono, K. W. Nam, K. Takahashi and K. Ando, 2004, "Effect of Local Wall Thinning on Fracture Behavior of Straight Pipe", The 15th European Conference of Fracture - Advanced Fracture Mechanics for Life and Safety Assessments, Stockholm, Sweden, August 11-13.
8. S. H. Ahn, K. Ando, M. Ishiwata and K. Hasegawa, 1998, "Plastic collapse behavior of pipes with local wall thinning subjected to bending load and allowable limit", Journal of High Pressure Institute of Japan, Vol. 36, pp. 225-233.
9. 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.
10. K. Miyazaki, A. Nebu, M. Ishiwata and K. Hasegawa, 2002, "Fracture strength and behavior of carbon steel pipes with local wall thinning subjected to cyclic bending load", Nuclear Engineering and Design, Vol. 214, pp. 127-136.
 11. S. Y. Kim, J. W. Lee and K. W. Nam, 2014, "Failure Criterion of Straight Pipe with Outer Local Wall Thinning under Internal Pressure" Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 18, pp. 76-83.