

감육배관의 파괴거동 평가

안석환* · 남기우** · 김선진* · 김현수*** · 김진환*** · 도재윤***

Fracture Behavior Evaluation of Pipes with Local Wall Thinning

S.H. Ahn, K.W. Nam, S.J. Kim, H.S. Kim, J.H. Kim and J.Y. Do

Key Words: Local Wall Thinning(국부감육), Failure mode(파괴양식), Pipe(배관), Bending Load(굽힘하중), Fracture Behavior(파괴거동), Allowance Limit(허용한계)

Abstract

Fracture behaviors of pipes with local wall thinning is very important for the integrity of nuclear power plant. In pipes of energy plants, sometimes, the local wall thinning may result from severe erosion-corrosion damage. However, effect of local wall thinning on strength and fracture behaviors of piping system were not well studied. In this paper, the monotonic bending tests were performed of full-scale carbon steel pipes with local wall thinning. A monotonic bending load was applied to straight pipe specimens by four-point loading at ambient temperature without internal pressure. From the tests, fracture behaviors and fracture strength of locally thinned pipe were manifested systematically. The observed failure modes were divided into four types; ovalization, ovalization+cracking, local buckling and local buckling+cracking. Also, maximum load was successfully evaluated.

1. 서론

발전시설 등의 에너지 관련 플랜트에 사용되는 배관은 플랜트의 성능이나 안전성유지에 있어서 중요한 설비의 일부이다. 그와 같은 이유 때문에 배관의 건전성유지에 대해서는 예방 및 보전을 위한 기술 등에 의한 특별한 배려가 행하여져 왔다. 그러나, 에너지 관련 플랜트의 배관은 사용기간 중에 여러 가지 종류의 열화손상을 받을 우려가 있고, Erosion-Corrosion(E/C)에 의해

발생하는 국부적인 손상인 감육(local wall thinning)도 그 중 하나이다¹⁾. 이러한 국부적인 감육 현상은 배관의 안전과 성능유지를 위해 중요하며, 세계 각 국에서 심각한 문제로 대두되고 있고, 감육의 허용기준 안 등이 검토되어지고 있다²⁻⁴⁾. 그러나, 배관에 국부적인 감육부가 발생하였을 때의 배관의 강도와 파괴기구를 해명하기 위한 계통적인 실험 연구의 예는 극히 적고, 또한 그 특성의 해명이 거의 이루어지지 않고 있다^{5,6)}.

따라서, 본 연구에서는 탄소강배관에 기계적으로 감육부를 가공하여 감육부의 형상이나 감육의 정도가 배관의 강도 및 파괴기구에 어떠한 영향을 미치는가를 정량적으로 해명하기 위하여, 계통적인 실험 연구를 실시하였다.

* 부경대 기계공학부

** 부경대 재료공학부

*** 부경대 재료공학부 대학원

2. 재료 및 실험방법

2.1 재료

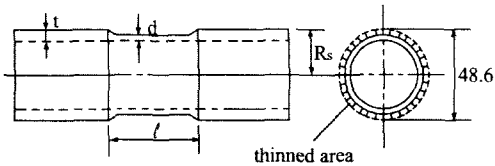
본 실험에 사용된 재료는 직경 48.6 mm인 Schedule 80 SPPH38 고압탄소강배관(Carbon Steel Pipes for High Pressure Service; KS Standard D-3564)이다. 그 기계적 성질 및 화학 성분을 각각 Table 1 과 2에 나타낸다. 그리고, 감육부의 강도 및 파괴기구에 대한 규명을 하기 위해 사용한 시험편의 형상을 Fig. 1(a), (b)에 나타낸다. Fig. 1(a)는 360° 전주에 걸쳐서 감육가공을 한 경우이고, Fig. 1(b)는 길이방향으로 감육의 깊이가 다르도록 가공하였고, 중심부에서의 감육의 깊이가 d_{max} 가 되게 하였다. Table 3에 시험편의 치수를 나타낸다.

Table 1 Mechanical properties

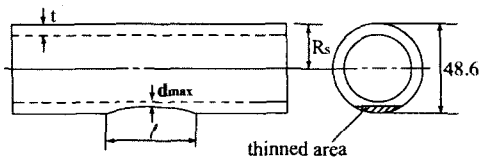
| Material | Tensile strength (σ_u) | Yield strength (σ_y) | Elongation |
|----------|---------------------------------|-------------------------------|------------|
| SPPH38 | 373 MPa | 216 MPa | 27 % |

Table 2 Chemical compositions [wt%]

| Material | C | Si | Mn | P | S |
|----------|------|------|------|-------|-------|
| SPPH38 | 0.25 | 0.25 | 0.43 | 0.035 | 0.035 |



(a) 360° circumferentially thinned specimen



(b) Partially thinned specimen with the different depth

Fig. 1 Pipe specimens with local wall thinning

2.2 실험방법

Fig. 1과 같은 시험편에 Fig.2 와 같이 4점굽힘 시험을 실시하였다. 이때, 부하 span 길이는 150 mm, 지지 span 길이는 600 mm로 하였고, crosshead 변위 속도는 1 mm/min의 변위 제어에 의해 실온 대기 중에서 실시하였다. 지지용 지그는 하중이 동일 위치에 부하될 수 있도록 하기 위하여 rollguide로 제작하였다. 시험시에 하중과 하중점변위를 측정하였다. 단, 내압은 고려하지 않았다.

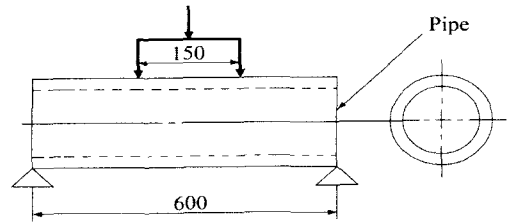


Fig. 2 Four-point bending test

3. 결과 및 고찰

3.1 실단면 응력 기준

국부 감육부를 가지는 SPPH38 탄소강시험편에 대한 굽힘시험의 결과를 Table 3에 정리하여 나타낸다. Table 3에서 M_{max} 는 실험으로부터 구한 각 감육시험편에서의 최대굽힘모우멘트를 나타낸다. 그리고, M_{PC} 는 소성붕괴모우멘트로서 실단면 응력 기준(net-section stress criterion)을 사용하여 구한 계산치이다. 이때, 실단면 응력 기준에 의하여 구한 이론식은 식(1)과 같이 주어진다.

$$M_{PC} = 2 R^2 t \sigma_f [2 \sin \beta + (\pi - 2\beta) \cos \beta] - [A r \sigma_f] \quad (1)$$

where,

$$\beta = \left(\frac{\pi}{2} \right) - \left(\frac{A}{4Rt} \right)$$

$$A = R_s^2 \theta - R_s^2 \cos \theta \sin \theta$$

$$r = R \cos \beta + \left(\frac{2 R_s}{3} \right) \left[\frac{\sin^3 \theta}{\theta - \sin \theta \cos \theta} \right]$$

$$R = R_s - \left(\frac{t}{2} \right)$$

여기서, β 는 중립축 반각, A는 감육된 면적, R은 평균반경, R_s 는 외측반경, θ 는 감육된 반각 (radian), r은 모우멘트 암 (arm), t는 배관 두께를 각각 나타낸다. 그리고, σ_f 는 유동응력으로서 식 (2)와 같이 주어진다.

$$\sigma_f = \left(\frac{\sigma_u + \sigma_y}{2} \right) \quad (2)$$

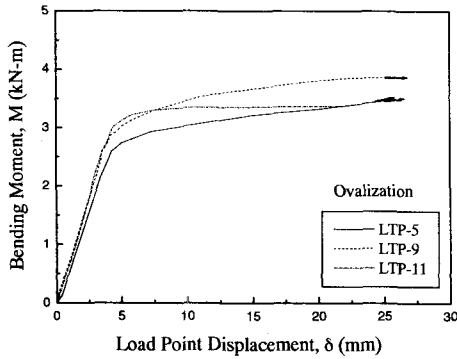
여기서, σ_u 는 인장응력을 σ_y 는 항복응력을 각각 나타내며, Table 1에 나타낸 SPPH38의 기계적특성치를 이용하였다.

3.2 감육배관의 파괴양식

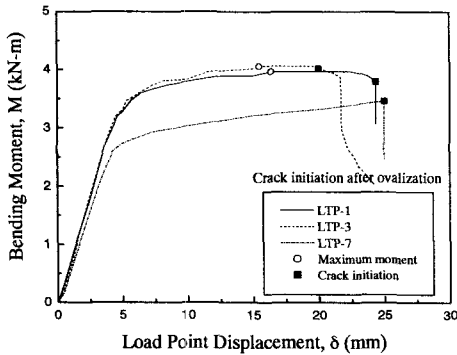
배관의 감육부에 배관의 감육부에 단조굽힘하중을 부하한 결과, 편평화, 국부좌굴, 균열발생과 같은 파괴 양식이 나타났다. Fig. 3(a)~(d)는 4점

굽힘시험에 의한 모우멘트(M)-하중점변위(δ)선도를 나타낸다.

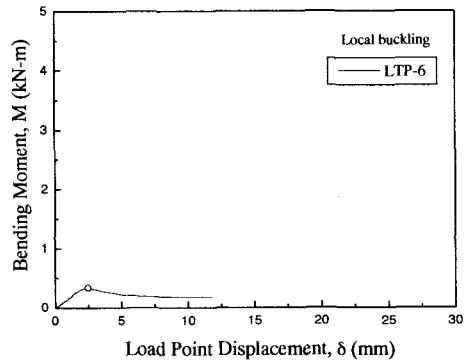
Fig. 3(a)는 편평화가 발생하여 파괴된 경우이다. 그림 속의 화살표는 부하되는 하중이 계속 증가하고 있음을 나타낸다. LPT-5는 $d/t=0.196$ 인 경우로서 감육결함이 없는 건전배관인 LPT-11과 거의 동일한 결과를 나타내고 있다. LPT-9는 다른 감육시험편과는 달리 원주방향으로 부분적으로 감육결함을 상징한 경우로서 하중부하방향에 대해서 인장측에 감육부를 놓이게 한 경우이다. 동일한 경우의 2개의 시험편을 시험하였고, 균열발생이 예상되었으나 균열이 발생하지 않은 반면에 편평화 현상이 지속되었다. 그러나, 시험 후



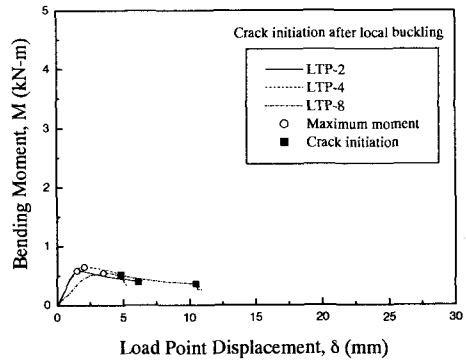
(a) The case of ovalization



(b) The case of crack initiation after ovalization



(c) The case of local buckling



(d) The case of crack initiation after local buckling

Fig. 3 Moment-displacement curves for locally thinned pipes

Table 3 Specimen geometries and test results

| Specimen No. | Half Outer Diameter | Wall Thickness | Thinned Depth | Axially Thinned Length | Thinned Angle | Maximum Moment by Exp. | Plastic Collapse Moment by Cal. | Plastic Collapse Moment Ratio | Failure Mode |
|--------------|---------------------|----------------|---------------|------------------------|----------------------|------------------------|---------------------------------|------------------------------------|--------------|
| | Rs(mm) | t(mm) | d(mm) | ℓ (mm) | $2\theta (^{\circ})$ | M_{max} (kN · m) | M_{pc} (kN · m) | $\frac{M_{max}(Exp)}{M_{pc}(Cal)}$ | |
| LTP-1 | 24.3 | 5.1 | 1.0 | 10 | 360 | 3.966 | 2.181 | 1.818 | OC |
| LTP-2 | " | " | 4.0 | 10 | " | 0.582 | 0.505 | 1.153 | BC |
| LTP-3 | " | " | 1.0 | 10 | " | 4.059 | 2.181 | 1.861 | OC |
| LTP-4 | " | " | 4.0 | 10 | " | 0.649 | 0.505 | 1.285 | BC |
| LTP-5 | " | " | 1.0 | 100 | " | 3.466 ↑ | 2.181 | 1.589 ↑ | O |
| LTP-6 | " | " | 4.0 | 100 | " | 0.341 | 0.505 | 0.675 | B |
| LTP-7 | " | " | 1.0 | 100 | " | 3.466 | 2.181 | 1.589 | OC |
| LTP-8 | " | " | 4.0 | 100 | " | 0.550 | 0.505 | 1.089 | BC |
| LTP-9 | " | " | 4.0 | 100 | 63.3 | 3.866 ↑ | 2.436 | 1.587 ↑ | O |
| LTP-11 | " | " | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 3.466 ↑ | 2.842 | 1.220 ↑ | O |

Note : OC=Crack initiation after ovalization

BC=Crack initiation after local buckling

O=Ovalization

B=Local buckling

시험편 표면을 조사해 본 결과 감육된 길이방향으로 좌굴현상이 관찰되었다. 따라서, 이후 길이 방향을 함수로 한 추가적인 시험이 필요하다고 생각된다. Fig. 3(b)는 편평화 발생 후 균열이 발생하여 파괴된 경우로서, 최대하중은 편평화에 의하여 결정되었다. 이러한 결과로 나타난 시험편들은 모두 감육깊이가 1mm인 $d/t=0.196$ 의 경우였다. 특히, LPT-1은 감육결함의 모서리를 rounding한 경우이며, LPT-3과 7은 non-rounding한 경우로서 모서리 부분에 응력의 집중으로 인하여 균열이 발생되었다. 그러나, LPT-1과 같이 모서리부분을 rounding하여 응력집중을 완하시켰음에도 불구하고 감육부의 정중앙부에 necking현상을 수반하면서 균열이 발생하였다. 균열은 모두 하중 부하방향에 대하여 인장측에서 발생하였고, 균열발생 후 하중은 급격히 저하되었다. Fig. 3(c)는 국부좌굴이 발생하여 파괴된 경우이다. 최대하중은 국부좌굴에 의해서 결정되어졌다. 최대하중 이후 하중이 감소하지만, 급격한 하중의 감소는 보이지 않고 어느 정도 소성변형을 수반하고 있음을 알 수 있다. Fig. 3(d)는 국부좌굴 발생 후에 균열이 발생하여 파괴된 경우이다. 이 경우의 시험편들은 모두 감육깊이가 4mm인 $d/t=0.784$ 의 경우로서 최대하중은 좌굴에 의하여 결정된 후 약간의 소성변형을 나타

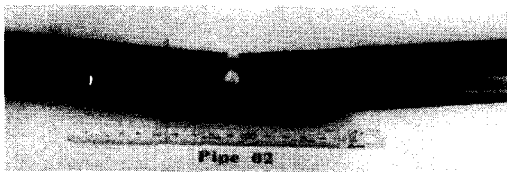
낸 후 균열이 발생되고 있음을 알 수 있다. 균열은 모두 인장측에서 발생하였다.

이상의 결과로부터, 360° 전주에 걸쳐 감육이 형성되었을 경우에는 d/t 의 비에 의해 감육부의 파괴 양식이 결정되어진다고 생각된다. 특히 감육부가 인장측에 형성되었을때는 균열발생이 용이해짐을 알 수 있다. 또한 감육부의 모서리를 non-rounding한 시험편의 경우에는 모두 균열이 발생하여 응력집중의 효과가 나타났다.

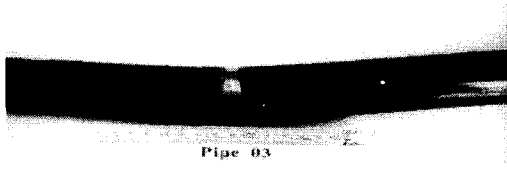
Fig. 4는 각 감육배관 시험편에 굽힘하중을 부하한 후 Fig. 3(a)~(d)에 나타내어진 거동을 보이면서 감육배관에 나타난 파괴 양상을 나타낸다.

3.3 감육배관의 파괴강도

Fig. 5에는 최대하중시의 모우멘트 M_{max} 와 식 (1)과 (2)를 이용하여 구한 소성붕괴모우멘트 M_{pc} 와의 관계를 나타낸다. 국부좌굴만이 발생하고 있는 경우를 제외하고는 이론치가 실험치를보수적으로 평가하고 있음을 알 수 있다. 그 결과는 편평화가 발생하였을때의 경우들에 있어서 더욱 보수적인 경향을 나타내고 있다. 그림 속의 M_y 는 감육결함이 없는 건전한 배관의 전소성모우멘트를 나타내고 있고, 소성단면계수와 항복강도의 곱으로 주어진다. 따라서, 건전배관의 전소성모우멘트보다도 상당히 보수적으로 평가되고 있는



(a) LTP-2 ($d/t=0.784$, $l=10\text{mm}$)

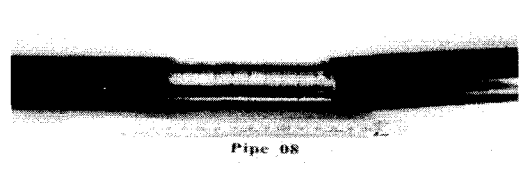


(b) LTP-3 ($d/t=0.196$, $l=10\text{mm}$)

upper : the front side / lower : the tensile side



(c) LTP-6 ($d/t=0.784$, $l=100\text{mm}$)



(d) LTP-8 ($d/t=0.784$, $l=100\text{mm}$)

upper : the front side / lower : the tensile side

Fig. 4 Fracture mode occurred of a pipe with locally thinned area

$M_{\max} \geq M_Y$ 인 경우들에 대해서 검토해보면, $M_{\max} = 1.5M_{PC}$ 를 만족하더라도 보수적임을 알 수 있다. 그러므로, 국부감육재의 경우에 있어서는 종래의 유동응력 σ_f 대신에 $1.5\sigma_f$ 를 이용하더라도 충분히 평가 가능하다는 것을 나타낸다. 단, 새롭게 제안된 유동응력 값의 타당성은 다양한 감육부 결합에 대해서 더 조사·검토할 필요가

있다. 또한, Net-section stress criterion이 상당히 보수적인 평가이며, 실단면을 적용한 평가이므로 금후 길이방향의 감육결합을 함께 parameter로 고려한 이론식의 적용이 필요하다고 생각된다.

3.4 감육배관의 허용한계

Fig. 6은 배관 감육부의 소성변형능력의 기준으로부터 구한 허용한계를 나타낸다. 횡축의 소성 회전각 ϕ_{\max} 는 최대하중시의 하중점에서의 소성 변위 δ_{\max} 를 이용하여 식 (3)으로부터 구하였다.

$$\phi_{\max} = \frac{4 \delta_{\max}}{L_0 - L_I} \quad (3)$$

여기서, L_0 는 지지 span 길이, L_I 는 부하 span 길이를 각각 나타낸다. 그리고, 종축의 M_{NP} 는 제안된 유동응력 $1.5\sigma_f$ 를 이용하여 구한 이론치이다. 그림 속에 나타낸 M_{3S_m} 과 $M_{1.5S_m}$ 은 식(4) 및 (5)로부터 구한 설계응력치이다.

$$M_{3S_m} = 3 S_m Z_e \quad (4)$$

$$M_{1.5S_m} = 1.5 S_m Z_e \quad (5)$$

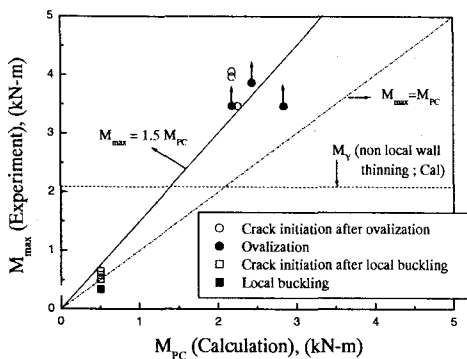


Fig. 5 Comparison between calculated and experimental plastic collapse moment of locally wall thinned pipes

여기서, S_m 은 본 실험에 이용한 재료의 기계적 특성치를 사용하여 구한 건전배관재의 설계응력을 나타내며, 그 값은 $1.243 \times 10^5 \text{ kN/m}^2$ 이다. Z_e 는 단면1차모우멘트를 나타낸다.

LIU⁷⁾들은 원자로 1차계 배관에서 필요한 φ_{\max} 를 약 0.1radian 정도로 제안하고 있다. 단, φ_{\max} 는 배관계에 따라 다를 수 있다. 따라서, 본 실험에서는 $\varphi_{\max}=0.1\text{radian}$ 을 기준으로 실험결과로부터 허용한계를 검토하였다. 실험으로부터 구한 값이 $M_{NP} \geq M_{3Sm}$ 의 조건하에 있으면 강도가 충분히 높기 때문에 조건 없이 허용 가능하고, $M_{NP} < M_{1.5Sm}$ 의 조건하에서는 허용할 수 없다. $M_{1.5Sm} < M_{NP} < M_{3Sm}$ 의 영역에 있는 경우는 $\varphi_{\max} \geq 0.1\text{radian}$ 인 경우 허용 가능하다. 그러므로, 본 실험의 결과를 위의 조건에 따라 검토한 결과 $d/t=0.196$ 인 감육결함을 가진 경우는 교환이 필요함을 알 수 있다. 이때의 파괴양식은 국부좌굴 및 국부좌굴 후의 균열발생의 경우들이었다.

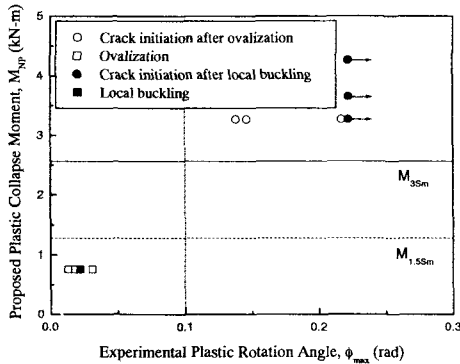


Fig. 6 Allowable limit of locally thinned pipes

4. 결론

본 실험으로부터 얻어진 파괴양식으로서의 편평화 파괴, 편평화 후 균열 파괴, 국부좌굴 파괴 및 국부좌굴 후 균열 파괴의 4종류가 나타났다. 이것은 국부적인 감육부를 가지는 배관에 있어서는 감육부의 형상 차이에 의해서 파괴양식이 다르게 나타남을 의미한다. $M_{\max} \geq M_Y$ 인 즉, 건전배관의 전소성모우멘트보다 감육부에서 나타난 소성붕괴 모우멘트가 큰 경우 종래의 유동응력을 적용한

경우 보수적인 평가를 하고 있다는 것을 알았다. 이것에 대해, 수정된 유동응력(1.5σ)을 적용하더라도 보수적으로 평가 가능함을 보였다. 파괴양식이 균열의 형태로 발생하였을 때에는 대개의 경우 충분한 소성변형의 능력을 보이지 않고, 하중이 저하 하였다. 따라서, 파괴의 시점을 균열의 발생점으로 보아도 타당하다고 생각된다. 이에 반해 좌굴 혹은 편평화에 의한 파괴의 형태는 최대하중 이후에도 충분한 소성능력을 나타내고 있음을 알았다.

참고문헌

- (1) “火力·原子力及化學機器·構造部材經年劣化壽命豫測”, 1994, 리아리즈사.
- (2) 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-186, NDE-Vol.7, pp. 71 ~ 75.
- (3) Mathonet, J.F., Cherasse, J.M., Leblois, C.L. and Guyette, MA., 1995, “Belgian Methodology for Evaluation of Erosion Corrosion phenomena in Unit 1; 2; 3 & 4 of the DOEL Nuclear Power Plant(NPP),” ASME PVP, PVP-Vol-303, pp. 393 ~ 399.
- (4) ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. X I, 1998.
- (5) 日本原子力研究所機器信頼性研究室, 1993, “配管信頼性實證實驗技術報告書,” JAERI-M93-076, pp.104 ~ 228.
- (6) 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.
- (7) Liu, S.P. and Ando, K., 2000, “Leak-before-break and plastic collapse behavior of statically with circumferential crack,” Nuclear Engineering and Design 195, pp.261 ~ 270.