

감육배관의 굽힘하중에 의한 손상모드와 파괴거동 평가

안석환[†] · 남기우^{*} · 김선진^{**} · 김진환^{***} · 김현수^{***} · 도재윤^{***}
(2001년 12월 17일 접수, 2002년 11월 18일 심사완료)

Failure Mode and Fracture Behavior Evaluation of Pipes with Local Wall Thinning Subjected to Bending Load

Seok-Hwan Ahn, Ki-Woo Nam, Seon-Jin Kim, Jin-Hwan Kim, Hyun-Soo Kim
and Jae-Yoon Do

Key Words: Local Wall Thinning(국부감육), Failure Mode(손상모드), Pipe(배관), Bending Load(굽힘하중), Fracture Behavior(파괴거동), Allowable Limit(허용한계)

Abstract

Fracture behaviors of pipes with local wall thinning are 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 (E/C) damage. However, the effects 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, crack initiation/growth after ovalization, local buckling and crack initiation/growth after local buckling. Also, the strength and the allowable limit of piping system with local wall thinning were evaluated.

기호설명

t : 배관의 두께
d : 감육된 깊이
d_{max} : 최대 감육된 깊이
R_s : 외측 반경
l : 감육된 길이
β : 중립축 반각
A : 감육된 면적

R : 평균반경
θ : 감육된 반각
r : 모멘트 암(arm)
M_{PC} : 계산에 의한 소성붕괴모멘트
M_{max} : 실험에 의한 최대모멘트
M_{NP} : 제안된 유동응력에 의해 계산한 소성붕괴모멘트
φ_{max} : 소성회전각
δ_{max} : 최대하중시의 하중점의 소성변위
S_m : 설계응력
Z_e : 단면계수
σ_u : 인장강도
σ_y : 항복강도
σ_f : 유동응력
L_l : 부하 스패 길이
L₀ : 지지 스패 길이

† 책임저자, 회원, 부경대학교 기계공학부
E-mail : shahn@mail1.pknu.ac.kr
TEL : (051)620-1617 FAX : (051)620-1405

* 회원, 부경대학교 재료공학부

** 회원, 부경대학교 기계공학부

*** 부경대학교 대학원

1. 서론

발전시설 등의 에너지 관련 플랜트에 사용되는 배관은 플랜트의 성능이나 안전성 유지에 있어서 중요한 설비의 일부이다. 이와 같은 이유 때문에 배관의 건전성 유지에 대해서는 예방 및 보전을 위한 기술 등에 의한 특별한 배려가 행하여져 왔다. 그러나, 에너지 관련 플랜트의 배관은 사용기간 중에 피로, 부식 등 여러 가지 종류의 열화 손상을 받을 우려가 있으며, 침식-부식(Erosion-Corrosion : E/C)에 의해 발생하는 국부적인 손상으로서 배관의 두께가 감소하는 현상(이하, 감육(減肉, local wall thinning)이라고 함)도 그 중 하나이다.⁽¹⁾ 이와 같은 국부적인 감육 현상은 배관의 안전과 성능유지를 위해 매우 중요하다. 대표적인 사례로서는 국외적으로는 미국 Surry 원전의 배관 파단사고⁽²⁾ 등이 보고 되어지고 있고, 1998년 고리 2호기, 1999년 고리 3, 4호기 외에 영광 1, 2호기 등 국내 원전의 전반에 걸쳐서도 배관감육 손상이 발생되고 있는 실정이다.⁽³⁾ 이상과 같이 배관의 감육문제는 세계 각국에서 심각한 문제로 대두되고 있고 감육의 허용기준 안 등이 검토되어지고 있다.⁽⁴⁻⁶⁾

그러나, 배관에 국부적인 감육부가 발생하였을 때의 배관의 강도와 손상모드를 해명하기 위한 실험 연구의 예는 극히 적고, 또한 그 특성의 해명이 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다.⁽⁷⁻⁹⁾ 실질적으로 배관에 발생하는 감육의 문제는 배관의 내부이며, 내압에 의한 영향을 크게 받을 것이다. 그러나, 실제 원전의 배관에 사용되는 배관 내압을 고려한 실험의 수행에는 여러 가지 어려움이 따른다.

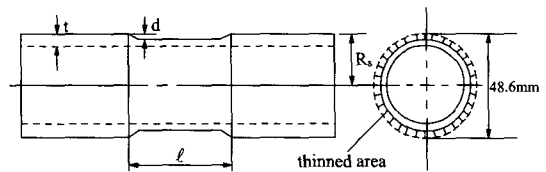
따라서, 본 연구에서는 고압탄소강배관의 외부에 기계적으로 감육부를 가공하여, 굽힘하중하에서 배관 감육부의 형상이나 감육의 정도가 배관의 강도 및 손상모드에 어떠한 영향을 미치는가를 정량적으로 해명하기 위한 실험 연구를 실시하고 또한, 감육부를 가지는 배관의 허용한계를 조사하였다. 이와 같이, 배관 외부에 감육을 설정하여 얻은 결과가 배관 내부에 감육을 설정한 결과 및 내압을 고려한 배관시험의 결과에 대한 기초적인 자료로서 활용되기를 기대하며, 향후 배관 내부에 감육을 고려한 경우 및 내압을 고려한 배관시험을 예정하고 있다.

2. 재료 및 실험방법

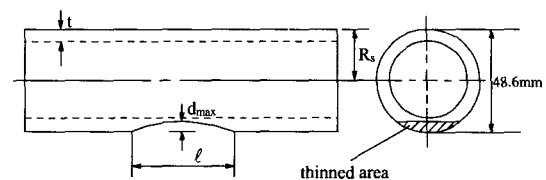
2.1 재료

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 화학성분을 각각 Table 1과 2에 나타낸다.

그리고, 감육부의 강도 및 손상모드에 대한 규명을 하기위해 사용한 시험편의 형상을 Fig. 1(a) 및 (b)에 나타낸다. 여기서, 배관의 외부에 감육결합을 가공한 이유는 배관 내부에 감육을 가공한 경우의 결과와 유사한 결과를 나타낸다는 보고에 기인하고⁽⁷⁾ 또한, 가공상의 편의 때문이다. 따라서, 파괴거동에 미치는 감육 위치의 영향은 고려되지 않았다. Fig. 1(a)는 360° 전주에 걸쳐서 감육가공을 한 경우로서 Table 3의 LPT-1~8 및 LPT-12~15의 시험편을 나타낸다. 또한, Fig. 1(b)는 감육각도(θ)를 가지는 부분적으로 감육한 시험편으로서 길이방향(ℓ)으로 감육의 깊이가 다르도록 가공하였고, 중심부에서의 감육의 깊이가 d_{max} 가 되게 하였으며 Table 3의 LPT-9와 10을 나타낸다. LPT-11은 감육결합을 가공하지 않은 건전한 배관을 나타낸다. Table 3에는 Fig. 1(a) 및 (b)에 도식적으로 나타낸 시험편의 각각의 치수



(a) 360° circumferentially thinned specimen



(b) Partially thinned specimen with the different depth

Fig. 1 Pipe specimens with local wall thinning

Table 1 Mechanical properties

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

Table 2 Chemical compositions[wt%]

| Components Material | C | Si | Mn | P | S |
|------------------------|------|-------|------|-------|-------|
| SPPH38 | 0.25 | 0.258 | 0.43 | 0.035 | 0.035 |

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 |
|--------------|---------------------|----------------|---------------|------------------------|---------------|------------------------|---------------------------------|-------------------------------|--------------|
| | R_s (mm) | t(mm) | d(mm) | l (mm) | 2θ (°) | M_{max} (kN·m) | M_{PC} (kN·m) | $M_{max}(Exp)/M_{PC}(Cal)$ | |
| LPT-1 | 24.3 | 5.1 | 1.0 | 10 | 360 | 3.966 | 2.181 | 1.818 | OC |
| LPT-2 | " | " | 4.0 | " | " | 0.582 | 0.505 | 1.153 | BC |
| LPT-3 | " | " | 1.0 | " | " | 4.059 | 2.181 | 1.861 | OC |
| LPT-4 | " | " | 4.0 | " | " | 0.649 | 0.505 | 1.285 | BC |
| LPT-5 | " | " | 1.0 | 100 | " | 3.466 ↑ | 2.181 | 1.589 ↑ | O |
| LPT-6 | " | " | 4.0 | " | " | 0.341 | 0.505 | 0.675 | B |
| LPT-7 | " | " | 1.0 | " | " | 3.466 | 2.181 | 1.589 | OC |
| LPT-8 | " | " | 4.0 | " | " | 0.550 | 0.505 | 1.089 | BC |
| LPT-9 | " | " | 4.0 | " | 63.4 | 3.866 ↑ | 2.404 | 1.608 ↑ | O |
| LPT-10 | " | " | 4.0 | 50 | " | 3.817 ↑ | 2.404 | 1.588 ↑ | OC |
| LPT-11 | " | " | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 3.466 ↑ | 2.842 | 1.220 ↑ | O |
| LPT-12 | " | " | 1.0 | 50 | 360 | 3.749 ↑ | 2.181 | 1.719 ↑ | O |
| LPT-13 | " | " | 4.0 | " | " | 0.922 | 0.505 | 1.856 | BC |
| LPT-14 | " | " | 1.0 | " | " | 4.367 | 2.181 | 2.002 | O |
| LPT-15 | " | " | 4.0 | " | " | 0.667 | 0.505 | 1.321 | BC |

Note: OC = Crack initiation after ovalization

* = Non-rounding specimen

BC = Crack initiation after local buckling

↑ = Increase in value

O = Ovalization

B = Local buckling

LPT-1~8, 12~15 : 360° circumferentially thinned specimen

LPT-9,10 : Partially thinned specimen with the different depth

LPT-11 : Non local wall thinning specimen

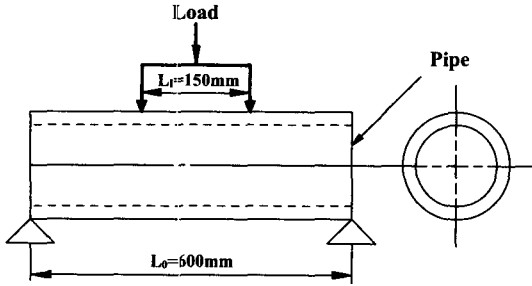


Fig. 2 Four-point bending test

및 뒤에 언급한 식 (1)로부터 계산된 소성붕괴모멘트와 실험으로부터 구한 최대모멘트 및 그 비와 실험 후 나타난 각 배관에서의 손상모드의 결과를 나타낸다.

2.2 실험방법

Fig. 1과 같이 감육결합을 가공한 실패관 시험편에 Fig. 2와 같이 4점굽힘시험을 실시하였다. 굽힘시험시에는 용량 98kN의 만능시험기(Shimadzu사: Model EHF-ED10)를 이용하여 정적인 굽힘하중을 부하하였다. 이때, 부하 스패 길이(L₁)는 150 mm, 지지 스패 길이(L₀)는 600 mm로 하였고, 크로스헤드 변위 속도는 1 mm/min의 변위 제어에 의해 실온 대기 중에서 실시하였다. 지지용 지그는 하중이 동일 위치에 부하될 수 있도록 하기 위하여 풀러형태로 제작하였다. 시험시에 하중과 하중점변위를 측정하였다. 또한, 시험의 실시간 중에 CCD카메라를 통하여 균열의 발생 상황을 확인하였다. 단, 본 실험에서는 내압은 고려하지 않았다.

3. 결과 및 고찰

3.1 실단면 응력 기준

국부 감육부를 가지는 SPPH38 고압탄소강배관 시험편에 대한 굽힘시험의 결과를 Table 3에 정리하여 나타낸다. Table 3에서 M_{max}는 실험으로부터 구한 각 감육시험편에서의 최대굽힘모멘트를 나타낸다. 그리고, M_{PC}는 소성붕괴모멘트로서 실단면 응력 기준(net-section stress criterion)^(7,10)을 사용하여 구한 계산치이다. 이때, 실단면 응력 기준에 의하여 구한 이론식은 식 (1)과 같이 주어진다.

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

여기서,

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

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

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

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

여기서, β는 중립축 반각, A는 감육된 면적, R은 평균반경, R_s는 외측반경, θ는 감육된 반각(radian), r은 모멘트 암(arm), t는 배관 두께를 각각 나타낸다. 그리고, σ_f는 유동응력(flow stress)으로서 식 (2)와 같이 주어진다.

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

여기서, σ_u는 인장강도를 σ_y는 항복강도를 각각 나타내며, Table 1에 나타낸 SPPH38 탄소강강관의 기계적특성치를 이용하였다.

단, 위에 나타낸 식 (1)은 본 실험에서 이용한 Fig. 1과 같은 결합의 단면형상에 대하여 기하학적으로 구한 식이다. 사실, 문헌 등^(7,10)에 인용되어 일반적으로 사용되고 있는 평가식은 사각형단면을 가정하여 구하고 있으나 실제 결합의 형상을 사각형으로 가공하기는 거의 불가능하며, 사각형을 가정한 평가식과 실제 가공한 결합과의 사이에는 단면적의 차이가 발생할 수 있다.

3.2 감육배관의 손상모드

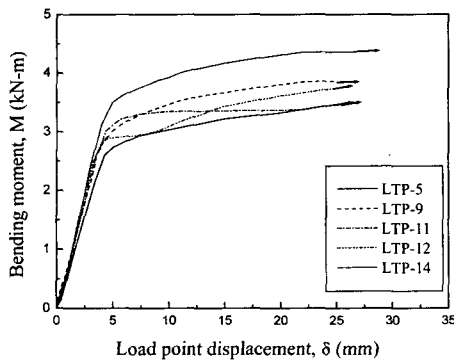
배관의 감육부에 굽힘하중을 부하한 결과, 본 연구에서는 편평화, 편평화후 균열발생, 국부좌굴 및 국부좌굴후 균열발생과 같은 4종류의 손상모드가 나타났다. Fig. 3(a)~(d)는 4점굽힘시험에 의한 모멘트(M)-하중점변위(δ)선도를 나타낸다.

Fig. 3(a)는 편평화가 발생하여 파괴된 경우가

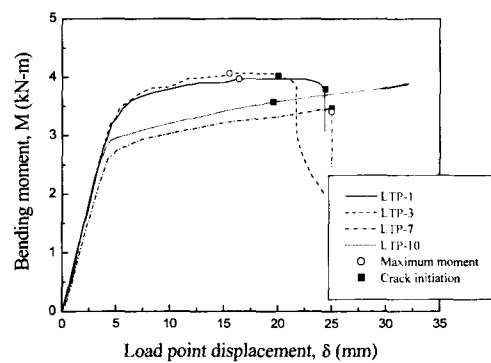
다. 그림 속의 화살표는 부하되는 하중이 계속 증가하고 있음을 나타낸다. 손상모드로서 편평화가 나타난 경우는 $d/t=0.196$ 인 경우로서 감육결합을 상정하지 않은 건전한 배관재인 LPT-11의 경우와 유사한 결과를 나타내었다. LPT-9는 다른 감육시험편과는 달리 원주방향으로 부분적인 감육결합을 상정한 경우로서 $d_{max}/t=0.784$ 이다. 하중 부하방향에 대해서 인장측에 감육부를 놓이게 한 경우로서 동일한 경우의 2개의 시험편을 시험하였고, 균열발생이 예상되었으나 균열이 발생하지 않은 반면에 편평화 현상이 지속되었지만, 시험 후 시험편 표면을 조사해 본 결과 감육된 길이방

향으로 국부적인 함몰이 미세하게 관찰되었다.

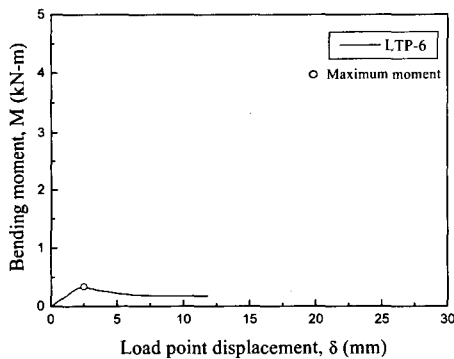
Fig. 3(b)는 편평화 발생 후 균열이 발생하여 파괴된 경우로서, 최대하중은 편평화에 의하여 결정되었다. 특히, LPT-1과 10은 감육가공한 불연속부의 모서리를 둥글게 가공한 경우이며, LPT-3과 7은 직각이 되도록 가공한 경우이다. 직각이 되도록 가공한 경우의 시험편에서는 감육의 모서리 부분에 응력이 집중되어 균열이 발생하였다고 생각한다. 그러나, $d/t=0.196$ 으로서 비교적 감육의 정도가 얇은 LPT-1은 모서리부분을 둥글게하여 응력 집중을 완화시켰음에도 불구하고 감육부에 네킹(necking)현상을 수반하면서 균열이



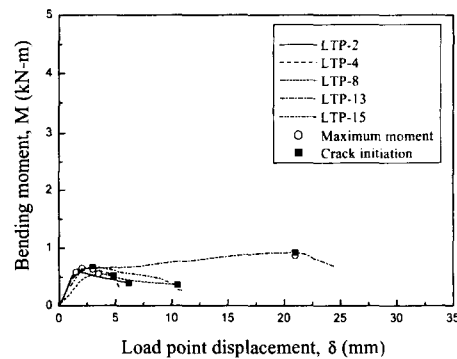
(a) The case of ovalization



(b) The case of crack initiation after ovalization

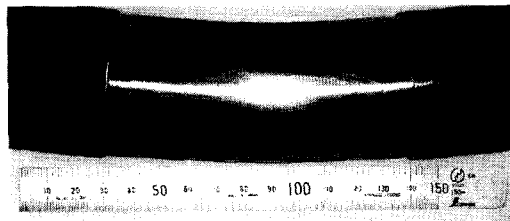


(c) The case of local buckling

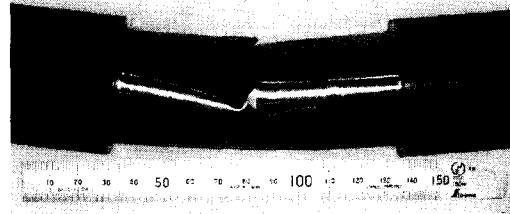


(d) The case of crack initiation after local buckling

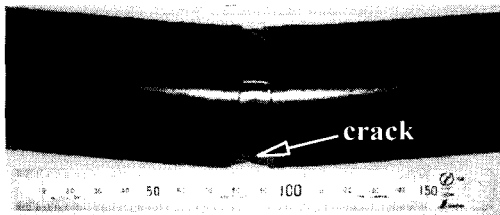
Fig. 3 Moment-displacement curves for locally thinned pipes



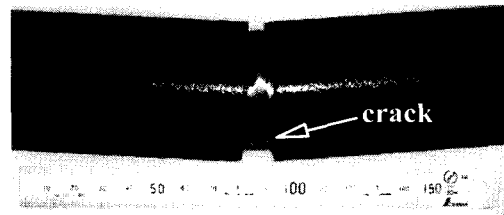
(a) LPT-5 ($d/t=0.196$, $l=100$ mm)
Ovalization



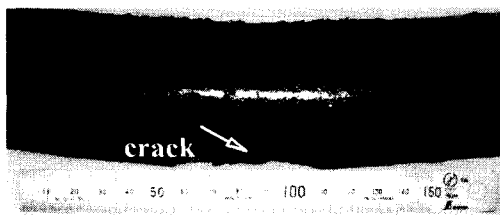
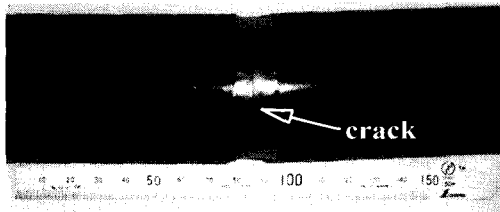
(d) LPT-6 ($d/t=0.784$, $l=100$ mm)
Local buckling



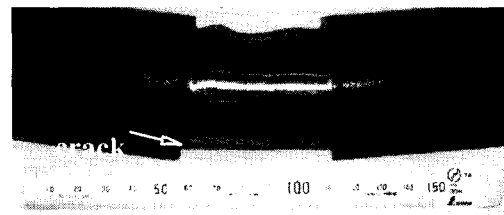
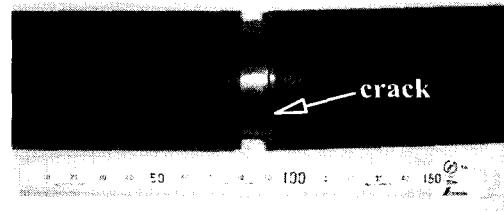
(b) LPT-1 ($d/t=0.196$, $l=10$ mm)
Crack initiation after ovalization



(e) LPT-2 ($d/t=0.784$, $l=10$ mm)
Crack initiation after local buckling



(c) LPT-10 ($d_{max}/t=0.784$, $l=50$ mm)
Crack initiation after ovalization



(f) LPT-13 ($d/t=0.784$, $l=50$ mm)
Crack initiation after local buckling

Fig. 4 Failure mode occurred in pipes with locally thinned area

발생하였다. LPT-10은 $d_{max}/t=0.784$ 의 경우인 반면 LPT-1보다 길이방향으로의 감육이 더 큰 경우이다. LPT-10은 감육의 정도가 깊었기 때문에 균열이 발생한 것 같고, LPT-1은 감육깊이가 얇지만 길이방향으로 짧기 때문에 노치(notch)효과에 의해 균열이 발생한 것 같다. 단, LPT-1과 LPT-10은 그 감육된 각(원주방향의 감육된 폭)이 360° 및 63.4° 로서 다르므로 원주방향의 폭의 영향도 무시할 수 없다고 생각한다. 균열은 모두 하중부하방향에 대하여 인장측에서 발생하였고, LPT-1, 3 및 7에서는 균열발생 후 하중은 급격히 저하되었다. 그러나 길이방향으로 감육의 깊이가 다른 LPT-10의 경우에 있어서는 균열발생 이후 급격한 하중의 저하는 보이지 않고 오히려 LPT-9와 비교했을 때 감육의 깊이가 달라짐에 따라 나타나는 손상의 양상이 다르므로, 이후 감육의 정도를 여러 가지 길이 및 깊이에 있어서 다르게 하여 검토해 볼 여지가 있다.⁽⁷⁾ 특히, 인용한 문헌⁽⁷⁾의 STS370의 결과와 비교하여 보면, 균열이 발생한 점에서는 동일하지만 STS370에서는 오히려 하중의 급속한 저하를 가져왔다. 이때의 STS370의 d_{max}/t 는 0.740보다도 큰 경우로서 $l=41\sim 44\text{mm}$ 인 반면, 본 연구에서의 d_{max}/t 는 0.784이며 $l=50\text{mm}$ 였다. 물론, 두 경우에 있어서는 R/t의 비율이 다르고 있다. 따라서, 현 단계에 있어서는 하중의 증감의 원인이 무엇에 있는가에 대해서는 명확히 결론 내리기가 힘들다.

금후, 앞에서 언급한 내용에 있어서의 추가적인 검토를 할 필요가 있다.

Fig. 3(c)는 국부좌굴이 발생하여 파괴된 경우이다. 최대하중은 국부좌굴에 의해서 결정되었다. 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 나타낸 후 균열이 발생되고 있음을 알 수 있다. LPT-13 및 15의 경우에는 모두 $l=50\text{mm}$ 로서 최대하중시 균열이 발생하였으나 하중의 급격한 저하는 보이지 않고 다소 소성변형을 나타내고 있고 특히, LPT-13은 불연속부의 모서리를 둥글게 처리한 경우로서 다른 시험편들과 비교했을

때 소성변형이 2.5~5배 정도 더 연장되고 있음을 알 수 있다. 이것은 감육깊이가 어느 범위의 영역에서는 소성능력이 증가되고 있음을 보여준다고 생각한다. 균열은 모두 하중부하방향에 대하여 인장측에서 발생하였다.

이상의 결과로부터, 360° 전주에 걸쳐 감육이 형성되었을 경우에는 주로 d/t 의 비에 의해 감육부의 손상모드가 결정되어진다고 생각한다. 특히 감육부가 인장측에 형성되었을 때는 균열발생이 용이해짐을 알 수 있다. 또한, 감육부의 모서리를 직각이 되도록 가공한 시험편의 경우에는 1례를 제외하고는 모두 균열이 발생하여 응력집중의 효과가 나타났다. 전반적인 경향으로서는 동일한 감육의 형태일지라도 모서리 부분이 둥글수록 균열의 발생은 감소하는 경향을 나타내었다. 실험의 결과를 종합하여 보면, 동일한 감육깊이 및 동일한 감육각(원주방향의 감육된 폭)이라면 감육깊이가 깊을수록 좌굴 혹은 균열 발생의 가능성이 높아진다. 또한, 동일한 감육깊이 및 동일한 감육각이라면 감육깊이가 짧을수록 균열의 발생 가능성이 높아진다. 그리고, 동일한 감육깊이 및 동일한 감육길이를 가지는 경우라면 감육된 각이 클수록 좌굴 혹은 균열의 발생 가능성이 높아진다.

이상과 같은 결과들은 다른 연구의 결과⁽⁷⁾와도 거의 일치함을 알 수 있다.

Fig. 4에는 각 감육배관 시험편에 굽힘하중을 부하하였을 때, Fig. 3(a)~(d)에 나타내어진 $M-\delta$ 의 거동을 보이면서 감육배관에 나타난 손상을 나타내고 있다.

3.3 감육배관의 파괴강도

Fig. 5에는 최대하중시의 모멘트 M_{max} 와 식 (1)과 (2)를 이용하여 구한 소성붕괴모멘트 M_{pc} 와의 관계를 나타낸다. 국부좌굴만이 발생하고 있는 일례를 제외하고는 계산치가 실험치를 보수적으로 평가하고 있음을 알 수 있다. 그 결과는 편평화가 발생하였을때의 경우들에 있어서 더욱 보수적인 경향을 나타내고 있다. 그럼 속의 M_y 는 감육결함이 없는 건전한 배관의 전소성모멘트의 계산치를 나타내고 있고, 소성단면계수와 항복강도의 곱으로 주어진다. 따라서, 건전배관의 전소성모멘트보다도 상당히 보수적으로 평가되고 있는 $M_{max} \geq M_y$ 인 경우들에 대해서만 검토해보면,

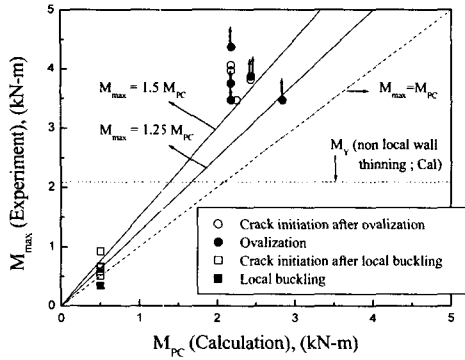


Fig. 5 Comparison between calculated and experimental plastic collapse moment of locally wall thinned pipes

$M_{max}=1.5M_{PC}$ 로 설정한 경우 아직도 보수적인 평가를 나타내고 있지만 새롭게 설정된 유동응력의 값이 본 재료의 인장강도를 상회하기 때문에 적용이 곤란하다고 생각된다. 이에 반해 $M_{max}=1.25M_{PC}$ 로 설정한 경우 $M_{max}=1.25M_{PC}$ 를 만족하더라도 아직도 보수적임을 알 수 있다. 그러므로, 국부감육재의 경우에 있어서는 종래의 유동응력 σ_f 대신에 $1.25\sigma_f$ 를 이용하더라도 충분히 평가 가능하다는 것을 나타낸다. 단, 새롭게 제안된 유동응력 값의 타당성은 다양한 감육부 결합에 대해서 더 조사·검토할 필요가 있다. 또한, 실단면 응력 기준(net-section stress criterion)이 상당히 보수적이고 균열을 가지는 실 단면을 적용한 평가이므로 본 실험과 같은 감육재에 대해서는 금후 길이방향의 감육결합을 함께 파라미터로 고려한 이론식의 적용이 필요하다.

3.4 감육배관의 허용한계

Fig. 6은 배관 감육부의 소성변형능력의 기준으로부터 구한 허용한계를 나타낸다. 실제 발전플랜트의 구성요소로서 사용되고 있는 배관은 정적인 구조보다는 거의 부정정계로서 이루어져 있다. 따라서, 본 연구에서는 이와 같이 배관을 부정정계로 간주하여 배관의 소성회전능력을 평가해 보았다. 횡축의 소성회전각 ϕ_{max} 는 최대하중시의 하중점에서의 소성변위 δ_{max} 를 이용하여 식 (3)으로부터 구하였다.^(11~14)

$$\phi_{max} = \frac{4 \delta_{max}}{L_0 - L_I} \tag{3}$$

여기서, L_0 는 지지 스패 길이, L_I 는 부하 스패 길이를 각각 나타낸다. 그리고, 종축의 M_{NP} 는 제안된 유동응력을 이용하여 구한 계산치이다. 그림 속의 기호들은 제안한 유동응력으로서 $1.25\sigma_f$ 를 적용한 M_{NP} 를, 그리고 파선은 제안한 유동응력으로서 $1.5\sigma_f$ 를 적용한 M_{NP} 를 각각 나타낸다. 그림 속에 나타낸 실선 M_{3Sm} 과 $M_{1.5Sm}$ 은 식 (4) 및 (5)로부터 구한 설계응력치이다.

$$M_{3Sm} = 3 S_m Z_e \tag{4}$$

$$M_{1.5Sm} = 1.5 S_m Z_e \tag{5}$$

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.⁽¹⁵⁾ Z_e 는 단면계수를 나타낸다.

Liu^(12,14)등은 원자로 1차계 배관에서 필요한 ϕ_{max} 를 약 0.1radian 정도로 제안하고 있다. 단, ϕ_{max} 는 배관계에 따라 그 값이 다를 수 있다. 따라서, 본 실험에서는 $\phi_{max}=0.1\text{radian}$ 을 기준으로 실험결과로부터 허용한계를 검토하였다. 실험으로부터 구한 값이 $M_{NP} \geq M_{3Sm}$ 의 조건하에 있으면 강도가 충분히 높기 때문에 조건 없이 허용 가능하고, $M_{NP} \leq M_{1.5Sm}$ 의 조건하에서는 허용할 수 없다. $M_{1.5Sm} \leq M_{NP} \leq M_{3Sm}$ 의 경우에 있어서는 조건적으로 허용 가능한 것으로 즉, $\phi_{max} \geq 0.1\text{radian}$ 인 경우에 한해서 허용 가능함을 나타낸다.

그러나, 본 실험의 결과중에서 ○ 및 ●의 기호로 표시된 시험편의 경우는 편평화 이후 균열이 발생한 경우로서 모두 $M_{NP} \geq M_{3Sm}$ 의 조건하에 있으면서, $\phi_{max}=0.1$ 이상을 나타내고 있다. ○의 경우에는 균열발생후 하중의 급격한 저하가 나타났다. 또한 ●의 경우에는 균열발생후 하중의 증가와 더불어 오히려 소성능력이 향상되고 있다. 따라서, $M_{NP} \geq M_{3Sm}$ 및 $\phi_{max}=0.1$ 이상의 영역에 있으므로 조건없이 허용 가능한 경우의 범주에 속하고 강도적으로 충분하여 급격한 파괴는 발생되지 않으리라고 예상되지만, 균열이 발생하

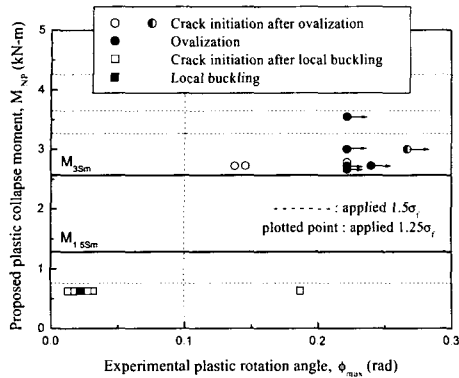


Fig. 6 Allowable limit of locally thinned pipes

였기에 교환 혹은 보수가 필요하다고 생각된다. 또한, 360° 전주 감육결합 중 $d/t=0.784$ 인 경우는 모두 $M_{NP} \leq M_{1.5\sigma_y}$ 의 영역내에 있고, 따라서 교환이 필요함을 알 수 있다. 이때의 파괴양식은 국부좌굴 및 국부좌굴 후의 균열발생의 경우들과 $\phi_{max} \geq 0.1$ 이지만 $M_{NP} \leq M_{1.5\sigma_y}$ 로서 허용할 수 없는 편평화 후 균열발생인 일례의 경우였다.

4. 결론

(1) 본 실험으로부터 얻어진 손상모드로서는 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 손상모드가 다르게 나타남을 의미한다.

(2) $M_{max} \geq M_y$ 인 즉, 건전한 배관의 전소성모멘트보다 감육부에서 나타난 소성붕괴모멘트가 큰 경우 종래의 유동응력을 적용한 경우 보수적인 평가를 하고 있다. 이것에 대해, 수정된 유동응력 ($1.25\sigma_y$)을 적용하더라도 보수적으로 평가 가능함을 보였다. 단, 이후 감육의 길이를 파라미터로 고려한 강도평가가 검토되어야 한다.

(3) 손상모드가 균열의 형태로 발생하였을 때에는 대개의 경우 충분한 소성변형을 수반하지 않고 하중이 저하하였다. 이에 반해, 좌굴 혹은 편평화에 의한 파괴의 형태는 최대하중 이후에도 어느 정도의 소성변형을 나타내었다.

(4) 동일한 감육길이 및 동일한 감육각(원주방향의 감육된 폭)이라면 감육깊이가 깊을수록 좌

굴 혹은 균열 발생의 가능성이 높아졌다. 또한, 동일한 감육깊이 및 동일한 감육각이라면 감육길이가 짧을수록 균열의 발생 가능성이 높아졌다. 그리고, 동일한 감육깊이 및 동일한 감육길이를 가지는 경우라면 감육된 각이 클수록 좌굴 혹은 균열의 발생 가능성이 높아졌다.

(5) 본 연구의 결과는 배관 외부에 감육을 설정한 경우이다. 그러나, 실제 감육의 문제는 배관의 내부에서 발생하고, 또한 내압에 의한 영향을 크게 받는다. 따라서, 향후 배관 내부에 감육을 설정한 경우 및 내압을 고려한 연구에 대한 검토가 필요하다.

참고문헌

- (1) Ahn, S. H., Ando, K., Isiwata, 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.
- (2) Virginia Electric and Power Co., 1987, "Surry Unit 2 Reactor Trip and Feedwater Pipe Failure Report."
- (3) Shim, S. H., Song, J. S., Yoon, K. B., Hwang, K. M., Jin, T. E., Lee, S. H. and Kim, W. S., 2000, "Application of CHECWORKS Code for Metal Loss in the Secondary Piping Systems Wolsung Unit 1," Proceeding of the Pressure Equipment Tech. Conference 2000, pp. 59~64.
- (4) 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.
- (5) Mathonet, J. F., Cherasse, J. M., Leblois, C. L. and Guyette, M. A., 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.
- (6) ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. X I, 1998.
- (7) 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.

- (8) Kim, J. W., Park, C. Y. and Kim, B. N., 1999, “ Effects of Axial Extent of Thinned Area on the Allowable Wall Thickness in Thinned Pipe,” Proceedings of the KSME 1999 Fall Annual Meeting A, pp. 597~602.
- (9) Kim, J. W., Park, C. Y. and Kim, B. N., 2001, “ Evaluation of Local Allowable Wall Thickness of Thinned Pipe Subjected to Internal Pressure and Bending Moment,” Transactions of the KSME A, Vol. 25, No. 1, pp. 81~88.
- (10) Kanninen, M. F., Zahoor, A., Wilkowski, G., Abousayed, I., Marschall, C., Broek, D., Sampath, S., Rhee, H. and Ahmad, J., 1982, “ Instability Predictions for Circumferentially Cracked Type-304 Stainless Pipes under Dynamic Loading,” EPRI

NP-2347, Vols. 1 and 2, EPRI, Palo Alto.

- (11) Okamura, K., 1970, “ Expansion on Statically Indeterminate Problem of Fracture Mechanics,” JHPI, Vol. 8, No. 2, p. 1924.
- (12) Liu, S. P. and Ando, K., 1996, “ Ultimate Strength and Plastic Collapse Behavior of Statically Indeterminate Pipes with Crack and Compliances,” JSME, Vol. 62, No. 597, pp. 48~55.
- (13) Horen, M. R., 1979, “ Plastic Theory of Structures, 2nd Edition,” Pergamon Press, Oxford.
- (14) 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.
- (15) ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. III, 1986.