

원주방향 노치형태 감육부를 가진 배관의 손상거동 평가

김진원* · 박치용 · 박상덕

Failure Behavior of Pipe with Circumferential Notch Type Wall Thinning

Kim Jin Weon, Park Chi Yong, Park Sang Doug

Abstract

To understand a failure behavior of a pipe with notch type wall thinning defect by flow accelerated corrosion, in the present study, the pipe failure tests were performed using the pipe specimen with artificial notch. Both monotonic and cyclic bending moment were applied to the pipe specimens under constant internal pressure. From the results, the failure mode, load carrying capacity, deformability, and fatigue life were investigated and compared with those obtained from circular type of a wall thinned pipe tested previously. The failure mode of notched pipe was similar to that of the pipe contained defect of a circular type wall thinning under monotonic bending load. However, the failure under cyclic bending load was caused by plastic collapse, which is deferent from circular type wall thinned pipe cracked by fatigue. The load carrying capacity of the notched pipe was dependent on the stress type and circumferential angle. When the thinning area was subjected to tensile stress, it was similar or slightly lower than that of the circular type thinned pipe. When the thinning area was subjected to compressive stress, it was higher than that of circular type thinned pipe. However, the deformability and fatigue life decreased with decrease in axial thinning length and they were the lowest in the notch type thinned pipe.

1. 서론

원자력발전소는 수많은 배관으로 구성되어 있으며, 이들 배관은 압력경계로서 주요 기기들과 연결되어 고에너지의 유체를 이송하는 역할을 하기 때문에 배관의 건전성은 발전소의 안전성 뿐 아니라 고유의 기능 유지 측면에서 매우 중요하다[1]. 그러나, 원전 배관은 운전 중에 다양한 하중과 환경에 노출되어 있으므로 발전소의 가동 년 수가 증가됨에 따라 여러 형태의 열화 메커니즘에 의해 손상 가능성이 증가되고 있다. 특히, 탄소강이 주로 사용된 2차 계통 배관의 경우에는 재질 특성상 부식에 취약할 뿐 아니라 열악한 수질과 유동조건 때문에 유동가속부식(Flow

Accelerated Corrosion, FAC) 현상에 의한 배관의 두께가 감소되는 배관감육의 손상 가능성이 높은 것으로 알려져 있다[1~3]. 이러한 형태의 배관 손상 사례는 국내·외의 많은 발전소에서 보고되고 있으며, 가동 년 수가 증가됨에 따라 발생 빈도가 더욱 증가될 것으로 예상되고 있다[1,3~5].

따라서, 최근 감육에 의한 배관 손상은 원자력발전소의 안전성과 운전성 측면에서 매우 중요한 관리 항목으로 고려되고 있으며, 많은 연구들이 수행되고 있다[3,5~7]. 특히, 현재 감육배관에 대한 적절한 평가 기준이 없는 상황에서 감육배관의 건전성 평가와 허용두께 기준을 설정하기 위한 연구들이 활발히 진행 중에 있다[10~14]. 원전 배관 감육의 특징은 가스나 오일 배관에서와 달리 감육부의 길이와 폭이 매우 다양하며 광범위하고, 내압뿐 아니라 굽힘하중이 중요하게 고려되어야 한다는 것이다. 그러나, 기존의 방법들에서는 이러한 원전 배관의 특성을 충분히 고려하지 못하는 한계를 보이고 있다. 특히, 최근 일부 국내 원전의 배관에서 발견된 것과 같은 노치형태의 감육 형상을 가진 배관에 대해서는 기존의 평가 방법에서 전혀 고려를 하지 못하고 있는 실정이다[1]. 노치 형태의 감육 형상은 흔하게 발견되는 것은 아니지만, 배관이 다른 기기들과 연결되어 있는 경우에 용접부 루트부와 같은 불연속적인 형상 변화와 재질 차이에 의해 국부적으로 나타날 수 있는 것으로 분석되고 있으며, 감육 배관의 건전성 평가 및 허용두께 기준 설정을 위해서는 이와 같이 형태의 감육 형상을 가진 배관에 대한 손상거동의 이해가 필요한 실정이다.

따라서, 본 논문에서는 노치형태의 감육형상(Type N)을 가진 배관의 손상거동을 살펴보기 위해서, 선행연구에서 수행되었던 완만한 감육형상(Type C)을 가진 배관의 손상거동 평가에 추가하여[15], 배관실험을 통해 노치형태의 감육부를 가진 배관의 하중지지능력, 변형수용능력, 그리고 반복하중에 대한 피로수명 등을 평가하였다. 배관 실험에서 하중은 내압과 굽힘하중을 고려하였으며, 굽힘하중으로는 단순굽힘하중과 반복 굽힘하중을 각각 고려하였다. 실험 결과는 선행연구에서 수행되었던 [15] 일반적인 감육형상에 가까운 Type C의 감육배관 실험 결과와 비교 분석되었다.

2. 배관 재료 및 배관 시편

2.1 배관 재료

실험에 사용된 배관 재료는 원전 2차 계통에 많이 사용되고 있는 ASTM A333 Gr.6 (STS370 in JIS) 탄소강이며, 실험장치의 용량을 고려하여 102mm, Sch.80 (외경 (Do)=114.3mm, 두께(t)=8.5mm)의 배관이 사용되었다. 배관 재료의 인장특성과 화학 조성은 Table 1 과 2 에 나타낸 바와 같다. 화학조성은 재료 성적서(Certified Material Test Report, CMTR)에 의해 제공된 값이며, 인장 데이터는 배관의 길이 방향에서 채취한 봉상 시편을 이용하여 상온에서 시험한 결과이다.

Table 1 Chemical composition of pipe material.

Chemical Composition	C	Si	Mn	P	S
w/o	0.19	0.21	0.59	0.0015	0.0011

Table 2 Tensile properties of pipe material.

Yield stress, σ_y [MPa]	Tensile stress, σ_{uts} [MPa]	Elongation, [%]
302.0	449.8	30.1

2.2 배관 시편

배관 시편은 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 총 길이가 1200mm로 감육부의 두께 가공을 위해서 400mm인 직관 3개를 가공 후 용접하여 제작하였으며, 가운데 배관이 노치 형상을 가공한 시험부이다. 시험부의 형상은 Fig. 1에 나타낸 것과 같으며, 노치형태 감육부의 원주방향 형상은 일정한 반경을 가지는 원형이며, 모든 시편에서 시험부의 가장 얇은 부분이 2mm가 되도록 가공하였다. 배관은 초기 형상을 균일하게 하기 위해 외경을 113.8mm, 두께를 7.8mm로 가공한 후 시험부에 노치 형상을 가공하였다. 내압을 작용시키기 위해서 시편의 양단에는 캡(cap)을 용접하여 밀봉하였으며, 유체 주입 및 압력 게이지의 설치, 그리고 가압을 위한 노즐을 용접하였다.

3. 실험 장치 및 방법

3.1 배관 실험 장치

배관실험에 사용된 실험 장치는 Fig. 2에서 개략적으로 나타낸 것과 같이 가압 장치와 굽힘하중 장치로 구성된다. 배관 시편의 가압 방법은 배관에 물을 가득 채운 후, 시편에 연결된 노즐을 통해서 질소 가스를 주입하여 가압하였으며, 가압 장치에 부착된 압력 조절밸브를 이용하여 배관시편의 압력을 조절하였다. 굽힘하중 장치는 가진기(Actuator)와 4점 굽힘지그로 구성되며, 가진기는 로드셀(Load Cell)이 부착된 Instron-Shenck사 제품으로 용량은 최대하중이 630kN이고, 최대변위가 ± 125 mm이다. 4점 굽힘지그는 곡률을 가진 롤러 형태로 제작되어 실험배관과 하중작용 위치가 구면을 이루어 접촉할 수 있도록 하였으며, 하중이 작용되는 동안 롤러의 틀이 회전할 수 있도록 제작되어 배관에서 대변형의 굽힘이 발생할지라도 하중 점과 하중방향이 일정하게 유지되도록 하였다. Fig. 3은 배관시편이 설치된 상태의 실험장치를 보여주는 것이다.

3.2 실험방법 및 데이터 측정

배관실험은 Table 3과 같은 조건에서 수행되었으며, 작용하중으로는 내압과 굽힘하중이 감육부에 작용되도록 고려하였다. 굽힘하중으로는 단순 굽힘하중과 반복 굽

힘하중을 고려하였으며, 단순 굽힘하중은 감육부에 압축응력이 작용되는 경우와 인장응력이 작용되는 경우로 구분하여 하중을 작용시켰다. 모든 실험은 상온에서 수행하였으며, 내압과 굽힘하중이 동시에 작용되는 실험에서는 먼저 가압하여 일정한 압력을 유지한 상태에서 굽힘하중을 작용시켰다. 단순 굽힘하중을 가하기 위해 가진기는 변위제어로 구동되었으며, 실험에 적용한 가진기의 이동속도는 2mm/min 로 준정적 하중속도를 유지하였다. 가진기의 이동은 균열 발생에 의해 하중이 급격히 감소하거나, 균열이 발생하지 않는 경우에는 하중-변위 곡선의 최대하중을 지난 시점에서 정지하였다. 또한, 변위의 증가에 따라 하중이 계속 증가되는 경우에도 변형에 따른 내압의 증가와 가진기의 최대 변위를 고려하여 가진기를 정지하였다. 반복 굽힘하중 역시 변위제어로 일정한 변위를 배관이 판단될 때까지 반복하여 작용시켰으며, 변위의 크기는 $\pm 2.7\text{mm}$ 로 감육이 없는 배관에서 굽힘하중에 대한 응력이 3S에 해당하는 변위로부터 결정하였다.

Table 3 Test matrix of notched pipe specimen tests.

Spec. ID	d/t	2θ	P[MPa]	Loading Type	
SP-11	0.74	90°	10	Monotonic	Tension
SP-14					Compression
SP-37		180°			Tension
SP-38					Compression
SP-35		180°		Cyclic	Tens.+Comp.

배관실험에서 하중, 내압, 배관의 변위, 그리고 변형률이 측정되었으며, 배관의 변형과 파열 등 전 과정은 비디오카메라를 이용하여 촬영하였다. 하중은 가진기에 부착된 로드셀에서 측정하였으며, 굽힘에 따른 배관의 변위는 가진기에 내장된 변위계와 배관시편의 중심에 설치된 와이어(Wire) 게이지를 이용하여 2중으로 측정하였다. 내압의 변화는 배관에 설치된 압력 게이지를 통해 측정하였으며, 변위에 따른 감육부의 변형률은 배관 표면에 15%의 변형률까지 측정이 가능한 소성 변형률 게이지를 부착하여 측정하였다.

4. 실험 결과 및 토의

4.1 노치형 감육배관의 손상모드

Table 3 과 같은 조건에서 수행된 실험결과로부터 노치형(Type N) 감육부를 가진 배관의 손상거동을 살펴보면, 단순 굽힘하중이 작용되는 경우에는 감육부의 원주방향 폭에 관계없이 $2\theta=90^\circ$ 와 180° 모두 감육부의 응력상태에 따라 네킹에 의한 원주방향 균열 발생과 국부좌굴에 의한 손상으로 구분되며, 반복 굽힘하중이 작용되는 경우에는 감육부에서 원주방향 균열 발생에 의해 손상되는 것으로 관찰된다.

Type N의 감육부를 가진 배관의 손상형태를 선행연구[15]에서 실험된 Type C의

감육길이(L)가 25mm와 200mm인 감육배관의 손상모드와 비교하면, 단순 굽힘하중이 작용되는 경우에는 Type C에서와 같이 균열 발생과 국부좌굴의 손상형태를 보이는 것을 알 수 있다[15]. 다만, 감육부에 인장응력이 작용되어 균열이 발생하는 경우에 네킹 현상이 Type N의 감육형상에서 뚜렷하게 관찰되고, 압축응력에 의한 국부좌굴이 발생하는 경우에 좌굴현상이 상당히 작게 나타나는 특징을 관찰할 수 있다. 한편, 반복 굽힘하중이 작용되는 경우, Type C의 감육부를 가진 배관에서는 반복하중이 작용됨에 따라 감육부가 팽창하고 팽창된 부분에서 균열이 생성되며, Type C의 L=25mm에서는 원주방향 균열이 생성되고 Type C의 L=200mm에서는 축방향의 45°인 균열이 생성된 반면, Type N의 감육부를 가진 배관에서는 단순 굽힘하중이 작용될 때와 같이 네킹에 의한 원주방향 균열이 발생하였다.

따라서, 단순 굽힘하중이 작용되는 경우, 노치형 감육배관의 손상모드는 Type C인 감육형상을 가진 감육배관의 손상모드와 유사한 것을 알 수 있다. 그러나, 반복 굽힘하중이 작용되는 경우, Type N의 감육부를 가진 배관의 손상모드는 Type C의 감육부를 가진 배관과 달리 단순 굽힘하중에서와 같은 손상형태를 보이는 것을 알 수 있다. 이것은 Type C 감육부를 가진 배관에서는 반복하중에 의한 피로가 균열 발생의 원인이지만, Type N에서는 감육부에서 응력과 변형의 집중이 심하게 발생하여 작은 반복하중에서도 국부적으로는 소성붕괴에 의한 균열을 발생시키기 때문이다.

4.2 단순 굽힘하중에 대한 노치형 감육배관의 하중지지능력 및 변형수용능력

Fig. 4는 단순 굽힘하중이 작용되는 경우에 노치형 감육부를 가진 배관에 대한 거동을 살펴보기 위해서, 노치의 원주방향 폭(2θ)이 90°와 180°인 감육배관의 하중-변위 곡선을 $2\theta = 90^\circ$ 와 180°인 Type C의 감육 배관에 대한 하중-변위 곡선과 비교하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 감육 배관에서 굽힘하중이 작용될 때, 배관의 초기 변형은 감육부의 원주방향 길이와 응력 상태 등에 관계없이 감육이 없는 배관과 유사한 선형 거동을 보였다. 그러나, 하중이 계속 증가하여 배관의 전체적인 거동이 소성변형을 보이면서 감육배관의 하중-변위 곡선은 감육부에 작용되는 응력 상태와 감육부 형상에 따라 다른 경향을 보이고 있다.

그림에서 보는 것과 같이 감육부에 인장응력이 작용되는 경우에는 Type N인 감육 배관은 Type C인 감육형상을 가진 배관에서와 같이 소성 거동을 보이면서 변위에 따라 하중이 계속 증가하다가 균열이 발생과 함께 급격히 감소하며, Type C의 L=25mm인 경우에 관찰된 것과 같이 내압이 완전히 제거된 후에 하중이 다시 증가하다 감소하는 경향을 보였다[15]. 배관의 전체적인 거동이 탄성영역에서 벗어나기 시작하는 하중은 $2\theta = 90^\circ$ 와 180°인 경우 모두 Type N의 감육부를 가진 배관이 Type C인 감육형상을 가진 배관보다 높게 나타났고, Type C에서는 감육길이가 증가됨에 따라 감소하였다. 한편, 감육부에 압축응력이 작용되는 경우에는 Type N의 감육부에서 국부좌굴이 발생하므로 소성 거동을 보이면서 하중이 계속 증가하였다.

이 경우에도 소성변형이 시작되는 하중의 크기는 Type N의 감육부를 가진 배관이 Type C에 비해 높고, Type C에서는 감육부 길이가 증가됨에 따라 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 특히, $2\theta = 90^\circ$ 인 노치형 감육부를 가진 배관의 경우에는 감육이 없는 배관보다 높은 하중-변위 곡선을 보였으며, $2\theta = 180^\circ$ 인 경우에도 감육이 없는 배관과 유사한 하중-변위 곡선을 보였다.

한편, 배관의 소성변형과 실제 손상을 고려한 하중으로부터 노치형 감육배관의 하중지지능력을 살펴보기 위해서, 감육부에 인장응력이 작용되는 경우에는 최대 하중을 그리고 국부좌굴이 발생하는 경우에는 변위가 17 mm인 위치에서의 하중을 Type C인 감육형상을 가진 배관의 결과와 비교하였다. Fig. 5(a)에서 보는 바와 같이 감육부에 인장응력이 작용되는 경우에 Type N인 감육배관의 최대 하중은 감육부 원주방향 폭에 관계없이 Type C의 $L=25\text{mm}$ 인 경우보다 높게 나타나고 있으며, Type C의 $L=200\text{mm}$ 와 비교하면 $2\theta=90^\circ$ 일 때는 낮은 값을 보이고, $2\theta=180^\circ$ 에서는 유사한 값을 보였다. 감육부에 압축응력이 작용되는 경우에는 Type N의 감육배관에서 가장 높은 하중을 보였으며, Type C인 감육배관에서는 원주방향 폭에 관계없이 축방향 길이에 따라 하중이 감소하는 경향을 보였다. Fig. 6은 Type N인 감육배관의 변형수용능력을 살펴보기 위해서 최대 하중까지의 변위를 나타낸 것으로 국부좌굴이 발생하는 경우에는 최대하중이 정의되지 않으므로 감육부에 인장응력이 작용되는 경우만을 살펴보고, $L=25\text{mm}$ 와 200mm 인 Type C와 비교하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 최대하중까지의 변위는 Type N의 감육배관에서 가장 작은 값을 보였으며, Type C인 감육배관에서는 축방향 길이에 따라 증가하는 경향을 보였다. 또한 축방향 길이에 따른 증가는 감육부의 원주방향 폭이 작은 경우에 보다 크게 관찰되었다.

따라서, 배관의 전체적인 거동에서 허용기준을 탄성거동에 제한하는 경우, 감육부의 원주방향 폭과 감육부에서의 응력형태 등에 관계없이 축방향 길이가 짧은 Type N의 감육부를 가진 배관이 가장 높은 하중지지능력을 보이는 것을 알 수 있다. 실제 감육배관의 손상을 기준으로 적용하는 경우, Type N의 감육부를 가진 배관에서 하중지지능력은 감육부에 인장응력이 작용될 때는 원주방향 폭과 축방향 길이에 따라 영향이 있지만 Type C의 감육배관과 유사하며, 감육부에 압축응력이 작용될 때는 Type N의 감육부를 가진 배관이 Type C인 감육배관에서 보다 높은 하중지지능력을 가지는 것을 알 수 있다. 반면, 감육배관의 변형수용능력은 축방향 길이에 비례해서 증가하므로 Type N의 감육부를 가진 배관이 Type C의 감육형상을 가진 배관에 비해 낮은 변형수용능력을 보였다. 그러므로 노치형태의 감육부를 가진 배관은 Type C의 감육형상을 가진 배관에 비해 하중제어 형태의 하중에는 유사한 하중지지능력을 가지고 있으나, 변위제어 형태의 하중에 취약한 하중지지능력을 보일 것으로 예상할 수 있다.

한편, Type N의 감육배관에서 감육부에 작용하는 응력의 형태에 따른 하중지지능

력을 비교하기 위해 응력 형태에 따른 하중-변형 곡선을 살펴보면, 그림 4에서 보는 것과 같이 감육부의 원주방향 폭에 관계없이 감육부에 압축응력이 작용되는 경우가 인장응력이 작용되는 경우에 비해 높은 하중을 보이고 있다. 이러한 거동은 Type C의 L=25 mm인 경우와 일치하는 경향이며, Type C의 L=200mm인 경우와는 상반된 경향이다. 노치와 Type C의 L=25mm에서 이러한 경향은 감육부에서 압축응력에 의해 국부좌굴이 발생하는 경우가 인장응력에 의해 균열이 발생하는 경우에 비해 낮은 하중지지능력이 보이는 것으로 보고하고 있는 기존의 연구 결과들과 다른 것으로[6,13,14], 본 실험 결과로부터 감육부의 축방향 길이가 짧은 경우에는 이러한 경향이 바뀌는 것을 확인할 수 있었다.

4.3 반복 굽힘하중에 대한 노치형태 감육배관의 피로수명 평가

노치형 감육부를 가진 배관의 반복하중에 대한 특성을 살펴보기 위해서 감육부의 원주방향 폭이 $2\theta = 180^\circ$ 인 감육배관에 변위제어의 일정 변위를 반복적으로 작용시켜 배관의 피로수명을 평가하였다. Fig. 7은 감육 배관에서 반복하중에 의해 균열이 배관을 관통하는 시점까지 반복하중의 횟수를 나타낸 것으로 Type C인 L=25mm와 200mm의 결과와 비교하였다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 Type N의 감육배관에서 피로수명은 Type C인 조건에 비해 감소하고 있으나, 급격한 감소는 관찰되지 않고 단순 굽힘하중이 작용되는 경우의 축방향 길이에 따른 변형수용능력의 거동과 거의 일치하였다. 이것은 배관실험에서 적용된 변위제어 반복하중이 저주기 피로 현상으로 반복 응력량($\Delta\sigma_p$)에 의존하기 보다 반복 변형률량($\Delta\varepsilon_p$)에 의존하기 때문으로 판단된다.

Fig. 8은 반복하중에 따른 노치형 감육배관의 거동을 보다 자세히 살펴보기 위해서 반복 굽힘하중을 변위-하중의 형태로 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 동일한 크기의 변위가 작용될지라도 감육부 축방향 길이에 따라 작용되는 하중 변화량의 크기(ΔF)가 다르게 나타나고 있으며, 양(+)의 방향 하중과 음(-)의 방향 하중의 크기가 대칭이 아닌 것을 알 수 있다. 즉, Type N인 감육부를 가진 배관에서 가장 큰 ΔF 를 보이고 있으며, Type C의 L=200mm에서 가장 작은 ΔF 를 보였다. 또한, Type N과 Type C의 L=25mm에서는 음(-)의 하중이 크게 나타난 반면, Type C의 L=200mm에서는 양(+)의 하중이 크게 나타나고 있다. 이것은 단순 굽힘하중에서 관찰된 것과 같이 감육부의 축방향 길이와 감육부에 작용되는 응력의 형태에 따라 감육 배관의 하중지지능력이 다르기 때문이다.

그림에는 나타내지 않았지만 반복 변위에 따른 하중의 크기 변화를 살펴보면, Type N의 감육형상을 가진 배관에서는 균열이 발생될 때까지 변위가 반복됨에 따라 거의 비슷한 하중 크기를 보였다. 그러나, Type C의 감육부의 길이가 200mm인 시편에서는 초기의 수 회 동안 하중이 증가하고 반복 회수가 계속 증가됨에 따라 다시 하중이 감소하는 것이 관찰되었는데, 이것은 피로현상에서 나타나는 변형강화

와 변형연화의 특징으로 판단된다. 이러한 현상은 반복 굽힘하중에 의한 손상모드 관찰과 잘 일치하는 것으로 반복하중에 따른 변형강화와 연화가 관찰된 Type C의 L=200mm에서는 균열발생에 앞서 감육부에서 팽창이 관찰되고 균열이 축방향에 45°로 생성되는 등 전형적인 피로손상의 특징을 보였으나, 반복하중에 따른 ΔF 의 변화가 거의 관찰되지 않은 Type N 감육배관의 경우에는 단순 굽힘하중에서와 같이 네킹에 의한 손상형태를 보였다.

따라서, 노치형 감육배관은 변형수용능력에서와 같이 변위제어 반복하중이 작용되는 경우는 완만한 감육형상을 가진 배관에 비해 취약한 피로손상 거동을 보였으나, 급격한 피로수명의 감소는 관찰되지 않았다. 또한, 단순 굽힘하중과 반복 하중-변위 곡선에서 유추할 때, 하중제어 형태의 반복하중에 작용되는 경우에는 변위제어 반복하중이 작용되는 경우와는 다른 피로특성을 보일 것으로 예상되지만 정확한 평가를 위해서는 추가의 실험과 해석이 필요한 실정이다.

5. 결론

- (1) 노치형태 감육부(Type N)를 가진 배관에서 단순 굽힘하중에 의한 손상모드는 일반적인 감육형상인 완만한 감육부(Type C)를 가진 배관의 손상모드와 유사하나, 반복 굽힘하중에 의한 손상모드는 완만한 감육부를 가진 배관과 달리 피로에 의한 손상이라기 보다 소성붕괴에 의한 손상형태를 보였다.
- (2) 감육배관의 전체 거동을 탄성 범위에 제한하는 경우, 노치형 감육배관이 완만한 감육형상을 가진 배관에 비해 원주방향 폭과 응력형태에 관계없이 높은 하중지지능력을 보였다.
- (3) 감육배관의 실제 손상을 기준으로 고려하는 경우에는 노치형 감육부를 가진 배관의 하중지지능력은 감육부 폭과 감육부에 작용되는 응력 형태에 따라 결정된다. 즉, 감육부에 인장응력이 작용하는 경우에는 원주방향 폭과 축방향 길이에 따라 차이는 있지만 완만한 감육부를 가진 배관과 유사한 하중지지능력을 보였고, 압축응력이 작용되는 경우에는 노치형태의 감육부를 가진 배관이 완만한 감육형상을 가진 배관 보다 높은 하중지지능력을 보였다.
- (4) 감육부에서 균열 발생에 대한 변형수용능력은 감육부의 축방향 길이에 비례해서 증가하므로 노치형태 감육부를 가진 배관이 완만한 감육형상을 가진 배관에 비해 낮은 변형수용능력을 보였다.
- (5) 노치형 감육배관은 변위제어 반복하중이 작용되는 경우에 완만한 감육형상을 가진 배관에 비해 취약한 피로손상 거동을 보였으나, 급격한 피로수명의 감소는 관찰되지 않았다.

참고 문헌

- (1) Choi, Y. H. and Kang, S. C., 2000, "Evaluation of Piping Integrity in Thinned Main Feedwater Pipes," J. of Kor. Nucl. Soc., Vol. 32, No. 1, pp. 67 ~ 76.
- (2) Frank, M., Hans, R., and Helmut, S., " Experience with piping in German NPPs with respect to ageing-related aspects.," 2001, Nucl. Eng. & Des., Vol.207, pp. 307 ~ 316.
- (3) Chexal, B., Horowitz, J., Dooley, B., Millett, P., Wood, C., and Jones, R., 1998, "Flow-Accelerated Corrosion in Power Plant," EPRI/TR-106611-R2.
- (4) Virginia Electric and Power Co., 1989, "Surry Unit 2 Reactor Trip and Feedwater Pipe Failure Report."
- (5) Kuen, T. and Yin, P. M., "The evaluation of erosion/corrosion problems of carbon steel piping in Taiwan PWR nuclear power plant.," Nucl. Eng. & Des., Vol.191, pp.231 ~ 243.
- (6) Japan Atomic Energy Research Institute, 1993, "Technical Reprt on the Piping Reliability Tests at the Japan Atomic Energy Research Institute (Japanese)," JAERI-M, 93-074, pp. 104 ~ 115.
- (7) Merz, K. L. and Ibanez, P., 1993, "Seismic and dynamic reliability of eroded/corroded piping components.," EPRI TR-102066.
- (8) American Society of Mechanical Engineer, ASME B&PV Code Sec.III, 1995 ed., "Nuclear Components."
- (9) American Society of Mechanical Engineer, ANSI/ASME B31.1, 1995ed., "Power Piping Code."
- (10) American Society of Mechanical Engineer, ASME B&PV Sec.XI, Div.1, 1998ed., ASME Code Case N-597, "Requirement for Analytical Evaluation of Pipe Wall Thinning."
- (11) Wilkowski, G., Stephens, D., Krishnaswamy, P., Leis, B., and Rudland, D., 2000, Nucl. Eng. & Des., Vol.195, pp. 149 ~ 169.
- (12) 최재봉, 김진수, 구분걸, 김영진, 최영환, 2001, 재료물성을 고려한 감육배관의 공학적 한계하중해 제시, 대한기계학회 춘계학술대회논문집 A 권, pp.351 ~ 356.
- (13) Ando, K., Ahn, S. H., Ishiwata, M., and Hasegawa, K., 1999, "Plastic Collapse Behavior of Pipe with Local Wall Thinning Subjected to Bending Moment," Proc. SMiRT-15, Vol. 5, pp. v257 ~ v264.
- (14) 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," Nucl. Eng. & Des, Vol.191, pp. 195 ~ 204.
- (15) 김진원, 박치용, 이성호, 간태경, 2001, 감육배관의 손상모드에 미치는 감육부 길이의 영향, 대한기계학회 춘계학술대회논문집 A 권, pp.357 ~ 362.

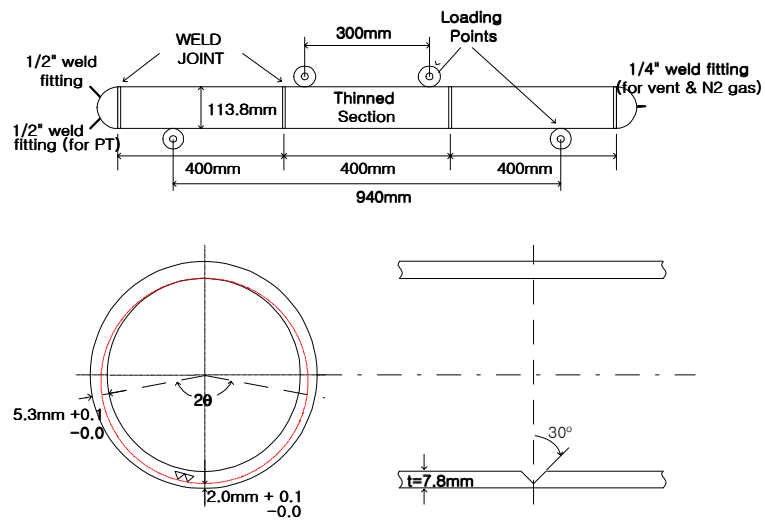


Fig. 1 Geometry of pipe specimen and local wall thinning shape.

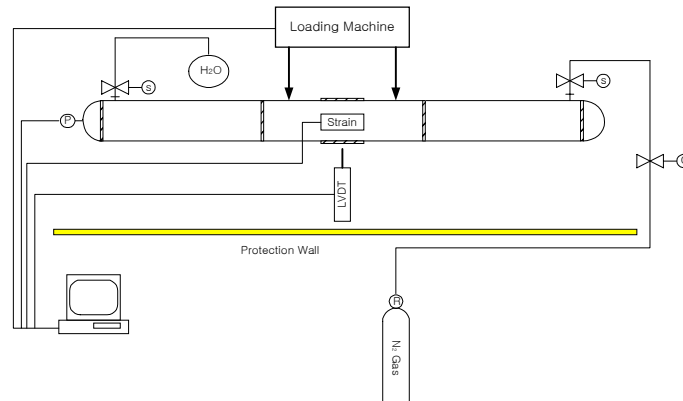
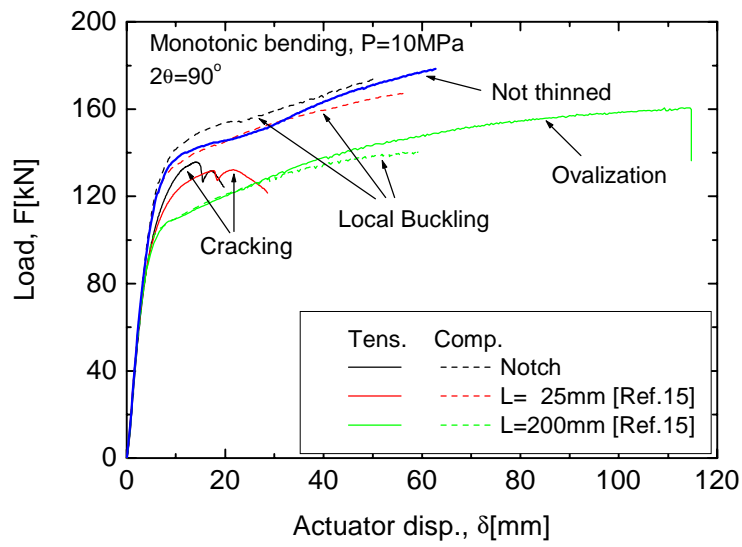


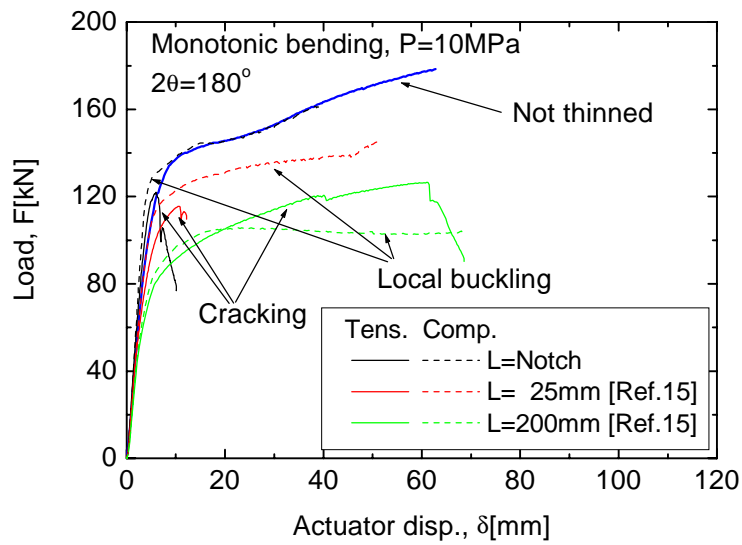
Fig. 2 Schematic diagram of pipe test loop.



Fig. 3 Photograph of 4 points loading frame with pipe specimen.



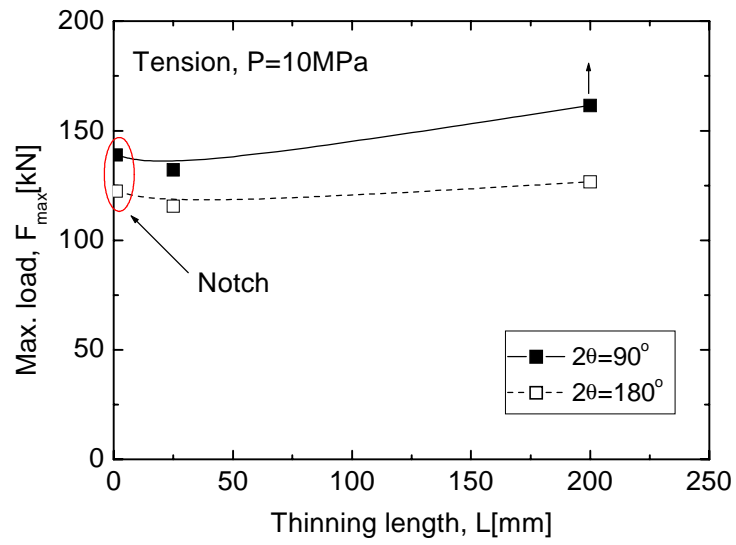
(a)



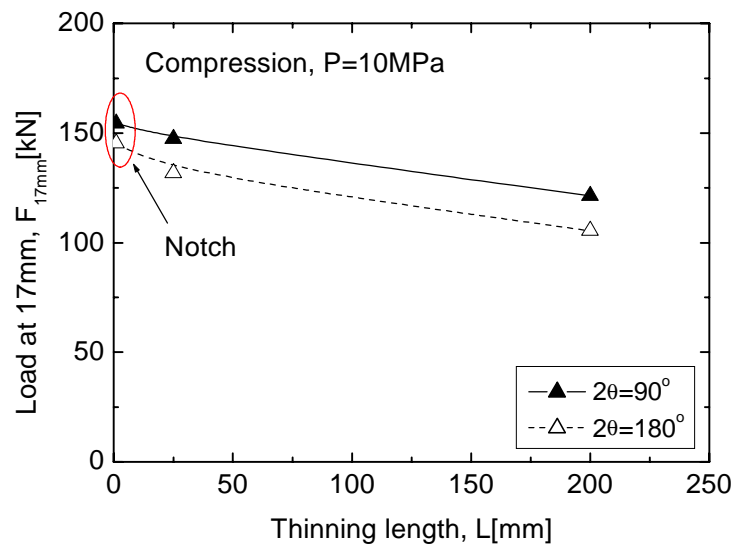
(b)

Fig. 4 Load-displacement curves of locally wall thinned pipes ;

(a) $2\theta=90^\circ$, (b) $2\theta=180^\circ$



(a)



(b)

Fig. 5 Load carrying capacity of pipe with local wall thinning subjected to (a) tensile stress, (b) compressive stress

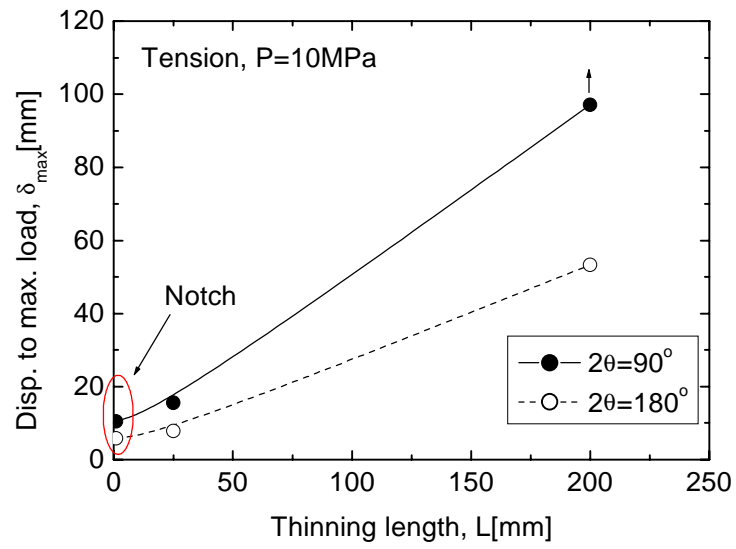


Fig. 6 Deformability of pipe with local wall thinning subjected to tensile stress

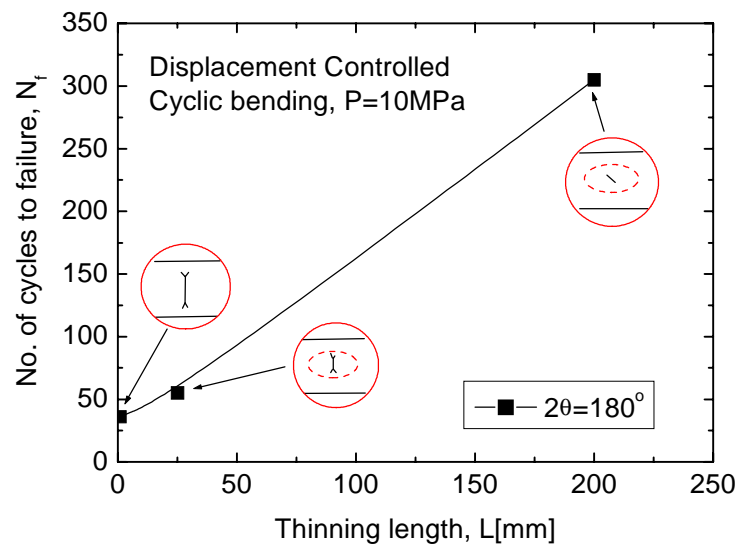
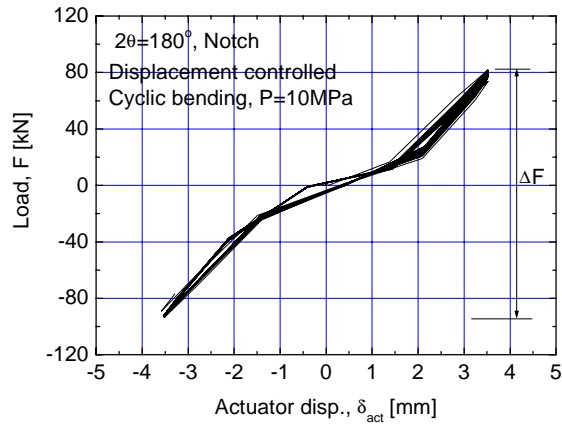
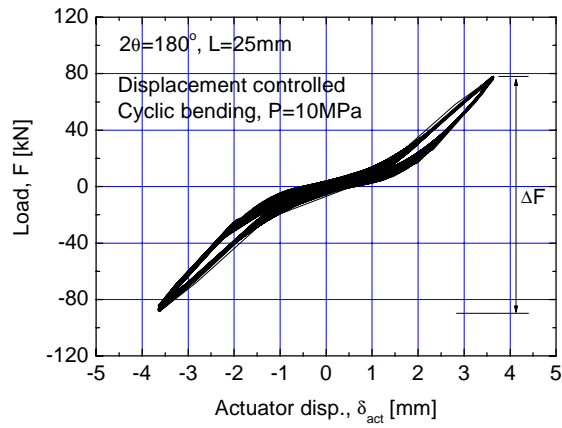


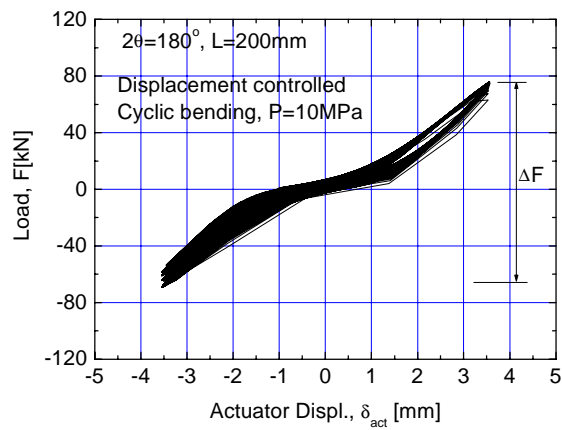
Fig. 7 Fatigue life of locally wall thinned pipe under cyclic bending moment



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 Cyclic displacement vs. load curves for (a) Notch, (b) L=25mm, (c) L=200mm