

원주방향 노치형 감육부를 가진 배관의 손상거동 평가

김진원[†] · 박치용^{*}
(2002년 7월 11일 접수, 2003년 6월 2일 심사완료)

Evaluation of Failure Behavior of a Pipe Containing Circumferential Notch-Type Wall Thinning

Jin-Weon Kim and Chi-Yong Park

Key Words: Pipe Wall Thinning (배관감육), Notch-Type Thinning (노치형 감육), Full-Scale Pipe Test (배관실증시험), Failure Mode (손상모드)

Abstract

In order to evaluate a failure behavior of pipe with notch-type wall thinning, the present study performed full-scale pipe tests using the 102mm, Schedule 80 pipe specimen simulated notch- and circular-type thinning defects. The pipe tests were conducted under the conditions of both monotonic and cyclic bending moment at a constant internal pressure of 10 MPa. From the results of experiment, the failure mode, load carrying capacity, deformation ability, and fatigue life of a notch-type wall thinned pipe were investigated, and they were compared with those of a circular-type wall thinned pipe. The failure mode of notched pipe was similar to that of circular-type thinned pipe under the monotonic bending load. Under the cyclic bending load, however, the mode was clearly distinguished with variation in the shape of wall thinning. The load carrying capacity of a pipe containing notch-type wall thinning was about the same or slightly lower than that of a pipe containing circular-type wall thinning when the thinning area was subjected to tensile stress, whereas it was higher than that of a pipe containing circular-type thinning defect when the thinning area was subjected to compressive stress. On the other hand, the deformation ability and fatigue life of a notch-type wall thinned pipe was lower than those of a circular-type wall thinned pipe.

1. 서론

원자력발전소의 배관계통은 운전 중 다양한 하중과 환경에 노출되기 때문에 다른 기기들에 비해 열화에 의한 손상 가능성이 높은 것으로 알려져 있다.^(1,2) 이러한 열화 현상중 하나가 탄소강 배관의 유동가속부식 (Flow Accelerated Corrosion, FAC)에 의한 두께 감소 (감육) 현상이다.^(2,3) 탄소강 배관에서 FAC에 의한 감육 현상은 결함의 특성상 발전소의 가동 년 수가 증가됨에 따라 발생

빈도가 증가하고 배관의 순간적인 파열을 유발할 수 있기 때문에, 원자력발전소의 안전성과 운영성 측면에서 중요한 관리 항목으로 다루어지고 있다.^(3~5) 따라서, 최근 감육배관에 대한 건전성 평가와 허용기준 확립을 위한 많은 실험적·이론적 연구들이 수행되었으며,^(6~11) 이들 연구 결과를 기반으로 몇몇 평가 절차나 두께 허용기준들이 제안되고 있다. ASME Sec.XI에서는 가스나 오일 배관의 부식결함 평가 절차⁽¹²⁾와 설계코드⁽¹³⁾의 두께 결정 개념을 결합하여 ASME Sec.XI Code Case N-597⁽¹⁴⁾을 제시하였으며, JAERI⁽⁶⁾와 Hasegawa^(10,11) 등은 실배관 실험 결과와 균열 평가식에 기초하여 감육배관에 대한 건전성 평가 방법을 제시한 바 있다.

그러나, 이러한 노력에도 불구하고 아직까지

[†] 책임저자, 회원, 조선대학교 원자력공학과
E-mail : jwkim@chosun.ac.kr
TEL : (062)230-7109 FAX : (062)230-9218
^{*} 회원, 한전 전력연구원 원자력연구실

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)	Ultimate Stress, σ_{uts} (MPa)	Elongation, %
302.0	449.8	30.1

원전 배관에서 발견되고 있는 다양한 형태의 감육 형상과 하중을 충분히 고려할 수 있는 평가 방법들이 제시되지 못하고 있다.^(7,9) 특히, 최근 원전 배관에서 발견된 것과 같은 노치형 감육 형상에 대해서는 기존의 방법들이 전혀 고려하지 못하고 있으며,⁽¹⁵⁾ 이와 같은 결함에 대해서는 손상거동 조차 정확히 파악하지 못하고 있는 실정이다. 노치형태의 감육은 일반적으로 관찰되는 감육 형상은 아니지만, 배관이 밸브, 펌프 등과 같은 다른 기기들과 연결되어 있는 경우에 용접 루트(root)와 같은 불연속적인 형상 변화나 재질의 전기화학적 차이에 의해 국부적으로 발생할 수 있는 감육 형태인 것으로 알려져 있다.^(3,15) 따라서, 감육배관에 대한 건전성 평가 방법 및 허용 두께기준을 확립하기 위해서는 노치형 감육부를 가진 배관의 손상거동과 배관의 건전성에 미치는 노치형 감육결합의 영향을 이해하는 것이 우선적으로 필요하다.

따라서, 본 논문에서는 배관의 건전성에 미치는 노치형 감육 결함의 영향과 손상거동을 파악하기 위해서, 노치형태(N-type)와 완만한 형상(C-type)의 감육을 모사한 배관 시편을 이용하여 실험실 실험을 수행하였다. 배관실험에는 일정한 내압에서 단순 굽힘하중과 반복 굽힘하중이 고려되었으며, 실험 결과로부터 감육 형상에 따른 손상모드, 하중지능력, 변형수용능력, 그리고 반복하중에 따른 피로수명 등이 평가되었다.

2. 배관 재료 및 배관 시편

2.1 배관 재료

실험에 사용된 배관 재료는 원전의 2차 계통에 많이 사용되고 있는 ASTM A333 Gr.6 탄소강이며, 실험장치의 용량을 고려하여 102mm, Sch.80

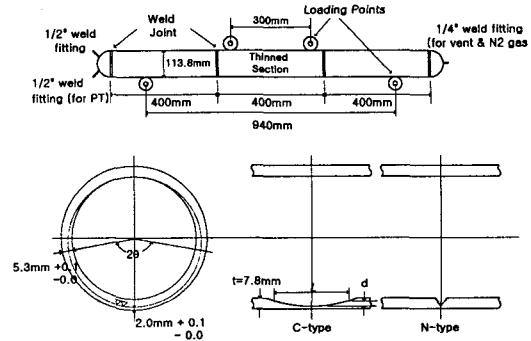


Fig. 1 Dimensions of pipe specimen and local wall thinning shape

(외경(D_o) = 114.3mm, 두께(t) = 8.5mm)의 배관이 사용되었다. 배관 재료의 화학조성과 인장물성치는 Table 1과 2에 나타낸 바와 같다. 화학조성은 재료 시험성적서에서 제공된 값이며, 인장 물성치는 배관의 길이 방향에서 채취된 시편을 사용하여 상온에서 시험한 결과이다.

2.2 배관 시편

배관 시편은 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 총 길이가 1200mm로 감육 결함의 가공을 위해서 400mm인 직관 3개를 용접하여 제작하였으며, 가운데 배관이 감육형상을 가공한 시험부이다. 시험부의 감육 형상은 Fig. 1에서 보인 것과 같이 C-type의 감육부에 대해서는 원주방향과 길이방향으로 모두 일정한 반경을 가지는 원형이 되도록 가공하였고, N-type 감육부에 대해서도 원주방향으로는 C-type과 같이 일정한 반경을 가지는 원형이 되도록 가공하였다. 모든 시편에서 감육부의 최소 두께는 실험 압력과 시험기의 용량을 고려하여 2.0mm로 설계하였다. Table 3에 제시된 감육부의 크기는 두께가 설계코드⁽¹³⁾의 최소설계 요구두께(t_{min}) 이하인 영역의 원주방향 폭(2θ)과 축방향 길이(L), 그리고 깊이(d)로 정의하였다.

배관의 초기 형상을 균일하게 하기 위해 외경을 113.8mm, 두께를 7.8mm로 가공한 후 시험부에 감육형상을 가공하였다. 모든 시편은 가공 후 초음파 두께측정을 통해 감육형상과 두께에 대한 가공 오차를 확인하였다. 측정 결과, 모든 시편에서 최소 가공두께는 2.0~2.1mm의 범위에 있었으며, 가공형상도 시편의 설계조건과 일치함을 확인하였다.

3. 실험 장치 및 방법

3.1 실험 장치

배관실험에 사용된 시험 장치는 Fig. 2에 개략적으로 나타낸 것과 같이 크게 가압 장치와 굽힘 하중 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 시편 내의 압력을 조절하였다. 굽힘하중 장치는 가진기(Actuator)와 4-점 굽힘지그로 구성된다. 4-점 굽힘지그는 곡률을 가진 볼러 형태로 제작되어 배관 시편과 하중작용 위치가 구멍을 이루며 접촉할 수 있도록 하였다. 또한, 하중이 작용되는 동안 볼러의 틀이 회전할 수 있도록 제작되어 배관에서 대변형의 굽힘이 발생할지라도 하중 점과 하중 방향이 일정하게 유지되도록 하였다.

3.2 실험방법 및 데이터 측정

배관실험은 Table 3과 같은 조건에서 수행되었으며, 작용하중으로는 내압과 굽힘하중이 감육부에 동시에 작용되도록 고려하였다. 굽힘하중으로는 단순 굽힘하중과 반복 굽힘하중을 고려하였으며, 단순 굽힘하중은 감육부에 압축응력이 작용되는 경우와 인장응력이 작용되는 경우로 구분하여 작용되었다. 모든 실험은 상온에서 수행하였으며, 먼저 가압하여 일정한 내압을 유지한 후

굽힘하중을 작용시켰다. 단순 굽힘하중은 변위제어 형태로 작용되었으며, 이때 가진기의 이동 속도는 2mm/min로 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 허용 변위량을 고려하여 가진기를 정지하였다. 반복 굽힘하중 역시 변위제어로 감육부에서 균열이 발생할 때까지 일정한 변위를 반복하여 작용시켰다. 시편에 적용된 반복 변위의 크기($\Delta \delta_{net}$)는 $\pm 2.7\text{mm}$ 로 실제 가진기 변위($\Delta \delta_{act}$)는 시험배관과 하중점 사이의 유격을 고려하여 $\pm 3.65\text{mm}$ 가 되도록 설정하였다. $\Delta \delta_{net} = \pm 2.7\text{mm}$ 는 식 (1)로 주어지는 지진하중에 대한 허용응력 기준을 적용하여 감육이 없는 배관의 굽힘모멘트에 해당하는 변위로부터 결정하였다.

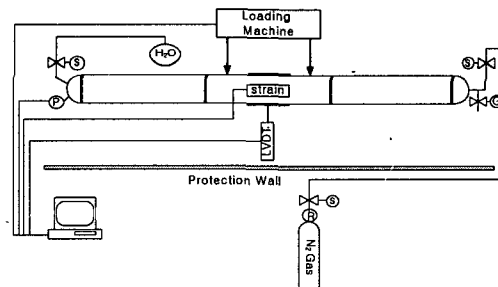


Fig. 2 Schematic diagram of pipe test loop

Table 3 Matrix of full-scale pipe tests and failure mode

Spec. ID	d/t_{min}	θ / π	L(mm)	P(MPa)	Loading Type	Observed Failure Mode			
SP-11	0.623	0.25	Notch	10	Monotonic	Tension	Cracking (Cir.)		
SP-12			25			Tension	Cracking (Cir.)		
SP-13			200			Tension	Ovalization		
SP-14			Notch			Compression	Local Buckling		
SP-15			25			Compression	Local Buckling		
SP-16			200			Compression	Local Buckling		
SP-37		0.50	Notch		10	Monotonic	Tension	Cracking (Cir.)	
SP-01			25				Tension	Cracking (Cir.)	
SP-04			200				Tension	Cracking (Cir.)	
SP-38			Notch				Compression	Local Buckling	
SP-05			25				Compression	Local Buckling	
SP-08			200				Compression	Local Buckling	
SP-35		0.50	0.50		Notch	10	Cyclic	Tens.+Comp.	Cracking (Cir.)
SP-23					25			Tens.+Comp.	Cracking (Cir.)
SP-24					200			Tens.+Comp.	Cracking (45°)

$$B_1 \frac{P_{max} D_o}{2t_{nom}} + B_2 \frac{D_o M_i}{2I} = 3S \quad (1)$$

식 (1)에서 S 는 재료의 최대 허용응력이며, P_{max} 는 최대 운전압력, M_i 는 배관에 작용되는 굽힘모멘트의 합, I 는 배관의 관성모멘트, B_1 과 B_2 는 설계코드에서 주어지는 1차응력 지수다.⁽¹³⁾ 반복하중에 대한 감육배관의 피로수명은 감육부에서 균열 관통에 의해 누설이 발생할 때까지의 반복 회수로 정의하였다.

하중이 작용되는 동안에 작용하중, 내압, 배관의 변위, 그리고 감육부 표면의 변형률이 측정되었다. 또한, 비디오카메라를 이용하여 배관의 변형과 파열 등 전 과정을 기록하였다.

4. 실험결과 및 토의

4.1 노치형 감육부의 손상모드

각 실험조건에서 관찰된 손상모드를 Table 3에 정리하였다. 표에서 알 수 있는 것과 같이 단순 굽힘하중이 작용되는 경우의 손상모드는 $\theta/\pi = 0.25$, $L = 200\text{mm}$ 인 조건을 제외하면 감육부에 작용되는 응력 상태에 따라 원주방향의 균열 발생과 국부좌굴에 의한 손상으로 크게 구분되었다. 또한, 반복 굽힘하중이 작용되는 경우에는 모든 감육 형상에서 균열 발생에 의한 손상이 관찰되었다. 따라서, 거시적인 손상형태는 감육부에 작용되는 응력 상태에 의존하며, 감육부 형상에 따른 영향은 거의 없는 것으로 관찰되었다. 즉, 노치형 감육부를 가진 배관의 거시적 손상모드가 완전한 형상의 감육부를 가진 배관과 유사한 것을 알 수 있다.

그러나, 손상에 수반되는 감육부의 변형이나 균열 형상을 살펴보면, 감육부 형상에 따른 차이를 관찰할 수 있다. Fig. 3은 $\theta/\pi = 0.50$ 인 감육 배관에서 작용하중에 따른 N-type과 C-type 감육 배관의 손상부를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 보인 것과 같이 단순 굽힘하중에 의해 균열이 발생하는 경우 N-type 감육부는 C-type에 비해 뚜렷한 네킹 현상을 보였으며, 국부좌굴이 발생하는 경우에는 C-type에 비해 N-type의 감육부에서 국부좌굴이 매우 작게 나타났다.

한편, 반복 굽힘하중이 작용되는 경우에는 단순 굽힘하중에 비해 감육 형상에 따른 차이가 보

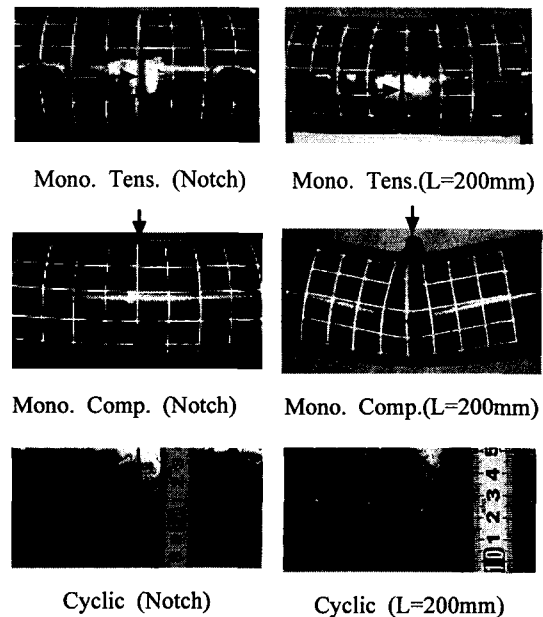


Fig. 3 Characteristics of failure mode of wall thinned pipe under monotonic and cyclic bending loads

다 뚜렷이 나타나는 것을 알 수 있다. C-type의 감육부를 가진 배관에서는 반복 굽힘하중이 작용됨에 따라 감육부가 팽창하고, 팽창된 부분에서 균열이 발생되었다. 특히, $L = 200\text{mm}$ 인 경우에는 축방향에 대해 45° 방향으로 단면 변형이 거의 없이 작은 균열이 생성되었다. 즉, 균열이 주응력의 45° 방향인 슬립 방향을 따라 생성된 것으로 전형적인 피로 균열의 특징을 보여주고 있다.⁽¹⁶⁾ 반면, N-type의 감육부에서는 단순 굽힘하중이 작용될 때와 같이 네킹을 수반한 원주방향의 균열 발생을 보였다. 따라서, N-type 감육형상을 가진 배관에서는 반복하중이 작용되는 경우에도 노치 선단에서 높은 응력 집중 때문에 슬립면이 감육부 단면의 45° 방향으로 형성되어 소성붕괴와 유사한 원주방향의 균열이 발생하는 것을 알 수 있다. 또한, 이들 결과에서 단순 굽힘하중에 비해 반복 굽힘하중이 작용되는 경우에 감육형상에 따른 손상모드의 변화가 뚜렷하게 나타나는데, 이것으로부터 감육부에서 응력 및 변형률의 집중이 단순 굽힘하중에 비해 반복 굽힘하중에 의한 손상에 민감하게 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

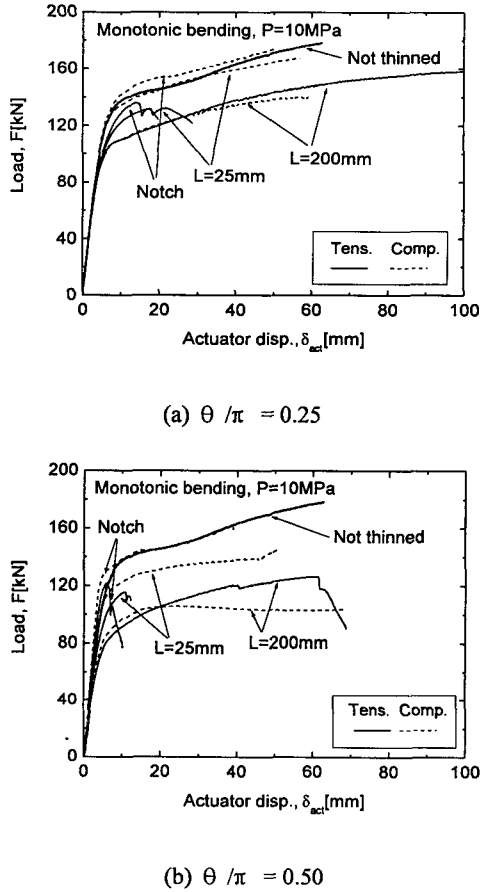


Fig. 4 Load-displacement curves of locally wall thinned pipes

4.2 단순 굽힘하중에 대한 노치형 감육배관의 하중-변형 거동

단순 굽힘하중이 작용되는 동안 노치형 감육배관의 전체적인 변형 거동을 살펴보기 위해서, 감육배관의 하중-변위 곡선을 감육부의 형상에 따라 비교하였다. Fig. 4에서 보인 것과 같이 감육부에 인장응력이 작용되는 경우, 하중-변위 곡선의 기울기가 감육부 길이의 감소에 따라 증가하여, 노치형 감육배관에서 가장 크게 나타났다. 또한, 배관의 전체적인 변형 거동이 비선형 거동을 보이기 시작하는 하중 역시 감육부의 원주방향 폭에 관계없이 감육부 길이가 감소함에 따라 증가하여, 노치형 감육배관에서 가장 높은 값을 보였다. 그러나, 균열 발생까지 허용되는 소성변형의량은 감육부 길이가 감소함에 따라 감소하여,

N-type 감육배관에서는 거의 소성변형 없이 균열이 발생하였다.

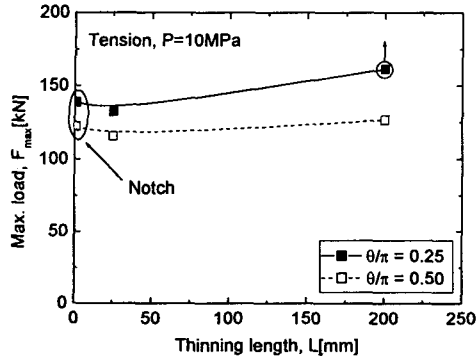
감육부에 압축응력이 작용되는 경우에는 국부 좌굴이 발생하므로 배관이 소성 거동을 보이면서 하중이 계속 증가하거나, 감육부의 폭과 길이가 긴 경우($\theta/\pi = 0.50, L = 200\text{mm}$)에는 증가하다가 감소하는 경향을 보였다. 이 경우에도 전체적인 배관의 변형 거동이 선형성에서 벗어나기 시작하는 하중은 감육부 길이가 감소함에 따라 증가하여 N-type 감육부를 가진 배관이 가장 높게 나타나고 있다. 특히, $\theta/\pi = 0.25$ 에서 N-type의 감육배관은 감육이 없는 배관보다 높은 하중-변위 곡선을 보였으며, $\theta/\pi = 0.50$ 인 경우에도 감육이 없는 배관과 유사한 하중-변위 곡선을 보였다.

따라서, 배관의 변형에 대한 허용범위를 탄성 영역으로 제한하는 경우, 감육부의 원주방향 폭과 감육부의 응력형태 등에 관계없이 N-type 감육부를 가진 배관이 C-type 감육부를 가진 배관에 비해 높은 하중지지능력을 보이는 것을 알 수 있다.

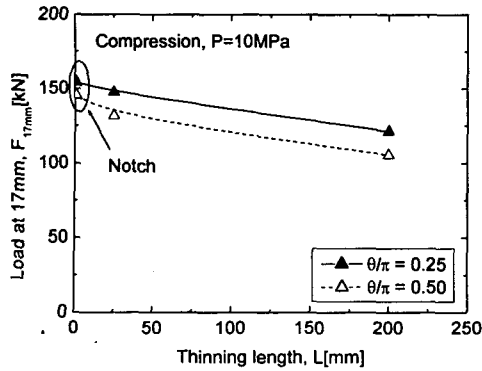
4.3 노치형 감육배관의 하중지지능력 및 변형 수용능력

노치형 감육배관의 하중지지능력을 보다 정량적으로 살펴보기 위해서, 감육부에 인장응력이 작용되는 경우는 하중-변위 곡선에서 최대하중을 그리고 국부좌굴이 발생하는 경우는 $\delta_{act} = 17\text{mm}$ 에 해당하는 하중을 감육부 형상에 따라 비교하였다. Fig. 5(a)에 나타낸 바와 같이 감육부에 인장응력이 작용되는 경우, 노치형 감육배관의 최대하중은 $L = 25\text{mm}$ 인 경우보다 높고, $L = 200\text{mm}$ 와 비교하면 $\theta/\pi = 0.25$ 일 때는 낮은 보이고, $\theta/\pi = 0.50$ 에서는 유사한 값을 보였다. 감육부에 압축응력이 작용되는 경우(Fig. 5(b))에는 원주방향 폭에 관계없이 감육부 길이에 따라 하중이 감소하므로 N-type의 감육배관에서 가장 높은 하중을 보였다.

한편, 굽힘에 대한 감육배관의 변형수용능력을 살펴보기 위해서, Fig. 6과 같이 최대하중까지의 변위를 감육부 형상에 따라 나타내었다. 감육부에서 국부좌굴이 발생하는 경우에는 최대하중이 정의되지 않으므로 감육부에 인장응력이 작용되는 경우만을 살펴보았다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 최대하중까지의 변위는 N-type 감육배



(a) Tensile stress



(b) Compressive stress

Fig. 5 Load carrying capacity of pipe with local wall thinning

관에서 가장 작은 값을 보였으며, 축방향 길이가 증가함에 따라 증가하였다. 또한, 축방향 길이에 따른 증가는 감육부의 원주방향 폭이 작은 경우에 크게 관찰되었다.

따라서, 원주방향 폭과 축방향 길이에 따라 차이가 있지만, 감육부에 인장응력이 작용될 때는 N-type 감육배관의 하중지지능력은 C-type의 감육배관과 유사하며, 감육부에 압축응력이 작용될 때는 N-type의 감육부를 가진 배관이 C-type인 감육배관에서 보다 높은 하중지지능력을 가지는 것을 알 수 있다. 반면, 감육배관의 변형수용능력은 축방향의 감육길이에 비례해서 증가하므로 N-type 감육부를 가진 배관이 C-type 감육형상을 가진 배관에 비해 낮은 변형수용능력을 보였다. 그러므로, 노치형태의 감육부를 가진 배관은

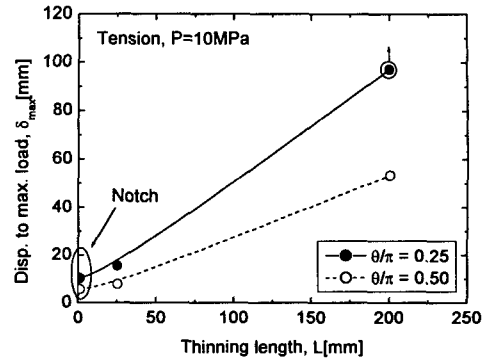


Fig. 6 Deformation ability of pipe with local wall thinning subjected to tensile stress

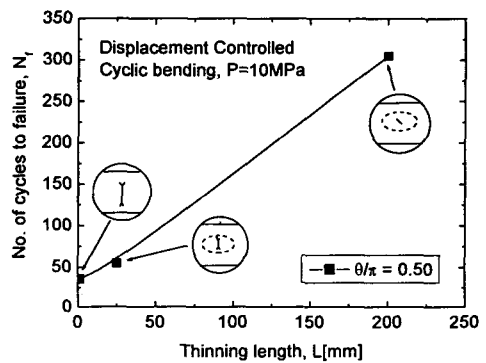


Fig. 7 Fatigue life of local wall thinned pipe under cyclic bending moment

C-type의 감육형상을 가진 배관에 비해 하중제어 형태의 하중에는 유사한 하중지지능력을 보이는 반면, 변위제어 형태의 하중에는 취약한 하중지지능력을 보이는 것을 알 수 있다.

4.4 반복 굽힘하중에 따른 노치형 감육배관의 손상

반복 굽힘하중에 따른 노치형 감육배관의 손상 특성을 살펴보기 위해서, 감육부의 원주방향 폭이 180°인 감육배관에 일정한 변위를 반복적으로 작용시켜 피로수명을 평가하였다. Fig. 7은 감육배관에서 반복 굽힘하중에 의해 균열이 배관을 관통하는 시점까지 작용된 반복 변위의 횟수를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 N-type의 감육배관에서 피로수명이 가장 짧았으

며, 감육부의 길이가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 그러나, C-type의 감육배관과 비교하여 N-type의 감육배관에서 급격하게 피로수명이 감소하지는 않았다. 또한, 감육부 형상에 따른 피로수명의 변화 경향은 감육부 형상에 따른 변형수용능력의 변화 경향과 거의 일치하였다. 감육부 형상에 따른 피로수명의 변화와 변형수용능력 사이의 유사성은 저주파 고변형률인 변위제어 형태의 반복하중에서 피로수명이 반복되는 응력의 크기보다 반복 변형률의 크기에 의존하기 때문으로 판단된다.⁽¹⁶⁾

Fig. 8은 반복하중에 따른 노치형 감육배관의 거동을 보다 자세히 살펴보기 위해서 반복 굽힘하중을 변위-하중의 형태로 나타낸 것이다. 그림에서 보는 것과 같이 동일한 변위($\Delta \delta_{net} = \pm 2.7\text{mm}$)가 작용될지라도 감육부의 축방향 형상에 따라 작용되는 하중의 변화량(ΔF)이 다르게 나타나고 있으며, 양(+)의 방향 하중과 음(-)의 방향 하중의 크기가 대칭을 아닌 것을 알 수 있다. 즉, N-type의 감육배관에서 가장 큰 ΔF 를 보였으며, C-type의 $L = 200\text{mm}$ 에서 가장 작은 ΔF 를 보였다. 또한, 노치형과 $L = 25\text{mm}$ 인 감육배관에서는 음(-)의 방향 하중이 큰 반면, $L = 200\text{mm}$ 인 감육배관에서는 양(+)의 방향 하중이 크게 나타났다. 이것은 단순 굽힘하중 실험 결과에서 본 바와 같이 감육부의 축방향 형상과 감육부에 작용되는 응력의 형태에 따라 감육배관의 하중지지능력이 다르기 때문이다. 한편, N-type 감육배관에서는 전체 수명기간동안 거의 일정한 ΔF 를 보인 반면, $L = 200\text{mm}$ 인 C-type 감육배관에서는 반복하중이 작용되는 동안 ΔF 의 변화가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이러한 하중의 변화는 피로손상에서 나타나는 감육부의 변형강화와 변형연화 현상에 기인하는 것으로,⁽¹⁶⁾ $L = 200\text{mm}$ 인 경우에는 초기 수주기 동안 변형강화 현상이 뚜렷이 나타나고, 그 이후 연속적인 변형연화 현상이 관찰되었다. 하중-변위 거동에서 이러한 특징들은 감육부 형상에 따른 손상모드의 차이와 일치하는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 배관의 건전성에 미치는 노치형 감육결합의 영향을 파악하기 위해 노치형태와 완

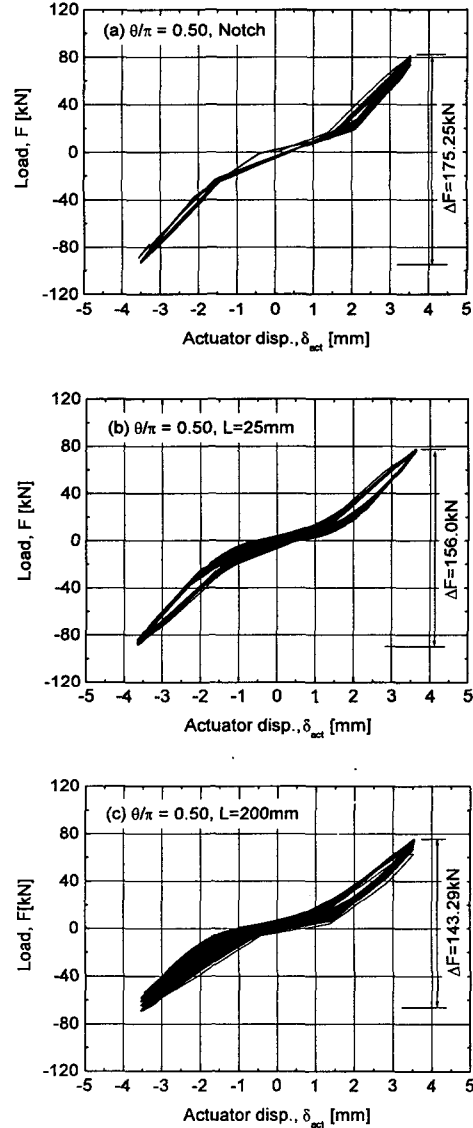


Fig. 8 Cyclic load vs. displacement curves for (a) Notch, (b) $L=25\text{mm}$, (c) $L=200\text{mm}$

만한 형상의 감육결합을 가진 배관을 이용하여 실험을 수행하였다. 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 단순 굽힘하중이 작용되는 경우, 노치형 감육부를 가진 배관의 손상모드는 완만한 감육부를 가진 배관과 거의 유사했다. 그러나, 반복 굽힘하중이 작용되는 경우, 완만한 형상의 감육배관은

감육부의 팽창과 팽창부에서 균열 발생을 보인 반면, 노치형 감육배관은 감육부에서 네킹을 수반한 균열 발생을 보였다.

(2) 감육배관의 붕괴에 대한 하중지지능력은 감육부에 인장응력이 작용되는 경우 노치형 감육배관이 완전한 형상의 감육결함을 가진 배관과 유사하거나 약간 낮은 값을 보였고, 압축응력이 작용되는 경우에는 노치형 감육배관이 완전한 형상의 감육부를 가진 배관 보다 높은 하중지지능력을 보였다. 그러나, 감육배관의 손상에 대한 기준을 탄성영역에 제한하는 경우에는 응력 형태에 관계없이 노치형 감육배관이 완전한 감육 형상을 가진 배관에 비해 높은 하중지지능력을 보였다.

(3) 감육배관의 변형수용능력과 피로수명은 감육부의 축방향 길이에 비례해서 증가하므로, 완전한 감육결함을 가진 배관과 비교하여 노치형 감육배관이 변위제어 형태의 하중과 피로손상에 취약한 거동을 보였다.

참고문헌

- (1) Choi, Y. H., Park, Y. W., and Wilkowski, G., 1999, "An Experimental Study on the Fracture Behavior of Nuclear Piping System with a Circumferential Crack(I)," *Trans. of KSME(A)*, Vol. 23, No. 7, pp. 1182~1195.
- (2) Frank, M., Hans, R., and Helmut, S., 2001, "Experience with Piping in German NPPs with Respect to Ageing-Related Aspects.," *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., 1999, "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) Kim, J. W., Park, C. Y., and Kim, B. N., 2001, "Evaluation of Local Wall Thickness of Thinned Pipe Subjected to Internal Pressure and Bending Moment," *Trans. of KSME(A)*, Vol. 25, No. 1, pp. 81~88.
- (8) Wilkowski, G., Stephens, D., Krishnaswamy, P., Leis, B., and Rudland, D., 2000, "Progress in Development of Acceptance Criteria for Local Thinned Areas in Pipe and Piping Components," *Nucl. Eng. & Des.*, Vol. 195, pp. 149~169.
- (9) Choi, J. B., Kim, J. S., Goo, B. G., Kim, Y. J., and Choi, Y. H., 2001, "Engineering Estimation of Limit Load Solution for Wall-thinned Pipes Considering Material Properties," *Proceedings of the KSME 2001 Spring Annual meeting (A)*, pp. 351~356.
- (10) 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.
- (11) Hasegawa, K., Sakata, K., Miyazaki, K., and Kanno, S., 2002, "Fatigue Strength for Pipes with Allowable Flaws and Fatigue Design Curve," *Int. J. of Pres. Vess. & Piping*, Vol. 79, pp. 37~44.
- (12) American Society of Mechanical Engineer, ANSI/ASME B31.G, 1991, "Manual for Remaining Strength of Corroded Pipelines."
- (13) American Society of Mechanical Engineer, ASME B&PV Code Sec.III, 1995 ed., "Nuclear Components."
- (14) American Society of Mechanical Engineer, ASME B&PV Sec.XI, Div.1, 1998, ASME Code Case N-597, "Requirement for Analytical Evaluation of Pipe Wall Thinning."
- (15) 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.
- (16) Fuchs, H. O. and Stephens, R. I., 1980, "Metal Fatigue in Engineering," John Wiley & Sons, Inc.