

배관실험을 통한 국부감육 배관의 손상거동 평가

김진원* · 박치용*
(2001년 8월 3일 접수, 2002년 1월 21일 심사완료)

An Evaluation of Failure Behavior of Pipe with Local Wall Thinning by Pipe Experiment

Kim Jin Weon and Park Chi Yong

Key Words: Pipe Wall Thinning(배관감육), Failure Mode(손상모드), Pipe Failure Test(배관손상시험), Thinning Length(감육길이), Flow Accelerated Corrosion(유동가속부식)

Abstract

To understand failure behavior of pipe thinned by flow accelerated corrosion, in this study, the pipe failure tests were performed on 102mm-Sch.80 carbon steel pipe with various local wall thinning shapes, and the failure mode, load carrying capacity, and deformability were investigated. The tests were conducted under loading conditions of 4-points bending and internal pressure. The experimental results showed that the failure mode of thinned pipe depended on magnitude of internal pressure and thinning length as well as loading direction and thinning depth and angle. The variation in load carrying capacity and deformability of thinned pipe with thinning length was determined by stress type applied to the thinning area and circumferential thinning angle. Also, the effect of internal pressure on failure behavior was dependent on failure mode of thinned pipe, and it promoted crack occurrence and mitigated local buckling at thinned area.

1. 서론

원자력발전소는 수많은 배관으로 구성되어 있으며, 이들 배관은 압력경계로서 고에너지의 유체를 이송하는 역할을 하기 때문에 배관의 건전성은 발전소의 안전성 뿐 아니라 고유의 기능 유지 측면에서 매우 중요하다.^(1,2) 그러나, 원전 배관은 운전 중에 다양한 하중과 환경에 노출되어 있으므로 발전소의 가동 년 수가 증가됨에 따라 여러 형태의 열화 기구에 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) 현상

에 의한 배관의 두께가 감소되는 배관감육의 손상 가능성이 높은 것으로 알려져 있다.^(2~4) 이러한 형태의 배관 손상 사례는 국내·외의 많은 발전소에서 보고되고 있으며, 가동 년 수가 증가됨에 따라 발생 빈도가 더욱 증가될 것으로 예상되고 있다.^(2,4~6) 따라서, 최근 감육에 의한 배관 손상은 원자력발전소의 안전성과 운전성 측면에서 매우 중요한 관리 항목으로 고려되고 있으며, 이와 관련한 많은 연구들이 수행되고 있다.^(4,6~8)

이들 연구의 한 부분이 감육된 배관의 건전성 평가와 감육된 배관의 계속 사용, 정비, 교체를 결정하기 위한 허용두께 기준을 설정하는 것이다. 현재 원자력발전소 배관의 허용두께와 관련한 기준으로는 설계코드의 최소설계두께(t_{min})가 공식적으로 적용되고 있으며,^(10,11) 배관두께에 대한 검사 및 평가 기준은 아직까지 제시되어 있지 않은 실정이다. 따라서, 최근 ASME B&PV Sec.XI에서는 가동중 국부적으로 감육된 배관에

* 책임저자, 회원, 조선대학교 원자력공학과

E-mail : jwkim@chosun.ac.kr

TEL : (062)230-7157 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

대해 적절한 관리지침을 제공하기 위한 연구를 수행하였으며, ASME Code Case 형태로 감육배관에 대한 평가 기준 및 평가 절차들을 제시한 바 있다.^(11,12) 그러나, 감육부의 길이가 작거나 큰 경우에 대한 예측에서 지나치게 보수적이거나 비보수적인 결과를 주는 것으로 알려져 있으며,⁽¹³⁾ 이러한 불확실성으로 인해 아직 규제 기관의 승인을 얻지 못하고 제한적으로만 사용이 허용되고 있는 실정이다. 한편, 국부적으로 감육된 배관에 대한 건전성 평가와 허용두께 기준에 대한 공학적인 평가 방법을 개발하기 위한 연구들이 수행되고 있다.^(7,14,15) 이들 연구에서는 다양한 형태의 감육배관 실험을 수행하고, 실험 결과를 바탕으로 배관의 건전성 평가를 위한 모델들을 제시하였다. 그러나, 이들 평가 모델 역시 원전 배관의 감육에서 나타나는 다양한 감육길이의 영향과 압력 및 굽힘하중의 영향들을 적절히 반영하지 못하는 한계를 보이고 있다.

따라서, 본 논문에서는 원자력발전소 2차 계통 감육배관의 건전성 평가 및 허용두께기준 설정을 위한 연구의 일부로, 원전 배관에서 고려되고 있는 다양한 작용하중과 감육 형상을 가정하여 배관 파단실험을 수행하고 손상거동을 평가하였다. 특히, 감육배관의 손상거동에 미치는 감육부 길이와 폭의 영향을 평가하였으며, 내압의 크기가 이러한 손상거동에 어떻게 영향을 미치는 지를 분석하였다.

2. 배관 재료 및 배관 시편

2.1 배관 재료

실험에 사용된 배관 재료는 원전의 2차 계통에 많이 사용되고 있는 ASTM A333 Gr.6 (STS370 in

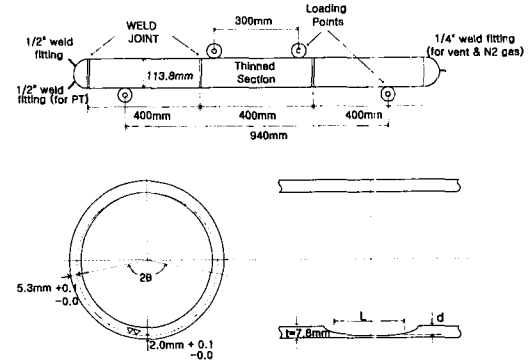


Fig. 1 Geometry of pipe specimen and local wall thinning shape

JIS) 탄소강이며, 실험장치의 용량을 고려하여 102mm, Sch.80(외경(D_o)=114.3mm, 두께(t)=8.5mm)의 배관이 사용되었다. 배관 재료의 인장특성과 화학조성은 Table 1과 2에 나타난 바와 같다. 화학조성은 재료 성적서에 의해 제공된 값이며, 인장 데이터는 배관의 길이 방향에서 채취한 시편을 이용하여 상온에서 시험한 결과이다.

2.2 배관 시편

배관 시편은 Fig. 1에 나타난 것과 같이 총 길이가 1200mm로 감육부의 두께 가공을 위해서 400mm인 직관 3개를 가공 후 용접하여 제작하였으며, 가운데 배관이 감육형상을 가공한 시험부이다. 시험부의 감육형상은 Table 3에 나타난 것과 같으며, 감육부의 형상은 설계코드의 t_{min} 이하로 얇아진 영역의 원주방향 폭과 축 방향 길이로 정의하였다. 감육부의 형상은 Fig. 1에 나타난 것과 같이 원주방향과 길이방향으로 일정한 반경을 가지는 원형이 되도록 가공하였으며, 모든 시편에서 시험부의 가장 얇은 부분이 2mm가 되도록 하였다. 배관은 초기 형상을 균일하게 하기 위해 외경을 113.8mm, 두께를 7.8mm로 가공한 후 시험부에 감육형상을 가공하였다. 내압을 작용시키기 위해서 시편의 양단에는 캡(cap)을 용접하여 밀봉하였으며, 유체 주입 및 압력 게이지의 설치, 그리고 가압을 위한 노즐을 용접하였다. 모든 시편은 가공 후 초음파 두께측정기를 이용하여 감육부의 두께를 측정함으로써 감육형상과 두께에 대한 가공 오차를 확인하였다. 측정 결과, 모든 시편에서 최소 가공두께는 2.0~2.1mm의 범위에 있었으며, 가공형상도 설계조건과 일치함을 확인하였다.

Table 3 Test matrix of thinned pipe tests

Spec. ID	P (MPa)	Loading type	d/t	2θ	L(mm)
SP-17	0	tension	0.74	180°	25
SP-18					200
SP-19					25
SP-20		compression		200	
SP-31				25	
SP-32		tension+compression		200	
SP-12	10	tension		90°	25
SP-13					200
SP-15					25
SP-16		compression			200
SP-1					25
SP-2		tension			180°
SP-3			100		
SP-4			200		
SP-5		compression	25		
SP-6			50		
SP-7	100				
SP-8	tension+compression	360°	25		
SP-9			200		
SP-22	10	"	0	0°	0

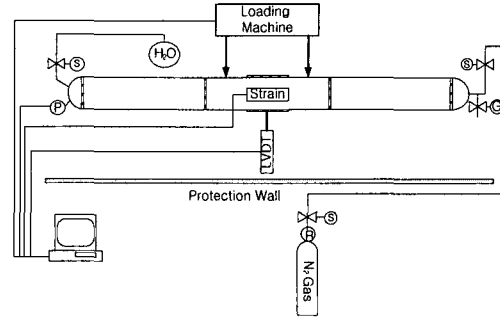


Fig. 2 Schematic diagram of pipe test loop

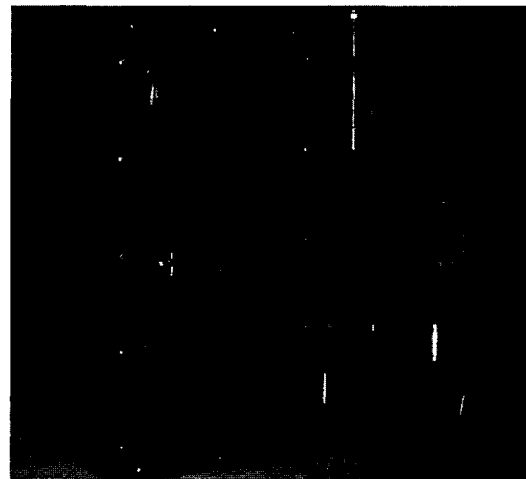


Fig. 3 Photograph of 4 points loading frame with pipe specimen

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 4-점 굽힘지그로 구성되며, 가진기는 로드셀(Load Cell)이 부착된 Instron-Shenck 사 제품으로 용량은 최대하중이 630kN이고, 최대 변위가 ± 125mm이다. 4-점 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

배관실험에는 Table 3에 나타낸 것과 같이 여러 가지 감육형상과 작용하중이 고려되었다. 작용하중으로는 내압없이 단순 굽힘하중이 작용되는 경우와 내압과 굽힘하중이 동시에 작용되는 경우를 고려하였으며, 굽힘하중의 방향으로는 감육부위에 압축응력이 작용되는 경우와 인장응력이 작용되는 경우로 나누어 실험되었다. 모든 실험은 상온에서 수행하였으며, 내압과 굽힘하중이 동시에 작용되는 실험에서는 먼저 가압하여 일정한 압력을 유지한 상태에서 굽힘하중을 작용시켰다. 굽힘하중을 가하기 위한 가진기는 변위제어로 구동되었으며, 실험에 적용한 가진기의 이동속도는 2mm/min로 준정적 하중속도를 유지하였다. 가진기의 이동은 균열 발생에 의해 하중이 급격히 감소하거나, 균열이 발생하지 않는 경우

Table 4 Failure mode of locally wall thinned pipe

Spec. ID	Failure Mode
SP-17	Cracking
SP-18	Ovalization
SP-19	Local Buckling
SP-20	Local Buckling
SP-31	Local Buckling → Cracking
SP-32	Local Buckling → Ovalization
SP-1	Cracking
SP-2	Cracking
SP-3	Cracking
SP-4	Cracking
SP-5	Local Buckling
SP-6	Local Buckling
SP-7	Local Buckling
SP-8	Local Buckling
SP-12	Cracking
SP-13	Ovalization
SP-15	Local Buckling
SP-16	Local Buckling
SP-9	Local Buckling → Cracking
SP-10	Local Buckling → Cracking
SP-22	Not Failed (Bending Deformation)

에는 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.

배관실험에서 하중, 내압, 배관의 변위, 그리고 변형률이 측정되었으며, 배관의 변형과 파열 등의 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. 실험결과 및 토의

4.1 감육길이에 따른 손상모드의 변화

Table 4는 실험조건에 따른 손상모드를 정리한 것으로 Fig. 4에서 보는 것과 같이 감육배관의 손

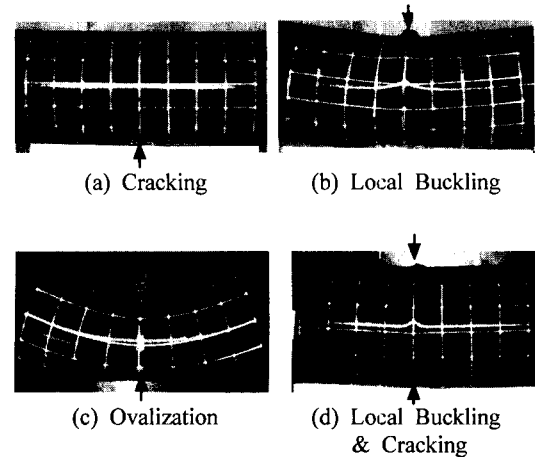


Fig. 4 Post-test photographs of test section of wall thinned pipe specimens

상모드는 크게 균열 발생, 국부 좌굴, 단면 변형, 그리고 국부 좌굴 후 균열 발생으로 구분되며, Table에서 알 수 있는 바와 같이 손상모드는 하중 형태, 내압의 크기, 감육부의 폭, 그리고 감육부의 길이에 따라 결정되었다.

각 실험조건에 따른 감육배관의 손상모드를 살펴보면, 감육부에 압축응력이 작용되는 경우에는 감육길이에와 내압의 크기에 관계없이 국부 좌굴에 의한 손상을 보였다. 반면, 감육부에 인장응력이 작용되는 경우에는 감육부의 형상과 내압의 크기에 따라 감육부에서 균열이 발생하거나 단면 변형의 손상형태를 보였다. 즉, 감육길이가 짧은 경우($L=25\text{mm}$)에는 감육부의 폭과 내압의 크기에 관계없이 네킹에 의해 균열이 발생하였다. 그러나, 감육길이가 긴 경우($L=200\text{mm}$)에는 감육부의 폭에 따라 $2\theta=90^\circ$ 에서는 단면변형 거동을 보였고, $2\theta=180^\circ$ 에서는 균열이 발생되었다. 또한, $2\theta=180^\circ$ 에서도 내압이 없는 경우에는 단면 변형을 보였다. $2\theta=360^\circ$ 에서는 감육부에 인장응력과 압축응력이 모두 작용되므로 복합적인 손상모드를 보였다. 즉, 압축응력이 작용되는 부분에서는 국부좌굴이 발생하고, 인장응력이 작용되는 부분에서는 감육길이에와 내압에 따라 균열 발생과 단면 변형을 보였다.

따라서, 감육배관의 손상모드는 감육부에 작용되는 응력의 형태와 감육부의 폭, 감육길이 뿐만 아니라 감육부의 길이와 내압의 크기에 영향을 받고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 5는 이러한 결

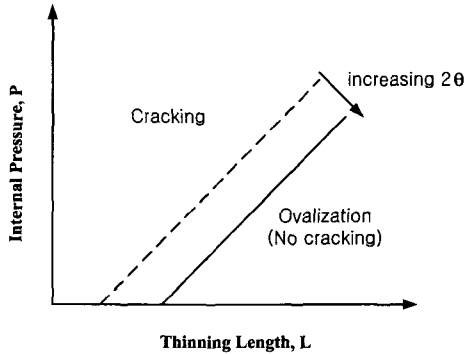


Fig. 5 Effect of internal pressure and thinning length on crack occurrence in thinned area

과를 바탕으로 균열 발생에 미치는 감육길이, 내압 크기, 그리고 감육 폭의 영향을 개념적으로 나타낸 것으로, 감육길이가 길 수록 감육배관의 균열 발생에 의해 손상될 가능성은 감소되고, 내압이 크기와 감육 폭이 증가할수록 동일한 감육 길이에서 균열 발생의 가능성이 증가하고 있는 것을 잘 보여주고 있다.

4.2 급힘하중에 따른 감육배관의 하중-변위거동

Fig. 6은 급힘하중에 따른 감육배관의 거동을 살펴보기 위해서 감육 폭이 90°, 180°, 360° 이고, 감육길이가 25mm와 200mm인 감육배관의 하중-변위 곡선을 나타낸 것이다. Fig.에서 알 수 있는 바와 같이 감육배관에 급힘하중이 작용되는 경우, 초기 변형은 감육형상과 감육부에서 응력 형태에 관계없이 감육이 없는 배관과 유사한 선형 거동을 보였다. 그러나, 하중이 계속 증가됨에 따라 배관이 소성거동을 보이면서 감육배관의 하중-변위 곡선은 감육부에 작용되는 응력의 형태에 따라 다른 경향을 보이고 있다.

감육부에 인장응력이 작용되는 경우에는 변위가 증가됨에 따라 균열이 발생하거나 단면변형이 발생할 때까지 하중이 계속 증가하다 감소하는 경향을 보였다. 그러나 감육부에 압축응력이 작용되는 경우에는 감육형상에 따라 하중이 계속 증가하거나 증가하다 일정한 값에 수렴, 또는 증가하다 감소하는 경향을 보였다. 감육부의 폭과 길이가 짧은 경우에는 변위에 따라 하중이 계속 증가하였으며, 감육 폭과 감육길이가 큰 경우에는 변위에 따라 하중이 증가하다 수렴하거나 감

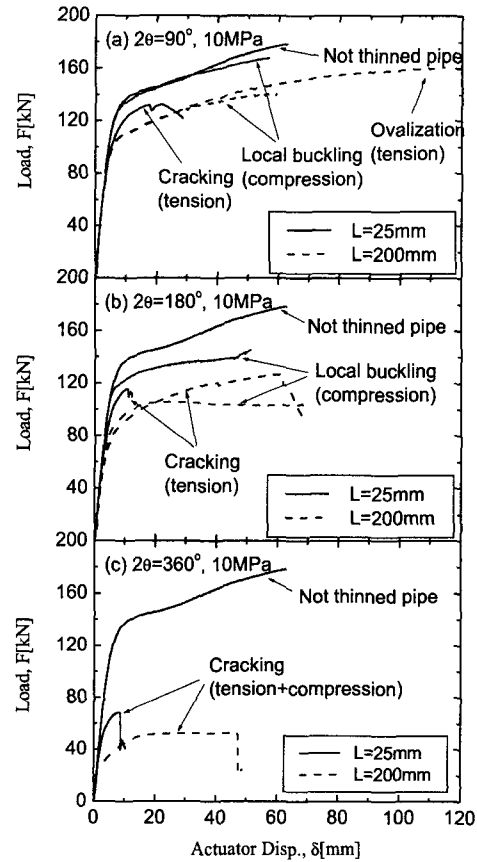


Fig. 6 Comparison of load-displacement curves with thinning length for (a) $2\theta = 90^\circ$, (b) $2\theta = 180^\circ$, and (c) $2\theta = 360^\circ$

소하는 경향을 보였다. 또한, $2\theta = 360^\circ$ 의 경우에는 균열 발생에 의해 손상됨에도 불구하고 L=200mm일 때 하중이 일정한 값에 수렴하다 균열발생과 함께 급격히 감소하는 경향을 보였다.

따라서, 감육부에 인장응력이 작용되는 경우, 하중-변위 거동은 감육길이와 폭에 관계없이 거의 유사하며 균열 발생까지 감육부의 변형 특성에 의존하는 것을 알 수 있다. 한편, 감육부에 압축응력이 작용되는 경우, 감육길이와 폭이 작은 조건에서는 국부적으로 좌굴이 발생됨에도 불구하고 전체적인 배관의 하중-변위 거동에는 좌굴의 영향이 거의 나타나지 않으며, 감육 폭과 길이가 증가할수록 배관의 전체적인 거동에 좌굴의 특성이 뚜렷이 나타나는 것을 알 수 있다.

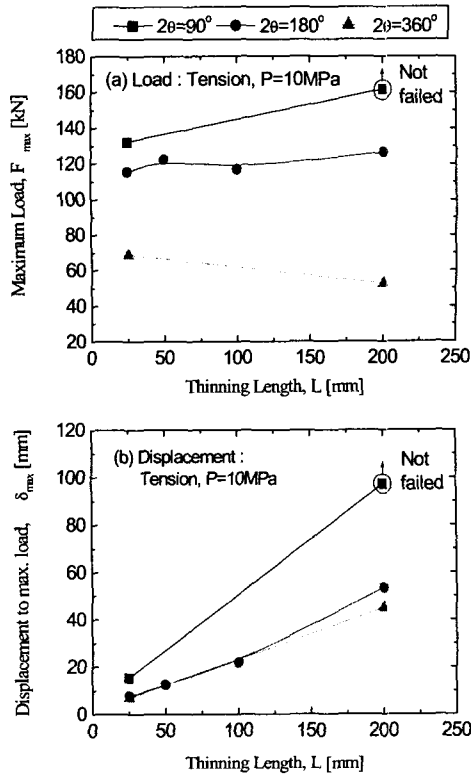


Fig. 7 Effect of thinning length on load carrying capacity and deformability of pipe with locally thinned area subjected to tensile stress

4.3 감육배관의 하중지지능력과 변형수용능력에 미치는 감육길이에 영향

Fig. 7은 감육부에 인장응력이 작용될 때, 감육길이에 따른 하중지지능력과 변형수용능력을 살펴보기 위해 하중-변위 곡선에서 최대하중과 최대하중까지의 변위를 감육길이에 따라 나타낸 것이다. Fig. 7(a)에서 보는 바와 같이 감육길이에 따른 최대하중의 변화는 감육 폭에 따라 서로 다른 경향을 보였다. 즉, $2\theta=90^\circ$ 인 경우에는 감육길이에 따라 최대하중이 증가하였으나, $2\theta=180^\circ$ 인 경우는 감육길이에 따라 거의 유사한 값을 보였고, $2\theta=360^\circ$ 인 경우는 감육길이에 따라 최대하중이 감소하는 경향을 보였다. 그러나, 최대하중까지의 변위는 감육 폭에 관계없이 감육길이에 따라 비례해서 증가하는 경향을 보였다(Fig. 7(b)). 따라서, 감육부에 인장응력이 작용될 때,

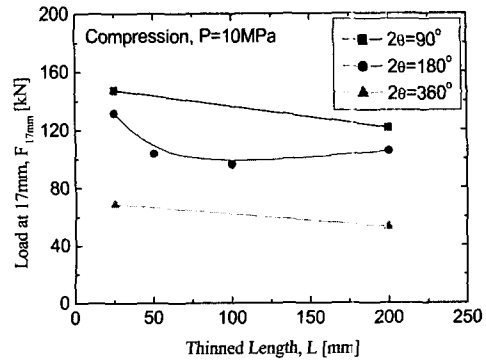


Fig. 8 Effect of thinning length on load carrying capacity of pipe with locally thinned area subjected to compressive stress

감육길이에 따른 하중지지능력의 변화는 감육부의 폭에 따라 결정되며, 변형수용능력은 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 감육길이에 따라 변형수용능력이 증가하는 것은 감육길이의 증가에 따라 감육부에서 변형이 분산되기 때문인 것으로 판단된다. 감육길이가 증가됨에 따라 감육부에서 응력집중이 분산됨에도 불구하고, 감육폭이 큰 경우 감육길이에 따라 하중지지능력이 감소하는 것은 감육부에 인장응력 뿐 아니라 감육부의 일부에 압축응력이 작용되기 때문인 것으로 판단된다. $2\theta=360^\circ$ 에서 균열 발생과 국부 좌굴의 복합적인 손상모드가 나타나는 것은 이러한 설명을 뒷받침하는 극단적인 예가 된다.

감육부에서 압축응력이 작용되는 경우, 앞 절에서 살펴본 바와 같이 최대하중과 최대하중까지의 변위를 정의하기 어렵다. 따라서, 하중지지능력을 비교하기 위해서 일정한 변위에서의 하중을 비교하였다. Fig. 8은 변위가 17mm에서의 하중을 감육길이에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 보는 것과 같이 이 경우에는 감육부의 폭에 관계없이 모든 조건에서 감육길이 증가에 따라 하중지지능력이 감소하는 경향을 보였다. 이와 같이 감육길이에 따라 하중지지능력이 감소하는 것은 손상모드가 국부 좌굴이기 때문으로 판단되며, 일반적인 좌굴현상에서 좌굴 하중이 길이에 반비례하는 거동과 일치하고 있다.

한편, 동일한 감육 형상을 가진 배관에서 굽힘 하중의 방향에 따른 하중지지능력을 비교하면, 감육길이에 따라 다른 경향을 보이고 있다. Fig.

6에서 알 수 있는 것과 같이 감육 폭에 관계없이 L=25mm에서는 감육부에서 압축응력에 의해 국부 좌굴이 발생하는 경우가 인장응력이 작용되는 경우보다 큰 하중-변위 곡선을 보이지만, L=200mm에서는 국부 좌굴이 발생하는 경우가 낮은 하중-변위 곡선을 보였다. 이러한 특징은 감육부에서 압축응력에 의해 국부 좌굴이 발생하는 경우가 인장응력에 의해 균열이 발생하는 경우에 비해 낮은 하중지지능력이 보이는 것으로 보고하고 있는 기존의 연구 결과들과 다른 것으로, (7,14,15) 감육부의 길이가 짧은 경우에는 감육부에 압축응력이 작용되는 경우에 높은 하중지지능력을 나타내는 것을 알 수 있다.

4.4 감육배관 손상거동에 미치는 내압의 영향

감육배관의 손상거동에 미치는 내압의 영향을 살펴보기 위해 감육폭이 180° 과 360° 인 배관에 대해서 내압이 없는 경우와 10MPa의 내압이 고려된 실험 결과를 비교하였다. Fig. 9(a)는 2θ =180° 인 감육배관에서 내압에 따른 하중-변위 곡선을 나타낸 것이다. Fig.에서 알 수 있는 바와 같이 감육부에 작용하는 응력 형태에 따라 내압의 영향이 상이하게 나타나고 있다. 감육부에 인장응력이 작용되는 경우에는 최대하중과 최대하중까지의 변위가 내압에 따라 감소한 반면, 감육부에 압축응력이 작용되는 경우에는 내압에 의해 하중-변위 곡선에서 하중이 증가하고, 하중-변위 곡선의 변화가 나타나는 변위가 증가하였다. 또한 하중 형태에 관계없이 내압의 영향은 감육길이가 짧은 경우에 크게 나타나고 있다.

한편, 감육 폭이 360° 인 경우에는 Fig. 9(b)에서 보는 것과 같이 내압에 의한 영향이 보다 복합적으로 나타나고 있다. 즉, 최대하중은 내압이 고려됨에 따라 약간 증가하는 경향을 보였으며, 최대하중까지의 변위는 감육길이가 25mm인 경우는 감소하고 200mm인 경우는 증가하는 경향을 보였다. 이것은 손상모드에서 살펴본 것과 같이 감육부에서 압축응력과 인장응력이 동시에 작용되기 때문이다. 여기서 내압에 따른 최대하중의 증가와 L=200mm에서 균열 발생까지의 변위 증가는 감육부에 압축응력이 작용되는 경우의 특징이며, L=25mm에서 균열 발생까지 변위의 감소는 감육부에 인장응력이 작용될 때 관찰된 내압의 영향임을 알 수 있다.

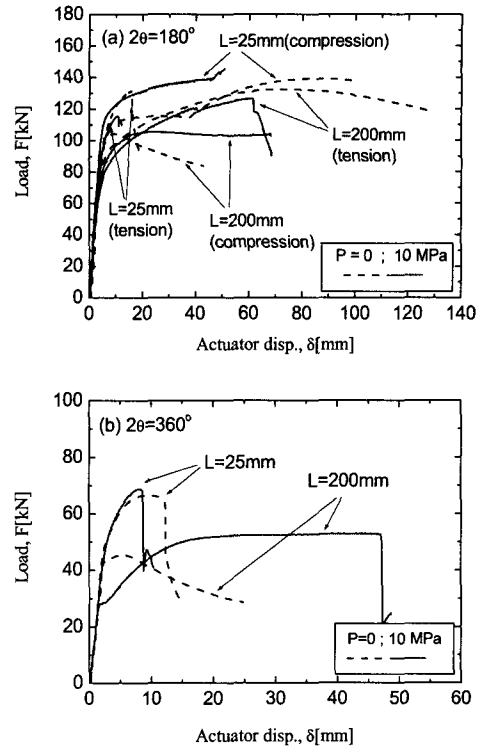


Fig. 9 Comparison of load-displacement curves with internal pressure for (a) 2θ =180° , (b) 2θ =360°

내압에 따른 이러한 손상거동의 변화는 내압이 배관에서 축방향의 인장응력으로 작용함으로써 감육부에 인장응력이 작용되는 경우에는 인장응력을 증가시켜 균열발생을 촉진하고, 압축응력이 작용되는 경우에는 압축응력을 상쇄하여 국부 좌굴을 억제하는 역할을 하기 때문이다. 또한, 감육 길이가 짧은 경우에 내압의 영향이 크게 나타나는 것은 감육길이가 짧은 경우에 감육부에서 응력의 집중이 크고, 따라서 감육부의 응력집중에 영향을 미치는 인장응력의 증가 효과가 상대적으로 크게 나타나기 때문이다.

5. 결론

(1) 감육배관의 손상모드는 감육부에 작용되는 응력의 형태, 감육부의 폭 뿐 아니라 내압의 크기와 감육길이에 따라 결정되며, 내압이 크고 감

육길이가 짧을 수록 균열 발생에 의한 손상 가능성은 높고, 감육길이가 길고 폭이 작으며 압력이 낮을수록 균열에 의한 손상 가능성이 낮았다.

(2) 감육길이에 따른 감육배관의 거동은 감육부에 작용되는 응력 상태에 따라 다르게 나타나는데, 감육부에 압축응력이 작용되는 경우는 감육폭에 관계없이 감육길이에 따라 하중지지능력이 감소하였다. 그러나, 인장응력이 작용되는 경우, 감육 폭이 작을 때는 감육길이에 따라 하중지지능력이 증가하지만, 감육 폭이 클 때는 하중지지능력이 감소하였다. 또한, 변형수용능력은 감육길이에 비례해서 증가하였다.

(3) 동일한 감육형상과 내압에서 굽힘하중의 방향에 따라 하중지지능력을 비교하면, 감육부의 길이가 짧은 경우에는 감육부에 압축응력이 작용될 때 높은 하중지지능력을 보였고, 감육길이가 긴 경우에는 감육부에 인장응력이 작용될 때 높은 하중지지능력을 보였다.

(4) 감육배관의 손상거동에 미치는 내압의 영향은 감육부의 손상모드에 따라 상반된 경향을 보였다. 균열 발생에 의해 손상이 유발되는 경우에는 내압의 작용이 최대 하중과 최대 하중까지의 변위를 감소시키지만, 국부 좌굴에 의한 손상에서는 내압의 작용이 하중지지능력을 증가시켰다. 또한, 이러한 내압의 영향은 감육길이가 짧은 경우에 크게 관찰되었다.

참고문헌

- (1) 허남수, 임창주, 김영진, 표창률, 박치용, 2000, "원자력발전소 주요기기의 건진성 평가를 위한 3차원 탄소성 해석 시스템의 개발," 대한기계학회논문집 A권, 제24권, 제8호, pp. 2015~2021.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) Chexal, B., Horowitz, J., Dooley, B., Millett, P., Wood, C., and Jones, R., 1998, "Flow-Accelerated Corrosion in Power Plant." EPRI/TR-106611-R2.
- (5) Virginia Electric and Power Co., 1989, "Surry Unit 2 Reactor Trip and Feedwater Pipe Failure Report."
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) Merz, K. L. and Ibanez, P., 1993, "Seismic and Dynamic Reliability of Eroded/Corroded Piping Components.," EPRI TR-102066.
- (9) American Society of Mechanical Engineer, ASME B&PV Code Sec.III, 1995 ed., "Nuclear Components."
- (10) American Society of Mechanical Engineer, ANSI/ASME B31.1, 1995ed., "Power Piping Code."
- (11) 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."
- (12) 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.
- (13) 최재봉, 김진수, 구분걸, 김영진, 최영환, 2001, "재료물성을 고려한 감육배관의 공학적 한계하중해 제시," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 A권, pp. 351~356.
- (14) 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.
- (15) 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.