

감육 배관의 손상모드에 미치는 감육부 길이의 영향

김진원* · 박치용 · 이성호 · 강태경

Effects of Thinning Length on Failure Mode of Local Wall Thinned Pipe

Kim Jin Weon, Park Chi Yong, Lee Sung Ho, Kang Tai Kyung

Key Words: Thinned Pipe(감육배관), Failure Mode(손상모드), Pipe Fracture Test(배관파단시험)

Abstract

The pipe fracture tests were performed on 102mm-Sch.80 carbon steel pipe with various local wall thinning shapes, in order to understand failure behavior of thinned pipe. Pipe specimens were subjected to monotonic bending moment, using 4-points loading system, under internally pressurized condition. From the results of experiment, the failure mode, load carrying capacity, and deformability of local wall thinning pipe were investigated. 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 length of thinned area was determined by stress type applied to thinning region 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. 서 론

원자력발전소의 2차 계통 배관은 대부분이 탄소강으로 구성되어 있는데, 재질 특성상 부식에 취약할 뿐 아니라 1차 계통에 비해 수질이나 유동조건이 취약하기 때문에 침부식에 의한 배관의 두께 감소 가능성이 높은 것으로 알려져 있다^(1,2). 실제 이와 같은 형태의 손상은 발전소의 가동 연수가 증가됨에 따라 발생 빈도가 증가되고 있고, 원전의 안전성과 운영성 측면에서 매우 중요한 관리 항목으로 고려되고 있다. 따라서, 최근에는 배관의 두께 측정을 가동중검사 계획에 반영하여 점검을 강화하고, 감육이 발견된 배관들을 교체하거나 부식이 강한 재질로 보강하고 있다. 이와 같이 가동중에 발견된 감육배관의 교체나 보강,

그리고 계속 사용을 결정하기 위해서는 감육배관에 대한 적절한 강도평가 절차나 두께기준이 요구되고 있지만, 아직까지 설계코드의 두께 기준인 최소설계두께(t_{min})가 적용되고 있다^(3,4). 따라서, ASME B&PV Sec.XI에서는 가동중 침부식에 의해 감육된 배관에 대해 적절한 관리지침을 제공하기 위한 연구를 수행하여, ASME Code Case 형태로 감육배관의 사용, 교체, 보수 등에 대한 평가 기준 및 평가 절차들을 제시한 바 있다⁽⁵⁾.

한편으로는 국부적으로 감육된 배관에 대한 건전성 평가 및 허용두께 기준으로 실제 감육배관의 손상거동에 기초한 공학적인 방법을 확립하기 위한 연구들이 수행되고 있다^(6~9). 이들 연구에서는 실제 배관을 이용한 다양한 시험결과로부터 감육된 배관의 파단거동과 손상모드를 밝히고, 배관의 건전성 평가를 위한 이론적 모델들을 제시하였다. 그러나, 이들 방법은 실제 감육배관에서 나타나는 감육부의 형상과 원전 배관에서 고려되는 다양한 형태의 하중조건을 충분히 고려하

* 회원, 한전 전력연구원 원자력연구소
E-mail : jwkim@kepri.re.kr
TEL : (042)865-5556 FAX : (042)865-5514

지 못하는 한계를 보이고 있다.

따라서, 본 논문에서는 작용하중과 감육부의 형상에 따른 감육배관의 손상거동을 평가하기 위해서 다양한 감육형상을 가진 감육배관에 대한 파괴시험을 내압과 굽힘하중을 고려하여 수행하였다. 특히, 실험에서 다양한 원주방향 감육 폭에서 손상거동에 미치는 축방향 감육길이의 영향과 굽힘하중에 의한 파괴시 내압의 영향이 주로 고려되었다.

2. 배관 재료 및 배관시편

2.1 배관재료

시험에 사용된 배관 재료는 원전의 2차 계통에 많이 사용되고 있는 ASTM A333 Gr.6 (STS370 in JIS)이며, 시험장치의 용량을 고려하여 102mm, Sch.80 ($D_o=114.3\text{mm}$, $t=8.5\text{mm}$)의 배관이 사용되었다. 배관 재료의 인장특성과 화학조성은 Table 1과 2에 나타낸 바와 같다. 화학조성은 재료성적서(CMTR)에 제시된 값이며, 인장 데이터는 배관의 길이 방향에서 채취한 시편을 이용하여 상온에서 인장시험을 수행하여 결과를 평균한 값이다.

Table 1 Chemical composition of pipe material.

화학조성	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 tensile stress, σ_{uts} (MPa)	Elongation, %
303.5	452.4	35.8

2.2 배관시편

배관 시편은 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 총 길이가 1200mm로 배관의 가공을 편리하게 하기 위해서 400mm인 직관 3개를 가공후 용접하여 제작하였으며, 중앙 배관이 감육형상을 가공한 시험부이다. 시험부의 감육형상은 Table 3에 나타낸 것과 같으며, 감육부의 형상은 ASME B&PV Sec.III의 설계요구두께(t_{min}) 이하로 감육된 영역에 대한 원주방향 폭과 축 방향 길이로 정의하였다. Fig. 1에 나타낸 것과 같이 감육부의 형상은 원주

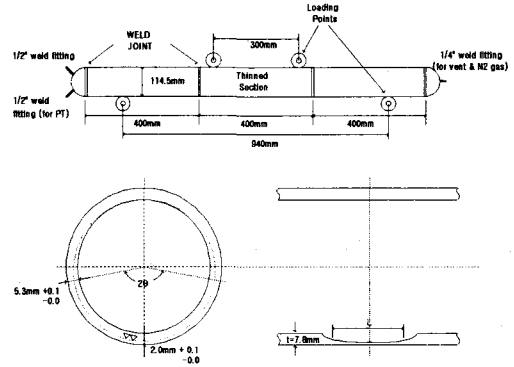


Fig. 1 Geometry of local wall thinning in pipe.

방향과 길이방향으로 일정한 반경을 가지는 원형이 되도록 가공하였으며, 모든 감육시편에서 가장 얇은 부분의 두께는 2mm로 가공하였다. 시험부 배관은 초기 두께를 균일하게 하기 위해 7.8mm로 가공한 후 중앙에 감육형상을 가공하였다. 내압을 작용시키기 위해서 시편의 양단에는 Cap을 용접하였으며, 유체 주입 및 압력 게이지의 설치, 그리고 가압을 위해 노즐이 용접되었다. 제작후 모든 시편은 감육형상과 두께에 대한 오차 정도를 확인하기 위하여 가공후 감육부의 두께를 초음파장비를 이용하여 측정하였다. 측정 결과, 모든 시편에서 최소 가공두께는 2.0~2.1mm의 범위에 있었으며, 가공형상도 만족됨을 확인하였다.

Table 3 Test matrix of thinned pipe tests.

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

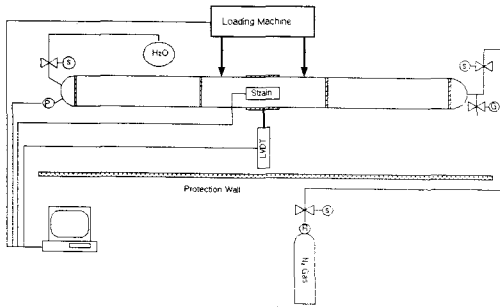


Fig. 2 Schematic diagram of pipe test loop.

3. 실험 장치 및 방법

3.1 배관 실험 장치

배관시험에 사용된 시험장치는 Fig. 2에서 개략적으로 나타낸 것과 같이 가압 장치와 굽힘하중 장치로 구성된다. 배관 시험의 가압 방법은 시험 배관에 물을 가득 채운 후, 시험에 연결된 노즐을 통해서 질소 가스를 주입함으로써 가압하였으며, 가압 장치의 최고 압력은 12MPa로 가스통에 부착된 압력 조절밸브를 이용하여 배관시험의 압력을 조절하였다. 굽힘하중 장치는 Actuator와 4-점 굽힘지그로 구성되며, Actuator는 Load Cell이 부착된 Instron-Shenck사 제품으로 용량은 최대하중이 630N이고, 최대변위가 $\pm 125\text{mm}$ 이다. 4-점 굽힘지그는 곡률을 가진 롤러 형태로 제작하여 시험배관과 하중작용 위치가 구멍을 이루어 접촉할 수 있도록 하였으며, 하중이 작용되는 동안 롤러의 틀이 회전할 수 있도록 제작되어 시험배관에서 대변형의 굽힘이 발생할지라도 하중 점과 하중방향이 일정하게 유지되도록 하였다. Fig. 3은 배관시험이 시험장치에 설치된 상태를 보여주는 것이다.

3.2 시험방법 및 데이터 측정

배관시험에는 Table 3에 나타낸 것과 같이 여러 가지 감육형상과 작용하중이 고려되었다. 작용하중으로는 내압 없이 단순굽힘이 작용되는 경우와 내압과 굽힘하중이 동시에 작용되는 경우를 고려하였으며, 굽힘하중의 방향으로는 감육부위에 압축응력이 작용되는 경우와 인장응력이 작용되는 경우로 나누어 실험되었다. 모든 시험은 상온에서 수행하였으며, 내압과 굽힘하중이 동시에

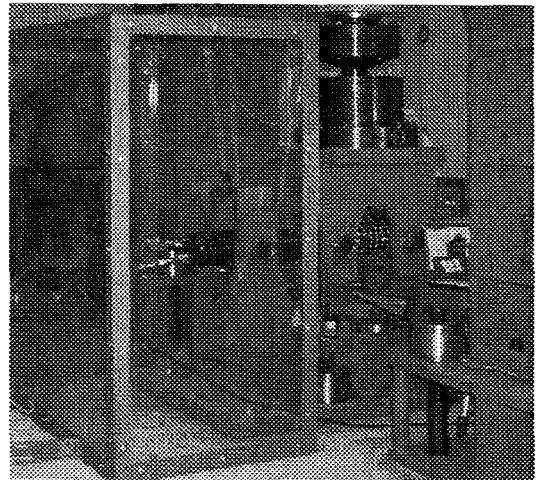


Fig. 3 Photographs of 4-points pipe test loop.

작용되는 시험에서는 먼저 가압하여 일정한 압력을 유지한 상태에서 굽힘하중을 작용시켰다. 굽힘하중을 가하기 위한 Actuator는 변위제어로 작동하였으며, Actuator의 이동속도는 2mm/min을 적용하여 준정적 하중속도를 유지하였다. Actuator의 이동은 균열 발생에 의해 하중이 급격히 감소하거나, 균열이 발생하지 않는 경우에는 하중-변위 곡선에서 최대하중을 초과하는 시점에서 정지하였다. 또한, 변위의 증가에 따라 하중이 계속 증가되는 경우에는 배관 변형에 따른 내압의 증가와 Actuator의 최대 변위를 고려하여 시험을 정지하였다.

배관시험에서 하중, 내압, 배관의 변위, 변형률이 측정되었으며, 배관의 변형 형태와 파열 등의 전 과정은 비디오카메라를 이용하여 촬영하였다. 하중은 시험기에 내장된 Load Cell에서 측정하였으며, 굽힘에 따른 배관의 변위는 Actuator에 내장된 변위계와 배관시험의 중심에 설치된 Wire 게이지를 이용하여 2중으로 측정하였다. 내압은 시험배관에 설치된 압력 게이지를 통해 측정하였으며, 하중의 작용에 따른 감육부에서의 변형률은 배관 표면에 15%의 변형률까지 측정이 가능한 소성 변형률 게이지를 부착하여 측정하였다.

4. 시험결과 및 토의

4.1 감육길이에 따른 손상모드

Table 4는 실험조건에 따른 손상모드를 정리한

것으로 배관의 손상형태는 크게 균열 발생, 국부 좌굴, 단면 변형, 국부 좌굴후 균열 발생, 그리고 국부 좌굴후 단면 변형으로 구분되며, 손상형태는 Table에서 알 수 있는 바와 같이 하중 형태, 내압의 크기, 감육부의 폭, 그리고 감육부의 길이에 따라 결정되었다.

시험조건에 따른 감육배관의 손상형태를 살펴보면, 감육부에 압축응력이 작용되는 경우에는 모든 조건에서 국부 좌굴의 손상모드를 보였다. 반면, 감육부에 인장응력이 작용되는 경우에는 감육부의 형상과 내압에 따라 균열 발생 또는 단면 변형의 손상형태를 보였다. 즉, 감육길이가 짧은 경우(L=25mm)에는 감육 폭과 내압의 크기에 관계없이 네킹에 의해 균열이 발생하였다. 그러나, 감육길이가 긴 경우(L=200mm)에는 감육부의 폭에 따라 $2\theta = 90^\circ$ 에서는 단면변형 거동을 보였으며, $2\theta = 180^\circ$ 에서는 내압이 작용된 경우에 균열이 발생되고 내압이 없는 경우에는 단면 변형을 보였다. 또한, $2\theta = 360^\circ$ 에서는 감육부에 인장응력과 압축응력이 모두 작용되므로 복합적인 손상모드를 보였는데, 인장응력을 받는 영역에서 내압에 따라 균열 발생과 단면 변형을 보였다. 따라서, 감육배관의 손상형태는 감육부에 작용되는 응력의 형태와 감육부의 폭, 감육부의 길이 뿐만 아니라 감육부의 길이와 내압의 크기에 영향을 받는 것을 알 수 있으며, Fig. 4에 나타난

Table 4 Failure mode of locally wall thinned pipe.

ID	Failure Mode
SP-17	Necking → Cracking
SP-18	Ovalization
SP-19	Local Buckling
SP-20	Local Buckling
SP-31	Local Buckling/Necking → Cracking
SP-32	Local Buckling + Ovalization
SP-1	Necking → Cracking
SP-4	Cracking
SP-5	Local Buckling
SP-8	Local Buckling
SP-12	Necking → Cracking
SP-13	Ovalization
SP-15	Local Buckling
SP-16	Local Buckling
SP-9	Local Buckling/Necking → Cracking
SP-10	Local Buckling → Cracking
SP-22	Bending

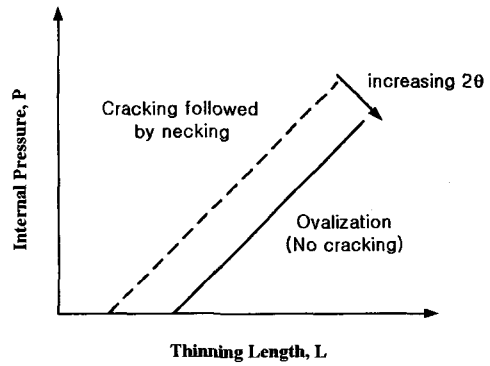


Fig. 4 Effect of internal pressure and thinning length on crack occurrence in thinned area.

바와 같이 내압이 크고 감육길이가 짧은 수록 감육부에서 균열 발생에 의한 손상 가능성은 높고 감육길이가 길고 압력이 낮을수록 균열에 의한 손상 가능성이 낮은 것을 알 수 있다.

4.2 감육길이에 따른 하중-변위 곡선

Fig. 5는 감육 폭이 90° , 180° , 그리고 360° 이고, 감육길이가 25mm와 200mm인 경우의 하중-변위 곡선을 나타낸 것이다. Fig에서 알 수 있는 바와 같이 감육부에 인장응력이 작용되는 경우에는 감육길이에 따라 균열이 발생하는 변위가 비례해서 증가하는 경향을 보였다. 그러나, 균열이 발생하는 최대하중은 감육 폭에 따라 다른 경향을 보였다. 즉, $2\theta = 90^\circ$ 인 경우(Fig. 5(a))에는 감육길이에 따라 최대하중이 증가하였으나, $2\theta = 180^\circ$ 인 경우(Fig. 5(b))는 감육길이에 따라 거의 유사한 값을 보였으며, $2\theta = 360^\circ$ 인 경우(Fig. 5(c))는 감육길이에 따라 최대하중이 감소하는 경향을 보였다. 한편, 감육부에서 압축응력에 의한 국부 좌굴이 발생하는 경우에는 하중-변위 곡선에서 최대하중과 변위를 정의할 수는 없으나, 일정한 변위에서 하중을 비교하면 감육 폭에 관계없이 모든 조건에서 하중지지능력이 감육길이에 따라 감소하는 경향을 보였다.

감육부에 압축응력이 작용되는 조건에서 감육길이에 따른 하중지지능력의 거동을 고려해보면, 감육부에 인장응력이 작용되는 경우에 감육 폭이 증가됨에 따라 감육길이에 따른 하중지지능력이 감소되는 것은 인장응력과 함께 감육부의 일부에서 압축응력이 작용되기 때문인 것으로 판단되

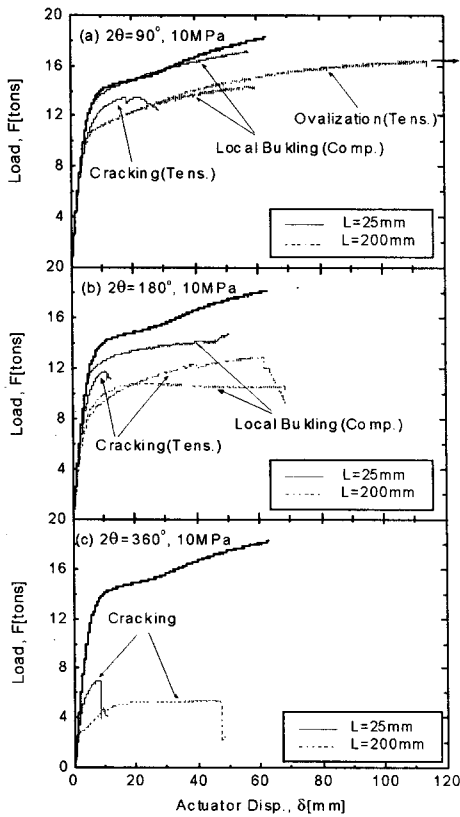


Fig. 5 Comparison of load-displacement curves with length of thinned area for (a) $2\theta = 90^\circ$, (b) $2\theta = 180^\circ$, (c) $2\theta = 360^\circ$.

며, $2\theta = 360^\circ$ 의 손상형태에서 인장응력과 압축응력의 특징이 복합적으로 나타나는 것에서도 이러한 설명을 뒷받침할 수 있다.

동일한 감육길기와 감육 폭을 가진 감육배관에서 감육부에 작용되는 응력이 인장응력인 경우와 압축응력인 경우를 비교하면, $L=25\text{mm}$ 에서는 국부 좌굴이 발생하는 경우가 균열이 발생하는 경우보다 큰 하중지지능력을 보였으며, $L=200\text{mm}$ 에서는 국부 좌굴이 발생하는 경우가 작은 하중지지능력을 보였다. 따라서, 기존의 연구결과들에서 국부 좌굴이 발생될 때의 하중지지능력이 균열 발생의 경우에 비해 낮은 것으로 보고하고 있으나^(6,8), 감육부의 길이가 짧은 경우에는 이러한 경향이 역전되는 것을 보여주고 있다.

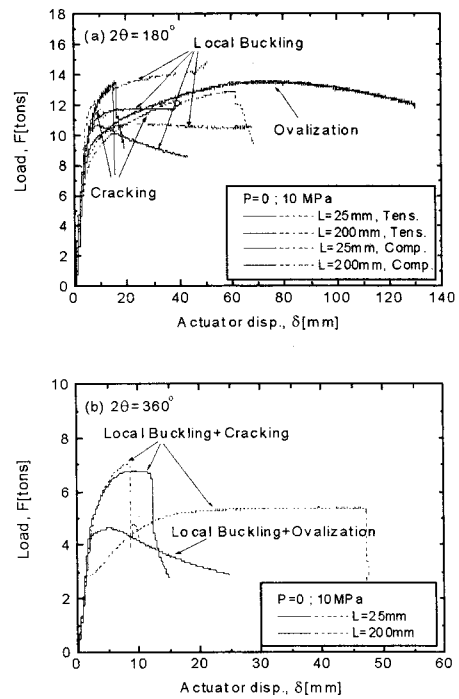


Fig. 6 Comparison of load-displacement curves with internal pressure for (a) $2\theta = 180^\circ$, (b) $2\theta = 360^\circ$

4.3 감육배관의 손상거동에 미치는 내압의 영향

감육배관의 손상거동에 미치는 내압의 영향을 살펴보기 위해서 감육폭이 180° 과 360° 인 감육배관에서 내압이 없는 경우와 내압이 작용된 경우를 고려하여 실험을 수행하였다. Fig. 6(a)는 $2\theta = 180^\circ$ 인 감육배관에서 내압에 따른 하중-변위 곡선을 나타낸 것이다. Fig에서 알 수 있는 바와 같이 감육부에 작용하는 응력 형태에 따라 내압의 영향이 상이하게 나타나고 있다. 감육부에 인장응력이 작용되는 경우에는 균열이 발생하는 최대하중과 균열발생 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 나타나는 것으로 관찰되었다.

한편, 감육 폭이 360° 인 경우에는 Fig. 6(b)에

서 보는 것과 같이 감육부에서 압축과 인장응력이 동시에 작용되기 때문에 내압에 의한 영향이 보다 복합적으로 나타나고 있다. 즉, 최대하중은 내압이 고려됨에 따라 약간 증가하는 경향을 보였으며, 최대하중까지의 변위는 감육길이가 25mm인 경우는 감소하고 L=200mm인 경우는 증가하는 경향을 보였다. 여기서 내압에 따른 최대하중의 증가와 L=200mm에서 균열 발생까지의 변위 증가는 감육부에 압축응력이 작용되는 경우의 특징이며, L=25mm에서 균열 발생 변위의 감소는 감육부에 인장응력이 작용되는 경우의 특징임을 알 수 있다.

이러한 내압에 따른 손상거동은 내압이 감육부에서 축방향의 인장응력으로 작용하여 굽힘에 의해 인장응력이 작용되는 경우에는 균열발생을 촉진하고, 압축응력이 작용되는 경우에는 압축응력을 상쇄하여 국부 좌굴을 억제하는 역할을 하기 때문이다. 또한, 감육길이가 짧은 경우에 내압에 의한 영향이 크게 나타나는 것은 감육길이가 짧은 경우에 감육부에서 응력의 집중이 크고, 따라서 인장응력의 영향이 상대적으로 크게 나타나기 때문이다.

5. 결론

1) 감육배관의 손상모드는 하중 형태와 감육부의 폭 뿐 아니라 내압의 크기와 감육부의 길이에 따라 결정되며, 내압이 크고 감육길이가 짧을 수록 감육부에서 균열 발생에 의한 손상 가능성은 높고 감육길이가 길고 폭이 작으며 압력이 낮을 수록 균열에 의한 손상 가능성이 낮았다.

2) 감육길이에 따른 감육배관의 거동은 감육부에 작용되는 응력 상태에 따라 다르게 나타나는 데, 감육부에 압축응력이 작용되는 경우에는 감육길이에 따라 하중지지능력이 감소한다. 그러나, 인장응력이 작용되는 경우에는 원주방향 감육 폭에 따라 감육 폭이 작은 경우에는 감육길이에 따라 하중지지능력이 증가하며, 감육 폭이 큰 경우에는 감육길이에 따라 하중지지능력이 감소하였다. 균열 발생까지의 변위는 감육길이에 비례해서 항상 증가하였다.

3) 감육배관의 손상거동에 미치는 내압의 영향은 감육부의 손상모드에 따라 상반된 경향을 보인다. 즉, 균열 발생에 의해 손상이 유발되는 경

우에는 내압의 작용이 균열 발생 하중과 변위를 감소시키지만, 국부 좌굴에 의한 손상에서는 내압의 작용이 하중지지능력을 증가시켰다. 또한, 이러한 내압의 영향은 감육길이가 짧은 경우에 크게 관찰되었다.

참고문헌

- (1) Chexal, B., Horowitz, J., Dooley, B., Millett, P., Wood, C., and Jones, R., 1998, "Flow-Accelerated Corrosion in Power Plant," *EPRI/TR-106611-R2*.
- (2) Virginia Electric and Power Co., 1989, "Surry Unit 2 Reactor Trip and Feedwater Pipe Failure Report."
- (3) American Society of Mechanical Engineer, *ASME B&PV Code Sec.III*, 1995 ed., "Nuclear Components."
- (4) American Society of Mechanical Engineer, *ANSI/ASME B31.1*, 1995ed., "Power Piping Code."
- (5) 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."
- (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) 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.
- (8) 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.
- (9) Wilkowski, G., Stephens, D., Krishnaswamy, P., Leis, B., and Rudland, D., 2000, *Nucl. Eng. & Des.*, Vol.195, pp. 149 ~ 169.