

원형 감육이 발생한 중수로 피더관의 한계하중 평가

제진호* · 이국희* · 정하주* · 김종성** · 김윤재**†

* 고려대학교 기계공학과, ** 순천대학교 기계공학과

Limit Loads for Circular Wall-Thinned Feeder Pipes Subjected to Bending and Internal Pressure.

Jin Ho Je*, Kuk Hee Lee*, Ha Joo Chung*, Jong Sung Kim** and Yun Jae Kim**†

* Dept. of Mechanical Engineering, Korea Univ.,

** Dept. of Mechanical Engineering, Suncheon Nat'l Univ

(Received June 7, 2010 ; Revised August 27, 2010 ; Accepted September 6, 2010)

Key Words : CANDU(캐나다형 중수로), feeder pipe(피더관), limit load(한계하중), circular wall-thinning(원형감육), bending(굽힘하중), internal pressure(내압)

초록: 캐나다형 중수로에서 피더관은 가동 중에 유동 가속 부식에 의해 감육이 발생한다. 피더관에 감육이 발생하면 배관 건전성이 떨어진다. 본 논문은 원형 감육이 발생한 피더관에서의 기기신뢰성 평가를 위한 한계 하중을 연구하였다. 유한요소 해석을 통하여 면내 굽힘 하중과 내압을 받는 경우에 대하여 연구하였다. 재료는 대변형 효과를 고려하고 탄성-완전소성 재료로 가정하였다. 원형 감육이 발생한 피더관에 대하여 내압과 단립 방향, 열림 방향 굽힘 하중에 대하여 한계하중해를 제시하였다.

Abstract: Flow Accelerated Corrosion (FAC) occurring during in-service conditions results in localized wall-thinning in the feeder pipes of CANDU. The wall-thinning of the feeder pipes is the main degradation mechanisms affecting the integrity of piping systems. In this paper, we assess the integrity of wall-thinned feeder pipes by limit load analysis. The limit loads for wall-thinning feeder pipes subjected to in-plane bending and internal pressure were determined on the basis of finite element limit analyses. The limit loads are determined from the results of limit analyses of elastic-perfectly-plastic materials using the large geometry change. Closed-form approximations of limit load solutions for wall-thinning feeder pipes subjected to in-plane bending and pressure are proposed.

- 기호설명 -

- E : 탄성계수
- d : 감육의 두께방향 깊이
- M : 굽힘하중
- M_L : 감육이 발생한 곡관의 한계 굽힘 하중
- M_O : 감육이 없는 곡관의 한계 굽힘 하중
- M_O^S : 직관의 한계 굽힘 하중($4\sigma_0 r^2 t$)
- P : 내압
- P_L : 감육이 발생한 곡관의 한계 내압
- P_O : 감육이 없는 곡관의 한계 내압
- P_O^S : 직관의 한계 내압($2/\sqrt{3}\sigma_0 t/r$)
- R : 곡관의 곡률반경
- r : 곡관의 평균 반지름
- t : 곡관의 두께

- σ_0 : 항복응력
- θ : 곡관의 원주방향 감육의 길이각
- ϕ : 곡관의 축방향 감육의 길이각
- TES : Twice-elastic-slope

1. 서론

지금까지 원자력 발전소에서 발생한 감육(wall-thinning)된 직관과 곡관의 파열 사고는 일반적으로 소성 붕괴(plastic collapse)에 따른 파열이 원인이었다.⁽¹⁾ 아직까지 CANDU 중수로 피더관에서 감육에 의한 파열 사고는 발생하지 않았지만, 피더관에 감육이 진행되고 있으므로,^(1,2) 사고를 미연에 방지하기 위해서 감육에 대한 평가법 개발이 필요하다. 피더관 직관부에 발생한 감육에 대한 소성 붕괴 평가법은 개발되어 있으나, 현재 곡관

† Corresponding Author, kimy0308@korea.ac.kr
© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

부에 발생한 감육에 대한 소성 붕괴 평가법은 개발되어 있지 않다. 공간적인 문제로 각각의 피더관은 곡관부가 존재하고, 일반적으로 피더관에서 감육은 주로 곡관부에서 발생되므로,⁽³⁾ 이에 대한 연구가 중요하다.

본 연구에서 유한요소해석을 이용하여 감육이 발생한 피더관의 좌열 내압과 좌열 모멘트에 대한 평가식을 제시하였다. 중수로에서 사용되는 다양한 피더관의 크기와 작동 하중 범위를 고려하여 유한요소 해석을 실시하였다.

2. 최적 유한요소 해석 모델

2.1 유한요소해석 기법

Fig. 1 에서 본 연구에서 사용한 곡관 및 감육 형상과 하중에 대한 변수를 표시하였다. 곡관 형상과 관련된

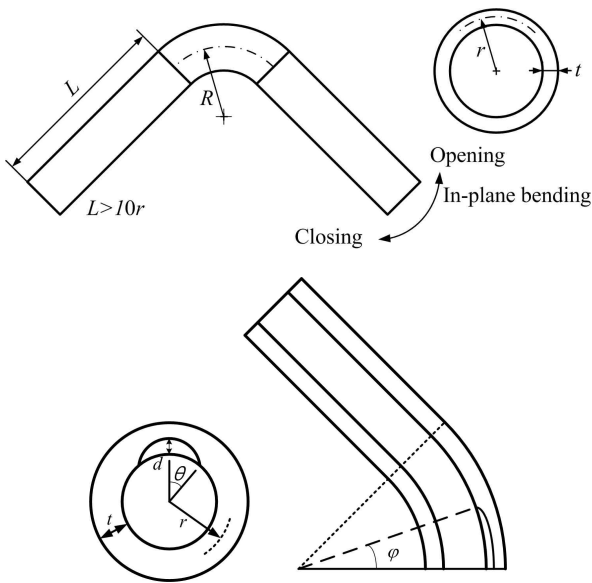


Fig. 1 Schematic illustrations of elbows, relevant variables and applied loads

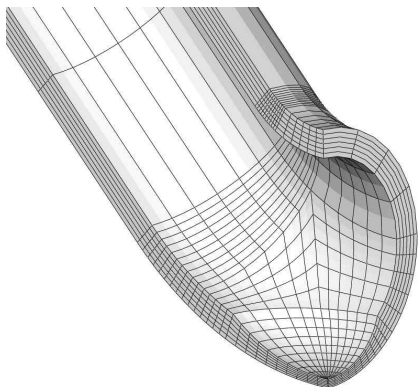


Fig. 2 Typical finite element meshes

변수는 평균 반경(r), 곡관 반경(R), 두께(t), 외경(d_0)이다. 곡관 형상에 대한 중요한 무차원 변수는 R/r 과 r/t 이다. 감육 형상과 관련된 변수는 감육 깊이(d), 축방향 감육각(ϕ), 원주방향 감육각(θ)으로 표현되며, 감육 형상에 대한 중요한 무차원 변수는 r/t , R/r , d/t , $4\phi/\pi$, θ/π 이다. 곡관의 굽힘각은 90 도이다.

상용 유한요소 해석 소프트웨어인 ABAQUS V6.9 를 이용하여 유한요소 해석을 수행하였다. 재료는 탄성-완전 소성을 사용하고 비경화 J_2 유동 이론(flow theory) 이 사용되었다. 유한요소 해석에서 모든 곡관의 반지름을 일정하게 고정시켜서 t 와 R 은 r/t 와 R/r 에 따라서 결정된다. 탄성 계수 $E=180\text{GPa}$, 푸아송 비 $\nu=0.3$, 항복 응력 $\sigma_0=180\text{MPa}$ 으로 설정하였지만, 유한요소 결과는 항복 응력으로 무차원화되므로 재료 특성은 한계 하중 해석에 영향을 미치지 않는다. 해석 시간을 단축하기 위해서 1/4 대칭 유한요소 모델을 사용하였다. Fig. 2 는 본 연구에 사용된 유한요소망이다. 해석 시간 단축을 위해서, ABAQUS 의 3 차원 20 절점 저감적분 요소(reduced integration elements; C3D20R)를 사용하였다.

내압과 평면 굽힘하중이 하중 조건으로 주어졌다. 내압은 곡관 내면에 가해졌다. 곡관 끝단의 단힘을 고려하여, 끝단에 가해지는 내압에 대응하는 축방향 응력을 가하였다. 탄성-완전 소성 유한요소 한계 압력 해석시 수반되는 수렴문제를 해결하기 위해서, ABAQUS 의 RIKS 옵션을 사용하였다. 굽힘하중인 경우에 ABAQUS 의 MPC(multi-point constraint)를 이용하여 곡관의 끝단의 절점을 구속하고 굽힘하중을 측정하였다.⁽⁴⁾ ABAQUS 에서 지원하는 MPC 옵션으로 관의 끝 단의 모든 절점을 구속시켜 충분히 큰 회전 변위를 가하고 굽힘하중(모멘트)을 측정한다.

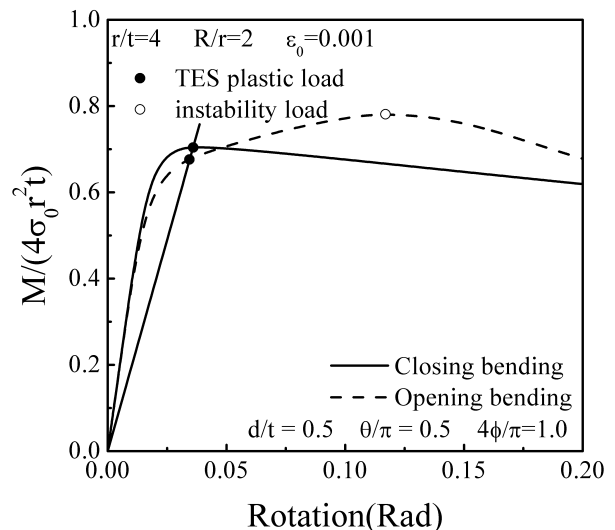


Fig. 3 Moment-rotation relation and TES plastic load

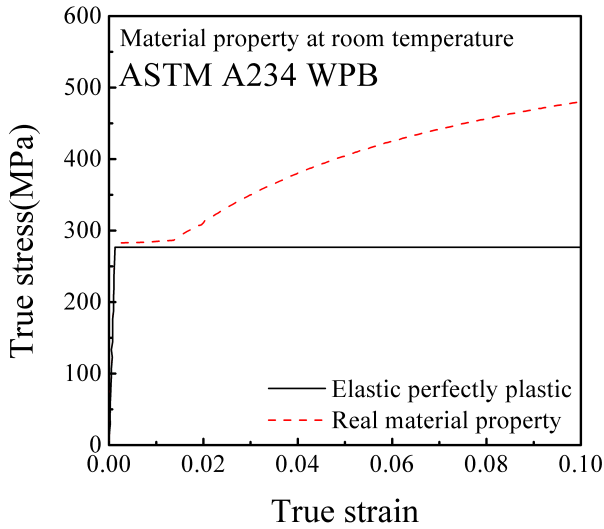


Fig. 4 Tensile test result and elastic perfectly plastic property

내압이 가해지는 경우, 비하학적 비선형(대변형) 효과가 크지 않으므로 기하학적 선형(소변형) 가정만을 고려한 한계 해석을 수행 하였다. 그러나 굽힘하중이 가해지는 경우에는 소변형 효과와 대변형 효과 가정에 따라서 소성 거동의 차이가 현저히 발생된다. 곡관에 굽힘하중이 가해지는 경우에는 굽힘하중의 종류에 따라 곡관 단면의 형상이 다르게 변하므로 이러한 차이가 발생된다. 따라서 본 연구에서는 실제 현상을 묘사하기 위해서 기하학적 비선형 효과를 고려하여 모멘트에 대한 유한요소 해석을 실시하였다.

Fig. 3 에서 곡관의 유한요소 해석 결과를 모멘트-회전 변위 곡선으로 나타냈다.

곡관의 굽힘하중 M 은 직관의 한계 굽힘하중으로 무차원화된다. 대변형 효과를 고려하면 열림 방향과 닫힘 방향에 따라서 거동이 현저히 다르게 나타나고, 변위-모멘트 곡선이 수렴하지 않는다. 따라서 수렴하는 한계하중을 나타낼 수 없고, ASME 에서 제시하고 있는 2 배 탄성 구배법(Twice-elastic-slope method)을 이용하여 TES 소성 하중(TES plastic load)을 결정한다. 불안정 하중(instability load)는 변위-하중 선도에서 최대 하중을 의미한다. 이 TES 소성 하중을 이용하여 피더관의 소성 붕괴 하중을 결정할 수 있다.

2.2 물성치

피더관의 재료는 SA-106 Gr. B 이다. Fig. 4 의 점선은 상온에서의 인장실험 물성치이다. 실선과 같은 방법으로 탄성-완전소성을 가정할 수 있다. 해석에 사용된 물성치는 ASME BPVC Section II⁽⁵⁾의 SA-106 Gr. B 에서 발췌하였다. 작동온도인 300℃에서 항복응력과 탄성계수는 각각 180MPa 과 180GPa 이다.

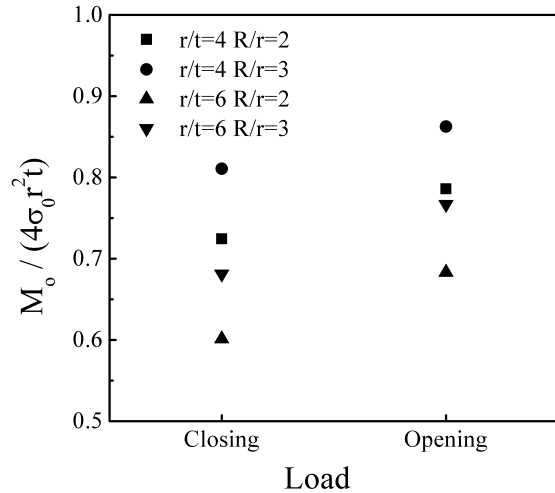


Fig. 5 Plastic limit collapse load according to bend characteristic of feeder pipes

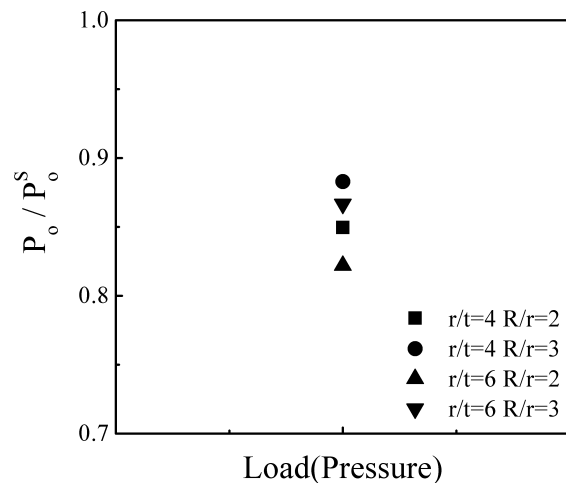


Fig. 6 Limit pressure according to bend characteristic of feeder pipes

2.3 피더관의 대표 형상 선정

피더관의 형상은 매우 다양하므로 각각의 형상에 대하여 한계 하중을 제시하기에는 무리가 있다. 만약 가장 취약한 굽힘 형상(bend characteristic)을 찾아서 그때의 한계하중을 제시한다면 그 한계 하중값은 보수적으로 모든 피더관에 대하여 적용될 수 있다.

CANDU 형 중수로에 사용되는 피더관의 굽힘 형상은 주로 $r/t = 4\sim 6$, $R/r = 2\sim 3$ 의 범위이다.

감육이 발생하지 않은 곡관에 대하여 $r/t = 4\sim 6$, $R/r = 2\sim 3$ 인 4 가지 조합에 대하여 닫힘, 열림 방향 굽힘 하중을 가하여 한계 하중 해석을 수행하였다.

한계하중을 구해보면 Fig. 5 와 같이 $r/t = 6$, $R/r = 2$ 일 때가 소성 한계 하중이 제일 작음을 알 수 있다.

내압을 받고 있을 때도 $r/t = 6$, $R/r = 2$ 가 가장 작음이 Fig. 6 에 나타나 있다. 따라서 모든 하중에 대하여 $r/t = 6$, $R/r = 2$ 의 굽힘형상을 가진 피더관이 가장 취약하다

고 할 수 있다.

3. 원형감육이 발생한 피더관에서의 한계 하중 제시

3.1 내압

감육이 외호부와 내호부에 있을 경우를 각각 따로 제시하였다. 감육 평가방법을 더 간편하게 만들기 위하여 감육이 있는 곡관의 한계 내압은 감육이 없는 직관의 한계 내압⁶⁾로 나누어 무차원화 하였다.

피더관은 원자로라는 특수한 공간에서 사용되는 만큼 보수성이 중요하다. 게다가 모든 하중 중에서도 내압은 원자로 작동중에 항상 부하되고 있으므로 곱힘하중보다 더 정확하고 안전한 평가 방법이 제시되어야 한다. 따라서 가장 하한계(Low bound)라고 할 수 있는 직관이 붙어 있지 않은 곡관부만을 사용하여 해석을 수행하였다. 만약 곡관에 직관이 붙어 있다면 직관으로 인한 응력이 재분배에 의하여 실제 한계 내압은 더 높아질 수 있으며, 감육의 성장에 따른 한계하중의 감소가 비선형적이므로 평가법으로서의 사용에 부적합하다.

Fig. 7을 보면 감육이 외호부에 있을 경우, 감육의 크기가 비교적 작은 범위는 감육이 없는 곡관의 한계 내압과 일정한 한계 내압을 가지지만 감육이 상당히 커진다면 서로 비슷한 기울기를 가지고 감소하는 경향을 보인다. 이것은 곡관이 내압을 받아 파손하게 되는 매커니즘에서 기인한다. 일반적인 곡관이 내압을 받으면 내호부에서 소성 파단이 시작된다. 즉, 외호부의 감육이 비교적 작다면 감육이 없는 곡관과 유사한 거동을 하지만 외호부의 감육이 무시할 수 있을 만큼 작지 않다면, 외호부에서 소성 파단이 시작되어 곡관의 한계 내압보다 작아지는 것이다. Fig. 8은 감육의 크기가 작은 곡관이 내압에 의하여 파손된 모습이다. 내호부가 두께 방향으로 모두 항복 응력을 초과한 반면 외호부는 아직 두께 방향으로 항복응력에 도달하지 않았다. 외호부의 한계 내압은 식 (1)과 같다. 두가지의 파손 모드를 가지므로 MIN 함수를 사용하였고, 감육이 없는 곡관과 직관의 한계 내압비가 0.67이다.

$$\frac{P_L}{P_o^s} = \text{MIN} \left(0.67, -1.25 \frac{d}{t} + A \right) \quad (1)$$

$$P_o^s = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_r t$$

$$A = -0.302 \frac{\theta}{\pi} + B$$

$$B = \left(\frac{1}{(4\phi/\pi) + 1} \right)^6 + 1.41$$

내호부에 감육이 있을 경우 앞서 말한 곡관의

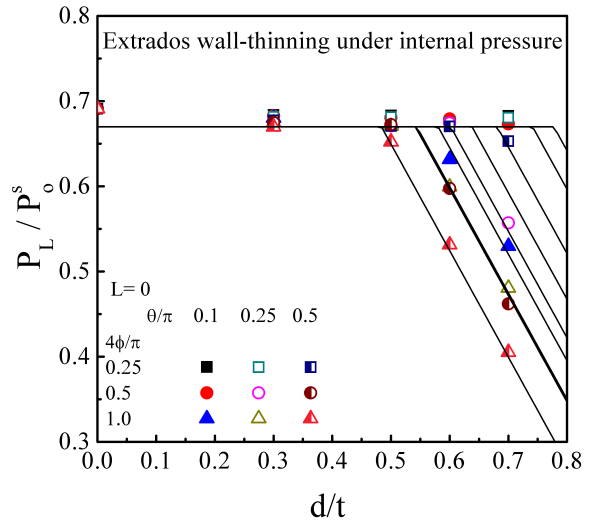


Fig. 7 FE limit pressure for extrados wall-thinning feeder pipe

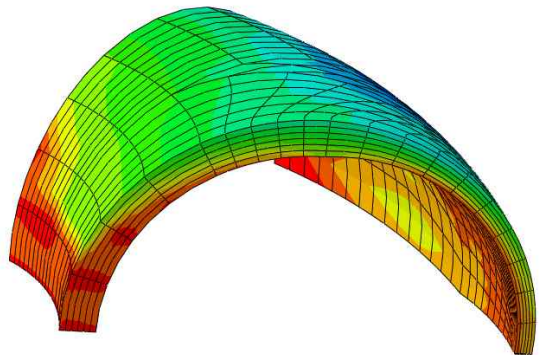


Fig. 8 FE model

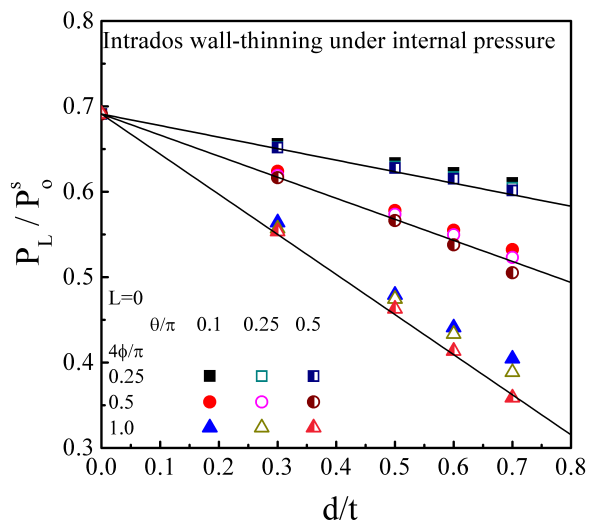


Fig. 9 FE limit pressure for intrados wall-thinning feeder pipe

내압 파손 매커니즘에 따라 감육의 크기가 증가함에 따라 한계 내압이 꾸준히 감소한다. 특이할 점은 내호부의 한계 내압은 감육의 형상 변수 중 d/t 와 $4\phi/\pi$ 의

영향만 받고 감육의 원주방향 길이를 결정 짓는 변수인 θ/π 에 대해서는 큰 영향을 받지 않는다. 내호부의 한계 내압은 식 (2)와 같고, 그 경향은 Fig. 9와 같다

$$\frac{P_L}{P_o^s} = A \frac{d}{t} + 0.691 \quad (2)$$

$$A = -0.446 \left(\frac{4\phi}{\pi} \right) - 0.0234$$

3.2 굽힘 하중

감육이 외호부와 내호부에 있을 경우와 단힘, 열림 방향을 모두 고려하였다. 내압과 마찬가지로 감육 평가 방법을 더 간편하게 하기 위하여 감육이 있는 곡관의 한계 하중은 감육이 없는 직관의 한계하중⁽⁷⁾으로 나누어 무차원화 하였다.

굽힘 하중에 대한 한계 하중 평가에서는 곡관에 직관이 붙어 있는 경우를 고려하였다. 직관으로의 응력 재분배와 직관의 한계하중으로 무차원화되는 효과에 의하여 감육의 위치에 관계 없이 비슷한 거동을 취한다. Fig. 10 을 보면 d/t 가 0.7 보다 작을 때는 응력이 직관으로 재분배되어 응력 완화가 이루어지기 때문에 d/t 가 0.7 에 이르러서 감육의 크기가 매우 커지게 되면 한계 하중이 급격하게 떨어지는 경향을 보인다.

외호부에 감육이 있을 때 단힘 방향 하중을 받는다면 식 (3)과 같은 평가식을 제시할 수 있다.

$$\frac{M_L^{ref}}{M_o^s} = M_o - A \left(\frac{d}{t} \right) \quad (3)$$

$$M_o^s = 4\sigma_0 r^2 t$$

$$M_o = \begin{cases} 0.601 \text{ (closing bending)} \\ 0.683 \text{ (opening bending)} \end{cases}$$

$$A = B + C \left(\frac{4\phi}{\pi} \right)$$

$$B = -0.009 + 0.025 \left(\frac{\theta}{\pi} \right) + 0.015 \left(\frac{\theta}{\pi} \right)^2$$

$$C = \begin{cases} 0.026 - 0.0228 \left(\frac{\theta}{\pi} \right) + 0.3153 \left(\frac{\theta}{\pi} \right)^2 & \text{(closing bending)} \\ 0.02 + 0.0914 \left(\frac{\theta}{\pi} \right) + 0.1905 \left(\frac{\theta}{\pi} \right)^2 & \text{(opening bending)} \end{cases}$$

외호부 감육에 열림 방향 굽힘 하중이 작용하는 경우는 Fig. 11, 내호부 감육에 단힘 방향 굽힘 하중이 작용하는 경우는 Fig. 12, 내호부 감육에 열림 방향 굽힘 하중이 작용하는 경우는 Fig. 13 에 잘 나타나 있다.

굽힘 하중이 작용하여 곡관의 한계 하중이 감소하는 기울기와 경향은 외호부, 내호부의 감육 형상에 상관없이 동일하며, 단힘, 열림 방향 등 굽힘하중의 방향에 영향을 받지만 매우 작아 거의 비슷하다고 볼 수 있다.

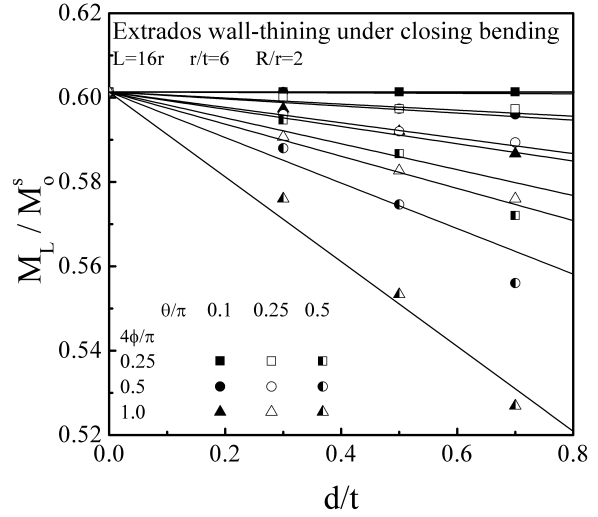


Fig. 10 TES plastic load for extrados wall-thinning feeder pipe under closing moment

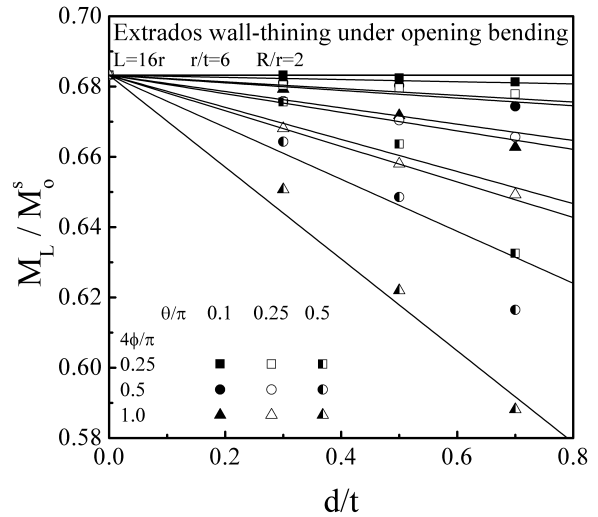


Fig. 11 TES plastic load for extrados wall-thinning feeder pipe under opening moment

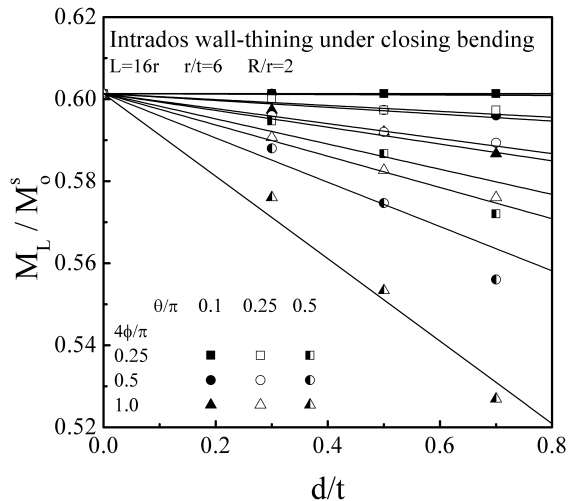


Fig. 12 TES plastic load for intrados wall-thinning feeder pipe under closing moment

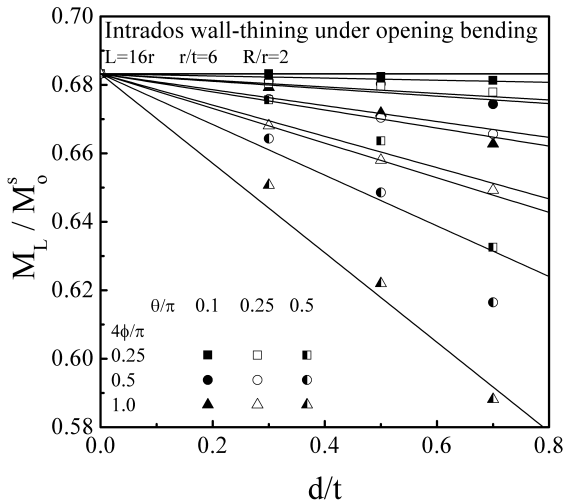


Fig. 13 TES plastic load for intrados wall-thinning feeder pipe under opening moment

다만, 감육이 없는 직관과 감육이 없는 곡관의 단힘, 열림 방향 한계 하중비가 다르기 때문에 그래프의 세로축값이 다르다.

단힘 방향 하중의 경우 직관과 곡관의 한계 하중 비는 0.601, 열림 방향 하중의 경우 직관과 곡관의 한계 하중비는 0.683로 단힘 방향 하중이 조금 더 위험하다고 볼 수 있다

4. 결론

본 연구에서는 평균 반지름-두께 비(r/t)는 4~6, 굽힘 반경-평균 반지름 비(R/r)는 2~3의 범위의 90도 굽힘각을 가진 피더관에 대해서 연구하였다. 감육의 형상을 원형으로 가정하였다. 변수 해석을 $d/t = 0 \sim 0.7$, $4\phi/\pi = 0 \sim 1$, $\theta/\pi = 0 \sim 0.5$ 의 범위에서 수행하여, 감육의 형상이 한계 하중에 미치는 영향을 체계적으로 조사하였다.

유한요소 해석에서는 탄성-완전 소성 재료를 사용하였다, 내압이 가해지는 경우에는 기하학적 선형(소변형) 가정을 고려한 한계 해석만을 수행하였다. 굽힘하중이 가해지는 경우에는 실제 현상을 묘사하기 위해서 기하학적 비선형 효과를 고려하여 유한요소 해석을 실시하였다. 대변형 효과를 고려하면 변위-모멘트 곡선이 수렴하지 않는다. 따라서 2배 탄성 구배법(Twice-elastic-slope method)을 이용하여 TES 소성 하중(TES plastic load)을 결정하여 이를 한계 하중으로 정의하였다.

원형 감육 형상 변수(d/t , $4\phi/\pi$, θ/π)에 따른 한계 하중의 변화를 정량적으로 평가하였다. 대체적으

로 감육 형상 변수에 선형적으로 소성 붕괴 하중이 감소함을 볼 수 있다. 이를 바탕으로 원형 감육에 대한 한계 하중 평가식을 제시하였다.

이러한 연구 결과를 바탕으로 하여, 90도 피더관에 발생한 감육을 평가할 수 있는 상세 기법을 제시하였다. 그리고 다양한 굽힘각을 가지는 곡관에 발생한 감육의 한계 하중도 가장 하한계(Low bound)라고 할 수 있는 90도 피더관의 식을 사용한다면 보수적으로 안정적인 적용이 가능하다.

후기

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원(2008T100100143) 주관으로 수행된 "중수로 피더관 감육에 대한 구조 건전성 평가 연구" 과제의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) Duan, X., Kozluk, M. J. and Li, M., 2009, "Comprehensive Integrity Assessment of Carbon Steel Feeder Pipes/Elbows Subject to Wall Thinning," *Proceedings of the ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Division Conference*, Prague, Czech Republic.
- (2) Jin, J. C., Eom, S. and Awad, R., 2008, "Some Issues in Fitness for Service Assessment of Wall Thinned CANDU Feeder Pipes," *Proceedings of the ASME 2008 Pressure Vessels and Piping Division Conference*, Chicago, USA.
- (3) Slade, J. P. and Gendron, T. S., 2005, "Flow Accelerated Corrosion and Cracking of Carbon Steel Piping in Primary Water - Operating Experience at the Point LEPREAU Generating Station," *Proceedings of the 12th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System*.
- (4) ABAQUS User's Manual, Version 6.9, 2009 (Dassault Systemes, Paris, France).
- (5) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section II, ASME, New York (2007).
- (6) Kim, Y.-J., Kim, J., Ahn, J., Hong, S.-P. and Park, C.-Y., 2008, "Effects of Local Wall Thinning on Plastic Limit Loads of Elbows Using Geometrically Linear FE Limit Analyses," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 75, pp. 2225~2245.
- (7) Oh, C.-S., Kim, Y.-J. and Park, C.-Y., 2007, "Plastic Loads of Elbows with Local Wall Thinning Under in-Plane Bending," *International Journal of Fracture*, Vol. 145, pp. 63~79.