

대변형 효과를 고려한 감육 엘보우의 닫힘굽힘 한계하중에 미치는 내압 영향 평가

*홍석표¹, 천광희¹, 오창식¹, 김윤재²

¹ 고려대학교 기계공학과 대학원, ² 고려대학교 기계공학과

Effect of Internal Pressure on Plastic Limit Loads for Elbows with Local Wall-Thinning under Closing Bending Incorporating Large Geometry Change Effects

*S. P. Hong¹, K. H. Chun¹, C. S. Oh¹, Y. J. Kim²

¹ (Graduate, Dept. of Mech. Eng., Korea Univ.), ² (Dept. of Mech. Eng., Korea Univ.)

Key Words : Finite element limit analysis, Local wall thinning, Closing bending, Pipe bends, Large geometry change effects, Plastic limit loads

1. 서론

원자력발전소나 가스산업계에서 엘보우와 같은 곡관의 구조 신뢰성평가는 매우 중요한 문제로 소성한계하중은 주요 관심대상이 되어 왔다.⁽¹⁻⁶⁾ 특히 내압과 모멘트를 동시에 받는 복합하중이 작용하는 경우 감육이 없는 엘보우에 대한 내압영향 평가⁽⁷⁾는 발표되었으나, 감육이 존재하는 엘보우에 대한 연구는 아직까지 명확히 알려져 있지 않다. 따라서 본 논문에서는 다양한 감육 엘보우 형상에 대해 3차원 유한요소 해석을 하고, 기존의 식을 기반으로 대변형 효과를 고려한 감육 엘보우의 닫힘굽힘 한계하중에 미치는 내압 영향을 근사식으로 제시하였다.

2. 유한요소해석

Fig. 1은 본 연구에 사용된 감육엘보우의 형상을 나타낸 것이다. 감육부의 형상은 사각으로 모델링 하였으며, 접합된 직관은 굽힘 하중이 작용하는 곡관의 해석에서 경계조건 적용에 대한 어려움을 없애주기 때문에 곡관과 직관이 접합된 형상을 보편적으로 사용한다. 특히 굽힘하중의 경우, 접합된 직관의 길이를 외경의 5 배(L=5Do)로 설정하였다. 감육은 곡관 내부의 외호부(extrados)에 존재하며, 평균 반경, 두께, 곡률반경을 각각 r, t, R 로 나타내었다. 엘보우의 형상과 관련된 중요한 무차원 변수는 R/r, r/t, 4φ/π, θ/π, d/t 이며, 곡률특성을 나타내는 무차원 변수 λ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\lambda = \frac{Rt}{r^2} = \frac{(R/r)}{(r/t)} \quad (1)$$

위의 무차원 변수는 R/r 과 r/t 가 독립적으로 변함에 따라 λ 는 0.1 부터 0.5 까지 변화하며, 이에 따라 곡관 형상의 효과가 정량화된다. 재료는 탄성-완전소성(elastic-perfectly plastic)재료로 가정하였고, 대변형 옵션을 사용하였다. 해석시간을 줄이기 위해 1/4 대칭조건을 사용하였으며, 비압축성과 관련된 문제를 피하기 위해, 적분점이 감소된 20 절점 등각주요소(C3D20R)를 사용하였다. 하중조건은 내압과 굽힘하중이 결합된 복합하중 상태이고, 굽힘하중일 때 직관의 끝에 MPC(Multi-point constraint)옵션을 사용하여, 충분한 회전을 직접 가하였으며, 내압일 때는 유한요소모델 내부면에 분포하중으로서 내압을 작용시켰다. 내압에 의해 발생하는 등가 축방향 응력은 직관의 한 끝단에 작용시켰다. 해석에 사용된 요소 수는 2088~2268 개, 절점의 수는 10512~11232 개이며, 유한요소 해석은 상용 프로그램인 ABAQUS Ver.6.4 를 사용하였다.

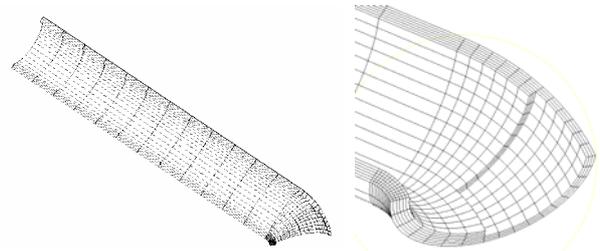


Fig. 1 Typical finite element mesh, employed in present work.

3. 결과

본 연구에서는 최근 Kim⁽⁷⁾ 이 제안한 식을 바탕으로 하여 감육이 존재하는 곡관의 닫힘굽힘 한계하중에 미치는 내압 영향 평가식을 간단한 소성한계하중의 형상 변수를 적용하여 다음과 같이 제안한다.

$$m = 1 + a\alpha p + b\beta p^2 + c\gamma p^3 \quad (2)$$

$$\alpha = \begin{cases} 135\lambda^3 - 202.5\lambda^2 + 101.25\lambda - 14.575 & \text{for } 0.3 \leq \lambda \leq 0.5 \\ 1.22 & \text{for } 0.1 \leq \lambda \leq 0.3 \end{cases}$$

$$\beta = \begin{cases} 105\lambda^2 - 105\lambda + 23.75 & \text{for } 0.3 \leq \lambda \leq 0.5 \\ 1.70 & \text{for } 0.1 \leq \lambda \leq 0.3 \end{cases}$$

$$\gamma = \begin{cases} -75\lambda^2 + 75\lambda - 18.83 & \text{for } 0.3 \leq \lambda \leq 0.5 \\ -3.08 & \text{for } 0.1 \leq \lambda \leq 0.3 \end{cases}$$

$$a = \left\{ 1 + 0.1 \left(\frac{d}{t} \right) \right\} \left\{ 1 + 0.01 \left(\frac{4\phi}{\pi} \right) \right\}$$

$$b = 1 + \left[\left(\frac{\theta}{\pi} \right)^{2.65} / \lambda \right] 15 \left(\frac{d}{t} \right)^2$$

$$c = 1 + \left[\exp \left\{ 6.4 \left(\frac{d}{t} \right) \right\} - 1 \right] \left(\frac{\theta}{\pi} \right)^{2.45}$$

Fig. 2, 3 는 외호(extrados)에 감육(θ/π=0.3, θ/π=0.5)을 가진 곡관에 대하여 4φ/π, d/t, R/r, r/t 를 고려한 소성한계 하중의 영향을 보여준다. 식(2)는 형상 변수 r/t = 20 인 경우에 적용할 수 있는 식이며, Fig. 2 에 나타낸 것처럼 유한요소해석 결과와 잘 일치되는 것을 볼 수 있다. 또한 식(3)은 r/t = 5, 10, 15 인 경우에 적용할 수 있는 식이며, Fig. 3 에 나타내었다.

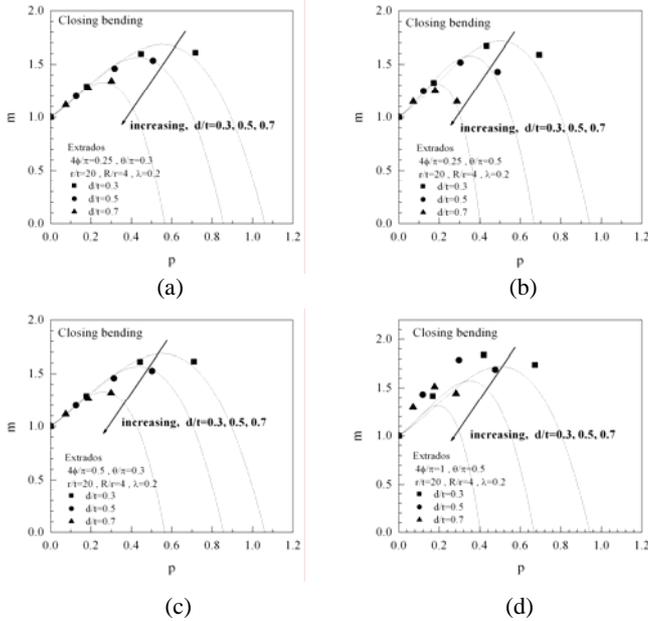


Fig. 2 Comparison of proposed solution with FE results under combined pressure and closing bending. ; $r/t = 20, \lambda = 0.2$
 (a) $4\phi/\pi = 0.25, \theta/\pi = 0.3$ (b) $4\phi/\pi = 0.25, \theta/\pi = 0.5$
 (c) $4\phi/\pi = 0.5, \theta/\pi = 0.3$ (d) $4\phi/\pi = 1, \theta/\pi = 0.5$

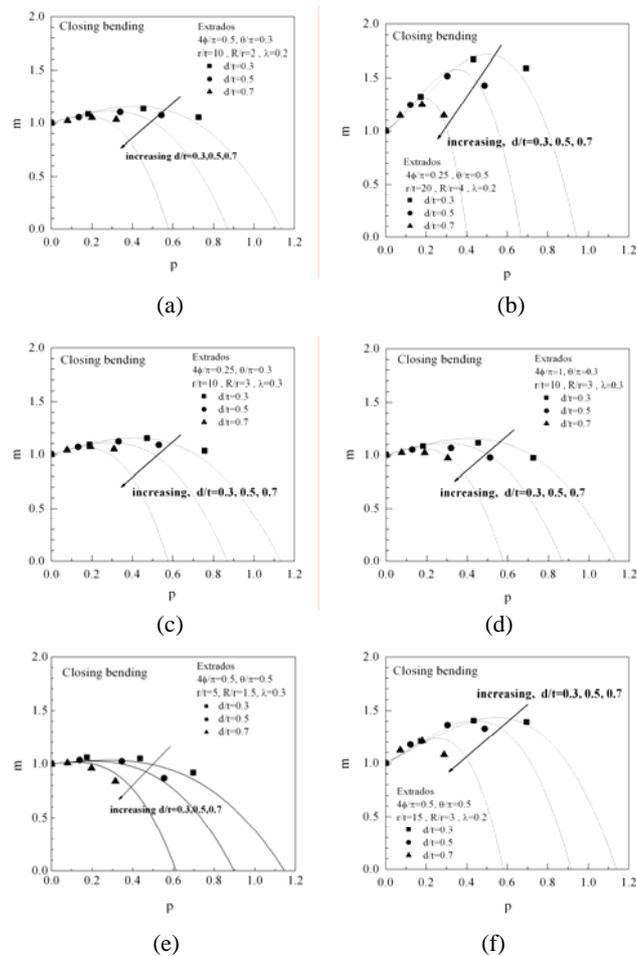


Fig. 3 Comparison of proposed solution with FE results under combined pressure and closing bending. ; $r/t = 5, 10, 15$
 (a) $4\phi/\pi = 0.5, \theta/\pi = 0.3, \lambda = 0.2$ (b) $4\phi/\pi = 1, \theta/\pi = 0.3, \lambda = 0.2$
 (c) $4\phi/\pi = 0.25, \theta/\pi = 0.3, \lambda = 0.3$ (d) $4\phi/\pi = 1, \theta/\pi = 0.3, \lambda = 0.3$
 (e) $4\phi/\pi = 0.5, \theta/\pi = 0.5, \lambda = 0.3$ (f) $4\phi/\pi = 0.5, \theta/\pi = 0.5, \lambda = 0.2$

$$m = 1 + a\alpha p + b\beta p^2 + c\gamma p^3 \quad (3)$$

$$\alpha = -0.18 + 0.07 \left(\frac{r}{t} \right)$$

$$\beta = 0.0005 \left(\frac{r}{t} \right)^3 - 0.0075 \left(\frac{r}{t} \right)^2 + 0.0375 \left(\frac{r}{t} \right) - 0.05$$

$$\gamma = -0.011 \left(\frac{r}{t} \right)^2 + 0.110 \left(\frac{r}{t} \right) - 0.880$$

$$a = \left\{ 1 + 0.1 \left(\frac{d}{t} \right) \right\} \left\{ 1 + 0.01 \left(\frac{4\phi}{\pi} \right) \right\}$$

$$b = 1 + \left[\left(\frac{\theta}{\pi} \right)^{2.65} / \lambda \right] 15 \left(\frac{d}{t} \right)^2$$

$$c = \exp \left\{ 1.62 \left(\frac{d}{t} \right)^2 + 7.14 \left(\frac{d}{t} \right)^3 - 4.76 \left(\frac{d}{t} \right)^4 \right\}$$

4. 결론

본 논문에서는 3 차원 유한요소해석을 통해 굽힘하중과 내압하중이 결합된 하중상태하에서 국부감육 곡관의 소성한계하중을 계산하고 해석결과를 이용하여 곡관의 단힘굽힘 한계하중에 미치는 내압 영향 평가식을 제안하였다. 본 논문에서 제안한 내압 영향 평가식은 유한요소 해석에 기초한 식이므로 비교적 정확한 식이라 할 수 있으며, 곡관의 소성붕괴 및 여러가지 파괴역학 매개변수의 예측에 유용하게 적용할 수 있다.

참고문헌

1. Spence J, Findlay GE., "Limit load for pipe bends under in-plane bending," Proc.2nd Int. Conf. On Pressure Vessel Technology, San Antonio, 1-28, pp. 393-399, 1973.
2. Calladine CR., "Limit analysis of curved tubes," Journal of Mechanical Engineering Science, vol. 16, pp.85-87, 1974.
3. Goodall IW., "Lower bound limit analysis of curved tubes loaded by combined internal pressure and in-plane bending moment," CEBG report RD/B/N4360 Central Electricity Generating Board, 1978.
4. Miller AG., "Review of limit loads of structures containing defects," International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 32, pp.191-327, 1988.
5. Robertson A, Li H, Mackenzie D., "Plastic collapse of pipe bends under combined internal pressure and in-plane bending," International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 82, pp.407-16, 2005.
6. Chattopadhyay J, Natahani DK, Dutta BK, Kushwaha HS., "Closed-form collapse moment equations of elbows under internal pressure and in-plane bending moment," Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 122, pp.431-6, 2000.
7. Kim Y-J, Oh C-S., "Closed-form plastic collapse loads of pipe bends under combined pressure and in-plane bending," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 73, pp.1437-1454, 2006.