

압력과 모멘트의 복합하중을 받는 곡관에 대한 유한요소 한계하중 해석

오창식*(고려대 대학원 기계공학과), 김윤재(고려대 기계공학과)

Limit Loads for Pipe Bends under Combined Pressure and in-Plane Bending Based on Finite Element Limit Analysis

C. S. Oh(Mecha. Eng. Dept. Korea Univ.), Y. J. Kim(Mechanical Eng. Dept., Korea Univ.)

ABSTRACT

In the present paper, approximate plastic limit load solutions for pipe bends under combined internal pressure and bending are obtained from detailed three-dimensional (3-D) FE limit analyses based on elastic-perfectly plastic materials with the small geometry change option. The present FE results show that existing limit load solutions for pipe bends are lower bounds but can be very different from the present FE results in some cases, particularly for bending. Accordingly closed-form approximations are proposed for pipe bends under combined pressure and in-plane bending based on the present FE results. The proposed limit load solutions would be a basis of defective pipe bends and be useful to estimate non-linear fracture mechanics parameters based on the reference stress approach.

Key Words : FE analysis(유한요소해석), Limit load(한계하중), Pipe bend(곡관),
Combined pressure and in-plane bending(압력과 모멘트의 복합하중)

1. 서 론

곡관의 한계하중에 대한 평가는 배관의 건전성 평가에 매우 중요하다. 예를 들면 압력배관의 한계하중 해석에 직접적으로 사용되며 또한 참조하중법을 사용하여 비선형 파괴역학 매개변수인 J 와 C^* 적분을 예측하는데 사용 가능하다.^{1,3} 그러나 직관의 한계하중^{4,6} 이 잘 알려져 있는 반면, 곡관의 한계하중식은 아직까지 명확히 알려져 있지 않다. 본 논문에서는 다양한 곡관 형상에 대해 3 차원 유한요소해석을 하고, 내압과 굽힘하중을 받는 곡관의 소성 한계하중을 closed-form 근사식으로 제시하였다.

2. 유한요소 한계해석

Fig. 1 은 본 연구에 사용된 90° 곡관의 형상을 나타낸 것이다. 중요한 무차원 변수는 R/r 과 r/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 변화함으로써 소성한계하중에 대한 곡관의 기하학적 영향을 정량화한다. 1/4 대칭조건의 3 차원 모델을 사용하였고, 재료는 탄성-완전소성 재료로 가정하였으며, 소변형 용선을 사용하였다. 유한요소 해석은 상

용 프로그램인 ABAQUS Ver.6.4 를 사용하였다.⁹

3. 결 과

3.1 내압을 받는 곡관의 한계하중

곡관에 대한 한계하중은 Goodall⁴ 에 의해 유도된 식을 Mises 항복조건으로 변환하면 다음과 같다.

$$P_0 = \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 \frac{t}{r} \right) \left[\frac{1-r/R}{1-r/(2R)} \right] = P_0' \left[\frac{1-r/R}{1-r/(2R)} \right] \quad (2)$$

Fig. 2 는 직관이 없는 곡관에 대한 유한요소 해석결과이다. 유한요소 해석결과와 식 (2)가 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 식 (2)는 내압을 받는 곡관의 한계압력을 예측하는데 사용될 수 있다.

3.2 굽힘하중을 받는 곡관의 한계하중

Spence 와 Findlay⁷ 그리고 Callandine⁸ 은 소변형에 기초하여 굽힘하중을 받는 곡관에 대한 한계 굽힘하중을 제시한 바 있다. 그러나 이 식들은 Fig.3 에 나타난 것과 같이 유한요소 해석결과보다 매우 보수적으로 예측한다. 따라서 본 논문에서는 정확한 한계하중을 예측하기 위해 유한요소 결과를 토대로 새로운 식을 제안하고자 한다.

$$\frac{M_0}{M_0^s} = A(\lambda + k)^n \quad (3)$$

$$A = 0.6453 \left(\frac{r}{t} \right)^{0.0772} \quad k = 1.5398 \left(\frac{r}{t} \right)^{-0.6755} \quad n = 0.5157 \left(\frac{r}{t} \right)^{0.0601}$$

Fig. 3 는 유한요소 해석결과와 제안한 식 (3)을 비

교한 것이다. 모든 r/t 에 대하여 1% 이내의 차이를 나타내며 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

3.3 내압과 모멘트를 동시에 받는 곡관의 한계 하중

Fig. 4 는 내압과 모멘트가 동시에 작용하는 곡관에 대한 해석결과를 나타낸다. Fig. 4 에 나타난 결과는 다음의 압력과 모멘트를 받는 곡관에 대한 항복선도를 따른다.

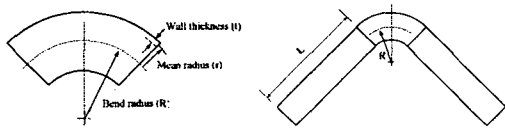


Fig. 1 Schematic illustrations of 90 degree pipe bends, considered in the present work.

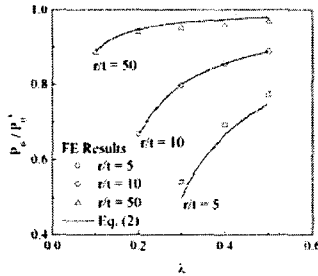


Fig. 2 Comparisons of theoretical limit pressure solutions with the present FE results without the straight pipe

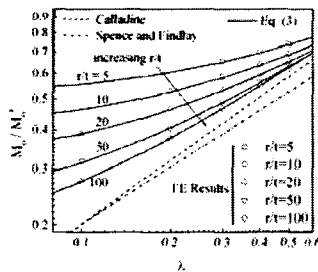


Fig. 3 Comparisons of the FE limit solutions for pipe bends under in-plane bending with the proposed closed-form solution

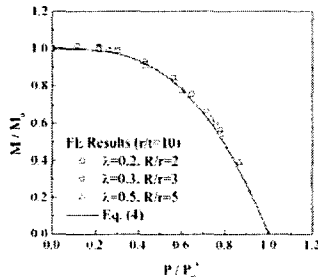


Fig. 4 Comparisons of the FE limit solutions for pipe bends under combined pressure and in-plane bending with the proposed closed-form solution.

$$\frac{M}{M_o} = 1 - \left(\frac{1-r/R}{1-r/(2R)} \cdot \frac{P}{P_o} \right)^2 = 1 - \left(\frac{P}{P_o} \right)^2 \quad (4)$$

식 (4)는 유한요소 해석결과와 전부 잘 일치함을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는, 탄성-완전소성 재료와 소변형 옵션에 기초하여 압력과 모멘트의 복합하중을 받는 곡관에 대하여 3 차원 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소 해석결과에 기초하여, 내압, 굽힘하중 그리고 내압과 모멘트의 복합하중을 받는 곡관의 소성한계하중에 대해 closed-form 근사식을 제안하였다.

후 기

본 논문은 과학기술부 지원으로 수행하는 원자력연구개발사업(원자력기초공동연구소)의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. R6, "assessment of the integrity of structures containing defects," Revision 4, British Energy, 2001.
2. R5, "an assessment procedure for the high temperature response of structures," Revision 2, British Energy, 1999.
3. Webster GA., Ainsworth RA., "High temperature component life assessment," Chapman & Hall, 1994.
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. Kim Y-J, Shim D-J, Huh N-S, Kim Y-J., "Plastic limit pressures for cracked pipes using finite element limit analyses," International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 79, pp. 321-30, 2002.
6. Kim Y-J, Shim D-J, Nikbin K, Kim Y-J, Hwang S-S, Kim J-S., "Finite element based plastic limit loads for pipes with part-through surface cracks under combined loading," International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 80, pp. 527-40, 2003.
7. Spence J. and Findlay GE., "Limit load for pipe bends under in-plane bending," Proc. 2nd Int. Conf. On Pressure Vessel Technology, San Antonio, Vol. 1-28, pp. 393-399, 1973.
8. Calladine CR., "Limit analysis of curved tubes," Journal of Mechanical Engineering Science, vol. 16, pp. 85-87, 1974.
9. ABAQUS Version 6.4, "User's manual," Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc., 2003.