

< 논문 >

소변형 이론에 입각한 감육이 존재하는 90 도 곡관의 소성 한계 하중 (II)

- 굽힘 -

김종현* · 안중혁* · 홍석표* · 김운재† · 박치용**
(2006년 12월 4일 접수, 2007년 3월 20일 심사완료)

Plastic Limit Loads of 90° Elbows with Local Wall-Thinning Using Small Strain FE Limit Analyses (II)

- Bending Moment -

Jong-Hyun Kim, Joong-Hyok An, Seok-Pyo Hong, Yun-Jae Kim and Chi-Yong Park

Key Words : FE Analysis(유한요소해석), Wall Thinning(감육), Elbow(곡관), Plastic Limit Load(소성 한계하중), Bending Moment(굽힘)

Abstract

This paper proposes closed-form plastic limit load solutions for elbows under in-plane bending, via three-dimensional (3-D), small strain FE limit analyses using elastic-perfectly plastic materials. A wide range of elbow and thinning geometries are considered. For systematic analyses of the effect of the axial thinning length on limit loads, two limiting cases are considered; a sufficiently long wall thinning, and the circumferential part-through surface crack. Closed-form plastic limit load solutions for wall thinning with intermediate longitudinal extents are then obtained from these two limiting cases. The effect of the axial extent of wall thinning on plastic limit loads for elbows is highlighted by comparing that for straight pipes. Although the proposed solutions are developed for the case when wall thinning exists in the center of elbows, it is also shown that they can be applied to the case when wall thinning exists anywhere within the elbow.

1. 서론

발전소 배관 시스템의 건전성 평가에 있어 감육이 존재하는 배관의 소성한계하중은 주요 관심대상이 되어왔다.^(1~10) 특히, 최근 감육배관에 의한 사고가 잇따름에 따라 감육배관의 소성한계하중은 더욱 중요해졌다. 현재 연구는 주로 직관의 감육에 국한되어 있으며, 실험과 해석 등을 통한 폭넓은 연구가 진행되어 왔다.^(5~9) 반면 곡관의 경우 침부식에 의한 감육이 쉽게 발생할 수 있고, 지진 발생시 과도한 굽힘 모멘트가 발생할 수 있음에도 불구하고 그에 대한 연구는

여전히 매우 부족한 상황이다. 감육이 있는 곡관은 그 자체로 형상이 복잡하며, 감육의 위치, 크기, 굽힘 하중의 방향에 따라 하중이 달라질 수 있다. 따라서 감육곡관의 한계하중을 결정하기 위해서는 보다 체계적인 접근이 필요하다.

본 연구에서는 굽힘 하중이 작용하는 곡관에 대해 다양한 형상 변수를 체계적으로 변화시키면서 3 차원 유한요소 한계해석을 수행하였으며, 감육 길이를 고려하여 감육의 폭과 깊이의 영향을 표시할 수 있는 closed-form 한계모멘트 근사식을 제시하였다.

2. 유한요소해석

Fig. 1 은 감육이 있는 90° 곡관의 형상을 나타낸 것이다. 곡관의 형상은 평균반경 r , 두께 t , 곡관의 반경을 R 로 나타내었다. 곡관형상과 관련된 중요한 무차원 변수는 R/r 과 r/t 이며, 이를 조합하

† 책임저자, 회원, 고려대학교 기계공학과
E-mail : kimy0308@korea.ac.kr
TEL : (02)3290-3372 FAX : (02)929-1718

* 회원, 고려대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 한전 전력연구원 원자력 연구실

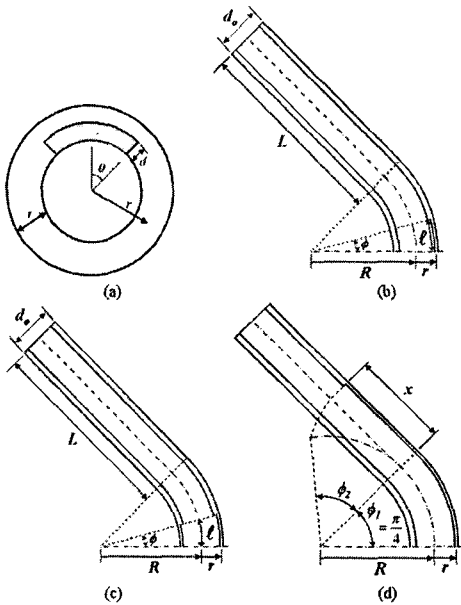


Fig. 1 Schematic illustrations of elbows with local wall thinning ; (a) cross section, (b) finite circumferential wall thinning, (c) fully circumferential wall thinning, and (d) definition of the circumferential angle for very long thinning

여 다음과 같은 곡관 특성 변수 λ 를 정의하였다.

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

내압의 관한 연구인 Part I⁽²⁰⁾과는 다르게 Part II의 굽힘 모멘트에 관한 연구에서는 축방향 길이를 ϕ 로 표현한다. Fig. 1(d)는 축방향 감육이 곡관부분을 초과하여 직관에 걸쳐있는 경우에 대한 모식도로서 초과된 감육 길이 x 와 감육각 ϕ 는 식 (2)와 같은 관계를 갖는다.

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 = \frac{\pi}{4} + \frac{x}{R} \quad (2)$$

또한 곡관 형상에 대한 효과를 정량화하기 위해 다양한 r/t 와 R/r 에 대한 조합을 사용하였다. 실제 곡관의 경우 모두 직관과 연결되어 있으므로 이를 모사하기 위해 Fig. 1과 같이 길이 L 의 직관이 함께 고려된다. 이때 직관의 길이 L 은 충분히 길어야 하며, 본연구에서는 직관의 길이 L 을 곡관반경의 5배($L=5R$)로 설정하였다.

감육의 형상은 Fig. 2와 같이 일정한 깊이의 사각형 모양으로 가정하였고, 내부에 위치한 감

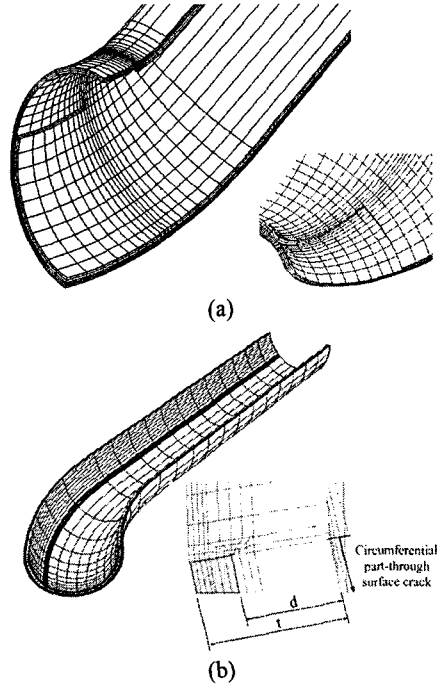


Fig. 2 FE meshes of defective elbows : (a) partial circumferential wall thinning at extrados, (b) circumferential part-through, constant-depth surface crack at extrados

육만을 고려하였다. Fig. 2와 같이 감육의 형상에 대한 변수로 배관의 외경은 d_o , 감육의 깊이는 d , 원주방향 감육각은 2θ , 감육 길이는 ϕ 로 각각 나타내었고, 이를 이용하여 감육 형상에 대한 중요한 무차원 변수로 d/t , θ/π , $4\phi/\pi$ 를 이용하였다. 체계적인 분석을 위해 d/t 는 0.3, 0.5, 0.7, θ/π 는 0.1, 0.3, 0.5, 1.0의 경우를 각각 고려하였다. θ/π 가 1.0인 경우는 원주방향으로 전체가 감육된 것으로 볼 수 있다.

유한요소해석은 Part I에서와 같이 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS Ver. 6.4를 이용하여 소변형 유한요소해석을 수행하였다.⁽¹⁷⁾ 재료는 탄성-완전소성으로 가정하였고 대칭조건을 고려하여 1/4 모델을 사용하였다. 유한요소모델에는 C3D20R 요소를 사용하였다. 또한 Part I의 경우와 달리 하중조건에 굽힘을 가하였다. 이때 하중조건은 직관의 끝을 한 점으로 묶어 회전시키는 MPC (Multi-point constraint) 옵션을 사용하였다.

3. 결함이 없는 곡관의 한계하중

결함이 없는 곡관의 한계하중은 Calladine⁽¹²⁾에 의해 아래와 같이 유도되었다.

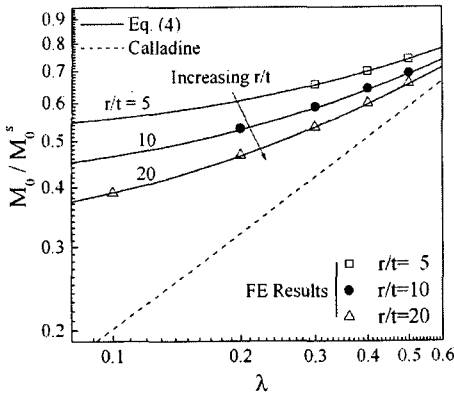


Fig. 3 Comparisons of the FE limit loads for smooth (un-defective) elbows with closed-form solutions under in-plane bending

$$M_0 = (4r^2t\sigma_0)(0.935\lambda^{2/3}) = M_0^s (0.935\lambda^{2/3}) \quad (3)$$

σ_0 는 탄성-완전소성 재료의 한계 응력을 나타내고 M_0^s 는 결함이 없는 직관의 한계하중을 나타낸다. Fig. 3에서 유한요소해석결과는 식 (3)에서 예측된 값보다 높게 계산되고, r/t 가 감소함에 따라 증가하는 결과를 보인다. 또한 식 (3)은 무차원화 변수 λ 에만 의존하지만, 유한요소해석 결과는 추가적으로 r/t 나 R/r 에 의존함을 보여준다. 이는 직관과 결합된 곡관의 경우 항복영역이 곡관 뿐만 아니라 직관에까지 영향을 미치기 때문이다. 이것은 곡관만 존재하는 것보다 한계 모멘트를 더 높게 만드는 결과를 만든다. 유한요소해석 결과에 따라 결함이 없는 곡관의 한계 모멘트는 다음과 같이 제안되었다⁽¹¹⁾.

$$\frac{M_0}{M_0^s} = A(\lambda+k)^n \quad (4)$$

여기서,

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

4. 감육이 존재하는 곡관의 한계하중

4.1 축방향 감육 길이가 충분히 긴 경우

4.1.1 국부 감육이 존재하는 경우

축방향으로 감육이 충분히 긴 경우($\phi \gg 1$), 소성 한계하중은 어느 특정한 값에 수렴하여 더 이상 한계하중이 감육의 축방향 길이에 의존하지 않음을 Fig. 8~11에서 확인할 수 있다. 축방향으로 충분히 감육이 긴 경우 곡관의 단립 방향 굽힘 유한요

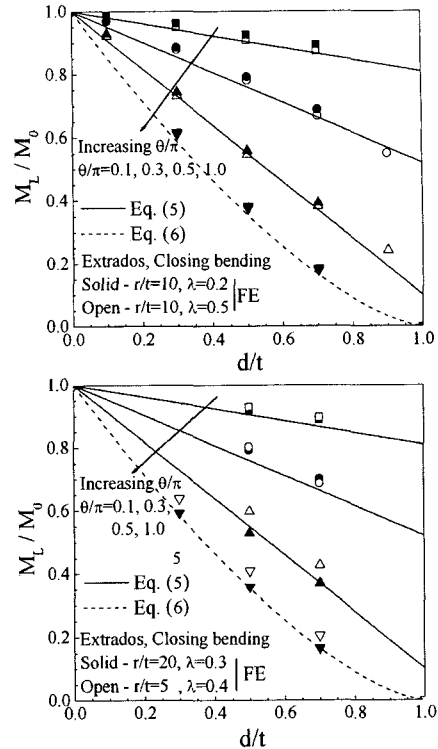


Fig. 4 Comparison of the FE limit moments for sufficiently long thinning at extrados in elbows under closing bending with closed-form solutions.

소 한계하중은 Fig. 4에서와 같다. 이는 곡관 기하학적 특성 R/r 과 배관 기하학적 특성 r/t 의 영향이 중요하지 않음을 보여준다. 한계하중은 단지 d/t 에 의존하고 선형적임을 알 수 있다. 이러한 유한요소해석 결과를 바탕으로 감육이 있는 다양한 형상의 곡관에 대하여 축 방향 감육 길이가 충분히 길 때의 하한계 값을 식 (5)와 같이 간단한 함수로 제안하였다.

$$\frac{M_L}{M_0} = f_\infty = 1 - \left(\frac{d}{t}\right) \left[0.09 + 0.8 \left(\frac{\theta}{\pi}\right) + 1.63 \left(\frac{\theta}{\pi}\right)^2 \right] \quad (5)$$

Fig. 4에서는 식 (5)와 유한요소해석 결과를 비교하였고, Fig. 5(a)에서는 제안된 식 (5)를 외호부에 감육이 있을 때 열림방향 굽힘의 유한요소해석 결과와 비교하였다. 예측대로 소변형 해석에서는 열림방향 굽힘의 한계하중은 단립방향의 한계하중과 같았다. 따라서 식 (5)는 굽힘 방향에 관계없이 적용될 수 있다. Fig. 5(b)는 외호부에 감육이 있을 때 보다 내호부에 감육이 있을 때 $r/t, \lambda$ 의 영향이 조금 더 나타남을 보여주는 그림이다. 제시한 식 (5)와 비교하여 차이가 있긴 하지만, 식 (5)는 유한요

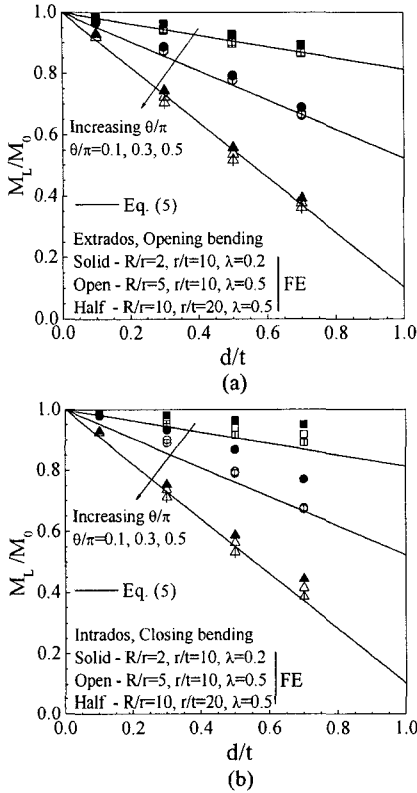


Fig. 5 Effects of (a) the loading mode (opening bending for extrados thinning) and (b) the location (intrados thinning) on limit moments for elbows with sufficiently long thinning

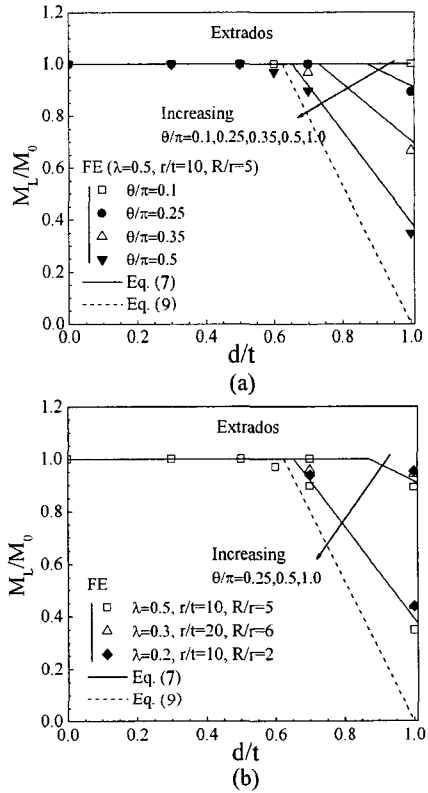


Fig. 6 Comparison of FE limit moments for circumferential part-through surface cracks at extrados in elbows with the closed-form solution

소 한계하중의 하한계 값을 이용하여 만들었기 때문에 내호부에 감육이 있는 경우더라도 적용될 수 있다.

4.1.2 완전 감육이 존재하는 경우

제안된 식 (5)는 $0 \leq \theta/\pi \leq 0.5$ 범위에서만 유용하며 이 범위 안에서 소성한계하중은 d/t 에 대해서 선형적으로 나온다. 그러나 $0.5 \leq \theta/\pi$ 범위에서는 소성한계하중은 다른 경향을 보인다. 따라서 완전 감육($\theta/\pi=1$)의 경우에 대해서는 다른 형태의 근사식을 제시하였다. Fig. 4에는 축방향 감육길이가 충분히 긴 곡관에 완전감육이 존재할 때의 유한요소해석 결과를 나타내었다. 이를 통해 곡관에 완전감육이 존재하는 경우에 대하여, 곡관의 기하학적 특성($r/t, \lambda$)의 영향이 적고 소성한계하중이 d/t 에만 의존하는 식 (6)을 제시하였다.

$$\frac{M_L}{M_0} = f_\infty = \left(1 - \frac{d}{t}\right)^2 \quad (6)$$

4.2 축방향 감육 길이가 없는 경우

4.2.1 국부 감육이 존재하는 경우

원주방향 부분 표면균열은 축방향 감육길이가 '0'으로서, 국부감육의 또 하나의 극단적인 경우로 생각될 수 있다. 부분 표면균열의 경우 굽힘방향이 중요하지만, (13) 본 논문에서는 단지 표면 균열을 열어주는 방향의 굽힘만을 고려하였다. 표면균열이 내호부에 있을 때의 열림방향 굽힘, 표면균열이 외호부에 있을 때의 닫힘방향 굽힘이 이에 해당한다. Fig. 6(a)에는 $r/t=10$ 이고 $R/r=5, \lambda=0.5$ 인 곡관에서 외호부에 원주방향 표면균열이 존재할 때 닫힘방향 굽힘에 대한 유한요소해석 결과를 나타내었다. 이 그림에서는 균열이 충분히 길거나 깊지 않으면 소성한계하중은 균열에 큰 영향을 받지 않음을 보여준다. 예를 들어 $d/t \leq 0.6$ 이면 균열이 있는 곡관의 소성한계하중은 결함이 없는 곡관에서와 같다. Fig. 6(b)에서는 세가지 경우 ($\theta/\pi=0.5$ 이고 $d/t=0.7, 1.0$ 일 때, $\theta/\pi=0.25$ 이고 $d/t=1.0$ 일 때)의 유한요소해석 결과에 대하여 λ 의 영향을 보여준다. $\lambda=0.5$ 인 경우보다 $\lambda=0.2, 0.3$ 인 경우의 소성

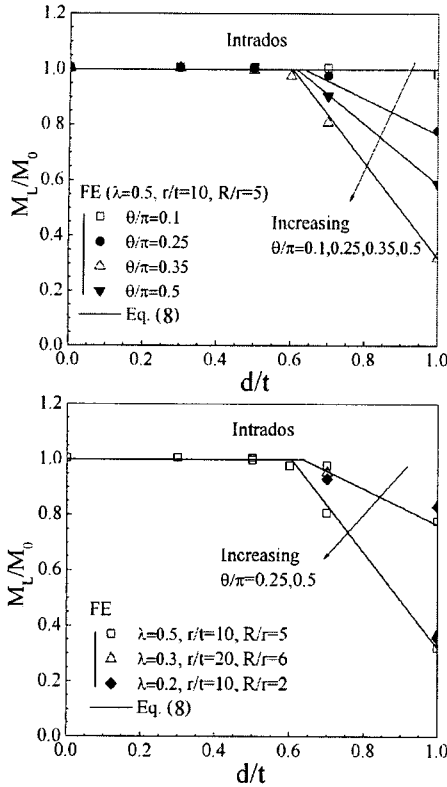


Fig. 7 Comparison of FE limit moments for circumferential part-through surface cracks at intrados in elbows with the closed-form solution

한계하중이 더 높지만 차이는 실제적인 관점에서 그다지 크지 않다. 이를 바탕으로 균열이 곡관의 외호부에 있을 때의 단힘방향 굽힘 부분 표면균열 식 (7)을 제시하였다.

$$\frac{M_L}{M_0} = f_0 = \min \left\{ 1.0, -4.4 \left(\frac{\theta}{\pi} - 0.1 \right) \left(\frac{d}{t} \right) + \left(2.3 \frac{\theta}{\pi} + 1.0 \right) \right\} \quad (7)$$

식 (7)은 Fig. 6 에서 유한요소해석 결과와 비교할 수 있으며, $0 \leq \theta/\pi \leq 0.5$ 범위에서 유용하다.

내호부에 표면균열이 존재하고 $r/t=10$, $R/r=5$ ($\lambda=0.5$)인 경우의 곡관의 소성한계하중을 Fig. 7 에서 나타내었다. 전체적인 경향이 외호부에 균열이 있을 때와 매우 유사하지만, 소성한계하중에 대한 λ 의 영향이 존재함을 확인할 수 있다. 예를 들면 $d/t=0.7$, $\theta/\pi=0.5$ 인 경우에 대하여, $r/t=20$, $R/r=6$ ($\lambda=0.3$)인 경우의 소성한계하중은 $r/t=10$, $R/r=5$ ($\lambda=0.5$)인 경우의 소성한계하중보다 20% 높게 계산된다. 따라서 보수적인 관점에서 다음 식 (8)을 곡관의 내호부에 부분 표면균열이 있는 경우에 대한 식으로 제안하였다.

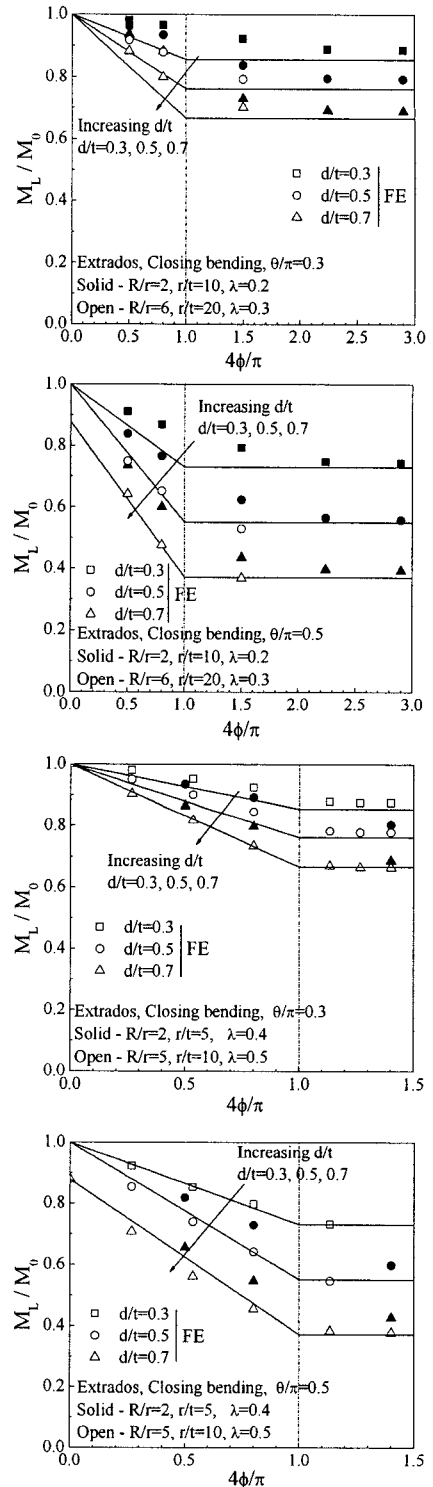


Fig. 8 Effect of the longitudinal extent of wall thinning on limit moments of finite circumferential thinning at extrados in elbows under closing bending : for $\lambda=0.2, 0.3, 0.4, 0.5$

$$\frac{M_L}{M_0} = f_0 = \min \left\{ 1.0, -4.0 \left(\frac{\theta}{\pi} - 0.1 \right) \left(\frac{d}{t} \right) + \left(2.22 \frac{\theta}{\pi} + 0.81 \right) \right\} \quad (8)$$

식 (8)은 Fig. 7 에서 유한요소 해석결과와 비교되며, $0 \leq \theta/\pi \leq 0.5$ 범위에서 유용하다.

4.2.2 완전 감육이 존재하는 경우

원주방향으로 전체에 표면균열이 존재하는 경우 균열이 닫히는 현상 때문에 유한요소해석을 수행할 수 없다. 대신에 식 (9)와 같이 다른 균열 폭에 대해 이미 계산된 유한요소해석 결과를 보간하여 균열 깊이에 따른 한계하중을 예측하였다.

$$\frac{M_L}{M_0} = f_o = \frac{8}{3} \left(1 - \frac{d}{t} \right) \quad (9)$$

5. 곡관의 소성한계모멘트

5.1 곡부 감육이 존재하는 경우

앞의 두 단락에서는 두 극단적인 경우에 대한 곡관의 closed-form 한계하중식을 제안하였다. 하나는 축방향으로 감육 길이가 충분히 긴 경우($\phi > 1$)이며, 또 다른 하나는 원주방향 표면 균열에 대한 경우($\phi = 0$)이다. 두 식을 이용하여 중간 범위($0 \leq \phi \leq 1$)에 감육이 존재하는 곡관에 대한 한계하중식을 만들 수 있다. Fig. 8 은 $r/t, R/r$ 가 다른 4가지의 경우에 대해서 감육폭이 $\theta/\pi = 0.3, \theta/\pi = 0.5$ 이고 외호부에 감육이 존재하는 곡관에 대해 소성한계하중의 축방향 감육 길이에 대한 영향을 나타낸 것이다. Fig. 8 에서 무차원화된 유한요소 한계모멘트 (M_L/M_0)는 $4\phi/\pi$ 의 함수로 나타내었다. 여기서 $\phi > 1$ 일 때 소성한계하중은 식 (5)에서 주어진 값에 접근한다. 또한 $\phi = 0$ 이 되는 다른 극단 값의 경우에는 식 (7)에 접근하였다. Fig. 8 에서 보여주는 다양한 유한요소해석 결과는 무차원화 된 한계모멘트(M_L/M_0)가 $0 \leq 4\phi/\pi \leq 1$ 구간에서 선형적임을 보여준다. 이를 바탕으로 식 (10)과 같은 간단한 근사식을 제시하였다.

$$\frac{M_L}{M_0} = \begin{cases} (f_\infty - f_o) \left(\frac{4\phi}{\pi} \right) + f_o & \text{for } 0 \leq \frac{4\phi}{\pi} \leq 1 \\ f_\infty & \text{for } \frac{4\phi}{\pi} \geq 1 \end{cases} \quad (10)$$

여기서 f_∞ 와 f_o 는 식 (5)와 식 (7)에서 주어진다. 제안된 식 (10)이 $0 \leq 4\phi/\pi \leq 1$ 구간에서 곡관의 기하학적 특성($r/t, \lambda$)과 완벽히 맞아떨어지지 않는 않지만, 보수적인 관점에서 전체적으로 외호부에 감육이 있는 곡관의 굽힘 소성한계하중해석 결과에

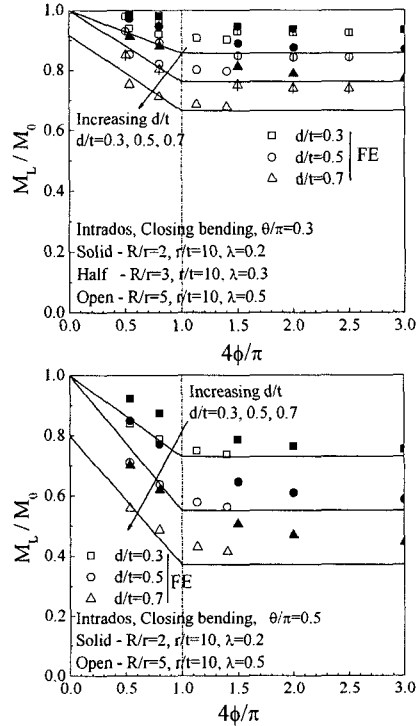


Fig. 9 Effect of the longitudinal extent of wall thinning on limit moments of finite circumferential thinning at intrados in elbows under closing bending

적절히 부합됨을 확인할 수 있다.

Fig. 9 은 곡관 내호부에 감육이 존재할 때 외호부에 감육이 있는 경우와 마찬가지로 무차원화 된 유한요소해석 결과(M_L/M_0)가 $0 \leq 4\phi/\pi \leq 1$ 구간에서 선형적임을 보여준다. 이를 바탕으로 식 (11)과 같은 간단한 근사식을 제시하였다.

$$\frac{M_L}{M_0} = \begin{cases} (f_\infty - f_o) \left(\frac{4\phi}{\pi} \right) + f_o & \text{for } 0 \leq \frac{4\phi}{\pi} \leq 1 \\ f_\infty & \text{for } \frac{4\phi}{\pi} \geq 1 \end{cases} \quad (11)$$

여기서 f_∞ 와 f_o 는 식 (5)와 식 (8)에서 주어진다. 외호부에 감육이 있는 경우와 비교해서 곡관의 기하학적 형상($r/t, \lambda$)의 영향이 조금 더 나타난다. 제안된 식 (11)은 $r/t = 10$ 이고 $R/r = 5 (\lambda = 0.5)$ 인 경우에 적절히 맞아떨어지나, r/t 와 R/r 이 다른 경우에 대해서는 조금 더 보수적으로 나온다. 결론적으로 말해서 λ 가 감소함에 따라 보수성의 크기는 더 커진다고 말할 수 있다.

소성한계하중의 굽힘 방향에 대한 영향은 Fig. 10 에서 확인할 수 있다. 이는 본 연구 초기의

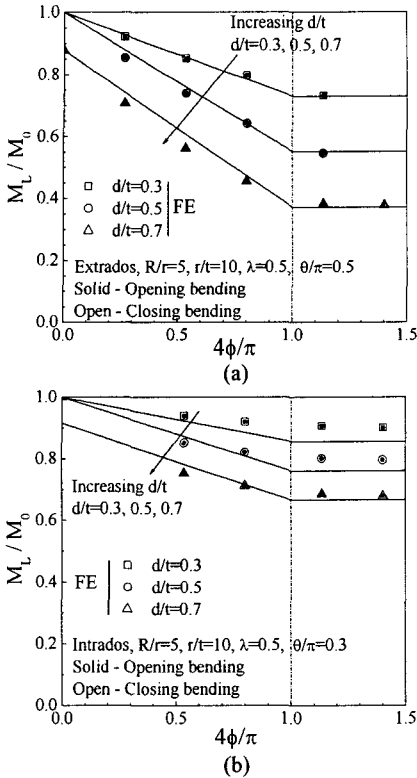


Fig. 10 Effect of the bending mode on limit moments of finite circumferential thinning in elbows under closing bending: (a) thinning at extrados and (b) thinning at intrados

예상대로 소변형 해석에서는 굽힘 방향의 영향이 없음을 보여준다.

5.2 완전 감육이 존재하는 경우

Fig. 11 은 다양한 r/t 와 R/r 에 대해서 완전감육 ($\theta/\pi=1$)이 존재하는 곡관에 대한 축방향 감육 길이 영향을 보여준다. 부분 감육이 존재하는 경우에 대해서는 Fig. 8~9 에서 볼 수 있듯이 ϕ 에 대해서 다양한 M_L/M_0 의 값을 살펴볼 수 있으나, 완전 감육에서는 그렇지 못하다. 따라서 완전감육이 존재하는 곡관의 소성관계하중식 (12)을 Fig. 11 의 유한요소해석을 바탕으로 제안하였다

$$\frac{M_L}{M_0} = (f_0 - f_\infty) \exp\left(-\beta \cdot \frac{4\phi}{\pi}\right) + f_\infty \quad (12)$$

여기서,

$$\beta = \frac{3}{2} \cdot \frac{d}{t} + \frac{3}{10} \left(\frac{R}{r} - 1\right)$$

여기서 f_∞ 와 f_0 는 식 (6)와 식 (9)에서 주어진다.

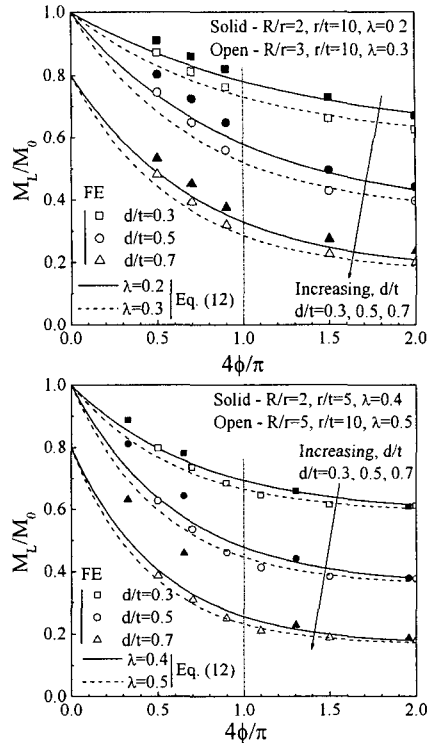


Fig. 11 Effect of the longitudinal extent of wall thinning on limit moments of elbows with fully circumferential thinning under closing bending

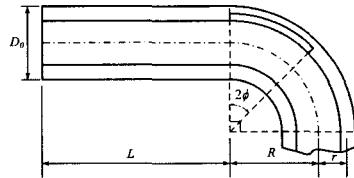


Fig. 12 Schematic illustration of wall thinning in elbows, extended from the end of the attached straight pipe to the elbow

6. 고찰

본 논문에서는 굽힘하중이 작용하는 감육이 있는 곡관에 대하여 closed-form 근사식을 제시하였다. 본 연구가 소변형 해석에 기초함에 따라 대변형 해석은 고려하지 않았다. 또한 곡부 감육의 경우 사각형상으로 감육 부위를 이상화하였다. 기하학적 변수는 평균반경과 두께의 비인 r/t 에 더하여 곡률특성을 나타내는 무차원 변수 λ 를 사용하였다. 곡부감육은 감육 깊이와 폭, 길이와 관련된 독립적인 세가지 변수로 특징지었다. 변수가 매우 많은 관계로 감육이 있는 곡관의 소성관계하중의 정량화는 매우 어려운 작업이었다.

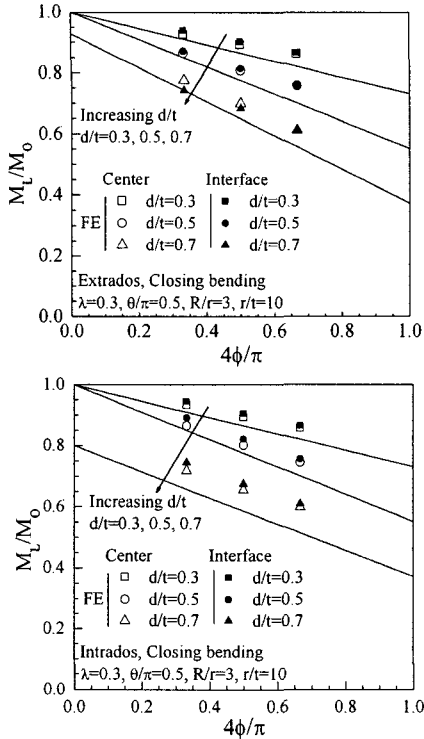


Fig. 13 Comparison of FE limit moments for thinning in the center of the elbow (refer to as “center” with those for thinning in elbows, extended from the end of the attached straight pipe to the elbow (refer to as “interface”)

본 연구에서 주목할만한 점은 감육이 있는 곡관의 소성한계하중에 대한 형상의 영향을 정량화하기 위한 체계적인 접근 방식에 있다. 먼저 손상이 없는 곡관에 대한 충분한 정확한 한계하중을 검토하고⁽¹¹⁾, 다음으로 두 극단적인 경우의 감육 형상을 고려하였다. 하나는 감육이 충분히 긴 경우로서, 일정한 감육 길이 이상에서는 한계하중 값이 더 이상 감육길이에 영향을 받지 않고 특정한 값으로 수렴하는 것을 알 수 있었고, 이를 축방향 감육길이와 감육폭에 대한 간단한 함수를 이용하여 나타내었다. 다른 하나는 감육길이가 없어 표면균열과 같은 경우로 취급할 수 있는 경우로서, 이 경우에 대해서 이미 제시된 closed-form 근사식을 사용하였다.⁽¹³⁾ 두 극단적인 경우의 사이에 속하는 축방향 감육 길이에 대한 한계하중은 간단한 보간을 통하여 근사식을 구하였다.

본 연구는 두 가지 가정에 기반하여 진행되었다. 하나는 감육의 형상을 일정한 깊이의 사각형 모양으로 이상화한 것이다. 사각형 감육의 가정은 원형 감육보다 작은 한계하중을 뜻하므로 보수적인 결과를 얻게 된다. 다른 하나는 대변형 효과를 무

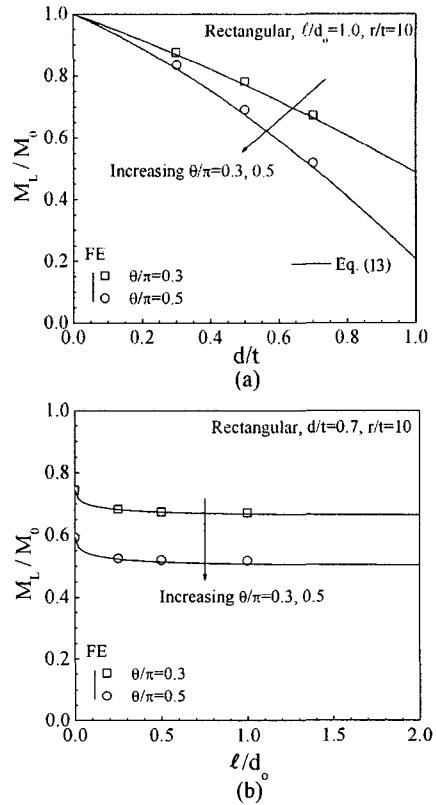


Fig. 14 Comparison of plastic limit moments for straight pipes with local wall thinning with FE results: (a) for the case of sufficiently long thinning, and (b) the effect of the axial extent of local wall thinning

시한 것이다. 곡관은 변형이 일어나기 쉬운 부품이므로, 소성 거동에 대한 대변형 효과는 매우 중요하다. 대변형 해석에 기초한 감육이 있는 곡관의 한계하중에 대한 연구는 진행 중이며, 본 연구에서와 유사한 과정을 통해 이 경우의 closed-form 근사식을 제시할 예정이다. 실제 문제에 적용하기에는 대변형 해석에 기초한 결과가 더욱 바람직하지만, 소변형 해석에 기초하여 이루어진 본 연구의 결과는 여전히 유용하다.

다른 주목할 만한 점은 소성한계하중에 대한 곡관내 감육의 위치에 따른 영향이다. 본 연구에서는 감육의 위치를 곡관의 중앙부로 가정하였으나, 실제로 많은 경우의 부식에 따른 감육은 Fig. 12과 같이 곡관부와 직관부가 접합되는 지점에 발생한다. 따라서 실제 발생하는 감육을 평가하기 위해서는 소성한계하중에 대한 감육 위치의 영향을 정량화하는 것이 필요하다. 감육 길이에 대한 일관적인 정의를 위하여, 곡관과 직관의 접합부에서

발생한 감육길이는 총 길이로 간주하여 2ϕ 로 표시한다. 감육 위치의 효과를 정량화 하기 위해 소변형 유한요소 한계해석을 수행하였다. Fig. 13는 곡관의 중앙에 감육이 있을 때와 곡관과 직관의 접합부에 감육이 있을 때의 유한요소해석 결과를 비교한 것이다. 이 결과는 소성한계하중이 감육 위치에 영향을 받지 않음을 보여준다. 따라서 본 논문에서 제시한 closed-form 근사식은 감육이 곡관 어느 부분에 있더라도 적용될 수 있다.

마지막으로 곡관의 감육이 있을 때의 결과를 직관의 경우와 비교할 필요가 있다. 직관의 감육에 대한 굽힘 효과는 최근 연구에서 유한요소해석을 통하여 정량화되었다.⁽¹⁹⁾ 축방향으로 감육이 충분히 긴 직관의 경우 소성한계하중에 대한 감육 깊이와 폭의 영향은 Fig. 14(a)에 나타내었으며, 식 (13)과 같이 제시되었다.

$$\frac{M_L}{M_0} = f_\infty = \cos\left(\frac{\theta d}{2t}\right) - \frac{d \sin \theta}{t \cdot 2} \quad (13)$$

식 (13)은 원주방향으로 일정한 깊이 d 를 갖는 균열에 대한 한계하중을 하한계 값으로 근사화한 식이다. 이를 곡관에 대해 축방향 감육이 충분히 긴 경우 해당하는 경우는 식 (5)와 비교할 수 있다. 직관의 경우 감육 깊이와 폭에 따른 한계하중해석 결과가 곡관의 경우(Fig. 4)와 비슷함을 알 수 있다. 그러나 결함이 없는 곡관의 한계하중은 Fig. 3에서와 같이 직관의 비해 매우 작다는 사실을 놓쳐서는 안된다. 직관의 경우와 비교하여 한가지 더 흥미로운 결과는 한계하중에 대한 축방향 감육 길이의 영향이다. 감육이 있는 직관의 유한요소 한계하중은 Fig. 14(b)에 나타내었다. 이는 축방향 감육 길이가 늘어남에 따라 감소하는 한계하중은 10%이하로서 축방향 감육 길이의 영향이 매우 작고, $l/d_0 \leq 0.5$ 인 구간에 국한됨을 보여준다. 반면에 곡관에 대하여 소성한계하중의 축방향 감육 길이의 영향은 Fig. 8-9에서와 같이 더 중요하게 고려되고 있음을 확인할 수 있다.

7. 결론

본 논문은 탄성-완전소성 재료를 사용하여 3차원 유한요소해석에 근거한 굽힘 하중 하에서의 곡관의 소성한계하중에 대해 감육이 미치는 영향을 정량화 하였다. 다양한 종류의 곡관과 다양한 감육 크기가 고려되었으나, 대변형 효과는 고려되지

않았다. 곡관과 감육형상을 나타내기 위해 많은 변수가 사용되었으므로, 한계하중에 대한 감육의 영향은 다음과 같은 체계적인 순서로 정량화 되었다. 하나는 한계하중의 감육길이에 대한 영향이 더 이상 없을 만큼 충분히 감육길이가 큰 경우이고, 다른 하나는 감육길이가 없는 경우로서 표면 균열과 같은 경우이다. 두 경우에 대해 감육의 폭과 깊이가 미치는 영향이 우선적으로 정량화 되어 closed-form 소성한계하중식이 제시되었다. 중간 범위의 감육에 대해서는 유한요소해석 결과와 위의 두 극단적인 경우에 대한 보간을 이용하여 근사화하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부 지원으로 수행하는 원자력 연구개발사업(원자력기초공동연구소)과 BK21 2007년도 연구의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Kanninen, M.F., Zahoor, A., Wilkoski, G., Abousayed, I., Marschall, C., Broek, D., Sampath, S., Rhee, H. and Ahmad, J., 1982, "Instability Predictions for Circumferentially Cracked Type-304 Stainless Pipes Under Dynamic Loading," EPRI NP-2347, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA.
- (2) ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section IX (1992).
- (3) API, API RP579 - Recommended Practice for Fitness-For-Service, 2000, American Petroleum Institute.
- (4) Stephens, D.R. and Lei, B.N., 2000, "Development of an Alternative Criterion for Residual Strength of Corrosion Defects in Moderate-to High-Toughness Pipe," Proc. Int. Pipeline Conf., Vol. 2, pp. 781~792.
- (5) Miyazaki, K., Kanno, S., Ishiwata, M., Hasegawa, K., Ahn, S.H. and Ando, K., 2002, "Fracture and General Yield for Carbon Steel Pipes with Local Wall Thinning," Nuclear Engineering and Design, Vol. 211, pp. 61~68.
- (6) Hasegawa, K., Sakata, K., Miyazaki, K., Kanno, S., 2002, "Fatigue Strength for Pipes with Allowable Flaws and Design Curve," International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 79, pp. 37~44.
- (7) Choi, J.B., Goo, B.K., Kim, J.C., Kim, Y.J., Kim, W.S., 2003, "Development of Limit Load Solutions for Corroded Gas Pipelines," International Journal of Pressure Vessels and Piping 2003; Vol. 80: pp. 121~128.
- (8) Ahn, S.-H., Nam, K.-W., Yoo, Y.-S., Ando, K., Ji, S.-H., "Ishiwata, M., Hasegawa, K., 2002, "Fracture

- Behavior of Straight Pipe and Elbow with Local Wall Thinning," *Nuclear Engineering and Design* 2002; Vol. 211: pp. 91~103.
- (9) Shim, D.J., Choi, J.B., Kim, Y.J., 2004, "Failure Strength Assessment of Pipes with Local Wall Thinning Under Combined Loading Based on Finite Element Analyses. *ASME Journal of Pressure Vessel Technology* 2004; Vol. 126: pp. 179~183.
- (10) Kim, Y.J., Oh, C.K., Park, C.Y., Hasegawa, K., 2006, "Net-section Limit Load Approach for Failure Strength Estimates of Pipes with Local Wall Thinning," *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 2006; Vol. 83: pp. 546~555.
- (11) Oh, C.S. and Kim, Y.J., 2006, "Closed-Form Plastic Collapse Loads of Pipe Bends under Combined Pressure and In-Plane Bending," *Transaction of the KSME(A)*, Vol. 30, No. 8, pp. 1008~1015.
- (12) Calladine, C.R., 1974, "Limit Analysis of Curved Tubes," *Journal of Mechanical Engineering Science* 1974; Vol. 16: pp. 85~87.
- (13) Kim, Y.J., Oh, C.S., 2007, "Effects of Attached Straight Pipes on Finite Element Limit Analysis of Pipe Bends," *International Journal of Pressure Vessels and Piping* (electronic version available).
- (14) Kim, Y.J., Kim, Y.I. and Song, T.K., 2006, "Finite Element Plastic Loads for Circumferential Cracked Pipe Bends Under In-Plane Bending," *Engineering Fracture Mechanics*.
- (15) Kim, Y.J., Oh, C.K., Park, C.Y., Hasegawa, K., 2006, "Net-section Limit Load Approach for Failure Strength Estimates of Pipes with Local Wall Thinning," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 83, pp. 546~555.
- (16) Roberston, A., Li, H. and Mackenzie, D., 2005, "Plastic Collapse of Elbows Under Combined Internal Pressure and In-Plane Bending," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 82, pp. 407~416.
- (17) ABAQUS Version 6.2-1. User's manual. Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc, RI; 2001.
- (18) Goodall, I.W., 1978, "Lower Bound Limit Analysis of Curved Tubes Loaded by Combined Internal Pressure and In-Plane Bending Moment," CEGB report RD/B/N4360 Central Electricity Generating Board.
- (19) Oh, C.K., Kim, Y.J. and Park, C.Y., 2007, "Quantification of Axial Length Effects on Net-Section Limit Loads for Pipes with Local Wall Thinning Under Combined Pressure and Bending," *International Journal of Pressure Vessels and Piping* (submitted).
- (20) Joong-Hyok An, Jong-Hyun Kim, Suk-Pyo Hong, Yun-Jae Kim, Chi-Yong Park, 2007, "Plastic Limit Loads of 90° Elbows with Local Wall Thinning using Small Strain FE Limit Analyses, Part I : Internal Pressure," Submitted to *Transaction of the KSME(A)*.