

< 논문 >

소변형 이론에 입각한 감육이 존재하는 90 도 곡관의 한계하중 (I)

- 내압 -

안중혁* · 김종현* · 홍석표* · 김운재† · 박치용**

(2006년 12월 4일 접수, 2007년 4월 25일 심사완료)

Plastic Limit Loads of 90° Elbows with Local Wall Thinning using Small Strain FE Limit Analyses (I)

- Internal Pressure -

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

Key Words : FE Analysis(유한요소해석), Local Wall Thinning(감육), Elbow(곡관), Plastic Limit Load(소성 한계하중), Internal Pressure(내압)

Abstract

This paper proposes closed-form plastic limit load solutions for elbow with local wall thinning at extrados under internal pressure. This work was performed using 3-dimensional, small strain FE analyses based on elastic-perfectly plastic materials. The wide range of elbow and local wall thinning geometries are considered. For systematic analyses for effect of axial thinning extent on limit loads, two limiting cases are considered; a sufficiently long thinning, and the circumferential part-through surface crack. Then, the closed-form plastic limit load solutions for intermediate thinning are obtained by using result of two limiting cases. The effect of axial thinning extent for elbow on plastic limit load is highlighted by comparing with that for straight pipes. Although the proposed limit load solutions are developed for the case when local wall thinning exist in the center of elbow, it is also shown that they can be applied to the case when local wall thinning exists anywhere within elbow.

1. 서론

원자력 발전 산업에서 감육에 대한 평가의 중요성은 나날이 증대되고 있다. 감육은 크랙보다 노치에 가까운 손상이므로, 실단면 한계하중을 적용하는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁻⁹⁾ 감육이 있는 직관에 대해서는 실험과 해석 등을 통한 폭 넓은 연구가 수행되어 왔으며,⁽⁶⁻⁹⁾ 실단면 한계하중 접근방법에 의한 평가식도 제시되어

있다. 반면, 감육이 있는 곡관에 대한 연구는 여전히 매우 부족하다. 감육이 있는 곡관에 대한 실제 파열 실험과 저주기 피로실험은 수행된 바 있지만,^(6,7,10) 단일 하중하에서의 평가식 개발은 아직 수행된 바가 없다. 곡관은 침식이나 부식에 의한 감육에 직관보다 더욱 취약하므로, 감육이 있는 곡관에 대한 평가식은 시급히 요구된다.

본 연구에서는 3 차원 소변형 유한요소해석을 이용하여 감육이 있는 곡관의 내압에 대한 실단면 한계하중을 제시하였다. 소성하중에서의 비선형 형상 효과는 고려되지 않았다. 곡관의 한계하중에 감육이 미치는 영향을 파악하기 위해, 곡관과 감육형상에 따른 많은 변수를 고려하여 다음의 체계적인 분석이 수행되었다. 먼저, 두 가지 경우의 극단적인 길이의

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

* 고려대학교 기계공학과

** 회원, 한전 전력연구원 원자력 연구실

감육을 고려하여 한계하중에 대한 감육의 폭과 깊이의 효과를 closed-form 의 근사식으로 제시하였다. 하나는 감육이 충분히 긴 경우이며, 다른 하나는 감육 길이가 '0'으로써 원주방향 표면균열의 경우이다. 두 극단적인 경우에 대해 제시한 근사식과 유한요소해석 결과를 이용하여, 중간길이의 감육에 대한 한계하중을 보간하여 closed-form 근사식을 제시하였다.

2. 유한요소해석

본 연구에서는 Fig. 1 과 같은 90° 곡관을 고려하였다. 평균반경은 r , 두께는 t , 그리고 곡관반경은 R 로 각각 나타내었다. 곡관형상과 관련된 중요한 무차원변수는 R/r 과 r/t 이며, 이를 조합하여 다음과 같이 곡관특성변수 λ 를 정의하였다.

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

곡관형상에 대한 효과를 정량화하기 위해 r/t 와 R/r 에 대한 다음 네 가지의 조합이 고려되었다. (i) $r/t=10$ & $R/r=2$, $\lambda=0.2$, (ii) $r/t=10$ & $R/r=3$, $\lambda=0.3$, (iii) $r/t=10$ & $R/r=4$, $\lambda=0.4$, (iv) $r/t=10$ & $R/r=5$, $\lambda=0.5$. 이는 발전 산업에서 실제로 주로 사용되는 곡관의 형상 범위로 알려져 있다.

실제 곡관이 포함된 배관시스템에서 곡관은 직관과 연결된 채 하중이 인가된다. 따라서, 유한요소해석에서는 Fig. 1 과 같이 90° 곡관과 길이 L 의 직관을 함께 고려하였다. 직관은 적용되는 하중에 대한 유한요소해석상의 끝단 효과를 최소화하기 위해 사용되며, 직관의 길이는 충분히 길어야 한다.⁽¹¹⁻¹³⁾ 본 연구에서는 직관의 길이를 곡관반경의 5 배($L=5R$)로 설정하였다.

감육의 형상은 Fig. 1 과 같이 일정한 깊이의 사각형 모양으로 가정하였고, 외호부의 내부에 위치한 감육만을 고려하였다. 감육의 형상에 대한 변수는 Fig. 1 과 같이 배관의 외경을 d_o , 감육의 깊이를 d , 원주방향 감육각을 2θ , 감육길이를 $2l$ 로 각각 나타내었고, 이를 이용하여 감육형상에 대한 중요한 무차원변수로 dt , θ/π , l/d 를 사용하였다. 체계적인 분석을 위해 dt 는 0.3, 0.5, 0.7, θ/π 는 0.1, 0.3, 0.5, 1.0 의 경우를 각각 고려하였다. θ/π 가 1.0 인 경우는 원주방향으로 전체가 감육된 것으로 볼 수 있다. 길이에 대해서는 두 극단적인 경우를 포함하여 넓은 범위가 고려되었다. 하나는 감육이 곡관부분을 초과하여 직관에만까지 형성될 만큼 충분히 긴 경우이며, 다른 하나는 감육길이가 '0'인 것으로 일정한 깊이를 가지는 표면균열과 같은 경우이다.

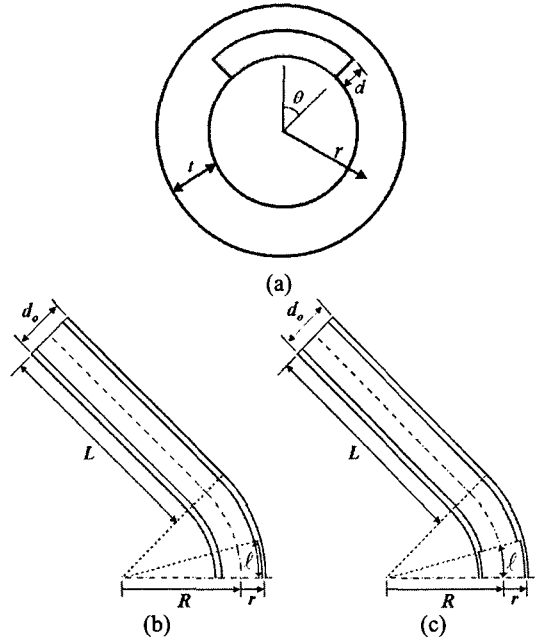


Fig. 1 Schematic illustrations of elbows with local wall thinning; (a) cross section, (b) finite circumferential wall thinning at extrados, (c) fully circumferential wall thinning

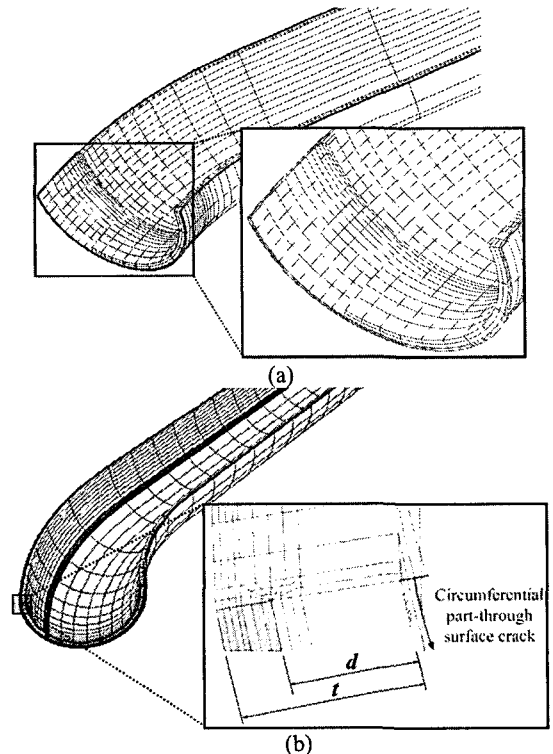


Fig. 2 FE meshes of defected elbows: (a) partial circumferential wall thinning at extrados, and (b) circumferential part-through, constant-depth surface crack at extrados

유한요소해석에는 상용프로그램인 ABAQUS Ver. 6.4 를 사용하였다.⁽¹⁴⁾ 재료는 탄성-완전소성으로 가정하였고, 대칭조건을 고려하여 1/4 모델을 사용하였다. Fig. 2 는 해석에 사용된 유한요소 모델이다. 유한요소 모델에는 C3D20R 요소를 사용하였으며 개수는 1500~2000 이다. Fig. 2(a)의 감육이 있는 곡관 모델은 감육된 얇은 부분에서 3 개 이상의 요소를 사용하였다. Fig. 2(b)는 표면균열을 가지고 있는 곡관의 유한요소 모델이다. 이 모델은 두께 방향으로 총 11~12 개의 요소를 사용하였으며, 해석에 적합하도록 균열부에 4 개, 비균열부에 7~8 개의 요소를 사용하였다. 균열끝단에는 썩기 모양의 붕괴요소를 사용하였다.

본 연구에서는 하중의 종류로 내압(P)을 고려하였다. 이를 위해 해석 모델의 안쪽 면에 분포하중을 가해주었으며, 끝단효과를 구현하기 위한 등가의 분포하중을 배관 끝면에 가해주었다.

3. 손상 없는 곡관의 한계내압

감육이 있는 곡관의 유한요소해석 결과를 체계적으로 정리하기 위해, 손상 없는 곡관의 한계하중⁽¹³⁾을 기준으로 사용하였다.

내압하중하의 손상 없는 곡관에 대해, Goodall⁽¹⁷⁾과 Miller⁽¹⁸⁾는 한계내압(P₀)에 대한 하한계값을 다음과 같은 식으로 제시하였다.

$$P_0 = \left(\sigma_0 \frac{t}{r} \right) \left[\frac{1-r/R}{1-r/(2R)} \right] \quad (2)$$

식 (2)에서 우변의 첫번째 항은 직관에 대한 한계내압이며, 두번째 항은 곡관에 대한 보정 계수이다. 첫번째 항은 Tresca 소성 상태에 기초한 하한계값으로, Mises 소성 상태가 사용된다면 다음과 같이 2/√3 을 곱해주어야 한다.

$$P_0 = \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 \frac{t}{r} \right) \left[\frac{1-r/R}{1-r/(2R)} \right] = P_0^s \left[\frac{1-r/R}{1-r/(2R)} \right] \quad (3)$$

식 (3)에서 P₀^s는 균열 없는 직관에 대한 한계내압을 나타낸다. Fig. 3 은 충분히 긴 직관이 부착된 곡관에 대한 유한요소해석 결과(P₀^{FE})와 식 (3)을 비교한 그래프이다.

해석 결과와 식 (3)은 r/t = 15, 20 인 경우 λ ≥ 0.2 에서 5% 이내로, r/t = 10 인 경우는 λ ≥ 0.3 에서 6% 이내로 비교적 잘 부합하고 있다. 그 외의 경우,

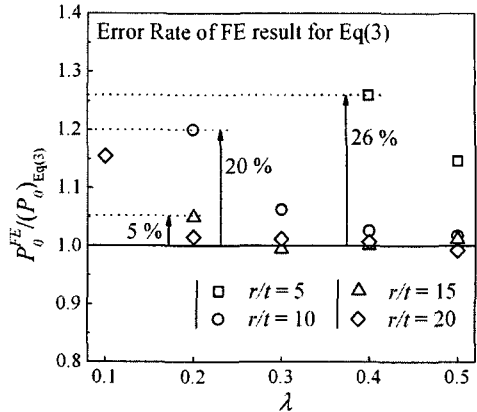


Fig. 3 Comparisons of FE limit loads for un-cracked elbows under internal pressure

해석 결과는 식 (3)보다 20~26% 정도 높은 값을 보이며, λ와 r/t 가 작아짐에 따라 증가한다. 이 차이는 부착된 직관에 기인한 것으로 보이며, 이에 대한 자세한 논의는 참고논문⁽¹⁶⁾에 서술되어 있다.

본 연구에서 고려되는 형상의 범위는 전술한 바와 같이 r/t=10, λ=0.2~0.5 이다. 이 중 λ=0.3~0.5 의 형상은 6%이내의 매우 작은 오차를 보이지만, λ=0.2 의 형상은 20%의 비교적 큰 오차를 보인다. 그러나 식 (3)이 해석결과보다 낮은 결과를 예측하므로, 식 (3)을 이용하면 보수적인 결과를 얻을 수 있다. 따라서, 식 (3)은 20% 정도의 보수성을 포함하여 본 연구에서 고려된 형상에 적용할 수 있다고 사료되며, 이를 결과분석의 기준으로 사용하였다.

4. 내압하중하에서 감육이 있는 곡관의 한계하중

체계적인 분석을 위해 먼저 감육길이에 대한 두 가지의 극단적인 경우를 살펴보았다. 하나는 감육 길이가 충분히 큰 경우이며, 다른 하나는 감육 길이가 '0'으로 원주방향 표면균열과 같은 경우이다. 원주부분감육의 경우, 감육길이 2l 은 외호부에 위치한 감육부의 길이를 사용하였다. 원주완전감육의 경우, 외호부와 내호부의 감육길이가 다르므로, Fig. 2(c)와 같이 곡관 중심 길이를 감육길이 2l 로 사용하였다.

4.1 감육길이가 충분히 큰 경우

4.1.1 원주부분감육(θ/π ≤ 0.5)

감육 길이가 커질수록 한계내압은 특정한 값으로 수렴하는 경향을 보였다. 이 수렴값에 대한 원주방향 감육각의 영향은 거의 없었다. 유한요소해석

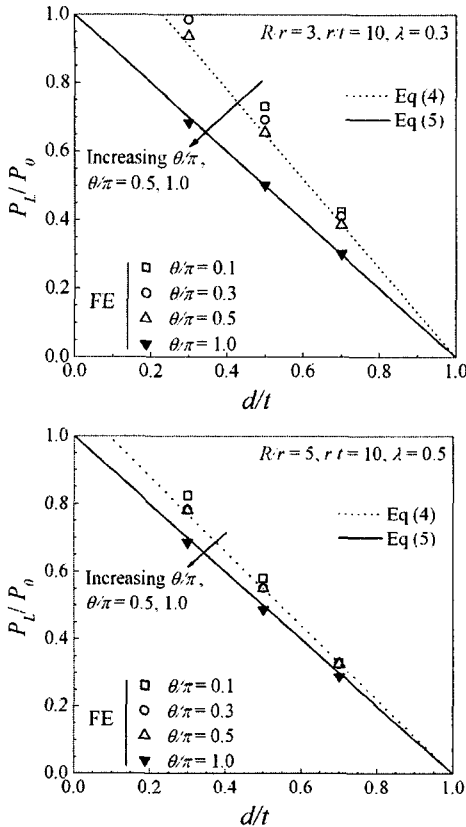


Fig. 4 Comparison of FE limit pressures for elbows with sufficiently long thinning under internal pressure with the closed-form solution

으로 구한 이와 같은 수렴값을 Fig. 4 에 $r/t=10$, $R/r=3, 5$ 에 대해 나타내었다. 이 값은 d/t 에 따라 선형적으로 감소하며, 곡관특성변수인 λ 에 약간의 영향을 받는다. 유한요소해석 결과로부터, 내압하중하에서 감육 길이가 충분히 큰 감육이 있는 곡관의 수렴 한계 하중에 대한 근사식을 다음과 같이 제시하였다.

$$\frac{P_L}{P_0} = f_{\infty} = \min \left[1, (1.6 - \lambda) \left(1 - \frac{d}{t} \right) \right] \quad (4)$$

식 (4)에서 P_0 는 식 (3)의 손상 없는 곡관의 한계내압식이다. Fig. 4 에 식 (4)와 유한요소 해석결과를 비교하였다.

4.1.2 원주완전감육($\theta/\pi=1.0$)

감육길이가 충분히 큰 경우에 대한 수렴값을 Fig. 4 에 표시하였다. 원주방향으로 완전히 감육이 있을 경우에 대한 수렴값은 곡관형상과 관계없이 오

직 d/t 에만 선형적인 관계를 보인다. 이 결과로부터, 내압하중하에서 감육 길이가 충분히 큰 감육이 있는 곡관의 수렴 한계하중에 대한 근사식을 다음과 같이 제시하였다.

$$\frac{P_L}{P_0} = f_{\infty} = \left(1 - \frac{d}{t} \right) \quad (5)$$

Fig. 4 에서 $\theta/\pi=0.5, 1.0$ 의 해석 결과는 비교적 큰 차이를 보이고 있다. 실제 감육은 대부분 $\theta/\pi < 0.5$ 의 범위에서 일어나고, 해석결과는 원주방향 감육각보다 감육 깊이에 대한 영향이 지배적으로 나타나므로, 본 연구에서는 간단한 작업을 위해 $\theta/\pi > 0.5$ 인 감육에 대해 원주방향 감육각의 영향은 고려하지 않았다. $\theta/\pi > 0.5$ 의 감육에서 감육길이가 충분히 큰 경우의 수렴 한계 하중은 식 (5)를 이용하여 작은 오차범위 내에서 보수적으로 구할 수 있다.

4.2 원주방향 표면균열($\ell=0$)

감육 길이가 '0'이면 표면균열 상태와 동일하다. 원주방향으로 부분적인 표면균열이 있는 경우 ($\theta/\pi=0.3, 0.5$)에 대한 유한요소 해석 결과를 Fig. 5 에 표시하였다. 균열이 있는 곡관의 한계내압은 균열이 매우 길고 깊은 경우를 제외하면 균열이 없는 곡관의 한계내압과 거의 비슷하다. 예를 들어, $\theta/\pi=0.3$ 일 때, 균열이 있는 곡관의 한계내압은 균열이 없는 곡관과 $d/t < 0.8$ 에서는 거의 같다. 한편, $\theta/\pi=0.5$ 일 때는 $d/t=0.8$ 로 균열이 매우 깊은 경우 한계내압의 차이가 있지만, 이 차이는 20% 이내에 불과하다. 따라서, 다음 식과 같이, $\theta/\pi=0.5$ 이내의 부분적인 원주방향 균열이 있는 곡관에 대한 한계내압은 균열이 없는 곡관의 한계내압과 같다고 보아도 무방하다.

$$\frac{P_L}{P_0} = f_0 = 1 \quad (6)$$

$\theta/\pi=1.0$ 으로 원주방향으로 완전한 표면균열이 있을 때는 균열 닫힘 현상으로 인해 유한요소해석을 수행하기 어렵다. 본 연구에서는 이 경우에 대해 실제 유한요소해석 결과를 사용하는 대신, 넓은 범위의 감육길이에 대한 유한요소해석 결과로부터 그 경향을 잘 만족하는 표면균열 상태의 한계하중값을 추정하여 다음과 같은 추정식을 제시하였다.

$$\frac{P_L}{P_0} = f_0 = \frac{1}{3} \left(1 - \frac{d}{t} \right) \left(10 \frac{d}{t} + 1 \right) \quad (\text{where, } d/t > 0.5) \quad (7)$$

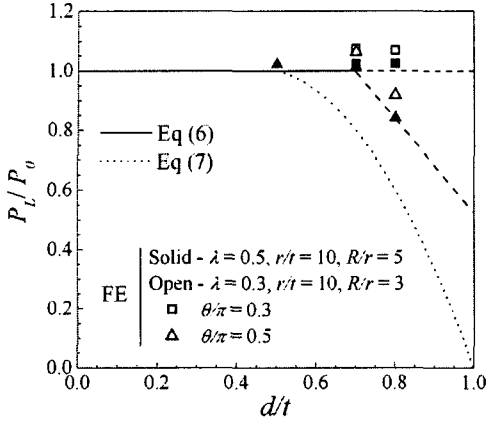


Fig. 5 FE limit pressures for circumferential part-through surface cracks in elbows

식 (7)은 $d/t > 0.5$ 의 범위에서 적용되며, Fig. 5 와 같이 $d/t \leq 0.5$ 의 원주방향 표면 균열은 한계내압에 영향을 미치지 않는다.

4.3 감육이 있는 곡관의 한계내압

4.3.1 원주부분감육

4.1 절과 4.2 절에서 제시된 두 극단적인 경우에 대한 수렴 한계내압 근사식과 유한요소해석 결과에 근거하여 중간길이의 감육에 대한 한계내압을 보간하여 closed-form 근사식을 제시하였다. Fig. 6(a) ~ 6(c)는 외호부에 감육이 위치할 때, 감육길이가 한계내압에 미치는 영향을 보여준다. ℓ/d_o 가 0.5 정도에 도달하면 유한요소 해석결과는 4.1 절에서 서술한 수렴값에 접근함을 알 수 있다. 유한요소해석 결과를 이용하여, 다음과 같은 근사식을 제시하였다.

$$\frac{P_L}{P_o} = (f_o - f_\infty) \exp\left(-\beta \frac{\ell}{d_o}\right) + f_\infty \quad (8)$$

$$\beta = -2.76 + 18.3 \frac{d}{t}$$

f_∞, f_o 는 각각 식 (4), (6)으로 제시한 두 극단적인 경우에 대한 근사식이다. 식 (8)은 원주부분감육의 한계내압에 대한 최종적인 근사식으로 Fig. 6(a)~6(c)에서 유한요소해석 결과와 비교하였다.

4.3.2 원주완전감육

Fig. 6(d)는 원주완전감육($\theta/\pi=1.0$)일 경우 감육 길이가 한계내압에 미치는 영향을 보여준다. ℓ/d_o 가 1.0 을 넘어서면 유한요소 해석결과는 4.1 절에서 서술한 수렴값에 접근하였다. Fig. 6(d)의

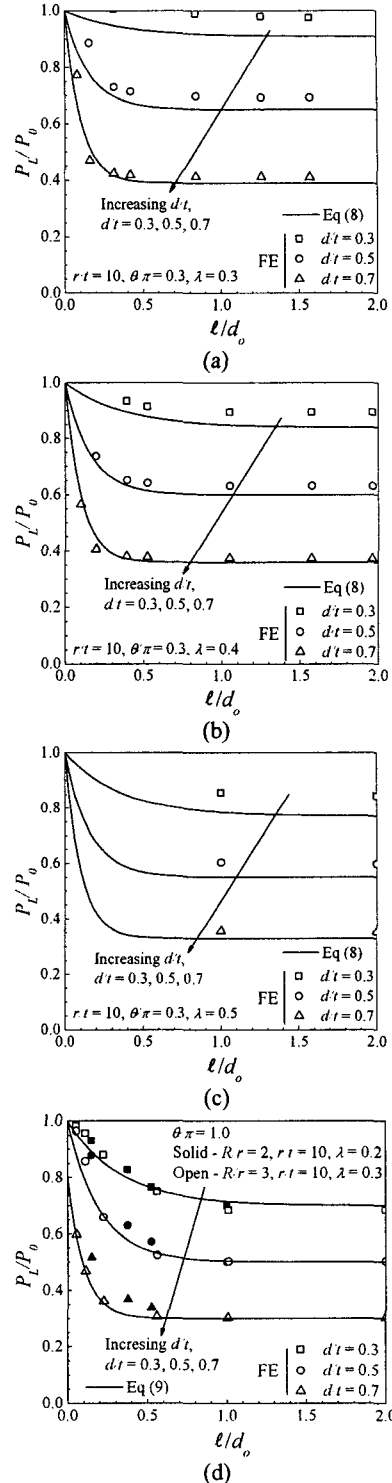


Fig. 6 Effect of the longitudinal extent of wall thinning on limit pressures of elbows with local wall thinning: (a)-(c) finite circumferential thinning, and (d) fully circumferential thinning

유한요소해석 결과에 근거하여, 다음과 같은 근사식을 제시하였다.

$$\frac{P_t}{P_0} = (f_0 - f_\infty) \exp\left(-\beta \frac{\ell}{d_0}\right) + f_\infty \quad (9)$$

$$\beta = 5.625 - 20.0 \left(\frac{d}{t}\right) + 37.5 \left(\frac{d}{t}\right)^2$$

f_0, f_∞ 는 각각 식 (5), (7)로 제시한 두 극단적인 경우에 대한 근사식이다. 식 (9)는 원주완전감육의 한계내압에 대한 최종적인 근사식으로 Fig. 6(d)에서 유한요소해석 결과와 비교하였다. 제시한 근사식은 약간의 보수성을 가지며 해석결과를 잘 나타내고 있다.

5. 고찰

본 연구에서는, 내압하중하에서 감육이 있는 곡관의 소성 한계 하중에 대한 closed-form 근사식을 제시하였다. 본 연구는 소변형 해석으로 진행되었고, 대변형 효과는 고려되지 않았다. 또한 감육은 원형이 아닌 사각형 형상으로 단순화되었고, 외호부의 내부에 위치한 감육만이 고려되었다. 곡관형상과 관련한 변수는 곡관특성변수(λ)와 평균반경과 두께의 비(r/t)가 사용되었다. 감육형상은 감육깊이(d), 감육폭(θ), 그리고 감육길이(ℓ)의 세가지 독립적인 변수로 표현되었다. 변수의 종류가 많으므로, 감육이 있는 곡관에 대한 한계하중을 정량화 하는 것은 매우 까다롭다.

본 연구에서 주목할 만한 점은, 감육이 있는 곡관의 한계하중에 대해 형상변수의 영향을 파악하기 위한 체계적인 접근 방식에 있다. 먼저 손상이 없는 곡관에 대해 알려져 있는 한계하중식이 충분히 정확하지 검토하였다. 그 다음으로 두 극단적인 경우의 감육 형상을 고려하였다. 하나는 감육이 충분히 긴 경우로서, 일정 감육길이 이상에서는 한계하중이 특정한 값으로 수렴하였고, 이를 감육깊이와 곡관형상에 대한 근사식으로 표현하였다. 다른 하나는 감육길이가 '0'인 표면 균열과 같은 경우이다. 두 극단함수와 유한요소 해석결과를 이용한 간단한 보간을 통하여 중간 길이의 감육에 대한 한계하중을 표현하는 근사식을 구하였다.

본 연구에서는 두 가지 가정이 이용되었다. 하나는 감육형상을 일정한 깊이의 사각형 감육으로 단순화한 것이다. 사각형 감육의 가정은 원형 감육보다 작은 한계 하중이 나타나므로 보수적인 결과

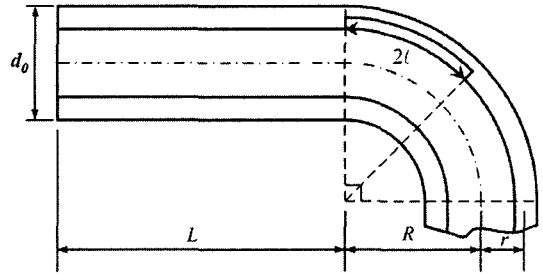


Fig. 7 Schematic illustration of wall thinning in elbows, extended from the end of the attached straight pipe to the elbow

를 얻게 된다. 다른 하나는 대변형 효과를 무시한 것이다.

곡관은 변형이 일어나기 쉬운 형상의 부품이므로, 소성 거동에 대한 대변형 효과는 매우 중요하다. 대변형 해석에 입각한 감육이 있는 곡관의 한계하중에 대한 연구가 현재 진행중이며, 본 연구와 유사한 과정을 통해 closed-form 근사식을 개발중이다. 실제 문제에 적용하기에는 대변형 해석에 기초한 결과가 더욱 바람직하긴 하지만, 소변형 해석에 기초하여 이루어진 본 연구의 결과도 여전히 유용하다.

다른 주목할 만한 점은 한계하중에 대한 곡관내 감육의 위치에 대한 영향이다. 본 연구에서는 감육의 위치는 곡관의 중앙부로 가정되었다. 그러나, 실제로 많은 경우의 부식에 따른 감육은 Fig. 7과 같이 곡관부와 직관부가 연결되는 지점에서 발생한다. 따라서 실제 발생하는 감육을 평가하기 위해서는 한계하중에 대한 감육위치의 영향을 파악하는 것이 필요하다. 감육길이에 대한 일반적인 정의를 위하여, 곡관과 직관의 접합부에 발생한 감육의 감육길이는 총 길이를 이용하여 2ℓ 로 표시하였다. 감육 위치의 영향을 파악하기 위해 소변형 유한요소해석이 수행되었다. Fig. 8은 곡관의 중앙에 감육이 있을 때와 곡관과 직관의 연결부에 감육이 있을 때의 유한요소 해석 결과를 비교한 것이다. 두 경우에 대한 한계하중은 거의 같고, 감육 위치에 따른 영향은 거의 없었다. 따라서, 본 논문에 제시된 곡관에 대한 한계하중식은 감육의 위치에 상관없이 적용 가능하다고 사료된다. 마지막으로, 곡관에서 감육이 한계하중에 미치는 영향과 직관에서의 결과를 비교해 볼 필요가 있다. Fig. 9와 같이, 직관에서도 감육길이가 충분히 긴 경우에 한계 하중이 특정한 값으로 수렴하였으며, 그 결과를 다음과 같은 식으로 표현하였다.

$$\frac{P_t(\infty)}{P_0} = f_\infty = 1 - \frac{d}{t} \quad (10)$$

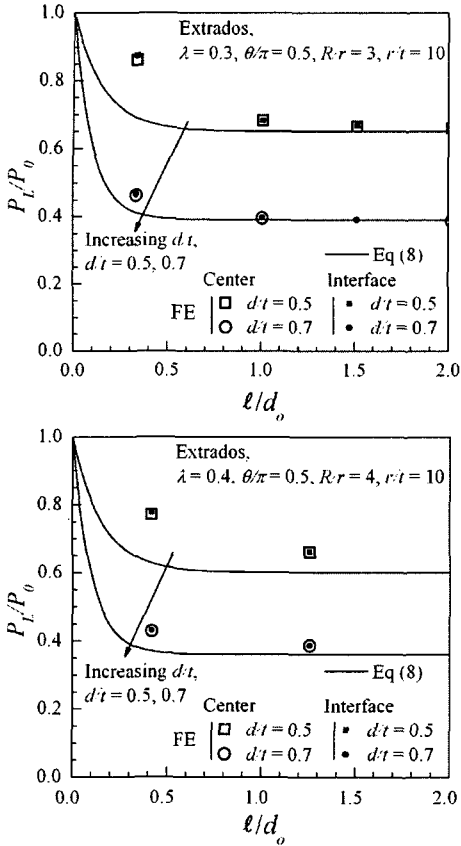


Fig. 8 Comparison of FE limit pressures for thinning in the center of the elbow (refer to as “center”) with those for thinning in elbows, extended from the end of the attached straight pipe to the elbow (refer to as “interface”)

Fig. 4의 곡관의 결과와 비교해보면, 한계내압에 대한 감육깊이와 폭의 영향은 매우 유사하다. 감육이 있는 직관의 몇 가지 경우에 대한 유한요소해석 결과를 Fig. 9(b)에 나타내었으며, 이 결과는 Fig. 6의 곡관의 결과와 매우 유사한 경향을 보인다.⁽¹⁹⁾

6. 결론

본 논문은 탄성-완전소성 재료를 이용한 3 차원 소변형 유한요소해석에 근거하여 내압하중하에서 곡관의 한계하중에 대해 감육이 미치는 영향을 정량화하였다. 넓은 범위의 곡관과 감육형상이 고려되었지만, 대변형 효과는 고려되지 않았다. 곡관과 감육형상을 나타내기 위해 많은 종류의 하나는 한계하중에 감육길이에 대한 영향이 더 이상 나타나지 않을 만큼 충분히 감육길이가 큰 경우이다. 다른 하나는 감육길이가 ‘0’으로, 표면균열과 같은 경우이다. 두 경우에 대해서, 한계하중에 감육의

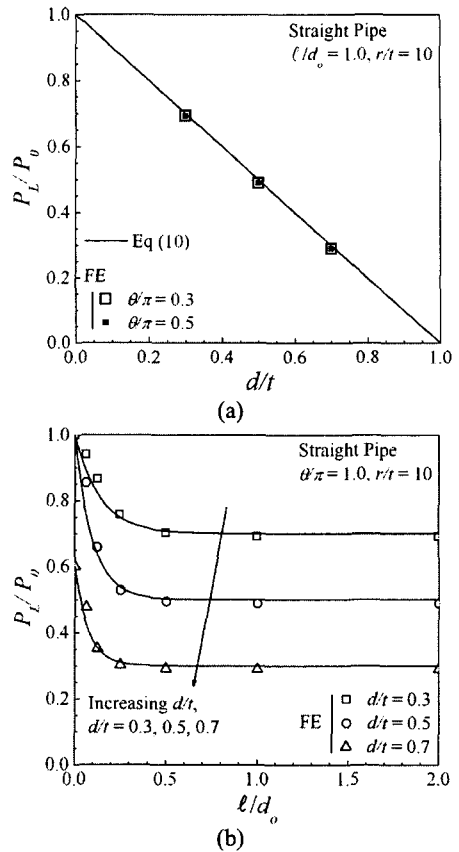


Fig. 9 Comparison of plastic limit pressures for straight pipes with local wall thinning with FE results: (a) for the case of sufficiently long thinning, and (b) the effect of the axial extent of local wall thinning

감육의 폭과 깊이가 미치는 영향에 대한 closed-form 근사식이 제시되었다. 유한요소해석 결과와 위의 두 극단적인 경우에 대한 근사식을 사용하여 중간길이의 감육을 포함하는 근사식을 구하였다.

주목할 만한 점은, 본 논문에서 제시한 한계하중식은 곡관 중앙부에 감육이 위치하였을 경우에 대한 것이지만, 감육이 곡관 끝단에 위치한 경우에 대한 한계하중식도 같은 결과임을 알 수 있었다. 이를 통해, 본 논문에서 제시한 한계하중식은 감육의 위치에 상관없이 적용 가능하다는 것을 알 수 있다. 또 다른 주목할 만한 점은, 한계하중에 대해 감육의 길이가 미치는 영향이 곡관과 직관 모두 유사하다는 것이다.

마지막으로, 비록 본 연구에서 대변형 효과는 고려되지 않았지만, 대변형 효과를 고려한 감육이 있는 곡관의 한계하중에 대한 연구가 진행중이며, 본 연구에서 발견된 중요한 현상들은 대변형 효과를 고려하였을 때도 동일하게 나타났다.

후 기

본 연구는 과학기술부 지원으로 수행하는 원자력연구개발사업(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) Choi, J.B., Goo, B.K., Kim, J.C., Kim, Y.J. and Kim, W.S., 2003, "Development of Limit Load Solutions for Corroded Gas Pipelines," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 80, pp. 121~128.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) Hasegawa, K., Sakata, K., Miyazaki, K. and 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.
- (8) Ahn, S.H., Nam, K.W., Yoo, Y.S., Ando, K., Ji, S.H., Ishiwata, M. and Hasegawa, K., 2002, "Fracture Behavior of Straight Pipe and Elbow with Local Wall Thinning," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 211, pp. 91~103.
- (9) Shim, D.J., Choi, J.B. and 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*, Vol. 126, pp. 179~183.
- (10) Kim, Y.J., Oh, C.K., Park, C.Y. and 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.
- (11) 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.
- (12) Yahiaoui, K., Moffat, D.G. and Moreton, D.N., 2000, "Piping Elbows with Cracks - a Parametric Study of the Influence of Crack Size in Limit Loads Due to Pressure and Opening Bending," *Journal of Strain Analysis*, Vol. 35, pp. 35~46.
- (13) Kim, Y.J. and Oh, C.S., 2006, "Closed Form Plastic Collapse Loads of Elbows Under Combined Pressure and In-Plane Bending," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 73, pp. 1437~1454.
- (14) ABAQUS Version 6.2-1. User's manual. Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc, RI; 2001.
- (15) Calladine, C.R., 1974, "Limit Analysis of Curved Tubes," *Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 16, pp. 85~87.
- (16) Kim, Y.J. and Oh, C.S., "Effects of Attached Straight Pipes on Finite Element Limit Analysis of Pipe Bends," *International Journal of Pressure Vessels and Piping* (electronic version available).
- (17) 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.
- (18) Miller, A.G., 1988, "Review of Limit Loads of Structures Containing Defects," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 32, pp. 191~327.
- (19) Oh, C.K., Kim, Y.J. and Park, C.Y., "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).