

복합하중이 작용하는 원주방향 표면균열배관에 대한 소성한계하중식

심도준* · 김윤재** · 김영진† · 황성식*** · 김정수***

(2002년 11월 4일 접수, 2003년 7월 5일 심사완료)

Plastic Limit Load Solutions for Circumferential Surface Cracked Cylinders Under Combined Loading

Do-Jun Shim, Yun-Jae Kim, Young-Jin Kim, Seong-Sik Hwang and Joung-Soo Kim

Key Words : Finite Element Analysis(유한요소해석), Limit Load(한계하중), Surface Crack(표면균열), Combined Loading(복합하중)

Abstract

This paper provides plastic limit load solutions of cylinders with circumferential part-through surface cracks under combined axial tension, internal pressure and global bending. Such solutions are developed based on detailed three-dimensional (3-D) finite element (FE) limit analyses using elastic-perfectly-plastic material behaviour, together with analytical solutions based on equilibrium stress fields. For the crack location, both external and internal cracks are considered. Furthermore, in terms of the crack shape, both semi-elliptical and constant-depth surface cracks are considered. The resulting limit load solutions are given in a closed form, and thus can be easily used in practical situations. Being based on detailed 3-D FE limit analysis, the present solutions are believed to be most reliable, and thus to be valuable information for integrity assessment of piping.

1. 서 론

균열이 존재하는 배관에 대한 건전성을 평가하는 방법 중에는 한계하중해석(limit load analysis)법과 파괴역학해석(fracture mechanics analysis)법이 있다. 한계하중해석법은 인성과 연성이 높은 배관재료에 적합한 평가법이다. 이 방법은 현재 ASME Code Section XI, Appendix H⁽¹⁾에서 사용되고 있다. 파괴역학해석법은 균열배관에 대한 탄소성 파괴역학 매개변수인 J -적분을 이용하는 평가법이다. 이 방법은 현재 많은 사용적합성(fitness-for-purpose) 코드에서 사용되고 있으며, 특히 R6⁽²⁾에서는 참조응력법(reference stress method)⁽³⁾을 이용하여 J -적분

을 계산한다. 참조응력을 정의하기 위해서는 참조하중이 필요한데, 현재는 구조물의 한계하중을 참조하중으로 사용하고 있다.

앞서 서술한 두 가지 평가법의 공통점은 모두 소성한계하중을 사용한다는 것이다. 이와 같이 소성한계하중은 균열배관의 건전성평가에 매우 중요한 인자이다. 이와 같은 이유로, 균열이 존재하는 배관에 대한 소성한계하중식은 널리 제안되어 왔다.^(4,5) 하지만, 기존식들은 대부분 배관에 대한 실험을 통해 실험적으로 도출된 식이거나 Tresca 항복조건과 같은 단순한 항복조건을 이용하여 해석적인 방법으로 제안된 식들이다. 이와 같은 식들을 통해 얻은 결과는 실제의 한계하중을 과소예측(under-predict)하며, 참조응력법에 적용하였을 경우 J 를 보수적으로 예측하여, 보수적인 평가결과를 나타낸다.⁽²⁾

표면균열배관에 대한 한계하중식은 두 가지로 분류될 수 있는데, 첫째는, 국부적인 항복을 기준

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail : yjkim@yurim.skku.ac.kr

TEL : (031)290-5274 FAX : (031)290-5276

* 회원, 성균관대학교 기계공학부

** 성균관대학교 기계공학부

*** 회원, 한국원자력연구소

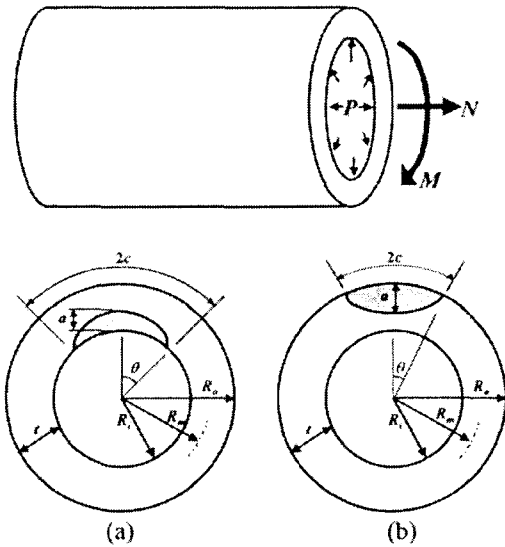


Fig. 1 Geometries and dimensions for cylinders under internal pressure (P), axial tension (N) and global bending (M) with (a) internal circumferential semi-elliptical surface cracks, (b) external circumferential semi-elliptical surface cracks

으로 하는 국부한계하중(local limit load)이고, 둘째는 배관 실단면의 항복을 기준으로 하는 광범위한계하중(global limit load)이다. 참조응력법을 이용하여 J 를 예측하는 경우에는 광범위한계하중을 사용하는 것이 더 정확한 결과를 나타내는 것으로 알려져 있다.⁽⁶⁻¹⁰⁾ 하지만 기존 광범위한계하중식은 정확한 한계하중식이 아니고 하한계 한계하중을 기준으로 제안된 식이므로 앞서 서술한 결론이 일반적인 결론이라고 보기는 어렵다. 따라서, 이 문제의 명확한 결론을 얻기 위해서는 표면균열이 존재하는 배관에 대한 정확한 광범위한계하중식을 제안할 필요가 있다.

본 논문의 목적은 탄성완전소성 거동을 나타내는 재료에 대한 3차원 유한요소한계해석(finite element limit analysis)과 응력평형으로부터 유도된 해석식(analytical solution)을 이용하여 원주방향 표면균열이 존재하는 배관에 대한 소성한계하중식을 제시하는 것이다. 작용하중은 축방향하중, 내압, 굽힘하중 또는 복합하중이 작용하는 경우를 고려하였다. 균열위치에 대해서는 내부균열과 외부균열을 고려하였다. 또한, 균열형상에 대해서는 반타원 표면균열과 직사각형 표면균열을 고려하였다.

2. 유한요소한계해석

Fig. 1은 표면균열이 존재하는 배관의 형상을 도



Fig. 2 Crack dimension and shape (a) a semi-elliptical crack, (b) a rectangular (constant depth) crack

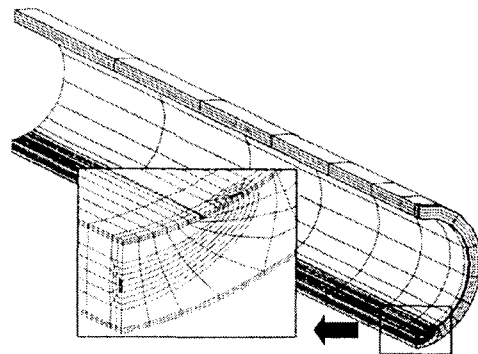


Fig. 3 Typical FE mesh employed in the present work

식적으로 나타낸 것으로서, R_o , R_m , R_i 는 각각 배관의 외경, 평균반경, 내경이며 t 는 배관의 두께이다. 균열의 위치에 따라 내부 원주방향균열(Fig. 1(a))과 외부 원주방향균열(Fig. 1(b))을 고려하였다. 균열형상은 Fig. 2에 도시되어 있으며, a 는 균열깊이, $2c$ 는 축방향 균열길이, 2θ 는 원주방향 균열각도이다. 본 연구에서는 원주방향의 균열길이를 배관의 50%로 제한하였다. 배관에 작용하는 하중으로는 내압(P), 축방향하중(N), 굽힘하중(M)을 각각 고려하였으며 이들의 복합하중도 고려하였다.

유한요소해석을 위해서는 범용 해석프로그램인 ABAQUS⁽¹¹⁾를 사용하였으며, 모든 경우에 대하여 탄성완전소성(elastic-perfectly-plastic)해석을 수행하였다. 해석모델의 대칭성을 고려하여 1/4모델링을 하였으며, 20절점 등계수 사각주요소(C3D20R)를 사용하였다. 또한, 해석과정에서 발생하는 수렴 문제를 고려하여 ABAQUS내에서 지원하는 RIKS 옵션을 사용하였으며, 이를 통해 Mises 소성한계하중을 계산하였다. Fig. 3은 해석에 사용된 유한요소모델의 예를 나타낸 것이다.

유한요소한계해석의 타당성을 검증하기 위해 저자들은 기존연구⁽¹²⁾에서 균열이 없는 배관, 축방향 무한균열이 존재하는 평면변형률 배관, 축대칭 원주방향균열이 존재하는 배관에 대하여 유한요소해석을 수행하여 기존식과 결과를 비교하여 해석의 타당성을 검증하였다. 한편, 정확한 한계하중을 계산하기 위해서는 응력의 평형조건, 변위의 적합

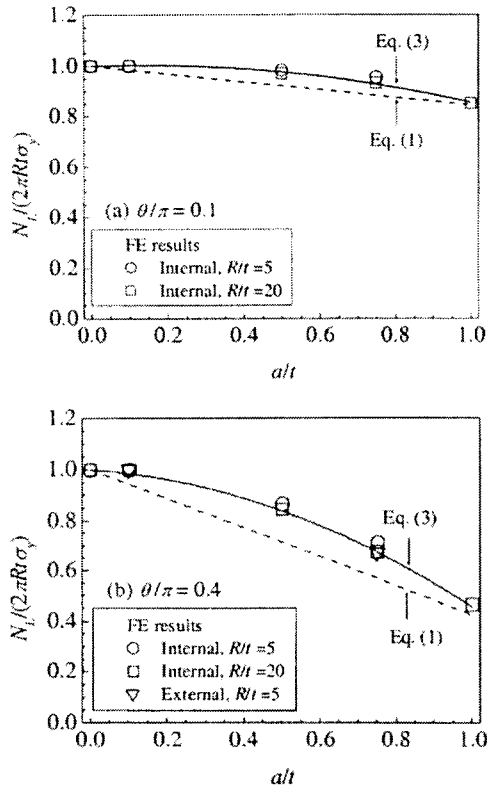


Fig. 4 Limit loads for cylinders with circumferential semi-elliptical surface cracks under axial tension

조건 및 항복조건이 모두 동시에 만족되어야 한다. 유한요소해석을 이용한 한계해석에서는 모든 요소 내에서 3가지 조건이 만족되므로, 이를 통해 도출한 한계하중식은 정확한 식이라고 할 수 있다.

3. 단일하중을 받는 원주방향 표면균열

3.1 축방향 인장하중을 받는 경우

배관에 원주방향 반타원 표면균열(Fig. 1(a))이 존재하고 축방향 인장하중이 작용하는 경우에 대한 Tresca 한계하중식은 다음과 같다.⁽¹³⁾

$$n_L^{T,S} = \frac{N_L}{2\pi\sigma_y R_m t} = 1 - \frac{a\theta}{t} \frac{2 \sin^{-1}\left(\frac{a f(\theta)}{t} \frac{1}{2\theta}\right)}{\pi} \quad (1)$$

$$f(\theta) = 0.7854\theta^2 - 0.0982\theta^4 + 0.0041\theta^6 - 0.000085\theta^8 \quad (2)$$

식 (1)은 응력의 평형조건으로부터 유도된 식으로 유도과정은 지면상 생략하였다. 식 (1)에서 σ_y 는 탄성완전소성 재료에 대한 항복응력이며, 첨자 'T'와 'S'는 각각 'Tresca' 조건과 'Semi-elliptical' 표면균열을 의미한다. 또한, 식 (1)은 배관의 두께가 외경에 비해 얇다는 가정으로부터 유도된 식이

므로 내부균열과 외부균열에 대한 구분이 없다.

Fig. 4는 내부 반타원 표면균열에 대한 유한요소 해석 결과를 식 (1)과 비교한 것으로 $\theta/\pi=0.1, 0.4$ 와 $R_m/t=5, 20$ 에 대한 결과를 나타낸 것이다. θ/π 가 증가할수록 유한요소해석 결과와 식 (1)은 더 많은 차이를 나타내며, 주어진 θ/π 에서는 차이가 $a/t=0.5$ 까지는 증가하다가 그 이후에는 감소한다. 모든 경우에 대해서 유한요소해석 결과가 식 (1)보다 높게 나타났는데, 이는 식 (1)이 하한계 한계하중이라는 사실을 입증한다. 또한, 유한요소해석 결과는 R_m/t 의 영향을 많이 받지 않았다. 유한요소해석 결과를 바탕으로 내부균열에 대한 한계하중식을 다음과 같이 제안하였다.

$$n_L^{M,S} = \frac{N_L}{2\pi\sigma_y R_m t} = 1 + A_1 \left(\frac{a}{t}\right) + A_2 \left(\frac{a}{t}\right)^2 \quad (3)$$

$$A_1 = 0.0662 - 0.038 \left(\frac{\theta}{\pi}\right) - 0.96 \left(\frac{\theta}{\pi}\right)^2$$

$$A_2 = -0.0598 - 1.525 \left(\frac{\theta}{\pi}\right) + 1.4267 \left(\frac{\theta}{\pi}\right)^2$$

여기서, 첨자 'M'은 'Mises' 조건을 의미한다.

3.2 굽힘하중을 받는 경우

배관에 원주방향 반타원 표면균열(Fig. 1(a))이 존재하고 굽힘하중이 작용하는 경우에 대한 Tresca 한계하중식은 다음과 같다.⁽¹³⁾

$$m_L^{T,S} = \frac{M_L}{4\sigma_y R_m^2 t} = \cos\left(\frac{\pi a}{8t} \theta\right) - \frac{a}{t} \frac{f(\theta)}{2\theta} \quad (4)$$

여기서, $f(\theta)$ 는 식 (2)에 나타내었으며, 식 (4)에서도 내부와 외부균열에 대한 구분은 없다.

Fig. 5는 내부 반타원 표면균열에 대한 유한요소 해석 결과를 식 (4)와 비교한 것으로 $\theta/\pi=0.1, 0.4$ 와 $R_m/t=5, 20$ 에 대한 결과를 나타낸 것이다. 인장하중이 작용하는 경우와 동일한 경향을 나타내었다. 유한요소해석 결과를 바탕으로 내부균열에 대한 한계하중식을 다음과 같이 제안하였다.

$$m_L^{M,S} = \frac{M_L}{4\sigma_y R_m^2 t} = 1 + B_1 \left(\frac{a}{t}\right) + B_2 \left(\frac{a}{t}\right)^2 \quad (5)$$

$$B_1 = 0.0741 - 0.1693 \left(\frac{\theta}{\pi}\right)$$

$$B_2 = -0.0863 - 1.0127 \left(\frac{\theta}{\pi}\right)$$

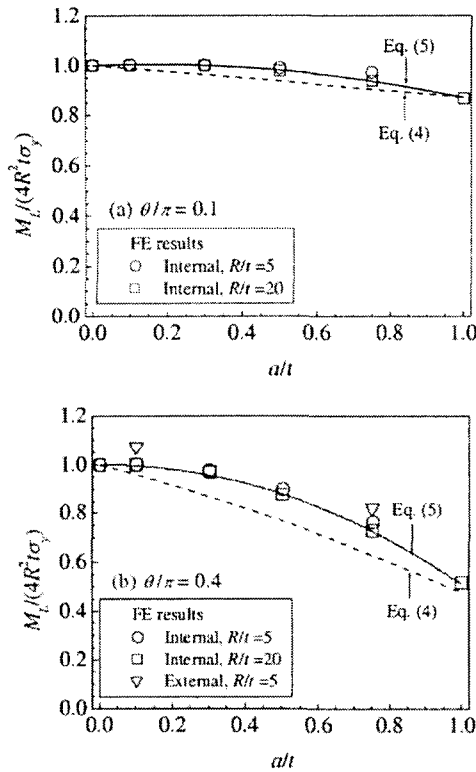


Fig. 5 Limit loads for cylinders with circumferential semi-elliptical surface cracks under global bending

3.3 내압을 받는 경우

배관에 원주방향 표면균열이 존재하고 내압이 작용하는 경우에 대한 Tresca 한계압력식은 다음과 같다.⁽¹³⁾

$$p_L^{T,S} = \frac{P_L R_m}{2\sigma_y t} = 1 - \frac{a\theta}{t4} - \frac{2\sin^{-1}\left(\frac{a}{t} \frac{f(\theta)}{2\theta}\right)}{\pi} \quad (6)$$

여기서, $f(\theta)$ 는 식 (2)에 나타내었다. 식 (6)은 내압으로 인해 발생하는 등가 축방향 인장하중을 기준으로 유도된 식으로, 원주방향 응력(hoop stress)에 대한 영향을 고려하지 않는다. 원주방향 응력으로 인해 붕괴가 발생하는 경우에 대한 Tresca 한계압력식은 다음과 같다.

$$p_L^{T,S} = \frac{P_L R_m}{2\sigma_y t} = \frac{1}{2} \quad (7)$$

식 (7)은 a/t 와 θ/π 에 무관하다. 따라서, 주어진 a/t 와 θ/π 에 대한 한계압력을 계산하기 위해서는 식 (6)과 식 (7) 중 작은 값을 이용하면 된다.

Fig. 6은 내부 반타원 표면균열에 대한 유한요소

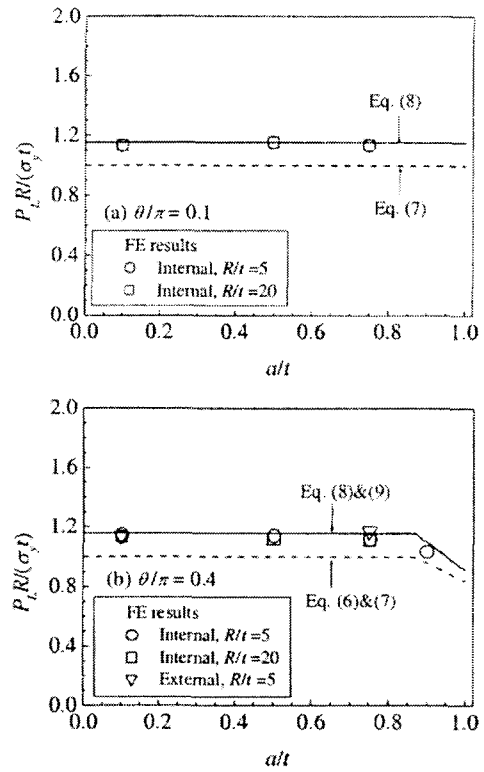


Fig. 6 Limit loads for cylinders with circumferential semi-elliptical surface cracks under internal pressure

해석 결과를 식 (6), (7)과 비교한 것으로 $\theta/\pi=0.1, 0.4$ 와 $R_m/t=5, 20$ 에 대한 결과를 나타낸 것이다. 해석결과에서 다양한 θ/π 와 a/t 에 대해서 원주방향 응력이 지배적인 영향을 나타내었으며, 한계압력은 균열이 없는 배관의 Mises 한계압력(식 (8))과 유사하게 나타났다.⁽¹²⁾

$$p_L^{M,S} = \frac{P_L R_m}{2\sigma_y t} = \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (8)$$

소성붕괴가 축방향 인장응력에 의해 일어날 경우에는 인장하중이 작용하는 경우에 대한 식(식 (3))을 다음과 같이 수정하여 내부균열에 대해 사용할 수 있다.

$$p_L^{M,S} = \frac{P_L R_m}{2\sigma_y t} = 1 + A_1 \left(\frac{a}{t}\right) + A_2 \left(\frac{a}{t}\right)^2 \quad (9)$$

여기서, A_1 과 A_2 는 식 (3)에 나타내었다. 주어진 a/t 와 θ/π 에 대한 Mises 한계압력을 계산하기 위해서는 식 (8)과 식 (9) 중 작은 값을 이용하면 되며, Fig. 6에 나타난 바와 같이 제안된 식은 유한요소 해석 결과와 잘 일치하였다.

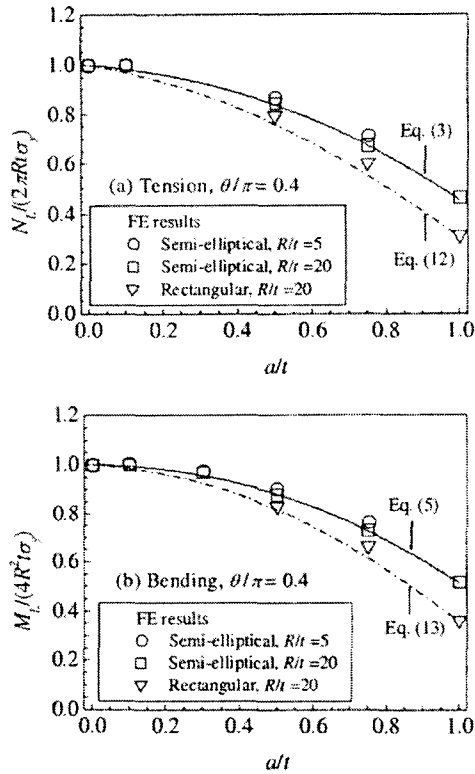


Fig. 7 Effect of crack shape on limit loads for cylinders with internal circumferential surface cracks under tension and global bending

3.4 균열형상의 영향

직사각형 표면균열(Fig. 2(b))이 존재하는 배관에 대한 한계하중식도 경우에 따라서 필요하다. 축방향 인장하중이 작용하는 경우에 대한 Tresca 한계하중식은 다음과 같다.^(4,14)

$$n_L^{T,C} = \frac{N_L}{2\pi\sigma_y R_m t} = 1 - \frac{\theta \frac{a}{t} + 2 \sin^{-1}\left(\frac{a \sin \theta}{t}\right)}{\pi} \quad (10)$$

여기서, 첨자 'C'은 'Constant-depth'를 의미한다.

한편, 굽힘하중이 작용하는 경우에 대한 Tresca 한계하중식은 다음과 같다.⁽⁴⁾

$$m_L^{T,C} = \frac{M_L}{4\sigma_y R_m^2 t} = \cos\left(\frac{\theta a}{2t}\right) - \frac{a \sin \theta}{t} \quad (11)$$

식 (10)과 식 (1), 또는 식 (11)과 식 (4)의 차이는 θ/π 와 a/t 가 증가할수록 증가하였다. 균열형상의 영향이 이들 식간의 차이로 충분히 정량화 된다고 가정하면, 반타원 표면균열에 대한 Mises 한계하중식을 다음과 같이 수정함으로써 직사각형 표

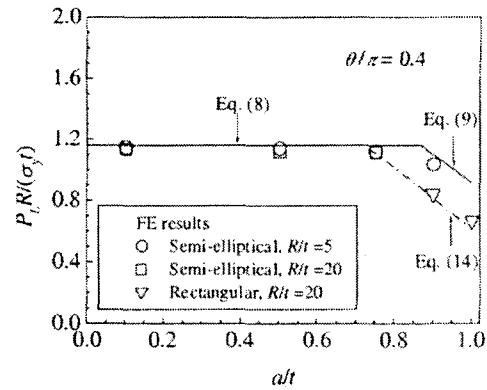


Fig. 8 Effect of crack shape on limit loads for cylinders with internal circumferential surface cracks under internal pressure

면균열에 대한 Mises 한계하중식을 구할 수 있다.

$$n_L^{M,C} = n_L^{M,S} \cdot \frac{n_L^{T,C}}{n_L^{T,S}} \quad (12)$$

$$m_L^{M,C} = m_L^{M,S} \cdot \frac{m_L^{T,C}}{m_L^{T,S}} \quad (13)$$

Fig. 7은 직사각형 표면균열에 대해 수행한 유한요소해석 결과를 식 (12), (13)과 비교한 것으로, 반타원 표면균열(식 (3), (5))에 대한 결과도 함께 도시하였다. θ/π 와 a/t 가 증가할수록 균열형상으로 인한 한계하중값의 차이가 증가하였다.

내압이 작용하고 소성붕괴가 원주방향응력에 의해서 발생하는 경우에는 균열의 형상이 한계압력에 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있다. 따라서, 이와 같은 경우에는 직사각형 표면균열에 대해서 균열이 없는 배관에 대한 Mises 한계압력식(식 (8))을 사용해도 된다. 소성붕괴가 인장응력에 의해 발생하는 경우에는 반타원 표면균열에 대한 Mises 한계압력식을 다음과 같이 수정함으로써 직사각형 표면균열에 대한 Mises 한계압력식을 구할 수 있다.

$$p_L^{M,C} = p_L^{M,S} \cdot \frac{n_L^{T,C}}{n_L^{T,S}} \quad (14)$$

Fig. 8은 직사각형 표면균열에 대해 수행한 유한요소해석 결과를 식 (8), (14)와 비교한 것으로, 반타원 표면균열(식 (8), (9))에 대한 결과도 함께 도시하였다.

3.5 균열위치의 영향

3.1절에서 3.4절까지는 내부균열에 대한 결과를

정리한 것이다. R_m/t 가 충분히 큰 경우에는 내부균열에 대한 한계하중식을 외부균열에 대해서도 적용할 수 있다. 또한, θ/π 가 작은 경우에는 균열위치의 영향이 크게 나타나지 않는다. 따라서, 균열 위치가 한계하중에 미치는 영향을 분석하기 위해 $R_m/t=5$, $\theta/\pi=0.4$ 인 경우에 대해서 제한된 유한요소 해석을 수행하였으며, Fig. 4~6에 그 결과를 나타내었다. Fig. 4~6에서 내부균열에 대해서는 R_m 을 이용하여 한계하중을 무차원화하였고, 외부균열에 대해서는 R_0 또는 R_o 를 이용하였다. 이와 같은 방법을 이용하면 균열위치의 영향을 최소화할 수 있다. 예를 들어, 외부 반타원 표면균열(Fig. 1(b))이 존재하고 축방향 인장하중이 작용하는 경우에 대한 한계하중은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$n_L^{M,S} = \frac{N_L}{2\pi\sigma_y R_o t} = 1 + A_1 \left(\frac{a}{t}\right) + A_2 \left(\frac{a}{t}\right)^2 \quad (15)$$

여기서, A_1 과 A_2 는 식 (3)에 나타내었다. Fig. 4에 나타낸 바와 같이 유한요소해석 결과와 식 (15)가 정확히 일치하였다.

굽힘하중이 작용하는 경우에는 식 (5)에 R_0 를 대입하여 사용할 수 있으며, Fig. 5에 나타낸 바와 같이 제안된 방법이 유한요소해석 결과보다 보수적으로 나타났다.

한편, 내압이 작용하는 경우에는 R_o 를 이용하여 한계압력을 무차원화 시키는 것이 균열위치의 영향을 최소화 하였는데, 이는 균열면에 작용하는 압력으로 인한 것으로 판단된다. 원주방향 응력이 지배적인 경우, 외부균열에 대한 한계압력식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_L^{M,S} = \frac{P_L R_o}{2\sigma_y t} = \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (16)$$

Fig. 6에 나타낸 바와 같이 유한요소해석 결과와 식 (16)이 정확히 일치하였다.

4. 복합하중을 받는 원주방향 표면균열

4.1 축방향 인장하중과 굽힘하중을 받는 경우

내부 원주방향 반타원 표면균열(Fig. 1(a))이 존재하고 축방향 인장하중과 굽힘하중을 동시에 받는 배관에 대한 항복궤적(yield locus)은 다음과 같다.⁽¹³⁾

$$n = 1 - \frac{a\theta}{t \cdot 4} - \frac{2 \sin^{-1} \left(m + \frac{a f(\theta)}{t \cdot 2\theta} \right)}{\pi} \quad (17)$$

여기서, n 과 m 은 각각 무차원화된 축방향 인장하중과 굽힘하중으로, 다음과 같이 정의된다.

$$n = \frac{N}{2\pi\sigma_y R_m t} ; m = \frac{M}{4\sigma_y R_m^2 t} \quad (18)$$

식 (17)은 Tresca 조건과 응력의 평형조건을 이용하여 유도된 식으로 지면상 유도과정은 생략하였다. 식 (17)은 단일하중에 대한 Tresca 한계하중(식 (1), (4))을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{n} \cdot n_L^{T,S} = 1 - \frac{a\theta}{t \cdot 4} - \frac{2 \sin^{-1} \left(\bar{m} \cdot m_L^{T,S} + \frac{a f(\theta)}{t \cdot 2\theta} \right)}{\pi} \quad (19)$$

$$\bar{n} = \frac{n}{n_L^{T,S}} ; \bar{m} = \frac{m}{m_L^{T,S}} \quad (20)$$

이와 같은 방법으로 항복궤적을 표현하면 $\bar{n}-\bar{m}$ 좌표상에서 항복궤적과 양축이 항상 1에서 교차하는 장점이 있다. 식 (20)에서는 Tresca 한계하중식을 이용하여 각각의 작용하중을 무차원화 하였는데, 이를 본 연구에서 제안한 Mises 한계하중(식 (3), (5))으로 무차원화 할 수 있다.

$$\bar{n} = \frac{n}{n_L^{M,S}} ; \bar{m} = \frac{m}{m_L^{M,S}} \quad (21)$$

따라서, 식 (19)와 식 (21)을 사용하면 인장하중과 굽힘하중이 동시에 작용하는 경우에 대한 Mises 항복궤적을 구할 수 있다. Fig. 9는 제안된 항복궤적을 유한요소해석 결과와 비교한 것으로, 두 결과가 잘 일치하였다. 균열이 작은 경우(Fig. 9(a))에는 제안된 항복궤적이 비보수적인 경향을 나타내었고, R_m/t 가 증가할수록 비보수성이 조금씩 증가하였나, 오차범위 6% 이내에서 일치하였다.

4.2 내압과 굽힘하중을 받는 경우

내압과 굽힘하중을 동시에 받는 배관에 대한 항복궤적을 예측하기 위해서는 두 가지 경우를 고려할 수 있다. 첫번째 경우는 인장응력에 의해 소성분괴가 발생하는 경우로, 인장하중과 굽힘하중이 동시에 작용하는 경우에 대한 항복궤적을 다음과 같이 수정하여 사용할 수 있다.

$$\bar{p} \cdot p_L^{T,S} = 1 - \frac{a\theta}{t \cdot 4} - \frac{2 \sin^{-1} \left(\bar{m} \cdot m_L^{T,S} + \frac{a f(\theta)}{t \cdot 2\theta} \right)}{\pi} \quad (22)$$

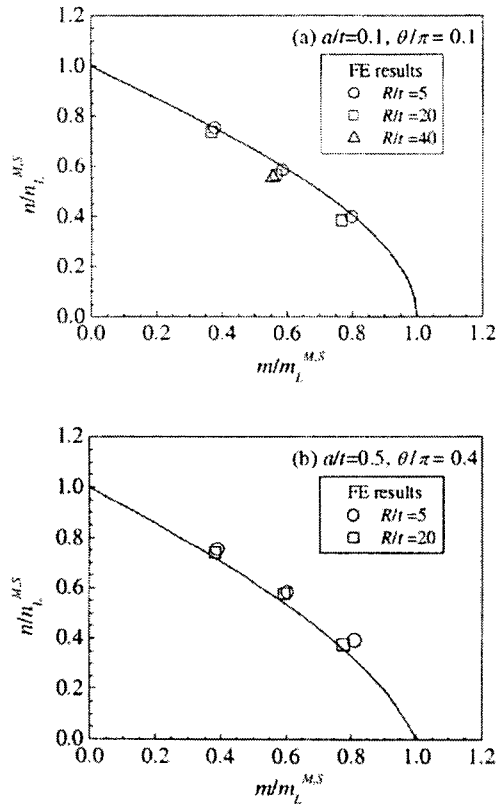


Fig. 9 Limit loads for cylinders with internal circumferential semi-elliptical surface cracks under combined tension and global bending

$$\bar{p} = \frac{P}{P_L^{M.S}} ; \bar{m} = \frac{m}{m_L^{M.S}} \quad (23)$$

여기서, $P_L^{M.S}$ 와 $m_L^{M.S}$ 는 각각 식 (9)와 식 (5)에 나타내었다. Fig. 10(a)는 제안된 항복계적을 유한요소 해석 결과와 비교한 것으로, 두 결과가 잘 일치하였다.

두번째 경우는 원주방향 응력에 의해 소성붕괴가 발생하는 경우로, 이와 같은 경우에는 내압과 굽힘하중의 상호작용을 고려해야 한다. 앞서 서술한 바와 같이 원주방향 응력이 지배적인 경우에는 θ/π 와 a/t 가 한계압력에 영향을 미치지 않는다(식 (8) 참조). Tresca 조건에서는 굽힘하중에 의한 인장응력이 추가적으로 작용해도 한계압력은 변하지 않는다. 하지만, Mises 조건에서는 굽힘하중에 의해 인장응력이 추가적으로 작용하면 한계압력이 영향을 받는다. 이와 같은 경우에 대한 항복계적을 해석적으로 유도하는 것은 매우 복잡하다. 한편, 다음과 같이 일반화된 식을 이용하면 항복계적을 도출할 수 있다.

$$\Phi = A(\bar{p} - B)^2 + C(\bar{m} - D)^2 - 1 = 0 \quad (24)$$

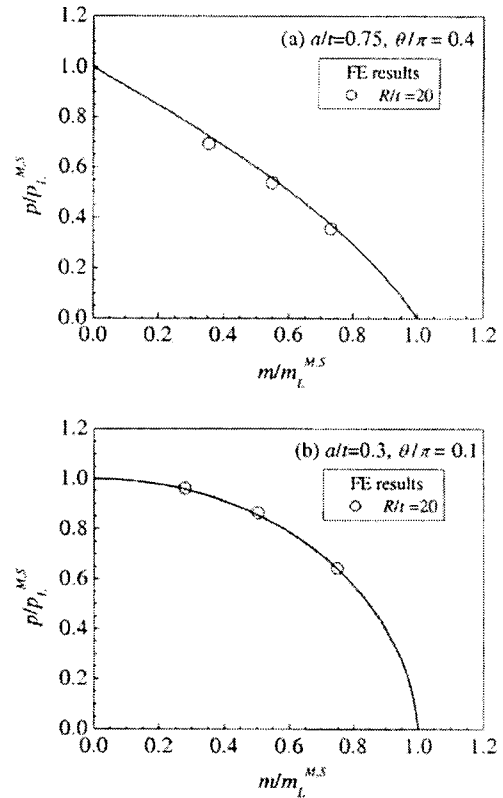


Fig. 10 Limit loads for cylinders with internal circumferential semi-elliptical surface cracks under combined internal pressure and global bending

여기서, \bar{p} 과 \bar{m} 은 식 (23)에 정의되었다. 식 (24)의 각 계수를 결정하기 위해서 다음과 같은 경계조건을 이용할 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{p} &= 1 ; \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{m}} = 0 & @ \bar{m} = 0 \\ \bar{m} &= 1 & @ \bar{p} = 0 \end{aligned} \quad (25)$$

또한 식 (22)에서 순수굽힘하중이 작용하는 경우 ($\bar{p} = 0$)의 기울기 $\partial \bar{p} / \partial \bar{m}$ 를 마지막 경계조건으로 사용할 수 있다. 이와 같은 방법을 이용하면 각 계수는 θ/π 와 a/t 의 함수로 다음과 같이 계산된다.

$$A = \left(\frac{h+2}{h+1} \right)^2, B = \frac{1}{h+2}, C = hAB, D = 0 \quad (26)$$

여기서,

$$h = -\frac{2}{\pi} \frac{m^{T.S}}{P^{T.S}} \cdot \frac{1}{\sin\left(\frac{a}{t} \frac{\theta\pi}{8}\right)} \quad (27)$$

Fig. 10(b)는 제안된 항복계적을 유한요소해석 결과와 비교한 것으로, 두 결과가 정확히 일치하였다.

따라서, 주어진 θ/π 와 a/t 에 대해 식 (22)와 식 (24) 중 작은 값을 한계압력 또는 한계하중으로 사용할 수 있다.

4.3 균열형상 및 균열위치의 영향

4.1절과 4.2절에서는 배관에 내부 반타원 표면 균열이 존재하고 복합하중이 작용하는 경우에 대한 한계하중을 제안하였다. 외부균열 또는 직사각형 표면균열에 대해서는 3.4절과 3.5절에서 제안한 단일하중에 대한 한계하중식을 식 (21)과 식 (23)에 적용하면 복합하중에 대한 한계하중식을 구할 수 있다. 본 논문에서는 이에 대한 검증을 수행하지 않았지만, 앞서 제시된 결과들로부터 충분한 타당성을 입증하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 원주방향 표면균열이 존재하는 배관에 축방향하중, 내압, 굽힘하중 또는 복합하중이 작용하는 경우에 대한 소성한계하중식을 제안하였다. 이 식들은 탄성완전소성 거동을 나타내는 재료에 대한 3차원 유한요소한계해석과 응력평형 조건에 기초한 해석식으로부터 도출되었다. 균열 위치에 대해서는 내부균열과 외부균열을 고려하였으며, 균열형상에 대해서는 반타원 표면균열과 직사각형 표면균열을 고려하였다. 최종적으로 제안된 식들은 실제문제에 적용이 용이한 형식으로 표현되었다.

본 논문에서 제안한 한계하중식은 유한요소해석에 기초한 식이므로 가장 정확한 식이라 할 수 있으며, 배관의 건전성평가에 유용하게 적용될 수 있을 것이다. 예를 들면, 가동중인 원전 증기발생기 세관의 소성붕괴해석에 사용될 수 있을 것이다. 또한, 참조응력법에 기초하여 표면균열의 J -적분을 예측하는 경우, 광범위한하중의 적용성 검토에 중요한 자료를 제공할 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이

루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 2001, "Evaluation of Flaws in Ferritic Piping," Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI, Appendix H, American Society of Mechanical Engineers.
- (2) 2001, "R6: Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects," Revision 4, British Energy Generation Ltd.
- (3) Ainsworth, R.A., 1984, "The Assessment of Defects in Structures of Strain Hardening Materials," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 19, pp. 633~642.
- (4) Miller, A.G., 1988, "Review of Limit Loads of Structures Containing Defects," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 32, pp. 191~327.
- (5) 1999, SINTAP Final Procedure, Brite Euram Project, BE95-1426.
- (6) Chell, G.G., 1989, "Application to the CEGB Failure Assessment Procedure, R6, to Surface Flaws," CEGB Report, RD/L/3415/R88, CEGB.
- (7) Miller, A.G., 1988, "J Estimation for Surface Defects; Further Results," CEGB Memorandum TPRD/B/SM/SF95/M88.
- (8) Kim, Y.J., 2000, "Reference Stress Based J Estimation for Surface Crack Assessments: Global versus Local Limit Loads," British Energy Report, E/REP/GEN/0010/00, British Energy Generation Ltd.
- (9) Shim, D.J., Kim, Y.J., Choi, J.B. and Kim, Y.J., 2002, "Engineering Elastic-Plastic Fracture Analysis for Semi-Elliptical Surface Cracked Plates Under Combined Bending and Tension," *Transaction of the KSME (A)*, Vol. 26, No. 6, pp. 1127~1134.
- (10) Goodall, I.W., Webster, G.A., 2001, "Theoretical Determination of Reference Stress for Partially Penetration Flaws in Plates," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 78, pp. 687~695.
- (11) 2001, "ABAQUS User's manual," Hibbit, Karlson & Sorensen, Inc.
- (12) Shim, D.J., Huh, N.S., Kim, Y.J. and Kim, Y.J., 2003, "Plastic Limit Pressure for Cracked Pipes Using Finite Element Limit Analyses," *Transaction of the KSME (A)*, Vol. 27, No. 1, pp. 26~33.
- (13) Rahman, S., 1998, "Net-Section-Collapse Analysis of Circumferentially Cracked Cylinders - Part II: Idealized Cracks and Closed-Form Solutions," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 61, pp. 213~230.
- (14) Jones, M.R., Eshelby, J.M., 1990, "Limit Solutions for Circumferential Cracked Cylinders Under Internal Pressure and Combined Tension and Bending," Nuclear Electric Report TD/SID/REP/0032, Nuclear Electric Ltd.