

< 논문 >

3 차원 유한요소 한계해석을 이용한 관통균열 배관의 소성한계하중

허 남 수* · 김 영 진†

(2005년 12월 6일 접수, 2006년 2월 27일 심사완료)

Plastic Limit Loads for Through-Wall Cracked Pipes Using 3-D Finite Element Limit Analyses

Nam-Su Huh and Young-Jin Kim

Key Words : Axial Through-Wall Crack(축방향 관통균열), Circumferential Through-Wall Crack(원주 방향 관통균열), Finite Element Limit Analysis(유한요소 한계해석), Plastic Limit Load(소성한계하중)

Abstract

The present paper provides plastic limit load solutions of axial and circumferential through-wall cracked pipes based on detailed three-dimensional (3-D) finite element (FE) limit analysis using elastic-perfectly-plastic behavior. As a loading condition, axial tension, global bending moment, internal pressure, combined tension and bending and combined internal pressure and bending are considered for circumferential through-wall cracked pipes, while only internal pressure is considered for axial through-wall cracked pipes. Especially, more emphasis is given for through-wall cracked pipes subject to combined loading. Comparisons with existing solutions show a large discrepancy in short through-wall crack (both axial and circumferential) for internal pressure. In the case of combined loading, the FE limit analyses results show thickness effect on limit load solutions. Furthermore, the plastic limit load solution for circumferential through-wall cracked pipes under bending is applied to derive plastic η and γ -factor of testing circumferential through-wall cracked pipes to estimate fracture toughness. Being based on detailed 3-D FE limit analysis, the present solutions are believed to be meaningful for structural integrity assessment of through-wall cracked pipes.

1. 서 론

원자력 배관에 대한 파단전누설(Leak-Before-Break; LBB) 설계를 위해서는 관통균열(through-wall crack)이 존재하는 배관에 대한 파괴역학적 건전성 평가가 수행되어야 하므로 최근 20여 년간 관통균열 배관의 파괴역학적 건전성 평가 기법 정립을 위해 많은 연구가 수행되어 왔다.^(1,2) 관통균열 배관에 대한 건전성 평가 방법은 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 첫 번째 방법은 한계하중법

(limit load method)으로 이 방법은 고연성 재료로 만들어진 균열 배관의 최대하중 지지능력(maximum load carrying capacity)을 예측하기 위해 사용되고 있다.⁽³⁾ 두 번째 방법은 비선형 파괴역학 매개변수인 J -적분을 이용한 탄소성 파괴역학(Elastic-Plastic Fracture Mechanics; EPFM) 평가법이다. EPFM 평가법 가운데 J -적분을 계산하기 위해 가장 널리 적용되고 있는 방법 가운데 하나가 참조응력법(reference stress method)⁽⁴⁾이다. 참조응력법을 이용하여 J -적분을 계산하기 위해서는 먼저 참조응력을 결정해야 하는데 현재에는 이를 위해 해석 대상의 소성한계하중(plastic limit load)이 사용되고 있다. 따라서 관통균열 배관의 소성한계하중은 한계하중법에 입각한 건전성 평가뿐만 아니라 EPFM 평가법에 입각한 건전성 평가를 위해서도

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail : yjkim50@skku.edu

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

* 회원, 성균관대학교 기계공학부

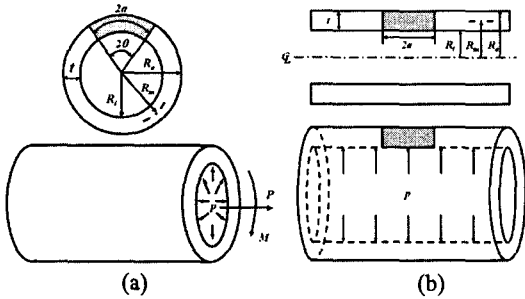


Fig. 1 Schematic illustrations for a pipe with (a) a circumferential through-wall crack and (b) an axial through-wall crack

매우 중요하다.^(5,6) 이와 같은 이유로 관통균열이 존재하는 배관에 대한 소성한계하중식은 Miller⁽⁷⁾ 등에 의해 널리 제안되어 왔으며 최근에는 SINTAP⁽⁸⁾에서 다양한 균열형상에 대한 소성한계하중식을 제안하였다.

그러나 기존의 식들은 실증실험을 통해 실험적으로 도출된 식이거나 응력평형과 Tresca 항복조건과 같은 단순한 항복조건을 이용하여 해석적인 방법으로 제안된 식들이다. 이와 같은 식들을 이용하여 구한 소성한계하중은 실제 균열 배관의 한계하중을 낮게 예측(under-predict)하며 참조응력법에 적용하여 J-적분을 예측하면 계산 결과가 보수적이 된다. 반대로 균열열림면적(Crack Opening Area; COA)을 계산하여 누설률(leakage rate)을 예측할 경우에 기존 식들은 누설률을 낮게 예측하여 비보수적인 결과를 초래할 수 있다. 또한 내압이 작용하는 관통균열 배관의 경우는 해석 조건에 따라 원주방향 응력(hoop stress)이 소성한계압력에 큰 영향을 미칠 수 있으나 기존 식의 경우는 이의 영향을 고려하지 않기 때문에 소성한계압력을 높게 예측하고 이로 인해 J-적분도 비보수적이 된다는 문제도 있다.

따라서 본 논문에서는 탄성완전소성(elastic-perfectly-plastic) 거동을 나타내는 재료에 대한 3차원 유한요소 한계해석(finite element limit analysis)을 수행하여 관통균열이 존재하는 배관에 대한 정확한 소성한계하중식을 새롭게 제시하였다. 균열형상으로 원주방향과 축방향 관통균열을 고려하였으며 하중 조건으로는 단순 하중과 복합 하중이 작용하는 경우를 고려하였다. 그리고 제시된 결과를 기존 식과 비교하였다. 특히 원주방향 관통균열이 존재하는 배관의 경우는 제시된 소성한계하중을 배관 파괴저항실험법에 적용하였다.

2. 유한요소 한계해석

Fig. 1은 원주방향 관통균열이 존재하는 배관과 축방향 관통균열이 존재하는 배관의 기하학적 형상을

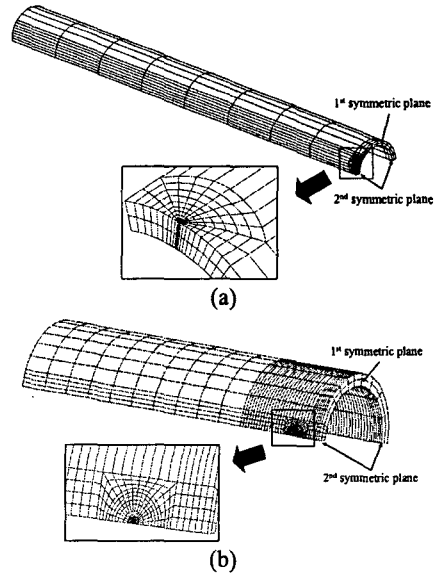


Fig. 2 Typical FE meshes, employed in the present FE analysis for pipes with (a) circumferential through-wall cracks and (b) axial through-wall cracks

나타낸 것이다. Fig. 1에서 R_o , R_m , R_i 는 각각 배관의 외반경(outer radius), 평균반경(mean radius), 내반경(inner radius)이며 t 는 배관의 두께이다. 또한 a 는 균열길이의 1/2이며 원주방향 관통균열의 경우 θ 는 균열각의 1/2을 나타낸다.

본 논문에서는 Fig. 1에 나타난 2가지 균열에 대하여 3차원 유한요소 한계해석을 수행하였다. 유한요소해석을 위해서는 범용 해석프로그램인 ABAQUS⁽⁹⁾를 사용하였다. 재료는 탄성완전소성 조건으로 고려되었으며 소규모 변형을 해석(small strain analysis)을 적용하였다. Fig. 2는 해석에 사용된 대표적인 유한요소모델을 나타낸 것으로 대칭성을 고려하여 1/4만을 모델링하였으며 20절점 등계수 사각주요소(20-nodes isoparametric brick reduced integration element, C3D20R in ABAQUS element library)를 사용하였다. 배관 모델에 사용된 요소의 수는 원주방향 관통균열의 경우는 936개이며 축방향 관통균열의 경우는 1440개이다. 또한 탄성완전소성 해석 시 해석과정에서 발생할 수 있는 수렴문제를 고려하여 ABAQUS내에서 지원하는 수정(modified) RIKS 옵션을 사용하였으며, 따라서 소성한계하중 결과가 해석 결과로부터 쉽게 계산될 수 있다.

하중조건으로 원주방향 관통균열 배관의 경우에는 내압, 인장하중, 굽힘모멘트, 인장하중과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 경우, 내압과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 경우의 5가지가 고려되었으며, 축방향 관통균열 배관의 경우는 내압만이

Table 1 Cases considered in the present FE limit analysis

Crack type	R_m/t	$\rho = a/\sqrt{R_m t}$	θ/π
Axial crack	5, 20	0.5, 1, 2, 3	-
Circumferential crack	5, 20	-	0.125, 0.25, 0.375, 0.5

고려되었다. 내압은 배관 내부에 분포 하중의 형태로 작용시켰으며 배관의 끝단에는 상당 인장하중을 작용시켰다. 또한 균열면에 작용하는 압력의 영향을 고려하기 위해 원주방향과 축방향 관통균열 모두 균열면에 내압의 50%에 해당하는 압력을 작용시켰다.

본 논문에서는 소성한계하중에 영향을 미치는 기하학적 인자의 영향을 고려하기 위해 각 변수를 체계적으로 변화시키며 해석을 수행하였다. 먼저 배관 형상의 영향을 고려하기 위해 모든 경우에 대해 R_m/t 는 5와 20을 고려하였으며 균열 길이도 4가지 경우로 변화시켰다. 본 논문에서 고려된 해석 변수를 정리하여 Table 1에 나타내었다.

유한요소 한계해석의 타당성을 검증하기 위해 저자들은 선행 연구⁽¹⁰⁾에서 내압이 작용하는 균열이 없는 배관에 대한 소성한계압력을 계산하고 이를 이론식과 비교한 바 있으며 지면 관계상 해석결과를 인용하지는 않았으나 유한요소 한계해석결과와 이론식으로 구한 결과가 잘 일치하여 본 논문에서 적용한 해석 방법의 타당성이 입증되었다.

3. 원주방향 관통균열이 존재하는 배관

3.1 내압이 작용하는 경우

Kanninen 등⁽¹¹⁾은 축방향 응력이 원주방향 관통균열 배관의 소성한계압력에 영향을 미친다고 가정하여 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$\frac{1}{2} \left(\frac{p_L R_m}{\sigma_y t} \right) = 1 - \frac{\theta + 2\sin^{-1} \left(\frac{\sin \theta}{2} \right)}{\pi} \quad (1)$$

여기서, p_L 은 소성한계압력이며, σ_y 는 탄성완전소성 재료의 항복응력(yield strength)을 의미한다.

Kastner 등⁽¹²⁾은 다음과 같은 소성한계압력식을 제시한 바 있다.

$$\left(\frac{p_L R_m}{\sigma_y t} \right) = \frac{\pi}{\pi - \theta} \left[1 + \frac{2\sin \theta \left(\cos \theta + \frac{\sin \theta}{\pi - \theta} \right)}{(\pi - \theta) - \frac{2\sin^2 \theta}{(\pi - \theta)} - \frac{\sin 2\theta}{2}} \right] \quad (2)$$

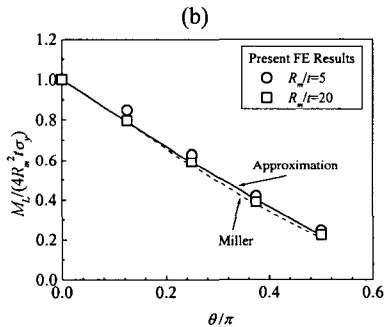
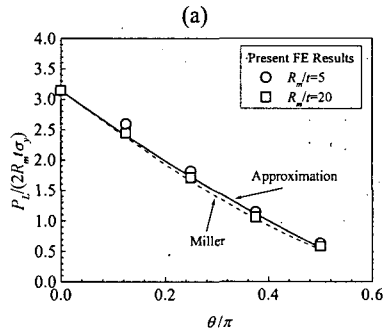
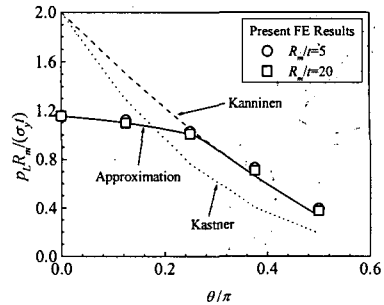


Fig. 3 Comparison of the FE limit load solutions for circumferential through-wall cracked pipes: (a) internal pressure, (b) axial tension and (c) global bending moment

Fig. 3(a)는 내압이 작용하는 원주방향 관통균열 배관에 대한 유한요소해석 결과를 식 (1)과 식 (2)로 구한 결과와 비교한 것으로서, $\theta/\pi \sim 0.25$ 인 경우, 즉 균열 길이가 비교적 긴 경우에는 해석결과가 Kanninen식과 잘 일치하였고, Kastner식은 해석결과에 비해 보수적인 결과를 나타내었다. $\theta/\pi \sim 0.25$ 인 경우에는 식 (1)과 식 (2)가 해석결과를 과대 예측하였다. 따라서 이 영역에서 기존의 식을 적용하면 실제 소성한계압력과 비선형 파괴역학 매개변수를 비보수적으로 예측할 수 있다. 이와 같이 짧은 균열 영역에서 기존의 식이 비보수적인 이유는 두 식이 모두 배관이 축방향 응력에 의해서만 소성붕괴를 일으킨다고 가정하고 있기 때문이다. 하지만 균열이 없고 내압이 작용하는 배관에서는 축방향 응력보다 원주방향 응력

(hoop stress)이 소성붕괴에 더 큰 영향을 미친다. Fig. 3(a)에 나타난 바와 같이 유한요소해석 결과는 짧은 균열의 경우 원주방향 응력이 소성붕괴에 큰 영향을 미친다는 것을 보여주고 있으며 기존의 식은 매우 부정확함을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 유한요소 한계해석 결과를 이용하여 $0 < \theta/\pi < 0.263$ 인 원주방향 관통균열에 대한 소성한계압력식을 다음과 같이 제안하였으며 이는 해석결과와 최대 1% 이내에서 일치하였다.

$$\frac{p_L^{Mises} R_m}{\sigma_y t} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[-0.92 \left(\frac{\theta}{\pi} \right)^2 - 0.28 \left(\frac{\theta}{\pi} \right) + 1 \right] \quad (3)$$

for $0 \leq \frac{\theta}{\pi} < 0.263$

여기서, 상첨자 ‘Mises’는 Mises 항복 조건을 기반으로 한 소성한계하중임을 의미한다.

$\theta/\pi > 0.263$ 인 경우에는 축방향 응력이 소성붕괴에 큰 영향을 미치며, 따라서 기존의 Kanninen식을 $\theta/\pi = 1$ 까지 사용할 수 있다.

3.2 인장하중이 작용하는 경우

가장 일반적으로 적용되고 있는 인장하중이 작용하는 원주방향 관통균열 배관의 소성한계하중식은 Miller⁽⁷⁾가 제시한 것으로 다음과 같다.

$$P_L = 2R_m t \sigma_y \left\{ \pi - \theta - 2 \sin^{-1} \left(\frac{1}{2} \sin \theta \right) \right\} \quad (4)$$

Fig. 3(b)에 식 (4)로 구한 결과를 유한요소 한계해석 결과와 비교하였다. Fig. 3(b)에 나타난 바와 같이 Miller가 제시한 식은 유한요소해석 결과와 잘 일치하였다. 비록 $\theta/\pi > 0.2$ 인 경우 Miller식은 유한요소해석 결과보다 약간 작았으나 실제 적용에서는 무시할 수 있을 것으로 생각된다.

본 논문에서는 유한요소 한계해석 결과를 이용하여 인장하중이 작용하는 원주방향 관통균열 배관의 소성한계하중을 다음과 같이 제시하였으며 이는 해석결과와 최대 4% 이내에서 일치하였다.

$$P_L^{Mises} = 2R_m t \sigma_y \left\{ 2.19 \left(\frac{\theta}{\pi} \right)^2 - 6.27 \left(\frac{\theta}{\pi} \right) + 3.14 \right\} \quad (5)$$

3.3 굽힘모멘트가 작용하는 경우

가장 일반적으로 적용되고 있는 굽힘모멘트가 작용하는 원주방향 관통균열 배관의 소성한계하중식은 Miller⁽⁷⁾가 제시한 것으로 다음과 같다.

$$M_L = 4R_m^2 t \sigma_y \left\{ \cos \left(\frac{\theta}{2} \right) - \frac{1}{2} \sin \theta \right\} \quad (6)$$

Fig. 3(c)에 식 (6)으로 구한 결과를 유한요소 한계해석 결과와 비교하였다. Fig. 3(c)에 나타난 바와 같이 Miller가 제시한 식은 유한요소해석 결과와 잘 일치하였으며 전반적인 경향은 인장하중이 작용하는 경우와 일치하였다.

본 논문에서는 유한요소 한계해석 결과를 이용하여 굽힘모멘트가 작용하는 원주방향 관통균열 배관의 소성한계하중을 다음과 같이 제시하였으며 이는 해석결과와 최대 3% 이내에서 일치하였다.

$$M_L^{Mises} = 4R_m^2 t \sigma_y \left\{ 0.35 \left(\frac{\theta}{\pi} \right)^2 - 1.74 \left(\frac{\theta}{\pi} \right) + 1 \right\} \quad (7)$$

3.4 인장하중과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 경우
응력 평형과 Tresca 항복 조건을 이용하여 도출된 인장하중과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 경우의 항복 궤적(yield locus)은 다음과 같다.⁽⁷⁾

$$m = -\frac{1}{2} \sin \theta + \cos \left(\frac{n\pi + \theta}{2} \right) \quad (8)$$

여기서, 무차원화된 굽힘모멘트 m 과 인장하중 n 은 다음과 같이 정의된다.

$$m = \frac{M}{4R_m^2 t \sigma_y}; \quad n = \frac{P}{2\pi R_m t \sigma_y} \quad (9)$$

본 논문에서는 Mises 항복 조건을 기반으로 인장하중과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 경우의 항복 궤적을 제시하기 위해 다음과 같은 방법을 사용하였다. 먼저 Mises 항복 조건을 이용하여 순수 인장하중이 작용하는 경우와 굽힘모멘트가 작용하는 경우에 대해 제시한 소성한계하중인 식 (5)와 식 (7)을 이용하여 식 (8)을 재정의하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{m} \cdot m_L^{Tresca} = -\frac{1}{2} \sin \theta + \cos \left(\frac{\hat{n} \cdot n_L^{Tresca} \pi + \theta}{2} \right) \quad (10)$$

여기서,

$$\hat{n} = \frac{n}{n_L^{Mises}}, \quad \hat{m} = \frac{m}{m_L^{Mises}};$$

$$n_L^{Tresca} = \frac{P_L^{Tresca}}{2\pi R_m t \sigma_y}, \quad m_L^{Tresca} = \frac{M_L^{Tresca}}{4R_m^2 t \sigma_y}; \quad (11)$$

$$n_L^{Mises} = \frac{P_L^{Mises}}{2\pi R_m t \sigma_y}, \quad m_L^{Mises} = \frac{M_L^{Mises}}{4R_m^2 t \sigma_y}$$

식 (10)과 같이 항복 궤적을 재정의하면 $\hat{n} - \hat{m}$

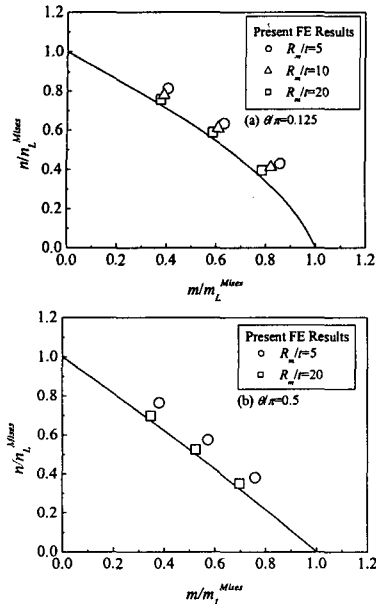


Fig. 4 Yield locus for circumferential through-wall cracked pipes under combined tension and bending

평면에서 항복 궤적과 각 축과의 교점은 항상 1이 되며, 또한 식 (10)은 Mises 항복 조건에 입각하여 인장하중과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 경우의 소성한계하중을 제시한다는 장점이 있다.

Fig. 4에 본 논문에서 새롭게 제시한 항복 궤적인 식 (10)으로 구한 결과와 유한요소 한계해석으로 구한 결과를 비교하였다. 균열 길이 θ/π 는 0.125와 0.5의 두 가지 경우를 고려하였으며 R_m/t 도 5와 20의 두 가지 경우를 고려하였다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 R_m/t 가 20인 경우는 제시된 항복 궤적과 유한요소 한계해석 결과가 잘 일치하였다. 그러나 R_m/t 가 5인 경우는 항복 궤적과 어느 정도 차이를 보였으며 차이의 정도는 균열 길이와는 무관하였다. 이와 같이 R_m/t 가 5인 경우 제시된 항복 궤적과 차이를 보이는 이유는 항복 궤적 유도 시 사용된 기존 항복 궤적이 박판(thin-wall) 가정으로 도출되었기 때문인 것으로 생각된다. 이를 보이기 위해서 R_m/t 가 10이고 θ/π 가 0.125인 경우에 대해 유한요소 한계해석을 추가적으로 수행하였으며 그 결과를 Fig. 4(a)에 함께 나타내었다. 그럼에 나타난 바와 같이 배관의 두께가 증가할수록 본 논문에서 제시한 항복 궤적과 유한요소 한계해석 결과의 차이가 일정하게 커졌다. 그러나 이러한 R_m/t 의 영향은 단순 하중인 경우(Fig. 3 참고)에는 매우 적었다.

3.5 내압과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 경우 복합하중에 대해 제시된 기존의 항복 궤적들은 모두 균일 분포 응력(membrane stress)과 굽힘 응력만을

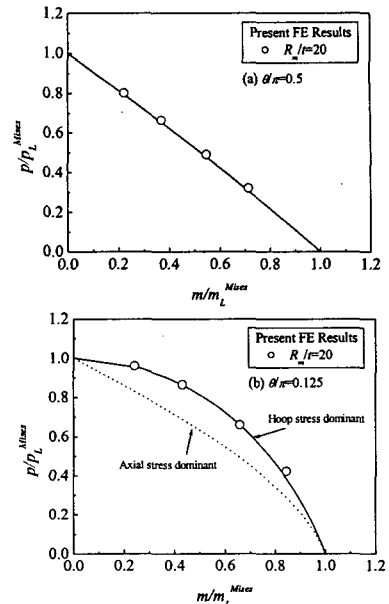


Fig. 5 Yield locus for circumferential through-wall cracked pipes under combined internal pressure and bending

고려하므로 인장하중과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 경우에 적용가능하다. 반면에 기존의 항복 궤적은 원주방향 응력의 영향을 고려할 수 없기 때문에 내압에 의한 원주방향 응력의 영향이 소성 붕괴 거동에 지배적일 경우 적용할 수 없다. 따라서 내압과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 경우, 원주방향 응력이 항복 궤적에 미치는 영향을 정량적으로 고려하기 위해서는 상세한 유한요소 한계해석이 수행되어야 한다.

전술한 바와 같이 만약 소성붕괴가 축방향 응력에 의해 발생한다면[균열 길이가 긴 경우, Fig. 3(a) 참고] 식 (10)에 제시된 인장하중과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 경우에 대한 항복 궤적이 내압과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 경우에도 적용될 수 있다. 이때에는 내압을 등가 인장하중(equivalent axial tension)으로 환산하여 적용된다. Fig 5(a)에 축방향 응력이 지배적인 경우에 대해 식 (10)으로 구한 항복 궤적과 유한요소 한계해석 결과를 비교하였으며 두 결과는 잘 일치하였다.

반면, 내압에 의한 원주방향 응력이 소성붕괴에 지배적인 영향을 미치는 경우에는 내압과 굽힘모멘트의 상호영향을 고려해야 한다. 내압과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 경우 해석적으로 항복 궤적을 유도하는 것은 어려우며 본 논문에서는 다음과 같이 항복 궤적을 가정하였다.

$$\Phi = A(\hat{p} - B)^2 + C(\hat{m} - D)^2 - 1 = 0 \quad (12)$$

여기서, \hat{p} 은 $\hat{p} = p/p_L^{Mises}$ [p_L^{Mises} 는 식 (3) 참고] 이며, \hat{m} 은 식 (11)에 정의되어 있다. 식 (12)는 항복 궤적으로 적용될 수 있는 형태(admissible form)이다.

식 (12)의 계수 A~D는 다음과 같은 세가지 경계조건을 적용하여 구할 수 있다.

$$\hat{p} = 1, \quad \frac{\partial \hat{p}}{\partial \hat{m}} = 0 \quad @ \hat{m} = 0; \quad \hat{m} = 1 \quad @ \hat{p} = 0 \quad (13)$$

마지막 경계조건으로 식 (10)과 식 (12)에서 순수 굽힘모멘트가 작용하는 경우 ($\hat{p} = 0$)의 기울기 $\partial \hat{p} / \partial \hat{m}$ 이 같아야 한다. 이와 같이 구한 항복 궤적을 유한요소 한계해석 결과와 비교하여 Fig. 5(b)에 나타내었다. 또한 비교를 위해 축방향 응력이 지배적인 경우에 대한 항복 궤적[식 (10)]도 함께 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 원주방향 응력이 지배적인 경우에 대해 본 논문에서 제시한 항복 궤적은 유한요소 한계해석 결과와 잘 일치하였으나 축방향 응력이 지배적인 경우에 대한 항복 궤적은 매우 다른 결과를 제시하였다. 따라서 내압과 굽힘모멘트가 작용하는 경우, 원주방향 응력이 소성붕괴에 지배적인 영향을 미친다면 식 (12)와 같은 항복 궤적이 적용되어야 한다.

4. 축방향 관통균열이 존재하는 배관

4.1 내압이 작용하는 경우

축방향 관통균열의 경우 무차원화된 균열 길이는 다음과 같이 정의된다.

$$\rho = \frac{a}{\sqrt{R_m t}} \quad (14)$$

Folias⁽¹³⁾는 다음과 같은 축방향 관통균열 배관의 소성한계압력식을 제시하였다.

$$\frac{p_L R_m}{\sigma_y t} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1.05\rho^2}} \quad (15)$$

또한 Erdogan⁽¹⁴⁾은 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$\frac{p_L R_m}{\sigma_y t} = \frac{1}{0.614 + 0.87542\rho + 0.386 \exp(-2.275\rho)} \quad (16)$$

Fig. 6은 유한요소 한계해석 결과와 식 (15) 및 식 (16)의 결과를 비교한 것으로, $\rho > 0.5$ 인 경우에는 잘 일치하였으나, $0 < \rho < 0.5$ 인 경우에는 차이를 나타내었다. 이는 균열이 없는 경우($\rho \rightarrow 0$), 식 (15)와

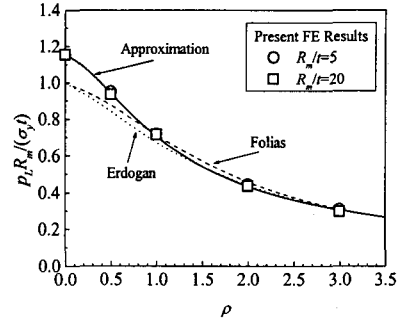


Fig. 6 Comparison of the FE limit load solutions for axial through-wall cracked pipes under internal pressure

식 (16)이 Mises 해가 아닌 Tresca 해로 수렴하기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 유한요소 한계해석 결과를 이용하여 Mises 항복 조건을 이용한 축방향 관통균열 배관의 소성한계압력식을 다음과 같이 제시하였으며 이는 해석결과와 최대 3% 이내에서 일치하였다.

$$\frac{p_L R_m}{\sigma_y t} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{1}{\sqrt{1 + 0.34\rho + 1.34\rho^2}} \quad (17)$$

축방향 관통균열의 경우, 본 논문에서는 내압이 작용하는 경우에 대해서만 소성한계하중식을 제시하였다. 그러나 일반적으로 배관에는 내압과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 경우처럼 복합하중이 작용한다. 그러므로 원주방향 관통균열의 경우와 같이 복합하중에 대한 항복 궤적이 제시되어야 한다. 그러나 축방향 관통균열의 경우에는 굽힘모멘트나 축하중에 의한 축방향 응력이 소성붕괴에 거의 영향을 미치지 않는다. 따라서 식 (17)에 제시된 소성한계압력식이 내압과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 경우에도 적용될 수 있다.

5. 토 론

본 논문에서는 3차원 유한요소 한계해석을 수행하여 원주방향 및 축방향 관통균열 배관에 대한 소성한계하중식을 제시하였다. 본 논문에서 제시된 식은 유한요소해석을 통해 도출되었기 때문에 기존 식에 비해 정확하며, 따라서 배관의 소성붕괴 해석에 적용될 수 있다. 또한 참조응력 개념으로 비선형 파괴역학 매개변수를 구하기 위해서는 먼저 소성한계하중을 이용하여 참조응력을 정확하게 정의하는 것이 매우 중요하기 때문에 본 논문의 결과는 참조응력 개념을 기반으로 비선형 파괴역학 매개변수인 J-적분과 C*-적분을 구하기 위해

서도 적용될 수 있다.

뿐만 아니라 본 논문에서 제시된 소성한계하중 식은 실패관 실험으로 파괴저항곡선을 구하는 경우에도 적용될 수 있으며 특히 LBB 해석 시 중요한 원주방향 관통균열 배관에 대한 실험 시 매우 유용하다.

Fig. 1(a)와 같이 순수 굽힘모멘트가 작용하는 원주방향 관통균열 배관을 고려하면 일반적인 파괴저항곡선 실험법에서 J -적분은 하중(P)과 하중선 변위(Δ)를 이용하여 다음과 같이 구한다.⁽¹⁵⁾

$$J = J_{el} + J_{pl} \tag{18}$$

여기서, J -적분의 탄성 성분인 J_{el} 은 응력확대계수 K 를 이용하여 다음과 같이 구한다.

$$J_{el} = \frac{(1-\nu^2)K^2}{E} \tag{19}$$

여기서, ν 는 포아송의 비이다.

또한 J -적분의 소성 성분인 J_{pl} 은 다음과 같이 구한다.

$$J_{pl} = \int_0^{A_{pl}} \eta_{pl} P dA_{pl} + R_m \int_{\theta_0}^{\theta} \gamma J_{pl} d\theta \tag{20}$$

여기서,

$$\eta_{pl} = \eta_{pl}(\theta) = -\frac{h'(\theta)}{2R_m t h(\theta)} ; \quad \gamma = \gamma(\theta) = \frac{h''(\theta)}{R_m h'(\theta)}$$

$$h(\theta) = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) - \frac{1}{2}\sin\theta ; \quad h'(\theta) = \frac{dh(\theta)}{d\theta} ; \quad h''(\theta) = \frac{d^2h(\theta)}{d\theta^2} \tag{21}$$

식 (20)과 식 (21)에서 θ 와 θ_0 는 각각 균열각의 1/2과 그 초기값을 의미하며, a 는 균열 길이의 1/2로 $a=R_m\theta$ 이다.

여기서 실험보정계수인 η_{pl} 과 γ 는 소성한계하중을 이용하여 다음과 같이 정의된다.^(15,16)

$$\eta_{pl} = -\frac{\partial P_L}{\partial A} \frac{1}{P_L} ; \quad \gamma = -\frac{\partial^2 P_L / \partial a^2}{\partial P_L / \partial a} \tag{22}$$

여기서, A 는 균열면의 면적($A=2R_m t \theta$)이다.

식 (22)에서도 알 수 있는 바와 같이 실험보정계수의 정확성은 소성한계하중(P_L)의 정확성에 의존한다. 따라서 본 논문에서 제시된 소성한계하중식은 실험보정계수를 결정하기 위한 식 (22)에 적용될 수

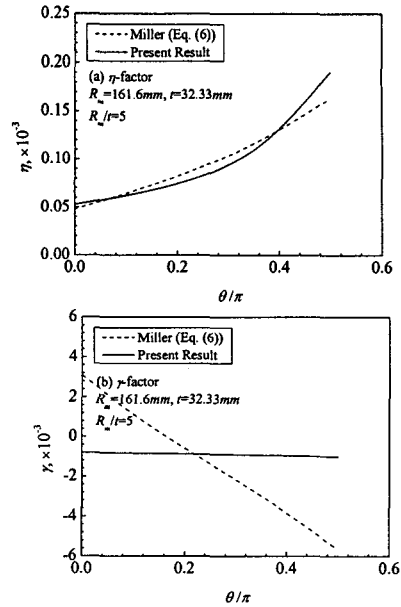


Fig. 7 Comparison of η_{pl} and γ based on the proposed limit load solution with those based on existing limit load solution

있다. 예로 굽힘모멘트가 작용하는 원주방향 관통균열 배관의 경우, 본 논문에서 제시한 소성한계하중인 식 (7)을 식 (22)에 적용하면 다음과 같이 실험보정계수를 구할 수 있다.

$$\eta_{pl} = -\frac{\partial M_L^{Mises}}{\partial A} \frac{1}{M_L^{Mises}} = -\frac{1}{2R_m t} \frac{0.072\theta - 0.55}{0.036\theta^2 - 0.55\theta + 1}$$

$$\gamma = \frac{\partial^2 M_L^{Mises} / \partial a^2}{\partial M_L^{Mises} / \partial a} = \frac{1}{R_m} \frac{0.072}{0.072\theta - 0.55} \tag{23}$$

식 (23)으로 구한 실험보정계수를 기존의 소성한계하중식인 식 (6)으로 구한 결과와 비교하여 Fig. 7에 나타내었다.

6. 결론

본 논문에서는 3차원 유한요소 한계해석을 수행하여 원주방향 관통균열 배관과 축방향 관통균열 배관에 대한 소성한계하중식을 새롭게 제시하였다. 원주방향 관통균열의 경우에는 내압, 인장하중, 굽힘모멘트, 인장하중과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 경우, 내압과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 경우를 하중조건으로 고려하였으며, 축방향 관통균열의 경우에는 내압만을 고려하였다. 내압이 작용하는 경우, 기존의 식은 원주방향과 축방향 관통균열 모두 짧은 균열에서 유한요소 해석결과와

큰 차이를 나타냈다. 또한 복합하중이 작용하는 경우에 대해서도 Mises 항복 조건에 입각한 항복 궤적을 새롭게 제시하였으며 이 경우에는 배관의 두께가 유한요소 한계해석 결과에 영향을 미쳤다. 그러나 단순 하중의 경우에는 두께의 영향이 매우 적었다.

본 논문에서 제시된 소성한계하중식은 유한요소 해석에 기초한 식이므로 비교적 정확한 식이라 할 수 있으며, 따라서 관통균열 배관의 소성붕괴 평가와 비선형 파괴역학 매개변수 예측에 유용하게 적용될 수 있다. 또한 실제 배관에 대한 파괴저항 곡선 실험법에서 실험보정계수를 구하기 위해서도 적용될 수 있다.

후 기

이 논문은 2005년도 성균관대학교의 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- (1) Wilkowski, G. M., Ahmad, J., Barnes, C., Broek, D., Kramer, G., Landow, M., Marschall, C., Maxey, W., Nakagaki, M., Scott, P., Papaspyropoulos, V., Pasupathi, V. and Popelar, C., 1985, "Degraded Piping Program Phase-II," NUREG/CR-4082, USNRC.
- (2) Hopper, A., Wilkowski, G.M., Scott, P., Olson, R., Rudland, D., Kilinski, T., Mohan, R., Ghadiali, N. and Paul, D., 1997, "The Second International Piping Integrity Research Group (IPIRG-2) Program - Final Report," NUREG/CR-6452, USNRC.
- (3) "ASME Boiler and Pressure Vessel Code," Section XI, 1992.
- (4) Ainsworth, R. A., 1984, "The Assessment of Defects in Structures of Strain Hardening Materials," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 19, pp. 633~642.
- (5) "R6: Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects," Revision 4, British Energy Generation Ltd., 2001.
- (6) Huh, N. S., Kim, Y. J., and Kim, Y. J., 2002, "An Engineering Method for Non-Linear Fracture Mechanics Analysis of Circumferential Through-Wall Cracked Pipes Under Internal Pressure," *Transaction of the KSME (A)*, Vol. 26, No. 6, pp. 1099~1106.
- (7) Miller, A. G., 1988, "Review of Limit Loads of Structures Containing Defects," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 32, pp.191~327.
- (8) "SINTAP Final Procedure," Brite Euram Project, BE95-1426, 1999.
- (9) "User's Manual," ABAQUS Version 6.4-1, ABAQUS, Inc., 2003.
- (10) Shim, D. J., Huh, N. S., Kim, Y. J. and Kim, Y. J., 2003, "Plastic Limit Pressure Solutions for Cracked Pipes Using 3-D Finite Element Method," *Transaction of the KSME (A)*, Vol. 27, No. 1, pp. 26~33.
- (11) Kanninen, M. F., Zahoor, A., Wilkowski, G. M., Abou-Sayed, I., Marschall, C., Broek, D., Sampath, S., Rhee, H. and Ahmad, J., 1982, "Instability Predictions for Circumferentially Cracked Type 304 Stainless Steel Pipes Under Dynamic Loading," EPRI NP-2347, Vols. 1 and 2, EPRI.
- (12) Kastner, W., Roehrich, E., Schmitt, W. and Steinbuch, R., 1981, "Critical Crack Sizes in Ductile Tearing," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 9, pp. 197~219.
- (13) Folias, E. S., 1975, "On the Fracture of Nuclear Reactor Tubes," SMiRT III, Paper C4/5, London.
- (14) Erdogan, F., 1976, "Ductile Failure Theories for Pressurised Pipes and Containers," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 4, pp. 253~283.
- (15) Chattopadhyay, J., Dutta, B. K. and Kushwaha, H. S., 2001, "Derivation of γ Parameter from Limit Load Expression of Cracked Component to Evaluate J -R Curve," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 78, pp. 401~427.
- (16) Roos, E., Eisele, U. and Silcher, H., 1986, "A Procedure for the Experimental Assessment of the J -integral by Means of Specimens of Different Geometries," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 23, pp. 81~93.