

축방향 표면균열이 존재하고 내압을 받는 직관의 J 예측 방법

오창식* · 송태광* · 김운재 †

J Estimations For Axial Surface Cracked Pipes Under Pressure

Chang-Sik Oh, Tae-Kwang Song and Yun-Jae Kim

Key Words : Axial surface crack(축방향 표면균열), Finite element analysis(유한요소해석), Limit pressure(한계압력), J estimation(J 예측), reference stress approach(참조응력법)

Abstract

In the present paper, limit pressures for axial surface cracked pipe are proposed, and a reference stress based J estimation method is also provided based on the proposed limit pressure solutions. Employed cracks are assumed to be constant-depth, internal surface cracks, and wide ranges of variables are considered.

제시하였다.

1. 서 론

균열이 존재하는 배관의 건전성 평가는 발전소의 안전성과 효율성에 있어 중요한 문제이다¹⁻⁶. 그 중 축방향 표면균열의 건전성 평가는 현재까지 많은 연구가 진행되어 왔다. 균열이 존재하는 배관의 건전성을 평가할 수 있는 방법은 한계압력이다. 이 방법은 결함이 존재하는 배관이 지탱할 수 있는 최대 압력을 예측함으로써 배관의 건전성을 가장 쉽게 예측할 수 있다. 또한 이 한계압력은 참조응력법과 같은 비선형 파괴역학적 평가에 바로 이용될 수 있기 때문에, 매우 유용하다. 내압을 받는 배관은 원주방향 응력이 가장 크게 작용하므로, 축방향 표면균열이 있는 배관은 다른 방향의 균열보다 압력에 의한 위험이 크다. 따라서 축방향 표면균열이 존재하는 배관의 한계하중 평가는 보다 우선되어야 한다. 건전성평가의 또다른 방법은 탄소성 파괴역학 변수인 J 를 평가하는 것이다. 이 방법은 한계하중보다 더욱 정확하게 예측할 수 있다. 그러나 이 방법에 대한 연구는 한계하중 연구에 비해 매우 미비하다. 따라서 본 논문에서는 축방향 사각 표면균열이 직관의 한계하중에 미치는 영향을 체계적으로 정량화하였으며, 이를 이용하여 참조응력법에 기반한 정확한 J 예측방법을

2. 유한요소 한계해석

2.1 유한요소 모델

본 논문에 사용된 형상은 Fig. 1에 나타나 있다. 내압 P 를 받고 있는 직관의 내부에 축방향으로 사각 표면균열이 존재하는 형상이다. 직관의 평균 반경은 r_m 으로 나타내었으며, 두께는 t 이다. 크랙의 형상은 사각이며, 깊이 a 와 길이 $2c$ 의 크기를 가진다. 여기서 사용된 무차원변수는 r_m/t , a/t , ρ 이다. r_m/t 는 평균반경과 두께의 비이고, a/t 는 직관두께와 크랙깊이의 비이며, ρ 는 크랙길이를 나타내며 다음과 같이 정의된다.

$$\rho = \frac{c}{\sqrt{r_m t}} \quad (1)$$

논문에 사용된 r_m/t 의 범위는 5부터 20까지이며, a/t 는 0부터 1까지이다. $a/t=0$ 인 경우는 크랙이 존재하지 않는 경우이며, $a/t=1$ 인 경우는 관통균열인 경우이다. 또한 ρ 는 16까지 고려되었는데, 기존의 연구⁷에서 고려된 길이인 $\rho=3$ 보다 매우 긴 경우까지 고려하였다. 따라서 본문에 고려된 형상은 직관에 발생할 수 있는 표면균열 형상을 광범위하게 다루었음을 알 수 있다. Fig. 2는 해석에 사용된 유한요소 요소망을 보여준다. 균열을 모사하기 위해 collapsed crack tip 요소를 사용하였으며,

† 고려대학교 기계공학과

E-mail : kimy0308@korea.ac.kr

TEL : (02)3290-3372 FAX : (02)926-9290

* 고려대학교 기계공학과

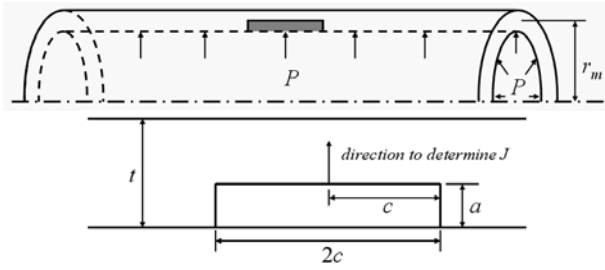


Fig. 1 Schematic illustration of a straight pipe with an axial part-through crack.

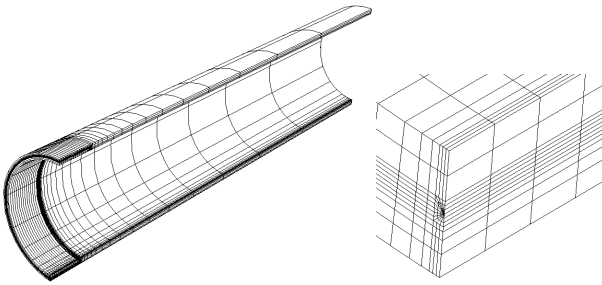


Fig. 2 Typical FE mesh for the pipe with the constant-depth, internal axial part-through surface crack.

균열주위의 요소를 조밀하게 사용하고 균열에서 벗어나수록 점차 크게 구성하였다. 해석은 상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS⁸를 사용하였다.

2.2 K 검증

요소망의 타당성을 검증하기 위해, 탄성해석을 수행하여 기존에 알려진 해와 비교하였다. 사각균열의 경우 K에 대한 알려진 식이 존재하지 않기 때문에, 사각표면균열의 길이(ρ)가 매우 길어지면 축방향으로 관통된 표면균열과 같다는 가정을 하였다. $a/c=0.01$ 인 경우에 대해 사각표면균열이 존재하는 직관의 K를 유한요소해석결과로부터 구하였으며, 축방향으로 관통된 표면균열이 존재하는 직관에 대해서도 K를 유한요소 해석으로부터 구하였다. 또한 아래의 몇몇 기존식과 비교하였다. 길이방향으로 관통된 표면균열이 존재하는 직관의 K_I 에 대해 API⁶는 다음과 같이 제시하고 있다.

$$K_I = \frac{pr_0^2}{r_0^2 - r_i^2} \left[2G_0 - 2G_1 \left(\frac{a}{r_i} \right) + 3G_2 \left(\frac{a}{r_i} \right)^2 - 4G_4 \left(\frac{a}{r_i} \right)^3 + 5G_5 \left(\frac{a}{r_i} \right)^4 \right] \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

G_0 부터 G_5 까지의 변수는 r_m/t 와 a/t 에 따라 각각 상수로 주어지며, 자세한 값은 지면상 생략하였다. 위의 경우에 대해 Zahoor³은 다음과 같이 제시하였다.

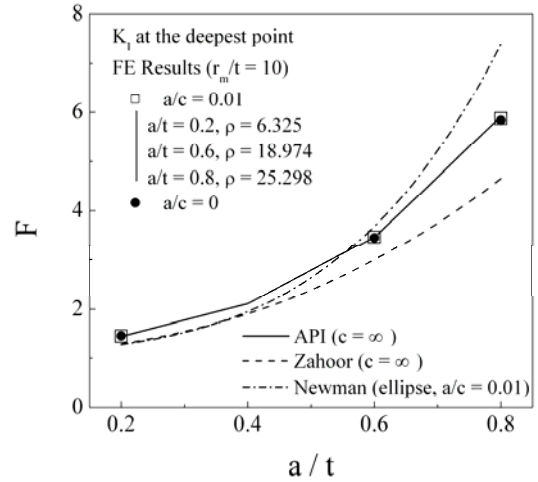


Fig. 3 K validation of FE model with very long length of crack.

$$K_I = \frac{pr_0^2}{r_0^2 - r_i^2} \sqrt{\pi a} F \quad (3)$$

$$F = 1.1 + A \left[4.951 \left(\frac{a}{t} \right)^2 + 1.092 \left(\frac{a}{t} \right)^4 \right]$$

여기서 A는 r_m/t 의 함수로 주어지며, 지면상 생략하였다. 반면, Newman⁹은 반타원 균열형상에 대해 다음과 같이 K_I 식을 제시하였다.

$$K_I = \frac{pr_i}{t} \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} F \quad (4)$$

$$F = 0.97 \left[M_1 + M_2 \left(\frac{a}{t} \right)^2 + M_3 \left(\frac{a}{t} \right)^4 \right] g f \phi f_c$$

M_1, M_2, M_3 는 a/c 의 함수이고 g, f_c 는 a/t 의 함수이며, $f\phi$ 는 a/c 의 함수이다. 자세한 내용은 지면상 생략하였다.

Fig. 3는 위에 제시된 기존식과 유한요소 해석결과를 비교한 그림이다. ρ 가 매우 긴 사각 표면균열의 해석결과와 축방향으로 관통된 표면균열의 해석결과가 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 또한 이 해석결과들은 API에서 제시한 식(2)와 잘 일치한다. Zahoor의 식(3)은 해석결과보다 다소 낮으며, a/t 가 증가할수록 차이가 커진다. Newman의 식(4)는 a/t 가 작을 때에는 식(3)과 비슷하지만 $a/t > 0.4$ 이면 급격히 증가하는데, 이것은 식(4)가 반타원형 표면균열에 대한 식이기 때문이다. 따라

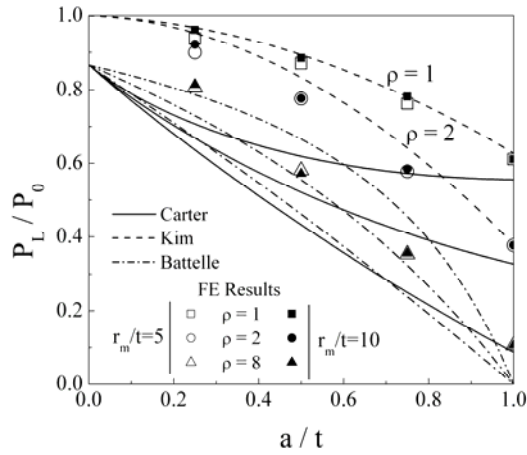


Fig. 4 Comparison of FE results of axial surface cracked pipes with existing solutions.

서 위 결과로부터 유한요소 해석에 사용된 요소망이 타당함을 알 수 있다.

3. 탄소성 J 예측 방법

3.1 한계압력

내압이 작용하는 직관 내부에 표면균열이 있는 경우의 한계내압은 문헌에서 몇몇 찾아볼 수 있다. Carter⁹가 제시한 식은 다음과 같다.

$$P_L = \sigma_0 \left[\frac{a}{(r_m - t/2)\psi} + \left(\frac{r_m - t/2}{r_m - t/2 + a} \right) \ln \left(\frac{r_m + t/2}{r_m - t/2 + a} \right) \right] \quad (5)$$

$$\psi = \left[1 + \frac{1.61c^2}{(r_m - t/2)a} \right]^{0.5}$$

Battelle¹⁰은 제시한 식은 다음과 같다.

$$P_L = \frac{1 - a/t}{1 - \frac{a/t}{\sqrt{1 + 1.05\rho^2}}} \sigma_0 \frac{t}{r_m} \quad (6)$$

최근의 Kim⁷은 $\rho \leq 3$ 인 경우에 대해 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$P_L = \frac{\sqrt{t}}{3} \left[1 + D_1 \left(\frac{a}{t} \right) + D_2 \left(\frac{a}{t} \right)^2 \right] \sigma_0 \frac{t}{r_m} \quad (7)$$

$$D_1 = -0.1429 + 0.134\rho - 0.043\rho^2$$

$$D_2 = 0.1587 - 0.5928\rho + 0.1131\rho^2$$

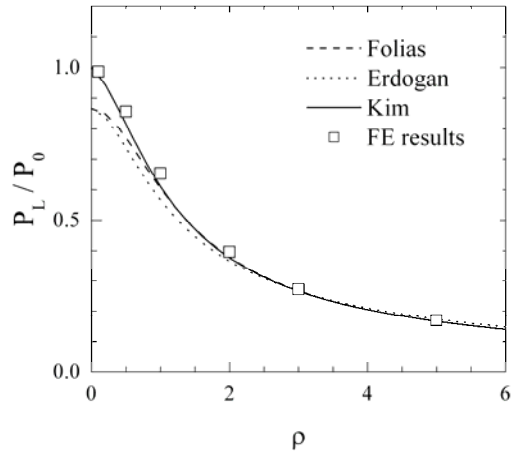


Fig. 5 Comparison of FE results of axial through-wall cracked pipes with existing solutions.

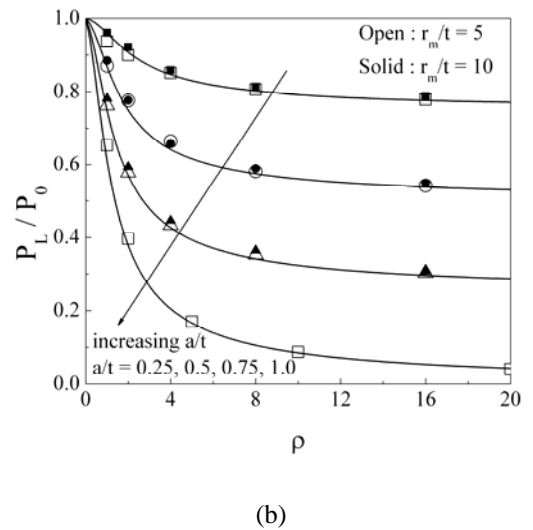
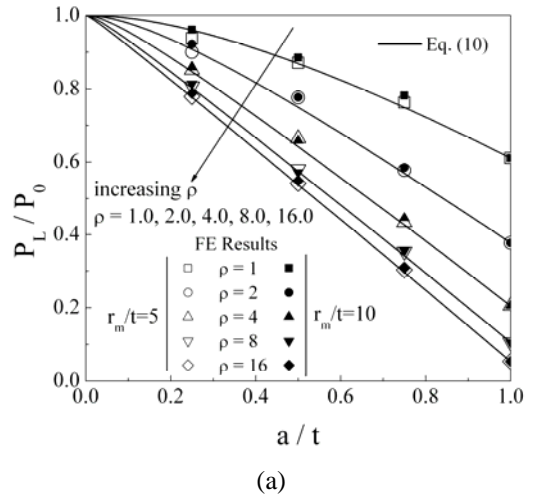


Fig. 6 Comparison of FE results of axial through-wall cracked pipes with proposed solution.

위의 식들과 비교하기 위해, 탄성-완전소성 재료를 사용하여 유한요소 한계해석을 수행하였다.

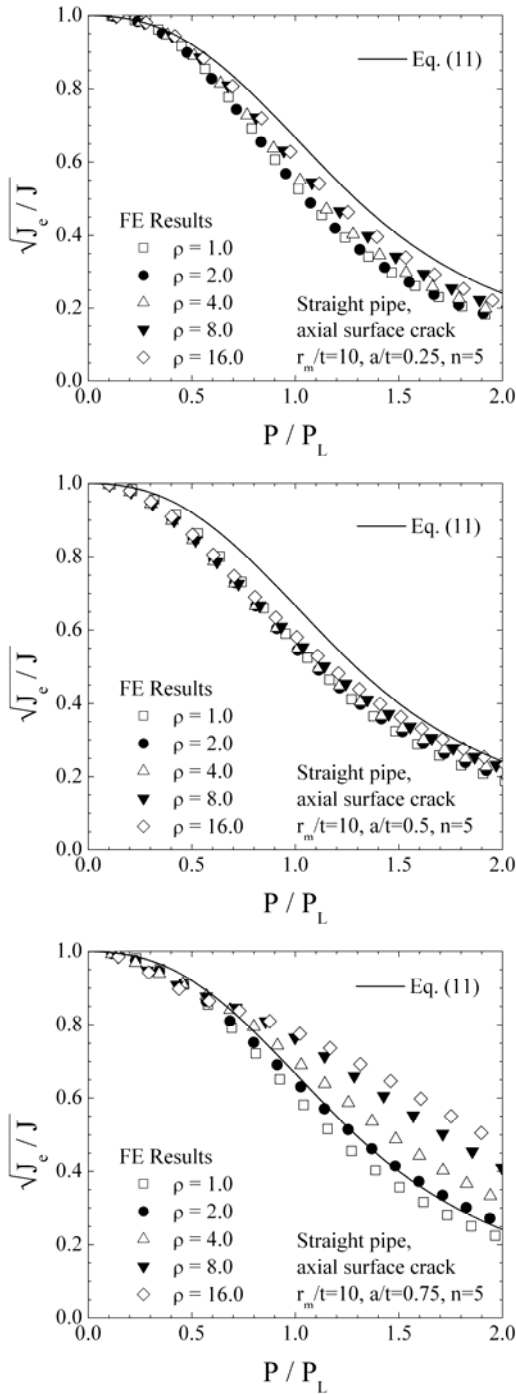


Fig. 7 Comparison of reference stress based J estimates with FE results for axial part-through surface cracked pipes under internal pressure: results for $n=5$.

Fig. 4는 위에 제시된 기존식들과 유한요소 해석결과를 비교하여 나타낸 그림이다. 식 (5)와 (6)은 Tresca 항복조건을 사용하였기 때문에 Mises 항복조건의 유한요소 해석결과 보다 작은 값을 나타낸다. 반면 식 (7)은 대체적으로 잘 일치하나 ρ 가 3보다 큰 경우에는 사용할 수가 없다. 따라서 본

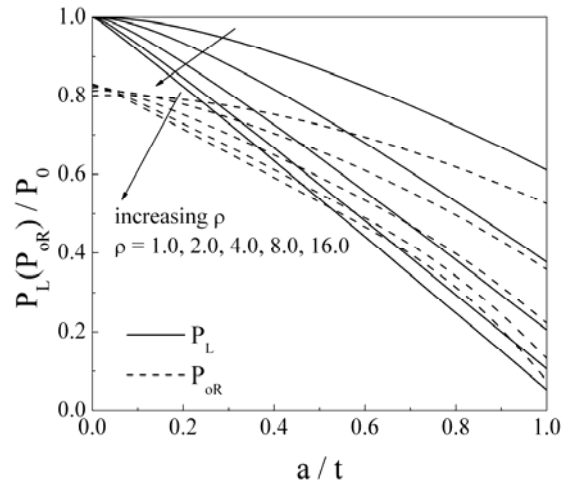


Fig. 8 comparison of P_{or} with the proposed limit pressure.

논문에서는 다음과 같은 경계조건을 살펴보았다. 한계압력은 $a/t=0$ 일 때 결함이 없는 직관의 한계압력과 같아져야하고, $a/t=1$ 일 때에는 관통균열이 존재하는 직관의 한계압력과 같아져야한다. Fig. 5는 관통균열이 존재하는 직관의 한계압력결과를 나타낸 것이며, 다음과 같은 식으로 표현하였다.

$$\frac{P_L}{P_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + 0.34\rho + 1.34\rho^2}} \quad (8)$$

여기서, P_0 는 결함이 없는 직관의 한계압력이며, 다음과 같다.

$$P_0 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 \frac{t}{r_m} \quad (9)$$

본 논문에서는 식 (8)을 이용하여 내압을 받는 직관 내부에 사각 표면균열이 있을 때의 한계압력을 다음과 같이 제안하였다.

$$\frac{P_L}{P_0} = \frac{a/t}{\sqrt{1 + 0.34\left(\frac{a}{t}\right)\rho + 1.34\left(\frac{a}{t}\right)\rho^2}} + \left(1 - \frac{a}{t}\right) \quad (10)$$

식 (10)과 유한요소 해석결과를 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. $a/t=0$ 부터 1 까지, ρ 가 매우 긴 경우에도 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

3.2 참조응력을 이용한 J 예측

참조응력법에서 J 예측방법은 다음과 같이 주어진다¹².

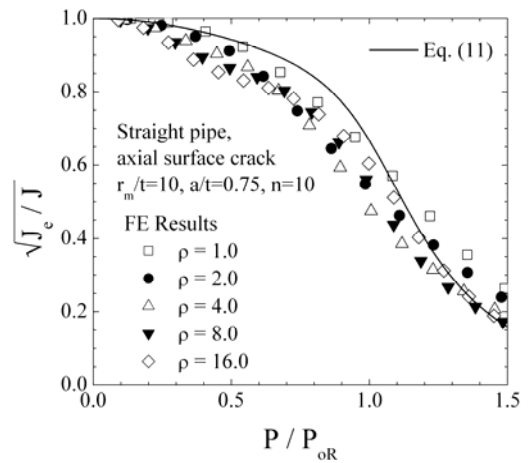
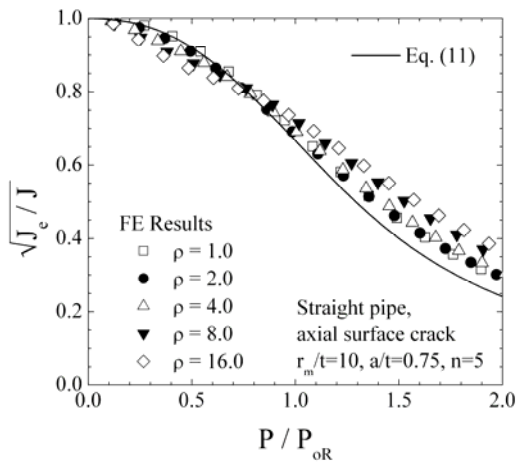
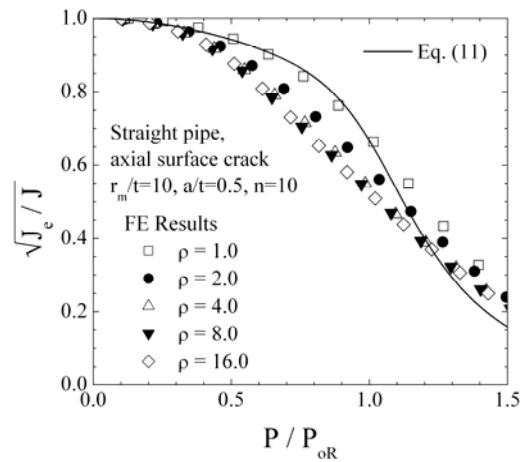
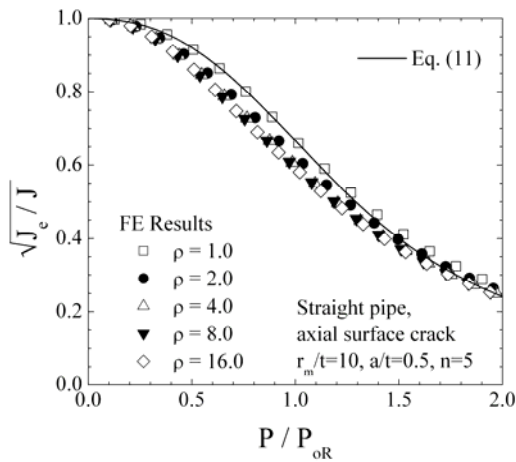
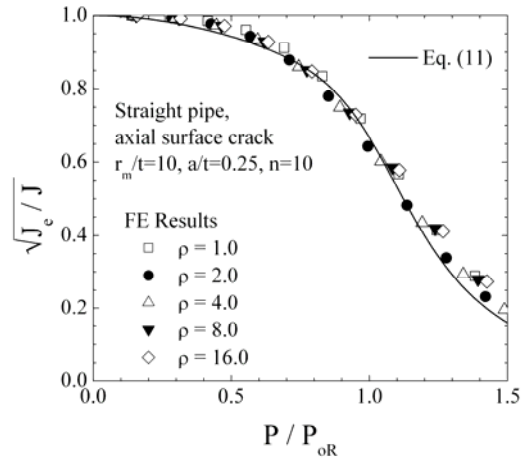
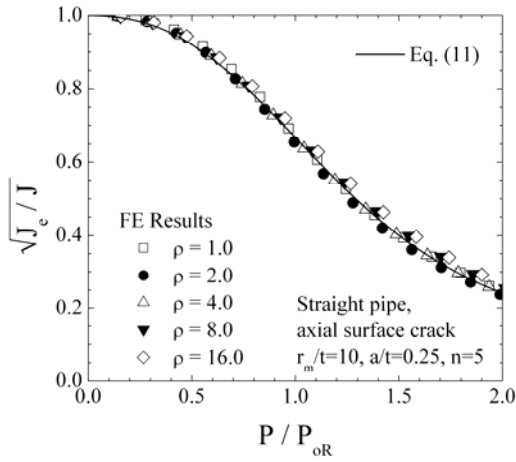


Fig. 9 Comparison of reference stress based J estimates with FE results for axial part-through surface cracked pipes under internal pressure: results for $n=5$.

Fig. 10 Comparison of reference stress based J estimates with FE results for axial part-through surface cracked pipes under internal pressure: results for $n=10$.

$$\frac{J}{J_e} = \frac{E\varepsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} + \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{ref}}{\sigma_o} \right)^2 \frac{\sigma_{ref}}{E\varepsilon_{ref}} \quad (11)$$

여기서 σ_{ref} 는 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma_{ref} = \frac{P}{P_{ref}} \sigma_o \quad (12)$$

P_{ref} 는 참조하중이며, ε_{ref} 는 $\sigma = \sigma_{ref}$ 일때의 변형률이다. J_e 는 탄성에 기초한 J 값이며 다음과 같이 계

산되어 진다.

$$J_e = \frac{K^2}{E'} \quad (13)$$

K 는 응력확대 계수이며, E' 은 평면응력 조건에서 $E'=E$ 이며, 평면변형률 조건에서 $E'=E/(1-\nu^2)$ 이 된다. P_{ref} 의 선택은 보통 가장 간편하게 P_L 을 사용할 수 있는데, 이것은 정확한 J 를 제시하지 못한다. Fig. 7은 $P_{ref}=P_L$ 를 사용하여 유한요소 해석을 통해 예측한 그림이며, $n=5$ 인 Ramberg-Osgood 재료를 사용하였다. 예측식은 $at \leq 0.5$ 까지 해석결과보다 비보수적이며, at 가 클 경우에는 ρ 의 크기에 따라 예측식과 해석결과의 편차가 크게 발생한다. 따라서 본 논문에서는 ρ 의 영향을 줄이고 예측식을 비보수성을 줄이기 위해 다음과 같이 $P_{ref}=P_{oR}$ 을 사용하였다.

$$P_{OR} = \psi\left(\frac{\bar{a}}{t}, \rho\right) P_L \quad (14)$$

$$\psi\left(\frac{\bar{a}}{t}, \rho\right) = 0.75 + \frac{1}{8 + \left[11(1 - at)^2 + 1\right] \rho}$$

P_{oR} 은 P_L 에 $\psi(at, \rho)$ 의 함수를 곱하여 at 와 ρ 의 영향을 감소시켰다. Fig. 8은 P_L 과 P_{oR} 을 비교한 그림이며, P_{oR} 은 P_L 보다 전체적으로 낮은 값을 가지며, at 에 따른 크기 변화도 작다. Fig. 9는 $P_{ref}=P_{oR}$ 을 사용하여 J 를 예측한 그림이며, $n=5$ 인 Ramberg-Osgood 재료를 사용하였다. 예측식과 유한요소 해석결과가 대체적으로 잘 일치함을 알 수 있다. 특히 $P_{ref}=P_L$ 을 사용한 것에 비해 ρ 의 영향이 많이 줄어든 것을 확인할 수 있다. Fig. 10에 나타난 것과 같이 $n=10$ 인 경우에도 대체적으로 잘 일치하지만, $0 \leq P/P_{oR} \leq 1$ 인 경우에는 비보수적이다. 하지만 이것은 Ramberg-Osgood 재료의 가정 때문이며, $P/P_{oR} > 1$ 인 경우는 대체적으로 보수적인 경향을 나타낸다. 따라서 수정된 참조하중 P_{oR} 은 축방향 사각표면균열된 직관의 J 예측에 유용하게 사용될 수 있다.

4. 결론

한계압력해석은 배관의 건전성평가에 있어 가장 기초적인 방법이며, 또한 한계압력은 J 를 예측하기 위해 참조하중으로 유용하게 사용된다. 본 논문에서는 다양한 크기의 축방향 사각표면균열이 존재하는 직관의 한계압력을 정량화하였다. 또한 이를 바탕으로한 최적화된 참조하중을 제시하여 정확한 J 예측방법을 제시하였다. 제시된 식들은

축방향 사각표면균열이 존재하는 직관의 건전성평가에 유용하게 사용될 것이다.

참고문헌

- (1) Kumar V and German MD, 1988, "Elastic-plastic fracture analysis of through-wall and surface flaws in cylinders," EPRI Report, NP-596.
- (2) Miller AG, 1988, "Review of limit loads of structures containing defects," International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 32, pp.191-327
- (3) Zahoor A., 1991, "Ductile fracture handbook," Novetech Corp.
- (4) R6, 2001, "Assessment of the integrity of structures containing defects," revision 4, British Energy Generation Ltd.
- (5) SINTAP, 1999, "Final Procedure," Brite Euram Project, BE95-1426.
- (6) API, 2000, "Appendix C-API Recommended Practice 579," American Petroleum Institute.
- (7) Yun-Jae Kim, Do-Jun Shim, Kamran Nikbin and Young-Jin Kim, 2003, "Finite element based plastic limit loads for cylinders with part-through surface cracks under combined loading," International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 80, pp. 527-540.
- (8) ABAQUS Version 6.2-1., 2001, "User's manual," Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc, RI.
- (9) Raju I S and Newman J C., 1982, "Stress-intensity factors for internal and external surface cracks in cylindrical vessels," Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 104, pp. 293-298.
- (10) Carter A J, 1992, "A library of limit loads for FRACTURE-TWO," Nuclear Electric Report TD/SID/REP/0191, Nuclear Electric Ltd, Gloucester, UK.
- (11) Yun-Jae Kim, Jin-Su Kim, Young-Jae Park and Young-Jin Kim, 2004, "Elastic-plastic fracture mechanics method for finite internal axial surface cracks in cylinders," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 71, pp. 925-944.
- (12) Ainsworth RA., 1984, "The assessment of defects in structures of strain hardening materials," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 19, pp. 633-642.