

배관 내 축방향 반타원 표면균열에 대한 비선형 파괴역학 해석

김진수[†] · 김윤재* · 김영진*

Non-Linear Fracture Mechanics Analyses for Axial Semi-Elliptical Surface Cracked Pipes

Jin-Su Kim, Yun-Jae Kim and Young-Jin Kim

Key Words : Axial Surface Crack (축방향 표면 균열), J Estimation (J 예측), Finite Element Analysis (유한요소해석), Deformation Plasticity(변형 소성), Reference Stress (참조응력)

Abstract

This paper provides two types of engineering J estimation equations for cylinders with finite internal axial surface cracks under internal pressure. The first type is the so-called GE/EPRI type J estimation equation based on Ramberg-Osgood materials. Based on detailed 3-D FE results the GE/EPRI-type J estimation equation along the crack front is proposed and validated for Ramberg-Osgood materials. For more general application, the developed GE/EPRI-type solutions are then re-formulated based on the reference stress concept. The proposed reference stress based J estimation equation has good agreement between the FE results and the proposed reference stress based J estimation provides confidence in the use of the proposed method for elastic-plastic fracture mechanics of pressurised piping

1. 서 론

배관 균열 구조물의 정확한 건전성 평가를 위해서는 탄소성 파괴역학 매개변수인 J -적분의 정확한 계산이 필요하다. J -적분 예측을 위해 가장 널리 사용되는 방법은 변형 소성(deformation plasticity) 이론에 기초한 GE/EPRI 방법^(1,2)이다. 이 방법은 다양한 형상 및 재료물성에 대한 3 차원 탄소성 유한요소해석이 필요하다. 원주방향 표면 균열의 경우, Kumar 등⁽¹⁾이 변형 소성에 기초한 J -적분 예측식을 처음 제시하였으며, 현재 다양한 3 차원 유한요소해석을 통해 예측식이 정립되어 있다.⁽²⁻⁴⁾ 그러나 원주방향 표면균열과 달리 축방향 표면균열에 대한 파괴역학 해석법에 대한 연구는 상대적으로 미비한 실정이다. 탄성 파라미터인 응력확대계수 (stress intensity factor)의 경우, 충분히

정확한 해가 제시되어 있으나,^(3,5) 탄소성 파라미터인 J -적분 예측식의 경우⁽²⁾에는 공학적 판단에 기초하고 있으며, 따라서 신뢰성이 매우 낮다.

또한 변형소성이론에 기초한 방법은 많은 문제점을 안고 있다. 첫째, 이 방법은 재료 인장 데이터를 R-O(Ramberg-Osgood) 재료로 이상화하기 때문에, R-O 이상화 방법에 매우 민감하다.⁽⁶⁾ 둘째, 소성영역 영향함수를 계산하기 위해 많은 유한요소해석이 필요하므로 복잡 하중과 같이 복잡한 문제에 대해서는 적용하기 매우 어렵다. 셋째, 각 균열 각에 따른 J -적분을 예측하기 위해서는 해당 위치에서의 소성영역 영향함수가 필요하므로 임의의 균열각에 대한 J -적분 예측이 매우 어렵다. 넷째, 고온 크리프 거동을 보이는 일반 재료에 대한 C^* -적분 예측시, 부정확한 결과를 초래한다. 다섯째, 확률론적 해석을 효율적으로 수행하기 위해서는 간단하면서도 정확한 예측식이 필요하다. 그러나 이 방법은 매우 복잡하며 특히 소성영역 영향 함수를 결정하기 위해 내삽(interpolation) 등의 많은 노력이 필요하다.

이 논문에서는 배관에 존재하는 축방향 표면균

[†] 회원, 성균관대학교 기계공학부
E-mail : hadfors@safe.skku.ac.kr
TEL : (031)290-5277 FAX : (031)290-5276

* 회원, 성균관대학교 기계공학부

열에 대한 J -적분 예측식을 GE/EPRI 방법과 GE/EPRI 방법의 단점을 보완하기 위해 참조응력 (reference stress)⁽⁶⁾ 개념을 도입한 새로운 방법으로 제시하였다. 이를 위해 먼저 다양한 3차원 유한요소해석을 통해 소성영역 영향 함수를 결정하였으며, 이를 재정리하여 새로운 개념의 참조 응력을 정의하여, J -적분 예측식을 제시하였다. 제시된 J -적분 예측식은 유한요소해석결과와 비교하여 타당성을 입증하였다.

2. 유한요소해석

본 연구에서는 Fig. 1 과 같이 내압 p 을 받는 배관에 존재하는 축방향 반타원 균열에 대한 3 차원 유한요소해석을 수행하였다. 균열 형상 변화가 J -적분에 미치는 영향을 고려하여 균열길이 대 배관 두께 비(a/t)를 0.1, 0.4, 0.75 로 변화시켰으며, 식 (1)로 정의되는 무차원 균열길이(ρ)를 0.5, 1, 2, 3 으로 변화시켰다.

$$\rho = \frac{c}{\sqrt{R_m t}} \tag{1}$$

배관의 평균반경 대 배관두께 비(R_m/t)는 배관의 실제 크기를 고려하여 두가지 경우(5, 20)에 대한 해석을 수행하였다.

유한요소해석에 사용된 재료는 다음 Ramberg-Osgood(R-O) 관계식을 만족한다고 가정하였다.

$$\left(\frac{\epsilon}{\sigma_y/E}\right) = \frac{\sigma}{\sigma_y} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_y}\right)^n \tag{2}$$

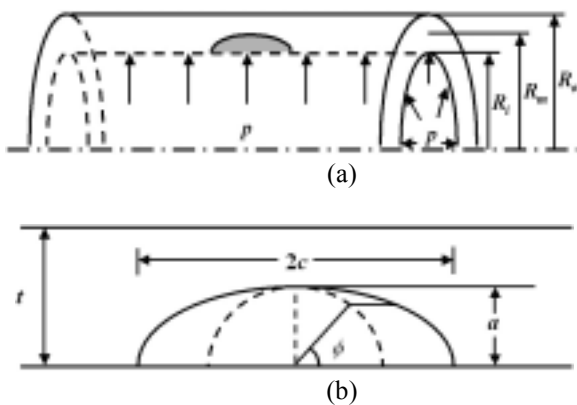


Fig. 1 Schematic illustration for a cylinder with a finite internal axial surface crack, under internal pressure p : (a) cylinder geometry and (b) crack geometry

여기서 α 와 n 은 각각 재료상수와 재료 가공경화 지수이다. 본 연구에서는 α 와 σ_y 는 각각 1.0 그리고 400 MPa 을 사용하였으며, n 은 1(탄성), 3, 7, 10 으로 변화시켰다. 따라서 본 연구에서는 총 96 가지 균열형상에 대한 유한요소해석을 수행하였다.

유한요소해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS⁽⁸⁾를 사용하였다. J -적분은 ABAQUS 에서 제공하는 영역적분법을 이용하여 유한요소해석결과로부터 계산하였다. 계산된 J -적분은 경로 독립성이 잘 유지되었으며, 2~5 번째 경로에 대한 평균값으로부터 결정하였다.

3. 변형소성에 기초한 J 적분식

3.1 탄성 형상함수 F

탄성 유한요소해석결과($n=1$ 인 경우)로부터 얻은 각 균열위치(ϕ)별 J -적분(J_e)으로부터 응력확대계수 K 는 다음과 같이 결정된다.

$$K = \sqrt{E' J_e(\phi)} = \frac{p R_m}{t} \sqrt{\pi a} F\left(\frac{R_m}{t}, \frac{a}{t}, \rho, \phi\right) \tag{3}$$

여기서 평면응력(plane stress) 조건시 $E'=E$, 평면 변형률(plane strain) 조건시 $E'=E/(1-\nu^2)$ 이다. 식 (3)에서 F 는 응력확대계수에 대한 형상함수이며, Table 1 에 유한요소해석으로부터 얻은 F 를 나타내었다.

3.2 소성 영향함수 h_1

R-O 재료의 경우, J -적분의 소성성분 J_p 는 균열 각 위치 ϕ 에 대해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_p(\phi) = \alpha \frac{\sigma_y^2}{E} (t-a) h_1\left(\frac{R_m}{t}, \frac{a}{t}, \rho, \phi, n\right) \left(\frac{p}{p_L}\right)^{n+1} \tag{4}$$

여기서 $h_1(\phi, n)$ 은 가공경화지수 n 인 재료에 대해 균열각 ϕ 에서의 소성 영향 함수이다. 식 (4)에서 p_L 은 내압하에서 축방향 표면균열이 존재하는 실린더에 대한 소성 한계하중(limit load)을 나타낸다. 본 연구에서는 3 차원 유한요소해석에 기초한 해⁽⁹⁾를 사용하여 한계하중을 정의하였다.

$$p_L = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_y \frac{t}{R_m} \left[1 + A_1 \left(\frac{a}{t}\right) + A_2 \left(\frac{a}{t}\right)^2 \right] \tag{5}$$

Table 1 Values of the shape factor F as a function of the crack angle ϕ

| R_m/t | ρ | a/t | ϕ | | | | |
|---------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 0° | 22° | 45° | 73° | 90° |
| 5 | 0.5 | 0.1 | 0.573 | 0.873 | 1.125 | 1.279 | 1.309 |
| | | 0.4 | 0.826 | 0.927 | 1.097 | 1.174 | 1.175 |
| | | 0.75 | 1.023 | 0.968 | 0.996 | 0.980 | 0.904 |
| | 1 | 0.1 | 0.571 | 0.885 | 1.150 | 1.311 | 1.344 |
| | | 0.4 | 0.747 | 0.996 | 1.275 | 1.448 | 1.475 |
| | | 0.75 | 1.111 | 1.214 | 1.401 | 1.484 | 1.476 |
| | 2 | 0.1 | 0.582 | 0.891 | 1.157 | 1.331 | 1.365 |
| | | 0.4 | 0.667 | 1.016 | 1.396 | 1.694 | 1.752 |
| | | 0.75 | 1.082 | 1.425 | 1.853 | 2.178 | 2.228 |
| | 3 | 0.1 | 0.588 | 0.888 | 1.161 | 1.339 | 1.372 |
| | | 0.4 | 0.637 | 1.001 | 1.435 | 1.806 | 1.881 |
| | | 0.75 | 1.008 | 1.463 | 2.068 | 2.607 | 2.705 |
| 20 | 0.5 | 0.1 | 0.472 | 0.749 | 1.012 | 1.169 | 1.198 |
| | | 0.4 | 0.668 | 0.900 | 1.174 | 1.350 | 1.376 |
| | | 0.75 | 1.014 | 1.123 | 1.302 | 1.344 | 1.325 |
| | 1 | 0.1 | 0.475 | 0.746 | 1.018 | 1.185 | 1.216 |
| | | 0.4 | 0.599 | 0.922 | 1.289 | 1.576 | 1.629 |
| | | 0.75 | 1.017 | 1.361 | 1.780 | 1.975 | 1.983 |
| | 2 | 0.1 | 0.476 | 0.744 | 1.021 | 1.194 | 1.226 |
| | | 0.4 | 0.560 | 0.904 | 1.353 | 1.756 | 1.837 |
| | | 0.75 | 0.946 | 1.474 | 2.262 | 2.836 | 2.918 |
| | 3 | 0.1 | 0.478 | 0.746 | 1.023 | 1.198 | 1.229 |
| | | 0.4 | 0.543 | 0.888 | 1.373 | 1.831 | 1.928 |
| | | 0.75 | 0.888 | 1.450 | 2.465 | 3.374 | 3.532 |

$$A_1 = 0.0462 - 0.0569\rho - 0.013\rho^2$$

$$A_2 = 0.0395 - 0.3413\rho + 0.0652\rho^2$$

본 연구에 사용된 한계하중해에 대한 보다 자세한 내용과 다른 한계하중해와의 비교는 참고문헌 (9)에 기술되어 있다.

본 연구에서는 소성영향함수 $h_I(\phi, n)$ 는 다음과 같이 결정하였다. 먼저 유한요소해석결과로부터 얻은 J -적분으로부터 탄성 성분을 제거하여 J -적분의 소성성분 J_p 를 다음과 같이 결정한다.

$$J_p^{FE} = J^{FE} - J_e \tag{6}$$

계산된 J_p 와 식 (4)를 이용하여 $h_I(\phi, n)$ 을 결정한다. 유한요소해석으로부터 얻은 $h_I(\phi, n)$ 은 하중 크기에 민감하게 변화하며 충분히 큰 하중에 대해서만 일정하게 유지된다. 본 연구에서는 이 값을 사용하여 $h_I(\phi, n)$ 을 결정하였다. Table 2~4 는 유한요소해석으로부터 얻은 $h_I(\phi, n)$ 값을 나타낸 것이다.

Table 2 Values of the plastic influence h_I -functions for the plastic J -integral ($n=3$) as a function of the crack angle ϕ

| R_m/t | ρ | a/t | ϕ | | | | |
|---------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 0° | 22° | 45° | 73° | 90° |
| 5 | 0.5 | 0.1 | 0.186 | 0.366 | 0.591 | 0.748 | 0.788 |
| | | 0.4 | 2.293 | 3.086 | 4.086 | 4.411 | 4.373 |
| | | 0.75 | 13.93 | 15.18 | 14.96 | 13.85 | 13.28 |
| | 1 | 0.1 | 0.172 | 0.362 | 0.628 | 0.795 | 0.838 |
| | | 0.4 | 2.019 | 3.336 | 5.341 | 6.718 | 6.939 |
| | | 0.75 | 13.39 | 17.44 | 21.08 | 23.46 | 23.49 |
| | 2 | 0.1 | 0.152 | 0.347 | 0.615 | 0.802 | 0.848 |
| | | 0.4 | 1.376 | 2.844 | 5.521 | 8.307 | 8.907 |
| | | 0.75 | 7.935 | 13.54 | 20.48 | 28.19 | 30.13 |
| | 3 | 0.1 | 0.145 | 0.323 | 0.593 | 0.779 | 0.823 |
| | | 0.4 | 0.973 | 2.161 | 4.808 | 8.189 | 8.989 |
| | | 0.75 | 4.291 | 8.708 | 15.54 | 25.16 | 28.16 |
| 20 | 0.5 | 0.1 | 0.123 | 0.265 | 0.504 | 0.688 | 0.727 |
| | | 0.4 | 2.035 | 3.422 | 5.617 | 7.162 | 7.371 |
| | | 0.75 | 17.07 | 23.15 | 28.22 | 25.51 | 24.83 |
| | 1 | 0.1 | 0.120 | 0.258 | 0.500 | 0.706 | 0.749 |
| | | 0.4 | 1.595 | 3.310 | 6.464 | 9.758 | 10.41 |
| | | 0.75 | 14.16 | 25.19 | 39.72 | 38.28 | 38.17 |
| | 2 | 0.1 | 0.113 | 0.246 | 0.482 | 0.695 | 0.740 |
| | | 0.4 | 1.039 | 2.420 | 5.868 | 10.69 | 11.80 |
| | | 0.75 | 7.698 | 17.57 | 37.14 | 41.60 | 43.31 |
| | 3 | 0.1 | 0.105 | 0.236 | 0.460 | 0.668 | 0.711 |
| | | 0.4 | 0.726 | 1.784 | 4.831 | 9.840 | 11.13 |
| | | 0.75 | 4.299 | 11.21 | 27.98 | 35.99 | 38.84 |

3.3 J -적분 예측식

소성영향 함수로부터 변형소성에 기초한 J -적분을 예측할 수 있다. 균열각 ϕ 에 대한 J -적분식은 다음과 같이 나타낼 수 있다

$$J(\phi) = \frac{[K(a_{eff}, \phi)]^2}{E} + \alpha \frac{\sigma_y^2}{E} (t-a) h_I(\phi, n) \left(\frac{p}{p_L} \right)^{n+1} \tag{7}$$

여기서 유효균열길이 a_{eff} 는 다음과 같이 정의된다.

$$a_{eff} = a + \varphi r_y \tag{8}$$

$$\varphi = \frac{1}{1 + (p/p_L)^2} \quad r_y = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{n-1}{n+1} \right) \left(\frac{K}{\sigma_y} \right)^2$$

식 (7)에서 $h_I(\phi, n)$ 은 Table 2~4 에 주어진 데이터를 보간하여 구한다.

4. 참조응력에 기초한 J -적분 예측식

Table 3 Values of the plastic influence h_I -functions for the plastic J -integral ($n=7$) as a function of the crack angle ϕ

| R_m/t | ρ | a/t | ϕ | | | | |
|---------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 0° | 22° | 45° | 73° | 90° |
| 5 | 0.5 | 0.1 | 0.227 | 0.431 | 0.698 | 0.875 | 0.926 |
| | | 0.4 | 3.657 | 4.605 | 5.901 | 6.077 | 6.040 |
| | | 0.75 | 18.93 | 22.46 | 20.46 | 21.18 | 21.08 |
| | 1 | 0.1 | 0.192 | 0.384 | 0.760 | 0.965 | 1.035 |
| | | 0.4 | 3.729 | 5.443 | 8.261 | 9.566 | 9.786 |
| | | 0.75 | 17.80 | 22.20 | 24.74 | 32.80 | 34.14 |
| | 2 | 0.1 | 0.158 | 0.344 | 0.732 | 0.980 | 1.057 |
| | | 0.4 | 2.598 | 4.667 | 8.609 | 11.46 | 12.00 |
| | | 0.75 | 10.70 | 13.83 | 17.73 | 33.95 | 40.57 |
| | 3 | 0.1 | 0.142 | 0.304 | 0.682 | 0.926 | 1.001 |
| | | 0.4 | 1.560 | 3.165 | 6.922 | 10.53 | 11.52 |
| | | 0.75 | 4.998 | 7.219 | 9.430 | 28.25 | 33.62 |
| 20 | 0.5 | 0.1 | 0.165 | 0.287 | 0.562 | 0.860 | 0.923 |
| | | 0.4 | 3.925 | 5.882 | 9.549 | 11.19 | 10.99 |
| | | 0.75 | 25.19 | 34.86 | 38.47 | 36.62 | 36.76 |
| | 1 | 0.1 | 0.135 | 0.276 | 0.546 | 0.893 | 0.966 |
| | | 0.4 | 3.409 | 6.132 | 11.77 | 15.54 | 15.84 |
| | | 0.75 | 19.39 | 33.00 | 42.84 | 46.76 | 48.54 |
| | 2 | 0.1 | 0.112 | 0.251 | 0.505 | 0.852 | 0.925 |
| | | 0.4 | 1.85 | 4.18 | 10.25 | 16.71 | 17.66 |
| | | 0.75 | 7.986 | 17.71 | 26.04 | 38.07 | 41.56 |
| | 3 | 0.1 | 0.100 | 0.226 | 0.460 | 0.785 | 0.854 |
| | | 0.4 | 1.123 | 2.556 | 7.543 | 14.35 | 15.63 |
| | | 0.75 | 3.328 | 9.394 | 14.23 | 24.42 | 26.83 |

Table 4 Values of the plastic influence h_I -functions for the plastic J -integral ($n=10$) as a function of the crack angle ϕ

| R_m/t | ρ | a/t | ϕ | | | | |
|---------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 0° | 22° | 45° | 73° | 90° |
| 5 | 0.5 | 0.1 | 0.251 | 0.482 | 0.763 | 0.931 | 1.041 |
| | | 0.4 | 4.883 | 4.883 | 6.448 | 7.143 | 7.091 |
| | | 0.75 | 21.40 | 25.96 | 23.63 | 24.37 | 25.52 |
| | 1 | 0.1 | 0.201 | 0.477 | 0.837 | 1.043 | 1.218 |
| | | 0.4 | 5.157 | 6.574 | 9.891 | 10.62 | 11.26 |
| | | 0.75 | 19.23 | 22.60 | 27.34 | 35.77 | 36.43 |
| | 2 | 0.1 | 0.129 | 0.361 | 0.781 | 1.075 | 1.194 |
| | | 0.4 | 3.456 | 5.552 | 9.796 | 12.26 | 13.01 |
| | | 0.75 | 13.15 | 13.33 | 17.26 | 33.37 | 38.08 |
| | 3 | 0.1 | 0.119 | 0.307 | 0.705 | 0.989 | 1.190 |
| | | 0.4 | 1.902 | 3.537 | 6.941 | 9.918 | 11.52 |
| | | 0.75 | 5.304 | 6.597 | 6.337 | 20.72 | 31.85 |
| 20 | 0.5 | 0.1 | 0.184 | 0.308 | 0.600 | 0.932 | 1.005 |
| | | 0.4 | 5.126 | 7.574 | 12.05 | 13.67 | 13.71 |
| | | 0.75 | 29.28 | 40.65 | 43.53 | 43.61 | 43.76 |
| | 1 | 0.1 | 0.148 | 0.302 | 0.603 | 0.993 | 1.079 |
| | | 0.4 | 4.517 | 7.898 | 14.52 | 17.69 | 17.34 |
| | | 0.75 | 20.11 | 33.92 | 41.35 | 48.45 | 50.43 |
| | 2 | 0.1 | 0.119 | 0.268 | 0.553 | 0.951 | 1.037 |
| | | 0.4 | 2.369 | 5.266 | 12.50 | 17.77 | 18.61 |
| | | 0.75 | 6.811 | 15.48 | 19.94 | 33.46 | 33.25 |
| | 3 | 0.1 | 0.102 | 0.235 | 0.492 | 0.855 | 0.935 |
| | | 0.4 | 1.265 | 3.005 | 8.597 | 14.28 | 15.34 |
| | | 0.75 | 2.388 | 6.130 | 8.667 | 18.28 | 15.68 |

R-O 재료의 경우, J -적분의 소성성분 J_p 는 균열 각 위치 ϕ 에 대해 다음과 같다.

$$J_p(\phi) = \alpha \frac{\sigma_y^2}{E} (t-a) h_1 \left(\frac{R_m}{t}, \frac{a}{t}, \rho, \phi; n \right) \left(\frac{p}{p_L} \right)^{n+1} \quad (9)$$

탄성의 경우($n=1$), J -적분의 탄성성분 J_e 는 식 (9)에서부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_e(\phi) = \alpha \frac{\sigma_y^2}{E} (t-a) h_1(\phi; n=1) \left(\frac{p}{p_L} \right)^2 \quad (10)$$

식 (1)을 식 (3)으로 무차원화하면 다음과 같다.

$$\frac{J_p(\phi)}{J_e(\phi)} = \alpha \frac{h_1(\phi, n)}{h_1(\phi, n=1)} \left[\frac{p}{p_L} \right]^{n-1} \quad (11)$$

p_L 대신 새로운 무차원 하중인 p_{ref} 를 도입하여 식 (11)을 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{J_p(\phi)}{J_e(\phi)} = \alpha \left\{ \frac{h_1(n, \phi)}{h_1(n=1, \phi)} \left[\frac{p_{ref}}{p_L} \right]^{n-1} \right\} \left[\frac{p}{p_{ref}} \right]^{n-1} \quad (12)$$

여기서 $h_1(n, \phi)/h_1(n=1, \phi)$ 와 p_{ref}/p_L 는 무차원 변수이다. 식 (12)를 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{J_p(\phi)}{J_e(\phi)} = \alpha H_1 \left[\frac{p}{p_{ref}} \right]^{n-1} \quad (13)$$

여기서 H_1 은 $R_m/t, a/t, \rho, \phi$ 및 n 의 함수이다. 본 연구에서 제시할 J -적분 예측식의 기본 개념은 p_{ref} 을 적절히 정의함으로써 H_1 에 대한 $R_m/t, a/t, \rho, \phi$ 및 n 의 영향을 최소화할 수 있다는 것이다.^(7,10) 본 연구에서는 이러한 p_{ref} 을 최적참조하중(optimized reference load) p_{oR} 이라 정의하였다. p_{oR} 결정에 대한 보다 자세한 설명은 저자의 전보⁽¹¹⁾에 기술되어 있다. 유한요소해석결과를 재정리하면 p_{oR} 을 다음과 같다.

$$p_{oR} = [A \ln(\rho) + B] \sigma_y \frac{t}{R_m} \quad (14)$$

$$A = \left[-1 + 0.847 \tanh \left(0.352 \frac{R_m}{t} \right) \right] \frac{a}{t} + 0.006$$

$$B = \left[-1 + 0.751 \tanh \left(0.256 \frac{R_m}{t} \right) \right] \frac{a}{t} + 2 - 0.98 \tanh \left(0.312 \frac{R_m}{t} \right)$$

식 (14)의 마지막 항은 원주방향 응력에 대한 균열없는 실린더의 한계하중이다. 식 (7)은 유한요소해석결과에 기초하고 있기 때문에 $0.1 \leq a/t \leq 0.75$, $0.5 \leq \rho \leq 3.0$ 인 경우에 유효하다. 그러나 이 식은 실제 균열 형상 범위인 $0.05 \leq a/t \leq 0.8$, $0.3 \leq \rho \leq 4.0$ 까지 외삽하여 확대 적용할 수 있다고 판단된다.

p_{oR} 을 도입하면 식 (13)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{J_p}{J_e} = \alpha \left[\frac{p}{p_{oR}} \right]^{n-1} \quad (15)$$

식 (8)은 H_I 값이 R_m/t 와 n 에 대하여 조금씩 변화하므로 정확한 것은 아니다. 그러나 식 (15)은 공학적으로 근사화된 값이며, 정확히 J -적분을 예측한다. 이러한 참조응력을 이용한 방법의 가장 큰 장점은 일반 응력-변형률 선도에 적용할 수 있다는 것이다.

R-O 재료의 경우, 소성 변형률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon_p = \alpha \frac{\sigma}{E} \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^{n-1} \quad (16)$$

참조 응력 σ_{ref} 와 참조 변형률 ε_{ref} 을 도입하여 식 (15)와 식 (16)을 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{J_p}{J_e} = \frac{E \varepsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} ; \sigma_{ref} = \frac{p}{p_{oR}} \sigma_y \quad (17)$$

여기서 σ_y 는 0.2% 항복응력이며, ε_{ref} 은 $\sigma = \sigma_{ref}$ 일 때 응력-변형률 선도에서 얻어지는 진변형률(true strain)이다. 식 (10)은 근사화된 것으로 정확성은

다소 낮아질 수 있다. 그러나 이 방법은 일반재료 거동에 대해 적용할 수 있을 뿐만 아니라 매우 단순하다. 식 (17)은 소성 J -적분식을 나타내며 전체 J -적분은 소성역 보정을 포함한 탄성 성분을 추가하여 나타낼 수 있다.⁽¹¹⁾

$$\frac{J}{J_e} = \frac{E \varepsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} + \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{ref}}{\sigma_y} \right)^2 \frac{\sigma_{ref}}{E \varepsilon_{ref}} ; \sigma_{ref} = \frac{p}{p_{oR}} \sigma_y \quad (18)$$

본 연구에서는 참조응력에 기초한 이러한 방법을 개선된 참조응력법(enhanced reference stress method; ERSM)이라 정의하였다.

고온 환경하의 균열 실린더에 대한 안전성 평가를 위해서는 크리프 균열 성장에 대한 C^* -적분의 계산이 필수적이다.^(12,13) 이 경우, 일반 크리프 거동을 보이는 재료에 대한 C^* -적분은 본 연구에서 제시한 J -적분 예측식으로부터 다음과 같이 예측될 수 있다.⁽¹³⁾

$$C^* = \left(\frac{E}{E'} \right) \cdot \frac{K^2 \dot{\varepsilon}_c}{\sigma_{ref}} \quad (13)$$

여기서 ε_c 는 $\sigma = \sigma_{ref}$ 일 때 실제 크리프 변형률 데이터로부터 얻어지는 크리프 변형률 속도(creep strain rate)이다.

확률론적 파괴역학해석을 수행하기 위해서는 많은 J -적분 및 C^* -적분 계산이 필요하며 따라서 기존 변형소성에 기초한 방법은 적용하기 매우 어렵다. 본 연구에서는 제시한 예측식은 매우 간단하면서도 실제 재료에 대한 J -적분 및 C^* -적분을 정확히 예측⁽¹⁴⁾하므로 확률론적 파괴역학해석에 폭넓게 사용될 수 있다.

5. 결 론

이 연구에서는 실린더에 존재하는 축방향 표면 균열에 대한 공학적 J -적분 예측식을 제시하였다. 예측식은 변형소성이론에 기초한 GE/EPRI 방법과 개선된 참조응력법에 기초한 방법으로 제시하였다. GE/EPRI 방법의 경우, $R_m/t=5, 20$ 인 경우($1 < n < 10$, $0.1 < a/t < 0.75$, $0.5 < \rho < 3$)에 대한 예측이 가능하다.

개선된 참조응력법에 기초한 방법은 먼저 유한요소해석결과를 재정리하여 최적참조하중을 정의하였으며, 최적참조하중으로부터 J -적분 예측식을 새롭게 제시하였다. 제시된 J -적분 예측식은 균열

선단 임의의 위치에서뿐만 아니라 내압과 굽힘 모멘트가 동시에 작용하는 경우에 대해 확대 적용할 수 있다. 본 연구에서 제시한 식은 균열선단 임의의 위치에 대해 J -적분 및 C^* -적분을 예측할 수 있으며, 매우 간단하므로 확률론적 파괴역학해석에 쉽게 적용할 수 있다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성 평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Kumar, V. and German, M.D., 1988, *Elastic-Plastic Fracture Analysis of Through-Wall and Surface Flaws in Cylinders*, EPRI Report, NP-5596.
- (2) Zahoor, A., 1991, *Ductile Fracture Handbook*, Vol. 2 Chapter 6 Axial Through-Wall Crack, Novetech Corp.
- (3) Bergman, M., 1995, "Stress Intensity Factors for Circumferential Surface Cracks in Pipes," *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 18, pp. 1155~1172.
- (4) Kim, J.S., Kim, Y.J., and Kim, Y.J., 2002, "Fracture Behavior Estimation for Circumferential Surface Cracked Pipe (I): J -Integral Estimation Solution," *Transaction of the KSME, A*, Vol. 26, No. 1, pp. 139~146.
- (5) *Appendix C, API Recommended Practice 579*, 2000, American Petroleum Institute.
- (6) Kim, Y.J., Huh, N.S. and Kim, Y.J., 2001, "Enhanced Reference Stress Based J and COD Estimation Method for LBB Analysis and Comparison with GE/EPRI Method," *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 24, pp. 243~254.
- (7) Ainsworth, R.A., 1984, "The Assessment of Defects in Structures of Strain Hardening Materials," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 19, pp. 633~642.
- (8) *ABAQUS Version 5.8 User's Manual*, 1999, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc, RI.
- (9) Kim, Y.J., Shim, D.J., Huh, N.S. and Kim, Y.J., 2001, "Plastic Limit Pressure for Cracked Cylinders Using Finite Element Limit Analyses," Submitted for Publication to *International Journal of Pressure Vessels and Piping*.
- (10) Kim, Y.J., Huh, N.S. and Kim, Y.J., 2002, "Pressure Induced Hoop Stress Effect on Fracture Analysis of Circumferential Through-Wall Cracked Pipes," *Engineering Fracture Mechanics* (to appear).
- (11) Kim, J.S., Kim, Y.J. and Kim Y.J., 2002, "Fracture Behavior Estimation for Circumferential Surface Cracked Pipes (I) - J -Integral Estimation Solution -," *Transactions of the KSME, A*, Vol.26, No.1, pp. 131~138.
- (12) Webster, G.A. and Ainsworth, R.A., 1994, *High Temperature Component Life Assessment*, Chapman & Hall.
- (13) R5, 1998, *R5: Assessment Procedure for the High Temperature Response of Structures, Issue 2*, British Energy Generation Ltd.
- (14) Kim, J.S., Kim, Y.J. and Kim Y.J., 2002, "Estimation of C^* -Integral for Defective Components with General Creep Deformation Behaviors," *Transactions of the KSME, A*, Vol.26, No.5, pp. 795~80