

< 논문 >

관통균열 세관의 파열압력 예측을 위한 탄소성 파괴역학 해석

장윤석* · 문성인* · 김영진† · 황성식** · 김정수** · 김윤재***
 (2005년 4월 18일 접수, 2005년 9월 10일 심사완료)

Elastic-plastic Fracture Mechanics Analyses for Burst Pressure Prediction of Through-wall Cracked Tubes

Yoon-Suk Chang, Seong-In Moon, Young-Jin Kim, Seong-Sik Hwang,
 Joung-Soo Kim and Yun-Jae Kim

Key Words : Steam Generator Tube(증기발생기 세관), Burst Pressure(파열압력), Reference Stress Method(참조응력법), *J*-integral(*J*-적분), Crack Opening Displacement(균열열림변위)

Abstract

The structural and leakage integrity of steam generator tubes should be sustained all postulated loads with appropriate margin even if a crack is present. During the past three decades, for effective integrity evaluation, several limit load solutions have been used world-widely. However, to predict accurately load carrying capacities of specific components under different conditions, the solutions have to be modified by using lots of experimental data. The purpose of this paper is to propose a new burst pressure estimation scheme based on fracture mechanics analyses for steam generator tube with an axial or circumferential through-wall crack. A series of three dimensional elastic-plastic finite element analyses were carried out and, then, closed-form estimation equations with respect to both *J*-integral and crack opening displacement were derived through reference stress method. The developed engineering equations were utilized for structural integrity evaluation and the resulting data were compared to the corresponding ones from experiments as well as limit load solutions. Thereafter, since the effectiveness was proven by promising results, it is believed that the proposed estimation scheme can be used as an efficient tool for integrity evaluation of cracked steam generator tubes.

1. 서론

원자력발전소 증기발생기 세관은 1차계통에서 생성된 열을 2차계통으로 전달하고 압력경계를 구성하는 중요한 부품이다. 세관이 안전운전에 미치는 중요성을 감안하여 두께가 40% 이상 감육된 경우 판막음을 하도록 규정하고 있으나,^(1,2) 현행 판막음 기준은 매우 보수적인 것으로 알려져 있다.⁽³⁻⁵⁾ 국외의 경우 증기발생기 세관의 하중 지지

능력 평가를 위해 다양한 실험 및 해석이 수행된 바 있으며, 관련 연구결과를 기반으로 한계하중 해석법이 일반적으로 적용되어 왔다.^(6,7) 이는 증기발생기 세관의 재질이 오스테나이트계 합금과 유사할 뿐만 아니라 두께가 매우 얇기 때문에 파열압력(burst pressure) 예측시 한계하중 해석의 적용이 용이하기 때문이다.

우리나라에서도 균열이 존재하는 증기발생기 세관 및 배관에 대한 다수의 실험 및 한계하중 해석과 일부 파괴역학 해석이 수행된 바 있다. 대표적인 예로 축방향 및 원주방향 표면균열이 존재하는 배관에 복합하중이 작용하는 경우의 한계하중 해석식이 제시되었고,^(8,9) 평판과 세관에 동일직선상 및 평행한 축방향 다중균열이 존재하는 경우의 한계하중 해석식이 제시되었으며,⁽¹⁰⁻¹²⁾ T형 복합균열 및 응력부식균열을 고려한 세관의 탄성 파괴역학

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부
 E-mail: yjkim50@skku.edu
 TEL: (031)290-5274 FAX: (031)290-5276

* 성균관대학교 기계공학부

** 한국원자력연구소

*** 회원, 고려대학교 기계공학과

해석식이 제시된 바 있다.^(13,14) 그러나 세관의 탄소성 파괴역학 실험 및 해석에 관한 연구는 아직 수행된 바 없다.

한편 균열 세관의 건전성평가지 주로 사용되고 있는 한계하중 해석은 재료의 항복강도와 인장강도만으로 간단하게 건전성평가를 수행할 수 있다는 장점이 있지만, 운전조건의 변화에 따른 차이를 일반화하기 어렵기 때문에 예측식의 신뢰성 확보를 위해서는 많은 양의 실험 데이터가 요구되는 단점이 있다. 이러한 점을 고려할 때 탄소성 파괴역학에 기초한 건전성평가 방법의 적용이 바람직할 수 있다.⁽¹⁵⁾ 세관 실험을 통해 파괴인성(fracture toughness, J_{IC}) 또는 파괴저항곡선(J - R curve)을 확보해야 하는 다소의 어려움은 있으나, 타당성이 입증된다면 상이한 운전조건을 고려할 경우에도 한계하중 해석법에 비해 적은 실험 데이터만으로 비교적 정확한 건전성평가가 가능하다는 장점이 있다. 아울러 한계하중 해석을 통해서서는 제한적인 조건에서의 누설률(leak rate) 평가만 가능하지만, 파괴역학 해석을 수행할 경우 다양한 조건에서의 균열열림변위(Crack Opening Displacement: COD) 예측 및 누설률 평가를 수행할 수 있다.

따라서 본 논문의 목적은 축방향 및 원주방향 관통균열이 존재하는 증기발생기 세관에 대한 탄소성 파괴역학 해석법을 새롭게 제시하기 위한 것이다. 이를 위해 먼저 기존 절차에 따라 한계하중 해석을 수행한다. 또한 유한요소해석을 수행하여 내압이 작용하는 균열 세관에 대한 공학적 J -적분 및 COD 예측식을 개발하고, 개발된 J -적분 예측식을 이용하여 세관의 파괴압력을 평가한다. 최종적으로 예측결과를 실험 데이터 및 한계하중 해석결과와 비교하여 타당성을 검증하고자 한다.

2. 증기발생기 세관의 파손형태 결정

ASME Sec.XI⁽¹⁵⁾에는 균열이 존재하는 배관의 파손기구(failure mechanism) 및 해석방법 결정기준이 제시되어 있으며, 이에 따른 파손기구는 탄성파괴(elastic fracture), 탄소성파괴(elastic-plastic fracture), 소성붕괴(plastic collapse)의 3가지 영역으로 구분할 수 있다. 그러나 전술한 바와 같이 증기발생기 세관의 파괴압력을 예측하기 위해 지금까지 수행된 대부분의 연구들은 한계하중법에 집중되어 있다. 본 연구에서는 증기발생기 세관의 파손형태를 확인하기 위해 Ainsworth⁽¹⁶⁾의 참조응력법을 기반으로 제시된 R6⁽¹⁷⁾ 평가법을 적용하였다. 파손평가지(Failure Assessment Diagram: FAD)로 표현되는 R6 평가법에서는 매개변수로 K_r 과 L_r 이 사용되는데,

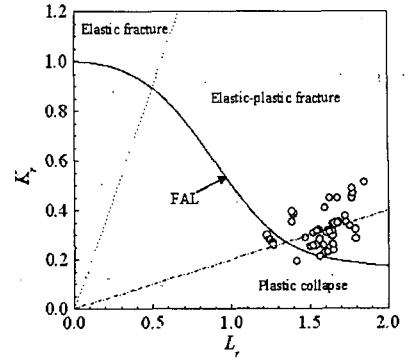


Fig. 1 FAD for cracked steam generator tubes

K_r 은 작용응력확대계수 K (stress intensity factor)와 재료파괴인성치 K_{max} (fracture toughness)의 비로써 정의되고 L_r 은 작용하중 P 과 구조물의 한계하중 P_L 의 비를 의미한다. 또한 FAD에서 축방향 관통균열이 존재하는 세관의 파손여부를 결정하는 파손평가곡선(Failure Assessment Line: FAL)은 다음과 같이 표현된다.

$$K_r = \frac{0.3 + 0.7 \exp(-0.8L_r^6)}{(1 + 0.5L_r^2)^{0.5}} \quad (1)$$

Fig. 1은 증기발생기 세관에 파괴압력이 작용하는 경우의 FAD를 도시한 것으로서, 대부분의 평가결과는 $K_r/L_r=0.2$ 인 선을 중심으로 소성붕괴 또는 탄소성파괴 영역에 위치함을 알 수 있다. 따라서 증기발생기 세관의 파손평가를 위해 한계하중법과 탄소성 파괴역학에 기초한 방법을 모두 적용할 수 있을 것으로 판단되며, 이에 대한 세부 내용은 각각 3장과 5장에서 기술하고자 한다.

3. 한계하중 해석

Fig. 2(a)는 내압이 작용하는 축방향 관통균열 세관을 개략적으로 나타낸 것이다. 이 경우 지금까지 제안된 여러 한계하중 해석법 중 가장 널리 사용되고 있는 다음의 예측식으로 한계압력을 계산하였다.⁽⁶⁾

$$P_L = \frac{\sigma_f t}{M_T R} \quad (2)$$

여기서, σ_f 는 식 (3)과 같이 정의되는 유동응력, t 는 관두께, R 은 세관의 평균반경, M_T 는 Erdogan이 제시한 벌정계수(bulging factor)로써 식 (4) 및 (5)를 이용하여 결정한다.

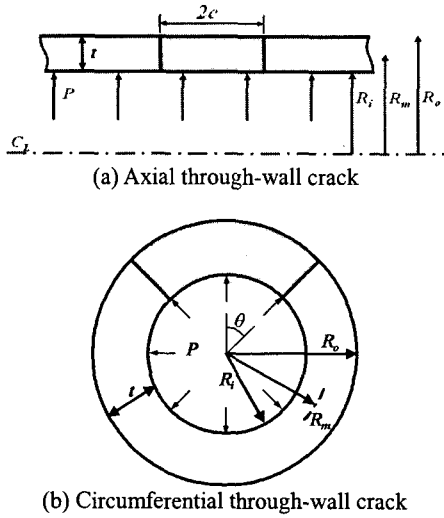


Fig. 2 Schematics of cracked steam generator tubes

$$\sigma_f = k(\sigma_y + \sigma_u) \quad (3)$$

$$M_T = 0.614 + 0.481\lambda + 0.386\exp(-1.25\lambda) \quad (4)$$

for $5 \leq R/t \leq 50$

$$\lambda = [12(1-\nu^2)]^{0.25} \rho; \rho = (c/\sqrt{Rt}) \quad (5)$$

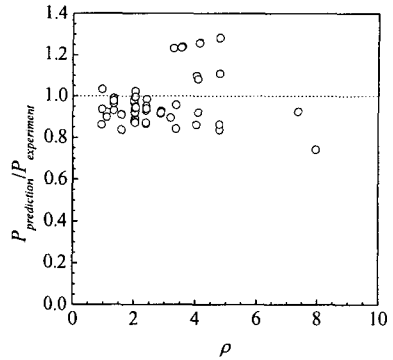
이때, k 는 유동응력계수, σ_y 는 항복강도, σ_u 는 인장강도, λ 는 셸 파라미터, ν 는 푸아송비, c 는 균열길이의 1/2이다.

Fig. 2(b)는 내압이 작용하는 원주방향 관통균열 세관을 나타낸 것으로서, θ 는 균열각의 1/2이다. 이 경우 한계압력은 다음 식으로 계산하였다.^(18,19)

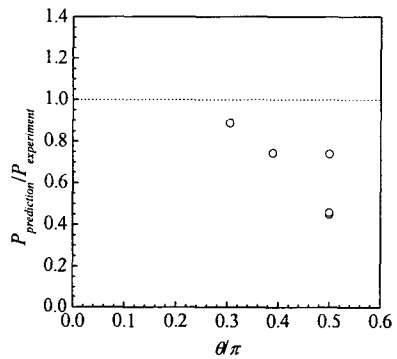
$$P_L = \left[1 - \frac{\theta}{\pi} - \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left(\frac{\sin \theta}{2} \right) \right] \frac{2t}{R} \sigma_f, \quad (6)$$

for $\theta/\pi \geq 0.263$

Fig. 3은 식 (2)와 (6)을 이용하여 구한 예측결과를 실험결과⁽⁷⁾로 무차원화하여 나타낸 것으로서, 재료의 항복강도 및 인장강도 값으로 각각 270MPa과 700MPa을 사용하였다. 이후 무차원압력이 1.0 보다 작은 경우의 예측결과는 보수적, 큰 경우의 예측결과는 비보수적이라고 표현한다. Fig. 3(a)에서 볼 수 있듯이 축방향 관통균열에서는 일부 예외적인 경우도 있으나 예측결과는 전반적으로 보수적이었다. Fig. 3(b)는 원주방향 관통균열이 존재하는 세관에 대한 예측결과를 나타낸 것으로서, 모든 경우에 대해 보수적인 형태를 보였다.



(a) Axial through-wall crack



(b) Circumferential through-wall crack

Fig. 3 Normalized burst pressure of cracked steam generator tubes obtained from limit load analysis

4. 관통균열 세관에 대한 공학적 J-적분 및 COD 예측식 개발

증기발생기 세관에 대한 탄소성 파괴역학 해석에 앞서 먼저 주요 매개변수인 J-적분 및 COD 예측식을 개발하고자 한다. 이를 위해 세관에 대한 응력-변형을 선도(σ - ϵ curve)를 결정하고, 축방향 및 원주방향 균열이 존재하는 세관에 대한 유한요소해석을 수행하여 참조응력법^(16,20,21) 기반의 J-적분 및 COD 예측식을 개발하였다.

4.1 인장물성 데이터 결정

증기발생기 세관은 니켈계 합금인 Alloy 600TT, 600HTMA, 690TT 등으로 제작된다. Fig. 4는 이에 상응하는 인장특성을 나타낸 것으로서, 진응력-진변형률 선도를 항복강도로 무차원화하고 항복후의 변형거동에 초점을 맞춘 것이다. 유한요소해석을 위해 평균적인 가공경화 거동을 보이는 재료를 선정하였으며, 그림에서 굵은 실선으로 표시하였다.

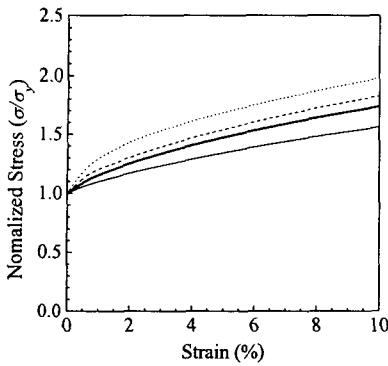


Fig. 4 Normalized stress-strain curve for typical materials used in steam generator tubes

4.2 유한요소해석

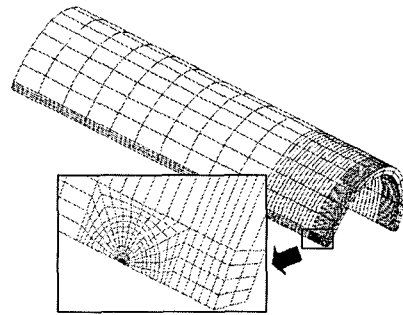
내압이 작용하는 관통균열 세관의 유한요소해석 시 상용 프로그램인 ABAQUS를 사용하였다. 대표적인 세관 형상으로 $R/t=8.25$ 를 선정하였으며, 실제 발견된 균열 등을 근거로 하여 축방향 관통균열의 경우에는 무차원 균열길이 ρ 를 0.14~8.78, 원주방향 관통균열의 경우에는 무차원 균열각 θ/π 를 0.05~0.5로 변화시키며 해석을 수행하였다.

Fig. 5는 대표적인 3차원 유한요소해석 요소망을 나타낸 것으로서 형상의 대칭성을 고려하여 1/4만 모델링하였으며, 20절점 요소(C3D20R in ABAQUS)를 사용하였다. 해석은 진응력-진변형률 데이터에 따른 증분소성이론(Incremental plasticity theory)에 입각하여 수행하였으며, 소규모 변형률 해석(small strain analysis)을 적용하였다. 정상운전조건 및 비상운전조건에서 안전계수를 고려할 때 예상되는 최대압력은 약 30MPa이므로 이를 세관 내면에 분포하중 형태로 작용시켰다. 또한 세관의 끝단에는 상당 인장하중을, 균열면에는 내압의 50%에 해당하는 분포하중을 작용시켰다.

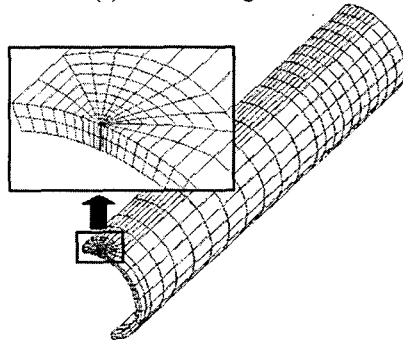
4.3 공학적 J-적분 및 COD 예측식

J-적분 및 COD 예측식 개발을 위해 참조응력법을 사용하였다. 참조응력법의 기본개념은 주요 매개변수를 한계하중 등으로 무차원화하고 이를 이용하여 J-적분 또는 COD 값을 예측할 수 있는 식을 제시하는 것이다. 본 논문에서는 다음과 같이 R6⁽¹⁷⁾ 평가법의 FAL과 동일한 형태로 J-적분 예측식을 결정하고자 한다.

$$\left(\frac{J}{J_e}\right)^2 = \frac{0.3 + 0.7 \exp(-\alpha_1 \cdot L_r^{m_1})}{(1 + \beta_1 \cdot L_r^2)^2} \quad (7)$$



(a) Axial through-wall crack



(b) Circumferential through-wall crack

Fig. 5 Typical FE meshes for cracked steam generator tubes

여기서, J_e 는 J-적분의 탄성성분을 의미하며, 잘 알려진 바와 같이 응력확대계수 K 와 탄성계수 E 및 푸아송비 ν 의 함수이다.

식 (7)의 α_1, β_1, m_1 은 R6 평가법에 각각 0.8, 0.5, 6으로 제시되어 있는 상수이나, 본 연구에서는 유한요소해석 결과를 곡선적합하기 위한 매개변수(fitting parameter)로 취급하였다. 또한 L_r 결정을 위해 필요한 한계하중은 식 (2) 대신 유한요소해석 결과를 이용하여 수정한 식 (8)로 계산하였다.⁽²²⁾ 이에 따라, 축방향 관통균열 세관에 대해 최종적으로 결정한 J-적분 예측식은 식 (9)로 표현된다.

$$P_L' = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{(-0.0007\rho^2 + 0.0202\rho + 0.9595) t}{\sqrt{1 + 0.34\rho + 1.34\rho^2}} \frac{t}{R} \sigma_f \quad (8)$$

$$\left(\frac{J}{J_e}\right)^2 = \frac{0.3 + 0.7 \exp(-0.8L_r^{3.5})}{(1 + 0.5L_r^2)^{1/2}} \quad (9)$$

COD(δ) 예측식도 J-적분 예측식과 유사한 형태로 다음과 같이 결정하였으며, 이때 δ_e 는 COD의 탄성성분을 의미한다.

$$\left(\frac{\delta}{\delta_e}\right)^2 = \frac{0.3 + 0.7 \exp(-0.8L_r^{3.5})}{(1 + 0.5L_r^2)^{1/2}} \quad (10)$$

한편 유사한 과정을 거쳐 원주방향 관통균열 세관에 대한 J -적분 및 COD 예측식을 다음과 같이 결정하였다.

$$\left(\frac{J}{J_e}\right)^2 = \frac{0.3 + 0.7 \exp(-0.8L_r^{2.5})}{(1 + 0.5L_r^2)^{1/2}} \quad (11)$$

$$\left(\frac{\delta}{\delta_e}\right)^2 = \frac{0.3 + 0.7 \exp(-0.8L_r^{2.5})}{(1 + L_r^2/6)^{1/2}} \quad (12)$$

이때, 한계하중은 식 (6) 대신 유한요소해석 결과를 이용하여 수정한 다음 식으로 계산하였다.

$$p_L = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[0.5664 \left(\frac{\theta}{\pi}\right)^2 + 0.6369 \left(\frac{\theta}{\pi}\right) + 0.8191 \right] \quad (13)$$

$$\left[1 - 0.28 \left(\frac{\theta}{\pi}\right) - 0.92 \left(\frac{\theta}{\pi}\right)^2 \right] \frac{t}{R} \sigma_f, \text{ for } 0 \leq \frac{\theta}{\pi} < 0.263$$

$$p_L = 2 \left[0.5664 \left(\frac{\theta}{\pi}\right)^2 + 0.6369 \left(\frac{\theta}{\pi}\right) + 0.8191 \right] \quad (14)$$

$$\left[1 - \frac{\theta + 2 \sin^{-1}\left(\frac{\sin \theta}{2}\right)}{\pi} \right] \frac{t}{R} \sigma_f, \text{ for } \frac{\theta}{\pi} \geq 0.263$$

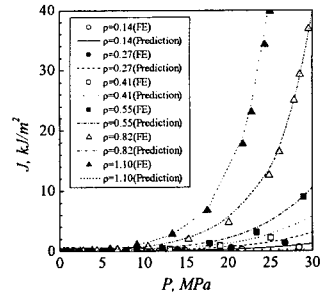
4.4 J -적분 및 COD 예측식 검증

제안된 J -적분 및 COD 예측식으로 계산한 결과를 유한요소해석 결과와 비교하였다. Fig. 6과 7은 각각 축방향 관통균열에 대한 J -적분 및 COD를, Fig. 8과 9는 각각 원주방향 관통균열에 대한 J -적분 및 COD를 나타낸 것이다. 모든 경우에 대해 제안된 예측식을 이용하여 평가한 J -적분과 COD는 유한요소해석 결과와 잘 일치하였으며, 증기발생기 세관의 건전성평가를 위해 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

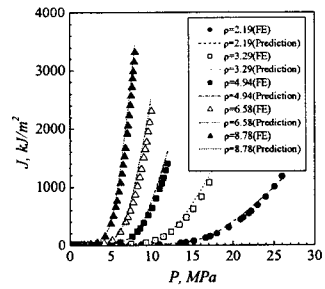
5. 탄소성 파괴역학 해석

5.1 파괴저항물성 데이터 결정

탄소성 파괴역학 해석을 수행하기 위해서는 앞서 기술한 바 있는 기본적 물성치가 필요하다. 본 연구에서는 Alloy 600 재료의 실세관 시편에 초기 원주방향 관통노치 θ/π 를 0.45로 가공한 후, 실험

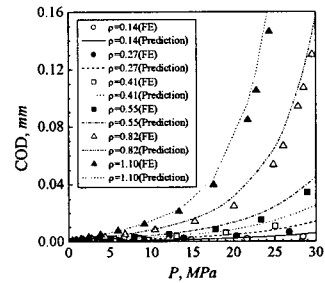


(a) $0.14 \leq \rho \leq 1.10$

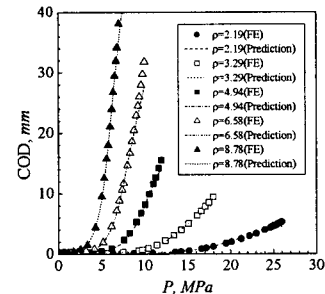


(b) $2.19 \leq \rho \leq 8.78$

Fig. 6 Comparison with FE J with that according to proposed J estimation equation for axial through-wall crack

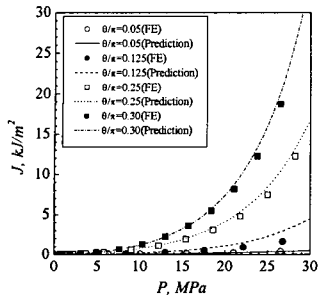


(a) $0.14 \leq \rho \leq 1.10$

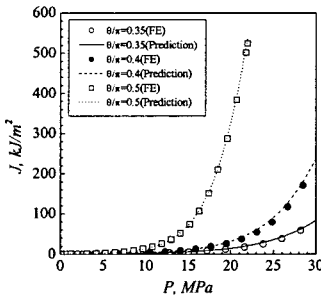


(b) $2.19 \leq \rho \leq 8.78$

Fig. 7 Comparison with FE COD with that according to proposed COD estimation equation for axial through-wall crack

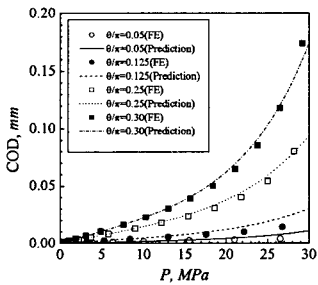


(a) $0.05 \leq \theta/\pi \leq 0.30$

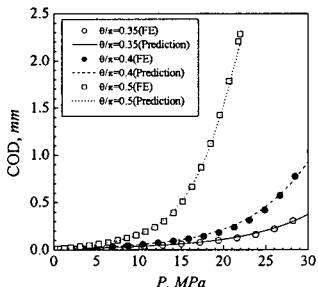


(b) $0.35 \leq \theta/\pi \leq 0.50$

Fig. 8 Comparison with FE J with that according to proposed J estimation equation for circumferential through-wall crack



(a) $0.05 \leq \theta/\pi \leq 0.30$



(c) $0.35 \leq \theta/\pi \leq 0.50$

Fig. 9 Comparison with FE COD with that according to proposed COD estimation equation for circumferential through-wall crack

Table 1 Fracture toughness of Alloy 600 steam generator tubes⁽²³⁾

Specimen I.D.	Blunting line: $J=2\sigma_f \Delta a$			Blunting line: $J=4\sigma_f \Delta a$		
	C_1	C_2	J_{IC}	C_1	C_2	J_{IC}
CT01	904	0.59	1503	869	0.71	499
CT02	853	0.60	945	827	0.70	471

을 통해 구한 값⁽²³⁾으로 결정하였다. Table 1은 2개 시편에 대한 실험결과를 정리한 것으로서, C_1 과 C_2 는 식 (15)와 같이 ASTM E1820-01⁽²⁴⁾에 제시된 파괴저항곡선 결정 상수이다.

$$J = C_1 (\Delta a)^{C_2} \tag{15}$$

한편 J_{IC} 는 표준시험법에 제시되어 있는 $J=2\sigma_f \Delta a$ 의 둔화직선(blunting line)과 저장도 고인성 재료에 사용 가능한 것으로 알려져 있는 $J=4\sigma_f \Delta a$ 의 둔화직선⁽²⁵⁾으로부터 결정하였으며, 파열압력 예측시 이중 하한계(lower bound) 값인 945kJ/m^2 과 471kJ/m^2 을 사용하고자 한다.

5.2 균열세관의 파열압력 예측

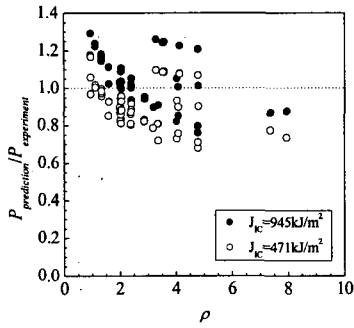
탄소성 파괴역학 해석시 다음과 같은 조건이 성립할 때 균열 세관이 파열된다고 가정하였다. 즉 식 (9) 또는 (11)로 예측한 J -적분값이 J_{IC} 에 도달할 때의 압력을 파열압력으로 정의하였다.

$$J = J_{IC} \tag{16}$$

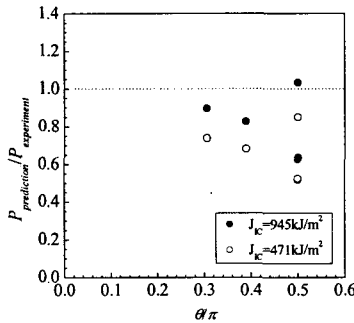
Fig. 10은 2가지 하한계 J_{IC} 값을 사용하여 예측한 결과를 실험결과로 무차원화하여 나타낸 것이다. Fig. 10(a)는 축방향 관통균열 세관의 경우로서, $J_{IC}=945\text{kJ/m}^2$ 일 때 파괴역학 해석을 적용하여 예측한 결과는 한계하중 해석결과에 비해 하중 지지능력을 다소 과대평가하고 $J_{IC}=471\text{kJ/m}^2$ 일 때는 일부 예외도 있으나 하중 지지능력을 과소평가함을 알 수 있다. Fig. 10(b)는 원주방향 관통균열 세관에 대한 것으로서, 전반적으로 관통균열의 세관의 경우와 유사한 경향을 나타내었다.

5.3 토의

실험으로 구한 파열압력과 Fig. 3의 한계하중 해석결과 및 Fig. 10의 파괴역학 해석결과를 종합적으로 비교하였으며, 이로부터 다음과 같은 결과를 도출하였다. 먼저 축방향 관통균열이 존재하는 세관의 경우 J_{IC} 가 크고 균열길이가 짧을 때 ($J_{IC}=945\text{kJ/m}^2$, $\rho \leq 3$)의 파괴역학 해석결과는 실험결



(a) Axial through-wall crack



(b) Circumferential through-wall crack

Fig. 10 Comparison of burst pressure predicted using fracture mechanics analysis with experimental data for axial through-wall cracked tubes

과를 다소 비보수적으로 예측하였다. 이는 균열길이 짧을 때 파손형태가 소성붕괴에 지배되기 때문인 것으로 생각되며, 비록 큰 차이는 없으나 균열길이 짧은 때의 한계하중 해석결과와 균열길이 길 때의 파괴역학 해석결과를 활용하면 보다 정확한 예측이 가능할 것으로 보인다. 반면 J_{IC} 가 작을 때($J_{IC}=471\text{kJ/m}^2$)의 파괴역학 해석결과는 $J_{IC}=945\text{kJ/m}^2$ 일 때의 결과와 전반적으로 유사한 경향을 보였으며, 분포의 차이는 있으나 한계하중 해석결과에 준하는 값을 예측하였다. 또한 원주방향 관통균열이 존재하는 세관의 경우 상대적으로 비교한 데이터의 수가 적기 때문에 명확한 판단을 내리기 어렵지만 축방향 관통균열 세관에서의 유사한 경향을 예측하는 것으로 보인다. 따라서 기존의 한계하중 해석법 대신 본 연구에서 제시한 파괴역학 해석법을 이용하더라도 균열 세관의 건전성을 적절히 평가할 수 있을 것으로 판단된다. 아울러 탄소성 파괴역학 해석법은 상대적으로 적은 실험 데이터만을 필요로 하기 때문에, 향후 상이한 재질 및 운전조건 또는 다중균열이 존재하는 구조물의 건전성평가시에도 확대 적용이 용이할 것으로 생각된다.

6. 결론

본 연구에서는 축방향 및 원주방향 관통균열이 존재하는 증기발생기 세관의 파열압력 예측을 위해 탄소성 파괴역학 해석법을 제안하고 타당성을 검증하였다. 이 과정에서 얻은 주요 결과는 다음과 같다.

- (1) 유한요소해석과 참조응력법을 기반으로 하여 균열 세관에 내압이 작용하는 경우에 대한 공학적 J -적분 및 COD 예측식을 새롭게 제시하였다. 제시된 예측식의 타당성은 3차원 유한요소해석 결과와의 비교를 통해 입증되었다.
- (2) 현재 산업체에서 주로 사용되고 있는 한계하중 해석법 뿐만 아니라 파괴역학 해석법을 이용하더라도 균열 세관의 건전성 평가가 가능할 것으로 생각된다.
- (3) 축방향 관통균열이 존재하는 세관의 경우 균열길이가 짧은 때($\rho \leq 3$)는 한계하중 해석을, 균열길이가 길 때는 파괴역학 해석을 수행하면 파열압력을 보다 정확히 예측할 수 있을 것으로 판단된다.
- (4) 원주방향 관통균열이 존재하는 세관의 경우 표준시험법에 따라 구한 J_{IC} 를 기반으로 파괴역학 해석을 수행하면 한계하중 해석에 비해 정확한 파열압력 예측이 가능하다.

후기

본 논문은 한국원자력연구소 및 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) MacDonald, P.E., Shah, V.N. and Ellison, P.G., 1996, "Steam Generator Tube Failure," NUREG/CR-6365, USNRC.
- (2) USNRC, 1976, "Base for Plugging Degraded PWR Steam Generator Tubes," Regulatory Guide 1.121.
- (3) Cochet, B. and Flesh, B., 1987, "Crack Stability Criteria in Steam Generator Tubes," 9th International Conference on SMiRT, Vol. D, pp. 413-419.
- (4) Yu, Y.J., Kim, J.H., Kim, Y. and Kim Y.J., 1994, "Development of Steam Generator Tube Plugging Criteria for Axial Cracks," International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 280, pp. 79-83.
- (5) Majumdar, S., 1999, "Failure and Leakage Through Circumferential Cracks in Steam Generator Tubing during Accident Conditions," International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 76, pp. 839-847.
- (6) Majumdar, S., Kasza, K., Franklin, J. and Muscara,

- J., 2000, "Pressure and Leak-Rate Tests and Models for Predicting Failure of Flawed Steam Generator Tubes," NUREG/CR-6664, USNRC.
- (7) Electric Power Research Institute, 1991, "Steam Generator Tube Integrity Volume 1: Burst Test Results and Validation of Rupture Criteria (Framatome Data)," EPRI NP-6865-L.
- (8) 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," *Trans. Of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 27, No. 1, pp. 26~33.
- (9) Shim, D.J., Kim, Y.J., Kim, Y.J., Hwang, S.S. and Kim, J.S., 2003, "Plastic Limit Load Solutions for Circumferential Surface Cracked Cylinders Under Combined Loading," *Trans. Of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 27, No. 9, pp. 1469~1476.
- (10) Moon, S.I., Chang, Y.S., Kim, Y.J., Lee, J.H., Song, M.H. and Choi, Y.H., 2004, "Assessment of Steam Generator Tubes with Multiple Axial Through-Wall Cracks," *Trans. Of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 28, No. 11, pp. 1741~1751.
- (11) Moon, S.I., Chang, Y.S., Kim, Y.J., Lee, J.H., Song, M.H., Choi, Y.H. and Hwang, S.S., 2004, "Evaluation of Plastic Collapse Behavior for Multiple Cracked Structures," *Trans. Of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 28, No. 11, pp. 1813~1821.
- (12) Moon, S.I., Chang, Y.S., Kim, Y.J., Lee, J.H., Song, M.H., Choi, Y.H. and Kim, J.S., 2005, "Development of Optimum Global Failure Prediction Model for Steam Generator Tube with Two Parallel Cracks," *Trans. Of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 29, No. 5, pp. 754~761.
- (13) Shin, K.I., Park, J.H., Kim, H.D., Chung, H.S. and Choi, Y.H., 2004, "Experimental and Analytical Study on Burst Pressure of a Steam Generator Tube with a T-type Combination Crack," *Trans. Of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 28, No. 2, pp. 158~164.
- (14) Shin, K.I., Park, J.H., Jung, M.J. and Choi, Y.H., 2004, "Fracture Mechanics Analysis of Steam Generator Tubes after Shot Peening," *Trans. Of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 28, No. 6, pp. 732~738.
- (15) ASME, 1998, "Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components," Sec.XI, ASME Boiler and Pressure Vessel Committee.
- (16) Ainsworth, R.A., 1984, "The Assessment of Defects in Structures of Strain Hardening Materials," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 19, pp. 633~42.
- (17) British Energy, 2001, "R6: Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects," Revision 4.
- (18) Kanninen, M.F., Zahoor, A., Wilkowski, G., Abou-Sayed, I., Marshall, 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 Report NP-2347, Electric Power Research Institute.
- (19) Miller, A.G., 1988, "Review of Limit Loads of Structures Containing Defects", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 32, pp. 191~327.
- (20) Webster, G.A. and Ainsworth, R.A., 1994, "High Temperature Component Life Assessment," Chapman and Hall.
- (21) Penny, R.K. and Marriot, D.L., 1995, "Design for Creep," Chapman and Hall.
- (22) Kim, Y.J., Shim, D.J., Huh, N.S. and Kim, Y.J., 2002, "Plastic Limit Pressure for Cracked Tubes Using Finite Element Limit Analyses," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 79, pp. 321~330.
- (23) Kim, Y.J., Chang, Y.S., Moon, S.I., Kim, C.H. and Song, K.H., 2004, "Development of Predictive Models for Failure of Flawed Steam Generator Tubes at Realistic Corrosion Environment," KAERI/CM-778/2004.
- (24) ASTM, 2001, "Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness," E1820-01.
- (25) Mills, W.J., 1981, "On the Relationship Between Stretch Zone Formation and the J-Integral for High Strain Hardening Materials," *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 9, pp. 56~62.