〈 논문 〉

증기발생기 세관의 파괴저항 특성 측정에 관한 연구

장윤석* · 허남수* · 안민용* · 김영진† · 황성식** · 김정수**

(2005 년 9 월 13 일 접수, 2006 년 2 월 26 일 심사완료)

A Study on the Measurement of Fracture Resistance Characteristics for Steam Generator Tubes

Yoon-Suk Chang, Nam-Su Huh, Min-Yong Ahn, Young-Jin Kim,
Seong-Sik Hwang and Joung-Soo Kim

Key Words : Burst Pressure(파열압력), DCPD Method(직류전위차법), Finite Element Analysis(유한요소해석), *J-R* curve(파괴저항곡선), Steam Generator Tube(증기발생기 세관)

Abstract

The structural and leakage integrity of steam generator tubes should be sustained against all postulated loads even if a crack is present. During the past three decades, most of the efforts with respect to integrity evaluation of steam generator tubes have been focused on limit load solutions but, recently, the applicability of elastic-plastic fracture mechanics was examined cautiously due to its effectiveness. The purpose of this paper is to introduce a testing method to estimate fracture resistance characteristics of steam generator tubes with a through-wall crack. Due to limited thickness and diameter, inevitably, the steam generator tubes themselves were tested instead of standard specimen or alternative ones. Also, a series of three dimensional elastic-plastic finite element analyses were carried out to derive closed-form estimation equations with respect to *J*-integral and crack extension for direct current potential drop method. Since the effectiveness of J_{IC} as well as *J-R* curves was proven through comparison with those of standard specimens taken from pipes, it is believed that the proposed scheme can be utilized as an efficient tool for integrity evaluation of cracked steam generator tubes.

1. 서 론

원자력발전소 증기발생기는 압력경계를 구성할 뿐만 아니라 1차 계통에서 생성된 열을 2차 계통으로 전달하는 중요한 부품이다. 현재 가동중인 가압경수로 증기발생기 세관의 경우 일반적으로 반경과 두께가 각각 약 10*mm*와 1*mm*이며, Alloy 600 재료로 제작되었다. 그러나 최근 들어 안전운전에 영향을 미칠 수 있는 다수의 손상사례가 발생된 바 있다.[1,2] 이에 따라 세관의 구조 및 누설 건전성 확보를 위해 많은 연구가 수행되었으며, 크게 한계하중 평가법과 파괴역학 평가법 관련 내용으로 구분할 수 있다.

한계하중 평가법은 지난 30여년간 해외에서 균열 세관의 건전성 입증을 위해 지속적으로 검토되어 온 방법으로써, 하중 지지능력 결정과 관련된 다양한 실험 및 해석 결과를 기반으로 광범위하게 적용되고 있다.[3,4] 우리나라에서도 수년전 발생한 세관파단(steam generator tube rupture) 사고 이후 단일 또는 다중 균열에 대한 독자적인 파열압력(burst pressure) 실험을 수행하고 공학적 해석식을 제시한 바 있다.[5~7] 한계하중 평가법이 주로 사용되어 온 이유는 세관의 재질이 오스테나이트계 합금과 유사할 뿐만 아니라 항복강도 또는 인장강도와 같은 기본적인 특성을 이용하여 간단하게 파열압력을 예측할 수 있기 때문이다. 그러나 운전조건의

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

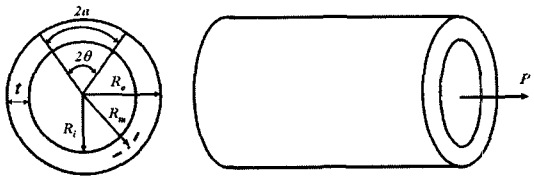


Fig. 1 Geometry and loading condition of tubular specimen

변화에 따른 차이를 일반화하기 어렵기 때문에 예측식의 신뢰성 확보를 위해서는 많은 양의 실험 데이터가 요구되는 단점이 있다.

파괴역학 평가법 또한 기본적으로 실험을 통해 파괴인성(fracture toughness, K_{IC} 또는 J_{IC}) 및 파괴저항곡선(*J-R curve*)을 측정하여야 하는 다소의 어려움은 있으나, 타당성이 입증된다면 상이한 운전조건을 고려할 경우에도 상대적으로 적은 실험 데이터만으로 비교적 정확한 건전성평가가 가능하다는 장점이 있다. 이러한 파괴역학 평가법의 효용성은 원자로 압력용기 및 배관에 대해서는 충분히 입증된 바 있다. 지금까지 증기발생기 세관에 적용한 사례는 많지 않으나, 최근 들어 관련 연구결과가 보고되고 있다. 대표적인 예로 T-형 복합균열을 고려한 세관 실험 및 탄성 파괴역학 해석이 수행된 바 있다.[8] 또한 저자들은 관통균열이 존재하는 세관을 대상으로 R6[9] 절차에 따른 평가를 수행하여 세관의 파손 형태는 소성붕괴와 탄소성파괴 영역에 걸쳐 있음을 보인 바 있다.[10]

전술한 바와 같이 탄소성 파괴역학 해석을 위해서는 재료의 파괴인성 및 파괴저항곡선이 필수적이다. 그러나 증기발생기 세관의 경우는 두께가 매우 얇기 때문에 표준 파괴인성 시험법에서 제시하고 있는 규격 시편을 제작할 수 없다. 또한 표준 형상의 시편을 제작한다고 하더라도 크기가 너무 작아 시험이 곤란하거나 실제 세관과 시편과의 균열부 구속 상태 차이로 인해 정확하게 세관의 파괴거동을 예측하기가 어렵다. 이러한 이유로 손상 세관의 파괴 거동 평가에 이용할 수 있는 신뢰성 있는 파괴인성 측정결과는 거의 없는 실정이다. 따라서 시편 제작과 실험을 용이하게 하고 세관의 파괴 거동도 정확하게 평가할 수 있는 새로운 파괴인성 측정 시험법이 필요하다.

본 논문의 목적은 관통균열이 존재하는 증기발생기 세관의 탄소성 파괴역학 평가에 필요한 파괴저항 특성 측정법을 실제 세관 시편을 기반으로 제시하고, 파괴저항시험을 수행하여 세관의 파괴저항곡선을 구하는 것이다. 이와 같은 세관 시편은 기존의 표준 시편과 달리 부수적인 기계적 가공이 필요 없기 때문에 제작이 용이하고 세관 균열부의 파괴거동도 정확하게 평가할 수 있다는 장점이 있다.

2. 손상 세관의 파괴저항곡선 계산식

2.1 손상 세관의 *J*-적분 계산식

시험으로부터 파괴저항곡선을 구하기 위해서는 *J*-적분과 균열진전량을 계산하여야 한다. 전체 *J*-적분은 탄성 성분과 소성 성분을 더하여 다음과 같이 결정한다.

$$J = J_{el} + J_{pl} \tag{1}$$

여기서, J_{el}은 *J*-적분의 탄성 성분으로 다음과 같이 구한다.

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

여기서, E는 탄성계수, K는 탄성 응력확대계수(elastic stress intensity factor), ν는 포아송의 비(Poisson's ratio)이다.

J-적분의 소성 성분(J_{pl})은 다음과 같이 구한다.

$$J_{pl} = \eta \frac{U_{pl}}{A_L} \tag{3}$$

여기서, U_{pl}은 하중-하중선변위 선도에서 구한 소성 면적, A_L은 잔여 리가먼트(ligament)의 면적, η는 실험보정계수이다.

증기발생기 세관에 작용하는 주된 하중은 내압이므로 본 논문에서는 세관의 파괴인성 측정법 제시를 위해 Fig. 1에 나타낸 바와 같은 인장하중이 작용하는 원주방향 관통균열 세관을 고려하였다. 이 경우에 대해 식 (1)~식 (3)을 다시 정리하면 다음과 같이 표현된다.

$$J = \frac{K^2(1-\nu^2)}{E} + \eta \frac{U_{pl}}{2\pi R_m t(1-\theta/\pi)} \tag{4}$$

따라서 손상 세관의 파괴저항곡선을 구하기 위해서는 식 (2)에 나타낸 탄성 *J*-적분 계산식(혹은 K 계산식)과 식 (3) 및 식 (4)에 나타낸 실험보정계수, 그리고 균열진전량 계산식이 제시되어야 한다.

본 연구에서는 직류전위차(direct current potential drop; DCPD)법을 이용하여 균열 진전량을 결정하였

Table 1 Summary of tensile properties for Alloy 600 used in the present study

Material	E (GPa)	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	$\sigma_f(=\frac{(\sigma_y+\sigma_u)}{2})$ (MPa)
Alloy 600 (20°C)	214	259	668	464

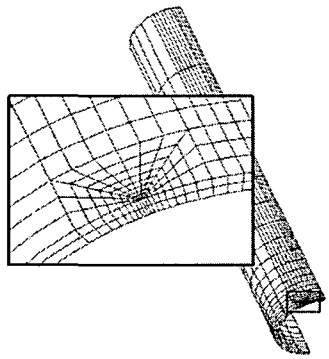


Fig. 2 Typical 3-D FE mesh employed in the present study

으며, 본 절에서는 유한요소해석을 기반으로 앞서 기술한 균열 세관에 대한 파괴인성 측정법을 제시하였다.

2.2 손상 세관의 η 및 K 계산식

손상 세관의 탄성 J-적분과 실험보정계수를 정의하기 위해 3차원 탄성 및 탄소성 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 2는 본 논문에서 구성한 대표적인 유한요소모델을 나타낸 것으로, 유한요소해석에는 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS[11]를 사용하였다. 해석 대상의 대칭성을 고려하여 전체의 1/4만을 모델링하였으며, 20절점 등계수 사각주요소(C3D20R in ABAQUS element library)를 사용하였다. 사용된 요소의 수는 1,440개이며, 소규모 변형률 해석(small strain analysis)을 적용하였다. 유한요소해석 시 세관의 균열 길이는 θ/π=0.2, 0.4, 0.6의 세 가지 경우를 고려하였다.

재료물성치는 세관에 적합한 실험보정계수를 제시하기 위해 실제 세관의 인장 물성치를 사용하였다. 본 논문에서 고려된 재질은 Alloy 600으로, 주요 인장 특성을 Table 1에 정리하여 나타내었으며 Fig. 3에 응력-변형률 곡선을 나타내었다. 탄소성 유한요소해석 시에는 ABAQUS 프로그램의 증분소성(incremental plasticity) 이론을 적용하여 Fig. 3에 나타낸 응력-변형률 곡선을 직접 입력조건으로 사용하였다.

J-적분값은 ABAQUS 프로그램의 영역적분법(domain integral)을 이용하여 직접 구할 수 있다.

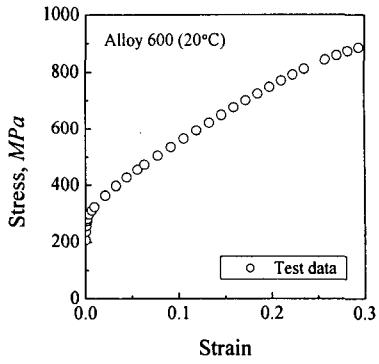


Fig. 3 True stress-strain curve for Alloy 600 used in the present study

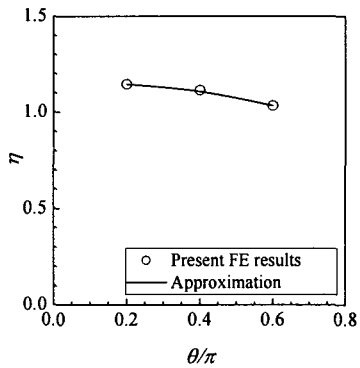


Fig. 4 Resulting values of the plastic η-factor for the plastic component of J for steam generator tube

3차원 균열 해석의 경우는 J-적분값이 두께 방향으로 변하게 되는데 본 논문에서는 두께에 대해 J-적분값을 평균하여 실험보정계수를 결정하였으며, 두께에 대한 평균 J-적분값이 실제 실험 결과와 잘 일치하는 것으로 알려져 있다. 이와 같이 구한 J-적분값을 식 (4)에 대입하여 정리하면 실험보정계수 η를 결정할 수 있다.

Fig. 4는 유한요소해석으로 구한 인장하중이 작용하는 원주방향 관통균열 세관의 실험보정계수를 나타낸 것이다. 이를 균열 길이에 대해 곡선 적합(curve fitting)하여 결정한 손상 세관의 실험보정계수는 다음과 같다.

$$\eta = -0.75\left(\frac{\theta}{\pi}\right)^2 + 0.34\left(\frac{\theta}{\pi}\right) + 1.10 \tag{5}$$

식 (5)의 곡선 적합 결과는 유한요소해석 결과와 1% 내에서 잘 일치하였으며, 이를 유한요소해석결과와 함께 Fig. 4에 나타내었다.

일반적으로 탄성 K-계산식은 많은 핸드북 등에 제시되어 있으므로 이를 이용하여 식 (2)와 (4)에

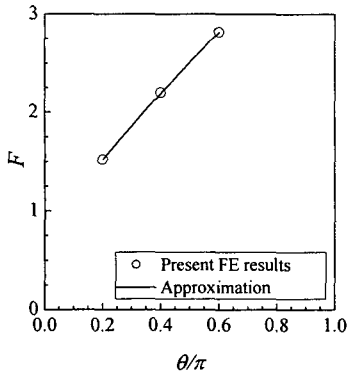


Fig. 5 Resulting values of the shape factor, F, for the stress intensity factor for steam generator tube

나타낸 탄성 J-적분을 구할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 손상 세관에 대한 보다 정확한 K-계산식을 유한요소해석 결과를 기반으로 제시하였다. 먼저 손상 세관의 K-계산식은 다음과 같이 표현된다.

$$K = \sigma^{\infty}\sqrt{\pi R_m \theta}F \quad \text{at } \sigma^{\infty} = P/(2\pi R_m t) \tag{6}$$

여기서, F는 형상보정계수이며 본 논문에서는 3차원 탄성 유한요소해석으로 인장하중이 작용하는 원주방향 관통균열 배관의 형상보정계수를 제시하였다. 해석에 사용된 유한요소모델은 Fig. 2와 동일하다. 균열 길이 역시 실험보정계수 정의 시 사용된 3가지 값이 동일하게 사용되었다.

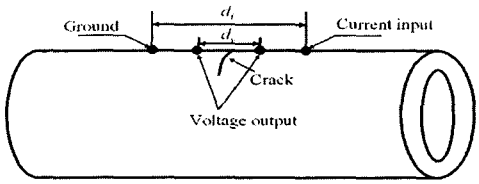
Fig. 5에 본 논문에서 구한 형상보정계수를 나타내었다. 유한요소해석으로 구한 형상보정계수를 균열 길이에 대해 곡선 적합하면 다음과 같다.

$$F = -0.88\left(\frac{\theta}{\pi}\right)^2 + 3.94\left(\frac{\theta}{\pi}\right) + 0.77 \tag{7}$$

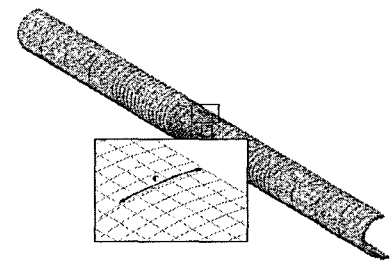
식 (7)의 곡선 적합 결과 역시 유한요소해석 결과와 1% 내에서 잘 일치하였으며, 유한요소해석 결과와 비교하여 Fig. 5에 함께 나타내었다. 따라서 식 (6)과 식 (7)을 이용하면 식 (4)의 우변 첫번째 항으로 표현되는 J-적분의 탄성 성분을 구할 수 있다.

2.3 DCPD 법을 이용한 손상 세관의 균열 길이 계산식

전술한 바와 같이 시험을 통해 파괴저항곡선을 구하기 위해서는 하중-균열 진전량 선도가 필요하며, DCPD법을 사용하기 위해서는 균열길이와 전위차 사이의 관계식을 결정하여야 한다. 이를 위해 본 논문에서는 3차원 유한요소 전기장 해석을 수행하여 DCPD법을 이용한 손상 세관의 균열 길이 계산식을 제시하였다.



(a) Electric potential wire locations



(b) Typical finite element mesh

Fig. 6 Schematic illustration of electric potential wire locations and typical 3-D mesh for FE electromagnetic analyses

Fig. 6(a)는 전류 입력단자와 전압 측정단자의 최적 위치 결정을 위한 개략도를 나타낸 것이며, Fig. 6(b)는 대표적인 유한요소 모델을 나타낸 것이다. 형상과 하중의 대칭성을 고려하여 1/2만을 모델링하였고, 입력 전류는 시험 조건과 동일하게 2A의 전류를 작용시켰다. 기준 전압(V_{ref})은 균열이 없는 시편에서의 전위차로 하였으며, 균열 길이(θ/π)를 0~0.9로 변화시키며 해석을 수행하였다.

Fig. 7은 최적의 위치(d_v=10mm, d_i=30mm)에서 해석으로 구한 무차원 균열길이와 무차원 전위차의 관계를 나타낸 것이다. 유한요소 전기장 해석 결과를 곡선 적합하면 DCPD법으로 구한 무차원 전위차와 손상 세관의 균열 길이의 관계를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\theta}{\pi} = 0.0003\left(\frac{V}{V_{ref}}\right)^3 - 0.0189\left(\frac{V}{V_{ref}}\right)^2 + 0.2702\left(\frac{V}{V_{ref}}\right) - 0.1911 \tag{8}$$

식 (8)의 곡선 적합 결과를 유한요소 전기장 해석 결과와 비교하여 Fig. 7에 함께 나타내었으며, 유한요소해석 결과와 잘 일치함을 확인하였다. 따라서 식 (8)을 이용하면 손상 세관에 대한 파괴저항시험시 DCPD법을 이용하여 균열 진전량을 구할 수 있다.

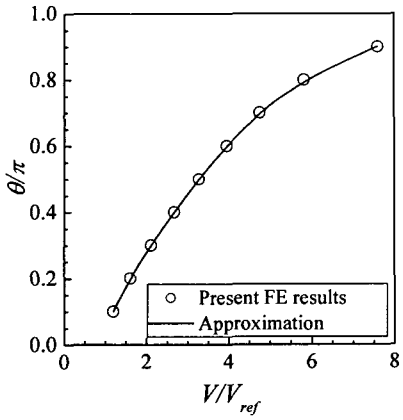


Fig. 7 Resulting calibration curve for crack length calculation

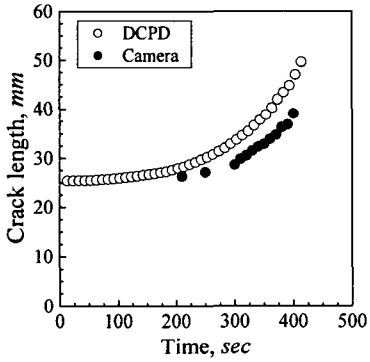
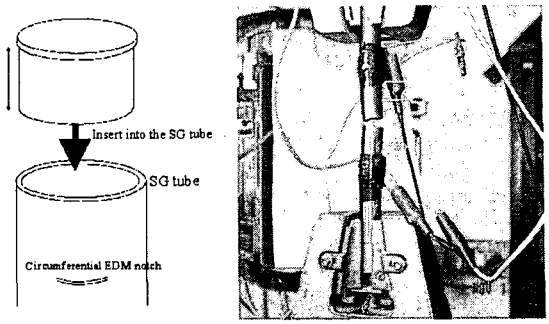


Fig. 9 Comparison of measured crack lengths by DCPD and high resolution camera



(a) Schematic of specimen and jig (b) Test facilities

Fig. 8 Fracture toughness test system

Table 2 Summary of fracture toughness test results

Specimen		Construction line: $J=2\sigma_f\Delta a$ (kJ/m^2)			Construction line: $J=4\sigma_f\Delta a$ (kJ/m^2)		
θ/π	ID	C_1	C_2	J_{IC}	C_1	C_2	J_{IC}
0.35	F01	1371	0.56	2344	1417	0.53	1257
	F02	1087	0.60	1925	1278	0.47	1337
	F03	1360	0.56	2330	1404	0.53	1245
0.40	F04	1292	0.50	1872	1348	0.44	1200
	F05	1357	0.55	1249	1454	0.47	990
	F06	1293	0.47	1917	1331	0.44	1322
0.45	F07	847	0.52	942	833	0.55	605
	F08	904	0.59	1052	869	0.71	499
	F09	853	0.60	945	827	0.70	471

3. 손상 세관의 파괴저항시험

3.1 시험장비 구성

Fig. 8은 손상 세관의 파괴저항시험을 위해 제작한 시편 고정기구(jig)의 대략적인 형상과 실험 중 촬영한 시험장치의 전반적인 구성을 나타낸 것이며, 파괴저항시험에는 100*kN* 용량의 전기유압식 만능시험기(INSTRON 4505)가 사용되었다. DCPD 측정단자는 시편에 직접 용접되었으며, 2*A*의 입력 전류를 사용하여 균열 진전량을 결정하였다. 또한 고배율 사진기를 보조 균열길이 측정 장비로 활용하였다.[12] 시험기는 변위제어(displacement control) 방식으로 제어하였으며, 데이터 및 영상 처리는 PC 및 A/D 변환기를 통해 실시간으로 수행하였다.

3.2 시편 준비 및 시험 절차

본 논문에서는 평균반경 및 두께가 각각 8.98*mm*와 1.09*mm*인 Alloy 600 세관 시편을 사용하였으며, 기계적 가공을 통하여 초기 원주방향 관통 노치를 삽입하였다. 균열 길이(θ/π)가 0.35, 0.40 그리고 0.45인 경우에 대해 각 3개씩 총 9개의 원주방향 관통균열이 존재하는 시편을 제작하였다. 해당 세관의 기계적 특성은 3개의 인장시험 결과를 평균하여 구하였다(Table 1 참고). 파괴저항실험 시 균열 진전량은 본 연구에서 제시한 DCPD법과 고배율 카메라를 이용하여 동시에 측정하였다.

실험이 수행되는 동안 하중, 하중선 변위, 균열길이 데이터를 측정하였으며, 측정 데이터와 본 논문에서 제시한 세관 파괴저항곡선 측정법을 이용하여 증기발생기 세관의 파괴저항곡선을 산출하였다.

4. 파괴저항시험 결과

4.1 파괴저항곡선 측정

앞서 언급한 바와 같이 원주방향 관통균열이 존재하는 증기발생기 세관에 대해 9개의 파괴저항 실험을 수행하였다. 먼저 변위제어 방식으로 인장

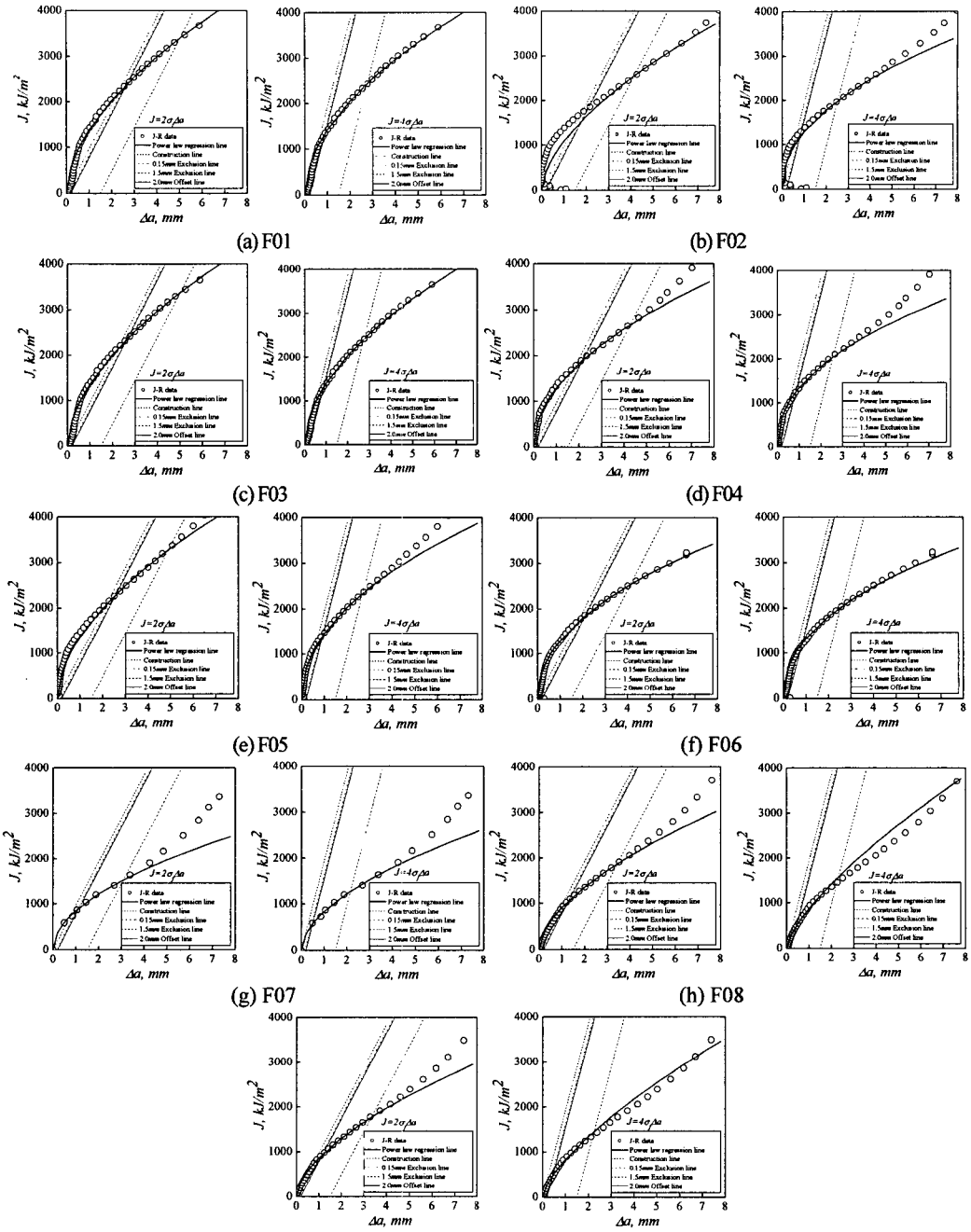


Fig. 10 Resulting fracture toughness (*J-R*) curves and J_{IC}

하중을 작용시킨 후, 하중 증가에 따른 하중-하중선변위 선도를 작성하였다. 이를 토대로 식 (1)~식 (7)에 따라 *J*-적분값을 계산하였으며, 측정한 전위차를 토대로 식 (8)을 이용하여 균열 진전량을 결정하였다. 최종적으로 *J*-적분값과 균열 진전량의 관계를 이용하여 파괴저항곡선을 작성하였으며 다음과 같은 멱급수(power law) 형태로 곡선적합하여 상수 C_1과 C_2를 결정하였다.

$$J = C_1(\Delta a)^{C_2} \tag{9}$$

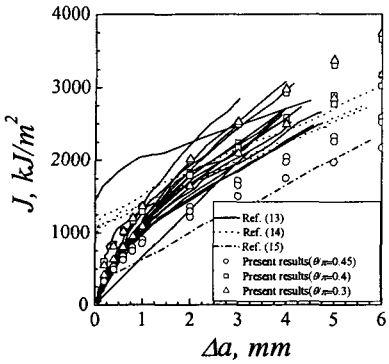


Fig. 11 Comparison of *J-R* curves with previous results

4.2 J_{IC} 결정

J_{IC} 값은 ASTM E813-89[13]에 제시되어 있는 절차에 따라 식 (9)로 표현되는 파괴저항곡선과 둔화직선(construction line)의 0.2*mm* 오프셋선(offset line)의 교점으로 구하였다. 단, 둔화직선 결정시 시험법에 제시된 $J=2\sigma_f\Delta a$와 더불어 고인성 재료에 사용 가능한 것으로 알려져 있는 $J=4\sigma_f\Delta a$를 모두 사용하여 J_{IC} 값을 결정하였다. J_{IC} 결정 시에도 Table 1에 나타낸 세관의 인장 특성을 사용하였다.

4.3 시험결과 분석

Fig. 9는 DCPD법과 고배율 사진기를 사용하여 측정한 균열길이를 비교한 것으로, 경향은 유사하지만 고배율 사진기로 구한 균열길이가 다소 작고 균열 진전량이 증가함에 따라 그 차이가 증가하였다. 본 연구에서는 사진기 이용시 시편의 단면이 원형으로 유지된다는 가정하에 평면영상으로부터 균열길이를 계산하는 단순한 방식을 채택하였기 때문에 유한요소 해석결과를 사용한 DCPD법으로 구한 균열길이가 보다 정확하며, 이를 파괴저항 특성 결정에 사용하였다.

Table 2는 각 시편에 대해 최종적으로 결정한 상수 C_1 및 C_2와 J_{IC} 값을 정리한 것이며, Fig. 10은 파괴저항곡선과 2가지 J_{IC} 결정과정을 도식적으로 나타낸 것이다. 동일 조건에서 수행된 실험결과는 서로 유사한 결과를 보여주고 있으나, 무차원 균열길이가 증가함에 따라 파괴저항곡선이 낮아지는 구속효과를 확인할 수 있었다.

Fig. 11은 증기발생기 세관을 대상으로 본 논문에서 결정한 파괴저항곡선을 타 기관에서 제시한 선행연구 결과[14~16]와 비교한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 연구기관에 따라 Alloy 600 재료로 구한 파괴저항곡선은 큰 차이를 보였다. 그러나 이는 타 기관의 경우 배관에서 채취한 두께 25.4*mm* 크기의 표준 시편을 사용하였고, 실험 온도도 24°C~343°C[14,16]와 315.56°C[15]로 본 논문의 조건과 상이하기 때문에 발생한 것으로 판단된다. 따라서 간접적이기는 하나 실험결과의 타당성을 확인하였으며, 제안된 파괴거동 측정법은 증기발생기 세관의 탄소성 파괴역학 평가를 위해 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 원주방향 관통균열이 존재하는 증기발생기 세관의 탄소성 파괴역학 평가에 필요한 파괴저항 특성 측정법과 결과를 제시하였으며, 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 인장하중 상태의 원주방향 관통균열 세관을 이용한 파괴저항시험법을 3차원 유한요소해석을 기반으로 새롭게 제시하였다.

(2) 본 논문에서 제시된 파괴저항시험법을 바탕으로 실제 세관 시편을 이용한 파괴저항시험을 수행하였으며, 얻어진 결과를 타 기관에서 기 수행한 결과와 비교하였다. 시험 조건과 시편 형상의 차이 등을 고려하면 본 논문에서 새롭게 얻어진 세관의 파괴저항곡선은 타당한 것으로 생각된다.

(3) 본 논문에서 제시한 실제 세관 시편을 이용하면 실제 세관 균열부의 구속 효과를 고려하여 정확하게 균열 거동을 평가할 수 있으며, 시편 제작을 위한 추가적인 기계적 가공이 필요 없다는 장점이 있다. 따라서 균열 길이의 변화에 따른 구속효과 및 최적의 J_{IC} 값 결정을 위한 추가적인 분석이 이루어진다면, 탄소성 파괴역학 평가에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

후 기

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., Ward, L.W. and Ellison P.G., 1996, "Steam Generator Tube Failures," NUREG/CR-6365, USNRC.

(2) Choi, Y.H. et. al., 2003, "Root Cause Analysis and Measures for Steam Generator Tube Rupture of Ulchin Unit 4," KINS/RR-203, KINS.

(3) 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.

(4) 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.

(5) Kim, H.S., Kim, J.S., Jin, T.E., Kim, H.D. and Chung, H.S., 2004,"Burst Pressure Evaluation for Through-Wall Cracked Tubes in the Steam Generator," *J. Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 28, No. 7, pp. 1006~1013.

(6) 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," *J. Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 29, No. 5, pp. 754~761.

(7) Moon, S.I., Chang, Y.S., Kim, Y.J., Lee, J.H., Song, M.H. and Choi, Y.H., 2005, "Evaluation of Plastic Collapse Pressure for Steam Generator Tube with Non-Aligned Two Axial Through-Wall Cracks," *J. Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 29, No. 8, pp. 1070~1077.

(8) 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," *J. Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 28, No. 2, pp. 158~164.

(9) British Energy, 2001, "R6: Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects," Revision 4.

(10) Chang, Y.S., Moon, S.I., Kim, Y.J., Hwang, S.S., Kim, J.S and Kim, Y.J., 2004, "Elastic-Plastic Fracture Mechanics Analyses for Burst Pressure Prediction of Through-wall Cracked Tubes," *J. Korean Society of Mechanical Engineers*, Accepted.

(11) ABAQUS Ver. 6.4, 2004, "User's Manual," Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc.

(12) Miura, N., Miyazaki, K., Hisatsune, M., Hasegawa, K. and Kashima, K., 2004, "Ductile Fracture Behavior of Class 2 and 3 LWR Piping and Its Implications for Flaw Evaluation Criteria," *Proceedings of 5th international Workshop on the Integrity of Nuclear Components*, pp. 27~39.

(13) ASTM, 1989, "Standard Test Method for J_{IC}, A Measure of Fracture Toughness," E813-89.

(14) Hiser, A.L., 1989, "Fracture Toughness Characterization of Nuclear Piping Steels," NUREG/CR-5188, USNRC.

(15) "Pipe Fracture Encyclopedia, Vol. 3-Pipe Fracture Test Data," Battelle, 1997.

(16) 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.