

< 논문 >

## 평행한 두 개의 균열이 존재하는 증기발생기 세관의 최적 광범위파손 예측모델 개발

문성인\* · 장윤석\* · 김영진† · 이진호\*\* · 송명호\*\* · 최영환\*\* · 김정수\*\*\*  
(2004년 12월 20일 접수, 2005년 3월 7일 심사완료)

### Development of Optimum Global Failure Prediction Model for Steam Generator Tube with Two Parallel Cracks

Seong-In Moon, Yoon-Suk Chang, Young-Jin Kim,  
Jin-Ho Lee, Myung-Ho Song, Young-Hwan Choi and Joung-Soo Kim

**Key Words :** Steam Generator Tube(증기발생기 세관), Plastic Collapse(소성붕괴), Failure Prediction Model(파손예측모델), Parallel Multiple Cracks(평행한 다중균열), Interaction Effect(간섭효과)

#### Abstract

The 40% of wall thickness criterion which has been used as a plugging rule of steam generator tubes is applicable only to a single cracked tube. In the previous studies performed by authors, several global failure prediction models were introduced to estimate the failure loads of steam generator tubes containing two adjacent parallel axial through-wall cracks. These models were applied for thin plates with two parallel cracks and the COD base model was selected as the optimum one. The objective of this study is to verify the applicability of the proposed optimum global failure prediction model for real steam generator tubes with two parallel axial through-wall cracks. For the sake of this, a series of plastic collapse tests and finite element analyses have been carried out for the steam generator tubes with two machined parallel axial through-wall cracks. Thereby, it was proven that the proposed optimum failure prediction model can be used as the best one to estimate the failure load quite well. Also, interaction effects between two adjacent cracks were assessed through additional finite element analyses to investigate the effect on the global failure behavior.

#### 1. 서론

가압경수로형 원자력발전소에서 증기발생기는 1차 냉각계통으로부터 2차 냉각계통으로 열을 전달하는 열교환기이며, 그 주요부품인 증기발생기 세관의 열전달면적은 전체 1차 압력경계의 50% 이상을 차지하고 있다.<sup>(1)</sup> 이러한 증기발생기 세관의 중요성을 고려하여 USNRC(US Nuclear Regulatory

Commission) 등에서는 세관 벽두께가 40% 이상 감육된 경우 관막음을 통해 건전성을 유지하도록 규정하고 있다.<sup>(2,3)</sup> 그러나 이는 특정 열화기구 및 세관 손상위치에 대해 지나치게 보수적인 것으로 알려져 있기 때문에 결함유형과 위치에 따라 서로 다른 기준을 적용하는 결함고유관리(steam generator defect specific management) 개념이 확산되고 있으며, 대체관막음기준(alternative repair criteria)을 개발하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있는 추세이다.<sup>(4,5)</sup> 이와 관련하여 프랑스가 설계한 일부 원전에서는 균열 깊이가 아니라 균열길이에 근거한 대체관막음기준을 사용하고 있다. 또한 국내외의 증기발생기 세관에서 발생하는 결함은 일반적으로 관판(tube sheet) 상단부에서 발견되고 있으며 다중균열의 양상을 띄고 있다. 그러나 아직까지 다중균열이 존재하는 경우에 대해서는 명확한 관보수

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

\* 성균관대학교 기계공학부

\*\* 한국원자력안전기술원

\*\*\* 한국원자력연구소

기준이 제시되어 있지 않은 실정이다.<sup>(4-8)</sup> 비록 다중균열의 거동을 평가하기 위한 몇몇 선행연구<sup>(9-12)</sup>가 수행된 바 있으나 대부분 탄성해석에 국한된 것이며, 증기발생기 세관과 같이 소성붕괴가 지배적인 경우에 대한 연구는 미비한 실정이다.

본 연구자들은 이전연구<sup>(13)</sup>에서 동일 직선상에 있는 두 균열(two collinear cracks)이 존재하는 세관의 건전성을 평가하기 위해 균열 사이 리거먼트(ligament)의 반력에 기초한 모델 및 소성역 접촉에 기초한 모델 등의 최적 국부파손 예측모델(optimum local failure prediction model)을 제안하였다. 이를 통해 하중이 증가함에 따라 동일 직선상에 있는 두 균열은 합체된 후 하나의 균열로 거동하지만, 평행한 두 개의 균열은 합체되지 않고 하나의 균열선단에서 찢김이 발생한 후 그 균열이 주 균열로 성장하여 소성붕괴됨을 언급한 바 있다. 또한 별도의 이전연구<sup>(14)</sup>에서 평판을 이용한 실험 및 유한요소해석을 수행하여 COD(Crack Opening Displacement)에 기초한 모델을 평행한 두 개의 균열이 존재하는 세관에 대한 최적 광범위파손 예측모델(optimum global failure prediction model)로 제시하였다. 그러나 평판을 이용하여 결정한 최적 광범위파손 예측모델을 형상이 다른 증기발생기 세관에 직접 적용할 수 있는지의 여부는 아직 평가되지 않은 상태이다.

본 논문의 목적은 평행한 두 개의 축방향 관통균열이 존재하는 실제 증기발생기 세관의 소성붕괴하중 평가를 통해 최적 광범위파손 예측모델의 타당성을 검증하는 것이다. 이를 위해 균열길이와 균열간 거리를 변화시키며 두 개의 관통균열을 가공한 10 개의 세관시편을 제작하여 소성붕괴실험을 수행하였다. 또한 이전연구에서 최적 광범위파손 예측모델로 제안된 COD에 기초한 모델을 사용하여 평행한 두 개의 축방향 관통균열이 존재하는 증기발생기 세관의 소성붕괴하중을 예측하며, 소성붕괴실험 결과와 비교하여 최적 광범위파손 예측모델의 타당성을 검증하였다. 이와 더불어 인접한 두 균열의 소성붕괴거동을 설명하기 위해 최적 광범위파손 예측모델을 이용하여 두 균열 사이의 간섭효과를 평가하였다.

## 2. 최적 광범위파손 예측모델

지금까지 구조물의 표면균열에 대한 합체기준으로는 ASME Section XI, BSI PD6493, 표면점의 연결방법 등이 제시되었으며, 표면점의 연결방법이 실험결과와 비교적 잘 일치하는 것으로 알려져 있다.<sup>(15-17)</sup> 이러한 실험결과는 두 균열 사이에 잔여 리거먼트가 없을 때, 즉 두 균열 사이의 리거먼트가 외부에서 가해지는 하중을 더 이상 견딜 수 없을 때 서로 합체됨을 의미한다. 그러나 이 합체기

준들은 소규모항복(small scale yielding)이 발생하는 경우에 적용할 수 있는 것으로서, 대규모항복(large scale yielding)의 지배를 받는 증기발생기 세관에는 적용하기 어렵다. 따라서 증기발생기 세관에 존재하는 다중균열의 거동을 예측하기 위한 대체기준 개발이 필수적이다. 본 연구자들은 평행한 두 개의 축방향 관통균열이 존재하는 증기발생기 세관의 변형거동을 평가하기 위해 다음과 같은 광범위파손 예측모델을 제안하였다.

### 2.1 광범위파손 예측모델

평행한 두 개의 축방향 관통균열이 존재하는 증기발생기 세관의 소성붕괴하중을 예측하기 위해 이전연구<sup>(14)</sup>에서는 COD를 이용한 광범위파손 예측모델을 제안한 바 있다. 이와 함께 국부파손 예측모델인 PZC-II, III도 함께 사용하여 소성붕괴압력을 예측하였으며, 각 예측모델의 주요 특징을 요약하면 다음과 같다.

(1) COD Base Model (CBM): 평행한 두 균열의 COD가 소성붕괴하중에서의 단일균열의 COD와 일치할 때 세관이 소성붕괴된다고 가정한다.

(2) Plastic Zone Contact Model II (PZC-II): 두 균열선단에서 성장하는 소성역이 서로 접촉할 때 증기발생기 세관이 소성붕괴된다고 가정한다. 소성은 상당응력(von Mises stress)이 인장강도에 도달될 때 발생한다고 가정한다.

(3) Plastic Zone Contact Model III (PZC-III): PZC-II와 동일하며 소성은 상당응력이 인장강도의 진응력값에 도달될 때 발생한다고 가정한다.

### 2.2 최적 광범위파손 예측모델 결정

이전연구<sup>(14)</sup>에서는 해석과 실험의 단순화를 위해 평판시편에 평행한 두 개의 관통균열을 가공하여 소성붕괴실험을 수행하였으며, 전술한 총 3 가지의 파손 예측모델을 사용하여 구한 소성붕괴하중과 비교하였다. Table 1은 예측결과( $P_{pl}^{est}$ )를 실험결과( $P_{pl}^{exp}$ )로 무차원화하여 나타낸 것이다. CBM 모델은 최고 3.8 % 및 평균 1.0 %의 편차 내에서 실험결과를 잘 예측하였으나 PZC-II, III을 사용하여 예측한 결과는 실험결과와 큰 차이를 보였다. 따라서 CBM 모델을 평행한 두 개의 축방향 관통균열이 존재하는 세관의 소성붕괴하중을 예측하기 위한 최적 광범위파손 예측모델로 결정하였다.

## 3. 증기발생기 세관 소성붕괴실험

이전연구에서 평판을 대상으로 제안한 최적 광범위파손 예측모델의 타당성을 검증하기 위해 평행한 두 개의 축방향 관통노치를 가공한 증기발생기 세관을 시편으로 가공하여 소성붕괴실험을 수

행하였다.

### 3.1 재료 및 시험편

본 실험에서는 가압경수로형 원자력발전소 증기 발생기 세관재료로 사용되고 있는 Inconel 600 성분의 세관을 시편으로 제작하여 사용하였다. 인장 실험과 소성붕괴실험은 외경과 두께가 각각 19.05 mm 와 1.09 mm 인 세관을 사용하여 수행하였다. 재료물성을 측정하기 위해 세관시편을 사용하여 인장실험을 수행하였으며 그 결과를 Table 2 에 나타내었다.

소성붕괴실험은 평행한 두 개의 축방향 관통노치가 존재하는 세관을 이용하여 수행하였으며 실험에 사용된 시편의 형상은 Fig. 1에 나타내었다. 균열을 모사하기 위한 노치는 전기방전가공(EDM)으로 제작하였으며 균열길이(2c)가 5, 8, 10 mm, 원주방향 균열간 거리(h)가 각각 1, 2, 4 mm인 경우에 대해 소성붕괴실험을 수행하였다. 이외에 2c가 8 mm, h가 8 mm인 두 균열과 2c가 5, 10 mm인 단일균열이 존재하는 시편에 대해서도 소성붕괴실험을 수행하였다.

### 3.2 실험장치 및 방법

증기발생기 세관 소성붕괴실험은 세관 내부에 작용하는 유체의 압력을 일정속도로 증가시켜 세관이 소성붕괴되는 순간의 하중을 측정하는 실험이다. 이를 위해 본 연구에서 사용한 소성붕괴 실험장치는 고압 발생장치, 데이터 취득장치, 시편 고정장치 및 제어장치로 구성되어 있으며 실험장치의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다.

일반적으로 가압률이 증가함에 따라 증기발생기 세관의 소성붕괴하중은 증가하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 가압률이 실험결과에 미치는 영향을 최소화하기 위해 2.8~4.1 MPa/s(400~600 psi/s)<sup>(13)</sup>의 속도로 가압하면서 소성붕괴실험을 수행하였다. 한편 EPRI 등에서는 관통균열의 경우에는 세관이 파열되기 전에 작동유체가 누설되는 것을 방지하기 위해 블래더(bladder)로서 플라스틱 세관을 사용하고, 블래더가 균열면을 가압하는 효과를 제거하기 위해 세관과 블래더 사이에 두께가 0.1524 mm(0.006 in) 이하인 보강박판(back-up foil)을 덧대도록 권고하고 있다.<sup>(20)</sup> 본 연구에서는 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 블래더로서 3.175 mm 두께의 타이곤(tygon) 호스를 사용하였으며, 보강박판으로 0.15 mm 두께의 황동박판<sup>(13)</sup>을 사용하였다.

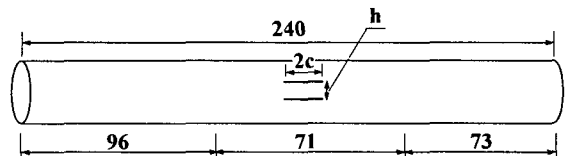
실험 시 하중증가에 따른 두 균열의 성장거동을 고배율 사진기를 사용하여 촬영하였고, 압력센서를 사용하여 세관시편 내면에 작용하는 하중을 측정하면서 세관이 소성붕괴 될 때까지 실험을 수행하였다. 이러한 데이터들은 시간-영상 또는 시간-하중 데이터의 형태로 실시간으로 PC에 저장하였다.

**Table 1** Normalized plastic collapse loads of thin plates containing two parallel through-wall cracks

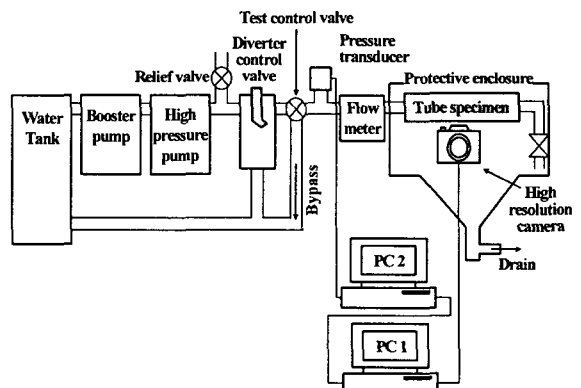
Crack size (mm)	$P_{pl}^{est}/P_{pl}^{exp}$		
	CBM	PZC-II	PZC-III
2c=5, h=1	0.962	0.688	0.830
2c=5, h=2	0.964	0.756	0.964
2c=5, h=4	0.976	0.872	1.067
2c=8, h=1	0.998	0.694	0.848
2c=8, h=2	0.996	0.770	0.964
2c=8, h=4	0.973	0.846	1.052
2c=10, h=1	1.027	0.730	0.829
2c=10, h=2	1.012	0.771	0.941
2c=10, h=4	1.000	0.854	1.042

**Table 2** Mechanical properties of Inconel 600 tube

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Elongation (%)	Poisson's ratio
285	674	214	40	0.3



**Fig. 1** Geometry of tubular specimen containing two parallel axial through-wall cracks



**Fig. 2** Schematic of plastic collapse test system

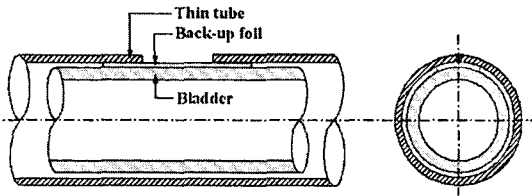


Fig. 3 Schematic of a tubular specimen with bladder and back-up foil

3.3 실험결과

Fig. 4는 하중증가에 따른 시편의 변형거동을 나타낸 것으로서 고배율 사진기를 사용하여 촬영한 것이다. (a)는 실험 수행전에 촬영한 사진으로 초기의 평행한 두 균열을 나타낸다. (b)는 비교적 낮은 하중상태에서의 균열부의 변형을 나타낸 것으로서 노치선단이 둔화(blunting)되고 두 균열의 COD가 거의 동일하게 증가된 모습을 볼 수 있다. (c)는 소성붕괴되기 직전의 모습을 나타낸 것으로서 한 균열의 COD가 크게 증가된 것을 확인할 수 있다. (d)는 실험후의 모습을 나타낸 것으로서 하나의 균열 선단에서만 불안정 균열성장이 발생한 것을 볼 수 있다. 따라서 낮은 하중상태에서는 두 균열의 COD가 거의 동일하게 증가하지만 내압이 소성붕괴하중에 가까워지면 하나의 균열에서 COD가 급격히 증가한 후 세관의 소성붕괴로 이어짐을 확인할 수 있다. 이때, 추가적인 하중증가 없이 불안정 균열성장이 발생하는 하중을 소성붕괴하중이라 정의하였다.

소성붕괴실험 결과는 Fig. 5에 나타내었다. 단,  $2c$ 가 5 mm이고  $h$ 가 1 mm인 시편의 소성붕괴하중은 본 연구에서 사용한 파열압력 시험기 용량을 초과하여 측정하지 못하였다. 평행한 두 개의 축방향 관통균열이 존재하는 증기발생기 세관의 소성붕괴하중은  $2c$ 가 클수록 감소하는 경향을 보였으나  $h$ 의 영향은 미미하였다. 제시된 결과는 다음 장에서 선형연구 및 최적 광범위파손 예측모델을 사용하여 구한 값의 타당성 입증에 사용된다.

4. 최적 광범위파손 예측모델을 이용한 소성붕괴하중 예측

4.1 유한요소해석

최적 광범위파손 예측모델의 타당성을 검증하기 위해 평행한 두 개의 축방향 관통균열이 존재하는 증기발생기 세관의 소성붕괴하중을 CBM 모델을 사용하여 예측한 후, 소성붕괴 실험결과와 비교하였다. 세관의 변형거동을 살펴보기 위해 3차원 탄소성 유한요소해석을 수행하였으며, 이 때 상용 프로그램인 ABAQUS Ver. 6.4를 사용하였다.

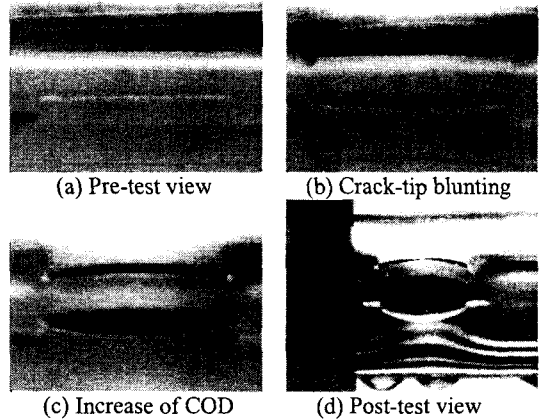


Fig. 4 Process of plastic collapse of SG tube containing two parallel axial through-wall cracks ( $2c=10$  mm,  $h=2$  mm)

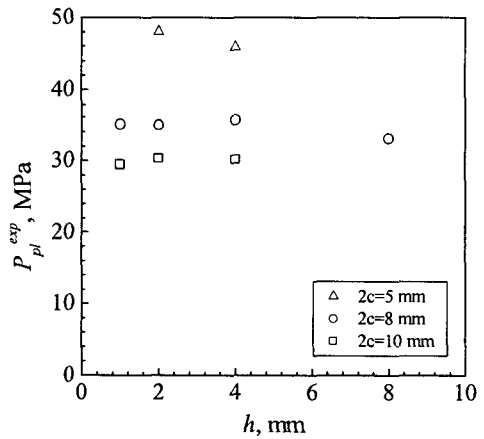


Fig. 5 Plastic collapse loads of SG tubes obtained from experiment

Fig. 6은 평행한 두 개의 축방향 관통균열이 존재하는 증기발생기 세관의 유한요소모델을 나타낸 것으로서 대칭성을 이용하여 1/4만 모델링 하였으며, 20절점 요소(20-node brick element)를 사용하여 요소망을 구성하였다. 해석에는 약 2,400개의 요소와 약 15,000개의 절점을 사용하였다. 이 때 노치 선단의 곡률반경은 실제 시편과 동일하게 0.09 mm로 고려하였다.

최적 광범위파손 예측모델을 사용하여 세관의 소성붕괴하중을 계산하였으며, 그 결과를 실험치로 무차원화하여 Table 3에 제시하였다.

4.2 결과 및 토의

최적 광범위파손 예측모델인 CBM 모델을 사용하여 평행한 두 개의 축방향 관통균열이 존재하는

증기발생기 세관의 소성붕괴하중( $P_{pl}$ )을 예측하기 위해서는 먼저 축방향 단일 관통균열이 존재하는 세관의 소성붕괴하중( $P_{cr}$ )을 결정해야 한다. 축방향 단일 관통균열이 존재하는 세관의 소성붕괴하중은 한계하중법에 기초하여 원주방향응력이 유동응력(flow stress)값에 도달할 때 발생한다는 개념과 세관의 부풀을 고려하여 제시된 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다.<sup>(21)</sup>

$$P_{cr} = \frac{\sigma_f t}{M_T R} \tag{1}$$

여기서,  $\sigma_f$ 는 식 (2)와 같이 정의되는 유동응력,  $t$ 는 관두께,  $R$ 은 세관의 평균반경,  $M_T$ 는 Erdogan 이 제시한 벌장계수(bulging factor)로서 식 (3) 및 (4)와 같이 표현된다.

$$\sigma_f = k(\sigma_y + \sigma_u) \tag{2}$$

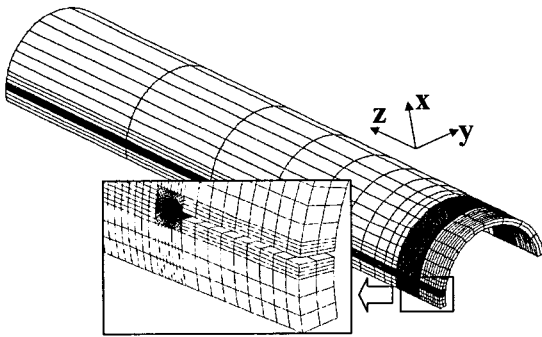


Fig. 6 A typical finite element mesh of SG tube containing two parallel axial through-wall cracks ( $2c=5$  mm,  $h=4$  mm)

Table 3 Normalized plastic collapse loads of SG tubes containing two parallel axial through-wall cracks

Crack size (mm)	$P_{pl}^{est} / P_{pl}^{exp}$
$2c=5, h=1$	-
$2c=5, h=2$	0.922
$2c=5, h=4$	0.925
$2c=8, h=1$	1.034
$2c=8, h=2$	1.008
$2c=8, h=4$	0.943
$2c=8, h=8$	0.968
$2c=10, h=1$	1.084
$2c=10, h=2$	1.020
$2c=10, h=4$	0.974

$$M_T = 0.614 + 0.481\lambda + 0.386 \exp(-1.25\lambda) \tag{3}$$

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

$$\lambda = [12(1 - \nu^2)]^{0.25} (c/\sqrt{Rt}) \tag{4}$$

여기서,  $k$ 는 유동응력계수,  $\sigma_y$ 는 항복강도,  $\sigma_u$ 는 인장강도,  $\lambda$ 는 셸 파라미터,  $\nu$ 는 푸아송비,  $c$ 는 균열길이의 1/2이다. 식 (1)을 사용하여 소성붕괴하중을 예측한 결과는 약 3% 이내에서 실험결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

균열 증앙에서의 COD( $\delta_0$ )의 변화는 유한요소 해석을 수행하여 계산하였다. Fig. 7은 평행한 두 개의 균열이 존재하는 세관에 대한 균열부의 변형 형태를 나타낸 것으로서 COD의 정의를 함께 도시하였다. 두 균열 사이의 간섭효과에 의해 균열을 중심으로 상하의 변형이 다르게 나타났다. 본 연구에서는 반경방향 변위는 무시하고 원주방향 변위만을 고려하여 COD를 정의하였다. Fig. 8은 세관에 단일균열이 존재하는 경우 하중증가에 따른  $\delta_0$ 의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 단일균열이 존재하는 세관의 소성붕괴하중은 유동응력계수 0.5와 식 (1)을 사용하여 계산하였으며, 소성붕괴하중에서의  $\delta_0$ 는 'X' 기호로 표시하였다. 본 연구에서는 이 값을  $\delta_0$ 의 임계값으로 정의하였으며  $(\delta_0)_{crit}$ 로 나타내었다.  $(\delta_0)_{crit}$ 값들로부터 최소자승 오차법을 이용하여 다음과 같은 곡선식을 유도하였다.

$$(\delta_0)_{crit} = 0.3523t \left( \frac{PR}{\sigma_f t} \right)^{-1.7406} \tag{5}$$

여기서,  $P$ 는 내압이다. 이 선도는 균열 증앙에서의 임계 COD를 결정하기 위해 사용되며, 또한 평행한 두 개의 축방향 관통균열이 존재하는 세관의 소성붕괴하중을 예측하는데 사용된다. 평행한 두 개의 균열이 존재하는 세관에서  $\delta_0$ 는 유한요소 해석을 수행하여 계산하였으며, 이를 Fig. 9에 나타내었다. CBM 모델에서 평행한 두 개의 균열이 존재하는 세관의 소성붕괴하중은 식 (5)의  $P - (\delta_0)_{crit}$  선도와 평행한 두 균열의  $P - \delta_0$  선도의 교차점으로 결정된다.

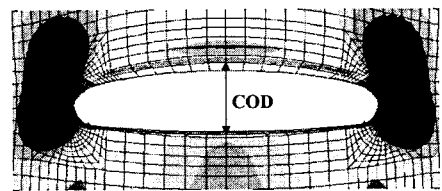


Fig. 7 Three dimensional deformed shape of SG tube around crack ( $2c=8$  mm,  $h=4$  mm)

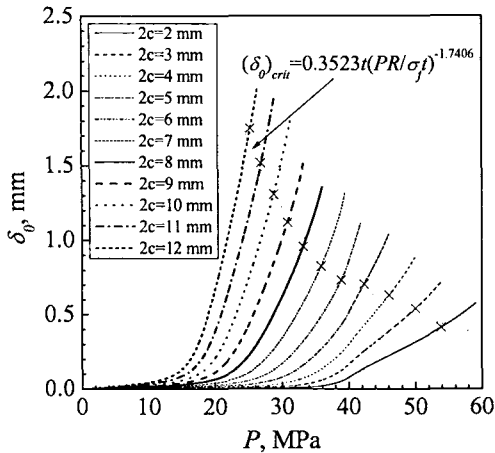


Fig. 8  $P-(\delta_0)_{crit}$  curve for a single crack

Fig. 10은 CBM 모델을 사용하여 구한 소성붕괴 하중을 실험결과와 비교하여 나타낸 것으로서 예측값은 최고 8.4%, 평균 1.4% 내에서 실험결과를 잘 예측하였다. 따라서 평판시편을 사용하여 결정된 최적 광범위파손 예측모델인 CBM 모델은 평행한 두 개의 축방향 관통균열이 존재하는 증기발생기 세관의 소성붕괴하중 예측을 위해서도 사용 가능한 것으로 입증되었다. 이는 반경방향의 COD가 원주방향 COD에 비해 무시할 만큼 작아서 소성붕괴압력에 미치는 영향이 미미하기 때문인 것으로 판단된다.

일반적으로 증기발생기 세관에 대한 유동응력계수는 0.5~0.6의 값으로 알려져 있다<sup>(22)</sup>. 유동응력의 영향을 평가하기 위해 유동응력계수로서 0.55를 사용하여 평행한 두 개의 균열이 존재하는 세관의 소성붕괴하중을 예측한 결과, 유동응력이 10% 증가될 때 소성붕괴하중도 약 10% 증가하는 것으로 평가되었다.

### 5. 다중균열 간섭효과

전술한 실험 및 예측 결과로부터 평행한 두 개의 축방향 관통균열이 존재하는 증기발생기 세관의 소성붕괴하중 예측시 CBM 모델을 사용하는 것이 타당함을 확인하였다. 한편 평행한 두 개의 관통균열이 존재할 경우에는 단일관통균열이 존재하는 경우에 비해 더 큰 소성붕괴하중을 나타내는 것으로 알려져 있다.<sup>(9,10)</sup> 다중균열이 존재하는 증기발생기 세관의 안전운전 여부를 신속하게 결정하기 위해서는 두 균열 사이에 발생하는 간섭효과에 대한 체계적인 검토가 필요하다. 따라서 본 장에서는 두 균열 사이의 간섭효과를 평가하기 위해

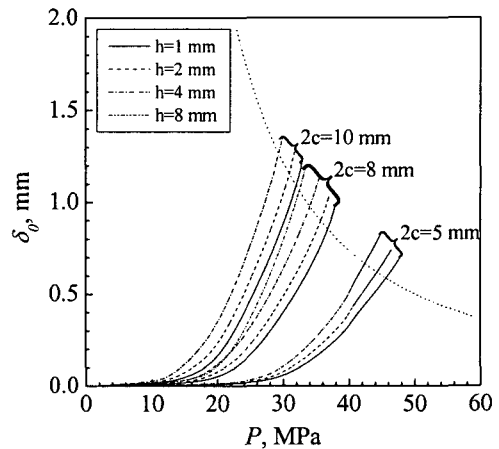


Fig. 9  $P-\delta_0$  curve for two parallel cracks

추가적인 3 차원 유한요소해석을 수행하였다. 최적 광범위파손 예측모델인 CBM 모델을 사용하여 2c가 4, 6, 8, 10 mm이고 h가 각각 1, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20 mm인 경우에 대하여 소성붕괴하중을 계산하였으며, 그 결과로부터 두 균열 사이에 발생하는 간섭효과를 정량적으로 평가하였다.

Fig. 11은 식 (1)을 사용하여 구한 단일균열 세관과 CBM 모델을 적용하여 구한 평행한 두 균열이 존재하는 세관의 소성붕괴하중을 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 12는 유한요소해석 결과로부터 평행한 두 개의 균열이 존재하는 세관의 소성붕괴하중( $P_D$ )을 단일균열세관의 소성붕괴하중( $P_S$ )으로 무차원화하여 도시한 것이다. 두 균열 사이의 거리가 가까울 때, 즉, h가 약 5 mm 이하일 경우에는 두 균열이 존재하는 세관의 소성붕괴하중이 단일균열이 존재하는 세관의 소성붕괴하중보다 더 크게 나타났다. 이러한 경향은 무한평판에 존재하는 평행한 두 개의 관통균열에 대한 Murakami의 연구,<sup>(9)</sup> 유한평판에 존재하는 평행한 두 개의 표면균열에 대한 조영진 등의 연구<sup>(10)</sup>와 일치하는 것으로 다중균열이 존재할 경우 균열선단의 응력장이 완화되는 것으로 판단된다. 또한 균열간 거리가 작아질수록 균열길이에 상관없이 거의 동일한 간섭효과를 보였다. 그러나 h가 약 5 mm 이상일 경우에는 단일균열이 존재하는 세관에 비해 두 균열이 존재하는 세관의 소성붕괴하중이 더 작게 나타났으며, 2c가 증가할수록  $P_D/P_S$ 가 감소하여 간섭효과가 증가하는 경향을 보였다. h가 20 mm인 경우에는 두 균열과 단일균열이 존재하는 세관의 소성붕괴하중의 비가 1.0에 근접하여 두 균열 사이의 간섭효과가 사라지는 것으로 평가되었으며, 그 결과 두 균열은 각각 단일균열로 거동하게 될 수 있다.

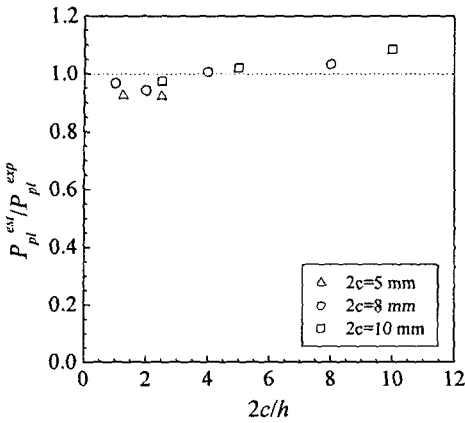


Fig. 10 Normalized plastic collapse load of SG tubes with two parallel cracks

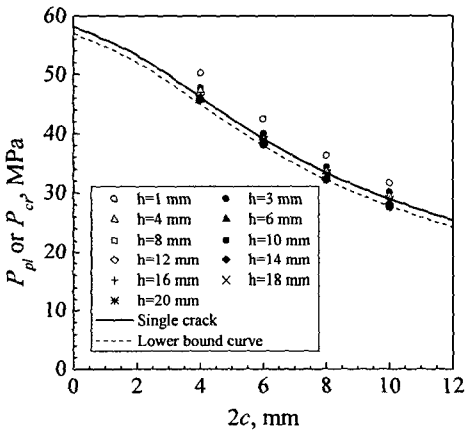


Fig. 11 Plastic collapse loads of SG tubes with two parallel cracks or a single crack

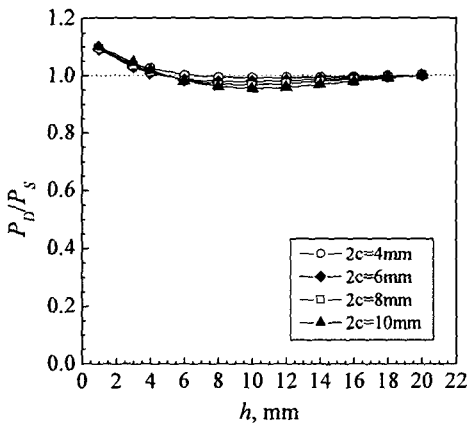


Fig. 12  $P_D/P_S - h$  curve

이상의 결과로부터 증기발생기 세관에 평행한 두 개의 축방향 관통균열이 존재할 때 균열간 거리가 5 mm 이하 또는 20 mm 이상이면 두 균열은 각각 단일균열로 취급해도 건전성에 이상이 없는 것으로 나타났다. 또한 균열간 거리가 약 5 mm 이상 또는 20 mm 이하이면 안전성을 고려한 보수적 관점에서 Fig. 11에 도시한 하한계 곡선을 사용하여 건전성을 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

### 6. 결론

본 연구에서는 평행한 두 개의 축방향 관통균열이 존재하는 증기발생기 세관의 소성붕괴하중을 예측하기 위해 Inconel 600 세관시편을 사용하여 소성붕괴실험을 수행하고, 유한요소해석을 수행하여 최적 광범위파손 예측모델의 타당성을 검증하였다. 또한 두 균열 사이에 나타나는 간섭효과를 평가하기 위한 추가적인 해석을 수행하였다. 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 소성붕괴실험과 3차원 유한요소해석을 이용하여 타당성을 검증한 결과, 본 논문에서 제시한 COD에 기초한 모델(CBM)은 평행한 두 개의 축방향 관통균열이 존재하는 증기발생기 세관의 소성붕괴하중을 정확하게 예측하였다.
- (2) CBM 모델을 적용하여 두 균열 사이에 나타나는 간섭효과를 평가하였다. 균열간 거리가 약 5 mm 이하인 다중균열의 경우에는 단일관통균열이 존재하는 경우에 비해 더 높은 소성붕괴하중을 보였으며, 그 이상인 경우에는 더 낮은 소성붕괴하중을 나타내었다.
- (3) 균열간 거리가 20 mm 이상인 경우에는 두 균열의 간섭효과가 사라지고, 두 균열은 각각 별개의 단일균열 형태로 거동하였다.

### 후기

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

### 참고문헌

- (1) USNRC, 1996, "Steam Generator Tube Failures," NUREG/CR6365.
- (2) USNRC, 1976, "Bases for Plugging Degraded PWR Steam Generator Tubes," Regulatory Guide 1.121.
- (3) ASME, 1998, "Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components," ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III.

- (4) Cochet, B. and Flesch, B., 1987, "Crack Stability Criteria in Steam Generator Tubes," *9th Int. Conference on SMiRT*, Vol. D, pp. 413~419.
- (5) Yu, Y.J., Kim, J.H., Kim, Y. and Kim, Y.J., 1994, "Development of Steam Generator Tube Plugging Criteria for Axial Crack," *ASME PVP*, Vol. 280, pp. 79~83.
- (6) Gorman, J.A., Harris, J.E. and Lowenstein, D.B., 1995, "Steam Generator Tube Fitness-for-Service Guidelines," AECB Report, No. 2.228.2
- (7) Lee, J.H., Park, Y.W., Song, M.H., Kim, Y.J. and Moon, S.I., 2000, "Determination of Equivalent Single Crack Based on Coalescence Criterion of Collinear Axial Cracks," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 205, pp. 1~11.
- (8) Kim, J.S. et al., 1999, "Investigation Report for Steam Generator Tubes Pulled Out from Ulchin #1."
- (9) Murakami, Y., 1987, "Stress Intensity Factors Handbook," pp. 204~205.
- (10) Cho, Y.J., 1990, "A Study on the Interaction Effect of Adjacent Semi-Elliptical Crack," Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University.
- (11) Hasegawa, H., Miyazaki, K. and Kanno, S., 2001, "Interaction Criteria for Multiple Flaws on the Basis of Stress Intensity Factors," *ASME PVP*, Vol. 422, pp. 23~29.
- (12) Moussa, W.A., Bell, R. and Tan, C.L., 1999, "The Interaction of Two Parallel Non-Coplanar Identical Surface Cracks under Tension and Bending," *Int. J. PVP*, Vol. 76, pp. 135~145.
- (13) 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," *J. Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 28, No. 11, pp. 1813~1821.
- (14) Moon, S.I., Kim, Y.J. and Lee, J.H., 2003, "Estimation of Plastic Collapse Load of Steam Generator with Two Parallel Axial Through-Wall Cracks," *ASME PVP*, Vol. 464, pp. 223~230.
- (15) Kim, Y.J., Choy, Y.S. and Lee, J.H., 1993, "Development of Fatigue Life Prediction Program for Multiple Surface Cracks," *ASTM STP 1189*, pp. 536~550.
- (16) Shibata, K., Yokoyama, N., Ohba, T., Kawamura, T. and Miyazono, S., 1985, "Growth Evaluation of Fatigue Cracks from Multiple Surface Flaws (I)," *J. Japanese Nuclear Society*, Vol. 28, No. 2, pp. 250~262.
- (17) Shibata, K., Yokoyama, N., Ohba, T., Kawamura, T. and Miyazono, S., 1986, "Growth Evaluation of Fatigue Cracks from Multiple Surface Flaws (II)," *J. Japanese Nuclear Society*, Vol. 28, No. 3, pp. 258~265.
- (18) Diercks, D.R., 1999, "Steam Generator Tube Integrity Program Monthly Report"
- (19) EPRI, 1991, "Steam Generator Tube Integrity," EPRI NP-6865-L, Vol. 1
- (20) McIlree, A., 2002, "Steam Generator Tubing Burst Testing and Leak Rate Testing Guidelines," EPRI, Technical Report 1006783.
- (21) Erdogan, F., 1976, "Ductile Failure Theories for Pressurized Pipes and Containers," *Int. J. PVP*, Vol. 4.
- (22) USNRC, 1997, "Failure Behavior of Internally Pressurized Flawed and Unflawed Steam Generator Tubing at High Temperatures - Experiments and Comparison with Model Predictions," NUREG/CR 6575.