

< 논문 >

## 두 개의 비대칭 축방향 관통균열이 존재하는 증기발생기 세관의 소성붕괴압력 평가

문성인\* · 장윤석\* · 김영진† · 이진호\*\* · 송명호\*\* · 최영환\*\*  
(2005년 1월 21일 접수, 2005년 7월 11일 심사완료)

### Evaluation of Plastic Collapse Pressure for Steam Generator Tube with Non-Aligned Two Axial Through-Wall Cracks

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

**Key Words :** Steam Generator Tube(증기발생기 세관), Plastic Collapse(소성붕괴), Failure Prediction Model(파손예측모델), Non-Aligned Multiple Cracks(비대칭 위치에 있는 다중균열)

#### Abstract

The 40 % of wall thickness criterion which has been used as a plugging rule is applicable only to a single cracked steam generator tubes. In the previous studies performed by authors, several failure prediction models were introduced to estimate the plastic collapse pressures of steam generator tubes containing collinear or parallel two adjacent axial through-wall cracks. The objective of this study is to examine the failure prediction models and propose optimum ones for non-aligned two axial through-wall cracks in steam generator tubes. In order to determine the optimum ones, a series of plastic collapse tests and finite element analyses were carried out for steam generator tubes with two machined non-aligned axial through-wall cracks. Thereby, either the plastic zone contact model or COD based model was selected as the optimum one according to axial distance between two cracks. Finally, the optimum failure prediction model was used to demonstrate the conservatism of flaw characterization rules for various multiple flaws according to ASME code.

#### 1. 서론

가압경수로형 원자력발전소에 사용되는 증기발생기 세관은 열전달 및 압력경계 구성이라는 두 가지의 고유 기능을 수행한다. 이러한 증기발생기 세관의 중요성을 고려하여 USNRC(US Nuclear Regulatory Commission) 등에서는 세관 벽두께가 40 % 이상 감육된 경우 판막음을 통해 건전성을 유지하도록 규정<sup>(1,2)</sup>하고 있으나, 이는 특정 열화기구 및 세관 손상위치에 대해 지나치게 보수적인

것으로 알려져 있다. 또한 국내의 증기발생기 세관의 결함은 일반적으로 관판(tube sheet) 상단부에서 발견되며 다중균열의 형태를 띄고 있으나, 아직까지 이에 대해서는 명확한 판보수 기준이 제시되어 있지 않은 실정이다<sup>(3-5)</sup>. 비록 다중균열의 거동을 평가하기 위한 몇몇 선행연구<sup>(6-8)</sup>가 수행된 바 있으나 대부분 탄성해석에 국한된 것이며, 증기발생기 세관과 같이 소성붕괴에 의해 파손이 지배되는 경우에 대한 연구는 미비한 실정이다.

본 연구자들은 이전연구<sup>(9)</sup>에서 실제 다중균열을 동일 직선상에 있는 두 개의 축방향 균열(collinear two axial through-wall cracks)과 평행한 두 개의 축방향 균열(parallel two axial through-wall cracks)로 이상화하여 각각에 대한 최적 파손예측 모델을 제시한 바 있다. 세관의 파손을 예측하기 위해 동일 직선상에 있는 두 개의 축방향 관통균열이 존재하는 경우에는 반력에 기초한 모델과 소성역의 접촉에 기초한 모델을 최적 국부파손 예측모델

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail : yjkim50@skku.edu

TEL : (031)290-5274 FAX : (031)290-5276

\* 성균관대학교 기계공학부

\*\* 한국원자력안전기술원

(optimum local failure prediction model)로, 평행한 두 개의 축방향 관통균열이 존재하는 경우에는 COD(Crack Opening Displacement)에 기초한 모델을 최적 광범위파손 예측모델(optimum global failure prediction model)로 선정하였다. 그러나 비파괴검사 에서 발견된 균열을 대상으로 건전성을 평가하기 위해서는 보다 실제 형상에 가까운 다중균열의 파손을 예측할 수 있는 모델 개발이 필요하다.

본 논문의 목적은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 비대칭 위치에 있는 두 개의 축방향 관통균열(non-aligned two axial through-wall cracks)이 존재하는 증기발생기 세관의 소성붕괴압력을 평가하기 위한 최적 파손 예측모델을 결정하는 것이다. 이를 위해 균열길이와 균열간 거리를 변화시키며 비대칭 위치에 있는 두 개의 관통균열을 가공한 9개의 세관시편을 제작하여 소성붕괴실험을 수행한다. 또한 이전연구에서 제시된 최적 국부파손 및 광범위 파손 예측모델의 적용성을 분석한 후, 소성역의 접촉에 기초한 모델과 COD에 기초한 모델을 사용하여 소성붕괴하중을 예측하고 최적의 파손 예측모델을 결정한다. 최종적으로, 선정된 최적 파손 예측모델을 이용한 세관 건전성평가 및 비교를 통해 다중균열을 단일균열로 이상화하기 위해 사용되고 있는 현 ASME 기준의 보수성을 분석하고자 한다.

## 2. 다중균열 세관에 대한 파손 예측모델

### 2.1 다중결함 합체기준

구조물의 표면결함에 대한 합체기준으로는 ASME Section XI, BSI PD6493, 표면점의 연결방법 등이 제시된 바 있으며, 표면점의 연결방법이 실험결과와 비교적 잘 일치하는 것으로 알려져 있다<sup>(10-12)</sup>. 이러한 실험결과는 두 균열 사이에 잔여 리거먼트(ligament)가 없을 때, 즉, 두 균열 사이의 리거먼트가 외부에서 가해지는 하중을 더 이상 견딜 수 없을 때 서로 합체됨을 의미한다. 그러나 제시되어 있는 합체기준들은 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 요구되고 있다.

### 2.2 최적 국부파손 및 광범위파손 예측모델

증기발생기 세관에 동일 직선상으로 존재하는 두 개의 축방향 관통균열의 경우에는 작용 압력이 증가함에 따라 두 균열사이의 리거먼트에 응력과 변형이 집중된다. 이를 고려하여 이전연구<sup>(9)</sup>에서는 소성붕괴압력 예측을 위한 다양한 모델을 제안하

였으며, 이들 중 반력에 기초한 모델과 소성역의 접촉에 기초한 모델을 최적 국부파손 예측모델로 결정하였다. 한편 평행한 두 개의 축방향 관통균열이 존재하는 증기발생기 세관의 소성붕괴압력을 예측하기 위해서는 COD를 이용한 광범위파손 예측모델을 제안한 바 있다. 이러한 최적 국부파손 및 광범위파손 예측모델의 주요 특징은 다음과 같다.

(1) Reaction Force Model (RFM): 두 균열 사이의 리거먼트에 작용하는 반력이 증가하다가 감소하기 시작할 때 두 균열이 합체된다고 가정한다.

(2) Plastic Zone Contact Model II (PZC-II): 두 균열 선단에서 성장하는 소성역이 서로 접촉할 때 두 균열은 합체된다고 가정한다. 소성은 상당응력이 인장강도에 도달될 때 발생한다고 가정한다.

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

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

한편 비대칭 위치에 있는 두 개의 축방향 관통균열이 존재하는 증기발생기 세관의 파손거동은 동일 직선상에 있는 두 개의 축방향 균열과 평행한 두 개의 축방향 관통균열에 대한 파손모드가 복합적으로 작용하여 결정될 것으로 판단된다. 따라서 비대칭 위치에 있는 두 개의 축방향 관통균열이 존재하는 세관의 소성붕괴를 예측하기 위한 본 연구에서는 최적 국부파손 예측모델과 최적 광범위파손 예측모델의 적용 타당성을 모두 검토하고자 한다. 단, 전술한 4가지 파손 예측모델 중 공학적으로 널리 사용되고 있으며 비대칭 조건을 고려한 3차원 전체 유한요소모델 적용이 가능한 PZC-II 및 CBM 모델을 사용한다.

## 3. 증기발생기 세관 소성붕괴실험

비대칭 위치에 있는 두 균열이 존재하는 증기발생기 세관의 소성붕괴압력을 구하기 위해 실험 세관을 이용하여 소성붕괴실험을 수행하였다.

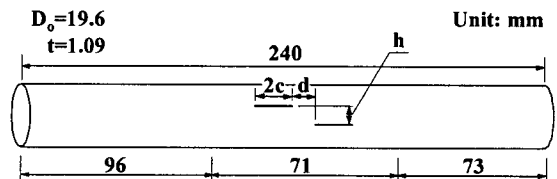


Fig. 1 Geometry of tubular specimen containing non-aligned two axial through-wall cracks

3.1 재료 및 시험편

본 실험에서는 가압경수로형 원자력발전소 증기 발생기 세관재료로 사용되고 있는 Inconel 600 성분의 세관을 시편으로 제작하여 사용하였다. 인장 실험과 소성붕괴실험은 외경( $D_o$ )과 두께( $t$ )가 각각 19.05 mm와 1.09 mm인 세관을 사용하여 수행하였다. 재료물성 측정을 위해 3개의 세관시편을 사용하여 인장실험을 수행하였으며, 그 결과를 Table 1에 정리하였다.

소성붕괴실험은 비대칭 위치에 있는 두 개의 축방향 관통노치가 존재하는 세관을 이용하여 수행하였으며, 실험에 사용된 시편의 형상은 Fig. 1에 제시하였다. 균열을 모사하기 위한 노치는 전기방전가공(EDM)으로 제작하였으며 노치반경은 0.09 mm로 가공하였다. 비대칭 위치에 있는 두 개의 축방향 관통균열의 경우에는 균열길이( $2c$ )가 5 mm인 경우에 대해 축방향 균열간 거리( $d$ )를 -2.5, 0, 2 mm, 원주방향 균열간 거리( $h$ )를 1, 2, 4 mm로 변화시키며 총 9개의 시편을 가공하여 소성붕괴실험을 수행하였다. Fig. 2는 비대칭 위치에 있는 두 균열을 나타낸 것으로서  $d$ 에 따라서 3가지 균열형태로 분류하였다. 두 균열은  $d$ 가 0보다 큰 경우, 0인 경우, 0보다 작은 경우로 구분하였으며 각각 Type A, B, C 균열이라 명하였다.

Table 1 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

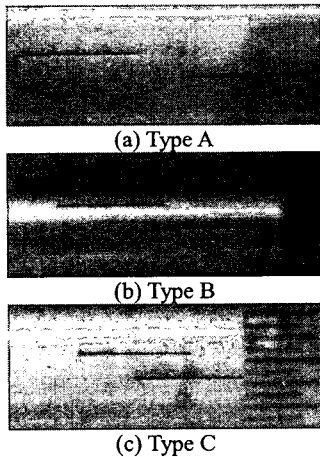


Fig. 2 Classification of non-aligned two axial through-wall crack types

3.2 실험장치 및 방법

증기발생기 세관 소성붕괴실험은 세관 내부에 작용하는 유체의 압력을 일정속도로 증가시켜 세관이 소성붕괴되는 순간의 압력을 측정하는 실험이다. 이를 위해 본 연구에서 사용한 소성붕괴 실험장치는 고압 발생장치, 데이터 취득장치, 시편 고정장치 및 제어장치로 구성되어 있다.

일반적으로 가압률이 증가함에 따라 증기발생기 세관의 소성붕괴압력은 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 호스를 사용하였다. 또한 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>(14)</sup> 본 연구에서는 3.175 mm 두께의 타이곤(tygon) 호스를 블래더로 사용하였으며, 0.15 mm 두께의 황동박판<sup>(13)</sup>을 보강박판으로 사용하였다.

실험은 세관이 소성붕괴될 때까지 수행하였다. 압력증가에 따른 두 균열의 성장거동을 고배율 사진기를 사용하여 촬영하였으며 압력센서를 사용하여 세관시편 내면에 작용하는 하중을 측정하였다. 이러한 데이터들은 시간-영상 또는 시간-하중 데이터의 형태로 PC에 실시간 저장하였다.

3.3 실험결과

Fig. 3은 비대칭 위치에 있는 두 개의 축방향 관통균열이 존재하는 세관시편의 변형거동을 나타낸 것으로서 고배율 사진기를 사용하여 촬영하였다. 작용압력이 낮은 상태에서는 COD가 서서히 증가하였으며, 소성붕괴압력에 근접할수록 COD가 급격히 증가한 후 두 균열이 합체되었다. Type A, B, C 모든 경우에 두 균열의 합체와 동시에 세관이 소성붕괴되었다. Fig. 3(a)~(c)에서 각각 3번째 사진은 합체되기 직전의 모습을 나타낸 것으로서, Type A 균열은 Type B, C 균열에 비해 시편이 소성붕괴되기 직전의 COD가 상대적으로 작음을 알 수 있다.

Fig. 4는 소성붕괴실험 결과를 나타낸 것이다. 비대칭 위치에 있는 두 균열이 존재할 경우에는 원주방향 균열간 거리  $h$ 가 증가함에 따라 두 균열이 합체되어 세관이 소성붕괴되는 압력( $P_{bc}$ )이 증가하였으며 동일한  $h$ 에 대한 소성붕괴압력의 크기는 Type C, A, B의 순으로 나타났다. 제시된 결과는 다음 장에서 최적 파손 예측모델을 결정하기 위해 사용된다.

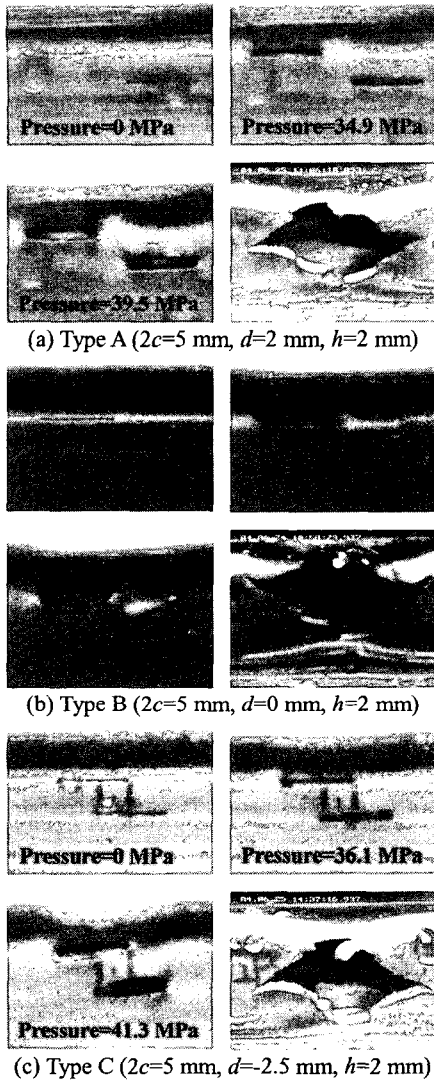


Fig. 3 Plastic collapse process of steam generator tubes containing non-aligned two axial through-wall cracks

#### 4. 최적 파손 예측모델을 이용한 소성붕괴압력 예측

##### 4.1 유한요소해석

비대칭 위치에 있는 두 개의 축방향 관통균열이 존재하는 증기발생기 세관의 소성붕괴압력을 예측하기 위해 3차원 탄소성 유한요소해석을 수행하였으며, 이 때 상용 프로그램인 ABAQUS Ver. 6.4를 사용하였다. Fig. 5는 Fig. 3과 상응하는 비대칭 위치에 있는 두 개의 축방향 관통균열이 존재하는

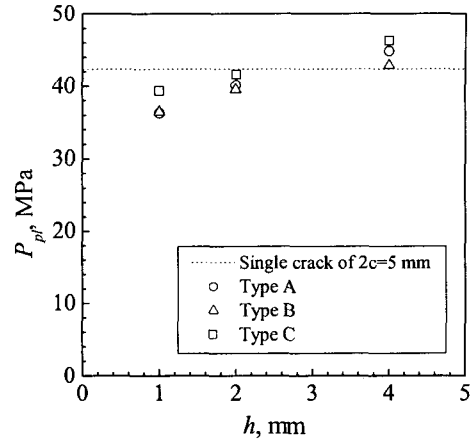


Fig. 4 Plastic collapse pressures of steam generator tubes obtained from experiments

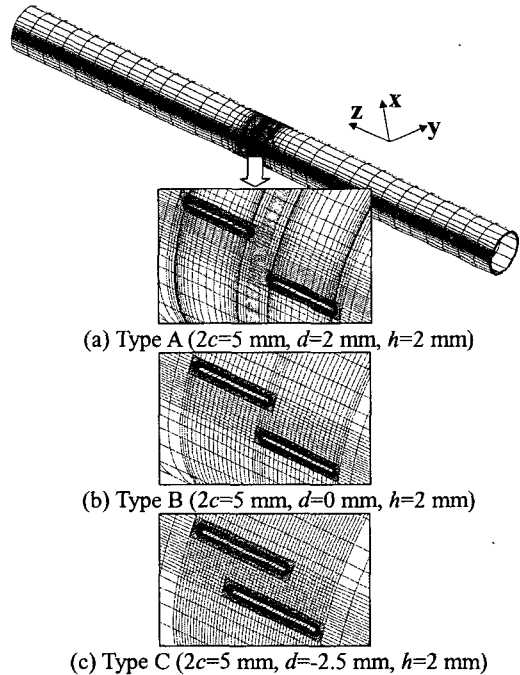


Fig. 5 Typical finite element meshes of steam generator tubes containing non-aligned two axial through-wall cracks

증기발생기 세관의 대표적인 유한요소모델을 나타낸 것이다. 20절점 요소(20-node brick element)를 사용하여 요소망을 구성하였고 세관의 두께방향으로 두 개의 요소를 사용하였다. 이 때 노치선단의 곡률반경은 실제 시편과 동일하게 0.09 mm로 고려하였다. 유한요소 해석은  $2c$ 가 5 mm인 경우에 대해  $d$ 를 -2.5, 0, 2 mm,  $h$ 를 1, 2, 4 mm로 변화시키며 수행하였다.

**Table 2** Normalized plastic collapse pressures of steam generator tubes containing non-aligned two axial through-wall cracks

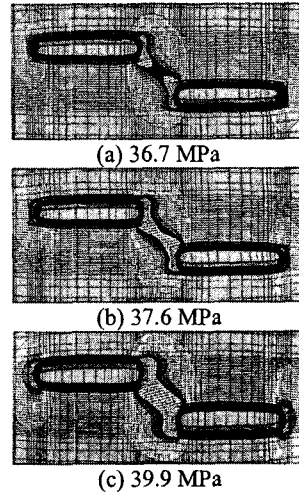
Crack type	Crack size (mm)	Normalized plastic collapse pressure	
		PZC-II	CBM
Type A	2c=5, d=2, h=1	0.997	-
	2c=5, d=2, h=2	0.940	-
	2c=5, d=2, h=4	1.000	-
Type B	2c=5, d=0, h=1	-	1.011
	2c=5, d=0, h=2	-	0.977
	2c=5, d=0, h=4	-	0.968
Type C	2c=5, d=-2.5, h=1	-	0.978
	2c=5, d=-2.5, h=2	-	0.977
	2c=5, d=-2.5, h=4	-	0.937

4.2 예측결과 및 토의

소성붕괴실험 결과로부터 비대칭 위치에 있는 두 균열이 존재하는 시편의 경우에는 두 균열이 합체된 직후 세관시편이 소성붕괴됨을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 두 균열의 합체압력과 세관의 소성붕괴압력이 동일하다고 가정하였다. 최적 국부파손 예측모델인 PZC-II 모델과 최적 광범위파손 예측모델인 CBM 모델을 이용하여 세관의 소성붕괴압력을 계산하였으며, 그 결과를 소성붕괴실험 결과로 무차원화하여 Table 2에 제시하였다.

Fig. 6은 소성붕괴압력을 예측하기 위해 PZC-II 모델을 적용하여 압력증가에 따른 소성역의 변화를 나타낸 것이다. 이는 Type A 균열이 존재하는 시편 중 d가 2 mm이고 h가 2 mm인 경우에 대해 나타낸 것으로서, 37.6 MPa의 압력에서 두 균열선단에서 성장한 소성역이 접촉하는 것을 볼 수 있다. 소성역은 원주방향 균열간 거리가 작은 경우에는 세관의 내면에서 외면으로 성장하였으며, 균열간 거리가 큰 경우에는 외면에서 내면으로 성장하였다. PZC-II 모델을 사용하여 두 균열의 합체압력을 예측할 경우에는 최대 6.0 %, 평균 2.0 % 내에서 실험결과를 잘 모의하였다. 그러나 Type B 균열이 존재하는 시편에 대해 PZC-II 모델을 적용하면 경우에 따라 합체압력을 매우 보수적 또는 비보수적으로 예측하여 일관성 있는 결과를 얻을 수 없었다. 또한 Type C 균열이 존재하는 시편에 대해서는 모든 경우에 매우 비보수적으로 예측하였다.

한편 최적 광범위파손 예측모델인 CBM 모델을 사용하여 평행한 두 개의 축방향 관통균열이 존재하는 증기발생기 세관의 소성붕괴하중을 예측하기 위해서는 우선 단일균열세관 소성붕괴압력에서의 COD( $\delta_0$ )를 계산해야 한다. 유한요소해석을 수행하여 균열 중앙에서의 임계 COD를 결정하기 위한 선도(critical COD curve)를 결정하였으며, 이는 다음과 같은 식으로 표현된다.

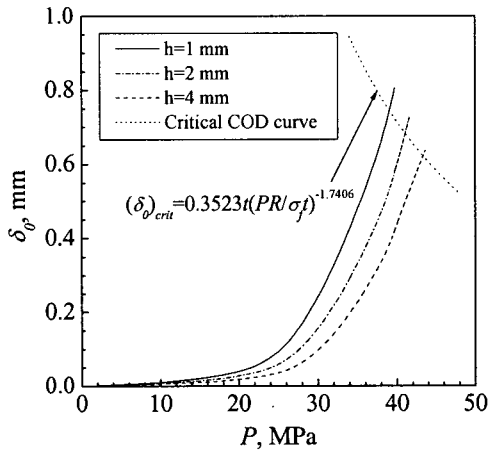


**Fig. 6** Contour plot of von Mises stress around cracks (Type A, 2c=8 mm, d=2 mm, h=2 mm)

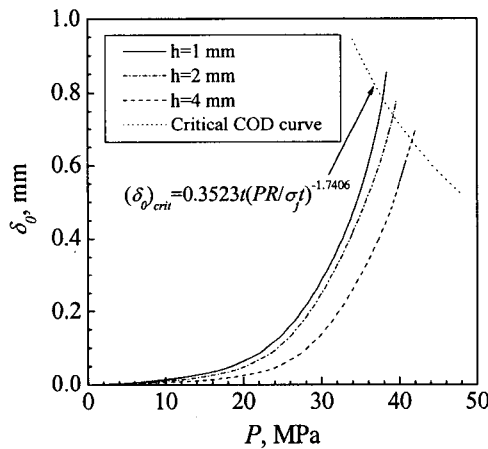
$$(\delta_0)_{crit} = 0.3523t \left( \frac{PR}{\sigma_{ft}} \right)^{-1.7406} \quad (1)$$

여기서, t는 세관 두께, R은 세관의 평균반경,  $\sigma_{ft}$ 는 유동응력, P는 내압이다. 제시한 선도는 비대칭 위치에 있는 두 개의 축방향 관통균열이 존재하는 세관의 소성붕괴압력을 예측하는데 적용된다. 비대칭 위치에 있는 두 개의 균열이 존재하는 세관에서  $\delta_0$ 는 유한요소해석을 수행하여 계산하였으며, 이를 Fig. 7에 나타내었다. CBM 모델에서 비대칭 위치에 있는 두 개의 균열이 존재하는 세관의 소성붕괴압력은 식 (1)의  $P(\delta_0)_{crit}$  선도와 비대칭 위치에 있는 두 균열의 P- $\delta_0$  선도의 교차점으로 결정하였다. 이와 같이 CBM 모델을 이용하여 Type B, C 균열의 합체압력을 예측한 경우 각각 최대 3.2, 6.3 % 및 평균 1.3, 2.6 % 이내에서 실험결과를 매우 잘 모의하였다. 그러나 Type A 균열이 존재하는 시편에 CBM 모델을 적용하면 매우 비보수적인 결과를 보였으며, 이는 Fig. 6에서 볼 수 있는 바와 같이 COD가 임계값에 도달하기 전에 균열 사이의 리거먼트에서 응력과 변형의 집중되어 COD가 크게 증가하지 않고 두 균열이 합체되기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 8은 비대칭 위치에 있는 두 개의 축방향 관통균열의 합체압력을 PZC-II 모델과 CBM 모델을 사용하여 예측한 결과를 나타낸 것이다.

Fig. 4에 제시한 바와 같이 h가 4 mm인 경우에는 비대칭 위치에 있는 두 균열의 소성붕괴압력이 단일균열이 존재하는 세관의 소성붕괴압력에 비해 큰 값을 보여 유익한 효과(beneficial effect)를 주는 것으로 나타났다. 이러한 유익한 효과는 높은 압력상태에서 두 균열 사이 리거먼트에 발생하는 최



(a) Type B



(b) Type C

Fig. 7  $P$ - $\delta_o$  curve for non-aligned two cracks

소 주응력이 비교적 큰 음의 값을 갖는 압축 응력장을 형성하기 때문에 나타나는 것으로 판단된다.

이상의 결과로부터 증기발생기 세관의 비대칭 위치에 있는 세 가지 3가지 형태의 두 개의 축방향 관통균열의 합체압력을 예측하기 위해 최적 국부파손 및 광범위파손 예측모델을 혼용할 수 있음을 확인하였으며, 축방향 균열간 거리에 따라 적용 가능한 최적 파손 예측모델을 구분하여 제시하였다. 즉, 축방향 균열간 거리가 0보다 큰 경우에는 균열사이의 리거먼트에 인장응력장이 형성되어 PZC-II모델을 적용하면 소성붕괴압력을 잘 예측할 수 있으며, 0 이하인 경우에는 균열사이의 리거먼트에 압축응력장이 형성되므로 CBM 모델을 사용

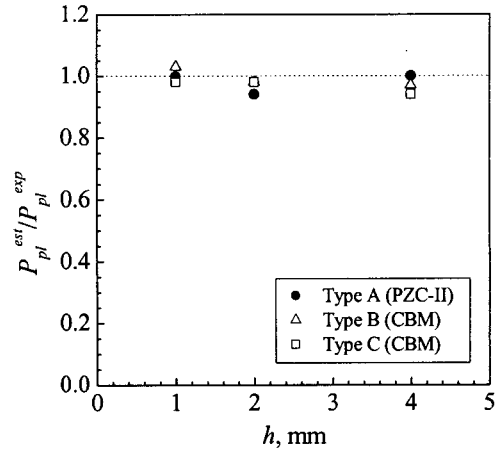


Fig. 8 Normalized coalescence pressures for non-aligned two cracks

하면 소성붕괴압력을 정확하게 예측할 수 있는 것으로 판단된다.

## 5. 현 결함 이상화 기준의 보수성 분석

### 5.1 평가 기준 및 절차

ASME Section XI, IWA-3000<sup>(2)</sup>에는 비파괴검사를 통해 발견된 다중균열을 단일균열로 이상화하기 위한 기준이 제시되어 있다. 현재 널리 사용되고 있는 이러한 균열 이상화 기준과 본 연구에서 제안한 최적 파손 예측모델을 적용하여 다중균열이 존재하는 증기발생기 세관의 건전성을 평가하고, 그 결과로부터 ASME 코드에서 제시하고 있는 다중균열 이상화 기준의 보수성을 분석하고자 한다.

현 다중균열 이상화 기준의 보수성을 다음과 같은 절차에 따라 분석하였다. 먼저 ASME 코드에서 제안하고 있는 다중균열 이상화 기준에 따라 건전성을 평가한다. Fig. 9는 ASME 코드에서 권고하고 있는 다중균열의 이상화 기준을 나타낸 것으로서 원주방향 균열간 거리가 12.7 mm(1/2 in) 이하인 경우 두 균열을 길이가  $2c_{eq}$ 인 단일균열로 치환한다. 이와 같이 치환된 단일균열이 존재하는 세관의 소성붕괴압력 ( $P_{eq}$ )<sup>(15)</sup>을 다중균열이 존재하는 증기발생기 세관의 소성붕괴압력으로 결정하였다. 최종적으로 이상화를 통해 결정한 소성붕괴압력과 실험으로 구한 소성붕괴압력 ( $P_{pl}^{exp}$ )의 비( $P_{eq}/P_{pl}^{exp}$ )로서 ASME 코드에서 제시하고 있는 기준의 보수성을 확인하였다. 한편 논문에서 제안한 최적 파손 예측모델을 이용한 평가의 경우 먼저 최적 파손 예측모델을 이용하여 세관의 소성붕괴압력을 결정한 후, 무차원 소성붕괴압력 ( $P_{pl}^{est}/P_{pl}^{exp}$ )으로 타당성을 확인하였다.

5.2 분석결과 및 토의

Table 3은 결함 이상화 기준의 보수성 평가결과를 비교하여 나타낸 것이다. ASME 코드에 제시된 다중균열의 이상화 기준이 내포하고 있는 보수성과 최적 파손 예측모델의 신뢰성을 평가하기 위해 소성붕괴실험을 수행한 시편정보와 실험결과를 이용하였다. 표에 제시한 바와 같이 비대칭 위치에 있는 두 개의 축방향 관통균열이 존재하는 경우 ASME 기준을 적용하면 축방향 균열간 거리와 원주방향 균열간 거리가 커질수록 보수성이 증가하였으며 약 10~50 % 정도의 보수성을 보였다. 반면 본 연구에서 제안한 최적 파손 예측모델을 이용하여 평가한 결과는 최대 6 % 이내에서 실험결과를 매우 잘 예측하였다.

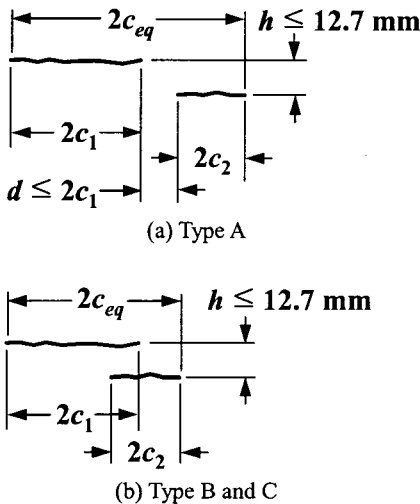


Fig. 9 Flaw characterization rules for various multiple cracks according to ASME code

한편 ASME 기준에 의해 평가한 결과  $P_{eq}/P_{pl}^{exp}$ 의 평균과 분산이 각각 0.73, 0.09로 나타난 반면 최적 파손 예측모델을 이용한 결과는 평균과 표준편차가 각각 0.98, 0.03로 평가되어 최적 파손 모델의 신뢰성이 입증되었다. 따라서 증기발생기 세관에 존재하는 다중균열을 이상화하기 위해 ASME 코드에 제시된 기준을 사용할 경우 소성붕괴압력이 매우 보수적으로 예측되기 때문에 보다 정확한 평가를 위해서는 본 연구에서 제안한 최적 파손 예측모델을 이용하여 평가하는 것이 보다 타당할 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 비대칭 위치에 있는 두 개의 축방향 관통균열이 존재하는 증기발생기 세관의 소성붕괴압력을 평가하기 위해 Inconel 600 세관시편을 사용하여 소성붕괴실험과 유한요소해석을 수행하였다. 또한 최적 파손 예측모델을 이용한 세관 건전성평가 및 비교를 통해 현 ASME 코드에서 제안하고 있는 다중균열 이상화 기준의 타당성을 분석하였다. 이를 통해 얻은 주요 결과는 다음과 같다.

- (1) 축방향 균열간 거리 ( $d$ )가 0보다 큰 경우에는 균열사이 리거먼트에 인장응력장이 형성되며, PZC-II 모델을 사용할 경우 6.0 % 오차 이내로 세관의 소성붕괴압력을 정확하게 예측하였다.
- (2) 축방향 균열간 거리가 0 이하인 경우에는 균열사이 리거먼트에 압축응력장이 형성되며, CBM 모델을 이용할 경우 6.3 % 오차 이내로 세관의 소성붕괴압력을 정확하게 예측하였다.
- (3) 증기발생기 세관에 존재하는 다중균열을 ASME 코드에서 제안하고 있는 기준에 따라 단일 균열로 이상화하여 평가할 경우 약 10~50 %의 보

Table 3 Integrity evaluation of steam generator tubes using ASME criteria and optimum failure prediction model for multiple cracks

Specimen type	Crack size			$P_{pl}^{exp}$ (MPa)	Equivalent single crack evaluation based on ASME criteria			Multiple cracks evaluation using optimum failure prediction model	
	$2c$ (mm)	$d$ (mm)	$h$ (mm)		$2c_{eq}$ (mm)	$P_{eq}$ (MPa)	$P_{eq}/P_{pl}^{exp}$	$P_{pl}^{est}$ (MPa)	$P_{pl}^{est}/P_{pl}^{exp}$
Type A	5	2	1	36.3	12	25.4	0.70	36.2	1.00
		2	2	40.1	12	25.4	0.63	37.7	0.94
		2	4	44.8	12	25.4	0.57	44.8	1.00
Type B	5	0	1	36.4	10	28.8	0.79	37.4	1.03
		0	2	39.5	10	28.8	0.73	38.8	0.98
		0	4	42.9	10	28.8	0.67	41.5	0.97
Type C	5	-2.5	1	39.3	7.5	34.5	0.88	38.5	0.98
		-2.5	2	41.5	7.5	34.5	0.83	40.9	0.99
		-2.5	4	46.2	7.5	34.5	0.75	43.5	0.94

수성을 보인 반면 본 연구에서 제시한 최적파손예측 모델을 사용하여 평가할 경우 최대 6 % 이내에서 실험결과와 잘 일치하였다.

## 후 기

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

## 참고문헌

- (1) USNRC, 1976, "Bases for Plugging Degraded PWR Steam Generator Tubes," Regulatory Guide 1.121.
- (2) ASME, 1998, "Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components," ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI.
- (3) 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.
- (4) Gorman, J.A., Harris, J.E. and Lowenstein, D.B., 1995, "Steam Generator Tube Fitness-for-Service Guidelines," AECB Report, No. 2.228.2.
- (5) 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.
- (6) Murakami, Y., 1987, "Stress Intensity Factors Handbook," pp. 204~205.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) Chang, Y.S., Moon, S.I., Kim, Y.J., Lee, J.H., Song, M.H. and Choi, Y.H., 2004, "Assessment of Steam Generator Tube with Multiple Axial Through-Wall Cracks," Proceedings of Asian Society for Integrity of Nuclear Components.
- (10) 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.
- (11) 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.
- (12) 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.
- (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) McIlree, A., 2002, "Steam Generator Tubing Burst Testing and Leak Rate Testing Guidelines," EPRI, Technical Report 1006783.
- (15) Erdogan, F., 1976, "Ductile Failure Theories for Pressurized Pipes and Containers," Int. J. PVP, Vol. 4, pp. 253~283.