

< 논문 >

길이가 다른 두 개의 축방향 관통균열이 동일선상에 존재하는 증기발생기 세관의 균열 합체 압력

허남수* · 장윤석* · 김영진†

(2006년 3월 15일 접수, 2006년 7월 14일 심사완료)

Coalescence Pressure of Steam Generator Tubes with Two Different-Sized Collinear Axial Through-Wall Cracks

Nam-Su Huh, Yoon-Suk Chang and Young-Jin Kim

Key Words : Coalescence Pressure(합체 압력), Collinear Axial Through-Wall Crack(동일선상에 존재하는 축방향 관통균열), Elastic-Plastic Finite Element Analysis(탄소성 유한요소해석)

Abstract

To maintain the structural integrity of steam generator tubes, 40% of wall thickness plugging criterion has been developed. The approach is for the steam generator tube with single crack, so that the interaction effect of multiple cracks can not be considered. Although, recently, several approaches have been proposed to assess the integrity of steam generator tube with two identical cracks whilst actual multiple cracks reveal more complex shape. In this paper, the coalescence pressure of steam generator tube containing multiple cracks of different length is evaluated based on the detailed 3-dimensional (3-D) elastic-plastic finite element (FE) analyses. In terms of the crack shape, two collinear axial through-wall cracks with different length were considered. Furthermore, the resulting FE coalescence pressures are compared with FE coalescence pressures and experimental results for two identical collinear axial through-wall cracks to quantify the effect of crack length ratio on failure behavior of steam generator tube with multiple cracks. Finally, based on 3-D FE results, the coalescence evaluation diagrams were proposed.

1. 서론

증기발생기는 원자로에서 핵연료 분열 반응으로 가열된 냉각수의 열전달 과정으로부터 터빈 발전기를 가동시키는 증기를 생성하는 원자력발전소 주요기기 중의 하나이다. 증기발생기는 수천개의 세관으로 구성된 일종의 열교환기로서 열전달이라는 기본적인 기능외에 방사능이 외부로 누설되는 것을 차단하는 방사능 차단막으로서의 기능도 수행한다.⁽¹⁾ 따라서 증기발생기 세관의 건전성 확보는 전체 원자력발전소의 안전 운전을 위해 매우 중요하다.

전술한 바와 같이 증기발생기는 약 3300~8300개의 U자형 세관으로 구성되어 있으며, 세관의 두께는

약 1mm~1.3mm 정도 이다. 세관에는 다양한 열화기구에 의해 결함이 발생할 수 있는 것으로 알려져 있다. 세관에서 결함이 발생할 경우, 세관의 중요성을 감안하여 두께의 40% 이상이 감육된 경우에는 해당 세관을 관막음 하도록 규정하고 있다.⁽¹⁻³⁾ 그러나 세관의 두께에 근거한 현재의 관막음 기준은 열화기구나 결함 위치에 따라 지나치게 보수적일 수 있는 것으로 알려져 있다.⁽⁴⁾ 이러한 이유로 최근에는 결함의 유형과 위치에 따라 서로 다른 기준을 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

국내의 가압경수로형 원자력발전소의 증기발생기 세관에서 발생하는 결함은 일반적으로 관판(tube sheet) 상단부에서 발견되고 있으며 다중 균열(multiple cracks)의 형태를 보이고 있으나, 아직까지 다중 균열이 존재하는 세관에 대해서는 명확한 보수 기준이 제시되지 않은 실정이다.⁽⁵⁻⁷⁾

저자들은 최근 3차원 유한요소해석을 이용하여 다중 균열이 존재하는 구조물의 균열 합체 거동을 예측하기 위한 10개의 국부 파손 예측 모델을 제

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

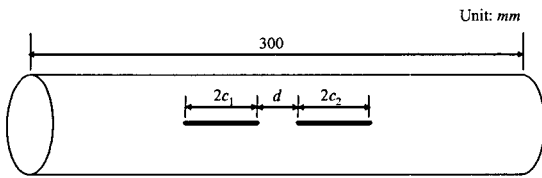


Fig. 1 Schematic illustration of tube containing two collinear axial through-wall cracks

시한 바 있다. 또한 제시된 모델을 이용하여 평판과 세관에 동일 직선상으로 존재하는 두 개의 축방향 관통균열(axial through-wall crack)의 합체 압력을 예측하였으며 소성 붕괴 실험 결과와 비교하여 두 균열의 합체를 가장 정확하게 예측하는 최적 국부 파손 예측 모델을 제시한 바 있다.^(8,9)

그러나 선행 연구에서는 동일 선상에 존재하는 축방향 다중 균열의 길이를 동일하다고 가정하였다. 그러나 실제로는 인접한 균열의 길이가 서로 다른 경우가 대부분이기에 다중 균열 존재시 균열 사이의 상호 영향(interaction effect)을 정확하게 고려하기 위해서는 균열 길이가 서로 다른 경우에 대한 연구가 수행되어야 한다.

따라서 본 논문에서는 선행 연구에서 제시한 국부 파손 예측 모델과 3차원 탄소성 유한요소해석을 이용하여 길이가 서로 다른 동일 선상의 축방향 다중 관통 균열의 균열 합체 거동을 평가하였다. 또한 해석 결과를 균열 길이가 서로 같은 경우의 결과와 비교하였으며, 최종적으로 균열 합체 거동을 예측할 수 있는 합체 평가 선도(coalescence evaluation diagram)를 제시하였다.

2. 탄소성 유한요소해석

2.1 형상 및 재료물성치

Fig. 1은 본 논문에서 고려된 길이가 서로 다른 두 개의 축방향 관통균열이 동일선상에 존재하는 증기발생기 세관의 형상을 나타낸 것이다. 각각의 형상 변수도 Fig. 1에 함께 나타내었다. 세관의 외경(outer diameter)과 두께는 각각 19.05mm와 1.09mm이다. 두 개의 축방향 관통균열의 길이는 각각 $2c_1$ 과 $2c_2$ 로 나타내었으며, 균열 사이의 거리는 d 로 나타내었다.

균열 길이 $2c_1$ 은 5mm와 10mm의 두 가지 경우를 고려하였으며, 균열 사이의 거리 d 는 1, 2, 4mm의 세 가지 경우를 고려하였다. 또한 균열 길이의 비가 합체 압력에 미치는 영향을 고려하기 위해 두 개의 축방향 관통균열의 길이비로 c_2/c_1 은 1.5와 2의 두 가지 경우를 고려하였다. 국내의 경우,

Table 1 List of analysis cases for the present FE analysis

$2c_1$ (mm)	d (mm)	c_2/c_1
5, 10	1, 2, 4	1.5, 2

Table 2 Summary of tensile data for Alloy 600 tube

σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	E (GPa)	Elongation (%)	Poisson's ratio
285	674	214	40	0.3

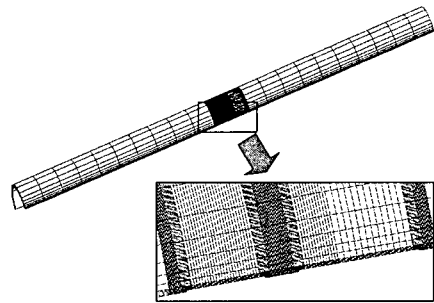


Fig. 2 Typical FE mesh employed in the present work

세관에 존재하는 균열 길이가 13mm 이상이면 판막음을 수행하기 때문에 본 논문에서는 균열 길이가 13mm 이하인 경우만을 고려하였으며 본 논문에서 고려된 해석 조건을 정리하여 Table 1에 나타내었다.

증기발생기 세관은 Alloy 600 재료로 제작되었으며, ASTM E8M⁽¹⁰⁾에 따라 구한 인장물성치를 Table 2에 정리하여 나타내었다.

2.2 유한요소해석

동일 선상에 존재하는 두 개의 축방향 관통균열의 길이비가 합체 압력에 미치는 영향을 평가하기 위해 Fig. 1의 형상에 대해 3차원 탄소성 유한요소해석을 수행하였다. 해석에는 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS⁽¹¹⁾가 사용되었다. 전체 형상의 대칭성을 고려하여 전체의 1/2만을 모델링하였으며, 대표적인 유한요소모델을 Fig. 2에 나타내었다. 유한요소모델의 구성에 사용된 전체 요소수와 절점수는 각각 5956개와 34756개이다. 균열 선단은 16개의 쉘기 형태의 요소를 이용하여 구성하였다. 이때 균열 선단의 곡률 반경은 실제 세관 시편(균열 길이가 동일한 축방향 다중 관통균열에 대한)과 동일하게 0.09mm로 고려하였다.

비압축성과 관련된 문제를 피하기 위해 20절점 등계수 사각주요소(20-nodes isoparametric brick reduced integration element, C3D20R in ABAQUS element library)를 사용하였으며, 두께 방향으로 2개의 요소가 사용되었다.

해석은 세관의 실제 진응력-진변형률(true stress-true strain) 곡선을 입력 자료로 하여 증분소성(incremental plasticity)이론을 기반으로 수행하였으며 대규모 변형률 해석(large strain analysis)을 적용하였다.

하중 조건으로는 내압(p)을 작용시켰다. 내압은 세관 내부에 분포 하중의 형태로 작용시켰으며 세관의 끝단에는 상당 인장하중을 작용시켰다. 본 논문에서는 균열면에 작용하는 압력은 고려하지 않았는데 이는 균열 길이가 같은 경우에 대한 선행 연구와 해석 조건을 동일하게 하기 위해서이다.^(8,9) 균열 길이가 같은 축방향 다중 관통균열에 대해 선행 연구에서 수행한 유한요소해석 결과와 실험 결과는 다음 장에 간략하게 정리하였다.

3. 길이가 서로 다른 축방향 다중 관통균열의 합체 압력

3.1 최적 파손 예측 모델

전술한 바와 같이 저자들은 선행 연구에서 증기발생기 세관에 존재하는 다중 균열의 합체 압력을 예측하기 위한 10개의 국부 파손 예측 모델을 제시한 바 있다. 그리고 평판 및 세관에 대한 3차원 유한요소해석과 실험 결과를 이용하여 최종적으로 3개의 최적 국부 파손 예측 모델을 제시한 바 있으며 주요 특징은 다음과 같다.

(1) Reaction Force Model (RFM): 두 균열 사이의 잔여 리가먼트에서의 반력이 감소하기 시작할 때 두 균열의 합체가 발생한다.

(2) Plastic Zone Contact Model II (PZC-II): 두 균열의 선단에서 성장하는 소성역이 잔여 리가먼트에서 서로 접촉할 때 두 균열의 합체가 발생한다. 이때 소성은 유효 응력(effective stress)이 인장강도에 도달될 때 발생한다고 가정한다.

(3) Plastic Zone Contact Model IV (PZC IV): 두 균열 사이의 잔여 리가먼트가 완전 소성화될 때 두 균열은 합체된다고 가정한다. 이때 소성은 유효 응력이 인장강도에 도달될 때 발생한다고 가정한다.

본 논문에서는 길이가 서로 다른 두개의 축방향 관통균열이 동일선상에 존재하는 증기발생기 세관의 균열 합체 압력을 평가하기 위해 상기 기술된 세

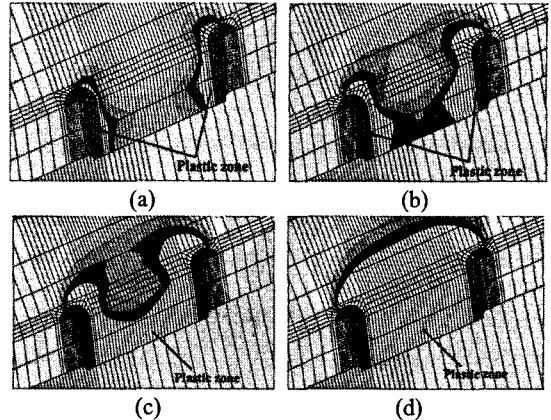


Fig. 3 The distribution of von Mises equivalent stress at the remaining ligament ($2c_1=5mm$, $d=2mm$, $c_2/c_1=1.5$). (a) $p=26.6MPa$, (b) $p=28.4MPa$, (c) $p=29.4MPa$, and (d) $p=31.1MPa$

개의 최적 파손 예측 모델을 사용하였다. 특히 RFM 모델을 사용하여 균열 합체 압력을 평가하는 경우에는 두 균열 사이의 잔여 리가먼트에서 발생하는 원주방향 반력이 사용되었다.

3.2 해석결과

Fig. 3은 작용 압력의 증가에 따른 소성역의 변화를 $2c_1=5mm$, $d=2mm$, $c_2/c_1=1.5$ 인 경우에 대해 나타낸 것이다. 3.1절에 기술된 바와 같이 소성역은 유효 응력이 인장강도보다 큰 영역으로 정의되었다. Fig. 3(c)는 두 개의 축방향 관통균열 선단에서 발달한 소성역이 리가먼트에서 서로 접촉할 때의 유효 응력의 분포를 나타낸 것으로 이때의 작용 압력이 PZC-II 모델에 기초한 합체 압력이다. Fig. 3(d)는 잔여 리가먼트가 완전히 소성화되었을 때의 유효 응력의 분포를 나타낸 것으로 이때의 작용 압력이 PZC-IV 모델에 기초한 합체 압력이다.

세 가지의 최적 국부 파손 예측 모델로 구한 합체 압력을 Table 3에 정리하였다. 예상한 바와 같이 두 개의 균열 사이의 리가먼트가 감소할수록 합체 압력은 감소하였으며, 두개의 관통균열의 길이비가 증가할수록 합체 압력은 감소하였다.

3.3 균열길이가 같은 경우^(8,9)와의 비교

저자들은 선행연구에서 균열길이가 서로 같은 두개의 축방향 관통균열이 동일선상에 존재하는 증기발생기 세관에 대한 3차원 유한요소해석과 소성 붕괴 실험을 수행하여 균열 합체 압력을 예측한 바 있다. 본 절에서는 균열 길이가 같은 경우에 대한 선행 연구의 내용과 결과를 간략하게 요약하고 균열 길이가 서로 다른 본 논문의 결과와 비교하였다.

Table 3 Coalescence pressures of tubes containing collinear cracks

Crack Size (mm)	Coalescence pressure (MPa)									
	Experiment ($c_2/c_1=1$)	Prediction Results (RFM)			Prediction Results (PZC-II)			Prediction Results (PZC-IV)		
		$c_2/c_1=1$	$c_2/c_1=1.5$	$c_2/c_1=2$	$c_2/c_1=1$	$c_2/c_1=1.5$	$c_2/c_1=2$	$c_2/c_1=1$	$c_2/c_1=1.5$	$c_2/c_1=2$
$2c_1=5, d=1$	31.8	29.1	25.2	21.2	28.6	22.9	19.0	29.1	25.1	21.2
$2c_1=5, d=2$	36.7	35.7	31.1	26.4	34.8	29.4	25.3	35.4	31.1	26.7
$2c_1=5, d=4$	43.7	42.5	37.5	31.9	42.6	36.4	31.9	42.6	37.6	31.9
$2c_1=10, d=1$	15.7	15.6	12.6	10.0	15.6	11.7	8.8	15.6	12.7	10.2
$2c_1=10, d=2$	21.1	20.8	16.9	13.7	20.7	15.8	12.4	20.9	17.0	13.7
$2c_1=10, d=4$	28.7	27.7	22.4	17.9	27.8	21.5	17.9	27.8	22.4	18.0

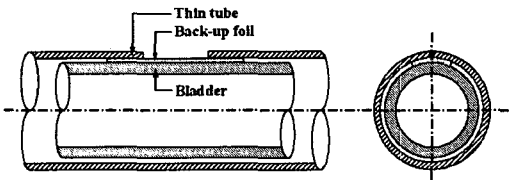


Fig. 4 Schematic drawing of tube specimen with bladder and back-up foil

소성 붕괴 실험은 길이가 같은 동일 직선상의 두 개의 축방향 관통 균열이 존재하는 세관을 이용하여 수행하였다. 균열은 전기방전가공으로 제작하였으며 균열길이($2c$)가 5, 10mm, 균열간 거리(d)가 각각 1, 2, 4mm인 경우에 대해 소성 붕괴 실험을 수행하였다. 이외에 비교를 위해 $2c$ 가 5, 10mm인 단일균열이 존재하는 시편에 대해서도 소성 붕괴 실험을 수행하였다. 관통균열의 경우에는 세관이 파열되기 전에 작동 유체의 누설이 발생하기 때문에 이를 방지하기 위해 블래더(bladder)로서 3.175mm 두께의 타이곤(tygon) 관을 시편 내부에 삽입하였으며, 보강박판으로 0.15mm 두께의 황동 박판을 사용하였다. 따라서 선행 연구 및 본 논문에서는 실험과의 비교를 위해 유한요소해석 시 실험 조건과 동일하게 균열면에 압력을 고려하지 않았다. 하중증가에 따른 두 균열의 성장거동을 고배율 카메라를 사용하여 촬영하였으며 압력 센서를 사용하여 세관 시편 내면에 작용하는 하중을 측정하였다. Fig. 4는 실험에 사용된 세관 시편의 형상을 나타낸 것이다. 소성 붕괴 실험은 상온에서 수행되었으며, 두 균열이 합체될 때까지 수행하였다.

Table 4 Plastic collapse pressures of tubes containing a single crack

Crack size (mm)	Experimental plastic collapse pressure (MPa)
$2c=5$	43.7
$2c=10$	29.7

이상과 같은 실험과 3차원 유한요소해석으로 구한 균열 길이가 서로 같은 경우의 합체 압력도 Table 3에 함께 정리하여 나타내었다. 또한 단일 균열에 대한 실험 결과도 Table 4에 나타내었다. Table 3에 나타난 바와 같이 3개의 최적 파손 예측 모델로 구한 합체 압력은 실험 결과와 잘 일치하였다. Table 3과 Table 4의 균열 길이가 같은 경우에 대한 결과를 비교하면 균열 사이의 거리가 멀어질수록 두 균열의 합체 압력이 단일 균열의 소성 붕괴 하중에 접근함을 확인하였다. 이로부터 두 균열간 거리가 멀어질 경우에 균열사이의 간섭효과가 사라지고 단일균열처럼 거동함을 알 수 있다.

Fig. 5는 균열 길이가 서로 다른 축방향 다중 관통균열 세관의 균열 합체 압력을 나타낸 것이다. 여기서, 균열 합체 압력은 길이가 같은 축방향 다중 관통균열($c_2/c_1=1$)의 균열 합체 압력으로 무차원화하였다. Fig. 5(a)에 나타난 바와 같이 $2c_1=5mm$ 이고 $c_2/c_1=1.5$ 인 경우 합체 압력은 균열 길이가 같은 경우에 비해 10% 정도 감소하였다. 반면, $2c_1=5mm$ 이고 $c_2/c_1=2$ 인 경우에는 균열 길이가 같은 경우에 비해 25% 정도 감소하였다. 합체 압력이

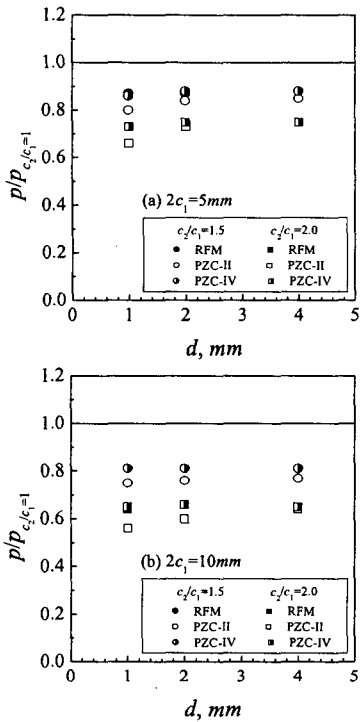


Fig. 5 Comparison of coalescence pressure of tubes with collinear axial through-wall cracks

감소하는 비는 균열 길이의 비에는 크게 의존하였으나 균열 사이의 거리와는 거의 무관하였다. PZC-II 모델로 합체 압력을 예측한 경우에는 균열 사이의 거리가 합체 압력 감소비에 영향을 미쳤다. 그러나 균열 길이가 같은 경우에 대한 결과에 따르면 PZC-II 모델은 다른 두개의 모델에 비해 부정확하며 RFM과 PZC-IV 모델이 합체 압력 예측에 적합함을 알 수 있다. $2c_1=10mm$ 인 경우도 $2c_1=5mm$ 인 경우와 경향이 비슷하였으며, 합체 압력은 균열 길이가 같은 경우에 비해 20~35% 정도 감소하였다.

4. 균열합체평가선도

본 논문에서는 다중 균열의 합체 여부를 결정할 수 있는 합체평가선도 작성을 위해 추가적인 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 전술한 바와 같이 균열 길이가 13mm 이상인 경우에는 세관 관막음을 수행하기 때문에 $2c_1$ 은 2, 4, 6, 8, 10, 12mm, d 는 1, 2, 4, 6, 8mm인 경우에 대하여 추가적인 3차원 유한요소해석을 수행하였으며, 최적 국부 파손 예측 모델 가운데 하나인 PZC-IV 모델을 적용하여 균열이 합체되는 순간의 작용 압력을 결정하였다.

Fig. 6은 유한요소해석 결과로부터 두 균열이 합체되는 순간의 압력을 결정할 수 있는 선도를 도

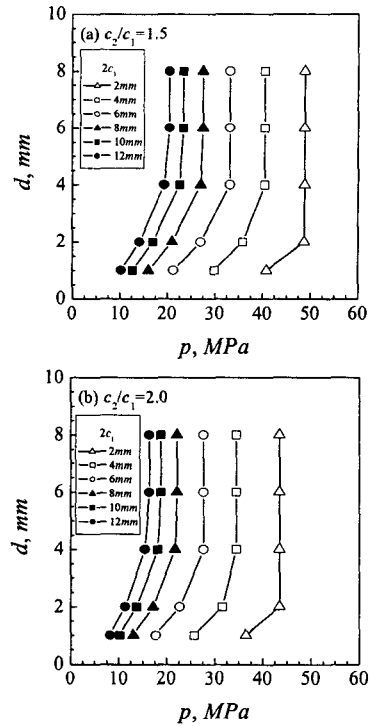


Fig. 6 Coalescence evaluation diagrams for steam generator tubes with different-sized axial through-wall cracks

시한 것이다. 본 논문에서 제시된 이와 같은 균열 합체평가선도를 이용하면 주어진 가동 조건하에서 인접한 축방향 관통균열이 합체되는지 여부를 쉽게 판단할 수 있다. 만약 균열 길이가 서로 다른 동일선상의 두개의 축방향 관통균열이 합체된다면 균열 길이가 $2c_{new}=2c_1+d+2c_2$ 인 단일 균열이 된다.

증기발생기 세관의 경우에는 재료물성치, 세관의 크기, 하중 형태 등이 거의 일정하기 때문에 본 논문에서는 균열 합체 압력 계산 시 균열 길이만을 변수로 하여 Fig. 6과 같이 절대값으로 균열 합체 압력을 도시하였다. 만약 세관의 크기나 재료물성치가 작은 범위에서 변화하여도 균열 합체 압력의 크기에는 큰 영향을 미치지 않기 때문에 본 논문의 결과는 대부분의 증기발생기 세관에 적용될 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 균열 길이가 서로 다른 두 개의 축방향 관통균열이 동일선상에 존재하는 증기발생기 세관의 균열 합체 거동을 평가하기 위해 3차원 탄소성 유한요소해석을 수행하였으며, 균열 길이가 서로 같은 경우의 결과와 비교하였다. 이를 통

해 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 균열 길이가 서로 다른 축방향 다중 관통균열의 합체 압력은 균열 길이가 서로 같은 경우에 비해 10~35% 정도 감소하였다. 합체 압력의 감소비는 균열 길이와 균열 길이비에 의존하였으나, 균열 사이의 거리에는 거의 영향을 받지 않았다. PZC-II 모델의 경우에는 균열 사이의 거리가 합체 압력 감소비에 영향을 미쳤으나 PZC-II 모델은 균열 합체 압력 예측에 적합하지 않다.

(2) 3차원 유한요소해석 결과를 이용하여 주어진 균열 형상과 가동 조건 하에서 다중 균열의 합체 여부를 평가할 수 있는 합체평가선도를 균열 길이가 서로 다른 축방향 다중 관통균열의 경우에 대해 PZC-IV 모델을 기반으로 제시하였다.

(3) 본 논문에서 제시한 균열합체평가선도를 이용하면 비파괴검사서 검출된 다중 균열의 합체 여부를 신속하게 평가할 수 있으며, 선행 연구 결과와 함께 축방향 다중 관통균열 세관에 대한 건전성 평가 절차를 정립하는데 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

후 기

이 논문은 2005년도 성균관대학교의 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- (1) USNRC, 1996, "Steam Generator Tube Failures," NUREG/CR-6365.
- (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) Yu, Y.J., Kim, J.H., Kim, Y. and Kim, Y.J., 1994, "Development of Steam Generator Tube Plugging Criteria for Axial Crack," International Conference on Pressure Vessels and Piping, Vol. 280, pp. 79~83.
- (5) Cochet, B. and Flesch, B., 1987, "Crack Stability Criteria in Steam Generator Tubes," 9th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Vol. D, pp. 413~419.
- (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) 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," International Conference on Pressure Vessels and Piping, Vol. 464, pp. 223~230.
- (9) 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," *Transactions of the KSME(A)*, Vol. 28, No 11, pp. 1813~1821.
- (10) ASTM International, 2001, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials," American Society for Testing and Materials Standard, E8M.
- (11) "ABAQUS User's manual," ABAQUS, Inc., 2003.