

축방향 및 원주방향 관통균열이 존재하는 나선형 전열관의 파손 외압 평가임은모^a, 허남수^{a*}, 최신범^b, 유제용^b, 김지호^b, 최순^b**Investigation of Maximum External Pressure of Helically Coiled Steam Generator Tubes with Axial and Circumferential Through-Wall Cracks**Eun-Mo Lim^a, Nam-Su Huh^{a*}, Shin-Beom Choi^b, Je-Yong Yu^b, Ji-Ho Kim^b, Sun Choi^b^a Dept. of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul, 139-743, Republic of Korea^b Korea Atomic Energy Research Institute, Republic of Korea**ARTICLE INFO***Article history:*

Received	10	April	2013
Revised	15	May	2013
Accepted	17	May	2013

Keywords:

External pressure
Helical tube
Maximum external pressure
Ovality
Plastic collapse
Through-wall crack

ABSTRACT

Once-through helically coiled steam generator tubes subjected to external pressure are of interest because of their application to advanced small- and medium-sized integral reactors, in which a primary coolant with a relatively higher pressure flows outside the tubes, while secondary water with a relatively lower pressure flows inside the tubes. Another notable point is that the values of the mean radius to thickness ratio of these steam generator tubes are very small, which means that a thick-walled cylinder is employed for these steam generator tubes. In the present paper, the maximum allowable pressure of helically coiled and thick-walled steam generator tubes with through-wall cracks under external pressure is investigated based on a detailed nonlinear three-dimensional finite element analysis. In terms of the crack orientation, either circumferential or axial through-wall cracks are considered. In particular, in order to quantify the effect of the crack location on the maximum external pressure, these cracks are assumed to be located in the intrados, extrados, and flank of helically coiled cylinders. Moreover, an evaluation is also made of how the maximum external pressure is affected by the ovality, which might be inherently induced during the tube coiling process used to fabricate the helically coiled steam generator tubes.

1. 서론

현재 국내 개발 중인 일체형원자로의 경우 하나의 압력용기 내에 가압기, 냉각재펌프, 증기발생기 등의 모든 주기기(main components)가 배치됨으로써 기존 상용로와 설계 특성 및 형상이 매우 다르다. 이와 같이 모든 주기기가 하나의 압력용기에 배치됨에 따라 대형

배관이 존재하지 않으며 이로 인해 대형배관파단과 같은 설계 기준 사고를 고려할 필요가 없기에 안전성도 향상될 수 있다. 또한 전체 플랜트의 설계 역시 단순해진다는 장점이 있다^[1].

전술한 바와 같이 일체형원자로의 경우 증기발생기 역시 원자로 압력용기 내부에 설치되기 때문에 노심에서 가열된 원자로 1차냉각수의 열을 2차냉각수로 전달하는 전열관은 제한된 공간에서 큰

* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6317

Fax: +82-2-974-8270

E-mail address: nam-su.huh@seoultech.ac.kr (Nam-Su Huh).

전열 면적을 확보할 수 있도록 나선형으로 설계되었다. 또한 상대적으로 압력이 높은 1차냉각수가 전열관 외부로 흐르고 상대적으로 압력이 낮은 2차냉각수가 전열관 내부를 따라 흐르기 때문에 전열관에는 결과적으로 외압(external pressure)이 작용하게 된다. 증기발생기 전열관은 기본적으로 1차 계통에서 생성된 열을 2차 계통으로 전달하는 중요한 기기로 특히 1차 계통과 2차 계통의 경계부를 이뤄 1차 냉각수 압력 경계를 구성할 뿐만 아니라 1차 계통에서 2차 계통으로 방사성 물질을 함유한 냉각수가 흘러나와 대기 및 주변 환경으로 확산되는 것을 막는 방사능 차단막으로서의 기능도 수행하는 핵심 기기이다. 따라서 증기발생기 전열관의 건전성 유지는 원자력발전소의 안전 운영을 위한 주요 관심 사항 가운데 하나로 이에 따라 이미 운전 중인 상용 원자력발전소 전열관의 경우는 다양한 결함 형상을 고려한 파손 예측 모델이 제시된 바 있다²⁻⁵⁾.

이미 운전 중인 상용 원자력발전소 증기발생기 전열관의 경우는 대부분 직관의 형태이며, 상대적으로 압력이 높은 1차 냉각수가 전열관 내부를 따라 흐르고 상대적으로 압력이 낮은 2차 냉각수가 전열관 외부로 따라 흐르기에 하중 조건도 내압(internal pressure)이 작용하는 형태가 된다. 그러나 전술한 바와 같이 일체형원자로 증기발생기 전열관의 경우는 형상도 직관이 아닌 나선형이며 하중 조건도 내압이 아닌 외압이 작용하기에 상용 원자력발전소 증기발생기 전열관과는 형상 및 하중 조건이 상이하게 된다. 이에 따라 이미 운전 중인 상용 원자력발전소 증기발생기 전열관에 대해 제시된 파손 예측 모델을 적용할 수 없으며 일체형원자로 증기발생기 전열관의 형상과 하중 특성을 반영한 새로운 파손 예측 모델이 제시되어야 한다. 이에 따라 다양한 형태의 결함이 존재하는 외압 전열관의 파손 거동을 예측하기 위한 제한된 연구가 시도된 바 있으며, 특히 관통균열의 경우는 외압으로 인해 균열 닫힘 현상이 발생한다는 결과가 제시된 바 있다⁶⁾. 균열이 외압에 의해 닫힘에 따라 외압이 작용할 경우 관통균열이 존재하는 전열관의 최대 외압도 균열이 없는 경우의 그것과 유사할 수 있을 것으로 예상되지만 만약 국부적인 형상의 불균일성 등이 존재한다면 이의 영향으로 최대 외압이 영향을 받을 수 있다. 또한 나선형 전열관이라는 고유의 특성으로 인해 균열의 위치에 따른 영향도 있을 수 있다.

따라서 본 연구에서는 관통균열(through-wall cracks)이 존재하는 일체형원자로 증기발생기 전열관의 파손 예측 모델을 제시하기 위해 나선형 형상과 외압 조건을 고려한 3차원 유한요소해석을 수행하여 관통균열이 존재하는 일체형원자로 전열관의 최대지지가능 외압을 평가하였다. 이를 위해 균열 길이를 다양하게 변화시키며 원주방향 관통균열(circumferential through-wall cracks)과 축방향 관통균열(axial through-wall cracks)에 대한 해석을 수행하였으며, 나선형 전열관의 형상 특성을 고려하여 균열 위치가 파손 압력에 미치는 영향도 평가하였다. 뿐만 아니라 전술한 바와 같이 나

선형 전열관의 제작 과정에서 발생할 수 있는 ovality (국부적 형상의 불균일성)의 영향이 전열관의 파손 압력에 미치는 영향도 함께 평가하였다.

2. 해석 대상 및 유한요소해석

2.1 해석 대상

Fig. 1은 관통균열이 존재하는 나선형 전열관의 파손 외압을 예측하기 위해 본 논문에서 고려한 균열 형상 및 위치를 나타낸 것이다.

먼저 원주방향 관통균열에 대한 파손 외압을 결정하기 위해 5가지의 관통균열 길이($\theta/\pi = 0.125, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$)를 고려하였다. 또한 축방향 관통균열의 경우는 다음과 같이 무차원 균열 길이를 정의하였다.

$$\rho = \frac{c}{\sqrt{R_m t}} \tag{1}$$

축방향 관통균열의 경우도 $\rho = 1, 1.5, 3, 5, 6$ 의 5가지 경우를 고려하여 해석을 수행하였다. 직관과 달리 나선형 전열관의 경우는 전열관에서의 위치에 따라 응력 분포가 달라지기에 파손 외압도 균열 위치에 따라 달라질 수 있다. 따라서 균열의 위치가 파손 외압에 미치는 영향을 고려하기 위해 Fig. 1(c)에 나타낸 바와 같이 균열이 나선형 전열관의 외호(extrados), 내호(intrados), 중앙(flank)에 존재하는 경우에 대해 모두 해석을 수행하였다. 본 연구에서 고

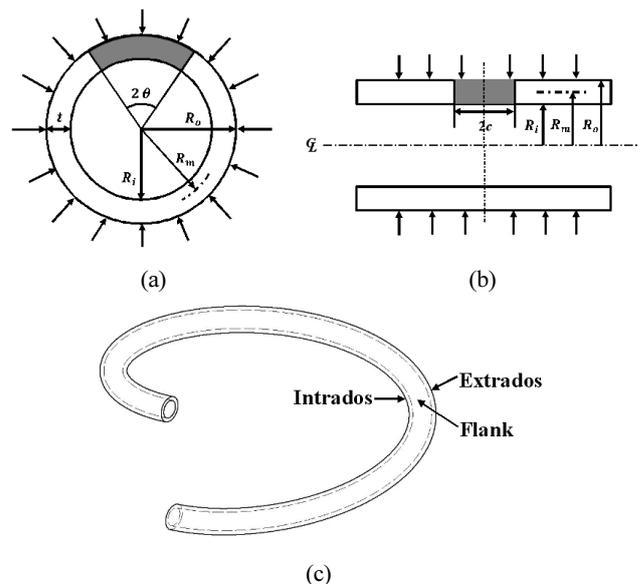


Fig. 1 Schematics of helically coiled steam generator tubes under external pressure with (a) circumferential through-wall crack (b) axial through-wall crack, and (c) locations of postulated through-wall cracks

려된 국내 일체형원자로 증기발생기 전열관의 직경(outer diameter, $D_o = 2R_o$)과 두께의 비는 6.7이며, 해석 대상을 정리하여 Table 1에 나타내었다.

Fig. 2는 ovality가 존재하는 나선형 전열관의 단면을 나타낸 것이다. 전술한 바와 같이 나선형 전열관의 제작 과정에서 전열관에 ovality가 발생할 수 있으며 이는 전열관의 파손 외압에 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 연구에서는 전열관의 ovality가 파손 외압에 미치는 영향도 평가하였다. Fig. 2에 나타낸 단면 형상 정보를 이용하면 전열관의 ovality는 다음과 같이 정의된다⁷⁾.

$$W = \frac{D_{o,max} - D_{o,min}}{D_o} \quad (2)$$

여기서, $D_{o,max}$ 와 $D_{o,min}$ 은 ovality가 발생한 전열관 단면의 최

대 및 최소 외경을 의미하여, D_o 는 ovality가 없는 전열관의 외경을 나타낸다. 또한 ovality의 변화 정도를 나타내는 ovality 변위 (W_1)는 다음과 같이 정의된다.

$$W_1 = \frac{WD_o}{4} \quad (3)$$

본 연구에서는 ovality 형상으로 $W = 0.025, 0.05$ 의 2가지 경우를 고려하였다. Ovality가 있는 경우도 ovality가 없는 경우와 동일하게 관통균열이 전열관의 외호, 내호, 중앙부에 존재할 수 있다고 가정하여 해석을 수행하였다. Ovality의 영향을 평가하는 경우에는 Table 1에 나타낸 경우 가운데 축방향 관통균열은 $\rho = 1, 3, 6$ 의 3가지 경우, 원주방향 관통균열의 경우에는 $\theta/\pi = 0.125, 0.3, 0.5$ 의 3가지 경우에 대해서만 해석을 수행하였다. Ovality의 영향을 고려하기 위한 해석 대상을 정리하여 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Summary of geometries considered in the present work (without tube ovality)

D_o/t	Crack Length		Crack Location
	Circumferential (θ/π)	Axial (ρ)	
6.7	0.125	1	Extrados Intrados Flank
	0.2	1.5	
	0.3	3	
	0.4	5	
	0.5	6	

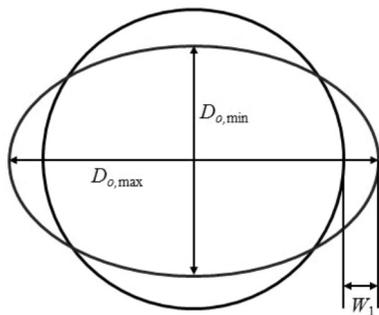


Fig. 2 Cross section of tube with ovality

Table 2 Summary of geometries considered in the present work for an ovoided tube

Ovality W	Crack Length		Crack Location
	Circumferential (θ/π)	Axial (ρ)	
0.025, 0.05	0.125	1	Extrados Intrados Flank
	0.3	3	
	0.5	6	

2.2 유한요소해석

Fig. 3은 해석에 사용된 대표적인 유한요소모델을 나타낸 것으로 나선형 전열관은 형상이 대칭적이지 않기 때문에 전체 형상을 모두 모델링하였다. 해석에는 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS⁸⁾를 이용하였으며 비압축성 문제를 고려하여 20절점 등계수 사각 감차 적분요소(20-nodes isoparametric brick reduced integration element, C3D20R in ABAQUS element library)를 사용하였다.

일반적으로 두께가 얇은 실린더형 구조물에 외압이 작용하면 구조물은 좌굴(buckling)에 의해 파손된다. 반면 두께가 두꺼우면 좌

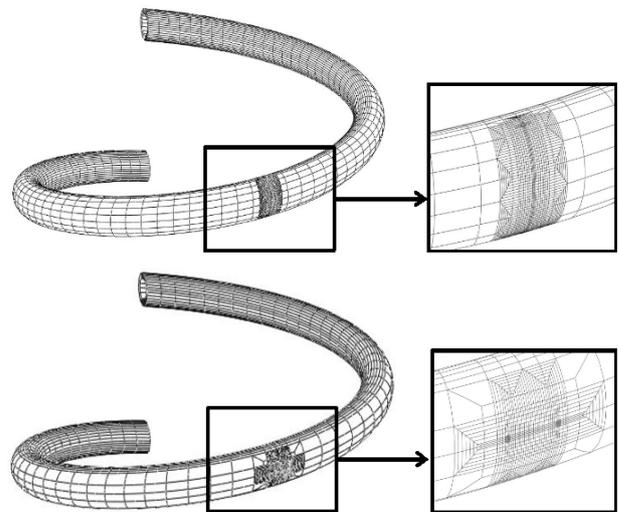


Fig. 3 Typical FE meshes employed in the present FE analyses: (a) a circumferential through-wall crack and (b) an axial through-wall crack in extrados

Table 3 Material properties of titanium alloy

Material	E (GPa)	σ_y (MPa)	ν
Titanium alloy (@ 350°C)	89	181	0.3

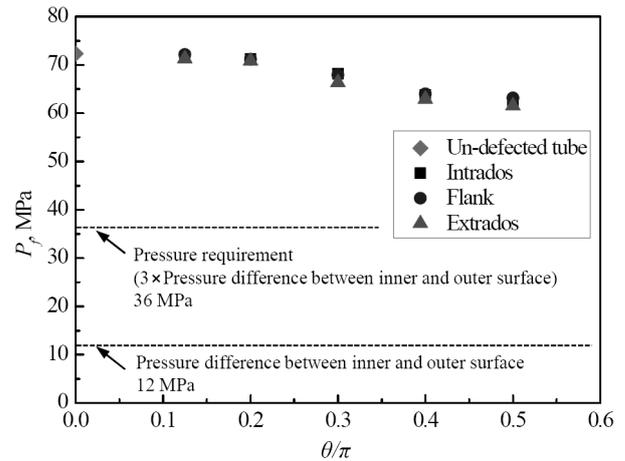
굴이 아닌 소성 붕괴(plastic collapse)에 의해 파손되게 된다. 만약 실린더의 평균 반경(R_m)과 두께(t)의 비(R_m/t)가 5보다 크면 얇은 실린더로 가정할 수 있으며, R_m/t 가 5보다 작으면 두꺼운 실린더로 간주될 수 있다⁹⁾. Table 1에 나타난 바와 같이 본 논문에서 고려된 전열관의 경우는 R_m/t 가 2.8($D_o/t=6.7$)이므로 두꺼운 실린더의 거동을 보이게 된다. 따라서 본 연구에서 고려된 증기발생기 전열관의 경우는 좌굴이 아닌 소성 붕괴에 의해 파손될 것으로 생각된다¹⁰⁾. 이에 따라 본 연구에서는 소성 붕괴법을 이용하여 외압이 작용하는 관통균열 전열관의 최대지지외압을 결정하였다. 해석을 위해 전열관의 재료 특성은 탄성-완전 소성(elastic-perfectly plastic)으로 가정하였으며 ABAQUS에서 제공하는 RIKS 옵션을 사용하여 최대지지외압을 결정하였다. 특히 ovality에 의한 영향을 평가하는 경우에는 ovality에 의해 전열관에 국부적인 불안정성(local instability)이 나타날 수 있으므로 이에 의한 영향을 고려하기 위해 대변형 해석(large strain analyses)을 고려하였다.

전열관은 티타늄 합금으로 제작되었으며 해석에 사용된 재료 물성을 Table 3에 정리하였다. 해석 시 전열관의 양 끝단은 모두 구속하였고 외압은 전열관 외면에 분포 하중의 형태로 작용시켰다. 또한 균열면에 작용하는 압력의 영향을 고려하기 위해 외압의 50%에 해당하는 압력을 균열면에 작용시켰다. 특히 외압으로 인한 실질적인 균열거동을 모사하기 위하여 균열면에 접촉조건(contact)을 부여하여 해석을 수행하였다.

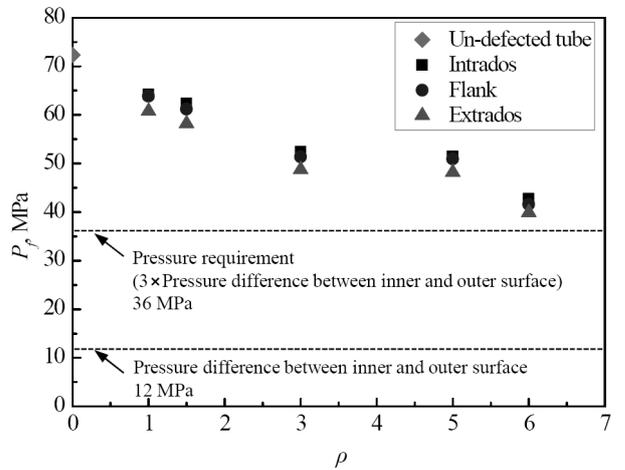
3. 유한요소 파손 외압 평가 결과

3.1 균열 길이에 따른 최대지지외압의 변화

Fig. 4는 유한요소해석으로 구한 최대지지 외압을 균열길이와 균열위치(외호, 내호, 중앙부)에 따라 나타낸 것이다. 미국원자력규제위원회(U.S. Nuclear Regulatory Commission, USNRC)의 기준에 따르면 증기발생기 전열관은 정상운전압력에 대해 3배의 안전여유도를 유지해야 한다¹¹⁾. 이에 따라 정상운전압력에 3배의 안전여유도를 고려한 기준 압력도 Fig. 4에 함께 나타내었다. 또한 균열이 존재하지 않는 나선형 전열관($\theta/\pi=0, \rho=0$)에 대한 파손 외압 계산 결과도 함께 나타내었다. 균열이 없는 나선형 전열관에 대해 본 연구에서 적용한 유한요소해석 방법으로 구한 파손 외압 평가 결과는 이론식¹²⁾으로 계산한 결과와 잘 일치하여 본 연구



(a)



(b)

Fig. 4 Variation of maximum external pressures according to crack length and crack location: (a) circumferential through-wall crack and (b) axial through-wall crack

에서 사용한 유한요소해석 방법의 타당성이 입증되었다. 먼저 균열 길이가 증가하면 나선형 전열관의 최대지지 외압은 감소하였다. 특히 최대 외압의 감소폭은 원주방향에 비해 축방향 관통균열의 경우가 큰 것으로 나타났다. 이는 압력이 작용할 경우에는 원주방향 응력이 축방향 응력에 비해 크게 되는데 이러한 원주방향 응력에 의해 축방향 관통균열이 큰 영향을 받기에 원주방향 관통균열에 비해 축방향 관통균열이 더 취약하기 때문인 것으로 생각된다. 균열 위치에 따른 최대지지 외압의 경우는 나선형 전열관의 외호에 균열이 존재할 경우가 가장 작게 나타났다. 따라서 나선형 전열관의 경우는 내호나 중앙부에 비해 외호가 더욱 취약한 것으로 평가되었다.

그러나 원주방향 및 축방향 관통균열 모두 충분히 균열길이가 긴 경우에도 모두 정상운전압력에 3배의 안전여유도를 고려한 경우에 비해 최대지지 외압이 큰 것으로 나타나 구조 건전성 측면에

서는 모두 충분한 안전여유도를 유지하는 것으로 평가되었다.

Fig. 5는 나선형 전열관의 최대지지 외압을 직관으로 가정하여 구한 최대지지 외압과 비교하여 나타낸 것이다. 직관의 경우에도 해석 조건 및 방법은 나선형 전열관의 경우와 동일하게 고려하였다. Fig. 5에 나타낸 바와 같이 원주방향 관통균열의 경우에는 직관으로 구한 최대지지 외압과 나선형으로 구한 최대지지 외압이 균열 길이와 관계없이 거의 일치하였다. 그러나 축방향 관통균열의 경우에는 직관으로 구한 최대지지 외압에 비해 나선형으로 구한 최대지지 외압이 약 10~16% 정도 작은 것으로 나타났다. 따라서 원주방향 관통균열의 경우에는 해석의 편이성을 고려하여 직관으로 가정하여 해석을 수행할 수 있을 것으로 생각되지만 축방향 관통균열의 경우에는 응력 성분과 균열 형상 특성으로 인해 나선형 전열관을 직관 전열관으로 모사할 경우 비보수적인 결과를 얻을 수 있는 것

으로 평가되었다.

3.2 Ovality가 최대지지 외압에 미치는 영향

Fig. 6은 전열관의 ovality에 따른 최대지지 외압의 변화를 나타낸 것이다. 전술한 바와 같이 원주방향 및 축방향 관통균열에 대해 각각 3가지 균열 길이와 2가지 ovality 값을 고려하였다. Fig. 6에서 $W=0$ 의 경우는 ovality가 없는 나선형 전열관의 파손 압력 (Fig. 4 참조)을 의미한다. 이때 균열은 ovality 전열관의 외호에 존재한다고 가정하였다. 먼저 원주방향 관통균열의 경우는 균열길이에 관계없이 ovality값이 증가함에 따라 최대지지 외압이 선형적으로 감소하였으며 $W=0.025$ 인 경우는 ovality가 없는 경우($W=0$)에 비해 약 6~8% 정도 감소하였으며 $W=0.05$ 인 경우에는 약 11~14% 정도 감소하였다. 그러나 원주방향 관통균열의 경우에는 상대적으로 큰 ovality가 존재하여도 정상운전압력의 3배에 해당

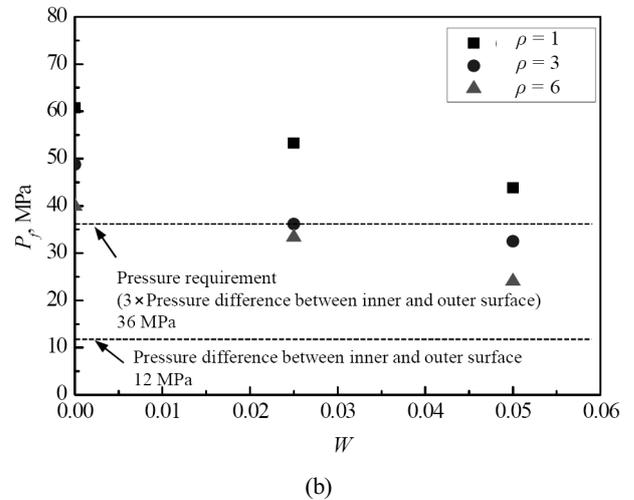
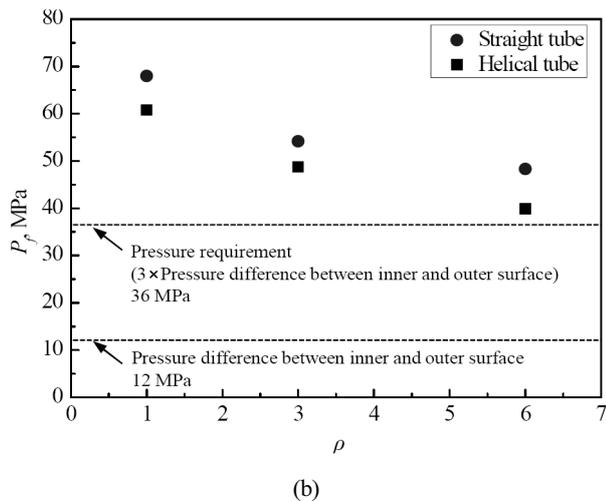
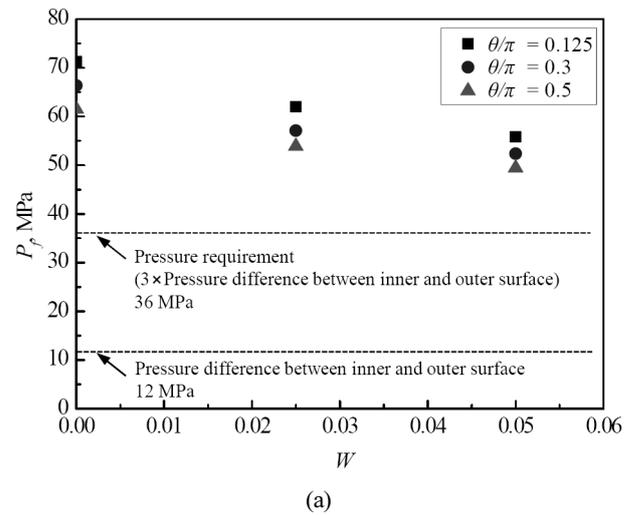
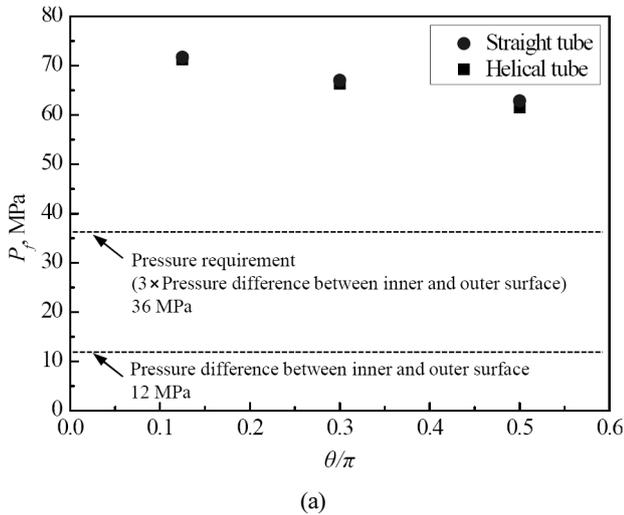


Fig. 5 Comparison of the maximum external pressures from straight tube with those from helically coiled tube: (a) a circumferential through-wall crack and (b) an axial through-wall crack

Fig. 6 Effect of tube ovality on maximum external pressure (a) circumferential through-wall crack and (b) axial through-wall crack

하는 여유도를 충분히 유지하는 것으로 나타났다.

Fig. 6(b)의 축방향 관통균열의 경우도 전반적인 거동은 원주방향 관통균열의 경우와 유사한 것으로 나타났다. 다만 축방향 관통균열의 경우에는 ovality가 없는 경우에 비해 $W=0.025$ 인 경우에는 약 12~25%, $W=0.05$ 인 경우에는 약 27~39% 정도로 크게 감소하여 만약 균열길이가 상대적으로 길고 ovality가 존재하면 정상운전압력의 3배보다 최대지지 외압이 작아질 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 축방향 관통균열의 경우에는 ovality가 나선형 전열관의 구조 건전성에 큰 영향을 미칠 수 있다.

Fig. 7과 Fig. 8은 ovality가 존재하는 전열관에서 균열 위치에 따른 최대지지 외압의 변화를 나타낸 것으로 Fig. 7은 $W=0.025$ 인 경우에 대한 결과이며, Fig. 8은 $W=0.05$ 인 경우에 대한 결과를 나타낸 것이다. 두 경우 모두 해당 ovality가 존재하는 전열관에서 균열이 외호, 내호, 중앙에 각각 위치한다고 가정하여 최대지지

외압을 평가하였다. 평가 결과 먼저 ovality가 발생한 나선형 전열관의 내호와 중앙부에 관통균열이 위치한다고 가정된 경우는 최대 지지 외압의 차이가 크지 않은 것으로 나타났다. 반면 ovality가 있는 전열관의 외호에 균열이 존재한다고 가정된 경우는 국부적 불안정성의 영향이 크게 나타나 동일한 균열길이 및 ovality 값에 대해 내호 및 중앙부에 비해 최대지지 외압이 크게 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 ovality가 존재하는 전열관의 경우도 내호부 및 중앙부에 비해 외호부가 가장 취약한 것으로 평가되었다.

4. 결론

본 연구에서는 일체형원자로 증기발생기 전열관의 파손 예측 모델을 개발하기 위해 3차원 유한요소해석을 수행하여 전열관의 파손 외압을 예측하였다. 이를 위해 나선형 전열관의 형상 특성 및

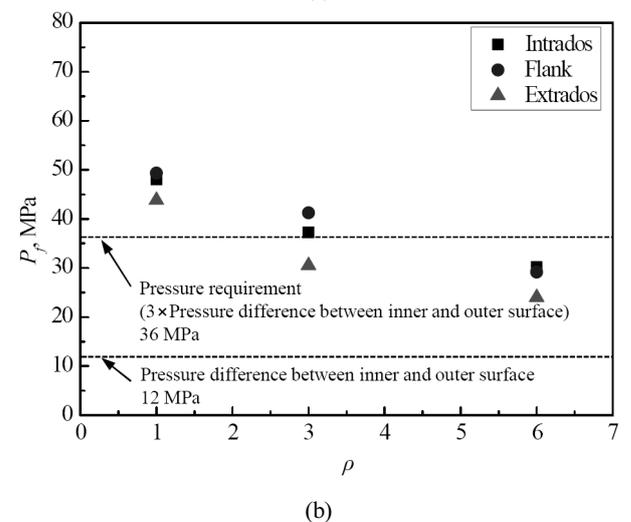
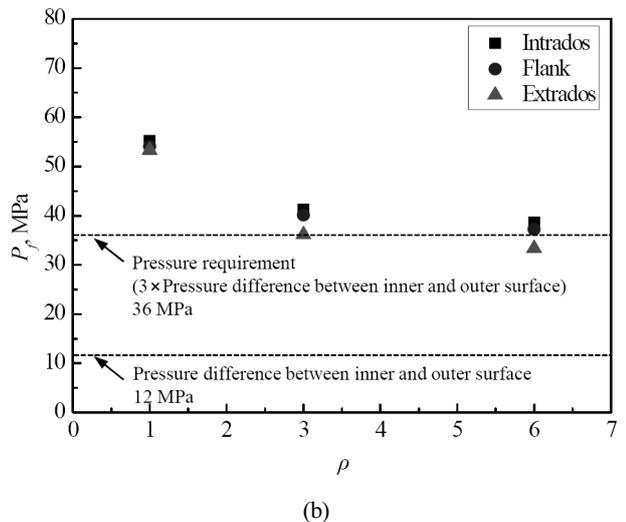
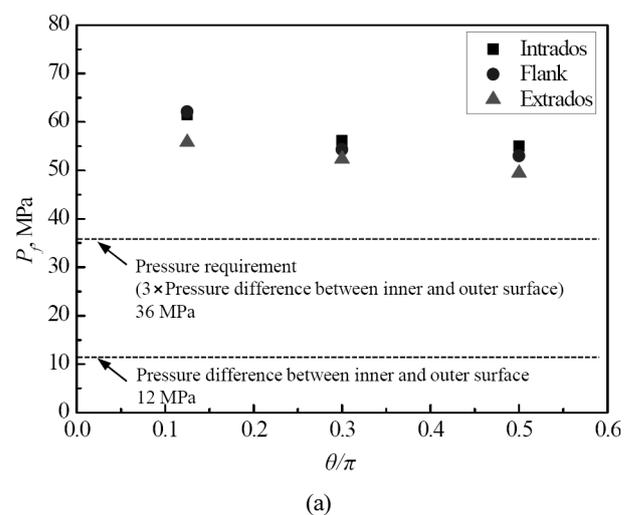
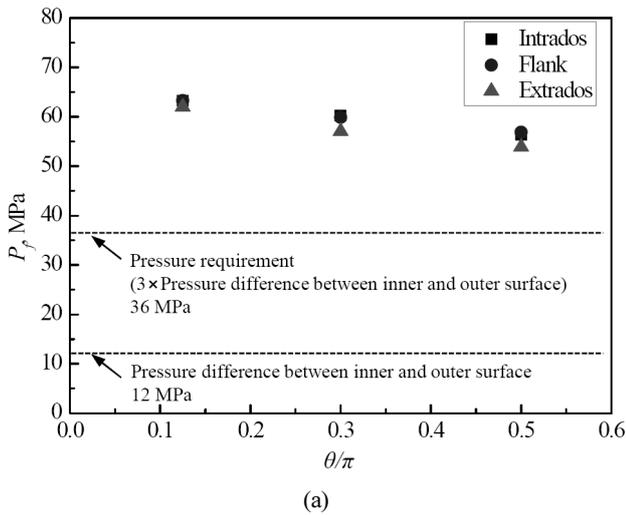


Fig. 7 Effect of crack location on maximum external pressure in the ovoided tube ($W=0.025$): (a) a circumferential through-wall crack and (b) an axial through-wall crack

Fig. 8 Effect of crack location on maximum external pressure in the ovoided tube ($W=0.05$): (a) a circumferential through-wall crack and (b) an axial through-wall crack

외압 하중 조건을 고려하였으며 원주방향 및 축방향 관통균열에 대한 최대지지 외압을 평가하였다.

최대지지 외압을 평가하기 위해 다양한 균열길이를 고려하였으며, 균열 위치 및 전열관의 ovality가 최대지지 외압에 미치는 영향도 정량적으로 평가하였다. 본 논문에서 얻은 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 외압이 작용하는 나선형 전열관의 경우, 나선형 형상의 외호에 균열이 위치하는 경우가 내호 및 중앙부에 비해 최대지지 외압이 작게 평가되었으며, 원주방향 관통균열에 비해 축방향 관통균열의 최대지지 외압이 작은 것으로 평가되었다.
- (2) 원주방향 관통균열의 경우는 직관으로 가정하여 구한 최대지지 외압과 나선형 전열관에 대해 구한 최대지지 외압이 큰 차이를 보이지 않았으나 축방향 관통균열의 경우는 직관에 비해 나선형 전열관으로 구한 최대지지 외압이 크게 작은 것으로 나타났다.
- (3) 전열관의 ovality가 증가할수록 최대지지 외압은 거의 선형적으로 감소하였으며 이 경우에도 외호부가 국부적인 불안정성으로 인해 가장 취약한 것으로 나타났다.
- (4) 원주방향 관통균열의 경우는 균열길이가 상대적으로 길어도 요구되는 안전여유도를 충분히 유지하는 것으로 나타났으나 축방향 관통균열의 경우는 균열길이가 상대적으로 길거나 큰 ovality가 있는 경우 요구되는 안전여유도를 만족하지 못할 수 있는 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 한국원자력연구원의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

[1] International Atomic Energy Agency, 2000, Small Power and Heat Generation Systems on the basis of Propulsion and

Innovative Reactor Technologies, IAEA-TECDOC-1172.
 [2] MacDonald, P. E., Shah, V. N., 1996, Steam Generator Tube Failure, NUREG/CR-6365.
 [3] Huh, N. S., Kim, J. M., Chang, Y. S., Kim, Y. J., Hwang, S. S., Kim, J. S., 2007, Elastic-Plastic Fracture Mechanics Assessment for Steam Generator, Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 30 131-142.
 [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] Majumdar, S., Kasza, K., Franklin, J., Muscara, J., 2000, Pressure and Leak-Rate Tests and Models for Predicting Failure of Flawed Steam Generator Tubes, USNRC NUREG/CR-6664.
 [6] Korea Institute of Nuclear Safety, 2003, Development of Regulatory Technology for Structural Integrity of Components in SMART-P, KINS/HR-553.
 [7] American Society of Mechanical Engineers, 2011, Tolerances for Formed or Bent Piping, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. III, Div. 1, NB-4223.
 [8] ABAQUS, 2011, ABAQUS/Standard User's Manual Version 6.11-1, Simulia Corp.
 [9] Electric Power Research Institute, 1991, Ductile Fracture Handbook, EPRI NP-6301.
 [10] Yoo, Y. S., Huh, N. S., Choi, S., Kim, T. W., Kim, J. I., 2010, Collapse Pressure Estimates and The Application of a Partial Safety Factor to Cylinders subjected to External Pressure, Nuclear Engineering and Technology, 42:4 450-459.
 [11] United States Nuclear Regulatory Commission, 1976, Base for Plugging Degraded PWR Steam Generator Tubes, Regulatory Guide 1.121.
 [12] Hill, R., 1950, The Mathematical Theory of Plasticity, Oxford University Press, England.