관통균열이 존재하는 증기발생기 전열관의 파열압력 평가

김현수† · 김종성* · 진태은* · 김홍덕** · 정한섭**

(2003년 12월 5일 접수, 2004년 6월 3일 심사완료)

Burst Pressure Evaluation for Through-Wall Cracked Tubes in the Steam Generator

Hyun-Su Kim, Jong-Sung Kim, Tae-Eun Jin, Hong-Deok Kim and Han-Sup Chung

Key Words: Burst Pressure(파열압력), Free Span(직관), U-Bend(곡관), Bulging Factor(벌징계수), Through-Wall Crack(관통균열), Flow Stress(유동응력), Intrados(내호), Extrados(외호)

Abstract

Operating experience of steam generators shows that the tubes are degraded by stress corrosion cracking, fretting wear and so on. These defected tubes could stay in service if it is proved that the tubes have sufficient structural margin to preclude the risk of tube bursting. This paper provides detailed plastic limit pressure solutions for through-wall cracks in the steam generator tubes. These are developed based on three dimensional(3D) finite element analyses assuming elastic-perfectly plastic material behavior. Both axial and circumferential through-wall cracks in free span and in u-bend regions are considered. The resulting limit pressure solutions are given in a polynomial form, and thus can be simply used in practical integrity assessment of the steam generator tubes.

1. 서 론

원자력발전소의 증기발생기는 핵분열에 의해 생성된 1차 냉각재의 열을 2차측으로 전달하는 역할을 수행하며, 증기발생기의 구성요소 중 전열관은 열전달 및 압력경계 구성이라는 두 가지의 중요한 고유 기능을 수행한다. 1기의 증기발생기에는 대략적으로 수천 개의 전열관이 존재하며, 전열관은 열전달 효율의 향상을 도모하기 위해 두께가 매우 얇게 설계 및 제작되어 다른 기기에 비해 손상이 발생할 가능성이 높다. 만약 증기발생기 전열관에 손상이 발생할 경우 1차 냉각재의 누설로 인한 방사능 유출 및 이로 인한 원전의 가동 정지 등 심각한 경제적, 사회적 문제를 유발할 수 있으므로, 전열관은 정상 및 사고 운전조건 등 다양한 운전 환경에서 구조적 건전성이 보장되어야 한다.

전열관은 가동 중 응력부식균열 등 다양한 손상이 발생하였으며,[1,2] 이에 따라 지난 수십 년 동안 원전의 안전운영 측면에서 주요한 관심사가 되어왔다. 이에 전열관의 건전성 확보 관점에서 균열의 파괴거동을 정확히 파악하고, 그 결과로부터 전열관의 파열압력을 정확히 예측할 수 있는 연구가 필요하게 되었다.

미국, 프랑스 및 벨기에 등에서는 1970년대부터 전열관에 존재하는 균열에 대한 다수의 실험 및 해석연구를 수행하였으며, 이를 토대로 균열 유형별 파열압력 예측식을 제시한 바 있다.[3~5] 그러나 기존에 제시된 파열압력 예측식에 대한 적용 타당성 검증 및 곡관 등 다양한 부위에 대한 정확한 파열압력 예측식 개발과 관련한 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다.

본 논문에서는 축방향 및 원주방향 균열이 존재하는 전열관을 대상으로 유한요소해석을 수행

† 책임저자, 회원, 한국전력기술(주) 재료기술연구그룹
E-mail : hyunsu@kopec.co.kr
TEL : (031)289-4296 FAX : (031)289-3189
* 회원, 한국전력기술(주) 재료기술연구그룹
** 한국전력공사 전력연구원

한 후, 이를 토대로 직관 및 곡관에 존재하는 균열의 파열압력 예측식을 제시하고자 한다.

2. 파열압력 예측식 분석

2.1 축방향 관통균열

현재 제시되어 있는 파열압력 예측식들은 전열관에 작용하는 내압에 의한 원주방향 응력이 전열관 재질의 유동응력(flow stress)에 도달할 때 파열이 발생한다고 가정하고 있다.[3-5] 내압에 의해 균열 주위가 부풀어 오르는 벌징(bulging) 현상을 고려한 파열압력 예측식은 식 (1)과 같다.

$$P_{NL} = 1/M \tag{1}$$

여기서, P_{NL} : 무차원 파열압력 = $P_L R_m/\sigma_f t$

M : 벌징계수

P_L : 파열압력, MPa

R_m : 전열관의 평균 반경, mm

σ_f : 유동응력=0.5(σ_{YS} + σ_{UTS}), MPa

σ_{YS} : 재료의 항복강도, MPa

σ_{UTS} : 재료의 인장강도, MPa

t : 전열관 두께, mm

이다.

2.1.1 직관

Erdogan은 식 (2)와 같은 벌징계수를 제시하였으며,[6] Folias는 식 (3)과 같은 벌징계수를 제시하였다.[6] 한편 SAFE(safety and structural integrity research center)의 Kim 등은 배관에 대한 유한요소해석 결과를 토대로 식 (4)와 같은 벌징계수를 제시하였다.[7]

$$M = 0.614 + 0.87542\rho + 0.386\, e^{-2.275\rho} \tag{2}$$

$$M = \sqrt{(1 + 1.05\rho^2)} \tag{3}$$

$$M = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{1}{\sqrt{1 + 0.34\rho + 1.34\rho^2}} \tag{4}$$

여기서, ρ: 무차원 형상계수 $= c/\sqrt{R_m t}$

c : 축방향 균열 길이의 1/2, mm

이다.

2.1.2 곡관

Miller는 곡관의 내호(intrados)에 축방향 관통균열이 존재하는 경우를 대상으로 다음과 같은 벌징계수를 제시하였다.[6] 한편 곡관 외호(extrados)에 존재하는 균열의 경우 곡률(curvature)의 영향은 작은 것으로 판단하여 식 (1) 및 식 (3)과 같은 직관에 대한 파열압력 예측식을 사용하도록 권고하였다.

$$M = \sqrt{(1 + 1.61\rho^2)} \times \frac{1 - R_m/2R_{Bend}}{1 - R_m/R_{Bend}} \tag{5}$$

여기서, R_{Bend}는 곡관의 평균 굽힘반경이다.

2.2 원주방향 관통균열

전열관의 굽힘 구속조건 등 경계조건의 영향이 작은 축방향 균열과는 달리 원주방향 균열은 경계조건에 따라 파손모드 및 파열압력이 변화하기 때문에 경계조건의 영향을 적절히 반영하여야 한다.[4,5,8]

2.2.1 직관

원주방향 관통균열이 존재하는 직관의 경계조건은 Fig. 1에 도시한 바와 같이 크게 제한굽힘(restrained bending) 조건과 자유굽힘(free bending) 조건으로 구분할 수 있다.

Kanninen은 자유굽힘 조건에 대해 식 (6)과 같은 파열압력 예측식을 제시하였으며,[6] Framatome은 균열 길이에 따른 파손모드의 변화를 고려하여 전열관의 원주방향 응력이 축방향 응력보다 작은 경우에 대해 식 (7), 이와 반대인 경우에 대해 식 (8)과 같은 예측식을 제시하였다.[3] 또한 SAFE의 Kim 등은 균열 길이에 따른 파손모드의

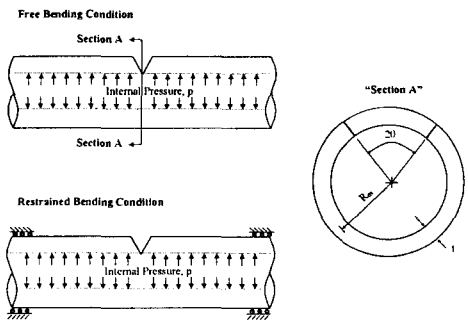


Fig. 1 Boundary conditions for circumferential through-wall cracks in free span

변화를 고려하여 균열각이 95°이하인 경우에 대해 식 (9)와 같은 예측식을 제시하였으며, 균열각이 95° 이상인 경우 Kanninen이 제시한 식 (6)을 사용하도록 권고하고 있다.[7]

$$P_{NL}=2(1-\frac{\theta+2\sin^{-1}(\sin\theta/2)}{\pi}) \quad (6)$$

$$P_L=\sigma_f \log(1+t/R_i) \quad (7)$$

$$P_L=\frac{4\sigma_f t R_m}{\pi R_i^2}[\frac{\pi-\theta}{2}-\sin^{-1}(\frac{\sin\theta}{2})] \quad (8)$$

$$P_{NL}=\frac{2}{\sqrt{3}}[1-0.28(\frac{\theta}{\pi})-0.92(\frac{\theta}{\pi})^2] \quad (9)$$

여기서, R_i : 전열관의 내측 반경, mm

θ: 균열각의 1/2

이다.

한편 제한굽힘 조건에 대해 ANL(Argonne national laboratory), Belgatom 및 EPRI(electric power research institute) 등이 파열압력 예측식을 제시하였다. ANL이 제시한 식은 식 (10)과 같고[5], Belgatom이 제시한 식은 식 (11)과 같으며[4] 다수의 실험결과를 토대로 도출한 EPRI 식은 식 (12)와 같다.[8]

$$P_L=\frac{2(\gamma^2-1)(\pi-\theta)\sigma_f}{2\pi+(\pi-\theta)(\gamma^2-1)} \quad (10)$$

$$P_L=\frac{2\sigma_f}{n(R_m/t-1)} \quad (11)$$

$$P_{NL}=1.14652-0.70562\xi, \text{ for PDA}\leq 75\%$$

$$P_{NL}=2.4454(1-\xi), \text{ for PDA}>75\% \quad (12)$$

여기서, $\gamma=R_o/R_i$

R_o : 전열관의 외측 반경, mm

$$n=\frac{\pi}{2}/[\cos^{-1}(\frac{\sin\theta-K}{2})-\frac{\theta}{2}]$$

$$K=0.5\pi(\sigma_y/\sigma_f)$$

σ_y : 비례한도의 근사값, MPa

ξ= PDA/100

PDA : Percent Degraded Area

이다.

2.2.2 곡관

EPRI는 곡관에 대해 별도의 예측식을 제시하고 있지 않으며, 식 (12)와 같은 직관의 파열압력 예측식을 사용할 것을 권고하고 있다[8]. 한편 Miller는 곡률의 영향이 작은 것으로 가정하여 균열각이 100° 미만인 경우에 대해서는 식 (13), 100° 이상인 경우에 대해서는 직관에 대한 식 (6)을 사용하도록 권고하였다.[6]

$$P_{NL}=1 \quad (13)$$

3. 파열압력 평가

3.1 축방향 관통균열

3.1.1 직관

기존 파열압력 예측식의 적용 타당성 검토 및 최적의 예측식 도출을 위해 축방향 관통균열이 존재하는 직관에 내압이 작용하는 경우를 대상으로 공학적 해석과 ABAQUS 코드[9]를 활용한 탄성-완전 소성 유한요소해석을 수행하였다.

축방향 관통균열이 존재하는 직관의 해석모델은 Table 1과 같다.[3] 한편 Fig. 2는 축방향 관통균열이 존재하는 직관의 3차원 유한요소 모델을 나타낸 것으로서, 대칭성을 이용하여 전체 전열관의 1/4을 모델링 하였으며, 총 19,000개의 절점

Table 1 Geometry and dimensions for axial through-wall cracks in free span

O.D. (mm)	t (mm)	2c (mm)	Mat.	σ_{YS} (MPa)	σ_{UTS} (MPa)
19.06	1.09	0.0	Alloy 600	361.0	754.0
19.06	1.09	7.0		361.0	754.0
19.08	1.08	15.0		361.0	741.0
19.06	1.07	25.0		361.0	741.0
19.05	1.09	30.0		361.0	754.0
19.08	1.10	50.0		361.0	741.0

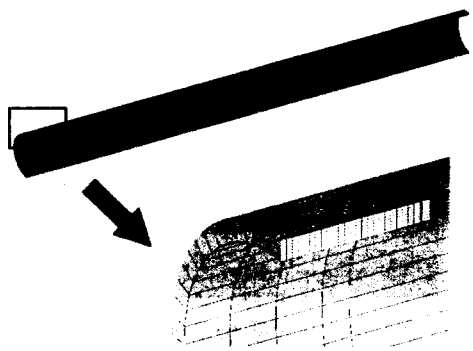


Fig. 2 FE model for axial through-wall crack in free span

과 3,520개의 20절점 등사각주 요소를 사용하였다. 또한 파열압력 계산을 위해 재료가 탄성-완전 소성(elastic-perfectly plastic) 거동을 보이는 것으로 가정하였으며,[6,7] 경계조건으로는 대칭면을 이루는 모든 절점의 변위를 구속하였고, 균열 면에서의 압력과 내압에 기인한 축방향 하중(end cap force)을 고려하였다.

3.1.2 곡관

직관의 경우와 동일하게 축방향 관통균열이 존재하는 곡관에 내압이 작용하는 경우를 대상으로 공학적 해석과 탄성-완전 소성 유한요소해석을 수행하였다. 곡관의 내호 및 외호에 축방향 관통균열이 존재하는 해석모델은 Table 2와 같다. 한편 곡관 내호에 축방향 관통균열이 존재하는 대표적 유한요소 모델은 Fig. 3과 같으며, 전반적인 해석조건은 직관의 경우와 동일하다.

Table 2 Geometry and dimensions for axial through-wall cracks in u-bend

O.D. (mm)	t (mm)	2c (mm)	R_{Bend} (mm)	Mat.	σ_{YS} (MPa)	σ_{UTS} (MPa)	Crack Loca.
19.05	1.07	0.0	76.2	Alloy 600	361.0	754.0	Int.
		7.0					
		11.0					
		15.0					
		25.0	279.4				Ext.
		30.0					
		50.0					

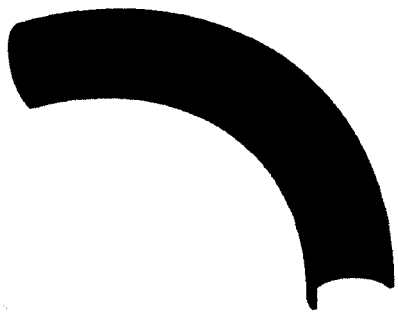


Fig. 3 FE model for axial through-wall crack in u-bend

3.2 원주방향 관통균열

3.2.1 직관

Table 3에 제시한 바와 같이 원주방향 관통균열이 존재하는 직관에 내압이 작용하는 경우를 대상으로 공학적 해석과 탄성-완전 소성 유한요소해석을 수행하였다.

원주방향 관통균열이 존재하는 직관의 굽힘제한 조건에 대한 대표적 유한요소 모델은 Fig. 4와 같다. 그림에 도시한 바와 같이 굽힘제한 실험조건[3]을 모사하기 위해 지지판(support plate)을 링 형상의 강체(rigid)로 모델링 한 후 전열관과 지지판 사이에 1°의 회전을 허용하는 간극 및 접촉(contact) 조건을 부여하였으며, 전반적인 해석조건은 축방향 균열의 경우와 동일하다.

3.2.2 곡관

직관의 경우와 동일하게 원주방향 관통균열이

Table 3 Geometry and dimensions for circumferential through-wall cracks in free span

Boundary Condition	O.D. (mm)	t (mm)	2θ (deg.)	Mat.	σ_{YS} (MPa)	σ_{UTS} (MPa)
Free Bending	22.24	1.33	0	Alloy 600	360.0	748.0
	22.24	1.33	45		360.0	748.0
	22.25	1.33	90		360.0	748.0
	22.27	1.29	180		346.0	725.0
	22.26	1.29	250		346.0	725.0
	22.26	1.30	300		346.0	725.0
Restrained Bending	22.26	1.29	0		346.0	725.0
	22.26	1.29	110		346.0	725.0
	22.26	1.29	140		346.0	725.0
	22.26	1.29	180		346.0	725.0
	22.26	1.29	250		346.0	725.0
	22.26	1.30	300		346.0	725.0

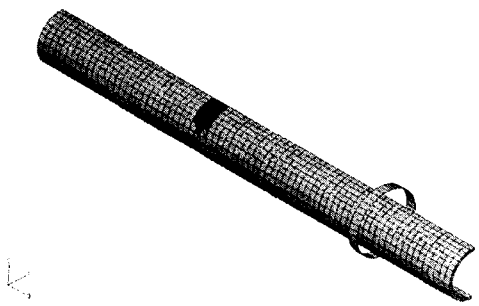


Fig. 4 FE model for circumferential through-wall crack in restrained bending condition

존재하는 곡관에 내압이 작용하는 경우를 대상으로 공학적 해석과 탄성-완전 소성 유한요소해석을 수행하였다.

곡관의 내호 및 외호에 원주방향 관통균열이 존재하는 해석모델은 Table 4와 같으며, 전반적인 해석 조건은 직관의 경우와 동일하다.

4. 해석결과

4.1 축방향 관통균열

4.1.1 직관

Table 1에 기술한 모델을 대상으로 유한요소해석 및 공학적 예측식을 사용하여 구한 파열압력을 실험결과[3]와 비교한 결과는 Fig. 5와 같다.

그림에 도시한 바와 같이 전반적으로 예측값이 실험결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 한편 각 해석방법으로 구한 파열압력 예측결과를 비교해 보면 유한요소해석과 SAFE의 벌징계수를 사용한 예측값이 실험결과와 거의 유사한 것으로 나타난 반면, 균열 길이가 작은 경우 Erdogan과 Folias의 벌징계수를 사용한 방법은 보수적인 예측결과를 보였다. 이러한 차이가 발생한 원인은 유한요소해석이 Von Mises 항복조건을 채택한 반면 Erdogan과 Folias의 벌징계수를 사용한 방법은 Tresca 항복조건에 기반을 둔 것에 기인하는 것으로 판단되며, 균열 길이가 작은 경우 Tresca와 Von Mises 항복조건의 차이값인 $2/\sqrt{3}$을 고려하면 Erdogan과 Folias의 벌징계수를 사용한 방법은 실험결과와 잘 일치할 것으로 예상되었다.

Table 4 Geometry and dimensions for circumferential through-wall cracks in u-bend

O.D. (mm)	t (mm)	2θ (deg.)	R_{Bend} (mm)	Mat.	σ_{YS} (MPa)	σ_{UTS} (MPa)	Crack Loca.
19.05	1.07	5	76.2	Alloy 600	346.0	725.0	Int.
		110					
		140					
		180	279.4				Ext.
		250					
		300					

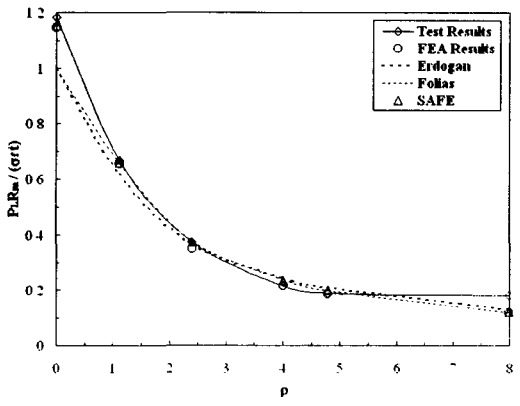


Fig. 5 Limit pressure prediction results for axial through-wall cracks in free span

한편 식 (14)는 유한요소해석을 통해 구한 파열압력을 다항식 형태로 곡선적합(curve fitting) 한 것으로서, 축방향 관통균열이 존재하는 직관의 파열압력 예측시 재료물성치 및 치수 변화에 무관하게 적용이 가능하다.

$$P_{NL}=\frac{1}{\sqrt{0.81029\rho^2+0.25473\rho+0.69105}} \quad (14)$$

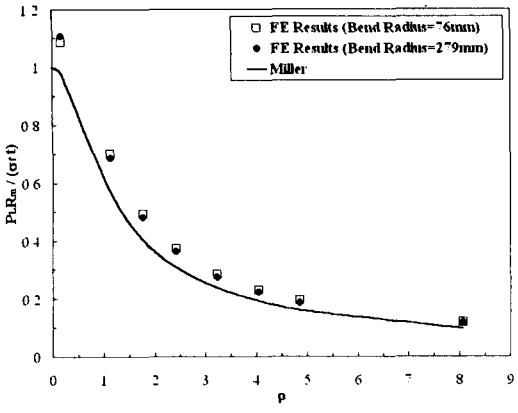
4.1.2 곡관

Table 2에서 기술한 해석모델을 대상으로 유한요소해석 및 공학적 예측식을 사용하여 구한 파열압력을 비교한 결과는 Fig. 6과 같다.

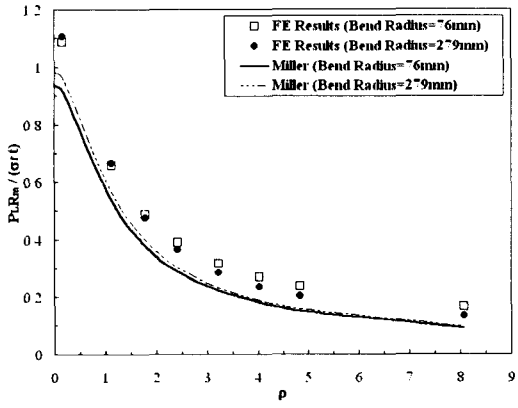
실험결과가 제시되어 있지 않아 정확한 비교는 어려우나 유한요소해석 결과와의 비교를 통해 간접적으로 판단해 볼 때 Miller의 예측식은 외호 및 내호의 경우 모두 상당히 보수적인 것으로 나타났다. 또한 Miller는 외호의 경우 곡률반경의 효과가 없으며, 내호의 경우 곡률반경 증가에 따라 파열압력이 증가할 것으로 예상한 반면에, 유한요소해석 결과에 따르면 내호의 경우 곡률반경 증가에 따라 오히려 파열압력이 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 곡률반경 변화에 따른 파열압력의 차이는 그리 크지 않았다.

Miller의 예측식 활용 결과와 유한요소해석 결과가 큰 차이를 보이는 이유는 Miller의 예측식이 직관에서와 마찬가지로 Tresca 항복조건에 기반을 두고 실제 곡관의 형상 및 경계조건 등을 상세히 고려하지 않고 도출되었기 때문으로 판단되며, 유한요소해석 결과와의 차이가 거의 일정하기 때문에 Von Mises 항복조건 및 곡관의 경계조건 등을 적절히 고려할 경우 유한요소해석 결과와 잘 일치할 것으로 예상되었다.

한편 식 (15)와 식 (16)은 각각 곡관 내호 및

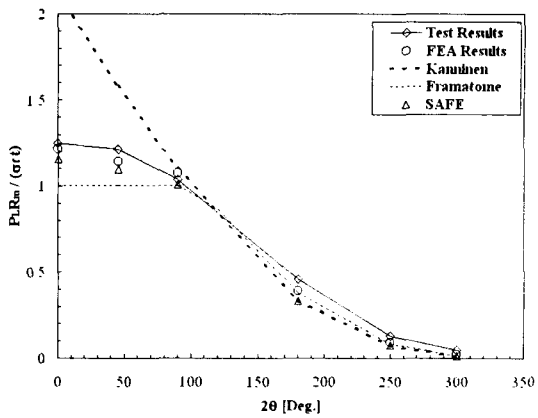


(a) Extrados

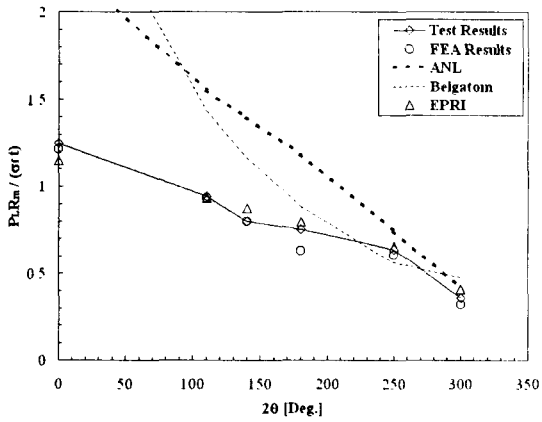


(b) Intrados

Fig. 6 Limit pressure prediction results for axial through-wall cracks in u-bend



(a) Free bending condition



(b) Restrained bending condition

Fig. 7 Limit pressure prediction results for circumferential through-wall cracks in free span

외호에 대해 유한요소해석 결과를 토대로 도출한 하한(lower bound) 예측식으로서, 축방향 관통균열이 존재하는 곡관의 파열압력 예측시 재료물성치 및 치수변화에 무관하게 적용이 가능하다.

$$P_{NL} = 0.1249 + 0.96885 \times (0.57447)^{\rho} \quad (15)$$

$$P_{NL} = 0.09778 + 1.00063 \times (0.59331)^{\rho} \quad (16)$$

4.2 원주방향 관통균열

4.2.1 직관

Table 3에 기술한 모델을 대상으로 유한요소해석 및 공학적 예측식을 사용하여 구한 파열압력을 실험결과[3]와 비교한 결과는 Fig. 7과 같다.

Fig. 7(a)에 도시한 바와 같이 자유굽힘 조건의 경우 전반적으로 예측값이 실험결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 한편 각 해석방법으로 구한 파열압력 예측결과를 비교해 보면 유한요소해석과 SAFE 방법 활용 예측값이 실험결과와 거의 유사한 것으로 나타난 반면 균열 길이가 작은 경우 Kanninen 방법은 매우 비보수적인 예측결과를 보였고, Framatome 방법은 보수적인 예측결과를 보였다.

이러한 차이가 난 원인은 균열 길이에 따른 파손모드의 변화에서 찾을 수 있다. 즉, 균열 길이가 약 100° 이상인 경우 축방향 응력이 파열 발생의 지배적인 원인이나, 균열 길이가 약 100° 미만인 경우에는 원주방향 응력도 파열 발생의 주요 원인이 되기 때문이다.[3,7,8] 따라서 Kanninen 방법의 비보수적 예측경향과 Framatome 방법의 보수적 예측경향은 파열압력에 미치는 원주방향

응력의 영향을 적절히 반영하지 못했기 때문으로 판단할 수 있다.

한편 제한굽힘 조건의 경우 Fig. 7(b)에 도시한 바와 같이 유한요소해석과 EPRI 방법을 활용한 예측값이 실험결과[3]와 거의 유사한 것으로 나타난 반면 ANL과 Belgatom 방법을 활용한 예측값은 실험결과와 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다.

ANL과 Belgatom 방법이 이러한 비보수적 예측 경향을 보이는 주된 이유는 전열관 지지판에 의해 발생하는 굽힘제한의 영향을 과소평가했기 때문으로 판단되며, 이 외에도 균열 길이에 따른 파손모드의 변화 등 다양한 인자들의 복합적인 영향에 기인한 것으로 생각된다.

한편 식 (17) 및 식 (18)은 자유굽힘 조건에 대해 유한요소해석 결과를 토대로 도출한 식이고 식 (19) 및 식 (20)은 제한굽힘 조건에 대해 도출한 식으로서, 원주방향 관통균열이 존재하는 직관의 파열압력 예측시 재료물성치 및 치수 변화에 무관하게 적용이 가능하다.

$$P_{NL}=1.20113-0.00239(2\theta), \quad \text{for } 2\theta\le 90^{\circ} \tag{17}$$

$$P_{NL}=1.89368-0.01166(2\theta)+1.79696\times 10^{-5}(2\theta)^{2} \tag{18}$$

$$P_{NL}=1.1522-0.00267(2\theta)+1.643\times 10^{-6}(2\theta)^{2}, \quad \text{for } 2\theta<250^{\circ} \tag{19}$$

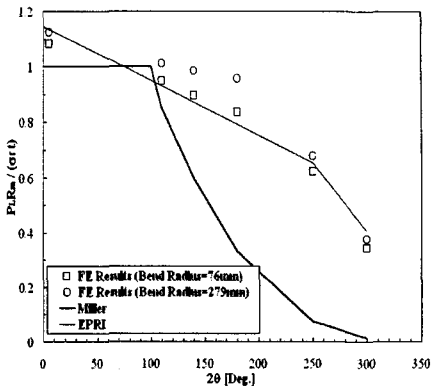
$$P_{NL}=1.96621-0.00552(2\theta) \tag{20}$$

4.2.2 곡관

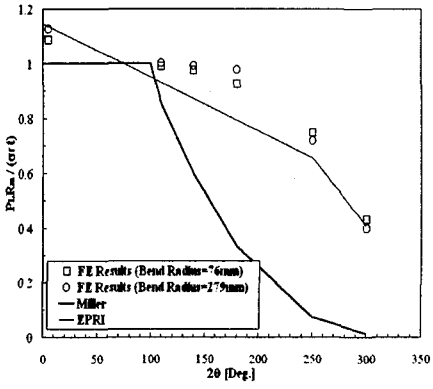
Table 4에 기술한 해석모델을 대상으로 유한요소해석 및 공학적 예측식을 사용하여 구한 파열압력을 비교한 결과는 Fig. 8과 같다.

실험결과가 제시되어 있지 않아 정확한 비교는 어려우나 유한요소해석 결과와의 비교를 통해 간접적으로 판단해 볼 때 Miller의 예측식은 외호 및 내호의 경우 모두 상당히 보수적인 것으로 나타났으며, EPRI 식은 외호의 경우 유한요소해석 결과와 비교적 잘 일치하나 내호의 경우 보수적인 것으로 나타났다.

또한 Miller는 내호 및 외호 존재 균열에 대해 곡률반경의 효과가 없는 것으로 판단하였으나, 유한요소해석 결과에 따르면 내호 및 외호 모두



(a) Extrados



(b) Intrados

Fig. 8 Limit pressure prediction results for circumferential through-wall cracks in u-bend

곡률반경이 파열압력에 영향을 미치며 그 영향은 외호의 경우 상당히 큰 것으로 나타났다.

Miller의 예측식이 유한요소해석 결과와 큰 차이를 보이는 이유는 Miller의 예측식이 Tresca 항복조건에 기반을 두고 실제 곡관의 경계조건 등을 상세히 고려하지 않고 도출되었기 때문으로 판단되며, Von Mises 항복조건 및 굽힘제한 경계조건 등을 적절히 고려할 경우 유한요소해석 결과와의 차이가 감소할 것으로 예상되었다.

한편 직관에 대한 실험결과로부터 도출된 EPRI 식은 굽힘제한 경계조건의 영향을 반영하고는 있으나, 곡률반경이 파열압력에 미치는 영향을 고려하지 않았기 때문에 전반적으로 보수적인 예측 경향을 보였다. 그러나 EPRI가 제시한 바와 같이 보수적인 측면에서 직관부의 파열압력 예측식을

곡관 외호 균열에 대해 적용하는 것은 적절한 것으로 판단되었으며, 내호 존재 균열의 경우 과도한 보수성 때문에 보편적 적용은 어려운 것으로 생각되었다.

식 (21)은 곡관 내호에 대해 유한요소해석 결과를 토대로 도출한 하한 예측식이고 식 (22)는 곡관 외호에 대해 도출한 하한 예측식으로서, 원주방향 관통균열이 존재하는 곡관의 파열압력 예측시 재료물성치 및 치수변화에 무관하게 적용이 가능하다.

$$P_{NL} = 1.14306 - 0.00262(2\theta) + 2.06966 \times 10^{-5}(2\theta)^2 - 6.70632 \times 10^{-8}(2\theta)^3 \quad (21)$$

$$P_{NL} = 1.14561 - 0.00223(2\theta) + 1.07514 \times 10^{-5}(2\theta)^2 - 4.02027 \times 10^{-8}(2\theta)^3 \quad (22)$$

5. 결 론

증기발생기 전열관의 직관 및 곡관 부위에 축방향 및 원주방향 관통균열이 존재하고 내압이 작용하는 경우 균열 크기 변화에 따른 파열압력 평가결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 기존에 제시된 파열압력 예측식들을 실험결과 및 유한요소해석 결과와 비교하여 각 식들의 적용 타당성 및 제한점 등을 상세히 분석하였다.

(2) 유한요소해석 결과를 토대로 직관 및 곡관 존재 축방향 및 원주방향 관통균열에 대한 파열압력 예측식을 제시하였으며, 이 식들은 재료물성치 및 치수변화에 무관하게 적용이 가능하다.

(3) 본 연구에서 제시한 예측식들을 광범위한 조건에 보편적으로 적용하기 위해서는 다양한 매개변수 변화에 따른 영향 검토 등 다수의 추가연구가 요구된다.

후 기

본 연구는 과학기술부 주관 원자력 연구개발 중장기 사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

(1) MacDonald, P. E. and Shah, V. N., 1996, "Steam Generator Tube Failure," *NUREG/CR-6365.*

(2) MacDonald, P. E. and Shah, V. N., 1999, "Regulatory Practices and Fitness-for-Service Guidelines in Various Countries," *Life Extension and Aging Management of Nuclear Power Plant Components in Korea.*

(3) Cochet, B., 1991, "Steam Generator Tube Integrity," *EPRI NP-6865L*, Vol. 1~2.

(4) Frederick, G. and Hernalsteen, P., 1990, "Belgian Approach to Steam Generator Tube Plugging for Primary Water Stress Corrosion Cracking," *EPRI NP-6626SD.*

(5) Majumdar, S., Bakhtiari, S., Kasza, K. and Park, J. Y., 2002, "Validation of Failure and Leak-Rate Correlations for Stress Corrosion Cracks in Steam Generator Tubes," *NUREG/ CR-6774.*

(6) Miller, A. G., 1988, "Review of Limit Loads of Structures Containing Defects," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 32, pp. 197~327.

(7) Kim, Y. J., Shim, D. J., Huh, N. S. and Kim, Y. J., 2002, "Plastic Limit Pressures for Cracked Pipes using Finite Element Limit Analyses," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 79, pp. 321~330.

(8) Keating, R. and Begley, J., 2001, "Steam Generator Degradation Specific Management Flaw Handbook," *EPRI TR-1001191.*

(9) HKS, 2001, "ABAQUS User's Manual," Version 6.2.