

< 논문 >

표면 마모결함을 고려한 증기발생기 세관의 구조건전성 평가

김종민* · 허남수* · 장윤석* · 김영진† · 황성식** · 김정수**

(2006년 7월 12일 접수, 2006년 10월 16일 심사완료)

Structural Integrity Evaluation of SG Tube with Surface Wear-type Defects

Jong-Min Kim, Nam-Su Huh, Yoon-Suk Chang, Young-Jin Kim
Seong-Sik Hwang and Joung-Soo Kim

Key Words : Burst Test(파열실험), Finite Element Analysis(유한요소해석), Steam Generator Tube(증기발생기 세관), Plugging Criteria(관막음 기준), Wear Type Defects(마모결함)

Abstract

During the last two decades, several guidelines have been developed and used for assessing the integrity of a defective steam generator (SG) tube that is generally caused by stress corrosion cracking or wall-thinning phenomenon. However, as some of SG tubes are also failed due to fretting and so on, alternative failure estimation schemes are required for relevant defects. In this paper, parametric three-dimensional finite element (FE) analyses are carried out under internal pressure condition to simulate the failure behavior of SG tubes with different defect configurations; elliptical wear, tapered and flat wear type defects. Maximum pressures based on material strengths are obtained from more than a hundred FE results to predict the failure of SG tube. After investigating the effect of key parameters such as defect depth, defect length and wrap angle, simplified failure estimation equations are proposed in relation to the equivalent stress at the deepest point in wear region. Comparison of failure pressures predicted by the proposed estimation scheme with corresponding burst test data showed a good agreement.

1. 서론

원자력발전소 증기발생기는 압력경계를 구성하는 주요기기 중 하나로서, 1차 계통에서 생성된 열을 2차 계통으로 전달하는 역할을 수행한다. 현재 가동중인 가압경수로형 증기발생기의 경우 일반적으로 반경과 두께가 각각 약 10 mm와 1 mm인 수천여 개의 세관으로 구성되어 있다. 그러나 유체의 불안정성에 기인한 가진이나 응력부식균열(stress corrosion cracking), 지지대와의 상호작용에 의한 마모결함 등 다수의 증기발생기 세관 손상사례가 보고되고 있다.^(1,2) 세관에 손상이 발생하여

냉각재 누설에 따른 방사능 유출 및 원전의 가동 정지 등이 발생할 경우 심각한 경제적, 사회적 문제가 야기될 수 있으므로 결함이 존재하는 세관의 파괴 거동을 정확히 예측하는 것은 매우 중요하다.

세관 건전성 평가 선행연구들은 다수의 파열실험 및 유한요소해석 결과를 토대로 유형별 보수기준을 제시하고 있으나, 이는 대부분 균열성 결함에 관한 것이다.⁽³⁻⁶⁾ 마모결함에 대해서도 일부 관련 연구가 수행된 바 있으나, 한정적인 실험 데이터를 곡선적합(curve fitting)하여 파열압력을 예측하는 수준이다.⁽⁷⁻¹⁰⁾ 또한 마모결함이 존재하는 세관의 파열압력에 영향을 미칠 수 있는 주요 형상 변수로 마모깊이(defect depth), 마모길이(defect length), 마모회전각(wrap angle)등을 들 수 있으며, 이는 기존의 연구에서 고가의 실험장치와 긴 실험기간으로 인해 체계적으로 고려되지 못하였다. 따라서 마모결함이 존재하는 세관의 파손거동을 정확히 파악하고 파열압력에 영향을 미치는 형상변

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail: yjkim50@skku.edu

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

* 성균관대학교 기계공학부

** 한국원자력연구소

수를 고려한 평가기준을 마련할 필요가 있다.

본 논문의 목적은 마모결함이 존재하는 증기발생기 세관의 구조건전성 평가모델을 개발하기 위한 것이다. 이를 위해 3가지 유형의 이상화된 결함 세관을 설정한 후, 파열실험과 유한요소 한계 해석을 수행하며 파손기준의 수립 및 유형별 파열 압력 예측식을 제시하고자 한다.

2. 균열 세관의 구조건전성 평가를 위한 기존 한계하중 예측식

2.1 결함이 존재하지 않는 관

일반적으로 결함이 존재하지 않는 관에 내압이 작용하는 경우 파열압력은 한계하중 해석법 기반의 다음 예측식을 사용하여 계산할 수 있다.

$$\frac{p_L}{\sigma_y} = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left(\frac{R_o}{R_i} \right) \quad (1)$$

여기서 p_L 은 소성한계압력이고, σ_y 는 재료의 항복강도(yield strength)이다. 또한 $2/\sqrt{3}$ 은 von Mises 항복 조건을 고려한 것이며, R_o/R_i 는 외경과 내경의 비이다. 식 (1)로 구한 파열압력은 균열이 존재하는 관의 파열압력 예측 및 비교에 활용된다.

2.2 균열이 존재하는 관

축방향 부분 관통균열이 존재하는 관에 대해 다음과 같은 파열압력 예측식이 제시된 바 있다.^(12,13)

$$p_L = \frac{\sigma_f t}{m_p R_m} \quad (2)$$

여기서 σ_f 는 유동응력, t 는 세관두께, R_m 은 평균 반경, m_p 는 응력보정계수(stress magnification factor)로써 식 (3) 및 (4)를 이용하여 결정한다.

$$m_p = \frac{1 - \alpha \frac{a}{mt}}{1 - \frac{a}{t}} \quad (3)$$

여기서,

$$\alpha = 1 + 0.9 \left(\frac{a}{t} \right)^2 \left(1 - \frac{1}{m} \right) \quad (4)$$

$$m = 0.614 + 0.481\lambda + 0.386 \exp(-1.25\lambda)$$

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

이때, k 는 유동응력계수, σ_y 는 항복강도, σ_u 는 인장강도, λ 는 쉘 파라미터, ν 는 푸아송비, c 는 균열길이의 1/2이다. 본 절에 제시하지는 않았지만 원주방향 부분 관통균열과 축방향 및 원주방향 관통균

열에 대한 파열압력 예측식 역시 여러 연구를 통해 잘 정립되어 있다.⁽¹²⁻¹⁴⁾ 그러나 식 (2)-(4)를 비롯한 선행연구 결과는 형상이 상이한 마모결함에 직접 적용하기 어려우므로, 새로운 파열압력 예측 모델의 수립이 필요하다. 본 연구에서는 3가지 마모형상에 따른 3차원 탄소성 유한요소해석을 수행하고 이를 국내의 실험결과와 비교하였다.

3. 마모결함 세관에 대한 유한요소 한계해석

3.1 형상과 재료

실험 및 유한요소해석에 사용된 증기발생기 세관의 재료는 Alloy 600이다. 외경은 19.05 mm, 두께는 1.09 mm이며, 상온에서의 재료물성치는 Table 1에 정리하였다. Fig. 1은 내압이 작용하는 증기발생기 세관에 존재할 수 있는 마모결함의 형상을 개략적으로 나타낸 것으로써, 타원형 마모결함(elliptical wear), 웨지형 마모결함(tapered wear), 사각형 마모결함(flat wear)의 3가지 유형으로 이상화하였다.

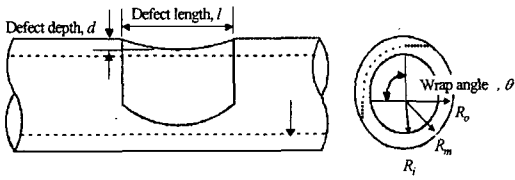
본 연구에서 첫번째로 고려한 타원형 마모결함은 유체유발진동(flow induced vibration)으로 인해 발생하는 손상형태 중 하나이다. 파열압력에 영향을 미치는 형상변수로 마모깊이, 마모길이, 마모회전각을 설정한 후 이를 체계적으로 변화시켜 각각의 영향을 정량화하였다. 총 60가지 경우에 대해 유한요소해석을 수행하였으며, 해석변수의 상세사항은 Table 2에 정리하였다. 여기서 d 는 마모깊이, l 은 마모길이이고 θ 는 마모회전각을 의미한다.

Table 1 Summary of tensile properties for Alloy 600 used in the present study

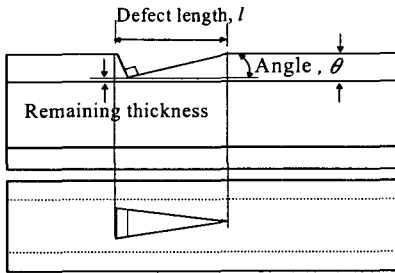
Material	E (GPa)	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	$\sigma_f = \frac{(\sigma_y + \sigma_u)}{2}$ (MPa)
Alloy 600 (20°C)	213	329	669	499

Table 2 The analysis matrix for elliptical wear

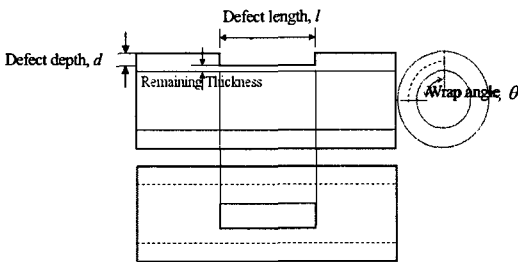
Defect depth (d/t)	Defect length(l) (mm)	Wrap angle(θ)
0.3, 0.45, 0.6, 0.75, 0.9	15, 25, 35	0, 45, 90, 135



(a)



(b)



(c)

Fig. 1 Schematics of wear-type defected steam generator tubes : (a) Elliptical wear (b) Tapered wear (c) Flat wear

웨이형 마모결함은 대각 바(batwing)와 증기발생기 세관 사이의 틈새에서 발생될 수 있는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁵⁾ Fig. 1(b)와 같이 마모 깊이 및 길이가 정해지면 마모각도는 자동적으로 결정된다. 이 중 잔여두께 0.1 mm 이상인 경우만을 고려하여 총 18가지 유한요소해석을 수행하였으며, 해석변수는 Table 3에 나타내었다. 마지막으로 사각형 마모결함은 타원형 마모결함을 보다 단순화시킨 것으로서, 형상은 Fig. 1(c)와 같다. 타원형 마모결함 세관의 파열압력과 비교하기 위해 형상변수를 동일하게 하였으며, 해석변수는 Table 4에 나타내었다.

3.2 유한요소해석

Fig. 2는 증기발생기 세관 마모결함의 3차원 요소망을 나타낸 것이다. 대칭성을 고려하여 타원형 및 사각형 마모결함의 경우 1/4 모델을, 웨이형 마모결함의 경우 1/2 모델을 작성하였다. 해석을

Table 3 The analysis matrix for tapered wear

angle(θ)	Defect length(l) (mm)
0.5, 1, 1.5, 2, 2.5	10, 20, 30, 40, 50, 60

Table 4 The analysis matrix for flat wear

Defect depth (d/t)	Defect length(l) (mm)	Wrap angle(θ)
0.3, 0.45, 0.6, 0.75, 0.9	15, 25, 35	0, 45, 90, 135

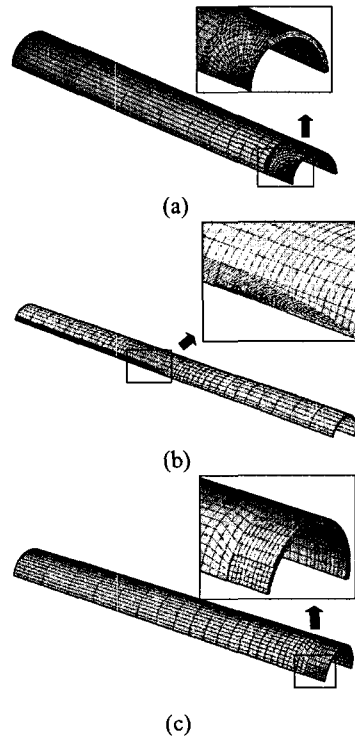


Fig. 2 Typical 3-D FE meshes employed in the present study : (a) Elliptical wear (b) Tapered wear (c) Flat wear

위해 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS⁽¹⁶⁾를 사용하였고, 요소의 비압축성 문제를 해결하기 위해 20절점 사각주 요소(C3D20R)를 선택하였다. 3가지 마모결함의 요소망은 3,213~4,980개의 요소와 16,895~25,357개의 절점으로 구성하였다. J_2 유동이론을 채택하여 등방 탄소성 재료로 가정하였으며, 소성 증분은 실제 응력-변형률 데이터를 그대로 사용하였다. 또한 대규모 변형률 해석조건(NLGEOM option within ABAQUS)을 적용하였다.

하중조건으로는 세관에 가해지는 내압(p)을 고려하였으며, 이에 따른 상당 인장력을 마모결함의 반대편 세관 끝단에 작용시켰다. 본 논문에서는 마모결함 최심점에서 잔여 리가먼트(ligament)까지의 von Mises 응력분포가 특정 임계 응력값에 도달하면 세관이 파열된다고 가정하였는데, 이때의 내압을 파열압력으로 정의하였다. 임계응력값으로 여러 기준($\sigma_y, k\sigma_y, 0.8\sigma_u, 0.9\sigma_u, \sigma_u$)을 검토하였으며, 유한요소해석으로 구한 파열압력과 국내의 실험결과를 비교하여 최적의 파손기준을 결정하였다.

4. 마모결함 세관의 파열압력 예측

4.1 타원형 마모결함

Fig. 3은 타원형 마모결함이 존재하는 세관에 대한 유한요소해석 결과와 파열압력 실험결과를 비교한 것이다. 해석 초기단계에서 항복응력 및 유동응력을 파손기준으로 사용한 경우는 매우 보수적으로 파열압력을 예측한 반면 인장강도를 파손기준으로 사용한 경우 비교적 타당한 결과를 도출할 수 있음을 확인하였다. 이에, 타원형 마모결함이 존재하는 세관의 파열압력 예측시 90%의 인장강도($0.9\sigma_u$)를 파손기준으로 선택하였다.

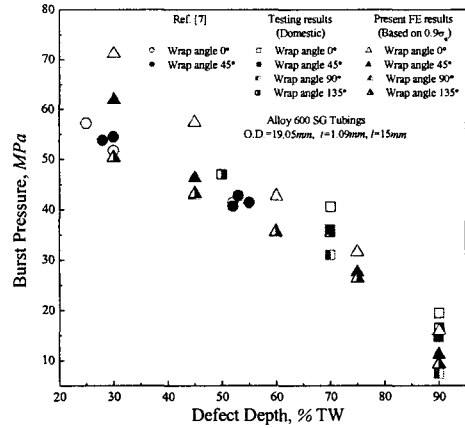
한편 참고문헌 (7)에 따르면 타원형 마모결함에 대한 파열압력은 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$\frac{\Delta p}{\Delta p_0} = \left(1 - \frac{d}{t}\right)^a \quad (5)$$

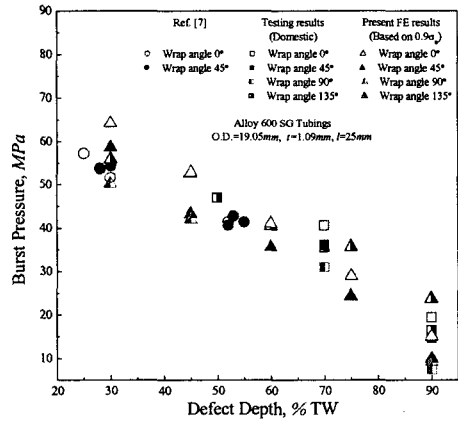
여기서 Δp 는 파열압력, Δp_0 는 균열이 존재하지 않을 때의 파열압력, d 는 마모깊이, t 는 세관의 두께, a 는 상수이다. 식 (5)은 실험 데이터를 기반으로 도출된 것으로서, 최소자승법으로 구한 상수 a 는 0.604이다. 그러나 기존 실험시 마모 길이와 각도의 변화를 충분히 고려하지 않았기 때문에, 본 연구에서는 유한요소해석 결과의 2차 곡선적합을 통해 타원형 마모결함에 대한 파열압력 예측식을 새롭게 제시하였다. 파열압력(p_{burst})은 마모 깊이 및 길이, 마모회전각의 함수이며 다음과 같이 표현된다.

$$p_{burst} = 0.9\sigma_u \left\{ \frac{4t}{\sqrt{3}D_i} \left[A_1 \left(\frac{l}{\sqrt{R_m t}} \right)^2 + A_2 \left(\frac{l}{\sqrt{R_m t}} \right) + A_3 \right] \right\} \quad (6)$$

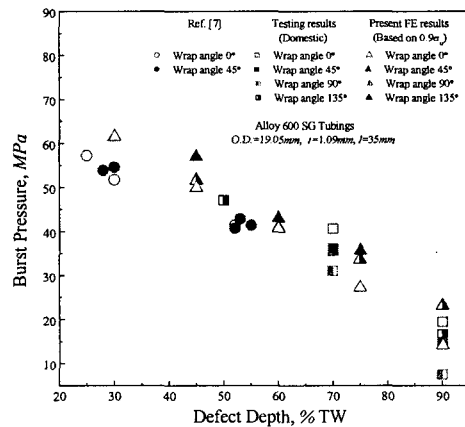
$$A_1, A_2, A_3 = X_1 \left(\frac{d}{t} \right)^2 \left(\frac{\theta}{\pi} \right) + X_2 \left(\frac{d}{t} \right) \left(\frac{\theta}{\pi} \right) + X_3 \left(\frac{\theta}{\pi} \right) + X_4 \left(\frac{d}{t} \right) + X_5 \quad (7)$$



(a)



(b)



(c)

Fig. 3 Comparison of the FE limit results for Elliptical wear with Test results : (a) $l=15$ mm (b) $l=25$ mm (c) $l=35$ mm

Table 5 Resulting constants for failure pressure estimation equation of elliptical wear

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
A_1	0.0058	-0.0110	0.0044	0.0035	-0.0023
A_2	-0.0117	0.0468	-0.0562	-0.0057	0.0200
A_3	-1.0873	1.5828	-0.7894	-0.7340	1.0000

여기서 D_i 는 세관의 내경($2R_i$)이고 상수 A_1, A_2, A_3 는 X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 의 함수이다. Table 5는 이들 각각의 값을 정리한 것이다.

Fig. 4는 Table 2에 제시한 형상변수를 고려하여 유한요소해석 및 공학적 예측식으로 구한 파열압력을 국내의 실험결과와 비교하여 나타낸 것이다.⁽⁷⁾ 마모깊이가 30%인 경우 다소 차이를 보이지만, (a)-(c)와 같이 마모깊이가 변화하고 마모깊이가 깊어져도 실험결과와 파열압력 예측식으로 구한 값이 잘 일치함을 알 수 있다.

4.2 웨지형 마모결함

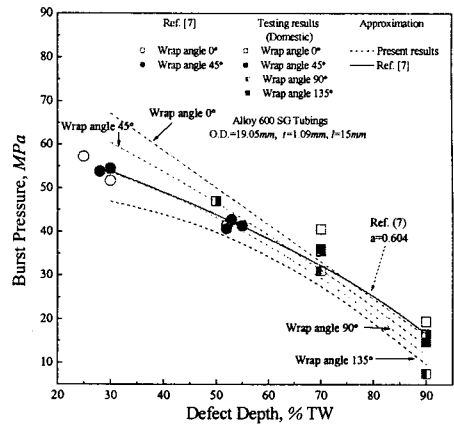
Fig. 5는 국내 데이터를 포함한 웨지형 마모결함 세관에 대한 실험결과와 유한요소해석으로 구한 파열압력을 비교한 것이다. 전술한 여러 파손기준 중 유동응력의 90%($0.9\sigma_f$)가 파열압력을 가장 잘 예측하였기 때문에, 이를 평가에 반영하여 웨지형 마모결함에 대한 파열압력 예측식을 결정하였다. 파열압력은 마모 깊이 및 길이의 함수이며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{burst} = 0.9\sigma_f \frac{4t}{\sqrt{3}D_i} \left\{ A_1 \left(\frac{l}{\sqrt{R_m t}} \right)^2 + A_2 \left(\frac{l}{\sqrt{R_m t}} \right) + A_3 \right\} \quad (8)$$

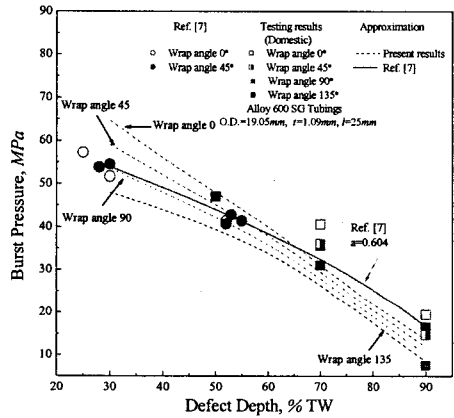
$$A_1, A_2, A_3 = X_1 \left(\frac{d}{t} \right)^2 + X_2 \left(\frac{d}{t} \right) + X_3 \quad (9)$$

여기서 A_1, A_2, A_3 는 X_1, X_2, X_3 에 따른 상수이며, 각각의 값은 Table 6에 나타내었다.

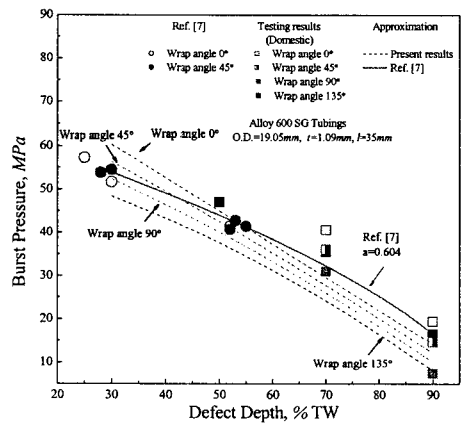
한편 본 논문에서 제시한 예측식의 타당성 확인을 위해 기존의 연구결과를 활용하였다. 참고문헌 (7)에 제시된 타원형 마모결함에 대한 식을 기반으로 하되 웨지형 마모결함 실험 데이터를 사용하여 상수 a 는 0.579로 결정하였다. Fig. 6은 본 논문에서 제시한 예측식과 기존 연구를 기반으로 새롭게 결정한 식으로 구한 파열압력을 비교한 것이다. 전반적으로 유사한 예측결과를 보여주고 있으나, 참고문헌 (7)을 기반으로 예측한 값은 마모깊이가 깊어질수록 실험결과와 차이를 보였다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 Comparison of the burst pressure prediction for elliptical wear type defect with experimental results : (a) $l=15$ mm, (b) $l=25$ mm, (c) $l=35$ mm

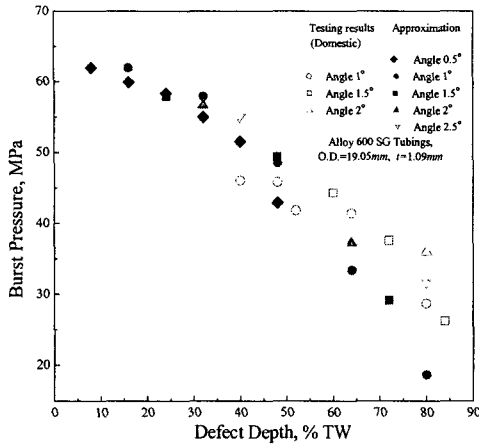


Fig. 5 Comparison of the FE limit results for tapered wear with test results

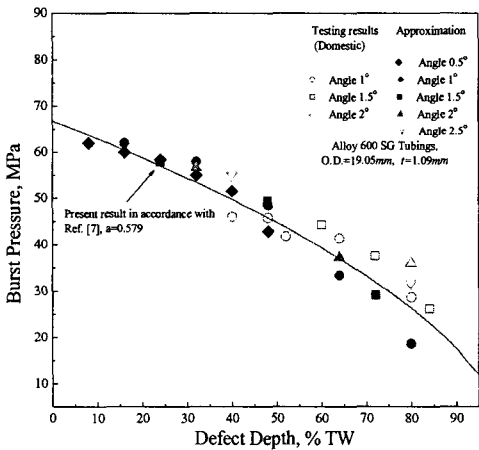


Fig. 6 Comparison of the limit pressure prediction for tapered wear with PNL prediction(SKKU in accordance with Ref. (7), $a=0.579$)

4.3 사각형 마모결함

실험 데이터가 없는 사각형 마모결함의 경우 타원형 마모결함과 동일하게 $0.9\sigma_u$ 파손기준을 적용하였으며, 이를 통해 도출된 파열압력 예측식은 다음과 같다. 예측식의 기본 형태는 타원형 마모결함과 같으며, 역시 2차 곡선적합을 하였다.

$$P_{burst} = 0.9\sigma_u \frac{4t}{\sqrt{3}D_i} \left\{ A_1 \left(\frac{l}{\sqrt{R_m t}} \right)^2 + A_2 \left(\frac{l}{\sqrt{R_m t}} \right) + A_3 \right\} \quad (10)$$

$$A_1, A_2, A_3 = X_1 \left(\frac{d}{t} \right)^2 \left(\frac{\theta}{\pi} \right) + X_2 \left(\frac{d}{t} \right) \left(\frac{\theta}{\pi} \right) + X_3 \left(\frac{\theta}{\pi} \right) + X_4 \left(\frac{d}{t} \right) + X_5 \quad (11)$$

Table 6 Resulting constants for failure pressure estimation equation of tapered wear

	X_1	X_2	X_3
A_1	0.0114	-0.0080	0.0015
A_2	-0.2286	0.1150	-0.0174
A_3	0.3894	-0.5520	1.0000

Table 7 Resulting constants for failure pressure estimation equation of flat wear

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
A_1	-0.0290	0.0359	0.0008	-0.0108	0.0019
A_2	0.4571	-0.5383	0.0055	0.1541	-0.0137
A_3	-2.2186	2.8447	-0.8979	-0.9637	1.0000

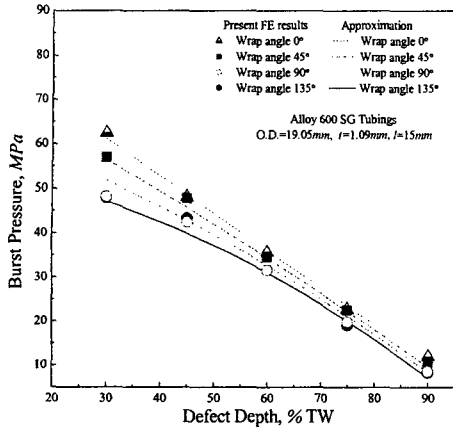
여기서 A_1, A_2, A_3 는 X_1, X_2, X_3 에 따른 상수이며, 각각의 값은 Table 7에 나타내었다.

Fig. 7은 사각형 마모결함의 유한요소해석 결과를 나타낸 것으로써, 타원형 마모결함에 비해 파열압력이 낮게 예측되었다. 마모깊이가 깊어질수록 마모각도에 따른 파열압력의 차이는 거의 없었으며, 마모 깊이에 따른 전체적인 파열압력 변화는 타원형 마모결함과 유사하였다. 이는 타원형 마모결함이 마모 부위가 넓고 전체적으로 세관의 두께가 얇아졌기 때문으로 판단된다.

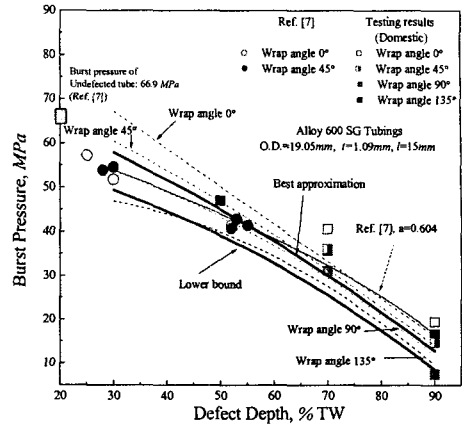
4.4 토의

식 (1)을 사용하여 구한 결함이 존재하지 않는 세관의 파열압력은 $83.2MPa$ 이었다. 이는 타원형 마모결함의 파손기준인 $0.9\sigma_u$ 를 적용하여 구한 유한요소해석 결과와 일치하나 참고문헌 (7)에 제시된 해당 실험값인 $66.9MPa$ 과는 상이하다. 이러한 차이가 발생한 원인은 보다 많은 실험이 수행될 때 명확히 규명될 수 있을 것으로 생각되며, 본 논문에서는 유한요소해석 결과와 파손기준을 토대로 결함이 존재하지 않는 세관의 파열압력이 $83.2MPa$ 이 되도록 하였다.

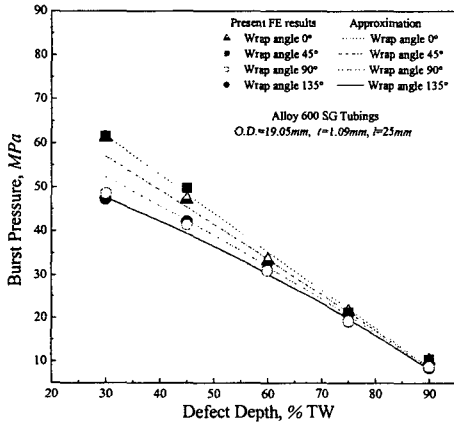
한편 Fig. 8은 유한요소해석 결과를 토대로 도출한 하한계(lower bound) 곡선과 마모각도를 고려하지 않고 마모 깊이 및 길이만을 고려한 파열압력 예측곡선을 보여주고 있다. 제시한 곡선은 마모결함이 존재하는 증기발생기 세관의 파열압력 예측과 건전성 평가시 보수적인 목적으로 활용될 수 있을 것이다.



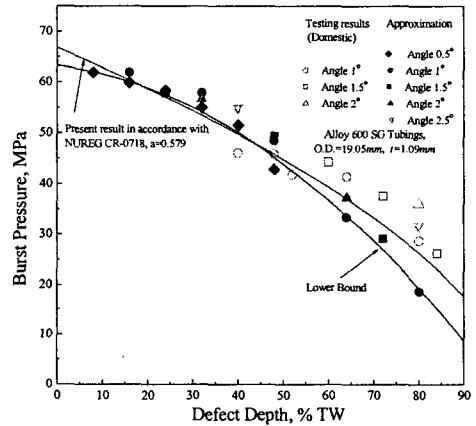
(a)



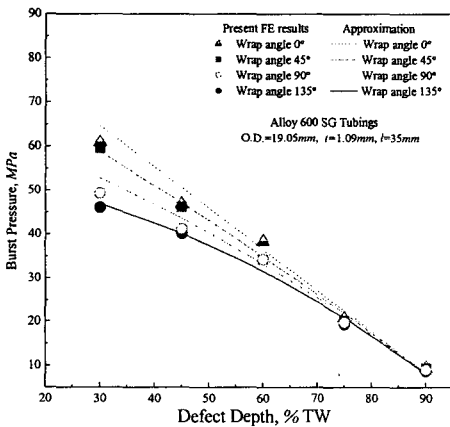
(a)



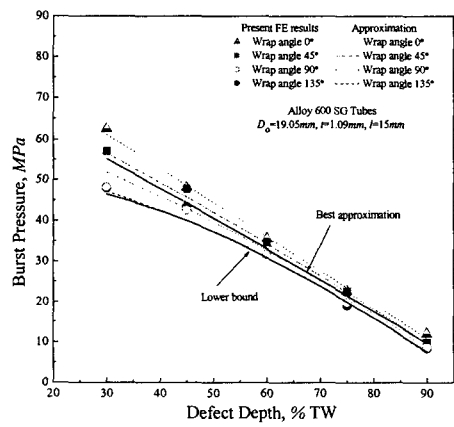
(b)



(b)



(c)



(c)

Fig. 7 Burst pressure prediction for flat wear type defect: (a) $l=15\text{mm}$, (b) $l=25\text{mm}$, (c) $l=35\text{mm}$

Fig. 8 Lower bound and best-fit curves for wear type defect: (a) elliptical wear, (b) tapered wear, (c) flat wear

5. 결론

본 논문은 타원형 마모결함, 웨지형 마모결함, 사각형 마모결함이 존재하는 증기발생기 세관의 파열압력 예측을 위한 것이며, 이를 통해 얻은 주요 결과는 다음과 같다.

(1) 기존에 제시된 마모결함 세관의 파열압력 예측식의 적용 타당성과 제한점을 분석하였다.

(2) 유한요소해석 결과와 실험결과를 비교하여 마모결함이 존재하는 증기발생기 세관의 파손기준을 제시하였다.

(3) 유한요소해석 결과를 토대로 3가지 유형의 마모결함에 대해 최적 또는 하한계 파열압력 예측식을 새롭게 제시하였다. 본 논문의 결과는 마모결함 세관의 건전성 평가를 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

- (1) Au-Yang, M. K., 1998, "Flow-Induced Wear in Steam Generators Tubes—Prediction versus Operational Experience," *International Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 120, pp. 138~143.
- (2) Axisa, F., Antunes, J., and Villard, B., 1988, "Overview of Numerical Methods for Predicting Flow-Induced Vibration," *International Journal of Pressure Vessels Technology*, Vol. 110, pp. 6~14.
- (3) Kim, Y. J., Shim, D. J., Huh, N. S., 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.
- (4) Moon, S. I., Kim, Y. J., Lee, J. H., Song, M. H., Park, Y. W., 2005, "Optimum Global Failure Prediction Model of Steam Generator Tube with Two Parallel Axial Through-Wall Cracks," *International Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 127, pp. 123~128.
- (5) Chang, Y. S., Kim, Y. J., Hwang, S. S., Kim, J. S., Lee, J. H., and Choi, Y. H., 2005, "Integrity Evaluation of Flawed Steam Generator Tubes," *Proceedings of ISG-TIP-3 TCG Meeting*, pp. 8-1~8-30.
- (6) Moon, S. I., Chang, Y. S., Kim, Y. J., Lee, J. H., Song, M. H., Choi, Y. H. and Hwang, S. S., 2006, "Assessment of Plastic Collapse Behavior for Tubes with Collinear Cracks," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 73, pp. 296~308.
- (7) Alzheimer, J. M., Clark, R. A., Morris C. J. and Vagins M., 1979, "Steam Generator Tube Integrity Program Phase I Report," NUREG CR-0718.
- (8) Kozluk, M. J., Martin, D. G. and Mills, B. E., 2002, "Ontario Power Generation's Steam Generator Tube Testing Project," 4th *CNS International Steam Generator Conference*, Toronto, Ontario, Canada.
- (9) Kozluk, M. J., Scarth, D. A. and Graham, D. B., 2002, "Technical Basis for the CANDU Steam Generator Tube Fitness-for-Service Guidelines," 4th *CNS International Steam Generator Conference*, Toronto, Ontario, Canada.
- (10) Electric Power Research Institute, 2001, "Steam Generator Degradation Specific Management Flaw Handbook," EPRI Technical Report 1001191.
- (11) Hill, R., 1950, "The Mathematical Theory of Plasticity," Oxford: Oxford University Press, pp. 248~252.
- (12) Majumdar, S., Kasza, K., Franklin, J. and Muscara, J., 2000, "Pressure and Leak-Rate Tests and Models for Predicting Failure of Flawed Steam Generator Tubes," NUREG/CR-6664.
- (13) Majumdar, S., 1999, "Prediction of Structural Integrity of Steam Generator Tubes Under Severe Accident Conditions," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 194, pp. 31~55.
- (14) Miller, A. G., 1988, "Review of Limit Loads of Structures Containing Defects," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 32, pp. 197~327.
- (15) Sweeney, K. M., Begley, J. A., Woodman, B. W., Johnson, R. E., Siska, D. P. and Thakkar, J., 1997, "Palo Verde Nuclear Generating Station Unit 2 Operational Assessment : Batwing Support Include Wear Degradation of Steam Generator Tubing During Cycle 7," 97-SGPG-001 Report.
- (16) ABAQUS Ver. 6.4, 2004, "User's Manual," ABAQUS, Inc.