

샷피닝 증기 발생기 전열관의 파괴역학적 해석

신규인[†] · 박재학^{*} · 정명조^{**} · 최영환^{**}

Fracture Mechanics Analysis of the Steam Generator Tube after Shot Peening

Kyu In Shin, Jai Hak Park, Myung Jo Jung and Young Hwan Choi

Key Words: steam generator(증기발생기), shot-peening(샷피닝), residual stress(잔류 응력), stress intensity factor(응력강도계수), semi-elliptical surface crack (반타원형 표면균열)

Abstract

One of the main degradation of steam generator tubes is stress corrosion cracking induced by residual stress. The resulting damages can cause tube bursting or leakage of the primary water which contained radioactivity. Primary water stress corrosion crack occurs at the location of tube/tubesheet hard rolled transition zone. In order to investigate the effect of shot peening on stress corrosion cracking, stress intensity factors are calculated for the crack which is located in the induced residual stress field.

1. 서 론

국내 원자력 발전소의 증기발생기는 Westinghouse 모델 F 형(고리 2, 3, 4호기, 영광 1, 2호기)와 160 형(고리 1호기), CANDU 형(월성 1, 2, 3, 4호기), Framatome 모델 51B형(울진 1, 2호기), CE 형 표준경수로(영광 3, 4, 5호기, 울진 3, 4호기) 등 서로 다른 다양한 모델이 운영되고 있으며, 발전소 1기당 2-3기가 설치되어 있다.

일반적으로 증기발생기는 원자로(nuclear reactor)와 가압기(pressurizer)에서 가열·가압된 1차 계통의 고온·고압수가 터빈을 돌리는 2차 계통수와 열교환을 일으켜 고온·고압의 증기를 발생시키는 것으로 원자력 발전소의 구성 요소 중 중요

한 부분에 속한다. 증기발생기는 방사능에 오염된 1차측과 터빈을 돌리는 2차측으로 나뉘어지며, 전열관의 손상 등으로 인한 누수현상이 일어날 경우 방사능 유출이라는 심각한 문제가 야기된다. 따라서 증기발생기의 전열관 손상이나 파손 문제는 원자력 발전소의 운영에 중요한 문제가 되고 있다.

증기발생기 전열관은 장시간 사용됨에 따라서 여러 열화(degradation)에 의한 손상을 겪게된다. Fig. 1은 전열관 내부 또는 외부에서의 응력부식균열(SCC, stress corrosion cracking), 마멸(wear), 슬러지(sludge), 덴팅(denting), 피로(fatigue) 등의 전열관에서 주로 발생하는 열화 기구들을 보여주는 그림이다.

일반적으로 응력부식균열은 증기발생기의 수명에 큰 영향을 미치는 열화 기구 중의 하나로 1차측(튜브의 안쪽면)의 응력부식균열과 2차측(튜브의 바깥면)의 응력부식균열이 가장 큰 비중(약 60%)을 차지하고 있다⁽¹⁻⁴⁾.

[†] 신규인, 한국원자력안전기술원

E-mail : kyuinshin@hanmail.net

TEL : (042)868-0458 FAX : (042)868-0457

^{*} 충북대학교 안전공학과

^{**} 한국원자력안전기술원

국내에서 사용중인 가압경수로형 원전에서 증기발생기 부위 중 특히 확관천이부에서 응력부식균열이 발생하는 것으로 보고되고 있다.

응력부식균열은 다음의 세 가지 요인에 의하여 주로 발생된다고 알려져 있다. 첫째는 튜브의 제조과정에서 발생하는 잔류응력이고, 둘째는 U-굽힘(U-bending) 및 확관 과정에서 생겨나는 잔류응력이며, 셋째로는 운전 중에 열, 압력, 진동 등으로 인하여 생겨나는 기계적인 응력이다.

그 중 세 번째의 운전 중에 발생하는 기계적 응력은 수치해석 등의 방법으로 예측하기가 용이하나, 첫 번째와 두 번째의 잔류응력은 그 형성 과정을 알 수 없거나, 알 수 있어도 해석이 곤란한 경우가 대부분이다⁽³⁾. 또한 보고된 잔류응력의 수준은 그 재료의 항복응력 400~500 MPa보다 높은 경우도 많아 심각한 수준인 것으로 알려져 있다^(2,5).

응력부식균열의 초기균열은 전열관의 확관 또는 굽힘 가공 소성변형에 의해 발생한 인장 잔류응력과 가동중의 서비스 응력이 집중된 부위에서 화학물질이 농축되어 나타나며, 발생한 균열은 내면으로부터 외면으로 성장한다.

주요 발생 부위는 제 1열 또는 제 2열 전열관의 U-굽힘부, 확관부, 관판(tube sheet) 상단 또는 틸새의 확관천이부, 관지지대 부위이다. 2차측 응력부식균열은 주로 관판 틸새, 농축 슬러지가 집적되는 부위 및 전열관과 관지지대 사이의 틸새에서 발생한다⁽¹⁻⁵⁾.

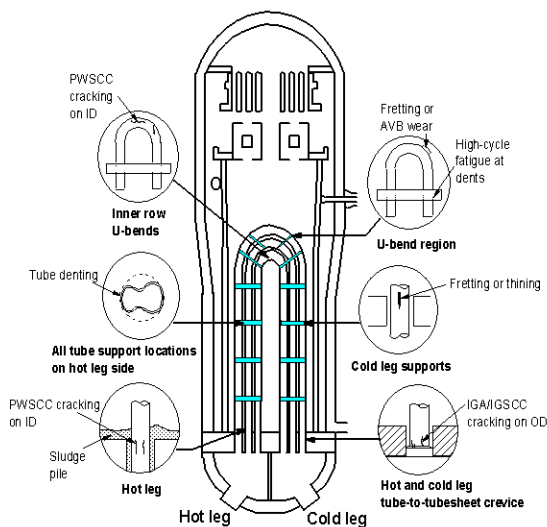


Fig. 1 A schematic diagram of degradation mechanisms in steam generator tubes⁽¹⁾.

응력부식균열의 성장을 방지하는 효과적인 방법으로 샷피닝(shot peening) 작업이 시행되고 있다. 그러나 샷피닝 작업은 균열 발생을 억제시키는 데는 효과적이지만 기존에 존재하는 균열에 대해서는 그 효과가 의문시되고 있다.

김정수⁽⁴⁾ 등에 의하면 손상 전열관의 인출검사 에서 샷피닝 이후에 전열관 내부 표면에서의 균열 성장은 억제되는 반면 두께 깊이 방향으로의 균열 성장은 지속적으로 진행되는 것으로 보고되었다. 또한 샷피닝 후의 잔류응력을 측정 한 연구가 있기는 하지만 필요한 데이터를 주지 못하고 있는 실정이다⁽²⁻⁶⁾.

따라서 본 논문에서는 증기발생기 전열관의 확관천이부에 존재하는 응력부식균열에 대하여 Frederick⁽⁵⁾에 의해 소개되고 있는 모델을 이용하여 샷피닝 전·후의 잔류응력 분포를 추정하고 이를 이용하여 표면균열이 존재하는 경우에 응력강도계수를 구하였다.

2. 샷피닝 해석 모델

본 해석에서는 Frederick⁽⁵⁾에 의해 소개되고 있는 모델을 이용하여 샷피닝 전·후의 잔류응력을 추정하고 이를 이용하여 해석을 수행하였다.

샷피닝 후의 잔류응력을 구하는 방법은 다음과 같다. 우선 샷피닝 전의 잔류응력 분포는 Fig. 2에서의 COE선으로 전열관의 외벽에 σ_b 의 인장 잔류응력이 그리고 전열관의 내벽에 $(-\sigma_b)$ 의 압축 잔류응력이 분포하고 있고 내벽과 외벽 사이에서는 직선적으로 변화한다고 가정하였다.

전열관의 두께가 직경에 비하여 아주 작다고 가정하면, 잔류응력은 압축과 인장이 평형을 이루고 있으므로 잔류응력에 의한 전체 축방향 하중은 0이 된다.

전열관의 내벽에 샷피닝 작업을 행하면 내벽에서는 소성변형에 의하여 압축 잔류응력 $(-\sigma_F)$ 이 발생된다. 여기서 σ_F 는 유동응력(flow stress)으로 항복강도와 인장강도의 평균값으로 정의되는 값이나, 작업에 따라 그 값은 달라질 수 있다.

샷피닝에 의하여 영향을 받는 깊이는 그다지 깊지 않은 것으로 알려져 있다. Frederick⁽⁵⁾은 전열관 두께의 1/10정도에 샷피닝 효과가 있는 것으로 보고 있다. Fig. 2에서 전열관 내벽과 외벽

사이의 거리는 두께에 대한 상대적인 길이로 1이라 하면, x^* 는 전체 두께에 대한 샷피닝에 의하여 영향을 받는 두께의 비로 $x^*=0.1$ 이고 상대 길이 x^* 에서의 잔류응력값은 σ^* 로 가정하였다.

내벽의 압축 잔류응력($-\sigma_F$)로부터 x^* 에서의 잔류응력 σ^* 까지 직선적으로 변화하고, x^* 에서 외벽까지의 잔류응력은 분포형태에는 변화가 없고 전체적으로 $\Delta\sigma$ 만큼 증가하고 있다고 가정하였다.

샷피닝 전에 가정된 잔류응력 분포가 축방향으로 평형을 이루고 있으므로 샷피닝 후의 잔류응력 분포도 평형을 이루어야 한다. 이를 위해서는 Fig. 2에서 사각형 FCDG와 삼각형 DJE의 면적 또는 사각형 FCEH와 삼각형 GJH의 면적이 동일하여야 한다. 이 조건으로부터 $\Delta\sigma$ 와 σ^* 는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta\sigma &= \frac{x^*}{2-x^*}(\sigma_F - \sigma_b) \\ \sigma^* &= (1-2x^*)\sigma_b - \Delta\sigma \end{aligned} \quad (1)$$

다음으로 Fig. 3과 같이 전열관의 외벽에 ($-\sigma_b$)의 압축 잔류응력이 그리고 내벽에 σ_b 의 인장 잔류응력이 분포하고 있는 경우를 고려하면, 내벽에 샷피닝 작업을 하여 내벽의 잔류응력이 ($-\sigma_F$)까지 낮아질 경우, 앞에서와 같이 잔류응력에 의한 하중이 평형을 유지하여야 한다는

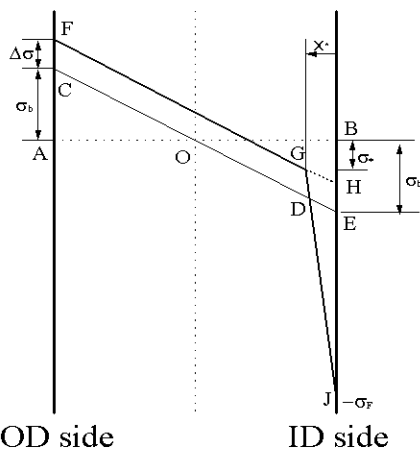


Fig. 2 Residual stress distribution before and after shot-peening(I).

조건으로부터 식 (2)가 얻어진다.

$$\begin{aligned} \Delta\sigma &= \frac{x^*}{2-x^*}(\sigma_F + \sigma_b) \\ \sigma^* &= (1-2x^*)\sigma_b + \Delta\sigma \end{aligned} \quad (2)$$

Fig. 4에서와 같이 증기발생기 내벽에 축방향의 반타원형 표면균열(axial semi-elliptical surface crack)이 존재한다고 가정한 후 샷피닝의 영향을 해석하기 위하여 상용 프로그램인 ANSYS (V. 5.0)를 이용하였다⁽⁷⁾. 모델에 사용된 요소(element)는 20 절점의 3 차원 요소이며, 요소의 크기와 수 및 균열의 크기 및 모양은 변수에 의하여 조절할 수 있도록 하였다.

균열선단을 포함하는 요소에서는 응력의 특이성을 나타내기 위하여 중간 절점을 1/4 지점으로 옮긴 균열선단요소를 사용하여 $1/\sqrt{r}$ 형태의 특이성을 나타낼 수 있도록 하였다.

반타원형 표면균열은 Fig. 5에 도시하였다. 그림에서 보면 $L(=2c=c_1+c_2)$ 은 균열 길이, a 는 균열 깊이이다.

본 해석에서는 압력, 잔류응력 등이 외력으로 작용되는 경우, Fig. 5에서와 같이 θ 에서의 응력 강도계수(stress intensity factor, K_I)를 구하였다.

반타원형 표면균열에서 타원 중심에서부터 판의 두께 방향으로 좌표 x 를 정하면, 균열면에서의 수직 응력이 x 의 3차 다항식으로 식 (3)과 같이 표현된다.

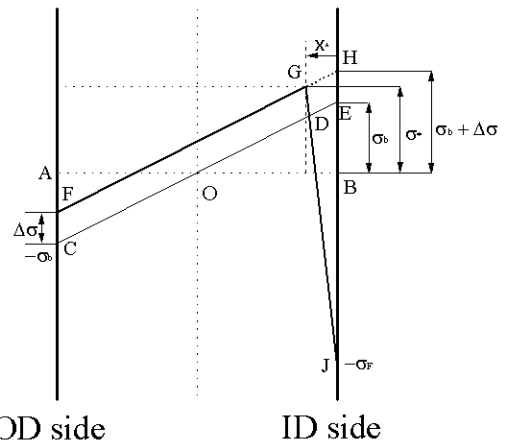


Fig. 3 Residual stress distribution before and after shot-peening(II).

$$\sigma(x) = A_0 + A_1x + A_2x^2 + A_3x^3 \quad (3)$$

응력강도계수 K_I 은 식 (4)로부터 구할 수 있다.

$$K_I = \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} (G_0A_0 + G_1A_1a + G_2A_2a^2 + G_3A_3a^3) \quad (4)$$

여기서 Q 는 $Q = 1 + 1.464(\frac{a}{c})^{1.05}$ 으로 주어지고 G_0, G_1, G_2 그리고 G_3 값은 참고문헌⁽⁸⁾에서 구할 수 있다.

이때 다항식의 계수들을 구하는 데에는 최소오차 자승법이 사용된다. 슛피닝 후의 잔류응력 분포가 3차 다항식으로 정확하게 나타내기 어려운 경우에는 응력강도계수 결과에도 그에 상당하는 오차를 포함하게 된다.

해석에 사용된 튜브의 형상 및 치수는 내경 20.06 mm, 외경 22.60 mm, 관 두께 1.27 mm, 그리고 튜브의 길이는 102.0 mm로 하였다.

증기발생기 전열관의 재료는 Inconel 600이고, 재료의 물성치는 Table 1과 같다. 해석에서는 튜브의 경우 고온에서 운전되기 때문에 탄성계수 (E)는 195 GPa, 푸아송비(ν)는 0.3으로 하였다. Table 1에 나타낸 K_{IC} 는 J_{IC} 로부터 계산된 값이고 K_{IC} 와 J_{IC} 의 관계는 식 (5)와 같다.

$$K_{IC} = \sqrt{\frac{EJ_{IC}}{(1-\nu^2)}} \quad (5)$$

Table 1 Material properties of Inconel 600

Temperature (°C)	E (GPa)	ν	J_{IC} (kJ/m ²)	K_{IC}^* (MPa√m)
20	210	0.3	376	295
300	195	0.3	220	217

3. 해석 결과

우선 슛피닝 전의 잔류응력 상태가 Fig. 3과 같다고 하고, $\sigma_b=400$ MPa라고 할 때, 즉 전열관

외벽은 -400 MPa의 압축 잔류응력이, 내벽은 400 MPa의 인장 잔류응력이 작용되고, 전열관 내벽에 슛피닝 작업을 행한 후 내벽에는 -500 MPa의 잔류응력이 발생되었다면 식 (2)로부터 $\Delta\sigma=47.4$ MPa의 값을 얻는다.

Fig. 6부터 Fig. 10까지는 이러한 잔류응력장을 가지는 전열관의 내벽에 반타원형 표면균열이 존재할 경우 균열선단을 따라서 응력강도계수 분포를 나타낸 것이다.

Fig. 6은 $a=0.3$ mm, $c=0.45$ mm인 경우의 응력강도계수 분포이다. 실선으로 나타낸 슛피닝 전의 응력강도계수 분포와 비교해 볼 때, $\theta=0^\circ$ 에서 즉 표면쪽 균열선단에서 응력강도계수가 아주 감소하고 있음을 알 수 있다. 그러나 $\theta=45^\circ$ 에서는 슛피닝 후의 응력강도계수 감소가 거의 없고, $\theta=90^\circ$ 로 갈수록 다시 응력강도계수 감소량이 증가하고 있다.

응력강도계수 분포로부터 예상되는 슛피닝 후의 균열성장 특성을 보면, 표면을 따라서 균열성장이 아주 느리게 됨을 알 수 있다. 반면 $\theta=45^\circ$ 부근에서 균열성장속도는 슛피닝 전과 비슷하고, 균열깊이의 성장률은 다소 둔화되고 있다. 따라서 반타원형이었던 균열형태는 성장에 따라 표면에서의 균열길이 보다 안쪽에서의 균열길이 가 더 긴 항아리 형태로 변해가게 된다. 이는 실제 슛피닝 후 관찰되고 있는 균열형상과 일치한다⁽⁴⁾.

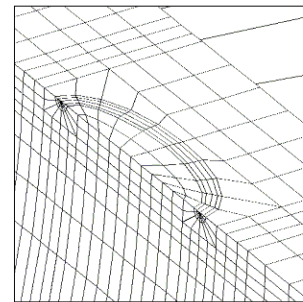


Fig. 4 Detailed mesh of the surface crack in a tube

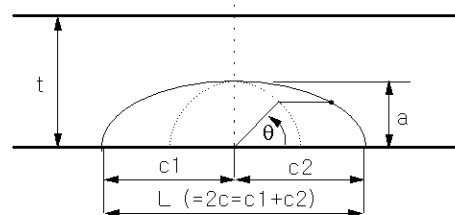


Fig. 5 A schematic diagram of a semi-elliptical surface crack

Fig. 7은 $a=0.4$ mm, $c=0.6$ mm인 경우이다. 그림에서 보면 $\theta=0^\circ$ 에서 응력강도계수가 아주 감소하고 있음을 알 수 있다. 그러나 θ 가 커질수록 샷피닝 효과는 점차 감소하여 $\theta=45^\circ$ 이후는 응력강도계수가 샷피닝 전과 거의 같아지게 된다.

Fig. 8부터 Fig. 10에서도 유사한 경향을 보이며, $\theta=22.5^\circ$ 이후는 응력강도계수 감소효과가 거의 나타나지 않고 오히려 증가하는 경향을 보이기도 한다. 응력강도계수 증가는 Fig. 2와 Fig. 3의 그림에서 상대 깊이 x^* 이후에 $\Delta\sigma$ 만큼의 잔류응력 분포 증가에 기인한다.

이상의 결과로부터 상대 균열깊이 a/t 가 x^* 내에 있을 경우 샷피닝에 의한 응력강도계수 감소가 매우 커지게 되어 균열성장의 감소효과 또한 클 것으로 판단된다.

그러나 x^* 보다 커지게 되면 샷피닝 효과가 점차 감소하여 균열깊이 성장을 감소에 그다지 큰 영향을 주지 않게 된다. 표면에서는 압축 잔류응력으로 인하여 표면에서의 균열길이 L 의 성장을 둔화시켜 균열의 형태가 초기의 반타원형에서 항아리 모양으로 변해가게 된다. 따라서 샷피닝 후의 균열형상비는 샷피닝 작업을 행하지 않았을 때의 형상비와는 달라지게 된다.

잔류응력이 없는 전열관에 샷피닝 작업을 행한 경우, 즉 Fig. 2 또는 Fig. 3에서, $\sigma_b=0$ MPa이라고 하고, 샷피닝 후 내벽에는 -500 MPa의 잔류응력이 발생되었다고 하면, 식 (5)로부터 $\Delta\sigma=26.3$ MPa의 값을 얻는다.

샷피닝 후의 잔류응력장에 반타원형 표면균열이 존재하는 경우 균열선단을 따라서 응력강도계수의 변화를 Fig. 11에 도시하였다.

샷피닝 전의 응력강도계수가 0이었으므로 그림에 표시된 값이 음이면 샷피닝 후 응력강도계수가 그만큼 감소한 것이며, 양이면 오히려 증가한 것이다.

Fig. 11에서 볼 때 $a=0.1$ mm인 균열은 음의 잔류응력장 내에 존재하는 경우이므로 응력강도계수는 균열선단 전체에 걸쳐서 큰 음의 값을 가진다. 그러나 균열깊이가 증가하여 양의 잔류응력장 내에 들어가게 되면 응력강도계수 값이 점차 증가하여 양의 응력강도계수를 가지는 경우도 생겨나게 된다.

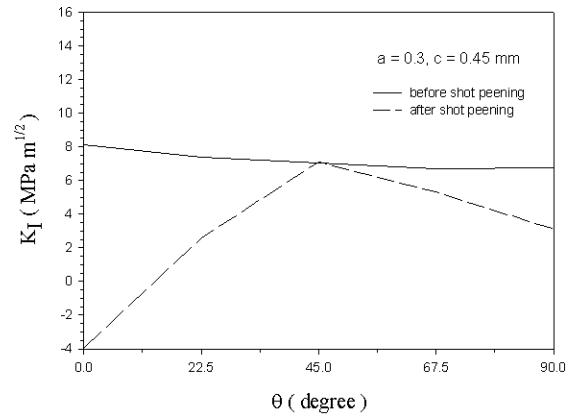


Fig. 6 Stress intensity factor distribution along crack front before and after shot-peening($a=0.3$ mm and $c=0.45$ mm)

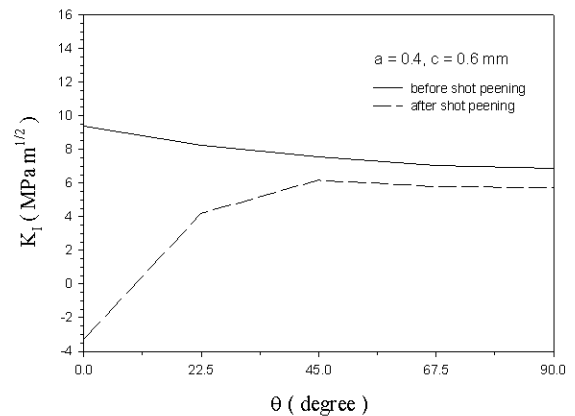


Fig. 7 Stress intensity factor distribution along crack front before and after shot-peening($a=0.4$ mm and $c=0.6$ mm)

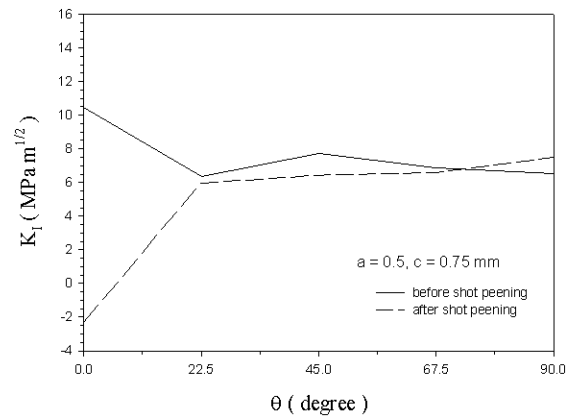


Fig. 8 Stress intensity factor distribution along crack front before and after shot-peening($a=0.5$ mm and $c=0.75$ mm)

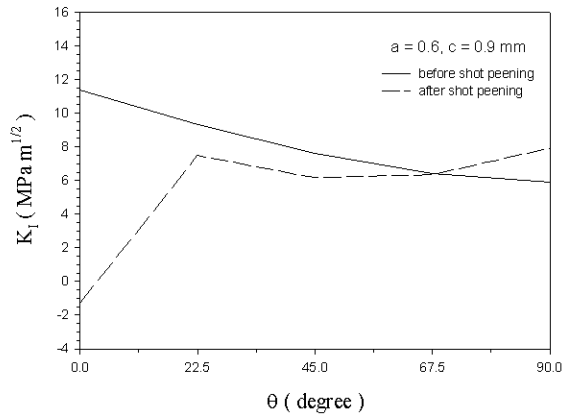


Fig. 9 Stress intensity factor distribution along crack front before and after shot-peening($a=0.6$ mm and $c=0.9$ mm)

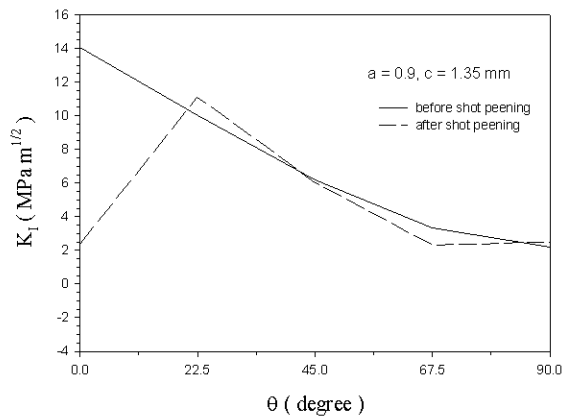


Fig. 10 Stress intensity factor distribution along crack front before and after shot-peening($a=0.9$ mm and $c=1.35$ mm)

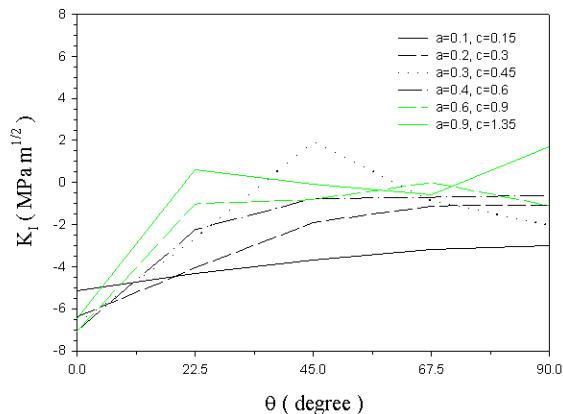


Fig. 11 Stress intensity factor distribution along crack front after shot-peening. No residual stress before shot-peening

4. 결 론

내부 표면균열이 존재하는 전열관에 대하여 유한요소 모델을 형성하고 간단한 모델을 통하여 슷피닝 작업 전·후의 잔류응력 분포를 추정하였고 이를 이용하여 표면균열이 존재하는 경우에 응력강도계수를 구하였다.

(1) 균열이 슷피닝 작업으로 형성된 압축 잔류응력 영역 영향을 받는 영역 내에 존재하는 경우는 균열성장 억제효과가 컸지만 균열이 압축 잔류응력 영역을 벗어남에 따라 슷피닝 효과는 감소하였다.

(2) 균열깊이가 더욱 깊어질 경우 균열깊이 성장률은 슷피닝 전보다 더 빨라지는 경우도 있었으며 표면에서의 균열깊이 성장률은 슷피닝 작업으로 감소되었다.

참고문헌

- (1) P. E. MacDonald, V. N. Shah, L. W. Ward and P. G. Ellison, 1996, "Steam Generator Tube Failures," *NUREG CR-6365 report*.
- (2) 정한섭, 김기태, 김홍덕, 2000, "증기발생기 전열관 건전성 평가기준 개발," 전력연구원 보고서 (TR.96NJ14).
- (3) Kyu In Shin, Jai Hak Park, Hong-Deok Kim and Han-Sub Chung, 2002, "Simulation of Stress Corrosion Crack Growth in Steam Generator Tubes," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 214, pp. 91-101.
- (4) 김정수, 1999, "울진 1호기 증기발생기 전열관 인출검사," 한국원자력연구소 보고서.
- (5) G. Frederick, P. Hermalsteen, J. Stubbe and A. R. McIlree, 1987, "Qualification of Remedial Methods to Prevent Primary-Side Stress Corrosion Cracking of Steam Generator Tubing Volume 1: Shot Peening," *EPRI NP-5249 report*.
- (6) J. M. Hassig, 1986, "Steam Generator Tube Shot Peening," *Nuclear Power Plant Maintenance*, Vol. 2, pp. 12-53-12-66.
- (7) *ANSYS User's Manual Volume III, Version 5.0*, 1994, Swanson Analysis Systems Inc.
- (8) T. L. Anderson, 1995, *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*, CRC press.