

# 증기발생기 전열관에서의 응력부식균열 성장해석

신규인 · 박재학<sup>†</sup> · 김홍덕\* · 정한섭\*

충북대학교 안전공학과 · \*한국전력공사 전력연구원  
(2000. 5. 4. 접수 / 2000. 9. 1. 채택)

## Simulation of Stress Corrosion Crack Growth in Steam Generator Tubes

Kyu-In Shin · Jai-Hak Park<sup>†</sup> · Hong-Deok Kim · Han-Sub Chung

Department of safety Engineering, Chungbuk National University · \*Korea Electric Power Research Institute  
(Received May 4, 2000 / Accepted September 1, 2000)

**Abstract :** The stress corrosion crack growth is simulated assuming a small axial surface crack inside a S/G tube. Internal pressure and residual stresses are considered as applied forces. Stress intensity factors along crack front, variation of crack shape and crack growth rate are obtained and discussed. It is noted that the aspect ratio of the crack is not depend on the initial crack shape but depend on the residual stress distribution.

**Key Words :** steam generator, stress corrosion cracking, residual stress

### 1. 서 론

가압 경수로의 증기발생기는 원자로(reactor vessel)와 가압기(pressurizer)에서 가열·가압된 1차 계통의 고온, 고압수가 터빈을 돌리는 2차 계통수와 열교환을 일으켜 고온·고압의 증기를 발생시키는 것으로, 전열관의 파손이 발생할 경우 1차 계통에서 2차 계통으로 방사능 물질이 누출되어 심각한 문제가 야기된다. 따라서 증기발생기의 전열관 손상이나 파손 문제는 원자력 발전소의 수명과 밀접한 관계가 있다. 전열관의 주 손상원인으로는 1차측(tube 안쪽면)의 응력부식균열(PWSCC, primary water stress corrosion cracking)과 2차측(tube 바깥면)의 응력부식균열이 가장 큰 비중(약 60%)을 차지하고 있다.

응력부식균열의 원인이 되는 응력을 살펴보면, 첫째는 tube의 제조과정에서 발생하는 잔류응력이고, 둘째는 U-bending 및 확관 과정에서 생겨나는 잔류응력이며, 셋째는 운전 중에 열,

압력, 진동 등으로 인하여 생겨나는 기계적인 응력이다. 그 중 세 번째의 운전중에 발생하는 기계적 응력은 수치해석 등의 방법으로 예측하기가 용이하나, 첫 번째와 두 번째의 원인인 잔류응력은 그 과정을 알 수 없거나, 알 수 있어도 해석이 불가능한 경우가 대부분이다. 또한 보고된 잔류응력의 수준은 그 재료의 항복응력 400~500MPa보다 높은 경우도 많아 심각한 수준인 것으로 알려져 있다. 따라서 전열관의 잔류응력을 정확하게 측정하고 예측하며, 또한 이들의 영향을 살펴보는 것은 제작기술의 향상과 제품의 안전성 평가 및 설계에서 매우 중요하다.

이에 본 연구에서는 증기발생기의 결합 전열관 균열특성 및 균열형태에 관한 연구와 균열해석을 통한 파손 건전성 평가 연구를 위하여 인장의 잔류응력이 크게 작용되는 곳에 균열을 가정하고, 작용압력과 잔류응력의 영향이 고려된 해석을 행하여 균열에서의 응력강도계수(stress intensity factor) 등을 구하였다. 또한 응력강도계수와 균열성장식으로부터 균열의 성장거동 및 성장하는 균열의 형태에 대하여 살펴보았다.

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
jhpark@cbucc.chungbuk.ac.kr

## 2. 응력부식 균열 성장 해석

### 2.1. 유한요소 모델 생성 프로그램

응력부식 상태하에서 축방향 균열(axial crack)이 존재하는 증기 발생기 전열관의 해석을 위해 ANSYS 프로그램을 이용하였다.

해석에 사용된 조건들을 살펴보면, 파이프의 형상 및 치수는 내경(ID) 20.06mm, 외경(OD) 22.60mm, 관 두께(t) 1.27mm, 그리고 파이프의 길이(L)는 102.0mm으로 하였다. 관판이 있는 경우의 해석시 파이프의 좌측 50mm는 관판에 삽입되어 있다고 가정하였고, 관판은 내경 22.60mm, 외경 42.60mm의 파이프로 모델링 하였다. 파이프와 관판 사이는 완전히 접합되어 있다고 가정하였으며 Fig. 1에 모델을 간단히 그림으로 나타내었다.

해석시 파이프 내부에 존재하는 축방향 반타원형 표면균열을 대상으로, 관판(sheet plate)도 포함시킬 수 있도록 모델링을 할 수 있는 프로그램을 개발하였다.

모델에 사용된 요소(element)는 8 절점(node)의 3차원 요소와 20 절점의 3차원 요소로, 요소의 크기와 수 및 균열의 크기 및 모양은 변수에 의하여 조절할 수 있도록 하였다.

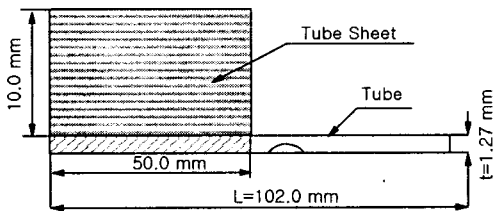
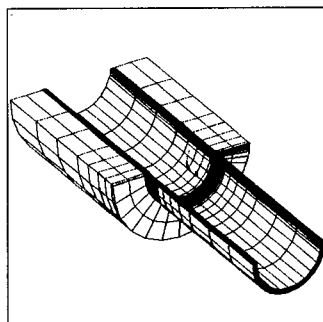
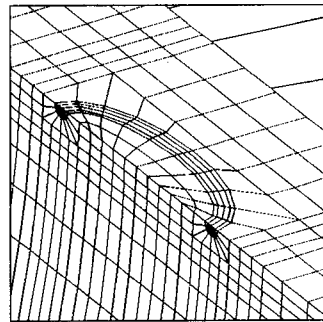


Fig. 1. Schematic diagram of the model



(a) Element model 01



(b) Element model 02

Fig. 2. FEM configurations of a pipe with an inner surface crack

균열선단을 포함하는 요소에서는 요소내 절점들을 중첩시킨 균열선단요소를 사용하여 응력의 특이성을 나타낼 수 있도록 하였다. 해석에 사용된 유한요소(FEM) 모델의 예를 Fig. 2에 나타내었다.

### 2.2. 해석 모델

증기 발생기 전열관의 재료는 Inconel 600이다. 파이프의 경우 고온에서 운전되기 때문에 해석에서는 탄성계수(E)는 195 GPa, 포아송비( $\nu$ )는 0.3으로 하였고, 관판의 탄성계수는 파이프와 동일한 값으로 가정하였다.

## 3. 응력부식 균열성장 해석

### 3.1. 균열성장 해석 방법

축방향 균열이 존재하는 전열관의 응력부식 상태에서의 균열의 성장 거동을 살펴보기 위하여, 파이프의 내벽에 작은 균열이 존재한다고 가정하고 균열선단을 따라서 응력강도계수를 구하였다. 이때 응력강도계수  $K_I$ 은 균열면에서의 변위를 이용하여 계산하였다. 얻어진 응력강도계수를 응력부식 균열 성장식에 대입하여 균열의 성장속도와 성장 중의 균열의 형태를 살펴보았다.

해석에서 고려한 하중으로는, 우선 파이프의 작용압력은 정상가동 압력으로 내압 9.73MPa이 파이프와 균열면 상에 작용한다고 가정하였으며 이와 함께 전열관에 발생된 잔류응력을 고려하였다.

잔류응력이 존재하는 곳에 균열이 발생된 경우 잔류응력이 균열의 응력강도계수에 미치는 영향을 해석하기 위하여, 중첩의 원리(superposition

principle)를 이용하여 잔류응력값의 (-)를 균열면에 가하였다.

본 연구에서는 전열관에서의 잔류응력을 직접 측정하지 않고 Fig. 3과 Fig. 4에서와 같이 참고 문헌 1에 제시된 측정 결과를 이용하였다.

잔류응력의 측정값은 관의 내벽과 외벽에 대하여 주어져 있어, 본 연구에서는 내벽과 외벽 사이에서 잔류응력이 직선적으로 변화한다고 가정하였다. 또한 초기균열의 중심은 잔류응력이 최대인 지점에 위치한다고 가정하였다.

응력부식균열(PWSCC)에서의 균열의 성장을 나타내는 식으로 다음 식을 사용하였다[2].

$$\frac{da}{dt} = 2.8 \times 10^{-12} (K_I - 9)^{1.16} \quad (1)$$

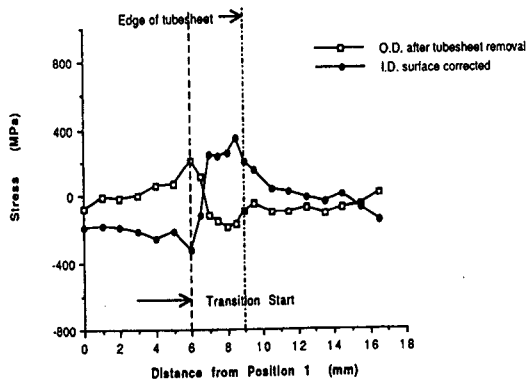


Fig. 3. A comparison of O.D. and I.D. residual hoop stress for underexpanded (E9-18) tube. The data is the average of four azimuths [1]

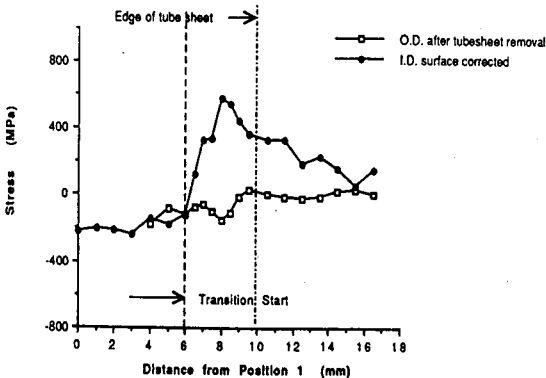


Fig. 4. A comparison of O.D. and I.D. residual hoop stress for underexpanded (E9-19) tube. The data is the average of four azimuths [1]

여기서  $da/dt$ 의 단위는 m/sec이고  $K_I$ 의 단위는  $MPa\sqrt{m}$ 이다.

이 식에 의하여 계산된 균열성장은 보수적인 결과를 주게된다. 즉 식(1)은 동일한  $K_I$ 에 대하여 성장속도가 빠른 데이터들로부터 얻어진 식이다. 반면 식(1)은 냉간 가공되지 않은 재료에 관한 식이므로 냉간 가공이 될 경우 성장 속도가 달라질 수 있다.

### 3.2. 해석에 1-응력강도계수 분포

표면균열이 존재하는 증기 발생기 전열관에서의 응력강도계수의 분포를 알아보기 위하여 두 조건으로 나누어 응력강도계수를 구하였다. 첫 번째 조건은 파이프에 잔류응력이 없는 내압만이 작용되는 경우(CS 조건)이다. 두 번째는 관판이 있는 파이프에 대하여 내압과 잔류응력이 존재한 경우(TS 조건)이다.

균열의 형상은 깊이가  $a$ 이고 표면에서의 길이가  $2c$ 인 반타원형으로 가정하였고 성장 중에도 반타원형 형상을 유지한다고 가정하였다.

Fig. 5부터 Fig. 7은 파이프에서 내압(inner pressure)만이 작용되는 경우(CS 조건)에 대하여 응력강도계수를 구한 결과이다.

Fig. 5는  $a=0.254mm$ ( $a/t=0.2$ )인 경우에 얻어진 응력강도계수의 분포를 나타낸 그림으로 여기서  $t$ 는 전열관의 두께이다. 그림에서 보면  $a/c=1.0$ 인 경우 표면쪽( $\theta=0^\circ$  및  $\theta=180^\circ$ )과 내부 균열선단( $\theta=9^\circ$ )에서의  $K_I$ 의 분포는 거의 일정하고,  $a/c$ 의 비가 작아질 경우  $\theta=90^\circ$ 에서의  $K_I$  값은 증가

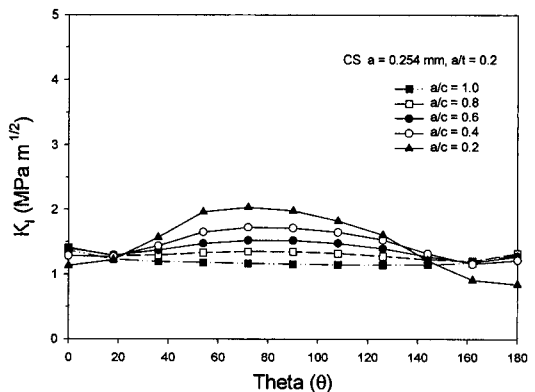


Fig. 5.  $K_I$  distribution along crack front line for the case with tube sheet and  $a=0.254$  mm. The applied load is only the inner pressure, 9.73 MPa

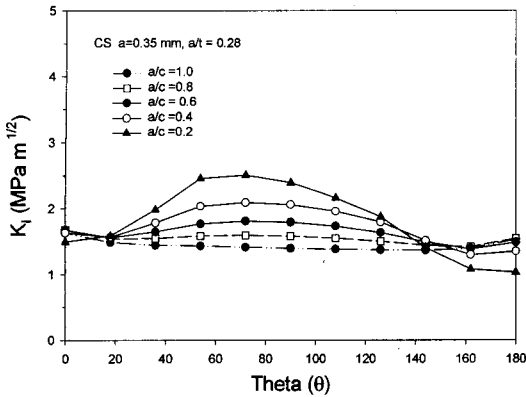


Fig. 6.  $K_I$  distribution along crack front line for the case with tube sheet and  $a=0.35$  mm. The applied load is only the inner pressure, 9.73 MPa

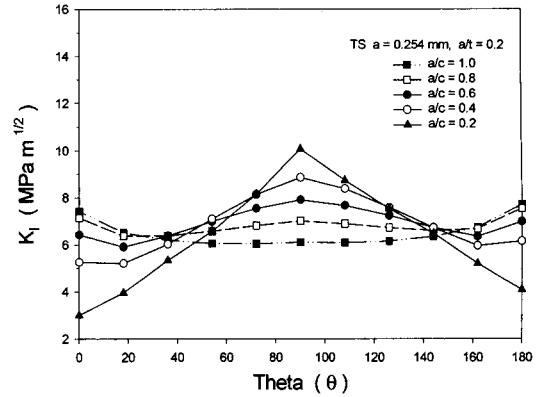


Fig. 8.  $K_I$  distribution along crack front line for the case with tube sheet and  $a=0.254$  mm. The applied loads are inner pressure (9.73 MPa) and the residual stress of Fig. 3[1]

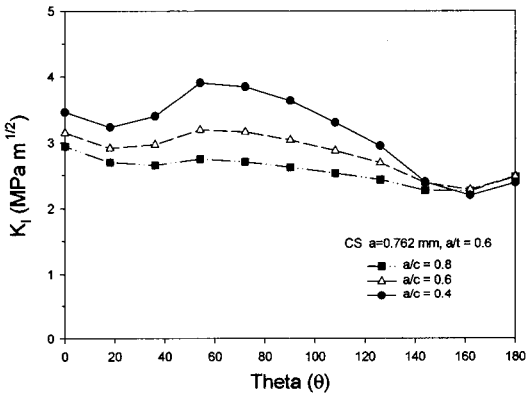


Fig. 7.  $K_I$  distribution along crack front line for the case with tube sheet and  $a=0.762$  mm. The applied load is only the inner pressure, 9.73 MPa

증가하고,  $\theta=0^\circ$ 와  $180^\circ$ 에서의  $K_I$  값은 그다지 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있다.

Fig. 6는  $a=0.35$ mm인 경우 그리고 Fig. 7은  $a=0.762$ mm인 경우로, 그 경향은 Fig. 5와 유사하다.

Fig. 8부터 Fig. 10은 관관이 있는 파이프에서 내압과 균열면에 작용되는 내압 및 잔류응력을 고려한 TS 조건으로 Fig. 2에 주어진 잔류응력에 대하여 해석하였다.

Fig. 8은  $a=0.254$ mm( $a/t=0.2$ )인 경우 얻어진 응력강도계수의 분포를 보인 것이다.

그림에서 볼 때  $a/c=1.0$ 에서는 반타원형 균열에서 표면 쪽( $\theta=0^\circ$  및  $\theta=180^\circ$ )에서의  $K_I$ 가 가장 깊은 내부 쪽 균열선단 ( $\theta=90^\circ$ )에서의  $K_I$ 보다 크다. 그러나  $a/c$ 의 비가 작아질수록, 즉  $c$ 가

커질수록 표면 쪽의  $K_I$ 는 점차 작아지는 반면 내부 쪽의  $K_I$ 는 점차 커져  $a/c=0.2$ 인 경우는 내부의  $K_I$ 가 표면 쪽보다 아주 커짐을 알 수 있다. 이러한 경향은 압력만이 하중으로 작용되는 경우인 Fig. 5부터 Fig. 7의 분포와는 상이하다. 이러한 현상을 보이는 이유는 잔류응력의 분포가 균열면 상에서 일정하지 않기 때문이다.

Fig. 8에서 볼 때 만약  $a/c=1.0$ 인 균열이 존재하고 있다면 표면 쪽에서의  $K_I$ 값이 내부보다 크므로  $c$ 의 증가가  $a$ 보다 크게 되어 균열이 성장함에 따라  $a/c$ 값은 점차 1.0보다 작게 될 것이다. 반면  $a/c=0.2$ 인 균열이 존재하고 있다면  $a$ 의 증가가  $c$ 의 증가보다 훨씬 크게 되어  $a/c$ 의 비는 증가할 것이다. 이렇게 볼 때 균열의 형상은 특정한  $a/c$ 의 비를 유지하면서 성장하려는 경향이 있음을 알 수 있다.

즉  $\Delta a$  및  $\Delta c$ 를 각각  $a$ 와  $c$ 의 증분이라고 한다면 특정한 형상을 유지하게 위해서는  $\Delta a/\Delta c = a/c$ 의 관계를 가져야 할 것이다. 따라서 이러한 관계를 가지는 균열의 형상을 초기형상으로 가정할 수 있다.

그러나 이와 같은 설명은 균열이 한 개 존재할 때에 적합하다. 반면 부식균열은 표면에 많은 미소균열을 형성시키고, 이들이 성장 중에 서로 만나 균열길이가 긴 균열을 형성할 수도 있다. 이런 경우  $a/c$ 가 작은 균열이 생성된 경우이므로  $a$ 의 증가가 크게 되어  $a/c$ 의 비를 증가시키게 된다. 따라서 균열성장에 따라 특정한 균열형상비

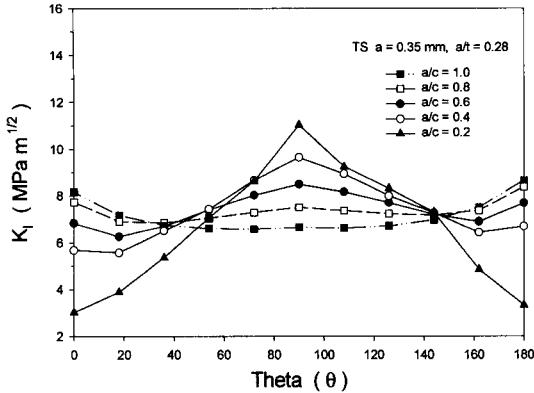


Fig. 9.  $K_I$  distribution along crack front line for the case with tube sheet and  $a=0.35$  mm. The applied loads are inner pressure(9.73 MPa) and the residual stress of Fig. 3[1]

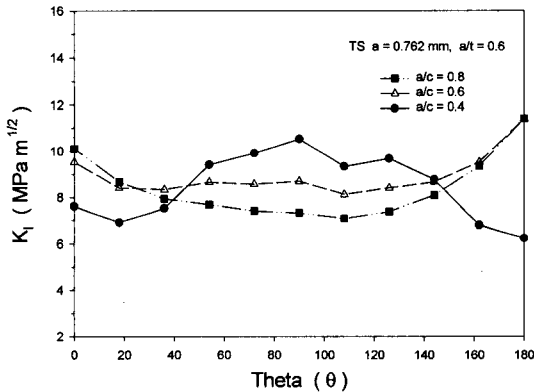


Fig. 10.  $K_I$  distribution along crack front line for the case with tube sheet and  $a=0.762$  mm. The applied loads are inner pressure(9.73 MPa) and the residual stress of Fig. 3[1]

로 접근하게 된다. 다음의 해석에 2에서 보이지만 약 50 % 관통 이후의 균열형상비는 초기 균열형상과는 무관한 성질을 나타낸다.

Fig. 9는  $a=0.35$ mm인 경우 그리고 Fig. 10은  $a=0.762$ mm인 경우로, 그 경향은 Fig. 8과 유사하다.

### 3.3. 해석에 2 - 균열성장 해석

관판이 있는 경우(TS 조건)와 관판이 없는 경우(RS 조건)에 대하여 Fig. 4에서와 같이 분포하는 잔류응력에 대한 균열성장 해석을 하였다.

작용 응력으로 앞 절에서와 동일하게 파이프의 내압, 균열면에 작용되는 내압 및 잔류응력을 고려하였다.

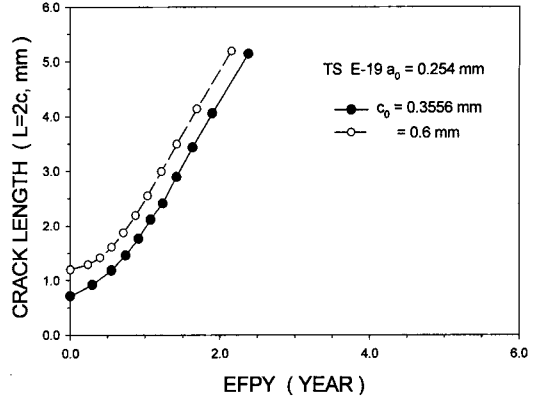


Fig. 11. Stress corrosion crack growth as a function of time under the inner pressure, 9.73 MPa and the residual stress of Fig. 4[1]. A tube sheet is included in the model.

해석시 두 조건 모두 초기균열 길이  $a_0$ 는 0.254mm로, 초기균열 길이  $c_0$ 는 0.3556, 0.6mm로 하여 초기 균열 형상의 영향을 살펴보았다.

가정된 두 가지 초기 균열형상 중  $c_0=0.3556$  mm인 경우는  $\theta=0^\circ$  및  $\theta=180^\circ$ 에서의  $K_I$ 과  $\theta=90^\circ$ 에서의  $K_I$ 이 거의 같아지는 경우로 균열성장 초기에 거의 일정한 균열형상비( $=a/L$ )를 유지하면서 성장하게 된다.

또한  $c_0=0.6$ mm인 경우는 초기에 형성된 두 작은 균열들이 성장 중에 합쳐져서 큰 균열길이를 가지는 표면균열이 되는 경우에 대하여 균열의 성장거동을 살펴보기 위한 것이다.

Fig. 11과 Fig. 12는 관판이 있는 경우(TS 조건)에 대하여 초기 균열깊이를  $a_0=0.254$ mm, 초기 균열깊이를  $c_0=0.3556$ , 0.6 mm로 가정한 경우에 시간에 따른 균열의 길이  $L(=2c)$ 과 균열의 깊이  $a$ 의 변화를 보여주고 있다.

Fig. 11에서 볼 때,  $c_0=0.6$ mm인 경우는  $c_0=0.3556$ mm인 경우에 비하여 초기의 균열길이성장률이 작지만, 시간이 흐름에 따라 거의 유사한 균열성장률을 보이며 성장해 가고 있음을 알 수 있다.

Fig 11은 균열깊이  $a$ 가 관두계를 관통할 때까지 해석을 행한 결과로, 관통할 때 균열길이가  $c_0=0.3556$ 인 경우  $L=5.1$ mm,  $c_0=0.6$ 인 경우는  $L=5.2$ mm로 초기균열형상비는 아주 달랐지만 관통시의 균열길이는 그다지 차이가 없게 나타남을 알 수 있었다. 얻어진 관통시의 균열길이는

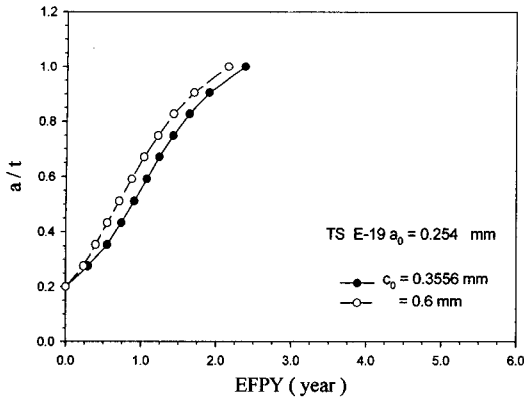


Fig. 12. Variation of  $a/t$  as a function of time under the inner pressure, 9.73 MPa and the residual stress of Fig. 4[1]. A tube sheet is included in the model

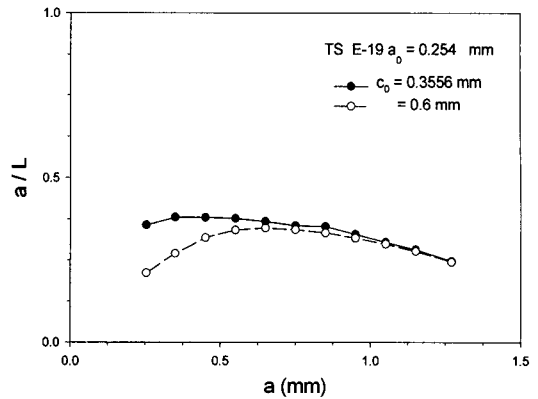


Fig. 13. Variation of  $a/L$  as a function of crack length under the inner pressure, 9.73 MPa and the residual stress of Fig. 4[1]. A tube sheet is included in the model

참고문헌 3에서 균열길이가 4~5mm가 되면 대부분 관통균열이 된다는 사실과 일치하고 있다.

Fig. 12는 관관이 있는 경우(TS 조건)에 대하여 시간에 따른 균열길이  $a$ 의 변화를 보여주고 있다.  $c_0=0.6$  mm인 경우 균열길이  $a$ 의 초기 성장률이  $c_0=0.3556$  mm인 경우에 비하여 큰 값을 가지나, 시간이 지남에 따라 거의 같은 성장률을 보이고 있다. 두 경우 모두  $a$ 의 성장률이 점차 증가하다가 다시 감소하고 있음을 알 수 있다. 초기 균열에서 관통할 때까지의 시간이  $c_0=0.3556$  mm인 경우는 2.4년,  $c_0=0.6$  mm인 경우는 2.2년이다.

식(1)의 균열성장식이 보수적인 경우 즉 균열 성장이 아주 빠른 데이터들을 나타낸 식이므로 얻어진 관통시간은 평균적인 결과가 아닌 빠른 균열성장을 보이는 경우의 결과로 보아야 한다.

Fig. 13은 관관이 있는 경우(TS 조건)에 대하여 균열 길이에 따른 균열형상비  $a/L$ 의 변화를 나타낸 것이다. 두 곡선을 비교해 볼 때 가정된  $c_0$ 의 길이가 다르므로 초기에는 서로 다른 균열형상비를 보이나  $a$ 가 증가함에 따라 균열형상비가 서로 동일한 값으로 됨을 알 수 있다. 따라서 비록 초기 균열길이가 다르다고 하더라도 균열이 성장함에 따라 초기 균열길이와는 무관하게 동일한 균열형상비  $a/L$ 의 변화 특성을 보이게 된다. 그러나 앞으로 살펴볼겠지만 균열형상비의 변화특성은 잔류응력 분포특성에 따라서는 변화하게 된다. 그러므로 관통시의 균열형상비는 초기 균열길이에는 무관하나 잔류응력분포 특성에

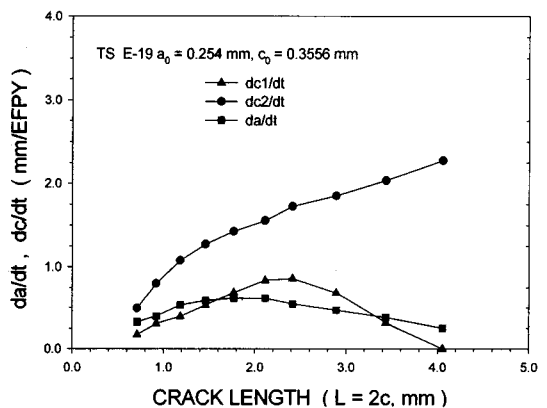


Fig. 14. Variation of crack growth rate under the inner pressure, 9.73 MPa and the residual stress of Fig. 4[1]. A tube sheet is included in the model

따라서는 달라지는 값을 보이게 된다.

Fig. 14와 Fig. 15는 관관이 있는 경우(TS 조건)에 대하여  $c_0=0.3556$ 과 0.6 mm에서의 균열길이에 따른 균열길이 성장률을 각각 나타내고 있다. 여기서  $c_1$ 은 표면 균열의 표면에서 측정된 길이 중 타원 중심에서 왼쪽 균열선단까지의 길이,  $c_2$ 는 타원 중심에서 오른쪽 균열선단까지의 길이이다. Fig. 15에서 볼 때 균열길이가 증가함에 따라  $c_1$ 의 성장률은 점차 커지다가 최대값을 보인 후 점차 감소하여 0에 접근하고 있다. 반면  $c_2$ 의 성장률은 계속적으로 증가하고 있다.

Fig. 4의 잔류응력분포에서 볼 때  $a$ 의 성장에 따라 잔류응력이 작은 영역으로 균열이 진행하게 된다. 하지만 균열길이의 성장은 또한  $K_I$ 을

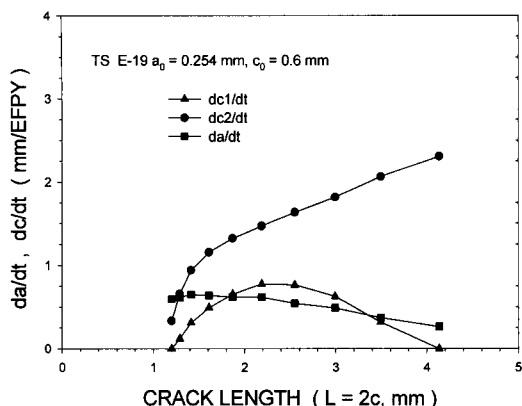


Fig. 15. Variation of crack growth rate under the inner pressure, 9.73 MPa and the residual stress of Fig. 4[1]. A tube sheet is included in the model

증가시키는 효과가 있으므로 처음에는 성장률이 증가하다 다시  $L=2\text{mm}$  정도에서부터 감소하는 경향을 보여주고 있다.

Fig. 14에서 균열길이 4mm일 때의 균열길이 성장률  $dL/dt (=dc_1/dt + dc_2/dt)$ 는 2.3mm/EPFY이다.

Fig. 15는  $c_0=0.6\text{mm}$ 에서의 균열길이에 따른 균열길이 성장률을 보여주고 있다. 이 경우는 Fig. 14보다  $c_0$ 를 크게 가정한 경우이므로  $\theta = 0^\circ$  및  $\theta = 180^\circ$ 에서의  $K_I$ 은 Fig. 14의 경우보다 감소하고  $\theta = 90^\circ$ 에서의  $K_I$ 은 증가하게 된다. 따라서 성장 초기에  $c_1$ 과  $c_2$ 의 성장률은 Fig. 14의 경우보다 작은 값을,  $a$ 의 성장률은 큰 값을 보인다. 그러나 균열길이가 증가할수록 모든 값들이 점차 Fig. 14와 유사하게 된다.

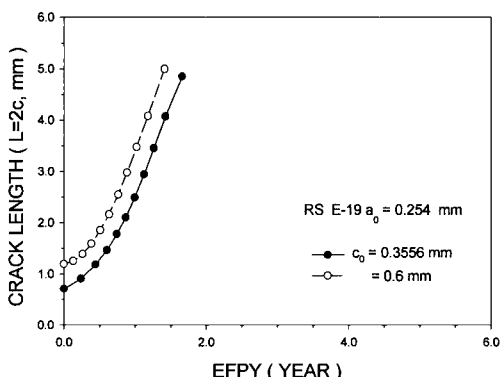


Fig. 16. Stress corrosion crack growth as a function of time under the inner pressure, 9.73 MPa and the residual stress of Fig. 4[1]. A tube sheet is not included in the model

Fig. 16부터 Fig. 20의 그림들은 Fig. 11에서 Fig. 15까지 수행된 해석을 관판이 없는 경우에 대하여 적용하여 관판의 효과를 살펴본 것이다.

Fig. 16와 Fig. 17은 관판이 없는 경우(RS 조건)에 대하여 초기균열 깊이를  $a_0=0.254$  mm, 초기균열 길이를  $c_0=0.3556, 0.6\text{mm}$ 로 한 경우에 시간에 따른 균열길이  $L$ 과 균열깊이  $a$ 의 변화를 보여주고 있다.

Fig. 11과 12의 관판이 존재하는 경우와 비교해 볼 때, 유사한 곡선 형태를 보이나 관통까지의 시간이 짧아 졌고, 관통시의 균열길이도 짧아 졌다.

Fig. 18은 관판이 없는 경우(RS 조건)에 대하여 균열 깊이에 따른 균열형상비의 변화를 나타

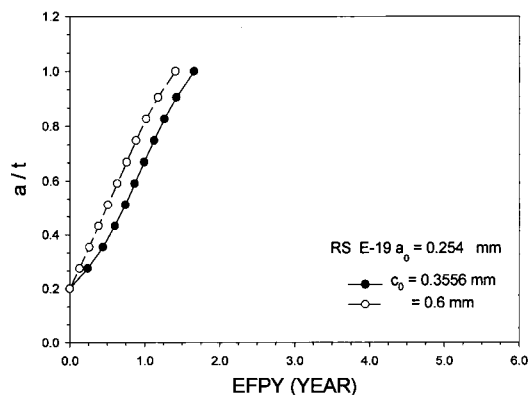


Fig. 17. Variation of  $a/t$  as a function of time under the inner pressure, 9.73 MPa and the residual stress of Fig. 4[1]. A tube sheet is not included in the model

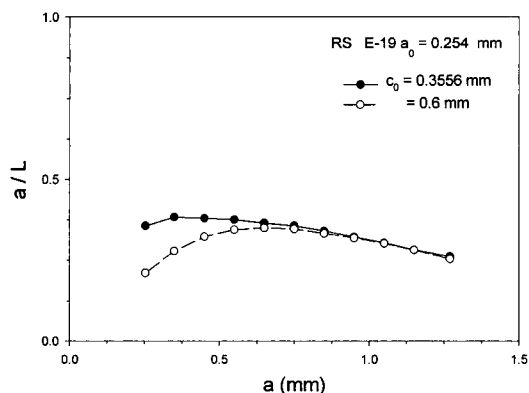


Fig. 18. Ratio of crack growth as a function of crack length under the inner pressure, 9.73 MPa and the residual stress of Fig. 4[1]. A tube sheet is not included in the model

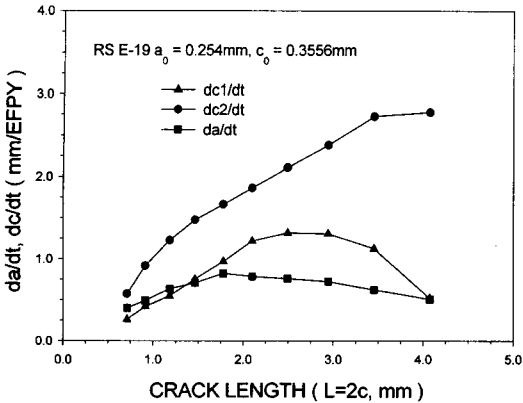


Fig. 19. Variation of crack growth rate under the inner pressure, 9.73 MPa and the residual stress of Fig. 4[1]. A tube sheet is not included in the model

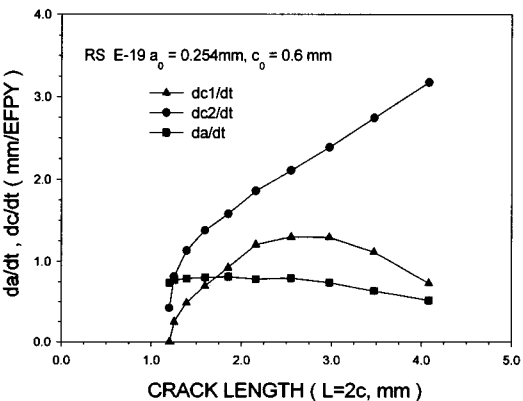


Fig. 20. Variation of crack growth rate under the inner pressure, 9.73 MPa and the residual stress of Fig. 4[1]. A tube sheet is not included in the model

낸 것으로, 관판이 있는 경우 경우와 유사한 경향을 나타내고 있다.

초기  $c_0$  길이를 다르게 가정한 경우,  $a$ 가 증가할수록 균열형상비의 값이 서로 같아지는 현상도 동일하게 나타나고 있다.

Fig. 19와 20은 관판이 없는 경우(RS조건)에 대하여 균열길이에 따른 균열의 성장률을 각각 나타내는 그림이다. 두 그림 모두 Fig. 15와 16의 관판이 있는 경우와 유사한 경향을 보이나 각각의 성장률 값들이 증가하였음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

응력부식 상태하에서 축방향 내부 표면 균열

이 존재하는 판에 대하여 내압과 잔류응력 그리고 관판(sheet plate) 등을 고려할 수 있는 유한요소 모델을 형성하고 해석을 할 수 있는 프로그램을 개발하였다.

이로부터 내압 및 잔류응력의 효과를 고려하는 경우 주어진 균열형상에 대한 응력강도계수를 구하여 형상의 변화가 응력강도계수에 미치는 영향을 살펴보았다.

또한 초기 균열을 가정하고 이 균열이 응력부식에 의하여 성장하는 형태를 살펴본 결과 다음과 같은 사실들을 알 수 있었다.

1. 50% 관통 이후의 균열 형상비는 초기 균열 형상비와는 무관한 특성을 보인다. 그러나 그 값은 잔류응력분포 특성의 영향을 많이 받는다.
2. 관통시의 균열 길이는 3.6~5.2mm 정도 되었고, 그 길이는 잔류응력분포 특성에 많은 영향을 받는다.
3. 성장 중에 두 미소균열이 연결되어 길이가 긴 균열을 형성하는 경우 관통에 요하는 시간이 단축될 수 있다. 그러나 관통시의 균열형상비에는 영향을 주지 않는다.

감사의 글 : 본 연구는 한국전력 전력연구원과 한국과학기술연구원 산하 성균관대학교 산업설비 안전성 평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- 1) EPRI TR-102355, "Residual Stresses in Roller-Expanded Steam Generator Tube Transitions", 1993.
- 2) EPRI TR-104898, "Crack Growth and Micro Structural Characterization of Alloy 600 Head Penetration Materials", 1995.
- 3) 정한섭, 김기태, 김홍덕, 이희종, 남민우, "증기 발생기 전열관 건전성 평가기준 개발", KEPRI 보고서, 1998.
- 4) C. O. Ruud, D. J. Snoha, D. P. Ivkovich and A. R. McIlree, "Residual Stress in Inconel 600 U-Bend Heat Exchanger Tubes", Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 112, pp. 169 ~174, 1990.
- 5) V. N. Shah, D. B. Lowenstein, A. P. L. Turner, S. R. Ward, J. A. Gorman, P. E. MacDonald



- and G. H. Weidenhamer, "Assessment of Primary Water Stress Corrosion Cracking of PWR Steam Generator Tubes", Nuclear Engineering and Design, Vol. 134, pp. 199~215, 1992.
- 6) M. H. Duc, H. Churier-Bosseenec and C. Faigy, "Computation of Stresses in French Steam Generator Tubes", SMIRT 11 Transactions, Vol. F, pp. 361~370, 1991.
- 7) 김정수, "울진 1호기 증기발생기 전열관 인출검사", 한국원자력연구소 보고서, 1999.