

증기발생기 전열관에서의 응력부식 균열성장해석

신규인* · 박재학* · 주진원** · 신응수** · 김홍덕*** · 정한섭***

Simulation of Stress Corrosion Crack Growth in Steam Generator Tubes

K. I. Shin, J. H. Park, J. W. Joo, E. S. Shin, H. D. Kim, H. S. Chung

Key Words : 증기발생기(steam generator), 응력부식균열(stress corrosion crack), 균열성장(crack growth), 응력강도계수(stress intensity factor)

Abstract

Stress corrosion crack growth is simulated after 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 noticed that the aspect ratio of the crack is not depend on the initial crack shape but depend on the residual stress distribution.

1. 서론

가압 경수로의 증기발생기(steam generator)는 원자로(reactor vessel)와 가압기(pressurizer)에서 가열·가압된 1차 계통의 고온, 고압수가 터빈을 돌리는 2차 계통수와 열교환을 일으켜 고온·고압의 증기를 발생시키는 것으로 증기발생기의 전열관의 손상 등으로 인한 누수현상이 일어날 경우 방사능 유출이라는 심각한 문제가 야기된다. 따라서 증기발생기의 전열관 손상이나 파손 문제는 원자력 발전소의 수명과 밀접한 관계가 있다. 전열관의 주 손상원인으로는 1차측(tube의 안쪽면)의 응력부식균열(PWSCC, primary water stress corrosion cracking)과 2차측(tube의 바깥면)의 응력부식균열이 가장 큰 비중(약 60%)을 차지하고 있다.

응력부식균열의 원인이 되는 응력을 살펴보면,

첫째는 튜브의 제조과정에서 발생하는 잔류응력이고, 둘째는 U-벤딩 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 원인으로 생겨나는 잔류응력은 그 과정을 알 수 없거나, 알 수 있어도 해석이 불가능한 경우가 대부분이다.

또한 보고된 잔류응력의 크기는 재료의 항복응력 400~500MPa보다 큰 경우도 많은 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 등을 구하였다.

* 충북대학교 안전공학과
 ** 충북대학교 기계공학부
 *** 한국전력공사 전력연구원

또한 응력강도계수와 균열성장식으로부터 균열의 성장거동 및 성장하는 균열의 형태에 대하여 살펴보았다.

2. 응력부식 균열성장 해석

2.1 유한요소 모델

2.2.1 모델생성프로그램

응력부식 상태에서 축방향 균열(axial crack)이 존재하는 증기 발생기 전열관의 해석을 위해 ANSYS 프로그램을 이용하여 파이프 내부에 존재하는 축방향 타원형 표면균열을 대상으로, 관판(sheet plate)도 모델에 포함시킬 수 있도록 모델링을 할 수 있는 프로그램을 개발하였다.

사용 요소는 8 절점의 3차원 요소와 20 절점의 3차원 요소로 하였다. 균열선단을 포함하는 요소에서는 응력의 특이성을 나타내기 위하여 균열선단요소를 사용하여 균열 해석을 하였다.

해석에 사용된 FEM 모델을 Fig. 1에 보였다.

2.2 해석 모델

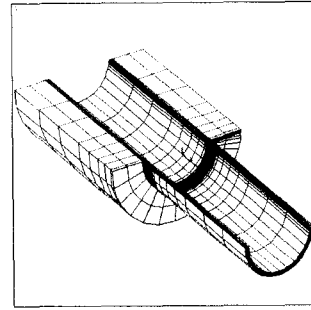
해석에 사용된 조건들을 살펴보면, 파이프의 형상 및 치수는 내경 20.06mm, 외경 22.60mm, 관두께 1.27mm, 그리고 파이프의 길이는 102.0mm로 하였다. 관판이 있는 경우의 해석시 파이프의 좌측 50mm는 관판에 삽입되어 있다고 가정하였고, 관판은 내경 22.60mm, 외경 42.60mm의 파이프로 모델링 하였다. 파이프와 관판사이는 완전 접합되어 있다고 가정하였다.

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

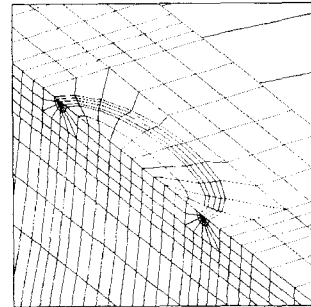
3. 응력부식 균열성장 해석

3.1 균열성장해석 방법

축방향 균열이 존재하는 전열관의 응력부식 상태에서의 균열의 성장 거동을 살펴보았다. 파이프의 내벽에 작은 균열이 존재한다고 가정하고 균열선단을 따라서 응력강도계수를 구하였다. 이때 응력강도계수는 균열선단 후방 균열면 상에서의 변위장으로부터 구해지게 된다.



(a) Element model 01



(b) Element model 02

Fig. 1 Finite element mesh configurations of a pipe with an inner surface crack

얻어진 응력강도계수를 응력부식 균열 성장식에 대입하여 균열의 성장속도와 성장 중의 균열의 형태를 살펴보았다.

해석시 파이프의 작용압력은 정상가동 압력으로 내압 9.73MPa이 파이프와 균열면 상에 작용한다고 가정하였다. 그리고 전열관에 발생된 잔류응력을 고려하였다.

본 연구에서는 전열관에서의 잔류응력을 직접 측정하지 않고 참고문헌 1에 제시된 측정 결과를 이용하였다. 균열 성장 해석을 위해서는 관의 내벽과 외벽 사이에서의 잔류응력의 분포에 대해서도 알아야 하므로, 내벽과 외벽 사이에서 잔류응력이 직선적으로 변화한다고 가정하였다.

또한 초기균열의 중심은 잔류응력이 최대인 지점에 위치한다고 가정하였다.

PWSCC에서의 균열의 성장을 나타내는 식으로 다음 식을 사용하였다[2].

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

여기서 da/dt 의 단위는 m/sec이고 K_I 의 단위는 $MPa\sqrt{m}$ 이다. 이 식에 의하여 계산된 균열성장률은 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 해석 예1-응력강도계수 분포

Fig. 2부터 Fig. 4는 참고문헌 1의 잔류응력분포(E9-18 튜브)를 이용하여 파이프에서 내압과 균열면에 작용되는 내압 및 잔류응력을 고려한 해석 결과이다.

Fig. 2는 $a=0.254mm(a/t=0.2)$ 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 이 가장 깊은 내부 쪽 균열선단($\theta=90^\circ$)에서의 K_I 보다 크다. 그러나 a/c 의 비가 작아질수록 표면 쪽의 K_I 은 점차 작아지는 반면, 내부 쪽의 K_I 은 점차 커져 $a/c=0.2$ 인 경우는 내부의 K_I 이 표면 쪽보다 아주 커짐을 알 수 있다.

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

이러한 경향으로부터 Δa 및 Δc 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.

Fig. 3은 $a=0.35mm$, 그리고 Fig. 4는 $a=0.762mm$ 인 경우로, 그 경향은 Fig. 2와 유사하다.

3.2 해석 예2-균열성장 해석

관판이 있는 경우(TS 조건)와 관판이 없는 경우(RS 조건)에 대하여 참고문헌 1에 주어진 잔류응력분포(E9-19 튜브)에 대하여 균열성장해석을 하였다.

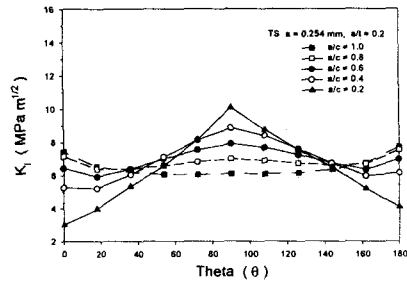


Fig. 2 K_I distribution along crack front line for the case with tube sheet and $a=0.254mm$. The applied loads are inner pressure(9.73MPa) and the residual stress of reference [1].

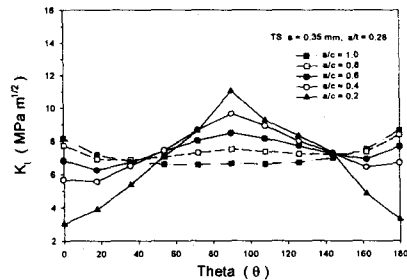


Fig. 3 K_I distribution along crack front line for the case with tube sheet and $a=0.35mm$. The applied loads are inner pressure(9.73MPa) and the residual stress of reference [1].

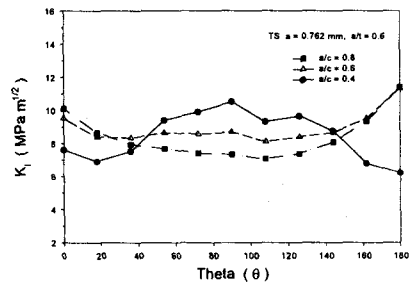


Fig. 4 K_I distribution along crack front line for the case with tube sheet and $a=0.762mm$. The applied loads are inner pressure(9.73MPa) and the residual stress of reference [1].

작용응력으로 앞 절에서와 동일하게 파이프의 내압, 균열면에 작용되는 내압 및 잔류응력을 고려하였다. 해석시 두 조건 모두 초기균열 깊이 a_0 는 0.254mm로, 초기균열 길이 c_0 는 0.3556와 0.6 mm로 하였다.

두 가지 초기 균열형상 중 $c_0=0.3556\text{mm}$ 인 경우는 $\theta=0^\circ$ 및 $\theta=180^\circ$ 에서의 K_I 과 $\theta=90^\circ$ 에서의 K_I 이 거의 같도록 초기균열형상을 가정한 경우로, 초기에 거의 일정한 균열형상비(= a/L)를 유지하면서 성장하게 된다. $c_0=0.6\text{mm}$ 는 미소균열이 합쳐지는 경우를 가정하여 c_0 를 길게 가정한 경우로, 초기 균열 형상의 영향을 살펴보았다.

Fig. 5부터 Fig. 9는 관관이 있는 경우(TS 조건)에 대하여 해석한 결과이다.

Fig. 5는 시간에 따른 균열의 길이 $L(=2c)$ 성장을 Fig. 6은 균열의 깊이 a 의 변화를 나타낸 그림이다. Fig. 5에서 볼 때, $c_0=0.6\text{mm}$ 인 경우는 $c_0=0.3556\text{mm}$ 인 경우에 비하여 초기의 균열길이 성장률이 작지만, 시간이 흐름에 따라 거의 유사한 균열성장률을 보이며 성장해 가고 있음을 알 수 있다. 또한 관통할 때 균열길이가 $c_0=0.3556\text{mm}$ 인 경우는 $L=5.1\text{mm}$, $c_0=0.6\text{mm}$ 인 경우는 $L=5.2\text{mm}$ 로 초기균열형상비는 아주 달랐지만 관통시의 균열길이는 그다지 차이가 없게 나타남을 알 수 있었다. 얻어진 관통시의 균열길이는 참고문헌 [3]에서 소개하고 있는 프랑스측 자료 즉, 균열길이가 4~5mm가 되면 대부분 관통균열이 된다는 사실과 일치하고 있다.

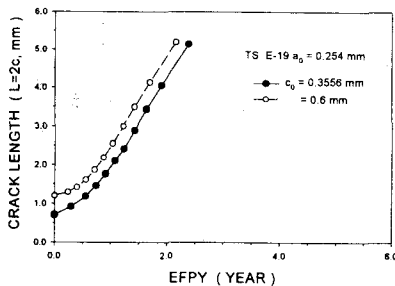


Fig. 5 Stress corrosion crack growth as a function of time under the inner pressure, 9.73MPa and the residual stress reference [1]. A tube sheet is included in the model.

Fig. 6에서 $c_0=0.6\text{mm}$ 인 경우 균열깊이 a 의 초기 성장률이 $c_0=0.3556\text{mm}$ 인 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.

Fig. 7은 균열형상비 a/L 의 변화를 나타낸 것으로, 두 곡선을 비교해 볼 때 가정된 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.

Fig. 8과 Fig. 9는 $c_0=0.3556\text{mm}$ 와 0.6mm에서의 균열길이에 따른 균열길이 성장률을 각각 나타내

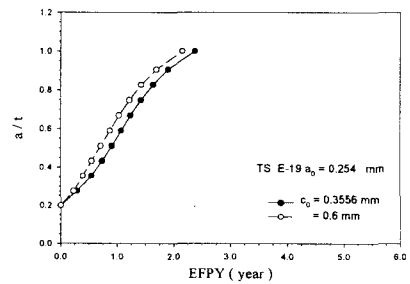


Fig. 6 Variation of a/t as a function of time under the inner pressure, 9.73MPa and the residual stress of reference [1]. A tube sheet is included in the model.

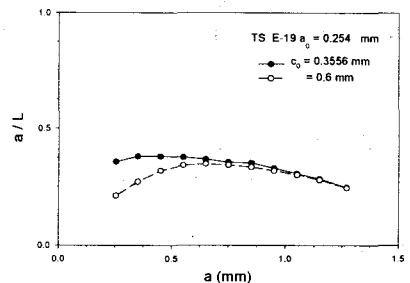


Fig. 7 Variation of a/L as a function of crack length under the inner pressure, 9.73MPa and the residual stress of reference [1]. A tube sheet is included in the model.

고 있다. Fig. 8에서 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. 9는 $c_0=0.6\text{mm}$ 에서의 균열길이에 따른 균열길이 성장률을 보여주고 있다. 이 경우는 Fig. 8보다 c_0 를 크게 가정한 경우이므로 $\theta=0^\circ$ 및 $\theta=180^\circ$ 에서의 K_I 은 Fig. 8보다 감소하고 $\theta=90^\circ$ 에서의 K_I 은 증가하게 된다. 따라서 성장 초기에 c_1 과 c_2 의 성장률은 Fig. 8의 경우보다 작은 값을, a 의 성장률은 큰 값을 보인다. 그러나 균열길이가 증가할수록 모든 값들이 점차 Fig. 8과 유사하게 된다.

Fig. 10부터 Fig. 14의 그림들은 Fig. 5에서 Fig. 9까지 수행된 해석을 관판이 없는 경우에

적용하여 관판의 효과를 살펴본 것이다.

Fig. 10과 Fig. 11의 그림 결과를 Fig. 5와 6의 관판이 존재하는 경우와 비교해 볼 때, 유사한 곡선 형태를 보이나 관통까지의 시간이 짧아졌고, 관통시의 균열길어도 짧아졌다.

Fig. 12의 그림에서도 관판이 있는 경우와 유사한 경향을 나타내고 있다. 초기 c_0 길이를 다르게 가정한 경우 a 가 증가할수록 균열형상비의 값이 서로 같아지는 현상도 동일하게 나타나고 있다.

Fig. 13과 14에서 보면 두 그림 모두 Fig. 8과 9의 관판이 있는 경우와 유사한 경향을 보이나 각각의 성장률 값들이 증가하였음을 알 수 있다.

참고문헌 1에 주어진 다른 잔류응력분포에 대해서도 균열성장해석을 행하였다. 그 자세한 결과 는 생략하기로 한다.

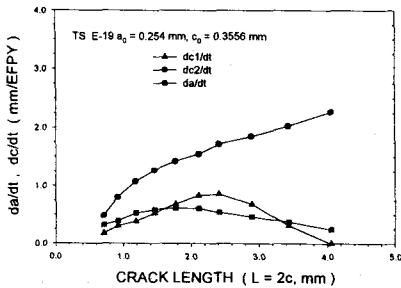


Fig. 8 Variation of crack growth rate under the inner pressure, 9.73MPa and the residual stress of reference [1]. A tube sheet is included in the model.

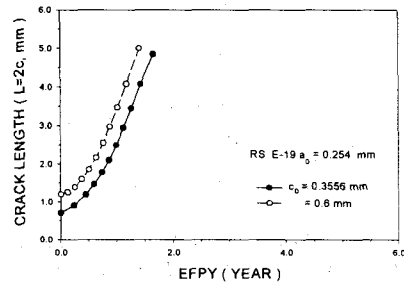


Fig. 10 Stress corrosion crack growth as a function of time under the inner pressure, 9.73 MPa and the residual stress reference [1]. A tube sheet is not included in the model.

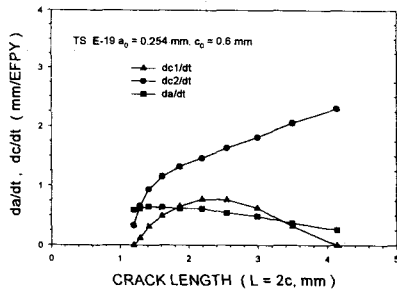


Fig. 9 Variation of crack growth rate under the inner pressure, 9.73MPa and the residual stress of reference [1]. A tube sheet is included in the model.

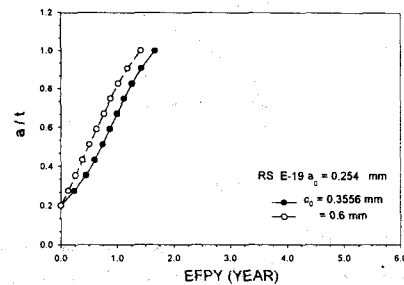


Fig. 11 Variation of a/t as a function of time under the inner pressure, 9.73MP and the residual stress of reference [1]. A tube sheet is not included in the model.

4. 결론

초기 균열을 가정하고 잔류 응력 분포에 대한 응력부식에 의하여 균열이 성장하는 형태를 해석한 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 3.6~5.2 mm 가 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.

후기

본 연구는 한국전력 전력연구원의 연구비 지원에 의하여 이루어진 것으로 이에 관계자여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. EPRI TR-102355, "Residual Stresses in Roller-Expanded Steam Generator Tube Transitions", 1993.
2. EPRI TR-1044898, "Crack Growth and Micro Structural Characterization of Alloy 600 Head Penetration Materials", 1995.
3. 정한섭, 김기태, 김홍덕, 이희중, 남민우, 증기발생기 전열관 건전성 평가기준 개발", KEPRI 보고서, 1998.

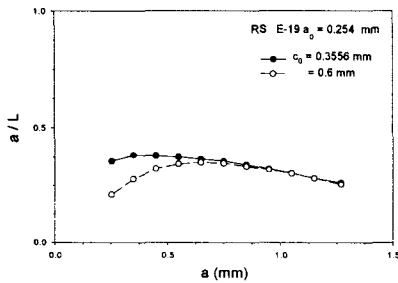


Fig. 12 Ratio of crack growth as a function of crack length under the inner pressure, 9.73 MPa and the residual stress of reference [1]. A tube sheet is not included in the model.

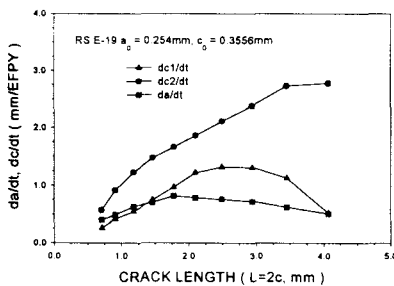


Fig. 13 Variation of crack growth rate under the inner pressure, 9.73MPa and the residual stress of reference [1]. A tube sheet is not included in the model.

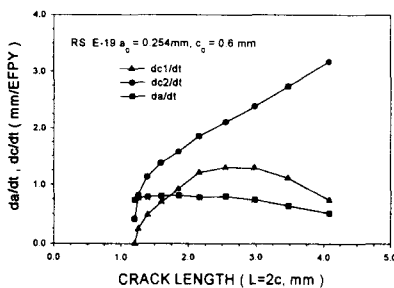


Fig. 14 Variation of crack growth rate under the inner pressure, 9.73MPa and the residual stress of reference [1]. A tube sheet is not included in the model.