

Alloy 600TT 증기발생기 전열관내 일렬 원주방향 표면 일차수응력 부식균열 성장에 미치는 균열 간격의 영향 고찰

허은주* · 김종성*† · 전준영** · 김운재**

* 순천대학교 기계공학전공, ** 고려대학교 기계공학과

Investigation on Effect of Distance Between Two Collinear Circumferential Surface Cracks on Primary Water Stress Corrosion Crack Growth in Alloy 600TT Steam Generator Tubes

Eun-Ju Heo*, Jong-Sung Kim*†, Jun-Young Jeon** and Yun-Jae Kim**

* Dept. of Mechanical Engineering, Suncheon Nat'l Univ.

** Dept. of Mechanical Engineering, Korea Univ.

(Received September 21, 2014 ; Revised December 17, 2014 ; Accepted January 9, 2015)

Key Words: Alloy 600TT(니켈기합금 600TT), Steam Generator Tubes(증기발생기 전열관), Collinear Circumferential Surface PWSCC(일렬 원주방향 표면 일차수응력부식균열), Growth Behavior(성장 거동), Damage Mechanics(손상역학), PWSCC Initiation Model(일차수응력부식균열 발생 모델), Finite Element Analysis(유한요소 해석)

초록: 일차수응력부식균열 개시 모델과 거시적 현상학적인 손상역학 접근론에 기반한 유한요소 손상해석을 수행하여 Alloy 600TT로 제작된 원전 증기발생기 전열관에 발생하는 일렬 원주방향 표면 일차수응력부식균열의 성장에 미치는 균열 간격의 영향을 고찰하였다. 기존 연구 결과와의 비교를 통해 손상해석 방법의 타당성을 검증하였다. 검증된 방법을 일렬 원주방향 표면 일차수응력부식균열에 적용하였다. 적용한 결과, 단일 균열에 비하여 일렬 균열의 경우 보다 빠른 합체시간과 관통시간을 보이며 균열 간격이 증가할수록 합체시간과 관통시간은 증가함을 확인하였다. 또한 일정 간격이상으로 두 균열이 떨어져 지면 합체 이전에 관통될 수 있음을 확인하였다.

Abstract: The study investigated the effect of the distance between two collinear circumferential surface cracks on the primary stress corrosion crack (PWSCC) growth in alloy 600TT steam generator tubes using a finite element damage analysis based on the PWSCC initiation model and macroscopic phenomenological damage mechanics approach. The damage analysis method was verified by comparing the results to the previous study results. The verified method was applied to collinear circumferential surface PWSCCs. As a result, it was found that the collinear cracks showed earlier coalescence and penetration times than the a single crack, and the times increased with the distance. In addition, it is expected that penetration may occur before coalescence of two cracks if they are more than a specific distance apart.

1. 서 론

원자력 발전소 증기발생기 전열관은 방사성 물질을 함유하고 있는 1차측과 함유하지 않고 있는 2차측을 구분하는 원자로 냉각재 압력 경계의 역할을 수행하는 안전 1등급 기기이다. 따라서 설계

수명 또는 계속운전 동안 전열관의 구조적 건전성은 보증되어야 한다. Alloy 600계열 니켈기 합금으로 제작된 국내외 몇몇 가동원전 증기발생기 전열관에 일차수응력부식균열(PWSCC : primary water stress corrosion cracking) 발생이 보고되고 있다.⁽¹⁾ PWSCC는 원자로 냉각재 압력 경계의 유지 역할에 악영향을 미칠 수 있는 잠재적이면서도 실제적인 경년열화 기구이다.⁽¹⁾

증기발생기 전열관에 발생하는 PWSCC 성장과

† Corresponding Author, kimjbsbat@suchon.ac.kr
© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

관련하여 많은 연구들이 진행되었다. Yamamoto 등은 Alloy 600TT 증기발생기 전열관에 존재하는 단일 PWSCC 표면균열의 성장 실험을 수행하여 PWSCC 표면균열의 성장거동을 고찰한 바 있다.⁽²⁾ EPRI(Electric Power Research Institute)에서는 증기발생기 전열관의 PWSCC 발생 및 성장과 관련하여 통계 처리, 재질 평가 등 다양한 연구를 수행한 바 있다.⁽³⁻⁵⁾ KAERI(Korea Atomic Energy Research Institute)에서 증기발생기 전열관의 PWSCC 발생 성장과 관련된 다양한 연구를 수행한 바 있다.^(6,7) 김종성 등은 PWSCC 개시 모델과 거시적 현상학적 손상역학 접근법을 이용한 PWSCC 성장 평가 방법론을 개발하여 증기발생기 전열관에 존재하는 일렬 및 평행 축방향 표면 PWSCC 성장 거동을 평가한 바 있다.⁽⁸⁾ 그러나, 증기발생기 전열관에 존재하는 일렬 원주방향 표면 PWSCC 성장 거동을 고찰한 연구는 찾아보기 어렵다.

본 논문에서는 Alloy 600TT 증기발생기 전열관에 발생하는 일렬 원주방향 표면 PWSCC 성장 거동을 김종성 등이 개발하고 검증한 PWSCC 개시 모델과 거시적 현상학적인 손상역학 접근론에 기반한 유한요소 손상해석 방법론⁽⁸⁾을 이용하여 평가하였다. 검증된 방법론을 다양한 균열 간격을 가지는 일렬 원주방향 표면 PWSCC에 적용하여 일렬 원주방향 표면 PWSCC 성장에 미치는 균열 간격의 영향을 고찰하였다.

2. 평가 방법론 및 검증

본 절에서는 김종성 등이 개발하고 타당성을 검증한 유한요소 손상해석 방법론과 타당성 검증 결과를 간략히 제시하고자 한다.⁽⁸⁾

2.1 평가 방법론

본 연구에서는 식 (1)과 같이 손상 D 를 PWSCC 개시시간 t_i 와 운전시간 증분 dt 의 함수로써 정의하고 식 (2)~(10)에 제시된 Garud의 PWSCC 개시 모델⁽⁹⁾을 이용하여 일렬 원주방향 표면 PWSCC 성장거동을 평가하였다.

$$D = \int_0^t \frac{dt}{t_i} \quad (1)$$

$$t_i = a_n \lambda_e \ln(A) \frac{\ln\left(\frac{A-z}{S/S_y - z}\right)}{\ln\left(\frac{A-z}{1-z}\right)} \quad (2)$$

$$a_n = 1/m^{0.375} \quad (3)$$

$$\lambda_e = C_e C_m e^{2.27 \times 10^4 / T} \quad (4)$$

$$A = 0.66 e^{0.5r} \quad (5)$$

$$z = 0.35 + \frac{\ln(r)}{3} \quad (6)$$

$$m = 10 \left(\frac{S_y}{E}\right)^{0.25} \frac{r^{0.5}}{[r(r-1)]^{0.75}} \quad (7)$$

$$r = \frac{S_u}{S_y} \quad (8)$$

$$C_e = 3.57 \times 10^{-14} \sim 2.31 \times 10^{-13} \text{ (Alloy600TT)} \quad (9)$$

$$C_m = 1.0 \text{ (Alloy600 MA)}, \\ = 1.61 \text{ (Alloy600 LTMA + TT)} \quad (10)$$

여기서 a_n 는 정규화된 응력부식균열 냉간가공저항인자, λ_e 는 Arrhenius 온도 종속성을 포함하는 재료-환경 인자, A 는 재료/응력(또는 미소균열) 저항 변수, S 는 잔류응력을 포함하는 유효 인장응력, z 는 응력 문턱치 모델 변수, m 은 냉간가공 정도, r 은 강도 비, T 는 온도, E 는 탄성계수, S_u 와 S_y 는 각각 극한 인장강도와 항복강도, C_e 와 C_m 는 각각 환경인자와 재료인자이다. C_e 의 최종 값은 PWSCC 시험 결과와 유한요소 손상해석 결과를 비교하여 교정되어진다. Alloy600TT는 열적 처리된 Alloy 600을, Alloy600MA는 밀 어닐링처리된 Alloy 600을, Alloy600LTMA는 저온 밀 어닐링 처리된 Alloy 600을 의미한다.

누적 손상이 임계 값인 1에 도달할 때, 균열 성장 증분은 다음과 같이 모사된다.

- 재료의 하중 지지능력 상실을 모사하기 위해, 요소 내 해당 Gaussian 적분점에서의 모든 응력 성분과 탄성계수를 0에 근접한 작은 값으로 바로 급격하게 줄어든도록 조치함.
- 이러한 조치는 상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS⁽¹⁰⁾의 사용자 정의 보조 프로그램(User Subroutine)인 USDFLD⁽¹⁰⁾을 이용하여 모사됨.

보다 자세한 정보는 김윤재 등의 논문⁽¹¹⁾에서 확인할 수 있다. 참고로 균열 선단 유한요소들의 누적 손상이 임계 값인 1에 도달시 균열이 성장한다고 모사하므로 균열 성장 동안 균열 형상비는 변화할 수 있다.

2.2 타당성 검증

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 Alloy 600TT 증기발생기 전열관에 존재하는 단일 축방향 표면 PWSCC에 대해 유한요소 손상해석을 수행하여 도출한 균열 성장면을 Yamamoto 등의 실험 결과⁽²⁾와 비교하여 환경인자 C_e 값을 Fig. 2와 같이 교정

한 결과, C_e 값을 4.6×10^{-14} 로 결정하였다. Alloy 600TT 전열관의 항복강도와 인장강도는 각각 328 MPa과 706 MPa이다.⁽²⁾ Yamamoto 등의 실험조건은 360 °C의 온도, 21.1 MPa의 내압, 1800 ppm의 B 농도, 3.5 ppm의 Li 농도, 30 cc/kgH₂O의 수소 농도를 가지는 모사된 경수로 원자로 냉각재 계통 수화학 조건이다.⁽²⁾

결정된 C_e 값을 이용하여 교정된 Alloy 600TT 증기발생기 전열관 축방향 PWSCC 손상 모델을 이용하여 유한요소 손상해석을 수행한 결과와 Yamamoto 등의 성장 실험 결과를 응력확대계수 K-PWSCC 성장률의 관계로 표현하여 비교한 결과를 Fig. 3에 제시하였다. 여기서 CGR(crack growth rate)은 표면균열 최심점에서의 PWSCC 성장률을 의미한다. 응력확대계수는 표면균열 최심점에서의 응력확대계수로서 Yamamoto 등의 논문에서 제시된 것과 같이 Newman-Raju의 수식⁽¹²⁾을 이용하여

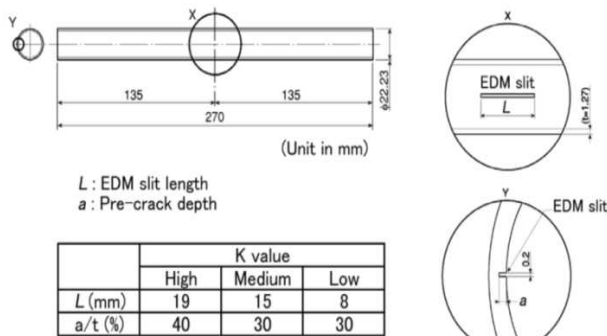


Fig. 1 Dimensions of the Alloy 600TT steam generator tubes for PWSCC growth test⁽²⁾

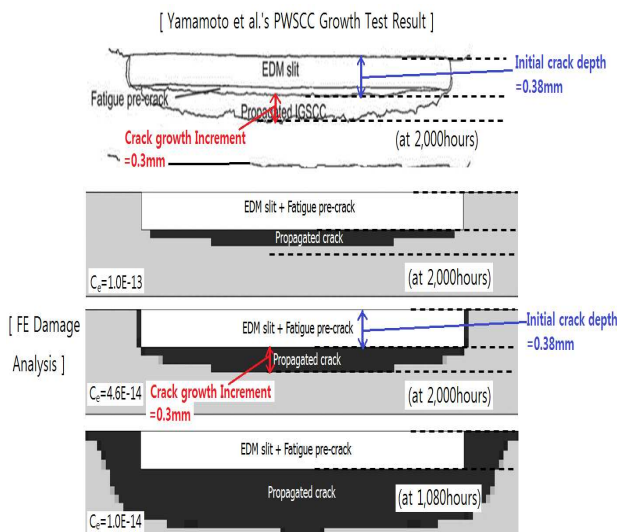


Fig. 2 Comparison of the experimental data for the Alloy 600TT tube with the prediction using FE damage analysis for various C_e values

계산된다. 실선은 Scott⁽¹³⁾에 의해 제안된 Alloy 600 재질의 PWSCC 성장률 선도로써 ASME B&PV Code, Sec.XI⁽¹⁴⁾ 상의 PWSCC 평가 절차내 PWSCC 성장률 선도와 거의 동일한 선도이다. Fig. 3에서 보이는 바와 같이 유한요소 손상해석 결과는 시험 데이터와 작은 차이를 보이며 냉간가공 정도에 무관하게 Scott의 적합선 상에 적절히 위치함을 알 수 있다. 즉, 유한요소 손상해석을 통한 PWSCC 성장 평가 방법론은 합리적인 성장 예측 결과를 도출할 수 있음을 확인하였다.

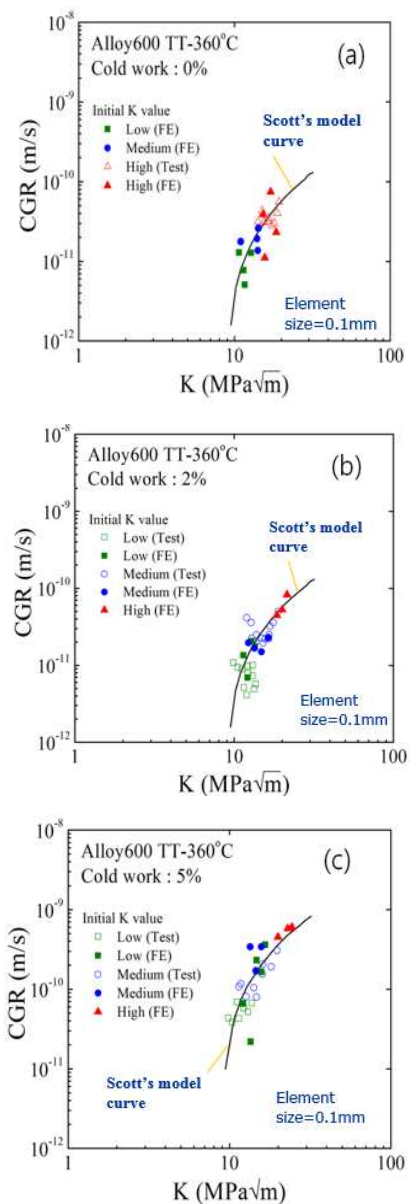


Fig. 3 Comparison of PWSCC growth rate data vs. stress intensity factor for various cold working ratios between the Yamamoto et al.'s test and the finite element damage analyses

3. 일렬 원주방향 표면 PWSCC 에 적용

3.1 적용 대상

전열관 재료는 Yamamoto 등의 실험에서 사용된 재료와 동일한 Alloy 600TT이며 수화학 및 경계 조건도 Yamamoto 등의 조건(2.2절에 제시)과 동일하다. 본 연구에서 고려되는 균열은 단일 균열이 아니라 Fig. 4와 같이 2개의 원주방향 표면 PWSCC가 일렬로 위치하고 있다. 초기 균열은 일직선의 균열 선단을 가진다. 또한, Table 1에 제시된 바와 같이 초기 균열의 균열 형상비는 $2a/c=1/6$ (a 는 균열 깊이, c 는 균열의 원주방향 길이)이고 균열 깊이비 $a/w=0.1$ (w 는 전열관 두께)이며 두 균열간 간격 h 는 0.5 mm, 1 mm, 2 mm, 4 mm의 4가지로 설정하였다. 사용된 대표적인 유한요소 모델을 Fig. 5에 제시하고 있는데 3차원 일차 완전 적분 연속체 요소로 구성된다. 기하학적 형상 및 경계조건의 대칭성을 이용하여 1/2 모델로 모델링하였다.

3.2 성장 거동에 미치는 균열 간격의 영향 고찰

Fig. 6은 C-2 해석 경우(일렬 원주방향 표면 PWSCC($a/w=0.1, 2a/c=1/6, h/a=10$)가 존재하는 증기 발생기 전열관의 PWSCC 성장 거동을 보여주고 있다. 그림으로부터 균열들이 관통되기 이전에 두 일렬 원주방향 표면 PWSCC들은 하나의 균열로 합체될 수 있음을 알 수 있다.

Table 1 Finite element damage analysis cases

No.	w (mm)	a/w	2a/c	h/a
C-1	1	0.1	1/6	5
C-2	1	0.1	1/6	10.
C-3	1	0.1	1/6	20
C-4	1	0.1	1/6	40

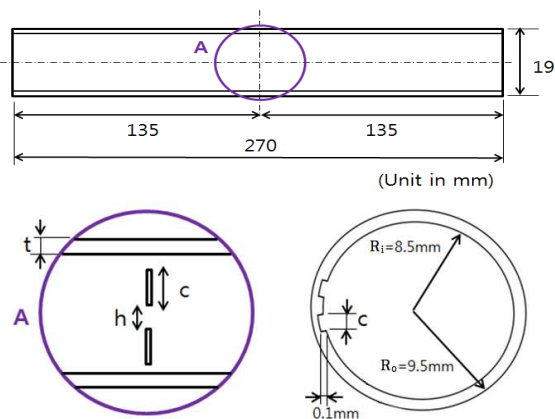


Fig. 4 Schematic configurations of the steam generator tube with the collinear circumferential surface PWSCCs

Fig. 7은 일렬 원주방향 표면 PWSCC사이의 간격의 변화에 따른 합체시간 및 관통시간의 변화를

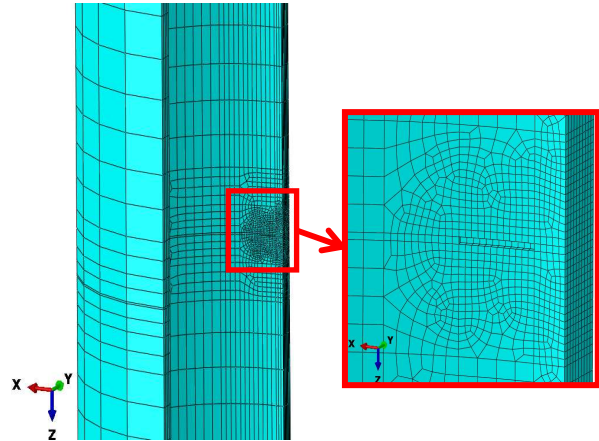


Fig. 5 A representative finite element model (C-2: $a/w=0.1, 2a/c=1/6, h/a=10$) of the steam generator tube with the collinear circumferential surface PWSCCs

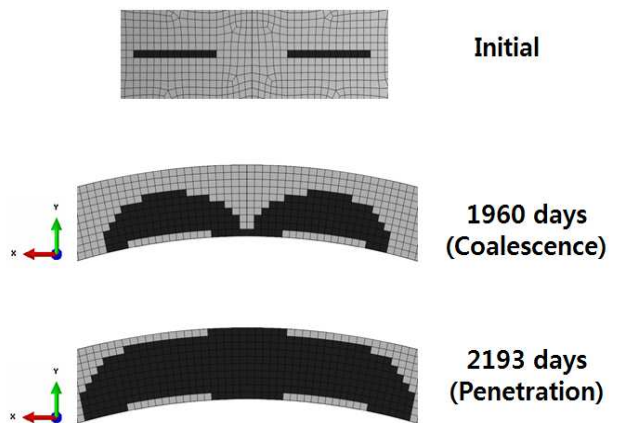


Fig. 6 Collinear circumferential surface PWSCC growth behavior of the steam generator tube C-2 ($a/w=0.1, 2a/c=1/6, h/a=10$)

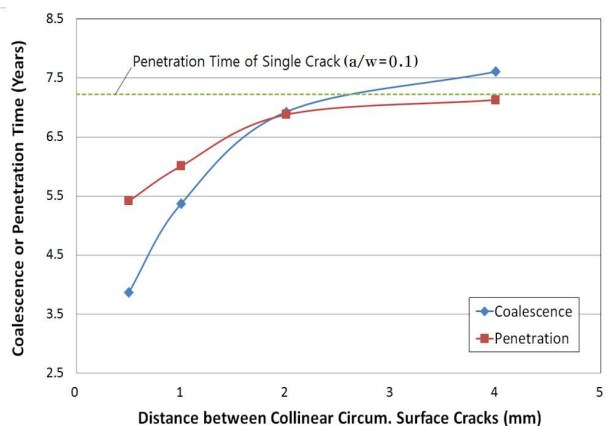


Fig. 7 Variations of the coalescence and penetration times vs. the distance between two collinear circumferential cracks

제시하고 있다. 그림에서 보이는 바와 같이, 일렬 원주방향 표면 PWSCC 의 관통시간은 단일 균열의 관통시간 보다 줄어드는데 두 인접 균열의 간격이 증가할수록 일렬 원주방향 표면 PWSCC 의 합체시간과 관통시간은 증가하여 일정 균열 간격 이상에서는 단일 균열의 관통시간과 동일할 것으로 예상된다. 단일 균열 보다 다중 균열이 일렬로 배치되면 균열 선단 요소들의 유효응력을 증가시켜 손상이 증가되므로 결국 균열 성장 구동력이 증가되어 균열 성장 속도가 빨라지는데 균열 간격이 멀어질수록 이러한 균열 간 상호 작용이 약해지므로 단일 균열 대비 균열 성장 속도의 빨라짐이 약해지기 때문으로 판단된다. 또한, 일정 균열 간격 이상 두 균열이 떨어져 있으면 합체 이전에 관통이 일어날 수 있음을 알 수 있다. 균열 간격이 멀어질수록 균열 간 상호 작용이 약해지고 기하학적 균열 위치가 균열 크기 대비 멀리 떨어지기 때문에 합체 이전에 관통이 발생할 수 있다고 사료된다. 이러한 경향으로부터 일정 간격 이상으로 원주 방향 표면 PWSCC 가 일렬로 배치되면 단일 균열 로 PWSCC 성장속도를 평가하여도 되나 일정 간격 미만이라면 단일 균열로 처리하면 안되고 다중 균열임을 반영하여 성장속도를 평가하여야만 함을 알 수 있다.

4. 결 론

PWSCC 개시 모델과 거시적 현상학적인 손상역학 접근론에 기반한 유한요소 손상해석 방법론을 이용하여 Alloy 600TT 증기발생기 전열관에 발생하는 일렬 원주방향 표면 PWSCC 성장 거동을 고찰한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 균열들이 관통되기 이전에 두 일렬 원주방향 표면 PWSCC들은 하나의 균열로 합체될 수 있는데 일정 간격 이상으로 떨어져 있으면 합체 이전에 관통이 일어날 수 있음.

(2) 일렬 원주방향 표면 PWSCC의 관통시간은 단일 균열의 관통시간 보다 줄어듬.

(3) 두 인접 균열의 간격이 증가할수록 일렬 원주방향 표면 PWSCC의 합체시간과 관통시간은 증가하여 일정 균열 간격 이상에서는 단일 균열의 관통시간과 동일할 것으로 예상됨.

후 기

본 연구는 2012 년 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 2012T100100443).

참고문헌

(References)

- (1) USNRC, 2010, *Final Report-Generic Aging Lessons Learned (GALL) Report*, NUREG-1801.
- (2) Yamamoto, Y., Ozawa, M., Nakata, K., Tsuruta, T., Sato, M. and Okabe, T., 2005, "Evaluation of Crack Growth Rate for Alloy 600TT SG Tubing in Primary and Faulted Secondary Water Environments," *Proceedings of the 12th Int. Conf. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System-Water Reactors-TMS*, pp.1243~1252.
- (3) EPRI, 1994, *A Model of Caustic Stress Corrosion Crack Initiation and Growth in Alloy 600*, TR-104073.
- (4) EPRI, 1994, *Steam Generator Reference Book*, Revision 1, TR-103824.
- (5) EPRI, 1994, *PWSCC Prediction Guidelines*, TR-104030.
- (6) Hwang, S.S., Kim, H.P. and Kim, J.S., 2003, "Degradation of Alloy 600 Steam Generator Tubes in Operating Pressurized Water Reactor Power Plants," *Corrosion Engineering*, Vol.59, No.9, pp.821~827.
- (7) KAERI, 2004, *Development of Technologies for Improving Integrity of Nuclear Steam Generators*, KAERI/RR-2540.
- (8) Kim, J.S., Heo, E.J., Jeon, J.Y. and Kim, Y.J., 2014, "An Investigation on Multiple Axial Surface PWSCC Growth Behaviors in Primary Alloy 600 Components Using the PWSCC Initiation Model and Damage Mechanics Approach," *Proceedings of the ASME PVP 2014*, Anaheim, USA, PVP2014-28517.
- (9) EPRI, 2009, *Stress Corrosion Cracking Initiation Model for Stainless Steel and Nickel Alloys*, TR-1019032.
- (10) Dassault Systems, *Simulia, User's Manuals for ABAQUS*, Ver.6.13, 2013.
- (11) Kim, N.H., Oh, C.S., Kim, Y.J., Baek, J.H., Kim, Y.P. and Kim, W.S., 2011, "A Finite Element Ductile Failure Simulation Method Using Stress-Modified Fracture Strain Model," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.78, No.1, pp.124~137.
- (12) Newman, J. and Raju, I., 1984, *Stress-Intensity Factor Equations for Cracks in Three-Dimensional Finite Bodies Subjected to Tension and Bending Loads*, NASA Technical Memorandum, 85793.
- (13) Scott, P.M., 1991, "An Analysis of Primary Water Stress Corrosion Cracking in PWR Steam Generators," *Proceedings of the Specialists Meeting on Operating Experience with Steam Generators*, Brussels, Belgium, pp.5~6.
- (14) ASME B&PV Code Committee, 2011, *ASME B&PV Code*, Sec.XI.