

스프링 체결나사의 응력부식균열 수명예측

고승기[†]·류창훈^{*}

Stress Corrosion Cracking Lifetime Prediction of Spring Screw

Koh, S.K., Ryu, C.H.

Key Words: Holddown Spring Screw(누름스프링 체결나사), Primary Water Stress Corrosion Cracking(1차냉각수 응력부식균열), Fracture Mechanics Analysis(파괴역학적 해석)

Abstract

A lifetime prediction of holddown spring screw in nuclear fuel assembly was performed using fracture mechanics approach. The spring screw was designed such that it was capable of sustaining the loads imposed by the initial tensile preload and operational loads. In order to investigate the cause of failure and to predict the stress corrosion cracking life of the screw, a stress analysis of the top nozzle spring assembly was done using finite element analysis. The elastic-plastic finite element analysis showed that the local stresses at the critical regions of head-shank fillet and thread root significantly exceeded than the yield strength of the screw material, resulting in local plastic deformation. Normalized stress intensity factors for PWSCC life prediction was proposed. Primary water stress corrosion cracking life of the Inconel 600 screw was predicted by using integration of the Scott model and resulted in 1.78 years, which was fairly close to the actual service life of the holddown spring screw.

1. 서 론

핵연료 상단고정체 스프링 체결나사의 손상은 Fig. 1과 같은 응력부식균열(Primary Water Stress Corrosion Cracking: PWSCC)에 의한 것으로 알려져 있다.⁽¹⁾ 상단고정체는 운전 중 원자로 노심 내의 냉각수의 부양력 및 유동력에 의하여 핵연료 집합체에 작용하는 수력과 열적 변형 및 중성자 조사에 의한 길이변화를 허용하면서 핵연료 집합체 구조물을 안정적으로 유지하는 중요한 역할을 하고 있다.

상단고정체에 대한 연구는 누름스프링의 강성 해석, 지지격자의 설계를 중심으로 진행되어 오고 있다. 그러나 실제 많은 파손이 발생하는 누름스프링 체결나사에 대한 강도 및 건전성해석은 일부 외국회사에서의 연구를 제외하고는 매우 적은 상황이므로 운전 중 발생하는 나사파손으로 인한 경제적인 피해를 국내 발전회사들이 감수하고 있는 상황이다.

본 연구에서는 현재 운전 중인 웨스팅하우스 원전용 17x17형 핵연료집합체 상단고정체부품의 건전성을 확보하고 나사손상의 원인을 규명하기 위하여 상단고정체에 대한 탄소성 유한요소해석을 수행하였으며 누름스프링나사에 발생하는 하중과 모멘트를 구하였다. 또한 나사의 나사산뿌리에 존재하는 균열의 응력부식균열진전수명을 파괴역학적인 방법을 이용하여 스프링나사의 PWSCC 수명을 예측하였다.

[†] 군산대학교 기계공학부

E-mail : skkoh@kunsan.ac.kr

TEL : (063)469-4717 FAX : (063)469-4727

^{*} 군산대학교 대학원 기계공학과

2. 스프링 체결나사의 응력해석

2.1 상단고정체의 유한요소모델링

상단고정체는 판스프링과 스프링 나사, 상판으로 구성되어 있고, 각 부품에서의 국부적인 응력과 변형률을 정확하게 계산하기 위하여 유한요소법을 사용하였다. 유한요소법을 이용하여 실제 부품을 모델링하고 실제 운전상태와 동일한 하중 및 경계조건을 부과하여 탄소성 해석을 수행하였다.⁽²⁾

상단고정체에 대한 유한요소모델은 Fig. 2와 같고 ABAQUS 6.2를 이용하여 해석을 수행하였다. 판스프링과 스프링나사는 20개 절점의 6면체요소(C3D20)를 사용하여 각각 6,267개와 11,296개의 요소로 모델링하였고 총 17,563개의 요소로 모델링되었다. 상판은 강체(analytical rigid surface)로 정의하였다.

상단고정체에 대한 탄소성해석을 위하여 사용된 체결나사 및 스프링재료인 Inconel 600 및 718의 기계적특성은 각각 Table 1과 같다.

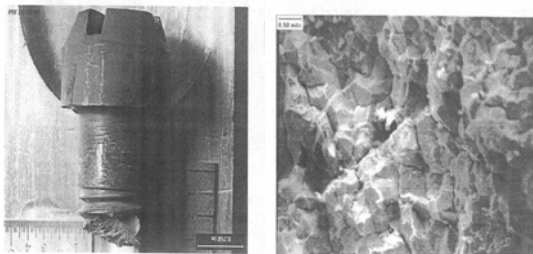


Fig. 1 Fracture of holddown spring screw.

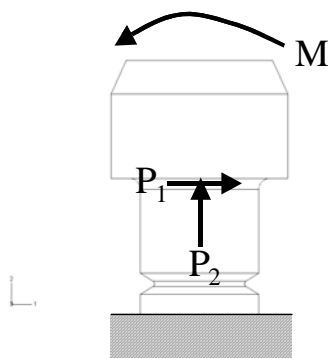


Fig. 3 Reaction forces and moments in the screw.

2.2 하중 및 모멘트

핵연료 상단고정체의 탄소성 유한요소 응력해석으로부터 누름하중을 받는 스프링체결나사에 발생하는 하중이 얻어졌다. 나사에 발생하는 하중은 축하중을 포함하여 전단하중 및 굽힘모멘트가 Fig. 3과 같이 작용한다. 나사에 발생하는 하중은 나사 예하중의 존재 여부에 따라 유한요소 해석으로부터 Table 2와 같이 얻어졌다.

3. 나사산 균열의 응력세기계수

3.1 응력세기계수식

매끄러운 원형봉에 원형 또는 직선균열이 존재하는 경우, 인장 및 굽힘 하중을 받을 때의 응력세기계수는 Forman과 Shivakumar에 의하여 제안되었다.⁽³⁾ 인장하중만을 받는 나사의 뿌리에 원주방향 균열이 존재하는 경우에 대한 응력세기계수는 Oster와 Mills에 의하여 제안되었으며⁽⁴⁾, 인장 또는 굽힘하중을 받는 나사의 뿌리에 원형-직선균열의 경우에는 Toribio, 그리고 James와 Mills에

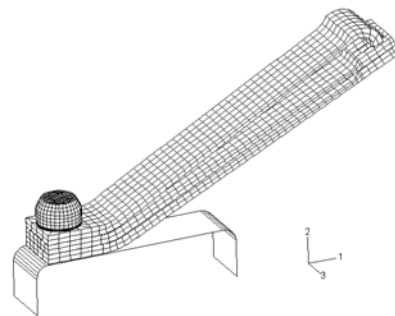


Fig. 2 Finite element models of a top nozzle spring assembly.

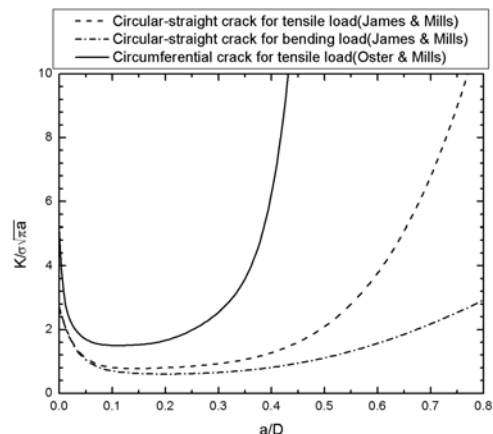


Fig. 4 Normalized stress intensity factors of cracks in screw thread.

Table 1 Mechanical properties of Inconel 600 and 718 alloys

Mechanical properties	Alloy 600	Alloy 718
Elastic modulus, E (GPa)	210	225
0.2% offset yield strength, σ_{ys} (MPa)	706	1,188
Ultimate tensile strength, σ_u (MPa)	792	1,492
Elongation, EL (%)	45	20
Reduction in area, RA (%)	68.2	34.7
True fracture strain, ϵ_f (%)	114.6	42.6
True fracture stress, σ_f (MPa)	1,625	2,007
Hardness, HRC	21.0	40.4

의하여 제안되었다.^(5,6) 여러 제안된 식 중에서 인장하중과 굽힘하중을 동시에 받는 나사뿌리에 존재하는 원형-직선균열에 대한 식은 James와 Mills에 의하여 제안된 식이 가장 적절한 것으로 판단되어 누름스프링 체결나사균열의 응력세기계수식으로 사용되었으며 인장하중을 받는 경우 다음과 같다.

$$\frac{K_I}{\sigma \sqrt{\pi a}} = Ae^{Bx} + C + Dx + Ex^2 + Fx^3 + Gx^4 \quad (1)$$

위에서 $x = a/D$, $A = 2.043$, $B = -31.332$, $C = 0.6507$, $D = 0.5367$, $E = 3.0469$, $F = -19.504$, $G = 45.647$ 이다. 굽힘모멘트, M 을 받는 경우는 $\sigma = \sigma_m = 32M/\pi D^3$ 이 되며 각 항의 계수는 다음과 같다.

$$\frac{K_I}{\sigma_m \sqrt{\pi a}} = Ae^{Bx} + C + Dx + Ex^2 + Fx^3 + Gx^4 \quad (2)$$

위에서 $A = 2.043$, $B = -31.332$, $C = 0.6301$, D

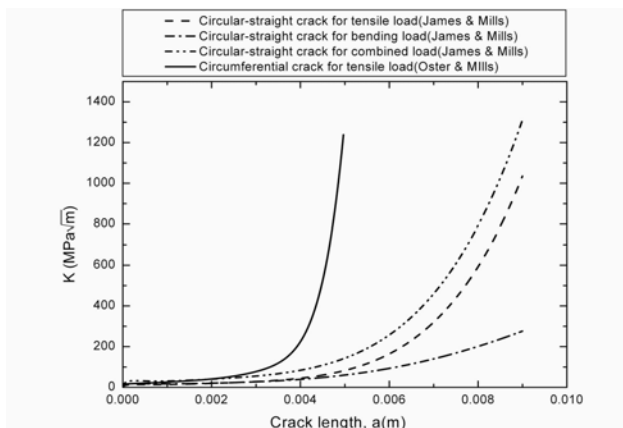


Fig. 5 Stress intensity factors versus crack length for cracked screw thread subjected to a holddown force of 2.25kN.

Table 2 Reaction forces and moments in screw

Loading type	P_1 (kN)	P_2 (kN)	M (kN · mm)
Holddown force	2.56	24.0	41.1
Preload + holddown force	2.22	20.0	34.5

= 0.03488, $E = -3.3365$, $F = 13.406$, $G = -6.0021$ 이다. 인장하중만을 받는 나사에 원주방향균열이 존재하는 경우의 응력세기계수식은 Oster와 Mills에 의해 다음과 같이 제안되었다.

$$\frac{K_I}{\sigma \sqrt{\pi a}} = f(a/D) \quad (3)$$

위에서 $f(a/D)=3.0149+2.04902e^{166.26x}-51.624x + 722.92x^2-5342.9x^3+21757x^4-45123.3x^5+37900.2x^6$ 이다. 식(1) ~ (3)의 무차원화된 응력세기계수를 비교하면 Fig. 4와 같으며, 나사 예하중이 없이 누름하중만 작용하는 경우, 즉 $P_2 = 24$ kN, $M = 41.4$ kN-mm의 축하중 및 모멘트가 나사에 작용하는 경우의 응력세기계수, K 는 균열길이, a 에 따라 Fig. 5와 같이 나타내어진다. Fig. 5로부터 동일한 균열길이를 갖는 경우 원주방향형상의 균열이 원형-직선형상의 균열에 비하여 매우 큰 응력세기계수를 갖게 됨을 확인할 수 있다.

3.2 응력세기계수에 대한 유한요소해석

ABAQUS에서는 균열을 해석하기 위해 균열 선단의 탄성 및 소성 특이요소를 제공하고 있다. 하지만 응력세기계수를 구한 여러 보고에 따르면 탄성 특이성을 고려한 것과 고려하지 않은 값의 차이는 1.5%보다 적다고 기술하고 있다.⁽⁵⁾ 본 연구에서는 Fig. 6과 같이 원형 봉에 균열을 삽입하

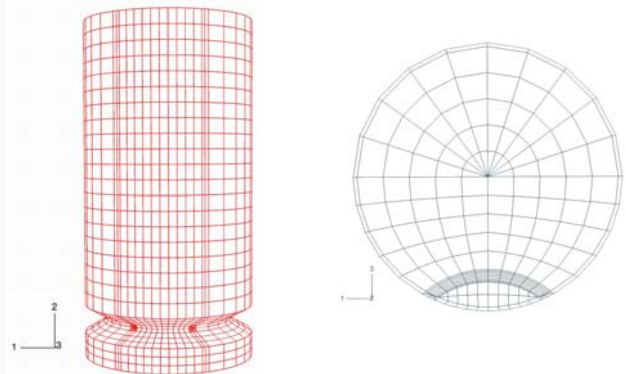


Fig. 6 Finite element model of a threaded round bar.

Table 3 Coefficients in correction factors of cracks in screw thread

Crack shape	Loading	A	B	C	D	E	F	G
Circular	Tension	0.17437	-1.57397	0.96729	-10.97457	82.95319	-263.40636	318.08257
	Bending	0.75548	-13.56502	0.12087	0.05257	13.80954	-70.29793	104.20933
Straight	Tension	0.45462	5.33368	1.05641	-9.58993	20.25923	-35.05266	-24.69558
	Bending	0.05528	-5.34089	1.02903	-5.53814	24.56525	-46.22219	34.99452
Circular-straight	Tension	0.10055	-0.16167	0.98909	-8.45693	44.07003	-86.65277	76.53347
	Bending	0.20167	-0.17406	0.56828	-5.67055	23.84548	-39.34886	27.77994

고 소성 특이성만을 고려하여 모델링하였으며 20 절점의 육면체 요소를 사용하였다. 체결나사의 균열의 형상은 원형과 직선 균열을 가지고 있으며, 원형 균열로 시작하여 직선균열로 진전하는 경향을 띄고 있다. James와 Mills는 원형 균열에서 직선균열로 변환되는 시점을 $a/D=0.5$ 로 제안하였다.⁽⁶⁾ Forman과 Shivakumar는 인장하중과 굽힘하중을 받을 때, 실제 파손된 파면의 균열진전 모양을 측정하여 균열의 형상비를 식(4)와 같이 제안하였다.

$$r = \frac{a(2R-a)}{2(R-a)} \quad (4)$$

위에서 a 는 균열의 깊이이며 R 은 실린더의 반경이다. 유한요소해석으로 응력세기계수를 구하였고, 균열선단에 위치한 중간부분의 균열길이에 따라 무차원화된 응력세기계수를 interpolation하여 수식을 구하였다. 식(5) 와 식(6)을 사용하여 계수와 지수를 Table 3과 같이 구하였다.

$$\frac{K_I}{\sigma \sqrt{\pi a}} = Ae^{Bx} + C + Dx + Ex^2 + Fx^3 + Gx^4 \quad (5)$$

$$\frac{K_{II}}{\sigma_m \sqrt{\pi a}} = Ae^{Bx} + C + Dx + Ex^2 + Fx^3 + Gx^4 \quad (6)$$

균열 선단에서 균열성장이 원형균열에서 직선 균열로 진행한다고 가정할 때 인장하중과 굽힘하중이 가해지면 a/D 가 0.5인 지점까지 각각 두 개의 수식은 중첩되어, Figs. 7 ~ 9와 Table 3으로 구할 수 있다.

3.3 체결나사의 균열진전수명예측

PWSCC에 의한 균열진전속도는 온도, stress intensity, water chemistry 및 시험방법에 따라서 10^{-12} 에서 10^{-8} m/sec정도의 범위에서 분포한다.^(7,8) Scott⁽⁷⁾는 Smialowska의 데이터 및 응력부식균열의 성장을 kinetics에 근거하여 PWSCC의 균열성장속도식을 제시하였다. Smialowska⁽⁸⁾의 데이터는 증기발생기용 튜브를 펴서 얇은 판형시편에 대해 측정된 값이다. 이 얇은 판재는 상당한 냉간가공을 받는다. 상단고정체 체결나사의 경우 표면의 일부만 냉간가공의 효과가 존재하고 내부는 냉간가공효과를 배제할 수 있다. 따라서 Smialowska의 데이터에 가공경화효과를 고려하여 PWSCC 균열진전속도를 결정해야 하며 Scott이 이를 제시하였다. Alloy 600 합금의 응력세기계수에 따른 PWSCC에 의한 균열진전속도식은 Scott 모델에서 제시한 다음 식으로 표현된다.

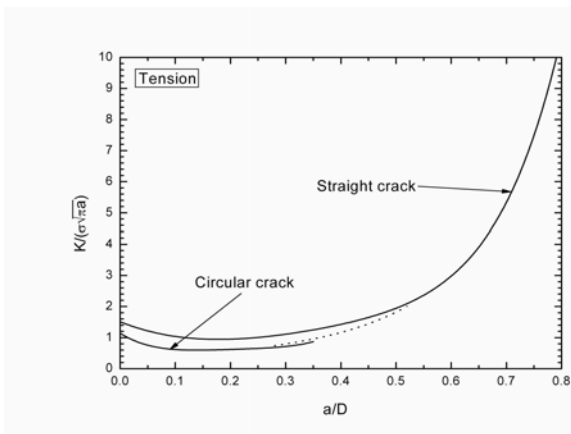


Fig. 7 K-solutions that apply to a crack in a threaded round bar subjected to tension.

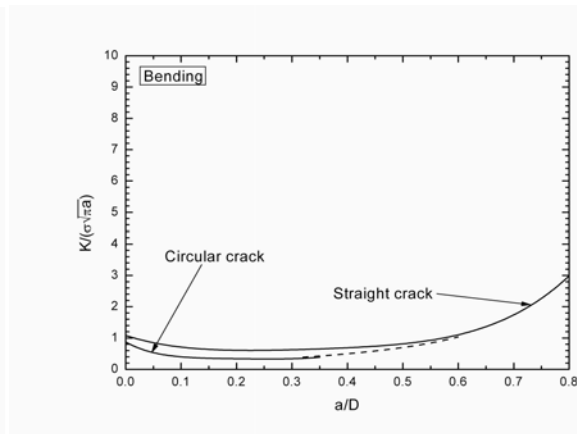


Fig. 8 K-solutions that apply to a crack in a threaded round bar subjected to bending.

Table 4 Predicted PWSCC crack growth life of screw at 330°C subjected to preload and holddown force using James and Mills equation

Loading type	a_i (m) at $K_I=K_{ISCC}$	a_c (m) at $K_I=K_{IC}$	Life(year)
Tension	0.000076	0.007388	9.09
Bending	0.000033	0.009934	5.14
Combined load	0.000010	0.006791	1.42

$$\frac{da}{dt} = CF \times 2.8 \times 10^{-12} (K-9)^{1.16} \text{ m/sec} \quad (7)$$

여기서 CF는 보정계수로서 원자력 노내 환경이 330°C 이상으로써 1로 정하였다. PWSCC 진전속도는 시험방법(하중모드, 변형속도), 시험편의 형태, 시험환경(Li, B의 함량) 및 재료 특성(탄성계수, 입계탄화물의 양, 가공정도) 등에 따라 차이가 있지만 대부분의 데이터가 Fig. 10과 같이 Scott model이 제시한 경향을 따른다.

누름스프링 체결나사의 파손수명은 PWSCC에 의한 균열생성수명과 균열진전수명의 합으로 계산되어 진다. 그러나 균열생성수명이 진전수명에 비하여 상대적으로 매우 짧다고 알려져 있으며 스프링나사 재료 Inconel 600의 결정립크기(grain size)가 대략 20 μ m로 일반적으로 사용되는 전열관의 30~50 μ m에 비하여 상당히 작은 편이므로 결정립크기의 초기 결함이 이미 존재한다고 가정하면 PWSCC 균열진전수명이 나사의 파손수명으로 간

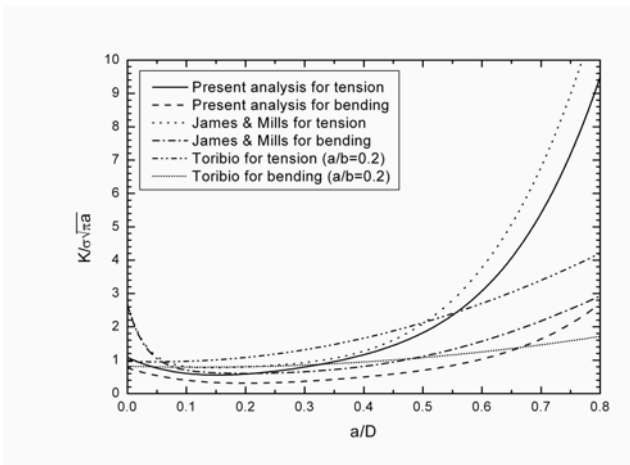


Fig. 9 Normalized stress intensity factors for a circular and straight crack in a threaded round bar subjected to tension and bending.

Table 5 Predicted PWSCC crack growth life of threaded round bar at 330°C subjected to preload and holddown force using calculated equation

Loading type	a_i (m) at $K_I=K_{ISCC}$	a_c (m) at $K_I=K_{IC}$	Life(year)
Tension	0.000258	0.006168	15.25
Bending	0.000159	0.007226	9.86
Combined load	0.000038	0.005629	1.78

주할 수 있다.

본 연구에서는 Inconel 600 나사재질에 대한 PWSCC 균열진전속도식으로 식 (7)에서 주어진 Scott 모델을 이용하였다. PWSCC 균열진전수명은 Scott 모델식을 적분하여 다음과 같이 계산이 가능하다.

$$T(\text{sec}) = \int_0^{t_f} dt = \int_{a_i}^{a_f} \frac{1}{2.8 \times 10^{-12} (K-9)^{1.16}} da \quad (8)$$

위 식에서 초기균열길이, a_i 와 최종균열길이, a_f 는 각각 $K_I = K_{ISCC}$ 때의 균열길이와 $K_I = K_{IC}$ 때의 균열길이이다. Inconel 600 나사재료의 응력부식균열과괴인성(K_{ISCC})은 10 MPa·m^{1/2}, 평면변형률과괴인성(K_{IC})은 Westing-house에서 얻어진 341 MPa·m^{1/2}을 이용하였다. 그러나 K_{ISCC} 가 10 MPa·m^{1/2}이하인 9 MPa·m^{1/2}부터 균열진전이 일어날 수 있으므로 $K_{ISCC} = 9 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 을 이용하여 계산된 초기균열길이를 이용하여 적분이 수행되었다.

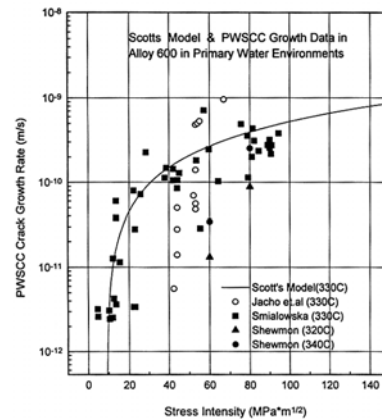


Fig. 10 Stress intensity factors of a crack in screw thread for different loading conditions.

나사체결토크에 의하여 20 kN의 예하중과 스프링 끝단에 2.25 kN의 누름하중이 가해진다면 James 와 Mills에 의해 제시된 응력세기계수식을 이용하여 Table 4와 같이 수명이 예측된다. 유한요소법으로 계산하여 얻어진 응력세기계수식을 이용하여 위와 같이 예측할 경우, Table 5로 구할 수 있다. Tables 4 ~ 5로부터 James 와 Mills의 응력세기계수식을 이용하여 계산된 수명이 유한요소법으로 계산되어진 수명보다 보수적으로 나타났으며 각각 1.42년과 1.78년이 얻어졌다.

4. 결 론

핵연료집합체 상단고정체의 탄소성 유한요소해석 및 파괴역학적 해석으로부터 누름스프링나사의 파손원인분석 및 수명예측이 이루어졌으며 다음과 같은 결론이 얻어졌다.

1. 나사에 발생하는 최대 국부응력의 위치는 누름하중수준에 따라 변화하여 누름하중이 증가할수록 스프링의 전면방향에서 후면방향으로 이동하는 경향을 나타냈다. 따라서 응력부식에 의해 나사가 파손되는 경우 현재 운전하중상태에서 스프링방향을 기준으로 하여 $0^\circ \sim \pm 90^\circ$ 사이의 나사머리 필렛 또는 나사뿌리에서 발생할 가능성이 높으며, 이는 실제 나사파단면해석으로부터 확인되었다.

2. 1차냉각수 응력부식균열(PWSCC) 진전에 의한 Inconel 600 나사뿌리에서의 수명은 약 1.78년(21개월)이 얻어졌으며 나사 예하중이 없는 경우 보다는 토크에 의한 나사 예하중이 작용하는 경우 약 35% 증가한 수명을 나타내어 예하중의 PWSCC 저항성을 나타냈다. 그러나 지나친 나사체결토크에 의한 높은 예하중은 오히려 PWSCC 수명을 저하시킬 가능성이 존재한다.

참고문헌

(1) Byers, J., Decristofaro, T., Dwight, J., Dye, M., Gold, R., Halligan, J., Iyer, J., Rankin, T., 1999, "Top Nozzle Holddown Spring Screw Fracture Root Cause," Final Report WCAP-15356, Westinghouse Electric Company, Pittsburgh.

(2) ABAQUS User's Manual, Ver. 6.2, 2001, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket.

(3) Forman, R.G. and Shivakumar, V., 1986, "Growth Behavior of Surface Cracks in the Circumferential Plane of Solid and Hollow Cylinders," in Fracture Mechanics, Seventeenth Volume, ASTM STP 905, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, pp. 59-74.

(4) Oster, D.M. and Mills, W.J., 2000, "Stress Intensity Factor Solutions for Cracks in Threaded Fasteners," in Structural Integrity of Fasteners: Second Volume, ASTM STP 1391, P.M. Toor, Ed., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, pp. 85-101.

(5) Toribio, J., Sanchez-Galvez, V., Astiz, M.A. and Campos, J.M., 1991, "Stress Intensity Factor Solution for a Cracked Bolt under Tension, Bending and Residual Stress Loading," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 39, No. 2, pp. 359-371.

(6) James, L.A. and Mills, W.J., 1988, "Review and Synthesis of Stress Intensity Factor Solutions Applicable to Cracks in Bolts," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 30, No. 5, pp. 641-654.

(7) Scott, P.M., 1991, "An Analysis of Primary Water Stress Corrosion Cracking in PWR Steam Generator," Proceedings of Specialist Meeting on Operating Experience with Steam Generators, Brussels, Belgium, pp. 5-6.

(8) Rebak, R.B. and Smialowska, Z., 1994, "Influence of Stress Intensity and Loading Mode on Intergranular Stress Corrosion of Alloy 600 in Primary Waters of Pressurized Water Reactors," Corrosion, Vol. 50, No. 5, pp. 378-393.