

## 원자력발전소 고강도 앵커 볼트의 파괴역학적 건전성평가<sup>§</sup>

임은모\* · 허남수\*<sup>†</sup> · 심희진\*\* · 오창균\*\* · 김현수\*\*

\* 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과, \*\* KEPCO E&C 전력기술연구소

### Structural Integrity Assessment of High-Strength Anchor Bolt in Nuclear Power Plant based on Fracture Mechanics Concept

Eun-Mo Lim\*, Nam-Su Huh\*<sup>†</sup>, Hee-Jin Shim\*\*, Chang-Kyun Oh\*\* and Hyun-Su Kim\*\*

\* Dept. of Mechanical System Design Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology

\*\* Power Engineering Research Institute, KEPCO Engineering & Construction Company, Inc.

(Received December 28, 2012 ; Revised April 12, 2013 ; Accepted April 15, 2013)

**Key Words:** Anchor Bolt(앵커볼트), Bolt Pretension(볼트 예비하중), Finite Element Analysis(유한요소해석), Steam Generator(증기발생기), Stress Corrosion Cracking(응력부식균열), Stress Intensity Factor(응력확대계수)

**초록:** 증기발생기 수직 지지대를 고정하고 있는 고강도 앵커 볼트의 응력부식균열에 대한 건전성 평가는 원자력발전소 기기 건전성 유지와 관련하여 중요한 현안 가운데 하나이다. 이에 따라 미국 EPRI에서는 고강도 앵커 볼트의 건전성 평가를 위한 기준균열계수 개념 기반의 평가 절차를 제시한 바 있으며, 본 연구에서는 EPRI에서 제시한 절차에 입각하여 증기발생기 수직 지지대 고정용 앵커 볼트의 응력부식균열 및 취성 파괴에 대한 건전성 평가를 수행하였다. 이를 위해 볼트 예비하중과 운전하중을 고려한 3차원 유한요소 응력해석을 수행하여 볼트 단면에 작용하는 공칭응력을 결정하였으며, 결정된 볼트 응력과 EPRI 절차를 이용하여 앵커 볼트의 균열 건전성을 평가하였다. 또한 3차원 탄성 유한요소 파괴역학 해석을 수행하여 EPRI에서 제시한 기준균열계수의 정확성을 검증하였다.

**Abstract:** The failure of a bolted joint owing to stress corrosion cracking (SCC) has been considered one of the most important structural integrity issues in a nuclear power plant. In this study, the failure possibility of bolting, which is used to support the steam generator of a pressurized water reactor, owing to SCC and brittle fracture was evaluated in accordance with guidelines proposed by the Electric Power Research Institute, which are called the Reference Flaw Factor method. For this evaluation, first, detailed finite element stress analyses were conducted to obtain the actual nominal stresses of bolting in which either service loads or bolt preloads were considered. Based on these nominal stresses, the structural integrity of bolting was addressed from the viewpoints of SCC and toughness. In addition, the accuracy of the EPRI Reference Flaw Factor for assessing bolting failure was investigated using finite element fracture mechanics analyses.

### 1. 서론

원자력발전소 증기발생기를 고정하기 위해 사용되는 수직 지지대는 고강도 앵커 볼트로 고정되어 있다. 따라서 이러한 앵커 볼트의 건전성 유지는 수직 지지대에 의해 지지되는 구조물과 수직 지지대 자체의 건전성과 관련하여 매우 중요하다.<sup>(1)</sup>

이러한 수직 지지대 고정용 앵커 볼트의 건전성 유지와 관련하여 핵심 현안 가운데 하나가 바로 고강도 앵커 볼트의 응력부식균열(Stress Corrosion Cracking, SCC)에 의한 열화 건전성이다. 가동운전 조건 하에서 수직 지지대 앵커 볼트에는 기기 수직방향으로 작용하는 기기 운전하중뿐만 아니라 볼트 체결에 의한 큰 예비하중(pretension)도 작용하게 되며, 또한 강도도 높아 응력부식균열에 의한 열화와 취성 파괴(brittle fracture)가 고강도 앵커 볼트의 파손 요인이 될 수 있다.<sup>(2,3)</sup>

§ 이 논문은 대한기계학회 2012년도 추계학술대회(2012.

11. 7.-9., CECO) 발표논문임

† Corresponding Author, nam-su.huh@seoultech.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

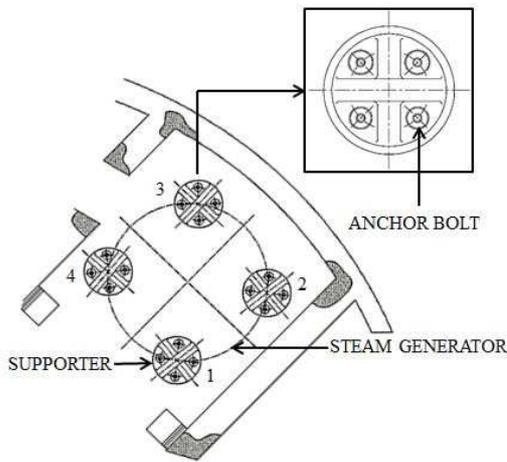


Fig. 1 The location of steam generator supporters

따라서 미국 EPRI(Electric Power Research Institute)에서는 수직 지지대 고강도 앵커 볼트의 응력부식균열과 취성 파괴에 대한 건전성을 평가하기 위해 탄성파괴역학 개념을 적용하였으며, 응력부식균열 성장에 대한 임계파괴인성 및 취성 파괴에 대한 파괴인성에 도달하는 응력을 볼트 단면에 작용하는 공칭응력(nominal stress)과 비교하여 볼트의 균열 건전성 평가를 수행하는 절차를 제시한 바 있다.<sup>(4)</sup>

이 절차에 입각하여 응력부식균열 혹은 파괴인성값으로부터 볼트에 작용 가능한 임계응력값을 구하는 경우 해석적으로 결정된 파괴역학 매개변수( $K$ , Elastic Stress Intensity Factor)가 사용 되는데 정확한 임계응력값을 결정하기 위해 EPRI에서 제시하는 볼트의 탄성파괴역학 매개변수 계산식(기준균열계수, reference flaw factor)의 검증도 필요하다.

본 논문에서는 먼저 EPRI에서 제시한 절차에 따라 원자력발전소 증기발생기 수직 지지대에 사용되는 고강도 앵커 볼트의 응력부식균열 및 취성 파괴 건전성을 평가하였다. 이를 위해 탄성 유한요소해석(Elastic Finite Element Analysis)을 수행하여 앵커 볼트에 작용하는 공칭응력을 결정하였으며 이 때에는 원자력발전소의 정상운전 및 가상사고조건 외에 볼트의 체결에 의해 발생하는 예비하중도 고려하였다. 이를 통해 볼트 체결에 의한 예비하중이 정상운전 및 가상사고조건에 대한 최종 응력 결과에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다. 그리고 EPRI 절차에서 고강도 앵커 볼트의 균열 건전성 평가 시 사용되는 기준균열계수의 정확성/적용성도 유한요소 파괴역학 해석을 수행하여 검증하였다.

Table 1 Specification of anchor bolts employed in the present work

|                               |                        |
|-------------------------------|------------------------|
| Standard                      | M76                    |
| Major Diameter, $D$           | 3 inch                 |
| Effective Diameter, $D_{eff}$ | 2.6933 inch            |
| Tensile Stress Area, $A_s$    | 5.97 inch <sup>2</sup> |

Table 2 Service loads and bolt pretension acting on the steam generator supporter under normal operating and postulated accident conditions

| I.D.                | Normal operating condition (N) |           | Postulated accident condition (N) |           |
|---------------------|--------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|
|                     | Case 1                         | Case 2    | Case 1                            | Case 2    |
| 1                   | 1,372,000                      | 1,217,650 | 2,499,000                         | 2,053,100 |
| 2                   | 1,384,250                      | 1,092,700 | 2,633,750                         | 1,942,850 |
| 3                   | 1,298,500                      | 1,122,100 | 2,915,500                         | 2,004,100 |
| 4                   | 1,445,500                      | 1,310,750 | 3,050,250                         | 2,097,200 |
| Bolt pretension (N) |                                |           |                                   |           |
| 2,070,000           |                                |           |                                   |           |

## 2. 유한요소 응력 해석

### 2.1 해석 대상

본 논문에서는 국내 가동 중인 원자력발전소 증기발생기 수직 지지대의 앵커 볼트를 대상으로 해석을 수행하였다.

Fig. 1은 해석 대상으로 고려된 증기발생기 수직 지지대 4개소에 대한 대략적인 위치 및 배치를 나타낸 것으로, 각 수직 지지대는 4개의 M76 앵커 볼트로 체결되어 있다. 수직 지지대 고정에 사용된 앵커 볼트의 정보를 Table 1에 정리하여 나타내었다.

### 2.2 하중조건 및 재료 물성치

Table 2는 운전 하중에 의해 앵커 볼트에 작용하는 하중을 정리하여 나타낸 것으로 먼저 정상운전조건과 가상사고조건이 고려되었다. 정상운전조건의 경우에는 자중, 열하중, 기기운전하중, 운전기준지진(operating basis earthquake) 하중 등이 고려되었으며, 가상사고조건의 경우에는 자중, 열하중, 기기운전하

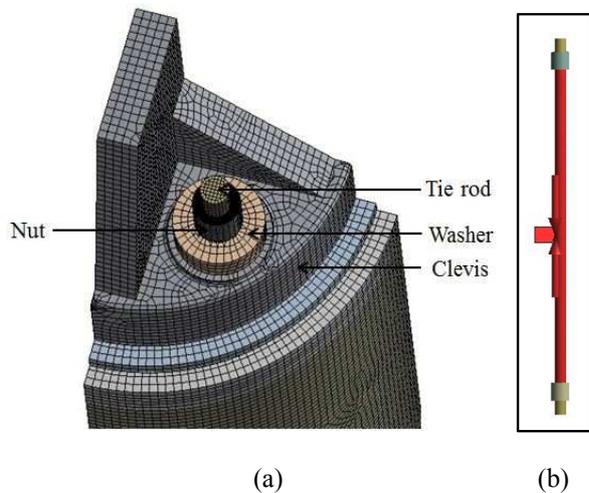


Fig. 2 (a) Typical FE mesh employed in the present work and (b) bolt pretension in anchor bolt

중, 안전정지지진(safe shutdown earthquake) 하중 그리고 냉각재 누출사고(loss-of-coolant accident)에 의한 배관 파단 하중이 고려되었다. 특히 Table 2에는 모든 하중이 축하중으로만 주어져 있는데 실제로 본 연구의 정상운전 및 가상사고조건에서 고려된 하중 성분의 경우 모멘트 및 전단하중 성분도 포함되어 있다. 그러나 본 논문에서 앵커 볼트의 건전성 평가를 위해 고려하는 응력부식균열 및 취성 파괴의 경우에는 축방향 하중(인장하중)이 지배적이기에 상기의 각종 하중 성분들을 응력을 기준으로 등가의 축방향 하중으로 재조합하여 평가 시 고려되었다.

또한 정상운전 및 가상사고조건에 대해서도 각각 2가지의 하중조건이 고려되었는데 본 논문에서 고려된 국내 특정 원자력발전소 증기발생기의 경우 가동 중 교체가 진행된 바 있다. 이에 따라 본 논문에서는 증기발생기 교체 전 운전조건(Case 1)과 교체 후 운전조건(Case 2)을 모두 고려하여 평가를 수행하였다.

앵커 볼트는 볼트 머리에 토크(torque)를 가해 볼트와 너트를 조여서 체결된다. 이 때 볼트에는 체결에 의해 큰 예비하중이 가해지게 되며, 이 예비하중도 Table 2에 함께 정리하였다.

앵커 볼트는 Cr-Mo 강으로 제작되었으며 화학조성을 Table 3에 나타내었다. 각 부품의 재질명 및 기계적 물성치도 Table 4에 정리하여 나타내었다.

### 2.3 탄성 유한요소 응력 해석 및 결과

Fig. 2는 해석에 사용된 대표적인 유한요소해석 모델을 나타낸 것으로 앵커 볼트 체결 시 사용되는

Table 3 Chemical composition of material of anchor bolt

| C     | Si   | Mn   | S     | P     | Ni   | Cr   | Mo   |
|-------|------|------|-------|-------|------|------|------|
| 0.297 | 0.36 | 0.44 | 0.003 | 0.009 | 3.38 | 1.29 | 0.43 |

Table 4 Mechanical properties employed in the present work

| Part         | Material  | Young's modulus (GPa) | Yield strength (MPa) | Ultimate strength (MPa) |
|--------------|-----------|-----------------------|----------------------|-------------------------|
| Tie rod, Nut | 30 NCD 16 | 218.2                 | 1029                 | 1171.4                  |
| Washer       | 35 CD 4T  | 218.2                 | 676                  | 834.5                   |
| Clevis       | 12MDV6    | 204.0                 | 538.2                | 644                     |

모든 구조물을 모델링 하였으며 앵커 볼트를 중심으로 한 해석 대상의 대칭성을 고려하여(Fig. 1 참고) 전체의 1/4만을 모델링 하였다. 탄성 유한요소 해석을 위해서 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS Workbench<sup>(5)</sup>를 사용하였으며 20절점 사각요소(Solid 186 in ANSYS element library)를 사용하였다. 요소망의 크기를 변화시키며 해석을 수행하여, 응력 결과의 수렴성과 해석 시간을 고려하여 최종 요소망의 크기를 결정하였다.

전술한 바와 같이 하중 조건으로는 앵커 볼트에 작용하는 기기하중(정상하중 및 가상사고하중)과 볼트 체결력에 의한 예비하중을 고려하였다. 특히 볼트 예비하중과 추가적인 기기하중을 모두 고려하여 응력 해석을 수행하는 경우에는 개별 하중을 따로 고려하여 단계적으로 응력 해석을 수행하여야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 첫 번째 응력 해석 단계에서 볼트에 예비하중만을 적용하여 응력 해석을 수행하였다. 그리고 두 번째 해석 단계에서는 볼트 예비하중에 의한 모든 상대 변위를 고정된 상태에서 증기발생기 수직 지지대에 작용하는 정상하중 혹은 가상사고하중을 전체 구조물에 작용시켰다. 예비하중의 경우에는 Fig. 2(b)에 나타난 바와 같이 ANSYS Workbench 프로그램에서 제공하는 기능을 이용하여 볼트 전체에 대해 내력의 형태로 작용시켰다.

접촉 조건으로는 완전 체결되는 tie rod와 nut (Fig. 2(a) 참고)는 완전 체결 조건으로 가정하였으며, washer와 clevis, clevis와 grout는 수평방향으로 상대운동이 허용되도록 하였다. 또한 grout와 concrete는 모든 방향의 상대운동이 발생하지 않도록 접촉조건을 부여하였다.

**Table 5** Values of bolt nominal stresses considering normal operating and postulated accident conditions and bolt pretension

| I.D. | Normal operating condition |        | Postulated accident condition |        |
|------|----------------------------|--------|-------------------------------|--------|
|      | Nominal stress (MPa)       |        | Nominal stress (MPa)          |        |
|      | Case 1                     | Case 2 | Case 1                        | Case 2 |
| 1    | 564.39                     | 561.36 | 648.79                        | 580.63 |
| 2    | 546.63                     | 558.90 | 683.77                        | 577.01 |
| 3    | 562.94                     | 559.48 | 756.92                        | 578.69 |
| 4    | 565.84                     | 563.19 | 791.90                        | 582.16 |

응력해석 결과, 최대 응력은 예상할 수 있는 바와 같이 볼트와 너트가 체결되는 부분에서 발생하였다. 또한 EPRI 절차에 입각하여 볼트의 균열 건전성을 평가하기 위해서는 전술한 바와 같이 볼트 단면에 발생하는 공칭응력을 결정해야 하며 Table 5는 유한요소 응력해석으로 구한 볼트 단면의 최종 공칭응력 결과를 정리하여 나타낸 것이다. 볼트 예비하중만을 고려한 경우에는 537.42 MPa의 공칭응력이 볼트 단면에 발생하지만 정상운전 혹은 가상사고하중을 함께 고려하면 이보다 더 큰 응력이 볼트 단면에 발생하는 것으로 나타났다. 그러나 정상 혹은 가상사고하중을 볼트 단면의 면적으로 직접 나눈 응력값보다는 작은 증가가 발생하여 이와 같이 볼트 예비하중을 고려하는 경우에는 유한요소해석을 이용하여 예비하중에 의한 변위의 영향을 정확하게 평가해야 함을 확인할 수 있었다. 일례로 정상운전하중이 1,372,000 N인 경우(Table 2 참고) 이 값을 직접 볼트 단면의 면적으로 나누면 373.4 MPa이 되어 만약 볼트 예비하중만을 고려했을 때의 537.42 MPa과 직접 더하면 약 911 MPa이 되지만 실제 볼트 예비하중과 정상운전 하중을 모두 고려하여 유한요소해석으로 구한 결과는 564.39 MPa (Table 5 참고) 이며, 이와 같이 기계적 하중에 의해 응력이 증가하는 정도는 기계적 하중에 의한 변위와 볼트 예비하중에 의한 변위와의 상호 작용에 의해 단순 계산으로는 결정할 수 없게 된다.

### 3. 앵커 볼트에 대한 파괴역학적 건전성 평가

#### 3.1 EPRI 평가 절차

본 연구에서는 2장에서 구한 앵커 볼트의 공칭

응력과 EPRI에서 제시한 건전성 평가 절차를 이용하여 응력부식균열 및 파괴에 대한 앵커 볼트의 건전성 평가를 수행하였다. 응력부식균열에 의한 앵커 볼트의 열화 건전성은 기본적으로 탄성파괴역학 개념을 이용하여 평가 가능하다. 운전 기간 중 볼트에서 응력부식균열 및 파괴에 의한 균열 성장이 발생하지 않을 조건은 다음과 같다.

$$K_I < K_{ISCC}, \quad K_I < K_{IC} \quad (1)$$

$$K_I = F\sigma_n\sqrt{\pi a} \quad (2)$$

$$\sigma_a^{SCC} = \frac{K_{ISCC}}{F\sqrt{\pi a_r}} \quad (3)$$

$$\sigma_a^F = \frac{K_{IC}}{F\sqrt{\pi a_r}} \quad (4)$$

여기서,

- $K_I$  가상균열에 대한 응력확대계수
- $K_{ISCC}$  응력부식균열에 의한 균열성장이 발생하지 않을 임계값
- $K_{IC}$  파괴인성값
- $\sigma_n$  순단면(net section)에 작용하는 공칭응력
- $F$  형상보정계수
- $a, a_r$  균열길이, 기준균열크기
- $\sigma_a^{SCC}$  응력부식균열에 의한 균열성장이 발생하지 않은 허용 응력값
- $\sigma_a^F$  취성 파괴가 발생하지 않을 허용 응력값

위의 식 (1)~(4)를 이용하면 응력부식균열 및 취성 파괴가 발생하지 않을 허용 볼트 공칭응력을 정의할 수 있다. 즉, 식 (3) 및 식 (4)와 같은 탄성 파괴역학 개념으로 결정되는 허용 공칭응력이 볼트에 발생하는 공칭응력보다 크면 응력부식균열 및 취성 파괴가 발생하지 않는 것으로 평가할 수 있다.

EPRI에서는 이와 같은 탄성파괴역학 개념을 바탕으로 응력부식균열 및 파괴에 대한 임계응력값을 결정하기 위해 단위 작용응력에 대한 볼트의 응력확대계수값을 결정하고 이에 대해 역수를 취해 식 (3) 및 식 (4)와 같은 개념으로 볼트의 허용 공칭응력을 결정할 수 있는 방법을 아래와 같이 제시하였다.

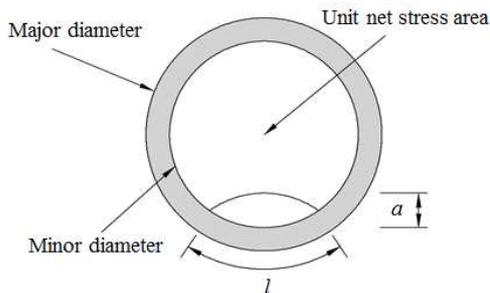
$$\sigma_a^{SCC} = C_k K_{ISCC} \quad (5)$$

$$\sigma_a^F = C_k K_{IC} \quad (6)$$

여기서,  $C_k$ 는 기준균열계수(reference flaw factor)이다.

**Table 6** Failure criteria based on stress range according to EPRI guideline

|                                | $\sigma^{st} / \sigma^{lt} \leq 1.1$ | $\sigma^{st} / \sigma^{lt} > 1.1$ |
|--------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| $\sigma^{lt} < \sigma_a^{SCC}$ | O                                    | O                                 |
| $\sigma^{st} < \sigma_a^F$     | -                                    | O                                 |



**Fig. 3** Schematics of thumbnail cracked thread root of high-strength anchor bolt

이 기준균열계수는 EPRI 방법을 이용한 볼트 균열 평가법의 핵심계수로 Fig. 3과 같이 균열이 볼트 안지름(minor diameter)에 존재한다고 가정하고, 순단면(net stress area)에 단위 응력을 작용시켜 응력확대계수를 구한 뒤 역수를 취한 것이다(식 (3)~식 (4) 참고). 즉 이렇게 구한 기준균열계수에는 볼트 형상(바깥 지름, 안지름, root 반경)에 따른 응력집중의 영향이 모두 고려되어 있으며, 단위 응력에 대한 응력확대계수의 역수 이기에 응력확대계수와 마찬가지로 볼트 및 균열의 형상, 하중 종류에만 의존하게 된다. 따라서 식 (5)와 (6)에 의해 정의되는 허용 응력값은 볼트 단면에 발생하는 허용 공칭응력을 의미하게 된다. 이 때 기준 가상균열의 균열 깊이( $a$ )는 0.01 inch이며 형상비( $a/l$ )는 0.5로 가정된다.<sup>(4)</sup>

최종적으로 EPRI에서 제시한 절차에 입각하여 볼트의 열화 건전성을 평가하기 위해서는 먼저 가상사고조건과 정상운전조건에서의 볼트의 공칭응력비를 이용하여 파손 모드를 결정해야 한다. Table 6은 응력비에 따른 파손 모드를 정리하여 나타낸 것으로 만약 가상사고조건에서의 단면 공칭응력( $\sigma^v$ )과 정상운전 조건에서의 단면 공칭응력( $\sigma^s$ )의 비가 1.1 이하이면 응력부식균열에 의한 균열 건전성만 평가하면 되고 1.1보다 큰 경우에는 응력부식균열에 의한 균열 건전성과 취성 파괴에 의한 균열 건전성을 동시에 만족해야 한다.

**Table 7** Allowable stresses based on SCC and brittle fracture

| Allowable stress based on SCC, $\sigma_a^{SCC}$ (MPa) | Allowable stress based on fracture, $\sigma_a^F$ (MPa) |
|---|--|
| 934.2   | 1,658.9  |

**Table 8** Ratio of stresses in postulated accident conditions to those in normal operating conditions

| I.D. | $\sigma^{st} / \sigma^{lt}$ |        |
|------|-----------------------------|--------|
|      | Case 1                      | Case 2 |
| 1    | 1.15                        | 1.03   |
| 2    | 1.25                        | 1.03   |
| 3    | 1.34                        | 1.03   |
| 4    | 1.40                        | 1.03   |

### 3.2 평가 결과

전술한 EPRI의 방법론에 따라 볼트의 공칭 직경이 3 inch인 증기발생기 수직 지지대 앵커 볼트에 대해  $K_{IC}$ 와  $K_{ISCC}$ 를 결정하였으며 그 값은 각각 58 ksi·in<sup>1/2</sup> 및 103 ksi·in<sup>1/2</sup> 이다. 또한 기준균열계수  $C_k$ 는 2.336 inch<sup>-1/2</sup> 이었다.<sup>(6)</sup>

$C_k$ 와 결정된 임계파괴인성값을 식 (5)와 식 (6)에 대입하여 구한 응력부식균열 및 파괴에 대한 허용응력값을 Table 7에 나타내었다. Table 8은 EPRI에서 제시한 절차에 따라 본 연구에서 고려된 정상운전조건 및 가상사고조건하의 응력비를 정리하여 나타낸 것으로 Case 1은 1.1보다 크게 평가되어 응력부식균열 및 파괴에 의한 균열 건전성을 모두 평가하고 Case 2는 1.1 이하로 평가되어 응력부식균열에 의한 균열 건전성만 평가하면 되는 것으로 나타났다.

이에 따라 Table 6과 Table 7의 허용 기준과 Table 5의 응력해석 결과를 이용하여 구한 응력부식균열 및 파괴에 대한 안전여유도를 Table 9에 정리하여 나타내었으며 Table 7의 응력부식균열에 대한 허용응력( $\sigma_a^{SCC}$ )과 파괴에 대한 허용응력( $\sigma_a^F$ )을 Table 5에서 구한 정상운전조건 및 가상사고조건에서의 볼트 공칭응력으로 나누어 안전여유도를 결정하였다.

**Table 9** Values of safety factor for anchor bolt

| I.D. | Normal operating condition, $\sigma^{lt}$                      |        | Postulated accident condition, $\sigma^{st}$                    |        |
|------|--|--------|---|--------|
|      | Safety factors based on SCC ( $\sigma_a^{SCC} / \sigma^{lt}$ ) |        | Safety factors based on fracture ( $\sigma_a^F / \sigma^{st}$ ) |        |
|      | Case 1   | Case 2 | Case 1  | Case 2 |
| 1    | 1.66   | 1.66   | 2.56  | -      |
| 2    | 1.71   | 1.67   | 2.43  | -      |
| 3    | 1.66   | 1.67   | 2.19  | -      |
| 4    | 1.65   | 1.66   | 2.09  | -      |

평가 결과 증기발생기 수직 지지대 앵커 볼트는 응력부식균열 및 파괴에 대해 충분한 안전 여유도를 유지하는 것으로 평가되었다.

#### 4. EPRI $C_k$ 값의 타당성 검증

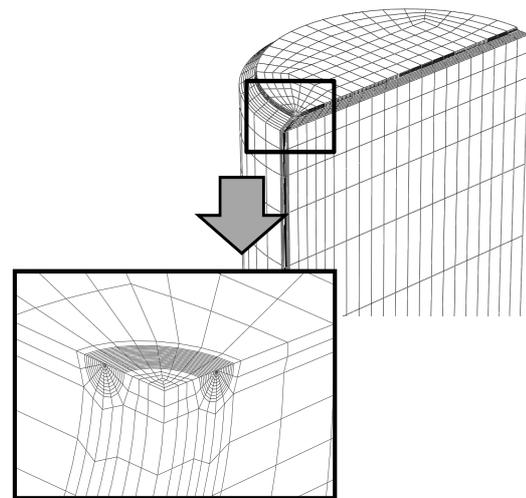
##### 4.1 유한요소해석을 이용한 $C_k$ 값 계산

EPRI에서 제시한 기준균열계수( $C_k$ )의 타당성을 검증하기 위해 실제 나사의 안지름에 EPRI의 기준 표면균열이 존재하는 경우에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 이를 모사하기 위해 Fig. 3과 같은 360° 노치(나사산 노치)가 존재하고 나사의 안지름에 EPRI 방법론과 동일한 균열 깊이 0.01 inch, 형상비 0.5의 기준가상균열<sup>(4)</sup>이 존재한다고 가정하였다. 해석을 위해 4-UN/4-UR 나사에서 공칭직경이 3, 4, 5 inch인 세 가지 경우를 고려하였으며 이 때 나사부의 노치 반경은 0.036 inch이다. 단위 응력에 대한 EPRI 기준균열계수를 구하기 위해 Fig. 3에서 나타낸 바와 같은 나사 순단면에 단위 응력이 작용한다고 가정하였다.

탄성 유한요소해석을 위해서 범용 해석 프로그램인 ABAQUS<sup>(7)</sup>를 사용하였으며 해석에 사용된 대표적인 유한요소해석 모델을 Fig. 4에 나타내었다. 해석 대상의 대칭성을 고려하여 전체의 1/4만을 모델링 하였고 해석에 사용된 요소는 20절점 등계수 사각감차적분요소(20 nodes isoparametric brick reduced integration element, C3D20R in ABAQUS element library)로 전체 360°에 대해 노치를 모사하였고 노치 단면에 EPRI 기준 표면균열을 모델링을 하였다. EPRI 방법론의  $C_k$  값을 구하기 위해 먼저 Fig. 3의 순단면(net stress area)에 단위 응력을 작용시켜 유한요소 응력확대계수를 구하였다. 유한요소 탄성  $J$ -적분값

**Table 10** Comparison of the present FE  $C_k$  with EPRI  $C_k$ 

| Bolt nominal size (inch) | Reference Flaw Factor ( $C_k$ ), $\text{in}^{-1/2}$ |       |
|--------------------------|---|-------|
|                          | Present FE  | EPRI  |
| 3                        | 2.426   | 2.336 |
| 4                        | 2.420   | 2.224 |
| 5                        | 2.460   | 2.162 |

**Fig. 4** Typical FE meshes for thread with 360° notch and thumbnail reference crack

( $J_e^{FE}$ )을 이용하여 응력확대계수값은 다음과 같이 결정된다.

$$K = \sqrt{EJ_e^{FE}} \quad (7)$$

여기서,  $K$ 는 응력확대계수이며,  $E$ 는 탄성계수이다.

또한 3차원 표면균열의 경우에는 균열선단을 따라  $K$ 값이 변하게 되는데 본 연구에서는 단일  $K$ 값을 얻기 위해 EPRI 방법론과 동일하게 표면점(surface point)과 최심점(deepest point)에서의  $K$ 값을 이용하여 root square 평균값으로 단일  $K$ 값을 결정하였다.<sup>(6)</sup> 그리고 식 (3)~(6)에서 설명한 바와 같이 이와 같이 단위 응력을 작용시켜 구한  $K$ 값에 역수를 취해  $C_k$ 값을 정의하였다.

##### 4.2 유한요소 $C_k$ 값과 EPRI $C_k$ 값의 비교

EPRI 방법론의 기준균열계수의 정확성을 평가하고자 유한요소해석을 통해 구한  $C_k$  값을 EPRI 방법론에 의한  $C_k$  값과 비교하여 Table 10에 나타내었다. Table 10에 나타낸 바와 같이 EPRI  $C_k$

값이 유한요소 결과에 비해 최대 10% 이내에서 보수적이었다. 즉 이와 같은 결과는 식 (5)와 식 (6)에 입각한 EPRI 방법론으로 임계응력을 구할 경우, EPRI  $C_k$ 로 구한 허용응력(응력부식균열과 취성 파괴)값이 유한요소 해석 결과로 구한 값보다 작음(보수적)을 의미한다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 3차원 유한요소해석을 수행하여 원자력발전소 증기발생기의 수직 지지대를 고정하기 위해 사용되는 고강도 앵커 볼트의 응력부식균열 및 취성 파괴 건전성을 평가하였다. 앵커 볼트에는 정상운전 및 가상사고조건에 따른 기기하중 외에 볼트 체결에 의한 예비하중도 작용하는데 복잡한 구조물 간의 상호 변형으로 인해 예비하중의 영향을 해석적으로 평가하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 상세 유한요소 응력해석을 수행하여 볼트 단면에 발생하는 공칭 응력을 결정하였으며 EPRI에서 제시한 건전성 평가 절차에 따라 응력부식균열 및 파괴에 대한 안전 여유도를 평가하였다. 본 논문에서 얻은 주요 결론은 다음과 같다.

(1) 고려된 모든 운전조건에서 증기발생기 수직 지지대 앵커 볼트는 응력부식균열 및 파괴에 대해 충분한 안전 여유도를 확보하는 것으로 나타났다.

(2) 앵커 볼트의 건전성 평가를 위해 EPRI에서

제시한 기준균열계수의 타당성을 상세 유한요소해석 결과를 바탕으로 검증하였으며 유한요소해석으로 구한  $C_k$ 값이 EPRI  $C_k$ 값 보다 10% 정도 큰 것으로 나타났다.

(3) EPRI 기준균열계수를 이용하여 구한 허용응력값이 유한요소해석으로 구한 허용응력값에 비해 작기에 EPRI 절차에 의해 수직 지지대 앵커 볼트의 균열 건전성을 평가하면 보수적인 결과를 얻을 수 있다.

## 참고문헌

- (1) USNRC, 1982, "Bolting Degradation or Failure in Nuclear Power Plants," GSI-29.
- (2) EPRI, 1995, "Bolted Joint Maintenance and Applications Guide," TR-104213.
- (3) USNRC, 1990, "Resolution of Genetic Safety Issue 29-Bolting Degradation or Failure in Nuclear Power Plants," NUREG-1339.
- (4) EPRI, 1988, "Degradation and Failure of Bolting in Nuclear Power Plants," EPRI NP-5769.
- (5) "ANSYS Workbench User's Manual," ANSYS Version 13.0, Mechanical APDL.
- (6) EPRI, 1984, "Requirements and Guidelines for Evaluating Component Support Material under Unresolved Safety Issue A-12," EPRI NP-3528.
- (7) "ABAQUS/Standard User's Manual," ABAQUS Version 6.10-1, Dassault Systemes Corp.