

2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

일체형원자로 증기발생기 전열관 건전성 평가

Integrity Evaluation for Steam Generator Tube of System Integrated Modular Advanced Reactor

김종성, 진태은
한국전력기술(주)
경기 용인시 구성읍 마북리 360-9

정명조, 최영환, 조종철
한국원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19번지 305-338

요 약

외압이 지배적으로 작용하고 헬리컬 형태인 일체형원자로 증기발생기 전열관에 대해 상용 유한요소 패키지인 ABAQUS와 미국 석유화학 산업 적용 코드인 API 579 Appendix B를 이용하여 구조적 건전성을 평가하였다. 우선, 국부적으로 과열되어진다는 가정 하에서 균열 거동을 ABAQUS를 이용하여 평가하였다. 또한, 감육이 존재하는 전열관의 좌굴 거동을 API 579 Appendix B를 이용하여 평가하였다. 평가 결과, 외압이 작용시 균열 닫힘 현상을 보이며 40% 감육이 발생하여도 좌굴이 일어나지 않음을 확인하였다.

Abstract

In this study, the structural integrity for SG tube of system integrated modular advanced reactor, which is subjected to dominant external pressure as well as helical type, is evaluated using the commercial finite element package ABAQUS and the American petrochemical industry code API 579 Appendix B. First of all, the crack behavior under the assumption of local heating is assessed using ABAQUS. And, the buckling behavior of tube with 40% wall thinning is assessed using API 579 Appendix B. As a result, it is found that the crack closure phenomenon occurs under external pressure and the buckling doesn't occur even if 40% wall thinning exists in tube.

1. 서 론

해수담수화, 대형 화물선, 잠수정, 산업 공정 열생산 등의 분야에 활용될 수 있는 중 소형 원자로에 대한 선진국간 개발경쟁이 치열해지고 있는 대내외적 동향을 반영하여 우리나라에서도 중소형 규모의 다목적용 원자로 개발에 관심을 가지고 한국원자력연구소 주관하에 330MWt 규모의 일체형원자로 설계 개발을 목표로 연구를 수행하여 왔다. 개념 설계 및 2단계 기본설계가 완료되었으며 현재 3단계에서는 일체형원자로 기술을 검증하여 실용화하기 위한 65MWt의 검증용 일체형원자로의 개발 및 건설이 추진되는 중이다^{1~4)}.

검증용 일체형원자로 설계기술 개발과 병행하여 원자력 안전 규제연구 분야에서는 검증용 일체형원자로의 안전성 측면의 기술지원과 설계개발 단계에서 안전성에 중요한 현안들을 도출하고 그 기술적 해결 방안을 강구하기 위해 한국원자력안전기술원의 주도하에 연구를 수행하는 중이다.

본 연구는 이러한 규제연구 분야 중 검증용 일체형원자로 기계 기기에 대한 구조건전성 규제기술 개발과 관련된 것으로서, 1차/2차 압력경계로서 구조적 건전성을 상실하는 경우 큰 피해를 야기시킬 수 있는 일체형원자로 증기발생기(SG) 전열관을 대상으로 하여 수행하였다. 국내 상용 원전 증기발생기 전열관과는 달리 외압이 지배적으로 작용하고 헬리컬 형태이므로 기존 관련 연구들과는 다른 결과를 도출할 것으로 예상되나 이에 대한 연구가 매우 미흡한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 국내 상용 원전 경우와는 달리 증기발생기 구조/설치가 복잡하고 전열관이 헬리컬 형태이기 때문에 ECT 검사 적용이 어려운 전열관의 구조적 건전성을 균열 및 감육이 존재하다는 가정 하에 상용 유한요소 패키지인 ABAQUS⁵⁾와 미국 석유화학 산업 적용 코드인 API 579 Appendix B⁶⁾을 사용하여 평가하였다.

2. 본 론

2.1 균열 거동 평가

2.1.1 해석모델

전열관 다발 내에서 가장 내측에 존재하는 내경 7mm, 두께 1.5mm, 곡률반경 57mm, 나선각 7.32°인 헬리컬 형태의 전열관을 해석대상으로 하였다. 전열관 재질은 그림 1에서 제시하는 바와 같이 부식생성물 TiO₂가 부착되는 Weight Gain 특성²⁾을 갖는 PT-7M이다. 이러한 PT-7M의 탄성계수, 프와송 비와 열팽창계수는 각각 92.2GPa, 0.3, 8.82x10⁻⁶ 1/°C으로 결정하였다.

그림 2에서 보이는 바와 같이 유한요소 모델링 상용 프로그램인 PATRAN⁷⁾을 이용하여 요소특성이 3차원 20node brick 요소인 유한요소 모델을 개발하였고 축방향 균열과 원주방향 균열, 두가지 종류에 대해 균열 거동 평가를 수행하였다.

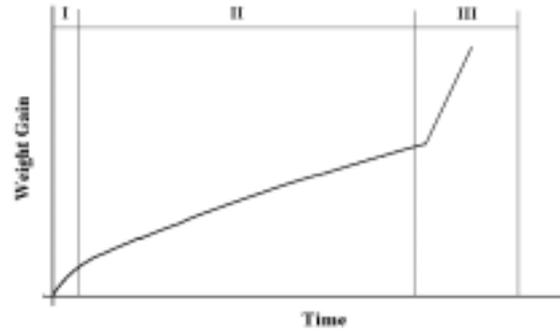


그림 1. PT-7M의 부식 특성

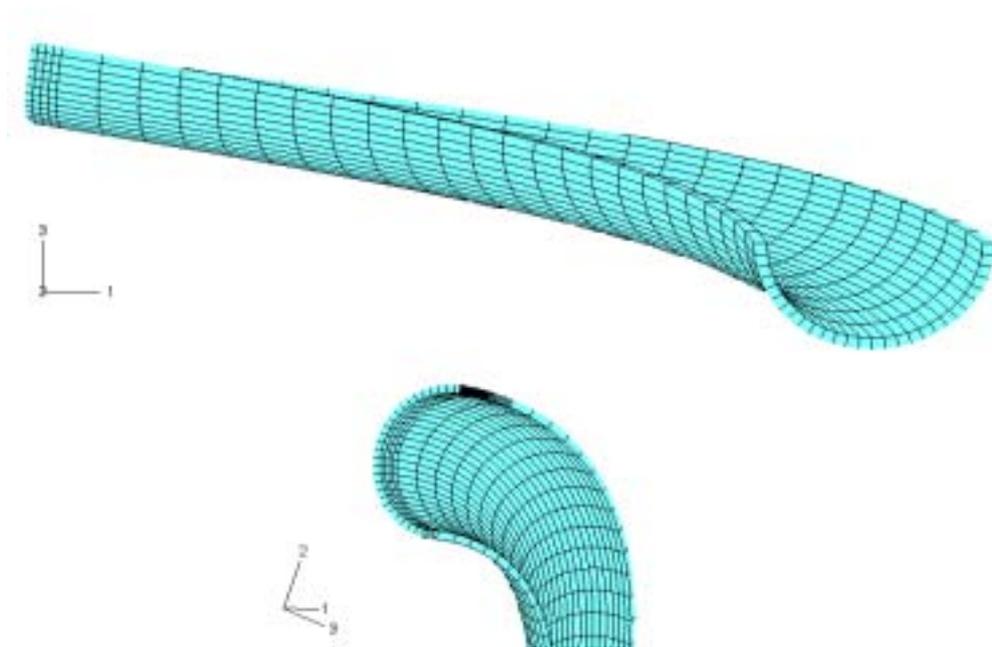
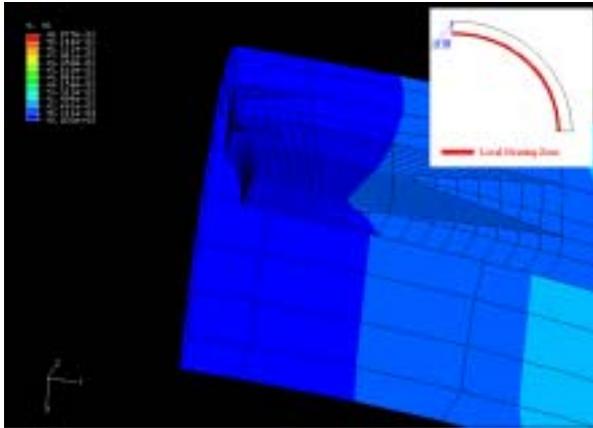


그림 2. 축방향 균열을 가진 검증용 일체형원자로 SG 전열관의 유한요소 모델

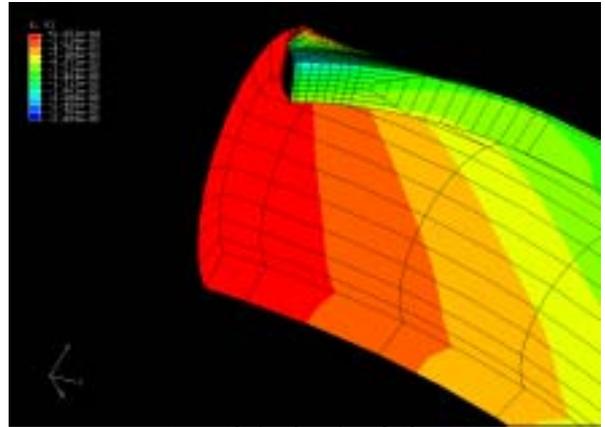
2.1.2 해석

다음 아래와 같은 가정에 근거하여 경계조건을 설정한 후 ABAQUS를 이용하여 선형 탄성해석을 수행하였다.

- 1차측은 무봉산 온전이며 1차측 수질관리가 보다 양호하다는 측면에서 1차측 온도가 높더라도 2차측에 TiO_2 가 보다 많이 부착한다고 가정
- TiO_2 열전도도가 모재에 비하여 매우 낮으므로 그림 3과 4에서 적색으로 표시한 바와 같이 국부 과열(과열도 40°C)이 곡률 내측 일부부분에 발생한다고 가정
- 설계 내외측 압력의 차이인 11.15MPa 가 외측에서 작용한다고 가정

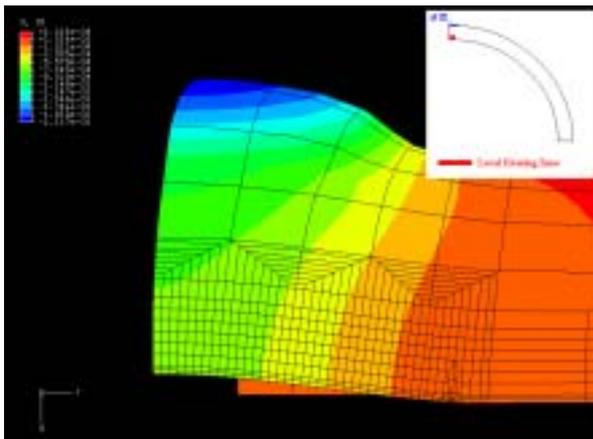


(a) 열응력만 고려(곡률 내측 과열)

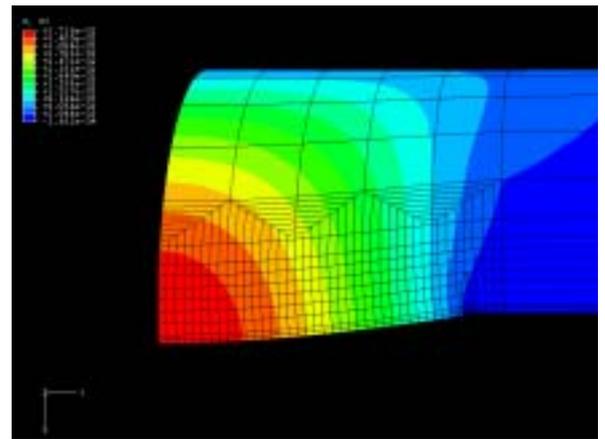


(b) 열응력 및 외압

그림 3. 전열관 곡률 외측에 존재하는 원주방향 균열의 거동



(a) 열응력만 고려(곡률 내측 일부 과열)



(b) 열응력 및 외압

그림 4. 전열관 곡률 외측에 존재하는 축방향 균열의 거동

2.1.3 고찰

그림 3은 전열관 곡률 외측에 원주방향 균열이 존재할 때 열응력만 고려한 경우와 열응력/외압 모두 고려한 경우에 대한 균열 거동을 나타내고 있다. 또한, 그림 4는 전열관 곡률 외측에 축방향 균열이 존재할 때 열응력만 고려한 경우와 열응력/외압 모두 고려한 경우에 대한 균열 거동을 나타내고 있다.

그림 3과 4로부터 국부 과열에 의한 열응력만 고려시 균열이 열리나, 국부 과열과 외압을 동시에 작용시 균열 닫힘 거동이 발생함을 알 수 있다. 즉, 균열이 존재하고 국부 과열이 발생하여도 외압이 작용한다면 누설은 발생하지 않는다.

2.2 좌굴 거동 평가

2.2.1 해석모델

헬리컬 형태의 전열관에 외압이 작용할 때 곡률 원점을 향해 압축되어지므로 과다 변형시 좌굴되어질 수 있으며 감육이 발생한다면 좌굴 변형은 보다 가속되어질 수 있다. 따라서 전열관 내면에 평행하게 40% 감육된 전열관의 좌굴 거동을 평가하고자 한다.

2.2.2 해석

다음 아래와 같은 가정에 근거하여 경계조건을 설정한 후 미국 석유화학 산업 적용 코드인 API 579 Appendix B를 이용하여 외압과 압축하중이 작용하는 40% 감육 전열관에 대한 좌굴 거동을 평가하였다.

- 두가지 하중 상태로 가정
 - 외압과 압축 축하중에 의한 좌굴
 - 외압과 압축 모멘트 하중에 의한 좌굴
- 헬리컬 형태와 같은 곡관에 대해서는 좌굴 평가식이 미 존재하므로 직관으로 가정

우선적으로 식(1)과 같은 이론식을 이용하여 외압에 의한 원주방향 압축 막응력 f_h 를 61.94MPa로 결정하였다.

$$f_h = \frac{pD_o}{2t_c} \quad (1)$$

여기서 p 는 내외압 차이, D_o 는 외경(10mm), t_c 는 감육된 두께(0.9mm)이다.

그림 5에서 나타낸 것과 같이 ABAQUS를 이용하여 외압이 작용하는 경우에 대한 유한요소 해석을 수행하여 축방향 압축 막응력 f_a , f_b 와 전단 압축 막응력 f_v 를 각각 26.46 MPa과 0.00123MPa로 결정하였다. 예상했던 것과 같이 그림 5 상의 변위 분포로부터 곡률 원점을 향해 압축되어짐을 알 수 있다.

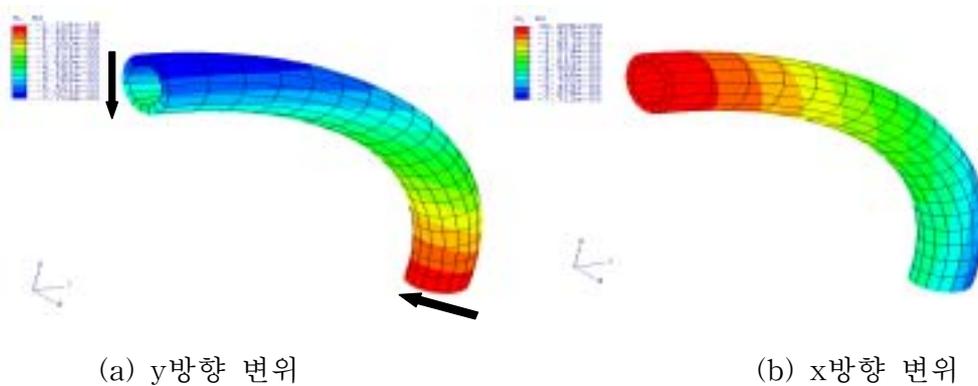


그림 5. 균열없는 전열관에 대한 변위 분포

외압과 압축 축하중이 작용하는 경우에 대한 API 579 Appendix B 상의 좌굴 평가 Criteria는 식(2)와 같다. 식(2)의 부등호를 만족시 좌굴이 발생하지 않음을 의미한다.

$$f_a \leq K_s F_{xha}, \quad \left(\frac{f_a}{K_s F_{xha}} > 0.2 \right) \quad (2)$$

$$K_s = 1 - \left(\frac{f_v}{F_{va}} \right)^2$$

$$F_{va} = 0.6 \frac{\sigma_{ys}}{FS}, \quad \left(\frac{F_{ve}}{\sigma_{ys}} \geq 1.7 \right)$$

$$F_{ve} = \frac{1.1936 E_y}{M_x^{0.5}} \frac{t_c}{D_o}, \quad \left(26 \leq M_x = \frac{L}{\sqrt{0.5 D_o t_c}} < 4.347 \frac{D_o}{t_c}, \frac{D_o}{t_c} \leq 500 \right)$$

$$F_{xha} = \min [F_{ahl}, F_{xa} 1 - 0.74(\lambda_c - 0.15)^{0.3}], \quad \left(0.15 < \lambda_c = \frac{KL_u}{\pi r_g} \left(\frac{F_{xa} FS}{E_y} \right)^{0.5} \leq 1.147 \right)$$

$$F_{ahl} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{F_{xa}^2} - \frac{C_1}{C_2 F_{xa} F_{ha}} + \frac{1}{C_2^2 F_{ha}^2}}}, \quad \left(0.15 < \lambda_c \leq 1.147 \right)$$

$$F_{xa} = \min \left[\frac{\sigma_{ys}}{FS}, \frac{F_{xe}}{FS} \right], \quad \left(\frac{D_o}{t_c} \leq 135 \right)$$

$$F_{ha} = \frac{\sigma_{ys}}{FS}, \quad \left(\frac{F_{he}}{\sigma_{ys}} = \frac{1.6 C_h E_y t_c}{D_o \sigma_{ys}} \geq 2.439 \right)$$

$$F_{xe} = \frac{C_x E_y t_c}{D_o}$$

여기서 σ_{ys} 는 항복강도, FS 는 가동중 안전계수로서 보수적인 관점에서 2로 설정, E_y 는 탄성계수, D_i 는 전열관 내직경, L 은 지지대가 단일 피치에서 6개 위치한다고 가정하였을 때의 지지대 사이의 간격, K 는 양끝단의 구속조건에 따라 결정되는 계수로서 양끝단이 pinned되어졌다고 가정하여 1로 설정

식(2)에 각 변수들을 대입하여 평가시 좌변은 26.46MPa이고 우변은 45.46MPa으로 식(2)의 부등호를 만족함을 알 수 있다.

외압과 압축 모멘트 하중이 작용하는 경우에 대한 API 579 Appendix B 상의 좌굴 평가 Criteria는 식(3)과 같다. 식(3)의 부등호를 만족시 좌굴이 발생하지 않음을 의미한다.

$$f_b \leq K_s F_{bha} / \Delta, \quad \left(\frac{f_a}{K_s F_{xha}} < 0.2 \right) \quad (3)$$

$$\Delta = \frac{C_m}{1 - \frac{f_a FS}{F_e}}$$

$$F_e = \frac{\pi^2 E_y}{\left(\frac{KL_u}{r_g}\right)^2}$$

$$F_{bha} = C_3 C_4 F_{ba}$$

$$F_{ba} = \frac{(1.4 - 2.9\gamma)\sigma_{ys}}{FS}, \quad \left(\frac{D_o}{t_c} < 100, \gamma = \frac{\sigma_{ys} D_o}{E_y t_c} < 0.11\right)$$

여기서 C_m 은 지지대 특성에 결정되는 계수로서 지지대 사이에 횡방향 하중이 작용하고 병진운동이 구속되며 양끝단에서 굽힘평면의 회전이 구속되어있지 않다고 보수적으로 가정한 경우 1임.

식(3)에 각 변수들을 대입하여 평가시 좌변은 26.46MPa이고 우변은 39.51MPa으로 식(3)의 부등호를 만족함을 알 수 있다.

2.2.3 고찰

식(2)와 (3)의 부등호가 모두 만족하므로 40% 감육에 대해서는 좌굴이 발생하지 않음을 알 수 있다. 그러나 헬리컬 형태의 전열관을 직관으로 가정하여 좌굴 평가를 수행하였기 때문에 향후 기하학적 형상이 충분히 반영된 상세 유한요소 좌굴 평가가 필요할 것으로 판단되어진다.

3. 결론

검증용 일체형원자로 증기발생기 전열관에 대한 건전성 평가 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 균열이 존재하고 국부 과열 발생시에도 누설은 발생하지 않음.
- 40% 감육이 존재하는 경우에도 좌굴은 발생하지 않는 것으로 평가되었으나 향후 기하학적 형상이 충분히 반영된 상세 유한요소 좌굴 평가가 필요함.
- 또한, 과도상태에서의 열응력, 전열관 용접부의 잔류응력, 유체유발진동에 의한 응력 등을 고려한 상세 건전성 평가가 향후 필요하다고 판단됨.

참고문헌

- 1) 한국원자력연구소, 신형원자로 기술개발, 일체형 원자로 기기개발 및 검증시험, KAERI/RR-1889/98, 1999.
- 2) 한국원자력연구소, 일체형원자로 설계기술개발, 일체형원자로 주기기 설계기술 개발, KAERI/RR-2200/2001, 2002.

- 3) 한국원자력연구소, 신형원자로 기술개발, 일 체형원자로 기계설계기술개발, KAERI/RR-1888/98, 1999.
- 4) 한국원자력연구소, 일체형원자로 설계기술개발, 일체형원자로 기계설계기술개발, KAERI/RR-2209/2001, 2002.
- 5) HKS, ABAQUS User's Manuals, Ver.6.2, 2002.
- 6) API, Fitness-for-Service, API 579, Appendix B, 2003.
- 7) MSC, PATRAN User's Manuals, Ver.2000, 2000.