

## SMART 증기발생기 치수결정에서 ASME와 러시아 기술기준의 비교 연구

### A Comparative Study for SMART Steam Generator Sizing Based on ASME and Russian Standard

김용완, 김종인, 장문희

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

#### 요 약

일체형원자로 SMART에 내장되는 관류식 나선형증기발생기를 설계함에 있어서 ASME와 러시아 기술기준을 적용하여 치수를 결정하는데 핵심적인 사항을 비교분석하였다. 증기발생기 전열관의 치수결정을 위해 사용되는 수식과 방법 및 재료에 대해 ASME에서 사용되는 응력강도와 러시아 기술기준에서 사용되는 허용응력강도개념과 비교하고 그 값의 크기가 증기발생기 치수결정에 미치는 영향을 분석하였다. SMART의 증기발생기 전열관은 외압을 받는다. 러시아 기술기준을 따르면 정적강도수식과 좌굴강도수식을 독립적으로 적용하는데 비해 ASME기준에서는 Section II에 주어진 재료성질과 밀접하게 관련된 수식과 절차로 평가한다. 수압시험의 경우 압력을 결정하는 기준식이 다르며 일반적으로 설계온도의 허용응력강도를 고려한 러시아의 기술기준을 따르면 시험수압이 높게된다. 수압시험온도와 설계온도에서의 허용응력강도값의 차이가 클수록 ASME기준으로 계산한 값과 차이가 커진다.

#### Abstract

A systematic comparison of ASME and Russian standard with respect to the design of SMART steam generator has been carried out. Classification of allowable stress in the Russian standard is quite different from that of ASME. Allowable stress of Russian standard and stress intensity defined in ASME were compared for various steam generator tube material as a function of design temperature. Equations and methodology of determining the thickness for the important parts of steam generator have been analyzed. For the tube subjected to internal and/or external pressure, Russian standard use the same equation in the sizing of tube with different allowable stress. However, ASME use different equations with the same value of allowable stress intensity. The hydraulic test pressure of ASME was also compared with that of Russian standard. In general, hydraulic test pressure determined by Russian standard is higher since it considers difference between allowable stress of test temperature and that of design temperature.

## 1. 서론

한국원자력연구소에서 개발중인 SMART는 증기발생기를 원자로 안에 내장하는 일체형원자로이다. ASME나 KEPIC의 경우 분리형인 대형 발전로의 U-튜브 전열관을 기준으로 기술되어 있으므로 SMART의 관류식 나선형증기발생기의 설계에 직접 적용하는 것이 어렵다[1]. 반면에 러시아의 경우 일체형원자로의 운전 경험도 보유하고 있고 관류식 나선형증기발생기도 제작되어 운전된 경험이 있다. 따라서 SMART의 증기발생기의 초기 치수 결정에 ASME의 기술기준과 러시아의 기술기준을 적용하여 비교평가함으로써 SMART의 다른 기기에서도 동일한 문제점을 극복할 수 있다.

SMART의 관류식 나선형 증기발생기는 개념설계가 수행되었으며[2,3] 이 과정에서 제작성 검토 및 핵심적인 현안사항들이 평가되었다. 제작성 평가에서는 나선형 전열관을 코일링 할 때에 발생하는 스프링백이 문제가 되었으며 이를 해결하기 위한 방안이 다각적으로 평가되었다[4]. 또한, 증기발생기에서 가장 중요한 문제인 유동유발진동에 대해 몇 가지 가정을 한 후 평균유속 개념을 바탕으로 일차적인 평가를 수행하였다[5,6]. 또한, 안팎의 온도차가 가장 큰 모듈급수관에 대해 예비적으로 응력을 평가하여 개념의 성립성을 검토하였다[7].

본 연구에서는 국내에서 익숙하지 않는 러시아의 기술기준을 ASME와 비교하면서 핵심적인 내용을 분석하고 증기발생기 설계에서 사용된 수치적 데이터로 비교하였다. SMART의 증기발생기는 러시아 기술기준에 준하는 PT-7M과 PT-3V 티타늄합금으로 설계되었다[8,9]. 전열관 재료의 선정은 설계조건과 밀접한 연관을 갖는다. 몇 가지의 전열관 후보 재료를 러시아의 기술기준[10]과 ASME[11]에 준해 허용강도를 상호 비교분석했다. 이어서 러시아 및 ASME의 기술기준에 준해 치수를 결정하는 과정을 비교하였다. SMART의 경우 외압을 받는 전열관이므로 ASME의 대형발전로의 증기발생기 설계에서 사용되는 수식이 적용될 수 없다. 치수결정에 이어 세부적인 응력해석은 부품별로 세부적인 해석을 수행하여 비교평가할 예정이다. 끝으로 수압시험압력을 결정하는 과정에 대해서 러시아의 기술기준과 ASME의 기술기준을 비교분석하였다.

## 2. 허용응력

SMART의 증기발생기는 기기 자체를 1등급으로 분류하고 있으며 Fig. 1에서 명시된 부품 중에서 일차냉각재 압력경계가 되는 급수헤더노즐, 모듈급수관, 모듈급수헤더, 전열관, 모듈증기헤더, 모듈증기관, 증기헤더노즐이 1등급으로 분류되므로 ASME Section III NB 혹은 KEPIC MNB[12]에 준해 설계된다. 이 중에서 전열관, 모듈급수관, 모듈증기관은 관 형상이므로 수식적으로 치수의 결정이 가능하다. 한편 모듈급수헤더 및 모듈증기헤더는 형상이 복잡하여 별도의 유한요소해석을 활용하여 응력해석이 수행된다[13]. ASME의 규정에 따르면 강도계산은 응력성분에 따라 응력강도와 비교되기도 하고 응력강도의 1.5배 혹은 3배와 비교된다. 그러나 치수를 결정할 때는 주로 일차막응력에 해당되는 값을 사용하여 응력강도와 비교된다.

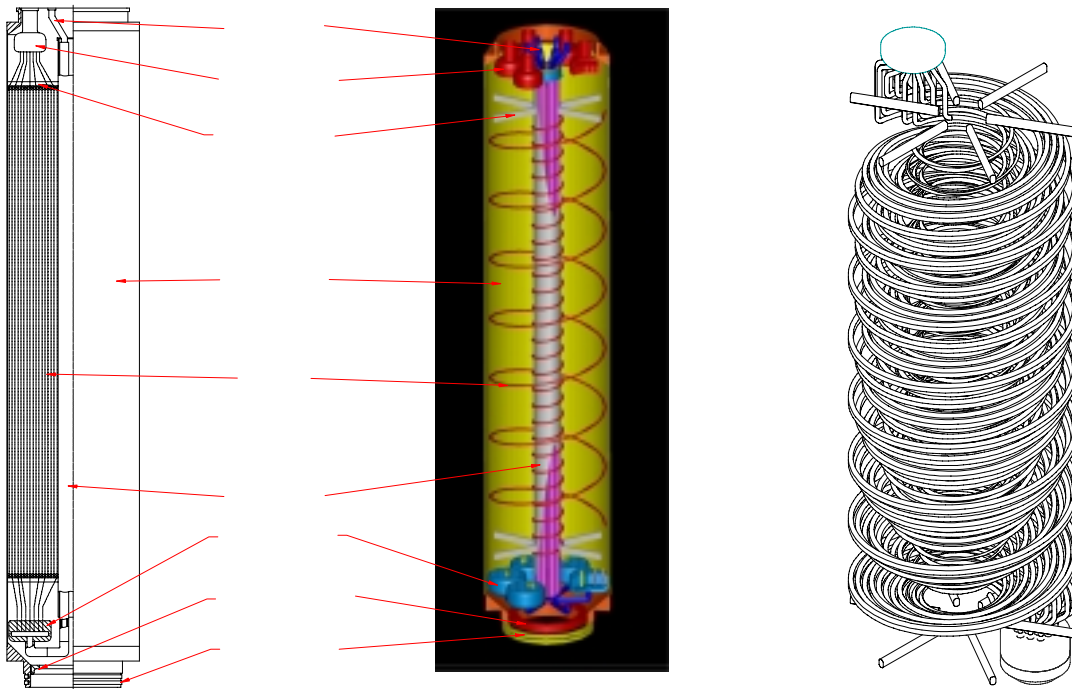


Fig. 1 증기발생기 개념 및 전열관의 형상

## 2.1 ASME의 허용강도

ASME에서는 기기등급에 따라 강도평가에 사용되는 허용응력 값이 다르다. 1등급으로 분류된 증기발생기는  $S_m$ 으로 표기되는 설계응력강도값(Design Stress Intensity Values)을 사용한다. 설계응력강도 값에 대한 정의는 ASME Section II Part D, Subpart 1의 표 2A 및 표 2B에 기술되어있다. 상온에서 최소인장강도의 1/3, 설계온도에서 인장강도의 1/3, 상온에서 최소항복강도의 2/3, 설계온도에서 항복강도의 2/3 이상의 값들을 비교하여 가장 작은 값을 채택하도록 되어 있다. 여기서 오스테나이트계 강과 비철금속은 설계온도에서 항복강도의 90%(단 최소항복강도의 2/3이하)이를 수식적으로 표현하면 다음과 같다.

$$S_m = \min \left\{ \frac{\sigma_{y0.2}^{20}}{1.5}; \frac{0.9\sigma_T^T}{1}; \frac{\sigma_T^{20}}{3}; \frac{1.1\sigma_T^T}{3} \right\} \quad (1)$$

여기서 아래첨자 y는 항복응력(yield stress)을 의미하며 T는 인장강도(Tensile Strength)를 의미한다. 그리고 윗첨자는 온도를 나타내는 것으로 20은 상온을 의미하며 T는 설계온도를 의미한다.

SMART의 증기발생기는 설계온도가 350℃이므로 상기의 기준에 준해 몇 가지 전열관 재료에 대한  $S_m$  값을 비교하면 Fig. 2와 같다. 이 중에서 서방세계의 재료는 ASME Section II로부터 구한 값이며 PT-7M은 항복응력과 인장강도 값을 사용하여 ASME의 허용응력강도를 구하는 기준인 수식 (1)을 사용하여 구하였다.

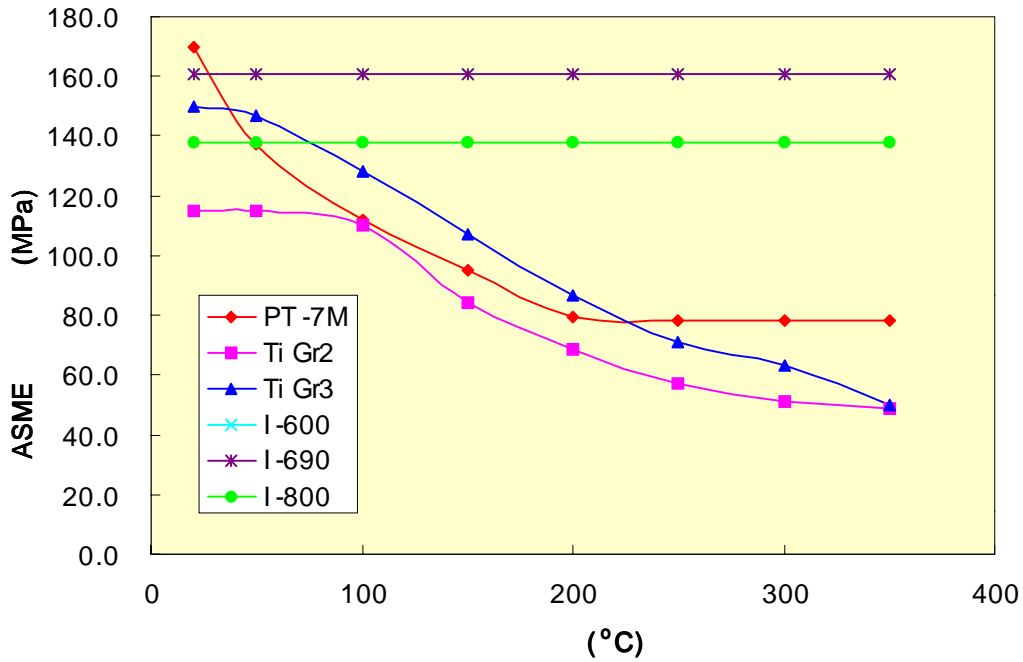


Fig. 2 여러 가지 전열관 재료의 설계응력강도값 비교

## 2.2 러시아 기술기준의 허용강도

러시아의 기술기준에 따르면 설계온도 T에서 허용응력은 다음과 같이 표현된다.

$$[\sigma]^T = \min \left\{ \frac{R_{P0.2}^T}{n_{0.2}}, \frac{R_m^T}{n_m} \right\} \quad (2)$$

여기서 항복응력에 대한 강도여유도, 즉  $n_{0.2}$ 가 내압을 받는 경우와 외압을 받는 경우에 달리 사용하고 있다. 즉 내압을 받는 경우에는 1.5를 사용하지만 외압을 받는 경우에는 2를 사용한다. 그러나 인장강도에 대한 강도여유도,  $n_m$ 은 내압과 외압에 상관없이 동일한 값을 사용한다.

여러 가지 전열관 재료에 대해 허용응력을 도식화하면 Fig. 3과 같다. SMART의 증기발생기가 외압을 받는 형태로 설계되므로 외압에 대한 기준을 적용했을 때의 값이다.

PT-7M과 Inconel 600에 대해 ASME의 기술기준을 적용했을 때의 허용응력과 러시아의 기술기준을 적용했을 때의 허용응력을 Fig. 4에서 비교하였다. Inconel600의 경우에는 러시아기술기준을 적용했을 때 허용응력이 낮았으며 PT-7M 티타늄합금의 경우에는 ASME를 적용했을 때 허용응력이 낮았다. 인코넬의 경우 러시아 기준을 적용하면 허용응력강도가 항복응력에 의해 결정되므로 내압과 외압을 받을 때 허용응력강도차이가 크다. 그러나 PT-7M의 경우 상온을 제외하고는 인장강도에 의해 허용응력강도값이 결정되므로 내압과 외압에 상관없이 동일한 값을 보여준다.

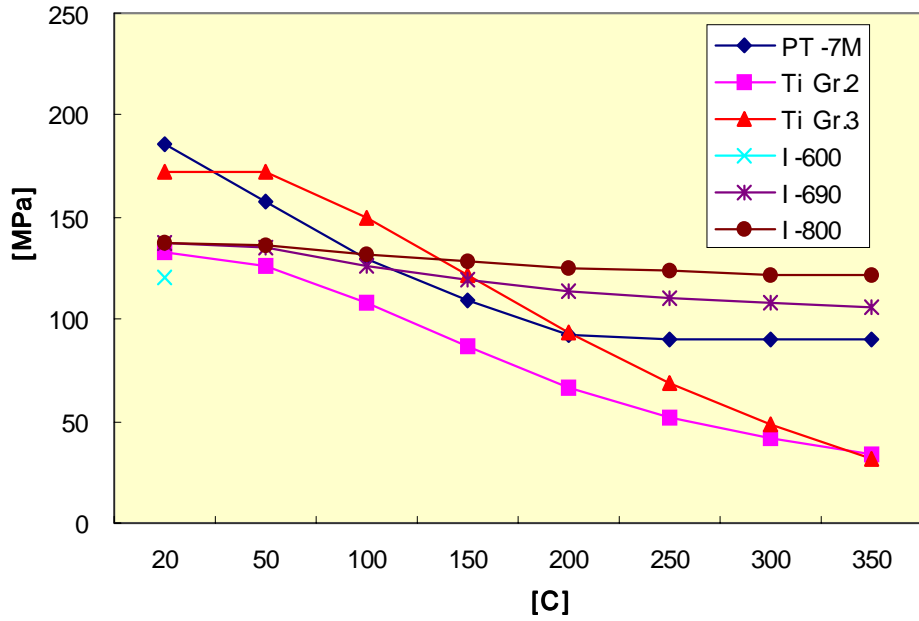


Fig. 3 외압을 받는 전열관에 대한 러시아 기준 허용응력.

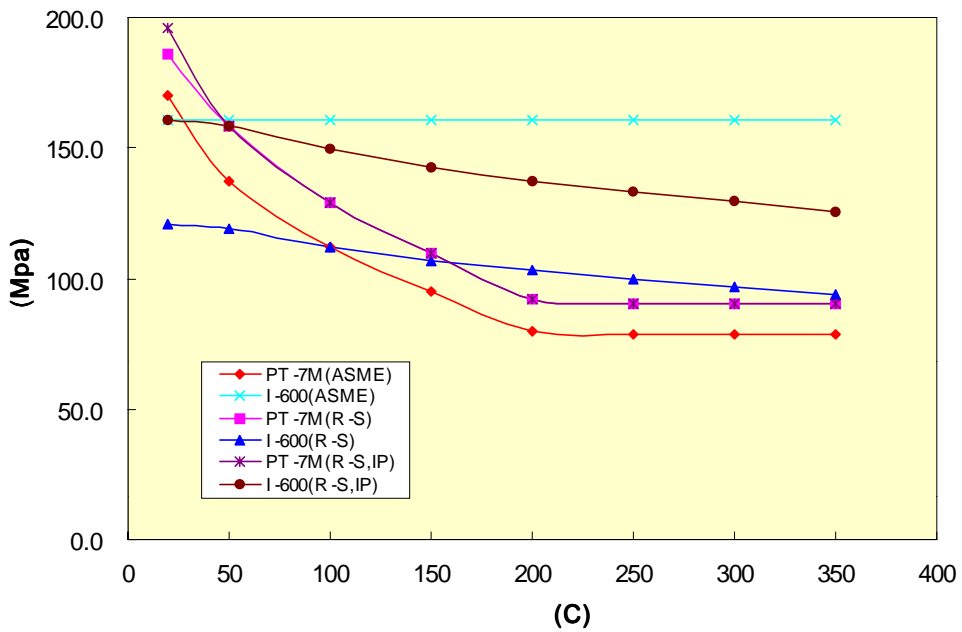


Fig. 4 러시아 허용응력과 ASME 허용응력강도 비교.

### 3. 치수결정

#### 3.1 ASME기준 치수 결정

ASME에서는 압력용기와 배관의 초기 두께 결정을 위한 수식이 별도로 존재한다. 원통형 압력용기동체에 대해서는 다음의 수식을 적용한다.

$$t = \frac{PR}{S_m - 0.5P} \quad \text{혹은} \quad t = \frac{PR_o}{S_m + 0.5P} \quad (3)$$

그리고 구형동체에 대해서는 다음의 수식을 적용한다.

$$t = \frac{PR}{2S_m - P} \quad \text{혹은} \quad t = \frac{PR_o}{2S_m} \quad (4)$$

ASME에서 내압을 받는 관의 두께는 다음 수식에 의해 결정된다.

$$t_m = \frac{PD_o}{2(S_m + Py)} + A \quad \text{혹은} \quad t_m = \frac{Pd + 2A(S_m + Py)}{2(S_m + Py - P)} \quad (5)$$

여기서 사용된 기호는 ASME의 기호와 동일하다. 그러나 외압을 받는 SMART의 전열관은 다음과 같이 별도의 수식에 의해 평가된다.

$$P_{a1} = \left( \frac{2.167}{(D_o/T)} - 0.0833 \right) B \quad (6-a)$$

$$P_{a2} = \frac{2S}{D_o/T} \left( 1 - \frac{1}{D_o/T} \right) \quad (6-b)$$

$P_{a1}$ 과  $P_{a2}$ 를 계산하여 작은 값이 설계압력  $P$ 를 만족해야 한다. 재료가 ASME에 등재된 재료가 아닌 경우에는 수식에서  $B$ 값이 없으므로 평가를 할 수 없다. 따라서 러시아 기술기준으로 제작된 PT-7M의 경우에는 ASME Section II 부록에  $B$ 값이 없으므로 직접 계산할 수 없다.

다음으로 중요한 부재인 튜브시트의 강도를 수식적으로 평가할 때 ASME는 등가중실판 개념을 사용한다. 등분포압력하중이 작용하는 등가중실판의 응력상태는 다음과 같다.

$$\sigma_r = \pm \frac{3}{8} \left( \frac{R^*}{t} \right)^2 (3 + \nu^*) \left[ 1 - \left( \frac{r}{R^*} \right)^2 \right] [\Delta p] \quad (7-a)$$

$$\sigma_\theta = \pm \frac{3}{8} \left( \frac{R^*}{t} \right)^2 \left[ (3 + \nu^*) - (1 + 3\nu^*) \left( \frac{r}{R^*} \right)^2 \right] [\Delta p] \quad (7-b)$$

그리고 튜브구멍에서의 압력을 고려한 응력은 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_r = \sigma_\theta = \frac{h}{P} \frac{(P - h - 2t_i)}{\left[ h + 2 \left( \frac{E_t}{E} \right) t_i \right]} p_i \quad (8)$$

수식 (5)와 (6)에서 계산된 값을 ASME기준에 준해 합산 한 후 다음의 수식을 사용하여 응력강도와 비교함으로써 치수결정에 활용할 수 있다.

$$S = \frac{P}{h} \sqrt{\left( \frac{\Delta p R^*}{t} + \frac{W}{\pi R^*} \right)^2 + (\bar{\sigma}_r)^2} \quad (9-a)$$

$$S = \frac{1}{2} \frac{P}{h} \sqrt{\left( \frac{\Delta p R^*}{t} + \frac{W}{\pi R^*} \right)^2 + (\bar{\sigma}_r)^2} + \bar{\sigma}_r + \frac{2p_i h}{P} \quad (9-b)$$

그 밖에 모듈증기헤더와 모듈급수헤더 등에 대해서는 여러 가지 구속조건을 고려하여 유한요소해석을 수행하였으며 별도의 논문에 기술되었다[13].

### 3.2 러시아기준 치수결정

러시아 기술기준으로 부재의 두께를 결정하는 것은 비교적 간단하다. ASME에서는 구형과 원통형에 대한 수식을 규정하는데 비해 러시아 규정에서는 수식적으로는 다음과 같은 하나의 수식으로 표현되며 그 계수가 형상에 따라 표와 같이 달라지게 된다.

$$s_R = \frac{pDm_3}{m_1\phi[\sigma] - pm_2} \quad (10)$$

여기서  $m$ 값은 표 1 같이 표현된다.

표 1 형상에 따른 계수의 비교

상수	(a) 형상	(b) 형상	(c) 형상	(d) 형상
$m_1$	2	2	4	4
$m_2$	1	$\cos \alpha$	1	1
$m_3$	1	1	$D/(2H)$	1

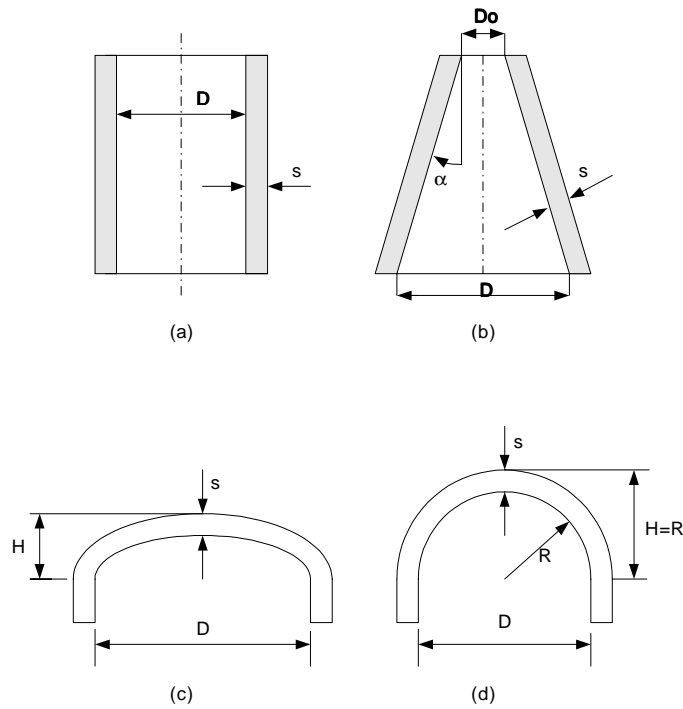


Fig. 5 러시아 기술기준 적용을 위한 기호설명도

그러나 관의 경우는 별도의 수식을 적용한다. 러시아의 기술기준에는 내압을 받는 전열관과 외압을 받는 전열관의 두께계산을 다음과 같이 동일한 수식을 사용하여 결정한다. 그러나 여기에 사용되는 허용 응력강도 값은 앞서 언급되었듯이 다를 수 있다.

$$S_R = \frac{pD_a}{2\phi[\sigma] + p} \quad (11)$$

$$S \geq S_R + c \quad (12)$$

여기서  $D_a$ 는 전열관의 외경으로서 SMART의 경우 12 mm이다.  $c$ 는 벽두께의 여유도로서 부식여유도와 제작과정에서 두께가 감소하는 것을 보상해주는 값을 합한 것이다. 여기서는 최종두께의 12.5%고려한다. 따라서 0.1875mm의 두께를 강도계산에 더해 주어야 한다. ASME에서는 부식 또는 침식, 기계적 마모 또는 다른 환경적 영향으로 그 두께가 얇아지는 재료는 계산된 모재의 두께에 여유도를 더해 주도록 되어있다.

전열관은 외압을 받으므로 단순히 정적 강도계산 뿐만 아니라 좌굴에 대한 평가도 수행하도록 규정되어 있다. 먼저 임계 길이는 다음과 같이 구한다.

$$L_{kr} = 1.2D_m \sqrt{\frac{D_m}{s-c}} \quad (13)$$

임계길이보다 전열관의 길이가 긴 경우에는 임계응력을 다음 수식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\sigma_{kr} = 1.1E^T \left( \frac{s-c}{D_m} \right)^2 \quad (14)$$

임계압력은 다음과 같다.

$$p_{kr} = 2\sigma_{kr} \left( \frac{s-c}{D_m} \right) \quad (15)$$

설계압력과 비교할 허용압력은 다음과 같이 계산된다.

$$[p_a] = 0.5\xi p_{kr} \quad (16)$$

여기서

$$\xi = \min \left\{ 0.7; \frac{\lambda}{1+\lambda} \right\} \quad (17)$$

$$\lambda = \frac{R_{p0.2}^T}{\sigma_{kr}} \quad (18)$$

위의 수식을 대입하여 전열관과 모듈급수관 모듈증기관의 좌굴안정성을 계산하여 표1에 나타내었다.

표 2 SMART증기발생기 관의 좌굴강도 평가결과

		(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)
	L>Lcr	3437	859	21.4	17
	L>Lcr	1308	294	17.5	17
	L>Lcr	1209	262	17.1	17

이상의 수식을 이용하여  $[P_a]$ 를 계산한 후 설계압력과 비교하여 좌굴에 대한 안정성을 평가한 결과 SMART의 전열관은 좌굴강도를 충분히 만족하였다.

다음으로 튜브시트의 두께는 다음과 같은 수식을 사용한다.



$$s_{1R} + c = K_4 \cdot D_R \sqrt{\frac{p}{\varphi[\sigma]}} + c \quad (19)$$

여기서  $\varphi (= \frac{t-d}{t})$  는 여러 개의 원공에 의해 강도가 감소된 것을 고려한 강도계수이며  $K_4$ 는 형상계수이다.

$$K_4 = xK_0 \quad (20)$$

$$x = 0.5 + \sqrt{0.25 - \frac{s_1 \cdot 0.5 \sqrt{p[\sigma]_1}}{s_2(2[\sigma]_2 - p)}} \quad (21)$$

$K_0$ 는 Fig. 6에서 보는 것과 같이 판의 끝 부분 형상에 따라 0.44에서 0.6까지 변하는 형상계수이다.

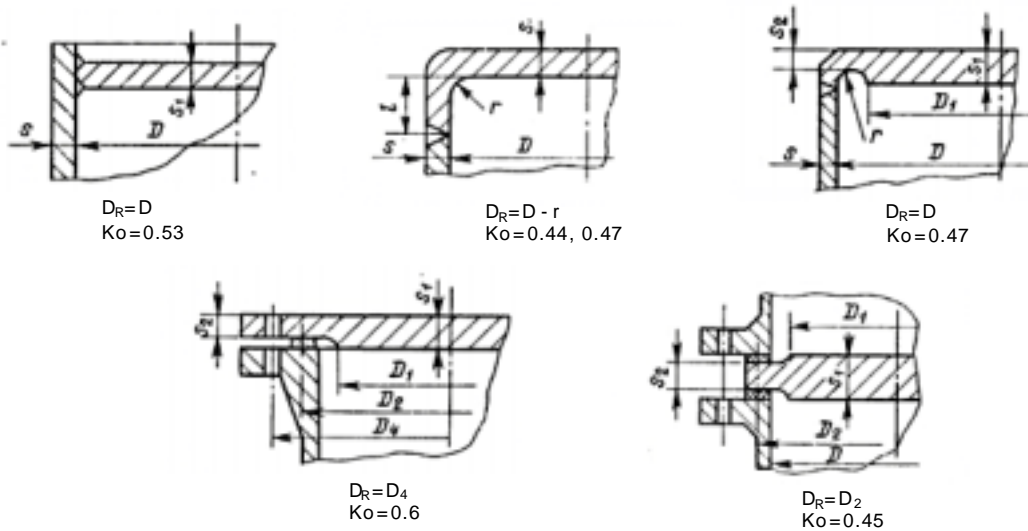


Fig. 6 끝단부위의 형상에 따른 형상계수

$s_1$ 은 튜브시트의 두께를 의미하며  $s_2$ 는 원통의 두께를 의미한다. 이 때  $x$ 는 결합부위의 강성을 고려한 계수인데 루트 안이 음수가 나오면 0.76으로 규정되어 있다. SMART 증기발생기 모듈급수헤더에 부착된 튜브시트의 계산결과는 유한요소해석결과와 함께 참고문헌 [13]에서 수치적으로 비교되었다.

#### 4. 수압시험

대형발전로의 증기발생기는 설계 및 일차측 수압시험동안 전열관이 내압을 받게되며 이차측 수압시험과 이차측누설시험동안 외압을 받게된다. 그러나 SMART의 증기발생기는 설계 및 일차측 수압시험동안 외압을 받게되며 이차측 수압시험과 이차측 누설시험동안 내압을 받게되므로 강도계산에서는 이들이 상호 다른 수식으로 평가된다.

#### 4.1 ASME에 따른 수압시험

ASME의 경우 수압시험 압력은 다음과 같이 표현된다.

$$P_h = 1.25P \quad (22)$$

여기서 P는 설계압력이 된다. 반면에 기압시험의 경우는 다음과 같다.

$$P_p = 1.2P \quad (23)$$

SMART증기발생기의 경우 설계압력이 17MPa이므로 ASME에 준한 수압시험압력은 21.25MPa가 된다.

#### 4.2 러시아 기술기준에 따른 수압시험

러시아의 기술기준에서는 시험압력을 결정할 때 다음과 같이 재료의 허용응력이 사용된다.

$$P_h \geq 1.25P \left( \frac{[\sigma]^{Th}}{[\sigma]^T} \right) \quad (24)$$

여기서

P : 기기의 설계압력

T : 기기의 설계온도

Th : 기기의 시험온도

$[\sigma]^{Th}$  : 기기 시험온도에서의 허용응력

$[\sigma]^T$  : 설계온도 T에서의 허용응력

이 때  $[\sigma]^{Th}$ 와  $[\sigma]^T$ 는 러시아의 기술기준에 의해 결정된다. ASME와 달리 러시아의 기술기준은 재료성질이 압력결정에 사용된다는 점이다.

반면에 기압시험의 경우는 다음과 같다.

$$P_h \geq 1.15P \left( \frac{[\sigma]^{Tp}}{[\sigma]^T} \right) \quad (25)$$

SMART증기발생기 수압시험을 20℃에서 실시하는 경우 시험압력을 러시아의 기술기준으로 계산하면 다음과 같다. ASME와 러시아 기술기준의 수압시험압력은  $[\sigma]^{Th}/[\sigma]^T$  배 만큼 차이가 발생하게 된다. 한편, 전열관 재료가 Incoloy800인 경우에는  $[\sigma]^{Th}/[\sigma]^T$ 가 1.137이 된다. 따라서 ASME기준의 시험압력은 21.25MPa이며 러시아 기술기준의 시험압력은 24.17MPa가 된다. 이는 설계온도와 시험온도의 허용응력값의 차이가 크면 러시아 기술기준의 시험압력과 ASME의 시험압력차이가 커짐을 의미한다.

### 5. 결론

일체형원자로 SMART에 내장될 증기발생기를 설계함에 있어서 ASME와 러시아의 기술기준을 비교평가하였다. ASME에서 응력강도에 해당되는 러시아 기술기준의 허용응력값은 러시아의 경우

외압을 받는 구조물과 내압을 받는 구조물이 다르게 정의된다. 반면에 러시아 기술기준을 적용하는 경우 내압을 받는 전열관과 외압을 받는 전열관의 두께는 동일한 수식으로 결정되고 외압의 경우 좌굴평가를 추가하지만 ASME에서는 별도의 수식으로 평가된다. 수압시험압력은 허용응력강도의 온도효과가 반영된 러시아 기술기준의 압력이 높다. 특히, 설계온도와 시험온도에서의 허용응력값의 차이가 클수록 ASME기준과 러시아기술기준의 수압시험압력차이가 크다. 전체적으로 SMART의 증기발생기는 ASME에 준해 치수를 결정하는 것이 가능하지만 ASME를 적용하기 위해서는 전열관 재료에 대한 인증과 필요한 데이터를 마련하는 것이 우선되어야 한다.

## 후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Kim Yong Wan, et al., "Analysis of Design Characteristics of Integral PWR for Advanced Reactor,(in Korean)" *Journal of Korean Nuclear Society*, Volume 27, No.2, pp.269-279, 1995.
2. Kim Jong In, et al., *Development and Verification Test of Integral Reactor Major Components*, KAERI/RR-1889/98, 1999.
3. Kim Yong Wan, et al., *Conceptual Design of Once-Through Helical Steam Generator for Integral Reactor SMART*, KAERI/TR-1446/99, 1999.
4. Kim Yong Wan, et al., "A Spring Back Calculation Model for the Sensitivity Analysis of Tube Design Parameters of Helical Steam Generator," *Proceedings of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting*, Seoul, Korea, 1999.
5. Kim Yong Wan, et al., "Vortex Shedding Induced Vibration Analysis of SMART Steam Generator Tubes," *Proceedings of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting*, Seoul, Korea, 1998.
6. Kim Yong Wan, et al., "Flow Induced Vibration Analysis of SMART Steam Generator Tubes : Fluid Elastic Instability, Random Turbulence Induced Vibration, Tube Inside Vibration," *Proceedings of the Korean Nuclear Society Spring Meeting*, Kori, Korea, 2000.
7. Kim Yong Wan, et al., "Transient Thermal Stress Analysis for Module Feedwater Pipe of SMART Steam Generator," *Proceedings of the Korean Nuclear Society Spring Meeting*, Pohang, Korea, 1999.
8. GOST 22178-76, Russia.
9. GOST 14-3-820-79
10. *Code for Strength Analysis of Nuclear Power Plant Equipment and Piping*, PNAE G-7-002-86, Energoatomizdat, 1989.
11. *ASME Section III NB*, 1998.
12. *KEPIC MNB*, 1995.
13. Kim Chung Kwan et al. "Thermal and Stress Analysis of Module Feed Water Header of SMART Steam Generator Using Finite Element Analysis," *To be presented at the Korean Nuclear Society Autumn Meeting*, Taejon, Korea, 2000.