

## SMART 증기발생기 카세트 설계

### Design of SMART Steam Generator Cassette

김용완, 김종인, 장문희

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

#### 요 약

일체형원자로 SMART에 내장될 증기발생기 카세트에 대한 기본설계개발이 수행되었다. 증기발생기의 기본설계개발 연구에서는 형상설계 최적화와 치수의 결정, 핵심부품에 대한 구조적 강도 평가와 함께 제작성에 대한 연구가 수행되었다. 증기발생기는 개별 교체가 가능한 개념으로 설계되었으며 형상설계는 3차원 모델을 이용하여 부품 상호간의 간섭을 컴퓨터 상에서 검토하고, 이를 이용하여 해석모델을 작성하는 방법을 사용했다. 증기발생기 부품의 기본치수는 ASME의 기준식을 사용하여 결정하였다. 구조적 해석 측면에서는 증기발생기 전체에 대한 동특성해석, 전열관집합체에 대한 유동유발진동해석과 함께 핵심부품에 대해 열해석, 응력해석, 피로해석까지 수행하여 개발된 증기발생기의 타당성을 부여하였다. 이와 함께 증기발생기 제작성을 검토하여 문제점으로 제기된 전열관의 코일링에 대해 실험과 수치적인 모사를 통해 스프링백을 제어하고 잔류응력을 이완할 수 있는 조건을 제시하였다. 이상의 연구를 종합적으로 수행함으로써 증기발생기 카세트가 개발되었다.

#### Abstract

Basic design development for the steam generator to be installed in the integral reactor SMART has been performed. Optimization of the steam generator shape, determination of the basic dimension, and confirmation of the structural strength have been carried out. Individual steam generator cassette can be replaced in the optimized design concept of steam generator. Shape design of the steam generator cassette has been done on the computer based on 3-D CAE strategy. The structural integrity of the developed steam generator was investigated by performing the dynamic analysis for the steam generator cassette, flow induced vibration analysis for the tube bundle, and the thermo-mechanical analysis for the module header and tube. As for the manufacturing of steam generator, the numerical and the experimental simulation have been carried to control the amount of spring back and to eliminate residual stress. SMART steam generator cassette was developed by a sequential research of the aforementioned activities.

## 1. 서론

한국원자력연구소에서 개발중인 SMART는 증기발생기를 원자로 안에 내장하는 일체형원자로이다. SMART에 사용될 관류식 나선형 증기발생기에 대한 개념설계에 이어서 기본설계개발연구가 수행되었다[1-3]. 증기발생기 기본설계개발연구로서 첫째는 증기발생기 형상설계 최적화 업무가 수행되었다. 핵심내용은 원자로용기 상부에 위치한 노즐헤더를 원자로용기의 측면에 배치하고 모듈식 교체개념이 가능하도록 설계를 최적화 하였다. 증기발생기의 각 부품에 대해 기본치수를 결정하기 위해서 강도 평가를 수행함으로써 치수결정에 대한 타당성을 부여하였다. 이 과정에서 ASME와 러시아 기술기준에 대해 비교분석을 수행함으로써 증기발생기 기술기준에 따른 증기발생기 치수설계가 가능하도록 하였으며 전열관 재질의 강도 특성에 대해 분석하였다[4,5].

다음으로 증기발생기의 구조적 건전성을 조사하기 위해서 증기발생기의 핵심부품인 헤드 및 튜브 시트부위와 전열관에 대해 열해석과 응력해석, 피로해석을 수행하였다[6-9]. 또한, 증기발생기 카세트에 대한 동특성해석 모델을 개발하여 전체적인 거동을 조사하였으며 전열관 집합체에 대한 유동유발진동해석을 하여 SMART의 증기발생기 전열관집합체에서는 유동유발진동이 발생하지 않음을 보였다[10-14].

마지막으로 증기발생기 제작과 관련된 핵심기술은 전열관 코일링 기술과 전열관 용접기술, 그리고 조립으로 구분된다[15]. 전열관을 코일링하기 위해서 코일링 장비를 개발하여 여러 가지 변수에 대한 설정작업을 수행하였다. 전열관을 코일링하는 과정에서 발생하는 스프링백을 줄이기 위해 이론적인방법과 유한요소해석으로 코일링과정을 모사하였다[16-20]. 특히, 인장하중의 부가와 열처리를 통한 잔류응력의 이완과 스프링백의 저감방안을 제시하였다. 이상의 연구를 종합적으로 수행하여 SMART에 내장될 증기발생기를 국내기술로 개발하였다.

## 2. 증기발생기 형상설계와 치수 결정

### 2.1 형상 및 계통설계

증기발생기의 기능은 원자로집합체에 내장하여 과열증기를 생산하는 것이다. 원자로집합체에서 증기발생기 카세트의 배열 및 형상 설계는 노심의 크기결정에 이어서 수행된다. 노심의 크기가 결정되면 노심지지원통의 크기가 결정되고 증기발생기를 배치할 수 있는 환형공간의 내부직경이 결정되므로 여기서 증기발생기 카세트의 초기 형상이 결정된다.

증기발생기 카세트는 이차측 냉각재가 전열관의 안쪽을 흐르고 일차측 냉각재가 전열관 사이의 공간을 흐르는 관류형(once-through type)이며 일차측 냉각재는 위에서 아래로 흐르고 이차측 냉각재는 아래에서 위로 흐른다. 일차측이 전열관의 바깥을 흐르므로 일차측 압력 차로 인해 전열관에 압축응력이 생성되어 응력부식을 억제하는 효과가 있다. 증기발생기의 전열관은 증기발생기의 높이가 낮고 조밀한 설계가 되도록 나선형으로 감겨 있으므로 단위 체적당 전열밀도가 높은 것이 특징이다.

증기발생기 노즐헤더를 측면에 배치하여 단위 카세트의 교체가 가능한 개념으로 설계 최적화 하였다. 원자로상부에 12개씩 배치된 증기발생기 노즐증기헤더와 노즐급수헤더를 노즐측면에 배치함으로써 원자로용기상부에서 배관배치가 매우 단순해졌다. 또한, 노즐급수헤더가 증기헤더의 중앙에 위치하도록 설계하여 원자로용기를 관통하는 원공 수를 24개에서 12개로 줄이게 되었다. 중전의 개념설계에서 증기발생기 모듈급수관 외부에는 배관이 한 더 존재하고 2개의 배관사이에 개스를 채워 모듈급수관에서 비등이 발생하는 것을 방지하였다. 그러나 원자로 안에 위치한 이중관의 파손을 검사할 수 있는 방안이 없으며 수명기간 동안의 구조적 건전성도 보장 할 수가 없다. 따라서, 설계최적화된 개념에서는 노즐헤더를 원자로용기의 측면에 배치함으로써 모듈급수관의 길이를 짧게 설계하

여 모듈급수관의 열차폐를 위한 가스차폐배관을 제거하였다. 그리고 동일한 모듈급수헤더에서 나온 전열관은 동일한 모듈증기헤더로 연결되어 전열관 누설 시 단위 모듈의 밀봉이 가능하도록 설계되었다.

증기발생기 카세트 상부에서 증기발생기 카세트 지지판에 의해 지지되는 기존의 개념을 탈피하여 노즐증기헤더 및 노즐급수헤더의 튜브시트와 일체로 된 구조물에 의해 매달린 형태로 지지되며 아랫 쪽으로는 열팽창이 가능한 구조로 설계되었다. 따라서 모듈증기관의 이중금속결합부는 수직으로 연결되는 구조로 설계된다.

증기발생기 카세트는 전열관, 지지원통, 카세트노즐, 노즐헤더로 구성되며, 원자로집합체 바깥쪽에 위치한 급수배관과 노즐헤더가 직접 연결된다. 증기발생기 카세트는 원자로집합체 내벽과 노심지지원통의 외벽사이의 환형공간에 위치하며 동일한 간격으로 12개가 배치된다. 증기발생기 카세트에는 6개의 모듈과 324개의 전열관이 있다. 따라서 전체적으로 72개의 모듈로 구성되며, 6개의 모듈이 합쳐져서 1개의 카세트노즐을 통해 원자로용기를 관통한다.

증기발생기 카세트의 주요부품의 형상은 그림 1과 같으며 모듈증기헤더, 모듈급수헤더, 전열관지지보, 카세트원통, 전열관, 카세트내통, 모듈급수관, 모듈증기관, 카세트원통노즐 등으로 구성된다. 단위카세트의 전열관은 12열로 구성되며 각 열은 전열관 수를 달리함으로써 피치는 일정하게 유지하고 전열관의 길이가 평균값에서 편차가  $\pm 15\%$ 이내에 포함되도록 설계되었다. 전열관을 지지하는 지지대는 5mm의 두께로 설치하여 일차측 유로를 확보함과 동시에 유체기인진동과 외부동적하중으로부터 전열관을 보호하는 역할을 한다.

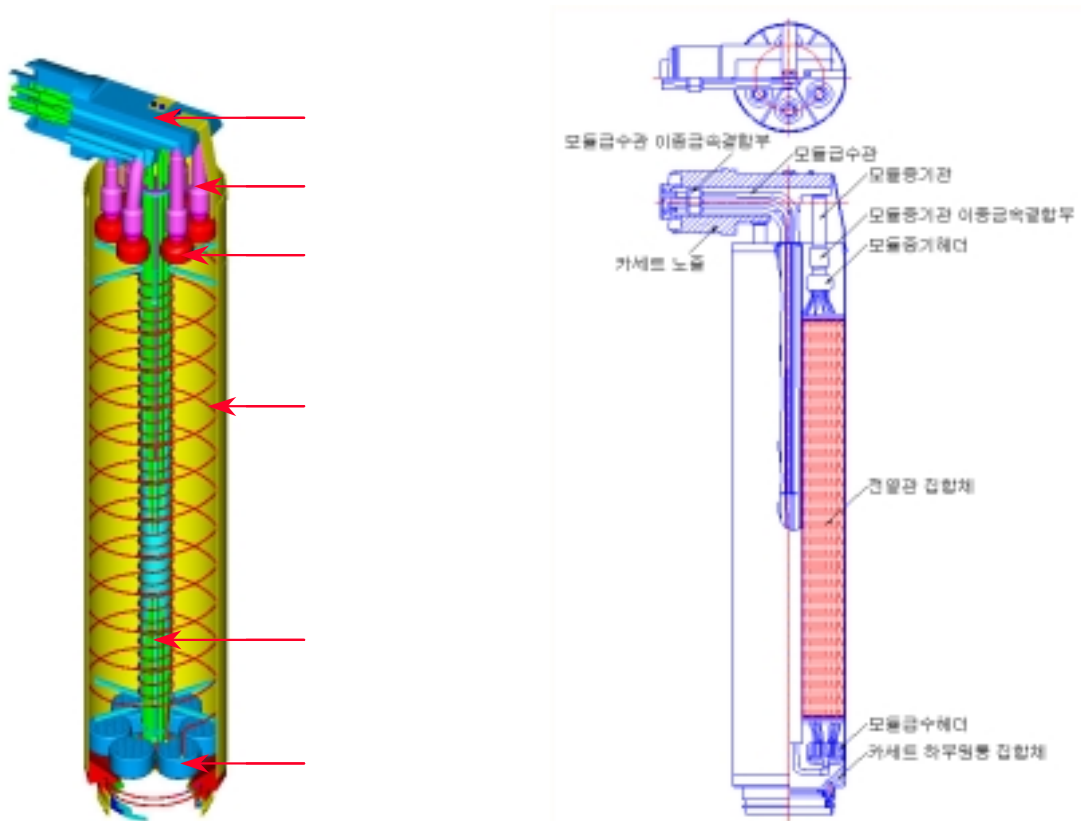


그림 1 주요 부품 형상과 명칭

증기발생기 카세트의 성능요건에서 설계변수 값은 NSSS 계통설계의 진행에 따라 최종 결정되며 다음의 수치는 현재의 NSSS 및 증기발생기 기본설계에 대한 값이다. 증기발생기 카세트의 설계조

건을 보면 일차계통설계온도는 350℃이고 일차계통설계압력은 17 MPa이다. 그리고 이차계통설계온도는 350℃, 이차계통설계압력은 17MPa인데 이는 전열관에 누설이 발생했을 때 일차측의 압력조건이 이차측에 작용하기 때문이다. 단위 카세트의 전열면적은 168.8 m<sup>2</sup>이고 전열관의 관막음여유도는 10 %이다. 정상운전중 일차냉각수의 유량은 128.3kg/s 이며 증기발생기 카세트의 입구온도는 310℃, 증기발생기 카세트의 출구온도는 270℃이다. 운전압력 15MPa이다. 그리고 증기발생기 카세트의 정상운전중 이차측의 정격변수는 다음과 같다. 증기유량은 12.7 kg/s, 증기발생기 카세트의 노즐헤더에서 입구급수의 온도는 180℃이고 출구에서는 40℃의 과열증기가 생산된다. 증기발생기 카세트의 주요 제원은 표 1과 같다.

표 1. 증기발생기 카세트 관련 주요 제원

원자로 열출력, MWt	330
증기발생기 카세트 수, 개	12
증기발생기 단위 카세트 당 전열면적, m <sup>2</sup>	168.8
증기발생기 전열관 외경, mm	12
증기발생기 전열관 내경, mm	9
전열관 반경방향 피치, mm	17
전열관 축방향 피치, mm	13.5
단위 카세트 당 전열관 수, 개	324
단위 카세트 당 모듈 수, 개	6
전열관 평균 길이, m	15.5
전열관 열 수, 개	17
전열관 최내열/최외열 직경, mm	182/726
유효 전열지역 높이, mm	2800
증기발생기 카세트 직경, mm	753

## 2.2 치수결정

증기발생기의 부품에 대한 기본치수를 결정하는 것에는 재료의 특성과 적용수식이 중요하다. 먼저 재료특성 측면에서 보면 다음과 같다. SMART의 증기발생기는 러시아 기술기준에 준하는 PT-7M과 PT-3V 티타늄합금으로 설계되었다. 러시아기술기준에서 사용하는 수식과 허용재료특성은 ASME의 수식 및 허용응력강도(allowable stress intensity)와 다르다. 따라서, 전열관 후보 재료를 러시아의 기술기준과 ASME에 준해 허용강도를 상호 비교분석했다. ASME에는 러시아 소재인 PT-7M이나 PT-3V에 대한 허용응력강도값이 나와있지 않으므로 PT-7M과 PT-3V의 기계적성질로부터 허용응력강도 값을 계산하여 사용하였다.

SMART의 경우 외압을 받는 전열관이므로 ASME의 대형발전로의 증기발생기 설계에서 사용되는 수식이 동일하게 적용될 수 없다. ASME Section III에서 1등급으로 분류된 기기에 적용하는 치수결정 식을 사용하여 각 부위의 허용두께를 계산하고 이를 만족하도록 표 1과 같이 치수를 결정하였다. 그러나 외압을 받는 배관에 대한 ASME의 수식을 적용하는데는 일부 상수가 필요한데 러시아 소재 PT-7M에 대해서는 이 값이 없다. 따라서, 이 경우에 대해서는 별도로 러시아 기술기준에 준해 외압을 받는 전열관, 모듈관에 대해서는 좌굴에 대한 평가를 수행하여 표 2에서 제시하였다. 허용압력은 모두 설계 압력보다 높으므로 좌굴측면에서 모든 배관은 안전하다고 판단된다.

표 2 증기발생기 카세트 주요 부위의 허용치수와 설계치수

	부품	설계두께 [mm]	최소두께 [mm]
노즐급수헤더	튜브시트	60	44
	원통	18	17.4
노즐증기헤더	Expansion Joint 원통	5	4.3
	덮개	120	83.8
모듈급수헤더	덮개	30	26.9
	원통	15	13.7
	튜브시트	82	47.9
모듈증기헤더	덮개	15	12.3
	원통	15	9.8
	튜브시트	50	31.5
배관	전열관	1.5	1.22
	모듈급수관	4	3.52
	모듈증기관	9	8.29

표 3 전열관, 모듈급수관 및 모듈증기관의 좌굴안정성 비교

배관 재료	임계길이 임계길이와 길이와의 조건	임계응력, [MPa]	임계압력, [MPa]	허용압력, [MPa]	설계외압, [MPa]
전열관 12×1.5 PT-7M	L>Lcr	1616	404	20.2	17
배관 35×4 PT-7M	L>Lcr	1318	298	17.9	17
배관 35×4(L=70) STS321	Lcr=47.5	2798	632	18.8	17
배관 83×9 STS321	L>Lcr	2910	619	17.7	17
배관 83×9 PT-7M	L>Lcr	1238	271	17.2	17

### 3. 증기발생기 카세트 해석결과

#### 3.1 열/응력/피로해석

SMART용 관류식 나선형증기발생기에 대한 열해석, 응력해석, 피로해석을 CAE를 활용하여 수행하였다. 개념설계된 모듈급수헤더에 대해 3차원 CAD모델을 생산하고 앞서 기술했듯이 단순한 수식을 적용하여 치수의 타당성을 평가하고 이어서 생산된 3차원 CAD 모델을 사용하여 유한요소해석 모델을 작성하고 열해석, 응력해석 및 피로해석을 하였다. 유한요소해석에서는 자유요소생성 개념을 활용하였는데 요소의 크기에 대한 결과의 수렴도 평가를 선행하여 보여 줌으로써 요소생성에 대한 타당성을 보였다. 설계압력하중만 고려한 응력해석을 수행하여 허용응력강도와 비교하여 안전함을 보여주고, 운전열하중과 운전압력하중 둘 다 고려한 응력해석을 수행함으로써 각 하중의 기여도를 비교 평가하고 3배의허용응력강도와 비교하여 안전함을 보였다. 응력을 구하기 위한 유한요소해석에서 기하학적 대칭성을 고려하여 그림 2와 같이 1/4만 모델링하였다. 열해석과 응력해석은 IDEAS로

수행하였는데 I-DEAS 코드에서는 순차적으로 열해석을 한 후 응력해석을 별도로 수행해야 한다. 먼저 열해석을 한 후에 그 결과와 정적해석의 경계조건을 조합하여 해석을 수행하면 열하중과 압력하중을 모두 고려한 결과를 얻을 수 있다. 응력해석에 대한 자세한 내용은 참고문헌[5,6]에 기술되어 있다. 그림 2는 튜브시트부위에서의 응력분포를 보여주는데 모두 허용범위 이내에 포함된다.

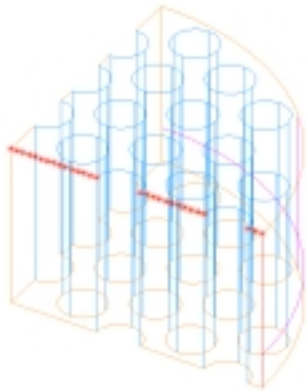


그림 2 튜브시트 해석모델

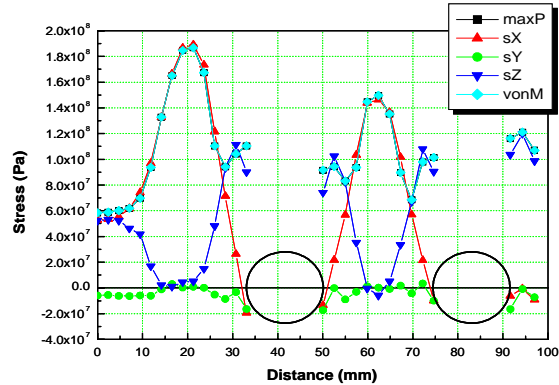


그림 3 모듈급수헤더튜브시트 밑면의 응력분포

모듈급수헤더의 열응력해석결과를 바탕으로 피로평가를 수행하였다. 모듈급수헤더는 러시아 기술 기준을 따르는 PT-3V 티타늄 합금으로 제작되므로 PT-3V에 대해 실험으로 구한 S-N곡선을 피로 해석에 사용하였다. PT-7M과 PT-3V에 대한 S-N곡선에 대해서는 온도의 함수로 실험을 수행하였다. 평균응력효과가 피로수명에 미치는 영향을 다양한 방법으로 고려하여 비교하였다. PT-3V 티타늄합금으로 설계할 경우 평균응력효과를 고려하면 Soderberg의 모델이 가장 보수적인 결과를 보였다. 응력이 크게 작용하고 있는 튜브시트부위에 대해 설계수명을 역으로 계산하여 평가한 결과 모듈급수헤더는 피로수명관점에서 안전함을 보였다. 자세한 응력해석과 피로해석은 상세설계단계에서 수행된다.

### 3.2 동특성 해석

SMART 증기발생기의 동특성 해석을 위한 유한요소모델을 개발하였으며 해석결과를 이용해 운전 중 동적 안전성을 검사하였다. 일체형원자로 SMART의 증기발생기는 상용로와 달리 원자로 내벽에 매달린 형태로 설치되며 냉각재순환펌프 임펠러에 의한 가진을 받으므로 진동특성에 관해 정확한 분석이 필요하다. 증기발생기의 배관부분은 보요소를 사용하고 전열관집합체는 집중질량요소를 사용하여 유한요소모델을 구성하였다. 상용코드인 ABAQUS를 사용한 해석에서 증기발생기의 고유진동수와 고유모드형을 구하였다.

2차원해석과 3차원해석을 독립적으로 수행하여 모델링의 타당성을 보였으며 표 4에서 비교하였다. 일차 비틀림모드는 2차원모델에서는 나타나지 않지만 3차원 모델에서 나타난다. 냉각재순환펌프 임펠러의 회전수와 날개 수에 따라 결정되는 가진력의 주파수와 증기발생기의 고유진동수를 비교하여 증기발생기의 운전 중 안전성을 평가하였다. 해석결과 증기발생기의 고유진동수와 가진력의 주파수가 근접해 있어 구조적 보강이 필요할 것으로 판단되어 증기발생기 카세트를 보강하였다. 3차원 모델에서 나타난 비틀림모드를 방지할 수 있도록 증기발생기 카세트 외통과 카세트노즐을 연결하는 지지대를 설계하여 보강하였다. 증기발생기 카세트에 대한 동특성 해석결과를 바탕으로 원자로집합체 전체의 동특성해석을 수행하기 위한 단순 모델을 생산하였다.

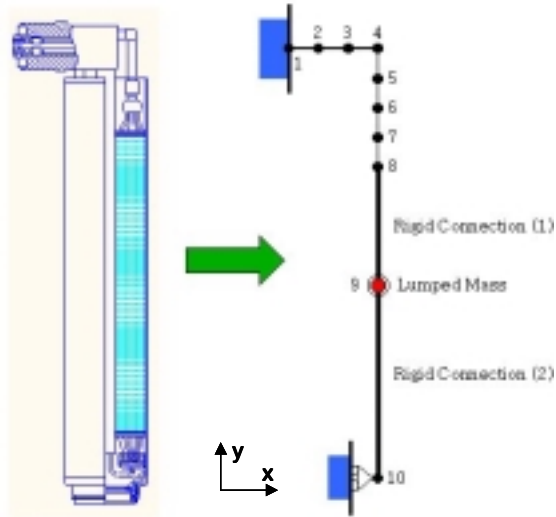


그림 4 증기발생기 카세트 동특성해석 모델

4 2D / 3D

	2D		3D	
	-	-	1	45.1 Hz
1	57.6 Hz	2	92.9 Hz	
	-	-	3	99 Hz
2	319 Hz	4	185 Hz	
-	-	-	5	780 Hz
-	3	648 Hz	6	953 Hz
-	4	1642 Hz	-	-

### 3.3 유동유발진동해석

일차냉각재에 의해서 칼만와류가 발생하고 칼만와류의 진동수와 전열관의 진동수가 일치하면 공진이 발생한다. 수치적인 해석을 한 결과 평균 유속개념에서 SMART의 증기발생기 설계는 공진이 발생하지 않음을 그림 4에서 보여준다. 기존의 실험식 및 실험결과, 그리고 유동유발진동해석 프로그램을 활용하여 유체탄성 불안정, 난류에 의한 불규칙 진동, 관 내류에 의한 진동 등이 발생할 가능성을 평가하였다. 유속, 피치 등에 대한 민감도 해석을 수행 한 후 현재의 SMART 설계 데이터와 비교한 결과를 제시하였다. 유체탄성 불안정과 난류에 의한 불규칙 진동해석을 수행한 결과 현재의 SMART 증기발생기에서는 전열관의 유동유발진동이 발생할 가능성은 낮은 것으로 판명되었다. 본 해석은 평균유속에 대한 결과이므로 향후 증기발생기의 유속분포를 구하여 국부적인 평가가 필요하다.

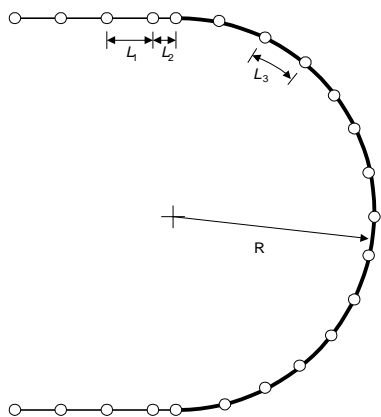


그림 5 유동유발진동해석 모델

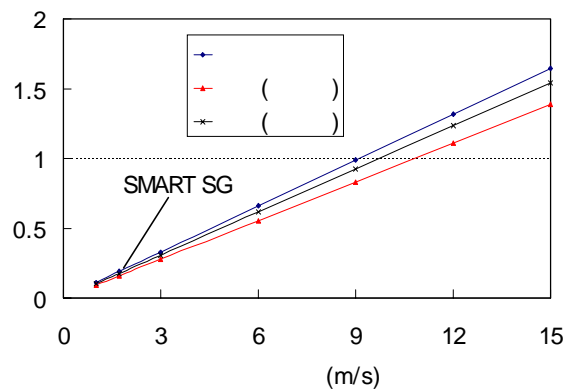


그림 6 전열관의 유동유발진동해석결과

## 4. 증기발생기 카세트 제작성 검토

증기발생기 카세트는 여러 가지 부품으로 구성되며 그 중에서 일차측 압력경계와 관련이 있는 주요부품의 가공방법은 표 5와 같다. 코일링과 용접 및 조립으로 요약할 수 있는데 그 중에서 코일링이

가장 어려운 기술이며 전열관용접 기술의 확보가 필요하다. 또한, 스테인레스강과 티타늄합금의 결합방법이 필요한 이중금속결합부는 별도로 개발하였다[21-22].

표 5 증기발생기 카세트 제작기술목록

제작품	제작기술	비고
전열관	자동용접, 코일링	
모듈급수헤더	NC 가공	단조품 사용
모듈증기헤더	NC 가공	단조품 사용
모듈급수헤더 튜브시트	천공	
모듈증기헤더 튜브시트	천공	
카세트 원통	굽힘 및 용접	
전열관 오리피스	선반가공	
전열관 지지대	절단, 굽힘, 용접	
모듈급수관	굽힘, 용접	이중금속결합부 사용
모듈증기관	굽힘, 용접	이중금속결합부 사용
카세트 오리피스	나사가공	
노즐증기헤더	NC 가공	단조품 사용

#### 4.1 전열관 코일링

한 모듈증기헤더에서 나온 모든 전열관은 동일한 모듈증기헤더로 연결된다. 증기발생기 제작 중에서 전열관을 감는 것은 증기발생기의 성능을 좌우하기 때문에 상당히 중요한 핵심기술이다. 먼저, 증기발생기 전열관 집합체를 제작하기 위하여 전열관 코일링 장비를 설계, 제작하였다. 맨드릴을 회전시키는 모터와 전열관을 이송하는 모터로 구동되도록 설계하였다. 주축에는 내통이 설치되고, 이송대에는 전열관을 적당한 인장력으로 잡아주는 장치가 장착되어 있다. 이송대를 이동시키는 모터와 주축을 회전시키는 모터가 각각의 인버터에 의해 제어되도록 하였고, 전열관의 축방향 피치를 유지하기 위하여 이송대의 이동속도를 주축의 회전속도에 대해 제어하도록 컨트롤러를 설치하였다. 주축과 이송대 부분에서 나선각도로 감김이 시작되는 지점과 마무리되는 지점에는 베드 하단에 빔 센서를 장착하여 균일한 간격 조정이 가능하도록 설계, 제작하였다. 이 모든 것이 제어가 가능하도록 별도의 컨트롤 상자를 부착하여 인버터 및 기타 기어가 장착된 모터를 제어한다.

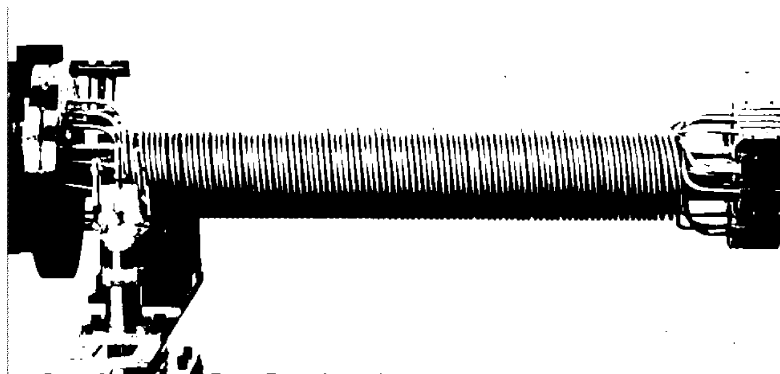


그림 7 전열관 코일링 시험



모듈급수헤더 및 모듈증기헤더는 전열관을 감은 후에 열처리를 하고 나서 각 전열관과 튜브시트, 튜브시트와 덮개를 용접하기 때문에 전열관을 감기 위해서 별도의 모듈급수헤더 및 증기헤더 튜브시트 치구를 제작하여 코일링 장비에 설치하였다. 모듈급수헤더 튜브시트 치구는 원형소재에 모듈급수헤더와 같은 위치에 구멍 가공하였고, 모듈증기헤더 튜브시트 치구는 각 전열관을 감은 후 매번 고정해야 하기 때문에 모듈증기헤더 튜브시트 치구를 레고 형식으로 제작하였다.

전열관을 감을 때 튜브시트 치구에서 나선형으로 감기는 부분까지 평행부가 존재한다. 전열관이 감기면서 이 평행부에 모멘트가 작용하여 휘어지는 현상이 발생한다. 전열관을 감을 때 전열관을 잡고 있던 이송대의 치구를 풀어야 하는 데 전열관이 감김으로 인해 큰 잔류응력이 발생한다. 이 잔류응력으로 인해 스프링백 현상이 발생하기 때문에 이를 방지하기 위하여 이송대의 치구를 풀기 전에 나선형으로 감긴 전열관의 마지막 부분을 고정할 수 있는 치구를 제작하였다.

#### 4.2 열처리

전열관을 코일링 한 후에 스프링백을 방지하여 형상을 유지하고 잔류응력을 제거하기 위한 열처리 조건을 조사하였다. 인장하중을 가하는 단계를 없앴고, 성형 후에 그 모양을 그대로 유지한 채로 변태점을 넘지 않도록 700 °C에서 1시간 유지시킨 후, 7시간 동안 서냉하였다. 600°C 및 650°C에 대한 실험을 수행하여 유사한 결과를 얻었으며 그 이하의 온도에 대해서는 실험을 수행 중이다. 인장하중을 주지 않고 응력제거를 하지 않은 경우와, 응력제거를 수행한 경우에서의 결과를 각각 보여주고 있다. 그림 8과 그림 9에서 보듯이 응력제거를 거친 후에는 스프링 백이 거의 사라짐을 예측할 수 있다. 실제 Mock-up 실험에서도 그림 10과 그림 11에서 보는 것 처럼 응력제거 후의 스프링 백은 0.8 %~1.2 %로 측정되었다.



그림 8 열처리를 안한 경우(FEM)



그림 9 열처리를 한 경우(FEM)



그림 10 열처리를 안한 경우(모형실험)



그림 11 열처리를 한 경우(모형실험)

#### 4.3 이중금속결합부 개발

티타늄합금부위와 스테인레스강 부위를 결합하기 위한 이중금속결합부는 나사산이 있는 브레이징으로 설계되었다. 나사부위는 하중을 지탱하고 브레이징부위는 밀봉을 하는 개념이다. 이중금속결합

부의 형상은 스테인레스강을 압나사로 하고 Ti합금은 수나사로 하며, 용가재 주입을 위한 깔때기를 압나사의 끝 부분에 용접으로 부착하였다. 용가재로 BAg-19, BVAg-30 및 Gapasil-9을 사용하여 상호 접합특성을 비교하였다. 스테인레스강의 젖음성을 향상시키기 위하여, Ni 또는 Ni-Pd의 피막을 도금 및 기타 방법으로 입히는 방법을 사용하였다. 가열은 진공전기기로와 전기유도록를 사용하고 가열온도는 약 900℃로 한다. 가열속도와 가열온도 및 유지시간에 따른 접합강도를 비교함으로써 최적 조건을 구하였다[21,22].

## 5. 결론

일체형원자로 SMART에 내장될 증기발생기 카세트에 대한 기본설계 개발이 수행되었다. 증기발생기의 기본설계 개발 연구에서는 형상설계 최적화와 기술기준에 준한 치수의 결정, 핵심부품에 대한 구조적 강도 평가와 함께 제작성에 대한 검토가 수행되었다. 구조적 해석 측면에서는 증기발생기 전체에 대한 동특성해석과, 전열관 집합체에 대한 유동유발진동해석과 함께 핵심부품에 대해 열해석, 응력해석, 피로해석까지 수행하여 개발된 증기발생기의 건전성을 입증하였다. 이와 함께 전열관의 코일링과 용접성에 대한 제작성 평가를 수행하고 유한요소해석을 이용한 모사와 실험을 수행하여 잔류응력과 스프링백을 줄이기 위한 열처리 조건을 제시했다.

## 후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. J.I. Kim, Y.W.Kim, J.H. Kim, J.S. Park, H. Huh, *Development and Verification Test of Integral Reactor Major Components*, KAERI/RR-1889/98, 1999.
2. Y.W. Kim, J.I. Kim, J.H. Kim, J.S. Park, D.O. Kim, *Conceptual Design of Once-Through Helical Steam Generator for Integral Reactor SMART*, KAERI/TR-1446/99, 1999.
3. Y.W. Kim, D.J. Lee, and M.H. Chang, *Analysis of Design Characteristics of Integral PWR for Advanced Reactor(in Korean)*, *Journal of Korean Nuclear Society*, Vol.27, No.2, pp.269-279, 1995.
4. Y.W. Kim, J.I. Kim, J.H. Kim, J.S. Park, H. Huh, C.K. Kim, *CAE Based Design and Analysis of Module FW Header for SMART Steam Generator*, KAERI/TR-1812/2001.
5. Y.W. Kim, J.I. Kim, and M.H. Chang, *A Comparative Study for SMART Steam Generator Sizing Based on ASME and Russian Standard*, *Proceedings of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting*, Taejon, Korea, October 27, 2000.
6. Y.W. Kim and J.H. Kim, J.S. Park, H. Huh, J.I. Kim, *Transient Thermal Stress Analysis for Module Feedwater Pipe of SMART Steam Generator*, *Proceedings of the Korean Nuclear Society Spring Meeting*, Taejon, Korea, May 29, 1999.
7. C.K. Kim, Y.W. Kim, and J.I. Kim, *Thermal and Stress Analysis of Module Feedwater Header in SMART Steam Generator Using Finite Element Method*, *Proceedings of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting*, Taejon, Korea, October 26, 2000.
8. Y.W. Kim, J.I. Kim, and C.K. Kim, *A Thermo-Mechanical Stress Analysis for Module Feedwater Header of SMART Steam Generator Using I-DEAS*, *Proceedings of 2000 SDRC Users Conference*, KyoungJu, November 3, 2000.
9. Y.W. Kim, J.I. Kim, and M.H. Chang, *Fatigue Analysis of SMART Steam Generator Module FW Header*, *Proceedings of the Korean Nuclear Society Spring Meeting*, JaeJu,

- Korea, May 25, 2001.
10. Y.W. Kim, J.I. Kim, J.S. Park, J.H. Kim, H. Huh, M.H. Chang, *Flow Induced Vibration of SMART Steam Generator Tube*, KAERI/TR-1134/98, 1998.
  11. Y.W. Kim, J.I. Kim, J.H. Kim, H. Huh, and W.G. Sim, Vortex Shedding Induced Vibration Analysis of SMART Steam Generator, *Proceedings of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting*, Seoul, Korea, October 31, 1998.
  12. Y.W. Kim, J.H. Kim, J.S. Park, J.I. Kim, and W.G. Sim, Flow Induced Vibration Analysis of SMART Steam Generator Tube : Fluidic Instability, Random Turbulence Induced Vibration, Tube Inside Vibration, *Proceedings of the Korean Nuclear Society Spring Meeting*, Pohang, Korea, May 28, 2000.
  13. C.K. Kim, D.O. Kim, Y.W. Kim, and J.I. Kim, "Dynamic Analysis of SMART Steam Generator," *Proceedings of the Korean Nuclear Society Spring Meeting*, JaeJu, Korea, May 25, 2001.
  14. D.O. Kim, C.K. Kim, Y.W. Kim, and J.I. Kim, *Development of Finite Element Model for Dynamic Analysis of SMART Steam Generator*, KAERI/TR-1893/2001, 2001.
  15. C.K. Kim, B.H. Lim, Y.W. Kim, and J.I. Kim, Development of Manufacturing Technology for the Tube Assembly of Helical Steam Generator, *Proceedings of the Korean Nuclear Society Spring Meeting*, JaeJu, Korea, May 25, 2001.
  16. Y.W. Kim, J.I. Kim, H. Huh, J.S. Park, J.H. Kim, A Spring Back Calculation Model for the Sensitivity Analysis of Tube Design Parameter of Helical Steam Generator, *Proceedings of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting*, Seoul, Korea, October 30, 1999.
  17. Y.W. Kim, J.I. Kim, and M.H. Chang, Minimization of the Spring back in the Coiling Process of the Helical Steam Generator Tubes of Integral Reactor SMART, *Proceedings of 2000 KSME Autumn conference*, Seoul, November 4-5, pp.837-842, 2000.
  18. Y.W. Kim, J.I. Kim, M.H. Chang, and Y.S. Suh, Control of Spring Back for Helically Coiled Steam Generator Tube, *Transactions of SMiRT 16*, Washington D.C., August 12-17, 2001.
  19. Y.W. Kim and J.I. Kim An analysis to minimize the amount of spring back after coiling of helical steam generator tubes, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol.78, pp.11-17, 2001.
  20. Y.W. Kim, J.I. Kim, D.O. Kim, H. Huh, J.H. Kim, J.S. Park, and M.H. Chang, *Development of Spring Back Analysis Model for the SMART Steam Generator Helical Tube*, KAERI/TR-1406/99, 1999.
  21. S.C. Kwon, S.H. Kim, Y.W. Kim, J.I. Kim, *Brazing Technology of Ti alloy/Stainless Steel Dissimilar Metal Joint at System Integrated Modular Advanced Reactor*, KAERI/AR-589/2001, 2001.
  22. S.C. Kwon, H.J. Lim, S.H. Kim, Y.W. Kim, J.I. Kim, Brazing of Ti and Stainless Steel Dissimilar Metal Joint, *Proceedings of the Korean Nuclear Society Spring Meeting*, JaeJu, Korea, May 25, 2001.