

가상증기발생기카세트를 활용한 전열관 공간설계와 카세트 조립

Use of Virtual Steam Generator Cassette for Tube Spatial Design and SGC Assembling Procedure

김용완, 김종인, 지성균

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

3차원 가상증기발생기카세트를 만들고 이를 이용하여 설계과정에서 전열관의 연결배치를 결정하고 조립하는 방법을 시도하였다. 하나의 카세트 안에 존재하는 수많은 전열관은 각각의 길이와 3차원상의 위치가 다르다. 전열관 배열결과를 이용하여 3차원에서 실제로 전열관을 배치하여 공간적인 좌표를 생산하고 이를 바탕으로 실제 코일링 치수를 결정하는 방법을 적용하였다. 전열관의 길이, 좌표 값에 대해 이론적으로 계산한 값, 3차원 가상증기발생기카세트로 생산한 값, 그리고 실제로 코일링 후에 측정된 값을 비교하였다. 최종전열면적은 열적산정크기와 약 4%의 차이를 보였으며, 가상증기발생기카세트를 이용해서 구한 값과 약 0.2%의 차이를 보였다. 컴퓨터상에서 3차원으로 이러한 작업이 구현됨으로 인해 나선형 전열관의 배열을 위한 별도의 엔지니어링모형이 생략될 수 있음을 보였다. 이와 함께 제작성이나 조립성 검토를 3차원 디지털 모형을 이용하여 설계 단계에서 효과적으로 검토할 수 있음을 보였다.

Abstract

A method of determining spatial arrangement of tube connection and assembling procedure of once-through helical steam generator cassette utilizing three dimensional virtual steam generator cassette has been developed on the basis of recent 3-D modelling technology. One ends of the steam generator tubes are connected to the module feed water header and the other sides are connected to the module steam header. Due to the complex geometry of tube arrangement, it is very difficult to connect the tubes to the module headers without the help of a physical engineering mock up. A comparative study has been performed at each design step for the tube arrangement and heat transfer area. Heat transfer area computed from thermal sizing was 4% less than that of measured. Heat transfer area calculated from the virtual steam generator cassette mock up has only 0.2% difference with that of measured. Assembling procedure of the steam generator cassette also, can be developed in the design stage.

1. 서론

최근의 CAD/CAE 기술의 발달은 설계업무와 해석에 많은 변화를 가져왔다. 단순히 2차원도면을 3차원으로 변화시킨 것 이외에도 유한요소해석모델과 연계하여 구조적 건전성을 계산하는데 중요한 역할을 하였다. 다양한 산업분야에서 컴퓨터에서의 시뮬레이션이 폭 넓게 활용되고 있다. 반면에 안전성을 최우선으로 하는 원자력분야에서는 검증되지 않은 새로운 기술의 시도는 비교적 낮은 편이다[1].

한국원자력연구소에서 개발중인 일체형원자로에는 관류식 나선형 증기발생기를 원자로 안에 내장한다. 관류식 나선형 증기발생기에 대한 개념설계에 이어서 기본설계개발연구가 수행되었다[2,3]. 이 과정에서 증기발생기 형상설계 최적화 업무가 수행되었다. 또한, 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 분석한 바 있다[4]. 다음으로 증기발생기의 구조적 건전성을 조사하기 위해서 증기발생기의 핵심부품에 대해 열해석과 응력해석, 피로해석을 수행하였다[5,6,7]. 또한, 증기발생기 카세트에 대한 동특성해석 모델을 개발하여 전체적인 거동을 조사하였으며 전열관 집합체에 대한 유동유발진동해석을 하여 전열관집합체에서는 유동유발진동이 발생하지 않음을 보였다. 이 과정에서 상용코드인 IDEAS[8]를 이용하여 모델링을 한 후에 이 것을 전문유한요소해석프로그램인 ABAQUS[9]로 전환하여 해석하는 것과 같이 3차원모델은 형상설계단계와 유한요소해석모델을 생산하는데 효과적으로 사용되었다[10].

본 연구에서는 한 단계 더 나아가 제작 및 조립에 3차원 모델링 기술을 이용하고자한다. 증기발생기 카세트(Stema Generator Cassette, SGC)에는 수많은 전열관이 존재하므로 각 전열관이 서로 간섭이 없이 타당하게 배치되는 것은 매우 어려운 일이므로 주로 엔지니어링 모형을 사용해왔다. 컴퓨터 상에서 가상의 전열관집합체를 생산하고 이를 이용하여 전열관 설계를 하면서 각 설계단계에서 전열면적을 비교하였다. 실제 전열관집합체에서 전열면적을 측정하여 가상의 모델과 비교하여 타당성을 입증하였다. 이와 병행하여 증기발생기 카세트의 모든 부품에 대해서도 컴퓨터 상에서 조립하여 조립절차를 개발하고 간섭을 검증하였다.

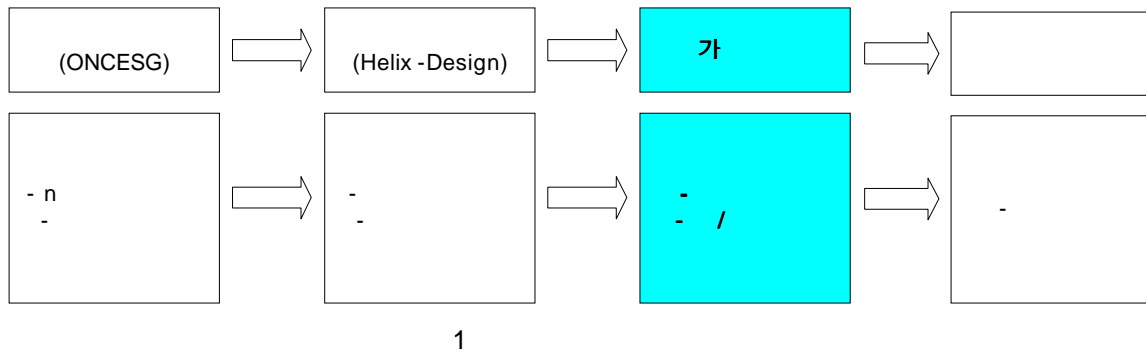
2. 가상 SGC를 이용한 전열관과 모듈헤더 연결

2.1 전열관 배열

증기발생기카세트의 출력이 결정되면 이를 바탕으로 재료와 전열관의 치수를 결정하고 전열면적을 산정한다. 이 때 산정된 전열면적은 유효전열지역에 대한 값이며 모든 전열관의 길이가 같다는 전제하에서 나온 값이다. 한국원자력연구소에서는 전열면적 산정을 위해 ONCE-SG를 개발하여 프로그램에 대한 입증을 하고 설계에 사용하고 있다.

나선형 증기발생기는 나선경에 따라 길이가 달라지므로 각 열에서의 전열관 수를 달리하여 전열관을 배치해야 한다. 전열관의 길이가 달라지면 전열관내의 압력강하 값이 달라지기 때문이다. 이는 전열관의 길이를 일정한 범위 이내에 포함시키고 전열관의 피치를 유지하고 각 열의 전열관 집합체의 높이가 허용범위 안에 들도록 배치한다. 이러한 설계는 한국원자력연구소에서 개발한 Helix-design이라는 프로그램으로 수행된다. 그러나 이 값 역시 전열관의 유효전열지역에 대한 값으로서 전열관이 모듈급수헤더와 연결되는 부위 및 모듈증기헤더와 연결되는 부위는 고려되지 않는다. 이 단계에서 증기발생기카세트의 각 열에 대한 전열관 수와 유효전열면적에서 전열관의 길이, 감김수, 나선각 등이 계산된다. 그러나 여전히 각 전열관과 모듈관과의 연결에 대한 설계정보는 생산되지

않는다. 그림 1에서 둘째 전열관 배열설계까지가 끝난 상황이다.



2.2 가상 SGC를 이용한 공간좌표와 길이 결정

전열관 입출구는 단순히 수식적으로 표현되지 않으므로 엔지니어링모형을 이용하여 결정해 왔다. 본 연구에서는 이 단계의 설계를 컴퓨터상에서 생산하였다. 즉, 전열관에 대한 완전한 3차원 모델링을 생산하여 이를 이용하여 전열관의 공간 좌표를 결정하였다. 그림 2는 각각의 모듈헤더에 대한 기호를 정의한 것을 보여준다. 컴퓨터 상에서 상호간의 간섭을 검증하여 전열관의 배치를 결정하고 전열관의 길이를 계산하였다. 동일한 급수헤더에서 나온 전열관은 동일한 증기헤더로 연결되어야 하며, 수가 다른 각 열의 전열관을 각 모듈에 적절히 분배하여야한다. 이 경우에 허용되는 최소 곡률반경은 전열관 외경의 5배이상이다.

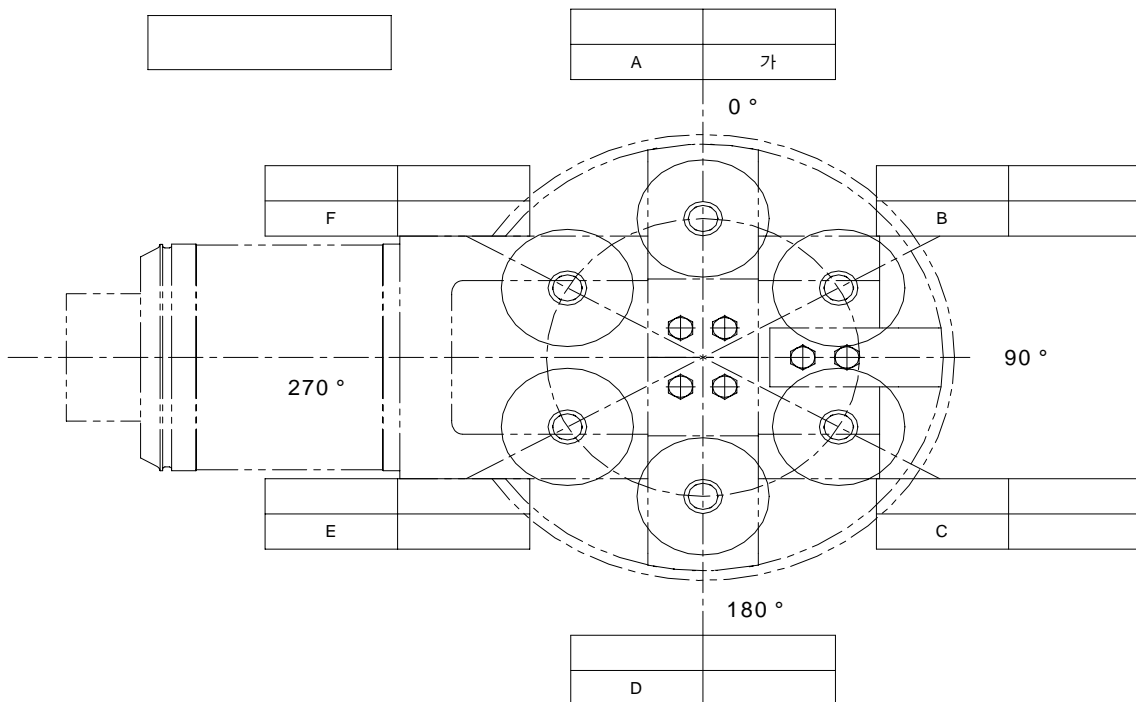


그림 2 모듈헤더 배치각도 및 기호

그림 3은 하나의 모듈을 나타낸 것인데 하나의 모듈에 여러개의 열에서 나온 전열관이 연결됨을 보여준다. 그림 4는 모듈급수헤더와 모듈증기헤더에 연결되는 부위를 보여주며 이러한 연결과 공간적 위치가 가상증기발생기 모형을 통해서 결정되었다.

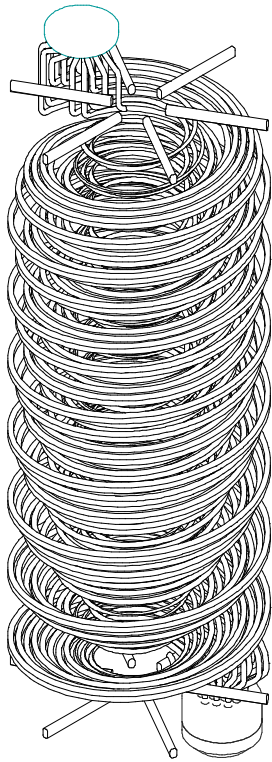


그림 3 하나의 증기발생기 모듈

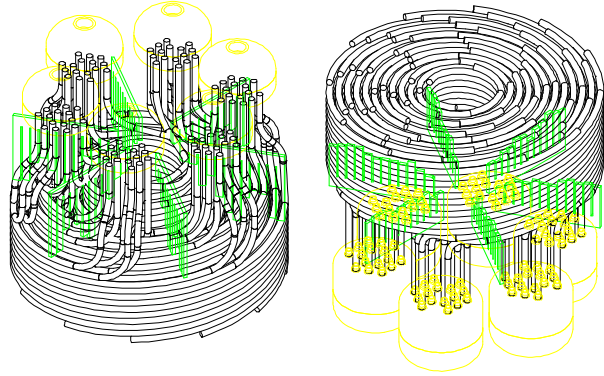


그림 4 전열관과 모듈급수/증기헤더연결

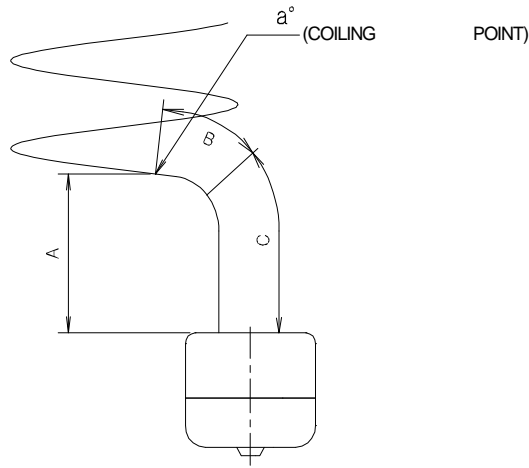


그림 5 모듈급수헤더 전열관 굽힘 좌표기호

공간좌표를 나타내기 위해서 그림 5와 같은 기호를 사용하였다. 여기서 a_0 는 위에서 바라봤을 때 유효전열지역이 끝나는 곳의 각도를 나타내며, A는 높이, B, C,는 각각의 길이를 나타낸다. 표 1에서는 전열관집합체의 제 6열에서 전열관과 모듈급수관이 연결되는 부위의 치수를 보여주며, 표 2는 제 6열에서 전열관과 모듈증기헤더가 연결되는 부위의 치수를 보여준다.

표 1 가상모형에서 구한 전열관과 모듈급수헤더연결 공간좌표

| | (M) | | (-) | | | | | | |
|---|------|------|-------|-----|---|-------|-------|-------|-----|
| | Coil | | | NO. | 。 | A(mm) | B(mm) | C(mm) | |
| 6 | 9.64 | 9.40 | 6-1 | A | 4 | 335 | 145 | 36 | 133 |
| | | 9.41 | 6-2 | B | 4 | 35 | 141 | 36 | 129 |
| | | 9.32 | 6-3 | B | 9 | 48 | 150 | 39 | 139 |
| | | 9.40 | 6-4 | C | 4 | 95 | 149 | 36 | 136 |
| | | 9.40 | 6-5 | D | 4 | 155 | 145 | 36 | 133 |
| | | 9.42 | 6-6 | E | 5 | 225 | 139 | 37 | 126 |
| | | 9.30 | 6-7 | E | 9 | 228 | 150 | 39 | 139 |
| | | 9.40 | 6-8 | F | 4 | 275 | 149 | 36 | 136 |

표 2 가상모형에서 구한 전열관과 모듈증기헤더연결 공간좌표

| | (M) | | (-) | | | | | | |
|---|------|------|-------|-----|----|-------|-------|-------|-----|
| | Coil | | | NO. | 。 | A(mm) | B(mm) | C(mm) | |
| 6 | 9.64 | 9.40 | 6-1 | | 5 | 84 | 194 | 36 | 181 |
| | | 9.41 | 6-2 | | 4 | 136 | 195 | 36 | 183 |
| | | 9.32 | 6-3 | | 9 | 155 | 189 | 58 | 174 |
| | | 9.40 | 6-4 | | 5 | 204 | 190 | 36 | 177 |
| | | 9.40 | 6-5 | | 5 | 264 | 194 | 36 | 181 |
| | | 9.42 | 6-6 | | 5 | 324 | 198 | 36 | 185 |
| | | 9.30 | 6-7 | | 10 | 344 | 191 | 65 | 175 |
| | | 9.40 | 6-8 | 가 | 5 | 24 | 190 | 36 | 177 |

표 3에서는 제 6열의 전열관이 각 설계단계에서 어떤 값으로 계산되었는지 보여준다. 열적크기를 산정하기위한 계산을 수행한 후에는 모든 전열관의 길이가 10.10m로 동일하다. 각 열의 전열관에 대해 배열설계가 끝나면 각 열의 전열관 길이는 서로 다르며 제6열의 전열관 길이는 9.64m로 결정된다. 가상증기발생기카세트를 사용하여 전열관 배열을 끝내면 동일한 열에서도 연결되는 모듈과 위치에 따라 약간씩 달라진다. 전열면적에 대한 비교는 표 4와 같다.

표 3 각 설계단계에서 전열관 길이 산정결과 비교

| | | | | 가 | |
|---|---|-------|------|------|-------|
| 6 | 1 | 10.10 | 9.64 | 9.75 | 10.16 |
| | 2 | | | 9.76 | 9.70 |
| | 3 | | | 9.73 | 9.94 |
| | 4 | | | 9.75 | 9.93 |
| | 5 | | | 9.75 | 9.89 |
| | 6 | | | 9.79 | 10.26 |
| | 7 | | | 9.68 | 9.91 |
| | 8 | | | 9.75 | 9.88 |

표 4 각 설계단계에서 전열면적과 평균길이 비교

| 설계 단계 | 전열면적 산정 (열적크기) | 전열관배열설계 (수식계산) | 가상SGC (개별전열관배치) | 제작 |
|-----------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------|
| 평균길이(m) | 10.10 | 10.06 | 10.51 | 10.53 |
| 전열면적(m ²) | 25.89 | 25.79 | 26.95 | 27.00 |
| 차이(%) | 0 | -0.38 | 4.09 | 4.27 |

초기 전열면적산정 값을 1로 했을 때 각 단계에서의 전열면적의 차이는 그림 6과 같다. 가상증기발생기카세트로 전열관 설계를 끝낸 경우는 초기에 비해 약 4.09%의 전열면적 증가가 있으며 실제로 모형제작을 통해 입증한 결과 4.27%증가하였다. 설계로 계산된 전열면적이 실측값과 거의 같음이 입증되었다.

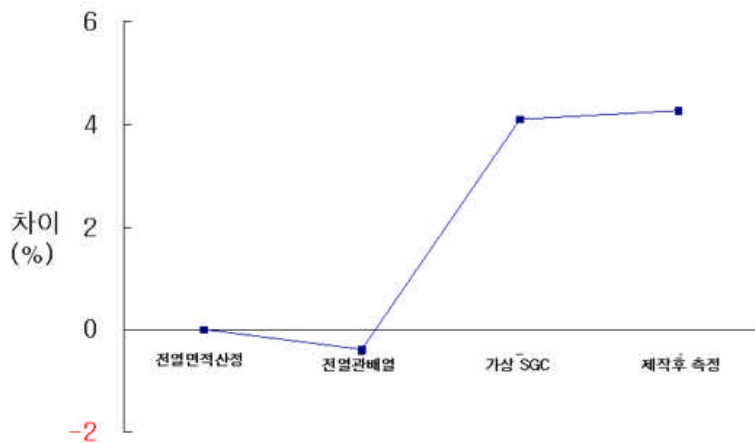


그림 6 각 설계단계에서의 전열면적 값 비교

2.3 전열관 길이차이 영향

위와 같은 방법으로 전열관을 배치하여도 전열관의 길이차이는 최대 약 10%가 발생하게 된다. 이 값은 각 전열관의 압력차이를 가져오나 유동불안정을 방지하기 위한 전열관 오리피스로 인해 압력 큰 문제가 되지 않는다. 이 값은 실험을 통해 그림 7과 같이 입증하였다. 전열관 이차측에서 평균적으로 약 2.55kg/cm²의 압력강하가 있다. 이 값의 15%에 해당하는 오차를 갖게 된다. 그러나 그림 7에서 보듯이 전열관 오리피스에서 약 7kg/cm²로서 전열관 이차측압력강하의 2.5배이상이 된다. 따라서 전열관 배치로 인한 10%의 길이차이는 전체압력강하측면에서는 미미한 영향을 미친다.

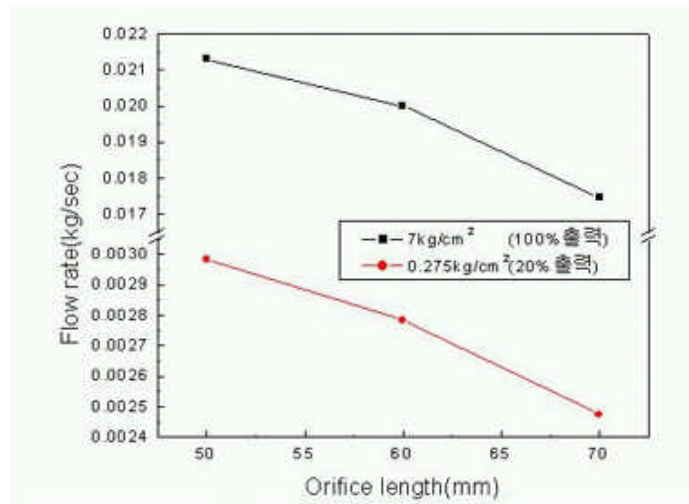


그림 7 전열관 오리피스 길이와 유량

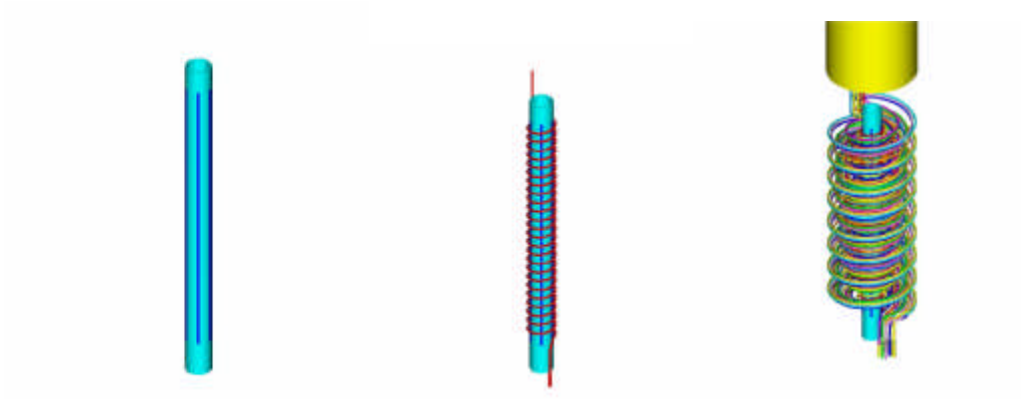
3. 가상증기발생기카세트 조립

실제로 증기발생기 카세트를 제작하는 과정과 마찬가지로 전열관을 배치한 후에 증기발생기의 카세트를 실제로 조립하는 과정을 컴퓨터상에서 Simulation하였다. 이를 위해서 상용프로그램인 IDEAS를 사용하였다. 용접 혹은 조립되는 단위부품으로 나누고 이를 순차적으로 조립하였다.

카세트 내통을 맨드릴로 하여 코일링 장치를 사용하여 제 1열의 전열관을 코일링한다. 한 열의 전열관을 모두 코일링한 후 전열관 지지대를 끼운다. 단, 이때 전열관의 급수쪽에는 전열관오리피스가 용접되어 있는 상태이다. 이와 같은 작업을 반복하여 12열까지 전열관(96개)을 코일링하며 전열관집합체를 완성한다. 전열관과 튜브시트 용접위치를 고정하기 위하여 전열관을 고정한다. 이 때 잔류응력을 이완하기위한 열처리를 수행해야한다. 열처리한 전열관 집합체의 지그부위를 잡고 카세트 원통에 삽입한다. 전열관집합체의 모듈급수헤더 튜브시트와 모듈증기헤더 튜브시트 지그를 제거하고, 모듈급수헤더 튜브시트와 모듈증기헤더 튜브시트를 조립한 후, 전열관을 길이에 맞게 절단한다.

상/하 전열관 지지보는 전열관집합체의 최종형상에 준해 현장 맞춤으로 제작하며, 제작된 전열관 지지보를 카세트 원통과 카세트 내통에 용접한다. 전열관(96개)을 모듈증기헤더 튜브시트(6개)에 용접한다. 전열관 오리피스 외피(96개)를 마찬가지로 방법으로 모듈급수헤더 튜브시트(6개)에 용접한다. 다음으로 전열관 오리피스 내피(96개)를 그림 5-21과 같이 전열관 오리피스 외피에 용접한 후, 전열관 오리피스 스크류(96개)를 오리피스 압력강하시험을 수행한 후 압력강하 요건에 만족하도록 적절한 길이로 재 가공한다. 전열관 오리피스 스크류(96개)를 그림 5-22와 같이 전열관 오리피스 내피에 삽입 후 용접한다.

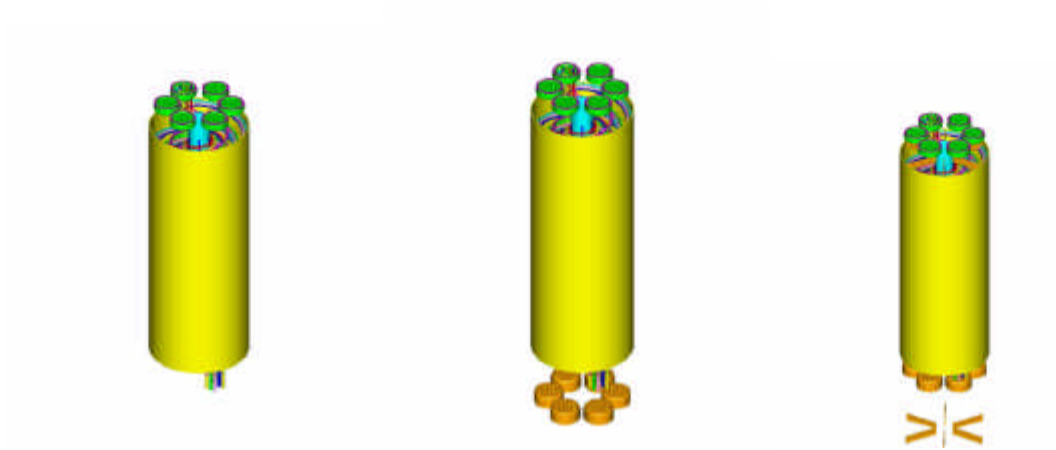
다음으로 모듈급수헤더 튜브시트에 모듈급수헤더 덮개(6개)를 용접한다. 모듈증기관 이중급속결합부(6개)를 모듈증기헤더 덮개에 용접한다. 이어서 모듈증기헤더 튜브시트에 모듈증기헤더 덮개(6개)를 용접한다. 카세트 내통 상부를 카세트 내통에 용접한다. 모듈급수관 지지구조물을 카세트 내통에 삽입하고, 카세트 내통 상부 덮개에 용접한다. 모듈급수관(6개)을 카세트 내통에 삽입한 후에 카세트 내통 하부 덮개를 취부 및 용접한다. 모듈급수관(6개)과 모듈급수관 엘보우(6개)를 용접한다. 카세트 원통 하부를 카세트 원통 하부 헤더에 용접한다. 카세트 원통 하부 헤더에 카세트 오리피스를 조립한다. 카세트 원통 하부 헤더에 면밀봉장치 압축 스프링, 면밀봉 장치를 조립한다. 카세트 원통 하부 헤더에 상부 밀봉링, 링격자, 하부 밀봉링, 밀봉링 고정자를 조립한다. 카세트 노즐을 모듈급수관과 모듈증기관에 취부 및 용접한다. 카세트 지지대를 카세트 노즐과 카세트원통에 볼트 체결 및 용접하며 조립된 형상은 그림 5-32와 같다.



전열관 지지대 부착

전열관 코일링

SG 카세트 외통 삽입



모듈증기헤드 튜브시트 조립

모듈급수헤더 튜브시트 조립

하부지지보 조립

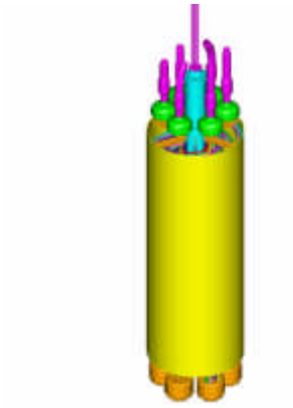


오리피스 스크류 조립

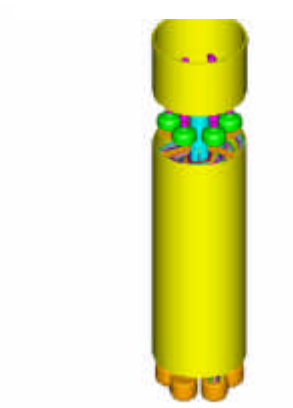
모듈증기헤더 조립

모듈증기관 조립

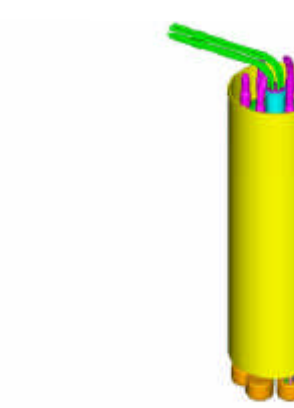
그림 8 가상SGC를 활용한 증기발생기 카세트 조립



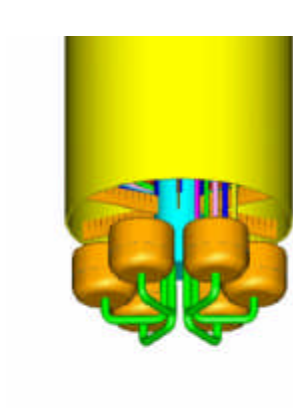
모듈급수관 지지구조물 조립



상부의통 조립



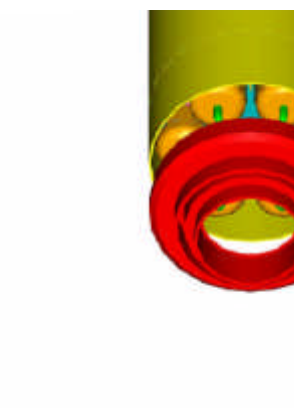
모듈급수관 조립



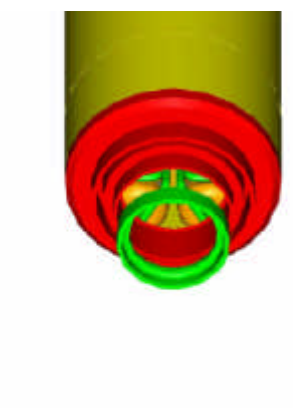
모듈급수관 하부엘보우 조립



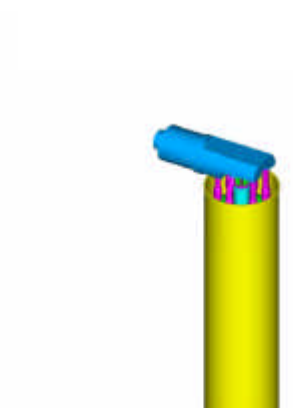
카세트 하부의통 조립



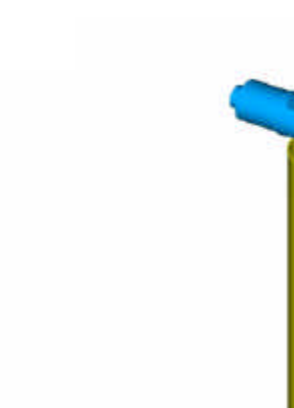
카세트 하부헤더 조립



카세트 오리피스 조립



카세트노즐 조립



카세트지지볼트 조립

그림 8 가상SGC를 활용한 증기발생기 카세트 조립(계속)

4. 결론

3차원 가상증기발생기카세트를 생산하고 이를 이용하여 설계단계에서 전열관의 연결배치를 결정하고 조립하는 방법을 시도하였다. 컴퓨터 상에서 3차원으로 이러한 작업이 구현됨으로 인해 별도의 엔지니어링모형이 생략될 수 있음을 보였다. 전열관 배열결과를 이용하여 3차원에서 실제로 전열관을 배치하여 공간적인 좌표를 생산하고 이를 바탕으로 실제 코일링 치수를 결정하는 방법을 적용하였다. 전열관의 길이, 좌표 값에 대해 이론적으로 계산한 값, 3차원 가상증기발생기를 사용하여 설계한 값, 그리고 실제로 코일링 후에 측정된 값을 비교하여 오차가 거의 없음을 보였다. 증기발생기 카세트의 모든 부품을 컴퓨터상에서 조립하여 제작성을 보이고 제작질차를 설계단계에서 제시하였다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. F. Andritsos, C. Damiani, F. Farfaletti, D. Maisonnier, G. Mercurio, "Simulation and experimental validation of first wall/blanket assembly and maintenance for the next step fusion reactor," *Fusion Engineering and Design*, Vol.42, pp.473-484, 1998
1. 김종인 외, 일체형원자로 주기기개발 및 검증시험, KAERI/RR-1889/98, 1999.
2. 김용완 외, SMART 증기발생기 개념설계, KAERI/TR-1446/99, 1999.
3. 김용완 외, CAE를 활용한 증기발생기 모듈급수헤더의 설계 및 해석, KAERI/TR-1812/2001.
4. 김용완, 김종인, 장문희, A Comparative Study for SMART Steam Generator Sizing Based on ASME and Russian Standard, 2000 한국원자력학회 춘계학술발표회, 대전, 2000.10.27.
5. 김용완, 김종인, 김충관, A Thermo-Mechanical Stress Analysis for Module Feedwater Header of SMART Steam Generator Using I-DEAS, *Proceedings of 2000 SDRC Users Conference*, 경주, 2000.11.3.
6. 김용완, 김종인, 장문희, Fatigue Analysis of SMART Steam Generator Module FW Header, 2001 한국원자력학회 춘계학술발표회, 제주, 2001.5.25.
7. 김용완, 외, 증기발생기 기본설계보고서, KAERI/TR-2127/2002.
8. *I-DEAS Master series*, Version 8.3, SDRC
9. *ABAQUS/Standard User's Manual*, Version 6.1, HKS
10. 김용완, 이환수, 박진석, 김종인, 장문희, "CAE를 활용한 증기발생기카세트 부품 피로해석," 2002 한국원자력학회 춘계학술발표회, 광주, 2002.5.