

’95 추계학술발표회 논문집  
한국원자력학회

일체형 신형원자로의 증기발생기 개념 설계

김용완\*, 김지호, 윤주현, 김주평, 김종인  
한국원자력연구소

요 약

일체형 원자로에는 노심지지원통과 원자로용기 내벽사이의 환형 공간을 나선으로 감는 형태인 일체형 관류식 나선형 증기발생기와 증기발생기를 여러개의 모듈로 나누어 환형 공간에 배치하는 형태인 모듈형 관류식 직관형 증기 발생기가 가장 적합한 것으로 판단되어 두가지 형태에 대한 개념을 설정하였다. 일체형 관류식 나선형 증기발생기는 전열관 집합체, 지지구조물, 하강유로, 그리고 증기 및 급수 헤더로 구성되어 있다. 모듈형 관류식 직관형 증기발생기는 개개의 모듈이 별도로 운전될 수 있는 12개의 모듈로 구성되며, 원자로용기를 관통하는 배관의 수를 줄이기 위해서 급수관이 증기관의 안쪽에 있는 이중배관 개념을 사용한 것이 특징이다. 모듈형 관류식 직관형 증기발생기가 설계 및 제작이 용이하지만 높이를 줄이기 위한 방안으로 두가지 개념이 조합된 모듈형 관류식 나선형 증기발생기도 검토하였다.

1. 서 론

기존의 상용 가압경수로의 대부분 분리형으로서 재순환식 U자형 증기발생기를 많이 사용하고 있는 실정인데 비해, 증기발생기가 원자로에 내장되는 일체형 원자로에서는 크기가 작고 원자로의 내부공간의 형상에 적합한 형태의 증기발생기가 요구된다[1]. 따라서 재순환식 증기발생기에 비해 상대적으로 작게 설계할 수 있는 관류식 증기발생기가 주로 사용되고 있다. 일체형원자로에서는 증기발생기의 크기, 유지 및 보수방법, 교체개념이 매우 중요한 설계조건이 된다[2]. 그리고 관류식 증기발생기는 이차측 냉각재가 전열관의 안쪽을 흐르게 되므로 전열관이 압축응력을 받게되므로 응력부식 측면에서 유리한 반면에 이차냉각수가 전열관 내에서 완전히 증발하므로 급수에 대한 순도조절이 중요하게 된다.

관류식 증기발생기를 설계할 때 첫째로 전열관을 직관형 혹은 나선형으로 사용할 것인가를 고려해야 하는데 이는 공간적인 조건, 제작의 용이성, 그리고 가동중 검사와 연관되어 결정된다. 다음으로 중요한 설계개념은 하나의 증기발생기로 구성된 일체형 혹은 여러개의 모듈로 구성된 모듈형이 유리한가를 평가해야 하는데 이는 주로 운용과 교체 개념에 의해 결정된다. 현재 널리 알려진 일체형원자로의 증기발생기 설계개념을 보면 SIR[3]에서는 모듈형 관류식 직관형 증기발생기를 사용하며, SPWR[4]에서는 일체형 관류식 나선형 증기발생기를 사용하고 있고, UNITHERM[5]등 러시아의 일체형 원자로에서는 모듈형 관류식 나선형 증기발생기가 많이 사용되고 있다.

본 연구에서는 일체형 원자로에 적용할 수 있는 일체형 관류식 나선형 증기발생기와 모듈형 관류식

직관형 증기발생기에 대한 개념설계를 수행하였고 모듈형 관류식 나선형 증기발생기에 대해서도 개념을 설정하여 적용 타당성을 검토하였다.

## 2. 일체형 관류식 나선형 증기발생기 개념설계

관류식 나선형 증기발생기는 많은 수의 전열관들이 나선으로 노심지지원통을 감고 올라가는 형상으로서 노심지지원통과 원자로용기 내벽 사이의 모든 환형 공간을 유효전열지역으로 활용하는 개념이다. 급수헤더(feed water header)에서 분리된 이차측 냉각수가 개개의 전열관을 통과하면서 완전히 증발하여 생성된 과열증기는 되어 증기헤더(steam header)에서 모여서 주증기관을 통해서 터빈으로 이동된다.

전열관의 길이에 따른 전열면적을 계산한 후[5]에 주요 설계조건을 감안하여 전열면적을 결정하였다. 전열관을 나선형으로 감는 방법은 여러가지가 있다[6~8]. 균일한 전열관의 배열을 유지하면서 전열관을 나선상으로 감게 되면 나선반경이 작은 곳에서 감긴 전열관의 길이와 나선반경이 큰 곳에서 감긴 전열관의 길이 차이가 커져서 이차측 압력강하의 차이를 유발 할 수 있다. 이를 방지하기 위해서 본 개념설계에서는 Fig. 1에서 보는 것과 같이 반경방향으로 가면서 각 열의 전열관 수를 점차 증가 시킴으로써 전열관 길이의 차이를 매우 작게할 수 있는데 이는 전열관이 삼각형배열과 사각형 배열이 조합된 형태가 된다. 그리고 각열은 서로 반대방향으로 감음으로써 열하중으로 인한 비틀림을 방지하였다. 반경방향 각열의 나선각( $\alpha$ )은 다음의 관계를 유지하면서 변한다.

$$\alpha_j = \tan^{-1} \left\{ \frac{\tan \alpha_1}{1 + 2 \frac{(n_r - 1) P_r}{D_1}} \right\} \quad (j=2, 3, \dots, n_r) \quad (1)$$

여기서  $P_r$ ,  $n_r$ ,  $D_1$ 은 각각 반경방향피치, 반경방향열수, 첫째열의 지름을 나타낸다. 반경방향피치를 결정하는 주된 설계인자는 유체기인진동이고 축방향피치는 wear sleeve 설치 할 수 있는 최소작업공간에 의해 주로 결정되며, 전열관의 크기는 가동중검사를 할 수있는 최소의 내경에 코드에서 결정되는 두께를 더한 값 중에서 표준치수에서 가까운 값을 설정하였다. 반경방향피치 및 축방향피치는 각각 25mm이며, 전열관은 외경이 19mm인 Inconel 690을 사용한다. 전술한 개념을 바탕으로 전열면적( $A_h$ )과 피치를 사용하여 반경방향에 따른 전열관의 수와 나선각을 아래의 조건을 고려하면서 다른 설계조건을 만족하도록 결정하였다.

$$\min[\max\{l_i - l_j\}, \min\{A_h(cal.) - A_h(inp)\}] \quad (2)$$

Table 1은 상기의 방법에 따라 결정된 전열관 집합체의 전열관수, 반경방향 열수, 나선각, 감김횟수 등의 일부 설계변수를 보여주고 있다.

Fig. 2는 일체형 관류식 나선형 증기발생기에 대한 개념도이다. 이는 독립적인 2개의 부분으로

나누어지는데 각 부분은 별개의 급수 및 증기헤더를 갖고 독립적으로 운전될 수 있으며 격리될 수 있다. 관류식 나선형 증기발생기는 튜브집합체, 지지구조물, 하강유로(downcomer), 내통과 외통(inner, outer shroud), 급수 및 증기헤더로 구성된다. 급수헤더에서 개개의 전열관으로 분산된 이차냉각수는 원자로용기와 외통사이의 하강유로를 통해 아래로 내려간 다음에 내통과 외통사이의 공간에서 나선으로 감기면서 상승하여 증기헤더에서 다시 모이게 된다.

튜브집합체는 반경방향지지판에 의해 지지되고 그 하중을 아래의 바닥지지구조물과 원자로용기에 부착된 러그(lug)에 전달하게 된다. 관류식 나선형 증기발생기는 유체기인진동이 중요한 설계인자인데 유체기인진동을 유발하는 유체의 진동수 및 임계속도로 부터 전열관의 진동수를 멀리하기 위해서는 지지간격을 좁혀서 전열관의 진동수를 높이는 것이 바람직하다. 그러나 반경방향지지판과 전열관은 열팽창차이가 매우 심하여 원주형태로 감겨 있던 전열관이 열팽창 후에는 울룩불룩해지는 bear-hug 현상이 발생하므로 열팽창측면에서는 반경방향지지판을 적게 사용하는 것이 바람직하다. 이 문제점을 해결하기 위해서 강성이 큰 반경방향지지판 사이에 다소 쉽게 열팽창이 되며, 유체기인진동측면에서는 지지역할을 할 수 있는 유연한 반경방향지지판을 사용하였다.

증기발생기는 전체적으로 교체하며, 증기 및 급수헤더를 통해 전열관의 파손을 감시하고 전열관 막음을 하는 개념을 사용하는데 가동중검사를 위해서는 전열관의 곡률이 일정한 값 이상이 되어야 하며 전열관의 내경이 일정한 값 이상이 되어야한다.

### 3. 모듈형 관류식 증기발생기 개념설계

노심지원통과 원자로용기 내벽사이의 환형공간에 여러개의 증기발생기를 두는 모듈형 개념을 사용하면 운용의 개념과 설계 제작 측면이 매우 달라지게 된다. 먼저 개개의 모듈에 대해 별개로 운전 및 격리를 될 수 있으며 증기발생기가 파손되었을 때는 파손된 모듈만 교체를 할 수 있다. 반면에 모듈형 개념을 채택하면 원자로 용기를 통과하는 배관이 많아지지만 여기서는 주급수관의 바깥에 주증기관이 있는 형태의 이중배관 개념을 사용함으로써 원자로압력용기를 통과하는 배관의 수를 줄였다. 모듈형 관류식 직관형 증기발생기는 설계 및 제작적인 측면에서 나선형에 비해 상대적으로 쉽지만 증기발생기의 길이가 길어지는 단점이 있다. 길이가 긴 전열관을 사용하면 전체 전열면적이 줄어들지만 원자로용기의 높이 제약때문에 가능한 범위 내에서 가장 긴 전열관을 사용하였다.

모듈형 관류식 직관형 증기발생기는 Fig. 3에서와 같이 모두 12개의 모듈로 구성되어 있다. 이중배관에서 안쪽에 위치한 주급수관은 증기발생기의 중앙으로 하강하여 아래의 급수헤더에서 개개의 전열관으로 연결되어 이차측 냉각수가 전열관안에서 상승하면서 증발하여 상부의 증기헤더에 모이게 된다. 전열관은 삼각형으로 배열되며, 전열관의 외경은 12.7mm이다. 일차측이 상부에서 유입되어 하단의 출구로 나가는 형태가 되므로 증기발생기의 셸(shell)은 단지 유로만 형성할 뿐 내외압의 차이가 없다.

직관형 증기발생기의 높이를 줄일 수 있는 방안으로 모듈형 관류식 나선형 증기발생기를 검토하였다. 기본적인 운용 개념은 모듈형 관류식 직관형 증기발생기와 동일하지만 이 경우에 개개의

없으므로 전열관의 파손을 검사하는 방법에 어려움이 예상되며, 설계와 제작도 직관형 보다는 복잡하게 된다.

#### 4. 결 론

일체형 원자로에 사용할 일체형 관류식 나선형 증기발생기와 모듈형 관류식 직관형 증기발생기에 대한 개념을 설정하였다. 전체적으로 평가하여 일체형 관류식 나선형 증기발생기는 좁은 공간에 설치할 수 있어 공간적인 제약이 큰 경우에 적합하고 모듈형 관류식 직관형 증기발생기는 제작 및 운용측면에서 유리하다. 열수력적인 검토 결과가 계속 반영될 것이며, 앞으로 열하중, 정적 및 동적인 거동과 유체기인진동에 대한 해석이 계속 수행할 예정이다.

#### 참 고 문 헌

1. 김지호 외, "일체형 신형원자로의 기계구조 예비 개념 설계," 한국원자력학회 추계학술대회 논문집, 1995.10.28.
2. *Steam/Its Generation and Use*, Babcock & Wilcox, 1978.
3. R. Bradbury, J. Longo, R. Strong, M. Hayns, "The Design Goals and Significant Features of the Safe Integral Reactor," *ANS'89 Annual Meeting*, Atlanta, Georgia, June 4-8, 1989.
4. Sako, T. Oikawa, and J. Oda, "SPWR(System-integrated PWR)," *IAEA Technical Committee Meeting on Integral Reactor Design Concept*, Obninsk, Russia, May 16-20, 1994.
5. 윤주현 외, "관류식 증기발생기의 열수력적 설계 및 성능분석 프로그램 ONCESG의 개발," 한국원자력학회 추계학술대회 논문집, 1995.10.28.
6. L.A.Adamovich, G.I.Grechko, V.V.Rumyantsev, V.K.Ulasevich, V.A.Shishkin, "Autonomous Nuclear Power Plant with Integrated Nuclear Steam Supply System Designed for Power and Heat of Remote Difficult-to-get Areas," *IAEA Technical Committee Meeting on Integral Reactor Design Concept*, Obninsk, Russia, May 16-20, 1994.
7. Hans W. Fricker, "Design and Manufacturing Experience for the German Thorium High-Temperature Reactor 300 MW(e) Steam Generator," *Nuclear Technology*, Vol.28, pp.339-347, 1976.
8. Alan H. Spring and Mithat Basol, "Steam Generator Conceptual Design for the Modular HTGR-Dissimilar Metal Weld Consideration," *ASME 87-WA/NE13*, Boston, December 13-18, 1987, pp.1-8
9. R.N. Quade, P.S.Hunt and W.G.Schuetzenduebel, "The Design of the FORT ST VRAIN Steam Generators," *Nuclear Engineering and Design* Vol.26, pp.118-134, 1974

Table 1 일체형 관류식 나선형 증기발생기의 튜브집합체 설계치.

열번호	튜브 갯수	유효 길이(m)	나선각( $^{\circ}$ )	감김 횟수
1	21	39.31	4.40	5 3/4
2	21	39.34	4.30	5 3/8
3	22	39.33	4.41	5 1/2
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
27	33	39.63	4.33	3 3/8
28	34	38.81	4.39	3 1/2
29	34	39.36	4.33	3 1/2
30	35	39.92	4.40	3 1/2
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.

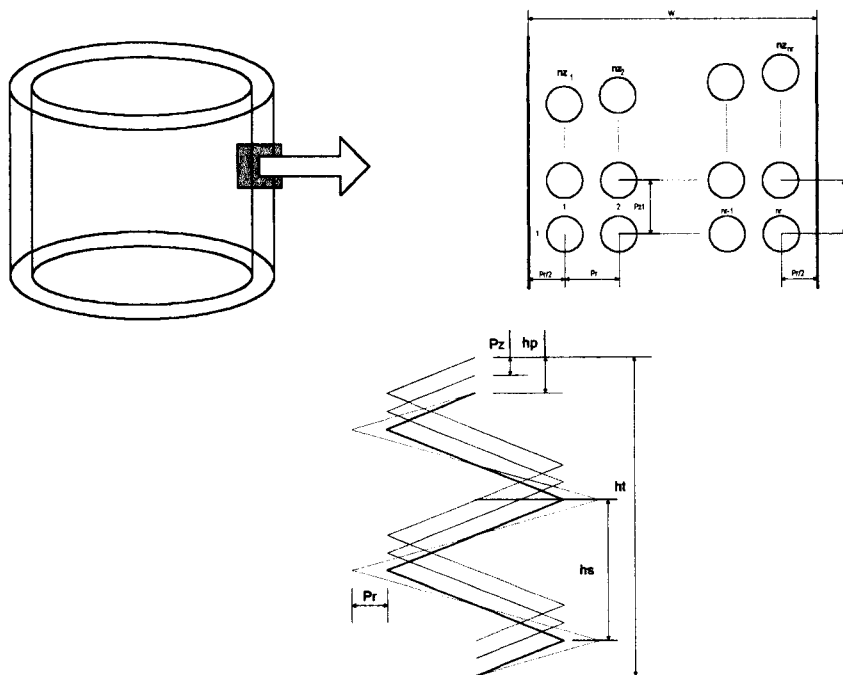


Fig.1 나선형 증기발생기의 전열관 배치 및 주요 변수.

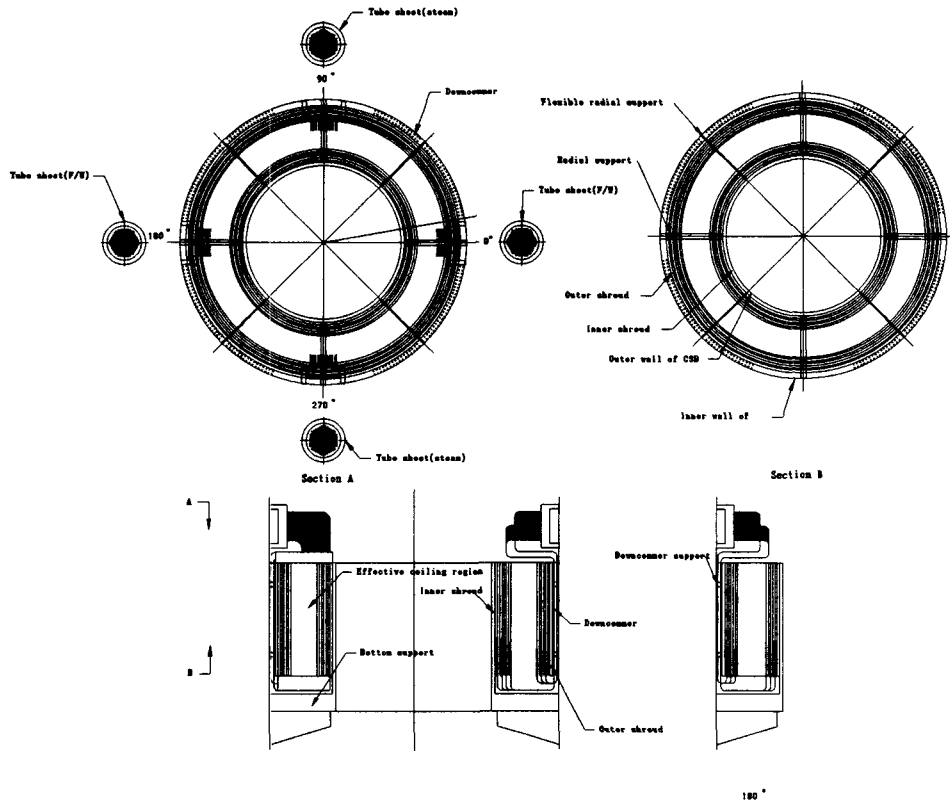


Fig. 2 일체형 관류식 나선형 증기발생기의 설계 개념도.

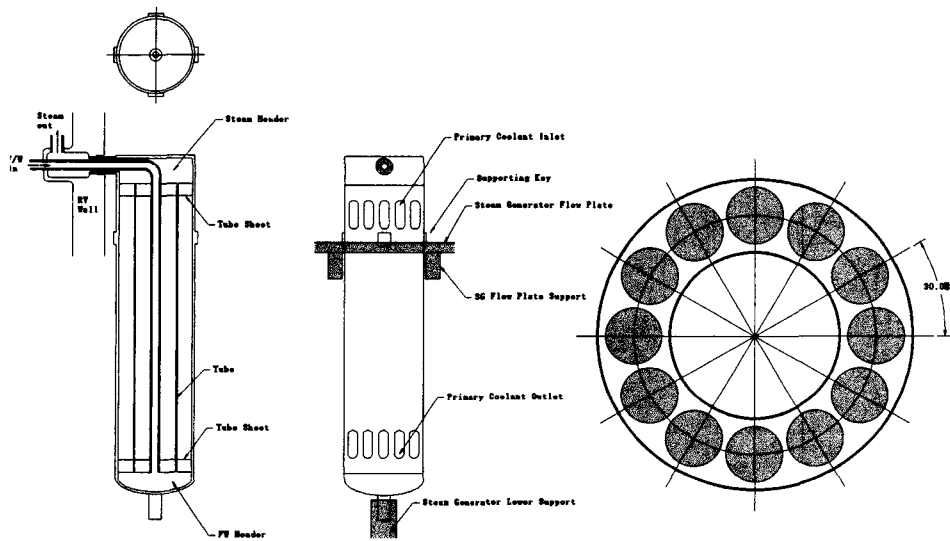


Fig. 3 모듈형 관류식 직관형 증기발생기의 설계 개념도.