

이중벽관 증기발생기의 설계개념 기술개발[§]

남호윤^{*†} · 최병해^{*} · 김종범^{*}

* 한국원자력연구원 고속로기술개발부

Design Concept and Technology Development of a Double-Wall-Tube Steam Generator

Ho-Yun Nam^{*†}, Byoung-Hae Choi^{*} and Jong-Bum Kim^{*}

* Div. of Fast Reactor Development, Korea Atomic Energy Research

(Received May 11, 2010 ; Revised July 20, 2010 ; Accepted July 20, 2010)

Key Words: Double Wall Tube(이중벽관), Steam Generator(증기발생기), SFR(소듐냉각 고속로), Reliability of Steam Generator(증기발생기 신뢰성), Heat Transfer Capability(열전달 성능), Reduction of Sodium-Water Reaction(소듐-물 반응성 감소)

초록: 소듐을 냉각제로 사용하는 고속로의 증기발생기에서는 소듐과 물의 화학적 반응을 최소화하는 것이 중요한 문제이다. 소듐과 물의 반응 가능성을 줄여 증기발생기의 신뢰성을 향상시키기 위한 한가지 방안으로 이중벽관을 전열관으로 사용하는 증기발생기를 개발하고 있다. 이 증기발생기에서 중요한 현안은 이중벽관에서의 열전달 성능을 향상시키는 문제와 원자로 운전 중에 소듐과 물 반응사고가 일어나기 전에 전열관의 파손을 감지하는 기술을 개발하는 것이다. 이 논문에서는 이 현안을 극복할 수 있는 방안을 제시하였고, 이 기술을 활용하여 증기발생기의 개념을 설계하였다. 또한 이 개념에 적용되는 이중벽관을 설계 및 예비 제작하여 기계적 시험을 수행하였다.

Abstract: The possibility of a sodium-water reaction occurring in a conventional single-wall-tube steam generator in an SFR is a major problem. To improve the reliability of a steam generator, a double-wall-tube steam generator that can reduce the possibility of the occurrence of a sodium-water reaction is being developed. Current developments are focusing on improving the heat-transfer capability of a double-wall tube; further, the development of a leak-detection method to detect the occurrence of a sodium-water reaction during the reactor operation is also underway. In this study, new concepts, which will solve the above-mentioned problems, have been developed. Accordingly, a double-wall tube has been designed, fabricated, and mechanically tested for the purpose.

- 기호설명 -

- Δn : 인접한 행 간의 전열관 개수 차이
- S_n : 행간격 피치(row pitch) (m)
- S_p : 종간격 피치(longitudinal pitch) (m)
- a : 전열관 경사각 (degree)

1. 서론

소듐을 냉각제로 사용하는 고속로(Sodium cooled

Fast Reactor; SFR)의 증기발생기 내부는 수많은 전열관들로 구성되어 있는데 대부분 저온, 고압(16.5MPa)의 물/수증기와 얇은 전열관 벽을 사이에 두고 상대적으로 고온, 저압(0.1MPa)인 셀츄 소듐과 열을 교환하는 구조를 갖고 있다. 따라서 어떤 이유로 인해 전열관 벽에 결함이 생겨 물이 소듐 속으로 누출되면, 격렬한 화학반응을 일으켜 고온의 반응열과 함께 다량의 수소가스와 부식성 반응생성물들을 생성시켜, 이로 인해 인접한 전열관들이 부식 및 침식되고 과압으로 인해 증기발생기 계통에 심각한 손상을 초래할 가능성이 있다.

따라서 고속로의 신뢰성을 향상시키기 위한 방안 중 하나로 소듐-물 반응 가능성이 낮은 이중벽관(Double Wall Tube; DWT)을 갖는 증기발생기

[§] 이 논문은 2010년도 대한기계학회 재료 및 파괴부문 춘계학술대회(2010. 4. 22.-23., 라테나콘도) 발표논문임.

[†] Corresponding Author, hynam@kaeri.re.kr

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

(Double Wall Tube Steam Generator; DWTSG)를 개발하기 위한 연구가 해외에서 다양하게 수행되고 있다.⁽¹⁾ 증기발생기에서의 누설로 인하여 소듐-물 반응사고가 발생한 고속로로는 미국의 FERMI, 영국의 PFR 및 소련의 BN350 등⁽²⁻⁴⁾이 있고, 다수의 미세한 누설사고가 보고되고 있다.

일반적으로 이중벽관은 소듐과 물 사이에 내관과 외관으로 구성된 2 중의 격리막이 있는 형태로 두 관 사이에는 열전달이 잘되고 재질과의 반응성도 없는 비활성가스를 채운다. 이중벽관은 제작성과 경제성이 좋은 프리스트레스(pre-stress) 방법으로 기계적 접촉을 하도록 제작하는데, 이는 이중벽관의 단점 중 하나인 열전달 성능저하를 방지하기 위해 냉간인발 가공공정에서 생성된 경계면의 잔류응력을 그대로 유지시킨다.⁽⁵⁾

증기발생기에는 셀 측에 흐르는 고온의 소듐에서 전열관 측으로 흐르는 저온의 물/수증기에 열이 전달되므로 외관의 온도가 내관의 온도보다 최대 55°C 정도 높다. 그러므로 내관과 외관을 같은 재질로 제작할 경우, 외관의 열팽창이 내관의 열팽창보다 커서 경계면에서의 잔류응력이 감소하여 상호 밀착되지 못하므로 열전달 성능이 감소된다.

프리스트레스 공법으로 제작된 이중벽관을 사용한 EBR-II 과열기에서 정상운전 8 년 후 열출력이 서서히 감소하다가 16 년 후에는 정상운전의 84% 정도로 감소된 것이 이의 단적인 예로, 이는 운전기간 동안 내관과 외관 사이의 간격(gap)이 커짐으로써 제작 시에 생성시켜둔 잔류응력이 감소하여 발생한 것으로 분석되었다.^(6,7)

또한 소듐-물 반응사고의 확률을 줄이기 위해서는 소듐-물 반응사고가 일어나기 전에 내관 또는 외관의 파손을 감지하는 것이 매우 중요하다. EBR-II⁽⁶⁾와 Westinghouse 사⁽⁸⁾에서 제작한 DWTSG의 경우 상부에 물 측 튜브시트와 소듐 측 튜브시트를 별도로 만들고, 이 두 튜브시트 사이인 공용 헬륨가스 플레넘에 모든 이중벽관의 경계면이 노출되도록 설계하여 여기에 모인 헬륨가스를 분석하여 전열관 파손을 감지하고자 하였으며, 일본 JAPC 사와 PNC(현 JAEA)가 공동으로 설계한 DWTSG⁽⁹⁾에서는 상부와 하부에 각각 공용 헬륨가스 플레넘을 설치하여 이중벽관의 경계면에 흐르는 헬륨가스를 분석하는 방법을 채택하였다.

이와 같은 방법들은 내관이 파손되면 급수헤더와 수증기헤더에서 전열관을 폐쇄시킬 수 있으나, 외관이 파손되면 그 관을 폐쇄시킬 수 없으므로 헬륨가스가 소듐 측으로 누설되거나 소듐이 공용

헬륨가스 플레넘에 채워지게 되므로 파손감지기능을 상실하게 된다. 그러므로 General Electric 사⁽¹⁰⁾와 JAEA⁽¹¹⁾의 DWTSG에서는 온라인 전열관 파손 감지 기능을 구비하지 않고 있다.

JAPC 사에서 개발한 헬리컬 DWTSG⁽¹²⁾에서는 모든 전열관을 증기발생기의 셀의 외부로 통과시킨 후에, 각각의 전열관 경계면의 헬륨가스를 분석하여 전열관의 파손을 감지코자 하였다. 이 방법은 수많은 전열관이 증기발생기 외부에 노출되므로 증기관 파단사고와 같은 사고를 유발시킬 수 있다.

그러므로 이중벽관 증기발생기에 있어서 가장 대두되는 기술적 현안은 내관과 외관 사이인 경계면에서의 열전달 성능을 향상시키는 문제와 소듐-물 반응사고가 일어나기 전에 전열관의 파손을 감할 수 있는 기술을 개발하는 것이다.

2. 개념개발

2.1 열전달 성능향상

지금까지의 국외연구에서는 실험과 실험로 운전에서 획득한 자료를 설계와 분석에 주로 사용하고 있으며,^(5,7,10) 비공개 문헌에 의하면 경계면에서의 열전달계수는 전열관의 위치와 조건에 따라 $0.2 \times 10^4 \sim 4.2 \times 10^4 \text{ W/m}^2\text{°C}$ 범위에 있었다. 또한 종래 개발된 프리스트레스 이중벽관은 내관과 외관이 동일한 재질이었다. 따라서 소듐과 접촉하는 외관은 온도가 높아 열팽창이 많고, 물/수증기와 접촉하는 내관은 상대적으로 온도가 낮아 열팽창이 적어 두 관 사이에 온도차가 클수록 밀착도가 떨어져 두 유체 사이의 열전달 성능이 저하되는 단점이 있었다.

잔류응력은 이중벽관을 제작할 시에 생성되는데, 잔류응력이 감소하는 원인으로는 시간에 따른 재질의 응력 감소, 내관과 외관의 온도차이, 전열관 다발 내부에서 전열관 간의 온도차이 및 전열관 다발과 셀 간의 온도차이에 의한 전열관의 축방향 압축성 응력의 영향 및 폐쇄한 전열관에 의한 주위 전열관 온도상승 등이다. 시간에 따른 재질의 응력감소와 내관과 외관의 온도차이에 따른 잔류응력 감소는 시스템에서 필연적이다.

내관과 외관 간의 온도차이에 의한 잔류응력 감소 문제는 본 논문에서 제시하는 개념인 내관과 외관의 재질을 다르게 함으로써 극복할 수 있다. 전열관다발에서의 온도차이에 의한 열응력은 직관형 증기발생기인 경우에는 셀에 벨로우즈를 설치

하고 전열관다발 내에서 유동과 온도를 균일하게 분포하도록 설계하여 줄일 수 있으나 실제적으로는 한계가 있다. 헬리컬형 증기발생기인 경우에는 이 문제가 대폭 완화될 수 있다.

본 연구에서는 Fig. 1 에서 보는 바와 같이 열팽창률이 10~15% 정도 다른 두 가지 재질 즉, 외관은 열팽창률이 낮고, 내관은 높은 재질로 이중벽관을 제작하여 온도차이가 발생하여도 밀착성을 유지할 수 있도록 하였다. 또한 온라인(on-line) 누출감지를 용이하게 하기 위하여 길이 방향으로 0.2~0.4mm 높이로 4 개의 홈(groove)을 외관의 내면에 90도 간격으로 설치하였다.

400℃에서 내관으로 사용되는 2¼Cr-1Mo 강의 열팽창률은 약 $1.39 \times 10^{-5}/\text{℃}$ 이고, 외관으로 사용되는 Mod.9Cr-1Mo 강의 열팽창률은 약 $1.21 \times 10^{-5}/\text{℃}$ 이다. 이 경우 증기발생기 정상운전조건에서 발생하는 내관과 외관 사이의 최대 온도차인 55℃에서 상온에서와 유사한 열전달 성능을 가지며, 물 측이 배출되어 내관과 외관이 동일하게 520℃가 되는 가상 이상상태에서는 ANSYS 전산코드 계산 결과 11MPa 정도의 응력이 발생하므로 이중벽관 제작 시 생성된 잔류응력 15MPa 와 합해도 26MPa 정도의 응력이 존재하지만 동일 온도에서 단조 파이프의 허용응력이 Mod.9Cr-1Mo 강은 103MPa, 2¼Cr-1Mo 강은 68MPa 정도이므로 안전에 이상이 없다.

이중벽관을 압연인발로 제작할 경우에 내관과 외관의 두께와 직경에 따라 내관과 외관의 경계면에 생성되는 잔류응력이 결정된다고 EPRI 보고서⁽¹³⁾에 도표로 잔류응력이 값이 제시되어 있다. Srinivasan 등의 해석⁽⁶⁾에 의하면 열전달 감소가 일어나는 EBR-II 의 임계잔류응력은 13.8MPa 이었다. 일본의 Mitsubishi 사가 개발하는 외관의 외경 19mm, 내관의 내경 13.8mm 인 이중벽관을 같은 재질(Mod.9Cr-1Mo 강)로 만들 때 경계면의 접촉성

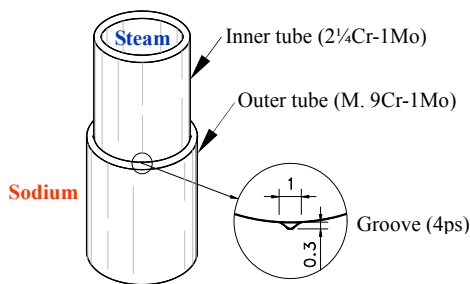


Fig. 1 Double wall tube with different materials

을 높이기 위하여 최소 잔류응력을 30MPa 로 설정한 바 있다.⁽¹⁴⁾

2.2 온라인 전열관 파손감지

이중벽관의 경우 내관과 외관이 접하는 부분이 표면돌기에 의해 완전히 밀착되지 못해 미세한 공간이 생성된다. 이 미세한 공간에는 헬륨가스를 채우는데, 만일 외관이 파손되면 이 공간에 채워진 헬륨가스(2 MPa)가 소듐 측(대기압)으로 누출되고, 내관이 파손되면 수증기(16.5MPa)가 이 헬륨가스가 채워진 공간으로 유입되게 된다. 따라서 홈에 채워진 가스 양의 변화를 온라인으로 감지하여 누출여부를 판단할 수 있다.

본 연구에서는 온라인 전열관 파손감지를 위해, Fig. 2 와 같이 하부 튜브시트에서 각 이중벽관의 홈들을 개별적으로 감지홀(detection hole)에 연결하는 방법을 도출하였다. 즉, 하부 튜브시트의 튜브홀(tube hole)에는 내관만 통과시켜 하부에서 튜브시트에 용접으로 부착하고, 외관은 튜브시트의 상부에서 용접으로 부착하면 홈에 있는 헬륨가스는 튜브시트 내부에서 내관의 외부와 튜브홀 사이로 연결된다.

하부 튜브시트에서 감지홀을 반경방향으로 설치될 수 있도록 각 전열관 행(row)에 있는 튜브홀이 반경방향으로 일직선이 되게 배치하였다. 감지홀은 튜브홀 사이로 상하로 배치되며, 측면에서 각 튜브홀의 깊이만큼 홈을 파서 만든다.

상부 튜브시트에서는 하부 튜브시트와는 다르게 이중벽관은 내관과 외관을 동시에 튜브홀을 통과시켜 튜브시트 상부에서 용접으로 부착한다.

이중벽관의 홈에 있는 헬륨가스는 개별적으로

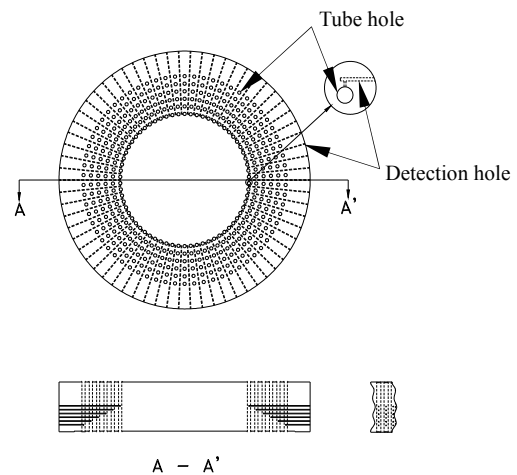


Fig. 2 Arrangement of the tube holes and the detection holes in the lower tube sheet

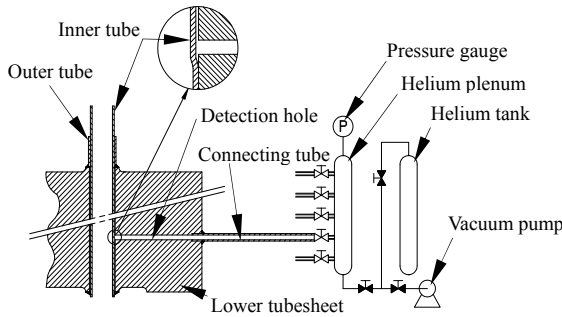


Fig. 3 On-line tube failure detection system

감지홀에 연결되고 튜브시트의 측면에서 연결튜브(connecting tube)를 통해 파손감지 시스템(Fig. 3)에 연결된다. 외관이 파손될 경우 연결튜브를 막고, 급수헤더와 수증기헤더에서 상응하는 전열관을 막으면 감지기능의 상실 없이 전열관 격리가 가능하다.

헬륨가스 플레넘의 개수는 압력계의 사고확률, 감응도 및 파손 후 감지하는데 필요한 시간을 고려하여 결정한다. Kisochara 등⁽⁹⁾이 이중벽관을 이용하여 수증기와 헬륨가스로 누출감지 실험을 수행한 결과를 바탕으로 압력계의 감응도, 헬륨가스 플레넘의 전체부피(0.4m³), 헬륨가스 압력(2MPa)을 고려해서 10⁻³g/s 누출될 때 파손 후 1 일 이내에 감지하려 할 경우 필요한 헬륨가스 플레넘 수는 대략 396 개의 전열관을 갖는 증기발생기의 경우 4~6 개 정도로 나타났다.

튜브시트에 외관은 상부에서 필렛 용접하고, 내관은 하부에서 필렛 용접하므로 내관과 튜브시트 사이에는 미세한 공간이 형성되는데 하부에서 감지홀까지는 관을 확장하여 튜브시트에 밀착시킴으로 견고성이 유지된다. 연결튜브의 내부에는 2MPa 압력이 항상 유지되나, 내관이 파열될 경우 16.5MPa 의 압력을 받을 수 있으므로 연결튜브는 외경 5mm, 내경 2mm 인 전열관을 사용하였고, 튜브시트의 벽면에 삽입하여 용접한다. 연결튜브들은 4~6 개의 다발로 구성하여 증기발생기와는 격리된 공간에 설치된 헬륨가스 플레넘에 연결한다.

3. 구조개념 설계

이중벽관을 적용하는 증기발생기의 형태는 이중벽관의 설치방법에 따라 직관형과 헬리컬형으로 구분되는데, 본 연구에서는 375MWth 용량의 헬리컬형 이중벽관 증기발생기를 예비 개념설계하여 상기 개념들의 적용성을 분석하였다.⁽¹⁵⁾ 이 증기발생기는 소듐과 물이 역류로 흐르는 셀과 전열관 형식으로 Fig. 4 와 같은 형상을 갖는다.

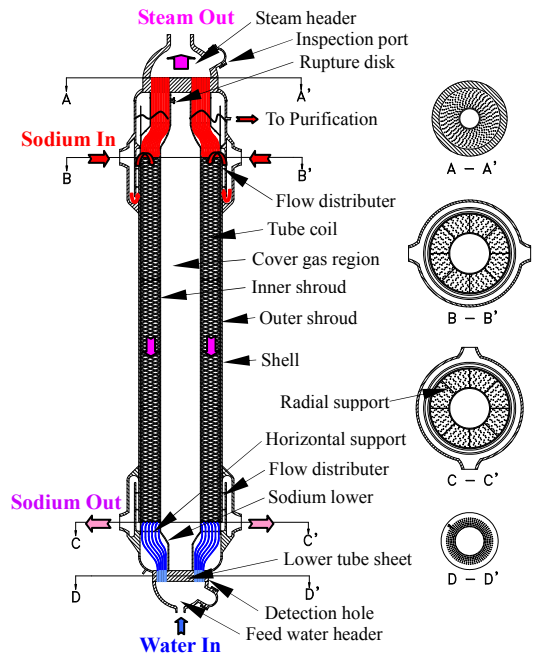


Fig. 4 375MWth helical DWTSG

증기발생기의 구조는 증기발생기 셀, 상하부 헤드, 헬리컬 코일과 지지대로 구성된 전열관다발과 전열관다발을 감싸고 있는 외부 및 내부원통, 소듐이 유입되는 부분인 상부전열관 어셈블리, 소듐이 유출되는 부분인 하부전열관 어셈블리, 수증기헤더, 급수헤더 및 커버가스 공간으로 구분된다. 헬리컬 코일은 30mm 외경인 이중벽관의 허용곡률반경보다 보수적인 반경으로 내부원통(Inner shroud)에 감겨 있는 형태이다.

외경 30mm, 내경 22mm 인 이중벽관을 전열관으로 사용하였다. 전열관 행 수는 11 개이며, 전열관의 개수는 396 개이다. 가장 작은 반경을 갖는 전열관 행은 26 개의 전열관으로 이루어지고, 코일 반경이 780 mm 이다. 이때 전열관 직경 대 코일반경의 비는 26 이다. 코일의 종간격 피치와 행간격 피치가 결정되면 코일의 경사각은 다음과 같이 결정된다.

$$\tan(\alpha) = \frac{\Delta n S_n}{2\pi S_p} \tag{1}$$

여기에서 α 는 전열관의 경사각, S_n 는 행간격 피치, S_p 은 종간격 피치이다.

두 인접한 행 간의 전열관 개수 차이인 Δn 이 커지면 증기발생기의 직경은 작아지고 높이는 높아지는데, 직경을 줄이기 위하여 이 값을 2 로 설정하였다. 이 설계에서 행간격 피치 60mm, 종간

격 피치가 44mm 이므로 전열관의 기울기는 13.14° 이다. 전열관다발의 높이는 12.56m, 증기발생기 전체 높이는 20.6m, 셀의 외경은 3.01 m 이다. 유효 전열관의 길이는 56.9m, 전 길이는 61.6m 이다.

외부원통(outer shroud)은 전열관다발의 외부에 설치되며, 다발의 내부에 소듐 유로가 형성되게 하고, 다발을 보호하는 역할을 한다. 전열관다발의 상부와 하부에는 2 개의 유량조절용 오리피스가 달린 수평으로 설치된 수평지지대가 있고, 전열관다발에는 상하로 설치되는 반경방향 지지대를 8 개 설치하였다. 반경방향 지지대는 내부원통, 외부원통 및 유량조절용 수평지지대들에 의해 지지된다.

상부전열관 어셈블리 영역에서 헬리컬 코일이 수증기헤더의 튜브시트에 용접되기 위해서는 전열관의 방향을 76.86° 바꾸어야 되므로 휘어서 방향을 바꾼다. 튜브시트의 반경을 줄이고 열팽창을 흡수하기 위하여 증기발생기의 중심을 향해 전열관의 방향을 다시 두 번 휘었다. 이 때 휨반경은 590.2 mm 이므로 전열관 직경 대 휨반경의 비는 19.7 이다.

전열관을 휘게 되면 중심 쪽의 벽면은 두꺼워지고, 바깥 쪽은 얇아진다. 이 현상은 운전 시에 전열관에 미치는 응력의 분포와 열전달 성능에 영향을 미친다. 또한 이 비를 크게 설정하면 헬리컬 증기발생기의 직경이 커지므로 이 휨반경은 헬리컬 증기발생기에서 중요한 설계 인자이다. 전열관 직경 대 휨반경의 비 19.7 은, Hiroshi 등⁽¹⁶⁾의 실험에서 측정된 증기발생기에 사용되는 이중벽관의 최소허용 비인 16 보다 크다.

하부전열관 어셈블리에서는 상부전열관 어셈블리에서와 같이 전열관을 휘어 튜브홀에 각각 연결하였는데, 이때 인접한 전열관 표면과의 간격이 최소 10mm 이상 되도록 최적화하였다. 하부 튜브시트에는 6 개의 전열관 행이 있으며 각 행마다 66 개의 전열관이 배치되고, 가장 안쪽 행의 직경은 1.052m, 행간격 피치는 60mm 이다.

증기발생기의 수위는 정화계통으로 연결되는 배관으로 넘쳐흐르는 방법으로 제어하고, 정화계통으로 통하는 관보다 높은 부분에는 아르곤 가스로 채워지는 커버가스 공간을 형성한다. 내부원통의 내부 공간은 독립적으로 커버가스 공간과 연결되어 압력을 동일하게 유지하지만, 소듐증기가 내부원통에 들어가 응축되는 것을 최소화하기 위하여 여러 개의 작은 홀을 설치하였다. 또한 내부원통

의 상부에 12.7cm 크기의 파열관 3 개를 설치하여, 이 증기발생기에서는 초과설계기준사고에 속하는 소듐-물 반응사고 발생 시, 급수밸브 작동 등과 같은 비상조치에 소요되는 시간 동안 증기발생기 내부의 압력상승을 완화시킬 수 있도록 하였다.

상부에서 소듐과 커버가스 사이의 온도차가 매우 커서 소듐의 자유액면이 요동하면 전열관에 열피로를 유발할 수 있기 때문에 이를 최소화하기 위하여 외부원통을 상부까지 확장하고, 상부전열관 어셈블리에서는 전열관의 외각에 전열관 보호막을 설치하여 자유액면 요동의 진폭을 완화시키는 방법을 강구하였다. 상부 외부원통과 보호막에는 작은 홀을 여러 개 만들어 외부와 내부로 미세하게 소듐과 커버가스가 유동할 수 있게 설계하였다.

소듐은 두 개의 유입노즐을 통해 상부에서 유입되고, 두 개의 노즐을 통해 하부에서 배출되도록 하였는데 전열관다발에서의 유동을 균일화하기 위하여 유입노즐과 배출노즐은 서로 직각으로 배치하였다. 소듐이 들어오는 부위에는 2 개의 오리피스형 유동분배기를 설치하여 원주방향으로 균일하게 전열관다발 내부로 들어오게 하고, 소듐의 출구에서도 같은 방법을 사용하여 전열관다발에서 소듐이 균일하게 흐르도록 설계하였다.

소듐출구와 하부 튜브시트 사이에는 정체된 소듐 영역이 발생하는데, 이는 유동 정체화 현상을 유발할 수 있고 증기발생기에서 소듐을 배출시킬 때 문제가 발생할 수 있다. 따라서 이를 방지하기 위하여 소듐이 들어가는 최하부에 소듐 배출노즐과 직각으로 2 개의 작은 배관을 설치하고, 항상 소듐이 흐르도록 하여 소듐이 정체하는 것을 방지하였다. 이 냉각된 소듐은 정화계통으로 들어가는 고온의 소듐을 냉각시키는데 사용한다.

수증기헤더, 급수헤더에는 감시창(inspection port)을 각각 설치하여 전열관 비파괴 검사와 파손된관의 폐쇄(plugging) 시에 사용한다.

여기서 설계한 증기발생기의 제작성과 전열관의 상호 간섭 여부를 확인하기 위하여 Fig. 5 에서와 같이 각각의 부품을 ACAD 프로그램을 사용하여 3 차원 도면을 작성하였다. 본 연구에서는 1 차원 열수력 설계 및 3 차원 전열관 배열을 설계할 수 있는 SGOLD(Steam Generator with On-line Leak Detection System) 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램은 급수가 유입되는 전열관의 입구부터 증기가 나가는 출구까지 3 차원 전열관 설계가 가능하며, 최적의 배관조건을 설정하면 자동으로 전열관

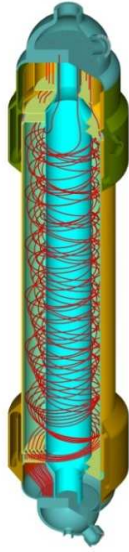


Fig. 5 3D view of the helical DWTSG

의 배열을 교정하는 기능을 갖고 있으며 지지대 설계도 가능하다.

하부전열관 어셈블리에 있는 최하위 수평지지대를 통과한 전열관의 위치와 하부 튜브시트에 있는 튜브홀의 위치는 배열상 매우 다르다. 튜브시트의 직경을 줄이고, 열팽창을 흡수하기 위하여 이 전열관 지지대와 튜브홀 사이에는 전열관을 같은 휨 반경과 동일한 각도로 2 번 휘었는데 이때 전열관에서 튜브홀까지의 거리와 휘는 방향이 각각 다르므로 전열관들 사이에 간섭이 일어날 수 있다. 그러므로 전열관을 튜브시트에 있는 최적의 튜브홀에 연결하는 것이 중요하다.

SGOLD 프로그램을 이용하여 전열관들 사이에 간섭이 일어나는 것을 방지하기 위해 배관을 최적화하였다. 최적조건으로는 인접한 전열관 사이에 적절한 거리 이상의 간격을 두면서 최단거리로 연결하는 것이다. 전열관 사이의 간격을 설정하는 데는 열팽창도 고려해야 하지만 보다 중요한 것이 유동에 의한 전열관의 진동이다. 이를 고려해서 본 연구에서는 최대진폭을 $\pm 3\text{mm}$ 로, 또한 열팽창을 고려해서 인접한 전열관들의 표면간의 최소거리를 10mm 로 설정하였다.

수증기헤더, 전열관다발, 내부원통, 외부원통 및 급수헤더는 용접과 볼트로 제작된다. 이를 증기발생기 셸에 삽입하고, 상부 튜브시트와 하부 튜브시트를 셸에 용접으로 부착시킨다. 따라서 셸과 외부원통 사이에는 미세한 간격이 생기고 소듐 중 일부가 이 틈새로 흘러 증기발생기 외부로 방출되는 열량을 공급하는 역할을 하므로 셸과 전열관다

발 사이의 온도차를 최소화시킬 수 있다.

4. 이중벽관 설계, 예비 제작 및 시험

4.1 이중벽관 설계

국내의 경우 일부 중소기업에서 가열/냉각 방식의 열끼워맞춤 방법으로 짧은 길이의 이중벽관을 제작한 경험은 있으나 긴 길이의 프리스트레스 이중벽관을 제작한 경험은 전무하다. 일본은 고속로인 JSFR 에 적용하기 위해 내관과 외관이 동일한 재질인 Mod.9Cr-1Mo 강으로 만든 직관형 이중벽관을 Tohsei Kokan 사와 Nippon steel 사의 자회사인 NSTR 이 공동으로 개발하고 있는데, 이 기술의 활용은 JAEA 에 국한되며 외부로의 기술유출을 금하고 있는 실정이다.

본 연구에서 예비 선정된 이중벽관은 냉간인발 가공공정에서 생성된 경계면의 잔류응력을 그대로 유지시키는 프리스트레스 방법으로 제작한다. 증기발생기 개념설계에서는 소듐 유입온도 520°C , 수증기 온도 490°C , 수증기계통 압력이 16.5MPa 인 설계조건에서 최적의 전열관 설계사양으로 외관의 외경 30mm , 내경 26mm , 내관의 내경 22mm 인 이중벽관을 설정하였다.

외관의 내면에는 4 개의 홈이 길이방향으로 90° 도 간격으로 설치된다. 내관과 외관의 두께는 외관의 내면에 있는 높이 약 0.3mm 의 홈, 내관 내면의 허용깊이 0.5mm 인 물 측의 부식 및 헬리컬 전열관에서의 휨 등을 고려하여 각각 2mm 로 설정하였다.

ANSYS 전산코드에 의한 수치적 분석에 의하면 520°C 의 운전조건에서 내관과 외관의 온도차가 55°C 로 유지되면 경계면의 간격에는 변화는 없으나, 만약 520°C 운전조건에서 온도차가 없다면 앞에서 기술한 이상상태에서 발생하는 11MPa 의 압축응력이 발생한다. 이를 고려하여 최대응력이 26MPa 정도가 되도록 인발 제작시 경계면의 접촉 잔류응력은 15MPa 로 설정하였다.

4.2 이중벽관 예비 제작 및 시험

신개념 이중벽관의 타당성을 검증하고, 설계자료를 생산하기 위해 3 종의 이중벽관을 예비 제작하였다. 이중벽관-1 은 내관을 $2\frac{1}{4}\text{Cr-1Mo}$ 강, 외관을 Mod.9Cr-1Mo 강으로 제작하고, 외관의 내면에 4 개의 홈을 가공하였다. 이중벽관-2 는 재질은 이중벽관-1 과 같으나 홈이 없는 형태이고, 이중벽관-3 은 이중벽관-1 과 같으나 내관과 외관을 같은

재질인 Mod.9Cr-1Mo 강으로 제작하였다. 예비 제작한 이중벽관의 길이는 각각 6m 이다.

이 이중벽관들은 한국특수파이프 사에서 제작하였는데 제작사양이 고유하고 또한 국내에서 처음 제작을 시도한 것이었기 때문에 한국원자력연구원과 상호 협의를 통해 trial and error 방식으로 개발하였다. 이중벽관은 내관의 외경과 외관의 내경의 차이가 1mm 보다 작도록 내관과 외관을 각각 별도 인발 가공한 후 내관을 외관에 삽입한 다음 동시에 인발하여 제작하였다. 이때 내관과 외관의 크기와 인발 가공율에 따라 잔류응력의 크기가 달라지므로 적절한 잔류응력을 확보하기 위해서는 최적의 제작조건을 찾는 것이 노하우가 되고 이를 위해 많은 시간이 소요된다.

이중벽관의 특성을 검사하는데 있어서는 외형의 치수를 분석하는 것도 중요하지만 경계면에 생성된 잔류응력을 측정하여 분석하는 것이 매우 중요하다. 잔류응력 측정방법에는 홀드릴링 방법, 중성자 회절법, x-선 조사법 등 여러 종류가 있는데 본 연구에 사용되는 이중벽관의 경우 홀드릴링 방법과 x-선 조사법은 적합하지 않은 것으로 나타나서 연구용 원자료를 사용한 중성자 회절법을 적용하여 측정을 시도하고 있다.

내관과 외관을 다른 재질로 제작한 이중벽관의 경계면에서의 열전달계수를 측정하는 것은 신개념 이중벽관의 타당성 검증과 더불어 증기발생기 설계하는데 중요한 자료이다. 이의 측정을 위해 본 연구에서는 제작한 이중벽관을 사용하여 5m 길이의 환형 실험부를 갖는 소듐/소듐 열교환장치를 설계하였고 설치를 준비하고 있다.

제작된 이중벽관의 제작 시 허용공차로는 경계면의 간격은 5 μ m 이하로, 잔류응력의 허용공차는 ± 2 MPa 정도로 설정하였고, 외경과 내경은 $\pm 0.5\%$, 두께는 $\pm 5\%$, 홈의 높이는 0.25~0.35mm, 홈의 폭은 0.8~1.2mm 로 설정하였다.

제작 후 측정결과 외경은 0.03mm 정도 크며(표준편차 7.9×10^{-3} mm), 내경은 0.07mm 정도 작고(표준편차 5.3×10^{-3} mm), 내관의 두께는 2.17mm, 외관의 두께는 1.88mm 로 나타났다. 가공한 홈의 높이와 폭, 그리고 경계면의 간격은 허용공차 범위에 있었다.

Fig. 6 은 제작한 이중벽관-1 의 단면을 보여주고 있는데, 홈과 경계면을 표면처리 한 후 전자현미경으로 관찰한 것이다. 홈의 크기는 제작사양을 잘 만족시키고 있고 경계면의 간격도 5 μ m 요건을 잘 만족시킴을 알 수 있다. 600 $^{\circ}$ C에서 2 시간 열처

리한 후에 홈과 경계면의 형상을 전자현미경으로 다시 관찰한 결과를 Fig. 7 과 Fig. 8 에 나타내었다. 홈은 반달형으로 뚜렷한 형태를 유지하고 있으며 경계면 또한 요구 간격을 유지하고 있고 이는 원주방향에서 일관되게 관찰되었다.

열처리 하였을 때에 경계면과 홈에는 이 물질이

Table 1 Compositions of the materials in Fig. 8

| Spectrum | O | V | Cr | Fe | Mo | Total |
|----------|------|------|------|-------|------|-------|
| S1 | | | 2.36 | 97.64 | | 100.0 |
| S2 | | | 3.45 | 96.55 | | 100.0 |
| S3 | 7.74 | | 18.5 | 72.08 | 1.68 | 100.0 |
| S4 | | 0.43 | 8.25 | 92.32 | | 100.0 |
| Max. | 7.74 | 0.43 | 18.5 | 97.64 | 1.68 | |
| Min. | 7.74 | 0.43 | 2.36 | 72.08 | 1.68 | |

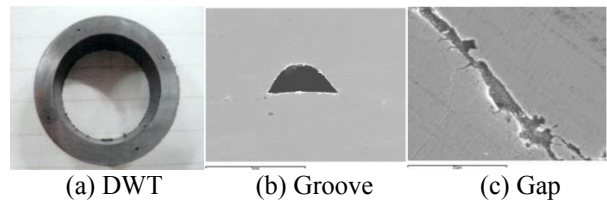


Fig. 6 Photo of the double wall tube

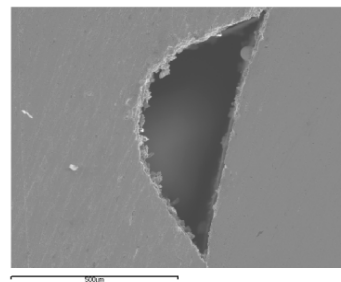


Fig. 7 Groove after 2 hour tempering at 600 $^{\circ}$ C

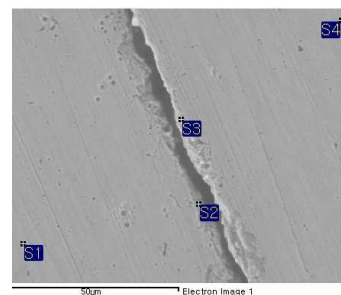


Fig. 8 Gap after 2 hour tempering at 600 $^{\circ}$ C

얼마간 생성되었는데 성분을 분석한 결과 약간의 산화물이 석출되었다. 이는 이 공간에서 산소가 재질과 반응하여 생성된 것으로 판단된다. Table 1 은 Fig. 8 의 지정된 위치에서 분석된 재료의 성분을 정리한 것을 보여주고 있는데 S1 은 내관을 나타내고 S4 는 외관을 나타내고 있다.

5. 결론

이중벽관 증기발생기의 열전달 성능을 향상시키고, 온라인 전열관 파손검지가 가능한 개념을 개발하였고 이 개념들을 구현할 수 있는 375MWt 용량의 증기발생기를 예비 개념설계 하였다.

프리스트레스 이중벽관에서 외관은 열팽창률이 낮은 재질(Mod.9Cr-1Mo), 내관은 높은 재질(2¼Cr-1Mo)로 만들어 온도차이가 발생하여도 밀착성을 유지하여 열전달 성능을 향상시키는 개념을 개발하였다

하부 튜브시트에서 각 이중벽관의 홈들을 개별적으로 감지홀에 연결하여 전열관의 파손이 일어날 경우 홈에 채워진 가스의 양을 온라인으로 감시, 확인하여 누출여부를 감지하는 방법을 개발하였다.

증기발생기의 직경을 줄이기 위해 전열관 외경대 휨반경의 비는 26 이상이면서도 상대적으로 적은 행을 갖는 전열관 배열방법과 튜브시트의 직경을 줄이는 전열관 배열방법을 고안하였다.

이 증기발생기에 사용될 이중벽관을 3 종류로 구분하여 설계 및 예비 제작하고 기계적 시험을 수행하였다. 시험결과 내경과 외경의 치수는 약간상이하나 대체적으로 제작공차를 만족시켰다.

경계면에서의 잔류응력은 현재 연구용 원자로에서 중성자회절법을 이용하여 측정 중이다. 또한 재질이 다른 이중벽관의 타당성과 경계면에서의 열전달 특성을 측정하는 실험장치 설계를 완료하여 설치 준비 중이다.

후 기

이 연구는 교육과학기술부의 지원을 받아 원자력연구개발 사업을 통해 수행되었다.

참고문헌

(1) Nam, Ho-Yun, B., Kim, J. and Kim, B., 2007, Current Status on the Development of a Double Wall Tube Steam Generator, *KAERI/AR-788/2007*, KAERI

- Report.
- (2) Takasshi, M, Inoue, A. and Aritomi, M., 1988, Gas Entrainment at Free Surface of Liquid, (II): Onset Conditions of Vortex-Induced Entrainment, *J. of Nuc. Sci. & Tech.*, 25(3), pp.245~253.
- (3) Smith, F. A., 1967, Sodium Reactor Intermediate Heat Exchangers and Steam Generators - A Review, *Symposium of Montana Idaho Section of ASME*.
- (4) Brinkman, C. R. and Katcher, M., 1979, Materials Technology for LMFBR Steam Generator, *Metal Progress*, pp. 55~61.
- (5) Sessions, C.E., Uber, C.F., 1981, Steam Generator Tubing Development for Commercial Fast Breeder Reactors, *Nuclear Technology*, Vol. 55, pp. 280~288.
- (6) Srinivasan, M.G., France, D.M., 1985, Non-uniqueness in Steady-State Heat Transfer in Prestressed Duplex Tubes - Analysis and Case History, *J. of Applied Mechanics*, Vol. 52, pp. 257~262.
- (7) Bushman, H.W., Penney, H., Quilici, M.D., Radtke, W.H., 1981, Operating Experience of the EBR-II Steam Generating System, *ASME paper*, 81-JPGC-NE-4.
- (8) Sessions, C.E., Reynolds, S.D., Hebbard, J.F., Lewis, J.F., Kiefer, J.H., 1981, Materials Development for a Fast Breeder Reactor Steam Generator Concept, *Nuclear Technology*, Vol. 55, pp. 270~279.
- (9) Kisohara, N., Nakai, S., Tanabe, H., Kubota, S., Sakakibara, Y., Inoue, M., Kashiwakura, J., Motooka, N., Yano, K., Omata, I., 1991, Feasibility Study on Double-Wall-Tube Type Primary Steam Generator, *FR91, Proc. of Int. Fast Reactors and Related Fuel Cycles*, Kyoto, Japan, p2.7.
- (10) Cho, S.M., Seltzer, A.H., 1989, Thermal Hydraulic Characteristics of a Double-Walled Tube Advanced Nuclear Steam Generator, *Heat Transfer Engineering*, Vol. 10(3), pp. 25~35.
- (11) Hishira, M., Kubo, S., Konomura, M. and Toda, M., 2007, Progress on the Plant Design Concept of Sodium Cooled Fast Reactor, *J. of Nucl. Sci. and Tech.*, Vol. 44(3), pp. 303~308.
- (12) Kashiwakura, J., Tashi, Y., Nagata, S., Fujii, T., Morita, T., Fujii-E, Y., 1991, Study of a Plant Without an Intermediate System: Study of the Helically Coiled Double Wall Tube Steam Generator with Fluid Head Structure, *FR91, Proc. of Int. Fast Reactors and Related Fuel Cycles*, Kyoto, Japan, p2.18.
- (13) Dawson, B. E., 1979, Preliminary Design: Duplex Tube Low-Pressure Saturated Steam Generator for Large LNFBR Plant, *EPRI NP-1219*.
- (14) Kurome, K., Kawamura, M., Enuma, Y., Tsujita, Y., Sato, M., Futagami, S., Hayafune, H., 2009, Steam Generator with Straight Double-Walled Tube: Development of Fabrication Technologies of Main Structure Made of High Chrome Steel-Made, *Proc. of Int. Fast Reactors and Related Fuel Cycles*, Kyoto, Japan.
- (15) Nam, H., Choi, B., Kim, J., Kim, B., 2009, Steam Generator for Sodium Cooled Fast Reactor, Heat

Transfer Tubes Thereof, and Leak Detection Unit for Heat Transfer Thereof, *USA Patent Application No.:* US 12/413,416, *Korea Patent Application No.:* 10-2008-009110, *JAPAN Patent Application No.:* 2009-58954, *EU Patent Application No.:* EP 09 156 341.1.

(16) Hiroshi, H., Naomichi, K., Tsuneo, T., Kenji, M., Hiroshi, T., Katsuhiko, H., Shigeru, M., 1987, Feasibility Study of Primary Sodium Heated Steam Generator, *Proceedings of the Int. Conf. on Fast Breeder Systems, Sept 13-17*, Richard, USA.