

소듐냉각 고속로용 증기발생기 기술분석 및 개념개발[§]

남호윤*[†] · 김종범* · 이재한* · 박창규*

* 한국원자력연구원

Concept Development and Review of Current Technical Issues for SFR Steam Generator

Ho-Yun Nam *[†], Jong-Bum Kim*, Jae-Han Lee* and Chang-Gyu Park*

* Korea Atomic Energy Research Institute

(Received April 13, 2010 ; Revised June 30, 2011 ; Accepted July 1, 2011)

Key Words : SFR (소듐냉각 고속로), Steam Generator (증기발생기)

초록: 소듐냉각 고속로를 개발함에 있어 최대 현안 중 하나가 증기발생기에서의 소듐-물 반응사고 가능성이다. 이를 개선하기 위해 지금까지 수십 종 이상 연구개발 되었지만 국가마다 그 사양이 다르고, 동일한 기종이 후속기에 다시 활용되지 못할 정도로 기술이 안정화 상태에 도달하지 못하였다. 최근 개발되고 있는 증기발생기의 공통적 목표는 소듐-물 반응사고의 조기감지 및 제어, 증기발생기의 검사 및 보수가 쉽게 용접개수를 줄이고 경제성을 높인 Benson 증기사이클을 적용하는 것이다. 이 논문에서는 지금까지 설계 또는 활용한 증기발생기들의 사양과 문제점을 비교, 분석하였고, 이를 토대로 현안 극복방안을 제시하였다.

Abstract: A steam generator poses many difficulties during the development of a sodium-cooled fast reactor because of the sodium-water-reaction problems. Until now, several types of steam generators have been developed, but the specifications of these generators differed in each country. Moreover, even if a country had developed a steam generator, it was not used in the subsequent reactor because the current techniques were not stabilized to select the proper steam generator. As a common development, the Benson steam cycle with few welding locations and high economical efficiency may be adopted. Moreover, the design is dwelled on the convenience of inspection, detection, control, and maintenance for the wear caused by sodium-water reactions. The specifications of the designed steam generators were reviewed and the current technical problems for steam generators were analyzed. Concepts were proposed to overcome the current technical problems for steam generators.

1. 서론

소듐은 핵적, 열유체적 특성이 매우 좋아 소듐 냉각 고속로(SFR)의 냉각재로 사용되나, 반면에 화학적 활성이 커서 다양한 물질과 쉽게 반응하기 때문에 안전성 및 경제성 향상에 걸림돌이 되기도 한다. 가장 큰 어려움이 증기발생기에서의 소듐-물 반응사고 발생 가능성이다. 이는 확률적으로 그 가능성이 높아 설계기준사고로 분류된다. 따라

서 소듐냉각 고속로를 상용화하기 위해서는 소듐-물 반응사고 가능성을 최대한 낮춰 안전성이 향상된 증기발생기를 개발해야 한다.

일반적으로 증기발생기는 원자로의 안전가동을 위한 잔열 제거기능을 갖고 있기 때문에 소듐-물 반응사고로 인해 그 기능을 상실하지 않도록 방호함이 매우 중요하다. 수많은 실험과 운전경험들을 통해 다양한 기술들이 축적되었으나 아직 이 문제를 완전히 해결하지는 못했다. 참고문헌⁽¹⁾에 지금까지의 증기발생기 개발 연혁과 설계사양을 종합적으로 분석하여 기술하였다. 이를 요약해서 Table 1 에 소듐냉각 고속로에서 채택한 증기발생기의 용량과 증기사이클 방법을, 그리고 Table 2 에는 증기발생기 및 전열관의 형태를 정리하였다. 표에

§ 이 논문은 2011 년도 대한기계학회 재료 및 파괴부문 춘계학술대회(2011. 4. 21.-22., 제주대) 발표논문임

† Corresponding Author, hynam@kaeri.re.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

서 각 원자로 이름 옆의 괄호 안 숫자는 해당 원자로의 증기발생기 용량(MWt)을, 동일한 원자로 이름 우측 하단에 첨자표시가 다른 것은 Table 1의 하단에 표기한 것과 같이 하나의 원자로에 여러 형태의 전열관 및 증기사이클 구조를 적용하여 비교 평가해 본 것임을 의미한다. 또한 EPRI, WH 등과 같이 증기발생기만을 개발한 경우에는 원자로 이름 대신 회사 이름을 기술하였다.

증기발생기 운전경험이 있는 경우는 실험로인 DFR, EBR-II, FBTR 과 원형로인 HNPE, SRE, FERMI, PFR, Phenix, MONJU, BN-350, BN-600, 그리고 실증로인 SPX-1(Super Phenix-1)이다. 한편 원형로인 SNR-300 과 CRBR 의 경우 설계 및 제작은 완료되었으나 운전을 하지 않았고, 중국의 CEFR (실험로)와 소련의 BN-800, 인도의 PFBR(이상 원형로)의 경우 현재 건설 중이다.

이 논문에서는 상기 분석자료를 기반으로 기술 현안에 대한 극복방안을 도출하여⁽²⁾ 안전성이 보다 향상된 새로운 개념의 증기발생기인 SGOLD (Steam Generator with On-line Leak Detection System) 를 설계하였다.

Table 1 Power (MWt) and steam cycle of the steam generator in SFR

Cycle Power	Saturation	Recircul. superheat	Sulzer	Benson
≥ 200		EBR-II (6) CRBR-J (117)	CEFR (28) PFBR-1st (63) HNPE (68) SRE-nat(18) Phenix (9.9) PFR (113) SNR-300 (55) BN-350 (57) BN-600 (41) BN-800 (51) MONJU (191)	AEC (30) SRE-for (30) FERMI (143) FBTR (13) PFBR (158) CFBR (158)
200-400	EPRI (364)			WH (364) SPX-2 (225) SNR-2 (150-450) SGOLD (375) France-new (200)
≤ 400	PRISM-dwt (432) PRISM-sat (479)	CDS (470)	Japan-DEMO (586) SPX-1 option (551)	CDFR (425) CRBR-hel (438) PRISM-ben (479) SPX-1 (750) EFR (600) JAPC (613) JSFR (1765) KALIMER (765) BN-1800 (536)

첨자설명: -J: J-type, -nat: natural circulation type, -for: forced convection type, -sat: saturation steam cycle, -ben: Benson steam cycle, -dwt: double wall tube type, -hel: helical tube type

2. 주요설계인자 분석

2.1 소듐-물 반응사고

지금까지 개발된 소듐냉각 고속로 증기발생기는 대부분 셀 측에 고온/저압인 소듐이 흐르고, 그 내부에 설치된 얇은 벽의 수많은 전열관 속을 저온/고압의 물/증기가 흐르는 형태로 되어 있다. 따라서 용접 결함 등으로 인해 전열관벽이 손상될 경우 고압(15~19MPa)의 물/증기가 셀측 소듐(0.1MPa)으로 분사되어 반응하며 수소가스와 함께 고온의 부식성 반응물을 생성하여 인접한 전열관을 순차적으로 손상시키며 대형 사고로 확대된다.

지금까지 개발된 소듐냉각 고속로에서는 사고의 확대 방지를 위해 조기 감지설비, 중간열전달계통, 반응생성물 배출계통 등과 같은 많은 방호설비를 갖춤으로 인해 경수로에 비해 경제성이 낮았다. 또한 이는 근본적으로 사고 가능성을 낮추거나 배제하지 못하기 때문에 이를 가능하게 하는 새로운 설계개념의 개발이 문제해결의 핵심이다.

Table 2 Shape of SG and type of heat transfer tube

SG	Tube	Single wall tube	Double wall tube	Remark
S-type	Phenix FBTR		SRE-for	소형 튜브로 셀 제작
U-type	PFR			셀측 유로 복잡
Bayonet	BN-350 Superheat		HNPE	내부 튜브 지지 난이
J-type	CRBR-J CDS CDFR			셀 제작 난이
Tube bending	PFBR-1 st PFBR CFBR		AEC	셀 제작 난이
Straight without bellows	BN-350		EBR-II	BN-350: 많은 소듐-물 반응사고 EBR-II: 출력감소 사고
Straight with bellows	SPX-1 option SPX-2 EFR SNR-300 (2/3) BN-600 BN-800 BN-1800 CEFR France-new		EPRI WH PRISM-dwt JAPC-PNC JSFR	고압 Bellows 필요 SG 높이가 높음 : JSFR: 38m 세관 사용
Helical	FERMI SPX-1 SNR-300 (1/3) PRISM-sat PRISM-ben MONJU Japan-DEMO KALIMER		SRE-nat JAPC SGOLD	전열관 길이 : 70-100m SPX-1: 7 개소에 전열관을 용접이음

2.2 전열관의 형태

개발 초기에 전열관 재료로 많이 사용된 오스텐 나이트 계열 강은 소듐-물 반응사고 시 가소성 응력부식에 취약한 것으로 확인되어 2¼Cr-1Mo 강으로 바뀌었고, 최근에는 고온에서 강도가 높고 내부식성이 좋은 9Cr-1Mo-V 강을 선호하고 있다. 전열관 형상은 단일벽관(single wall tube)과 이중벽관(double wall tube)이 함께 개발되어 사용되고 있으나, EBR-II 등 몇몇을 제외한 대부분의 운전한 고속로에서는 단일벽관을 사용하고 있다.

이는 이중벽관의 경우 소듐과 물 사이에 두 겹의 경계막을 만들어 소듐-물 반응사고 가능성을 배제하기 위해 선택한 것인데, 오히려 이로 인해 열전달성능이 떨어지고 제작비가 많이 드는 단점이 나타났기 때문이다. 하지만 이중벽관 증기발생기의 소듐-물 반응사고 가능성을 확률론적으로 해석한 일본의 연구결과⁽³⁾를 보면, JSFR 에서 핵연료 교체 기간에 초음파 검사와 와전류 검사를 수행할 경우 사고발생 확률이 초과설계기준사고($10^{-7}/\text{year}$)에 접근하는 것으로 나타나 안전성 측면에서는 매우 효과적인 것으로 나타났다.

이중벽관의 누출여부는 내·외관 사이의 틈새로 헬륨가스를 흐르게 하고 이를 분석하여 감지하는 방법이 사용되었으나⁽⁴⁾ 이는 외관이 파손되면 그 기능을 상실하며, 전열관을 모두 셀 외부로 통과시켜 분석하는 방법⁽⁵⁾은 증기관 파단사고의 확률을 높이는 결과를 가져왔다. 이러한 문제로 인해 최근 직관형 이중벽관 증기발생기 개념을 도입한 일본의 JSFR 에는 전열관 파손감지 기능이 없다.

2.3 증기사이클에 따른 분류

소듐은 대기압에서 비등점이 883°C로 저압에서 고온으로 운전할 수 있어 모든 종류의 증기사이클이 가능하다. 초기에는 PRISM⁽⁶⁾에서와 같이 포화 증기 사이클을 채용한 증기발생기도 있었으나 이는 효율이 낮아 이후 증발기와 과열기로 구성된 과열증기 사이클을 선택하였다. 과열증기 사이클에서 재순환 과열증기 사이클은 재순환하는 많은 물로 인해 소듐-물 반응사고 시 불리하기 때문에 현재에는 거의 선택하지 않고, 증발기 출구에서 증기의 건조도가 높은 Sulzer 사이클을 대부분의 원형로에서 선택하고 있다.

파손이 자주 일어나는 용접부를 줄이기 위해 Super Phenix-1(SPX-1)의 증기발생기를 비롯하여 최근에 개발한 대부분은 증발기와 과열기의 역할이 한 증기발생기에서 이루어지는 Benson 사이클을 선호하고 있다. 하지만 이 증기사이클의 단점은

한 개의 전열관에서 과열증기를 생산하기 때문에 전열관이 길어지고, 급수를 소량 주입하므로 전열관에서 유동불안정성 현상이 일어나 유입구에 유량제한용 오리피스를 설치하는 것이 필수적이다.

2.4 증기발생기 형상

증기발생기는 U-형, J-형, 직관형, 헬리컬형 등과 같이 여러 형태로 개발되었지만 기본적인 고려사항은 재질의 열팽창 문제이다. U-형 증기발생기는 경수로에서 많이 사용된 경험이 있으나 고속로에서는 셀에서 소듐의 유로가 복잡하므로 PFR에서만 사용되었다. J-형은 CRBR과 CDFR에서 채택하였고, EFR의 후보 개념으로 고려되었으나 운전에서 사용된 경험은 없다.

직관형 증기발생기는 제작이 간편하고 용량에 비해 크기가 작다. 그러나 전열관다발과 셀 간의 열팽창 차이 및 전열관다발에서 전열관 간의 열팽창 차이를 흡수해야 하는 문제점이 있다. 대부분 셀에 벨로우즈를 설치하여 열팽창 차이를 흡수하고 있다. 셀의 온도 550°C, 압력 2.26MPa에서 200 MWt 용량일 경우 셀의 직경은 1.2m 정도가 되는데 이 조건에서 벨로우즈가 사용된 경험은 없다.

전열관 간의 열팽창 차이를 줄이기 위해서는 온도와 유속의 분포를 균일하게 유지하여야 하지만 JSFR 의 증기발생기를 분석한 바에 의하면 100% 운전조건에서 전열관 간의 최대온도 차이는 7.8°C, 30% 출력조건에서는 9.1°C 인 것으로 나타났다.⁽⁷⁾ 하지만 더 큰 문제는 전열관 1개가 폐쇄될 경우 인접한 전열관의 평균온도가 1°C 정도 상승한다. Benson 사이클을 채택한 직관형에서는 과열증기를 생성시키기 위하여 내경이 13mm 정도되는 세관을 사용하므로 전열관의 개수가 헬리컬형에 비해 3~4 배 많아져 용접부가 증가하는 단점이 있다.

열팽창 차이로 인해 열응력이 발생하는 직관형의 문제를 해결할 수 있는 개념이 바로 헬리컬형 증기발생기이다. 헬리컬형 증기발생기는 직관형에 비해 직경이 크고 전열관의 길이는 더 길지만 높이가 20m 정도로 낮아 진다. 이 증기발생기의 문제점은 길이가 65~100m 에 달하는 전열관의 제작, 전열관 배관 및 가동 중 비파괴 검사가 어려운 것이다. SPX-1의 경우 튜브를 일곱 곳에 용접으로 이어서 전열관을 만들었다.⁽⁸⁾

2.5 증기발생기 용량

증기발생기는 대용량일수록 경제적이다. 하지만 대용량 증기발생기는 소듐-물 반응사고가 일어날 경우 보수가 어려우며, 보수/교체 기간이 길어 운

전효율이 떨어진다. 소용량일 경우에는 제작비와 건물의 공간활용 면에서 경제성이 낮지만 소듐-물 반응사고가 일어나면 예비로 준비한 것으로 교체 가능하므로 운전효율이 높아진다.

일본은 대용량을 선호하여 1500MWe 인 JSFR 에 두 기의 증기발생기를 설치할 계획이다. 프랑스 역시 SPX-1 에서와 같이 대용량을 선호하였고, EFR 에는 600MWt 용량인 증기발생기 6 기를 설치할 계획이었지만, 최근에는 1500MWe 원자로에 200MWt 급 소용량 증기발생기 18 기를 설치하는 것을 제안하고 있다.⁽⁹⁾ 지금까지 70MWt 급 이하인 소용량을 사용하던 러시아는 최근 BN-1800 을 설계하면서 600MWt 급 대용량 증기발생기를 선택하였다. 인도에서는 CFBR 에 200MWt 급 소용량 증기발생기를 채용할 예정이다. 이 중 SPX-1 을 제외하고, 운전한 경험이 있는 원자로들에서는 모두 소용량 증기발생기를 모듈로 사용하였다.

3. 설계요건 분석 및 비교

3.1 설계요건 설정

증기사이클에 따라 원자로의 운전온도와 압력이 많은 차이가 있지만 개발 초기의 대표적 원형로인 영국의 PFR 의 2 차 소듐계통의 운전온도(530℃), 증기압(19MPa)과 최근 설계가 진행 중인 일본의 JSFR 의 2 차 소듐계통의 운전온도(520℃), 증기압(19.2MPa)은 큰 차이가 없다. 이는 비록 전열관 재료가 2¼Cr-1Mo 강에서 고온에서 강도가 높고 내식성이 좋은 고 크롬강(9Cr-1Mo-V)로 바뀌었음에도 불구하고 소듐-물 반응특성으로 인해 여전히 큰 변화를 보이지 못하는 것으로 보인다. JSFR 이외에 설계/운전된 모든 증기발생기는 프랑스의 SPX-1 의 증기발생기 용량(750MWt) 보다 적다. 본 연구팀에서 개발 중인 증기발생기 역시 그 용량이 375MWt 이며, 운전온도 및 압력은 다른 증기발생기들과 유사하다.

전열관으로 주입되는 물의 질량유속이 높으면 전열관의 유동유발진동이 문제시되고, Benson 사이클을 채용하는 헬리컬 전열관에서는 2 상 유동 영역에서 침식이 중요시 된다. 질량유속이 낮으면 증기발생기가 커지고, 전열관 내부에서 유동불안 전성이 증가한다. 건설착수 연도를 기준으로 각 증기발생기에서의 질량유속은 Fig. 1 과 같다. 이 그림에서 자연순환형과 포화증기 사이클에서는 재순환하는 물을 고려하지 않았기 때문에 질량유속이 적다. 증기발생기의 크기를 줄이기 위해 질량유속을 1600kg/m²-s 정도로 증가시켰으나 최근에는

전열관의 진동 등을 고려하여 1100kg/m²-s 정도로 감소시키고 있다. Benson 사이클의 대용량 헬리컬 증기발생기를 선택한 SPX-1 은 직경을 줄이기 위해 질량유속을 증가시켰다.

셀 측의 설계압력은 Fig. 2 에서와 같이 초기에는 낮게 설계하다가 점차 높아짐을 볼 수 있다. 초기에 설계압력이 높은 증기발생기는 셀이 하나의 튜브로 된 소용량이다. 소듐-물 반응사고의 목표확률을 10⁻⁴/year 로 낮게 설정한 EFR 의 증기발생기는 설계압력을 3MPa 로 설정하였다. 일본 JAEA 에서 MONJU 를 대상으로 한 연구결과에 따르면, 소듐-물 반응이 일어날 때에 충격과가 증기발생기에는 2.2MPa, 중간열교환기에는 1.1MPa 정도 영향을 준다.⁽¹⁰⁾ 그 후 이를 기준으로 셀 측의 설계압력은 대부분이 2.26MPa 정도로 설정되었다.

튜브시트의 설계압력과 운전압력의 비는 Fig. 3 과 같이 1.1 정도이다. 증기발생기의 설계온도는 550℃ 정도이므로 설계온도를 조금만 증가시켜도 재료의 허용응력은 많이 감소한다. 셀 및 증기계

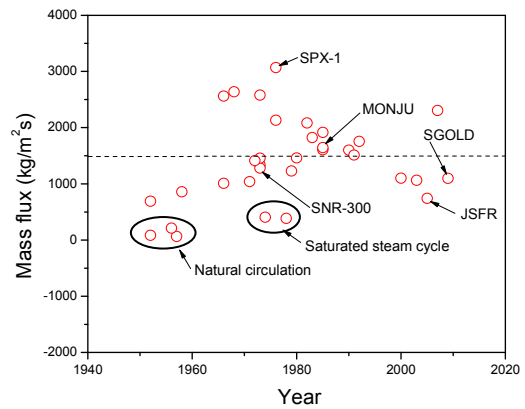


Fig. 1 Water mass flux in the heat transfer tube

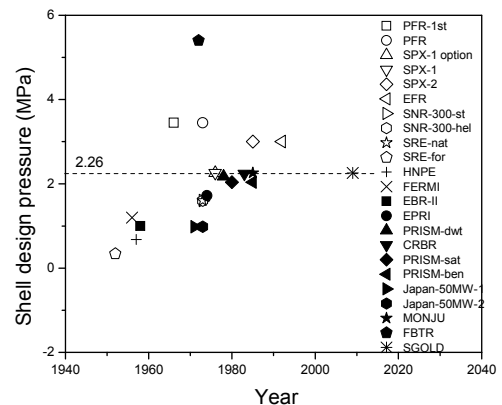


Fig. 2 Design pressure of the shell side

통의 설계온도와 운전온도의 비는 Fig. 4 와 같다. 운전온도는 셸에서는 소듐의 유입온도이고, 증기계통에서는 증기온도이다. 초기에는 설계온도를 높게 설정하였으나 최근에는 그 비가 1.05 정도이다. 일반적으로 전열관과 증기헤더의 튜브시트 설계온도는 셸과 같고, 헤더의 설계온도는 증기계통 설계온도이다. 급수헤더의 튜브시트 설계에는 소듐온도와 급수헤더의 압력을 고려한다.

헬리컬 증기발생기에서 중요한 설계인자는 전열관의 곡률반경이다. 전열관을 휘면 중심 쪽의 벽면은 두꺼워지고, 바깥 쪽은 얇아진다. 이 현상은 전열관에서의 응력분포와 열전달 성능에 영향을 미친다. 또한 이 비를 크게 설정하면 헬리컬 증기발생기의 직경이 커진다. 이중벽관에서는 튜브의 간격이 벌어질 수 있으므로 곡률반경이 단일벽관보다 커진다. 지금까지 설계한 헬리컬 증기발생기의 휨반경과 튜브외경의 비는 초기에는 14 정도로 낮았으나 점차 증가하여 최근에는 20 이상이다.

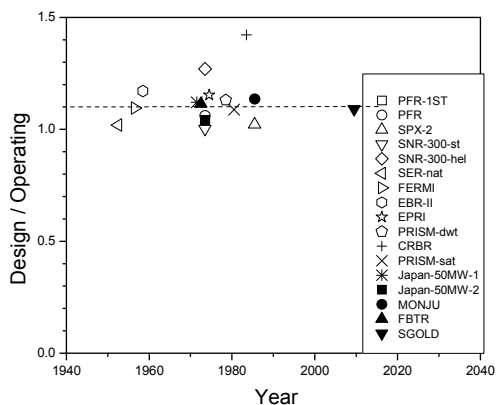


Fig. 3 Ratio of the design pressure to operating pressure

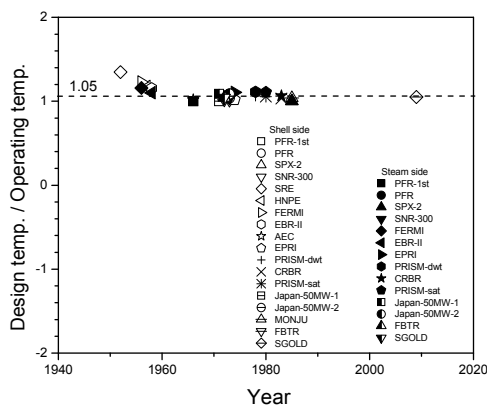


Fig. 4 Ratio of the design temperature to operating temperature

3.2 셸 및 튜브시트의 최소두께

소듐냉각 고속로에서는 원자로와 증기발생기 사이에 중간열교환계통이 있다. 따라서 증기발생기 전열관은 원자로냉각재 압력경계가 아니므로 일반 고온 열교환기 설계코드에 따라 설계되었으나, 최근 소듐-물 반응사고 가능성 때문에 Class 1 재료 물성을 적용하여 설계하고 있다.

미국 CRBR 증기발생기는 ASME Code Section-III Class 3 에 따라 설계하였지만 후속기인 PLBR 증기발생기는 Class 2 에 따라 설계하였고, 소듐-물 반응사고에 영향을 받는 압력경계에서는 Class 1 에 따라 설계하도록 하였다.⁽¹⁰⁾ PRISM 고속로에 채용한 헬리컬 단일벽관 증기발생기와 후보인 이중벽관 증기발생기의 설계는 ASME Code Section-VIII Division 2 코드에 따라 설계하였다.⁽⁶⁾ Division 2에서는 Nuclear Class 1 에 준하는 재료의 데이터가 사용된다. 프랑스에서는 RCC-MR Class-1 에 따라 설계하고 있다.

이 연구에서는 ASME Code Section-VIII Division 2⁽¹¹⁾ 에 따라 계산하였다. 이 코드에서는 최소두께만을 계산하고 부식, 오차 등은 별도로 고려한다. 이 코드에서는 헬리컬 증기발생기의 설계방법이 제시되어 있지 않기 때문에 U-type 증기발생기 설계방법을 도용하였다. 또한 참조한 직관형 증기발생기들에는 벨로우즈가 설치되어 있고 고속로 증기발생기에서 벨로우즈의 두께는 10mm 이상인데, 이 코드에는 벨로우즈의 두께가 5mm 이하인 경우에만 적용할 수 있는 설계방법이 제시되어 있다. 또한 참조한 증기발생기들에서는 벨로우즈의 상세 설계사양이 제시되어 있지 않아서 벨로우즈가 설치된 직관형 증기발생기의 최소두께 계산에는 프로팅 증기발생기 설계방법을 도용하였다.

ASME Code Section-VIII Division 2의 4.18항인 ‘Design Rules for Shell-and-Tube Heat Exchangers’ 에서 제시하는 U-tube 증기발생기의 셸, 헤더 및 튜브시트들의 두께를 계산하는 절차를 Table 3에 기술하였고, Table 4에서는 계산한 최소두께와 각 증기발생기에서 제시한 설계자료를 비교한 것이다.

이 계산에서는 ASME Code Section-III Div.1 Sub. NH 에서 사용하는 Class 1 에 해당하는 재료 물성을 사용하였는데, 시스템의 운전시간을 3×10^5 시간으로 가정하였다. 설계압력과 설계온도가 주어진 증기발생기는 그 값을 사용하였고, 설계조건이 주어지지 않는 증기발생기의 설계압력은 증기압력을 1.1배, 설계온도는 운전온도의 1.05배로 하여 계산하였다. 프랑스에서 RCC-MR 코드 Class-1에 따라 설계한 SPX-1들의 설계치는 이 논문에서 계산한

값과 거의 같거나 약간 적은 경향을 보였고, ASME Code Section-III Class 3 로 설계한 EPRI 와 CRBR 의 증기발생기 튜브시트의 두께는 계산치보다 적은 값을 보이고 있다. 그러나 ASME Code Section-VIII Division 2 코드로 계산한 증기발생기들은 설계치가 더 높은 값을 보이고 있다.

Table 3 Calculation Procedure

Step	Calculation Parameter
0	Assume the initial thickness
1	Determination of effective dimensions and ligament efficiencies from the geometry and material properties
2	Calculate the diameter ratios with the respect to the equivalent diameter of outer tube limit circle
3	Determine effective modulus of elasticity of tubesheet and effective Poisson's ratio in perforated region of tubesheet
4	Calculate the shell coefficients and the head coefficients
5	Calculate the coefficient F
6	Calculate the moment acting on the unperforated tubesheet rim
7	Calculate the maximum bending moments acting on tubesheet at the periphery and at the center
8	Calculate the tubesheet bending stress(σ). If $\sigma > 2S$, increase the tubesheet thickness and return to Step 3. Where S is allowable stress of tubesheet material.
9	Calculate the average shear stress (τ) in the tubesheet at the outer edge. If $\tau > 0.8S$, increase the tubesheet thickness and return to Step 1.
10	Calculate the axial membrane stress and the bending stress of the shell, sum of the two stresses becomes a total axial stress (σ_s) of the shell. Calculate the axial membrane stress and the bending stress of the head, sum of the two stresses becomes a total axial stress (σ_c) of the head.
11	If $\sigma_s > 1.5S_s$, replace the modulus of elasticity of shell with the effective modulus of elasticity and return to step 4. If $\sigma_c > 1.5S_c$, replace the modulus of elasticity of head with the effective modulus of elasticity and return to step 4. Where S_s is allowable stress of shell material, and S_c is allowable stress of head material.

Table 4 Comparison of the calculated thickness with design thickness

SG	Type	Tube-sheet thick.(mm)		Shell thick. (mm)	
		Des.	Cal.	Des.	Cal.
Phenix	S-shape	-	-	5.4	5.25
SPX-1 option	Straight	385	418	24	44.6
SPX-1	Helical	120	91	21	28.0
PRISM-dwt	Straight	406	366	51	32.8
PRISM-swt	Helical	-	-	63.5	48.8
EPRI	Straight	483	599	66.7	59.4
CRBR	J-shape	292	316	70	58.1
CRBR option	Helical	-	-	40	28.0
SGOLD	Helical	500	398	50	32.2

4. SGOLD 증기발생기

4.1 신개념 평가

소듐-물 반응사고의 확률을 줄이려면 이중벽관을 사용하여야 하며, 열응력을 흡수하려면 헬리컬 증기발생기가 가장 적합하다. 그러나 헬리컬형 이중벽관은 두 관 사이의 틈새로 인해 열전달성능이 저하되고, 운전 중 검사와 제작에 어려움이 있다. 본 연구에서는 이중벽관의 틈새로 인한 열전달성능 감소 문제는 재질이 다른 이중벽관으로 해결하였고, 헬리컬 코일의 비파괴검사 어려움은 온라인으로 전열관의 파손을 감지하는 방법을 고안하여 해결하였다.⁽²⁾

증기발생기에서 이중벽관의 내관은 온도가 낮고 외관은 온도가 높다. 그러므로 같은 재질로 만들 경우 내관은 열팽창이 적고, 외관은 열팽창이 커서 그 틈새가 벌어지게 되어 열전달성능이 저하된다. 따라서 이러한 현상을 방지하기 위해 내관은 열팽창률이 높은 2¼Cr-1Mo 강, 외관은 열팽창률이 적은 9Cr-1Mo-V 강으로 이중벽관을 구성하였다. 재질이 다른 이중벽관은 운전온도 500°C에서 내관과 외관의 온도차이가 55°C일지라도 같은 열팽창률을 유지하므로 틈새의 간격변화가 없다.

이중벽관은 내관과 외관이 접하는 부분이 표면 돌기에 의해 완전히 밀착되지 못해 미세한 공간이 생성된다. 이 공간에는 2MPa 정도의 압력이 유지되게 열전도도가 높은 헬륨가스를 채우는데, 만일 외관이 파손되면 이 공간에 채워진 헬륨가스가 소듐 측으로 누출되고, 내관이 파손되면 수증기가 헬륨가스가 채워진 공간으로 유입되게 된다. 따라서 홈에 채워진 헬륨가스 양의 변화를 온라인으로 감지하여 누출여부를 판단할 수 있다.

이 증기발생기에서는 온라인 전열관 파손감지를 위해, 하부 튜브시트에서 전열관을 방사형으로 설치하고 외관은 튜브시트의 상부에서 내관은 하부에서 용접하여 각 이중벽관의 홈들을 개별적으로 감지홀에 연결하는 방법을 도출하였다. 감지홀은 튜브홀 사이로 상하로 배치되며, 측면에서 각 튜브홀의 깊이만큼 홀을 뚫어, 이중벽관의 홈에 있는 헬륨가스는 개별적으로 감지홀에 연결되고 튜브시트의 측면에서 연결튜브를 통해 파손감지 시스템에 연결된다. 내관 또는 외관이 파손될 경우에는 연결튜브를 막고, 급수헤더와 수증기헤더에서 해당 전열관을 막으면 감지기능의 상실 없이 전열관 격리가 가능하다.

4.2 증기발생기 열수력 설계

이러한 개념들을 구비한 증기발생기 SGOLD 를

Table 5 Design specifications of the SGOLD

Thermal power (MW)	375
Steam cycle	Benson
SG type	Helical
Tube type	Double wall
Inner tube materials	2¼Cr-1Mo
Outer tube materials	9Cr-1Mo-V
Tube OD/GD/ID (mm)	30 / 26 / 22
Shell materials	9Cr-1Mo-V
Tube effective/total length (m)	57 / 62
Number of tube	396
Number of row	11
Number of circumference support	8
Number of horizontal support	5
Transverse/Logitudinal pitch (mm)	60 / 44
Angle of tube (degree)	13.14
Outer diameter of inner shroud (m)	1.49
Inner diameter of outer shroud (m)	2.83
Diameter of first row (m)	1.56
Outer diameter of shell (m)	3.01
Height of SG	20.6
Shell side design pressure (MPa)	2.26
Steam side design pressure (MPa)	18.2
Shell/Steam design temperature (°C)	546 / 515
Steam pressure (MPa)	16.5
Sodium inlet/outlet temperature(°C)	520 / 335
Water inlet/outlet temperature (°C)	230 / 490
Sodium mass flow rate (kg/s)	1592.
Water mass flow rate (kg/s)	165.4
Tubesheet thickness (mm)	500.
Shell thickness (mm)	50.

개발하였다. 그러나 아직 62m 길이의 이중벽관을 제작하는 문제가 남아있다. 열수력 설계에서는 헬리컬 증기발생기 설계에 적용되는 공개된 소듐과 물/증기에 관련된 열전달계수와 압력강하 실험식들을 사용하였다. 소듐과 급수의 유량과 온도조건은 원자력연구원에서 설계한 KALIMER-600 고속로의 설계조건을 사용하였다. 여러 종류의 실험식들의 민감도를 상호 비교분석하여본 바에 의하면 설계한 열출력은 ±10% 미만의 오차를 가지고 있다.

헬리컬형 전열관은 외경이 1.49m 인 내부원통에 감겨 있는 형태이다. 상부의 측면에서 주입된 고온의 소듐은 유동분배기에 의해 원주방향으로 균일하게 분배된 후에 전열관다발의 셸 측을 따라 하강하여 하부 측면으로 유출된다. 급수헤더에 주입된 물은 전열관 내부를 따라 상승하면서 가열되어 과열증기가 증기헤더에 들어간다. 외부원통은 전열관다발의 외부에 설치되며, 다발의 내부에 소듐 유로가 형성되게 하고, 다발을 보호하는 역할을 한다. 전열관다발의 상부와 하부에는 2 개의 유량조절용 오리피스가 달린 수평으로 설치된 수평 지지대가 있고, 전열관다발에는 상하로 설치되는 반경방향 지지대를 8 개 설치하였다.

열수력 계산은 증기발생기의 하부 즉 급수압력을 가정한 후에 소듐이 배출되는 부분부터 1-D 로 헬리컬 전열관을 따라 길이를 증가시키면서 셸 측의 소듐온도가 소듐 유입온도와 같아질 때까지 계산하였다. 계산한 증기의 압력이 설정한 증기압력과 같을 때까지 급수압력을 변화시키면서 수렴시켰다. 열수력 설계에서는 1-D 로 계산하였지만 각 전열관 열(row)의 출구에서의 증기온도가 다르면, 총급수량이 일정한 조건에서 각 전열관 열의 급수량을 변화시키면서 수렴하였다. 내관과 외관의 틈새에서의 열전달 계수는 EBR-II 에서 운전경험으로 추정된 값인 35,000 W/m²°C을 사용하였고,⁽¹²⁾ 물 측에서의 fouling factor 는 General Electric 사의 PRISM 고속로 설계에 사용한 17,447 W/m²°C을 사용하였다.⁽⁶⁾

이 증기발생기의 장점은 재질이 다른 이중벽관을 사용하여 열전달성능을 향상시켰고, 온라인으로 소듐-물 반응이 일어나기 전 전열관 파손을 감시하는 기능을 구비하고 있다는 것이다. 증기발생기의 형상은 Fig. 5 에, 열수력 설계사양은 Table 5 에 도시하였다.

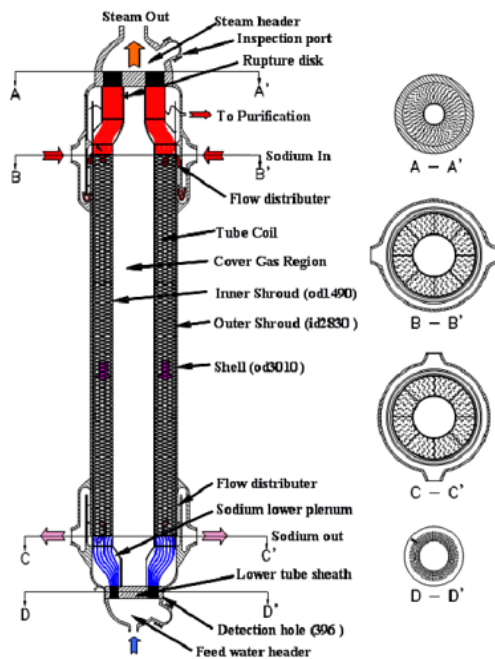


Fig. 5 Layout of the SGOLD

5. 결 론

소듐냉각 고속로에 사용되는 증기발생기는 개발

하는 국가마다 형상이 다르고, 동일한 국가에서 개발하였을지라도 후속기에 같은 증기발생기를 사용하지 않을 만큼 기술이 안정화 상태에 도달하지 못하고 있다. 그러므로 신뢰성 있는 증기발생기 개발은 소듐냉각 고속로의 최대 현안이다.

이를 위해 증기발생기의 주요 설계인자와 요건들을 분석하였다. 질량유속은 $1100\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$, 설계압력은 운전압력의 1.1 배, 설계온도는 운전온도의 1.05 배 정도가 적절하며, 헬리컬 전열관에서 휨반경과 직경의 비는 20 이상이 타당하다.

최적의 개발방향은 온라인으로 전열관의 파손을 상시 감시하는 기능을 구비하고, 고압과 고온의 운전조건에서도 재료의 열팽창 차이에 따른 응력을 감소시킬 수 있으며, 가장 경제적인 Benson 사이클을 채용하여 규모가 작은 증기발생기를 개발하는 것이다. 이 논문에서 개념설계한 증기발생기는 개발방향을 만족시키므로 소듐냉각 고속로 증기발생기의 현안들을 해결할 수 있다.

후 기

이 연구는 교육과학기술부의 지원을 받아 원자력연구개발 사업을 통해 수행되었다.

참고문헌

- (1) Nam, H., Kim, J., Lee, J. and Park, C., 2011, "Review of the SFR Steam Generator," KAERI, KEARI/AR-877/2011.
- (2) Nam, H., Choi, B. and Kim, J., 2010, "On the Design Concept Technology Development of a Double Wall Tube Steam Generator," *Trans. Of the KSME(A)*, Vol. 34, No. 9, pp. 1217~1225.
- (3) Hishida, 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, No. 3, pp. 303~308.
- (4) Sessions, C.E., Harman, D. and Kindell, W.H., 1974, "Nuclear Steam Generator Materials Technology: Development of Duplex Tubing for Nuclear Steam Generator," *Trans. ANS*, 18, pp. 117~118.
- (5) Kashiwakura, J., Tachi, Y., Nagata, S., Fujii, T., Morita, T. and 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," *Proc. of Int. fast Reactors and Related Fuel Cycles: FR91*.
- (6) Kakarala, C.R. and Boardman, C.E., 1990, "Advanced Liquid Metal Reactor Helical Coil Steam Generator," *ASME NE-Vol.5*, Book No. G00548-1990.
- (7) Kisohara, N., Moribe, T. and Sakai, T., 2006, "Flow and Temperature Distribution Evaluation on Sodium Heated Large-sized Straight Double Wall Tube Steam Generator," *Proc. of ICAPP '06*, Reno, USA, Jun 4-8, 516~524.
- (8) IAEA, 1984, "Specialists' Meeting on Maintenance and Repair of LMFBR Steam Generators," *IWGFR/53*.
- (9) Riou, B., Verwaerde, D. and Mignot, G., 2009, "Design Features of Advanced Sodium Cooled Fast Reactors with Emphasis on Economics," IAEA, *Int. Conf. FR09*, Kyoto, Japan.
- (10) Dawson, B.E., 1979, "Preliminary Design: Duplex Tube Low-Pressure Saturated steam Generator for Large LMFBR Plant," *EPRI NP-1219*.
- (11) ASME, 2007, "2007 ASME Boiler & Pressure Vessel Code: Section-VIII," *The American Society of Mechanical Engineers*.
- (12) Bushman, H.W., Penney, H., Quillici, M.D. and Radtke, W.H., 1981, "Operating Experience of the EBR-II Steam Generator System," *ASME 81-JPGC-NE-4*.