2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

소듐냉각 액체금속로의 이중튜브증기발생기의 열적 크기 평가

Thermal Size Evaluation for Double Wall Tube Steam Generator in Sodium Cooled Liquid Metal Reactor

위명환, 김성오, 최석기, 어재혁
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

이중튜브 증기발생기의 열적크기 평가 결과를 기술하였다. 이중튜브 증기발생기는 소듐과 증기사이의 물리적경계를 이중으로 형성하므로 기존의 단일 튜브에 비해 기기의 안전성 및 신뢰성을 증진시킬 수 있는데 반해 튜브를 통한 전열저항의 증가로 소듐에서 증기로의 열전달에 영향을 미친다. 이 개념의 전열성능 평가를 위해 이중튜브 증기발생기의 필요 전열면적을 구하여 KALIMER의 경우와 비교한 결과, 기존 개념에 비해 약 2배에 해당하는 전열면적이 필요하였으나, 중간계통을 제거한 경우에는 이중튜브개념의 열전달면적이 중간열교환기와 증기발생기를 합한 전열면적의 70%까지 감소함을 확인하였다

Abstract

The results obtained in assessing the thermal sizing of double wall tube steam generator concept are presented in this paper. The concept provides double barrier between the sodium and the steam. This will result in improved reliability of SG compared to the KALIMER design using single wall tubes. The condition between the inner and outer tubes affects the heat transfer from sodium to steam. To estimate heat transfer performance of the concept, the required heat transfer area was calculated, and compared with KALIMER SG. The required heat transfer area for DWTSG is about 2 times larger than that of KALIMER 150 SG. In the case of .eliminating IHTS, the area is decreased to the 70% of the total area of intermediate heat exchanger and steam generator.

1. 서 론

소듐을 냉각재로 사용하는 액체금속로 증기발생기는 전열관의 파손으로 야기되는 소듐-물 반응 사고 가능성에 노출되어 있는 민감한 기기로서, 발전소의 안전성 증진을 위해 많은 나라에서 이

러한 사고를 근본적으로 차단 할 수 있는 개념의 증기발생기 개발을 위한 연구[1,2,3] 들이 진행되고 있다. 대부분 연구의 주된 경향은 SG의 고온유체를 물/증기와 반응하지 않는 액체금속(주로 Pb-Bi)을 사용하는 함으로써 튜브에서 손상이 발생하더라도 연쇄 화학반응 및 계통내 압력상승 가능성을 미연에 방지하는데 중점을 두고있다. 그러나 이런 접근방법은 대체냉각재로 고려되고 있는 Pb 나 Pb-Bi의 혼합물의 낮은 전열 특성으로 때문에 증기발생기의 크기 및 무게가 증가하고, 이에 따른 효율저하, 배관크기 및 펌프출력 증가와 같은 문제점이 나타나고 있으므로, 현재까지 이런 개념을 실제 적용 하기에는 많은 어려움이 따른다.

이중튜브 증기발생기(Double Wall Tube Steam Generator :DWTSG)는 30여년 전부터 이미 제작과 운전 경험이 있는 개념으로 기존 단일튜브에 비해 전열성능이 떨어지고 제작 및 유지/보수에 어려움이 있지만 튜브 파손에 의한 소듐-물 반응사고 가능성이 낮을 뿐 아니라, Pb 나 Pb-Bi를 사용한 개념에 비해 외형 크기도 작고, 소듐을 냉각재로 사용하는 기존개념과 비교적 유사하기 때문에 관심을 끌고있다. 실제로 이러한 개념을 적용하고 있는 EBR-II의 경우 지난 1964년 운전이 시작된 이래 약 30년 동안 출력운전을 하면서 SG에서 튜브 파손에 의한 SWR이 발생하지 않았고[4], 이는 지금껏 운전된 액체금속로 중에서 거의 유일한 것으로 알려져 있다. 또한 일본에서는 이중튜브사이에서의 전열효과를 높이기 위한 다양한 방법과, 튜브 파손의 조기 감지 방법 및 설계의 단순화등에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다. 본 연구는 DWTSG 개념의 적절성 평가를 위해, 문헌조사를 통해 DWTSG 설계특성을 검토하고, 열전달 특성을 분석을 통해 전열성능에 대해 기존개념과 비교/분석을 수행하였다.

2. DWTSG 개념 특성

증기발생기의 튜브가 이중튜브(duplex-tube arrangement)로서, 하나의 튜브가 또 하나의 튜브를 둘러싸고 있는 형상으로 두 튜브사이에는 불활성기체이면서 비교적 열전달 특성이 좋은 He으로 채워져서 소듐과 증기사이에 이중의 경계를 이루는 개념이다. 따라서 만일 튜브 한쪽에서 균열이 발생하더라도, 다른 쪽 튜브 벽에 의해 소듐-물 반응사고로 발전되는 누출을 방지 할 수 있다. 또한 두 튜브 중간에 채워져 있는 He을 이용하여 튜브 균열을 조기에 감지할 수 있을 뿐 아니라 소듐측 튜브의 소규모 파손시에는 즉각적인 원자로 정지 없이 대처할 수 있는 장점이 있다. 그림1의 개념도에 나타낸 것처럼 DWTSG에서는 상부 전열튜브판이 2개 설치되어 소듐과 증기를 분리하고 있으며 그 튜브판 사이에는 불활성 기체로 채워져 있다. 외부튜브는 하단의 튜브판에 고정되고 내부 튜브는 He 공간을 가로질러 상부 튜브판에 연결된다.

내외부 각 각의 튜브는 설계압력에 따라 두께가 결정되며, 사전 변형(pre-stressed) 공정을 통해 두 튜브가 충분히 밀착(0.2 mm 이하)되도록 제작하여 튜브사이의 전열저항을 줄이고, 운전

중에 내/외부 튜브간에 이탈이 발생하지 않도록 한다. 두 튜브사이의 아주 작은 간격은 누출감지를 위해 채워놓은 기체의 유로를 방해할 수도 있기 때문에 그림에 처럼, 외부튜브의 안쪽에 튜브의 길이방향으로 홈을 내어 감지기체의 유로를 만들어 줌으로써 소듐이나 물/증기측에서 발생한 튜브 균열을 조기에 감지 할 수 있도록 하였다

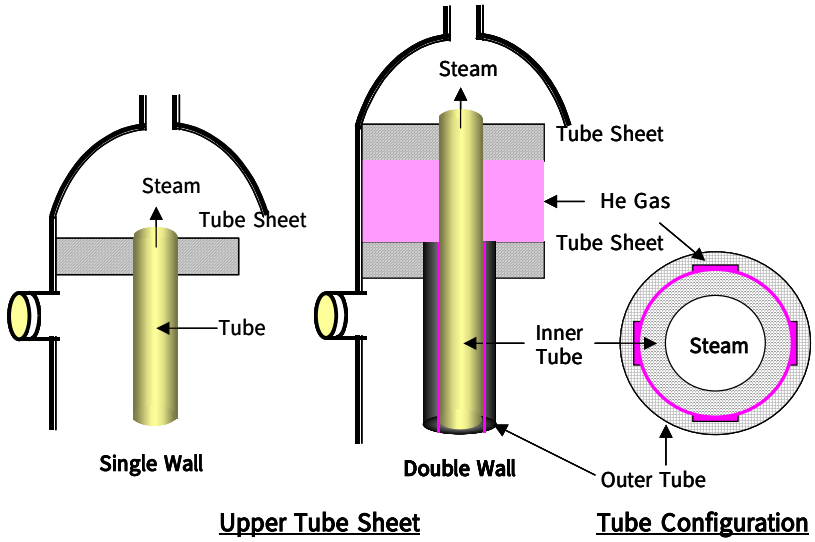

그림 1 이중튜브 증기발생기의 개념도

3. 열적크기 계산

3.1. DWTSG 사양 및 계산조건

정량적 비교를 위해 사용된 DWTSG 는 KALIMER-150과 고온의 소듐의 SG 상단에서 유입되어 하단으로 빠져나가고, SG하단에서 유입된 급수는 튜브 내부를 통해 상승하면서 열교환이 이루어져 증기로 바뀌어진다. DWTSG의 설계사양은 표1과 같다. KALIMER-150의 SG 와 비교를 위해 튜브 개수. 내경 및 재질을 동일하게 설정하고 튜브간의 간격 및 두께는 EBR-I[5] Forster Wheeler Energy[6]사의 설계를 참조하여 설정하였다.

튜브 내외부 두께의 합은 약 5.3mm로서 KALIMER에 비해 약 50% 증가하였다. 또한 증기발생기 전열면적 계산을 위해 사용된 열유체적 작동조건은 표2에 나타내었다. 경우에 따라 일차계통 또는 중간계통의 조건이 DWTSG의 셀측 조건으로 사용되며, 튜브측 작동조건은 항상 일정하다. 표2의 일차계통 유량은 증기발생기 한대에 해당하는 것으로, 비교 계산시 동일기준을 적용하기 위해 조정하여 사용하였다.

표 1 이중벽튜브 다발의 설계 사양

Parameter	Value
내부튜브 내경/외경, mm	16 / 21.2
외부튜브 내경/외경, mm	21.216/ 26.67
He 공간 간격,mm	0.008
내부/외부 튜브 두께, mm	2.6 / 2.7
튜브 배치	사각배치
튜브간 피치, mm	52
전열관 재질	2-1/4Cr-1Mo
충진 기체	He

표 2 KALIMER-150 정격운전 조건

	일차계통	중간계통	급수/증기계통
T_{hot}, °C	529.8	511	230
T_{cold}, °C	385	339	483.2
질량유속, kg/s	1071.2 *	901.8	87.725

3.2. 대류 열전달상관식

필요 전열면적 계산에 사용된 대류열전달 상관식은 표3과 같다. 또한 전열관 내측의 오염계수는 Roy[7]등이 제시한 것처럼, 전영역에서 28,400W/m-°C를 사용하였으며, 소듐측의 경우는 고려하지 않았다. 여기서 St는 튜브피치와 외경과의 비를 의미한다.

표 3 소듐측과 튜브내측의 열전달 상관식

영 역	상 관 식
Sodium Side	$Nu=0.25+6.2\,S_T-0.007+0.032\,S_T\,Pe^n$ $n=0.800-0.024\,S_T$, $(S_T=P/d)$
Water Side Subcooled	$Nu=0.023\ Re^{0.8}\ Pr^{0.4}$
Nucleate Boilnig	$h_B=Sh_b+Fh_c$ S= Suppression factor, F:Martinelli parameter

	$h_b = 0.00122\left[\frac{k_l^{.79}\ Cp_l^{.45}\ \rho_l^{.49}}{\sigma^{.5}\ \mu_l^{.29}\ \rho_g^{.24}\cdot}\right]^{0.68}\ \Delta T_{sat}^{.24}\ \ \Delta P_{sat}^{.75}$
	$h_c = 0.023\left[\frac{k}{d_i\cdot}\right](1-x)^{.8}\ \mathrm{Re}^{.85}\ \mathrm{Pr}^{.4}\ di^{.1}$
Flim Boling	$Nu = 0.0193\ \mathrm{Re}^{0.8}\ \mathrm{Pr}^{1.23}\left[x+(1-x)\frac{\rho_g}{\rho_f\cdot}\right]^{0.68}\left[\frac{\rho_g}{\rho_f\cdot}\right]^{0.068}$
Super heated	$Nu = 0.0073\ \mathrm{Re}^{0.936}\ \mathrm{Pr}^{0.61}\ di^{\ 0.1}$

3.3. 이중벽 전열저항

이중튜브에서 내/외부 튜브사이에 존재하는 기체(He)는 전열 저항의 대부분을 차지하며 이 저항은 공간(gap)의 크기와 공간에서의 전열모드에 의해 결정된다. 두 튜브 표면이 서로 접촉되지 않는 상태로 유지된다면 주요 전열모드는 정지된 기체층에서의 전도에 의해 열전달이 일어날 것이다. 또한 기체의 자연대류에 의한 열전달이 일어날 만큼 넓은 gap 간격(Gr>8000) 에서는 대류에 의한 열전달도 고려되어야 할 것이지만 일반적인 이중튜브의 제작 및 운전조건에서의 gap 간격은 Gr이 훨씬 낮은값을 갖는다. 또한 복사에 의한 열전달은 전도의 약 1~3%에 불과하므로 본 계산에서는 전도 열전달만 고려한다.

튜브벽을 통한 전도 전열저항, R_{CD}, 은 다음과 같다. 여기서 L은 단위 튜브길이를, r_{ii}, r_{io} 는 내부튜브의 내,외경을 , r_{oi}, r_{oo} 는 외부튜브의 내,외경을 의미하며, k_w, k_g는 각각 벽면재질과 He의 열전도도를 나타낸다. 또한 CFR은 He이 접한는 벽면에서의 오염 및 산화의 영향을 반영하는 인자로 본 계산에서는 15%로 설정하였다(CFR=1.15).

.

$$R_{CD} = \left\{ \frac{\ln\left(\frac{r_{ii}}{r_{io}}\right)}{2\pi k_w L} + \frac{\ln\left(\frac{r_{oi}}{r_{io}}\right)}{2\pi k_g L} + \frac{\ln\left(\frac{r_{oo}}{r_{oi}}\right)}{2\pi k_w L} \right\} \times CFR$$

4. 결 과 (K-150대비 열적크기)

KALIMER-150 SG와의 크기 비교를 위해 표2의 IHTS 조건을 입력인자로 하여 DWTSG의 필요열전달 면적을 계산하여 그림 2에 나타내었다. 이 경우는 KALIMER-150과 같이 일차계통 및 중간계통이 있는 조건으로, 단지 증기발생기의 튜브를 이중으로 하였을 때의 영향을 나타낸다. DWTSG는 2 배정도의 열전달 면적이 추가로 필요한데, 벽면을 통한 전도저항 증가가 주 원인이 된다.

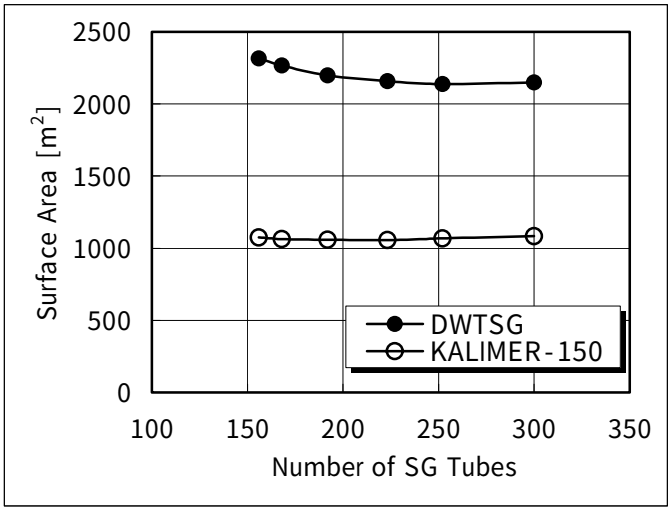

그림 2 중간계통(IHTS) 작동조건에서 필요 열전달 면적 비교

또한 동일 튜브 수에서 늘어난 전열면적(길이 증가)에 따른 압력 손실변화는 그림3.과 같다 KALIMER 설계점인 튜브수 224개 일 때 압력손실은 1.9MPa 정도로 KALIMER .설계 제한치(1.3 MPa)을 약 50% 정도 초과하는 경향을 보인다. 따라서 중간계통이 있는 상태에서 DWTSG 개념을 적용하기에는 2배 이상 커진 SG 및 과도한 압력손실로 상당 부분의 경제성 저하가 예상된다.

PHTS 운전 조건을 SG 셀측의 작동조건으로 설정하여 분석한 결과를 그림4에 나타내었다. 이 경우는 KALIMER의 중간열교환기를 제거하고 원자로 냉각재가 증기발생기에 직접 열교환이 이루어지는 방식으로, SG로 전달되는 소듐의 온도가 중간계통이 존재하는 것에 비해 높게 유지된다. He 층의 간격이 기준 경우일 때 DWTSG의 필요 열전달 면적은 기준 KALIMER- SG의 95%에 해당할 만큼 감소하는데 소듐의 작동온도의 상승이 주된 원인으로 SG에서의 대수 평균온도차는 약 55% 증가한다. 또한 이 경우는 DWTSG 하나가 KALIMER-150의 중간열교환기(2대)와 SG의 기능을 대신하기 때문에 전열면적 감소효과는 훨씬 커지는데 참고문헌[8]의 결고와 비교하면, DWTSG

의 전열면적은 중간열교환기와 증기발생기를 합한 것의 약 70%에 해당한다. DWTSG에서의 전열 성능은 튜브벽을 통한 열전도에 의해 결정되는데 그 중에서도 기체층을 통한 전도 저항이 전체 저항의 50% 이상을 차지함으로 향후 DWTSG 성능 개선은 이 영역의 저항을 줄 일수 방법이 모색되어야 할 것이다.

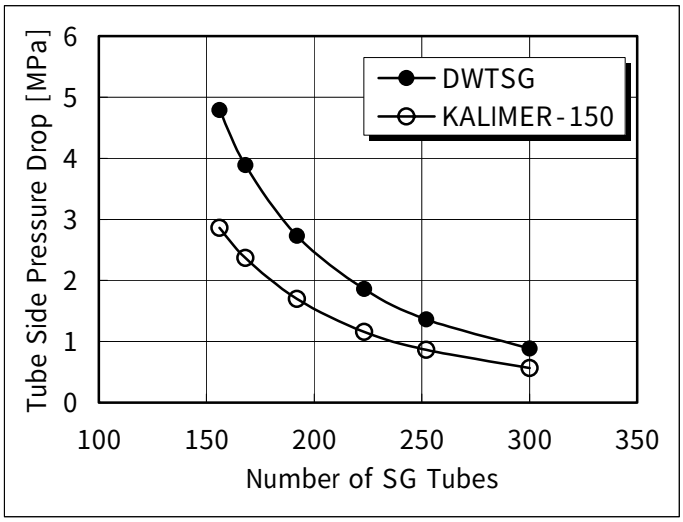

그림 3 중간계통 작동조건에서 튜브측 압력손실 비교

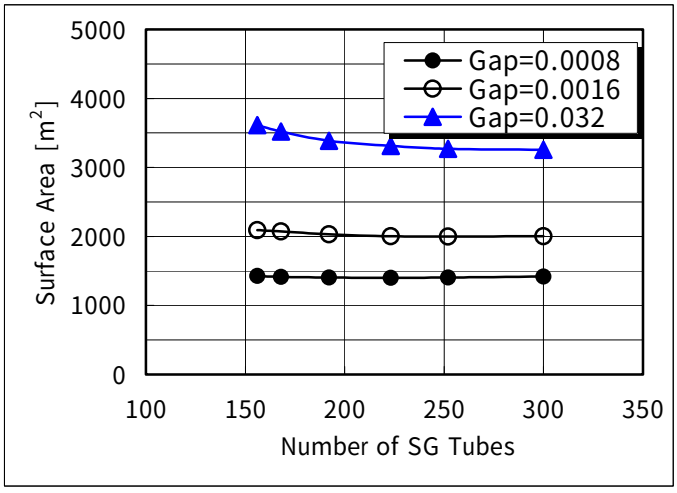

그림 4 일차계통(PHTS) 작동조건에서 필요 열전달 면적 비교

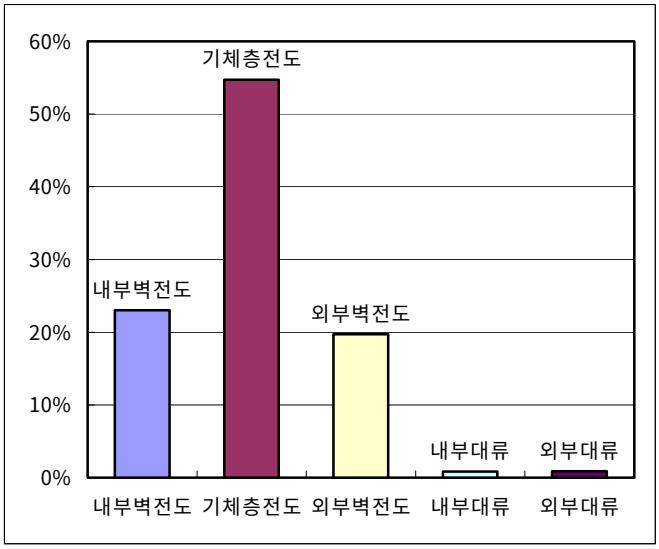

그림 5 DWTSG 전열저항 분포

5. 결 론

DWTSG 개념은 소듐과 증기사이에 다중 경계를 형성 함으로서 증기발생기에서 소듐-물 반응 사고 발생 가능성이 낮은 개념으로 여겨지며, 또한 DWTSG의 전열특성 분석결과에서 처럼 중간계통을 제거하고 일차계통 소듐을 이용할 경우 필요 전열면적은 기준 증기발생기 보다 작기 때문에 경제성 증진에 기여할 것으로 판단된다. 그러나 중간계통의 존재 하에서는 전열면적이 2배이상 증가하기 때문에 큰 장점이 없다. 따라서 중튜브 중 하나에서 균열이 발생하였을 때 누출까지 진행 되기 전에 조기 감지 가 매우 중요하며, 만일 이 방법 이 확보된다면 이중튜브SG는 현재 연구가 진행되고 다른 신개념SG와 대비해 충분한 경쟁력을 갖을 수 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 주관한 원자력 중장기 연구과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문 헌

1. Gromov, et al, "Use of Lead-Bismuth Coolant in Nuclear Reactors and Accelerator-driven System", Nuclear Engineering Design, 173, 1997

2. Seong-O Kim “Evaluation of New Design Concepts for Steam Generators in

Sodium Cooled Liquid Metal Reactors", Journal of the Korea Nuclear Society, Vo1. 35, No.2, April, 2003.

3 위명환, 김성오, 심윤섭, "Lead-Bismith 혼합물을 중간냉각재로 사용한 증기발생기 열적특성분석", 2003 한국원자력학회 추계학술대회 논문집, 2003.

4 P.J Langford " Alternative Concept Evaluation LMFBR Duplex-Tube Steam Generators",WNET-110,1974.

5 J.I. Sackett, "Operating and Test Experience with EBR-II, the IFR Prototype", Progress in Nuclear Energy, Vol.3, No.1/2, 1997

6 Foster Wheeler Co "Preliminary Design: Duplex Tube Low Pressure Saturated Steam Generator for Large LMFBR Plant", NP-1219, Oct. 1979

7 Roy, P. and Dodson, G.R., Effects of Particulate Deposition on the Heat Transfer Coefficient of LMFBR Heat Exchanger, GE Report GEFT-00265(L), 1977

8. KAERI, "KALIMER Conceptual Design Report", KAERI/TR-2204/2002, 2002