

액체금속로 증기발생기의 안전성 증진 개념 특성 평가

위명환, 김성오, 성승환, 김진환*
한국원자력연구소, 전남대학교*

Characteristics Evaluation of Steam Generator

Safety Enhancement Concept in Liquid Metal Reactor

Wi Myung-Hwan, Kim Seong-O, Seong Seung-Hwan, Kim Jin-Hwan*
Korea Atomic Energy Research Institute, Chonnam National University*

1. 서론

액체금속로는 우라늄 자원의 효율적 이용을 통해 에너지 자원의 한계를 극복할 수 있는 원자로로서, 지난 수 십년 간의 연구개발을 통해 이제는 실용화 단계에 이른 기술이다. 그러나 원자로 냉각재로 사용되는 소듐이 갖는 고유특성으로 인해 물과 화학적으로 반응하여 화재 및 급격한 압력상승 등을 초래하기 때문에 이를 대비한 설비 및 계통이 추가로 요구됨에 따라 발전소의 안전성 및 경제성 저하의 주요 원인이 되고 있다. 특히 액체금속로의 증기발생기(SG)는 소듐과 물이 전열튜브벽을 경계로 열교환이 일어나는 기기로서, 전열튜브의 손상에 따른 소듐-물 반응사고 가능성이 상존하기 때문에 많은 나라에서 이러한 사고를 근본적으로 차단할 수 있는 증기발생기 개념 개발을 위한 연구^{1,2,3}가 활발히 진행되고 있다.

본 연구는 액체금속로의 안전성 개선과 함께 경제성 증진을 도모하기 위한 새로운 증기발생기개념, 즉 LBE(Lead-Bismuth Euthetic)를 중간계통냉각재로 이용하는 개념과 전열튜브벽을 이중으로 하는 DWTSG (Double Wall Tube Steam Generator)개념을 제시하고, 각 개념의 정량적인 특성평가를 위해 기존의 액체금속로 증기발생기와 열적크기를 비교하였다.

2. 개념 특성 및 크기계산

2-1. 액체금속로 전열계통구성

액체금속로에서는 원자로 노심에서 발생하는 열을 터어빈에 전달하는데 있어서 경수로와는 달리 일차계통(PHTS)과 증기발생계통(SGS)사이의 중간계통(IHTS)을 두어 SG전열튜브에서의 누출에 의한 소듐-물 반응이 발생하였을 때 반응에 따른 압력상승 및 반응생성물로부터 원자로 노심 및 주요기기들을 보호하는 기능을 담당한다(그림 1 참조). 그러나 이처럼 열전달계통이 추가됨에 따라 열효율 감소 및 기기의 대형화가 예상되고 이는 곧 전반적인 경제성 저하의 원인이 되기도 한다.

2-1-1. LBE 중간계통 냉각재 개념

전반적인 계통의 구성은 PHTS, IHTS, 그리고 SGS와 같이 기존의 개념과 동일하게 하고 단지 IHTS 냉각재를 물-증기 등과 반응을 일으키지 않는 LBE로 대체하는 개념이다. LBE는 물 또는 공기등과 화학적으로 안정되고, 특히 열적특성이 유사한 납과는 달리 융점이 상대적으로 낮기 때문에(약 130 °C) 소듐을 대체할 냉각재로 관심을 끌고 있다. LBE를 사용할 경우는 SG에서 전열튜브 손상에 의해 증기가 누출 되어도 2차 반응에 의해 더 이상 사

고가 진전되지 않기 때문에 비교적 발생 가능성이 빈번한 소규모 물 누출에서 일정 기간 동안 원자로 정지 없이 운전이 가능하다. 따라서 발전소 전체의 가동률 향상 및 운전 여유도 증진에 기여할 수 있을 것으로 판단되며, 소듐을 사용하는 개념에서 반드시 필요했던 소듐-물 반응을 대비한 많은 보조계통들의 제거가 가능하기 때문에 계통 및 구성 기기의 단순화를 이룰 수 있을 것으로 판단된다.

2-1-2. DWTSG 개념

이중튜브증기발생기는 전열튜브를 이중으로 제작하여 소듐과 증기사이에서 이중 경계를 형성함으로써 만일 한쪽 튜브의 균열이 발생하더라도 또 다른 튜브가 일차 방벽으로 작용하기 때문에 소듐-물 반응사고로 진전되는 것을 방지하는 개념이다. 이 개념은 한 쪽 튜브벽면에서의 누출 여부를 조기에 감지할 수 있도록 하여, 단일벽 전열튜브를 사용하는 것에 비해 소듐-물 반응 발생 확률을 획기적으로 낮출 수 있으므로 기존의 액체금속로 개념에서 전열 저항으로 작용하는 중간계통의 제거가 가능하다. 따라서 DWTSG를 사용한 전열계통은 노심을 빠져나온 PHTS 소듐이 직접 증기발생계통에 유입되어 급수/증기측에 열을 전달함으로써 SG의 고온측 작동온도가 상승된다. 이중벽튜브는 하나의 튜브가 또 하나의 튜브를 둘러싸고 있는 형상으로 내-외부 튜브사이의 간격은 0.006mm - 0.2mm까지 다양^{4,5} 한데 0.2mm로 설정된 경우는 튜브사이에서 전열 증진을 위해 LBE를 충전하거나, 신뢰성 있는 누출감지를 위해 wire space 를 설치하여 튜브사이 간격을 일정하게 유지하기 위한 경우이며, 0.01mm 이하의 경우는 사전 변형(pre-stressed) 공정을 통해 두 튜브 사이 간격을 최소화하여 전열저항을 줄일 수 있도록 한 것이다.

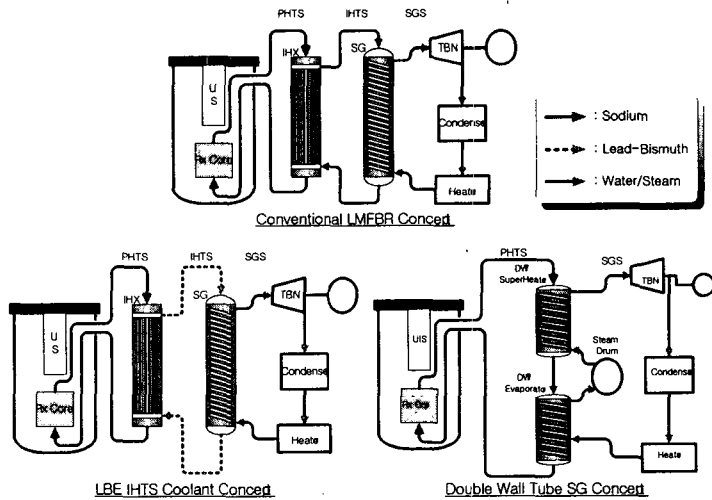


그림 1 액체금속로 전열계통 구성 비교

2-2. 필요 전열 면적 계산

2-2-1. 계산조건

LBE를 중간계통 냉각재로 사용할 때 SG의 열적 크기를 소듐을 사용할 때와 비교하기 위해 IHTS 냉각재와 급수/증기의 온도, 압력 및 SG 열용량을 동일하게 유지한 다음 크기를 계

산하였다. LBE의 낮은 열전달 특성 때문에 일정한 온도차에서 소듐을 사용할 때와 같은 열을 전달하기 위해서는 유량 증가가 필요한데 LBE의 필요 유량, \dot{m}_{LBE} 은 다음과 같이 설정하였다.

$$\dot{m}_{LBE} = \dot{m}_{Na} \left(\frac{C_p Na}{C_p LBE} \right)$$

또한 크기 비교를 위해 기준조건으로 설정된 SG는 KALIMER-150설계⁶와 동일하고 자세한 설계사양은 표 1과 같다.

표 1 KALIMER-150 증기발생기 설계사양

Thermal Capacity, MWt	198.35		
Steam Condition : Superheated		Tube Configuration	
Temperature, °C	483.2	Type	Helical coil
Pressure, MPa	15.5	I.D., m	0.016
Flowrate, kg/sec	87.74	O.D., m	0.023
Feedwater Temp. °C	230	Length, m	60
IHTS Coolant Inlet Temp. °C	511	Material	2-1/4 - 1Mo
IHTS Coolant Outlet Temp. °C	339		

또한 DWTS의 필요전열면적 계산은 일본의 MONJU 설계⁷를 기준으로 작동 조건을 설정하였으며 DWTS를 적용한 개념에서는 중간열교환기가 없기 때문에 MONJU의 노심 출구 온도가 과열기 셀측 입구 조건으로 사용되고 과열기와 증발기의 출구 소듐온도는 열용량을 MONJU와 동일하게 설정하고 구하였다. 액체급속로의 높은 작동 온도(500°C 이상)를 이용하여 보다 높은 열효율을 얻기 위하여 과열 증기사이클을 채택하였으며, 특히 전열튜브의 건전성에 악영향을 미치는 DNB를 피하기 위하여 증발기와 과열기로 분리된 Sulzer사이클을 채택하였다. 이밖에 냉각재의 유량을 비롯한 주요 작동조건은 표2와 같다.

표 2 MONJU와 DWTS 작동 조건

Parameters	unit	MONJU			DWTS	
		IHX	Evaporator	Superheater	Evaporator	Superheater
Heat Capacity	MWt	38	190.8	47	190.8	47
Shell Inlet Temp.	°C	529	469	505	502.76	529
Shell Outlet Temp.	°C	397	325	469	397	502.76
Shell Flow rate	kg/s	1416.7	1027.8	1027.8	1416	1416
Tube Inlet Temp.	°C	325	240	367	240	367
Tube Outlet Temp.	°C	505	369	487	369	487
Tube Flow rate	kg/s	1027.8	105.6	105.6	105.6	105.6
Steam Pressure	MPa	-	14.6	13.2	14.6	13.2

2-2-2. 해석 도구

SG의 열적크기 계산에 사용된 전산코드인 HSGSA⁸는 관류형 헬리컬코일 증기발생기 성능해석을 위한 일차원 해석코드로서 튜브내에서의 전열현상을 예열, 포화, 막비등 그리고 과열과 같이 4가지로 구분하여 각 영역에 관련된 전열상관식을 사용하며 특히 나선형튜브형상에서 오는 원심력에 의한 영향을 반영하고있다. 작동 중 유체의 불순물이나 유체와 벽사이의 상호작용에 의한 열저항인 오염계수는 Roy등⁹이 제시한 것처럼 튜브측(급수/증기)은 전 영역에서 28,400W/m²·°C를 사용하였으며, 셸측(소듐)은 고려하지 않았다.

3. 결과 및 고찰

표 1의 KALIMER-150 설계조건에서 중간계통 냉각재로 각 각 소듐과 LBE를 사용한 경우에 대한 계산 결과를 그림2에 나타내었다. SG의 셸측과 튜브 측의 대류열전달 계수를 전열 튜브의 길이에 따라 도시한 것으로 전열관 내부 대류열전달 계수는 두 경우 모두 비교적 유사한 크기를 갖는데 반해 셸측 대류열전달계수는 LBE의 경우, 소듐의 1/3 정도의 값을 갖는다. 이는 Na에 비해 LBE의 낮은 전열 특성에 의한 결과로 중간계통 냉각재로 LBE를 사용할 경우 총괄SG 필요 열 전달면적이 기준경우에 비해 약 30% 증가하는 원인이 된다.

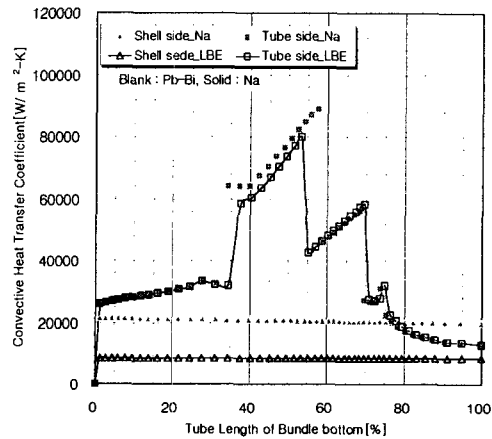


그림 2 중간계통 냉각재에 따른 대류열전달계수

또한 LBE를 사용한 경우는 지난연구¹⁰에서 제시한 것처럼 동일 형상의 SG에서 소듐을 사용할 때에 비해 냉각재 펌프 소요 동력이 4 배 이상 증가하게 되어 전반적인 발전소 효율 감소를 야기한다. 그리고 LBE의 높은 밀도 때문에 중간계통 배관의 무게가 크게 증가하고 배관의 과도한 응력 및 열적하중 때문에 만일 이 개념의 적용을 위해서는 중간계통 배관길이를 최소화하는 설계 개념의 도입이 필요하다.

또한 DWTS의 특성평가를 위해 일본의 MONJU설계와 열적크기 관점에서 비교를 수행하였으며 여기에서 기준으로 사용된 MONJU의 전열면적은 중간열교환기와 증발기/과열기의 면적을 합한 것이다. 그림 3은 내-외부 튜브 사이를 비교적 작게 하고 두 튜브사이의 공간에 헬륨이 채워진 상태에서 간격의 크기가 필요전열면적에 미치는 영향을 도시한 것으로 튜브의 두께가 2.5mm 일 때 튜브간 간격이 0.02mm 이하이면 DWTS의 전열면적이 MONJU의 중간열교환기와 증발기/과열기를 합한 면적보다 작아짐을 나타내고 있다. 따라서 튜브사이에 헬륨이 채워진 DWTS 개념을 이용하고자 할 때 열적크기 관점에서 기존 개념에 비해 경쟁력을 갖기 위해서는 튜브사이의 간격이 기체유로의 영향을 고려하여 0.02mm 이하로 설정되어야 한다.

그림 4는 DWTS의 내-외부 튜브 간격에서 발생하는 열저항을 줄이기 위한 방법의 일환으로 이 공간에 헬륨보다 열전도도가 훨씬 좋은 LBE($k_{Pb-Bi}=14$ W/m·K)를 채워 넣은 경우에 대한 분석결과이다. DWTS의 필요전열면적은 LBE의 높은 열전도도 영향으로 헬륨

을 사용할 때에 비해 크게 줄어들게 되는데 튜브 간격이 0.2mm 일 경우를 기준으로 보면, 중간계통이 없을 때 필요전열면적은 MONJU 설계의 약 40%까지 감소하게 되며 중간계통이 존재한다 할지라도 필요전열면적이 기준 경우의 약 1.2배에 해당할 만큼 충분한 전열촉진 효과를 기대할 수 있다. 또한 이 경우는 헬륨을 채워넣는 것과는 달리 내-외부 튜브 간격에 따른 전열면적 크기 변화가 거의 없는데, 이는 LBE의 열전도도가 높고 내-외부 튜브 간격이 튜브두께의 1/10에도 미치지 못할 만큼 작아 총괄전열저항에 미치는 영향이 미미하기 때문이다.

그러나 전열촉진을 위해 LBE를 채워넣을 경우는 튜브에서 미세 균열이 발생하였을 때 조기 누출 감지가 헬륨을 충전 하였을 때 보다 용이하지 않을 뿐 아니라, 두 튜브사이의 간격이 커지게 되므로 DWTSG의 무게 및 외형크기가 증가하게 되는데 헬륨을 채워넣는 것과 비교할 때 전열튜브 무게는 15% 이상 증가한다. 또한 LBE의 화학적 특성 때문에 고온에서 장기간 튜브재질과 접촉되어 있을 때 야기되는 부식문제가 여전히 해결되지 않은 상태이기 때문에 이 개념을 DWTSG에 적용하기 위해서는 추후 충분한 검토가 이루어져야 할 부분으로 여겨진다.

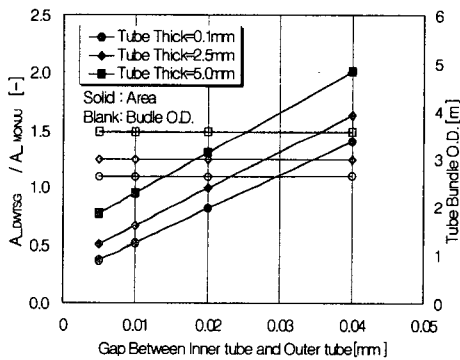


그림 3 내/외부 튜브간격에 따른 전열면적 변화 (He Gas 충전)

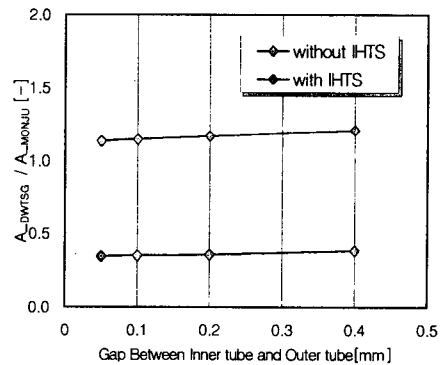


그림 4 내/외부 튜브간격에 따른 전열면적 변화 (LBE 충전)

4. 결론

액체금속로 안전성 증진을 위해 SG에서 소듐-물 반응사고 차단이 가능한 새로운 증기발생기 개념을 제안하고 열적크기 특성평가를 수행하였다. 제시한 개념들은 SG에서 튜브손상에 의한 물/증기 누출이 발생해도 소듐-물 반응에 의한 사고의 확산이 발생하지 않을 뿐 아니라 기존의 액체금속로 전열계통과 구성이 유사하기 때문에 기술 구현이 비교적 용이하며 기기의 안전성 및 작동 신뢰성 증진과 함께 계통의 단순화를 이룰 수 있을 것으로 평가된다.

또한 제시한 증기발생기 개념의 열적크기에 대한 정량적인 비교 분석결과, 중간계통 냉각재로 소듐 대신 물/증기와 반응하지 않는 LBE로 대체하는 경우 전열면적은 기존개념에 비해 약 30% 증가하게 되며, 소듐과 증기사이의 물리적 경계를 이중으로 형성하는 DWTSG를 사용할 경우는 중간계통의 존재 여부 및 전열튜브의 형상에 따라 기존 개념과 충분한 경쟁력을 갖는 설계가 가능할 것으로 판단된다. 그러나 중간냉각재로 LBE를 사용하는 경우는 배관의 무게 및 열적하중 문제 해결을 위해 중간계통 배관길이를 최소화하는 설계개념의 도입

이 필요하며, DWTSG의 경우는 누출감지에 대한 응답성 및 전열촉진 매체에 의한 부식문제 등에 대한 연구가 병행되어야 할 것이다.

감사의글

본 연구는 과학기술부에서 주관한 원자력 중장기 연구과제의 일환으로 수행되었습니다.

5. 참고문헌

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, Vol. 35, No.2, April, 2003.
3. 위명환, 김성오, 최석기, 어재혁, "소듐냉각 액체금속로의 이중튜브증기발생기의 열적 크기 평가", 2003 한국원자력학회 추계학술대회 논문집, 2003
4. L.E. Efferding et al "Preliminary Thermal Hydraulic Sizing Calculation for Duplex Tube Evaporator/Superheater", DOE/SG/00962, June, 1974
5. B.E. Dawson et al Preliminary Design : Duplex Tube Low-Pressure Saturated Steam Generator for Large LMFBR Plant", NP-1219, 1979
6. D.H. Hahn, et al., "KALIMER Conceptual Design Report", Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI/TR-2204/2002, 2002.
7. Miyazaki et al, "Advanced IHX-SG Combined FBR System Designs and Basic Experiments" Proc. 10th Pacific Nucl. Conf. Vol.1 p769, Kobe, Japan 20-25 Oct.,1996
8. 김연식, "HSASA 전산코드 사용자 지침서", KALIMER/FS-4CM-98-00, 한국원자력연구소,1998
9. 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
10. 위명환, 김성오, 심윤섭, "Lead-Bismuth 혼합물을 중간냉각재로 사용한 증기발생기 열적 특성분석", 2002 한국원자력학회 추계학술대회 논문집, 2002