

Lead-Bismuth 혼합물을 중간냉각재로 사용한 증기발생기 열적 특성 분석

Analysis of Steam Generator Thermal Characteristics using Lead Bismuth Eutectic as a IHTS Coolant

위명환, 김성오, 심운섭
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

액체금속로의 안전성 증진을 위한 방법의 하나로 증기발생기에서 소듐-물 반응사고를 방지하기 위해 중간계통냉각재를 기존의 Na 대신 물/증기와 반응하지 않는 LBE로 대체하는 개념의 증기발생기에 대한 열적 특성 평가를 수행하였다. 이 개념은 증기발생기에서 소듐-물 반응사고를 완전 방지할 수 있기 때문에 증기발생계통의 단순화, 발전소 가동을 증진과 같은 효과를 기대 할 수 있는 반면 Na에 비해 LBE의 낮은 전열 특성 때문에 증기발생기 크기의 대형화 및 중간계통 배관 크기 증가 등과 같은 부정적인 면도 함께 내포하고있다. 현재 개념 개발이 완료된 KALIMER 증기발생기와 비교 할 때 필요 전열면적은 약 30% 증가 하게되며 또한 동일 형상의 중간계통 및 증기발생기 에서 필요 Pumping power는 4.3 배 증가된다.

Abstract

The LBE IHTS coolant concept is evaluated to avoid sodium-water reaction incidents in the SG. This study attempts to assess thermal characteristics of SG for this concepts. The use of LBE as a IHTS coolant provides an attractive design option due to its several advantages, especially enhancement of reactor safety, simplification of SGS and increase in the reactor availability. However, comparing with the SG of KALIMER, the estimated SG heat transfer surface area with LBE IHTS coolant is about 1.3 times larger than that of KALIMER and when maintaining the IHTS size of KALIMER the required IHTS pumping power is 4.3 times higher due to its hydraulic properties

1. 서 론

액체금속로는 자원의 효율적 이용 및 핵확산 저항성 등과 같은 많은 장점이 있음에도 불구하고 일반적으로 사용되는 Na 가 갖는 특성, 즉 물과 격렬하게 반응하는 성질 때문에 이를 대비한 설

비 및 계통이 추가로 요구됨에 따라 발전소의 경제성 저하의 주요 원인이 되고 있다. 따라서 일본, 러시아를 비롯한 원자력 선진국들은 새로운 원자로 냉각재에 대한 연구, 계통 및 기기의 단순화, 그리고 새로운 개념의 기기/재료의 개발과 같은 연구를 통해 기존의 설계/개발된 액체금속로의 안전성 개선과 함께 경제성 증진을 도모하고 있다.

본 연구는 액체금속로의 안전성 증진을 위한 대체 개념 중 하나인 Lead-Bismuth 혼합물을 중간 냉각재로 사용하는 증기발생기에 대한 열전달 특성을 평가하고, 현재 개념개발이 완료된 KALIMER SG와 비교를 통해 이 대체 개념의 장, 단점 및 적절성을 평가하였으며 이 결과는 향후 새로운 액체금속로 개념을 개발하는데 있어서 각 평가 요소의 기초 자료로 활용될 수 있도록 하였다.

2. 개념 특성

액체금속로 증기발생기는 셀측에 고온의 중간계통(IHTS: Intermediate Heat Transfer System) 냉각재가, 전열관측에는 고압의 물/증기가 흐르면서 전열관벽을 통하여 열을 주고받아 증기를 생산하는 기기이다. 특히 IHTS는 일차계통의 열을 증기발생계통에 전달함과 동시에 SG 전열관 손상에 따른 물/증기 누출 사고(SWR: Sodium-Water Reaction) 발생시 반응생성물 및 압력으로 부터 원자로를 보호하는 방벽 기능을 담당한다. 지금까지는 소듐이 거의 모든 액체금속로에서 IHTS 냉각재로 사용되어왔으나 소듐의 경우 물/증기와 격렬하게 반응하여 계통의 압력 증가 및 화재 발생 등과 같은 안전성을 저해하는 요인이 되어왔다. 따라서 SG에서 SWR발생가능성을 완전 차단하는 방법의 일환으로 IHTS 냉각재로 LBE(Lead Bismuth Eutectic)를 채택하는 개념이 제안^[1] 되었다(그림 1 참조). 전반적인 계통의 구성은 일차계통, 중간계통 그리고 증기발생계통과 같이 기존의 개념과 동일하게 하고 단지 IHTS 냉각재를 물-증기 등과 반응을 일으키지 않는 액체금속로로 대체하는 개념으로서 무엇보다도 SG에서 물/증기 누출사고가 발생해도 기존개념의 취약점인 SWR(Sodium Water Reaction) 발생을 차단함으로써 더 이상 사고가 진전되는 것을 방지할 수 있다. 따라서 기존 Na를 사용하는 개념에서 반드시 필요했던 SWR 대비 계통을 제거함으로써 기존 SGS 계통을 단순화 할 수 있고 SG에서 비교적 발생 가능성이 빈번한 소규모 물 누출 사고 시에도 일정 기간 동안 원자로 정지 없이 운전이 가능하기 때문에 발전소 전체의 가동율 향상 및 운전 여유도 증진에 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 안전성을 향상시킬 수 있으면서도 기존의 개념과 큰 차이가 없으므로 추가적인 기술 개발 없이 기존의 경험 및 축적된 기술을 활용하여 구현이 가능한 개념이다.

3. SG 및 계통 특성 분석

3.1 냉각재 특성

LBE는 물 또는 공기와 화학적으로 안정되고, 특히 융점이 330 °C에 달하는 Pb 와는 달리 상대적으로 낮은 융점(130°C) 때문에 계통의 소듐을 대신할 대체 냉각재로 관심을 끌고 있다. 다음 표1에 Na 와 LBE의 열적 물성치^[2,3]를 비교하여 제시하였다.

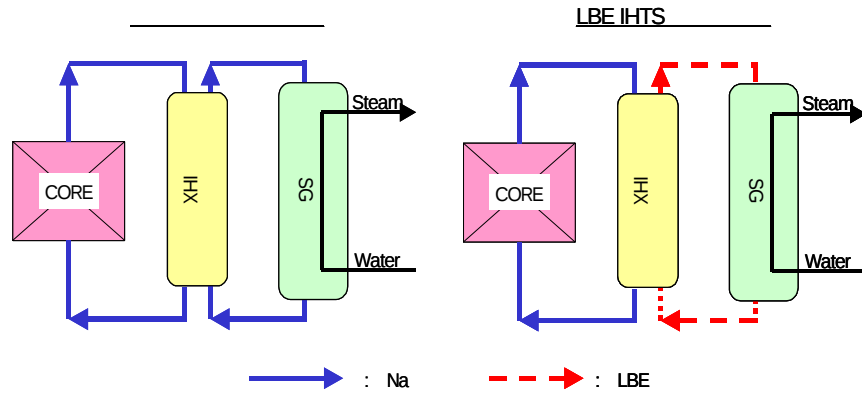


그림 1 기존 액체금속로와 LBE IHTS냉각재 개념 비교

3. SG 및 계통 특성 분석

3.1 냉각재 특성

LBE는 물 또는 공기와 화학적으로 안정되고, 특히 융점이 330 ℃에 달하는 Pb 와는 달리 상대적으로 낮은 융점(130℃) 때문에 계통의 소듐을 대신할 대체 냉각재로 관심을 끌고 있다. 다음 표1에 Na 와 LBE의 열적 물성치^[2,3]를 비교하여 제시하였다.

표 1 Na 와 LBE의 열적 물성치 비교(T=425℃)

Properties	Na	LBE	X_{Na}/X_{LBE}
Melting Point, ℃	89	130	-
Boiling Point, ℃	885	1670	-
Density, kg/m ³	850	10194	0.079
Specific Heat, J/kg-K	1278	146	8.8
Thermal Conductivity, W/m-K	72	13.4	5.4
Viscosity, kg/m-sec	0.000266	0.00146	0.18
Prantle Number	0.00472	0.0159	0.3

3.2 열적크기 계산

3.2.1 분석 조건

평가 대상 증기발생기의 형상 및 성능요건은 KALIMER SG^[4]의 개념과 동일하며 분석에 사용된 SG 설계사양은 표 2에 나타내었다. LBE를 사용하는 SG의 열적 크기를 Na를 사용하는 것과 비교하기 위한 전제조건으로 SG에서의 IHTS 및 급수증기의 온도, 압력조건 및 SG 열용량을 동일하게 유지한 다음 SG의 크기를 계산하였다. 따라서 표 1에 제시한 것처럼 LBE의 낮은 열전달 특성 때문에 일정 온도차에서 Na와 같은 열용량을 전달하기 위해서는 유량증가가 필요하며 LBE의 필요 유량은 식 1)과 같이 설정하였으며 필요 전열면적은 2)식에 의해 구하였다.

$$\dot{m}_{LBE} = \dot{m}_{Na} \left(\frac{C_{p, Na}}{C_{p, LBE}} \right) \quad 1)$$

Table 2 KALIMER SG 설계사양(/ SG)

Thermal Capacity, MWt		198.35	
<u>Steam Condition (Superheated)</u>		<u>Tube Configuration</u>	
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		

$$A_{SG} = \frac{q}{U \Delta T} \quad 2)$$

여기서 A_{SG} 필요전열면적, q 는 열용량, ΔT 는 SG에서의 온도차를 의미하며 총괄 열전달계수, U , 는 다음식에 정의된다.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_s} + \frac{1}{h_{Fs}} + \frac{d_o}{2k} \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right) + \frac{d_o}{d_i} \frac{1}{h_{Fw}} + \frac{d_o}{d_i} \frac{1}{h_w}} \quad 3)$$

윗 식에서 하첨자 s 와 w 는 각 각 SG의 셸, 및 전열관 측을, 의미하고 k 와 h_F 는 전열관재질의 열전도도와 오염계수를 의미한다.

3.2.2 분석 도구

SG의 크기에 대한 비교 평가를 위해 사용된 전산코드인 HSGSA^[5]는 관류형 헬리컬코일 증기발생기 성능해석을 위한 일차원 해석코드로서 KALIMER SG 설계를 목적으로 개발되었다. HSGSA에서 사용된 주요 열전달 상관식은 다음과 같다.

o. Shell 측(Kalish-Dwyer)

$$Nu = 1.086 (5.44 + .228 Pe^{.614}) \left(\frac{\sin \theta + \sin^2 \theta}{1 + \sin^2 \theta} \right)^{1/2} \quad 4)$$

o. 전열관 측(Kalish-Dwyer)

- Preheat(Seban-McLaughlin)

$$Nu = .023 Re^{.85} Pr^{.4} \left(\frac{d_i}{D_c} \right)^{.1} \quad 5)$$

- Nucleate Boiling(Chen (Modified for h_c))

$$h_B = Sh_b + Fh_c \quad (6)$$

(여기서, F : Martinelli parameter S : suppression factor)

$$h_c = .023 \left(\frac{k}{d_i} \right) (1-x)^{.8} Re^{.85} Pr^{.4} \left(\frac{d_i}{D_c} \right)^{.1}$$

$$h_b = 0.00122 \left[\frac{k_l^{.79} c_{p_l}^{.45} \rho_l^{.49}}{\sigma^{.5} \mu_l^{.29} h_{fg}^{.24} \rho_g^{.24}} \right] \Delta t_{sat}^{.24} \Delta p_{sat}^{.75}$$

- Film Boiling (Bishop et al.)

$$Nu_f = 0.0193 Re_f^{0.8} Pr_f^{1.23} \left[x + (1-x) \frac{\rho_g}{\rho_f} \right]^{0.68} \left(\frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{0.068} \quad (7)$$

- Superheat (Mori-Nakayama)

$$Nu = \frac{Pr^{.4} Re^{5/6}}{41.0} \left(\frac{d_i}{D_c} \right)^{1/12} \left\{ 1 + \frac{.061}{[Re(\frac{d_i}{D_c})^{2.5}]^{1/6}} \right\} \quad (8)$$

3.3 Pumping power

LBE의 경우 동일 열출력을 내기 위해서는 보다 많은 유량이 필요 할 뿐 아니라 Na의 5배 이상 되는 점성 때문에 보다 큰 Pumping Power, η , 가 필요 할 것으로 여겨지며 이에 대한 정량적인 평가를 위해 다음 9) - 11) 식을 이용하여 η 를 계산하고 이에 대한 영향을 분석하였다. Pumping power, η , 는 다음과 같이 정의되며,

$$\eta = \Delta P V \quad (9)$$

여기서 부피유량, V , 과 압력강하, ΔP , 는 식 10), 11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (10)$$

$$\Delta P \approx \frac{K}{2} \rho u^2 = \rho \left(\frac{V}{A_c} \right)^2 = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\dot{m}}{A_c} \right)^2 \quad (11)$$

10), 11)를 9)에 대입하고 3.2.1 항에서 설정한 $(\dot{m}C_p)_{Na} = (\dot{m}C_p)_{LBE}$ 의 관계를 이용하여 정리하면 다음과 같다.

$$\eta = \left(\frac{1}{\rho} \right)^2 \left(\frac{1}{C_p} \right)^3 \left(\frac{1}{A_c} \right)^2 \quad (12)$$

4.결과 및 검토

4.1 SG 열적특성

Na과 LBE를 IHTS 냉각재로 사용 한 경우 SG의 필요전열면적 계산을 위한 HSGSA 해석 결과를 그림 2, 3에 나타내었다. 그림 2는 SG의 셀측과 전열관 내 급수/증기의 대류열전달 계수를 전열관 길이에 따라 도시한 것으로, 전열관 내부 대류열전달 계수는 두 경우 모두 비교적 유사한 경향을 갖는데 비해 셀측 계수는 LBE의 경우 Na의 약 1/3 정도의 값을 갖는다. 이는 LBE를 사용하는 경우 IHTS 유량을 식1)에 따라 조정하였음에도 Na에 비해 낮은 LBE의 열전도도에 때문에 나타난 결과이다. 이 결과를 기준으로 각 각의 경우에 대해 전열관 내, 외측 대류열전달 및 전열관 벽에서의 전도열전달과 같은 SG에서의 열전달 저항 분포를 그림 3에 나타내었다. LBE를 사용할 경우 셀측에서의 대류저항이 Na에 비해 약 2.5배 증가 하게되며 이는 총괄저항 약 30% 증가에 해당되며 이는 곧 SG의 필요전열면적의 증가를 의미한다.

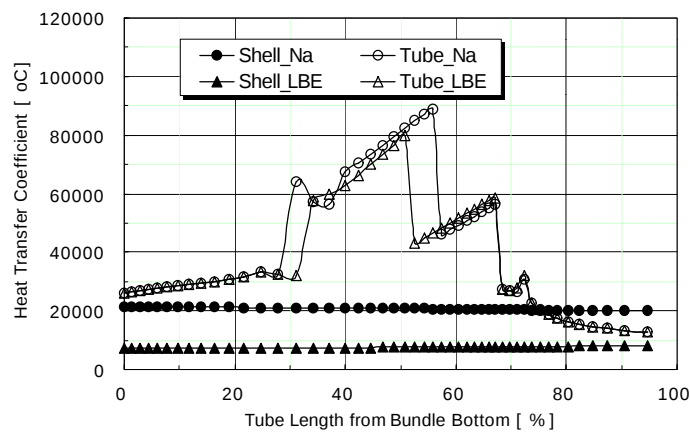


그림 2 Na 와 LBE 대류 열전달계수 비교

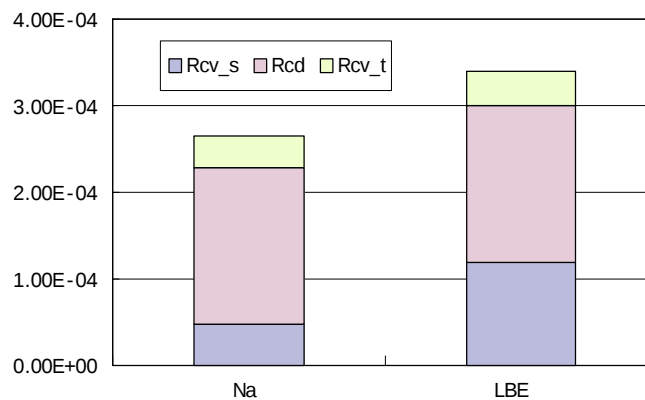


그림 3 Na 와 LBE 사용시 전열저항분포

그림 4와 5에는 LBE를 IHTS 냉각재로 사용 할 때 표 2에서 제시한 성능요건 및 사양을 만족시키는 SG 열적특성을 도출하였다. 정격 조건을 만족하는 SG의 전열관 길이는 77.7 m이고 셀 측 소듐 온도는 입구에서 출구까지 거의 선형적으로 변한다. 전열관 내부의 증기온도는 전열관 하단, 즉 급수 입구에서부터 약 30% 지점까지는 과냉 상태로 머물다가 이 지점부터 포화상태에 진입하게되며 이 때부터 온도변화 없이 상부로 올라갈수록 점차 증기질이 증가된다. 전열관 하단에서 약 70% 지점에 이르렀을 때 전열관 내 증기는 과열증기로 전환되며 이 때부터 증기의 온도는 483.2 °C 까지 급격히 증가하여 SG를 빠져나간다.

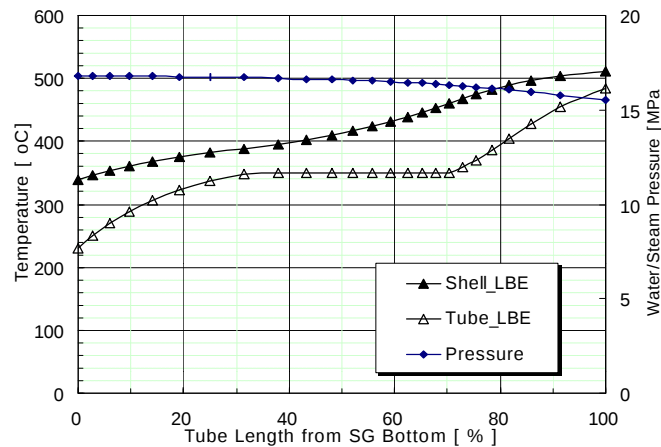


그림 5 LBE IHTS SG의 정격 조건에서의 온도 및 압력분포

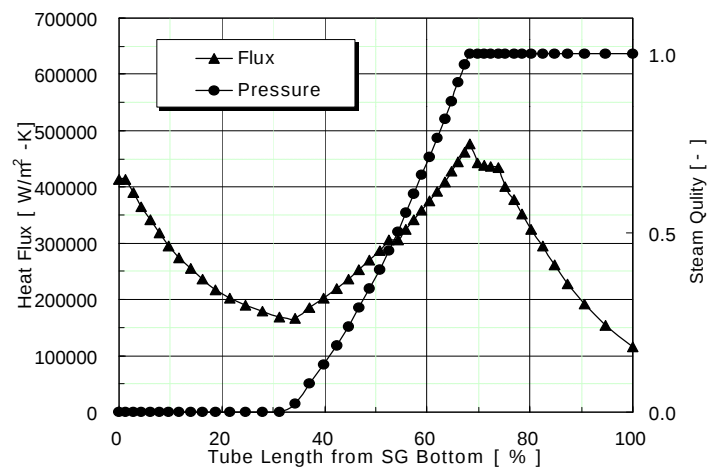


그림 5 LBE IHTS SG의 정격조건에서의 열속 및 증기질 변화

4.2 Pumping Power 및 SG 크기 영향

식 12)에 의해 정의된 Pumping powr, η , 은 표 1의 LBE와 Na의 상관관계를 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\frac{\eta_{LBE}}{\eta_{Na}} &= \left(\frac{\rho_{Na}}{\rho_{LBE}} \right)^2 \left(\frac{Cp_{Na}}{Cp_{LBE}} \right)^3 \left(\frac{A_{c Na}}{A_{c LBE}} \right)^2 \\ &= 4.3 \left(\frac{A_{c Na}}{A_{c LBE}} \right)^2\end{aligned}$$

즉, 유로단면적 일정할 때 IHTS냉각재가 LBE 일 경우는 Na일 때에 비해 약 4.3 배의 Pumping Power가 필요하고, 만일 두 경우에 대해 동일 Pumping Power를 유지하기 위해서는 LBE를 냉각재로 사용 할 때 IHTS 배관 및 관련기기의 유로단면적이 약 2.2배 증가되어야 하며, 이는 IHTS 배관 직경이 1.5 배 증가되는 것에 해당한다. 또한 SG에서의 셀측 유로단면적 역시 같은 비율로 증가되어야하는데 SG 셀측 유로단면적이 커지면 유속 감소에 따라 SG에서의 열절달 성능이 감소하게된다. 정량적인 분석을 위해 전열관다발의 가로피치의 비 (P_{Trea}/d_o)를 조절하면서 SG 셀측 유로단면적에 따른 SG의 전열면적 및 SG 외형 크기 변화를 그림 6에 나타내었다. 동일 Pumping power를 갖는 유로단면적의 비 2.2에서의 SG의 필요 전열면적은 약 1820 m²로서 KALIEMR SG의 약 2배에 해당한다. 또한 SG의 필요전열면적의 증가를 전열관의 길이를 늘려서 수용 한다고 할 때 셀측 유로단면적 증가가 SG 직경을 약 1.5배 증가 시키게됨을 알 수 있다.

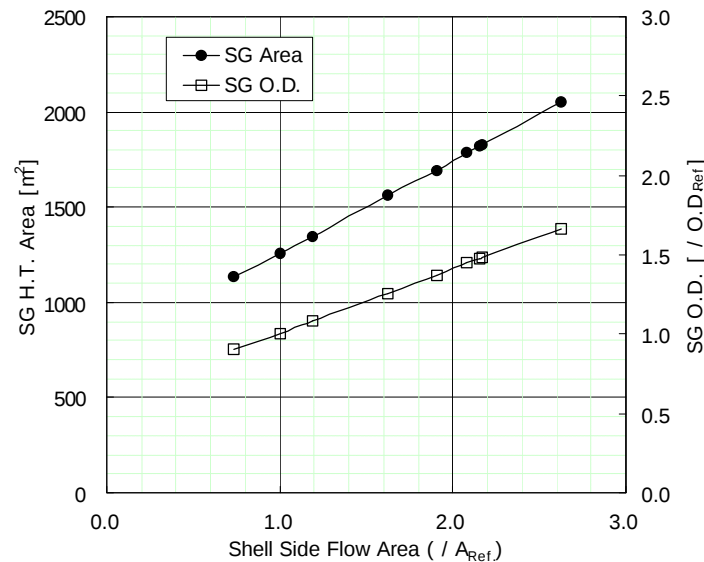


그림 6 셀측 유로단면적에 따른 SG 전열면적 및 외형크기 변화

5. 결 론

IHTS 냉각재로 Na 대신 LBE를 사용하는 개념은 발전소의 전반적인 안전성증진 및 SGS 단순화등을 기대 할 수 있으나 LBE의 열적 특성으로인해 동일한 열출력을 내기 위해서는 SG 필요

전열면적이 기존 Na를 사용 할 때에 비해 약 1.3배 증가하게 되며, 또한 LBE 경우는 Na에 비해 약 4.3배의 Pumping Power가 필요하게 된다. 따라서 이러한 개념이 차후 새로운 액체금속로 개념으로서의 타당성을 평가하기 위해서는 기존 개념에 비해 기대되는 안전성 및 경제성 증진 효과에 대한 정량적인 평가가 추가로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

감사의글

본 연구는 과학기술부에서 주관한 원자력 중장기 연구과제의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Athmalingam, "Choice of Coolant for Secondary Circuit of LMFBRs", IAEA-TECDOC-10831. 2000.
2. 정지영 등 , “ 대체 냉각재 특성연구”, KAERI/AR-579/2000, 2000.
3. M. Dzodzo, D. Cuckovic-Dzodzo, Natural Convection Enclosures Containing Lead-Bismuth and Lead , Proceedings of ICON9, Nice, France, April 8-12, 2001.
4. D.H. Hahn, et al ., "KALIMER Conceptual Design Report", Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI/TR-2204/2002, 2002.
5. 김연식, "HSASA 전산코드 사용자 지침서", KALIMER/FS-4CM-98-00, 한국원자력연구소 KALIMER기술개발팀 내부작업보고서, 1998.