2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

이중튜브증기발생기의 개념 특성 분석

Characteristics Analysis of Double Wall Tube Steam Generator

위명환*, 김성오*, 성승환*, 김진환**
*한국원자력연구소, ** 전남대학교
대전광역시 유성구 덕진동 150

액체금속로의 증기발생기에서 소듐-물반응사고방지를 위한 새로운 개념으로 DWTSG를 제안하고 작동조건에 따라 열적 특성을 평가하였다. 이중튜브 증기발생기는 소듐과 증기사이의 물리적경계를 이중으로 형성하므로 기존의 단일튜브 증기발생기에 비해 기기의 안전성 및 신뢰성을 증진시킬 수 있는 반면 내-외부 튜브간격에서의 전열저항 증가로 인해 소듐에서 증기로의 열전달에 영향을 미친다. 이 개념의 전열성능에 대한 정량적인 비교 분석을 위해 필요전열면적을 구하여 MONJU설계와 비교한 결과, 중간계통이 없는 경우 DWTSG의 필요전열면적이 MONJU의 경우와 대등한 크기를 갖는다.

Abstract

The DWTSG concept is proposed as a new liquid metal reactor concept to avoid sodium-water reaction incidents in the SG. This present paper attempts to assess thermal characteristics of DWTSG in the this alternate concepts. The concept provides double barrier between the sodium and the steam. This will result in improved reliability of SG compared to the conventional steam generator design using single wall tubes. The gap 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 MONJU SG.. In the case of .eliminating of IHTS the required heat transfer area for DWTSG is equally mated to that of MONJU design.

1. 서론

액체금속로 증기발생기는 화학적으로 격렬하게 반응하는 소듐과 증기가 전열튜브벽을 경계로 열교환을 이루는 기기로서 운전 기간 동안 전열튜브의 손상에 따른 소듐-물 반응 사고 가능성이

상존하기 때문에 이 사고를 대비한 방지계통 및 완화계통을 구비하여야 하며 이는 곧 발전소의 투자비용의 상승으로 이어지게된다. 많은 나라에서 이러한 사고를 근본적으로 차단 하여 안전과 경제성을 향상을 동시에 추구할 수 있는 증기발생기개념 개발을 위한 연구[1,2,3,4] 들이 활발히 이루어지고 있다.

이중튜브증기발생기(Double Wall Tube Steam Generator :DWTSG)는 소듐과 증기사이에 이중 경계를 형성함으로써 만일 한쪽 튜브의 균열이 발생하더라도 또 다른 튜브가 일차 방벽으로 작용하기 때문에 소듐-물 반응사고로 진전되기 전에 누출여부를 감지하여 발전소의 안전성을 제고하는 개념이다. DWTSG는 EBR-II에 적용되는 등 지난 80년 대 초반 까지는 활발한 연구가 이루어졌으나 기존 단일튜브에 비해 낮은 전열성능과 기기의 제작 및 보수의 어려움 때문에 대부분의 연구가 진행되지못하다가, 최근들어 액체금속로 개발 단계에서 안전성 확보가 무엇보다 우선되면서 다시 관심을 끌고 있다. 이에 따라 일본의 CRIEPI에서는 안전성과 경제성이 개선을 위한 신개념 증기발생기 개발을 위해 다양한 개념에 대한 분석을 바탕으로 DWTSG 개념을 차세대 액체금속로의 증기발생기 중 하나로 제시[5]하고 있으며 전열성능 촉진방법 및 설계단순화에 대한 방안들을 제시하고 있다.

본 연구는 DWTSG의 열적특성에 대한 예비 분석결과[6] 를 바탕으로 DWTSG를 사용할 때 증기발생계통 개념을 제시하고 적절성 평가를 위해 기존 노형과의 필요전열면적에 대한 정량적 비교분석을 수행하였으며, 또한 DWTSG개념에서 고려할 수 있는 주요 설계조건에 대한 분석을 병행하여 개념의 적용 타당성을 평가하였다.

2. DWTSG를 이용한 계통 및 기기 특성

2.1. 전열계통 구성

액체금속로에서는 원자로 노심에서 발생하는 열을 터어빈에 전달하는데 있어서 경수로와는 달리 일차계통과 증기발생계통사이에 중간계통을 두어 증기발생기 전열튜브에서의 누출에 의한 소듐-물반응사고 발생시 반응에 따른 압력파 및 반응생성물로 부터 원자로 노심 및 주요기기들을 보호하는 기능을 담당한다(그림 1.(a) 참조). 그러나 이처럼 열전달계통이 추가됨에 따라 열효율 감소 및 기기의 대형화가 예상되고 이는 곧 전반적인 경제성 저하의 원인이 되기도한다. DWTSG는 물과 소듐간의 경계를 다중으로 할 뿐 아니라 한쪽 튜브의 파손을 조기에 감지 할 수 있도록 설계되므로 증기발생기에서 소듐-물 반응 발생 확률을 기존 단일튜브증기발생기에 비해 획기적으로 낮출 수 있기 때문에 중간계통의 제거가 가능하므로 분석대상인 DWTSG를 사용한 전열계통은 노심을 빠져나온 소듐이 직접 증기발생계통에 유입되어 과열기와 증발기를 거치면서 급수/증기계통에 열을 전달하는 개념을 취하였다(그림 1.(b) 참조).

또한 액체금속로의 높은 작동 온도(500°C 이상)를 이용하여 보다 높은 열효율을 얻기위하여 과열 증기사이클을 채택하였으며, 특히 전열튜브의 건전성에 악영향를 미치는 DNB를 피하기위하여 증발기와 과열기로 분리된 Sulzer사이클을 채택하였다.

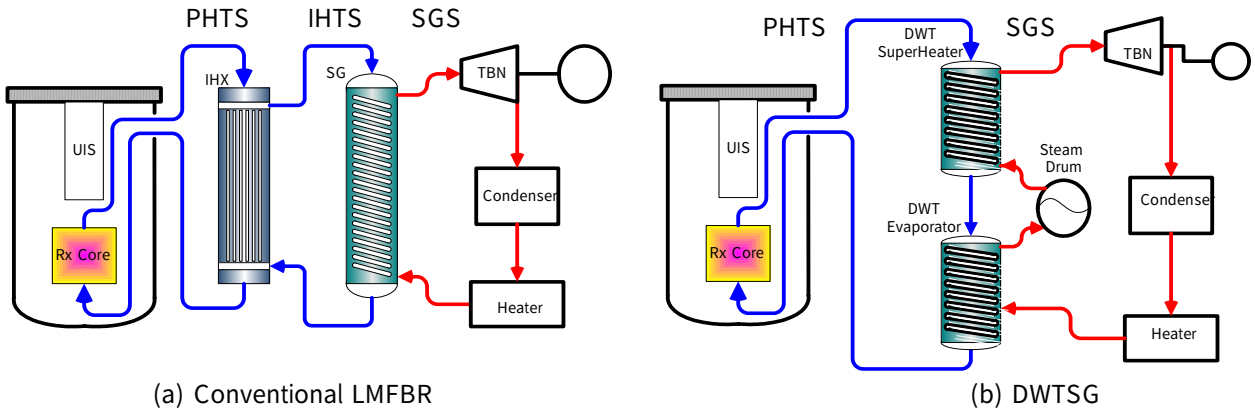

그림 1 소듐냉각 액체금속로 전열계통 구성

2.2. 튜브 형상

이중벽튜브는 하나의 튜브가 또 하나의 튜브를 둘러싸고 있는 형상으로 증기발생기에서의 파손에 취약한 튜브판과 튜브간의 용접부위를 줄이기 위해 튜브의 길이가 상대적으로 길면서 갯수가 적은 나선형(Helical coil)튜브를 사용하였으며, 셀측의 최대 유속이 1m/s 이하가 되도록 튜브를 배치하였다. DWTSG에 대한 연구결과[5,7,8] 따르면 내-외부 튜브사이의 간격은 0.006mm~0.2mm까지 다양한데 0.2mm로 설정된 경우는 튜브사이에 전열증진을 위해 Pb-Bi를 충진하거나, 신뢰성 있는 누출감지를 위해 wire spacer 를 설치하여 튜브사이간격을 일정하게 유지하기위한 경우이며, 0.01mm 이하의 경우는 사전 변형(pre-stressed) 공정을 통해 두 튜브 사이 간격을 최소화화여 전열저항을 최대한 줄일수 있도록 한것이다. 본 연구에서는 튜브사이의 간격을 0.01mm로 설정하고 불활성기체이면서 비교적 열전달 특성이 좋은 헬륨을 충진하였으며, 또한 외부튜브의 안쪽에는 튜브의 길이방향으로 홈을 내어 감지기체의 유로를 만들어 줌으로써 소듐이나 물/증기측에서 발생한 튜브 균열을 조기에 감지 할 수 있도록 하였다. 공기 유로는 원주방향으로 일정한 간격을 유지하면서 4개가 마련 되며, 따라서 열적크기 계산시에는 튜브간은 간격과 기체유로크기의 영향을 고려하여 계산을 수행하였다.

표 1 이중벽튜브의 설계 사양

내부 튜브 내경, mm	24.2
내,외부 튜브 두께, mm	2.5
내-외부 튜브 간격, mm	0.01
튜브 형상	나선형
튜브 배치	사각배치
반경방향 코일 수	14
튜브간 피치, mm	52
전열관 재질	2.254Cr-1Mo

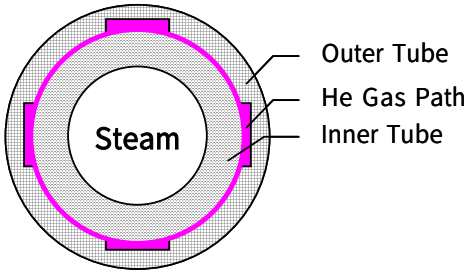

그림 2 이중벽튜브 단면도

3. 열유체적 특성 분석

3.1. 전열 상관식

열적크기 계산을 위해 DWTSG의 튜브내에서의 전열현상을 예열, 포화, 막비등 그리고 과열과 같이 4가지로 구분하여 각 영역에 관련된 전열상관식을 사용하였으며 특히 나선형튜브형상에서 오는 원심력에 의한 영향을 반영하였다. 소듐측과 물/증기측표의 전열상관식을 표 3에 나타내었으며 작동 중 유체의 불순물이나 유체와 벽사이의 상호작용에 의한 열저항인 오염계수는 Roy[9]등이 제시한 것처럼 튜브측(급수/증기)은 전영역에서 28,400W/m-^{o}C를 사용하였으며, 셀측(소듐)은 고려하지 않았다.

3.2. 필요 전열면적

DWTSG의 필요 전열면적 계산을 위해 증기발생계통이 본 해석대상과 유사한 일본의 MONJU 설계[10] 를 기준으로 작동 조건을 설정하였다. 중간열교환기가 없기 때문에 MONJU의 노심 출구 온도가 과열기 셀측 입구 조건으로 사용되고 과열기와 증발기의 출구 소듐온도는 열용량을 MONJU와 동일하게 설정하고 구하였으며 이밖에 냉각재의 유량을 비롯한 주요 작동조건은 표3과 같다. 그림 3에 전열면적 계산시 고려한 DWTSG의 전열저항 분포를 기존개념과 비교하여 나타내었으며 본 계산에서는 내-외부 튜브 간격에 채워진 기체층에서의 저항은 전도에 의한 것 만을 고려하였여으며 튜브재질의 열전도도는 온도조건에 따라 27~32W/m-K 이며, 헬륨은 0.043 W/m-K로 설정하였다. 총괄열전달 계수, U, 는 각 각의 전열저항으로 구성되며 이때 DWTSG의 전열면적,A, 는 다음 관계식에 의해 구하였다.

$$A = \frac{Q}{U \cdot \Delta T_{LMTD}} \qquad (\text{여기서 } \Delta T_{LMTD} : \text{대수평균온도차})$$

표 2 셀측과 튜브측의 열전달 상관식

Sodium Side	$Nu = 4.03 + 0.028\ (Re \cdot\ Pr)^{2/3}$
Water Side Subcooled Nucleate Boiling	$Nu = 0.023\ Re^{0.8}\ \cdot\ Pr^{0.4}$ $h_B = S h_b + F h_c$ S= Suppression factor, F:Martinelli parameter $h_b = 0.00122 \left[\frac{k_l^{.79}\ Cp_l^{.45}\ \rho_l^{.49}}{\sigma^{.5}\ \mu_l^{.29}\ \rho_g^{.24}\ \cdot} \right]^{0.68} \Delta T_{sat}^{.24}\ \Delta P_{sat}^{.75}$ $h_c = 0.023 \left[\frac{k}{d_i\ \cdot} \right] (1-x)^{.8}\ Re^{.85}\ Pr^{.4}\ di^{.1}$
Film Boling	$Nu = 0.0193\ Re^{0.8}\ Pr^{1.23} \left[x + (1-x) \frac{\rho_g}{\rho_f\ \cdot} \right]^{0.68} \left[\frac{\rho_g}{\rho_f\ \cdot} \right]^{0.068}$
Super-heated	$Nu = 0.0073\ Re^{0.936}\ Pr^{0.61}\ di^{\ 0.1}$

표 3 MOUJU 와 DWTSG의 작동 조건 비교

Parameters	Unit	MONJU			DWTSG	
		IHX	증발기	과열기	증발기	과열기
Heat Capacity	MWt	238	190.8	47	190.8	47
Shell Inlet T	°C	529	469	505	502.76	529
Shell Outlet T	°C	397	325	469	397	502.76
Shell Flow rate	kg/s	1416.7	1027.8	1027.8	1416	1416
Tube inlet T	°C	325	240	367	240	367
tube Outlet T	°C	505	369	487	369	487
Tubel 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

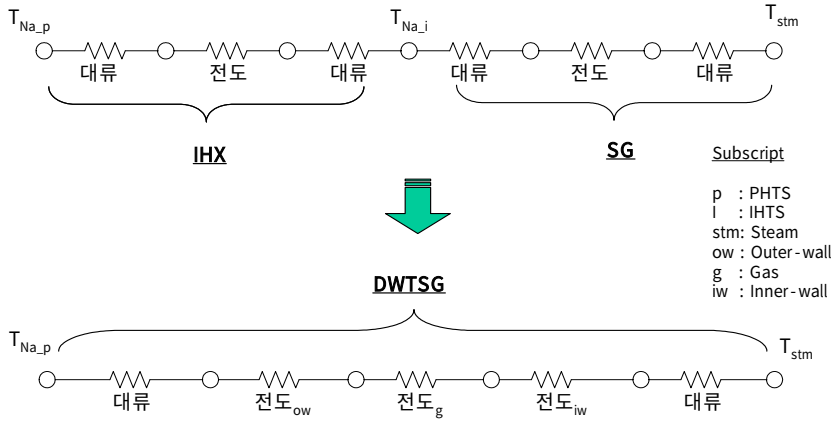

그림 3 DWTSG와 기준개념의 전열저항 구성

4. 결과 및 검토

DWTSG의 설계 특성평가를 위해 일본의 MONJU설계와 열적크기 관점에서 비교를 수행하였으며 여기에서 기준으로 사용된 MONJU의 전열면적은 중간열교환기와 증발기/ 과열기를 합한 것이다. 그림 4는 내-외부 튜브 사이에 헬륨이 채워진 상태에서 간격의 크기가 필요전열면적에 미치는 영향을 도시한것으로 튜브의 두께가 2.5mm 일 때 튜브간 간격이 0.02mm 이하이면 DWTSG의 전열면적이 MONJU의 중간열교환기와 증발기/과열기를 합한 면적보다 작아짐을 나타내고있다. 따라서 DWTSG을 이용한 설계에서 열적크기 관점에서 기존개념에 비해 경쟁력을 갖기 위해서는 튜브사이의 간격이 기체유로의 영향을 반영하여 0.02mm 이하로 설정되어야 하며 그림에서 보인 것처럼 튜브간 간격이 2배 증가할 경우 전열면적은 약 1.7배 증가하는 하는데 이는 튜브사이에 채워진 헬륨의 열적특성 때문에 전열저항의 대부분이 이 영역에서 발생하기 때문이다.

그림 5에는 중간계통의 유,무에 따른 DWTSG의 크기를 도시한 것으로 중간계통을 배제한 조건에서는 튜브간 간격(0.01mm~0.04mm)에 따라 대개 기준경우의 0.7에서 2배정도의 전열면적이 필요한 반면 중간계통이 있는경우(표3의 MONJU 작동조건)는 1.5~4배 정도로 정도증가된다. 이는 DWTSG를 사용할 때 이중튜브에서 발생하는 전열저항의 증가를 증기발생기 셀측의 높은 작동온도에서 기인하는 대수평균온도차의 증가에 의한것으로 판단되며, 본 계산조건에서 증발기에서의 대수평균온도차는 148 ^{o}C로 기준 경우보다 약 1.6배에 해당한다. 또한 이 결과로부터 0.02mm의 간격을 갖는 DWTSG의 자체 전열저항이 중간열교환기와 증발기/과열기에서 생기는 총 저항 약 2.5배 이상임을 보여주고 있다.

그림 5는 DWTSG의 내-외부 튜브 간격에서 발생하는 전열저항을 줄이기 위한 방법의 일환으로 이 공간에 헬륨보다 열전도도가 300배 이상(k_{Pb-Bi}=14 W/m-K)인 Pb-Bi를 채워넣은 경우에 대한 분석결과이다. DWTSG의 필요전열면적은 헬륨을 사용할 때에 비해 크게 줄어들게 되는데 튜브 간격이 0.2mm 일 경우를 기준으로 보면, 중간계통이 없을 때 필요전열면적은 MONJU 설계의 약 40% 로 감소하며, 중간계통이 있을 때에는 약 1.2배 증가한다. 또한 이 경우는 헬륨을 채워넣는 것과는 달리 내-외부 튜브 간격에 따른 전열면적 크기 변화가 거의 없는데, 이는 Pb-Bi의 열전도도가 높고 내-외부 튜브 간격이 튜브두께의 1/10에도 미치지 못할 만큼 작아 총괄전열저항에 미치는 영향이 미미하기 때문이다.

그러나 전열촉진을 위해 Pb-Bi를 채워넣을 경우는 튜브에서 미세 균열이 발생하였을 때 조기 누출 감지가 용이하지 않을뿐 아니라 DWTSG의 무게증가 및 외형크기가 커지게되는데, 헬륨을 채워넣는 것과 비교할 때 전열튜브 무게는 15% 이상 증가한다. 또한 Pb-Bi의 화학적특성 때문에 고온에서 장기간 튜브재질과 접촉되어 있을 때 야기되는 부식문제가 여전히 해결되지 않은 상태이기 때문에 이 개념을 DWTSG에 적용하기위해서는 추후 충분한 검토가 이루어져야할 부분으로 여겨진다.

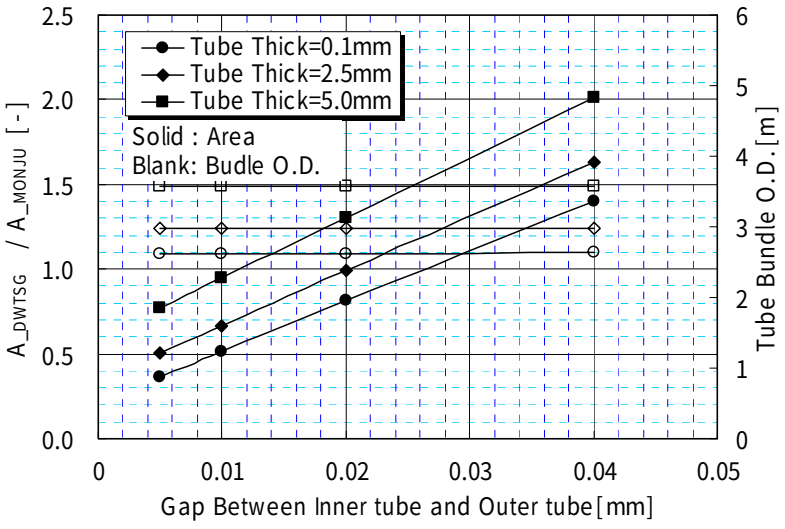

그림 4 DWTSG의 튜브간격에 따른 전열면적 및 튜브다발 크기

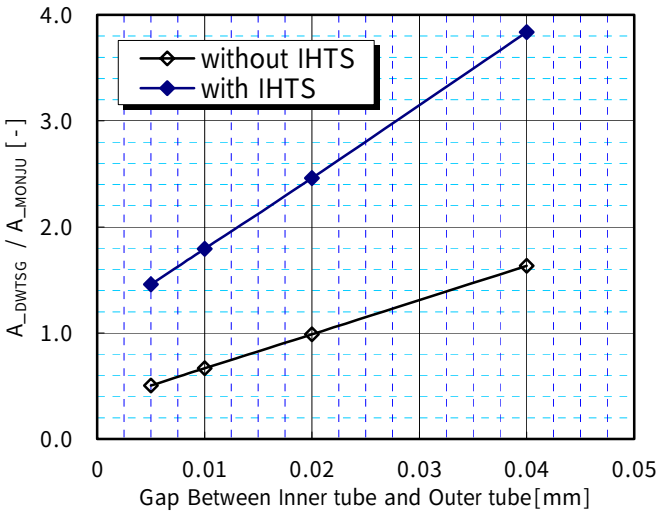

그림 5 중간계통 유/무에 따른 필요전열면적 변화

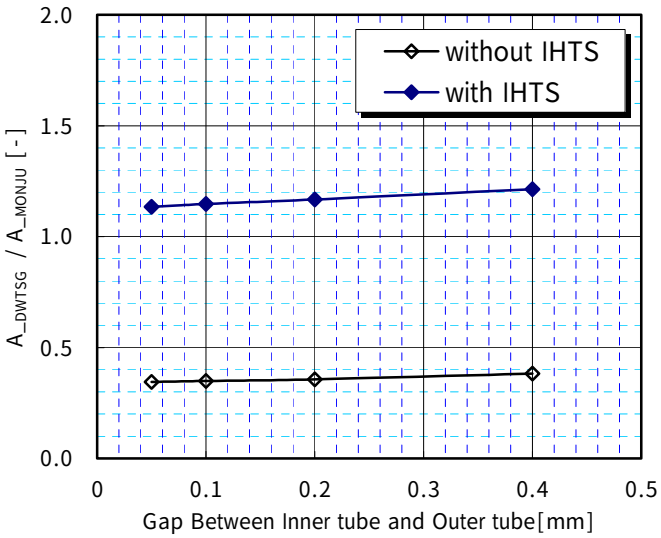

그림 6 내-외부 튜브사이 전열촉진 매체(Pb-Bi) 충진 영향

5. 결 론

증발기와 과열기로 분리된 경우 DWTSG의 적용 타당성을 평가하기 위하여 전열면적크기를 계산하여 일본의 MONJU 비교한 결과, DWTSG의 보다 경제성 있는 설계을 위해서는 내-외 튜브 간

격을 0.02mm 이하로 유지하는 것이 필요하며, 이럴경우 현재 국내외에서 개발중인 다양한 신개념 액체금속로 증기발생기와 비교해 볼 때 충분한 경쟁력을 갖을 것으로 판단된다. 또한 전열 촉진을 위한 방안으로 내-외 튜브 사이에 Pb-Bi를 채워넣은 개념은 필요전열면적이 획기적으로 줄어들게됨을 확인하였지만 실제 적용을 위해서는 누출감지에 대한 응답성, DWTSG의 외형크기 증대 및 전열관에서의 부식 등에 대한 해결방안이 우선되어야할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 주관한 원자력 중장기 연구과제의 일환으로 수행되었습니다

참고 문헌

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, Myung-hwan Wi, Yoon sub Sim, Eui kawng 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 열적 특성분석”, 2002 한국원자력학회 추계학술대회 논문집, 2002
4. 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
5. Yoshihisa Nishi, “ Study on Lead-Bismuth Eutectic Utilization Technology”, CRIEPI-KAERI Information Exchange on FBR Technology, Oct., 2003
6. 위명환, 김성오, 최석기, 어재혁, “소듐냉각 액체금속로의 이중튜브증기발생기의 열적 크기 평가”, 2003한국원자력학회 추계학술대회 논문집, 2003
7. L.E. Efferding et al “Preliminary Thermal Hydraulic Sizing Calculation for Duplex Tube Evaporator/Superheater”, DOE/SG/00962, June, 1974
8. B.E. Dawson et al Preliminary Design : Duplex Tube Low-Pressure Saturated Steam Generator for Large LMFBR Plant”, NP-1219, 1979
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. Takeo Suzuki et al, “MONJU Secondary Heat Transport System Solium Leak”, 10th Pacific Basin Nuclear Conference, Kobe, Oct., 1997