

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.11.991

ISSN 1226-4881

중간 열교환기 높이 상승에 의한 KALIMER-600 원자로 풀 과도 성능 변화 분석

한지웅*† · 어재혁* · 김성오*

* 한국원자력연구원 고속로기술개발부

Analysis of Transient Performance of KALIMER-600 Reactor Pool by Changing the Elevation of Intermediate Heat Exchanger

Ji-Woong Han*†, Jae-Hyuk Eoh* and Seong-O Kim*

* Fast Reactor Technology Development Division, Korea Atomic Energy Research Institute

(Received May 19, 2010 ; Revised September 21, 2010 ; Accepted September 27, 2010)

Key Words: KALIMER-600, Sodium-cooled Fast Reactor(소듐냉각 고속로), COMMIX-1AR/P, Intermediate Heat Exchanger(중간 열교환기)

초록: 소듐냉각 고속로 내부기기 배치 변경에 의한 초기냉각 성능변화를 검토하기 위하여 중간열교환기의 수직배치가 다른 3개의 원자로를 대상으로 COMMIX-1AR/P 코드를 활용한 다차원 해석을 수행하였다. 원통좌표계의 중심축을 기준으로 원주방향의 1/4 부분만을 모델링하고 정상상태 및 과도상태 분석을 수행하여 IHX 수직배치 변화가 초기 냉각 특성에 미치는 영향을 분석하였고, DHX를 통한 후기 냉각 모드 개시 시점에 미치는 영향도 분석하였다. 분석 결과 IHX 수직배치 상승은 원자로 풀내부 자연순환 유량을 증가시켜 초기 냉각과정에서 노심 최고 온도의 급격한 상승을 방지할 수 있으며, 초기냉각 성능을 향상시키기 위한 관성회전차의 가용설계재원의 범위도 확대시킨다. 또한 IHX 수직배치 상승은 후기냉각모드에 큰 영향을 주지 않으면서 초기냉각성능의 향상에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

Abstract: The effect of increasing the elevation of an IHX (intermediate heat exchanger) on the transient performance of the KALIMER-600 reactor pool during the early phase of a loss of normal heat sink accident was investigated. Three reactors equipped with IHXs that were elevated to different heights were designed, and the thermal-hydraulic analyses were carried out for the steady and transient state by using the COMMIX-1AR/P code. In order to analyze the effects of the elevation of an IHX between reactors, various thermal-hydraulic properties such as mass flow rate, core peak temperature, RmfQ (ratio of mass flow over Q) and initiation time of decay heat removal via DHX (decay heat exchanger) were evaluated. It was found that with an increase in the IHX elevation, the circulation flow rate increases and a steep rise in the core peak temperature under the same coastdown flow condition is prevented without a delay in the initiation of the second stage of cooling. The available coastdown flow range in the reactor could be increased by increasing the elevation of the IHX.

- 기호설명 -

- ΔP : 압력손실 (Pa)
- D_h : 수력직경 (m)
- ρ : 유체밀도 (kg/m³)
- f : 손실계수
- Re : Reynolds No.
- Pr : Prandtl No.
- Nu : Nusselt No.
- C_i : 상관계수

1. 서론

최근 온난화에 의한 급속한 기후변화에 대응하기 위하여 세계 각국은 온난화의 주범인 온실가스 저감을 목표로 기존의 화석연료를 대체할 수 있는 대체에너지를 개발하기 위한 다양한 연구, 개발을 수행하고 있다. 이러한 미래기술 확보를 위한 투자와 더불어 현재 기술단계에서 온실가스 저감목표를 달성하기 위한 가장 현실적인 대안으로 원자력에너지가 다시 주목받으면서, 국제적으로도 신규 원자력발전소 건설이 활발히 진

† Corresponding Author, jwhan@kaeri.re.kr

행되고 있다. 또한, 기존의 원자력발전소에서 발생된 사용후 핵연료를 재활용하는 지속가능 핵연료주기의 필요성이 대두되면서^(1,2) 핵연료주기에 사용되는 고속로에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 이러한 고속로는 냉각재의 종류에 따라 소듐냉각 고속로(SFR, Sodium-cooled Fast Reactor), 납냉각 고속로(LFR, Lead-cooled Fast Reactor), 가스냉각 고속로(GFR, Gas-cooled Fast Reactor) 등으로 분류된다.⁽²⁾ 이중 소듐냉각 고속로는 비등점이 높고 열전도율 및 금속친화성이 우수한 소듐을 냉각재로 활용하기 때문에 고압의 경수 혹은 중수를 냉각재로 사용하는 기존 원자로와 달리 대기압 조건에서도 고온 운전이 가능하며, 열효율도 우수하다.

이와 관련하여 주요 선진국들은 안전성과 신뢰성이 향상된 다양한 설계개념을 제안하였으며 이를 검증하기 위한 실증로를 운영 혹은 건설하고

있다. 한국원자력연구원에서도 피동잔열제거(PDRC, Passive Decay heat Removal Circuit)개념을 채택한 KALIMER-600(Korea Advanced Liquid Metal Reactor) 원자로에 대한 개념설계안⁽³⁾을 제시하였고, 원자로 냉각성능에 대한 다양한 수치해석적 연구⁽⁴⁻⁸⁾를 수행하였다. 본 연구진도 피동잔열제거시스템의 본격적인 작동 직전까지의 초기 냉각성능의 중요성을 지적하였으며, 펌프 관성유량이 초기 냉각성능에 미치는 영향을 분석하여 보고한 바 있다.^(4,5)

이와 관련하여 본 연구에서는 원자로 내부기기 배치 변경에 의한 초기냉각 성능변화를 검토하였다. 이를 위하여 원자로 내부기기 중 열침원에 해당하는 IHX의 수직배치를 변경한 원자로를 대상으로 원자로 열수력 성능 평가에 많이 사용되는 COMMIX⁽⁹⁾코드를 활용한 다차원 해석을 수행하였다. 이로부터 IHX 수직배치가 상이한 원자로 별 정상상태 열유동 분포를 도출하였으며, 과도

Table 1 Conservation equations

$$\frac{\partial}{\partial t}(\gamma_v \rho \Phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\gamma_x \rho u \Phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\gamma_y \rho v \Phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\gamma_z \rho w \Phi) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma_x \Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\gamma_y \Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma_z \Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) + \gamma_v S_\Phi$$

Equation	Direction	Variable(Φ)	Diffusion Coefficient(Γ_Φ)	Source Term (S_Φ)
Continuity	Scalar	1	0	0
Momentum	x	u	μ	$\rho g_x - V_x - R_x + \left(\frac{\Delta P}{L} \right)_{p,x} - \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)$
	y	v	μ	$\rho g_y - V_y - R_y + \left(\frac{\Delta P}{L} \right)_{p,y} - \left(\frac{\partial P}{\partial y} \right)$
	z	w	μ	$\rho g_z - V_z - R_z + \left(\frac{\Delta P}{L} \right)_{p,z} - \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right)$
Energy	Scalar	h	$\frac{\lambda}{C_p}$	$\frac{DP}{Dt} + q''''_{bs} + q'''' + \rho \Phi$

$g_x \ g_y \ g_z$: Component of gravitational acceleration(body forces)
 $V_x \ V_y \ V_z$: Viscous diffusion terms at boundaries
 $R_x \ R_y \ R_z$: Distributed resistances due to submerged solids
 $\left(\frac{\Delta P}{L} \right)_{p,x} \ \left(\frac{\Delta P}{L} \right)_{p,y} \ \left(\frac{\Delta P}{L} \right)_{p,z}$: Pressure increase supplied by pump
P : Pressure
 q''''_{bs} : Rate of heat liberated from submerged solids per unit fluid volume
 q'''' : Rate of internal heat generation per unit fluid volume
 Φ : Rate of dissipation of mechanical energy, per unit mass of fluid, due to viscous effect

상태 분석 및 상호비교를 통하여 IHX 수직배치 변화가 초기 냉각 특성에 미치는 영향을 분석하였고, DHX를 통한 후기 냉각 모드 개시 시점에 미치는 영향도 분석하였다.

2. 계산 대상 및 방법

2.1 계산 대상

Fig. 1(a)와 (b)는 KALIMER-600 원자로의 수평 및 수직단면 개략도를 각각 도시한 것이다.^(4,5,8) KALIMER-600 내부에는 IHX(Intermediate Heat Exchanger) 4개, DHX(Decay Heat eXchanger) 및 PHTS(Primary Heat Transport System) 펌프 2개가

있다. Fig. 1(b)는 수직단면에서의 원자로풀 내부 각각 원점을 중심으로 Fig. 1(a)와 같이 배치되어 구조를 도시한 것으로서, 중심선을 기준으로 좌측은 Fig. 1(a)의 IHX 중심(OA)을 지나는 단면을 나타내고, 우측은 Fig. 1(a)의 Pump 중심(OB)을 지나는 단면을 나타낸다. 정상상태 원자로풀 내부의 소듐은 펌프(①)를 통해 저온풀(⑤)로부터 유입된 후 원자로 노심(Core Assembly, ②)을 통과하면서 가열되고 고온풀(③)로 이동된다. 이러한 고온의 소듐은 IHX(④)를 통과하면서 2차측 배관과 열교환이 이루어진 후 저온풀(⑤)로 이동되고, 다시 펌프를 통해 저온풀에서 고온풀로 순환되는 과정이 반복된다. 이러한 소듐의 순환 경로는 전원공급 상실 사고에 의한 펌프 정지시에도 일정 시간동안 유지된다.

2.2 계산 방법

본 연구에서는 다공성 개념(Porous Medium Approach)을 도입하여 복잡한 기하 형상의 구조물과 구조물을 둘러싼 주변 유동 사이의 열전달 현상 및 거시적인 유체 거동을 분석하는데 적합하며, 고속로 개발 및 평가에 많이 이용되고 있는 코드중 하나인 COMMIX-1AR/P 코드를 사용하여 풀내부의 열유동 현상을 모사하였다. Table 1에는 COMMIX-1AR/P 코드에 사용된 지배방정식을 정리한 것이며, 보다 자세한 상세는 문헌⁽⁹⁾을 참조하기 바란다. 또한 본 해석과 관련된 수력학적 모델 및 열전달 모델, 정상 및 과도운전 조건 등은 이전 연구와 동일하다.^(4,5)

2.2.1 원자로 내부 구조 변화 및 모델링

본 논문에서는 IHX 수직배치 변화에 따른 풀 과도 성능 변화를 분석하기 위하여 기존의 KALIMER-600 원자로^(4,5)를 기본으로, IHX 높이를 각각 1m, 2m씩 수직이동하여 배치한 원자로를 추가적으로 모델링하였다. Fig. 2(a)와 (b)는 IHX 수직 배치를 변경하기 전과 후의 원자로 주요기 및 구조물 배치 개략도를 비교, 도시한 것이다. IHX를 수직방향으로 이동할 경우 IHX 상단과 하단을 지지하는 baffle plate 및 separation plate와 같은 구조물의 위치도 함께 변하게 된다. 또한, 고온풀 액위면부터 IHX 입구창까지의 설계요건 깊이를 유지하기 위하여 액위면의 위치도 IHX 이동 거리만큼 상승시킨다.

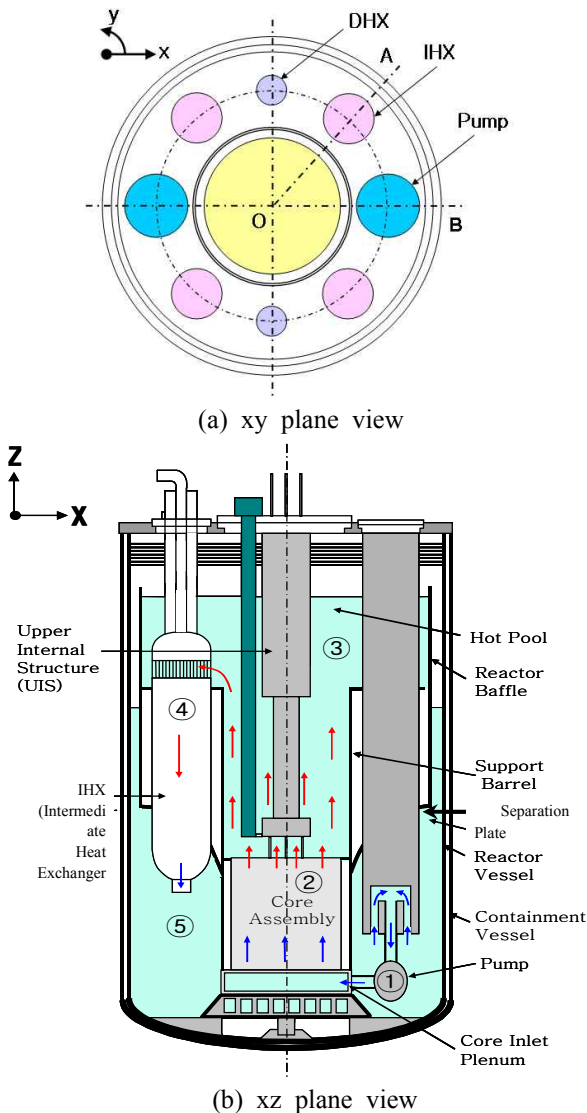
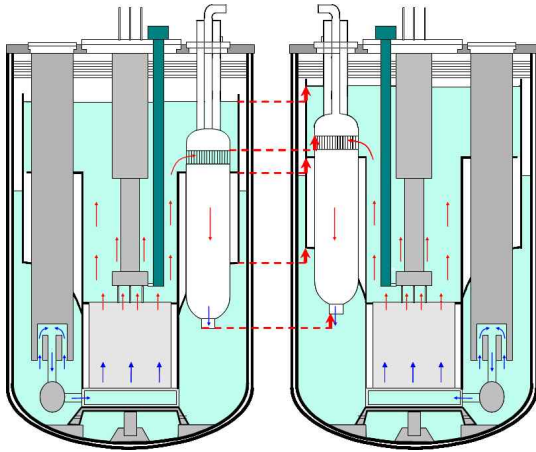


Fig. 1 Schematics of KALIMER-600^(4,5)



(a) Reference (b) IHX elevation change

Fig. 2 Geometry change due to the increase of IHX elevation

본 계산에서는 원통좌표계를 기본으로 반경방향(x), θ 방향(y), 축방향(z)으로 각각 31, 14, 39개의 비등간격 격자를 적용하였으며 IHX 수직 배치 변경에 따라 격자 간격을 일부 조정하였다. 축방향으로는 고온풀의 소듐 표면으로부터 노심 하단부인 Core Inlet Plenum 까지를 고려하였으며, 원자로 바닥의 굴곡면은 수평면으로 가정하여 모델링하였다. IHX의 경우 IHX Shell 내부의 tube가 위치하는 각 격자마다 격자체적에 대한 유체체적의 비율로 표현되는 다공도⁽⁹⁾를 설정하여 내부 유효 체적을 모사하였다.

내부 기기에서의 압력손실(ΔP) 및 Nusselt 수(Nu)는 각각 식 (1) 및 (2)와 같은 형태의 상관식을 활용하였으며, 이에 대한 상세는 참고문헌^(4,5)과 동일하므로 본 논문에서는 생략한다.

$$\Delta P = f \frac{L}{D_h} \frac{\rho v^2}{2} \tag{1}$$

여기서, f 는 손실계수, L 은 길이, D_h 는 수력직경, ρ 는 유체밀도, v 는 유속을 의미한다.

$$Nu = C_1 + C_2 Re^{C_3} Pr^{C_4} \tag{2}$$

여기서, Re 는 Reynolds 수, Pr 은 Prandtl 수, C_1, C_2, C_3, C_4 는 상관계수를 의미하며, 유체 및 구조물에 따른 상관계수 값은 Table 2와 같다.

Table 2 Coefficients for Nu No.

Fulid	Structure	C_1	C_2	C_3	C_4
Sodium	Fuel pins	5.0	0.401	0.45	0.45
	IHX tube side, Flat plate	5.0	0.025	0.8	0.8
	IHX shell side	6.5484	0.2809	0.653	0.653
	Support barrel inside	5.0	0.172	0.45	0.45
Argon, Air	Flat plate	1.0	1.22	0.457	0.4

2.2.2 계산조건

2.2.4.1 정상운전

본 계산에서는 IHX 수직배치가 각기 다른 세 개의 원자로를 대상으로 원주방향의 1/4 부분만을 모사하였으며, 노심 및 IHX tube를 통한 열발생량 및 열제거량은 노심 및 IHX shell 내부에 위치한 모든 격자에 대하여 이전과 동일한 방법^(4,5)으로 열발생량 및 열제거량 모델을 설정하였다.

2.2.4.2 과도운전

과도운전조건은 원자로에 전원공급이 중단되어 원자로 가동이 중단된 경우를 가정하였으며, 이와 관련된 주요 운전 조건은 다음과 같으며 이에 대한 상세는 참고문헌^(4,5)과 동일하다.

- 노심 열출력 : 정상운전 대비 6%로 저감후 시간에 따라 붕괴열(decay heat) 감소
- IHX tube측 열제거량 : 운전 정지순간 열제거 기능 상실
- 펌프 질량 유량 : 여러가지 펌프회전차(CDT= 0~125초)에 의한 관성유량 조건 고려

3. 계산 결과

Fig. 3은 정상상태에서 IHX의 수직배치가 다른 원자로에서의 수력학적 모델링 타당성을 상호 검토하기 위하여 IHX의 중심이 위치한 단면에서의 압력, 온도 및 유속 분포를 각각 비교하였으며, 지면관계상 기존 원자로(reference)와 IHX를 2m 상승하여 배치한 경우(IHX+2m)만을 도시하였다.

우선, 노심 입구의 Orifice로부터 노심 출구까지

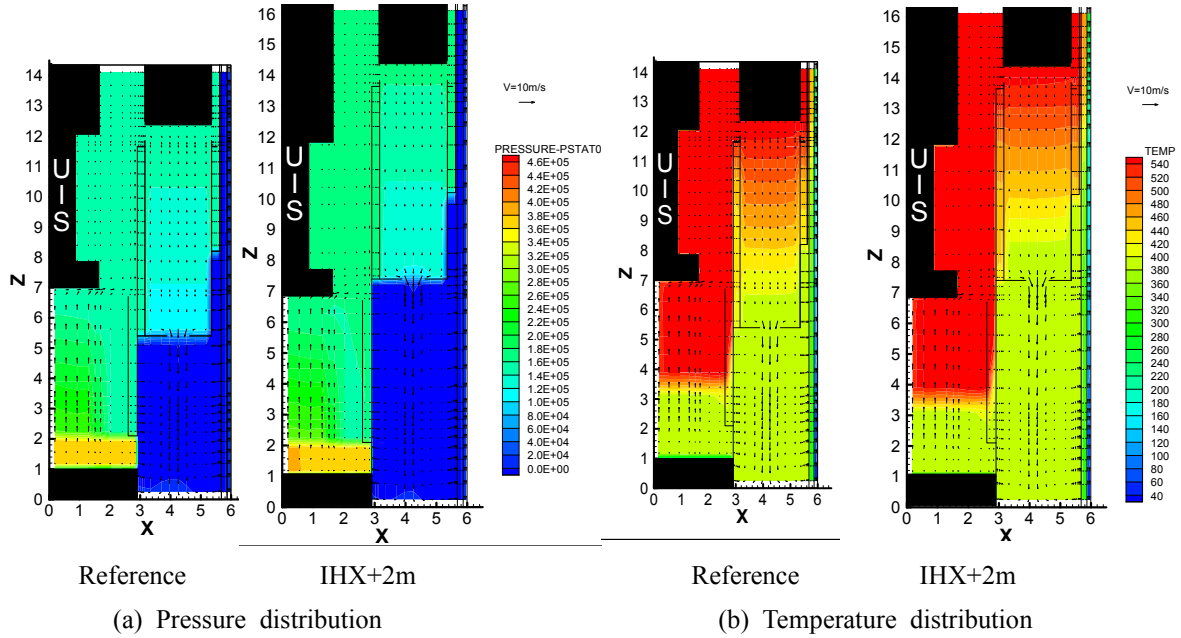


Fig. 3 Pressure and temperature distribution with velocity(J=8)

의 압력손실은 세 가지 원자로 해석 결과 모두 중심으로부터 반경방향 영역별로 각각 0.216, 0.212, 0.214, 0.215 MPa이며 평균 0.214 MPa을 나타낸다. 이는 노심 압력손실 설계값인 0.213 MPa과 거의 비슷하며, 이로부터 세 원자로에서의 노심모델링이 노심 설계특성값을 잘 반영하고 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 1/4 펌프를 통해 토출되는 질량유량이 각각 1932.7kg/s 및 1932.8kg 로서 설계값(1932.8 kg/s)과 거의 차이가 없고, 노심 입구 및 출구 평균온도의 경우 두 원자로 모두 390°C 및 545°C로서 운전조건을 잘 만족시키고 있다. 이와 같은 정상상태 계산결과로부터 COMMIX-1AR/P를 활용한 KALIMER 모델링이 참고문헌(4,5)에 제시된 열평형상태를 잘 모사하는 것을 확인하였다.

Fig. 4는 원자로 전원공급 중단직후부터 잔열 제거계통의 본격적인 작동 직전까지의 과도상태시 IHX 수직배치 변화가 자연순환 유량에 미치는 영향을 비교하기 위하여 IHX를 각각 1m, 2m 상승하여 배치시킨 원자로의 순환유량을 기존 원자로와 비교, 도시한 것이다. 그림에 도시한 바와 같이 IHX 수직배치 상승에 따라 원자로 내부의 자연순환 유량도 증대된다. 이때, 풀내부 자연순환 유량은 부력에 의해 결정되며, 다차원효과를 배제한다면 부력은 식 (3)과 같이 정의된다.

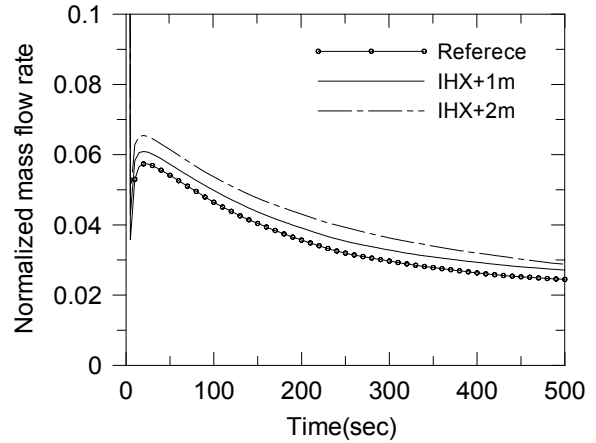


Fig. 4 Comparison of IHX elevation effects on mass flow rate(RV without flywheel)

$$\Delta P_{buoyancy} \equiv [(\rho_{cold}) - (\rho_{hot})]g\Delta Z \quad (3)$$

여기서, ρ_{cold} , ρ_{hot} 은 각각 저온풀과 고온풀의 밀도를 의미하며, ΔZ 는 열원(heat source)인 노심과 열침원(heat sink)인 IHX 사이의 거리를 의미한다. 즉 IHX 수직배치 상승에 따라 노심과 IHX 간의 이격거리가 증가하면서 부력이 강화되어, 결과적으로 IHX 수직배치별로 각기 다른 자연순환 유량을 형성하게 된다.

Fig. 5와 Fig. 6은 펌프 관성유량 유무에 따른

IHX 수직배치 효과의 변화를 비교, 검토한 것으로서 Fig. 5에 펌프 관성유량이 없는 경우에 대하여 IHX 수직배치에 따른 (a)노심 최고 온도 및 (b)RmfQ 변화를 도시하였다. RmfQ⁽⁶⁾는 식 (4)와 같이 유량 저감 속도에 대한 상대적인 노심 냉각 속도비를 의미한다.

$$RmfQ \equiv \frac{\dot{m}(t)/\dot{m}_0}{\dot{Q}(t)/\dot{Q}_0} \quad (4)$$

여기서, $m_0, \dot{Q}_0, \dot{m}(t), \dot{Q}(t)$ 는 각각 정상상태 질량유량과 노심 열출력 및 시간 t에서의 질량유량과 노심 열출력을 의미하며, “RmfQ=1”인 경우는 소듐 유량 저감 속도와 노심 냉각 속도가 동일하여 노심 냉각이 가장 이상적으로 일어나는 상황을 나타낸다. Fig. 5의 reference의 경우 원자로 정지 초기 5초에 574도까지 급상승후 감소하며, 370초 이후에는 지속적인 순환 유량 저감으로 인하여 노심 최고 온도가 재상승한다. 이때 RmfQ는 초반에는 1.5 근방까지 상승하였다가 시간 경과와 함께 따라 1.0으로 수렴하는 것을 알 수 있다. 그러나, IHX 수직배치가 상승함에 따라 원자로 정지 초기에 나타나는 노심최고 온도 극대점의 경우 다소 감소되며, 370초 근방에서 재상승하던 노심 최고 온도 반등시점도 400초 이후로 지연된다. 또한 RmfQ도 IHX 수직배치 상승에 의해 전체적으로 증가된다. 이러한 현상들은 IHX

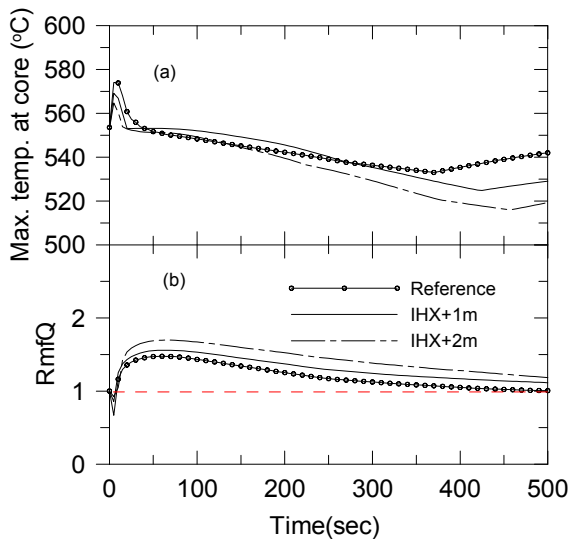


Fig. 5 IHX elevation effects on maximum coolant temperature at core and RmfQ for RV without flywheel

수직배치 상승에 의해 증가된 자연순환 유량이 노심냉각을 보다 강화하고 있는 것을 잘 나타낸다.

Fig. 6은 관성유량이 존재하는 원자로에서의 IHX 수직배치 상승효과를 관찰하기 위하여, 50초 동안의 관성유량이 공급되는 경우(CDT=50)에 대하여 IHX 수직배치 변화에 따른 노심 최고 온도 분포 및 RmfQ 변화를 비교, 도시한 것이다.

reference의 경우 원자로 정지 초기에 공급된 관성유량에 의해 소듐 유량 저감 속도 및 노심 냉각 속도간의 불균형이 발생하는데, 이는 노심 과냉각으로 인해 노심 내에 국부적으로 형성되는 유동안정 영역에 기인한다.^(4,5) 이로 인하여 RmfQ도 초반에 급격한 상승 및 하강분포를 나타내며, 그 이후엔 잔열제거시스템의 본격적인 작동 직전까지 RmfQ가 1 이하의 값을 유지한다. 또한 노심 최고 온도의 경우 90초까지 감소하다가 급격히 상승하여 160초에 571도까지 도달한 이후 감소하면서 560도를 전후로 변화한다. 그러나, IHX 수직배치를 1m 상승함에 따라 노심 최고 온도의 급격한 상승은 감소되며, IHX를 더욱 상승배치할 경우(IHX+2m) 온도 극대점은 사라지게 된다. 이것은 IHX 수직배치 상승에 따라 증가된 자연대류 유량으로 인하여 reference 원자로에서 노심출구 부분에 국부적으로 발생하여 풀내부 순환유동

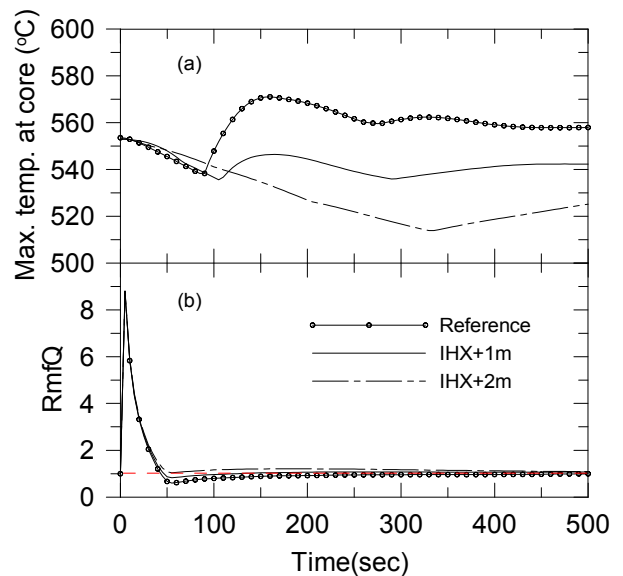


Fig. 6 IHX elevation effects on maximum coolant temperature at core and RmfQ for RV with CDT=50

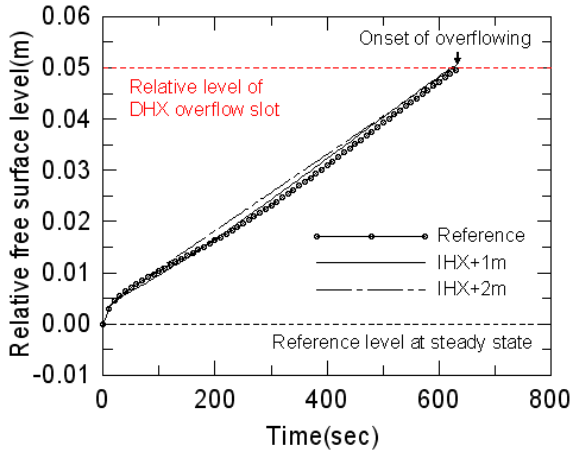


Fig. 7 IHX elevation effects on the onset of overflowing(CDT=50)

을 저해했던 유동안정 영역⁽⁵⁾이 IHX 수직배치가 상승된 원자로에서는 충분히 발달할 수 없기 때문이다. 이로부터 동일한 관성유량 조건하에서도 IHX 수직배치 설계변경에 의하여 노심 최고 온도의 급격한 상승을 방지하는 것이 가능함을 알 수 있다.

Fig. 7은 IHX 수직배치 변화가 DHX 계통 작동 시점에 미치는 영향을 분석하기 위하여 고온풀의 소듐이 DHX로 월류(overflowing)되는 시점을 비교 도시한 것이다. 그림 중 y축은 고온풀 소듐 자유액면의 상대 높이를 나타내며, 정상상태 소듐의 액위를 기준(0)으로 하였다. 그림에서 나타난 바와 같이 IHX 수직배치가 변화하여도 DHX로 월류가 시작되는 시점은 크게 변하지 않는다. 이로부터 IHX 수직배치 변화를 통해 DHX에 의한 후기 냉각모드에 영향을 주지 않으면서 초기 냉각성능을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 8은 IHX 수직배치 상승에 따른 노심 역류 시간 변화를 여러가지 관성유량 공급 조건별로 구분하여 비교한 것이다. 이러한 냉각재 역류현상은 노심내에서 국부적으로 형성되는 유동안정 영역에 기인하며 노심 최고 온도의 급격한 상승 원인^(4,5)이므로 실제 관성유량 설계점은 노심 역류현상을 배제할 수 있는 범위에서 적절히 결정되어야 한다. 그림에 나타난 바와 같이 reference의 경우 관성유량이 75초 이상 지속적으로 공급되는 경우 노심에서 역류가 발생되며, 이로부터 reference 원자로의 설계시 적용성을 검토해 볼 수 있는 설계가용 관성유량 범위는 75초 미만인 것을 알 수 있다. 그러나, IHX+1m인 경우는 100

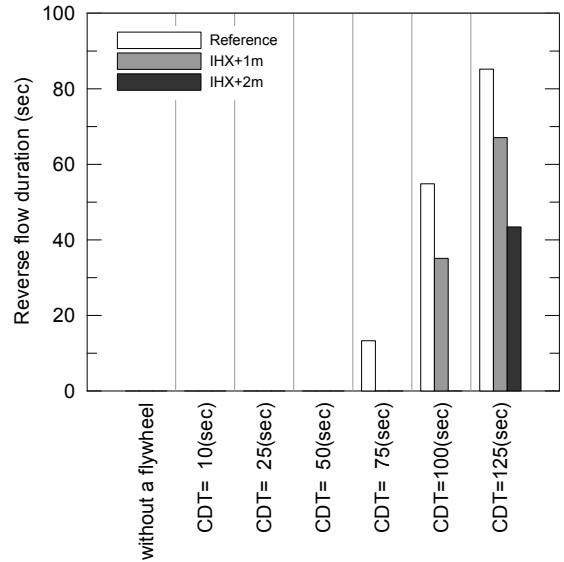


Fig. 8 IHX elevation effects on the reverse flow duration in various coastdown flow conditions

초 미만, IHX+2m인 경우는 125초 미만으로 각각 평가되었으며, 이로부터 IHX 수직배치가 상승할 수록 설계가용 관성유량 범위도 증가하는 것을 알 수 있다.

이로부터 초기냉각성능을 향상시키기 위한 관성회전차의 설계에서 적용가능한 관성유량 범위는 IHX 수직배치 상승에 의해 증대시킬 수 있는 것으로 사료된다.

4. 결론

COMMIX-1AR/P를 사용하여 KALIMER-600 원자로 풀에서 IHX 수직배치 변화가 원자로 정지 초기 과도성능 분석에 미치는 영향을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) IHX 수직배치 상승에 의해 원자로 풀내부 자연순환 유량을 증가시킬 수 있으며, 이를 통하여 동일한 관성유량공급 조건하에서는 노심 최고 온도의 급격한 상승을 방지할 수 있다.
- (2) IHX 수직배치 변화를 통해 DHX에 의한 후기 냉각모드에 영향을 주지 않으면서 초기 냉각성능을 향상시킬 수 있다.
- (3) IHX 수직배치가 상승함에 따라 초기냉각성능을 향상시키기 위한 관성회전차 설계시 고려가능한 관성유량 범위도 증가한다.

후기

본 연구는 교육과학기술부의 원자력 중장기 연

구개발사업의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Till, C. E., Chang, Y. I. and Hannum, W. H., 1997, "The Integral Fast Reactor-An Overview," *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 31, No. 1/2, pp.3~11.
- (2) "A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems," *U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum*, GIF-002-00.
- (3) Hahn, D. H. et al., 2007, "KALIMER-600 Conceptual Design Report," KAERI/TR-3381/2007.
- (4) Han, J. W., Eoh, J. H., Lee, T. H. and Kim, S. O., 2009, "Transient Performance Analysis of the Reactor Pool in KALIMER-600 with an Inertia Moment of a Pump Flywheel," *Transactions of Korean Society of Mechanical Engineers B*, Vol. 33, No. 6, pp.418~426.
- (5) Han, J. W., Lee, T. H., Eoh, J. H. and Kim, S. O., 2009, "Investigation into the effects of a Coastdown Flow on the Characteristics of Early Stage Cooling of the Reactor Pool in KALIMER-600," *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 36, No. 9, pp.1325~1332.
- (6) Sim, Y. S., 2008, "Introduction of IDINHX, A New Heat Exchanger for Passive Decay Heat Removal," *Nuclear Technology*, Vol. 161, MAR. pp.299~314.
- (7) Kim, S. O., Eoh, J. H. and Choi, H. K., 2002, "Analysis of Free Surface Motions in the Hot Pool of KALIMER," *Korean Society of Computational Fluid Engineering*, Vol. 7, No. 3, Sep., pp.44~52.
- (8) Jeon, W. D., 2004, "Flow Analysis Report in KALIMER-600," KAERI, LMR/FS200-AR-01/2004.
- (9) Garner, P. L., Blomquist, R. N. and Gelbard, E. M., 1992, "COMMIX-1AR/P:A Three-dimensional Transient Single-phase Computer Program for Thermal Hydraulic Analysis of Single and Multicomponent Systems Volume2 : User's Guide," Argonne National Laboratory, ANL-92/33.