'2000 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

액체금속로 피동 잔열제거계통의 과도기 작동특성 분석

Transient Operational Characteristics of LMR PSDRS

어재혁, 심윤섭, 김의광

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

현재 개념설계 단계인 액체금속로 KALIMER의 피동 안전등급 잔열제거계통인 PSDRS의 작동 mechanism 파악을 위하여 기 개발된 PARS2 코드의 특성을 분석하고 이를 변형하여 원자로 100% 정상출력 운전시의 PSDRS를 통한 열손실량을 계산하고 원자로 정지 후 PSDRS 작동시점까지의 소듐 액위 변화에 대한 분석을 통해 PSDRS 정상작동 시작 시간을 설정하여 정상상태에서 과도상태로 전환되는 기간에 대한 분석을 수행하였다. 이를 통해 PSDRS 정상작동시의 조건을 원자로 정지 후 계통 과도기 특성 분석을 위한 PARS 코드 초기조건의 체계적인 설정 방법을 개발하고 원자로 Baffle과 최고온도 등 계통설계에 필요한 설계인자와 계통 성능간의 상관성에 대한 정량적인 결과를 얻었다.

Abstract

The operational characteristics of the safety grade passive decay heat removal system PSDRS of KALIMER(Korea Advanced LIquid MEteal Reactor) was investigated using the code PARS2. The time required in the operation mode change of PSDRS to the circulation mode through the annular gap path between the reactor vessel and reactor baffle was calculated and the transient characteristics of the heat removal process after a reactor trip to the time the system gets the peak temperature was analyzed. Through this investigation, a systematic way of setting the initial condition for the PARS analysis was set up and the qualitative relations between the system performance and system design parameters such as the relation between the reactor baffle height and the peak temperature and the time were found.

1. 서론

Pool형 액체금속로인 KALIMER는 출력운전 중 노심에서 발생된 열은 그림 1과 같이 원자로 내부의 소듐 풀, 중간열교환기(IHX), 중간계통(IHTS)을 거쳐 증기발생기 계통(SGS)으로 이어지는 정상 열제거 경로를 통해 운전된다[1]. 이 때의 원자로 내부 열전달 경로를 자세히 설명하면 정상운전 중 노심에서 발생되는 열은 노심 상단의 고온의 소듐 풀을 거쳐 중간열교환기(IHX)를 통해 중간계통(IHTS)로 열을 전달시키고 저온풀을 거쳐 PHTS Pump에 의해 다시 노심으로 유입되므로 정상운전 중에는 원자로 baffle과 원자로용기(RV) 내벽 사이의 환형공간으로의 직접적인 유로가 형성되지 않는다. 따라서, 노심으로부터 받은 열량이 환형공간의 소듐으로 직접적으로 전달되지 않으므로 정상운전중 원자로용기(RV) 벽면의 온도는 상대적으로 저온으로 유지된다. 또한, PHTS Pump에 의한 1차계통의 순환유량에 의해 발생하는 압력차로 정상운전중에는 고온풀과 환형공간 소듐 자유표면은 액위차를 나타내고 환형공간 소듐 자유표면 상부는 Helium 기체로 채워진다. 이러한 환형공간은 정상운전 중 PSDRS를 통한 열손실량을 최소화하는 기능과 사고 발생시 원자로 내부의 열을 제거하기 위한 중요한 열제거 경로를 형성하는 기능을 동시에 수행하게 된다.

노심-중간열교환기(IHX)-중간계통(IHTS)-증기발생기계통(SGS)로 이어지는 정상 열제거 경로 중에서 중간열교환기(IHX)의 기능이 상실되는 경우, 원자로 정지 후 계속적으로 발생되는 노심의 잔열은 오직 피동안전등급 잔열제거 계통(Passive Safety Decay Heat Removal System ; PSDRS)을 통해서만 제거된다. 경수로와 구분되는 특징 중의 하나인 PSDRS의 작동 시작 시점은 원자로 정지 후 노심의 잔열에 의해 원자로 내부 고온풀 자유표면의 액위가 상승하여 원자로 Baffle의 overflow slot을 넘어서 환형공간에 존재하는 저온 소듐으로 유입되는 시점으로 설정한다. 이는 기 수행된 연구결과에 의해 PSDRS를 통한 열제거가 고온에서 더 효율적으로 이루어지므로[2] 고온의 소듐이 원자로 baffle과 원자로용기(RV) 내벽 사이의 환형공간으로 유입되어 저온 소듐의 온도를 증가시켜 PSDRS를 통한 열제거량 증가를 초래하여 원자로 내부 소듐 풀의 온도를 감소시키고 궁극적으로는 구조적 건전성을 확보할 수 있게 된다. 본 연구는 기 수행된 연구[2]의 일환으로 원자로 정상운전에서 PSDRS 작동 이후의 과도기 특성 분석을 위해 100% 정상출력 운전시의 PSDRS를 통한 열손실량을 계산하고, 원자로 정지 후 원자로 내부 소듐 액위 상승률을 계산하여 PSDRS 작동 시작시간을 설정하였다. 또한, PSDRS 작동 특성 및 장시간 동안의 계통 과도기 특성 파악을 위해 PSDRS 작동 시작시의 조건을 PARS 코드의 초기조건으로 설정하여 계통 과도기 현상 해석에 신뢰성을 기했으며, PSDRS 설계인자의 변화에 대한 계통 성능의 민감도 분석을 병행하였다.

2. 전산 코드 PARS2 특성

기 수행된 연구를 통하여 노심의 붕괴열이 원자로 내부의 소듐 풀에서 원자로 Baffle, 원자로용기(RV) 벽면, 원자로 격납용기(CV), 공기 냉각유로(Air channel)로 이어지는 전열 경로를 통해 외부로 연결된 공기 굴뚝에 의해 최종적인 열침원인 대기로 열이 방출되는 PSDRS의 전 과정을 해석할 수 있는 PARS 코드가 개발되었다[3]. PARS 코드는 1차원 지배 계산식

을 사용하여 전도, 대류 및 복사 열전달 계산을 수행하는 설계해석 코드로 원자로내부 소듐 풀, 원자로용기(RV) 벽면, 원자로 격납용기(CV) 및 공기 냉각유로(Air channel)를 모사하기 위해 원자로 baffel과 원자로용기(RV) 내벽 사이의 환형공간을 N개의 node로 나누고, 원자로 내부 소듐 풀 및 원자로용기 내벽과 원자로 Baffle 사이의 환형공간에서 계산된 결과를 공기 냉각유로(Air channel)의 N개의 node와 대응시켜 전열 과정을 계산한다. 이 과정에서 원자로 내부의 소듐 유동과 공기유로의 유동이 서로 반대 방향인 점을 감안하여 그림 2에서와 같이 각각의 Node를 역순으로 배열하여 계산에 적용한다. 그림 2는 원자로 baffel과 원자로용기(RV) 내벽 사이의 환형 공간인 소듐 Channel을 N개, 저온풀과 노심 부분을 각각 I개 및 J개, 고온풀을 K개로 나누고, 이에 대응하는 공기 냉각유로를 N개의 Node로 나눈 경우의 Nodalization을 나타내고 있다. 하지만, PARS 코드는 PSDRS 설계해석 코드로서의 현실성을 갖기 위한 코드 구조의 단순화로 인해 중간열교환기(IHX)와 중간계통(IHTS) 등에 대한 해석 기능이 없어 원자로 100% 정상출력 운전 상태에서 원자로가 정지된 후 원자로 내부 소듐 풀의 온도 증가에 의해 액위가 상승하여 PSDRS의 정상작동이 시작되는 순간의 시간 및 온도를 사용자가 외부에서 입력하도록 되어 있어 초기조건의 체계적 설정 방법에 대한 연구가 요구되고 있다. 또한, 정상운전중 PSDRS를 통한 열손실량 계산을 위해서는 원자로 baffle과 원자로용기(RV) 내벽 사이의 환형공간에 존재하는 저온 소듐 자유표면 액위와 환형공간의 Helium 기체 영역에 대한 해석이 필요하지만 현재 PARS 코드는 이러한 점을 고려하고 있지 못하므로 본 연구에서는 이에 대한 분석을 수행하였다.

3. 정상운전중 PSDRS를 통한 열손실량 분석

원자로용기(RV) 벽면을 통해 외부로 빠져나가는 열량은 환형공간의 소듐이 채워진 부분에서의 전도에 의한 열전달과 상부 Helium 공간에서의 복사에 의한 열전달에 의해 많은 차이가 나타날 것으로 예상된다. 따라서, 본 분석에서는 범용 전산해석 코드인 COMMIX-1AR/P를 사용하여 100% 정상출력 운전시의 고온풀 자유표면 상부 및 원자로 baffle과 원자로용기(RV) 내벽 사이의 환형공간에 존재하는 Helium 기체 공간까지 해석 영역에 포함시켜 복사열전달의 영향을 고려함으로써 보다 신뢰성 있는 원자로 내부 온도분포 해석을 수행한바 있는기 수행 연구결과[4]를 인용하여 정상운전중 PSDRS를 통한 열손실량을 계산하였다. 그림 3은 COMMIX 코드를 사용하여 계산된 정상운전중 원자로용기(RV)의 축방향 온도분포 해석 결과로 원자로용기(RV)의 축방향 온도분포는 고온풀의 정상운전시 액위면보다 위에 위치한 Helium 기체 공간에서 온도가 일정하게 유지되다가 원자로 baffle이 존재하는 지점부터는 고온풀 영역에서 원자로용기(RV)로 전달되는 복사열이 baffle에 의해 차폐되어 원자로용기(RV)의 온도가 급격히 감소하며, Baffle의 영향으로 낮아진 온도는 고온풀 자유표면 위치에서 다시 급격히 상승하는 것을 볼 수 있다. 또한, baffle 내부에 존재하는 IHX의 영향으로 소듐의 온도는 저온풀 정상운전시의 액위면 위치까지 감소하고 원자로용기와 직접 접촉하고 있는 환형공간에 존재하는 저온 소듐의 영향으로 원자로용기(RV)로의 열전달이 자유표면 상부의 복사모드에서 전도열전달 모드로 전환됨에 따라 온도가 다시 상승하였다가 IHX 하

단까지 감소하다가 IHX 하부의 저온풀 영역에서는 거의 일정한 온도를 유지하고 있음을 알 수 있다.

본 연구에서는 이와 같은 COMMIX 해석 결과를 PARS 코드에 적용하기 위하여 원자로용기(RV) 축방향 온도분포를 표 1에 제시된 4개의 구간으로 구분하고 각 구간별 상관식을 도출하여 PARS 코드에 사용되는 원자로용기(RV) 축방향 온도 분포를 산출하였다. 상관식에 의해 계산된 온도 분포는 그림 4와 같이 대부분의 영역에서 오차범위 ±5% 이내에서 일치하였으며 COMMIX 결과와 상관식에 의해 계산된 원자로용기(RV) 축방향 온도의 평균값은 각각 375.3℃와 374.5℃로 거의 유사한 값으로 나타났다. 이는 PSDRS에 의해 제거되는 열량이 원자로 내부 소듐 풀의 평균온도에 의해 가장 지배적으로 결정된다는 기 수행연구 결과[2]에 의해 적절한 방법론임을 알 수 있다.

이러한 방법을 통해 계산된 원자로용기(RV)의 축방향 온도분포를 PARS 코드에 적용하여 계산을 수행한 결과, 발전소 100% 정상출력 운전시 PSDRS를 통한 열손실량은 1.29 MW로 100% 열출력의 약 0.33%에 해당되는 것으로 나타났다.

4. PSDRS 작동 시작시간 설정

4.1 수학적 모형

PSDRS의 작동 시작시점은 고온풀 자유표면의 액위가 원자로 Baffle overflow slot에 도달하여 환형공간의 저온 소듐으로 고온의 소듐이 유입되는 시점으로 설정한다. 원자로 정지 후 발생하는 노심의 잔열은 원자로 내부 소듐의 온도를 증가시키고, 온도증가로 인한 부피증가는 고온풀의 액위를 PSDRS 작동위치까지 상승시킨다. 이와 같이 원자로 내부의 소듐에 축적되는 에너지는 다음의 식 (1)과 같이 표시할 수 있다.

$$\Delta Q = Q_{gen} - Q_{out} = \frac{\partial}{\partial t}(M \cdot c_p \cdot T) \tag{1}$$

여기서, 좌변의 ΔQ는 노심에서 발생하는 붕괴열, Q_{gen}와 PSDRS를 통해 제거되는 열량, Q_{out}의 차로서 순수히 원자로 내부의 소듐 풀을 가열시키는 열량을 의미하며, 우변의 M은 PHTS 내에 존재하는 소듐의 총질량, c_p와 T는 각각 비열과 온도를 나타낸다. 이 식을 시간에 대하여 적분하면 다음의 식 (2)에서 (4)의 관계를 얻을 수 있다.

$$\int Q_{gen} dt - \int Q_{out} dt = \int_{t1}^{t2} M \cdot c_p \cdot T \cdot dt \tag{2}$$

$$Q_{ACC} = M \cdot c_p \cdot T\Big|_{t=t2} - M \cdot c_p \cdot T\Big|_{t=t1} \tag{3}$$

$$M \cdot c_p \cdot T\Big|_{t2} = M \cdot c_p \cdot T\Big|_{t1} + Q_{ACC} \tag{4}$$

Q_{ACC}는 시간 t_1과 t_2사이에 소듐에 축적된 총 에너지를 의미한다. PSDRS 작동시간까지 소듐에 축적된 에너지는 소듐의 부피증가로 나타나며, 부피가 증가한 만큼 소듐의 밀도는 감소하므로 다음의 식 (5)를 이용하여 정상운전시의 소듐의 평균밀도를 계산하고 이를 이용하여 액위상승에 따른 밀도변화를 계산할 수 있다.

$$r_{normal-avg} = \frac{V_{hot} \cdot r_{hot} + V_{cold} \cdot r_{cold}}{V_{tot}} \tag{5}$$

V_{hot}과 V_{cold}는 각각 정상운전중의 고온풀 및 저온풀의 부피이며, V_{tot}은 V_{hot}과 V_{cold}를 합친 PHTS 소듐의 총 부피로서 KALIMER 열평형도[1]를 참고하여 고온은 530℃, 저온은 385℃에서의 값을 적용하면 정상운전 중의 소듐의 평균 밀도는 836.93kg/m^3이 된다. 정상운전 중의 평균밀도를 기준으로 소듐의 온도 증가로 인한 부피의 증가 및 이로 인해 감소한 밀도를 각각 식 (6)과 식 (7)에 의하여 계산할 수 있다.

$$\Delta V = V_1 - V_0 = \left(\frac{M}{r}\right)_1 - \left(\frac{M}{r}\right)_0 \tag{6}$$

$$r_1 = \frac{1}{\left(\frac{1}{r}\right)_0 + \frac{\Delta V}{M}} \tag{7}$$

아래첨자 0과 1은 각각 정상운전시와 액위 상승시를 의미하며, 식 (7)에서 계산된 밀도를 이용하여 소듐의 온도와 비열을 계산하고 이를 식 (3)에 대입하여 원자로 내부 소듐에 축적된 총 에너지를 계산할 수 있다. 또한, 소듐의 액위 증가는 가해지는 열량, 즉 노심에서 발생하는 붕괴열에 의한 것이 대부분이므로 노심의 붕괴열 발생곡선(Decay Heat Curve)[5]을 이용하여 다음의 식 (8)과 같이 소듐 액위 상승시간을 결정할 수 있다.

$$\int_0^t \{Q_{decay} - Q_{out}\} dt = \sum_{i=1}^{t} \{Q_{decay,i} - Q_{out,i}\} \cdot \Delta t_i = Q_{ACC} \tag{8}$$

여기서, Q_{decay}는 원자로 정지 후 노심에서 발생하는 잔열이며, 소듐 액위별 축적된 에너지 Q_{ACC}가 각각 t_1과 t_2에 해당하는 $Q_{ACC,1}$과 $Q_{ACC,2}$ 사이에 존재할 경우, 시간 t는 다음 식 (9)와 같이 결정된다.

$$t = t_1 + \frac{t_2 - t_1}{Q_{ACC,2} - Q_{ACC,1}} \cdot \left(Q_{ACC} - Q_{ACC,1}\right) \tag{9}$$

4.2 원자로 정지시의 소듐 액위 설정

100% 정상출력 운전중에는 PHTS Pump에 의한 1차계통의 순환유량에 의해 발생하는 압력차로 인해 그림 5와 같이 고온풀 자유표면 및 원자로 baffle과 원자로용기(RV) 내벽 사이의 환형공간의 소듐 자유표면 간에는 액위차, L_{diff}를 갖게 되며, 원자로 정지후 1차계통의 순환유량이 완전히 멈추게 되면 고온풀 자유표면 액위는 감소하고 환형공간의 소듐액위는 급

격히 증가하여 고/저온풀간의 액위는 동일해진다. 본 분석에서는 PHTS Pump 정지시의 Coastdown 유량이 존재하지 않으며, 따라서 원자로 정지와 동시에 순간적으로 고온풀과 저온풀이 동일한 액위를 갖는 것으로 가정하였다. KALIMER의 정상운전중 계통작동 조건 및 PSDRS 설계인자는 표 2와 같으며[1][4], 제시된 값들을 통해 다음의 식 (10)과 식 (11)에 의하여 고온풀과 환형공간 소듐이 동일한 액위를 갖는 높이를 계산하였다.

$$\Delta V_{hot} = \Delta V_{ch} \tag{10}$$

$$\Delta h_{inc} = \frac{L_{diff}}{1+\left(\frac{A_{ch}}{A_{hot}}\right)} \tag{11}$$

ΔV_{hot}과 ΔV_{ch}는 각각 감소하는 고온풀의 부피와 증가하는 환형공간 소듐의 부피를 의미하며, Δh_{inc}는 환형공간에서의 액위상승 폭, L_{diff}는 고온풀과 환형공간 저온풀의 액위차를 나타낸다. 위의 식 (10)과 식 (11)을 이용하여 원자로가 정지되는 순간의 동일해지는 풀 액위를 계산하면 약 15.1 m이며, 원자로 내부 소듐 풀의 액위는 이 높이에서부터 상승하는 것으로 가정하였다.

4.3 소듐 액위 상승시간 설정

앞서 언급한 바와 같이 원자로 정상운전 중에는 환형공간이 저온의 소듐과 Helium 기체로 채워져 있어 원자로용기(RV)를 통한 열손실량이 작지만 원자로 정지시에는 고온풀의 액위는 다소 감소하고 환형공간의 저온 소듐은 액위가 급격히 상승하여 원자로용기(RV) 외벽을 통한 열전달량이 정상운전중에 비해 다소 증가할 것으로 예상된다. 원자로 정지 후 소듐의 액위가 동일해지는 높이부터 PSDRS 작동이 시작되는 높이까지 PSDRS를 통해 빠져나가는 열량은 PARS 코드를 사용하여 액위 상승에 따른 열제거량 변화로 계산하였다. PARS의 입력으로 사용되는 환형공간의 소듐온도는 그림 3의 COMMIX 해석 결과[4]에서 환형공간 소듐 자유표면이 상승함에 따라 일정 비율로 증가하는 것으로 가정하였으며, PSDRS가 작동하기 전까지 소듐 액위의 상승에 따른 PARS 계산조건 및 PSDRS를 통해 제거되는 열량을 표 3과 그림 6에 제시하였다.

5. PSDRS 작동 특성 분석

원자로 정지시의 고/저온풀의 액위가 동일해지는 높이인 15.1m에서 PSDRS를 통한 본격적인 열제거가 시작되는 높이인 15.8m까지 시간별 액위 상승률을 분석하였다. 그림 7은 100% 정상출력 운전에서부터 원자로 정지 후 1시간까지의 소듐액위 변화를 나타낸다. 원자로가 정지되는 순간에 고온풀과 환형공간 소듐의 액위가 동일해지면서 원자로 내부의 전체 소듐 액위는 순간적으로 감소하였다가 노심의 잔열로 인한 온도증가로 다시 증가하는 것을 볼 수 있다. PSDRS 작동시간은 소듐의 액위가 원자로 Baffle Overflow Slot에 도달하는 시간인 원자로 정지 후 15분경이며 고온풀의 소듐이 원자로 Baffle Overflow Slot을 넘어선 이후에도 계속

해서 발생하는 노심 잔열에 의해 소듐 액위는 증가하지만 그 증가폭은 PSDRS 정상작동 시점 이전 보다 급격히 감소함을 알 수 있다. PSDRS 작동 초기에 소듐의 액위가 다소 감소하는 것은 PSDRS 작동 시작시의 고온풀 온도를 PARS 코드의 초기조건으로 사용하기 때문으로, 고/저온풀간의 초기 온도차가 클 경우에는 초기에 자연대류에 의한 노심의 순환유량 증가로 열제거량이 많아져 노심으로 재유입되는 저온풀의 온도가 낮아져 노심의 온도가 감소하고, 따라서 소듐에 가해지는 열량이 감소하면서 고온풀로 유입되는 소듐의 온도가 감소하여 시간이 경과함에 따라 고온풀의 온도가 초기에 설정된 온도 이하로 감소하는 경향을 보일 수 있다. 그림 8은 PARS 코드를 사용하여 이러한 특성을 분석한 것으로 초기온도 및 고/저온풀 간의 온도차를 변화시키면서 최고온도 도달 시간 및 고온풀의 온도변화를 분석하였다. 분석 결과, 계통의 과도기 최고온도 및 최고온도 도달시간 등은 표 4와 같이 초기온도 설정 값에 관계 없이 거의 유사한 경향을 보임을 알 수 있으며, 다소의 차이가 나는 것은 설정된 초기온도에 따라 소듐의 평균온도가 달라지기 때문인 것으로 판단된다. 이와 같은 계산상의 특성으로 인해 PSDRS 정상작동 시작 직후 소듐액위는 초기에 약간 감소하였다가 다시 증가하는 경향을 보이게 된다.

그림 9는 원자로 정지 후의 원자로 내부 풀의 평균온도 및 PSDRS를 통한 열제거량의 변화를 나타낸다. 100% 정상출력 운전 중에는 원자로 내부 소듐의 평균온도가 일정하게 유지되므로 PSDRS를 통한 열손실량 역시 정상운전중의 열손실량인 1.29MW로 유지됨을 알 수 있다. 또한, PSDRS가 정상작동하기 시작하는 시간에서는 고온풀의 소듐이 환형공간으로 유입되면서 PSDRS를 통한 열제거량이 급격히 증가하며, 계속해서 증가하던 원자로 내부 소듐 풀의 평균온도는 PSDRS의 정상작동으로 인한 열제거량 증가로 완만한 증가를 보이고 있다. 이후 계속해서 발생하는 노심의 잔열로 인해 소듐의 평균온도는 지속적으로 상승하고 이에 따라 PSDRS를 통한 열제거량 역시 완만한 증가를 보인다.

그림 10과 그림 11은 원자로 정지후 875초의 PSDRS 작동시작 시간 이후 48시간까지의 장기간의 계통 과도기 특성을 나타낸다. 그림 9는 원자로 정지후 48시간 동안의 계통 거동 특성으로 원자로 내부 소듐의 평균 온도가 증가할수록 PSDRS를 통해 제거되는 열량은 증가하고 시간이 경과함에 따라 온도가 감소하면서 PSDRS를 통해 제거되는 열량이 같은 경향으로 감소하고 있음을 알 수 있다. 그림 10은 48시간까지의 원자로 내부 소듐의 액위 변화로 초기에 Baffle Overflow Slot을 상회하던 액위는 약 3시간경에 최고 액위를 나타낸 후 원자로 내부의 소듐온도 감소에 따라 점차 낮아지는 것을 볼 수 있다.

그림 12는 원자로 내부의 설계인자의 변화에 대한 분석으로 PSDRS의 작동 시간 설정을 위해 가장 많은 영향을 미치는 인자로 판단되는 고온풀 자유표면 상단의 원자로 Baffle 높이, L_{SLOT}의 변화에 의한 PSDRS 작동시간 변화를 분석하기 위한 것이다. 그림에서와 같이 L_{SLOT}이 증가할수록 PSDRS 작동시간이 늦어져 계통의 최고온도가 증가하고 최고온도 도달 시간은 짧아지는 것을 알 수 있으며, 정량적으로는 L_{SLOT}의 25% 변화에 PSDRS 시작 시점은 약 $\pm$2분의 차이를 보였고 계통의 최고 온도는 약 $\pm$15℃ 정도의 차이를 나타냈다. 따라서, 정상운전 중의 원자로용기(RV) 벽면을 통한 열손실량 감소를 위한 열차폐체로서의 기

능과 사고 발생시 PSDRS를 통한 신속한 계통 온도 감소의 역할을 동시에 고려하여 원자로 Baffle 높이에 대한 적절한 설정이 필요할 것으로 판단된다.

6. 결론

이상의 연구를 통해 발전소 100% 정상출력 운전시, 원자로 정지 후 PSDRS 정상 작동 시점까지, 그리고 이후 48시간까지의 PSDRS 작동 특성에 대한 분석을 수행하였으며 결론은 다음과 같이 정리할 수 있다. 첫째, PSDRS 정상작동 시작은 원자로 내부의 소듐 액위가 원자로 Baffle Overflow Slot에 도달하여 고온풀의 소듐이 환형공간의 저온 소듐으로 유입되는 시점이며 원자로 정지 후 약 15분경이다. 둘째, 이를 통해 PSDRS 정상작동 초기조건 설정 방법을 수립/개발하여 PARS코드의 초기조건으로 활용함으로써 계산의 신뢰성을 높였다. 셋째, 고온풀 자유표면 상부의 원자로 Baffle의 길이가 증가할수록 PSDRS 작동시간이 늦어지고 계통의 최고온도는 증가하며 최고온도 도달 시간은 짧아짐이 확인되었으며, 정량적으로는 길이 25% 변화에 PSDRS 시작 시점은 약 ±2분 정도의 시간차가 있으며 계통의 과도기 최고온도는 약 ±15℃ 정도 차이를 보이는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 주관한 원자력 중장기 연구과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. “KALIMER Preliminary Conceptual Design Report”, Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI/TR-1636/2000, Aug, 2000.
2. 심윤섭, 위면환, 김성오,“PSDRS의 잔열제거 특성 분석”,’98 춘계학술발표회 논문집, 1998.
3. “Code PARS User’s Guide”, 한국원자력연구소, KALIMER 기술개발팀 내부문서, LMR/FS500-CM-01/2000, Mar., 2000.
4. 김의광, 심윤섬, 김성오, 김연식, 위명환, “KALIMER 원자로 용기 온도분포 해석”, ’99 추계학술발표회 논문집, 1999.
5. “Core Decay Heat와 Core Radionuclide Inventory 설계연계자료”, 한국원자력연구소, KALIMER 기술개발팀 내부문서, IOC-CD-011-1998 , Dec., 1998.

Region	축방향 위치
A	상부 Helium gas 공간
B	고온풀 자유표면 ~ 환형공간 소듐 자유표면
C	환형공간 소듐 자유표면 ~ IHX 하단
D	IHX 하단 ~ 원자로용기(RV) 하단

표 1. 원자로 용기 축방향 온도분포 영역

Parameter	Unit	Value	Description
L_{RV}	m	16.55	원자로용기(RV) 높이
L_{BF}	m	15.8	PSDRS 작동 높이
L_{SLOT}	m	0.6	고온풀 상부 Baffle 높이
L_{HPL}	m	15.2	정상상태 고온풀 자유표면 액위
L_{CHPL}	m	9.99	정상상태 환형공간 소듐 액위
D_{BFin}	m	6.83	원자로 Baffle 내경
D_{RVin}	m	6.92	원자로용기(RV) 내경

표 2. PSDRS 설계인자[1][4]

H (m)	온도(℃)	열량(MW)	H (m)	온도(℃)	열량(MW)
15.1	385.3	1.43199	15.2	410.5	1.43874
15.3	431.8	1.44587	15.4	449.1	1.45336
15.5	462.6	1.46123	15.6	472.2	1.46946
15.7	477.9	1.47807	15.8	479.7	1.48704

표 3. 소듐액위 상승시의 환형공간 소듐 자유표면 온도 및 열제거량

ΔT (℃)	T_{hot} (℃)	T_{cold} (℃)	T_{av} (℃)	$T_{\max}$ (℃)	$t_{\max}$ (sec)
10	540	530	535	602.5	26,703
40	550	510	530	603.1	24,695
70	560	490	525	604.3	26,090
100	570	470	520	605.3	25,884
130	580	450	515	606.2	24,077
160	590	430	510	607.2	25,844
190	600	410	505	608.0	23,923
220	610	390	500	609.0	24,066

표 4. 고/저온풀간 온도차에 의한 최고온도 및 시간 비교

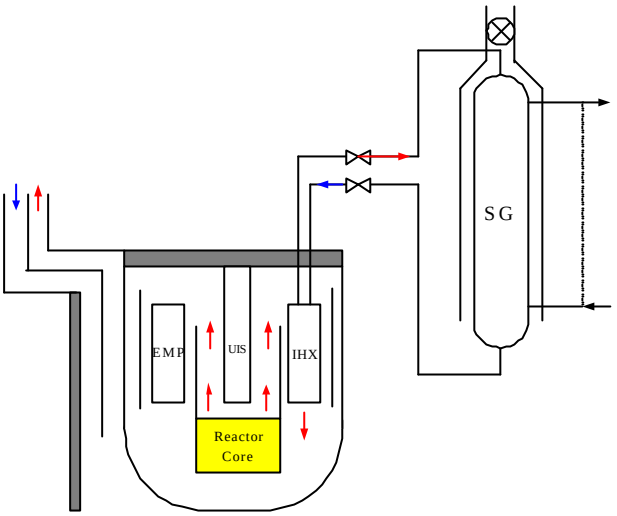

그림 1. KALIMER 계통 개략도

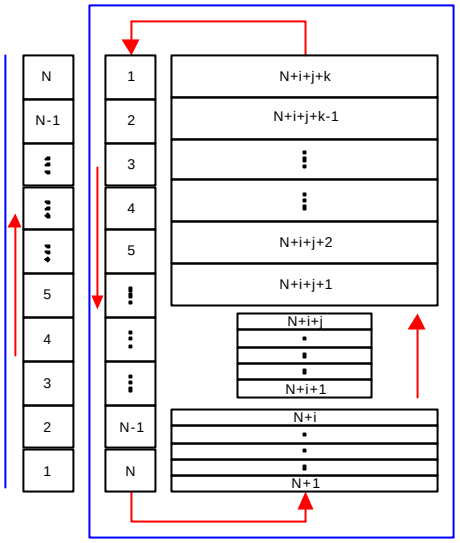

그림 2. PARS 코드 Nodalization

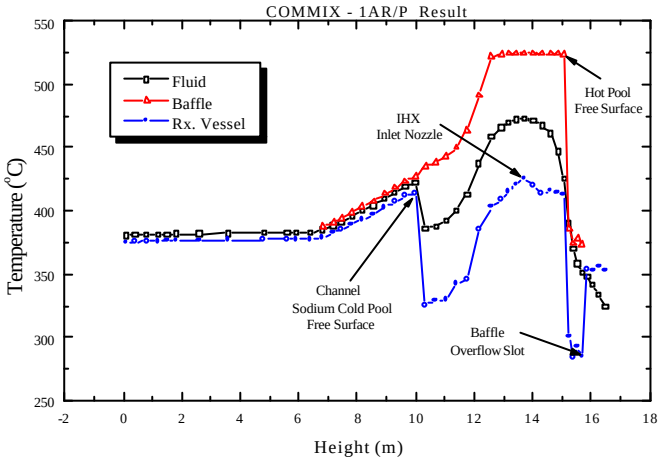

그림 3. COMMIX 해석 결과[4]

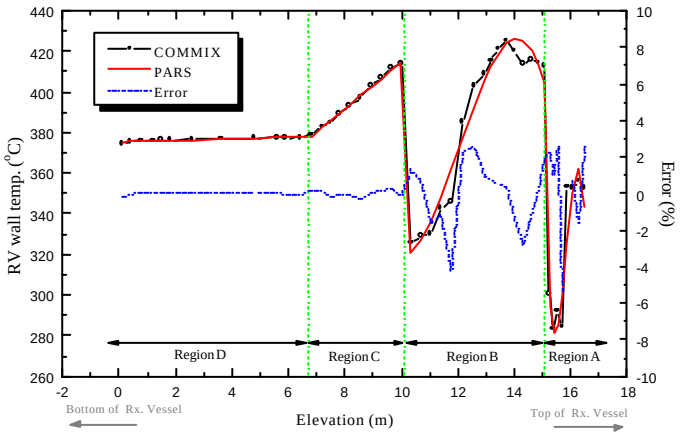

그림 4. PARS에 사용된 원자로용기(RV) 축방향 온도분포

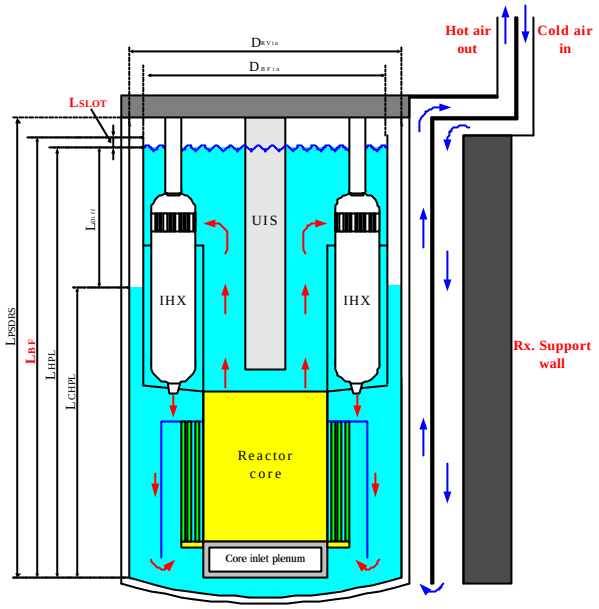

그림 5. PSDRS 구조 및 정상운전중 소듐액위

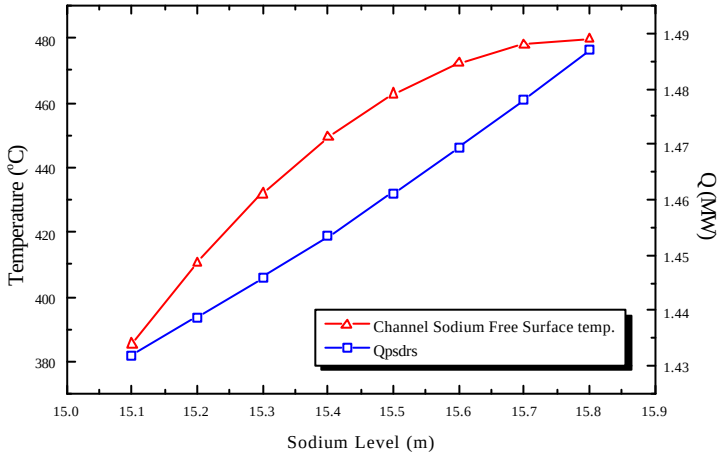

그림 6. 액위별 환형공간 소듐 자유표면 온도분포 및 열제거량

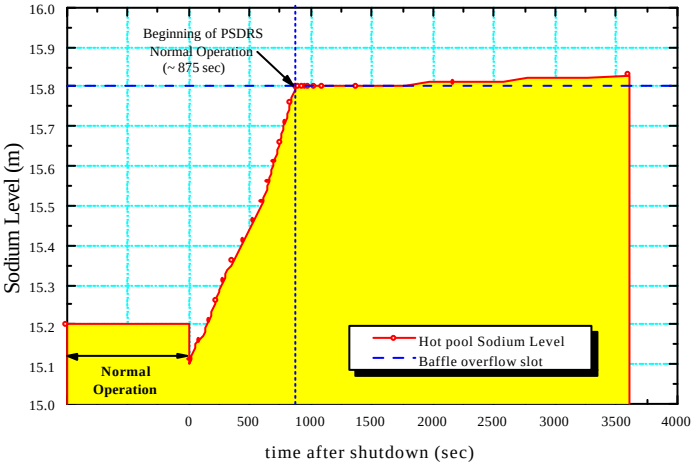

그림 7. 원자로 정지후 소듐액위 변화

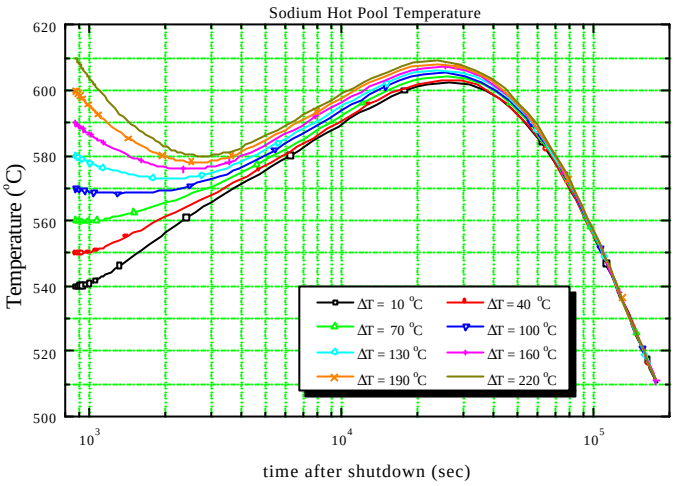

그림 8. PARS 초기조건 변화에 의한 고온풀 온도 변화

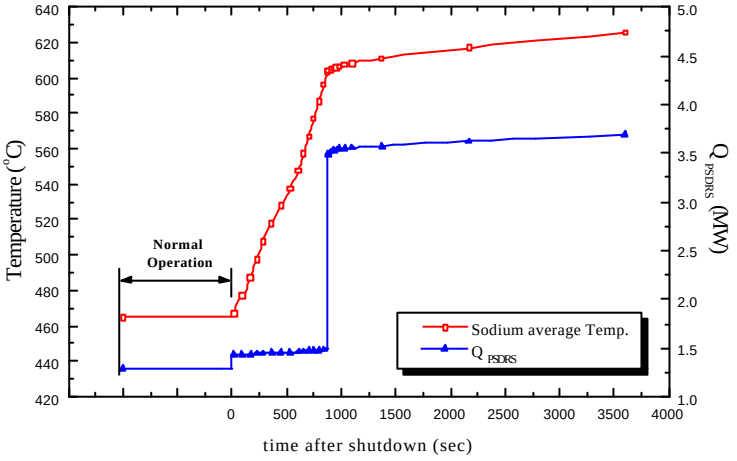

그림 9. 원자로 정지후 풀 평균온도 및 PSDRS 열제거량 변화

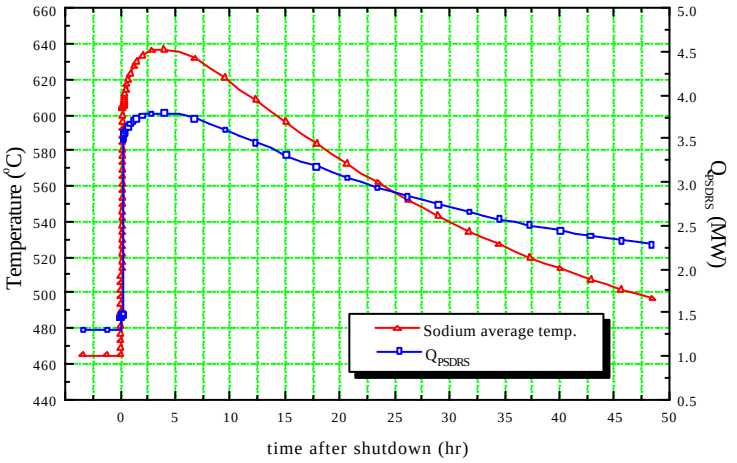

그림 10. 원자로 정지후 48시간 동안의 계통 거동 특성

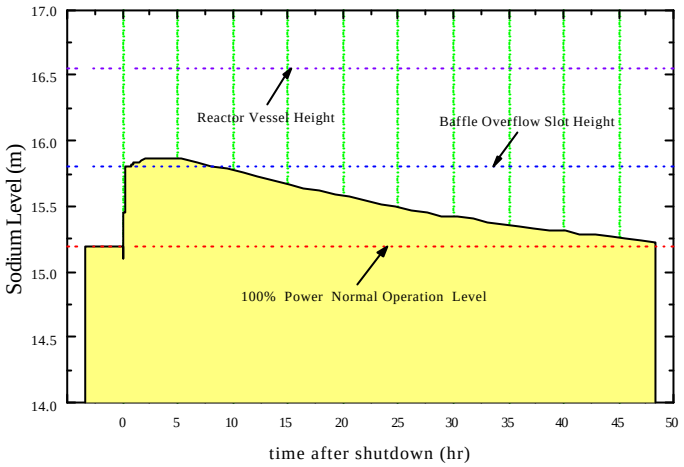

그림 11. 원자로 정지후 48시간 동안의 소듐액위 변화

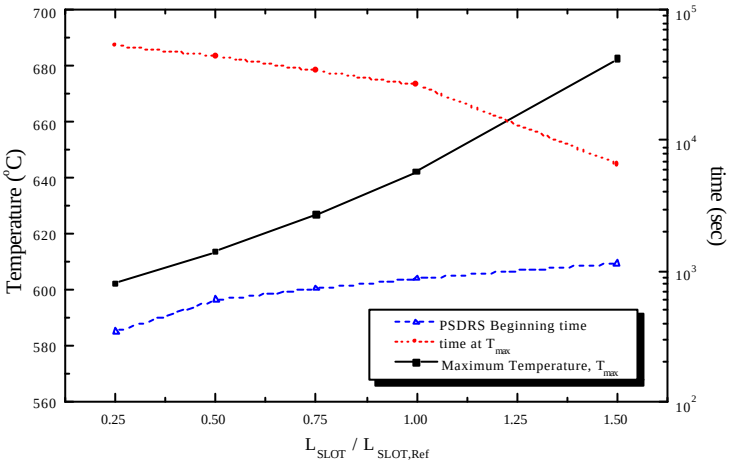

그림 12. L_{SLOT} 변화에 의한 PSDRS 작동 특성