2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

KALIMER-600 PDRC 계통 설계인자 설정 방법론 개발
Development of Quantification Method for design parameters of PDRC system in KALIMER-600

어재혁, 위명환, 김성오

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

개념설계가 완료된 한국형 소듐 냉각 액체금속 원자로인 전기출력 150 MWe의 KALIMER에 대하여 최근에는 전기출력을 600 MWe로 증가시킨 KALIMER-600 원자로 계통 개념에 대한 연구가 수행중에 있다. 열출력 1589.3 MWth인 KALIMER-600의 잔열제거계통은 원자로 열출력에 직접적인 제약을 받지 않고 효과적인 계통 잔열제거 수행이 가능도록 원자로 풀 직접 냉각방식을 사용하는 피동 붕괴열 제거 회로 (Passive Decay heat Removal Circuit ; PDRC) 개념을 활용하여 정상 열제거원 기능 상실시의 계통 잔열제거를 수행한다. 본 연구에서는 피동 붕괴열제거 계통 (PDRC)만을 사용하여 계통의 비상 잔열제거 용량을 확보하기 위한 KALIMER-600의 피동 잔열제거계통 설계인자 설정 방법론을 개발하고, 각 설계인자간의 상관관계를 통해 KALIMER-600 PDRC 계통의 전반적인 설계인자 변화 경향을 파악하여 PDRC 계통 설계점(design point)에 대한 정상상태 각 전열 유로 및 열교환기에서의 온도, 유량 및 UA 관계 등에 대한 구체적인 계산을 수행하였다. 또한, 계통 설계 단계에서의 다양한 설계변화에 유연하게 대처할 수 있도록 설계인자 변화에 대한 적용성 강화를 위하여 해석 방법론의 전산화 작업을 병행하고 그 결과를 기술하였다.

Abstract

The conceptual design of a sodium cooled liquid metal reactor, KALIMER (Korea Advanced LIquid MEtal Reactor) of which electric output is 150 MWe, has performed by KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute). A revised design concept up-rating electric capacity to 600 MWe, named as KALIMER-600, has been currently developed. The residual heat removal (RHR) system under a loss of normal heat sink accident of KALIMER-600 is characterized by the concept of PDRC (Passive Decay heat Removal Circuit) and it has superiority in the aspect that an enough decay heat removal capacity can be provided since it uses a very simple concept of direct reactor pool cooling. This study describes quantification method for the steady-state design parameters of PDRC system at the design point. On the basis of the inter-relationship between the various design parameters quantified by using the method, overall characteristics of PDRC system corresponding to the variations of system design parameters have been investigated, and more detail calculations are also performed using the quantified results such as the variations of the temperature, pressure loss, mass flow rate and UA values in each heat transfer circuit and heat exchangers in PDRC system.

1. 서 론

풀(pool)형 액체금속 원자로의 잔열제거계통은 원자로 열출력에 따라 계통 구성 및 열제거 방식에서 많은 특성 차이를 나타낸다. 해외에서 기 개발되었거나 개발 중인 피동 잔열제거 방식의 노형들에 대하여 원자로 열출력에 따른 잔열제거계통의 특성을 분석한 결과, 노심 열출력이 1,000MWth 이하인 원자로에 대해서는 원자로용기 냉각방식(RVACS)의 잔열제거계통을 사용하고, 그 이상 노심 열출력의 원자로에 대해서는 원자로의 크기 요건에 제약을 받지 않는 원자로 풀 직접 냉각방식 잔열제거계통을 사용하는 것으로 조사되었다[1]. 노심 열출력이 1589.3MWth인 KALIMER-600의 경우, 정상 열제거원 상실 사고시 운전자 개입 또는 어떠한 추가적인 능동 기기의 작동 없이도 본격적인 붕괴열 제거가 가능한 72시간 grace time 적용 요건을 만족시키기 위하여 정상운전 중의 열손실은 최소화하면서도 능동기기 (active component)를 배제할 수 있는 피동 안전등급 붕과열제거 회로인 PDRC (Passive safety-grade Decay heat Removal Circuit) 계통 개념을 설정하여 KALIMER-600 계통 설계에 적용하였다. 본 연구에서는 KALIMER-600의 잔열제거계통인 PDRC 계통의 설계 및 해석과 관련하여 설계점(design point)에서의 PDRC 요구 제열용량 결정 및 정상상태 온도, 유량 및 UA 관계 설정을 통해 계통 설계특성을 분석하고 PDRC 기본 성능요건 및 기기크기 타당성 평가를 위한 기본 계산자료 생산하였다.

2. KALIMER-600 PDRC 계통

2.1 PDRC 계통 개념

PDRC 계통은 그림 1과 같이 노심 붕괴열 제거를 위해 원자로 풀(pool)에 소듐-소듐 열교환기(DHX)를 설치하고 별도의 제열용 소듐 루프로 연결된 소듐-공기 열교환기(AHX)를 이용하여 소듐 및 공기의 자연순환에 의해 계통의 열을 최종 열침원인 대기 중으로 방출시키는 개념이다[2]. 이 개념은 기존의 유사 개념을 사용하는 SPX (Super Phenix) 및 EFR (European Fast Reactor) [3][4] 등의 원자로와 비교하여 운전원의 개입을 최대한 배제하여 작동 신뢰성을 향상시킨 완전한 피동 개념을 채택하고 있음이 특징이며, 이와 같은 설계로 인해 정상운전 중의 열손실을 해외의 유사 설계들[3][4]에 비해 상당부분 감소시킬 수 있는 장점을 동시에 갖는다[2]. PDRC 계통은 2개의 제열용 소듐 루프로 구성된 전기출력 600MWe인 KALIMER-600에 대하여 적용 가능하며, 각 루프당 1개의 소듐-소듐 열교환기 (DHX)와 소듐-공기 열교환기(AHX)로 구성된다. 이 때, 1차계통의 방사화된 소듐은 DHX를 통해 순수 소듐으로 채워진 제열용 소듐 루프와 열교환을 수행하여 최종 열침원인 공기 측으로 열을 제거하므로 공기 열교환기(AHX)에서의 소듐 전열관 결함이 발생하더라도 대기중으로의 방사능 누출 가능성은 배제할 수 있다. 즉, 그림 1과 같이 원자로 풀의 붕괴열 제거를 위해 설치된 DHX는 고/저온풀을 연통하는 DHX 지지통 (DHX support barrel) 내부에 위치하여 정상운전 중에는 PHTS 펌프의 양정(head)에 의해 형성되는 고/저온 풀 간의 액위차를 이용하여 소듐과 직접 접촉하지 않도록 배치한다. DHX 지지통 (DHX support barrel)의 상단부는 원자로 배플(baffle) over flow slot 높이와 동일하게 설정하여 정상 열제거원 상실 사고시 PHTS 펌프 작동이 중지되면, 저온풀 소듐의 액위가 상승하여 DHX 전열관과 소듐의 직접 접촉 및 정상 제열원 상실로 인한 고온풀 소듐의 부피 팽창에 의해 KALIMER-150의 PSDRS[5] 작동 시와 동일하게 고온 소듐이 DHX 지지통 (DHX support barrel) 내부로 유입되도록 고안되어 있다. 이와 같이 PHTS 펌프 작동 중단으로 고온 소듐이 DHX shell측으로 유입되면, DHX 지지통 (DHX support barrel) 내부의 공간에 고/저온 풀을 연결하는 소듐 유로가 형성되면서 자연순환 유량 증가로 인한 DHX shell 측 소듐의 대류 전열계수 증가에 의해 DHX 전열관측으로의 본격적인 열제거가 수행된다. 이 때, DHX 전열관 경계를 통하여 전열관 내부로 본격적으로 열이 유입되면 밀폐계(closed loop or system)인 제열용 소듐 루프 내부의 2차 소듐은 냉각원인 상부 AHX 측과 열원인 하부 DHX 측 간의 온도차에 기인하는 소듐 밀도차를 구동력으로 하는 제열용 소듐 루프 내부 소듐의 자연순환 유량이 증가하면서 풀 내부의 열을 공기 열교환기(AHX)로 효과적으로 전달하면서 최종 열침원인 공기로의 본격적인 열제거를 수행하게 된다. 또한, 정상운전 중의 열손실 방지를 위해 고온 풀 내부 DHX 지지통 (DHX support barrel)에 위치하는 소듐-소듐 열교환기 (DHX)를 정상운전 중에는 소듐과 직접 접촉하지 않고 PHTS 펌프의 양정에 의해 형성되는 저온 풀(pool) 상부의 기체 공간에 위치시킴으로써 DHX 지지통 (DHX support barrel) 내벽과 DHX 전열관 사이의 복사 전열에 의해 제열용 소듐 루프 내부의 2차 소듐 고화 방지를 위한 최소한의 전열만을 수행하도록 설계함으로써, 해외 유사설계[3][4]에 비교하여 열효율 및 작동 신뢰성 측면에서 매우 우수한 설계상의 장점을 갖는다.

2.2 PDRC 계통 설계점 및 요구 제열용량 특성

KALIMER-600 잔열제거계통인 PDRC 계통의 설계를 위해서는 제열용량 및 해당 제열용량의 구현을 위한 열교환기 크기의 현실성 평가, 그리고, 계통의 열유체적 설계인자의 설정작업 등이 상호 보완적으로 요구된다. 이를 위해서는 PDRC의 요구 제열용량 설정이 우선되어야 하며, 이는 시간의 함수로 주어지는 계통 작동시의 정상상태 설계점(design point)에서 결정될 수 있다. PDRC 정상상태 설계점 (design point)은 정상 열제거원의 기능상실시 원자로심의 붕괴열을 PDRC만으로 제거하는 경우, 열 발생량과 열제거량이 평형을 이루는 시간에서의 제열용량을 의미하므로, KALIMER-600 잔열제거계통의 설계점(design point)은 KALIMER-150 해석결과[5]를 참조하여 다음과 같이 설정할 수 있다. 즉, 노심 열출력이 392.2MWth인 KALIMER-150의 경우, 정상 열제거원 상실사고시 노심 붕괴열 발생량과 잔열제거계통의 제열용량이 평형을 이루는 시간대는 그림 2와 같이 원자로 정지 후 약 17시간 경과 시점이며, 이 때의 잔열제거계통의 설계점 (design point) 요구 제열용량은 약 2.6 MWth로, 이 값이 바로 잔열제거 계통의 최대 제열용량을 의미한다. 즉, 설계점(design point)은 원자로 정지 후 10~20시간 사이에 존재하며 소듐을 냉각재로 사용하는 대부분의 풀(pool) 형 원자로의 경우 소듐 냉각재의

열관성 (thermal inertia) 및 잔열제거 계통 특성에 의해 상기 시간대에서 정상상태 설계점 (design point)이 분포한다. 그림 3은 원자로 열출력 1589.3MWth인 KALIMER-600의 원자로 정지 후 노심 붕괴열 발생량을 시간에 대해 도시한 그림으로, 설계점(design point)이 원자로 정지 후 약 10~20시간 사이에 존재하는 경우, PDRC 계통이 제거해야 하는 제열용량은 약 10~12 MWth임을 알 수 있다. 또한, 설계점(design point)의 잔열제거 계통 요구 제열용량은 최대 열제거량에 도달하는 시간의 함수로 주어지므로, KALIMER-600 PDRC 계통 설계를 위해서는 임의의 가능 설계점 (design point) 분포 영역 중에서 가장 큰 제열용량이 요구되는 원자로 정지 후 10시간에서의 요구 제열용량을 선정함으로써 보수성을 부여하여 계통 설계 및 해석에서의 불확실성을 보상할 수 있도록 하였다. KALIMER-600의 경우, 원자로 정지 후 10시간에서의 노심 발생 붕괴열은 약 12.09MWth이므로 각 루프당 요구되는 제열용량은 각각 6.05 MWth가 된다. 이와 같은 과정을 통해 PDRC 계통의 설계점(design point)을 설정하고, 설계점에서의 요구 제열용량을 기준으로 PDRC 계통 온도배치 및 설계인자 등의 상관관계를 설정하였다.

2.3 PDRC 계통 설계점 기본 경계조건 설정

PDRC 계통의 기본 설계인자 설정을 위해서는 "노심 – 고온 풀(pool) – DHX shell측 – DHX tube측 – 제열용 소듐 루프 – AHX – 공기"로 이어지는 제열 경로에 대하여 기본 경계조건을 설정해야 한다. PDRC 계통 설계를 위한 기본 경계조건으로는 PDRC의 요구 제열용량인 Q_{PDRC}, 고/저온 풀 소듐 온도인 T_{PH} 와 T_{PC}, PDRC 제열용 소듐 루프 내부의 고/저온관 소듐온도인 T_{LH} 와 T_{LC}, AHX shell측 공기 출구 및 입구 온도인 T_{AH} 와 T_{AC}, DHX와 AHX의 열교환기 특성 인자인 $\{UA\}_{DHX}$ 와 $\{UA\}_{AHX}$, 그리고 DHX shell측 소듐 유량인 $\dot{m}_P$, 제열용 소듐 루프 내부의 소듐 유량인 $\dot{m}_L$, AHX shell측 공기 유량인 $\dot{m}_a$ 등이 있다. 이들 설계인자 중에서 KALIMER-600 PDRC 설계시 경계조건으로 고정 가능한 변수로는 고온 풀 소듐 온도인 T_{PH} 와 공기 입구온도인 T_{AC} 뿐이며, 이들 경계조건은 다음과 같이 결정할 수 있다. 일반적으로 원자로 정지 후 가능한한 빠른 시간에 PDRC를 통한 본격적인 열제거가 시작되는 편이 전반적인 계통 냉각측면에서 유리하므로, DHX를 포함하는 PDRC 설계 역시 이에 상응하도록 고온 풀 소듐 온도 경계조건을 설정할 필요가 있다. 따라서, DHX 지지통 상단을 넘어서는 고온 풀 소듐 온도는 기 수행 연구[6]를 통해 정상운전 중 고온 풀 자유표면 요동에 의한 DHX 지지통 내부로의 고온 소듐 유입 방지를 위한 고온 풀 소듐 자유표면 요동 폭을 감안하여 약 547.86°C로 설정하였으며, DHX shell측 고온 풀 소듐 유입온도와 함께 또 하나의 고정 경계조건 가능 인자인 냉각용 공기 입구온도는 KALIMER-150[5] 설계 및 해석 경험을 토대로 40°C로 설정하였다.

3. PDRC 계통 설계인자 특성 분석

3.1 계통 기본 설계인자 상관관계 설정

KALIMER-600 PDRC 계통의 설계인자간 기본 상관관계는 그림 4와 같이 고온 풀에서 공기로 전달되는 3개의 별도 열제거 회로에 대하여 설정할 수 있다. 즉, PDRC 전열 계통은 PHTS 내부의 1차 소듐 순환 루프와 제열용 소듐루프가 소듐-소듐 열교환기(DHX)를 경계로 배치되어 있으며, 제열용 소듐 루프와 공기측은 소듐-공기 열교환기(AHX)를 경계로 배치되어 있다. 따라서, 각각의 전열회로는 상기 제시한 바 있는 경계조건인 고온 풀 소듐 온도와 공기 입구 온도를 기준으로 하여 설계 인자 변화에 의해 다양한 값을 가질 수 있다. 이 경우, 각 전열 회로의 온도 분포를 토대로 전체 PDRC 계통의 온도 분포를 개념적으로 도시하면 그림 5와 같이 나타낼 수 있다. 그림 5는 경계조건으로 주어진 공기측 입구온도(40°C)와 PHTS 소듐 고온 풀 온도를 고정시킨 상태에서 나타날 수 있는 다양한 온도배치를 개념적으로 도시한 그림으로, 제열용 소듐 루프 측의 온도 배치는 일단 DHX shell측을 통과하면서 에너지를 상실하는 저온 소듐의 온도에 영향을 받게 되고, 이 후 DHX를 통해 가열된 제열용 소듐 루프 내부의 고온 소듐은 공기측 출구 온도에 영향을 미치게 되면서, 3개의 전열 회로가 결국은 일련의 전열 메커니즘에 의해 상호 보완적으로 구성되어 있음을 볼 수 있다. 이는 결국 3개의 전열 회로에 대하여 온도, 유량 열교환기의 UA 등이 서로 맞물려 계산되어야 함을 의미하는 것으로, 그림 5의 미지수 온도들(T_{PC}, T_{LH}, T_{LC}, T_{AH})을 결정하기 위해서는 3개의 전열회로에 흐르는 유체들에 대한 유량 조건과 열교환기 특성값(UA_{DHX}, UA_{AHX}) 등이 종합적으로 고려되어야 함을 단적으로 보여주고 있다. 따라서, 본 연구에서는 이와 같은 PDRC 계통의 기본 성능 요건 설정을 위해서 설계점(design point)에서의 정상상태 계통 전열 상관관계를 다음과 같이 설정하였다.

$$Q_{DHX}^{rej} = \{UA\}_{DHX} \cdot \Delta T_{LMTD}(T_{PH}, T_{PC}, T_{LH}, T_{LC}) \tag{1}$$

$$Q_{AHX}^{rej} = \{UA\}_{AHX} \cdot \Delta T_{LMTD}(T_{LH}, T_{LC}, T_{AH}, T_{AC}) \tag{2}$$

$$Q_{DHX}^{rej} = \dot{m}_P \cdot c_P(\overline{T}_P) \cdot (T_{PH} - T_{PC}) \tag{3}$$

$$Q_{Loop}^{rej} = \dot{m}_L \cdot c_P(\overline{T}_L) \cdot (T_{LH} - T_{LC}) \tag{4}$$

$$Q_{AHX}^{rej} = \dot{m}_a \cdot c_P(\overline{T}_a) \cdot (T_{AH} - T_{AC}) \tag{5}$$

식 (1)~(5)에서 하첨자 P, L 및 A는 각각 소듐 풀, 제열용 소듐 루프 및 공기측을 의미하며, 역시 하첨자 H 및 C는 각각 고온 측과 저온 측을 나타낸다. 또한, $\dot{m}$ 와 Cp는 각각 전열회로에서의 질량유량[kg/s] 및 열용량(heat capacity : kJ/kg-K)이며, Cp의 경우 온도의 함수로 주어진다. 한편, 상기 식들에서의 전열량들은 PDRC 설계점(design point)에서의 정상상태 조건에 의해 다음 관계를 만족한다.

$$(Q_{DHX}^{rej} = Q_{AHX}^{rej} = Q_{Loop}^{rej}) \equiv Q_{PDRC} \tag{6}$$

PDRC 계통의 전열량 상관관계와 함께 계통 설계인자 결정에 지배적인 영향을 미칠 것으로 예상되는 각 전열 회로에서의 계통 유량조건은 계통 설계와 관련하여 기하 형태, 기기간의 수두차, 기기배치 등에 의해 영향을 받게 되는 유동저항(flow resistance) 또는 압력손실(pressure drop)에 의해 결정되므로, KALIMER-600 PDRC의 기기 배치 및 대략적인 계통

기하형태를 그림 6과 같이 설정하여 PDRC 설계점에서의 정상상태 계통 설계인자 도출을 위한 상관관계를 설정하였다. 그림 6의 각 유로에서의 소듐 및 공기 순환의 구동력은 모두 밀도차에 의한 자연 순환이며, 따라서 기기 배치와 관련된 수두차와 계통의 유동저항(C)이 자연순환 유량 형성 및 이에 기인하는 계통의 전반적인 온도 배치에 가장 지배적인 영향을 미칠것으로 예상되는 바, 상기 세 유로에 대하여 다음 식(7)~(9)와 같은 유동 상관관계를 추가적으로 설정할 수 있다.

$$C^P \cdot \dot{m}_P^2 = \Delta H(T_{PH}, T_{PC}, Z_C^+, Z_C^-, Z_D^+, Z_D^-, \beta_{TP}) \quad (7)$$

$$C^L \cdot \dot{m}_L^2 = \Delta H(T_{LH}, T_{LC}, Z_D^+, Z_D^-, Z_A^+, Z_A^-, \beta_{TL}) \quad (8)$$

$$C^A \cdot \dot{m}_a^2 = \Delta H(T_{AH}, T_{AC}, Z_A^+, Z_A^-, Z_{chm}^+, Z_{chm}^-, \beta_{TA}) \quad (9)$$

식에서, C는 소듐 및 공기의 유동저항으로 단위는 [Pa-sec^2/kg^2]이며, 상첨자 P, L, A를 사용하여 각각의 전열회로를 나타내었다. 또한, ΔH 는 자연순환 유량 형성에 영향을 미치는 기기간의 수두차로 온도 및 높이(Z)의 함수로 나타낼 수 있으며, 각 기기를 의미하는 하첨자 C, D, A 및 chm은 각각 원자로심, DHX, AHX, 및 공기굴뚝을 의미하고 각각의 상/하단을 상첨자 +와 -를 사용하여 구분하였다. 또한, β_T 는 온도변화에 의한 물성치 변화항을 개념적으로 표기하기 위해 도입한 것으로, 실제 계산 중에는 다수의 반복계산(iteration) 과정에서 매질의 온도변화 항을 고려함으로써 각 변수간의 관계를 실질적으로 모사하기 위하여 사용된다. 따라서, KALIMER-600 PDRC 계통 설계점에서의 정상상태 온도배치 및 유량 조건, 그리고 열교환기 특성변수 UA를 결정하기 위해서는 상기 식 (1)~(5)와 식 (7)~(9)의 조건식 8개가 활용될 수 있으며, 이 중 미지수는 PDRC 계통 온도 중에서 경계조건으로 주어지는 고온 풀 소듐 온도(T_{PH})와 공기측 입구온도 (T_{AC})를 제외한 온도변수 4개, DHX와 AHX에 대한 {UA}값 2개, 그리고 각 전열회로에서의 유량($\dot{m}$) 변수 3개의 총 9개가 된다. 따라서, 조건식이 1개 부족한 샘이므로 설계시 경제성을 고려한 열교환기의 UA 값이 최소화 될 수 있도록 식 (10)과 같이 DHX와 AHX의 열교환기 {UA} 값의 비를 나타내는 자유도, R_{UA}를 도입하여 조건식과 미지수의 개수를 동일하게 하였으며, 자유도 값은 초기 물리적으로 타당한 값을 입력으로 사용하고 반복계산을 통해 차후 설계과정에서 최적화할 수 있도록 설정하였다.

$$R_{UA} = \frac{\{UA\}_{DHX}}{\{UA\}_{AHX}} \quad (10)$$

본 연구에서는 상기 조건식 9개를 사용하여 PDRC 설계점(design point)에서의 정상상태 온도, 유량 및 열교환기 UA 값의 해석해(analytic solution) 계산을 위한 해석 방법론을 개발하고, PDRC 계통 각 부분에서의 최적화된 온도배치 및 설계인자 계산을 수행하였다.

3.2 PDRC 계통 각 유로의 유동모형 설정

3.2.1 PDRC 계통 자연순환 수두차 계산

KALIMER-600 PDRC 계통의 전체적인 기기간 수직 배치도는 앞서 제시한 바 있는 그림 6과 같으며, 자연순환 유로 (A), (B) 및 (C)에 대한 자연순환 수두차(natural circulation head)는 다음과 같이 수식화할 수 있다.

$$\Delta H_G^P = -\oint \rho g\, ds = -\sum_i \rho_i\, g\, \Delta Z_i = -g \cdot \left[\rho_{PC} \cdot \left(Z_D^- - Z_C^- \right) - \rho_{PH} \cdot \left(Z_D^+ - Z_C^+ \right) + \bar{\rho}_P \cdot \left\{ \left(Z_C^+ - Z_C^- \right) - \left(Z_D^+ - Z_D^- \right) \right\} \right] \tag{11}$$

$$\Delta H_G^L = -\oint \rho g\, ds = -\sum_i \rho_i\, g\, \Delta Z_i = -g \cdot \left[\rho_{LC} \cdot \left(Z_A^- - Z_D^- \right) - \rho_{LH} \cdot \left(Z_A^+ - Z_D^+ \right) + \bar{\rho}_L \cdot \left\{ \left(Z_D^+ - Z_D^- \right) - \left(Z_A^+ - Z_A^- \right) \right\} \right] \tag{12}$$

$$\Delta H_G^A = \sum_i \rho_i\, g\, \Delta Z_i = g \cdot \left[\bar{\rho}_a \cdot \left(Z_A^+ - Z_A^- \right) + \rho_{AH} \cdot \Delta Z_{chm} \right] \tag{13}$$

식에서, ΔH_G 는 각 전열유로에서의 자연순환 수두차를 의미하며, 상첨자 P, L 및 A를 사용하여 구분하였다. 또한, ρ 와 g는 각각 매질의 밀도(kg/m^3)와 중력 가속도(m/sec^2)를 의미하며, 하첨자 H와 C는 각각 고온측과 저온측을 의미한다. 본 수식화 과정에서는 전체 유로를 고온측과 저온측으로만 단순화하여 계산에 고려하였으므로, $\bar{\rho}$ 는 원자로심, DHX 및 AHX 기기 내부유로에서의 평균 밀도를 의미한다.

3.2.2 PDRC 계통 압력손실 모형

KALIMER-600 PDRC의 각 전열 유로를 흐르는 자연순환 유량 계산을 위해서는 식 (7)~(9)에 제시된 PDRC 전체 계통의 유동 상관관계로부터 각 유로의 유동저항(C)를 계산해야 하며, 유동저항과 유량간의 관계는 다음 식 (14)와 같은 관계를 갖는다.

$$\dot{m} = \sqrt{\frac{\Delta H_G}{C}} \quad [kg/\sec] \tag{14}$$

식에서, ΔH_G 는 각 전열유로에서의 자연순환 수두차를 의미하며, 유동저항, C는 [Pa-kg^2/sec^2]의 단위를 갖는다. 따라서, PDRC 각 유로에서의 자연순환 유량을 계산하기 위해서는 그림 6과 같은 “원자로심- 고온풀(pool) - DHX shell측 – 저온풀(pool) - 원자로심”으로 연결되는 자연순환 소듐 유로(A)와 “DHX tube측 – 제열용소듐루프 고온관 – AHX 전열관측 - 제열용소듐루프 저온관 – DHX tube측”으로 연결되는 자연순환 소듐 유로(B), 그리고 공기 열교환기 shell측의 하부로부터 유입되는 찬 공기에 의해 상방향으로 진행하면서 AHX 전열관을 냉각하고 공기 굴뚝을 통해 대기중으로 방출되는 자연순환 공기 유로(C)에 대한 유동저항, C를 활용한다.

3.2.2.1 PHTS 풀 소듐 자연순환 유량 계산

그림 6의 자연순환 소듐 유로(A)에 대한 PHTS 자연순환 유동저항은 기 수행연구[6]를

통해 계산된 바 있는 KALIMER-150 IHX shell측 및 전열관측 유동저항 설정 결과를 참고하여 DHX shell측 및 노심의 유동저항, 그리고 이와 함께 과도기 PHTS 자연순환 유동에 영향을 미치는 또하나의 유동저항 요소인 풀 구조물(pool structure) 및 여타 부수적인 유동 방해 요소를 정량화한 C_{plst}로 표현되며, 이들 세가지 주된 유동저항 요소를 고려한 KALIMER-600 PHTS의 총 유동저항은 식 (15)와 같이 계산되고, 이를 활용한 PHTS 소듐의 자연순환 유량은 PHTS 풀 내부 수두차(ΔH_G^P)를 반영하여 식 (16)과 같이 계산된다.

$$C_{PHTS,tot}^{SS} = C_{DHX,sh} + C_{core}^{SS} + C_{plst} \tag{15}$$

$$\dot{m}_P = \sqrt{\frac{\Delta H_G^P}{C_{PHTS,tot}^{SS}}} \tag{16}$$

3.2.2.2 PDRC 제열루프 소듐 자연순환 유량 계산

KALIMER-600 PDRC의 제열용 소듐루프에서의 유동저항은 DHX 전열관 측에서의 유동저항과 AHX 소듐 전열관 측에서의 유동저항, 그리고 제열용 소듐 루프 고/저온관에서의 마찰손실(friction loss) 및 형상변화 손실(form loss)로 구성되며, 기 수행 연구[6]를 통해 PDRC 제열용 소듐루프 전체의 소듐 자연순환 유동에 영향을 미치는 유동저항은 식 (17)과 같이 상기 유동저항의 합으로 정리할 수 있으며, 앞서 제시한 AHX와 DHX 간의 수두차(ΔH_G^L)를 고려하여 KALIMER-600 PDRC의 제열용 소듐루프에서의 소듐 자연순환 유량은 식 (18)과 같이 계산할 수 있다.

$$C_{f,tot}^{Loop} = C_{DHX,tube}^{Loop} + C_{f,pipe}^{Loop} + C_{f,tube}^{AHX} \tag{17}$$

$$\dot{m}_L = \sqrt{\frac{\Delta H_G^L}{C_{f,tot}^{Loop}}} \tag{18}$$

3.2.2.3 AHX shell측 공기 자연순환 유량 계산

KALIMER-600의 소듐-공기 열교환기(AHX)는 PDRC 제열용 소듐루프와 연결된 소듐 전열관이 나선형(helical) 구조로 회전하면서 전열관 번들을 이루고 있는 형상이며, AHX의 하부로부터 유입된 찬 공기가 상방향으로 진행하면서 전열관 번들의 외부를 냉각하고, 가열된 공기는 AHX 상부에 연결된 공기 굴뚝을 통해 대기중으로 방출되는 형태이다. 이 때의 공기측 자연순환 유동의 구동력은 전열관 번들의 외표면으로부터 가열된 뜨거운 공기와 AHX 하부로부터 유입되는 찬공기의 밀도차에 의해 제공된다. 따라서, AHX shell측의 공기 자연순환 유량 계산을 위해서는 공기측의 수두차와 함께 유동저항의 계산이 요구된다. 이와 같은 AHX shell측 및 공기굴뚝에서의 압력손실 및 자연순환 유동에 영향을 미치는 유동저항은 식 (19)와 같이 AHX shell측 공기유로 및 공기 굴뚝에서의 유동저항의 합으로 정리할 수 있으며, 공기측 자연순환 유동의 구동력인 AHX shell측의 전체 수두차(ΔH_G^A)를 고려하여 AHX shell측 및 공기 굴뚝에서의 공기 자연순환 유량은 (20)과 같이 계산된다.

$$C_{f,tot}^{air} = C_{sh,air}^{AHX} + C_{chm,air}^{AHX} \tag{19}$$

$$\dot{m}_a = \sqrt{\frac{\Delta H_G^A}{C_{f,tot}^{air}}} \tag{20}$$

4. KALIMER-600 PDRC 계통 설계인자 설정

본 절에서는 KALIMER-600 PDRC의 계통의 유동 해석모형을 앞서 기술한 계통 각 부분의 온도배치 계산을 위한 상관관계와 연계함으로써, 계통 전체의 설계인자의 해석해(analytic solution) 계산시 요구되는 반복계산 수행을 위한 전산화 작업을 수행하는 일련의 과정을 기술하였다. PDRC 계통 설계인자의 해석해(analytic solution) 계산을 위해서는 계통의 설계인자간 상관관계를 활용하여 반복계산에 의해 비선형 9원 연립 방정식을 풀게 된다. 이 때, 계통의 온도 변화에 의한 영향은 반복계산에 의해 지속적으로 계산에 반영되며, 수치해석 방법으로는 비선형 다원 연립방정식에 대한 Newton-Rapson Method[7] (Newton-Rapson Method with Multiple Equations and Unknowns)를 사용하여 계산을 수행하였다. 이를 위해서는 상기 계통 온도배치 및 유동 해석모형, 그리고 열교환기 특성인자 등의 상관관계를 연립방정식화 해야 하며, 일반적으로 $N \times N$ matrix 형태는 식 (21)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ f_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \frac{\partial f_1}{\partial x_3} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_N} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2}{\partial x_3} & \cdots & \frac{\partial f_2}{\partial x_N} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x_1} & \frac{\partial f_3}{\partial x_2} & \frac{\partial f_3}{\partial x_3} & \cdots & \frac{\partial f_2}{\partial x_N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_N}{\partial x_1} & \frac{\partial f_N}{\partial x_2} & \frac{\partial f_N}{\partial x_3} & \cdots & \frac{\partial f_N}{\partial x_N} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \Delta x_3 \\ \vdots \\ \Delta x_N \end{pmatrix} \tag{21}$$

식에서 얻고자 하는 해석해(analytic solution)는 결국 $\Delta x_1 \sim \Delta x_N$ 이 되며, 이와 같은 관계를 토대로 수치 해석적으로 PDRC 계통 설계인자간 상관관계로부터 해석해(analytic solution)를 계산하게 된다. 이 때, 각 연립방정식의 변수들은 계통 온도변화의 함수로 주어지므로 해석해의 계산시에는 전산화 작업을 통해 온도 변화 항에 대한 영향을 각 계산 단계별로 수정하여 반영해야 한다. 따라서, 이와 같은 계산 과정의 수행을 위해 KALIMER-600 PDRC 계통의 소듐과 공기에 대한 온도 및 압력별 물성치 계산 루틴을 전산화 작업의 일환으로 부프로그램화 하였으며, Newton-Rapson Method를 사용한 수치 해석 방법의 부프로그램과 함께 반복 계산을 수행하도록 하였다. 이와 같은 방법을 사용하여 본 연구에서는 KALIMER-600 PDRC 계통의 정상상태 설계인자 해석해(analytic solution)를 계산하기 위한 전산해석 프로그램, POSPA (Passive-safety grade decay heat removal circuit Overall System Performance Analyzer) 코드를 개발하였으며, POSPA 코드의 전체적인 계산 흐름도는 그림 7에 도시하였다. 또한, 개발된 전산해석 코드를 활용하여

KALIMER-600 PDRC 계통의 각 부분별 온도배치 및 유량, 그리고 DHX 및 AHX의 UA 값을 계산하였으며, 계산 결과를 표 1에 제시하였다. 전산해석 결과, 각 부분별 온도, 유량 및 열교환기 특성인자 등은 물리적으로 타당한 값을 가지고 있음을 확인할 수 있었으며, POSPA 계산 결과에 의해 수렴에 성공한 값을 기준으로하여 이 값에 대한 각 Iteration 단계별로 계산된 값의 비를 도시한 그림 8을 통해 전산해석시 해의 수렴성을 확인하였다. 그림 8(a)와 그림 8(b)는 각각 PDRC 계통의 각 부분별 온도배치 및 유량변화 전산해석 수렴성을 도시한 것으로, 계산 결과의 수렴성은 불확실성이 상대적으로 클 것으로 예상되는 초기 가정치 설정에도 불구하고 20회 내외의 최대 Iteration 횟수에 의해 보수적으로 설정한 수렴조건($\varepsilon_{diff} < 10^{-6}$)을 충분히 만족시키고 있음을 확인하였다. 본 연구에서 수행한 KALIMER-600 PDRC 계통 설계인자 설정 방법론은 계통 설계의 지속적인 수행 과정에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

피동 붕괴열 제거 회로 (Passive Decay heat Removal Circuit ; PDRC) 개념을 활용하는 열출력 1589.3 MWth인 KALIMER-600의 잔열제거계통 설계를 위하여 계통 설계특성 분석을 통해 설계점(design point)에서의 정상상태 PDRC 계통 설계인자를 설정하였다. PDRC 계통은 노심-원자로 풀-DHX-제열용 소듐루프-AHX로 이어지는 제열 경로를 통해 계통의 열을 최종 열침원인 공기로 제거하므로, 각각의 전열 회로에 대한 해석을 통해 계통 설계인자를 설정하게 된다. 이를 위해서는 PDRC를 통한 과도기 요구 제열용량의 설정 및 계통 설계인자 간의 상관관계 분석이 필수적이므로, PDRC 계통 설계점에서의 정상상태 설계인자 설정은 계통의 유량, 온도배치, 그리고 DHX와 AHX의 열교환기 특성인자 등에 대한 종합적인 고려를 통해 수행되었으며, 비선형 9원 연립 방정식 형태로 구성되는 계통 설계인자간의 상관관계를 효과적으로 반영하기 위하여 전산해석 프로그램, POSPA를 개발하여 계통 설계인자 설정 작업에 활용하였다. POSPA 코드 계산 결과, 계산의 수렴성은 불확실성이 상대적으로 클 것으로 예상되는 초기 가정치 설정에도 불구하고 약 17번의 최대 Iteration 횟수에 의해 보수적으로 설정한 수렴조건을 충분히 만족시키고 있음을 확인하였으며, 이를 통해 계산된 정상상태 설계점의 PDRC 계통 설계인자가 물리적으로 타당함을 확인할 수 있었다. 본 연구를 통해 개발된 KALIMER-600 PDRC 계통 설계인자 설정 방법론은 향후 KALIMER-600 PDRC 계통 설계에 유용하게 활용 가능할 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 주관한 원자력 중장기 연구과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] 어재혁 외, "복사구조물을 이용한 액체금속로 잔열제거 용량증진 타당성 분석", 한국원자력학회 2002 추계학술발표회 논문집 (2002)

[2] 어재혁 외, "대용량 액체금속로 잔열제거 용량 특성 연구", 한국원자력학회 2003 춘계학술발표회 논문집 (2003)
[3] T. M. Darrington, "Non-Site-Specific safety Report", EFR Associates Draft, TOME1, FRAMATOME-Division NOVATOME (1993)
[4] T. M. Darrington, "NSSSR-Nuclear Island and Division Concept (Chap.5.1)", EFR Associates Draft, TOME2, FRAMATOME-Division NOVATOME (1993)
[5] 한도희 외, "KALIMER Conceptual Design Report", Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI/TR-2204/2002 (2002)
[6] 어재혁, "KALIMER-600 피동 잔열제거계통 설계점의 계통 설계인자 계산 방법론 개발",KAERI/TR-02653/2004
[7] W.F. Stoecker, “Design of Thermal Systems”, 3rd ed., McGRAW-Hill International Editions (1989)

표 1. KALIMER-600 PDRC 정상상태 설계인자 계산 결과 비교

Description	Unit	Value	Remarks
Number of PDRC Loop	EA	2	Design Data
Number of DHX/AHX per Loop	EA/EA	2/2	Design Data
Total Required PDRC heat removal rate, $Q_{PDRC}^{req,tot}$	MWth	12.09	BC
Steady State Reached at time	hour	10	BC
POSPA Numerical Characteristics			
- Numbe of Iterations	-	21	
- Maximum % Difference	%	1.964E-10	
POSPA code Calculation Results			
{UA}_DHX	kW/°C	107.29	
{UA}_AHX	kW/°C	21.25	
{LMTD}_DHX	°C	56.35	
{LMTD}_AHX	°C	284.55	
PHTS hot pool Temperature	°C	547.86	BC
PHTS cold pool Temperature	°C	517.24	
PDRC hot leg Temperature	°C	326.12	
PDRC cold leg Temperature	°C	288.70	
AHX shell-side air inlet Temperature	°C	40.0	BC
AHX shell-side air outlet Temperature	°C	234.25	
PHTS pool sodium mass flowrate	kg/sec	37.13	
PDRC loop sodium mass flowrate	kg/sec	24.67	
AHX shell-side air mass flowrate	kg/sec	30.53	
PHTS pool total flow resistance	$Pa\text{-}s^2/kg^2$	1.981	
PDRC loop total flow resistance	$Pa\text{-}s^2/kg^2$	14.636	
AHX air-side total flow resistance	$Pa\text{-}s^2/kg^2$	0.3	
PHTS Pool Net Developing head	kPa	2.731	
PDRC loop net developing head	kPa	8.910	
AHX air-side developing head	kPa	0.280	

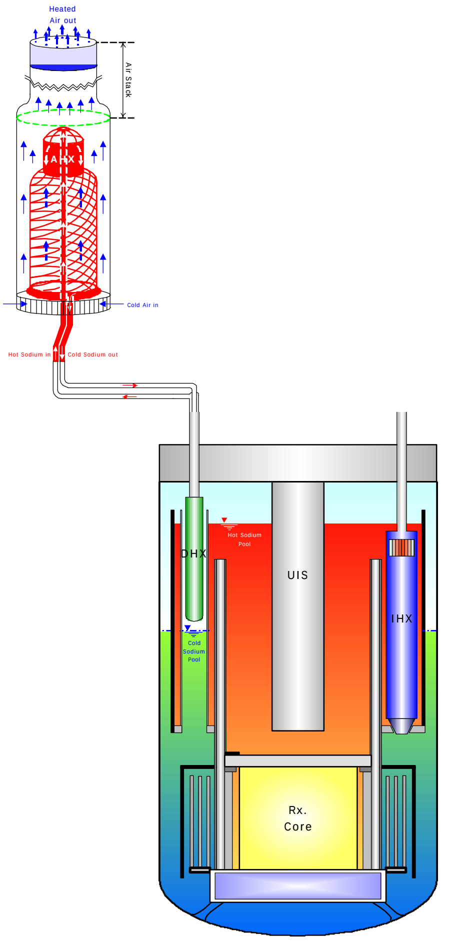


그림 1. KALIMER-600 PDRC 계통 개념도

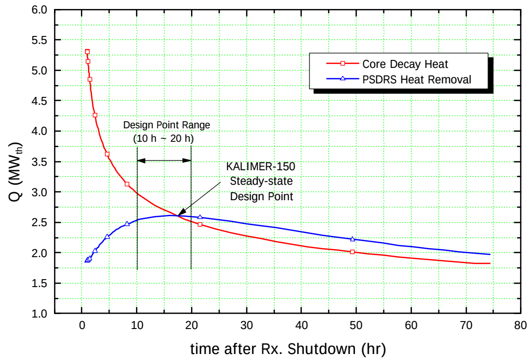


그림 2. KALIMER-150 설계점 제열량 변화

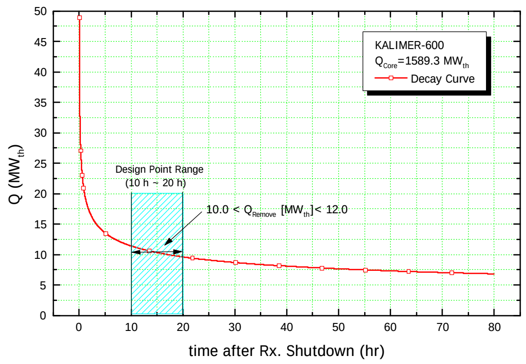


그림 3. KALIMER-600 PDRC 설계점 요구 제열용량

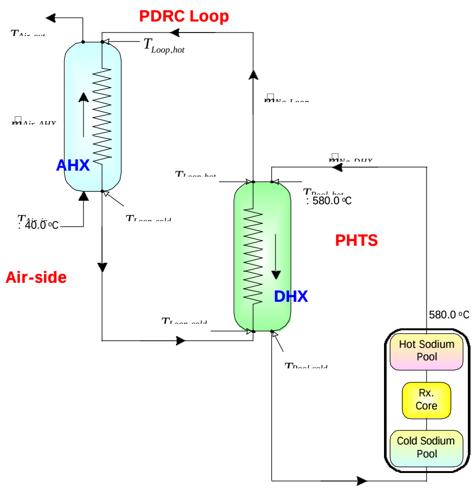


그림 4. KALIMER-600 PDRC 전열 회로도

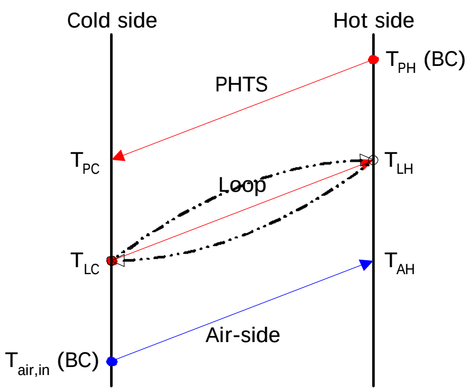


그림 5. KALIMER-600 PDRC 온도분포 개념도

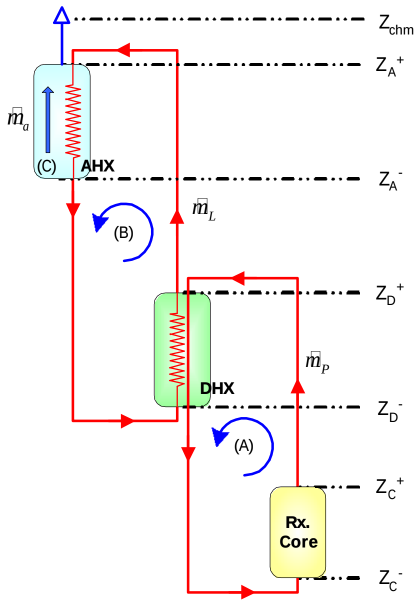


그림 6. PDRC 계통 수직배치 개략도

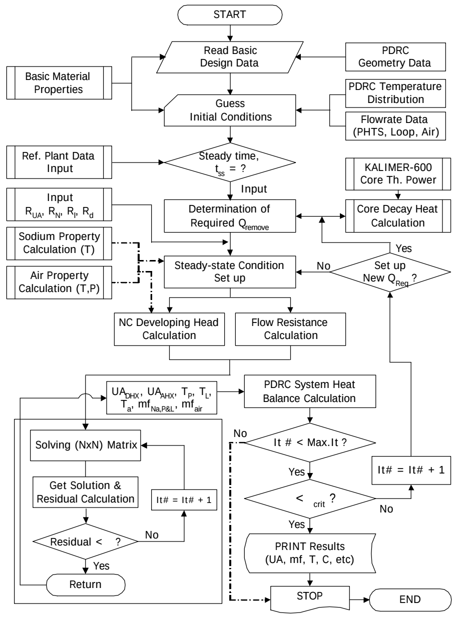
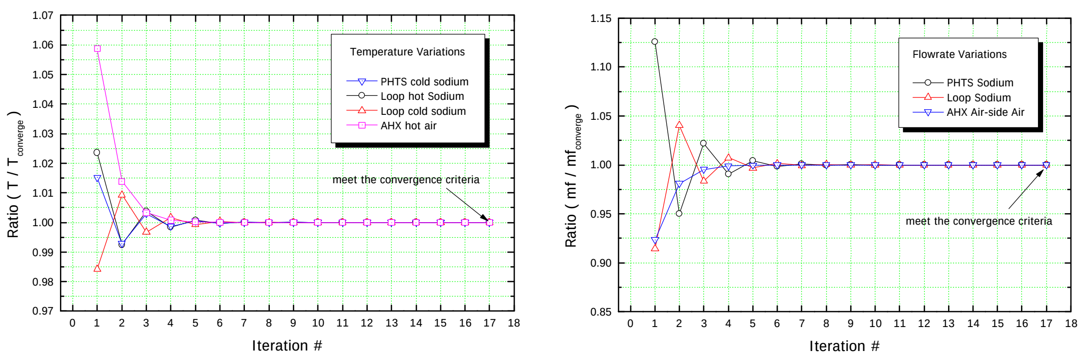


그림 7. POSPA 코드 계산 흐름도 (Flowchart)



(a) PDRC 계통 온도변화 (b) PDRC 계통 유량변화

그림 8. POSPA 코드 계산 결과 수렴성 비교