2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

대용량 액체금속로 잔열제거 용량 특성 연구

A Study on the Characteristics of the Decay Heat Removal Capacity for a Large Thermal Rated LMR Design

어재혁, 김의광, 김성오

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

풀(pool)형 액체금속로인 KALIMER의 잔열제거계통 설계 특성 및 제열 방식에 따른 제열용량을 정량적으로 분석하고, 제열용량과 가능 최대 열출력의 상관관계를 분석하여 잔열제거 측면의 대용량 액체금속로 설계 타당성을 분석하였다. 원자로 열출력 1,000 MWth 이상의 대용량 액체금속로의 잔열제거계통은 제열용량 확보를 위해 원자로 풀로부터 직접 열을 제거하는 풀 직접 냉각 방식이 적절하며, 정상운전 중의 열손실 및 피동 개념의 작동 신뢰성 부족 등의 단점 극복을 위해 완전 피동 개념의 풀 직접 냉각 방식 (PDRC ; Passive Decay Heat removal Circuit) 개념을 설정하였다. PDRC 개념은 소듐-소듐 열교환기를 고온 풀이 아닌 저온 풀 상부에 설치하여 정상운전 중에는 소듐과의 직접 접촉을 방지하고, 정상 열제거원 상실 사고 발생시에만 고온 소듐의 직접 접촉에 의한 본격적인 열제거를 수행할 수 있도록 배치하여 정상운전 중의 열손실을 최소화 하는 개념으로, 운전자의 조치 또는 외부 구동신호(operation signal) 등을 배제시키는 완전 피동 개념 적용이 가능한 대용량 잔열제거 계통 설계 개념이다. 본 연구를 통해 설정된 PDRC 개념은 향후 열출력 1,500MWth 급의 KALIMER-600 설계시 유용하게 사용 가능함을 확인하였다.

Abstract

The design characteristics and the decay heat removal capacity according to the type of DHR (Decay Heat Removal) system in LMR are quantitatively analyzed, and the general relationship between the rated core thermal power and decay heat removal capacity is created in this study. Based on these analyses results, a feasibility of designing a larger thermal rating KALIMER plant is investigated in view of decay heat removal capacity, and DRC (Direct Reactor Cooling) type DHR system which rejects heat from the reactor pool to air is proper to satisfy the decay heat removal capacity for a large thermal rating plant above 1,000 MWth. Some defects, however, including the heat loss under normal plant operation and the lack of reliance associated with system operation should be resolved in order to adopt the total passive concept. Therefore, the new concept of DHR system for a larger thermal rating KALIMER design, named as PDRC (passive decay heat removal circuit), is established in this study. In the newly established concept of PDRC, the Na-Na heat exchanger is located above the sodium cold pool and is prevented from the direct sodium contact during normal operation. This total passive feature has the superiotity in the aspect of the minimizing the normal heat loss and the increasing the operation reliance of DHR system by removing either any operator action or any external operation signal associated with system operation. From this study, it is confirmed that the new concept of PDRC is useful to the designing of a large thermal rating power plant of KALIMER-600 in view of decay heat removal capability.

1. 서 론

풀(pool)형 액체금속로 잔열제거계통은 원자로 열출력에 따라 계통 구성 및 열제거 방식에서 많은 특성 차이를 나타낸다. 해외에서 개발되었거나 개발 중인 노형들에 대하여 원자로 열출력에 따른 잔열제거계통의 특성을 분석한 결과, 각각의 노형들은 원자로 출력 및 계통 특성에 의해 고유의 잔열제거계통을 갖추고 있으며, 대부분의 경우에 안전성을 고려한 자연순환 방식의 붕괴열 제거계통을 채택하고 있다. 특히, 풀(pool)형 액체금속로 중에서 열출력 1,000 MWth 이하의 중소형 원자로는 대부분 RVACS (Reactor Vessel Auxiliary Cooling System)라고 불리는 원자로용기(RV) 직접 냉각 방식을 채택하고 있으며, 열출력이 1,000 MWth 이상인 대용량 원자로에서는 주로 DRC (Direct Reactor Cooling) 형태의 풀 직접 냉각 방식의 노심 붕괴열 제거계통을 사용하고 있다. 한국형 액체금속로인 노심 열출력 392.2 MWt의 KALIMER (Korea Advanced LIquid METal Reactor)[1]는 정상 열제거원 상실사고시 계통의 열을 신속히 제거하기 위한 잔열제거계통으로 PSDRS (Passive Safety-grade Decay heat Removal System)이라 불리는 원자로용기 직접 냉각방식의 비상 잔열제거계통을 보유하고 있으며, 사고시 72시간의 grace time을 갖는 완전한 피동 개념으로 설계되어 있다.

본 연구에서는 잔열제거 용량 확보 측면에서의 KALIMER 원자로 열출력 증진 가능성을 조사하기 위하여 기 수행 연구의 일환으로 복사구조물 설치에 의한 제열용량 증진 및 이에 따른 가능 최대 열출력 변화 경향을 분석하고, 이를 토대로 원자로 열출력 1,000MWth 이상의 대용량 원자로 설계시 적합한 풀 직접 냉각방식 잔열제거계통의 개념 및 소듐-소듐 열교환기(DHX), 소듐-공기 열교환기(AHX) 등의 대략적인 크기를 분석하여 적용 타당성을 검토하였다. 이를 통해 원자로 노심 열출력 증가에 따른 잔열제거계통 설계 특성을 종합하여 KALIMER 열출력 격상시의 완전 피동 개념의 잔열제거계통 설계 가능 개념을 도출하고, 대용량 제열용량 확보를 위한 복사구조물 사용 및 완전 피동 개념의 풀(pool) 직접 냉각방식 (PDRC ; Passive Decay heat Removal Circuit) 잔열제거계통 개념의 제열 특성 및 설계시 요구되는 예비 분석 결과를 기술하였다.

2. 원자로 열출력에 따른 계통특성 및 제열성능 분석

2.1 복사구조물을 활용한 PSDRS 제열성능 증진

고온의 소듐을 냉각재로 사용하는 풀형 액체금속로인 KALIMER의 잔열제거계통은 격납용기(CV) 외벽을 공기의 자연순환에 의해 직접 냉각하는 방식의 PSDRS (Passive Safety-grade Decay Heat Removal System)를 사용한다[1]. 소듐을 이용하는 KALIMER는 높은 운전온도에 의해 대류전열 외에도 복사전열과정이 활발히 일어나므로, 격납용기(CV) 외벽을 직접 냉각하는 PSDRS의 제열용량 증진을 위해서 격납용기(CV)와 공기유로 분리기(air separator) 사이의 공기유로의 복사전열과정을 보다 효율적으로 활용하는 방법을 연구해 왔다. 복사전열량은 기 수행 연구[2]를 통해 공기유로에 복사구조물(radiation structure)을

설치하여 증진 가능한 것으로 나타났으며, 본 연구에서는 복사 전열과정의 효율적인 활용을 위하여 복사구조물 설치시의 제열량 증진효과를 RADST 코드[2]를 이용하여 정량적으로 분석하고, 이를 통해 열출력 증가시의 필요 잔열제거 용량확보 가능성을 평가하였다.

2.1.1 복사전열량 증진을 위한 복사구조물 설치

복사전열량을 증진시키기 위해서는 PSDRS 공기유로에 그림 1과 같이 다수의 작은 vane이 여러 겹으로 밀집된 구조로 구성된 복사 전열면을 설치하게 되며, 이와 같은 각각의 vane 집합체를 복사구조물(radiation structure)이라고 지칭한다. 복사구조물은 기존의 공기유로에 공기 진행 방향에 직각으로 다수를 배치하여 복사 전열량을 증가시키게 되며, 각각의 복사 전열면은 두 조각의 경사진 vane 형태가 좁은 간격으로 반복적으로 배열된 형태로, vane 사이에 공기유로가 형성되어 있어 각각의 vane이 형성하는 면적이 결국은 대류 전열면적(convective heat transfer area)이 되므로 복사와 대류에 의한 열제거가 가능한 구조이다. PSDRS 공기유로의 복사구조물 설치를 실제 설계에 반영할 경우, 크기 및 설치 개수 등은 공기유로의 압력손실(pressure loss)과 최대 복사전열량을 고려하여 이 두가지 인자의 정량적인 분석에 의한 최적화를 통해 설정된다.

2.1.2 복사구조물 설치시의 용량 격상 타당성 분석

본 절에서는 복사구조물 설치시의 제열량 증진효과 분석 결과를 이용하여 KALIMER의 열출력 격상 설계시 전열제거계통 측면에서의 가능 최대 열출력을 계산하였다. 원자로용기 직접 냉각 방식의 잔열제거계통을 사용하는 KALIMER의 열출력을 증진시키기 위해서는 필요 제열용량 확보와 원자로의 크기 증가를 병행하여 고려해야 하며, 이들 인자간의 상관관계를 분석하여 복사구조물 설치시의 열출력 증진 경향을 분석할 필요가 있다. 그림 2는 PSDRS 형태의 잔열제거계통을 사용하는 풀형 소듐 냉각 액체금속로 설계시의 원자로 크기와 원자로 열출력간의 상관관계를 도시한 그림으로, 열출력 1,000MWt 이하의 원자로 설계시에는 계통 내부기기 수용 요건에 의해 원자로 용기의 크기가 결정됨을 알 수 있다. 즉, 열출력 격상 시에는 노심 및 중간열교환기 등의 풀 내부기기 크기가 모두 증가하고 이러한 기기의 수용이 가능하기 위해서는 원자로용기(RV)의 크기가 이에 상응하여 증가해야 하며 원자로의 크기 증가에 의한 전열면적 확대로 인해 필요 잔열제거 용량이 충분히 확보되므로, 1,000MWt 이내의 열출력 증진은 원자로 용기의 크기 증가에 의해서 충분히 실현 가능함을 보여주고 있다.

따라서, 원자로 열출력 격상 설계시의 가능 최대 열출력 계산을 위해서는 복사구조물 설치에 의한 제열량 증진효과를 원자로용기(RV)의 크기 증가와 연계시켜 고려해야 하므로, 본 절에서는 이들 인자간의 상관관계 분석을 통해 KALIMER 열출력 격상시의 가능 최대 열출력을 정량적으로 분석하였다[3]. 분석 결과, 복사구조물 설치에 의해 증가하는 열제거량은 원자로용기(RV) 크기 및 운전온도의 함수로 주어지며[3], KALIMER 열출력 격상시의 원자

로 설계시의 가능 최대 열출력을 그림 3과 같이 도시할 수 있다.

그림 3은 대용량 원자로 설계시의 가능 최대 열출력을 원자로 크기와 운전온도의 함수로 도시한 그림으로, 출력 증가에 의해 크기가 증가할 것으로 예상되는 풀 내부기기를 수용할 수 있는 필요 원자로 크기 곡선과 함께 도시하였다. 그림과 같이 원자로의 가능 최대 열출력은 각 원자로 직경에서의 잔열제거 용량에 상응하는 열출력 곡선과 열출력 별로 풀 내부기기 수용이 가능한 원자로 직경 곡선이 만나는 점에서 결정되므로, 풀 내부기기 수용을 위한 출력 별 필요 원자로 크기 곡선은 일종의 경제성 곡선으로 고려할 수 있다. 따라서, PSDRS만을 사용하는 경우에는 원자로 크기가 증가할수록 가능 최대 열출력 증가 폭이 급격히 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 그림 2에서와 같이 PSDRS식 잔열제거계통을 사용하는 풀형 액체금속로의 경우, 대용량으로 갈 수록 PSDRS 방식의 잔열제거를 위한 필요 전열면적이 풀 내부기기 수용 측면에서 결정되는 전열면적 보다 커지기 때문으로, 열출력이 증가할수록 수렴하는 기기 수용 요건의 원자로 크기로는 필요 제열 용량을 만족시키기 어려워 지기 때문에 가능 최대 열출력이 이에 의해 제한 받는 것으로 판단된다. 따라서, 경제성을 고려하여 원자로 열출력을 증가시키기 위해서는 가능 최대 열출력 곡선이 경제성 곡선과 최대한 높은 출력에서 만나야 한다는 결론을 얻을 수 있다.

이와 같이 PSDRS만을 사용하는 경우에는 가능 최대 열출력 곡선이 원자로 크기 증가에 의해 제약 받는 것과 달리, 복사구조물 설치시에는 앞서 분석한 결과와 같이 원자로용기(RV)의 직경 증가에 의해 가능 최대 열출력이 이에 상응하여 거의 선형적으로 증가하게 된다. 따라서, 동일 조건에 대하여 PSDRS만을 사용하는 경우에 비해 가능 최대 열출력을 증가시킬 수 있으며, 원자로용기(RV) 직경이 클수록, 운전온도가 높을수록 복사구조물 설치에 의해 고출력의 원자로 설계가 가능함을 알 수 있다. 하지만, 소듐을 냉각재로 사용하는 경우, 운전 온도와 관련하여 원자로 직경 증가시 가능 최대 열출력이 점차 감소하는 경향을 나타내며, 또한 현실적으로 필요 잔열제거 용량 확보를 위해 원자로 직경을 무조건 증가시키는 경우에는 풀 내부기기 배치 및 풀 충진을 위한 소듐 양의 급격한 증가로 인해 복사구조물을 설치한다고 하더라도 경제성이 감소할 수 있다. 따라서, PSDRS 형태의 잔열제거계통을 사용하는 소듐 냉각 원자로의 경우에는 경제성을 고려할 때 원자로 직경은 약 12m, 이 때의 원자로 열출력은 약 1,000MWth 정도가 한계라고 할 수 있으며, 해외 계통개념 검토 결과[4]에서도 이러한 경향을 대체적으로 따르고 있음을 알 수 있다. 따라서, 본 연구 결과 및 기 수행 연구[4] 결과를 종합해 볼 때 소듐을 냉각재로 사용하는 원자로용기 직접 냉각방식의 잔열제거계통은 제열용량 및 경제성을 종합적으로 고려하여 열출력 1,000MWth 이하의 중소형 원자로에 주로 사용이 가능하며, 열출력 1,000MWth 이상의 중/대용량 원자로 설계시에는 잔열제거 목적의 제열용량 및 경제성 확보를 위해 풀 직접 냉각 방식(DRC)의 잔열제거 계통 적용이 적절한 것으로 분석되었다.

2.2 풀 직접냉각 방식 잔열제거 계통 개념

PSDRS 형식의 원자로용기 직접 냉각방식 잔열제거계통을 사용하는 경우, 필요 제열용량 확보 및 이를 충족시키기 위한 경제성 관련 문제로 인해 노심 열출력 격상시 1,000MWth 이하로 제한되는 것과 반대로, 풀 직접 냉각방식의 잔열제거계통인 DRC (Direct Reactor Cooling) 계통은 원자로의 크기 요건이 열출력 증가에 따른 풀 내부기기의 크기 수용에 의해서만 제약을 받을 뿐, 제열성능 측면의 전열면적 확보 요건은 존재하지 않기 때문에 원자로용기 직접 냉각 방식의 잔열제거 계통과 비교하여 대용량 원자로 설계시에 적절한 방식이다. 본 절에서는 전기출력 150MWe의 KALIMER[1] 설계를 전기출력 600MWe의 중/대용량 KALIMER-600으로 용량 격상시키는 경우, 효과적인 노심 붕괴열 제거를 위해 완전 피동개념의 풀 직접 냉각방식(Passive Decay heat Removal Circuit ; PDRC) 잔열제거계통 설계 개념을 도입하여 이에 대한 적용 타당성 및 대략적인 계통 구성 특성을 분석하였다.

2.2.1 풀 직접 냉각방식 개념 적용성 분석

대용량 풀형 원자로인 Super Phenix(SPX) 및 EFR(European Fast Reactor) 등에서 사용하고 있는 DRC 개념은 주로 1,000MWth 이상의 대용량 원자로에서의 잔열제거계통으로 사용하고 있으며, 원자로 풀에 담겨 있는 IHX 형태의 소듐-소듐 열교환기(DHX) 및 공기와의 열교환을 위한 소듐-공기 열교환기(AHX)로 구성된다. DRC는 1차계통 고온 소듐 풀에 담겨있는 DHX와 격납돔 외부의 원자로건물 상부에 위치한 AHX간의 별도의 소듐 루프를 형성시켜 DRC 루프에서의 소듐 자연순환으로 계통의 열을 제거하는 개념으로 그림 4와 같이 형상화할 수 있다.

본 연구에서는 150MWe급 KALIMER의 노심 열출력을 격상시킨 KALIMER-600에 PDRC 개념을 적용하기 위하여 유사 풀 직접 냉각방식 잔열제거계통을 사용하고 있는 EFR의 DRC 설계 자료 분석을 선행하여, DRC 계통의 특성 및 장단점 분석을 통해 KALIMER 열출력 격상시의 PDRC 계통 개념을 설정하였다. 먼저 EFR의 DRC 계통은 각 15MWth의 제열 용량을 갖는 완전 피동 개념의 DRC1 루프와 강제대류 냉각 방식을 사용하는 DRC2 루프로 구성되어 있으며, 각각은 완전히 독립적으로 설계 및 운전되어 하나의 작동 실패시에도 나머지 계통이 그 기능을 충분히 발휘할 수 있도록 설계되어 있다. DRC1은 소듐 및 공기의 자연순환을 사용하므로 DRC1 루프의 소듐-소듐 열교환기(DHX)와 소듐-공기 열교환기(AHX)의 높이차를 34m로 매우 높게 설정하여 DRC 루프에서의 충분한 소듐 자연순환 유량 확보를 가능케 하였다. EFR의 DRC 구성기기인 DHX와 AHX의 대략적인 형상 및 크기는 다음 그림 그림 5와 같다.

그림에서와 같이 소듐-소듐 열교환기인 DHX는 성능 측면에서 기본적으로 KALIMER 설계의 중간열교환기(IHX)[1]와 유사한 개념으로 설정하여 DHX를 통해 DRC 루프의 소듐으로 전달되는 열량은 KALIMER의 IHX 경계조건을 적용하여 대략적으로 계산할 수 있다. 또한,

공기 열교환기인 AHX는 EFR의 크기 자료를 이용하여 직경을 3.8m, 그리고 열교환부의 전열관 번들 영역의 높이를 4.9m로 설정하였다. 본 절에서는 DHX 측의 온도 경계조건을 KALIMER IHX와 동일하게 설정하고 AHX측의 제열용량 계산을 위한 전열 표면적은 상기 data를 활용하여 DRC 루프 구성시의 가능 제열용량을 대략적으로 계산하였다. 먼저, 원자로 긴급정지시 1차계통 펌프가 정지하는 경우, 1차계통 소듐 풀의 자연순환에 의해 IHX로 유입되는 소듐의 입/출구 온도는 참고문헌 [1]의 값을 적용하여 각각 524°C와 520°C로 설정할 수 있으며, 이 경우 IHX shell측 소듐의 자연순환 유량을 정상운전 중 소듐유량의 10%로 가정하여[5], 정상 열제거 기능을 상실하여 DRC 루프를 통한 잔열제거만이 이루어지는 경우의 DRC 루프 소듐 입/출구 온도는 각각 510°C와 520°C로 가정하였다[6]. 또한, DRC 루프의 소듐 자연순환 유량은 입/출구 소듐 온도 경계조건을 이용하여 식 (1)과 같이 계산된다.

$$\dot{m}_{Na,DRC} = \sqrt{\frac{\Delta P}{C_{tot}}} \tag{1}$$

식에서 C_{tot} 는 [Pa-sec^2-kg^{-2}]의 단위를 갖는 DRC 루프의 유동저항 계수이며, ΔP 는 각 위치에서의 온도에 따른 소듐 밀도차에 의해 형성되는 수두차로 DRC 루프 소듐 자연순환 유량의 구동력(driving force) 항을 의미한다. 또한, 배관에서의 열손실을 무시하여 DHX를 통해 전달된 소듐의 에너지는 AHX 열교환부 전단까지는 그대로 유지되는 것으로 가정함으로써, 소듐의 온도는 AHX 공기 열교환부 전까지의 520°C의 고온소듐과 이후의 510°C의 저온 소듐으로만 분류하여 해석을 단순화시켰다[6]. 이와 같이 DHX를 통해 DRC 루프로 가해진 열량은 최종 열침원인 공기와의 열교환을 위해 AHX로 전달되며, AHX는 DRC 루프 소듐의 열량을 보다 효율적으로 공기측으로 제거하기 위해 EFR의 경우와 동일하게 helical 형태의 소듐 전열관 형태로 가정하였다. Helical 형태의 소듐 전열관은 동일한 AHX 크기에서 전열관의 길이를 최대한 늘릴 수 있어 전열면적을 극대화할 수 있는 장점을 갖는다. 또한, AHX는 원자로 건물과의 연계성을 고려하여 그 크기가 적절히 설계되어야 하므로 EFR의 구성기기 크기 검토 결과를 활용하여 3.8m x 4.9m 정도의 크기로 설정하였으며, 이러한 사항을 반영하여 AHX의 대략적인 형상을 그림 6에 도시하였다.

AHX를 통해 공기로 제거되는 열량을 계산하기 위해서는 AHX의 총 전열면적을 계산해야 하므로, AHX의 전열관 직경을 0.1m, helical 형태 전열관의 수평 대비 기울기는 10°로 가정하고 이 값을 이용하여 단일 전열관의 길이를 계산하였다. 계산 결과, 약 4m x 5m의 AHX 전열부 크기에 대하여 약 25m의 단일 전열관 설치가 가능하며, 동일 직경 및 높이에 대하여 약 4바퀴 정도 회전하는 것으로 계산되었으며[6], 반경방향으로 다수의 소듐 전열관을 동일한 형상으로 배치하는 경우에는 AHX 전열부 크기 및 DRC 루프 소듐 전열관의 직경을 고려할 때 최대 약 40개의 단일 전열관을 묶어서 설치할 수 있으므로, 전열관의 총 전열면적 증가에 비례하여 제열용량을 증가시킬 수 있다. 따라서, 계산 결과를 토대로 AHX의 가

능 제열용량과 소듐 전열관의 총 표면적 간의 비례관계는 그림 7과 같이 도시할 수 있다.

그림에서와 같이 AHX의 전열관 전열면적을 증가시킬 수록 제열용량은 이에 상응하여 증가하며, 전열부의 원주방향 길이 및 전열관 설치 기울기 등을 고려할 때 최대 약 40개의 소듐 전열관에 해당하는 면적인 310 m^2까지의 제한치까지 DRC 루프 수에 따라 제열용량이 선형적으로 증가함을 볼 수 있다. 또한, 전열관 배치 측면에서 반경방향으로 15^o 정도의 간격으로 전열관을 배치시키는 경우에는 설치 가능한 전열관의 수는 총 24개가 되며, 이 때의 전열관의 총 전열면적이 약 190m^2이므로 이에 해당하는 AHX 한대당 제열량은 약 3.5MWth가 된다. 이는 EFR의 루프당 5MWth 보다 30% 가량 낮은 값으로 충분한 타당성을 갖는 값이며, 계산상의 불확실성을 고려하여 DRC 루프당 3.5 MWth의 제열용량 확보를 DRC 루프 설계의 목표 값(target value)으로 설정할 수 있다. 따라서, 3개의 DRC 루프를 갖는 경우에는 계통의 총 제열용량은 총 10.5MWth에 이르며, 잔열제거계통을 통해 제거되는 과도기 최대 열제거량과 노심의 정격 열출력의 비가 대략적으로 일정한 비율을 갖는 것으로 가정하는 경우에는 KALIMER 설계 자료를 이용하여 최대 제열용량이 정격 출력의 약 0.66% ~ 0.7%에 해당하므로, DRC 계통을 통해 제거되는 열량을 기준으로 잔열제거계통 측면에서의 최대 노심 열출력은 약 1,500MWth까지 가능한 것으로 계산되었다.

2.2.2 PDRC 개념 설정

EFR의 DRC1 루프는 소듐의 고화(freezing) 방지를 위해 원자로 전 운전기간 동안 항상 대기 상태(standby)로 유지되며, 이로 인해 정상운전 중 DRC 루프를 통한 열손실이 최대 약 15 MWt에 이른다. 따라서, EFR의 DRC 루프에 소듐 격리밸브를 설치하거나 공기 열교환기로 유입되는 공기 배관의 입/출구에 damper를 설치하여 정상운전 중의 열손실을 최소화 하고 있으며, 정상 열제거원 상실시에는 운전자 또는 원자로 보호계통(reactor protection system)에서 보내는 자동신호(automatic signal)에 의해서 차단 밸브 및 공기열교환기(AHX)측 damper를 개방하여 본격적인 구동이 시작되도록 설계되어 있다. 하지만, PSDRS와 같은 72시간 grace time 적용 요건을 만족시키기 위해서는 정상 열제거원 상실 사고시 운전자 개입 또는 어떠한 추가적인 작동 개시 신호 없이도 본격적인 붕괴열 제거가 가능한 설계가 요구되므로, DRC 개념은 KALIMER의 원자로용기 직접 냉각방식과 같은 완전 피동 개념의 적용이 어렵다. 따라서, 본 분석에서는 DRC 루프의 작동 환경을 완전한 피동개념으로 설정하기 위하여 정상운전 중의 열손실은 최소화 하면서도 DRC 루프의 차단 밸브를 제거할 수 있는 PDRC (Passive Decay heat Removal Circuit) 개념을 설정하였다.

PDRC 개념은 앞서 분석한 바와 같이 3개의 중간열전달 루프로 구성된 열출력 1,500MWth, 전기출력 600MWe인 KALIMER-600에 대하여 적용 가능하며, 각 루프당 2개의 중간열교환기(IHX)와 2개의 전자펌프(EMP) 그리고, 이와 병행하여 1개의 DHX가 위치할 수 있도록 구성된다. 이와 같은 KALIMER-600의 풀 내부기기 배치의 대략적인 개념도를 그림 8에 도

시하였다.

그림에서와 같이 KALIMER-600은 3개의 루프로 구성되어 있으며, 2개의 IHX와 연결된 중간열전달계통(IHTS)이 1개의 증기발생계통(SGS ; Steam Generator System)과 연결되어 있으며, 각 루프 사이에 1개의 소듐-소듐 열교환기(DHX)가 위치하여 별도의 2차 소듐 루프인 DRC 루프를 통해 공기열교환기(AHX)와 연결된다. 이 때, 1차계통의 방사능을 띤 소듐은 DHX를 통해 순수 소듐 루프와 열교환을 수행하여 최종 열침원인 공기 측으로 열을 제거하므로 공기 열교환기(AHX)에서의 소듐 전열관 결함이 발생하더라도 대기중으로의 방사능 누출 위험은 배제할 수 있다. 그림 9는 PDRC 개념의 풀 내부기기 수직 배치를 개념적으로 도시한 그림이다.

그림에서와 같이 잔열제거를 위한 DHX는 저온풀과 연결된 수직 원형관(DRC hole) 내부에 위치하여 정상운전 중에는 PHTS 전자펌프의 양정(head)에 의해 형성되는 고/저온 풀 간의 액위차로 인해 소듐과 직접 접촉하지 않도록 배치한다. 원형의 DRC hole 상단 높이는 원자로 배플(baffle) over flow slot의 높이와 동일하게 설정하여 정상 열제거원 상실 사고시 PHTS 펌프 작동이 중지되면, 저온풀 소듐의 액위가 상승하여 DHX 전열관과 소듐의 직접 접촉 및 제열원 상실에 인한 고온풀 소듐의 부피 팽창에 의해 KALIMER의 PSDRS 작동 시와 동일하게 고온 소듐이 DRC hole 내부로 유입되도록 설정하였다. 이와 같이 PHTS 펌프 작동 중단으로 고온의 소듐이 저온풀 소듐과 직접 접촉하고 있는 DHX shell측 DRC hole 내부로 유입되면, PSDRS 작동 시와 마찬가지로 DRC hole 내부의 환형공간에 고/저온 풀을 연결하는 소듐 유로가 형성되면서 유량 증가에 의한 shell 측 소듐의 대류 전열계수 증가에 의해 DHX에서의 본격적인 붕괴열 제거가 시작된다. 이 때, DHX 전열관 경계를 통한 전열관 내부로의 본격적인 열 유입으로 인해 DRC 루프의 소듐은 상부인 AHX 측과 하부인 DHX 측 간의 온도차 및 이로 인해 발생하는 소듐 밀도차에 의해 DRC 루프의 순환 유량이 증가하게 되고, 이로 인해 고온의 소듐이 AHX 소듐 전열관 내부로 유입되어 공기측으로의 열제거가 본격적으로 일어나게 된다. 또한, 정상운전 중의 열손실 방지를 위해서 풀 내부에 있는 DRC hole에 위치하는 DHX를 정상운전 중에는 소듐과 직접 접촉하지 않고 저온 풀 상부의 기체 공간에 위치시켜 DRC hole 내벽과 DHX 전열관 간의 복사 전열에 의한 최소한의 전열만을 수행하도록 설계되어 있으므로, EFR의 DRC 개념과 비교하여 열효율 및 작동 신뢰성 측면에서 매우 우수한 설계상의 장점을 갖는다.

또한, 고온풀과 직접 접촉하고 있는 DRC hole의 내표면과 DHX 전열관 간의 복사 전열량을 조절하여 정상운전 중의 전열량 감소로 인한 DRC 루프의 소듐 응고를 방지할 수 있도록 설계하였다. 즉, DRC 루프의 소듐 고화 방지를 목적으로 DRC 루프 최소 순환유량 확보를 위한 최소한의 열량만을 공급할 수 있도록 DRC hole 내표면 및 DHX 전열부의 표면 방사율 및 거리 등을 적절히 설정한다. 또한, AHX 공기 굴뚝의 막힘 또는 전열관 파손 등의 외

부적인 요인에 의해 DRC 루프를 통한 열제거가 원활히 수행되지 못할 경우에는 기존의 KALIMER 설계와 같이 PSDRS에 의한 열제거를 수행할 수 있도록 잔열제거 계통의 Redundancy 개념을 도입하여 잔열제거계통의 작동 신뢰성을 증진시킬 수 있는 장점을 갖는다. 따라서, 노심 열출력 1500MWth의 KALIMER-600 잔열제거계통은 PDRC 개념의 도입으로 인해 보다 안전하고 신뢰성 높은 설계가 가능할 것으로 판단된다.

3. 결론

풀(pool)형 액체금속로인 KALIMER의 용량 격상시 요구되는 잔열제거계통의 설계 특성 및 제열용량을 분석하고, 잔열제거 측면의 가능 최대 열출력과의 상관관계를 분석하였다. 풀형 액체금속로의 잔열제거계통은 원자로 열출력에 따라 크게 원자로용기 직접 냉각 방식과 풀 직접 냉각방식으로 분류할 수 있으며, 각 계통 별로 각각의 장점을 지니고 있으나 원자로용기 직접냉각 방식을 사용하는 경우는 그 제열 성능상의 특성으로 인해 원자로 열출력 1,000MWth 이하의 중소형 원자로에 국한된다. 반면에 풀 직접 냉각방식의 DRC 형태 잔열제거계통은 고온 풀로부터 직접 열교환을 수행함으로써 열교환기의 크기에 상응하여 제열성능이 결정되므로 원자로 크기 및 열출력에 직접적인 제약을 받지 않으나, 정상운전 중의 열손실 등과 피동 개념의 작동 신뢰성 부족 등이 단점으로 지적된다. 따라서, 본 연구에서는 두가지 계통의 장점만을 확보한 완전 피동 개념의 PDRC 계통 개념을 설정하였다. PDRC 개념은 소듐-소듐 열교환기를 고온 풀이 아닌 저온 풀에 설치하여 정상운전 중에는 소듐과의 직접 접촉을 방지하고, 정상 열제거원 상실 사고 발생시에만 고온 소듐의 직접 접촉에 의한 본격적인 열제거를 수행할 수 있도록 배치함으로써 정상운전 중의 열손실을 최소화 하고, 또한 PDRC 루프의 소듐 응고 방지를 위한 표면 방사율 조절을 통해 최소한의 전열만을 허용함으로써 DRC 루프 차단 밸브 등의 제거를 가능케 하여 운전자의 조치 또는 구동 신호(operation signal) 등을 배제시키는 완전 피동 개념 적용이 가능한 대용량 잔열제거계통 설계개념을 정립하였다. 본 연구를 통해 설정된 PDRC 개념은 향후 정량적인 분석을 통해 열출력 1,500MWth의 KALIMER-600 잔열제거계통 설계시 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 주관한 원자력 중장기 연구과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. D. H. Hahn, et al., "KALIMER Conceptual Design Report", Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI/TR-2204/2002, 2002

2. Yoon-Sub Sim, et. al., "Heat Transfer Enhancement by Radiation Structures for an air channel of LMR decay heat removal", Nuclear Engineering and Design 199 (2000) pp.167~186, 2000
3. 어재혁, "복사구조물을 이용한 잔열제거용량 증진 타당성 분석 보고서", 한국원자력연구소, LMR/FS500-ER-02 Rev.0/02 (FS112400), 2002
4. 어재혁, "노형별 잔열제거계통 개념 평가 보고서", 한국원자력연구소, LMR/FS500-ER-01 Rev.0/02 (FS1114000), 2002
5. Hattori, S., Minato, A., "Passive Safety Features in 4S Plant", 2nd ASME-JSME Int. Conf. On Nuclear Engineering-1993(ICONE-1), 1993
6. 어재혁, "액체금속로 잔열제거계통 설계개념 타당성 평가", 한국원자력연구소, KAERI/TR-2271/02, 2002

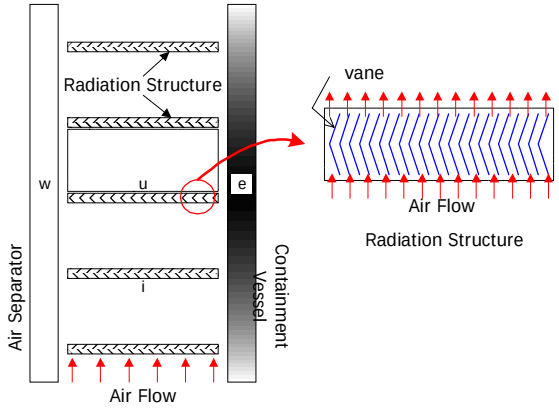


그림 1. PSDRS 공기유로 및 복사구조물(Radiation Structure) 형상

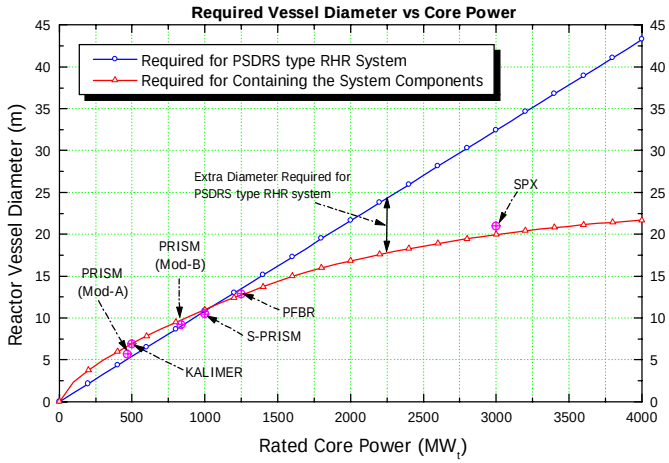


그림 2. 열출력별 원자로 크기 산정

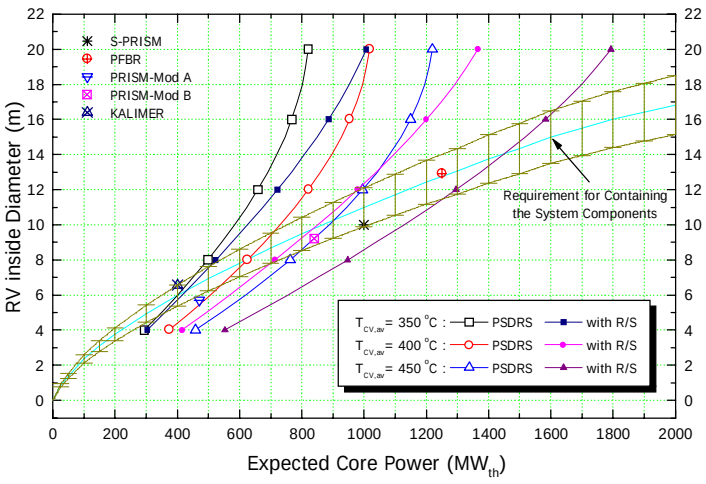


그림 3. 복사구조물 설치시의 가능 최대 열출력 비교

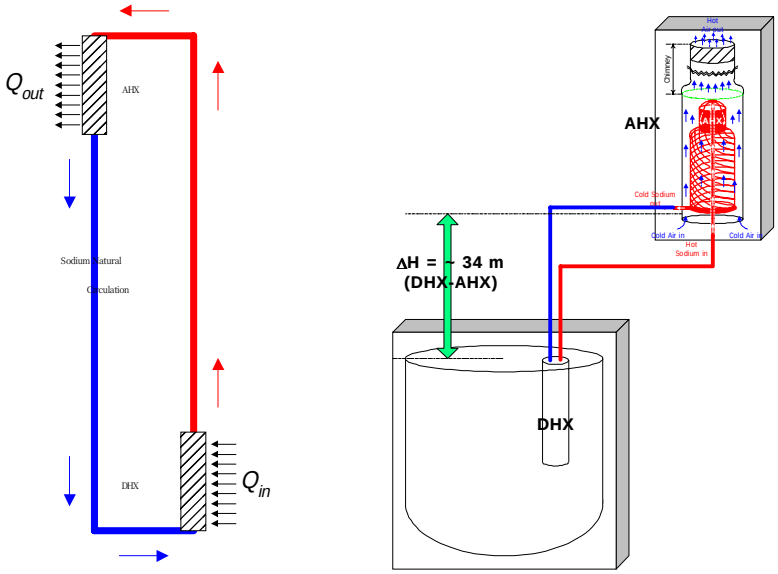
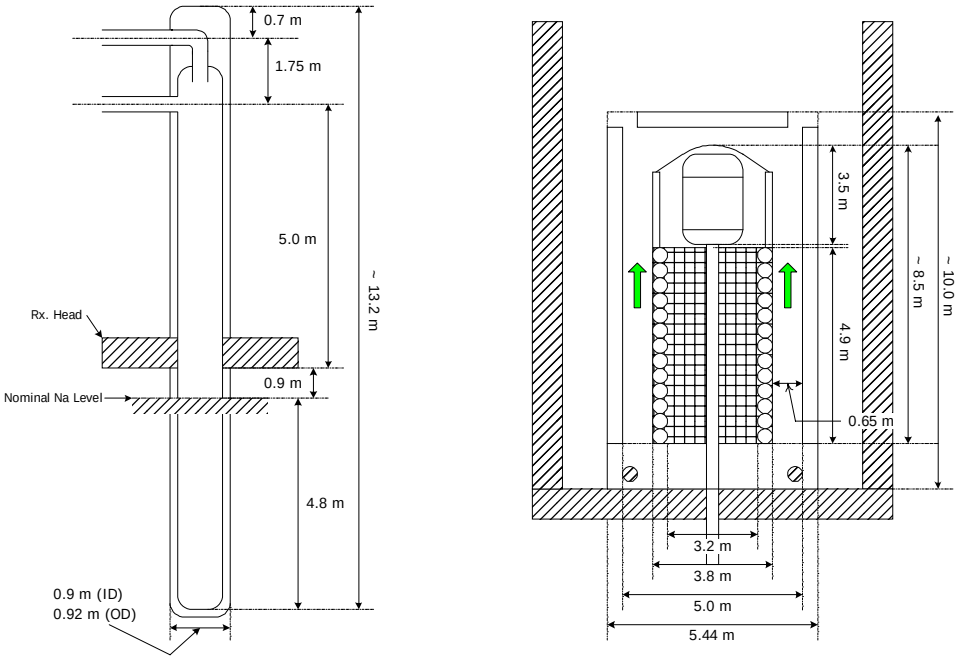


그림 4. DRC Loop 개념도



(a) EFR DHX
(DRC1 : Passive Type)

(b) EFR AHX
(DRC1 : Passive Type)

그림 5. EFR의 DRC 구성기기 형상 및 크기 개략도

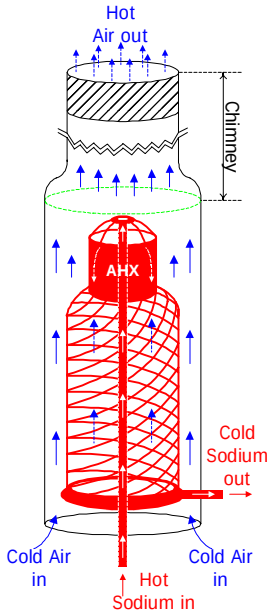


그림 6. 공기 열교환기(AHX) 형상 개략도

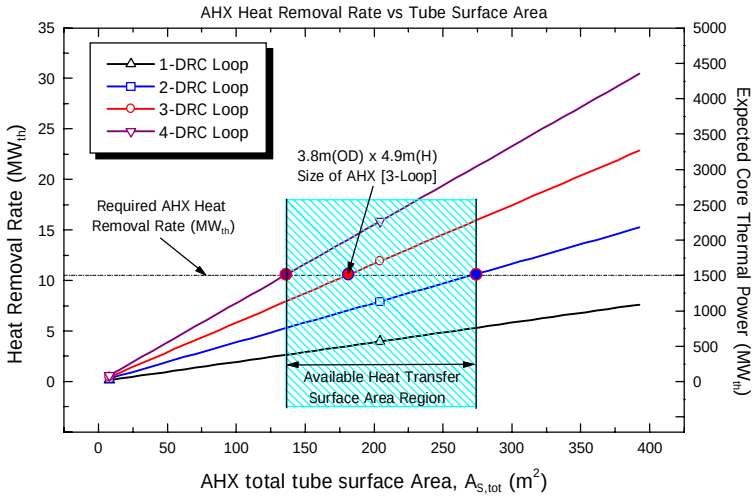


그림 7. AHX 전열관 전열면적 대비 제열용량 비교

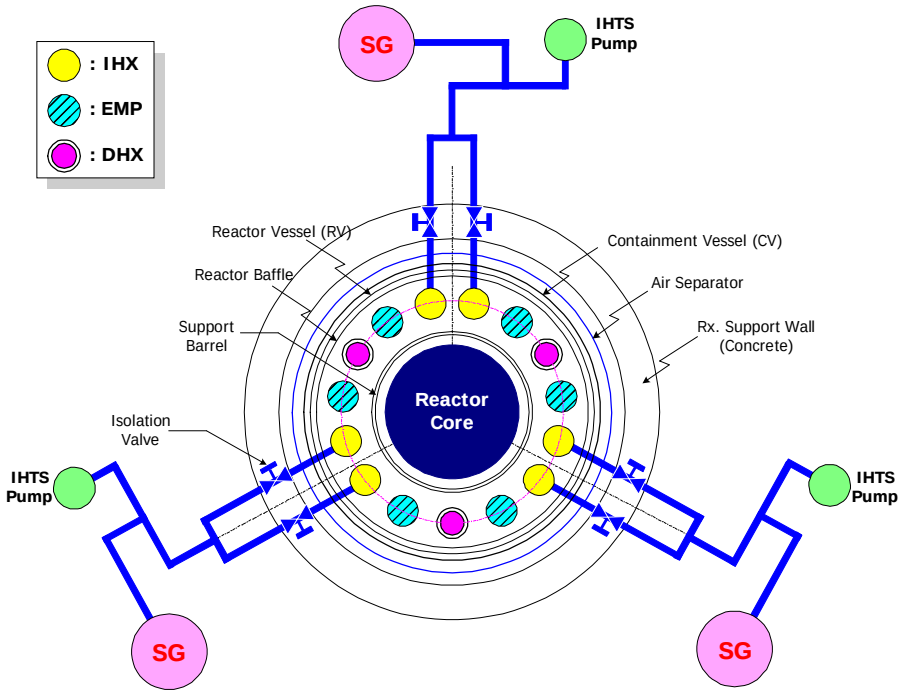


그림 8. KALIMER-600의 3-루프 풀 내부기기 수평 배치 개념도

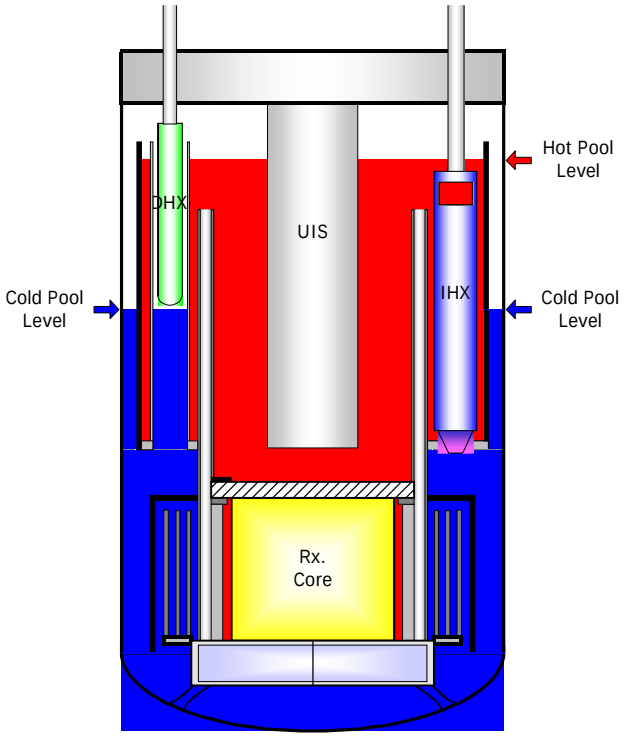


그림 9. PDRC 계통의 풀 내부기기 수직 배치 개념도