2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

복사구조물을 이용한 액체금속로 잔열제거 용량증진 타당성 분석

Feasibility Study on Enhancement of Decay Heat Removal Capacity in LMR using Radiation Structures

어재혁, 심윤섭, 김성오

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

한국형 액체금속로 KALIMER의 피동 안전등급 잔열제거계통(PSDRS) 공기유로에 복사구조물을 설치하는 경우 예상되는 제열용량 증진효과를 정량적으로 분석하고, 이를 토대로 대용량 액체금속로 설계시의 필요 잔열제거 용량 확보를 위한 방법을 설정하여 잔열제거 관점의 가능 최대 열출력을 계산하였다. 복사구조물 설치에 의한 제열량 증진효과는 복사구조물의 개수가 많을수록, 공기유로 간격이 넓을수록, 그리고 공기와 접하는 전열면의 온도가 높을수록 잘 나타나는 것으로 분석되었으며, 제열성능 개선 분석결과를 토대로 계산한 대용량 원자로 설계시의 가능 최대 열출력은 원자로 크기 증가와 전열면 온도 증가에 비례하여 증가 가능하며, 정량적으로는 운전온도에 따라 약 30% ~ 40%의 복사구조물 설치로 인한 열출력 증진효과가 나타나므로, 잔열제거 관점에서 최대 1,000MWt 열출력의 원자로 설계가 가능함을 확인하였다.

Abstract

In this study, a quantitative analysis of heat transfer enhancement by using the radiation structure installed in hot air riser of PSDRS in KALIMER is performed and a feasibility of designing a large thermal rating power plant is investigated in view of decay heat removal capacity. The heat transfer enhancement by radiation structure is directly proportional to the increasing the number of radiation structure, gap width of air flow path, and the temperature of heat transfer area contacting to the natural circulating air. Based on these analyses results of the enhancement of decay heat removal capacity, the feasible maximum core power of a large thermal rating power plant is investigated, and it is founded that the higher operation temperature of reactor coolant system, the larger thermal rating power plant design is possible and the enhancement is about 30% ~ 40%, quantitatively. From the analyses results, it is expected that a large thermal rating power plant of about 1,000MWt is feasible to design in view of the enhancement of decay heat removal capability.

1. 서 론

고온의 소듐을 냉각재로 사용하는 풀형 액체금속로는 기존의 경수로에 비해 고온에서 운전되므로, 액체금속로의 잔열제거계통은 그림 1 과 같이 격납용기(CV) 외벽을 공기의 자연순환에 의해 직접 냉각하는 방식의 PSDRS(Passive Safety-grade Decay Heat Removal System)를 사용하며, 특히 고온의 구조물 표면온도에 의해 대류전열 외에도 복사전열과정이 활발히 일어난다. PSDRS 는 공기 밀도차에 의한 공기측 자연대류에 의해 열을 제거하므로 특별한 설비 또는 운전원의 개입 없이도 매우 안정적인 열제거 수단을 제공하는 장점이 있으며, PSDRS 의 열제거 용량은 전적으로 대류전열면인 격납용기(CV)의 표면적에 비례한다[1]. 격납용기(CV) 외벽을 직접 냉각하는 PSDRS 의 제열용량 증진기 위해서는 격납용기(CV)와 공기유로 분리기(air separator) 사이의 공기유로 간격조정 등의 최적설계를 통해 대류 전열량을 증가시키는 방법과 고온 구조물을 이용하여 복사전열과정을 보다 효율적으로 활용하는 방법이 있을 수 있다. 복사전열량은 기 수행 연구[2]를 통해 공기유로에 복사구조물(radiation structure) 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. 전열량 증진 방안

2.1 복사전열량 증진을 위한 복사구조물 설치

복사전열량을 증진시키기 위해서는 PSDRS 공기유로에 그림 2와 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 진행방향에 직각으로 다수를 배치하여 복사 전열량을 증가시키게 되므로, 복사구조물 설치에 의해 공기유로 배치(air channel configuration)가 그림 3과 같이 변경된다. 그림 2에서 각각의 복사 전열면은 두 조각의 경사진 vane 형태가 좁은 간격으로 반복적으로 배열된 형태이며, vane 사이로 공기유로가 형성되어 있어 각각의 vane이 형성하는 면적이 결국은 대류 전열면적(convective heat transfer area)이 되므로 복사와 대류에 의한 열제거가 가능한 구조이다. 또한, 그림 3의 점선영역은 복사구조물이 축방향으로 다수가 설치되는 경우의 동일 기하형태가 반복되는 영역으로서, 복사 전열과정 해석시 기본 계산 cell로 사용되는 영역을 나타낸다. 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.

2.2 복사전열량 증진 메커니즘

KALIMER PSDRS의 열제거량 증진을 위해 공기유로에 복사구조물을 설치하는 경우에는 격납용기(CV) 외표면으로부터 공기로의 전열과정이 복사구조물을 설치하지 않은 기존의

열전달 경로에 비해 매우 복잡해질 것으로 예상되므로, 복사구조물 설치 여부에 따른 격납용기(CV) 외표면에서 공기로의 열전달 경로를 상호 비교하여 그림 4에 도시하였다. 그림 4(a)와 그림 4(b)는 각각 복사구조물 비설치시 및 설치시의 열전달 경로로, 그림에서 “e”, “w”, 및 “s”는 각각 격납용기(CV) 외표면, 공기유로 분리기(air separator) 내표면, 그리고 복사구조물을 의미하며, “i/e”는 공기유로 입/출구의 구조를 모사하기 위한 인자이다. 또한, 하첨자, “conv”와 “rad”는 각각 대류와 복사 전열을 의미하며, 상첨자는 해당 구조물 표면을 뜻한다. 그림과 같이 기존의 공기유로는 격납용기(CV)와 공기유로 분리기(air separator)가 평행하게 서로 마주보고 있는 단순한 구조이므로, 격납용기(CV) 외표면에서 공기로의 대류전열과 공기유로 분리기로의 복사전열, 그리고 공기유로 분리기 표면에서 공기로의 대류전열의 세가지 단순한 전열과정에 의해서만 열이 제거되었으나, 복사구조물 설치에 의해 공기로의 전열과정은 매우 복잡한 형태를 나타낸다. 즉, 복사구조물의 설치에 의해 복사전열은 마주보는 두 평면 외에 공기유로에 직각으로 위치하는 복사구조물에 대하여 전열면 간의 view factor를 이용한 복사전열량을 계산해야 하므로 매우 복잡한 계산이 필요하다. 복사구조물 설치시의 총 열제거량은 식 (1)과 같이 격납용기(CV) 외벽에서의 대류전열량과 각 구조물 표면으로의 복사전열량의 합이 되며, 격납용기(CV) 외표면으로부터 각각의 구조물로 전달되는 열량은 결국 각 구조물 표면으로부터 공기로의 대류전열과정에 의해 제거되므로, 식 (2)의 관계가 성립한다.

$$Q_{tot} = Q_e^{conv} + Q_w^{rad} + Q_s^{rad} + Q_{i/e}^{rad} \tag{1}$$

$$Q_i = Q_i^{rad} = Q_i^{conv} = h_i A_i (T_i - T_{air}), \qquad i = s,\ w,\ i/e \tag{2}$$

따라서, 복사구조물 표면으로부터 공기로의 총 전열량은 결국 PSDRS 구조물 표면에서 공기로의 대류 전열량이 되므로, 복사구조물을 설치하는 경우에는 대류 전열면적의 증가에 의해 전열량이 증가할 수 있다. 반면에, 복사구조물의 설치는 공기측 유동저항의 증가를 의미하여 자연순환 유량 감소에 의한 대류전열량 감소를 초래할 수 있으므로, 공기유로의 기하형상 또는 복사구조물의 설치 개수에 의해 총 열제거량이 증가할 수도 또는 감소할 수도 있다. 따라서, 복사구조물 설치시에는 공기측 압력손실 증가를 고려하여 공기유로의 기하형상이나, 복사구조물의 개수 등에 대한 정량적인 분석이 필요하며, 본 연구에서는 이에 대한 분석을 통해 KALIMER PSDRS의 제열용량 증진을 위한 분석을 수행하였다.

2.3 RADST 코드

복사 구조물에 의한 제열량 증진효과가 최대가 될 수 있는 복사구조물의 개수와 공기유로의 면적 등에 대한 분석은 기 수행 연구[2]를 통해 개발된 RADST 코드를 이용하여 수행된다. RADST 코드는 격납용기(CV) 외표면과 복사구조물, 그리고 공기유로 분리기(air separator) 간의 복사 전열과정을 모사하고, 복사구조물 설치에 의한 공기측 유동저항을 계

산하여 PSDRS식 잔열제거계통 설계인자 변화에 의한 복사 전열량과 대류 전열량의 증/감을 정량적으로 계산할 수 있도록 개발된 코드이다. RADST 코드는 1차원 에너지수지 및 공기유로에서의 공기 밀도차와 유동손실항의 수지식을 지배방정식으로 하며, 지배방정식의 수학적 모형은 식 (3)과 같다.

$$\oint r\vec{g}\cdot d\vec{S} = \dot{m}^2 \cdot \sum_i C_i \tag{3}$$

식에서, S는 PSDRS 공기유로의 유선 방향으로의 길이벡터(length vector)이며, $\dot{m}$ 와 C는 각각 공기유량과 압력손실계수, 그리고 “g”와 하첨자 “i”는 각각 중력가속도 벡터와 계산 노드(node)를 의미한다. PSDRS 공기유로에 복사구조물을 설치하는 경우, 격납용기(CV) 외표면으로부터 복사구조물이나 공기유로 분리기 등으로 전달되는 복사전열량은 결국 구조물 표면과 공기의 대류전열과정에 의해 제거되므로 RADST 코드는 PSDRS 열제거량 계산을 위해 복사구조물 설치시의 복사전열량 외에 공기유량의 계산을 통해 대류 전열계수를 계산하여 대류전열량을 구한다. RADST 코드의 공기유량은 식 (4)와 같이 계산되며, 식에서 ΔH 는 공기유로의 정압수두차(static pressure head difference)이고, K 및 f는 각각 공기의 유동저항 계산에 사용되는 유로의 형상변화계수 및 마찰손실계수를 의미한다.

$$\dot{m}_{air} = \sqrt{\frac{\Delta H}{\sum_i (K_i + f_i \frac{L_i}{D_h}) r_i V_i}} \tag{4}$$

식에서와 같이 공기유량은 축방향 각 노드에서의 압력손실계수(C)와 공기의 정압수두차를 이용하여 계산된다. 그림 5는 RADST 코드의 공기유량 계산을 위한 단위 복사구조물 집합체의 형태를 도시한 그림으로, 그림 5(a)는 공기유로에 설치되어 있는 복사구조물과 공기유동의 관계를 대략적으로 도시한 그림이고, 그림 5(b)는 공기유량 계산을 위한 압력손실 계산에 직접적으로 사용하는 단위 복사 전열면에 해당하는 공기유로 형태를 개념적으로 도시한 그림이다. RADST 코드는 공기유로에서의 유량 및 Reynolds 수 계산은 모두 그림 5와 같은 단위 복사구조물 집합체에 대하여 수행된다.

RADST 코드는 PSDRS 구조물 표면을 흑체(black surface)로 가정하여 표면 방사율(surface emissivity)을 “1”로 설정하고 계산을 수행하는 RADST1 코드와 real surface에 대한 실질적인 복사구조물 효과를 분석하기 위한 RADST2 코드로 구분되며, 흑체 분석은 구조물 표면을 흑체(black surface)로 가정하여 표면 방사율을 1로 설정함으로써 해석에 단순화를 기할 수 있는 장점을 갖지만, 실제 구조물 표면은 흑체로 볼 수 없으므로 설계에 적용하기 위해서는 real surface를 고려해야 한다. 따라서, 본 분석에서는 real surface 분석

용 RADST2 코드를 사용하여 복사구조물 설치시의 PSDRS 제열량 증진효과를 정량적으로 분석하였다.

3. 복사구조물을 이용한 제열용량 증진 분석

본 절에서는 RADST2 코드[2]를 이용하여 KALIMER PSDRS 설계인자 변화시의 복사구조물 설치에 의한 열제거량 증진효과를 정량적으로 분석하고, 용량 격상시의 KALIMER 가능 최대 열출력을 계산하였다. KALIMER PSDRS의 공기유로에 복사구조물을 설치하는 경우에는 공기유로의 압력손실 증가로 인해 공기의 자연순환 유량이 감소하고, 이에 상응하여 대류전열량이 감소하게 된다. 따라서, 복사구조물 설치에 의한 제열용량 증진효과를 적절히 활용하기 위해서는 공기유로의 압력손실을 감소시킬 필요가 있으며, 이와 함께 고온에서 더 활발해지는 복사전열 메커니즘의 특성을 활용하기 위해 격납용기 표면온도 변화에 대한 복사구조물 설치효과의 정량적인 분석이 필요하다. 그림 6은 격납용기 표면온도 변화에 의한 복사구조물 설치시의 총 제열량에 대한 대류 및 복사 전열량 비를 비교하여 도시한 그림이다. 그림에서와 같이 KALIMER 설계[3](N=0)에서는 PSDRS를 통한 제열량 중 대류 및 복사 전열량이 약 55:45의 비율로 나타났으나, 복사구조물 설치시에는 공기유로의 유동저항 증가로 인해 복사구조물 개수가 증가할수록 대류의 비중은 감소하고 복사 전열량의 비중이 점차 증가함을 볼 수 있다. 또한, 대류와 복사 전열량의 차이는 격납용기(CV) 외표면의 온도가 높을수록 더 확실히 나타나며, 이는 복사 전열과정이 고온에서 더 효과적으로 작용함을 단적으로 보여주는 결과라 할 수 있다. 이러한 경향을 토대로, 본 연구에서는 복사구조물 설치에 의한 PSDRS 제열성능에 가장 직접적인 영향을 미칠 것으로 예상되는 설계인자인 격납용기(CV)와 공기유로 분리기(air separator) 사이의 공기유로 간격 및 격납용기(CV) 외표면 평균온도 변화에 의한 전열성능 변화 경향을 분석하였다.

그림 7은 공기유로 간격 변화시의 최대 제열량 변화를 KALIMER 설계[3]의 최대 열제거량에 대한 비율로 도시한 그림이다. 그림에서와 같이 공기유로 간격이 좁은 경우에는 복사구조물의 설치가 오히려 공기측 유동저항 증가로 작용하여 대류전열량이 감소하고, 이로 인해 전체 열제거량이 오히려 감소하는 경향을 나타내고 있음을 볼 수 있다. 이는 공기유로의 간격이 0.3m인 경우에도 유사한 경향으로 나타나며, 공기유로 간격이 0.7m 이상 되는 경우에는 복사구조물 설치에 의한 열제거량 증가가 서서히 나타나기 시작하여 간격이 증가할 수록 복사구조물 설치효과가 확연히 나타남을 볼 수 있다. 또한, 복사구조물 개수가 40개 이상이 되면 제열량 증진효과가 거의 수렴하는데, 이는 PSDRS 공기유로에 복사구조물을 설치하는 경우에 산술적으로는 축방향으로 최대 400개 까지 설치가 가능하지만, 개수 증가에 의한 격납용기 외벽으로부터 공기로의 직접적인 대류 전열면적 감소 및 공기유로의 압력손실 증가로 인해 복사전열량의 증가분 보다 대류전열량이 급격한 감소가 지배적으로 나타나기 때문으로 판단된다. 따라서, 공기유로 구조의 단순화 및 원자로의 크기를 고려하여 복사구조물 설치시의 새로운 공기유로 배치(air channel configuration)는 간격이 0.7m인 공기유로에

공기 진행방향으로 40개의 복사구조물이 설치되는 것으로 설정하였다. 이와 같이 설정된 복사구조물 설치시의 새로운 공기유로 배치에 대하여 격납용기(CV) 외표면 온도증가에 의한 제열량 증진 효과를 정량적으로 분석하였다.

그림 8은 격납용기(CV) 평균온도 증가에 의한 열제거량 변화를 KALIMER 설계[3]의 최대 열제거량에 대한 비율로 나타낸 그림으로, 복사구조물 비설치 경우(N=0)는 KALIMER 설계를 의미한다. 그림에서와 같이, 격납용기의 평균온도가 낮을수록 복사구조물의 설치에 의한 제열량 증진효과가 상대적으로 감소하는 경향을 보임에 따라, KALIMER 설계[3]의 격납용기 온도영역(350°C)에서는 복사구조물 설치효과가 약 5% 미만으로 크지 않은 것으로 나타났다. 하지만, 과도기 격납용기 평균온도가 현재보다 약 50°C~100°C 증가하는 경우에는 최고 80% 이상의 제열량 증진효과가 나타나는 것으로 분석되었다. 이러한 현상은 고온에서 더 활발히 나타나는 복사전열과정의 특성에 기인하여 상대적으로 낮은 온도영역에서는 공기유로의 유동저항 증가로 인한 대류전열량의 감소를 복사구조물 설치에 의한 복사전열량 증가가 보상하지 못하기 때문으로 판단된다.

4. KALIMER 가능 최대 열출력 계산

본 절에서는 앞서 수행한 복사구조물 설치시의 제열량 증진효과 분석 결과를 이용하여 KALIMER의 열출력을 격상시켜 대용량으로 설계할 경우의 가능 최대 열출력을 계산하였다. KALIMER 열출력 증진은 필요 잔열제거 용량 확보와 원자로의 크기 증가를 병행하여 고려되어야 하며, 이들 인자간의 상관관계를 분석하여 복사구조물 설치시의 열출력 증진 경향을 분석할 필요가 있다.

그림 9는 PSDRS식 잔열제거계통을 사용하는 풀형 액체금속로 설계시의 원자로 크기와 원자로 열출력간의 상관관계를 도시한 그림[4]으로, 그림과 같이 열출력 1000MWt 이하의 원자로 설계시에는 계통 내부기기 수용 요건에 의해 원자로 용기의 크기가 결정됨을 알 수 있다. 즉, 열출력 격상시에는 노심 및 중간열교환기 등의 풀 내부기기 크기가 모두 증가하게 되고 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, 1000MWt 이내의 열출력 증진은 원자로 용기의 크기 증가에 의해서 충분히 실현 가능함을 보여주고 있다. 따라서, 대용량 원자로 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 가능 최대 열출력을 정량적으로 계산하였다. 분석시 기준 경우로 사용한 KALIMER 설계[3]의 원자로용기(RV) 직경 및 공기유로 간격은 각각 6.92m와 0.2m이고, 이 때의 PSDRS 최대 열제거량은 2.6MWt이며, 최대 열제거량을 나타내는 과도기 격납용기(CV)의 평균온도는 약 350°C이다. 본 연구에서는 이 값을 기준으로 복사구조물 설치시의 원자로용기(RV) 직경 증가에 의한

PSDRS 최대 열제거량 변화를 KALIMER 설계[3] 경우와 비교하여 그림 10에 도시하였다. 그림에서와 같이 복사구조물 없이 PSDRS만을 사용하는 경우에는 원자로용기의 직경 증가에 따라 열제거량 증가가 다소 둔화되는 경향을 보이고 있으나, 복사구조물 설치시에는 원자로용기 직경 증가에 비례하여 열제거량이 선형적으로 증가하며, 이러한 경향은 격납용기 표면 온도가 높은 경우에 더욱 뚜렷이 나타나고 있음을 볼 수 있다. 정량적으로는 원자로용기 직경이 S-PRISM과 유사한 10m인 경우, KALIMER 설계와 동일한 격납용기 표면온도 조건에서 약 40%의 제열량 증가를 보이고 있으며, 이와 같은 복사구조물 설치 효과는 원자로의 크기가 증가할수록 더욱 뚜렷이 나타남을 알 수 있다. 이와 같은 열제거량 증가 경향을 토대로 KALIMER의 열출력 격상시의 가능 최대 열출력을 계산하였다. 복사구조물 설치에 의한 가능 최대 열출력($Q_{core}^{Expected}$)을 과도기 최대 열제거량 증가분과 연관시켜 고려하면 식 (5)와 같은 관계를 갖는다.

$$Q_{core}^{Expexted} = a \cdot Q_{core}^{K} \ , \qquad a = \frac{Q_{\max,removed}^{R/S}}{Q_{\max,removed}^{K}} \tag{5}$$

여기서, 상첨자, “K” 및 “R/S”는 각각 기준 KALIMER 설계[3]와 복사구조물 사용시를 의미하며, 하첨자 “max,removed”는 소듐 풀 최대온도가 나타나는 시점에서의 최대 열제거량을 나타낸다. 따라서, a 는 복사구조물 설치에 의해 제열량이 증가하는 비율을 나타내는 값이 되며, 식 (6)과 같이 복사구조물의 개수(N), 공기유로 간격(G), 원자로용기 직경(D_{RVin}) 및 운전온도($T_{operation}$)의 함수로 표현된다.

$$a = f(N, G, D_{RVin}, T_{operation}) \tag{6}$$

이와 같이, 가능 최대 열출력은 기준 KALIMER 설계와 복사구조물 설치시의 최대 열제거량 비에 의해 결정되지만, 열출력이 증가하면 기준 최대 열제거량 역시 이에 상응하여 증가하므로, 식 (5)는 다음과 같이 변형하여 고려하는 것이 타당하다.

$$Q_{core}^{Expexted} = Q_{\max,removed}^{R/S} \cdot \left(\frac{Q_{core}}{Q_{\max,removed}} \right) \tag{7}$$

즉, 열출력이 증가하면 이에 맞추어 소듐 풀 내부기기의 크기가 증가하며 이를 수용하기 위해 원자로의 크기가 증가하게 되므로, 원자로 풀 크기 증가에 의해 소듐의 양도 비례하여 많아지게 된다. 따라서, 열관성(thermal inertia) 측면에서 정격 출력과 최대 열제거량의 비는 항상 유사한 비율을 나타낸다고 볼 수 있으므로, 이 두가지 인자의 비를 식 (8)과 같이 상수로 가정하면, 가능 최대 열출력은 식 (9)와 같이 계산이 가능하다.

$$g = \frac{Q_{\max,removed}}{Q_{core}} \cong const \tag{8}$$

$$Q_{core}^{Expexted} = \frac{1}{g} \cdot Q_{\max,removed}^{R/S} \tag{9}$$

앞선 분석을 통해 복사구조물 설치에 의한 증가하는 열제거량은 그림 10과 같이 원자로용기(RV) 크기 및 운전온도의 함수로 주어지며, 식 (8)의 g 는 KALIMER 설계[3]를 기준으로 약 0.7%이므로, 이 값을 이용하면 식 (9)에 의해 대용량 원자로 설계시의 가능 최대 열출력을 그림 11과 같이 도시할 수 있다. 그림 11은 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. 참고로, 원자로의 가능 최대 열출력은 각 원자로 직경에서의 잔열제거 용량에 상응하는 열출력 곡선과 열출력별로 풀 내부기기 수용이 가능한 원자로 직경 곡선이 만나는 점에서 결정되므로, 풀 내부기기 수용을 위한 출력별 필요 원자로 크기 곡선은 일종의 경제성 곡선으로 간주할 수 있다. 그림에서와 같이 PSDRS만을 사용하는 경우에는 원자로 크기가 증가할수록 가능 최대 열출력 증가 폭이 급격히 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 그림 9에서와 같이 PSDRS식 잔열제거계통을 사용하는 풀형 액체금속로의 경우, 대용량으로 갈 수록 PSDRS식 잔열제거를 위한 필요 전열면적이 풀 내부기기 수용 측면에서 결정되는 전열면적 보다 커지기 때문으로, 열출력이 증가할수록 수렴하는 기기 수용 요건의 원자로 크기로는 필요 잔열제거 용량을 맞추기 어려워 지기 때문에 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 제약받는 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. 이러한 경향을 토대로 운전 온도별 가능 최대 열출력을 계산하여 그림 12에 도시하였다. 그림 12는 복사구조물 설치에 의해 증가 가능한 열출력 곡선과 풀 내부기기 수용을 위한 경제성 곡선이 만나는 지점의 실질적인 가능 최대 열출력을 PSDRS만을 사용하는 기존 설계 개념과 비교하여 도시한 그림이다. 그림에서와 같이, 격납용기 평균온도를 기준으로 가능한 운전온도 영역인 400°C 근방에서는 PSDRS만으로는 원자로 직경 증가에 의한 열출력 증진이 약 630MWt에 불과한 것과 달리, 복사구조물 설치시에는 동일 운전온도 조건에서 약 850MWt 까지도 열출력 증진이 가능하여 약 30% 이상의 열출력 증진효과가 나타남을 볼 수 있으며, 운전온도를 420°C 까지 증가시키는 경우에는 최대 1,000MWt 까지의 열출력 증가가 가능한 것으로 계산되었다. 이는

증기발생기 보조냉각계통(SGACS)을 안전등급(safety grade)화 하여 잔열제거 목적으로 사용함으로써 열출력을 1,000MWt 까지 증가시킨 미국 GE사의 S-PRISM 설계[4]와 비교할 때, 기 수행 연구를 통해 자체 개발된 복사구조물 설치 효과의 우수성을 잘 보여주는 결과라고 할 수 있다.

5. 결 론

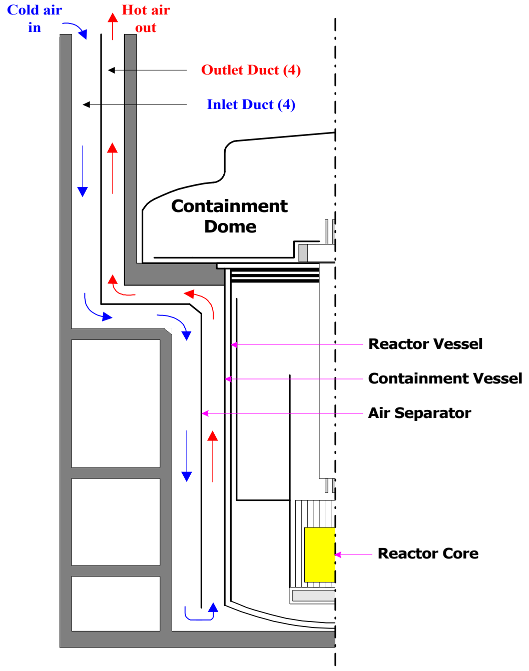
본 연구에서는 KALIMER PSDRS 공기유로에 복사구조물을 설치하는 경우 예상되는 제열용량 증진효과를 정량적으로 분석하고, 이를 토대로 대용량 액체금속로 설계시의 필요 잔열제거 용량 확보를 위한 방법을 설정하여 잔열제거 관점의 가능 최대 열출력을 계산하였다. 복사구조물 설치에 의한 제열량 증진효과는 복사구조물의 개수가 많을수록, 공기유로 간격이 넓을수록, 그리고 공기와 접하는 전열면의 온도가 높을수록 잘 나타나는 것으로 분석되었으며, 제열성능 개선 분석결과를 토대로 계산한 대용량 원자로 설계시의 가능 최대 열출력은 원자로 크기 증가와 전열면 온도 증가에 비례하여 증가 가능하며, 정량적으로는 운전온도에 따라 약 30% ~ 40%의 복사구조물 설치로 인한 열출력 증진효과가 나타나므로, 잔열제거 관점에서 최대 1,000MWt 열출력의 원자로 설계가 가능함을 확인하였다. 또한, 복사구조물 설치효과를 보다 효율적으로 활용하기 위해서는 운전온도를 높이는 것이 유리하므로, 향후 KALIMER 열출력 증진 설계시에는 본 연구의 분석 결과를 반영하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 주관한 원자력 중장기 연구과제의 일환으로 수행되었습니다.

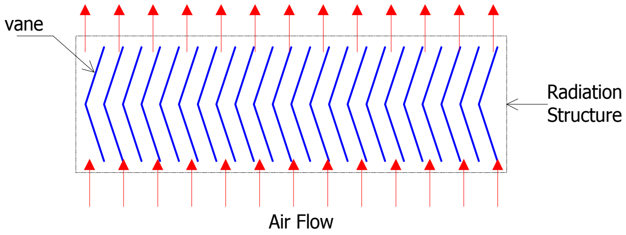
참고문헌

1. 위명환, 심윤섭, 김성오, "PSDRS의 잔열제거 특성분석", 한국원자력학회 '98 춘계학술발표회 논문집 pp. 653-659, 1998
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. D. H. Hahn, et al., "KALIMER Conceptual Design Report", Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI/TR-2204/2002, 2002
4. Generation IV Roadmap, "Generation IV-Submitted Reactor System Concepts-Liquid Metal Reactor System", DOE Gen IV Site, April, 2001



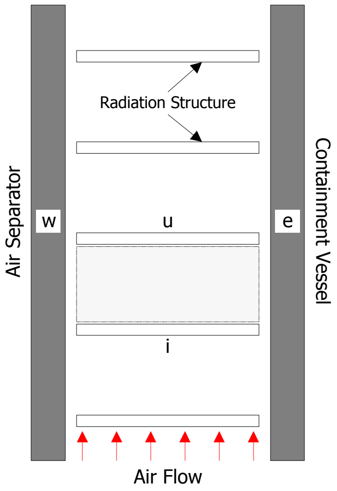
Cold air in
Hot air out
Outlet Duct (4)
Inlet Duct (4)
Containment Dome
Reactor Vessel
Containment Vessel
Air Separator
Reactor Core

그림 1. KALIMER PSDRS 개략도



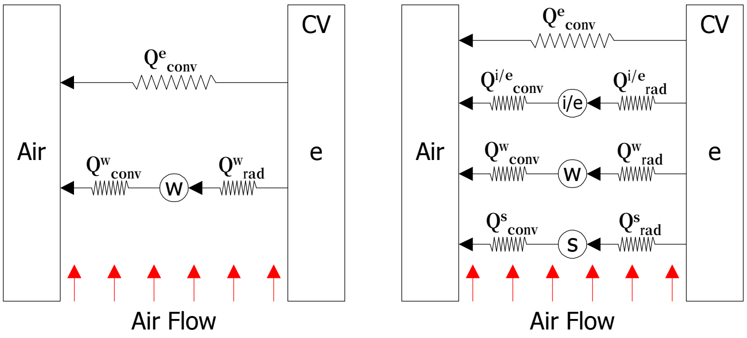
vane
Radiation Structure
Air Flow

그림 2. 복사구조물(Radiation Structure) 형상



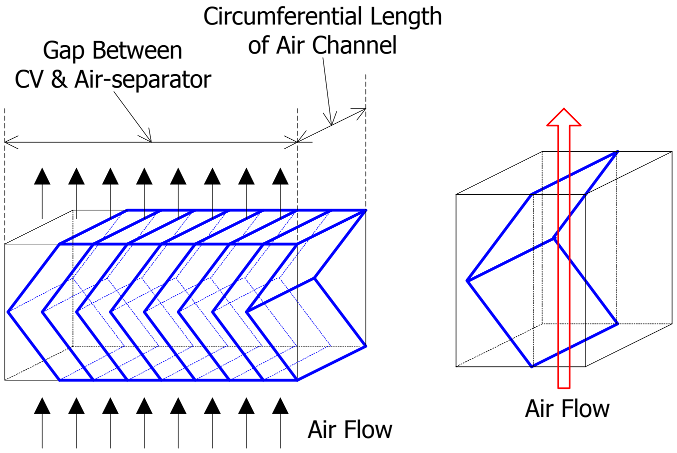
Radiation Structure
Air Separator
w
u
e
Containment Vessel
i
Air Flow

그림 3. 복사구조물 설치시의 PSDRS 공기유로 형상


Air
CV
e
Q^e_{conv}
Q^w_{conv}
Q^w_{rad}
w
Air Flow
Air
CV
e
Q^e_{conv}
$Q^{i/e}_{conv}$
$Q^{i/e}_{rad}$
i/e
Q^w_{conv}
Q^w_{rad}
w
Q^s_{conv}
Q^s_{rad}
s
Air Flow

(a) no radiation structure (b) radation structure

그림 4. 격납용기 표면에서 공기로의 열전달 경로


Circumferential Length
of Air Channel
Gap Between
CV & Air-separator
Air Flow
Air Flow

(a) (b)

그림 5. RADST 코드의 공기유량 계산을 위한 기본 cell 형태

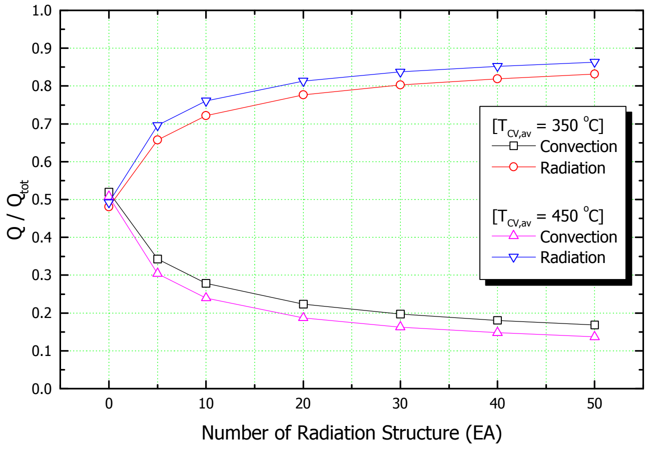


그림 6. 복사구조물 설치시의 대류/복사 전열량 비교

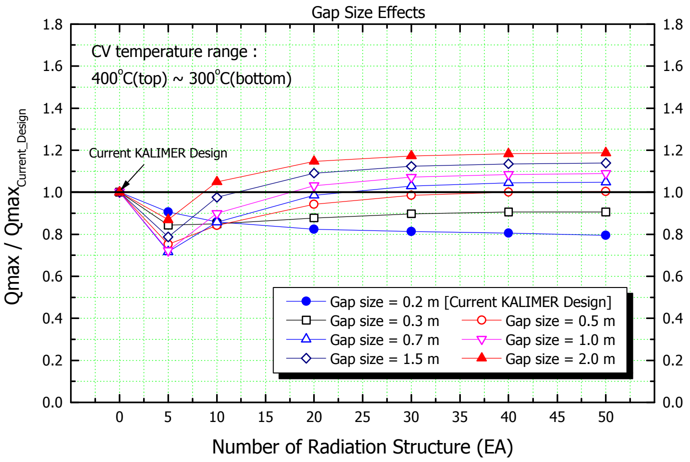


그림 7. 공기유로 간격변화에 의한 열제거량 비교

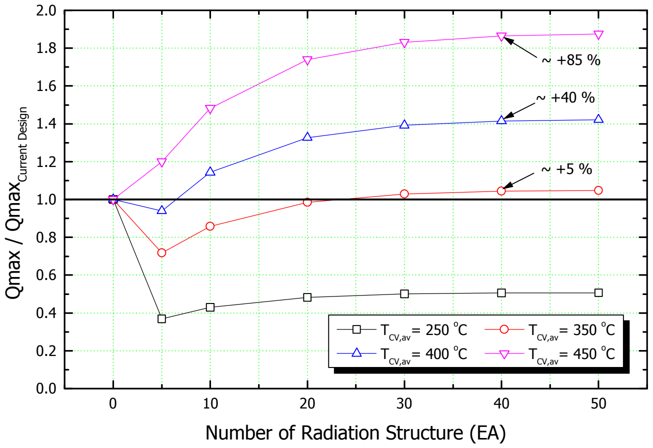


그림 8. 격납용기 표면온도별 복사구조물 설치효과 비교

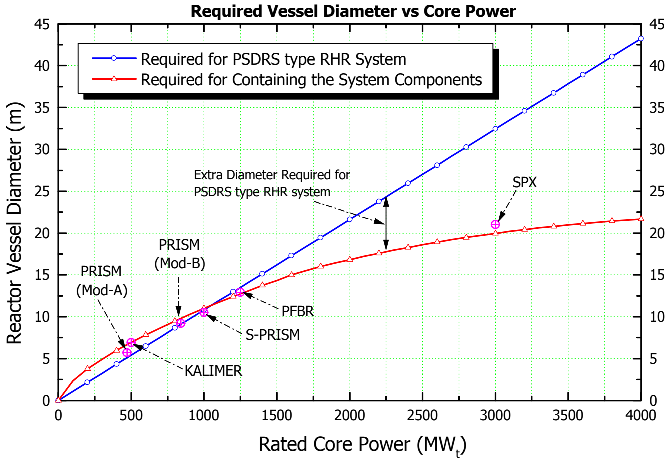


그림 9. 열출력별 원자로 크기 산정

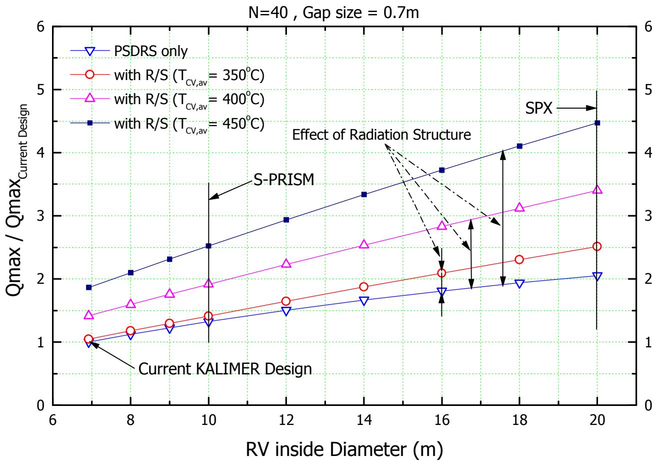


그림 10. 복사구조물 설치시의 RV 직경별 제열량 변화 비교

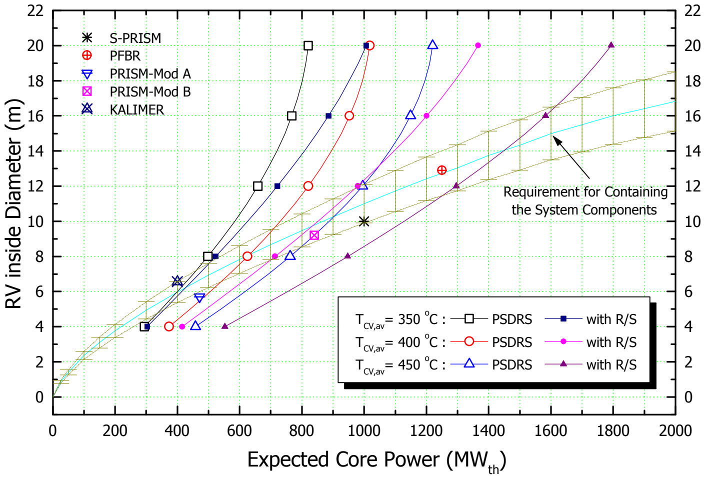


그림 11. 복사구조물 설치시의 가능 최대 열출력 비교

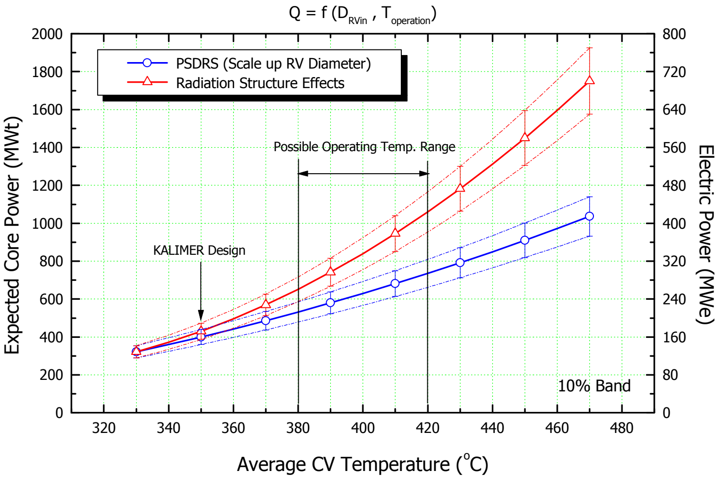


그림 12. 복사구조물 설치시의 운전온도별 가능 최대 열출력 비교