

KALIMER 피동 잔열제거계통 재열용량 증진 방안 연구

어재혁, 김의광, 김성오
한국원자력연구소

A Study on Enhancement of Residual Heat Removal Capacity in KALIMER

Eoh Jae-Hyuk, Kim Eui-Kwang, Kim Seong-O
Korea Atomic Energy Research Institute

1. 서론

고온의 소듐을 냉각재로 사용하는 플형 액체금속로인 KALIMER[1]는 기존의 경수로에 비해 고온에서 운전되므로, 잔열제거계통은 공기 자연순환에 의해 격납용기(CV) 외벽을 직접 냉각하는 방식의 PSDRS(Passive Safety-grade Decay Heat Removal System)[1]를 사용하며, 특히 고온의 구조물 표면온도에 의해 대류전열 외에도 복사전열과정이 활발히 일어난다. PSDRS는 공기 밀도차에 의한 공기층 자연대류에 의해 열을 제거하므로 매우 안정적인 열제거 수단을 제공하는 장점이 있으며, PSDRS의 열제거 용량은 전적으로 대류 전열면인 격납용기(CV)의 표면적에 비례한다[2]. 격납용기(CV) 외벽을 직접 냉각하는 PSDRS의 재열용량 증진을 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[3]를 통해 공기유로에 복사구조물(radiation structure) 설치하여 증진 가능한 것으로 나타났으며, 본 연구에서는 복사 전열과정의 효율적인 활용을 위하여 복사구조물 설치시의 재열용량 증진효과를 RADST 코드[3]를 이용하여 정량적으로 분석하고, 이를 통해 열출력 증가시의 필요 잔열제거 용량확보 가능성을 평가하였다.

2. 전열량 증진 메커니즘

복사전열량을 증진시키기 위해서는 PSDRS 공기유로에 그림 1 과 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) 역시 변경되며, 각각의 복사 전열면은 두 조각의 경사진 vane 형태가 좁은 간격으로 반복적으로 배열된 형태이다. 또한, vane 사이로 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. 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 2에 도시하였다. 그림 2(a)와 그림 2(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, "ie"는 공기유로 입/출

구의 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 분리기의 복사전열, 그리고 공기유로 분리기 표면에서 공기로의 대류전열의 세가지 단순한 전열과정에 의해서만 열이 제거되었으나, 복사구조물 설치에 의해 공기로의 전열과정은 매우 복잡한 형태를 나타낸다.

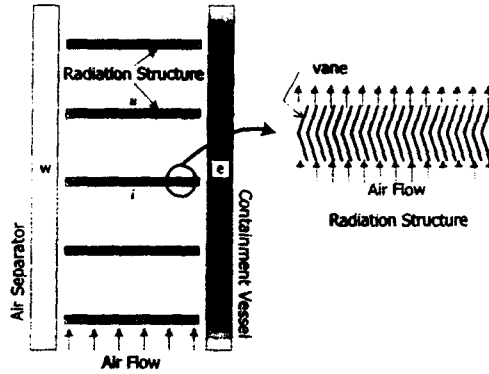


그림 1. 복사구조물 형상 및 PSDRS 공기유로 형상 변화

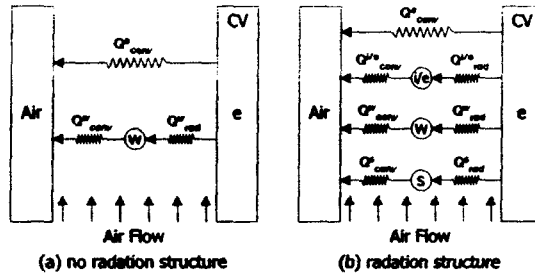


그림 2. 격납용기 표면에서 공기로의 열전달 경로

즉, 복사구조물의 설치에 의해 복사전열은 마주보는 두 평면 외에 공기유로에 직각으로 위치하는 복사구조물에 대하여 전열면 간의 view factor 를 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.

$$Q_{tot} = Q_c^{conv} + Q_w^{rad} + Q_s^{rad} + Q_{i/e}^{rad} \quad (1)$$

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

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 설치에 의해 공기측 유동저항의 증가를 의미하여 자연순환 유량 감소에 의한 대류전열량 감소를 초래할 수 있으므로, 공기유로의 기하

형상 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, 복사 구조물 설치에 의한 제열량 증진효과가 최대가 될 수 있는 복사구조물의 개수와 공기유로의 면적 등에 대한 분석은 기 수행 연구[3]를 통해 개발된 RADST 코드를 이용하여 수행하였다.

3. 복사구조물을 이용한 제열용량 증진 분석

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. KALIMER 설계[1]에서는 PSDRS를 통한 제열량 중 대류 및 복사전열량이 약 55:45의 비율로 나타났으나, 복사구조물 설치시에는 공기유로의 유동저항 증가로 인해 복사구조물 개수가 증가할수록 대류의 비중은 감소하고 복사 전열량의 비중이 점차 증가한다. 또한, 복사 전열과정이 고온에서 더 효과적으로 작용하므로, 대류와 복사 전열량의 차이는 격납용기(CV) 외표면의 온도가 높을수록 더 확실히 나타나게 된다. 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 분석한 결과, 공기유로 간격이 좁은 경우에는 복사구조물의 설치가 오히려 공기측 유동저항 증가로 작용하여 대류전열량이 감소하고, 이로 인해 전체 열제거량이 오히려 감소하는 경향을 나타냄을 알 수 있었다. 따라서, 공기유로 간격이 0.7m 이상 되는 경우에 비로소 복사구조물 설치에 의한 열제거량 증가가 서서히 나타나기 시작하며, 복사구조물 개수가 40 개 이상이 되면 제열량 증진효과가 거의 수렴하므로, 본 연구에서는 공기유로 구조의 단순화 및 원자로의 크기를 고려하여 복사구조물 설치시의 공기유로 간격을 0.7m로, 그리고 공기 진행방향으로 40 개의 복사구조물을 설치하는 것으로 설정하고 복사구조물 설치시의 새로운 공기유로 배치에 대하여 격납용기(CV) 외표면 온도증가에 의한 제열량 증진 효과를 정량적으로 분석하였다.

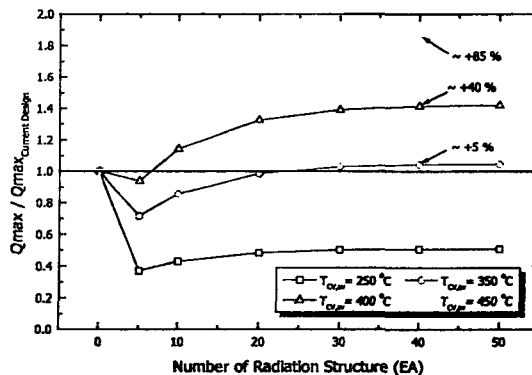


그림 3. 격납용기 표면온도별 복사구조물 설치효과 비교

그림 3은 격납용기(CV) 평균온도 증가에 의한 열제거량 변화를 KALIMER 설계[1]의 최대 열제거량에 대한 비율로 나타낸 그림으로, 복사구조물 비설치 경우(N=0)는 KALIMER 설계

를 의미한다. 그림과 같이 격납용기의 평균온도가 낮을수록 복사구조물의 설치에 의한 제열량 증진효과가 상대적으로 감소하는 경향을 보임에 따라, KALIMER 설계[1]의 격납용기 온도영역(350°C)에서는 복사구조물 설치효과가 약 5% 미만으로 크지 않은 것으로 나타났다. PSDRS 공기유로에 복사구조물을 설치하는 경우, KALIMER 설계[1]를 기준으로 30% 이상의 실질적인 제열량 증진효과가 나타나는 유효 격납용기 평균온도는 최소한 400°C 이상이므로, 만일 격납용기의 온도가 이 온도보다 낮다면 복사구조물 설치 보다는 공기유로의 간격조정 등을 통해 대류 전열량을 증가시키는 것이 비용 측면에서도 더 효과적인 방법이 될 것으로 판단된다. 따라서, PSDRS 공기유로의 복사구조물 설치 효과를 충분히 활용하기 위해서는 격납용기(CV)의 온도를 현재보다 평균 50°C 이상 증가시켜야 한다는 결론을 얻을 수 있으므로, 전열면 온도 증진을 위한 분석을 수행하였다.

3.1 격납용기 표면온도 증진 방안

KALIMER 설계[1]에서 격납용기 온도를 50°C 이상 높이기 위해서는 고온플 소듐온도가 약 600°C 이상으로 증가해야 하므로, 이 경우에는 KALIMER 설계안전기준을 만족시킬 수 없다. 기 수행 연구[4]를 통해 PSDRS 작동사고는 IHTS 펌프의 고장확률을 상향 조정함에 따라 Unlikely Event(UE) 에서 Infrequent Event(IE) 로 변경, 분류되어 “Service Level B” 기준을 적용하므로[4], “Service Level B”에 해당하는 설계기준 온도인 600°C를 고온플 소듐온도 제한치로 설정하고 있다. 이 경우, 격납용기의 과도기 최고 온도는 약 400°C(top) ~ 300°C(bottom) 정도이므로, 평균온도를 50°C 이상 증가시키기는 쉽지 않다. 따라서, 30% 이상의 제열량 증진효과를 얻기 위해서는 IHTS 펌프 고장확률을 하향 조정하여 PSDRS 사고를 Unlikely Event(UE)로 재분류 함으로써 “Service Level C”의 온도기준(650°C)을 적용하는 것이 하나의 방법이 될 수 있을 것으로 판단된다. 과도기 격납용기(CV) 표면온도를 증가시키는 또 하나의 방법으로는 원자로용기(RV)와 격납용기(CV) 사이에 고체 또는 액체 금속물질을 삽입하여 전도 혹은 대류전열에 의해 격납용기 온도를 증가시키는 방법을 고려할 수 있다. 즉, RV-CV 사이에 금속물질을 삽입하는 경우에는 복사전열저항 보다 작은 전도 또는 대류 전열저항에 의해 격납용기의 온도를 증가시킬 수 있다. RV-CV 사이의 환형공간에 주입이 가능한 금속 물질로는 다양한 해외 노형[5]에서 1 차계통 냉각제로 주로 사용하고 있는 소듐 또는 Pb-Bi를 고려할 수 있다. 하지만, 전열면 온도 증가를 위한 이러한 방법들은 다양한 설계상의 문제점 및 추가설비 요구에 따른 비용 문제가 대두될 수 있으므로, 향후 설계시에는 안전성 및 경제성을 종합적으로 고려하여 설계에 반영하는 것이 적절할 것으로 판단되며, 본 연구에서는 대략적인 격납용기 온도 증진 경향 파악을 위해 RV-CV 사이 환형공간에 고체 또는 액체 Pb-Bi를 삽입하는 경우에 대한 전열면 온도증가 경향 및 이에 따른 복사구조물 설치 효과를 정량적으로 분석하였다.

3.2 전열방법 변경시의 제열성능 분석

RV-CV 사이의 환형공간에 안전성 측면에서 우수한 Pb-Bi를 채우는 경우의 전열저항 및 제열성능 변화를 정량적으로 분석하였다. 특히, 액체상태의 Pb-Bi를 삽입하는 경우에는 원자로용기(RV)와 격납용기(CV) 사이 환형공간에서의 Pb-Bi 액체의 자연순환 유량계산을 통해 대류전열계수, h_{Pb-Bi} 를 계산하였다. 계산 결과, RV-CV 사이 환형공간에서의 액체 Pb-Bi의 전열계수는 약 $245W/m^2-K$ 정도이며, 이 값을 이용하여 원자로용기(RV)와 격납용기(CV) 사이에서의 전도, 복사 및 대류 전열저항을 계산한 결과는 그림 4에 도시하였다. 그림에서와 같이 소듐 풀에서 공기로의 전체 전열저항에서 RV-CV 사이의 전열저항이 차지하는 비율은 대류의 경우가 가장 작게 계산되었으며, 전체 전열저항에 대한 비율은 복사 전열저항이 약 40%, 전도전열저항은 약 20% 인데 반해 대류전열저항은 약 9% 미만으로 계산되었다. 따라서, RV-CV 사이의 대류 전열과정을 적용하는 경우에는 전열저항 감소에 의해 격납

용기(CV) 온도 증가가 가능하며, 정량적으로는 KALIMER 설계[1]를 기준으로 RV-CV 복사전열과정에서 160 °C인 원자로용기(RV)와 격납용기(CV)의 평균온도 차이는 전도 전열저항의 경우 약 80 °C, 그리고 대류 전열과정에서는 약 40 °C 내외의 차이만을 보이는 것으로 분석되었다.

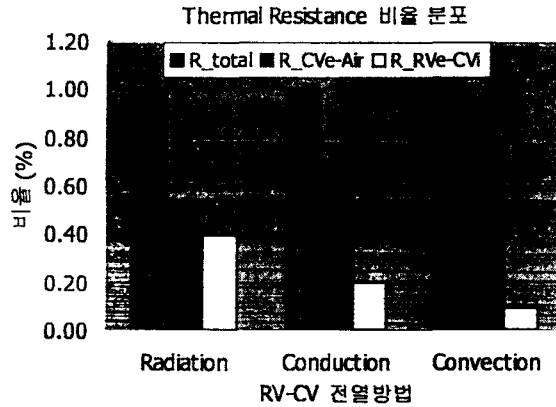


그림 4. Pb-Bi 삽입시 전열저항 분포 비교

이 때 원자로용기(RV)의 온도는 거의 변화가 없는 상태이므로, 환형공간에서의 자연대류 영향을 무시하고 전도 전열만을 고려한다 해도 결과적으로는 격납용기(CV)의 온도는 50 °C 이상 충분히 증가 가능성을 알 수 있다. 따라서, 공기유로에 복사 구조물을 설치하는 경우에는 격납용기 외표면 온도증가에 의해 그 효과가 활발히 나타날 수 있을 것으로 판단된다.

4. KALIMER 가능 최대 열출력 계산

본 절에서는 복사구조물 설치에 의한 제열량 증진효과 및 격납용기 온도증가 경향을 이용하여 대용량 원자로 설계시의 가능 최대 열출력을 계산하였다. 대용량 원자로 설계는 복사구조물 설치 효과와 원자로 직경 증가 효과를 모두 고려하여 수행하게 되므로 결과적으로 현재 KALIMER 설계를 기준으로 복사구조물 설치에 의한 가능 최대 열출력을 과도기 최대 열제거량 증가분과 연관시켜 고려하면 식 (4) 와 같은 관계를 갖는다.

$$Q_{core}^{Expected} = \alpha \cdot Q_{core}^K, \quad \alpha = \frac{Q_{max,removed}^{R/S}}{Q_{max,removed}^K} \quad (4)$$

여기서, 상첨자, “K” 및 “R/S”는 각각 기준 KALIMER 설계[1]와 복사구조물 사용시를 의미하며, 하첨자 “max,removed”는 소듐 풀 최대온도가 나타나는 시점에서의 최대 열제거량을 나타낸다. 따라서, α 는 복사구조물 설치에 의해 제열량이 증가하는 비율을 나타내는 값이 되며, 복사구조물의 개수(N), 공기유로 간격(G), 원자로용기 직경(D_{RVin}) 및 운전온도 ($T_{operation}$)의 함수로 표현이 가능하다. 따라서, 이들 관계를 이용하면 대용량 원자로 설계시의 가능 최대 열출력을 그림 5 와 같이 도시할 수 있다. 그림에서와 같이 PSDRS 만을 사용하는 경우에는 가능 최대 열출력 곡선이 원자로 크기 증가에 의해 제약받는 것과 달리, 복사구조물 설치시에는 원자로용기(RV)의 직경 증가에 의해 가능 최대 열출력이 이에 상응하여 거의 선형적으로 증가함을 볼 수 있으므로, 동일 조건에 대하여 PSDRS 만을 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.

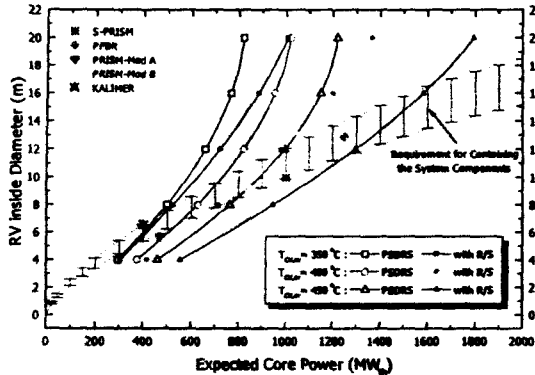


그림 11. 복사구조물 설치시의 가능 최대 열출력 비교

따라서, 복사구조물 설치에 의해 증가 가능한 열출력 곡선과 풀 내부기기 수용을 위한 경제성 곡선이 만나는 지점의 실질적인 가능 최대 열출력은 격납용기 평균온도를 기준으로 가능한 운전온도 영역인 400 °C 근방에서는 PSDRS 만으로는 원자로 직경 증가에 의한 열출력 증진이 약 650MWt 에 불과한 것과 달리, 복사구조물 설치시에는 동일 운전온도 조건에서 최대 약 1,000MWt 까지 열출력 증진이 가능한 것으로 분석되었다.

5. 결론

본 연구에서는 KALIMER PSDRS 공기유로에 복사구조물을 설치하는 경우 예상되는 제 열용량 증진효과를 정량적으로 분석하고, 이를 토대로 대용량 액체금속로 설계시의 필요 간 열제거 용량 확보를 위한 방법을 설정하여 간열제거 관점의 가능 최대 열출력을 계산하였다. 제열성능 개선 분석결과를 토대로 계산한 대용량 원자로 설계시의 가능 최대 열출력은 원자로 크기 증가와 전열면 온도 증가에 비례하여 증가 가능하며, 정량적으로는 간열제거 관점에서 최대 1,000MWt 열출력의 원자로 설계가 가능함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 주관한 원자력 증장기 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. 위명환, 심윤섭, 김성오, "PSDRS의 간열제거 특성분석", 한국원자력학회 '98 춘계학술발표회 논문집 pp. 653-659, 1998
3. 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
4. Y.S. Sim, et. al., "Guides for the Development of Fluid System Design and Methodology", 한국원자력연구소, LMR/FS100-DG-01, 1998
5. Generation IV Roadmap, "Generation IV -Submitted Reactor System Concepts -Liquid Metal Reactor System", DOE Gen IV Site, April, 2001