

KALIMER 잔열제거 운전 기본 논리 개발

Development of Basic Logic for Residual Heat Removal Operation of KALIMER

어재혁, 심윤섭, 김연식, 김의광

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

발전소 출력감소 운전시, 계통에서 발생하는 열부하 제거에 사용되는 KALIMER 잔열제거계통의 용량을 평가하여 잔열제거 기본 논리를 설정하고, 이를 구현하기 위한 적용 예를 제시하였다. 100% 출력운전에서 재장전 온도 도달시점까지 발생하는 계통의 총 열부하(total heat load)는 270°C/hr에 해당하는 충분한 냉각능력을 갖는 증기발생계통(SGS)을 이용하여 제거하며, 재장전 온도 도달 시점부터는 SGACS에 의해 계통의 총 열부하를 제거한다. SGACS의 열제거 용량 증진을 위해 SGACS의 설계 변수 중 SG-shroud 간격과 재장전온도 도달 시점에서의 필요 열제거량 확보를 위한 공기유량에 대한 분석을 수행하여, 공기유로 간격과 공기유량을 각각 0.1m와 45kg/sec로 설정하였다. 이를 토대로 KALIMER 잔열제거 기본 운전 방법을 설정하였으며, 100% 정격출력에서 원자로 정지 후 12시간 경과 후인 재장전온도 진입 시점까지는 증기발생계통(SGS)을 사용하여 계통 열부하를 제거하고, 재장전온도 도달 이후로는 PSDRS와 SGACS 2대를 사용하여 노심 붕괴열에 의해서만 발생하는 계통 열부하를 제거하며, 원자로 정지 후 4일 경과 시점부터는 PSDRS와 SGACS 1대만을 사용하여 재장전 온도를 유지할 수 있다. 본 연구를 통해 수행된 계통의 잔열제거 용량 평가 및 이를 이용한 잔열제거 운전 예는 KALIMER 잔열제거계통 설계에 활용될 수 있다.

Abstract

In this study, the capacity of KALIMER RHRs for removal of the decay and residual heat load is assessed and a basic logic for the decay heat removal operation in KALIMER was set up. The system total heat load imposed by the temperature transient from reactor shutdown to the refueling mode is to be removed only by steam generating system (SGS), which has the sufficient cooldown rate of more than 270°C/hr. When the system reaches the refueling temperature, the heat load can be removed by SGACS alone. To enhance the heat removal capacity of SGACS, the design parameters such as gap size of air path between SG and shroud were investigated. The optimal gap size of the air path and the mass flowrate of air that satisfies the heat removal capacity of the heat load at refueling temperature were determined as 0.1m and 45kg/sec, respectively. Through these investigations, a sample operation of RHR was set up. For the 12 hours operation after reactor shutdown, from full power to the refueling mode, SGS is only used and after that PSDRS and two-SGACS are operated to remove the system heat load generated only by core decay heat, and from 4 days after reactor shutdown, PSDRS and only one SGACS are used to maintain the refueling temperature. The results from the assessment of RHR capability and the illustration of the sample operation for RHR can be used for improvement and refinement of RHR system design.

1. 서론

KALIMER는 출력운전 중 노심에서 발생된 열이 그림 1과 같이 원자로 내부의 소듐풀, 중간열교환기(IHX), 중간열전달계통(IHTS)을 거쳐 증기발생계통(Steam Generating System ; SGS)으로 이어지는 정상 열제거 경로를 통해 운전된다[1]. 이러한 열제거 계통은 정상운전 뿐만 아니라 발전소의 출력변화시 고온대기 운전모드 또는 재장전 모드까지 계통을 냉각시키는 경우에도 동일하게 사용되며, 출력감소 운전시에는 계통의 온도변화에 의한 에너지 변화가 수반되므로 계통에서 발생하는 열부하를 제거해야 한다.

계통의 냉각은 크게 증기발생계통(SGS), 피동 안전등급 잔열제거계통(PSDRS), 그리고 증기발생기 보조냉각계통(SGACS)의 세가지를 사용하여 이루어지며, 이중 PSDRS는 발전소의 전 수명기간동안 항상 작동하는 안전등급의 완전한 피동개념을 적용하고 있다. 또한, 증기발생계통(SGS)은 노심 정지후 초기의 계통 잔열 및 노심 붕괴열을 증기발생기(SG)로부터 제거하여 응축기(condenser) 또는 대기중으로 dump시키는 역할을 수행하며 주로 많은 양의 기저 열부하를 제거하는데 사용된다. 증기발생기 보조냉각계통(SGACS)은 기저 열부하를 제거하는 증기발생계통(SGS)의 사용시간을 최대한 단축시키기 위해 계통의 열하중(heat load)이 일정용량 이하로 감소하면 증기발생계통(SGS)을 대신하여 계통 온도를 목표치로 유지하는 정도의 상대적으로 적은 열부하를 제거하는데 사용되며, 증기발생기 상단 공기 굴뚝에 설치된 Air Blower를 사용하여 강제순환에 의해 증기발생기를 직접 냉각한다.

2. 허용 계통 냉각률

계통의 허용 냉각률은 계통을 급격히 냉각시키는 경우, 열충격(thermal shock)에 의해 구조재에 급격한 온도구배가 발생하여 재료적 결함이 발생하는 것을 방지하기 위해 반드시 지켜져야 하며, 발전소 출력 및 운전모드에 따라서 허용 냉각률을 달리 적용하고 있다. KALIMER의 계통 예비 허용 냉각률은 100% 정격출력에서 고온대기 온도까지는 100°C/hr, 고온대기 온도에서 재장전 온도까지는 28°C/hr이며, 재장전 온도 도달시간은 노심 정지 후 24시간 이내로 설정되어 있다[2]. 이 값을 여타 발전소 설계치와 비교하면 다음과 같다. 경수로의 경우, 100% 정격출력 운전에서 고온대기 모드까지의 허용 냉각률은 100°F/hr로, 섭씨로 환산하면 약 55°C/hr이며, 설계시에는 75%의 여유도를 두어 약 42°C/hr로 설정하고 있다. 이러한 계통의 허용 냉각률은 구조물의 두께가 얇을수록 thermal stress가 감소하므로, 경수로와는 달리 1차계통의 운전압력이 낮은 액체금속로의 경우에는 원자로용기(RV)의 두께가 경수로에 비해 상대적으로 얇기 때문에 적용하는 허용 냉각률이 경수로에 비해 여유도를 가질 수 있다. 이러한 액체금속로의 허용 냉각률 설정을 위해 해외의 노형과 비교한 결과, GE에서 개발한 PRISM의 경우에는 25% 출력 운전에서 고온대기 온도까지 약 100°C/hr이며, 고온대기온도에서 재장전온도까지는 PRISM과 CRBRP 모두 약 28°C/hr로 설정하고 있으므로, KALIMER의 경우도 설정치에 대한 타당성을 지닌 것으로 판단할 수 있다. 잔열제거 방법 설정시에는 이러한 허용 냉각률 및 재장전 운전모드 진입 요건을 상당한 여유도를 부여하여 달성 가능하도록 할 필요가 있으며, 본 연구에서는 이를 구현하기 위한 방법의 설정 및 평가를 수행하였다.

3. 잔열제거 용량 계산

3.1 계통의 축적 에너지

KALIMER는 수명기간동안 수 차례 이상의 보수 또는 핵연료 재장전 등의 과정을 겪게 되므로, 발전소의 100% 정격출력 운전에서 재장전 모드까지의 천이과정이 필요하다. 이 경우, 계통에 축적되는 에너지는 LSYS2 코드의 계산 결과를 이용하였으며[3], 계통의 에너지는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$MC_p \frac{\partial T_{Na}}{\partial t} = Q_{Gen} - Q_{sink} \quad (1)$$

$$m_{Na} C_{p,Na} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\gamma \bar{T}_{st}) + \frac{\partial}{\partial t} (\bar{T}_{Na}) \right] = Q_{gen} - Q_{sink} ; \quad \gamma = \frac{m_{st} C_{p,st}}{m_{Na} C_{p,Na}} \quad (2)$$

여기서, M은 계통내의 소듐과 구조물의 총 질량, 하첨자 Na와 st는 각각 소듐과 구조물을 의미하며, Q_{Gen} 과 Q_{sink} 는 노심에서의 열 발생량과 열 제거량, γ 는 구조물과 소듐의 열용량의 비를 나타낸다. 즉, 100% 정격운전에서 출력 감소가 발생할 경우에는 식 (2)의 우변 항에서의 열생성과 열제거량의 불균형으로 인한 ΔQ 의 에너지가 계통에 축적되며, 이 때의 축적 에너지는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E = E_o + \int_{T_o}^{T_i} \rho C_p dV \quad (3)$$

여기서, E는 계통에 축적되는 에너지로 T_{SYS} 가 30°C 일 때를 기준 에너지 준위, 0으로 하여 계산되며[3], 발전소 출력 변화에 의해 계통의 온도가 변화되면 ΔE 만큼의 에너지가 계통에 축적된다. 본 연구에서는 발전소 출력 변화에 의한 계통 축적에너지와 이 때의 노심 붕괴열(decay heat)을 계산하여 계통의 총 열부하(total heat load)를 계산하였다. 다음의 표 1은 발전소 출력별 1차계통(Primary Heat Transport System ; PHTS)과 중간열전달계통(Intermediate Heat Transport System ; IHTS)의 계통 에너지를 나타낸다[3]. 그림 2는 표 1에 제시된 PHTS와 IHTS의 계통 총 에너지를 발전소 천이 상태별로 비교하여 도시한 그림으로, 소듐과 구조물의 질량이 많은 PHTS의 에너지가 IHTS의 에너지에 비해 각 상태별로 일정 비율이상 항상 크게 나타남을 잘 보여주고 있다. 따라서, 본 분석에서는 그림에 제시된 계통의 총 축적 에너지를 대상으로 계통의 총 열하중(total heat load)을 계산하였다.

3.2 계통의 열하중 계산

계통의 열하중은 앞서 제시된 계통의 총 에너지를 이용하여 PHTS와 IHTS의 에너지를 모두 합산하여 계산되며, 발전소 상태 천이에 의한 계통의 온도변화에 의해 시간당 발생하는 열량, $Q_{SYS,E}$ 은 식 (4)와 같이 표현할 수 있으므로 원자로 정지 이후의 계통의 총 발생 열부하(total heat load), $Q_{SYS,Load}$ 는 계통의 냉각률을 반영하여 시간(t)에서의 노심의 붕괴열(decay heat)과

계통 에너지 변화율을 합산하여 식 (5)과 같이 계산된다.

$$Q_{SYS,E} = \frac{E_n - E_{n-1}}{\Delta t} \quad (4)$$

$$Q_{SYS,Load} = Q_{SYS,E} + Q_{Decay} \quad (5)$$

100% 출력에서 25% 출력까지의 출력변화 구간에서는 터빈계통을 이용한 출력운전이 가능하며, 25% 출력 이하의 영역에서는 계통의 냉각을 위해 증기발생계통(SGS)을 통한 열제거가 시작된다. 이후 출력을 계속 감소시켜 0% 출력에 도달하는 시점에서 원자로가 정지하고 이때부터 재장전 온도까지는 계통 냉각으로 인해 발생하는 잠열과 노심 붕괴열에 의해 계통의 총 열 부하(total heat load)가 결정되며, 계통을 냉각시켜 재장전 온도에 도달하면 잠열은 더 이상 발생하지 않으므로, 계통의 열 부하는 오직 노심 붕괴열에 의해서만 발생하게 된다. 따라서, 발전소의 출력변화 이후 원자로가 정지되는 고온대기 운전모드 진입시점에서의 노심 붕괴열을 설정하기 위해 다음 그림 3과 같은 3가지 노심 붕괴열 곡선을 가정하여 잔열제거 용량 평가에 가장 적합한 경우를 설정하였다. 그림 3의 곡선 Q1은 계통이 100% 정격출력에서 출력변화가 시작되는 시점을 원자로 정지 시점으로 가정하고 이 때부터 노심의 붕괴열이 발생하여 0% 출력에서의 붕괴열을 고온대기 운전모드 도달시간에서의 붕괴열로 설정하는 방법으로, 원자로 출력변화 기간 중에 핵분열 반응물 생성이 중단되지 않고 계속됨에도 불구하고 핵분열 반응물 생성이 중단되는 것으로 간주하므로, 고온대기 운전모드에 진입 시점에서는 실제 값보다 적은 붕괴열이 발생할 것으로 예상되어 잔열제거 용량 평가 측면에서 보수성이 결여될 수 있다. 또한, Q2 곡선은 100% → 80% → 25% → 고온대기 운전모드까지의 출력변화 중에 붕괴열을 포함한 노심 출력의 실제적 변화를 나타내는 것으로서, 이 곡선의 값은 곡선 Q1과 Q3 사이에 존재하게 된다. 그리고, 곡선 Q3는 원자로가 정지되는 시점을 100% 출력으로 고려하여 이 출력을 붕괴열의 기준으로 설정하는 방법으로, 고온대기 진입시점에서 100% 출력을 기준으로 붕괴열을 계산하므로 계통의 열하중이 지나치게 큰 값으로 계산되므로 비현실적이지만, 잔열제거 용량 평가 측면에서는 재장전 온도 진입 직전까지는 증기발생계통(SGS)에 의해 계통의 열제거를 수행하므로 보수적인 측면에서 적절한 가정이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 모든 운전 가능 경우를 포함하는 해석 결과가 이루어져야 하므로, 계통의 총 열하중 계산을 위한 노심 붕괴열 곡선을 보수적인 Q3 곡선으로 설정하였다. 이 경우, 노심 붕괴열은 실제 현상보다 지나치게 보수성을 가지고 있으나, 고온대기 운전모드에 진입하는 시점까지는 증기발생계통(SGS)을 통해 많은 양의 열을 제거할 수 있고, 또한 재장전 온도 진입 시점까지의 소요시간이 수 시간에 이르므로 붕괴열 곡선에서 초기 수백 초의 불확실성은 재장전온도 도달시점에서는 Q3 곡선의 지나친 보수성이 비현실적인 결과를 나타낼 정도로 큰 영향을 미치지 않을 것으로 예상하여 노심 붕괴열 곡선을 보수적으로 가정하고, 이를 구현하기 위한 증기발생계통(SGS) 및 증기발생기 보조냉각 계통(SGACS)의 용량을 평가하여 계통의 잔열제거 방법 에 설정에 활용하였다.

3.3 증기발생계통(SGS) 용량 평가

증기발생계통(SGS)은 원자로 정지 후 재장전온도까지 계통을 냉각시키는 경우에 발생하는 계통의 잠열과 노심 붕괴열을 포함하는 계통의 총 열하중 제거를 위한 충분한 용량을 확보해야 한다. 본 연구에서는 계통의 총 열하중의 하나인 노심 붕괴열을 앞서 언급한 바와 같이 매우 보수적으로 설정하였으므로 증기발생계통(SGS)이 이러한 보수적인 계통의 총 열하중 제거를 위한 충분한 열제거 능력 보유 여부를 평가하였다. 고온대기 운전모드에서 재장전온도까지의 증기발생계통(SGS)의 용량은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$Q_{SGS} = MC_p \cdot R_C \quad \therefore R_C = \frac{Q_{SGS}}{MC_p} \quad (6)$$

$$MC_p = \frac{\Delta E}{\Delta T} = \frac{E_1 - E_2}{T_1 - T_2} \quad (7)$$

식 (7)에서, 하첨자 1과 2는 발전소 상태를 나타내며, 각각 고온대기 운전모드와 재장전 모드를 의미한다. 또한, R_C 는 증기발생계통(SGS)의 용량, Q 에 상응하는 계통의 냉각률이며, R_C 를 계산하여 증기발생계통(SGS)의 최대 냉각률 및 용량을 표현할 수 있다. 증기발생계통(SGS)의 용량은 계통의 평균온도의 함수로 주어지므로, 0% 출력에서의 증기발생계통(SGS) 용량 계산을 위해 고온대기 운전 모드에서의 계통 평균온도, $(T_{SYS} - T_{FW})^{HS}$ 와 25% 출력운전에서의 계통 평균온도, $(T_{SYS} - T_{FW})^{25\% Power}$ 를 같다고 가정하면 다음의 관계가 성립한다.

$$(T_{SYS} - T_{FW})^{HS} \cong (T_{SYS} - T_{FW})^{25\% Power} \quad (8)$$

$$\therefore Q_{SGS}^{HS} \cong Q_{SGS}^{25\% Power} = 392.2MW \cdot 0.25 = 98.05MW \quad (9)$$

표 2는 앞서 제시한 LSYS2 해석 결과를 인용하여 발전소 상태변화에 따른 계통의 평균온도와 에너지를 정리한 것으로, 이 data를 이용하면 계통의 MC_p 가 큰 변화 없이 거의 유사한 값을 가지며, 따라서 고온대기에서 재장전모드까지의 증기발생계통(SGS) 열제거 용량은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$R_C = \frac{Q_{SGS}^{HS}}{MC_p} = \frac{Q_{SGS}^{25\% Power} \cdot (T_{HS} - T_{Re\ fueling})}{E_{HS} - E_{Re\ fueling}} \cong 270^\circ C / hr \quad (10)$$

즉, 증기발생계통(SGS)을 이용하여 계통을 냉각시키는 경우, 시간당 270 °C 까지 냉각이 가능하며, 열량으로 환산하면 약 100MW의 큰 열제거 용량을 갖는다. 이 값은 앞서 제시한 고온대기 온도에서 재장전온도까지의 계통 허용 냉각률 28°C/hr의 약 10배에 가까운 값이므로 계통에 매우 큰 열부하가 발생한다고 해도 증기발생계통(SGS)을 사용하여 충분히 제거할 수 있음을 잘 보여주고 있다. 따라서, 계통의 잔열제거 용량 평가에 보수성을 부여하기 위해 원자로 정지 시점에서의 노심의 붕괴열을 100% 출력을 기준으로 계산한다고 해도 증기발생계통(SGS)을 통

해 충분한 열제거를 수행할 수 있으므로, 원자로 정지부터 재장전 온도까지는 증기발생계통(SGS)을 이용하여 계통을 냉각시키고 재장전 온도 진입시점부터는 SGACS를 이용하여 노심 붕괴열에 의해 발생하는 계통 열하중을 제거하여 온도를 일정하게 유지시킬 수 있다. 따라서, 노심의 붕괴열을 효과적으로 제거할 수 있는 SGACS의 용량 확보가 필요하므로 재장전 온도 도달시의 노심 붕괴열을 기준으로 SGACS 용량평가를 수행하였다.

3.4 증기발생기 보조계통(SGACS) 용량 평가

그림 4는 SGACS의 개략적인 형상이며, 그림에서와 같이 증기발생기를 둘러싸고 있는 shroud와 증기발생기(SG) 외벽 사이에 형성된 공기유로를 통한 강제순환에 의한 열제거를 수행한다. 증기발생기 보조냉각계통(SGACS)은 증기발생기 하단으로부터 찬 공기가 유입되어 증기발생기 상단의 공기 굴뚝에 설치된 Fan에 의해 일정 목표 유량을 사용하여 필요한 열제거 용량을 확보하는 방식으로, 발전소의 정격출력 운전 동안에는 SGACS 공기굴뚝 상단에 설치된 air damper를 폐쇄하여 증기발생기(SG) 외벽을 통한 열손실을 방지하고, SGACS가 가동되는 경우에는 air damper를 개방한다.

증기발생기 보조냉각계통(SGACS)의 주된 열제거 기구(mechanism)는 공기유로를 통한 대류 전열과 증기발생기 외벽과 shroud 간의 복사 전열이며, PSDRS와는 달리 강제순환을 사용하는 능동계통(active system)인 점을 감안할 때 복사보다는 대류가 차지하는 비율이 매우 높다. 따라서, 잔열제거 용량을 증가를 위해 증기발생기(SG)와 shroud 사이의 공기유로 간격을 조정하였다. 그림 5는 SG-shroud 사이의 간격을 기준 설계값인 0.15m에서[1][4], 강제대류 성능에 가장 적합하도록 조정한 결과를 나타낸 그림으로, 자연대류시 공기유로 간격이 작을수록 유로저항이 급격하게 증가하여 약 15cm 정도의 간격에서 최대 열제거량이 나타나지만, 강제대류의 경우에는 공기유로의 저항과 상관없이 공기유로 간격을 감소시킬수록 대류에 의한 전열능력이 향상됨을 알 수 있다. 하지만, 발전소 가동 중 검사 또는 진동에 의한 지지구조물 요동 등의 종합적인 측면을 고려하여 SG-shroud 간격을 10cm로 설정하고, SGACS 열제거량의 현실성 파악을 위한 공기유로 유속, 유동하중 및 SGACS air blower의 크기, 하중, 그리고 소요 전력 등의 구체적인 계산을 수행하였다[5]. 또한, SG-shroud 간격을 15cm 에서 10cm로 조정한 결과, SGACS의 열제거량은 증기발생기의 shell 측 온도가 일정할 경우, 그림 6과 같이 강제순환 유량별로 평균 30% 가량 증가하는 것으로 나타났다. SGACS 열제거 용량은 발전소 상태 천이에 의해 발생하는 계통의 총 열부하(total heat load)를 제거할 수 있어야 하므로, 앞선 분석을 통해 제시된 재장전온도 도달시점 이후의 노심 붕괴열에 10%의 여유도를 부여한 열량을 기준으로 다음 식 (11)을 만족시키도록 SGACS의 강제순환유량을 설정하였다.

$$Q_{SGACS}(T = T_{Re\ fueling}) \geq (1 + \alpha) \cdot Q_{SRC}(t) \quad (11)$$

그림 7은 고온대기 운전모드에서 재장전 온도까지의 계통에서 발생하는 열부하와 재장전온

도 도달 시간에서의 노심 붕괴열을 포함하는 시간에 따른 계통 총 열부하(total heat load) 곡선을 나타낸 그림으로, 재장전온도 도달 시점 이후의 노심 붕괴열을 제거할 수 있도록 SGACS Fan의 강제순환유량별 열제거량을 함께 도시하여 적절한 재장전온도 도달 시간과 SGACS Fan 용량을 설정하였으며, 고온대기 운전모드에서 재장전 모드까지의 시간이 짧을 수록, 즉 계통의 냉각률이 증가할수록 계통의 총 열하중이 증가함을 알 수 있다. 따라서, 상태 천이 기간 동안은 SGACS를 사용한 계통의 열부하 제거가 불가능하므로 SGACS는 재장전온도 진입 이후의 계통 온도 유지에만 사용할 수 있음을 알 수 있다. 또한, 고온대기 온도에서 재장전온도까지의 상태천이 기간 동안은 증기발생계통(SGS)을 사용하여 계통을 냉각시키므로 열하중이 급격히 증가하여도 앞서 계산한 증기발생계통(SGS) 용량에 미치지 못하므로 계통의 열제거는 충분하다. 다만, 재장전 온도에 도달하는 시점에서의 계통의 총 열하중이 노심 붕괴열에 의해 결정되므로 고온대기 온도에서 재장전 온도까지의 냉각률이 감소할수록 재장전 온도 진입 이후의 계통 열하중이 감소하여 SGACS를 통한 필요 열제거 용량을 감소시킬 수 있다. 그림 7을 통해 SGACS의 필요 열제거량을 계산하면, 원자로 정지 후 재장전 온도 진입 시점이 6시간인 경우에는 약 50 kg/sec의 강제순환유량이 필요하지만, 12시간이 지난 경우에는 약 40 kg/sec, 그리고, 18시간이 지난 경우에는 약 30~35 kg/sec의 강제순환유량이 필요함을 알 수 있다. 따라서, 증기발생계통(SGS)의 사용시간을 감소시키고 SGACS의 강제순환 유량을 현실화시키는 관점에서 재장전온도 진입시간을 원자로 정지 후 12시간으로 설정하는 경우, 이 때의 SGACS 1대당 강제순환 유량은 여유도를 두어 45kg/sec, 열제거량은 1.66 MW이 된다. 이를 통해 재장전온도 진입 시점인 원자로 정지 후 12시간 이후부터는 SGACS 2대를 이용해 계통의 잔열을 제거하여 계통 온도를 재장전 온도로 일정하게 유지시킬 수 있다. 결론적으로, KALIMER의 운전모드별 잔열제거 기본 방법은 SGACS의 용량만으로는 고온대기 운전모드에서 재장전모드까지의 계통 냉각시 발생하는 총 열부하(total heat load)를 제거할 수 없으므로 100% 출력에서 재장전온도 진입 전까지는 증기발생계통(SGS)을 사용하여 계통을 냉각시키고, 재장전온도 진입시점 이후로는 SGACS를 사용하여 계통의 온도를 일정하게 유지시키는 방법이 된다.

4. 잔열제거 운전논리 적용 예

본 절에서는 원자로 정지 후 48시간 동안의 잔열제거 방법을 구체적으로 적용하여 KALIMER 계통 특성을 분석하였다. 원자로 정지 이전 단계인 출력변화 운전 중의 계통 냉각은 앞선 계산을 통해 그 용량이 충분함을 확인한 바 있는 증기발생계통(SGS)을 사용하되, 가능한 예로써 다음과 같은 경우를 고려해 볼 수 있다.

4.1 적용 경우의 계통 목표온도 및 열제거량 설정

계통의 허용 냉각률을 이용하여 계통의 목표온도를 설정하였다. 100% 출력 정격운전중의 계통 평균온도는 약 459 °C이며, 재장전 온도는 200 °C이므로[3][5], 약 259 °C의 온도에 해당하는 에너지를 계통으로부터 제거해야 하며, 원자로 정지 후 24시간 이내에 재장전온도에 도달해야

한다[2]. 이 조건을 만족시키기 위해 계통의 허용 냉각률을 이용하면[2][5], 발전소 상태 천이 과정에서의 냉각률을 다음의 표 3과 같이 예를 들어 가정할 수 있다.

KALIMER 계통의 증기발생계통(SGS) 또는 관련 계통의 점검 및 유지/보수 작업을 위해 그 사용 시간을 최대한 단축시키는 것이 바람직하므로, 표 3에서와 같이 100% 정격출력 운전에서 80% 출력, 25% 출력, 그리고 고온대기 운전모드까지의 계통 온도 변화는 각각 약 91 °C, 74 °C, 33 °C로 계통의 허용 냉각률이 100 °C/hr이므로 증기발생계통(SGS)의 용량과 계통의 구조적 안전성 측면에서 충분한 냉각 능력을 갖도록 가정하였다. 그림 8은 예를 들어 설정된 발전소 상태 천이별 계통의 목표온도를 도시한 것으로 앞서 가정된 냉각률을 토대로 원자로 출력변화 시점으로부터 2시간 경과 후에 고온대기 온도에 도달하고, 재장전온도 도달 이후의 열제거를 위한 SGACS의 용량을 고려하여, 고온대기 온도에서 재장전 온도까지의 허용 최대 냉각률 28°C/hr 이내에서 앞서 설정한 바와 같이 고온대기 온도에 도달한 후 12시간에 재장전 온도에 도달할 수 있도록 계통의 냉각률을 약 12°C/hr로 설정하였다. 이와 같은 방법은 증기발생계통(SGS)의 열제거 용량이 매우 크기 때문에 가능하며, 여타 가능한 방법들 중의 한 예를 나타내는 것이다.

4.2 계통의 기본 열제거 방법 예

원자로 정지 이전 단계인 발전소 출력운전 중에는 증기발생계통(SGS)을 이용하여 계통을 냉각시키며, 고온대기 온도에 도달하는 시점에서 원자로가 정지하여 이후 12시간 경과한 시점부터는 목표 계통온도를 재장전 온도로 일정하게 유지해야 하므로 계통의 열제거량을 계통 열하중의 대부분을 차지하는 노심 붕괴열을 제거할 수 있을 정도로 적절히 조정해야 한다. 이 때 PSDRS를 통한 열제거량은 동일 소듐 풀 온도에서는 항상 일정한 값을 가지므로 계통의 온도 균형은 SGACS의 Fan 용량을 조절하여 유지하도록 한다. 이러한 잔열제거 방법을 시간에 대하여 도시하면 그림 9와 같이 요약하여 나타낼 수 있다.

그림에서와 같이 계통의 총 열부하(total heat load)는 출력운전 중에는 매우 큰 값을 가지며, 이후 원자로가 정지되는 시점에서는 노심 붕괴열과 계통의 냉각에 의한 잠열을 포함하여 출력변화 기간 동안보다는 작지만 역시 큰 열부하를 가지므로, 재장전온도에 도달하는 초기 12시간까지는 PSDRS와 SGACS 2대를 합친 열제거량을 훨씬 상회하는 것을 알 수 있다. 따라서, 재장전온도에 도달하는 원자로 정지 후 12시간까지는 계통의 총 열부하(total heat load)를 증기발생계통(SGS)을 통해 제거하고, 고온대기 온도에서 재장전온도까지는 증기발생계통(SGS)의 사용 시간을 최대한 단축시키기 위해 계통의 허용 냉각률 내에서 계통을 일정 냉각률로 냉각시켜 원자로 정지 후 12시간 경과시의 재장전 온도 진입 이후에는 증기발생계통(SGS)을 사용한 대규모 열제거는 사용하지 않고, PSDRS와 SGACS 2대만을 이용하여 재장전온도를 유지시킨다. 이 때, SGACS를 통한 열제거는 해당 온도에서의 최대 Fan 용량에 의한 열제거량을 나타낸 것이므로, 계통의 목표온도와 발생하는 열부하를 고려하여 적절한 강제순환 유량으로 운전할 수 있다. 특히, SGACS의 열제거 용량은 재장전온도 도달시의 노심 붕괴열을 기준으로 설정하였으므로, 재장전 온도 진입 시점에서의 충분한 계통 열부하 제거를 위해서는 SGACS 2대의 Fan

용량을 설계 최대용량으로 운전해야 한다. 또한, 시간이 경과함에 따라 노심의 붕괴열 감소로 인해 원자로 정지 후 약 4일 경과 후에는 PSDRS와 SGACS 1대의 열제거 용량만으로도 계통의 열부하를 충분히 제거하여 계통을 재장전 온도로 일정하게 유지할 수 있게 되므로, 2-Loop으로 이루어진 계통의 한쪽 Loop을 점검 또는 보수할 수 있는 시간적 여유를 가질 수 있다. 이 경우, SGACS의 열제거량은 증기발생기(SG)의 직경, 높이 등의 전열면적과 SG-shroud 간격, 그리고 강제순환 유량의 함수로 주어지며, 이 인자들에 의한 영향을 정량적으로 분석한 결과, 증기발생기(SG)의 직경을 약 10% 증가시키는 경우에는 SGACS의 전열면적 증가로 인해 SGACS 1-Loop 잔열제거 운전 가능 시간이 약 12시간 정도 빨라지는 것으로 계산되었다[5].

5. 결론

KALIMER 계통의 잔열제거 용량을 평가하여 계통의 잔열제거 기본 논리를 설정하였으며, 이를 토대로 잔열제거 방법의 적용 예를 제시하였다. 발전소 상태 천이에 의해 생성되는 계통의 총 열부하(total heat load)를 제거하기 위해서는 원자로 정지 후 재장전 온도 도달시점까지는 시간당 270°C에 해당하는 열제거 용량을 갖는 증기발생계통(SGS)을 사용하며, 본 연구를 통해 증기발생계통(SGS)의 용량이 재장전온도 도달 시점까지의 보수적인 계통의 열하중을 제거하기에 충분한 용량임을 확인하였다. 재장전 온도 진입 이후부터는 SGACS를 이용한 열제거가 수행되므로, 이 시점에서의 SGACS를 통한 열제거량을 증진시키기 위해 설계인자를 변경하여 SG-shroud 간격은 0.1m로 설정하고, 재장전온도 진입 시점의 필요 열제거량을 고려하여 SGACS의 강제순환 유량은 45kg/sec, 이 때의 SGACS 1대당 열제거량은 1.66MW로 설정하였다. 이러한 분석을 토대로 한 실제 적용 예를 보면, 계통의 허용 냉각률 내에서 원자로 정지 후 12시간에 재장전 온도에 도달하도록 하여 증기발생계통(SGS)의 사용시간을 최대한 단축시키고 SGACS Air blower의 용량을 현실화하였다. 이로부터 설정된 KALIMER 잔열제거 운전 기본 방법은 100% 출력에서 재장전온도 진입 전까지는 증기발생계통(SGS)을 사용하여 계통을 냉각시키고, 재장전온도 진입시점 이후로는 SGACS 2대를 사용하여 계통의 온도를 일정하게 유지시키는 방법으로, 원자로 정지 후 약 4일 경과 후에는 PSDRS와 SGACS 1대만으로도 재장전 온도를 유지할 수 있다. 본 연구를 통해 수행된 계통의 잔열제거 용량 평가 및 이를 이용한 운전 논리 예는 KALIMER 잔열제거계통의 설계 고려자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 주관한 원자력 중장기 연구과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. KALIMER Preliminary Conceptual Report, KAERI/TR-1636/2000
2. Y.S. Sim, Y. S. Kim, "Guide for the Development of Fluid System Design and Methodology", 한국원자력연구소, KALIMER팀 내부분서, LMR/FS100-DG-01 Rev.1/2001 (FS1110000)
3. 심윤섭, "100%에서 80%로의 출력감소 운전시 계통과도특성 1차 해석보고서", 한국원자력연구소, KALIMER 팀 내부분서, LMR/FS700-AR-01, 2001 (FS1335000)

4. Residual Heat Removal System Design Description, 한국원자력연구소, KALIMER팀 내부분서, LMR/FS-500-DD-01 Rev.3/2001
5. 어재혁, “KALIMER 잔열제거계통 용량 평가 및 잔열제거 방법 설정 보고서”, 한국원자력연구소, KALIMER팀 내부분서, LMR/FS500-ER-01 Rev.0/2001 (FS1220000)

표 1. 발전소 상태 천이에 의한 계통 에너지 변화

Unit = MJ		100% Power	80% Power	25% Power	Hot-Standby	Refueling
E _{PHTS}	Sodium	2.07E+5	1.84E+5	1.68E+5	1.53E+5	8.26E+4
	structure	1.24E+5	1.11E+5	1.03E+5	9.40E+4	5.33E+4
	Sum	3.31E+5	2.95E+5	2.70E+5	2.47E+4	1.36E+5
E _{IHTS}	Sodium/loop	3.35E+4	2.99E+4	2.91E+4	2.73E+4	1.46E+4
	Structure/Loop	4.49E+4	3.99E+4	3.91E+4	3.67E+4	1.96E+4
	Sum/system	1.57E+5	1.39E+5	1.37E+5	1.28E+5	6.85E+4
E _{SYS,tot}		4.88E+5	4.35E+5	4.07E+5	3.75E+5	2.04E+5

표 2. 발전소 상태별 계통 평균온도 및 에너지

State	T _{sys} [°C]	E _{sys,tot} [MJ]
100% Power	459.1	5.36E+05
80% Power	413.7	4.78E+05
25% Power	376.7	4.47E+05
Hot standby	344.2	4.12E+05
Refueling	201.4	2.25E+05

표 3. 발전소 상태별 계통 냉각률 가정

발전소 상태천이 과정	냉각률(°C/hr)
100% Normal → 80% Power	90.8
80% → 25% Power	74.0
25% Power → Hot standby	32.5
Hot standby → Refueling mode	11.9

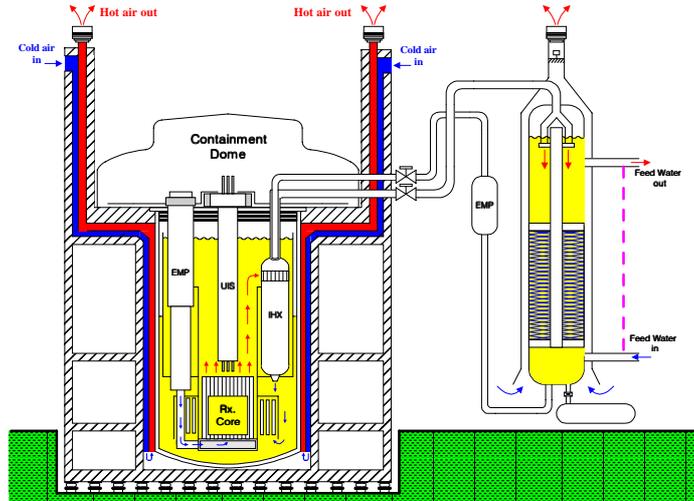


그림 1. KALIMER 열전달 경로

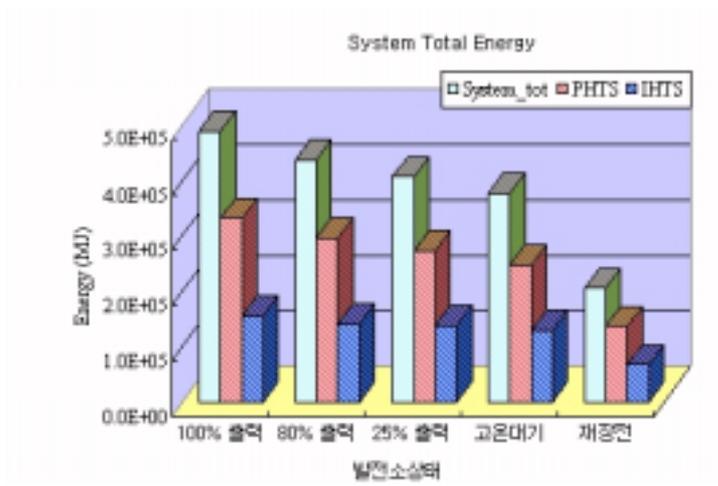


그림 2. 총 Energy 축적량과 각 계통별 에너지 축적량 비교

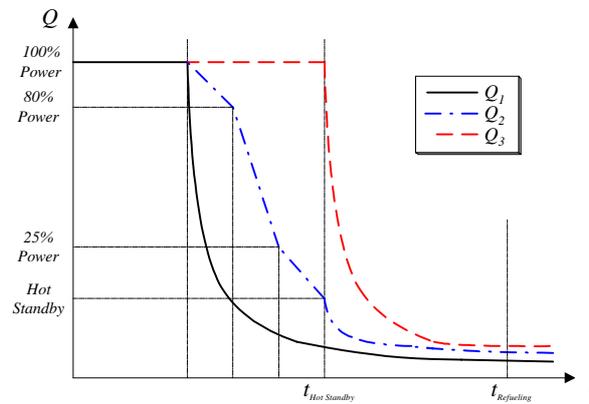


그림 3. 노심 붕괴열 곡선 가정

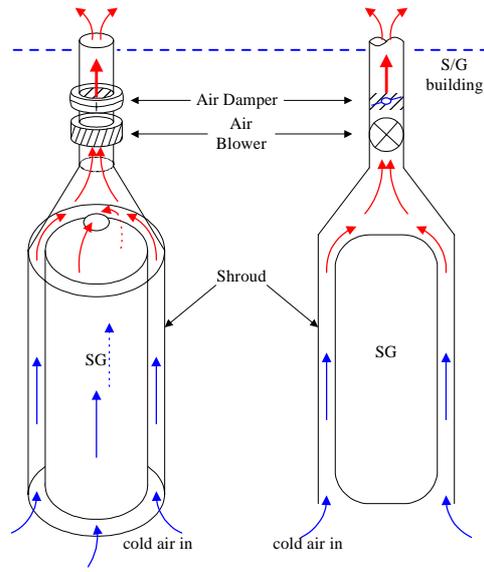


그림 4. SGACS 형상 개략도

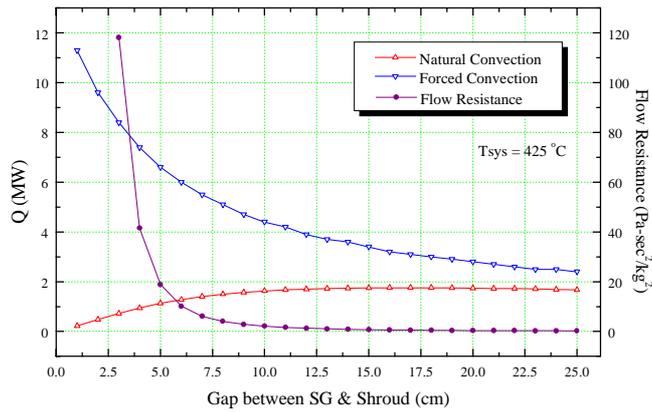


그림 5. SGACS 공기유로 간격과 열제거량 비교

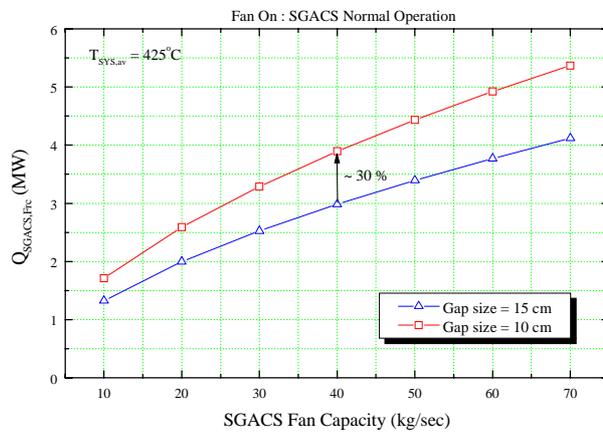


그림 6. SG-shroud 간격변화에 의한 SGACS 열제거량 비교

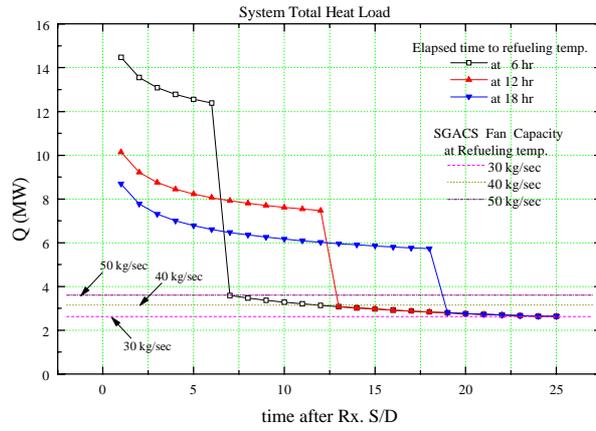


그림 7. 계통의 총 열부하(total heat load) 및 SGACS 열제거량

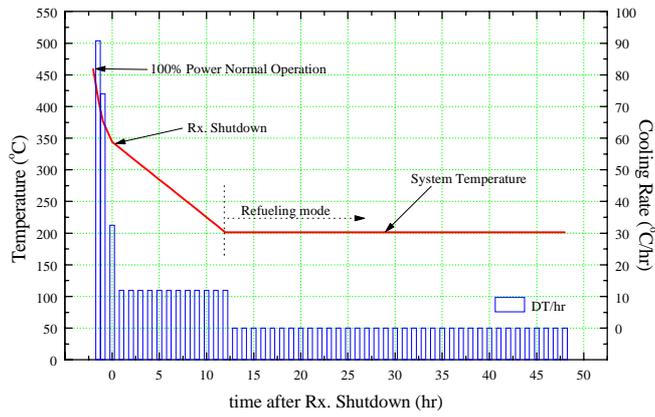


그림 8. 발전소 상태 천이별 계통 목표온도 및 냉각률

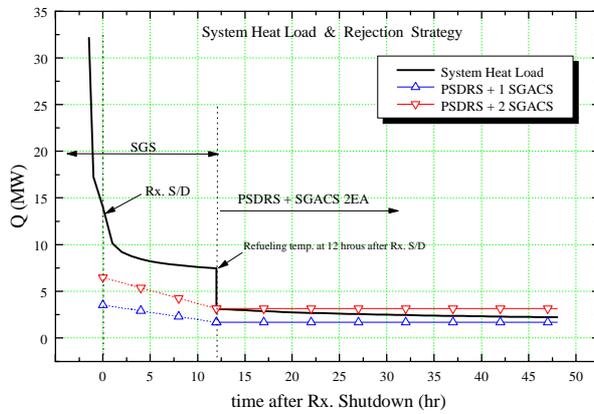


그림 9. 발전소 상태 천이시의 잔열제거 운전논리 예