

SGACS 성능특성에 관한 수치해석적 연구 Numerical Analysis of SGACS Characteristics

위명환, 김연식, 김의광, 심윤섭

한국원자력연구소

요 약

증기발생기 외벽을 이용하여 잔열을 제거하는 KALIMER의 비안전등급 잔열제거 설비인 SGACS 성능을 분석하기 위한 전산코드, Qsgacs,를 개발하고 개발된 코드를 이용하여 SGACS의 설계인자와 잔열제거 성능과의 상관성을 분석하였다. 이러한 연구 결과를 바탕으로 하여 설계시 우선 고려 대상 설계인자를 도출하여 현재 진행중인 KALIMER SGACS의 최적 설계를 개발하는데 활용할 수 있도록 하였다.

ABSTRACT

A computer program, Qsgacs, has been developed for the SGACS which is non-safety grade residual heat removal system of KALIMER. The SGACS utilizes the high temperature of S/G shell. The developed code is applied to the KALIMER SGACS concept and the relations between the design parameters and SGACS performance are investigated. Based on investigation results, guides for developing an optimized design of the system are generated so that the guides can be utilized for the KALIMER residual heat removal system design.

1. 서 론

KALIMETR의 잔열제거는 각각의 독립된 열전달 유로를 갖는 3개의 계통으로 구성되어 있다 (그림1). 증기발생기 외벽을 에워싸고 있는 외피관과 증기발생기 외벽사이에 형성되어 있는 환형 공간을 통해 유입되는 외부공기에 의해 증기발생기를 냉각시킴으로서 잔열을 제거하는 SGACS(Steam Generator Auxiliary Cooling System)는 현재 개념설계가 진행중인 칼리머의 비안전등급 잔열제거계통^[1]이다. SGACS는 중간계통에서 냉각재의 누출이 발생하지 않은 조건에서 증기계통의 운전과는 관계없이 중간계통냉각재의 강제 또는 자연순환에 의해 열을 제거하여 발전소 사고시 원자로의 안전정지 까지 도달하는데 필요한 시간을 단축하고 원자로내 소듐의 최고온도를 낮추는 역할을 담당하여 발전소의 운전성 및 안전여유도 증진에 기여한다. 이와 유사한 설계개념은 GE의 PRISM 설계에서도 채택^[2]되어 있으며, 특히 단일 루프인 PRISM에 비해 중간계통이

두 개의 루프로 구성되어 있는 KALIMER에서는 활용 범위 및 용도가 다양 할 것으로 생각된다. 따라서 SGACS 설계 및 운전모드별 종합적인 잔열제거 전략 수립을 위해서는 이 계통에 대한 작동특성 및 성능에 대한 이해가 요구되며 본 연구는 SGACS의 작동특성 및 설계인자와 성능간의 상관성 분석을 위해 SGACS 해석코드, Qsgacs,를 개발하였고 개발된 코드를 이용하여 SGACS 설계시 우선 고려대상 설계인자를 도출하여 최적의 크기 및 계통 구성을 위해 활용할 있도록 하였다.

2. 해석모델

2.1 SGACS 구조

해석 대상인 SGACS는 증기발생기, 외부공기와의 접촉면이 절연되어 있는 외피관, 공기방출 굴뚝 그리고 공기굴뚝의 상단에 설치되어 있는 fan과 damper로 구성되어 있다(그림2). 증기발생기 외벽의 열은 증기발생기외피관과 형성된 환형공간을 통해 흐르는 복사열전달 및 공기와 대류 열전달에 의하여 공기 유로의 공기로 열을 전달시키며 가열된 공기는 굴뚝을 거쳐서 대기로 빠져나가면서 열을 계통에서 최종적으로 방출시키게 된다. SGACS의 공기흐름에 대한 구동력은 증기발생기 공기굴뚝 상단에 있는 팬을 이용한 강제대류와 증기발생기 외벽에 의해 가열된 공기와 주변 공기와의 밀도차로 인해 생기는 자연대류에 의해 이루어진다.

2.2 수학적 모형

공기 유로의 공기 유동 및 열전달 현상을 아래 식 (1),(2)로 묘사한다.

$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial t} \sum_i \frac{\Delta S_i}{A_i} = \oint \rho g ds - \frac{\dot{m}^2}{2} \sum \frac{1}{\rho_i A_i^2} (K_i + f_i \frac{\Delta S_i}{di}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (A_n \Delta x \rho C_P T)_i = \dot{m} (C_{P_{in}} T_{in} - \overline{C_{P_{ex}}} T_{ex}) + Q_{sg} \quad (2)$$

ΔS , K , f a 및 Q_{sg} 는 각각 공기의 유선거리, 형상손실계수, 마찰계수 그리고 증기발생기 외벽으로 부터의 전열량을 의미한다. 증기발생기 외벽과 공기와의 열전달은 증기발생기 외벽으로 부터 공기로의 직접적인 열전달과 증기발생기 외피관이 내벽면으로의 복사열전달을 통한 우회적인 열전달 모드가 있으며 이에 대한 전열량 Q_{sg} 다음과 같이 묘사한다.

$$Q_{sg} = hA_{sg}(T_{sg} - T_a) + \frac{\sigma A_{sg}(T_{sg}^4 - T_{srd}^4)}{1/\epsilon_{sg} + (A_{sg}/A_{srd})(1/\epsilon_{srd} - 1)} \quad (3)$$

(3)식에서 하첨자 sg 와 srd 는 각각 증기발생기와 외피관을 나타낸다. 지배식의 대수식으로서의 체제전환은 온도 정의를 제어 체적의 경계면에서 수행하는 경계점 기법^[3]을 사용한다. 경계점 기법은 기존의 제어체적 중앙에 온도를 정의하는 방법인 중앙점 기법에 비하여 대류항의 대수식화 과정에서 발생할수 있는 numerical diffusion의 전산해석상의 오차를 피할수 있다. 공기에 대한 대류열전달 계수를 구하기위하여 사용된 Nusselt 수의 경우 아래와 같은 Dittues -Bolters의 상

관식을 이용하여 계산하였다.

$$N_u = 4 \quad , \quad N_{Re} < 2,000$$

$$N_u = (4 + 0.023 \cdot N_{Re}^{0.8} \cdot N_{Pr}^{0.4} - 4) \times \frac{(N_{Re} - 2,000)}{4,000 - 2,000} \quad , \quad 2,000 < N_{Re} < 4,000 \quad (4)$$

$$N_u = 0.023 \cdot N_{Re}^{0.8} \cdot N_{Pr}^{0.4} \quad , \quad N_{Re} > 4,000$$

k, h, v 는 각 각 공기의 열전도도, 대류 열전달 계수, 공기유속등을 나타내며 N_{Re}, N_{Pr}, N_u , 등은 Reynolds수, Prandtl수, Nusselts수를 의미한다. 또한 마찰손실계수를 구하기위한 상관식은 Idelchik^[4]가 제시한 상관식을 사용하였다.

$$f = \frac{64}{N_{Re}} \quad , \quad N_{Re} < 2000$$

$$f = \exp \left[\frac{(\log(0.32) \times \log(\frac{N_{Re}}{4,000}) - \log(\frac{N_{Re}}{2,000}) \times \log(0.426))}{\log(0.5)} \right] \quad , \quad 2,000 < N_{Re} < 4,000 \quad (5)$$

$$f = \frac{1}{(1.8 \times \frac{\text{Log } N_{Re}}{\text{Log } 10} - 1.64)^2} \quad , \quad N_{Re} > 4,000$$

지배식의 해를 구하기 위한 대수식으로의 전환은 유한 차분화 방법을 사용하여 구하였으며 시간항 적분항에 대하여는 아래와 같은 표현식을 사용하여 Explicit 및 Implicit 기법 또는 양기법의 혼합방법을 입력 인자로서 선택적으로 적용하여 적분할 수 있도록 하였다.

$$\frac{\varphi^{j+1} - \varphi^j}{\Delta t} = ft \cdot f(\varphi^{j+1}) + (1 - ft) \cdot f(\varphi^j) \quad (6)$$

윗 식에서 $ft=1$ 이면 완전한 implicit, $ft=0$ 이면 완전한 explicit 기법이 되고 $0 < ft < 1$ 이면 양기법의 혼용이 된다. 해의 수렴성을 개선하고 해가 발산(diverge)하는 것을 방지하기위하여 수치계산을 반복할 때 적절한 이완인자 (Relaxation Factor) RF를 가정하여 반복 단계에서의 변수 상관관계를 표시 하였다. 즉,

$$\varphi_{new} = (\varphi_{new} - \varphi_{old}) \cdot RF + \varphi_{old} \quad (7)$$

여기서 $RF > 1$ 이면 Over-Relaxation이고 $0 < RF < 1$ 이면 Under-Relaxation이다.

3. SGACS 특성 해석

SGACS의 설계는 중간열전달 계통과 증기/터빈 계통의 연결기기인 증기발생기 고유의 기능이 우선적으로 고려되어야 하기 때문에 본 연구에서는 KALIMER에서 설정된 증기발생기 설계인자를 기본으로 공기 유로의 설계인자들에 대한 민감도 평가를 수행하였다. 해석대상 증기발생기의 외형 크기는 직경 3m, 높이 20m 이며 각 열전달 표면의 복사계수는 0.4이다. 증기발생기 셀 내측의 온도는 400℃(상단)에서 300℃(하단) 까지 선형적으로 변하며, 한 절연재로 피복된 외피관은 단열, 그리고 공기 굴뚝에서의 열교환은 일어나지 않는다고 가정하였다.

그림3과 4는 공기 팬(fan)을 이용하여 SGACS의 공기 유량을 조절한 강제 대류 운전모드에서의 잔열제거성능 및 작동특성을 비교하였다. 동일 작동조건에서 공기 유량의 증가함에 따라 잔열제거량도 증가하는데 이때 공기 유로의 간격이 10의 경우 간격이 30cm일 때에 비해 잔열제거량이 3배 정도 되는데 이는 공기 유속이 증가하면서 대류열전달 계수가 증가하기 때문이다.

그림5는 SGACS 잔열순환 운전 모드에서 증기발생기 shell과 외피관 사이의 간격이 성능에 미치는 영향을 알아보았다. 공기유로의 간격이 감소하면 공기유속이 빨라져 공기의 대류열전달 계수가 증가하지만 간격이 너무 좁아지면 공기 유로의 유동저항을 증가시키게되어 대류 열전달 성능을 감소시키게된다. 따라서 공기 유속 및 대류열전달 계수의 상관관계에 따라 최대 열속이 나타나는 나타나게 된다. 본 분석 대상 모형의 경우 간격이 증가함에 따라 공기 유량은 계속 증가하지만 SGACS를 통한 잔열제거량은 간격이 15cm 일 때 최고 성능을 나타내다가 점차 감소하는데 해석 범위내에서 약 30%의 편차를 나타낸다. 그림6은 정상 또한 비정상 원자로 정지시 증기발생기 내부온도가 변화하는 경우 SGACS의 성능특성을 알아보기 증기발생기 내부의 온도차를 일정($\Delta T=100^{\circ}\text{C}$)하게 고정하고서 평균온도에 따른 열제거능력을 도시한 것이다. 온도 증가에 따라 변화율은 평균온도에 따라 거의 선형적으로 이루어 짐을 알 수있다. 그림7은 공기 굴뚝높이가 잔열제거 성능에 미치는 영향을 도시한 것이다. 증기발생기 공기굴뚝이 높아짐에 따라 공기층 수두 증가로 유량이 증가하고 이에따라 SGACS의 잔열제거량도 증가하는 경향을 보이고 있다. 기준 경우(굴뚝높이:5m)에 비해 굴뚝 높이를 4배 증가하였을 경우에도 열제거량의 증가폭은 약 10% 미만으로 SGACS의 성능에 미치는 영향이 적기 때문에 공기굴뚝의 설계는 BOP 설계의 제약점으로 작용하지는 않을것으로 판단된다.

4. 결 론

SGACS의 성능특성에 대해 수치해석방법을 이용한 분석결과는 다음과 같다.

- 1) 강제 순환 운전 모드에서 SGACS의 잔열제거성능이 안전등급 잔열제거계통인 PSDRS의 열제거능력과 유사함으로 전반적인 잔열제거 전략에 따라 SGACS의 활용 용도의 확대 가능성을 확인.
- 2) SGACS의 성능에 영향을 주는 공기 유로간격과 증기발생기의 내부 온도등 SGACS 설계시 우선 고려대상 설계인자 도출
- 3) SGACS 설계 해석방법론 설정을 위한 기본 사항을 파악함으로써 KALIMER SGACS의 설계에 활용.

Acknowledgement : 본 연구는 과학기술부의 원자력사업 일환으로 수행 되었음.

<참고 문헌>

1. KALIMER Design Concept Report, 한국원자력연구소, KAERI/TR/-888/97, 1997.7
2. P.M. Magee, "Design and Performanc of the PRISM Natura Convection Decay Heat Removal System", Int. Topical Meeting on Safety of Next Generatio Power Reactor, May, 1-5, 1988.
3. 심윤섭, 위명환, 김성오, "PSDRS 잔열제거 특성분석", '98 춘계학술발표논문집, 한국원자력학회, 1998.
4. I.E. Idelchik et al, Handbook of Hydraulic Resistance", 2nd Ed., 1986

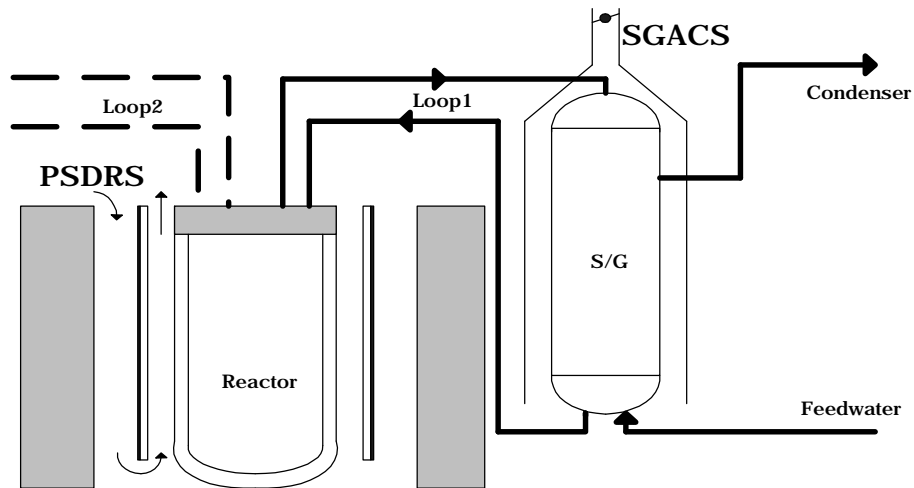


그림1 KALIMER 잔열제거계통 개략도

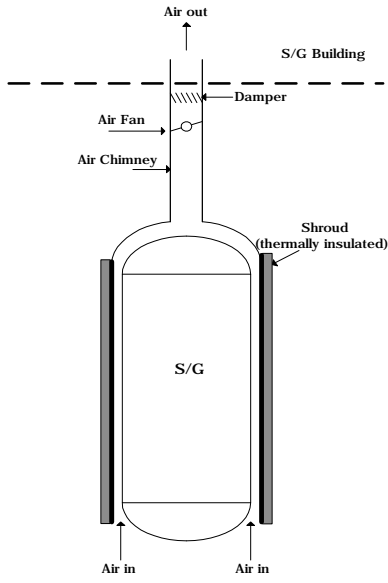


그림2 SGACS의 구조

