

액체금속로 피동 원자로용기냉각계통의 특성 분석

위명환, 심윤섭

한국원자력연구소

요 약

피동 원자로용기 냉각계통은 원자로 용기를 둘러싸고 있는 격납용기 외부가 공기에 자연순환에 의해 냉각하는 방식으로 공기 흐름 구동력은 원자로용기의 외부 유로의 공기와 주변 대기와의 밀도 차이에 의하여 피동적으로 형성됨에 따라 높은 작동 신뢰성이 보장된 개념으로서 본 연구에서는 공기입구 위치에 따른 영향 및 격납용기와 유로 벽면간의 복사 효과 까지를 고려 할 수 있도록 해석 모형을 개선 시키고 개선된 모형을 이용하여 계통을 구성하는 설계인자들이 계통의 성능 및 크기에 미치는 영향등을 분석하였다. 이러한 분석을 통하여 공기의 입구 위치가 계통의 열제거용량에 미치는 영향, 상향공기 유로에서의 복사 열전달 고려 유무가 해석 결과에 미치는 영향 그리고 설계인자와 계통 성능간의 상관성을 밝혔다.

1. 서론

액체금속로의 잔열제거 개념 중의 하나인 피동 원자로용기 냉각계통은 원자로 용기를 둘러싸고 있는 격납용기 외부가 공기에 자연순환에 의해 냉각하는 방식이다. 이때 공기 흐름 구동력은 원자로용기의 외부 유로를 흐르게 되는 높은 온도의 공기와 주변 대기와의 밀도 차이에 의하여 피동적으로 형성된다. 이러한 개념은 안전한 피동개념의 잔열제거 방식으로서 높은 작동 신뢰성이 보장되며 발전소 사고시에도 외부의 지원없이 자체적인 자연적 현상에 의하여 잔열을 제거할 수 있는 장점이 있는 것으로 수 백만 MWe의 중소형 원자로의 잔열제거에 적절한 개념으로서 현재 미국 ALMR 인 PRISM[1]에 RVACS라는 이름으로 채택되어 있는 개념이다. 그러나 이 개념을 실제 원자로 설계에 이용하기 적용하기 위해서는 이 냉각계통의 작동 특성에 대한 이해 및 특성 분석 방법론의 확보가 요구된다. 이러한 필요성으로 피동 원자로용기 냉각 개념에 대한 연구를 수행하였는데 본 연구는 기 발표된 연구논문[2]에 대한 연속된 연구로서 공기의 입구가 원자로 용기 상부에 위치 할 경우에 대한 해석 기능을 추가하고 복사열전달 해석 기능을 원자로 용기와 이를

둘러싸고 있는 격납용기간의 복사열전달만이 아니라 격납용기벽 바깥 쪽의 공기 유로 벽면간에 대하여도 삽입하여 해석 모형을 개선하고 개선된 모형을 이용하여 계통의 특성을 분석하였다.

2. 해석 모형

해석 대상인 피동 원자로 용기 잔열제거 현상을 구체적으로 보면 열전달 경로는 원자로 용기와 격납용기 벽을 통한 열전달은 전도에 의한 것이며 원자로 용기로 부터 격납용기로의 열전달은 복사(radiation)에 의해 이루어진다.. 최종단계의 잔열 제거는 격납용기를 지나는 공기가 자연순환에 의해 열전달이 이루어지고 이 공기는 대기로 방출된다 .격납용기와 concrete사이의 공기 유로는 collector cylinder에 의해 공기 하강 유로가 상승 유로가 구분되어 있으며 collector cylinder 외부는 절연되어있다. 그림 1에 해석 모형에 대한 개략도를 도시하였다.

2.1 지배식

공기의 흐름 및 열제거량 및 흐름저항등은 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial (\rho C_p A \Delta S T a)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\dot{m} C_p T) + h A (T_a - T_w) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial t} \sum_i + \frac{\Delta \dot{m}_i}{A_i} + \frac{\dot{m}^2}{2} \left[\frac{1}{\rho v x \cdot A e x^2} - \frac{1}{\rho \dot{m} A \dot{m}^2} \right] = P_s \cdot g (Z_{ex} - Z_i) - \sum \rho_i g \cdot \Delta Z_i \quad (2)$$

$$+ \frac{\dot{m}^2}{2} \left[\sum_i \frac{f_i}{A x^2 \rho_i^2} \cdot \frac{\Delta \pi_i}{d_i} + \sum_i \frac{K}{A_i^2 \rho_i} \right]$$

여기에서의 m, Cp, ΔSi, k 등은 질량 유속, 비열, 유선길이, 압력강하계수등을 나타내며 하첨자 ex, in 등은 공기의 출/입구를 의미한다.

2.2 상관식

열전달에 사용된 상관식은 다음과 같다.

$$Nu = 0.023 \times RE^{.4} \times Pr^{.4} \quad (3)$$

$$Re = \frac{D_H v \rho}{\mu} \quad (4)$$

$$h = \frac{Nuk}{D_H} \quad (5)$$

D_H , h 는 각각 공기 흐름의 수력적 직경 및 대류 열전달 계수를 의미한다

2.3 분석 모형의 변수

직경 12m, 높이 18m 의 원자로를 해석의 기준으로 사용되었으며 분석 모형에 주요 변수로는 원자로 용기 및 격납용기 재질의 열전도도[W/m²-K]는 각각 23, 30 이며 재질의 emissivity는 0.8 로 설정하였다. 공기 유로의 형상계수[3]는 입/출구의 경우 각각 0.6 이며 유로의 하단에서의 U 자형 유로의 경우는 4.7 이다.

3. 분석결과

용기 내벽으로부터 공기로의 열전달 저항 분포는 기준 해석 조건 겨우 총 저항중 원자로용기에서의 저항이 9%, 원자로용기로부터 격납용기까지의 복사저항이 24%, 격납용기의 저항이 3%, 이며 격납용기 외부로부터 공기로의 저항이 64% 이다. 아래에 주요 설계 변수에대한 민감도 분석 결과를 나타내었다.

- 공기입구 위치의 영향

공기유로의 입구가 원자로 용기 상부에 있는 경우와 원자로용기 하단부에 있는경우에 대한 분석한 결과를 그림2에 나타내었다. 공기의 입구 모두 300K 일정하게 하고 입/출구의 형상계수도 동일 하게 하였다. 그림에서 보인 것처럼 공기의 입구 위치가 계통의 열제거용량에 미치는 영향은 3% 이내인 것으로 나타났는데 이는 발전소의 기기 배치 및 건물 구조 설계시에 피동 원자로 용기 냉각계통의 공기 입구의 위치는 열유체적 관점에서의 제약성은 크지 않음으로 다른 건물 및 기기 배치 관점 위주로 그 위치를 설정 할 수 있음을 시사한다.

- 공기유로의 간격

공기유로의 수력적 직경은 공기의 유속 및 대류열전달 계수와의 상관 관계에 의해 최대 열속이 존재하는 적절한 간격이 요구된다. 용기의 직경이 12m, 높이 18m의 기준 모형에 대한 해석 결과 약 14cm의 간격일 때 최대 열전달이 일어난다. 유로의 직경이 증가 할 경우 공기의 유속은 감소되나 열속이 증가할 때 따라서 공기의 유속이 증가 되기 때문에 유로와 열제거량간에는 최적의 값이 존재한다. 그림 3.에 공기유로의 간격에 따른 열제거량과의 관계를 형상계수에 따라 도시하였다.

- 원자로 용기의 면적

열전달은 열전달면적의 증가한 함께 증가한다. 열전달면적의 변화를 고려할 때 직경 및 길이의 변화에 대한 열제거용량간의 상관 관계 및 영향을 분석하였다. 그림4.에 보이 것처럼 동일한 전열면적의 변화일 경우 용기의 높이에 따른 변화가 계통의 성능에 보다 민감하게 작용한다.

- 입/출구의 형상계수

공기유로의 입,출구의 형상계수가 열제거용량에 미치는 영향을 평가하였다. 그림5에 보이 것처럼 출구 형상계수의 변화가 입구 형상계수의 영향에 비해 열제거량에 크게 영향을 미치게 되는데 공기의 밀도차에 기인한 결과이다.

공기 상승로에서의 복사효과

공기 상승로에서의 열전달은 대류 및 복사에 의해 이루어짐에 따라 전체 열전달에 미치는 대류 및 복사의 효과를 분석하였다. 그림6에 나타낸 것 처럼 전체 열전달량에서 복사가 차지하는 비중이 원자로에서의 온도에 따라 약 8 - 15% 정도을 영향을 미친다 따라서 설계관점에서 보면 Collextor Cylinder 내면의 복사효과 증진을 위한 고려가 필요하다..

4. 결론

공기의 자연 대류에 의한 잔열제거계통인 피동 원자로냉각계통 특성 해석 모형을 개선 시키고 개선된 모형을 이용하여 피동냉각계통의 작동특성을 분석하였으며 이 결과 확보된 새로운 주요 사항은 다음과 같다. 1) 상향 공기유로 벽면간의 복사 열전달량이 무시할 수 없을 정도의 영향을 총 열전달량 해석 결과에 미친다. 2) 공기의 입구 위치가 총 열전달량에 미치는 효과는 3% 정도로 크지않다. 3) 설계 인자와 성능간의 민감도 파악.

5. 참고문헌

1. General Electric, PRISM-Preliminary Safety Information Document, GEFR-00793UC-87 Ta, November 1986.
- 2.. Sim Y.S. et al, "Elevation Configuration fo KALIMER Intermediate System", IAEA Technical Committee on Conceptual Dcsigns of Advnced Fast Breeder Reactors, Kalpakkam, India, 1996.
3. I.E. Idelchik et al , "Handbook of Hydraulic Resistance", 2nd Ed., 1986

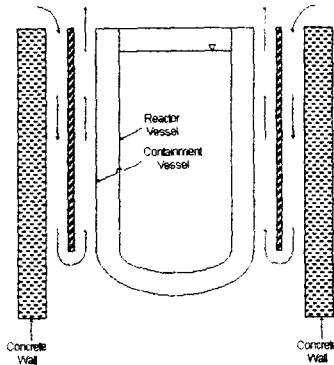


그림 1 해석모형의 개략도

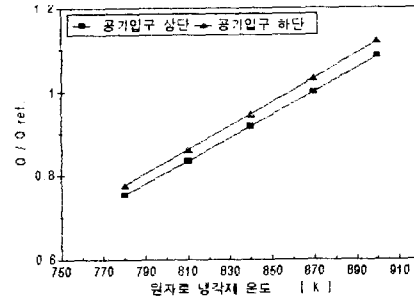


그림 2 공기입구 위치에 따른 열제거량 변화

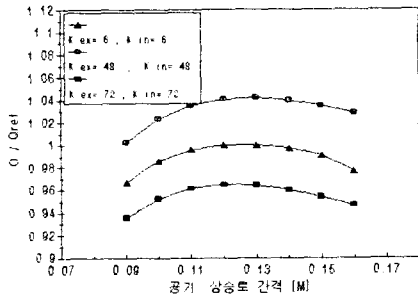


그림 3 공기유로 간격이 열제거량에 미치는 영향

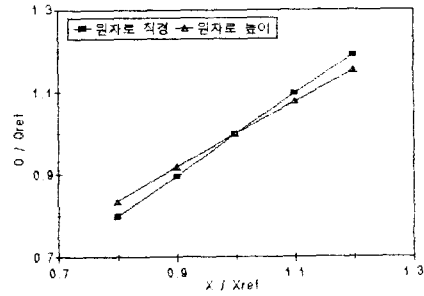


그림 4 원자로용기의 면적에 따른 열제거량 변화

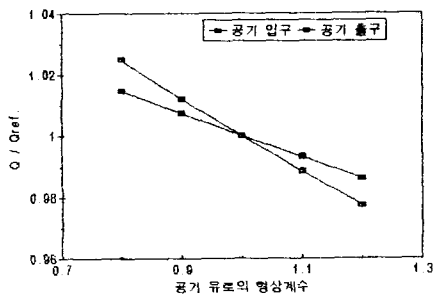


그림 5 형상계수의 변화에 따른 열제거량 변화

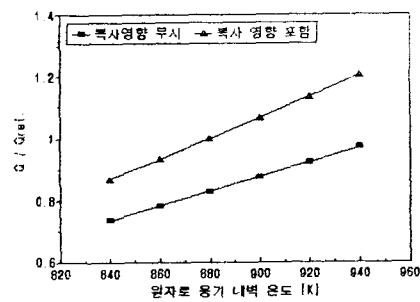


그림 6 공기 상승로에서의 복사효과가 열제거량에 미치는 영향