

CONTEMPT4 코드를 이용한 SMART 안전보호용기 해석

SMART Safeguard Vessel Analysis using CONTEMPT4 Code

송진호, 배규환, 이규형

한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

요 약

열출력 330 MW의 일체형 원자로인 SMART에서 소형냉각재 상실사고가 발생하였을 경우에 안전보호용기 (Safeguard Vessel) 및 격납 건물의 온도와 압력 거동을 CONTEMPT4/MOD5/PCCS 코드를 사용하여 해석하였다. 원자로로부터의 질량 및 에너지 방출량은 보수적인 소형냉각재 상실사고 해석결과로부터 구하였다. 한편, 안전보호용기 외벽에 설치된 냉각탱크로의 비등 열전달을 모사하기 위하여 CONTEMPT4 전산코드를 수정하여, 난류자연대류 및 Subcooled Boiling에 대한 상관식을 추가하였다. SMART 설계기준사고인 소형냉각재 상실사고시 안전보호용기의 압력 및 온도 거동은 해석결과 최대 압력과 온도가 각각 1.645 MPa, 206.5 °C로 설계 조건을 만족함이 분석되었다.

Abstract

Performance analyses of the SMART safeguard vessel during a postulated small break LOCA have been performed using the CONTEMPT4/MOD5/PCCS code. The break location has been selected at a gas cylinder line for a conservative mass/energy release. The CONTEMPT4/MOD5/PCCS code has been modified to implement boiling heat transfer correlation in the cooling tank attached at the safeguard vessel wall. Analysis results showed that the maximum safeguard vessel pressure and temperature during the postulated small break LOCA were 1.645 MPa and 206.5 °C, which are within the safeguard vessel design limits.

1. 서론

SMART 일체형 원자로에서 안전보호용기의 기능은 냉각재 상실사고 및 주증기관 파단사고등의 냉각재 누설사고시 외부로의 방사능 누출을 막는 격리 안전계통의 기능을 수행한다. 따라서 안전보호용

기는 강력한 누설방지 압력용기로 설계되며 내부에 원자로 용기, 가압기 가스 실린더, Accumulator, 크레인 등의 장치가 있다. 안전보호용기 외부 위쪽에는 냉각탱크가 있어 용기의 온도/압력을 설계치 이내로 유지시키는 주요 열침원 (heat sink) 역할을 하게 된다.

본 연구에서는 CONTEMPT4/MOD5/PCCS 코드 [1,2] 를 사용하여 SMART 일체형 원자로의 안전 보호용기 및 격납건물에 대한 해석모델을 개발해서 가압기 가스 실린더관 파단사고가 발생했을 경우 열수력 거동에 대한 해석모델 개발 및 해석을 수행하였다. 기존의 CONTEMPT4 전산코드에서는 냉각탱크의 물의 온도가 포화온도 이상으로 상승시 비등 열전달 모델이 없어 정확한 열전달을 모사할 수 없다. 따라서 CONTEMPT4 전산코드를 개선하여, 난류자연대류 및 Subcooled Boiling 모드에 의해 열전달이 이루어 질 수 있도록 하였다.

2 본론

2.1 안전보호용기 및 격납용기 해석 모델

2.1.1 안전보호용기 구조물 및 기능

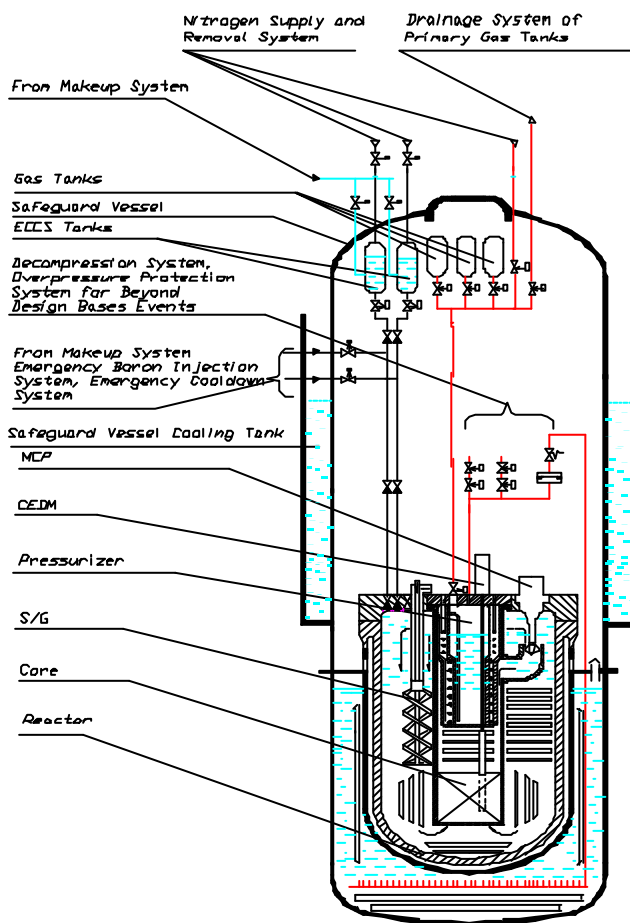


그림 1 안전보호용기 개략도

일체형 원자로는 철제 보호용기인 안전보호용기 및 콘크리트 격납건물로 둘러싸여 있는 이중 격납건물 구조를 가지고 있다. 안전보호용기는 철제 용기로서 내부에는 원자로, 질소 보충탱크, Accumulator, 크레인 등의 장치가 있다. 내부에 차폐탱크가 아래쪽에 있고 용기 외부 위쪽에 물 재킷이 있어서 용기를 식히는 역할을 한다. 안전보호용기의 개략도는 그림 1에 나타내었다. 안전보호용기의 압력이 설계 압력보다 높아지는 경우를 대비해서 과압보호 밸브가 있다. 이 밸브의 출구는 외부 차폐탱크로 연결되어 있다. 한편, 원자로와 내부 차폐탱크 사이에는 빈 공간이 있어서 단열기능을 한다. 해석시 원자로에 연결되는 배관은 주증기관 및 주급수관외에는 모두 안전보호용기 내부에 위치하고 있는 것으로 가정하였다. 따라서 소형냉각재 상실사고나 주증기관 파단사고가 발생할 경우 보호용기의 압력이 높아지게 된다. 격납 건물 온도 및 압력을

보수적으로 높게 계산하기 위해서 다음과 같은 몇 가지 가정을 하였다.

- 1) 내부 차폐 탱크의 물과 안전보호용기내의 공기 부분의 직접 접촉 면적은 없다.
- 2) 안전보호용기와 격납 건물은 보호용기 벽을 통해 열 전달이 이루어진다.
- 3) 원자로와 내부 차폐탱크는 원자로 주위의 빈 공간으로 인해 열 전달이 없다.

2.1.2 격납 건물의 구조물 및 기능

격납건물의 온도와 압력이 높아지는 경우는 두 가지 인데, 격납건물을 관통하는 주증기관 및 주급수관이 파단되어 직접적인 질량 에너지 방출이 되는 경우와, 소형냉각재상실사고등의 사고로 인해 안전보호용기가 가열되어 간접적으로 온도 및 압력이 증가하는 경우가 있다. 격납건물 해석을 위해 다음과 같은 가정을 하였다.

- 1) 외부 차폐탱크의 물과 격납건물 내의 공기 사이의 직접 접촉 면적은 없다.
- 2) 냉각탱크로부터의 증기방출은 외부차폐 탱크로 연결되지만, 이 증기가 격납건물로 방출되는 것으로 가정함.
- 3) 격납건물 외벽과 Emergency Cooldown Tank의 물과 직접 열전달이 없음.

2.1.3 CONTEMPT4/MOD5 코드 개요

CONTEMPT4[1] 코드는 냉각재 상실사고시 격납용기의 압력, 온도거동을 해석하기 위하여 Brookhaven National Lab. 에서 만든 코드이다. 본 코드는 격납건물을 다중 격실 (compartment)로 모사할 수 있으며 각각의 격실을 대기 (atmosphere)와 풀 (pool)로 나누어 열 평형 상태를 질량/에너지 방출과 열전달 구조물을 고려해서 구한다. 본 해석에서는 PCCS 모델을 추가하고 열전달 모델을 개선한 CONTEMPT4/MOD5/PCCS [2] 전산프로그램을 사용한다. 그러나 기존의 프로그램에서는 안전보호용기로부터 냉각탱크 내의 물로의 열전달을 모사할 수 없다. 따라서 CONTEMPT4 전산코드를 수정하여, 난류자연대류 및 Subcooled Boiling 모드에 의해 열전달이 이루어 질 수 있도록 하였다.

2.2 격납 건물 및 안전보호용기 거동 예비 해석

2.2.1 격실 및 유로 모델

안전보호용기는 원자로로부터의 질량 및 에너지 방출에 의해 압력이 높아진다. 안전보호용기의 온도 및 압력이 높아지면 벽을 통한 응축 열전달로 인해 안전보호용기가 가열되고 이로 인해 격납건물 내에서 자연대류가 발생하고 온도와 압력이 높아진다. 안전보호용기의 외벽에 설치된 냉각탱크는 보호용기를 식히는 역할을 한다. 냉각탱크로부터 방출되는 증기는 격납건물로 방출되는데 이 경로를 모델하였다. 안전보호용기 및 격납건물의 벽에 응축되는 물은 벽을 따라 용기 및 건물의 아래에 고이는 것으로 보수적으로 가정하였다. 본 해석시 nodalization은 다음과 같이 안전보호용기, 물재킷, 콘크리트 격납건물, 외부 대기의 4개 격실로 하였다.

- 1) 안전보호용기
- 2) 물 재킷
- 3) 격납건물
- 4) 대기
- 5) 냉각탱크와 격납건물 사이의 유로

2.2.2 열구조물 모델

격납건물, 안전보호용기 및 그 부속물의 열구조물은 단순화시켜서 격납건물 벽, 안전보호용기 벽, 안전보호용기 벽 중 냉각탱크와 접촉되는 부분의 3가지로 나누었다.

- (1) 안전보호용기 부분 (냉각탱크 접촉부 제외)
- (2) 안전보호용기 냉각탱크 접촉부
- (3) 격납건물

열구조물의 형상은 평판구조물로 모델하였다.

열 구조물과 격실 사이의 열전달을 모델은 다음과 같이 하였다.

안전보호용기 벽과 그 내부: 주증기관 파단사고나 소형냉각재 상실사고시 원자로로부터 질량 및 에너지가 방출되므로 Blowdown에 의해 최대 압력에 도달하기까지의 기간에는 Tagami correlation, 그 이후에는 Uchida correlation을 사용하였다. 기준온도는 격실의 온도로 택하였다.

안전보호용기 벽(1)과 격납건물 격실: 격납건물내로의 직접적인 방출량이 없으므로, Turbulent Natural convection에 의한 열전달로 모델하였다.

안전보호용기 벽(2)과 냉각탱크: 두 가지로 나누었는데,

- 액체부분과의 열전달로 제안되고 있는 $2.3 \text{ W/m}^2/\text{K}$ 로 가정한 경우와
- 전산코드를 수정하여 물로의 난류자연대류 혹은 pool boiling으로 열전달이 되는 경우를 고려하였다.

격납건물 벽: 내외부를 모두 Turbulent Natural convection에 의한 열전달로 모델하였다.

구조물 뿐 아니라, 보호용기 내외부의 페인트, 격납건물 내부의 페인트도 모델링 하였다. 페인트 자료가 충분하지 않아 기존 발전소의 자료를 원용하였다.

2.2.3 CONTEMPT4 코드 모델 개선

냉각재 상실사고에 의한 안전보호용기의 압력/온도 증가를 감당하는 주요한 열침원 (heat sink)인 냉

각탱크 (cooling tank)의 수조 비등 (boiling)을 모델하기 위하여 다음과 같은 열전달 모델 개선을 수행하였다.

turbulent natural convection:

$$h_{tc} = 0.13(\rho^2 g \beta \Delta T C_{\text{cp}} \frac{k^2}{\mu})^{1/3}$$

McAdams correlation:

$$q'' = 0.074(T_w - T_{\text{sat}})^{3.86}$$

$$\rightarrow h_{tc} = \frac{q''}{\Delta T}$$

$T_{\text{wall}} < T_{\text{sat}}$; h_{tc} = turbulent convection h_{tc}

$T_{\text{wall}} \geq T_{\text{sat}}$; h_{tc} = maximum of (turbulent convection h_{tc} ,
McAdams correlation)

모델 개선 시 냉각탱크로의 열속 (heat flux)양을 냉각탱크 수조의 level 변화를 고려해서 변경했다.

3. 해석결과

본 연구에서는 SMART 개념설계의 설계기준사고인 소형냉각재상실사고 중 질량 및 에너지 방출량 측면에서 보수적이라고 판단되는 가압기 가스관 파단의 경우를 선택하여 소형냉각재상실사고시 안전보호용기와 격납건물 열수력 거동을 해석하였다.

3.1.1 질량 및 에너지 방출량

가압기의 상부에 질소 가스가 있으므로 사고 초기에는 질소가 방출되고, 그 다음에는 액체가 방출되며 계통의 압력이 감소하여 가압기내의 냉각재가 포화 상태에 도달하면 증기가 방출되게 된다. 질소 가스는 직접적으로 질량 및 에너지 방출에 따른 안전보호용기의 압력을 증가시키며, 또한 용기내의 비 응축성 가스의 비율이 증가함에 따라 응축열전달계수가 감소하는 효과가 있다. 본 해석에서는 가압기내의 질소량이 안전보호용기내의 공기양보다 상대적으로 매우 작다고 판단되어 응축열전달계수의 감소 효과는 무시하였다. 질량 및 에너지 방출량 측면에서는 질소가 방출되는 경우에도 증기가 방출되는 것과 동일한 엔탈피를 가지는 것으로 가정하여 해석을 수행하였다. 그림 2에 질소, 증기, 액체 방출량 [3]이 도시되어 있다. 소형냉각재상실사고의 경우 원자로의 압력이 안전보호용기의 압력과 동일하여 질 때까지 지속적으로 방출이 이루어지므로 충분히 긴 시간인 20,000초까지 소형냉각재상실사고해석을 수행하였다. 소형냉각재상실사고 해석을 할 때에는 안전보호용기의 압력을 대기압으로 하고 사고기간중 변화하지 않는 것으로 가정하여 방출량을 최대화하였다.

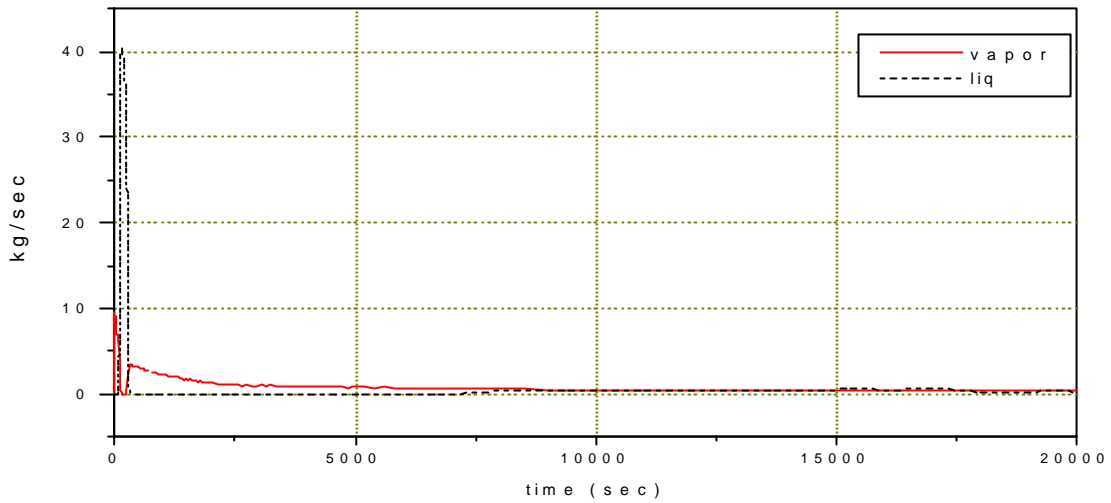


그림 2 가스관 파단시 방출량

3.1.2 안전보호용기 온도 압력 해석 결과

안전보호용기의 온도 및 압력이 설계 제한 값 보다 낮게 유지되는 것을 볼 수 있다. 안전보호용기의 압력 그림에서 점선은 냉각탱크에서의 Pool boiling을 고려하지 않고 열전달계수를 2.3 KW/m^2 으로 고정한 경우이고, 실선의 경우가 Pool boiling을 고려한 경우의 압력 거동이다.

어느 경우에나 원자로의 압력이 안전보호용기의 압력과 같아질 때에 방출이 멈추게 되고 냉각탱크의 물이 충분할 경우 평형 압력에 도달할 것으로 여겨진다. 안전보호용기의 외벽이 냉각탱크의 포화온도보다 높아지면 비등이 발생하고 냉각탱크의 온도가 높아지는데, Pool boiling의 경우 열전달 계수가 크기 때문에 안전보호용기의 압력이 일찍 안정화되고 그 값이 1.7 Mpa 이하로 유지되는 것을 볼 수 있다. 그림 5는 냉각탱크와 접촉되는 안전보호용기 벽면 부분에서의 비등이 발생하여, 냉각탱크의 물 질량이 감소하는 것을 보여준다.

표 1 안전보호용기 온도 압력 계산 값

	설계값	계산값
온도	250 °C	206.5 °C
압력	3.0 MPa	1.645 MPa

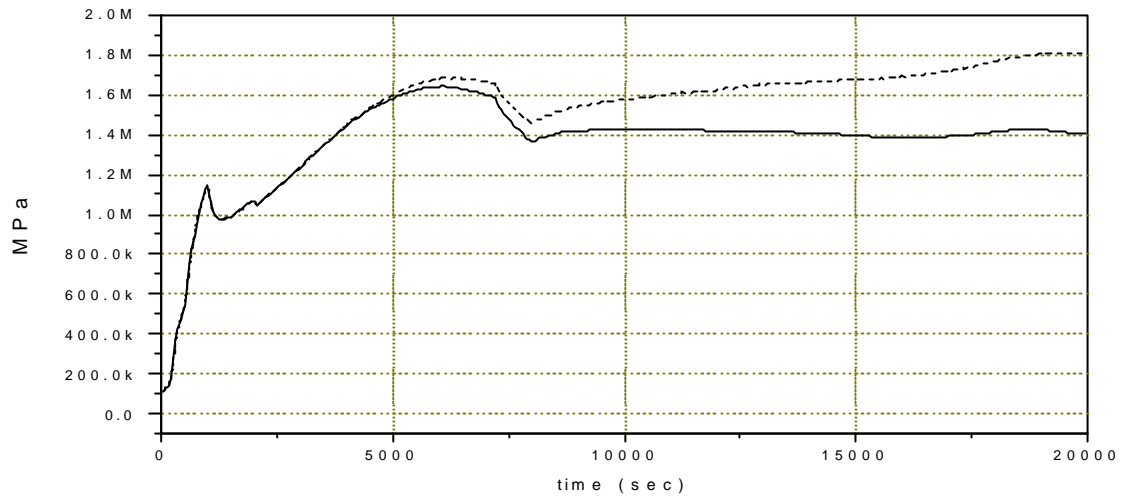


그림 3 안전보호용기 압력 거동

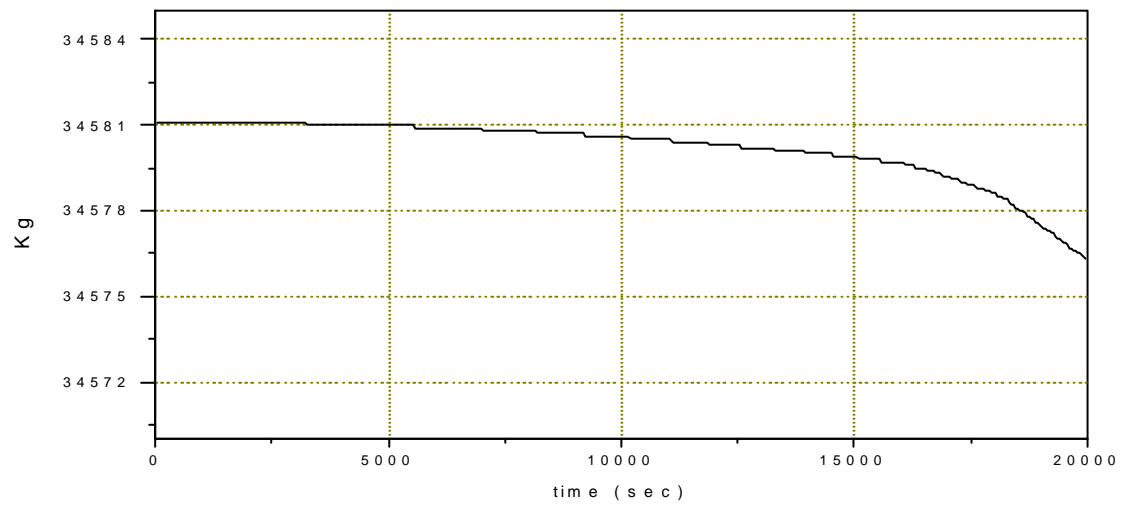


그림 4 냉각탱크 수조 양 변화

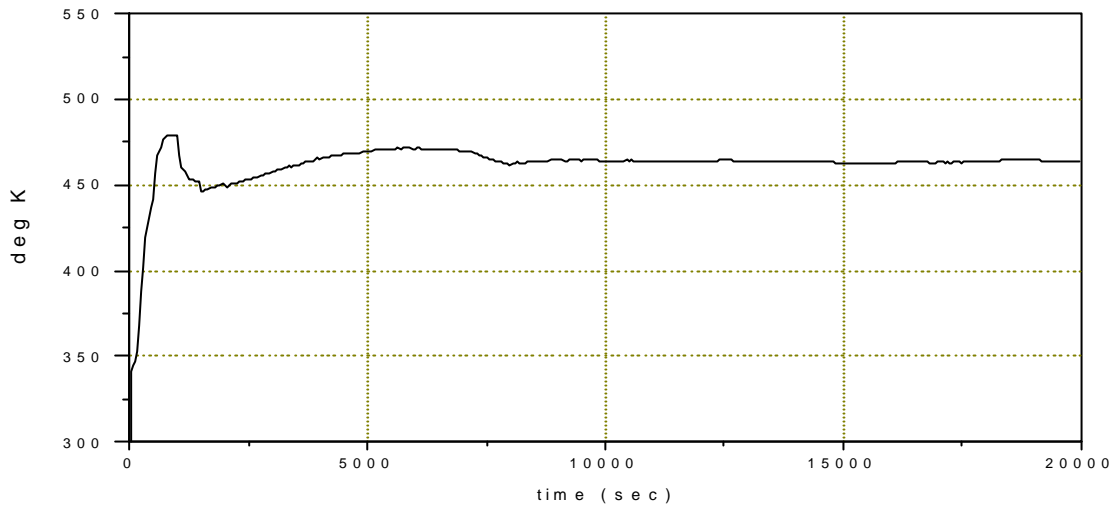


그림 5 안전보호용기 온도 거동

4. 결 론

SMART 개념설계에서 소형냉각재상실사고에 대한 안전보호용기 및 격납건물의 온도와 압력 거동을 분석하였다. 방출량이 안전보호용기 내에 국한되는 것으로 보수적으로 가정하여 해석을 수행하였다. 소형냉각재상실사고의 경우 냉각탱크에서의 pool boiling을 고려함으로써 안전보호용기의 최대 압력이 1.7 MPa이하로 설계 제한 값인 3.0 MPa 보다 낮게 안정되며, 최대 온도도 206.5 °C로 설계 제한 값인 250 °C 보다 낮았다.

감사의 글

본 연구는 과기부 원자력 중장기 개발 계획의 일환으로 수행된 것이다.

5. 참고문헌

1. "CONTEMPT4/MOD5: An Improvement to CONTEMPT4/MOD4 Multicompartment ContainmentSystem Analysis Program for Ice Containment Analysis", NUREG/CR-4001, BNL-NUREG-51824, 1984.
2. Y.D, Hwang, et al., " 피동형원자로 격납용기 과도현상 해석 코드 개발", KAERI/TR-1058/98, 1998.
3. 배규환, " RELAP5/SMR을 이용한 SMART 가압기 가스 실린더 배관 파단사고 해석", SMART-SA-SA500-18, Rev. 01, 1999.4.
4. 송진호/이규형, 안전보호용기 및 격납건물 온도 압력 해석, SMART-SA-SA500-19, Rev. 00, 1999. 3.
5. 이준, "SMART 격납용기 성능해석을 위한 설계자료 송부", SMART-FS-98013, 1998. 10. 29.