2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

격납건물 열수력 해석용 전산코드 개발

Development of a Computer Program to Analyze Thermal Hydraulics in Containment

박 찬억, 이 상용, 최 한림, 최 철진, 서 종태

한국전력기술주식회사
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

냉각재상실사고 시 격납건물 배압 해석용 열수력 전산코드(CAP, Containment thermal hydraulics Analysis Program)를 개발하였다. 격납건물내 증기 및 액체 영역에 대해서 각각 물-증기-공기 혼합체 및 과냉각 물에 대한 질량 및 에너지 보존식을 수립하고 Newton-Raphson 방법을 적용하여 수치해를 구하였다. 이 때 증기 및 액체 각 영역내에서 균일 온도를 가정하였고 두 영역 사이에서는 온도 비평형을 고려하였다. 열구조물에서의 열전도 방정식을 수립하고 완전 음함수적 수치해법(fully implicit scheme)을 적용하여 온도분포를 계산하였다. 열구조물 표면에서는 Tagami, Uchida 상관식, 난류 자연대류 열전달, 액체 영역에 대한 열전달, 단열, 일정 온도 등 경계조건에 따라 증기응축 및 열전달이 달리 계산될 수 있도록 하였다. 또한 일차계통 파단면 방출수의 순간기화(flashing) 모델, 증기 영역과 액체 영역간의 상호작용에 관한 모델이 작성되었고 능동형 열제거원으로서 격납건물 살수 및 팬냉각기 모델이 작성되었다. 끝으로 CONTEMPT4/MOD5 와 해석 결과를 비교하여 적용성을 입증하였다.

Abstract

A computer program(CAP, Containment thermal hydraulics Analysis Program) is developed for the analysis of the containment thermal hydraulic response to Loss-of-Coolant Accident. The mass and energy conservation equations are set up for the mixture of liquid water-vapor-air in the atmosphere region and for the subcooled or saturated water in the liquid pool region, respectively, assuming uniform, but different temperatures for each region. The conservation equations are solved by using the Newton-Raphson method. The conduction equation for the heat structure is set up, and solved by the fully implicit numerical scheme. Several user options including Tagami-Uchida condensation heat transfer, heat transfer to the liquid pool region, adiabatic heat transfer, constant surface temperature, are given on the surface of the heat structure. The computer program also includes the models for the flash of the primary system water blowdown, interaction between the two regions, containment spray, and fan cooler. Finally, validation is performed through the comparison of the results from the developed computer program and the previous best-estimate containment thermal hydraulic analysis program, CONTEMPT4/MOD5.

1. 서론

냉각재상실사고 또는 고에너지관 파단 사고 시 격납건물 열수력 현상에 대한 해석은 격납건물 설계, 격납건물내 안정성 관련 기기의 내환경 기기검증을 위해서 필요할 뿐만 아니라 동 가상사고 시 계통 열수력 해석 시에도 경계조건으로서의 배압 계산을 위해 필수적이다. 특히 대형 냉각재상실사고 재관수 단계 시 격납건물 배압은 증기막힘(Steam binding) 현상에 대한 지배적인 인자로 작용하여 결과적으로 재관수 최대 피복재 온도에 민감한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 그러나 일반적으로 계통내에서의 열수력 현상은 배관 및 노심에서의 일차원 물-증기 유동에 의해 지배되는 반면에 격납건물 열수력 현상은 물-증기-공기 혼합체와 과냉각 물이 각각 증기 영역과 액체 영역에 분리되어 상대적으로 정적인 열수력 거동을 보이므로 이들에 대해 동일한 지배방정식, 수치해법, 상관식군을 적용할 수 없다. 이와 같은 이유로 대부분의 계통 열수력 해석용 전산코드들[1-3]은 별도의 격납건물 배압 해석용 부프로그램을 가지고 있지 못하다. 이에 따라 배압의 영향을 고려하기 위해서는 격납건물 열수력 전산코드와의 코드간 반복계산을 통하여 수행할 필요가 있다. 그러나 코드간 반복계산은 연계 절차가 번거롭고 반복계산 횟수 및 연계자료 개수가 한정되므로 해석 결과의 정확도에 일정한 한계가 있을 수 밖에 없다. 이러한 난점을 극복하기 위한 한가지 방법으로 프로세스간 통신을 활용한 계통 열수력 전산코드와 격납건물 열수력 전산코드의 코드 접합을 들 수 있다[2,4]. 또 다른 대안으로서는 계통 열수력 해석과는 별도의 지배방정식, 상관식군으로 구성된 격납건물 열수력 해석용 수치해석 알고리즘를 부프로그램으로 작성하여 하나의 통합된 전산코드로 사용하는 방법이 있을 수 있다. 이 때 격납건물 열수력 해석용 부프로그램은 단지 계통 열수력 해석 모델에 대한 경계 조건으로서의 배압 계산을 목적으로 한다. 따라서 일반적인 격납건물 열수력 해석용 전산코드의 모델 전체를 포함할 필요는 없으므로 보다 간소한 규모의 모델로 구성될 수 있다.

이 논문에서는 기존의 최적 전산코드로 잘 알려진 격납건물 열수력 해석 전산코드들[5-7]을 참고하여 격납건물 배압 해석에 필요하고도 충분한 모델들을 정리하고, 이들만으로 구성된 열수력 모델 및 수치해석 알고리즘을 작성함으로써 계통 열수력 전산코드에 쉽게 통합될 수 있는 격납건물 열수력 전산코드(CAP, Containment thermal hydraulics Analysis Program)를 개발하고자 하였다.

2. 격납건물 열수력 모델

2.1 증기 영역

증기 영역은 물-증기-공기의 균일 혼합체로 가정하고 이에 대한 열역학적 상태는 해당 시간단계에 발생한 모든 질량 및 에너지 전달을 고려하여 재고량을 산정한 후에 계산된다. 질량 및 에너지 전달은 액체 영역과의 상호작용, 살수 및 팬냉각기의 영향, 또는 일차계통 파단면으로부터의 방출수 및 방출 증기 그리고 방출수의 감압에 의한 증기화를 고려하여 결정된다. 이 때 질량 및 에너지 재고량과 증기 영역 물-증기 혼합체 밀도는 다음과 같이 주어진다.

$$m_w^{new} = m_w + \Delta m \quad (1)$$

$$r_w^{new} = \frac{m_w^{new}}{V_{atm}} \quad (2)$$

$$U^{new} = M_{air} C_{v,air} T + m_w u_w + \Delta e \quad (3)$$

위에서 결정된 질량 및 에너지 재고량과 물-증기 혼합체 밀도를 근거로 온도, 압력, 습도, 건도, 내부 에너지 등 나머지 열역학적 상태를 구하기 위해서는 우선 증기 영역의 과포화 및 포화 상태를 구분할 필요가 있다. 증기에 대해서 Gibbs-Dalton’s law를 적용하고 혼합체 내의 각 성분들의

열역학적 평형 상태를 가정할 때 과포화 상태의 경우 증기 영역의 총에너지 및 증기 밀도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$U^t = M_{air} C^t_{v,air} T^t + m^{new}_w u^t_w (p^t_{wv}, T^t) \tag{4}$$

$$\rho^t_{wv} = \rho^t_{wv} (p^t_{wv}, T^t) \tag{5}$$

포화 상태의 경우 증기 영역의 총에너지, 건도 및 내부 에너지는 다음과 같이 주어진다.

$$U^t = M_{air} C^t_{v,air} T^t + m^{new}_w u^t_w \tag{6}$$

$$x^t = \frac{\rho_{g,sat(T^t)}}{\rho_{f,sat(T^t)} - \rho_{g,sat(T^t)}} \left(\frac{\rho_{g,sat(T^t)}}{\rho^{new}_w} - 1 \right) \tag{7}$$

$$u^t_w = (1 - x^t) u_{f,sat(T^t)} + x^t u_{g,sat(T^t)} \tag{8}$$

식 (1) 에서 (8)을 만족하는 해당 시간 단계에서의 새로운 열역학적 상태를 구하기 위한 수치해법으로서는 Newton-Raphson 방법을 채택하였다. 이 때 증기의 내부 에너지, 밀도 및 관련 미분항은 계통 열수력 최적 해석용 전산코드인 MEDUSA 코드[3]의 증기표 및 상태방정식 부프로그램을 사용하여 결정하며 공기의 경우는 이상기체의 상태방정식을 사용하되 비열은 온도에 대한 다항식 형태의 물성치 곡선을 사용한다.

증기 영역의 온도, 건도 및 증기압이 결정되면 습도 및 전압력은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$hum = p_{wv} / p_{g,sat(T^{new})} \tag{9}$$

$$p^{new}_{tot} = \frac{M_{air} R_{air} T^{new}}{V_{atm}} + p^{new}_{wv} \tag{10}$$

2.2 액체 영역

액체 영역은 균일 온도의 과냉각 또는 포화 상태 물로서 압력은 증기 영역 전압력으로 가정하고 해당 시간단계에 발생한 질량 및 에너지 전달을 고려하여 재고량을 산정한 후 온도를 계산할 수 있다. 질량 및 에너지 재고량은 다음과 같이 주어진다.

$$m^{new}_p = m_p + \Delta m_p \tag{11}$$

$$U^{new}_p = m_p u_p + \Delta e_p \tag{12}$$

액체 영역의 총에너지는 다시 다음과 같은 온도의 함수로 나타낼 수 있다.

$$U^t_p = m^{new}_p u^t_p (p_{tot}, T^t_p) \tag{13}$$

다시 Newton-Raphson 방법을 따라 식 (11)에서 (13)을 만족하는 액체 영역 온도를 구할 수 있다. 과냉각 물의 열역학적 상태가 결정되면 액체 영역 및 증기 영역의 체적은 각각 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_p = \frac{m_p^{new}}{\rho_p^{new}(p_{tot}, T_p^{new})} \quad (14)$$

$$V_{atm} = V - V_p \quad (15)$$

2.3 증기 및 액체 영역간 상호 작용

증기 및 액체 영역에서의 질량 및 에너지 재고량은 각 영역간의 상호 작용에 의해 영향을 받을 수 있다. 증기 및 액체 영역간 상호작용으로서는 경계면에서의 증발, 증기 응축, 현열에 의한 열전달, 포화 상태의 증기 영역에서의 de-entrainment 와 액체 영역의 비등이 고려 대상이 될 수 있다. 그러나 개발하고자 하는 격납건물 열수력 전산코드에서는 급격한 영역간 질량 및 에너지 전달을 수반하는 de-entrainment 및 액체 영역 비등만을 모사하고, 경계면에서의 증발, 증기 응축, 그리고 현열에 의한 열전달은 상대적으로 느린 과도 현상을 보이며 그 영향이 적은 것으로 판단되어 이에 대한 모델은 생략되었다. 포화 상태 증기 영역에서의 de-entrainment 는 사용자 입력에 의한 액적 제거율에 따라 계산할 수 있도록 모의하였으며 따라서 각 계산 시간 단계에서의 액적 제거분율은 제거율과 계산 시간 증분의 곱으로 계산된다. 액적 제거율은 보수적 계산의 경우 10^{12} sec^{-1} 로 사용되며 이는 매 시간 단계에 증기 영역의 모든 액적이 액체 영역으로 편입되는 것을 의미한다.

액체 영역에서의 비등은 액체 영역 내부 에너지가 격납건물 전압력에 대한 포화 물의 내부 에너지보다 클 경우에 발생하며, 따라서 비등 조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_p > u_{f,sat(P_{tot})} \quad (16)$$

이 때 비등수량은 다음과 같이 결정된다.

$$\Delta m_{boil} = m_p \frac{u_p - u_{f,sat(P_{tot})}}{u_{g,sat(P_{tot})} - u_{f,sat(P_{tot})}} \quad (17)$$

2.4 질량 및 에너지 방출

격납건물로의 질량 및 에너지 방출은 사용자 입력에 의해 시간에 따른 방출 표로 작성되거나 계통 전산코드와의 연계 계산을 통해 고려될 수 있도록 모의하였다. 따라서 이를 이용하여 계통 배관 파단 및 안전 밸브 작동으로 인한 질량 및 에너지 전달을 고려할 수 있다. 또한 붕괴열 또는 물-금속 반응열 등을 고려하여 필요에 따라 격납건물에 직접 추가되는 질량 및 에너지를 모의할 수도 있다.

2.5 방출수 증기화 모델

일차계통 파단면으로부터 물이 방출되는 경우 감압으로 인한 증기화를 모의하기 위해서는 증기 영역 온도 또는 압력을 기준으로 증기화 정도를 결정할 수 있도록 각각 온도에 따른 순간기화 (temperature flash) 및 압력에 따른 순간기화(pressure flash) 모델이 제공된다. 먼저 온도 순간기화 모델의 경우에는 파단면으로부터의 방출수가 순간적으로 증기영역에 편입되어 균질화 되는 것으로 가정하였다. 압력 순간기화 모델의 경우에는 방출수의 엔탈피에 따라 증기화율을 달리 적용한다. 즉, 방출수 엔탈피가 증기 영역 전압력을 기준으로 포화 증기 엔탈피보다 큰 경우에는 모두 증기화 하고 반대로 포화 상태 물의 엔탈피보다 작은 경우에는 모두 액체 영역으로 편입되도록 하였다. 방출수 엔탈피가 포화 상태 증기 및 물의 엔탈피 사이의 값을 갖는 경우에는 다음과 같이 증기화율을 결정한다.

$$\Delta m_{flash} = \frac{h_{in} - h_{f,sat(P_{tot})}}{h_{g,sat(P_{tot})} - h_{f,sat(P_{tot})}} \Delta m_{in} \tag{18}$$

2.6 살수 및 팬냉각기

격납건물 살수에 의한 영향을 모사하기 위하여 다음과 같이 살수 효율을 정의하였다.

$$h_s = \frac{h_{sf} - h_s}{h_e - h_s} \tag{19}$$

이상적인 살수계통에서의 최종 살수 엔탈피(h_e)는 증기 영역의 열역학적 상태에 따라 다른데, 포화 상태인 경우에는 포화 물의 엔탈피, 그리고 과포화 상태인 경우에는 동 영역의 증기 엔탈피가 된다. 또한 포화 상태의 증기 영역에서 열교환이 이루어진 살수는 최종적으로 액체 영역으로 편입되며, 과포화 증기 영역에서는 열교환 이후의 최종 살수 엔탈피와 동 증기 영역에서의 온도를 기준으로 하여 계산된 최종 살수 건도에 따라 각 영역으로의 편입 비율이 결정된다.

즉, 최종 살수 엔탈피가 포화 상태 물의 엔탈피보다 낮을 경우에는 살수량은 최종적으로 액체 영역으로 편입되고, 반대로 최종 살수 엔탈피가 포화 증기 엔탈피보다 높은 경우에는 살수량은 모두 증기 영역에 편입된다. 열교환 후의 최종 살수 상태가 포화 상태인 경우에는 다음과 같이 계산된 살수 건도에 따라 증기 및 액체 부분이 각각 증기 및 액체 영역으로 편입된다.

$$x_s = \frac{h_{sf} - h_{f,sat(T)}}{h_{g,sat(T)} - h_{f,sat(T)}} \tag{20}$$

팬냉각기는 증기 영역에 설치된 일종의 열교환기로 간주되며 이를 통한 열 제거율은 격납건물 증기 영역의 온도에 따른 사용자 입력으로 주어진다. 또한 별도로 온도 제어에 의한 스위치를 고안하여 팬냉각기 작동 여부를 제어하도록 하였다. 냉각코일에서의 증기 응축 현상을 별도로 반영할 필요가 있는데 격납건물 증기 영역이 포화 상태일 경우는 격납건물내 열수력적 평형에 의하여 자동적으로 고려되나, 과포화 증기 영역에서 최종적으로 액체 영역으로 편입되는 응축 증기량은 다음과 같이 모의하였다.

$$\Delta m_{fcc} = \min\left(\frac{f \cdot \Delta q_{fc}}{h_{wv} - h_{f,sat(pwv)}}, m_w\right) \tag{21}$$

2.7 열전도 해석

열구조물에서의 열전도 해석을 위한 수치 알고리즘을 개발하였다. 최대 50 개까지 열구조물을 정의할 수 있고 각 열구조물내에 다시 100 개까지의 격자를 두어 유한차분법에 의한 열전도 해석이 가능하도록 구성하였다. 각 열구조물은 최대 10 개까지 내층(sub-layer)을 정의하여 각 층마다 다른 격자 크기를 적용하며 역시 10 개까지 별도의 내층을 두어 층별로 적절한 물성치를 적용할 수 있도록 하였다.

온도는 각 격자점에서 정의되며 물성치는 격자점 사이에서 일정한 것으로 가정하였다. 그림 1 은 열전도 방정식의 차분화를 위해 주어지는 격자점, 격자 간격, 그리고 물성치에 대한 표기 방식을 도식적으로 나타낸 것이다. 이러한 표기 방식을 사용하고 완전 음함수적 방법으로 열구조물에

서의 열전도 방정식을 차분화 하면 다음과 같다.

$$\frac{rC_{p,i-1} + rC_{p,i}}{2}\left(T_i^{n+1} - T_i^{n}\right) = \frac{2\Delta t}{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i}\left(\frac{k_i}{\Delta x_i}T_{i+1}^{\ n+1} - \left(\frac{k_i}{\Delta x_i} + \frac{k_{i-1}}{\Delta x_{i-1}}\right)T_i^{n+1} + \frac{k_{i-1}}{\Delta x_{i-1}}T_{i-1}^{\ n+1}\right) \quad (22)$$

열구조물 좌측 표면에서의 경계 조건은 다음과 같은 차분 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$k_1 \frac{T_1^{\ n+1} - T_2^{\ n+1}}{\Delta x_1} = h_l^{\ n}\left(T_{bl}^{\ n} - T_1^{\ n+1}\right) \quad (23)$$

마찬가지로 우측 표면에서의 경계 조건은 다음과 같다.

$$k_{n-1} \frac{T_n^{\ n+1} - T_{n-1}^{\ \ n+1}}{\Delta x_{n-1}} = h_r^{\ n}\left(T_{br}^{\ n} - T_n^{\ n+1}\right) \quad (24)$$

위의 차분식으로부터 수립된 3 열 대각선 행렬식(Tri-diagonal matrix)에 대해 Thomas 계산법을 적용함으로써 열전도 방정식의 해를 구하였다.

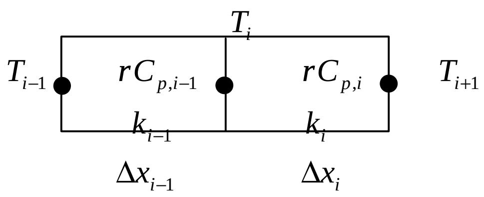

그림 1 열전도 방정식의 차분화를 위한 표기법

2.8 벽면 열전달 및 증기 응축

열구조물 표면에서의 열전달은 벽면 열전달 계수 및 인접한 열수력 계산 체적에서의 대표 온도에 의존한다.

$$q_w = h_w A_w (T_b - T_w) \quad (25)$$

열수력 계산 체적의 대표 온도는 사용자 선택에 따라 증기 영역 온도, 액체 영역 온도, 그리고 외기 온도 등으로 달리 적용될 수 있도록 하였다. 또한 열전달 계수에 대한 상관식 적용을 위해 다양한 사용자 선택이 가능하도록 하였다. 표 1 은 열전달 계수에 대한 사용자 선택 사양이다. 표 1 의 열전달 계수 선택 사양 중 1 번의 경우는 열구조물 경계에서의 단열 또는 대칭 조건이 필요할 때 유용하며 2 번의 경우는 격납건물 액체 영역으로의 열전달 시에 적절하게 사용할 수 있다. 3 번의 경우는 높은 열전달 계수를 채택함으로써 열구조물 표면 온도를 인접한 열수력 계산 체적 대표 온도와 동일하게 유지할 수 있도록 하였다. 5 번을 선택하면 취출 종료 시점까지는 Tagami 상관식을 적용하고 이 시점 이후에는 Uchida 상관식을 적용하여 벽면 열전달을 계산한다.

표 1 열전달 계수에 대한 사용자 선택 사양

열전달 계수 선택 색인	적용 상관식	증기 응축 고려 여부
1	h_w=0.0 *Btu/ft²-hr-°F*	-
2	h_w=0.405 *Btu/ft²-hr-°F*	-
3	h_w=10038 *Btu/ft²-hr-°F*	-
4	$h_w = h_{tnc}$ (난류 자연대류 열전달 상관식)	-
5	$h_w = h_{tu}$ (Tagami-Uchida 상관식)	고려

포화 상태 증기 영역에서의 증기 응축은 어떤 상관식을 사용하는 경우에도 동 영역내의 열수력적 평형에 의해 자동적으로 고려되나 과포화 증기 영역에서의 직접적인 증기 응축은 Tagami 또는 Uchida 상관식이 적용되는 경우에 한하여 계산된다. Tagami 상관식은 일차 계통 취출 기간 동안의 강제 대류 열전달 현상에 적용되며 취출 기간 동안의 총에너지 방출량, 격납건물 자유 체적, 그리고 취출 기간의 함수로 표현된다.

$$h_{\max} = f_{mtag} C \left(\frac{U}{V t_{peak}} \right)^{0.62} \tag{26}$$

냉각재상실사고 해석 시에는 증기막힘(Steam binding) 현상으로 인해 격납건물 압력이 낮게 예측될수록 보수적인 결과를 얻을 수 있으므로 이를 위해서 열구조물에서의 열전달 및 증기 응축을 최대로 모사할 필요가 있다. 따라서 사용자 입력에 의해서 주어지는 증배계수, f_{mtag} 를 편입하였으며 보수적 해석 시에 4.0 이 추천된다. 식 (26)은 취출 종료 시점의 열전달 계수를 나타내며 취출 기간 중에는 다음과 같이 선형 보간법이 적용된다.

$$h_{tag} = h_{\max} \frac{t}{t_{peak}} \tag{27}$$

또한 보수적 해석을 위해 사용자 선택에 따라 다음과 같이 취출 시작 시점에서의 최소 열전달 계수를 수정할 수 있도록 하였다.

$$h_{tag} = h_{\min} + (h_{\max} - h_{\min}) \frac{t}{t_{peak}} \tag{28}$$

여기에서 계수 h_{min} 는 *8 Btu/ft²-h-°F* 이 추천된다.

Tagami 열전달 계수는 취출 기간 중의 강제 대류 열전달 시에만 적용되는 것으로 취출 종료 시점 이후에는 Uchida 상관식이 적용되도록 하였다. Uchida 상관식은 증기 영역에서의 공기/증기 질량비에 따라 표 2 와 같이 주어진다. 또한 보수적 해석을 위해서 사용자 선택에 따라 Uchida 열전달 계수에 대한 증배계수를 적용할 수 있도록 하였다.

$$h_{uch} = f_{much} h_{uchida} \tag{29}$$

표 2 공기/증기 질량비에 따른 열전달 계수

질량비 (공기/증기)	열전달 계수 (h_{uchi} , Btu/ft^2-h-°F)	질량비 (공기/증기)	열전달 계수 (h_{uchi} , Btu/ft^2-h-°F)
> 50	2.0	3.0	29.1
20	8.0	2.3	37.0
18	9.0	1.8	46.0
14	10.0	1.3	63.0
10	14.0	0.8	98.1
7	17.0	0.5	140.
5	21.0	< 0.1	280.
4	24.0		

여기에서 최소 격납건물 압력 해석용 계산에서는 증배계수(f_{much})는 1.2 가 추천된다. 또한 Tagami 상관식으로부터 Uchida 상관식으로 갑자기 이행될 때 발생하게 되는 열전달 계수의 불연속성을 완화하기 위해 다음과 같이 연결 곡선을 도입하였다.

$$h = h_{uch} + (h_{\max} - h_{uch}) \exp(-t_{uch}(t - t_{peak})) \quad (30)$$

여기에서 시간상수, t_{uch} 는 사용자 입력 값으로서 보수적 해석의 경우에 0.025 가 추천된다. 표준 Tagami-Uchida 상관식을 사용하고자 할 경우에는 이 시간 상수로서 매우 큰 값(10^5)을 적용함으로써 연결 곡선의 적용 없이 갑작스러운 열전달 계수 변화를 허용할 수도 있다. 그림 2 에서 보수적 해석을 위하여 추천되는 Tagami-Uchida 상관식 적용 곡선을 도식적으로 나타내었다.

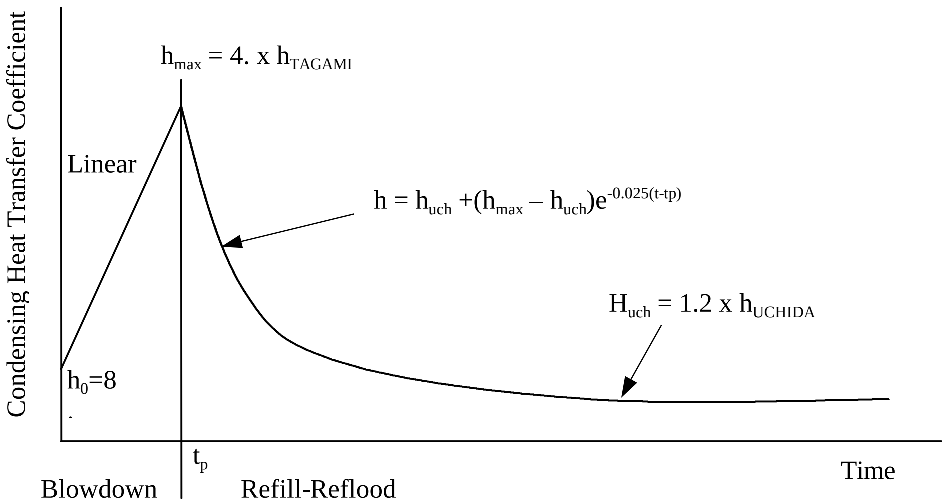

그림 2 보수적 해석에서 권장되는 Tagami-Uchida 열전달 계수

또 다른 벽면 열전달 모델로서 난류 자연대류 열전달 상관식이 적용될 수 있다. 이 상관식의 적용 범위는 다음과 같다.

$$10^{7} < Gr\,\mathrm{Pr} < 10^{12} \tag{31}$$

난류 자연대류 열전달 상관식은 다음과 같이 주어진다.

$$h_{tnc} = 2.0\left(r_{f}^{\;2} g b_{f} \Delta T C_{pf} \frac{k_{f}^{\;2}}{m_{f}} \right)^{1/3} \tag{32}$$

위 식에서 증기 영역 물성치는 벽면 및 증기 영역의 평균 온도로 정의되는 필름온도에서 구해지며, 체적 팽창 계수는 이상기체 팽창계수를 적용한다. 정압 비열 및 점도는 증기-공기 혼합체의 물성치를 적용한다.

열구조물 표면에서의 열전달 계수가 모두 결정되면 식 (25)에 의해 벽면 열전달을 계산할 수 있고 식 (23), (24)에 의해서 열구조물 열전도 해석에 반영된다. 마지막으로 이는 다시 증기 및 액체 영역에 대한 질량 및 에너지 전달을 통하여 격납건물 열수력 해석에 반영되어야 한다. 각 열구조물의 좌우측 경계면과 인접한 열수력 계산 체적은 사용자 입력에 의하여 결정된다.

과포화 증기 영역에서의 직접적인 증기 응축은 벽면 온도가 증기 온도 및 증기압 기준 포화 온도보다 낮은 경우에 한하여 다음과 같이 계산된다.

$$m_{wc} = \frac{q_{w}}{h_{wv} - h_{f,sat(pwv)}} \tag{33}$$

3. 검증 계산

개발된 격납건물 열수력 모델(CAP)을 시험하기 위하여 가상적인 대형 냉각재 상실사고 해석을 수행하였다. 동시에 기존의 최적 격납건물 열수력 전산코드인 CONTEMPT4/MOD5 에 의한 비교 계산을 수행하였다. 대상 원전은 한국 표준형 원전이며 격납건물 초기 온도 및 습도는 각각 80 °F 및 95 % 로 가정하였고 살수 계통, 팬냉각기 작동에 의한 열제거를 고려하였다. 열침원으로서는 격납건물 내부에서 각각 증기 영역 및 액체 영역과 인접하게 되는 외벽, 그리고 내부에 존재하는 내부 구조물 2 개를 모사하였다. Tagami-Uchida 열전달 계수에 대해서는 그림 2 의 보수적 증배 계수를 적용하였다. 격납건물 및 내부 구조물의 기하학적 입력 값, 초기 조건, 열구조물의 물성치, 열 제거 계통의 용량 및 작동 범위에 대하여는 검증되지 않았으므로 전산코드간 해석 결과 비교로만 이해 할 필요가 있다. 비교를 위해 채택한 주요 변수들은 격납건물 압력, 온도, 증기 분압, 액체 영역 온도, 그리고 습도이다. 그림 3 에서 5 에서 보는 바와 같이 CAP 모델에 의한 해석 결과는 초기 약 100 초간 격납건물 온도 및 압력 상승이 CONTEMPT4/MOD5 전산코드의 결과보다 최대 약 4% 정도 낮게 예측되는 것을 제외하고는 주요 변수들의 변화가 물리적으로 합당하고 CONTEMPT4/MOD5 계산 결과와 대체로 잘 일치한다. 따라서 초기 파단면 방출 질량 및 에너지에 의한 온도 및 압력 증가, 열구조물에서의 응축 열전달에 의한 감압, 그리고 격납건물 살수 작동에 의한 감압 등 격납건물 열수력의 주요 현상에 대해 타당한 모사를 하고 있음을 확인할 수 있다. 초기 온도 및 압력에 대한 다소 낮은 예측결과는 두 전산코드가 서로 다른 수증기표를 사용하는 데에 그 주요 원인이 있는 것으로 보인다. 즉, CAP 전산코드에서 CONTEMPT4/MOD5 전산코드의 수증기표를 사용하는 대신에 MEDUSA 전산코드와의 접합을 용이하게 하기 위하여 의도적으로 동 MEDUSA 전산코드의 수증기표를 원용하였으므로 두 전산코드의 예측결과는 다소 상이할 수 있다. 그러나 계통 질량 및 에너지방출 해석 시 배압이 낮을수록 보수적임을 감안할 때 배압 계산용으로서의 적용성은 여전히 유효하다고 볼 수 있다.

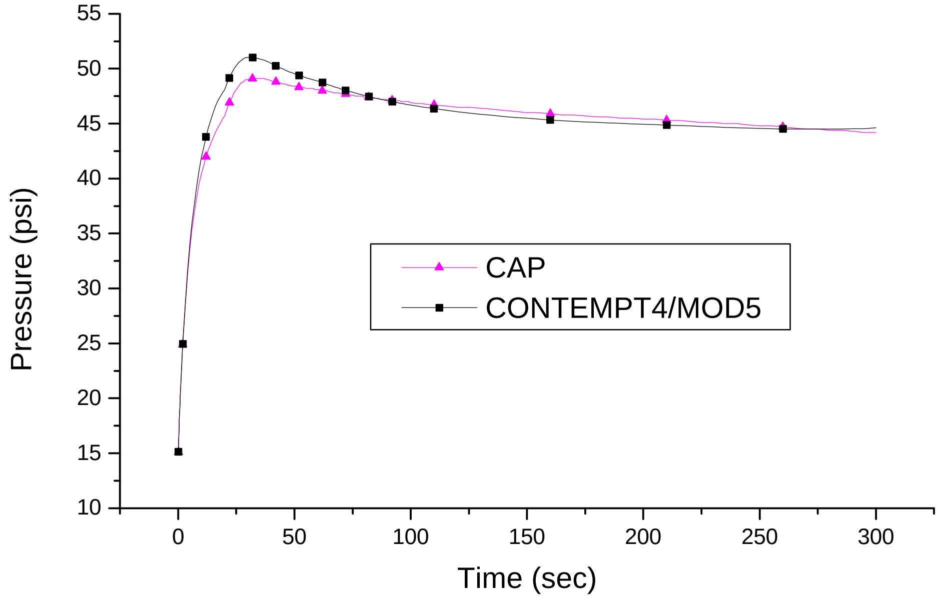

그림 3 온도 기준 순간 기화 모델 적용 시 격납 용기 압력 변화

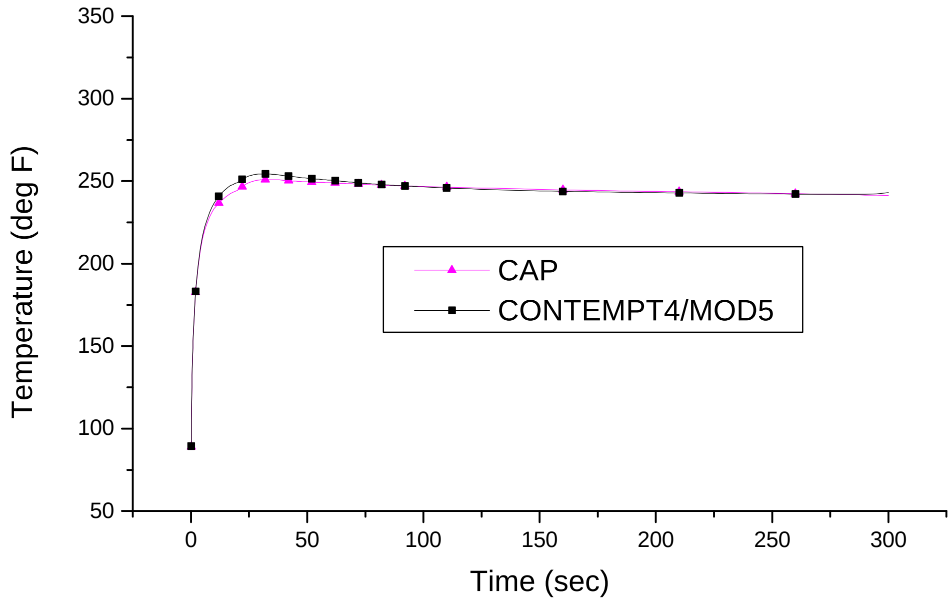

그림 4 온도 기준 순간 기화 모델 적용 시 격납 용기 온도 변화

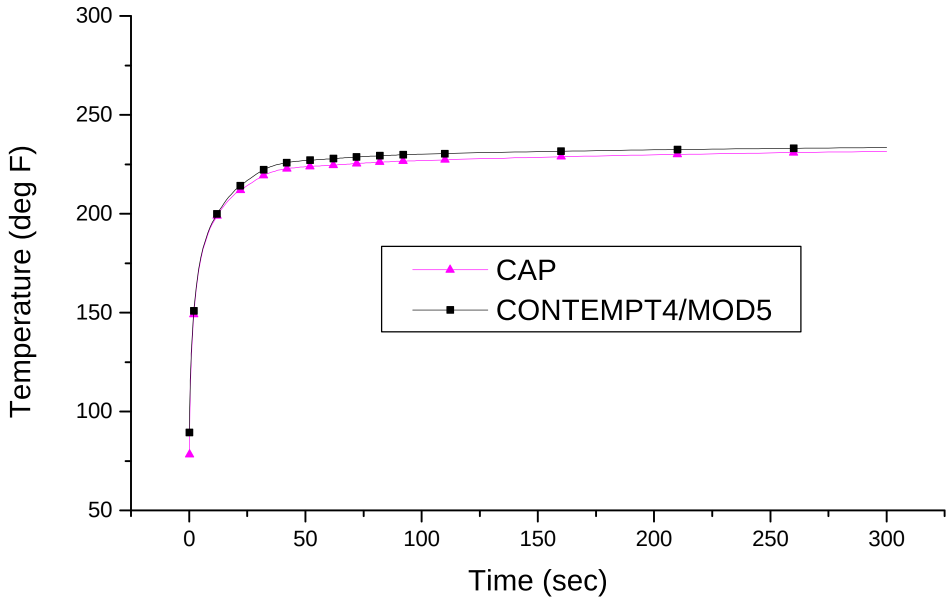

그림 5 온도 기준 순간 기화 모델 적용 시 액체 영역 온도 변화

4. 결론

기존의 최적 격납건물 열수력 전산코드를 검토하고 가압경수로형 격납건물 배압 관점에서 필요한 모델만을 구분하여 인허가용 격납건물 열수력 모델을 신규로 작성하였다. 격납건물을 하나의 계산 체적으로 간주하되 증기 영역과 액체 영역으로 구분하여 각각 액적-증기-공기 혼합체 및 과냉각 물에 대한 질량 및 에너지 보존식을 수식화하고 이를 만족하는 열역학적 상태 결정을 위한 수치 해법을 개발하였다. 그 밖에 격납건물 열수력 거동에 영향을 미칠 수 있는 다음 모델들이 개발되었다.

a) 질량 및 에너지 방출 자료 연계 방법
b) 파단면 방출수 순간 기화 모델
c) 살수 및 팬냉각기 모델
d) 열구조물 열전도 방정식의 수치 해법
e) 벽면 열전달 및 증기 응축(Tagami, Uchida, 난류 자연대류 열전달 외 다수)

개발된 격납건물 열수력 해석용 모델에 대해서는 CONTEMPT4 전산코드와의 비교 계산을 통하여 그 적용성을 입증할 수 있었다. 향후 보수적 또는 최적 방법론에 의한 계통 열수력 해석용 전산코드의 부프로그램으로 활용할 수 있으며, 저압에서의 수증기표 정확도 제고 및 다중 격실 모델 등 일부 모델을 보완한다면 격납건물 설계 및 기기 검증용 격납건물 열수력 해석도 가능할 것으로 판단된다.

Nomenclature

V_{atm} = 증기 영역 체적(ft^3)
M_{air} = 증기 영역 공기 질량(lbm)
m_w = 증기 영역 물-증기 혼합체 질량(lbm)
u_w = 증기 영역 물-증기 혼합체 내부 에너지(Btu/lbm)
T = 증기 영역 온도(R)
Δm = 해당 시간 단계에 증기 영역으로 추가된 질량(lbm)
Δe = 해당 시간 단계에 증기 영역으로 추가된 에너지(Btu)
m_w^{new} = 해당 시간 단계의 증기 영역 물-증기 혼합체 질량(lbm)
r_w^{new} = 해당 시간 단계의 증기 영역 물-증기 혼합체 밀도(lbm/ft^3)
U^{new} = 해당 시간 단계의 증기 영역 물-증기-공기 혼합체 총에너지(Btu)
$C_{v,air}$ = 공기의 정적 비열($Btu/lbm\text{-}R$)
u_{wv} = 증기 내부 에너지(Btu/lbm)
p_{wv} = 증기 분압(psi)
$Superscript, t$ = 미지수에 대해 임의로 시도된 임시 값
x^t = 건도
u_w^t = 물-증기 혼합체 내부 에너지(Btu/lbm)
$r_{f,sat(T^t)}$ = 포화 물 밀도(lbm/ft^3)
$r_{g,sat(T^t)}$ = 포화 증기 밀도(lbm/ft^3)
$u_{f,sat(T^t)}$ = 포화 물 내부 에너지(Btu/lbm)
$u_{g,sat(T^t)}$ = 포화 증기 내부 에너지(Btu/lbm)
m_p = 액체 영역 과냉각 물 질량(lbm)
u_p = 액체 영역 과냉각 물의 내부 에너지(Btu/lbm)
Δm_p = 해당 시간 단계에 액체 영역으로 추가된 질량(lbm)
Δe_p = 해당 시간 단계에 액체 영역으로 추가된 에너지(Btu)
m_p^{new} = 해당 시간 단계의 액체 영역 질량(lbm)
U_p^{new} = 해당 시간 단계의 액체 영역 총에너지(Btu)
p_{tot} = 증기 영역 전압력(psi)
T_p = 액체 영역 온도(R)
V_p = 액체 영역 체적(ft^3)
V_{atm} = 증기 영역 체적(ft^3)
p_{tot} = 증기 영역 전압력(psi)
Δm_{boil} = 비등수량(lbm)
$u_{f,sat(P_{tot})}$ = 증기 영역 전압력에 대한 포화 상태 물의 내부 에너지(Btu/lbm)
$u_{g,sat(P_{tot})}$ = 증기 영역 전압력에 대한 포화 증기의 내부 에너지(Btu/lbm)
Δm_{flash} = 해당 시간 단계에서 증기화된 방출수량(lbm)

Δm_{in} = 해당 시간 단계에서의 방출수량(*lbm*)

h_{in} = 방출수 엔탈피(*Btu/lbm*)

$h_{g,sat(P_{tot})}$ = 증기 영역 전압력 기준 포화 증기 엔탈피(*Btu/lbm*)

$h_{f,sat(P_{tot})}$ = 증기 영역 전압력 기준 포화 상태 물의 엔탈피(*Btu/lbm*)

h_s = 살수 효율

h_s = 초기 살수 엔탈피(*Btu/lbm*)

h_{sf} = 증기 영역에서의 열교환 후의 최종 살수 엔탈피(*Btu/lbm*)

h_e = 이상적인 살수계통에서의 최종 살수 엔탈피(*Btu/lbm*)

f = 증기 응축률

$h_{f,sat(pwv)}$ = 증기압 기준 포화 상태 물의 엔탈피(*Btu/lbm*)

Δm_{fcc} = 해당 시간 단계에서의 응축 증기 질량(*lbm*)

T_{bl} = 좌측 열수력 계산 체적의 대표 온도(°*F*)

h_l = 좌측 표면에서의 열전달 계수(*Btu/ft*^{2}*-sec-°F*)

T_{br} = 우측 열수력 계산 체적의 대표 온도(°*F*)

h_r = 우측 표면에서의 열전달 계수(*Btu/ft*^{2}*-sec-°F*)

q_w = 벽면 열전달(*Btu/sec*)

T_w = 열구조물 표면 온도(°*F*)

h_w = 열전달 계수(*Btu/ft*^{2}*-sec-°F*)

A_w = 열구조물 표면적(*ft*^{2})

$h_{\max}$ = 취출 기간 중 최대 열전달 계수(*Btu/ft*^{2}*-h-°F*)

C = 상수, 72.98

U = 취출 기간 중 총에너지 방출량(*Btu*)

V = 격납건물 자유 체적(*ft*^{3})

t_{peak} = 일차 계통 취출로 인해 초기 최대 압력이 발생되는 시간(*sec*)

f_{mtag} = 보수적 해석을 위한 증배계수

h_{tnc} = 난류 자연대류 열전달 계수(*Btu/ft*^{2}*-h-°F*)

r_f = 증기-공기 혼합체 밀도(*lbm/ft*^{3})

g = 중력 가속도(*ft/s*^{2})

b_f = 온도에 대한 체적 팽창 계수(*R*$^{-1}$)

ΔT = 벽면과 증기 영역 온도 차이(°*F*)

C_{pf} = 정압 비열(*Btu/lbm-°F*)

k_f = 열전도도(*Btu/ ft-h -°F*)

m_f = 점도(*lbm/ft-sec*)

m_{wc} = 증기 응축률(*lbm/s*)

h_{wv} = 증기 엔탈피(*Btu/lbm*)

$h_{f,sat(pwv)}$ = 증기압 기준 포화 물의 엔탈피(*Btu/lbm*)

참고문헌

1) TRAC-PF1: An Advanced Best-Estimate Computer Program for Pressurized Water Reactor Analysis, NUREG/CR-3567, 1984
2) Development of a Multi-Dimensional Realistic Thermal-Hydraulic System Analysis Code, MARS 1.3 and Its Verification, KAERI/TR-1108/98, 1998
3) S. Y. Lee and C. S. Lee, "Introduction to the Developmental Activities of a System Code: MEDUSA", International Meeting on "Best-Estimate" Methods in Nuclear Installation Safety Analysis Washington, DC, 2000
4) C. E. Park *et. al*., "Development of a Merged Version of RELAP5/MOD3 and CONTEMPT4/MOD5," Proceeding of KNS Spring Meeting, Pohang, Korea, May 1994.
5) CONTEMPT4/MOD4 A Multicompartment Containment System Analysis Program, NUREG/CR-3716, 1984
6) CONTEMPT4/MOD5 An Improvement to CONTEMPT4/MOD4 Multicompartment Containment System Analysis Program for Ice Containment Analysis, NUREG/CR-4001, 1984
7) Reference Manual for the CONTAIN 1.1 Code for Containment Severe Accident Analysis, NUREG/CR-5715, 1991