

액막의 유동 및 온도계산 모델에 의한 PCCS 열전달 현상 해석

김성오, 황영동, 김영인, 배운영, 장문희
한국원자력연구소

요 약

범용 전산유체 해석코드인 CFX 4.1을 사용하여 철재격납용기 표면을 전열면으로 이용하는 피동격납용기냉각계통에 대한 열전달 현상해석을 수행하였다. 철재격납용기 내부와 외부 채널에서 발생하는 열전달 현상을 모사하기 위하여 액막의 유동 및 온도계산 모델을 범용 전산유체해석코드인 CFX4.1에 적용하여 철재격납용기 내,외부의 표면을 흐르는 액막의 높이, 액막내 온도분포, 철재격납용기 내,외부의 온도, 유속 및 부피분율 등을 계산하는 복합 열전달 해석 방법론을 개발하였다. 해석결과는 향후 실험 등을 통한 검증이 필요하나 피동형 격납용기냉각계통에서 발생하는 물리적 현상들의 복합적인 거동 분석에 사용될 수 있는 것으로 평가되었다.

1. 서론

철재격납용기를 전열면으로 이용하는 피동형격납용기냉각계통(PCCS : Passive Containment Cooling System)의 설계개념은 철재격납용기와 콘크리트 보호건물로 구성되어 있다. 내부의 철재격납용기는 완전히 밀폐되어 있어 사고시 방사능 물질의 유출을 방지하고 노심의 잔열을 최종열침원인 외부 대기로 전달하는 기능을 수행하며, 콘크리트 보호건물은 외부 비산물로부터 철재격납용기를 보호하고, 격납용기 냉각수 탱크지지 및 철재격납용기 내부의 에너지를 제거하기 위한 자연대류 통로로 이용된다.(그림 1)

대형냉각재상실사고 등과 같이 원자로냉각재계통으로부터 고온, 고압의 수증기가 철재격납용기 내부로 방출되는 사고시 피동형 격납용기냉각계통에서 발생하는 주요 물리적인 현상은 크게 철재격납용기 내부 및 외부 채널에서의 자연대류 유동, 자연대류에 의한 증기의 이동으로 발생하는 열 및 물질전달 현상, 철재격납용기 내벽에서 발생하는 증기의 응축현상과 철재격납용기 외벽에서 발생하는 액막의 증발에 의한 상변화 열전달 현상으로 분류될 수 있다.

현재까지 자연대류유동이나 공기 중에 혼합된 물질의 이동으로 인해 발생하는 열 및 물질전달에 대한 많은 연구 결과가 발표되었으며 피동형 격납용기에서 이용되는 자연대류 유동은 개개의 기하형상에 대하여 비교적 상세한 연구가 되어 왔다. 그러나 공기와 증기가 혼합된 유동물질의 증기 응축으로 인해 액막이 생성되고 액막내부에서 열 및 물질 수송이 이루어지는 복합 열전달 현상에 대한 연구는 미진한 실정으로 이들 현상의 물리적 특성을 고려한 종합적인 해석이 필요하다.

본 연구에서는 PCCS에서 발생하는 물리적인 특성이 유지될 수 있는 범위 내에서 해석대상을 단순화하고 증기의 응축 및 증발, 또는 철재격납용기 외벽에 살수되는 유체에 의하여 철재격납용기의 내,외부의 표면에 형성되는 액막유동과 이들 현상을 고려한 온도계산모델을 개발하여 피동형격납용기의 열전달 특성을 분석하였다. 실제 원주형의 PCCS에서 발생하는 물리적 현상은 내부 기기의 배치와 외부 액막의 거동에서 3차원적인 현상을 보이고 있으나 계산의 단순화를 위하여 2차원 축대칭으로 가정하였으며, 철재격납용기 내, 외부의 공기와 수증기는 계산의 편의성을 위하여 압력에 따른 밀도의 변화는 없는 것으로 가정하였다. 또한 철재격납용기내의 증기와 공기는 기체상태로서 혼합이 잘 이루어지므로 속도장과 에너지는 균질모델(Homogeneous model)을 사용

하여 계산하고, 각각의 성분에 대한 부피분율(Volume fraction)을 계산하기 위하여 질량보존 방정식은 증기와 공기에 대하여 각각 계산하였다.

2. 지배방정식 및 경계조건

공기 및 증기의 혼합물에 대한 해석은 CFX4.1 코드의 복합물질 해석 모델을 사용하므로 질량, 운동량 및 에너지 보존방정식은 (1)-(3)식으로 각각 표시된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\gamma_a \rho_a) + \nabla \cdot (\gamma_a \rho_a U_a) = \gamma_a S_a \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U) + \nabla \cdot (\rho U \times U - \mu(\nabla U + (\nabla U)^T)) = B - \nabla P \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U H - \lambda \nabla T) = S \quad (3)$$

여기서 α 는 각 유체성분을 나타내고, ρ , μ , U , S , γ 는 각각 밀도, 점성계수, 속도, source항과 부피분율을, B 는 체력(body force), $H = h(T)$ 는 static enthalpy를 나타내며 혼합체의 물성치는 각 성분의 부피분율이 비에 의해 보간법으로 결정된다.

이와 같은 지배방정식에 대하여 그림 2에서와 같이 B면(하부중심에 있는 셀)을 통하여 증기가 유입되고, A면(콘크리트 격납용기와 철재격납용기 사이의 갭)을 통하여 자연대류에 의해 공기가 유입되며, 수막의 증발에 의한 증기와 공기의 혼합기체가 C면을 통하여 방출되도록 경계조건을 설정하였다. 자연대류 현상을 해석하기 위하여 A면과 C면은 동일압력조건으로 설정하였다. 또한 SIMPLE계열 알고리즘을 사용하는 CFX4.1코드의 압력항은 1개의 기준 압력에 대한 상대압력을 의미하므로 B점의 압력도 CFX계산을 위하여 A,C점과 동일하게 설정한다. 그러나 B점에서 증기가 유입되어 철재격납용기 내벽에 응축되는 현상을 모의하기 위하여 증기의 응축 계산에 필요한 압력은 증기 및 기체 혼합물의 온도의 포화압력으로 설정하였다.

3. 액막 및 난류 해석 모델 설정

철재격납용기의 내부와 외부에 형성되는 액막표면의 온도는 증기의 응축과 액막의 증발에 큰 영향을 미치므로 액막표면 온도에 대한 정확한 계산이 필요하다. PCCS에서 발생하는 열전달 현상의 해석에는 수증기의 응축 및 액체의 증발에 의한 질량전달 및 열전달 해석에 필요한 액막유동 및 온도계산 모델, 철재격납용기의 표면에서 발생하는 응축 및 증발 모델, 자연대류 유동에 대한 난류모델이 필요하다.

3.1 액막유동 및 온도계산 모델

철재격납용기 내부와 외부에 형성된 액막의 유동을 모의하기 위해서는 자유표면 유동에 대한 모델이 필요하다. 철재격납용기에 형성되는 액막의 유동은 격납용기의 표면을 따라 거의 일정한 높이를 형성하면서 흐르는 유동이므로 자유표면 해석 모델 중 해석방법이 단순하면서도 정확성이 높은 Height function[1]을 이용한 해석방법을 선택하였다. Height function은 자유표면의 형상이 유동방향으로 평탄하게 분포하여 액막의 높이가 유동진행 방향의 거리에 대해 1개의 값을 갖는 경우, 즉 단일값 함수로 정의되는 경우에 사용된다.

Height function을 이용하여 액막의 높이를 계산하기 위해 그림 3과 같은 PCCS표면 액막에 대해 질량보존방정식을 세우면 (4)식의 형태를 갖는 액막유동방정식이 설정된다.

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r u \delta)}{\partial x} = \dot{m} \quad (4)$$

여기서 r , δ 는 철재격납용기 중심축에서 각 셀까지의 거리(반경)와 액막높이를 나타낸다.

이와 같은 액막 유동방정식을 SUN[1]의 방법에 따라서 해석적인 방법으로 계산하면 (5)식과 같은 3차식으로 표현되며 유도과정은 참고문헌[3]에 상세히 기술되었다.

$$\delta_{i+1/2} = \left\{ -\frac{c_f}{2a_f} + \left[\left(\frac{c_f}{2a_f} \right)^2 + \left(\frac{c_f}{3a_f} \right)^3 \right]^{1/2} \right\}^{1/3} + \left\{ -\frac{c_f}{2a_f} - \left[\left(\frac{c_f}{2a_f} \right)^2 + \left(\frac{c_f}{3a_f} \right)^3 \right]^{1/2} \right\}^{1/3} \quad (5)$$

여기서 $a_f = \left(\frac{\rho g r \cos \beta}{3\mu} \right)$, $b_f = \frac{A_i}{2dt}$ 이며 $c_f = \frac{A_i(\delta_{i-1} - \delta_{i-1}^0 - \delta_i^0)}{2dt} - \frac{\rho g r_{i-1} \cos(\beta_i) \delta_{i-1}^3}{3\mu} - \frac{\dot{m} A_i}{\rho}$ 이다.

또한 액막의 온도는 액막의 높이 방향으로 선형으로 변한다고 가정하고 액막에 대한 에너지 보존식을 설정하면 (6)식으로 표현되며 q^w, q^c, q^s, q^e 는 각각 전도, 응축, 증발 및 살수에 의해 액막에 가감되는 에너지를 의미한다.

$$\frac{d(\rho c_p \delta \bar{T})}{dt} + \frac{\partial(\rho c_p r \delta u \bar{T})}{r \partial x} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} \right) + q^w + q^c + q^s - q^e \quad (6)$$

액막에 대한 에너지보존방정식에 벽면과 액막 표면에서의 경계조건을 적용하여 액막의 중심온도 \bar{T} 를 계산한 후 액막과 증기의 응축 및 증발량 및 에너지를 결정하기 위한 액막표면온도를 계산하면 액막표면 온도 T^i 는 (7)식으로 표시된다.[2]

$$T^i = \frac{2k^f \delta^v \bar{T} + k^v \delta T^v + h_{fg} \delta^v \delta}{2k^f \delta^v + k^v \delta} \quad (7)$$

여기서 δ = 액막의 높이, k^f, k^v = 액막과 증기의 열전도도, \bar{T}, T^v = 액막 중심 및 증기온도를 나타내며 h_{fg} 는 증기의 상변화에 의한 엔탈피 변화량을 의미한다.

3.2 증기의 응축 및 증발현상 모델

액막 표면에서 발생하는 액막의 증발 및 증기의 응축에 관한 모델은 Eckert[3]의 반 투과막 특성 모델을 사용하였다. 비응축성 기체인 공기는 통과할 수 없고 증기만이 응축과 비등을 통해서 통과할 수 있는 반 투과막의 특성을 가진 액막 표면에서의 증기와 공기의 혼합기체의 속도는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$v_v = - \frac{D_v}{1 - w_v} \frac{\partial w_v}{\partial y} \Big|_{\text{액막표면}} \quad (8)$$

여기서 w_v 는 증기의 질량분율, D_v 는 증기의 확산계수를 나타낸다. 유동장내의 증기 질량분율은 각 성분별 질량보존 방정식에 의해서 계산되며, 액막 표면의 질량분율은 Dalton의 분압법칙과 증기 상태방정식을 사용하여 계산한다.

그런데 본 연구에서 계산하고자 하는 PCCS는 물리적으로 철재격납용기 내부와 외부로 이루어진 2개의 유동공간으로 나누어져 있는 반면에 CFX4.1코드는 단일유동장만을 처리하는 범용전산해석코드이므로 계산영역내에서 발생하는 증기의 응축 및 증발에 의한 열전달 계산을 수행하기 위하여 사용자 프로그램 'USRSRC'를 사용하였다. 먼저 PCCS 철재격납용기를 나타내는 기하형상을 도출하여 이를 기본으로 'FLMTMP' 프로그램에서 이용하여 액막의 높이와 액막표면의 온도를 계산한다. 계산된 액막표면의 온도와 미국 ASME의 증기표를 모델한 프로그램을 사용하여 액막표면의 증기분압 및 총압력을 이용하여 액막표면에서 발생하는 증기의 응축 및 증발을 계산한다. 여기서 계산된 액막의 온도와 증기표의 물성치를 이용하여 액막표면에서 발생하는 증기의 응축량과 증발량과 증기의 응축과 증발에 의한 상변화 열전달 량을 계산한다.

CFX4.1코드 내부의 계산영역내부에 존재하는 철재격납용기의 표면에서 발생하는 증기의 응축 및 증발에 의한 물질 및 열전달 효과는 1) 증기의 생성과 소멸을 증기의 질량보존식의 Source항에 각각의 현상에 의한 양만큼 더하고 빼주는 방법을 사용하고, 2) 증기의 생성과 소멸효과에 의한 상변화 열전달 효과는 상당 열전도 계수 값을 사용하여 계산함으로써 이들 효과를 반영하였다. 상당열전도 계수는 사용자 프로그램 'USRCND'로부터 계산된다.

3.3 난류 모델

PCCS는 철재격납용기에 의해 분리된 두 개의 유동장을 형성한다. 철재격납용기 외부의 채널 유동은 공기의 자연대류에 의해 형성된 채널유동이며, 내부에서의 유동은 자연대류에 의한 와동

과 강철 쉘 내벽의 응축 열전달 현상을 동반한 유동이다. 본 연구에서는 이와 같은 와동 등의 복잡한 유동 해석에 적합한 RNG $k-\epsilon$ 모델[4]을 사용하였다. 벽면에서 미세 격자를 사용할 경우 많은 계산시간이 요하므로 벽함수(wall function)를 사용하여 단순화하였다.[2]

4. 해석결과

피동격납용기 열전달 특성을 모의하기 위하여 PCCS를 축대칭 2차원 형태로 단순화하여, 계산 영역에 대한 Mesh를 그림 2와 같이 설정하고, 초기 및 경계조건을 적용하여 과도상태 해석을 수행하였다. 자연대류에 의해 형성되는 유동장의 밀도는 온도만의 함수로 계산하였으며, 밀도 차이에 의한 구동력은 Boussinesq 가정을 사용하였다. 시간간격은 1초로 하여 100초까지 계산하였다.

이와 같은 조건으로 계산을 수행한 결과 격납용기 중심 하단에서 내부에 주입된 증기는 그림 5와 같이 중심선을 따라서 상승하다가 격납용기 내벽과 만나면서 격납용기 내벽을 따라 분산된다. 철재격납용기와 만난 높은 증기는 격납용기 내벽에서 응축되고 이로 인한 열전달로 철재격납용기가 가열되어 액막 외부 표면에서는 증발에 의한 열전달 현상이 발생한다. 철재격납용기에 전달된 열로 인해 철재격납용기 외부에서는 가열된 공기의 밀도감소와 증기의 증발에 의한 저 밀도 기체의 유입에 의해 유체의 상승유동이 발생한다. 이와 같은 현상으로 인해 그림 6과 같이 철재격납용기 내부의 기체에서는 증기의 부피분율이 감소하고 외부에서는 증기의 부피분율이 증가하게 된다. 그림 6을 상세히 살펴보면 격납용기 바닥 중심에서 유입되는 증기는 철재격납용기의 중심축을 따라 상승할 때에는 높은 증기 체적비를 유지하고 있으나 철재격납용기의 상단에서는 내벽에서의 응축으로 증기의 체적비가 급격히 감소되는 현상을 보이고 있다. 또한 이와 같은 자연순환 유동이 지속되는 동안에 철재격납용기 외곽 하단 부근에서는 증기의 체적비가 작고 공기의 체적비가 높은 혼합기체의 정체 현상도 나타나고 있다.

이와 같은 증기의 응축 및 증발현상에 의한 열전달과 자연대류 유동이 진행됨에 따라 그림 7과 같이 철재격납용기 내부의 중심부분은 고온이며 외곽부분은 철재격납용기를 통한 열전달 효과로 중심부분에 비하여 낮은 온도분포를 나타내고 있다.

각 위치별로 온도와 증기의 부피분율의 변화를 상세하게 살펴보기 위하여 그림 8과 9에 각 위치별 온도 및 증기의 부피분율을 격납용기 수평단면방향으로 도시하였다. 그림 8에 나타난 것처럼 수직높이가 증가하면서 격납용기 중심부근과 외곽사이의 온도차이가 점차 감소하고 있으며 그림 9의 증기분율도 온도와 유사한 변화를 보이고 있다.

철재격납용기 내벽에서 증기의 응축에 의해 형성되는 액막은 그림 10과 같이 초기에는 격납용기 상부에서 발생하여 차츰 시간이 진행됨에 따라 격납용기 하단으로 이동되며 하단부에서는 거의 액막의 높이가 일정하게 유지된다. 그런데 상단부에서 액막의 높이가 급격하게 상승하였다가 감소하는 현상을 보이는데 이는 그림 2의 C면과 동일한 넓이의 철재격납용기를 수평하게 설치하였기 때문에 응축된 액막이 격납용기 하단 부위로 유동하지 못하기 때문에 발생하는 현상이다.

격납용기 외벽에서는 그림 11과 같이 외부에서 분산된 격납용기 살수에 의해 액막이 형성되는데 시간이 진행함에 따라 액막이 차츰 격납용기 하단부위로 진행되고 있다. 시간이 약 10초 정도 지난 이후에 외부 액막이 완전하게 형성된 모습을 보이고 있다. 살수부위에서는 액막의 높이가 높은 상태로 유지되다가 살수부위를 지나면서 급격하게 감소되는 현상을 보이고 있는데 이는 철재격납용기의 각도가 점점 더 급격하게 수직방향으로 기울며 이에 따라 격납용기의 표면 넓이가 증가하기 때문이며 표면거리의 약 절반정도에서는 격납용기가 완전하게 수직으로 변화되므로 경사와 표면 넓이가 일정해지므로 액막의 높이도 일정한 값에 도달하게 된다.

5. 결론

피동격납용기는 철재격납용기 내,외부에서 발생하는 단상 열전달 및 상변화 열전달현상과 철재격납용기를 매개로 하여 내,외부의 열전달 현상이 복합되어 발생한다. 본 연구에서는 이러한 현상을 이해하기 위하여 철재격납용기에서 발생하는 액막의 유동 및 액막의 온도계산을 위한 모델을 범용 전산유체해석코드인 CFX4.1에 적용하여 해석하는 방법론을 개발하였다. 이 해석방법론을

이용하여 철재격납용기 내부와 외부의 표면을 흐르는 액막의 유동 및 온도분포를 계산하고 이를 이용하여 철재격납용기 내·외부의 온도, 유속, 부피분율 등을 계산하였다. 해석결과는 정성적인 관점에서 피동격납용기 내에서 발생하는 물리적 현상들의 복합적인 거동을 이해하는데 사용될 수 있는 것으로 판단된다. 본 연구에서 개발한 액막 유동 및 온도계산 모델과 이를 이용한 해석방법론의 실제 적용에는 적절한 실험 데이터에 의한 이들 모델과 해석방법에 대한 검증이 필요하다.

참고문헌

1. J. G. Sun, et al., "Development of liquid-film tracking models for analysis of AP-600 passive containment cooling system", presented at the ASME winter annual meeting New Orleans, Louisiana, 1993.
2. S. O. Kim, et al., "Development of methodology for PCCS heat transfer analysis of Passive reactor", KAERI/TR, will be published, 1998.
3. Eckert and Drake, "Analysis of heat and mass transfer, Chapter 20", McGraw-Hill company, 1972.
4. CFX 4.1C. Flow solver user guide, UKAEA, 1995.

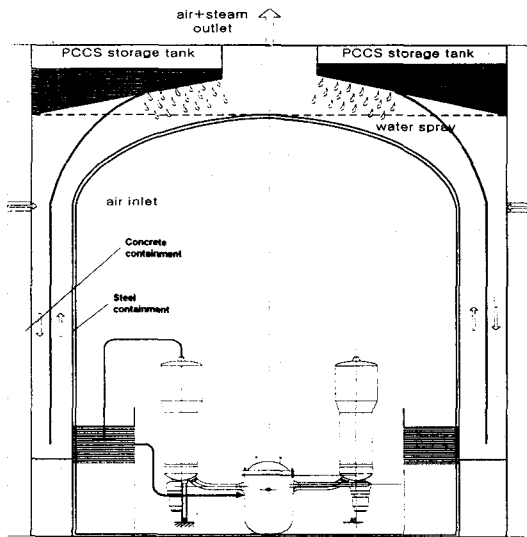


그림 1. 강철 셸 형태의 피동격납용기 개념도

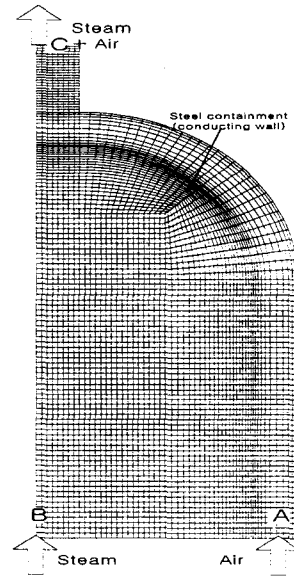


그림 2. PCCS 해석격자

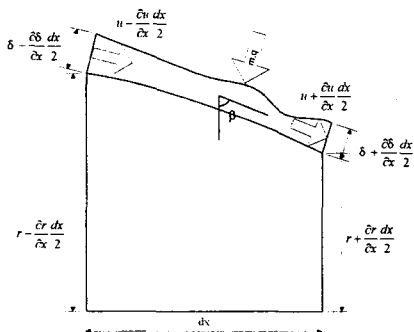


그림 3. Height function을 이용한 PCCS 액막 모델

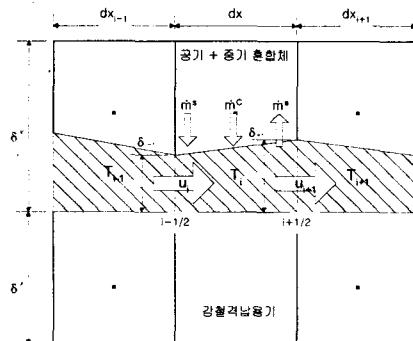


그림 4. 액막 유동 및 온도계산을 위한 개념도

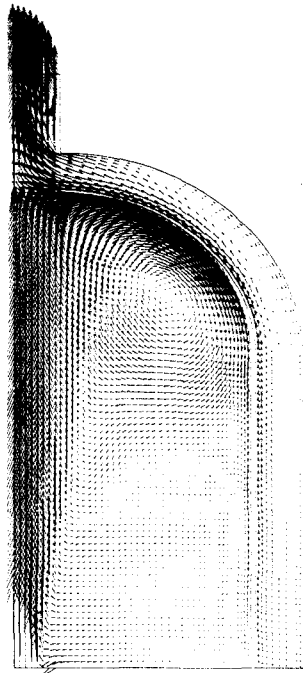


그림 5. PCCS 속도

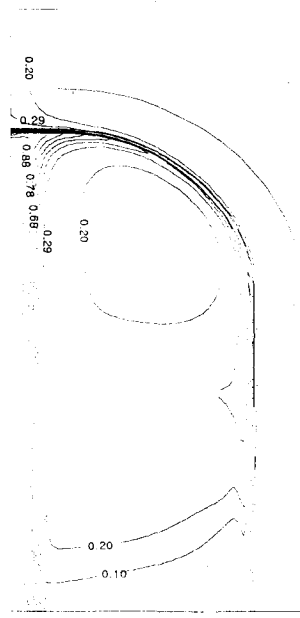


그림 6. PCCS 내 증기분율

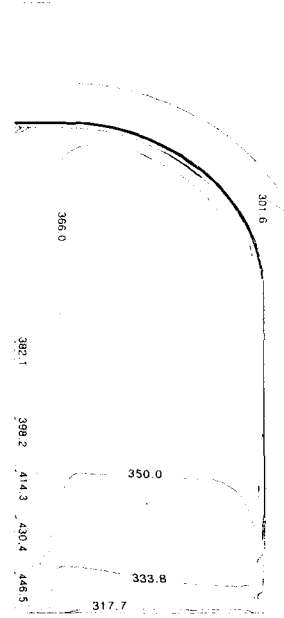


그림 7. PCCS 온도

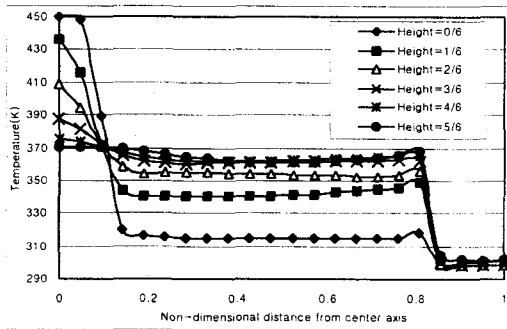


그림 8. PCCS 내부 온도분포 (시간=100초)

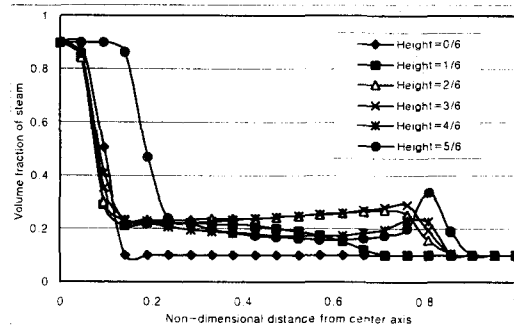


그림 9. PCCS 내부 증기분율(시간=100초)

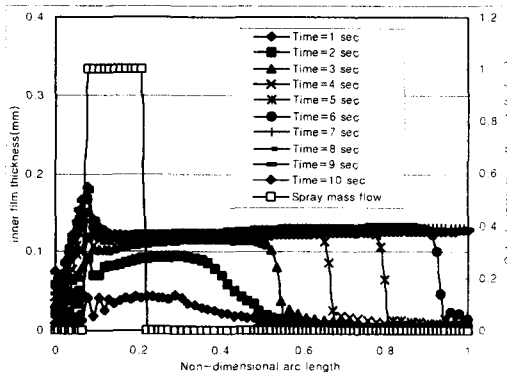


그림 10. 철제격납용기 내벽 액막높이

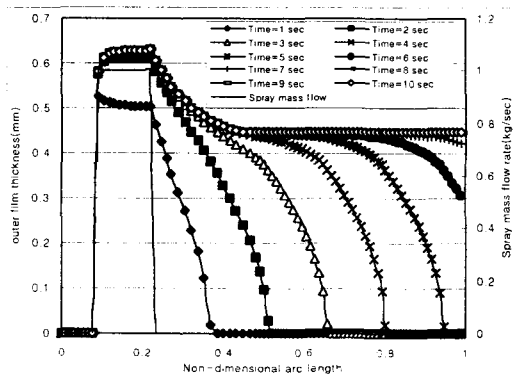


그림 11. 철제격납용기 외벽 액막높이