

불응축성 기체 환경에서의 연무/확산 경계층 응축열전달 모델 평가

변충섭, 이재용, 이창섭
한국전력 전력연구원

Evaluation of the Mist Diffusion Layer Condensation Heat Transfer Model with a Non-condensable Gas Present

Choong-Sup Byun, Jae-Yong Lee, Chang-Sup Lee
Korea Electric Power Research Institute

1. 서론

원자력 발전소에서 격납건물 계통의 건전성 유지는 냉각재상실사고(Loss of Coolant Accident: LOCA) 및 주증기관 파단(Main Steam Line Break : MSLB) 사고와 같은 설계기 준사고 시 격납건물의 최대 온도/압력을 평가하는 격납건물 성능 평가는 격납용기 내에 방사능 물질을 효율적으로 가두어 방사능 피해로부터 공공의 안전을 확보할 수 있으나 하는 관건이다. 지금까지 격납건물의 성능평가는 CONTEMPT-LT 코드 또는 이에 준하는 보수적 평가모델을 적용한 코드를 사용하여 가급적 격납건물 온도/압력이 최대한 높아지는 방향으로 설계코드의 입력자료 및 코드 내의 상관식을 선택하여 분석하는 보수적 접근방법을 사용한다.

열수력학적 상관식의 관점에서 볼 때, 격납건물 최대 온도/압력에 지배적인 영향을 끼치는 현상은 불응축성 기체 환경에서 격납건물 내부에 존재하는 열전도체 표면에서 일어나는 응축열전달이다. 지금까지 격납건물 설계에서 사용된 응축열전달 상관식은 소규모 실험을 바탕으로 개발되었고 증기와 불활성 기체의 질량비에 의해 단순하게 주어지는 Uchida 상관식이 사용되어 왔다. 그러나 CVTR과 같은 대형 실험은 Uchida 상관식이 상당히 보수적임을 보여준다. 이 보수성을 제거하고 보다 실제적인 상관식을 개발하기 위해서 확산 경계층 이론을 적용하려는 일련의 노력이 있었다. Peterson[1], Corradini[2,3]의 연구에서 그 예를 찾아볼 수 있다. 그리고 격납건물 내 열수력 현상을 모사하기 위해 EPRI에 의해 개발된 GOTHIC[4] 코드의 최근 버전인 7.0 이상에서 채택된 연무/확산 경계층 모델(Mist Diffusion Layer Model : MDLM)도 이런 노력의 일환이라 볼 수 있다. MDLM은 일반적 열/질량 확산 이론을 바탕으로 실험결과에 적합하도록 조절된 반 분석적인 방법으로 개발되었다. 본 논문에서는 GOTHIC 코드의 MDLM을 고리 1호기에 적용하여 특성을 평가해본다.

2. 연무/확산 경계층 모델

MDLM은 GOTHIC 7.0 버전이상에서 도입된 것으로 도체 표면의 확산 경계층에서 불응축성 기체 및 증기 분자의 확산현상에 기반을 두고 열/질량 전달 상사를 사용하여 응축율과 잠열 전달을 계산하는 불응축성 기체 환경 하에서의 응축열전달 모델이다. 경계층을 통한 확산 및 체적 이송으로 인한 증기 질량 전달률(즉, 응축률)은 식(1)에 의해 주어진다.

$$\Gamma''_d = - \frac{M_s Sh D_{sg} \bar{c}}{D_h} \ln\left(\frac{1-x_i}{1-x_b}\right) \quad (1)$$

여기서, M_s 는 증기의 분자량, Sh 는 Sherwood 수, D_{sg} 는 증기/기체 혼합물에서의 증기의 이항 확산계수(Binary Diffusion Coefficient), \bar{c} 는 경계층에서 증기/기체 혼합물의 몰 농도, x_i 및 x_b 는 각각 막 표면과 Bulk에서의 증기분률이며 D_h 는 열전도체의 전열반경(Heated Diameter)이다.

일련의 실험에 따르면 응축 벽체 표면에서 연무가 생성됨을 지적하였다. 연무의 생성 메카니즘과 열수력 현상은 대단히 복잡할 수 있지만 GOTHIC에서는 보다 단순한 접근법을 사용하여 연무생성을 설명하고 실험 결과에 맞도록 계수를 조절한다. 연무는 경계층에서의 과냉각에 의해서 발생한다는 단순한 가정 하에 연무의 생성율(Γ''_m)은 식(1)의 증기 응축률로부터 다음과 같이 주어진다.

$$\Gamma''_m = - \Gamma''_d S_{\max} \quad (2)$$

여기서 S_{\max} 는 최대 상대 과포화도로 식(3)에 의해 계산된다.

$$S_{\max} = - \frac{\text{Max}(x_s(y) - x_{sat}(T(y)))_{0 < y < \delta_m}}{x_s(y_m)} \quad (3)$$

여기서 y_m 은 응축막 표면에서 과포화가 최대인 지점까지의 거리, T 는 경계층에서의 온도, x_s 는 실제 증기분률, 그리고 x_{sat} 는 경계층에서 포화 증기분률이다. 이렇게 생성된 연무의 일부는 응축막으로 확산되고 나머지는 Bulk 체적으로 확산되어 연무장(Mist Field) 방정식의 질량/에너지원이 된다. Bulk 내로 확산된 연무는 과열 대기 상태를 낮추는 역할을 수행하게 된다.

MDLM은 몇가지 기본가정을 포함한다. 우선 연무의 생성은 경계층에서의 증기 농도 감소로 인한 농도 구배 유지로 응축률 감소를 유발하지는 않는다고 가정한다. 그리고 연무 생성으로 인해 방출된 잠열은 응축막 표면으로 증기 분자 운동에너지 전달, 연무와 벽체 사이의 복사열전달 및 잠열로 인해 벽체 근처에서의 증기온도가 증가함에 따른 대류열전달을 통해 벽체에 흡수된다고 가정한다.

이와 같이 분석적으로 얻어진 계산식은 실험결과와의 비교를 통하여 검증된다. 검증을 위해서 Uchida, 위스콘신 대학, Dehbi, CVTR 실험으로부터 얻어진 실험결과와 Nusselt 이론으로부터 계산된 예측값을 사용하였다. 검증을 통하여 GOTHIC에서는 열/질량 전달률을 보다 잘 예측하도록 몇가지 보정계수를 도입하였다. 보정은 아주 높은 벽체에서의 난류 막유동 효과와 생성된 연무가 벽체로 전달되는 비율 및 연무 생성 시 발생하는 잠열로 인한 대류의 증가 현상에 적용된다.

아주 높은 벽체인 경우, 응축막의 두께는 점점 두꺼워지다 결국 난류를 형성하게 되어 막의 표면은 거칠어지고 파형 흐름을 만들어낸다. 이 파형 표면과 막표면의 속도가 연합하여 확산 경계층의 난류를 발생시켜 결국 열 및 질량 전달률을 증가시키게 된다. G&K에 따르면 대략 벽체 상부로부터 1-2m 하부에서 난류를 발생시키며 벽체 높이에 따른 유효 열전달계수는 높이의 5/7승에 의존하는 것으로 평가되었다. 소형실험에 비해 CVTR과 같은 대형 응축실험에서 유효 열전달 계수가 상당히 큰 것으로 나타났기 때문에 위에서 언급한 유효 열전달계수의 벽체 높이에 대한 의존성을 고려하는 것이 필요하다. GOTHIC에서는 실험결과에 적합하도록 결정된 아래 스케일링 인자(λ_h)를 사용하여 이 현상을 반영한다.

$$\lambda_h = \left(\frac{h}{h_t} \right)^{0.7} \quad (4)$$

여기서 h_t 는 대류 열전달이 난류가 되는 지점의 벽체 상부로부터의 거리이며 실험결과에 가장 적합한 값으로 2.3m를 사용한다. 위에서 논의한 것과 같이 열전도체의 높이가 2.3m 미만일 경우에는 층류이며 이때는 막의 열저항 증가에 의해 질량/열 전달율이 감소한다. 따라서 이를 고려하면 이 인자의 최소 값은 1로 설정하는 것이 타당하다. 그리고 상한값은 실험을 통해 결정된 3을 사용한다. 이 보정계수는 Nusselt 수와 Sherwood 수에 적용한다.

연무생성과 관련한 보정은 생성 연무 중 벽체로의 전달률과 잠열발생으로 인한 효과이다. 생성된 연무 중 벽체로 전달되는 비율은 실험 결과에 맞도록 조절되는 데 GOTHIC에서는 실험 결과와 비교하여 생성된 연무의 25%가 벽체로 전달된다고 가정하였다. 그리고 연무 생성시 발생한 잠열은 경계층 내에서의 대류 열전달을 증가시킨다는 가정 하에 다음 보정계수를 대류열전달 계수에 고려한다. 실험 결과와 비교하여 결정된 f_m 의 값은 10을 사용하며 λ_{mh} 의 최대 값은 2로 제한된다.

$$\lambda_{mh} = 1 + f_m S_{max} \quad (5)$$

3. 고리 1호기 MDLM 적용

MDLM의 평가를 위해 고리 1호기에 MSLB에 대한 GOTHIC 분석을 수행하였다. 본문에서 분석된 MSLB 시나리오는 원자로출력 102%에서 1.4ft²의 양단파단 사고이며 단 일고장 가정으로 살수펌프 한대가 상실되었다고 가정한다. 격납건물 내부의 초기조건은

FSAR의 경우와 마찬가지로 압력 14.7 psia, 기체 및 액체 온도 120°F, 습도 50%를 사용하였으며 사고 시작 시 배수조 온도의 비정상적 예측을 방지하기 위해 물의 비율을 1E-6로 가정하였다. RWST는 14.7 psia 대기압 조건에 있으며 90°F로 냉각 상태를 유지한다고 가정한다.

GOTHIC 코드의 평가모델 입력은 그림 1에서 보는 바와 같다. 그림 1에서 보는 바와 같이 제어체적은 격납건물 내부, 환형공간 및 RWST(Refueling Water Storage Tank) 세 개로 구성된다. 고리 1호기의 경우, 능동 열침원은 냉각팬과 살수계통이 사용된다. 본 모델에서는 두개의 냉각팬이 기동된다고 가정하였다. 냉각팬의 기동압력은 Hi-1 설정치(5 psig)에 3 psig의 불확실도를 더한 8 psig(22.7 psia)를 사용하였으며 50초의 지연시간을 가정하였다. 격납건물 살수 펌프는 2대로 구성되어 있으나 단일고장을 고려하여 한대만이 가용한 것으로 가정한다. 따라서 그림 1에서 보는 것처럼 격납건물 살수신호 발생시 RWST를 수원으로 하는 살수운전을 수행하다가 재순환 운전으로 절체된 후에는 배수조를 수원으로하고 RHR(Residual Heat Removal) 열교환기에 의해 냉각된 물이 살수될 수 있도록 구성하였다. RWST 살수운전 개시 압력은 44.7 psia이고 83초의 지연시간을 가정하였다.

격납건물 내부에 있는 열 전도체는 사고시 격납건물로 방출되는 고온의 증기를 구조물

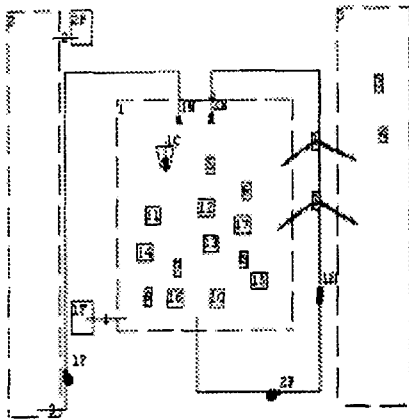


그림 1 고리1호기 GOTHIC 평가모델

표면에서 응축시키며 그 열을 흡수하여 격납 용기의 압력상승을 완화하는 역할을 하며 초기 침투압력을 결정짓는 중요한 역할을 수행한다. 그림 1에서 보듯이 열전도체는 모두 17개로 구성된다. MDLM의 성능평가는 열전도체표면에 해당 응축열전달 계수를 적용함으로써 수행된다. 10ft 이상인 구조물에 대해서 MDLM이 적용되고 그 외의 열전도체에 대해서는 Uchida 등 기존 GOTHIC Option을 사용하였다. MDLM에서 특성길이는 식(4)의 보정계수를 계산하기 위한 입력으로 사용된다. 표에서 보듯이 Polar Crane의 경우는 10ft를 사용하고 벽체에 대해서는 40ft를 사용한다. 식(4)에 대한 설명에서 알 수 있듯이 40ft의 특성길이는 3의 스케일링 인자가 적용될 것이다.

4. 평가 결과

GOTHIC 7.1에 의한 MDLM 평가 결과를 그림 2에서 그림5에 나타내었다. 그림 2는 콘크리트 벽체 표면에서의 열전달 계수를 비교 평가한 것이다. 그림 2에서 보듯이 MDLM을 사용하였을 때가 Uchida 옵션을 사용했을 때에 비해 전반적으로 더 큰 열전달 계수를 예측하였으며 그 차이는 살수 후에 더 두드러졌다. 이는 살수 후 격납건물 대기가 포화 상태로 변

하고 이로 인해 응축율이 증가함에 기인하는 것으로 판단된다. MDLM은 연무 생성 모델을 큰 특징으로 가지고 있다. 연무의 생성과 생성된 연무가 Bulk 대기로 확산되며 증발하는 과정은 사고초기 과열상태를 완화하는 데 지배적인 기여를 한다. 그림 3은 벽체 표면에서 생성된 연무가 재 증발하는 율을 나타낸다. 그림에서 보듯이 이와 같은 현상은 예측대로 살수 이전에 발생하여 살수 후 포화 상태에서는 기여하는 바가 없음을 알 수 있다.

그림 4 및 5는 MDLM을 적용한 경우와 Uchida 모델을 사용한 경우 격납건물의 압력과 온도를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 침투압력은 MDLM을 사용한 경우(52 psia)가 Uchida를 사용한 경우(56 psia)에 비해 4 psi 정도 낮게 예측하는 것으로 평가되었으며, 침투온도의 경우는 305°F 대 328°F로 MDLM을 사용한 경우가 약 23°F 정도 낮게 예측하는 것으로 나타났다. 그림 5의 포화 온도 대비 격납건물 온도 추이를 살펴보면 MDLM을 사용하였을 경우 과열 상태를 완화해 주는 경향을 뚜렷이 볼 수 있다.

따라서 평가 결과로 판단할 때, MDLM을 사용할 경우, 과열대기 상태로 출발하는 MSLB의 경우에는 사고초기 연무생성/증발 과정이 과열상태를 완화해주어 침투온도 관점의 큰 이득을 얻을 수 있을 것이며 포화 상태로 출발하는 LOCA의 경우에도 살수 후 MSLB 열전달 계수에서 보듯이 Uchida를 사용했을 때에 비해 이득이 있을 것으로 판단된다.

6. 결론

본 논문을 통하여 고리 1호기 격납건물에 대해 GOTHIC 7.1 버전에 도입된 MDLM의 성능평가를 수행하였다. 성능 평가 결과는 MDLM을 적용을 할 경우 침투압력은 Uchida 열전달 계수를 적용할 때에 비해 최대 4 psi 정도, 온도는 23°F 정도 낮게 예측하는 것으로 밝혀졌다. 그리고 초기 과열상태를 완화하고 결과적으로 온도상승을 제어하는 데 연무의 생성 모델이 상당한 역할을 수행할 것으로 예측되었다. 고리 1호기의 설계압력이 57.7 psia임을 감안하면 이는 상당한 정도의 여유도를 확보할 수 있다는 의미가 되며 격납건물의 대기 온도가 기기검증을 위한 기준 온도임을 감안하면 상당한 정도의 경제적 이득도 기대해 볼 만하다.

참고문헌

1. P.F. Peterson, et. al., "Diffusion Layer Theory for Turbulent Vapor Condensation with Noncondensable Gases", ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 115, pp 998-1003, 1993.
2. M.L. Corradini, "Turbulent Condensation on a Cold Wall in the Presence of a Noncondensable Gas," Nuclear Technology, Vol. 64, pp 186-195, 1984.
3. M.H. Kim, and M.L. Corradini, "Modeling of Condensation Heat Transfer in a Reactor Containment", Nuclear Engineering and Design, Vol. 118, pp 193-212, 1990.
4. T.L., George, et. al., "GOTHIC Containment Analysis Package-Technical Manual, Version 7.1", NAI8907-06, Rev.13, NAI, Jan. 2003.

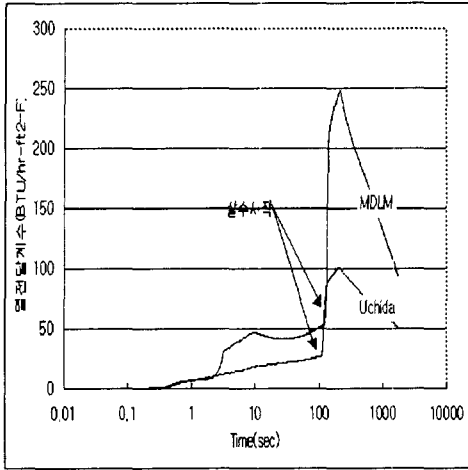


그림 2 콘크리트 표면에서의 열전달 계수

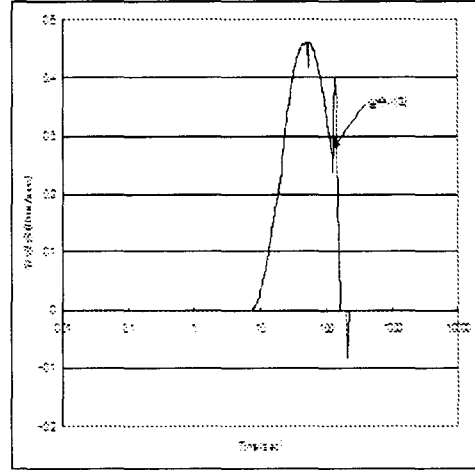


그림 3 격납건물 내 연무의 증발율

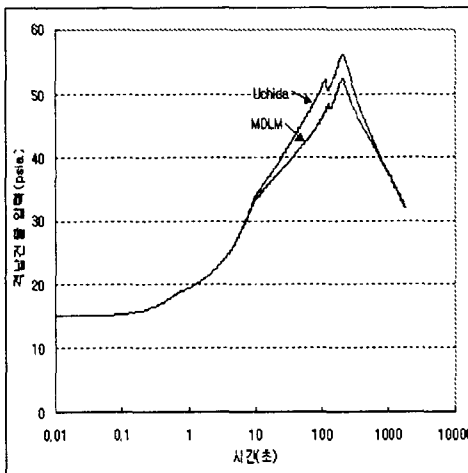


그림 4 MSLB 사고시 격납건물 압력

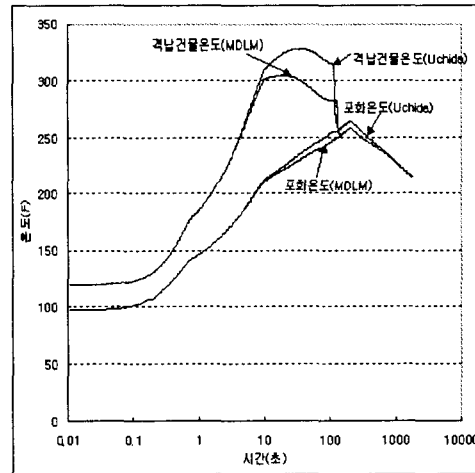


그림 5 MSLB 사고시 격납건물 온도