

고리 1호기 주증기관 파단사고에 대한 GOTHIC 연무/확산 경계층
응축모델 성능 평가

Performance Evaluation of the Mist Diffusion Layer Condensation
Model of GOTHIC for Main Steam Line Break Accident of Kori
Unit 1

변충섭, 이재용, 이창섭

전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요약

본 논문에서는 원자력 발전소의 주증기관 파단 사고시 불응축성 기체 환경에서 격납건물 구조물 표면에서의 응축현상을 열/질량 전달 관점으로 모사할 수 있도록 GOTHIC 7.1 버전에 도입된 연무/확산 경계층 모델의 성능평가를 고리 1호기에 대해 수행하였다. 이를 위해 GOTHIC Lumped Parameter Model을 사용하였다. 성능평가 결과, 연무/확산 경계층 모델을 적용 할 경우 Uchida 응축열전달 모델을 적용할 때에 비해 첨두압력은 최대 4psi 정도, 첨두온도는 24°F 정도 낮게 예측하는 것으로 밝혀졌다. 고리 1호기의 설계압력이 57.7 psia임을 감안하면 연무/확산 경계층 모델을 사용함으로써 기존 보수성을 제거하고 상당한 정도의 여유도를 확보할 수 있다는 결론을 얻었다.

Abstract

In this paper, the performance analysis for Mist Diffusion Layer Model in GOTHIC 7.1 is performed for a main steam line break accident of Kori Nuclear Power Plant unit 1. GOTHIC Lumped Parameter Model is used for this analysis. The results show that the peak pressure and temperature when Mist Diffusion Layer Model is used are under-predicted about 4psi and 24°F compared with Uchida option. Judging from this evaluation, the additional margin in containment peak pressure can be obtained if Mist Diffusion Model is applied.

1. 서론

원자력 발전소에서 격납건물 계통의 건전성 유지는 냉각재상실사고(Loss of Coolant Accident: LOCA) 및 주증기관 파단(Main Steam Line Break : MSLB) 사고와 같은 설계기준사고 시 격납용기 내에 방사능 물질을 효율적으로 가두어 방사능 피해로부터 공공의 안전을 확보할 수 있느냐 하는 관건이다. 따라서 위의 설계기준사고를 바탕으로 격납용기의 기밀성을 충분히 유지할수 있는 지 보이는 격납건물 계통의 성능 평가는 원자력 발전소 격납건물 설계업무의 중요한 요소로 취급된다.

종래의 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. 그러나 설계기준사고 시 격납용기의 충분한 보수성에도 불구하고 설계기준 초과사고의 경우 계산 결과가 설계기준값을 초과할 위험이 있으며 따라서 추가적인 안전설비의 채택이 필요하며 설비관리의 어려움을 가중시켜 설비의 고장확률을 증가시켜 원전의 운영에 악영향을 끼치는 모순을 발생시킬 수 있다. 따라서 격납용기의 보수성을 일정정도 유지하면서도 과도한 보수성을 완화시키는 것이 필요하다.

격납건물 성능분석에 있어서 보수성은 주로 LOCA나 MSLB 시 격납건물 내로 방출되는 증기의 질량 및 에너지 항, 기하학적 입력, 초기조건 및 코드 내에 포함되어 있는 열수력학적 상관식의 보수성에서 기인한다. 이 중 질량 및 에너지 방출항의 보수성은 격납건물 성능분석 코드가 아닌 사고해석 코드에 의해 결정되어야 하며 기하학적 입력 및 초기조건은 입력 자료계산의 불확실성에 기인한다. 한편 열수력학적 상관식의 보수성 관점에서 격납건물 최대 온도/압력에 지배적인 영향을 끼치는 현상은 격납건물 내부에 존재하는 열전도체 표면에서 일어나는 응축열전달이다. 열전도체 표면에서의 응축은 원자력 발전소의 LOCA나 MSLB 시 취출단계 동안 격납건물 대기 압력을 제한하는데 주요 역할을 한다.

사고시 원자력 발전소 격납건물 내의 응축은 격납용기의 밀폐성으로 인해 공기와 같은 불응축성 기체의 존재에 크게 영향 받는다. 지금까지 격납건물 설계에서는 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, Corradini의 연구 및 AP600의 설계에서 그 예를 찾아볼 수 있다. 그리고 격납건물 내 열수력 현상을 모사하기 위해 EPRI에 의해 개발된 GOTHIC 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 분석

적인 방법으로 개발되었다. 이는 미국의 Kewaunee 발전소에 처음 적용하여 대략 2 psi 이상의 압력 이득을 얻을 수 있는 것으로 평가되었고 현재 미 NRC에 인허가 신청 중이다. 본 논문에서는 GOTHIC의 MDLM을 고리 1호기에 적용하여 성능을 평가해본다.

2. 불응축성 기체 환경에서의 열전달 모델

LOCA 및 MSLB 시, 열전도체 표면에서 응축현상을 정확히 모사하고자 할 때 가장 중요하게 다루어지는 것은 불응축성 기체의 존재이다. 그림 1은 불응축성 기체 환경에서 수직 편판 표면에서 응축이 발생할 때 발생하는 열수력적 현상을 개념적으로 보여준다. 응축이 진행됨에 따라 증기와 불응축성 기체 혼합물은 차가운 표면으로 이동한다. 벽체 표면에서 증기 분자는 응축되어 물로 바뀌는 반면 응축되지 않는 불응축성 기체 분자는 표면에 축적된다. 따라서 증기의 분압은 벽체 근처로 갈수록 감소하여 응축막 표면에서 포화 압력에 도달하는 반면 증기의 부분압은 응축막 표면에서 최대이고 벽체에서 멀어질수록 평균 대기조건까지 감소하는 농도 구배가 발생한다. 이 농도 구배에 의해 증기와 불응축성 기체가 서로 반대 방향으로 확산이 일어나는 일정한 확산경계층(Diffusion Layer)이 형성된다. 이 때 응축막 표면에서의 응축열전달은 공기층을 통해 확산될 수 있는 증기의 양에 의해 제한된다. 한편 증기가 응축되기 위해 응축막 표면에서 냉각되면 경계층 외부와의 밀도차에 의해 경계층 내에서 자연대류가 형성된다. 이 때 발생하는 대류는 벽체 표면의 과포화도에 의해 발생하는 연무(Mist)의 잠열과 응축막의 난류 유동에 영향을 받게 되고 이는 또 다시 응축률에 영향을 주게 된다. 응축시 연무의 발생 현상은 Mori & Hijikata[1] 등의 실험을 통해서 지적된 바 있으며 Peterson[2]은 실험결과 대비 이론적 예측과의 차이를 설명하기 위해 연무 생성으로 인한 효과를 고려한 큰 승수(Multiplier)를 도입하기도 하였다. 불응축성 기체 환경에서 응축열전달 현상을 제대로 모사하기 위해서는 위에서 말한 현상들을 적절하게 설명할 수 있어야 한다.

현재 격납건물 성능평가에서 주로 사용되는 응축열전달 계수는 Uchida와 Tagami 열전달 계수이다. Uchida의 실험은 대략 높이가 30cm 정도의 열전도체를 사용하고 압력은 대기압 조건인 정상상태에 대해 수행되었다. 이 실험을 통해 얻어낸 Uchida 상관관계는 대부분의 경우 보수적이다. 왜냐하면 대류로부터의 모든 영향을 무시하기 때문이다. Tagami는 실험결과로부터 총 격납건물 체적, 취출 종결시간 및 그 때까지의 누적 방출 열량의 함수로 열전달계수를 구해내었다. 실험조건의 상사성에 근거하여 본 열전달 계수는 LOCA 사고시 초기 취출단계의 열전달 계수로 설계에 사용된다. 위의 실험들은 평균 열전달 계수를 예측하는 상관식 상호간의 비교를 위해 사용될 수는 있으나 경계층 현상과 같은 국부 현상을 설명하지는 못한다.

Gido와 Koestel(G&K)은 대형인 Carolinas Virginia Tube Reactor(CVTR) 격납건물 시험장치와 Battelle Frankfurt에서 측정된 응축열전달 실험 결과를 바탕으로 대형 벽체에

서의 응축 열전달은 Uchida와 Tagami 상관관계에 의해 예측된 값보다 상당히 큼을 알았다. CVTR 및 Battelle 실험장치의 열전도체는 대략 높이가 10, 100m 사이에 있고 거친 표면을 가진다. 이러한 표면에서 응축막은 불안정하여 벽의 상부 대략 2m 근처의 불응축성 기체/증기 경계층 내에서 난류로 천이됨을 알았다. Uchida와 Tagami 실험은 높이가 1m도 되지 않는 시험영역에서 수행되었기 때문에 난류로의 천이를 관찰하지 못했다. G&K는 증기와 불안정한 액체 경계에서 질량, 에너지 전달 및 레이놀즈 유추에 기초해 열전달 계수를 유도하였다. G&K 응축열전달 상관식은 자연 대류와 강제 대류에 대해 적용된다. 이렇게 개발된 G&K 상관식은 대형 벽체인 CVTR와 Battelle 실험의 결과와 잘 일치하는 것으로 알려져 있다. 그러나 G&K 상관식은 컴퓨터 코드 시뮬레이션에서 쉽게 얻어낼 수 없는 각종 속도비를 필요로 한다. 따라서 대부분의 속도비는 모사하고자하는 유동 상황에 대한 사전지식에 기초해 추정되어야 한다.

불응축성 기체 환경에서 수직 열전도체 표면에서의 응축열전달 현상을 열/질량 전달 현상을 통해 이해하기 위한 다수의 연구가 있었다. Corradini[3]는 잠열 열전달(Sensible Heat Transfer)을 고려한 응축열전달 모델을 개발했다. 총 열전달 계수는 응축 막을 통한 에너지 전달로 인한 것과 불응축성 기체/증기 경계층을 통한 에너지전달(확산)로 인한 것으로 구성되어 있다고 가정한다. 즉 불응축성 기체/증기 혼합물을 통한 열전달 계수는 대류와 응축이라는 2가지 에너지 전달 과정을 고려한다. 복사는 Corradini가 고려하지 않았지만 원래 포함되어 있었고 수소 연소를 모델링할 때 또는 증기 혼합물이 과열될 때 중요하다. Corradini 모델은 강제, 자연 대류에 대해 유도되며, 몇몇 주요 가정으로 이루어졌다. 초기 모델은 층류에 대한 Nusselt 이론을 기초로 개발되었으며 막 표면은 부드러운 것으로 모델링 하였으나 후에 Kim & Corradini[4]에 의해 난류 응축 막 및 파형 물막 현상을 포함시키는 것으로 모델을 바꾸었다. 이는 파형 또는 난류 응축막이 확산 경계층에서의 난류를 발달시키는 현상을 모사하기 위한 것이었다. Corradini와 Kim & Corradini 모델을 통해 계산된 평균 열전달율을 몇몇 실험 결과와 비교한 결과 Uchida 데이터가 자연대류 관계를 과소하게 예측했다는 사실을 발견하였다. 2m/sec의 강제 속도에 대해 Corradini의 강제대류 모델은 실험결과를 잘 예측하는 것으로 평가되었다. Corradini는 또한 벽체의 길이가 격납건물 내부에서 사용되는 것과 스케일이 유사하다면 자연대류 열전달 계수는 2m/s 속도에 대한 강제대류 열전달계수와 크기가 유사하다는 것을 알아내었다. 본 연구를 통해 밝혀낸 주요 사실은 큰 강제 속도가 없는 곳에서 자연대류는 격납건물 내부에서 응축열전달 메카니즘을 지배한다는 것이다. 이는 AP600 대형 실험장치에 의해 확인되었다. Corradini 모델은 국부 열/질량 전달 계수를 평가하는데 사용될 수 있는 적절한 것이나 그 복잡성 때문에 격납건물 성능분석 컴퓨터 코드에서 사용하기에는 부적절하다.

Peterson[2]은 포화 온도차 향으로 자연대류 과정에 대해 국부 열전달 계수의 계산을 할 수 있는 난류 확산 모델을 개발하였다. 이는 Corradini 모델과 유사한 방법으로 응축 열

전달 계수는 열/질량 전달 유추를 기반으로 계산된 응축 열전도도(k_{cond})의 정의로부터 계산된다. k_{cond} 는 Nusselt 및 Sherwood 수에 의해 표현된다. Peterson은 이 모델을 Uchida 실험결과에 적용하였다. 그는 증기와 가스 밀도 사이의 비를 Uchida 데이터가 잘 연관시킨 이유는 대기압에서 거의 일정한 불응축성 기체 부분압력을 유지하였기 때문이라는 사실을 알았다. Peterson은 Uchida 상관관계는 불응축성 기체 부분압이 대기압보다 작은 격납건물 조건에 대해 열 제거를 과대하게 예측할 것이나 불응축성 기체 부분압이 대기압보다 클 때는 더 보수적일 수 있다는 결론을 얻었다.

3. 연무/확산 경계층 모델(Mist Diffusion Layer Model : MDLM)

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. 본 모델은 만일 조건이 맞다면 벽체 근처에서의 연무 형성을 포함한다. 응축 막 저항은 Nusselt 이론에 근거하여 순수 증기 환경에서 적용될 수 있도록 모사된다.

대류열전달 계수는 일반대류열전달 계수에 질량전달에 의해 발생하는 경계층의 thinning 효과를 계수형태로 곱하여 얻어진다[5]. 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, Sh는 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 응축률으로부터 다음과 같이 주어진다.

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

여기서 S_{\max} 는 최대 상대 과포화도로 식(3)으로 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, T는 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.

MDLM은는 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 대류 열전달을 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. 이 데이터 베이스가 포괄하는 변수의 적용 범위는 표 1과 같다.

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.

표 1. MDLM 적용 범위

시험 변수	최소	최대
높이	0.3 m	36 m
대기속도	0 m/s	3m/s
전압력	1 atm	4.5 atm
증기체적분률	0.1	1

강제 대류에서 열/질량 전달계수는 증기와 응축막 표면의 상대속도의 함수이다. 강제대류가 발생할 때, 체적 속도는 막 속도에 비해 상대적으로 커서 막의 속도는 무시가능하다고 가정한다. 자연대류 상관식은 체적유동이 경계층에서의 밀도 구배에 의해 발생하며 막의 표면은 고정되어 있다는 가정에 기초하여 계산된다. 수직 평판에서 응축의 경우에 응축막의 유동은 열 및 질량 전달에 영향을 끼친다. 막이 얇은 벽체 상층부에서 막의 유동은 층류이고 일반적인 층류 유동에 대한 자연대류 상관식으로 충분할 것이다. 막이 벽체 아래로 내려가면서 막의 두께는 점점 두꺼워진다. 이렇게 두꺼워지는 막 유동이 층류를 형성하는 한 열 및 질량 전달률은 막 열저항의 증가로 인해 벽체 꼭대기로부터의 거리가 멀어질수록 감소하게 된다. 아주 높은 벽체인 경우, 막의 두께는 점점 두꺼워 지다 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 열전달 계수는 높이의 5/7승에 의존하는 것으로 평가되었다. 소형 실험에 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 전달률이 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.

위에서 언급한 대로 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 가정하에 다음 보정계수를 대류열전달 계수에 고려한다.

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

실험 결과와 비교하여 결정된 f_m 의 값은 10을 사용하며 λ_{mh} 의 최대 값은 2로 제한된다.

4. 고리 1호기 MDLM 적용

가. 고리 1호기 GOTHIC 코드 평가모델

GOTHIC 코드는 격납건물에서 발생할 수 있는 일반적 열수력 현상을 분석할 목적으로 EPRI에서 개발된 코드로 현재 미국에서 급속히 산업계 표준 전산코드로 자리 잡아 가고 있다. 이 코드와 기존 인허가 코드인 CONTEMPT 사이의 주요 차이점을 살펴보면 다음과 같다.

GOTHIC은 열수력 과도현상을 분석하는 일반적 목적으로 개발된 반면, CONTEMPT는 격납건물 현상 분석이라는 특정 목적을 위해 개발되어, 이 목적을 위한 4개의 융통성 없는 체적 형태를 가진다. CONTEMPT는 사용자 입력에 의해 취출단계에서 상분리 모델(Pressure Flash 또는 Temperature Flash)을 선택하는 반면 GOTHIC은 액적을 모사하고 기체 온도에 순간적으로 열평형을 이룬다는 가정을 사용하지 않는다. 따라서 액적의 크기가 클수록 열평형에 도달하는 시간이 길다. CONTEMPT가 살수 효율을 사용자 입력으로 제공해야 하며 보통 100%의 살수효율을 가정하는 반면 GOTHIC에서 살수 액적의 직경은 사용자 입력값으로 주어질 수 있으며 액적이 기체와 빠르게 열평형에 도달할 수 있도록 매우 작은 값을 할당할 수 있다. 계면 열/질량전달에 관해서, CONTEMPT는 계면에서 항상 포화 상태에 있다고 가정하는 반면 GOTHIC은 이를 제 1원리에 입각하여 계산한다.

고리 1호기에서는 MSLB 사고시 격납건물 성능 분석을 위해 CONTEMPT를 사용하였다. 본 논문에서는 벤치마킹을 위해 GOTHIC 평가모델의 결과를 CONTEMPT 결과와 비교하였다. GOTHIC 코드의 평가모델 입력은 그림 3에서 보는 바와 같이 3개의 제어체적, 두개의 격납건물 살수 펌프, 냉각팬 그리고 17개의 피동 열침원 구조물로 구성된다. 기본 입력의 작성에 사용된 자료는 모두 FSAR의 값을 근거로 하였으며 사용자의 공학적 판단이 필요한 경우에는 기존 격납건물 압력/온도 해석코드인 CONTEMPT 코드에서 사용한 값을 적용하였다.

제어체적은 격납건물 내부, 환형공간 및 RWST(Refueling Water Storage Tank) 세 개로 구성된다. 격납건물 내부는 바닥 높이를 임의의 0 피트에 맞추었고 높이는 최대높이인 167 피트, 수력학적 직경(Hydraulic Diameter)는 직경인 92 피트를 사용하였다.

고리 1호기는 능동 열침원으로써 냉각팬과 살수계통이 사용된다. GOTHIC의 냉각팬 열제거 성능은 CONTEMPT와 같이 증기 온도의 함수로 주어진다. 두개 이상의 냉각팬의 성능은 한 냉각팬 열제거성능에 운전 냉각팬 개수 만큼의 숫자를 곱하여 모델한다. 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 3에서 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. 재순환 운전으로의 절체는 RWST 저저수위 신호를 따라 수동으로 이루어진다. RWST 살수운전 중에는 노심으로의 비상노심 냉각수 주입 운전이 병행된다. 그러나 본 논문에서 단기간의 MSLB 시나리오를 고려하였으므로 재순환 모드는 사용되지 않는다.

격납건물 내부에 있는 열 전도체는 사고시 격납건물로 방출되는 고온의 증기를 구조물 표면에서 응축시키며 그 열을 흡수하여 격납용기의 압력상승을 완화하는 역할을 하며 초기 침투압력을 결정짓는 중요한 역할을 수행한다. 열전도체의 열전달 성능을 결정짓는 변수로 GOTHIC 코드에서 요구하는 값은 구조물의 노출 표면적, 두께 및 구성물질, 그리고 경계조건으로 표면온도와 열전달 계수에 대한 정의가 필요하다. GOTHIC 분석에서 사용된 열전도체의 입력변수는 콘크리트 바닥의 경우를 제외하고는 기본적으로 FSAR에서 사용된 값과 동일한 것을 사용하였다.

GOTHIC에서 경계조건은 LOCA나 MSLB 사고 시 질량/에너지 방출원을 사용한다. GOTHIC에서 질량/에너지 경계조건은 시간에 따른 질량 방출률과 비엔탈피를 각각 표 형태로 입력한다. 본 논문에서 분석된 MSLB 시나리오는 원자로출력 102%에서 1.4ft²의 양단과단 사고이며 단일고장 가정으로 살수펌프 한대가 상실되었다고 가정한다. 과단 유동에 대한 유로는 격납건물 내부 50 피트에 설치된 것으로 가정하였는데 이는 체적의 침수여부에 상관없이 항상 기체 영역에서 질량/에너지가 방출되도록 하기 위함이다. GOTHIC 경계조건에서 또 다른 입력 요소는 상류 압력으로 이것은 경계조건에서의 유체의 밀도를 결정하며 이렇게 결정된 밀도는 유입 유동의 속도를 계산하는 데 사용된다. Lumped Parameter Model에서는 유입 운동량은 소멸되므로 그렇게 중요하지는 않다. 본 연구에서는 격납건물 압력이 최대로 될 가능성이 있는 60 psia를 입력으로 사용했다. 취출 단계의 이상유동 중 액체는 액적형태로 방출된다고 가정한다. GOTHIC의 경우 액적에 대한 질량에너지 보존 방정식을 풀므로 액적의 크기는 중요한 변수가 된다. 여기에서는 GOTHIC 코드를 개발한 NAI가 권고하는 0.00394 인치를 취출 액적 크기로 사용한다.

격납건물 내부의 초기조건은 FSAR의 경우와 마찬가지로 압력 14.7 psia, 기체 및 액체온도 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.

나. MDLM 적용

MDLM의 이행은 응축열전달 계수를 적용함으로써 수행된다. 표 2에서 보듯이 10ft 이상인 구조물에 대해서 MDLM이 적용되고 그 외의 열전도체에 대해서는 Uchida 등 기존 GOTHIC Option을 사용하였다. 표의 4번째 컬럼은 추가적 보수성을 부과하기 위해 실험 데이터 베이스에 대해 MDLM이 예측한 평균 열전달계수를 Owen의 95/95 단측공차구간으로 바이어스 시킨 것이다. 이는 MDLM에 의한 예측결과를 28.3%정도 보수적으로 평가한다는 의미가 된다. 본 논문에서는 정상 MDLM 및 바이어스 시킨 MDLM 모두에 대해 격납건물 성능을 평가하였다. 마지막 컬럼의 Characteristic Length는 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 Characteristic Length는 3의 스케일링 인자가 적용될 것이다.

5. 평가 결과

GOTHIC 7.1에 의한 MDLM 평가 결과를 그림 3 및 그림 4에 나타내었다. 그림 3에서 보듯이 GOTHIC에 의해 예측되는 격납건물 압력의 대략적 추이가 CONTEMPT와 유사하였으나 격납건물 발생 시간은 MDLM을 사용하였을 때 조금씩 늦어짐을 볼 수 있다. 이는 격납건물 살수가 격납건물 대기 압력에 의해 시작되는 데 MDLM을 사용함으로써 초기 압력 감소에 의해 살수 작동 신호가 그만큼 늦게 발생함에 기인한다. 표 3에 평가 결과를 제시하였다. 표에서 보듯이, GOTHIC 및 CONTEMPT 공히 동일한 Uchida 응축 열전달 모델을 사용하였을 경우 GOTHIC이 +1.1psi 정도 더 높은 침투압력을 예측하였다. 한편 MDLM을 적용한 경우 침투압력은 CONTEMPT 결과에 비해 바이어스 MDLM의 경우에 -1.7 psi, 정상 MDLM의 경우에 -2.9psi 정도 낮게 예측하였다. Uchida 열전달 계수를 GOTHIC에 사용한 경우와 비교해 보면, 순수하게 MDLM에 의한 영향은 -2.8 psi 및 -4.0 psi 정도로 침투압력을 낮추어주는 성능을 나타낸다고 판단할 수 있다.

그림 4의 격납건물 대기 온도 추이는 MDLM 영향을 보다 분명하게 보여준다. MDLM 사용시 온도 감소 효과는 상당한 것을 볼 수 있으며 침투이후의 온도 감소도 Uchida 열전달 계수를 사용할 때보다 크다. 그러므로 침투에 도달하는 시간도 조금씩 빨라짐을 알 수 있다. 표 3에서 보듯이 CONTEMPT 대비 침투온도는 바이어스 MDLM 적용시 31.8°F, 정상 MDLM 적용 시 38°F 정도로 침투온도를 낮게 예측하였다.

표 2. MDLM 이행을 위한 입력 사양

Conductor		HTC Option	Reduction Factor	Characteristic length(ft)
1	Cylinder Steel	MDLM	0.717	40
2	Dome Steel	MDLM	0.717	40
3	Cylindrical Shield BLDG	Convection	1	N/A
4	Dome of Shield BLDG	Convection	1	N/A
5	Stiffner Ring	Uchida	1	N/A
6	Polar Crane	MDLM	1	10
7	Polar Crane Girder	MDLM	1	10
8	Misc. Platforms	Uchida	1	N/A
9	Steel Lined Wall	MDLM	0.717	40
10	Concrete Wall	MDLM	0.717	40
11	Refueling Canal	MDLM	0.717	40
12	Electrical Equipment	Uchida	1	N/A
13	HVAC Ductwork	Uchida	1	N/A
14	Piping	Uchida	1	N/A
15	Piping & Supports	Uchida	1	N/A
16	Concrete Floor	SPLIT	1	N/A
17	Concrete Floor/ceiling	SPLIT	1	N/A

표 3. MDLM 적용에 따른 침투온도/압력 예측 결과

MSLB (102%, 1.4 ft ² 과단)	침투압력 (psia)		침투온도 (F)	
CONTEMPT(Uchida)	55.1	0	343.1	0
GOTHIC 7.1(Uchida)	56.2	+1.1	330.1	-13.0
GOTHIC 7.1(Biased MDLM)	53.4	-1.7	311.3	-31.8
GOTHIC 7.1(Nominal MDLM)	52.2	-2.9	305.1	-38.0

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 4psi 정도, 온도는 24°F 정도 낮게 예측하는 것으로 밝혀졌다. 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. 그리고 3차원 모델을 사용할 경우에는 격납건물 대기의 대류현상을 모사할 수 있으므로 약간 더 이득이 커지리라 예상된다. 향후 본 논문의 후속으로 3차원 모델에 의한 MDLM 성능 평가도 수행할 예정이다.

7. 후기

본 연구는 과학기술부가 지원하는 원자력 연구개발 중장기 과제 중 “원전 운전 과도해석 및 신 안전해석기술개발” 과제의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

1. Y. Mori and K. Hijikata, "Free Convective Condensation Heat Transfer with Non-condensable Gas on a Vertical Surface", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 16, pp 2229-2240, 1973.
2. 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.
3. M.L. Corradini, "Turbulent Condensation on a Cold Wall in the Presence of a Noncondensable Gas," Nuclear Technology, Vol. 64, pp 186-195, 1984.
4. 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.
5. Bird, R.B., W.E. Stewart and E.N. Lightfoot, "Transport Phenomena", John Wiley & Sons, New York, 1960.

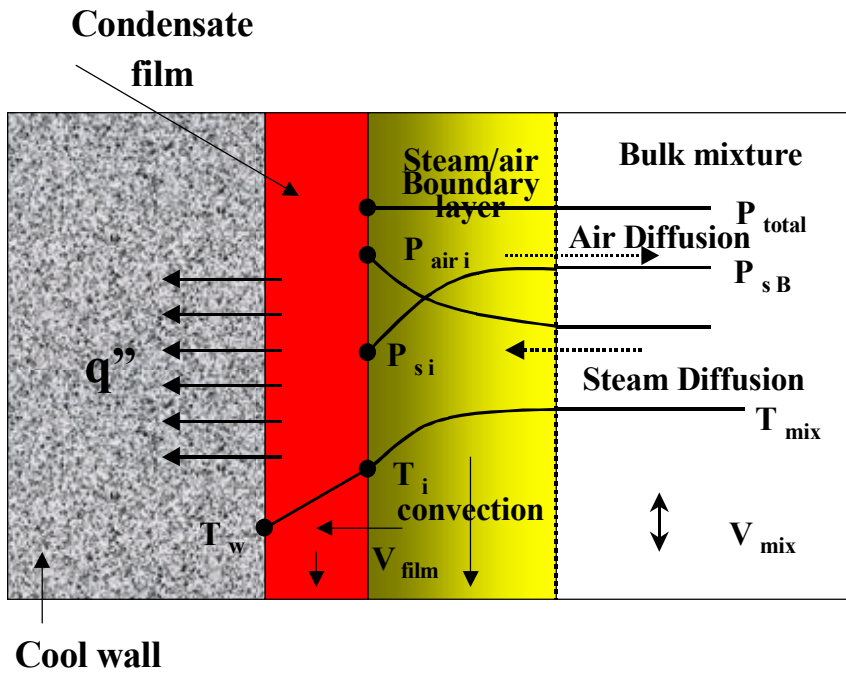


그림 1. 비 응축성 기체 환경에서 수직평판에서의 응축열전달 기구

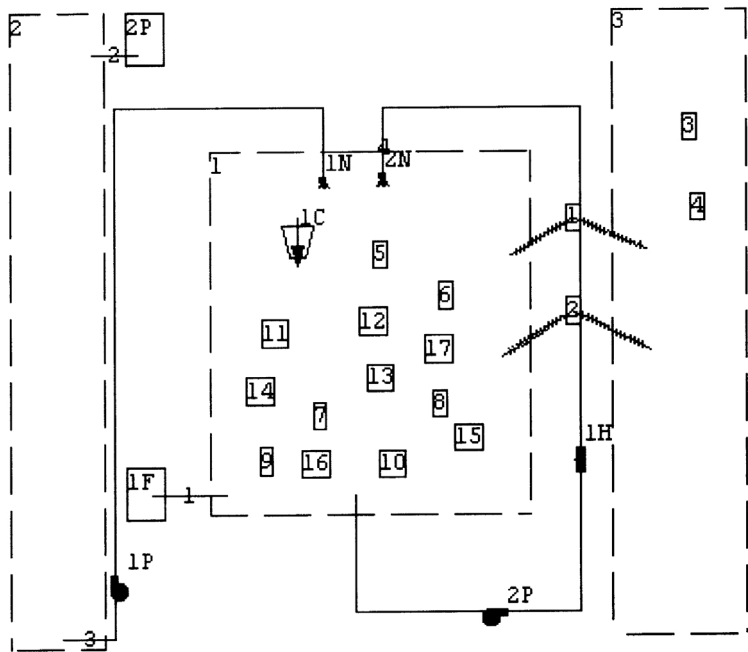


그림 2. 고리1호기 GOTHIC 코드 평가모델 구성도

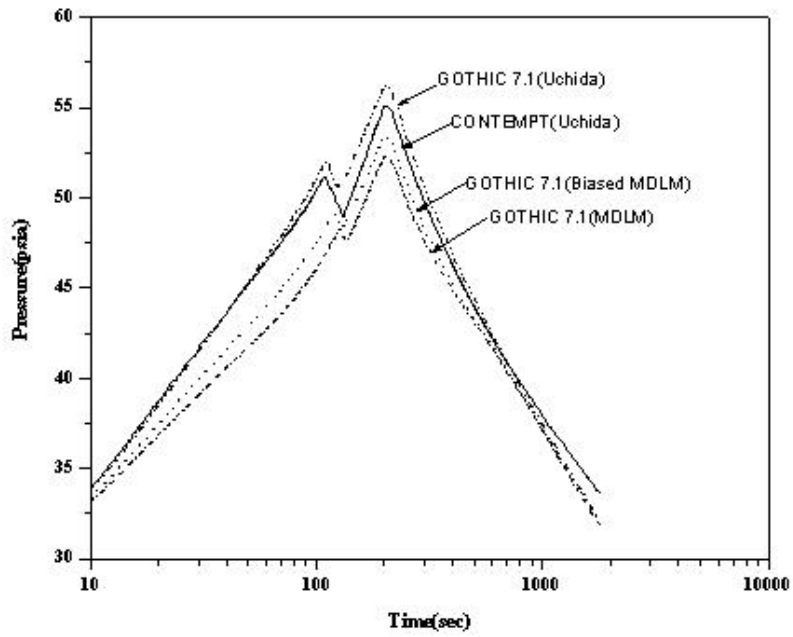


그림 3. MSLB 사고시 격납건물 압력(102% 원자로 출력, 1.4ft² 파단)

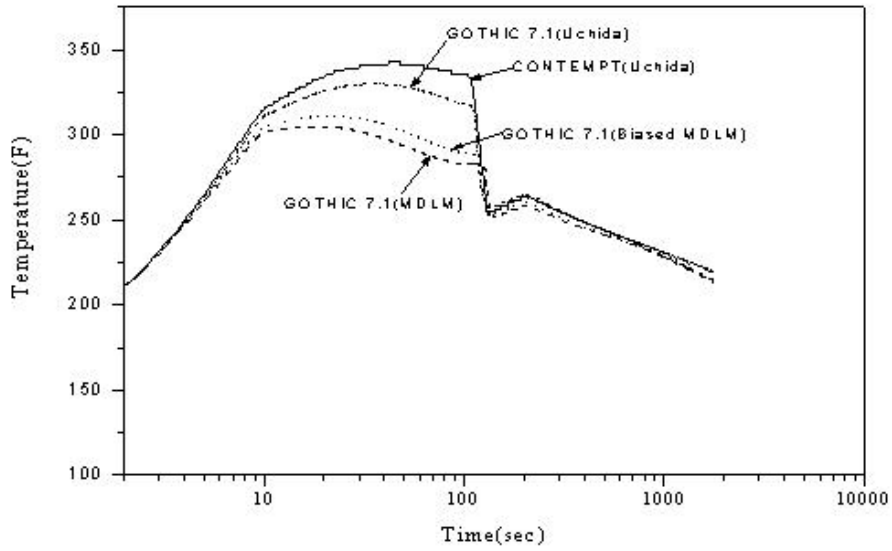


그림 4. MSLB 사고시 격납건물 온도(102% 원자로 출력, 1.4ft² 파단)