2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

GOTHIC 코드를 이용한 격납건물 성능분석 방법론 개발

A Development of Containment Performance Analysis Methodology Using GOTHIC Code

이병철, 윤정익
㈜미래와 도전
서울시 관악구 신림동 산 56-1

변충섭, 이재용
한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

이진용
서울대학교
서울시 관악구 신림동 산 56-1

요 약

본 논문에서는 단일 격실로 격납건물을 모델링하는 격납건물 설계 코드인 CONTEMPT-LT에 대하여 격납건물 다격실 해석이 가능한 GOTHIC 코드를 이용한 격납건물 성능해석방법론을 개발하였다. GOTHIC 코드의 적용 타당성을 평가하기 위하여 고리 1호기를 대상으로 설계 코드와 동일한 설계 입력데이타, 주요 열수력 모델링, 가정 등을 사용하여 격납건물 온도 및 압력 예측 결과를 비교 평가하였다. 고리1호기 GOTHIC 분석모형은 외부 대기를 포함하여 원자로건물 전체 및 RWST를 모의하는 3개 격실로 구성되어 있으며, 격납건물 열제거 기능의 모의하기 위하여 2대의 송풍냉각기와 1계열의 격납건물살수계통을 고려하였다. 그 결과, 동일한 설계 데이타 및 조건에 대하여 GOTHIC 코드는 초기 냉각수 및 증기 취출로 인해 발생되는 온도 및 압력 첨두치와 단기 격납건물 거동을 CONTEMPT-LT와 거의 동일하게 해석할 수 있음을 보여주었다. 특히, CONTEMPT-LT에 내재된 보수성을 감안할 경우 GOTHIC 코드의 분석결과는 적절한 결과를 제시하는 것으로 평가되었다.

Abstract

In a circumstance that well-established containment pressure/temperature analysis code, CONTEMPT-LT treats the reactor containment as a single volume, this study introduces, as an alternative, the GOTHIC code for an usage on multi-compartmental containment performance analysis. With a developed GOTHIC methodology, its applicability is verified for containment performance analysis for Korean Nuclear Unit 1. The GOTHIC model for this plant is simply composed of 3 compartments including the reactor containment and RWST. In addition, the containment spray system and containment recirculation system are simulated. As a result of GOTHIC calculation, under the same assumptions and conditions as those in CONTEMPT-LT, the GOTHIC prediction shows a very good result; pressure and temperature transients including their peaks are nearly the same. It can be concluded that the GOTHIC could provide reasonable containment pressure and temperature responses if considering the inherent conservatism in CONTEMPT-LT code.

1. 서 론

원자력발전소 격납건물은 냉각재상실사고 및 주증기관파단사고와 같은 설계기준사고시 원자로에서 방출되는 다량의 질량 및 에너지를 수용하도록 설계되어 있다. 현재의 격납건물 설계 압력 및 온도는 CONTEMPT-LT[1] 코드 또는 이에 준하는 보수적 평가모델(Evaluation Model, EM)을 적용한 코드를 사용하여 분석하고 있으며 격납건물 내 소격실(subcompartment)들이 온도 및 압력 등의 열수력 거동 측면에서 크게 다르지 않다는 가정에 기초하여 격납건물을 단일 격실로 모델링하여 왔다. 하지만, 최근에 이르러 격납건물 열수력 거동해석에서는 최적분석기법을 사용하여 격납건물내 국부 지역에 관한 상세해석정보를 필요로 하는 분야가 늘어나는 추세에 있다. 그와 같은 예로는 가동 중 원전의 주기적안전성점검 (Periodic Safety Review) 또는 신형원전의 고유설계특성에 따른 격납건물 성능평가 등을 들 수 있다. 이와 같은 필요성에 부합하기 위해서는 단일격실 모델을 사용하는 기존의 CONTEMPT-LT 를 이용한 분석방법론으로는 한계가 있으며, 동일한 수준의 보수성을 유지하면서도 다격실 분석이 가능한 분석방법론의 도입이 불가피하다.

본 논문에서는 GOTHIC 코드[2]를 이용한 격납건물 성능해석방법론을 제시하고자 한다. GOTHIC (Generation of Thermal-Hydraulic Information for Containment) 코드는 원전 격납건물 및 기타 주요건물의 설계, 인허가, 안전 및 운전에 대한 분석에 적용하는 일반화된 열수력 코드로서, 특히, 설계기준사고시 격납건물 전체 또는 격실의 압력 변화를 해석하는 능력을 보유하고 있다. 격납건물 설계 여유도 확보 가능성을 평가하기 위한 연구의 첫 단계로서, GOTHIC 코드의 적용성을 평가하기 위하여 고리 1 호기를 대상으로 CONTEMPT-LT 와 동일한 조건에서, 즉 동일한 설계 입력데이타, 주요 열수력 모델링, 가정 등을 사용하여 격납건물 온도 및 압력 예측 결과를 비교 평가한다. 제 2 절에서는 격납건물 압력 및 온도 해석 관점에서 중요한 고리 1 호기의 격납건물 구조 및 안전계통에 대하여 간략하게 기술하며, 제 3 절에서는 고리 1 호기에 대한 CONTEMPT-LT 의 입력에 근거하여 GOTHIC 코드를 위한 입력 모델링에 관한 내용을 기술한다. 제 4 절에서는 GOTHIC 코드의 분석 과정 및 결과를 제시하며, 제 5 절에서는 본 연구의 결론을 도출하고자 한다.

2. 고리 1호기 격납건물 및 안전계통

고리 1호기 격납건물은 약 1.45×10^{6} ft^{3} 의 자유체적을 가진 철제 원통형 구조물로 되어 있다. 최대 설계 내압은 사고 환경하에서 270 °F에 해당하는 43.0 psig이고 최대 외압 구배는 살수계통의 작동으로 인한 약 1.3 psig이다. 격납건물 반경은 52.5 ft이며, 원통형 높이는 146.0 ft이다. 그림 1은 고리 1호기의 격납건물 구조를 보여준다.

격납건물은 철제로 되어 있어 변형이 작으며 모든 설계 하중에 대하여 선형적으로 응답한다. 따라서, 압력 방벽으로서의 격납건물 기능은 실패하지 않는다. 격납건물의 최대 설계 누설율은 24시간동안 무게비로 0.1 %이다.

고리 1호기의 격납건물 열제거계통은 격납건물살수계통과 격납건물 재순환계통으로 구성되어 있다. 격납건물살수계통은 350 피트의 전개헤드에서 1,600 gpm의 용량을 가진 두 개의 부계통으로 구성되며 각각의 부계통은 살수 펌프, eductor, 96개의 살수 노즐을 포함하는 두 개의 헤더 그리고 필요한 배관, 밸브 등으로 구성되어 있다. 격납건물살수계통은 23 psig에서 공학적안전설비작동계통에 의해 작동된다. 격납건물 재순환계통은 정상운전시 총 요구용량의 1/3 및 사고시 총 요구용량의 1/2을 가지는 4 대의 송풍냉각기로 구성되어 있다. 특히, 사고시에는 4 대의 송풍냉각기 중에서 2 대가

저속 모드에서 운전된다. 격납건물 온도 및 압력 해석에서는 2 대의 송풍냉각기와 1계열의 격납건물살수계통을 고려하도록 요구하고 있다.

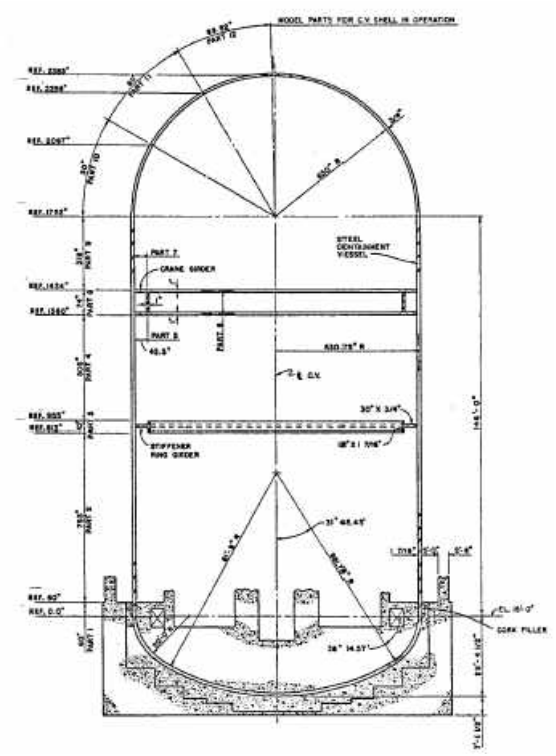

그림 1 고리 1호기 격납건물

3. 고리 1호기 GOTHIC 모델링

고리 1 호기를 위한 GOTHIC 분석모형은 외부 대기를 포함하여 원자로건물 전체 및 RWST 를 모의하는 3 개 격실로 구성되어 있다. GOTHIC 모델링을 위한 원자로건물(CV #1) 및 RWST (CV #2)의 설계정보는 참고문헌 3 에 의해 다음과 같이 정의된다.

CV No.	Description	Volume (ft^3)	Floor El. (ft)	Height (ft)	Hydraulic Dia. (ft)
1	Containment	1.45×10^6	0*	167	92
2	RWST	80,000	33	40	20

* GOTHIC 분석을 위한 기준 고도는 격납건물 바닥임.

GOTHIC 에서 정의되는 수력반경은 액막에 의해 젖을 수 있는 제어체적 내의 구조물 면적을 계산하는데 사용된다. 따라서, 수력반경은 wetted perimeter (P_w)에 의해 다음과 같이 정의되어야 한다.

$$D_h = \frac{4A}{P_w}, \quad P_w = S/h \tag{1}$$

여기서, D_h 는 수력반경, A 는 체적의 단면적, P_w 은 wetted perimeter, S 는 구조물 표면적, 그리고 h 는 체적의 높이를 각각 의미한다. 구조물의 표면적을 실제적으로 예측함으로써 수력반경을 가능한 한 정확히 표현하는 것이 중요하지만, 구조물에 관하여 참조가능한

설계정보[3]는 냉각수에 의해 젖혀질 수 있는 구조물의 방향(orientation)에 대한 상세한 정보를 수록하고 있지 않으며 단순한 벽체 형태를 가정하고 있다. 한편, 제어체적내 액상과 증기상의 접촉면을 통한 열 및 물질전달을 계산하는 데 사용되는 접촉면의 크기는 일반적으로 제어체적의 의해 결정되는 단면적을 사용하는 데 GOTHIC 에서는 기본모델로 되어 있다.

고리1호기의 경우, 격납건물과 외부를 연결하는 물리적인 통로가 없기 때문에 GOTHIC 모델에서의 피동 유로 (Passive Flow Path)는 없다.

원자로건물살수계통은 주입모드에서는 RWST 냉각수를 흡입원으로 하여 원자로건물 상부 및 돔 부분에서 살수 액적(droplet)을 분사시켜 원자로건물 대기를 냉각시키는 기능을 수행하며, 원자로건물살수펌프, 열교환기, 살수노즐, 그리고 관련 배관 및 밸브로 구성되어 있다. 따라서, GOTHIC에서도 이들 기기들을 적절히 모델링하여야 하는데, 피동 유로를 이용하여 우선적으로 살수배관을 만든다. 이 때 요구되는 유로 특성은 집중 모델의 성격상 분석결과에 크게 영향을 주지 않기 때문에 단순 수치를 사용하였다.

다음으로 모델링되어야 하는 CSS 기기들은 펌프, 열교환기, 그리고 노즐이다. GOTHIC에는 이들 기기들을 위한 모델이 마련되어 있으며, 모델링의 기준이 되는 조건[3]은 다음과 같다. 동 분석에서는 최소값을 적용한다.

- 살수유량 : 3,200 gpm (max) & 1,600 gpm (min)
- 살수 온도 : 90 ^{o}F
- 작동 설정치 : 23 psig
- 작동지연시간 : 83 sec

원자로건물살수펌프는 정격 체적유량에 대한 총 유량비를 시간의 함수로 표현하는 "*Q/Qr vs T*"로 모델링하며, 열교환기는 유효 열전달면적 및 열전달계수를 가진 관류형, 수평 U-튜브의 형식으로 모델링한다. 펌프 및 열교환기 모델링을 위하여 제공되는 설계변수는 참고문헌 3에 의해 제공된다. 살수노즐은 0.7 mm의 액적 크기로 원자로건물로 유입되도록 간단히 모델링할 수 있다.

원자로건물 압력 및 온도 거동에 영향을 주는 또 다른 인자는 피동열침원이다. 원자로건물의 경우 15개의 소그룹으로 나누어져 있는 설계기준사고시 원자로냉각재계통 성능해석에서 사용되는 설계정보를 적용한다[3]. 열침원의 종류에 따른 표면적 및 두께에 대하여 "wall' 형태로 모델링하였다.

열전도에 의한 열침원내 온도분포 해석을 위한 노드는 일반적으로 그 크기가 구조물 성분의 열확산길이(thermal diffusion length, δ)의 일정 부분이 되도록 분포시킨다. 열확산길이는 다음과 같이 정의되는데,

$$d = \left(\frac{4k\Delta t}{c_p \, r} \right)^{1/2} \tag{2}$$

계산의 최대 시간간격을 1초로 가정할 경우 재질별 열확산길이는 다음과 같이 주어진다.

Material	density, ρ (lbm/ft^3)	specific heat, c_p (Btu/lbm-^{o}F)	thermal conductivity, k (Btu/hr-ft-^{o}F)	thermal diffusion length, (ft)	thermal diffusion length, (m)
concrete	150.	0.215	1.0	5.9×10^{-3}	1.8×10^{-3}
carbon steel	490.	0.120	27.3	2.3×10^{-2}	7.0×10^{-3}
stainless steel	490.	0.120	9.79	1.4×10^{-2}	4.3×10^{-3}
Inorg. zinc paint	353.	0.221	1.0	3.8×10^{-3}	1.2×10^{-3}
epoxy paint	108.	0.338	0.21	2.5×10^{-3}	7.6×10^{-4}
air	0.06	0.172	0.0174	-	-

첫번째 노드는 정의된 열확산길이를 초과하지 않으며, 연속하는 노드들은 이전 노드 크기의 2 내지 3 배를 초과하지 않도록 결정한다. 그리고 열구조물이 2개 이상의 다른 재질로 구성되어 있는 경우, 다음과 같은 상관식에 따라 노드 크기를 결정한다 (A는 이전 재질이며 B는 이후 재질임).

$$d_B = d_A \times \left[\frac{k_B / (c_p \cdot r)_B}{k_A / (c_p \cdot r)_A} \right]^{1/2} \tag{3}$$

본 분석에서는 원자로건물 내벽에 접하는 재질의 두께가 열확산길이보다 작으므로 한 개의 노드로 모델링하며, 인접되는 재질의 노드 크기는 해당 재질의 열확산길이로 정한다.

GOTHIC 코드에서의 열구조물 벽체를 통한 대류 및 응축 열전달은 코드에서 권고하는 "*Direct*" 모델을 사용하는 것이 일반적이다. 본 분석에서는 "*Direct*" 모델을 사용하고 응축 옵셥으로 "*Uchida*"모델을 선택하였다. 원자로건물 외벽을 통한 외부대기와의 열전달은 외부대기 온도 및 열전달계수를 정의하는 "*Sp Ambient and HTC*"를 사용한다.

원자로건물 온도 및 압력 변화를 좌우하는 RCS 질량 및 에너지 방출량은 MSLB (Main Steam Line Break)에 대하여 참고문헌 3에 제시된 RCS 사고해석 결과를 적용하였다. 원자로건물 대기의 초기 온도 및 압력은 120 ^{o}F와 14.7 psia의 대기압 하에서 최대 운전조건으로 결정하며 습도는 50 %이다.[3] RWST의 경우 초기 냉각수량은 최소값인 320,000 gal로 결정하였다.

앞서 기술한 모든 모델링 결과를 GOTHIC 코드의 입력으로 완성하면 그림 2에서 보는 바와 같은 모델을 얻을 수 있다.

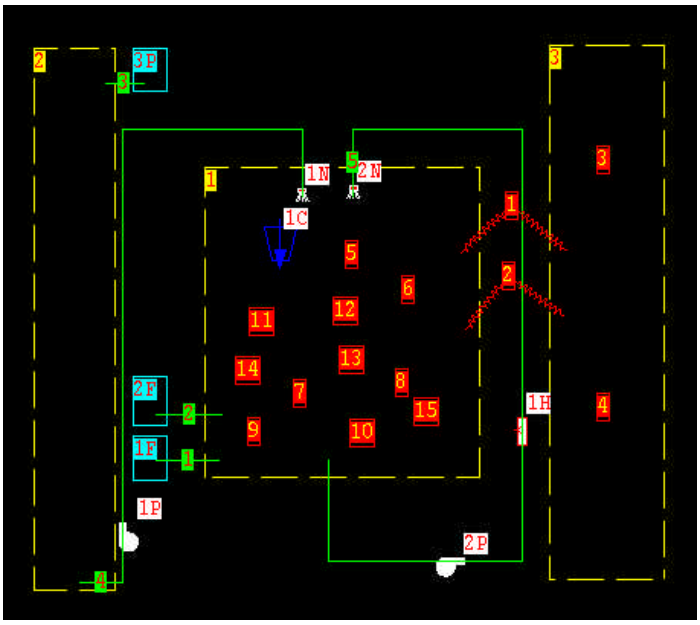

그림 2 고리1호기 GOTHIC 코드 입력 Layout

4. GOTHIC 해석 수행 및 결과 분석

완성된 고리 1호기 GOTHIC 모델에 대하여 최대 0.1초 (열구조물에서 요구되는 노드 크기 결정에서의 1초보다 작은)의 시간간격을 부여한 후 1,000초까지 분석을 수행하였다.

그림 3과 4는 격납건물의 압력 및 온도 변화를 보여주며, CONTEMP-LT의 계산 결과를 함께 나타내었다. 격납건물로 방출되는 질량 및 에너지로 인하여 초기에 압력 및 온도가 급격히 상승하여 원자로건물 압력이 23 psig 보다 크게 되면 원자로건물살수계통이 기동하며 83 초의 시간지연 후 원자로건물로 냉각수가 유입된다. 하지만 그 유량이 질량 및 에너지 방출율에 따른 압력 및 온도 증가분을 상쇄할 수 있을 때까지는 계속 증가한다. GOTHIC 코드에 의한 첨두 압력 및 온도는 각각 약 56.5 psia 및 326.7 ^{o}F로 나타난다. 약 210 초에서 에너지 방출율 감소에 따라 압력 및 온도가 하강하기 시작하며 단기(short term) 격납건물 압력 및 온도가 계속 낮아진다.

그림 3과 4에 함께 제시된 CONTEMPT-LT의 분석결과에 대하여 GOTHIC의 분석결과는 동일한 설계 데이타 및 조건을 부여할 경우 초기 증기 취출로 인해 발생되는 압력 첨두치를 거의 동일하게 해석할 수 있음을 보여준다. 또한, 첨두치 이후 온도 및 압력이 감소되는 부분에서도 CONTEMPT-LT 분석 결과와 근접한 결과를 나타냄을 알 수 있다. 이는 격납건물 대기가 고온 상태에 있을 경우 주위로의 열전달 모델을 적절히 선택하면 GOTHIC 코드의 분석결과는 타당성을 갖는 것으로 파악할 수 있다.

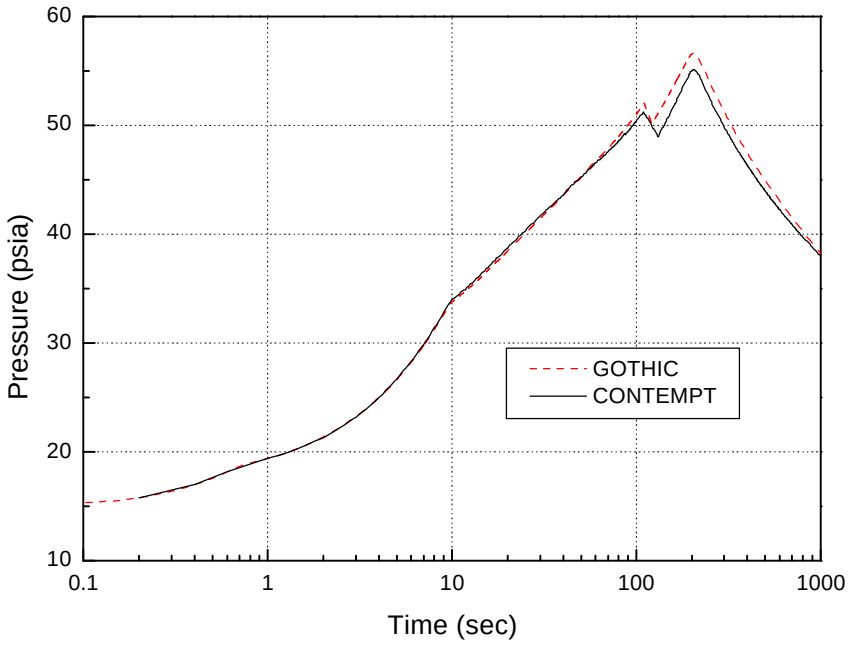

그림 3 격납건물 내 압력추이 비교

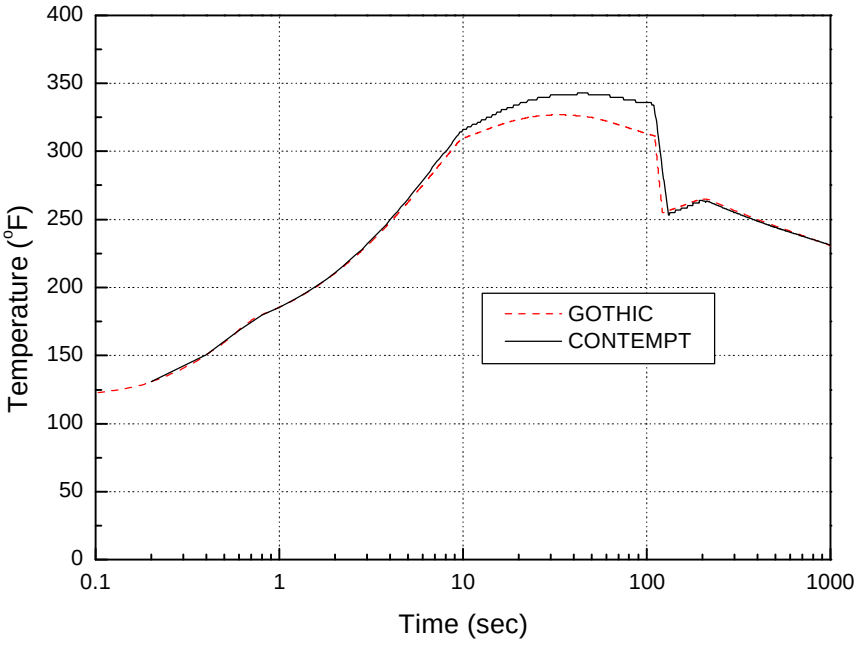

그림 4 격납건물 내 vapor 온도추이 비교

5. 결론

고리 1호기의 격납건물 설계특성을 반영한 GOTHIC 분석을 수행한 결과, 동 코드가 설계에서 적용되고 있는 CONTEMPT-LT 코드에 의해 제시되는 결과와 거의 동일한

첨두치를 예측하는 것으로 파악되었다. 이러한 결과는 동일한 입력 데이터와 모델링 방법론을 적용하면 CONTEMPT-LT에 내재된 보수성을 감안하더라도 GOTHIC 코드는 적절한 분석결과를 제시하는 것으로 볼 수 있다. 이들 분석 결과의 비교 평가에 근거하여 동일한 조건에서 GOTHIC 코드를 이용한 격납건물 상세분석을 수행할 경우 그 분석결과의 타당성을 충분히 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

[1] NUREG/CR-0255, “CONTEMPT_LT/028-A Computer Program for Predicting Containment Pressure Temperature Response to a Loss of Coolant Accident,” March, 1979.

[2] NAI 8907-02, “GOTHIC Containment Analysis Package User’s Manual,” Numerical Application Inc., V. 6.0, December, 1997.

[3] Korean Nuclear Unit 1 Final Safety Analysis Report, KEPCO, 1997.