2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

고리 2호기 냉각재 상실사고시 격납용기의 열수력 현상에 대한 해석

An Analysis of Thermal Hydraulic Phenomena in Containment Building during LOCA for KNU 2

송동수

전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

강연문

㈜미래와도전
서울 관악구 신림동 산56-1 서울대학교 130동 202호
Phone: +82-2-3285-6111, Fax: +82-2-3285-6112, Email: yeonmoon@hanmail.net

요 약

본 연구에서는 고리 2호기의 냉각재상실사고시 격납용기의 압력과 온도 거동을 비롯한 열수력 현상을 격납용기의 설계코드인 CONTEMPT-LT/028 코드와 CONTEMPT4/MOD5 코드를 사용하여 해석하였으며 그 결과를 비교하였다. 그리고, 냉각재상실사고시 격납용기의 압력과 온도 거동에 영향을 줄 수 있는 각종 열전달 관련 모델들을 분류하고 비교계산을 통해 그 영향을 분석하였다.

Abstract

In this paper, thermal hydraulic phenomena such as pressure and temperature in containment building are analyzed and compared using CONTEMPT-LT/028 and CONTEMPT4/MOD5, design code of containment pressure and temperature, for KNU2. Various models related to heat transfer which affect the behavior of pressure and temperature in containment are reviewed and calculations using the different models are performed and compared to analyze the effects on thermal hydraulic behavior in containment.

1. 개요

격납용기는 냉각재 상실사고나 중대사고의 발생기 원자로 용기 등에서 방출되는 방사선 물질의 누출이 외부환경으로 누출되는 것을 억제하는 최후의 방벽역할을 수행하는 공학적 안전 설비의 하나로서 원전의 안전확보에 매우 중요한 역할을 수행한다. 따라서 격납용기의 건전성 유지는 매우 중요한 문제이며 격납용기의 건전성에 영향을 주는 가상사고시 격납용기내의 압력과 온도를 예측하는 것은 사고 해석뿐 아니라 격납용기의 설계에 있어 매우 중요한 문제라 할 것이다.

격납용기의 설계를 위해 냉각재 상실사고나 이차계통의 증기관 파단사고시의 압력과 온도를 해석하는 전산 코드로는 CONTEMPT-LT/028 코드와 CONTEMPT4/MOD5 코드 등이 널리 사용되고 있다. CONTEMPT-LT/028 코드는 NRC의 인허가를 받아 현재 규제기관이 인정하는 격납용기의 압력/온도 해석 코드이며 CONTEMPT4/MOD5 코드는 CONTEMPT-LT/028 코드에 준하는 격납용기의 압력/온도 해석 코드로 다격실해석 기능을 비롯하여 열전달계수 모델, 스프레이와 냉각팬 등의 모델, 수소 연소모델 등이 개선 혹은 추가되어 있다.

본 연구는 고리 2호기의 냉각재상실사고시 격납용기의 압력과 온도 거동을 비롯한 열수력 현상을 격납용기의 설계코드인 CONTEMPT-LT/028 코드와 CONTEMPT4/MOD5 코드를 사용하여 해석하였으며 그 결과를 비교한 것이다. 그리고, 냉각재상실사고시 격납용기의 압력과 온도 거동에 영향을 줄 수 있는 각종 열전달 관련 모델들을 적용한 계산을 수행하여 그 영향을 분석하였다.

2. 냉각재 상실사고시 격납용기내의 열수력 현상분석

격납용기의 설계기준사고는 일차계통을 구성하는 loop의 파단에 의해 냉각재가 격납용기내로 방출되는 냉각재상실사고(LOCA)와 이차계통의 증기관이 파단되어 격납용기내로 이차계통의 증기가 방출되는 주증기관 파단사고(MSLB)로 나눌 수 있다. 냉각재 상실사고의 경우 파단부위와 파단 면적 등에 따라 사고 조건에 차이가 있으며 주증기관 파단사고의 경우에는 원자로의 출력조건과 MSIV의 실패 조건과 격납용기 냉각기능 상실 조건에 따라 사고조건이 구분된다.

그림 1은 원자로의 냉각재 상실사고시 격납용기 내부의 상태와 격납용기 계통의 기능을 도시한 것으로 파단 부위를 통해 증기상태와 액상상태의 냉각재가 격납용기의 vapor 영역 및 liquid 영역으로 방출되고 벽면에서의 응축과 fan cooler와 spray의 작동에 의한 vapor 영역의 증기 응축으로 격납용기의 압력과 온도가 감소 된다.

일차계통의 배관이 파열되면 파열부위를 통해 일차계통의 냉각재가 방출되는데 냉각재의 방출은 비상노심냉각수의 주입시점을 기준으로 blowdown과 reflood 단계로 구분된다. Blowdown은 원자로용기내에 있던 고온/고압의 냉각재가 파단부위를 통해 방출되는 것이며

reflood는 원자로용기의 냉각재 방출로 인한 압력감소에 의해 주입되는 비상노심냉각수가 파단부위를 통해서 원자로 용기 밖으로 방출되는 것이다. Blowdown 기간동안의 특징적인 열수력현상은 이상 임계유동 현상과 flashing 현상을 들 수 있다. 이상 임계유동 현상은 일차계통의 압력이 격납용기의 압력에 비해 매우 크기 때문에 냉각재의 방출량이 파단면적에만 관계되는 현상으로 RELAP 등과 같은 계통해석 코드를 사용하여 구할 수 있으며 격납용기의 압력과 온도 해석은 계통해석의 결과로 얻어진 방출량을 입력으로 사용한다. Blowdown 기간동안 발생하는 flashing 현상은 과냉각 상태의 액상에서 급격하게 기화되는 것으로 냉각재가 격납용기로 방출되면서 대기의 순환을 일으키므로 대류열전달 효과를 발생시킨다. 따라서, blowdown 기간동안의 격납용기 열전달 구조물의 열전달 현상은 대류열전달을 고려해야 하며 해석시에는 Tagami 열전달계수를 사용한다. Reflood 기간동안의 증기 방출은 blowdown에 비해 매우 작은 압력차이를 유지하며 진행되므로 격납용기 대기의 순환에 영향을 주지 않으므로 자연대류 열전달 현상으로 해석할 수 있으며 해석시에는 증기와 비응축성기체의 질량비를 변수로 구해지는 Uchida 열전달계수 상관식을 적용한다.

공학적 안전설비의 하나인 냉각팬은 고온의 대기를 흡입하여 열교환기를 통해 제거하는 heat sink의 역할을 하며 대기의 온도에 의해 열거량이 성능곡선으로 주어진다. 스프레이는 냉각팬과 같이 공학적 안전설비의 하나로 격납용기의 대기가 설정된 압력과 온도조건에 도달하면 살수가 시작되어 격납용기 대기의 압력과 온도를 감소시키고 대기중의 방사선 분진 등을 제거하는 역할을 한다. 원자로용기에서 방출된 증기에의해 격납용기 대기의 증기가 과열상태를 유지하게 되는데 스프레이가 작동되면 과열증기가 뿌려진 물과 혼합되면서 포화증기 상태로 변하고 대기중에 응축된 응축수는 sump로 제거된다.

열전달 구조물은 도온의 격납용기 대기로부터 열을 흡수하여 외부로 방출하는 역할을 하며 표면에서의 열전달은 대류열전달과 응출열전달, 그리고 복사열전달 현상이 복합적으로 작용한다. 그러나, 응축열전달이 다른 열전달 메커니즘에 비해 훨씬 큰 값을 가지므로 실제 해석에는 응축열전달만을 고려하는 것이 일반적이다. 열전달 구조물 중 격납용기 외부와 접하는 격납용기의 실린더 벽과 돔은 흡수된 열을 외부로 전달하는 역할을 하며 격납용기 내부에 있는 구조물은 사고초기에 열을 흡수하여 격납용기 대기의 압력과 온도상승을 억제하는 효과를 얻는다.

3. CONTEMPT-LT/028 코드의 열수력 모델 분석

CONTEMPT-LT/028 코드는 격납용기의 압력과 온도, 격납용기내의 열유체 질량 및 에너지의 변화, 열전달 구조물의 온도 분포 및 열전달율, 그리고 격납용기 외부 대기로의 열전달 등을 연구한다. 또한, 냉각팬과 스프레이와 같은 공학적 안전설비 모델이 포함되어 있어 이들 설비에 의한 격납용기의 거동을 해석할 수 있다.

CONTEMPT-LT/028 코드는 BWR의 pressure suppression system과 PWR의 dry containment, subatmospheric containment, 그리고, dual containment 등을 모델링 할 수

있으며 일반적인 유형의 containment 격실은 vapor 영역과 liquid 영역 그리고 두 영역의 계면 등으로 분할한다.

격실내의 vapor 영역은 격실내의 열유체가 가지는 질량 및 에너지 정보를 활용하여 증기표를 역추적하는 방식으로 압력과 온도를 비롯한 열역학적 정보를 연구해 내며 vapor 영역과 liquid 영역의 계면에서는 liquid 영역의 pool boiling, 계면에서의 evaporation 및 condensation 효과 등을 반영할 수 있다.

Blowdown에 의해 격납용기로 방출되는 냉각재는 원자로용기내의 압력이 매우 높기 때문에 고온의 액상으로 방출되지만 격납용기 대기의 압력이 상대적으로 매우 낮으므로 격납용기 대기의 압력을 기준으로 볼 때 증기상태가 되어야 한다. 따라서 냉각재가 격납용기로 방출되자마자 액상에서 증기로 빠르게 변하게 되는데 이를 falshing이라하며 flashing되는 양은 방출냉각재의 에너지와 질량, 격납용기의 대기압을 기준으로 한 비에너지(specific enthalpy)를 사용하여 다음과 같이 계산된다.

$$M_{flash} = \frac{U_{liq} - M_{liq} h_l}{h_g - h_l} \quad (1)$$

여기서, M_{flash} = mass of blowdown liquid which flashes

U_{liq} = total step energy of blowdown fluid which enters drywell

M_{liq} = mass of blowdown liquid enters drywell

h_g = specific enthalpy of liquid at boiling based on total pressure

h_g = specific enthalpy of vapor at boiling based on total pressure

한편, 격납용기의 압력과 온도 해석시 blowdown에 의해 방출되는 유체는 모두 증기상태를 유지한다고 보수적으로 가정하는 경우에는 flashing 모델을 사용하지 않는다.

격납용기계통의 공학적 안전설비 중 냉각팬은 온도에 따른 에너지의 제거량의 성능 data table을 입력으로 격납용기의 대기조건에 따라 내삽 연구를 수행하여 반영하므로 특별히 고려해볼 만한 열수력 모델은 없다. 스프레이의 경우는 입력카드를 통해 스프레이양과 효율을 제공하는데 스프레이 효율은 격납용기로 살수된 물이 격납용기 대기의 증기와 혼합된 후의 갖게 되는 최종 비에너지를 결정하는 변수가 되며 효율과 비에너지의 관계는 다음 식과 같다.

$$h_s = \frac{h_{sf} - h_s}{h_e - h_s} \quad (2)$$

여기서, h_s = specific enthalpy of spray droplets leaving spray nozzle

h_{sf} = final specific enthalpy of spray droplets after exchanging energy with vapor region

h_e = end point specific enthalpy of water in the vapor region prior to spray effects. ($h_e = h_{f,sat}$, if saturated and $h_e = h_{g,sat}$, if superheated)

스프레이의 살수 결과 격납용기 대기의 열역학적 상태가 영향을 받을 수 있으므로 본 연구에서는 스프레이의 살수 효율 변화에 따른 격납용기 대기의 압력과 온도 변화를 조사하였다.

열전달 구조물에서의 열전달 현상은 일차원 열전도 방정식을 사용하여 해석되는데 열전달 계수와 열전달 구조물과 인접한 격실의 bulk 온도를 경계조건으로 요구한다. 열전달 계수는 열전달 구조물의 성능을 규정할 수 있는 유일한 변수이며 격납용기 대기의 압력과 온도 거동에 가장 큰 영향을 줄 수 있는 인자이다. CONTEMPT-LT/028 코드에는 아래 표와 같이 여러 형태의 열전달 계수 모델이 제공된다.

표 1. CONTEMPT-LT/028 코드에 포함된 열전달 계수 option 요약

Option Index	Option Type	Condensation
0	0.0 $J/(\sec\cdot m^2\cdot K)$;insulation	N
1	user input value in outside air table	N
2	Uchida heat transfer coefficient model	Y
3	2.3 $J/(\sec\cdot m^2\cdot K)$	N
4	57000 $J/(\sec\cdot m^2\cdot K)$	N
5	time dependent input table	Y
6	temperature dependent input table	N
50	turbulent natural convection	N
51	direct radiation heat transfer	N
52	option 50 + option 51	N
53	Tagami heat transfer coefficient model	Y

표 1에 포함된 열전달 계수중 Uchida 열전달계수 모델은 대기중에 포함된 증기의 질량비에 따라 열전달계수값이 결정되는 모델로 코드내에 table로 제공되며 그 값은 그림 2와 같은 같다.

Tagami 열전달 계수는 blowdown 기간 동안에 forced convection 효과를 반영한 경험 상관식으로 최대 열전달 계수가 일차계통에서 격납용기 대기로 방출된 총 에너지에 의존한다. Tagami 열전달 계수는 격납용기 대기로 방출된 총에너지와 격납용기의 자유체적, 그리고 최대 열전달 계수에 도달하는 시간 간격(blowdown의 종료시점)간의 상관관계로 구성되며 아래 식과 같다.

$$h_{\max} = C\left(\frac{Q}{Vt_p}\right)^{0.62} \tag{3}$$

여기서, $h_{\max}$ = the maximum heat transfer coefficient during blowdown

Q = total energy released from the primary system during blowdown

V = the net free volume of containment

t_p = the time interval until peak pressure

자연대류 열전달 계수는 $10^7 \le Gr \cdot \Pr \le 10^{12}$ 범위인 경우에 사용되며 아래의 McAdams 상관식을 사용한다.

$$Nu = 0.13(Gr \cdot \Pr)^{1/3} \tag{4}$$

여기서, Nu = Nusselt number(dimensionless heat transfer coefficient)

Gr = Grashof number

$\Pr$ = Prandtl number

본 연구에서는 Tagami-Uchida 열전달 계수 조건과 Uchida 열전달 계수 조건, 그리고 자연대류 열전달 계수 조건의 3가지 조건 하에서 해석을 수행하고 그 결과를 비교하였다.

4. 고리 2호기 코드 입력 구성

본 연구는 고리 2호기의 double-ended hot leg brake 사고를 대상으로 해석을 수행한 것이다. 본 연구의 해석을 위하여 필요한 CONTEMPT-LT/028 코드의 주요 입력 변수들은 다음과 같다.

- 격납용기 격실의 기하학적 구조 및 초기조건
- 열전달 구조물의 기하학적 구조 및 물성치
- 일차계통 및 노심 냉각수의 질량 및 에너지 방출량
- 스프레이, Fan cooler 등의 공학적 안전 설비
- Heat conducting structure information

4.1 초기조건

초기조건은 격납용기의 내부압력 및 온도, 상대습도 등이 포함되며 입력자료의 10031 card에 기록된다. 격납용기의 외부 대기의 조건은 11001 card와 1001 card에 기록된다. FSAR 표 6.2-1에 기록된 값들은 아래와 같다. 단 모든 단위는 별표하지 않은 것은 모두 British 단위를 사용하였다.

표 3. CONTEMPT-LT/028 코드 초기조건 입력 요약표

항목	값	관련 card 번호
Net free volume	$1.44+10^6$	10031
초기내부온도	120	10031
초기내부압력	14.7	10031
초기 상대습도	0.3	10031
외부온도	120	11001, 1001
외부압력	14.7	11001
외부상대습도	0.5	11001
외부열전달계수	2	1001

4.2 질량 및 에너지 방출량

질량 및 에너지 방출량은 계통해석코드를 실행하여 얻는 값으로 Blowdown, Reflood, Post-Reflood 의 단계로 나누어 FSAR 6.2장에 파단부위 및 파단 면적 등으로 구분한 사고 유형별로 제시된다. 본 연구는 FSAR 6.2장의 질량 및 에너지 방출량 data를 사용하였다.

4.3 공학적 안전설비

격납용기 계통의 공학적 안전설비로는 스프레이 시스템과 fan cooler가 있다. 스프레이 시스템은 100%의 용량을 가진 2개의 계열이 있으며 사고 격납용기 최대 압력 및 온도를 유발하는 사고시에는 1개의 계열만 작동한다. 반면에 스프레이의 오작동에 의한 격납용기 부압 발생 조건하에서는 2개의 계열 모두 작동하는 것으로 가정한다. Fan cooler는 모두 4 개의 계열로 구성지만 스프레이 시스템과 마찬가지로 사고의 결과가 보수적인 경향을 갖도록 작동 계열수를 2개로 제한한다. 스프레이 시스템과 fan cooler의 입력 값 들은 아래와 같다.

표 4. 격납용기 공학적 안전설비 주요 입력값

항 목	값	출 처	관련 card 번호
Spray initiation	94.4sec	표 6.2-45	801 -
Spray flow rate	1064 gpm	표 6.2-1	801 -
Spray temperature	80F	표 6.2-45	801 -
Fan cooler init. Performance	63sec	표 6.2-45 그림 6.2-7	2000, 2001-

4.4 Heat conducting structures

Heat conducting structure는 사고시 격납용기로 방출되는 고온의 증기를 structure의 표면에서 응축시키며 그 열을 흡수하여 격납용기의 압력상승을 완화하는 역할을 한다. Heat conducting structure에 필요한 정보로는 구조물의 열전달 면적, 두께, 구성 물질, 기하학적 형태, 양측면에서의 열전달 계수 및 경계온도 조건, 구조물의 격자 구성 등이다. 고리2호기

의 Heat conducting structure 정보는 FSAR 표 6.2-40과 6.2-41, 표 6.2-42에 제시되어 있다. 본 연구에서는 모든 구조물의 격자를 100개로 구성하였으며 구성물질별로 영역을 구분하였다. 열전달 구조물의 수는 모두 12개이며 구성물질은 콘크리트, carbon steel, stainless steel, 그리고 air 등 4개를 고려하였다.

본 연구에서는 냉각재 상실사고시 격납용기의 압력과 온도해석에 사용되는 일반적인 option들을 base case로 하고 blowdown의 flashing option, spray efficiency의 변화, 열전달계수 option의 변화를 두어 각각의 차이를 분석하였다. 본 연구의 base case에서는 Tagami-Uchida 열전달계수를 사용하였으며 spray efficiency는 100%로 두었다. 그리고 blowdown시 flashing option은 사용하지 않았다.

5. 결과 및 토의

본 연구에서는 고리 2호기의 냉각재상실사고 중 double-ended hot leg break에 대해 CONTEMPT-LT/028 코드를 사용하여 격납용기의 압력과 온도를 계산하였으며 동일한 사고에 대해 CONTEMPT4/MOD5 코드를 사용한 비교계산을 수행하여 FSAR에 제시된 값과 비교하였다.

그리고, 본 연구에서는 Tagami-Uchida 열전달계수의 사용, 100% 효율의 spray 성능, 그리고 blowdown시 flashing option을 배제한 경우를 base case로 하여 각 인자의 모델값을 변화 시켜 가면서 그 영향을 분석하였다.

그림 3은 CONTEMPT-LT/028 코드와 CONTEMPT4/MOD5 코드의 계산 결과를 FSAR 값과 비교한 것이다. 계산 결과 격납용기의 최대 압력에 도달하는 시간과 최대 압력값은 모두 비슷한 경향과 크기를 나타내고 있다. 비록 최대 압력에 도달후 격납용기 대기의 압력이 감소하는 기울기의 차이가 존재하지만 이는 그리 큰 차이는 아닌 것으로 보인다.

그림 4는 blowdown시 flashing 모델을 적용하여 계산한 결과를 나타낸 것으로 base case와 비교하여 차이를 나타내지 않는 것으로 나타났다. 이는 blowdown시 방출되는 냉각재 온도가 blowdown 기간 동안의 격납용기 대기 압력조건에서 모두 과열증기 상태에 해당하여 모두 기화되기 때문인 것으로 판단된다.

그림 5는 스프레이의 효율에 따른 격납용기의 압력계산을 비교한 것으로 거의 일치하는 것으로 나타났다. 이는 스프레이에 의해 격납용기 대기로 살수되는 물의 양이 충분하여 포격납용기 대기를 포화상태로 유지하고 나머지는 모두 sump로 바로 제거되기 때문으로 판단된다. 그러나 스프레이의 액적이 sump에 도달하는 시점까지 액적 표면에서의 응축을 고려한다면 격납용기 대기의 압력감소에 영향을 줄 수 있을 것이다. 하지만 CONTEMPT-LT/028코드에는 spray droplet의 거동을 모사할 수 있는 모델이 없으며 spray droplet의 거동을 모사할 수 있다 할 지라도 spray droplet의 크기나 국부적인 열전달 메커니즘을 모사하기는 상당히 어려우므로 향후 지속적인 연구 수행이 필요할 것이다.

그림 6과 7은 열전달계수의 option에 따른 격납용기의 압력과 온도를 계산한 것으로 사용된 모델에 따라 큰 차이를 보이고 있다. 특히 Uchida 열전달계수의 경우 높은 압력과 온도를 보이고 있는데 이는 blowdown 동안 발생하는 대류 효과를 반영하지 못하여 대기중의 에너지가 누적되었기 때문으로 보인다. 열전달 계수 option의 비교를 통해 격납용기의 압력과 온도가 열전달 구조물로의 열전달에 매우 민감함을 알 수 있으므로 향후 열전달 계수 모델의 개선 연구가 필요할 것으로 보인다.

6. 결론

본 연구에서는 고리 2호기의 냉각재상실사고 중 double-ended hot leg break에 대해 CONTEMPT-LT/028 코드와 CONTEMPT4/MOD5 코드의 비교계산을 수행하였으며 격납용기의 열수력학적 거동에 영향을 줄 수 있는 여러 모델들에 대한 비교계산을 수행하였다. 비교계산 결과 스프레이의 효율과 blowdown시의 flashing 모델은 거의 영향이 없었으나 열전달 계수의 영향은 매우 큰 것으로 나타났다.

References

1. D.Hargroves, CONTEMPT-LT/028 Computer Program for Predicting Containment Pressure-Temperature Response to A Loss-Of-Coolant Accident, NUREG/CR-0255, Idaho, 1979.
2. R.Lehner, CONTEMPT4/MOD4-A Multycompartment Containment System Analysis Program, NUREG/CR-3716, 1984
3. **Final Safety Analysis Report-Kori 2, KEPCO**
4. **Holman, J.P., 1992. Heat Transfer, seventh ed. McGraw-Hill,**

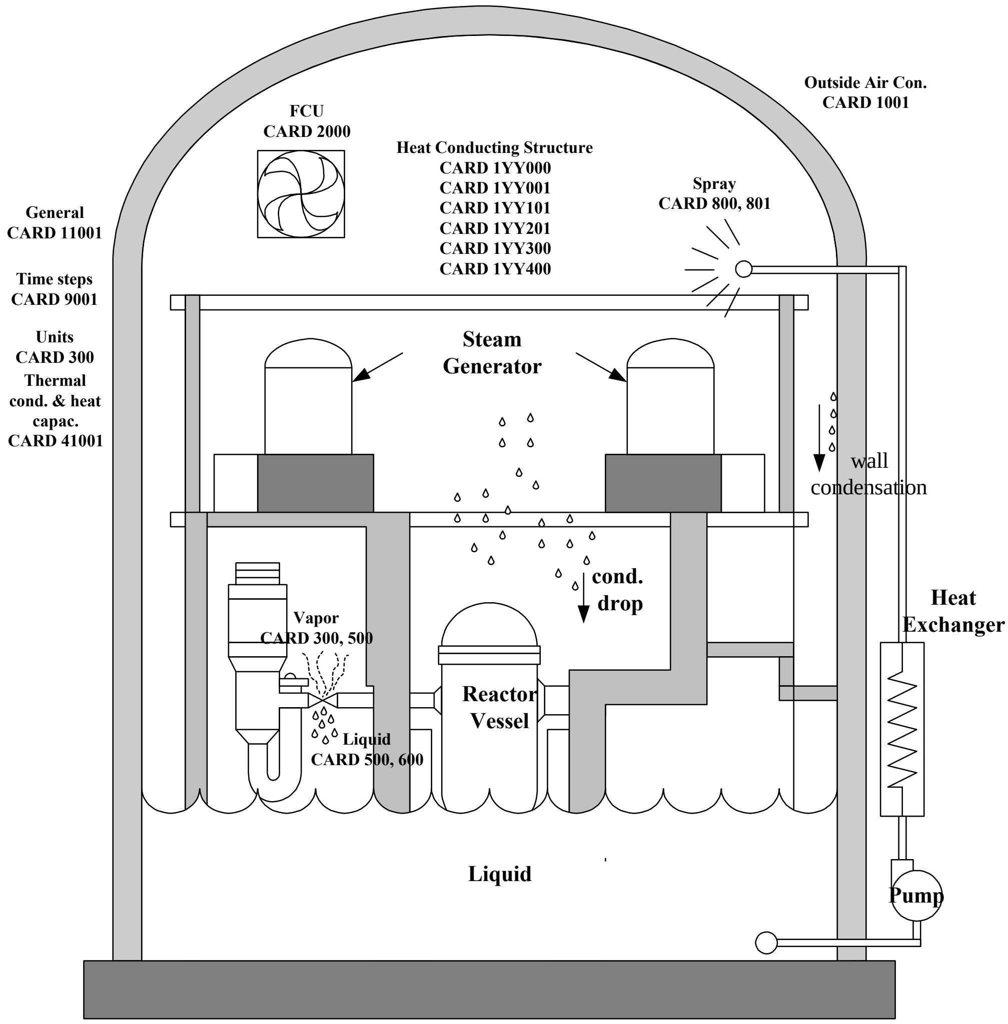

그림 1. 냉각재 상실사고시 격납용기 내부의 열수력 현상 개략도

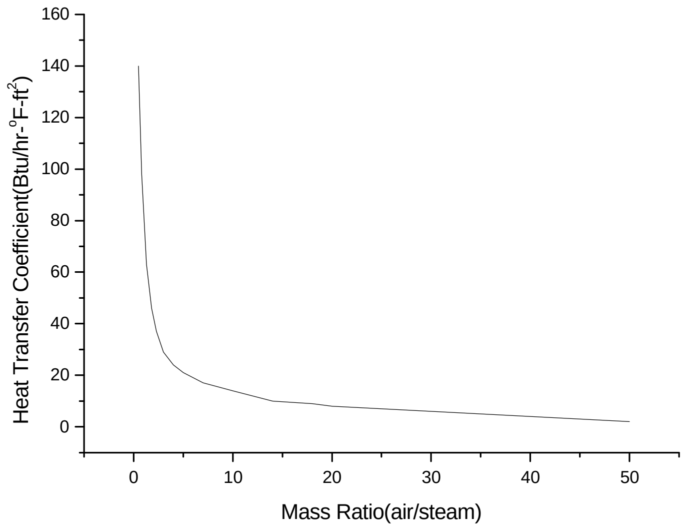

그림 2. Uchida 열전달계수 값

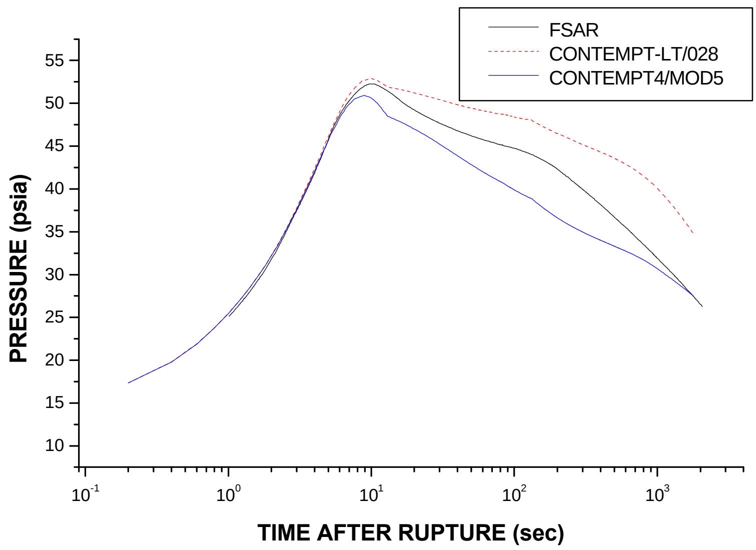

그림 3. 고리 2호기 압력 곡선 비교(base case)

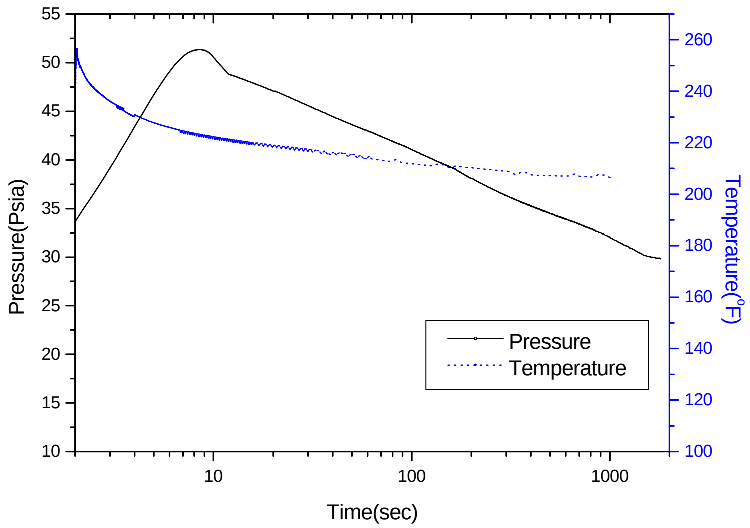

그림 4. 격납용기의 압력/온도 곡선(blowdown flashing model 사용)

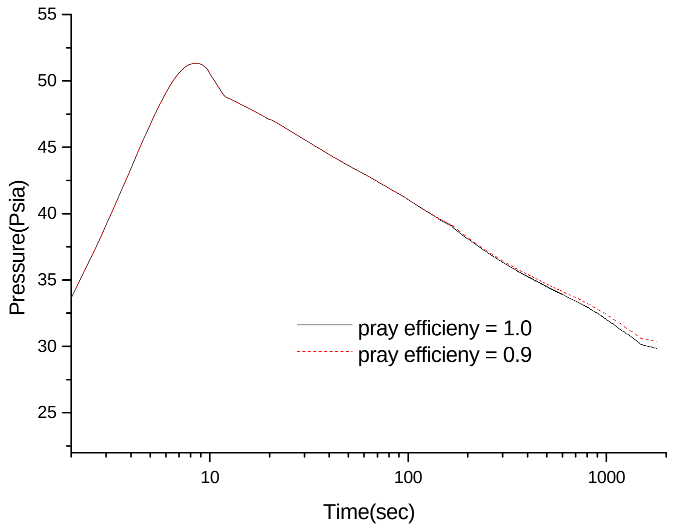

그림 5. 격납용기의 압력 곡선 비교 (spray efficiency 비교)

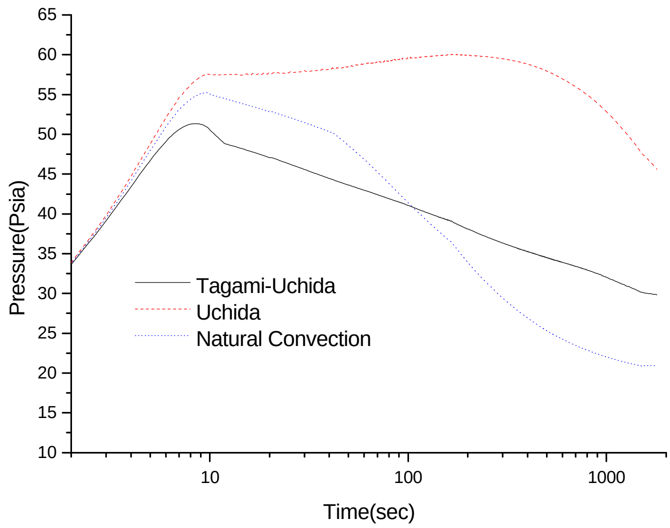

그림 6. 열전달계수에 대한 격납용기의 압력 곡선 비교

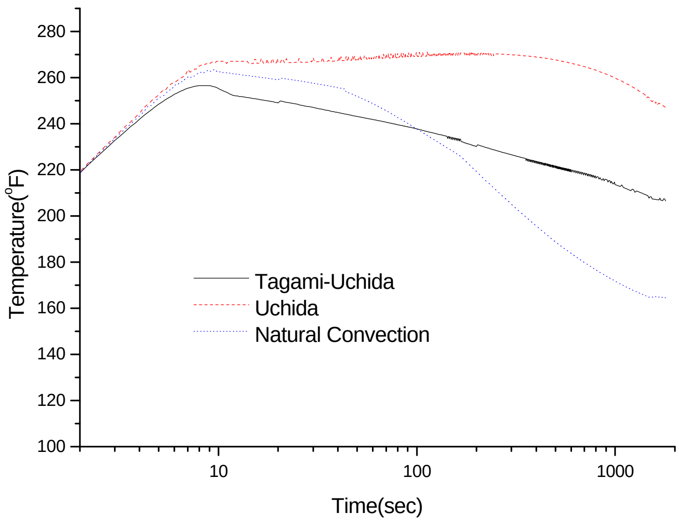

그림 7. 열전달계수에 대한 격납용기의 온도 곡선 비교