

## 피동형 격납용기 분석모델 개발 및 민감도 분석

정법동, 김성오, 황영동, 장문희  
한국원자력연구소

정 의  
서울대학교

### 요 약

피동형 격납용기 냉각계통 해석을 위하여 격납용기 압력, 온도 과도현상 분석 코드인 CONTEMPT4/MOD5 전산코드에 피동형 격납용기 열전달 모델을 추가하였다. 외부공기의 순환에 의한 철재 격납용기와 차폐건물 사이의 환형 공간의 냉각모델은 자연대류 및 혼합 대류의 기존 실험적 상관식을 사용하였고 상부에서 분사된 물의 증발에 의한 열전달 현상은 analogy 개념을 적용한 질량전달 모델을 도입하였다. 개선된 전산코드로 1000Mwe급 원전의 피동형 격납용기에 대하여 각 실험적 상관식의 차이, 물막의 형성비율, 습식냉각 지연시간 등의 민감도 분석을 수행하였다.

### 1. 서론

피동형 안전계통은 비교적 단순한 구조이며 외부전원이 없이 동작한다는 장점을 가지고 있어 사고대응에 신뢰성을 가지고 있다. 피동형 격납용기 냉각계통(PCCS : Passive Containment Cooling System)도 사고시 철재 격납용기의 냉각에 의한 열제거로 격납건물 내부의 압력과 온도 상승을 억제하는 역할을 수행한다. 피동형 안전계통이 사고시 장점을 지니고 있는 반면 현상에 대한 이해 및 열전달 평가에 있어서 불확실성이 존재한다. 기존의 전산코드는 피동형 격납용기의 이러한 현상을 모사하지 못하고 있으므로 피동형 격납용기 냉각계통의 해석을 위하여 피동형 열전달 모델을 개발하여 기존의 격납용기 해석코드에 적용하였다.

### 2. 피동형 격납용기 냉각모델

#### 2.1 Passive cooling feature

피동형 격납용기는 철재격납용기와 차폐건물로 구성된 이중 격납용기의 환형공간에서의 열전달을 이용하여 격납용기 내부의 냉각을 목적으로 하고 있다. 열전달 기구는 온도차로 인한 부력에 의해 상승되는 공기에 의한 건식냉각(dry cooling)과 피동형 격납용기의 상부에서 분사되어 철재 격납용기의 외부 표면에서 증발에 의한 열전달을 일으키는 물막에 의한 습식냉각(wet cooling)을 사용하는 피동형 안전계통을 이용하고 있다. 습식냉각시 증발량은 물막의 온도와 순환하는 공기의 온도에 크게 의존하며, 물막과 공기의 밀도차의 형태로 표현된다.<sup>[1]</sup>

## 2.2 Computational model

### 2.2.1 Natural convection

수직벽 주위의 부력유동에 관한 실험은 현재까지 다양한 경계조건에서 많은 연구가 수행되었다. 층류유동의 경우 Sparrow<sup>[6]</sup>에 의해 상관식이 개발되었으며, 난류 상태의 실험은 Hugot<sup>[8]</sup>, McAdams<sup>[10]</sup>, Miyamoto<sup>[5]</sup> 등에 의해 수행되었다. 실제 PCCS에서의 공기에 의한 열전달은 그 사이의 영역에 존재하는 Hugot의 상관식이 가장 잘 묘사한다.<sup>[2]</sup>

일반적으로 수직벽 주위의 자연대류에서 열전달상관식은 Nu 수와 Ra 수의 관계식으로 다음과 같은 형태로 표현된다.

$$Nu_s = \frac{hs}{k} = C Ra_s^n$$

위의 식에서 계수 C와 지수 n은 실험을 통해서 결정되며 층류인 경우 n은 1/4이며 난류에서는 대략 1/3이다. 여러 상관식 중 층류 유동에 관한 Sparrow 상관식은 유동 채널의 폭과 길이의 비인 aspect ratio를 상수의 형태로 포함한다.

### 2.2.2 Mixed convection

Westinghouse는 피동적 특성을 가지는 AP600의 격납건물계통을 묘사하기 위해 GOTHIC 코드를 개발하였다. 이 전산 코드에서 공기의 부력유동에 의한 열전달계수는 다음과 같은 Churchill의 혼합유동 상관식에 의해 얻어진다.<sup>[4][7]</sup>

$$h = \max[(h_{\text{forced}}^3 - h_{\text{free}}^3)^{1/3}, 0.75h_{\text{forced}}, 0.75h_{\text{free}}]$$

Churchill 혼합유동 상관식에서 강제대류 상관식은 Colburn의 난류 상관식을 사용하였으며, 자연대류 상관식은 McAdams의 난류 부력 유동 상관식을 사용하였다.

### 2.2.3 Wet cooling

물막표면으로부터의 증발상관식은 열전달과 물질전달간의 analogy 개념을 도입해 얻어졌다. 물질전달 문제에서는 이전 열전달의 식에서 열전도도 k 대신 확산계수 D가 사용되며, 온도 구배에 의한 열전달 항은 밀도차에 의한 질량 전달로 된다. 자연 대류 및 강제대류 조건하에서 질량전달 계수는 다음의 형태이다.<sup>[1]</sup>

- 1) 자연대류  $Sh = C (Gr_m Sc)^m$
- 2) 강제대류  $Sh = 0.023 Re^{0.8} Sc^{1/3}$

위의 자연대류 상관식의 상수 C와 지수 m, n은 다음의 값을 가진다.

PARAMETER	C	n or m
Hugot	0.108	0.325
Sparrow	$0.667 \times (S/H)^{0.229}$	0.229
Miyamoto	0.0961	0.344
McAdams	0.13	1/3

### 2.2.3 복사열 전달

부가적 열전달로 철재 격납용기와 콘크리트 차폐 건물간의 직접적인 복사를 들 수 있다. Hugot의 실험에 의하면 마주보는 두 벽면의 표면 방사율이 0.7인 경우 천체의 열전달에서 복사에 의한 열전달이 차지하는 비율이 약 10% 정도를 차지하고 있었다. 위에서 추가한 각 열전달 모드에서 직접 복사를 추가하여 사용하도록 하였다.<sup>[8]</sup>

### 2.2.4 응축열전달계수

철재 격납건물 내부의 열전달은 노심에서 방출된 증기가 격납용기 표면에서 응축되는 현상으로 설명된다. 응축열전달은 가상사고시 격납건물내부의 열수력학적 거동에 가장 큰 영향을 미치는 모델로 CONTEMPT4/MOD5 코드에 포함된 응축 열전달계수 모델은 Tagami 응축열전달계수 모델과 Uchida 응축열전달계수 모델이며 blowdown과 reflood 단계에서 각각 사용된다. 이 Tagami 응축열전달계수 모델과 Uchida 응축열전달계수 모델은 과거에 수행되어왔던 응축열전달 관련 연구들에 의해 상당히 보수성을 지니고 있음이 밝혀졌다. 따라서 이 두 모델을 피동형 격납건물의 압력, 온도 해석에 사용하였다.<sup>[2]</sup>

### 2.3 CONTEMPT4/MOD5 코드 개선

CONTEMPT4/MOD5 코드는 PWR, BWR의 격납용기 다격실해석 코드로 ICE Condenser가 있는 경우까지 분석이 가능하다. 피동형 격납용기 냉각(PCCS)에서는 기존의 원전과 달리 격납건물 살수계통(Cooling Spray System)이나 격납건물 송풍냉각기(Fan Cooler) 등의 능동열제거기기를 사용하지 않으며, 철재격납용기와 같은 열전달 구조물로의 열전달 만으로 사고시 격납건물의 압력을 진압하게 되므로 피동형 철재 격납용기의 열전달 상관식이 첨두압력 계산에 중요하다. 그러나 기존의 코드가 이들 열전달을 적절하게 고려하지 못할 뿐 아니라 습식 냉각 열전달은 고려하고 있지 않다.

본 코드의 개선시 추가된 모델은 다양한 조건의 실험에서 얻어진 공기의 부력유동 상관식과 열전달과 물질전달의 analogy 개념을 이용한 질량전달 모델이다. 기존의 부 프로그램에서 모델의 추가를 위하여 열전달 계수를 계산하는 HTCOEF 부 프로그램과 열구조물 입력을 처리하는 INSEQ 부 프로그램이 확장되었으며, 질량전달계수의 계산을 위하여 HTPCC 부 프로그램이 추가되었고, 입출력과정과 계산의 편의를 위하여 내부의 프로그램을 수정하였다.

#### INSEQ

입력을 읽고 처리하는 프로그램으로 ANNULUS와 ANNSPRAY 부 프로그램을 추가하여, 입력 파일의 200 카드와 300 카드의 PCCS의 입력을 처리하는 부분이 추가되었다. 200 카드에서는 PCCS 채널의 폭과 높이를 입력으로 주고, 300 카드에서는 수막에 의한 냉각의 시작시각, 종료시각과 냉각수 유량 및 철재격납건물의 물막에 의해 냉각되는 부분의 비율을 입력으로 준다. 또한 열전달 모드의 확장을 위해 열구조물의 경계조건을 처리하는 subroutine HTBCIN이 수정되었다.

#### subroutine HTPCC

물막에 의한 냉각시 질량전달은 물막 표면의 포화공기의 수증기밀도와 순환하는 격실 공기의

수증기 밀도차에 의해 지배된다. 물막 표면의 포화공기 밀도는 물막 표면의 온도에 의해 결정되며, 물막 표면 온도의 계산을 위하여 물막 내에서의 열전달의 주 기구인 열전도 방정식을 반복계산에 의한 해를 구하여 물막온도를 결정하였다. 결정된 물막 온도로부터의 질량전달 계수로 물질속이 결정되며, 질량전달에 의한 PCCS 격실에서의 열전달량은 다음의 순서로 얻어진다.<sup>[11]</sup>

$$m'' = h_m(\rho_{Ps} - \rho_{Po}) \quad q'' = h_{fg}m''$$

증발과정의 물질전달에 의한 열전달 효과는 다음의 증발 열전달 계수로 알 수 있다.

$$h_{\text{evap}} = \frac{q''}{T_w - T_\infty}$$

#### subroutine HT1GO

입력에 의한 격실의 초기화 계산을 하는 subroutine INISHL과 시간에 따른 격실의 압력 및 온도의 계산에 사용되는 subroutine GO에서 열구조물 계산을 하는 subroutine HT1GO에서 열전달 계수를 결정하는 subroutine HTCDEF에 공기에 부력유동과 질량전달 모델이 추가되었으며, 질량전달에 의한 PCCS 격실에서의 열전달을 위하여 subroutine HTPCC이 subroutine HTCDEF 아래에 추가되었다.

#### Subroutine HTCDEF

본 프로그램에 건식냉각 열전달 및 질량전달 Analogy를 통한 습식냉각 열전달 상관식을 추가하였다. 각 열전달 모델은 사용자가 임의로 선택할 수 있게 하였다.

### 3. 냉각 모델의 평가

#### 3.1 Model verification

PCCS 냉각모델의 평가를 위하여 Westinghouse의 AP600을 대상으로 Westinghouse의 GOTHIC 코드의 결과와 비교하였다. 계산에 사용된 입력조건은 Westinghouse의 안전성분석 보고서(SSAR)를 적용하였다.<sup>[2]</sup> 두 결과는 같은 경향을 보이며 CONTEMPT4/MOD5-PCCS가 약간 낮은 압력과온도를 예측한다. 입력 자료와 계산결과를 아래의 표3-1,3-2와 그림3-1,3-2에 나타내었다.

#### 3.2 KP1000 격납건물 모델링

본 코드의 분석대상인 KP1000은 미국 Westinghouse사의 AP600을 참조노형으로 Scaleup한 1000 MWe급 대용량 피동형원자로로 공기에 의한 자연대류와 중력에 의해 철제격납용기 외벽에 살수되는 물막에 의해 냉각되도록 계통개념이 설정되어 있다.<sup>[13]</sup> 격납용기 분석은 저온관 양단 파단사고에 대하여 분석을 수행하였다. KP1000 발전소의 격납건물 설계 사항은 기존 연구의 결과를 사용하였는데, 설계압력과 온도는 AP600과 동일하다.<sup>[2]</sup> 질량 및 에너지방출 자료는 RELAP5 전산코드의 계산결과를 이용하였다. 계산결과 압력과 온도는 설계압력과 온도를 초과하지 않으며, 효과적 냉각을 수행함을 알 수 있다. 사용된 격납건물 입력자료와 결과를 아래의 표3-1, 3-3에 정

리하였다.

### 3.3 격납건물 압력, 온도 분석

격납건물의 냉각효과의 중요인자를 도출하고 전산코드의 검증을 위하여 다양한 열전달 모델 및 계산조건의 변화로 인한 민감도분석을 수행하였다. 민감도 분석의 항목은 열전달모델, 물막의 형성비율, wet cooling 지연시간(시작시점) 및 계산 시간간격의 4 가지 조건이다. 분석의 결과를 보면 단기간에 해당하는 1차 침투압 및 침투온도는 PCCS에 큰 영향을 받지 않으며, 2차 침투압력 및 침투온도가 변화한다.

#### 열전달 모델

CONTEMPT5/MOD5-PCCS에 포함된 다양한 열전달 모델을 KP1000 발전소의 PCCS 해석을 위하여 사용하였다. Dry cooling의 McAdams, Hugot, Sparrow, Miyamoto 및 Churchill 상관식과 wet cooling의 질량전달에 의한 상관식이다. 분석결과 앞의 모델 설명에서 밝힌 바와 같이 층류 모델인 Sparrow 상관식이 기저를 형성하였고, 초기에는 Churchill의 혼합유동상관식이 후반부에는 순수 난류 열린 채널 모델인 Miyamoto 상관식이 가장 높은 열전달을 예측한다. PCCS의 형태 및 물리적현상을 고려할 때, 난류 채널 모델인 Hugot 상관식이 가장 PCCS의 열전달 기구를 모사함을 알 수 있다. Churchill의 혼합유동 상관식은 PCCS 격실 상부에서의 굴뚝효과 등의 모사에 이용이 가능하다.

#### 물막의 형성 비율

장기냉각의 관점에서 물막의 형성은 가장 중요한 인자이다. 기준 해석의 경우로 물막의 형성비율은 70%로 하였으며, 비율을 0~100%로 변화시키며 계산하였다. 계산결과 물막의 비율이 30% 이상일 때 설계압력을 넘지 않으며 장기냉각을 수행함을 알 수 있었다. 30%미만의 경우 2차 침투압의 발생시각이 지연되며 설계압력을 초과한다. KP1000 발전소의 경우 AP600과 동일한 설계압력을 적용하였으므로 Dry cooling 만으로는 장기냉각이 불가능하다.

#### Wet cooling 지연 시간

물막에 의한 냉각은 격납건물 상부에 위치한 냉각수 탱크로 부터 살수된 냉각수가 중력에 의해 철제격납건물 표면에서 흘러내리면서 이루어진다. 냉각수의 살수의 지연이 격납건물 냉각에 미치는 영향을 분석하였다. 분석결과 wet cooling의 시작시점이 20분이내일때는 설계압력을 넘지않으나 그 이후의 경우 설계압력을 초과한다. 사고시 운전자는 경보신호에 의해 대응을 하므로 모든 경보장치의 고장을 가정하지 않는다면 사고의 진압이 용이함을 알 수 있다.

#### 계산시간 간격

계산시간 간격은 전산코드의 보수성에 중요한 인자이다. 기준 해석의 경우 계산간격은 1000초 이후에 1초로 하였으며, 분석에서는 0.2초에서 2.5초까지 변화시키면서 계산을 수행하였다. 시간간격이 작아질수록 침투압은 감소하며 가장 큰 시간간격에서 높은 침투압을 산출하는 보수적인 결과를 낸다.

#### 4. 결론

CONTEMPT4/MOD5에 피동형 열전달 모델을 추가하여 CONTEMPT4/MOD5-PCCS를 개발하였다. 개발된 코드를 응용하여 1000 MWe급 발전소인 KP1000의 격납용기에 대한 민감도 분석을 수행한 결과, 습식냉각의 경우 어떠한 경우의 상관식을 사용하여도 설계압력과 온도를 초과하지 않고 사고를 완화함을 알 수 있었다. 그러나 물막 형성비율이 30% 이하일 경우나 습식냉각지연이 20분 이상일 경우에는 설계압력을 초과하였다.

#### 5. 참고 문헌

- [1] 강한옥, "PCCS 수직 채널내 열전달 및 증발과정에 대한 이론적 모델링 및 상관식 연구", 공학박사학위논문, 서울대학교, 1996
- [2] 한국전력공사, "원자력발전소 안전성점검 연구(격납건물 성능해석 분야)," 최종보고서, 1994
- [3] 정범진, "격납용기 피동냉각계통에서 발생하는 열 및 질량전달 현상에 대한 상사해석," 공학박사학위논문, 서울대학교, 1994
- [4] M.D. Kennedy., et al, "Westinghouse-GOTHIC Comparison with 1/10 Passive Containment Cooling System," Proceeding of International Conference on "New Trends in Nuclear System Thermohydraulics", Pisa, 1994
- [5] M. Miyamoto, et al, "Development of Turbulent Characteristics in a Vertical Free Convection Boundary Layer," Proc. 7th Int. Heat Transfer Conference, Vol.2, pp323-328, Munich, 1982
- [6] E.M. Sparrow, et al, "Observed Flow Reversal and Measured- Predicted Nusselt Numbers for Natural Convection in a One-sided Heated Vertical Channel," J. Heat Transfer, Vol.106, pp325-332, 1984
- [7] S.W. Churchill, R. Usagi, "A General Expression for the Correlation of Rates Transfer and Other Phenomena," A.I.Ch.E. J1 Vol.18, pp1121-1128, 1972
- [8] G.Hugot, "Study of the Natural Convection Between Two Plane, Vertical, Parallel and Isothermal Plates," Doctorial Dissertation, Univ. Paris, 1972
- [9] M.Miyamoto, Y.Katoh, "Turbulent Free Convection Heat Transfer from Vertical Parallel Plates," Proc. 8th Int. Heat Transfer Conf., Vol4, pp1593-1598, 1986
- [10] W.H.McAdams, *Heat Transmission*, 3rd ed., McGraw-Hill, 1954
- [11] J.J.Shin, et al, "NPR and ANS Containment Study Using Passive Cooling Techniques"
- [12] NUREG/CR-4547, CONTEMPT4/MOD6: A Multicompartment Containment System Analysis Program, 1986
- [13] 장문희 등, "신형원자로 계통개념연구", KAERI/RR-1483/94, 한국원자력연구소, 1995

표 3-1. AP600과 KP1000 발전소 입력자료

Compartment	PARAMETER	AP600	KP1000
containment	free volume (ft <sup>3</sup> )	1.7E+6	2.65E+6
	intial temperature (°F)	120. (48.89°C)	120.
	intial pressure (psia)	15.7 (1.104Kg/cm <sup>2</sup> )	15.7
	relative humidity	0.1	0.1
	liquid region surface area (ft <sup>2</sup> )	9292.(횡 단면적의 70%)	12,370
	inner diameter (ft)	65. (19.812m)	75.
PCCS Anulus	channel height (ft)	78.04 (23.7966m)	88.72 (27.042m)
	channel width (ft)	0.90625 (0.276225m)	0.90625
	channel area (ft <sup>2</sup> )	373.22	430.52
	initail temperature (°F)	115.(46.11°C)	115.
	initail pressure (psia)	14.7	14.7
	relative humidity	0.1	0.1
	wetting fraction	0.7	0.7
Passive Heat Sink Data		19	19

표 3-2. AP600 저온관 파단사고 해석결과 비교

해석 코드	첨두압력(psia)	첨두온도(°F)
WGOTHIC	54.2	283.0
CONTEMPT-PCCS	54.00	262.48

표 3-3. KP1000 저온관 파단사고 계산결과

해석 코드	설계압력 (psia)	계산압력		설계온도 (°F)	계산온도	
		첨두압력(psia)	시각(sec)		첨두온도(°F)	시각(sec)
CONTEMPT4 /MOD5-PCCS	59.5	56.07	1100.	280.	265.18	1500.

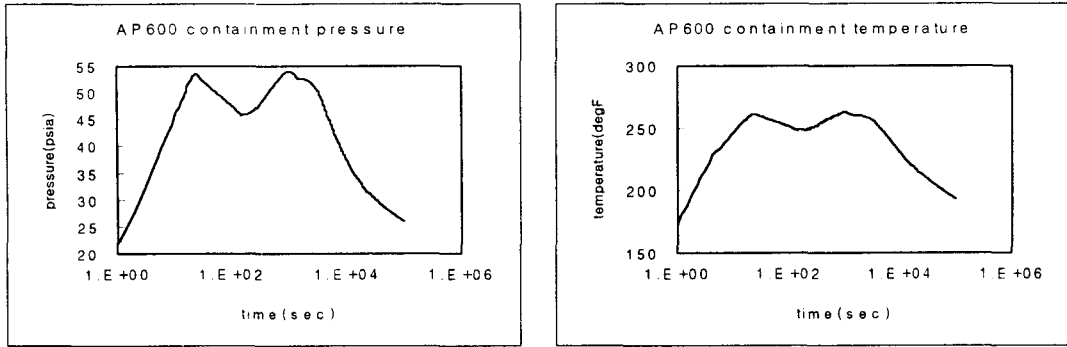


그림 3-1. AP600 저온관 파단사고시 격납용기 압력 및 온도

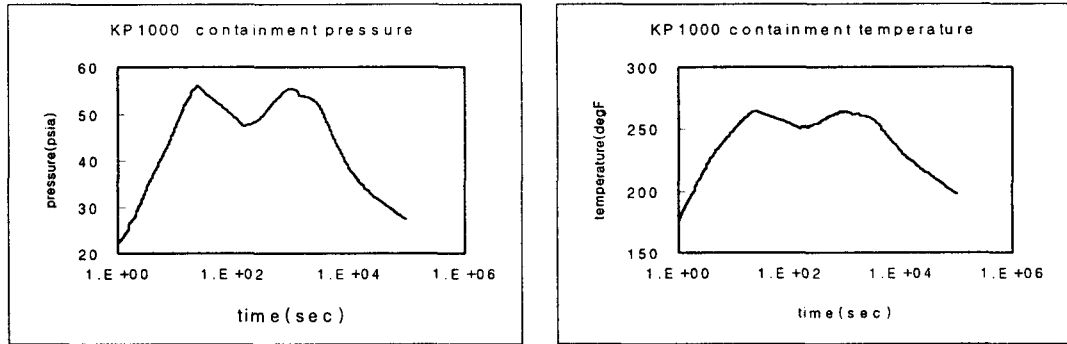


그림 3-2. KP1000 저온관 파단사고시 격납용기 압력 및 온도

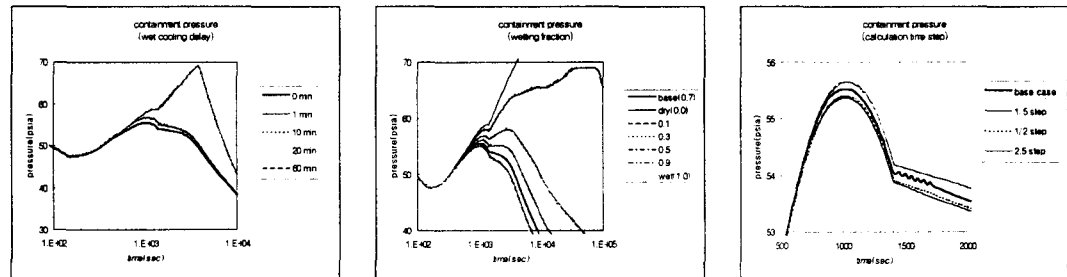
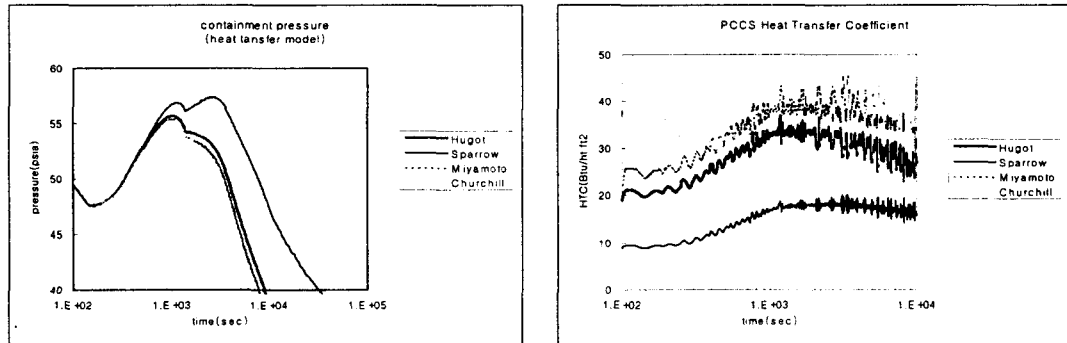


그림 3-3. 격납용기 민감도 분석 ( 냉각모델, 물막형성비율, 냉각지연, 시간간격)