’2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

MELCOR1.8.5 를 이용한 ISP-46(Phebus FPT-1 실험)의 단계-III 해석

Analysis of ISP-46 (PHEBUS-FPT1 Experiment) Phase-III Using MELCOR

박종화, 김동하
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 305-303

요 약

PHEBUS-FPT-1 실험은 2001 년 OECD 에 의해 ISP-46 으로 지정되었고, 이 논문에서는, ISP-46 중, 격납건물 모의용기내 에어로졸 거동에 관해 연구하는 단계 III 에 대해, MELCOR1.8.5 로 부터의 계산 결과들을 실험 측정치와 비교, 평가하였다. 측정치와 비교 결과, 열수력 변수들인 대기온도, 압력, 상대습도 그리고 응축율이 응축수 처리방식에 관계됨을 보였다. 또한 부유 에어로졸의 용기내 구조물 부착 및 크기 변화 예측과 관련 해서는, 흡수체 물질, 특히 은의 방출 고려 여부에 예측 결과가 관계됨을 보였다.

먼저 응축수를 막추적 모델을 적용하여 응축수 이송을 모의함으로 대기온도, 응축율, 상대습도 변화에 대한 예측을 개선하였다. 그러나 용기내 압력은 가열된 벽으로 부터의 과응축수 증발로 인한 부분적인 압력 기여 결여로, 압력이 다소 과소 평가되었다. 만일 용기를 단일 제어체적으로 모의하는 대신에 다중 구역으로 모의한다면, 예측 결과를 개선할 수 있음을 보였다. 다음으로 흡수체 물질의 방출을 고려하는 것이 에어로졸 농도 및 크기 변화 예측을 개선시킬 수 있음을 보였다. 따라서 MELCOR 코드내 흡수체 물질 방출 모델 첨가가 필요함을 확인하였다.

Abstract

The Phebus FPT-1 experiment was designated as the international standard problem 46 by OECD in 2001. In this paper, the phaseIII for the aerosol behavior in the vessel atmosphere referring the containment was simulated using MELCOR1.8.5 were evaluated and the results were compared against the experimental measured data.

It was found from the comparison that the thermal hydraulic parameters such as the gas temperature, the

pressure, the relative humidity and the condensation rate were dependent on the method of treating the condensate water. Also, it was found that the aerosol deposition on the structure in the containment and the size change of the suspended aerosol relied on whether the release of absorber material, especially silver, is considered or not.

With the film tracking model, the prediction on the gas temperature, the condensation rate and the relative humidity were improved. The film tracking model means that the condensed water on the structure can be transported directly to the designated structure in the other volume without any interaction in the current volume. However, the vessel pressure was rather under-estimated because there was no contribution by steaming partially due to the evaporation of the excess condensed water from the heated wall. When the vessel referring the containment is modeled with the multi-compartments instead of single volume, the prediction for the thermal hydraulic parameters is improved. The predictions on the aerosol density and their size change can be improved by considering the release of the absorber material. Therefore, it is suggested that the release model for the absorber material should be implemented into the MELCOR.

I. 서 론

중대사고시 격납건물내 열수력 변수 및 에어로졸 거동은 격납건물 손상시 방출될 선원항의 정확한 예측을 위해 연구 되어야할 중요한 현상이다. 특히 냉각재 상실 사고이후 노심 손상 과정이 진행됨에 따라서 노심과 일차계통 배관을 통해서 격납건물로 유입된 대량의 핵분열생성물 가스와 수증기, 노심에서 생생된 수소 가스는 격납건물내 에어로졸 거동에 크게 영향을 미친다. 궁극적인 격납건물로 부터의 방사능 물질 방출 준위는 격납건물내 부유된 에어로졸이나 가스의 절대양, 에어로졸 입자간 화학반응에 의한 비휘발성 특성에서 휘발성 특성 전환양, 기본 열수력 조건들에 의해 결정된다. 따라서 격납건물내 부유 에어로졸의 제거 관련 현상에 관한 연구는 타당한 선원항 평가를 위해 수행되어야 할 기본 연구 분야중 하나이다. 이같은 격납건물내 에어로졸과 가스의 제거 기구는 격납건물내 열수력관련 매개 변수들과 밀접하게 연관되어있다.

현재까지 수행된 격납건물내 에어로졸 거동 관련 실험은 DEMONA, VANAM 그리고 KAEVER 실험이 있었다[1]. 1983 년부터 1986 년 까지 수행된 DEMONA 실험은 약 640m^3 부피의 대형 BMC(Battelle Model Containment)에서 주석 산화물, 철산화물 그리고 은과 철및 주석 산화물로 구성된 에어로졸을 발생, 수증기와 주입시켜 상대습도와 응축율에 따른 에어로졸 거동을 연구하였다. 또한 1990 년부터 1992 년까지 BMC 에서 수행된 VANAM 실험은 현실적인 열수력 조건하에서 다중 구역화가 에어로졸 거동에 미치는 효과를 연구하였다. VANAM 실험은 이전 DEMONA 실험과 달리 용해성 및 비용해성 에어로졸을 사용하였다. 1991 년부터 1996 년 까지 수행된 KAEVER 실험 경우, 상대습도에 따른 용해성(CsOH, CsI) 및 비용해성 입자(Ag, SnO_2)의 부착 거동을 모의하였다. 그러나 이 실험들은 에어로졸을 임의로 발생시켜 주입시키는 실험 들이었으며,

노심 손상 과정과 연동되어 실제 중대사고시와 유사한 조건하에서 각 현상들이 서로 유기적으로 연관되어 발생된 결과를 측정한 Phebus FPT-1 과 같은 실험 조건은 아니었다.

ISP-46 문제는 Phebus FPT-1 실험을 대상으로한 국제 표준 문제로서[2] 이 논문에서는 FPT-1 실험 총 IV 단계중 III 번째 단계인 격납건물내 현상에만 국한하여, 중대사고 해석 코드 MELCOR 1.8.5 를 적용, 결과를 분석, 코드내 에어로졸 관련 모델의 해석 능력을 평가하고, 모델의 제한점이나 첨가 되어야 할 모의 현상을 규명하는 것을 목적으로 하였다.

II. 본 론

II.1 격납건물관련 실험 조건및 모의 방법

FPT-1 실험시설은 노심 손상이 진행되는 원자로 용기 부분, 증기발생기를 모의한 세관, 원자로용기 상단 출구부와 세관 입구를 연결해주는 수직관 및 수평 배관, 세관부 출구를 격납건물모의 용기와 연결해주는 수평 배관 그리고 마지막으로 이 논문에서 부분적으로 모의, 분석한 격납건물 모의용 용기 부분으로 구성되 있다. 노심으로 부터 증기발생기를 포함 격납용기 유입관 까지의 모의와 분석은 이미 완료하여 발표한 바 있다[3].

이 논문에서는 ISP-46 문제의 III 번째 단계만을 모의하였다. 즉 실제 격납건물을 모의하기 위해 상부는 반구 모양으로 제조된, 총 체적 약 $10m^3$ 의 원통형 용기로 유입된 에어로졸 및 가스 거동관련 변수 및 열수력 변수들을 각각 예측하여 측정치와 비교, 분석하였다.

중대사고시 격납건물내 저온 구조물에서 발생되는 응축현상을 모의하고, 부착 제거되는 핵분열생성물의 양을 정량화하기 위해, 실제 원전에는 존재하지 않지만, 용기 상단에 3 개의 응축기를 설치하였다. 이 응축기는 직경 0.15m, 높이 2.5m 의 원통 모양으로, 외벽면이 90^o C 로 유지되는 상단부와 120^o C 로 유지되는 하단부로 구성돼있다. 대부분 응축 현상은 응축기 상단부에서 일어나며, 응축된 냉각수는 모아졌다가, 격납용기 하단부에 있는 sump 로 반복적으로 배수되어, 냉각수내 핵분열생성물의 화학반응과 냉각수로 부터의 격납건물로의 재증발 현상을 연구하는 ISP-46 의 단계 IV 로 진행한다.

만일 격납용기 측벽면에서 핵분열 생성물 에어로졸이나 가스가 응축될 경우 응축양을 정량화하기 어려운점을 방지하기 위해, 실험과도 기간에, 원통형 용기 내벽면을 110 ^{o}C 로 일정하게 가열하여 응축 현상이 용기 내벽면에서 발생되지 않도록 하였다. RCS 로부터 응축기 하단부에서 상부 방향으로 주입되는 에어로졸이나 가스는, 차가운 3 개의 응축기 상단부 표면에 응축하여, 제거되거나, 가스와 수증기가 부유 에어로졸의 입자 표면에 응축, 에어로졸 입자간 결합(coagulation)으로 각 입자의 크기가 증가하여, 특정 크기 이상의 입자들은 궁극적으로 중력에 의해서 제거되게 된다. 그러나 이같은 에어로졸이나 가스의

제거현상은 용기내 열수력 관련 변수, 예를 들면 용기내 가스 온도, 압력, 대기내 불활성 가스나 수증기의 몰비 값 그리고 대류운동 들에 의해서 영향을 받게된다. 특히 유입된 에어로졸이나 불활성가스 및 수증기의 시간에 따른 유입율이 정확히 제공되었다는 가정하에, 용기내 설치된 응축기의 응축율 변화에 따라 용기내 대기온도와 압력값이 변화한다. 따라서 응축기 표면에서의 정확한 응축율 예측은 용기내 에어로졸 및 가스 거동 예측에 매우 중요하다.

MELCOR 코드를 이용한 모의시 격납건물을 모의하기 위한 용기는 단일 제어체적으로 가정 하였고, 측면벽과 상부 천정은 각각 HS 모델[4]을 李용하여 내면 온도를 주어진 값으로 과도 기간 동안 일정하도록 지정하였고, 외벽은 단열을 가정하였다. 상부 천정에 설치된 원통형 3 대의 응축기는 HS 모델을 이용하여, 외벽 표면 온도를 주어진 값으로 일정하게 유지되도록 하였다. 그러나 실제 경우 응축기 내벽으로 organic 유체를 이용한 열교환관이 외벽면의 온도를 제어하도록 되어있다. 따라서 실제 경우 진행된 응축기 표면 온도의 미세 변화에 의한 효과는 모의시 무시하였다.

MELCOR 는 응축기 표면 온도가 대기내 수증기 분압의 포화온도, 즉 이슬점 온도 보다 낮으면 응축기 표면에서 응축이 발생되도록 모의하고 있다. 반대로 증발은 응축된 막의 표면온도가 이슬점 이상일 경우 발생된다. 또한 FPT-1 실험 경우 같이, 용기내 실험전 잔존 질소와 과도 기간내 노심에서 발생되어 유입된 수소 가스와 같은 비응축성 가스들이 응축기 표면에서의 수증기 접촉에 의한 응축을 방해하는 효과를 고려하는 모델을 포함하고 있다.

용기내로 유입된 에어로졸은 두개 군 (component) 으로 분류하여, 물 입자군과 핵분열생성물로 구성된 에어로졸 군으로 각각 모의하였다. 이같은 2 개 군으로 구성된 에어로졸은 사용자가 지정한 최대와 최소 입자 직경 크기 사이에 분포하며, 특정 입자크기 영역(section)을 기준으로 다른 입자 영역들간 결합이나 응축, 증발 현상들에 의한 손실이나 유입을 고려하여 방정식을 세운다[5]. 결과적으로 이 미분 방정식을 풀어, 특정 공간내 에어로졸의 제거양이나 부유양을 예측한다. 이때 입자 영역간 결합이나 증발, 응축에 의해 특정 영역으로의 이동 빈도는 모의 계산전 지정된 에어로졸 계수값(ROCEF)으로 과도기간내 상수값으로 적용하게 된다.

결합 모의시 고려하는 현상들은 브라운 거동, 중력낙하 그리고 난류에 의한 효과들을 종합적으로 고려한다. 결합에 의한 에어로졸의 크기 변화는 궁극적으로 중력낙하에 의한 제거 효과를 보이게 된다. 동시에 고려되는 용기내 에어로졸 제거 기구는 부착 현상이다. 부착 현상은 중력, 브라운 운동, 열영동(thermophoresis), 확산영동(diffusiophoresis)의 효과들이 종합되어 총 부착 속도를 구하여 궁극적인 구조물이나 냉각수 표면에 대한 부착양을 예측하게 된다. 이 논문에서는 격납건물을 모의한 용기내 열수력 변수값을 비롯한, 응축기, 용기벽, 바닥에 부착된 각각의 부착 제거양과 시간에 따른 에어로졸 농도, 평균입자직경(AMMD: aerodynamic mass mean diameter)크기 변화, 표준편차(GSD:

geomertical standard deviation) 그리고 에어로졸 구성 성분을 측정치와 비교하여 MELCOR 코드의 모델 평가와 사용시 제한점을 규명, 제안하였다.

II.2 모의 및 분석

II.2.1 격납건물내 열수력 조건 (압력, 대기온도, 상대습도 및 응축율)

그림 1 은 격납건물 모의 용기내 가스 온도에 대하여 두가지 경우를 비교하여 보여준다. 첫째는 기본 MELCOR1.8.5 기본 계산 경우(점선) 이고, 두 번째는 막추적 모델을 적용한 경우(실선) 이다. 언급한 두 경우 모두 격납건물을 단일 제어체적으로 가정하여 모의 하였다. 비교한 용기내 대기온도 등가 평균 측정값은, 축 높이별로 반경 방향으로, 용기 벽면과 중앙의 응축기에 가까운 각각의 두 측정값을 평균한 가스 온도 값을 용기내 유입관 상부 높이(-2.180m)부터 응축기 상단 높이(-0.14m)까지 총 5 개 의 높이별로 구한 후, 이 평균값들을 다시 5 개의 축 높이에 대해 평균한 가스 온도를 나타낸다. 모든 경우 대기 온도 변화를 과소평가 하고 있음을 보여 준다. 특히 기본 계산 경우 대기 온도를 크게 과소 평가하고 있음을 보여준다.

기본 경우의 대기 온도 과소 평가 이유는 응축기 표면에서 응축된 응축막의 두께가 성장하여 사용자가 지정한 최대 크기($5x10^{-4}m$)를 초과하면, 초과된 응축양은 용기 바닥으로 이동, 약 $110^{o}C$ 로 가열된 측벽면과 접촉, 재증발 함과 동시에, 여분은 용기와 sump 공간의 연결을 모의하는 유로관을 통해 하부에 설치된 sump 로 이동된다. 따라서 대기 온도가 과소 평가된 이유는 초과된 응축수 이동시, 재증발로 인한 수증기 발생으로 대기 온도가 급격하게 냉각되기 때문이다.

그러나 막추적 모델을 적용한 경우, 응축된 응축수가 용기 바닥에 모이지 않고 바로 sump 로 이동하도록 용기 상단에 설치되있는 3 개 응축기와 용기 바닥 중앙에 연결된 sump 공간으로 직접 연결하는 dummy (무시할 만큼 작은 질량)관을 가정하였다. 따라서 가열된 용기 벽과 하부로 이동된 응축수와의 접촉에 의한 수증기 발생이 없기 때문에 대기온도의 급냉 현상이 없었다. 실제 경우도 응축기 하부에 고깔 형태의 응축수를 수집하는 장치가 설치되어 있어 응축수가 용기 하부에 모이지 않는다. 그림 2 는 두 경우 응축기 표면에서의 각각의 응축막 두께 변화를 보여준다.

용기내 압력은 실험 시작 초기에 용기내 잔존 질소 가스양, 과도 기간내 수증기 주입율 및 발생 수소 가스양 그리고 대기 온도와 응축기에 의한 응축율에 관계된다. 노심으로부터의 수소 발생양이 적절히 예측되었고, 수증기 주입율은 실험 측정 값으로 주어지며, 초기 질소 가스양은 이미 알고 있음을 고려할 때, 격납 건물 압력의 과소 평가 원인은 대기 온도 및 응축율 예측과 관계있다고 판단된다.

그림 3 은 두 경우에 대한 용기내 압력 변화를 보여주며, 막추적 모델을 적용한 경우가 적용하지 않은 경우 보다 압력을 과소 평가하였다. 이같이 예측 압력이 기본 경우 보다

과소 평가된 원인은, 앞의 대기 온도에서 설명한 바와같이, 과응축수의 재증발에 의한 수증기압의 기여가 없기 때문이다. 또한 격납 건물을 격리한 18600 초 이후 용기내 압력이 과대 평가된 이유는 모의시 시료 채취양을 제거하지 않았기 때문이다.

그림 4 와 5 는 각각 응축기에 의해 응축된 응축수의 모의 방식에 따른 격납 건물내 상대습도 변화 및 응축율 변화를 보여준다. 기본 경우는, 막추적 모델을 적용하지 않은 경우로, 응축기 외벽에서 응축된 응축수는 최대 응축막 두께 초과분이 격납 건물 벽과 접촉, 용기내 대기로 증발되어, 과도기간 동안 대기 온도의 급냉과 상대 습도를 100%로 유지시키는 문제점을 발생시켰다. 이같은 문제점을 개선하기 위해 응축된 응축수가 sump 로 즉시 이동될 수 있도록 응축기와 sump 간 막추적 모델을 적용한 경우, 대기 온도와 상대습도 그리고 응축율 변화에 대한 예측 결과를 크게 개선시켰다.

격납 건물을 단일 제어체적으로 모의한 경우, 용기내 모든 위치에서 각 열수력 변수값이 시간 지연 없이 같기 때문에, 실제 측정치와의 차이를 보일 것은 충분히 예상할 수 있는 일이다. 그러나 막추적 모델을 적용하지 않더라도, 용기를 다중 제어체적으로 모의할 경우 막추적 모델로 모의한 것과 같이 위치별 대기 온도 변화를 예측할 수 있다. 그림 6 은 격납 용기를 50 개로 모의했을 경우, 용기내 유동과 상대습도 분포를 보여준다.

II.2.2 에어로졸 농도, 평균 입자직경 크기및 입자 크기별 분포 표준편차

그림 7 은 용기내 시간에 따른 에어로졸 총질량 변화를 제어봉 물질 방출을 고려한 경우(사선)와 고려하지 않은 경우(점선)을 비교한 것이다. 노심, 일차계통, 격납건물 용기를 연속적으로 연결하여 실험을 진행하다가, 18600 초에 일차계통과 격납 건물 용기를 연결하는 밸브를 잠가서, 격납 용기로의 유입을 차단한 직후, 격납 건물내 에어로졸의 주요 구성 핵종은 측정치 경우와 동일하게 주로 U 와 Ag 이었다. 제어봉내 제어봉 물질(Ag)의 방출을 고려하지 않은 경우, 에어로졸 양이 측정치와 비교하여 크게 과소 평가 되었다. 현재 MELCOR 에서는 제어봉 손상시 용융 흡수체 물질(Ag,In,Cd)의 격렬한 방출(저압사고시, FPT-1 실험 2~4 bar)에 의한 에어로졸 발생 현상을 모의하고 있지 않다. 다만 제어봉 물질의 방출을 고려한 경우도 방출이, 노심내 핵분열생성물 Ag 의 방출 방식에 지배되도록 하고있다. 따라서 제어봉 손상시 용융 흡수체 방출에 의한 에어로졸 형성과 인접 핵연료 봉간의 용해현상 모의 모델의 개발이 추후 필요하다. 그러나 핵연료봉내 핵분열 생성물 Ag 양을 제어봉 물질내 Ag 양으로 교체, 방출양을 모의한 경우 격납 건물내 에어로졸양 예측치가 크게 개선 되었다. 에어로졸양 변화는 후반 노심 손상 단계에서 최대치를 보이고, 이후 에어로졸 제거 현상에 의해 감소된다. 제어봉 물질 방출을 고려하지 않은 기본 계산의 경우, 격납 건물내 에어로졸 양 감소율이 측정치와 비교하여 과소 평가되었다. 그러나 제어봉내 Ag 물질 방출을 고려를 고려하여, 격납 건물내 에어로졸양을 유사하게 예측한 경우, 그림 8 에서 보는 바와 같이, 충돌 빈도의 증가로, 에어로졸 입자 크기 예측치가 측정치와 비교, 유사하게 개선되었다. 그림 9 는

제어봉 물질 방출 고려 여부에 따른 격납 건물내 입자 크기 분포의 표준 편차 변화를 보여준다.

II.2.3 격납건물내 위치(벽, 응축기외벽, 바닥)별 핵종별 축적양 분포

그림 10,11 그리고 12 는 용기벽, 응축기 그리고 바닥에 모든 핵종에 대한 에어로졸의 총부착양을 나타내며, 바닥에 제일 많이 부착된 것을 보여준다. 이것은 격납건물 용기내 에서는 중력에 의한 침강 (gravitational settling) 현상이 주요한 에어로졸 제거 방식임을 의미한다.

그림 13,14,15 은 흡수체 방출을 고려한 경우, 핵종별, 격납 건물 내벽, 바닥 그리고 응축기 외벽에 부착양 변화를 보여준다. 벽면 경우, 측정치에 의하면, 부착된 질량 크기에 따라 Ag, U, Cs 그리고 Te 순서로 부착되었다. 반면 계산치 경우는 Ag, Cs 순서 였으며, 측정치와 다르게 U 의 부착양이 매우 적게 평가 되었다. 이는 노심으로 부터의 U 방출양 과소 평가와 관계있다. 응축기 외벽면 경우, 응축수와 함께 sump 로 이동 되기 때문에 sump 내 양과 함께 비교해야 할 것으로 판단된다. 추후 sump 에 대한 단계 IV 분석을 수행할 필요가 있다. 격납 건물 바닥 경우, 측정치는 부착양 크기 순서로, Ag, U, Cs, Te 순서로 측정되었다. 반면에 계산치 경우는, Ag, Cs, U 로 유사하게 예측되었다.

다만 격납건물내 부착 핵종의 크기 순서는 적절히 예측 되었으나, 부착의 절대 질량 예측이 정확하지 못했다. 추후 초기 재고량을 기준으로한 부착 분율로 비교할 필요성이 있으며, 연관하여 노심으로 부터의 핵분열생성물 가스와 에어로졸 방출 모델에 대한 개선이 필요하다.

II.2.4 G 지점 그리고 격납건물내 에어로졸 입자크기 분포 비교

그림 16 은 Cs 핵종에 관하여 G 지점에서는 16800 초, 격납건물내에서는 21000 초와 26500 초에서의 에어로졸 입자의 평균직경 크기 및 표준편차 그리고 입자크기에 따른 질량분율의 log-normal 분포 함수, 측정치와 예측치를 비교하였다. 예측치 경우 평균입자 직경 크기가 반이상 작게 예측되었지만, 위치와 시간에 따른 입자뭉침(agglomeration) 에 의한 입자 직경 의 성장 과정을 보여주었다. Log-normal 분포는 입자 크기별(section) 입자 질량 분포를 MELCOR 결과로부터 구하여, shape 변수 α 와 scale 변수 β 값을 최대 가능 평가 방법(Maximum likelihood estimators)을 적용하여 구한후, 이를 이용 평균 입자 직경(AMMD) 및 표준편차(SIGMA)값을 각각 구했다. Log-normal 분포 함수는 α 및 β 의 함수로 구해진다[6].

III. 결 론

ISP-46 문제의 III 단계 해석을 통한, MELCOR1.8.5 코드의 격납건물내 에어로졸 거동 관련 현상들의 예측 능력 평가로부터 다음과 같은 결과들을 얻을 수 있었다.

용기내 열수력 변수 예측에 관하여, 기본 계산 결과에 의하면, 격납건물 압력, 대기온도가 모두 과소 평가되었고, 상대습도는 60%~70% 로 변화한 측정치와는 다르게 과도 기간중 100% 로 일정하게 변화가 없었다. 원인은 응축수 모의 방식과 관계가 있었다.

응축수 모의 방식과 관련하여, 기본 계산 경우는 응축기에서 응축된 응축막이 입력시 지정한 최대 두께 이상으로 성장하면 여분의 과응축수는 해당 제어 체적 바닥으로 이동되어, 110^{o} C 로 가열중인 용기벽과 접촉, 즉각적인 증발로 대기온도를 냉각시켰고, 상대습도를 과도기간 100% 로 유지하게 하였다.

그러나 응축수를 격납용기가 아닌 sump 로 직접 이동시키는 막추적 모델을 적용한 경우, 대기온도와 상대습도 그리고 응축율에 대한 예측 결과를 크게 개선하였다. 그러나 이는 격납건물을 단일 체적으로 모의하였기 때문이며, 만일 다중 볼륨으로 모의할 경우 대기온도, 압력, 상대습도 그리고 응축율을 개선할 수 있음을 보였다.

격납 건물내 핵분열 생성물 부착 기구에 관해서는, 중력에 의한 침강 (gravitational settling) 현상이 주요한 에어로졸 제거 방식으로 예측되었다.

격리 직후 격납건물내 에어로졸의 주요 구성 핵종은 측정치와 유사하게 크기 순서로 U, Ag 로 예측되었다.

제어봉 물질의 방출을 고려하지 않은 경우, 시간에 따른 용기내 에어로졸 양이 측정치와 비교하여 크게 과소평가 되었으나 제어봉 물질 방출을 고려한 계산 경우, 에어로졸양 및 크기 변화 예측치가 크게 개선되었다. 따라서 이 결과에 의하면, 에어로졸 거동 모의시, 제어봉 물질의 방출을 모의할 필요가 있다.

IV. 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었다.

참 고 문 헌

1. K. Fischer, T. Kanzleiter ,“ Experimental and computational models for aerosol behaviour in the containment, " Nuclear Engineering and Design 191 (1999) 53-67.
2. T. Haste ,“ Specification of International Standard Problem ISP-46 (Phebus FPT-1) ,“ Note Tech SEMAR, Cadarache France , May 2002.
3. 박종화, 김동하,” MELCOR1.8.5 를 이용한 ISP-46 (Phebus FPT-1 실험)의 단계-I, II 해석 ," 한국원자력학회 2003 춘계학술발표회.
4. MELCOR Computer Code Manuals: Reference Guide ,NUREG/CR-6119, Vol.1 & 2, July 1997.
5. F.Gelbard, “ MAEROS User Manual ,” NUREG/CR-1391,1982.
6. Norman J. McCormick, “ Reliability and Risk Analysis ,“ Ch 3,4 Academic Press, 1981.

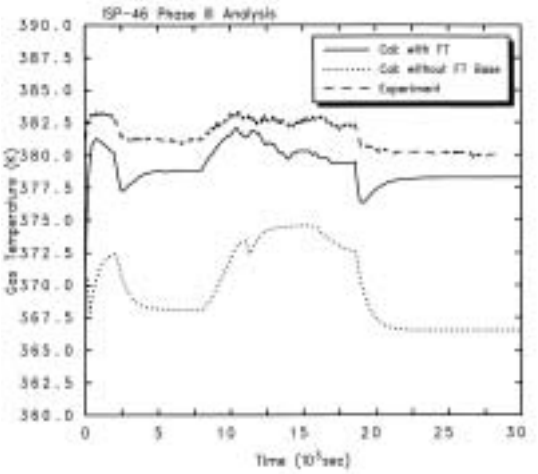

그림 1. 막추적 모델에 따른 용기내 대기온도

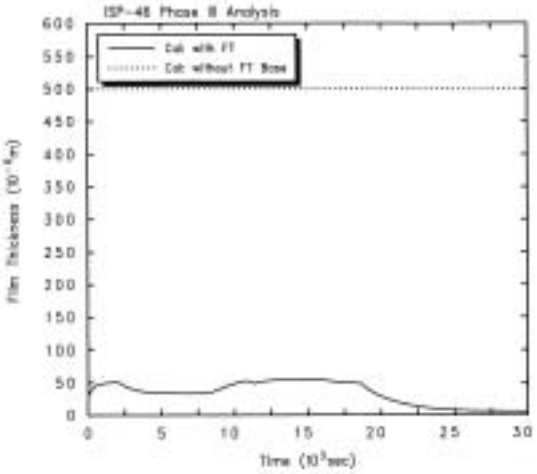

그림 2. 막추적 모델에 따른 응축기 막두께

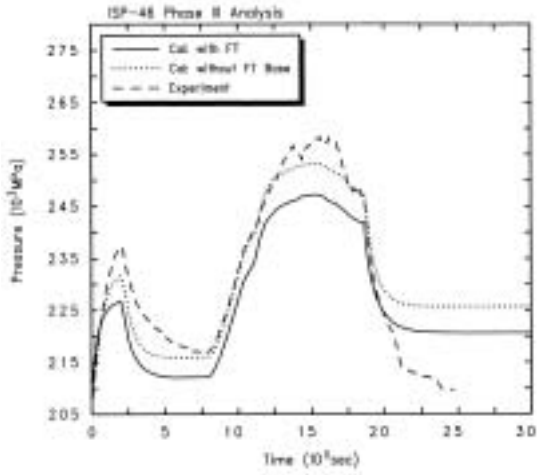

그림 3. 막추적 모델에 따른 용기내 압력

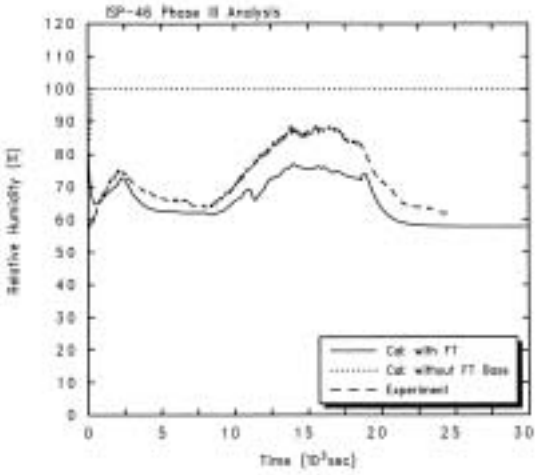

그림 4. 막추적 모델 따른 용기내 상대습도

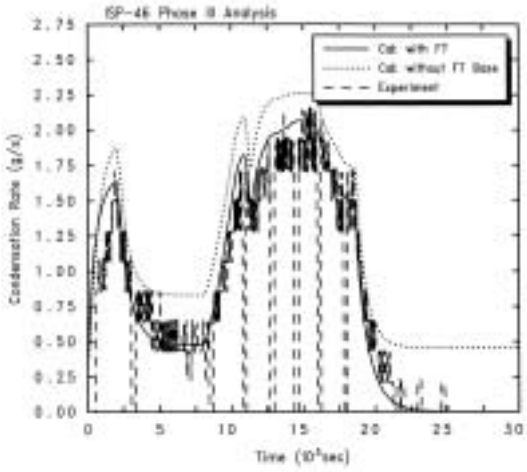

그림 5. 막추적 모델따른 응축기 응축율

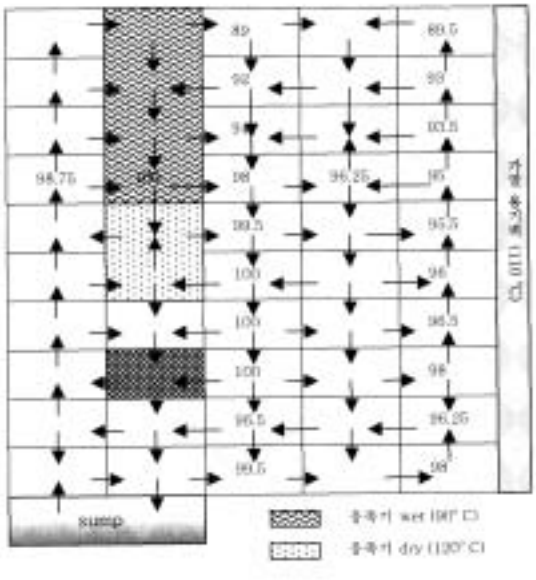

그림 6. 용기를 50 개 체적구분 경우, 용기내 유동및 상대습도 분포

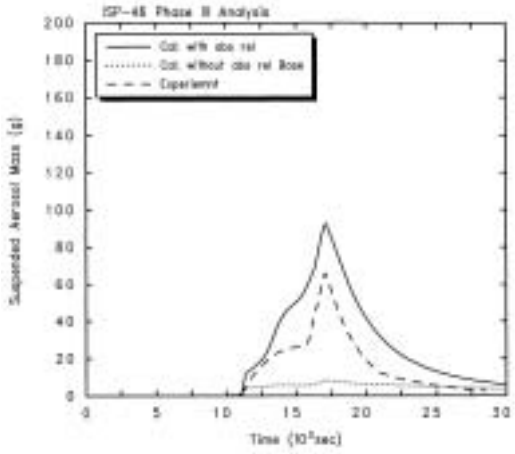

그림 7. 제어봉 물질 방출 따른 용기내 에어로졸 질량

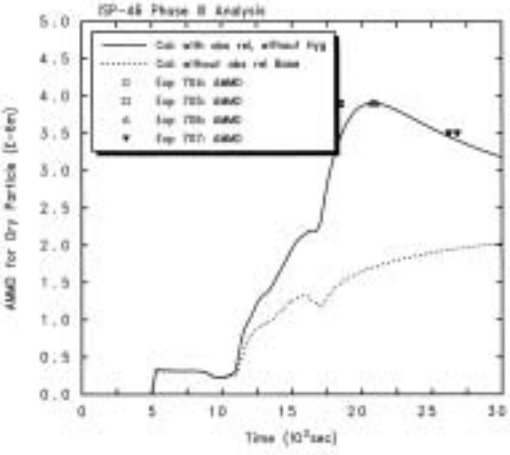

그림 8. 제어봉 물질 방출 따른 입자크기 변화

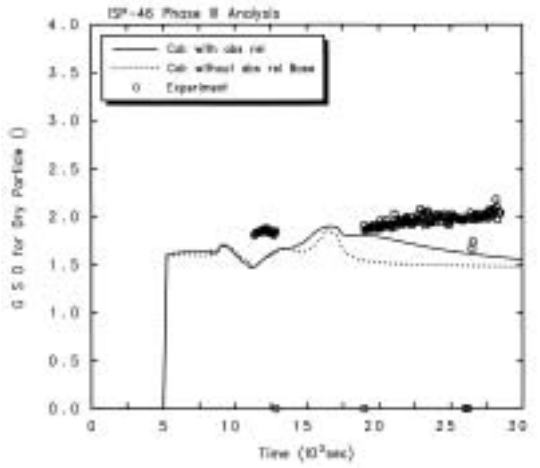

그림 9. 제어봉 물질 방출 따른 입자 표준편차

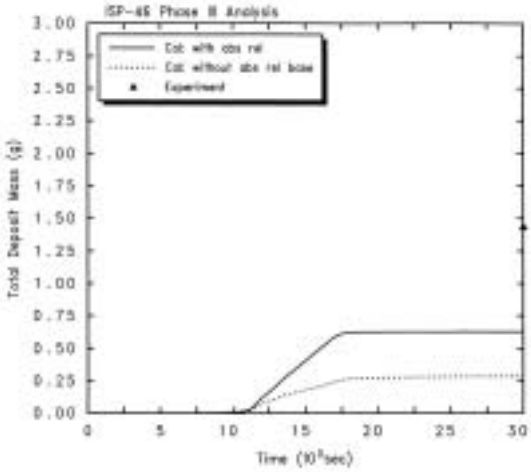

그림 10. 제어봉 물질 방출 따른 용기벽 에어로졸 부착 질량

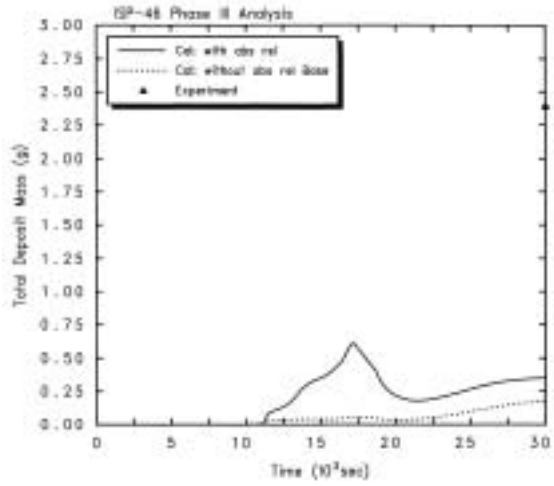

그림 11. 제어봉 물질 방출 따른 응축기 표면 에어로졸 부착 질량

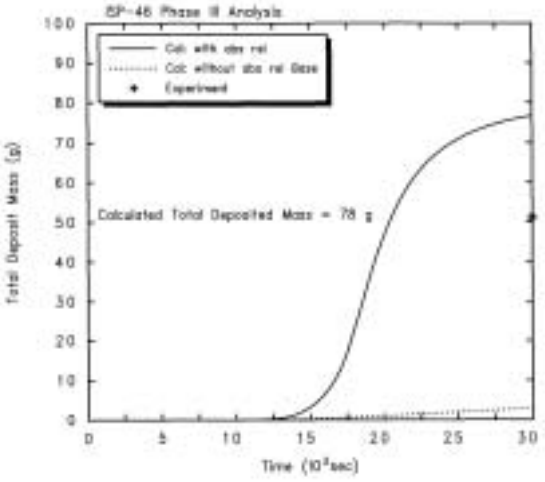

그림 12. 제어봉 물질 방출 따른 용기 바닥에 에어로졸 부착 질량

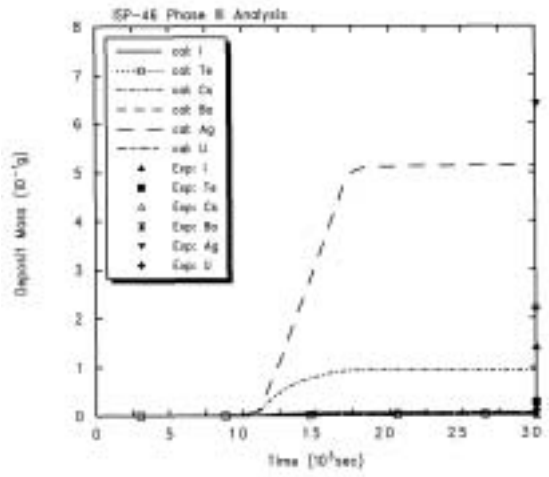

그림 13. 제어봉 물질 방출 고려한 경우 용기벽에 핵종별 부착 질량

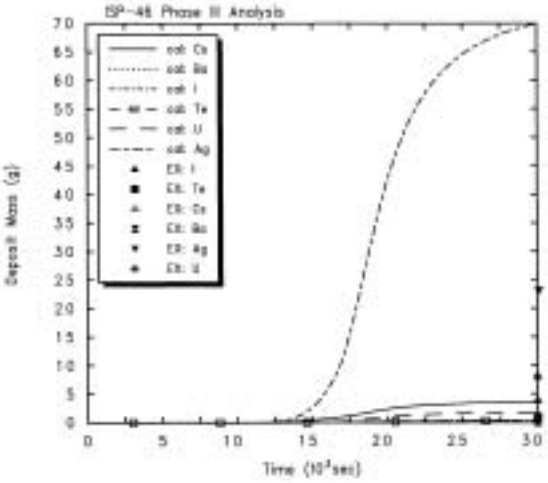

그림 14 제어봉 물질 방출 고려한 경우, 용기 바닥에 핵종별 부착 질량

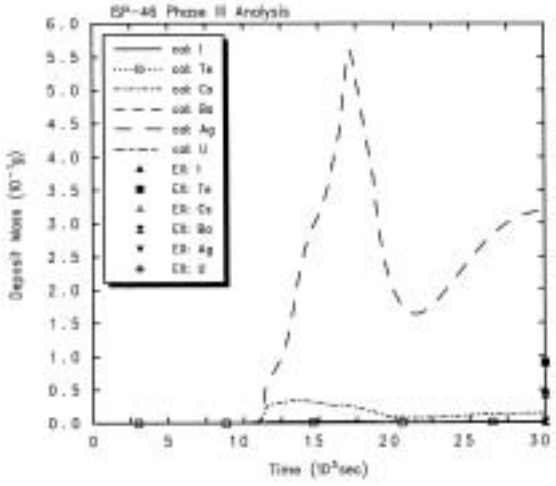

그림 15. 제어봉 물질 방출 고려한 경우, 용기 응축기에 핵종별 부착 질량

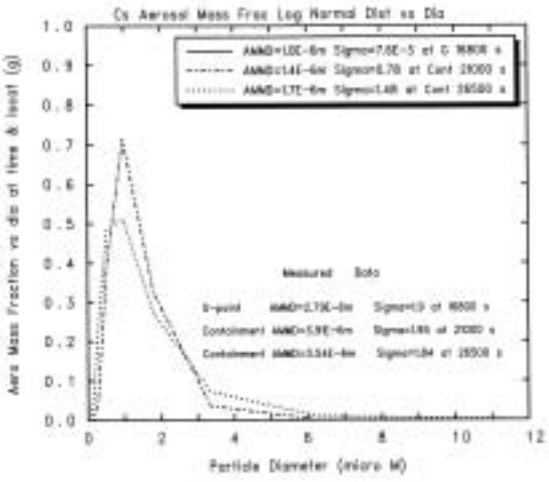

그림 16. Cs 핵종의 위치, 시간별 평균입자 입자 크기 및 표준편차