2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

MELCOR 1.8.4 코드를 사용한 KAEVER 에어로졸 실험 계산결과의 정확성 분석 – ISP44

Analyses of the Accuracy of Calculated Results Using MELCOR 1.8.4 Code for the KAEVER Aerosol Tests – ISP44

송용만, 김희동
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

조성원
한국방사선기술연구소
대전광역시 유성구 구성동 19

요 약

OECD-CSNI에 의해 제안된 국제표준문제 ISP-44는 격납용기내 에어로졸의 거동을 모의하는 것이다. 이를 위해 독일에서 수행된 KAEVER 에어로졸 결과공개 실험들 (K123/K148/K186/K188)을 MELCOR 1.8.4 코드로 모의하여 모델의 정확성을 평가하였다. KAEVER 실험에서는 과포화 상태 (상대습도 > 100%)에서 흡습성 에어로졸 (CsOH 및 CsI)과 비흡습성 에어로졸 (Ag)의 대기내 거동특성이 각각 측정되었다. 따라서 코드모의에서는 실험별로 열수력 조건을 우선 모의하고 다음으로 에어로졸의 거동을 실험결과와 비교하였다. 계산결과, 에어로졸의 대기내 농도는 건식에어로졸에 대해서는 잘 일치하는 것으로 나타났으나 습식에어로졸에 대해서는 전혀 경향이 맞지 않았다. 이는 MELCOR 1.8.4 코드 습식에어로졸 모델의 약점에 기인하는 것으로 분석되었으며, 모델의 개선결과 경향이 일치하여 모의능력이 크게 향상되었다.

Abstract

International Standard Problem No.44 by OECD-CSNI is to simulate the aerosol behavior in a containment. As a part of this program, MELCOR 1.8.4 code has been employed to simulate the KAEVER open test series (K123/K148/K186/K188) performed in Germany through which accuracy of the MELCOR aerosol model is evaluated. In KAEVER experiments, the behavior characteristics of hygroscopic CsOH/CsI and unsoluble Ag aerosols in a vessel atmosphere are measured under a supersaturated condition (relative humidity > 100%). In code simulations, thermal hydraulic conditions are simulated first and then, the aerosol behavior is compared between the experimental results and the code predictions. The calculation results of vessel atmospheric concentration show a good simulation for dry aerosol but show large difference for wet aerosol. The difference is due to a hygroscopic model weakness in MELCOR 1.8.4 and this weakness is improved through which simulating results and capability are largely enhanced.

1. 서론

원자력 발전소에서 노심용융을 포함한 중대사고 발생시, 핵분열생성물은 증기 (vapor) 또는 에어로졸 (aerosol) 형태로 격납건물내로 방출된다. 이중 대기내 에어로졸 농도는 장시간에 걸쳐 중력에 의한 침적 (settlement) 또는 온도차에 의한 열침원에의 부착 (deposition)등에 의해 감소하고 이는 격납건물의 손상시 누출되는 방사선원항에 영향을 미치게 된다. 특히, 노심용융 사고초기에 에어로졸의 거동은 에어로졸의 성분 및 격납대기내 열수력 경계조건에 크게 좌우된다. 일정하게 제어된 열수력 조건하에서 에어로졸

거동에 대한 데이타를 얻기 위해 독일에서 중간크기 (체적 ≈ 10 m^3)의 실험용기를 이용하여 KAEVER (Core Melting Aerosol Experiments) 실험이 수행되었고 이중 일부실험이 OECD-CSNI에 의해 국제공동문제인 ISP44 [1]로 채택되었다. 결과가 공개된 KAEVER실험의 주 목적은 과포화 조건 (상대습도가 100% 이상이고 안개 (fog)가 형성되는 상태)에서 대기내 에어로졸의 감소율을 측정하는 것이다. ISP44 에서는 이러한 데이타를 이용하여 중대사고시 에어로졸의 거동을 모의하는 COCOSYS [2], MELCOR [3], 및 CONTAIN [4][5]과 같은 전산코드의 모의능력을 평가했다.

본 논문에서는 아래와 같은 에어로졸 성분을 사용한 4개의 결과공개 KAEVER 실험이 모의되었다:
K123: CsI 에어로졸
K148: Ag 에어로졸
K188: CsOH 에어로졸
K186: Ag 및 CsOH 혼합 에어로졸

실험모의의 주안점은 사고관리에 이용될 수 있는 데이타를 획득하기 위해 시간에 따른 에어로졸의 대기내 농도에 있지만 이를 위해서는 열수력 조건을 가능한 잘 모사하는 일이 필요하다. 본 논문에서는 4개의 실험을 대상으로 열수력 모의 과정을 예시하고 에어로졸의 거동을 분석하는 순서로 기술되었다. 실험조건인 대기 습도의 과포화 상태는 중대사고 초기 다량의 냉각수가 격납건물로 유출되거나 사고관리의 수단으로 상당량의 냉각수가 이용될 수 있는 점을 고려할 때 예상이 가능하다.

본 연구를 통하여 MELCOR 코드의 열수력 및 에어로졸 모델의 해석능력이 평가되었다. 이러한 평가를 통하여 발전중인 원자로의 안전여유도를 정량화하고 중대사고 전개를 완화할 수 있는 방안을 도출하는데 기여할 것으로 사료된다.

2. KAEVER 에어로졸 실험

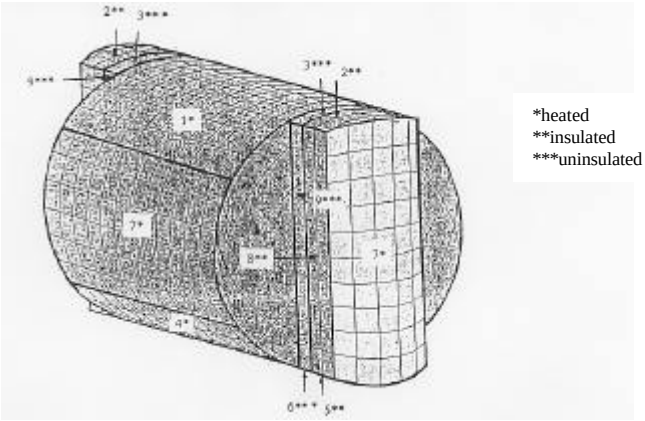


그림.1 KAEVER 실험용기

KAEVER 실험용기는 그림.1 에 보인 것처럼 가로로 눕힌 실린더(지름=2090 ㎜, 길이=2500 ㎜) 모습이며 양단에 직사각형 (800㎜ x 1900㎜)의 출입문이 달린 구조로 되어 있다. 실린더 내부의 자유체적은 10.595 m^3 이며 벽체 및 출입문등은 전열매트 및 단열체가 설치되어 있다.

실험은 그림.2 에서 보였듯이 2단계에 걸쳐 수행되었다. 첫 단계는 실험용기내 대기조건을 예비적으로 조정하는 단계 (Preconditioning Phase)로서 용기내 수증기가 주입되고 전기가열이 이루어져 대기내 온도 및 습도조건을 제어한다. 다음단계는 대기내 열수력 조건이 수증기 주입 및 전기가열에 의해 다시 한번 미세조정되어 유사평형상태 (quasi-stationary state)에 도달한다. 응축된 수증기는 용기바닥에 고이고 실험용기 외부의 온도는 실험별로 약 18~22℃를 유지한다. 이러한 상태에서 유도가열을 이용한 용융로에서 에어로졸을 발생시켜 질소가스에 실어 주입한다. 이후 대기내 에어로졸은 성분 및 대기조건에 따라 감소하게 된다.

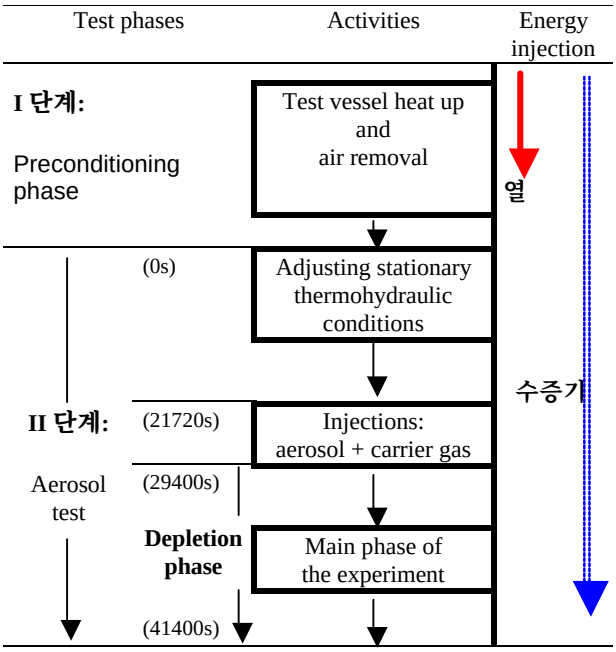


그림.2 K188 실험계획 예시

3. MELCOR 계산 입력 모델

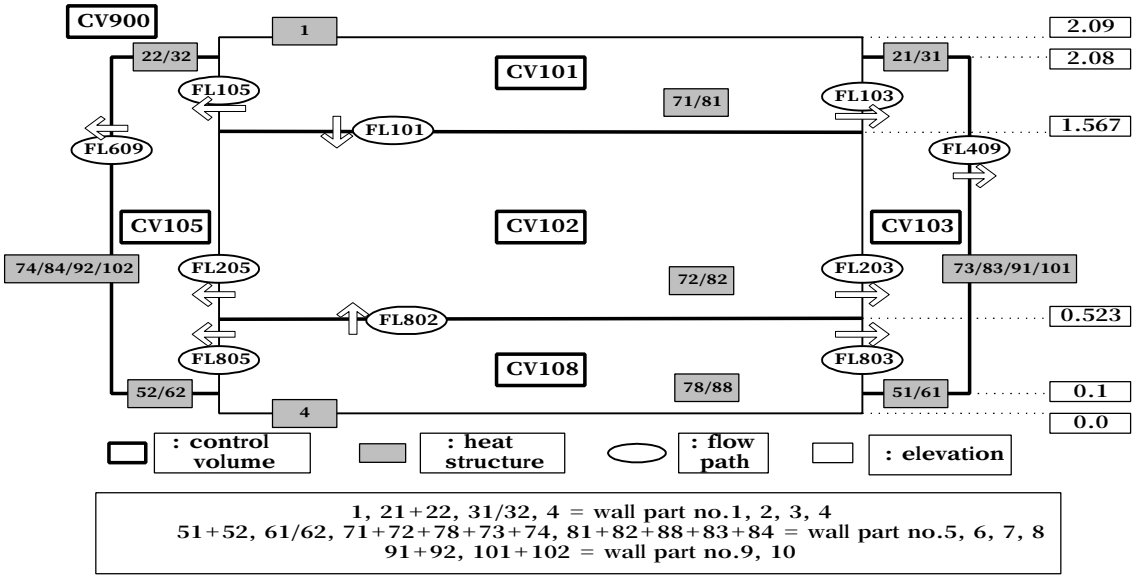


그림.3 MELCOR 실험용기 Nodalization

그림.3 에서 보였듯이 MELCOR 모의에서 실험용기는 6개의 제어체적 (control volume) 및 24개의 열구조물 (heat structure)로 상세노드를 구성하였다. 6개의 제어체적은 실린더 지역 3개 (상부, 하부 및 Sump) 및 출입구 지역 좌/우측 각 1개로 구분하였고 실험용기 외부는 시간에 따른 특성이 일정한 1개의 독립노드로 지정하였다. 열구조물은 수직 또는 수평의 평판으로 구성하였고 각 제어체적을 연결하는 10개의 유로를 정의하였다.

실험모의를 위해 사용한 KAEVER 실험별 열수력 초기조건은 표.1에서 제시하였다.

	K123	K148	K186	K188
대기압력 [bar]	1.1	1.04	0.99	1.09

대기온도 [℃]	104	92	97.8	109.5
대기습도 [%]	85	116	110	93
질소 가스량 [kg]	0.057	2.72	0.533	0.0
Sump 물의 양 [kg]	0.0	290.0	67.3	4.6
Sump 물의 온도 [℃]	101	80	94.1	101

표.1 KAEVER 실험별 열수력 초기조건

실험에서 실험용기는 대부분 단열이 되어 있으나 출입문을 여닫는 장치등은 단열이 설치되지 못해 열손실이 일어나므로 인공적으로 가상한 비단열(uninsulated) 벽체를 가정하여 이러한 냉각핀 효과를 고려하였다. 시행착오 (Trial and Error) 기법에 의한 반복계산을 통하여 가상 벽체의 면적은 2.5 m^2 을 4개의 실험에 대해 공통으로 적용하였다. 또한 용기의 누출부분을 모사하기 위한 누출면적 및 마찰손실계수는 ISP44 시방서 [1]에 제공된 값을 사용하였다.

에어로졸의 특성변수 및 에어로졸 주입율을 표.2 및 그림.4에 각각 제시하였으며 계산에 고려한 에어로졸 입자의 크기는 0.1~50 μm 이었다. 실험모의에서 실제 열구조물의 형태를 동일하게 모의하는데 한계가 있다. 이는 코드에서 제공되는 열구조물의 기하학적 형태와 제어체적의 구분에 따른 실제 구조물의 형태가 일치하지 않기 때문이다. 따라서 에어로졸의 침착에 이용되는 총 면적은 동일하나 위치에 따른 차이가 존재하며 이를 표.3 에서 제시하였다. 한편 에어로졸의 특성변수중 ISP44 시방서는 흡습에어로졸은 용해효과 (Van't Hoff factor)를 비흡습에어로졸은 표면장력 효과 (Kelvin effect)를 각각 고려하였다. 그러나 MELCOR 1.8.4 에서는 흡습모델 (hygroscopic model) 옵션의 작동여부에 따라 위 2가지 효과가 동시에 고려되므로 흡습모델을 작동시켰다. 흡습모델이 작동되지 않는 경우 에어로졸의 침착이 감소하며 이는 습도가 과포화 상태인 점을 고려할 때 비현실적인 결과를 초래하게 된다.

Parameter	K123(CsI)	K148(Ag)	K186(Ag +CsOH)	K188(CsOH)
Volume median particle diameter [μm]	1.634	0.996	0.567	0.37
Number median particle diameter [μm]	0.691	0.516	0.402	0.26
Geometric standard deviation	1.80	1.40	1.2	1.45
Dry aerosol density [kg/m^3]	4510	10510	(10510+3675)/2	3675
Molecular weight [kg/kmol]	260	108	108 / 150	150
Surface tension (Kelvin effect) [N/m]	none	0.0512	0.0512 / none	none
Solubility (Van't Hoff factor)	1.7	None	None / 2.0	2.0
Dynamic shape factor	1.0	1.0	1.0	1.0
Agglomeration shape factor	1.0	1.0	1.0	1.0

표.2 에어로졸 특성변수

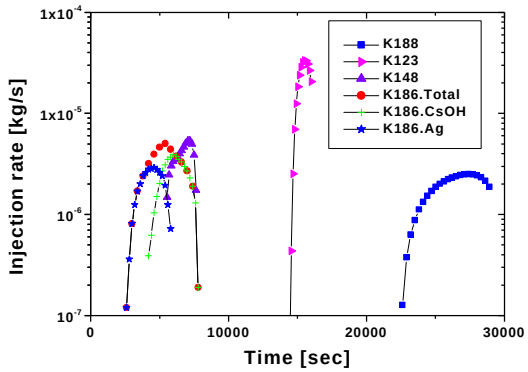


그림.4 에어로졸 주입율

	ISP-44	MELCOR
Floor	7 m^2	5.67 m^2
Ceiling	7 m^2	5.67 m^2
Wall	17.6 m^2	20.51 m^2
Total	31.6 m^2	31.8 m^2

표.3 에어로졸 침착 면적

4. 모의결과

실험모의에서 수증기 및 질소가스는 제어체적 108 및 제어체적 101로 각각 주입되고 열은 벽면을 통해 주입된다. 수증기/열/질소가스의 주입 및 누출에 의해 실험용기 대기내 조건이 계속 변화하고 수증기의 응축으로 Sump내 냉각수의 양도 변화한다. 또한 열구조물의 온도도 벽체내의 열 주입 및 열전달에 의해 변화한다. 그러나 에어로졸 주입 직전의 열수력 조건의 정확한 모의는 이후 에어로졸의 거동에 영향을 주므로 매우 중요하다. 표.4에서는 에어로졸 주입직전 열수력 조건의 계산치와 측정치를 실험별로 비교하였다.

	K123		K148		K186		K188	
	Mea[1]	MEL[2]	Mea	MEL	Mea	MEL	Mea	MEL
대기 압력 [bar]	1.49	1.56	1.64	1.58	0.99	0.98	0.99	1.05
대기 온도 [°C]	102.4	101.2	92.5	88.8	97.7	97.1	97.7	99.5
대기 습도 [%]	90	100	116	100	110	100	110	100
질소가스량 [kg]	3.917	4.03	8.314	8.398	0.533	0.614	0.9	0.98
Sump 물의 양 [kg]	42.7	40.0	301.1	300.5	69.1	68.8	65.3	67.5
Sump 물의 온도 [°C]	98.6	101.5	79.7	89.9	94.0	97.2	94.8	98.4
출입구측 벽면 외부온도 (비단열)	N/A	99.28	N/A	82.15	93.9	96.11	96	96.9
출입구측 벽면 내부온도	N/A	98.62	N/A	82.63	96.8	96.77	96.7	97.5
실린더측 벽면 외부온도 (비단열)	N/A	47.44	N/A	33.20	35.5	36.40	33.3	32.7
실린더측 벽면 내부온도	N/A	100.5	N/A	88.10	97.3	96.99	97.1	99.3

[1] : 측정치, [2] : MELCOR

표.4 에어로졸 주입 직전 열수력 조건의 비교

표.4에서 보였듯이 열수력 조건을 대체적으로 잘 모의하는 것으로 나타났다. 단, 대기습도는 MELCOR 코드가 100% 이상을 모의하지 못하였으며, K123 실험의 대기습도 및 K148의 Sump 물 온도는 여타 데이타와의 비교에 의해 측정오류인 것으로 판단된다. 가장 중요한 변수인 온도 및 압력은 시간에 따른 변화를 그림.5 (마지막 페이지 참조)에 제시했으며 실험기간동안 0.1 bar 및 2.5°C 차이내에서 잘 일치하였다. 에어로졸 주입 단계에서 함께 주입되는 질소가스는 압력의 상승을 유발하였고 에어로졸 주입이 종료된 이후에는 내부가스의 외부로의 누출에 의해 압력 및 온도가 약간씩 감소하는 것을 알 수 있다.

그림.6 (마지막 페이지 참조)은 실험별로 시간에 따른 건식입자 (CsOH/CsI/Ag 에어로졸만 고려) 및 습식입자 (CsOH/CsI/Ag 및 수증기 에어로졸을 함께 고려)의 대기내 농도변화를 보여주고 있다. 이에 의하면 흡습모델 사용시 건식입자 (그림.6 : dry-old-hygro) 및 습식입자 (그림.6 : wet-old-hygro)의 농도가 동일하게 나타났으며 실제에 비해 매우 빠른 감소를 보이고 있다. 이로 인해 대기내 최고농도를 실제보다 낮게 예측하고 에어로졸 주입이 종료후 30분 이내에 대기내 에어로졸이 거의 모두 침착되는 결과를 초래하였다. 이는 습도가 과포화 상태임을 감안해도 너무 빠른 감소이며 이는 측정치와 비교하여 쉽게 판단할 수 있다. 이로부터 흡습모델의 상세한 검토결과 모델의 약점이 판명되었고 이의 개선이 이루어졌다 (다음 절 참조). 개선된 모델을 이용한 계산결과를 건식입자 (그림.6 : dry-new-hygro) 및 습식입자 (그림.6 : wet-new-hygro)에 대해 제시하였다.

건식입자의 결과에서는, 비흡습에어로졸 및 비흡습/흡습에어로졸을 각각 사용한 K148 및 K186 실험모의에서 결과를 거의 차이 없이 예측하였다. 한편 흡습에어로졸을 사용한 K123 (CsI) 및 K188 (CsOH) 에서는 계산후반에 결과예측이 조금씩 어긋남을 볼 수 있다. K123의 경우에는 실제보다 에어로졸의 빠른 감소를 예측하였고 이는 수증기 응축에 의한 에어로졸의 성장이 빨랐던 결과로 판단된다. 반면 K188의 경우에는 실제보다 에어로졸의 느린 감소를 예측하였고 이는 수증기 응축에 의한 에어로졸의 성장을 충분히 고려하지 못한 결과로 판단된다. 결국 이상의 결과로부터 건식입자의 농도예측은 대체로 실제를 잘 모사하는 것으로 판단된다. 단지, 흡습에어로졸의 경우 수증기 응축에 의한 에어로졸의 성장모델에 한계가 있을 수 있으며 서로 다른 흡습에어로졸을 사용한 두 경우에 서로 상반되는 결과가 나온 점은 모델의 검증에 추가 데이타를 요구하고 있다.

습식입자의 결과에서는 4개의 실험 모두 같은 결과를 보여주고 있다. 즉, 실제와 경향이 거의 일치하나 절대값이 약 이차 (two-order)의 차이를 보인다는 점이다. 이는 대기내 수증기 에어로졸의 초기농도 (background concentration)를 고려하지 못한 탓으로 사료된다.

5. 흡습모델 개선

흡습현상은 에어로졸 표면에서 수증기가 응축하거나 증발하여 에어로졸의 성장을 촉진시키며 응축 또는 증발시 대기의 증기압 및 온도는 영향을 받는다. 특히, 에어로졸 표면에서 수증기의 응축은 에어로졸 성장의 가장 주요한 원인이며 이러한 성장은 다른 에어로졸과의 접촉 가능성을 높여 에어로졸의 응집 (agglomeration)을 증가시킨다. MELCOR 코드에서 흡습모델은 에어로졸 입자에서 수증기의 응축 및 증발율을 결정하는 아래의 Mason 식에 근거하며 용해효과 및 Kelvin 효과를 포함하고 있다.

$$\frac{dr}{dt} = \frac{1}{r}\frac{(S - S_r)}{(a+b)}$$

여기서

$S_r = A\exp(\frac{2M_w s}{RT_\infty r_w r})$, A = 화학작용 인수

$b = \frac{RT_\infty r_w}{D_v M_v P_{sat}(T_\infty)}$ 및 $a = \frac{\Delta h_f^2 M_w r_w}{RT_\infty K_a}$

여기서,
r = 에어로졸 입자의 반경,
t = 시간
S = 포화율 [$P_v/P_{sat}(T)$].

위에서 사용된 화학작용 인수는 아래처럼 정의된다:

$$A = 1/(1 + \sum_i l_i n_i / n_w)$$

여기서
l_i = 용질 i에 대한 Van't Hoff 이온화 인수
n_i = 물방울내의 용질 i 의 몰(mole) 수
n_w = 물방울내 물의 몰 수.

위의 Mason 식에서 Kelvin 효과 (exponential term) 및 용해효과 (A term)는 하나의 식에서 표현되고 흡습모델의 작동에 의해 동작된다. 그리고 용해효과내의 Van't Hoff 이온화 인수는 흡습에어로졸 입자에서 수증기 응축을 촉진시키는 역할을 한다. MELCOR 1.8.4 모델에서는 모든 원소에 대한 이온화 인수값이 일정하며 동일한 용해도를 갖는 약점이 있다. 이로 인해 비흡습 원소도 흡습원소의 성질을 갖게 된다. 모델의 개선에서는 핵분열 생성물중 대표적인 흡습원소인 CsI 및 CsOH 만을 흡습원소로 지정하였다. 따라서 개선모델을 이용할 경우, 대기내 에어로졸의 감소속도가 느려지는 효과가 있다.

6. 결론

MELCOR 1.8.4 코드를 사용하여 ISP44로 제안된 KAEVER 에어로졸 결과공개 실험인 K123 (CsI 에어로졸), K148 (Ag 에어로졸), K188 (CsOH 에어로졸), 및 K186 (Ag 및 CsOH 혼합 에어로졸)을 모의하였다. 모의결과 실험용기내 대기온도 및 압력 같은 열수력 조건들을 별 차이없이 예측하여 코드의 열수력 모델이 상당히 정확함을 검증할 수 있었다. 그러나 다량의 냉각수가 격납건물내로 누출되는 중대사고시 과포화 조건이 형성될 수 있음에도 코드가 상대습도 100% 이상을 모의하지 못하는 점은 약점으로 판명되었다. 한편 습도가 높은 상태에서 에어로졸의 농도 및 감소를 모의하기 위한 흡습모델은 건식입자의 대기내 농도변화에서 매우 빠른 감소를 보여 실제와

상당한 차이가 발생하였고 습식입자의 모의는 경향조차 예측하지 못하는 약점이 발견되었다. 본 논문에서는 이의 개선을 시도한 결과 4개의 실험 모두에 대해 건식입자의 최고농도와 감소경향이 계산중반까지 일치하는 결과를 얻었다. 그러나 K123 및 K188 의 경우, 사고후반에 결과값이 측정치와 발산하는 경향이 나타났는데 이는 모델의 약점임이 확실하지 않아 추가 검증이 요구된다. 또한 개선모델을 이용한 습식입자의 계산에서는 실제와 경향이 거의 일치하여 모의능력의 우수함을 재검증 하였다. 한편, 습식입자 농도의 계산값이 실제에 비해 이차 (two-order)의 차이를 보였는데 이는 대기내 수증기 에어로졸의 초기농도를 고려하지 못한 입력실수로 여겨진다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

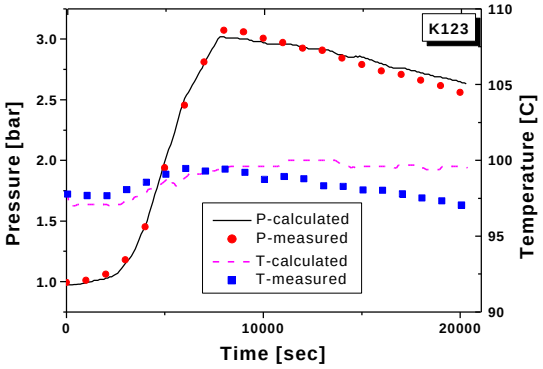
[1] GRS-Cologne (2000), Draft Summary Report: Preparatory workshop on the international standard problem No. 44 exercise.

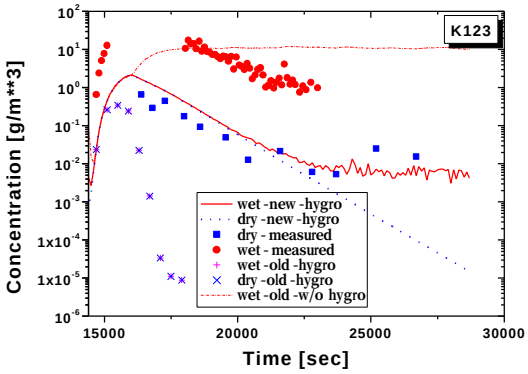
[2] GRS (2000), Draft Specification of the international standard problem ISP No.44.

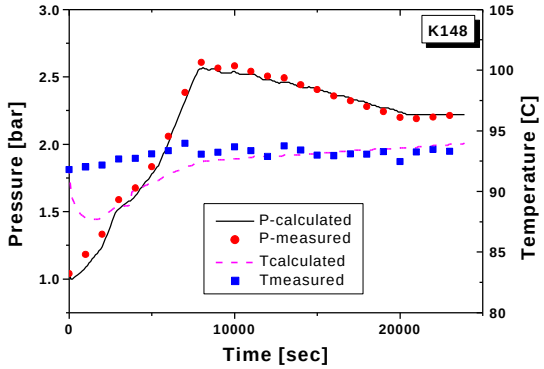
[3] SNL (1990), MELCOR Computer Code Manuals, NUREG/CR -6119, SAND97-2398.

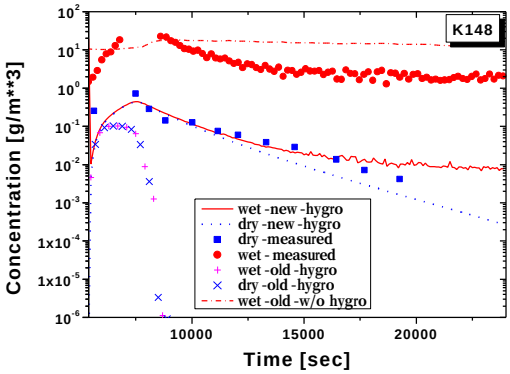
[4] SNL (1997), Code manual for CONTAIN 2.0: A computer code for nuclear reactor containment analysis, NUREG/CR-6553, SAND97-1735.

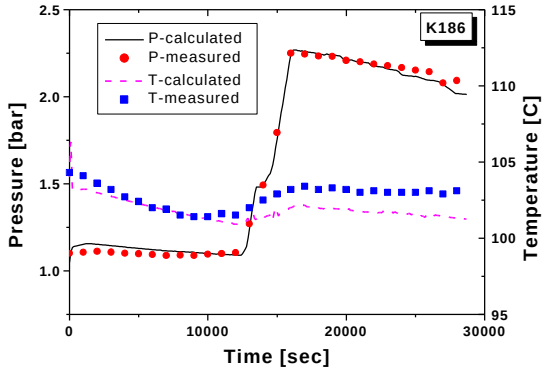
[5] J.W. Park (2000), Analyses of the Accuracy of Calculated Results Obtained by CONTAIN 2.0 Code for the KAEVER Aerosol Tests – ISP44, Proceedings of the KNS ’2000 Spring Meeting.

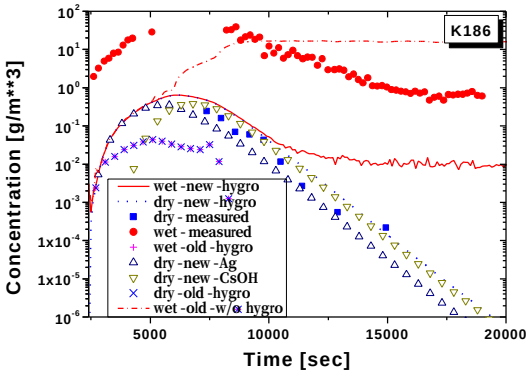


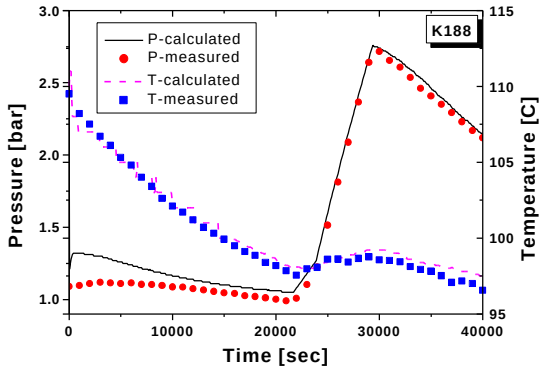












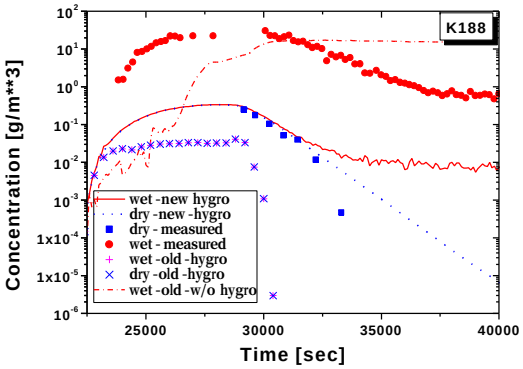


그림.5 실험용기내 압력 및 온도

그림.6 실험용기 대기의 에어로졸 농도