

MELCOR 코드를 이용한 VANAM M3 실험 해석

조 성 원, 김희동
한국원자력연구소
박 재 우
제주대학교

요 약

중대사고시 격납용기내의 열수력거동 및 에어로졸 제거능력을 해석할 수 있는 코드의 현황 파악과 모델의 타당성을 평가하기 위한 ISP 37에 참여, MELCOR 코드를 이용하여 VANAM M3 실험을 해석하였으며 해석결과를 실험과 비교함으로써 코드의 검증과 해석결과의 타당성을 검토하였다.

I. 서론

MELCOR 코드는 SNL(Sandia National Lab)에서 개발중인 중대사고 해석용 종합(Integrated) 코드로서 선원항과 위험도의 계산은 물론 민감도분석과 불확실성에 대한 해석을 용이하게 할 수 있도록 되어 있으며, 또한 코드의 개선이 용이하도록 모듈형태로 구성되어 있다. 가장 최근의 개정판은 Version 1.8.3 이며, 이미 국내에서도 이를 사용하고 있다. 국내에서는 수년전부터 중대사고 실험해석을 통해 코드의 검증작업을 수행하고 있다.

ISP (International Standard Problems)는 원자로 안전성 연구의 일환으로 실험과 해석결과를 비교하기 위해 OECD-CNSI에서 결정되며, 해석코드에 의한 사고모의와 해석결과의 정확성을 판단하고 해석코드의 부족한 부분을 찾아내어 개선하기 위해 수행되는 것이다. ISP 37은 격납용기내에서의 열수력과 에어로졸의 거동에 관한 실험, 특히 수용성 에어로졸의 거동에 중점을 두고 독일의 GRS(Gesellschaft für Analagen- und Reaktorsicherheit)에 의해 Battelle Frankfurt의 BMC(Battelle Model Containment)에서 수행된 VANAM M3 실험의 해석으로 이 실험은 가압기의 SRV(Safety Relief Valve)를 통해 증기와 방사성물질이 격납용기로 방출될 때 격납용기 내의 열수력거동과 에어로졸 제거능력을 측정하고 그 결과를 에어로졸 거동해석용 코드검증에 사용하기 위한 것이다.

VANAM M3 실험과 같이 계획과 측정이 잘 된 실험의 해석을 통하여 코드의 문제점을 발견하고, 검증을 수행할 수 있다. 여기에서는 VANAM M3 실험을 MELCOR 코드를 이용하여 해석하고 결과를 실험결과와 비교함으로써 코드의 검증을 수행하였다.

II. VANAM M3 실험

VANAM 실험은 노심용융을 일으키는 중대사고시 격납용기내의 열수력 거동과 에어로졸의 영향을 상세하게 파악하기 위하여 수행되는 일련의 실험으로 다음과 같은 분야에 중점을 두고 있다. (1)PWR 격납용기 처럼 여러개의 격실로 분리되어 있는 다 격실(multi-compartment)의 상이한 열수력 조건 파악, (2)격실내의 증기응축과 증기응축이 에어로졸의 침전에 미치는 영향, (3)격납용기내에 증기와 fog가 존재할 때 용해성과 비용해성 에어로졸의 거동 비교, (4)수소연소가 에어로졸의 거동에 미치는 영향 파악. VANAM M3 실험에서는 특히 제한된

증기공급시의 용해성 에어로졸의 거동에 초점을 맞추고 있다. 즉 원래 작고 가벼운 NaOH 입자가 증기응축에 의한 fog에 용해되어 입자의 크기가 급격히 커짐으로써 침전이 많이 일어나는 것을 실험한 것으로 비용해성 에어로졸인 SnO₂를 이용한 M2 실험과 비교된다.

가압경수로의 격납용기를 도의한 BMC는 그림 1 과 같이 원통 대칭형으로서 각 격실간에는 보강콘크리트(reinforced concrete)로 되어있는 차단막과 통로가 있으며, 전체적이 626 m³이다. 중앙부분의 격실 R5와 R3를 통해 공기와 수증기를 주입시키며, 격실 R9의 하단부부(R9.4)를 통해 공기가 제거되도록 되어있다. 또한 응축된 물은 각 격실의 하단부에 있는 sump로 모이도록 되어 있다.

실험은 다음같이 6 단계로 수행되었다. 1단계는 격납용기 벽면 가열단계로 고온의 증기를 격실 R5를 통해 주입시키며, 격실 R9.4를 통해 공기를 제거시킴으로서 격납용기의 낮은 부분까지도 가열시킬 수 있도록 하고 있다. 이때 격납용기내의 압력이 1.25기압을 유지시킬 수 있도록 증기의 유입량을 조절한다. 2단계는 1차 에어로졸 주입단계로서 격실 R5를 통해 에어로졸을 공기-수증기의 혼합물과 함께 주입시킨다. 이때 압력을 조절하기 위한 수단을 취하지 않으며, 압력은 2.05기압까지 상승한다. 3단계는 자연 응축단계로서 모든 주입을 정지시키므로 외부 벽면에 수증기의 응축이 발생하여 격납용기 내의 압력이 1.25기압까지 떨어진다. 4단계는 2차 에어로졸 주입단계로 격실 R5를 통해 공기-수증기의 혼합물과 함께 에어로졸을 주입시키며, 이때 압력 상승이 발생한다. 5단계는 수증기의 주입단계로 모든 주입을 정지시킨 후 격실 R3를 통해 수증기를 주입시킨다. 이때 압력이 1.75기압까지 상승한다. 마지막 6단계에서는 수증기의 주입을 격실 R5로 바꾸므로써 격납용기 내의 압력이 1.7기압으로 안정된다.

실험결과에 의하면 수증기-공기의 혼합물이 유입되는 경우에 유입위치보다 높은 곳에서는 혼합이 잘 이루어 지므로 고온,고습을 유지하지만 낮은 곳은 유통이 매우 적으므로 높이에 따라 온도와 수증기의 분포가 다르게 나타나는 층화(stratification)현상을 보인다. 따라서 에어로졸의 농도 분포도 높은 위치에서는 모두 동일하게 높지만 낮은 위치에서는 격실에 따라 다른 분포를 보이고 있다.

III. MELCOR 실험해석

ISP 37은 격납용기내 대기의 열수력거동과 가압기의 SRV을 통해 방출된 에어로졸의 격납용기내 공간분포와 침전에 관한 해석에 주안점을 두고 있다. 다시 말해서 격납용기내의 열수력 및 에어로졸 거동을 해석할 수 있는 코드현황과 다음과 같은 현상 파악에 중점을 두고 있다. (1)다 격실에 의한 기하학적 영향, (2)대기의 층화현상, (3)자연순환 loop에 의한 대기의 혼합, (4)열적평형, (5)구조물의 열평형, (6)벽면에서의 응축, (7)체적내의 응축, (8)에어로졸의 분포 및 침전, (9)수용성 에어로졸의 성분, (10)에어로졸 표면의 증기응축, (10)실험의 정확도 검증 등

MELCOR 코드로 실험해석을 수행하기 위해 Control volume은 그림 2와 같이 11개의 격실과 5개의 sump, 3개의 주위물질로 하였으며, control volume 사이를 연결시켜 주는 Flow path는 28개, Heat structure는 51개로 하였다. Heat structure 중에서 cone 모양과 같이 입력이 복잡한 것은 간단하게 모의하였으며, 초기 열수력 조건과 수증기, 공기, 에어로졸의 주입과 제거는 실험에서 측정된 자료를 수정없이 사용하였다. 실험해석은 알고있는 모든 자료를 이용하여 입력을 작성하고 예비계산을 수행하여 입력의 오류를 파악한 후에 에어로졸의 입력없이 열수력거동을 모의한다. 열수력거동 모의결과와의 타당성을 검토한 후에 에어로졸의 입력을 사용한 최종계산을 수행한다. 이와같이 열수력거동과 에어로졸의 거동을 분리시키는 이유는 빠른 시간내에 열수력에 관련된 입력들의 오류를 판단하기 위해서다.

ISP 37 해석에 사용된 입력의 대부분이 GRS에서 권고한 값들을 이용하였기 때문에 실험과 큰 차이를 보이지 않을 것으로 예상되었지만, 권고한 수증기 주입량을 이용하여 계산한 결과 그림 3에서 보는 바와 같이 실험 1단계에서의 압력이 측정치와 다르게 나타났기 때문에 실험에서와 같이 1.25기압의 압력을 유지하도록 그림 4와 같이 수증기의 주입량을 조절하였다. 측정자료중 일부만이 그림형태로 입수되었으므로 해석결과와의 비교가 매우 어려웠다. 따라서 본 해석에서는 실험단계별 격납용기내의 압력과 R9-DOM의 온도와 에어로졸의 농도만을 측정치와 비교하여 입력의 오류를 판단하였다.

MELCOR 코드의 계산시간은 에어로졸의 계산유무와 사용자의 time step 조절에 따라 큰 차이를 보인다. 즉 에어로졸의 계산에 많은 시간이 소요되고, 사용자의 선택에 따라 계산시간을 축소시킬 수 있지만 계산결과는 전혀 다른 경향을 보여 줄 수도 있다. MELCOR 코드로 모의한 해석결과중 일부를 그림 5와 6에서 보여주고 있다. 그림 5는 격실간의 유체속도중 일부를 보여주고 있으며, 이에는 많은 진동이 발생하고 있음을 볼 수 있다. 이와같이 격실간의 유체이동에 진동이 발생하여 유체의 흐름이 많은 경우에 두 격실간에 혼합이 잘 이루어지므로 실험에서와 같은 격실간의 층화현상을 모의할 수 없지만, time step을 줄여줌으로서 수증기의 주입 높이보다 낮은 위치에서의 층화현상의 모의가 가능하여 진다. 그림 6은 여러 격실에서의 에어로졸의 농도를 보여주고 있다. 에어로졸의 농도는 해석결과가 측정치 보다 크게 나타나는 것을 알았으며, 이는 MELCOR 코드에서 에어로졸의 수용성을 취급하지 못하였기 때문으로 판단하였다.

IV. 해석결과의 비교 및 검토

'96.2월 계산결과의 비교.검토를 위한 회의가 독일에서 개최되었으므로, 우리의 해석결과에 대한 실험치와의 비교뿐만 아니라 다른코드로 계산된 결과와의 비교자료를 얻을 수 있었다. 표 1에 ISP 37에 사용된 코드들을 참가한 연구소에 따른 해석범위를 보여주고 있으며, 격납용기내의 압력, 상부 Dome과 R3의 가스온도, Dome 내의 에어로졸의 농도 등 가장 중요한 해석결과들을 그림 7-10에 보여주고 있다. 그림 7a,b에서는 격납용기내의 압력중에서 MELCOR 코드로 모의한 결과를 보여주고 있으며, 그림 8a,b에서는 R9-DOM내의 온도, 그리고 그림 9a,b에서는 층화현상이 나타나는 R3 내의 온도를 보여주고 있다. 그리고 그림 10a,b에서는 코드와 연구소에 따른 R9-DOM의 에어로졸 농도분포의 해석결과를 보여주고 있다.

V. 결론

MELCOR 코드를 이용하여 에어로졸 실험의 격납용기내 열수력거동과 에어로졸의 제거를 모의하는 데 큰 문제가 없었으며, VANAM M3 해석결과에서 에어로졸 계산의 불확실성이 대부분 열수력거동의 불확실성에서 유래됨을 알 수 있었다.

MELCOR 코드의 계산결과가 다른 코드에 비해 사용자에게 따른 효과가 적게 나타나고 있으므로 매우 안정된 코드라고 할 수 있다. 그러나 ISP 37을 통해 MELCOR 코드의 다음과 같은 문제점이 발견되었다.

1. 에어로졸의 계산에 있어서 물에 용해되는 효과를 고려하지 못하므로 침전을 과소평가한다. SNL에서 에어로졸 용해모델을 추가시킨 새로운 version의 코드를 사용하여 계산하였다고 하지만 그 효과가 거의 나타나지 않았다. 이미 에어로졸의 용해에 관한 모델을 사용하고 있는 코드(FIPLOC)가 있으므로 MELCOR 코드에서도 빠른 시일안에 이 모델을 추가시킬 것으로 보인다.
2. MELCOR의 계산결과가 Time step이 커지면 계산결과의 신뢰도가 낮아진다. Time step의 설정에 따라 격실간의 유체이동이 안정되어 격실간의 층화현상을 모의할 수 있다.

Table 1 Participants and codes.

Code	Participating Institution	ISP 17 Abbreviation	Country	Thermal Hydraulic	Aerocoel
CONTAIN	VIEMAT	VIEMAT	Japan	x	x
	ECN	ECN	Netherlands	x	x
	Kurchatov Inst.	KIKON	Russia	x	x
	VUBE	VUBECOM	Slovakia	x	x
	FEK	FEK	Germany	x	x
MELCOR	CIEMAT	CIEMAT	Spain	x	x
	ENEA	ENEA	Italy	x	x
	KAERI	KAERI	Korea	x	x
	Kurchatov Inst.	KI-MEL	Russia	x	x
	NUPEC	NUPEL	Japan	x	x
	Russ. Acad. of Sci.	RAS	Russia	x	x
	Sandia Nat. Lab.	SNL	USA	x	x
	Swedish Eco Safe	STU	Sweden	x	x
	VUBE	VUBEMEL	Slovakia	x	x
	Russian Institute of Atomic Reactor	RIAR	Russia	x	x
PIPLCO	GRS/PSN	GRS/PSN-F1	Germany	x	x
	GRS/PSN	GRS/PSN-Fe	Germany	x	x
	FE-1	FE-1	Germany	x	x
	FE-2	FE-2	Germany	x	x
	JRC	JRC	European Community	x	x
HALCO	GRS/PSN	GRS/PSN-Fo	Germany	x	
DOTHIC	Battelle	Battelle	Germany	x	
FLMO	Uppsala	UPIS	Italy	x	
ECART	JA-Psa/ENEL		Italy	x	x
MACRES	NUPEC	NUF Ma	Japan	x	
MOSAIC	FE	FE	Germany	x	
REMOVAL	JAERI	JAERI	Japan	x	

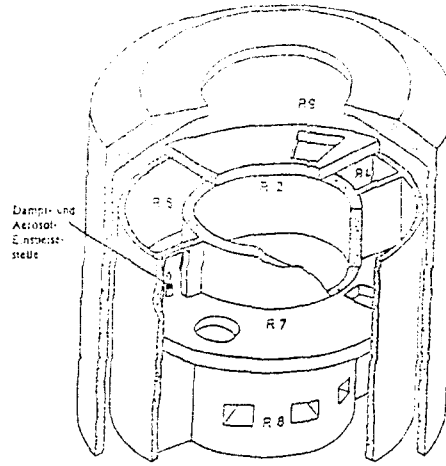


Fig. 1 Battelle model containment.

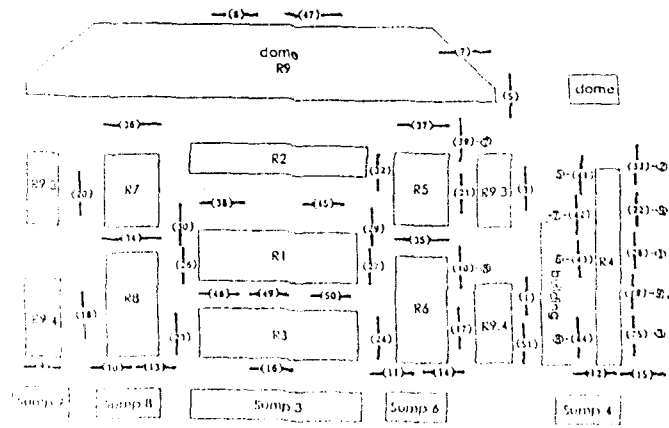


Fig. 2 Nodalization of VANAM M3 experiment.

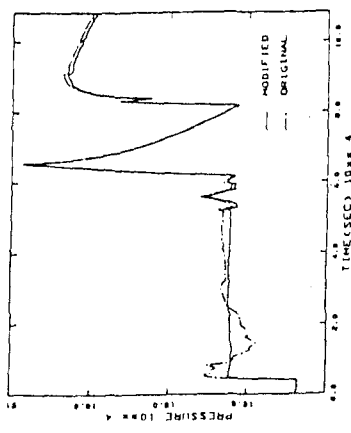


Fig. 3 Calculated containment pressure.

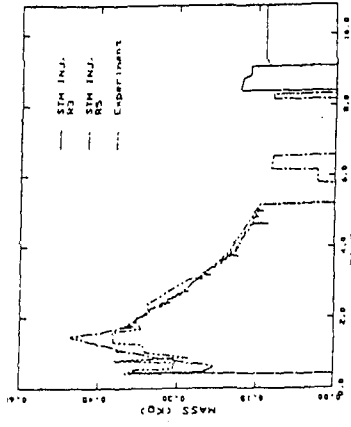


Fig. 4 Steam injection rate.

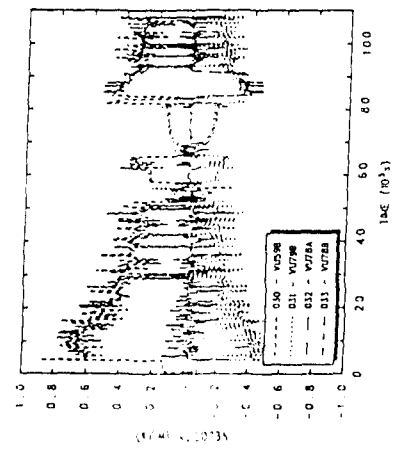


Fig. 5 Gas flow rate

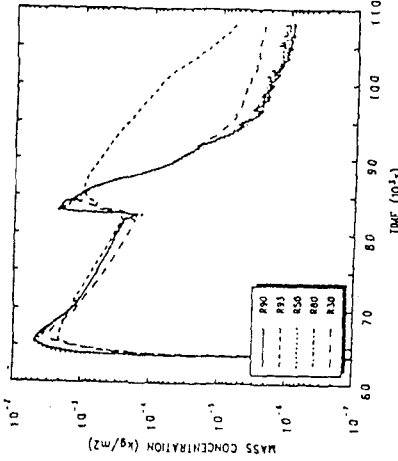


Fig. 6 Aerosol concentration in the containment.

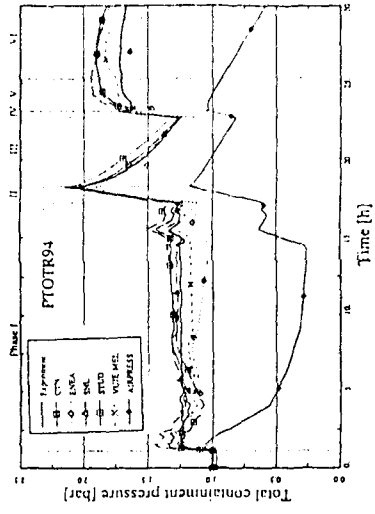


Fig. 7 a Calculated containment pressure by MELCOR group

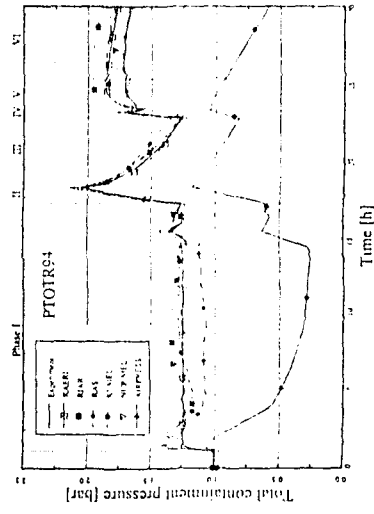


Fig. 7 b Calculated containment pressure by MELCOR group.

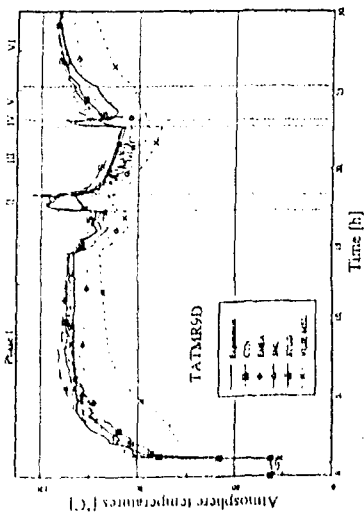


Fig 8 a Calculated gas temperature R9-DOM by MELCOR. prop

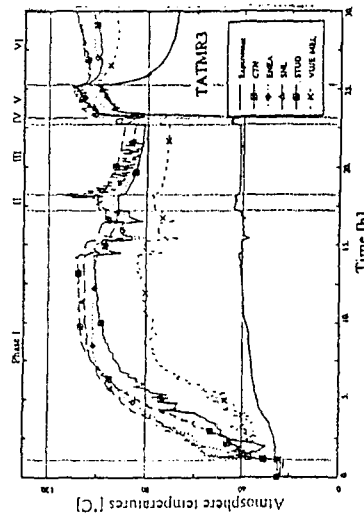


Fig 9 a Calculated gas temperature R3 by MELCOR. prop

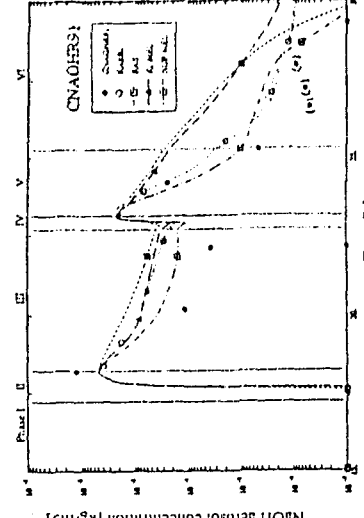


Fig 10 a Aerosol concentration in the dome (MELCOR)

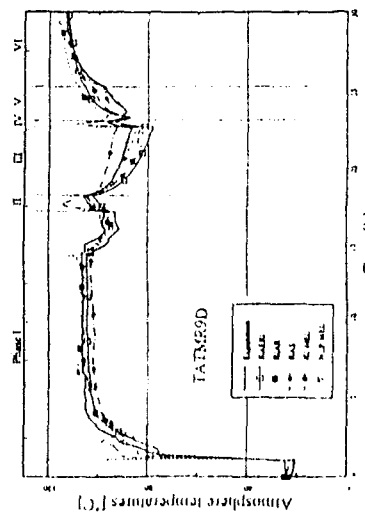


Fig 8 b Calculated gas temperature R9-DOM by MELCOR. prop

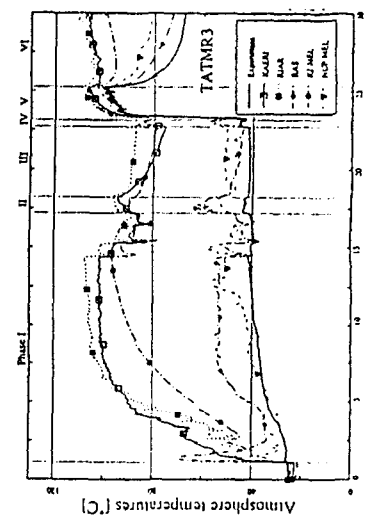


Fig 9 b Calculated gas temperature R3 by MELCOR. prop

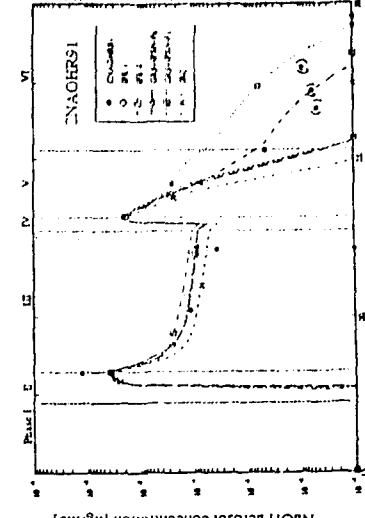


Fig 10 b Aerosol concentration in the dome (FILO)