

‘96 춘계학술발표회 논문집

한국원자력학회

MELCOR 1.8.3을 이용한 NUPEC 수소분포실험 분석

최종수, 이종인

한국원자력안전기술원

요 약

PWR 원전의 중대사고시 격납건물내 수소거동을 모의한 NUPEC의 수소분포실험 결과를 MELCOR 1.8.3 코드를 이용하여 검증 차원의 비교분석을 수행하였다. 이 연구에서는 정확한 실험조건 및 코드의 특성을 반영하여 실험에서의 유동 및 열역학적 조건을 모두 모의하였다. 이를 통해 실험에서 나타난 수소거동 특성을 재확인하고, MELCOR 코드의 분석능력 및 특성을 평가하였다. ISP-35에 대한 비교분석을 통해 다격실 격납건물내 중대사고시 수소 혼합 및 분포 현상에 대한 MELCOR의 분석능력을 확인하였다.

1. 서 론

원전의 노심손상사고시에는 상당량의 수소가 발생되며 방출된 수소는 격납건물내의 혼합과정 중에서 높은 농도로 야기된 폭발적 연소 및 이로 인한 충격파로 인해 내부 구조물 손상 및 사고완화계통의 파손의 가능성이 있다. 이에 대한 우려로 미국 NRC는 중대사고 수소제어 요건을 발효하였으며 국내에서도 이를 반영하여 신규원전의 중대사고 수소제어 능력 평가 및 수소제어설비 설치를 추진하고 있다.

격납건물내 수소거동은 유체역학 및 열역학적 특성에 영향 줄 수 있는 요인인 내부격실의 구조, 사고 시나리오, 안전계통이 복합적으로 영향이 미치는 복잡한 양상을 갖는다. 일반적으로 전산코드를 이용한 분석과정에서는 실험결과 및 Benchmark problem에 대한 비교 계산을 통해 계산능력 및 특성을 파악하는 검증계산의 역할이 중요하다. OECD/

NEA의 ISP (International Standard Problem)는 전산코드 검증에 적절한 실험결과들로서 ISP-35 “NUPEC Hydrogen Distribution Test M-7-1”은 PWR 원전에서의 중대사고시 격납건물내의 고온 수증기와 수소의 방출, 살수계통의 작동에 따른 수소농도의 변화 및 열력학적 상태를 관측한 실험이다. ISP-35에 대한 실험결과 평가 및 전산코드 비교분석결과로 자연순환과 고온 증기 및 살수의 영향이 수소혼합을 보다 원활하게 해 줌을 보여주고 있고, 관련 전산코드들이 수소거동을 비교적 적절히 모의하고 있다고 설명하고 있다 [2].

MELCOR 코드는 NRC 중대사고연구의 일환으로 SNL에서 개발한 코드로서 관련 중대사고 현상들을 신속히 평가를 할 수 있도록 한 종합적 중대사고 해석용 전산코드이다. 현재 MELCOR 1.8.3이 가장 최근에 발표된 버전이며 지속적인 개선이 이루어지고 있다.

2. NUPEC 수소분포실험 개요

NUPEC의 수소분포실험은 일본의 4-loop PWR 원전의 1/4 축척 모형 격납용기 실험장치를 사용한 다양한 조건에서의 실험들로서, 이 중의 한 실험인 ISP-35는 100% Zr-H₂O 반응에 의한 수소 발생량을 He 기체로 모의하고 대표적 사고 상황을 실험조건으로 설정하고 있다. 이 실험에서 사용한 모형 격납용기는 그림 1과 같으며 표 1의 크기를 갖는다. 이 모형 격납용기에는 25개의 격실 및 66개 유로가 있으며 격실별 온도 및 헬륨농도, 압력 및 주요 벽면온도를 계측할 수 있다. 이에 대한 자세한 내용은 참고문헌 [1]에서 확인할 수 있으며, 그림 1과 2를 통해 격실 및 유로의 관계를 간략히 확인할 수 있을 것이다.

ISP-35의 실험조건은 표 2와 같이 고온 고압 고습의 초기조건에서 그림 3의 유입율에 따라 헬륨가스 및 수증기의 유입 및 상대적으로 차가운 살수가 주입된다.

3. 분석 및 논의

3.1 MELCOR 1.8.3의 입력 모델

본 분석은 참고문헌 [1]에서 제시한 25개 격실을 바탕으로 그림 2와 같은 noding scheme을 채택하였으며, 66개의 유로 및 모든 heat structure의 초기조건과 경계조건을 실험조건과 동일하게 모의하였다. 이 과정에서 각 유로별 flow loss coefficient 및 유동 길이는 유로의 기하학적 형상을 고려한 수계산 결과로 결정하였으며, 단열재를 포함한 heat structure의 열전달을 모의 및 전산코드내 열전달 모델을 근간한 분석이 이루어졌다.

해당 실험조건은 격실내 열역학적 상태, 유로의 유체역학적 흐름, 구조물의 열전달, 살수계통의 열역학적 요인에만 주로 영향 받으므로 해당 현상 관련 입력변수 및 모델의 적용성을 다양한 민감도분석을 통해 사전 검토가 있었다. 이를 통해 실험조건에 부합되는 다음과 같은 가정사항들을 입력모델 수립과정에서 반영하였다.

- 5%의 살수 유량은 벽면과의 충돌로 인해 살수효과에 의한 압력감소 효과를 상실하고 일부 벽면에 수막을 형성함. (95%의 살수유량을 고려하였으며, HS package의 film tracking 모델을 사용하여 해당 heat structure에서의 수막에 의한 열전달을 고려해 줌.)
- 살수에 의한 강한 난류로 대류열전달율을 증가됨을 고려해 줌. (살수 상황에서의 대류 열전달을 코드내에서 모의하지 않으므로 인위적으로 증가된 대류열전달율을 적용함.)
- 16번 격실의 유동을 효과적으로 모의하기 위해 noding scheme을 변경함. (일반적 1-D lumped parametric code들은 16번 격실과 같은 “dead-end compartment” 내에서의 유동을 극히 under-estimate 한다. 16번 및 22번 격실에 대해 각각 두개의 node가 되도록 함.)

3.2 분석결과 및 논의

그림 4는 격납용기 dome내의 압력에 대한 MELCOR 계산결과가 실험결과와 일치함을 보여주고 있다. 그림 5는 대부분의 부피를 차지하는 25번 격실 및 가장 높은 농도를 보이는 2개의 격실에서의 헬륨농도를 비교한 결과를 보여주고 있다. 그림 6은 열역학적 상태에 영향이 큰 25번 격실, 고온의 증기가 방출되는 8번 격실과 공기 유동이 적은 바닥층 외곽 격실에서의 대기온도를 비교하고 있다. 그림 7은 열용량이 가장 큰 25번 격실의 dome과 측벽의 온도, 바닥층 외벽의 온도를 계산한 결과를 보여주고 있다.

이번 계산결과 및 그 외의 민감도분석을 통해 아래와 같은 경향을 파악할 수 있었다.

- 거의 모든 격실들에서 헬륨농도, 대기온도, 구조물 온도에 대한 계산결과에서 실험결과를 잘 예측하고 있다. 이 계산결과를 볼 때, 살수에 의해 대류 열전달율이 매우 높음을 간접적으로 확인할 수 있었다.
- 헬륨기체의 농도는 유로를 통한 유체의 유동에 주로 영향 받으며 유로를 통한 유동은 유로의 form loss coefficient에 매우 민감함을 알 수 있다.
- 격실을 세분화하는 noding scheme의 적용은 “dead-end compartment”인 16번에서의 헬륨 농도 예측을 보다 적절히 모의할 수 있게 해준다.

4. 결 론

ISP-35의 실험결과를 볼 때, 고온의 수증기 방출 및 저온의 살수의 작동이 수소혼합을 원활하게 해 줌을 알 수 있으며, 이에 대한 MELCOR 계산을 통해 MELCOR 1.8.3 코드가 격납건물내의 수소거동에 대한 계산 능력을 갖고 있음을 확인할 수 있었다.

본 분석에서는 MELCOR 계산결과가 실험결과를 매우 잘 예측하고 있음을 보여주고 있으나 유로 특성 변수 및 살수작동시의 열전달 특성을 결정하는 어려움과 noding scheme에 따른 유동의 변화를 확인할 수 있었다.

참고문헌

- [1] NUPEC, "Specification of ISP-35, NUPEC's Hydrogen Mixing and Distribution Test - Test M-7-1", ISP-35-027, Rev.1, May, 1993.
- [2] NUPEC, "Comparison Report on ISP-35, NUPEC's Hydrogen Mixing and Distribution Test - Test M-7-1", ISP-35-092, Rev.3, May, 1994.
- [3] SNL, "MELCOR Computer Code Manuals", NUREG/CR-6119, March, 1995.
- [4] 김한철 외, "OECD ISP-35 NUPEC 수소분포실험", 한국원자력학회 '94 추계학술발표회 논문집, p.483, 1994년 10월.

표 1. 모형 격납용기의 크기

항 목	크 기
• 높이	17.4 m
• 내부 직경	10.8 m
• 내부 용적	1300 m ³
• 벽면 두께	
- 내부구조벽	4.5 mm
- 격납용기	12 mm
- 최하층 바닥면	16 mm (EL. 3200)
- 중간층 바닥면	12 mm (EL. 5425)
- 상층 바닥면	12 mm (EL. 7325)

표 2. ISP-35의 실험조건

● 초기조건	
격납용기 Dome 압력	139.7 kPa
격납용기 Dome 온도	67.3 °C
격납용기 습도	100 %
외부대기 온도	11 °C
● 실험조건 (0 - 30분)	
He 유량 (14 °C)	0-0.03-0 kg/s
증기유량 (165 °C)	0.08-0.03 kg/s
살수유량 (40 °C)	19.4 kg/s
살수 droplet 크기	0.75 mm

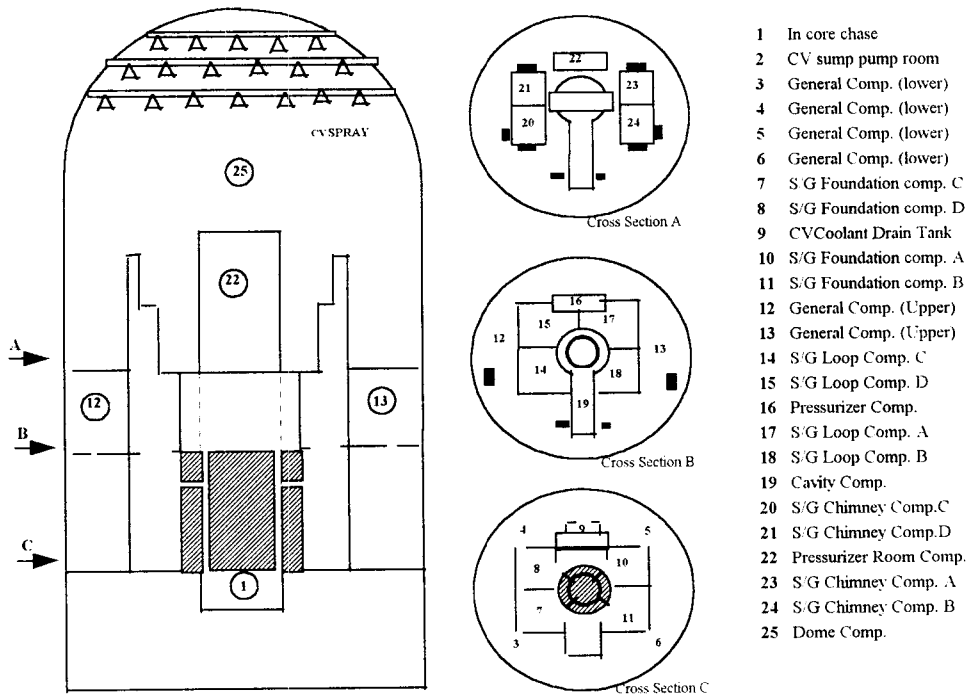


그림 1. 모형 격납용기의 내부 구조

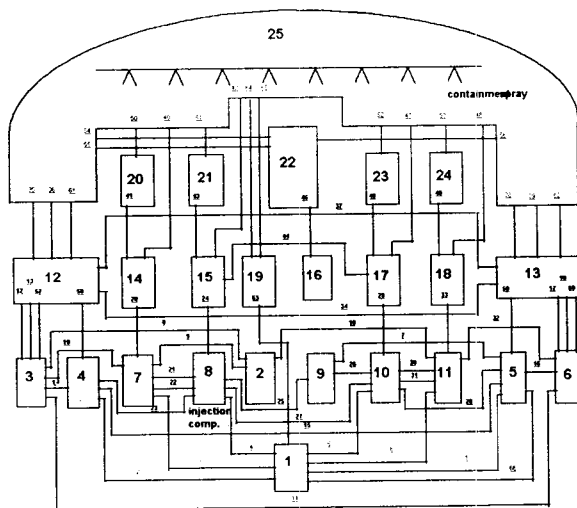


그림 2. 계산 nodding scheme

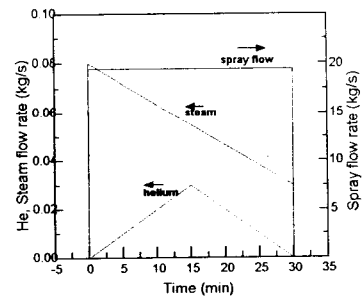


그림 3. He, 증기 및 살수 유량

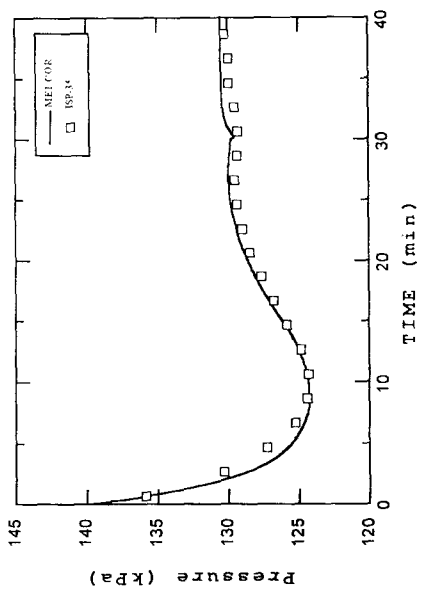


그림 4. 귀남용기 양량의 비교

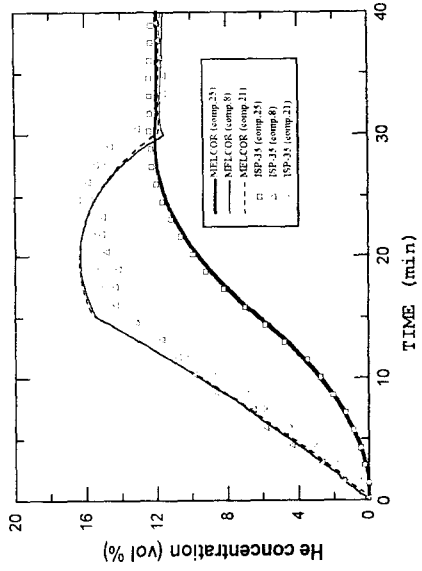


그림 5. 주요 격실내 He 농도의 비교

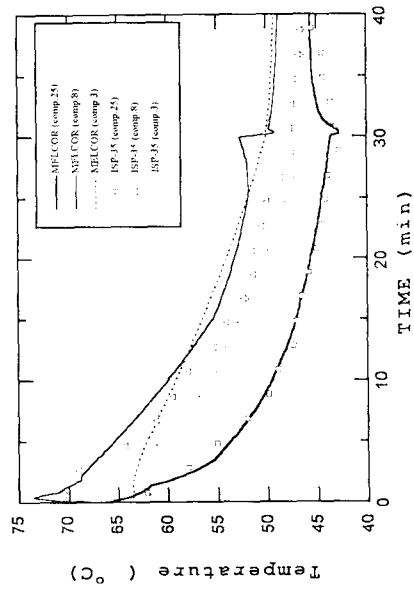


그림 6. 주요 격실내 공기온도의 비교

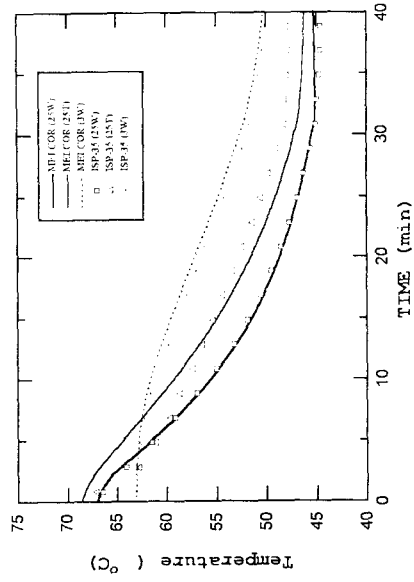


그림 7. 주요 구조별내 온도도의 비교