

**MELCOR 코드를 이용한 핵분열생성물의 거동해석**

조 성원, 김희동  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

**요약**

중대사고시 핵연료와 핵분열생성물의 거동을 파악하기 위한 PHEBUS FPT1 실험을 MELCOR 코드 version 1.8.4로 해석하고, 코드에 내장되어 있는 CORSOR 모델을 기본으로 요오드의 방출과 이송에 대한 해석을 수행하였다. 요오드의 방출에 대해서는 코드에 내장되어 있는 CORSOR-M, CORSOR-BOOTH 등의 방출모델과 CORSOR 모델의 방출분율의 변경에 따른 민감도 분석을 수행하였다. 격납용기내의 거동에 대하여서는 수용성(Hygroscopic) 에어로졸에 관한 모델의 효과를 검토하였다.

**1. 서론**

프랑스의 Cadarache 연구소에서 수행 중인 PHEBUS FP 프로그램 [1]은 PWR의 중대사고시 핵연료의 손상(degradation)과 함께 핵분열생성물(FP)과 에어로졸의 방출, 이송, 부착 등에 관한 물리, 화학적 성질을 파악하는 것으로서 두 번째 실험인 FPT1 실험은 1996.7.26에 수행되었다. 측정자료 중 열수력에 관한 일부 자료 [2]가 97년5월에 입수되었고, 실험해석은 MELCOR 코드 1.8.3 [3]과 1.8.4 [4]를 이용하여 수행하였다. FPT1 실험의 열수력 거동 해석은 실험을 잘 모의하고 있으며, MELCOR 코드의 version에 따른 해석결과의 차이는 매우 적었다. 그러나 핵분열생성물의 방출과 이송에 관한 해석은 측정자료를 입수하지 못하여 전반적인 모델검증은 수행할 수 없었지만 위해도에 미치는 영향이 크기 때문에 매우 중요하게 취급되는 핵종인 세슘(Cs)과 요오드( $I_2$ )는 일부 측정자료 [5, 6]를 이용하여 해석결과를 분석할 수 있었다.

본 논문에서는 비교적 측정결과가 많은 요오드의 해석결과를 기술하고 있다. MELCOR 코드에 의한 핵분열생성물의 방출과 이송에 대한 해석은 CORSOR 모델에 의한 핵분열생성물의 방출을 기본으로 열수력거동 해석에서 만족할 만한 결과를 얻은 것으로 판단되는 입력 [6]을 이용하여 수행하였고, 코드에 내장되어 있는 CORSOR-M, CORSOR-BOOTH 등의 방출모델과 CORSOR 모델의 방출분율의 변경에 따른 민감도분석을 수행하였다. 또한 격납용기내의 요오드 제거를 적절히 모의하기 위하여 수용성(Hygroscopic) 에어로졸 제거에 관련된 모델을 적용

시킨 결과가 측정치와 큰 차이를 보이고 있으므로 수용성 에어로졸의 거동을 파악하기 위한 VANAM 실험의 해석[7]을 통해 모델을 검토하였다.

MELCOR 코드에 의한 해석결과에서 CORSOR와 CORSOR-M 모델은 핵연료에서 방출되는 요오드의 양이 실험에 비해 많은 반면에 CORSOR-BOOTH 모델에서는 적었다. 또한 격납용기내의 거동에서 수용성 에어로졸에 관련된 모델을 사용하는 경우에 요오드의 제거가 과다하게 이루어지고 있었다.

## 2. 해석결과 및 검토

### 가. 요오드의 방출 및 일차계통내에서의 거동

CORSOR 모델로 해석된 요오드의 일차계통내 위치에 따른 농도분포를 그림 1에서 보여주고 있다. 요오드의 방출은 핵연료 피복재가 파손되는 약 8200초 부근에서 갭 방출(gap release)이 이루어지며, 이 이후에는 핵연료의 온도에 따른 방출 분율에 의해 지배된다. 해석결과에 의하면 노심에서 방출된 핵분열생성물은 1초 이내의 짧은 시간에 일차계통으로 전파되며, 수초내에 모두 격납용기로 이송된다. 즉 핵연료에서 방출된 핵분열생성물이 매우 짧은 시간내에 일차계통으로 전파되므로 노심내의 농도분포를 이용하여 시간당 방출량과 부착에 의한 감소량을 파악할 수 있다. 구조물에서의 부착은 비교적 높은 온도(700 °C)를 유지하는 노심과 C-POINT 사이에서는 거의 일어나지 않고 온도 구배가 큰 증기발생기에서 30% 이상의 많은 양이 부착하므로, 노심과 C-POINT에서는 동일한 농도를 보여주는 반면에 G-POINT에서는 감소한다.

요오드의 누적방출분율을 그림 2에서 실험결과 비교하여 보여주고 있다. 여기서 보여주는 실험결과는 아직 정확하지 못하고 단지 경향만을 파악할 수 있을 정도이고, 20% 정도가 증기발생기에 부착되었다는 가정을 이용한 것이다. 해석에서 요오드의 누적방출량은 약 87% 정도로 높으며, 급격한 산화반응이 일어난 11300초 부근에서의 방출량이 매우 높다.

### 나. 격납용기에서의 요오드의 거동

핵연료로부터의 방출을 포함하여 일차계통내와 격납용기내의 거동을 종합적으로 판단할 수 있는 격납용기내의 농도를 그림 3에서, 격납용기 입구인 G-POINT에서의 농도변화를 그림 4에서 측정치와 비교하여 보여주고 있다.

CORSOR 모델을 사용하는 경우에 11300초 부근에서 방출량이 많으므로 11000 - 14000초 사이에서 요오드의 농도를 높게 예측하고 있으며, 이는 약 2000 °C 부근에서의 방출분율이 높기 때문으로 생각된다. 또한 16000 - 17000초 사이에서 핵연료의 온도가 높기 때문에 방

출분율이 높음에도 불구하고 농도가 낮은 것은 16000초 이전에 방출된 양이 너무 많으므로 핵연료내에 잔류 재고량이 적기 때문에 방출량이 줄어들었기 때문이다. 요오드가 수용성 물질임에도 불구하고 수용성 에어로졸의 모델을 사용하지 않았기 때문에 17000초 이후의 감소율이 실험에서 측정된 것보다 적다.

#### 다. 민감도 분석

해석에 의한 요오드의 누적 방출분율과 격납용기내의 농도변화가 측정치와 많은 차이를 보이고 있다. 코드내에 내장되어 있는 CORSOR-M과 CORSOR-BOOTH 모델을 이용한 민감도 분석을 수행함으로써 모델에 따른 효과를 파악하고자 노력하였으며, 해석결과는 그림 2-4에 기본 해석결과와 함께 보여주고 있다.

CORSOR-M 모델을 사용하는 경우 시간에 따른 방출량과 누적방출분율이 CORSOR의 경우와 동일하다. 반면에 CORSOR-BOOTH 모델의 경우는 16000초 이전에는 낮은 방출량을 나타내고, 16000초 이전의 방출량이 적기 때문에 용융과 재배치가 발생하는 17000초 부근의 높은 온도에서 방출량이 많음을 볼 수 있다. 또한 누적방출분율도 약 50% 정도로 CORSOR나 CORSOR-M 모델의 약 87% 정도에 비해 매우 낮다.

CORSOR나 CORSOR-M 모델을 이용한 해석에서 요오드의 격납용기내의 농도는 15000초 부근에서 측정치와 거의 비슷한 해석결과를 얻은 반면에 CORSOR-BOOTH 모델을 사용하는 경우에는 측정치의 약 1/4 정도로 매우 낮다. 이와 같은 현상은 앞에서 언급한 방출율의 차이에서 유래된 것으로 정확한 방출량의 파악이 필요하다.

격납용기내 요오드의 거동을 해석하기 위하여 MELCOR 코드에 새로 추가된 수용성 에어로졸의 제거 모델을 CORSOR 모델에 적용한 결과를 그림 5에 보여주고 있다. 수용성 에어로졸의 제거모델을 적용하는 경우에 예상한 바와 같이 물방울(fog)의 생성이 증가하여 에어로졸의 제거를 촉진시키고 있으나 FPT1의 해석에서는 제거율이 너무 크기 때문에 격납용기내의 농도가 매우 낮게 나타났음을 알 수 있다. 모델의 타당성을 확인하기 위하여 수용성 에어로졸의 거동을 모의한 VANAM 실험의 해석에 적용시킨 결과 그림 6에서 보여주고 있는 바와 같이 매우 높은 제거효과에 의해 매우 낮은 농도를 보여주고 있다. 따라서 현재의 상태에서는 MELCOR 코드의 수용성 에어로졸에 관련된 모델을 적용하는 경우 제거율이 너무 높기 때문에 실험결과를 적절히 모의하지 못하므로 모델의 개선이 이루어질 때까지는 적용하지 않는 것이 바람직하다.

CORSOR 모델의 해석에서 2000°C 부근의 방출분율이 높은 것으로 판단되었기 때문에 방출분율을 변경하여 측정치와 유사한 결과를 얻도록 노력하여 보았다. CORSOR 모델의 방출분율을 여러가지로 변경시켜 민감도분석을 수행한 결과중에서 1400 °C와 2100 °C 사이에서의 방출분율을 1/2로 축소시키고 증기발생기에서의 부착율을 20%로 감소시킨 경우의 해석결과가 실험결과와 가장 근접하였다. 이와 같이 방출분율과 부착율을 감소시킨 해석결과를 그림 7에 보여주고 있다.

### 3. 결론

요오드의 방출을 예측하기 위해서는 온도에 따른 방출분율과 핵연료 열수력 거동의 모의가 정확하여야 하며, MELCOR 1.8.4를 이용한 요오드의 방출 및 이송에 관한 해석은 성공적으로 수행되었다.

실험결과를 획득한 후에 방출분율과 침전에 대하여 재검토가 요망된다. MELCOR 1.8.4에서 2000°C 부근의 요오드 방출분율은 CORSOR와 CORSOR-M 모델에서는 높으며 CORSOR-BOOTH 모델에서는 낮은 것으로 보이며, 증기발생기내의 요오드 침전은 실험에서 약 20% 정도로 보이지만 해석에서는 30% 이상으로 많이 일어나고 있다.

요오드와 같은 수용성 에어로졸의 거동해석에 있어서는 수용성 에어로졸의 제거에 관한 모델을 적용시켜야 하지만, MELCOR 1.8.4에 내장되어 있는 모델에서는 제거량이 과다하므로 많은 검토와 코드의 개선이 요구된다.

### 참고문헌

1. Von der HARDT, et al. "The PHEBUS FP Severe Accident Experiment Program", Nuclear. Safety 35(2) (1994).
2. B.Berthet, et al. "FPT1 Quick Look Report" Note Technique LERES No 55/96, PF IP/96/310.
3. 조성원, 홍성완 "MELCOR 코드를 이용한 PHEBUS FPT1 실험해석", 원자력학회 '97추계 학술발표회, 726p, Oct.1997.
4. 조성원, 김희동 "MELCOR 1.8.4를 이용한 PHEBUS FPT1 실험해석", KAERI/TR-989/98, Mar. 1998.
5. L.Codron "Minutes of the 26th PHEBUS FP Technical Group - ANNEX 4", Aix-en-Provence, Sep. 25, 1996", TG 317, Dec. 1996.
6. B.Berthet, et al. "PHEBUS PF : FPT1 - Preliminary Report" Note Technique LERES No 24/97, PF IP/97/334, Oct.1997.
7. 조성원, 김희동 "ISP 37:MELCOR 1.8.4를 이용한 VANAM M3 실험해석", KAERI/TR-737/96, July 1996.

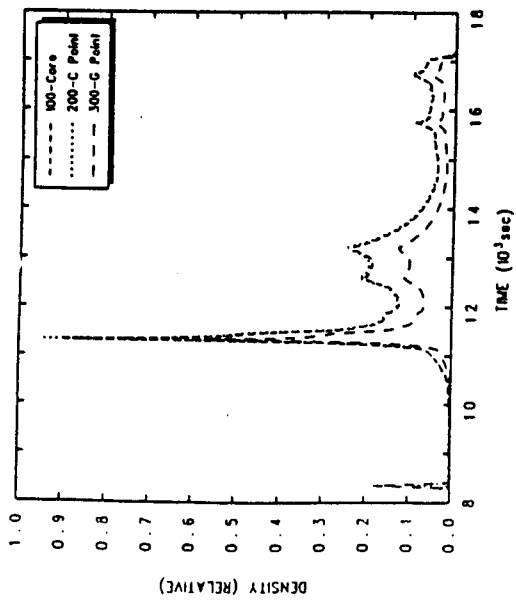


그림 1. 노심에서 방출된 요오드의 일차계통내 위치에 따른 농도분포 (CORSOR 모델) 변화.

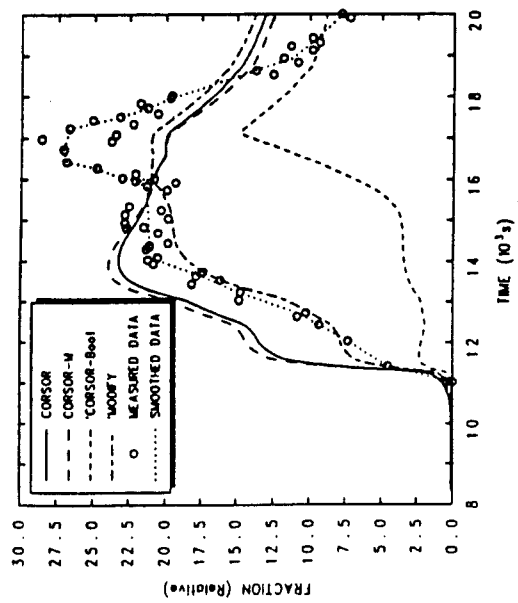


그림 3. 모델에 따른 요오드의 격납용기내 농도 비교.

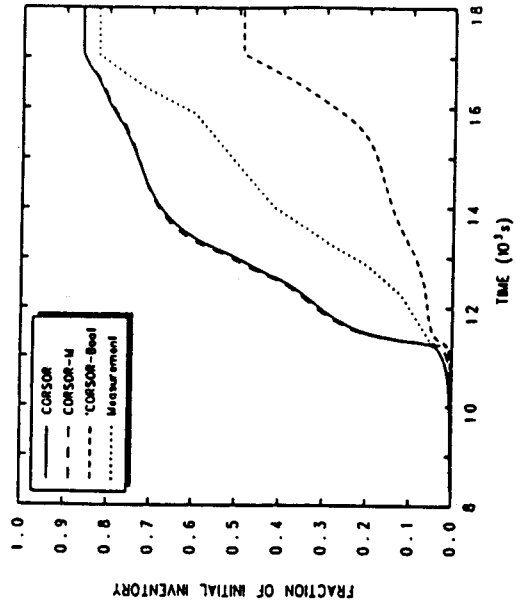


그림 2. 모델에 따른 요오드의 누적방출분율 비교

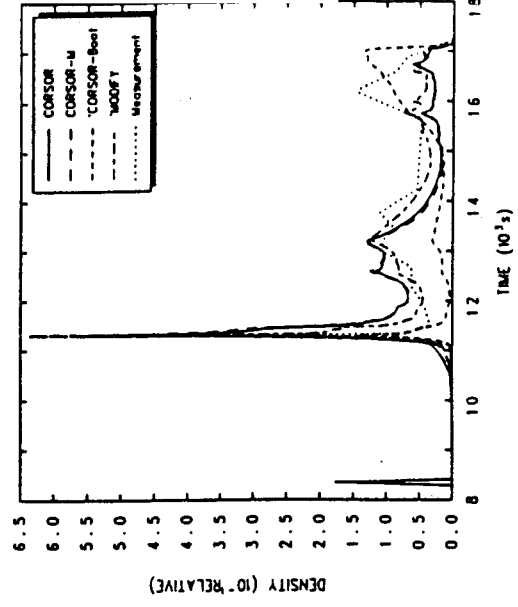


그림 4. 모델에 따른 G-POINT에서의 요오드 농도 비교

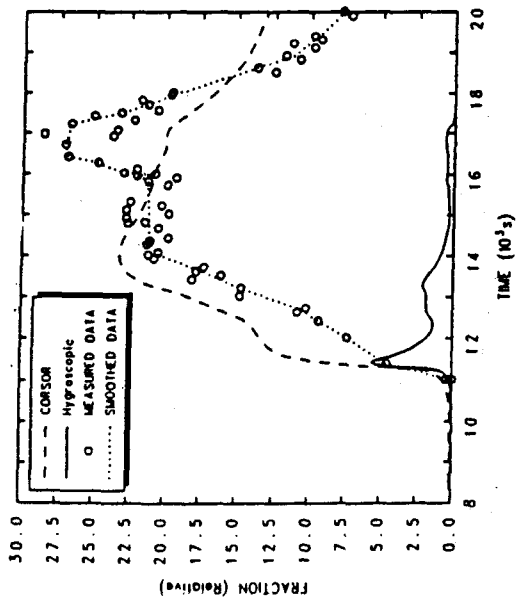


그림 5. Hygroscopic 모델을 적용시켰을 때 격납용기내의 농도 변화.

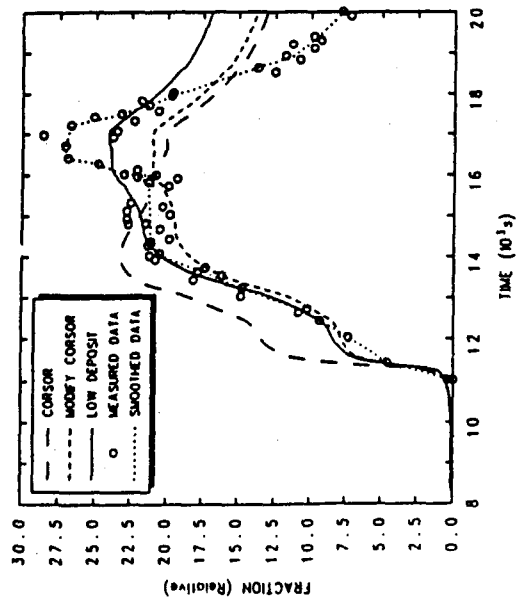


그림 7. 방출분율과 부착율의 변경에 따른 격납용기내 요소드의 농도 변화.

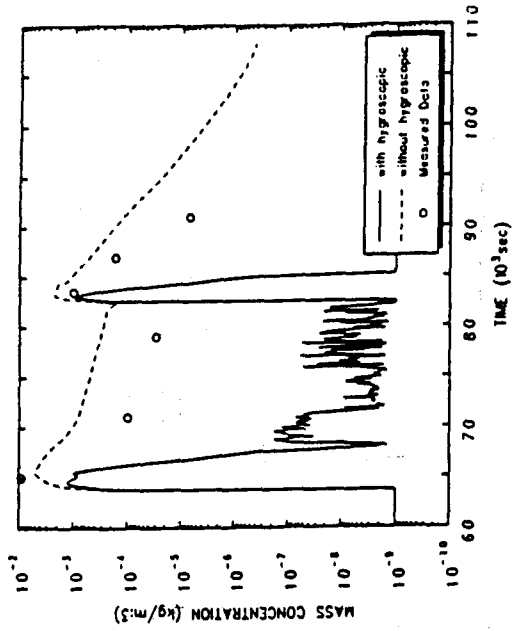


그림 6. Hygroscopic 모델의 적용여부에 따른 VANAM 실험의 해석결과 비교.