

OECD ISP-40 에어로졸 부착 및 재부유에 관한 STORM 실험 분석

김한철, 최종수, 박재홍, 이석호
한국원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19

원전 중대사고시 에어로졸 거동 현상과 분석 모델에 대한 이해의 증대와 분석 능력을 개선하기 위한 목적으로 OECD ISP-40에 참여하여 SR-11 에어로졸 부착 및 재부유 실험을 분석하였다. MELCOR 코드에 의한 부착 분석 결과, 부착량을 과소 예측하는 것으로 나타나 열영동 상관식 계수의 조정과 난류 효과의 고려 등 모델의 개선이 필요한 것으로 보이며, 분석모델 작성시 입자 크기의 분포에 주의해야 함을 알 수 있었다. VICTORIA 코드는 부착량을 약간 과도하게 예측하였고 재부유가 초기에 과도하게 일어나는 것으로 예측하는 모델의 제한점을 나타냈다.

1. 서론

원자력발전소의 원자로냉각재계통과 격납건물에서의 에어로졸의 거동은 중대사고시 환경으로 방출되는 방사성 물질의 양에 중요한 영향을 미친다. 분석에 따르면 재부유가 일어날 경우 가압 경수로의 발전소 정전사고 시나리오에서 환경으로 방출되는 에어로졸의 양이 매우 증가하는 것으로 예측되었다. 배관 상부와 격납건물내 벽, 바닥, 내부구조물 상부에서의 에어로졸의 부착 (Deposition)과 부착된 입자가 그 표면으로부터 재부유 (Resuspension)되는 정도의 차이만큼 에어로졸이 대기 환경으로 방출되며, 이들은 원자로심에서 생성된 핵분열생성물의 상당한 분량을 실어 가게 된다.

핵연료로부터 에어로졸의 방출에 관해서는 과거 OECD의 국제표준문제 (International Standard Problem: ISP)로서 다루어진 바 있었으나 재부유에 대해서는 개발된 모델이 마땅히 없는 데다 실험 자료도 거의 없었기 때문에 국제적인 분석 대상으로 채택된 바가 없었다. 1992년 이후 수년간, 특히 1995년 중반 이래 에어로졸의 부착과 재부유를 대규모 실험설비에서 연구하기 위해 STORM (Simplified Tests On Resuspension Mechanisms) 실험계획이 JRC (Joint Research Centre of the Commission of the European Communities)-Ispra (이탈리아)에서 착수됨과 동시에 몇몇 물리적 모델이 개발되었고 이 모델들을 실험 자료로써 검증할 필요성이 대두되게 되었다. 1996년에는 6개국의 11개 기관이 전산코드 계산에 참여하여 STORM 설비에서의 열수력학적 거동과 에어로졸 물리학을 연구한 바 있으며, 그 결과 실험 부위에서 열수력학적 거동은 예측과 잘 일치하는 것으로 나타났으나 에어로졸의 재부유에 대한 Benchmark은 다양한 결과를 보여 기존 모델들의 검증의 필요성을 부각시켰다. JRC가 STORM SR-11 실험을 OECD/NEA/CSNI PWG (Principal Working Group)-4에 ISP로 제안하여 채택됨에 따라 1997년 3월 ISP-40 예비 워크샵이 Ispra에서 개최되었다. 원자력안전기술원에서는 PWG4 Task Group을 통해 에어로졸 부착 및 재부유 분석에 참여하게 되었으며, 이 분석에는 일본원자력연구소 등 10개국의 17개 기관이 참여하고 있다.[1] 국내에서는 ISP-37 VANAM M3 실험에 원자력연구소가 참여하는 등 중대사고시 핵분열생성물과 에어로졸의 거동에 관한 분석 모델 및 방법론이 개발되고 있는 상태이다.[2] 본 연구는 원자력안전기술원의 중대사고 평가용 코드인 MELCOR 및 VICTORIA의 에어로졸 거동 모델을 평가하고 분석방법론을 개선하는 등 사고시 방사선원항에 관한 규제 기술의 향상을 위해 수행하였다.

2. STORM 에어로졸 부착 및 재부유 실험 개요

STORM 실험은 내경 63 mm, 길이 5 m인 스테인레스강 관에서의 부착 및 재부유 현상을 모의하기 위해 두가지 Test Section을 사용하고 있으며, 원자력발전소의 중대사고시 예상되는 기기 조건과 유사하도록 설정하고 있다. 이 실험장치는 그림 1에서 보여주는 바와 같이 Carrier Gas Supply, Aerosol Generation System, Mixing Vessel, Test Section, Aerosol Instrumentation, Washing and Filtering System으로 구성되어 있다. Carrier Gas로서는 수증기와 질소 기체가 사용되며 유속 0.5 kg/s, 온도 430℃ 정도로 공급된다. 에어로졸로서는 건조한 특성이 유지되는 SnO₂ 고체 입자를 사용한다. 주석 입자는, 아르곤과 헬륨 기체로 작동되는 100 kW DC plasma torch를 통해 최대 0.5 g/s로 주입되며, vaporization chamber에서 증발된다. 냉각기체 유속 및 입구 온도의 조절을 통한 응축관 내에서의 SnO₂ 증기의 조절과 고체 분말의 주입량 변화를 통해 에어로졸 입자의 크기가 결정된다.

SR-11 실험은 관 내부를 흐르는 기체에 비해 상대적으로 낮은 온도를 갖는 단열되지 않은 관 벽면에서의 에어로졸 입자의 부착 현상을 다루고 있으며, 표 1과 같은 유체 및 에어로졸 조건이 적용되었다. 그림 2는 주입 기간중 기체와 벽면의 위치별 온도분포를 보이고 있다. 재부유 실험에서는 SnO₂ 에어로졸을 Test Section에 부착시킨 상태에서 깨끗한 질소를 배관 내로 송풍함에 따라 재부유되는 양을 측정하였다. Carrier Gas의 유속은 그림 3과 같이 약 805 kg/h (약 125 m/sec)까지 6단계로 증가되었으며, 각 단계에서 Step 함수적으로 증가된 후 일정기간 유지되었다. 전체 재부유 질량은 시험 종료시 배관내 잔존 질량과 비교하여 산출되며, 배관의 한 Section에 축적된 양을 On-Line으로 측정할 수 있는 γ -radiation system 등을 통해 부착 및 재부유 양의 공간 분포를 알 수 있다.

3. 분석 요건 및 방법

부착 실험에 대한 Blind Calculation을 위해 전 실험기간동안 test section내 위치별로 측정치로부터 추정된 정상상태에서의 유체의 유량 및 압력과 온도, 벽면의 온도 등 열수력 자료와 실험관 입구에서의 에어로졸 크기 분포가 제시되었다. 부착 단계에 대한 Blind Calculation 결과 제출 후, 재부유 실험에 대한 분석을 위해 그림 4와 같이 부착 단계 종료시 부착량의 분포가 제시되었다.

분석자에게 계산이 요구되는 항목은 아래와 같다.

- 실험 배관에서의 시간별 에어로졸 부착율
- 주요 부착 메커니즘별 퍼센트 (부착 단계만 해당)
- 실험 배관 출구를 빠져나가는 에어로졸의 질량 및 평균 직경, 크기 분포
- 실험 배관에서의 시간별 에어로졸 재부유율 (재부유 단계만 해당)

3.1 부착 분석

STORM 실험의 에어로졸 부착 분석에는 MELCOR 코드 1.8.3판을 사용하였다. 이 코드는 열수력학 계산 외에 MAEROS 모델에 근거한 에어로졸의 부착 등의 동력학적 효과를 취급할 수 있다. MELCOR 코드의 RN Package의 부착 메커니즘은 중력, 브라운 확산, 열영동, 확산영동 등이 포함되어 있다. 이러한 자연 현상 가운데서도 중력에 의한 부착이 격납건물과 같이 제어체적이 큰 경우 주된 메커니즘이 되며, 기체 중의 온도 구배에 의한 열영동이나 물의 응축에 의한 확산영동 등과 같은 영동 효과가 중요한 경우도 있다. 입자의 확산은 일반적으로 비교적 중요하지 않은 메커니즘으로 간주할 수 있다. [3]

MELCOR 코드는 SUN Center 2000 Workstation에 설치하여 계산을 수행하였다. 분석 요건으로 제시되어 있는 변수값 중 부착 메커니즘별 퍼센트는 출력 변수가 아니기 때문에 이를 알

기 위해서는 RN package의 Source Program 일부를 수정해야 했다. 즉 각 열구조물에 대한 에어로졸 크기 Section별로 부착 메커니즘별 부착속도를 나타내는 변수값을 찾아 각 Time-step에서 기존 출력 파일들과 충돌되지 않도록 출력시킨 후 에어로졸 전체의 메커니즘별 기여도를 구하는 추가 조치가 필요하였다.

Test Section은 등간격 (0.50055 m)의 수평 원통형 노드 10개로 구분하였으며, 그밖에 기체와 에어로졸의 Sink Node 1개, 대기 환경을 나타내는 Node 1개 등 총 12개 노드를 구성하였다. 최대 계산 Time Step은 0.1초로 설정하였고, 기체 역학에 관련되는 상수 등에 대해 대체로 MELCOR Default Value를 사용하였다. 분석에 적용한 주요 가정은 다음과 같다. [4]

- (1) 초기 대기는 수증기와 질소가 57:20으로 분포한다고 가정하였는데 이 값은 과거 STROM 실험 Heat-up 단계에서의 안정상태시 질량 유속 비이다. 이상기체 방정식을 적용하여 수증기의 분압은 전체 압력의 81.6%로 결정하였고 나머지는 질소 분압으로 가정하였다.
- (2) Carrier Gas중 공기는 질소와 산소가 78.8: 21.2의 비율로 혼합되어 있는 것으로 가정하여, 질소의 유량은 0.9989E-02 kg/s, 산소는 0.1214E-2 kg/s로 결정하였다.
- (3) 에어로졸의 직경은 실험규격을 참고하여 상한치 4.0E-7m, 하한치 1.0E-5m로 가정하였다.
- (4) 에어로졸의 크기 Section당 질량은 천천히 변하는 것으로 가정하여 부착에 기여하는 메커니즘별 퍼센트를 구할 때 직전 Time Step이 아니라 현재 Time Step의 값을 사용하였다.

각 노드에서의 초기 대기 온도 및 벽면의 온도는 실험자료에서 제시한 값으로부터 내삽법으로 계산한 노드별 질량 중심점에서의 값을 적용하였다. 열구조물, 즉 시험관의 두께는 13 mm로 균일하다고 가정하였다.

3.2 재부유 분석

부착 분석에서 사용한 MELCOR 코드에는 재부유 모델이 포함되어 있지 않기 때문에 재부유 분석에는 US NRC의 상세 코드인 VICTORIA를 SUN Center 2000 Workstation에 설치하여 계산을 수행하였다.[4]

분석시 1 m 길이의 노드 4개와 1.0055 m 길이의 노드 1개 등 총 5개 노드로 Test Section을 구분하였으며, Courant limit 때문에 최대 계산 Time Step은 0.01초로 설정하였다. 각 노드에서의 Carrier gas의 속도는 기체 압력과 온도 및 유량으로부터 결정하였다. 기체 역학 관련 상수 값들은 VICTORIA Default Value를 사용하였다. 분석에 적용한 주요 가정은 다음과 같다. [5]

- (1) 대기 유동이 없는 각 단계 사이 기간 (합계 900 초)에는 부착과 재부유가 일어나지 않는 것으로 가정하였다.
- (2) 재부유 초기 대기는 질소만 포함되어 있는 것으로 가정하였다. VICTORIA 코드에서는 질소를 취급하지 않기 때문에 초기 질소 대기와 Carrier Gas로서의 질소는 Argon과 Helium의 혼합물로 가정하되, 질량과 몰 수를 동일하게 유지하였다.
- (3) 분석이 요구된 출구에서의 에어로졸 입자 크기를 계산 결과로부터 직접 구할 수 없기 때문에 관의 마지막 노드에서의 값으로 대체하였다.
- (4) VICTORIA 코드로써 재부유 단계를 직접 분석할 수 없는 제한점 때문에 부착 계산을 먼저 수행하여 재부유 단계의 초기조건을 결정하였다. 이에 따라 재부유 시작 시점에서의 부착량과 그 분포 및 입자 크기가 실험치와 다른 점에 대해, 부착량에 대해서는 총 부착량 계산치 (230.55 g)가 실험치 (161.97 g)와 일치하도록 보정하고 (보정상수 0.7025), 부착량의 분포와 입자의 크기는 부착 계산결과를 그대로 사용하였다.
- (5) 부착 단계의 열역학적 조건에 대한 가정은 MELCOR 계산과 유사하나, 초기 대기는 아르곤, 네온, 산소, 수증기가 Carrier gas 유량 비에 따라 조성된 것으로 보았다.

4. 분석 및 논의

4.1 분석 결과

부착에 대한 분석결과, 주입 단계 종료시점에서의 시험관 내 에어로졸의 Node별 및 총 부착량은 그림 4와 같으며 총 누적량은 0.055 kg 정도로 나타났다. 측정된 부착량 누적치는 0.162 kg 이므로 MELCOR 분석결과는 실험치의 34% 정도로 과소 예측하는 것을 알 수 있다. 각 메커니즘별 기여도는 실험관 중앙 부근에서 그림 6과 같이 열영동 (Thermophoresis)에 의한 영향이 가장 크게 나타났으며, 부착 종료시점에서 시험관 전체적으로도 동일한 경향을 나타내고 있음을 그림 7에서 볼 수 있다. MELCOR Default Model에서 확산영동 효과는 무시되었다. 실험시 부착량의 시간에 따른 경사도를 2개 단계로 나누어지는 데 비해 분석결과는 그림 7과 같이 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 입자 크기는 Test pipe 출구에서 비현실적으로 크게 증가하는 것으로 나타났다. 시험관 출구를 빠져나간 에어로졸의 총량은 그림 8과 같이 3.39 kg이었으며, 계산 종료시점까지 질량 보존은 잘 유지되었다.[5,6]

VICTORIA에 의한 재부유 분석결과 (그림 9 참조), 실험시 초기에는 작았다가 기체의 유속이 증가함에 따라 증가한 경향과 달리, 대부분의 에어로졸이 기체 공급 직후 재부유되고 그후에는 매우 적은 양(약 3 g)이 재부유 단계 종료시점까지 부착되어 있는 것으로 나타났다. 실험관을 빠져 나온 에어로졸의 총량은 약 159 g 정도로 예측되었다.[7]

계산 소요시간은 MELCOR가 2.49E5 초, VICTORIA는 부착 계산에 1.91E5 초, 재부유 계산에 1.03E5 초이었다.

4.2 논의

MELCOR 코드에 의한 부착 분석이 과소 예측하는 이유는 열영동 계산시 Brock 상관식의 계수가 부적절하고, Eddy impaction을 고려하지 못하는 점 때문인 것으로 보인다. 따라서 Talbot 계수를 고려하는 것과 난류에 대한 적절한 고려가 향후 모델 개발에 고려되어야 할 것으로 판단된다. 입자 크기의 비정상적 증가 예측 결과에 대해서는 초기 에어로졸 입자 분포를 수정하여 재계산해야 할 필요가 있음을 나타냈다.

VICTORIA 코드의 과도한 부착량 예측은 JRC 측이 최근 제시한 대로 수증기 유량을 수정할 경우 개선될 것으로 판단된다. VICTORIA의 재부유 모델은 초기 재부유를 과도 예측하는 것으로 판단되나, 매 기체 가속 단계마다 기준시점을 재설정함으로써 기체 속도 증가에 따른 재부유 효과는 약간 관찰할 수 있을 것으로 예상된다.

두 코드가 모두 부착량의 분포를 잘 모의하지 못하며, 실험관 만을 고려한 분석 모델에서는 Entrance effect가 나타나는 것으로 판단된다.

4. 결론

ISP-40 분석을 통해 MELCOR 코드는 부착량을 과소 예측하며 입자 크기의 분포에 대한 모델링에 주의해야 함을 보였다. 차후 부착량 및 출구 입자의 크기에 대한 예측 능력을 개선하기 위해 열영동 상관식의 계수를 조정하는 것이 필요할 것으로 보인다. VICTORIA 코드는 부착량을 과도하게 예측하는 것으로 나타났으나 수증기 유량의 수정시 개선될 수 있을 것으로 보인다. 재부유에 대한 계산 결과는 모델의 제한점 때문에 초기 재부유가 과도 예측됨을 나타냈으나, 매 기체 가속 단계마다 기준시점을 재설정함으로써 가속 효과는 관찰할 수 있을 것으로 보인다.

ISP-40 분석은, 중대사고시 에어로졸의 부착 및 재부유 현상과 분석 방법을 이해하고 기존 중대사고 분석 코드들의 에어로졸 거동 모델들이 가진 제한점과 개선 방향을 파악하는 데 유익한 경험을 제공하였으며, 이는 차후 사고시 방사선원향 평가에 반영될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] OECD/NEA/CSNI PWG 4, "Summary record of the preparatory ISP-40 workshop," held at the Joint Research Centre of the Commission of the European Communities, Ispra on 17th-18th March 1997.
- [2] 박재우, "ART 에어로졸 재부유실험 데이터를 이용한 재부유모델의 평가," 한국원자력학회 '97 추계학술발표회 논문집, pp. 790- 797.
- [3] R. M. Summers et al., "MELCOR Computer Code Manuals" (Sandia National Laboratories), NUREG/CR-6119. Vol. 2, SAND93-2185.
- [4] T. J. Heames et al., "VICTORIA: A Mechanistic Model of Radionuclide Behavior in the Reactor Coolant System Under Severe Accident Conditions" (Sandia National Laboratories), NUREG/CR-5545, Rev.1.
- [5] H. C. Kim and J. S. Choi, "Specification on the Analysis of the Deposition Phase Measurements," October 14, 1997.
- [6] 김한철 등, "최적 방사선원항의 규제 적용 연구," 기본연구 연차 결과 요약보고서, 1997. 12.
- [7] H. C. Kim and J. S. Choi, "Specification on the Analysis of the Resuspension Measurements," January 31, 1998.

표 1. SR-11 실험시 유체 및 에어로졸 조건

● Aerosol: SnO ₂
● Aerosol Mass Flow Rate at the entrance of the Test Pipe: 3.83E-4 [kg/s]
● Carrier Gas Mass Flow Rates:
N ₂ : 0.5467E-2 [kg/s]
Air : 0.5728E-2 [kg/s]
Ar : 0.7194E-2 [kg/s]
He : 0.0119E-2 [kg/s]
H ₂ O : 1.7467E-2 [kg/s]
● Particle Size Distribution at the entrance of the Test Pipe:
Geometric Mean Diameter : 0.4348E-6 [m]
Geometric Standard Deviation : 1.7003
● Estimated Aerosol Density : 4000 [kg/m ³]
● Estimated Aerosol Heat Conductivity (at 400 °C): 11.0 [W/m/K]

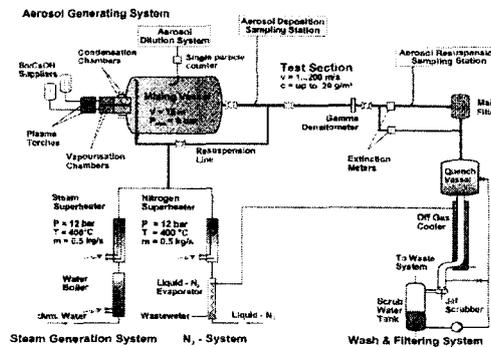


Figure 1: STORM facility

그림 1. STORM 실험장치 (A. de los Reyes et al. 1997)

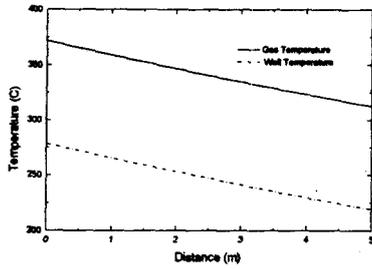


그림 2. 부착 단계에서의 시험관내 기체와 벽면의 온도 분포

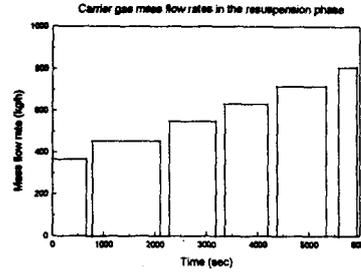


그림 3. 재부유 단계에서 Carrier Gas의 속도

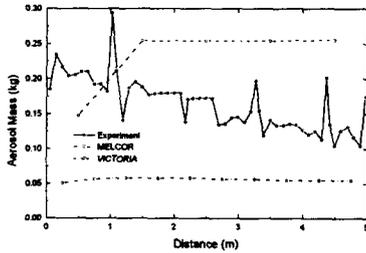


그림 4. 부착 단계 종료시 에어로졸 부착량의 시험관내 분포 (측정치 및 계산치)

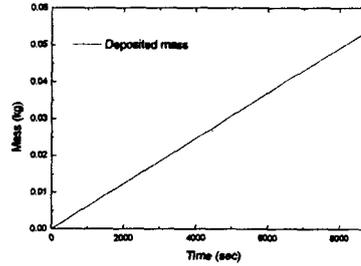


그림 5. 시간에 대한 에어로졸 총 누적 부착량

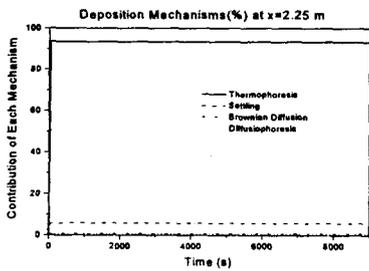


그림 6. 실험관 중앙 부근에서의 시간별 부착 메커니즘별 기여도

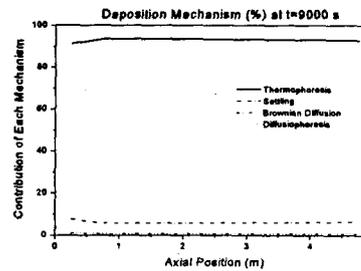


그림 7. 부착 종료시점에서 시험관내 부착 메커니즘별 기여도

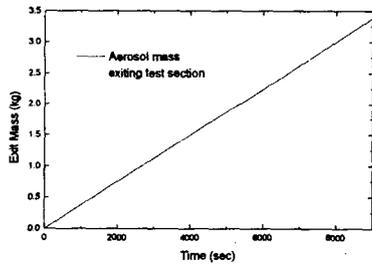


그림 8. 시험관 출구를 빠져나오는 에어로졸 누적 질량

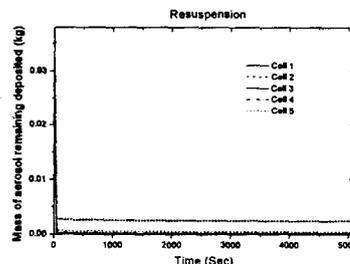


그림 9. VICTORIA에 의한 재부유 분석결과