

## 사용후핵연료 수송용기의 과도화재 전산시물레이션 방안분석

이주찬, 방경식, 서기석, 김형진\*, 윤정현\*

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045

\*한국방사성폐기물관리공단, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045

[siclee@kaeri.re.kr](mailto:siclee@kaeri.re.kr)

### 1. 서론

911 테러 이후 사용후핵연료 수송저장시스템에 대한 설계 외 중대사고(차량, 선박 및 비행기 충돌, 화재, 강진 등)의 영향에 대한 관심과 규제측면에서의 요구가 강화되고 있는 추세이며, 국내에서도 2009년도부터 사용후핵연료 수송저장시스템의 중대사고 안전성평가에 관한 연구를 수행하고 있다. 본 연구의 목적은 사용후핵연료 수송저장시스템의 과도화재 전산시물레이션 방안분석을 통하여 중대사고 시나리오 및 전산시물레이션 방안을 도출하는데 있다.

### 2. 본론

#### 2.1 과도화재 기술현황 분석

2001년 7월 18일 미국의 볼티모어 시내의 Howard Street 터널에서 인화성물질을 싣고 가던 화물열차에서 화재사고가 발생하였다[1]. NRC의 지원으로 미국의 기술표준원인 NIST(National Institute of Standard and Technology), CNWRA(Center for Nuclear Waste Regulatory Analyses), PNNL (Pacific Northwest National Laboratory) 등 3개 기관의 전문가로 연구팀을 구성하여 화재 원인 분석 및 전산 시물레이션을 수행하였다.

NIST에서 개발된 FDS(Fire Dynamic Simulator) 코드를 이용하여 터널화재조건에 대한 열환경을 예측하였다. 화재 시물레이션 결과 3시간 동안 화재가 지속되었으며, 열방출률, 즉 화재강도는 약 50 MW로 예측되었다. 3시간 동안 터널 내부의 화염 및 차량의 절반 길이에서의 최대온도는 약 1,000 ~ 1,100 °C, 3~4개 차량에 해당되는 터널 길이의 평균온도는 약 500 °C로 계산되었다.

PNNL에서는 FDS 결과를 ANSYS 및 COBRA-SFS 코드의 경계조건으로 고려하여 NRC로부터 인허가 승인된 3종(HI STAR-100, TN-68,

NAC-LWT)의 수송용기에 대한 열적 건전성을 평가하였다. 이들 수송용기는 볼티모어 터널화재 조건에서 crud와 같은 방사성물질의 미세한 누설이 발생하였으나 핵물질의 누설은 발생하지 않는 것으로 분석되었다.

#### 2.2 과도화재 전산시물레이션 방안

연소해석을 포함한 화재 시물레이션을 위해서는 가연성 기체와 산소의 화학반응과 관련된 변수의 설정, 화재성장 조건의 설정, 가연물의 열적 경계조건의 설정, 가연성 고체 또는 액체의 화재시 열전달, 연소 특성치의 입력자료 등 불확실한 요소를 갖는 변수가 많다. 따라서 FDS를 이용한 연소해석은 해석결과에 대한 신뢰성을 충분히 확보하기 어려운 단점이 있으므로 화재성장곡선 및 화재강도를 고려한 터널화재 전산해석 방안을 분석하였다.

PIARC[2]은 터널설계를 목적으로 차량의 화재강도를 제시하고 있으며, 인화성 물질을 실은 화물트럭 1대의 화재강도가 20~30 MW이고 대형+대형차의 충돌에 의한 화재강도가 40 MW 이상이다. 따라서 수송용기를 실은 트럭의 충돌로 인한 화재사고에서는 20 ~ 50 MW 범위의 화재강도를 갖는다. 화재강도는  $Q = \alpha \cdot t^n = (t/k)^2$  으로 정의되고 ultrafast 화재 성장속도에서 k는 75이고  $\alpha$ 는 0.1876이다. 따라서 위의 식으로부터 화재가 시작된 후 약 330초 이후에 20 MW, 460초 이후에 40 MW의 화재강도를 갖는다. 수송용기를 운반하는 대형 트랙터에 1,000 kg의 경유(연소열  $\Delta H_c = 45 \text{ MJ/kg}$ )가 실려져 있을 경우 화재강도  $Q = m \cdot \Delta H_c / t$ 이므로 화재강도가 20 MW일 경우 연소시간(t)은 2,250초로 계산된다. 이와 같이 계산된 화재강도, 화재성장 속도와 연소시간은 터널화재 전산해석을 위한 입력자료로 사용된다.

터널화재 시물레이션을 위해서는 먼저 대상물체 즉, 터널 내에서의 운반차량, 화염의 영역, 터널(입출구, 바닥, 벽 및 천정)의 공간 구성이 정확

히 구현되어야 한다. 특히 터널 내 대류열전달 해석을 위하여 마감재의 마찰계수를 고려하여야 한다. 해석시간을 줄이고 보수적인 평가를 위하여 터널의 바닥, 벽 및 천정을 통한 열전달을 무시할 경우에는 마감재를 무시하고 단열 경계조건을 고려할 수 있다. 터널화재 시뮬레이션을 통하여 얻어진 화염의 온도분포를 경계조건으로 고려하여 수송용기의 온도분포를 계산한다.

2.3 터널화재 전산시뮬레이션

그림 1은 터널화재 전산해석 모델이며, 해석대상으로 선정된 터널은 길이 100 m, 폭 9.8 m, 높이 7.0 m의 2차선 터널이고, 터널의 중간 부위에 길이 10 m, 폭 2.75 m, 높이 1.0 m의 수송차량을 고려하였다. 수송차량 위에는 0.5 m 높이에 직경 2 m, 길이 5 m의 수송용기가 실린 것으로 가정하였으며, 수송차량 및 용기 주변을 화염영역으로 설정하였다. 차량 화재해석을 모델링하기 위하여 30 MW, 40 MW, 50 MW의 화재강도를 고려하였다.

FLUENT를 사용하여 3차원 유동해석을 수행하였다. 터널 내부의 유동은 난류영역이며, 난류모델은 k-ε 모델을 사용하였고 벽면근처의 처리는 standard wall function을 사용하였다. 대류항과 확산항의 이산화 방법으로는 2차 정확도를 갖는 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다. 화염자체 및 터널 벽과 차량, 수송용기 표면에서의 복사를 고려하였으며, 복사열전달 방정식은 구분좌법(Discrete Ordinates Model)을 사용하였다.

그림 2는 전산해석 결과로서 터널내부의 온도분포를 보여주고 있다. 표 1은 화재강도에 따른 터널내부 주요 부위의 온도를 나타내었다. 화재강도에 비례하여 터널내부의 온도가 증가하였다. 여기에서 계산된 온도는 과도화재 조건에서 수송용기의 열해석을 위한 입력자료로 사용될 예정이다.

3. 결론

화재성장곡선을 이용한 화염의 전파해석을 통하여 터널 내부의 온도분포 계산하고 이들 온도를 경계조건으로 고려하여 수송용기의 열해석을 수행하는 방안을 도출하였다. 또한, 실제 터널화재 조건에 대한 전산시뮬레이션을 통하여 터널

내부의 온도분포를 계산하였으며, 이 온도를 경계조건으로 주어 과도화재 조건에 대한 수송용기의 열해석을 수행할 예정이다. 향후에는 터널화재 이외의 저장시설 내 밀폐공간에 대한 과도화재 해석을 수행하고 실제 과도화재 시험을 수행하여 전산시뮬레이션을 검증할 예정이다.

4. 감사의 글

본 연구는 지식경제부의 “지식경제 기술혁신사업”의 일환으로 수행되었음.

5. 참고문헌

[1] NISTIR 6902, “Numerical Simulation of the Howard Street Tunnel Fire, Baltimore, Maryland”, NIST, 2002.  
 [2] PIARC, “Fire and Smoke Control in Road Tunnel”, World Road Association, Report No. 05.05.B, 1999.

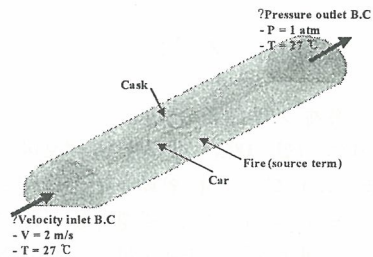


Fig. 1. Thermal model for tunnel fire.

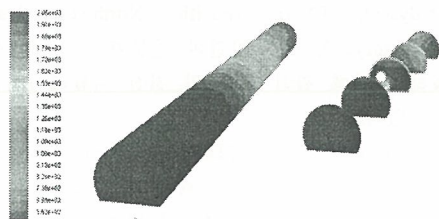


Fig. 2. Temperature contours for tunnel fire.

Table 1. Thermal Analysis Results for Tunnel Fire

|                     | Calculated temperature (°C) |       |       |
|---------------------|-----------------------------|-------|-------|
|                     | 30 MW                       | 40 MW | 50 MW |
| Fire flame          | 834                         | 1067  | 1388  |
| Environment of cask | 652                         | 955   | 1207  |
| Tunnel wall         | 297                         | 455   | 647   |
| Tunnel outlet       | 177                         | 242   | 346   |