



원자력 발전소 화재안전해석을 위한 전산화재모델의 비교 연구

김성찬 · 김정용 · 윤정숙 · 이은신*
경일대학교, *파워빌트씨앤이

A Comparative Study of Computational Fire Models for Fire Safety Analysis of Nuclear Power Plant.

Sung Chan Kim · Jung Yong Kim · Jung Sook Yoon · *Eun Shin Lee
Kyungil University, PBC&E

요 약

원자력 발전소는 화재 발생 시 대규모 피해를 야기하는 특수한 시설물로서 일반 건축물에 비하여 매우 엄격한 화재 안전 기준을 적용하고 있으며 일반 건축물과 차별화된 화재 안전 설계 조건을 요구한다. 본 연구에서는 원자력 발전소의 화재안전성을 평가하기 위한 기초연구로써 원자력 발전소 내 주 제어실(이하 MCR)에 대해 화재시나리오 및 환기조건에 따른 화재해석모델의 계산결과를 비교분석하여 각 해석모델의 특성을 파악하고자 한다. MCR 내 화재안전성을 평가하기 위해 Field Model인 FDS 와 Zone Model인 CFAST를 이용하였으며 NUREG/RC-6850, NUREG/RC-1894에 기초하여 화재시물레이션을 수행하였다. 해석결과로써 연기농도, 가시거리, 연층높이 등의 데이터를 분석하여 MCR내의 거주가능 시간을 평가하였으며 이를 통해 원자력 시설물의 안전성 확보를 위한 정량적인 자료를 제공하고자 한다.

1. 서 론

원자력발전소는 다른 발전설비에 비해 높은 효율로 에너지를 생산해 내지만 화재 발생 시 화재 자체만으로도 피해 이외에 방사능유출과 같은 중대사고로 발전할 우려가 크기 때문에 확률 높은 조기 화재방호 체계가 요구된다. 1990년대 이후에는 높은 수준의 원자력 발전소 화재 안전성을 확보하기 위해 기존의 사양위주의 설계방식에서 화재안전성 평가를 통한 성능위주의 설계방식으로 변화하고 있으며 화재 모델링을 통해 공간내 위험정도를 평가하고 이를 통해 화재대응체계를 구축하고 있다. 화재 모델링을 통해 원자력 발전소의 화재안전성을 평가하기 위해서는 화재모델에 의한 해석결과의 검증과 확인과정이 필수적이며 다양한 실험 및 이론적 접근을 통해 모델의 신뢰성을 검증하고 타당성을 확보해 나가고 있다. 2001년 NFPA에서는 원자력 발전소의 성능위주설계를 위한 기준을 제시하였으며 이후 미원자력위원회, 미전력연구원(EPRI), 미국표준기술원(NIST)등 다양한 기관

에서 원자력 발전소의 화재안전성 평가의 타당성을 확보하기 위한 노력을 지속하고 있다. 원자력 발전소 화재에 대한 주요관심요소는 화재로부터의 연기생성, 공간내 축연정도, 천정제트 및 고온연층부의 특성, 그리고 주요 방호대상물에 대한 대류/복사 열유속정도등이 있다. 이러한 주요관심요소를 해석하기 위해 이론적인 방법이나 경험에 기초한 다음과 같은 수치적 접근 방법이 널리 이용되고 있다.

- 대수방정식 모델(algebraic model)
- 존모델 (zone model)
- 필드모델 (field model)

본 연구에서는 원자력 발전소의 화재안전성을 평가하기 위한 기초연구로써 원자력 발전소 내 주요공간에 대해 화재시나리오 및 환기조건에 따른 화재해석모델의 계산결과를 비교분석하여 각 해석모델의 특성을 파악하고자 한다. 모델간 비교를 위해 연기농도, 가시거리, 연층높이 등의 데이터를 분석하여 공간내의 거주가능 시간을 평가하였으며 이를 통해 원자력 시설물의 안전성 확보를 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 연구내용

화재해석 대상 공간은 가로 16 m, 폭, 12.5 m, 높이 6 m 로써 화재공간의 경계에는 2개의 개방된 출입구가 존재하며 전면 출입구의 크기는 폭 1.85 m × 높이 2.15 m 이며, 후면 출입구의 경우 폭 0.92 m × 높이 2.15 m 이다. 화재공간은 HVAC 설비에 의해 공간으로의 강제급기와 배기가 이루어지고 있는데 천정부에는 4개의 급기구(supply vent)와 2개의 배기구(return vent)가 위치한다. 4개의 급기구의 총 급기용량은 21,240 CMH 이고 2개의 배기구의 총배기용량은 20,900 CMH이다. 따라서 주 제어실 내부는 HVAC 설비에 의해 양의 압력상태(positive pressure condition)가 되고 이로 인해 개방된 출입구를 통해 외부로의 유출 유동이 발생된다. FDS 해석의 경우에는 급기구에서 공급되는 공기는 공간내부에서 방사형 유동을 형성하는데 이러한 효과를 고려하기 위해 NUREG-1934와 같이 Supply Vent 하부 20cm 위치에 가상의 얇은 판이 존재하는 것으로 가정하여 이러한 확산 유동을 모사하였다. 본 화재모델링에서는 NUREG/CR-6850에서 제시하고 있는 전면부 제어반의 전기적 결함에 의해 발생한 화재 시나리오를 고려한다. 초기 화재시나리오의 경우 공간 전면부에 위치한 제어반의 전기적 결함에 의한 다중 케이블에 초기 점화를 가정한다. 화재발생 위치는 제어반 하단부이며 화원의 크기는 0.6 m × 0.3 m 이다. 점화된 화재는 t^2 화재성장 모드에 따라 성장하며, 화재발생 12분 후 주어진 15 BIN에 해당되는 발열량에 도달하여 3분간 준정상상태(quasi-steady state)로 지속되며 화재발생 15분후 선형적으로 발열량이 증가한다고 가정한다. 그림 1은 15개 시나리오에 따른 총괄 발열량 곡선을 나타낸다. 해석대상 케이블 화재는 폴리에틸렌(C_2H_4)과 네오프렌(C_2H_5Cl)의 혼합물인 XPE/Neoprene ($C_2H_4.5Cl_{0.5}$)케이블의 연소로 가정하고 NUREG-1934에서 적용된 연소특성을 동일하게 적용한다. 연기생성율은 화재공간내의 환기조건에 따라 영향을 받는데 본 해석에

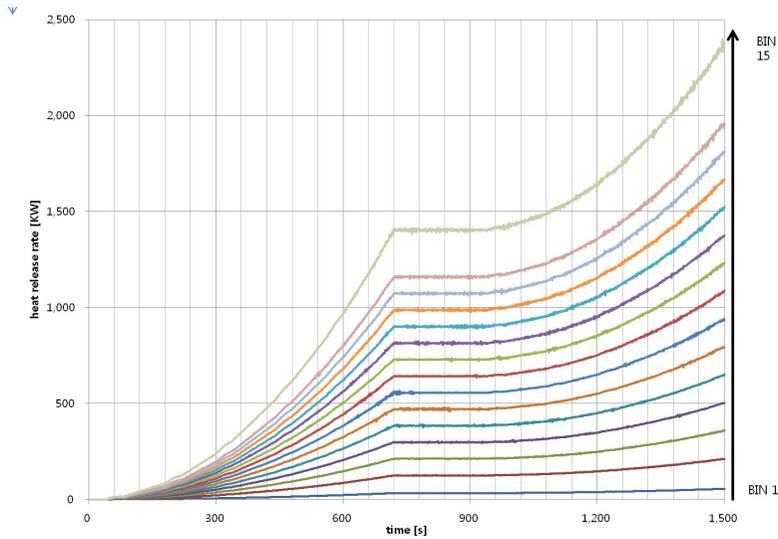


Figure 1. Time history of heat release rate for 15 BINs of Fire Scenario.

서는 NUREG-1934와 같이 연기생성율을 0.1로 가정하였으며 이는 적정환기조건인 당량비 (equivalence ratio) 1 정도에서의 경험값이다. NUREG-1934에서는 주어진 연기생성율에 대하여 일산화탄소의 생성율이 다음식에 의해 계산되며 본 해석에서는 0.038 g/g을 적용한다.

$$y_{co} = \frac{12x}{M_f \nu_f} 0.0014 + 0.37y_s \quad (1)$$

여기서 x 는 연료내 탄소수, M_f 는 연료의 분자량 (45.26 g/mol), y_s 는 연기생성율 (0.1) ν_f 는 연료의 화학량론 계수(1)를 나타낸다.

3. 해석 결과

그림 2는 15개 BIN에 따른 CFAST와 FDS에 의해 예측된 연층의 높이변화를 나타낸다. CFAST의 경우 계산진행과 동시에 연층하강이 시작되지만 FDS 모델의 경우 연층높이를 산정하는 알고리즘에 따라 수직방향으로의 온도차가 존재해야 연층높이를 산정하기 때문에 화재발생후 연층높이의 하강시간이 CFAST와는 다소 차이를 보인다. CFAST 모델의 경우 화재시나리오에 상대적으로 덜 영향을 받는데 반해 FDS 모델의 경우 화재시나리오에 따라 연층의 하강이나 준정상상태의 연층높이가 상대적으로 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 환기가 없는 경우 BIN15에 대해 연층이 호흡선에 도달하는 시간은 CFAST의 경우 350 s로 예측되었으나 FDS의 경우 430 s 정도로 늦게 예측했다. 이는 해석모델의 고유한 특성이외에 FDS 모델에서 연층의 높이를 산정하는 알고리즘의 의한 영향이 존재하기 때문인 것으로 보인다.

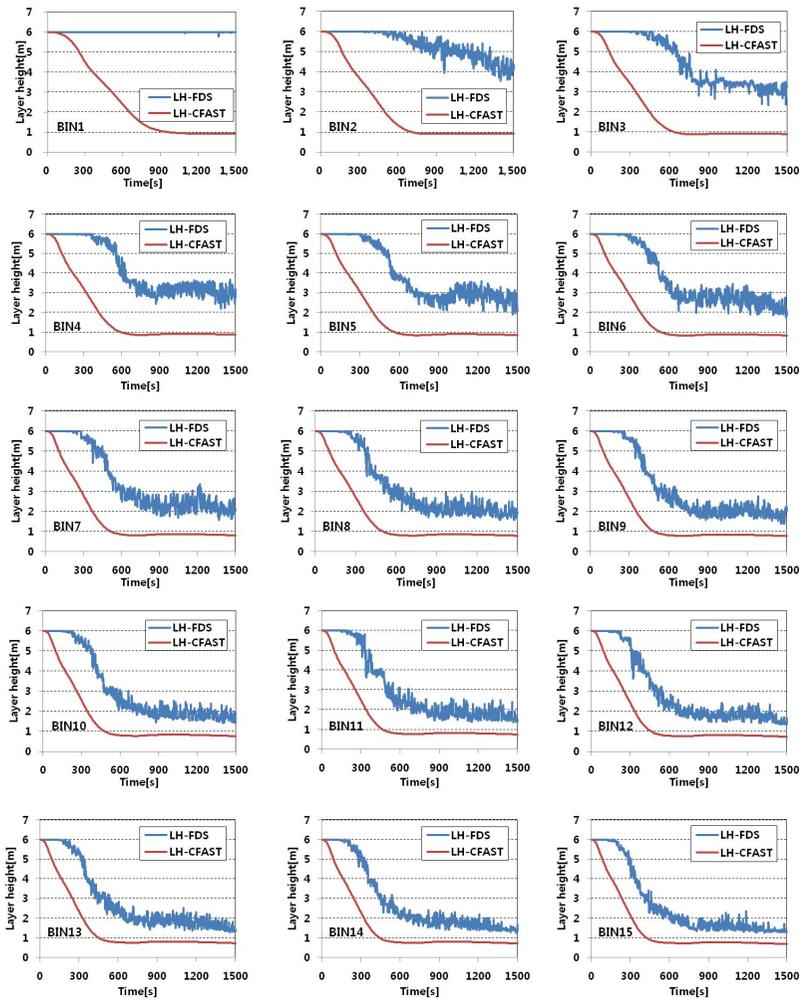


Figure 2. Comparison of clear height with different fire scenario for the case of activated forced ventilation system.

참고문헌

1. NUREG/CR-6850, "EPRI/NRC-RES Fire PRA Methodology for Nuclear Power Facilities", Vol. 2, Detailed Methodology, 2005.
2. K. Hill, J. Dreisbach, F. Joglar, B. Najafi, K. McGrattan, R. Peacock, and A. Hamins, "Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications", NUREG-1824, Vol. 7, US-NRC, 2007.
3. A. Bounagui, N. Benichou, C. McCartney, A. Kashef, "Optimizing the grid size used in CFD simulations to evaluate fire safety in houses", 3rd NRC Symposium on CFD, HPC and VR, Ottawa, 2003.