

원자력발전소 안전 펌프실의 화재 위험성 평가를 위한 Zone Model과 Field Model의 적용 비교

이윤환 · 양준언 · 김종훈*

한국원자력연구소 · *광운대학교 건축공학과

1. 서 론

원자력발전소에서의 화재는 다른 시설의 화재에 비하여 발생시 그 피해가 매우 심각하기 때문에 더욱 강화된 화재안전의 수준이 요구된다. 즉 원자력 발전소에서 발생하는 화재는 내부에서의 인적, 물적 피해의 발생에만 국한되는 것이 아니라 원자로의 정지를 유발시키고 각종 안전관련 기기들을 손상시키기 때문에 더 큰 재난을 가져올 확률이 매우 높다. 이러한 위험에 대하여 설계 단계에서부터 사용 중 관리에 이르기까지 다각도의 안전전략을 수립하고 시행하지만, 가연물과 발화원이 존재하는 한 화재는 언제든 발생할 수 있다고 보아야 할 것이며, 미국 EPRI(Electric Power Research Institute)에서는 10년간의 원자로 운전 중 3.6회의 화재가 발생한다는 경험적 데이터를 제시하고 있어 화재의 위험이 현실적인 사실이라는 것을 뒷받침해 주고 있다. 화재 PSA(Probabilistic Safety Assessment)에 의한 안전 분석을 수행하는 것은 이러한 위험에 대한 안전의 확보에 중요한 역할을 하고 있다. 그러나 현재 화재 PSA 수행 시 원자력 발전소에서 발생 가능한 화재의 현상에 대한 평가는 수행하지 않고 매우 보수적인 가정을 통하여 분석을 수행하고 있는 상황이다. 화재 PSA에서의 매우 보수적인 가정보다는 좀 더 현실적인 고려를 위해서 이러한 예측 기법의 도입이 매우 필요하다. 이는 화재 시나리오를 기반으로 한 현상의 예측 및 결과 분석을 의미하며, 화재 현상의 예측을 위해서는 화재모델의 사용이 최선의 선택이라 할 수 있다. 화재 현상을 예측하는 모델은 크게 Zone Model과 Field Model로 구분할 수 있으며, 각각은 다른 장단점을 지니고 있다. 그러므로 본 논문에서는 원자력발전소의 안전 펌프실을 대상으로 하여 Zone Model인 CFAST와 Field Model인 Fire Dynamic Simulator(FDS)를 적용하여 그 결과를 비교 분석하였으며, 분석 결과를 바탕으로 두 모델간의 차이점과 특징을 파악하고자 하였다.

2. Zone Model과 Field Model 적용 시 차이점

구획 내에서 발생한 화재 현상을 예측할 수 있는 모델은 크게 Zone Model과 Field Model로 나눈다. 먼저 Zone Model은 화재 구획(Compartment)을 크게 화염(Fire) 및

플룸(Plume) 영역, 상부 고온의 가스층(Hot Gas Layer), 하부 저온층(Lower Layer) 등의 검사 체적(Control Volume)으로 구분하고, 화재실과 비화재실에 형성된 각 검사체적 간의 에너지 및 질량 등의 이동을 예측하는 방식을 사용하고 있다. 물리화학적 이론과 각종 경험식을 토대로 만들어졌으며, 실험을 통한 검증 등의 과정을 거쳐 예측의 정밀도는 과거에 비해 높은 수준에 도달하였다.

Field Model은 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics)의 코드들을 사용하여 화재로 인해 발생한 열, 연기, 그리고 화학종의 분포 등을 예측하는 방식이며, 대상 공간을 2차원 또는 3차원 격자로 나누어 각 격자간의 관계를 계산하도록 되어 있다. 그러나 대량의 격자점을 계산하기 때문에 시간의 소요가 많고, Zone Model에 비하여 사용이 복잡한 단점이 있다.

Field Model은 비 정형화된 내부 공간이라든가 내부 시설물에 대한 반영이 가능하며, 공간 내부의 연기 및 온도 분포를 알 수 있어, 특정위치의 정보를 비교적 정밀하게 얻을 수 있다는 특징이 있다. 반면에 Zone Model은 직육면체의 공간의 설정만 가능하며, 결과에서도 층의 높이, 각 층의 온도 등의 주요 정보만을 제공하도록 되어 있다. 따라서 Field Model이 Zone Model에 비해 좀 더 정밀한 고려가 가능하나, 분석 대상과 목적에 따른 모델 선택이 필요할 것으로 판단된다.

3. 분석의 개요

본 연구의 분석 대상은 그림 1에 나타난 바와 같이 원자력 발전소의 안전계통 펌프실이며, 내부에는 펌프 1대가 설치되어있고, 상부에는 케이블이 관통하고 있다. 본 화재구역에서의 대표적인 화재 시나리오는 펌프에 사용되는 윤활유의 누출과 펌프 과열에 의한 윤활유의 연소이다. 공간의 크기는 8.14m(W) × 4.29m(D) × 8.46m(H)의 규모이며, 바닥에서 5.3m 높이에 1.0m(W) × 2.0m(H) 크기의 방화문이 설치되어 있다. 내부에는 철재 계단과 Waffle Slab으로 만들어진 구조물이 있다.

4. 모델선정 및 입력변수의 설정

(1) 화원의 설정

화재 시나리오는 펌프의 이상에 의하여 윤활유가 누출되고 펌프의 과열로 인하여 점화되면서 화재가 시작된다. 가연성 액체가 특정 공간에 누출되는 경우 연료량과 바닥면적의 비교에 의하여 화재의 크기가 결정된다. 본 대상 공간의 총 바닥면적은 34.92m²이나 모터 하부의 받침을 위한 콘크리트 구조물이 일정 면적을 차지하여 실제 누출될 시에 윤활유가 있게 되는 면적은 23.78 m²이다. Zone Model에서의 연소면적은 23.78 m²을 그대로 반영하였으나, Field Model에서는 20m²의 연소면적을 설정하였다.

현재 윤활유(Lubricants)에 대한 연소열(Heat of Combustion)과 질량 소모율(Mass

Loss Rate)의 데이터 확보가 용이하지 못하였던 관계로 매우 보수적인 가정으로 표 1과 같은 경유(Diesel Oil)의 데이터를 사용하여 내부 화재의 규모와 지속시간 등을 설정하였다.

일반적으로 작은 규모의 가연성 액체의 화재는 표면적 전체를 화재 영역으로 설정한다. 그러나 실제 가연성 액체의 화재는 종류에 따라 조금 차이가 있으나, 상온에서 점화 초기에 최대 열방출률에 바로 도달하기보다는 어느 정도의 시간을 가지고 성장한다고 보는 것이 타당하다. 그러므로 Diesel 70 ℓ의 연소 총면적에 의한 최대 열방출율은 37.1 MW이며, 연소지속시간은 62.4초이나 이는 이론적으로 점화와 동시에 최대치에 도달한다는 가정이므로, 이보다는 Ultra-Fast Fire Growth 정도의 화재 성장률($a=0.1878\text{kJ/s}^2$)을 고려하는 것이 조금 더 실제적이고 타당하다 할 수 있다.

37.1MW로 62.4초간 화재가 지속될 경우 발생하는 에너지의 양(Q_{total})은 2315.04MJ이며 Ultra-Fast Growth로 성장하는 화재로 위에 언급된 에너지량을 발생시키는 시간은 333.2초이며 이때 도달하는 최대 열방출율은 20,802 kW 이다.

표 1. 경유의 화재관련 특성 값

Type	Heat of Combustion(MJ/kg)	Mass Loss Rate (kg/m ² · s)
Diesel Oil	40	0.039

(2) 공간 및 내부 설정

실제 대상 공간의 내부에는 펌프와 철제 계단 및 Waffle Slab, 배관 및 덕트와 같은 구조물이 설치되어 있다. Zone Model에서는 공간 내부 구조물인 철제 계단 및 Waffle Slab에 대한 고려는 하지 않았으며, Field Model에서는 상기 구조물 등을 모델에 반영하여 내부를 구성하였다.

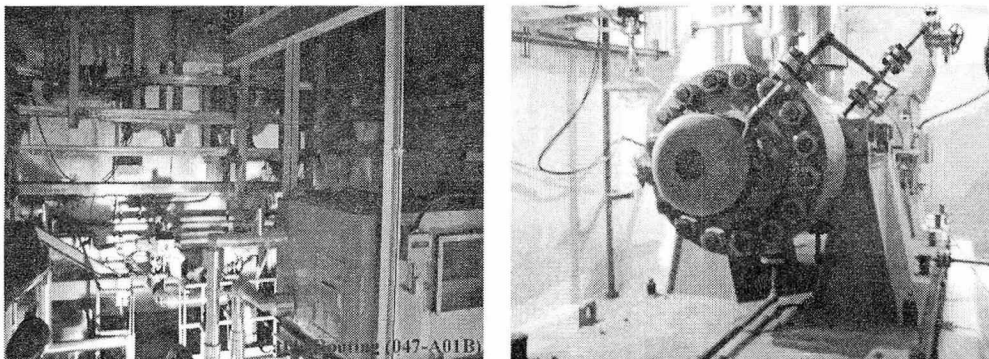


그림 1. 펌프실 내부의 모습

모델링을 위한 대상공간에 대한 설정은 CFAST의 경우 8.14m(W) × 4.29m(D) ×

8.46m(H)의 규모로 설정되었으며, 문은 폐쇄된 상태로 구성되었다. FDS의 경우는 실제 외벽을 포함하여 8.4m(W) × 4.5m(D) × 8.7m(H)로 구성되었다.

격자(Cell)는 총 328,860개로 나뉘어졌으며, 천정, 벽 및 바닥의 재질은 콘크리트로, 내부 구조물의 재질은 철판으로 설정되었다. 그림 2에 FDS에서 설정한 펌프실 내부 및 격자 구성을 나타내었다.

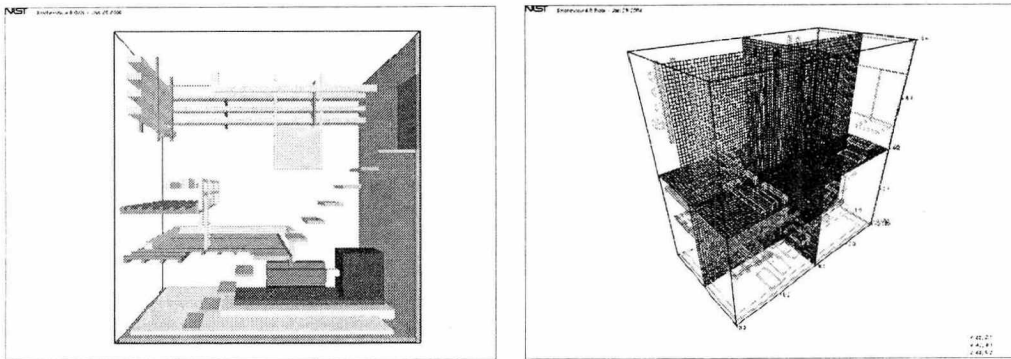


그림 2. FDS에서의 펌프실 내부설정 및 격자(Grid) 구성 모습

(3) 출력 데이터

원자력발전소 안전 펌프실에 대한 분석의 목표는 화재 발생 시 공간 상부에 설치되어 있는 케이블의 손상 및 관련된 기기의 기능 상실 여부이다. 이를 위해서는 상부에 위치한 케이블의 온도가 중요하게 되며, 이는 케이블 주변의 연기층 온도로 케이블의 건전성 여부를 판단할 수 있다.

Zone Model에서는 모델 특성에 따라 상부층의 평균 온도를 가지고 판단하게 되며, Field Model에서는 열전대가 설치된 각 위치별 온도변화를 알 수 있다. 그러므로 Field Model에서는 표 2 및 그림 3에 나타낸 바와 같이 16개의 열전대(Thermocouple)를 케이블 트레이(Cable tray) 옆면에 위치시켜 온도의 변화를 측정하였으며, Zone Model에서는 공간 상부층의 평균온도를 측정하였다.

TC	X	Y	Z	TC	X	Y	Z	TC	X	Y	Z	TC	X	Y	Z
A1	2.1	8.1	7.9	B1	2.1	7.5	7.9	C1	3.5	4.1	7.9	D1	4.1	4.1	7.9
A2	2.1	8.1	7.4	B2	2.1	7.5	7.4	C2	3.5	4.1	7.4	D2	4.1	4.1	7.4
A3	2.1	8.1	6.9	B3	2.1	7.5	6.9	C3	3.5	4.1	6.9	D3	4.1	4.1	6.9
A4	2.1	8.1	6.4	B4	2.1	7.5	6.4	C4	3.5	4.1	6.4	D4	4.1	4.1	6.4

표 2. 열전대 위치 좌표

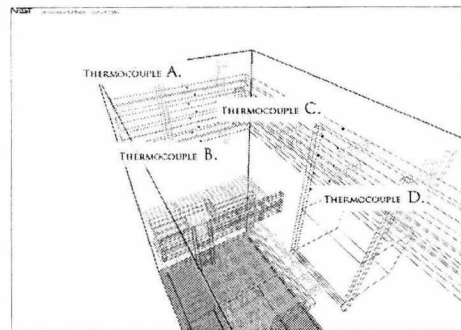


그림 3. 열전대 위치

5. 수행결과 및 분석

(1) Zone Model을 사용한 분석 결과

그림 4에 나타난 바와 같이 상부층 가스 온도는 화재 발생 개시 후 약 160초에서 180초 사이에 400℃ 이상으로, 최고 온도는 약 434℃ 정도 되는 것으로 나타났다. 이때 400℃ 이상으로 지속된 시간은 약 25초 정도인 것으로 확인되었다. 그림 4에 나타난 바와 같이 이 경우는 모두 개구부가 닫혀있고 그로 인해 외부로의 연기 방출이 되지 않는 상황이기 때문에 약 90초 정도에 연기층이 바닥면까지 내려오게 되는 현상을 확인할 수 있었다.

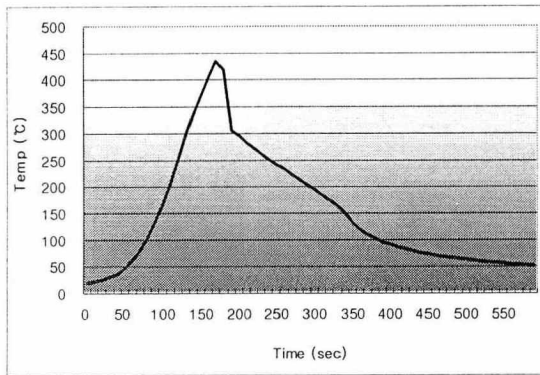


그림 4. 펌프실 상부층 온도

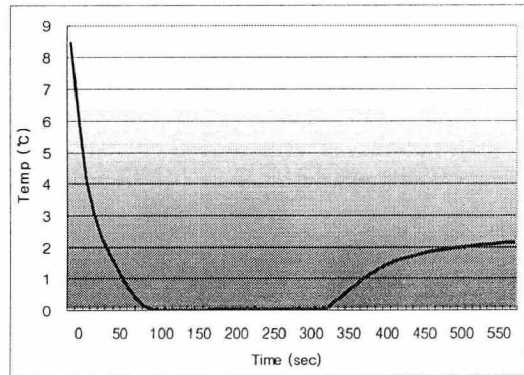


그림 5. 펌프실 경계층 높이

(2) Field Model을 사용한 분석 결과

그림 6, 그림 7, 그림 8 및 그림 9에 나타난 바와 같이 각 위치에 설치된 열전대들은 하부에 설치된 4번의 열전대가 상부에 설치된 1번 열전대에 비하여 온도가 높은 경향을 보여주었다. 이는 화원으로부터 하부의 열전대가 가까워 상승하는 열기류(Fire Plume)에 신속히 감열되고, 또한 하부에서 올라오는 복사열에 의한 열전달도 상부의 열전대보다 많이 받기 때문이다.

단면 온도분포 분석을 보면 화재에서 방출되는 열에너지에 의한 온도는 초기에 상승하게 된다. 그러나 X 단면이나 Y 단면의 온도 분포를 분석해 본 결과, 150초까지는 급격히 상승하여 케이블 트레이 하부에 약 400℃ 이하의 온도분포가 나타나나, 그 이후 하강하여 240초에는 약 80℃ 정도의 온도분포가 나타나는 것을 보여준다. 330℃ 온도 영역을 가시화시킨 Isosurface의 분석을 보면 온도영역이 상승하다 150초 이후 급격히 사라지는 것을 볼 수 있다. 케이블 트레이 온도 상승 분석을 설치된 열전대에 측정된 최고온도는 148초에 A4위치의 지점에서 381.8℃를 기록하였다. 각 부분에서 200℃ 이상 유지되는 시간은 A1에서 39초, B4에서 73초, C1에서 56초, D1에서 61초로 나타났다.

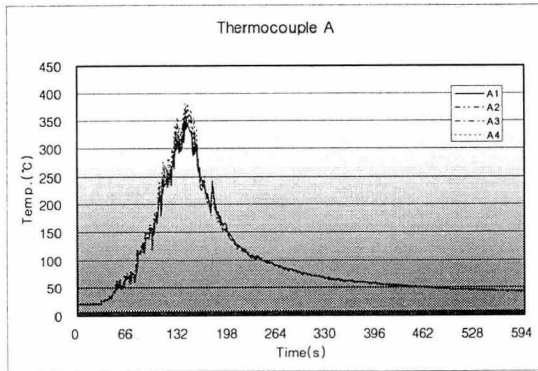


그림 6. 열전대 A의 온도변화

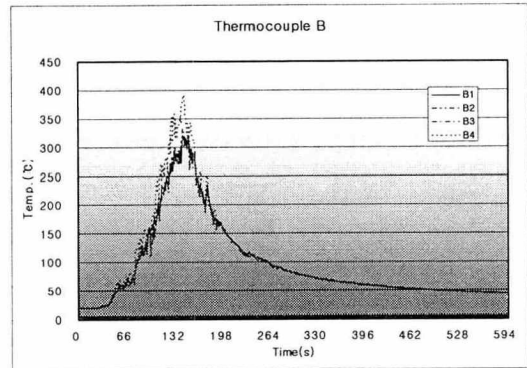


그림 7. 열전대 B의 온도변화

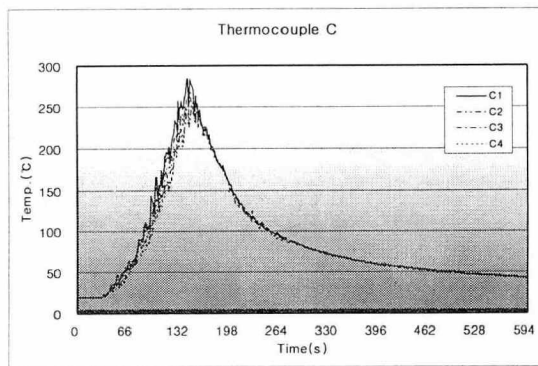


그림 8. 열전대 C의 온도변화

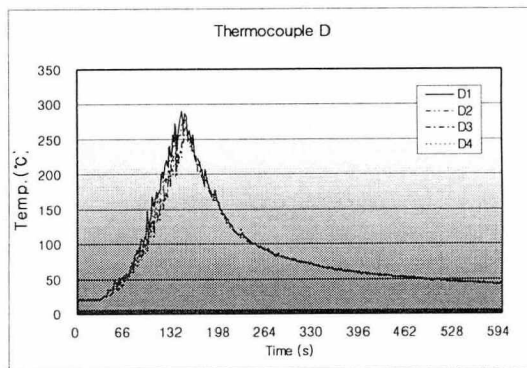


그림 9. 열전대 D의 온도변화

미국 원자력 규제위원회(Nuclear Regulatory Commission: NRC)에서 발간한 "Fire Protection Significance Determination Process (SDP)" 자료 및 미국 전력연구원(EPRI)에서 발간한 "Fire PRA Implementation Guide" 자료에 의하면 상기 결과로 인해 안전 펌프실에 위치한 케이블이 손상 받지 않음을 확인할 수 있다.

6. 분석 및 결론

Zone Model인 CFAST를 수행한 결과, 약 160초에서 180초 사이에 400°C 이상으로, 최고 온도는 약 434°C 정도 되는 것으로 나타났다. 이 때 400°C 이상으로 지속된 시간은 약 25초 정도인 것으로 확인되었다. 이에 비하여 Field Model인 FDS를 사용한 분석 결과, 최고온도는 148초에 A4 위치의 지점에서 381.8°C를 기록하였다.

두 가지 결과를 비교해볼 때 Zone Model에 비하여 Field Model이 더욱 낮은 온도 예측 결과를 보여준다는 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 모델에서의 내부 구조물에 대한 고려 여부로 판단된다. 내부에 설치된 구조물들은 그림 1에서 보는 바와 같이 많은 부피를 차지하고 있다. 그러므로 일차적으로는 Zone Model의 설정과 비교해 볼 때 내부의 산소량이 작아짐을 알 수 있다. 특히 Zone Model에서는 150초에 371℃를 기록하고 160초 이후부터 400℃이상의 온도를 보여주지만, Field Model에서는 148초에 최고온도인 381.8℃를 기록한 것을 보면, 이러한 추측을 뒷받침해주고 있다.

두 번째로는 공간내부의 구조물들이 연소에서 발생하는 열을 흡수하기 때문에 Field Model에서의 온도가 낮은 것으로 판단된다.

Zone Model의 최고 온도는 상부 가스층 온도의 평균값이고, Field Model에서의 최고 측정 온도는 각 열전대에서 측정한 최고 온도이므로, 실제 온도는 Field Model이 Zone Model에 비해 상대적으로 낮으며, 현실적인 값이라 할 수 있다.

그러므로 화재실 내부의 특정 위치의 온도를 예측하여 평가하고자 할 때에는 한 가지 종류의 모델 결과만을 반영하기 보다는 다른 종류의 모델을 사용하여 다양한 분석을 수행하고 결론을 내리는 것이 바람직하다고 사료된다.

감사의글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) NSAC-178L, Fire Event Database for U.S. Nuclear Power Plants, Research Institute, January 1993.
- 2) 이윤환 외 3, "화재모델 CFAST를 이용한 원전 화재구역의 CCDP 평가", 한국 화재소방학회 논문지, Vol. 18, No. 4, pp 64-71, 2004.
- 3) Fire PRA Implementation Guide, TR-105928, EPRI, 1995.
- 4) Supporting Guidance for Implementation of IMC 0609 Appendix F-Fire Protection Significance Determination Process (SDP), U. S. NRC, 2004.
- 5) Kevin B. McGrattan, "Fire dynamics Simulator (Version 4.1) - User's Guide", NIST (2004)