

FDS를 이용한 원전 성능기반 화재 모델링 분석

조성민 · 이규복 · 구희권*
한국전력기술(주), *(주)미래와도전

Performance-Based Fire Modeling in the Nuclear Power Plants using FDS

Cho, Sung Min · Lee, Kyu Bok · Ku, Hee Kwon*
KEPCO - Engineering & Construction Co., Inc., *FNC Technology Co., Ltd.

요 약

본 논문에서는 원자력발전소 기기냉각해수격실 내 가연성 액체에 의한 화재를 가정하여 FDS 전산코드를 이용한 화재모델링 분석을 수행하였다. 특히 열방출률, 환기효과, 복사분율 등에 대한 입력변수 변경을 통해 보다 보수적인 화재시나리오 설정을 위한 환경조건을 확인하였다. 이 결과는 추후 실제 가동 중인 원자력발전소에 대한 성능기반 화재모델링 분석에 활용할 예정이다.

1. 서 론

그 동안 국내 원자력발전소에 대한 화재 위험도 분석은 결정론적인 방법론에 따라 수행되어 왔으나, 최근 미국에서는 화재모델링을 이용한 성능기반 화재위험도 분석방법을 허용하고 있다.^{1,2)} 성능기반 방법론은 대상 방화지역의 설계특성을 고려한 화재시나리오를 설정하고 화재모델링을 수행하여 화재위험도 및 안전 여유도를 정량화하는 것으로 현실적이면서도 안전성을 동시에 보장하는 설계가 가능하다. 하지만 화재시나리오의 작성에 사용되는 입력변수는 다양한 값을 취할 수 있으며, 모든 경우에서 성능기준을 만족하여야 한다. 따라서 본 논문에서는 화재모델링을 이용하여 대상 방화지역의 화재위험도 평가 시 화재모델의 주요 입력변수에 다양한 값을 적용하여 변경된 입력변수가 화재모델링 결과에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 화재 모델링

본 연구에서 사용된 FDS³⁾는 전산유체역학을 사용하여 화재에 의해 생성되는 유체흐름을 해석하며, 화재로 인한 열전달 및 연기이동에 초점을 두고 Navier-Stokes 방정식을 수치해석적으로 계산하는 모델이다.

2.1 일반 사항

분석대상인 원자력발전소 기기냉각해수격실은 직육면체, 29.4m×16.4m×9.0m 크기로 3개의 기기냉각해수펌프 A, B, C 및 13개의 안전정지기기와 2개의 캐비닛이 설치되어 있으며, 각 기기 위로 전원 및 계측 케이블이 배치되어 있다. 안전정지기기는 원자력발전소가 안전하게 정지하기 위한 필수 기기로 화재 시 건전성 확인이 필요한 주요 표적이 된다. 그 외 격실 내 구성요소들의 설계사양은 다음과 같다.

- 건물구조 : 격실 바닥, 벽 및 천정은 0.6m 두께의 콘크리트
- 기기표면 : 펌프, 캐비닛 등 안전정지기기는 1.5mm의 강철
- 케이블 : PE/PVC 피복 케이블
- 환기 : 4개의 강제 환기구(배출-17.7m³/s, 공급-18.4m³/s), 2개의 자연 환기구

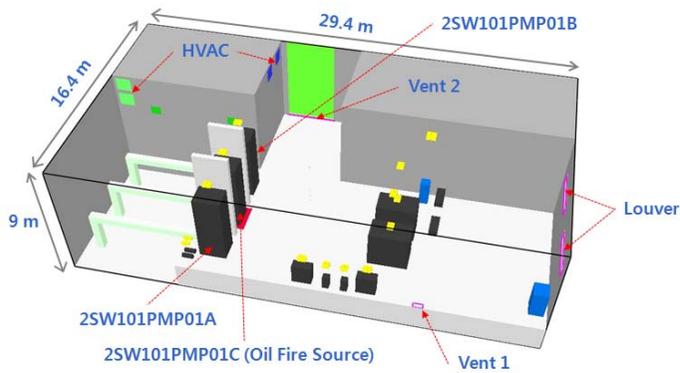


그림 1. 기기냉각해수격실 기하학적 구조

2.2 입력 변수

열방출률 및 연소시간, 복사분율, 환기의 모델입력 변수를 통해 화재 모델의 예측결과에 미치는 영향을 관찰해 보면, 열방출률은 화재의 크기를 정량적으로 기술할 수 있는 핵심 특성으로 화재위험 부분에서 단일 변수로서는 가장 중요하다. 열방출율의 크기 및 연소시간은 유출면적 및 가연물 양에 의해 결정되며, 열방출율의 크기는 방화지역내의 고온층 온도 및 관심대상 기기의 표면온도 증가에 영향을 미친다. 복사는 화염이 인접 대상물의 표면으로 열을 전달하는 주된 방식중 하나로 표면특성길이(characteristic length)가 0.2m를 넘는 화염에 대해서는 복사가 지배적인 열전달방식으로 알려져있다.⁴⁾ 복사분율은 열복사에너지의 방출량에 영향을 미친다. 환기는 화원에서 발생하는 고온 가스와 외부로부터 방화지역내로 유입되는 공기의 온도 및 흐름에 영향을 미친다.

2.3 화재시나리오 설정

기기냉각해수격실 화재는 누출된 윤활유에서 발생하고 누출된 윤활유는 바닥에 Pool을 형성한다고 가정하였다. 윤활유의 화재성장곡선은 화재성장단계 및 소멸단계를 제외한 화재발달단계의 최대 열방출률 크기의 정상상태(Steady State)만을 고려한다. 입력조건은 각 2종류의 열방출율, 복사분율 및 환기효과로 총 6가지 경우이며 분석에서 고려된 화재 시

나리오는 표 1에 나타내었다.

표 1. 화재 시나리오

Scenario	Base Case	Case 1.1	Case 1.2	Case 2.1	Case 2.2	Case 3.1	Case 3.2
HRR(kW)	3982	6046	1991	3982	3982	3982	3982
Fuel area(m ²)	2.22	3.33	1.11	2.22	2.22	2.22	2.22
Grid size(m)	0.2						
Radiative fraction(%)	35	35	35	20	0	35	35
Louver(Natural)	×	○	○	○	○	○	○
HVAC(Mechanical)	×	×	×	×	×	×	○
Fire Duration(sec)	475	313	950	475	475	475	475

2.4 모델링 입력 자료

분석대상 방화구역인 기기냉각해수격실의 화재모델링 입력자료는 NUREG-1805⁵⁾에서 제시된 값을 사용하였다. 입력자료의 자세한 사항은 다음과 같다.

- 콘크리트 : 밀도-2,400kg/m³, 비열-0.75kJ/kg/K, 열전도성-1.6W/m/K
- 케이블 : 밀도-1,380kg/m³, 비열-1.29kJ/kg/K, 열전도성-0.192W/m/K
- 스틸 : 밀도-7,850kg/m³, 비열-0.465kJ/kg/K, 열전도성-54W/m/K
- 환기 : 배출-17.666m³/s, 공급-18.416m³/s
- 화원연료 : 용량-54.11Liter, 열방출율-1,794kW/m², 유효연소열-4.64×10⁴kJ/kg, 질량소모율-0.039kg/m²/s, 밀도-760kg/m³

3. 결 론

열방출율의 크기는 분석대상 방화지역내의 온도증가에 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 그림 2 및 3과 같이 열방출율이 큰 경우, 케이블의 기능 상실이 일어나는 시간이 빨라지는 것으로 나타났다. 그러나 화원의 복사분율이 격실 내 고온층의 평균온도나 대상물의 표면온도 증가에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 그림 4 및 5와 같이 복사분율 감소에 대한 비교 결과, 기본분석에 비해 케이블의 표면온도는 최대 9% 증가하였다. 환기 영향은 분석대상 방화지역내의 공기의 온도 및 흐름에 비교적 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그림 6 및 7에서 HVAC(Heating, Ventilation, and Air Conditioning)은 미작동일 때와 비교에서 격실 내 고온층의 평균 온도를 50% 이상 감소시켰으며, 케이블의 기능 상실은 일어나지 않는 것으로 나타났다.

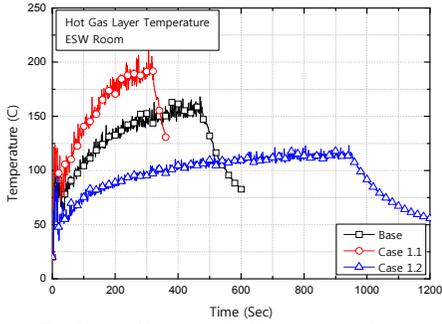


그림 2. 고온층 평균온도 비교(Case1)

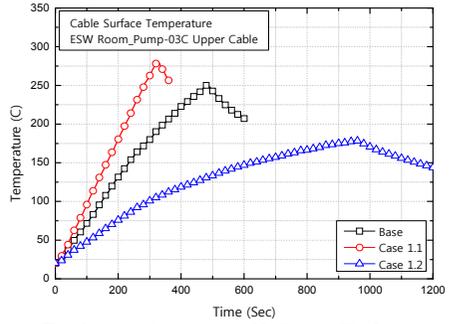


그림 3. 케이블 표면온도 비교(Case1)

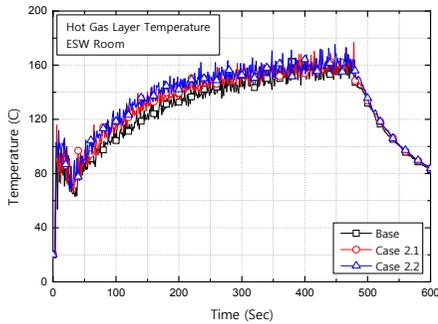


그림 4. 고온층 평균온도 비교(Case2)

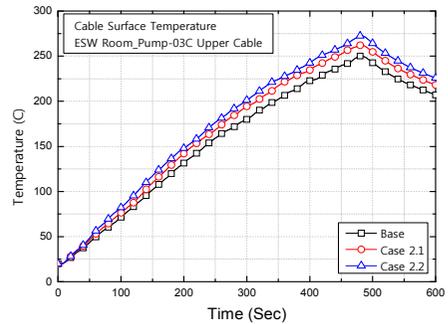


그림 5. 케이블 표면온도 비교(Case2)

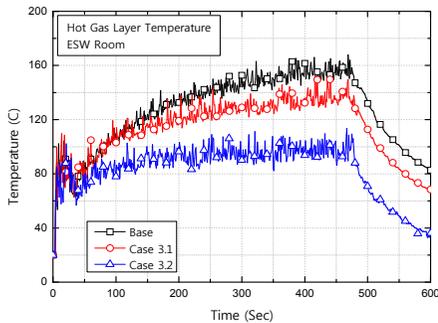


그림 6. 고온층 평균온도 비교(Case 3)

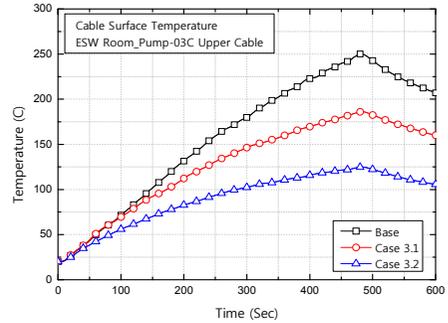


그림 7. 케이블 표면온도 비교(Case3)

참고문헌

1. NRC, 10CFR50.48(c), "Fire Protection"(2004)
2. NRC, Regulatory Guide 1.205, "Risk-Informed, Performance-Based Fire Protection for Existing Light-Water Nuclear Power Plants"(2006)
3. NIST, FDS(Fire Dynamics Simulator) User's Guide(2005)
4. 한국화재보험협회, SFPE 방화공학 핸드북 I, 제3판(2008)
5. NRC, NUREG-1805, "Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the U.S. Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program"(2004)