

원전 펌프실 윤활유 화재 분석 및 확인에 관한 연구

박종석 · 박윤정 · 이창주

한국원자력안전기술원

Simulation & Validation of Lubricating Oil Fire
in Nuclear Power Plant Pump Room
JongSeuk PARK · YoonJeong PARK · ChangJoo LEE

요 약

화재방호에 성능기반 개념을 도입함에 따라 화재모델링의 활용도는 점점 높아지고 있다. 본 연구의 목적은 FDS를 이용하여 원자력발전소 펌프실의 윤활유 화재 시 케이블의 손상여부를 평가하고, 확인분석을 통해 화재모델링의 적합성을 파악하는 데 있다.

화재는 펌프 주변의 누출된 윤활유에서 발생하며 화원의 면적은 2.75 m^2 이고 단위면적당 열방출율은 $1,794 \text{ kW/m}^2$ 로 가정하였다. 계산결과, 고온기체층의 온도는 $400 \text{ }^\circ\text{C}$ 를 상회하고 있으나 케이블 트레이의 온도는 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 아래로 예측되고 있어 본 화재시나리오에서 케이블의 건전성은 유지되고 있으며 밀폐된 격실에서의 대형화재는 환기 지배형 화재가 된다는 것을 보여주고 있다. 또한 확인분석 결과, 화재 시나리오의 주요 변수인 열방출율, 격실크기 그리고 강제 환기 변수가 확인계산 범위 내에 있어 본 계산결과는 NUREG-1824의 확인요건을 만족하고 있다. 따라서 펌프실 윤활유 화재에 대한 모델링의 적합성을 확인하였다.

Keyword: Performance-based Fire Hazard Analysis, Fire Model, Fire Dynamics Simulator(FDS), Compartment Fire, Verification & Validation

1. 서 론

화재방호에 성능기반 개념을 도입함에 따라 화재모델링의 활용도는 점점 높아지고 있다. 화재모델링은 화재로 인해 발생하는 복잡한 유동현상을 수치적으로 단순화시켜 화재 현상을 재현하고 화재전개양상을 예측하여 화재특성을 해석·규명하는 일련의 과정이다.

ASTM E1355에서 모델 검증·확인(verification and validation, V&V) 연구를 수행하여 그 결과를 NUREG-1824¹⁾로 발간하였다.

본 연구에서는 화재모델링 전산코드인 FDS²⁾를 활용하여 원자력발전소 펌프실의 윤활유 화재의 영향을 분석하였다. 본 연구의 목적은 펌프실 화재로 인한 중요한 안전지지 설비의 손상여부 및 손상시간을 파악하고, 확인분석을 통해 화재모델링의 적합성을 짚어보는 데 있다.

2. 화재 모델링

FDS 코드를 사용한 본 연구에서는 난류모델로 대와류모사(large eddy simulation)를 사

용하였고 혼합분율모델을 연소모델로, 복사유한체적법을 복사모델로 사용한다.

또한 FDS가 액면 연소모델을 구현할 수 있어도 연료에 대한 충분한 정보가 없고, 중요한 입력 변수인 누설 면적과 펌프의 실제 구조를 제대로 묘사할 수 없기 때문에, 액면 연소모델을 사용하지 않았다.

Figure 1은 전반적인 펌프실의 구조를 보여주고 있다. 총 구획은 $7.6 \times 4.6 \times 4.9$ (m^3)이며, 복도는 $5.7 \times 1.5 \times 4.9$ (m^3)이다. 수치 격자는 한 면이 0.2 m인 육면체로 산정하였다. 0.1 m의 격자 크기에서도 비슷한 결과가 산출되었지만 계산시간의 경제성을 고려하여 격자 크기를 0.2 m로 산정하였다.

2.1 화재시나리오 설정

펌프실 화재는 누출된 윤활유에서 발생하며 펌프는 누출된 윤활유로 둘러싸여 있다고 가정한다. Table 1은 윤활유의 물성치를 보여주고 있으며, 윤활유의 물성치는 NUREG-1805³⁾를 참고하였다. 또한 윤활유는 탄화수소의 혼합물로서 화학식은 C_nH_{2n+2} 이며, N의 범위는 12~15이다. HRR의 복사분율은 35%, 윤활유의 누출면적은 $2.75 m^2$, 밀도는 $0.76 kg/L$, 단위 면적당 연소율은 $0.039 kg/m^2/s$ 로 가정하여 $0.141 L/s$ 의 비율로 윤활유가 연소된다. 이 비율에 따르면, 총 190 L의 윤활유는 1,348초 동안 연소되며 열방출율은 $4933.5 kW$ 의 일정한 값으로 지정하였다.

환기조건으로는 $0.5 m^2$ 의 면적을 갖는 공급 및 배출 환기구가 각 한 개씩 있으며, 환기구의 체적유량은 $0.1 m^3/s$ 이다.

격실에 설치된 방화문의 크기는 너비 및 높이가 각각 1.1 m, 2.1 m이다. 추가적으로, 방화문은 점화 10분 후 소방대에 의해 개방된다고 가정한다. 방화문이 개방되기 전, 문 아래에 2.5 cm의 틈을 통해서 누설이 발생한다고 가정한다. 또한 화재 시에 화재로 인한 격실의 압력 변화는 없으며, 환기계통은 계속 작동된다고 가정한다.

Table 1. Thermal properties of lubricating oil

물성치	값
Density	$760 kg/m^3$
Heat of Combustion	$46,400 kJ/kg$
Mass Loss Rate	$0.039 kg/m^2 \cdot sec$
Combustion Efficiency	0.97

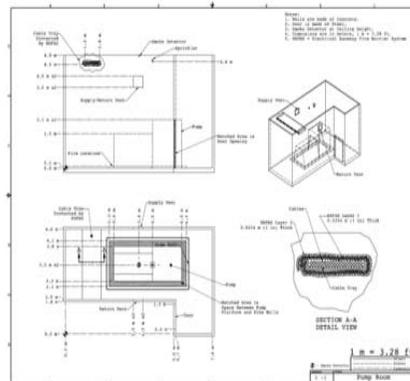


Figure 1. Geometry of the Pump Room.

이는 화재가 환기계통에 영향을 주지 않는다는 사실을 의미한다. 또한 스프링클러는 작동하지 않는다고 가정한다.

2.2 입력 자료

벽, 천장, 바닥은 모두 0.9 m 두께의 콘크리트라고 가정하며, 콘크리트의 밀도, 비열, 열전도성은 각각 2,400 kg/m³, 0.75 kJ/kg/K, 1.6 W/m/K 이라고 가정한다.

보호 트레이의 케이블은 밀도 1,380 kg/m³, 열전도성 0.192 W/m/K, 비열은 1.289 kJ/kg/K라 가정한다. 내부 케이블 온도가 200 °C (392 °F)에 도달하거나 열유속이 6 kW/m²에 도달할 때, 케이블이 손상된다고 가정한다.

단일 케이블 트레이에는 절연 처리된 PVC와 피복된 PE 케이블이 설치되어 있다. 이 케이블들의 지름은 약 1.5 cm이며, 피복재(jacket)의 두께는 약 2 mm이다. 또한 7개의 전도체가 있다. 이 케이블 트레이는 ERFBS(Electrical Raceway Fire Barrier System)에 의해 보호된다. 2개 층으로 이루어져 있는 2.54 cm의 두께를 가지고 있는 ERFBS는 128 kg/m³의 kaowool 절연체이다. GL 86-10, Sup. 1⁴⁾에서 요구되는 한계점을 사용하여 ASTM E 119 조건 하에서 실시한 검증시험에서, ERFBS는 24분 동안 보호를 유지할 수 있다.

따라서 케이블 트레이는 2개의 층으로 모델링하였다. 2개의 층은 5 cm의 kaowool과 질량 비율이 각각 67%, 33%인 구리와 플라스틱으로 이루어진 2.5 cm의 ‘평판(slab)’으로 구성되어 있으며, 평판은 kaowool로 둘러싸여 있다.

열전도 계산은 1차원으로 하고, 원통형이 아닌 직교 좌표로 계산한다. 펌프는 2개의 직사각형 박스로 모델링하였으며 문 외부의 복도를 포함한 총 구획은 동일한 직사각형 격자로 구성하였다.

감지기는 UL등급으로 4.9 %/m의 민감도를 갖는다. 스프링클러는 130 (m·s)^{1/2}의 반응시간 지수 (RTI)를 갖으며, 100 °C에서 작동한다.

고온기체층 및 ERFBS의 측정온도 위치는 Table 2에 기술되어 있다.

2.3 결과

본 연구의 목적은 펌프실의 윤활유화재 시 안전정지 케이블의 손상 가능성을 평가하는 것이다. 이를 위해 가스 온도와 케이블트레이 지점에서의 온도를 예측해야 한다. Figure 2는 FDS로 모델링한 펌프실 모습을 보여주고 있다.

Table 2. Temperature measurement location

변 수	위 치	측 정 량
고온기체층	XYZ= (2.0, 3.0, 4.5), (3.0, 3.0, 4.5), (4.0, 3.0, 4.5), (5.0, 3.0, 4.5)	온도
ERFBS	XB= (0.4, 2.4, 1.5, 4.6, 4.0, 5.0)	내부 벽온도

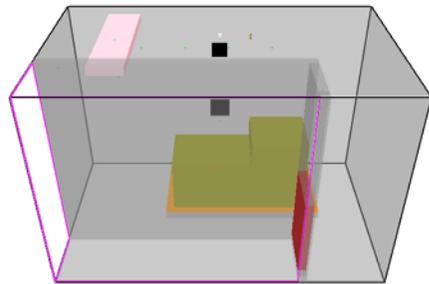


Figure 2. FDS modeling of pump room.

2.3.1 열방출율 (HRR)

본 연구에서 사용된 화원의 면적은 2.75 m²이므로 단위면적당 열방출율은 1794 kW/m²

이다.

Figure 3은 예측된 HRR을 보여주고 있다. HRR은 문이 개방되기 전에 가동 중인 환기 계통으로 유지될 수 있는 수준까지 낮아진다. Figure 3에서 보는 바와 같이 600초에서 HRR이 급격하게 상승한 점을 볼 수 있는데 이는 부족한 산소공급 상태에서 열분해를 계속하고 있는 연료가 문이 개방된 후에 빠르게 연소됨으로써 나타난 현상이다. 역화 현상(backdraft)이라 알려져 있는 이 현상으로 인해, 문이 개방되면서 격실 내로 산소가 공급되어 갑자기 확 타오르는 화재상황이 발생하게 되는 것이다.

2.3.2 격실 온도 분포

Figure 4는 x축에 따른 고온기체층 온도를 Figure 5는 ERFBS의 최고 및 평균 온도를 각각 보여주고 있다.

Figure 4에서 보는 바와 같이 고온기체층 온도는 HRR 계산결과와 유사한 경향을 보여주고 있다. 산소부족상태에서 지속되고 있는 화재가 600초에서 방화문이 개방되면서 공급된 산소로 인해 급격하게 성장하고 있으며 화원인 윤활유의 고갈로 인해 소멸하고 있다.

이러한 계산결과는 누출된 윤활유의 연소율이 명시되었을지라도, 밀폐된 격실에서의 대형화재는 환기지배형 화재가 된다는 것을 보여주고 있다.

반면, ERFBS 내부온도는 고온기체층 온도보다 상당히 낮게 예측되고 있다. 이는 트레이가 좌측 상부 천장부근에 위치해 있고 ERFBS로 인해 열전도가 작아서 나타난 것이다. 이는 ERFBS가 케이블트레이를 열적으로 보호하고 있는 것을 의미한다.

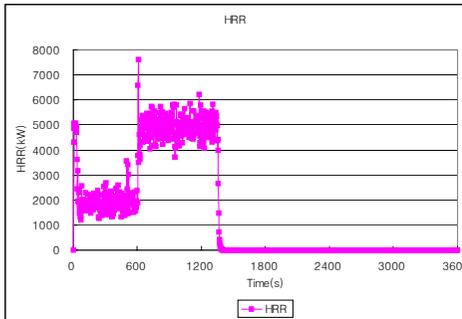


Figure 3. HRR for the pump room fire scenario.

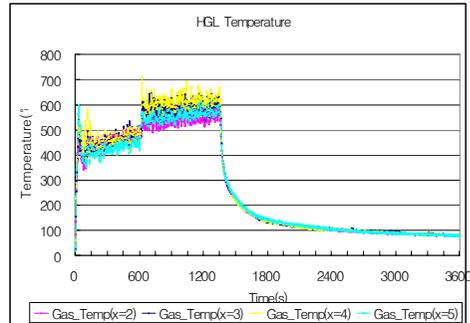


Figure 4. HGL temperature for the pump room fire scenario.

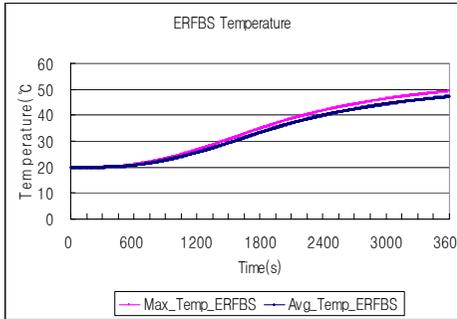


Figure 5. ERFBS temperature for the pump room fire scenario.

Table 3. Summary of validation results

측정변수	범위	계산값
HRR	0.4-2.4	0.94
Room/Target	3.6-16	2.7
Ceiling jet radial distance	1.2-1.7	0.8
Radiant heat flux	0.03~0.2	0.24
Room size - W/H	0.6~5.7	1.6
- L/H	0.6~2.0	0.9
Mechanical ventilation	0.04~0.6	0.32

3. 확인

NUREG-1824에 의하면 화재모델링 분석결과의 확인을 위해 요구되는 변수들은 열방출율, 격실/대상물 높이, 천장 제트류 반경방향 거리, 복사열속, 격실 크기, 자연/강제 환기의 7가지이며 주어진 화재시나리오에서 한 개 이상의 확인변수 값이 확인범위 내에 있어야 한다.

Table 3은 본 계산결과의 적합성을 확인하기 위해 산출된 상기 7개 변수들의 값을 보여주고 있다. Table 3에서 보는 바와 같이 열방출율, 격실 크기 그리고 강제 환기 변수가 확인계산 범위 내에 있어 본 계산결과는 NUREG-1824의 확인요건을 만족하고 있다. 따라서 펌프실 윤활유 화재시나리오의 분석결과는 적합하다.

4. 결론

펌프실 윤활유화재 분석을 통해 ERFBS는 화재 시 케이블트레이의 온도 상승을 막아 열적으로 보호해주는 역할을 하고 있음을 확인하였다. 또한 확인 계산을 수행하여 본 화재시나리오의 주요 변수인 열방출율을 포함하여, 격실의 크기 및 강제환기 변수값이 NUREG-1824에 제시된 확인 범위 내에 있음을 확인하였다. 따라서 본 원전의 펌프실 윤활유화재 시나리오에 대한 화재링의 결과는 적합하다.

참고문헌

1. US NRC, "Verification and validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications", NUREG-1824 Vol.1, pp.2~34, May(2007).
2. K.B. McGrattan, et al., "Fire Dynamics Simulator (Ver.5), Technical Reference Guide", NIST Special Publication 1018-5, NIST, Gaithersburg, Maryland, USA(2007).
3. US NRC, "Fire Dynamics Tools (FDTs) Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the US NRC Fire Protection Inspection Program", NUREG-1805, June(2003).
4. US NRC, "Fire Endurance Test Acceptance Criteria for Fire Barrier Systems used to Separate Redundant Safe Shutdown Trains within the Same Fire Area", GL86-10 Supp.1, March(1994)