

원자력발전소 비상디젤발전실에서 화재모델링 적용에 관한 연구

배용범, 박종석, 이상균, 고완영, 김위경
한국원자력안전기술원

An Application of Fire Modeling in Emergency Diesel Generator Room in Nuclear Power Plant

Bae, YoungBum, Park, JongSeuk, Lee, SangKyoony,
Koh, WanYeong, Kim, WeeKyong
Korea Institute of Nuclear Safety

1. 서 론

경수로 원전에 대한 성능기반 화재방호 기술기준인 NFPA-805¹⁾가 2004년 개정된 미국 원자력발전소의 화재방호에 관한 연방법 10 CFR 50.48²⁾에서 인정됨에 따라 화재모델링에 대한 국제 공동연구³⁾가 활발하게 진행되고 있다. 화재방호와 관련된 규제체계 정립을 위하여 안전심사지침서인 Standard Review Plan (BTP SLPB 9.5-1)⁴⁾와 위험도 정보 및 성능기반 화재방호에 대한 규제지침서 Regulatory Guide 1.205⁵⁾가 개발되었으며 위험도 정보 활용 성능기반 화재방호를 이행하기 위한 지침서인 NEI 04-02⁶⁾도 개발되었다.

미국 연방법에서 준용하고 있는 NFPA-805의 주된 내용은 원자로 안전 목표와 방사성물질 방출목표를 달성하기 위한 원자력발전소에 대한 화재방호요건을 확립하기 위한 방법론으로 기존의 결정론적 방법론뿐만 아니라 화재모델링이나 확률론적 안전성평가를 이용하는 방법론을 채택하고 있다.

국내 원전의 경우 과학기술부 고시 제2005-31호 설계수명이 만료되는 원자로시설의 계속운전 평가를 위한 기술기준 적용에 관한 지침에서 10 CFR 50.48을 참조기술기준으로 지정하고 있어 화재위험성 평가에 화재모델링에 의한 분석이 사용될 예정이다. 그러나 화재모델링에 의한 분석은 NFPA 805에서 제시하고 있는 바와 같이 화재모델의 사용범위 이내에서만 적용되어야 하며 타당성이 검증되어야 한다. 특히 원자력발전소에서 사용되는 화재모델링의 경우 충분한 보수성이 입증되어야 할 것이다.

본 연구에서는 향후 제출될 수 있는 화재모델링에 의한 분석결과에 대한 검증체계를 구축하기 위한 첫 번째 단계로 NFPA 805에 따라 FDS를 이용하여 화재모델링을 수행하였으며 도출되는 문제점을 파악하는데 주안점을 두었다. 분석 대상으로 원자력발전소에서 교류전원 완전상실 사고시 사용되는 비상디젤발전기가 위치한 지역에서 발생할 수 있는 화재사건을 선정하였다. 그리고 경험식과 실험식을 통한 Engineering Calculation을 수행하여 분석결과를 모델링 결과와 비교 검토 하였다.

2. 분석방법

2.1 비상디젤발전실

원자력 발전소에는 어떠한 경우에도 원자로를 안전한 상태로 유지하기 위하여 공학적 안전설비를 갖추고 있다. 교류전원이 완전히 상실되는 사고시에 이러한 설비에 전원을 공급하기 위하여 설치되는 것이 비상디젤발전기이며 다중성 개념에 의거하여 비상디젤발전실은 각 원자력발전소 한 호기에 2개가 있다. 또한 별도 구역에 설치되어있으며 물리적으로는 격리되고, 전기적으로는 완전히 독립되어있다. 비상 디젤 발전기들은 기동신호를 받은 후 10초 이내에 정격 전압 및 주파수에 도달되어 안전등급 4.16kV 모선의 부하에 전력을 공급할 수 있어야 한다. 비상 디젤 발전실의 화재방호시설은 3시간 내화등급을 만족하는 방화벽과 방화문으로 물리적으로 격리되어있으며, 자동화 CO₂ 설비 및 감지기가 설치 되어있다⁷⁾⁸⁾. 윤활유와 디젤유를 저장하는 Day Tank는 각각 3시간 내화등급의 방화벽으로 격리되어있으며 자동화 CO₂ 설비 및 감지기가 설치되어 있다. 비상디젤발전실에서 가연물질은 전선(cable), 디젤유(diesel oil) 및 윤활유(lube oil)의 3가지이다. 두 개의 비상 디젤 발전실중 하나를 Figure 1에 나타내었다.

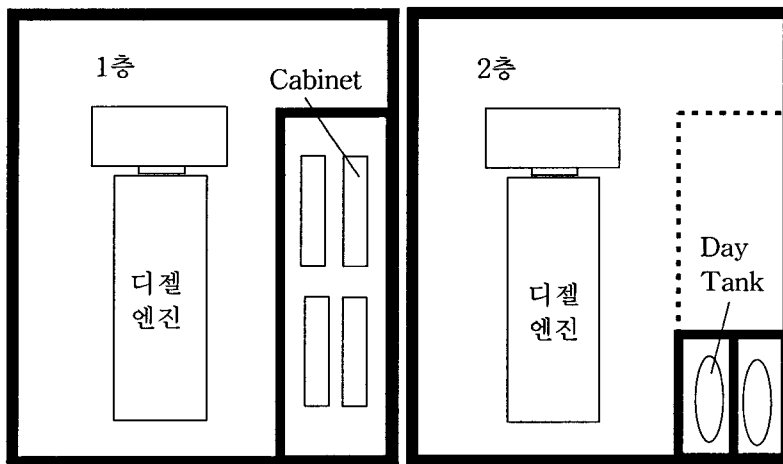


Figure 1. Overview of Emergency Diesel Generator Room A

2.2 화재시나리오 설정

본 연구에서는 대표 화재 시나리오로서 MEFS(maximum expected fire scenario)를 선정하여 이 시나리오에 따른 화재모델링 분석을 수행하였다. 화재시나리오 선별은 비상디젤발전실에 대한 확률론적 위험도분석 결과를 이용하였다⁷⁾⁹⁾. 비상디젤발전실에서 가장 발생확률 높은 화재는 디젤발전기에서의 화재이었으며, 특히 비상 디젤 발전기의 가동 중 연료공급 펌프와 엔진을 연결하는 연료공급선의 파손으로 인한 화재가 가장 피해가 큰 것으로 나타났다⁸⁾. 연소물질은 Day Tank로부터 공급되는 디젤유이며, 펌프에 의해서 일정 압력으로 디젤유가 공급되기 때문에 Jet Fire 또는 Pool Fire를 예상할 수 있겠다. 디젤엔진의 뜨거운 면과의 접촉에 의한 점화를 시작으로 화재는 전파되어 가며, 확대되어가는 화재로부터 일정거리에 떨어져있는 Cable에 대한 화재피해를 예측하였다. 본 화재시나리오 설정에서는 비상 디젤 발전실의 화재방호 설비인 자동화 CO₂ 소화설비의 작동 실패를 가정하였다⁹⁾. 또한 화재피해는 화재로부터 Cable에 전해지는 Heat Flux(kW/m²)를 측정하였다.

Table 1. Fire ignition elements⁷⁾

화재구역	확 률
전기케비넷	4.80×10^{-5}
디젤발전기 (Engine)	8.67×10^{-3}
공조기기	2.39×10^{-4}
임시점화원	1.88×10^{-5}
용접에 의한 케이블화재	1.85×10^{-5}
용접/절단에 의한 가연물화재	1.12×10^{-4}

Table 2. Evaluation of the Severity of Diesel Generator Room Fire⁹⁾

Initiating Component		Engine	
		Yes	No
Severity Screen Criteria	Overhead Cable 피해		O
	주위의 가연물 점화 Cable	O	
	화재감지기 CO ₂ 설비작동		O
	지속시간 10분 이상	O	
	심각한 화재예상	O	
	Fuel Oil leak; Spray onto hot engine		

2.3 화재모델링 분석

본 연구에 사용된 화재 모델은 Engineering Calculation과 FDS이다. FDS는 미국 NIST(National Institute of Standard and Technology)에서 만든 전산해석코드이다. 기존 화재전산코드인 CFAST가 단순한 화재시나리오를 구현할 수 있는 반면에 FDS는 복잡한 공간구조, 다양한 화재시나리오의 구현이 가능하도록 만들어졌다. 그러나 Jet Fire등과 같은 음속이상의 모멘텀을 가지는 화재의 경우 구현에 제약이 있으며, 화재전파(Fire Spread)의 수행에 취약점이 있다. 더욱이 Fire Sprinkler이외의 CO₂, 할론, 분말등과 같은 다양한 Suppression System의 적용이 아직 불가능한 상태이다. 또한 다양한 화재시나리오를 사용자가 화재상황을 맞게 고려해야 하는 단점이 있다. 이러한 제약사항과 단점 때문에 화재모델링 분석시 2개 이상의 전산해석코드의 수행과 Engineering Calculation의 수행을 권장하고 있다. 본 연구에서는 FDS와 Engineering Calculation을 수행하였다.

본 연구에서는 비상디젤발전실에서 일정한 압력에 의해 공급되는 디젤유 유출사고에 기인한 화재를 화재시나리오로 선정하였다. 유류화재의 경우 대개 Pool Fire의 형태로 화재가 진행되므로 화재면적의 확대에 따른 열방출율을 계산하고 이를 FDS에 적용하였다. 화재시나리오에 따른 화재피해 분석을 위해 Heat Flux를 이용하였다. 본 연구에서는 화재로부터 일정한 거리에 위치한 Cable에서 받는 Heat Flux를 계산하여 비교하였다.

2.4 화재모델링 입력 수치

화재에 대한 정의와 확산에 대한 계산은 분석결과에 나타내었다. 분석공간은 3×3×4m인 공간을 선택하였다. Figure 2.에 대상 공간과 연료공급선, 디젤기관, Cable 및 화재에 대한 간단한 배치를 나타내었다.

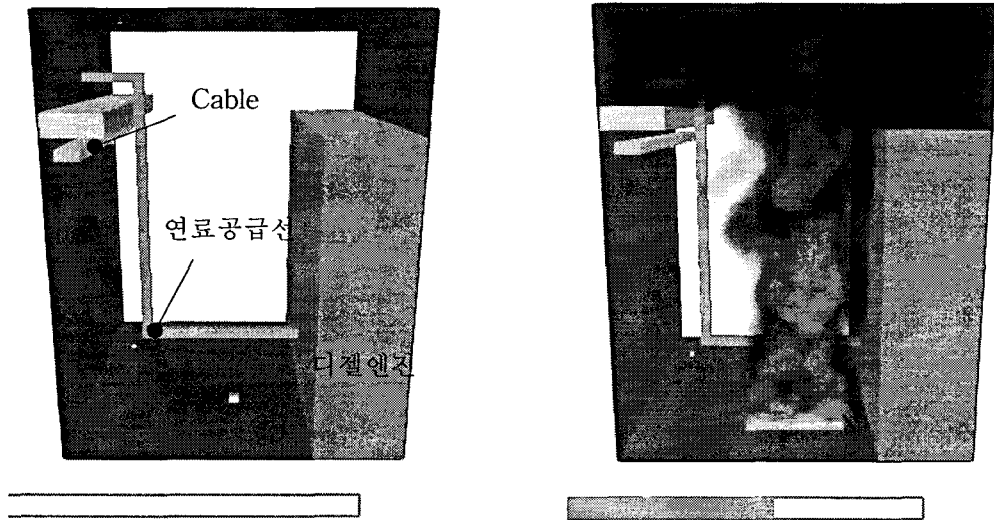


Figure2. Compartment and Fire configuration

3. 분석결과

비상디젤발전실에서 운전 중 연료공급선 파손으로 인한 화재의 형태는 유류화재이기 때문에 Pool Fire를 예상할 수 있다. 전산해석이나 Engineering Calculation을 이용한 방법 둘 다 화재전파 메커니즘을 사전에 고려하여야 한다. Figure 3은 디젤유에 의한 Pool Fire 발생시 시간에 따른 열방출율의 변화를 보여주고 있다. 연장선을 200초까지 연결하면 대략 1600kW에서 수렴하는 곡선을 나타내었다. 전산해석 방법과 Engineering Calculation 방법 둘 다 화재면적의 확장으로 인한 열방출율이 공동으로 이용되었다¹⁰⁾¹⁴⁾¹⁶⁾. 또한 Dike의 존재로 인하여 최대 화재면적은 1m²로 설정하였다.

Engineering Calculation을 통한 Cable(Target)까지의 Heat Flux 계산은 Pool Fire에 대한 경험상관식을 사용하여 수행되었다¹⁷⁾. 전산해석 방법은 Pool Fire에 대한 계산된 열방출율을 적용하여 Cable(Target)까지의 Heat Flux를 계산하였다¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾. 계산된 Cable(Target)에서의 Heat Flux를 Figure 4에 나타내었다.

Cable(Target)은 화재로부터 대략 1.2m 정도 떨어진 상층부에 위치해 있다. Engineering Calculation은 Pool Fire가 확대되어 가면서 Cable(Target)에서 받는 Heat Flux가 증가하였다. 그러나 FDS의 결과는 약 14 kW/m²에서 수렴하는 곡선으로 계산 되어졌으며, Engineering Calculation의 경우 약 7 kW/m²에서 수렴하는 곡선을 나타내었다. 이는 FDS의 경우 대류열과 복사열 둘 다를 Heat Flux계산에 이용한 반면에 Engineering Calculation에서는 복사열만을 고려하여 계산되었기 때문에 차이가 발생한 것으로 예상되어졌다.

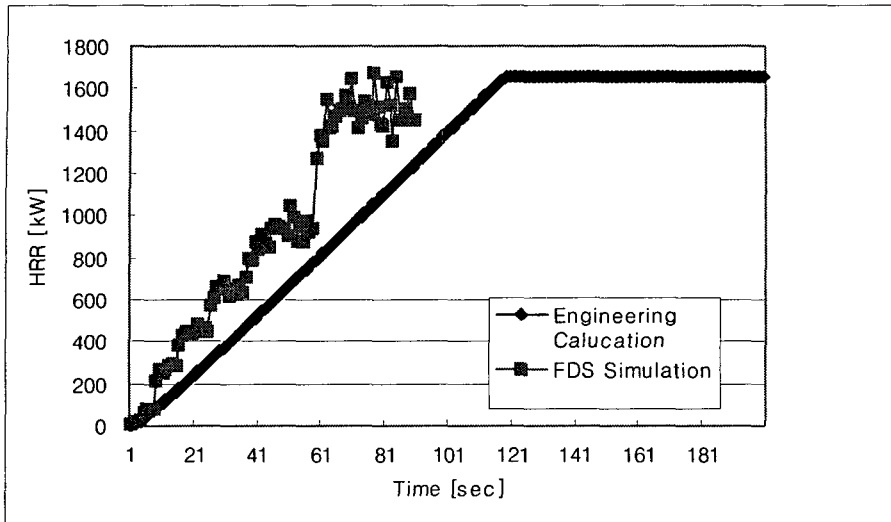


Figure3. Heat Release Rate calculated by Engineering calculation and FDS

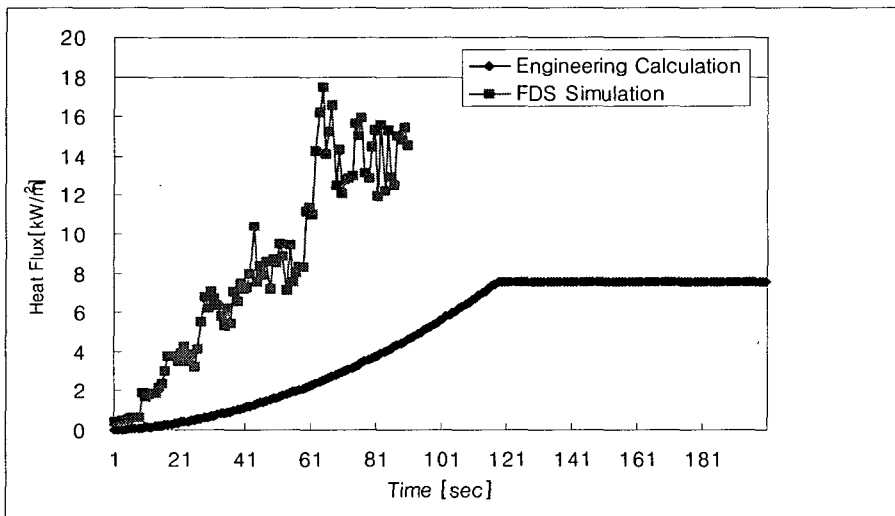


Figure 4. Heat Flux on target using engineering calculation and FDS

4. 결론

비상디젤발전실에서 디젤유화재 시나리오에 대한 Engineering Calculation과 FDS를 이용한 전산해석의 결과를 비교하였다. 디젤유의 Pool Fire에 대한 화재면적의 확대에 따른 열방출율의 정의가 화재전산해석을 위해 중요한 요소였으며, 화재피해분석에서는 화재전산해석(FDS)의 경우 열대류와 열복사 영향을 종합하여 나타내었으나 Engineering Calculation의 경우는 취약점이 있음이 확인되었다. 향후 원자력 발전소에서 화재모델링적용의 검증을 위해서는 다양한 실제 화재실험을 통한 Data의 구축 및 연구가 필요하다고 판단된다.

5. 참고문헌

1. NFPA 805, "Performance-Based Standard for Fire Protection for Light Water Reactor Electric Generating Plants" National Fire Protection Association, Quincy, MA, 2001.
2. 10 CFR 50.48, Fire Protection
3. NUREG/CP-1801, "International Collaborative Project to Evaluate Fire Models for Nuclear Power Plant Applications: Proceedings of 5th Meeting", U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, May 2002.
4. NUREG-0800, "Standard Review Plan for Fire Protection Program", Revision 4 U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, October 2003.
5. Regulatory Guide 1.205, "Risk-Informed, Performance-Based Fire Protection for Existing Light-Water Nuclear Power Plants", U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, May 2006.
6. NEI 04-02, "Guidance for Implementing a Risk-Informed, Performance-Based Fire Protection Program Under 10 CFR 50.48(c)," Revision 1, Nuclear Energy Institute, Washington, DC, September 2005.
7. 울진 5,6호기 확률론적 안전성평가 (II단계 연구):외부사건분석, 한국수력원자력주식회사, 2002
8. KOPEC 98-TD-007, "원전 화재안전성 제고방안 연구", 한국전력기술주식회사, 1998.
9. KAERI/AR-673, "화재사건 분석 방법론에 대한 최근 연구 동향 분석", 한국원자력연구소, 2003
10. Guttuk, D.T. and White, D. A., "Liquid Fuel fires,' Section 2-15, The SFPE Handbook of fire Protection Engineering, 3rd Edition.
11. McGrattan, K., "Fire Dynamics Simulator(Version 4) Technical Reference Guide", NIST Special Publication 1018, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, August, 2005.
12. McGrattan, K. and Forney, G., "Fire Dynamics Simulator(Version 4) User's Guide", NIST Special Publication 1019, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, August, 2005
13. NUREG-1805, "Fire Dynamics Tools(FDT): Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the U.S. Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program", December 2004.
14. Tewarson, A., "Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires", Section 3-4, The SFPE Handbook of fire Protection Engineering, 3rd Edition.
15. James B. Biggins., "Stationary Combustion Engines and Fuel Cells", NFPA Fire Protection Handbook, Nineteenth Edition, National Fire Protection Association, Quincy, MA, 2003.
16. Babrauskas, V., "Heat Release Rates", Section 3-1, The SFPE Handbook of fire Protection Engineering, 3rd Edition.
17. Gunnar Hestkestad, "Fire Plumes, Flame Height, and Air Entrainment", Section 2-1, The SFPE Handbook of fire Protection Engineering, 3rd Edition.