

B-03

원전 화재방호구역의 화재위험 분석을 위한 FDS 적용성 검토

지문학, 김태룡, 박준현
한전 전력연구원

Review on the Applicability of FDS for the Fire Hazard Analysis of the Fire Zone at Nuclear Power Plants

Moon-Hak Jee, Tae-Ryong Kim, Jun-Hyun Park
Korea Electric Power Research Institute

1. 서 론

국내 원자력발전소의 화재방호규정은 원자로설계국의 규정과 규제지침에 따르는 것이 일반적이며, 국내 원자력법과 소방법 및 건축법의 규정도 적용받는다. 이러한 규정과 지침에서 요구되는 기준은 크게 세 가지로 분류할 수 있다. 첫째 요건은 화재위험도분석(Fire Hazard Analysis)이며 둘째 요건은 안전정지능력분석(Capability for Safe Shutdown Analysis)이다. 이와 함께 화재로 인하여 발생가능한 원자로 노심의 손상빈도를 정량적으로 평가하기 위한 목적으로 화재로 인한 확률론적 안전성 평가(Fire-PSA)를 수행하여야 한다.

첫 번째 요건과 두 번째 요건은 원자력발전소에서 화재가 발생한 경우 원자로를 안전하게 정지할 수 있는 능력을 확보하기 위한 것이며, 이에 대한 규정은 1980년 11월 발행된 미국의 화재방호규정인 10CFR50 부록 R¹⁾에 명시되어 있다. 이 요건은 10CFR50.48²⁾에 따르면 1979년 이전 인허가된 원전에 적용되는 것이지만 미국 원자력사업 규제기관의 기술규제입장(Branch Technical Position)에 의하면 이후에 건설된 원자력발전소의 경우도 이와 동일한 요건을 적용받는다.

원자로의 안전정지와 관련한 10CFR50 부록 R의 내용을 보면, 고온정지에 도달하고 그 상태를 유지하기 위한 케이블, 기기, 및 비안전관련 전기회로가 동일 화재방호구역에 있을 경우 안전정지 기능을 수행하기 위한 다중계열중 반드시 하나의 계열은 화재의 영향으로부터 안전하게 유지되어야 한다. 이를 위하여 원자로 격납건물 외부의 방화구역일 경우 다중계열간 3시간 성능의 내화벽으로 격리하거나, 계열간 20피트 이상의 거리를 유지하면서 화재탐지 및 자동소화설비를 비치하거나 또는 1시간 성능의 내화체로 하나의 계열을 보호하고 화재탐지 및 자동소화설비를 설치하도록 요구하고 있다.

상기와 같은 안전정지요건은 결정론적 및 규범적 요건으로 매우 보수적인 경험적 판단

에 의한 것이다. 이러한 요건은 원자력발전소 설계당시 적용되어 다중계열에 대한 격리, 분리, 보호 등의 조치가 취해져야 하나 인허가 당시 이러한 규정을 적용받지 않은 1979년 이전의 원자력발전소의 경우 운영중인 원전에서 이러한 요구조건을 충족시키기에는 건축설비 개축 및 설비개선 측면에서 많은 무리가 따른다. 이와 같은 맥락에서 미국에서는 면제 (Exemption) 또는 경미한 위반사항 (Dedication)을 합법적으로 처리할 수 있는 법적 요건³⁾을 마련하였으며 이의 접근방법은 상세 화재위험분석에 의하여 다중계열의 안전성을 입증하고 화재로부터 안전하다는 평가와 동등한 안전성능을 입증할 수 있는 경우 규제기관에서 이를 검토하여 면제조치를 인정해 주고 있다.

본 논문에서는 방화구역의 화재시 고온, 열유속, 화염접촉 등의 열적 거동을 평가할 수 있는 전산유체역학 (CFD) 모델인 FDS (Fluid Dynamics Simulator)를 이용하여 원전 화재방호구역의 위험성 평가를 수행하였다. 즉, 원자로 안전정지 관련 기기가 동일한 화재구역에 존재하는 경우 화재시나리오를 구성하고 이에 대한 화재 모델링 결과를 분석하고 평가함으로써 전산유체역학 모델인 FDS에 의하여 원전 방화지역의 화재위험성을 평가할 수 있는 방안을 검토하였다.

2. 본 론

2.1. 분석 프로그램

방화지역의 화재시 열적거동 및 시간에 따른 변수들을 분석하기 위한 전산프로그램은 미국 국립표준연구소 (NIST)에서 개발하여 공개한 FDS (Fire Dynamics Simulator, version 4.0.5)와 연기와 열적 거동을 시각적으로 볼 수 있는 Smokeview⁵⁾ (version 4.0)을 이용하였다. 전산유체역학모델인 FDS는 저속 열적 거동을 Navier-Stokes식에 의하여 수치해석을 하는 Hydrodynamic 모델, Mixture Fraction 연소 모델, Finite Volume Method를 응용한 Radiation Transport 모델로 구성된 필드모델이다.

2.2. 방화지역 화재모델링

분석대상인 방화지역 또는 방호구역에 대한 화재모델링 분석을 위하여 다음과 같은 항목에 대하여 상세 자료를 취득하고 분석하였다.

- (1) 건축도면 및 P&I 도면에 의한 방호구역 기하학 형상 구성
- (2) Grid 크기 및 수량 결정
- (3) Obstruction 종류 및 위치의 잠정 결정
- (4) Target의 Gas 및 Solid Phase Output Quantity 결정
- (5) 자연환기와 강제환기량 및 환기방법에 대한 평가
- (6) 화재감지 및 소화설비 검토
- (7) 점화원과 가연물의 선정 및 시나리오별 특성 분석
- (8) 화재 시나리오 구성 및 화재위험성 평가 (1차 평가)

(9) 현장 Walkdown 및 방화지역 리모델링에 의한 상세평가 (2차 평가)

2.3. 화재위험 정량적 평가 기준

화재에 의한 영향을 평가하기 위한 항목들은 온도, 열속, 화염의 직접적인 접촉 등으로 대별할 수 있으며, 본 논문에서는 EPRI 1008239⁶⁾, NUREG-1805⁷⁾, SFPE Handbook⁸⁾ 등에서 제공하는 값을 기준하였으며 국제적으로 공인된 이들 값에 대하여 별도의 검증과 타당성 입증은 수행하지 않았다. 아래의 표에는 화재로 인한 영향을 평가하는데 사용한 손상기준치를 제시하였다.

표 1. 화재모델링에서의 열적영향 평가 기준

평가항목	손상기준치	비고 (참고 자료)
케이블 표면온도 (Wall Temperature) 1) Thermoplastic Cable (or) 2) Thermoset Cable	1) 205 °C (400°F) 2) 330 °C (625°F)	EPRI 1008239 App.H
케이블 표면 열유속 (Heat Flux) 1) Thermoplastic Cable 2) Thermoset Cable	1) 6 kW (0.5 Btu/ft ² -sec) 2) 11 kW (1.0 Btu/ft ² -sec)	EPRI 1008239 App.H
Unconfined Oil Film Thickness 1) 누설량 : 25 Gallon (95 L) 이하 2) 누설량 : 25 Gallon (95 L) 이상	1) 0.7 mm (0.027 in) 2) 2.8 mm (0.1 in)	EPRI 1008239 App. G
1. Electrical Panel 또는 전기화재 2. 유류 화재 3. 일반가연물 (A급)의 1MW 도달 시간 - Ultra-Fast/Fast/Medium/Slow	1) Steady State 가정 2) Steady State 가정 3) 75초/150초/300초/600초	Steady Fire의 경우 t=0에서 최대발열을 가정
케이블 화염전파속도 (Flame Spread) 1) Vertical Cable 2) Horizontal Cable	1) 8~25 mm/sec 2) 0.3~0.9 mm/sec	EPRI 1008239 App.R
화염접촉 (Flame Impingement)	Plume Zone 포함여부	NUREG-1805
복사분율 (Radiation Fraction)	0.2-0.35	SFPE Handbook
연소효율 (Combustion Coefficient)	0.6-1.0	SFPE Handbook

2.4. 방화구역 화재모델링 분석

- 1) 현상 : 동일 방화구역에 안전정지관련 케이블 및 벨브가 존재하므로 원전 화재방호 규정에 따를 경우 다중계열간 격리, 분리, 보호조치가 필요함
- 2) 화재시나리오 구성 및 FDS 입력자료 평가

표 2. 방호구역내에서 적용가능한 화재시나리오

시나리오명	ZAJ08-SC01	ZAJ08-SC02	ZAJ08A-SC01
Combustible	- 종류 : 윤활유 / 누설량 : 136 리터		A급 가연물
Ignition Source	고온 (주증기배관)		Hot Work
화원위치	방호구역 중앙지역	방호구역 측면지역	방호구역 벽체지역
화염전파 가능성	없음	없음	없음
개구부 영향	있음	있음	있음
강제환기 영향	있음	있음	있음
단위열발생율	1,307kW/m ²	1,307kW/m ²	95kW/m ²
화재성장율	Steady	Steady	Fast

- 방호구역 기하학 수치 : (D*W*H) = 14.4 * 9.6 * 12.8 m
- Grid 선정 : 72 * 48 * 64 = 221,184 개
- Target : 안전정지관련 케이블 및 주변기기

Smokeyview 4.0.6 - Sep 15 2005



그림 1. 화재모델링을 위한 Grid 및 Obstruction 구성 화면

3) Target에 대한 화재모델링 분석 결과

표 3. 화재모델링 분석 결과 (1차 평가)

시나리오명	ZAJ08-SC01	ZAJ08-SC02	ZAJ08A-SC01
CPU 소요시간	7.67 hr	10.04 hr	1.39 hr
최대 온도 (℃)	52.5	45.0	28.28
최대열속 (kW/m ²)	12.99	8.74	0.04
Flame Impingement	영향없음	영향없음	영향없음
Target 손상 여부	열속에 의한 손상	Cable 종류별 차이	안전
조치사항	설비개선필요	상세 검토 필요	해당없음

4) 1차 화재모델링에 대한 잠정 결론

상기의 화재모델링 분석결과에 의하여 시나리오 ZAFJ08-SC01의 경우 안전정지 관련 케이블 및 기기는 표면 열속에 의하여 손상 또는 열화의 우려가 있으므로 별도의 조치가 필요함

표 4. 화재모델링 분석에 의한 Target 표면 열속값

2.5. 설비개선을 가정한 방호구역 화재 리모델링 (2차평가)

1) 설비개선 방안

1차 모델링 결과, 열적 거동을 살펴보면 Target에 대한 열적 손상원인은 Heat Flux이며 화재발생후 약 36.85초가 경과한 시점부터 일부 케이블 부위에 손상 한계치의 열속이 가해진다. 열속을 줄일 수 있는 방법은 다양하나 가장 용이하며 유효한 방법으로 오일확산을 제한하는 방법을 적용하였다. 이에 따라 1차 평가시 오일누설량과 면적은 136리터, 41평방미터였으나 2차 평가시에는 16리터, 3.2평방미터로 개선되었다.

2) 설비개선이 이루어진 상태를 가정한 화재시나리오

표 5. 화재시나리오 (2차 평가)

시나리오명	ZAJ08-SC03	ZAJ08-SC04
Combustible	윤활유 / 16 리터 누설 (Oil Drip Pan)	
Ignition Source	고온 (주중기배관)	
화원위치	방호구역 중앙지역	방호구역 측면지역
화염전파 가능성	없음	없음
개구부 영향	있음	있음
강제환기 영향	있음	있음
단위열발생율	1,307kW/m ²	1,307kW/m ²
화재성장율	Steady	Steady

3) Target에 대한 화재 리모델링 분석 결과

표 6. 화재모델링 분석 결과 (2차 평가)

시나리오명	ZA J08-SC03	ZA J08-SC04
CPU 소요시간	7.92 hr	10.34 hr
최대 온도 (°C)	31.23	30.12
최대열속 (kW/m ²)	1.2	0.79
Flame Impingement	영향없음	영향없음
Target 손상 여부	안전	안전
조치사항	설비개선 (Oil Drip Pan 설비)	

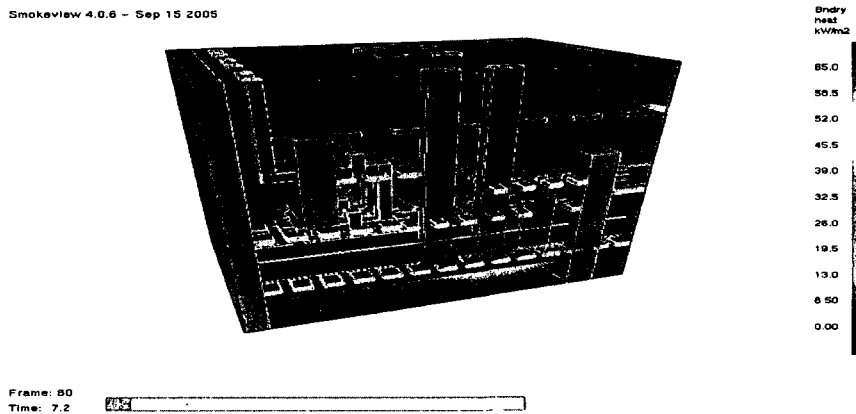


그림 2. 설비개선후 열유속 그래프 및 상층부 연기 집적 상태

4) 2차 화재모델링에 대한 결론

Oil Drip Pan을 설치하여 오일확산면적을 줄이고 연소량을 줄이는 설비개선의 결과 제한된 구간 (Confined Area)에서 연소가 일어났으며, 이로 인하여 안전정지 관련 케이블 및 기기에 미치는 온도 및 열유속은 매우 낮은 상태로 유지되어 Target의 안전정지 관련 기능을 확보할 수 있는 것으로 나타남

3. 결 론

운전중인 원전의 화재위험도분석은 방화지역 또는 방호구역이 일정공간으로 제한된 상태를 기준하여 평가된다. 그러나 운전중의 경상점검(Preventive Surveillance) 또는 운전중 정비 (On-line Maintenance)가 이루어지거나 계획예방정비 기간중에는 방화지역 또는 방호구역의 배열이 변경될 경우 가연물, 점화원, 환기량, 연소조건 등이 크게 변동하게 된다. 따라서 화재조건별 적정 시나리오에 의한 화재위험도 평가 방법을 마련되어야 하며 이를 위하여 다양한 존모델 또는 필드모델이 개발되었다.

본 논문에서는 전산유체역학 모델로서 미국 국립표준연구소에서 개발한 FDS를 이용하여 원전 화재방호구역의 위험성 분석을 위한 적용성을 평가하였다. 이의 결과 화재 시나리오별 온도, 열속, 화염접촉 등 화재로 인한 동적 영향을 평가할 수 있었으며 설비개선을 가정한 상태에서도 화재위험 영향을 평가하여 개선안을 제시할 수 있었다. 또한 화재모델링에 의한 상세평가에 의하여 정량적 화재위험분석방법인 Fire-PSA에서 요구하는 조건부 노심손상확률 (CCDP) 값을 개선할 수 있는 논문⁹⁾이 발표되고 있는 등 원전 화재방호구역의 화재위험 분석을 위한 화재모델링 기법은 앞으로 운영원전뿐만 아니라 신규원전 및 계속운전을 계획하고 있는 원전에 폭넓게 적용될 수 있을 것으로 여겨진다.

참고문헌

- 1) NRC, 10CFR50 Appendix R, Fire Protection Program (1980.11)
- 2) NRC, 10CFR50.48, Fire Protection (1980.11)
- 3) NRC, 10CFR50.12, Specific Exemptions
- 4) NIST, FDS User's Guide (2005.02)
- 5) NIST, User's Guide for Smokeview; A Tool for Visualization Fire Dynamics Simulation Data (2004.08)
- 6) EPRI, EPRI/NRC-RES Fire PRA Methodology for NPF (2005.09)
- 7) NRC, Fire Dynamics Tools (2004.11)
- 8) SFPE, The SFPE Handbook of Fire Protection; 3rd Edition (2002)
- 9) 이윤환, 양준언, 김종훈, 김운형, '화재모델 CFAST를 이용한 원전 화재구역의 CCDP 평가(II)' 한국화재소방학회 논문지, Vol. 19, No.3, pp.20~27 (2005)