

원전 화재방호구역의 화재위험 분석을 위한 FDS 적용성 Applicability of FDS for the Fire Hazard Analysis of the Fire Zone at Nuclear Power Plants

지문학*[†] · 이병곤

Moon-Hak Jee*[†] · Byung-Kon Lee

*한전 전력연구원 원자력발전연구소, 충북대학교 안전공학과
(2006. 6. 14. 접수/2006. 10. 2. 채택)

요 약

원자력발전소의 화재방호규정은 정성적인 화재위험성평가와 정량적인 화재위험도분석에 기반을 두며, 화재위험은 심층화재방어개념인 화재 예방, 화재 진압, 및 피해 최소화의 3가지 요소에 균형을 유지하면서 화재방호계획에 의해 관리되고 있다. 최근 화재위험 상세평가는 일반적으로 존모델 또는 필드모델을 이용하고 있다. 본 논문에서는 이런 추세에 따라 최신 화재모델링 도구인 FDS를 이용하여 원자력발전소의 방화지역에 대한 정량적 화재위험분석 및 화재영향 평가가 가능한지 그 여부를 확인하였다. 이의 결과 화재모델링을 이용한 정량적 위험분석은 원자력발전소의 방화지역에 대한 정량적 위험도 분석뿐만 아니라 화재로 인한 원자로 노심 손상빈도를 개선할 수 있는 응용 도구로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

ABSTRACT

The fire protection regulation for the nuclear power plants is based on the qualitative fire hazard assessment and the quantitative fire risk analysis, and the fire risk is managed by the fire protection plan with the appropriate balance among the fire prevention, fire suppression and the minimization of the fire effect. In these days, the zone model or the field model is generally used for the detail evaluation for the fire risk. At this paper, with consideration of the present trend, we evaluate whether the quantitative fire risk analysis and the assessment of fire result for fire areas at nuclear power plants can be possible by use of Fire Dynamics Simulator (FDS) that is the state-of-the-art fire modeling tool. Consequently, it is expected that the quantitative fire risk evaluation propelled by the fire modeling can be available as an applicable tool to improve the core damage frequency as well as the quantitative fire risk analysis.

Keywords : Nuclear power plant, Fire Hazard, Fire risk, FDS (Fire Dynamics Simulator), Field model

1. 서 론

국내 원자력발전소(이하 “원전”이라 명명함)의 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 안전정지능력의 확보(Safe Shutdown Capability)

여부이다. 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 원전에서 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. 미국의 연방법규인 10CFR50.48²⁾에 따르면 위에서 언급된 요건은 1979년 이전 인허가된 원전에 적용되는 것이지만 미국 원자력사업 규제기관의

[†]E-mail: jmbak@kepri.re.kr

기술규제입장(Branch Technical Position)에 의하면 1979년 이후에 건설된 원자력발전소의 경우도 이와 동일한 요건을 적용받게 된다.

원자로 안전정지와 관련한 10CFR50 부록 R의 내용을 보면, 고온정지에 도달하고 그 상태를 유지하기 위한 케이블, 기기 및 비안전관련 전기회로가 동일 방화구역에 있을 경우 안전정지 기능을 수행하기 위한 다중계열중 반드시 하나의 계열은 화재의 영향으로부터 안전하게 유지되어야 한다. 이를 위하여 원자로 격납 건물 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 결정론적인 규범으로 매우 보수적인 경험적 판단에 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 원전 방화지역의 화재시 고온, 열유속, 화염접촉 등의 열적 거동을 평가할 수 있는 전산 유체역학 모델인 FDS(Fluid Dynamics Simulator)를 이용하여 방화구역들의 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; National Institute of Standard and Technology)

에서 개발하여 공개한 FDS(Fire Dynamics Simulator, version 4.0.5) 및 열과 연기의 거동을 시각적으로 볼 수 있는 Smokeview⁵⁾(version 4.0)를 이용하였다. 전산 유체역학모델인 FDS는 지속 열적 거동을 Navier-Stokes 식에 의하여 수치해석을 하는 Hydrodynamic 모델, Mixture Fraction 연소 모델, Finite Volume Method를 응용한 Radiation Transport 모델로 구성되어있다.

2.2 방화지역 화재모델링

방화지역의 화재모델링 분석을 위해서는 우선적으로 필요한 기본적인 정보와 자료를 확보하여야 한다. 이는 분석목적과 방화지역의 물리적 특성에 따라 다소 차이가 있으나 대부분 다음과 같은 항목에 대하여 상세 자료가 필요하며 본 연구에서도 다음과 같은 항목에 대한 자료와 정보를 취득하였다.

- 건축도면 및 발전소 계통도면을 이용하여 분석대상인 방화구역의 기하학 형상과 구조물의 물리적 수치 확인
- 방화구역의 크기를 고려한 그리드(Grid) 규격의 검토 및 프로그램 계산시간을 고려한 전체수량 결정
- 방화구역의 열연기거동에 장애가 되는 방해물(Obstruction)의 종류 및 좌표상의 위치 결정
- 목표대상물(Target)에 대하여 구하고자 하는 기상 또는 고상의 출력변수값 결정
- 방화구역의 자연환기와 강제환기량 및 환기방법에 대한 평가(시간에 대한 환기방법 검토)
- 방화구역에 존재하는 화재감지기와 소화설비의 검토 및 감지기와 자동소화방법 연동 분석
- 1차 점화원과 가연물 선정 및 화재시나리오별 특성 분석
- 화재 시나리오 구성 및 화재위험성 평가(1차 평가)
- 현장의 실제 상황점검(Walkdown) 및 방화지역의 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 1008239,⁶⁾ NUREG-1805,⁷⁾ SFPE Handbook⁸⁾ 등에서 제공하는 값을 기준하였다. 단, 본 연구는 평가방법에 대한 결과의 경향을 분석하기 위한 목적이므로 이미 국제적으로 공인된 변수들의 평가기준 및 분석방법들에 대해서는 별도 검증이나 타당성을 평가하지 않았다. Table 1은 이번 연구에서 화재로 인한 열적 영향을 평가하는데 사용한 손상기준치(damage threshold)를 제시하였다.

Table 1. Damage threshold for fire modeling

Evaluation item	Threshold	Reference
Surface temperature of cable 1) Thermoplastic Cable 2) Thermoset Cable	1) 205°C (400°F) 2) 330°C (625°F)	EPRI 1008239 App.H
Heat flux to the cable surface 1) Thermoplastic Cable 2) Thermoset Cable	1) 6 kW 2) 11 kW	EPRI 1008239 App.H
Unconfined oil film thickness (for leakage amount) 1) Less than 95 liters 2) More than 95 liters	1) 0.7 mm 2) 2.8 mm	EPRI 1008239 App. G
Assumption for Fire Growth 1) Electric fire 2) Oil fire 3) General combustibles	1) Steady state fire 2) Steady state 3) 75~600 seconds	Refer to the general guide line
Flame Spreading rate at cable 1) Vertical Cable 2) Horizontal Cable	1) 8~25 mm/sec 2) 0.3~0.9 mm/sec	EPRI 1008239 App.R
Flame Impingement	Within Plume Zone	NUREG-1805
Radiation Fraction	0.2-0.35	SFPE H/B
Combustion Coefficient	0.6-1.0	SFPE H/B

2.4 방화구역 화재모델링 분석

2.4.1 평가대상인 방화구역의 현재 상태

평가대상인 원전의 방화구역에는 다양한 가연물이 존재하며 특히 원자로 고온정지를 위한 안전정지케이블 및 안전정지관련기기가 하나의 방화구역에 존재하고 있다. 원전 화재방호규정 요건에 따라 경우 원자로의 고온정지를 위하여 필요한 안전정지 관련 케이블 및 기기는 방화구역별 격리하거나 계열별 일정의 거리(약 6.1미터 이상)를 확보하여야 하며, 이러한 조치가 불가능할 경우 한 계열을 내화체로 보호하는 등 특별한

한 조치를 취하여야 한다.

반면 연구대상인 원전 방화구역들은 현실적으로 이러한 요건을 충족할 수 없는 실정이므로 결정론적 요건을 만족할 수 없다. 그러나 동일 방화지역에 원전 안전정지 관련 다중계열이 존재할 경우에도 화재로부터 안전한 상태를 유지할 수 있음을 입증하거나, 현 상태가 미흡할 경우 설계변경이나 설비개선에 의해 안전정지 기능을 확보할 수 있도록 화재위험을 정성적으로 평가하고 FDS에 의한 상세 화재모델링에 의해 분석하여 면제조치 등 현실적 대안을 마련하여야 한다.

Table 2. Fire scenario and features

Scenario	ZAJ08-SC01	ZAJ08-SC02	ZAJ08A-SC01
Combustible	- Type : lube oil - Leak amount : 136 liter		General (type A)
Ignition Source	Hot temperature (Main steam line)		Hot Work (temporary)
Fire location	Center	wall side	Wall side
Fire propagation	No possibility	No possibility	No possibility
Opening effect	Incorporated	Incorporated	Incorporated
Forced ventilation	Existing	Existing	Existing
HRR	1,307 kW/m ²	1,307 kW/m ²	95 kW/m ²
Fire growth rate	Steady	Steady	Fast

2.4.2 화재시나리오 구성 및 FDS 입력자료 평가

방화지역에 대한 화재모델링을 수행하기 위하여 2.2 방화지역 화재모델링에서 언급된 정보와 자료를 조사하여 실제 발생 가능한 화재시나리오를 작성하였다. 이후 화재시나리오의 특성별 다른 시나리오의 화재 현상을 대표적으로 취급할 수 있는 3종류의 화재시나리오를 최종적으로 결정하여 Table 2에 표시하였다.

표에 명시된 화재시나리오명은 FDS의 내부 프로그램에 지정된 영문명칭이며 아래와 같은 기준에 따라 화재위험성을 가장 대표적으로 나타내는 화재시나리오를 선정하였다.

- 방화구역 기하학 수치는 가로, 세로, 높이를 산정함(D*W*H) = 14.4*9.6*12.8 m)
- 그리드 개수는 가로, 세로, 높이별 20 cm를 기준하여 산정함(72*48*64 = 221,184개)
- 목표대상물은 A 계열 또는 B 계열의 안전정지관련 케이블 및 주변기기로서 두 계열중 하나의 계열이 보호되는 것을 기준함
- 가연성물질의 종류와 양의 결정은 화재시나리오별 발생 가능한 종류별 물량을 기준하여 대표물량을 평가하여 산정함
- 점화원은 고온 증기가 지나가는 배관에서 발화되

거나 현장의 임시작업에서 점화되는 것을 기준함

- 가연성물질의 열발생율은 윤활유 종류에 대해 이미 알고 있는 일반적인 값을 적용함
- 화재성장율의 경우 액체연료의 경우 발화와 동시에 최대발열량에 도달하며 일반기연물의 경우 Fast Fire를 기준하여 평가의 보수성을 유지함
- 환기, 화원 위치 및 기타 일반적인 정성적 기준은 평가방법상의 보수성을 확보하기 위한 관점에서 현실적인 기준을 적용함

2.4.3 목표대상물에 대한 화재모델링 분석 결과

화재모델링 결과 Table 3에서 나타난 바와 같이 ZAJ08A-SC01의 경우 화재로 인한 열적 영향은 없는 것으로 평가되었다. 반면, 화재시나리오 ZAJ08-SC01의 경우 열속에 의한 영향으로 원자로 안전정지를 위한 케이블의 손상이 발생하였으며 화재시나리오 ZAJ08-SC02의 경우 최대 열속이 8.74 kW/m²로서 케이블이 내화케이블일 경우 화재로 인한 영향은 없으나 비내화케이블을 가정하여 열적 영향에 대한 추가적인 검토를 수행하였다. Table 4는 화재모델링 분석결과 케이블의

Table 4. Heat flux table for cable surface

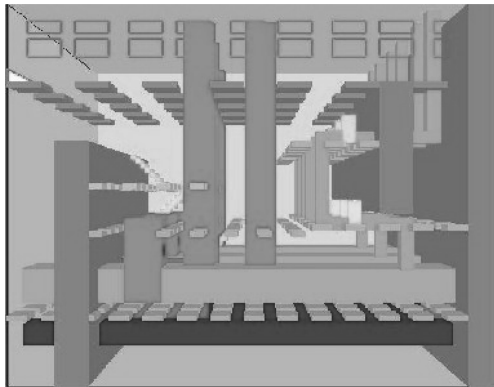


Fig. 1. Physical configuration of modeling.

Table 3. Modeling result (1st evaluation)

Scenario	ZAJ08-SC01	ZAJ08-SC02	ZAJ08A-SC01
Elapsed time	7.67 hr	10.04 hr	1.39 hr
Max. temperature	52.5°C	45.0°C	28.28°C
Max. heat flux (kW/m ²)	12.99 kW/m ²	8.74 kW/m ²	0.04 kW/m ²
Flame impinging	No effect	No effect	No effect
Target Damage	Heat flux damage	Heat flux damage	Safe
Required action	Required	Required	Okay

중에서 열속의 평가 한계치를 초과하는 부분은 다른 셀과 구분하여 색깔로 구분한 것이다.

2.4.4 1차 화재모델링에 대한 잠정 결론

1차 화재모델링에 의하여 분석된 결과는 방화구역의 현 상태를 기준하여 평가한 것이다. 따라서 방화구역의 가연물량을 줄이는 개선작업이나 열속의 영향을 차단하는 방안을 고려하여 재차 화재모델링을 수행하여 현재의 상태를 개선할 필요가 있다.

2.5 설비개선을 가정한 방화구역 화재 리모델링 (2차 평가)

2.5.1 설비개선 방안

1차 모델링 결과, 열적 거동을 살펴보면 목표대상물인 안전정지 관련 케이블에 대한 열적 손상원인은 열속(heat flux)이며 화재 발생후 약 36.85초가 경과한 시점부터 일부 케이블 부위에 손상 한계치의 열속이 가해졌다. 열속을 줄일 수 있는 방법은 여러 가지 있을 수 있으나 현실적이며 가장 유효한 방법인 액체가연물인 오일 확산을 제한하는 방법을 적용하였다.

이에 따라 1차 평가시 오일누설량과 면적은 136리터, 41평방미터였으나 2차 평가시에는 16리터, 3.2평방미터로 개선되었다.

가연물을 줄이는 방법은 고온 증기배관의 표면과 보온재에 누설된 오일을 별도의 누설오일 저장조에 배유할 수 있도록 설비개선을 가정하였다. 이에 따라 1차 화재모델링에서 평가한 오일 누설량은 136리터였으나 설비개선후 오일 누설량은 약 16리터로 감소하여 누설면적은 크게 감소하였다. 오일 누설량 감소에 따라 오일 확산면적의 계산을 다음과 같은 기준에 따랐다.

- 누설원(주증기격리밸브의 작동유) 종류 : FYRQUEL 150
- 누설가능량 : 227.11리터(전체량을 기준)
- 오일 드립 팬에 의하여 누설된 오일은 계속적으로 누설오일 저장조로 배유되므로 오일 확산면적은 드립 팬의 단면적에 해당하는 부분임(가로*세로 = 1.6 m*2.0 m = 3.2 평방미터)

2.5.2 설비개선이 이루어진 상태를 가정한 화재시나리오

설비개선이 이루어진 상태를 가정하여 화재시나리오를 재차 검토하였다. 화재시나리오에서 1차 평가 과정에서 화재로 인한 영향이 없는 시나리오는 배제하였다. 방화지역에 대한 정보 및 자료는 가연성물질의 양 및 누설면적을 제외하고는 1차 평가 때와 동일하며 그 평가결과를 Table 5에 제시하였다.

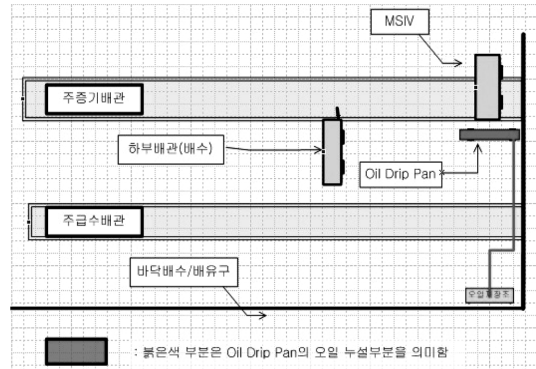


Fig. 3. Assumed improvement with oil drip pan.

Table 5. Fire scenario (for 2nd evaluation)

SCENARIO	ZAJ08-SC03	ZAJ08-SC04
Combustible	- Type : lube oil - Leak amount : 16 liter	
Ignition Source	Hot temperature (steam line)	
Fire location	Center	Wall side
Fire propagation	No	No
Opening effect	Existing	Existing
Forced ventilation	있음	있음
HRR	1,307 kW/m ²	1,307 kW/m ²
Fire growth rate	Steady	Steady

Table 6. Fire modeling 2nd-analysis result

Scenario	ZAJ08-SC03	ZAJ08-SC04
Relapsed time	7.92 hr	10.34 hr
Max. temperature	31.23°C	30.12°C
Max heat flux	1.2 kW/m ²	0.79 kW/m ²
Flame effect	No effect	No effect
Target damage	Safe	Safe
Required action	Installation of oil drip pan with tank, piping, etc	

2.5.3 화재모델링 재평가 결과

화재모델링의 재평가 결과 실내 최고온도는 약 31°C이며 열속은 1.2 kW/m² 정도로 유지되었으며 2차 화재 모델링 결과는 Table 6에 수록하였다. 본 화재구역은 상부 1사분면이 외기와 직접 접하며 2사분면은 환기용 그릴에 의하여 외기에 노출된 상태로서 가연물량 및 발화면적이 감소될 경우 열적영향이 크게 감소할 것이

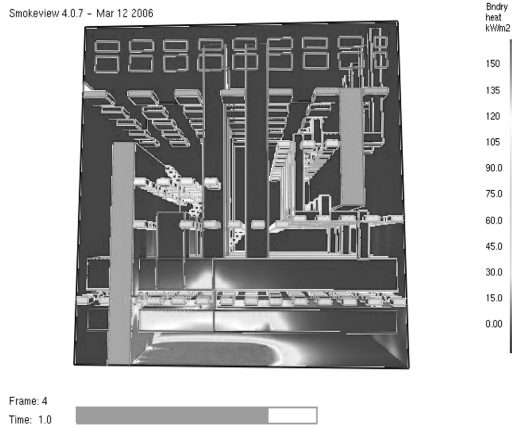


Fig. 4. 설비개선 이전 열속 분포 및 그래프(예).

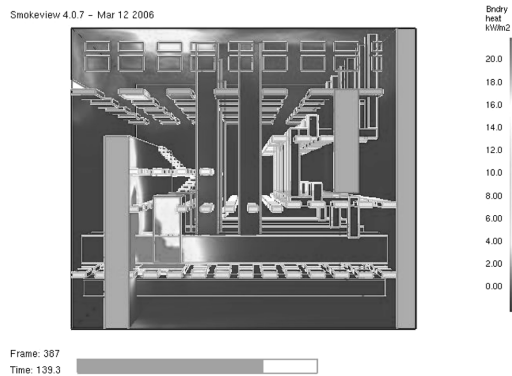


Fig. 5. 설비개선 이후 열속 및 그래프(예).

라고 판단된 결과를 보였다.

2.5.4 2차 화재모델링에 대한 결론

오일 드립 팬을 설치하여 오일 확산면적을 줄이고 연소량을 줄이는 설비개선의 결과 제한된 구간인 오일팬 상부에서 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 나타났다.

3. 결 론

운전중인 원전의 화재위험도분석은 방화지역 또는 방화구역이 일정공간으로 구획된 상태를 기준하여 평가된다. 그러나 운전중의 경상점검(Preventive Surveillance) 또는 운전중 정비(On-line Maintenance)가 이루어지거나 계획예방정비 기간중에는 방화지역 또는 방화구역

의 배열이 변경되므로 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 방화구역의 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 방화구역의 화재위험 분석을 위한 화재모델링 기법은 앞으로 운영중인 원전뿐만 아니라 신규원전 및 계속운전을 계획하고 있는 국내의 원전에 폭넓게 적용될 수 있을 것이다.

후 기

본 논문은 2006년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음(This work was supported by the research grant of the Chungbuk National University in 2006).

참고문헌

1. NRC, 10CFR50 Appendix R, "Fire Protection Program"(1980).
2. NRC, 10CFR50.48, "Fire Protection"(1980).
3. NRC, 10CFR50.12, "Specific Exemptions"(1982).
4. NIST, FDS(Fire Dynamics Simulator) User's Guide (2005).
5. NIST, User's Guide for Smokeview; A Tool for Visualization Fire Dynamics Simulation Data(2004).
6. EPRI, EPRI/NRC-RES, "Fire PRA Methodology for Nuclear Power Facilities"(2005).
7. NRC, Fire Dynamics Tools, "Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the U.S. Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program"(2004).
8. SFPE, The SFPE Handbook of Fire Protection; 3rd Edition(2002).
9. 이윤환, 양준언, 김종훈, 김윤희, "화재모델 CFAST를 이용한 원전 화재구역의 CCDP 평가(II)", 한국화재소방학회 논문지, Vol. 19, No. 3, pp.20-27(2005).