

성능기반 화재모델(FDS)을 이용한 원전 방화지역 화재위험 분석조건에 대한 민감도 해석

Sensitivity Analysis for Fire Risk Conditions of Fire Area at Nuclear Power Plant with Performance-based Fire Model (FDS)

지문학[†] · 이병곤* · 정래혁**

Moon-Hak Jee[†] · Byung-Kon Lee* · Rae-Hyuck Jeoung**

한전 전력연구원, *충북대학교 안전공학과, **(주)엠엔디
(2007. 4. 10. 접수/2007. 6. 12. 채택)

요 약

본 연구는 원자력발전소의 방화지역에 대한 화재위험을 전산유체역학모델인 FDS를 이용하여 평가한 내용이다. 원자로 안전정지를 유지하기 위한 스위치기어실이 화재지역으로 선정되었으며, 화재 시나리오는 가상 화재조건을 기준으로 구성되었다. 본 연구의 주요 목적은 화재 모델링의 주요 입력항목인 열 발생율과 분석 모델 격자 크기를 변경한 경우 프로그램에 의하여 나타나는 결과값의 민감도를 분석하는 것이다. 그 결과는 전산유체역학모델에서 개선이 필요한 항목과 함께 결론에 제시되었다.

ABSTRACT

This study is related with the fire risk assessment for fire area at nuclear power plant by use of FDS (Fire Dynamics Simulator) that is a computational fluid dynamics (CFD) model of fire-driven fluid flow. The major purpose of this research is to analyze the sensitivity of the fire modeling when the heat release rate that is an important input variable is changed as well as when the grid size that is a critical factor of the fire model is modified. The result is presented at the conclusion with some comments for CFD model application.

Keywords : FDS, Fire modeling, Heat release rate, CFD model

1. 서 론

원자력발전소(이하 “원전”이라 함)는 크게 원자로건물, 터빈건물, 보조건물, 취수구 및 기타 지역으로 나눠진다. 과학기술부 고시 2003-19^{1)호}에 의하면 이들 지역은 방화지역 또는 방화구역으로 구분되며 이웃 지역으로 화재가 확산되어 전파되는 것을 방지하기 위해 내화벽과 독립적 특성을 갖도록 설계된다. 원전의 화재방호 설계개념은 방화지역 또는 방화구역 단위로 정성적 측면의 화재위험성을 분석하여 위험요소를 평가한 다음 방화지역에서 화재가 발생할 경우에도 원자로 손상 가능성을 최소화하기 위한 심층화재방어(defense-in-depth) 목표²⁾를 달성하는 것이다. 화재로 인한 원자로 손상의 예로서, 원자로 냉각 계통 기능이 화재로 상

실되거나 화재의 고온 열가스에 의해 제어용 케이블이 이상 동작하여 원자로 내부의 핵연료가 용융되는 가상 사고를 들 수 있다. 따라서 원전의 화재 예방과 화재 방호를 위한 전략은 기본설계 단계에서부터 적용되어야 한다. 방화지역과 방호구역의 화재위험성을 검토하는 초기 단계에서 설계자는 가연물과 점화원을 분석하고 구획화된 공간에 대하여 각각 화재위험을 평가하며, 또한 화재 공간에서 발생한 열과 열유속에 견딜 수 있는 내화방벽의 물리적 특성을 결정하며 화원을 냉각하고 열전달을 차단하기 위한 소화설비를 설계하여 독립된 다중기능을 유지함으로서 원자로를 안전하게 정지하고 그 상태를 유지할 수 있는 원자로 안전정지(safe shutdown) 성능을 확보한다.

원전 화재위험에 대한 계통 설계자는 세분화된 방화지역들의 화재위험성과 화재위험도를 종합적으로 분석하고 평가한다. 이를 위한 정성적 및 정량적 도구로서

[†]E-mail: jmhak@kepri.re.kr

원자력 산업 초기에는 결정론적인 리스크 평가 방법인 존 모델의 COMPBRN¹-I, II, III와 화재로 유발된 위험성을 평가하기 위한 모델인 FIVE² 등이 사용되었고 화재로 인한 원자로 손상 빈도는 확률론적 안전성 평가(probabilistic risk analysis) 방법이 사용되었다. 최근 원전 화재위험 전문가들은 정량화 방법을 재평가하고 최신기술의 컴퓨터 분석기술을 이용하여 원전 화재를 안전성 측면에서 재조명하고 있다. 예를 들어 기존 개념에 따르면 내화방벽으로 구획된 방화지역에서 화재가 발생하였을 경우 화재 규모와 연소 결과에 관계없이 그 지역의 모든 안전설비와 기기는 기능을 상실한다고 가정하였다. 반면 화재는 규모, 성상, 강도, 기하 구조 등에 따라 온도, 열유속, 화염, 열 및 연기 유동 등의 특성이 크게 달라지므로 최신 화재위험 분석 전문가들은 안전설비 또는 기기에 미치는 온도, 열속, 화염 접촉 등의 영향을 분석하여 보호대상이 되는 기기, 설비의 기능 상실 여부를 정량적으로 평가하고 있다. 이를 위해 존 모델 또는 전산유체역학 모델을 이용한 컴퓨터 분석 프로그램이 다양하게 개발되었으며 일반 산업계뿐만 아니라 원전에서도 이의 활용이 적극적으로 추진되고 있다.

과거 엔지니어링 경험과 수 계산에 의한 분석방법들이 최근 공학의 발전에 힘입어 컴퓨터를 활용한 분석방법으로 다양하게 보급되고 있다. 화재공학 분석 역시 컴퓨터에 의해 최첨단 역학적 분석과 해석을 할 수 있게 되었다. 그러나 인명과 산업 안전을 다루는 안전분석 코드는 사용자가 프로그램의 적용성과 제한성을 이해하면서 입출력을 제어하여야 하며, 입력 자료의 민감성과 결과치의 불확실성을 평가하고 그 유효성을 입증하여야 한다.

본 논문의 목적은 화재모델링을 이용하여 화재위험을 평가할 때 주요 입력변수인 열 발생율(heat release rate)과 격자(grid) 크기를 변경할 경우 알고자하는 출력 변수에 미치는 영향을 분석하는 것으로 입력값에 대한 분석 프로그램의 민감도를 확인하는 것이다. 즉, 실험에 의하거나 공학적으로 결정된 열 발생율과 프로그램의 요소 변수인 격자 사이즈를 변경하였을 때 온도, 열유속 등의 변화를 평가하는 것으로 원전의 방화지역 화재위험 분석에서 필수적인 입력값의 정확도와 결과값의 평가에 대한 중요성을 확인하기 위한 것이다.

2. 본 론

2.1 컴퓨터 분석도구 사용시 검토사항

일반적 사실을 과학적으로 분석하거나 평가하기 위한 컴퓨터 프로그램의 경우 개발자가 주축이 되어 내부 알고리즘의 타당성(verification)을 확인하고 유효성(validation)을 검증한다. 타당성과 유효성에 대한 정의는 기술 분야별로 다양하게 사용되고 있으나 불명확하게 사용되는 경우도 있다. 타당성이란 사용된 평가방법이나 알고리즘이 진리나 이치 관점에서 합리적이고 구체적인 방법으로 프로그램에 반영되었는지 여부를 확인하는 것이다. 유효성이란 공인된 사용자가 프로그램을 이용하여 원하는 목적을 실현할 수 있으며 그 결과에 따라 프로그램의 효과를 인정하는 것이다.

대부분의 유체역학해석 컴퓨터 프로그램은 제한사항과 적용범위가 있다. 따라서 컴퓨터 프로그램 사용자는 설계자가 제시한 바에 따라 사용하는 프로그램의 과학적 적용성과 분석 범위를 이해하여야 한다. 사용자는 또한 변수값의 입력 범위와 조건에 따라 결과값이 변동하는 것을 분석하여 민감도를 평가하여야 하며 이에 따른 경제적 비용과 품질의 정확도를 고려하여 최적 방안도 검토하여야 한다.

2.2 원전 화재위험 분석을 위한 FDS³ 적용성

미국립 표준기술연구소에서 개발하여 일반에게 공개한 FDS³(version 4.0.7)는 연소공간에서 일어나는 다양한 종류의 화재현상을 전산유체역학 모델에 의하여 해석하는 프로그램이다. 이 프로그램의 기술지침서에는 이의 사용 범위와 제한 사항을 명시하고 있으며 이의 주요 내용은 다음과 같다.

첫째, 이 프로그램은 저속으로 유동하는 유체의 해석에 적용되어야 한다. 즉, 마하수가 0.3 이하인 유동에 적합하다. 따라서 폭발, 폭굉 등 음속에 가까운 유체의 유동해석에는 적합하지 않다. 둘째, 연소공간의 기하학적 형상은 직선으로 형상화할 수 있는 육면체이어야 한다. 천정이 원형이거나 일정한 각도를 갖는 경우 격자의 크기를 작게 하면 실제와 유사한 해석을 할 수 있으나 해석 시간이 지나치게 길어지며 형상이 복잡한 공간의 난류 해석은 기대할 수 없다. 셋째, 열 및 연기 유동해석에서 중요한 입력값인 열 발생율은 연소 조건에 따라 값이 달라지며 결과값에 미치는 영향이

¹COMPBRN : computer code for compartment fire modeling at nuclear power plants

²FIVE : fire risk evaluation program for "Fire Induced Vulnerability Evaluation" by EPRI in US

³FDS : Fire Dynamics Simulator developed by NIST in US

가장 큰 변수이다. 넷째, FDS 프로그램에서는 가연성 물질이 공기와 미리 혼합된 연소모델을 가정한다. 즉, 공기와 연료가 균질한 시간함수로 존재한다. 이에 따라 넓은 공간이나 환기가 양호한 상태에서는 이 모델이 적합하나 환기가 불량한 연소공간 또는 소화약제의 영향으로 가연성가스 및 연소가스 조성이 변할 경우 정확성은 떨어진다. 앞의 네 가지 특성과 함께 복사에 의한 열적 영향 또한 중요한 고려사항이다. FDS 프로그램에서는 복사 열전달을 유한체적법으로 해석한다⁴. 이 방법은 초기에 화원과 목표대상을 사이에 존재하는 공간을 일정 각도로 균등화하여 복사에너지를 방출되는 것을 가정한다. 반면, 연기층의 흡수율은 조성, 온도, 매질 등과 관련한 복잡한 관계를 갖고 있다. 또한 화원의 크기가 변할 경우 초기 설정된 복사 공간의 배열은 변하게 된다. 따라서 사용자는 프로그램의 적용 범위와 사용조건을 이해한 다음 보정 항목, 특수 조건, 환경 설정, 불확실성 평가 방안을 고려하여야 한다.

Table 1. Fire area input variable and condition

	Input variables	Reference
Geometry	width×depth×height - 16×8×4.8 [m]	- real size
Ventilation	natural ventilation at opening	- fire damper
Opening size	one opening at each wall - size: 0.5×0.2 [m] - total area: 0.2 m ²	- sill : 1.5 m - soffit : 1.7 m
Material	wall, floor, ceiling : concrete - specific heat: 1,000 J/Kg·K - conductivity: 1.75 W/m·K - density: 2,200 Kg/m ³ - emissivity: 0.94	- thickness: 152 mm - referring to NUREG-1758
Fuel	hydrocarbon transformer oil - ΔH_{eff} : 46,000 KJ/Kg - density (ρ): 760 Kg/m ³ - MLR: 0.039 Kg/m ² ·sec - empirical coefficient ($\kappa\beta$): 0.7 - fuel area (A_f): 1.96 m ² - HRR (\dot{Q}): 2,351.5 kW	- referring to NUREG-1805 and SFPE data - $\dot{Q} = (\dot{m}) \cdot \Delta H_{\text{eff}} (1 - e^{-\kappa\beta}) A_f$
Target	power cable at cable tray - combustion heat: 16,000 kJ/Kg - radiation factor: 0.3 - specific heat: 1,040 J/Kg·K - conductivity: 0.092 W/m·K - density: 1,710 Kg/m ³ - emissivity: 0.8	- referring to NUREG-1805

⁴FDS technical guide : radiative heat transfer is included in the model via the solution of the radiation transport equation for a non-scattering gray gas, and in some limited cases using a wide band model

원전의 방화구역은 다수 구역으로 세분화되어 있다. 터빈건물 방화지역은 자연 및 강제 환기가 이루어지는 대형 공간이며, 원자로건물은 강제 환기가 이루어지거나 밀폐된 공간이고 보조건물과 기타 구역의 방화지역은 밀폐된 소형공간으로 자연 환기와 강제 환기가 이루어진다. 따라서 FDS 프로그램을 원전 방화지역에 사용하고자 할 경우 다음과 같은 측면에서 사용 제한 요소를 고려하여야 한다. 첫째, 원전에서 발생할 수 있는 화재는 합성 유기체 가연물에 의한 A급 화재와 윤활유와 연료유에 의한 B급 화재 및 전기적 원인에 의한 C급 화재로 구분할 수 있다. 이러한 화재는 성장속도가 그다지 빠르지 않는 일반적인 연소과정을 보이므로 FDS의 저속 연소특성에 적합하다. 둘째, 원전의 방화지역은 원자로건물을 제외한 대부분의 구획이 직선으로 구성된 육면체 형태로 모사할 수 있다. 원자로건물 상부 천정은 원형이지만 복잡한 곡면 부분을 이중으로 격자화할 수 있다. 또한 직선과 곡선이 만나는 원주부분은 열 및 연기의 거동에 대한 상세한 분석이 필요치 않은 부분이므로 직육면체 형태의 구획으로 모사할 수 있다. 셋째, 화재성장과 전파에 따른 열 발생율 및 입력요소의 불확실성은 전산유체역학 분야의 일반적 현상으로 개선이 필요하나 현재 기술로는 한계가 있는 분야이다. 넷째, 환기가 불충분한 공간에서 혼합분율의 연소모델을 사용하는 것은 바람직하지 않다. 특히, 밀폐된 격실로 구획되고 통풍이 차단된 환기 지배의 화재 특성을 갖는 일부 방화지역의 화재위험 분석을 FDS 프로그램을 이용하여 수행하고자 할 경우 기하학적인 형상에 대한 검토가 필요하다. 중요 검토항목은 지배적인 연소 양상, 자연 및 강제 환기량 제어, 불완전연소 모델 또는 산소 소모에 의한 연소특성, 소화설비 작동에 의한 소화약제의 영향 등이다. 이들은 각 조건별 다양한 실험을 수행한 다음 정성적 평가와 정량적 분석이 요구되는 기술 분야이다. 프로그램 사용자는 최종적으로 복사 열전달 메커니즘의 개선 방안 및 경제적 이득과 정확성을 함께 검토하여야 한다. 복사 열전달식의 입력 내용과 조건은 분석 결과에 많은 영향을 미치므로 프로그램을 사용하는 전문가는 불확실성을 검토하고 입력조건을 개선하여 전체 결과에 미치는 영향과 비용 및 이득을 함께 고려하여야 한다.

2.3 FDS를 이용한 원전 방화지역 화재위험 분석

위에서 살펴본 바와 같이 원전 방화지역의 화재위험

은 FDS를 이용하여 평가가 가능한 것으로 결론지어졌다. 반면, 컴퓨터 프로그램을 사용하여 성능기반 해석을 할 경우 사용자는 분석결과에 대한 민감도와 불확실성을 평가하는 것이 필요하다. 서론에서 강조된 바와 같이 화재모델링의 주요 입력변수는 각 항목별 결과값에 미치는 민감도가 각각 다르므로 수많은 입력요소와 모든 조건에 대해 민감도를 해석하는 것은 불가능하다. 반면, 결과값에 미치는 영향이 가장 크거나 불확실성이 큰 변수는 엔지니어링 경험에서 추정이 가능하다. 이에 따라 본 연구에서는 입력 변수중 가장 중요하며 결과값에 미치는 영향이 클 것으로 기대되는 변수로서 열 발생율과 격자 크기를 선정하여 민감도를 분석하였다.

화재 시나리오로 선정된 방화지역은 비상 스위치기어실이다. 이 지역은 원자로를 안전하게 정지시키고 그 상태를 유지하기 위해 비상전력을 공급하고 제어하는 기능의 안전정지용 동력케이블과 제어케이블이 설치되어 있는 곳이다. 화재 시나리오는 변압기 절연유인 가연성 물질이 바닥으로 누설된 다음 인근의 비정상적인 점화원(transient fire source)에 의해 발화된다고 가정하였다. 누설된 절연유 양은 120리터와 240리터 2가지 경우이며 누설면적은 1.96 m^2 이며 화재모델링을 위한 격자 크기는 $0.4 \times 0.4 \times 0.4 \text{ m}$, $0.2 \times 0.2 \times 0.2 \text{ m}$ 및 $0.1 \times 0.1 \times 0.1 \text{ m}$ 의 3가지 경우를 가정하였다.

화재 모델링에 의해 분석된 결과값은 방화공학의 경험식에 산출된 값과 상호 비교하였다. 일반적으로 프로그램의 분석 결과는 실증시험을 통하여 얻은 값과 비교하는 것이 타당하나 본 연구는 컴퓨터 프로그램의 입력값 변경에 따른 결과값의 민감도 해석이 주 목적이므로 공학적 경험식을 이용하여 결과값을 비교하였다. 공학적 경험식은 미국 원자력 규제위원회에서 개발한 NUREG-1805⁴⁾의 공학 프로그램을 사용하였다. 이 프로그램의 3장을 이용하면 액체연료의 누설량, 누설면적, 가연성 액체의 물성치가 주어질 경우 단위시간당 열발생량, 연소지속시간, 화염 높이 등을 Heskstad식 또는 Thomas 식에 의해 얻을 수 있다. 복사에 의한 열속은 SFPE⁵⁾ 핸드북에서 제시한 식을 이용하여 화염중심선에서 목표대상물까지의 수평거리를 이용한 NUREG-1805의 제5장 관계식을 이용하였다.

FDS 해석은 윈도우 XP 펜티엄 IV로서 1.6 GHz 프로세스와 992 MB RAM의 노트북을 사용하였다. 시간증분, 프레임 수량 등은 FDS의 초기값을 사용하였다. 각 시나리오별 연소성장속도는 시간의 자승에 비례하여 열 발생율이 증가하며 누설된 연료량에 따라 산정된 연소 시간을 사용하였다. 전체 계산시간은 0.4 m 및

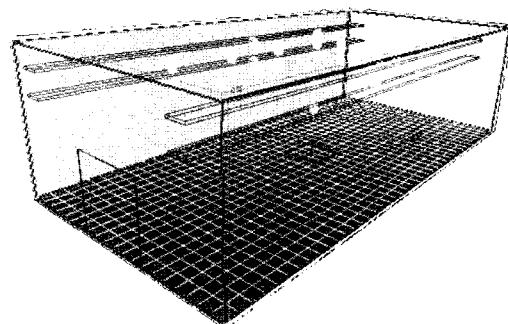


Fig. 1. Fire modeling for switch gear room.

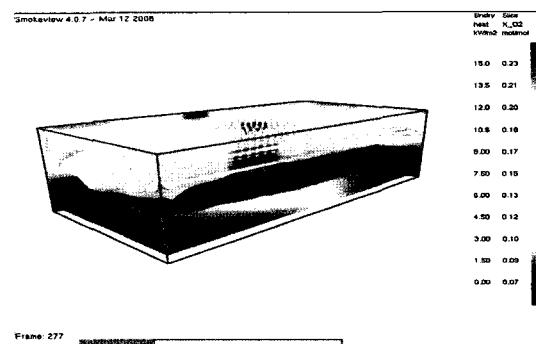


Fig. 2. A frame of smokeview for FDS result.

0.2 m 정방형 격자의 경우 200초를 설정하였고 0.1 m 정방형 격자의 경우 역시 200초를 기준하였다. 이 시간은 연소공간의 산소농도 및 연기층 강하에 따른 연소 지속시간을 미리 모사하여 결정한 값이다. Fig. 1은 방화지역에 대한 기하학적 형상, 목표대상물, 그리고 열적 특성을 분석하기 위한 기하학적 모습과 열전대 위치를 보여준다. Fig. 2는 FDS에 의하여 계산된 결과를 Smokeview⁶⁾를 이용하여 한 프레임을 발췌한 모습이다.

2.3.1 화재 시나리오 구분

화재시나리오는 아래와 같이 가연물량 및 격자 크기에 따라 여섯 가지 경우를 가정하였다.

2.3.2 시나리오를 기준한 분석 결과

각 시나리오에 따라 FDS를 이용하여 화염 온도와 열유속을 계산하였으며 Table 3은 이들 값을 보이고 있다.

2.4 입력값 변동에 따른 결과값의 민감도 검토

본 화재 시나리오는 소규모 개구부가 존재하는 밀폐 공간의 화재 발생을 가정한 것이다. 화재모델링의 입

Table 2. Conditions for fire scenarios

Scenario	case1.1	case1.2	case2.1	case2.2	case3.1	case3.2
Fuel (liter)	120	240	120	240	120	240
Fuel depth (cm)	6.12	12.24	6.12	12.24	6.12	12.24
Grid size (m)	0.4×0.4×0.4	0.4×0.4×0.4	0.2×0.2×0.2	0.2×0.2×0.2	0.1×0.1×0.1	0.1×0.1×0.1
Fuel area (m^2)	1.96 m^2 (embanked area of 1.4 m×1.4 m)					
HRR (kW)	2,315.5 (by use of SFPE and NUREG-1805 program)					
Duration (second)	1,193	2,406	1,193	2,406	1,193	2,406
Dimulation time (sec.)	200	200	200	200	200	200
Radiation distance (m)	4.66 (straight distance from plume center to power cable)					

Table 3. Maximum plume temperature and heat flux

Scenario	case1.1	case1.2	case2.1	case2.2	case3.1	case3.2
Grid size(m)	0.4×0.4×0.4	0.4×0.4×0.4	0.2×0.2×0.2	0.2×0.2×0.2	0.1×0.1×0.1	0.1×0.1×0.1
Max plume temperature (°C)	446	446	694	694	1,373*	1,411*
Max. heat flux (kW/ m^2)	6.8	6.3	6.7	6.7	7.1**	7.1**

*For 0.1 m grid size, temperature was saturated at 1,373°C and 1,411°C at 180 seconds (Engineering calculation value by NUREG-1805 : 688°C).

**For 0.1 m grid size, heat flux was saturated at 7.1 kW/ m^2 at 180 seconds (Engineering calculation value by NUREG-1805 : 3.08 kW/ m^2).

력 조건은 2종류의 가연물량 및 3종류의 격자 크기로 총 6개의 경우를 가정하여 각 조건을 입력변수로 FDS에 의해 화염의 최고온도 및 열유속을 확인하였다. 최종 분석은 스위치기어실 내부에 설치된 안전정지 기능을 수행하는 전력케이블의 손상 여부를 확인하면서 민감도를 평가하는 것이다.

전력케이블은 온도 및 열속에 의하여 손상을 입을 수 있으며 Table 4에서와 같이 열경화성 전력케이블의 경우 약 330°C의 온도 또는 약 11 kW/ m^2 의 열속을 받게 되면 본래의 기능을 상실하는 것으로 알려져 있다. 화재 시나리오에서 스위치기어실의 목표 대상물인 전력케이블은 화염 수직 중심에서 최소반경 2.5 m, 최대반경 3.1 m에 위치하므로 화염지역(plume zone)에 포함된다. 따라서 모든 시나리오에서 목표 대상물의 주위 온도는 손상한계치인 370°C를 초과하므로 열적 손상을 입게 된다. 그러나 전력케이블이 받는 열유속은

손상한계치인 11 kW/ m^2 이하므로 복사열에 의한 손상 가능성은 없다고 평가할 수 있다.

화재모델링의 입력값에 대한 결과값의 영향을 분석한 결과, 가연물량의 변경은 연소시간과 직접적인 관계가 있으나 본 화재공간에서 화염의 온도 및 열유속은 거의 변하지 않았다. 화염 온도 및 열유속은 가연물의 열 발생율에 의존하므로 이러한 예측은 공학적 경험식에 의해서도 평가가 가능하다. 반면, 시간의 흐름에 따라 연소형태(환기지배 또는 가연물지배 화재)가 변할 경우 연소시간은 실내온도와 총발생열량의 직접적인 영향인자가 되므로 하나의 사례로 평가하기에는 충분하지 않다.

직사각형 격자의 한쪽 면 길이가 절반으로 줄어들 경우 전체 체적은 2^{-3} 에 비례하여 감소한다. 격자 셀에서는 각각 질량, 에너지, 운동량 및 연소화학적 보존식이 적용되고 프로그램에 의한 반복 계산되어 일정값으로 수렴하게 된다. FDS를 이용하여 격자 크기를 변경할 경우 화염의 최고온도 및 열유속의 변화를 분석한 결과, 격자 크기를 줄여들 경우 화염온도는 크게 증가하였다. 열 발생율이 동일한 화재 시나리오에서 격자 체적을 1/64로 줄일 경우 초기 화재시나리오에 비하여 화염 최대온도는 약 3배 이상 증가하여 격자의 크기는 화재모델링의 중요한 변수로 분류되었다. 반면, 현

Table 4. Thermal damage threshold of cable

Items	Qualified cable (thermoset cable)	Unqualified cable (thermoplastic cable)
Temperature	330°C (625°F)	205°C (400°F)
Heat flux	11 kW/ m^2 (1 BTU/ $ft^2\cdot sec$)	6 kW/ m^2 (0.5BTU/ $ft^2\cdot sec$)

실적으로 화재모델링에 의한 정량적 화재위험 평가에서 격자 수치를 점차 줄여갈 경우 결과값에 수렴하는 격자의 치수를 결정할 수 있으나 이는 수차례 반복된 작업과 막대한 시간 및 비용이 소요된다. 따라서 전산 유체역학모델을 이용한 정량적 화재위험 분석에서 격자의 크기와 민감도에 대한 평가 기준과 적용 방법은 시급히 마련되어야 할 것으로 판단된다. 격자 크기를 변경할 경우 목표물에 미치는 열속의 민감도는 크지 않은 것으로 분석되었다. 즉 격자의 길이를 2배, 4배 줄여 체적이 $1/8$, $1/64$ 로 감소되어도 열유속은 약 4~13% 증가에 그쳤다.

연소공간이 연료지배형 화재일 경우 가연물량은 총 연소시간과 총발생열량과 직접적인 영향을 주게 되며, 환기지배형 화재일 경우 화재공간에서 이용 가능한 실내공기와 유입공기량에 의존하게 된다. 본 화재 시나리오에서 가연물량의 변화는 화염온도 및 열유속에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 분석되었다. 즉, 가연물량은 연소시간을 증가시켰으나 모든 시나리오 조건에서 결과값에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 분석되었다. 이와 같은 결과는 화재 공간의 작은 개구부가 방화 뎁퍼에 의해 차단된 이후 실내에서 이용 가능한 산소량이 제한되어 환기지배형 화재로 전환된 것으로 풀이된다. 반면, 실제 상황에서는 환기설비의 동작, 출입구 개폐 등 다양하게 화재 양상이 변하게 되므로 연소 특성에 따른 환기의 영향은 실시간으로 정량적 평가가 필요한 항목으로 규명되었다.

최종적으로 FDS 결과값을 공학적 경험치와 비교한 결과 Fig. 3에 보인 바와 같이 FDS에 의해서 계산된 화염온도와 열속은 NUREG-1805의 경험식에서 해당 변수값을 입력하여 얻은 결과값에 비하여 약 2배 이상 높은 값을 보였다. 이러한 결과는 공학적 계산방법과 FDS를 이용한 필드모델의 특성이 상이한 결과로 판단된다. 이의 원인은 제한된 화재 시나리오에 의해 포괄적인 일반식을 대변할 수 없지만 화재 모델링에 많은 불확실성이 내포되었음을 단적으로 보여준 것이다.

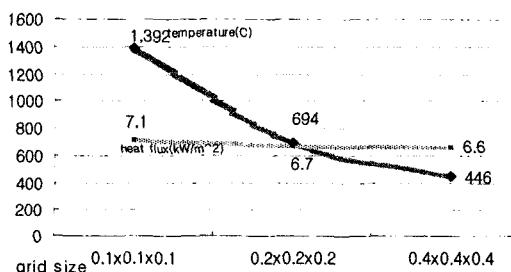


Fig. 3. Temperature and heat flux trend to Grid sizes.

2.5 민감도 해석 관련 변수

본 연구에서는 열 발생율 및 격자 크기가 변동할 경우 화재모델링 결과의 변동을 살펴보았다. 열 발생율은 가장 중요한 입력변수의 하나이지만 변수 자체의 연소효율, 열손실율, 복사 재순환율을 고려할 때 입력값에서부터 불확실성이 존재한다. 액체연료의 경우 시간에 따른 확산면적, 점도와 유막 두께, 질량연소율의 시간적 변화, 액면 깊이의 감소율 등이 민감도에 관련된 변수이다. 방화지역의 열손실은 복사, 대류, 전도에 의한 영향을 고려하여야 하며 벽체의 종류와 두께 및 물성치에 따른 변화에 기인한다. 화원의 위치는 열 및 연기의 거동에 영향을 미친다. 환기 횟수와 유량, 환기구의 실제위치와 프로그램에 입력한 위치 등을 공간에서 가연성증기와 유입되는 공기의 흐름 및 연소 생성물의 유동 벡터에 영향을 미치는 변수이다. 기타 화재성장률, 지역적 화재강도와 심각도, 소화설비의 영향 등 다양한 요소들이 컴퓨터를 이용한 화재위험 분석 프로그램의 결과값에 영향을 미친다.

3. 결 론

오늘날 컴퓨터를 이용한 과학기술은 급속히 발달하고 있으나 물리적 기초기술과 경험을 통한 응용 능력보다 사용 방법과 결과물 활용에 초점을 맞추고 있다. 산업계 일선에 배치된 기술자들은 시간과 비용을 줄이기 위한 방법으로 결과 중심의 성과를 지향한다. 그러나 새로운 기술이 개발될수록 그 기술을 이용하는 전문가는 합리적이고 논리적인 기술에 기반을 두고 새로운 기술을 활용하여야 한다. 입력이 잘못될 경우 그 결과는 실제와 엄청난 차이를 냥게 되며 그러한 결과를 여과 없이 사용할 경우 예상하지 못한 인명 손실과 재산 피해를 가져올 수 있다.

본 논문에서는 원전의 실제 규모 방화지역을 선정하여 가상 화재 시나리오를 구성하고 전산유체역학모델인 FDS를 이용하여 성능기반 분석 방법에 의하여 화재위험을 평가하였다. 이와 함께 주요 입력요소인 열발생율과 열적 거동 해석의 최소단위인 격자 크기를 변경하여 결과값에 미치는 영향을 해석하였다. 화재 시나리오를 이용하여 분석한 입력값의 민감도 분석 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 격자 크기가 실내온도에 미치는 영향은 매우 큰 것으로 확인되었다. 즉, 동일 열 발생율을 갖는 화재 시나리오에서 격자 체적을 $1/64$ 로 줄일 경우 초기 화재시나리오에 비하여 화염 최대온도는 약 3배 이상 증가하였다.

2) 격자 크기가 목표물에 미치는 열속의 영향은 크지 않은 것으로 확인되었다. 즉, 동일한 조건에서 격자 체적을 1/64로 줄일 경우 초기 화재 시나리오에 비하여 열유속은 약 4~13% 증가에 거쳤다.

3) 가연물량의 증가는 화염온도 및 열유속에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 분석되었다. 즉, 가연물량은 연소시간을 증가시켰으나 모든 시나리오 조건에서 결과값에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 분석되었다.

4) FDS의 결과값과 공학적 경험치를 비교한 결과, 화염온도와 유속 모두 약 50%의 차이를 보였다. 이는 실험조건과 공학적 수치를 계산하는 조건이 상이한 결과이나 대략적으로 약 50%의 불확실성을 내포하는 것으로 분석되었다.

상기와 같은 민감도 해석 결과와 불확실성을 포함한 비교 결과를 미루어볼 때 화재구역의 기하학적 규모, 열 발생율, 환기효과, 연소특성 대비 격자의 크기를 정량적으로 평가할 수 있는 기준이 수립되어야 하며, 전

산유체역학모델을 보다 폭넓게 사용하기 위해서는 많은 실증시험과 연구가 뒷받침되어야 한다.

참고문헌

1. 과기부, 고시 제2003-19호, “화재방호계획 수립 및 이행에 관한 규정”(2003.11.29).
2. NRC, 10CFR50 Appendix R, “Fire Protection Program” (1980) 및 NRC, 10CFR50.48, ”Fire Protection”(1980).
3. NIST, FDS (Fire Dynamics Simulator) User's Guide (2005).
4. NRC, NUREG-1805, “Fire Dynamics Tools”(2004. 12).
5. SFPE, SFPE Handbook of Fire Protection, 3rd Edition(2002).
6. NIST, User's Guide for Smokeview(2004).