

## 화재모델 CFAST를 이용한 원전 화재구역의 CCDP 평가 CCDP Evaluation of the Fire Area of NPPs Using Fire Model CFAST

이윤환<sup>†</sup> · 양준언 · 김종훈\* · 노삼규\*

Yoon-Hwan Lee<sup>†</sup> · Joon-Eon Yang · Jong-Hoon Kim\* · Sam-Kyu Noh\*

한국원자력연구소, \*광운대학교 건축공학과  
(2004. 9. 21. 접수/2004. 11. 17. 채택)

### 요 약

본 논문에서는 NIST에서 개발한 CFAST 화재 모델링 코드를 사용하여 원자력발전소 펌프실 화재를 모의하였다. 급기 제한, 최소 산소 농도(Lower Oxygen Limit), 복사열 방출비율(Radiative Fraction), 방화문 개방 정도 등의 CFAST 입력 변수 변화에 따라 화재 성장 변화를 분석하였다. 분석 결과에 의하면 본 화재구역에서의 화재는 환기 지배형 화재이므로 급기 제한 및 최소 산소 농도 10%로 설정하는 것이 타당한 것으로 판단되며, 복사열 방출에 따라 상부층 가스 온도는 큰 변화가 없는 것을 알 수 있었다. 화재가 발생한 화재구역 내 펌프를 제외하고는 상부에 위치한 케이블은 모두 건전성을 유지하는 것으로 나타났다. CCDP(Conditional CDP)를 평가한 결과 9.25E-07로, 화재위험도분석보다 현실적이고 불확실성이 감소한 결과를 도출할 수 있었다.

### ABSTRACT

This paper describes the result of the pump room fire analysis of the nuclear power plant using CFAST fire modeling code developed by NIST. The sensitivity studies are performed over the input parameters of CFAST: the constrained or unconstrained fire, Lower Oxygen Limit (LOL), Radiative Fraction (RF), and the opening ratio of the fire doors. According to the results, a pump room fire is the ventilation-controlled fire, so it is adequate that the value of LOL is 10% which is also the default value. It is analyzed that the Radiative Fraction does not affect the temperature of the upper gas layer. It is appeared that the integrity of the cable located at the upper layer is maintained except for the safety pump at the fire area and the Conditional Core Damage Probability (CCDP) is 9.25E-07. It seems that CCDP result is more realistic and less uncertain than that of Fire Hazard Analysis (FHA).

**Keywords :** CFAST, CCDP, Zone Model, Cable Integrity, Fire Area

## 1. 서 론

원자력 발전시설에서의 화재는 화학제조공장 등 다른 시설의 화재에 비하여 그 피해가 매우 심각할 우려가 있으므로, 보다 완벽한 안전관리를 요구한다. 원자력 발전소의 화재사고는 원자로의 정지를 유발함과 동시에 안전 관련 기기들을 손상시킬 수 있다. 이러한 위험에 심층방호의 개념으로 설계단계에서의 안전확보를 시도하고 있으나, 가연성 물질과 여러 가지 점화 요인

들이 존재하는 현실에서 화재는 언제든 발생할 가능성이 있다고 할 수 있다. Electric Power Research Institute (EPRI)에서 발행한 미국 원자력발전소 화재경험데이터 NSAC-178L<sup>1)</sup>에 의하면 원전의 안전성과 관련된 잠재적 위험성이 있는 화재는 10년의 원자로 운전 연수 중 3.6회가 발생하는 것으로 나타나 화재위험에 대한 중요성을 알 수 있다.

현재 화재 안전 분야에서는 화재시나리오를 중심으로 대상의 화재안전성능을 분석하는 성능기준 화재안전 설계(Performance-Based Fire Safety Design)에 대한 연구와 도입이 이루어지고 있다. 성능기준설계에

<sup>†</sup>E-mail: yhleec3@kaeri.re.kr

서 가장 중요한 성능을 증명하는 분석방법으로 화재 모델링을 사용하고 있으며, 이는 결정론적 분석방법(Deterministic Analysis)이다.

화재 분야에서 확률론적 분석이 용이하지 못한 이유는 화재사고와 현상은 너무나 다양하고 복잡하여 일관성 있는 데이터의 축적이 현실적으로 어렵기 때문이다. 그러므로 화재 발생에 대한 시나리오를 구축하고, 이에 대한 화재 현상을 계산하거나 모델링 코드를 사용하여 분석한 후, 이에 대한 방어 대책을 수립하여 원하는 수준의 화재 안전을 확보할 수 있기 때문에, 화재 안전 분야에서는 화재 분석을 대부분 결정론적인 분석으로 수행하고 있다. 이러한 결정론적 분석의 결과로부터 발생 가능한 화재의 결과가 대상물들에 어떠한 피해를 줄 수 있는지 판단할 수 있으므로 화재 PSA에서도 화재 모델링코드 사용의 필요성이 요구되고 있는 상황이다.<sup>2)</sup> 그러므로 본 연구에서는 실제 원전 화재구역인 안전 펌프실을 대상으로 화재모델링 코드 CFAST의 주요 입력 변수에 따른 결과의 변화를 알아보고자 하였으며, 이를 바탕으로 얻은 결론을 토대로 화재 PSA에 그 결과를 반영할 시 원전의 화재 안전성에 미치는 영향을 알아보고자 하였다.

## 2. 분석의 개요 및 설정

현재까지 다수의 Zone Model이 개발되었으나 현재 가장 대표적인 모델은 미국 NIST Building Fire Research Lab.에서 배포하고 있는 CFAST(Consolidated model of Fire growth And Smoke Transport)라고 할 수 있다. 이 모델은 기존 Zone Model을 통합하여 정밀도를 향상시키고 부가적 기능을 첨부하였으며, 사용자 환경을 개선한 FASTLite 및 FAST 모델로 이루어져 있다.<sup>3)</sup>

화재모델링의 사용 시 입력 데이터는 분석 결과의 신뢰도에 매우 중요한 영향을 미친다. 그러므로 이러한 입력 데이터의 사용은 화재공학 및 모델에 대한 이해를 기반으로 판단되고 선정되어야 한다. 또한 특정 모델의 입력 변수들을 설정하고 결정할 때 결과에 어떠한 영향을 미치는가에 대한 분석과 연구가 필수적으로 수행되어야 한다. 이러한 입력변수의 변화에 의한 결과변화에 대한 화재모델 검증은 ISO TC 92<sup>4)</sup>의 검토 서류나 ASTM E 1355<sup>5)</sup> 등에서도 요구하고 있는 사항이기도 하다. 그러므로 본 분석은 화재 PSA에 적용할 화재모델링 코드 Zone Model CFAST에 대한 입력 변수의 변화가 결과에 미치는 영향을 실제 원전의 특정 구역을 대상으로 수행하였다. 이는 입력 변수와 그에 따른 결과의 변화가 실제 대상 구역에서 어떠한 차

이를 나타내는가를 알아보기 위함이다.

### 2.1 Zone Model CFAST의 특성

구획 내부에서 화재가 발생할 경우 화원에서 화염이 형성되고 연소 영역을 벗어나 밀도 차에 의한 부력으로 상부를 향해 상승하는 연기 기둥인 화재 플룸(Fire Plume)이 있다. 고온의 열 기류는 공간 상부에 축적되게 되는데, 공간 내부는 화재 시 고온의 상부층(Hot Gas Layer)와 비교적 저온이면서 산소가 풍부한 하부층(Lower Layer)로 나누어지게 되며, 각각을 검사 체적(Control Volume) 또는 영역(Zone)으로 하여 상호간에 미치는 영향을 시간에 따라 해석해 내는 것이 바로 Zone Model이다. CFAST는 미국 National Institute of Standards and Technology(NIST)에서 제공하는 모델로서, NIST에서 추진된 FAST와 CCFM 개발의 합병에 의한 결과로 두 모델의 통합에 의하여 제작된 모델이다. 화재 발생 시 대상공간에서 발생되는 현상과 그 결과를 예측하기 위해서 제작되었으며, 또한 여러 공간으로의 연기 이동이나 화재 성상의 변화를 알아볼 수 있도록 구성되어 있다.

본 연구에서는 CFAST모델을 사용하는 FASTLite Ver. 1.1을 사용하여 분석하였다.

### 2.2 분석 대상의 설정

본 연구의 분석 대상은 원자력 발전소의 안전계통 펌프실이며, 내부에는 펌프 1대가 설치되어있고, 상부에는 케이블이 관통하고 있다. 본 화재구역에서의 대표적인 화재 시나리오는 펌프에 사용되는 윤활유의 누출과 펌프 과열에 의한 윤활유의 연소이다.

공간의 크기는 8.14 m(W)×4.29 m(D)×8.46 m(H)의 규모이며, 바닥에서 5.3 m 높이에 1.0 m(W)×2.0 m(H) 크기의 방화문이 설치되어 있다. 내부에는 철재 계단과 Waffle Slab으로 만들어진 구조물이 있으나, 현 Zone Model에서는 공간 내부 구조물인 철재 계단 및 Waffle Slab에 대한 고려는 하지 않았다.

### 2.3 분석 입력 변수와 범위의 설정

#### 2.3.1 화재에 대한 설정

화재 시나리오는 펌프의 이상에 의하여 윤활유가 누출되고 펌프의 과열로 인하여 점화되면서 화재가 시작된다. 가연성 액체가 특정 공간에 누출되는 경우 연료량과 바닥 면적의 비교에 의하여 화재의 크기가 결정된다. 본 대상 공간의 총 바닥면적은 34.92 m<sup>2</sup>이나 모터 하부의 받침을 위한 콘크리트 구조물이 일정 면적을 차지하여 실제 누출될 시에 윤활유가 있게 되는 면

표 1. 경유(Diesel Oil)의 화재관련 특성값<sup>6)</sup>

Type	Heat of combustion (MJ/kg)	Mass loss rate (kg/m <sup>2</sup> -s)
Diesel Oil	40	0.039

적은 23.78 m<sup>2</sup>이다. 현재 윤활유(lubricants)에 대한 연소열(Heat of Combustion)과 질량 소모율(Mass Loss Rate)의 데이터 확보가 용이하지 못하였던 관계로 매우 보수적인 가정으로 경유(Diesel Oil)의 데이터를 사용하여 내부 화재의 규모와 지속시간 등을 설정하였다.

일반적으로 작은 규모의 가연성 액체의 화재는 표면적 전체를 화재 영역으로 설정한다. 그러나 실제 가연성 액체의 화재는 종류에 따라 조금 차이가 있으나, 상온에서 점화 초기에 최대 열방출율에 바로 도달하기보다는 어느 정도의 시간을 가지고 성장한다고 보는 것이 타당하다. 그러므로 Diesel 70 l의 연소 총면적에 의한 최대 열방출율은 37.1 MW이며, 연소지속시간은 62.4 초이나 이는 이론적으로 점화와 동시에 최대치에 도달한다는 가정이므로, 이보다는 Ultra-Fast Fire Growth 정도의 화재 성장율( $a=0.1878 \text{ kJ/s}^2$ )을 고려하는 것이 조금 더 실제적이고 타당하다 할 수 있다.

37.1MW로 62.4초간 화재가 지속될 경우 발생하는 에너지의 양( $Q_{\text{total}}$ )은 2315.04 MJ이며 Ultra-Fast Growth로 성장하는 화재로 위에 언급된 에너지량을 발생시키는 시간은 333.2초이며 이때 도달하는 최대 열방출율은 20,802 kW이다.

### 2.3.2 입력 변수에 의한 Case의 분류

Zone model CFAST의 입력 변수는 크게 공간의 크기, 벽면 재질, 개구부, 화재 관련 특성으로 나누어 생각할 수 있다. 우리가 적용의 대상으로 하는 공간은 이미 결정되어 있으므로, 공간의 크기와 벽면의 재질 등은 모든 분석 항목에서 공통으로 한다. 본 대상 공간은 가연성 액체에서 발생하는 에너지가 매우 클 것으로 판단되므로 환기 지배형 화재(Ventilation-Limited Fire)가 될 확률이 높다. 그러므로 먼저 화재 입력데이터 설정 중 급기 제한 화재(Constrained Fire) 부분과 최소 산소 제한농도(Lower Oxygen Limit, LOL)의 설정에 대한 부분을 비교하였다. 이 중 LOL은 연소 중단 산소농도를 10%일 때와 0%일 때로 구분하여 설정하였다. 두 번째는 화재에서 발생하는 에너지는 대류 열 전달과 복사 열 전달로 손실된다고 가정하는데, 이때 복사열 방출 비율(Radiative Fraction, RF)이 전체 화재 예측에 미치는 영향을 알아보려고 하였으며, 일반적으로 제시되는 0.2에서 0.4의 값을 설정하였다. 세 번째 분

석은 공간 개구부가 실제 개구부 면적의 0%, 50%, 100% 등으로 설정하였을 경우 각각의 변화를 알아 보았으며, 이는 급기가 화재 형태에 미치는 영향을 알아보려고 한 것이다. 결과 값으로는 상부층 온도와 상부 고온층의 높이를 그래프로 비교 분석하였다. 이는 그래프 결과로부터 상부 고온가스층에 위치한 케이블의 건전성 여부를 판단할 수 있기 때문이다.

### 2.3.3 가정 및 제한사항

본 연구에서 수행한 분석의 몇 가지 주요 가정과 제한사항은 다음과 같다.

1) 본 분석의 공통적인 가정으로 화재구역 외부 및 내부의 온도는 20°C이며, 개구부는 평상시 폐쇄되어 있는 상황이며, 벽, 천정 및 바닥은 모두 콘크리트로 설정하였다.

2) 연료는 보수적으로 경유(Diesel Oil)로 설정하였으며, 이는 윤활유(Lubrication Oil)에 대한 화재 관련 데이터의 확보가 현실적으로 어렵기 때문에 매우 보수적인 가정에 유사한 데이터를 사용하였다.

3) 연료가 가연성 액체인 경우 화재 개시와 동시 최대 열방출율에 도달하도록 설정하는 경우가 있으나, 가연성 액체인 경유의 경우도 최대 열방출율에의 도달에는 어느 정도의 시간이 필요하므로, 현재 제시된 화재 상승 곡선 중 Ultra-Fast Growth를 사용하였다. 그러나 현재 대상이 되는 바닥 면적 규모에 대한 액체 가연물 화재 시 정확히 이러한 상승을 한다고는 하기 어려우나 점화와 동시에 모든 면적의 액체 가연물이 일제히 최대치로 연소한다는 가정에 비해서는 매우 현실적인 가정이라 할 수 있다.

4) 실제 대상 공간의 내부에는 철재 구조물들이 있으며, 공간의 상부에는 다량의 케이블과 케이블 트레이가 존재한다. 이를 고려한다면 실제 온도는 예측치보다 낮을 것으로 예상되지만, 이들에 의한 열손실을 고려하지 않고 분석을 수행하였다. Zone Model의 한계상 벽면이 아닌 공간 내부 구조물에 의한 열손실은 고려되지 못하므로 이러한 부분에 대한 보정은 추후 분석해야 할 사항이다.

## 3. 분석 수행 및 결과

위에서 언급한 조건에 의한 설정으로 화재모델링 코드를 사용하여 분석을 수행하였다. 각 Case의 결과는 다음과 같다.

### 3.1 Case 1 - 급기 제한 설정 및 최소 산소 제한농도 급기제한은 Constrained Fire와 Unconstrained Fire로

표 2. Case 분류 및 설정조건

	No.	Case	Fixed Value
Case 1	1	Constrained Fire - LOL 10	Radiative Fraction 0.3
	2	Unconstrained Fire - LOL 10	Radiative Fraction 0.3
	3	Constrained Fire - LOL 0	Radiative Fraction 0.3
	4	Unconstrained Fire - LOL 0	Radiative Fraction 0.3
Case 2	5	Radiative Fraction 0.4	Constrained Fire - LOL 10
	6	Radiative Fraction 0.3	Constrained Fire - LOL 10
	7	Radiative Fraction 0.2	Constrained Fire - LOL 10
Case 3	8	Door - Close	R.F - 0.3, C.F. LOL-10
	9	Door - half open	R.F - 0.3, C.F. LOL-10
	10	Door - Fully Open	R.F - 0.3, C.F. LOL-10

설정한다. 이는 화재 발생시 공간 내부로의 산소 유입이 제한을 받는지 여부를 설정하는 것이다. 또한 최소 산소 제한 농도(LOL)는 설정농도 이하로 공기 중 산소의 비율이 떨어질 경우 연소가 중단되는 농도를 의미한다.

이에 대한 분석은 표 2에서 보는 바와 같이 4가지 사항에 대해서 분석을 수행하였다.

먼저 그림 1을 보면 C2-UF-L10와 C4-UF-L0의 곡선이 일치함을 볼 수 있다. 이는 급기 제한이 없다고 가정되는 경우 즉, Unconstrained Fire인 경우 산소 농도의 설정은 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 그러나 급기 제한을 설정하는 경우 산소농도의 설정에 따라 차이가 발생하는데 산소농도를 10%로 설정하는 경우가 연소로 인한 온도 상승이 좀 더 일찍 중단되는 것을 알 수 있다. 각 경우에 있어서 모두 개구부가 닫혀있기 때문에 외부로의 연기 방출이 되지 않는 상황이기 때문에 연기층 하강은 그림 2에 나타난 바와 같이 동일한 것으로 나타났다.

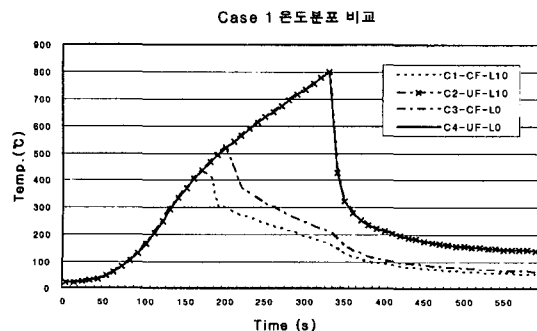


그림 1. Case 1의 온도변화의 비교.

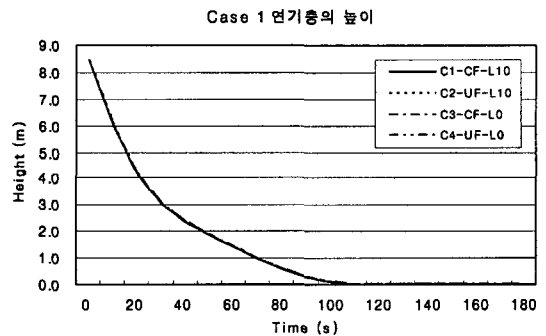


그림 2. Case 1의 경계층 높이의 변화 비교.

현실적으로 불 때 실제와 가장 유사한 상황은 급기 제한이 고려되고 최소 산소농도(LOL)가 10%로 설정된 경우라 할 수 있다.

3.2 Case 2 - 복사열 방출 비율

복사열 방출비율(RF)은 화재로부터 방출되는 에너지에서 어느 정도 비율이 복사열의 형태로 발산되는가에 대한 설정이다. 일반적으로 30%를 설정하나 공간이 협소한 경우에 대해서는 설정을 분석해 볼 필요가 있다. 그림 3과 그림 4에서 보듯이 복사열 방출비율의 설정에 따라 온도의 상승이나 연기층의 하강이 미세한 차이를 보이는 하나, 매우 유사한 결과를 보여준다. 그러므로 복사열 방출비율에 대한 설정은 화재로 인한 결과에 큰 영향을 주지 않는 것을 알 수 있다.

3.3 Case 3 - 방화문 개방 비율

본 대상공간의 방화문은 바닥면에 있는 것이 아니라 5.3 m 높이에 있으며, 높이 2 m, 폭 1 m의 크기를 가지

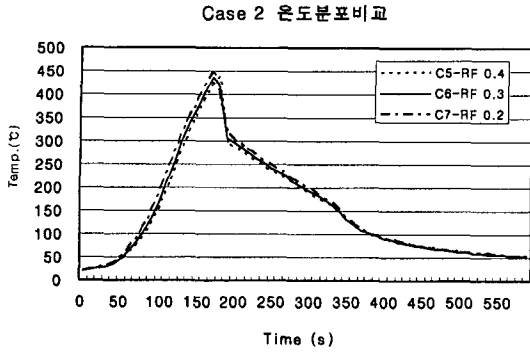


그림 3. Case 2의 온도변화의 비교.

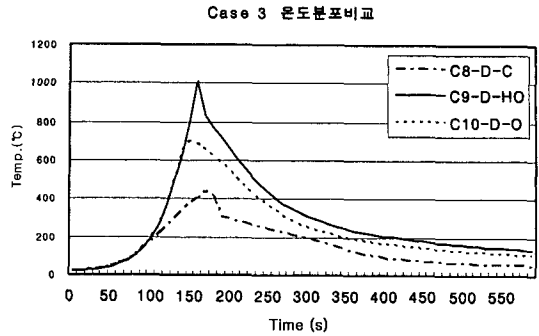


그림 5. Case 3의 온도변화의 비교.

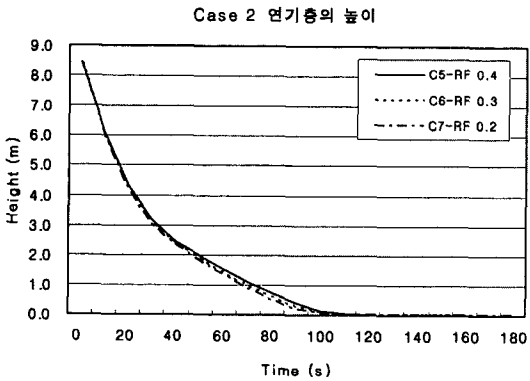


그림 4. Case 2의 경계층 높이의 변화 비교.

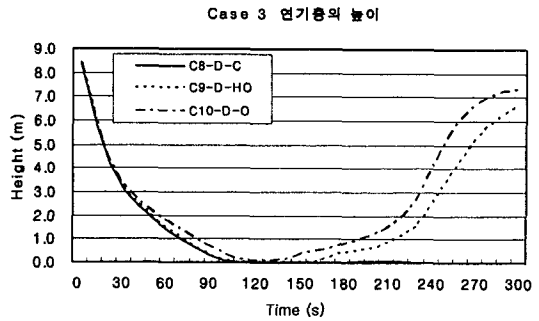


그림 6. Case 3의 경계층 높이의 변화 비교.

고 있다. 현재 분석중인 대상의 경우 다량의 가연성 액체가 바닥에서 급격히 연소하면서 성장하기 때문에 환기제한 화재(Ventilation-Controlled Fire)로 예상되므로 개구부인 방화문의 설정은 매우 중요하다. 그러므로 이에 대하여 개방 비율을 0%, 50%, 100%로 설정한 후 분석을 수행하여 보았다. 그림 5에서 보듯이 개방 비율이 0%인 경우가 가장 온도가 낮으며, 그 다음이 100%, 가장 높은 경우가 50%로 나타났다. 이러한 결과는 개구부가 폐쇄되면 급기 제한을 받아 온도 상승이 적게 나타나지만, 개구부가 열려 공기 유입이 이루어지면 온도 상승이 크게 나타나게 된다. 그러나 개구부가 크면 유입 및 유출량이 많아지기 때문에 오히려 온도의 상승은 작게 나타난 것으로 판단된다. 이 결과로 볼 때 화재구역에서 화재 발생시 방화문 등을 포함한 개구부가 완전히 차단되지 않은 상태에서는 상부층 가스 온도가 개구부가 차단된 경우에 비하여 매우 높게 형성되므로, 원전 운전시 방화문 등의 닫힘 상태 유지는 매우 중요하다고 볼 수 있다.

그림 6에 방화문의 개방이 없는 경우 연기층은 하강

하여 그 상태를 유지하나, 방화문의 개방이 있는 경우는 발화원의 화재가 종료된 후 개방된 문으로 연기가 배출되어 연기층이 상승하는 결과를 보여주고 있다.

#### 4. 분석 대상 구역 내의 케이블 건전성 평가

분석 대상 구역인 안전 펌프실에는 그림 7 및 8에 나타난 바와 같이 해당 펌프의 케이블뿐만 아니라 이웃한 두 개의 화재구역에서 관통한 케이블도 위치하고 있다. 따라서 상부 케이블이 화재시 발생된 고온 가스에 의해 손상을 받게 된다면 본 분석 대상 화재구역에 위치한 펌프와 함께 이웃한 두개의 방에 위치한 펌프 두 대 역시 기능을 상실하게 된다. 그러므로 상부 케이블이 건전성을 유지할 수 있는가의 여부에 따라 화재시 발전소의 안전성이 달라지게 된다.

앞에서 수행한 여러가지 조건 중에서 가장 현실적인 조건은 Constrained Fire, Lower Oxygen Limit 10%, Radiative Fraction 0.3 그리고 방화문이 닫힌 상태이다.

원자력발전소 운전시 방화문은 닫힌 상태를 유지하도록 되어 있으며, 또한 주요 화재구역에서의 방화문

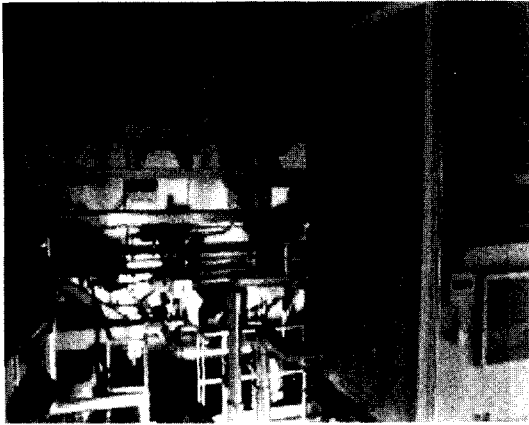


그림 7. 펌프실 상부 케이블 트레이.

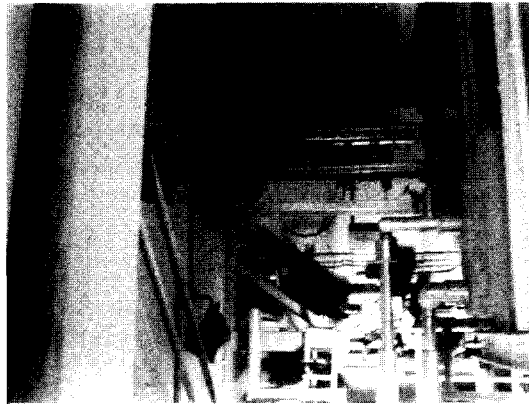


그림 8. 안전펌프실 내 케이블 관통부.

열림은 주 제어실에서 확인할 수 있도록 설계되어 있다.

상기와 같은 조건 하에 분석한 결과인 그림 1 중 C1-CF-L10에 의하면 상부층 가스 온도는 화재 발생 개시 후 약 160초에서 180초 사이에 400°C 이상으로 최고 온도는 약 434°C 정도 되는 것으로 나타났다. 이 때 400°C 이상으로 지속된 시간은 약 25초 정도인 것으로 확인되었다.

현재 원자력 발전소에 설치된 안전등급 케이블의 외 피 재질은 CSP(Chloro-Sulfonated Polyethylene)이며, 화재시 불에 잘 안타는 성질을 지닌 난연성 케이블로 구성되어 있다.<sup>7)</sup>

미국 원자력 규제위원회(Nuclear Regulatory Commission: NRC)에서 발간한 “Fire Protection Significance Determination Process(SDP)” 자료<sup>8)</sup> 및 미국 전력연구원(EPRI)에서 발간한 “Fire PRA Implementation Guide” 자료<sup>9)</sup>에 의하면 상기 결과로 인해 안전 펌프실에 위치

한 케이블이 손상 받지 않음을 확인할 수 있다.

## 5. 화재구역의 CCDP 평가

화재 PSA(Probabilistic Safety Assessment) 방법론에 의하면 화재가 발생한 구역에서의 기기 손상과 전파되었을 때의 추가 기기 손상을 고려하여 화재로 인한 조건부 노심손상확률(Conditional Core Damage Probability, CCDP)을 계산하도록 되어 있다.<sup>9)</sup>

화재구역 CCDP 평가에는 원자력연구소 종합안전평가부에서 개발한 KIRAP(KAERI Integrated Reliability Assessment code Package) 코드를 사용하였다.<sup>10)</sup>

일반적으로 화재 PSA에서는 각 화재구역별 노심손상빈도(Core Damage Frequency, CDF)를 CCDP와 해당 화재구역의 화재발생빈도값을 사용하여 구하게 된다.

안전펌프실의 화재발생빈도값은 CDF값의 증가에 영향을 미치지 않으므로 CCDP만을 분석하였으며, CCDP는 화재사건 분석을 위해 구성된 고장수목을 사용하여 안전펌프실 사고경위에 대해서 CCDP를 구하였다.

본 논문의 대상 화재구역인 안전펌프실에는 안전펌프 외에 밸브, 펌프실 냉방기 및 이웃한 두 개의 방에 위치한 기기의 케이블 등이 있다. 따라서 화재 발생시 해당 펌프실의 펌프와 관련된 기기가 화재로 인하여 기능을 수행하지 못할 경우 보다는 펌프실의 상부 케이블의 전소로 인해 해당 펌프를 포함하여 이웃하고 있는 두 개의 방에 위치한 기기가 기능상실할 경우 발전소 안전성 측면에 보다 큰 영향을 미치게 된다. 그러나 본 논문의 결과에 의하면 화재가 발생한 해당 펌프를 제외하고는 상부에 위치한 케이블은 모두 건전성을 유지하는 것으로 나타났으므로, KIRAP를 사용한 정량화시 안전 펌프실에 위치한 기기만이 기능상실한다는 조건으로 분석을 수행하였다. 또한 정량화 단계에서 적절한 시간 내에 계산되면서도 의미있는 모든 최소단절집합을 도출하기 위하여 CCDP에 영향이 극히 미미한 일부 최소단절집합을 제외하기 위한 절삭값(Cutoff Value) 1.3E-11을 적용하였다.

일반적으로 화재위험도분석에서는 한 화재구역에서 화재가 발생하게 되면 해당 화재구역에 위치한 기기 및 케이블은 전소하여 모두 기능상실 한다는 보수적인 가정하에 평가를 수행하게 된다.

CFAST 결과를 이용하여 안전 펌프실의 CCDP를 평가한 결과 그림 9에 나타난 바와 같이 9.25E-07이었으며, 이는 기존의 보수적 가정하에 수행한 CCDP값인 2.19E-06 보다 약 2.3배 감소하는 보다 현실적이고 확실성이 감소한 결과를 도출할 수 있었다.

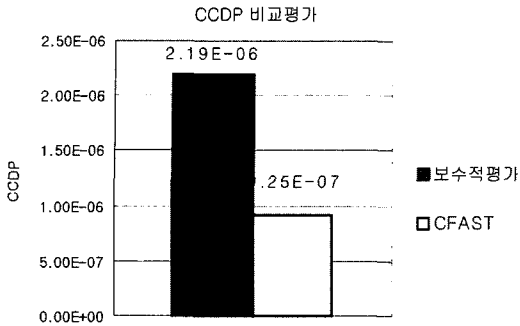


그림 9. CCDP 비교 평가.

현재 화재 PSA에서 정량적 선별 분석시 CDF값이  $1.0E-06$ 보다 작은 경우는 상세 분석 대상에서 제외하고 있으며,<sup>9)</sup> 안전펌프실의 사고경위 역시 화재발생빈도값을 적용하면 그 값이 거의 E-10 정도로 다른 주요 사고경위의 CDF인 E-06에 비해 매우 작음을 알 수 있다. 그러나 화재구역의 기기 및 케이블 건전성 평가에 CFAST와 같은 화재모델을 이용하게 되면 상기 설명한 바와 같이 현실적이고 불확실성이 감소한 결과를 얻을 수 있을 뿐만 아니라, 화재 PSA 모델의 품질 향상과 위험도 활용 측면에서 큰 의미를 부여할 수 있다고 판단된다.

## 6. 결 론

본 연구 수행의 결론은 다음과 같다.

1) 본 대상의 구조 및 화재 특성상 환기 지배형 화재이므로 급기제한 및 최소산소농도 10%를 설정하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

2) 복사열 방출은 총 열방출율에서 대류 열전달로 소모되는 비율을 줄이게 되지만 대상 공간의 온도나 연기층 하강에는 큰 영향을 미치지 않으므로 30%의 일반적 비율로 설정하여도 무방한 것으로 판단된다.

3) 개구부가 열릴 경우 산소의 공급이 이루어져 상부층 온도는 높은 상승을 보여준다. 그러나 오히려 100%의 개방이 외부로의 연기 방출과 저온의 공기 공급을 원활하게 하여 50%에 비해 온도 상승이 작은 것으로 나타났다.

4) Constrained Fire, Lower Oxygen Limit 10%, Radiative Fraction 0.3 및 방화문이 차단된 상태 즉, 앞에서의 여러 가지 조건 중 가장 현실적인 조건하에서의 화재구역 내 상부 케이블 건전성은 유지됨이 확인되었다.

7) 안전 펌프실의 CCDP를 평가한 결과  $9.25E-07$  이

었으며, 이는 기존의 보수적 가정 하에 수행한 CCDP 값인  $2.19E-06$  보다 약 2.3배 감소하는 보다 현실적이고 불확실성이 감소한 결과를 도출할 수 있었다.

위의 분석을 통하여 검토 대상이 된 변수 중 복사 열방출은 영향이 거의 없는 것으로 판단되었다. 그러나 개구부의 개방 정도나 개방시간에 대한 설정은 시나리오에서 다양하게 검토하거나 신중하게 조건을 설정할 필요가 있는 것으로 판단된다. 정확한 데이터가 확보되고, 위에서 제시된 변수들에 대한 고려를 시나리오에서 충분히 해 준다면 화재로 인한 공간 내부의 대상물질에 대한 피해 여부를 보다 정확하고 현실적으로 판단할 수 있을 것으로 생각되며, 그에 따르는 소화설비의 설치 필요 유무와 같은 개선 방안을 수립하여 원전의 화재에 대한 안전도를 높이는 데 기여할 수 있을 것이라 판단된다. 또한 현재 국내에서 작성 중인 각 원전에 대한 화재방호계획서 상에는 중요 화재구역에 대한 화재 성장 및 전파 현상을 화재모델링 결과를 토대로 상세하게 기술하도록 규제기관에서 요구하고 있는바 앞으로 더 많은 화재구역에 대한 적용 연구가 필요하다고 사료된다.

마지막으로 화재 PSA 및 화재위험도분석시 화재모델링코드를 사용하여 보다 정량적이고 불확실성이 감소한 결과를 도출할 수 있을 뿐만 아니라, 화재 PSA 모델의 품질 향상과 위험도 활용 측면에서 큰 의미를 부여할 수 있다고 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 중장기 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. NSBAC-178L, Fire Event Database for U.S. Nuclear Power Plants, Electric Power Research Institute, January(1993).
2. 이윤환 외, 화재모델링코드의 특성 비교, 2003 추계학술 발표대회논문집, 한국원자력학회, 2003.
3. A Users Guide for CFAST Version1.6; Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, December(1992).
4. Richard D. Peacock *et al.*, Issue in Evaluation of Complex Fire Models, Fire Safety Journal(1998).
5. ASTM E 1355, Standard Guide for Evaluating the Predictive Capability of Fire Models, ASTM stan-

- ard(1992).
6. WHC-SD-SQA-ANAL-501, Fire Protection Guide for Waste Drum Storage Array, September(1996).
  7. 원자력발전소용 케이블 설명서, LG Cable(2003).
  8. Supporting Guidance for Implementation of IMC 0609 Appendix F-Fire Protection Significance Determination Process (SDP), U. S. NRC(2004).
  9. Fire PRA Implementation Guide, TR-105928, EPRI (1995).
  10. Han, ET. AR., "KAERI Integrated Reliability Analysis Code Package (KIRAP) Release 2.0 User's Manual", KAERI/TR-361/93, KAERI(1993).