

## 화재모델 CFAST를 이용한 원전 화재구역의 CCDP 평가(II) CCDP Evaluation of the Fire Areas in NPP Applying CFAST Model (II)

이윤환<sup>†</sup> · 양준언 · 김종훈\* · 김운형\*\*

Yoon-Hwan Lee<sup>†</sup> · Joon-Eon Yang · Jong-Hoon Kim\* · Woon-Hyung Kim\*\*

한국원자력연구소, \*광운대학교 건축공학과, \*\*경민대학 소방안전관리과  
(2005. 6. 8. 접수/2005. 8. 29. 채택)

### 요 약

본 논문에서는 화재 모델 CFAST를 사용하여 원자력발전소에 있는 8개 펌프실의 화재 안전 수준을 평가해 보고, 그 결과를 조건부 노심손상확률에 반영하여 분석해 보았다. 분석 대상 구역은 원자력발전소 일차보조건물에 위치한 고압안전주입 펌프실 A/B, 저압안전주입 펌프실 A/B, 격납건물 살수 펌프실 A/B 및 모터구동 보조급수 펌프실 A/B 등 총 8곳이었다. 각 화재구역의 상부층 가스 온도를 분석하였으며, 분석 결과를 바탕으로 상부층에 위치한 케이블의 손상 유무를 파악하였다. 분석 결과에 의하면 총 8개 화재구역의 상부층 케이블은 건전성을 유지하는 것으로 확인되었다. 케이블의 건전성 평가 결과를 바탕으로 각 화재구역의 조건부 노심손상확률을 평가한 결과, 기존의 보수적인 가정 하에 수행된 화재위험도분석 결과보다 약 2배 정도 감소하는 보다 현실적이고 불확실성이 감소한 결과를 도출할 수 있었다.

### ABSTRACT

This paper evaluates the fire safety level of eight pump rooms in the nuclear power plant using a fire model, CFAST. We estimate the Conditional Core Damage Probability (CCDP) of each room based on the analyzed results of CFAST. Eight rooms located on the primary auxiliary building of the nuclear power plant are high pressure safety injection pump room A/B, low pressure safety injection pump room A/B, containment spray pump room A/B, and motor-driven auxiliary feed water pump room A/B. The upper layer gas temperature of each room is estimated and the integrity of cable is reviewed. Based on the results, the integrity of the cable located at the upper part of compartment is maintained without thermal damage. The Conditional Core Damage Probability is reduced to half of the old values. Accordingly, the fire safety assessment for eight pump rooms using the fire model will be capable of reducing the uncertainty and to develop a more realistic model.

**Keywords :** CFAST, CCDP, Zone model, Cable integrity, Fire, PSA

### 1. 서 론

원자력 발전소에서의 화재는 다른 시설의 화재에 비하여 발생 시 그 피해가 매우 심각하기 때문에 더욱 강화된 화재 안전의 수준이 요구된다. 즉 원자력 발전소에서 발생하는 화재는 내부에서의 인적, 물적 피해에만 국한되는 것이 아니라 원자로의 정지를 유발시키고 각종 안전 관련 기기들을 손상시키기 때문에 더 큰 재난을 가져올 확률이 매우 높다.

이러한 위험에 대하여 설계 단계에서부터 사용 중 관리에 이르기까지 다각도의 안전전략을 수립하고 시행하지만, 가연물과 발화원이 존재하는 한 화재는 언제든 발생할 수 있다고 보아야 할 것이며, 미국 EPRI에서는 10년간의 원자로 운전 중 3.6회의 화재가 발생한다는 경험적 데이터를 제시하고 있어 화재의 위험이 현실적인 사실이라는 것을 뒷받침해 주고 있다<sup>1)</sup>.

화재 PSA(Probabilistic Safety Assessment)를 통한 안전 분석 수행은 이러한 위험에 대한 안전의 확보에 중요한 역할을 하고 있다. 그러나 현재는 화재 PSA 수행 시 대상이 된 원자력 발전소의 각 부분에서 발생될

<sup>†</sup>E-mail: yhleee3@kaeri.re.kr

수 있는 화재의 현상에 대한 평가는 수행되지 않고 매우 보수적인 가정을 통하여 데이터를 결정하고 있는 상황이다.

화재의 현상은 매우 복잡하여 그 예측이 용이하지 않은 점이 있었다. 그렇지만 화재 안전분야에서는 화재 현상의 예측 기술을 지속적으로 발전시켜 왔으며, 최근에는 실무에도 사용될 정도로 기술의 수준이 높아졌다. 특히 이러한 화재 현상의 예측을 기반으로 하는 설계 기술인 이른바 성능기준 화재 안전 설계의 도입이 가능해지게 된 것도 화재모델링과 같은 예측 기술의 발전에 힘입은 것이다.

화재 PSA에서 사용하는 매우 보수적인 가정보다는 좀 더 현실적인 고려를 위해서는 이러한 예측 기법의 도입이 매우 필요하며, 본 논문은 이러한 예측기법의 도입과 그 결과가 PSA의 결과에 어떠한 영향을 주게 되는지를 연구하는데 목적이 있다.

그러므로 본 저자들의 지난 논문<sup>2)</sup>에 이어 이번에는 원자력 발전소의 고압안전주입펌프실 A와 B, 저압안전주입펌프실 A와 B, 격납건물 살수펌프실 A와 B, 및 모터구동 보조급수 펌프실 A와 B 등의 8곳에 대하여 화재모델링을 실시하여, 상부층에 있는 케이블의 건전성을 평가하였다. 또한 그 결과를 각 화재구역의 조건부 노심손상확률(Conditional Core Damage Probability: CCDP)을 평가하는데 적용하여 보고, 그 결과가 매우 보수적인 가정 하에서의 기존의 결과와 비교해 볼 때 어떠한 변화가 있는가를 알아보려고 하였다.

## 2. 분석 대상 및 화재에 대한 설정

본 논문에서는 지난 논문에서 결정되었던 CFAST 입력 변수 결정 결과를 바탕으로 원자력발전소에 위치한 주요 안전펌프실에 대해서 화재 안전성 평가를 수행하였다. 지난 논문에서 결정된 최적 입력 변수값은 Constrained Fire, Lower Oxygen Limit 10%, Radiative

Fraction 0.3 그리고 방화문이 닫힌 상태이다<sup>2)</sup>.

본 연구에서는 CFAST모델을 사용하는 FASTLite Ver. 1.1을 사용하여 분석하였으며, 화재구역에서의 대표적인 화재 시나리오는 펌프에 사용되는 윤활유의 누출과 펌프 과열에 의한 윤활유의 연소이다. 모터구동 보조급수 펌프실을 제외한 분석 대상 화재구역 내부에는 철제 계단과 Waffle Slab으로 만들어진 구조물이 있으나, 현 Zone Model에서는 공간 내부 구조물인 철제 계단 및 Waffle Slab에 대한 고려는 하지 않았다.

### 2.1 분석 대상의 설정

본 연구의 분석 대상은 다음과 같은 원자력발전소에 위치한 안전계통 펌프실이다.

- 고압안전주입 펌프실 A/B
- 저압안전주입 펌프실 A/B
- 격납건물 살수 펌프실 A/B
- 모터구동 보조급수 펌프실 A/B

총 8개 화재구역에 대해서 분석을 수행하여야 하나, 일차보조건물은 A구역과 B구역으로 나뉘어 같은 화재 구역이 대칭적으로 설치되어 있으므로, 편의상 한 개씩의 화재구역에 대해서 분석을 수행하였다. 각 화재 구역의 크기 및 분석 조건을 Table 1에 정리하였다.

#### 2.1.1 고압안전주입 펌프실

내부에는 펌프 1대가 설치되어 있고, 상부에는 케이블이 위치하고 있다. 공간의 크기는 Table 1에 나타낸 바와 같이 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. 고압안전주입 펌프실에는 고압안전주입 펌프실의 기기 관련 케이블과 이웃한 방인 저압안전주입 펌프실 및 격납건물살수 펌프실에 위치한 기기 관련 케이블이 모두 관통하고 있다. 따라서 고압안전주입 펌프실에 위치한 기기와 함께 상부에 위치한 케이블 모두가 분석 대상에 포함된다.

Table 1. Technical descriptions of the fire areas

	고압안전주입펌프실 A/B	저압안전주입펌프실 A/B	격납건물살수펌프실 A/B	모터구동보조급수펌프실 A/B
공간크기	8.14 m×4.29 m×8.46 m	8.23 m×5.15 m×8.53 m	8.23 m×5.15 m×8.53 m	11.89 m×6.4 m×5.0 m
개 구 부	1.0 m(W)×2.0 m(H) 닫혀 있음	1.0 m(W)×2.0 m(H) 닫혀 있음	1.0 m(W)×2.0 m(H) 닫혀 있음	1.0 m(W)×2.0 m(H) 닫혀 있음
연소면적	23.8 m <sup>2</sup>	47.3 m <sup>2</sup>	40.7 m <sup>2</sup>	69.7 m <sup>2</sup>
화재성장률	Ultra-fast	Ultra-fast	Ultra-fast	Ultra-fast
화재지속시간	333.2초	297.7초	307.2초	128.0초
최대열방출률	20802 kW	16843.8 kW	17911.8 kW	3077 kW

**Table 2.** Characteristic values of the diesel oil<sup>3)</sup>

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

화재 시나리오는 펌프의 이상에 의하여 윤활유가 누출되고 펌프의 과열로 인하여 점화되면서 화재가 시작된다. 가연성 액체가 특정 공간에 누출되는 경우 연료량과 바닥 면적에 의하여 화재의 크기가 결정된다. 본 대상 공간의 총 바닥 면적은 34.9 m<sup>2</sup>이나 모터 하부의 받침을 위한 콘크리트 구조물이 일정 면적을 차지하여 실제 누출될 시에 윤활유가 있게 되는 면적은 23.8 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 Table 2와 같이 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 열방출률에 바로 도달하기 보다는 어느 정도의 시간을 가지고 성장한다고 보는 것이 타당하다. 그러므로 경유 70 l의 연소 총 면적에 의한 최대 열방출율은 37.1 MW이며, 연소 지속시간은 62.4초이나 이는 이론적으로 점화와 동시에 최대치에 도달한다는 가정이므로, 이보다는 Ultra-Fast Fire Growth 정도의 화재 성장률( $a = 0.1878 \text{ kJ/s}^2$ )을 고려하는 것이 조금 더 실제적이고 타당하다 할 수 있다. 37.1 MW로 62.4초간 화재가 지속될 경우 발생하는 에너지의 양( $Q_{\text{total}}$ )은 2315.04 MJ이며 Ultra-Fast Growth로 성장하는 화재로 위에 언급된 에너지를 발생시키는 시간은 333.2초이며, 이 때 도달하는 최대 열방출율은 20,802 kW이다.

#### 2.1.2 저압안전주입 펌프실

내부에는 펌프 1대가 설치되어있고, 상부에는 케이블이 위치하고 있다. 공간의 크기는 8.23 m(W)×5.95(D)×8.53 m(H)의 규모이며, 바닥에서 5.3 m 높이에 1.0 m(W)×2.0 m(H) 크기의 방화문이 설치되어 있다. 본 대상 공간의 총 바닥면적은 49.0 m<sup>2</sup>이나, 펌프를 받치기 위한 세 개의 구조물이 일정 면적을 차지하여 실제 누출될 시에 윤활유가 있게 되는 면적은 47.3 m<sup>2</sup>이다. 본 분석의 경우에도 윤활유에 대한 연소열과 질량 소모율의 데이터 확보가 용이하지 못하였던 관계로 매우 보수적인 가정으로 Table 2와 같이 경유의 데이터

를 사용하여 내부 화재의 규모와 지속시간 등을 설정하였다.

경유 50 l의 연소 총면적에 의한 최대 열방출률은 73.7 MW이며, 연소 지속시간은 22.4초이나 이는 이론적으로 점화와 동시에 최대치에 도달한다는 가정이므로, 이보다는 Ultra-Fast Fire Growth 정도의 화재 성장률( $a = 0.1878 \text{ kJ/s}^2$ )을 고려하는 것이 조금 더 실제적이고 타당하다 할 수 있다. 73.74 MW로 22.4초간 화재가 지속될 경우 발생하는 에너지의 양( $Q_{\text{total}}$ )은 1651.78 MJ이며 Ultra-Fast Growth로 성장하는 화재로 위에 언급된 에너지를 발생시키는 시간은 297.7초이며 이때 도달하는 최대 열방출률은 16843.8 kW이다.

#### 2.1.3 격납건물 살수 펌프실

내부에는 펌프 1대가 설치되어있고, 상부에는 케이블이 위치하고 있다. 공간의 크기는 8.23 m(W)×5.15 m(D)×8.53 m(H)의 규모이며, 바닥에서 5.3 m 높이에 1.0 m(W)×2.0 m(H) 크기의 방화문이 설치되어 있다. 격납건물 살수 펌프실에는 격납건물 살수 펌프실의 기기 관련 케이블과 이웃한 방인 저압안전주입 펌프실에 위치한 기기 관련 케이블이 모두 관통하고 있다. 따라서 격납건물 살수 펌프실에 위치한 기기와 함께 상부에 위치한 케이블 모두가 분석 대상에 포함된다.

본 대상 공간의 총 바닥면적은 42.4 m<sup>2</sup>이나, 펌프를 받치기 위한 구조물이 일정 면적을 차지하여 실제 누출될 시에 윤활유가 있게 되는 면적은 40.7 m<sup>2</sup>이다. 이 경우 역시 윤활유에 대한 데이터 확보가 용이하지 못하였던 관계로 매우 보수적인 가정으로 Table 2와 같이 경유의 데이터를 사용하여 내부 화재의 규모와 지속시간 등을 설정하였다.

경유 55 l의 연소 총면적에 의한 최대 열방출률은 63.5 MW이며, 연소 지속시간은 28.6초이나 이는 이론적으로 점화와 동시에 최대치에 도달한다는 가정이므로, 이보다는 Ultra-Fast Fire Growth 정도의 화재 성장률( $a = 0.1878 \text{ kJ/s}^2$ )을 고려하는 것이 조금 더 실제적이고 타당하다 할 수 있다. 63.5 MW로 28.6초간 화재가 지속될 경우 발생하는 에너지의 양( $Q_{\text{total}}$ )은 1816.1 MJ이며 Ultra-Fast Growth로 성장하는 화재로 위에 언급된 에너지를 발생시키는 시간은 307.2초이며 이때 도달하는 최대 열방출률은 17911.8 kW이다.

#### 2.1.4 모터구동 보조급수 펌프실

내부에는 펌프 1대가 설치되어있고, 상부에는 케이블이 위치하고 있다. 공간의 크기는 11.89 m(W)×6.4 m(D)×5.0(H)의 규모이다. 모터구동 보조급수 펌프실에는 보조급수 펌프실의 기기 관련 케이블과 화확 및 체적제어계통, 기기냉각수계통 및 필수해수계통 등

의 일부 기기 관련 케이블이 모두 관통하고 있다. 따라서 모터구동 보조급수 펌프실에 위치한 기기와 함께 상부에 위치한 케이블 모두가 분석 대상에 포함된다.

본 대상 공간의 총 바닥면적은 76.1 m<sup>2</sup>이나 펌프가 차지하고 있는 공간을 제외할 경우, 실제 누출될 시에 윤향유가 있게 되는 면적은 69.65 m<sup>2</sup>이다. 이 경우 역시 윤향유의 데이터 확보가 용이하지 못하였던 관계로 매우 보수적인 가정으로 Table 2와 같이 경유의 데이터를 사용하여 내부 화재의 규모와 지속시간 등을 설정하였다.

경유 4 l의 연소 총면적에 의한 최대 열방출률은 108.7 MW이며, 연소지속시간은 1.21초이나 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. 108.7 MW로 1.21초간 화재가 지속될 경우 발생하는 에너지의 양( $Q_{total}$ )은 131.5 MJ이며 Ultra-Fast Growth로 성장하는 화재로 위에 언급된 에너지량을 발생시키는 시간은 128초이며 이때 도달하는 최대 열방출률은 3,077 kW이다.

### 2.2 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 경유로 설정하였으며, 이는 윤향유에 대한 화재 관련 데이터의 확보가 현실적으로 어렵기 때문에 매우 보수적인 가정하에 유사한 데이터를 사용하였다.

3) 연료가 가연성 액체인 경우 화재 개시와 동시에 최대 열방출률에 도달하도록 설정하는 경우가 있으나, 가연성 액체인 경유의 경우도 최대 열방출률에의 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 예측치

보다 낮을 것으로 예상되지만, 이들에 의한 열손실을 고려하지 않고 분석을 수행하였다. Zone Model의 한계상 벽면이 아닌 공간 내부 구조물에 의한 열손실은 고려가 어려우므로 이러한 부분에 대한 보정은 추후 분석해야 할 사항이다.

## 3. CFAST 분석 수행 및 결과

### 3.1 고압안전주입펌프실

Fig. 1에 나타난 바와 같이 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. Fig. 2에 나타난 바와 같이 이 경우는 모두 개구부가 닫혀있고 그로 인해 외부로의 연기 방출이 되지 않는 상황이기 때문에 약 90초

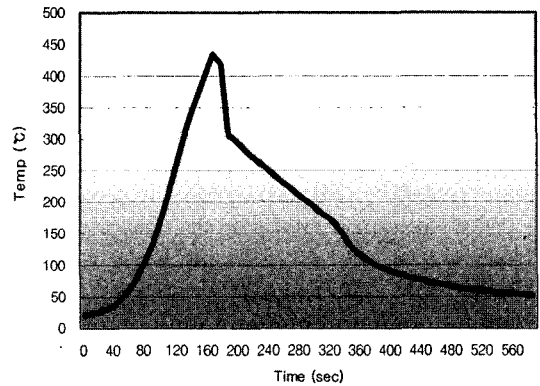


Fig. 1. Upper layer temperature of the HPSI pump room as estimated by CFAST.

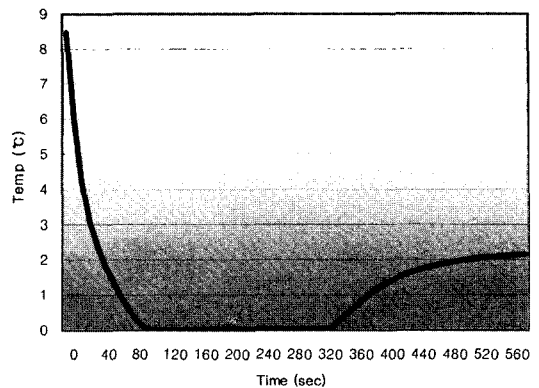


Fig. 2. Interface height between upper and lower layer in the HPSI pump room.

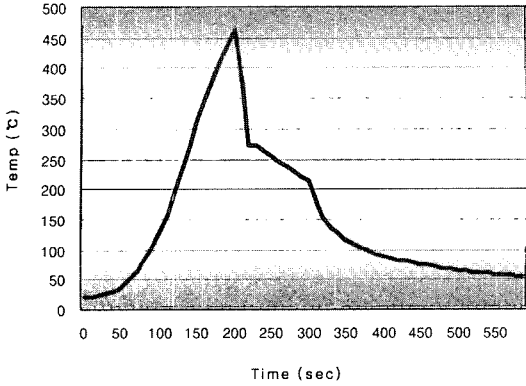


Fig. 3. Upper layer temperature of the LPSI pump room as estimated by CFAST.

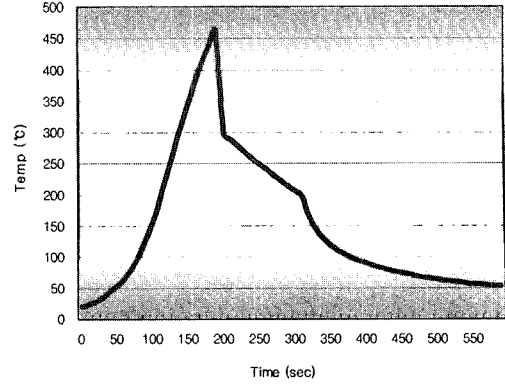


Fig. 5. Upper layer temperature of the CSS pump room as estimated by CFAST.

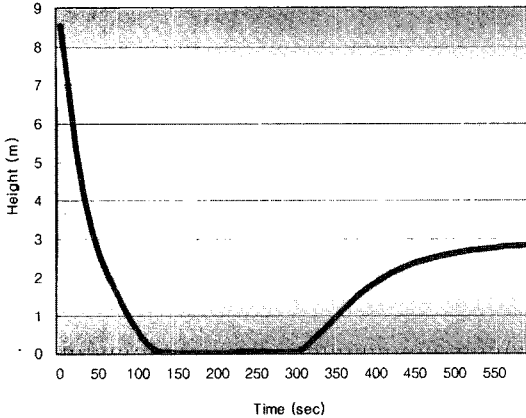


Fig. 4. Interface height between upper and lower layer in the LPSI pump room.

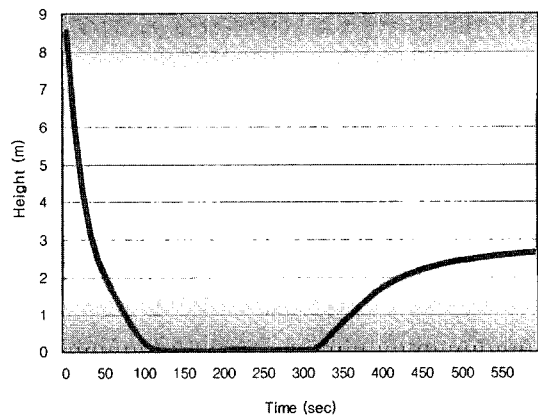


Fig. 6. interface Height between Upper and Lower Layer in the CSS pump room.

정도에 연기층이 바닥면까지 내려오게 되는 현상을 확인할 수 있었다.

**3.2 저압안전주입펌프실**

Fig. 3에 나타난 바와 상부층 가스 온도는 화재 발생 개시 후 약 180초에서 205초 사이에 400°C 이상으로, 최고 온도는 약 463°C 정도 되는 것으로 나타났다. 이 때 400°C 이상으로 지속된 시간은 약 25초 정도인 것으로 확인되었다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 이 경우는 모두 개구부가 닫혀있고 그로 인해 외부로의 연기 방출이 되지 않는 상황이기 때문에 약 140초 정도에 연기층이 바닥면까지 내려오게 되는 현상을 확인할 수 있었다.

**3.3 격납건물살수펌프실**

Fig. 5에 나타난 바와 상부층 가스 온도는 화재 발

생 개시 후 약 160초에서 195초 사이에 400°C 이상으로, 최고 온도는 약 461°C 정도 되는 것으로 나타났다. 이 때 400°C 이상으로 지속된 시간은 약 25초 정도인 것으로 확인되었다. Fig. 6에 나타난 바와 같이 이 경우는 모두 개구부가 닫혀있고 그로 인해 외부로의 연기 방출이 되지 않는 상황이기 때문에 약 130초 정도에 연기층이 바닥면까지 내려오게 되는 현상을 확인할 수 있었다.

**3.4 모터구동 보조급수펌프실**

Fig. 7에 나타난 바와 상부층 가스 온도는 화재 발생 개시 후 약 110초에서 140초 사이에 200°C 이상으로 최고 온도는 약 249°C 정도 되는 것으로 나타났다. 이 때 200°C 이상으로 지속된 시간은 약 30초 정도인 것으로 확인되었다. Fig. 8에 나타난 바와 같이 이 경우는 모두 개구부가 닫혀있고 그로 인해 외부로

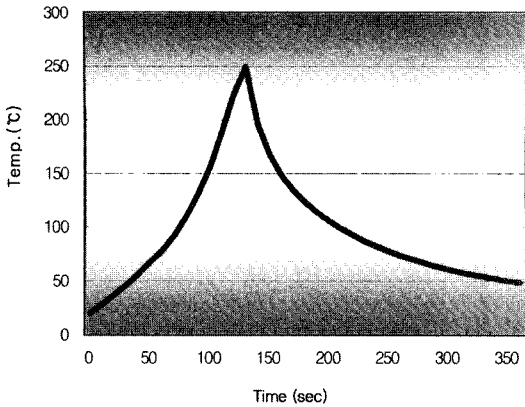


Fig. 7. Upper layer temperature of the AFW pump room as estimated by CFAST.

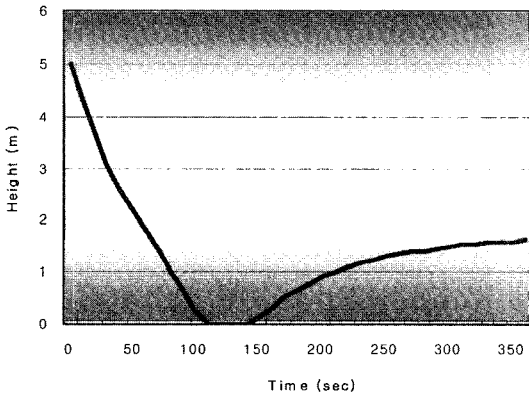


Fig. 8. Interface height between upper and lower layer in the AFW pump room.

의 연기 방출이 되지 않는 상황이기 때문에 약 110초 정도에 연기층이 바닥면까지 내려오게 되는 현상을 확인할 수 있었다.

#### 4. 분석 대상 구역 내의 케이블 건전성 평가

각 구역에 대한 화재모델링의 분석 결과, 먼저 고압 안전주입 펌프실의 경우 Fig. 1에 나타난 바와 같이 상부 연기층의 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.

저압안전주입 펌프실의 경우 Fig. 3에 나타난 바와 상부층 가스 온도는 약 180초에서 205초 사이에 400°C

이상으로, 최고 온도는 약 463°C 정도 되는 것으로 나타났다으며, 400°C 이상으로 지속된 시간은 약 25초 정도인 것으로 나타났다.

격납건물 살수 펌프실의 경우 Fig. 5에 나타난 바와 상부 연기층의 온도는 약 160초에서 195초 사이에 400°C 이상으로, 최고 온도는 약 461°C 정도 되는 것으로 나타났다. 이 때 400°C 이상으로 지속된 시간은 약 25초 정도인 것으로 확인되었다.

모터구동 보조급수 펌프실의 경우 Fig. 7에 나타난 바와 상부 연기층의 온도는 화재 발생 개시 후 약 110초에서 140초 사이에 200°C 이상으로, 최고 온도는 약 249°C 정도 되는 것으로 나타났다. 이 때 200°C 이상으로 지속된 시간은 약 30초 정도인 것으로 확인되었다.

상기 4개 화재구역 중 모터구동 보조급수 펌프실을 제외하고는 상부층 가스 온도가 약 434°C 이상이었으며, 400°C 이상으로 지속된 시간은 약 25초 정도이었다. 화재구역의 크기 및 화원의 크기가 비슷하기 때문에 결과 또한 비슷하였으나, 모터구동 보조급수 펌프실의 경우는 화재구역의 크기가 다를 뿐 아니라 화원의 크기 역시 상대적으로 작기 때문에 상부층 가스 온도가 낮게 나타난 것으로 판단된다. 또한 현재 한국형 표준 원자력발전소에는 사양이 같은 저압안전주입펌프와 격납건물살수펌프가 설치되어 있다. 두 개 화재구역의 상부층 가스 온도 결과가 비슷하게 나타나고 있으며, 수치상으로 약간의 차이를 나타내는 이유는 펌프실 바닥 면적의 차이에 기인하는 것으로 판단된다.

현재 원자력발전소에 설치된 안전등급 케이블의 외피 재질은 CSP(Chloro-Sulfonated Polyethylene)이며, 화재시 불에 잘 안타는 성질을 지닌 난연성 케이블로 구성되어 있다<sup>4)</sup>.

미국 원자력 규제위원회(Nuclear Regulatory Commission: NRC)에서 발간한 “Fire Protection Significance Determination Process(SDP)” 자료<sup>5)</sup> 및 미국 전력연구원(EPRI)에서 발간한 “Fire PRA Implementation Guide” 자료<sup>6)</sup>에 의하면 450°C 이상에서 케이블 건전성이 유지될 수 있는 노출 시간은 약 2분 정도로 평가되었다. 따라서 상기 결과로 인해 안전 펌프실에 위치한 케이블이 손상 받지 않음을 확인할 수 있다.

#### 5. 화재구역의 CCDP 평가

화재 PSA 방법론에 의하면 화재가 발생한 구역에서의 기기 손상과 전파되었을 때의 추가 기기 손상을 고려하여 화재로 인한 조건부 노심손상확률 CCDP를 계산하도록 되어 있다<sup>6)</sup>.

화재구역 CCDP 평가에는 원자력연구소 종합안전 평가부에서 개발한 KIRAP(KAERI Integrated Reliability Assessment code Package) 코드를 사용하였다<sup>7)</sup>.

일반적으로 화재 PSA에서는 각 화재구역별 노심손상빈도(Core Damage Frequency: CDF)를 CCDP와 해당 화재구역의 화재발생빈도값을 사용하여 구하게 된다. 안전펌프실의 화재발생빈도값은 예전의 값과 동일하므로 CDF 값의 증가에 영향을 미치지 않는다. 따라서 CDF에 영향을 미치게 되는 CCDP만을 분석하였으며, CCDP는 화재사건 분석을 위해 구성된 고장수목 및 사건수목을 사용하여 안전펌프실 사고경위에 대해서 CCDP를 구하였다. CCDP 계산을 위해서 1단계 PSA에서 작성된 고장수목을 화재 PSA에서 수행할 수 있도록 화재로 인한 손상 사건을 추가하였다.

본 논문의 대상 화재구역인 안전펌프실에는 안전펌프 외에 밸브, 펌프실 냉방기 및 이웃한 방에 위치한 기기의 케이블 등이 위치하고 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 방에 위치한 기기가 기능을 상실할 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 최소단절 집합을 도출하기 위하여 CCDP에 영향이 극히 미미한 일부 최소단절집합을 제외하기 위한 절삭값(Cutoff Value) 1.0E-11을 적용하였다.

Table 3. CCDPs for the fire areas

분석 대상 화재구역	Old CCDP	New CCDP	비고
고압안전주입펌프실 A	2.19E-06	9.25E-07	2.4배 감소
고압안전주입펌프실 B	2.19E-06	9.26E-07	2.4배 감소
저압안전주입펌프실 A	2.08E-06	9.84E-07	2.1배 감소
저압안전주입펌프실 B	1.00E-06	9.85E-07	1.1배 감소
격납건물살수펌프실 A	2.18E-06	9.21E-07	2.4배 감소
격납건물살수펌프실 B	2.17E-06	9.27E-07	2.3배 감소
보조급수 모터구동 펌프실 A	4.41E-06	3.07E-06	1.4배 감소
보조급수 모터구동 펌프실 B	4.26E-06	3.09E-06	1.4배 감소

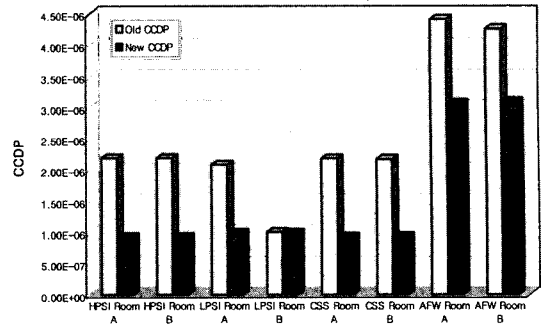


Fig. 9. Comparisons of the CCDPs.

CFAST 결과를 이용하여 안전펌프실의 CCDP를 평가한 결과 Table 3 및 Fig. 9에 나타난 바와 같이 고압안전주입 펌프실 A의 경우 CCDP 값이 2.19E-06에서 9.25E-07로 약 2.4배 감소, 저압안전주입 펌프실 A의 경우 2.08E-06에서 9.84E-07로 약 2.1배 감소, 격납 건물 살수 펌프실 A의 경우는 2.18E-06에서 9.21E-07로 약 2.4배 감소, 그리고 보조급수 모터구동 펌프실 A의 경우 4.41E-06에서 4.41E-06로 약 1.4배 감소하는 결과를 나타내었다. 단, 저압안전주입펌프실 A와 B의 CCDP 감소율이 차이가 나는 이유는 A실과 B실에 포설된 케이블에 관련된 기기가 완전 대칭을 이루지 못하고 있기 때문이며, 이로 인해서 화재 발생시 상부 케이블이 전소할 경우를 평가한 기존의 CCDP 값에서 차이가 발생하게 된다. 그러나 CFAST 결과를 사용하여 상부 케이블이 건전하다고 평가된 경우에는 A실 및 B실 모두 해당 화재구역에 위치한 기기만 기능상실하게 되고 상부 케이블은 건전성을 유지하므로 각 화재구역에 포설된 케이블과는 무관하게 같은 CCDP 값을 보여주고 있다. 이와 같이 CFAST 결과를 이용하여 안전 펌프실의 CCDP를 평가한 결과, 기존의 보수적 가정에 수행한 CCDP값 보다 약 2배 정도 감소하는 보다 현실적이고 불확실성이 감소한 결과를 도출할 수 있었다.

현재 화재 PSA에서 정량적 선별 분석시 CDF 값이 1.0E-07보다 작은 경우는 상세 분석 대상에서 제외하고 있으며, 안전펌프실의 사고경위 역시 화재발생빈도 값을 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

CFAST 결과를 이용하여 안전 펌프실의 CCDP를 평가한 결과, 고압안전주입 펌프실 A의 경우 CCDP 값이 2.19E-06에서 9.25E-07로 약 2.4배 감소, 저압안전주입 펌프실 A의 경우 2.08E-06에서 9.84E-07로 약 2.1배 감소, 격납건물 살수 펌프실 A의 경우는 2.18E-06에서 9.21E-07로 약 2.4배 감소, 그리고 보조급수 모터 구동 펌프실 A의 경우 4.41E-06에서 4.41E-06로 약 1.4배 감소하는 결과를 나타내었다. 이와 같이 CFAST 결과를 이용하여 안전 펌프실의 CCDP를 평가한 결과, 기존의 보수적 가정하에 수행한 CCDP 값 보다 약 2배 정도 감소하는 보다 현실적이고 불확실성이 감소한 결과를 도출할 수 있었다. 그러나 본 논문에서는 한 가지의 화재 시나리오만을 선택하여 분석한 결과이므로, 추후 다른 화재 시나리오를 가지고 분석을 수행하여 케이블 건전성 여부를 다시 한번 확인할 계획이다. 또한 실제 대상 공간의 내부에는 철재 구조물들이 있으며, 공간의 상부에는 다량의 케이블과 케이블 트레이가 존재한다. 그러나 Zone Model의 한계상 벽면이 아닌 공간 내부 구조물에 의한 열손실은 고려가 어려워 이들에 의한 열손실을 고려하지 않고 분석을 수행하였다. 따라서 같은 화재구역을 대상으로 Field Model과 Zone Model과의 비교 분석은 반드시 분석해야 할 사항으로 판단된다.

마지막으로 화재 PSA 및 화재위험도분석 시 화재모델링코드를 사용하여 보다 정량적이고 불확실성이 감

소한 결과를 도출할 수 있을 뿐만이 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. NSAC-178L, Fire Event Database for U.S. Nuclear Power Plants, Electric Power Research Institute, January(1993).
2. 이윤환 외 3, “화재모델 CFAST를 이용한 원전 화재구역의 CCDP 평가”, 한국화재소방학회논문지, Vol. 18, No. 4, pp64-71(2004).
3. WHC-SD-SQA-ANAL-501, Fire Protection Guide for Waste Drum Storage Array, September(1996).
4. 원자력발전소용 케이블 설명서, LG Cable(2003).
5. Supporting Guidance for Implementation of IMC 0609 Appendix F-Fire Protection Significance Determination Process (SDP), U. S. NRC(2004).
6. Fire PRA Implementation Guide, TR-105928, EPRI (1995).
7. Han *et al.*, “KAERI Integrated Reliability Analysis Code Package (KIRAP) Release 2.0 User's Manual”, KAERI/TR-361/93, KAERI(1993).