2004 춘계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

화재모델 CFAST의 변수 분석

Parametric Analysis of Fire Model CFAST

이윤환 • 양준언 • 김종훈*
한국원자력연구소 • *경민대학

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 시간 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 것으로 나타났다. 그러나 개구부의 개방 정도나 개방 시간에 따른 상부층 가스 온도의 변화는 경우에 따라 많은 차이를 보이고 있으므로 좀 더 많은 민감도 분석을 수행해야 할 것으로 판단된다.

Abstract

This paper describes the pump room fire of the nuclear power plant using CFAST fire modeling code developed by NIST. It is determined by the constrained or unconstrained fire, Lower Oxygen Limit (LOL), Radiative Fraction (RF), and the times to open doors, which are the input parameters of CAFST. According to the results, pump room fire is ventilation-controlled fire, so it is adequate that the value of LOL is 10% which is also the default value. It is appeared that the RF does not change the temperature of the upper gas layer. But the level of opening of the penetrating area and the times to opening it have an effect on the temperature of the upper layer, so it is determined that the results of it should be carefully analyzed.

1. 서 론

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 요인들이 존재하는 현실에서 화재는 언제든 발생할 가능성이 있다고 할 수 있으며, 이는 Electric Power Research Institute (EPRI)에서 발행한 미국 원

자력발전소 화재경험데이터 NSAC-178L[1]에서 언급된 바와 같이 원전의 안전성과 관련된 잠재적 위험성이 있는 화재는 10년의 원자로 운전 연수 중 3.6회가 발생하는 것으로 나타난다는 사실로도 알 수 있다.

현재 화재 안전 분야에서는 화재 현상의 특성에 의하여 확률론적 분석보다는 결정론적 분석을 사용하여 건축물이나 대상의 화재 발생시 어떠한 현상이 발생되고 그에 의한 피해가 어느 정도인가를 파악하여 설계에 반영하는 이른바 성능기준 화재안전 설계(Performance-Based Fire Safety Design)에 대한 연구와 도입이 이루어지고 있다. 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 방어대책을 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 있는 상황이다[2].

현재 여러 가지 Zone Model이 개발되었으나 현재 가장 많이 사용되고 있는 모델은 미국 NIST산하 Building Fire Research Lab.에서 배포하고 있는 CFAST(Consolidated model of Fire growth And Smoke Transport)이다. 이 모델은 기존 Zone Model을 통합하여 정밀도를 향상시키고 부가적 기능을 첨부하였으며, 사용자 환경을 Graphic User Interface로 개선한 FASTLite 및 FAST 모델로 이루어져 있다.[3]

현재 화재 PSA 수행 시 CFAST, MAGIC 등이 주로 많이 사용되고 있으나, 코드 해석 분야의 격언인 garbage in, garbage out에서 보듯이 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 [4]의 검토 서류나 ASTM E 1355 [5]등에서도 요구하고 있는 사항이다.

그러므로 본 연구에서는 실제 원전 화재구역인 안전 펌프실을 대상으로 화재모델링 코드 CFAST의 주요 입력변수에 따른 결과의 변화를 알아보고자 하였다. 다시 말하면 원전의 안전 펌프실에 대한 화재모델링코드의 해석 시 어떠한 변수가 보다 정확하게 설정되어야 하며, 그에 따른 변화는 어떻게 나타나는가를 파악하고, 이를 바탕으로 얻은 결론을 토대로 화재 PSA에 그 결과를 반영할 시 원전의 화재 안전성에 미치는 영향을 알아보고자 하였다.

2. 분석의 개요 및 설정

본 분석은 화재 PSA에 적용할 화재모델링 코드 Zone Model CFAST에 대한 입력 변수와 결과에 미치는 영향을 실제 원전의 특정 구역을 대상으로 수행하였다. 이는 입력 변수와 그

에 따른 결과의 변화가 실제 대상 구역에서 어떠한 차이를 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 구성되어있다.

본 연구에서는 CFAST 모델을 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 8.14m (W) X 4.29m(D) X 8.46m(H)의 규모이며, 바닥에서 5.3m 높이에 1.0m (W) X 2.0m(H) 크기의 방화문이 설치되어 있다. 내부에는 철재 계단과 Waffle Slab으로 만들어진 구조물이 있으나, 현재 Zone Model에서는 공간 내부 구조물 등을 고려할 수 없으므로 본 분석에서는 철제 계단 및 Waffle Slab을 고려하지 않았다.

2.3. 분석 입력 변수와 범위의 설정

(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 34.92m^2이나 모터 하부의 받침을 위한 콘크리트 구조물이 일정 면적을 차지하여 실제 누출될 시에 윤활유가 있게 되는 면적은 23.78 m^2이다.

현재 윤활유에 대한 연소열(Heat of Combustion)과 질량 소모율(Mass Loss Rate)의 데이터 확보가 용이하지 못하였던 관계로 좀 더 보수적인 가정으로 경유(Diesel Oil)의 데이터를 사용하여 내부 화재의 규모와 지속시간 등을 설정하였다.

표 1. 경유(Diesel Oil)의 화재관련 특성값 [6]

Type	Heat of combustion (kJ/kg)	Mass loss rate (kg/m^2-s)
Diesel Oil	40	0.039

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 62.4초이나 이는 이론적으로 점화와 동시에 최대치에 도달한다는 가정이므로, 이보다는 Ultra-Fast Fire Growth 정도의 화재 성장율(a=0.1878kJ/s^2)을 고려하는 것이 조금 더 실제적이고 타당하다 할 수 있다.

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

(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 발생되는 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. 이중 LOL은 연소 중단 산소농도를 10%일 때와 0%일 때로 구분하여 설정하였다. 두 번째는 화재에서 발생하는 에너지는 대류 열전달과 복사 열전달로 손실된다고 가정하는데, 이때 복사열 방출 비율(Radiative Fraction : RF)이 전체 화재 예측에 미치는 영향을 알아보고자 하였으며, 일반적으로 제시되는 0.2에서 0.4의 값을 설정하였다. 세 번째 분석은 공간 개구부가 실제 개구부 면적의 0%, 50%, 100%등으로 설정하였을 경우 각각의 변화를 알아 보았으며, 이는 급기가 화재 형태에 미치는 영향을 알아보고자 한 것이다. 마지막으로 개구부 열림 시간이 화재 형태에 미치는 영향을 분석하였다. 이는 시간에 따른 개구부 개방으로 인한 산소 유입이 화재 현상에 미치는 영향을 알아보고자 하였으며, 특히 백 드래프트(Back Draft) 발생 유무를 예측해 볼 수 있다.

결과 값으로는 상부층 온도와 상부 고온층의 높이를 그래프로 비교 분석하였다. 이는 그래프 결과로부터 상부 고온가스층에 위치한 케이블의 건전성 여부를 판단할 수 있기 때문이다.

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
Case 4	8	Door - Close	R.F - 0.3, C.F. LOL-10
	11	Time to open door : 30s	R.F - 0.3, C.F. LOL-10
	12	Time to open door : 60s	R.F - 0.3, C.F. LOL-10
	13	Time to open door : 90s	R.F - 0.3, C.F. LOL-10
	14	Time to open door : 120s	R.F - 0.3, C.F. LOL-10
	15	Time to open door : 150s	R.F - 0.3, C.F. LOL-10
	16	Time to open door : 300s	R.F - 0.3, C.F. LOL-10
	17	Time to open door : 600s	R.F - 0.3, C.F. LOL-10

(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℃이며, 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 보수적인 가정하에 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 비

해서는 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.

(1) Case 1 – 급기 제한 설정 및 최소 산소 제한농도

급기제한은 Constrained Fire와 Unconstrained Fire로 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.

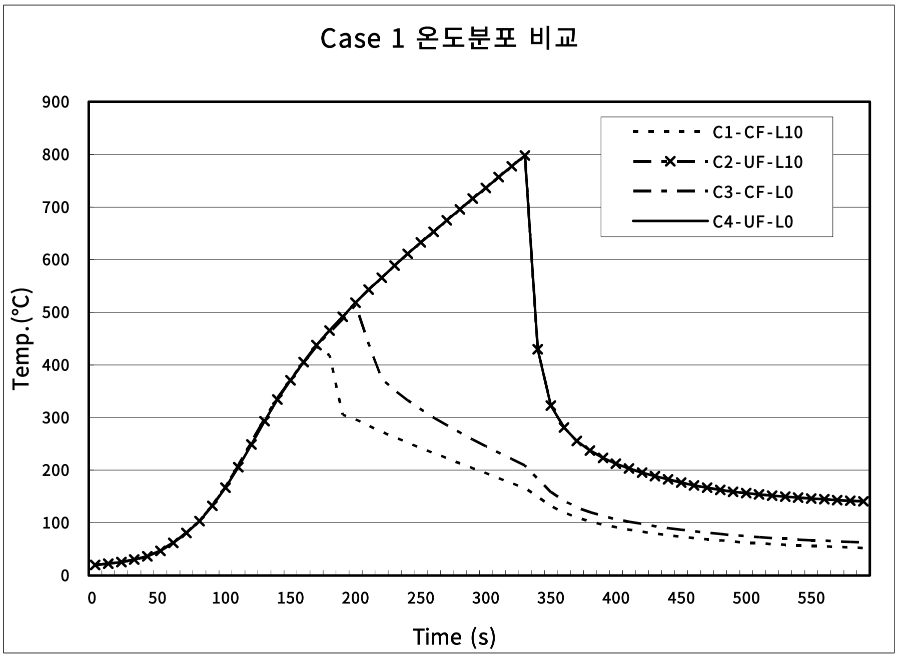

그림 1. Case 1의 온도변화의 비교

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 동일한 것으로 나타났다.

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

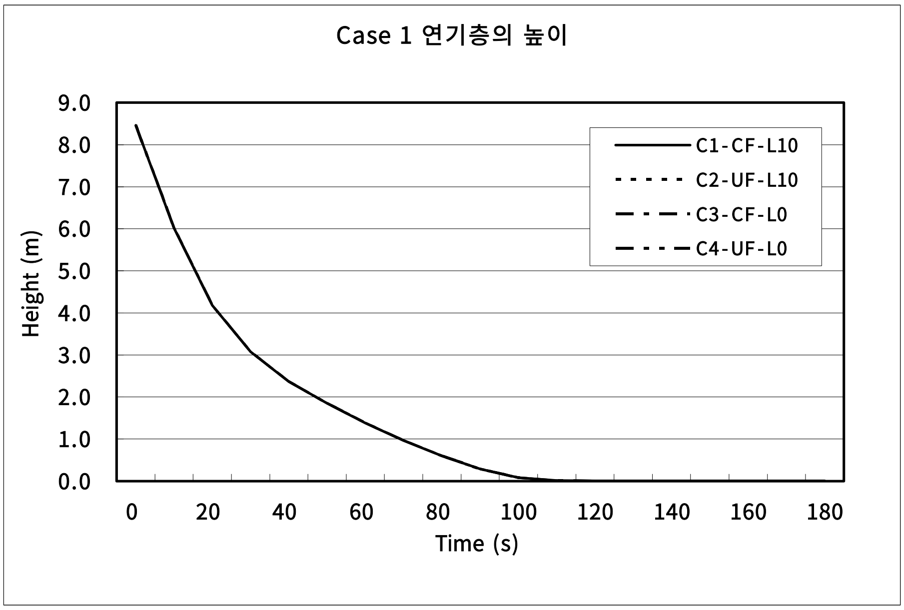

그림 2. Case 1의 경계층 높이의 변화 비교

(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 보이기는 하나, 매우 유사한 결과를 보여준다. 그러므로 복사열 방출비율에 대한 설정은 화재로 인한 결과에 큰 영향을 주지 않는 것을 알 수 있다.

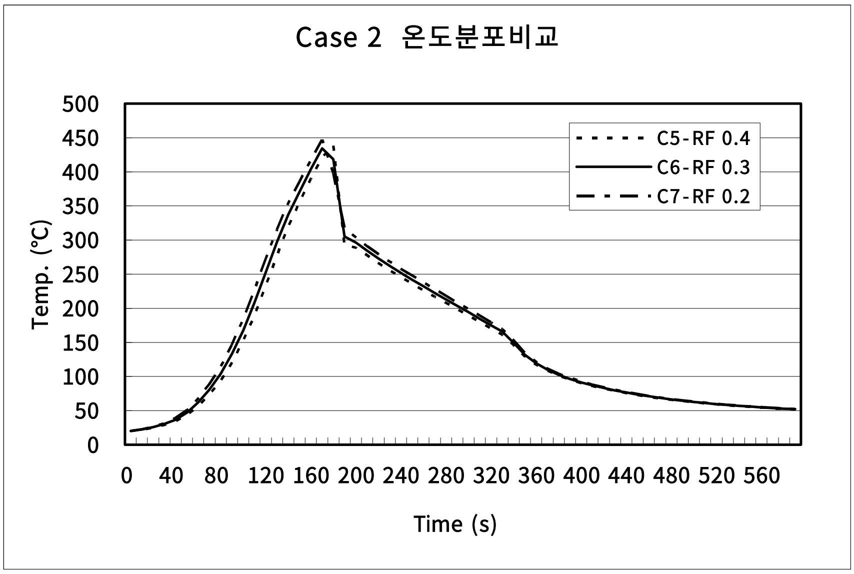

그림 **3. Case 2**의 온도변화의 비교

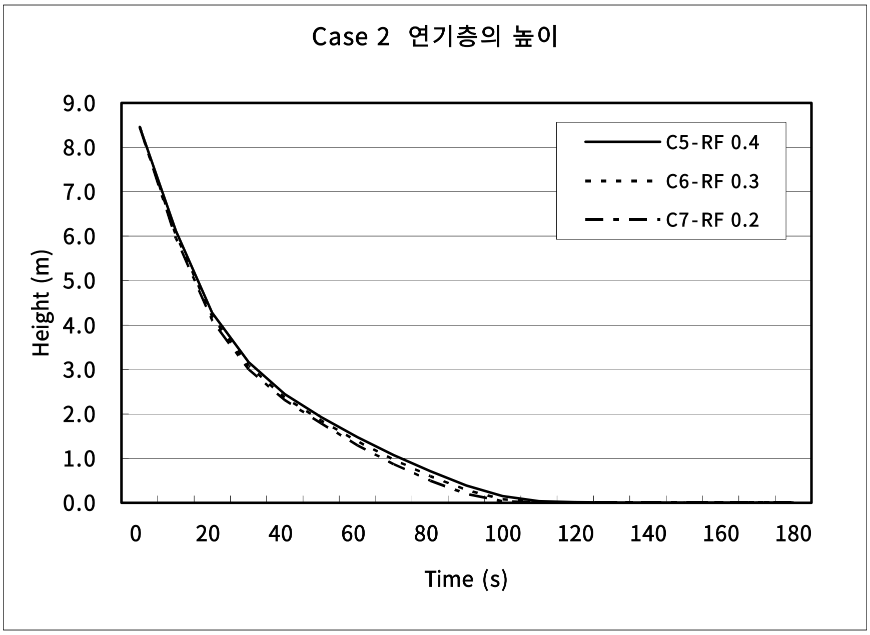

그림 **4. Case 2**의 경계층 높이의 변화 비교

(3) Case 3 – 방화문 개방 비율

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

정한 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.

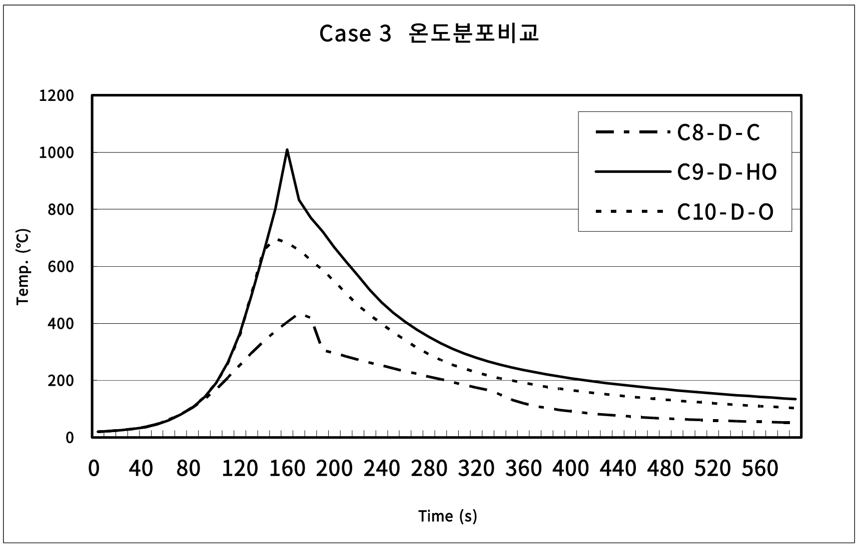

그림 **5. Case 3**의 온도변화의 비교

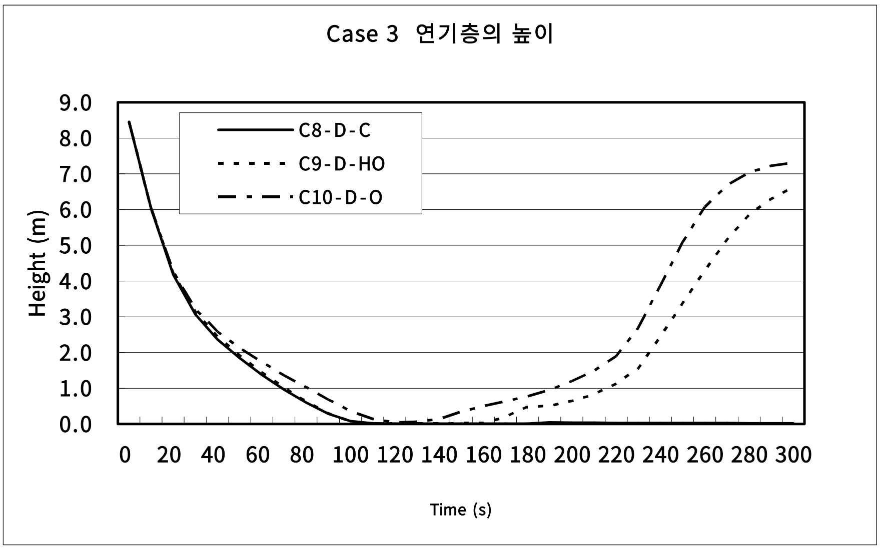

그림 **6. Case 3**의 경계층 높이의 변화 비교

(4) Case 4 – 방화문 열림 시간

본 대상에서의 화재는 환기 지배형으로 볼 수 있으며, 급기 제한을 받는 상황이다. 이러한 상황에서 급격한 개구부의 열림은 백 드래프트(Back Draft) 발생을 가져올 수 있다. Back Draft는 일반적으로 개구부를 확장한 즉, 문을 연 사람이나 인접 사람을 사망하게 할 수 있으며, 급격한 화재의 확대를 가져올 수 있다. 그림 7에서 보듯이 개구부가 열리지 않는 경우에

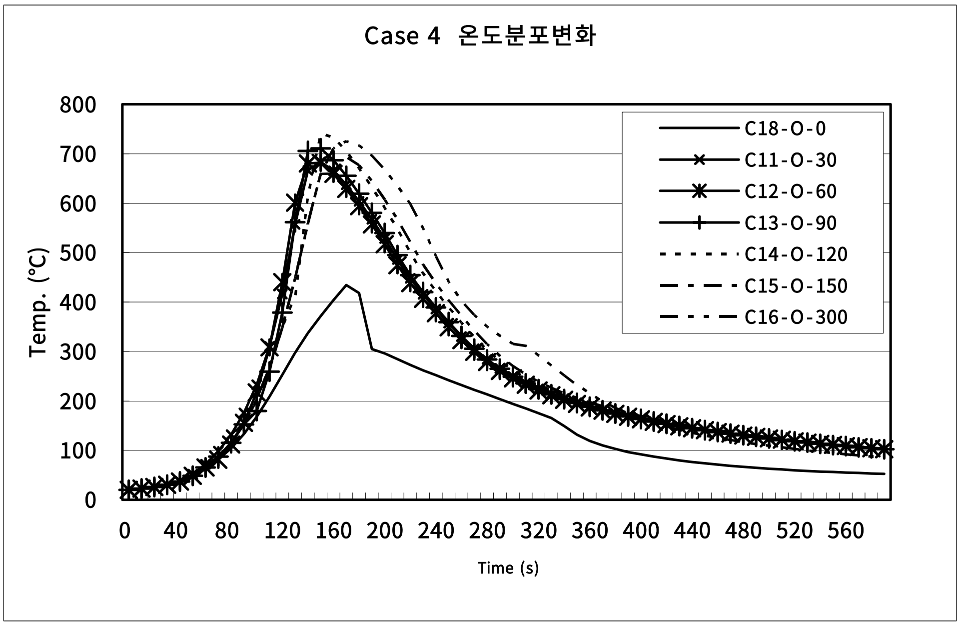

그림 7. Case 4의 온도변화의 비교

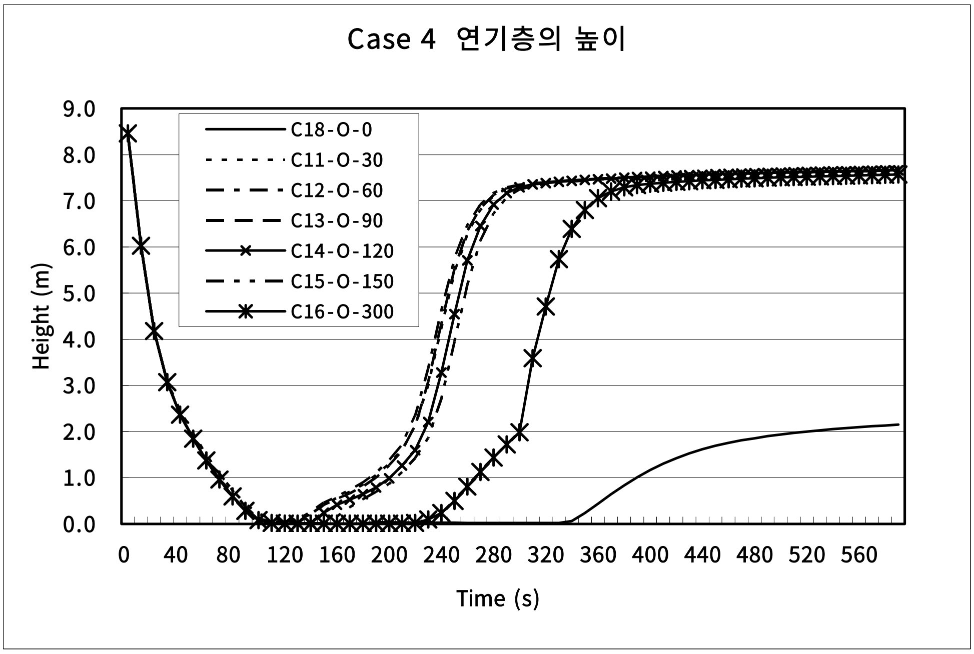

그림 8. Case 4의 경계층 높이의 변화 비교

비하여 개구부가 열리는 경우는 매우 높은 온도 상승을 보여준다. 시간에 따른 공기유입에 의한 온도의 상승과 하강의 차이는 있는 것으로 보이나 그 추세나 최고 도달온도는 유사한 것으로 판단된다. 개구부가 열리는 시점에 따라 상부층 가스 온도의 급격한 변화가 나타나지 않는 것으로 보아 Back Draft 발생 가능성은 없는 것으로 보여진다.

현재 원전 화재구역 중 많은 구역이 수동으로 화재를 진압하도록 설계되어 있으므로, Back Draft와 같은 현상의 발생 유무는 효율적인 수동 화재 진압을 위해 매우 필요한 정보라 할 수 있다.

4. 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) 시간별 개구부의 100% 개방은 온도의 큰 상승을 보여준다. 개방 시간에 따른 상부층 가스 온도 차이는 나타나나 온도 상승 추세나 도달된 최고 온도는 큰 차이를 나타내지 않았다. 연기층의 하강은 차이가 없으나 연기 방출로 인한 상승은 영향을 받는 것으로 나타났다.

5) 본 대상 공간의 화재 발생 시 나타나는 현상은 먼저 개구부가 닫혀 있는 경우는 온도의 상승이 약 400℃를 넘는 수준으로 나타나지만, 화재발생 후 300초 이내에 개구부가 열리게 되면 약 700℃ 정도로 온도가 상승함을 알 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. 이러한 분석을 좀 더 정확하게 수행하기 위해서는 이러한 변수의 설정뿐만 아니라 현재 가정되어 있는 연료에 대한 데이터 등을 바로 사용해야 한다. 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 진압 절차를 화재모델링 결과를 토대로 상세하게 기술하도록 규제기관에서 요구하고 있는바 앞으로 더 많은 화재구역에 대한 적용 연구가 필요하다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 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 추계학술발표대회논문집, 한국원자력학회, 2003.

[3] A User's 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 standard, 1992.

[6] WHC-SD-SQA-ANAL-501, "Fire Protection Guide for Waste Drum Storage Array," September 1996.