

[Research Paper / Technical Paper]

국내 화력발전소의 주제어실 화재 및 피난 시뮬레이션을 통한 위험도 평가

조용선 · 김동민* · 임경태**†

서울시립대학교 재난과학과 박사과정, *㈜한빛안전기술단 기업부설연구소 팀장, **㈜한빛안전기술단 기업부설연구소 연구원

Risk Assessment through Fire and Evacuation Simulation in the Main Control Room of a Domestic Thermal Power Plant

Yong-sun Cho · Dong-Min Kim* · Gyeong-Tae Im**†

Ph.D. Course, Department of Disaster Science, University of Seoul,

*Team Leader, Department of R&D, Hanbit Safety Engineering Co.,Ltd.,

**Researcher, Department of R&D, Hanbit Safety Engineering Co.,Ltd.

(Received October 19, 2021; Revised November 17, 2021; Accepted November 24, 2021)

요 약

화력발전소 주제어실 내의 화재 발생은 발전소의 안전성을 확보하기 위한 성능설계 개념을 무력화시켜 발전소 전체에 커다란 위협요인이 된다. 본 논문에서는 주제어실 화재 및 피난 위험도 평가를 목적으로 Pyrosim 및 Pathfinder 프로그램을 이용하여, 주제어실의 ASET 및 RSET을 비교하였을 때 대피자들이 침착하게 대피할 수 있는 적정 시간과 화재 형상을 확인하였다. 케이블화재의 경우 실제 실험결과보다 시뮬레이션 결과가 열발생률을 더 심각하게 해석하는 것으로 나타났다. 이는 케이블을 이루는 폴리머 소재가 연소 중 바닥으로 떨어져 더 이상 타지 않게 되기 때문에 실험에서 열발생이 더 낮게 측정되는 것으로 나타난다. FDS 시뮬레이션으로는 이런 미세한 사항까지 고려하지 못하므로 FDS 시뮬레이션에서 안전하다는 결론을 얻었다면 케이블 실화재에서 조금 더 안전하다고 추측된다.

ABSTRACT

A fire in the main control room of a thermal power plant is a significant threat to the entire power plant by incapacitating the concept of performance design to secure the safety of the power plant. In this study, using the PyroSim and Pathfinder programs to evaluate fire and evacuation risk of the main control room, the appropriate time and fire shape for evacuating people calmly were confirmed when the available safe egress time and required safe egress time of the main control room were compared. In the case of a cable fire, the simulation results indicate the heat generation rate to be more serious than the actual experimental results showed. This is because heat generation was lower in the experiment as the polymer material constituting the cable fell to the floor during combustion and no longer burns. The fire dynamics simulator results indicate that the power plant facility is safe because even these points are not considered.

Keywords : Thermal power plant, Main control room, Fire and evacuation simulation, Risk assessment

1. 서 론

체계적인 방재시스템이 구축되어 있지 않은 화력발전소는 매년 화재로 인한 피해가 발생하여 화재 취약시설이라고 할 수 있다. 화력발전소는 국가기반시설로서 화재로 인한 기능이 마비될 경우 대규모 정전과 같은 큰 피해가 예상된다.

국내 화력발전소의 운전원들은 발전소의 유동적 상황에 대처하기 위해 고도의 능력을 요구하고 있다. 특히, 주제어실(main control room)은 운전원들이 발전소 전체에 대한 기동 및 전출력 운전, 정지, 비정상 및 비상 상황 시 적절한 대처에 관해 책임지고 있다.

화력발전소 주제어실 내의 화재 발생은 발전소의 안전성을 확보하기 위한 성능설계 개념을 무력화시켜 발전소

† Corresponding Author, TEL: +82-70-4895-1191, FAX: +82-2-6008-8179, E-Mail: sadvan123@naver.com

© 2021 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

전체에 커다란 위험요인이 될 수 있다.

국내 발전소의 경우 안전성 평가 방법으로는 화재 위험성 분석(fire hazard)과 확률론적 안전성 평가(probabilistic safety assessment, PSA)가 있다⁽¹⁾. 화재 위험성 분석은 발전소 내 화재 발생 시 발전소가 안전정지를 제대로 할 수 있으나 여부의 평가에 초점이 맞춰져 있다. PSA 방법은 발전소의 설계, 운전, 정비 등을 고려하여 원전의 안전성 평가와 효율적 안전성 향상 방안을 제시하는 방법이다.

한국원자력연구원에서는 국내 원자력발전소의 주제어실을 대상으로 화재 피난 리스크 평가를 위한 화재 시뮬레이션 연구⁽²⁾를 FDS 프로그램을 통해 진행하였다. 화력발전소 관련 위험성 분석 연구로는 transfer tower, chute, turbine 등의 시설에 대한 소방설비 적정성 평가 분석 등이 이루어졌다^(3,4). 기존 연구에서는 화력발전소 위험성 분석 시 주제어실에 대한 화재 시나리오를 고려하지 않았다. 또한, 화재에 대한 열·연기 유동에 대한 분석만 진행되었고 가장 중요한 운전원 피난에 대한 분석이 이루어지지 않았다.

화재 시뮬레이션 결과는 화재 발생 위치에 따라 달라질 수 있는데, 기존 연구에서는 대부분 운전원이 없고 화재 위험성만 높은 대상지를 선정하였다. 이는 기존 연구 대부분이 FDS, CFAST 등의 화재 시뮬레이션 프로그램만을 사용하였기 때문에 pathfinder와 같은 피난 시뮬레이션 분석을 병행함으로써 피난에 대한 위험성 분석이 추가될 필요가 있다.

본 연구에서는 화력발전소 주제어실에 대한 유동 및 화재 해석과 피난 소요시간 분석을 통한 화재·피난 위험성을 체계적으로 평가할 목적으로, FDS 및 Pathfinder를 이용하여 국내 참조화력발전소 주제어실의 시뮬레이션을 수행하고 평가하였다.

2. 화재 및 피난 위험도 평가 방법

2.1 주제어실 화재 위험성 고찰

화력발전소에서 발생한 주요 화재사례를 살펴보면, 대형 인명피해는 발생하지 않았지만 많은 근무자와 고가의 설비 등 화재로 인한 인적·물적 피해의 위험성이 크다고 할 수 있다. 화력발전소 화재사례⁽⁵⁾와 참조화력발전소 현장조사를 통해 도출된 주요 화재·피난요인은 건물구조, 근무행태, 작업 부주의로 분류할 수 있다.

주제어실의 건물구조로는 컴퓨터실, 릴레이실 등과 인접하고 있으며, 많은 케이블이 설치되어 있으므로 주제어실 및 케이블의 화재는 광범위한 사고로 확대되어 대규모의 피해발생 가능성이 있다. 또한 주제어실을 출입하기 위해서는 각종 도어인터락을 통과하여야 하고, 철제 계단을 통한 외부 피난로는 길고 복잡하여 대피지연의 요인으로 작용할 가능성이 크다.

근무행태 측면에서 주제어실은 많은 인원이 근무하고 있으며 발전소 전체를 제어할 수 있는 설비가 밀집되어 있다.

2.2 화재 시뮬레이션 조건 및 방법

주제어실 용접작업 및 케이블실 전기화재에 따른 화재 시뮬레이션 프로그램은 fire dynamics simulator (FDS)를 기반으로 만들어진 pyrosim 2019 버전을 이용하였다. 용접작업에 의한 화재는 오버홀 때만을 한정한다.

화재현상을 규명하는 이론은 유체 역학적 모델(hydrodynamic model), 연소모델(combustion model), 복사열전달 등이 있으며 화재 시 발생하는 난류유동은 large eddy simulation (LES)을 적용하여 해석한다.

화재로부터 생성된 가연성 연기가 사람의 호흡선(약 1.8 m)까지 내려오면 피난하는 사람이 연기를 들며 마시게 된다. 따라서, 연기가 사람의 호흡 한계선까지 내려오기 전에 모든 사람이 피난할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 호흡 한계선을 기준으로 온도, 가시도, CO농도에 대한 영향을 분석하였다.

온도는 사람이 피난하는 동안 노출되는 열에 대한 온도 측정값으로 SFPE 핸드북⁽⁶⁾과 소방시설 등의 성능 위주 설계⁽⁷⁾에 의하면 60 ℃가 습도 100%의 공기를 흡입할 경우 최고온도라고 제시되어 있어 본 연구에도 적용하였다.

가시거리에 의한 영향은 피난하는 동안 느끼는 연기 밀도의 척도로 소방시설 등의 성능 위주 설계 방법 및 기준에 따라 기타시설로 분류하여 5 m를 적용하였다.

독성에 의한 영향은 일산화탄소(CO)가 피난동안 거주자 노출 시 연기 독성의 측정값이다. SFPE 핸드북에 따라 노출 시간과 CO농도 간의 상관관계에 근거하여 본 연구에서는 단순화한 일차적인 계략 값으로 1,400 ppm의 단일점 기준을 적용하였다.

2.3 피난 시뮬레이션 조건 및 방법

화재 시 주제어실 운전원들이 대피하는데 소요되는 시간을 예측하고, 특정 시설의 개선 또는 피난절차의 개선 등이 피난활동의 지연에 얼마나 영향을 주는지 평가하여 최적의 피난시설과 피난절차를 유도할 수 있도록 한다. 본 연구에서는 주제어실 피난 시뮬레이션 분석을 위해 Pathfinder 2019 버전을 이용하였다.

피난 프로그램에서는 재실자의 행동을 SFPE 모드와 steering모드, 2가지 방식으로 계산한다. SFPE 모드는 SFPE Handbook of Fire Protection Engineering에 수록된 개념을 기반으로 한다(Figure 1). 해당 공간의 재실자 밀도에 따라 보

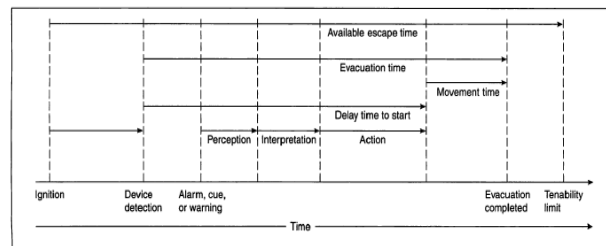


Figure 1. How to determine the evacuation safety of occupants.

행속도가 산정되며, 출입문의 너비에 따라 재실자의 출입문 통과율이 정해지는 유동적 모델이다. Pathfinder에서 이동 알고리즘의 부산물인 steering모드는 재실자가 피난을 위해 다양한 움직임들을 행동하도록 한다.

피난 개시 시간은 모든 피난 시뮬레이션 프로그램에서 사용하며, 특히 숙박 등 특정 목적 건물에서 피난 시간이 늦어지는 것을 고려하는데 본 연구에서는 피난지연 조건을 가정하여 분석을 실시하였다. 피난지연 조건이라하면 인지 시간과 피난 개시시간의 합을 말한다. 피난 개시까지 30 s까지는 시간이 지연될 수 있음을 가정하였다.

$$RSET = t_d + t_a + t_o + t_i + t_e \quad (1)$$

여기서, t_d : 발화부터 화재감지까지의 소요시간, t_a : 화재감지로부터 화재사실의 재실자 통보까지의 소요시간, t_o : 통보로부터 거주자가 조치를 취하기로 결장하기 까지의 소요시간, t_i : 결정으로부터 피난개시까지의 소요시간, t_e : 피난개시로부터 완료까지의 소요시간

영국표준연구소(british standard institute, BSI) 고시에 의거하면 용도별 피난 지연시간은 Table 1과 같다⁽⁸⁾. 이 표를 참고하여 주제어실 직원들의 훈련도는 충분하다 판단하였기 때문에 피난대피시간(피난인지에서 피난개시까지)을 W1 최대치인 1 min으로 상정하였다.

3. 화재 및 피난 시나리오

3.1 화재 시나리오 선정

화재는 주제어실이나 인접 전기기기실의 전기 캐비닛 속 케이블에서 화재가 발생하는 것으로 가정하였다. 이 화재는 NUREG/CR-6850기준으로 12 min 후 최대 열방출률로 성장, 이후 8 min 후까지 최대 열방출률을 유지하다가 잦아든다. 또한 잦아들기 시작한 지 13 min 즈음 소화된다. 반면 시나리오 NUREG-1934⁽⁹⁾에 따라 캐비닛 상부에 환기구가 있고 캐비닛 내부 케이블에서 화재가 발생하는 것을 가정한다. 원전과 화력발전소 의 주제어실 구조는 거의 동일하다. 여기서는 주제어실에 대한 규정들이 원자력발전소 기준이어서 원전 기준을 차용하였다. 화력발전소 주제어실에 대해 다루더라도 원전기준을 차용한다면 더 안전을 보장받을 수 있다. 예로들어, 국내 화력발전소에서는 셀룰러폰이 사용가능하거나 PCS 시스템으로 무선통화가 가능하나 원자력발전소에서는 무선통신장치의 사용이 원천 차단되어있고 기기까지 이동해야 하는 페이징폰을 사용해야 한다⁽¹⁰⁾. 또 원자력발전소는 사고시 위험이 더 커 주제어실을 운전원이 조작 불가하더라도 원격으로 긴급가동중단할 수 있다. 하지만 화력발전소에서는 그 정도 위험이 수반되지는 않는다. 생각하여 상주인원이 있는 주제어실의 인원 대피를 우선으로 하였다. 독일의 리펜도르프 화력발전소처럼 반원형 벽면 계기패널을 가지며 주제어실 크기도 ceiling height (CH) 4.8 m, 263 m²

Table 1. Pre-Movement Time (from BSI)

Occupancy type	W1 (min)	W2 (min)	W3 (min)
Office, commercial and industrial buildings, schools, colleges and universities (Occupants awake and familiar with the building, the alarm system, and evacuation)	< 1	3	> 4
Shops, museums, leisure-spot centers, and other assembly buildings (Occupants may be asleep but are predominantly familiar with the building, alarm system, and evacuation procedure.)	< 2	3	> 6
Dormitories, residential mid-rise and high-rise (Occupants may be asleep but are predominantly familiar with the building, alarm system, and evacuation procedure.)	< 2	4	> 5
Hotels and boarding house (Occupants may be asleep but are predominantly familiar with the building, alarm system, and evacuation procedure.)	< 2	4	> 6
Hospital, nursing home, and other institutional establishment (A significant number of occupants may require assistance)	< 3	5	> 8

W1: live directives using a voice communication system from a control room, or live

W2:

W2: nondirective voice messages (prerecorded) and/or informative warning visual display with trained staff

W3: warning system using fire alarm signal and staff with no relevant training

Note:

For occupants in a small room/space of fire origin who can clearly see smoke and flames at a distance, adopt the relevant time given for the W1 For occupants in a large room/space of fire origin who can clearly see smoke and flames at a distance, adopt the relevant time given for the W2, unless W1 For occupants outside room/space of fire origin who cannot clearly see smoke and flames, adopt the relevant time given for the warning system in operation

정도로 유사한 것으로 가정하였다. 하지만 출입문이 하나 밖에 없다. 케이블 캐비닛 위마다 환기구가 있으며 주제어실 출입문 1개, 자동문 1개를 제외하고는 피난로까지 장애물이 되는 개구부는 없다. 급기 supply air (SA), 환기 return air (RA), 순환공기(CA)는 모두 약 30,000 m³/hr, 배기 outdoor air volume (OA)는 300 m³/hr로 가정되었다.

720 s 보다 더 긴 시간 후 피크점에 도달하므로 화재성상은 600 s 기준인 느림(slow)보다 안전한 것으로 가정한다. 여기서 열방출율은 12 min 내 최대치인 464 kW/m²에 도달하여 8 min 간 지속, 12 min 내 선형적 감소되는 것을 가정

Table 2. Input Parameters Suggested in NUREG-1934

Material	Density (kg/m ³)	Coefficient of heat transfer (W/mK)	Specific heat (kJ/kgK)
Concrete	2,400	1.6	0.75
Cable	1,380	0.192	1.289

한다. 화원의 단위면적당 열방출률(heat release rate, HRR)은 176.28 kW/m², 연소열 연소열은 24,000 kJ/kg, CO 산출량은 0.038, soot 산출량은 0.1로 가정하였다. 환기조건은 HVAC 정상작동이며, 체적유량은 0.472 m³/s이다. 그 외 NUREG-1934에 따른 주요 물성치는 Table 2과 같다.

시나리오에 따라 주제어실에 미치는 피해를 생각하였을 때, 터빈실과 보일러실로부터 오는 화재는 다중의 방화문들에 의하여 차단될 것으로 판단된다.

케이블 화재를 선정한 이유로 먼저 Lim 등⁽¹¹⁾에서는 원자력발전소 주제어실에서 화재원인을 케이블화재로 보고 연구하였다. 이를 기반으로 이번 연구의 화재 시나리오를 케이블화재에 관한 것으로 선정하였다. 또 Korean Re에서 발행한 The RISK 7호(2018)의 보험금지급 표를 Table 3⁽¹²⁾에 표시하였다. 10년간 재물보험 사고분석시 MLOP를 포함하더라도 케이블룸에서의 화재가 가장 피해액이 컸다. 케이블룸은 인원이 상주하는 공간이 아니지만 케이블을 사용하는 주제어실 및 전기기기실에서 화재발생 가능성이 있다는 것을 암시한다. 그 외 화재원인으로는 시설 내 용접작업을 들 수 있다. 여기서 조사된 발전소는 복합화력발전소(combined cycle power plant, CCPP)와 증기력(steam power)을 이용하여 발전하는 화력발전소(thermal power plant)이며 CCPP 터빈실에서 발생한 사고에 대해서는 machinery loss of profit cover (MLOP) insurance까지 포함한 보험금이다. 즉, 화재, 폭발, 기계/전기적 사고 등으로 물적 손해를 입고 일정기간 영업을 중단(business interruption)한 경우 발생하는 영업손실을 보상하는 기업휴지보험이 합산된 수치라는 의미이다. 발전소 전체로 보았을 때 가장 잦고 재산피해가 많은 사고는 터빈사고였고 이런 터빈사고는 터빈실에서의 오버홀(overhaul) 때 발생하기 쉽다. 변압기에서도 드물게 사고가 발생할 수 있으나 모두 대부분 물리적 사고였던 것으로 확인되며 케이블룸에서 화재사고로 588억 원의 피해를 입은 것이 확인된다. 이상의 이유로 화력발전소 화재사고로 케이블 화재를 시나리오로 선정하였다.

3.2 케이블의 물성

주제어실(MCR)에서 발생하는 화재는 케이블 화재로 가정한다. 케이블 화재의 경우 polyethylene (C₂H₄)이나 상품명 Neoprene으로 주로 불리는 폴리클로로프렌(C₂H₅Cl)으로 되어 있으므로 그 혼합물인 XPE/Neoprene (유효 화학식 C₂H_{4.5}Cl_{0.5})의 연소로 가정하여 그 연소특성을 적용한다. 이 케이블의 연소열은 10.3 kJ/g이며 이는 NUREG-1805을 따랐다. 연기

Table 3. Accident Insurance Payments by Power Plant

No.	Plant type	Accident object	Accident type	Claim paid (mn won)
1	Thermal power (steam power)	Cable room	Fire	55,800
2	CCPP	Steam turbine generator	Physical damage	29,400 (including MLOP)
3	CCPP	Steam turbine	Physical damage	17,800
4	CCPP	Gas turbine	Physical damage	10,500 (including MLOP)
5	CCPP	Steam turbine generator	Physical damage	8,800 (including MLOP)
6	CCPP	Gas turbine	Physical damage	7,600
7	CCPP	Gas turbine	Physical damage	6,600
8	CCPP	Steam turbine	Physical damage	4,900
9	Thermal power (steam power)	Gas turbine	Physical damage	4,500
10	CCPP	transformers	Physical damage	4,400

생성률은 경험값인 0.1로 가정하고 이는 공기과잉률(λ)의 역수인 당량비(Ø, equivalence ratio)는 연료와 공기의 비를 나타낸다. 당량비가 1 근방일 때 적정환기조건이고, 당량비가 1.5 근방일 때는 연료가 풍부한 경우로 예혼된 경우이다. 당량비가 0.7 근방일 때는 연료가 희박한 연소이다. Table 4는 EPRI의 Module III – Fire Analysis Appendix H: Damage Criteria and Damage Time을 기준으로 작성하였다. Neoprene 소재의 경우 열경화성(thermoset) 소재인 반면 polyethylene은 열가소성(thermoplastic or thermosoftening) 플라스틱이다. Table 5은 원전 기준인 NUREG/CR-6850에 나타난 케이블 물성관련 기준으로 cross-linked polyethylene (XLPE)의 물성이 나와있다. XLPE는 cross-linked poly olefin을 의미한다 (Tables 4와 5 참고).

화재성장은 점화 후 화재가 1055 kW에 도달하는 시간을 기준으로 slow, medium, fast, 그리고 ultra fast로 구분한다. 이때 사용되는 식은 NFPA에서 규정한 식으로 다음과 같다.

$$Q = at^2$$

여기서 계수 a값의 범위에 따라 화재성장속도를 규정하는 것이다. t와 a의 범위에 대하여 Table 6에 표기하였다.

3.3 피난 시나리오

피난은 주제어실이 있는 3층에서 이루어진다. 재실자는

Table 4. Damage Criteria for Electrical Cables

Cable type	Property	
	Temperature criteria	Radiation heat criteria
Thermo plastic	205 °C (400 °C)	6 kW/m ² (0.5 BTU/ft ² s)
Thermoset	330 °C (625 °C)	11 kW/m ² (1.0 BTU/ft ² s)

Table 5. NUREG/CR-6850; Summary of General Material Specific Cable Thermal Damage Criteria

Cable insulation material	Reported failure temperature range (°C)	Number of tested samples	Recommended failure threshold (°C)
XLPO including the specific subclass XLPE	299-388	13	299
*The specific subclass polyethylene (XLPE)	320-388	12	320

화재가 발생한 주 제어실이나 전기기기실을 피해 바깥으로 나와 3층 복도 양 끝에 있는 2곳의 피난계단을 통하여 피난한다. 3층에서 벗어나면 사실상 피난에 성공한 것으로 볼 수 있지만 건물을 완전히 빠져나오는 시간까지 측정한다. 단, 연기가 계단출입구 기준 1.8 m 높이까지 내려올 때까지 피난하지 못한 경우에는 대피하지 못한 것으로 취급한다. 즉, ASET이 RSET보다 큰 경우에만 대피가능한 것으로 본다. 에이전트들은 전원 성인 남성으로 고려하여 키 1.8 m, 이동속도 1.2 m/s, 어깨너비 45 cm, 밀집현상을 해결하기 위한 감소계수(reduction factor)는 0.7로 설정하였다. 에이전트 행동에 대하여 별도로 돌발행동을 하거나 웨이포인트가 지정되지는 않았으며, 에이전트들은 A*알고리즘에 따라 이동한다.

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 ASET 및 RSET

Available safe egress time (ASET)은 가시거리 5 m, 온도 60 °C, CO 농도는 1,400 ppm 이상을 기준값으로 한다. O₂ 농도는 15% 미만 기준으로 한다. 감지기들은 화재 대피시점을 기준으로 하기 때문에 계단실 인근에 위치시켰다. required safe egress time (RSET)은 재실자가 화재를 인지할 때부터 대피완료할 때까지 걸리는 시간으로 산정된다. Pathfinder 시뮬레이션을 통하여 RSET이 계산되었으며 해당 층을 기준으로 하였다. 대피할 재실자는 20명으로 산정하였다. 화원 크기 별로 0.24 m² 면적에서 발생한 화재를 시나리오 1, 그리고 4.00 m² 면적에서 발생한 화재를 시나

Table 6. Growth Time with Coefficient of Fire Growth Speed

Fire growth speed	Growth time		Coefficient of fire growth speed (a)
	Range (s)	Application (s)	
Slow	400 ≤ t ≤ 600	600	a ≤ 0.0066
Medium	150 ≤ t ≤ 400	300	0.0066 < a < 0.0469
Fast	t ≤ 150	150	0.0469 < a < 0.1876
Ultra fast	t ≤ 75	75	a > 0.1876

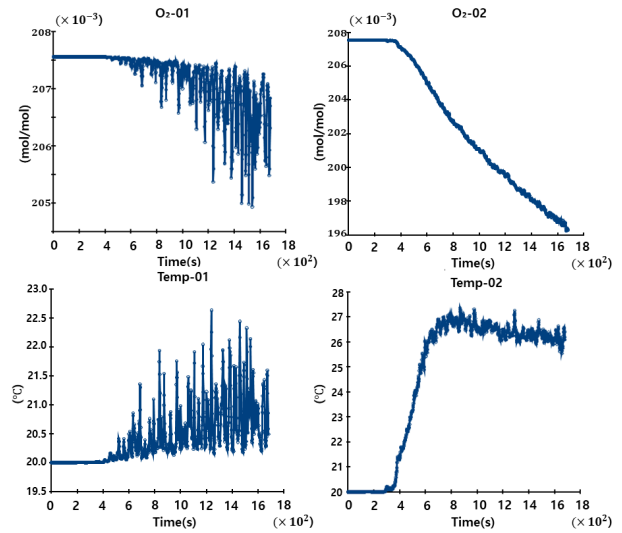


Figure 2. Temperature and O₂ concentration detected by the stairs for scenario 1.

리오 2로 분석한 결과는 다음과 같다(Figures 2~6). 빨간 선은 ASET과 ASET 기준치를 가시화한 것이다.

센서에 의한 모든 기준치들은 피난계단을 기준으로 측정되었다. 두 탈출경로 모두에서 1,680 s가 경과될 때까지 계단진입로 온도가 60 °C를 넘지 않았고 산소 농도도 최소 19% 이상으로 안전하게 나타났다.

가시거리 시뮬레이션 결과, 계단 대피까지 가시도(Vis-1)은 629 s경부터 가시거리가 줄어들기 시작하여 1,200 s가 초과될 때까지 대피불능 가시거리인 5 m 이상이 보장되어 안전함을 보였다. 시나리오2의 경우 383 s경부터 가시거리가 줄어들기 시작하여 500 s경부터 가시거리가 5 m 밑으로 줄어들어 대피불능이 된다(Figure 3).

RSET인 95 s 기준 시나리오1의 경우 95 s에서 15 kW의 HHR을 보였고 약 514 s 후 최고 HRR인 531 kW까지 도달하였다. 시나리오2의 경우 95 s에서 131 kW의 HRR을 보였다(Figures 6). 최고 HRR인 약 4,134 kW 도달시까지는 약 484 s까지 소요되었다.

4.2 분석

시나리오1에서는 발화면적을 0.24 m²로 가정하고 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 대피시간을 고려하였을 때 안정

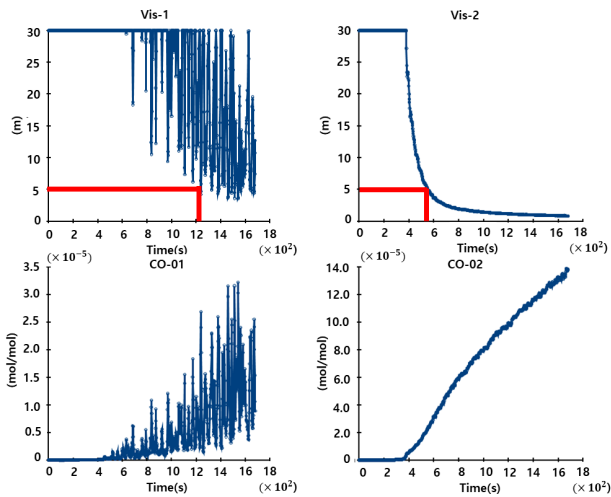


Figure 3. CO concentration and visibility detected by the stairs for scenario 1.

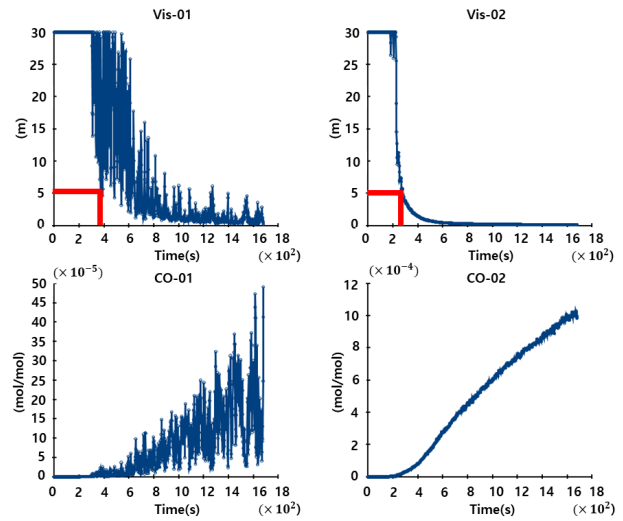


Figure 5. CO concentration and visibility detected by the stairs for scenario 2.

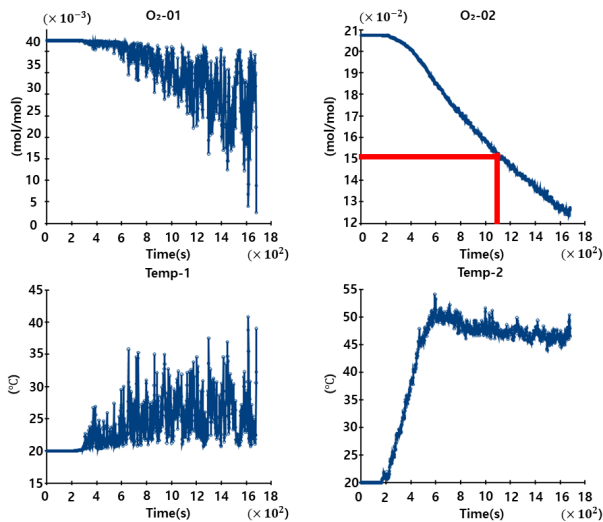


Figure 4. Temperature and O₂ concentration detected by the stairs for scenario 2.

성 확보를 확인하고 시나리오2에서 4 m²로 발화면적을 넓혀 시뮬레이션을 수행하였다. 가장 기준이 되는 가시도를 상실하는 때는 약 272 s (가시화) 인근이었다. pathfinder 시뮬레이션결과로는 인원이 해당 층을 완전히 벗어나는 데 걸리는 시간이 약 95 s였던 것을 보면 대피하기에 충분한 ASET을 확보할 수 있다. 가시도 뿐 아니라 O₂, CO, 온도, HRR 등에서 260 s 미만에서 위험수치에 근접하는 물성치는 없었다. 시나리오2에서 초기발화면적을 4 m²로 하여 과장되게 위험한 가정을 하였음에도 RSET이 160 s 미만이므로 해당시설에서 케이블 화재발생시 시설대피에 문제는 없을 것으로 판단된다.

5. 결론

이 연구에서 실제 규모 화력발전소 주 제어실 층을 모델링

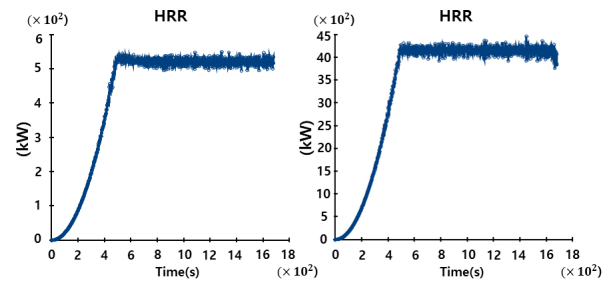


Figure 6. Comparison of HRR (heat release rate) for scenarios 1 and 2.

한 후 주 제어실 내의 케이블화재를 가정하여 FDS 시뮬레이션 및 피난 시뮬레이션을 수행하였다. pyrosim과 pathfinder를 사용하여 full-coupling 방식을 사용할 수 없는 한계가 있으며 semi-coupling의 경우, 가시화에는 도움이 되나 결과에 영향을 주지 않으며 full coupling은 아니더라도 과도기적인 coupling을 시행할 수 있는 상태에 있으나 그 결과 또한 full-coupling에 비하여 크게 영향을 줄 것으로 판단하지 않고 full-coupling이 아닌 만큼 non coupling 방식에 비하여 더 신뢰 있는 결과를 준다는 보장이 없기 때문에 non coupling 방식으로 진행되었다. 4.2의 분석결과에 더하여, 남동군 등의 연구에 따르면 케이블화재의 경우 실제 실험결과보다 시뮬레이션 결과가 열발생률을 더 심각하게 해석하는 것으로 나타났다. 이는 케이블을 이루는 폴리머 소재가 연소 중 바닥으로 떨어져 더 이상 타지 않게 되기 때문에 실험에서 열발생이 더 낮게 측정되는 것으로 나타난다⁽¹¹⁾. FDS 시뮬레이션으로는 이런 미세한 사항까지 고려하지 못하므로 FDS 시뮬레이션에서 안전하다는 결론을 얻었다면 케이블 실화재에서 조금 더 안전하다고 추측할 수 있다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20206610100060)

References

1. Y. H. Lee and J. E. Yang, "Fire Safety Assessment of Nuclear Power Plant", Proceedings of 2002 Autumn Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 307-314 (2002).
2. D. I. Kang, K. Y. Kim, S. C. Jang and S. Y. Yoo, "Fire Simulations for the Abandonment Risk Assessment of Main Control Room Fire in Domestic Nuclear Power Plant", Journal of the Korean Society of safety, Vol. 29, No. 4, pp. 199-207 (2014). <https://doi.org/10.14346/JKOSOS.2014.29.4.199>.
3. D. H. Kwon, "A Study on the Improvement of Fire Fighting Facilities and Safety Management in Coal-Fired Power Plants", Master in Fire & Disaster Prevention Engineering, University of Seoul, pp. 60-68 (2021).
4. M. R. Cho, "A Risk Analysis for Fire in Turbine Building of Coal-Fired Power Plant", Master in Mechanical Engineering, Keimyung University, pp. 60-68, (2017).
5. K. T. Son, J. Y. Son, Y. H. Bae and J. H. Choi, "Risk Assessment of a MLCC Plant through Fire and Evacuation Simulations", Fire Science and Engineering, Vol. 35, No. 2, pp. 67-73 (2021). <https://doi.org/10.7731/KIFSE.447f583b>.
6. SFPE, "SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", Society of Fire Protection Engineers, pp. 213-532 (2002).
7. National Fire Agency, "Performance-oriented design methods and standards for firefighting facilities, etc. Annex Table 1" (2002).
8. British Standard Institute, "Guide to the application of Fire Safety Engineering Principles", Table 21, DD240 (1997).
9. EPRI, U.S.NRC, "NUREG-1934" EPRI 1023259 Final Report (2012).
10. D. Y. Ko, J. G. Lee, and B. H. Bae, "A Study on the Application of the Most Suitable Wireless Communication System in Nuclear Plant", Proceedings of the KIEE Conference, Vol. 2005, No. 10, pp. 454-456 (2005).
11. H. S. Lim, I. H. Kim, and M. S. Kim, "Cable Functional Failure Time Evaluation for a Main Control Room Fire using Fire Dynamic Simulator", Fire Science and Engineering, Vol. 30, No. 3, pp. 79-85 (2016). <https://doi.org/10.7731/KIFSE.2016.30.3.079>.
12. J. H. Choi, "Suggestions for Current Status of Domestic Power Plant Accidents and Accident Prevention", The Risk Quarterly Magazine, Vol. 7, No. 3, pp. 22-30 (2018).