

FDS를 이용한 전기실의 화재모델링 및 연기제어 특성 분석

최정아¹, 이민구², 이대동^{3*}

¹합동소방기술단(주), ²원광대학교 전기공학과, ³한밭대학교 전기공학과

Fire Modeling and Smoking Control Characteristic Analysis of Electric Room by Using FDS

Jeong-A Choi¹, Min-Gu Lee², Dae-Dong Lee^{3*}

¹HABDONG ENG Co., Ltd

²Department of Electrical Engineering, Wonkwang University

³Department of Electrical Engineering, Hanbat National University

요약 전기실은 대부분 건물의 지하공간에 위치하고 있어 전기설비에서 화재가 발생할 경우 화학적 가공에 의해 제조된 케이블 절연재로 화재가 확대되어 강한 독성의 연기 및 연소생성물이 발생하게 된다. 이때 발생한 연기 및 연소생성물이 수직적, 수평적으로 빠르게 이동하게 되면 재실자의 피난 및 소방대의 소방 활동에 지장을 주게 된다. 따라서 전기실의 화재가 발생할 경우 연기제어에 필요한 최적의 설비 및 설계가 필요하지만 현재 이에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 화재 시뮬레이션 프로그램 FDS(Fire Dynamics Simulator)를 기반으로 만들어진 PyroSim을 이용하여 전기실의 큐비클식 수배전반에서의 화재발생에 따른 연기 및 연소생성물의 특성변화를 분석하였다. 화재모델링은 기계식 환기설비의 작동여부, 급기량 및 배기량의 변화, 급기구의 위치 변경에 따른 4가지 시나리오로 구성하였다. 분석 결과, 기계식 환기설비가 작동하면 작동하지 않을 때보다 연기밀도, 가시거리, 일산화탄소 농도, 온도특성이 더욱 개선되어지며, 소방법 규정으로 풍량과 급기구의 위치를 적용할 경우 가시거리 및 온도특성이 개선됨을 확인하였다.

Abstract Most electric rooms are located in the underground spaces of buildings. When a fire occurs in electrical equipment, the fire expands to cable insulation material, resulting in toxic smoke and combustion products. If the smoke and combustion products quickly move vertically and horizontally, the evacuation of occupants and firefighting activities will be hindered. Therefore, it is necessary to design optimal equipment for smoke control in cases of fires in electric rooms. This study analyzes the characteristics of smoke and combustion products in fires in a cubicle-type switchboard in an electric room using PyroSim, which is based on the program Fire Dynamics Simulator (FDS). The fire modeling consists of four scenarios according to the operation mode of the mechanical ventilation equipment, the amount of air supply and exhaust, and the location of the air supply slot. The analysis shows that the mechanical ventilation equipment improves the smoke density, visibility, carbon monoxide concentration, and temperature characteristics. The visibility and temperature characteristics were improved when the air flow rate and the location of the air supply slot from fire defense regulations were applied.

Keywords : Electric Room, FDS(Fire Dynamics Simulator), Fire Modeling, PyroSim, Smoking Control

1. 서론

최근 건축물들은 전기설비의 다양화와 집중화로 인해

전기사용량이 지속적으로 증가하고 있으며 전기화 발생 시 인명피해 및 재산피해도 점점 증가하는 추세이다. 국내 전기화재의 주요 원인으로 단락, 과부하, 누전 등에

*Corresponding Author : Dae-Dong Lee(Hanbat National Univ.)

Tel: +82-42-821-1089 email: ldd77@hanbat.ac.kr

Received January 30, 2018

Revised February 26, 2018

Accepted March 9, 2018

Published March 31, 2018

의해 발생하며[1-3] 전기설비에서의 화재 점유율은 10% 이상 되고 있으며, 화재가 발생 시 대부분은 유독가스에 의해 의식을 잃거나 사망하게 된다.

수배전반이 설치된 전기실은 설치공간의 제약에 따라 건물의 지하 1층 이하에 대부분 위치하며, 수배전반은 효율적인 유지관리를 위해 철판으로 제작된 외함에 쌓여져 있는 큐비클식(폐쇄식)으로 설치하고 있다[4].

만약 수배전반에서 화재가 발생하여 케이블로 화재가 확대된다면 케이블이 연소의 도화선으로 작용하여 석유계 유기물로 구성되어 있는 케이블의 절연재 또는 외부(Sheath)재에서 발생하는 유독가스와 연기가 다량으로 발생 될 것이다[5].

이런 위험성을 해결하기 위하여 최규철[6]은 급기압 제연설비가 최적성능을 나타내기 위한 덕트 설계에서부터의 정확한 압력손실 계산을 연구하였으며 서찬원[7]은 부속실의 출입문의 수, 위치, 댐퍼 등의 여러 변수로 인한 차압과 방연풍속의 변화를 연구하였다. 그리고 김미선 등[8]은 거실제연설비 개선에 관한 연구, 구선환 등[9]은 이중외피 구조의 화재 특성에 관한 연구, 송영주 등[10]은 커튼월 구조의 화재 확산에 관한 연구를 각각 수행하였다. 그러나 전기실의 화재발생에 따른 연기제어 시스템에 대한 연구는 수행되지 못하여 이에 따른 기초 자료가 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 화재 시뮬레이션 프로그램 FDS(Fire Dynamic Simulator)를 기반으로 만들어진 PyroSim을 이용하여 화재 발생에 따른 연기밀도, 가지거리, 일산화탄소 농도, 온도의 특성을 분석하였다.

2. 화재모델링 및 시나리오 구성

2.1 해석대상

해석대상인 전기실에 설치된 기계식 환기설비의 평면도는 그림 Fig. 1과 같다. 지하 1층에 설치된 전기실의 크기는 가로 14m, 세로 7.9m, 높이 4.8m, 바닥면적 111m²이다. 큐비클식 고압 수전상자의 크기는 가로 9.6m, 세로 3m로 전기실의 중앙부에 설치되어 있으며 상부에는 발전기실과 각 배전반 및 분전반으로 나가는 케이블 트레이가 설치되어 있다. 급기덕트는 큐비클의 긴 방향과 나란하게 설치되어 있고 급기구는 2개가 설치되어 있으며 배기덕트는 큐비클의 짧은 방향과 나란하게 설치되어 있고 배기구는 2개가 설치되어 있다. 급기구 및 배기구의 크기는 0.5m×0.3m이다.

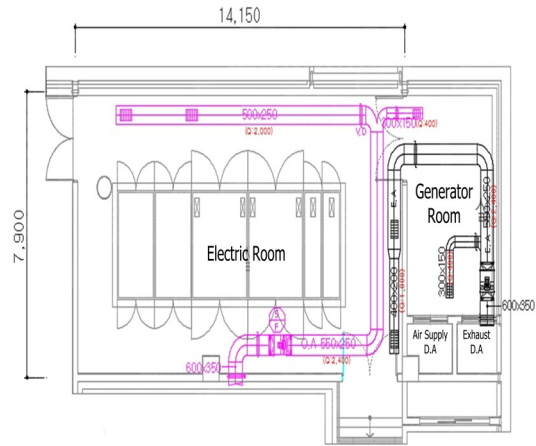


Fig. 1. Floor plan of mechanical ventilation equipment in electric room

2.2 해석조건 및 감지장치 설정

해석모델의 조건은 Table 1과 같으며 열방출률은 3,500kW, 화재성장은 정상상태의 지속시간 (t2)가 60초가 되도록 설정하여 ultra fast로 화재가 성장하는 것으로 하여 수행하였다.

Table 1. Conditions of analytical model

Classification	Contents
Location of ignition source	Inside of cubicle type switchboard
Heat release rate	3,500kW/m ²
Number of cells for mesh	84,600
Grid size	0.2m×0.2m×0.2m

Table 2와 같이 Concrete, Steel, Cable의 물성 값은 PyroSim 2015 프로그램에서 Bryan Klein에 의해 제공된 자료를 적용하였으며, Table 3과 같이 케이블의 절연재인 PE/PVC가 반응하는 것으로 물성을 설정하였다. 모델링에 적용되어진 물성은 벽체는 콘크리트, 큐비클 금속상자는 스틸, 케이블을 각각 적용하였으며 가연물인 케이블의 절연재 PE/PVC가 지속적으로 연소하여 일산화탄소와, Soot이 생성되도록 하였다.

Table 2. Material properties applied to modeling

Classification	Concrete	Steel	Cable
Density(kg/m ³)	2,280	7,850	1,380
Specific heat(kJ/kg-K)	1.04	0.46	1.289
Thermal conductivity(w/m-K)	1.8	45.8	0.192

Table 3. Material properties of PE/PVC applied to modeling

Classification	Contents
PE/PVC Molecular composition	CO : 2 Hydrogen : 3.5
Maximum heat release rate	200kW/m ²
Heat of combustion	20,900kJ/kg
product	CO Yield : 0.147 Soot Yield : 0.136

2.3 화재 시나리오 구성

전기실내 수배전반에서 화재가 발생하고 큐비클형 수배전반 상부의 환기구에서 화염이 분출하여 상부에 설치된 케이블 표면에 열전달에 의한 열해리를 통하여 화재가 급속하게 진행될 때 연소특성을 분석하기 위하여 Table 4와 같이 시나리오를 구성하였고 각 시나리오에 따른 연기밀도, 가지거리, 일산화탄소 농도, 온도의 특성을 분석하였다.

시나리오 1은 해석공간에 실제 운영되고 있는 풍량 2,000m³/h, 풍속 1.85m/s, 급기구의 크기 0.15m², 급기구 및 배기구의 설치높이를 2.9m로 적용하였고 화재가 발생 시 기계식 환기설비가 작동하지 않도록 하였다. 시나리오 2는 풍량, 풍속, 급기구의 크기, 급기구 및 배기구의 설치높이를 시나리오 1과 같이 동일하게 적용하나, 화재가 발생 시 기계식 환기설비가 작동하도록 하였다. 시나리오 3은 소방방법에서 제시하는 풍량기준 5,000m³/h를 적용하고, 풍속 1.85m/s, 급기구의 크기 0.38m², 급기구 및 배기구의 설치높이를 2.9m로 적용하였고 화재가 발생 시 기계식 환기설비가 작동하도록 구성하였다. 시나리오 4는 풍량, 풍속, 급기구의 크기 및 화재가 발생 시 기계식 환기설비의 작동특성은 시나리오 3과 같이 동일하게 적용하나, 급기구의 위치를 급기구의 중심이 전기실의 바닥으로부터 설치높이 0.7m로 적용하였고 배기구의 설치높이는 2.9m로 적용하였다.

해석공간에서의 감지장치 1은 전기실의 출입구에 설치하였고, 감지장치 2는 발전기실로 통하는 출입구에 설치하였으며 설치높이를 소방방법에서 제시하는 인명안전 기준 호흡선 높이인 1.8m에 설치하였다. 재실자와 소방대에게 위험요소가 큰 연기밀도는 감지장치 1과 감지장치 2로 측정하였으며 가지거리, 일산화탄소 농도, 온도는 감지장치 1로 측정하였다.

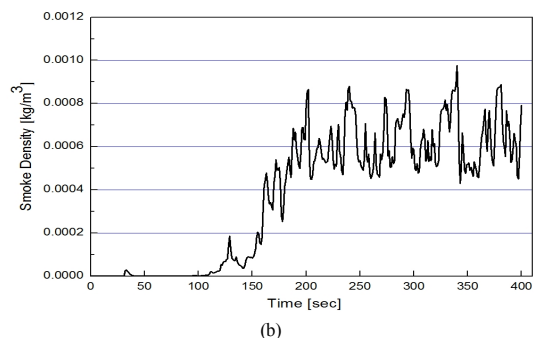
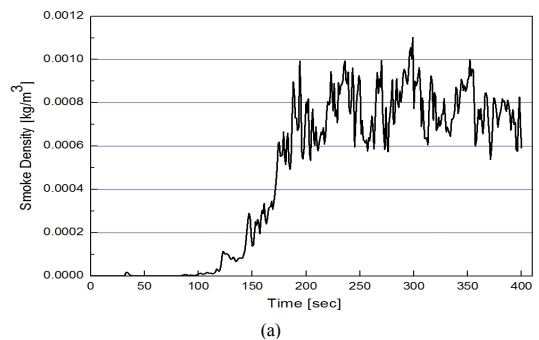
Table 4. Conditions by scenario configuration

Conditions	Air flow rate (m ³ /h)	wind speed (m/s)	Air supply slot		Ventilation equipment
			size (m ²)	height (m)	
Scenario 1	2,000	1.85	0.15	2.9	inactivated
Scenario 2	2,000	1.85	0.15	2.9	activated
Scenario 3	5,000	1.85	0.38	2.9	activated
Scenario 4	5,000	1.85	0.38	0.7	activated

3. 결과 및 분석

3.1 연기밀도

Fig. 2는 각 시나리오의 시간에 따른 연기밀도를 분석하였다. 최대 연기밀도는 화재 발생 후 Fig. 2(a) 시나리오 1의 경우 300초에 약 0.0011kg/m³이며, Fig. 2(b) 시나리오 2의 경우 340초에 약 0.0009kg/m³으로 나타났다. Fig. 2(c) 시나리오 3의 경우 360초에 약 0.0008kg/m³이며 Fig. 2(d) 시나리오 4의 경우 360초에 약 0.0007kg/m³으로 나타났다. 연기밀도 상승곡선도 Fig. 2(a) 시나리오 1과 Fig. 2(b) 시나리오 2의 경우 화재발생 150초 이후 급격하게 상승하는 반면, Fig. 2(c) 시나리오 3과 Fig. 2(d) 시나리오 4의 경우 완만하게 상승하였다.



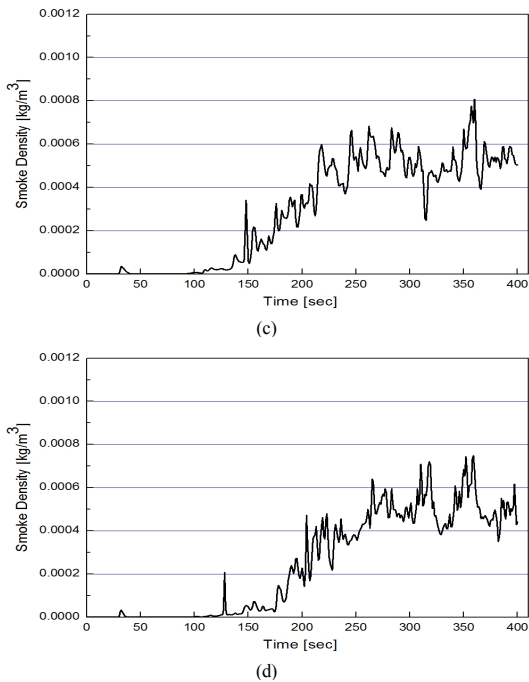


Fig. 2. Smoke Density according to the time of each scenario (a) scenario 1, (b)scenario 2, (c)scenario 3, (d) scenario 4

3.2 가시거리

Fig. 3은 피난에 유효한 가시거리 10m를 기준으로 각 시나리오의 시간에 따른 가시거리를 분석하였다. Fig. 3(a) 시나리오 1의 경우 화재발생 약 120초 이후 일시적으로 가시거리를 약 5m를 나타내다가 약 125초 이후 가시거리가 약 16m로 늘어났으며, 약 140초경과 후 가시거리가 약 10m 이하로 줄어들었다.

Fig. 3(b) 시나리오 2의 경우 화재발생 약 120초 이후 일시적으로 가시거리가 약 7m를 나타내다가 약 150초 까지 가시거리가 약 10m 이상으로 늘어났으며 약 150초 이후에 가시거리가 약 10m 이하로 줄어들었다. Fig. 3(c) 시나리오 3의 경우 화재발생 약 150초경과 후 가시거리가 약 10m이하로 줄어들었으나 약 150초 이후에는 간헐적으로 가시거리가 약 10m를 확보하기도 하였다. Fig. 3(d) 시나리오 4의 경우 화재발생 약 180초까지 가시거리가 10m를 확보하였으며 약 180초 이후에도 Fig. 3(c) 시나리오 3의 경우보다 피난에 유효한 가시거리가 약 10m 이상 확보하는 경우가 더 많아 개선효과가 있다.

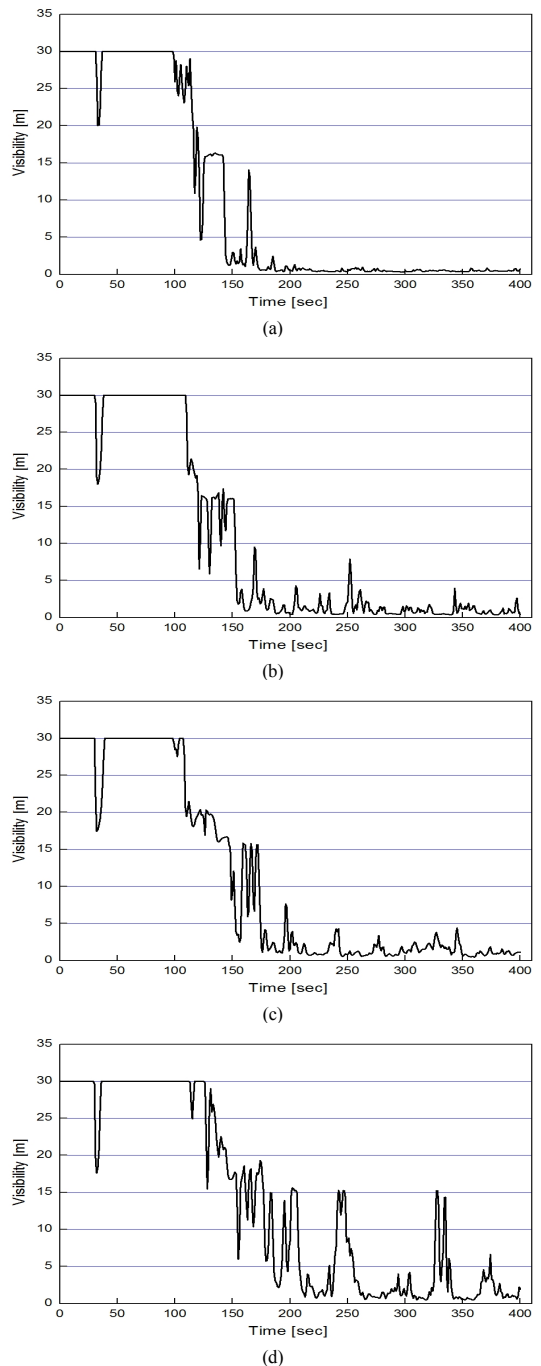


Fig. 3. Visibility according to the time of each scenario (a) scenario 1, (b) scenario 2, (c) scenario 3, (d) scenario 4

3.3 일산화탄소 농도

Fig. 4는 각 시나리오의 시간에 따른 일산화탄소 농도

를 분석하였다.

Fig. 4(a) 시나리오 1의 경우 화재발생 약 150초까지 약 0.0002[mol/mol] 이하의 농도를 나타내었고 최고농도는 약 300초 이후에 약 0.0014[mol/mol]을 나타내었다. Fig. 4(b) 시나리오 2의 경우 화재발생 약 160초까지 약 0.0002[mol/mol] 이하의 농도를 나타내었고 최고농도가 약 0.0012[mol/mol]를 초과하지 않았다. Fig. 4(c) 시나리오 3의 경우 화재발생 약 175초까지 약 0.0002[mol/mol] 이하의 농도를 나타내었고 최고 농도는 약 0.00083[mol/mol]을 나타내었다. Fig. 4(d) 시나리오 4의 경우 화재발생 약 190초까지 0.0002[mol/mol] 이하의 농도를 나타내었고 최고농도가 0.0008[mol/mol]를 초과하지 않았다.

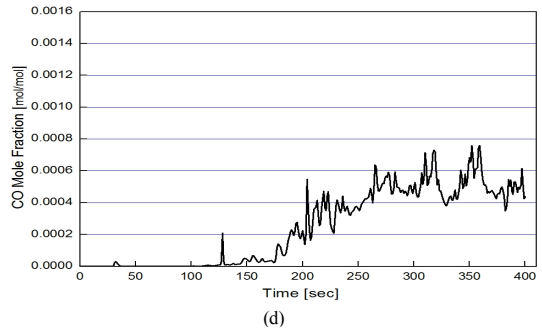
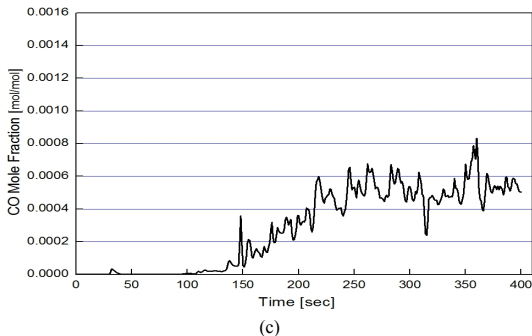
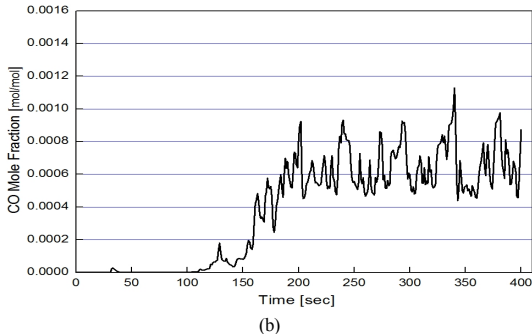
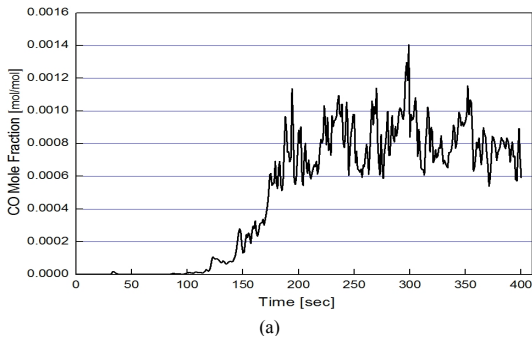
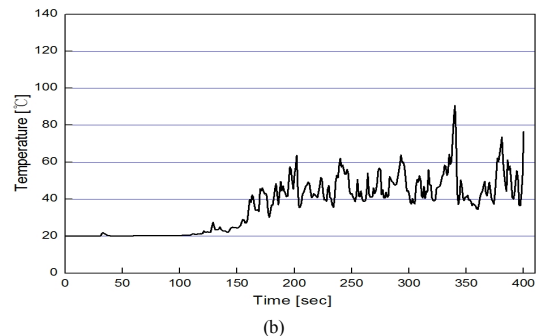
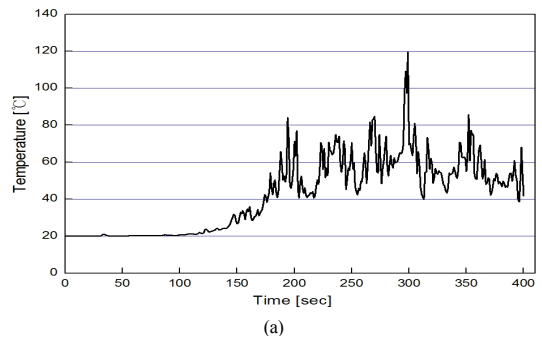


Fig. 4. CO concentration according to the time of each scenario (a) scenario 1, (b) scenario 2, (c) scenario 3, (d) scenario 4

3.4 온도

Fig. 5는 각 시나리오의 시간에 따른 온도를 분석하였다. Fig. 5(a) 시나리오 1의 경우 화재발생 약 180초 이후 약 60℃에 도달하였으며 최고온도가 약 120℃까지 상승하였다. Fig. 5(b) 시나리오 2의 경우 화재발생 약 240초 이후 약 60℃에 도달하였으나 그 이후에도 급격한 온도상승 특성은 나타나지 않았다.

Fig. 5(c) 시나리오 3과 Fig. 5(d) 시나리오 4의 경우에도 소방법의 인명안전기준인 온도 60℃에는 도달하지 않았다.



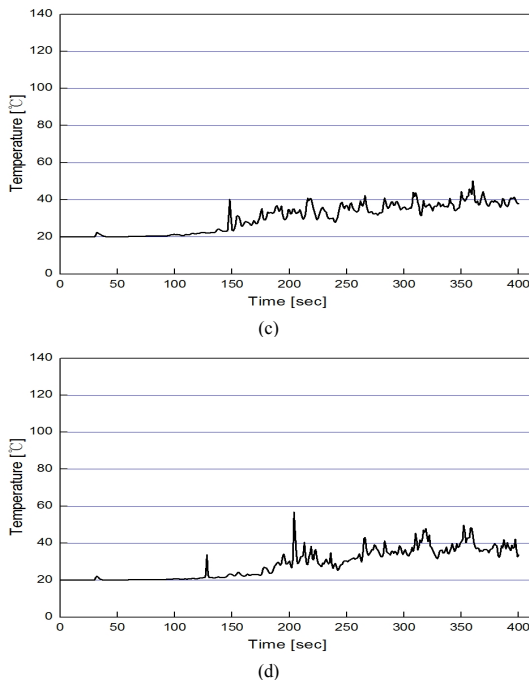


Fig. 5. Temperature according to the time of each scenario (a) scenario 1, (b) scenario 2, (c) scenario 3, (d) scenario 4

4. 결론

본 연구에서는 실제 운영되고 있는 지하 1층에 설치된 전기실을 대상으로 큐비클식 수배전반에서 화재 발생에 따른 화재모델링 및 연기제어 특성을 분석하였다.

이를 위해 화재시뮬레이션 프로그램 FDS(Fire Dynamic Simulator)를 기반으로 만들어진 PyroSim을 이용하여 기계식 환기설비가 작동하지 않은 경우, 기계식 환기설비가 작동한 경우, 풍량을 소방방법 기준으로 적용한 경우, 급기구의 위치를 변경한 경우의 4가지 시나리오의 조건으로 수행하였고 이에 따른 연기밀도, 가시거리, 일산화탄소 농도, 온도의 특성을 분석하였으며 본 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 전기실에 설치된 기계식 환기설비는 화재가 발생하면 작동하지 않도록 규정되어 있어 환기설비를 작동시켰을 경우의 특성비교를 시나리오 1과 시나리오 2를 통해 분석하였다. 분석 결과, 가시거리 및 일산화탄소 농도는 환기설비가 작동할 경우 큰 변화가 나타나지 않았으며, 연기밀도는 환기설비가 작동될 경우 개선됨을 확인

하였다. 온도는 약 150초 이전까지는 시나리오 1과 시나리오 2의 경우 모두 비슷한 상승곡선을 나타내었다. 하지만 약 150초 이후 시나리오 1의 경우 급격한 상승곡선이 나타났지만 시나리오 2의 경우 완만한 상승곡선이 나타났다. 따라서 환기설비가 작동하면 가시거리나 일산화탄소 농도보다 온도특성이 더욱 개선됨을 확인하였다.

(2) 전기실에 설치된 환기설비는 급기량 및 배기량이 법적으로 규정되어 있지 않아 현재 대부분이 건축설비 포켓북에서 권장하는 환기량을 적용하고 있으나 실제 현장에서는 이에 미치지 못하고 있는 실정이다.

따라서 실제 운영되고 있는 환기량을 적용한 시나리오 2의 경우와 소방방법에서 규정하는 풍량을 적용한 시나리오 3의 경우에 대한 특성을 분석한 결과, 연기밀도, 가시거리, 일산화탄소 농도 및 온도특성이 풍량을 크게 적용한 시나리오 3의 경우가 풍량이 적은 시나리오 2의 경우보다 개선됨을 확인하였다. 따라서 전기실의 온도 조절용 환기설비를 설계에서부터 건축설비 포켓북에서 권장하는 환기량과, 소방방법에서 규정하는 급기량 및 배기량을 비교 검토 후 적용한다면 연기 및 연소생성물로 인한 피난 및 소방 활동에 대한 안전 대책 수립에 도움이 될 것으로 사료된다.

(3) 환기설비의 급기구와 배기구의 위치는 경제적 비용과 공간상의 제약으로 상부에 설치되고 있으나 소방방법에서는 급기구는 하부에 배기구는 상부에 설치하도록 규정하고 있다. 따라서 소방방법에서 규정하는 급기구를 하부에 설치할 경우에 대한 특성을 분석한 결과, 급기구가 하부에 있는 시나리오 4의 경우가 급기구가 상부에 있는 시나리오 3의 경우보다 가시거리 및 온도특성이 개선됨을 확인하였다.

마지막으로 본 연구의 결과는 화재발생에 따른 인명피해와 재산손실을 감소시키는 역할을 할 것으로 기대된다.

References

- [1] H. K. Kim, C. S. Choi, D. O. Kim, H. S. Choi, "Copper Oxide Growing Characteristics of PVC Insulated Wire and Application to the Fire Investigation", *Trans. KIEE.*, vol. 56P, no. 1, pp. 37-44, March, 2007.
- [2] K. M. Shong, Y. S. Roh, "A Study on Discrimination between Short-Circuit and Overload based on the Characteristics of the Fusing Current of an Electrical Wire", *Journal of KIIE.*, vol. 21, no. 10, pp. 176-180, December, 2007.
DOI: <http://doi.org/10.5207/JIEIE.2007.21.10.176>

- [3] H. W. Kim, D. H. Baek, "A Study on the Detection Technique of the Flame and Series arc by Poor Contact", *J. Kor. Inst. Fire Sci. Eng.*, vol. 26, no. 6, pp. 24-30, December, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.7731/KIFSE.2012.26.6.024>
- [4] Y. H. Kwon, "A Study on the Application Water Mist Fire Extinguishing System by Incoming and Distributing Panel Fire Measures of Agricultural Pumping and Drainage Stations", Yeungnam University, master's theses, 2013.
- [5] W. C. Jang, "Numerical Study on Fire Propagation Characteristics of Electric Cables in Electrical Cabinets", Chung-Ang University, master's theses, 2009.
- [6] K. C. Choi, "Development of Design Technique for the Performance Improvement of Pressurized Smoke Control System-Focused on Vestibules of Special Escape Stairs-", Konkuk University, doctorate thesis, 2010.
- [7] C. W. Seo, "A Study on the Performance Improvement of Pressurized Smoke Control System Installed in a High Rise Building", Chungnam National University, doctorate thesis, 2015.
- [8] M. S. Kim, E. S. Baek, "A Study on Improvement of Livingroom Smoke-control System using the FDS", *Fire Sci. Eng.*, vol. 31, no. 4, pp. 26-34, August, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.7731/KIFSE.2017.31.1.026>
- [9] S. H. Gu, H. H. Kim, Y. J. Song, "A Study on Fire Features of Double-Skin Facade Structure by Using Fire Simulation (FDS)", *Fire Sci. Eng.*, vol. 28, no. 1, pp. 1-11, February, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.7731/KIFSE.2014.28.1.001>
- [10] Y. J. Song, S. H. Gu, H. J. Kim, D. J. Park, J. M. Park, "A Study on the Fire Spread through Curtain Wall System with Fire Simulations (FDS)", *J. Kor. Inst. Fire Sci. Eng.*, vol. 26, no. 6, pp. 31-37, December, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.7731/KIFSE.2012.26.6.031>

최 정 아(Jeong-A Choi)

[정회원]



- 2016년 2월 : 한밭대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2012년 5월 : 소방기술사
- 2017년 2월 ~ 현재 : 합동소방기술단(주)
- 2015년 6월 ~ 현재 : 대전광역시 지방기술심의위원(소방)

<관심분야>
재생에너지, 전기화재 조사

이 민 구(Min-Gu Lee)

[정회원]



- 2016년 2월 : 한밭대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2016년 3월 ~ 현재 : 원광대학교 대학원 전기공학과 박사과정

<관심분야>
재생에너지, 전기화재 진단

이 대 동(Dae-Dong Lee)

[정회원]



- 2004년 2월 : 한밭대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2014년 2월 : 한양대학교 대학원 전기공학과 (공학박사)
- 2004년 3월 ~ 현재 : 한밭대학교 전기공학과 조교

<관심분야>
고속철도, 전기화재 진단