

분전반 내부 전기화재 시뮬레이션

이상익*, 김기현*, 신성수*, 배석명*
한국전기안전공사*

A Simulation of Electric Fire in Power Panel

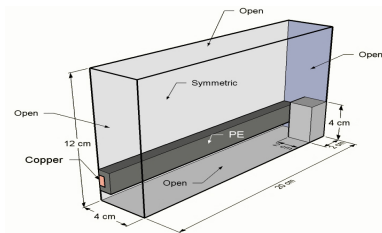
Sang-Ick Lee*, Gi-Hyun Kim*, Sung-Su Shin*, Suk-Myeong Bae*
Korean Electrical Safety Corporation*

Abstract - 본 논문에서는 분전반 내에서 전기화재가 발생할 경우 화염전파와 연기화염의 전파 특성, 연기의 진행방향, CO가스농도의 위치, 내부 온도분포 등을 통해 전기화재의 사전예방과 화재대응 운영시스템 등에 활용하고자 수치해석 등의 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과 화재가 발생한 경우 온도보다 CO가스가 분전반 상부에 빠르게 전달됨을 확인하였고, 시뮬레이션 결과는 분전반 화재예방을 위한 센서의 선택과 설치위치 선정 등에 활용될 것이다.

면을 제외한 나머지 면은 외기에 개방된 것으로 가정하였다. 가열표면에서 방출되는 열유속은 200 kW/m² 이며 크기는 폭 2cm 높이 4cm로써 케이블에서 1cm 떨어진 곳에 위치한다.

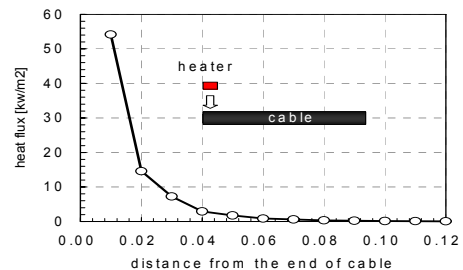
1. 서 론

전기화재의 주요 원인은 합선, 과부하, 누전, 접촉불량 등이다. 전기화재의 발생과정은 전기에너지가 변화되어 발생한 열이 발화원이 되어 일어난 화재와 절연물의 절연파괴, 노후, 누설방전, 취급부주의, 방화 등으로 인하여 발생하거나 부정확한 시공에 의한 차단장치의 불완전 동작 등으로 인한 화재가 발생한다[1]. 전기를 사용하기 위한 분전반에서 발생하는 전기화재의 위험요소는 전기적 요인, 환경적 요인, 물리적 요인 등으로 나눌 수 있고, 전기적 요인으로는 과부하, 단락, 접촉불량, 전류불평형을 들 수 있고, 물리적 요인으로는 진동, 충격, 접속부 이완 등에 의한 국부적 발열을 통한 요인들을 들 수 있다[2-3]. 전기를 사용하기 위하여 옥내배선에서 분기회로로 갈라지는 회로마다 차단기를 설치하여 분전반으로 사용하고 있다. 분전반은 장기간 유지보수의 미흡 등으로 인하여 전기화재가 발생할 수 있으므로 이를 사전에 화재정후를 검출하여 예방을 하여야 한다. 화재를 사전예방하기 위해서는 정후를 사전에 검출하여야 하는데 이를 위해서는 센서를 이용하여 그 정후를 포착할 수 있다. 화재가 발생하게 되면 연기가 발생하게 되고, 에너지를 방출하게 된다. 방출되는 에너지는 적외선, 자외선, 열에너지로 구분할 수 있다. 분전반 내부에서 화재가 발생하였을 경우 화염의 전파 특성, 연기의 진행방향, CO가스농도의 위치, 내부 온도분포 등을 통해 전기화재의 사전예방과 화재대응 운영시스템 등에 활용하고자 시뮬레이션을 수행하였다.



〈그림 1〉 화염전파 해석을 위한 FDS시뮬레이션 해석 영역

일반적으로 200 kW/m²의 가열조건은 다른 점화 시험방법에 비해 상대적으로 높은 가열조건이지만 초기에 빠른 발화를 유도하여 계산시간을 단축시키기 위하여 상대적으로 높은 열 유속을 제공하였다. 그림 2는 주어진 가열조건에 대하여 케이블의 길이 방향에 따라 표면에서의 열 유속을 나타낸다.



〈그림 2〉 도선표면의 열 유속(200 kW/m²)

일반적인 고체가열물의 임계 열 유속(critical heat flux)은 약 20~30 kW/m²로 알려져 있다. 본 수치해석의 경우 케이블의 끝단에서 약 15cm 영역정도가 직접 발화가 가능한 영역이고 그 외 10cm 이상의 케이블은 발화된 화염의 열 순환(heat feedback)에 의해 화염전파가 이루어지게 된다. 화염전파 및 화재성장에 미치는 격자 해상도의 영향을 분석하기 위하여 격자조건에 대하여 수치해석을 수행하였다.

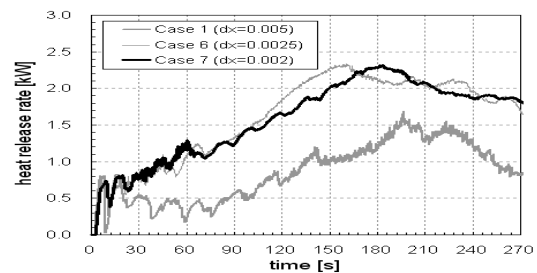
2. 본 론

2.1 전기화재 시뮬레이션

케이블의 화염전파 특성을 해석하기 위하여 사용된 수치해석 프로그램은 미국립표준기술원(NIST)에서 개발된 FDS 5이다. FDS 버전 5는 기존 버전에 비해 CO 생성과 국부적인 화염소화를 해석하는 다단계 연소모델을 적용하였으며 고체의 경계를 다중층(multi-layer)으로 설정하여 열전달의 계산이나 고체표면에서의 열해리(pyrolysis)등을 해석하는데 보다 발전적인 모델을 제공하고 있다. 본 연구에서는 단일 물질에 대하여 일 단계 반응을 고려하였으며 고체 가연물은 열해리에 의해 모두 연료증기로 변환되고 수증기나 잔존물은 생성되지 않는 것으로 가정한다. 각 시간 스텝에서의 반응율(r)은 아래와 같이 단순화된다.

$$r = Aexp\left(-\frac{E_a}{RT_s}\right) \quad (1)$$

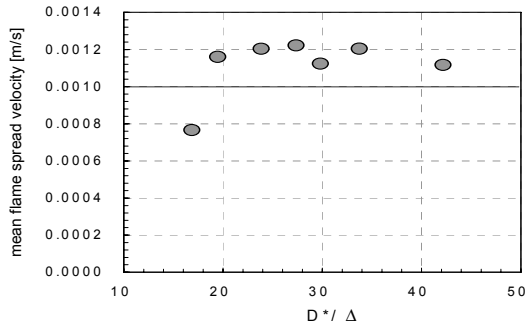
일반적으로 복합물질에 대해서 A와 E 값을 직접 적용할 수 없는 경우 FDS 모델에서는 기준 온도(reference temperature)에 대한 기준 반응율(reference reaction rate)을 이용하여 A와 E값을 산정하게 된다. 기준 온도는 케이블의 가연 피복 재료를 폴리에틸렌(PE)으로 가정하여 PE의 열분해 온도로서 411℃를 적용하였다. 열해리 과정을 통해 생성된 연료증기(에틸렌)의 연소반응은 2변수 혼합분율 모델을 사용하였으며 에틸렌의 연기생성율(soot yield rate)과 일산화탄소 생성율(CO yield rate)은 각각 0.06과 0.024를 적용하였다. FDS 모델의 화염전파 특성을 평가하기 위하여 그림 1에서 보는바와 같이 길이 20cm, 폭 4cm, 높이 12cm의 공간 내에 유효직경이 2cm인 케이블을 따라 복사 가열체에 의한 점화에서부터 화염전파과정을 분석하였다. 케이블의 내부 도선의 물성은 구리로 가정하였으며 외부 피복 재료는 폴리에틸렌으로 가정하였다. 전체 해석공간은 케이블의 중앙 면에 대하여 대칭으로 가정하였으며 대칭



〈그림 3〉 격자 크기 및 시간에 따른 열 방출량

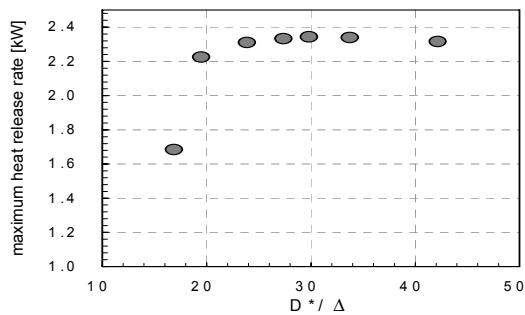
그림 3은 격자크기가 각각 5mm, 2.5mm, 2mm인 정방형 격자에 대하여 시간에 따른 방출열량의 변화를 나타낸다. 격자 크기가 2.5mm와 2mm

인 경우 최대발열량에 도달하는 시간이 2mm 격자가 약 30초 정도 빠른 것을 제외하고는 최대발열량이 약 2.3kW 정도로 유사한 값을 나타내고 있으며 초기 화재성장과정도 매우 유사한 경향을 나타내고 있다. 그러나 격자크기가 5mm인 경우 최대발열량이나 초기 화재성장과정에서 다소 큰 차이를 나타내고 있다.



〈그림 4〉 격자해상도에 따른 평균 화염전파 속도

그림 4는 격자해상도에 따른 화염전파 속도를 나타낸다. 열 순환 과정에 의한 고체가연물의 연소율은 5~50 g/m²s 정도로 알려져 있고 보통 연소율이 5 g/m²s 이하에서는 화염이 전파되지 못하고 소화되는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 각 격자에서 연소율이 5 g/m²s 이상이 되는 위치에서 화염전파가 이루어지는 것으로 가정하여 화염전파속도를 산정하였다. 일반적으로 PE/PVC 케이블에 대한 화염전파의 전파속도는 외부유동 조건이 없는 경우 약 1 mm/s의 크기 정도를 가지는 것으로 알려져 있다. FDS 계산에서 평균화염 전파 속도는 격자해상도가 20 이하인 경우에는 0.8 mm/s 정도를 나타내고 격자해상도가 20 이상인 경우에는 약 1.2 m/s 정도로 비교적 일정한 값을 가지는 것으로 나타났다.

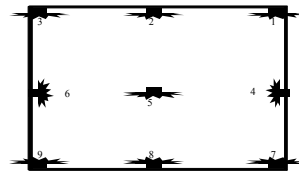


〈그림 5〉 격자해상도에 따른 화염전파 과정중 최대발열량

그림 5는 격자해상도에 따른 화염전파 과정중의 최대발열량을 나타낸다. 격자해상도가 약 20 이하인 경우 최대발열량은 상대적으로 낮게 나타났지만 20 이상인 경우에는 표준편차가 약 0.015정도로 격자해상도에 관계없이 거의 일정한 값을 나타냈다. 일반적으로 조밀한 격자가 생긴 격자에 비해 좋은 해상도의 결과를 제공하고 수치적으로 타당한 결과를 제공한다. 그러나 격자수의 증가는 계산시간과 직접적으로 관련되어 수치모사 과정의 제약조건으로 작용하기 때문에 해석결과와 계산시간을 동시에 고려하여 최적 격자를 선정하여야 한다.

격자의 개수에 따른 계산 시작 후 300초까지 화재가 전파되는데 소요된 계산시간은 선형적인 관계를 나타내고 있으며 격자수가 약 30,000개인 경우 계산시간은 약 17시간 정도 소요되었으며 격자수가 120,000개인 경우 계산시간은 약 70시간정도로써 4배 이상의 계산시간을 요구하는 것으로 나타났다. 따라서 화재발달특성과 계산량의 경제성 등을 고려할 때 격자해상도 약 20~25정도에서 화재발달 특성을 예측하는데 있어서 격자의 독립성을 확보함과 동시에 다양한 조건변화에 대한 화재발달 특성을 해석하는데 계산용량의 무리가 없을 것으로 판단된다.

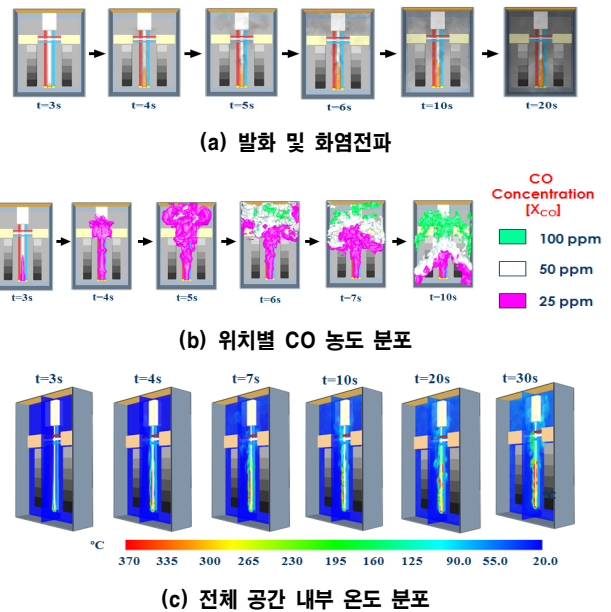
분전반 분기의 과부하 사용, 접촉불량, 단락, 전류 불평형 등에 의해 분전반 내부에 화재가 발생하였을 경우 화재로 인해 생성되는 열과 연기의 검출을 통해서 화재를 사전에 예지할 수 있도록 센서의 선택과 위치 등을 설정하기 위해서 그림 6과 같이 분전반 내부에서 화재 발생 시 각 위치에서의 시간에 따른 온도변화와 매연(soot)의 농도변화를 예측하기 위하여 분전반 천장과 바닥면, 분전반 중앙 부분에 각각 3개의 지점에 위치시켰다. 또한 같은 지점에 모델화된 열 감지기와 연기 감지기를 위치시켜 화재 발생 시 적절한 감지기 위치를 찾고자 한다. 열 감지기의 경우 화재시 74 °C 이상의 온도에서 감지기 몸체가 변형되어 화재에 반응하도록 하였으며, 기류온도에 대한 감열체의 시간지연을 의미하는 반응시간지수가 발생하게 된다.



〈그림 6〉 분전반 내부 화재 시뮬레이션을 위한 해석 도메인

2.2.2 분전반 화재 시뮬레이션

실제 현장에서 설치되고 운영되고 있는 층 분전반의 형상을 가로 0.5m, 세로 0.84m, 깊이 0.17m로 모델링하여 화재 시뮬레이션에 사용하였다. 층분전반 아래 부분에서 화재가 발생하였을 때를 가정하여 화재를 모사하여, 시뮬레이션을 수행한 결과 그림 7과 같이 발화 및 화염전파, CO 분포, 그리고 내부 온도 분포를 나타내었으며, CO의 농도의 경우 수십 초 내에 100 PPM 이상 상승함을 알 수 있었으며, 공간 내부 온도의 상승은 CO의 농도의 상승에 비해서 매우 느린 것을 알 수 있다.



〈그림 7〉 분전반 내 전선 화재 시뮬레이션 결과(발화 및 화염전파)

3. 결 론

본 논문에서는 분전반 내부에서 화재가 발생할 경우 화재 발생의 징후를 사전에 감지하고 관리하기 위한 센서의 종류 선택과 센서의 부착 위치 등을 파악하기 위하여 화재발생시 분전반 내부에서 화염의 전파와 발생하는 CO의 농도, 온도분포 등에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 수행결과 분전반 내부에서 화재 발생시 연기의 경우 5초 이내에 상부도착, 10초 경과후 CO 농도가 100ppm을 초과하는 것으로 나타났으며 CO의 경우 내부온도상승보다 빠르게 증가하는 것으로 나타나 분전반 내부에서 발생하는 화재의 징후인 가스검출 즉 CO를 사전에 검출하여 감지하고 관리하면 분전반이나 배전반과 같은 공간에서 발생할 수 있는 전기화재를 사전에 예방이 가능할 것으로 판단되며, 시뮬레이션 결과를 바탕으로 지능형 분전반 및 전기안전 관리시스템의 전기화재 예방기술에 활용할 예정이다.

본 연구는 지식경제부 에너지자원기술개발사업의 일환(2010201010095A)으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김동욱 외 6명, “저압 차단기에서의 전기화재 매커니즘에 관한 연구”, 대한전기학회 하계학술대회는논문집, 2166-2167, 2009
- [2] H.Zang, R.Hackam, “Electrical Surface Resistance Hydrophobicity and Diffusion Phenomena in PVC”, IEEE Trans. DEL, Vol. 6, No 1, pp.73-83, 1999
- [3] 김향근의 5명, “분전반에서의 전기화재 위험요소 및 현장상태조사 분석”, 대한전기학회 하계학술대회는논문집, 555, 2008