

분전반 화재 시뮬레이션 해석

글 _ 이 상 익

한국전기안전공사 전기안전연구원 응복합연구부 선임연구원

1. 서 론

전기화재의 주요 원인은 합선, 과부하, 누전, 접촉불량 등이며, 단락 또는 과부하에 의하여 전선에 과전류가 흐를 경우 전선은 용단되고 이것은 전기화재의 직접적인 원인으로 작용하게 된다. 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. 전기를 사용하기 위한 분전반에서 발생하는 전기화재의 위험요소는 전기적 요인, 환경적 요인, 물리적 요인 등으로 나눌 수 있고, 전기적 요인으로는 과부하, 단락, 접촉불량, 전류 불평형을 들 수 있고, 물리적 요인으로는 진동, 충격, 접속부 이완 등에 의한 국부적 발열을 통한 요인들을 들 수 있다. 분전반은 전기를 사용하기 위하여 옥내배선에서 분기로 나누어지는 회로마다 배선용 차단기나 누전차단기를 설치하여 사용하고 있다. 분전반은 장기간 유지보수의 미흡 등으로 인하여 전기화재가 발생할 수 있으므로 이를 사전에 화재징후를 검출하여 예방할 필요성이 있다. 분전반이나 수배전반 내부에서 발생하는 화재를 사전에 예방하기 위해서는 화재발생 징후를 센서를 이용하여 사전에 검출하고 관리할 필요성이 있다. 분전반 내부에서 화재가 발생하였을 경우 화염의 전파 특성, 연기의 진행방향, CO가스농도, 내부 온도분포 등을 통해 전기화재의 사전예방 및 징후 검출을 위한 센서의 설치 위치, 센서의 종류 선택과 전기안전 관리 운영시스템 등에 활용하고자 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 본 론

2.1 화재 징후

화재가 언제 어디서 발생할 것인지 화재의 원인, 화재로 인한 피해범위를 정확하게 예측한다는 것은 사실상 불가능하다. 그러나 발화에 대한 과학적 지식과 연소생성물을 통해 화재와 폭발의 위험성을 예측하고 제어하는 효과적인 방법을 결정할 수 있다.

화재가 발생하면 화재로 인하여 여러 가지 주변 환경에 영향을 미치게 된다. 이러한 주위조건을 변화를 화재징후라고 하는데 이러한 다양한 화재징후를 각종 센서로 포착할 수 있다. 화재징후 가운데 배전반 및 분전반 내에서 화재 발화물(전선, 하우징 등)에 의해 발생할 수 있는 연소생성물은 크게 화재 연기, 열, 가스로 구분할 수 있다. 먼저 연기는 대부분이 유기산, 알데히드, 염화수소와 같은 자극성물질을 흡수한 탄소입자로 되어 있어 이러한 생성물은 구토, 호흡곤란 등 심신에 악 영향을 받게 된다. 또한 열로 인한 표피화상 외에 고온가스와 연기 흡입으로 호흡기 계통에 치명상을 준다. 화재가 발생하였을 경우 사람에게 중독을 야기하는 유독가스는 매우 치명적이다. 특히, 일산화탄소는 화재 시 가장 위험하며 인명손실의 매우 중요한 요소 중의 하나이다. 화재 후 12시간 안에 사망한 사고의 주요 원인은 호흡기 계통의 손상보다 일산화탄소 중독에 의한 것으로 알려져 있다. 이산화탄소의 경우, 화재 발생 시 인체위험 허용량(5,000 ppm) 이상이 발생하여 호흡수를 증가시키고, 대기 중 함량이 9%(90,000 ppm)이상이면 산소부족으로 호흡수가 증가되어 유독가스를 더 많이 들이마시게 되어 질식사할 수 있다.

2.2 전기화재 발생 시나리오

화재가 발생하는 3가지 필수 요소로는 열원, 공기 또는 산소, 연료이다. 화재의 3가지 요소가 동시에 존재할 때 화재가 발생하며 그 중 전기화재의 경우 전기자체가 열원이 되며 전선의 절연체는 일차적인 발화물질 연료로써 주변 공기와 결합하면서 화재가 발생하게 된다. 일반적으로 전기화재에서 발생하는 열은 전류의 발열작용으로써 줄열에 기인하는 것으로 볼 수 있으며 특히 단락사고 발생 시 전선에는 매우 큰 전류가 흐르고 이로 인해 발생하는 줄열에 의하여 전선피복재가 착화되어 전기화재가 발생한다. 또한 과부하시 전선에 허용전류보다 큰 전류가 장시간 계속 흐르게 되면 도체에서 발생한 열에 의해 전선피복이 가열되고 그 후 전선피복에서 연기가 발생하게 된다. 시간이 경과하면 연기가 매우 많이 발생하면서 피복 절연물이 팽창하여

부풀어 오르고 용융하여 아래 방향으로 처지며 전선도체와 접촉한 피복의 상부에서는 탄화가 진행된다. 더욱 과열되면 전선도체는 붉게 발열하며 피복은 심하게 탄화, 용융하여 전선도체로부터 이탈하게 된다. 만일 전선도체에 가연물이 닿아 있으면 착화할 수 있으며 허용전류의 수배에 이를 경우 전선 도체는 붉게 적열한 후 용단하게 된다.

2.3 분전반 화재 시뮬레이션

2.3.1 시뮬레이션 방법 및 해석

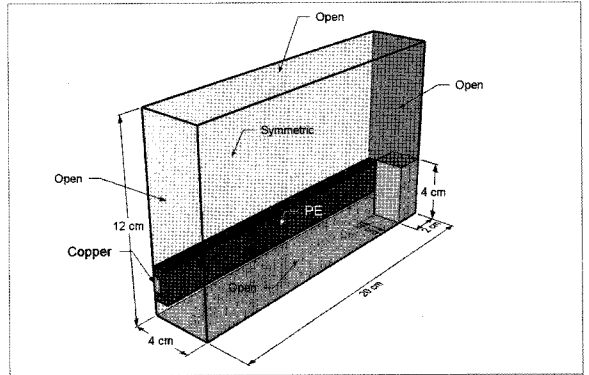
케이블의 화염전파 특성을 해석하기 위하여 사용된 수치해석 프로그램은 미국립표준기술원(NIST, National Institute of Standards and Technology)에서 개발된 FDS 5(Fire Dynamics Simulator Ver. 5)이다. FDS 버전 5는 기존 버전에 비해 CO 생성과 국부적인 화염소화를 해석하는 다단계 연소모형을 적용하였으며 고체의 경계를 다중층(multi-layer)으로 설정하여 열전달의 계산이나 고체표면에서의 열해리(pyrolysis)등을 해석 하는데 보다 발전적인 모델을 제공하고 있다. 시뮬레이션에서는 단일 물질에 대하여 일 단계 반응을 고려하였으며 고체 가연물은 열해리에 의해 모두 연료증기로 변환되고 수증기나 잔존물은 생성되지 않는 것으로 가정하였다. 각 시간 스텝에서의 반응율(r)은 아래와 같이 단순화된다.

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

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. 시뮬레이션에서의 기준 반응율은 0.1, 기준 온도는 케이블의 가연 피복 재료를 폴리에틸렌(PE)으로 가정하여 PE의 열분해 온도로써 411℃를 적용하였다. 열해리 과정을 통해 생성된 연료증기(에틸렌)의 연소반응은 2변수 혼합 분율 모델을 사용하였으며 에틸렌의 연기생성율(soot yield rate)과 일산화탄소 생성율(CO yield rate)은 각각 0.06과 0.024를 적용하였다.

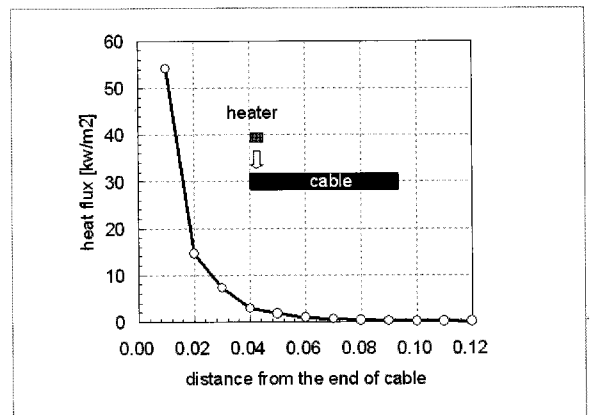
FDS 모델의 화염전파 특성을 평가하기 위하여 [그림 1]에서 보느냐와 같이 길이 20cm, 폭 4cm, 높이 12cm의 공간 내에 유효직경이 2cm인 케이블을 따라 복사가열체에 의한 점화에서

부터 화염전파과정을 분석하였다. 케이블의 내부 도선의 물성은 구리로 가정하였으며 외부 피복 재료는 폴리에틸렌으로 가정하였다.



【그림 1】 도선의 화염 전파해석을 위한 FDS 시뮬레이션 해석 영역

전체 해석공간은 케이블의 중앙 면에 대하여 대칭으로 가정하였으며 대칭면을 제외한 나머지 면은 외기에 개방된 것으로 가정하였다. 가열표면에서 방출되는 열유속은 200kW/m^2 이며 크기는 폭 2cm 높이 4cm로써 케이블에서 1cm 떨어진 곳에 위치한다.



【그림 2】 히터에 의한 도선 표면의 열 유속 (200kW/m^2)

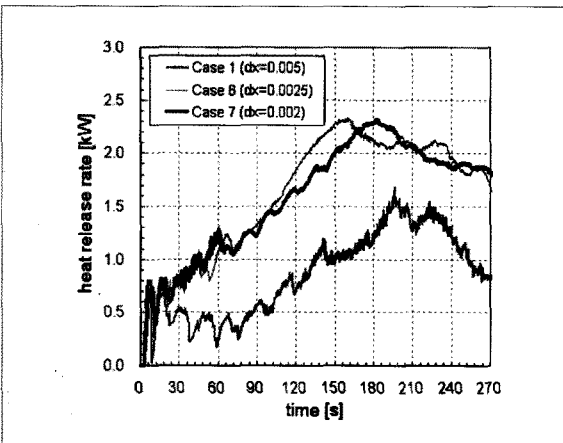
일반적으로 200kW/m^2 의 가열조건은 다른 점화 시험방법에 비해 상대적으로 높은 가열조건이지만 초기에 빠른 발화를 유도 하여 계산시간을 단축시키기 위하여 상대적으로 높은 열 유속을 제공하였다. [그림 2]는 주어진 가열조건에 대하여 케이블의 길이 방향에 따라 표면에서의 열 유속을 나타낸다. 일반적인 고체가 열물의 임계열유속(Critical Heat Flux)은 약 $20\sim 30\text{kW/m}^2$ 로

알려져 있다. 본 수치해석의 경우 케이블의 끝단에서 약 1.5cm 영역정도가 직접 발화가 가능한 영역이고 그 외 10cm 이상의 케이블은 발화된 화염의 열 순환(Heat Feedback)에 의해 화염전파가 이루어지게 된다. 화염전파 및 화재성장예에 미치는 격자 해상도의 영향을 분석하기 위하여 표 3과 같은 격자조건에 대하여 수치해석을 수행하였다.

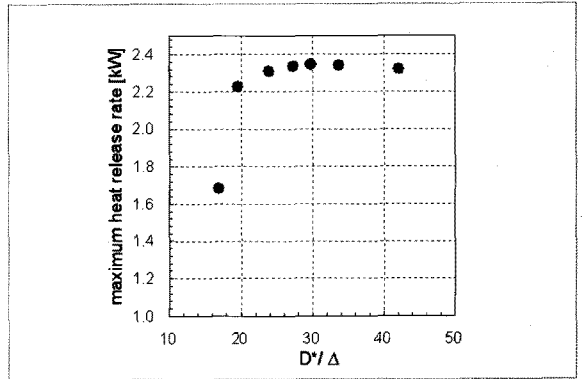
[그림 3]은 격자크기가 각각 5mm, 2.5mm, 2mm인 정방형 격자에 대하여 시간에 따른 발열량의 변화를 나타낸다. 격자 크기가 2.5mm와 2mm인 경우 최대발열량에 도달하는 시간이 2mm 격자가 약 30초 정도 빠른 것을 제외하고는 최대발열량이 약 2.3 kW 정도로 유사한 값을 나타내고 있으며 초기 화재성장 과정도 매우 유사한 경향을 나타내고 있다. 그러나 격자크기가 5 mm인 경우 최대발열량이나 초기 화재성장과정에서 다소 큰 차이를 나타내고 있다. 일반적으로 화재의 특성 길이는 다음과 같이 정의 된다.

$$D^* = \left(\frac{Q}{\rho_{\infty} C_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (2)$$

여기서 Q는 발열량, ρ_{∞} 는 외기밀도, C_p 는 비열, T_{∞} 는 외기온도, g는 중력가속도를 나타낸다. 격자의 해상도는 화재의 특성길이에 대한 미소격자의 대표 길이로 나타내고 일반적으로 열 및 연기거동에 대한 격자해상도는 약 4~16 정도에서 독립성을 가진다고 보고되고 있으나 이는 해석영역의 크기나 해석모델에 의해 크게 의존하기 때문에 보편적인 값으로 보기에는 무리가 있다.

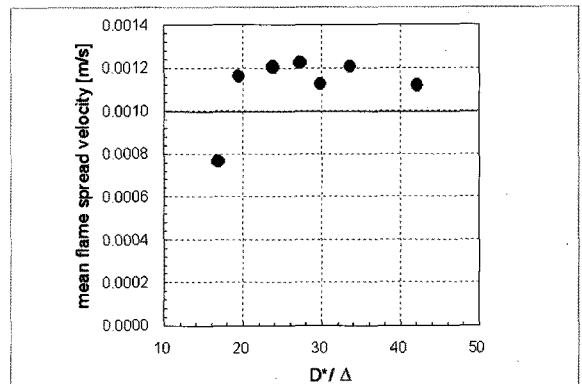


【그림 3】 격자 크기에 따른 시간에 따른 열 방출량



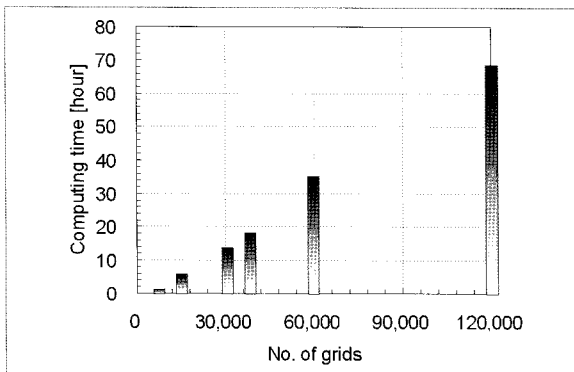
【그림 4】 격자해상도에 따른 화염전파 과정중의 최대발열량

[그림 4]는 격자해상도에 따른 화염전파 과정중의 최대발열량을 나타낸다. 격자해상도가 약 20이하인 경우 최대발열량은 상대적으로 낮게 나타났지만 20이상인 경우에는 표준편차가 약 0.015 정도로 격자해상도에 관계없이 거의 일정한 값을 나타냈다. [그림 3]은 격자해상도에 따른 평균 화염전파 속도를 나타낸다. 열 순환 과정에 의한 고체가연물의 연소율은 5~50g/m²s 정도로 알려져 있고 보통 연소율이 5g/m²s 이하에서는 화염이 전파되지 못하고 소화되는 것으로 알려져 있다. 각 격자에서 연소율이 5g/m²s 이상이 되는 위치에서 화염전파가 이루어지는 것으로 가정하여 화염전파속도를 산정하였다. 일반적으로 PE/PVC 케이블에 대한 화염전파의 전파속도는 외부유동 조건이 없는 경우 약 1mm/s의 크기 정도를 가지는 것으로 알려져 있다. FDS 계산에서 평균화염 전파 속도는 격자해상도가 20이하인 경우에는 0.8mm/s 정도를 나타내고 격자해상도가 20이상인 경우에는 약 1.2mm/s 정도로 비교적 일정한 값을 가지는 것으로 나타났다.



【그림 5】 격자해상도에 따른 평균 화염전파 속도

일반적으로 조밀한 격자가 성긴 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. [그림 6]은 격자의 개수에 따른 계산 시작 후 300초까지 화재가 전파되는데 소요된 계산시간을 나타낸다. 전반적으로 격자 개수와 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.

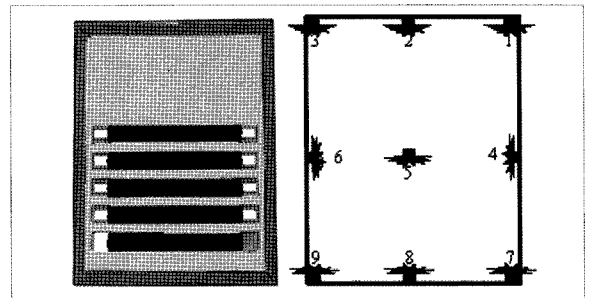


[그림 6] 격자 개수에 따른 컴퓨터 계산 시간

2.3.2 분전반 내부 화재 시뮬레이션

분전반 내부의 화염전파특성과 가스감지센서의 검출 특성을 확인하기 위해 [그림 7]과 같이 너비 0.7m, 폭 0.15m, 높이 1m의 공간을 105,000개의 격자로 구성하였다. 외벽 조건은 두께 1cm의 철로 설정하였으며 벽면에는 폭 1cm의 자연배기 조건을 설정하여 케이블 화재를 예측하였다. 공간 내부에 수평으로 5개의 원형케이블을 설치하였고 계단식 격자를 이용하여 직경 7mm의 원형케이블을 모사하였다. 전선 양 끝단에는 구리 성분의 접촉 부분을 설치하였다. 화재 가열원은 양 끝단의 구리 접촉부에서 200 kW/m²의 열이 발생하면서 점화가 시작된다. 화재 위치 변화에 따른 감지센서의 신호를 비교하기 위해 케이블 배열 중 가장 아래 부분과 중간 부분으로 나누어 화재가 발생 하도록 설정하였다.

케이블 화재로 인해 생성되는 열과 연기를 통해서 화재를 검출 하도록 설정하기 위해서 [그림 7]과 같이 화재발생시각 위치에서의 시간에 따른 온도변화와 매연(soot)농도변화를 예측하기 위하여 분전반 천장과 바닥면, 분전반 중앙 부분에 각각 3개의 지점에 위치시켰다. 또한 같은 지점에 모델화된 열 감지센서와 연기 감지 센서를 위치시켜 화재 발생 시 적절한 감지센서의 위치를 찾고자 한다. 열 감지센서의 경우 화재 시 74℃ 이상의 온도에서 감지센서 몸체가 변형되어 화재에 반응하도록 하였으며 연기 감지센서의 경우 초기 감지센서의 특성길이가 1.8 m인 Heskestad 모델을 이용하여 공간 내부의 연기 신호를 검출하였다.



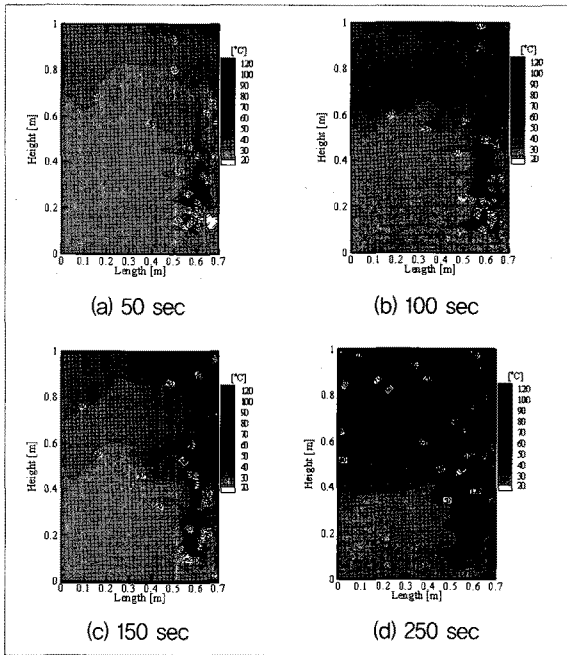
[그림 7] 분전반 내부 화재 시뮬레이션을 위한 해석 도메인 및 감지센서 위치

분전반 내부의 우측하단 모서리에서 화재가 발생하였을 경우 화재의 온도 및 속도분포를 [그림 8]에 나타내었다. [그림 9]는 분전반 내부에서 화재가 발생하였을 경우 시간에 따른 매연(Soot)의 농도를 나타내고 있다. 케이블 화재로부터 발생한 열원은 주위 공기의 밀도 차에 의한 부력으로 인해 주위 공기의 유입이 이루어져 연기가 상부로 이동하고 있으며 천장에 도달한 후 시간이 경과함에 따라 생성된 열원은 왼쪽 벽면을 따라서 하강하고 있는 것을 온도분포와 속도벡터를 통해서 확인할 수 있다. [그림 10]은 분전반 내부의 전선에서 화재가 발생하였을 경우 위치별 온도 및 연기 농도를 나타내고 있다. 일반적인 온도센서의 화재 감지 온도는 74℃이기 때문에 실제 분전반 내부에서 발생하는 화재를 감지하기 위해서는 온도 센서보다 연기 센서가 훨씬 효과적임을 알 수 있다.

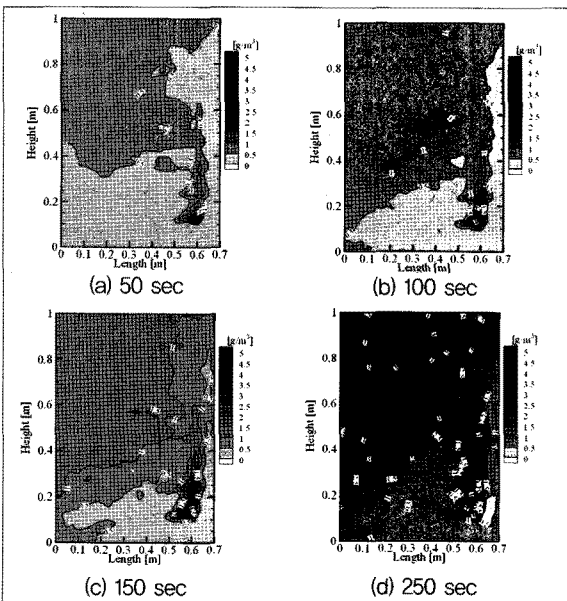
[그림 11]은 분전반 내부에서 화재가 발생하였을 경우 발화 및 화염전파, CO분포, 내부 온도 분포를 나타내었다. 그림에서 CO의 농도의 경우 수십 초 내에 100ppm 이상 상승함을 알 수 있었으며 공간 내부 온도의 상승은 CO의 농도의 상승에 비해서 매우 느린 것을 알 수 있었다.

2.3.3 수배전반 내부 화재 시뮬레이션

수배전반 내부에 화재가 발생하는 경우를 가정하여 [그림 12]와 같이 수배전반 1개 면의 앞쪽 부분에 대해서 모델링을 하고 화재 시뮬레이션을 수행하였다.

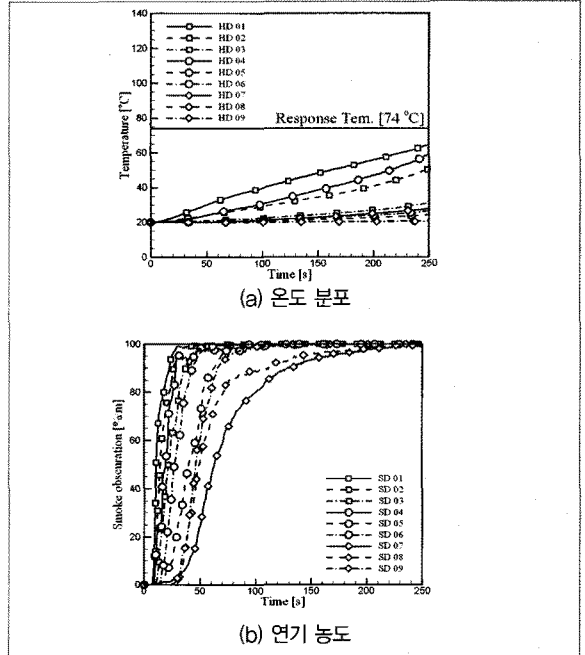


[그림 8] 분전반 내부 화재 발생시 시간에 따른 온도 및 유동 분포

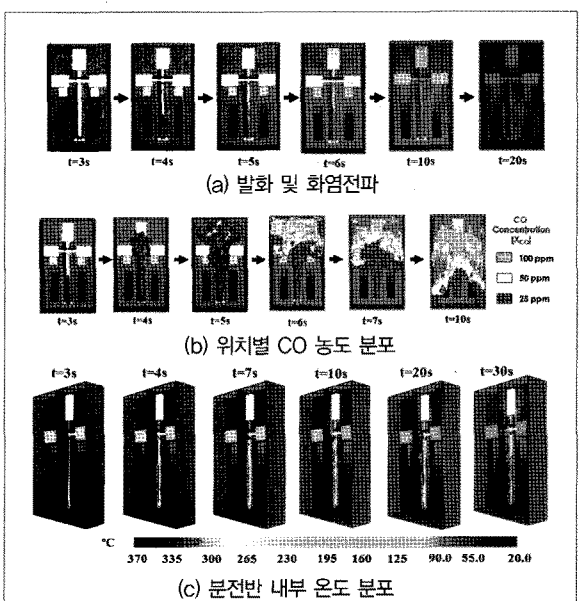


[그림 9] 분전반 내부 화재 발생시 시간에 따른 매연 분포

수배전반 화재 시뮬레이션에 사용한 해석 조건은 [그림 13]과 같이 사용하였으며 수배전반 상부 세 부분에서 CO를 검출하는 것으로 하고, 격자 크기는 1cm, 총 620,000개 정도의 격자를 생성하였다.



[그림 10] 분전반 내부 전선 화재시 위치별 온도 및 연기 농도

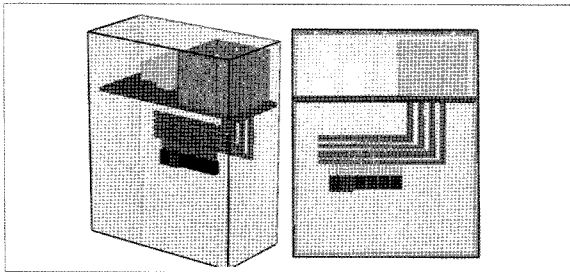


[그림 11] 분전반 내부 전선 화재 시뮬레이션 결과(발화 및 화염전파)

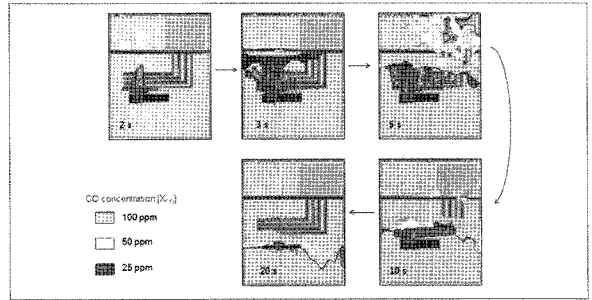
수배전반 내부에서 화재가 발생하고 발화 이후 화염이 전파되는 모습을 [그림 14]에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 상층부 선반으로 인해 화재의 전파가 지체되나 연기의 경우는 5초 이내에 상부에 도달하는 것을 알 수 있다.

수배전반 내부에서 화재가 발생하였을 경우 내부 공간의 CO 농도를 [그림 15]에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 CO의 경우 상부에 5초 이내에 100 ppm 까지 상승함을 알 수 있으며 화재발생에 따른 조기감지를 위해 CO센서를 사용이 가능한 것을 알 수 있다. [그림 16]에는 수배전반 내부 온도 분포를 나타내었고, 분전반 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 화재 시 온도의 상승은 CO농도의 상승에 비해 상대적으로 느림을 알 수 있다. 발화 후 선반 아래 연층 확산이 이루어지는 시간은 3초 이후부터이며 이후 약 10초 이내에 수배전반의 상부까지 연층 확산이 일어날

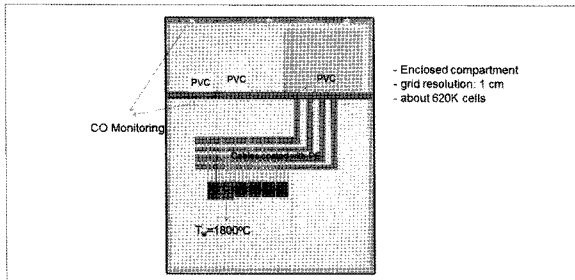
것으로 예측되며 발화 후 약 3초가 경과하면 선반 아래면의 CO 농도는 100ppm을 초과하고, 10초가 경과한 이후에는 수배전반 상부 대부분의 영역에서 CO농도가 100 ppm을 초과하는 것으로 예측된다.



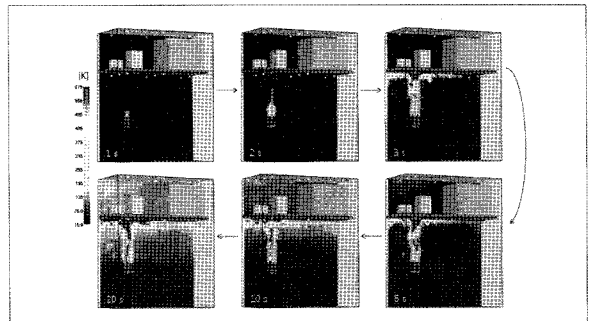
【그림 12】 수배전반 화재 시뮬레이션을 위한 형상 모델링



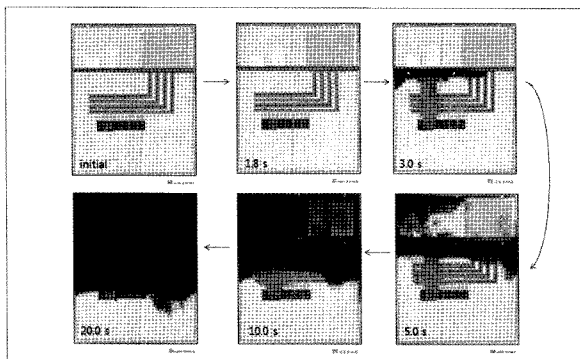
【그림 15】 수배전반 내부 화재시 CO 농도



【그림 13】 해석 조건



【그림 16】 수배전반 내부 화재시 온도 분포



【그림 14】 수배전반 내부 화재시 화염 및 연기 전파

3. 결 론

분전반이나 수배전반의 내부에서 화재가 발생할 경우 화재 발생의 징후를 사전에 감지하고 관리하기 위한 센서의 종류 선택과 센서의 부착위치 등을 파악하기 위하여 화재발생시 분전반과 수배전반 내부에서 화염의 전파와 발생하는 CO의 농도, 온도분포 등에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 수행결과 분전반 내부에서 화재 발생시 연기의 경우 5초 이내에 상부도착, 10초 경과후 CO농도가 100ppm을 초과하는 것으로 나타났으며 CO의 경우 내부온도상승보다 빠르게 증가하는 것으로 나타났다. 분전반이나 수배전반 내부에서 발생할 수 있는 화재를 감지하고 예방하기 위하여 화재발생 징후중의 하나인 가스검출 즉 CO를 사전에 검출하여 감시하고 관리하면 분전반이나 수배전반과 같은 공간에서 발생할 수 있는 전기화재를 사전에 예방이 가능할 것으로 판단된다. 분전반 및 수배전반 화재 시뮬레이션 결과를 바탕으로 지능형 분전반 및 수배전반 등을 활용하는 전기안전 관리시스템의 전기화재 예방기술에 활용이 가능할 것이다. ❖