

# 케이블 화재의 화염전파 해석을 위한 FDS 모델의 격자민감도 평가

김성찬 · 이성혁<sup>\*†</sup>

경일대학교 소방방재학부 · <sup>\*</sup>중앙대학교 기계공학부  
(2008. 7. 11. 접수 / 2008. 8. 12. 채택)

## Assessment of Grid Sensitivity in the FDS Field Model to Simulate the Flame Propagation of an Electric Cable Fire

Sung Chan Kim · Seong Hyuk Lee<sup>\*†</sup>

School of Fire and Disaster Prevention, Kyungil University,  
<sup>\*</sup>School of Mechanical Engineering, Chung Ang Univeristy  
(Received July 11, 2008 / Accepted August 12, 2008)

**Abstract** : The present study has been conducted to examine the effect of grid resolution on the predicted results for electric cable fire using pyrolysis model in FDS(Fire Dynamics Simulator, version 5). The grid independent test for different grid resolutions has been performed for a PE coating cable and the grid resolution is defined by the non-dimensional characteristic length of fire and mean grid size. The calculated maximum heat release rate and mean flame spread rate were almost constant for higher grid resolution of 20~25 and the computing time for the grid resolution takes approximately 20hours to solve flame propagation with pyrolysis model. The geometrical simplification of a electric cable dose not greatly affect on the maximum heat release rate and flame spread rate and the rectangular approximation of cable shape gives acceptable result comparing with the round cable with stepwise grid.

**Key Words** : cable fire, pyrolysis, fire simulation, fire propagation, grid sensitivity

### 1. 서론

일반적으로 에너지관련 화재는 발생 근원에 따라 가스나 유류화재등과 같이 자원 자체에서 발생하는 화재와 변환된 에너지의 전달 혹은 사용과정에서 발생하는 화재로 분류될 수 있다. 에너지 자원 자체에서 발생하는 화재의 경우 발화 및 화재전파의 메커니즘이 비교적 잘 알려진 편이지만 전기화재와 같이 변환된 에너지의 수송과정에서 발생하는 화재의 경우 전기적 에너지가 열적에너지로 변환되는 과정에서 복잡한 발화메커니즘을 가지고 있고 전기설비의 가연물에 대한 화재물성이 상대적으로 부족하여 화재특성을 해석하는데 어려움이 있다. 특히 전기화재와 관련된 연구는 발화의 주요 원인이 되는 누전이나 합선 등의 전기시스템 이상 징후를 사전에 감지하여 화재 발생이전에 대응하고자 하는 사전 대응에 대한 부분과 발생된 전기화재를 조

기에 감지하고 효과적으로 진압하기 위한 사후 대응 부분으로 구분할 수 있다. 일반적으로 발화 이전 시스템의 이상 징후와 관련된 부분은 전기공학적인 관점에서 접근되고 발화이후의 화재발달과 관련된 부분은 화재공학적인 관점에서 접근된다. 특히 전기시스템의 절연을 위해 사용되는 대부분의 폴리머 재료들은 화학적 구조가 복잡하기 때문에 화재특성을 정량적으로 평가하는데 어려움이 크다. 전기 및 통신 케이블 화재의 경우 절연피복의 연소반응은 다량의 유독성가스와 매연(soot)을 생성할 뿐만 아니라 화염 및 주변으로부터의 열순환(heat feedback) 및 전선을 통한 전도열전달에 기인한 열해리(pyrolysis)를 통하여 공간에서 공간으로의 케이블을 따라 급속히 화재가 전파되어 화재진압에 큰 어려움을 야기한다. 따라서 케이블 화재의 효율적인 감지 및 초기 화재진압을 위해서는 케이블 화재의 발달특성과 연소생성물 특성을 화재 역학적으로 이해하는 것이 무엇보다 중요하다.

Alvares 등은<sup>1)</sup> 케이블 화재발생으로 인한 공간 내

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
shlee89@cau.ac.kr

에서 연층(smoke layer)의 성장과 연층에서의 연기 및 HCl 농도 그리고 연기 감지기 및 스프링클러의 작동을 예측하기 위하여 케이블의 연소율과 발열량, 연기 및 HCl 생성율에 기초한 해석모델을 제시하였으며 이를 HTE(Hinsdale Telephone Exchange) 화재 사고의 보고 자료<sup>2)</sup>와 비교 검토하여 화재전파 특성을 분석하였다. Hietaniemi 등<sup>3)</sup>은 FDS(v.4) 모델의 타당성을 검증하기 위하여 건물 내 공동구에서의 케이블 화재에 대하여 FDS 모델의 해석결과와 실험결과를 비교분석하였다. FDS 모델에 의해 해석된 결과는 실험의 발열량과 공간의 온도분포를 비교적 잘 예측하였다. 그러나 공동구 공간의 크기에 비하여 케이블의 직경이 매우 작기 때문에 수치 해석을 위한 격자수가 제한되고 케이블 화재의 발달특성을 비교하기 위해서 케이블의 직경이 실제 실험에 사용된 케이블에 비해 약 2배 정도 크게 설정하고 케이블의 상부와 하부만이 연소된다고 가정하고 유효 연소면적만 유사하도록 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그러나 수치해석 모델에서 가연물의 화염 전파는 가연물 자체의 물성뿐만 아니라 가연물의 기하학적 형상 및 격자크기 등에 큰 영향을 받기 때문에 해석 결과의 타당성을 평가하는데 무리가 있다.

고체가연물의 화염전파현상은 복잡한 열전달, 열해리 및 연소반응기구등으로 인해 신뢰성 있는 해석에 어려움이 있고 큰 오차가 발생할 여지가 많다. 이러한 물리적 어려움 이외에 화염전파 특성은 격자의 해상도나 기하학적 형상등의 수치해석 조건에 따라 큰 영향을 받기 때문에 모델링 과정과 해석에 어려움이 있다. 이러한 이유로 대부분의 기존 연구는 실험적인 접근을 통하여 케이블의 화염전파 특성 및 화재발달 과정을 정량화 하고 있다. 그러나 최근 들어 복잡한 물리적 과정을 해석하기 위한 모델이 연구되고 있고 고성능 컴퓨터에 의해 대용량의 계산이 가능하기 때문에 수치모사에 의한 케이블 화재특성을 해석하는 연구가 증가하고 있다.

본 연구에서는 케이블 화재특성에 미치는 수치해석 조건의 영향을 평가하기 위한 기초적인 연구로서 격자의 해상도와 기하학적 형상의 단순화가 단일 케이블 화재의 발달 특성에 미치는 영향을 정량적으로 파악한다. 이러한 기초 연구를 통하여 케이블 화재 현상을 보다 정확하게 모사하기 위한 수치해석 조건을 설정하는데 기여하고 효율적인 화재모델링을 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

## 2. 수치해석

### 2.1. 해석방법

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 혼합분율 연소 모델을 적용하였으며 고체의 경계를 다중층(multi-layer)으로 설정하여 열전달의 계산이나 고체표면에서의 열해리(pyrolysis)등을 해석하는데 보다 발전적인 모델을 제공하고 있다<sup>4,5)</sup>. FDS 5에서는 열해리 과정이 혼합물질의 다단계 반응으로 구현이 가능하고  $i$  가연물의  $j$  번째 반응에서의 반응율( $r_{ij}$ )이 다음과 같이 Arrhenius 식에 의해 계산된다.

$$r_{ij} = \left( \frac{\rho_{s,i}}{\rho_{s,o}} \right) A_{ij} \exp \left( - \frac{E_{ij}}{RT_s} \right) \max(0, T_s - T_{ih}) \quad (1)$$

$A$ 는 빈도계수(frequency factor)이고  $E$ 는 활성화 에너지(activation energy),  $R$ 은 일반기체상수를 나타낸다. 본 연구에서는 단일 물질에 대하여 일단계 반응을 고려하였으며 고체 가연물은 열해리에 의해 모두 연료증기로 변환되고 수증기나 잔존물은 생성되지 않는 것으로 가정한다. 각 시간 스텝에서의 반응율( $r$ )은 아래와 같이 단순화된다.

$$r = A \exp \left( - \frac{E_a}{RT_s} \right) \quad (2)$$

일반적으로 복합물질에 대해서  $A$ 와  $E$ 값을 직접 적용할 수 없는 경우 FDS 모델에서는 기준 온도(reference temperature)에 대한 기준 반응율(reference reaction rate)를 이용하여  $A$ 와  $E$ 값을 산정하게 된다. 본 연구에서의 기준반응율은  $0.1s^{-1}$ 값을 적용하였으며<sup>5)</sup> 기준 온도는 케이블의 가연 피복 재료를 폴리에틸렌(PE)으로 가정하여 PE의 열분해 온도로써  $411^{\circ}C$ 를 적용하였다<sup>6)</sup>. 열해리 과정을 통해 생성된 연료증기(에틸렌)의 연소반응은 2변수 혼합분율 모델을 사용하였으며 에틸렌의 연기생성율(soot yield rate)과 일산화탄소 생성율(CO yield rate)는 각각 0.06과 0.024를 적용하였다<sup>7)</sup>.

### 2.2. 해석대상

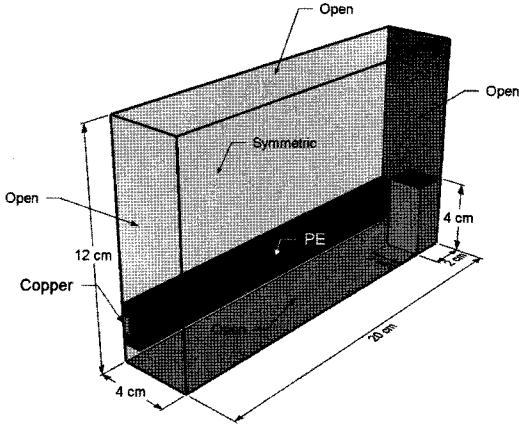


Fig. 1. Schematic of computational domain for FDS simulations of flame propagation along the cable.

FDS 모델의 화염전파 특성을 평가하기 위하여 Fig. 1에서 보는바와 같이 길이 20cm, 폭 4cm, 높이 12cm의 공간 내에 유효직경이 2cm인 케이블을 따라 복사가열체에 의한 점화에서부터 화염전파과정을 분석하였다. 케이블의 내부 도선의 물성은 구리로 가정하였으며 외부 피복재료는 폴리에틸렌으로 가정하였다. 수치해석에 적용된 물성은 Table 1과 같다.

Table 1. Material properties of the cable used in FDS simulation<sup>6,7)</sup>

Copper	Density: 8933kg/m <sup>3</sup>
	Specific Heat: 0.385kJ/kgK
	Conductivity: 401W/mK
Polyethylene (PE)	Density: 959kg/m <sup>3</sup>
	Specific Heat: 2.0kJ/kgK
	Conductivity: 0.43W/mK
	Heat of Reaction: 1296kJ/kg
	Heat of Combustion: 43400kJ/kg

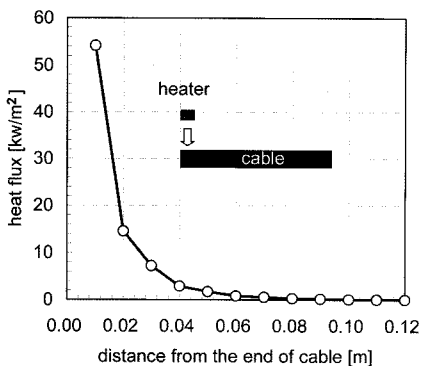


Fig. 2. Calculated heat flux on the cable surface heated by 200kW/m<sup>2</sup> radiant heater.

Table 2. Grid sizes for the computation domain

	No. of grids	grid sizes (mm)
Case 1	7680	5.0×5.0×5.0
Case 2	15360	5.0×5.0×2.5
Case 3	30720	5.0×2.5×2.5
Case 4	38400	4.0×2.5×2.5
Case 5	60000	4.0×2.0×2.0
Case 6	61440	2.5×2.5×2.5
Case 7	120000	2.0×2.0×2.0

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

일반적으로 200kW/m<sup>2</sup>의 가열조건은 다른 점화 시험방법에 비해 상대적으로 높은 가열조건이지만 초기에 빠른 발화를 유도하여 계산시간을 단축시키기 위하여 상대적으로 높은 열유속을 제공하였다. Fig. 2는 주어진 가열조건에 대하여 케이블의 길이 방향에 따라 표면에서의 열유속을 나타낸다. 일반적으로 ASTM-2058 시험에 의한 PE의 임계열유속 (critical heat flux)은 약 15.0kW/m<sup>2</sup>으로 알려져 있다<sup>7,8)</sup>. 본 수치해석의 경우 케이블의 끝단에서 약 2.0cm 영역정도가 직접 발화가 가능한 영역이고 그 외 10cm 이상의 케이블은 발화된 화염의 열순환 (heat feedback)에 의해 화염전파가 이루어지게 된다.

화염전파 및 화재성장에 미치는 격자 해상도의 영향을 분석하기 위하여 본 연구에서는 Table 2와 같은 격자조건에 대하여 수치해석을 수행하였다. 전체 계산은 쿼드코어(Quad-core) 2.4GHz CPU와 4GB RAM, 32비트 운영체제 하에서 영역분할 없이 직렬계산(serial computation)을 통해 이루어졌다.

### 3. 해석 결과

Fig. 3은 격자크기가 각각 5.0mm, 2.5mm, 2.0mm인 정방형 격자에 대하여 시간에 따른 발열량의 변화를 나타낸다. 격자 크기가 2.5mm와 2.0mm인 경우 최대발열량에 도달하는 시간이 2.0mm 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 5.0mm인 경우 최대발열량이나 초기 화재성장과정에서 다소 큰 차이를 나타내고 있다. 일반적으로 화재의 특성 길이는 다음과 같이 정의 된다.

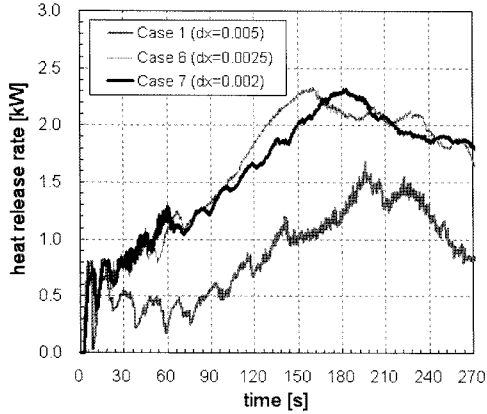


Fig. 3. Predicted heat release rate profiles using different grid sizes.

$$D^* = \left( \frac{\dot{Q}}{\rho_\infty C_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (3)$$

여기서  $\dot{Q}$ 은 발열량,  $\rho_\infty$ 는 외기 밀도,  $C_p$ 는 비열,  $T_\infty$ 는 외기온도,  $g$ 는 중력가속도를 나타낸다.

격자의 해상도는 화재의 특성길이에 대한 미소 격자의 대표길이로 정의되고 일반적인 구획 화재실에서 열 및 연기거동에 대한 격자해상도는 약 4~16 정도에서 독립성을 가진다고 보고되고 있으나<sup>9)</sup> 이는 해석영역의 크기나 해석모델에 의해 크게 의존하기 때문에 보편적인 값으로 보기에는 무리가 있다.

Fig. 4는 격자해상도에 따른 화염전파 과정중의 최대발열량을 나타낸다. 격자해상도가 약 20 이하인 경우 최대발열량은 상대적으로 낮게 나타났지만 20 이상인 경우에는 표준편차가 약 0.015 정도로 격자해상도에 관계없이 거의 일정한 값을 나타냈다.

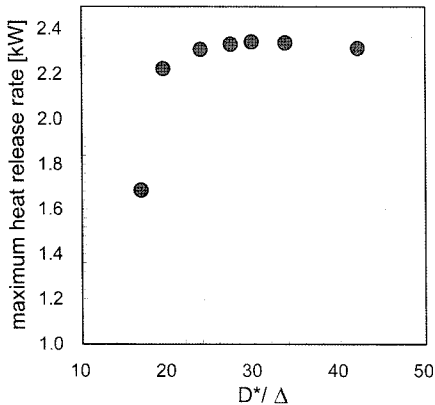


Fig. 4. Predicted maximum heat release rate using different grid sizes.

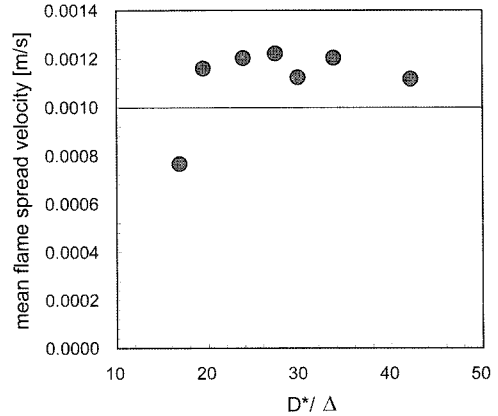


Fig. 5. Calculated mean flame spread rate using different grid sizes.

Fig. 5는 격자해상도에 따른 평균 화염전파 속도를 나타낸다. 열순환 과정에 의한 고체가연물의 연소율은  $5 \sim 50 \text{g/m}^2 \text{s}$  정도로 알려져 있고 보통 연소율이  $5 \text{g/m}^2 \text{s}$  이하에서는 화염이 전파되지 못하고 소화되는 것으로 알려져 있다<sup>8)</sup>. 본 연구에서는 각 격자에서 연소율이  $5 \text{g/m}^2 \text{s}$  이상이 되는 위치에서 화염전파가 이루어지는 것으로 가정하여 화염전파속도를 산정하였다. 일반적으로 PE/PVC 케이블에 대한 화염전파의 전파속도는 외부유동 조건이 없는 경우 약  $1 \text{mm/s}$ 의 크기 정도를 가지는 것으로 보고되고 있다<sup>10)</sup>. FDS 계산에서 평균화염 전파 속도는 격자해상도가 20 이하인 경우에는  $0.8 \text{mm/s}$  정도를 나타내고 격자해상도가 20 이상인 경우에는 약  $1.2 \text{mm/s}$  정도로 비교적 일정한 값을 가지는 것으로 나타났다. 일반적으로 조밀한 격자가 성긴격자에 비해 좋은 해상도의 결과를 제공하고 수치적으로 타당한 결과를 제공하지만 격자수의 증가는 계산시간과 직접적으로 관련되어 수치모사 과정의 제약조건으로 작용하기 때문에 해석결과와 계산시간을 동시에 고려하여 최적격자를 선정하여야 한다.

Fig. 6은 격자수에 따른 계산 시작 후 300초까지 화재가 전파되는데 소요된 계산시간을 나타낸다. 전반적으로 격자수와 계산시간은 선형적인 관계를 나타내고 있으며 격자수가 약 30,000개인 경우 계산시간은 약 17시간 정도 소요되었으며 격자수가 120,000개인 경우 계산시간은 약 70시간 정도로써 4배 이상의 계산시간을 요구하는 것으로 나타났다. 따라서 화재발달특성과 계산량의 경제성 등을 고려할 때 격자해상도가 약 20~25 정도에서 화재발달 특성을 예측하는데 있어서 격자의 독립성을 확보함과 동시에 다양한 조건변화에 대한 수치해

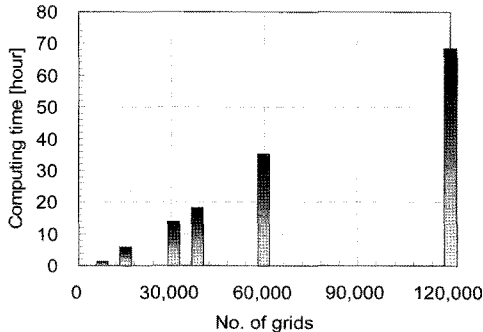


Fig. 6. Comparison of computing time for different grid sizes.

석 과정에서 계산용량의 무리가 없을 것으로 판단된다.

FDS 모델은 직교정렬격자계를 이용하고 있기 때문에 곡면형상이나 기하학적으로 복잡한 형상을 계단식격자(stepwise grid)로 가정하여 해석한다. 본 연구에서는 케이블의 형상을 사각으로 가정하여 실제 케이블의 형상과는 다소 차이가 발생할 수 있다. 이러한 기하학적 형상의 단순화가 화재발달에 미치는 영향을 파악하기 위하여 본 연구에서 사용된 사각케이블과 체적이  $30.0\text{cm}^3$ 으로 동일하며 유효직경이 2.2 cm인 원형케이블을 계단식 격자가정을 이용하여 비교분석 하였다. Fig. 7은 사각 케이블과 계단식 격자를 이용한 원형 케이블에 대한 시간에 따른 발열량 변화를 나타내고 있다. 그림에서 보는바와 같이 화재발생 초기의 발열특성은 매우 유사한 경향을 보이고 있으나 계산시작 약 50초경과 후 사각케이블의 발열량의 증가가 원형케이블에 비해 상대적으로 빠르게 일어남을 보여준다. 이는 원형과 사각케이블의 노출면적과 형상계수(view factor)의 차이에 기인하는 것으로 가열원에서 케이블 표면으로 도달하는 열유속에 차이가 발생하기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 전체적으로 최대발열량은 사각케이블이 약 2.3kW, 원형 케이블이 약 2.1 kW로써 약 0.2kW 정도의 차이를 보이고 있다. 사각 케이블의 단순화는 최대발열량이나 화염전파속도에서 원형케이블과 다소 차이는 있으나 모델링 과정의 복잡함이나 계산격자의 제한성 등을 고려할 때 받아들일만한 결과로 판단된다.

Fig. 8은 케이블의 화염전파과정을 단위체적당 발열량이  $600\text{kW/m}^3$  이상인 등면(iso-surface)을 시간에 따라 나타낸다. 초기에 발생한 화염은 케이블을 따라 전파되고 약 3분 정도 경과 후 전체 케이블에서 연소반응이 일어남을 알 수 있다. 연소반응이 진행됨에 따라 가연물의 질량은 지속적으로 감소하고

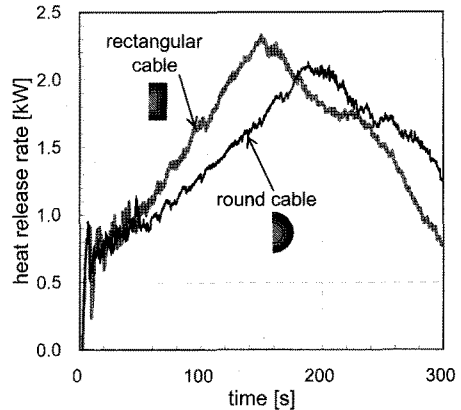


Fig. 7. Comparison of heat release rate between a rectangular shape and round cable with stepwise grid approximation.

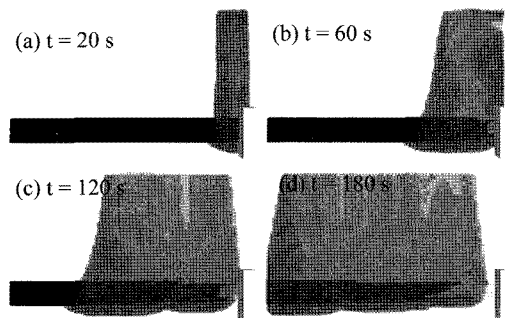


Fig. 8. Computed flame propagation process represented by iso-surface heat release rate of unit volume at  $600\text{kW/m}^3$ .

격자 내에 가연물의 질량이 완전 소모될 경우 초기 고체 가연물로 설정된 격자는 기상의 격자로 변환되어 내부 비가연성 전도체만이 존재하게 된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 케이블 화재특성에 미치는 수치 해석 조건의 영향을 평가하기 위한 기초적인 연구로써 격자의 해상도와 기하학적 형상의 단순화가 단일 케이블 화재의 발달 특성에 미치는 영향을 화재전용 수치해석 프로그램인 FDS 모델을 이용하여 정량적으로 분석하였으며 수치계산을 통해 얻은 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

일반적으로 FDS 모델에서 수치해석 결과에 독립적인 격자해상도는 공간화재에 대하여 약 4~16 정도로 알려져 있으나 본 연구와 같이 열해리 모델을 통해 화염전파를 해석하는 경우 격자해상도는 약 20 이상의 값에서 최대발열량이나 화염전파속도의 결과가 격자에 독립성을 가지는 것으로 나

타났다.

FDS 모델에 의해 계산된 케이블 화재의 평균 화염전파속도는 약 1.2mm/s로써 이전 연구의 실험결과 값인 약 1mm/s 정도와 비교적 잘 일치함을 보였다.

계산 시간은 격자수에 선형적으로 비례하는 것으로 나타났으며 격자해상도가 약 20~25인 경우 총 계산시간은 약 20시간 내외가 소요되었다. 이러한 계산용량은 다양한 조건변화에 대한 화재발달 특성을 예측하는데 있어서 격자의 독립성을 확보함과 동시에 경제적인 계산을 수행하는데 무리가 없을 것으로 판단된다.

본 연구에서 수행된 케이블의 사각형상 가정은 원형케이블에 비해 화재성장속도를 다소 빠르게 예측하지만 전체적인 최대발열량의 크기정도에 있어서 유사한 결과를 보여주고 있다.

**감사의 글 :** 본 연구는 지식경제부의 에너지기술혁신 프로그램으로 지원되었으며 이 논문은 “차세대에너지안전연구단”의 연구 결과입니다(세부과제번호 : 2007-M-CC23-P-06-1-000). 또한, 이 논문은 2008년도 중앙대학교 우수연구자연구비 지원에 의한 것임.

## 참고문헌

- 1) N. Alvares and A. C. Fernandez-Pello, “Fire initiation and spread in overloaded communication system cable trays”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 21, pp. 51~57, 2000.
- 2) Hinsdale Central Office Fire, Joint report of Office of State Fire Marshall and Illinois Commerce Commission Staff, March 1989.
- 3) J. Hietaniemi, S. Hostikka and J. Vaari, “FDS simulation of fire spread comparison of model results with experimental data”, VTT working papers, 1459-7683, pp. 33~38, 2004.
- 4) K. McGrattan, B. Klein, S. Hostikka and J. Floyd, “Fire Dynamics Simulator (Version 5) - User's Guide”, NIST SP-1019-5, 2008.
- 5) K. McGrattan, S. Hostikka, J. Floyd, H. Baum, R. Rehm and R. McDermott, “Fire Dynamics Simulator (Version 5) - Technical Reference Guide”, NIST SP-1018-5, 2008.
- 6) C. A. Harper, “Handbook of Building Materials for Fire Protection”, McGraw-Hill, ISBN 0071388915, 2004.
- 7) A. Tewarson, “Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires”, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3-4, 2002.
- 8) J. G. Quintiere, “Principles of Fire Behavior”, Delmar Publishers, 1997.
- 9) USNRC, “Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Application”, NUREG 1824, United States Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, 2007.
- 10) J. Axelsson, P. V. Hees, P. Blomqvist, “Cable Fires in Difficultly Accessible Areas”, SP Report 2002:12, 2002.