



## FDS를 이용한 화재시 연소가스의 독성평가에 관한 비교 연구

정범진 · †이근원

한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원

(2014년 11월 27일 접수, 2015년 2월 17일 수정, 2015년 2월 18일 채택)

### A Comparative Study on the Toxicity Evaluation for Fire Smoke by FDS

Beom Jin Jeong · †Keun Won Lee

Occupational Safety & Health Research Institute, Korea Occupational Safety and Health Agency, Deajeon 305-380, Korea

(Received November 27, 2014; Revised February 17, 2015; Accepted February 18, 2015)

#### 요약

FDS (Fire Dynamics Simulator)는 화재안전공학 분야에서 가장 널리 사용되는 전산유체역학 소프트웨어로서 화재의 성장과 영향에 대한 다양한 평가에 응용될 수 있다. 본 연구에서는 화재시 발생하는 연소가스의 독성을 평가할 수 있는 유효복용분량 (Fractional Effective Dose, FED)와 유효부농도 (Fractional Effective Concentration, FEC) 수준을 예측하기 위하여 FDS 시뮬레이션에서 얻어진 다양한 결과를 활용하였다. 그러나 FDS에서 기본적으로 제공하는 출력값으로는 이러한 값을 직접적으로 구할 수 없으므로, 피난 시뮬레이션에서 얻어진 결과를 결부시켜 별도의 계산과정을 통하여 FED와 FEC 수준을 계산하였다. 특히, 2013년 11월에 FDS의 버전이 업데이트된 바 있어 본 연구에서는 동일한 조건에 대하여 FDS의 구버전과 신버전을 비교하여 시뮬레이션 하였으며, 그 결과 FED, FEC값에 있어서 두 버전사이에 평균 약 10%의 차이가 발생함을 확인 할 수 있었다.

**Abstract** - FDS (Fire Dynamics Simulator) is the most widely used computational fluid dynamics software in the fire safety engineering community, and it is applicable to various evaluations of fire growth and its effects. This study made use of a range of outputs from FDS simulation to predict FED (Fractional Effective Concentration) and FEC (Fractional Effective Concentration) levels which are often adopted to evaluate toxicity of fire smoke. As it is not possible to calculate these values directly from outputs of FDS, it was necessary to produce them by means of additional calculation procedures incorporating results of evacuation simulation. In this study, the latest version of FDS, which was recently updated in November 2013, was utilized for the purpose of quantitative comparison with the old version of FDS. As a result, it was found that they make about 10 percent difference on average in predicting FED and FEC levels for the cable fire case study.

**Key words** : fire, smoke, FED, FEC, FDS

#### I. 서론

화재시 건물의 거주관계 조건은 화재실의 온도,

가시도, 열복사량 등에 의해 평가될 수 있으며, 자극성 가스와 질식성 가스와 같은 독성 연소생성물을 조사하는 것에 의해서도 가능하다. 보통 독성 연소생성물은 크게 질식성가스와 자극성가스의 두 그룹으로 분류될 수 있다. 질식성가스에는 대표적으로 일산화탄소, 시안화수소, 이산화탄소, 저산소농도 등

†Corresponding author:leekw@kosha.net

Copyright © 2015 by The Korean Institute of Gas

이 포함되며 일정량 이상을 흡입할 경우 의식불명에 이어 질식에 의한 사망을 유발하는 것으로 알려져 있다. 자극성가스에는 염화수소, 브롬화수소, 불화수소, 이산화황, 질소산화물과 같은 무기산이 포함된다. 이러한 가스들은 눈, 코, 목 등에 통증을 동반한 자극을 일으키고 호흡곤란을 유발하여 저산소증을 일으키는 것으로 알려져 있다.

이러한 연소생성물의 독성은 유효복용분량(Fractional Effective Dose, FED)와 유효부분농도(Fractional Effective Concentration, FEC)로 표현될 수 있다[1]. 지난 2010년 스웨덴 룬드대학에서는 피난 과정 중에 화재연기가 피난자들에 미치는 영향을 평가하기 위해 전산유체역학과 피난시뮬레이션을 결부시키는 방법을 연구한 바 있다[2]. 이 연구에서는 두 종류의 서로 다른 케이블 화재 실험데이터를 활용하였는데 한 가지는 할로겐 화합물이 포함된 것이고 또 하나는 그렇지 않은 케이블이었다. 할로겐 화합물 케이블로는 PVC가 사용되었고 연소실험시 일산화탄소, 이산화탄소 및 염화수소가 연소생성물로 발생되었다. 이러한 실험데이터를 바탕으로 실제 존재하는 대학건물에 대하여 화재시나리오를 구성하고 FDS 버전5를 사용하여 시뮬레이션 하였다. 이와 더불어 같은 건물에서 실제 실행한 피난실험 결과를 바탕으로 피난 시나리오를 구성하고 이에 대한 피난시뮬레이션이 이루어졌으며, 시간에 따른 각 피난자 개개의 FED와 FEC 수준을 평가하기 위해 최종적으로 FDS 시뮬레이션 결과와 피난 시뮬레이션 결과를 결부시켜 MATLAB을 이용하여 계산하였다.

한편 미국 국립표준기술연구소(National Institute of Standards and Technology, NIST)에서 개발한 화재안전공학 전용 소프트웨어인 FDS는 2000년 2월에 최초의 공식버전이 발표된 이래 그동안 버전5가 주로 사용되었으나 2013년 11월에 FDS 버전6이 공식적으로 발표된 바 있다. 이 새로운 버전에서는 향상된 난류모델, 경계조건 처리방법에 있어서의 개선, 새로운 연소모델의 채택 등 새로운 기능이 대폭 추가되어 계산의 정확도가 상당히 향상된 것으로 알려져 있다[3]. 이러한 새로운 해석 모델들은 앞서 서술한 FED, FEC 계산에 필요한 연소가스 농도와 직결되는 변화로서 이것이 최종적인 독성 평가값에 얼마나 영향을 주는지 살펴 볼 필요가 있다. 본 연구에서는 과거 룬드대학에서 제시한 PVC 연소실험 데이터와 방법론을 토대로 새로운 FDS 버전6을 적용하여 FED, FEC 수준을 계산하고 FDS 버전에 따른 시뮬레이션 결과를 비교 분석하였다. 이들 연구 결과는 FDS를 이용한 연소가스의 독성 평가시 소프트

웨어 버전에 따른 정량적 차이점을 제시하여 건물의 화재안전 설계시 안전성 확보에 기여하고자 한다.

## II. 시뮬레이션 및 계산

### 2.1. FDS 시뮬레이션

FDS 시뮬레이션의 해석대상 공간은 Fig.1 과 같이 길이 30m, 너비 9m, 높이 7m의 실제 존재하는 대학 건물로서 1층과 내부에 발코니가 있는 2층 구조이며, 1층과 2층 사이는 아트리움으로 개방되어 있는 공간이다.

화재시뮬레이션은 비교를 위해 FDS 버전 5와 6에서 모두 시행되었다. 시뮬레이션 대상 건물의 규모가 크기 때문에 계산시간이 상당히 많이 걸리므로 병렬 연산에 의해 수행되었다. 사용된 컴퓨터 환경은 3.0GHz CPU, 2GB 메모리를 가진 16개의 프로세서를 통해 동시에 연산이 이루어졌다. 건물의 전체적인 기하학적 모델링은 아래 그림과 같으며 전체 건물을 조밀한 격자로 해석하기에는 너무나 많은 시간과 자원이 소모되므로 중요도에 따라 10개의 격자로 나누어 모델링하였다.

화원과 그 수직화염 인근 지역은 조밀한 격자로, 아트리움과 발코니는 중간 격자, 그리고 나머지 중요도가 떨어지는 화원에서 멀리 떨어진 지역은 큰 격자를 사용하였다. 위 그림에서 보는 바와 같이 화원의 위치는 건물 오른쪽 끝 벽면에 위치한다. 전체 계산 격자의 수는 약 333만개이다. 격자 크기는 FDS 사용자 매뉴얼[3]에 따라 계산되었으며 사용된 각 격자의 크기는 Table 1과 같다.

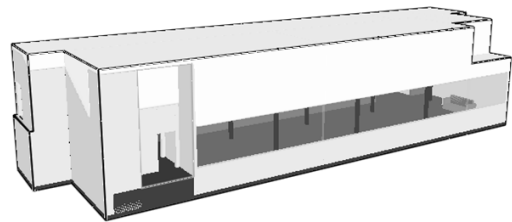


Fig. 1. Geometry model of the building.

Table 1. Mesh Resolution

Resolution	Coarse	Medium	Fine
D*/dx	4	10	16
dx(mm)	241	96	60
Cell size(mm) used	200	100	50

```

--- fuel ---
&REAC ID          = 'PVC'
  FYI              = 'Cable M - n(C_2 H_3 N_0 O_0 Cl_1),
  IDEAL            = .FALSE.
  HEAT_OF_COMBUSTION = 16533.33
  SOOT_YIELD       = 0.1
  CO_YIELD         = 0.133333333333
  N                = 0.
  C                = 2.
  H                = 3.
  O                = 0.
  OTHER            = 1.
  MW_OTHER         = 35.5 /

&SURF ID='BURNER', HRRPUA=832., TAU_Q=-1168, COLOR='RASPBERRY' /

```

Fig. 2. PVC combustion modelling in FDS5.

```

--- My fuel ---
&SPEC ID = 'C0506T1',          FORMULA = 'C2H3Cl' /
&SPEC ID = 'OXYGEN',           LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
&SPEC ID = 'NITROGEN',        LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
&SPEC ID = 'HYDROGEN CHLORIDE', LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
&SPEC ID = 'WATER VAPOR',     LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
&SPEC ID = 'CARBON MONOXIDE', LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
&SPEC ID = 'CARBON DIOXIDE',  LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
&SPEC ID = 'SOOT',           LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /

&SPEC ID = 'AIR', BACKGROUND=.TRUE.,
  SPEC_ID(1) = 'OXYGEN', VOLUME_FRACTION(1)= 1,
  SPEC_ID(2) = 'NITROGEN', VOLUME_FRACTION(2)= 3.76 /
&SPEC ID = 'PRODUCTS',
  SPEC_ID(1) = 'WATER VAPOR', VOLUME_FRACTION(1) =          1 ,
  SPEC_ID(2) = 'NITROGEN', VOLUME_FRACTION(2) =          6.882142857 ,
  SPEC_ID(3) = 'CARBON DIOXIDE', VOLUME_FRACTION(3) =          1.181547619 ,
  SPEC_ID(4) = 'CARBON MONOXIDE', VOLUME_FRACTION(4) =          0.297619048 ,
  SPEC_ID(5) = 'HYDROGEN CHLORIDE', VOLUME_FRACTION(5) =          1 ,
  SPEC_ID(6) = 'SOOT', VOLUME_FRACTION(6) =          0.520833333 /

&REAC FUEL = 'C0506T1',
  SPEC_ID_NU = 'C0506T1','AIR','PRODUCTS', NU=-1, -1.830357143, 1,
  HEAT_OF_COMBUSTION = 16533.33, CHECK_ATOM_BALANCE=.TRUE. /

&SURF ID='BURNER', HRRPUA=832., TAU_Q=-1168, COLOR='RASPBERRY' /

```

Fig. 3. PVC combustion modelling in FDS6.

2013년 11월에 발표된 FDS 버전6는 이전 버전인 5에 비해 특히 연소모델에서 큰 변화가 생겼다. 버전5에서는 기본적으로 혼합분율(mixture fraction) 모델이 적용되었다. 즉, 연소된 연료와 미연소된 연

료의 질량 분율만이 FDS에서 명시적으로 계산되기 때문에 사용자는 연소 반응물과 생성물을 구체적으로 지정하지 않았다. 그러나 FDS6에서는 반응식의 공기, 연료, 연소생성물 중에 연료와 연소생성물을 집

**Table 2.** input of combustion modelling

material	PVC
Formula	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl
Soot yield(g/g)	0.1
CO yield(g/g)	0.1333
Heat of Combustion(kJ/kg)	16,533.33
Peak heat release rate(kW)	1,000
Time to reach peak HRR(s)	1,168

합적으로 계산하는 혼합제어모델(mixing-controlled model)을 채택하였다. 만약 연료가 탄화수소와 같이 이미 FDS에 내장된 종류라면 화학양론반응식은 사용자에게 의해 지정될 필요가 없지만, 본 연구에서 분석하고자 하는 PVC와 같은 가연물은 연소 반응에 대한 화학양론식을 직접 제시해 주어야 한다. 본 연구의 연소 모델링을 위해 PVC 케이블의 적용하였으며 주요 물성치를 Table 2에 나타내었다.

Table 2의 데이터를 활용하여 FDS에서 화재를 모델링 할 때는 적용된 모델의 차이에 의해서 Fig. 2와 Fig. 3과 같이 버전에 따라 각각 다르게 구현되는 것을 알 수 있다. 전술한 바와 같이 FDS6에서는 이전 버전과는 다르게 공기량과 연소생성물의 생성량까지 입력해야 하는 것을 확인할 수 있었다.

**2.2. FED 와 FEC 계산**

일반적으로 건물내 화재 발생 시 연소가스의 독성을 평가할 수 있는 지표로는 FED와 FEC 수준을 평가한다. 본 연구에서는 FED와 FEC 수준은 ISO Technical Specification[5]에 따라 계산하였다. 화재시 발생하는 질식성 가스에 대한 FED를 계산하는 공식은 식(1)과 같다.

$$FED = \sum_{t_1}^{t_2} \frac{\varphi_{CO}}{35000} \Delta t + \sum_{t_1}^{t_2} \frac{\exp\left(\frac{\varphi_{HCN}}{43}\right)}{220} \Delta t \quad (1)$$

where,  $\varphi_{CO}$  is CO concentration in ppm

$\varphi_{HCN}$  is HCN concentration in ppm

$\Delta t$  is time increment in minutes

이산화탄소 농도가 2.0 vol% 이상일 경우, 위 공식의 각 항에 과호흡인자(hyperventilation factor)가 곱해져야 하며 식(2)와 같이 정의된다. 과호흡인자는 이산화탄소 농도 증가시 호흡 횟수가 증가하는

현상을 반영하기 위한 것이다.

$$v_{CO_2} = \exp\left(\frac{\varphi_{CO_2}}{5}\right), \quad (2)$$

$\varphi_{CO_2}$  is CO<sub>2</sub> concentration in %

자극성 가스에 대한 FEC는 식(3)과 같이 계산하였다.

$$FEC = \frac{\varphi_{HCl}}{F_{HCl}} + \frac{\varphi_{HBr}}{F_{HBr}} + \frac{\varphi_{HF}}{F_{HF}} + \frac{\varphi_{SO_2}}{F_{SO_2}} + \frac{\varphi_{NO_2}}{F_{NO_2}} + \frac{\varphi_{acrolein}}{F_{acrolein}} + \frac{\varphi_{formaldehyde}}{F_{formaldehyde}} + \sum \frac{\varphi_{irritant}}{F_{Cl}} \quad (3)$$

where,  $\varphi$  is concentration in ppm

여기서, F는 사람의 자력 거동이 불가능한 상태에 이르게 하는 각 자극성가스의 한계 농도이다. HCl의 경우 1000ppm을 사용하였다. 독성가스와 더불어 복사열과 대류열에 의해서도 FED를 계산할 수 있으나 여기서는 독성가스에 의한 FED 수준만 고려하기로 하였다.

본 연구에서는 특정 공간에 대한 FED나 FEC 값을 평가하는 것이 아니고 실제 건물에 있는 재실자가 피난과정에서 독성연기에 노출되는 수준을 시간에 따라 개인별로 평가하고자 하는 것이기 때문에 피난시물레이션 결과를 필요로 한다. 본 연구에서는 앞에서 기술한 바와 같이 룬드대학의 피난시물레이션 결과를 인용하였다[2]. FED는 시간에 따라 축적되는 값이기 때문에 계속 움직이고 있는 사람에 대한 데이터를 FDS로부터 직접적으로 얻을 수는 없었다. FDS는 특정 위치에서의 FED 결과값만 제공할 수 있기 때문이다. 따라서 피난시물레이션 결과로부터 시간에 따른 피난자의 위치정보를 얻을 수 있었고, 이를 FDS에서 얻어진 각종 독성가스 정보와 결합하여 FED와 FEC를 별도로 계산할 수 있었다. 이러한 별도의 계산은 MATLAB 소프트웨어를 활용하였으며 MATLAB에서는 다음과 같은 연산이 이루어진다.

FED와 FEC를 계산하기 위해서 FDS 시물레이션으로부터 가스온도와 밀도, 수트(soot)와 이산화탄소의 질량분율(mass fraction) 등을 출력하고 이상기체 상태방정식에 의해 농도(kg/m<sup>3</sup>)로 변환한다. 이때 각 시간 단계별로 이산화탄소의 농도를 확인하여 2 vol% 이상일 경우 FED의 각 항에 과호흡인자를 곱해주어야 한다. HCl의 농도를 계산하기 위해서는 실험데이터[2]를 기초로 변환인자(conversion factor)를 일산화탄소 농도에 곱해서 구한다. 여기서 변환인자란 일산화탄소 수율(yield)에 대한 HCl 수율(yield)의 비로 정의한다. 본 연구에서는 변환인자로 2.7625

를 적용하여 계산하였다.

정의에 의하면, FED와 FEC가 1.0일 경우 평균적인 신체조건인 사람들이 스스로 피난할 수 없는 무기력 상태에 이르는 것을 의미한다. 그러나 노약자나 환자와 같이 연기독성에 보다 민감하고 신체적으로 취약한 계층까지 고려한다면 일종의 안전율을 감안하여 거주한계조건으로서 1.0 대신에 0.3을 적용할 수 있다[5]. 따라서 본 연구의 모든 시뮬레이션 결과와 해석에서는 평가 기준으로 0.3을 적용하였다.

### III. 결과 및 고찰

FED의 계산식에는 시안화수소(HCN)가 포함되고, FEC의 계산에는 아크롤레인, 포름알데히드 등이 포함될 수 있으나, 본 연구에서는 PVC 케이블을 화재 실험데이터로 활용하였기 때문에 FED는 일산화탄소 성분만 의해서만 계산하였고, FEC는 염화수소 성분만 의해서만 계산되었다. 피난자가 화재발생 시 연기에 노출되는 시간에 영향을 주는 화재감지 시간과 알람시간은 FDS 시뮬레이션 결과로부터 90초로 결정되었다. Table 2에서 제시한 바와 같은 동일한 케이블화재에 대하여 FDS 버전5와 6에서 시뮬레이션 하였고, 이 결과를 다시 피난시뮬레이션 결과와 결합하여 MATLAB으로 계산한 결과를 Table 3에 나타내었다. Table 3에서 나타내는 값은 시뮬레이션 대상 건물 내에서 피난하고 있는 사람들에게 폭로되고 있는 FED, FEC 수준을 나타낸 것이다.

Table 3의 결과를 보면 FDS의 버전에 따라 평균 약 10%의 차이를 볼 수 있었다. FEC와 수트(soot)

농도의 최대값은 FED의 최대값에 비해 상당히 큰 차이를 보였다. 결과적으로 거주한계조건인 0.3 이상의 FEC에 노출되는 피난자의 수를 파악해보면 Table 4와 같이 FDS6의 경우, FDS5에서 계산했을 때에 비해 상당히 감소하는 것으로 나타났다.

각 피난자에게 노출되는 FED와 FEC 수준을 Fig. 4와 Fig. 5에 각각 나타내었다. 여기서 각 실선들은 개별 피난자에게 시간에 따라 노출되는 값을 나타낸다.

Fig. 6과 Fig. 7에서 FEC를 나타낸 그림에서의 붉은 점선은 전술한 FEC의 거주한계조건인 0.3을 나타낸다. 따라서 붉은 선 위쪽의 실선들은 허용되는 거주한계조건 이상의 FEC 수준에 노출되는 시간과 인원을 나타낸다고 할 수 있다. 새로운 버전의 FDS 시뮬레이션 결과로부터 이전버전에 비해 평균 약 10% 정도 낮은 FEC와 FED 값을 얻을 수 있었으며 이것은 다음과 같은 요인들에서 기인한 것으로 사료된다.

우선, FDS6의 새로운 연소모델인 "lumped species method"을 고찰해 볼 수 있다. 대부분의 FDS

Table 3. Summary of results in cable fires

OUTPUT		FDS5	FDS6	Deviation
FED <sub>CO</sub>	Avg.	2.54x10 <sup>-4</sup>	2.29x10 <sup>-4</sup>	9.8%
	Max.	0.00313	0.00295	5.8%
FEC <sub>HCl</sub>	Avg.	0.00472	0.00424	10.2%
	Max.	0.37497	0.32224	14.1%
Soot concentration (g/m <sup>3</sup> )	Avg.	0.00193	0.00173	10.4%
	Max.	0.15112	0.12988	14.1%

Table 4. People exposed to threshold FEC(≥0.3)

Version	Number of people affected
FDS5	8 of 446
FDS6	3 of 446

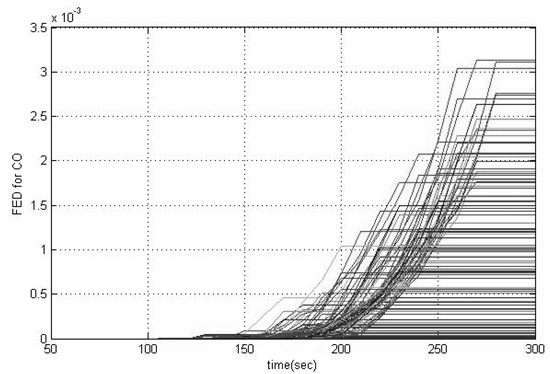


Fig. 4. FED by FDS5.

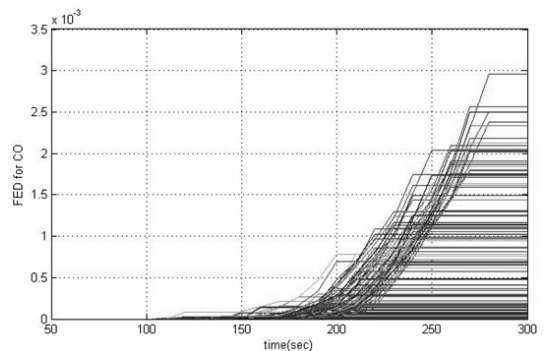


Fig. 5. FED by FDS6.

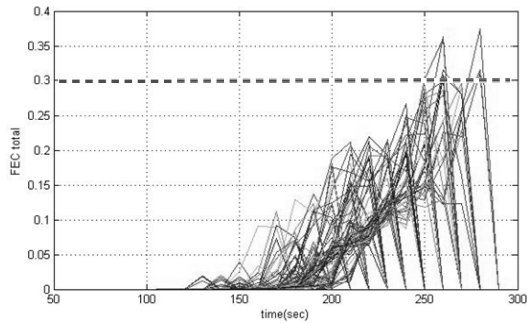


Fig. 6. FEC by FDS5.

적용에 있어서 화학반응 속도는 혼합에 걸리는 시간에 비하면 훨씬 빠르다는 가정이 유효하며 연료에 대한 평균 소스항(mean chemical source term)이 에디 소산개념(Eddy Dissipation Concept, EDC)에 의해 모델링된다[6]. 그러나 일산화탄소와 수트(soot)의 형성과 같은 복잡한 반응에 있어서는 혼합에 걸리는 시간 스케일과 화학반응에 걸리는 시간의 스케일이 중첩될 수 있다. FDS6는 이것을 새로이 개발된 부분혼합 회분반응기모형(Partially-Stirred Batch Reactor Model)로 해결하고 있다. 이 모델에서는 연소에 참여하는 각 물질의 질량분율에 기초한 혼합도가 소위 “혼합반응기구역(mixed reactor zone)”에서 시간에 따라 변화하며, 일반적으로 이러한 혼합도는 난류에 의해 좌우된다[7]. 그런데, FDS6는 난류모델링의 향상으로 인해 FDS5에 비해 상대적으로 큰 계산 격자에서도 높은 해상도를 제공하게 되었다. 따라서 본 연구에서와 같이 동일한 크기의 계산 격자를 적용했을 경우에는 FDS6에서 더 정확한 혼합율을 얻을 수 있을 것이다.

본 연구에서 채택한 FED와 FEC 계산 방법은 일산화탄소의 질량분율을 이용하는 것이다. FDS6에서는 미소 격자의 질량분율이 단순히 0이나 1과 같은 고정값이 아니고 혼합된 평균값이 시간에 따라 변화할 수 있기 때문에 FDS5에서 적용했던, 연료 질량분율과 탄소 함유 연소생성물(일산화탄소, 이산화탄소, 수트(soot) 등)에 대한 질량분율의 단순한 선형 조합인 혼합분율모형(mixture fraction model)에 비해 더 정확한 값을 얻을 수 있었다[8]. 미소 격자 단계에서 혼합도가 고려되지 않기 때문에 혼합분율모형은 일산화탄소와 수트(soot) 생성량을 과소평가하거나 과대 평가할 수 있다. 앞에서 논한 바와 같이 FDS 버전6에서 보다 향상된 연소모델과 난류모델을 적용한 것을 고려하면 금번의 시뮬레이션에서는 FDS5가 일산화탄소 질량분율과 수트(soot) 질량분율을 계산함에 있어 약 10% 이상 크게 예측하고 있

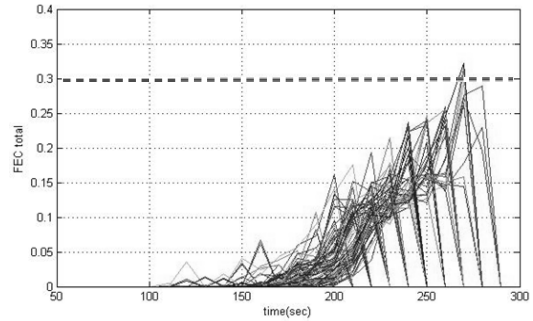


Fig. 7. FEC by FDS6.

으며 결과적으로 FED와 FEC 수준도 FDS6에 비해 높게 나타나는 것으로 사료된다.

#### IV. 결론

FDS를 활용한 화재시 연소가스의 독성평가에 대한 비교 연구로부터 얻어진 주요한 결론은 다음과 같다. FDS5로부터 얻어진 FED와 FEC 결과를 FDS6에서 시뮬레이션한 결과와 비교했을 때 케이블 화재의 경우 FDS6의 결과가 평균 약 10% 정도 작은 값이 도출되는 것을 확인 할 수 있었다. 이에 대해 가능한 원인으로서는 FDS6에서 수트(soot)와 일산화탄소의 생성량 계산에 있어 이전 보다 향상된 연소모델인 “부분혼합 회분반응기모형”을 채택하였기 때문으로 분석된다. 따라서 FDS를 이용한 연소가스의 독성과 이에 따른 거주환경조건 평가시 이러한 소프트웨어 버전에 따른 정량적 차이점을 염두에 두어야 할 것이다. 즉, 피난조건 설계의 측면에서 FDS5를 활용한 건물의 화재안전 설계는 본질적으로 평균 약 10% 정도의 과설계를 수반할 수 있다는 점이다. 그러나 이것은 건물 내 거주환경조건을 실제보다 가혹한 조건으로 예측한다는 점에서 보수적인 설계라고 볼 수 있으므로, 기존에 FDS 버전5를 가지고 이루어졌던 설계가 안전성 확보라는 관점에서는 문제가 되지 않을 것으로 판단된다.

#### REFERENCES

- [1] Purser, D.A., *Toxicity Assessment of Combustion Products*, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd ed., National Fire Protection Association, Quincy, MA, 83-171, (2003)
- [2] Patrick van Hees, Daniel Nilsson, Emil Berggren, *Simulation of critical evacuation conditions for a fire scenario involving cables and comparison*

- of two different cables*, Report 3147, Lund University, Sweden, (2010)
- [3] Kevin McGrattan, et. al, *Fire Dynamics Simulator (6th Edition) User's Guide*, NIST special publication 1019, FDS Version 6.0.1, SVN revision 17529, NIS, (2013)
- [4] Anna Stec, and Richard Hull, *Fire Toxicity*, CRC Press, (2010)
- [5] Technical Specification ISO/TS 13571:2002(E), *Life-threatening components of fire Guidelines for the estimation of time available for escape using fire data*, Geneva, ISO, (2002)
- [6] B.F. Magnussen and B.H. Hjertager. *On Mathematical Modeling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion*. Proceedings of the Sixteenth Symposium on Combustion, Combustion Institute, Pennsylvania, 719-729, (1977)
- [7] Kevin McGrattan, et. al, *Fire Dynamics Simulator (6th Edition) Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical Model*, NIST special publication 1018, FDS Version 6.0.1, SVN revision 17529, NIST, (2013)
- [8] Kevin McGrattan, et. al, *Fire Dynamics Simulator (version 5) Technical Reference Guide*, NIST special publication 1018-5, FDS Version 5.2.5, SVN revision 2076, NIST, (2012)