FDS 열분해 모델을 이용한 콘칼로리미터(ISO 5660) 화재 시뮬레이션
Fire Simulation by Pyrolysis Method of FDS for the Small Cone Calorimeter (ISO 5660)

양성진† 장정훈* 강찬용**
Yang, Sung-Jin Jang, Jung-Hun Kang, Chan-Yong

ABSTRACT

Chemical behaviors of each surface material for interior facilities affect to fire initiation and growth in general fire situation. These chemical behaviors were characterized by thermal properties (Heat release rate, Pyrolysis rate, specific heat, etc) which could be derived from experimental test. Especially, Heat release rate which indicates aspect of fire size is one of the most important property to asses fire hazard and protection needs. The cone calorimeter test (ISO 5660) has recently assumed to a dominant role in bench scale fire testing to obtain the Heat release rate of materials. This value could be calculated by the 'Oxygen Consumption Method' under various producing irradiances to each surface of materials.

In this study, Process of the cone calorimeter test was simulated by Pyrolysis model of FDS (Fire Dynamics Simulator by NIST) base on the ISO 5660 international standard. Then, we could estimate the simulation method of FDS in case of single materials through the comparative study with test results.

1. 서 론

화재라는 재난 상황은 그 규모가 극단적인 경우에 수많은 인명이 희생되고 시설과 자원이 심각하게 훼손되는 등 엄청난 피해가 발생하기 때문에 사전예방 차원에서 위험성 진단과 안전대책이 필수적으로 요구되는 문제이다. 전통적으로 주거환경을 주 관심 대상으로 하는 건축분야에서 활발하게 선행되었던 화재안전에 대한 연구는 각종 설비 와 시설뿐 만 아니라, 산림과 임야 분야에 까지 그 관심영역이 확대되고 있으며, 선박이나 철도차량도 이런 맥락에서 예외일 수 없는 상황이다.

실내 공간을 가정한 일반적인 화재상황에서 각 내장재들의 표면을 구성하고 있는 물질들의 열화학적 거동은 화재의 발생과 성장에 매우 민감하게 영향을 미친다. 물질들의 열화학적 거동은 분해과정, 각종 반응에너지, 열방출량 그리고 비열과 열전도도등 다양한 특성들로 구분할 수 있는데, 특히, 열방출량은 화재 위험성을 진단하는데 있어서 상당히 중요한 역할을 한다. 이는 해당 물질이 연소반응을 통해 주위로 방출하게 되는 에너지 값을 나타내므로 화재 성장을 정량적으로 예측하는 데에 필요할 뿐 아니라 전산유체역학을 기반으로 하는 화재모사 시뮬레이션에 입력 값으로 이용될 수 있기 때문이다.

열방출량 값을 측정하기 위한 시험 장비로써 본 논문에서 소개하는 콘칼로리미터(ISO 5660)는 시편 크기 100mm× 100mm 의 단품단위 시편에서의 열방출량을 측정할 수 있다. 해당 물질 전체 표면에서의 열방출률 값이 시험 장비 내 콘 히터에서 주어진 해당 열복사 상황에서 시간의 함수와 단위면적당 방출

† 책임저자 : 비회원, 현대로템(주) 기술연구소, 시스템기술팀, 연구원
E-mail : sjyang@hyundai-rotem.co.kr
TEL : (031)596-9328 FAX : (031)596-9759
* 비회원, 현대로템(주) 기술연구소, 시스템기술팀, 선임연구원
** 비회원, 현대로템(주) 기술연구소, 시스템기술팀, 수석연구원

하는 열로써 측정이 된다. 선행 연구[1]에서 FDS(Fire Dynamics Simulator)를 이용한 시뮬레이션 기법으로 철도차량의 화재강도를 예측하는데 콘 칼로리미터에서 얻은 열방출량 값을 이용하여 해석을 수행하였고, 그 기법의 한계를 기 진단한 바 있다. 본 연구에서는 화재 시뮬레이션으로 화재강도를 예측하는 작업의 전 단계로서, ISO 5660규격[2]에 의거한 콘칼로리미터 시험을 통해 열방출량 곡선을 산출하는 과정을 FDS(Fire Dynamics Simulator) 열분해 모델(Pyrolysis model)을 통해 모사했으며, 이를 통해 단품 단위의 물질에 대해서 화재 시뮬레이션 기법을 적용 및 진단하고자 하였다.

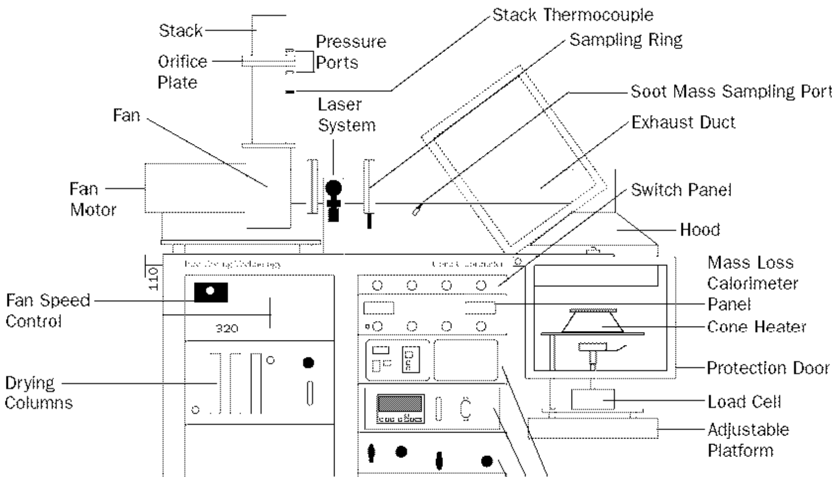
2. 콘 칼로리미터 테스트 (ISO 5660)

2.1 시험원리

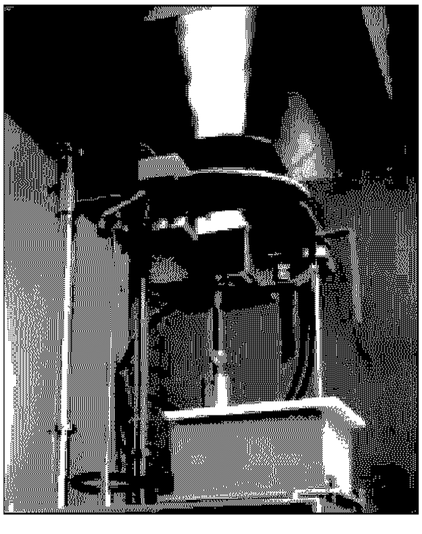
이 시험 방법은 '일반적으로 순연소열은 연소하는데 필요로 하는 산소의 양에 비례 한다'라는 점에 기초를 두고 있다[2~3]. 즉, 산소 1kg 이 소비되면 13.1× 103[kJ] 의 열이 방출되는 관계가 성립하며, 이는 가연물의 종류에 관계없이 거의 일정한 값을 갖기 때문에 시편을 미리 결정된 0kW/m2 ~ 100kW/m2 의 범위에 노출시켜 대기 조건에서 연소시키고 이때의 산소농도와 배출가스 유량을 측정하면, 그 물질에서 방출된 가연성 물질의 단위 면적당 순연소열을 알 수 있다는 것이다. 이 시험 방법은 시험하는 물질이 화재에 노출되는 동안 열방출률에 기여하는 정도를 평가하는데 사용되며, ISO 5660 규격의 경우, 이러한 특성들을 소규모 대표적인 시편(100mm× 100mm) 에 대해서 측정한다[2].

2.2 시험방법[3]

Fig. 1 a)에는 원추형 콘히터를 사용한 콘 칼로리미터 열량계의 개념도가 도시되어 있으며, b)는 실제 시험 장면을 나타낸다. 크기 100mm× 100mm 시편을 홀더 위에 올려놓고, 0kW/m2 ~ 100kW/m2 의 복사 에너지 범위에서 콘 히터를 통해 해당 시편에 열 선속을 가해준다. 일반적으로 콘 히터는 시편 전체에 고도로 균일한 열을 비춰줘야 하며, 대류 성분의 열전달이 크면 복사 발화 시험의 시행 의도를 충족시키지 못하게 된다. 따라서 대류 가열 성분은 상대적으로 적어야 한다. 이를 위해 후드를 통해서 연직방향과 반대 방향의 흡기를 통해 화염의 방향을 상부로 고정한다. 공기 유속은 발화결과에 부적절하게



a) Overview design of standard cone calorimeter



b) Cone calorimeter test

Fig. 1 Cone calorimeter test (ISO 5660)

영향을 줄 만큼 너무 빨라서도 안 되며, 연소 생성물이 후드 밖으로 유출될 만큼 너무 느려서도 안 된다. 점화장치는 그 부근에 있는 가연성 혼합기체를 안정적으로 발화시켜야 한다. 따라서 점화 장치의 위치를 선택할 때는 열분해 가스의 성장이 극대화 되리라고 예상되는 지점에 가깝도록 해야 한다. 가연성 기체는 스파크에 의해서 발화하며 연기 측정 장치에 의해 소모된 산소량을 측정하면, 해당 물질의 단위 면적당 열 방출량 값을 산출 할 수 있다.

3. FDS (Fire Dynamics Simulator) 시뮬레이션

전산유체역학 (CFD, Computational Fluid Dynamics)의 발전으로 복잡한 유동 현상을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 해석하고 설계를 개선하는 사례들이 많이 보고되어 있으며, 최근 화재 문제도 이러한 수치해석 기법을 이용하여 해석하고 진단하려는 시도가 진행되고 있다. 본 연구[1]에서는 미국의 NIST(National Institute of Standards and Technology)가 개발한 공개 해석 툴인 FDS(Fire Dynamics Simulator)를 이용하여 앞서 언급한 ISO 5660 콘 칼로리미터 시험을 통한 단품 단위의 열방출량 측정 시험을 재연하였다. 또 그 결과를 시험치와 비교함으로써 현상이 보여주는 의미를 진단하고 화재해석에서 사용된 FDS(Fire Dynamics Simulator) 툴이 갖는 한계점과 개선될 사항을 지적하고자한다.

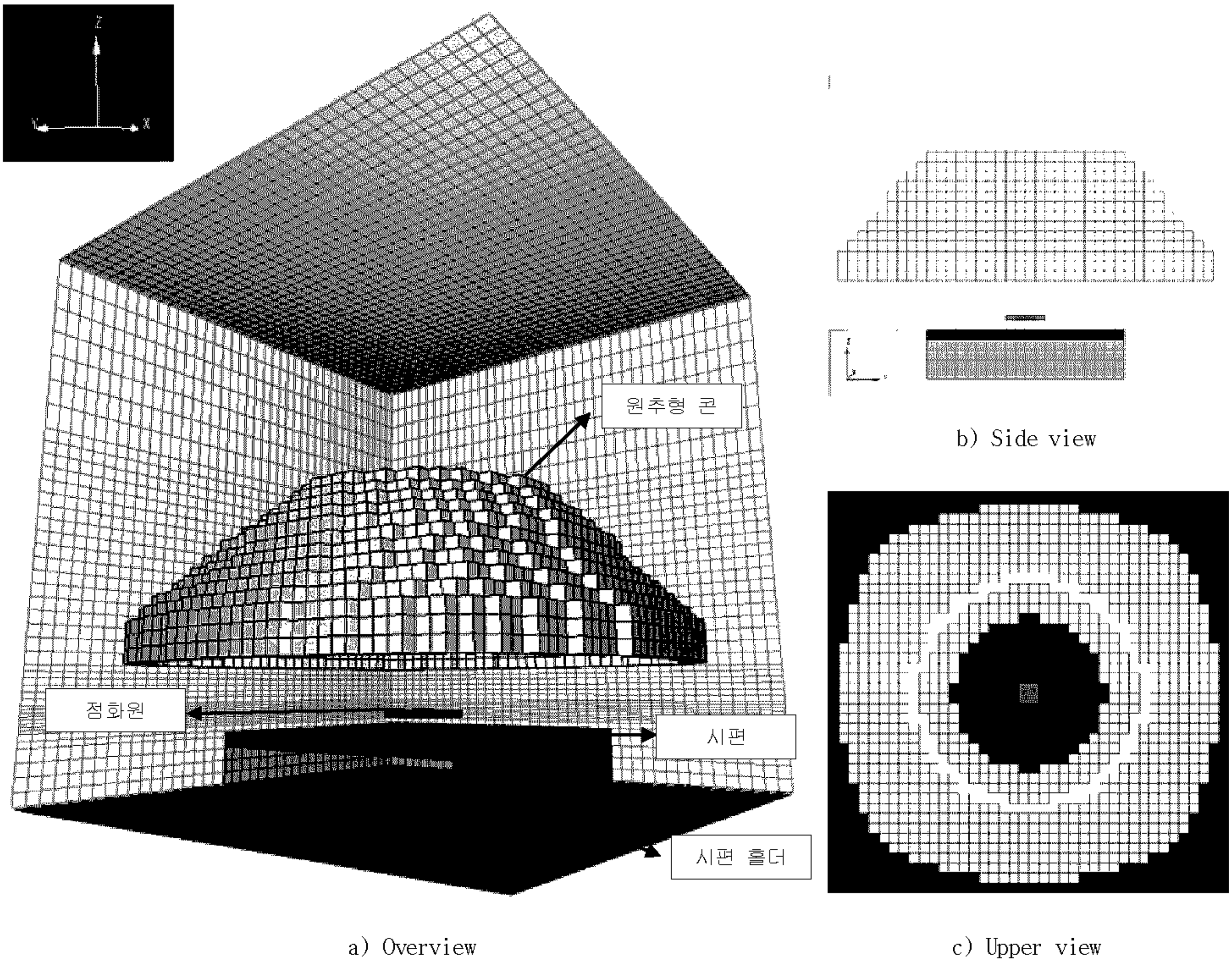


Fig. 2 Computational domain of cone calorimeter

3.1 해석대상 및 격자생성

ISO 5660에서 규정하는 표준 원추형 콘 칼로리미터를 해석 격자에 반영하였으며, 그 모습은 Fig. 2와 같다. a)에는 전체적 모습을 도시하였고, b), c)는 각각 측면과 위에서 본 해석격자를 나타내었다. 0.2m× 0.2m× 0.21m 크기의 해석 도메인을 고려하였고, 콘의 제원은 규격에 명시된 정보에 따라 하부직경 0.197m, 상부직경 0.110m, 높이 0.65m의 원추 콘을 해석격자에 표현하였다. FDS(Fire Dynamics Simulator)해석 툴의 특징 상 장방형 모양의 격자를 구성할 수밖에 없는 관계로 Fig.2에 나타난 바와 같이 격자 크기 단위(0.005m)의 블록을 이용하여 원추형 콘을 표현하였고, "Sawtooth" 기능을 OFF 설정하여, 장방형 격자로 인해 유동영역에서 나타나는 계단현상을 최소화 하였다. 시편과 시편홀더 그리고 시편에서 발생하게 되는 가연성 증기를 점화시키게 되는 점화원의 위치는 Fig. 2 a)에 자세히 도시되어 있다. 실제시험에는 전기스파크를 이용하여 가연성 증기에 점화를 시키는 방법을 택하나, FDS(Fire Dynamics Simulator)에서는 전기 스파크를 표현할 수 있는 방법이 없기 때문에 HRRPUA(Heat Release Rate Per Unit Area, kW/m2)방식의 Burner를 이용하여 0.003m2의 면적에 대해서 2000kW/m2 열방출을 구현하였다.

정사각형 모양의 단위격자 하나의 크기는 해석시간과 Chiam 등[4]의 논문을 참고하여 0.005m× 0.005m× 0.005m을 고려했으며, 이는 FDS User-guide[5]에 소개된 (NUREG 1824)의 격자민감도 테스트에 의해 산출된 적당한 $D^*/\delta x$ = (4~16)의 격자 사이즈를 만족한다. 총 72000개의 격자가 사용되었으며, 격자 생성에 사용된 모든 데이터는 규격 ISO 5660을 참고하여 신뢰성을 확보하였다.

3.2 해석조건 및 시나리오

SFPE Handbook[3]에서 언급된 바와 같이 본 해석에서는 일반적으로 플래시오버 상황에서의 열복사량인 50kW/m2의 상황에서 콘 시험과 시뮬레이션을 수행하였다. 콘의 열선 부분의 표면 온도(850℃) 설정으로 시편표면에 50kW/m2의 열복사를 구현하였고, 수치해석 초기 급격하게 변하는 Enthalpy Term 변화에 의한 발산을 막기 위해 Fig. 3과 같이 1차 곡선을 이용하여 각 Source Term을 해석에 반영하였다.

3.3 해석방법

수치해석을 수행함에 있어서 공개 코드인 FDS(Ver.5)를 사용하였으며, Intel Xeon 3.0 GHz 2CPU 워크스테이션을 사용하였다. 유동장을 풀기 위해 사용된 지배 방정식은 기본적으로 Navier-Stoke 방정식

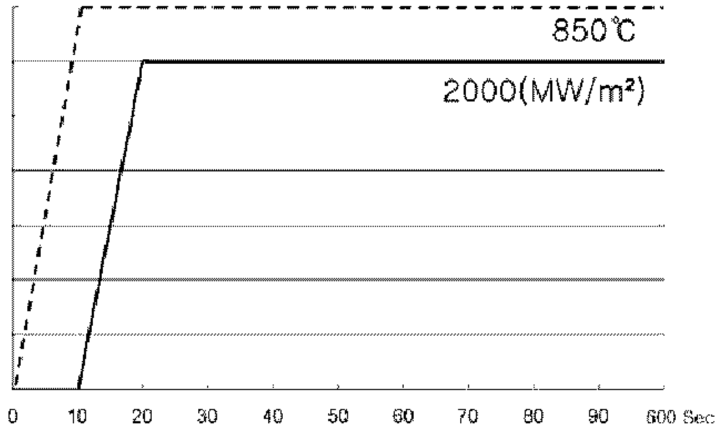


Fig. 3 Ignition source term and radiative heat flux

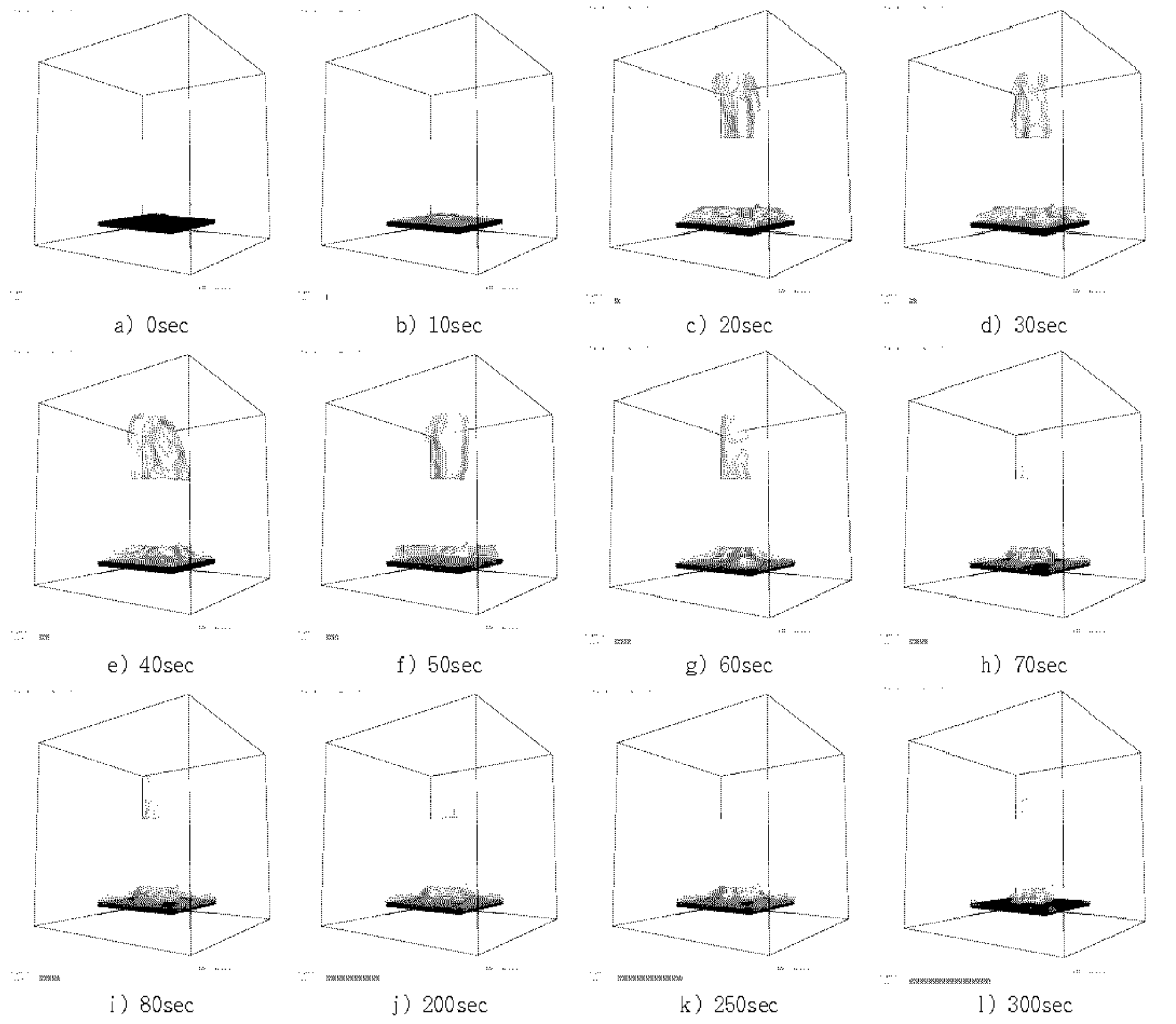
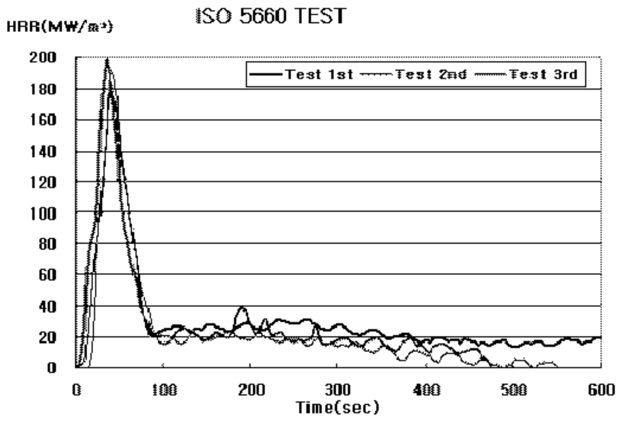


Fig. 4 Simulation results of cone calorimeter (ISO 5660)

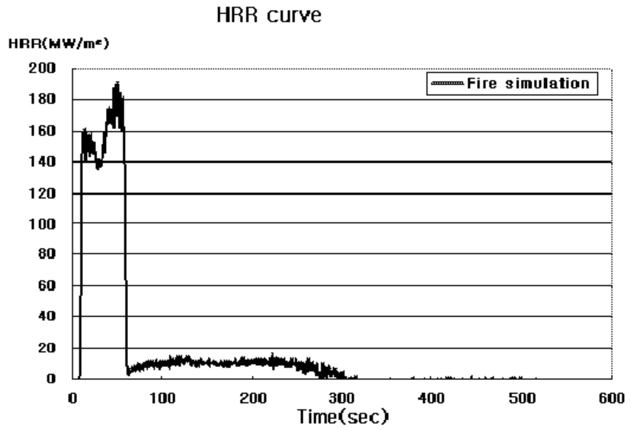
이며, LES(Large Eddy Simulation) 난류 모델을 사용하였고, 화재 시 열반응을 표현하기 위해 solid material의 Pyrolysis Model을 사용하였다.

4. 결과분석 및 토의

Fig. 4에는 FDS(Fire Dynamics Simulator)를 이용한 콘 칼로리미터 발열량 테스트에 대한 결과가 도시되어 있다. 콘의 표면이 다소 울퉁불퉁한 모양을 하고 있는 것은 블록을 쌓아서 만든 콘의 격자에서 Sawtooth를 OFF한 결과 각진 면을 시각적으로 곡면 처리하는 과정에서 발생한 자연스러운 현상이다. 해석이 시작되고 나서 10초 동안 콘에서의 히터온도는 Fig. 3에 표현된 1차 곡선의 형태로 상승하여 850℃에 이르게 된다. 시편 표면은 복사열에 노출되며 열분해를 통해 가연성 증기를 방출하게 된다. 시편 표면 상부로 방출된 가연성 증기는 10초 후 HRRPUA(Heat Release Rate Per Unit Area) 방식의 버너에 의해서 점화되며, 시편 상부에는 불꽃이 나타나게 된다. 그 양상이 Fig. 4 b)에 잘 나타나 있다. 정상상태인 복사열과 화염에 의한 에너지는 시편의 가연성 증기 생성을 끊임없이 야기 시키고, 화재 성장으로 인한 열방출량은 어느 정도까지 높아지는 경향을 보인다. Fig. 4 f)까지의 결과에서 알 수 있듯이 화



a) HRR curve of ISO 5660 test



b) HRR curve of FDS simulation

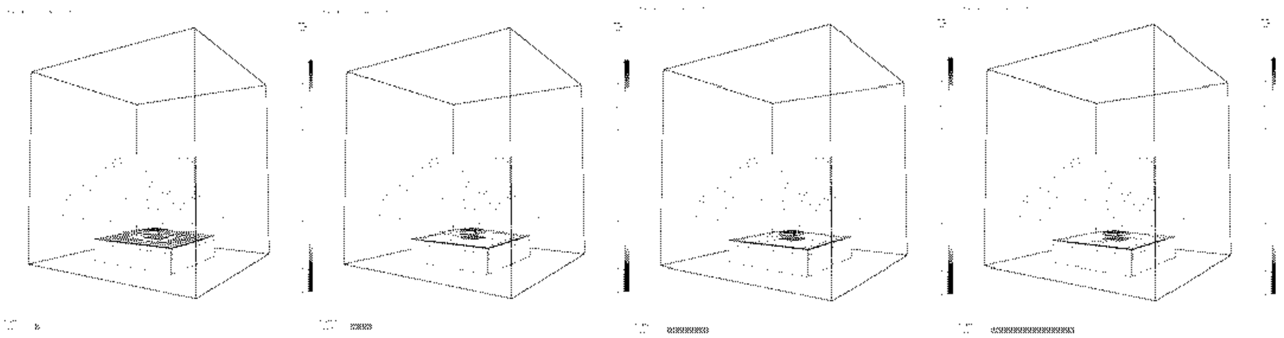
	Test 1st	Test 2nd	Test 3rd	Average	Simulation	Variation
Peak HRR (kW/m^2)	197.8	190.9	176.7	188.5	190.4	1% over estimated
Total Heat Release (~600 Sec)	132.1	110.6	117.5	120.0	101.0	16% under estimated

c) Peak HRR and total heat release

Fig. 5 Comparative results between ISO 5660 test and FDS simulation

재발생 후 50초 까지 불꽃의 양상은 성장하는 것으로 관찰되며, 60초를 넘어서면서 열방출량이 다소 줄어드는 것을 알 수 있다. 이 시점에서는 가연성 증기의 생성이 그만큼 활발하지 못하다는 것을 나타내며, 이는 고정된 시편의 연료가 한정적이다 라는 것으로 간주할 수 있다. 50초 근처에서 최고치를 보인 열 방출량은 급격히 줄어들어 250초 부근까지 미약한 크기의 정상상태를 보인다. Fig.4 l)에서 나타난 결과를 통해 알 수 있듯이 300초 부근의 시간대에서는 시편이 방출할 수 있는 가연성 증기가 거의 소진되었음이 나타난다. 시편의 중간 부근에서 발생한 화염은 HRRPUA(Heat Release Rate Per Unit Area)방식의 점화원에 의해 발생한 것이며, 시편의 열분해에 의해서 발생한 가연성 증기에 의한 발화가 아님을 알린다. 또한 시편의 가장자리 부근에 미약하게나마 가연성 증기에 의한 발화가 관찰된다. Fig. 5는 실제 콘 칼로리미터 테스트에 의한 결과 값과 시뮬레이션 결과 값에 대한 비교를 나타낸 것이다. Fig. 5 a)와 b)에서 도시된 그래프 비교를 통해서 두 결과 그래프의 경향이 상당히 닮았다는 것을 알 수 있다.

a) Legend of radiative heat flux



b) 20sec c) 80sec d) 150sec e) 300sec

Fig. 6 Radiative heat flux on the surface of test specimen

100초 미만에서 시편의 열분해에 의한 단위 시간당 가연성 증기의 방출은 최고조에 이르러 콘 칼로리미터 테스트나 시뮬레이션 두 경우에 최대 열방출률을 기록하며, 그 이후에는 급격한 열방출률 감소를 나타낸다. 다소 차이가 있는 것은 실제 실험값에서는 그래프의 최대 열방출률 값을 전후로 그래프의 상승과 하강이 시뮬레이션 값에 비해서 상대적으로 완만하다는 것이다. 또한 300초를 기점으로 시뮬레이션 결과에서는 가연성 증기의 발생이 더 이상 일어나지 않았음을 알 수 있다. Fig. 5 c)에서 기록된 바와 같이 최대 열방출률은 1% 내외의 오차를 보이지만, 총 화염에 의해서 발생한 총 열에너지 방출량은 시뮬레이션 결과 값이 실험값에 비해서 약 16% 저 평가된 면이 있다.

Fig. 6은 주요 시간대별 시편 표면의 복사에너지 값을 a)에 나타난 범례에 따라서 도시하였다. 이는 시뮬레이션 시간 동안 시편 표면 전체에 균일하게 50kW/m2의 열복사에 노출되었다는 것을 나타내며, ISO 5660 콘 칼로리미터 시험과 동일하게 시편의 열분해를 촉진하는 환경조건을 구성하였다는 것을 의미한다.

5. 결론

본 논문을 통해서 ISO 5660규격[2]에 의거한 콘칼로리미터 시험을 통해 열방출량 곡선을 산출하는 과정을 FDS(Fire Dynamics Simulator) 열분해 모델(Pyrolysis model)을 통해 모사했으며, 이를 통해 얻어진 결과 값을 비교하였다. 해석시간 동안의 열방출량 양상 자체는 상당히 닮은 모습을 보인다. 하지만 시뮬레이션의 경우 급격한 곡선의 기울기로 최대 열방출율을 기록하고 그 값이 급격하게 저하되는 것을 볼 수 있었다. 이는 FDS(Fire Dynamics Simulator)가 갖는 알고리즘적인 한계라 사료된다. 실제의 경우에 있어서 시편의 열분해는 시편을 구성하고 있는 중합체의 사슬구조 연결이 끊어져 증발할 수 있는 더 작은 상태의 화학종으로 분해되는 과정을 거치고 그 과정에서 발생된 화학종들 간의 상호작용 때문에 열분해가 지연되는 등의 복잡한 현상을 경험하게 되는데, FDS(Fire Dynamics Simulator)에서는 단순히 에너지 방정식에 근거한 열분해 과정을 고려하기 때문에, 이러한 열분해 지연현상들을 일일이 표현할 수 없다. 또한 온도 범위에 따라서 시편의 열분해 속도와 반응률은 달라 질 수 있으며, 그 외의 열분해에 관여하는 각종 열적 물성치(thermal property)들도 수시로 변화하게 되는데, 이러한 재료의 상황에 따른 가변적 특성들을 획일화에서 적용할 수밖에 없는 실정이다. 때문에, 열분해 가속이 매우 빠르게 일어날 수 있고 그 결과는 Fig. 5 b)에 도시된 그래프와 같이 매우 급격한 열방출률 성장과 쇠퇴를 보이는 것으로 판단할 수 있다.

참고문헌

1. 양성진, 장정훈, 강찬용(2008), “철도 차량 화재시 화재강도 예측을 위한 연구”, 철도학회춘계학술대회논문집, 6, pp.2082 – 2089
2. (2003), "KS F ISO 5660-1 연소 성능 시험-열 방출 연기발생, 질량감소율-제1부 열 방출률(콘 칼로리미터법)", 한국산업표준심의회
3. J. Philip, et al(2005), "SFPE Handbook of Fire Protection Engineering(3rd edit.)", SFPE.
4. B-H. Chiam, et al(2005), "Numerical Simulation of a Metro Train Fire", Thesis for the degree of master course, Univ. of Canterbury.
5. K. McGrattan, et al(2006), "Fire Dynamics Simulator(Ver. 5) User's Guide", NIST.
6. K. McGrattan, et al(2006), "Fire Dynamics Simulator(Ver. 5) Technical Reference Guide", NIST.
7. “전동차 내장재 시편 발열량시험 결과”
8. D. Madrzykowski, et al(2003), "Heat Release Rate Experiments and FDS Simulations", NIST.