

주거공간 단위가연물의 열역학적 수치해석 모델링에 관한 연구 A Study for Thermal Mechanism of Residential Combustibles with Numerical Modeling

안찬솔[†] · 김정엽 · 유용호 · 권오상 · 주상현

Chan-Sol Ahn[†] · Jung-Yup Kim · Yong-Ho You · Oh-Sang Kweon · Sang-Hyun Joo

한국건설기술연구원

(2011. 8. 11. 접수/2011. 10. 26. 수정/2011. 12. 9. 채택)

요 약

본 연구는 주거공간에 배치된 가연물의 열역학적 연소모델을 구현하는데 목적이 있다. 화재하중과 화재 강도는 성능설계의 사용이 증가함에 따라 건축물 화재안전 설계에 중요한 요소로 대두되고 있으며, 컴퓨터를 이용한 수치해석을 통해 예측이 가능해 지고 있다. 주거 가연물의 열역학적 연소특성을 예측하기 위해 각 가연물의 수치해석용 모델을 설계하였다. 해석된 결과를 검증하기 위해 수치해석의 결과를 실물 연소실험의 열방출량 결과와 비교하였다. 수치해석을 위해 FDS를 사용하였으며, 난류해석을 위해 LES모델이 사용되었다. 검증결과 열방출율 및 총발열량은 실험결과와 잘 일치함을 확인하였다.

ABSTRACT

This study is intended to present a computational thermal model for the combustibles in a residential building. As the Performance Based Design is more popular, fire-intensity and fire-load have turned out to be very important factors for building design and can be predicted through some computational work. To predict and estimate the thermal properties of the residential combustible fire, we made some numerical models of combustibles in a residential building. In a bid to validate the estimate values, computational analysis results from numerical models were compared with real fire tests. For computational analysis, the Fire Dynamics Simulator was used with Large Eddy Simulation model for turbulence. Consequently, each heat release rate and total heat release curves were successfully estimated.

Key words : Combustible, Real scale fire test, Numerical modeling, Fluid dynamics simulator

1. 서 론

성능위주의 설계(PBD: Performance Based Design)가 일반화 되면서 건축물 설계에 필요한 정보를 얻기 위해 건축물 화재의 수치해석이 매우 중요한 부분으로 자리를 잡아가고 있다. 화재의 성장과 연기의 확산 현상을 예측하여 재실자의 안전한 피난을 유도할 수 있으며, 화염에서 발생하는 발열량과 복사열량 등을 분석하여 구조 부재가 화재 열에 의해 받게 되는 손상의 정도를 예측할 수도 있다. 또한 화재 시 발생하는 유독가스의 양을 계산함으로써, 재실자가 유독가스에 노

출되는 정도를 예측할 수 있으며, 실내 마감재료의 안전한 선정에 도움을 줄 수도 있다. 그리고 화재 공간의 유동현상을 분석하여 제연설비 및 방재시설의 적절한 위치와 성능을 선정하는데 유용한 정보를 제공하는 것도 가능하다.

현재 수치해석을 통해 화재현상을 예측하는 방법은 실물 화재실험을 대신할 만큼 정밀하거나 간편하지 못한 것이 사실이다. 그러나 많은 연구들에 의해 효과적인 기법이 제안되고 있으며 다양한 사례의 실물 화재 실험과 비교 검증을 통해 수치해석의 신뢰성이 증가하고 있다.

실험실 수준의 화염에 대한 수치해석의 연구로써 Hamins 등¹⁾은 양초의 연소현상을 분석한 바가 있으며,

[†]E-mail: chansole@kict.re.kr

Wen 등²⁾에 의해 medium-scale의 pool fire에 대한 결과가 검증된 바 있다. 최근에는 SBI(single burning item) test에서 예측되는 화염의 heat flux와 flame height이 Jianping 등³⁾에 의해 연구되기도 하였다. 조금 더 큰 화재현상에 대한 연구로써 Hurley⁴⁾는 compartment의 post-flashover를 예측하기 위하여 수치해석 모델을 연구하였으며, Pope 등⁵⁾은 compartment에서 발생한 화재에 대하여 fire curve와 수치해석에 의한 post-flashover를 예측하여 정량적으로 비교하였다. 최근에는 컴퓨팅 성능의 개선으로 대형 화재현상에 대한 연구가 주를 이루고 있다. 건축물 Balcony를 통해 분출되는 화염의 확산예측⁶⁾과 World Trade Center 5 building의 붕괴에 대한 수치해석적 연구⁷⁾ 등이 대표적인 예이며, 특히 tunnel과 atrium과 같은 대형공간에 대한 수치해석을 검증하는 연구들^{8,9)}이 활발히 수행되고 있다. 이 밖에도 개선된 모델링을 통하여 진보된 수치해석의 결과를 도출한 연구들¹⁰⁻¹²⁾과 수치해석을 기반으로 제연 설비와 스프링클러 설비 같은 active system의 성능을 예측하는 연구들¹³⁻¹⁵⁾도 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 일반 주거공간에서 흔히 사용하고 있는 물품들에 대한 화재특성을 수치해석적으로 예측하기 위하여 대표적인 단위 가연물(combustibles)을 선정 한 후 모델링하였다. 또한 수치해석의 결과에 대한 신뢰성을 확보하기 위하여 룸코너테스터(Room Corner Tester; KS F ISO 9705)에 의한 실물 화재실험의 열방출율(Heat Release Rate)과 결과를 비교 검증하였다.

연구과정에서 사용한 Fire Dynamics Simulator(FDS)는 미국 NIST의 BFRL그룹에서 개발한 공개용 프로그램으로써 3차원 Field Model의 대표적인 화재해석 소프트웨어이다. 화재에 의해 유도된 유동현상, 유체 및 고체 내부의 열전달현상, 가연물의 연소현상을 해석하는데 주로 사용 된다. FDS는 유체역학적 관성모델로 저속의 Navier-Stokes 방정식을 사용하고 난류해석을 위하여 Large Eddy simulation(LES)을 사용하며, 연소모델로 혼합분율 연소모델을 사용하고 있다. 또한 화재의 주요 열전달 현상인 복사 열전달을 해석하기 위하여 비분산 회색가스 복사전달 모델을 사용하고 있다.

2. 단위가연물 수치해석

2.1 연소실 모델링

표준 단위 가연물의 연소실험은 국제 화재시험평가 기준인 ISO-9705 시험법이 적용된 Room corner tester를 사용하였다. Room corner tester는 가연성 물질의 시간별 열방출율(Heat Release Rate) 측정이 가능하며, 덕트

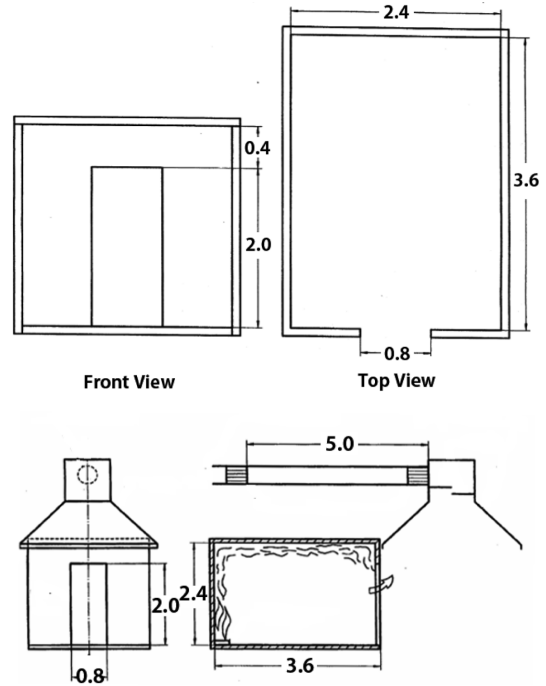


Figure 1. Room corner tester.

내부에 유독가스를 측정하기 위한 샘플링 라인이 설치되어 있어 FT-IR(Fourier transform infrared spectroscopy)을 이용한 유독가스(HCl, HCN, HBr) 성분 및 발생량의 측정이 가능하다. Figure 1에 나타난 바와 같이 3.6 m(W) × 2.4 m(L) × 2.4 m(H) 크기의 연소실 안에 1개의 출입구가 설치되며, 연소실 안에서 발생하는 유독가스는 3.5 m³/s 이상의 유량이 확보된 덕트로 모두 배출된다.

가연물의 수치해석 조건을 실물 연소실험과 동일하게 구성하기 위하여 연소실을 모델링하였다. Figure 2와 같이 국제 화재시험평가 기준인 ISO-9705의 Room Corner Tester와 동일한 크기로 3.6 × 2.4 × 2.4 m의 연

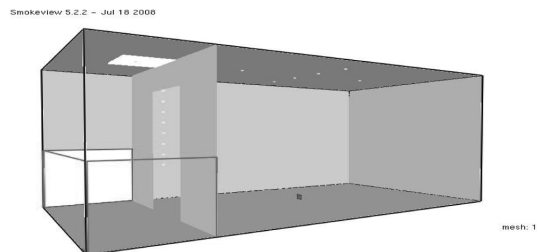


Figure 2. Combustion chamber modeling.

소실을 $36 \times 24 \times 24$ grid로 모델링하였다. 가연물은 연소실의 중앙에 위치시켰으며 외부공기의 유입조건, 연소가스의 배출조건 및 열방출량 측정조건 등은 실제의 ISO 9705 조건과 동일하게 구성하였으나 유독가스의 성분 및 발생량에 대한 측정조건은 제외하였다. 또한 연소특성을 측정하기 위하여 연소실의 천정부에는 십자 모양으로 6개의 온도측정 point를 설정하였고 전면 개구부의 오른쪽 코너부분에는 높이에 따라 일렬로 8개의 온도특정 point를 설정하였으며, 시간별 열방출율을 측정하였다.

2.2 가연물의 모델링

주거공간에서 주로 사용중인 가구 및 생활 용품들 중에서 화재 하중(Fire Load)과 재료특성을 고려하여 대표적인 가연물 12가지를 선정하였으며, 가연물의 모델링을 통해 외형을 단순화하고 물리적·화학적 특성값은 FDS에 설정되어있는 기본값을 사용하였다. Table 1에서와 같이 12개 가연물 중 나무를 주 재료로 사용한 물품이 5종, 나무와 섬유, 또는 나무와 가죽을 주 재료로 한 물품이 3종, 합성수지를 주 재료

Table 1. Modeling of Representative Inflammables

Combustible	Material	Weight
Cloth	Fiber	5 kg
Table	Wood	30 kg
Television	Synthetic Resin	30 kg
Couch(1)	Leather, Wood	18 kg
Couch(3)	Leather, Wood	35 kg
Chair	Fiber, Synthetic Resin	8 kg
Wardrobe	Wood	43 kg
Bed	Fiber, Wood	34 kg
Desk	Wood	33 kg
Bookshelf	Wood	31 kg
Sink Set	Wood	55 kg
Refrigerator	Synthetic Resin	60 kg

로 사용한 물품이 2종, 합성수지와 섬유를 주 재료로 한 물품이 1종, 섬유를 주 재료로 한 물품이 1종이다.

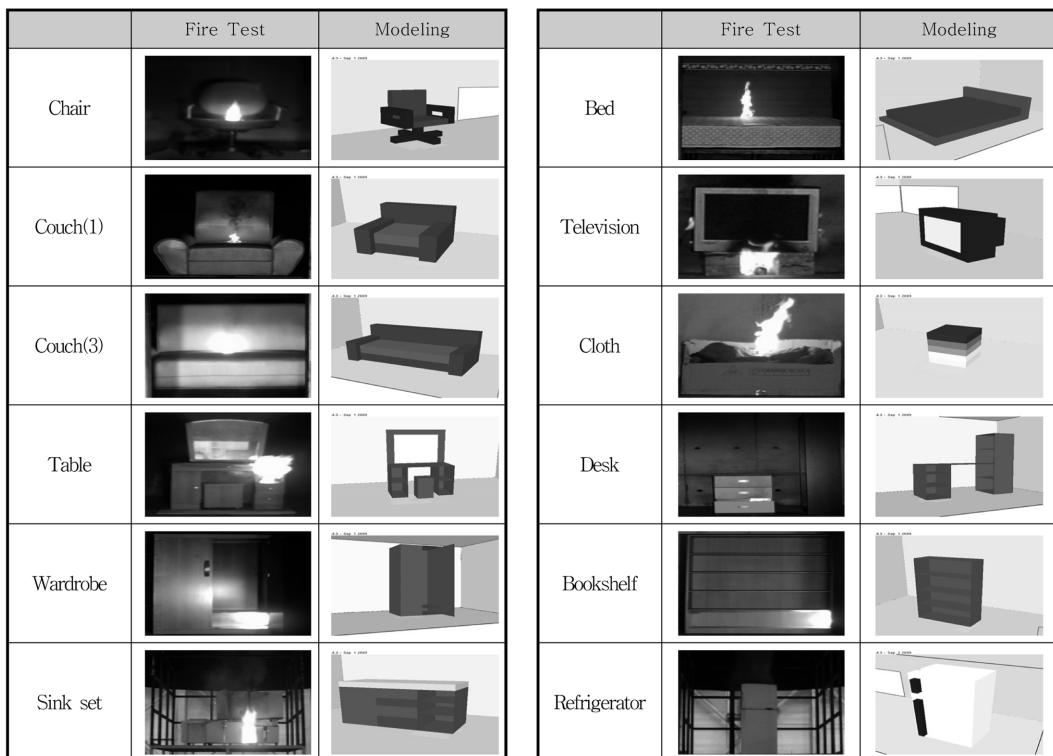


Figure 3. Picture of combustibles and modeling.

Table 2. Maximum HRR Time

Combustible (Up-ward)	Fire Test [sec]	Modeling [sec]
Bookshelf	1,088	741
Desk	966	1,014
Refrigerator	420	883
Sink set	962	1,403
Table	1997	671
Television	462	798
Wardrobe	426	712
Combustible (Down-ward)	Fire Test [sec]	Modeling [sec]
Bed	405	598
Chair	579	521
Cloth	621	807
Couch(1)	597	1,016
Couch(3)	384	637

2.3 가연물 화염성장속도

단위 가연물별 실물 연소실험은 “점화 → 최성기 → 쇠퇴기”의 과정으로 진행되었다. 점화원의 위치는 가연물에 화염확산이 용이하도록 위치를 설정하였으며, 이로 인해 화염의 성장방향이 상향(up-ward), 하향(down-ward)의 경우로 구분되었다. Table 2는 가연물의 화염전파 방향 및 연소현상이 최성기에 도달했을 때의 시간을 정리한 표이다.

수치해석 결과 화염의 성장 및 최성기에 이르는 과정은 실물실험과 유사하게 예측하고 있으나 가연물의 주재료에 따라 최성기에 이르는 시간 예측에 차이를 보였다. 섬유와 플라스틱계열 가연물의 경우 실물실험보다 느리게 최성기를 예측하였고 나무계열 가연물의 경우 빠르게 예측하는 경향을 보였다. 또한 상향 화염전파의 속도가 하향 화염전파의 속도보다 대체적으로 빨랐으나 수치해석적 특이점은 관찰되지 않았다.

2.3 가연물 열방출율(HRR)

가연물의 열방출율은 주요 재료의 성분 및 공기와 접촉하고 있는 면적과 상관관계를 갖고 있다. Table 3은 구성 가연물의 실물 연소실험과 수치해석의 최고 열방출율을 정량적으로 비교하였다.

실물 연소실험과 수치해석의 결과를 정성적인 측면에서 비교하였을 때 Figure 4와 같이 가연물의 열방출율은 주 재료에 따라서 많은 차이를 보였다. 주재료의

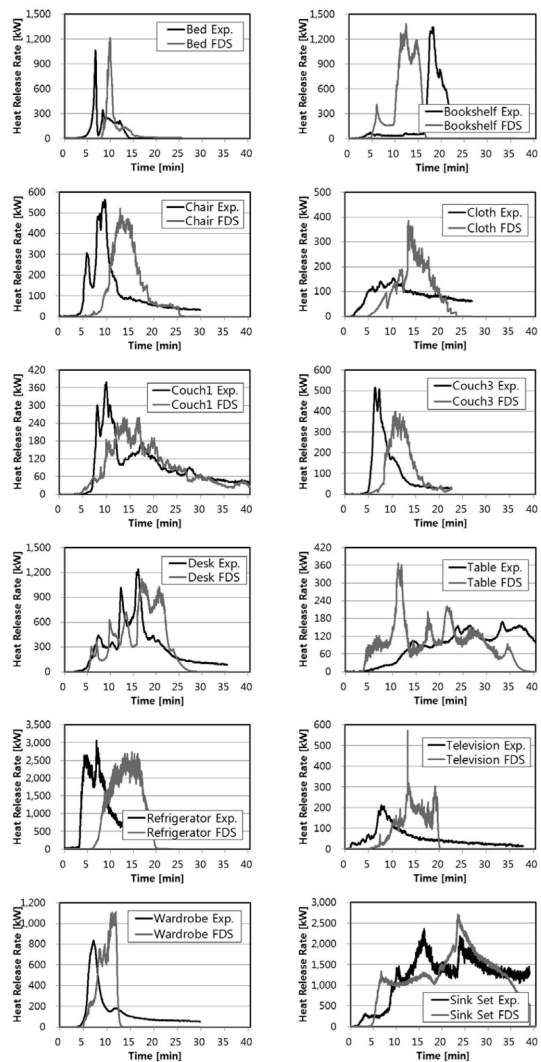


Figure 4. Compare HRR of combustibles.

성분이 섬유, 합성수지로 구성된 가연물의 경우 열방출율의 정성적 경향이 유사하게 예측되었으나, 나무를 주 재료로 하는 가연물에서는 많은 차이를 보였다. 실물 연소실험의 경우 열방출율이 적고 장시간 연소하는 경향을 보인 반면 수치해석의 경우에는 열방출율이 높고 단시간에 연소하는 경향을 보였다. 이는 나무가 초기 연소에서는 열분해에 의해 가연성가스가 외부로 방출되어 불꽃연소를 하는 반면 연소 후반으로 갈수록 가연성 가스의 방출이 줄어들고 재료 내부에 생성된 숯(Char) 성분에 의해 작열연소로 연소패턴의 변하는 특징이 있기 때문이다. FDS에서도 이와 같은 다단계 연소과정의 모사가 가능하지만 실제 연소현상과 같이

Table 3. Maximum HRR point

Combustible	Fire Test [kW]	Modeling [kW]
Bed	1,062	1,216
Bookshelf	1,347	1,382
Chair	564	521
Cloth	154	385
Couch(1)	379	260
Couch(3)	516	400
Desk	1,241	1,124
Refrigerator	3,052	2,736
Sink set	2,363	2,707
Table	169	367
Television	210	571
Wardrobe	832	1,111

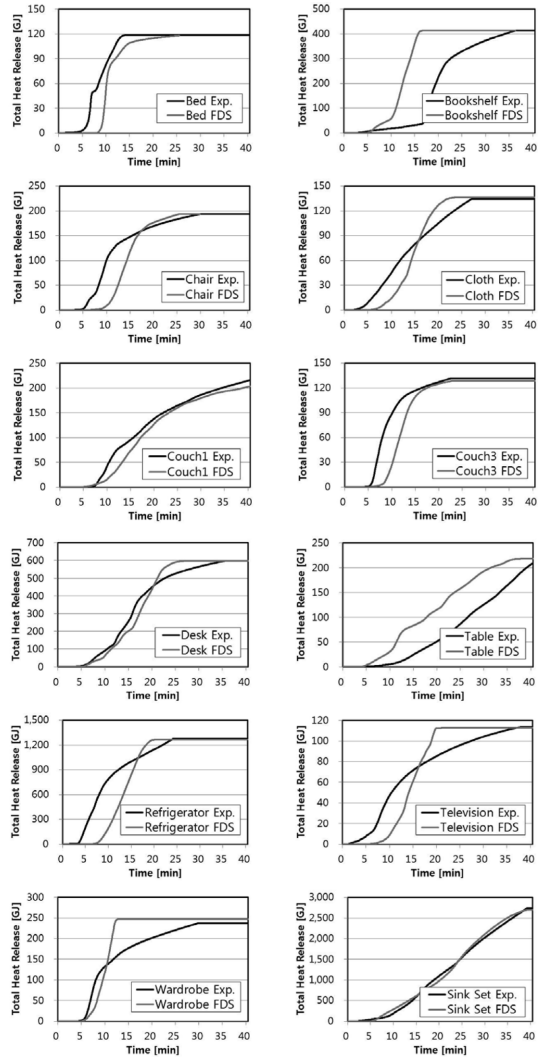
Table 4. Maximum THR Point

Combustible	Fire Test [MJ]	Modeling [MJ]
Cloth	133	134
Table	193	194
Television	237	236
Couch(1)	113	114
Couch(3)	374	374
Chair	413	417
Wardrobe	118	65
Bed	596	598
Desk	131	132
Bookshelf	236	238
Sink set	2725	2710
Refrigerator	1274	1330

복잡한 연소 단계를 정확히 구현하지 못하는 한계 때문인 것으로 추정된다. 최고 열방출율이 측정된 점을 비교하였을 때, 열방출율 예측은 평균 약 10%, 시간은 약 10~50%의 차이가 있었다.

2.3 가연물 총열량(THR)

단위 가연물의 총열량은 가연물의 주요 구성재료와 중량에 의해 결정되는 요인이다. 중량이 많을수록 총열량은 증가하고 최성기의 지속시간이 길어지며 경우에 따라 열방출량도 증가하는 경향이 있다. Table 4는 구성 가연물의 중량 및 실물 연소실험과 수치해석의 총열량을 비교하였고 Figure 5에서는 가연물별 총열을

**Figure 5.** Compare THR of combustibles.

시간에 따른 변화로 비교하였다.

정성적, 정량적 비교에서 총열량은 실물 연소실험과 수치해석의 결과가 동일한 경향을 보이고 있다. 가연물의 중량이 많을수록 총열량이 증가하는 경향을 보였으며 섬유와 합성수지류를 주 재료로 하는 경우는 동일한 중량에서 더 높은 열량을 방출하였다.

3. 결 론

일반 주거공간에서 사용되고 있는 물품들을 대상으로 가연물의 연소시 열특성을 예측할 수 있는 수치해

석용 모델을 구성하였으며 가연 물질의 물리적·화학적 화재특성은 FDS의 기본값을 그대로 사용하였다. 수치해석 결과를 실물 연소실험과 비교하였을 때, 총 열 방출량은 실물 연소실험과 거의 유사하게 예측하였으나 가연물의 주요 물성에 따라 화재 최성기에 도달하는 시간이 10~50%의 편차를 보였으며, 최대 열방출율은 약 10% 내외로 예측하였다. 이것은 FDS의 기본값으로 입력된 가연물의 물성값들이 실제의 값과 다른 것에 기인한 것으로 추정되며 개선된 결과값을 얻기 위하여 실제 물성값을 직접 계측하여 사용한 연구가 후속으로 진행되어야 할 것으로 판단한다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부에서 지원하는 한국건설기술연구원 의 주요사업인 “(11주요) 성능기반 화재안전 선진화 연구” 과제와 관련한 연구에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. A. Hamins, M. Bundy, and S.E. Dillon, “Characterization of Candle Flames”, *Journal of Fire Protection Engineering*, Vol.15, pp.265-285(2005).
2. J.X. Wen, K. Kang, T. Donchev, and J.M. Karwatzki, “Validation of FDS for the Prediction of Medium-scale Pool Fires”, *Fire Safety Journal*, Vol.42, pp.127-138(2007).
3. Z. Jianping, D. Michael, and C. Matthieu, “Assessment of Fire Dynamic Simulator for Heat Flux and Flame Heights Predictions from Fires in SBI Tests”, *Fire Technology*, Vol.46, pp.291-306(2010).
4. M.J. Hurley, “Evaluation of Models of Fully Developed Post-flashover Compartment Fires”, *Journal of Fire Protection Engineering*, Vol.15, pp.173-197(2005).
5. N.D. Pope and C.G. Bailey, “Quantitative Comparison of FDS and Parametric Fire Curves with Post-flashover Compartment Fire Test Data”, *Fire Safety Journal*, Vol.41, pp.99-110(2006).
6. R. Harrison and M. Spearpoint, “A Simple Approximation to Predict the Transition from a Balcony Spill Plume to an Axisymmetric Plume”, *Journal of Fire Protection Engineering*, Vol.20, pp.273-289(2010).
7. K.J. LaMalva and J.R. Barnett, “Failure Analysis of the World Trade Center 5 Building”, *Journal of Fire Protection Engineering*, Vol.19, pp.261-274(2009).
8. M.K. Cheong, M.J. Spearpoint, and C.M. Fleischmann, “Calibrating an FDS Simulation of Goods-vehicle Fire Growth in a Tunnel Using the Runehamar Experiment”, *Journal of Fire Protection Engineering*, Vol.19, pp.177-196(2009).
9. S. Kerber and J.A. Milke, “Using FDS to Simulate Smoke Layer Interface Height in a Simple Atrium”, *Fire Technology*, Vol.43, pp.45-75(2007).
10. S.M. Olenick and D.J. Carpenter, “An Updated International Survey of Computer Models for Fire and Smoke”, *Journal of Fire Protection Engineering*, Vol.13, pp.87-110(2003).
11. G. Rein, A. Bar-ilan, and C. Fernandez-pello, “A Comparison of Three Models for the Simulation of Accidental Fires”, *Journal of Fire Protection Engineering*, Vol.16, pp.183-209(2006).
12. M. Hjohlman, P. Andersson, and P.V. Hees, “Flame Spread Modelling of Complex Textile Materials”, *Fire Technology*, Vol.47, pp.85-106(2009).
13. B.P. Husted and G. Holmstedt, “Influence of Draft Curtain in Sprinkler Activation-Comparison of Three Different Models”, *Journal of Fire Protection Engineering*, Vol.18, pp.29-54(2008).
14. A. Kashef and N. Benichou, “Investigation of the Performance of Emergency Ventilation Strategies in the Event of Fires in a Road Tunnel-A Case Study”, *Journal of Fire Protection Engineering*, Vol.18, pp.165-198(2008).
15. J. Trelles and J.R. Mawhinney, “CFD Investigation of Large Scale Pallet Stack Fire in tunnels Protected by Water Mist Systems”, *Journal of Fire Protection Engineering*, Vol.20, pp.149-198(2010).
16. NIST, FDS(Fire Dynamics Simulator) User’s Guide (2010).
17. 김홍열, 유용호, 이재승, 조봉호, 김형준, “병원형 모듈러블럭의 화재안전 성능평가를 위한 실물스케일 화재실험”, *대한건축학회*, 제28권, 학술발표대회 논문집, pp.329-332(2008).
18. 김홍열, 유용호, 이재승, 조봉호, 김형준, “화재하중을 고려한 병원형 모듈러블럭의 화재거동 및 구조체 변형에 관한 실험적 연구”, *대한건축학회*, Vol.25, No.12, pp.21-30(2009).
19. 유용호, 권오상, 김홍열, “공동주택의 단위공간 실물 화재실험”, *한국화재소방학회*, 춘계학술발표집, pp.346-351(2009).