

상대식 지하철 역사내 화재시 연기제어에 관한 수치해석적 연구

이 성 룡, 유 흥 선**

중앙소방학교 소방과학연구소실, *중앙대학교 기계공학부

A Numerical Study on the Smoke Control in Side-Platform Type Subway Station Fires

Sung Ryong Lee, Hong Sun Ryou**

National Fire Research Laboratory, National Fire Service Academy, Asan 336-922, Korea

*Department of Mechanical Engineering, Chung-Ang University, Seoul 156-756, Korea

(Received May 31, 2007; revision received July 18, 2007)

ABSTRACT: In this study, numerical simulations were carried out to analyze the effect of the smoke extraction system and fire shutters in subway station fires using FDS 4.0. Subway station used in the experiment was 205 m long. Simulation results are validated by comparing with experimental results. Simulation results showed good agreement with experimental results within 20 °C. 20 MW polystyrene was used as a fuel in the numerical prediction. Numerical predictions were performed in the side-platform type subway station in case of a train fire. Temperature and CO concentration were lowered by the operation of smoke extraction system.

Key words: Subway station fire(지하철역사화재), Smoke movement(연기거동), Smoke extraction (배연)

1. 서 론

인류가 지반을 굴착하고 이것을 최초로 이용한 것은 기원전 약4000년, 메소포타미아 지방으로, 지하수를 유도하기 위해 굴착한 수로와 기원전 2700년경 건설한 이집트 피라미드 내 유해 안치소로 통하는 터널, 기원전 2100년경부터 나일강 상류에 위치한 거대한 조각상 뒤쪽의 신전에 이르는 터널 등인 것으로 알려져 있다. 산업혁명에 의해 기술의 진보, 문화의 발전이 보이고 석탄 채굴을 포함하는 광산기술이 비약적으로 발전함과 동시에 지하 공간 이용도 19세기에 들어와서 본격화되기 시작하였다. 1829년에 영국 리버풀시 교

외에서 사상 최초의 철도 터널이 구축되었으며, 1830년대에는 파리에서 대규모 하수도 터널이, 1863년 런던에서는 세계 최초의 지하철이 개통되었다.

급속한 경제의 성장과 인구가 증가함에 따라 세계의 많은 도시들은 지하철을 주요 교통수단으로 사용하고 있다. 또한 교통문제를 해결하기 위해 세계의 주요도시 들에서 지하철이 건설되고 있다. 지하철이 가지는 신속성, 안전성, 정시성, 효율, 저공해 발생 등의 장점으로 인해 대중교통의 주요수단이 되었다.

지하철 역사 승강장의 형태는 크게 섬식과 상대식으로 분류된다. 현재 일본의 동경도내 승강장의 약 59%가 섬식 형태이며 약 30%가 상대식 승강장으로 구성되어있다.

대구 중앙로역 화재⁽¹⁾와 같이 지하철 역사내 화

* Corresponding author

Tel.: +82-2-820-5280; fax: +82-2-813-3669

E-mail address: cfdmec@cau.ac.kr

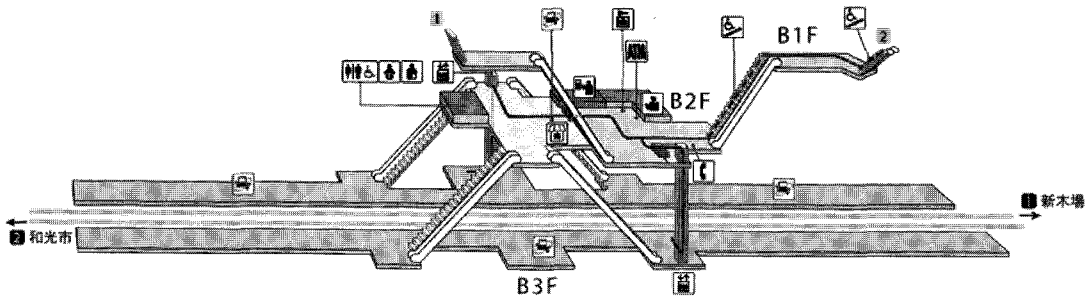


Fig. 1 Map of the subway station.

재 발생시 화재발생 사실을 신속히 통보하고 초기조치를 취하지 않으면 화재가 확대되어 인명과 재산상의 막대한 손실을 초래할 수 있음을 예상할 수 있다.

지하공간의 화재는 일반화재와는 다른 특성을 가지고 있다. 화재시 공기의 공급 부족으로 인하여 불완전 연소가 되어 다량의 연기를 발생시키고 산소결핍을 초래할 수 있다. 또한 폐쇄공간이기 때문에 발생한 열과 연기가 배출되지 않고 내부에 축적된다. 고열과 축적된 연기로 인하여 내부 상황 파악 및 소방대의 화재현장 진입이 곤란하여 화재진화 시간이 지연될 수 있다. 제한된 공간에 다수의 승객이 이용함으로 인하여 승객의 행동 및 피난에 지장을 받는다. 피난방향과 연기의 유동방향이 일치함으로 인하여 피난에 장애요인이 된다.

위와 같은 위험성에도 불구하고 현재 지하철역사는 소방법의 적용을 받지 않고 있다. 지하공간의 최근의 연구들은 화재시 피해를 최소화하기 위해서는 연기의 제어가 중요한 요소임을 보여주고 있다.⁽²⁻⁴⁾ 적절한 방재대책을 세우기 위해서는 무엇보다도 지하공간 화재의 특성을 파악하는 것이 중요하다.

따라서 본 연구에서는 수치해석을 통하여 상대적 지하철 역사내 연기의 거동 특성을 파악하고 가상 시나리오를 설정하여 배연시스템의 성능을 파악하였다. 이를 통하여 지하철 역사내 방화계획의 수립과 배연시스템의 설계에 기초자료로 제공하고자 한다.

2. 실험 지하철 역사

일본 동경에 위치한 현재 사용 중인 지하철 역

사에서 연기거동 실험이 실시되었다.⁽⁵⁾ 실험대상 지하철 역사는 상대식 승강장 형태이다. 승강장은 높이 2.8m, 폭 4~6m, 길이 205m이다. 실험 지하철 역사의 안내도를 Fig. 1에 나타내었다. 승강장은 지하 3층에 위치하고 있으며, 지하 2층의 개찰구 및 대합실은 지하 3층의 승강장과 계단 및 에스컬레이터로 연결되어 있다. 역사 내에는 기계 배연시스템이 설치되어 있으며, 계단과 승강장이 연결되는 위치에 방화셔터가 설치되어 있다.

실험시 메탄올을 연료로 사용하였으며 한 번의 길이가 0.5m인 6개의 메탄올 트레이를 사용하여 실험을 실시하였다. 예비시험을 통해 측정된 결과 하나의 트레이의 발열량은 80kW로 총 발열량은 480kW이다. 양쪽 승강장에 배연구가 설치되어 있으며 총 배연용량은 약 160,000m³/h이다. 배연구는 길이방향 5m 간격으로 양쪽 승강장에 80개가 설치되어 있다. 지하 2층에는 총용량 약 45,000m³/h의 배기구가 설치되어 있다. 실험은 약 12분간 지속되었으며 풍속, 온도, 압력 등을 측정하였다.

3. 수치해석

본 연구에서는 수치해석 코드로 미국의 NIST에서 개발된 화재전용 코드인 FDS 4.0을 사용하였다.⁽⁶⁾ FDS는 난류해석에 있어서 DNS와 LES를 적용할 수 있으나 DNS 계산의 경우 화재공간 전체를 해석하기에는 지나치게 많은 격자를 요구하므로 본 연구에서는 LES 모델을 적용하였다. LES 모델은 필터링을 통하여 필터의 폭보다 큰 에디들의 유동은 직접 해석하고 작은 에디들은 유동의 형태에 독립적으로 모델링하게 된다. FDS 모델의 필터링에는 가우시안 필터와 모자필터가

Table 1 Scenarios of fire simulation

Case No	Platform	Concourse	Fire shutter
1	off	off	open
2	on	on	open
3	on	on	close
4	on	off	open
5	off	off	close
6	on	on	close

적용되고 있으며, 본 연구에서는 수치해석적 안정성이 우수한 모자필터를 이용하였다.⁽⁷⁾ 연소모델로는 혼합분을 연소모델을 사용하였다.

수치해석은 지하 2층 및 3층의 공간을 대상으로 하여 실시되었다. 지하철 역사의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 배연시스템 및 방화셔터의 작동에 따른 6가지의 가상의 시나리오를 선정하여 수치해석을 실시하였으며 이를 Table 1에 나타내었다. 화재는 승강장의 좌측 출구에서 100m 떨어진 객차에서 폴리스티렌이 연소하는 것으로 가정하였으며 최고 발열량은 20 MW로 가정하였으며 화재성장속도는 Ultra Fast로 가정하였다. 배연장치의 경우, 화재발생 120초 후 작동하는 것으로 하였으며 방화셔터는 화재발생 180초 후 일부 폐쇄되고 300초 후 전부 폐쇄되는 것으로 가정하였다. Case 6의 경우 승강장에서는 화재발생 60초 후, 대합실에서는 240초 후 배연시스템이 작동하는 것으로 가정하였다. 또한 방화셔터는 화재발생 60초 후 일부 폐쇄되고 240초 후 전부 폐쇄되는 것으로 가정하였다.

본 연구에서 수치해석에 사용된 격자수는 약 700,000개 이다. 화재발생 이후 600초까지 계산하는데 Pentium-IV 2.13GHz PC를 사용하여 약 17시간이 소요되었다.

Table 2 Measuring points of temperature

No.	X(m)	Y(m)
0	127	4
1	122	1
2	132	4
3	137	4
4	142	4
5	117	5
6	182	4
7	97	4
8	77	5

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 코드의 타당성을 검증하기 위하여 화재발생 300초와 720초 후 승강장 바닥으로부터 2.75m 높이에서의 온도를 실험결과와 비교하였다. 실험시 온도의 측정위치를 Table 2에 나타내었으며 비교결과를 Fig. 3에 나타내었다. 화원 상부를 제외한 영역에서 수치해석 결과가 실험 결과와 최대 20℃ 이내의 범위에서 비교적 잘 예측하는 것을 확인할 수 있다.

Case 1에 대하여 시간에 따른 연기의 이동을 Fig. 4에 나타내었다. 화재발생 약 100초 후 지하 2층으로 연기가 유입되기 시작하였으며 약 130초 후 승강장 양 끝단에 연기가 도달하였다. 화재발생 약 200초 후에는 지하 2층 개찰구에 연기가 도달하였다.

Fig. 5와 Fig. 6에 화재 발생측 승강장에서 2.0m 높이에서 터널 측벽으로부터 5m 떨어진 위치에서의 온도분포와 CO 농도분포를 나타내었다. 배연시스템을 작동함으로써 인하여 승강장 내부의 온도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 화재발생 300

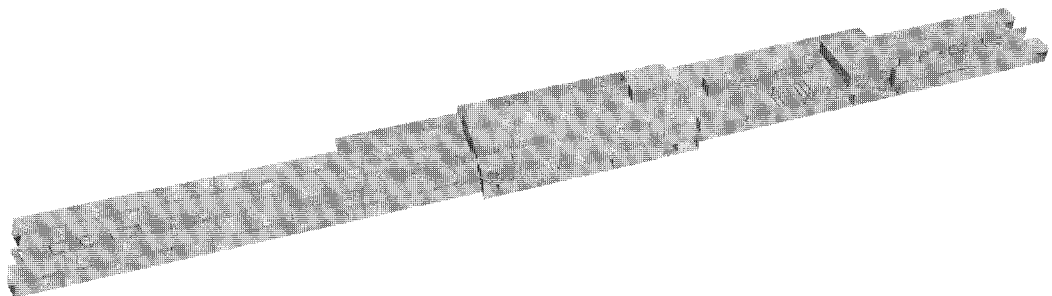
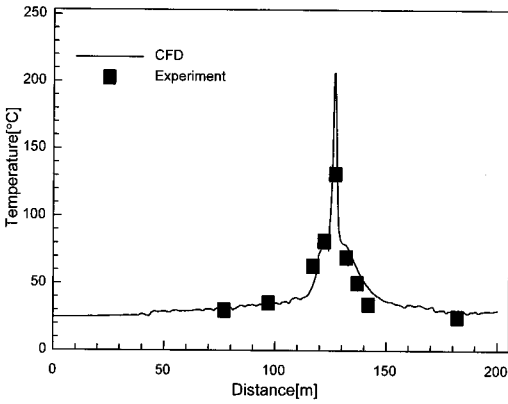
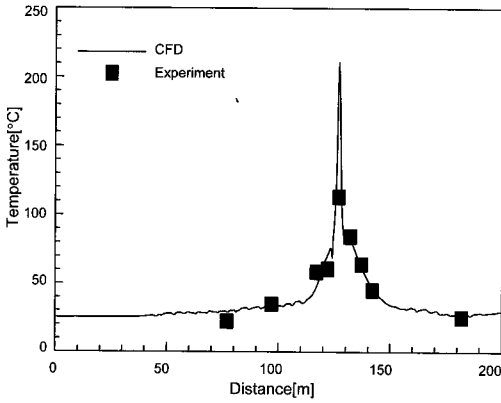


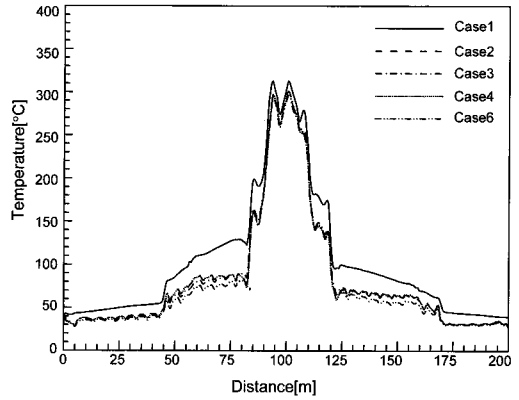
Fig. 2 Schematic of the subway station.



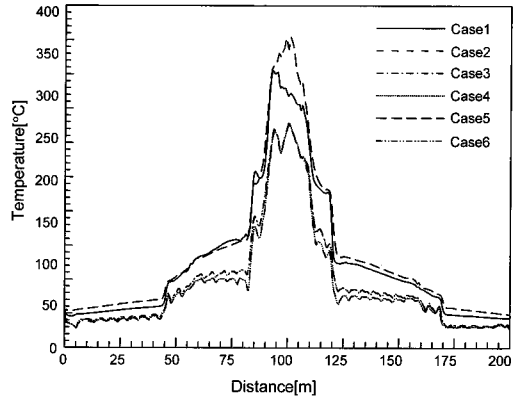
(a) 300sec



(b) 720 sec



(a) 300 sec



(b) 600 sec

Fig. 3 Temperature comparison under the platform ceiling.

Fig. 5 Temperature distribution in the platform.

초 후 배연설비가 작동함으로 인하여 온도가 최대 약 40 °C 감소하였다. Case 6의 경우 배연설비가 조기에 작동함으로 인하여 온도가 최대 약 50 °C가 감소하였다. 화재발생 600초 후 방화셔터는 작동하지 않고 배연설비만 작동한 경우가 승강장에서 온도감소 효과가 가장 우수한 것을 확인할 수 있다. 배연설비와 방화셔터가 모두 작동한 경우가 배연설비만 작동한 경우보다 약 15 °C 높은 것을 확인할 수 있다. CO 농도의 경우 화재발생 300초 후 배연설비가 작동함으로 인하여 최대 약 350 ppm이 감소하였으며 배연설비가 60초 후에 작동한 Case 6의 경우 약 100 ppm이 더 감소하였다. 이를 통하여 조기 화재감지의 중요성을 확인할 수 있다. 화재발생 600초 후에는 배연설비 작동시간의 영향이 거의 없는 것을 확인할 수 있다. 배연설비가 작동하지 않고 방화셔터만 작동한 Case 5의 경우 CO 농도가 100 ppm 이상 증가

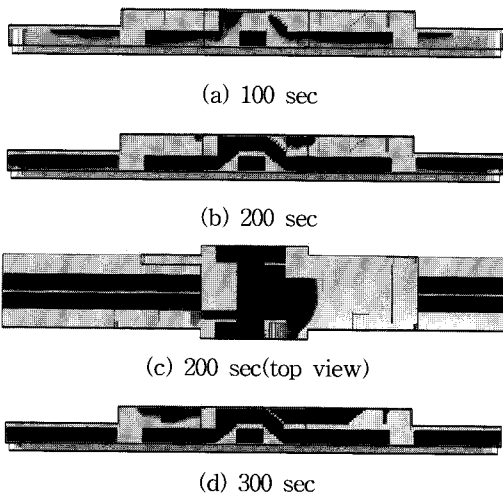
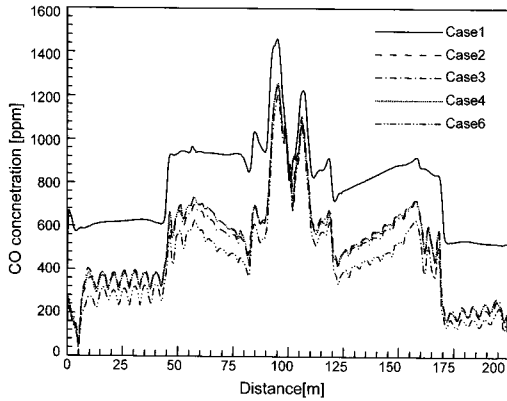
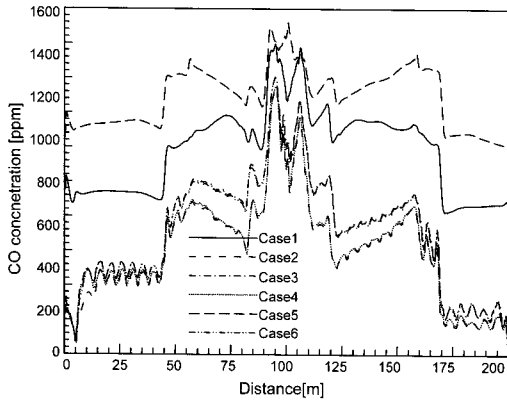


Fig. 4 Distribution of soot density with time.



(a) 300 sec



(b) 600 sec

Fig. 6 CO concentration distribution in the platform.

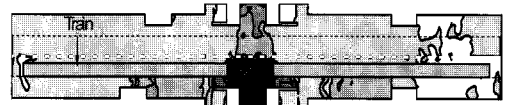
하는 것을 확인할 수 있다. 화재시 배연설비 등이 화열 등으로 인하여 설비의 일부가 파손되어 정상적으로 작동하지 아닐 경우 발생 할 수 있으므로 설계시 이에 대한 고려가 필요할 것이다.

승강장의 바닥으로부터 1.6m 높이에서 화재발생 300초 후 배연시스템의 작동시간에 따른 온도와 CO 농도를 비교하였으며 이를 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다. 배연시스템 작동으로 인하여 온도와 CO 농도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 배연시스템이 조기에 작동할수록 온도 및 CO 농도 감소효과가 상대적으로 더 큰 것을 확인할 수 있다.

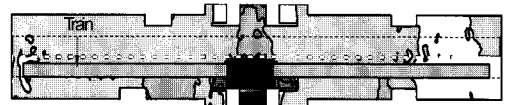
화재발생 600초 후 지하 2층 대합실에서의 CO 농도 분포를 Fig. 9에 나타내었다. Case 2의 경우 배연시스템이 작동함으로 인하여 지하 2층 대



(a) Case 1



(b) Case 3



(c) Case 6

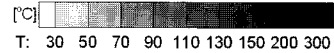


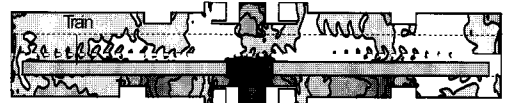
Fig. 7 Temperature contours.



(a) Case 1



(b) Case 3



(c) Case 6

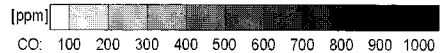


Fig. 8 CO concentration contours.

합실과 화재 발생층 계단의 경계부 부근에서 CO 농도가 약 950 ppm에서 450 ppm 이하로 감소하였으며, Paid-Area(개찰한 자에게만 개방되는 공간)에서는 CO 농도가 약 250 ppm 이하로 감소하였다. 배연시스템과 방화셔터가 모두 작동한 Case 3의 경우, 지하 2층에서 CO 농도가 50 ppm 이하로 감소하였다. 방화셔터만 작동한 Case 5의 경우, 대합실의 대부분의 영역에서 CO 농도가 200

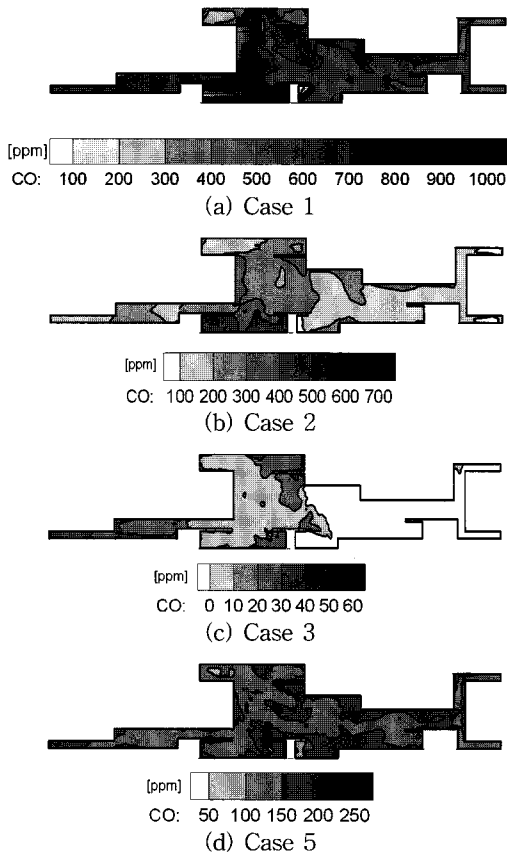


Fig. 9 CO concentration contours.

ppm 이하로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 대합실에서는 배연설비의 작동보다는 방화셔터를 사용하여 승강장에서 발생한 연기의 유입을 차단하는 것이 보다 중요함을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 상대식 지하철 역사내 화재시 배연시스템 및 방화셔터의 작동에 따른 수치해석을 통하여 온도 및 CO 농도를 연구하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론을 다음과 같이 정리할 수 있다.

(1) 지하철 역사내 화재시 배연시스템 및 방화셔터 작동을 통하여 온도 감소 및 CO 농도를 감소시킬 수 있다.

(2) 배연시스템이 조기에 작동할수록 온도 및 CO 농도의 감소에 더욱 효과적이다. 따라서 조기에 화재를 감지할 수 있는 감지기의 설치가 필요

할 것이다.

(3) 대합실에서 CO 농도의 감소에는 배연설비보다 방화셔터의 작동이 더욱 효과적이다.

(4) 국내의 경우 지하철 역사내 승강장 층에 대한 소방방법이 적용되지 않고 있으나, 방화시스템의 설계시 범규위주의 설계보다는 신방재개념을 도입한 성능위주의 방화설계가 필요할 것이다.

후 기

이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2006-214-D00021).

참고문헌

- Hong, W. H., 2004, The progress and controlling situation of daegu subway fire disaster, 6th Asia-oceania symposium on fire science and technology, Dague, Korea, pp. 28-46.
- Modic, J., 2003, Fire simulation in road tunnels, Tunnelling and Underground Space, Vol. 18, No. 5, pp. 525-530.
- Gao, P. Z., Liu, S. L., Chow, W. K. and Fong, N. K., 2004, Large eddy simulations for studying tunnel smoke ventilation, Tunnelling and Underground Space, Vol. 19, No. 6, pp. 577-586.
- Vauquelin, O. and Wu, Y., 2006, Influence of tunnel width on longitudinal smoke control, Fire Safety Journal, Vol. 41, No. 6, pp. 420-426.
- Moriyama S., Hasemi, Y., Okazawa, N., Nam, D. G. and Ding, W., 2006, Smoke movement tests in subway stations actually in service-smoke movement characteristics in side platforms station in the early stage of a fire, Bulletin of Japan Association for Fire Science and Engineering, Vol. 56, No. 3, pp. 23-35.
- McGrattan, K. B., 2006, Fire dynamics simulator (version 4)-Technical reference guide, NIST.
- Zhang, W., Hammer, A., Klassen, M., Carpenter, D. and Roby R., 2002, Turbulence statistics in a fire room model by large eddy simulation, Fire Safety Journal, Vol. 37, No. 8, pp. 721-752.