

터널 화재시 터널 단면의 종횡비에 따른 연기 거동에 관한 실험적 연구

이성룡[†] · 유홍선* · 김충익*

An Experimental Study of Smoke Movement in Tunnel Fires with Aspect Ratio of Tunnel Cross Section

Sung Ryong Lee, Hong Sun Ryou, Choong Ik Kime

Key Words : Tunnel Fire(터널화재), Smoke Movement(연기거동), Aspect Ratio(종횡비), Pool Fire(풀 화재)

Abstract

In this study, smoke movement in tunnel fires was investigated with various aspect ratio(0.5, 0.667, 1.0, 1.5, 2.0) of tunnel cross section. Reduced-scale experiments were carried out under the Froude scaling using 8.27 kW ethanol pool fire. Temperatures were measured under the ceiling and vertical direction along the center of the tunnel. Smoke front velocity and temperature decrease rate were reduced as higher aspect ratio of the tunnel cross-section. Smoke movement was evaluated by analysis of vertical temperature distribution 3 m downstream from the fire source. Elevation of smoke interface according to N percent rule was under about 60% of tunnel height.

M : 모형

기호설명

- A* : 풀의 면적 [m²]
- Fr* : Froude 수
- g* : 중력가속도 [m/s²]
- H_C* : 연소열 [kJ/kg]
- l* : 길이 [m]
- m_f* : 연료의 질량 감소율 [kg/m²s]
- Q* : 발열량 [kW]
- V* : 속도 [m/s]
- χ* : 연소효율

하 첨 자

- F* : 실물

1. 서 론

우리 나라는 국토의 약 70%가 산악 지역이며 간선 도로망의 정비에 있어서 산맥 등의 지형적 장벽을 극복하는 수단으로서 터널의 건설이 불가피하다. 현재 국내에는 492 개소의 철도 터널이 건설되어 있으며, 도로 터널은 269 개소가 건설되어 사용되고 있다. 터널의 대부분이 1km 미만이지만, 도로 터널중 38 개소가 1km 이상인 장대터널이며 최근 건설되는 터널들은 점차 장대화되고 있는 추세이다. 현재 건설중인 고속철도의 경우, 서울 부산간 총 410km 중 44%가 터널 구간으로 이루어져 있다.

그러나 터널 안에서 1 차 화재 또는 기타의 사고가 발생했을 때 신속히 사고의 발생을 터널 관리소에 통보하고 신속한 조치를 취하지 않으면 사고가 확대되어 2 차적인 화재를 발생시킬 위험성이 있다. 특히 터널 안에서 화재 사고가 발생하였을 경우, 공간이 한정된 특수한 환경 하에 있으므

[†] 중앙대학교 기계공학부 대학원
E-mail : comblee@hanmail.net
TEL : (02)820-5283 FAX : (02)813-3669

* 중앙대학교 기계공학부

로 대피자들의 피난 및 대처가 어렵다. 외기의 공급이 한정되기 때문에 대량의 연기나 유독가스를 발생시킬 가능성이 있으며 지하 공간의 용적이 작기 때문에 연기와 열기가 급속도로 퍼질 염려가 있다. 또한 화재시 발생하는 열 및 연기로 인해 내부상황 파악이 어렵고 소방대의 화재 현장 접근과 발화점 파악 곤란으로 인하여 소방 활동의 지연 등이 예상된다.

1999년 3월 24일 프랑스와 이탈리아를 연결하는 몽블랑 터널에서 마아가린과 밀가루를 실은 트럭이 폭발하면서 화재가 발생하여 39명이 사망하고 30명이 부상 당하였다. 2000년 11월 11일 오스트리아의 키츠슈타인호른에서 스키 관광객 165명을 태우고 스키장으로 향하던 케이블 등산열차가 터널을 통과할 무렵 화재에 휩싸여 승객 155명이 사망하는 사고가 발생하였다. 2001년 10월 24일 스위스의 생 고타르 터널 안에서 트럭 2대가 정면 충돌, 사고 트럭에 실려있던 타이어에 불이 붙으면서 화재가 발생하여 11명이 사망하였다. 화재 사례에서 보듯이 터널 화재는 자주 발생하지 않지만 최근 들어 증가 추세에 있으며, 발생 빈도에 비해 대형 참사를 초래하는 경우가 많다. 그러므로 터널 화재 현상의 이해와 터널내 화재 발생에 대비하여 적절한 배연설비 및 피난대책의 마련

이 무엇보다 중요하다.

터널 화재에 관한 연구로 Chow⁽¹⁾는 Zone 모델을 이용하여 터널 내부의 연기 거동을 해석하였으며 Ingason⁽²⁾은 종류식 배연의 영향을 평가하기 위해 모형 실험을 실시하였다. Kumar⁽³⁾는 터널 구배가 자연 환기시에 많은 영향을 끼치고 있음을 밝혔다. Atkinson과 Wu⁽⁴⁾는 터널 경사의 영향을 파악하기 위하여 축소 모형 실험을 실시하였다. 또한 화재시 역기류를 막기 위한 임계속도를 결정하기 위한 연구들이 진행되었다.⁽⁵⁻⁸⁾

터널 화재의 경우 터널 단면의 형상이 화재의 성장과 발달에 중요한 영향을 끼치는 요인 중의 하나이다. 화재 발생 초기 화염의 성장에 있어 터널 폭과 높이는 주위 공기의 유입에 영향을 끼친다. 플룸(plume)이 천장에 충돌한 후 천장 제트를 형성하며 터널 길이 방향으로 퍼져나가면서는 터널 높이보다는 터널 폭의 영향이 더 큰 비중을 차지한다. 그러나 터널 폭의 영향과 높이의 영향에 대한 개별적인 연구들은 이루어지고 있지만 이 두 가지를 모두 고려한 체계적인 연구를 이루어지지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 동일 수력직경을 가지는 터널에 대하여 화재시 종횡비 변화에 따른 영향을 파악하고자 한다. 연기 거동 특성을 파악하여 터

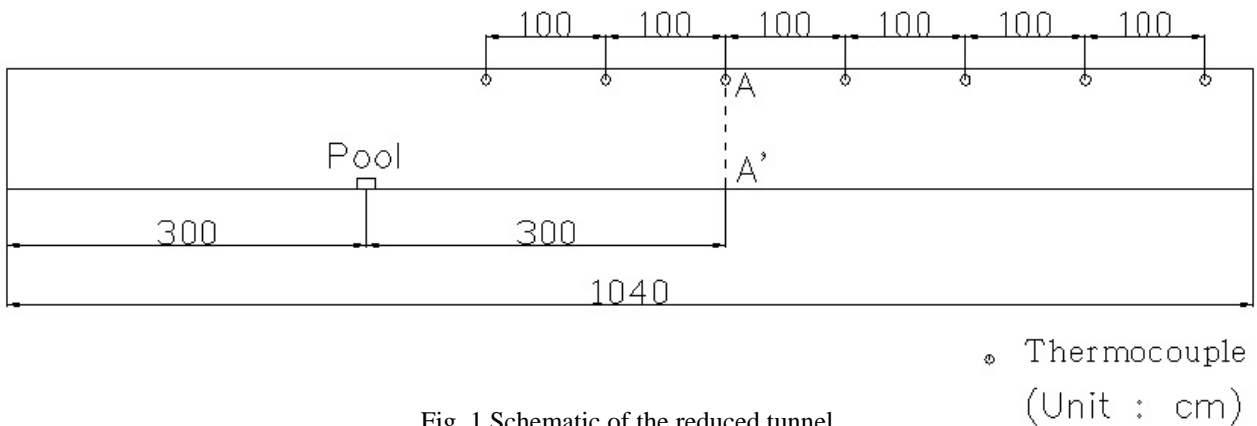


Fig. 1 Schematic of the reduced tunnel

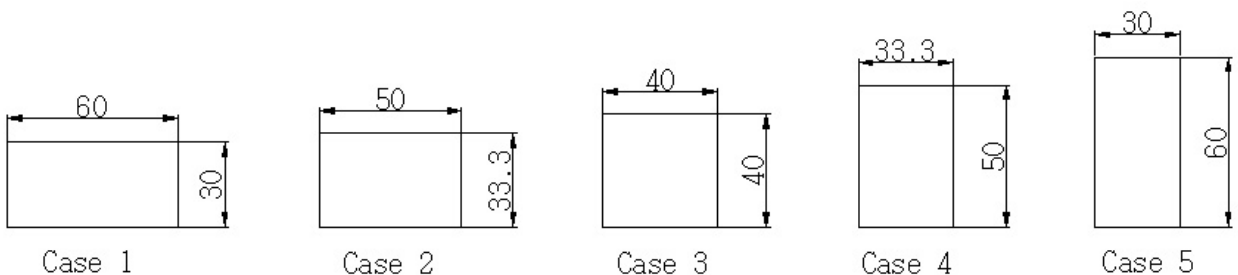


Fig. 2 Cross-section of the model tunnel

널 화재에 관한 물리적 이해를 증진시키고 터널 설계시 방재 계획의 수립과 방재 시스템의 설계시 이론적, 정성적 자료를 제공하고자 한다.

2. 2 장 실험 장치 및 방법

2.1 실험 터널

터널 내부의 단면적이 64m^2 , 총연장 208m 크기의 실물 터널 공간을 길이에 대하여 1/20 로 축소하였다. 모형 터널의 내부 단면적은 0.16m^2 , 총연장은 10.4m이며 두께 10mm의 투명 아크릴을 사용하여 모형 터널을 제작하였다. 화원부는 열에 의한 변형을 방지하기 위하여 방화 석고보드를 사용하여 제작하였다. 터널 단면의 수력직경이 0.4m로 동일한 5 개의 모형 터널이 사용되었으며 종횡비를 각각 0.5, 0.667, 1.0, 1.5, 2.0 으로 변화시켜가며 실험을 실시하였다. 터널의 입구와 출구는 외부에 개방되어 있으며 내부 유동이 없는 상태에서 실험이 실시되었다. Fig. 1 에 모형 터널의 개략도를, Fig. 2 에 단면의 형상을 나타내었다.

2.2 측정 장치

화재 실험 동안 연료의 증발량을 측정하기 위해 로드셀(CAS BC-5AS)을 사용하였다. 연기선단의 이동속도 계산과 터널 내부의 온도 측정을 위하여 소선 지름 0.4mm의 K-type 열전대(Chromel-Alumel)를 사용하였다. 터널 천장 아래 2cm 떨어진 위치에서 천장을 따라 1m 간격으로 길이방향과 화원으로부터 3m 떨어진 위치(A-A')에 수직 방향으로 열전대를 설치하였다. 열전대에서 발생된 신호는 Agilent 34970A Data Acquisition Unit 과 Agilent 34910 채널을 통해 수집되었다. 수집된 데이터는 Labview 프로그램을 이용하여 실시간으로 저장되었다.

2.3 축소 법칙

화재로 인한 연기의 거동을 모델링 하는데 Froude 상사를 이용하여 축소 모형 실험을 실시하였다. Froude 수는 중력에 대한 관성력의 비이다. 부력은 중력에 의한 힘이기 때문에 화재로 인한 유동에 지배적이다. 따라서 Froude 수의 보존은 중요하다.

Froude 수의 보존은 다음과 같이 표현될 수 있

Table 1 Smoke front velocity of 8.27kW fire

Aspect ratio	Section	Velocity [m/s]
0.5	T1~T3	0.23
	T3~T5	0.19
	T5~T7	0.15
0.667	T1~T3	0.28
	T3~T5	0.24
	T5~T7	0.17
1.0	T1~T3	0.32
	T3~T5	0.3
	T5~T7	0.27
1.5	T1~T3	0.35
	T3~T5	0.32
	T5~T7	0.29
2.0	T1~T3	0.37
	T3~T5	0.37
	T5~T7	0.35

다⁽⁹⁾.

$$Fr = \frac{V_M^2}{gl_M} = \frac{V_F^2}{gl_F} \quad (1)$$

속도와 발열량에 대한 상관관계는 다음과 같다.

$$V_M = V_F \sqrt{\frac{l_M}{l_F}} \quad (2)$$

$$Q_M = Q_F \left(\frac{l_M}{l_F} \right)^{5/2} \quad (3)$$

2.4 화원

실험에 한 번의 길이가 14cm인 정사각형 풀을 사용하였으며 가연물질로는 에탄올을 사용하였다. 에탄올의 연소열은 268000kJ/kg 이다. 발열량은 화재 실험 동안 증발된 연료의 양을 측정하여 산정하였다. 본 연구에서는 92%의 연소효율을 가정하였다⁽¹⁰⁾. 발열량은 다음 식에 의해 결정하였다⁽¹¹⁾.

$$Q = \chi \cdot \dot{m}_f \cdot A \cdot \Delta H_C \quad (4)$$

3. 실험 결과 및 고찰

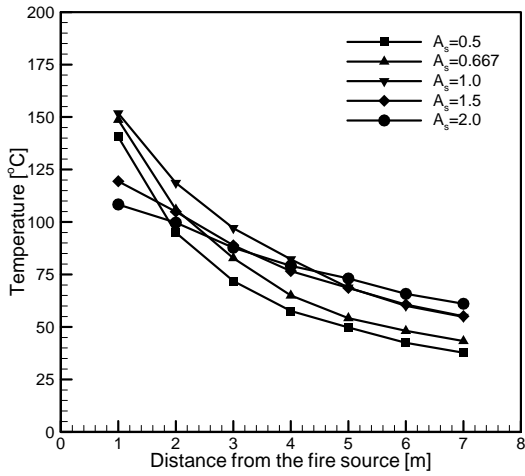


Fig. 3 Ceiling temperature distribution in the tunnel.

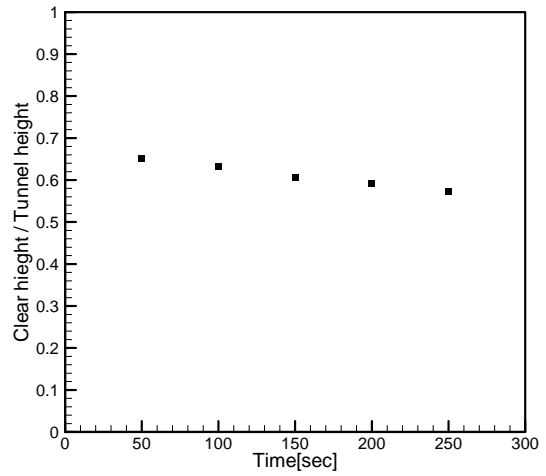


Fig. 5 Elevation of smoke interface with time (aspect ratio=1.0).

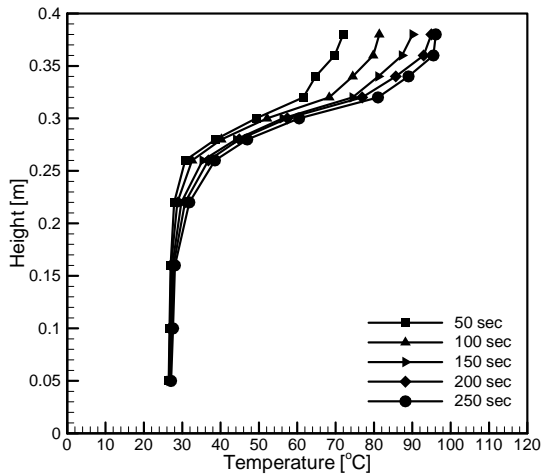


Fig. 4 Vertical temperature distribution with time.

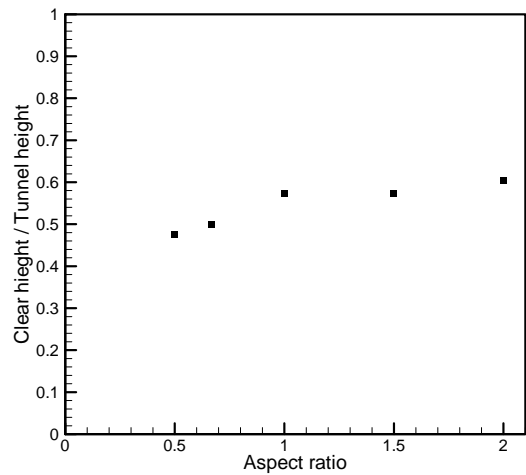


Fig. 6 Elevation of smoke interface with aspect ratio.

화원의 발열량을 산정하기 위하여 로드셀을 이용하여 연료의 증발량을 측정하였다. 측정된 연료의 증발량을 식 (4)에 대입하여 계산한 결과 발열량은 8.27kW 이며 실제 터널에 대한 발열량으로 환산하면 14.8MW 에 해당한다.

터널 내에서 화재가 발생하면 연기가 상승하여 천장에 도달한 후 천장을 따라 터널 길이 방향으로 전파된다. 연기 선단의 이동속도는 대피자들의 대피시간과 밀접한 관련이 있다. 초기 온도상태에 있는 열전대들이 연기 선단과 만나면 온도가 순간적으로 수직 상승하게 되는데, 열전대간의 온도상승 시간차를 이용하여 연기 선단의 이동속도를 계산하였다. 종횡비에 따른 연기 선단의 이동속도를 Table 1 에 나타내었다. 화원에서 멀어질수록 연기 선단의 이동속도가 감소하는데, 이는 연기가 가지

고 있는 열에너지의 손실과 천장과의 마찰 등으로 인해 부력이 감소하기 때문이다. 종횡비가 클수록 터널 높이가 높아져 화재가 충분히 성장할 수 있어 연기 선단의 이동속도가 증가하게 된다. 또한 종횡비가 클수록 터널 폭이 좁기 때문에 출구로 배출되는 연기가 가지고 있는 열에너지의 손실과 부력의 감소가 줄어들어 연기 선단의 속도 감소율이 줄어들어 화원 부근과 출구에서의 속도차가 종횡비가 작은 경우에 비해 줄어든다. Fig. 3 에 화재발생 250 초 후 천장 아래에서의 온도 분포를 나타내었다. 종횡비가 1 이하의 경우 화염이 천장에 도달하여 천장을 직접 가열하게 된다. 따라서 화원 부근의 온도가 화염이 천장에 도달하지 않는 종횡비가 1.5 이상인 경우에 비하여 높은 것

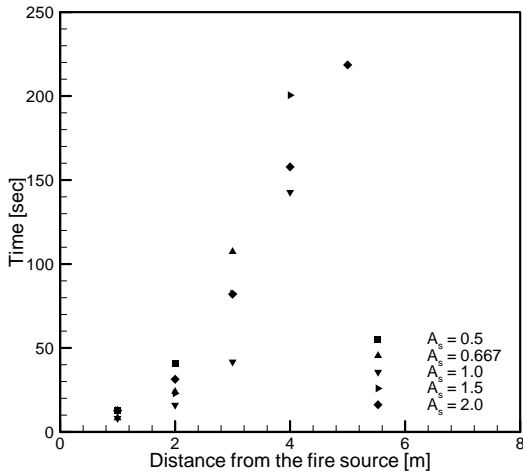


Fig. 7 Smoke detection time with aspect ratio.

을 확인할 수 있다. 그러나 천장을 따라 전파되면서 종횡비가 클수록 터널 폭이 줄어들기 때문에 터널 폭방향으로의 열손실이 감소하여 온도의 강하율이 줄어든다. 출구 부근에서는 종횡비가 클수록 온도가 높아지게 되는 것을 확인할 수 있다. T1 위치에서 T7 위치까지 이동하면서 연기의 온도가 종횡비가 0.5 일 때 약 103℃가 감소하였으며 종횡비가 2.0 일 때 약 47℃가 감소하였다. Fig. 4에 종횡비가 1.0 일 때 화원에서 3m 떨어진 위치에서 시간의 경과에 따른 수직 온도 분포를 나타내었다. 화원에서 발생한 고온의 연기가 터널 천장을 따라서 이동하기 때문에 터널 상부의 온도는 시간의 경과에 따라 계속 증가하고 있지만 터널 하부에서는 외부에서 차가운 공기의 지속적인 유입으로 인해 온도가 거의 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있다. 터널 내부의 연기의 거동은 터널 출구로 배출되는 상부의 뜨거운 연기층, 하부의 차가운 공기층, 뜨거운 연기층과 차가운 공기층의 혼합이 일어나는 혼합 영역으로 나눌 수 있다. 온도 구배를 이용하여 세 영역을 구분할 수 있다.

연층의 하강 정도는 대피자의 가시거리 확보의 측면에서 중요하다. 연층의 존재 영역을 추론하는 방법으로 cooper 등⁽¹²⁾은 N퍼센트법을 제안하였다. 본 연구에서는 N퍼센트법을 사용하여 연층의 경계 높이를 결정하였다. 종횡비가 1.0 일 때 8.27kW 화재에 대하여 시간 경과에 따른 연층 경계의 높이를 Fig. 5에 나타내었다. 시간의 경과에 따라 연층이 점진적으로 감소하였으며 화재 발생 250 초 후 터널 높이의 약 56%에서 연층이 유지되었다. 종횡비 변화에 따른 연층 경계의 위치

를 Fig. 6에 나타내었다. 종횡비가 증가할수록 터널 높이에 대하여 연층이 차지하는 비율이 감소하는 경향을 보이고 있다. 종횡비가 1.0 이상인 터널에서는 연층의 두께가 터널 높이의 약 40%에서 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 실제 화재가 발생하면 터널 밖으로 배출되는 연기의 일부가 부력을 잃고 하강하여 터널 내부는 연기로 가득차게 된다⁽¹³⁾.

터널 내에는 화재시 발생하는 열, 빛, 연기로 화재 발생을 검출하는 화재 감지기가 설치되어 있다. 이중 정온식 열감지기가 가격이 가장 저렴하고 오작동율도 가장 낮다. 열감지기의 작동 온도를 75℃로 가정하여 화재 감지시간을 Fig. 7에 나타내었다. 종횡비가 0.5 일 경우 화원으로부터 3m 이상 떨어진 위치에서는 감지기가 작동하지 않았다. 실제 터널로 환산하면 약 13m 이상 떨어진 위치에서는 화재를 감지할 수 없다. 따라서 약 15MW의 화재에 대해 열감지기의 설치간격을 약 10m 이하로 하여야 한다.

4. 결론

본 연구에서는 터널 단면의 종횡비 변화에 따른 연기거동 특성을 파악하기 위하여 축소 모형 실험을 실시하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론을 다음과 같이 정리할 수 있다.

- (1) 종횡비가 클수록 연기 선단의 이동속도가 증가하며, 연기 전파에 따른 속도 감소율이 낮아진다.
- (2) 종횡비가 클수록 온도 강하율이 감소하며 출구에서의 온도는 종횡비가 클수록 높아진다.
- (3) 수직 온도분포를 통하여 연기의 거동을 확인할 수 있으며 연층의 경계 높이를 예측할 수 있다.
- (4) 연층의 경계 높이가 종횡비에 따라 증가하다가 종횡비가 1.0 이상에서는 터널 높이의 약 60% 이하에서 일정하게 유지된다.
- (5) 15MW 화재에 대하여 화재를 감지하려면 10m 이하의 간격으로 열감지기를 설치하여야 한다.

참고문헌

- (1) W. K. Chow, 1996, "Simulation of Tunnel Fires Using a Zone Model", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.11, No.2, pp.221-236.
- (2) H. Ingason, 1999, "Effects of Ventilation on Smoke Spread in Tunnels", *Proceedings of the 1st International Conference on Tunnel Fires and One Day Seminar on Escape from Tunnels*, Lyon, France, pp.407-416.
- (3) S. Kumar and G. Cox, 1985, "Mathematical Modeling of Fires in Road Tunnels", *5th International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, Lille, France, pp.61-76.
- (4) G. T. Atkinson and Y. Wu, 1996, "Smoke Control in Sloping Tunnels", *Fire Safety Journal*, Vol.27, pp.335-341.
- (5) W. D. Kennedy, 1996, "Critical Velocity: Past, Present and Future". *Contribution to the One Day Seminar Smoke and Critical Velocity in Tunnels*, London, pp.58-67.
- (6) D. Tetzner, R. Pollak, W. Foit and M. Sippel, 1999, "Critical Velocity - Comparative Assessment of Test Results and CFD Simulation", *Proceedings of the 1st International Conference on tunnel Fires and One Day Seminar on Escape from Tunnel*, Lyon, France, pp.181-190.
- (7) Y. Oka and G. T. Atkinson, 1996, "Control of Smoke Flow in Tunnel Fires", *Fire Safety Journal*, Vol.25, pp.305-322.
- (8) Y. Wu and M. Z. A. Bakar, 2000, "Control of Smoke Flow in Tunnel Fires Using Longitudinal Ventilation Systems - A Study of the Critical Velocity", *Fire Safety Journal*, Vol.35, pp.363-390.
- (9) J. G. Quintiere, 1989, "Scaling Applications in Fire Research", *Fire Safety Journal*, Vol.15, pp.3-29.
- (10) A. Tewarson, 1998, "Smoke Point Height and Fire Properties of Materials", NIST-GCR-88-555, National Institute of Standards and Technology, Available from National Technical Information Services, Springfield, VA 22161, USA.
- (11) K. B. Edward, E. N. Harold and D. E. David, 1997, "Simplified Fire Growth Calculation", *Fire Protection Handbook*, 18th Edition, NFPA FPH1897, Section 11, Chapter 10.
- (12) L. Y. Copper, M. Harkleroad, J. Quintiere and W. Rinkinen, 1982, "An Experimental Study of Upper Hot Layer Stratification in Full-Scale Multiroom Fire Scenarios", *Journal of Heat Transfer*, Vol.104, pp.741-749.
- (13) S. R. Lee, H. T. Park, C. I. Kim and H. S. Ryou, 2002, "An Experimental Study of Smoke Movement in Tunnel Fires with Natural Ventilation", *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol.14, No.3, pp.247-253.