

터널 화재시 연기류의 위치 결정에 관한 실험적 연구

이성룡^{1)*}, 유홍선²⁾

An Experimental Study on the Determination of Backlayering Distance in Tunnel Fires

Sung Ryong Lee and Hong Sun Ryou

Abstract In this study reduced-scale experiments were conducted to determine the backlayering distance in tunnel fires. The 1/20 scale experiments were carried out under the Froude scaling using ethanol square pool fire ranging from 8 to 16cm in each side with total heat release rate from 2.47 to 12.30 kW. It has been found that ventilation velocity increases with aspect ratio(tunnel height/tunnel width). At $L_B^* < 5$ the ventilation velocity increases proportional to the backlayering distance from 0.25 power of the heat release rate. However at $L_B^* \geq 5$ the ventilation velocity varies as the 0.3 power of the heat release rate.

KeyWords Tunnel Fire, Smoke Movement, Backlayering, Aspect Ratio

초 록 본 연구에서는 터널에서 화재 발생시 연기류의 위치를 결정하기 위하여 축소실험을 실시하였다. Froude 상사를 사용하여 1/20로 축소된 모형터널에서 실험을 실시하였으며 가연물질로는 에탄올을 사용하였다. 한 변의 길이가 8~16 cm의 화원을 사용하였으며 발열량은 2.47~12.30 kW이다. 터널 단면의 종횡비(터널높이/터널폭)가 증가할수록 연기류를 제어하기 위해 더 큰 배연 풍속이 요구됨을 확인하였다. $L_B^* < 5$ 일 때 연기류를 막기 위한 배연속도가 0.25승에서부터 발열량에 비례하여 증가한다. $L_B^* \geq 5$ 에서는 발열량의 0.3승에 비례한다.

핵심어 터널화재, 연기거동, 연기류, 종횡비

1. 서 론

터널(tunnel)이란 광의로 정의하면 '지반 중에 어떤 목적이나 용도에 따라 만들어 놓은 공간을 갖는 구조물' 또는 협의로 정의하면 '입구와 출구를 갖는 지하통로 역할을 하는 연속적 공간'이며 구체적으로는 일반적인 도로 및 철도 터널을 예로 들 수 있다. NFPA 502¹⁾에 의하면 터널은 제한된 접근로를 통해 차량이 진입할 수 있는 밀폐형 도로(enclosed road)라고 정의하고 있다.

현재 국내에는 492개소의 철도 터널이 건설되어 있으며, 도로 터널은 269개소가 건설되어 사용되고 있다. 터널의 대부분이 1 km 미만이지만, 도로 터널 중 38개소가 1 km 이상인 장대터널이며 최근 건설되는 터널들은

점차 장대화되고 있는 추세이다. 현재 건설 중인 고속철도의 경우, 총 터널 수는 83개소로 터널 전체 길이가 189 km에 이른다. 가장 긴 터널은 부산에 건설 중인 금정터널로 총 연장이 18.53 km이다.

터널 안에서 화재 또는 기타의 사고가 발생했을 때 신속히 사고의 발생을 터널 관리소에 통보하고 신속한 조치를 취하지 않으면 사고가 확대되어 2차적인 화재와 파생 사고를 발생시킬 위험성이 매우 크다. 특히 터널 안에서 화재 사고가 발생하였을 경우, 공간이 한정된 특수한 환경 하에 있으므로 대피자들의 피난 및 대처가 어렵다. 외기의 공급이 한정되기 때문에 대량의 연기나 유독가스를 발생시킬 가능성이 크며 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.

터널 내부에서 화재시 발생한 고온의 연기는 천장을 따라 터널 출구 방향으로 이동하게 되는데, 화재 방향

¹⁾ 중앙대학교 기계공학부 대학원

²⁾ 중앙대학교 기계공학부 교수

*교신저자(Corresponding Author): comblee@hanmail.net

접수일: 2004년 7월 2일

심사 완료일: 2004년 8월 17일

으로 신선한 공기를 불어넣어 대피자들의 피난 방향으로 진행되는 역기류(backlayering)를 막기 위한 최소 속도를 임계속도(critical velocity)라 한다. 기계 배연 터널의 경우 배연 방식에 따른 배연 성능과 임계속도에 관한 연구들이 주로 이루어지고 있다²⁻⁶⁾.

화재시 화염 자체에 의한 피해보다는 유독가스에 의한 피해가 더 큰 비중을 차지하고 있다. 따라서 연기의 거동에 대한 보다 정확한 이해와 연기의 제어가 무엇보다 중요하다. 본 연구에서는 배연풍속에 따른 역기류의 위치 파악을 통하여 터널 화재의 물리적 특성의 이해와 터널 설계자나 방재 전문가들에게 보다 유용한 화재 안전 설비에 관한 이론적, 정성적인 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험터널

폭 8 m, 높이 8 m, 길이 268 m 크기의 실물 터널 공간을 길이에 대해 1/20로 축소하였다. 축소 터널은 수력직경이 0.4 m로 동일하며, 길이 10.4 m이며 두께 0.01 m의 투명 아크릴을 이용하여 제작하였으며 화원

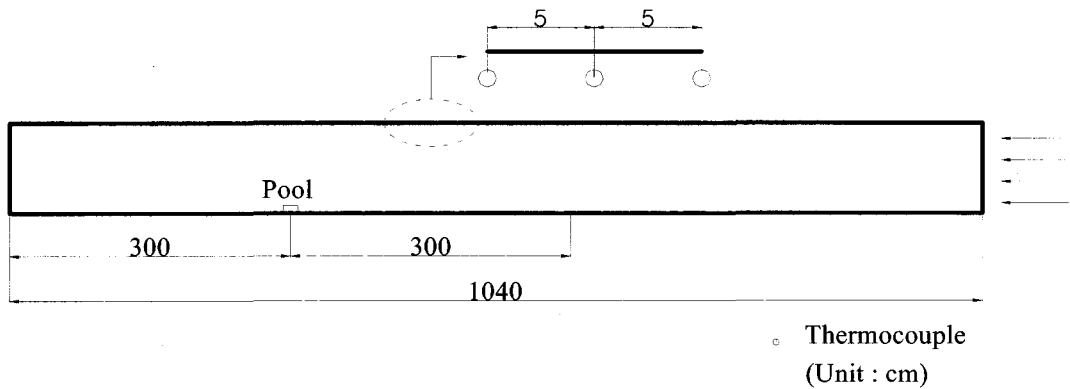
부의 천장은 열에 의한 변형을 방지하기 위해 방화 석고보드를 이용하여 제작하였다. 터널의 입구와 출구는 외부에 개방되어 있으며 터널내부의 유동이 없는 상태에서 실험을 실시하였다. 터널 입구에 풍동을 연결하여 배연 풍속을 유발시켰으며 전압을 조정하여 풍속을 조절하였다. Fig. 1에 실험터널의 개략도와 터널 단면의 형상을 나타내었다.

2.2 실험 장치

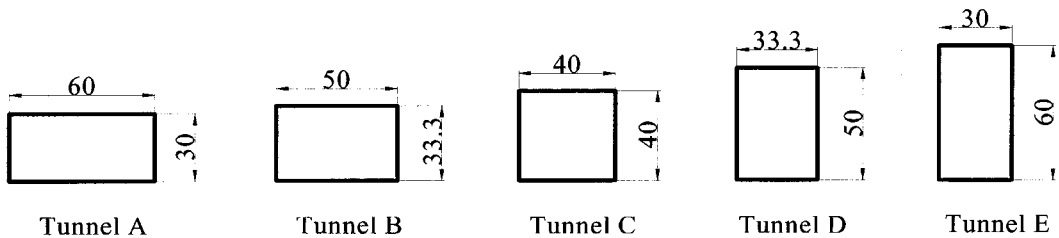
터널 천장아래 2 cm 떨어진 위치에 5 cm 간격으로 열전대를 설치하여, 열전대들의 온도 변화를 이용하여 역기류의 길이를 측정하였다⁷⁾. 열전대에서 발생된 신호는 Agilent 34970A Data Acquisition Unit과 Agilent 34910 채널을 통해 수집되었다. 데이터 수집 장치의 각 채널에서 수집된 데이터는 RS232를 통해 PC로 전송되었으며 LabView 프로그램을 이용하여 수집된 데이터를 처리하였다.

2.3 화원

일반적으로 풀 화재는 버너 화재나 고체 화재 등과 같은 다른 화재 장치들에 비해 실험 장치가 간단하고



(a) Schematic of the reduced tunnel



(b) Cross-sections of the model tunnels

Fig. 1. Schematic and cross-sections of the model tunnels

연소 면적이 일정하여 발열량 산정이 용이한 장점이 있기 때문에 고정된 발열량의 확산 화염을 묘사하는데 있어서 널리 이용된다⁸⁻¹⁰⁾. 본 연구에서는 6개의 풀을 사용하였으며, 정사각형으로 각 변의 길이가 각각 8 cm, 10 cm, 12 cm, 14 cm, 16 cm, 18 cm이고 풀의 높이는 2 cm이다. 가연물질로는 에탄올을 사용하였다. 에탄올의 밀도는 794 kg/m^3 이고, 연소열은 26800 kJ/kg 이다¹¹⁾.

각 화원의 발열량은 로드셀을 이용하여 화재 실험시 증발된 연료의 양을 측정하여 산정하였다. 본 연구에서는 92%의 연소효율을 가정하였다¹²⁾. 발열량은 다음 식에 의해 결정하였다¹³⁾.

$$Q = \chi \dot{m}_f \Delta H_c A \quad (1)$$

여기서, χ 는 연소효율, \dot{m}_f 는 연료의 증발량, ΔH_c 는 연소열, A 는 풀의 표면적을 나타낸다. 식 (1)에 의해 계산된 각 화원에서의 발열량을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Fire size of the ethanol pool fire

Hydraulic diameter [cm]	Q [kW]
8	2.47
10	3.84
12	5.63
14	8.27
16	9.96
18	12.30

3. 실험결과 및 고찰

배연 속도에 따른 연기류의 길이를 Fig. 2에 나타내었다. 자연 환기 터널 실험 결과에서 확인하였듯이 종횡비가 커질수록 연기류를 제어하기 위해 더 큰 배연풍속이 요구됨을 보여주고 있다.

무차원 해석을 통하여 연기류의 길이에 따른 배연속도를 분석하였다. 무차원 발열량 Q 와 무차원 배연속도 V_B 를 사용하여 무차원 해석을 실시하였으며 Q 와 V_B 는 다음과 같이 정의된다.

$$Q = \frac{Q}{\rho_0 C_p T_0 \sqrt{A_s g H^5}} \quad (2)$$

$$V_B = \frac{V}{A_s \sqrt{g H}}$$

$$\alpha = -0.0008 L_B^{*2} + 0.038 L_B^* + 0.16$$

$$L_B^* = \frac{L_B}{H} \quad (3)$$

여기서, ρ_0 는 주위 공기의 밀도, C_p 는 정압비열, T_0 는 주위 공기의 온도, A_s 는 터널 단면의 종횡비, g 는 중력가속도, H 는 터널 단면의 수력직경, L_B 는 연기류의 길이이다.

각 위치에서 무차원 발열량 Q 에 따른 무차원 배연속도 V_B 를 Fig. 3에 나타내었다. 입의 위치까지 연기류를 제어하기 위한 배연속도가 발열량의 0.25승에서부터 연기류의 길이에 비례하여 증가하 점차 장대화되고 있는 추세이다. 현재 건설 중인 고속철도의 경우, 총 터널 수는 83개소로 터널 전체 길이가 189 km에 이른다. 가장 긴 터널은 부산에 건설 중인 금정터널로 총 연장이 18.53 km이다.

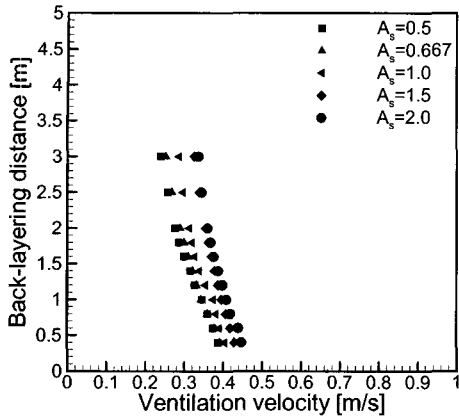
터널 안에서 화재 또는 기타의 사고가 발생했을 때 신속히 사고의 발생을 터널 관리소에 통보하고 신속한 조치를 취하지 않으면 사고가 확대되어 2차적인 화재와 파생 사고를 발생시킬 위험성이 매우 크다. 특히 터널 안에서 화재 사고가 발생하였을 경우, 공간이 한정된 특수한 환경 하에 있으므로 대피자들의 피난 및 대처가 어렵다. 외기의 공급이 한정되기 때문에 대량의 연기나 유독가스를 발생시킬 가능성이 크며 지하 공간의 용적이 작기 때문에 연기와 열기가 급속도로 퍼질 염려가 있다. 또한 화재시 발생하는 열 및 연기로 인해 내부상황 파악이 어렵고 소방대의 화재 현장 접근과 발화점 파악 곤란으로 인하여 소방 활동의 지연 등이 예상된다.

터널 내부에서 화재시 발생한 고온의 연기는 천장을 따라 터널 출구 방향으로 이동하게 되는데, 화재 방향다가 $L_B^* \geq 5$ 인 구간에서는 발열량의 0.3승에 비례하고 있다. 무차원 배연속도와 무차원 발열량의 상관관계는 다음과 같다.

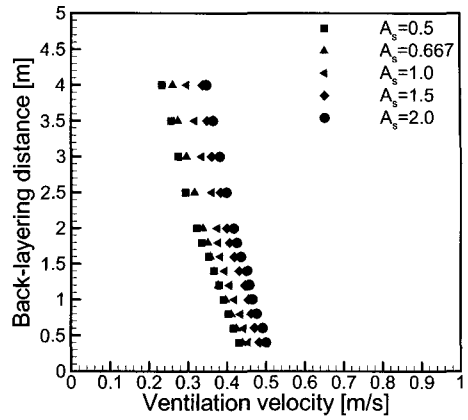
$$V_B = 0.5Q^{(0.02L_B^*+0.2)} \quad (L_B^* < 5) \quad (4)$$

$$V_B = (-0.02L_B^*+0.6)Q^{0.3} \quad (L_B^* \geq 5)$$

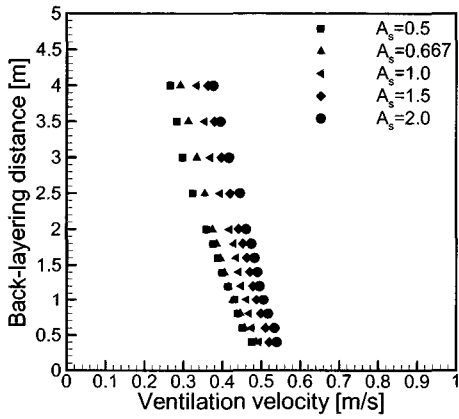
실험식의 타당성을 검증하기 위해 화재해석 전용 코드인 FDS를 이용한 수치해석 결과와 비교를 실시하였다⁷⁾. Fig. 4에 9.96 kW 화재에 대하여 무차원 배연속도, V_B 에 따른 무차원 연기류의 길이, L_B^* 와의 관계를 식 (4)와 비교하였다. 실험식과 비교하여 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 수치 해석 결과와 비교를 통한 식 (4)의 적용 가능성을 검증하였으나 보다 정확한 검증을 위해 다른 실험 결과와의 비교가 필요할 것으로 사료된다.



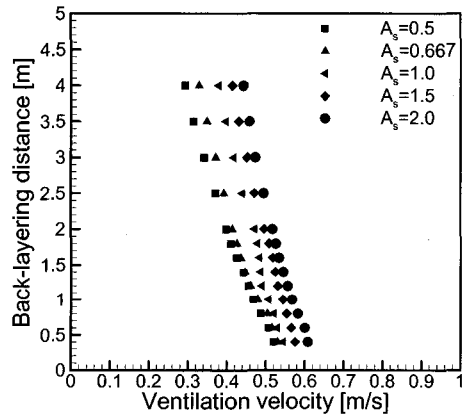
(a) 2.47 kW fire



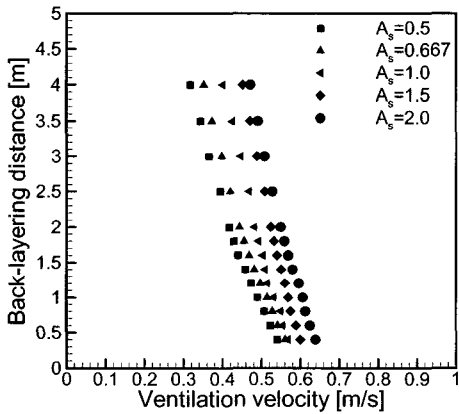
(b) 3.84 kW fire



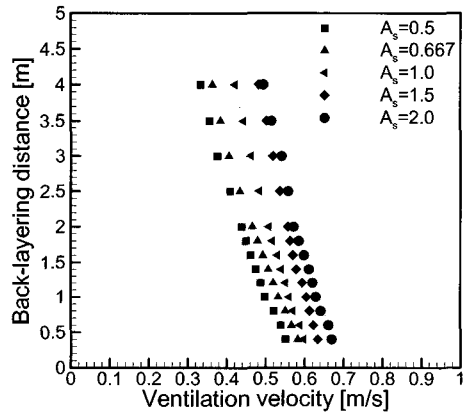
(c) 5.63 kW fire



(d) 8.27 kW fire



(e) 9.96 kW fire



(f) 12.3 kW fire

Fig. 2. Backlayering distance with ventilation velocity

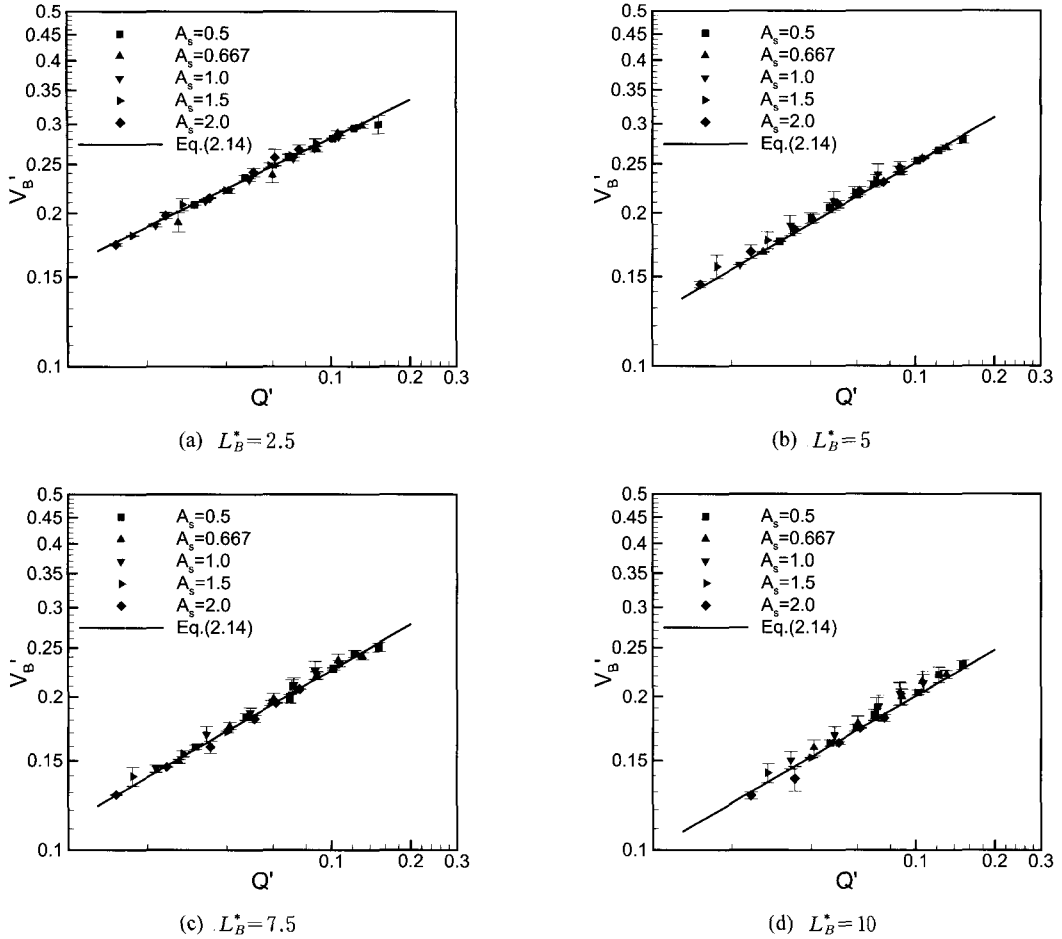


Fig. 3. Dimensionless ventilation velocity with dimensionless heat release rate

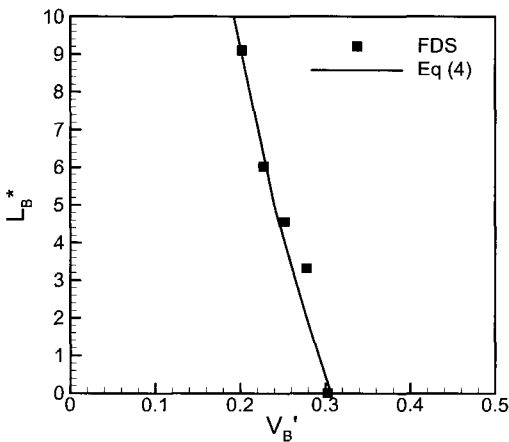


Fig. 4. Dimensionless backlayering distance with dimensionless ventilation velocity

4. 결 론

본 연구에서는 터널내 화재 발생시 배연속도에 따른 역기류의 위치를 파악하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론을 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 1) 터널 단면의 종횡비가 커질수록 역기류를 제어하기 위해 더 큰 배연풍속이 요구된다.
- 2) 임의의 위치까지 역기류를 제어하기 위한 배연속도가 발열량의 0.25승에서부터 역기류의 길이에 비례하여 증가한다. $L_B^* \geq 5$ 인 구간에서는 발열량의 0.3승에 비례한다.

후 기

본 연구는 과학기술부 인위재해 방재기술개발 사업

(M10323000002-03B32000020) 지원으로 수행되었으며 관계제위께 감사드립니다.

참고문헌

1. NFPA 502: Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways, 2001 Edition.
2. Ingason, H., 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, 407-416.
3. Ribot, B. and P. Chasse, 1999, Numerical Simulations of Smoke Extraction by Roof Vents in a Tunnel: Comparison with Experimental Tests Analysis of Physical Phenomena, Proceedings of the 1st International Conference on Tunnel Fires and One Day Seminar on Escape from Tunnels, Lyon, France, 169-179.
4. Vauquelin, O. and O. Mgret, 2002, Smoke Extraction Experiments in Case of Fire in a Tunnel, Fire Safety Journal, Vol. 37, 523-533.
5. Oka, Y. and G. T. Atkinson, 1996, Control of Smoke Flow in Tunnel Fires, Fire Safety Journal, Vol. 25, 305-322.
6. Wu, Y. 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, 363-390.
7. 이성룡, 2004, 종류식 배연 터널 화재시 입계속도에 대한 종횡비의 영향에 관한 연구, 중앙대학교.
8. Zhou, X. C. and J. P. Gore, 1995, Air Entrainment flow Field Induced by a Pool Fire, Combustion and Flame, 100.1, 52-60.
9. Drysdale, D., 1985, An Introduction to Fire Dynamics, A Wiley-Interscience Publication.
10. Weckman, E. J. and A. B. Strong, 1996, Experimental Investigation of the Turbulence Structure of Medium-Scale Methanol Pool Fires, Combustion and Flame, 105.3, 245-266.
11. Babrauskas, V., 1998, Burning Rates, The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2-1 to 2-15, USA.
12. Tewarson, A., 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.
13. Edward, K. B., E. N. Harold and D. E. David, 1997, Simplified Fire Growth Calculation, Fire Protection Handbook, 18th Edition, NFPA FPH1897, Section 11, Chapter 10.



이성룡

1998년 중앙대학교 기계설계학과 공학사
2000년 중앙대학교 기계공학부 공학석사
2004년 중앙대학교 기계공학부 공학박사

Tel: 02-820-5283
E-mail: comblee@hanmail.net
현재 Auburn University 연구원



유홍선

1977년 서울대학교 항공공학과 공학사
1979년 서울대학교 항공공학과
공학석사
1988년 Univ. of London(Imperial
College) 공학박사

Tel: 02-820-5280
E-mail: cfdmec@cau.ac.kr
현재 중앙대학교 기계공학부 교수