

## 터널화재에서 환기속도와 backlayer의 길이변화 The Change of Backlayer Length with the Ventilation Air Velocity in the Tunnel Fire

김성준\*† · 이민규

Sung-Joon Kim\*† · Min-Gyu Lee

\*강원대학교 공과대학 기계메카트로닉스공학부 교수, 소방안전협회 교수  
(2003. 6. 9. 접수/2003. 8. 30. 채택)

### 요 약

본 연구는 도로 터널 화재 발생 시 연소가스의 backlayer 현상을 수치실험하고 그 결과를 분석하였다. 상업용 열 유체해석코드인 PHOENICS를 사용하여 정상상태의 열 유동현상을 수치해석하였으며 환기용 공기속도를 독립변수로하고 종속변수는 backlayer의 길이로 하였다. 수치해석에 사용한 난류모델은  $\kappa$ - $\epsilon$  모델을 사용하였고 Hybrid 차분법을 사용하고 질량 잔류값을 수렴조건으로 사용하였다. 수치실험 결과 backlayer의 길이가 환기 속도에 반비례하여 감소하고 backlayer가 발생하지 않는 임계 환기속도가 있음을 확인 할 수 있었다. 또한 연소가스의 수직방향 성층화로 터널하부에 승객이 대피할 수 있는 공간이 존재함을 확인 할 수 있었다.

### ABSTRACT

The backlayer phenomena of smoke in the road tunnel is evaluated through numerical experiments. A commercial code, PHOENICS is used to simulate smoke flow in the road tunnel. The independent and dependent variables are ventilation air velocity and the length of backlayer of smoke respectively. Hybrid scheme and  $\kappa$ - $\epsilon$  turbulence model is adopted in the simulation process and mass residual is used as a convergence criterion. The experimental results say that the length of backlayer is reduced linearly with the increase of ventilating air velocity and that there is a critical air velocity which prevents from the onset of backlayering phenomena. One finds that there is a fresh air region near the bottom of tunnel which could make the passenger escape from the region polluted by smoke. These phenomena come from the severe vertical stratification of the smoke air mixture in the tunnel.

**Keywords** : Road tunnel(도로터널), Fire(화재), Backlayer, Numerical experiment(수치실험)

### 1. 서 론

도로 터널은 최근 도로의 직선화를 위해 많이 건설되고 있으며 우리 나라와 같이 산지가 70%인 산악지형에서 특별히 터널 건설이 많아지고 있다. 터널은 화재로 인하여 가끔 심각한 인명 손실을 가져왔으며 도로터널의 안전 주행을 위해서도 터널의 적절한 환기는 매우 중요한 건설, 설계 요소로 되어있다. 도로 터널 환기에 관한 그 동안의 연구는 그리 많지 않으나 지금

까지 진행되어온 연구 결과를 일부 소개하면 다음과 같다. Karki과 Patankar<sup>1)</sup>는 제트팬을 이용한 종류환기 시스템과 횡류 환기시스템의 전산유체모델개발과 모델 검증을 목적으로 연구하였고 난류, 화염, 복사 열 전달, 연기 및 제트 팬에 대한 부분 모델등을 포함한 프로그램 Solvent를 개발하고 프로그램 검증을 위해 Memorial tunnel fire ventilation test program의 실험결과를 사용하였다. 프로그램의 수치해석과 실험 결과가 잘 일치하였다. Bellasio<sup>2)</sup>는 도로 터널에서 차량으로 인한 공해 물질 분포를 표현할 수 있는 두 가지 오일러리안 모델을 소개했는데 하나는 Box 모델이고

† E-mail: kimsj@kangwon.ac.kr

다른 하나는 유한 체적법을 이용한 모델이다. Box 모델은 공해물질의 분포를 오직 시간의 함수로 표시하는 방법으로 비교적 간단한 모델로 터널 안 공해 물질의 순간적 분포를 물리적으로 이해하는데 도움을 주는 모델이다. 유한체적법을 이용한 모델은 1차원의 편 미분형 비정상 질량보존 방정식을 Patankar의 유한체적법으로 수치해석하여 공해물질의 분포를 시간과 공간의 함수로 얻는 것이다. 개발한 모델을 이용하여 차종 및 연료의 종류별로 공해물질 분포를 분석하였다. Indrehus와 Vassbotn<sup>3)</sup>은 7.5 km의 노르웨이 도로 터널에서 CO, NO와 NO<sub>2</sub>의 분포를 측정하고 가시거리와 공기유동속도를 1994년과 1995년에 도로 양방향에서 측정하였다. 측정 결과를 분석한 결과 기존의 CO 농도를 근거로 한 환기팬 제어를 차량의 CO 배출량을 기준으로 제어해야 한다고 주장하였다. 그리고 NO<sub>2</sub>를 제어하기 위해서는 터널 안 공기흐름을 모니터링 해야 한다고 하였다. Glynn, Eckford과 Pope<sup>4)</sup>는 터널 안에서 발생한 화재로 정지한 기차를 대상으로 강제 환기와 공기유동을 연구하였다. PHOENICS를 사용하여 터널 안 공기유동 즉 온도 분포, 속도 분포 그리고 연기 분포를 수치 해석하고 대피하고자하는 승객이 접하는 조건을 분석하였다. 연구 결과 심각한 수직방향 성층화를 볼 수 있었고 화염의 크기를 제한한다면 하부에 대피할 수 있는 차가운 공기층을 확보할 수 있다고 주장하였다. 곡선 좌표계를 사용하고 격자수는 22,000개를 사용하였다. 위의 과거 연구 내용을 요약하면 터널 안의 열 유체유동을 수치해석하고 그 주요 목적은 터널 주행의 안전성 확보와 화재와 같은 특수 상황에서 승객의 안전한 대피를 목적으로 하고 있으며 터널과 같은 대형시스템을 수치해석 할 때 수치계산의 경제성에 관한 연구이었다.

한편 터널에서 화재가 발생할 경우 화재로 인하여 발생한 연기의 운동을 강제 대류로 제어하도록 터널 환기 시스템을 보통 설계하고 있다. 가장 효과적이고 성공적인 연기 제거 장치는 횡류 환기시스템으로 연기를 연기 발생 원 근처에서 제거함으로써 승객들이 화재 양 옆쪽으로 대피할 수 있도록 신선한 공기 지역을 확보해 준다. 그러나 이 시스템을 터널에 사용하기 위해서는 터널 내부 천장에 덕트 공간을 만들어 주어야 하고 터널의 직경을 더 크게 하여야함으로 생기는 초기 투자비용이 많이 드는 단점이 있다. 따라서 비용을 절감하고 화재 발생 때 지하터널의 승객이 원활히 대피할 수 있는 공간을 확보하는 방법으로 종류 환기 시스템이 고려되고 있다. 이는 터널 안의 연기 등 오염 공기를 터널을 따라 불어 내는 방법이다. 종류 환

기는 제트팬을 사용한 환기로 근래 많이 일방통행용 도로에서 일반적으로 사용되고있는 시스템이다. 화재가 발생한 경우 화재 앞쪽의 차량은 터널 출구 쪽으로 급히 이동하게되나 화재 차량 뒤쪽의 차량은 앞으로 진행 할 수 없으므로 정지하게된다. 이 경우 도로 환기 시스템은 승객이 안전하게 대피할 수 있도록 뜨거운 연기를 정체되어있는 차량의 반대쪽으로 불어내게 된다. 그러나 환기용량이 충분치 못하면 뜨거운 연기가 환기 방향과 반대로 흘러 정체되어있는 차량 쪽으로 흐르게 된다. 이러한 현상을 backlayering 현상이라고 하며 이 현상은 화염의 크기 및 강도, 터널의 형상 및 구배, 화염에 접근하는 환기의 속도에 지대한 영향을 받게된다. 따라서 backlayering 현상을 방지할 수 있는 종류환기 용량이 터널 환기 시스템의 적절성을 판단하는 기준으로 근래 건설현장에서 사용되고 있는 중요한 설계인자이다. 따라서 본 연구에서는 종류 환기상태에서 터널 내부의 속도장, 온도장 및 연기 분포를 수치해석하고 승객의 안전의 관점에서 터널 안 공기 유동속도가 backlayering에 미치는 영향을 분석하는 것을 연구 목적으로 하였다.

## 2. 도로 터널의 구조와 화재 자동차 위치

수치해석용 터널은 일 방향 2차선의 터널로 구배가 없고 폭이 10 m, 높이가 5 m 그리고 길이가 100 m의

Table 1. The position and size of burning car

Coordinate	x(m)	y(m)	z(m)
position	6	0	47
size	2	1	3

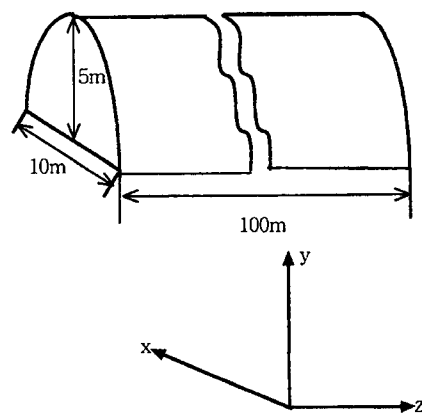


Fig. 1. Schematic view of tunnel and coordinate system.

반원형의 단면을 갖는 수치계산 목적의 가상의 도로 터널로 하였다. 1m폭의 대피 및 작업용 인도가 터널 내부에 존재하며 인도에서 먼쪽 차선에 있는 승용차에서 발화 한 것으로 하였고 터널의 가운데인 터널입구 47m 지점에 발화차량이 있는 것으로 하였으며 발화차량의 크기와 위치를 Table 1에 표시하였다. 터널의 개략도를 Fig. 1에 도시하였다.

### 3. 수치모델

터널이 중력 방향으로 구배가 없어 자연 통풍력이 없는 것으로 가정하고 화재로 차량이 정지하여 교통 환기력 역시 없는 것으로 하였다. 차량이 화재로 정제되어 있고 발화차량의 크기를  $2\text{m} \times 1\text{m} \times 3\text{m}$ 로 하였는데 이는 수치계산의 편의상 계산격자와 일치하는 크기로 한 것이며 실제 차량의 크기는 아니다. 발화차량의 위치는 승객대피의 관점에서 최악 상황으로 하기 위해 Fig. 1과 같이 터널의 중간인 47m지점으로 하고 화염은 차량 앞 부분에 있는 것으로 하였다. 환기용 공기는 차량 진행 방향으로 불고 있는 것으로 하였고 차량 화염에서의 발열량은 1992년부터 1995년 사이에 9개의 유럽국가들이 참여한 EUREKA 프로젝트에서 실제 차량을 이용한 실험결과를 사용하였으며 발화 후 10분 후에 도달하는 값(Table 1)으로 하였다. 발화 차량은 승용차로 하였으며 실험 값 중 최대 열량 값인 5 MW를 사용하였다.

#### 3.1 좌표계, 지배 방정식 및 경계조건

직선 좌표계의 지배 방정식을 사용하였고 운동량 방정식, 에너지 방정식과 분포 방정식을 난류모델과 함께 풀었다. 운동량 방정식의 경계조건으로 입구 공기 유동 속도를 주고 공기 유동 풍속을 실험변수로 조절하였다. 벽은 no-slip 조건으로 law of wall을 사용하였다. 에너지 방정식에서 입구 공기온도를  $20^{\circ}\text{C}$ 로 하였으며 단열 벽으로 열 손실이 없는 것으로 가정하였다. 화염은 화학 반응이 없는 열원으로 취급하고 연기의 발생원으로 하였다.

#### 3.2 계산 격자 및 수치해석 방법

CFD 프로그램은 PHOENICS 3.3<sup>6)</sup>을 사용하고 pre-processor로 VR-Editor 그리고 post-processor로 VR-Viewer를 사용하였다. 격자망은 직각 좌표계로  $15 \times 30 \times 100$  Staggered 계산 격자망을 사용하였고 z 방향을 터널의 축 방향 즉 주 공기 유동 방향으로 하고 x 방향을 터널의 폭 방향, y 방향을 터널의 높이 방향으로 하였다. 수치해석 방법은 수치해석의 안정성과 계산시간을 고려해 1차 정확도의 Hybrid차분법을 사용하였고 난류모델로  $k-\epsilon$  방정식 모델을 사용하였다. Under-relaxation으로 압력, 난류에너지 및 에너지 소산은 선형 이완법을 사용하고 속도성분과 온도는 관성 이완법을 사용하였다. 수치해석의 독립변수는 발열량과 터널 입구의 공기 유입속도로 하고 종속 변수는 backlayer의 존재여부와 backlayer의 길이로 하였다. 컴퓨터는 노트북으로 펜티엄 III 프로세서(CPU 933 Mhz)를 사용하였으며 수렴조건은 질량 잔류 값으로 하였고 질량 유동량의 1000분의 1로 하였다. 이때 수렴해를 얻는데 소요되는 수치계산 시간은 180분 정도이었다.

## 4. 입구 환기 속도와 backlayer의 길이 변화

#### 4.1 속도장, 온도장 및 연기 분포

터널 안 속도장, 온도장, 연기분포 그리고 backlayering 현상을 터널 환기속도를  $1\text{ m/sec}$ 에서  $2.3\text{ m/sec}$ 까지 변화시키면서 분석하였다. 환기 속도의 변화 범위는 예비 수치실험을 통해 정하였으며 backlayer의 길이가 최대 일 때 즉 터널 길이의 거의 반에 해당할 때와 backlayer가 발생하지 않는 경우를 고려한 값이다. backlayer길이는 자동차의 뒷면으로부터 터널 입구 쪽으로 연기의 길이로 정의하였으며 Fig. 2에 도시하였다. 이때 연기구간은 연기 분포가 1000 ppm보다 큰 구간으로 하였다. 터널 안의 전형적인 속도장, 온도장 및 연기분포를 보이기 위해 환기속도가  $1.1\text{ m/sec}$ 인 경우를 Fig. 3, Fig. 4 및 Fig. 5에 도시하였다. 도시된 분

Table 2. Thermal power of cars<sup>5)</sup>

Type	Passenger	Bus	Truck carrying mildly combustible merchandise	Tanker truck carrying liquid hydrocarbons	Tractor trailer carrying furnitures
Thermal power	2-5 MW	20 MW	30 MW	100-200 MW	more than 100 MW
Fire duration	45 min	1 hour	1.5 hour	2-3 hours	several minutes

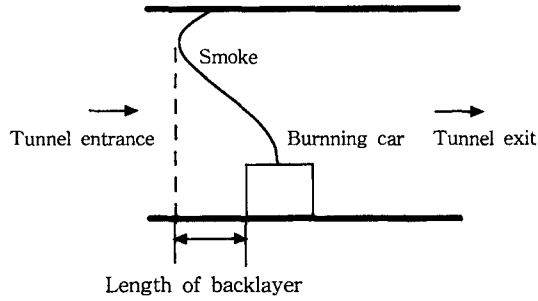


Fig. 2. Definition of backlayer length.

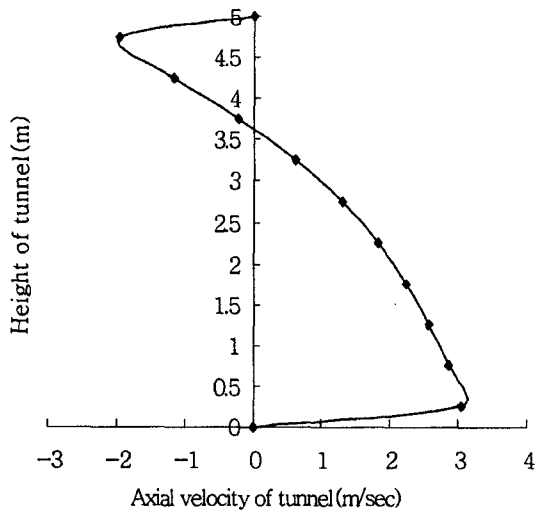


Fig. 3. Axial velocity distribution with the height of tunnel.

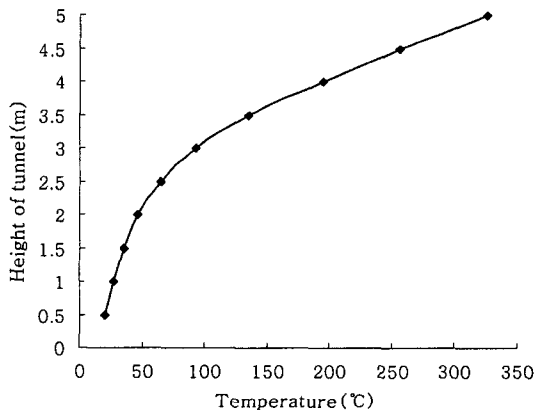


Fig. 4. Temperature distribution with the height of tunnel.

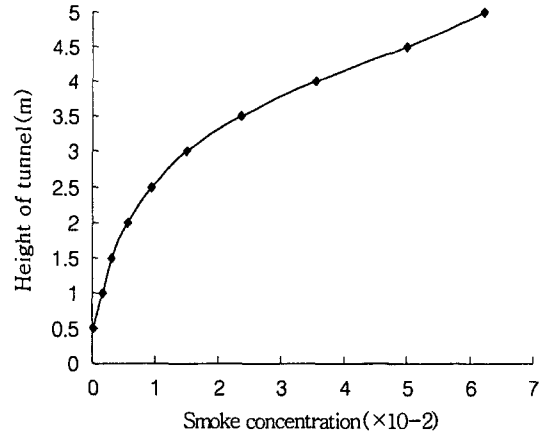


Fig. 5. Smoke distribution with the height of tunnel.

또는 y-z 단면의 분포이고 횡 방향 위치는 터널의 측대칭 단면으로 x 값이 5m인 경우이다.

터널 안 높이에 따른 터널 축 방향 속도 변화를 Fig. 3에 도시하였다. 도시된 속도분포에서 y 값이 3.9m보다 클 때 축 방향 속도 값이 음이 되며 터널 상층부에 터널 입구 쪽으로 연기의 흐름이 있어 연기의 backlayer현상이 발생하고 있음을 쉽게 확인 할 수 있다.

Fig. 4는 Fig. 3과 같은 위치에서의 온도 분포이다. 낮은 온도의 공기가 터널 하부에 존재하며 높은 온도의 연소가스층이 터널 상부에 존재함을 확인할 수 있다. 따라서 연소가스층의 수직방향 성층화를 쉽게 예상 할 수 있으며 터널 하부에 승객의 탈출이 가능한 저온의 공간이 존재함을 확인할 수 있다. 또한 터널 상부의 연기층이 하부의 공기층 보다 온도가 높아 수직 방향으로 안정된 성층화가 이루어져 있음을 쉽게 알 수 있다.

연기의 분포를 Fig. 5에 도시하였다. 연기 분포가 터널높이 3m부터 급격히 증가함을 볼 수 있다. 그리고 높이 1m 부분까지는 연기가 1000 ppm이하로 존재하여 화재 시 승객들의 탈출에 이용될 수 있는 연소가스로 오염되지 않은 공기층이 터널 하부에 존재함을 확인할 수 있다.

#### 4.2 Backlayer의 길이 변화

터널환기속도에 따른 backlayer 길이 변화를 Fig. 6에 도시하였다. 환기속도가 증가하면서 backlayer의 길이가 감소하여 서로 반비례관계에 있었다. 따라서 이 부분은 선형의 관계식을 유도할 수 있고 수치예측이 가능한 것으로 믿어진다. 그러나 화염 근처까지

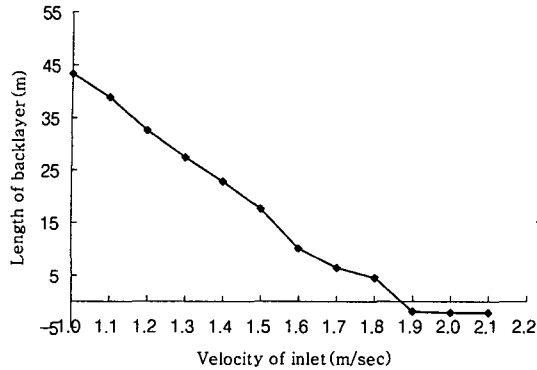


Fig. 6. Length variation of backlayer with the ventilation air velocities.

backlayer가 선형 감소한 뒤로는 환기속도 증가와 backlayer길이 감소가 반비례하지 않았다. 이 부분은 자세한 추후 연구가 필요한 것으로 믿어진다. 그리고 도시된 그림에서 backlayer 현상이 발생하지 않는 임계 공기속도를 찾을 수 있었으며 본 연구의 경우 1.87 m/sec이었다.

## 5. 결 론

본 연구는 도로 터널을 대상으로 화재 발생 시 연소가스 backlayer 현상을 환기용 공기속도를 독립변수로 수치실험하고 그 결과를 분석하였다. 수치해석은 정상상태를 대상으로 하였고 상업용 열 유체유동 해석코드인 PHOENICS를 사용하였다. 수치실험 결과 backlayer의 길이가 환기 속도에 반비례하여 짧아졌고 backlayer가 발생하지 않는 임계 공기속도가 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 발화차량 근처까지 짧아진 backlayer는 그 길이 감소가 환기속도 증가에 반비례하지 않았다.

또한 연소가스의 수직방향 성층화로 터널하부에 승객이 대피할 수 있는 공간이 존재함을 확인할 수 있었다.

## 후 기

이 논문은 2002년도 강원대학교 기성회교수국외과견연구 지원에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

1. K. C. Karki and S. V. Patankar, "CFD model for jet fan ventilation system", Proceedings of the 10th international symposium on aerodynamics and ventilation of vehicle tunnels; Principles, Analysis and Design; Boston, USA, BHR Group Ltd.(2000).
2. R. Bellasio, "Modelling traffic air pollution in road tunnels", Atmospheric Environment, Vol. 31, No. 31, pp.1539-1551(1997).
3. O. Indrehus and P. Vassbotn, "CO and NO<sub>2</sub> pollution in a two way traffic road tunnel: investigation of NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio and modelling NO<sub>2</sub> concentration", J. Environ. Monit., Vol. 3, pp.220-225(2001).
4. D. R. Glynn, D. C. Eckford and C. W. Pope, "Smoke concentrations and air temperatures generated by a fire on a train in a tunnel", PHOENICS J., Vol. 9, No. 1, pp.157-168(1996).
5. Minister of the interior, "Report of task force for technical investigation of the 24 march 1999 fire in the Mont Blanc vehicular tunnel", June 30(1999).
6. Phoenics 3.3, user's manual(2000).