도로터널 화재 시 외부 바람에 의한 연기거동 특성에 관한 실험적 연구

이성룡*

An Experimental Study on Smoke Movement by the External Wind
in Road Tunnel Fires

Sung-Ryong Lee*

Abstract In this study, reduced scale experiments were carried out to evaluate the effect of external wind in a road tunnel fire. Experiments were conducted in a $1.1 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \times 50.4 \text{ m}$ tunnel. 4.5 liter gasoline was used as a fuel. Temperature, oxygen and carbon monoxide concentration were measured. Smoke reaching time to the tunnel exit was affected by the external wind. When a fire was fully developed, wind effect is reduced compared with the early stage of a fire. CO concentration was reached at more than 1,500 ppm.

Key words Road Tunnel, Wind Effect, Smoke movement, Toxic gas, Reduced scale experiment

초 록 본 연구에서는 도로터널 화재 시 외부 바람에 의한 영향을 평가하기 위하여 축소모형 실험을 실시하였다. $1.1 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \times 50.4 \text{ m}$ 모형 터널에서 휘발유 4.5리터를 사용하여 실험을 실시하였다. 터널 내부의 온도, 산소와 일산화탄소 농도를 측정하였다. 외부 바람의 영향에 따라 연기의 출구 도달 시간에 차이를 보였다. 최성기 이후에는 외부 바람의 영향이 초기에 비하여 작은 것을 확인할 수 있었다. 화재로 인하여 발생한 일산화탄소가 1,500 ppm 이상 도달하여 피난자에게 치명적인 위해를 가할 수 있다.

핵심어 도로터널, 바람영향, 연기거동, 유독가스, 축소모형실험

1. 서 론

2012년 기준 총 1,578개소의 도로터널이 운영 중에 있으며, 총연장은 1,148.9 km이다. 이 중 775개소가 고속국도에 건설되어 있으며 총 연장은 606 km이고 일반 국도에는 421개소가 설치 운영 중이다. 대부분의 터널은 1 km 미만이지만, 도로 터널 중 38개소가 1 km 이상인 장대터널이며 최근 건설되는 터널들은 점차 장대화되고 있는 추세이다¹⁾.

2012년 3월 30일 개통한 배후령 터널은 총 연장 5,057 m로 국내 최장 도로터널이다. 배후령 터널에는 화재 발

생 시 전 터널의 어느 구간에서나 배기구를 이용하여 연기를 배출할 수 있는 국내 최초 횡류식 환기시스템, 역주행이나 낙하물·보행자·차량사고 등을 자동 감지하는 CCTV, 국내 처음으로 본터널 옆으로 차량 1대 정도가 지날 수 있는 피난대피용 보조터널 조성 등 최첨단 기술이 도입되었다.

터널 내에서 화재가 발생하였을 경우 공간이 한정된 특수한 환경 하에 있기 때문에 내부 상황 파악이 어렵고 급속하게 연기와 유독가스가 전파되는 특성을 가지고 있다. 대피자의 피난 방향과 연기의 확산방향이 동일하여 신속한 조치를 취하지 않으면 대형사고로 확대될 수 있다.

유용호 등은 터널 화재 시 국부제연설비인 에어커튼을 적용한 성능평가 실험을 수행하였다²⁾. 유지오 등은 도로터널 화재 시 열기류의 전파특성과 터널벽면에 미치는 열적특성을 수치해석적으로 고찰하였다³⁾. 김두영 등은 중규모 터널 화재 시 방재팬 초기가동 지체시간에 따른 영향을 수치해석적으로 고찰하였다⁴⁾. 박경환 등은

Received: Aug. 7, 2014

Revised: Aug. 25, 2014

Accepted: Aug. 26, 2014

*Corresponding Author: Sung-Ryong Lee

Tel) +82415590546, Fax) +82415411108

E-Mail) leesr72@korea.kr

National Fire Service Academy, 376-376 Songak-ro, Songak-myeon, Asan, Chungcheongnamdo, Korea

터널 화재 시 위험을 경감시키기 위해 설치하는 물분무 설비의 성능을 실험실시험을 통하여 평가하였다⁵⁾.

본 연구에서는 도로터널 화재 시 터널 외부 바람의 영향을 파악하고자 한다. 터널 화재 시 외부 바람의 풍속 변화에 따른 연기의 거동 특성과 터널 내부의 연기 거동 특성 파악을 통하여 터널 화재의 물리적 특성의 이해와 화재 진압 및 터널 설계자나 방재 전문가들에게 보다 유용한 이론적, 정성적인 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험대상 터널 및 실험방법

2.1 실험대상 터널

본 연구에서는 배후령 터널 단면을 축소한 모형터널에서 실험을 실시하였다. 배후령 터널의 단면은 폭 11 m, 높이 5 m이다. 실험 터널은 배후령 터널을 Froude 상사에 의해 1/10로 축소하였으며 크기는 1.1 m × 0.5 m × 50.4 m이다. 두께 5 mm의 철판 각파이프로 틀을 제작한 후 터널 벽체는 방화석고보드로 마감하였다. 터널 천장은 열에 의한 변형을 방지하기 위하여 두께 3 mm의 철판을 사용하였다. 본 실험에서는 배연시스템이 작동하지 않는 경우를 상정하여 배연시스템에 대한 고려는 하지 않았다. 실험 모형터널을 Fig. 1에 나타내었다.

2.2 실험장치 및 방법

실험을 위하여 터널 중앙에 25 cm 정사각형 풀을 위치시킨 후 실험을 실시하였다. 가연물로는 휘발유 4.5리터를 사용하였으며 연소 시 증발된 연료의 양을 측정하였다. 증발된 연료가 모두 연소되는 것은 아니기 때문에 연소효율을 0.7로 가정하였다¹⁰⁾. 연료의 질량감소량을 이용하여 열방출율을 다음 식에 의하여 결정하였다¹¹⁾.

$$Q = \dot{\chi} \dot{m}_f'' \Delta H_c A$$

Fig. 1. Photograph of the experimental tunnel

여기서, χ 는 연소효율, $\dot{m}_f''$ 는 연료의 연소율, ΔH_c 는 연소열, A 는 풀의 표면적을 나타낸다. 열방출율이 최대 약 140 kW를 기록하였으며 Fig. 2에 휘발유의 열방출율을 나타내었다. 이를 Froude 상사에 의해 실험 터널 열방출율로 환산하면 약 44.3 MW이다. 버스 한 대의 열방출율은 약 20 MW이다¹²⁾. 본 실험의 열방출율을 실험터널 화재로 환산하면 버스 약 2대가 연소하는 화재에 해당한다.

실험 터널의 개략도 및 측정장치의 설치위치를 Fig. 3에 나타내었다. 실험공간의 온도 측정을 위하여 소선 지름 0.6 mm의 K-타입 열전대를 사용하였다. 열전대의 측정범위는 -200℃~1,200℃이며 -20℃~120℃ 구간에서 $\pm 2^\circ\text{C}$ 의 오차를 가진다. 열전대에서 발생된 신호는 데이터로거(GL820)를 통해 수집되었다. 총 28개의 열전대를 설치하여 실험동안 터널 내부 온도 변화를 측정하였다. 터널 천장 아래 5 cm 떨어진 위치에 2.4 m 간격으로 열전대를 설치하였다. 또한 화원으로부터 6.6 m 떨어진 터널 입구방향 위치에 높이 방향(10 cm, 20 cm, 30 cm, 35 cm, 40 cm, 45 cm)으로 6개의 열전대를 설치하여 온도변화를 측정하였다.

가스의 농도 변화를 측정하기 위하여 호흡선 높이(16 cm)에 가스측정기를 설치하였다. 3대의 가스측정기(QRAE PLUS)를 화원으로부터 입구방향으로 9.0 m, 16.2 m, 23.4 m 떨어진 위치에 각각 설치하여 산소 및 이산화탄소 농도를 측정하였다.

송풍기를 설치하지 않은 경우 터널 입구로부터 2 m 떨어진 위치에 유속계(testo 435)를 설치하여 터널 외부 유속을 측정하였다. 또한 외부 바람의 영향을 평가하기 위하여 터널 입구 쪽에 송풍기를 설치하여 인위적으로

Fig. 2. Heat release rate (Gasoline)

Fig. 4. Velocity of the tunnel entrance

(a) inside

(b) outside

Fig. 5. Photographs of smoke movement

(a) entrance

(b) exit

Fig. 6. Temperature distribution under the ceiling (Case 1)

Fig. 7. Temperature distribution under the ceiling

입구쪽이 온도가 높았으나 최성기에 도달하면서 동일 위치에서 출구쪽의 온도가 더 높았다. 최성기를 지난 후에는 양쪽 모두 유사한 값을 나타내었다.

Case 2의 터널 입구 방향과 출구 방향의 온도 분포를 Fig. 8에 나타내었다. 터널 입구에서 터널 출구 방향으로 평균 1.55 m/s의 바람이 유입되는 상태에서 실험을 실시하였다. 바람의 유입으로 인하여 터널 입구에서는 화재 발생 약 365초 후 연기가 도달하였다. 그러나 터널 출구에서는 화재 발생 약 30초 후 연기가 배출되기 시작하였다. 화재 발생 약 160초 후 터널 입구 방향 3 m 떨어진 위치에 연기가 도달하였다. 화재 발생 약 320 초까지는 연기가 터널 입구 방향 12.6 m 떨어진 위치에 도달하지 않았으며, 이후 연기가 터널 입구 방향으로 이동하였다. 터널 입구에서 최대 약 85°C까지 온도가 증가하였다.

Fig. 8. Temperature distribution under the ceiling (Case 2)

Case 1과 비교하여 화재 발생 초기 터널 내부 유동의 영향으로 인하여 전체적으로 온도가 낮은 것을 확인할 수 있다. 화재 발생 200초 후 내부 유동이 없는 경우 화원으로부터 10.2 m 떨어진 입구 방향 위치에서 약 106°C에 도달하였으나, 외부 바람의 영향이 있는 경우 연기가 도달하지 않았다. 출구 방향 10.2 m 떨어진 위치에서는 내부 유동이 없는 경우 약 114°C, 내부 유동이 있는 경우 온도가 약 73°C까지 증가하였다.

화재 발생 550초 후 내부 유동이 없는 경우 화원으로부터 10.2 m 떨어진 입구 방향 위치에서 온도가 약 149°C까지 상승하였다. 내부 유동이 있는 경우 온도가 약 127°C까지 증가하였다. 출구 방향 10.2 m 떨어진 위치에서는 내부 유동이 없는 경우 159°C까지 온도가 상승하였으나 내부 유동이 있는 경우 약 174°C까지 온도가 증가하였다.

화재 발생 초기 터널 내부의 유동이 있는 경우 유동의 영향이 화재로 인한 부력 모멘텀보다 큰 영향을 끼치는 것으로 사료된다. 그러나 화재가 최성기에 도달한 후에는 화재로 인한 부력 모멘텀의 영향이 커져 상대적으로 내부 유동의 영향이 작은 것을 확인할 수 있다.

입구 방향에서는 열기류와 내부 유동이 충돌하여 열기류의 이동이 제한을 받아 유동이 없는 경우와 비교하여 온도가 낮았다. 출구 방향으로는 열유동이 바람의 방향과 일치하여 온도가 내부 유동이 없는 경우에 비하여 높게 나타났다.

화재 시 터널 입구와 출구의 동일 위치에서 온도를 비교하였으며 이를 Fig. 9에 나타내었다. 전체적으로 화재 발생 초기에는 출구측이 입구측에 비하여 높은 온도

를 나타냈다. 입구 방향 동일 위치에 열기류가 도달하기 전까지는 출구측 온도만 상승하였으며, 화재 발생 약 400초 이후에는 온도의 증감이 반복되었다. 화원으로부터 0.6 m 떨어진 위치에서는 화재 발생 100초 후 출구측이 약 240°C로 입구측보다 약 185°C 높았으며, 300초 후에는 출구측이 약 960°C로 입구측보다 560°C 이상 높았다. 약 400초 후부터는 화염의 방향에 따라 온도가 서로 교차하면서 증가하였다. 화염으로부터 3 m 떨어진 위치에서는 화재 발생 약 290초 후 최대 200°C의 온도차를 보였다. 화재 발생 약 600초 후부터는 입구 및 출구측 모두 유사한 온도값을 나타냈다. 화원으로부터 5.4 m 떨어진 위치에서도 3 m 떨어진 위치와 유사한 경향을 보였다. 화원으로부터 거리가 7.8 m 이상인 영역에서는 터널 출구측이 입구측에 비하여 높은 온도를 나타냈다. 화재로 인한 부력 모멘텀보다 외부 바람에 의한 유동의 영향이 화원부근 보다 큰 것을 확인할 수 있다. 화원으로부터 24.6 m 떨어진 위치에서 최성기 도달 이후 입구측과 출구측이 최대 약 68°C의 온도차를 보였다.

3.2 터널내부 수직온도 분포

화원으로부터 6.6 m 떨어진 입구 방향 위치에 높이 방향으로 6개의 열전대를 설치하여 시간 경과에 따른 수직온도 변화를 측정하였으며 Fig. 10에 나타내었다.

화재 발생 약 70초 후 연기가 터널 입구에 도달하였다. 화재로 인하여 온도가 증가한 후 약 400초 후 최성기에 도달하였으며 이후 약 200초간 최성기가 유지되었다. 이후 점차적으로 온도는 감소하였다. 화원으로부터

Fig. 9. Comparison of temperature between entrance and exit direction (Case 2)

Fig. 10. Vertical temperature distribution (Case 3)

터 3 m 떨어진 위치에서 최성기에 도달한 후 천장 아래에서의 온도가 약 300℃에 도달하였다. 터널 천장으로부터 10 cm 떨어진 높이에서 가장 높은 온도를 나타내었다. 화재로 인한 열기류가 천장을 따라 이동하면서

천장과와의 마찰 및 천장으로의 열전달로 인하여 천장으로부터 5 cm 떨어진 위치보다 10 cm 떨어진 위치에서 더 높은 온도를 나타내었다. 천장으로부터 10 cm 떨어진 위치에서 최대 약 170℃까지 온도가 상승하였다. 터널 바닥으로부터 10 cm 떨어진 높이에서는 최대 약 38℃까지 온도가 상승하였으며, 20 cm 떨어진 위치에서는 최대 약 75℃까지 온도가 상승하였다. 천장으로부터 5 cm 떨어진 위치에서는 화재 발생 전과 비교하여 약 140℃ 이상 상승하였으며, 바닥으로부터 10 cm 떨어진 위치에서는 약 20℃ 온도가 상승하였다.

3.3 터널내부 가스농도 분포

터널 내부의 산소 및 일산화탄소 농도를 측정하기 위하여 화원으로부터 9.0 m, 16.2 m, 23.4 m 떨어진 위치의 바닥으로부터 16 cm 높이에 가스측정기를 설치하여 5초 간격으로 샘플링을 실시하였다. 시간경과에 따른 일산화탄소의 농도를 Fig. 11에 나타내었다.

화재 발생 약 120초 후부터 일산화탄소가 감지되기 시작하였다. 이후 급격하게 일산화탄소 농도가 증가하였다. G1과 G2 위치에서는 일산화탄소의 농도가 거의

Fig. 11. Carbon monoxide concentration (Case 3)

유사하게 증가하였으며 화재 발생 약 370초 후 농도가 1,500 ppm 이상 도달하였다. 본 실험에 사용된 가스측정기의 측정한계가 1,500 ppm이어서 이 이상 측정할 수 없었다. 화재 발생 약 800초 후 일산화탄소의 농도가 1,500 ppm 이하로 측정되었다. 화재 발생 약 900초 후 일산화탄소의 농도가 G1 위치에서는 약 720 ppm, G2 위치에서는 약 705 ppm으로 감소하였다. G3 위치에서는 화재 발생 약 200초 후부터 G1, G2 위치보다는 일산화탄소 농도가 높게 측정되었다. G3가 G1, G2와 비교하여 화원으로부터 멀리 떨어져 있고, 터널 입구로부터 1.8 m 떨어진 곳에 위치하고 있어 외부로부터 유입되는 신선한 공기에 의해 희석되면서 일산화탄소 농도의 증가가 상대적으로 덜하였다. 화재 발생 약 200초 후 일산화탄소의 농도가 약 350 ppm을 기록하였다. 화재 발생 약 475초 후 일산화탄소의 농도가 1,500 ppm에 도달하였다. 이후 약 90초간 일산화탄소 농도가 1,500 ppm 이상을 유지한 후 1,500 ppm 이하로 감소하였다. 화재 발생 약 900초 후 일산화탄소의 농도가 약 350 ppm으로 감소하였다.

시간경과에 따른 산소의 농도를 Fig. 12에 나타내었다. 화재 발생 약 130초 후부터 산소 농도가 감소하기 시작하였다. G1과 G2 위치에서는 산소 농도가 유사하게 감소하였다. 화재 발생 500초 경과 후 G1 위치에서는 산소 농도가 약 14.4%, G2 위치에서는 약 13.8%로 감소하였다. 이 후 연료 소모에 따라 열방출율이 감소하면서 외부에서 유입되는 공기량 증가로 인하여 산소 농도가 다시 점차적으로 증가하였다. G3 위치에서는 G1과 G2 위치와 비교하여 산소 농도 감소폭이 덜하였으며, 화재 발생 500초 후 산소 농도가 약 17.7%를 기록

Fig. 12. Oxygen concentration (Case 3)

하였다. 화재 발생 900초 후 G1 위치에서는 약 19.4%, G2 위치에서는 19.5%, G3 위치에서는 20.3%를 기록하였다.

4. 결론

본 연구에서는 도로터널 화재 시 외부 바람에 의한 연기 거동 특성을 파악하기 위하여 축소모형 실험을 실시하였으며 결과를 다음과 같이 정리할 수 있다.

외부 바람이 0.42 m/s일 경우 연기가 터널 입구에 화재 발생 약 1분 후 도달하였으나, 외부 바람이 1.55 m/s로 증가했을 때 연기의 터널 입구 도달시간은 약 6분으로 증가하였다. 따라서 입구로 유입되는 바람의 영향을 고려하여 터널 입구 차량 진입 차단 계획을 수립하고 시행하여야 할 것이다.

외부 바람이 1.55 m/s일 때 화재 발생 초기에는 외부 바람의 영향이 화재로 인한 부력 모멘텀보다 커서 연기의 이동을 지연시키는 역할을 하였다. 화원에서 멀어질수록 외부 바람에 의한 영향이 상대적으로 크고 입·출구 동일 위치에서 최대 약 68℃의 온도차를 보였다. 최성기 이후 화원 부근에서는 화재로 인한 부력 모멘텀이 증가하여 외부 바람의 영향이 초기에 비하여 작은 것을 확인할 수 있다.

화원으로부터 6.6 m 떨어진 위치에서 화재 발생 약 400초 후부터는 바닥으로부터 20 cm 이상의 영역에서 온도가 60℃ 이상을 유지하였으며 상부에서는 180℃ 이상 도달하였다.

바닥으로부터 16 cm 떨어진 높이에서 화재로 인하여 발생한 일산화탄소 농도가 화재 발생 약 120초 후부터

급격하게 증가하기 시작하였으며 화재 발생 495초 후 모든 위치에서 1,500 ppm 이상 도달하여 지속되었다.

화재 발생 약 130초 후부터 산소 농도가 감소하기 시작하였다. 화재 발생 500초 후 화원으로부터 9.0 m 떨어진 위치에서는 산소 농도가 약 14.4%, 16.2 m 떨어진 위치에서는 약 13.8%로 감소하였다. 화원으로부터 23.4 m 떨어진 위치에서는 약 17.7%까지 감소하였다.

터널 외부에 바람이 작용할 경우 무풍일 경우와 비교하여 차이를 보이고 있다. 터널 내에 설치되는 배연설비의 용량 산정 시 외부 바람의 영향을 고려하지 않고 배연용량을 산정한다면 배연방향과 반대방향으로 외부 바람이 작용할 경우 배연 목적을 달성할 수 없다. 따라서 외부 바람의 영향을 함께 고려한 방재설비 및 피난 안전대책을 수립해야 할 것이다.

References

1. MOLIT-related statistics, The Ministry of Land, Infrastructure and Transport, <http://stat.molit.go.kr/>.
2. Yoo, Y.N., Park, S.H., Han, S.J., and Shin, H.J., 2004, A Evaluation Study of Local Smoke Control Facility for the Smoke Spread Prevention on Tunnel Fire, Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, 14-1, 43-48.
3. Yoo, J.O., Oh, B.C. and Kim, H.G., 2013, A Numerical Study on the Characteristics of the Smoke Movement and the Effects of Structure in Road Tunnel Fire, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, 15-3, 289-300.
4. Kim, D.Y. and Lee, C.W., 2010, A Study on Jet Fan Start Time in Medium-Length Tunnel Fires, Tunnel and Underground Space, 20-6, 465-474.
5. Park, K.H. and So, S.H., 2010, A Real Scale Test on Performance of Water Spray Systems in Tunnel Fire, Tunnelling Technology, 12-4, 341-347.
6. Quintiere, J.G., 1989, Scaling Applications in Fire Research, Fire Safety Journal, 15, 3-29.
7. Hottel, H.C., 1961, Fire Modeling. The Use of Models in Fire Research, Publication 786 National Academy of Sciences, Washington DC, 32-47.
8. Heskestad, G., 1975, Similarity Relations for the Initial Convective Flow Generated by Fire, Paper 72-WA/HT-17, American Society of Mechanical Engineers.
9. Heskestad, G., 1975, Physical Modeling of Fire, Journal of Fire and Flammability, 6, 253- 272.
10. Megret, O., Vauquelin, O., 2000, A model to evaluate tunnel fire characteristics, Fire Safety Journal 34, 393-401.
11. Edward, K.B., Harold, E.N. and David, D.E., 1997, Simplified Fire Growth Calculation, Fire Protection Handbook, 18th Edition, NFPA FPH1897, Section 11, Chapter 10.
12. Fire and Smoke Control in Road Tunnels, 1999, PIARC.

이 성 룡

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

Tel: 041-559-0546

E-mail: leesr72@korea.kr

현재 중앙소방학교 소방과학연구실 공업연구사