

도로터널내 연기거동 및 피난에 관한 실험적 연구

An Experimental Study of Smoke Movement and Evacuation in Road Tunnel

강현욱¹⁾, Hyun-Wook Kang, 이호석²⁾, Ho-Seok Lee,
신영완³⁾, Young-Wan Shin, 이인기⁴⁾, In-Ki Lee

¹⁾ (주)비엔텍 기술기획실 실장, Director, Building and Tunnel Technologies Co.,Ltd

²⁾ (주)비엔텍 대표이사, CEO, Building and Tunnel Technologies Co.,Ltd

³⁾ (주)하경엔지니어링 이사, Director, Hakyong Engineering Co.,Ltd

⁴⁾ (주)하경엔지니어링 부사장, Vice President, Hakyong Engineering Co.,Ltd

SYNOPSIS : Recently, According to increased tunnel accident, a matter of concern in tunnel fire safety is on an interesting trend. In case of tunnel fire, Evacuation is a primary factor for refugee safety. Therefore safety measures should be taken to increase capability of evacuation. Evacuation walking speed and characteristics of movement in tunnel is differ from building or outdoor site so, these characteristics must be considered in tunnel safety planning. In this study has performed to evaluate the smoke movement and characteristics of evacuation by full-scale test method. and aimed for basic data establishment in characteristics of evacuation for tunnel safety system design.

Key words : Evacuation, Safety, Tunnel fire, Safety system design

1. 서 론

최근들어 2003년의 대구지하철 사고외에도 서울 홍지문 터널사고 및 기타 터널내 사고의 증가로 인하여 터널방재설계에 대한 관심도가 증대되고 있으며, 교통특성상 도로터널에서의 화재위험도는 철도터널에 비하여 높은 것으로 알려져 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 국내 대부분의 도로터널은 일방향 쌍굴터널의 형태로 건설되고 있다.

그러나 설계목표년도의 교통량이 일방향 쌍굴터널의 건설조건을 충족시키기에 미흡한 경우(경제성, 사업성부족), 부득이하게 단굴터널로 건설되어야 하는 상황이 발생되며 이러한 경우, 하나의 터널내에 차량이 양방향으로 주행하게 되므로, 운전자의 심리적인 부담도 증가할 뿐만 아니라, 쌍굴터널에 비하여 충돌사고의 가능성이 증가되어 사고위험성은 상대적으로 높아진다.

특히, 터널내 사고발생시 쌍굴터널과 달리 피난자의 피난방향이 양방향으로 분리되는 현상이 발생할 위험이 높아 피난연락경 및 대피통로가 매우 중요한 방재설계요소가 된다.

특히, 양방향터널의 경우 연기의 거동이 터널의 종방향으로 대칭적으로 확산되므로 사고지점을 중심으로 어느 한 구역을 안전한 구역으로 설정하기가 어렵게 되고 피난자가 터널내에서 연기에 노출될 가능성이 높다.

따라서, 터널의 측부에 피난대피통로를 설치하여 피난거리를 감소시킬 수 있는 방안을 고려할 필요가 있다. 국내의 경우, 양방향 터널에 대하여 이와 같은 실험을 통한 설계인자도출한 사례가 없으며, 본 실험을 통하여 설계에 적용가능한 기초자료를 수립하고자 하였다.

2. 실험의 주요 목표도출인자 설정

본 실험에서 도출하고자 하는 인자는 인간의 피난행동양상과 이에 따른 터널설계에 대한 반영인자를 수립하는 것이다.

이를 위하여 실물실험방법을 이용하였으며 본 실험에서 중점적으로 관찰하고자 하는 바는 다음과 같다.

- 1) 면식자와 같이 이동하는 군집보행과 개별보행과의 보행속도 상관성
- 2) 터널내 가시도저하에 따른 이동속도의 저하
- 3) 대피통로내에서의 보행속도
- 4) 대피통로 출입문폭변동에 따른 통과용량

3. 실험방법 및 준비

실물실험을 위하여 경부고속도로 폐도구간내 터널을 이용하였으며, 터널내에 실험에 필요한 구조물 및 계측장비를 설치하였다. 실험에 사용된 터널은 연장이 짧은 터널이고 산악지형에 가깝기 때문에 외부자연풍의 영향을 크게 받는 것으로 판단되었으며, 갭문으로부터의 자연광유입이 발생되어 터널내의 조도가 불균일하게 형성되었다. 따라서, 양 갭구에 차단막을 설치하여 터널내를 실험실조건에 가깝게 유지하고 조명에 의한 조도관리를 가능하게 하였다.



그림1 터널갭구 차단막설치

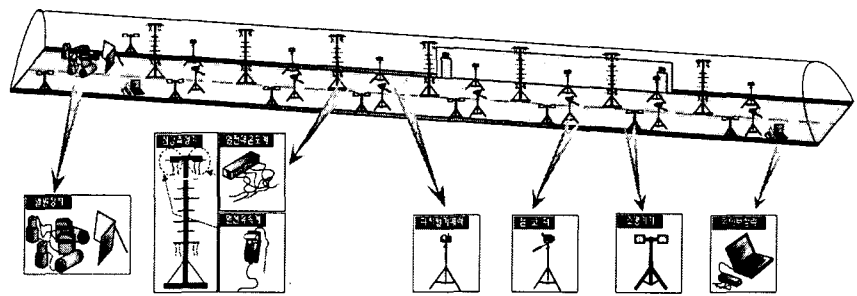


그림2 터널내 장비배치도

실험의 주요목적중 하나인 피난통로설치에 따른 피난효과 및 효율을 분석하기 위하여 터널일부구간에 대피통로를 제작, 설치하였다. 이 대피통로는 출입문 2개소가 있으며, 통로내에는 터널조명과 별도로 조명을 설치하였고 계획된 대피통로폭에 맞추어 제작, 설치하였다.

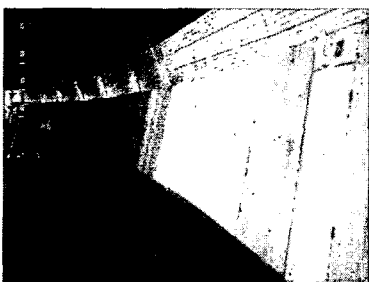


그림3 대피통로 설치



그림4 대피통로 내부

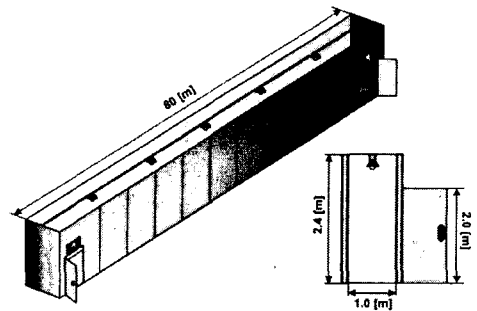


그림5 대피통로 설치도

터널내 가시도저하에 의한 피난속도저하를 관찰하기 위하여 실험용 연기발생기와 열발생기를 설치하여 연기를 발생시켰으며, 연기의 전파를 계측하기 위하여 관측자 7개소, 디지털카메라 및 캠코더 6개소, 온도측정용 열전대 T-type 7개소, 풍속측정용 TSI사의 풍속변환기 6개소를 연기측정용 측정자에 설치하였다. 연기발생장치는 인체에 무해한 백색연을 발생시키며, 냄새 및 유독가스가 없는 장치이다. 대당 연기발생량은 3MW급 화재에 대응가능한 정도이며, 본 실험에서는 2대를 사용하여 최대 6MW화재의 연기발생을 가정하였다. 또한, 열발생기는 부탄가스를 연료로 사용하여 연기발생기에서 발생한 연기에 부력을 주어 터널상단으로의 상승효과 및 터널내 전파, 침강효과를 보일 수 있도록 하였다. 열발생기의 용량은 대당 40kW이며, 2대를 사용하였다.



그림6 연기발생상황

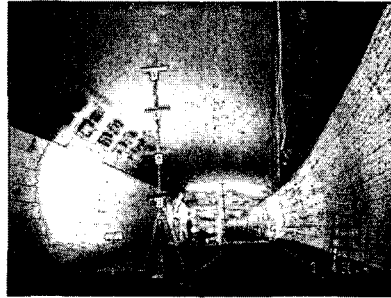


그림7 연기침강전

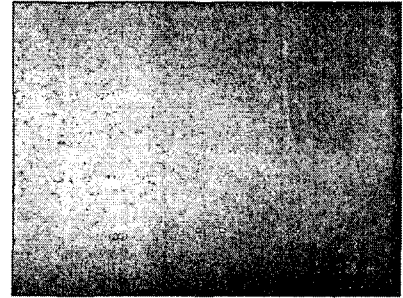


그림8 연기침강후

4. 실험결과

4.1 피난자성향파악

실험에 참가한 피실험자는 20대 초반 및 중반의 남성 및 여성으로 인원은 45명이다. 피실험자의 조건이 일반적인 터널내 승객조건과 반드시 일치하는 것은 아니므로 수차례의 기초실험을 통하여 평균보행속도 및 행동양상을 관찰하였다.

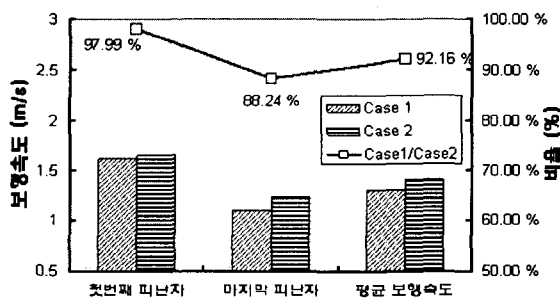


그림9 정상상황에서의 보행속도

정상보행조건, 즉 조명에 의하여 시야가 확보되고 터널내에 연기가 없는 조건에 대하여 보행속도를 측정하였다. 피실험자의 보행속도는 1.3~1.4m/s로 일반적으로 피난조건으로 삼는 1.0m/s를 상회하였다. 이는, 피실험자의 연령대가 20대에 집중되어 있어 노약자 및 어린이등이 감안되지 않았기 때문이다. 또한 3%의 오르막경사방향으로 보행시가 내리막보행시에 비하여 7.8%감소된 보행속도를 나타내었다.

4.2 개별보행과 집단보행과의 비교

사고상황이나, 모르는 곳에서 인간이 보행하는 경우에는 옆사람을 따라 행동하는 부화뇌동성 행동양상을 보이는 경우가 많다. 이러한 경우, 대부분 리더역할을 하는 사람이 자연적으로 형성되고 피난속도는 향상된다. 반면, 혼자 피난해야 하는 경우에는 피난로에 어떠한 상황이 펼쳐지는지 인지하지 못하며, 심리적으로 위축되는 경향을 보이기 때문에 피난속도가 저하될 것이다.

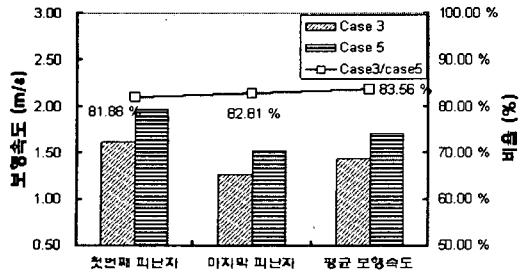


그림10 개별보행시와 집단보행시의 피난속도비교

개별보행시 피실험자는 보행시 집단보행에 비하여 주변을 살피는 정도가 높아지며, 출구쪽으로 시야를 고정하며 보행하는 양상을 나타내었다. 즉, 집단보행시에 발생하는 주변사람들과의 대화등이 없으므로 터널내 보행에 집중하게 되지만, 단독보행시에는 주변을 관찰하면서 신중하게 보행하는 양상을 띄게 되어 보행속도가 다소 감소하는 것으로 관찰되었다.

개별보행시 집단보행시에 비하여 심리적인 불안효과가 발생하여 보행속도의 감소가 발생하는 것으로 보이며, 집단보행시에 비하여 16.44[%]의 보행속도 저하가 발생하는 것으로 나타났다.

4.3 터널내 가시도에 따른 보행속도의 저하

터널내 가시도저하에 따른 보행속도를 측정하기 위하여 연기발생기와 열발생기를 사용하여 터널내 가시도를 저하시켰다. 터널외부에 대기하고 있는 피실험자에게는 이러한 사실을 인지시키지 않았으며, 피실험자는 터널진입과 동시에 터널내 가시도를 인지하게 된다. 연기발생장치가 시점부에서 20m정도 이격된 위치에 있었으므로 20m지점까지의 가시도는 상대적으로 양호한 편이었으나, 20m이후구간의 가시도는 크게 저하된 상태이다.

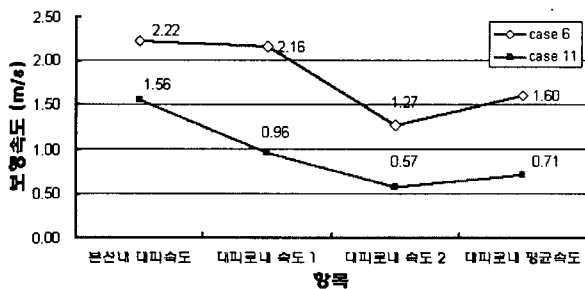


그림11 가시거리에 따른 보행속도 비교

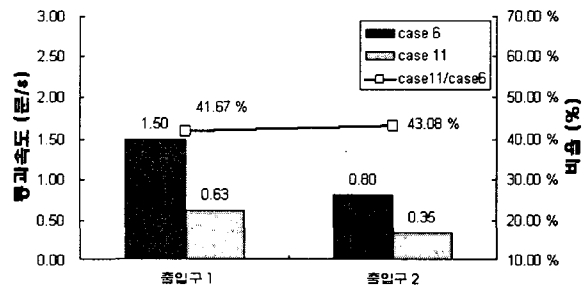


그림12 결과비교

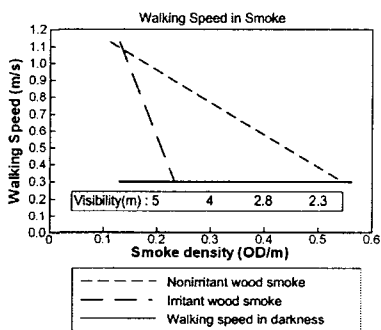


그림13 SFPE의 결과

위 그림의 Case 6은 연기가 없는 일반적인 상태, Case 11은 연기가 발생되어 가시거리가 크게 저하된 상태이다. 대피로내 가시도 저하에 따른 평균보행속도는 55.6[%] 감소하는 결과를 나타내었다.

즉, 연기가 가득찬 상황에서는 기본적인 가시도가 확보되지 않기 때문에, 이동경로가 단순할지라도 경계심에 의하여 보행속도가 크게 저하되는 것으로 볼 수 있으며, 본 실험의 피실험자들이 수차례의 실험으로 어느 정도 피난방향을 인지하였다는 것을 가정할 때, 실제상황에서는 연기속 피난속도가 심각하게 저하될 것으로 예상해 볼 수 있다.

미국 소방안전기술자협회(SFPE : Society of Fire Protection

Engineers)의 실험결과에서도 가시거리 2.3m이하에서는 보행속도가 정상보행속도의 30%미만으로 하락한다는 결과가 나타났다. 따라서, 본 실험의 결과가 신뢰성을 확보하고 있음을 알 수 있다.

즉, 터널설계시에 대피통로의 간격이 적절하게 확보되더라도 대피통로의 연기침투를 막지 못하면, 설치효용성이 크게 떨어지고 승객이 피난방향을 정확하게 예측하였다더라도 대피통로내에서 혼란상태가

야기되어 위험성이 도리어 증대되는 결과를 가져올 수 있다. 따라서, 대피통로에 대한 차연시설을 반드시 설치하여 대피통로를 안전구역으로 확보할 필요성이 있다.

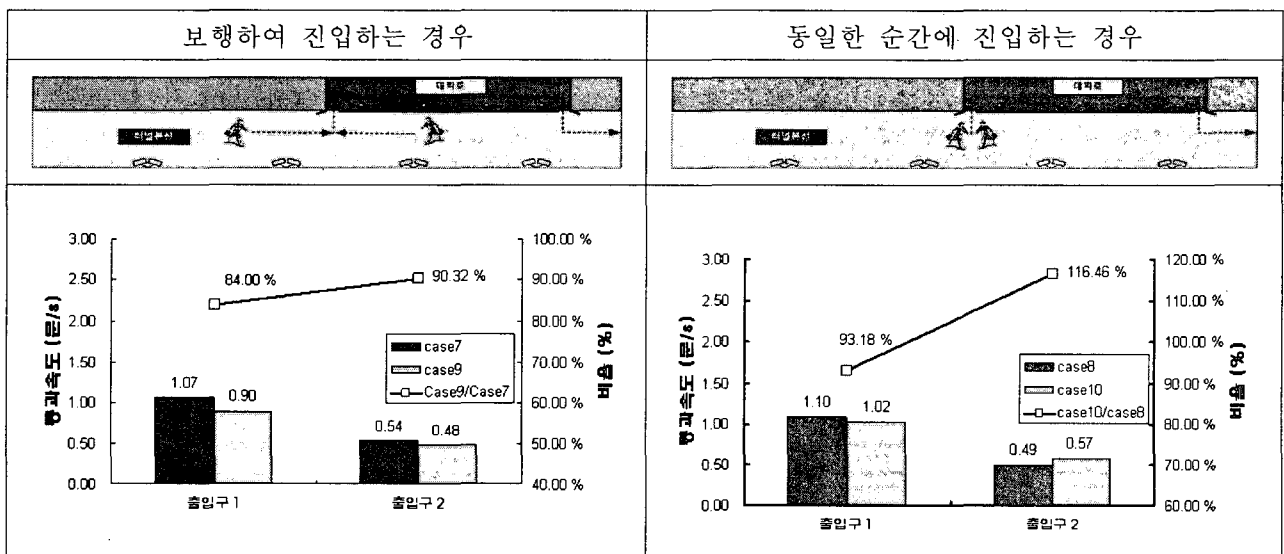
4.4 대피통로 진입시 통과용량 측정

대피통로 진입시 방화문 폭을 1.2m로 적용하는 경우와 1.0m로 적용하는 경우에 대한 비교분석실험을 수행하였다. 상황에 따라 많은 수의 피난인원이 한번에 몰려드는 경우를 가정하여 실험하였으며, 폭원변동에 따른 통과속도를 관찰하기 위하여 피실험자를 2가지 형태로 터널내에 배치하였다.

Case 07과 09의 경우와 같이 피실험자가 출입문에서 각각 40[m]떨어진 지점으로부터 출발하여 피난하는 경우와, 피실험자 모두가 출입문 바로 앞에서 피난을 시작하는 경우로 나누어 실험을 수행하였다.

실험결과, 40[m]지점에서 보행하여 대피통로로 진입하는 경우는 대피통로 폭을 1.2[m]에서 1.0[m]로 감소시켰을 경우 통과속도가 84[%]로 저하되는 것으로 나타났다.

대피통로 출입구 전면에서 대기하다 진입하는 경우에는 대피통로 폭을 1.2[m]에서 1.0[m]로 감소시 93.18[%]로 통과속도가 저하되는 것으로 나타났다.



4.5 상황별 보행속도 관찰

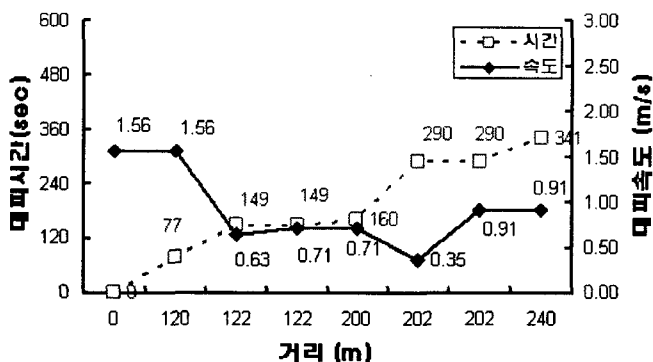


그림14 상황별 보행속도 관찰결과

그림 14은 상황별 보행속도를 종합적으로 분석한 결과이다.

0m~120m까지는 비교적 양호한 가시거리를 확보한 상태이며, 120m~200m까지는 피난통로내 연기가 침투된 상태이다.

그리고 200m~240m는 연기가 본선내에 가득차고 터널내 조명이 소등된 상태이다.

실험결과에서 나타나듯이 피난경로에 연기가 가득찬 경우에는 보행속도의 저하가 심각하게 나타나는 것으로 관측되었다.

5. 결 론

실제터널의 다양한 상황에 대한 피난자 거동관찰결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

3%의 내리막경사와 오르막경사에 대한 정상보행결과 오르막경사로 보행하는 경우의 보행속도가 다소 낮은 경향을 나타내었다. 경사도가 높아질 수록 이러한 차이는 더 커질 것이므로 대피로 설계시 부가적인 고려가 필요하다.

인식자간의 군집보행시에는 개별보행시에 비하여 높은 보행속도가 형성되므로 실제 상황에서는 피난자간의 거리가 넓혀지지 않도록 유도시설을 계획하는 것이 필요하다.

터널내에 연기가 가득찬 경우, 어느 정도 피난경로를 인지하더라도 보행속도는 50%이상 저하되며 실제 상황에서는 피난자가 피난경로를 미리 인지할 확률이 낮으므로 보행속도는 더 크게 감소할 것이다.

따라서, 보행속도 저하방지를 위한 다양한 승객유도시설이 필요하며, 대피통로에 차연시설을 설치하여 대피통로를 안전구역으로 확보하는 것이 중요하다.

대피통로의 진입구폭은 1.2m적용시와 1.0m적용시 최대 15%이하의 통과용량 저하를 나타내었다. 단, 해외사례에서 1.0m이하 적용시는 성능차이가 큰 것으로 보고되었으며, 터널의 특성에 따라 달라질 수 있으므로 면밀한 검토가 필요하다.

또한, 방재시스템 계획시 터널내 가시도에 따른 피난속도의 차등적용을 통한 안전성평가를 할 필요성이 있다.

향후 다양한 실험군에 대한 피난대피특성을 파악할 필요가 있으며, 실제 터널의 화재를 가정하여 대피시작시간에 대한 연구가 추가적으로 수행될 필요가 있다고 생각된다.

참고문헌

1. NFPA 130, National Fire Protection Association, 2003
2. NFPA 502, National Fire Protection Association, 2003
4. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering(3rd Edition), 2004
5. Behaviour by motorists on evacuation of a tunnel, Dr.L.C.Boer, TNO Report, 2002
6. Recommendations of the group of experts on safety in road tunnels, UN Economic and Social Council, 2001
7. 건축방재계획론, 이강훈 저, 경남대학교 출판부, 2002
8. 도암-유치간 지방도 확포장공사, 터널 연기거동 및 실물실험 보고서, 2004