

터널화재 열방출량에 영향을 미치는 인자

터널화재에서 터널의 높이와 폭 등의 크기가 열방출량에 어떠한 영향을 미치는가에 대해 터널 화재시험과 개방공간에서의 유사한 화재시험을 비교, 소개한다.

터널화재는 매년 몇 건씩 발생한다. 대부분의 터널화재는 사고규모가 작고 주로 자동차 한 대에서만 화재가 발생하지만, 간혹 다른 자동차로 전파되어 화재가 확산되기도 하며 화재로 인한 사상자가 발생하기도 한다. 예를 들면, 2001년 스위스 St. Gotthard 터널화재에서는 11명이 사망하고 23대의 차량이 전소되었고, 1999년 Mont Blanc 터널화재에서는 40여명이 사망하고 40여대의 차량이 전소되었다. 철도터널에서의 화재는 드물지만 사람이 많이 타는 관계로 아주 심각한 결과를 초래할 수 있다. 2000년 오스트리아의 삭도 터널 내 열차화재에서 155명이 사망하였고, 1995년 Baku 지하철 화재에서는 300여명이 사망하였다.

비록 현대 교통수단들이 예전보다 수준 높은 안전기준에 맞게 제작되고 있지만 터널화재는 필연적으로 계속될 것이다. 따라서 터널화재의 심각성을 감소시키기 위해 터널 내 방화설비에 대한 중요성이 점차 강조되고 있다. 방화설비의 효율성에 대한 기본적 토대는 터널 내 화재 역학의 이해이다. 터널 내 화재성장에 영향을

미치는 요소들을 적절히 이해한다면 방화설비의 설계를 더 잘할 수 있고 화재를 더욱 효과적으로 제어할 수 있게 될 것이다.

Edinburgh에 있는 Heriot-Watt 대학의 도시환경공학부의 한 팀은 터널에서 목재모형화재 및 액체연료 풀 화재에 의한 자동차의 열방출량(HRR)에 터널형상이 미치는 영향을 조사하는 연구프로젝트를 수행하였다. 터널의 높이와 폭 등의 크기가 터널화재의 열방출량에 영향을 미치는지 판정하기 위해 터널에서의 모든 화재시험 데이터를 수집하고 개방공간에서 수행된 유사한 화재시험의 데이터와 비교하였다.

과거 10여 년간 다양한 조건의 터널에서 여러 가지 형태의 화재를 조사하기 위한 시험연구들이 이루어졌다. Memorial 터널 배연시험 프로그램 및 실대규모 시험인 EUREKA EU499 프로젝트에서 뛰어난 업적을 거두었으며, 특히 배연설비를 사용하는 터널에서의 화재성상에 대한 이해의 폭을 넓히게 되었다. 그

러나 이 연구들에서도 해답을 구하지 못한 수 많은 기초적 의문사항들이 존재한다.

□ 터널화재시험의 약점

이러한 일련의 화재시험들의 약점 중 하나는 여러 화재시험이 동일한 터널에서 이루어졌다는 것이다. 이는 개별 터널들의 특성에 따른 화재성상이 관측되지 않을 수 있음을 뜻한다. 유사한 화재가 다른 터널에서는 다른 성상을 나타낸다는 것이다. 예를 들면, 프랑스 INERIS에 있는 화재시험용 갱도에서 수행된 1m² 헵탄 풀 화재시험의 열방출량이 EUREKA 시험에 사용된 적이 있는 노르웨이 Repparfjord의 폐기된 터널에서 수행한 1m² 헵탄 풀 화재시험의 열방출량 보다 80%나 컸다. 시험들간의 서로 다른 어떤 차이점은 터널의 배기 조건의 차이로 어느 정도 설명이 되며, 어떤 차이점은 터널 자체의 형상과 크기에 따라 명백히 달라진다.

자연배기되는 터널에서 수행한 화재시험으로부터의 열방출량 시험데이터를 개방공간에서 수행한 유사한 화재시험 데이터와 비교해 본 결과는 다음과 같았다.

(자동차 화재시험)

5m×5m 사각형 단면의 터널에서 승용차의 열방출량은 개방공간에서보다 2배 내지 3배 큰 값으로 나타났다. 3m×3m 사각형 단면의 터널에서 소형 자동차의 열방출량은 개방공간에서보다 2배 내지 3배 큰 값으로 나타났다. 2차선 아치형 터널에서 소형 밴은 개방공간에서보다 약간 큰 값으로 나타났다.

(목재모형 화재시험)

5m×5m 사각형 단면의 터널에서 대형 목재 모형의 열방출량은 개방공간에서 보다 1.3배 큰 값으로 나타났다. 3m×3m 사각형 단면의 터널에서 3개의 중규모 목재모형은 개방공간에서 보다 열방출량 최고치가 약 1.4배 큰 값으로 나타났다.

(플 화재시험)

0.3m×0.3m 사각형 단면의 시험용 터널에서, 크기가 직경 10cm에서 25cm까지 범위한 4개의 메탄올 풀 화재의 열방출량은 개방공간에서보다 약 1.0, 1.1, 1.4 및 2.7배 큰 값으로 나타났다. 동일한 장치에서 직경 15cm의 헵탄 풀 화재의 열방출량은 개방공간에서보다 4배 큰 값으로 나타났다.

□ 시험 데이터 비교

화재시험 데이터의 비교로부터 다음과 같은 현상을 알 수 있었다. 터널의 단면에 비하여 규모가 큰 화재는 개방공간에서 보다 열방출량이 현저하게 낮고, 터널의 단면에 비하여 매우 작은 화재의 열방출량은 개방공간에서와 유사하게 나타날 것이다. 이 두 가지의 극단적인 화재 규모 사이에는 개방공간에서 보다 4배까지나 큰 열방출량을 보이는 화재가 발생하는 어떤 조건이 존재하는 것이다.

개방공간에서 보다 열방출량이 현저하게 낮은 터널화재는 아마도 터널의 폐쇄로 인한 내부의 산소 고갈에 원인이 있을 것이며, 이는 연

구대상에서 배제되었다. 만약 화재가 터널내부에 존재함으로 인해 규모가 커진다면 이는 화재발생지로부터의 열방출이 제한되고 복사열이 화재로 되돌아오기 때문일 것이다. 이러한 영향은 예전에도 연구되었으나 정량화 되지 못하였다.

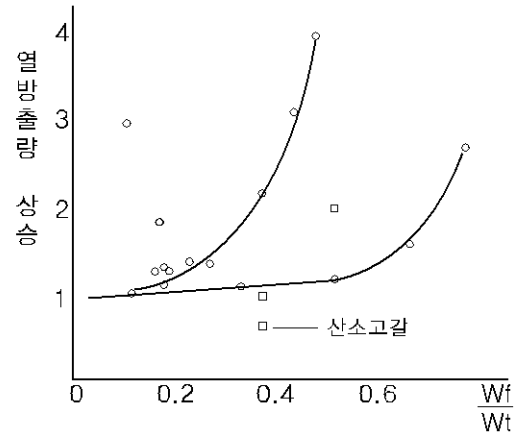
상대적으로 적은 양의 시험데이터로 인해 발생하는 문제는 어떻게 그 다양한 화재를 분석하느냐는 것이다. 'Bayes의 정리'는 제한된 정보에 근거하여 결정을 내릴 수 있게 해주는 다방면 개연성 정리이다. 이 연구프로젝트에서도 터널의 어느 기하학적 인자(높이, 폭, 밀폐비율, 수력지름, 기타 인자)가 화재의 열방출량에 가장 큰 영향을 끼쳤는지 판정하는데 Bayes의 정리가 사용되었다. 각 인자에 관련된 가정은 최초에 적용되었던 다른 가정들과 동일한 가능성의 것이었으며, 여러 시험관측으로 가능성의 추정치를 재확인하였다.

다른 시험데이터를 사용하여 여섯 번의 이러한 재확인 과정을 거친 후에, 열방출량의 상승은 주로 터널의 폭에 따라 변화한다는 가정에 대한 신뢰도는 다른 이론에서의 가정의 신뢰도보다 9배 이상 되었다. 따라서 터널의 폭(또는, 화재지점으로부터 터널 벽까지의 거리)이 화재의 열방출량에 가장 큰 영향을 끼친다고 가정함은 타당하다.

□ 열방출량의 상승 정도

가장 중요한 기하학적 인자인 W_t (터널의 폭)가 정해지면, 이것과 열방출량 상승 정도와의

상관관계를 추정하여야 한다. W_f (발화원의 폭) 또한 밀접한 상관관계가 있다(그림1 참조).



<그림1> 열방출량 상승 상관관계

최소자승법을 사용하여 열방출량 상승, W_t 및 W_f 의 상관관계를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\text{열방출량 상승} = 24 \left(\frac{W_f}{W_t} \right)^3 + 1$$

실제 사용에는 다음과 같이 조정한다.

$$Q_{add} = 24Q_{open} \left(\frac{W_f}{W_t} \right)^3$$

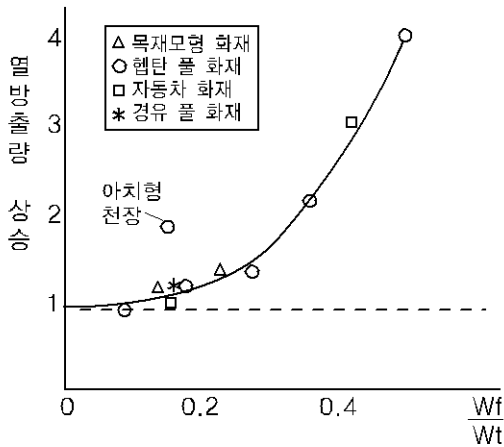
여기서, Q_{open} 은 개방공간에서의 열방출량, Q_{add} 는 터널로 인한 추가 열방출량 따라서 터널에서의 실제 열방출량은 다음과 같다.

$$Q_{tunnel} = Q_{open} + Q_{add}$$

예를 들면, 개방공간에서의 자동차 화재가 1.7MW의 열방출량을 나타내며, 이 자동차의

폭이 1.8m이고 6m 폭의 터널 내에 있으면, 개략적으로 $1.1 + 1.7MW = 2.8MW$ 로 판정할 수 있다.

이 상관관계는 공기흐름이 제한되고 주요 연료가 메탄올인 터널화재 현장에만 국한되는 것이 아니다. 열방출량은 아치형 터널에서 더욱 상승할 수도 있다(그림2 참조).



<그림2> 열방출량 상승, 발화원 폭, 터널폭의 상관관계

이 연구프로젝트는 터널의 폭이 높이나 다른 기하학적 인자보다 화재의 열방출량에 훨씬 큰 영향을 미치는 것으로 결론짓고 있다. 많은 화재시험을 통해 열방출량의 상승과 터널의 폭, 발화원의 폭과의 상관관계가 있는 것으로 나타났다.

이 연구에서 암시하는 점은 공기흐름이 제한되지 않는 상황에서, 모든 조건이 동일하다면 보다 폭이 넓은 터널이 더 안전하다는 것이다. 터널화재로 인한 열방출량(및 연기발생량)은

동일 높이의 좁은 터널에 비해 폭 넓은 터널에서 훨씬 더 낮을 것이다. 또한, 아치형 터널보다는 사각형 모양의 터널이 더 안전할 수 있다. 그러나 이를 사실로 확인하기 전에 더 많은 조사가 필요하다.

소방기술자들은 위에 기술한 공식을 사용함으로써, 개방공간에서 수행된 화재시험 열방출량 데이터를 단순히 사용하는 것보다 나은 터널화재 설계 추정치를 구할 수 있을 것이다. 그러나 터널내의 배기 조건이 화재의 열방출량을 높일 수 있다는 점을 꼭 기억해야 할 것이다. ☹

— Fire Prevention(2002.8)

— 번역: 기술지원부 과장대우 강영은