

터널에서의 열기류 특성과 화재감지 시스템

1. 머리말

화재감지설비는 도로상의 터널 안에서 안전한 피난 및 소방활동을 보장하는 데 중대한 역할을 한다. 그러나 터널 안 감지설비의 성능에 대한 정보는 많지 않다. 최근 사설 단체 및 공공기관의 후원 하에 방화연구재단(Fire Protection Research Foundation)은 터널 안에서 감지설비의 성능에 영향을 주는 요소들과 다양한 설비의 장단점에 대해서 2년간의 국제적 연구 프로젝트를 완료했다. 또한 이번 연구에서는 오경보율과 터널 환경 안에서 관리에 필요한 사항들에 대해서도 평가되었다. 비록 이번 연구가 도로상의 터널에 대해 수행되었지만, 여기서 알게 된 사실은 지하철과 같은 다른 터널에도 적용되어야 한다. 프로젝트의 일환으로 캐나다국립연구소(National Research Council of Canada, NRC)는 터널의 길

이방향으로 공기가 거의 흐르지 않는 상태에서 감지기 성능을 조사하기 위해 칼레톤 대학과 캐나다국립연구소가 만든 터널 안에서 두 가지 종류의 실험을 수행했다. 또한 캐나다국립연구소는 몬트리올의 까레비제(Caree-Viger) 터널 안에서도 컴퓨터 모델링 연구 및 실험을 수행했다. 휴즈 어소시에이즈(Hughes Associates)사는 뉴욕시의 링컨 터널에서 환경 실험 및 모의화재 실험을 실시했다. 그 프로젝트에서는 현재 유용한 5종류의 화재감지설비를 포함한 총 9가지 화재감지설비가 연구되었다. (표 참고) 설비업체들은 까레비제 터널, 링컨 터널 그리고 연구용 터널 안에 화재감지설비를 설치했다. 반응시간과 터널 안의 화재 및 터널 환경의 영향을 파악하고, 모니터링하는 능력을 포함한 감지설비의 성능은 동일한 환경 하에서 평가되었다.

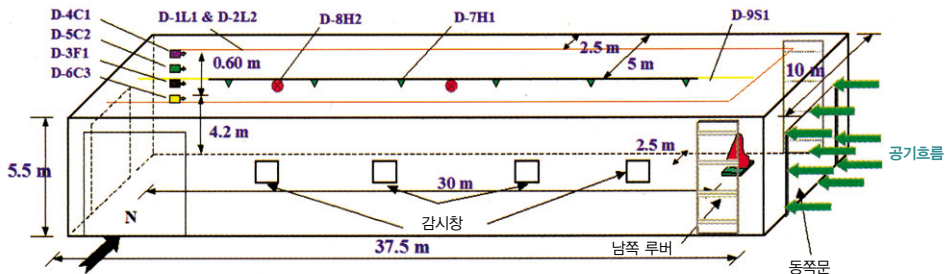
43

기술	설비번호	설비 정보	경보 기준	감지기 위치
감지선형감지기	D-1L1	섬유광학 선형열감지기	Level 1: 5°C, 10°C/분 Level 2: 100°C, 15°C/분	<ul style="list-style-type: none"> 터널 안의 벽으로부터 2.5m 이격된 두 개의 수평 케이블 터널 안의 벽으로부터 2.5m 이격된 두 개의 수평 케이블
	D-2L2	아날로그(동축케이블) 선형열감지설비	온도 : 70°C 온도상승: 7°C/분	
불꽃감지기	D-3F1	IR3 불꽃 감지기	감도 : 보통 (축에서 30.5m 떨어진 거리의 0.3m×0.3m 헵탄 화재)	<ul style="list-style-type: none"> 화원으로부터 30m 이격 및 지상으로 4.3m 높이
영상감지기	D-4C1	광학 불꽃/연기 감지기	화염 : 낮음(25%) 이격 : 50% 연기 : 보통 예비경보 시간 : 30초	<ul style="list-style-type: none"> 화원으로부터 30m 이격 및 지상으로 4.8m 높이
	D-5C2	광학 불꽃/연기 감지기	감도 : 60 평균 교차 : 4 표준편차 : 16 명멸지수 : 16	<ul style="list-style-type: none"> 화원으로부터 30m 이격 및 지상으로 4.6m 높이
	D-6C3	광학 불꽃감지기	감도 : 30m 거리에서 10Kw화재	<ul style="list-style-type: none"> 화원으로부터 30m 이격 및 지상으로 4.2m 높이
열감지기	D-7H1	정온식 열감지기	79.5°C 조기 반응 벌브	<ul style="list-style-type: none"> 터널 천장의 중앙에서 3m 이격
	D-8H2	차동식 열감지기	온도 : 57.2°C	<ul style="list-style-type: none"> 터널 천장의 중앙에서 3m 이격
연기감지기	D-9S1	공기흡입형 연기감지기	화재기준: 0.203%/m	<ul style="list-style-type: none"> 터널 천장의 중앙 공기흡입선

〈표〉 시험 프로그램에 사용된 화재감지설비

2. 연구용 터널 설비 안에서의 화재 시험

두 종류의 실물화재 실험이 폭 10m, 높이 5.5m, 길이 37m의 연구용 터널 설비 안에서 수행되었다. 첫 번째 실험은 공기의 속도를 가능한 0에 가깝게 유지하여 환기가 없는 상태에서 이루어졌다. 두 번째 실험은 터널을 통해 동쪽에서 서쪽 방향으로 공기가 흐르도록 배기설비를 작동시켜서 터널의 길이방향으로 기류를 만들고 그 상황 하에서 이루어졌다.(그림1 참고)



〈그림1〉 실물화재 실험의 두 번째 실험은 동쪽에서 서쪽으로 공기가 흐르는 상황 하에 수행되었다.

실험에서 환기속도는 초당 0, 5, 10ft(0, 1.5, 3m)이다. 연구용 터널 안에서 다양한 화재의 크기, 형태, 위치, 성장률을 포함한 3가지 화재 시나리오가 실험되었다. 그것은 가연성 액면화재(Pool fire), 정지된 차량에서의 화재, 그리고 이동하는 차량에서의 화재이다.

화재시나리오에서 사용된 화재는 125~3500Kw였다. 화재의 성장률은 1~12분 사이에 최대 열방출률에 도달하고, 화재의 위치는 일반 화재, 차량 밑에서의 화재, 커다란 차량 뒤에서의 화재를 포함한다. 가솔린, 프로판, 목재, 폼을 포함하는 다양한 연료가

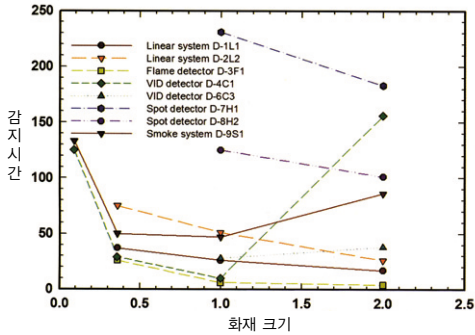
시험되었다. 이동하는 차량 화재 시나리오에서는 다양한 방향과 속도가 고려되었다. 이러한 화재 시나리오들은 화재감지설비에 문제가 될 수 있는 중요한 터널 화재들을 대표한다고 볼 수 있다.

연구용 터널에서 화재 환경과 연기 전파는 터널 천장에 설치된 55개의 열전대(Thermocouple), 2개의 열전대수(Thermocouple tree), 3개의 연기측정기, 5개의 열유속측정기, 1개의 속도측정기, 2개의 비디오키메라를 통해 모니터링되었다.

실험 화재에 대한 화재감지설비의 반응은 연료의 형태, 화재의 크기, 화재의 위치, 화재의 성장률과 감지방법에 따라 달라졌다. 차량이 화재가 만들어진 열과 화염을 제한하기 때문에 차량 밑에서의 액면 화재는 감지하기 어려운 시나리오였다.(그림2 참고) 또한 터널 안의 유속이 제한적일 때 화재크기는 차량의 본체로 제한되었다. 게다가 차량의 앞쪽에서 볼 때 화염의 모양은 감지기와 화원 사이에 놓여진

실험용 차량에 의해 부분적으로 가려졌다. 대부분의 감지설비는 차량 밑에서의 작은 화재를 감지하기 어려웠다. 그러나 화재의 크기가 증가함에 따라 더 많은 감지기가 반응하고 감지시간은 줄어들었다.

큰 차량 뒤에서 발생한 액면 화재는 불꽃을 측정하여 화재를 인지하는 감지기에는 문제가 될 수 있다. 왜냐하면 차량이 화염을 가리기 때문이다. 그러나 화재 앞에 놓인 큰 차량이 화재의 연소 과정, 온도 상승, 연기 전파에는 영향을 미치지 않는다. 많은 감지설비가 차량 밑에서 난 화재보다 차량 뒤에서 발생한 화재를 더욱 짧은 시간 안에 감지했다.



〈그림2〉 차량 밑에서 화재의 크기가 증가함에 따른 감지 시간

정지한 차량의 객실 또는 엔진에서 발생한 화재에 대한 화재 감지 설비의 반응은 느렸다. 왜냐하면 이러한 화재는 매우 느리게 성장하고, 발생한 화염과 열, 연기가 점화 후 초기 수 분 동안 차 안에 갇혀있기 때문이다. 또한 화재감지설비는 움직이는 작은 화재를 감지하기 어려웠다. 왜냐하면 터널 안에서 연기농도 및 온도의 변화가 거의 없기 때문이다. 광학 불꽃감지기는 한 시간에 17mi(27km)로 이동하는 화재를 감지했다. 그러나 시간당 31mi(50km)의 속도로 이동하는 화재는 감지하지 못했다. 다른 화재감지거나 감지설비는 이동하는 화재를 감지하지 못했다.

터널 길이방향의 기류가 흐르는 상황에서 실험된 결과는 화재감지설비의 반응시간이 화재 시나리오, 공기흐름의 속도, 감지 방법에 따라 줄어들거나 늘어날 수 있다는 것을 보여준다. 열/연기감지설비의 반응시간은 기류가 액면 화재의 연소율을 증가시키므로 공기흐름이 느린 상황보다 빠른 상황에서 일반적으로 더 짧았다. 광학불꽃감지기와 영상감지기의 반응시간은 설비에 따른 변화가 없었다.

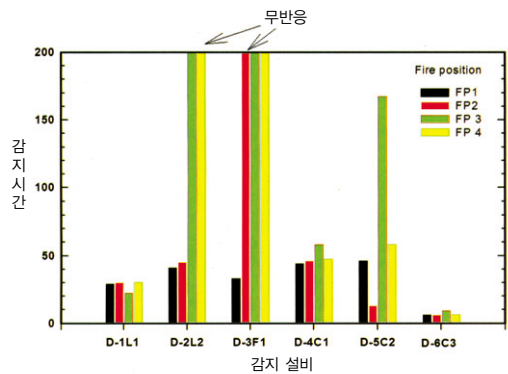
큰 차량 뒤에서 일어난 액면 화재에 대한 열감지기의 반응시간은 일반적으로 터널 안의 온도가 공기흐름에 영향을 받을 때 증가했다. 광학불꽃감지기와 영상감지기는 일반적으로 공기흐름의 속도가 증가함에 따라 반응시간도 증가했다.

3. 까레비제 터널 화재 시험

실제 터널 환경 안에서 최대 감지 거리에 위치한 화재감지설비의 성능을 조사하기 위해 퀘벡 교통부의

협조로 까레비제 터널 안에서 실물화재 실험이 이루어졌다. 4차선터널은 길이 600m, 높이 5m, 폭 17m 크기이고, 4개의 제트 팬이 설치되어있다.

연구용 터널 화재 안에 사용된 2개의 감지선형감지기, 1개의 광학불꽃감지기, 3개의 영상감지기를 포함한 6개의 감지설비가 까레비제 터널 안에 설치되었다. 약 125Kw의 작은 액면 화재, 실험용 차량 아래에서의 약 625kw 액면 화재, 실험용 차량 뒤에서의 액면 화재 등이 연구용 터널실험에서 사용된 시나리



〈그림3〉 까레비제 터널 시험에서 반응 시간

오 중 선별된 화재 시나리오들이다. 터널 안에서 화원은 다양한 위치에 놓여진다. 4가지의 길이 방향 공기유속은 초당 0, 1.3, 2, 2.4m이다. 열전대, 연기측정기, 속도측정기, 비디오키메라가 설치되었다.

각 감지설비들이 터널 안에서 양호하게 작동된다는 것이 까레비제 터널의 화재감지 설비 성능에 대한 전반적인 평가이다. 이러한 성능에 대한 평가는 동일한 시험 조건하의 연구용 터널시험에서 나온 결과와 부합되는 것이다.

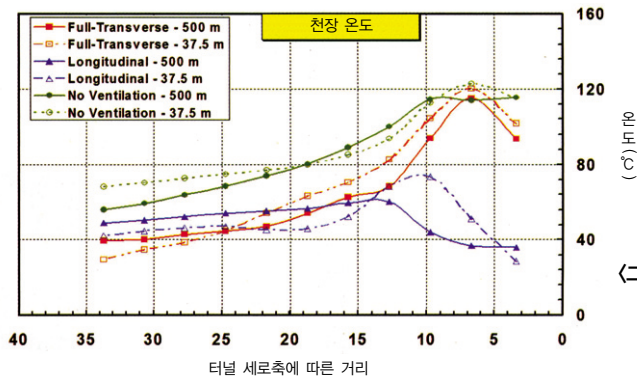
감지설비의 반응시간은 <그림3>과 같다. 다른 감지기들이 두 지점에 놓인 화재를 감지하는 반면에 온도상승율에 기초한 선형 열감지기설비의 하나는 작은 화재에 반응했다. 광학불꽃감지기는 대략 30m의 감지 범위 안에서 작은 화재를 감지했다. 세 종류의 영상감지기는 최대 60m의 감지 범위 안에서 작은 화재를 감지했다.

4. 시험 데이터의 비교

캐나다국립연구소의 연구원들은 연구 및 현장 실험으로부터 얻은 실험결과를 대수적 예측과 비교하기 위해 Fire Dynamic Simulator(FDS)라는 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, 이하 CFD) 모델을 이용하여 시뮬레이션을 수행했다. 실험된 시험 조건들이 각 시뮬레이션의 초기 및 경계 조건들로 입력되었다. 연구원들은 온도와 연기 광학 농도 측정값을 비교했고, 그리고 다양한 화재 시나리오, 환기 모드, 화재 거동 및 감지설비의 성능에 대한 터널길이의 영향들을 결정하기 위해 CFD 시뮬레이션을 수행했다. CFD 모델로부터 얻은 정보는 시험 프

로토콜을 개발하는 데 사용되었고, 도로상의 터널 방호를 위한 화재감지설비의 성능을 이해하고 최적화하는데 사용되었다. 연구원들은 기류가 없는 상태의 차량 밑 액면 화재 시나리오에 대한 실제 천장 온도와 시뮬레이션 된 천장 온도를 비교했다. 비교 결과 천장 온도는 대체로 비슷했다. 계산상 예측은, 특히 화재에 가까운 위치일수록 다소 큰 폭으로 변동하지만, 실험결과는 똑같이 변하지 않았다. 이 같은 사실은 데이터 수집의 빈도가 대수적 예측에 사용된 빈도보다 더 적고, 대수적 예측 과정은 화염의 형상을 완벽히 모사했다는 사실에 기인한다.

연구원들은 또한 화재 시나리오, 환기 모드, 터널 길이, 화재 거동, 감지설비의 성능과 같은 다양한 변수들의 영향을 결정하기 위해 CFD 시뮬레이션을 수행했다. 환기가 없는 상태, 길이방향의 환기 상태, 터널의 길이 방향과 완전히 교차되는 환기 상태, 터널의 길이방향과 반쯤 교차되는 환기 상태의 4가지 환기조건에 대해 연구되었다. 연구용 터널의 길이와 유사한 123ft(36.5m) 길이의 터널과 1640ft(500m) 길이의 터널이 시뮬레이션되었다. 두 터널의 높이는 18ft(5.5m)이고, 각각 33ft(10m), 39ft(12m)였다. 온도와 연기형상은 두 터널에서 모두 비슷했다. 그러므로 CFD 시뮬레이션은 터널의 길이가 천장 온도 또는 연기 축적에 중대한 영향을 미치지 않는다고 예측했다. 환기가 없는 연구용 터널 화재 실험에서 차량 밑에서 발생한 3ft×6.5ft(1m×2m)의 액면 화재에 대한 시뮬레이션에 대한 천장 온도의 비교는 <그림4>와 같다.



<그림4> 공기의 흐름이 없는 상태에서 연구용 터널 안 차량의 액면 화재 시험 시 천장 온도

5. 링컨 터널 화재 시험

뉴저지와 뉴욕 항만관리위원회의 지원으로 링컨 터널의 남쪽에 3가지의 화재 감지기술을 대표하는 4가지 감지설비가 설치되었다. 이 설비들은 특히 유지와 오경보에 관해서 성능을 평가하기 위해 10개월 동안 모니터링되었다. 이 긴 모니터링과 더불어 연구원들은 일련의 시험용 화재에 대한 감지설비의 반응을 기록하기 위해 터널 안에서 화재 시험을 수행하였다. 3가지 종류의 화재 감지설비를 대표하는 4가지 감지설비는 불꽃/연기를 감지하는 영상감지기, 광학불꽃감지기, 공기흡입형 연기감지기이다. 그리고 이것은 링컨 터널의 관리 및 데이터 수집 시스템에 의해 모니터링되었다.

이 설비들의 화재감지 능력을 평가하기 위해 항만관리위원회는 뉴욕과 뉴저지 지역 소방대와 합동훈련에 사용되는 일반적인 화재시험을 수행했다. 차량화재로 모든 창문이 제거된 디젤연료의 중공 차량이 사용되었다. 연료는 가솔린으로 점화되었고, 차량 뒤에 놓여진 두 개의 208L 드럼의 중간에서 연소되었다. 1~2Mw로 추정되는 규모의 화재는 엄청난 검은 연기를 만들었으나 화재는 부서진 창문을 통해 감지기의 위치에서 보였다. 감지기는 차량의 뒷편에 있고 차량의 뒷창문은 0.44㎡로 측정되었다. 화재가 성장함에 따라 창문의 열린 쪽으로 화염이 노출되었다. 모든 화재는 점화된 후로 5분 뒤에 진화되었다. 연구원들은 5가지 화재시험을 수행했다. 화재의 성질과 연소 중인 차량의 밖에서만 볼 수 있다는 제한 사항 때문에 이러한 시나리오는 모든 감지 설비에 어려운 문제였다. 공기흡입형 연기감지기의 성능이 제일 우수했다.

링컨 터널 안에서 4가지 감지설비는 오경보 경향에 대해 10개월 동안 모니터링되었다. 이 기간 동안 터널은 10(-12℃)에서 92°F(33℃) 정도의 외기에 노출되었다. 2.5cm의 눈이 내릴 때도 있었고, 19cm의 비가 내리기도 했다. 감지기들은 차량으로부터 배출되는 높은 매연과 더러움에 노출되었고, 천장은 정기적으로 세척제로 청소되었다. 링컨 터널 안의 가혹

한 환경으로 많은 설비들이 오경보를 일으켰다. 그러나 불꽃영상감지설비는 오경보가 없었고 공기흡입형 연기감지기는 단 2번의 오경보를 일으켰다. 광학창을 깨끗하게 유지하는 것은 불꽃감지기와 연기/불꽃 영상감지설비에 고장을 일으키는 심각한 문제였다. 연기/불꽃 영상감지설비에 있어서 오경보는 주로 차량의 반짝이는 등과 카메라 창문을 더럽히는 또는 안개나 헤드라이트 불빛에 의해 발생하는 환경 조건 때문에 발생했다. 터널 입구 안에서의 햇빛의 반사는 터널 안의 더러움과 같은 오경보의 중요한 원인이었다.

6. 맺음말

환경 조건 및 설비의 감지 능력이라는 관점에서 일반적으로 도로상의 터널은 화재감지설비가 운영되기에는 어려운 환경이다. 연구에서 검토된 터널 적용 설비를 대표하는 현재 유용한 5가지의 감지기술들은 각각 특정 시나리오에 대해 특별한 장점과 단점을 가지고 있었다. 이러한 결과와 이번 연구프로그램에서 제공된 기타 정보들로 인해 감지설비는 기술적으로 발전하게 될 것이다. 그와 동시에 터널 전문가들은 이 감지설비에 대한 최적의 기술을 사용하기 위해 이번 연구로부터 얻은 정보를 활용할 수 있을 것이다. NFPA 502, 출입제한 고속도로, 터널, 다리, 고가도로, 공중권을 가진 구조물 방화(Limited Access Highways, Road Tunnels, Bridges, and Elevated Roadways)를 책임지는 NFPA 기술위원회는 기준을 더 개발시키는 데 이 정보를 검토할 것이다. ☺