

도로터널 자동화재감지기 성능기준 도출을 위한 기초 연구

The study to establish performance standards of fire detector for road tunnel

유 지 오(신홍대학 건축설비과), 신 현 준(한국건설기술연구원)

1. 서 론

최근 유럽 및 국내의 도로터널 화재사고 이후에 터널에서의 평상시 안전운행의 확보 및 화재 등의 사고에 대비한 안전성 확보에 대한 요구가 증대 일로 있으며, 터널방재에 대해 기술적·사회적 관심이 고조되고 있는 실정이다. 터널은 반 밀폐구조로서 화재발생시 온도상승과 함께 유독성 연기의 확산이 제한됨으로 인해서 대피환경을 열악하게 하여 호흡과 시야장애 및 심리적인 공포감이 초래할 수 있으며, 피난 및 소화·구급활동이 제약을 받게 되기 때문에 터널에서의 화재는 대형인명 피해를 유발할 가능성이 아주 높은 것으로 보고되고 있으며, 또한 인명피해를 최소화하기 위해 초기대피환경의 확보가 가장 중요하며, 이를 확보하기 위한 수단으로 초기에 화재를 감지하기 위한 감지설비와 제연설비의 중요성이 강조되고 있는 실정이다.

외국의 경우, 몽브랑터널 화재이후 터널방재를 위한 기준에 대해서 전반적으로 제정비한 바 있으며, 지속적인 연구를 통해서 방재기술 수준을 향상하고 이를 기준에 반영하고 있다. 국내에서도 2004.12 건설교통부에 의해서 도로터널 방재시설 설치지침이 제정된 이래 2006년 소방법시행령에 의한 강화, 2007년 도로터널 화재안전기준이 제정되었으며, 이에 따라 일정규모 이상의 터널에서는 자동화재 탐지설비가 설치되고 있다.

본 연구에서는 자동화재 탐지설비의 성능기준 도출을 위한 기초적인 연구로서 소형차량의 실물화재 실험을 수행하여 화재강도를 도출하고 이를 경계조건으로 하여 실제터널에서 자동화재 탐지설비가 설치되는 천정부 온도에 대한 시뮬레이션을 수행하고 감지기 성능도출을 위한 온도 및 온도상승율에 대한 평가를 수행하였다.

2. 연구 방법 및 연구내용

본 연구는 자동화재 탐지설비의 감지기의 성능기준 도출을 위한 기초연구로 현재까지 국내에서 수행된 바가 없는 차량에 대한 실물화재실험을 수행하여 Large Concalorimeter를 이용하여 열방출을 및 온도 데이터를 확보하고 이를 FDS(Fire Dynamic simulator)를 이용한 수치해석의 입력자료로 하여 터널 천정부에 대한 복사열을 고려한 온도해석을 수행한다. 해석된 온도에 대한 분석을 통해서 화재감지를 위한 각 지점의 온도상승을 및 분포형 감지기의 감지성능 기준을 위한 일정거리에서의 온도 상승율을 고찰하였다.

3. 실물차량에 대한 화재강도 측정실험

3.1 실험방법

본 연구는 화재감지기의 성능 기준 도출을 목표로 하기 때문에 실물화재실험 대상차량을 화재강도가 작은 승용차와 승합차를 대상으로 실험하였다.

실험시 안전상의 문제를 고려하여 차량의 연료는 제거한 후 실험을 수행하였으며, 중형 승용차(소나타, 크레도스)와 승합차(그레이트 12인승)를 실험대상 차량으로 하였으며, 승용차의 경우, 차량의 엔진룸에서 화재가 발생하는 경우와 차량 내부 운전석에서 화재가 발생하는 것으로 구분하여 실험을 수행하였으며, 승합차의 경우에는 운전석에서 최초의 화재가 발생하는 것으로 하였다.

실물화재실험 및 측정장치의 개요도는 그림 1과 같으며, 실험시 주 측정항목은 화재로 인한 화재강도(Heat Release Rate)와 유독가스 발생량, 차량의 전소시간으로 화재로 인한 연기를 그림 1에 나타낸

바와 같이 화재상부에 설치된 후드에 의해서 완전히 포집하고 후드에서 집진기로 연결되는 덕트상에 샘플링 섹션에서 연기를 샘플링하여 발생열량 및 오염물질발생량을 분석하였다.

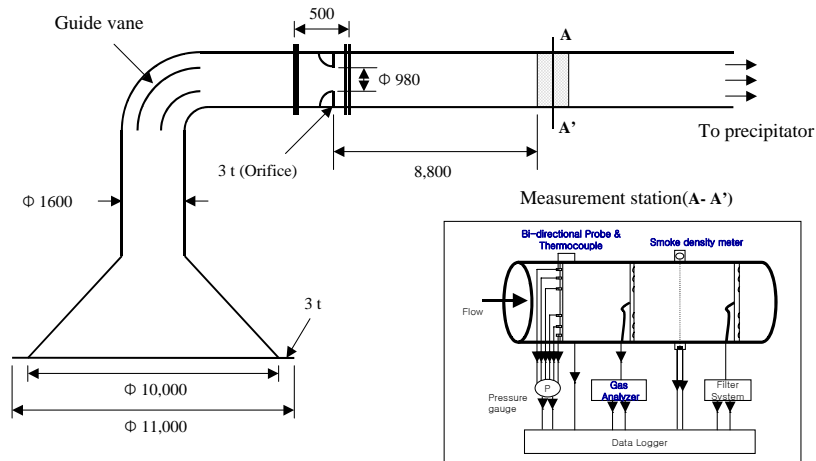


그림 1 실물화재실험 및 측정장치의 개요도

3.2 실험결과 및 고찰

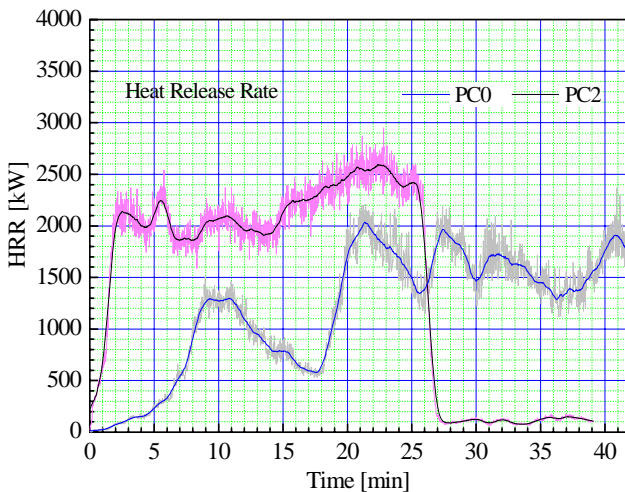
3.2.1 승용차 화재강도 측정결과

그림 2는 승용차에 대한 실물화재 화재강도를 나타낸 것이다.

그림에서 PC0는 엔진룸에서 화재가 발생하는 시나리오에 의한 실험결과로 화재강도가 10분 정도에 1차로 최대값(1.2MW)을 보인 후에 다시 감소하였다가 약 17분 정도에서 다시 성장하여 22분 정도에서 최대화재강도인 2MW에 도달하게 된다. 이와 같이 화재강도의 변화가 큰 것은 엔진룸과 승용차 내부가 분리되어있기 때문에 엔진룸에서 화재가 확산되어 승용차 내부로 화재가 확산될 때 화재의 확산이 지연되어 나타나는 현상이다.

PC2는 승용차의 창문을 열어놓은 상태에서 운전석에서 화재가 발생하는 시나리오에 의한 실험을 수행한 결과로 그림에서 화재강도는 화재초기 약 3분 이내에 급격하게 증가하여 Flesh over상태에 도달한 후 약 25분간 지속되는 것으로 나타나고 있으며, 이 경우 최대 화재강도는 2.6 MW정도로 나타났다.

이상의 승용차 화재실험에 의하면 승용차의 경우, 화재조건, 즉 엔진룸 화재, 차량 창문의 개폐정도에 따라서 시간에 따른 화재강도의 변화가 아주 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 최대화재강도는 PC0의 경우에는 약 2.0 MW, PC2의 경우에는 2.6 MW로 일반적으로 PIARC 기준 및 문헌에 제시되는 승용차의 화재강도인 약 2.5 MW와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 또한 총발생열량을 각각 3.02, 3.39GJ로 분석되었다.



(a) 화재강도



(b) 화재실험사진

그림 2 승용차화재시 화재강도 측정결과

3.2.2 승합차 화재강도 측정결과

그림 3은 그레이스(12 인승)화재시 화재강도를 측정결과를 나타낸 것으로 이 경우, 화재는 운전석에서 최초에 발화하는 것으로 하였다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 화재가 1분 이내 급격하게 성장하여 최대 화재강도를 보인 후에서 5분까지 서서히 감소하여 5분 이후에는 평균 2 MW정도의 화재강도를 지속되며, 화재지속시간은 약 25분 정도로 나타났다. 승합차의 경우 화재가 승용차보다 급격하게 진행되는 것으로 나타나고 있는데, 이는 화재현상을 관찰한 결과, 운전석에 화재를 발생하는 경우, 엔진룸과의 차단이 승용차보다 허술해서 차량내부와 엔진의 화재가 동시에 일어나서 화재강도가 증대하는 것으로 나타났다.

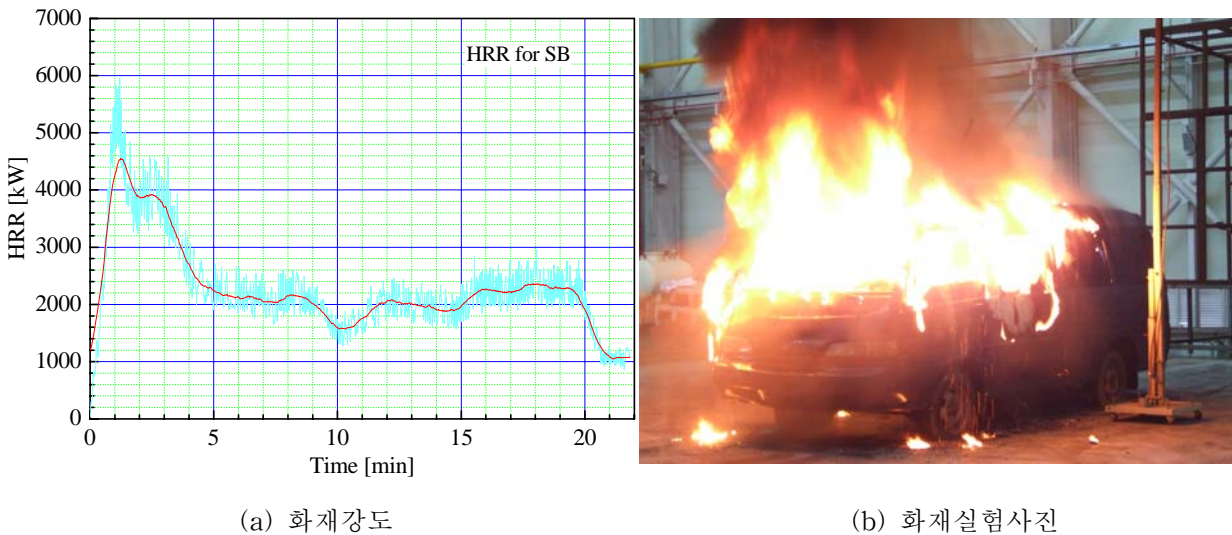


그림 3 승용차 화재시 화재강도 측정결과

4. 자동화재 탐지설비 성능기준 평가

4.1 자동화재 탐지설비 감지방식 및 성능기준

자동화재 감지기는 화재감지방식 및 작동원리에 따라 다양한 제품이 생산되고 있으며, 터널에 설치되는 화재감지기의 형식은 정의된 바는 없으며, 일반적으로 터널에는 표 1에 제시된 형식의 자동화재 감지기가 설치되고 있다. 자동화재 감지기의 성능기준은 오스트리아 및 독일의 기준에 제시되어 있으며, 성능기준 시험방법은 표 2에 나타낸 바와 같으며, 건교부의 도로터널 방재시설 설치지침은 오스트리아 기준을 적용하고 있으나 소방검정공사의 검정기준은 차동식 분포형 감지설비에 대한 감지기의 형식승인 및 검정기준을 표 3으로 제시하고 있으나 터널에 설치되는 공기관의 경우에는 100~120 m를 감지구간으로 하고 있기 때문에 소방검정공사에서 제시된 검정기준에 의해서 평가가 가능한지에 대한 검토가 필요한 실정이다.

4.2 수치시뮬레이션에 의한 터널천정부 온도평가

본 연구에서는 화재감지기가 설치되는 터널 천정부에서 감지기에서 감지되는 온도평가를 위해서 전술한 실험화재실험에서 얻어진 화재강도를 입력자료로 하여 수치시뮬레이션을 수행하여 천정부에서 온도분포 및 온도에 대한 평가를 수행하였다.

해석조건은 다음과 같으며, 터널내 풍속은 승용차에 대해서는 0, 3.0 m/s를 기준으로 하였으며, 승합차화재시에는 화재강도가 5MW를 초과하므로 RABT기준을 적용하여 6.0 m/s로 하였다.

- 해석프로그램 : FDS Ver 4.0
- 적용터널 : 표준단면, 터널높이 7.7 m, 터널최대폭 : 12 m, 해석연장 : 400 m
- 화재강도 : PC0, PC2, SB를 입력 데이터로 함.
- 풍속조건 : 0, 3.0 m/s(PC0, PC2), 0, 6.0 m/s(SB)

표 1 일반적으로 터널에 설치되는 자동화재 탐지설비의 종류

종 류		측 정 방 식
정온식 감지선형 감지기		2가닥의 철선에 특정온도에서 녹는 물질을 피복한 후 서로 꼬아 피복한 감지선으로 화재시 온도가 상승하여 일정온도에 도달하면 피복물질이 녹아 단락을 일으켜 전류가 흘러 작동한다. 또한, 4개의 동선을 사용하는 타입이 있으며 부온도계수(온도가 상승하면 저항이 낮아짐)를 갖는 물질로 피복하여 화재시 온도가 상승하면 동선사이의 저항이 감소하여 특정온도에서 전류의 흐름을 증가시켜 경보를 발한다. - 감도 : 70℃(사용조건에 따라서 변동가능)
차동식 분포형 감지기	공기관식	공기관과 다이아프램, 리크구멍, 접점으로 구성되며, 공기관의 공기가 열을 받아 팽창하여 다이아프램에 전달되어 접점을 작동하는 방식이다. - 감도 : 7.5℃/min - 구획설정 : 25~230 m간격으로 구획설정 가능
	반도체식	케이블내에 내장된 반도체센서에 의해서 온도상승을 감지하여 실시간으로 제어하며 온도상승에 따른 순차경보를 발생한다. - 감도 : 3.4℃/10s - 구획설정 : 소프트웨어에 의해서 설정(8 m간격), 2 km까지 1개의 중계기와 1개의 수신반으로 구획설정 가능
	광센서 감지선형 감지기	주위온도에 따라서 변하는 광섬유의 레이저 산란광을 분석하여 감지선의 위치별 온도 및 온도 변화를 측정할 수 있는 센서 - 감도 : 10℃/min(변동가능) - 구획설정 : 소프트웨어에 의해서 처리하며, 전 길이에 제한이 없으며 1개의 중계기와 1개의 수신반으로 4 km까지 가능

표 2 외국의 자동화재 감지기 성능기준

국가	터널내 유속조건	화재감지시간		화재하중
		예비경보(sec)	경보(sec)	
오스트리아	< 3 m/sec	60	90	1.5 MW 알코올 Pool Fire(2m ² -10리터)
	≥ 3 m/sec	120	150	3.5 MW
독일	최대 6 m/sec	60 이내		5 MW 벤젠 Pool Fire(4m ² -20리터)

표 3 차동식 분포형 감지기의 감도시험(감지기의 형식승인 및 검정기술기준 제15조)

종별	t1	t2
1 종	7.5	1
2 종	15	2
3 종	30	4

① 분포형 감지기로서 공기관식 감도는 그 종별로 다음표의 공기관 자체의 온도상승을 t1 및 t2의 값에 따라 다음 각호의 시험에 적합하여야 한다.

1. 작동시험 : 공기관중 검출부로부터 가장 먼거리에 있는 20 m의 부분이 t1 ℃/min의 직선적인 비율로 상승하는 경우 1분 이내에 작동하여야 한다.
2. 부작동시험 : 공기관 전체가 t2 ℃/min의 직선적인 비율로 상승하는 경우 15분 이내에 작동하지 않아야 한다.

4.2.1 해석결과

(1) 승용차(PCO)화재시 온도특성 검토(엔진룸화재)

그림 3과 그림 4는 승용차의 엔진룸에서 화재가 발생하는 경우(PCO)로 각각 터널내 풍속이 0, 3.0 m/s 인 경우의 해석결과를 나타낸 것으로 그림(a)는 화재지점(0 m)을 기준으로 각 지점에서 최고온도, 60초간 평균의 최대온도, 60초간 온도상승율을 나타낸 것이며, 그림(b)는 각 지점에서 온도상승율, 그림(c)는 화재지점을 포함하여 화재 상·하류의 100 m구간의 평균온도 상승률을 나타낸 것이다.

그림 3은 승용차의 엔진룸에서 화재가 발생하고 풍속을 0.0 m/s로 가정하는 경우로 기류에 영향이 없기 때문에 연기류가 양방향으로 이동하며, 최고온도는 화재직상부에서 발생하고 있으며, 직상부의 최대온도는 약 160°C정도로 나타나고 있으며, 1초 간격으로 sampling된 온도를 1분간 평균한 평균온도의 최대치는 150°C정도로 나타나고 있다.

또한 1분당 온도상승율은 화재 1분 이내에 6°C/min정도가 되며 약 3분 경과후에 7.5°C/min을 초과한 후에 감소하였다가 340초 이후에 다시 증가하여 약 11°C/min정도가 되는 것으로 나타나고 있다.

따라서, 터널내 화재감지기 1종 감지기(7.5°C/min)을 적용하는 경우, 엔진룸에서 화재와 같이 화재강도가 약 10분 만에 1.25 MW정도에 도달하는 경우에는 화재감지가 곤란할 것으로 판단된다. 특히, 그림(c)는 화재상류 20m지점에서부터 80 m까지의 구간 평균온도를 나타낸 것으로 그림에 의하면 일반적으로 100~125m구간의 평균온도 상승률에 의해서 화재를 감지하는 방식의 화재감지기는 그림(c)에서 알 수 있는 바와 같이 평균온도 상승률 450초 이후에 7.5°C/min을 초과하는 것으로 예측된다.

그림 4는 터널내 풍속이 3 m/s인 경우에 승용차의 엔진룸에서 화재가 발생하는 경우로, 터널내 풍속증가로 인해서 온도상승이 급격히 감소하며, 최고온도점은 화재지점에서 약 10 m정도 하류부에서에서 발생하며, 최고온도는 50°C정도로 나타나고 있다.

또한 화재지점하류의 온도상승율(°C/min)을 검토한 결과(그림 b참조), 약 450초 까지 온도상승율이 3°C/min정도로 아주 낮게 나타나고 있으며, 500초 정도에 화재하류 10 m지점의 센서가 제 1 종화재 감지기의 감지조건이 7.5°C/min을 초과하는 것으로 나타나고 있다. 또한 100 m구간의 평균온도 상승율은 540 정도에서 가장 크게 나타나고 있으나 약 3.5°C/min정도로 제1종 화재감지기의 화재감지조건에 못 미치는 것으로 나타나고 있다.

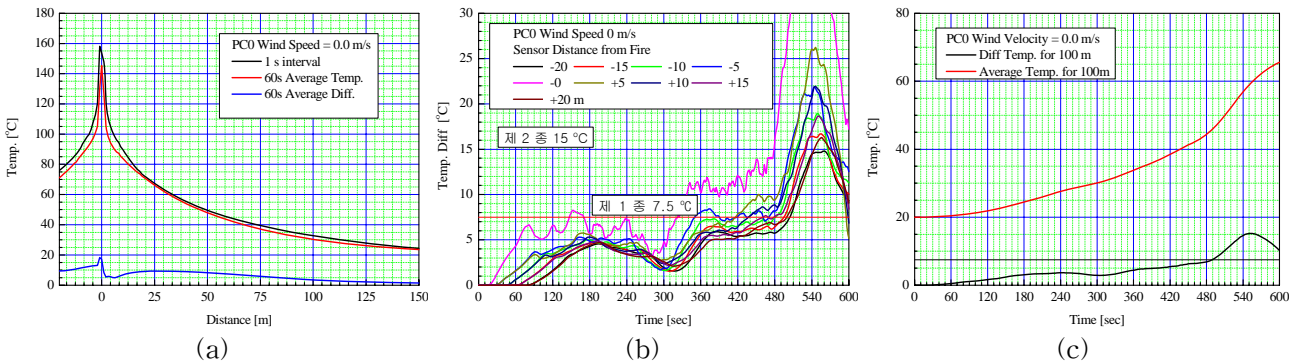


그림 3 엔진룸에서 화재가 발생하는 경우(PCO) 풍속 : 0.0 m/s

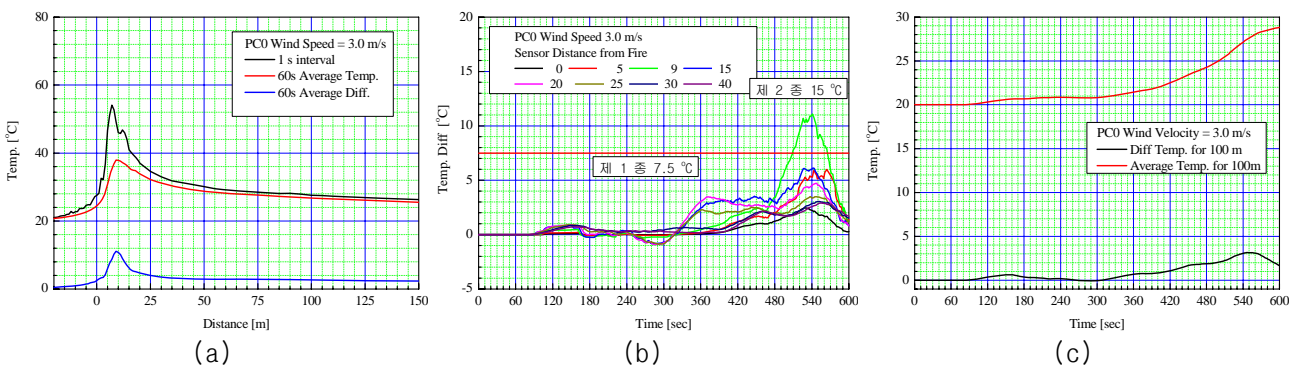


그림 4 엔진룸에서 화재가 발생하는 경우(PCO) 풍속 : 3.0 m/s

(2) 승용차(PC2)화재시 온도특성검토(운전석 화재)

그림 5는 터널내 풍속이 0 m/s인 경우로 이 경우 화재강도는 화재초기에 급격히 상승하여 60초 이내 2.5 MW에 도달하고 있기 때문에 터널내 온도도 급격하게 증가하여 최대온도가 3분내에 250℃에 도달하는 것으로 나타나고 있으며, 최대온도지점은 화재직상부에서 나타나고 있으며, 화재지점에서의 온도상승율은 최대 100 ℃/min으로 나타나고 있다. (그림 a참조)

또한 그림(b)에 의하면 화재지점을 기준으로 상·하류 20 m이내의 모든 지점에서 분당온도 상승률이 7.5℃/min을 초과하는 것으로 나타나고 있으며, 화재직상부(0 m지점)의 온도상승율은 20초 만에 1층화재감지기 성능평가기준인 7.5℃/min를 초과하는 것으로 나타나고 있다.

또한 100 m구간(화재하류 20~상류80m)의 평균온도 상승률은 약 60초 이후에 7.5℃/min을 초과하는 것으로 나타나고 있다.

그림 6은 터널내 풍속이 3 m/s인 경우로 최고온도는 화재지점에서 약 5 m정도 하류지점에서 발생하며, 기류에 의한 냉각효과로 최고온도는 풍속이 없는 경우보다 현저하게 감소하여 약 90℃ 정도로 나타나고 있다. 화재하류에서 온도상승율을 검토한 결과, 5~20 m정도 하류지점에서 약 80~120초 정도에 온도상승율이 7.5℃/min을 초과하는 것으로 나타나고 있다. 따라서 제 1 종감지기를 설치하는 경우에는 1분 이내에 화재감지가 곤란한 것으로 예측된다.

또한 화재하류 100 m구간의 평균온도상승율은 화재초기부터 서서히 증가하여 약 150초 정도에서 7.5℃/min을 초과하는 것으로 나타나고 있다.

(3) 승합차 화재시(SB) 온도특성 검토

그림 6은 터널내 풍속이 없는 경우에 승합차 화재시 온도특성을 나타낸 것으로 이 경우 화재강도는 전술한 바와 같이 120초 이내에 최대화재강도인 5 MW에 도달하고 있기 때문에 터널 천정부 온도 또한 화재초기에 급격하게 상승하며, 최대온도는 풍속이 없기 때문에 화재직상부에서 발생하며, 약 400℃ 이상이 되는 것으로 나타나고 있다. 온도상승율(그림 b참조)에 대한 분석결과, 화재 상하류 20 m이내의 모든 지점에서 60초 이내에 온도상승율이 7.5℃/min을 초과하는 것으로 나타나고 있다.

또한 100 m구간의 평균 온도상승율은 약 40초 만에 7.5℃/min를 초과하는 것으로 나타나고 있다.

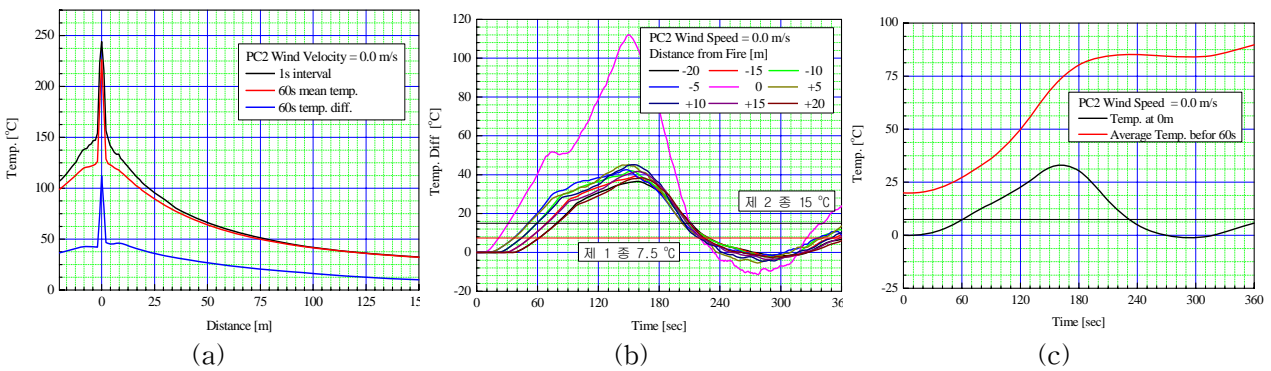


그림 5 운전석에서 화재가 발생하는 경우(PC2) 풍속 : 0.0 m/s

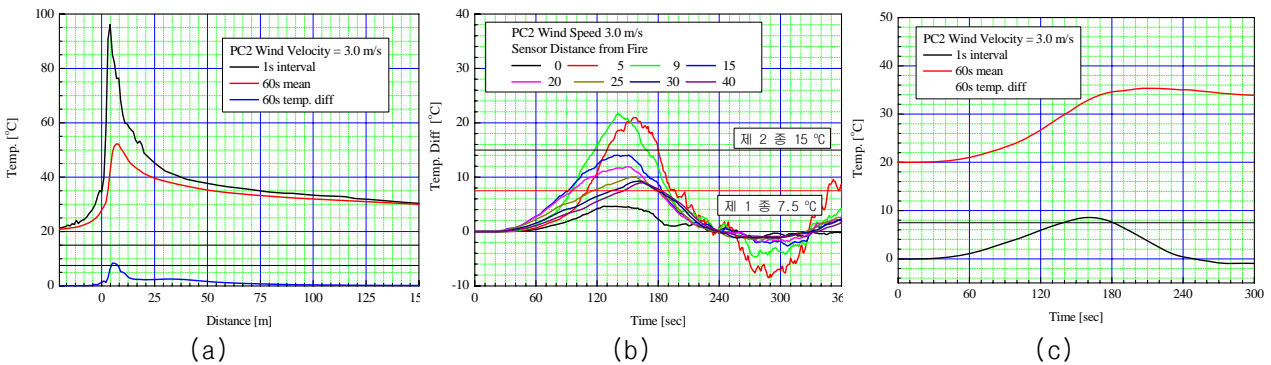


그림 6 운전석에서 화재가 발생하는 경우(PC2) 풍속 : 3.0 m/s

그림 8은 터널내 풍속이 6 m/s인 경우로 기류에 의한 냉각효과로 인해서 최고온도가 급격히 감소하여 화재하류 약 12.5 m지점에서 최고온도가 발생하며, 66°C에 도달하는 것으로 나타나고 있다. 이 경우, 화재로부터 15 m하류지점의 온도상승율은 약 60초 이후에 7.5 °C/min를 초과하는 것으로 나타나고 있으며, 100 m구간의 평균온도 상승률은 약 80초 이후에 7.5°C/min를 초과하는 것으로 나타나고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 터널화재감지기의 성능기준 도출을 위해서 승용차와 승합차에 대한 실물화재시험을 수행하여 화재강도를 측정하고 이를 입력자료로 하여 감지기가 설치되는 터널천정부에서 온도를 해석하여 천정부에서 온도 및 온도 상승률, 구간온도상승율을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 화재강도가 가장 작게 평가된 승용차의 엔진룸에서 화재가 발생하는 경우, 현재 감지기의 성능기준인 7.5°C/min을 준수하는 경우 터널내 3 m/s정도로 존재하는 경우에는 화재의 감지가 곤란할 것으로 평가된다.
- 화재가 급격하게 성장하는 PC2의 경우에 터널내 풍속이 3 s/m인 경우에는 100 m구간의 평균온도상승율은 140초 이후에 7.5 °C/min를 초과하는 것으로 나타났다.
- 또한 승합차의 경우에는 터널내 풍속이 6 m/s인 경우에 100 m구간의 평균온도상승율은 약 80초가 경과한후에 7.5 °C/min를 초과하는 것으로 나타났다.
- 화재강도가 1.5 MW이하의 경우에는 현 차동식 분포형감지기의 검증기준을 만족하는 화재감지기의 경우 1분 이내에 화재를 감지하는 것이 곤란한 것으로 평가되며, 따라서 터널내 화재감지기에 대한 성능기준의 재정립이 필요하며, 본 연구에서는 감지기의 최소성능기준으로 3.5°C/min으로 제시하는 바이다.

감사의 글

본 연구는 2005년 건설교통부 지하공간 환경개선 및 방재기술 연구사업(C03-01)의 “도로터널방재시스템 개발”의 일환으로 수행되었습니다.

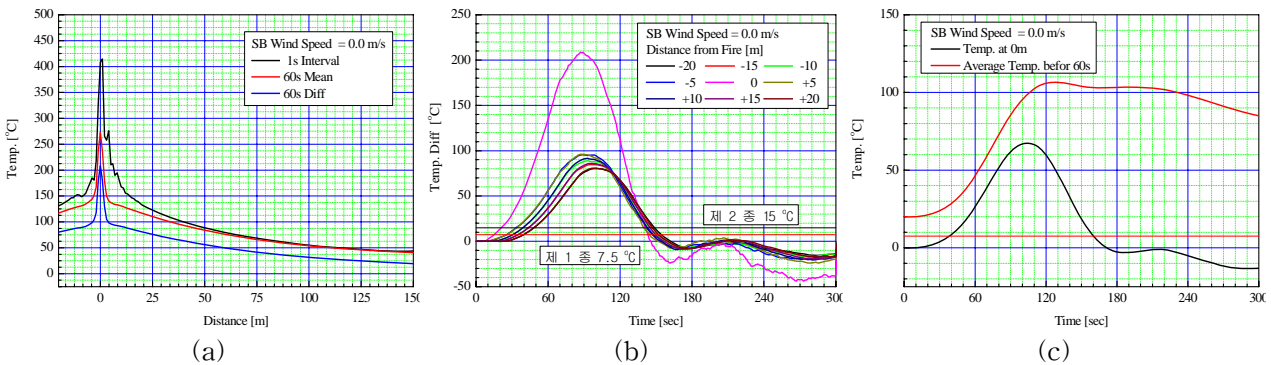


그림 7 승합차 화재시(SB) 풍속 : 0.0 m/s

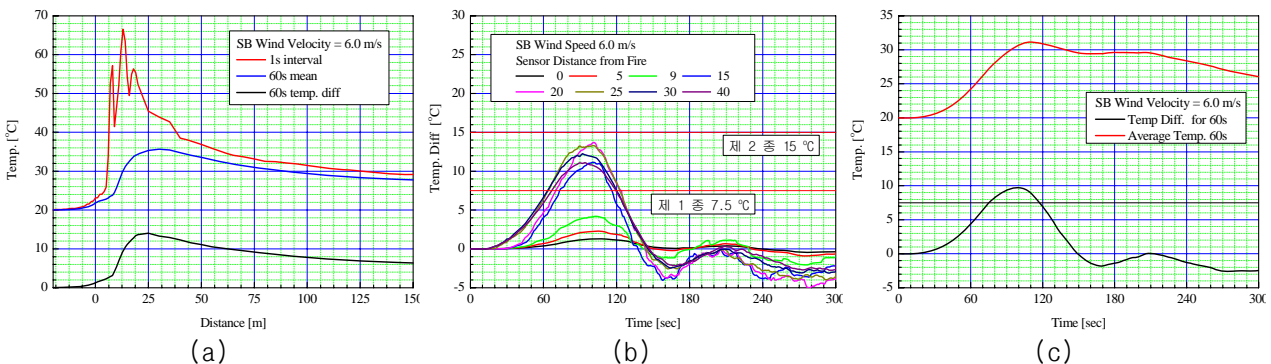


그림 8 승합차 화재시(SB) 풍속 : 3.0 m/s