

수치해석을 이용한 화재감지기 철도터널 화재 감지특성 연구

박원희*

¹한국철도기술연구원 철도안전연구실

Sensing Characteristics of Fire Detectors in Railway Tunnel by Using Numerical Analysis

Won-Hee Park^{1*}

¹Railroad Safety Research Division, Korea Railroad Research Institute, Gyeonggi-do, Korea

요 약 터널과 같은 밀폐 공간에서는 화재시 발생하는 열과 연기로 인하여 터널내의 승객들에게 심각한 피해를 입힐 수가 있다. 이러한 피해를 최소화하기 위하여 터널의 화재를 조기감지하기 위하여 화재감지기가 터널에 설치된다. 철도터널의 화재감지기 성능시험 방법 정립을 위한 제한된 규모의 화원에서 터널 상부 및 측벽에 설치된 화재감지기의 감지특성을 수치 해석을 이용하여 분석하였다. 화재영향 수치해석을 위하여 NIST에서 개발한 FDS 프로그램을 사용하였으며, 터널벽의 온도를 현실적으로 계산하기 위하여 터널 외부의 구조를 가정하여 고려하였다. 화원크기에 따른 화재감지기별 화재감지 시간을 터널 위치별로 산출하여 비교 분석하였다.

Abstract In enclosed areas such as railway tunnels, the heat and smoke generated by a fire can pose a tremendous risk to the life of passengers. To prevent or mitigate such scenarios, fire detectors are installed for early fire detection. This numerical study is preformed for establishing the method of detecting performance of fire detectors installed on railway tunnels. Numerical analysis are conducted using the fire dynamics simulator, developed by the NIST. The temperature of the tunnel walls is determined using the assumed exterior structure of the tunnel. In addition, the detection times of detectors installed at different locations in the tunnel are obtained for different sizes of the fire source, and the results are compared and analyzed.

Keywords : Fire detector, Tunnel, Numerical analysis, Temperature, Smoke

1. 서론

터널과 같은 밀폐공간에서 화재가 발생할 경우 불완전 연소로 인한 유독한 화재연기가 개활지에서 보다 더욱 많이 발생하며 이러한 화재연기는 터널의 온도가 급격하게 상승하여 발생된 기류와 같이 전파된다. 터널 내부의 연기의 전파로 인하여 피난 및 체류하는 승객에 영향을 미칠 수 있으며 대규모의 인명피해가 발생할 수 있다. 이렇듯이 대규모의 인적인 피해뿐만 아니라 물적인 피해를 야기할 수 있는 터널화재에 적극적으로 대응하기

위하여 터널에 화재감지기가 설치될 수 있다. 터널에 설치되는 감지기는 화재열로 인한 온도 상승, 연기로 인한 가시도 저하, 화재로 인한 특정 연소가스(CO 등) 및 화염으로 인한 빛을 인지하여 화재로 감지한다.

도로터널의 경우 연장에 따라 화재감지기의 설치가 강제되며[1], 화재규모가 1.5 MW인 화원을 1분 이내에 탐지할 수 있는 성능의 화재감지기가 설치되도록 규정하고 있다. 최근에 터널에서의 화재로 인한 터널에서의 온도변화에 대한 실험연구가 진행되었는데, 화원의 크기 및 높이에 따른 영향이 분석[2]된바 있으며, 터널에서의

본 논문은 국토교통부의 “철도터널 화재감지기 기준 및 지하역사 안전구역 구축기술 개발 연구과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Won-Hee Park(Korea Railroad Research Institute)

Tel: +82-31-460-5358 email: whpark@krrri.re.kr

Received september 25, 2015

Revised November 6, 2015

Accepted November 06, 2015

Published November 30, 2015

여러 종류의 감지기에 대한 화재감지 특성을 파악하기 위한 다양한 연구가 캐나다의 NRC(National Research Council) 주도로 진행된 바 있다.[3,4] 노형기 등[5]은 터널 화재 시 터널 천장에 설치되는 화재감지기의 작동 온도와 관련하여 실험실실험을 수행하였다. 터널에서의 화재감지기 관련한 시험은 화원의 크기를 제어할 수 있도록 그릇(pool)에 액체 연료를 채우고 화원으로 사용하는 풀 화재(pool fire)를 이용하여 진행되고 있다. 터널에서의 화재감지기 성능평가를 위하여 권오상 등[6]은 실험 화재실험을 진행하여 화재 감지기 성능 평가를 실행 한 바 있다.

본 연구는 철도터널에서 화재감지기 성능을 평가하는 성능 기준을 작성하기 위하여 수행되었는데, 철도터널의 화재감지기 성능평가시 화원의 크기 및 화재감지기의 화재감지시간 등을 검토하기 위하여 성능평가 시험시 활용 할 수 있는 화원 규모 및 이에 따른 화재감지기별 감지 시간을 비교 분석하였다.

2. 화재영향 수치해석

2.1 해석터널

터널에서 발생하는 화원의 특성에 따른 터널에 설치 되는 감지기의 감지 성능평가를 위한 대상터널로 충남 서천군에 있는 장항선의 온동 터널이 채택되었다. 온동 터널은 철도터널 화재감지기의 성능평가 현장시험이 수행된 장소로 본 논문에서 다루는 수치해석의 감지 성능 결과와 비교될 수 있는 장점이 있다. 온동터널은 2008년에 폐선된 철도 터널로, 길이는 214m, 높이는 5.2m, 폭은 3.9m이다. 본 터널에서 화원의 위치 및 화재크기별 터널 천장 온도를 측정에 대한 연구가 진행된 바 있다.[2]

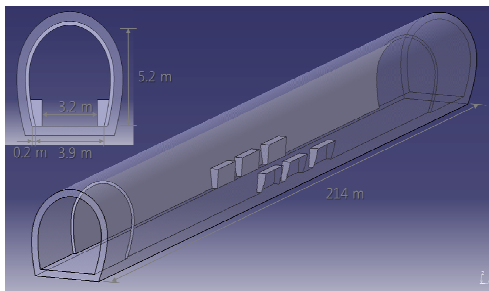


Fig. 1. Schematic draw of test tunnel [2]

2.2 수치해석을 위한 조건 설정

해석을 위한 프로그램으로는 미국의 표준과학연구소(NIST)에서 개발한 FDS(Fire Dynamics Simulator)[7]을 사용하였다. 화재모델링의 경우 정확한 결과를 얻기 위하여 적정 격자를 구성하는 것이 중요한데, 격자의 크기는 화원의 거동이 잘 표현될 수 있는 적절한 크기이어야 한다. 따라서 화원의 특성직경보다 작아야 화원으로 부터 비롯된 열/연기의 거동이 정확하게 예측된다. 식(1)의 D^* (화원특성직경)를 구하기 위하여 Table의 물성치를 식에 대입하여 격자의 크기를 구하였다. 계산결과 D^* 는 2.4m 이며 이를 토대로 격자크기를 1/10 이하로 설정하여 0.2m의 크기로 격자를 설정하였다.

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_0 T_0 C_{p0} \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (1)$$

Table 1. Input parameters for determining sizes of calculation mesh

parameters	values
Temperature [K]	293.15
Density [kg/m ³]	1.1934
Specific heat [kJ/kg · K]	1.007
HRR [kW]	10,000

격자크기는 식 (1)에서 구한 20 cm인 정육면체(0.2m × 0.2m × 0.2m)로 하였으며, 격자수는 약 777,600 개다. 계산의 속도를 위하여 2 개의 cpu를 이용한 병렬 계산을 수행하였다. 터널 벽에서의 온도에 따라 정온식 감지기가 작동하므로 터널 벽에서의 온도가 매우 중요하다. 또한 터널벽의 온도는 연기의 성장 및 하강의 중요한 조건 중 하나이다. 일반적으로 터널 벽에서의 에너지에 대한 경계 조건은 아래와 같이 단열로 설정하는 것이 일반적이다.

$$\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=walls} = 0 \quad (2)$$

본 연구에서는 터널 벽에 단열조건을 바로 설정하지 않고, 터널 벽(콘크리트)과 토양이 존재한다고 설정하였다. 이를 위하여 FDS에 경계조건에 터널 벽과 토양이 존재하는 것으로 가정하였으며, 토양 외부로는 단열 조건

이 설정된다. 터널 벽은 0.2 m 콘크리트로 설정하였으며, 터널 외부 벽 경계는 20 m의 대지로 설정하였으며, 각 성분의 열적 물성은 Table 2와 같다.

Table 2. Thermal properties for boundary conditions of tunnel walls

	specific heat [kJ/kg/K]	density [kg/m ³]	conductivity [W/m/K]
concrete	1.84	2050	0.519
soil	0.87	2300	1.4

2.3 화원 설정

화원의 경우 터널입구에서 100m 부근에 위치하였으며, 화원의 연료는 헵탄으로 설정하였으며, 연료트레이의 크기는 0.130m × 0.841m × 0.594m(H × L × W)이고 면적은 0.5m²이다. 이때 화재규모는 연료트레이 1개 일 때 1 MW, 연료트레이를 2개 사용하였을 경우는 2 MW이다.

2.4 화재 영향 수치해석 결과

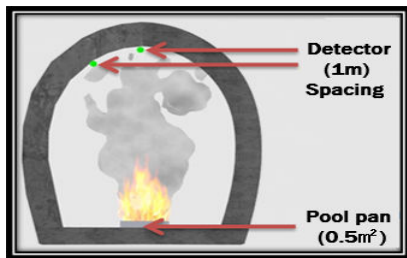


Fig. 2. Detector installation location (center and side departed 1 m from center)

화재발생으로 인하여 발생한 화재열, 연기, CO, CO₂ 및 수트 농도(Soot Volume fraction)의 수치 예측값을 분석하였다. Fig. 2와 같이 터널의 감지기 설치에 예상되는 단면의 2개의 위치(터널 천장 중앙 지점 및 터널 중앙에서 1 m 떨어진 지점)로 터널의 종방향으로 터널 위치별 물리량을 분석하였다. 데이터 간격은 10sec로 설정하였으며, 데이터 분석거리리는 5 m이다. Fig. 3는 화원이 1 MW 및 2 MW일 경우에 300초 이후에 터널 중앙상부 및 측부벽에서의 온도분포를 나타내고 있다. 1 MW의 화원의 경우 화재발생지역을 중심으로 상층부의 온도가 상승하며, 터널 천정을 따라 터널의 입출구 방향으로 발생한 자연 기류의 영향으로 온도가 상승하고 화재발생 지역을 중심으로 온도가 급상승 하며 터널 벽을

따라 점차 기류가 하강 한다. 화재지역에서 50 m 떨어진 지점까지 약 50℃ 의 온도가 측정되었다. 2 MW 크기의 화원의 경우는 1 MW 화원의 경우보다 터널 중앙부와 측면 부분의 온도차가 적는데 이는 큰 규모의 화재일 경우 화재연기 층이 두꺼워져 터널 최상부와 측부의 온도 차이가 작기 때문이다. Fig. 4 ~ 6은 화재 해석을 통하여 구한 CO, CO₂, Soot의 값인데, 온도분포와 마찬가지로 화원이 1 MW일 때 화재발생 지역을 중심으로 각 값들이 상승한 것을 확인 할 수 있다. 화재의 크기가 보다 커진 2 MW에서는 터널 중간과 측면에서의 값이 감소하는 경향을 보였는데 이는 온도차가 높음에 따라 연기의 확산속도가 증가했기 때문으로 보인다.

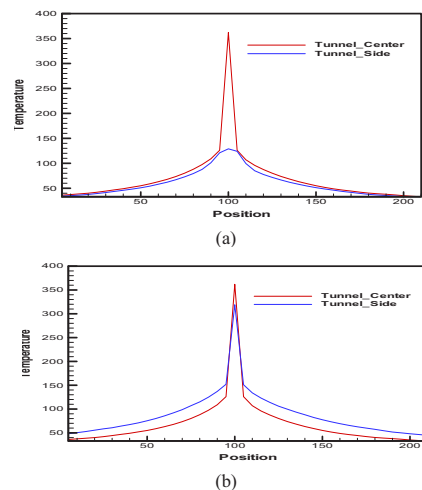


Fig. 3. Temperature distribution at 300 sec
(a) 1 MW (b) 2 MW

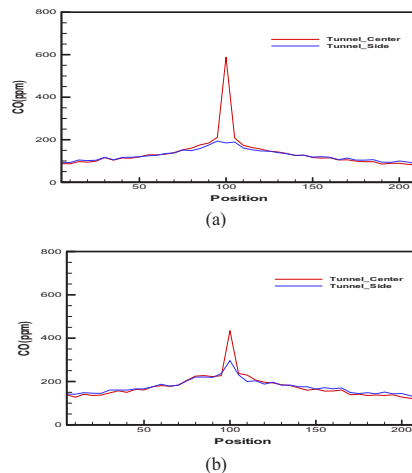


Fig. 4. CO distribution at 300 sec
(a) 1 MW (b) 2 MW

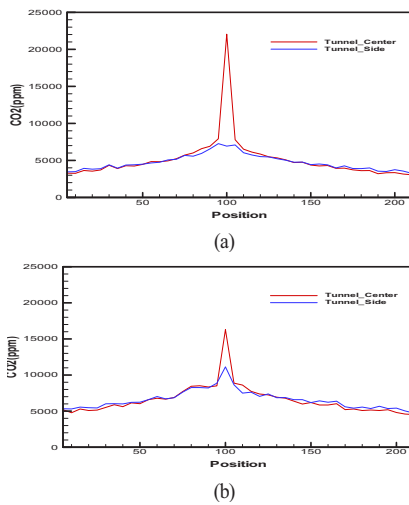


Fig. 5 CO₂ distribution at 300 sec
(a) 1 MW (b) 2 MW

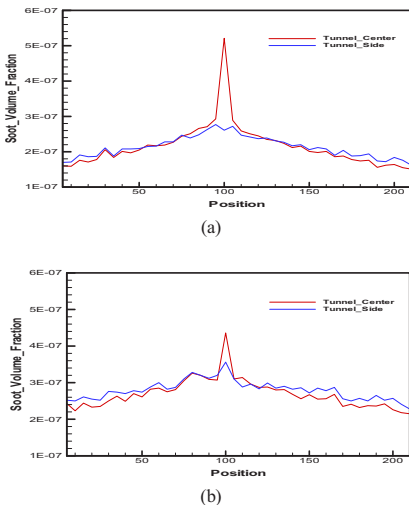


Fig. 6. Soot distribution when 300 sec
(a) 1 MW (b) 2 MW

3. 감지기별 감지성능 분석

3.1 화재감지기의 설정 및 감지 조건

감지기의 종류로는 3가지를 선정하였는데, 우선 터널 내부의 온도로 화재를 감지할 수 있는 열 감지기이다. 화재알람 설정은 국내에 시판되는 정온식 열감지기를 참조하여 70 °C로 설정하였다. 감지기 사양은 바이메탈 온도 감지 방식으로 -10 °C ~50 °C범위에서 사용가능하며 70 °C이상의 온도에서는 화재알람이 작동하도록 설정되

어있다. 감지기 RTI(Relative Temperature Index)값은 참고문헌[8]을 참고하여 27로 설정하였다. 둘째로 고려된 감지기는 터널내부의 연기농도를 감지하기 위해 연기 감지기이다. 연기감지기 사양은 30cm 당 0.61 ~ 1.91 % 연기농도에서 5단계 알람이 설정되며, 시간패턴이나 화재패턴이 프로그램 되어있어 화재에 따른 알람설정이 가능하다. FDS 값으로 m 당 2.03%의 농도에서 작동하며, 본 연구에서는 30cm 당 0.61% 이상 되는 연기 농도에서 화재 신호를 주도록 설정하였다. 세 번째로 고려된 감지기는 연기감지기의 다른 종류인 광전식 연기감지기이다. 연기감지기 위치가 있는 발광부는 열전대 위치와 동일하게 설정하였으며, 수광부의 위치는 발광부 위치와 대칭되는 곳에 설정하였다. 감지기 사양은 25%, 35%, 그리고 50%에서 3단계 알람이 설정되어 있다. 본 연구에서는 25% 이상 되는 연기농도에서 화재신호가 발생하도록 설정하였다. Table 3에 각지기별 화재감지 물리량과 값을 보여주고 있다.

Table 3. Each detector's detecting condition and configuration value

Detector type	Condition	Value
Heat	Temperature [°C]	70
	RTI	27
Smoke	Visibility [%]	0.61
	Step	5
Beam	Visibility [%]	25
	Step	3

3.2 감지기별 감지성능

Table 4와 5는 화재규모 1 MW 및 2 MW의 경우의 여러 위치(터널 시점에서 5, 50, 100, 150, 210 m)에서의 감지 시간을 보여주고 있다. Table 4, 5의 괄호 안의 거리는 화원을 중심으로 떨어진 거리는 나타낸 것이다. 전반적으로 정온식 온도감지기보다 연기 및 정전식 감지기가 감지를 더 빨리하는 것을 알 수 있다. 1 MW의 경우 정온식 온도감지기의 경우에는 화재발생 위치의 감지기만 화재를 감지하는 것을 알 수 있다. 그러나 2 MW의 경우에는 50 m 떨어진 위치에서도 화재를 감지할 수 있었다. Fig. 7은 1 MW 화원의 화재가 발생하였을 경우의 온도 분포를 보여주고 있는데 정온식 화재감지기의 약 70m 지역까지 화재를 비교적 빠른 시간에 감지할 수 있으나 화재지역 근방을 제외하고 감지하는데 시간이 많이

소요되는 것으로 나타났다. 터널 중앙에 설치되어 있는 감지기는 화재를 감지하지만 측벽에 설치되어 있는 감지기는 화재를 감지 못하는 경우도 발생하는 것을 알 수 있다.

Table 4. Detecting time for various detector types and installed position [1 MW]

Detector type		Position [m]				
		5 (-95)	50 (-50)	100 (0)	150 (50)	210 (110)
Heat	center	-	-	5	-	-
	side	-	-	13	-	-
Smoke	center	78	35	3	35	97
	side	-	36	5	36	96
Beam	center	-	94	5	161	-
	side	-	574	9	850	-

Table 5. Detecting time for various detector types and installed position [2 MW]

Detector type		Position [m]				
		5 (-95)	50 (-50)	100 (0)	150 (50)	210 (110)
Heat	center	-	94	5	161	-
	side	-	574	9	247	-
Smoke	center	62	29	3	28	75
	side	62	30	4	29	75
Beam	center	76	34	3	34	95
	side	60	28	2	28	73

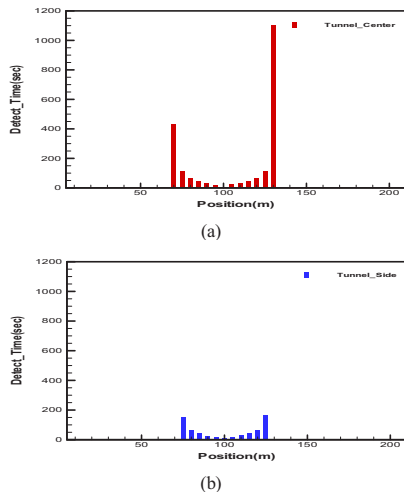


Fig. 7. Detecting time for heat detectors (1 MW)

(a) Center
(b) Side (depart 1 m from center)

Fig. 8은 2 MW의 경우의 정온식 감지기 터널 상부 및 측벽에서의 화재감지시간을 위치별로 나타낸 그림이

다. 1 MW의 화원을 이용한 결과를 나타낸 Fig. 7과 비교하였을 경우 화원이 크므로 화재전파가 빨라 보다 넓은 영역에서 화재감지를 하는 것을 알 수 있다. 2 MW의 화원에서 측벽에 설치된 감지기가 중앙 터널 천장에 설치되어 있는 감지기보다도 더 감지가 늦은 것을 볼 수 있으며, 적절한 화재감지기의 설치 위치는 터널의 가장 높은 터널 중앙에 설치하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

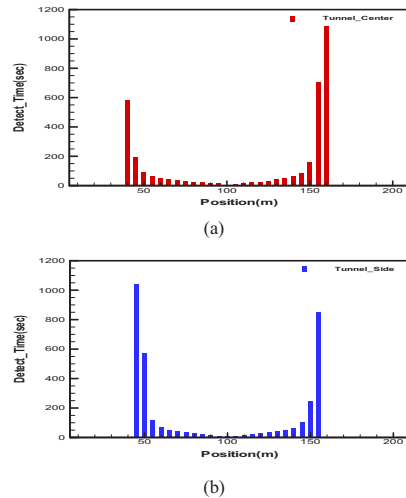


Fig. 8. Detecting time for heat detectors (2 MW)

(a) Center
(b) Side (depart 1 m from center)

Fig. 9과 10는 연기감지기와 광전식 연기감지기의 감지시간을 화원 1, 2 MW 및 터널 상부와 측벽에서 위치별로 표현한 그림이다. 온도감지기의 경우 화재 근방에서는 빠른 감지시간을 보이나 화원에서 거리가 멀어질수록 감지시간이 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 연기로 화재를 감지하는 연기감지기의 경우 위치에 따라 감지시간이 선형적으로 증가한다. Fig 11은 화원 1, 2 MW의 경우터널 천장에서의 광전식 연기감지기의 감지시간을 나타낸 것이다. 광전식 감지기도 연기감지기와 같이 화원으로부터 떨어진 위치에 따라 감지시간이 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 온도감지기의 경우 연기감지기보다 화원과 떨어진 거리에 민감하며 이에 따라 화재감지여부가 밀접하게 연관되므로 선형감지기와 같이 감지부의 간격이 좁은 감지기가 추천된다. 연기감지기의 경우 온도감지기보다 화원과 떨어진 거리에 비례하여 감지시간이 증가하였으며, 온도감지기보다는 감지부의 거리에 따른 영향이 적었다.

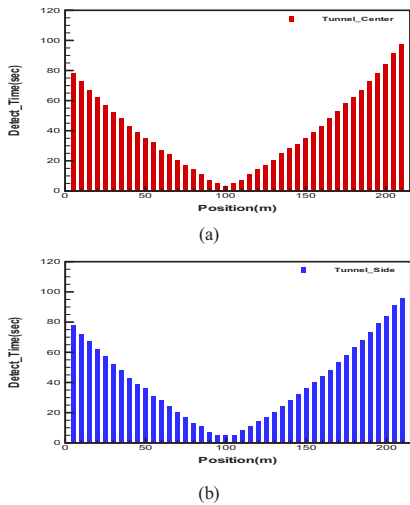


Fig. 9. Detecting time for smoke detectors (1 MW)
(a) Center
(b) Side (depart 1 m from center)

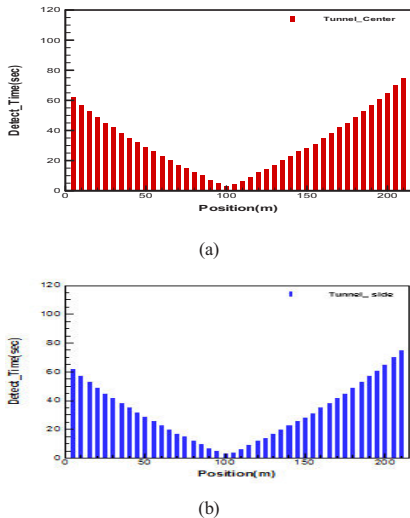


Fig. 10. Detecting time for smoke detectors (2 MW)
(a) Center
(b) Side (depart 1 m from center)

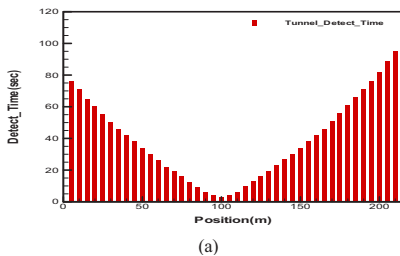


Fig. 11. Detecting time for beam detectors
(a) 1 MW
(b) 2 MW

4. 결론

본 연구에서는 수치해석 기법을 이용하여 철도터널에서의 화재발생시 터널내부의 온도분포, CO, Soot 분포를 예측하였으며 이에 따른 여러 감지기의 감지 특성을 분석하였다. 정온식 온도감지기 연기감지기 광전식 연기감지기 3 종류의 연기감지기를 고려하였다. 화원의 화재 규모는 1 MW와 2 MW로 설정하였으며, 연료는 헵탄으로 하여 연기발생 및 거동을 예측하였다. 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 화재를 감지하는 감지부의 간격에 따라 오차가 있을 수 있지만 화재 발생 위치 직상부에서의 화재 감지 시간은 모두 15초 이내였다.
- 화재를 감지하는 방식별로는 연기감지기가 가장 민감하게 화재에 반응하였다.
- 정온식 감지방법도 터널에 특화된 선형감지기와 같은 화재 감지부 사이의 간격이 적으면 빠른 시간 내에 화재를 감지할 수 있는 것으로 평가되었다.

Acknowledgement

본 논문은 국토부와 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행중인 “철도터널 화재감지기 기준 및 지하역사 안전구역 구축기술 개발” 과제의 지원으로 발간되었으며, 자료를 정리해준 황원준 학생과 (주)JSC에게도 감사드립니다.

References

- [1] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Instruction of disaster prevention facilities installation and management for road tunnel, 2015.
- [2] W.-H. Park, Measurement of ceiling temperature in tunnel for heights and fire sizes of fire source, *The KSFM Journal of Fluid Machinery*, Vol.18, No.2, pp.111-111. 2015
DOI: <http://dx.doi.org/10.5293/kfma.2015.18.1.005>
- [3] Z. G. Liu, A. H. Kashef, G. D. Loughheed, G. P. Crampton,, Investigation on the Performance of Fire Detection Systems for Tunnel Applications - - Part 1: Full-Scale Experiments at a Laboratory Tunnel, *Fire technology*, Volume 47, Issue 1, pp 163-189, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10694-010-0142-4>
- [4] Z. G. Liu, A. H. Kashef, G. D. Loughheed, G. P. Crampton, Investigation on the Performance of Fire Detection Systems for Tunnel Applications - - Part 2: Full-Scale Experiments Under Longitudinal Airflow Conditions, *Fire Technology*, Volume 47, Issue 1, pp 191-220, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10694-010-0143-3>
- [5] H.-K. Roh, K.-Y. Park, S.-B. Im, *An Experimental Study on the Comparison of Operating Temperatures in Thermal Detector due to Tunnel Fire*, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 11, No.1, pp.23-27, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.9798/KOSHAM.2011.11.1.023>
- [6] O.-S. Kweon, Y.-H. Yoo, H.-Y. Kim, *The Real Scale Fire Test in Tunnel for Fire Detector performance Evaluation*, *Proceedings of the Korea institute of Fire Science and Engineering Conference*, pp96-101, 2010.
- [7] M. Kevin, H. Simo, F. Jason, B. Howard, R. Ronald, *Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide*, NIST Special Publication 1018-5., 2007
- [8] H. C. Ryu, T. S. Ho, L. B. Kon, *Response Time Index and Operation Time of Fixed Temperature Heat Detector*, *Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol 7, No 1, pp.11-16, July, 1993

박 원 희(Won-Hee Park)

[정회원]



- 2000년 2월 : 중앙대학교 기계공학과 (기계공학석사)
- 2004년 2월 : 중앙대학교 기계공학과 (기계공학박사)
- 2004년 3월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원
- 2009년 6월 ~ 2009년 12월 : 호주 Victoria Univ. 연구원

<관심분야>

철도 열유체, 화재안전