

화원의 높이 및 화재크기별 터널 천장온도 측정 실험

박원희^{*,**†}

Measurement of Ceiling Temperature in Tunnel for Heights and Fire Sizes of Fire Source

Won-Hee Park^{*,**†}

Key Words : Tunnel fire(터널화재), Fire size(화재크기) Ceiling temperature(천장온도)

ABSTRACT

The “Ondong tunnel” is not used now where is one of the tunnels in the Janghang line which is from Cheonan to Iksan. The length of the tunnel is 214 m. The location of the fire source is center of the tunnel and the pool fire with heptane is for the fire source. Tests are carried out for the various fire sizes, the height and obstructed/open condition of the fire source. Temperature on the top of the tunnel is measured. Even if the fire size is same, the maximum temperature on the ceiling of the tunnel for the elevated fire source is very larger than the maximum for the ground fire source. As the fire size is larger the maximum temperature on the ceiling is higher. These test results can be very useful for design and guidelines of fire detectors in tunnels.

1. 서 론

도로 및 철도 수송량의 증가, 철도의 고속화 및 지형적인 이유로 터널의 수요가 급증하고 있는 실정이며, 이에 따른 터널 화재의 가능성이 증가하고 있다. 터널에서 화재 발생시 아주 심각한 인명피해의 결과를 초래할 수 있다. 터널화재의 화재특성은 실험 및 수치해석적 방법으로 접근할 수 있는데, 각각의 접근방법별 장단점이 있다. 국내에서는 터널에서의 화재특성 및 화재안전 설비의 특성이 축소⁽¹⁻⁵⁾ 및 실대형 실험을 통하여서 연구된 바 있다. 특히 터널 화재유동 특성과 관련된 실험적인 연구 중 축소모형을 이용한 연구로는 장대 철도터널 구난역 및 본선터널에서의 화재안전에 대한 축소 모형 실험이 수행된 바 있다⁽¹⁻³⁾. 또한 김성찬 등⁽⁴⁾은 비교적 짧은 터널에서의 연기거동에 대하여 축소모형 시험을 수행하였으며, 김승렬 등⁽⁵⁾은 터널의 경사도가 임계속도에 미치는 영향에 대하여 연구를 진행하였다. 실제 터널에서 수행하

는 실험 시험은 축소시험에서 고려한 여러 상사법의 가정없이 실제 터널의 화재특성을 파악할 수 있지만 축소시험과는 달리 비용 등의 이유로 많이 진행되지 않은 실정이다. 박원희 등⁽⁶⁾은 지하철 9호선에서 본선터널의 제연성능을 실험실 시험을 수행하였으며, 실험실 시험을 이용하여 터널화재의 위험도가 평가된 사례⁽⁷⁾가 있다. 노형기 등은 터널 화재 시 터널 천장에 설치되는 화재감지기의 작동온도와 관련하여 실험실 시험을 수행하였다.⁽⁸⁾ 터널의 화재안전 설계를 위해 철도터널에서 발생하는 화재크기(열방출율)가 가장 중요한 설계 요소 중 하나이다. 특히 터널에 설치되는 화재감지기(특히 열을 이용하여 측정하는 화재감지기)의 성능을 평가하기 위해서 철도터널에서 발생하는 화재를 규정하여 이에 대한 현장시험을 통한 터널 천장의 온도를 측정하는 것은 감지기의 성능 평가를 위하여 필요하다^(8,9). 본 연구는 철도터널의 화재감지기의 성능평가를 목적으로 터널 실험실 화재 실험을 수행하였으며, 실험 규모의 터널에서 화원의 수직 위치 및 화재크기

* 한국철도기술연구원 교통환경연구팀(Korea Railroad Research Institute)

** 과학기술연합대학원대학교 철도시스템공학과(University of Science & Technology)

† 교신저자(Corresponding Author), E-mail : whpark@krri.re.kr



Fig. 1 Location and portal of test tunnel

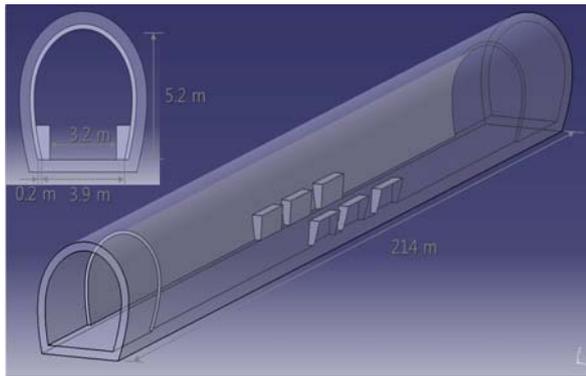


Fig. 2 Schematic draw of test tunnel

에 따른 터널 천장에서의 온도를 측정 비교분석하였다. 또한 화재감지기의 감지방범별로 설정 터널화재의 감지 특성을 검토하였다.

2. 실험터널 및 시험조건

2.1. 실험터널

실험을 수행한 터널은 충남 서천군 판교면에 위치한 장항선의 폐선 철도터널 중 하나이다. 본 실험대상 터널은 2008년에 폐선되었으며, Fig.1은 터널의 위치 및 입구 사진이다. 터널의 길이는 214 m 이며 기울기는 6.7%이고 동쪽보다 서쪽의 고도가 더 높다. 터널은 Fig.2와 같이 터널 중간 일정 부분에 다른 용도의 연구로 인하여 사용된 추가의 구조물이 존재하여 있다.

온도를 측정하기 위하여 석면 및 테프론 피복의 0.6 mm 두께의 K형 열전대를 사용하였는데 터널 출입구 부분 약 30m 구간은 낮은 연기온도가 예측되어 테프론 피복의 열전대를 설치하였고, 이외의 다른 부분은 석면 피복의 열전대를 설치하였다. 화재로 인한 터널 기류온도를 측정하기 위해 열전대를 터널 천장에서 약 5 cm 떨어지게 하여 고정하였으며, 천장에 설치된 열전대의 간격은 5 m 이다. 또한 터널 중앙인 107 m 지점에 열전대를 3, 4, 5 m의 높이로 설치하였으며,

Table 1 Condition of the tests

	Fire source 1	Fire source 2	Fire source 3	Fire source 4
Fire size (MW)	0.44	1.2	1.64	2.4
Heptane 양 (liter)	2.5	5	7.5	10

화원의 발화 및 소화 여부를 판단하기 위하여 화원 용기에 열전대를 설치하였다. 열전대는 NI사의 이더넷게이트웨이 (NI WSN-9791)를 활용하였으며 열전대는 측정노드인 NI WSN-3212와 연결되어 열전대를 최대한 짧게 하였다. 측정노드와 이더넷게이트웨이는 무선으로 연결된다.

2.2. 화 원

화재실험에서 화재크기를 제어하기 용이한 화원으로는 용기에 액체연료를 채워 발화시키는 방법인데 해외 터널 시험시에도 주로 활용되는 방법이다⁽¹¹⁾. 화원으로는 액체연료인 헵탄을 이용하였으며, 연소 진행에 따라 균일한 온도를 확보하기 위하여 연료 용기를 물 용기 안에 넣는 중탕방법을 활용하였다. 화재크기는 연료 용기의 면적에 따라 정해지는데 본 연구에서는 용기 1 (0.24 m², 0.6 m × 0.4 m), 용기 2 (0.5 m², 0.841 m × 0.594 m, 1개), 두 개의 연료 용기를 조합하여 4개의 화원을 실험에 적용하였다. 즉 화원 1은 용기 1 한 개, 화원 2는 용기 2 1개, 화원 3은 용기1과 용기 2 연료의 종류와 용기의 단면적 및 수력지름으로 화원의 크기를 이론적으로 아래와 같이 구할 수 있다⁽¹⁰⁾.

$$Fire\ size = H_c \times m'' \times A \tag{1}$$

$$m'' = m''_{\infty} (1 - e^{-k\theta D}) \tag{2}$$

여기서 A 및 D 는 연료용기의 면적 [m²] 및 수력지름 [m]이며, H_c 는 발열량 [MJ/kg]이다. $k\theta$ 는 화재의 소멸 및 흡수 계수 [m⁻¹]이며, m'' 및 m''_{∞} 는 각각 질량소모율 [kg/m²s] 및 무한대 지름의 경우의 질량소모율 [kg/m²s]이다. 위의 식으로 계산된 각 화원의 크기와 화원에 대한 실험수행 시 연료 용기에 들어갈 연료(헵탄) 양은 Table 1과 같다.

터널실험에서 사용할 화원의 이론적으로 계산한 화재크기를 정량적으로 측정하기 위해 림코너에서 화원 2, 4의 경우에 화재크기를 측정하였다. Fig.3은 화원 4의 림코너 측정사진이다. 화원 4의 경우에는 용기를 가로로 배치하였고 2개 용기 설치시 두 용기의 간격은 0.7m이다. Fig. 4는 림코너에서 측정한 화원 2와 4의 시간에 따른 화재크기를 보여주고 있다. 화원 2의 측정된 화재크기의 최대값은 0.89 MW로 식 (1)에서 이론적으로 계산한 값 1.2MW보다 약 25 % 작다. 화



Fig. 3 Fire source 4

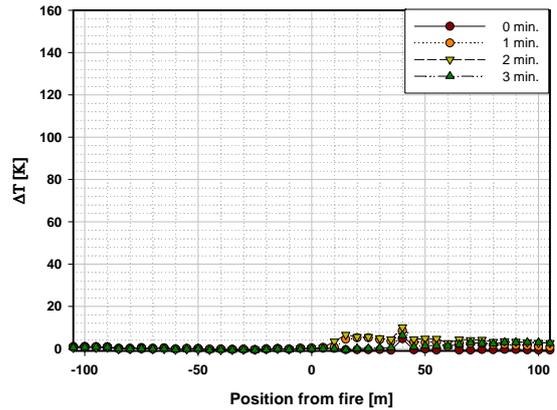


Fig 5 Difference of ceiling temperature at various times for Case 1

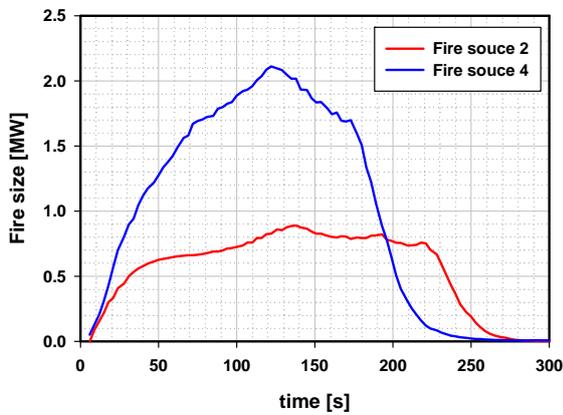


Fig 4 Fire sizes for source 2, 4

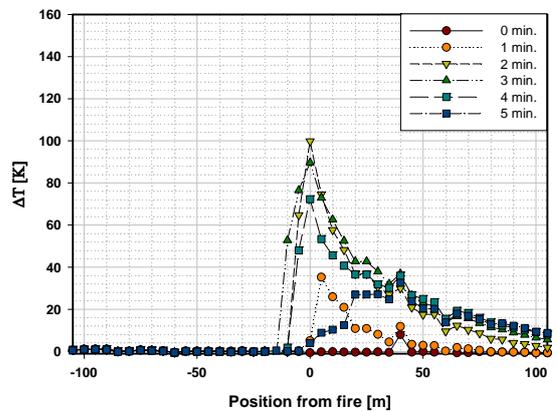


Fig 6 Difference of ceiling temperature at various times for Case 2-1

Table 2 Condition of the tests

conditions	Fire source			
	Fire source 1	Fire source 2	Fire source 3	Fire source 4
ground (shield)	Case 1			
upper (3.7 m)	Case 2-1 Case 2-2			
ground (exposed)	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6

원 4의 경우에 측정된 화재크기의 최대값은 2.11 MW로 약 5% 작은 등 이론에서 예측된 화재크기와 차이를 보였다. 화원 2와 화원 4의 화원지속시간은 4분과 4분 40초였다. 터널에서 화재 실험시 Table 1의 4가지 서로 다른 화재크기의 화원을 고려하였으며 발생위치에 따라서 바닥에 놓인 화원, 바닥에 놓였지만 화원 상부를 막는 차폐막을 설치한 화원(철도차량 하부 화재를 모사한 화원), 화원을 3.7 m 상부에 위치한 화원(철도차량 상부에서 발생한 화원)의 3가지를 고려하였다. 본 실험에서는 Table 2와 같이 화원종류와 위치에 따라 구분하여 화원시험 조건을 설정하여 그 조건별로 화원 테스트를 실행하였으며, 터널 중앙에 화원을 위치하였다.

3. 결과

Table 2에 표시한 바와 같이 화원 1에 대하여 화원의 설치 위치 조건(Case 1, 2-1, 2-2, 3)에 따른 철도터널 천장의 온도 측정결과에 대하여 먼저 논하고자 한다. Fig. 5-8은 각 화원의 위치에 대한 발화 후 시간에 따른 점화 전 평균온도와 온도편차를 나타내고 있다. 모든 그래프의 화염발생 위치를 0 m으로 설정하였으며 -105 m와 105 m는 각각 서쪽 출구와 동쪽 출구에 인접한 열전대에서 위치이다. Case 1(차폐막, 하부)의 경우는 대하여 2회의 실험을 수행하였으며, 2회의 실험 동안 3~4분의 화염이 지속되었고 점화 전 평균온도와 최대 편차는 14 K 미만으로 나타났다. 최대 편차를 보이는 온도분포가 동쪽에서 나타나 자연풍이 서쪽 출구에서 동쪽 출구(양의 방향)로 부는 것을 알 수 있다. 차폐막 설치로 인하여 최대온도가 화원과 가까이 형성되는 것이 아니라 화원으로부터 훨씬 후류인 40 m 지점에서 발생되었다. 차폐막이 설치된 경우에 훨씬 후류에서 최대온도가 측정되는 이유는 차폐막으로 인해 화원의 화재열로 인한 모멘텀이 바로 터널 상부로 전달되는 것이 아니라 화재열이 더 후류로 향하게 되고 화재열이 천장까지 전달되기에 더 많은 시간이

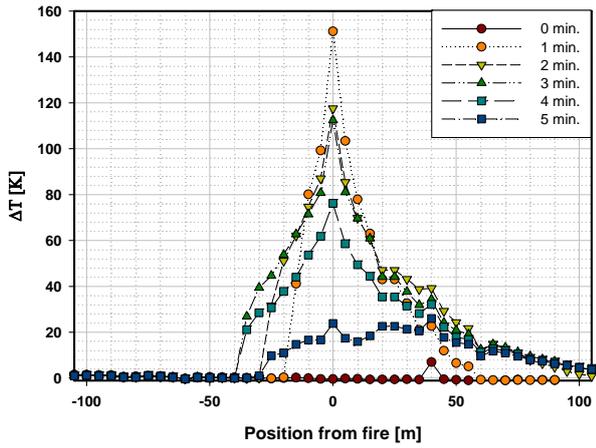


Fig 7 Difference of ceiling temperature at various times for Case 2-2

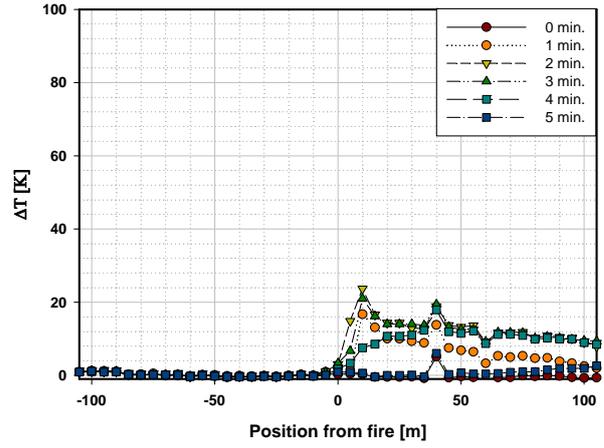


Fig 10 Difference of ceiling temperature at various times for Case 4

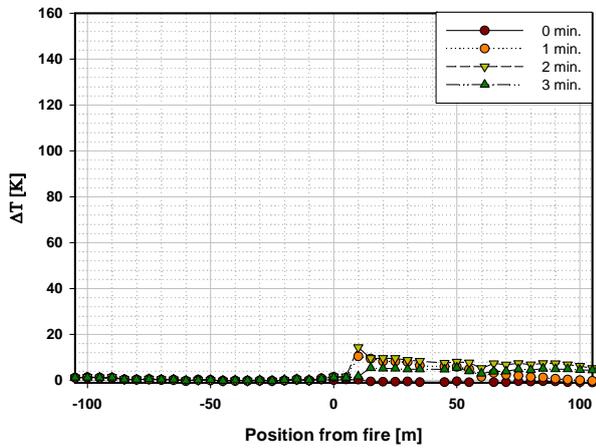


Fig 8 Difference of ceiling temperature at various times for case 3

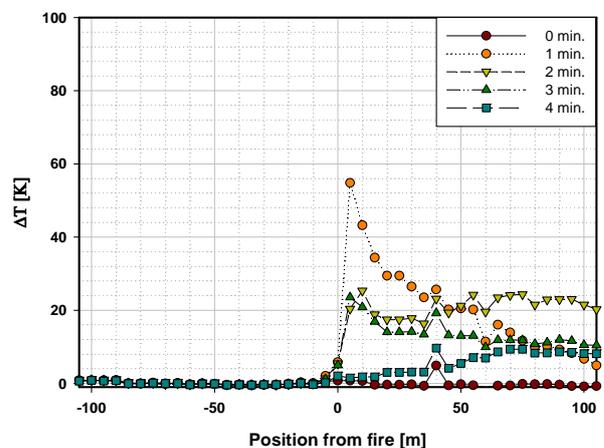


Fig 11 Difference of ceiling temperature at various times for Case 5

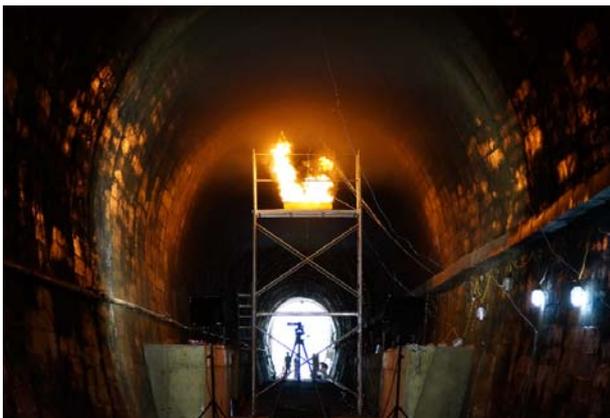


Fig 9 Photography for case 2-1

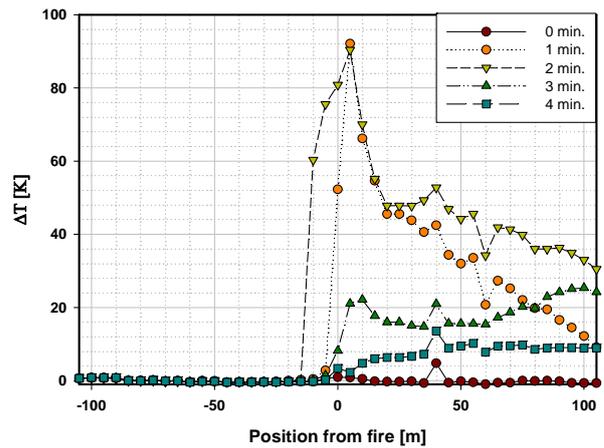


Fig 12 Difference of ceiling temperature at various times for Case 6

소요되기 때문이다. 이러한 예측은 바람의 방향과 크기가 동일하다고 가정하였을 경우에 본 실험의 측정 결과로 확인될 수 있다. 실제 터널에서 철도차량 및 차량의 하부에서 화재가 발생한 경우에는 Case 1과 같이 화재 발생위치보다 훨씬 후류의 천장에서 온도의 최대값이 예상되며 터널 상부에 설

치되어 있는 화재감지기가 화재 발생 위치를 부정확하게 알려 줄 확률이 높다. Case 2(상부 리프팅)에 대하여 2회의 실험을 수행하였으며, 2회의 실험 동안 5~6분의 화염이 지속되었고 점화 전 평균온도와와의 최대 편차는 각각 108.0 K 및

Table 3 Maximum difference, position and time at maximum difference temperature for all cases

Case	1	2-1	2-2	3	4	5	6
Maximum temperature difference (K)	14.0	108.0	151.1	19.2	25.1	59.9	93.3
position with max. emperature (m)	40	0	0	10	10	5	5
time (sec.)	107	127	60	71	85	72	86

151.1 K로 나타났다. 최대 편차를 보이는 온도분포가 동쪽에서 나타나 자연풍이 서쪽 출구에서 동쪽 출구로 부는 것을 알 수 있다. Case 2-2의 경우 천장의 온도분포가 가장 높게 나타났으며 화원 중심으로 상류 방향인 동쪽의 온도가 Case 2-1보다 높으므로 터널기류의 풍속이 Case 2-1 실험의 경우와 비교하여 상대적으로 느린 것을 판단할 수 있다. Case 3 (터널바닥, 노출)의 경우 실험 동안 4분의 화염이 지속되었고 점화 전 평균온도와의 최대 편차는 19.2 K로 나타났다. 최대 편차를 보이는 온도분포가 동쪽에서 나타나 자연풍이 동쪽 출구에서 서쪽 출구로 부는 것을 알 수 있다. 상부(리프팅, Case 2)의 경우 화염의 지속시간이 가장 길었고 점화 전 평균온도와의 최대 편차가 가장 크게 나타났다. Fig. 9는 Case 2의 화재 시험의 사진을 보여주고 있다.

다음은 터널 바닥에 위치한 화원에 대하여 다양한 화재크기에 대하여 수행한 조건인 Case 3, 4, 5, 6에 대하여 논하고자한다. Case 4의 경우 5분의 화염이 지속되었고 점화 전 평균온도와의 최대 편차는 25.1 K로 나타났다. Case 5의 경우 실험 동안 4분의 화염이 지속되었고 점화 전 평균온도와의 최대 편차는 59.9 K로 나타났다. Case 6의 경우 4분의 화염이 지속되었고 점화 전 평균온도와의 최대 편차는 93.3 K로 나타났다. Case 3-6을 비교하였을 때 화원의 크기가 커질수록 점화 전 평균온도와의 최대 편차가 가장 크게 나타났다. 모든 경우에 자연풍이 양의 방향(서쪽에서 동쪽)으로 부는 것을 알 수 있다. 모든 경우에 화재 발생 후 약 1분 후에 터널 천장의 온도가 최고에 이르고 이후에 온도가 감소하는 것을 볼 수 있다. 고려한 각 Case 별 최고 온도 및 최고 온도가 발생한 위치를 표로 정리하면 Table 3과 같다. 같은 화재 크기라 할지라도 화재발생 위치(철도차량 하부, 철도차량 상부화재, 터널 바닥 화재)에 따라 터널 천장에서 온도가 매우 틀린 것을 확인할 수 있다. 화원이 바닥에 설치된 경우 (Case 1, 3)는 차폐막의 설치 유무에 따라 5 K정도 밖에 차이가 나지 않는다. 반면 차량하부와 같이 차폐되어 있는 화재(Case 1)는 차폐되어 있지 않은 화재(Case3)에 비하여 멀리 떨어진 위치에서 보다 늦게 최대온도가 측정되는 것을 Table 3에서 볼 수 있다. 이는 차량하부 등 차폐된 화재의 경우 화재감지기 보다 늦게 될 수 있으며 또한 화재 발생 위

Table 4 Detection for heat detector types with fire source of 0.44 MW

Case	1	2-1	2-2	3
Fixed temperature (60℃)	X	70 s	30 s	X
Rate-of-rise (10℃/min)	30 s	under 10 s	under 10 s	30 s
Max. temperature rise rate per minute	21.8 (50 s)	148.9 (110 s)	253.1 (50 s)	35.5 (40 s)

치를 보다 하류로 통보될 수 있는 가능성을 보여준다. 반면 터널 화원의 위치가 높은 경우 최대 약 135도까지 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 또한 Case 2-1과 2-2를 비교하였을 경우 같은 위치, 같은 크기의 화원일지라도 최대값 온도 차이가 약 43도로 매우 크게 발생한다. 터널 바닥에 설치된 화원의 크기가 클수록 터널 상부의 최고 온도가 커지는 것을 확인할 수 있다(Case 3-5 비교). 화원의 크기와 터널 천장 온도의 최대값의 도달 시간은 71-86초로 화재크기와 최고온도 도달 시간의 상관관계는 발견할 수 없었다.

Table 4에서는 0.44MW(fire source 1)의 화원의 설치특성별 터널에 설치되어 있는 감지기의 감지특성을 확인하기 위하여 정리한 표이다. 정온식감지기(fixed temperature heat detector)는 주어진 온도이상의 주변온도가 되면 감지가 되는 방식이며, 차동식감지기(Rate-of-rise)는 주변온도의 상승률이 일정값 이상일 때 감지하는 방식의 감지기이다. Table 4를 보면 0.44 MW 급의 화원이 바닥에 설치되어 있는 경우(Case 1, 3)에는 정온식의 터널 감지기가 화재를 감지할 수 없는 것을 볼 수 있다. 그러나 차동식 감지기의 경우에는 모든 조건에서 30초 이내에 화재를 감지하는 것을 볼 수 있다. 이러한 측정결과를 볼 때 터널화재를 감지하기 위해서는 차동식의 감지기가 보다 정온식의 감지기보다 유리한 것을 알 수 있다.

4. 결 언

본 연구에서 철도터널의 화재감지기의 성능평가를 목적으로 하는 터널 실물화재 실험이 수행되었으며, 실제 철도 터널에서 화원의 화재크기별, 수직 위치별 터널 천장에서의 온도를 측정 비교분석하였다. 다음과 같이 결과를 요약할 수 있다.

화재의 위치특성(발생위치에 따라서 바닥에 놓인 화원, 철도차량 하부 화재를 모사한 화원, 철도차량 상부에서 발생한 화재를 모사한 화원)에 따라 터널 천장의 최대 온도가 상이하였으며, 화재열의 상승을 막는 구조물(차폐막)으로 인해 화재열의 상승이 느려져 화재발생위치보다 후류에서 화재가

감지(온도최대값이 측정)될 수 있다.

화원의 화재크기에 따라 터널천장의 최대온도가 증가한다.

터널 천장에 설치된 열전대의 온도 측정을 통해 화재열감지기의 종류별(정온식, 차동식)에 따라 화재의 감지특성을 분석하였으며, 철도터널에서는 차동식의 감지기가 정온식의 감지기보다 더 민감하게 반응하는 것을 알 수 있다.

후 기

본 논문은 국토부와 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행중인 “철도터널 화재감지기 기준 및 지하역사 안전구역 구축기술 개발” 과제의 지원으로 발간되었으며 이에 감사드립니다.

References

- (1) Kim, D. H. and Park, W. -H., 2006, “Experiment by using reduced scale models for the fire safety of a rescue station in very long tunnel in Korea,” Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 21, pp. 303.
- (2) Kim, D. H., Jang, Y. J. and Park, W. H., 2007, “Emergency Ventilation of a Rescue Station with lateral access in Very Long Rail Tunnel,” ITA-AI
- (3) Choi, D. J., Fire test using reduced scale,” Naure, Tunnel and Underground Space, Vol. 14, No. 1, pp. 28~34.
- (4) Kim, S. -C., Ryou, H.-S., Kim, C.-I. and Hong, K.-B., 2002, “A study of smoke movement in a short tunnel,” Tunnel and Underground, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 12, No. 1, pp. 31~36.
- (5) Kim, S. -Y., Jang, Y.-J. and Ryou, H.-S., 2008, “An experimental study on the critical velocity considering the slope in tunnel fire,” Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 11, No. 1, pp. 7~12.
- (6) Park, W. -H., Lee, D. -H. and Jung, W. -S., 2011, “Full-Scale Test of Smoke-Control Performance of a Subway Tunnel,” J. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng., Vol. 25, No. 4, pp. 94~102.
- (7) Choi, J. S., Choi, B. I., Kim, M. B., Han, Y. S., Jang, Y. J., Lee, Y. W., Hwang, N. S. and Kim, P. Y., 2002, “The Risk Assessment of Tunnel Fire Through Real Scale Fire Test,” J. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng., Vol. 16, No. 3, pp. 71~76.
- (8) Noh, H. -K., Park, K. -Y. and Im, S. -B., 2011, “An Experimental Study on the Comparison of Operating Temperatures in Thermal Detector due to Tunnel Fire,” Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 11, No. 1, pp. 23~27.
- (9) Korea Railroad Research Institute, 2013, “1st year report of Development of standard of fire detector in railway tunnel and Safety-Zone technology in underground station”
- (10) Stefan Särndqvist, 1993, Initial fires, Lund University.
- (11) Australian Standard, AS 4391, 1999, Smoke management systems - Hot smoke test.