종단부 유속조건 변화에 따른 철도터널 내 정상상태 화재유동해석

이 동 찬,*1 이 덕 희,1 정 우 성,1 박 서 현1

ANALYSIS OF STEADY FIRE-DRIVEN FLUID FLOW FOR RAILWAY TUNNEL BY DIFFERENT VELOCITY CONDITIONS AT THE END OF TUNNEL

D.C. Lee,*1 D.H. Lee,1 W.S. Jung1 and S.H. Park1

In this study, CFD(Computational Fluid Dynamics) analysis of the steady fire-driven fluid flow for the performance test of ventilation at railway tunnel between Heuksok and Nodeul Station from Seoul Metro 9 is performed. There were fans with exhaust and intake modes and each was installed at the middle and both ends of the tunnel. For this test, the pool fire source of methyl alcohol with 1.5MW and smoke generators were installed between the middle of tunnel and Heuksok Station. In this test, the smoke behavior from natural convection was observed for 10 minutes from the ignition of pool fire and then fans with intake-modes at both sides of Heuksok Station and exhaust-modes at the middle of tunnel and nearby Nodeul station were operated. In the analysis, the effect of fan-on with intake mode located in the opposite side of the tunnel nearby Heuksok Station on fire-driven fluid flow is studied on when the boundary conditions of fan-on at the tunnel between Heuksok and Nodeul Station are the same as test. FLUENT, a commercial CFD code, is used for this analysis.

Key Words : 화재유동(Fire-Driven Fluid Flow), 유류화원(Pool Fire), 팬(Fan), 철도터널(Railway Tunnel), 연기거동(Smoke Behavior)

1. 서 론

최근 대체/신재생 에너지 개발과 지구 온난화 방지를 위한 이산화탄소 배출 저감을 위해 에너지 사용 효율화 방안에 관한 기술 개발에 관심이 집중되고 있다. 이러한 사회적 분위기 속에서 2차 에너지를 이용하여 친환경적이며 인당 교통단가가 화석연료 기반의 교통수단보다 경제적인 철도가 새롭게 주목받고 있다. 국내 철도차량은 이미 개발된 350km/h 이상의 고속열차 뿐만 아니라 이 보다 빠른 자기부상열차 개발 등 세계적인 수준으로 발전하고 있으며, 국내뿐만 아니라 외국으로 수출할 만큼 그 기술력을 인정받고 있다. 최근 철도 고속화에 따라 요구되어지는 궤도의 직진성은 국토의 약 70%가 산악지형인 국내 현실로 인해 초장대 터널을 극단적으로 요구하고 있는 추세이고, 도로와 주거 및 각종 상업 시설이 밀집된 도심 지상 구간의 복잡성으로 인해 지하구간을 이용한 도시철도 또한 점점 확충되고 있는 추세이다. 이러한 철도의 고속화에 비례하여 터널과 같은 철도시설의 안전 문제 또한 관심이 증폭되고 있다. 특히, 철도터널은 화재발생 시 연기 질식으로 인한 대형 인명사고를 유발한다. 질식으로 인한 인명 손실을 막기 위해서는 연기와 승객의 대피로가 분리될 수 있도록 하고 화재 발생 시점으로부터 승객이 안전하게 대피할 수 있을 때까지 연층의 높이 예측이 가능한 유동제어가 필요하다. 이를 위해 실제 시험을 이용하는 것이 바람직하나, 상시 운영되는 철도터널의 특수성으로 인한 실험적 검증의 접근한계를 대비하기 위해 3차원 실물을 기반으로 하는 수치해석 결과의 신뢰성 확보가 매우 중요하다. 따라서 본 논문에서는 한국철도기술연구원에서 수행 중인 '철도종합안전기술 개발사업'의 '철도화재 안전성능 평가 및 사고방지 기술개발'에서 수행한 서울메트로 9호선 흑석-노들역 구간 '철도터널 제연/배연 성능 시험'을 개략적으로 소개하고 이를 대상으로 한 철도터널 화재유동해석을 정상상태에 대하여 수행하여 그 결과를 소개한다.

1 한국철도기술연구원 철도환경연구실
* TEL : 031) 460-5379
* Corresponding, author E-mail: dclee@krri.re.kr

2. 본 론

2.1 시험 소개

철도터널 제연시설 성능시험을 위하여 현재 운행 중인 서울메트로9 중의 본선터널을 시험터널로 선정하였고 시험은 지난 2009년 5월에 수행되었다. 서울메트로9의 터널은 개착식, NATM, Shield 공법 등 여러 공법의 터널로 이루어져있다. 1단계완공예정부분 전 구간에 대하여 모터카로 이동하면서 터널의 형상 및 시험의 적정성에 대하여 검토하여 Fig.. 1 같이 노들역과 흑석역 사이에 본선터널을 시험수행 터널로 선정하였다. 해당 터널의 거의 대부분은 NATM터널로 이루어져 있으며 복선터널로 일반 철도터널과 유사한 형태이다. 해당 본선터널은 역사와 인접한 부분을 제외한 대부분이 Fig. 2와 같은 단면이다.

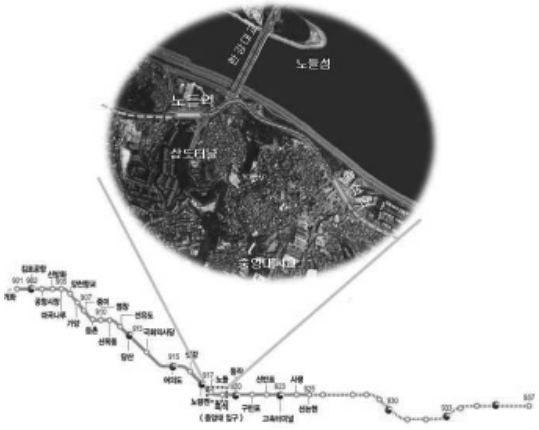

Fig. 1 Selected Part of the Tunnel for the Test.

Fig. 2 Representative cross section of the tunnel.

본선터널에 화재가 Fig. 3의 붉은색 지점에 발생하였을 시 Fige. 3과 같이 본선터널에 설치되어 있는 송풍기를 운전하여 화재연기를 제어할 수 있게 된다. 각 송풍기의 용량 및 위치는 Table 1과 같다.

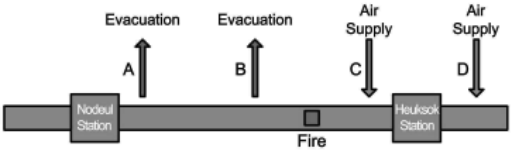

Fig. 3 Ventilation Mode and fire position.

Table 1 Capacity and position of ventilation fans

Position	A	B	C	D
Flow Rate (m3/min)	2,550	2,720	2,040	2,040

2.2 시험 개요

2.2.1 장비설치 및 측정 위치

터널화재 제연성능 검증을 위한 실험장비 설치는 Fig. 4와 같이 9호선 터널 노들-흑석역 구간 내부에 단면 1 지점(20k960), 화원 지점(20k860), 단면 2 (20k760), 단면 3 지점(20k540)을 선정하였으며, 터널 내부 화원 점화 시 각 선정된 지점에서 터널 내부의 온도 및 속도 및 연기농도를 측정하였으며 각 위치에서 연기의 거동을 화면 취득하였다.

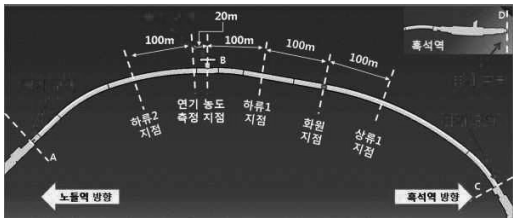

Fig. 4 Measuring Sections.

2.2.2 화원

화재연기를 모사하기 위하여 작동압력 5.5 bar에서 최대 290 m^3/min의 연기를 발생시키는 장치(ViCount Compact Smoke Generator) 4개를 사용하였다. 화원으로는 0.180 × 0.990 × 0.700 (H×L×W)m^3의 물트레이 4개와 0.130 × 0.841 × 0.594 (H×L×W)m^3의 연료트레이 4개를 사용하였다. 물트레이의 물의 양은 평균 49.19 kg이고, 각 연료트레이에는 연소열이 19.8

kJ/g인 메틸알콜 11.74 kg을 설치하여 연료로 사용하였다. 이때의 열방출율은 1.5MW이다. 메틸알콜 화원은 터널 길이방향으로 배치하였으며 연기발생기는 화원 양끝으로 두기씩 배치하였으며 전차선의 보호를 위하여 전차선 보호막을 설치하였으며 간단한 설치 개략도는 Fig. 5와 같다.

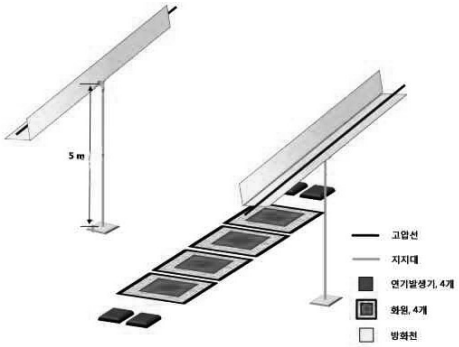

Fig. 5 Schematic Diagram of Fire Source.

2.2.3 측정단면

단면 1에서는 지지대 3개(5m 2개, 7m 1개), 연기농도계 1개, 풍향풍속계 1개, 풍속계 8개, 풍속계+온도계 4개, 풍속+온도용 DAQ(VT모듈2개, V모듈 2개)를 설치하여 상류1 지점의 단면 위치에서의 터널의 기류 속도, 온도 및 연기농도를 측정하였다. 단면 2 에서는 아래 그림과 같이 지지대 3개(5m 2개, 7m 1개), 풍향풍속계 1개, 풍속계 12개, 풍속계+온도계 6개, 풍속+온도용 DAQ(VT모듈3개, V모듈 3개)를 설치하였고 연기농도계를 천장부에 1기, 2m 높이에 1기를 설치하였다. 단면 3 에서는 지지대 3개(5m 2개, 7m 1개), 풍향풍속계 1개, 풍속계 8개, 풍속계+온도계 4개, 풍속+온도용 DAQ(VT모듈2개, V모듈 2개)를 설치하여 하류2 지점의 터널 기류의 온도 및 속도를 측정하였다.

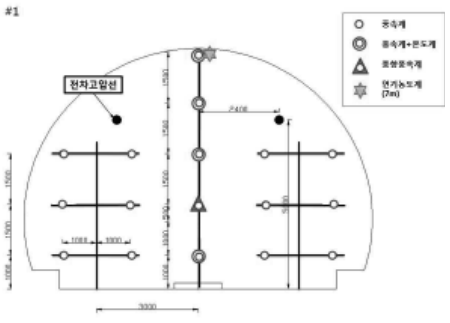

Fig. 6 Measuring Points in Section 1.

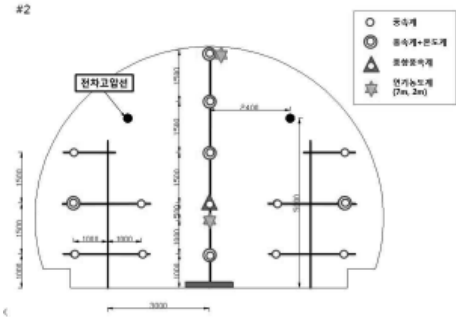

Fig. 7 Measuring Points in Section 2.

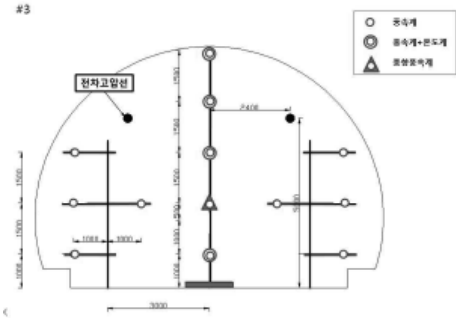

Fig. 8 Measuring Points in Section 3.

2.2.4 시험방법

터널 내부 화재발생 시 설계된 제연 성능을 검증하고자 터널의 국부적인 단면 위치에서 화원 및 각종 실험 장비를 설치한 후 화원 점화와 동시에 터널기류의 온도, 속도 및 연기농도를 측정하였다. 연기발생기에서 생성된 연기는 저온상태이므로 본 실험에서는 메틸알콜 화원을 사용하여 화원주변에서 발생되는 유동을 통해 연기가 터널 내부로 이동할 수 있는 환경을 설정하였다. 시험은 화원 연료인 메틸알콜이 자연소화 될 때까지 이루어졌다. 그리고 각 단면별 비디오 장치를 설치하여 화원 점화 후 시간에 따른 연기의 거동을 시각적으로 파악하였다. 화원 점화를 시작으로 9분이 경과한 후에 터널 내부에 급기 및 배기를 작동하였고 환기설비의 조건은 평상시의 운영 모드가 아닌 Fig. 3과 같은 제연모드로 운행되었다.

2.3 수치해석 개요

시험 해당 구간 도보 답사 및 운영기관의 협조를 통한 2차원 도면에 근거하여 3D 형상데이터를 작성하였으며 해석 영역은 흑석, 노들역의 스크린도어가 닫혀 있는 상태를 가정하여 각 역 승강장과 팬이 설치된 세부 구조를 반영하였다.

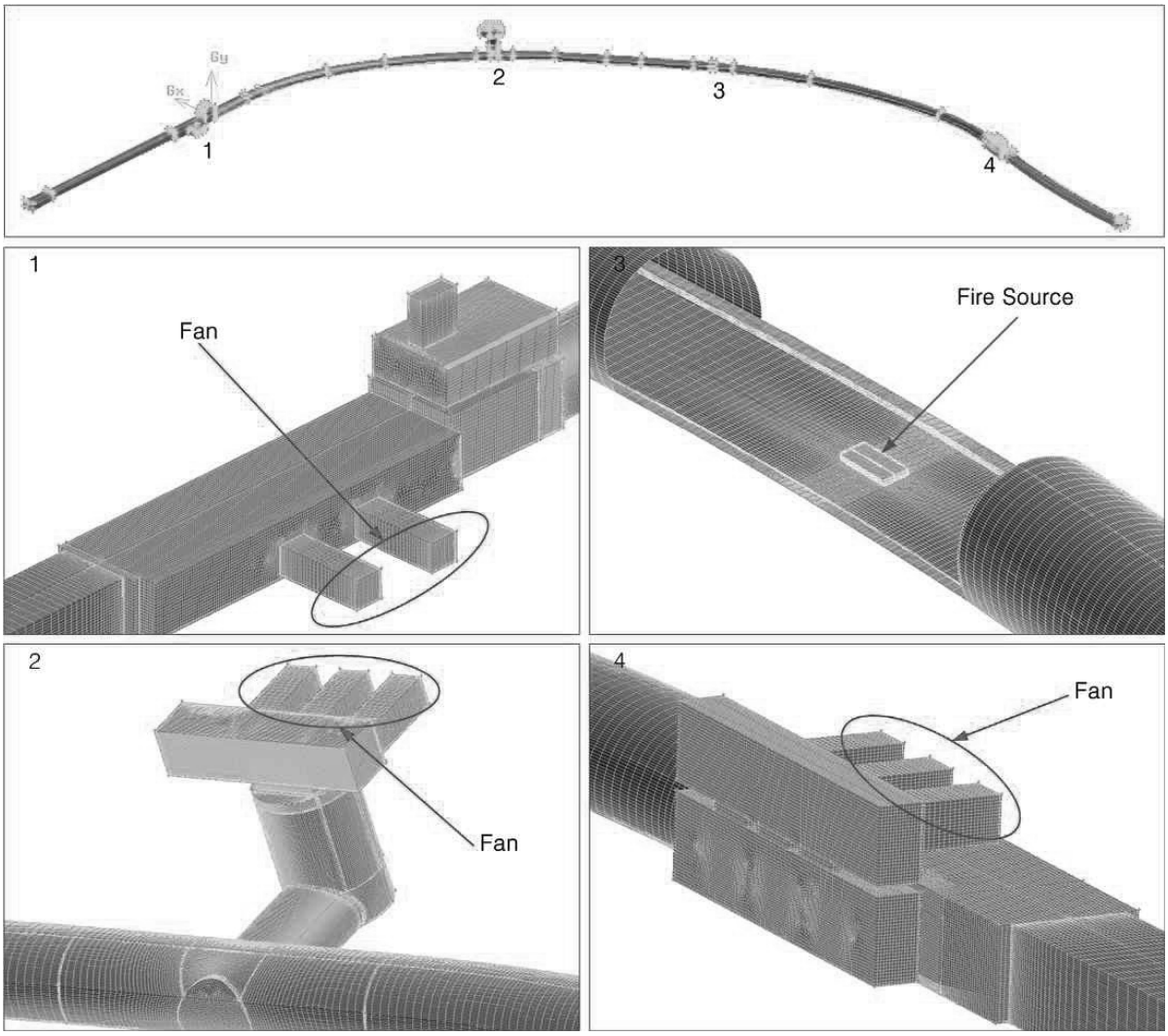

Fig. 9 Analysis Domain and Mesh.

Fig. 9는 해석형상 및 주요 영역의 격자를 보여준다. 화원은 실제 시험에서 쓰인 연료트레이 사이즈를 고려하였다. 팬은 3곳이 각각 다른 구조로 설치되어 있는 것을 확인할 수 있다. 노들역 인근 급배기 팬은 터널 측면부에 나란히 2개가 설치되어 있다. 해석영역 중앙 급배기 팬은 터널 길이 방향과 수직한 방향으로 지면과 나란히 아치형 단면의 갱이 일정 길이를 갖고 다시 지면으로부터 수직한 방향으로 원통 단면의 수직갱 솟아 있으며 이 위에 나란히 3개의 팬을 가지고 있다. 흑석연 인근 팬은 터널 측면부에 터널 높이 2배에 해당되는 공간이 확보되어 있고 이 공간 상부에 나란히 3개의 팬이 설치되어 있다. 이러한 설치구조의 근거는 확인된 바 없으나 터널이 시공되는 실제여건제약 때문으로 예측된다.

화원 점화 후 Fig. 3과 Table. 1의 조건 하에서 정상상태 유동 해석을 수행함에 있어 해석영역 밖에 존재하는 Table. 1의 D에 해당되는 조건을 경계면에 적절하게 반영하는 것이 필요하다. 추후 진행될 비정상상태 유동해석과 시험결과의 비교 및 화재가 발생된 본선 터널 이외 구간에서 발생하는 유동 영향을 고찰하기 위해서다. 따라서 본 해석에서는 흑석역 부근 해석 영역 끝단 면에 0, 0.5, 1.0, 1.5m/s의 속도 조건에 대한 정상상태 화재유동해석을 진행하였다.

해석 격자 구성은 Gambit 2.4를 사용하였으며, 격자는 약 560만개로 사용되었다. 계산은 상용 CFD Code인 Fluent 6.3을 이용하였으며 화재 열부력을 모사하기 위해 중력을 고려하고 난류 모델은 Realizalble K-epsilon을 사용하였다.

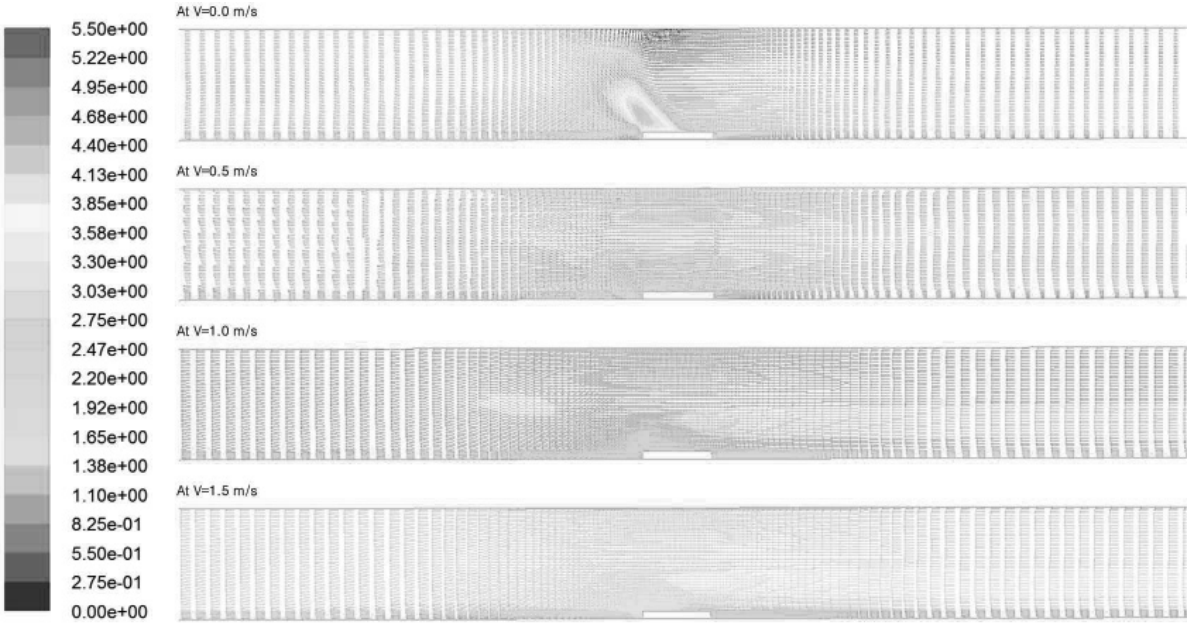

Fig. 10 Velocity Vectors around the Fire Source.

2.4 수치해석 결과

Fig. 10은 화원 주변의 유동 분포 해석결과를 보여준다. 종단부 속도가 0.0 m/s인 경우, 화원의 열부력에 의한 상승기류가 잘 나타남을 확인할 수 있다. 이 때 상승기류 최고 속도는 약 5.1m/s 정도를 나타낸다. 또한, 급배기 팬에 의한 터널 길이방향의 유동은 화원 주변 열부력 상승기류와 만나서 화원 부근 터널 상부 층에 정체 구간이 형성됨을 확인할 수 있다. 이것은 실제 화재 발생 시 해석 구간 내에 존재하는 급배기 팬의 구동만으로는 제/배연이 원활하지 않을 가능성을 보여준다. 따라서 본 해석 터널 구간 내의 팬만을 가동하여 제/배연을 하기 위해서는 새로운 팬 가동 시나리오 검토의 필요성이 제기될 것으로 보인다. 기본 급배기 모드로 제/배연을 수행하기 위해서는 인근 역사 주변 급배기 팬의 동반 가동이 필요할 것으로 보이며 그 근거는 Fig. 10의 V=0.5, 1.0, 1.5m의 해석 결과를 통해 확인할 수 있다. 종단부 속도가 0.5m/s인 경우 화원의 열부력 효과가 상당히 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 체적유량 증가로 인한 터널 단면에 걸쳐 터널 길이 방향으로 유동 속도가 다소 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그러나, 화원 인근 터널 단면에는 속도 편차가 다소 존재하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 화재 열부력의 의한 영향이 남아 있기 때문으로 예측 된다. 종단부 속도가 1.0m/s인 경우는 전체 유동장의 평균 속도가 약 2m/s 정도를 나타내고 있으며 분포가 보다 고르게 나타남을 확인할 수 있다. 종단부 속도가 1.5m/s인 경우는 화재 열부력의 의한 상승 기류는 거의 나타나지 않는 것으로 보인다.

3. 결 론

본 연구의 궁극적인 목표는 화원 점화 후 팬 가동 시 정상상태 시험 결과와 종단부 속도 변화에 따른 유동해석결과를 비교하여 정확한 경계조건 값을 찾은 후에 이 경계값을 이용하여 시험과 같은 조건으로 비정상상태 해석을 수행하고 시험 결과의 비교를 통해 해석결과의 신뢰성을 확보하는 것이다. 따라서, 본 논문은 해석 과정의 일부를 소개하였으며 현재까지 결론은 다음과 같다.

1. 해석 결과상으로 본 해석 구간 팬의 가동만으로 1.5Mw 화원 규모에서는 유동 정체 구간이 발생하였다.
2. Fig.3의 D지점 팬의 급기 모드 가동으로 인해 터널 내 유동 정체 구간을 해소할 수 있었다.
3. User Defined Scalar를 이용한 터널 내 연기 가시화 해석이 가능함을 확인하였으며 사용자 정의 함수를 이용하면 연층 하강을 해석적으로 구현할 수 있음을 확인하였다.
4. 화재 시 발생 하는 주요 독성 가스의 터널 내 분포를 CFD를 이용하여 해석이 접근이 가능함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 국토교통부 철도종합안전기술개발사업 '철도화재 안전성능평가 및 사고방지 기술개발' 과제 수행의 일부로 진행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

[1] 1999, Cha, C.H. and Kim, J.K., "Smoke control in subway tunnels," *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering 28 (6)*, pp.425-432.

[2] 2004, Gabay, Daniel, "Compared fire safety features for metro tunnels, Safe and Reliable Tunnels," *In: Innovative European Achievements First International Symposium*, 4 – .6 February 2004, Prague, Czech Republic.

[3] 1994, Ingason, H., "Heat release rate measurement in tunnel fires," *In: Proceedings of the International Conference on Fires in Tunnels*. Boras, Sweden, October 10 – .11, pp.86-103.

[4] 2007, Kang, Kai, "A smoke model and its application for smoke management in an underground mass transit station," *Fire safety Journal,* 42, pp.218-231.

[5] 2004, Kathryn, M.Butler and George, W., "Generation and transport of smoke components," *Fire Technology,* 40, pp. 149-176.

[6] 2004, Lee, S.R. and Ryou, H.S., "An Experimental study of the effect of the aspect ratio on the critical velocity in longitudinal ventilation tunnel fires," *Journal of Fire Sciences,* 23, pp.119-138.