

제트팬 용량이 도로터널 화재에 미치는 영향

김강희¹, 조목량¹, 김태권^{2*}

¹계명대학교 대학원 기계공학과, ²계명대학교 기계자동차공학과

Effect of Re-ventilated Fan Capacity on Road Tunnel Fire

Kang-Hee Kim¹, Mok-Lyang Cho¹, Tae-Kwon Kim^{2*}

¹Graduate school of Mechanical Engineering Keimyung University

²Department of Mechanical Automotive Keimyung University

요약 터널 내부에서의 화재의 경우 일반도로와 달리 운전자의 시야 확보가 어려워 대형사고가 발생할 가능성이 매우 높다. 따라서 터널 내부 화재 발생 시 제트팬 용량에 따른 제연 효과에 관한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 NIST에서 개발한 화재시뮬레이션인 FDS를 사용하여 제트팬의 유무, 제트팬의 용량에 의해 터널 내부에서 발생한 차량 화재에 대한 제트팬 용량에 따른 연기 거동 및 가시거리, 일산화탄소의 농도를 분석하였다. HRRPUA(Heat Release Rate Per Area)는 3.6MW/m²로 설정하였으며, 모든 해석 시간은 총 600s로 설정하였다. CFD에 의한 가시거리, 일산화탄소 농도 해석은 y=30m, y=110m에서 결과를 확인하였으며 직경과 유량에 따라 연기거동 분석, 가시거리 분석, 일산화탄소 농도를 확인하였다. 제트팬의 직경과 유량이 커질수록 y=30m 후방에서 높은 가시거리를 확인할 수 있으며 일산화탄소 농도가 0ppm임을 확인하였다. 제트팬 직경과 유량이 큰 조건에서는 제트팬 유동의 상류 방향으로 대피하면 인명피해를 최대한 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

Abstract In case of a fire inside a tunnel, unlike ordinary roads, it is very difficult for a driver to obtain visibility, and a large accident is highly likely to occur. In this study, the smoke behavior, visible distance, and CO concentration of a jet fan were analyzed using the NIST fire simulation (FDS). All analyses were set to HRRPUA (Heat Release Rate Per Area) 3.6MW/m² and all the analysis times were set to 600s. In all analyses by CFD, the results were confirmed at y=30m and y=110m, and smoke behavior analysis, visible range analysis, and carbon monoxide concentration were confirmed according to the diameter and flow rate. As the size and flow rate of the jet fan increased, the visibility distance was high at y=30m, and the concentration of carbon monoxide was also confirmed to be 0 ppm. Therefore, proper setting of the jet fan diameter and flow rate will be an excellent solution for fires in tunnels, and taking refuge at upstream area of a re-ventilated fan can reduce the number of casualties.

Keywords : FDS, Tunnel, CO Concentration, Visible Distance, Jet Fan, Smoke Behavior

1. 서론

도시의 지속적인 성장으로 도시 간의 네트워크가 강화되었다. 교통망의 발달로 인해 사람과 물류의 이동이 활발해지면서 지역 간의 시간 거리가 단축되고 도시민의

생활권 범위가 넓어짐에 따라 도시화의 촉진 및 가속화가 이루어지고 있다. 산악지역이 70%인 우리나라에서 자연훼손을 최소화하고 도시 간의 교통흐름의 원활을 위해 터널 건설이 증가하고, 지형조건에 따라 길이가 수 킬로미터에 달한다[1,2]. 대표적인 장거리 터널로는 상춘 터

*Corresponding Author : Tae-Kwon Kim(Keimyung Univ.)

email: tkkim@kmu.ac.kr

Received June 20, 2019

Accepted September 6, 2019

Revised July 31, 2019

Published September 30, 2019

널(9.9km), 배후령터널(5.1km)이 있다. 터널 내 화재 발생은 화물차의 브레이크 파열 및 추돌사고로 인하여 발생한다. 터널은 일반 도로와 달리 운전자의 시야 확보가 어려워 추돌사고가 발생하면 2차 연쇄 추돌로 이어져 대형사고가 발생할 가능성이 높다. 최근 터널 내 교통사고 발생건수는 2012년 589건, 2013년 539건, 2014년 539건으로 총 3년간 87명이 사망하였으며 최근5년 평균으로는 591건으로 꾸준히 터널 교통사고가 발생하고 있다. 터널 구조적 특성상 추돌사고 후 자동차에서 발생하는 유독가스의 배출이 어렵고 또한 빠른 온도 상승에 기인하여 피난의 어려움이 있다. 현재 터널 내 모니터링 강화 및 신속 대응 팀을 운영하고 있으나 사고 발생 시 터널 내 진입하기가 어렵기 때문에 신속한 사고처리가 어려운 실정이다. 공기의 흐름에 제한이 있는 터널의 경우 환기 및 제연을 위하여 제트 팬을 이용하여 자동차 진행 방향과 동일한 방향으로 환기시키는 방식의 제트팬을 설치 및 운영하고 있다. 제트팬 방식은 국내 1km 이상의 도로 터널의 환기방식 중 78%를 차지하고 있다. 따라서 제트팬 용량에 따른 터널 내 화재 발생 시 제연 효과에 관한 연구가 필요한 실정이다[3,4].

본 연구에서는 터널에 대해서 가상의 자동차 사고 화재 발생 시나리오를 설정하고, 터널 내 화재의 경우 제트팬의 제연 성능을 분석하기 위하여 미국 국립 표준 기술 연구소(NIST)에서 개발한 화재시뮬레이션 소프트웨어인 FDS(Fire Dynamics Simulation)을 사용하여 제트팬의 용량에 따라 연기 거동 및 가시거리, CO 농도를 해석하였다[5].

2. 본론

2.1 FDS 시뮬레이션 모델

본 연구에서 사용하는 화재시뮬레이션인 FDS를 사용하여 해석을 진행하였다. FDS는 필드 모델링을 바탕으로 화재, 연기, 열 유동을 분석할 수 있는 3차원 시뮬레이션 프로그램이다. 입력한 정보 및 화재 조건을 바탕으로 물질, 열전달, 연소 및 화염, 연기의 거동을 확인할 수 있다. 화재조사 및 화재감식, 화재안전성평가, 소방 설비의 설계, 공조 설비, 공기 오염도 등을 평가하는데 사용되고 있다. 해석 결과는 FDS 후처리 프로그램인 Smokeview를 이용하여 해석 결과를 확인할 수 있다[6].

FDS는 화재로부터 발생하는 연기와 열전달을 중심으로 두는 열적유동에 적당한 Navier-Stokes equations

을 수치적으로 계산한다. 실제 화재발생시 주변 물체의 유동은 난류 유동이 대부분이므로 몇 가지 유체 지배방정식을 사용하여 난류 모델링을 한다. 유체의 지배방정식에는 질량보존방정식, 운동량보존방정식, 그리고 에너지 보존방정식은 각각 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = \dot{m}_b''' \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) + \nabla p = \rho \mathbf{g} + \mathbf{f}_b + \nabla \cdot \tau_{ij} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h_s) + \nabla \cdot (\rho h_s \mathbf{u}) = \frac{D\bar{p}}{Dt} + \dot{q}''' - \dot{q}_b''' - \nabla \cdot \mathbf{q} \quad (3)$$

여기서, ρ 는 밀도, t 는 시간, ∇ 은 연산자, \mathbf{u} 는 속도, \dot{m}_b''' 은 입자의 증발속도, \mathbf{g} 는 중력가속도, \mathbf{f}_b 는 단위체적당 걸리는 외력, p 는 압력, τ_{ij} 는 점성응력 텐서, h 는 엔탈피, \dot{q}''' 은 단위체적당 열방출율, \dot{q}_b''' 은 입자의 열방출율, \mathbf{q}'' 는 열전달이다.

또한 FDS는 난류모델을 풀기 위한 방법으로 DNS(Direct Numerical Simulation)와 LES(Large Eddy Simulation)기법을 사용한다. 해당 터널 화재 해석에서는 LES기법으로 해석을 진행하였다.

2.2 터널 모델링

본 연구는 터널 내부 화재 발생 시 연기 및 유독성 가스의 거동을 확인하기 위하여 가상의 터널을 Fig. 1과 Fig. 2와 같은 제원으로 모델링 하였다. 터널의 길이는 160m, 폭 9.2m, 높이 6.8m의 편도 2차선 터널이다. 터널 바닥으로부터 5m 위에 $d=0.63m$, $d=1.03m$, $d=1.53m$ 의 제트팬을 $y=30m$, $y=110m$ 에 구현하였다. 미니밴(Passenger car)은 터널 시작점으로부터 $y=65m$

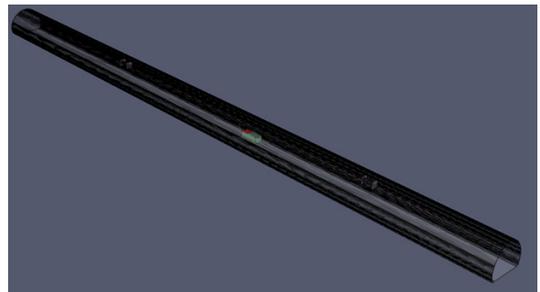


Fig. 1. Geometry of Tunnel (iso view)

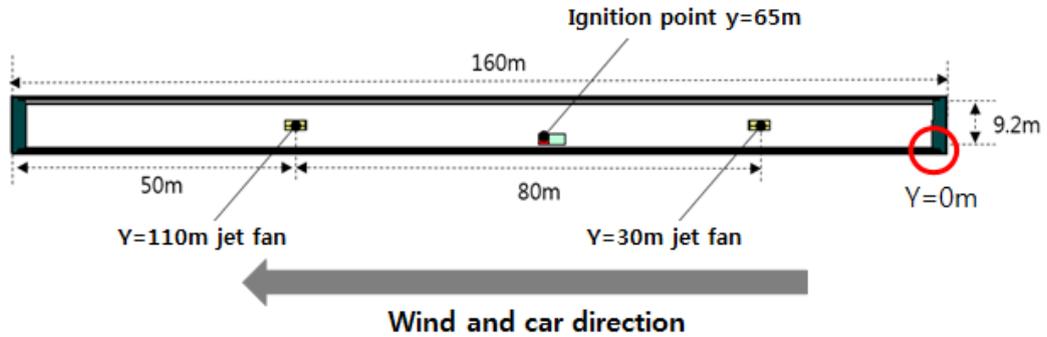


Fig. 2. Tunnel modeling in FDS

부근에 위치해있다. 모든 해석의 기준점은 Fig. 2에서 빨간색 원으로 표시된 곳은 $y=0m$ 이며 Fig. 2의 하단에 위치한 화살표는 차량과 유동의 방향을 나타낸다. 또한 가시거리와 일산화탄소 농도를 확인하기 위해 $y=30m$, $y=110m$ 에 각각 가시거리 Device와 일산화탄소 Device를 사람호흡높이인 1.5m 높이에 모델링하였다.

2.3 시뮬레이션 조건

터널 화재 발생 시 연기 거동 및 환기 제연을 적용시키기 위해 Table 1에 나타난 조건으로 해석을 진행하였다. 화원에서 발생하는 화재의 규모는 해외 실제 미니밴의 화재 시나리오를 이용하였으며 그래프를 시간과 분을 피팅 작업하여 미니밴이 전소된 경우 발생하는 HRRPUA 값인 $3.6MW/m^2$ 으로 설정하였다[7].

Table 1. FDS simulation conditions

Conditions		Values
Simulation Time		600s
Max. HRR		3.6MW
Ignition Point		Passenger car (1.7×1.7m)
Jet fan flow rate Q . (m^3/s)	Case1	No Jet Fan
	Case2	$Q=8.5m^3/s$
	Case3	$Q=28.5m^3/s$
	Case4	$Q=55.0m^3/s$

발화점은 미니밴 앞 범퍼(1.7×1.7m)로 모델링하였다. 터널 내부 자동차가 사고 발생으로 인해 정체되어 있어 교통 환기력이 없는 상황을 가정하였다. 제트팬 유량별(Q) 4가지 Case를 선정하였고 각 해석 시간은 600s이다. Case1은 터널 화재 발생 시 제트팬이 없는 조건으로 가정하고, Case2는 제트팬 유량을 $Q=8.5m^3/s$, Case3은

$Q=28.5m^3/s$, Case4는 $Q=55.0m^3/s$ 로 설정하였다. 토출 방향은 터널내부 자동차 이동방향과 동일한 방향으로 설정하고, 터널 내부 소재는 Concrete, 자동차는 Steel과 Plastic으로 설정하였다.

일산화탄소의 농도는 1.5m의 사람 호흡선에서 확인하였다.

3. 결과

3.1 연기거동분석

터널 내 자동차 화재 발생에 따른 연기의 거동을 제트팬의 유무, 직경(d), 유량(Q)의 조건으로 4가지 Case로 구분을 하였으며, Smokeview를 이용하여 터널 내부에서의 연기거동을 Fig. 3에 나타내었다.

Case1은 제트팬이 없는 조건에서 최초 발화 시작 후 35s와 300s의 상태이다. 연기의 거동은 터널 상부를 통해 양쪽으로 퍼져나가며, 최대 HRR에 도달하는 시간인 300s 후 연기의 거동은 터널 상하부를 통해 양쪽으로 계속해서 진행되는 것을 확인하였다.

Case2는 제트팬 $d=0.63m$, $Q=8.5m^3/s$ 의 조건에서 최초 발화 시작 후 35s와 300s의 상태를 나타낸다. 연기의 거동은 터널 상부를 통해 양쪽으로 퍼져나가는 현상을 보인다. 최대 HRR에 도달하는 시간인 300s 후 연기의 거동은 터널 상하부를 통해 양쪽으로 진행된다. 직경과 유량이 작으므로 이와 같은 연기의 거동이 확인된다. 300s 후 연기의 거동은 제트팬이 없는 조건과 동일하게 양쪽으로 거동하는 것을 확인하였다.

Case3은 제트팬 $d=1.03m$, $Q=28.5m^3/s$ 의 조건에서 최초 발화 시작 후 35s와 300s의 상태를 나타낸다. 연기의 거동은 양쪽으로 퍼져나가나 제트팬에 의해 차량진행 방향인 출구로 연기의 거동이 확인된다. 최대 HRR에 도

Case	t=35s	t=300s
1		
2		
3		
4		

Fig. 3. Smoke behavior at tunnel

달하는 시간인 300s 후 연기의 거동은 y=30m의 반대쪽으로 이동하나 계속해서 출구로 진행됨을 알 수 있다. y=30m의 후방에서 상부쪽으로 연기가 거동하나 하부쪽으로는 연기가 밀려나는 현상을 확인할 수 있다.

Case4는 제트팬 d=1.53m, Q=55.0m³/s의 조건에서 최초 발화 시작 후 35s와 300s의 상태를 나타낸다. 연기의 거동은 차량의 진행방향인 출구로 빠른 속도로 진행됨을 알 수 있다. 최대 HRR에 도달하는 시간인 300s 후 이전 결과와는 확연히 다른 연기거동을 확인할 수 있다. 제트팬 직경의 크기와 유량이 크므로 차량진행 방향으로 연기의 거동이 확인되지 않고 발화점의 전방으로 빠른 속도로 연기가 거동하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 발화 시점부터의 열방출율(HRR : Heat Release Rate)을 나타낸 그래프이다. 330s 지점에서 최고 열방출률 값인 9.5MW에 도달한 것을 확인할 수 있다.

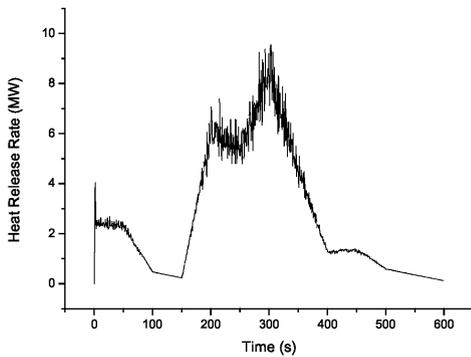


Fig. 4. Heat release rate

3.2 가시거리 분석

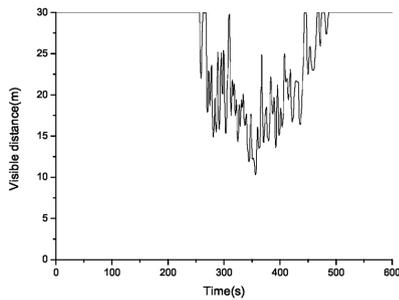
화재시물레이션을 통해 터널 화재 시 발생하는 연기 거동에 의한 가시거리를 해석한 결과를 나타내었다. y=30m, y=110m 제트팬의 위치를 기준으로 가시거리를 분석하였으며 제트팬이 없는 경우와 제트팬의 유량이 높은 직경 d=1.53m, 유량 Q=55.0m³/s의 조건에서 사람의 시야 높이인 1.5m에서 분석한 결과를 각 4가지의 Case를 아래 Fig. 4에 나타내었다.

(a)는 제트팬이 없는 조건에서 y=30m 위치의 가시거리를 분석한 결과이다. 최초 발화가 시작한 후, 200s 후 가시거리는 급감한다. 또한 최대 HRR 값인 약 300s에서 15m의 가시거리를 확인하였다.

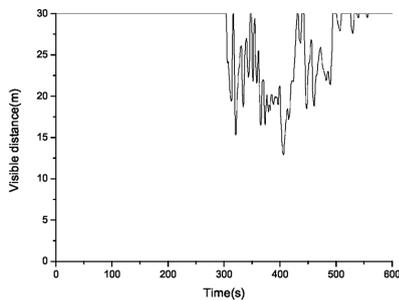
(b)는 제트팬이 없는 조건에서 y=110m 위치의 가시거리를 분석한 결과이다. 최초 발화가 시작한 후, 300s가 지나 가시거리가 감소함을 확인할 수 있다. 400s가 지나 약 20m의 가시거리를 보인 후 400s 이후부터 가시거리가 회복함을 확인하였다.

(c)는 제트팬 직경 d=1.53m, 유량 Q=55.0m³/s의 조건, y=30m의 위치에서 분석한 결과이다. 높은 유량에 의해 발화점 후방으로는 연기가 거동하지 않는다. 따라서 가시거리는 30m를 계속해서 유지하는 것을 확인하였다.

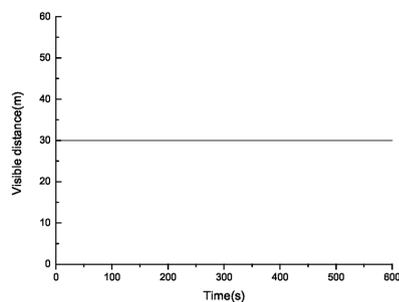
(d)는 제트팬 직경 d=1.53m, 유량 Q=55.0m³/s의 조건, y=110m의 위치에서 분석한 결과이다. 최초 발화 후 가시거리는 급감하여 약 10m의 가시거리를 확인할 수 있으며 약 100s부터 200s까지 가시거리가 소폭 상승하여 약 13m의 가시거리를 확보한다. 최대 HRR 부근인 300s에서 1m의 가시거리를 확인할 수 있으며 400s부터 600s까지 그래프가 상승 및 하강 후 가시거리가 회복한다.



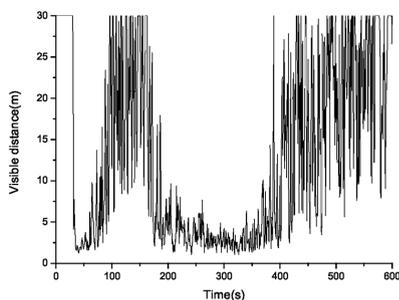
(a) Visible distance at $y=30m$, no jet fan



(b) Visible distance at $y=110m$, no jet fan



(c) Visible distance at $y=30m$, $d=1.53m$ diameter and flow rate $Q=55.0m^3/s$



(d) Visible distance at $y=110m$, $d=1.53m$ diameter and flow rate $Q=55.0m^3/s$

Fig. 5. Visible distance analysis

3.3 일산화탄소 농도 분석

화재시물레이션을 통해 터널 화재 시 발생하는 유독성 가스 중에서 CO의 농도를 해석한 결과를 나타내었다. 제트팬이 없는 경우와 제트팬 직경 1.53m, 유량 55.0m³/s의 조건에서 사람의 호흡 높이인 1.5m에서 분석한 결과를 아래 Fig. 5에 나타내고 추세선을 표시하였다.

(a)는 제트팬이 없는 경우에서 $y=30m$ 지점을 기준으로 사람 호흡 높이인 1.5m 높이를 가정하고 일산화탄소 농도를 확인한 결과이다. 최초 발화 시작 후 약 200s까지 0ppm의 농도를 확인할 수 있다. 200s부터 약 10ppm까지 농도가 확인되며 최대 HRR 시점인 300s 부근에서 20ppm, 400s대에서 약 35ppm의 농도를 확인하였다. 약 500s대에서 농도가 감소하는 것을 확인하였다.

(b)는 제트팬이 없는 경우에서 $y=110m$ 지점을 기준으로 확인한 결과이다. 최초 발화 시작 후, 100s대까지는 0ppm에 가까운 농도를 나타내고 있다. 200s 이후부터 농도가 약 40ppm까지 상승하는 것을 확인하였다. 300s부터는 최대 약 60~70ppm에 달하는 것을 확인하였다. 400s부터는 농도가 계속해서 감소하는 것을 확인하였다.

(c)는 제트팬 $d=1.53m$, $Q=55.0m^3/s$ 의 조건에서 $y=30m$ 지점을 기준으로 일산화탄소 농도를 확인하였다. 직경이 크고 유량이 강하므로 화재가 발생할 때부터 연기, 일산화탄소가 역행하지 않고 차량진행방향의 출구 쪽으로 진행되므로 $y=30m$ 의 후방으로 일정한 0ppm의 일산화탄소 농도를 확인할 수 있다. 따라서 그래프의 변동이 없이 일정한 0ppm의 그래프를 확인할 수 있다.

(d)는 제트팬 $d=1.53m$, $Q=55.0m^3/s$ 의 조건에서 $y=110m$ 지점을 기준으로 확인하였다. 차량 전방 쪽이므로 연기, 일산화탄소가 다량으로 거동하므로 그래프 상 전체적으로 높은 농도를 확인할 수 있다. 초기 발화부터 약 500ppm의 농도를 확인할 수 있으며 점차 감소하여 150s에서 약 200ppm의 농도를 확인하였다. 300s부터 약 800ppm의 농도를 확인할 수 있다. 300s 이후부터는 농도가 감소하여 450s에서 0ppm~200ppm에 가까운 농도를 확인할 수 있다. 일산화탄소 800ppm의 농도는 장시간 노출 시 사람의 생명에 위험을 끼칠 수 있는 농도이나 $y=30m$ 후방으로는 영향이 없으므로 화재가 발생 시 차량진행의 반대방향으로 대피하면 인명피해를 최대한 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

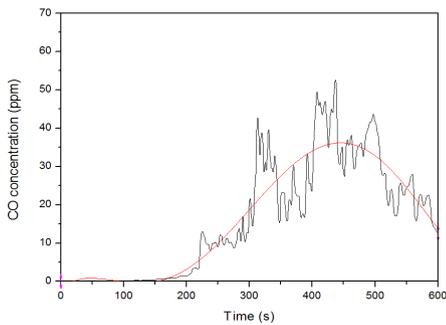
본 연구에서는 화재 시뮬레이션인 FDS를 이용하여 터널 내부 화재 시 제트팬 용량에 따른 연기의 거동 및 일산화탄소의 농도, 제연 효과를 해석하였다. 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

최초 발화 후 연기의 거동은 빠른 속도로 확산하는 모습을 보인다. 연기로 인해 가지거리가 감소함에 따라 이동이 제한되어 높은 인명피해가 발생할 수 있다. 이를 통하여 터널 내부에 있는 제트팬의 직경과 유량을 조절하면 터널 화재 시 인명피해를 줄일 수 있다고 판단된다. 수많은 인명피해를 유발하는 유독성 가스인 일산화탄소는 차량이 터널 내부에서 화재 시 다량 발생한다. 특히 직경 $d=1.53\text{m}$, 유량 $Q=55.0\text{m}^3/\text{s}$ 의 해석결과에서는 차량 진행방향으로 일산화탄소가 빠져나가며, $y=30\text{m}$ 을 기준으로 후방으로는 일산화탄소가 거동하지 않는 것을 확인하였다.

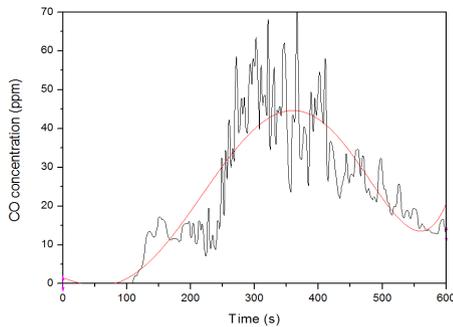
본 연구를 통하여 환기 설비가 없는 조건이나 제트팬의 직경 크기 및 유량에 따라 순수 연기의 거동, 가지거리 분석, 일산화탄소의 농도를 확인하였다. 이러한 결과를 통해 제트팬 $d=1.53\text{m}$, $Q=55.0\text{m}^3/\text{s}$ 의 조건에서는 차량 진행의 반대방향으로 연기와 일산화탄소가 역행하지 않고 차량의 진행방향인 출구 쪽으로 거동하는 것을 확인하였다. 따라서 제트팬의 직경 과 유량의 설정에 의해 터널 내부 화재 시 신속한 제연 효과의 해결책이 될 것으로 판단된다[7].

References

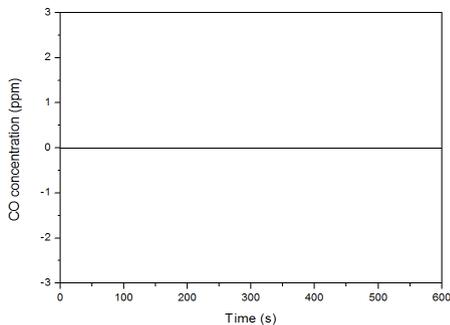
- [1] Dong-Ho Min, Bong-Sei Son, "Numerical Simulation on the Heat Transfer and Smoke Flow Phenomena and Evacuation in the Road Tunnel Fires", Fire Science and Engineering, Vol.19, No.1, pp.87-92, 2005.
- [2] Nag-Young Kim, Young-Seok Park, "Consideration of Accident Prevention System for Highway Tunnels", Korean Geo-Environmental Society Fall Conference, Vol.2011, No. 9, September 30, 2011.
- [3] Dong-Ho Rie, Ha-Young Kim, Sung-Woong Moon, Ji-Oh Yoo, "The dynamic characteristics of upper hot gas layer and smoke propagation along with tunnel slope in case of fire", Journal of Korean Tunneling and Underground Space Association, Vol.11. No.3, pp.223-228, September, 2009.
- [4] Sung-Ryoung Lee, "An Experimental Study on Smoke Movement by the External Wind in Road Tunnel



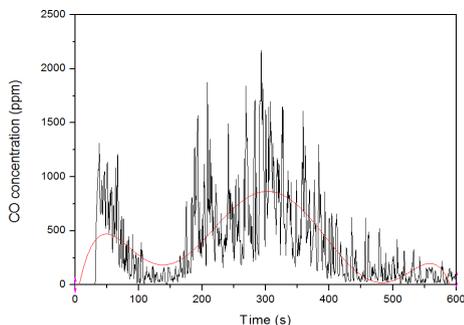
(a) Carbon monoxide concentration at $y=30\text{m}$, no jet fans



(b) Carbon monoxide concentration at $y=110\text{m}$, no jet fans



(c) Carbon monoxide concentration at $y=30\text{m}$, $d=1.53\text{m}$ diameter and flow rate $Q=55.0\text{m}^3/\text{s}$



(d) Carbon monoxide concentration at $y=110\text{m}$, $d=1.53\text{m}$ diameter and flow rate $Q=55.0\text{m}^3/\text{s}$

Fig. 6. Carbon monoxide concentration analysis

Fires", Korean Society for Rock Mechanics, Tunnel and Underground space, Vol. 24, No. 4, pp. 308-315, 2014.

- [5] Tae-Kwon Kim, Mok-Lyang Cho, "A Simulation of fire smoke behavior in the K subway station for Daegu Metro Line 2", Journal of the Korean institute of gas, Vol.2016, No.11, pp.217, 2016.
- [6] Yong-Kyun Yonn, Eun-Hye Ju, "A Study on the Behavior of Smoke Spread Caused by Vehicle Fire in a Road Tunnel", Korean Society for Rock Mechanics, Vol.22, No.5, pp.365-372, 2012.
- [7] Batsuhiko Okamoto, Takuma Otake, Hiroki Miyamoto, Masakatsu Honma, Norimichi Watanabe, "Burning behavior of minivan passenger cars", Fire Safety Journal, Vol.62, Part C, pp.272-280, November 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2013.09.010>

김 태 권(Tae-Kwon Kim)

[정회원]



- 1992년 8월 : 한국과학기술원 기계공학(연소공학) 전공 (박사)
- 1981년 3월 ~ 1995년 8월 : 한국 기계연구원 동력기계연구실장
- 1995년 9월 ~ 현재 : 계명대학교 기계자동차공학과 교수

<관심분야>
연소공학

김 강 희(Kang-Hee Kim)

[준(학생)회원]

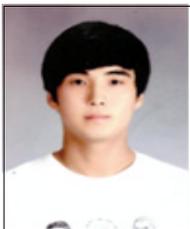


- 2018년 2월 : 경일대학교 신재생 에너지학과 (학사)
- 2018년 3월 ~ 현재 : 계명대학교 일반대학원 기계공학과 (석사재학)

<관심분야>
연소공학

조 목 량(Mok-Lyang Cho)

[정회원]



- 2018년 2월 : 계명대학교 기계공학과 (석사)
- 2018년 3월 ~ 현재 : 계명대학교 일반대학원 기계공학과 (박사재학)

<관심분야>
연소공학