

터널 내 차량 화재에 따른 연기 확산 거동에 관한 연구

윤용균*, 주은혜

A Study on the Behaviour of Smoke Spread Caused
by Vehicle Fire in a Road Tunnel

Yong-Kyun Yoon*, Eun-Hye Ju

Abstract This paper aims to evaluate the effects that presence, installation number and capacity of ventilation vent and presence of multiple fire sources have on the behaviour of smoke temperature induced by vehicle fire in road tunnel. Six types of scenarios were assumed and FDS was ran to simulate them. As the number of ventilation vents increases, the smoke temperature are calculated to be reduced, but it is shown that effects exerted by two ventilation vents are almost similar to ones by three ventilation vents. Capacity of ventilation vent has a greater impact on the reduction of smoke temperature than installation number of ventilation vents. Smoke temperatures computed for all scenarios except for scenario No. 1 (without ventilation vent) and scenario No. 6 (with multiple fire sources) above fire source are analyzed to be under 400°C and it means that the radiation of smoke layer above fire source doesn't induce the ignition of materials around fire source.

Key words Ventilation vent, Smoke temperature, FDS, Fire source

초 록 본 논문에서는 환기구의 존재, 환기구 설치 대수, 환기구 용량, 복수 화원의 존재가 도로터널에서 발생한 차량 화재에 의한 연기 온도 분포에 미치는 영향을 평가하였다. 6개의 시나리오를 가정하였으며 FDS를 이용하여 시나리오 해석을 실시하였다. 해석 결과 환기구의 설치 대수가 증가함에 따라 연기의 온도는 감소하는 것으로 나타났지만, 환기구의 설치 대수가 2대인 경우와 3대인 경우에 온도 감소 효과는 거의 같은 것으로 나타났다. 환기구의 설치 용량은 환기구의 설치 대수 보다 연기 온도 감소에 더 큰 영향을 주는 것으로 해석되었다. 환기구가 없는 시나리오 No. 1과 복수 화원을 갖는 시나리오 No. 6를 제외한 나머지 시나리오에 대해서 해석한 결과 화원 상부에서의 연기 온도는 모두 400°C 이하로 나타났는데, 이는 화원 상부 연기층에서 발생하는 복사열에 의해 화원 주변 가연물의 착화가 어렵다는 것을 나타낸다.

핵심어 환기구, 연기 온도, FDS, 화원

1. 서 론

행복도시, 혁신도시, 기업도시 등과 같은 신도시 건설과 기존 도시 경계의 확대에 의한 도시 내 도로와 도시 간 연결 도로의 건설이 점증함에 따라 터널 건설이 증

가하고 있고, 도로가 산악지역을 통과하는 경우 자연환경 파괴를 최소화하기 위하여 절개 사면을 형성하는 것 보다는 터널을 굴착하는 경우도 많아지고 있다. 국내 도로 터널 현황을 보면 2010년을 기준으로 하여 연장이 1 km 이상이 되는 터널의 개수는 254개소이고 총연장은 448 km로 장대터널의 연장이 전체 터널 연장의 약 46%를 차지하고 있는 것으로 나타나고 있다(MLTM, 2011). 앞으로도 동·서간을 관통하는 도로나 철도를 신설하는 경우 우리나라 산맥의 분포 특성에 따라 장대터널을 건설할 가능성이 높고, 한·일 해저터널(연장 : 220 km), 한·중 해저터널(연장 : 198~374 km)과 같은 초장대 터널(Shin, 2011)에 대한 타당성도 논의되고 있어

Received: Oct. 22, 2012

Revised: Oct. 24, 2012

Accepted: Oct. 25, 2012

***Corresponding Author:** Yong-Kyun Yoon

(Tel) +82436491318, (Fax) +82436491787

(E-Mail) yoon63@semyung.ac.kr

Department of Fire Disaster and Prevention, Semyung University, Jecheon, Korea

장대 터널 화재 발생에 따른 화재 확산 및 연소 생성물의 유동에 대한 연구가 지속적으로 요구된다.

지난 7년간(2004~2010) 터널 수가 증가함에 따라 터널 내 사고 건수도 증가하고 있다. 최근 3년간 국내 터널 내 화재 발생은 2008, 2009, 2010년에 각기 27, 34, 40건으로 매년 증가하고 있고, 고속국도 터널에서의 화재 발생 건수는 각기 9, 12, 5건으로 나타났다(NEMA, 2011). 해외에서 발생한 도로터널 화재 중 대표적인 터널화재로는 1999년도에 발생하여 각기 39명과 12명의 사망자가 보고된 Mont Blanc 터널화재와 Tauern 터널 화재, 2001년도에 일어나 11명의 사망자가 발생한 St. Gotthard 터널화재 등을 들 수 있다(Lonnermark, 2005).

터널 공간은 반 밀폐 공간으로 터널 내에서 차량 화재가 발생하는 경우 방연, 방화구획이 없으므로 대류복사에 의한 화재 확산이 빨라 빠른 시간 내에 화재 진압을 하는 것이 쉽지 않고, 화재 시 발생한 연소 생성물로 인해 가시거리가 짧아져 대피 인원의 피난을 어렵게 하며 연기로 인한 질식으로 인해 인명피해가 발생할 수 있다. 터널 화재는 터널 라이닝과 슛크리트와 같은 지보재 뿐만 아니라 암반 자체에 열적 손상을 일으켜 터널 자체의 안정성에 심각한 영향을 미치기도 한다(Hertz and Sorensen, 2005, Chang et al., 2006, Kim et al., 2009).

터널 내 차량 화재 발생에 따른 인명 및 재산 피해를 방지하기 위해서는 적절한 방재시설을 설치하여 소방대원이 도착하기에 앞서 피난 및 초동 대응을 할 수 있도록 해야 한다. 현재 국내 도로 터널 설계 시 방재시설을 설계하는 경우 국토해양부에서 2009년에 제정한 ‘도로터널 방재시설 설치 및 관리지침’을 준용하고 있으며, 도로 터널에 설치하는 소방시설에 대한 설치기준과 유지 및 안전관리에 관한 사항은 소방방재청에서 제정한 ‘도로터널의 화재안전기준’을 따르도록 되어 있다. 2009년 이후에 설계된 도로 터널은 설계 지침에 따라 어느 정도의 방재시설을 갖추고 있지만 그 이전에 건설된 터널은 방재시설을 임의로 설계함에 따라 화재에 취약한 경우가 많다. 또한 장대터널의 경우 단순히 설계 지침을 준용하는 것만으로는 적합한 방재설비를 설치하는 것이 어렵다. 적절한 방재시설을 설치하기 위해서는 터널의 자연적 조건과 설계 조건을 고려한 화재 및 연기의 확산 거동에 대한 수치해석적인 연구가 필요하다.

본 연구에서는 실험실시험이나 모형실험을 통해 터널 내 화재 확산 거동을 모사하는 것이 어렵기 때문에 조건을 다양하게 변화시키며 결과를 분석할 수 있는 수치해석을 이용하여 해석을 실시하였다. 사용된 프로그램은 NIST에서 개발한 FDS(Fire Dynamics Simulator)를 기반으로 만들어진 PyroSim(Ver. 5) 이다. 건설 예정인

○○터널을 대상으로 6가지의 시나리오를 가정하여 터널 내 차량 화재 시 환기구의 존재, 환기구의 용량, 환기구의 개수, 복수 화원의 존재가 연기의 온도 분포 거동에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 터널 화재의 특성 및 화재강도

국내의 경우 교통수송의 대부분이 도로를 통해 이루어지기 때문에 도로터널을 안전하게 설계하는 것이 필수적이다. 도로터널의 설계개념을 화재에 대한 안전성에 두는 경우 그 대상은 터널을 이용하는 사람과 터널 구조물이 될 수 있다. 사람에 대한 안정성 문제는 화재 발생에 의한 연기 확산 때문에 발생하기 때문에 열방출 속도(Heat release rate, HRR)를 고려한 환기설비를 적절하게 설계하는 것이 중요하다. 화재 발생 시 라이닝과 같은 터널 구조물의 안전성은 구조물의 내화력에 달려있다. 발화원에 따라 구조물에 가해지는 화재강도가 달라지기 때문에 발화원에 따라 적절한 시간-온도 곡선을 적용하는 것이 중요하다. Fig. 1에는 표준곡선뿐만 아니라 네덜란드, 독일, 프랑스의 터널에서 얻어진 시간-온도 곡선들이 표시되어 있다. 그림에서 $T_{Standard}$ 곡선은 ISO 834 표준곡선으로써 셀룰로오스에 대한 화재곡선을 나타내며 일반적으로 건축구조물에 적용되지만 터널에도 사용된다. 석유화학물질을 운반하는 트럭이 빈번하게 터널을 운행함에 따라 기존의 표준곡선을 대신하여 제시된 것이 $T_{Hydrocarbon}$ 곡선으로 유류화재에 적용되며 표준곡선보다 화재가 빠르게 성장하며 온도증가도 더 빠르다는 것을 알 수 있다. $T_{HC,mod}$ 곡선은 기존의 $T_{Hydrocarbon}$ 곡선을 1300/1100만큼 증가시킨 것으로써 최고온도가 1,280°C에 이르며 프랑스에서 사용된다. T_{RWS} 곡선은 네덜란드 Rijkswaterstaat 터널 곡선으로

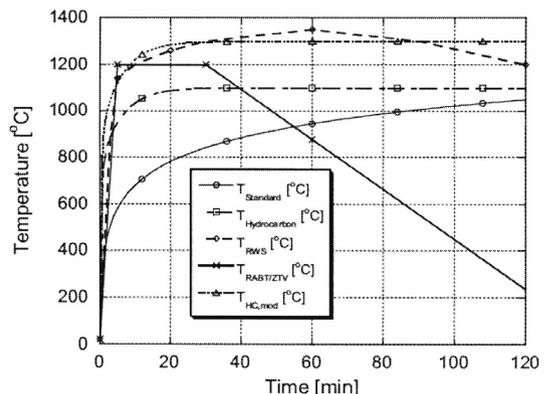


Fig. 1. Fire time-temperature curves (After Lonnermark, 2005)

써 석유류를 적재한 대형 탱커(45,000 ℓ)의 화재를 모사한 것으로 화재 발생 60분 후에 최고온도가 1,350°C에 도달하고 열방출속도가 300MW인 최악의 화재 조건을 가정한다. TRABT/ZIV 곡선은 독일에서 고안된 석유류 화재에 대한 곡선으로써 화재 발생 5분만에 1,200°C에 도달하는 것으로 나타난다(Lee and Ahn, 2006, Won et al., 2009, Lonnermark, 2005). 세계도로협회(World Road Association, PIARC)에서는 승용차와 밴에 대해서는 T_{Standard} 곡선을 트럭과 탱커에 대해서는 T_{RWS} 곡선이나 T_{HC,mod} 곡선을 적용할 것을 추천하였다(Lacroix and Haack, 2004).

터널 내에서의 화재 및 연기 확산을 평가하고 제연설비 용량을 결정하기 위해서는 차량 종류에 따른 적절한 HRR을 선택하는 것이 중요하다. Table 1에는 미국 NFPA (National fire protection association) 502에 수록된 각종 차량에 대한 최대 HRR이 표시되어 있다. Table 2에는 국내 도로터널 제연설비 용량 계산을 위해 사용되는 설계화재강도 및 연기발생량이 표시되어 있다. ‘도로터널 방재시설 설치 및 관리지침’에서는 설계화재 강도를 20 MW 이상으로 하고, 연기 발생량은 80(m³/s)로 할

것을 권장하고 있다. Table 3에는 국내에서 시공된 연장이 비교적 긴 터널들에 대한 교통특성 및 설계화재강도가 표시되어 있다. Table 3에서 보는 바와 같이 유조차를 포함한 위험물 적재 가능성이 높은 트럭의 통행 비율이 낮은 경우 대체적으로 설계 화재강도를 낮게 선정한다는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 해석대상으로 선택한 OO터널의 경우 대형차 통행 비율은 5.52%, 유조차를 포함한 특수트럭 비율은 0.3%로 예측되어 다른 터널에 비해 대형차의 이동 비율이 낮을 것으로 예상된다. Table 1, 2, 3에 제시된 각종 차량에 대한 설계화재강도와 OO터널이 도심지에 설치되는 장대터널임을 고려하여 본 연구에서는 OO터널의 설계화재강도를 30 MW로 가정하였다.

3. 수치모델링 프로그램 및 요소망

본 연구에 사용된 수치모델링 프로그램은 Thunderhead Eng.에서 개발한 PyroSim이라는 상용 프로그램이지만 PyroSim은 PyroSim, FDS, Smokeview의 3개의 프로그램으로 구성되어 있다. FDS(Fire dynamics simulator)

Table 1. Fire data for typical vehicles (After NFPA, 2011)

Vehicles	Peak fire heat release rate (MW)	Time to peak HRR (Min.)
Passenger car	5-10	0-30
Multiple passenger cars (2-4 vehicles)	10-20	13-55
Bus	20-30	7-10
Heavy goods truck	70-200	10-18
Tanker	200-300	-

Table 2. Design value for fire load and quantity of emitted smoke (After MLTM, 2009)

Vehicles	Passenger car	Bus	Truck	Tank lorry
HRR (MW)	≤ 5	20	30	100
Smoke flow rate (m ³ /s)	20	60~80	80	200

Table 3. Design values for fire load of some tunnels constructed in Korea (After OO E & C, 2010)

Name of tunnel	Length (km)	Percentage of heavy goods vehicles (HGV) (%)	Percentage of special trucks (Including petrol tanker) (%)	Applied HRR (MW)
Bachuryeong	5	29.69	0	20~50
Jinhae	6.1	16.01	2.44	50
Inje	10.9	25.18	1.94	50
Geumseong	4.5	29.95	3.48	20
Yangnam	7.5	30.53	0.72	20
GK immersed tunnel	3.6	22.81	5.98	100

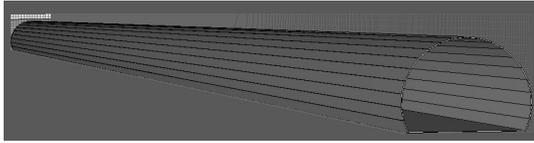


Fig. 2. A mesh for a analysis

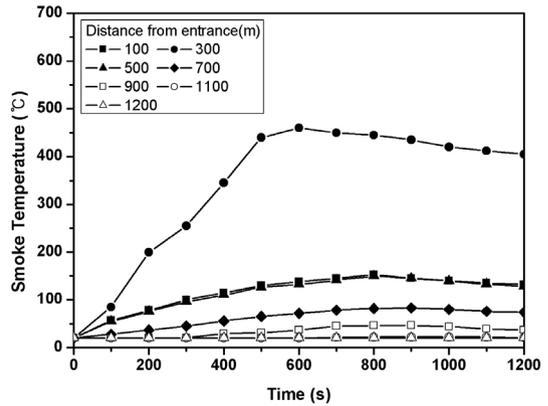
는 미국 NIST(National institute of standards and technology)에서 개발한 전산유체역학 모델로써 화재로 인한 유체 유동 특히 화재로부터 발생한 연기와 열수송 문제를 해석하는데 우수한 성능을 발휘한다. FDS는 명령지시메시지(Command prompt)상에서 입력파일을 작성하도록 되어 있기 때문에 초보자가 입력파일을 작성하는 것이 어렵다. 입력파일 작성의 어려움을 해소하기 위하여 PyroSim 프로그램이 사용되는데, PyroSim은 GUI 형태의 FDS 전처리 프로그램이라 할 수 있다. Smokeview는 FDS의 후처리 프로그램으로써 NIST에서 개발하였으며 FDS에서 계산된 결과를 2/3차원적으로 도시할 수 있도록 하는 기능을 가지고 있다(NIST, 2007, Thunderhead Eng., 2010). PyroSim에 통합되어 있는 FDS는 Ver. 5 이고, FDS와 Smokeview는 무료로 배포되고 있다.

PyroSim 프로그램에서는 3차원 사변형 요소망을 구현할 수 있기 때문에 2/3차원 요소를 동시에 사용하여 요소망을 구성하는 것이 가능하다. 본 연구에서는 연장이 4.85 km로 예정된 OO터널을 해석대상으로 하였으며, 해석의 편의성을 위하여 종단경사는 0%로 가정하였다. 해석대상 터널 단면의 크기는 10×10(m)로 하였으며, 요소의 크기는 1.0×1.0×1.0(m)로 하여 요소망을 구축하였다(Fig. 2 참조).

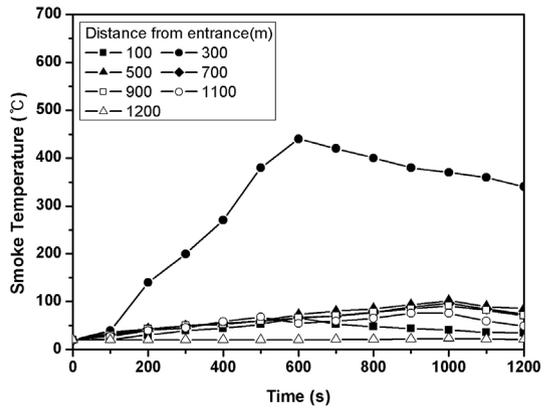
4. 결과 해석 및 검토

4.1 예비해석

장대 터널 내에서 차량 화재가 발생하는 경우 연기 유동은 터널 전 길이에 영향을 미치지 않고 일정한 길이만큼만 영향을 미칠 것으로 예상할 수 있다. 연기의 온도도 최대온도까지 상승한 후에는 온도가 일정하게 유지되다 하강하기 때문에 전 시간에 걸쳐 해석을 하는 것 보다는 최대온도에 이르는 시간만 해석시간으로 하는 것이 효과적이다. 연기의 유동이 미치는 영향 길이와 영향 시간을 결정하기 위하여 예비 해석을 실시하였다. 화원은 터널 입구에서 300 m 이격된 지점에 존재하는 것으로 하였다. Fig. 1에 나타난 화재 시간-온도곡선에서 보는 바와 같이 대부분의 화재모델에서 화재 발생 후 20분 정도가 경과하면 최대 온도에 도달한다는 점을



(a) Wind speed = 0m/s



(b) Wind speed = 2m/s

Fig. 3. Variations of smoke temperature with time

고려하여 화재해석 시간을 1200초, 화재 규모 즉 열방출 속도(HRR)를 30 MW로 하여 해석한 결과가 Fig. 3에 표시되어 있다. 화재 발생 전 주변 공기의 온도는 20°C로 가정하였다. 그림에서 주어진 해석 지점의 거리는 터널 입구로 부터의 이격거리를 나타낸다. 그림을 보면 풍속이 0 m/s인 경우가 2 m/s인 경우 보다 화원 상부에서의 연기 최대온도가 더 높은 것으로 나타나는데 이는 바람이 터널 내부로 유입됨으로 인해 냉각효과가 발휘되기 때문인 것으로 생각할 수 있다. 터널 내부로 바람이 유입되지 않는 경우 화원을 중심으로 터널의 양쪽 방향으로 연기가 똑같이 퍼져나갈 것으로 예상할 수 있는데, Fig. 3(a)를 보면 화원에서 양쪽으로 동일한 거리에 있는 100 m와 500 m지점에서의 연기의 온도가 거의 일치하는 것으로 나타난다. 풍속이 2 m/s인 경우 100 m 지점에서의 온도는 500 m 지점에서의 온도 보다 상당히 낮은 것으로 나타나는데 이는 바람이 터널 출

구 방향으로 불기 때문에 연기의 대부분이 터널의 출구 부분으로 나가고 입구 부분으로 역류하는 것은 적은 것에 기인한다고 볼 수 있다. 화원 상부에서의 연기의 최대 온도는 풍속이 0 m/s, 2 m/s인 경우 각기 460, 440 (°C)로 나타났다. 연기의 온도가 400~600(°C)인 경우 바닥에 도달되는 열유속(Heat flux)은 10~20(kW/m²)이기 때문에 상기의 조건으로 터널에 화재가 발생하는 경우 화원 주변에 전달되는 열유속은 약 10~15(kW/m²) 정도가 될 것으로 예상할 수 있다(Quintiere, 1998). 일반적으로 가연물이 점화되기 위해서는 10~20(kW/m²)의 열유속이 필요하기 때문에 본 해석에서 고려한 화재 규모 30 MW의 차량 화재가 발생하는 경우 화원의 직접적인 접촉이 없어도 고온의 연기로부터 전달되는 복사열에 의해 화원 주변에 있는 가연물로 화재가 확대될 수 있다. 연기가 확산되는 거리를 비교해 보면 풍속이 없는 경우 1100 m 지점에서 터널 내 온도가 주변 공기 온도로 떨어지기 때문에 연기는 900~1100(m) 구간까지 확산되는 것으로 예상할 수 있고, 풍속이 있는 경우는 1200 m 지점에서 연기의 온도가 주변 공기 온도로 감소하기 때문에 연기는 1100~1200(m) 까지 퍼질 것으로 예상할 수 있다. 최고온도 도달 시간을 비교해 보면 풍속이 있는 경우 화원 상부에서는 600초 만에 최고 온도에 도달하지만 500~1100(m) 지점에서는 1,000초가 경과되어야 최고온도에 도달하는 것으로 나타났다. 예비 해석 결과를 참조하여 본 해석에서는 화재 해석 시간을 1,000초, 해석 대상이 되는 터널의 길이는 1,100 m로 하였다. 또한 제트팬에 의한 환기 효과를 고려하기 위하여 화재 시나리오에 따라 수직 환기구가 설치되어 있는 것으로 가정하였다.

4.2 화재 시나리오에 따른 연기 확산 해석

터널 내 화재는 다양한 조건 하에서 발생할 수 있기 때문에 여러 조건을 상정하여 해석을 실시하는 것이 필요하다. Table 4에는 환기구의 유무, 환기구의 용량 변

화, 복수 화원의 존재, 환기구 설치 대수의 변화를 고려한 6개의 시나리오가 표시되어 있다. 시나리오 No. 1은 환기구가 없는 경우, 시나리오 No. 2와 No. 3는 각기 용량 180 m³/s와 220 m³/s의 환기구가 화원 직상부에 존재하는 경우, 시나리오 No. 4는 100 m 이격하여 2대의 환기구가 존재하는 경우, 시나리오 No. 5는 상호간에 100 m씩 이격하여 3대의 환기구가 존재하는 경우, 시나리오 No. 6는 추돌 사고에 의해 2대의 차량에 화재가 발생한 경우를 가정한 것이다.

화원 직상부에 존재하는 환기구가 연기의 온도 분포에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Fig. 3(b)(시나리오 No. 1)와 Fig. 4(시나리오 No. 2)를 비교해 보면 환기구가 존재함으로 인해 화원 직상부에서의 연기 최고 온도가 440°C에서 320°C로 감소함을 알 수 있다. 320°C의 연기층에서 발생하는 복사 열유속은 약 6 kW/m² 정도로 평가할 수 있기 때문에 물체가 점화되기 위한 최소 열유속인 10 kW/m² 보다 작아서 화원 부근에서 복사 열유속만으로는 화재 확산이 어렵다는 것을 알 수 있다. 500~1000(m) 지점에서의 연기 온도 분포 양상을 보면

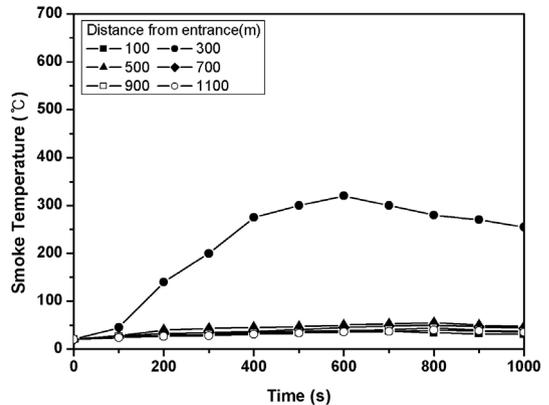


Fig. 4. Changes of smoke temperatures for scenario No. 2 with time

Table 4. Fire scenarios

Type	Distance of fire source from tunnel entrance (m)	Wind speed (m/s)	Volume flow rate of ventilation vent (m ³ /s)	Distance of ventilation vent from tunnel entrance (m)
No. 1	300	2	-	-
No. 2	300	2	180	300
No. 3	300	2	220	300
No. 4	300	2	180	300, 400
No. 5	300	2	180	300, 400, 500
No. 6	300, 310	2	180	300

수직환기구가 없는 경우 1,000초가 경과할 때까지 온도가 계속적으로 증가하는 것으로 나타나지만 수직환기구가 있는 경우 900초부터 감소하는 것으로 나타나 환기구가 온도의 감소뿐만 아니라 연기가 영향을 미치는 시간도 감소시키는 것을 알 수 있다.

환기구의 용량이 연기 온도 분포에 미치는 영향을 해석하기 위하여 Fig. 4(시나리오 No. 2)와 Fig. 5(시나리오 No. 3)를 비교하였다. 환기구의 용량이 180 m³/s에서 220 m³/s로 커짐에 따라 화원 직상부에서의 연기 온도는 320°C에서 200°C로 급격히 감소함을 알 수 있다. 200°C의 연기층에서 발생하는 복사 열유속은 약 2.5 kW/m²이고, 피부 화상이 발생하는 열유속 임계치는 4 kW/m²이기 때문에 환기구 용량을 180 m³/s에서 220 m³/s로 증가시키는 경우 연기층의 복사가 사람에게 미치는 영향은 거의 없다고 판단할 수 있다. 환기구의 설

치 대수가 연기의 온도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 Fig. 4(시나리오 No. 2), Fig. 6(시나리오 No. 4), Fig. 7(시나리오 No. 5)를 비교한 결과 환기구의 설치 대수가 1대 → 2대 → 3대로 증가함에 따라 화원 직상부에서의 최고 온도는 320°C → 245°C → 230°C로 감소하는 것으로 나타나 환기구의 설치 대수가 증가함에 따라 연기 확산 피해를 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

환기구 설치 대수의 증가가 연기 온도 감소에 미치는 영향 정도를 평가하기 위하여 환기구의 설치 대수가 0, 1, 2, 3대 있는 경우의 각 지점에서의 최고 온도를 해석한 것이 Fig. 8에 표시되어 있다. 그림을 보면 환기구로 인한 온도 감소는 화원 상부에서 가장 크고 나머지 지점들에서는 온도 감소 효과가 저하되면서 유사한 양상을 보이고 있음을 알 수 있다. 환기구 설치 대수의 영향을 살펴보면 환기구를 1대 설치할 때 온도 감소 효과가

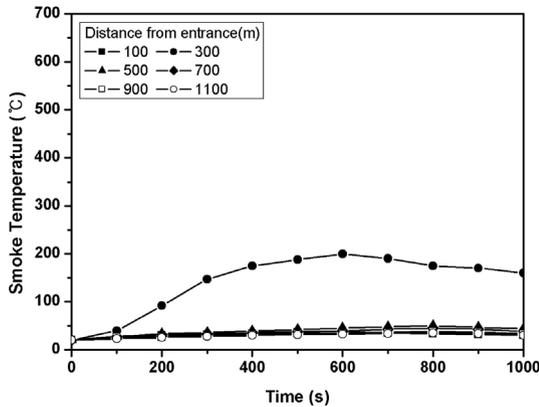


Fig. 5. Changes of smoke temperatures for scenario No. 3 with time

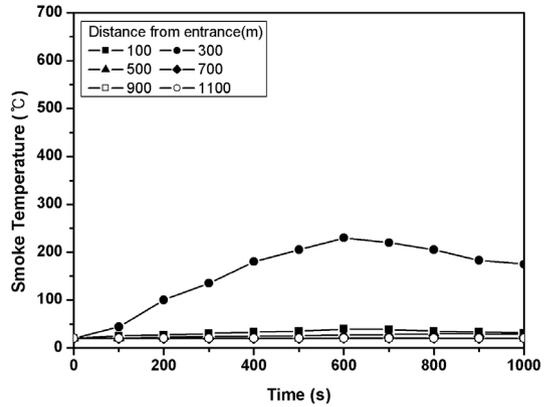


Fig. 7. Changes of smoke temperatures for scenario No. 5 with time

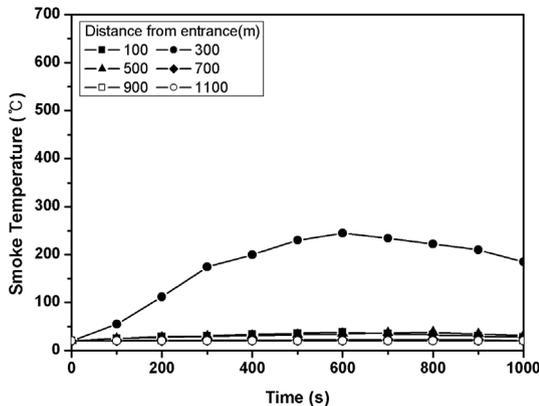


Fig. 6. Changes of smoke temperatures for scenario No. 4 with time

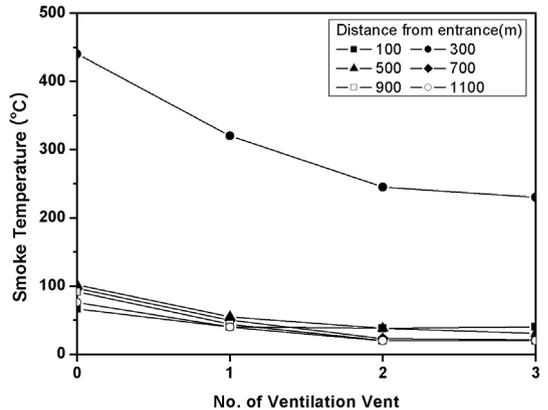


Fig. 8. Changes of smoke temperature with installation number of ventilation vent

가장 크고, 2대 이상을 설치하는 경우에는 온도 감소 효과가 거의 없음을 알 수 있다. 환기구의 설치 대수와 용량이 온도 감소에 미치는 영향을 평가하기 위한 그래프가 Fig. 9에 표시되어 있다. 그림을 보면 화원 직상부에서 연기의 온도를 낮추기 위해서는 환기구의 설치 대수를 늘리는 것 보다는 용량을 증가시키는 것이 효과적이다. 그러나 화원에서 어느 정도 이격된 지점에서 온도를 저하시키기 위해서는 환기구의 설치 대수를 늘리는 것이 유리한 것으로 나타났다.

차량이 추돌하여 2대의 차량에 화재가 발생한 경우 즉 복수 화원이 존재하는 경우를 모사한 결과가 Fig. 10에 표시되어 있다. 그림을 보면 화원 직상부에서의 최고 온도는 620°C로 나타나고, 이 온도에서의 복사 열유속은 약 20 kW/m²이기 때문에 화원 부근에 있는 일반적인 가연물은 즉시 발화 가능성이 있다는 것을 알 수 있다.

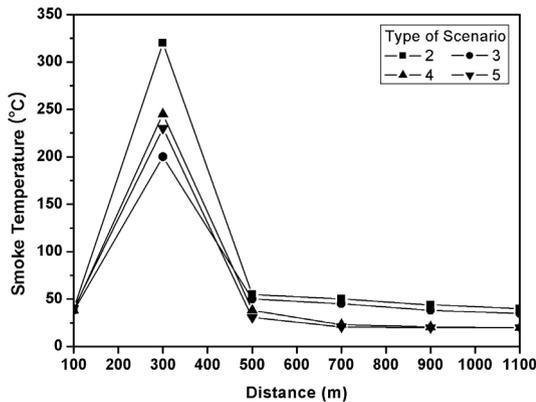


Fig. 9. Changes of smoke temperature with capacity and installation number of ventilation vent

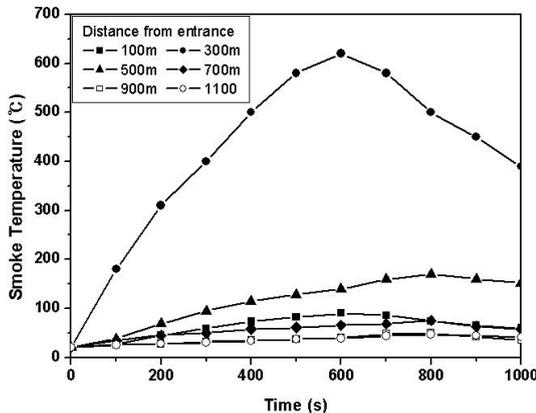


Fig. 10. Changes of smoke temperatures for scenario 6 with time

5. 결론

도로터널 건설시 환기의 목적은 평상 시 오염 물질 배출로 제한되지만 화재가 발생하는 경우 유독한 연소 생성물의 배출뿐만 아니라 연기의 온도를 저하시켜 복사에 따른 2차 화재 확산을 방지하기 위한 것이다. 본 연구에서는 6가지 시나리오를 가정하여 환기구의 존재, 환기구 설치 대수, 환기구의 용량, 복수 화원의 존재가 연기의 온도 분포 거동에 미치는 영향을 수치해석적으로 평가하였다. 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 화원 직상부에 환기구가 없는 경우와 용량 180 m³/s의 환기구가 1대, 2대, 3대 있는 경우의 연기 최고 온도는 각기 440, 320, 245, 230(°C)로 나타나 환기구가 존재하는 경우 연기 온도 감소에 효과가 큰 것으로 나타났으나, 환기구가 2개 이상이 되는 경우 연기 온도 감소 효과 증대는 크지 않으며 특히 화원에서 200 m 이상 이격된 지점에서는 환기구의 설치 대수를 2대에서 3대로 증가시켜도 온도 감소 효과는 없는 것으로 나타났다.
2. 환기구의 용량이 연기 온도 감소에 미치는 영향을 평가한 결과 용량이 각기 180 m³/s, 220 m³/s인 경우 화원 직상부에서의 연기 온도는 320, 200(°C)로 나타나 용량을 증가시키는 경우 환기구를 설치하는 것과 유사한 온도 감소 효과가 발생하는 것으로 나타났다. 또한 화원 직상부에 존재하는 연기층의 온도를 감소시키기 위해서는 용량이 작은 환기구를 다수 설치하는 것 보다 용량이 큰 환기구 1대를 설치하는 것이 효과적인 것으로 평가되었다.
3. 복수 화원의 존재가 연기 온도에 미치는 영향을 평가한 결과 화원 직상부에서의 연기 온도가 620°C 까지 상승되어 화원이 1개 있는 경우의 2배 정도로 나타나 화원 부근의 화재 피해가 커질 것으로 예상되었으나, 화원으로부터 출구쪽으로 600 m 이상 이격된 지점에서는 화원이 1개인 경우와 차이가 별로 없는 것으로 나타났다.
4. 연기층의 복사에 의해 화원의 직접적인 접촉없이도 발화가 되기 위해서는 연기층의 온도가 400°C 이상이 되어야 된다는 점을 고려하면 환기구가 없는 경우와 복수 화원이 있는 경우를 제외하고는 화원 직상부에 존재하는 연기층의 복사에 의해 화원 부근에 존재하는 가연물의 발화는 없을 것으로 예상된다.

참고문헌

1. Chang, S.H., S.W. Choi, J.W. Kwon and G.J. Bae, 2006, Evaluation of fire-induced damage to structural members in tunnels, J. of KSCE 26.3C, 219-228.
2. Kim, H.Y., H.J. Kim, K.S. Cho, J.S. Lee and K.H. Kwan, An experimental study on thermal damage and spalling of concrete lining in tunnel fire, J. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng. 23.3. 110-120.
3. Hertz, K.D. and L.S. Sorensen, 2005, Test method for spalling of fire exposed concrete, Fire Safety J. 40, 466-476.
4. Lacroix, D. and A. Haack, 2004, PIARC design criteria for resistance to fire for road tunnel structures, In Joint Issue ITA/PIARC Route-Roads on Fire Safety in Tunnels, 64-71.
5. Lee, J.S. and T.S. Ahn, 2006, Needs of fireproofing for tunnel, J. of KSMI 10.6, 6-11.
6. Lonnermark, A., 2005, On the characteristics of fires in tunnels, Ph D. Thesis, Lund University, 3-11.
7. MLTM, 2009, Guideline for installation of safety facility in road tunnel, 70.
8. MLTM, 2011, Status reference for road bridge and tunnel. NEMA, 2011, National audit for 2011.
9. NFPA, 2011, NFPA 502 : Standard for road tunnels, bridges, and other limited access highways, NFPA, 24-29.
10. NIST, 2007, Fire dynamics simulator (Version 5) : User's guide, NIST, 3-5.
11. OO E & C, 2010, Design report for OO tunnel.
12. Quintiere, J.G, 1998, Principles of fire behavior, Delmar Publishers, 60-62.
13. Shin, H.S., 2011, Major technical challenges for construction of submarine tunnel, Proc. 2011 KSRM Fall Symposium, KSRM, 35-43.
14. Thunderhead Eng., 2010, PyroSim User Manual, Thunderhead Eng., 7.
15. Won, J.P., M.J. Choi, C.I. Jang and S.W. Lee, 2009, Applied time-temperature curve for safety evaluation in the road tunnel by fire, J. of KSCE 29.5A, 551-555.



윤용균

1985년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1987년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1992년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사

Tel: 043-649-1318

E-mail: yoon63@semyung.ac.kr

현재 세명대학교 소방방재학과 교수



주은혜

2009년 세명대학교 소방방재학과 소방방재학사
2012년 세명대학교 대학원 환경안전시스템공학과 공학석사

Tel: 043-649-7379

E-mail: jeh0715@nate.com

현재 세명대학교 대학원 소방방재공학과 박사과정 재학중