

# 터널 화재 시 열부력을 고려한 제연용 제트팬 용량산정에 관한 기초 연구

이호형<sup>1\*</sup> · 최판규<sup>2</sup> · 조종복<sup>3</sup> · 이승철<sup>4</sup> · 이창우<sup>5</sup>

<sup>1</sup>정회원, (주)주성지앤비 대리

<sup>2</sup>정회원, (주)주성지앤비 팀장

<sup>3</sup>정회원, (주)삼보기술단 부장

<sup>4</sup>정회원, 강원대학교 교수

<sup>5</sup>정회원, 동아대학교 교수

## A fundamental study on the jet fan capacity for smoke control considering thermal buoyancy force in tunnel fires

Ho-Hyung Lee<sup>1\*</sup> · Pan-Gyu Choi<sup>2</sup> · Jong-Bok Jo<sup>3</sup> · Seung-Chul Lee<sup>4</sup> · Chang-Woo Lee<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Assistant Manager, Ju-sung G&B Inc.

<sup>2</sup>Team Leader, Manager, Ju-sung G&B Inc.

<sup>3</sup>Director, Sambo Engineering Co., Ltd.

<sup>4</sup>Professor, Kangwon National University

<sup>5</sup>Professor, Dong-A University

\*Corresponding Author : Ho-Hyung Lee, hhlee@gnbeng.com

### Abstract

As a result of the recent revision of the ‘Guideline for Installation and Management of Fire Prevention Facility in Road Tunnels’, the thermal buoyancy has to be taken into account when calculating the capacity of jet fans for smoke control in tunnel fires. However, there is no detailed methodologies for considering thermal buoyancy, so further study is needed. In this study, the thermal buoyancy in the tunnel is calculated by 3-D numerical simulation to consider the thermal buoyancy in case of fire in tunnels, and the relationship between heat buoyancy and vehicle drag. And the method of calculating the capacity of the jet fan for smoke control in tunnels. According to the analysis results, heat buoyancy acts as a resistance force in the case of a down-slope tunnel, and the pressure rise of jet fan for smoke control is not simply determined by the value of heat buoyancy at the entrance of the tunnel and the value of the vehicle drag at the exit. And it is analyzed that it is necessary to carry out a comprehensive review according to the location of the fire vehicle in tunnels.

**Keywords:** Road tunnel, Thermal buoyance force, Vehicle drag force, Simulation, Jet fan for smoke control

### OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and  
Underground Space Association  
20(2)501-511(2018)  
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2018.20.2.501>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received February 13, 2018

Revised February 23, 2018

Accepted February 28, 2018



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution

Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2018, Korean Tunnelling and Underground Space Association

[www.kci.go.kr](http://www.kci.go.kr)

## 초 록

최근 ‘도로터널 방재시설 설치 및 관리지침’의 개정으로 인해 터널 내 제연용 제트팬의 용량 산정 시에는 열부력을 고려하도록 규정하고 있다. 그러나 열부력을 고려하는 세부방법론에 대한 규정이 없어, 이에 대한 세부적인 추가 연구가 필요한 실정이다. 본 연구에서는 터널 내 화재 시 열부력을 고려하기 위하여 3차원 수치해석 시뮬레이션을 수행하여 터널 내 열부력을 계산하고, 화재차량의 진행방향에 따라 열부력과 차량항력의 관계, 즉, 화재차량의 위치에 따른 터널 내 제연용 제트팬 용량 산정방법에 대하여 검토를 수행하였다. 분석결과에 따르면, 하향경사 터널의 경우에는 열부력이 터널 내 저항력으로 작용하며, 터널 내 화재연기를 제연하기 위해 필요한 제연팬의 송압력은 단순히 터널 입구부의 열부력 값과 출구부의 차량항력값에 의해 단순히 결정되지 않으며, 터널 내 화재차량의 위치에 따라 종합적인 검토가 필요한 것으로 분석되었다.

**주요어:** 도로터널, 열부력, 차량항력, 수치해석, 제연용 제트팬

## 1. 서론

최근 터널 굴착과 시공방법의 발달로 산악지형은 물론 도심지 터널에서도 터널 연장은 점차 장대화되고 있으며, 이에 따라 터널에서 발생하는 긴급 상황에 대처하기 위하여 기존의 방재시설별 대책방안을 지속적으로 수정 및 보완하여 적용하고 있다. 그 중 하나가 터널 내 화재가 발생한 경우 피난자들의 안전한 피난환경 확보를 목적으로 설치되는 제트팬 등의 제연설비이다. 최근 개정된 국토교통부의 “도로터널 방재시설 및 설치관리지침 (2016.8)”에서는 터널 내 화재 시 설계화재강도에 따른 임계풍속을 유지하기 위한 제연용 제트팬을 설치하도록 하고 있으며, 제연용 제트팬의 용량은 터널 제원, 터널 내 정체차량에 의한 환기저항, 자연풍에 의한 환기저항, 열부력에 의한 환기저항 등을 고려하여 결정하게 된다(MOLIT, 2016).

그러나 이중 터널 내 정체차량에 의한 환기저항은 고려할 수 있는 수식을 명확하게 제시하고 있고, 자연풍에 의한 환기저항은 자연풍을 일정수준(2.5 m/s)으로 가정하여 적용하도록 하고 있다. 반면, 열부력에 의한 환기저항에 대한 고려방안에 대해서는 명확히 제시하지 못하고 있는 실정이다. 국외 노르웨이, 스위스, 오스트리아 등에서는 이러한 열부력에 의한 환기저항을 고려하기 위하여 다양한 실험실험은 물론 그에 따른 실험식을 제시하는 등 이에 대한 연구(NRTD, 2010; FDETEC, 2008; ARARRT, 2008)가 활발한 반면, 국내의 경우 이에 대한 연구가 미흡한데, Yoo and Shin (2013)이 제시한 터널 내 화재 시 열부력에 의한 저항력이 제연용 제트팬 용량에 미치는 영향에 관한 연구가 유일하다.

따라서 본 연구에서는 기존 선행연구의 연장선상에서 터널 내 화재 시 열부력을 고려한 제연용 제트팬 용량 산정에 대하여 3차원 수치해석을 통하여 열부력을 계산하고, 이를 고려한 제연용 제트팬 용량 산정방법에 대하여 검토하였다.

## 2. 열부력 수치해석

### 2.1 열부력 개요

터널 화재 시 발생하는 열부력이란 외부공간과 화재공간에서의 밀도차이와 부력이 작용하는 고도차이에 의해 발생하는 것으로서, 터널의 경사도에 따라서 순방향 혹은 역방향으로 승압력(환기력 혹은 저항력)이 작용하게 된다. 터널 화재 시 열부력에 의한 환기저항은 일반적으로 외기의 공기밀도와 화재구역의 공기밀도의 차, 중력가속도, 부력이 작용하는 고도차를 이용해 식 (1)과 같이 산출된다.

$$\Delta p = (\rho_{out} - \rho_{fire})g\Delta H \quad (1)$$

여기서,  $\rho_{out}$ : 외기의 밀도( $\text{kg/m}^3$ ),  $\rho_{fire}$ : 화재구역의 공기밀도( $\text{kg/m}^3$ ),  $g$ : 중력가속도( $\text{m/s}^2$ ),  $\Delta H$ : 부력이 작용하는 고도차(m)이다.

Fig. 1에는 열부력의 작용에 대한 개요도를 나타내었다. 화재차량이 터널 중앙부에 위치한다고 가정하였을 때, 차량진행방향이 상향경사인 경우 차량진행방향으로 작용하는 환기력과 열부력이 이동하는 방향은 동일하기 때문에, 열부력은 제연용 제트팬 용량 산정시 승압력(환기력)으로 작용하게 된다. 한편, 차량진행방향이 하향경사인 경우 차량진행방향으로 작용하는 환기력과 열부력이 작용하는 방향은 반대이기 때문에, 열부력은 제연용 제트팬 용량 산정시 저항력으로 작용하게 된다. 터널 화재 시 작용하는 열부력의 크기는 화재규모, 화재차량의 위치, 터널 연장, 구배, 차량진행방향 등의 영향을 받아 결정되게 된다.

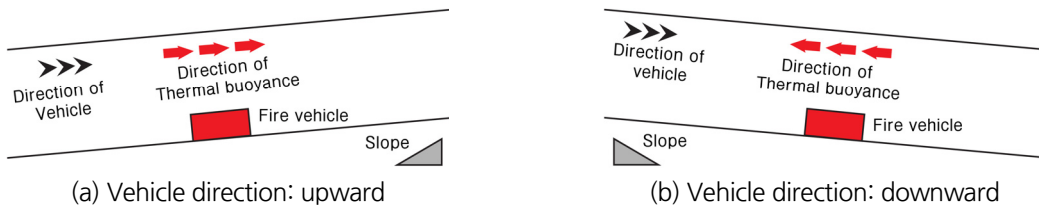


Fig. 1. Diagram of thermal buoyance

### 2.2 열부력 산출

본 연구에서는 열부력을 산출하기 위하여 비정상상태의 3차원 수치해석을 수행하였으며, 해석 대상은 일반적으로 설계되는 2차로 터널로 선정하였다(내공단면적:  $75 \text{ m}^2$ , 대표직경:  $8.8 \text{ m}$ ). 열부력을 산출하기 위하여 해석 대상의 연장을  $1, 2, 3 \text{ km}$ 로 구분하였고, 경사도 역시  $1.0, 1.5, 2.0\%$ 로 구분하여 수치해석을 수행하였다. 화재차량의 제원은 한국도로공사의 “도로터널 제연용 제트팬 산정기준 개선연구”에서 제시된 값을 인용하여 길이  $10.77 \text{ m}$ , 폭  $2.45 \text{ m}$ , 높이  $3.12 \text{ m}$ 로 설정하였으며(Korea Expressway Corporation, 2012), 화재차량의 위치는 터

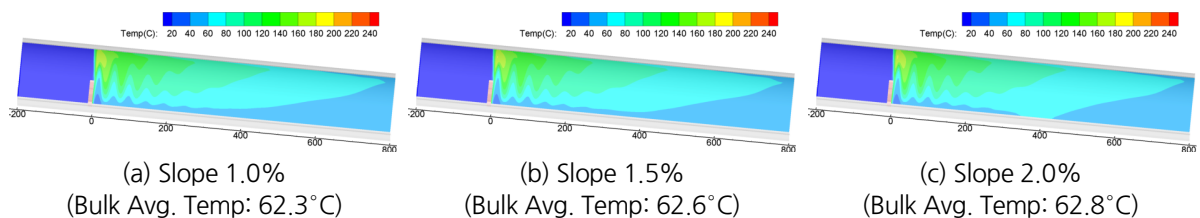
널 입구부로부터 200 m를 이격시켰다. 또한 발열량은 Ultrafast 급 화재로 최대 발열량이 20 MW가 되도록 하였으며, 이때 연기발생량은 80 m<sup>3</sup>/s로 설정하였다(MOLIT, 2016).

또한 터널 벽체에서의 열전달을 모사하기 위하여 벽면에 Non-slip 조건과 콘크리트 라이닝을 형성하였고, 라이닝 외기의 온도조건은 15°C의 등온조건을, 터널 입구부에서의 유입풍속 및 유입공기 온도는 각각 2.5 m/s, 15°C로 설정하였다. 이에 대한 내용을 Table 1에 정리하여 나타내었다.

**Table 1.** Boundary condition

Contents	Input
Length	1 km, 2 km, 3 km
Slope	1.0%, 1.5%, 2.0%
HRR (Heat Release Rate)	20 MW
SPR (Smoke Production Rate)	80 m <sup>3</sup> /s
State condition	Unsteady-state condition
Flow condition	Incompressible ideal gas
Turbulence model	Standard k- ε
Concrete lining inside	Coupled heat transfer condition
Inflow velocity, Temperature	2.5 m/s, 15°C
Outside temperature	15°C

Fig. 2~4에는 수치해석 중 화재발생 1,200초 이후의 연장과 경사에 따른 온도분포와 그에 따른 터널 내 온도분포를 나타내었고, Fig. 5~7에는 차량진행방향이 하향방향인 경우의 시간에 따른 터널 내 평균온도와 그에 따른 열부력에 의한 환기저항을 압력손실로 나타내었다. Fig. 2, 3에 나타난 연장 1 km, 2 km의 경우 평균온도의 최대값은 각각 약 62.3~62.8°C, 50.2~50.5°C로 나타났으며, Fig. 4에 나타난 연장 3 km의 경우 평균온도의 최대값은 약 40.5~40.8°C로 나타나 터널의 연장이 증가될수록 터널 내 평균온도는 낮아지는 것을 확인 할 수 있다. 이는 터널연장이 짧은 경우에는 발생된 열기류가 터널 출구로 유출되기 때문에 시간이 경과하면 터널내부에 상대적으로 온도가 높게 나타나기 때문이며, 반대로 터널연장이 길어질수록 열기류의 누출량이 작거나 누출되지 않기 때문에 가열되지 않은 공기량이 연장이 짧은 경우보다 상대적으로 많이 때문으로 분석된다.



**Fig. 2.** Temperature contour (length: 1 km)

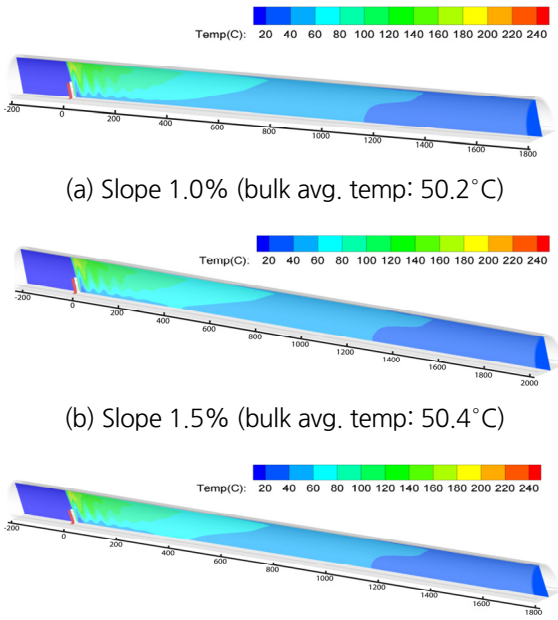


Fig. 3. Temperature contour (length: 2 km)

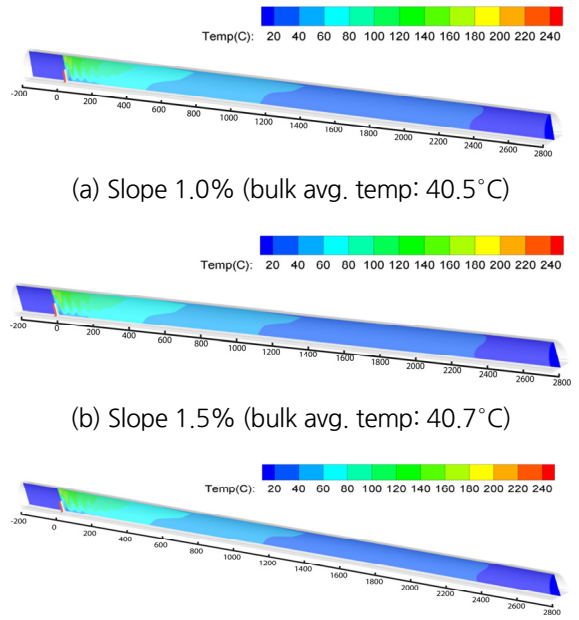
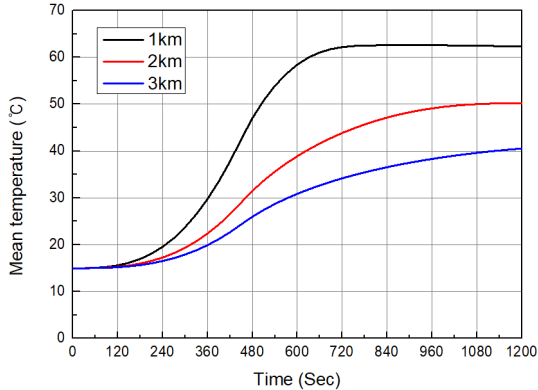
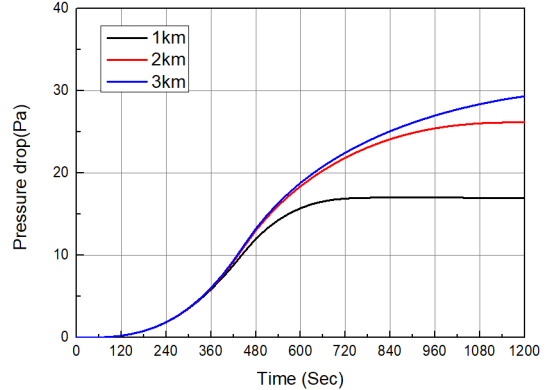


Fig. 4. Temperature contour (length: 3 km)



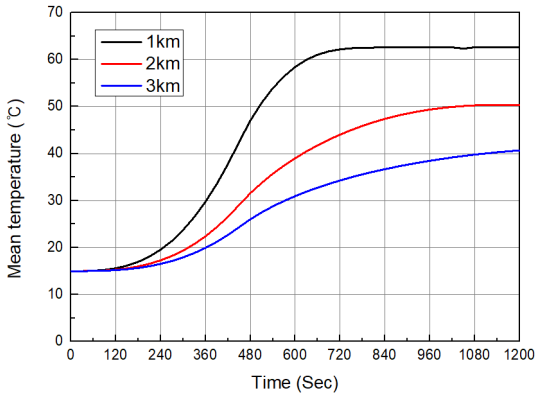
(a) Mean temperature



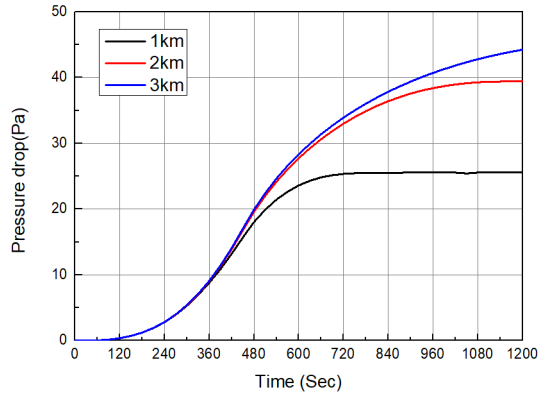
(b) Pressure drop by thermal buoyancy

Fig. 5. Mean temperature & pressure drop by thermal buoyancy (slope: 1.0%)

또한 Fig. 5~7에 나타난 열부력에 의한 환기저항은 연장이 1 km, 2 km의 경우 일정 부분 증가하다가 일정한 값을 나타내고 있으며, 연장 3 km의 경우 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다. 이는 전술한 이유와 같이 가열된 열기류가 터널 출구로 유출되기 때문이다. 즉, 연장이 1 km인 경우 화재발생 약 720초 이후 시간이 경과하여도 열부력에 의한 환기저항은 일정하게 유지된다는 것을 의미한다. 이러한 경향은 모든 경사에서 동일하게 나타나고 있다.

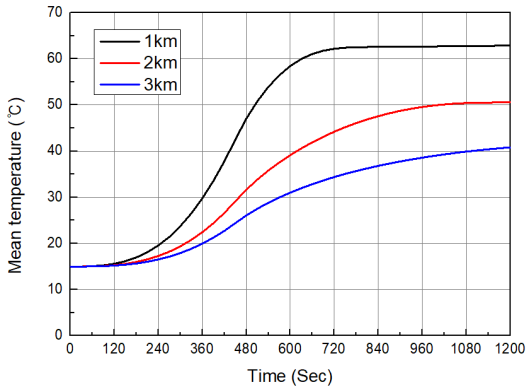


(a) Mean temperature

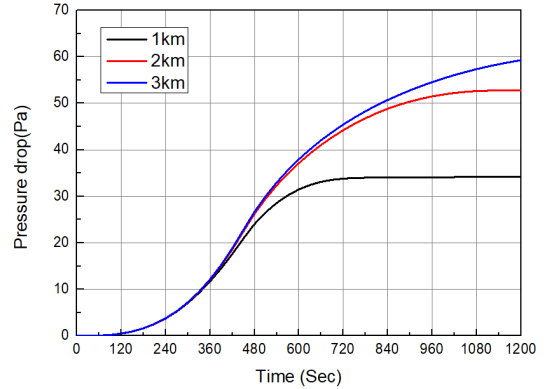


(b) Pressure drop by thermal buoyance

Fig. 6. Mean temperature & pressure drop by thermal buoyance (slope: 1.5%)



(a) Mean temperature



(b) Pressure drop by thermal buoyance

Fig. 7. Mean temperature & pressure drop by thermal buoyance (slope: 2.0%)

### 3. 화재 시 열부력과 차량항력과의 관계

#### 3.1 열부력 효과에 따른 승압력 저하량 계산

터널 화재 시 화재 차량의 위치에 따라서 열부력에 의한 환기저항(열부력)과 차량에 의한 환기저항(차량항력)이 달라진다. 즉, 차량에 의한 환기저항은 화재위치가 터널출구부로 갈수록 터널 내 정체차량의 증가로 증가하며, 열부력에 의한 환기저항은 화재위치가 터널 출구부로 갈수록 열기류가 터널출구로 유출되기 때문에 감소하게 된다. 앞에서 분석된 열부력을 바탕으로 열부력 효과에 따른 승압력 저하량을 살펴보기 위해, 차량항력이 최대로 나타날 수 있는 시속 10 km/hr에 대하여 필요한 제연용 제트팬 대수를 산출하였다. 화재 시물레이션에 효율적인 분석을 위하여 터널연장을 상대길이의 개념을 적용하였다. 본 연구에서 적용된 상대길이는 터널의 연장을 1.00로 가정하여 터널 입구는 0.00, 중앙부는 0.50, 출구는 1.00을 의미하는 것으로 적용된 상대길이에 따른 화재차량의

위치에 대한 개요도를 Fig. 8에 나타내었다. 또한 열부력 효과에 따른 승압력 저하량 계산을 위하여 국토교통부의 “도로설계편람”(MOLIT, 2011) 상에 예제로 제시된 터널과 교통량 제원을 적용하였고, 상세한 내용은 Table 2에 나타내었다.



Fig. 8. Location of fire vehicle to relative length

Table 2. Tunnel and traffic data

Contents	Input	Diagram								
Length (km)	1, 2, 3									
Area (m <sup>2</sup> )	75									
Hydraulic diameter (m)	8.8									
Slope (%)	1.0, 1.5, 2.0									
Lane	2									
Contents	Passenger car	Bus	Truck	AADT (veh./day)	HGV (%)					
	Gasoline	Diesel	Small	Large	Small	Medium	Large	Special		
Traffic (ea)	18,040	12,026	3,069	3,098	211	5,475	1,789	866	44,574	25.2
Component ratio (%)	40.5	27.0	6.9	7.0	0.5	12.3	4.0	1.9	100.0	

Table 3에는 열부력 효과에 따른 승압력 저하량을 계산하여 열부력이 최대로 나타나는 연장 3 km에 대하여 차량진행방향에 따른 필요한 제연용 제트팬 대수를 나타내었다.

경사도가 1.0%에서는 현행기준에 따라 화재차량의 위치를 터널 출구부에 위치시켜 차량항력이 최대이고, 열부력을 고려하지 않았을 경우 필요한 제연용 제트팬 대수는 9대로 나타났다. 그러나 상대길이(0.00, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00)에 따른 열부력과 차량항력을 고려한 경우, 상대길이에 따른 필요한 제연용 제트팬 대수는 상향방향인 경우 최소 2대에서 최대 6대의 제트팬 감소가 예상된다. 이러한 이유는 상대길이 0.00인 경우 차량항력은 존재하지 않고, 열부력은 터널 내 환기력으로 작용하기 때문에 기존 필요한 환기력에서 감소되기 때문으로 분석된다. 한편 하향방향이 경우 필요한 제연용 제트팬 대수는 각각 7, 8, 9, 9, 9대로 나타남에 따라 추가적인 제연용 제트팬이 필요하지 않는 것으로 나타났다.

**Table 3.** The number of jet fans for smoke control according to relative length, thermal buoyance

Slope: 1.00%		Up -ward	Down -ward	Slope: 1.50%		Up -ward	Down -ward	Slope: 2.00%		Up -ward	Down -ward
Non considered thermal buoy.		9 ea		Non considered thermal buoy.		9 ea		Non considered thermal buoy.		9 ea	
Considered thermal buoy.	Relative Lr. (0.00)	3 ea	7 ea	Considered thermal buoy.	Relative Lr. (0.00)	2 ea	8 ea	Considered thermal buoy.	Relative Lr. (0.00)	1 ea	9 ea
	Relative Lr. (0.25)	5 ea	8 ea		Relative Lr. (0.25)	4 ea	9 ea		Relative Lr. (0.25)	3 ea	10 ea
	Relative Lr. (0.50)	6 ea	9 ea		Relative Lr. (0.50)	5 ea	10 ea		Relative Lr. (0.50)	4 ea	10 ea
	Relative Lr. (0.75)	7 ea	9 ea		Relative Lr. (0.75)	7 ea	10 ea		Relative Lr. (0.75)	6 ea	11 ea
	Relative Lr. (1.00)	9 ea	9 ea		Relative Lr. (1.00)	9 ea	9 ea		Relative Lr. (1.00)	9 ea	9 ea

반면, 경사도가 1.5%인 경우 현행기준과 열부력을 고려하지 않은 경우 동일한 9대의 제연용 제트팬이 필요한 것으로 나타났으나, 상대길이에 따른 열부력과 차량항력을 고려한 경우, 상향방향에서는 최소 2대에서 7대의 제트팬 감소가 예상되고, 하향방향에서는 최소 8대에서 10대의 제연용 제트팬이 필요한 것으로 나타남에 따라 1대의 추가적인 제연용 제트팬이 필요한 것으로 분석되었다.

경사도가 2.0%인 경우 현행기준과 열부력을 고려하지 않은 경우 9대의 제연용 제트팬이 필요한 반면, 상대길이에 따른 열부력과 차량항력을 고려한 경우, 상향방향에서는 최소 3대에서 최대 8대의 제트팬의 감소가 예상되고, 하향방향에서는 9대에서 11대의 제연용 제트팬이 필요함에 따라 2대의 제연용 제트팬의 증설이 요구되는 것으로 나타났다. 즉, 차량진행방향이 상향방향인 경우 열부력은 터널 내 필요 환기력에 감소요인으로 작용되고, 하향방향인 경우 터널 내 환기력에 증가요인으로 작용하는 것을 나타내고 있다.

상대길이에 따른 열부력과 차량항력을 고려한 경우 경사도 1.0%와 1.5%인 경우 현행기준과 열부력을 고려하지 않았을 때 보다 필요한 제트팬의 대수가 감소하는 것으로 나타났는데, 이는 현행기준의 경우 화재차량을 터널 출구에 위치시킴에 따라 차량항력을 최대로 가정하지만, 상대길이에 따라 적용할 경우 차량항력 역시 화재차량의 위치에 따라 변화하기 때문으로 판단된다.

한편, 열부력에 의한 환기저항은 상대길이가 길어질수록 높아지는 것으로 검토되었으나, 제연용 제트팬 대수의 산정결과 최대 필요한 제연용 제트팬의 대수는 상대길이가 0.75일 때인 것으로 나타났다. 이러한 이유는 화재차량의 위치에 따라 열부력과 차량항력이 다르게 작용하기 때문으로써 다음 절에서 보다 자세하게 살펴보았다.



### 3.2 화재차량위치에 따른 열부력과 차량항력의 관계

Fig. 9에는 본 연구에서 수행한 연구결과 중 차량진행방향이 하향경사이고, 차량항력의 관점에서 최악조건인 주행속도 10 km/hr에 대하여 연장 3 km를 대상으로 경사도에 따른 열부력과 차량항력을 나타내었다.

터널 내 화재에 따른 열부력은 화재차량의 위치가 터널 입구부에 가까울수록 크게 나타나고, 화재차량이 출구부에 위치할수록 감소되어 터널 출구부에 위치할 경우 0에 가까워지는 것으로 나타났다. 반대로 차량항력은 화재차량의 위치가 터널 입구부에 가까울수록 0에 가까워지며, 터널 출구부에 가까울수록 점차 증가하는 것으로 나타났다.

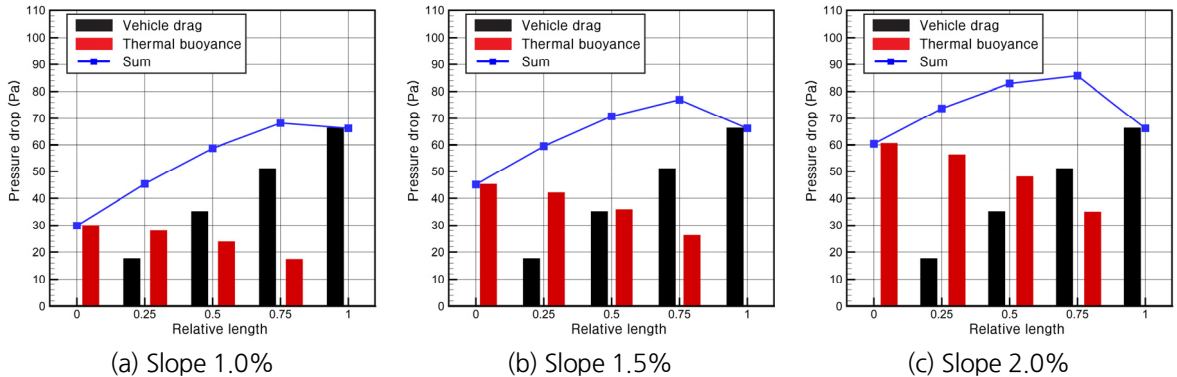


Fig. 9. Relationship thermal buoyancy force and vehicle drag force

한편, 차량진행방향이 하향경사인 경우, 터널 내 화재 시 발생하는 열부력은 터널 내 환기력에 저항력으로 작용하고 차량항력 역시 터널의 상대길이에 따라 비례적으로 증가되기 때문에 터널 내 화재 시 제연용 제트팬의 용량 산정 시 열부력과 차량항력을 모두 고려하기 위해서는 두 인자를 합해야 한다. 즉, 두 인자의 합은 화재차량이 터널 입구부에 가까울수록 열부력에 절대적인 영향을 받고, 터널 출구부에 가까이 위치할수록 차량항력에 절대적인 영향을 받는 것을 알 수 있다.

또한 상대길이가 0.75에 화재차량이 위치한 경우 두 인자의 합은 가장 큰 값을 나타내고 있다. 이는 열부력과 차량항력의 합이 단순히 터널 입구부나 출구부에 위치할수록 증가되는 것이 아니라, 화재차량의 위치에 따라 변화된다는 것을 나타내고 있으며, 터널 내 화재 시 열부력을 고려할 경우 화재차량의 위치에 따라 고려되어야 하는 값이 달라야 한다는 것을 나타내고 있다. 즉, 화재차량이 터널 내 상대길이 0.00에 위치한 경우 화재 시 제연을 위한 환기력은 열부력만 고려하면 되고, 터널 내 상대길이 1.00에 위치한 경우 차량항력만을 고려하면 되지만, 그 중간에 위치한 경우 열부력과 차량항력 모두를 고려해야 한다는 의미이다.

본 연구에서는 터널연장 1~3 km, 경사도 1~2% 그리고 표준설계 화재강도인 20 MW에 대하여 한정적인 연구를 수행하였지만, 화재강도, 터널연장 그리고 경사도 등 관련 고려인자가 변화될 경우에 대하여 다양한 관점에서 지속적인 연구가 필요하며, 향후 합리적인 정립이 필요한 부분이라 사료된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 터널연장과 경사도에 따라 3차원 수치해석을 통해 열부력을 산출하고, 화재차량의 위치에 따른 열부력과 차량항력의 관계를 고찰하여 터널 내 화재 시 열부력을 고려한 제연용 제트팬 용량 산정에 관하여 연구를 수행하였다. 이상의 연구내용을 요약하면 다음과 같다.

1. 터널 내 화재발생시 차량의 진행방향이 하향경사인 경우, 발생된 열부력은 터널 내 제연에 필요한 환기력에 저항력으로 작용하고, 차량의 진행방향이 상향경사인 경우 발생된 열부력은 승압력(환기력)으로 작용한다.
2. 본 해석결과, 연장 3 km와 경사도 2.0%를 기준으로 화재차량의 위치에 따른 열부력과 차량항력을 고려한 화재 시 제연용 제트팬의 설치대수는 하향경사일 경우, 최대 11대로 현행 기준에 비하여 2대의 제트팬 대수의 증가가 요구되는 것으로 분석되었다. 반면, 상향경사일 경우는 환기력으로 작용하기 때문에 방재적 관점에서 제트팬 대수를 감하지 않는 것이 타당한 것으로 판단된다.
3. 차량진행방향이 하향경사로 진행 할 경우, 터널 내 화재에 따른 화재연기를 제연하기 위해 필요한 환기력은 단순히 터널 입구부의 열부력 값, 출구부의 차량항력 값으로 단순히 결정할 수는 없으며, 화재차량의 위치에 따라 종합적인 분석이 필요한 것으로 판단된다. 그러나 실무적인 관점이 모든 터널 내 화재위치를 고려하여 3차원 수치해석을 수행하기에는 시간적, 경제적 비용이 크에 따라 합리적인 기준의 제시가 필요해 보인다.
4. 터널 내 열부력에 대하여 다양한 관점에서 지속적인 연구가 필요하며, 향후 합리적인 설계기준의 정립이 필요한 것으로 분석된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 2017년 건설기술연구사업의 ‘대심도 복층터널 설계 및 시공 기술개발(16SCIP-B089409-03)’ 연구단을 통해 수행되었습니다.

## References

1. Austrian Research Association for Roads, Rail and Transport (FSV) (2008), Guidelines and regulations for road construction (RVS 09.02.21).
2. Federal Department of Environment, Transport, Energy and Communications (2008), “Luftung der Strassentunnel Systemwahl; Dimensionierung und Ausstattung”, ASTRA 13001.
3. Korea Expressway Corporation (2012), A study on the improvement of the calculation criteria for the jet fan in road tunnels, pp. 120-141.
4. MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport) (2011), Road design manual (617. Ventilation), pp. 617-28 - 617-35.

5. MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport) (2016), Guidelines for fire prevention equipment's installation and management in road tunnels, pp. 56-57.
6. The Norwegian Road and Transport Department (2010), Road Tunnels (Handbooks).
7. Yoo, J.O., Shin, H.J. (2013), "A numerical study on effects of thermal buoyancy force on number of jet fans for smoke control", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, No. 15, Vol. 3, pp. 301-310.