

도로터널 화재시 열부력이 제연용 제트팬 댓수에 미치는 영향에 대한 해석적 연구

유지오^{1*} · 신현준²

¹정회원, 신홍대학교 건축설비 설계과 교수

²정회원, 한국건설기술 연구원, 연구위원

A numerical study on effects of thermal buoyance force on number of jet fans for smoke control

Ji-Oh Yoo^{1*}, Hyun-Jun Shin²

¹Professor, Department of Building Mechanical System, Shin Heung College

²Research Fellower, KICT

ABSTRACT: Jet fans are installed in road tunnels in order to maintain critical velocity when fire occurs. Generally the number of jet fans against fire are calculated by considering critical velocity and flow resistance by wall friction, vehicle drag force, thermal buoyance force and natural wind. In domestic case, thermal buoyance force is not considered in estimating the number of jet fans. So, in this study, we investigated the pressure loss due to the thermal buoyance force induced by tunnel air temperature rise and the impact of thermal buoyance force on the number of jet fans by the numerical fire simulation for the tunnel length(500, 750, 1000, 1500, 2000, 3500m) and grade (-1.0, -1.5, -2.0%).

Considering the thermal buoyance force, number of jet fans have to be increased. Especially in the case of 100MW of heat release rate, the pressure loss due to thermal buoyance force exceed the maximum pressure loss due to vehicle drag resistance, so it is analyzed that number of 2~11 jet fans are needed additionally than current design criteria. Thus, in case of estimating the number of jet fans, it must be considered of thermal buoyance force induced tunnel air temperature rise by fire.

Keywords: Thermal buoyance force, Jet fans, Tunnel fire

초 록: 현재 도로터널에는 화재시 임계풍속을 유지할 수 있도록 제트팬을 설치하고 있으며, 제트팬 댓수는 임계풍속을 유지하기 위한 유동저항, 자연풍에 의한 환기저항, 열부력에 의한 환기저항을 고려하여 산정한다. 그러나, 국내의 경우, 제트팬 댓수 산정시 열부력은 고려하지 않고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 열부력이 제트팬 댓수에 미치는 영향을 검토하기 위해서 터널연장(500, 750, 1000, 1500, 2000, 3500 m) 및 경사도(-1.0, -1.5, -2.0%)를 변수로 하여 화재성장곡선에 따른 비정상상태의 수치 시뮬레이션을 수행하였으며, 열기류의 평균온도 및 열부력에 의한 압력손실을 검토하여 열부력이 제트팬 댓수에 미치는 영향을 검토하였다. 이에 본 연구에서는 화재로 인한 열부력을 고려하는 경우에 제트팬 댓수의 증가가 필요하며, 특히, 설계화재강도를 100 MW로 하는 경우에는 본 해석조건인 모든 범위에서 열부력에 의한 압력손실이 차량저항에 의한 압력손실의 최대치보다 증가하며, 현행설계기준을 적용하는 경우보다. 최소 2~11대의 제트팬 대수의 증가가 필요한 것으로 분석되었다. 따라서 제연용 제트팬 용량 산정시 열부력에 대한 고려가 반드시 필요한 것으로 나타났다.

주요어: 열부력, 제연용 제트팬, 도로터널 화재

*Corresponding author: Ji-Oh Yoo

E-mail: geotunnel@hanmail.net

Received April 29, 2013; Revised May 14, 2013;

Accepted May 21, 2013

1. 서론

도로터널에는 화재에 대비하여 대피자의 안전확보를 목적으로 제트팬 등 제연설비를 설치하고 있다. 우리나라는 국토부에서 제정한 도로터널 방재시설 설치 및 관리지침(국토해양부, 2009)에 의거하여 터널에 제연용 제트팬을 설치하고 있으며, 제연용 제트팬 뗏수(용량)는 설계화재강도에 따른 임계풍속을 구하고 이 풍속을 유지하기 위해서 필요한 제트팬 승압력을 구하여 뗏수를 산정한다.

제연을 위해 필요한 제트팬 승압력은 일반적으로 환기저항의 총합으로 벽면마찰에 의한 유동저항, 외부 자연풍에 의한 유동저항, 터널내 정체된 차량의 형상저항의 합으로 고려하고 있다. 유럽 대부분의 국가는 제연에 필요한 제트팬 뗏수 산정시 열부력에 의한 저항을 고려하여 유동저항의 총합을 구하고 있다. 그러나, 우리나라는 열부력에 의한 환기저항을 자연풍에 의한 환기저항에 포함되는 것으로 하고 있으나, 열부력에 의한 환기저항과 자연풍에 의한 환기저항을 정확하게 예측하는 것은 매우 어렵다. 따라서 열부력 및 자연풍에 의한 환기저항의 적정성여부를 평가하는 것은 곤란한 실정이다. 특히, 죽령터널의 경우에는 실제 운영과정에서 자연풍을 평가한 결과, 역풍이 4.5m/s 이상 작용하는 것으로 평가되고 있다. (한국도로공사, 2004) 따라서 자연풍에 의한 유동저항을 고려하기 위해서 현행설계에서 적용하고 있는 역풍 2.5 m/s 기준은 평상시 열부력과 화재시 온도상승에 의한 열부력을 포함하는 것으로 평가하기에는 과소한 측면이 있으며, 이로 인해 제트팬 용량을 과소하게 산정할 우려가 있는 것으로 평가된다.

화재시 온도상승에 의한 열부력은 상향경사 방향으로 작용하기 때문에 상향경사 터널에서는 열부력이 승압력으로 작용하며, 하향경사 터널에서는 환기저항으로 작용하게 된다. 따라서 열부력에 대한 고려는 상향경사의 터널에서는 제연용 제트팬 뗏수를 감소할 수 있는 요인이 되며, 하향 경사터널에서는 증가시키

는 요인이 된다. 그러나, 터널 화재시 열부력에 대한 검토는 실험결과 및 연구결과가 제한되어 있어 이를 기준화하지 못하고 있으며, 현 설계기법에서는 이를 고려하지 못하고 있는 실정이다.

이에 본 연구에서는 터널 화재시 열부력에 의한 저항력이 제연용 제트팬 용량에 미치는 영향을 검토하기 위하여 터널연장 및 경사도를 변수로 하여 화재성장곡선에 따른 비정상상태의 수치시물레이션을 수행하여 열부력에 대한 고찰을 수행하고 열부력에 의한 저항이 제연용 제트팬 뗏수에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 열부력

터널 화재시 터널내 기류는 환기저항과 제트팬에 의한 승압력이 평형을 유지하는 상태에서 결정된다. 압력평형식은 식 (1)과 같다.

$$N_j \cdot \Delta P_j = \Delta P_r + \Delta P_m + \Delta P_t \quad (1)$$

여기서, N_j : 제트팬 뗏수, ΔP_j : 제트팬 1대의 승압력, ΔP_r : 벽면마찰에 의한 압력저항, ΔP_t : 정체 차량의 형상저항, ΔP_m : 자연풍에 의한 환기저항이다.

식 (1)에서 자연환기저항은 일반적으로 자연풍에 의한 환기저항과 열부력에 의한 환기저항의 합으로 정의한다.

본 연구의 검토대상인 터널 화재시 열부력은 식 (2)로 표현될 수 있다.

$$\Delta p = (\rho_{out} - \rho_{fire})g\Delta H \quad (2)$$

여기서, ρ_{out} : 외기의 밀도(kg/m³), ρ_{fire} : 화재구역의 공기밀도(kg/m³), g : 중력가속도(m/s²), ΔH : 부력이 작용하는 고도차(m)이다.

열부력을 예측하기 위해서는 식 (2)에서 제시된 바와 같이 화재구역의 공기밀도와 부력이 작용하는

높이(ΔH)를 알아야 한다.

노르웨이(NRTD, 2010)의 경우, 화재강도 및 터널 경사도별로 열부력을 그래프로 제시하여 적용하도록 하고 있으며, 화원에서 압력손실은 최소 10~20 Pa을 고려하고 열부력에 의한 압력저항은 50 Pa이상을 고려하고 있다. 스위스(FDETEC, 2008)의 경우, 메모리얼(Memorial) 터널의 실험결과를 근거로 하여 화재로 인한 온도상승(ΔT)를 식 (3)으로 고려하고 있다. 화재강도가 20 MW일 때 온도상승은 53°C 정도이다.

$$\Delta T = 11.9 \sqrt{Q} : Q : \text{화재강도(MW)} \quad (3)$$

오스트리아(ARARRT, 2008)의 경우, 제연팬 용량 산정시 열부력을 식 (4)로 고려하고 있다.

$$\Delta p = \eta_p \cdot \rho_{out} \left(1 - \frac{T_{out}}{T_{fire}}\right) g \cdot L_{fire} \cdot Slop/100 \quad (4)$$

여기서, L_{fire} : 화재 열기류가 확산된 구간길이(m), η_p : 압력변환효율, T_{out} : 외기온도(°C), T_{fire} : 화재구간의 온도(°C), L_{fire} : 화재구간의 거리(m), $Slop$: 경사도(%)이며, 화재강도에 따라서 Table 1과 같이 적용한다.

이 경우, 30 MW의 화재에서 열부력에 의한 저항은 경사도에 따라서, 1%에서는 9.4 Pa, 1.5%에서는 14.1 Pa, 2%에서는 17.8 Pa로 분석된다.

프랑스(CETU, 2002)의 경우에는 열부력을 시간지연과 함께 검토하고 있으며, 열기류의 온도상승으로 인한 팬효율 감소 및 열소손을 고려하도록 하고 있다. 또한, N. Harvey (2009)는 1D 해석프로그램에 의해서

연장이 2 km이고 단면적이 72.4 m²인 터널에서 화재강도가 70, 200 MW일 때 열부력에 의한 압력과 풍속을 예측하고 있으며, 이를 근거로 화재강도가 20 MW일 때 열부력을 단순보간하여 개략적으로 계산하면 경사도가 0~3%일 때 12~58 Pa로 예측된다. 또한 Harvey의 연구에 의하면 제트팬 통과온도의 증가로 인한 공기밀도 감소에 따른 젯트팬 승압효율은 100°C에서는 약 75%, 200°C에서는 약 55% 수준으로 감소하는 것으로 보고하고 있다. 따라서, 제연팬 산정시에는 열부력에 의한 환기저항 뿐만 아니라 통과온도의 상승으로 인한 승압효율의 감소를 고려하여야 할 것으로 분석된다.

3. 해석모델 및 조건

본 검토에서는 화재강도는 20 MW와 100 MW로 하였으며, 터널내 풍속은 2.5 m/s로 하였다. 터널벽체를 통한 열손실을 고려하기 위해서 터널라이닝을 모사하였으며, 지중온도는 15°C로 등온조건으로 하고 터널공기와 벽체사이에는 대류열전달이 발생하는 조건에서 수치해석을 수행하였다. 해석모델을 요약하면 다음과 같으며, 해석은 상용 열유체 해석프로그램인 Fluent (Version 6.3)를 사용하였다.

- 터널연장 : 500, 750, 1000, 1500, 2000, 3500m
- 경사도 : -1.0%, -1.5%, -2.0%
- 화재조건(화원에 대한 경계조건)
 - 위치 : 터널 입구에서 부터 200 m지점(버스기준 : 194~206 m)
 - 화원의 크기 : 12(L) × 3.12(H) × 1.0(W)

Table 1. Coefficients of calculating

Item		5 MW	30 MW
Temperature rise Δt	Longitudinal ventilation sys.	25°C	65°C
	Transverse or Large Port exhaust sys.	20°C	40°C
Smoke moving distance (L_{fire})		400 m	800 m
Efficiency of pressure change (η_p)		0.85	0.75

- 화재성장곡선 : Table 2
- CO발생량 : 최대 0.1025 kg/s
- Soot발생량 : 최대 0.13325 kg/s
- 입구풍속 및 유입공기온도 : 2.5 m/s (Inlet velocity condition), 27°C
- 출구경계조건 : 압력경계조건(Pressure outlet condition)
- 터널벽면 경계조건 : 대류열전달을 모사하기 위해서 두께 0.5 m의 라이닝을 모사하고 표면 대류열전달이 발생하는 것으로 하였다.
 - 라이닝 내측 경계조건 : Coupled heat transfer condition
 - 라이닝 외측 경계조건(지중) : 15°C 등온조건

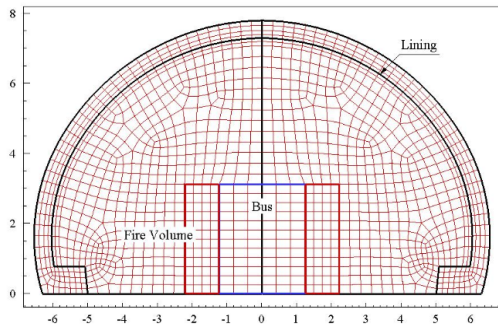
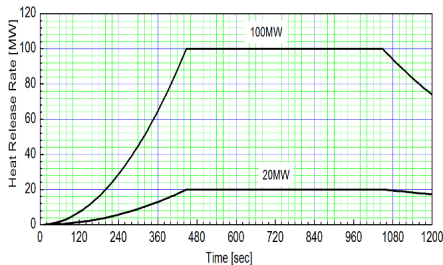


Fig. 1. Grid at the tunnel section

Table 2. Fire growth curve

Heat release rate (MW)	20.0	100
Fire Load (GJ)	35	125
Fire growth rate (α)	0.1	0.5
Fire decay rate (β)	0.001	0.002
Growth time (Sec)	450.0	450
Full fire time (Sec)	605	600



- 해석시간 : 1,200초
- 단면상의 그리드형상 : 0.25(X) × 0.25(Y) × 0.5 m(L) (Fig. 1)

4. 해석결과분석

Fig. 2는 화재강도가 20 MW이고 경사도가 -2.0%인 경우에 열기류의 이동지점과 이동속도를 나타낸 것으로 그림에서 Temp > Tamb+4)는 호흡선 높이(1.6 m)의 평균온도가 외기온도보다 4°C 이상 상승하는 지점을 기준으로 나타낸 것이며, CO > 100은 호흡선 높이에서 CO농도가 100 ppm을 초과하는 지점을 기준으로 연기이동거리를 산정한 결과이다. 본 해석에서 화원의 중심점이 200 m지점이므로 연기의 이동거리는 그림에 나타낸 smoke moving position-200 m이 된다.

그림에서 연기의 이동거리는 평가기준에 따라 다소 차이가 발생함을 알 수 있으며, CO농도는 온도보다 늦게 발현하기 때문에 화재초기에는 온도상승을 기준으로 평가한 이동거리가 CO농도변화를 기준으로 하는 경우가 보다 증가한다. 또한 화재 경과시간이 동일하면 터널연장 및 경사도에 관계없이 연기의 이동거리는 동일한 것으로 나타나고 있다. 따라서, 터널 화재 시 제트팬에 의해서 임계풍속을 유지하는 것과 같이

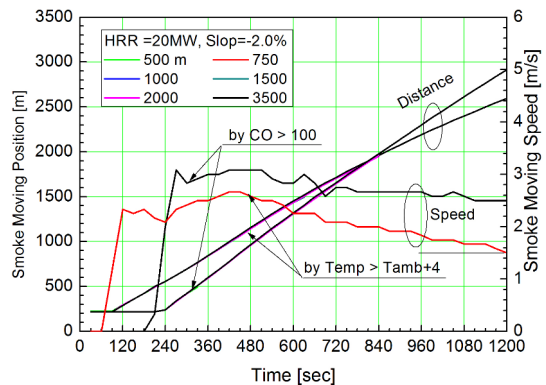
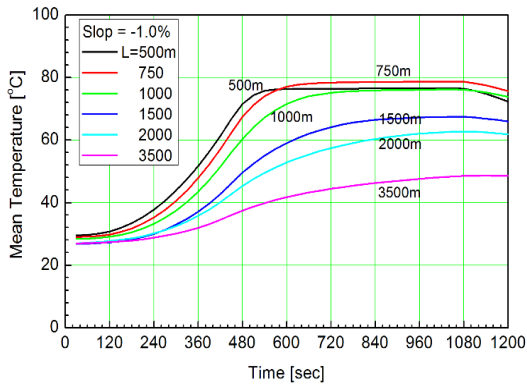


Fig. 2. Smoke moving distance & speed at H=1.6 m (Hrr=20 MW, S=-2.0%)

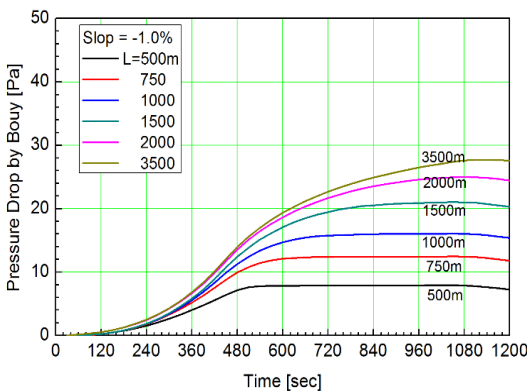
터널내 풍속을 일정하게 유지하는 경우, 연기이동 거리는 터널연장이나 경사도에는 무관하며, 터널내 풍속에만 영향을 받는 것으로 판단할 수 있다.

따라서, 연기의 이동속도 또한 터널내 풍속이 일정하게 유지되는 경우에는 터널연장이나 경사도에 영향을 받지 않으며, 본 평가에서는 CO농도를 기준으로 하는 경우에는 연기의 이동속도가 2.5~3.1 m/s, 온도를 기준으로 하는 경우에는 이동속도(1.5~2.7 m/s) 보다 빠르게 나타나고 있다. 온도를 기준으로 하는 경우에는 시간이 경과하면 이동속도가 점차 감소하는 경향을 보이는데, 이는 벽면냉각효과에 의해서 평균온도가 감소하기 때문이다.

Fig. 3은 화재강도가 20 MW이고 경사도가 -1.0%



(a) Temperature distribution



(b) Pressure distribution

Fig. 3. Mean temperature & Pressure distribution at HRR=20 MW

인 경우에 터널연장별 시간에 따른 터널내 평균온도 변화와 열부력에 의한 압력손실을 나타낸 것이다. 터널내 평균온도는 연기의 이동거리와는 관계없이 터널 전체 공기의 평균온도를 구한 것이다.

그림에서 터널내 평균온도는 화재초기에는 화재강도의 증가와 가열된 공기량이 증가하기 때문에 증가하는 경향을 보이나, 연장이 1,000 m이하인 경우에는 480초 이후에는 온도상승이 거의 없는 것으로 나타나고 있는데, 이는 450초 이후에는 화재강도가 일정한 상태에 도달하며, 열기류의 이동거리가 터널연장을 초과하여 열기류가 터널출구로 배출되기 때문에 터널내 공기 온도상승은 거의 나타나지 않기 때문이다.

그림에서 터널연장이 증가할수록 평균온도가 감소하는 것으로 나타나고 있는데, 이는 평균값 산정시 연기가 이동하지 않은 터널구간을 포함하여 산정하였기 때문이다. 즉, 연장이 긴 경우에는 가열되지 않은 구간길이가 증가하기 때문이다.

그림(b)는 그림(a)의 평균온도를 적용하여 식 (2)에 의해 계산되는 열부력의 크기를 나타낸 것이다. 이 경우, 터널경사도가 -경사이므로 열부력은 환기저항이 된다. 즉, 열부력은 압력손실로 작용하며, 열부력에 의한 압력손실은 터널연장이 증가하면 식 (2)에서 평균온도 감소에 따른 밀도변화 보다 ΔH 의 변화율이 크기 때문에 증가하게 된다.

유의 연구(유지오, 2013)에 의하면, 경사도가 다른 경우에도 터널내 공기온도는 터널입구 풍속이 동일하기 때문에 거의 차이가 없는 것으로 나타나고 있다. 따라서 열부력에 의한 압력손실은 경사도 증가에 따른 ΔH 의 변화에 영향을 받는 것으로 평가된다.

Fig. 4 및 Fig 5는 화재지점에서의 열기류의 수직상승으로 인한 유동저항을 평가하기 위해서 터널 축방향으로 압력분포 및 화재지점에서의 압력강하를 나타낸 것이다. Fig. 4는 압력분포를 나타낸 것으로 화재가 거의 성장하지 않은 상태인 30 s에서는 화재지점(200 m)에서 화재차량에 의한 유동저항으로 인한 압력손실이 미소하게 발생하며, 출구부로 갈수록 압력이 감

소하여 출구부 압력은 대기압에 도달하는 것을 알 수 있다. 시간이 경과하면 터널내 공기가 가열되어 열부력이 증가하기 때문에 입구압력은 증가한다. 본 해석에서는 터널입구 풍속을 일정하게 유지하였기 때문에 입구지점에서 압력은 2.5 m/s를 유지하기 위해서 필요한 압력이며, 30 s일 때 입구압력이 온도의 영향을 거의 받지 않은 상태로 30 s에서 입구압력에 대한 입구압력상승이 열부력에 의한 압력손실 증가치를 의미한다.

또한, 그림에서 화재가 완전히 성장한 후, 600 s 이후에는 화재에 근접한 지점에서 압력이 급격하게 감소하며, 약 2,500 m 이후에는 압력감소 기울기가 초기(30 s)값에 근접하게 됨을 알 수 있다. 이것은

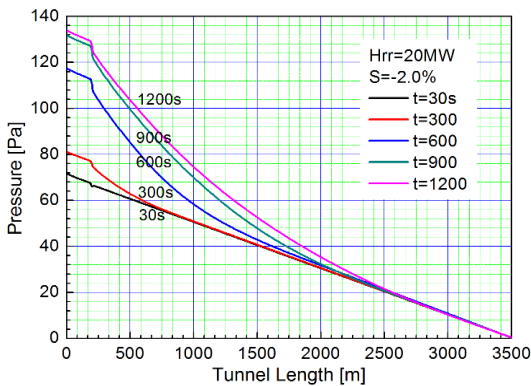


Fig. 4. Pressure drop by thermal buoyance (Hrr=20 MW, S=-1.0%)

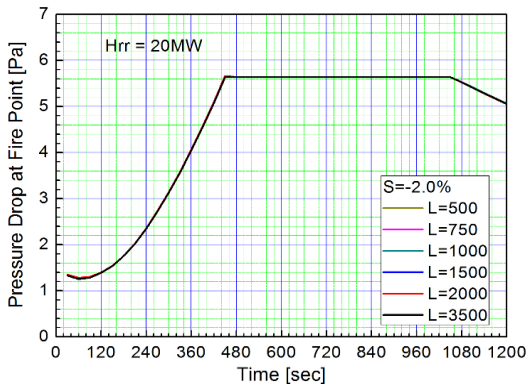


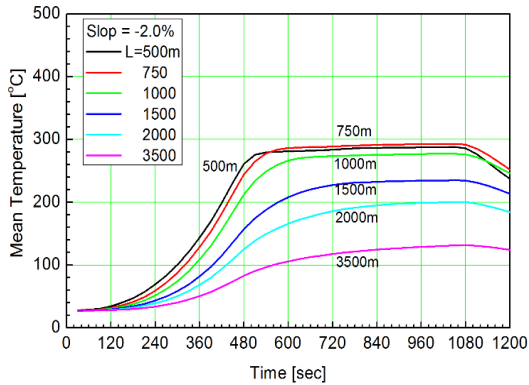
Fig. 5. Pressure Drop at Fire Point (Hrr=20 MW, S=-2.0%)

화재에 근접한 지점에서는 공기온도의 상승으로 밀도의 감소가 발생하게 되는데, 이는 풍속을 증가시키는 요인으로 작용하여 밀도의 감소에 따른 압력손실의 감소와 풍속 증가에 따른 압력손실의 증가라는 상반된 효과를 동시에 발생시키게 된다. 본 경우에는서는 공기온도의 상승은 20~60℃이며, 이로 인한 터널내 압력상승은 이론계산에 의하면 약 1.7~4.3 Pa 정도로 평가된다.

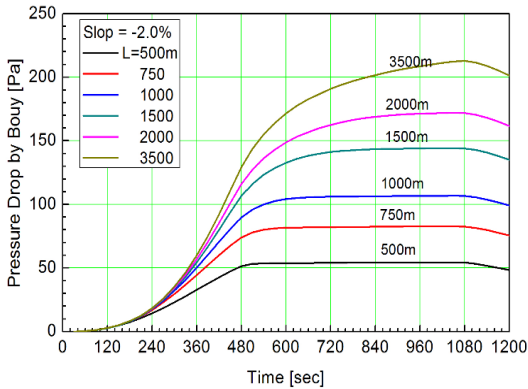
또한, 화재시간이 경과하면 화재지점(200 m)에서 압력이 급격하게 감소하는데, 이것은 화재지점에서 발생하는 상승기류로 인해서 축방향 주기류의 압력손실이 발생하는 것을 의미한다. Fig. 5는 터널연장별로 화재지점에서 압력손실을 나타낸 것으로 화재지점에서의 압력손실은 터널연장과는 무관하며, 화재성장곡선과 마찬가지로 450 s까지는 상승하는 경향을 보이며, 화재가 완전히 성장한 이후에는 일정한 값을 보이게 된다. 이 경우, 화재가 완전히 성장하는 450 s 이후에 화재지점에서의 압력손실은 5.6 Pa 정도로 나타나고 있다.

Fig. 6은 화재강도가 100 MW인 경우에 경사도가 -2.0%일 때 터널연장별 시간에 따른 터널내 평균온도 변화와 열부력에 의한 압력손실을 나타낸 것이다. 터널내 평균온도는 연기의 이동거리와는 상관없이 터널 전체의 평균온도를 구한 것이다. 이 경우 터널내 평균온도는 터널연장이 짧은 500 m일 때 약 290℃까지 상승하고 있으며, 열부력에 의한 압력손실은 연장이 증가하면 증가하는 경향을 보이며, 연장이 3,500 m일 때 최대압력손실은 약 212 Pa까지 상승하는 것으로 나타나고 있다. 따라서 화재강도가 20 MW에서 100 MW로 증가하는 경우, 열부력에 의한 압력상승은 56 Pa에서 약 213 Pa로 약 3.8배정도 증가하는 것을 알 수 있다. 이에 설계화재강도를 20 MW보다 증대하는 경우에는 열부력에 의한 압력손실을 반드시 검토하여야 할 것으로 판단된다.

또한, 화재강도가 100 MW인 경우에 화재지점에서 압력상승을 분석한 결과, 경사도별로 17.24 (-1.0%),



(a) Temperature



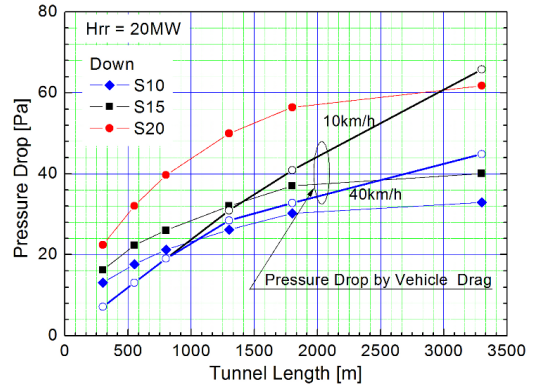
(b) Pressure drop by thermal buoyancy

Fig. 6. Mean temperature & Pressure distribution at HRR=100 MW

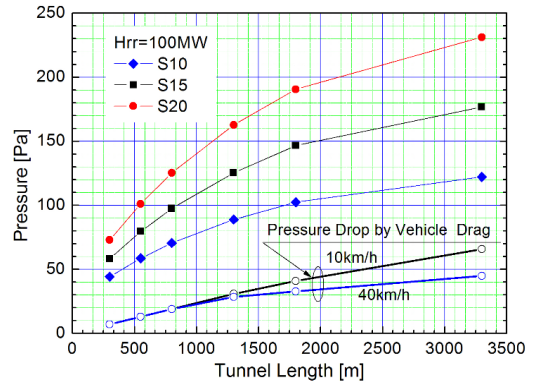
17.73 (-1.5%), 18.35 (-2.0%)로 분석되었다. 따라서 화재지점에서 상승기류에 의한 압력손실은 20 MW의 경우와 마찬가지로 경사도와 무관한 것으로 평가되며, 화재강도에 따라서 5.6 Pa (20 MW), 17.8 Pa (100 MW)로 평가된다.

Fig. 7은 화재로 인해 발생하는 압력손실의 최대값 즉, 열부력에 의한 압력손실의 최대값과 화재지점에서 압력손실의 합과 터널연장별 정체차량으로 인한 차량저항을 나타낸 것이다.

제연용 제트팬 산정시 차량저항에 의한 압력손실은 화재지점이 터널 출구측에 근접할수록 증가하며, 열부력에 의한 압력손실은 연기의 이동거리가 증가할수록 증가하기 때문에 화재지점이 입구측일수록 증가



(a) Hrr = 20MW



(b) Hrr=100MW

Fig. 7. The maximum pressure drop according to tunnel lengths and slopes

한다. 이에 본 분석에서는 화재로 인한 압력손실과 차량저항에 의한 압력손실의 상대적인 크기를 비교하기 위해서 화재지점을 터널입구로 하여 압력손실을 분석하였다.

그림(a)는 하향 경사터널에서 20 MW의 화재가 발생한 경우로, 예상되는 바와 같이 열부력에 의한 압력손실은 연장이 동일하면 경사도가 증가하면 증가하며, 경사도가 동일한 경우에는 터널연장이 증가할수록 증가한다. 압력손실의 증가율은 연장이 1,300 m로 이하인 경우가 가장 크며, 연장이 1,800 m이상인 경우에는 증가율이 둔화되는 경향을 보이고 있다.

그림에서 (○)는 터널내 풍속이 2.5 m/s인 경우에 터널 연장별 차량저항에 의한 압력손실을 나타낸 것

으로 터널에서 화재가 발생하는 경우, 전술한 바와 같이 현재 설계시 계산하는 차량저항은 터널출구에서 화재가 발생하는 것으로 가정하기 때문에 차량저항이 최대가 되는 조건에서 제트팬을 산정하고 있다. 따라서, 터널 입구측에서 열부력에 의한 압력손실이 차량저항에 의한 압력손실보다 작다면 제트팬 댓수 산정시 제트팬 승압력의 부족현상은 발생하지 않으나, 그 반대의 경우(차량저항에 의한 압력손실 < 열부력에 의한 압력손실)에는 제트팬에 의한 승압력이 부족하게 되어 임계풍속을 유지하는 것이 불가능하게 된다.

Fig. 7(a)에서 경사도가 1.5%이상이고 터널연장이 1,800 m이하인 경우에 차량저항에 의한 압력손실보다 열부력이 증대하는 것으로 나타나고 있으며, 본 해석 조건에서 제트팬 댓수의 증감은 Table 3에 나타난 바와 같다. Fig. 7(b)는 화재강도가 100 MW이고 터널내 풍속이 2.5 m/s인 경우로 본 분석 범위의 모든 조건(터널연장 : 300~3200 m, 경사도 1.0%이상)에서 열부력에 의한 압력손실이 차량저항에 의한 압력손실보다 증대하는 것으로 나타나고 있다.

Table 3는 터널내 풍속을 2.5 m/s로 하는 경우에 화재강도 및 경사도에 따른 제트팬 댓수를 나타낸

것이다. 주행속도에 따른 제연용 제트팬 댓수는 주행속도가 감소하면 증가하는 경향을 보이기 때문에 현행 한국도로공사의 환기 및 제연용 설계속도기준에 따라 제연용 제트팬 댓수가 최대가 되는 10 km/h와 최소가 되는 40 km/h에 대해서 비교·검토하였다.

화재강도가 20 MW인 경우에 열부력에 의한 제트팬 댓수의 증가는 본 연구범위에서는 1~2대정도로 나타나고 있으며, 화재강도를 100 MW로 하는 경우에는 열부력에 의한 압력손실의 증가로 인한 제연용 제트팬 댓수 증가는 연장이 증가할수록 경사도가 증가할수록 증가하는 것으로 나타나고 있으며, 본 연구범위에서는 2~11대의 증가가 요구되는 것으로 나타나고 있다.

이상의 검토에서 본 결과는 100 MW에서 임계풍속을 2.5 m/s로 가정하였기 때문에 화재강도 증가로 인한 임계풍속의 증가에 따른 제트팬 대수의 증가 및 풍속증가로 인한 온도강하에 의한 열부력의 감소 효과는 반영되지 못하고 있으나, 제연용 제트팬 설계시 100 MW의 화재규모를 고려하는 경우에 단순히 임계풍속 증가에 따른 팬 증가보다는 상당히 많은 수의 제트팬 증가가 필요한 것으로 판단된다.

Table 3. Number Jet fans for smoke control

Veh. Speed (km/h)	Tunnel Length (m)	Number of Jet Fan						
		Not Considered thermal buoyance force (Hrr=20 MW)	Considered thermal buoyance force					
			Hrr=20 MW			Hrr=100 MW		
			S1.0%	S1.5%	S2.0%	S1.0%	S1.5%	S2.0%
10	300	2	2(0)	3(+1)	3(+1)	4(+2)	5(+3)	6(+4)
	550	3	3(0)	3(0)	4(+1)	5(+2)	7(+4)	8(+5)
	800	3	3(0)	4(+1)	5(+2)	6(+3)	8(+5)	10(+7)
	1,300	5	5(0)	5(0)	6(+1)	8(+3)	10(+5)	12(+7)
	1,800	6	6(0)	6(0)	7(+1)	10(+4)	12(+6)	15(+9)
	3,200	9	9(0)	9(0)	9	12(+3)	16(+7)	19(+10)
40	300	2	2(0)	3(+1)	3(+1)	4(+2)	5(+3)	6(+4)
	550	3	3(0)	3(0)	4(+1)	5(+2)	7(+4)	8(+5)
	800	3	3(0)	4(+1)	5(+2)	6(+3)	8(+5)	10(+7)
	1,300	5	5(0)	5(0)	6(+1)	8(+3)	10(+5)	12(+7)
	1,800	5	5(0)	6(+1)	7(+2)	10(+5)	12(+7)	15(+10)
	3,200	8	8(0)	8(0)	9(+1)	12(+4)	16(+8)	19(+11)

5. 결론

본 연구에서는 도로터널 화재시 터널입구풍속을 2.5 m/s로 유지하는 조건에서 열부력에 의한 저항력이 제연용 제트팬 용량에 미치는 영향을 검토하기 위하여 터널연장(500, 750, 1000, 1500, 2000, 3500 m) 및 경사도(-1.0, -1.5, -2.0%)를 변수로 하여 화재성장 곡선을 반영하여 비정상상태의 수치시뮬레이션을 수행하여 열기류의 평균온도 및 열부력에 의한 압력손실을 검토하고 열부력의 증가에 따른 제트팬 댛수의 증감을 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 터널내 풍속을 2.5 m/s로 하는 경우, 연기의 이동속도는 CO 농도(호흡선 높이에서 100 ppm)를 기준으로 하는 경우에 터널 경사도에 영향을 받지 않으며, 화재강도가 20 MW인 경우에 2.5~3.1 m/s정도로 평균 2.4 m/s로 나타났다.
2. 터널입구 풍속을 2.5 m/s로 일정하게 유지하는 조건에서 화재가 전파되지 않은 구간을 포함하는 터널전체의 평균온도는 터널 경사도에는 영향을 받지 않으며, 연장이 동일하면 화재성장률에 따라 거의 동일한 값을 나타낸다.
3. 터널에서 화재가 발생하는 경우, 열부력에 의한 압력손실과 화원에서 상승기류에 의한 유동저항에 따른 압력손실이 발생하며, 열부력에 의한 압력손실은 터널연장이 길수록 경사도가 증가할수록 증가하는 경향을 갖는다.
4. 본 해석조건에서는 화재로 인한 압력손실은 20 MW의 경우, 경사도가 -2.0%이고 연기의 전파거리가 3300 m일 때 61.8 Pa분석되었으며, 화재강도가 100 MW인 경우에는 231.2 Pa로 분석되었다.
5. 터널화재시 차량저항에 따른 압력손실은 화재지점이 터널 출구측에 근접할수록 증대하고, 열부력에 의한 압력손실은 화재지점이 터널 입구측에 근접할수록 증가하는 상반된 경향을 갖기 때문에 입계풍속을 충족하기 위한 제연용 제트팬 용량

산정시 열부력에 의한 압력손실과 차량저항의 크기를 비교·검토하여야 추가적인 제트팬 승압력의 필요 여부를 검토하여야 할 것으로 판단된다.

6. 본 해석결과, 설계화재강도가 20 MW인 경우에는 경사도가 증가하고 터널연장이 짧은 경우에 열부력이 차량저항에 따른 압력손실보다 증가하며, 이에 따른 제트팬 증가댛수는 1~2대 정도로 예측되었다. 또한, 화재강도가 100 MW인 경우에는 본 해석조건인 모든 범위에서 열부력에 의한 압력손실이 차량저항에 따른 압력손실보다 증가하는 것으로 나타나고 있으며, 본 해석범위에서는 최소 2~11대의 제트팬 대수의 증가가 요구되는 것으로 나타나고 있다. 따라서 제연용 제트팬 댛수를 산정하는 경우에 열부력을 반드시 고려하여야 할 것으로 분석되었다.

참고문헌

1. MLIT (2009), Design and Management for Road Tunnel Fire Protection, MLIT, Seoul.
2. Korea Expressway Corporation (2004), The investigation of the performance of smoke exhaust system in JukRyung Tunnel, Bumchang Eng., Seoul
3. NEMA (2012), National Fire Safety Code for Road Tunnel(NFSC 603), NEMA, Seoul.
4. The Norwegian Road and Transport Department (2010), Road Tunnels(Handbooks)
5. Federal Department of Environment, Transport, Energy and Communications (2008), Luftung der Strassentunnel-Systemwahl, Dimensionierung und Ausstattung, ASTRA 13001
6. Austrian Research Association for Roads, Rail and Transport (FSV) (2008), Guidelines and Regulations for Road Construction (RVS 09.02.31)
7. CETU (Centre D'etudes des Tunnels) (2000), Inter-ministry circular n°2000-63 of 25 August 2000 relating to the safety of tunnels in the national highways network(Appendix n°2)
8. N harvey, T Fuster (2009), "Design fire heat release

- rate selection - impacts for road tunnels”, ISAVVT 13rd, USA, BHR Group, Vol. 1, pp. 211-223.
9. FGSV (Forschungs Gesellschaft fuer Strassen- und Verkehrswesen) workgroup of traffic management and road safety (2006), RABT Guidelines for the Equipment and Operation of Road Tunnels.
10. Yoo, J.O., Oh, B.C., Kim, H.G. (2013), “A numerical study on the characteristics of the smoke movement and the effects of the structure in road tunnel fire.”, J. of Korean tunnel underground Sp Assoc. Vol. 15, No. 3, pp. 289-300.