

강우변화를 고려한 도로터널의 환기특성에 관한 수치해석

이호형¹ · 이승철^{2*}

¹비회원, 강원대학교 방재전문대학원

²정회원, 강원대학교 소방방재공학전공

A numerical study on the ventilation characteristics of rainfall in road tunnel

Ho-Hyung Lee¹, Seung-Chul Lee^{2*}

¹Korea, Kangwon National University Graduate School of Disaster Prevention, 346 Jungang-ro, Samcheok 245-711

²Korea, Kangwon National University Dept. of Fire Protection Engineering, 346 Hwangjo-gil, Samcheok 245-905

ABSTRACT: When rainfall occurred on road tunnel, that is likely to have influence upon ventilation force in the tunnels but the tunnels ventilation system did not consider factors of rainfall. Thus, this study investigated effects of rainfall upon ventilation force in the tunnels at no rainfall and changing of rainfall by 3 dimensional numerical method. Flow rate into road tunnels decreased as many as 52.34% at rainfall of 150 mm/hr, and pressure drop of road tunnel between entrance and exit decreased as many as 22.22%, so that rainfall had influence upon ventilation force in the tunnel. The number of necessary jet fan in road tunnels is 12 at no rainfall but, when rainfall of 80 mm/hr on road tunnels, the number of necessary jet fan in road tunnels is 16, when rainfall of 150 mm/hr on road tunnels, the number of necessary jet fan in road tunnels is 17. So, factor of rainfall should be considered at estimation of ventilation system of road tunnel.

Keywords: Road tunnel, Rainfall, Ventilation force, Ventilation system, Jet fan

초 록: 강우가 도로터널에 발생될 경우 공기 중 존재하는 빗방울에 의해 도로터널 내 환기력은 영향을 받을 것이라 예상되지만, 국내 도로터널 환기시스템 설계 시에는 이러한 인자가 고려되지 않은 채 설계되고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 비 강우 시와 시간 당 강우량을 변화시켜가며 강우가 도로터널 내 환기력에 미치는 영향을 3차원 수치해석 기법을 이용하여 알아본 결과 강우 시를 기준으로 시간 당 150 mm의 강우가 도로터널에 발생될 경우 도로터널 내부로 유입되는 공기의 유량은 52.34%만큼 감소되었고, 도로터널 입·출구의 압력차이는 22.22% 감소되어 나타나 강우에 의해 도로터널 내 환기력은 감소되는 것으로 나타났다. 시간 당 강우량을 변화시켜가며 도로터널에 필요한 제트팬의 대수를 산정해본 결과 비 강우 시에는 12대인 반면 시간 당 강우량이 80 mm인 경우에는 16대, 150 mm 인 경우에는 17대의 제트팬이 필요한 것으로 나타나 도로터널의 환기시스템을 설계할 때에는 강우에 대한 인자가 추가되어야 한다.

주요어: 도로터널, 강우, 환기력, 환기시스템, 제트팬

1. 서 론

우리나라는 최근 산업과 교통의 발전으로 인해 국내 도로망의 증설이 필요한 실정이다. 하지만 국토의 70% 이상이 산악지형으로 구성되어 있어 일반적인 도로망 구축에는 한계가 있다. 따라서 최근 국내에서

는 산악지형에서도 도로망을 구축할 수 있도록 도로터널의 시공이 증가되고 있으며, 터널공법 및 굴착기술의 발전에 따라 점차 장대화·대단면 되고 있다.

이러한 도로터널의 내부는 도로터널 외부와의 거리 차로 인해 외부와 고립된 공간적 특징을 지니고 있다. 도로터널은 국토해양부에서 제시하는 도로설계편람(MLTMA, 2011)에 의해 도로터널의 제원, 교통량, 자연환기량 등이 고려된 환기시스템을 설계하여 도로터널 내 이동하는 차량에 의해 발생된 오염물질을 효과적으로 희석 및 외부로 배출시키고 있다.

*Corresponding author: Seung-Chul Lee
E-mail: sclee@kangwon.ac.kr

Received April 30, 2015; Revised May 8, 2015;

Accepted May 11, 2015

최근 국내에서는 이 도로터널의 환기시스템에 대해 다양한 연구가 진행되고 있다. 먼저 도로터널의 환기 시스템에 대한 적절한 설계를 위해 이창우(Lee, 2000)는 최근 국내 도로터널이 장대화됨에 따라 관련 기초 분야의 연구가 시급함을 언급하였고, 조형제 등(Jo et al., 2010)은 터널 위치, 연장, 교통량 등의 설계조건과 터널 단면계획의 연계를 통해 적절한 환기방식이 선정되어야 한다고 하였으며, 김태형(Kim, 2001)은 국내 도로터널 환기시설의 적정설계 및 운전기법의 확보를 위해 국내 실정에 맞는 설계기법과 운전기법 확립이 필요하다고 하였다. 또한 소충섭 등(So et al., 2002)은 터널의 노선선정 시 종단경사에 따른 환기검토가 필요하다고 하였고, 이승철(Lee, 2013)은 외부자연풍이 터널 연장길, 종단경사, 갭문형식에 따라 도로터널 내 환기저항에 영향을 미치기 때문에 도로터널 환기량 산정시 자연풍속에 대한 개선이 필요하다고 하였다.

이처럼 국내 도로터널의 환기에 대한 연구는 매우 다양한 분야와 다각도의 관점에서 진행되고 있다. 하지만 최근 기후변화와 이상기후를 대비한 연구는 사회 전반적인 분야에서 많이 진행되고 있음에도 불구하고 도로터널과 관련된 연구는 아직 진행되고 있지 않아 이에 대한 연구가 필요하다.

만일 국지성 폭우를 포함한 강우가 도로터널에 발생하게 될 경우 도로터널 입·출구 단면에는 강우로 인해 낙하하는 빗방울이 대기와 함께 공존하게 된다. 이러한 현상은 비(非) 강우 시 산정되었던 도로터널의 환기력을 저하시킬 수 있기 때문에 비(非) 강우 시와 비교하여 도로터널 내부 환기력을 보다 상승시켜야 할 것으로 예상된다.

하지만 국내 도로터널의 환기시스템 설계 시 강우에 대한 인자가 고려되지 않아, 강우 시 도로터널 내부에 환기가 비(非) 강우 시 보다 원활하지 못해 도로터널 내부로 신선공기의 유입 및 도로터널 외부로 오염물질의 배출이 더딜 것으로 예상되지만 이와 관련된 연구는 전무하다.

따라서 본 연구에서는 대상 도로터널을 기준으로 비(非) 강우 시와 시간 당 강우량에 따른 도로터널 내 환기력의 영향을 전산유체역학 기법을 이용한 3차원 수치해석을 수행하여 그 결과를 비교·분석 하였다.

2. 국내 강우량 현황

Table 1은 2013년 기준 최근 5년간 기상청에서 발표한 기상예보를 바탕으로 매우 강한 대류성 강우(Llasat, 2001)인 시간 당 강우량이 80 mm이상의 경우를 나타낸다(KMA, 2009 ~ 2013). 표에서와 같이 시간 당 강우량이 80 mm이상인 경우는 모두 7 ~ 9월 사이에 나타났으며, 매해 수차례에 걸쳐 발생하고 있다. 또한 최근 이상기후 등으로 인해 발생하는 국지성 폭우의 빈도는 점차 증가될 것으로 예상된다.

이러한 자료를 국내 초장대 도로터널의 수가 증가되는 경향과 비교해본다면 강우가 도로터널 내 환기력에 미치는 영향에 대해 연구할 필요가 있다고 판단된다.

Table 1. Situation of domestic hourly rainfall

Date	Location	Hourly Rainfall (mm/hr)
2009.07.16	Masan	102.0
2009.07.16	Busan	90.0
2010.07.23	Hunsan	81.0
2010.07.23	Seosan	99.5
2010.07.23	Boryung	98.0
2010.08.07	Jeonju	80.0
2010.09.21	Ichon	98.0
2011.07.27	Dongduchon	84.0
2011.07.27	Busan	96.0
2011.07.27	Yangpyung	85.0
2011.08.01	Namhae	95.0
2012.07.15	Busan	80.5
2013.07.28	Imsil	85.0

3. 강우 모델링

$$n(a) V_0 = N_0 e^{-\Lambda a} V_0 \quad (1)$$

3.1 강우 기본 가정

본 연구에서 강우에 따른 도로터널 내 환기력의 영향을 3차원 수치해석을 통해 알아보기 위해 해석 상 강우에 대한 기본 가정을 다음과 같이 수립하였으며, 각 기본 가정은 원활한 계산을 위해 설정하였다.

- 빗방울의 배치는 각 방향으로 일정 간격을 갖는다고 가정함.
- 빗방울은 압축되거나 찌그러지지 않는 완전한 구의 모양을 유지한다고 가정함.
- 공기는 비압축성 유체로 가정함.
- 고도에 관계없이 온도는 일정하고, 습도는 고려하지 않음.

3.2 적용 모델 및 강우 설정

강우의 형태는 빗방울의 지름과 강우량에 의해 분류되며 이에 대한 분류를 Table 2에 나타내었다 (Britannica, 2013). 본 연구에서는 4가지 강우 형태 중 폭우에 해당하는 강우 형태를 기준으로 연구를 진행하였다.

한편 강우량에 따른 빗방울의 크기 분포는 Marshall-Palmer 분포(Marshall and Paler, 1948) 모델을 적용하여 연구를 진행하였다(식 (1)).

- 여기서, $N_0 : 1.6 \times 10^4 \text{ (mm}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1})$
 $V_0 : \text{빗방울 지름이 } a \text{인 빗방울의 체적 (mm}^3)$
 $\Lambda : 8.2 \times R^{-0.21} \text{ (mm}^{-1})$
 $a : \text{빗방울의 지름 (mm)}$
 $R : \text{시간 당 강우량 (mm/hr)}$
 $n(a): \text{빗방울의 단위체적당 개수 (개/mm}^3)$

설정된 빗방울의 지름은 8 mm로 설정하여 비(非)강우 시를 포함해 매우 강한 대류성 강우량인 80 mm/hr (Llasat, 2001), 국내 100년 빈도 강우량인 100 mm/hr (NEMA, 2010), 국내 기왕최대강우량인 120 mm/hr (NEMA, 2010), 국내 최대집중강우량인 150 mm/hr (NEMA, 2010)로 증가시켜가며 총 5가지로 강우를 설정하였다.

설정된 대기 중 존재하는 빗방울을 3차원 수치해석에서 처리하기 위해서는 빗방울을 각각 모델링해야 하지만 컴퓨터의 연산 능력 및 계산시간 등 현실적으로 어렵기 때문에 빗방울들을 다공성 물질로 가정하였다. 다공성 물질의 처리는 등방성(Isotropic)을 갖는 Ergun 식(Huang and Ayoub, 2006)을 사용하였고, 이를 식 (2)에 나타내었다. Ergun 식은 공극율이 0.35~0.55이고 충전층에 구형 고체입자일 때 실험값과 상당히 일치하는 결과를 보인다. 본 계산에서 공극율은 이에 미치지 못하지만 빗방울을 구형 고체로 가정하였으므로 이 식을 사용하였다.

Table 2. Type of rainfall according to raindrop diameter and hourly rain fall

	Type of rainfall			
	Drizzled rain	Light rain	Moderate rain	Heave rain
Raindrop diameter (mm)	below 0.5	excess 0.5	excess 0.5	excess 0.5
Hourly rainfall (mm/hr)	under 2.5	2.5	2.5~7.6	excess 7.6

$$-\frac{dp}{L} = \frac{150\mu(1-\chi)^2 u^*}{\chi^3 D_p^2} + \frac{1.75\rho(1-\chi)u^{*2}}{\chi^3 D_p} \quad (2)$$

- 여기서, $d_p : \text{압력차이 (Pa)}$
 $L : \text{단위길이 (m)}$
 $\mu : \text{유체의 점성계수 (Pa}\cdot\text{s)}$
 $\rho : \text{유체의 밀도 (kg/m}^3)$
 $u^* : \text{다공성 물질의 Superficial velocity (m/s)}$

χ : 공극율 ($\chi = \frac{V_m}{V_t}$)

V_m : 물질의 체적 (m^3)

V_t : 전체 영역의 체적 (m^3)

D_p : 입자의 입경 (m)

4. 강우를 고려한 3차원 수치해석 방법

4.1 대상모델 및 해석영역

본 연구의 대상모델은 일방향 2차선인 도로터널로써 Fig 1과 같이 총 연장길이 1,965 m, 폭 13 m, 높이 7.11 m의 제원을 갖으며, 계산의 편의상 도로터널의 표고는 고려하지 않았다. 외경 1.45 m, 내경 1.25 m, 길이 5.2 m의 토출풍속 30 m/s 이상의 성능을 갖는 제트팬은 병렬로 도로터널의 입구에서 30 m, 130 m, 230 m와 출구에서부터 100 m, 200 m, 300 m에 각각 2대씩 총 12대가 설치되어 있다.

본 연구의 해석영역은 Fig 2에 나타난 것과 같이 4개로 구성되어 있다. 먼저 A, B Zone은 외부영역으로써 A Zone은 공기만 존재하는 외기영역을 의미하고, B Zone은 외기영역 중 강우 시 빗방울이 존재하는 공간을 의미한다. 이 때 도로터널 입구에서의 유입손실과 강우를 고려하기 위해 A Zone과 B Zone의 높이는 도로터널 높이의 3배, 폭은 도로터널의 폭의 3배로 설정하였고, 길이는 반복해석을 통해 도로터널 입

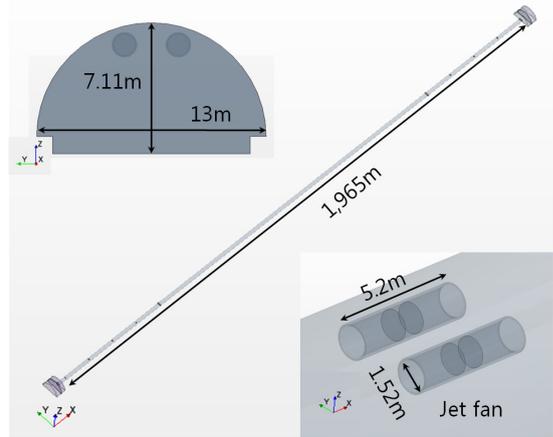


Fig. 1. Schematic diagram of road tunnel

출구 압력차이와 터널 내 유량이 일정해진 20 m와 15 m로 설정하였다. C Zone은 도로터널 내부 영역이며, D Zone은 제트팬 영역을 의미한다.

유동은 A Zone에서 길이방향(+X 방향)으로 유입되어 B Zone을 통과 한 후 도로터널 입구로 유입되며, 도로터널 내에는 제트팬에 의해 유동이 가속되어 도로터널 출구를 거쳐 출구 외부영역의 B Zone, A Zone 순으로 유동이 진행된다.

본 연구에서 수행한 해석 종류는 비(非) 강우 시를 비롯해 시간 당 강우량 80 mm에서 150 mm로 변화시켜가며 총 5가지의 계산이 수행되었으며, Table 3에 해석종류의 상세를 나타내었다.

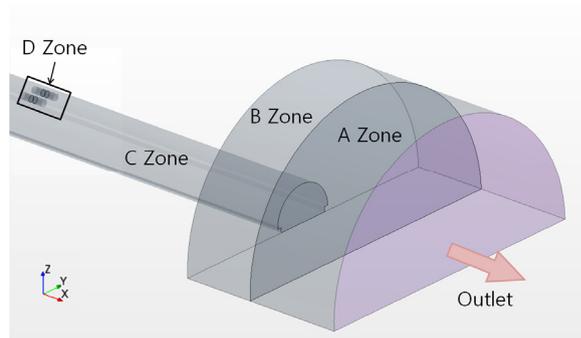
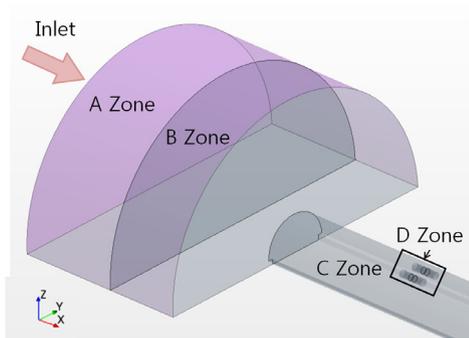


Fig. 2. Computational domains

Table 3. Case of calculations

Case	Hourly rainfall (mm/hr)	Porosity (%)
1	0	0
2	80	0.12
3	100	0.13
4	120	0.14
5	150	0.15

4.2 지배방정식 및 경계조건

본 연구에서 사용된 지배방정식은 연속방정식, 운동량 방정식, 난류운동에너지 방정식, 난류운동에너지 소산율 방정식이 사용되었으며, 수학적 표현은 다음과 같다.

연속방정식(Continuity equation) :

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (3)$$

운동량 방정식(Momentum equation) :

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + S_M \quad (4)$$

난류운동에너지 방정식(Turbulent kinetic energy equation) :

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j} + G - \rho \epsilon \quad (5)$$

난류운동에너지 소산율 방정식(Dissipation rate equation of turbulent kinetic energy) :

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} + \frac{\epsilon}{k}(C_1 G - C_2 \rho \epsilon) \quad (6)$$

위 식에서 사용된 x_i , u_i , ρ , p , S_M , δ_{ij} , μ , k 및 ϵ 은 각각 직교 좌표, 각 좌표축의 속도 성분, 밀도,

압력, 운동량 방정식 생성항, Kronecker delta, 점성계수, 난류운동에너지 및 난류운동에너지 소산율을 의미한다. 한편 전단응력 τ_{ij} 와 난류점성계수 μ_t , 난류 생성항 G 및 난류 실험상수값인 C_{1s} , σ_k , σ_ϵ , $C_{\epsilon 1}$, $C_{\epsilon 2}$ 은 각각 0.09, 1.0, 1.22, 1.44, 1.92이다(Lauder and Sharma, 1974).

$$\text{여기서, } \tau_{ij} = -(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$$

$$\mu_t = \frac{C_\mu \rho k^2}{\epsilon}$$

$$G = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

경계조건으로는 외기 영역 중 빗방울이 존재하는 B Zone에 Stagnation pressure 조건을 부여하였고, 터널 벽면 및 바닥은 점착조건(No-slip condition)을 부여하였다. 제트팬은 토출풍속이 30 m/s가 되도록 Momentum source를 적용하였다.

4.3 수치해석 방법

강우를 고려한 도로터널 내·외 유동은 3차원, 정상 상태, 비압축성, 난류유동이라 가정하였고, 전체 해석 영역에 대해서 지배방정식을 유한체적법(FVM, Finite Volume Method)과 비엇갈린 격자계(Non-staggered grid system)방법으로 이산화 하였으며, 상용 CFD 코드인 STAR-CCM⁺ Version 9.06(CD-Adapco, 2014)을 통해 유동영역에 암시도식(Implicit scheme)과 독립연산(Segregated solver)을 적용하였다. 또한 운동량 방정식의 압력장을 처리하기 위해 비교적 계산 비용이 적으면서 압력장을 정확히 예측하는 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) 알고리즘(Patankar and Spalding, 1972)을 사용하였으며, 표준 k- ϵ 난류모형(Lauder and Spalding, 1974)을 사용하였다. 한편 대류항 처리를 위하여 2차 상류 차분법(2nd order upwind differencing scheme)을 사

용하였다.

반복 계산 시 종속변수들의 수렴정도를 판단하기 위해 잉여치(Residual)를 확인하여 그 잉여치가 10^{-6} 이하에 도달하면 수렴된 것으로 판단하였다.

Table 3에 나타낸 해석 종류의 수렴조건을 만족하기 위해 약 5,000회의 반복계산이 수행되었으며, 128 GB의 RAM과 48 node의 병렬컴퓨터에서 해석종류별 계산시간은 약 5시간 소요되었다.

4.4 격자 의존성 파악

3차원 전산해석에서는 생성된 격자의 수와 배치에 따라 그 수렴된 해가 다를 수 있다. 따라서 적절한 격자시스템을 선정하기 위해 Case 2를 대상으로 기본 격자크기를 점차 축소해가며 격자시스템을 생성하였다. 그 결과 M-1은 약 70 만개, M-2는 약 140 만개, M-3은 약 230 만개, M-4는 약 430 만개의 격자가 생성되었으며, Table 4에 상세히 나타내었다.

Fig. 3에는 각 격자시스템의 해석결과에 대한 비교를 용이하도록 도로터널 입구에서 유입되는 유량과 도로터널 입·출구에서의 압력차이를 그래프로 나타내었다.

그림에서 보이는바와 같이 M-2를 기준으로 M-1의 도로터널 입구에서 유입되는 유량과 도로터널 입·출구에서의 압력차이의 변화는 -7.29%, -14.64%로 나타났지만, M-3의 도로터널 입구에서 유입되는 유량과 도로터널 입·출구에서의 압력차이의 변화는 0.20%, 0.04%로, M-4의 도로터널 입구에서 유입되는 유량과 도로터널 입·출구에서의 압력차이의 변화는 0.38%,

Table 4. Setting of mesh grid

Case	Mesh base size (m)			
	A Zone	B Zone	C Zone	D Zone
M-1	2.0	0.8	0.8	0.4
M-2	1.6	0.6	0.6	0.3
M-3	1.0	0.5	0.5	0.2
M-4	0.8	0.4	0.4	0.1

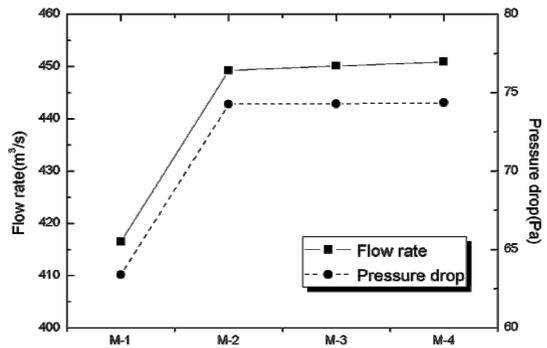


Fig. 3. Flow rate and pressure drop according to grid system

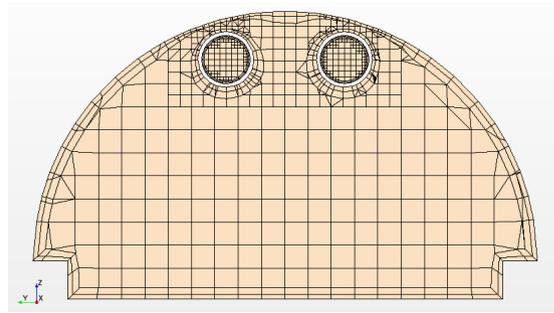


Fig. 4. Mesh grid system

0.12%로 나타나 M-2 이후로는 계산 결과의 차이가 크게 없는 것으로 판단하였다.

따라서 본 연구에서 사용된 격자시스템은 M-2로 선정하여 계산을 수행하였고, Fig. 4에는 M-2에 대한 격자시스템을 나타내었다.

5. 강우를 고려한 도로터널 내 환기력 특성

5.1 시간 당 강우량에 따른 도로터널 내 유동 특성

Fig. 5에는 각 해석종류에 따라 도로터널 입구부, 중앙부 및 출구부에서의 속도분포를 입구부, 중앙부, 출구부에 따라 그림에 표시한 위치로부터 10 m 씩 이격시켜 나타내었다. 각 Case별로 속도 크기만 다를 뿐 도로터널 입구부, 중앙부 및 출구부에서 유사한

기류 패턴을 보이고 있다.

먼저 도로터널 입구부에서 기류는 도로터널 단면 중, 하단부에서 가장 큰 속도가 존재하고 터널 벽면 근처에서 속도가 작게 나타난다. 이러한 이유는 도로터널 외부영역에서 도로터널 입구로 단면적이 급축소됨에 따라 터널 벽면 근처의 정계층이 두꺼워지기 때문이다. 도로터널 중앙부에서 기류는 일반적인 덕트 유동과 유사하게 터널 단면 중앙에서 가장 큰 속도가 존재하고 터널 바닥 및 벽면쪽을 향하면서 속도가 작게 나타난다.

도로터널 출구에서는 단면 상부에 큰 속도가 분포

하고 있다. 이러한 이유는 제트팬의 위치와 형상 때문이라 판단된다. 본 연구의 도로터널 내 제트팬은 일(-)자형의 형상을 가지고 있으며, 위치는 앞서 서술한바와 같이 도로터널 입구에서 길이 방향(+X 방향)으로 230 m 내에 6대가 설치되어 있고, 도로터널 출구에서 길이 반대 방향(-X 방향)으로 300 m 내에 6대가 설치되어 있어 도로터널 중앙부에는 제트팬이 설치되어 있지 않다. 이 때문에 도로터널 중앙부에서 도로터널 단면에 고르게 나타난 기류가 도로터널 출구부에서는 제트팬에 의해 도로터널 상부에 비교적 빠른 유속이 존재한 채 도로터널 외부로 유출된다. 이러한 문제점

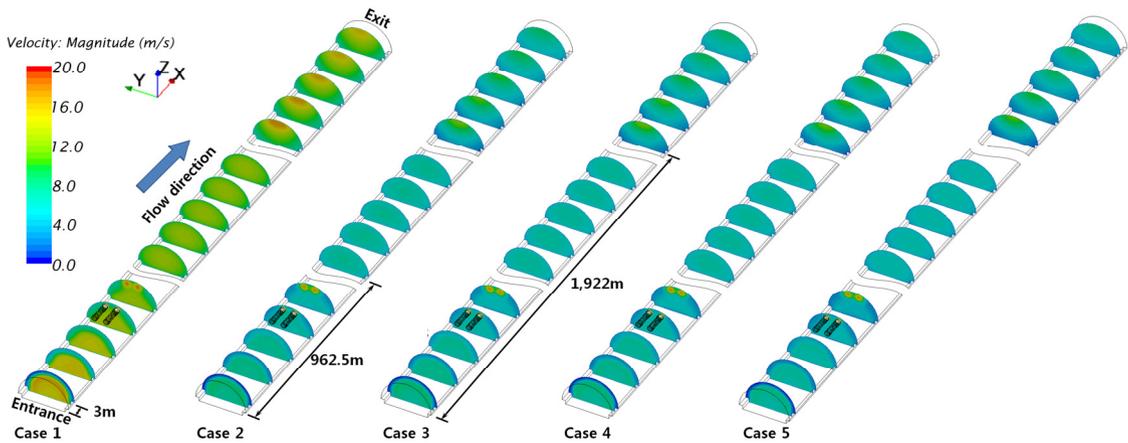


Fig. 5. Distribution of velocity contour

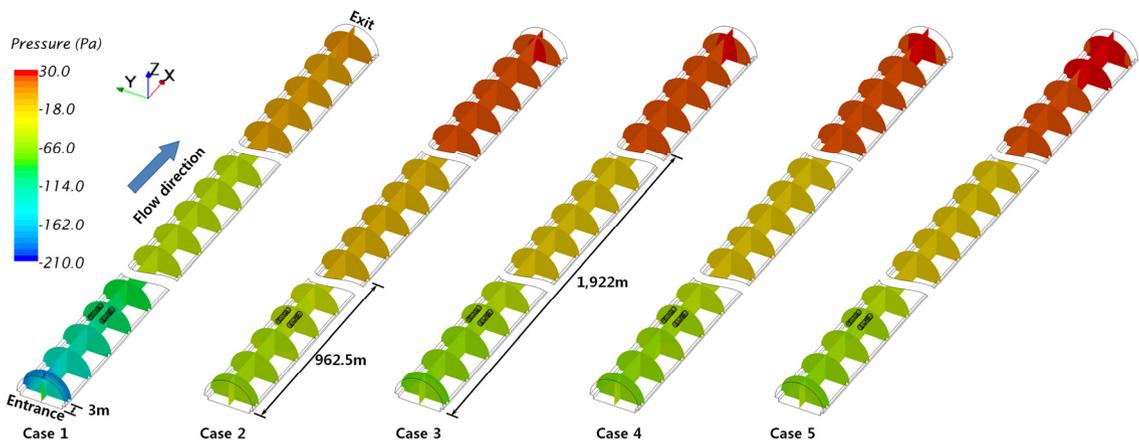


Fig. 6. Distribution of pressure contour

은 기존 문헌에 의해서도 지적된 바 있다(Lee, 2014).

한편 비(非) 강우 시인 Case 1 에 비하여 강우가 발생한 Case 2, 3, 4, 5의 경우 도로터널 입구로 유입되는 유속이 크게 감소되는 것을 확인 할 수 있다. 이러한 이유는 강우에 의한 압력강하가 터널 유입구와 출구부에서 발생하기 때문이다. 이로인해 비(非) 강우 시와 강우 시 도로터널 내부의 유속은 큰 차이를 나타냈다.

이러한 결과는 강우에 의해 도로터널을 주행하는 차량에서 발생된 오염물질이 효과적으로 희석과 배출이 되지 못하는 결과를 야기할 수 있기 때문에 강우가 발생할 경우 도로터널 내에는 평상시보다 많은 환기력이 필요할 것으로 판단된다.

Fig 6에는 Fig 5과 동일한 위치와 종단면의 압력분

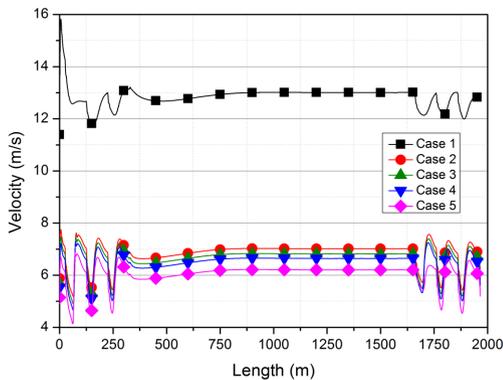


Fig. 7. Velocities in center of tunnel cross-section according to longitudinal length

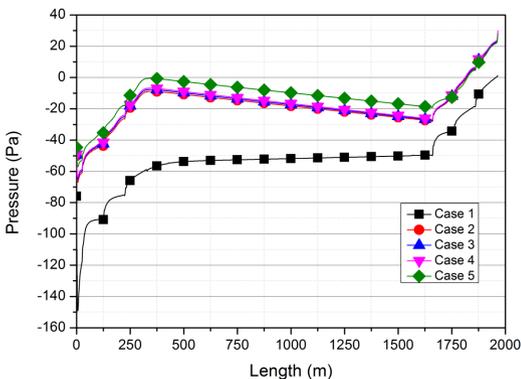


Fig. 8. Pressures in center of tunnel cross-section according to longitudinal length

포를 나타내었다. 그림에서와 같이 비(非) 강우 시인 Case 1와 비교하여 강우가 발생한 Case 2, 3, 4, 5의 경우 도로터널 입구부, 중앙부 및 도로터널 출구부에서 압력이 높게 나타났다. 이러한 이유는 강우에 발생에 따른 압력강하로 인해 도로터널 입구로 기류의 유입 및 도로터널 출구로 기류의 유출이 비(非) 강우 시에 비해 어렵기 때문이며, 강우에 의해 도로터널 입·출구의 압력차이가 증가될 것으로 예상된다.

Fig. 7과 8에는 터널 종방향 길이에 따른 터널 단면 중앙점(바닥으로부터 3.75 m)에서의 속도와 압력을 각각 나타내었다. Fig. 7에서 각 Case별 속도는 유사한 경향을 보이지만 그 크기가 강우량에 따라 차이가 있음을 알 수 있다. 또한 터널 입구부와 출구부에 나타나는 큰 속도변화는 제트팬에 의한 것이다. Fig. 8의 압력도 전반적으로 속도와 유사한 경향을 보이며, 터널 입구부와 출구부에 나타나는 압력의 가파른 상승은 제트팬에 의한 승압력 때문이다.

5.2 시간 당 강우량에 따른 도로터널 내 유량 변화

도로터널의 환기는 도로터널을 이동하는 차량에 의해 발생된 오염물질을 희석 및 배출시키기 위하여 신선외기의 유입을 유도하고 있다. 하지만 강우 시에는 대기 중 존재하는 빗방울로 인해 신선외기의 유입과 도로터널 내 오염물질의 배출이 어렵다. 따라서 Fig 9에는 본 연구의 해석 결과 인 시간 당 강우량에 따른 해석결과 중 도로터널 입구로 유입되는 유량의 비교를 용이하도록 도로터널 입구에서 유입되는 유량을 그래프로 나타내었으며, Table 5에는 본 연구의 해석 결과 인 시간 당 강우량에 따른 해석결과 중 도로터널 입구로 유입되는 유량과 도로터널 입·출구의 압력차이를 나타내었다.

Fig. 9과 같이 각 Case에 따른 도로터널에서 유입되는 유량은 비(非) 강우 시 인 Case 1과 비교하였을 경우 Case 2는 46.11%, Case 3은 47.63%, Case 4는 48.97%, Case 5는 52.34% 감소되어 평균 48.76%

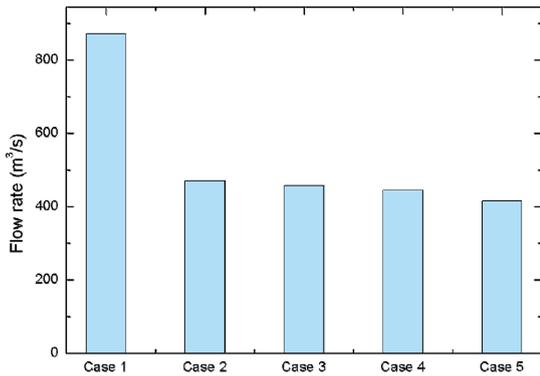


Fig. 9. The results of flow rate according to case

감소되어 나타났다. 이러한 이유는 앞서 서술한바와 같이 도로터널에 강우가 발생하였을 경우 도로터널 내부로 유입되는 유량이 감소됨을 나타내며, 결과적으로 도로터널 내 환기력을 감소시킬 것으로 예상된다.

한편 Table 5에는 도로터널 입구에서의 유입되는 유량, 도로터널 입·출구의 압력차이를 나타내었다. 표와 같이 Case 1의 경우는 각각 871.95 m³/s, 85.32 Pa로 나타났고, Case 2의 경우 도로터널 입구에서의 유입되는 유량, 도로터널 입·출구의 압력차이는 유속은 각각 469.90 m³/s, 72.77 Pa로 나타났으며, Case 3의 경우 도로터널 입구에서의 유입되는 유량, 도로터널 입·출구의 압력차이는 각각 456.67 m³/s, 72.56 Pa로 나타났다. Case 4의 경우 도로터널 입구에서의 유입되는 유량, 도로터널 입·출구의 압력차이는 각각 444.96 m³/s, 72.51 Pa로 나타났고, Case 5의 경우 도로터널 입구에서의 유입되는 유량, 도로터널 입·출구의 압력차이는 각각 415.56 m³/s, 66.36 Pa로 나타났다. 도로터널 입·출구의 압력차이는 비(非) 강우 시인

Table 5. The results according to hourly rainfall

Case	Rate of inflow (m ³ /s)	Pressure difference between entrance and exit (Pa)
1	871.95	85.32
2	469.90	72.77
3	456.67	72.56
4	444.96	72.51
5	415.56	66.36

Case 1를 기준으로 Case 2의 경우 14.71%, Case 3의 경우 14.96%, Case 4의 경우 15.01%, Case 5의 경우 22.22%만큼 감소되어 비(非) 강우 시에 비해 평균 16.73% 감소되어 나타났다. 이러한 이유는 도로터널에 폭우가 발생하였을 경우 도로터널 내부로 유입되는 유량이 감소되고 도로터널 출구로 유출되는 유량이 감소되기 때문이다.

5.3 시간 당 강우량에 따른 도로터널 내 환기력 검토

시간 당 강우량에 따른 도로터널 내 환기력을 검토하기 위하여 본 연구에서 진행한 해석결과 중 제트팬 대수를 산정하기 위한 각 항들을 Fig 10에 나타내었다.

Fig. 10에 나타난 항은 자연풍에 의한 저항력 (ΔP_m), 도로터널 벽면 마찰에 따른 통기 저항력 (ΔP_r), 강우에 따른 저항력(ΔP_{ra}), 교통환기력 (ΔP_t), 도로터널 필요 승압력(ΔP_o), 제트팬 승압력 (ΔP_j)로써 Fig. 10에서 보는 바와 같이 비(非) 강우 시인 Case 1의 경우 도로터널에 필요한 승압력(P_o)는 193.17 Pa로, 강우가 발생한 Case 2, 3, 4, 5의 경우 도로터널에 필요한 승압력(P_o)는 각각 325.30 Pa, 333.57 Pa, 342.83 Pa, 350.20 Pa로 나타나 비(非) 강우 시인 Case 1과 비교하여 68.40%, 72.68%, 77.48%, 81.29%의 승압력이 더 필요한 것으로 나타났다.

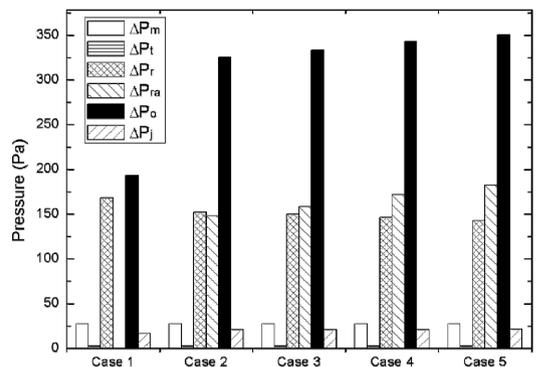


Fig. 10. Pressure requirements according to hourly rainfall

Table 6. The number of jet fan according to hourly rainfall

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Z_o (ea)	11.45	15.68	15.99	16.27	16.51
Z (ea)	12	16	16	17	17

Table 6에는 이를 바탕으로 국토해양부에서 제시한 도로설계편람(MLTMA, 2011)에 따라 식 (7)과 (8)에 의해 제트팬 대수를 산정하여 나타내었다.

$$\Delta P_o = \Delta P_m + \Delta P_r + \Delta P_{ra} - \Delta P_t \quad (7)$$

$$Z_o = \Delta P_o / \Delta P_j \quad (8)$$

Table 6에 나타난 Z_o 는 식 (7)과 (8)에 의해 산출된 제트팬 대수를 의미하고, Z 는 Z_o 를 절상하여 도로터널에 필요한 제트팬 대수를 의미한다. 표에서 보이는바와 같이 비(非) 강우 시인 Case 1인 경우 필요한 제트팬의 대수는 12대로 나타난 반면, 강우가 발생한 Case 2, 3, 4, 5,의 경우 필요한 제트팬의 대수는 최소 16대에서 최대 17까지로 비(非) 강우 시인 Case 1과 비교하여 최소 1.33배에서 최대 1.42배의 제트팬이 추가적으로 필요한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 시간 당 강우량이 증가함에 따라 도로터널 필요 승압력이 증가되게 되어 도로터널의 필요 환기력이 증가됨을 나타낸다.

따라서 시간 당 강우량이 증가할수록 도로터널 내 환기력은 감소되기 때문에 이를 고려한 인자를 도로터널의 환기시스템 산정 시에 추가하여야 한다.

6. 결론

본 연구에서는 강우 시 도로터널 내 환기력에 대한 영향을 파악하기 위해 비(非) 강우 시와 시간 당 강우량을 변화시켜 3차원 수치해석기법을 이용하여 도출된 결과를 비교·분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 비(非) 강우 시를 기준으로 시간 당 강우량이 80 mm인 경우 도로터널 내부로 유입되는 유량은

46.11%, 시간 당 강우량이 150 mm인 경우 도로터널 내부로 유입되는 유량은 52.34%만큼 감소되어 나타났으며, 도로터널 입·출구의 압력차이는 시간 당 강우량이 80 mm인 경우 14.71%, 시간 당 강우량이 150 mm인 경우 22.22% 감소되어 나타났다. 이러한 결과는 도로터널에 80 mm/hr 이상의 강우가 발생할 경우 도로터널 내 유입되는 유량은 비(非) 강우 시에 비해 감소되기 때문에 강우에 의해 도로터널의 환기력은 부족해진다.

2. 각 계산결과를 통해 도로터널 내 필요한 제트팬 대수를 산정한 결과, 비(非) 강우 시 인 경우는 12대인 반면 시간 당 강우량이 80 mm인 경우 16대, 시간 당 강우량이 150 mm인 경우 17대로 최소 1.33배에서 최대 1.42배의 제트팬이 추가적으로 필요한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 시간 당 강우량이 증가할수록 도로터널 내 환기력은 감소되기 때문이며, 향후 도로터널의 환기시스템 설계 시에는 이를 고려한 인자가 추가되어야 한다.
3. 본 연구에 대상이 된 도로터널의 제트팬의 위치는 도로터널 입구 부분과 출구 부분에 밀집해있고, 입·출구 케이싱의 형태가 일(-)자형이기 때문에 도로터널 입구 부분과 출구 부분에 기류가 도로터널 단면의 상부에서 비교적 높게 나타났다. 이를 해결하기 위해서는 제트팬 입·출구 덕트의 형태를 일(-)자형이 아닌 각도를 갖도록 설치하는 것을 추천한다.

References

1. Britannica (2013), Britannica Visual Dictionary, Britannica.
2. CD-ADAPCO Ltd. (2014), "STAR-CCM+ Ver.

- 9.06 User Guide”, CD-ADAPCO Ltd., 2014.
3. Huang, H., Ayoub, J. (2006), “Applicability of the forchheimer equation for non-darcy flow in porous media”, SPE Journal, pp. 112-122.
 4. Jo, H.J., et al. (2010), “Ventilation system of long road tunnel”, Proceeding of the Society of Air-Conditioning and Reigrigerating Enginners of Korea Winter Conference, pp. 491-496.
 5. Kim, T.H. (2001), “Method of operating tunnel ventilation facilities”, Magazine of SAREK, Vol. 30, No. 7, pp. 14-18.
 6. Korea Meteorological Administration (2013), Annual Climatological Report, Korea Meteorological Administration, pp. 29-265.
 7. Korea Meteorological Administration (2012), Annual Climatological Report, Korea Meteorological Administration, pp. 28-264.
 8. Korea Meteorological Administration (2011), Annual Climatological Report, Korea Meteorological Administration, pp. 29-266.
 9. Korea Meteorological Administration (2010), Annual Climatological Report, Korea Meteorological Administration, pp. 27-263.
 10. Korea Meteorological Administration (2009), Annual Climatological Report, Korea Meteorological Administration, pp.27-260.
 11. Launder, B.E., Sharma, B.L. (1974), “Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disk”, Letters in Heat and Mass Transfer, Vol. 1, pp. 131-138.
 12. Launder, B.E., Spalding, D.B. (1974), “The numerical computation of turbulent flows”, Comput. Methods Apple. Mech. Eng., Vol. 3, pp. 269-289.
 13. Lee, C.W. (2000), “Worldwide trends in the research topics for the vehicle tunnel ventilation.”, J. of korean Society for Rock Mech, Vol. 12, No. 3, pp. 152-157.
 14. Lee, S.C. (2013), “The study on the effects of natural wind on the ventilation characteristics in road tunnel”, J. of the Korean Institute of Plant Engineering, Vol. 18, No. 4, pp. 41-49.
 15. Lee, S.C. et al. (2014), “CFD Analysis on ventilation characteristics of jet fan with different pitch angle”, KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 18, No. 3, pp. 812-818.
 16. Llasat, M.C. (2001), “An objective classification of rainfall events on the basis of their convective features”, Int. J. Climatol, 21, pp. 1385-1400.
 17. Marshall, J.S. Palmer, W.M. (1948), “The distribution of raindrop with size”, J. Meteorol., Vol. 5, pp. 165-166.
 18. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2011), Road Design Handbook, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, pp. 617-1-617-95.
 19. National Emergency Management Agency (2010), “Study of urban disaster prevention performance goal setting method of considering climate change”, National Emergency Management Agency.
 20. Patankar, S.V., Spalding, D.B. (1972), “A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows”, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 15, pp. 1787-1806.
 21. So, C.S, et al. (2002), “Study on the ventilation system according to vertical grade of road Tunnel”, J. of Korea Road Association, Vol. 89, pp. 34-48.