

# 교통환기력이 작용하는 터널 내 벽면마찰계수 추정을 위한 프로그램 로직 개발

김효규<sup>1\*</sup> · 최판규<sup>2</sup> · 류지오<sup>3</sup> · 이영훈<sup>4</sup>

<sup>1</sup>정회원, (주)주성지앤비 대표이사

<sup>2</sup>정회원, (주)주성지앤비 팀장

<sup>3</sup>정회원, 신한대학교 자동차공학과 교수

<sup>4</sup>비회원, 한국도로공사 교통처 차장

## Development of a programming logic to estimate the wall friction coefficient in vehicle tunnels with piston effects

Hyo-Gyu Kim<sup>1\*</sup> · Pan-Gyu Choi<sup>2</sup> · Ji-Oh Ryu<sup>3</sup> · Young-Hoon Lee<sup>4</sup>

<sup>1</sup>CEO, Jusung G&B Inc.

<sup>2</sup>Team Leader, Jusung G&B Inc.

<sup>3</sup>Professor, Dept. of Automotive Engineering, Shin-Han University

<sup>4</sup>Senior Manager, Traffic Division, Korea Expressway Corporation

\*Corresponding Author : Hyo-Gyu Kim, hgkim@gnbeng.com

### Abstract

Generally, the total ventilation resistance coefficient in a tunnel consists of inlet/outlet loss coefficient, wall friction coefficient, and other loss coefficient caused by sudden expansion and contraction of cross-section, etc. For the tunnel before opening, when the running ventilation fan is stopped, the wind speed in the tunnel is reduced by the total ventilation resistance drag. The velocity decay method is comparatively stable and easy to estimate the wall friction coefficient in the pre-opening tunnel. However, the existing study reported that when the converging wind speed is a negative value after the ventilation fan stops, it is difficult to estimate the wall friction coefficient according to the velocity decay method. On the other hand, for the operating tunnel in which the piston effect acts, a more complex process is performed; however, a reasonable wall friction coefficient can be estimated. This paper aims at suggesting a method to minimize the measurement variables of the piston effect and reviewing a method that can be applied to the operating tunnel. Also, in this study, a new method has been developed, which enables to calculate an variation of the piston effect if the piston effect is constant with a sudden change of external natural wind occurring while the wind speed in the tunnel decreases after the ventilation fan stops, and a programming logic has been also developed, which enables dynamic simulation analysis in order to estimate the wall friction coefficient in a tunnel.

**Keywords:** Operating tunnel, Wall friction coefficient, Total ventilation resistance coefficient, Dynamic simulation, Velocity decay method

### OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and  
Underground Space Association  
20(1)39-53(2018)  
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2018.20.1.039>

eISSN: 2287-4747  
pISSN: 2233-8292

Received November 24, 2017

Revised December 26, 2017

Accepted January 3, 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

## 초 록

일반적으로 터널 내 총환기저항계수는 입출구 손실계수, 벽면마찰계수 그리고 급격한 확대나 축소단면 등에 의해 발생하는 부차적 손실계수의 총합으로 구성된다. 개통 전 터널의 경우는 가동 중인 환기팬을 중단하게 되면, 터널 내 풍속은 총환기저항력에 의해 감소하는 현상이 나타난다. 즉, 속도감쇄법은 개통 전 터널에서 비교적 안정적이면서도 손쉽게 터널 내 벽면마찰계수를 추정하는 방법이다. 그러나 기존의 선행연구에서 환기팬의 가동을 중단 후 수렴되는 풍속이 음수일 경우는 속도감쇄법에 따른 벽면마찰계수의 추정이 곤란한 특성이 있다. 반면 교통환기력이 작용하는 공용 중인 터널에서는 좀더 복잡한 과정을 거치지만, 합리적인 벽면마찰계수를 추정할 수 있다.

본 연구에서는 교통환기력의 측정변수를 최소화할 수 있는 방법을 제안하였고, 공용 중 터널에 적용할 수 있는 방법을 고찰하였다. 또한 환기팬 정지 후 터널 내 풍속이 감소하는 동안에 외부 자연풍의 급격한 변화가 발생하여도 교통환기력이 일정할 경우에 대하여, 교통환기력의 증분을 계산할 수 있는 방법과 터널 내 벽면마찰계수를 추정할 수 있도록 동적 시뮬레이션이 가능한 프로그램 로직을 개발하였다.

**주요어:** 공용 중 터널, 벽면마찰계수, 총환기저항계수, 동적 시뮬레이션, 속도감쇄법

## 1. 서론

터널 내 환기 및 방재설비 용량을 산출하기 위해서는 터널 내 총환기저항계수를 고려하여야 한다. 즉, 터널 내 총환기저항계수는 터널 입구 및 출구 손실계수와 터널 내 벽면마찰계수의 합으로 이루어져 있으며, 부차적으로 터널 단면적의 변화에 따른 확대, 축소 단면손실계수 등이 고려되어야 한다.

벽면마찰계수에 대한 국외 연구사례로, Lotsberg (1997)는 노르웨이 Fodnes 터널( $L_r = 6,560$  m, 종류식)에서, Bruin et al. (1997)은 네델란드 Wijker 터널( $L_r = 704$  m, 종류식)에서 속도감쇄법(Velocity Decay Method, VDM)으로 연구를 수행하였고, Jang and Chen (2002)은 대만 Fu-De 터널( $L_r = 1,762$  m, 종류식)에서 통계적 방법으로 연구를 수행한 적이 있다. 국내 연구사례로, Kim (2000), Kim et al. (2000)은 개통 전 백양산 터널( $L_r = 2,430$  m, 반횡류식)에서, Lee et al. (2004)은 개통한 백양산 터널의 수정산 터널( $L_r = 2,330$  m, 종류식), 황령산 터널( $L_r = 1,860$  m, 반횡류식)에서, Lee (2005)은 백약산 터널, 수정산 터널, 황령산 터널의 와촌 터널( $L_r = 2,992$  m, 종류식), 장연 터널( $L_r = 3,055$  m, 종류식), 함양 터널( $L_r = 1,445$  m, 종류식)에 대하여 속도감쇄법 및 역추적법을 적용하여 연구한 사례가 있다(KICT, 2014). 또한 Lew et al. (2002)은 1/67 scale ( $L_s = 12$  m)의 모형실험을 통해 조명기구 설치에 따른 마찰손실계수를 추정한 사례가 있다. 기존 연구사례 중에서 역추적법을 제외한 속도감쇄법을 적용하여 측정된 대부분의 실측자료들은 환기팬 정지 후의 수렴풍속( $V_2$ ) 값이 양수인 경우에 한정된 데이터만을 제시하고 있는데, 이것은 속도감쇄법에 따른 이론해(exact solution)의 특수성에 기인한 결과이기 때문이다. 즉, 수렴풍속이 음수일 경우, 속도감쇄법을 적용하지 못하기 때문이다.

또한 공용 중 터널에는 차량통행에 의한 교통환기력 및 외부 자연풍에 의한 환기저항력이 작용하는 상태이며, 이들은 시간경과에 따라서 불규칙적으로 변동하는 특성을 보인다. 또한 실제 터널에서는 입출구부 양단에 작용

하는 전압의 측정이 용이하지 못하기 때문에 공용 중 터널의 총환기저항계수를 신뢰성 있게 추정하기가 곤란한 실정이다. 현재까지 이러한 총환기저항계수의 측정은 터널이 개통되기 전에 즉, 차량 통행이 없는 상태에서 T.A.B (Test, Adjust, Balance) 시험절차에 따른 측정이 대부분이다. 또한 차량이 통행하는 상태에서의 터널 내 총환기저항계수의 측정에 대한 방법은 불확실성 및 상당한 분석오차를 수반하고 있는 것으로 보고되고 있다 (Lee, 2005).

따라서 본 연구에서는 공용 중 터널에서 교통환기력 및 자연환기력의 변동에 의한 영향을 최소화할 수 있도록 터널 내 작용 환기력에 대한 관련 이론식을 중심으로 공용 중인 터널 내 총환기저항계수를 측정할 수 있는 방법을 제시하고, 이에 따른 터널 내 벽면마찰계수의 추정방법을 통해 터널 환기설계의 기초자료로 활용하는데 그 목적이 있다.

## 2. 터널 내 풍속자료의 측정방법

제트팬에 의한 종류식 환식방식을 적용하고 있는 대부분의 일자형 터널에서의 유체흐름은 덕트이론(Park, 1990)에 따라 1차원 유동으로 단순할 수 있다. 즉, 터널 내공단면적이 일정하고 유출입의 변화가 없다면 터널 내 평균풍속은 시점부, 중앙부, 종점부 등 종방향으로 어떤 지점에서든 동일하게 측정될 수 있다. 따라서 터널 내 측정 풍속계측기의 설치 포인터에서 터널 내 단면상의 평균풍속을 대표할 수 있다면, 일정한 지점에서의 시간 변화에 따른 풍속값을 연속적으로 측정할 수 있다.

### 2.1 유체역학적 가정

국내 터널환기 설계기준에 따르면, 도로 터널 내 공기의 흐름에 관련된 기본식의 정립은 일반적으로 다음과 같은 가정 하에서 이루어진다(MOLIT, 2011).

1. 이상기체: 이상기체라 함은 마찰저항에 따른 손실을 고려하지 않는 것이 아니라 보일-샤를의 법칙이 성립하는 기체를 말한다. 특별한 고압이나 저온상태가 아닌 일반적인 대기 상에서 점성계수( $\mu$ )가 속도구배에 독립적이며, 온도의 함수로 표현 가능한 뉴턴(Newton) 유체와 같은 기체로서의 공기를 가정한 것이다.
2. 비압축성 기체: 비압축성의 가정은 공기밀도 변화를 고려하지 않는 것이 아니고, 일정구간의 공기주(air column) 내의 밀도에 평균밀도 값을 적용하는 것이다.
3. 일차원적 유동: 축방향으로의 유동은 레이놀즈(Reynolds) 수가 상당히 큰 난류이며 횡방향으로는 차량통행과 환기설비의 가동으로 인하여 순간적인 혼합이 이루어지므로 축방향 즉 차량 통행방향으로의 일차원적 유동으로 단순화가 가능하다.
4. 준정상류 유동(quasi-steady state flow): 풍속의 축방향 및 횡방향으로 순간적인 변동은 심한 편이나 시간 가중 평균이 거의 일정한 값을 보이는 준 정상류 유동으로 가정한다. 이와 같은 특징은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 마

성터널(하행, 1998.8.31.) 내부고정점(100 m, 200 m)에서의 CO농도, 가시도( $m^{-1}$ ) 및 풍속의 변화에서도 잘 나타나 있다.

따라서 터널 내 평균풍속의 측정은 사전에 보정한 터널 내 풍속계측기를 사용하여 측정하며, 환기팬 가동 전 ( $\Delta P_0$ , 15분) 및 가동 유지상태( $\Delta P_1$ , 15분), 정지 후( $\Delta P_2$ , 15분)동안의 측정을 수행하여 Fig. 2와 같은 평균 풍속측정 결과값( $V_0$ ,  $V_1$ ,  $V_2$ )을 획득한다.

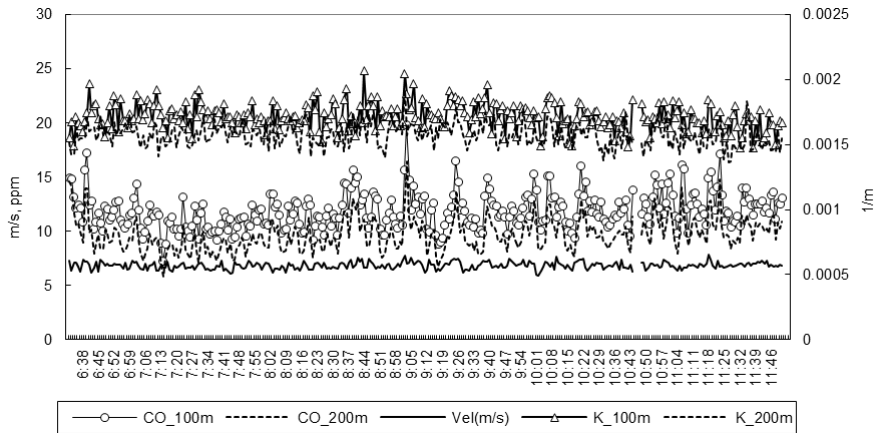


Fig. 1. Typical profiles for wind velocity, CO and smoke concentration (MOLIT, 2011)

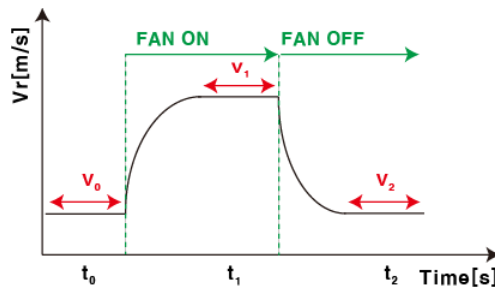


Fig. 2. Measurement of wind velocity (example)

## 2.2 획득한 데이터 중 판별제외 데이터 선정방법

본 연구에서는 환기팬 가동 후의 교통환기력과 외부 자연풍의 변화가 크지 않는 경우를 기본가정으로 적용하고 있으므로, 환기팬 가동 전 및 정지 후의 터널의 평균풍속차가 큰 경우(설치된 제트팬 1대분 이상의 승압력차가 발생할 경우)는 측정된 데이터를 판별조건에서 제외한다. 즉, 제트팬의 가동 전 풍속( $V_0$ )와 정지 후 풍속( $V_2$ ) 차이가 1 m/s 이상이거나 제트팬 1대분 이상의 승압력차가 발생할 경우에 해당하며 다음과 같이 계산하였다.

먼저, 환기팬 가동 후 평균풍속( $V_1$ )에 대하여 1대당 제트팬 승압력( $\Delta P_j$ )은 식 (1)과 같다.

$$\Delta P_j = K_j \rho V_j^2 \left( \frac{A_j}{A_r} \right) \left( 1 - \frac{V_1}{V_j} \right) \quad (1)$$

환기팬 가동 전 평균풍속( $V_0$ )과 정지 후 평균풍속( $V_2$ ) 차에 따른 압력변동값( $\Delta P_r$ )은 식 (2)와 같다.

$$\Delta P_r = \left( 1 + \zeta + \lambda \frac{L}{D} \right) \frac{\rho}{2} (|V_0^2 - V_2^2|) \quad (2)$$

따라서 만약  $|V_0 - V_2| \geq 1$  or  $\Delta P_r \geq \Delta P_j$  이면, 획득한 데이터에서 판별을 제외하는 검토조건이 된다 (MOLIT, 2016).

### 3. 개통 전 터널의 벽면마찰계수 추정(기존 연구)

환기팬 가동 전(15분) 및 가동 중(15분), 정지 후(15분) 동안에 터널 내 풍속은 준정적 상태로 가정하여 외부 자연풍에 의한 환기력(또는 저항력)이 급격한 변화를 하지 않는 조건에서, 환기팬의 가동상태에서 환기팬을 정지하면, 터널 내 풍속감소는 터널 내 총환기저항력에 기인하게 되고 뉴턴의 제2법칙으로 설명될 수 있다. 따라서 환기팬을 중단한 이후의 터널 내 작용하는 운동량 방정식은 식 (3)과 같다.

$$\pm \Delta P_m - \zeta \frac{\rho}{2} V^2 = \Delta p - \lambda \frac{L}{D} \frac{\rho}{2} V^2 = \rho L \frac{dV}{dt} \quad (3)$$

여기서,  $\pm \Delta P_m$  은 외부 자연풍에 의한 터널 내 작용하는 자연환기력을 나타내고,  $\Delta p$  는 터널 입출구부 양단에 작용하는 압력차이(전압)를 의미한다. 또한,  $\zeta = \zeta_{in} + \zeta_{out} + \lambda(L/D)$  는 유입, 유출 및 벽면마찰 저항을 나타내는 총 환기저항계수이고,  $L$  은 터널연장,  $D$  는 대표직경,  $\rho$  은 공기밀도,  $V$  는 터널 내 유속을 의미한다.

시간에 따른 자연환기력( $\Delta P_m$ )의 변화가 일정하다고 가정할 경우,  $\Delta P_m$  는 상수화가 가능하고 최종적인 방정식은 식 (4)와 같다.

$$\pm \Delta P_m = \zeta \frac{\rho}{2} V^2 \quad (4)$$

여기서,  $V$  는 자연환기력에 의해 수렴된 풍속인  $V_2$  를 의미한다(Fig. 2 참조).

환기팬 가동을 중단한 이후의 터널 내 풍속은, 식 (3)을 적분하여 얻을 수 있으며 이론해(exact solution)는 다음의 식 (5)~(8)과 같이 표현할 수 있다.

$$V(t) = V_2 \frac{e^{a+bt} + 1}{e^{a+bt} - 1} \quad \text{or} \quad \ln \frac{V(t) + V_2}{V(t) - V_2} = a + bt \quad (5) \text{ or } (6)$$

여기서,  $a = \ln \frac{V_1 + V_2}{V_1 - V_2}$ ,  $b = \zeta \frac{V_2}{L}$  이다. (7), (8)

즉, 환기팬 가동을 중단한 직후의 풍속은  $t=0$  일 때,  $V_1$  이며, 최종적인 속도감쇄 후의 수렴풍속은  $t = \infty$  일 때  $V_2$  가 된다. 상기 식에서  $a$  는 직접적으로  $V_1, V_2$  값을 측정하면 결정할 수 있으며,  $b$  는  $y$  절편이 0 인 선형 회귀 분석으로부터 결정할 수 있다. 따라서  $b$  값을 결정되면 총환기정항계수인  $\zeta$  값이 결정되고, 이에 따라 벽면마찰 계수인  $\lambda$  값도 결정할 수 있게 된다(Bruin et al., 1997).

## 4. 공용 중 터널의 벽면마찰계수 추정

교통환기력이 작용하는 경우는 팬 환기력의 작용여부에 따라 터널 내 풍속변화가 발생하게 되고, 이는 다시 교통환기력의 증감에 영향을 주게 된다. 따라서 환기팬 가동 전(15분) 및 가동 중(15분), 정지 후(15분) 동안에 터널 내 풍속은 준정적상태로 가정하여 교통환기력 및 자연풍에 의한 환기력(또는 저항력)이 급격한 변화를 하지 않는 가정하에서, 환기팬 가동시간 동안 교통환기력과 외부 자연풍에 의한 환기력(저항력)은 가동 직전 또는 가동 정지 후 시간동안의 급격한 변화가 없을 경우에는 다음의 식 (9)~(18)과 같이 표현이 가능하다.

### 4.1 터널 내 환기력 이론

공용 중 터널 내 작용하는 환기력은 일반적으로 통기저항력, 자연환기력, 교통환기력, 그리고 팬 환기력으로 구분할 수 있으며, 다음의 식 (9)~(12)와 같이 요약할 수 있다.

$$\text{통기 저항력: } \Delta P_r = \frac{(1 + \zeta + \lambda \frac{L}{D}) \rho}{2} V_r^2 = \underline{a} \times V_r^2 \quad (9)$$

$$\text{자연 환기력: } \Delta P_m = \frac{(1 + \zeta + \lambda \frac{L}{D}) \rho}{2} V_n^2 = \underline{a} \times V_n^2 \quad (10)$$

$$\text{교통 환기력: } \Delta P_t = \frac{A_m}{A_r} n_t \frac{\rho}{2} (V_t - V_r)^2 = \underline{b} \times (V_t - V_r)^2 \quad (11)$$

$$\text{팬 환기력: } \Delta P_{jf} = \underline{n_j K_j \rho V_j^2} \left( \frac{A_j}{A_r} \right) \left( 1 - \frac{V_r}{V_j} \right) = \underline{c} \times \left( 1 - \frac{V_r}{V_j} \right) \quad (12)$$

여기서,  $\zeta$ : 터널 입구손실계수,  $\lambda$ : 터널 벽면마찰계수,  $L$ : 터널연장(m),  $D$ : 터널 대표직경(m),  $\rho$ : 공기밀도( $1.2 \text{ kg/m}^3$ ),  $V_r$ : 터널 내 풍속(m/s),  $A_m$ : 자동차 등가저항면적( $\text{m}^2$ ),  $n_t$ : 터널 내 차량대수(대),  $V_t$ : 터널 내 주행속도(m/s),  $V_n$ : 외부 자연풍에 의한 차도내 유도풍속(m/s),  $n_j$ : 제트팬 가동대수,  $K_j$ : 제트팬 송압계수,  $A_j$ : 제트팬 토출면적( $\text{m}^2$ ),  $V_j$ : 제트팬 토출풍속(30 m/s) 이며,  $a, b, c$  는 식 (9)~(12)에 대한 개별 환기력식의 밑줄 친 부분에 대한 치환상수값을 의미한다.

## 4.2 준정상류 상태의 운동량 방정식과 이론해

공용 중 터널 내의 준 정상류 유동방정식은 식 (13)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \rho L \frac{dV}{dt} &= \sum P = P_t + P_{jf} - P_r \mp P_m \\ &= b \cdot V_t^2 - 2b \cdot V_t \cdot V_r + b \cdot V_r^2 + c \cdot V_j^2 - c \cdot V_j \cdot V_r - a \cdot V_r^2 \mp a \cdot V_n^2 \\ &= (b - a) \cdot V_r^2 + (-2b \cdot V_t - c \cdot V_j) \cdot V_r + (b \cdot V_t^2 + c \cdot V_j^2 \mp a \cdot V_n^2) \end{aligned} \quad (13)$$

상기의 식 (13)을 정리하면 다음의 식 (14)와 같다.

$$A \frac{dV}{dt} = V_r^2 + B \cdot V_r + C = (V_r - \alpha)(V_r - \beta) \quad (14)$$

여기서,  $A = \frac{\rho L}{b - a}$ ,  $B = \frac{-2b \cdot V_t - c \cdot V_j}{b - a}$ ,  $C = \frac{b \cdot V_t^2 + c \cdot V_j^2 \mp a \cdot V_n^2}{b - a}$  이고,  $\alpha, \beta$  는 임의의 시간(t)에서의 터널 내 이론적 풍속값을 의미한다.

따라서 공용 중 터널 내 환기설비의 가동 중단 후의 터널 내 속도감쇄법에 따른 이론해(exact solution)는 식 (14)를 적분하여 다음의 식 (15)~(18)과 같이 유도할 수 있다.

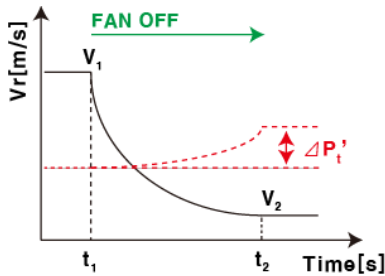
$$V_r(t) = \frac{\alpha - \beta \cdot \left(\frac{\alpha - V_1}{\beta - V_1}\right) \cdot e^{\frac{(\alpha - \beta)}{A} \cdot t}}{1 - \left(\frac{\alpha - V_1}{\beta - V_1}\right) \cdot e^{\frac{(\alpha - \beta)}{A} \cdot t}} \quad \text{or} \quad \ln \left| \frac{V_r - \alpha}{V_r - \beta} \right| = \textcircled{b} \times t + \textcircled{a} \quad (15) \text{ or } (16)$$

여기서,  $\textcircled{a} = \ln \frac{V_1 + V_2}{V_1 - V_2}$ ,  $\textcircled{b} = \frac{\textcircled{a}}{e^{\textcircled{a}}} = \frac{\alpha - \beta}{A} = \frac{a - b}{(\rho/2)} \cdot \frac{V_2}{L}$  이다. (17), (18)

이상에서  $\textcircled{b}$  값은 속도감쇄 그래프의 로그-로그 선형 회귀분석을 통해 구할 수 있다. 그러나  $b$  는 식 (11)의 교환기력 상수항으로 이 값을 도출하기 위해서는 터널 안을 주행하는 교통량에 각종 정보를 수집하여야 한다. 즉, 차종별 혼입률, 차종별 전면투영면적, 차종별 차량대수 등을 측정하여야 한다. 그러나 이와 같은 방법은 교환기력에 대한 변수들을 직접 측정해야하는 불편함이 있으므로  $b$  값을 직접 도출할 수 있는 이론적 방법을 다음 절에서 제시하였다.

### 4.3 속도감쇄에 따른 교환기력의 증가현상과 b값 도출 방법

Fig. 3과 같이 공용 중 터널에서는 환기팬을 정지하게 되면, 터널 내 풍속의 감소에 따른 교환기력의 변화가 발생하게 된다. 환기팬의 가동 중 압력평형식을 식 (19)에, 환기팬의 중지 후 압력평형식을 식 (20)에서와 같이 표현하면, 속도감쇄에 따른 압력차는 즉, 식 (19)에서 식 (20)을 빼면, 식 (21) or 식 (22)과 같이 표현할 수 있다.



- $P_t(V_1)$ : 시간( $t_1$ )일때의 교환기력
- $P_t(V_2)$ : 시간( $t_2$ )일때의 교환기력
- $\Delta P_{t'}$ : 속도감쇄에 따른 교통력 증가분

Fig. 3. Variation in piston effect due to velocity decay

환기팬 가동 중 압력평형식은 식 (19)와 같다.

$$P_r(V_1) = P_m + P_{jf} + P_t \quad (19)$$



환기팬 중지 후 압력평형식은 식 (20)과 같다.

$$P_r(V_2) = P_m + P_t + \Delta P_t' \quad (20)$$

식 (19)에서 식 (20)을 빼면, 식 (21)과 식 (22)가 도출된다.

$$P_r(V_1) - P_r(V_2) = P_{jf} - \Delta P_t' \quad (21)$$

$$a \cdot (V_1^2 - V_2^2) = c \cdot V_j \cdot (V_j - V_1) - \Delta P_t' \quad (22)$$

여기서,  $a$ 는 식 (9)와 식 (10)의 밑줄 친 부분,  $c$ 는 식 (12)의 밑줄 친 부분에 대한 치환상수값을 의미하며,  $\Delta P_t'$ 는 속도감쇄에 따른 교통환기력의 변화분을 나타내고 있다.

환기팬 가동단계에서의 교통환기력( $P_{t1}$ ) 및 환기팬 중지단계에서의 교통환기력( $P_{t2}$ )은 각각 다음의 식 (23), 식 (24)와 같이 표현이 가능하다.

$$P_{t1} = b \cdot (V_t - V_1)^2 = b \cdot V_t^2 - 2b \cdot V_t \cdot V_1 + b \cdot V_1^2 \quad (23)$$

$$P_{t2} = b \cdot (V_t - V_2)^2 = b \cdot V_t^2 - 2b \cdot V_t \cdot V_2 + b \cdot V_2^2 \quad (24)$$

여기서,  $V_1$ : 환기팬 가동 시 터널 내 풍속(m/s),  $V_2$ : 환기팬 중지 시 터널 내 풍속(m/s),  $V_t$ : 차량 주행속도(m/s)이며,  $b$ 는 식 (11)의 교통환기력에 대한 상수항이다.

식 (24)에서 식 (23)을 빼, 속도감쇄에 따른 교통환기력의 증분은 식 (25) 및 식 (26)과 같다.

$$\Delta P_t' = P_{t2} - P_{t1} \quad (25)$$

$$= -2b \cdot V_t (V_2 - V_1) + b(V_2^2 - V_1^2) = b(V_2 - V_1)[-2V_t + V_2 + V_1] \quad (26)$$

또한 식 (26)을 식 (21)에 대입하면 식 (27)과 같이 표현된다.

$$a \cdot (V_1^2 - V_2^2) = c \cdot V_j \cdot (V_j - V_1) - b(V_2 - V_1)[-2V_t + V_2 + V_1] \quad (27)$$

따라서 식 (27)을  $b$ 에 대하여 정리하면 식 (28)이 도출된다.

$$b = - \frac{a \cdot (V_1^2 - V_2^2) - c \cdot V_j \cdot (V_j - V_1)}{(V_2 - V_1)(-2V_t + V_2 + V_1)} = \frac{a \cdot (V_1^2 - V_2^2) - c \cdot V_j \cdot (V_j - V_1)}{(V_1 - V_2)(-2V_t + V_2 + V_1)} \quad (28)$$

식 (28)에서  $b$  값은  $V_1, V_2, V_t$  (평균 주행속도) 값을 측정하고,  $V_j$  (환기팬 토출풍속),  $c$  (환기팬 상수항) 값은 상수항으로 처리가 가능하다. 즉, 기존연구에서는 공용 중 터널에 대한 교통환기력의 변화를 고려할 수 없는 단점이 있지만, 본 연구에서는 교통환기력이 작용하는 터널에서도 총환기저항계수 및 벽면마찰계수를 추정할 수 있는 장점이 있다. 또한 차종별 혼입률, 차종별 전면투영면적, 차종별 차량대수 등과 같은 교통환기력에 대한 많은 변수를 직접 측정하지 않아도 교통환기력의 상수인  $b$  값을 직접 도출할 수 있는 장점이 있다.

#### 4.4 외부 자연풍의 변화를 고려한 동적 시뮬레이션 기법

속도감쇄에 따른 방법은 수렴풍속( $V_2$ ) 값이 0보다 큰 경우에는 이론적 해를 가지지만, 음수인 경우에는 해를 찾을 수 없는 단점이 있다. 즉, 이론적으로 속도감쇄법을 이용한 벽면마찰계수의 추정은 측정된 풍속값이 양수이어야 하는 조건이 발생하나, 터널 내 풍속값은 항상 양수값 만을 가질 수 없으며, 외부 자연풍 역시 항상 일정할 수 없는 조건이 발생한다. 따라서 이를 해결하기 위하여 시간에 따른 준정상류(Quasi-Steady State Flow) 해석을 이용하여 터널 내 벽면마찰계수를 추정할 필요가 있다.

Fig. 4는 속도감쇄법을 적용할 수 있는 영역과 동적 시뮬레이션이 필요한 경우에 대한 예를 나타내고 있다. 먼저 (a)는  $V_2$  값이 0 보다 큰 경우로 외부 자연풍이 일정할 경우, 속도감쇄법을 적용하면 정확한 벽면마찰계수를 추정할 수 있다. 반면 (b)는 외부 자연풍이 일정하여도  $V_2$  값이 0 보다 작은 경우로 이때는 속도감쇄법을 적용할 수 없다.

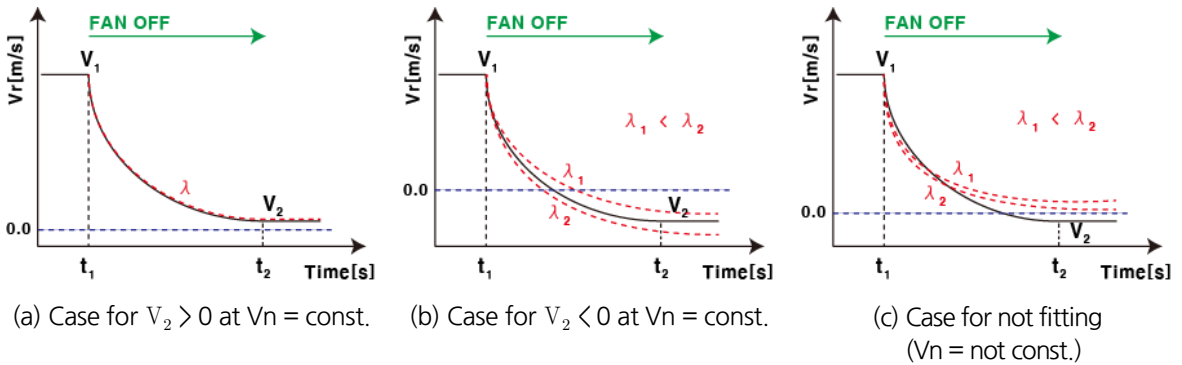


Fig. 4. Classification range for applications of velocity decay method vs dynamic simulation method

(b)와(c)의 경우는 동적 시뮬레이션에 의한 해석이 필요하며, (b)는 외부 자연풍이 일정할 경우로, 초기 벽면마찰계수 값을 가정하여 시행착오법(Trial and error method)으로 벽면마찰계수를 추정할 수 있다. 그러나(c)의 경우는 외부 자연풍을 고정하고서는 수렴(Fitting)을 시킬 수 없는데, 이는 환기팬의 가동을 정지한 이후 외부 자연풍의 급격한 변화로 터널 내 풍속의 변화가 발생한 경우이다. 따라서 터널 내 벽면마찰계수의 추정을 위해서는 수렴후 풍속인  $V_2$  값이 양수 혹은 음수인지 확인여부와 동적 시뮬레이션 해석 시 외부 자연풍의 변화를 검토한 후에 초기 벽면마찰계수의 가정에 따른 시행착오법과 외부 자연풍의 변화를 고려한 동적 시뮬레이션의 수행여부를 판단하여야 한다.

일반적인 동적 시뮬레이션을 구현하기 위해 랑케쿠타(Runge-Kutta) 알고리즘을 적용하면 Fig. 5와 같이 표현할 수 있다. Fig. 5에서 (a)는 준정상류 해석을 위한 해석시간(rTime)에 대한 메인함수를 나타내고 있으며, (b)는 4차 랑케쿠타 알고리즘을 나타내고 있다. (c)의 경우는 시간증분(dTime) 동안의 각종 환기력의 모멘텀 증분에 따른 유속의 증분을 표현하고 있다. 따라서 동적 시뮬레이션에 따라 각종 환기력별(P1, P2 ...)로 시간증분(dTime)에 따른 유속의 증분(dVr)을 구할 수 있으므로 시간에 따른 터널 내 풍속(Vr)은  $Vr = Vr + dVr$  으로 계산할 수 있다.

<pre> Sub Quasi_Sim()   rTime = 0; dTime = 1   Vr = V1 ; init velocity   Do     dVr = R-K_dVr(Vr)     Vr = Vr + dVr     rTime = rTime + dTime   Loop Until rTime &gt; Total_Time End Sub                 </pre> <p>(a) Main routine</p>	<pre> Func. R-K_dVr(X)   K1 = dTime × f_dVr(x)   K2 = dTime × f_dVr(x + K1/2)   K3 = dTime × f_dVr(x + K2/2)   K4 = dTime × f_dVr(x + K3)   R-K_dVr = (K1+2*K2+2*K3+K4)/6                 </pre> <p>(b) 4th R-K algorithm</p>	<pre> Func. f_dVr(X)   Rho_Len = Rho * Lr   P1 = dP_1(X) ; Vent force1(ex fan)   P2 = dP_2(X) ; Vent force2(ex traffic)   ...   f_dVr = (P1 + P2 + ....) / Rho_Len   (ex) dP_1 = Eq 4.1, dP_2 = Eq 4.2, dP_3 =   Eq 4.3, dP_4 = Eq 4.4 ...                 </pre> <p>(c) dVr function</p>
---	---	---

Fig. 5. Programming logic for dynamic simulation analysis

이상으로 공용 중 터널 내 벽면마찰계수 추정을 위한 속도감쇄법과 동적 시뮬레이션을 위한 프로그램 로직은 Fig. 6과 같이 요약된다.

터널 내 벽면마찰계수를 추정하기 위해서 팬 가동 시 풍속( $V_1$ ), 팬 정지 후 수렴풍속( $V_2$ )과 차량의 평균주행 속도( $V_t$ )의 측정이 필요하며, 만일 수렴풍속  $V_2$  값이 음수일 경우는 자연풍( $V_n$ )의 측정이 필요하다. 쌍굴터널에서 자연풍을 측정하는 손쉬운 방법은 속도감쇄법을 측정(수행)하지 않는 상대터널에서 시간에 따른 풍속자료를 측정하면 된다. 기타 터널제원(연장, 단면적, 대표직경 등) 및 팬 환기력 상수항(c)은 알려진 변수(known variable)이고, 교통환기력의 상수항(b)은 식 (28)로 계산이 가능하다. 또한 데이터의 유효성 판별을 위해서는 팬 가동 전 풍속( $V_0$ )과 팬 정지 후 수렴풍속( $V_2$ )의 풍속비교가 필요하므로 터널 내 풍속( $V_0, V_1, V_2$ ) 및 평균차속 ( $V_t$ ) 그리고 동적 시뮬레이션 해석을 위한 자연풍( $V_n$ )의 측정이 필수적이 된다.

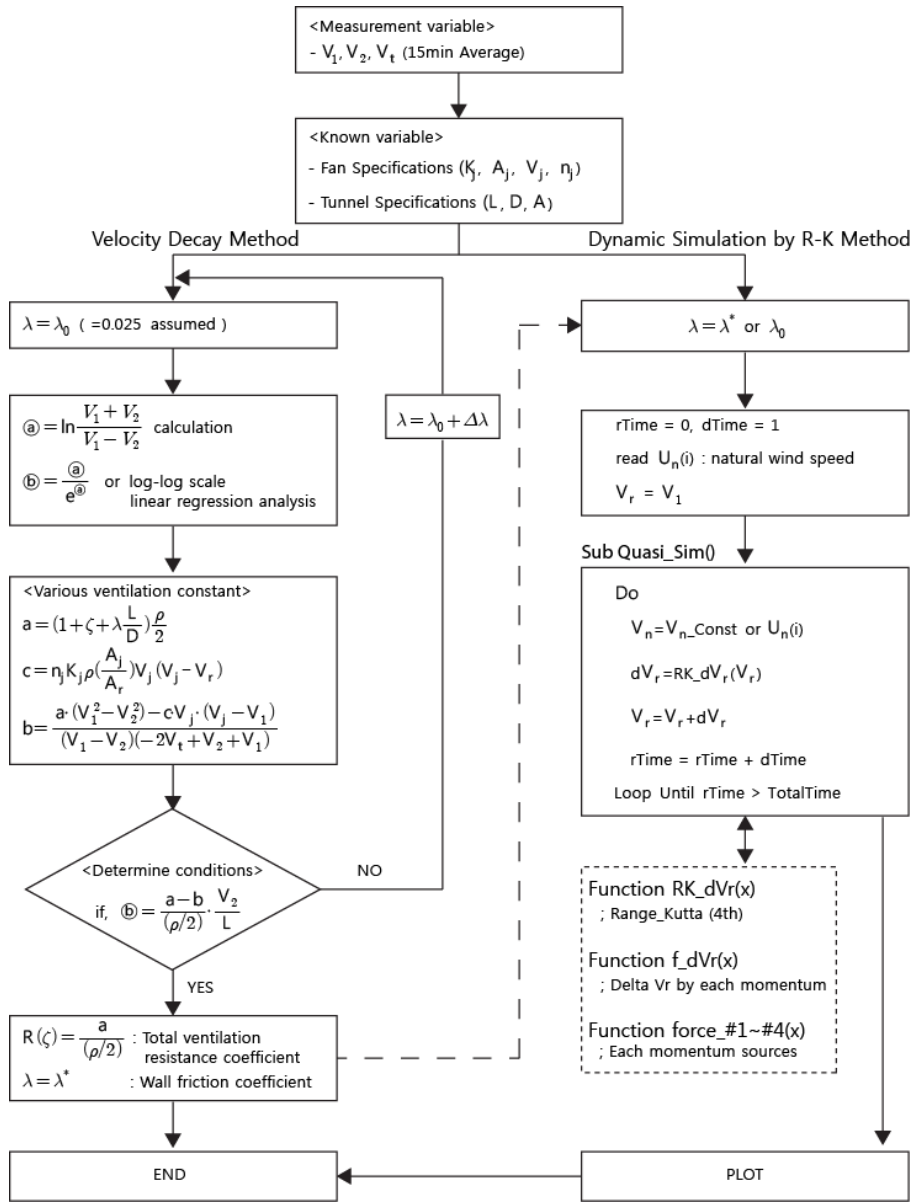


Fig. 6. Programming logic map for estimation of wall friction coefficient

Fig. 4에서는 제시하지 않았지만, 교통신기력과 자연환기력이 모두 급격하게 변하는 경우는 정확한 분석이 곤란할 수 있는데, 이를 극복하기 위해서는 교통상황이 천이하는 구간(transient time)에서 측정된 데이터 활용하기 보다는 일정한 지체조건이나 일정한 원할조건이 지속되는 조건하에서 측정된 데이터를 이용하는 것이 유리하다. 즉, 교통신기력이 일정하다고 가정할 수 있는, 팬 가동 중 시간( $t_1$ )과 팬 정지 후 시간( $t_2$ ) 동안에 평균차속( $V_t$ )의 편차가 크지 않거나, 일정한 경우( $V_t = \text{const}$ )에는 외부 자연풍의 급격한 변화가 발생하여도 실시간으로 획득한

외부 자연풍에 대한 이동창 평균(moving window average) 방법을 적용하여 시간간격(dTime)을 제어할 경우는 상대적으로 유효한 데이터를 분석할 수 있는 장점이 있다.

Fig. 5, 6에서 제시한 프로그램 로직처럼, 1차원 준정상류 해석으로 터널 내 벽면마찰계수를 추정할 수 있는 이유는 비압축성 유동에서 레이놀즈 수에 따른 마찰계수의 변화영역이 극히 제한적이기 때문이다. 즉, 일반적으로 레이놀즈 수가 증가하더라도 벽면마찰계수 곡선은 레이놀즈 수에 영향을 받지 않고 수평으로 그려지는 영역이 생기는데, 이 영역을 유동의 거칠은 관 영역(rough-pipe zone of flow) 또는 난류역(complet turbulent zone) 이라고 한다. 특수한 천이구간의 유동을 제외하고 대부분의 터널 내 유동장은 이 난류역에 속한다(Park, 1990; Munson et al., 2002).

#### 4.5 속도감쇄법 및 동적 시뮬레이션 기법에 의한 실측자료 분석(예)

다음은 속도감쇄법에 의한 자료해석과 동적 시뮬레이션에 의한 해석방법의 예를 나타내고 있다. 대상터널은 춘천~양양간 고속도로상의 ○○ 터널과 △△ 터널에 대하여 실측한 TAB 자료를 바탕으로 터널 내 마찰계수를 추정한 사례이다. 보다 자세한 실측자료의 분석내용은 2차 논문을 통해 발표하고, 본 연구에서는 프로그램 로직 개발과 관련하여 이론적 적용 가능성에 대한 사례로 일부 분석사례를 수록하였다.

Fig. 7의 (a)는 수렴풍속이 0 m/s 보다 큰 경우로 전통적인 속도감쇄법을 적용할 수 있는 경우이며, (b)는 수렴 풍속이 0 m/s 보다 낮은 음수인 경우로 속도감쇄법이 아닌 동적 시뮬레이션에 기법으로 분석을 수행한 예를 나타내고 있다. (a)의 경우, 초기풍속과 수렴풍속의 조건이 벽면마찰계수의 추정에 큰 영향을 미치는데, 본 사례에서는 실측값과 추정값이 비교적 상관도(결정계수,  $R^2 = 0.88$ )가 높게 나타나고 있어 ○○ 터널에 대한 벽면마찰계수값은 0.018 정도로 추정할 수 있다. 반면, (b)의 경우는 초기 벽면마찰계수를 가정하고 시행착오법으로 벽면마찰계수값을 추정한 사례이다. 이 경우는 벽면마찰계수값을 0.019로 가정한 경우가 실측자료와 잘 일치하는 것을

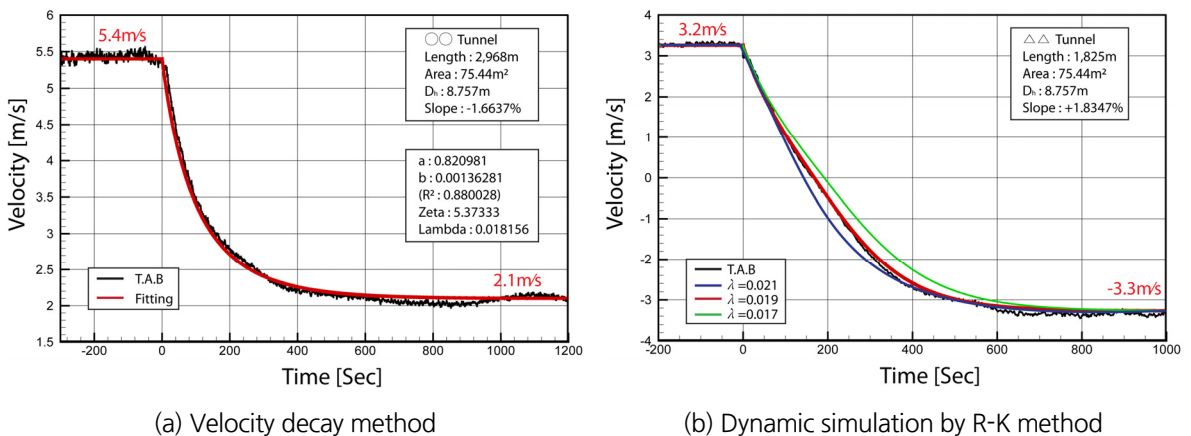


Fig. 7. Estimation of the wall friction coefficient in tunnels by two methods (example)

알 수 있으며,  $\Delta\Delta$  터널의 벽면마찰계수값은  $0.017 < \lambda < 0.021$  로 추정된다. 이상의 2가지 실측사례를 통한 벽면마찰계수의 추정 모두 현행 설계에서 적용하고 있는 터널 내 벽면마찰계수값  $\lambda = 0.025$  보다 낮은 범위를 나타내고 있는데, 이는 터널 내 환기력 계산 시 환기설비용량에 직접적인 영향을 미치는 변수이므로 현장측정 결과를 반영한 설계기준값의 재정립이 필요한 부분임을 암시하고 있다. 따라서 향후 설계기준 개정 시 터널 내 벽면마찰계수값에 대한 합리적인 재정립이 필요한 부분이다.

## 5. 결론

터널 벽면마찰계수를 추정하기 위한 방법은 기존 선행연구에서 속도감쇄법(VDM)이 보고된 적이 있으나 이는 차량의 통행이 없는 상태에서 관련식을 유도하여 이론해를 제시하고 있다. 그러나 터널 내 수렴풍속( $V_2$ )값이 음수(-)인 경우나 자연풍의 변화가 큰 경우에는 관련 데이터를 활용할 수 없는 단점이 있었다. 본 연구에서는 이와 같은 단점을 극복하기 위해 차량의 통행이 있는 상태 즉, 공용 중 터널에서의 벽면마찰계수 추정을 위한 이론해를 도출하였고, 또한 수렴 풍속값이 음수(-)인 경우나 자연풍의 변화가 있는 경우에도 실측한 자료를 이용하여 분석할 수 있는 프로그램 로직을 개발하였다. 이상의 연구내용을 요약하면 다음과 같다.

1. 기존 연구(Bruin et al.,1997)에서는 교통력이 없는 경우에 대하여 속도감쇄법에 따른 이론해가 주어졌으나, 본 연구에서는 교통량을 차단하지 않고도 공용 중 터널에서 속도감쇄법에 따른 벽면마찰계수를 추정할 수 있는 이론해를 제시하였다.
2. 교�통환기력이 작용하는 공용 중 터널에서 가동 중인 팬을 중지하게 되면 터널 내 속도감쇄에 따른 교�통환기력의 상대적 증가현상이 발생하게 된다. 또한 교�통환기력에 관한 많은 변수들(차종별 교통량, 차종별 혼입률, 차종별 전면투영면적 등)을 직접 측정하지 않고도 교�통환기력의 상수항인  $b$  값을 직접 도출할 수 있는 방법을 제시하였다.
3. 터널 내 벽면마찰계수를 추정하는 방법에는 이론적 해를 분석한 속도감쇄법과 터널 내 작용하는 개별 힘들의 모멘텀 방정식을 동적 시뮬레이션법으로 해석하는 방법이 있다. 이중 속도감쇄법은 수렴풍속( $V_2$ )이 양수(+)일 경우만 적용 가능하고, 음수(-)일 경우에는 동적 시뮬레이션에 의한 방법이 적합한 것으로 분석된다.
4. 공용 중 터널에 대한 동적 시뮬레이션이 가능한 방법으로 4차 랭케쿠타법을 이용한 프로그램 로직을 개발하였고, 제시된 로직은 팬 정지 후 자연풍의 급격한 변화가 있어도 교�통환기력이 일정한 패턴으로 작용할 경우에는 총환기저항계수를 유추할 수 있으므로 이에 따른 터널 벽면마찰계수의 추정이 가능한 것으로 판단된다.
5. 터널 내 벽면마찰계수에 대한 연구는 터널의 환기 및 방재설비의 용량을 결정하는 중요한 기초연구의 한 분야이며, 본 연구에서 제시된 방법과 향후 실측실험을 통해 획득한 데이터의 분석을 통해 적정 설계인자(벽면마찰계수)의 도출로 합리적인 설계가 가능할 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 2017년 건설기술연구사업의 ‘고수압 초장대 해저터널 기술 자립을 위한 핵심요소 기술개발(17SCIP-B066321-05)’ 연구단을 통해 수행되었습니다.

## References

1. Bruin, A., Maarsingh, R., Swart, L. (1997), “New attempts to solve an old problem: aerodynamic measurements in new vehicle tunnels”, Proceedings of 9th International Conference on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, pp. 3-23.
2. Jang, H.M., Chen, F. (2002), “On the determination of the aerodynamic coefficients of highway tunnels”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, Vol. 8, pp. 869-896.
3. KICT (2014), The research of the road tunnel ventilation guidelines establishment considering the economics (1st Final Report), Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, pp. 129-142.
4. Kim, H.G. (2000), A study on natural ventilation in local vehicle tunnels, Master’s Thesis, Dong-A University, pp. 80-86.
5. Kim, H.G., You, S.J., Lee, J.W., Lee, C.W. (2000), “In-situ measurement for ventilation resistance coefficient in road tunnels”, Proceedings of 74th Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, pp. 223-225.
6. Lee, K.B. (2005), A study on the aerodynamic coefficients in local vehicle tunnels, Master’s Thesis, Dong-A University, pp. 30-57.
7. Lee, K.B., Lee, C.W., Kim, H.G. (2004), “An in-situ study of the wall friction coefficient in road tunnels”, Proceedings of Korean Society for Rock Mechanics, pp. 61-72.
8. Lew, J.O., Rie, D.H. (2002), An experimental study on friction loss factor for attachment method of illuminator in tunnel, R&D Center of In-Cheon University (ISSN 1225-4509), pp. 183-190.
9. Lotsberg, G. (1997), “Investigation of the wall-friction, pressure distribution, and the effectiveness of big jet fans with deflection blades in the Fodnes tunnel in Norway”, Proceedings of the 9th Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, pp. 25-41.
10. MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport) (2011), Road design manual (617. ventilation), pp. 617-45-617-46.
11. MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport) (2016), Guidelines for fire prevention equipment’s installation and management in road tunnels, pp. 60-63.
12. Munson, B.R., Young, D.F., Okiishi, T.H. (2002), Fundamental of Fluid Mechanics, 4th Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 443-521.
13. Park, Y.D. (1990), Fluid Mechanics, Bosung-munhwasa, Seoul, pp. 145-188 (Original Edition: John, J.E.A., Haberman, W.L. (1980), Introduction to Fluid Mechanics, 2nd Edition).