현장측정을 통한 터널 내 벽면마찰계수 추정 연구

김효규[1*] · 최판규[2] · 이호형[3] · 백두산[4] · 나광훈[5]

[1]정회원, (주)주성지앤비 대표이사
[2]정회원, (주)주성지앤비 팀장
[3]정회원, (주)주성지앤비 대리
[4]비회원, (주)주성지앤비 주임
[5]비회원, (주)이음엔지니어링 이사

The estimation of the wall friction coefficient in tunnels by in-situ measurement

Hyo-Gyu Kim[1*] · Pan-Gyu Choi[2] · Ho-Hyung Lee[3] · Doo-San Baek[4] · Kwang-Hoon Na[5]

[1]CEO, Jusung G&B Inc.
[2]Team Leader, Jusung G&B Inc.
[3]Assistant Manager, Jusung G&B Inc.
[4]Assistant Manager, Jusung G&B Inc.
[5]Director, Eum Engineering Inc.

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

Abstract

In most of cases, the wall friction coefficients applied for local tunnel design are quoted directly from foreign data or local design guideline. In the previous studies, the wall friction coefficient was estimated using the velocity decay method. However, it is difficult to estimate the wall friction coefficient when the convergence wind velocity in the tunnel is negative (-) or if there is a change in the natural wind. Therefore, in this study, the wall friction coefficient is estimated by applying the dynamic simulation technique in addition to the conventional the velocity decay method. As a result of the analysis, the coefficient of wall friction in the tunnels for the total of 9 tunnels (18 tubes both directions) was 0.011~0.025, and the mean value was estimated to be 0.020. In addition, the wall friction coefficient obtained quantitatively through this study was compared with the current design criteria.

Keywords: Wall friction coefficient, Total ventilation resistance coefficient, Dynamic simulation, Velocity decay method, In-situ measurement

초 록

현재 국내터널에 적용중인 벽면마찰계수는 단순히 외국의 연구결과를 인용하여 사용하고 있는 실정이다. 또한 기존 선행연구들에서는 속도감쇄법을 이용하여 벽면마찰계수를 추정하였으나, 터널 내 수렴풍속이 음수(-)이거나 자연풍의 변화가 있는 경우에는 벽면마찰계수에 대한 추정이 어려운 점이 있었다. 이에 따라 본 연구에서는 기존 속도감쇄

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
20(2)405-421(2018)
https://doi.org/10.9711/KTAJ.2018.20.2.405

eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

Received February 1, 2018
Revised February 22, 2018
Accepted February 26, 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

법과 더불어 동적 시뮬레이션기법을 적용하여 벽면마찰계수를 추정하였다. 분석결과, 총 9개 터널(양방향 18개 튜브)에 대한 터널 내 마찰계수는 0.011~0.025 정도로 분석되었으며, 평균값은 0.020로 추정되었다. 또한, 본 연구를 통해 정량적으로 획득한 벽면마찰계수를 현재 적용중인 설계기준과 비교하였다.

주요어: 벽면마찰계수, 총환기저항계수, 동적 시뮬레이션, 속도감쇄법, 현장측정

1. 서 론

터널환기 설계 시 환기팬 용량은 터널 내 환기 저항력을 극복하기 위해 필요한 승압력으로 결정된다. 즉, 터널 내 순방향으로 작용하는 환기력은 교통 환기력과 팬 환기력이 있으며, 역방향으로 작용하는 저항력에는 자연환기력(자연풍 저항력)과 통기저항력이 있다. 자연환기력은 순풍 혹은 역풍조건에 따라 환기력 혹은 저항력으로 작용할 수 있지만, 통기저항력은 터널 내 기류형성과 반대방향으로 작용하는 저항력이 된다. 이러한 통기저항력은 덕트(Duct) 이론에 따라 터널 내 입구 및 출구 손실계수와 벽면마찰계수에 의해 주로 결정되며, 기타 부차손실계수의 합으로 구성된다. 특히, 장대터널에서는 벽면마찰계수의 영향이 지배적이며, 이 값의 크기에 따라 환기설비의 용량이 결정되는 중요한 환기설계인자가 된다.

본 연구에서는 이전 연구자료(Kim et al., 2018)와 최근 개통한 고속국도 제60호선 춘천~양양 간(동홍천~양양 간) 건설공사 노선중 공구별 터널에서 측정한 TAB 자료를 바탕으로 국내 터널 내 벽면마찰계수 추정에 대한 연구를 수행하였다. 또한 환기설계기준으로 적용되고 있는 벽면마찰계수(λ) 값인 0.025에 대하여 본 연구의 추정 결과와 비교하였다(MOLIT, 2011).

2. 벽면마찰계수 추정 이론

제트팬에 의한 종류식 환식방식을 적용하고 있는 대부분의 일자형 터널 내 유체흐름은 덕트이론(Park, 1989)에 따라 1차원 유동으로 단순화할 수 있다. 즉, 터널 내공단면적이 일정하고 공기의 유·출입의 변화가 없다면 터널 내 평균풍속은 시점부, 중앙부, 종점부 등 종방향으로 어떤 지점에서도 동일하게 측정될 수 있다. 따라서 터널 내 풍속계측기의 설치 위치에서 터널단면상의 평균풍속을 대표할 수 있다면, 일정한 지점에서 시간 변화에 따른 풍속값을 연속적으로 측정할 수 있다.

터널 내 풍속은 준정적 상태이며, 외부자연풍에 의한 환기력(또는 저항력)이 급격한 변화가 없다고 가정하면, 환기팬이 가동상태에서 정지할 때 터널 내 풍속감소는 터널 내 총환기저항력에 기인하게 되며, 이것은 뉴턴의 제2법칙으로 설명될 수 있다. 따라서 환기팬을 중단한 이후의 터널 내 작용하는 운동량 방정식은 식 (1)과 같다.

$$\pm \Delta P_m - \zeta \frac{\rho}{2} V^2 = \Delta p - \lambda \frac{L}{D} \frac{\rho}{2} V^2 = \rho L \frac{dV}{dt} \tag{1}$$

여기서, $\pm \Delta P_m$은 외부 자연풍에 의한 터널 내 작용하는 자연환기력을 나타내고, Δp는 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, L은 터널연장, D는 대표직경, ρ은 공기밀도, V는 터널 내 유속을 의미한다.

시간에 따른 자연환기력(ΔP_m)의 변화가 일정하다고 가정할 경우, ΔP_m는 상수화가 가능하고 최종적인 방정식은 식 (2)와 같다.

$$\pm \Delta P_m = \zeta \frac{\rho}{2} V^2 \tag{2}$$

여기서, V는 자연환기력에 의해 수렴된 풍속(V_2)을 의미한다.

환기팬 가동을 중단한 이후의 터널 내 풍속은, 식 (1)을 적분하여 얻을 수 있으며, 이론해(exact solution)는 다음의 식 (3)~(6)과 같이 표현할 수 있다.

$$V(t) = V_2 \frac{e^{a+bt}+1}{e^{a+bt}-1} \text{ or } \ln \frac{V(t)+V_2}{V(t)-V_2} = a + bt \qquad \text{(3) or (4)}$$

여기서, $a = \ln \frac{V_1 + V_2}{V_1 - V_2}$, $b = \zeta \frac{V_2}{L}$ 이다 (5), (6)

즉, 환기팬 가동을 중단한 직후의 풍속은 t = 0일 때, V_1이며, 최종적인 속도감쇄 후의 수렴풍속은 t = ∞ 일 때 V_2가 된다. 상기 식에서 a는 직접적으로 V_1, V_2 값을 측정하면 결정할 수 있으며, b는 y절편이 0인 선형 회귀분석으로부터 결정할 수 있다. 따라서 b 값을 결정되면 총환기저항계수인 ζ 값이 결정되고, 이에 따라 벽면마찰계수인 λ 값도 결정할 수 있게 되며, 이러한 방식에 의해 벽면마찰계수값을 추정하는 방식을 속도감쇄법(Velocity Decay Method, V.D.M)라 한다(Bruin and Maarsingh, 1997).

한편, 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, 외부자연풍 역시 항상 일정할 수 없는 조건이 발생한다. 따라서 이를 해결하기 위하여 시간에 따른 준정상류(Quasi-Steady State Flow)를 가정한 동적시뮬레이션 기법을 이용하여 터널 내 벽면마찰계수를 추정할 필요가 있다. 동적 시뮬레이션 기법 중 룽게-쿠타(Runge-Kutta) 알고리즘을 적용하여 외부자연풍의 변화가 일정하지 않고, 수렴풍속(V_2)값이 0보다 작

은 경우에도 터널 내 벽면마찰계수를 추정할 수 있는 방법에 대하여 소개하였으며(Kim et al., 2018), 본 연구에서 수렴풍속(V_2)가 음수이거나 외부자연풍이 일정하지 않은 경우에 해당 기법을 적용하여 터널 내 벽면마찰계수를 추정하였다.

3. 터널 내 벽면마찰계수 현장측정

3.1 대상터널

터널 내 벽면마찰계수 분석을 위해 측정대상 터널의 제원은 Table 1과 같다. 대상터널은 최근 개통된 고속국도 제60호선 춘천~양양간(동홍천~양양간) 건설공사 노선중 각 공구별 터널 중 표에서 보는 것과 같이 총 9개 터널

Table 1. Tunnel data

Case	Case 1		Case 2		Case 3		Case 4		Case 5	
Direction	Chun-cheon	Yang-yang	Chun-cheon	Yang-yang	Chun-cheon	Yang-yang	Chun-cheon	Yang-yang	Chun-cheon	Yang-yang
Design speed (km/hr)	100		100		100		100		100	
Length (m)	1,257	1,240	1,425	1,422	1,825	1,773	1,821	1,817	2,257	2,287
Slope (%)	+2.99	-2.99	-1.98	+1.98	+1.83	-1.84	+1.49	-1.49	-0.41	+0.41
Elevation (m)	312	312	475	475	421	421	386	389	366	368
Area (m^2)	75.44	75.44	75.44	75.44	75.44	75.44	75.44	75.44	75.42	75.42
Perimeter (m)	34.46	34.46	34.46	34.46	34.46	34.46	34.46	34.46	34.46	34.46
Hydraulic diameter (m)	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.59	8.59
Lanes (ea)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
AADT (veh/day)	27,646		27,280		27,280		27,280		26,350	

Case	Case 6		Case 7		Case 8		Case 9	
Direction	Chun-cheon	Yang-yang	Chun-cheon	Yang-yang	Chun-cheon	Yang-yang	Chun-cheon	Yang-yang
Design speed (km/hr)	100		100		100		100	
Length (m)	2,666	2,665	10,965	10,962	1,311	1,311	2,917	2,968
Slope (%)	-0.42	+0.35	+1.95	-1.95	+1.78	-1.66	+1.66	-1.66
Elevation (m)	426	426	325	325	152	150	126	126
Area (m^2)	75.44	75.44	77.06	77.06	75.44	75.44	75.44	75.44
Perimeter (m)	34.46	34.46	35.38	35.38	34.46	34.46	34.46	34.46
Hydraulic diameter (m)	8.757	8.757	8.712	8.712	8.757	8.757	8.757	8.757
Lanes (ea)	2	2	2	2	2	2	2	2
AADT (veh/day)	26,350		27,280		25,377		25,377	

(상·하행 방향을 구분한 총 18개 튜브의 터널)을 대상으로 측정이 진행되었으며, 총 96개의 풍속 샘플을 획득하였다. 대상터널은 2차로 단면의 일반적인 고속도로 터널의 제원을 가지고 있다.

3.2 풍속측정 방법 및 결과

2017년 4월 24일부터 5월 4일까지 측정한 터널 내 풍속결과를 Table 2에 정리하였으며, V_r은 각각 터널 내 제트팬 가동 전·중·후에 따른 평균풍속을 의미하고, V_n은 외부 자연환기력에 의해 유도된 터널 내 풍속(외부 자연풍)을 의미한다. 풍속 측정은 1회 측정 당 가동 전(V_0), 가동 중(V_1), 가동 후(V_2)에 대하여 각각 20분씩 총 1시간을 측정하였으며, 측정 시 제트팬 대수는 터널 내 설치된 제트팬 대수에 따라 1회 측정 종료 후 가동 대수를 증가시켜 측정하였다. 측정지점은 TAB 절차에 따라 터널 내 중앙부에 단면상의 18개 지점 다채널 열선식 풍속계를 설치하고 1초 간격으로 풍속 데이터를 획득한 후 평균풍속을 계산하였다. 이때, 외부 자연환기력에 의한 터널 내 자연풍의 영향은 제트팬을 가동하지 않는 상대편 터널에서 동일하게 열선식 풍속계를 이용하여 동시간대에 대한 풍속자료를 획득하였다(Fig. 1).

Table 2. Velocity measurement data (V_r, V_n)

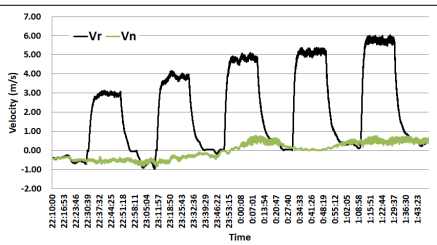
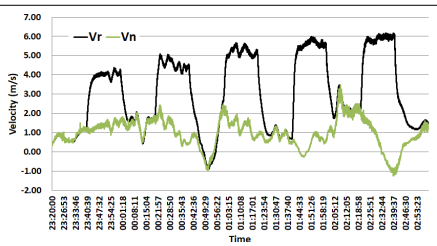
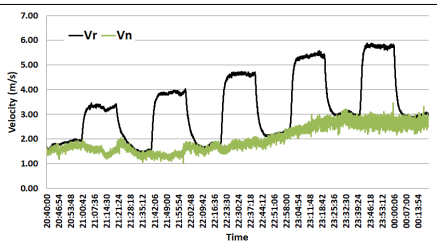
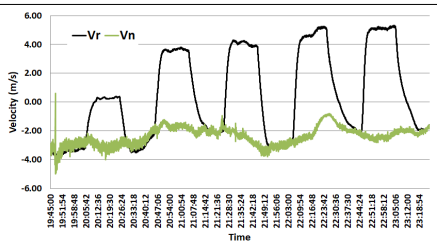
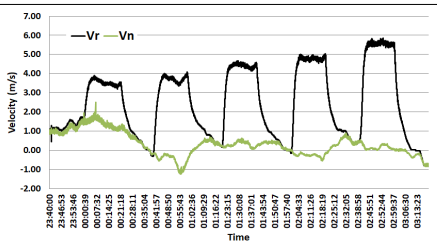
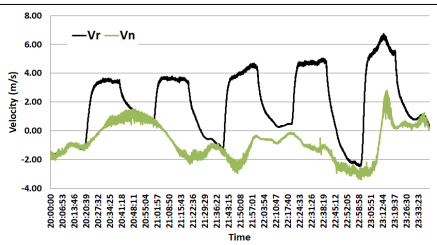
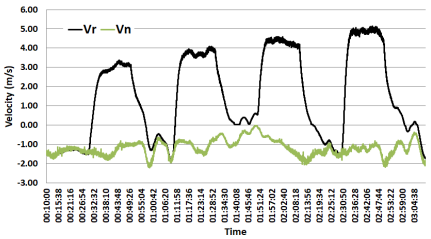
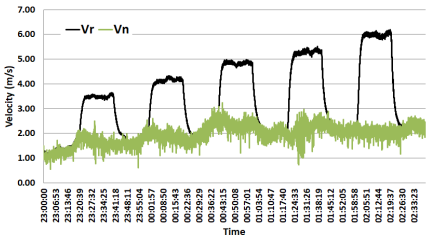
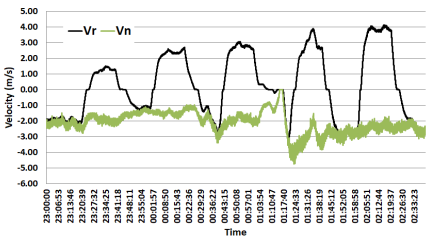
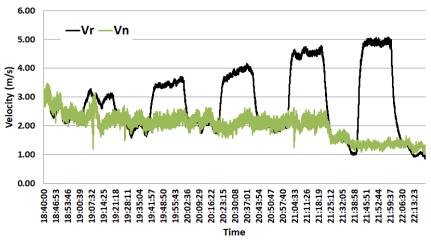
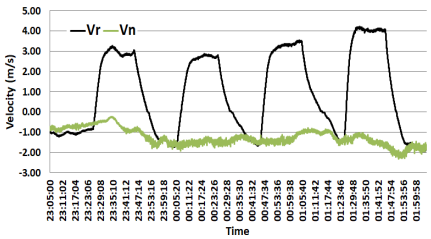
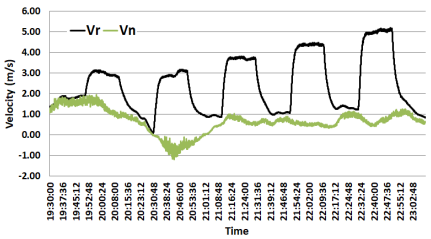
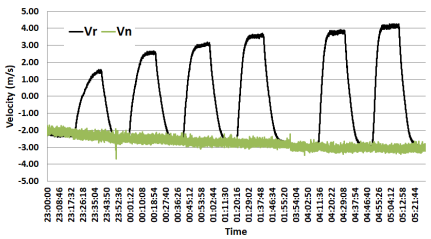
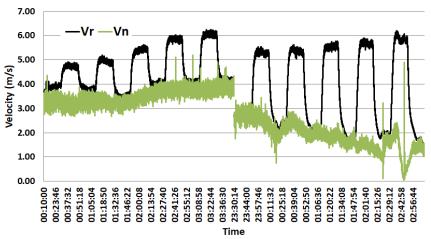
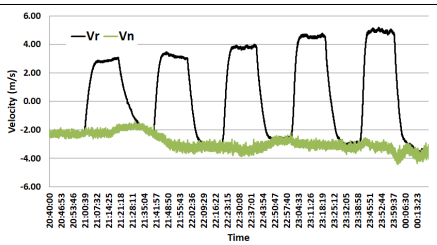
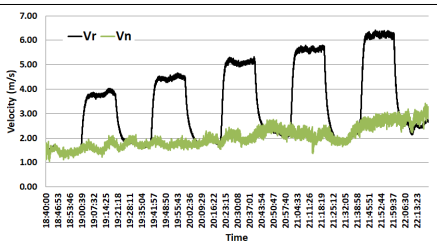
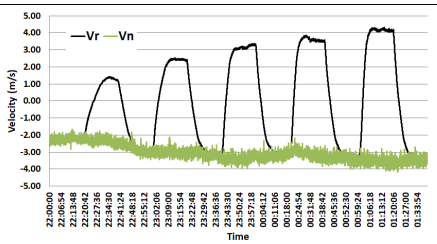
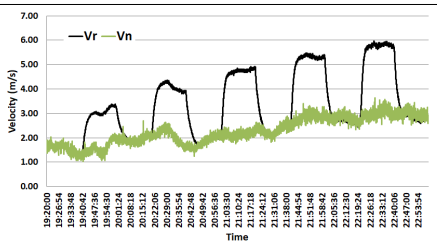
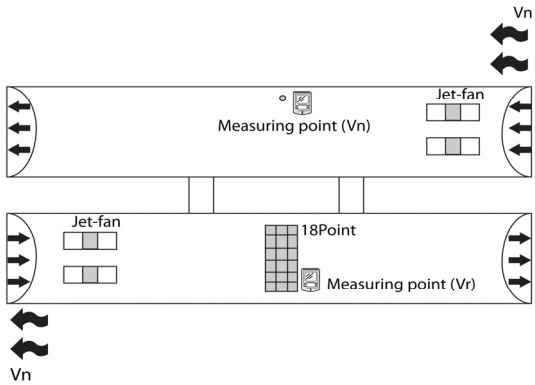
Case (sample)	Chuncheon direction	Yangyang direction
Case 1 (10 ea)		
Case 2 (10 ea)		
Case 3 (10 ea)		

Table 2. Velocity measurement data (V_r, V_n) (continue)

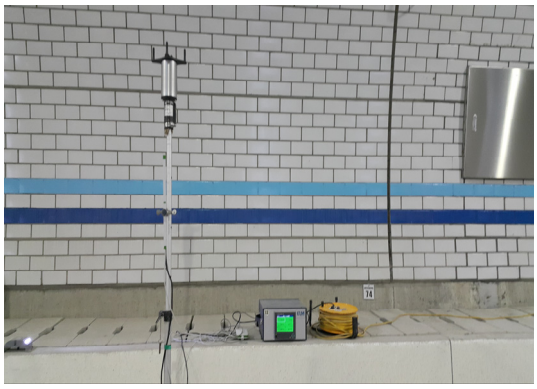
Case (Sample)	Chuncheon direction	Yangyang direction
Case 4 (9 ea)		
Case 5 (10 ea)		
Case 6 (9 ea)		
Case 7 (16 ea)		
Case 8 (10 ea)		
Case 9 (10 ea)		



(a) Layout for in-situ measurement

(b) Measuring equipment (velocity data logger)

(c) Photograph #1 (measuring tunnel side; V_r)



(d) Photograph #2 (opposite tunnel side; V_n)

Fig. 1. Overview and photos of in-site measurement

4. 벽면마찰계수 분석결과

4.1 속도감쇄법 및 동적시뮬레이션을 이용한 분석결과

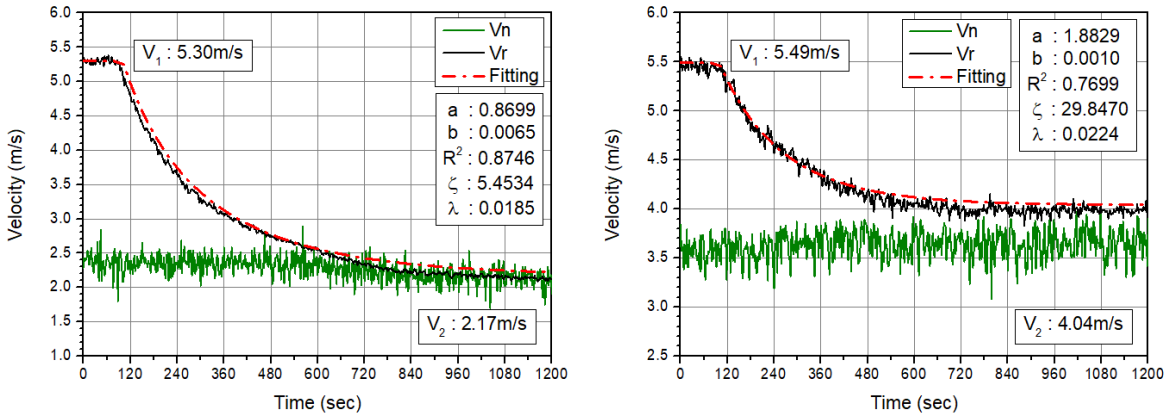
터널 내 평균풍속은 제트팬의 가동에 따라 증가하여 제트팬 가동 중 풍속(V_1)에 수렴이 되고, 제트팬의 가동이 정지됨에 따라 터널 내 평균풍속은 터널 내에 작용중인 벽면마찰계수를 비롯한 총 환기저항계수에 의해 감소되기 시작하여 제트팬 가동 후 풍속(V_2)에 도달하게 된다. 이때의 풍속은 반대방향 터널에서 측정된 자연풍속(V_n)과 일치되어야 한다. 이상으로부터 전체 터널에 대한 벽면마찰계수에 대한 분석을 수행하였으며, 분석결과에 앞서 먼저 속도감쇄법에 의한 분석 예시를 Fig. 2에 나타내었다. 그리고 동적시뮬레이션에 의한 분석 예시를 Fig. 3에 나타내었다.

속도감쇄법을 적용한 Fig. 2(a)에는 Case 4의 측정풍속 중 양양방향 터널에 대하여 제트팬 5대 가동 시, 제트팬 가동정지 이후 시간에 따른 터널 내 평균풍속(V_r)과 자연풍속(V_n), 그리고 속도감쇄법에 의하여 회귀분석된 추

정풍속(Fitting)을 나타내고 있고, Fig. 2(b)에는 Case 7의 양양방향 터널에 대하여 제트팬 16대 가동 시, 시간에 따른 터널 내 평균풍속(V_r), 자연풍속(V_n), 회귀분석된 추정풍속(Fitting)을 나타내고 있다. 두 경우 모두 제트팬의 가동에 따른 터널 내 평균풍속의 경향은 제트팬 가동 중 풍속(V_1)이 점차 감소하여 반대방향 터널에서 측정된 자연풍속(V_n)과 일치하는 경향을 보이고 있으며, 회귀분석된 풍속은 실제 측정된 터널 내 평균풍속과 유사하게 나타나고 있다. 세부적으로 살펴보면, 먼저 Fig. 2(a)에서 제트팬 가동 중 풍속(V_1)은 5.30 m/s로 나타났으며, 제트팬의 가동이 완전히 정지된 후 수렴된 풍속(V_2)는 2.17 m/s로 나타났다. 그리고 자연풍속은 시간에 따라 비교적 일정하게 유지되고 있는 것을 확인 할 수 있다. 속도감쇄법에 따른 각종 계수의 경우 식 (2.5)에 의해 산출된 a는 0.8699로 나타났고, 터널 내 평균풍속에 대하여 y절편이 0인 선형 회귀분석의 결과, b는 0.0065로 나타났으며, 이에 따라 산출된 총 환기저항계수(ζ)는 5.4534로 산출되었다. 따라서 터널 내 평균풍속과 속도감쇄법에 따른 추정풍속간의 상관도(결정계수, $R^2 = 0.87$)가 비교적 높게 나타나, Case 4 (양양방향)에 대한 벽면마찰계수는 0.018 정도로 추정할 수 있다. Fig. 2(b)의 경우, 제트팬 가동 중 풍속(V_1)은 5.49 m/s, 제트팬 가동 후 풍속(V_2)은 4.04 m/s로 나타났다. 그리고 속도감쇄법에 의한 벽면마찰계수 추정을 위한 각종 계수의 경우 a는 1.8829, b는 0.0010으로 추정되었으며, 이에 따른 총 환기저항계수(ζ)는 29.8470으로 산출되었다. 따라서 터널 내 평균풍속과 속도감쇄법에 따른 추정풍속간의 상관도(결정계수, $R^2 = 0.77$)가 비교적 높게 나타나, Case 7 (양양방향)에 대한 벽면마찰계수는 0.022 정도로 추정할 수 있다.

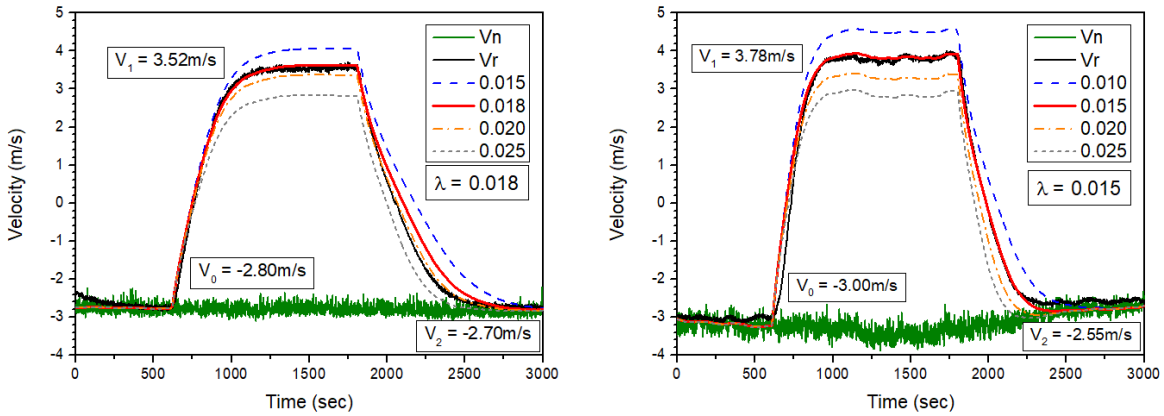
다음은 동적 시뮬레이션을 적용한 Fig. 3(a)에는 Case 7의 측정풍속 중 춘천방향 터널에 대하여 제트팬 20대 가동에 따른 터널 내 평균풍속(V_r)과 자연풍속(V_n), 그리고 Runge-Kutta 알고리즘을 적용한 동적 시뮬레이션에 의해 추정된 벽면마찰계수(λ: 0.015~0.025)에 대해 나타내었고, Fig. 3(b)에는 Case 8의 측정풍속 중 춘천방향 터널에 대하여 제트팬 4대 가동에 따른 터널 내 평균풍속(V_r), 자연풍속(V_n), 동적 시뮬레이션에 의해 추정된 벽면마찰계수(λ: 0.010~0.025)에 대해 나타내었다. 두 경우 모두 측정된 터널 내 평균풍속은 제트팬 가동 유·무에 따라 터널 내 작용하는 환기관련 계수에 의하여 증가한 후 점차 감소하여 반대방향 터널에서 측정된 자연풍속과 일치하는 결과를 보이고 있다. 한편 Fig. 3(a)의 경우 측정시간 동안 측정된 자연풍속은 비교적 일정하게 유지되고 있지만, Fig. 3(b)의 경우 측정시작 이후 비교적 일정하게 유지되던 자연풍속이 1,500초 이후 일정하게 상승하고 있는 것으로 나타나고 있다.

Fig. 3(a)의 경우 실측된 터널 내 평균풍속과 Case 7 (춘천방향) 터널의 제원을 고려하여 예상되는 벽면마찰계수를 직접 조절하여 추정한 결과 0.015~0.020사이에 존재하는 것으로 나타났다. 그 중 실제 측정된 터널 내 평균풍속과 가장 유사하게 나타난 벽면마찰계수는 그림에서 보는 것과 같이 0.018정도로 분석된다. 하지만 감소가 시작되는 시점인 1,800초 이전까지는 0.018과 매우 유사하지만, 1,800초 이후 제트팬 가동 후 풍속(V_2)이 감소되는 경향은 0.018보다는 0.020가 더 유사한 것으로 나타나고 있다.



(a) Case 4 Yangyang direction, Jet-fan 5 ea (b) Case 7 Yangyang direction, Jet-fan 16 ea

Fig. 2. Results by velocity decay method



(a) Case 7 Chuncheon direction, Jet-fan 20 ea (b) Case 8 Chuncheon direction, Jet-fan 4 ea

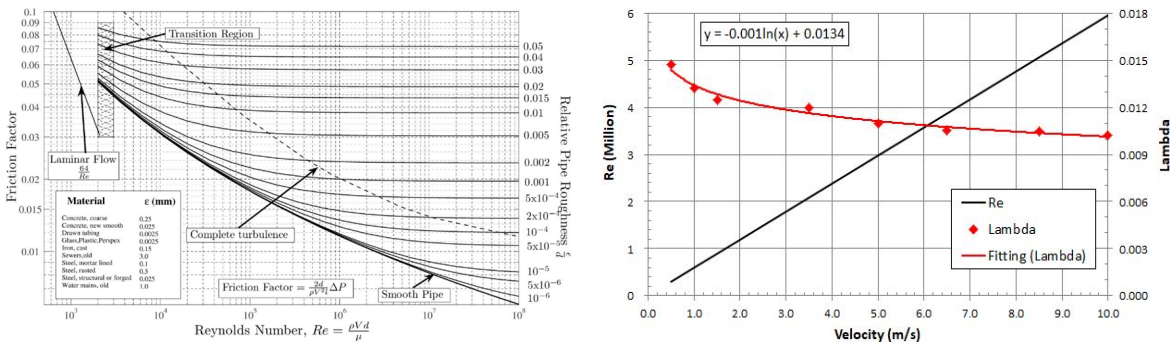
Fig. 3. Results by dynamic simulation

제트팬의 가동 및 중단 시 가감속 단계인 천이구간 단계에서 발생하는 유동특성에 기인한 터널 내 벽면마찰계수의 변화특성을 살펴보기 위해, Moody (1944) 선도상의 벽면마찰계수를 변화특성을 살펴보았다. 일반적으로 벽면마찰계수는 관성력과 점성력의 비인 레이놀즈 수(Re)와 직경(D), 조도(ε)에 따른 상대조도(ε /D)와의 관계에 따라 결정되며, 터널 내 풍속에 따른 레이놀즈 수의 변화는 벽면마찰계수의 변화를 동반하게 된다.

먼저, 레이놀즈수(Re)를 결정하기 위한 공기의 동점성계수(ν)는 15°C 조건에서 1.47×10^{-5}으로 가정하고, 대표직경은 8.757 m로 적용하였다. 이에 따라 풍속을 0.5~10.0 m/s로 증가시켜가며 레이놀즈 수를 분석한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 한편, 상대조도(ε /D)를 결정하기 위하여 조도(ε)는 Fig. 4(a) 내 좌측하단에 표시된 재료에 따른 콘크리트의 조도를 참고하여 0.25 mm를 적용하였고, 이에 따른 상대조도(ε /D)는 0.3×10^{-4}을 적용하였다. 이상의 조건으로부터 계산된 레이놀즈 수와 상대조도를 이용하여 터널 내 풍속을 증가시켜가며 그에 해당하

는 벽면마찰계수를 Fig. 4(b)에 나타내었다. 그림에서 보는 것과 같이 동일한 대상터널에서 터널 내 풍속과 레이놀즈 수의 관계는 비례적인 관계인 것을 확인할 수 있고, 풍속이 증가됨에 따라 벽면마찰계수는 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 동일한 조건에서 풍속이 감소됨에 따라 벽면마찰계수는 증가되는 것을 의미한다. 따라서 Fig. 3(a)에서 제트팬 가동 후 시점인 1,800초 이후 터널 내 평균풍속의 감소에 따른 벽면마찰계수 값이 0.018보다 0.020에 더 유사한 것으로 나타난 것은 이러한 이유에 기인한 것으로 분석되며, 터널 내 평균풍속은 제트팬 가동 중 풍속(V_1)인 3.52 m/s에서부터 감소가 되기 때문에 Case 7의 춘천방향 터널에 대한 적정한 벽면마찰계수(λ)는 0.018로 추정할 수 있다.

한편, Fig. 3(b)의 경우 실측된 터널 내 평균풍속과 해당 터널의 제원을 고려하여 예상되는 벽면마찰계수를 직접 조절하여 추정한 결과 0.010~0.020 사이에 존재하는 것으로 나타났고, 그 중 실제 측정된 터널 내 평균풍속과 가장 유사하게 나타난 벽면마찰계수는 0.015로 분석되었다. Case 8의 춘천방향 터널에 대한 제트팬 가동 전 풍속(V_0)에서 제트팬이 가동됨에 따른 터널 내 평균풍속의 변화가 시작되는 600초부터 제트팬 가동 후 풍속(V_1)에 도달되는 900초까지에는 추정된 벽면마찰계수에 따른 추정풍속과 터널 내 평균풍속간에 차이가 나타나고 있다. 이와 같은 이유는 제트팬이 가동됨에 따라 터널 내 풍속이 순간적으로 천이구간 단계에서 발생하는 유동특성과 제트팬이 전체부하로 이행하기 위한 단계에서 발생하는 기동시간에 따른 팬 추력(Thrust)의 점진적인 증가현상이 함께 발생하여 생긴 오차로 사료된다. 이러한 차이를 Fig. 3(a)와 3(b)에서 살펴보면, 제트팬의 가동대수가 적은 터널(Case 8)에서 크게 나타나고 있다.



(a) Moody diagram (Moody, 1944) (b) Lambda variation

Fig. 4. Relationship among Velocity, Re and Lambda

다음으로 Table 3에 측정된 각 Case별 풍속 측정자료와 속도감쇄법 및 동적 시뮬레이션에 따라 추정된 벽면마찰계수 및 환기관련 계수에 대해 정리하였다. 각 Case에 따라 제트팬 가동 후 풍속(V_2)가 양수인 경우에는 속도감쇄법(Velocity decay method, V.D.M)을, 음수인 경우에는 동적시뮬레이션(Dynamic Simulation technique을 적용하였다.

Table 3. Analysis results

Case			Measurement data		Analysis results						Method
T/L	Dir.	Operating no. fan	Velocity (m/s)		a	b	R^2	ζ	λ	Avg. λ	
			V_1	V_2							
1	Chun-cheon	2	3.00	-0.04	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0250	0.023	D.S
		3	3.89	0.05	0.0257	0.0002	0.5652	5.0280	0.0239		V.D.M
		4	4.79	0.05	0.0209	0.0002	0.6857	4.9777	0.0235		V.D.M
		5	5.06	0.40	0.1584	0.0015	0.5848	4.7138	0.0217		V.D.M
		6	5.65	0.44	0.1561	0.0015	0.5933	4.2852	0.0187		V.D.M
	Yang-yang	2	4.23	1.77	0.8916	0.0050	0.3164	3.5028	0.0134	0.015	V.D.M
		3	4.50	-0.85	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0150		D.S
		4	5.11	0.68	0.2677	0.0021	0.4731	3.7382	0.0151		V.D.M
		5	5.50	2.26	0.8734	0.0069	0.2693	3.7858	0.0154		V.D.M
		6	6.05	1.54	0.5205	0.0050	0.4837	4.0260	0.0171		V.D.M
2	Chun-cheon	2	3.42	1.54	0.9701	0.0040	0.7245	3.7013	0.0129	0.018	V.D.M
		3	3.99	1.71	0.9163	0.0052	0.4452	4.3333	0.0168		V.D.M
		4	4.65	2.10	0.9734	0.0080	0.2393	5.4286	0.0235		V.D.M
		5	5.28	2.97	1.2730	0.0095	0.3289	4.5581	0.0182		V.D.M
		6	5.77	2.97	1.1383	0.0090	0.2901	4.3182	0.0167		V.D.M
	Yang-yang	2	0.37	-3.09	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0200	0.019	D.S
		3	3.56	-2.02	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0200		D.S
		4	3.85	-2.77	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0200		D.S
		5	5.11	-2.20	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0200		D.S
		6	5.26	-1.58	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0150		D.S
3	Chun-cheon	2	3.51	-0.23	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0250	0.021	D.S
		3	4.00	0.18	0.0901	0.0005	0.8568	5.0694	0.0166		V.D.M
		4	4.46	0.05	0.0224	0.0002	0.8281	6.2050	0.0221		V.D.M
		5	4.95	0.32	0.1295	0.0010	0.7365	5.4180	0.0183		V.D.M
		7	5.60	-0.84	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0230		D.S
	Yang-yang	2	3.39	0.70	0.4190	0.0016	0.8682	4.0526	0.0121	0.017	V.D.M
		3	3.31	-1.30	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0150		D.S
		4	4.39	0.47	0.2149	0.0015	0.6490	5.6585	0.0200		V.D.M
		5	4.74	-2.39	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0200		D.S
		7	5.51	0.47	0.1710	0.0014	0.6187	5.2420	0.0175		V.D.M
4	Chun-cheon	2	3.14	-1.60	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0250	0.021	D.S
		3	3.93	0.54	0.2766	0.0015	0.5088	5.0572	0.0166		V.D.M
		4	4.04	-1.49	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0250		D.S
		5	4.44	-1.64	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0180		D.S
		7	5.50	-0.93	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0200		D.S
	Yang-yang	2	3.54	1.60	0.9744	0.0050	0.2902	5.6794	0.0197	0.021	V.D.M
		3	4.08	2.07	1.1183	0.0075	0.0541	6.5848	0.0240		V.D.M
		4	4.79	2.01	0.9762	0.0065	0.4256	5.8874	0.0206		V.D.M
		5	5.30	2.17	0.9108	0.0065	0.8746	5.4534	0.0185		V.D.M
		7	5.98	2.21	0.7758	0.0080	0.3629	6.5788	0.0240		V.D.M

Table 3. Analysis results (continue)

Case			Measurement data		Analysis results						Method
T/L	Dir.	Operating no. fan	Velocity (m/s)		a	b	R^2	ζ	λ	Avg. λ	
			V_1	V_2							
5	Chun-cheon	2	1.27	-1.30	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0250	0.022	D.S
		3	2.68	-2.04	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0190		D.S
		4	2.61	-0.01	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0230		D.S
		6	2.67	-2.55	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0200		D.S
		7	5.50	-0.95	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0220		D.S
	Yang-yang	2	3.06	1.79	1.2622	0.0038	0.5939	3.9400	0.0107	0.021	V.D.M
		3	3.55	1.84	1.1481	0.0068	0.4144	6.5524	0.0245		V.D.M
		4	3.79	2.00	1.1739	0.0075	0.4411	6.6488	0.0249		V.D.M
		6	4.60	1.40	0.6646	0.0048	0.6550	5.6360	0.0221		V.D.M
		7	4.94	1.35	0.5608	0.0050	0.6268	6.5667	0.0245		V.D.M
6	Chun-cheon	2	2.93	-1.63	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0250	0.024	D.S
		3	2.80	-1.61	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0250		D.S
		4	3.47	-1.45	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0250		D.S
		6	4.06	-1.90	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0250		D.S
		8	5.03	0.30	0.1194	0.0009	0.6473	7.9980	0.0210		V.D.M
	Yang-yang	2	2.78	0.50	0.8888	0.0030	0.9441	6.8922	0.0123	0.019	V.D.M
		3	3.10	0.86	0.5857	0.0028	0.5088	8.6767	0.0233		V.D.M
		4	3.70	1.06	0.5895	0.0032	0.6043	8.0453	0.0212		V.D.M
		6	4.34	1.21	0.5728	0.0034	0.4774	7.4884	0.0193		V.D.M
		8	5.17	0.84	0.3279	0.0021	0.7555	6.6625	0.0166		V.D.M
7	Chun-cheon	8	1.43	-2.54	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0250	0.021	D.S
		12	2.51	-2.66	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0240		D.S
		16	3.04	-2.69	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0230		D.S
		20	3.52	-2.70	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0180		D.S
		24	3.78	-2.96	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0210		D.S
		28	4.10	-2.90	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0200		D.S
	Yang-yang	8	4.79	3.80	2.1606	0.0110	0.4429	31.7321	0.0239	0.021	V.D.M
		12	4.98	3.61	1.8358	0.0100	0.3225	30.3657	0.0229		V.D.M
		16	5.49	4.04	1.8829	0.0110	0.7699	29.8470	0.0224		V.D.M
		20	5.77	4.18	1.8338	0.0110	0.3546	28.8474	0.0217		V.D.M
		24	6.10	4.15	1.9175	0.0100	0.3958	26.4145	0.0176		V.D.M
		28	5.30	2.49	1.0197	0.0070	0.4156	30.8169	0.0232		V.D.M
		30	5.37	2.16	0.9478	0.0065	0.4488	30.0646	0.0209		V.D.M
		36	5.63	1.78	0.6548	0.0040	0.5154	24.6337	0.0183		V.D.M
		40	5.69	2.02	0.7423	0.0040	0.4157	21.7069	0.0224		V.D.M
		44	5.79	1.45	0.6392	0.0045	0.6529	27.5581	0.0180		V.D.M

Table 3. Analysis results (continue)

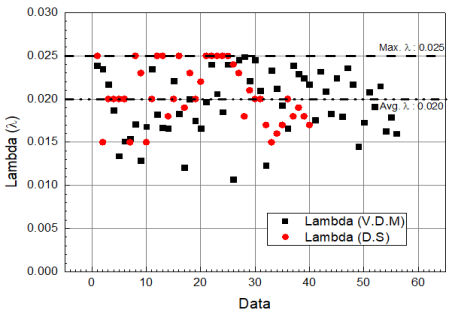
Case			Measurement data		Analysis results						Method
T/L	Dir.	Operating no. fan	Velocity (m/s)		a	b	R^2	ζ	λ	Avg. λ	
			V_1	V_2							
8	Chun-cheon	2	2.96	-2.19	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0200	0.017	D.S
		3	3.02	-3.03	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0170		D.S
		4	3.78	-2.55	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0150		D.S
		5	4.51	-2.88	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0160		D.S
		6	4.67	-3.45	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0170		D.S
	Yang-yang	2	3.80	1.79	1.0986	0.0070	0.5880	5.1268	0.0236	0.020	V.D.M
		3	4.47	1.89	0.9383	0.0070	0.4343	4.8556	0.0217		V.D.M
		4	5.17	2.09	1.0062	0.0085	0.5421	4.7218	0.0145		V.D.M
		5	5.63	1.88	0.6945	0.0060	0.2955	4.1840	0.0173		V.D.M
		6	6.14	2.50	0.9330	0.0090	0.2873	4.6090	0.0208		V.D.M
9	Chun-cheon	2	1.17	-2.81	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0200	0.018	D.S
		3	2.41	-3.09	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0180		D.S
		4	2.92	-2.93	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0190		D.S
		5	3.50	-3.25	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0180		D.S
		6	4.14	-3.24	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0170		D.S
	Yang-yang	2	3.28	1.84	1.2685	0.0050	0.4208	8.0652	0.0191	0.018	V.D.M
		3	3.92	1.84	1.0186	0.0055	0.2810	8.8717	0.0215		V.D.M
		4	4.89	2.08	0.9084	0.0050	0.3141	7.1346	0.0163		V.D.M
		5	5.29	2.52	1.1135	0.0060	0.5082	6.5231	0.0179		V.D.M
		6	5.72	2.75	1.0480	0.0065	0.5148	7.0153	0.0160		V.D.M
Total average λ										0.020	-

각 Case에 따른 벽면마찰계수의 범위는 최소 0.0107에서 최대 0.0250으로 나타났고, 속도감쇄법에 의해 추정된 벽면마찰계수의 경우 회귀분석에 의하여 산출된 각종 계수(a, b, R^2, ζ)들을 함께 제시하였다. 한편, 동적시뮬레이션에 의한 벽면마찰계수는 예상되는 벽면마찰계수 값을 직접 조정하면서 추정을 하였기 때문에 속도감쇄법처럼 각종 계수(a, b, R^2, ζ)를 나타낼 수 없다.

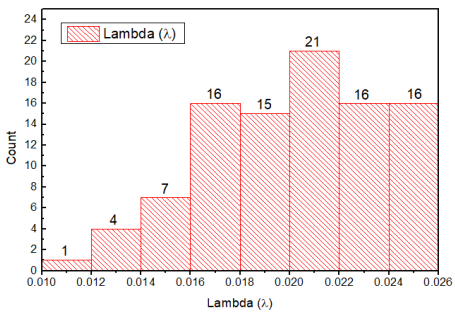
4.2 종합적 검토결과

Fig. 5에는 총 96개의 샘플링 자료에 대하여 분석한 벽면마찰계수 값의 분포를 정리하였다. Fig. 5(a)에는 벽면마찰계수를 분석방법에 따라 구분하여 나타내었고, 그림에서 보는 것과 같이 추정된 벽면마찰계수의 최대값은 0.025로 나타났으며, 전체 벽면마찰계수의 평균값은 0.020으로 분석되었다. 한편 분석방법에 따른 벽면마찰계수는 속도감쇄법을 적용한 경우가 평균 0.019로, 동적시뮬레이션기법을 적용한 경우가 평균 0.021로 나타났다.

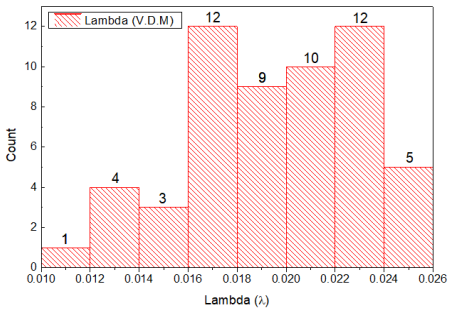
Fig. 5(b)에는 추정된 전체 벽면마찰계수를 0.010~0.025까지 계급구간을 0.002씩 증가시켜가며 그에 따른 분포를 나타내고 있다. 그림에서 보는 것과 같이 추정된 벽면마찰계수 중 가장 많은 분포는 0.020~0.022 사이에 21개가 분포하고 있어 전체의 약 21.9%가 분포하는 것으로 나타났다. Fig. 5(c)와 5(d)에는 속도감쇄법과 동적시뮬레이션기법에 따른 벽면마찰계수의 분포를 나타내고 있다. 또한 Fig. 6(a)는 터널별(tube별)로 터널연장에 따른 벽면마찰계수의 평균값을 나타내고 있으며, Fig. 6(b)는 제트팬 가동 시 평균 풍속값(V_1)별로 벽면마찰계수의 평균값을 나타내고 있다. 벽면마찰계수는 터널 연장과는 무관하게 일정한 분포를 보이나, 터널 내 풍속과는 음의 상관



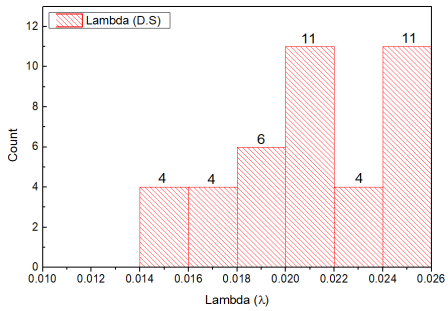
(a) Distribution of Lambda (all case)



(b) Statistics of Lambda (all case)

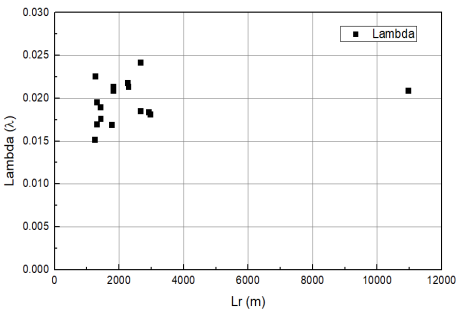


(c) Statistics of Lambda (velocity decay method)

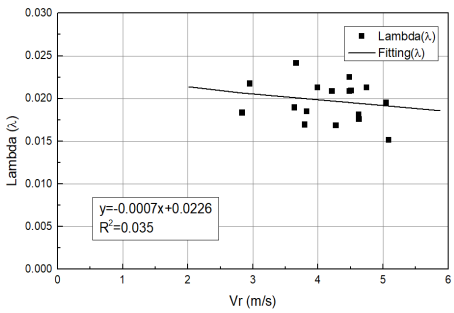


(d) Statistics of Lambda (dynamic simulation)

Fig. 5. Distribution of Lambda



(a) By length

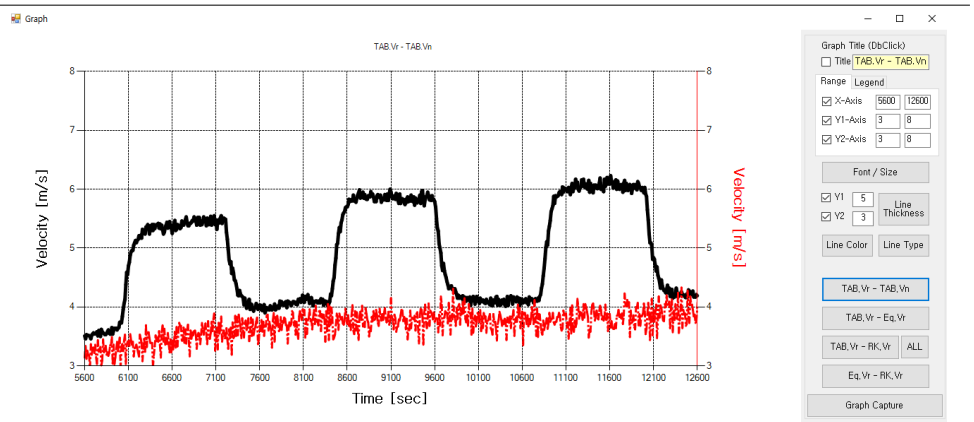
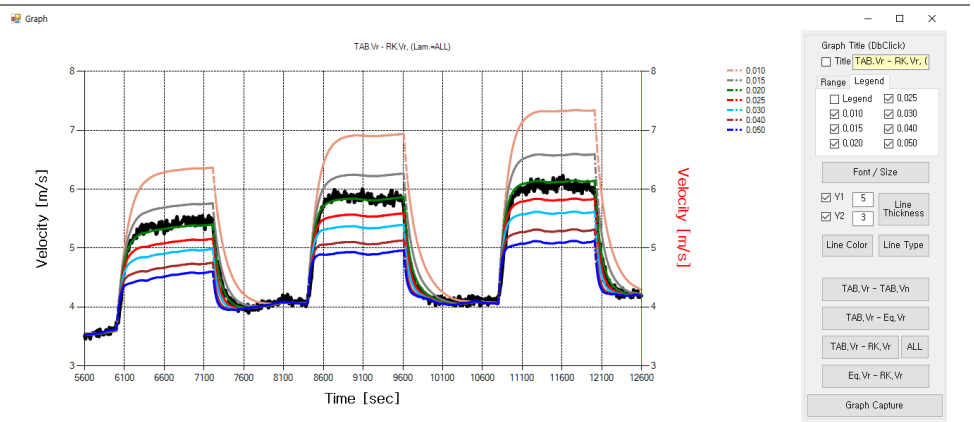
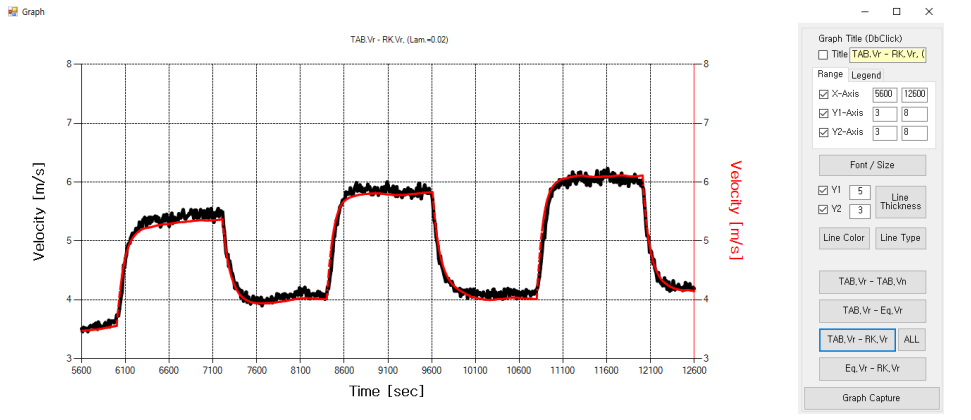


(b) By velocity

Fig. 6. Profile of average Lambda by tunnel (tube)

관계로 풍속에 반비례하는 분포특성을 보이고 있다. Table 4는 Case 7(양양방향 터널)에 대하여 연속적으로 측정한 풍속값을 기준으로 동적시뮬레이션을 수행한 결과를 나타내고 있으며, 벽면마찰계수 값은 0.020일 경우가 실측자료와 잘 일치하는 것으로 분석된다.

Table 4. Output of continuous dynamic simulation for Case 7

Type	Output of dynamic simulation
TAB Data (No Calibration) (*) Vn is needed for shifting 0.3 m/s up	
Fitting by Lambda (D.S) (0.010~0.050)	
Selecting Lambda ($\lambda = 0.020$)	

현재 환기설계 기준값으로 적용 중인 벽면마찰계수는 0.025로 제시되어 있지만, 본 연구에서 분석한 벽면마찰계수의 범위는 0.011~ 0.025이며, 평균값은 0.020으로 나타났다. 이는 국내 터널을 대상으로 속도감쇄법으로 분석한 타 연구사례 값(0.019~0.021)과도 잘 일치하는 경향을 나타내고 있다(Lee et al., 2004). 반면, 외부자연풍 조건을 반영한 연속적인 동적해석법으로도 Table 4에서처럼 비교적 정확한 벽면마찰계수를 유추할 수 있음을 확인하였다. 따라서, 벽면마찰계수는 터널 내 환기설비용량에 직접적인 영향을 미치는 변수이기 때문에 현장측정을 통한 데이터 구축과 관련 기초연구 및 설계기준 정립에 대한 지속적인 노력이 필요한 부분이라 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 총 9개의 터널(튜브수 기준 18개소)에 대하여 현장측정(TAB)을 통해 획득한 터널 내 풍속자료(총 96개 샘플링 수)를 대상으로 속도감쇄법과 동적시뮬레이션기법을 적용하여 벽면마찰계수 값의 범위를 추정하였다. 이상의 연구내용을 요약하면 다음과 같다.

1. 현장측정을 통해 획득한 터널 내 풍속자료를 대상으로 속도감쇄법과 동적시뮬레이션기법을 적용하여 기존 방법으로는 추정할 수 없었던 수렴 풍속값이 음수(-)인 경우나 자연풍의 변화가 있는 경우에도 해당 터널의 벽면마찰계수 값을 추정할 수 있었다.
2. 본 연구에서는 수렴풍속값이 양수인 경우는 속도감쇄법을, 음수인 경우는 동적 시뮬레이션을 적용하여 벽면마찰계수에 대한 분석을 수행하였다. 분석된 터널 내 벽면마찰계수 값은 0.011~0.025의 분포범위를 보였으며, 국내 터널의 벽면마찰계수의 평균값은 0.020로 추정되었다. 따라서 현재 설계기준의 범위인 0.020~0.025의 하한값 정도로 분석되었다.
3. 제트팬의 가동 및 정지시 터널 내 풍속분포는 천이구간 단계(가감속 단계)의 유동특성으로 인해 벽면마찰계수 값의 변동특성이 관찰되었고, 이는 높은 유속보다는 낮은 유속조건에서 벽면마찰계수 값이 상대적으로 높게 나타나고 있으며, 이러한 현상은 터널 내 풍속(Vr), 레이놀즈 수(Re), 벽면마찰계수(λ)에 대한 관계도로 설명할 수 있다.
4. 향후, 국내 실정에 적합한 터널 내 벽면마찰계수의 추정을 위하여 지속적인 현장측정 연구와 관련 기초연구의 활성화가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

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

References

1. De Bruin, A.C., Maarsingh, R.A., Swart, L. (1997), “New attempts to solve an old problem: aerodynamic measurements in new vehicle tunnels”, Proceedings of the 9th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Aosta Valley, Italy, pp. 3-23.
2. Kim, H.G., Choi, P.G., Ryu, J.O., Lee, Y.H. (2018), “Development of a programming logic to estimate the wall friction coefficient in vehicle tunnels with piston effects”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 20, No. 1, pp. 39-53.
3. Lee, K.B., Lee, C.W., Kim, H.G. (2004), “An in-situ study of the wall friction coefficient in road tunnels”, Proceedings of the Korean Society for Rock Mechanics, 2004 Fall Conference, Daejeon , pp. 61-72.
4. MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport) (2011), Road design manual (617. ventilation), pp. 617-45 - 617-46.
5. Moody, L.F. (1944), “Friction factor for pipe flow”, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, Vol. 66, No. 8, pp. 671-681.
6. Park, Y.D. (1989), Fluid mechanics, Bosung-munhwasa, Seoul, pp. 145-188 (Original Edition: John, J.E.A., Haberman, W.L. (1980), Introduction to Fluid Mechanics, 2nd Edition).