

## 도로터널 차도 벽면마찰계수 현장연구

이경복, 이창우 (동아대학교)

김효규 ((주)삼보기술단)

### 1. 서론

도로터널의 장대화에 따라 건설비용중 환기 및 방재설비 비용의 점유율이 상대적으로 높아져 설비설계의 최적화가 시급히 요구되고 있다. 또한 운영중 터널내 환경 및 비상시 입계속도의 유지를 위하여 국내 도로터널내의 환기력 관련 변수에 대한 면밀한 연구가 필요하나 이에 대한 국내 연구는 전무한 실정이다. 특히 차량 설계의 변화, 터널내벽 재료, 부착교통안전시설 등의 변화, 송풍기 성능의 개선 및 대형화는 벽면마찰계수, 차량저항계수, 제트팬 승압계수에 영향을 미치므로 이들 주요 공기역학적계수의 환기력에 대한 영향이 관심 대상이 되고 있다. 본 연구에서는 전형적인 제트팬 종류식 및 반횡류식 터널을 대상으로 벽면마찰계수를 현장 실험 및 시뮬레이션을 통하여 분석함을 목적으로 한다.

### 2. 이론적 배경

도로터널 내부 풍속에 영향을 미치는 환기력 관계식은 다음과 같다.

$$\sum_{i=1}^5 F_i = \rho A L \frac{dV}{dt}$$

- F1: 교통환기력 (piston effect)
- F2: 벽면마찰력 (wall friction force)
- F3: 자연환기력 (natural force)
- F4: 팬승압력 (fan thrust)
- F5: 입구 및 출구 손실력 (force loss at the portals)

이중 벽면마찰력, 터널 입구 마찰력을 고려한 총 에너지 손실력의 합은 다음과 같다.

$$F_2 + F_5 = (\xi_{in} + \xi_{out} + \lambda \frac{L}{D}) \frac{\rho}{2} u^2$$

$\xi_{in}$ ,  $\xi_{out}$ ,  $\lambda$ 는 각각 입출구 갭구에서의 손실계수 및 차도벽면 마찰계수로 국내에서는 일반적으로 0.6, 1, 0.025 (한국도로공사 고속도로 터널환기시설설계기준 2002.10)를 적용하고 있다. 한편  $L$  및  $D_h$ 는 길이, 대표직경이다.

터널의 장대화에 따라 비례하여 증가하는 벽면마찰력은 최근의 터널 내벽 마감재료의 변화, 안전 및 교통 표지판의 부착 등에 따라 변하는 벽면마찰계수,  $\lambda$  의 직접적인 영향을 받게 되므로 터널내 풍속의 추정에 상당한 영향을 미칠 가능성이 있다.

### 3. 현장연구

#### 3.1 대상현장

본 연구에서는 Table 1과 같은 특성을 가지는 부산광역시 소재 수정산터널(좌천방향), 황령산터널(전포방향), 백양산터널(당감방향) 3개터널을 대상으로 실험을 수행하였다.

Table 1. 현장실험대상 터널 제원

| 터널                     | 수정산(좌천방향) | 황령산(전포방향) | 백양산(당감방향) |
|------------------------|-----------|-----------|-----------|
| 길이 (m)                 | 2,330     | 1,860     | 2,340     |
| 내공단면 (m <sup>2</sup> ) | 61.7      | 52.0      | 53.3      |
| 대표직경 (m)               | 8.09      | 7.17      | 6.63      |
| 구배 (%)                 | -1.65     | -2.2      | -1.02     |
| 차선수                    | 2         | 2         | 2         |
| 환기방식                   | 제트팬 종류식   | 반횡류식      | 반횡류식      |

#### 3.2 실험방법

환기설비 가동을 중지한 후의 터널내 풍속 감쇄는 터널의 총 마찰력에 의하여 좌우된다. 설비가동 중지 후의 속도 변화는 교통환기력의 영향을 무시한 경우에는 다음식으로 정의할 수 있다.

$$\pm \Delta p_w - (\xi_{in} + \xi_{out} + \lambda \frac{L}{D_h}) \frac{1}{2} \rho u^2 = \rho L \frac{du}{dt}$$

$\Delta p_w$ 는 터널에 작용하는 자연환기력을 의미한다. 만일 자연환기력이 일정하다면 속도감쇄가 끝난 후 정상상태에 도달한 후의 풍속,  $u_e$ 를 고려할 경우, 다음식이 성립한다.

$$\Delta p_w = (\xi_{in} + \xi_{out} + \lambda \frac{L}{D_h}) \frac{1}{2} \rho u_e^2$$

상기식을 적분할 경우, 속도감쇄 시간동안의 속도,  $u(t)$ 와  $u_e$  및  $\lambda$ 의 관계는 다음과 같다.

$$u(t) = u_e \frac{e^{a+bt} + 1}{e^{a+bt} - 1} \quad \text{또는} \quad \ln \frac{u(t) + u_e}{u(t) - u_e} = a + bt$$

$$a = \ln \frac{u_0 + u_e}{u_0 - u_e}$$

$$b = (\xi_{in} + \xi_{out} + \lambda \frac{L}{D_h}) \frac{u_e}{L}$$

$u_0$ 는 환기설비 가동 중단전의 풍속이며 일반적으로 감쇄시작 초기 60초간의 속도변화를 기준으로 분석한다. 속도감쇄법으로 불리우는 본 방법은 교통환기력이 거의 일정한 환경에 적합하다.

또 다른 방법은 자연환기력, 교통환기력, 마찰력과 같이 터널내 풍속에 영향을 미치는 환기력의 영향을 동시에 분석하는 방법이다. 즉 다음과 같은 정상상태의 환기력 관련식으로부터 벽면마찰계수를 유도하는 방법이다.

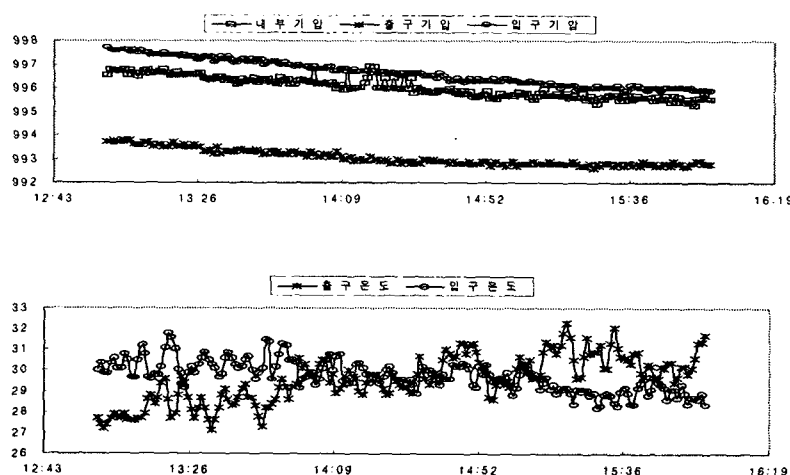
$$\sum_{i=1}^5 F_i = \rho A L \frac{dV}{dt}$$

그러나 본 논문에서 마찰계수 역추정법이라고 명명한 본 방법은 환기력 측정시간동안의 터널내외부 기상변수, 교통량/차종구성/차속 등과 같은 교통변수 들의 순간 변동에 의한 영향을 정량화하기 어려운 문제가 있다.

본 연구에서는 양 갱구에서의 기상변수의 정밀 측정이 가능한 조건의 터널에서는 역추정법을, 운행중인 터널내에서 환기설비의 가동 및 중단과 같은 설비조작 실험이 가능한 경우에는 속도감쇄법을 적용하였다.

### 3.3 실험결과

Figure 1은 실험시간동안의 내외부 기압, 온도 및 풍속변화를 보여 주며 자연환기력에 의한 내부 유입 기류의 풍속이 3.5m/s 정도로 안정되어 있으므로 자연환기력의 변화에 따른 오차를 최소화할 수 있는 실험환경이었다. Figure 2는 백양산터널에서 차량통행이 차단된 시간동안 속도감쇄법에 의하여 시행한 실험결과이다. 한편, 반횡류식 환기방식을 채택하고 있는 터널에서 상부환기 덕트로 부터 유입되는 기류만에 의한 본 터널내 기류유동방향을 일정하게 유지하기가 용이하지 않으나 상부덕트가 중간지점에 설치된 벌크헤드(bulk head)로 양분되어 있으므로 한쪽부분의 덕트로만 입기한 후, 터널내 풍향이 일방향으로 형성되는 경우를 분석대상으로 하였다.



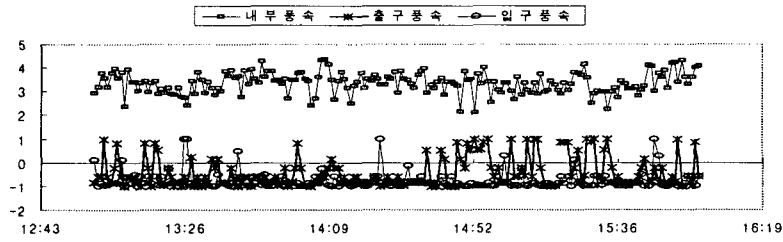


Figure 1. 실험중 풍속분포 (백양터널, 차량통행 없음)

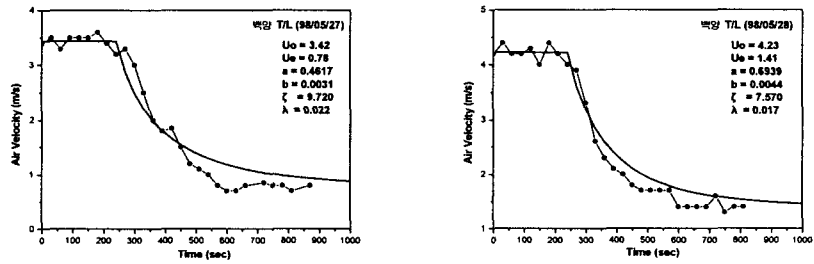


Figure 2. 팬가동 중단후의 풍속 감쇄 (백양산터널, 차량통행 없는 경우)

동일한 터널의 개통 직후, 측정된 기상 및 교통변수 측정 결과는 Table 2와 같다. 터널 내 기류의 완전한 치환이 이루어지는 15분을 분석대상 기준시간으로 가정하였다. 한편 측정중 자연환기력, 교통환기력 그리고 풍속의 측정값 및 추정값 ( $\lambda=0.025$  가정) 사이의 상대오차는 Table 3에 정리하였다.

Table 2. 기상 및 교통변수 측정자료 (백양산터널, 역추정법 적용 경우)

| C<br>A<br>S<br>E | 기압<br>(mbar) |       |       | 풍속<br>(m/s) |      |       | 건구<br>( $^{\circ}$ C) |      |       | 습구<br>( $^{\circ}$ C) |      |       | 밀도<br>(kg/m $^3$ ) |      |       |
|------------------|--------------|-------|-------|-------------|------|-------|-----------------------|------|-------|-----------------------|------|-------|--------------------|------|-------|
|                  | 입구           | 출구    | 터널 내부 | 입구          | 출구   | 터널 내부 | 입구                    | 출구   | 터널 내부 | 입구                    | 출구   | 터널 내부 | 입구                 | 출구   | 터널 내부 |
| 1                | 997.2        | 993.4 | 996.4 | 0.12        | 0.03 | 3.26  | 28.0                  | 27.1 | 24.1  | 21.2                  | 21.1 | 18.5  | 1.14               | 1.14 | 1.16  |
| 2                | 996.4        | 992.8 | 995.8 | 0.00        | 0.36 | 3.22  | 29.3                  | 27.3 | 24.8  | 21.8                  | 21.3 | 18.8  | 1.13               | 1.14 | 1.15  |
| 3                | 996.1        | 992.8 | 995.7 | 0.00        | 0.31 | 3.18  | 29.2                  | 27.4 | 24.8  | 21.8                  | 21.4 | 18.8  | 1.13               | 1.14 | 1.15  |

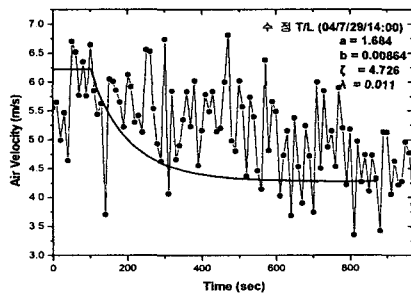
| C<br>A<br>S<br>E | 교통량 (대/20분) |          |          |          |          |          |          | 총계<br>(대) | 차속<br>(km/h) | 대형차<br>혼입율<br>(%) | 교통량<br>(대/h) |
|------------------|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|--------------|-------------------|--------------|
|                  | 승용차         | 소형<br>버스 | 대형<br>버스 | 소형<br>트럭 | 중형<br>트럭 | 대형<br>트럭 | 특수<br>트럭 |           |              |                   |              |
| 1                | 119         | 11       | 0        | 33       | 4        | 7        | 0        | 174       | 66.2         | 6                 | 522          |
| 2                | 101         | 20       | 0        | 45       | 1        | 7        | 0        | 174       | 67.2         | 5                 | 522          |
| 3                | 100         | 22       | 0        | 35       | 2        | 4        | 2        | 165       | 60.8         | 5                 | 495          |

Table 3. 환기력 및 풍속 추정오차 (백양산터널, 역추정법 적용 경우)

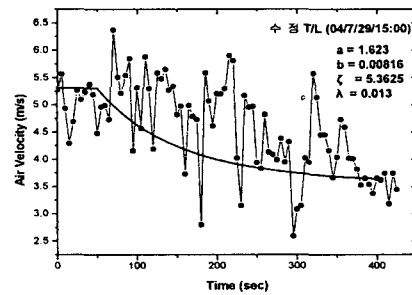
| CASE | 자연환기력(Pa) | 교통환기력(Pa) | 측정풍속 (m/s) | 추정풍속 (m/s) | 추정오차 (%) |
|------|-----------|-----------|------------|------------|----------|
| 1    | -3.942    | 101.28    | 3.26       | 3.23       | 1        |
| 2    | -4.092    | 96.59     | 3.22       | 3.13       | 3        |
| 3    | -4.028    | 80.64     | 3.18       | 2.80       | 12       |

마찰계수 0.025를 가정한 추정풍속이 측정값에 비하여 1~12% 정도의 낮은 값을 보이며 이를 바탕으로 추정한  $\lambda$ 값은 0.015~0.025정도이다.

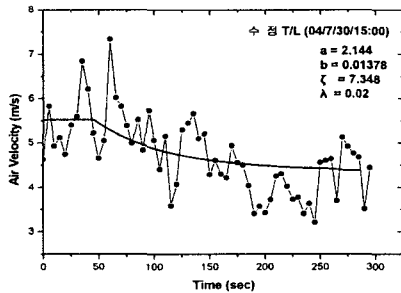
Figure 3.a~3.m에는 교통환기력 변화가 비교적 적은 시간대인 오후 2:00 및 3:00부터 터널 전체 기류 치환이 가능한 시간인 약 15분간 팬을 가동한 후 중단시키고 터널 출구 150m 정도지점에서 풍속과 속도감쇄법에 따라 추정한 추정속도와의 관계를 도시하였다.



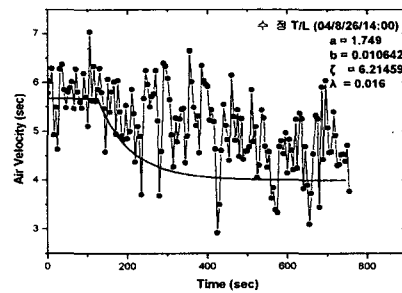
a. 수정산터널 (04/07/29/14:00)



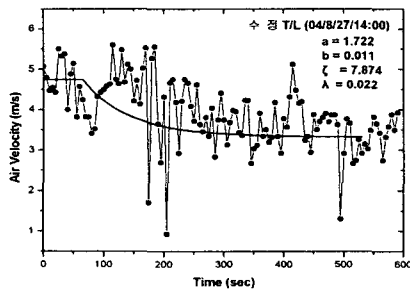
b. 수정산터널 (04/07/29/15:00)



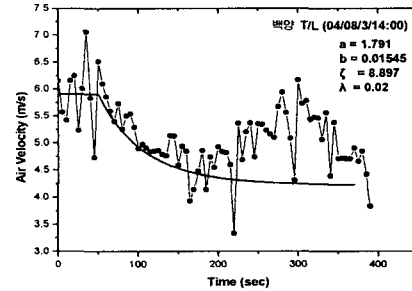
c. 수정산터널 (04/07/30/15:00)



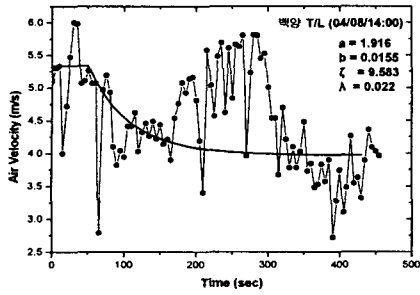
d. 수정산터널 (04/08/26/14:00)



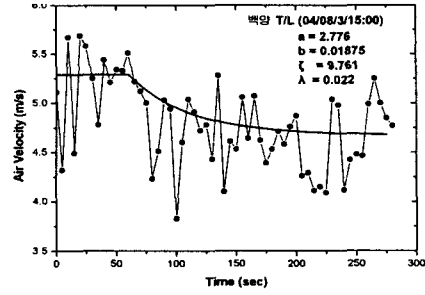
e. 수정산터널 (04/08/27/14:00)



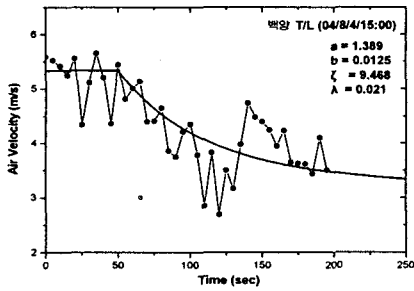
f. 백양산터널 (04/08/31/14:00)



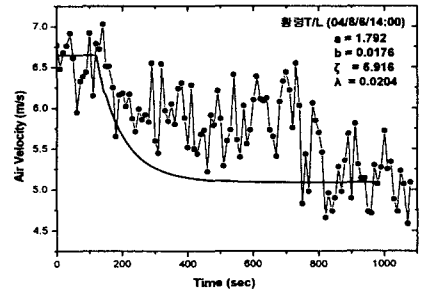
g. 백양산터널 (04/08/3/14:00)



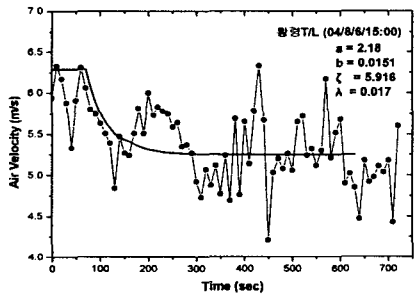
h. 백양산터널 (04/08/3/15:00)



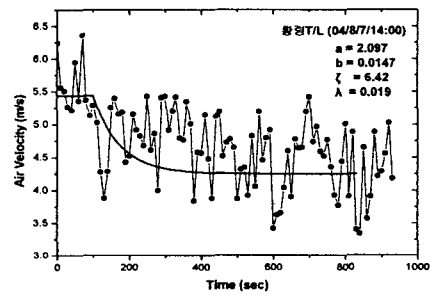
i. 백양산터널 (04/08/4/15:00)



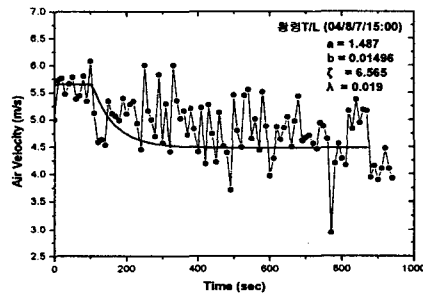
j. 황령산터널 (04/08/6/14:00)



k. 황령산터널 (04/08/6/15:00)



l. 황령산터널 (04/08/7/14:00)



m. 황령산터널 (04/08/7/15:00)

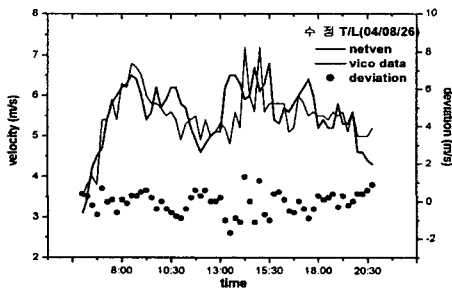
Figure 3. 속도감쇄법에 풍속변화 추정결과

Table 4. 속도감쇄법에 의한 벽면마찰 계수 추정

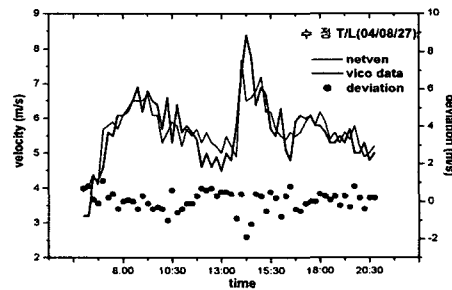
| 터널  | 날짜             | 환기방식       | $u_0$ (m/s)<br>initial velocity | $u_e$ (m/s)<br>final velocity | $\lambda$<br>wall friction coeff | $\lambda$<br>평균 |
|-----|----------------|------------|---------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|-----------------|
| 수정산 | 04/07/29/14:00 | 제트팬<br>종류식 | 6.23                            | 4.28                          | 0.011                            | 0.017           |
| 수정산 | 04/07/29/15:00 |            | 5.31                            | 3.56                          | 0.013                            |                 |
| 수정산 | 04/07/30/15:00 |            | 5.53                            | 4.37                          | 0.020                            |                 |
| 수정산 | 04/08/26/14:00 |            | 5.67                            | 3.99                          | 0.016                            |                 |
| 수정산 | 04/08/27/14:00 |            | 4.75                            | 3.31                          | 0.022                            |                 |
| 백양산 | 04/08/3/14:00  | 반횡류식       | 5.91                            | 4.22                          | 0.020                            | 0.021           |
| 백양산 | 04/08/3/15:00  |            | 5.29                            | 4.67                          | 0.022                            |                 |
| 백양산 | 04/08/4/14:00  |            | 5.34                            | 3.97                          | 0.022                            |                 |
| 백양산 | 04/08/4/15:00  |            | 5.34                            | 3.208                         | 0.021                            |                 |
| 황령산 | 04/08/6/14:00  | 반횡류식       | 6.65                            | 5.09                          | 0.021                            | 0.019           |
| 황령산 | 04/08/6/15:00  |            | 6.29                            | 5.25                          | 0.017                            |                 |
| 황령산 | 04/08/7/14:00  |            | 5.44                            | 4.25                          | 0.019                            |                 |
| 황령산 | 04/08/7/15:00  |            | 5.65                            | 4.48                          | 0.019                            |                 |

### 3.4 시뮬레이션 분석

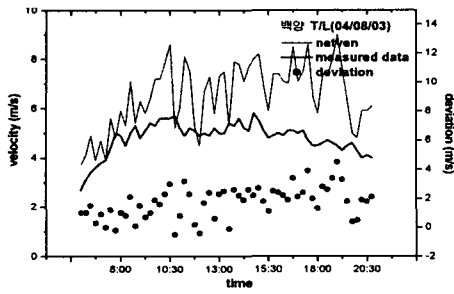
본 연구에서는 벽면 마찰계수 0.025를 가정한 일차원 시뮬레이션 분석을 통하여 풍속의 실측값과 시뮬레이션 분석결과와의 오차를 분석하여 보았다. 분석은 수정산 터널을 대상으로 하였으며 06:00~21:00사이 에 측정 한 자료를 기준으로 하였다. 사용 시뮬레이션 모델은 1차원 정상류 분석 모델인 NETVEN을 이용하였으며 입력 교통량 및 차속 자료는 실측자료의 매15분간 평균값을 적용하였다. Figure 4는 15분 간격의 풍속 실측값과 벽면마찰계수 0.025를 가정한 시뮬레이션 분석값과의 비교 결과이다. Table 5에서 보는 바와 같이 종류식 환기방식을 채택하고 있는 수정산터널의 오차가 단면상의 기류유동이 상대적으로 복잡한 백양산 및 황령산터널에 비하여 적음을 알 수 있다. 풍속의 피크가 일치하지 않는 것은 실제터널에서는 환기관련변수의 변화에 따른 터널내 기류유동이 정상상태에 도달하기까지 일정시간 (풍속 6m/s하에서 약 6분)이 소요되는데 반하여 시뮬레이션에서는 정상상태 도달시간이 고려되지 않은 차이에 기인한다. 그러나 본 연구에서의 비교분석 기준시간이 15분이므로 정상상태 도달시간이 정확히 두 그래프의 피크간의 괴리와는 일치하지 않는다.



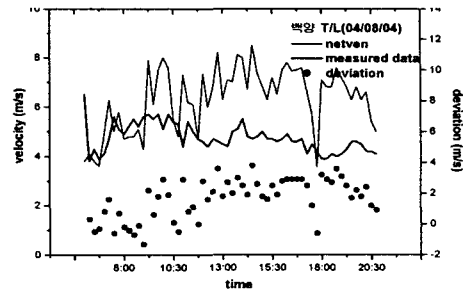
a. 수정산터널 (04/08/26)



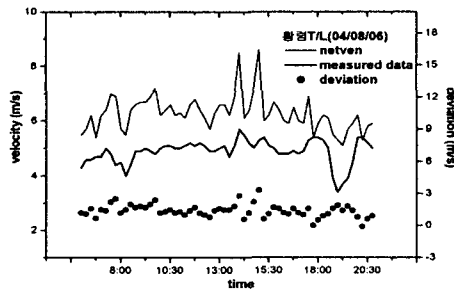
b. 수정산터널 (04/08/27)



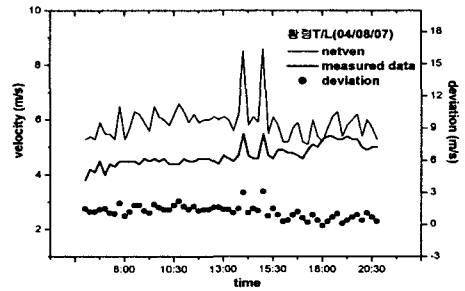
c. 백양산터널 (04/08/03)



d. 백양산터널 (04/08/04)



e. 황령산터널 (04/08/06)



f. 황령산터널 (04/08/07)

Figure 4. 풍속 실측값 및 시뮬레이션 결과 비교

Table 5. 오차 분포

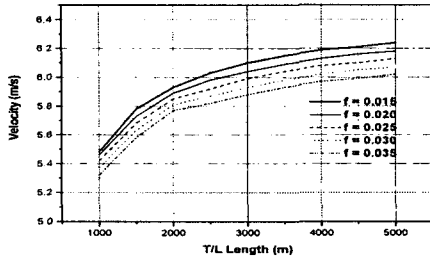
| 터널    | 날짜       | 오차       |            |
|-------|----------|----------|------------|
|       |          | 평균 (m/s) | 표준편차 (m/s) |
| 수정산터널 | 04/08/26 | -0.06    | 0.59       |
| 수정산터널 | 04/08/27 | 0.04     | 0.05       |
| 백양산터널 | 04/08/03 | 1.72     | 1.09       |
| 백양산터널 | 04/08/04 | 1.57     | 1.4        |
| 황령산터널 | 04/08/06 | 1.39     | 0.59       |
| 황령산터널 | 04/08/07 | 1.19     | 0.61       |

다음은 마찰계수의 변화가 실제 터널 환기력 및 터널내 풍속에 미치는 영향의 크기를 분석하였다. Table 6과 같은 터널 및 교통량 특성을 가지는 2, 3, 4차선 터널을 대상으로 하여 마찰계수는 0.015~0.035사이에서 0.005간격으로 가정 적용하였으며 터널길이는 1.0km로부터 0.5km씩 증가시켜 5.0km까지를 분석 대상으로 하였다.

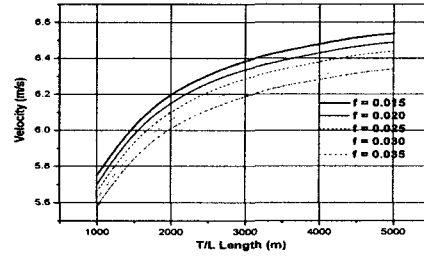
Table 6. 분석대상 터널 제원

| 터널                      | Case 1 | Case 2 | Case 3 |      |      |      |      |       |
|-------------------------|--------|--------|--------|------|------|------|------|-------|
| 내공단면적 (m <sup>2</sup> ) | 75     | 95     | 126    |      |      |      |      |       |
| 둘레길이 (m)                | 34.36  | 38.975 | 46.26  |      |      |      |      |       |
| 대표직경 (m)                | 8.731  | 9.750  | 10.895 |      |      |      |      |       |
| 차선수                     | 2      | 3      | 4      |      |      |      |      |       |
| 교통량 (대/h)               | 2500   | 3750   | 5000   |      |      |      |      |       |
| 차속 (km/h)               | 60     | 60     | 60     |      |      |      |      |       |
| 차종구성                    |        |        |        |      |      |      |      |       |
| 차종                      | 승용차    | 소형버스   | 대형버스   | 소형트럭 | 중형트럭 | 대형트럭 | 특수트럭 | 합계    |
| 구성비 (%)                 | 67.0   | 6.0    | 6.0    | 13.1 | 5.6  | 2.1  | 0.2  | 100.0 |

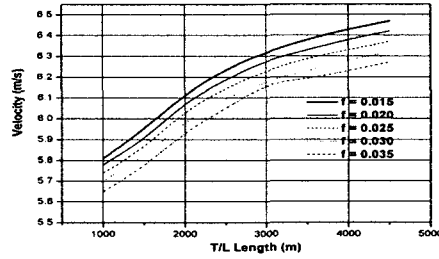




a. Case 1

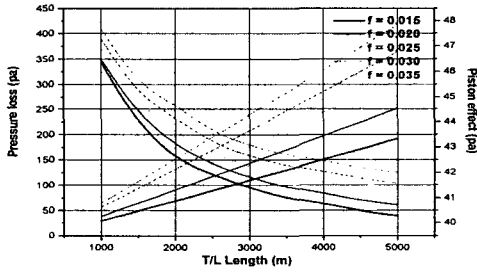


b. Case 2

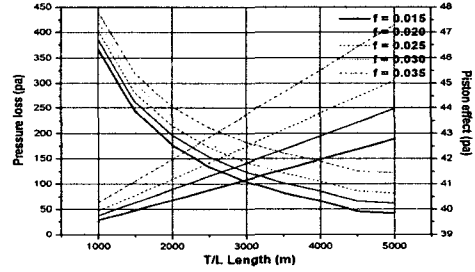


c. Case 3

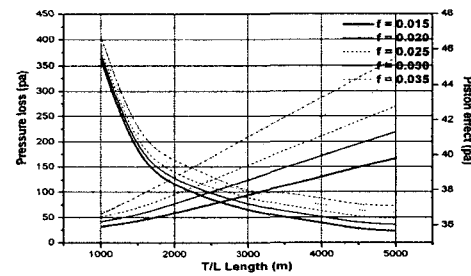
Figure 5. 벽면마찰계수와 환기속도 관계



a. Case 1



b. Case 2



c. Case 3

Figure 6. 벽면마찰계수, 마찰력 및 교통환기력 관계

Table 7. 마찰계수와 풍속 변화 및 기준대비 증감을

a. Case 1

| 터널길이<br>(m) | f = 0.015 |      | f = 0.020 |      | f = 0.025 |    | f = 0.030 |      | f = 0.035 |      |
|-------------|-----------|------|-----------|------|-----------|----|-----------|------|-----------|------|
|             | 풍속(m/s)   | 증감   | 풍속(m/s)   | 증감   | 풍속(m/s)   | 기준 | 풍속(m/s)   | 증감   | 풍속(m/s)   | 증감   |
| 1000        | 5.48      | 1.01 | 5.46      | 1.01 | 5.42      | 1  | 5.37      | 0.99 | 5.32      | 0.98 |
| 1500        | 5.78      | 1.01 | 5.73      | 1.01 | 5.68      | 1  | 5.63      | 0.99 | 5.58      | 0.98 |
| 2000        | 5.93      | 1.01 | 5.89      | 1.01 | 5.85      | 1  | 5.81      | 0.99 | 5.77      | 0.99 |
| 2500        | 6.03      | 1.02 | 5.98      | 1.01 | 5.92      | 1  | 5.87      | 0.99 | 5.82      | 0.98 |
| 3000        | 6.1       | 1.02 | 6.04      | 1.01 | 5.99      | 1  | 5.93      | 0.99 | 5.88      | 0.98 |
| 3500        | 6.15      | 1.02 | 6.09      | 1.01 | 6.04      | 1  | 5.98      | 0.99 | 5.93      | 0.98 |
| 4000        | 6.19      | 1.02 | 6.13      | 1.01 | 6.08      | 1  | 6.02      | 0.99 | 5.97      | 0.98 |
| 4500        | 6.21      | 1.02 | 6.16      | 1.01 | 6.1       | 1  | 6.05      | 0.99 | 5.99      | 0.98 |
| 5000        | 6.24      | 1.02 | 6.18      | 1.01 | 6.13      | 1  | 6.07      | 0.99 | 6.02      | 0.98 |

b. Case 2

| 터널길이<br>(m) | f = 0.015 |      | f = 0.020 |      | f = 0.025 |    | f = 0.030 |      | f = 0.035 |      |
|-------------|-----------|------|-----------|------|-----------|----|-----------|------|-----------|------|
|             | 풍속(m/s)   | 증감   | 풍속(m/s)   | 증감   | 풍속(m/s)   | 기준 | 풍속(m/s)   | 증감   | 풍속(m/s)   | 증감   |
| 1000        | 5.75      | 1.02 | 5.70      | 1.01 | 5.66      | 1  | 5.62      | 0.99 | 5.58      | 0.99 |
| 1500        | 6.04      | 1.01 | 6.00      | 1.01 | 5.95      | 1  | 5.90      | 0.99 | 5.86      | 0.98 |
| 2000        | 6.21      | 1.01 | 6.16      | 1.01 | 6.11      | 1  | 6.07      | 0.99 | 6.02      | 0.99 |
| 2500        | 6.31      | 1.01 | 6.27      | 1.01 | 6.22      | 1  | 6.17      | 0.99 | 6.12      | 0.98 |
| 3000        | 6.39      | 1.02 | 6.34      | 1.01 | 6.29      | 1  | 6.24      | 0.99 | 6.19      | 0.98 |
| 3500        | 6.44      | 1.02 | 6.39      | 1.01 | 6.34      | 1  | 6.29      | 0.99 | 6.25      | 0.99 |
| 4000        | 6.48      | 1.02 | 6.43      | 1.01 | 6.38      | 1  | 6.29      | 0.99 | 6.28      | 0.98 |
| 4500        | 6.52      | 1.02 | 6.47      | 1.01 | 6.42      | 1  | 6.37      | 0.99 | 6.32      | 0.98 |
| 5000        | 6.54      | 1.02 | 6.49      | 1.01 | 6.44      | 1  | 6.39      | 0.99 | 6.34      | 0.98 |

c. Case 3

| 터널길이<br>(m) | f = 0.015 |      | f = 0.020 |      | f = 0.025 |    | f = 0.030 |      | f = 0.035 |      |
|-------------|-----------|------|-----------|------|-----------|----|-----------|------|-----------|------|
|             | 풍속(m/s)   | 증감   | 풍속(m/s)   | 증감   | 풍속(m/s)   | 기준 | 풍속(m/s)   | 증감   | 풍속(m/s)   | 증감   |
| 1000        | 5.81      | 1.01 | 5.78      | 1.01 | 5.74      | 1  | 5.7       | 0.99 | 5.65      | 0.98 |
| 1500        | 5.95      | 1.02 | 5.9       | 1.01 | 5.86      | 1  | 5.82      | 0.99 | 5.77      | 0.98 |
| 2000        | 6.12      | 1.01 | 6.08      | 1.01 | 6.04      | 1  | 5.99      | 0.99 | 5.94      | 0.98 |
| 2500        | 6.24      | 1.01 | 6.19      | 1.01 | 6.15      | 1  | 6.1       | 0.99 | 6.05      | 0.99 |
| 3000        | 6.32      | 1.01 | 6.28      | 1.01 | 6.23      | 1  | 6.18      | 0.99 | 6.17      | 0.99 |
| 3500        | 6.38      | 1.01 | 6.33      | 1.01 | 6.29      | 1  | 6.23      | 0.99 | 6.19      | 0.98 |
| 4000        | 6.43      | 1.02 | 6.38      | 1.01 | 6.33      | 1  | 6.28      | 0.99 | 6.23      | 0.98 |
| 4500        | 6.47      | 1.02 | 6.42      | 1.01 | 6.37      | 1  | 6.32      | 0.99 | 6.27      | 0.98 |
| 5000        | 6.49      | 1.02 | 6.45      | 1.01 | 6.39      | 1  | 6.35      | 0.99 | 6.29      | 0.98 |

### 3.5 결과고찰

국내 터널의 가장 일반적인 환기방식인 제트팬 종류식과 도심터널의 전형적인 환기방식인 반횡류식 환기방식을 채택하고 있는 터널에서 수행한 차도 벽면마찰계수 실험 결과를 정리하면 Table 8과 같다. 벽면마찰계수에 대한 기준은 한국도로공사의 터널 환기시설 설계 기준(2002.10)의 “공기흐름에 관한 설정 조건 및 상수”부분에서 0.025로 명시하고 있는 것이 유일하다. 0.025는 플레인 콘크리트벽면의 마찰계수로 벽면 부착시설물 및 환기시설물에 대한 고려를 하고 있지 않다. 환기시설물의 스트립화, 터널내 부착물의 단순화 및 소형화, 벽

면 마감재료의 고급화 등의 경향이 벽면마찰계수의 변동을 초래했을 가능성이 있으며 실험 결과에서 보듯이 측정마찰계수는 0.025의 68%~84%인 0.017~0.021 정도이며 상대적으로차는 단면기류형태가 상대적으로 복잡한 반횡류식인 경우가 제트팬 종류식 터널에 비하여 높게 나타났다.

Table 8. 벽면 마찰계수 분석 결과

| 터널    | 환기방식    | $\lambda$ 추정방법 | $\lambda$   |       |
|-------|---------|----------------|-------------|-------|
|       |         |                | 추정범위        | 평균값   |
| 수정산터널 | 제트팬 종류식 | 속도감쇄법          | 0.011~0.022 | 0.017 |
| 백양산터널 | 반횡류식    | 속도감쇄법          | 0.020~0.022 | 0.021 |
|       |         | 속도 역추정법        | 0.015~0.025 | 0.020 |
| 황령산터널 | 반횡류식    | 속도 감쇄법         | 0.017~0.019 | 0.019 |

벽면마찰계수의 증가는 마찰력을 증가시키며 환기속도 감소를 초래하나 차속과의 상대속도의 증가는 오히려 교통환기력을 증가시키게 된다. 따라서 결과적인 터널내의 풍속 변화는 기타 조건이 일정할 경우, 마찰력 증가와 교통환기력 증가의 상대적 크기변화에 따라 결정되며 Figure 5에서 보는 바와 같이 일반적으로 벽면마찰계수는 풍속의 감소를 초래한다. 그러나 0.025를 기준으로한 동일 길이 터널내에서의 풍속의 상대적 증감율은 -2%~+2% 정도에 불과하며 터널길이별 차이도 거의 없음을 알 수 있다. 그러나 정체시 즉 차속이 약 20km이하일 경우에는 마찰력 증가에 따른 풍속저감은 교통환기력의 감소를 초래할 가능성이 높으므로 환기속도의 감소폭은 상대적으로 커질 가능성이 높다.

따라서 Figure 6 에서 보는 바와 같이 본 연구결과 국내 도심터널의 벽면 마찰계수는 현재 국내에서 적용하고 있는 벽면 마찰계수 0.025에 비하여 16%~32%정도 낮게 추정되나 이는 제트팬 종류식 터널에서의 정상상태 터널내 풍속 추정을 위한 목적인 경우에는 큰 오차가 예상되지 않는다. 그러나 여타 환기방식 채택터널이거나 정체시와 같이 마찰계수 증가가 교통환기력의 감소를 초래하는 경우에는 터널장대화에 따라 급격한 풍속감소가 예상된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 터널 장대화에 따른 벽면마찰계수의 영향을 분석하기 위하여 국내 도심터널중 가장 보편적 환기방식인 제트팬 종류식과 반횡류식 환기방식을 채택하고 있는 3개 터널을 대상으로 현장연구 및 시뮬레이션 분석연구를 수행하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 속도감쇄법 및 역추정법에 의한 벽면마찰계수의 측정결과는 0.017~0.021 정도이며, 단면상 기류유동형태가 상대적으로 복잡한 반횡류식의 경우가 제트팬 종류식 터널보다 크게 측정되었다.

(2) 차도 벽면마찰계수를 0.025를 가정한 시뮬레이션 결과와 실측풍속의 오차 평균 및 분산도 반횡류식의 경우가 제트팬 종류식 터널에 비하여 상대적으로 크게 나타났다.

(3) 정상운행시의 2~4차선 종류식 터널의 벽면마찰계수가 0.015에서 0.035까지 증가할 경우, 터널내 풍속은 최대 약 4% 감소한다. 한편 이와같은 관계는 터널 길이 1.0km~5.0km

범위에서 동일하게 관찰된다.

(4) 종류식 환기방식을 채택하지 않은 터널 및 터널내 풍속이 저속일 경우, 벽면마찰계수의 오차가 환기력에 상대적으로 큰 영향을 미치게 되어 풍속의 정확한 예측이 어려워진다. 따라서 환기방식의 복잡화, 터널 벽면재료 및 부착물의 변화 등을 고려할 때 벽면마찰계수에 대한 광범위한 연구가 필요하다고 판단된다.

## 참고문헌

1. Jang, H.M. and Chen F., 2002, On the Determination of the Aerodynamic Coefficients of Highway Tunnels, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 90, pp.869-896
2. 한국도로공사, 2002, 고속도로 터널환기시설 설계기준
3. Jang, H.M. and Chen, A., 2000, A Novel Approach to the Transient Ventilation of Road Tunnels, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 86, pp. 15-36
4. 김효규, 유상준, 이자원, 이창우, 2000, 도로터널 환기저항계수 현장측정 연구, 74회 한국자원공학회 학술발표회, pp. 223-225
5. 김효규, 1999, 국내도로터널내 자연환기력 분석연구, 동아대학교 석사논문
6. Bruin, A.C., Maarsing, .R.A and Swart, L., 1997, New Attempts to Solve an Old Problem: Aerodynamic Measurements in New Vehicle Tunnels, Proceedings of the 9th Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, pp. 3-23.
7. Lotsberg, G., 1997, Investigation of the Wall-Friction, Pressure Distribution, and the Effectiveness of Big Jet Fans with Deflection Blades in the Fodness Tunnel in Norway, Proceedings of the 9th Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, pp. 25-41
8. Marec, M., 1996, Major Road Tunnel Project-How Far Can We Go?, Tunneling and Underground Space Technology, Vol.11, No.1, pp.21-26