

도로터널 환기시스템 기초연구 차도벽면마찰계수 및 차량항력계수 중심으로

터널내 주요 기류유동계수인 벽면마찰계수와 차량항력계수의 현장 및 시뮬레이션 분석결과를 소개하고자 한다.

이 창 우

동아대학교 지구환경공학부(cwlee@daunet.donga.ac.kr)

머리말

도로터널의 건설 수요 증가 및 장대화에 따라 환기 시스템의 최적 설계 및 운영이 필요하나 낙후된 국내 설계기술력은 터널의 환경, 경제성, 안전성에 심각한 문제를 야기할 가능성이 있어 이에 대한 국내연구가 절실하게 요구된다. 더욱이 1960년대부터 터널내 기류 유동에 관한 연구가 체계적으로 진행된 유럽 및 일본 등과 같은 국가에 비하여 90년대 후반부터 제한적으로 수행된 국내연구도 기류유동계수, 오염물질 확산, 환기력 등에 관한 기초연구가 전무한 실정으로 환기 및 방재시스템의 최적설계를 위한 걸림돌이 되고 있다. 특히 차량 특성의 변화, 터널 내벽재료, 내부 교통·안전시설 등의 변화, 환기방식의 다양화, 송풍기 성능의 개선에 따른 대형화는 벽면마찰계수, 차량저항계수, 제트팬 송압계수에 직접적인 영향을 미치므로 이들 주요 공기역학적계수의 환기력에 대한 영향이 관심대상이 되고 있다. 본 연구에서는 전형적인 제트팬 종류식 및 반횡류식 터널을 대상으로 벽면마찰계수와 차량항력계수를 현장 실험 및 시뮬레이션을 통하여 분석함을 목적으로 한다.

벽면마찰계수

국내의 벽면마찰계수에 대한 권고치는 한국도로공사의 터널 환기시설 설계기준(2002.10)의 “공기흐름

에 관한 설정 조건 및 상수” 부분에서 0.025로 명시하고 있는 것이 유일하다. 벽면마찰계수의 변화가 종류식 터널에서의 정상환기 및 방재용 제트팬 소요 대수에 미치는 영향을 분석하면 그림 1과 같다. 분석대상인 A 터널은 길이 3587 m, 내공단면적 75.5 m², 대형차 혼입률 27.16%, B 터널은 길이 1735 m, 내공단면적 63.8 m², 대형차 혼입률 5.55%이다.

벽면마찰계수가 0.015~0.035 범위에서 방재용 제트팬(φ 1250) 소요대수는 A터널의 경우 10~12대, B 터널의 경우 6~8대이며 환기용은 각각 18~30, 2~4 대이다. 특히 주목이 되는 것은 마찰계수 0.025부근에서 소요대수의 변화가 심한 점이다. 따라서 정상시의 환기뿐만 아니라 화재발생시 임계속도의 유지를 위한 방재용 제트팬수의 결정에 벽면마찰계수는 큰 영향을 미칠 가능성이 있다는 점을 의미한다.

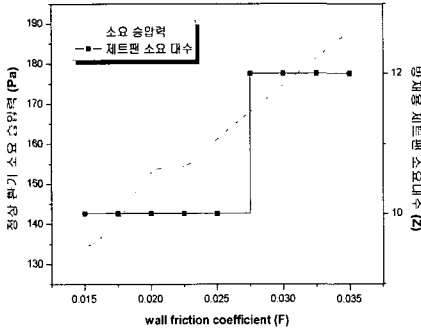
부산시 소재 수정산터널(좌천방향, 2,330 m, 제트팬 종류식), 황령산터널(전포방향, 1,860 m, 반횡류식), 백양산터널(당감방향, 2,340 m, 반횡류식) 3개 터널을 대상으로 실험을 수행하였다. 그림 3에서 분석한 것과 같은 환기설비 가동을 중지한 후의 터널 내 풍속 감쇄는 터널의 총 마찰력에 의하여 좌우된다. 환기설비 가동을 중지한 후 속도감쇄 동안의 자연환기력 및 교통환기력의 영향을 배제한 경우, 속도감쇄 동안의 풍속 $u(t)$, 환기설비가동시 풍속 u_0 , 감쇄후최종풍속 u_e 의 관계는 다음과 같다. 한편, u_0 는 일반적으로 감쇄시작 초기 60초간의 속

도변화를 기준으로 분석한다.

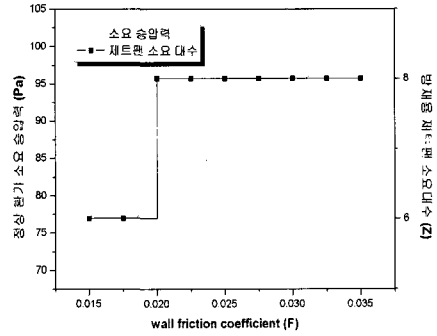
$$u(t) = u_e \frac{e^{a+bt} + 1}{e^{a+bt} - 1} \quad a = \ln \frac{u_0 + u_e}{u_0 - u_e}$$

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

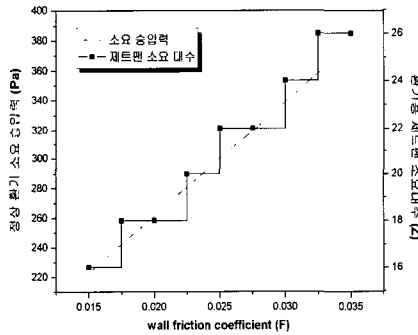
실험은 가급적 교통량 및 차속이 일정하게 유지되는 시간대에 수행하였으며 갱구부근에서의 외부환기력변화를 분석하기 위하여 갱구면에 수직방향으로 작용하는 속도성분 분포를 그림 2와 같이 조사하였다.



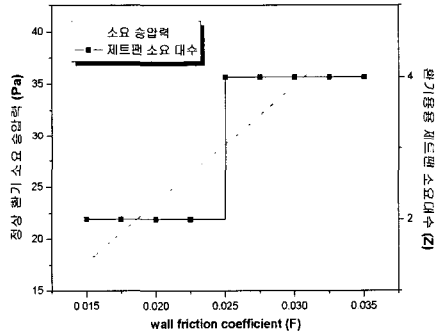
(a.1) 방채시 (A터널)



(b.1) 방채시 (B터널)

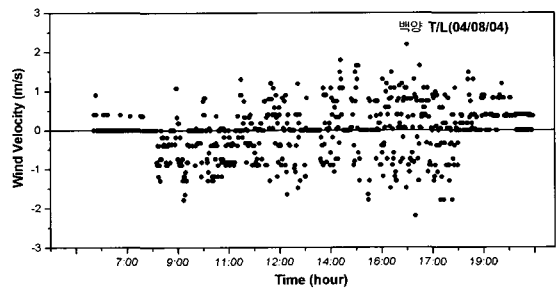
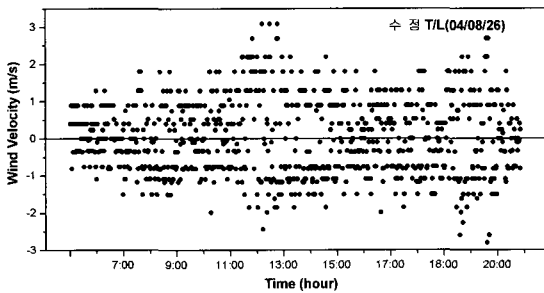


(a.2) 평상시 (A터널)

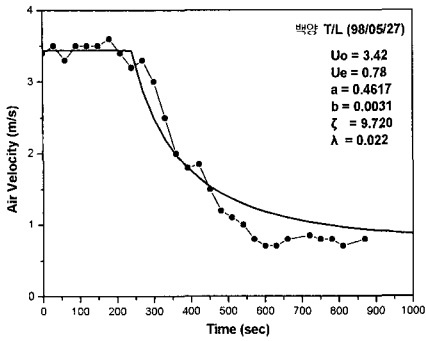


(b.2) 평상시 (B터널)

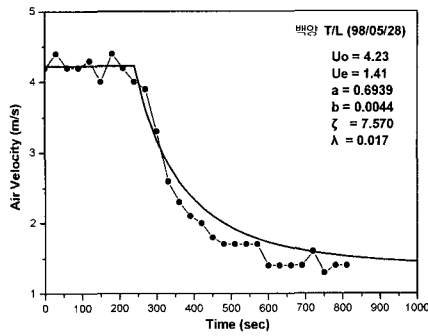
[그림 1] 벽면마찰계수 VS 제트, 팬 소요대수



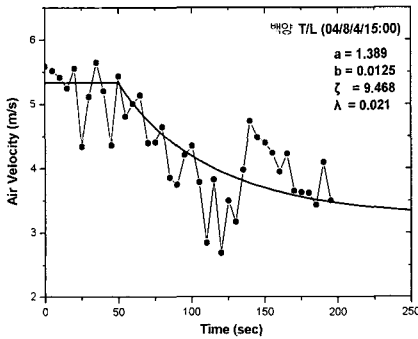
[그림 2] 터널 갱구면 작용 풍속 분포



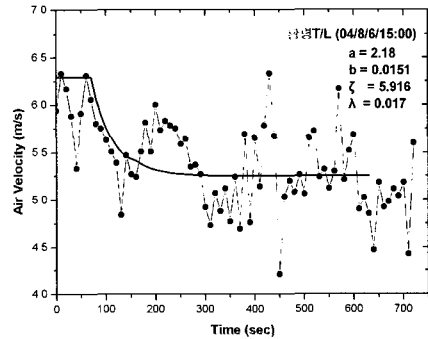
(a) 백양산터널(차량통행 없는 경우)



(b) 황령산터널(차량통행 없는 경우)



(c) 백양산터널



(d) 황령산터널

[그림 3] 속도감쇄법에 의한 풍속변화 추정결과

<표 1> 벽면 마찰계수 분석 결과

터널	환기방식	벽면마찰계수	
		추정범위	평균값
수정산터널	제트팬 종류식	0.011~0.022	0.017
백양산터널	반횡류식	0.015~0.025	0.021
황령산터널	반횡류식	0.017~0.019	0.019

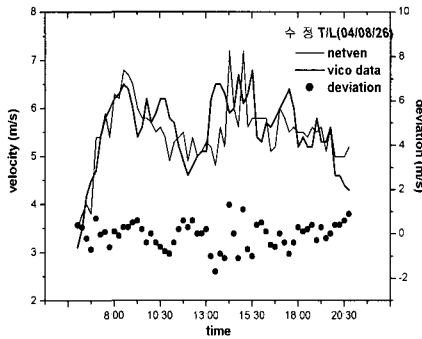
한편, 벽면 마찰계수 0.025를 가정한 1-D 시뮬레이션 분석을 통하여 터널내 풍속 실측값과 시뮬레이션 추정 풍속값을 비교·분석하였다. 그림 4는 풍속 실측값, 추정값, 오차의 분포를 보여준다. 풍속의 피크가 일치하지 않는 것은 천이상태를 고려하지 않은 15분 간격의 정상류 모델을 사용한 데 기인한 것으로

보인다. 오차분포는 평균 0.04~1.73 m/s, 표준편차 0.05~1.40 m/s 정도이다. 터널내의 환기력은 벽면 마찰계수, 차량항력계수 등의 영향을 직접적으로 받으므로 터널내 기류유동의 예측모델에 기반한 터널 환기시스템의 운영을 통한 환경 및 안전관리, 방재 시스템 제어를 통한 화재시 입계속도의 유지를 위하여서는 이들 기초인자들과 터널내 기류유동사이의 관계에 대한 연구가 필요하다.

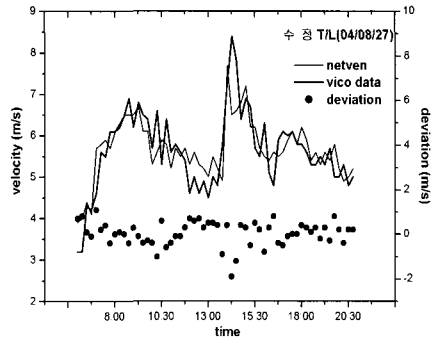
벽면마찰계수의 증가는 마찰력을 증가시키며 환기 속도 감소를 초래하나 차속과의 상대속도의 증가는 오히려 교통환기력을 증가시키게 된다. 따라서 결과적인 터널내의 풍속 변화는 기타 조건이 일정할 경우, 마찰력 증가와 교통환기력 증가의 상대적 크기 변화에 따라 결정된다. 내공단면적 75, 95, 126 m²인 2, 3, 4차선 터널에서의 차속 60 km/h시의 벽면마찰 계수의 변화와 환기력변화를 시뮬레이션 분석하였

으며 그림 5는 2차선 터널의 경우의 분석 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 일반적으로 벽면마찰계수는 풍속의 감소를 초래한다. 그러나 0.025를 기준으로 한 동일 길이 터널 내에서의 풍속의 상대적 증감율은 -2%~+2% 정도에 불과하며 터널길이별 차이도

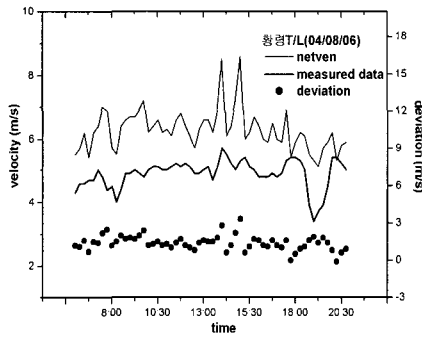
거의 없음을 알 수 있다. 그러나 정체시 즉 차속이 약 20 km 이하일 경우에는 마찰력 증가에 따른 풍속 저감은 교통환기력의 감소를 초래할 가능성이 높으므로 환기속도의 감소폭은 상대적으로 커질 가능성이 높다.



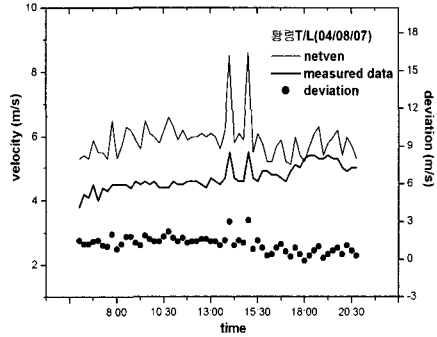
(a) 수정산터널 (04/08/26)



(b) 수정산터널 (04/08/27)

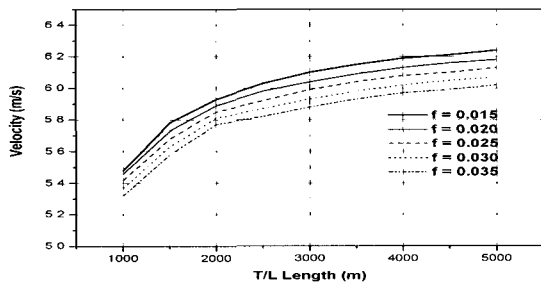


(c) 황령산터널 (04/08/6)

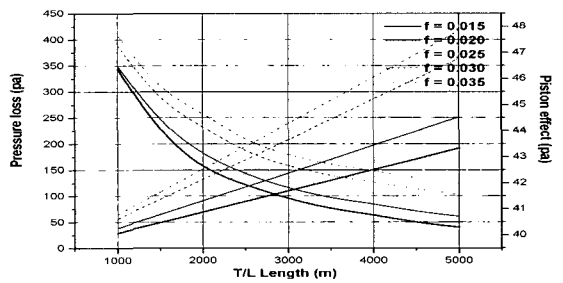


(d) 황령산터널 (04/08/7)

[그림 4] 풍속 실측값 및 시뮬레이션 추정값의 비교



(a) 터널길이 VS 환기속도



(b) 터널길이 VS 환기력

[그림 5] 벽면마찰계수, 터널길이, 환기력 관계 (2차선도로터널의 경우)

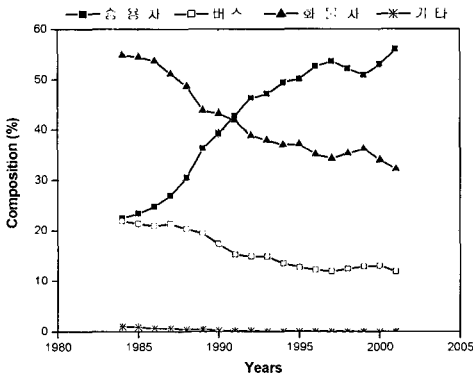


차량 항력계수

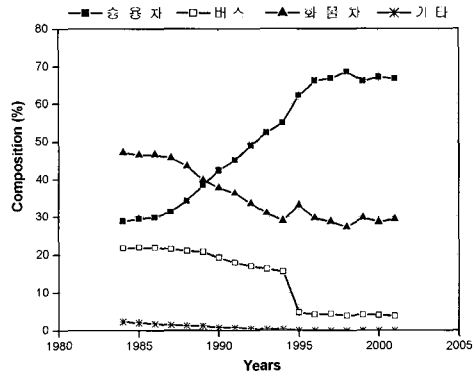
현재 국내 도로상에서 운행중인 차량들의 차종구성 및 차량별 형상은 지속적으로 변화하고 있으나 한국도로공사 기준상의 차량항력계수는 차량전면투영면적과 내공단면적의 비인 점적율(blockage ratio)을 고려한 10여년 전 일본 연구진의 연구결과에 기초하고 있다. 그림 6은 1984년~2001년, 8년간 고속도로, 일반국도, 지방도에서의 통행차량 차종구성비의 변화를 보여주고 있다. 고속도로통행 승용차 외의 차종 구성비는 77.6%에서 44.0%로 화물차량은 54.8%에서 32.1%로 비슷한 수준의 감소율을 기록하였다. 일반국도의 경우에는 승용차 외의 차종 구성비는 71.1%에서 33.2%로, 화물차량은 47.1%에서

29.4%로 훨씬 높은 감소율을 보였다. 지방도에서는 승용차외의 차종 구성비는 67.7%에서 42.1%로 화물차량은 44.4%에서 29.5%로 약간 높은 감소율을 보였다. 한편 국내 도로 전체를 대상으로 한 대형차 혼입은 1992년 38.4%에서 2001년 30.6%로 점진적으로 감소하고 있다.

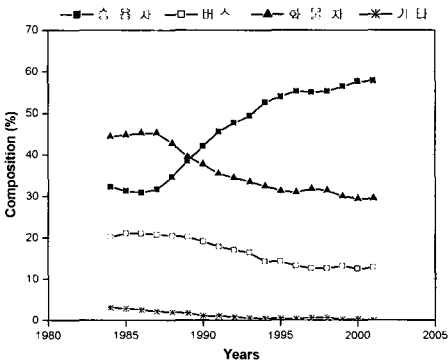
차량의 공기역학적 특성인 저항계수의 변화가 터널내 풍속에 미치는 영향을 분석하기 위하여 저항계수에 직접적인 영향을 미치는 차량전면투영면적을 기존 한국도로공사 기준인 소형차량 2.31 m², 대형차 7.11 m²보다 $\pm 25\%$ 증감하여 터널내 풍속의 변화를 시뮬레이션 분석하였다. 분석은 제트팬 종류식 터널인 수정산터널을 대상으로 하였으며 분석대상 시간은 대형차 혼입율이 3.74%와 22.01%로 현저한



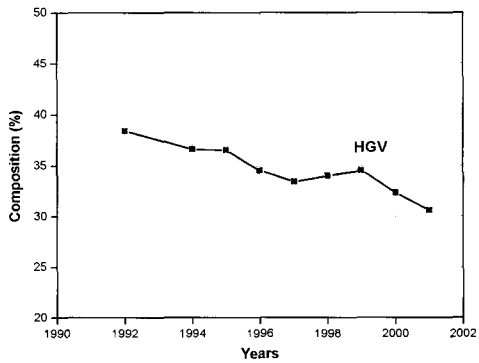
(a) 고속도로



(b) 일반국도

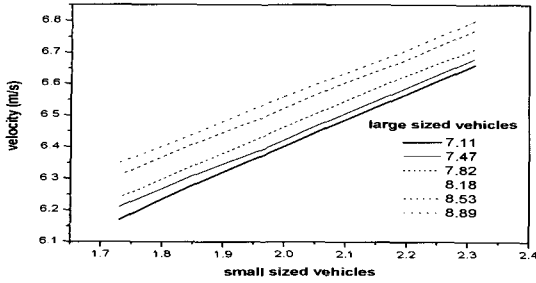


(c) 지방도

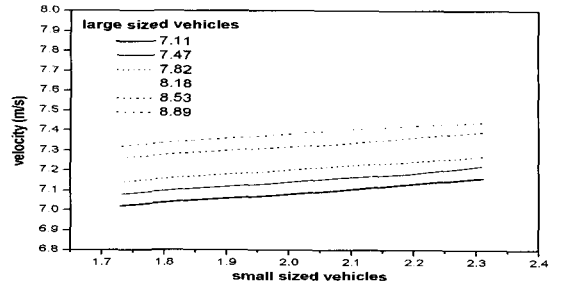


(d) 대형차 혼입율

[그림 6] 도로형태별 차종구성비



(a) 수정산터널 04/08/26 8시45분, 대형차 혼입율 3.74%



(b) 수정산터널 04/08/26 15시00분, 대형차 혼입율 22.01%

[그림 7] 차량 전면투영면적과 풍속

차이를 보이는 두 시간대(15분)를 선택하였다.

그림 7에서와 같이 대형차 혼입율이 비교적 낮은 경우의 터널에서의 소형차량 항력계수의 저감은 혼입율이 높은 터널에 비하여 터널내 풍속에 상대적으로 큰 영향을 미친다. 소형차량의 항력계수(전면투영면적)만을 25% 감소시킨 경우, 대형차 혼입율이 낮은 경우의 풍속 감소는 7.4%이었으나 혼입율이 높은 경우는 1.9%에 불과하였다. 그러나 대형차 항력계수의 증대는 대형차 혼입율에 큰 영향을 받지 않았으며 터널내 풍속에 대한 영향도 소형차 항력에 비하여 미미하였다. 대형차량의 항력계수만을 25% 증대시킨 경우, 대형차 혼입율이 낮은 경우의 풍속 증대는 2.1%이었으며 혼입율이 높은 경우는 3.9%이었다.

결론

도로터널의 환기시스템 최적설계 및 운영을 위하여 요구되는 기초인자에 대한 연구의 일환으로 추진

된 벽면마찰계수와 차량 항력계수에 대한 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

- 국내 도심터널의 벽면 마찰계수는 현재 국내에서 적용하고 있는 벽면 마찰계수 0.025에 비하여 16%~32%정도 낮게 측정되었다. 제트팬 종류식 터널에서의 정상상태의 터널내 풍속 추정을 위한 목적인 경우에는 큰 오차가 예상되지 않으나 여타 환기 방식의 터널이거나 정체시와 같이 마찰계수 증가가 교통환기력의 감소를 초래하는 경우에는 터널장대화에 따라 추정풍속의 급격한 감소가 예상된다.

- 주요 도로·터널 통행 차량 구성비의 급격한 변화, 차량 특성의 변화는 차량항력계수의 변화를 초래하며 궁극적으로는 교통환기력의 변화가 예상되어 이에 대한 연구가 요구된다. 그러나 분석결과, 항력계수 변화에 의한 도심터널내 최대 예상풍속 변화는 4%정도로 벽면 마찰계수나 오염물질 기준배출량 보다는 터널 내 풍속 및 오염물질 농도에 미치는 영향이 상대적으로 작을 것으로 판단된다. ㉔