

## 통계적 분석을 이용한 터널 환기시스템 적정설계변수의 산정 및 적용에 관한 연구

이보영<sup>1)\*</sup>, 유용호<sup>2)</sup>, 김진<sup>3)</sup>

### The Estimation and Application of Optimum Design Variables for Road Tunnel Ventilation System Based on Statistical Analysis

Bo-Young Lee, Yong-Ho Yoo and Jin Kim

**Abstract** In this study, the emission rate of pollutant was modified according to the published standards, and the distribution of pollutant concentration was analyzed for each vehicle velocity. This modified emission rate was applied to a model tunnel and it was proved that the required air quantity was reduced to 49%, compared to the PIARC method. From the simulation result, it was proved by using statistics that the most sensitive factor among them is the friction coefficient and it was modified to the value in the range of 0.018 to 0.021. It is also expected that the required air quantity can be decreased from 14.4% to 19.2% according as the coefficient is applied to the domestic model tunnels. In conclusion, it is proposed that the number of jet fans can be reduced and the annual operating cost can be curtailed as well.

**KeyWords** Emission rate, Optimization of design variable, Friction coefficient, Equivalent resistance area, Statistical analysis

**초 록** 본 연구에서는 도로터널 환기시설 설계기준에 의한 소요환기량 산정 시 오염물질의 기준배출량을 환경부 고시기준에 대해 산정하여 차종별, 속도별로 산정된 기준배출량을 모델터널에 적용하여 시뮬레이션 한 결과 기존의 배출량 기준 적용에 대해 소요환기량은 약 49%로 감소되었다. 또한 터널 내 유동손실로서 작용하는 변수 중 터널마찰계수와 입구저항계수 및 등가저항면적을 통계적 분석기법을 이용하여 이들 계수 중 터널의 환기량 산정에 가장 민감하게 영향을 미치는 인자가 마찰계수이며 시뮬레이션을 통해 실제 적용 가능한 계수 범위가 0.018에서 0.021의 값으로 보정될 수 있을 것으로 예상된다. 검증사례로서 4개소의 터널에 적용하였을 때, 최대 약 19.2%의 소요환기량 감소가 예상되며 이에 대해 기존의 설계운용 중인 Jet Fan 설치 대수의 산정에 있어 감소될 수 있으며, 약 연간 운용비용의 저감에 적용 가능할 것으로 사료된다.

**핵심어** 기준배출량, 계수보정, 마찰계수, 등가저항면적, 통계적 분석

## 1. 서 론

현재까지의 국내 도로터널 환기시스템 설계는 최근 까지 주로 국제상설도로협회(PIARC)와 일본의 설계기준 및 지침 등에 전적으로 의존하여 왔다. 그러나 이들 설계 방법의 무조건적인 적용은 현재 적지 않은 문제점을 낳고 있다. 국내의 기상, 차량, 교통 특성 등을 고려

하지 않음으로써 과다용량의 환기 설비가 설치·운영됨으로써 비용이 과다 지출되는 문제가 발생하고 있으며 운영 면에서도 자동제어 시스템의 운영 효율이 극히 낮은 문제가 제기되고 있다(유지오 외, 2002). 따라서 최근 터널 환기시스템의 설계 및 운영은 더욱 효율적인 설계방법을 요구하고 있으며 궁극적으로는 최적의 환기시스템을 설계하기 위한 설계변수의 필요성이 대두된다.

이에 본 연구에서는 이미 그 타당성이 검증된 미국의 연방도로공사(FHWA)에서 개발한 해석 프로그램인 TUNVEN의 제어체적 방법과 한국도로공사에서 1997년에 제시한 고속도로 터널 환기시설 설계기준을 바탕으로 모델터널에 대해 터널의 물리적 특성변수,

<sup>1)</sup> (주)범창종합기술 설계2팀

<sup>2)</sup> 인하대학교 환경토목공학부

<sup>3)</sup> 정회원, 인하대학교 공과대학 환경토목공학부 부교수

\*교신저자(Corresponding Author): brenda0918@naver.com

접수일: 2004년 10월 13일

심사 완료일: 2004년 10월 27일

차량 및 교통량관련변수의 터널 환기에 관련된 계수의 변화 범위를 제안하고자 하였다. 도로터널 환기 설계 시 그 산정에 가장 큰 비중을 차지하고 있는 차종별, 주행속도별 오염물질 기준 배출량을 현재 소요환기량 계산에 적용하고 있는 현행 도로공사 기준으로 2002년 환경부에서 고시한 제작차 배출허용기준을 이용하여 산정하여 이를 모델 터널에 적용하였다(환경부, 2002). 또한 모델 터널의 시뮬레이션을 통해 각 계수의 변화에 대해 주행속도별 차종에 대한 오염물질의 농도 변화량 및 터널 내부의 유량변동을 비교분석하여 환기량 산정에 가장 민감하게 영향을 미치는 인자를 검증하고자 하였으며, 오염물질의 기준배출량 이외에 환기량 산정에 영향을 미치는 인자로 선정된 계수의 실질적인 적용범위를 나타내고자 하였다. PIARC 방식에서 이용되는 추출된 계수의 적절성을 파악하여 실제 현장에서의 적용 가능한 범위를 제안하였다. 적용검증을 위해 우리나라 현재 종류식 환기시스템을 채택하여 운용중인 터널 4개소에 적용하여 기존 설계기준인 PIARC방식으로 산정된 소요환기량을 비교하여 실질적으로 환기량 산정에 있어 과설계되는 정도를 나타내고자 하였으며, 이에 환기기의 용량 선정 및 운용비용에 대한 절감효과를 구현하고자 하였다.

**2. 허용농도에 대한 기준배출량**

본 연구에서 터널 설계 시 환기량 산정에 대해 현실적으로 보다 타당성이 높은 오염물질의 기준배출량을 도출하기 위하여 현행 환경부에서 고시한 허용농도에 의해서 차종별, 주행속도별 기준배출량을 현행 도로공사 기준으로 2002년 환경부에서 고시한 제작차 배출허용기준을 이용하여 산정하였다. 제작차에 대한 허용배출량 규제값에서 승용차 및 소형버스의 경우는 차량의 주행거리당 중량[g/km]으로 고시되며, 이 경우 다음 식을 이용하였다(신현준, 2001).

$$Q_0^{CO,NOx} = \frac{1}{\rho_{CO,NOx}} \cdot EF_{lim} \cdot V \cdot C_v \quad (1)$$

여기서,  $Q_0^{CO}$  및  $Q_0^{NOx}$ 는 CO 및 NOx의 기준배출량 ( $m^3/h$ ),  $\rho_{CO,NOx}$ 는 오염물질의 밀도를 나타내며,  $EF_{lim}$ 는 제작차의 오염물질 배출 허용기준(g/km), V는 차량의 주행속도(km/h),  $C_v$ 는 속도에 대한 보정계수를 나타낸다. 속도보정계수는 제작차 배출허용 규제의 평균 주행속도가 34.1 km/h로 이를 PIARC 방식에 의한 환기량 계산 시 요구되는 정상주행속도인 60 km/h로 환산하기 위한 보정계수이다. 이에대한 결과는 다음의 Table 1에 나타난 바와 같다. 현재 도로터널 환기 설계 시 적용되는 PIARC 방식의 배출량 값과 비교할 때, CO농도의 경우 최소 약 11%에서 최대 42%, NOx농도의 경우는 최대 약 88%, 매연의 경우 54% 이상의 큰 차이의 감소 추세를 나타내었다. 이는 최근 운행되는 차량의 주행성능의 발전에 따른 오염원 배출량이 기존 적용되는 값에 비해 상당히 저하되었으며, 이는 곧 현재 적용하고 있는 기준배출량이 소요환기량 산정에 대해 과설계를 조장하는 주요한 원인이 됨을 알 수 있다. 이에 환기량 설계기준에서 기준배출량과 함께 주요 개선안으로 사료되는 교통용량의 산정문제 또한 차량의 구성비 및 교통밀도에 대한 데이터베이스의 마련 및 실질적으로 적용가능한 산정에 대한 연구가 필요하다고 사료된다(한국도로공사, 1997).

**2.1 모델 터널에의 적용**

개선된 오염물질 기준 배출량의 타당성 검토는 원칙적으로 다수의 실제 터널에서 교통량 및 주행속도에 따른 터널 내 풍속과 오염물질의 농도분포에 대한 실측 결과와 비교함이 바람직하나 현재 국내에는 이러한 기본 데이터가 전무한 실정이다. 그러나 본 연구에서는 이미 그 타당성이 입증된 제어체적방법(TUNVEN)을 적용하여 소요환기량을 계산하였기 때문에 이상에서

**Table 1.** Comparison of emission rates at vehicle velocity 60 km/h

Vehicles	CO ( $m^3/h$ )		NOx ( $m^3/h$ )		Soot ( $m^2/h$ )	
	Recent Standard ('97)	Calculated Emission Rate	Recent Standard ('97)	Calculated Emission Rate	Recent Standard ('97)	Calculated Emission Rate
automobile	0.1013	0.0642	0.0100	0.0048	-	-
small size bus	0.0610	0.0289	0.0250	0.0136	29.5819	16.9859
large size bus	0.6517	0.2793	0.6420	0.5559	172.0364	77.8507
small size truck	0.0730	0.0244	0.0270	0.0312	31.6099	16.9859
middle size truck	0.3190	0.1367	0.3150	0.0066	82.9411	38.1089
large size truck	0.7215	0.3092	0.7100	0.6155	208.5517	86.1973

도출한 CO, NOx, 매연의 기준배출량에 대한 적정성을 파악하기 위하여 모델 터널에 대해 주행속도별 오염물질의 농도 및 소요환기량을 산정 비교하였다.

Fig. 1에 도시한 바와 같이 CO에 대한 소요환기량은 PIARC방식에 의거한 현행기준을 사용하는 경우의 약 49% 수준이며, NOx의 경우는 약 59% 수준으로 감소한다. 그러나 이러한 급격한 감소 경향은 실측에 의한 배출량 데이터에 의한 것이 배재된 상태이며 또한 터널의 외부기상변수 및 차량 및 교통관련변수, 터널의 물리적 특성변수들 간의 동적인 연관분석이 동시에 수행되지 않은 결과이다. 이에 현실적으로는 다소간의 괴리가 있을 것으로 예상된다. 따라서 최적 터널환기시스템의 선택 및 운영을 위한 의사결정 방법 또한 다양하게 제시되어야 하며, 최근 환기 시뮬레이션에 대해 관련 변수들의 동적인 관계를 정량적으로 분석하는 것이 필수 불가결의 요소임이 강조된다.

또한 선행연구인 「종류식 도로터널 내의 오염도 예측을 위한 인공신경망 회로의 적용」(이덕준 외, 2003)에서는 인공신경망을 이용한 프로그램을 개발하여 종류식 환기방식을 적용한 도로 터널에서 터널 길이 및 대형차 혼입율에 따라 환기 특성을 파악하고 이를 기초로 하여 오염 물질의 농도 및 변화량을 입력값으로 하여 터널 내의 오염물질의 농도를 예측해 내었다. 이는 약 95%의 정확도를 나타내고, 현장 여건과 부합되는 모델 터널에 적용되어 그 오염물질의 농도는 실측 분포 패턴을 따라 약 90%의 신뢰도를 보인다 하였다.

이에 모델터널의 기본제원 및 교통량을 입력 데이터로 하여 주행속도별 터널 내 CO의 오염도 분포를 예측하고, 소요환기량 산정을 위한 기본 배출량을 계산하였다. 또한 주행속도에 대해 예측된 오염물질의 발생량에 대해 주행속도 10~80 km/h에서의 자동차 군의 1 km 당 오염물질 발생량에 대한 표준편차와 평균값 및 허용농도 규제기준을 적용하여 기준배출량을 산정하였다.

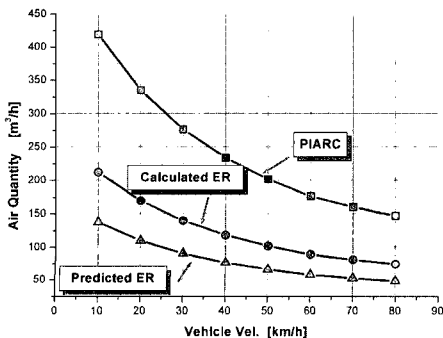


Fig. 1. Comparison of air quantity for each vehicle velocity

이상 결과에 따르면 PIARC 방식에 따르는 현행도로공사 기준에 대해 산정한 기준배출량을 적용한 경우의 환기량이 최대 약 49.5%로 감소되며 오염물질의 농도 예측프로그램의 결과에서는 약 38.2%의 환기량 저하를 나타내었다. 이에 대해 국내 도로터널의 환기량 설계 시 PIARC 방식의 보정 작업이 절실히 요구된다. 환기량 산정에 있어 PIARC 방식에 적용되는 여러 산정계수 및 보정계수들은 터널의 실제적요소로서 경사, 표고 및 벽면의 마감에 따른 조도에 대한 보정계수와 터널의 내부 기류에 영향을 미치게 되는 내외부 풍속 및 통과 차량에 대한 종류, 대수, 오염물질 배출량에 대한 실질적인 고려가 필요하다.

### 3. 주 영향인자 계수선정

현재 도로터널 설계에 있어 실질적인 설계 자료가 부족하며 오염물질의 기준배출량 및 설계 기준에 상응하는 계수 및 보정계수들은 다분히 외국의 사례에 의존하는 경향이 강한 실정이다. 본 연구에서는 모델터널의 시뮬레이션을 통하여 설계기준치의 변동에 따라 실질적으로 소요환기량의 변화를 초래하는 계수를 평가하였고 결과 벽면마찰계수, 입구손실계수 및 차량의 등가 저항면적이 선정되었다.

#### 3.1 벽면마찰손실계수 ( $\lambda$ )

터널 내 환기저항 계수의 측정에는 많은 어려움이 있으며, 특히 벽면마찰계수는 한국도로공사 환기설계 기준에 의해 모든 터널에서 0.025로 적용하고 있다. 터널 내 유속측정에 의한 선행 연구 자료(김효규, 2000)에 의하면 0.025보다 낮은 수치의 마찰계수를 나타낸다 하였다.

차량의 주행속도가 감소하면 오염물질 배출량의 증가에 대해 터널 내부의 오염농도가 증가하고, 이에 동반하여 교통환기력은 저하되어 일정 단면적에 대해 내부풍속과의 곱으로서 산출되는 실제유량은 감소하게 된다.

Fig. 2에 나타낸 바와 같이 결과적으로 주행속도별 벽면마찰계수가 증가할수록 터널내부의 실제 유량은 감소한다. 즉 개통된 도로터널로서 차량통행이 이루어지는 상황에서 터널 내 교통환기력 및 자연환기력에 의해 유도되는 내부 풍속이 저감되는 상황으로 판단된다. 이는 곧 일정 주행속도에 대해서 터널 내의 마찰저항의 상승에 따라 교통환기력 및 자연환기력의 감소 변화가 터널 내의 실제 유량의 저하 결과를 초래하며 단위 시간당 배출되는 오염물질의 농도의 증가로 인한 소요환기량 산정에 대해 과설계를 조장하는 원인으로 작용하는 것으로 사료된다. 본 연구에서 적용가능한 범위 내

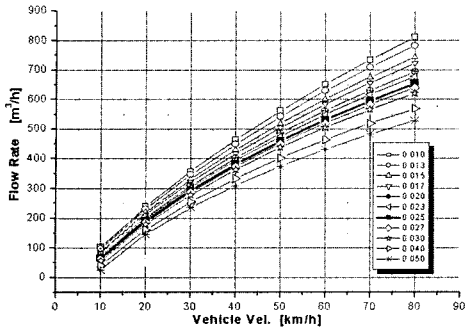


Fig. 2. Comparison of flow rates for the variation of  $\lambda$

의 벽면마찰계수값의 변화에 대해 현 기준보다 최대 약 14.9%의 감소된 유량이 산정되었다.

### 3.2 입구손실계수( $\zeta$ )

입구손실계수는 터널입구의 형상에 영향을 받으며 일반적으로 입구의 형상이 각이진 사각모서리로 되어 있는 경우에는 그 값은 0.5정도이며 원형으로 하는 경우에는 이 값이 상당히 작아진다. 현재 한국도로공사 설계 기준상의 입·출구 손실계수는 터널내의 평균 단면적이 일정하다는 가정하에 안전율을 고려하여 각각 0.6 과 1.0을 적용하고 있다.

Fig. 3은 주행속도 10 km/h에서 80 km/h까지 입구손실계수의 변화에 대해 각각 경우의 평균유량 및 표준편차, 표준오차의 수치를 비교함으로써 터널 내부 실제 유량의 변동을 확인한 결과이다. 입구손실계수의 경우 그 값의 변화에 대해 유량에 미치는 영향은 최대 1.18%에 그치고 있으며 이는 환기량 산정에 있어 현 기준이 과설계에 대한 영향은 적을 것으로 사료된다.

### 3.3 전면투영면적과 저항계수

현재 차량의 전면투영면적과 저항계수는 최근 운행중인 차량의 투영면적의 증가 및 형상의 변화에 대한 고려가 없는 문제점이 있다.

이에 본 연구에서는 현재 운행중인 국내 차량의 차종별 제원에 따라 소형 및 대형 차량으로 분류하여 차량의 출고 대수로 구분하였으며 이에 운행중인 제작차량에 대해 전폭 및 전고에 대한 전면투영면적을 계산하고 차량의 저항계수를 산출하였다.

Fig. 4는 등가저항면적의 변동에 대한 유량의 변화를 비교하여 도시한 것이며, 현 PIARC방식에 대해서 최대 약 9.8%의 유량 상승을 나타내었다. 이는 곧 일정 주행속도에서 유량의 상승에 대하여 터널 내부의 오염물질 농도 및 소요환기량 또한 그에 비례하여 감소될 것으로

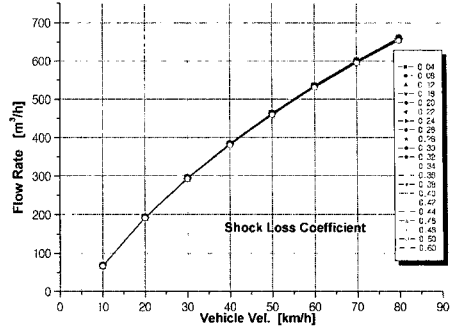


Fig. 3. Comparison of flow rate for each shock loss coeff.

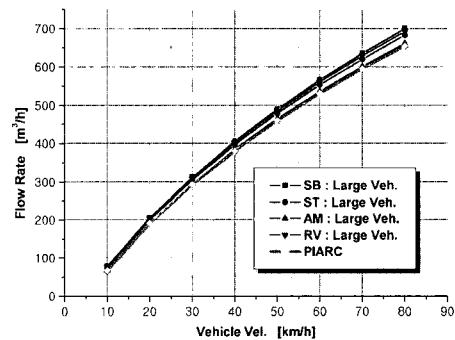


Fig. 4. Comparison of flow rate for each equivalent resistance area

사료된다. 터널의 단면적이 일정할 경우 전체 차량대수의 변화가 없다 가정한다면 이는 동일한 전면투영면적을 갖게되며 동일한 환기력으로 나타나지만, 실질적으로는 소형트럭의 비율이 큰 경우 환기력 및 실제유량이 크게 작용하게 된다. 이에 제안하는 바는 유효 저항계수로서 차량의 등가저항면적에 대해 일괄적으로 소형 : 대형으로 구분하여 적용되고 있는 값을 교통량 산정 시 세분화된 7종의 차량구성비에 대한 고려가 이루어져야 할 것으로 사료된다. 또한 신형의 제작차들이 생산되는 현 시점에서 차량의 공기역학적 변수들에 대한 자료의 관련 문헌에 대해 이론적인 검토가 요구된다.

## 4. 계수보정

### 4.1 평가방식 및 평가항목

본 연구에서는 환기량 산정을 위한 기본 주요계수들 각각의 변화에 대해 유량에 대해 가장 민감한 영향을 끼치는 인자를 추출하고 그 인자의 실질적인 적용 가능한 보정 범위를 찾기 위해 분산분석(ANOVA)과 공분산분석(ANCOVA)법을 그 평가방식으로 적용하였다. 분산분석은 처리가 종속변수에 미치는 영향에 초점을

두고 있는 반면에 공분산분석은 종속변수에 중요한 영향을 미치는 외생변수에 관심을 가지며 이러한 외생변수가 종속변수에 미치는 영향을 설명 또는 제거하고자 하는 것이다. 본 연구에서는 종속변수를 터널내 유량으로 하여 계량적 종속변수는(공변량) 주행속도이며 이는 실제적으로 유량의 변동이 각 주행속도별에 따라 영향을 받으므로 최대한 그 영향을 억제하여 각 계수의 변동에 대한 유량의 변화를 평가하고자 한 것이다. 분석 방법은 ANCOVA 및 ANOVA를 이용하였으며 X1은 주행속도, X2는 벽면마찰계수, X3는 입구손실계수, X4는 등가저항면적, Y1은 요인이 벽면마찰계수일 때의 유량, Y2는 요인이 입구손실계수일 때의 유량, Y3는 등가저항면적에 대한 유량을 나타낸다. 일원배치법을 이용한 분산분석은 각 요인에 대해 주행속도 또한 동등한 독립변수로 분석하며 세 요인 중 유량에 가장 민감한 영향을 미치는 인자에 대해서 Duncan의 다중비교를 이용한 사후분석을 수행하였다.

**4.2 계수의 보정범위**

가장 민감한 영향을 주는 인자인 벽면마찰계수에 대

한 분산분석을 수행하고 사후분석법 중 Grouping에 의한 Duncan의 다중비교법을 이용하여 전체적인 유의수준을 관리하면서 검정을 수행하였고, 이 결과를 회귀모형으로 분석하여 유량에 가장 민감하게 영향을 미치는 벽면마찰계수의 보정 범위를 산정하였다. Table 2 및 Table 3의 벽면마찰계수의 변동에 따른 유량의 변화에 대한 분산분석의 결과에서 나타난 바와 같이 유의수준 0.0001 이하로서 귀무가설은 기각되며 약 99.5%의 설명력을 나타낸다. 앞서 주 영향인자 선정에서 도시한 바와 같이 계수의 변동에 대해서는 유량의 변화가 나타나며 이는 곧 같은 계수에 대해 Table 4와 같은 grouping을 하였을 때, 그 각각의 집단간의 차이가 있음을 의미한다. 이는 집단 모두 서로 평균값이 다르다는 의미는 아니며 이 중에는 평균값이 통계적으로 서로 같은 것이 있을 수도 있고, 일부는 서로 다를 수도 있다. 이들 각각 집단끼리의 평균값차이를 분석하는 사후분석법이다. Duncan의 다중비교법은 평균값의 크기에 따라 순서대로 분류한 후 단계적으로 평균값차이를 검정해 가는 방법이다. Table 4에 나타난 바와 같이 벽면마찰계수의 변동이 유량에 미치는 영향은 실제 계수 변화에 대해

**Table 2.** ANCOVA analysis-the GLM procedure for the friction coefficient

Dependent Variable Y1			
Source	DF	F value	Pr>F
Model	21	460.84	<.0001
Error	146		
Source	DF	F Value	Pr > F
X1	1	9677.28	<.0001
X3	20	0.02	1.0000

**Table 3.** ANOVA analysis-the GLM procedure for the friction coefficient

Dependent Variable Y1			
Source	DF	F value	Pr>F
Model	27	1025.44	<.0001
Error	140		
Source	DF	F Value	Pr > F
X1	7	3846.44	<.0001
X2	20	38.08	<.0001

**Table 4.** Duncan's multiple range test for the variation of friction coefficient

Duncan grouping	Mean	N	×2	Duncan grouping	Mean	N	×2
A	489.848	8	.010	D	431.780	8	.018
	481.014	8	.011		426.049	8	.019
B	472.733	8	.012		420.569	8	.020
	464.949	8	.013		415.308	8	.021
	457.599	8	.014	E	410.256	8	.022
C	450.650	8	.015		405.393	8	.023
	444.050	8	.016		400.709	8	.024
	437.768	8	.017		396.189	8	.025
F					391.819	8	.026
				387.595	8	.027	
				383.511	8	.028	
				379.550	8	.029	

독립변수의 관계가 강한 선형성이며, 또한 실측데이터 이용이 아닌 모델터널의 시뮬레이션을 통한 선형성 구현이므로 데이터의 산포도가 감소하고 평균값에 대한 차이가 거의 일정한 것으로 판단된다. 본 연구에서는 주행속도 10 km/h~80 km/h에 대한 유량의 평균값과 Duncan Grouping으로 분류된 데이터를 각각 회귀분석하여 각 그룹의 회귀계수를 모 회귀계수와 비교하여 가장 잘 부합되는 그룹의 계수를 그 보정 범위로 해석하였다.

상기 회귀분석 결과인 Table 5는 벽면마찰계수의 전체 데이터에 대한 분석으로 유의수준 0.0001 이하이며 약 98%의 설명력을 나타낸다. 계수 변동에 대한 유량 변화의 모 회귀계수는 나타낸 바와 같이 -0.16430으로 산정되었다. 그러나 벽면마찰계수는 최대 0.3을 초과하지 않는 반면에 유량은 그 값의 폭이 계수값에 비해 매우 크다. 이러한 연유로 실질적인 회귀분석을 위해 각 유량의 값에서 평균을 제한 후 이를 표준편차로 나누는

단위의 표준화를 선행 하였다.

각 그룹에 대한 회귀계수는 다음 Table 6에 나타내었다. 위 결과에서 A에서 F까지의 그룹 중에서 모 회귀계수와 가장 근접하는 회귀계수를 갖는 그룹은 Table 7에 나타낸 바와 같이 마찰계수 0.018~0.021의 범위를 대표하는 그룹 D로 판별되었다. 이에 본 연구에서는 환기량 산정에 요구되는 계수 중 유량에 가장 민감하게 영향을 미치는 인자는 벽면마찰계수이며, 현재 0.025로 고정된 기준으로 모든 터널에 적용하는 현 시점에서 이를 0.018~0.021의 범위로서 보정하여 실 터널의 환기설계에 적용하여 소요환기량 산정에 있어 과설계 되는 요인을 감소시킬 수 있을 것으로 사료된다.

5. 신뢰성 검증을 위한 적용사례

종류식 환기방식을 채택하고 있는 국내 도로터널 A, B, C, D에서 차량주행속도 10~80 km/h 별 CO, NOx

Table 5. Regression analysis-for the whole friction coefficient

Analysis of Variance					
Source	DF	F value		Pr>F	
Model	2	4586.21		<.0001	
Error	165				
Parameter Estimates					
Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	t Value	Pr >  t
Intercept	1	-4.6123E-11	0.01032	-0.00	1.0000
XX1	1	0.97741	0.01035	94.45	<.0001
XX2	1	-0.16430	0.01035	-15.88	<.0001

Table 6. Regression coefficient for the each group

Group	Range of λ	Regression Coeff.	Group	Range of λ	Regression coeff.
A	0.010~0.011	-0.25983	D	0.018~0.021	-0.16147
B	0.012~0.014	-0.22256	E	0.022~0.025	-0.13791
C	0.015~0.017	-0.18946	F	0.026~0.030	-0.11845

Table 7. Regression analysis-for the friction coeff. group D(0.018~0.021)

Analysis of Variance					
Source	DF	F value		Pr>F	
Model	2	1102.30		<.0001	
Error	29				
Parameter Estimates					
Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	t Value	Pr >  t
Intercept	1	-0.02046	0.02263	-0.90	0.3733
XX1	1	0.97246	0.02072	46.93	<.0001
XX2	1	-0.16147	0.11223	-1.44	0.1609

의 농도 및 소요환기량을 산정하여 비교하였다. 오염물질의 농도분포는 4개소 모두 현 기준의 PIARC방식에 의한 방법보다 수치가 더 낮은 것으로 평가되었다. 지체 시 그 오염농도 증가에 대해 문제가 되는 주행속도 10 km/h의 경우, 계수 보정값을 적용한 결과 A터널의 경우 PIARC방식보다 최대 약 19.2%가 낮은 CO농도 분포를 나타내었다.

또한 다음의 Fig. 5는 감소폭이 가장 큰 터널 A에서의 주행속도별 CO농도 분포 및 환기량을 산정하여 나타낸 것이다.

소요환기량의 경우 동일한 터널에 대해서 각각의 산정 방식을 달리하였을 때, 보정된 계수를 적용한 결과 기존의 PIARC 방식에 대해 지체 시 가정 주행속도 10 km/h에서 터널 A의 경우는 최대 19.2%, 터널 B는 15.6%, 터널 C는 15.3%, 터널 D는 14.4%의 소요환기량 저하가 예측되었다. 이는 보정된 마찰계수 적용에 의한 감소된 압력손실값만으로 계산된 값이며, 각 터널에 대한 여타의 산정조건에 대한 보정은 수행하지 않은바 정확한 비교 및 산정을 위한 추후 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

5.1 Jet Fan 소요대수 산정 및 경제성 평가

요구승압력 ( $\Delta P_{req}$ )은 다음 식으로 계산된다. 따라서 요구승압력 ( $\Delta P_{req}$ ) > 0인 경우는 환기저항인 벽면마찰저항 ( $\Delta P_r$ )과 자연풍에 의한 환기저항 ( $\Delta P_{MTW}$ )의 합이 교통환기력 ( $\Delta P_t$ )보다 크다는 것으로 이 경우에는 강제 환기가 요구된다.

$$\Delta P_{req} = (\Delta P_r + \Delta P_{MTW}) - \Delta P_t \quad (2)$$

이에 본 연구에서는 Jet Fan 환기 방식이 적용되고 있는 터널 A, B, C, D에 대해 주행 속도별 요구 승압력을

산정하였다. 이는 교통 환기력 및 자연 환기력을 보충하여 Jet Fan 분류 효과에 의한 압력상승을 발생시켜 소요 환기량을 확보할 수 있도록 할 수 있다. 다음 결과는 터널 4개소에서 환기기 가동을 중지하였을 경우 각 터널에 대한 오염물질별 허용농도기준을 만족시키기 위한 주행속도별 요구 승압력을 나타낸 것이다. 저속 주행 10 km/h 시 요구되는 승압력이 각 터널에서 최대인 점에서 이 때의 Jet Fan 대수를 각 터널에 대해 산정한 내용은 다음 Fig. 6과 같다.

A터널의 경우 PIARC 방식에 의한 Jet Fan의 대수는 22대로 산정된 반면 보정된 벽면마찰계수 범위를 적용한 결과 Jet Fan운용대수의 감소가 예상되었다. 그러나 이는 터널의 실질적인 여타의 변수에 대한 제어가 이루어지지 않고, 본 연구에서 얻어진 보정된 마찰계수만의 적용에 의한 것으로 추후 터널제원의 각 특성을 고려하고 여타의 변수의 제어연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다. 기존의 연구결과에 따르면 연장 2500 m의 모델 터널에 대하여 6:00~22:00까지 가상교통량하에서 제어주기를 3분으로 하여 시뮬레이션을 수행한 결과 설계 Jet Fan 대수 9대에 대해 터널 내 풍속은 약 7.5 m/s 이하로 나타나고 Jet Fan이 가동되는 시간은 738분이며, 일일운전동력은 약 7389 kWh / day로 산정되었다. 이를 본 연구에 적용하여 A, B, C, D 각 모델터널에서의 요구 승압력에 준하는 Jet Fan의 대수를 운전하는데 있어 기존의 PIARC 방식과 보정된 계수의 적용에서의 소요 동력 대한 연간운영비를 비교분석하였으며, 계절별 및 일일 시간대별 산업전력비에 대해 소요 동력에 대한 Jet Fan의 연간운영비는 터널 본체의 증설 및 교통량 증가에 따르는 환기상의 단계건설은 배제한 경우 건설된 터널시점에서 20년 이상 환기시스템의 운영 및 관리에 영향을 미칠 수 있을 것으로 예상된다. 이에 대해 이후 산정된 Jet Fan의 계절 및 시간, 정상상태 및

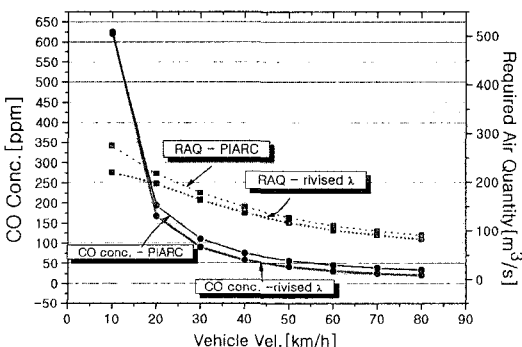


Fig. 5. Comparison of required air quantity and CO concentration at the tunnel A

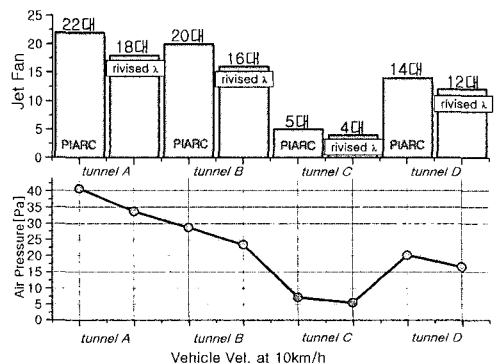


Fig. 6. Comparison of required air pressure and the number of jet fans at each tunnel

비상사태 시 운전 제어에 대한 연구를 통해 운전 단계에 대한 정확한 동력비의 산정이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

## 6. 결 론

차종별, 속도별로 산정된 기준배출량을 모델터널에 적용하여 시뮬레이션 한 결과 기준의 배출량 기준 적용에 대해 차종별 배출 오염물질 중 CO농도는 최소 11%에서 최대 약 42%까지의 감소된 경향을 나타내었으며, 그에 대한 소요환기량 감소가 예상되었다. 이러한 급격한 감소경향은 터널의 외부기상변수, 차량 및 교통관련 변수, 터널의 물리적 특성변수간의 동적인 연관 분석이 동시에 수행되지 않은 결과이며, 이에 현실적으로 실측에 의한 배출량 데이터 이용에 대한 사례 연구 및 실증이 배제된 상황에서는 실제 상황과 다소간의 괴리가 있을 것으로 예상된다.

또한 소요환기량 산정에 과설계를 조장하는 원인으로 작용하는 설계인자 중 실질적으로 보정할 수 있는 계수는 시뮬레이션을 통해 벽면마찰계수가 14.9%, 입구손실계수는 1.18%, 등가저항면적은 9.8%의 결과가 도출되었다. 통계적 분석을 이용하여 각 세 요인에 대해 그 영향성을 분석한 결과, 시뮬레이션 결과와 동일한 벽면마찰계수가 가장 민감한 요인으로 평가되었다. 마찰계

수의 종속변수에 대한 사후분석 및 회귀분석 결과 보정된 마찰계수의 적용범위는 0.018~0.021로서 이는 선행 연구에서 터널내부풍속 실측 데이터를 이용하여 산정한 범위 0.017~0.022와 잘 부합되는 결과로 사료된다. 선정된 계수의 적용범위에 대해 결과의 신뢰성 및 타당성을 검증하기 위하여 우리나라 현재 종류식 환기시스템을 채택하여 운용중인 터널 4개소에 적용하여 기존 설계기준인 PIARC방식으로 산정된 소요환기량을 비교한 결과 소요환기량 감소가 예상되었으며, 이에 감소된 요구 승압력에 준하는 Jet Fan 대수 및 연간 운용비용 절감을 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

## 참고문헌

1. 김효규, 2000, 국내 도로터널 내 자연환기력 분석연구, 동아대학교 자원공학과 석사학위논문.
2. 신현준, 2001, 터널환기 용량 산정을 위한 방안, 대한설비공학회 2001 환기부문학술강연회, 19-34
3. 유지오 외, 2002, 조합환기 방식 터널의 환기 운전 단계에 관한 연구, 터널기술, 4.4.
4. 이덕준, 2003, 종류식 도로터널 내의 오염도 예측을 위한 인공신경망 회로의 적용, 인하대학교 자원공학과 석사학위논문.
5. 한국도로공사, 1997, 고속도로 터널 환기시설 설계기준.
6. 환경부, 2002, 대기환경보전법시행규칙 개정령.

### 이 보 영



2000년 인하대학교 자원공학과 공학사  
2004년 인하대학교대학원 자원공학과  
공학석사

Tel: 02-570-1544  
E-mail: brenda0918@naver.com  
현재 (주)범창중합기술 근무

### 유 용 호



1997년 인하대학교 자원공학과  
공학사  
1999년 인하대학교 자원공학과  
공학석사

Tel: 032-60-7558  
E-mail: ventil@hanmail.net  
현재 인하대학교 자원공학과  
박사과정수로

### 김 진



1987년 인하대학교 공학사  
1990년 미국 University of Kentucky  
공학석사  
1995년 미국 University of  
Missouri-Rolla 공학박사

Tel: 032-860-7558  
E-mail: jinkim@inha.ac.kr  
현재 인하대학교 환경토목공학부 부교수