

터널환기제어를 위한 차종별 오염물 배출량 추정

홍대희[†] · 김우동* · 김태형** · 민 원***
(2001년 5월 31일 접수, 2001년 10월 13일 심사완료)

Estimation of Pollutants Exhausted From Vehicles for Tunnel Ventilation Control

Daehie Hong, Woo-Dong Kim, Tae-Hyung Kim and Won Min

Key Words : Tunnel(터널), Tunnel Ventilation(터널환기), Estimation Algorithm(추정알고리즘), Least Square(최소자승), Pollutant(오염물), Weighted Residual Method(가중오차방법)

Abstract

The tunnels built in recent years are equipped with traffic counters and pollution sensors (mostly, CO and VI sensors). Utilizing these built-in sensors, it is possible to develop an algorithm to estimate the amount of pollutants exhausted from the each class of cars passing through the tunnel. These estimated data can be effectively utilized not only for ventilation control but also for designing ventilation facilities. The diffusion of pollutants in a tunnel can be described with one-dimensional diffusion-convection equation. This equation is approximated with interpolation functions and weighted residual method converting to adequate form for standard state estimate algorithms. With this converted equations, a least square optimization based algorithm is developed, whose outputs are the estimated amounts of pollutants emitted from each class of cars. In order to verify the feasibility of the developed algorithms, simulations are performed with the real data acquisitioned from the Tunnae tunnel located in Young-Dong highway in Korea.

1. 서론

현재 차량유동속도를 높이기 위해 도로를 직선화 하는 추세에 따라 산지가 많은 지형에 있어서 고속도로에 많은 터널을 포함하고 있으며, 그 비율이 점점 늘어날 것으로 예상된다. 또한 터널의 길이도 장대화 하는 경향을 보이고 있다. 이에 따라, 터널의 효과적인 환기가 좀 더 중요한 문제로 대두되고 있다.

터널의 환기는 자동차가 배출하는 일산화탄소(CO), 매연(smoke), SOx, NOx 등 오염물질을 효과적으로 배출해 내는데 목적이 있다. 터널 구간은 구조적으로 폐쇄 공간이므로 터널을 통과하는 차

량에서 배출되는 오염물질은 평지에 비해 확산 속도가 느리고, 이로 인한 터널의 공기 오염을 가중시켜 인체에 좋지 않은 영향을 미칠 뿐더러 엔진의 효율 저하와 운전자의 시계를 저하시킴으로써 사고의 위험성을 증대시킨다.

터널은 차량의 통과 후 터널 내의 기류가 정상 유동을 회복하기 전에 그 뒤를 이어 통과하는 타 차량에 의해서 다시 새로운 기류가 형성되는 천이 과정의 연속이며, 차량으로부터 배출된 오염물질 확산시간과 환기 시설의 운전 상태에 따라 오염물질의 농도가 희석되어 가는 시간을 합한 양만큼의 지연 시간을 갖는 지연-천이계(delayed-transient system)⁽¹⁾로 알려져 있다. 터널의 환기는 차량의 대수, 속도, 종류, 터널의 구배와 표고, 터널 내의 부의 풍속 등 많은 변수의 함수이다. 특히, 각국의 지형특성, 기후특성, 차량특성에 따라 차종별 오염물질 배출량은 달라지게 되므로 터널의 소요환기량 계산과 환기 시스템의 설계는 많은 차이를 보인다. 즉, 터널 환기시설의 설계와 시공 후 최적의

[†] 책임저자, 회원, 고려대학교 기계공학과
E-mail: dhhong@korea.ac.kr
TEL : (02)3290-3369 FAX : (02)926-9290

* ㈜ 덕인

** 회원, 건설기술연구원 도시설비그룹

*** 하이콘엔지니어링

환기제어를 위해서는 터널을 통과하는 차량의 종류별 오염물 배출량을 정확히 알고 있어야 한다.

지금까지의 연구 방향은 터널의 동특성을 규명하기 위해 관련 변수를 선정하고, 관련 변수와 터널에 대한 동적 특성을 파악하는 것이 아니라, 터널을 정적인 시스템으로 간주하여 터널의 특성을 규명하고자 했다. 국제상설도로회의⁽²⁾(PIARC)의 보고서에 의하면 설계교통량을 기준으로 차종별 오염물질 배출량을 정량화하고 지형의 구배와 표고, 속도에 대한 영향을 보정함으로써 터널 설계시 환기 시설의 용량을 결정하는데 활용하고 이를 그대로 환기량 산정 알고리즘에 적용하고 있다. 이럴 경우 터널 환경에 맞는 차종별 오염물 배출량에 대한 정확한 데이터가 없기 때문에 환기 시설이 과다 설계될 가능성이 많으며, 환기시설 운전 시에도 환기량이 과다 산정되어 에너지 손실 등의 원인이 될 수 있다. 일반적으로 주행조건 하에 오염물 배출량을 측정한 다수의 논문과 보고서가 존재하나 구배와 표고가 다른 터널 내에서의 배출량과 차이를 보이고 있기 때문에 터널의 환기시설 운전에 적용하기에 문제가 있는 것으로 알려져 있다. 이외에도 터널 환기에 대한 많은 연구^(3,4,5)가 있었으나 대부분 환기제어 알고리즘과 화재 시와 같은 긴급 상황에 대처한 환기시설 운전 방안에 관한 것이었으며, 터널을 통과하는 차량의 종류별 오염물 배출량 추정에 관한 연구는 없었다.

본 연구에서는 터널 내 오염물의 확산과 대류를 모델링하고 이를 기반으로 차종별 오염물 배출량을 추정할 수 있는 알고리즘을 제안한다. 최근에 건설되는 대부분의 터널 내에는 통과 차량의 종류와 속도를 측정하는 센서와 CO 및 가시도(VI; Visibility Index)를 측정할 수 있는 센서들이 설치되어 있다. 제안된 알고리즘은 수학적 모델과 이 센서들의 데이터를 활용하여 차종별 오염물 배출량을 비교적 정확하게 추정해 준다. 알고리즘을 검증하기 위해 영동고속도로 상에 있는 둔내 터널에서 데이터를 채취하여 시뮬레이션을 수행하였으며 그 결과를 본 논문에 실었다. 이 추정 알고리즘을 이용하여 터널 별로 통과차량에서 배출되는 오염물에 대한 데이터가 축적이 되면, 환기제어뿐만 아니라 환기제어시설의 설계에도 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 터널 환기 모델

2.1 오염물 분포

터널의 길이는 일반적으로 단면적에 비해 상당히

히 길기 때문에, 단면 방향의 변화는 무시될 수 있다. 따라서, 다음과 같은 일 차원 확산대류(diffusion-convection) 방정식으로 터널 내의 오염물의 분포와 거동을 충분히 예측할 수 있다.⁽⁴⁾

$$\frac{\partial \Phi(x,t)}{\partial t} = -V_w(x,t) \frac{\partial \Phi(x,t)}{\partial x} + D \frac{\partial^2 \Phi(x,t)}{\partial x^2} + Q(x,t) \quad (1)$$

방정식의 오른쪽 항은 각각 대류(convection), 확산(diffusion), 그리고 오염원(source)에 의한 오염물의 양 $\Phi(x,t)$ 의 변화를 나타낸다. 대류 항은 터널 내의 풍속 V_w 에 많은 영향을 받는다. 오염원은 주로 터널을 통과하는 다양한 차종에서 배출되는 배기 가스에 의해 형성된다. 일반적으로 터널 내 오염물 분포는 오염원과 대류에 의해 결정되기 때문에 확산 항을 무시하고 다음과 같이 지배방정식을 표현해도 충분하다.⁽⁴⁾ 즉,

$$\frac{\partial \Phi(x,t)}{\partial t} = -V_w(x,t) \frac{\partial \Phi(x,t)}{\partial x} + Q(x,t) \quad (2)$$

오염물 $\Phi(x,t)$ 는 시간과 터널 내의 길이 방향 위치 x 의 함수이다.

2.2 추정 모델

대부분의 추정 알고리즘은 시간 영역에서만 적용된다.⁽⁶⁾ 이 문제를 해결하기 위해 Fig. 1 과 같이 터널을 길이 방향으로 적당한 수의 작은 구간(zone)으로 분할하고 함수 $\Phi(x,t)$ 를 형상함수(shape function) 또는 내삽함수(interpolation function) $\Psi(x)$ 로 표현하였다. 이러한 방법으로 임의의 구간 n 에서 오염물은 다음과 같이 근사적으로 나타낼 수 있다.

$$\hat{\Phi}(x,t) = \sum_{j=1}^{p+1} \Psi_j(x) \Phi_j(t), \quad x_A \leq x \leq x_B \quad (3)$$

여기서 p 는 내삽함수의 차수를 나타낸다. 내삽함수 $\Psi_j(x)$ 는 노드 j 에서 1의 값을 갖고 다른 노드에서는 0의 값을 갖는다. $\Phi_j(t)$ 는 각 노드에서 오염도를 나타내고 시간의 함수이다. Fig. 1은 N 개의 구간으로 분할된 터널을 나타낸다. 터널을 잘게 분할하여 구간의 수를 크게 한다면 모델의 정확도는 증가할 지 모르나 많은 계산시간을 요하고 모델이 불필요하게 복잡해진다. 구간의 수를

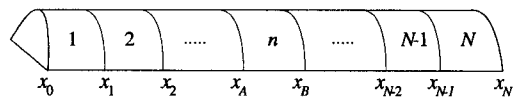


Fig. 1 A tunnel divided by n zones

결정하기 위한 적합한 기준은 터널 내의 센서의 배치를 이용하는 것이다. 일반적으로 CO와 VI 센서가 적당히 배열되어 있으며 이들을 기준으로 구간을 분할하는 것이 적당할 것이다.

미분방정식의 근사해를 얻기 위해 가중오차방법(weighted residual method)을 적용할 수 있다. 근사해 $\hat{\Phi}(x, t)$ 를 식 (2)에 대입하면 이 지배방정식을 정확히 만족시키지 않을 것이다. 이 오차(residual)를 ε 로 표시하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \hat{\Phi}}{\partial t} + V_w \frac{\partial \hat{\Phi}}{\partial x} - Q = \varepsilon \quad (4)$$

다음으로 가중함수(weighting function) w 를 도입하고 오차(residue)와 내적(inner product) (ε, w)를 고려해 보자. 이 내적을 0으로 놓는 것은 근사해에 따른 미분방정식 (4)의 오차를 평균적인 관점에서 0으로 하는 것과 동일하다. 가중함수 w 를 선택하는 방법에는 여러 가지가 있다. 이 논문에서는 Galerkin method⁽⁷⁾를 활용하여 가중함수 w 를 형상함수와 같게 하였다. 즉,

$$(\varepsilon, \Psi_j) = 0 \quad (5)$$

여기서 괄호는 함수 간의 내적(inner product)를 나타낸다. 이 식에 식 (3)과 (4)를 대입하면,

$$\int_{x_a}^{x_b} \left[\frac{\partial \hat{\Phi}}{\partial t} + V_w \frac{\partial \hat{\Phi}}{\partial x} - Q \right] \cdot \Psi_j dx = 0 \quad (6)$$

이 되며, 근사미분방정식의 오차를 평균 0으로 만들어 준다.

오염원 Q 와 풍속 V_w 는 전 터널 내에서 일정하지 않지만 각 구간이 충분히 작다면 이 구간 내에서는 상수로 가정할 수 있다. 이 상수 값들을 각각 Q_z, V_z 로 나타내도록 하자. 이 풍속은 터널 내에 설치된 센서의 데이터를 이용할 수 있다. 터널 단면 내의 공기의 유동 때문에 풍속계가 단면의 평균속도를 대표하지 않을 수 있지만, 본 알고리즘을 통한 추정치는 터널의 환기제어와 더 나아가 환기시설 설계 시 기초데이터를 확보하기 위한 것으로, 이 때 풍속은 터널 내에 설치된 센서의 데이터를 기초로 하기 때문에, 이 센서로 측정된 풍속을 배출량 추정 모델에 사용하는 것이 타당하다.

식 (3)을 (6)에 대입하면 다음 행렬식과 같은 일차 미분방정식을 얻을 수 있다.

$$M^z \dot{\Phi}^z + K^z \Phi^z = F^z \quad (7)$$

여기서 각 행렬의 성분들은 다음과 같다.

$$M_{ij}^z = \int_{x_a}^{x_b} \Psi_i(x) \Psi_j(x) dx \quad (8)$$

$$K_{ij}^z = V_z \int_{x_a}^{x_b} \frac{\partial \Psi_j}{\partial x} \Psi_i dx \quad (9)$$

$$F_i^z = Q_z \int_{x_a}^{x_b} \Psi_i dx \quad (10)$$

지수 i, j 는 1에서 $p+1$ 까지의 값을 가지며, p 는 다항식 내삽함수의 차수를 나타낸다. 상·하첨자 z 는 하나의 구간을 나타내기 위해 사용되었다.

터널 내의 모든 구간에 대해 이 관계를 조합하면 다음과 같은 행렬식을 얻을 수 있다.

$$M\dot{\Phi} + K\Phi = F \quad (11)$$

이식의 양변에 M^{-1} 을 곱하여 상태방정식의 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\dot{\Phi}(t) = A(t)\Phi(t) + B(t)U(t) \quad (12)$$

선형내삽함수를 사용할 때 전체 노드의 수는 $N+1$ 이 되어 계수행렬 $A(t)$ 와 $B(t)$ 의 크기는 각각 $(N+1) \times (N+1)$ 와 $(N+1) \times N$ 이 된다.

위 식들의 계산과정을 보여주기 위하여, 부록에 선형 내삽함수에 대한 예를 자세히 전개하였다.

3. 차종별 오염물 배출량 추정

3.1 오염원

입력벡터 $U(t)$ 는 터널을 통과하는 차량들이 배출하는 오염원을 나타낸다. 이것은 각 차종별 통과 차량 수의 함수가 된다. 일반적으로 터널 입구 측에 차량계수기가 설치되어 있어서 차량의 크기와 모양에 따라 서너 종류의 차종으로 구분하고 각 차종별 통과 차량 수와 속도를 측정할 수 있도록 되어 있다. 각 차량들이 터널 내에서 같은 속도를 유지하고 있다고 가정하면, 각 구간에 존재하는 차량의 수를 종류별로 계산할 수 있으며 이때 i 번째 구간에 존재하는 차량에서 배출되는 오염물의 총량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_i = a_1 q_1^i(t) + a_2 q_2^i(t) + \dots + a_r q_r^i(t) \quad (13)$$

여기서 q_j^i 는 i 구간에 존재하는 j 차종의 총 수를 나타내며, 하첨자 r 은 분류 가능한 차종의 수를 나타낸다. 일반적인 차종 분류의 한 예는 소형승용, 중형승용, 버스, 트럭, 특수차량 등으로 구분하는 것이다. 이 경우 $r=5$ 가 된다. 위 식 (13)에서 계수 a_k 는 각 차종별 오염물 배출량을 나타내며 이 값을 추정하는 것이 이 논문의 주목적이다. 이 식을 식 (12)에 대입하면,

$$\dot{\Phi}(t) = A(t)\Phi(t) + B(t)Q(t)\Theta \quad (14)$$

을 얻을 수 있고, 여기서

$$Q(t) = \begin{bmatrix} q_1^1 & q_2^1 & \dots & q_r^1 \\ q_1^2 & q_2^2 & \dots & q_r^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_1^N & q_2^N & \dots & q_r^N \end{bmatrix}, \quad \Theta = \{a_1, a_2, \dots, a_r\}^T \quad (15)$$

이다.

3.2 오염원

터널 내의 센서와 차량 계수기 등은 일정 시간 간격으로 샘플링 된다. 이 시간을 Δt 라 하고 식 (14)를 샘플링에 따른 선형차분방정식(linear difference equation)으로 변환하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Phi(t) - \Phi(t-1) = \Delta t \cdot \Phi(t-1)A(t-1) + \Delta t \cdot B(t-1)Q(t-1)\Theta \quad (16)$$

여기서 t 는 현재 시간을 $t-1$ 은 한 샘플링 시간간격 전에 채취된 값을 나타낸다.

식의 간략한 표현을 위하여 다음과 같은 벡터와 행렬을 도입하자.

$$\Xi(t) = \Phi(t) - (I - \Delta t \cdot A(t-1))\Phi(t-1) \quad (17)$$

$$\varphi(t) = \Delta t \cdot B(t-1)Q(t-1) \quad (18)$$

여기서 벡터 $\Xi(t)$ 의 크기는 $(N+1)$ 이며 행렬 $\varphi(t)$ 의 크기는 $(N+1) \times r$ 이다. 이 벡터와 행렬을 이용하면 식 (16)을 다음과 같이 간략하게 표현할 수 있다.

$$\Xi(t) = \varphi(t) \cdot \Theta \quad (19)$$

위 식은 측정치와 매개변수(parameter) Θ 와의 관계를 나타내고 있다. 추정된 매개변수 Θ 를 가지고 계산된 $\Xi(t)$ 와 실제 측정된 값을 구분하기 위해 계산 값에 hat 을 붙여 다음 식과 같이 나타내자.

$$\hat{\Xi}(t|\Theta) = \varphi(t) \cdot \Theta \quad (20)$$

매개변수 Θ 는 측정된 출력 값 $\Xi(t)$ 와 계산된 $\hat{\Xi}(t|\Theta)$ 사이에 최소자승법(least square method)을 적용하면 추정할 수 있다. 아래의 식 (21)은 시간 $0 < t \leq m\Delta t$ 사이에서 m 번 측정된 센서 출력으로 계산된 벡터와 행렬들을 표현한 것이다.

$$Z^m = [\Phi(1), Q(1), \Phi(2), Q(2), \dots, \Phi(m), Q(m)] \quad (21)$$

for $0 < t \leq m\Delta t$

이렇게 측정된 Z^m 을 가지고 최소자승법을 적용하면 Θ 를 추정할 수 있으며, 이를 식으로 표현하면 다음과 같다. 먼저 기준식은

$$V_m(\Theta, Z^m) = \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m \frac{1}{2} [\Xi(t) - \varphi^T(t)\Theta]^T \Lambda^{-1} [\Xi(t) - \varphi^T(t)\Theta] \quad (21)$$

와 같이 나타낼 수 있으며, 여기서 Λ 는 추정오차 벡터 성분들의 상대적인 중요도를 나타내는 가중 행렬로써 symmetric positive semi-definite 성질을 갖는다. 이 기준식을 최소로 하는 것이 우리가 찾는 매개변수가 된다. 즉,

$$\hat{\Theta}_m^{LS} = \min_{\Theta} V_m(\Theta, Z^m) \quad (22)$$

Θ 에 대한 미분값이 0 임을 이용하여 $\hat{\Theta}_m^{LS}$ 를 구할 수 있다. 즉, 매개변수의 추정치 $\hat{\Theta}_m^{LS}$ 은 다음과 같이 구해진다.

$$\hat{\Theta}_m^{LS} = \left[\frac{1}{m} \sum_{t=1}^m \varphi(t)\Lambda^{-1}\varphi^T(t) \right]^{-1} \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m \varphi(t)\Lambda^{-1}\Xi(t) \quad (23)$$

4. 사례 연구

4.1 대상 터널

지금까지 유도된 추정알고리즘의 타당성을 검토하기 위해 실제 터널에서 측정된 데이터를 가지고 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 대상은 영동고속도로 상의 국내 최장 터널인 둔내 터널로써 제원은 Table 1 과 같다.

터널에 설치된 센서는 다음과 같다: 입구측에 교통량계수기와 차량속도감지기가 설치되어 있고, CO 센서, VI 센서, 풍속계가 각 8 개소에 설치되어 있다. 교통량계수기는 차종을 Table 2 와 같이 5 종류로 분류한다. 각 센서로부터의 데이터는 매 1 분마다 기록된다. CO 센서에 사용된 농도 측정 방법은 우리나라 대기환경기준에서 일산화탄소 측정시 규정하고 있는 비분산적외선흡수방법(Non-dispersive infrared method)가 사용되고 있다.

4.2 결과

터널 내에 센서가 8 개 존재하므로 7 개의 구간(zone)으로 나누고 각 구간에서는 선형보간함수를 사용하였다. 터널 내에서 약 200 분 간 센서 데이터를 수집하여 추정알고리즘을 적용하였다. 영동고속도로의 특성 상 데이터 수집 당시에 상위 3 개 차종이 충분히 통과하지 않았다. 따라서, 수집된 데이터에 있어서 이들에 대한 관찰성(observability)이 낮아 하위 2 개 차종, 소형승용차(compact car)와 중형승용차(standard car)에 대한 배출량 추정을 수행하였다. 이들은 모두 매연을 거의 배출하지 않는 차량들이므로 CO 에 대해서만 추정알고리즘을 적용하였다. 매연을 배출하는 다른 차종이 충분히 존재한다면 똑같은 과정을 적용하여 차종별 매연 배출량도 추정할 수 있다.

Table 1 Specification of Tunnae tunnel

Tunnel	Specification				Ventilation
	Length (m)	Width (m)	Height (m)	Lane	
Tunnae	3,300	9.2	7.2	2	Jet-fan

Table 2 Classification of car classes

Class	Specification
Construction car	Diesel construction cars
Large bus and truck	Large diesel buses and trucks
Small bus and truck	Small diesel buses and trucks
Standard car	Gasoline passenger cars with volume of piston displacement over 1500cc
Compact	Gasoline passenger cars with volume of piston displacement below 1500cc

Table 3 Specification of CO gas-analyzer

	Specification
Method	Non-dispersive infrared method
Measuring height	3.5 m from road surface
Measuring range	0 - 300 ppm
Measuring distance	20 m

추정결과는 소형승용차는 1.3g/Km, 중형승용차는 1.7g/Km의 배출량을 얻었다. 자동차 공해 연구소의 시험에 의하면 신차(승용차)의 경우 평지에서 70~110Km/h 고속 주행 시에 소형승용차는 약 0.3g/km, 중형승용차는 약 0.9g/km 정도 배출하는 것으로 보고하고 있다.⁽⁸⁾ 그리고 우리나라의 CO 배출 허용치는 2.1g/Km이다.⁽⁹⁾ 이와 같은 근거로 위의 추정치의 타당성을 어느 정도 검증할 수 있다.

추정치와 타당성을 정확히 검증하기 위하여 이값들을 지배방정식에 대입하여 터널 내부의 오염도 값을 계산한 후 실측치와 비교하였다. CO의 실측은 둔내 터널에 설치된 CO 측정센서를 이용하여 수행되었으며, 센서의 규격은 Table 3과 같다. 이 결과를 Fig. 2와 3에 도시하였다. CO 센서의 측정 범위는 0-300ppm, 오차율은 +2%이며 이 측정 범위 내에서 range를 조정할 수 있도록 제작되어 있다. 둔내 터널은 개통 당시 교통량이 적어 측정된 자료의 범위가 수 ppm 범위에 분포하고 있지만 센서의 range 조정을 통하여 측정자료의 신뢰도를 높이고자 노력하였으며, 터널 내부의 CO 농도 변화에 대한 경향이 충분히 타당성이 있다고 판단되

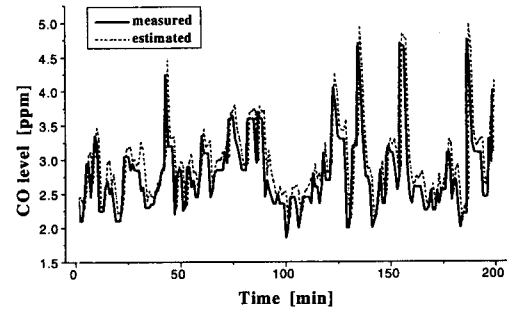


Fig. 2 Verification of estimated values with the measurement data used for estimation

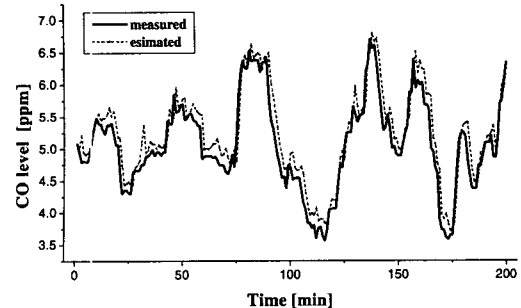


Fig. 3 Verification of estimated values with new set of measurement data

어 추정알고리즘에 적용하였다. Fig. 2는 추정에 사용된 데이터와 비교한 그림이다. 추정된 차종별 오염물 배출량을 근거로 계산된 터널 내 CO 농도와 센서에 의해 실측된 농도가 약 5% 범위 내에서 잘 일치함을 볼 수 있다. 이 결과를 통해 모델과 최소자승법을 기반으로 추정된 추정치의 정확성을 어느 정도 확인할 수 있었다. 추정치와 모델의 신뢰성을 정확히 검증하기 위해 추정에 사용된 데이터가 아닌 새로 채집된 데이터를 사용하여 같은 과정을 반복하였다. 이와 같은 방법은 추정알고리즘의 타당성을 검증하기 위해 일반적으로 사용하는 방법이다. Fig. 3은 새로이 채집된 데이터와 추정치와 모델을 가지고 계산한 결과를 비교한 것이다. 계산 결과와 실측치가 약 5% 범위 내에서 잘 일치함을 알 수 있다. 이들을 근거로 차종별 오염물 배출량 추정치의 타당성을 검증할 수 있었다.

5. 결론

지금까지 터널을 정적인 시스템으로 간주하고 터널 내의 오염도에 따라 터널의 환기 시설을 작동하였다. 이는 지형적 특성이나 기후적 특성, 차량의 특성에 따라 다른 오염물을 배출하는 차량이

터널을 통과하였을 때의 오차를 보상하지 못하는 단점을 지니고 있다. 본 논문에서는 터널을 1차원 확산대류 방정식으로 모델링 한 후 가중오차방법을 이용하여 추정 알고리즘 적용에 적당한 형태로 변환하였다. 이를 바탕으로 차종별 오염물 배출량을 계산할 수 있었으며 이의 타당성을 역계산을 통해 검증하였다. 이 데이터는 터널 환기 시설의 설계와 운전에 중요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다. 또한 본 논문에서 유도된 터널 환기 모델은 환기제어 알고리즘 개발의 지배방정식으로 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- (1) 김태형, 1999, 터널환기시설의 제어알고리즘 개발에 관한 연구, 한국건설기술연구원 보고서, pp. 2,3.
- (2) Marrakech, R. A., 1991, *Permanent International Association of Road Congress, 21th World Road Congress, 1991 Report.*
- (3) Mizuno, A., 1991, An Optimal Control with Ventilated Road Tunnel, *Proc. of Int. Sym. on Fluid Control, Measurement, Mechanics, and Flow Visualization*, pp. 393~399.
- (4) Koyama, T., 1997, Online-learning Type of Ventilation Control Systems in Longitudinal-flow Road Tunnels, *T. IEE Japan*, Vol. 117-D, No. 8, pp. 970~979.
- (5) Maarsingh, R. A. and Swart, L., 1991, Wind-Tunnel Experiments on Wind Effects at Tunnel Portals, *The 7th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, Brighton, UK, Elsevier Applied Science, pp. 545~561.
- (6) Ljung, L., 1996, *System Identification, Theory for the User*, 2nd ed., Prentice Hall.
- (7) Reddy, J.N., 1993, *An Introduction to Finite Element Method*, 2nd ed., McGraw-Hill.
- (8) 정일록, 1999, 자동차 공해발생과 공해 저감을 위한 검사제도 개선방안, 자동차공해연구소 보고서, pp. 14~17.

부 록

예를 들어 임의의 구간에서 오염물의 분포를 선형적으로 가정할 수 있다면 내삽함수는 다음과 같은 형태를 가질 것이다.

$$\Psi_1 = \frac{x_B - x}{L_z}, \Psi_2 = \frac{x - x_A}{L_z}, L_z = x_B - x_A \quad (A1)$$

이 내삽함수를 식 (8), (9), (10)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 계수행렬을 얻을 수 있다.

$$M^z = \frac{L_z}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}, K^z = \frac{V_z}{2} \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, F^z = \frac{L_z}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (A2)$$

계수행렬을 식 (12)에 대입하면 임의의 한 구간에 대해서 입구와 출구의 오염물 농도를 상태변수(state variable)로 갖는 상태방정식(state equation)을 유도할 수 있다. 즉,

$$\begin{bmatrix} \dot{\Phi}_A \\ \dot{\Phi}_B \end{bmatrix} = \frac{V_z}{L_z} \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_A \\ \Phi_B \end{bmatrix} + Q \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (A3)$$

여기서, L_z 는 구간(zone)의 길이를, V_z 는 구간(zone)의 내부의 풍속을 나타낸다.

근사적으로 구한 각 구간(zone)의 상태방정식(A3)을 조합하면 터널 전체에 대한 상태방정식을 얻을 수 있다. 본 논문의 대상 터널인 둔내 터널은 7 개의 구간으로 나뉘어져 있으며, 8 개의 오염도 센서가 설치되어 있어 8 개의 상태변수(state variable)를 갖는 상태방정식(state equation)으로 표현된다. 다음 식 (A4)는 이 상태방정식을 식(12) 형태로 표현했을 때 계수 행렬을 나타낸다.

$$A(t) = \begin{bmatrix} -\frac{V_{01}}{L_{01}} & \frac{V_{01}}{L_{01}} & \dots & 0 & 0 \\ \frac{V_{01}}{2L_{01}} & \frac{1}{2} \left(\frac{V_{01}}{L_{01}} - \frac{V_{12}}{L_{12}} \right) & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{2} \left(\frac{V_{67}}{L_{67}} - \frac{V_{78}}{L_{78}} \right) & \frac{V_{78}}{2L_{78}} \\ 0 & 0 & \dots & -\frac{V_{78}}{L_{78}} & \frac{V_{78}}{L_{78}} \end{bmatrix}$$

$$B(t) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (A4)$$

여기서 $V_{01}, V_{12}, \dots, V_{78}$ 은 각 구간(zone)에서의 내부 풍속을 $L_{01}, L_{12}, \dots, L_{78}$ 은 각 구간(zone)의 길이를 나타낸다.