대한기계학회 2001년도 춘계학술대회논문집 B pp. 87~92 KSME 01S170

도로터널에서 종류식 환기 시설의 운전 방안

김태형*· 황인주*· 홍대희**· 정종승***· 정종경***

An Operation Methed for Longitudinal Flow Ventilation System in a Road Tunnel

T. h. Kim, I. J. Hwang, D. H. Hong, J. S. Chung and J. K. Chung

Key Words: Longitudinal flow ventilation system(종류식 환기), Vertical tunnel for ventilation(수직 환기갱), Electric dust collector(전기집진기), Tunnel ventilation(터널 환기), Pre-estimation of pollution concentration(오염농도예측)

Abstract

In automobile highway tunnels, in order to maintain a suitable environment for drivers and traffic, visibility in the tunnel must be maintained, and the concentrations of poisonous substances including carbon monoxide must be kept at or below allowable levels. For this reason, in long tunnels and tunnels with heavy traffic, ventilation facilities are installed. When the ventilation facilities are run at full capacity, the environment in the tunnel is obviously adequately maintained, but this consumes a great deal of electric power. Consequently, a central problem in highway tunnel ventilation control systems is to keep the pollution concentration at or below the allowable level, and thus provide a safe environment for traffic, while consuming as little electricity as possible.

This paper introduces an operation method of longitudinal flow ventilation systems with jet-fan, dust collector and vertical ducts.

기호설명

C_{SM} : 매연농도 (g/m^3)
CO_{scr} : scr 위치의 CO농도
K : 가시도 또는 빛의 소멸율 (m^{-1})
L_{scr} : scr 위치까지의 거리
M : MIRA 계수 (=6.25)
$q[k]CO(i)$: i차종의 속도 k에서 CO 배출량
$q[k]SM(i)$: i차종의 속도 k에서 매연 배출량
V_{scr} : scr 오염물질의 순수 체적

* 한국건설기술연구원
** 고려대학교, *** 로얄정보기술(주)
E-mail : thkim@kict.re.kr
Tel : +82-344-910-0384; Fax : +82-344-910-0381

1. 서 론

터널은 차량이 통과한 후 터널내의 기류유동이 정상상태를 회복하기 전에 뒤를 이어 통과하는 타 차량에 의해서 다시 새로운 기류가 형성되는 천이과정의 연속이며, 터널을 통과하는 차량으로부터 배출된 오염물질이 터널 내부로 확산되는 데에 소요되는 시간과 환기시설의 운전상태에 따라 터널 내부의 오염농도가 희석되는 데에 소요되는 시간을 합한 만큼의 지연시간을 갖는 지연-천이계로 정의할 수 있다.

또한 동일한 차량이라 하더라도 통과하는 속도 및 터널의 구배, 형상 등 터널을 통과하는 물리적/기하학적인 조건에 따라 오염물질의 배출량이 다르게 나타나며, 터널을 통과하는 차종에 의해서도 터널 내부의 오염농도가 다르게 나타나는

특성을 가지고 있다.

따라서 터널의 환기시설은 터널의 특성에 적합하게 그리고 통과하는 차종 및 속도에 따라 적절히 운전되어야함에도 불구하고 이러한 기초자료가 미비하여 국내 터널의 환기시설 운전은 시간대별로 운전하는 schedule 운전 또는 임계값 설정에 의한 수동운전에 의존해 왔으며, 따라서 터널 환기시설의 운전자료는 물론 설계를 위한 기초자료도 확보되어 있지 않은 상태에 있다.

본고에서는 이러한 국내의 현실을 감안하여 터널환기시설 운전방안에 대하여 고찰하고자 한다.

2. 터널내 오염농도 예측

2.1 설정모델

Fig. 1에는 수학적 모델을 개발하기 위해 사용될 터널의 개요도를 수록하였으며, 수학적 모델의 유도를 위해 사용된 가정은 다음과 같다.

- 터널 내부의 오염농도는 거리에 따라 선형적으로 변한다.
- 터널을 통과하는 차량으로부터 배출된 오염물질의 확산속도는 제어주기와 동일하다.
- 집진기에 의한 승압력은 무시한다.
- 수직환기갱을 통해 배출되는 풍량과 유입되는 풍량은 같다.
- 수직환기갱의 배출부 입구와 유입부의 출구사이의 거리는 터널 연장에 비해 무시할 수 있다
- 전기집진기 흡입부에서 배출부까지의 거리는 터널 연장에 비해 무시할 수 있다

상기 가정 가운데 마지막 가정은 수직환기갱을 중심으로 터널 내부 풍량의 불균형이 발생할 경우 역류의 발생 가능성이 있어 환기 효율을 저하시킬 우려가 있기 때문이다.

Fig. 1에 나타낸 바와 같이 터널 입구에서는 외부의 신선한 공기가 유입되므로 CO농도와 가시도 모두 '0'으로 처리했으며, 수직환기갱의 배출구 입구부분의 CO농도와 흡입구 출구부분의 CO농도가 다르게 나타날 것이므로 각각 CO_{vi}와 CO_{vo}라고 하였다. 마찬가지로 매연농도 역시 집진기 입출구 및 수직환기갱에서 다르게 나타날 것이므로 집진기와 수직환기갱 입출구 부분에서 다른 값으로 표현하였다.

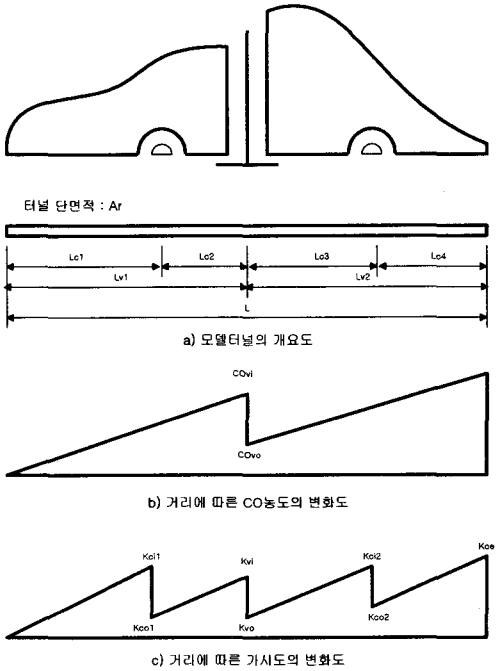

Fig. 1 Concept diagram for analysis

2.2 오염농도 예측 모델

2.2.1 CO 농도 예측

편의상 터널 입구에서 수직환기갱까지의 부분을 터널의 전반부라 하고 수직환기갱에서부터 터널 출구까지의 부분을 터널 후반부라고 칭하기로 한다. 임의의 n번째 제어주기 동안 터널을 통과한 차량들이 거리 L_x를 통과하면서 배출한 순수 CO 가스의 체적 $V_{co}(n)$은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V_{co}(n) = \sum_{k=1}^{3}\sum_{i=1}^{5} q[k]CO(i)\cdot M(i)\cdot t \quad (m^3) \qquad (1)$$

Fig. 1에서 n번째 제어주기 동안 터널을 통과한 차량들이 터널의 전반부를 통과하면서 터널 내부에 방출한 순수 CO 가스량 $Vco_{v1car}(n)$은

$$Vco_{v1car}(n) = \frac{M(i)\cdot L_{v1}}{v_{car}(n)}\cdot\sum_{k=1}^{3}\sum_{i=1}^{5} q[k]CO(i) \qquad (2)$$

가 되며, 이를 이용하여 n+1번째 제어주기가 시작되는 순간 터널 전반부에 존재하는 순수 CO 가스의 총량 $Vco_{v1t}(n+1)$을 구하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$Vco_{v1ti}(n+1)=\frac{A_r \cdot L_{v1}}{2 \cdot 10^6} \cdot CO_{vif}(n)+Vco_{v1car}(n) \quad (3)$$

여기에서 $CO_{vif}(n)$은 n번째 제어주기 동안 수직환기갱 입구에서 측정된 $CO_{vi}(n)$값 가운데 가장 나중에 측정된 값임을 의미한다.

이제 터널 내부의 풍속을 n+1번째 제어주기에서도 n번째 제어주기에서의 터널 내부풍속 $v_r(n)$으로 동일하게 유지한다고 가정하고 n+1번째 제어주기가 끝나는 순간 터널 내부 각 지점에서의 오염농도를 추정하기로 한다. 터널 내부의 풍속이 $v_r(n)$로 일정하게 유지되고 있으므로 n+1번째 제어주기가 시작되는 순간 검사체적을 차지하는 검사면 중 터널 전반부 검사면의 끝인 수직환기갱의 위치 즉 터널 입구로부터 거리 L_{v1}에 위치하고 있던 검사면은 제어주기 t_n초가 흘러 n+1번째 제어주기가 끝나는 순간에 터널의 입구로부터 $L_{v1}+v_r(n)\cdot t_n$의 위치로 이동하게 되어 제어주기 시작시 터널 입구부터 수직환기갱까지이던 검사체적이 제어주기가 끝나는 시점엔 터널 입구로부터 $L_{v1}+v_r(n)\cdot t_n$까지로 확장되게 된다.

따라서 해당 제어주기가 시작되는 순간 터널의 전반부에 존재하던 순수 CO 가스 량이 해당제어주기가 끝나는 순간에는 Fig. 2의 결과처럼 터널 입구에서 $L_{v1}+v_r(n)\cdot t_n$만큼의 거리에 걸쳐 선형적으로 분포하게 된다고 생각할 수 있다.

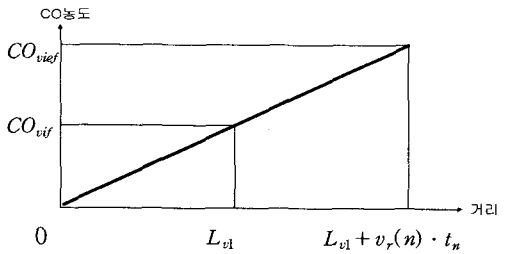

Fig. 2 Variation of CO concentration at the front tunnel.

이로부터 n+1번째 제어주기가 끝나는 순간 이동된 검사면의 끝부분 CO농도 $CO_{vief}(n+1)$와 수직환기갱 부분의 CO농도 $CO_{vif}(n+1)$는 다음과 같이 얻어진다.

$$CO_{vief}(n+1) = 2 \cdot \frac{Vco_{v1ti}(n+1)}{A_r \cdot (L_{v1} + v_r(n) \cdot t_n)} \cdot 10^6 \quad (4)$$

$$CO_{vif}(n+1) = \frac{L_{v1}}{L_{v1}+v_r(n)\cdot t_n} \cdot CO_{vief}(n+1) \quad (5)$$

식(4)와 식(5)로부터 n+1번째 제어주기 동안 터널 전반부에서 후반부로 이송되는 CO가스의 량을 계산할 수 있으며, 수직환기갱도 내의 풍속을 알고 있다고 가정하면 순수하게 터널 후반부로 이송되는 가스량을 계산할 수 있다. 식(3)을 계산할 때와 마찬가지 방법으로 터널 전반부로부터 이송되어온 순수 CO 가스량과 n번째 제어주기의 마지막으로 측정된 CO농도 그리고 n번째 제어주기동안 터널 후반부를 통과한 차량으로부터 배출된 CO 가스량을 바탕으로 n+1번째 제어주기 동안 터널 후반부에 남아있게 될 순수 CO 가스량 $V_{CO_{t2v}}(n+1)$을 알 수 있다.

여기에서 임의의 시간동안 터널 내부를 흐르는 유량을 Q_r, 수직환기갱을 통하여 유입·유출되는 유량을 Q_v, 터널 전반부에서 후반부로 순수하게 유입되는 유량을 Q_{rv}라고 하고 미소시간 dt동안에 터널 후반부 검사면의 시작부분인 수직환기갱 유입부 부근의 미소거리 dx만큼을 통과하는 검사체적에 대하여 생각하면, 터널 전반부 검사면의 끝단인 수직환기갱 배출부에서와 동일한 CO농도의 유량 Q_r-Q_v가 수직환기갱을 통하여 유입되는 유량 Q_v와 합해져 미소 검사체적 $A_r \cdot dx$에서 합해진다고 생각할 수 있으므로 다음과 같이 근사화할 수 있다.

$$CO_{vof}(n+1) = \frac{Q_{rv}}{Q_{rv}+Q_v} \cdot CO_{vif}(n+1)$$

$$= \left[1-\frac{A_v \cdot v_v(n+1)}{A_r \cdot v_r(n)}\right] \cdot CO_{vif}(n+1) \quad (6)$$

이제 터널 출구부의 CO농도 $CO_{ef}(n+1)$을 구하기 위하여 앞서 추정했던 것과 동일한 방식을 적용하게되면, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$CO_{eef}(n+1) = 2 \cdot \frac{Vco_{t2tf}(n+1)}{A_r \cdot (L_{v2}+v_r(n)\cdot t_n)} \cdot 10^6 - CO_{vof}(n+1) \quad (7)$$

$$CO_{ef}(n+1) = \frac{L_{v2} \cdot (CO_{eef}(n+1)-CO_{vof}(n+1))}{L_{v2}+v_r(n)\cdot t_n}$$

$$+CO_{wof}(n+1) \quad (8)$$

2.2.2 가시도 예측

터널 내부의 가시거리는 현재 빛의 소멸량을 측정하는 센서를 이용하여 간접적으로 추정하는 방법이 사용되고 있다. 이러한 간접적인 측정방법 때문에 매연농도와 빛의 소멸량과의 관계를 정량적으로 표현하는 것이 중요하며, 이 관계를 MIRA에서 다음과 같이 정립하여 발표하였다.

$$K = M \cdot C_{SM} \quad (9)$$

임의의 제어주기 n에 터널을 통과한 차량 N(i)대가 거리 L_x를 통과하면서 배출한 매연량 $SM(n)$은 다음과 같다.

$$SM(n) = L_x \cdot \sum_{k=1}^{3}\sum_{i=3}^{5} q[k]SM(i) \cdot N(i) \quad (g) \quad (10)$$

그리고 터널 입구에서 L_x만큼의 거리에 위치한 지점a에서의 n번째 제어주기에서 마지막으로 측정된 가시도가 $K_{af}(n)$라 하면, 터널 입구에서 지점a까지에 존재하는 매연의 총량 $SM_a(n)$은 다음 식으로부터 얻을 수 있다.

$$SM_a(n) = \frac{1}{2} \cdot A_r \cdot L_x \cdot \frac{K_{af}(n)}{6.25} \quad (g) \quad (11)$$

이들 식 (9), (10) 및 (11)을 이용하여 CO 농도 예측 때와 같은 방법으로 전기 집진기 입출구부, 수직환기갱 유입·유출부 그리고 터널 출구부의 가시도를 예측할 수 있다.

3. 환기설비의 운전

3.1 운전을 위한 전체 공정의 구성

Fig. 3에 터널 환기시설의 운전을 위하여 구성되는 전체 흐름을 도시하였다.

터널 환기시설의 운전 프로그램이 시작되면 터널과 관련된 파라메터를 설정하고 그 이후에 환기설비와 관련된 파라메터를 설정하게 된다. 설비 파라메터에 대한 설정이 완료되면 자료저장주기(t_s), 비상사태 감시주기(t_e), 환기설비 운전주기(t_n) 및 자료수집주기(t_a)를 설정한다.

각 공정별로 제어주기가 다른 것은 각 공정에 적합한 주기를 설정함으로써 긴급을 요하는 사항이나 자료수집 등 빈번하게 이루어져야하는 공정들은 동일한 시간동안에 자주 수행될 수 있도록 하기 위함이며, 조금 늦게 응답하여도 전체 환경에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 예상되는 공정들에 대해서는 시간적 여유를 부여하여 동일한 시간동안에 적은 회수로 가동될 수 있도록 하기 위한 것이다. 이러한 제어주기에 대한 설정이 완료되면 터널 내부의 허용 오염농도 및 한계기류속도 등을 입력하게 되고 그 다음으로 차량 1대당 차종별 차속별 오염물질 배출량 추정값을 입력한다.

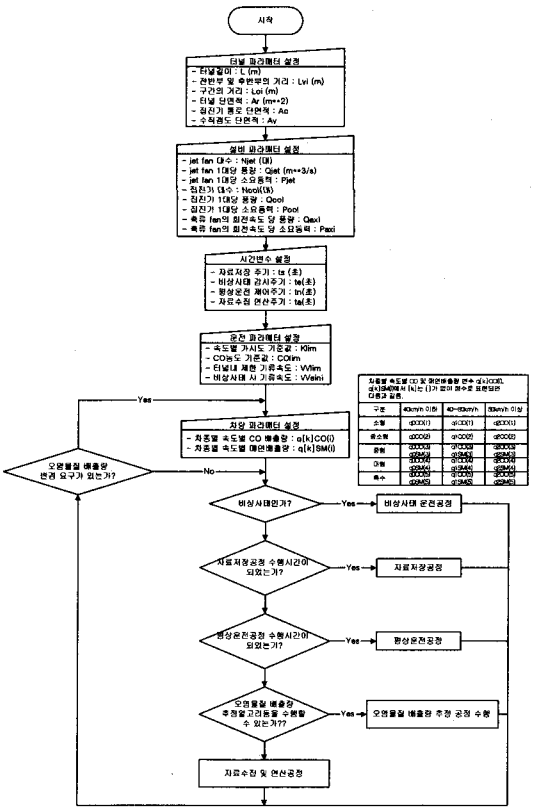

Fig. 3 Flow diagram of system control.

이러한 작업이 완료되면 환기시설의 제어를 위한 주 프로그램이 가동하게되며, 먼저 비상사태 제어주기가 되었는지를 확인하고 이 시간이 되었으면 비상사태 운전공정 프로그램을 가동하고 무한히 반복되는 차량 1대당 오염물질 배출량 자료를 읽어들이는 프로그램 시작부로 회귀하게 된다. 평상운전 제어 주기가 되지 않아 현재에도 임의의 제어주기가 수행중일 경우에는 현재까지

수집·저장된 자료를 바탕으로 차종별 차속별 오염물질 발생량을 추정하는 알고리듬을 수행한다.

이 추정 결과를 현재 설정되어 있는 값과 비교한 후 허용오차를 벗어난 경우에는 이 값을 수정하며, 그렇지 못할 경우에는 현재 터널 내부의 오염농도 및 터널 내외부의 풍향, 풍속 그리고 터널을 통과하는 차량의 종류 및 통과속도 등을 수집하는 자료수집을 수행하고 프로그램 반복부의 최초로 회귀하는 형태로 무한히 반복하게 된다.

3.2 평상운전

평상운전공정은 Fig. 4에 나타난 바와 같이 터널 내부의 오염농도 상태에 따라 총 16개의 운전모드로 구성되어 있으며, 수직환기갱이 더 설치된 터널에 대해서도 같은 방법으로 확장이 가능하다.

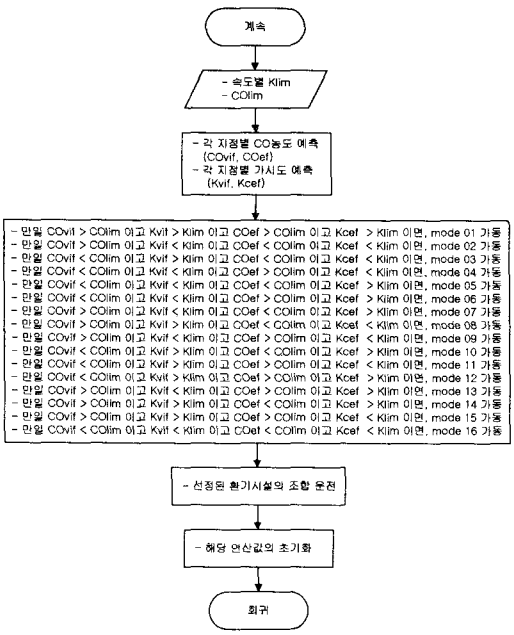

Fig. 4 Flow chart of ㅁrunning mode.

n번째 제어주기가 끝나는 순간 최종적으로 수집된 각 지점별 CO농도와 가시도 및 n번째 제어주기동안 터널을 통과한 차량들의 차종/차속/통과대수 및 터널 내부의 풍향 및 풍속을 바탕으로 n+1번째 제어주기가 끝나는 순간 각 지점에서의 CO농도 및 가시도를 예측하고 예측된 오염농도 가운데 수직환기갱 배출부 입구 부근의 CO농도 및 가시도와 터널 출구부의 CO농도 및 가시도가 모두 터널 내부 환경의 기준값을 초과한 경우에는 mode 1을 가동하여 n+1번째 제어주기동안 운전해야할 환기설비의 조합을 계산하고 이를 구동하게 된다. 또한 운전해야할 설비의 조합에 의해 해당 설비들의 구동 신호를 발한 후에는 해당 제어주기의 오염농도 예측을 위해 자료수집 및 연산공정에서 연산한 관련 값들을 초기화시켜 그 다음 제어주기의 오염농도 예측에 필요한 새로운 값들을 연산하도록 한다.

3.2 평상운전모드의 일예

n번째 제어주기의 환기시설의 운전상태를 그대로 유지할 경우에 대해 다음 제어주기가 끝나는 순간 예측된 각 지점의 모든 오염농도가 허용 기준값을 모두 초과한 경우에는 n번째 제어주기에서의 운전 상태가 부족한 것이므로 Fig. 5와 같은 mode I 을 수행하여 이에 적정한 새로운 환기시설의 운전 조합을 선택하여야 한다.

이때 예측된 수직환기갱 배출부 입구 부근의 예상 CO농도 CO_{vi}와 터널 출구부 부근의 예상 CO농도 CO_e를 비교하여 수직환기갱 입구부근의 CO농도 CO_{vi}가 더 큰 값을 갖을 때에는 CO_{vi}가 n+1번째 제어주기가 끝나는 순간 터널 내부 허용 CO농도 $CO_{\lim}$이 되기 위해 n+1번째 제어주기동안 유지해야하는 새로운 터널 내부 풍속 V_{ml}을 계산하고 이 풍속에서 터널 출구부의 CO농도 CO_{vi}가 $CO_{\lim}$을 만족하기 위한 새로운 수직환기갱도 풍속 V_{vnl}을 계산한다. 이 계산된 풍속들에 의해 축류팬의 운전속도와 제트팬의 운전속도를 결정하며, 이러한 조합에 의해 n+1번째 제어주기동안 소요되는 총 풍량 Q_1을 계산한다.

만일 터널 출구부의 CO농도 CO_e가 더 큰 값을 갖을 경우에는 수직환기갱에 설치되어 있는 축류팬의 회전속도를 일정하게 유지할 경우 n+1번째 제어주기가 종료되는 순간 터널 출구부의 CO농도가 허용 CO농도를 유지하기 위한 새로운 터널 내의 유지 풍속 V_{ml}을 계산하여 제트팬의 운전 대수를 결정하며, 이에 소요되는 동력 P_1을

구한다. 또한 터널 내부의 풍속을 n번째 제어주기에서와 동일하게 유지할 때 터널 출구부의 CO 농도가 허용 CO농도에 접근하기 위한 새로운 수직환기갱도 내의 유지풍속을 구하고 이에 해당하는 축류팬 소요 동력과 제트팬의 소요동력을 합한 총 소요동력 P_2를 계산하여 P_1과 비교한 후 소요 동력이 적게 소비되는 쪽의 운전 조합을 계산하고 이때 소요되는 총 풍량을 계산한다.

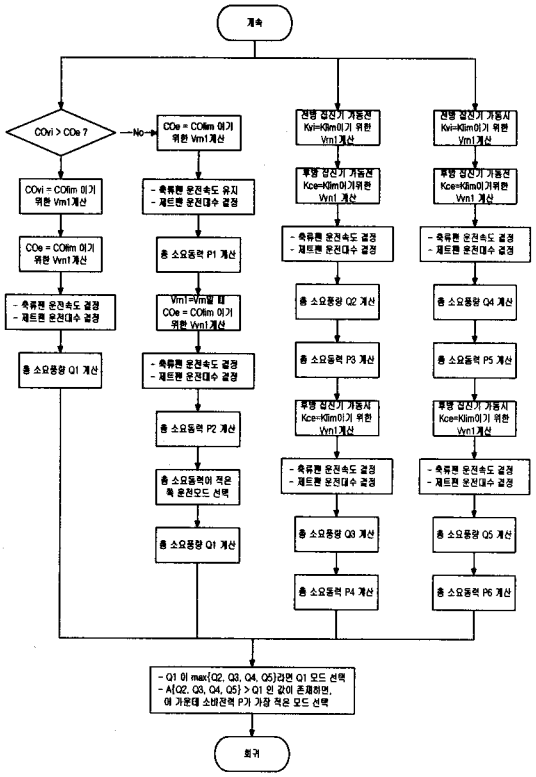

Fig. 5 Flow diagram of Mode I

또한 가시도에 대해서도 수직환기갱 배출부 입구 부근의 예상 가시도 K_{vi}가 터널 출구부의 예상 가시도 K_{ce}보다 클 경우에는 전방 집진기를 가동하지 않았을 때 예상된 가시도 K_{vi}가 터널내 허용 가시도인 $K_{\lim}$을 만족시키기 위한 터널 내 유지 풍속 V_{vnl}을 계산하고 후방 집진기를 가동하지 않았을 때 터널 출구부의 예상 가시도 K_{ce}가 $K_{\lim}$을 우지하기 위한 수직환기갱도 내의 풍속 V_{vnl}을 계산하며, 이에 필요한 축류팬의 운전속도와 가동해야할 제트팬의 대수를 결정하고 이때의 소요풍량 Q_2와 총 소요동력 P_3를 계산한다. 이러한 계산과 함께 동일한 방법으로 후방 집진기만 가동되었을 때의 소요풍량 Q_3와 총 소요동력 P_4, 전방 집진기만 가동되었을 때의 소요풍량 Q_4와 총 소요동력 P_5 및 전방 집진기와 후방 집진기가 모두 가동되었을 때의 소요풍량 Q_5와 총 소요동력 P_6를 모두 계산한다. 이 계산된 풍량들 가운데 Q_1이 가장 크다면 매연에 의한 환기량보다는 CO에 의한 환기량이 더 많이 요구되는 것이므로 Q_1에 해당되는 환기설비의 조합 운전을 행하며, 그렇지 않다면 Q_1보다 큰 Q_2에서 Q_5 가운데 총 동력소모량 P가 가장 적은 쪽의 환기설비 조합을 택하여 운전함으로써 소요 동력의 최소화를 기한다.

4. 결론

본 연구수행을 통하여 그간 국내 터널 환기시설의 운전 및 설계 상에 많은 문제점을 내포하고 있었던 기초 자료의 수집 및 가장 경제적인 운전 수행을 위한 기틀을 마련하였다.

본 연구결과를 바탕으로 향후에는 본 연구수행에서 다루어지지 않은 다음의 항목들에 대하여 보다 깊이 있는 연구가 수행되어야 할 것이다.

- 본 알고리듬의 실증실험
- 비상사태 운전 알고리듬 강화
- 환기시설 및 센서들의 설치 및 운영 기준
- 알고리듬의 package화를 통한 편리성 도모
- 지연시간에 대한 깊이 있는 고찰

후기

본 연구 결과는 현재 특허 청구 중입니다.

참고문헌

(1) 김태형 외, 2000, 터널환기시설의 운전 및 설계를 위한 통합제어알고리듬 개발, 로얄정보기술(주), 한국건설기술연구원.

(2) 김태형, 2000, 터널설비의 연동제어, 설비저널, 제29권, 제2호, pp. 55~60.

(3) 김태형 외, 1996, 터널환기시설에 대한 연구, 한국도로공사, 한국건설기술연구원.