

다중터널의 통합환기제어 알고리즘 연구

김태형[†], 홍대희*, 주백석, 김동남, 금재성**, 김진***

한국건설기술연구원, [†]고려대학교, ^{**}u-FRA I&C, ^{***}나라콘트롤

A Study on the Integrated Ventilation Control Algorithm for Road Tunnels

Taehyung Kim[†], Daehie Hong*, Baeksuk Chu, Dongnam Kim, Jaesung Keum**, Jin Kim*,

[†] Fire & Engineering Service Research Dept., KICT, GyeongGi 411-712, Korea

^{*}Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

^{**}Research Institute of Information Technology, u-FRA I&C Inc, Seoul 153-768, Korea

^{***}Research Center, Nara Controls Inc, Seoul 135-100, Korea

ABSTRACT : Over 70% of the land is mountains in Korea, so that many roadways naturally includes tunnels.

The air flow inside tunnel has complex characteristics, such that a new flow field is formed by following vehicles passing through the tunnel before previous flow field is stabilized. Due to these time delayed-transient characteristics, the ventilation facility requires the complex control algorithm that can handle adaptive and predictive controls. Also, it needs to be closely related to the disaster prevention system. The technology to integrate these system determines the success of TGMS.

The pollutant levels exhausted from the vehicles passing through tunnel depend on vehicle years and passing velocity. They also depend on the slope and altitude of the tunnel.

In order to solve this problem, an algorithm for estimating the compensating factors for calculating on design capacity of ventilation facilities was developed. Also, an integrated ventilation control algorithm with disaster prevention program to operate several tunnels was developed based on TGMS.

Key words: 터널군관리시스템(TGMS), 터널운영(operation of tunnel), 제어알고리즘(control algorithm), 통합제어(integrated control)

기호설명

CO_{ar} : 허용 CO농도
 DPC : 교통밀도(소형승용차 대수로 환산)
 f_i : 구배보정계수

f_v : 속도보정계수
 f_h : 표고보정계수
 f_{iv} : 속도-구배보정계수
 K_{ar} : 허용 가시도
 m_i : 도로구배
 \bar{m} : 구하고자 하는 구배구간의 평균 구배
 Q_{FCO} : CO 환기량
 Q_{FSM} : 매연환기량
 q_o^o : 차량 1대당 표준 CO배출량(소형승용 기준)

[†] Corresponding author
Tel.: +82-31-369-0504; fax: +82-31-369-0540
E-mail address: thkim@kict.re.kr

q_o^{sm} : 차량 1대당 표준매연배출량(소형승용 기준)
 $(q_{sm})_i$: 구배 m_i 구간 통과차량의 오염물배출량
 \bar{q}_{sm} : $(q_{sm})_i$ 의 평균
 $(q_{sv})_i$: 속도 v_i 통과차량의 오염물배출량
 \bar{q}_{sv} : $(q_{sv})_i$ 의 평균
 v_i : 차량 통과속도
 \bar{v} : 평균속도

1. 서론

최근 터널관리시스템(이하 TGMS)의 제어를 PC 기반으로 운영하는 개념이 도입되면서 개별 터널의 모든 제어는 개별터널관리시스템을 구성하는 관리계층에서 담당하고 통합관리센터의 운영시스템은 평시 각 터널의 운전상태를 감시하는 역할을 주로 담당하다가 임의의 터널에 이상이 발생할 경우 이에 대한 대처능력을 강화하는 방식으로 시스템 운영의 변경이 요구되고 있다.

따라서 터널 내의 모든 설비들 가운데 제어 알고리즘이 가장 복잡한 환기 시스템에 대한 통합 운영은 일부 화재발생에 대한 연동기능을 포함하고 있으므로 평상시에는 관리대상 터널의 환기 제어 상태를 모니터링하고 이상 발생시 해당 터널의 환기제어를 통합관리센터에서 직접 수행하는 기능이 요구된다.

이에 본 연구에서는 관리대상 터널들 가운데 임의의 터널에 화재가 발생하거나 또는 환기서버의 기능 상실이 발생하였을 경우 통합센터의 서버에서 해당터널의 환기 및 비상사태 제어를 수행할 수 있는 알고리즘을 개발하였다.

2. 전체 알고리즘

임의의 터널 통합관리센터에서 n개의 터널을 관리한다고 가정하고 이에 대한 전체 제어알고리즘의 흐름도를 다음의 Fig. 1에 나타내었다.

전체 공정의 구성은 통합센터 내의 운영프로그램이 작동되면 먼저 n개의 터널에 대한 터널별 파라미터, 설비 파라미터, 시간변수 및 운전변수 설정이 이루어지는 초기값 설정 루틴을 통해 제

어에 요구되는 각종 값들의 설정이 이루어지게 된다.

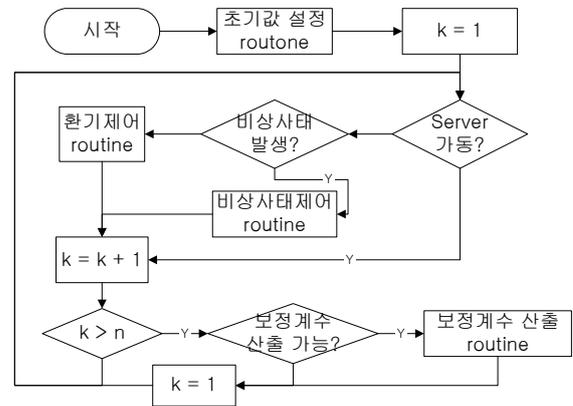


Fig. 1 Flow chart of integrated control algorithm in TGMS

이후 관리대상의 첫 번째 터널과의 tick 교환을 통하여 터널을 관리하고 있는 서버의 작동유무를 확인하고 이상이 없을 경우 n번째 터널까지 작동 유무의 확인을 지속적으로 수행하며, n번째 터널까지 확인한 결과 이상이 없을 경우 관련 DB의 축적현황을 파악하여 설계에 요구되는 각종 보정 계수를 산출하는 알고리즘을 가동한다.

그러나 tick를 교환하는 도중 임의의 터널을 담당하고 있는 서버로부터 응답이 없을 경우 비상사태 interrupt에 의한 것인지 또는 서버의 작동 중단에 의한 것인지를 파악하여 이에 상응하는 해당터널의 환기제어루틴 또는 비상제어루틴을 불러들여 해당터널의 서버역할을 수행하도록 구성되어 있다.

이 외에 Fig. 1에는 나타나 있지 않으나 watchdog timer가 내장되어 있어 관리자의 interrupt 요청에 즉각 대응할 수 있다.

3. 비상사태 제어 루틴

터널의 서버 상태를 점검하는 동안 임의의 터널에서 비상사태가 감지되었을 경우 수동운전요청이 있을 경우에는 해당터널의 제어권을 수동운전 모드로 이양하고 수동운전 요청이 없을 경우에는 비상사태 발생 경보를 발하게 된다.

비상사태 발생 경보를 발했음에도 불구하고 정해진 시간 내에 대응이 없을 경우에는 수동운전 요청이 있을 때까지 해당터널에 대한 비상제어 알고리즘을 불러와 비상운전을 하고 해당터널의 사태가 해지되어 해당 제어권을 인수하여 해당터널의 서버에 이양할 때까지 지속적으로 반복하게 된다.

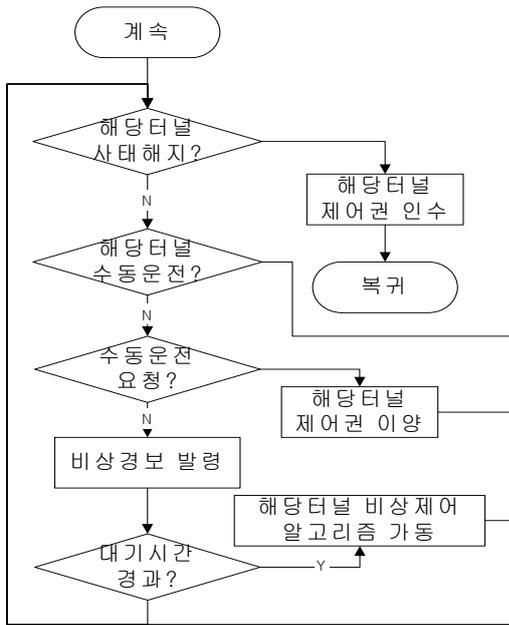


Fig. 2 Control routine for emergency state

이상의 비상사태 제어루틴에 대한 흐름도를 Fig. 2에 나타내었다.

4. 환기제어 루틴

관리대상 터널의 서버 상태를 점검한 결과 비상사태가 아님에도 불구하고 해당 터널의 서버가 작동을 하지 않을 때에는 통합관리센터의 서버가 대상터널의 서버 역할을 대신하게 된다.

이때 해당 터널의 제어권을 인수한 후 해당 터널 서버에 이상이 발생했다는 경보를 발령하고 환기제어 주기가 되었는지를 확인하여 제어주기가 아닐 경우 원 프로그램으로 복귀한다.

그러나 환기제어 주기에 해당하면 해당터널의 환기제어 알고리즘을 불러들인다.

본 연구에는 환기제어 알고리즘에 강화학습알고리즘^[1] 및 과 퍼지제어알고리즘^[2]을 사용하였으며, 이들 알고리즘은 학습에 일정기간의 시일이 소요되기 때문에 학습이 완료되었는지를 확인하고 학습이 완료되지 않았으면 제어이득을 산정하는 알고리즘을 가동한다.

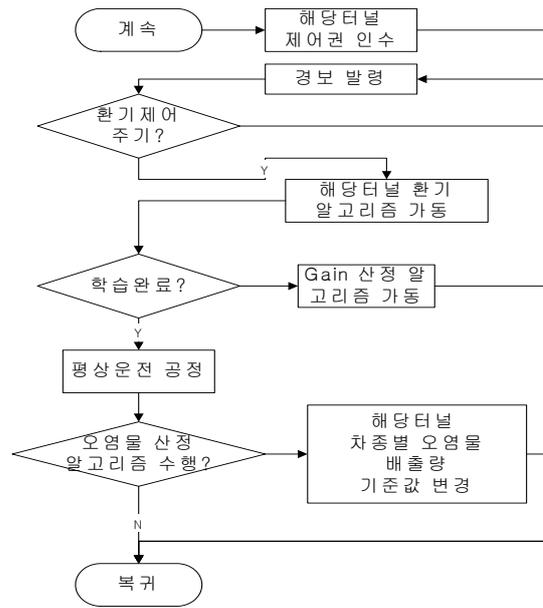


Fig. 3 Ventilation control routine with learning methodology

그러나 학습이 완료된 경우에는 제어에 필요한 제어이득이 모두 산정되어 있기 때문에 이들을 이용한 정상운전을 수행하고 관련 데이터베이스를 확인하여 오염물배출량산정알고리즘^[3] 수행 여부를 결정하며, 수행한 후에는 해당터널의 차종별 오염물 배출량 기준 값을 변경하게 된다.

Fig. 3은 본 연구에서 사용한 환기제어 루틴을 나타낸 것이다.

5. 보정계수 산출 루틴

현재 터널의 환기기 용량산정 설계에는 다음의 소요환기량 산정식이 사용되고 있다.

$$Q_{FCO} = \frac{q_v^{CO} \cdot f_i \cdot f_v \cdot f_h \cdot DPC \cdot 10^6}{3600 \cdot CO_{ar}} \quad (1)$$

$$Q_{FSM} = \frac{q_o^{sm} \cdot f_w \cdot f_h \cdot DPC}{3600 \cdot K_{ar}} \quad (2)$$

여기에서 식(1)은 CO 환기량산정식이고 식(2)는 매연환기량 산정식이다.

국내 터널의 경우 대부분 표고차에 의한 기압 변화보다는 터널이 위치한 지역의 기후에 따른 기압변화에 의한 영향을 많이 받으므로 표고보정 계수 $f_h = 1$ 로 하며(미국의 경우 1220m 이하는 모두 $f_h = 1$ 을 사용함), 매연환기량 산정에 있어서도 속도-구배보정계수의 값이 부정확한 경우가 많아 이를 속도보정계수와 구배 보정계수의 곱으로 표현하기로 한다.

이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$Q_{FCO} = \frac{q_o^{co} \cdot f_i \cdot f_v \cdot DPC \cdot 10^6}{3600 \cdot CO_{ar}} \quad (3)$$

$$Q_{FSM} = \frac{q_o^{sm} \cdot f_i \cdot f_v \cdot DPC}{3600 \cdot K_{ar}} \quad (4)$$

또한 본 연구에서는 차종별오염물배출량 산정 알고리즘^[3]을 통하여 각 터널마다 이를 산정한 충분한 데이터가 확보되어 있다고 가정한다.

임의의 터널 A에 CO 또는 가시도 센서가 설치된 구간의 구배가 '0'인 구간을 표준구배 구간이라고 한다.

Table 1. Representative variables for estimation values of pollution level

구분	대뿔값($v = v_0$)	CO	매연
소형승용	q_{so}	q_s^{co}	q_s^{sm}
중소형	q_{mso}	q_{ms}^{co}	q_{ms}^{sm}
중형	q_{mo}	q_m^{co}	q_m^{sm}
대형	q_{Lo}	q_L^{co}	q_L^{sm}
특대형	q_{sLo}	q_{sL}^{co}	q_{sL}^{sm}

그리고 속도 v 로 표준구배구간을 통과하는 차종별 오염물질 배출량의 추정값을 다음과 같다고 하며, 표준속도 v_o (표준속도란 터널에서 환기량 산정을 위해 기준으로 하는 차량의 통과속도를

의미한다)에서의 차종별 오염물질 배출량 추정값의 대뿔값은 하첨자 'o'를 첨가하도록 한다.

이를 정리하여 Table 1에 수록하였다.

이들 차종의 구분은 터널의 차종 구분 감도에 따라 정해지며, 다수의 종으로 구분 가능하다.

이들 값을 이용하여 승용차 단위로 환산하기 위한 차종별 승용차 환산계수 f_{car} 를 구하며 그 방법은 다음과 같다.

$$\text{중소형 보정계수} : f_{car-ms} = \frac{q_{mso}}{q_{so}} \quad (5)$$

$$\text{중형 보정계수} : f_{car-m} = \frac{q_{mo}}{q_{so}} \quad (6)$$

$$\text{대형 보정계수} : f_{car-L} = \frac{q_{Lo}}{q_{so}} \quad (7)$$

$$\text{특대형 보정계수} : f_{car-sL} = \frac{q_{sLo}}{q_{so}} \quad (8)$$

표준구간의 표준속도에서 소형차종의 오염물질 배출량의 대뿔값인 q_{so} 는 식(1) 및 식(2)에서 각각 q_o^{co} 와 q_o^{sm} 을 나타내고, 여기에 차종별 혼입율이 포함된 통과차량의 예상교통밀도 식인 DPC 에 구한 차종별 승용차 환산계수인 식(5)에서 식(6)까지를 각각 곱하여 계산하면 기준이 되는 중소형승용차종의 통과대수를 계산할 수 있다.

이는 실제 터널의 운영자료로부터 얻어진 오염물질배출량 자료를 바탕으로 하고 있기 때문에 국내실정에 가장 부합되는 값을 얻을 수 있다.

터널은 통과차량의 밀도가 높아 속도가 저하되고 이로 인해 단위시간당 단위길이에서 오염물질의 배출량이 증가한 경우 환기가 필요하기 때문에 차량의 진행속도가 느린 저속에서 환기기의 작동이 요구된다.

따라서 저속구간을 0~5 km/h, 5~10 km/h, 10~20km/h, 20~40 km/h 및 40km/h 이상등 임의의 개수로 나누기로 한다.

이를 바탕으로 표준 구간을 임의의 속도 v km/h로 통과하는 소형승용차종의 오염물질 배출량을 q_{sv} 라고 하고 오염물질 배출량 q_{sv} 와 통과속도 v 의 관계를 다음과 같이 1차식으로 가정한다.

$$q_{sv} = k(v_s - v) + q_{so} \quad (9)$$

그러면 식(9)는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$q_{sv} = av + b \quad (10)$$

여기에 많이 축적된 표준구간의 속도별 차종별 오염물질 배출량 추정 데이터를 적용하면 다음과 같이 식(10)의 계수 a 와 b 를 각각 구할 수 있다.

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v}) ((q_{sv})_i - \bar{q}_{sv})}{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2} \quad (11)$$

$$b = \bar{q}_{sv} - a\bar{v} \quad (12)$$

따라서 임의의 속도 구간인 $v_s \leq v < v_e$ 에서 구한 오염물질 배출량 q_s 의 식(10)을 이용하여 속도보정계수 f_i 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$f_v = \frac{q_{sv}}{q_{so}} = \frac{av + b}{q_{so}} \quad (13)$$

마찬가지 방법으로 표준속도 v_o 로 통과하는 차량이 구배가 $m_s \leq m < m_e$ 인 터널 구간을 지날 때 배출되는 오염물질량을 q_{sm} 이라 하면 앞서와 마찬가지로 동일하게 구배보정계수 f_i 를 다음의 과정을 통하여 구할 수 있다.

$$q_{sm} = cm + d \quad (14)$$

$$c = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m}) ((q_{sm})_i - \bar{q}_{sm})}{\sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2} \quad (15)$$

$$d = \bar{q}_{sm} - c\bar{m} \quad (16)$$

여기에서

m_i : 도로구배

\bar{m} : 구하고자 하는 구배구간의 평균 구배

$(q_{sm})_i$: 구배 m_i 의 터널구간을 통과하는 차량의 오염물질 배출량

\bar{q}_{sm} : 구배 m_i 의 터널구간을 통과하는 차량의 오염물질 배출량 평균이다.

$$f_i = \frac{q_{sm}}{q_{so}} = \frac{cv + d}{q_{so}} \quad (17)$$

이 방식은 충분한 데이터를 확보하여 터널을 통합관리하는 통합센터 또는 그 이상의 총괄센터에서 사용할 때 비로소 국내 실정에 적합한 보정계수를 산출할 수 있는 방식이지만 실측 데이터를 바탕으로 산출되는 보정계수인 만큼 외국의 자료에 의존하는 현재의 방식에 비해 그 정확도 및 신뢰도는 현격한 차이를 보일 것으로 기대된다.

6. 맺음말

본 연구는 TGMS 구축에 따른 개별터널관리서버의 이상 발생에 대비하여 통합관리센터에서 효과적인 대응을 할 수 있는 통합 알고리즘을 제시하였다. 또한 이를 통하여 설계시 환기기 용량 산정에 사용되는 제반 보정계수의 산정 알고리즘도 제시하였다.

그러나 이의 값들을 추출하는 데에는 많은 데이터의 축적이 필요한 만큼 이에 대한 효과의 검증에는 많은 시간이 소요될 것으로 판단된다..

후 기

이 논문은 산학연 공동연구개발사업 지하공간 환경개선 및 방재기술 연구과제('05~'08) 터널운영시스템개발연구 결과의 일부입니다.

참고문헌

1. Beaksuk Chu, et al., Tunnel ventilation control using reinforce learning methodology, JSME Int. Jour., 2006.
2. 주백석, 김동남, 홍대회, 박주영, 정진택, 김태형, 터널환기시스템을 위한 유전자 알고리즘 기반의 퍼지제어기 설계, 대한설비공학회 2004동계학술발표대회논문집, pp. 171-178
3. Beaksuk Chu, et al., Pollution level estimation for tunnel ventilation control, JSME Int. Jour., 2003.