

터널 환기시설의 운전방안

국내 고속도로 터널에 많이 적용되고 있는 종류식 환기 터널의 운전현황을 분석하고 이에 대한 문제점을 도출하여 향후 종류식 환기 터널의 운전 방법의 개선안을 제시하고자 한다.

김 태 형

최근 사회간접자본 확충을 통한 물류비용절감을 위해 국내 고속도로망 및 도시교통망 신·증설이 가속화되고 있고 도로망 확충시 환경 피해를 최소화하기 위한 노력으로 인하여 터널개소의 증가는 물론 장대화가 급속히 이루어지고 있으며, 이에 따라 차량의 안전운행을 위한 환기시설 및 교통관련시설, 재해 발생 시 신속대처를 위한 방재시설 그리고 터널 내 조도유지와 수전을 위한 전기시설등 관련시설의 규모도 다양해지고 고도화하고 있다.

향후에도 고속도로망 신설계획에 따른 신규터널개소는 급격하게 증가할 것으로 예상되며, 계획된 신설 터널 가운데 1000m 이상의 장대터널만도 44개소에 이르고 이들 장대터널은 기존 터널에서 사용되었던 설비에 비해 집진기 및 수직환기갱 등 새로운 시설들이 채택될 예정이다.

이러한 다양한 시설물을 경제적이고 효과적으로 유지·관리하고 나아가 도로를 효과적으로 관리할 수 있도록 일정구간내의 여러 터널을 한 장소에서 통합적으로 관리할 수 있는 통합관리시스템 구축의 필요성이 제기되었으며, 현재 영동선 확장 구간에 시범 적용되고 있다.

따라서 지금까지 터널시설들을 운전했던 제어방법으로는 통합관리시스템 구축에 따른 터널시설들을 적절하게 운용할 수 없으며, 새로운 운전전략 수립이 절실하게 요구되고 있다.

이러한 배경으로 본 고에서는 통합관리시스템 구축에 따른 터널 환기시설들을 적절하게 제어하기 위해 고려되어야 할 사항들에 대해 검토해 보고 이를 근거로 향후 터널 환기시설 운전의 개선 방안을 도출해 보았다.

터널 시설물 및 센서

터널 내 환경을 적정수준으로 유지하기 위하여 터널 내부에 설치하는 시설은 각종 설비들의 운전엔 필요한 전원을 공급하는 전원 공급시설과 운전자의 안전운전 확보를 목적으로 하는 운전환경 유지시설이 있다.

또한 터널 내 응급상황 발생시 대처하기 위한 방재시설, 터널 내부를 통과할 때 외부와의 전과단절을 방지하기 위한 재통신시설 및 터널내부의 상황을 외부에서 감시 또는 외부로 전달하기 위한 외부개입시설 등에 속하는 많은 설비들이 투입된다.

이러한 시설들 가운데 재통신시설 및 외부개입시설은 별도의 알고리즘이 없이 상시 가동되거나 운전원에 의해 인위적으로 수동 조작되는 특징을 가지고 있다.

방재시설 및 전원공급시설도 on/off에 의한 단순한 운전방식이지만 비상시 인명 피해나 타 시설에 심각한 영향을 초래할 수 있으며, 전원이 차단되면 터널에 투입되는 모든 시설의 운전이 불가능하다는 특성 때문에 특별한 관리가 요구된다.

이러한 시설들에 비해 운전환경 유지시설에 포함되어 있는 조명시설과 환기시설은 외부 환경변화에 따른 자동 및 수동운전을 위해 타 시설보다 복잡한 운전 알고리즘을 가지고 있으며, 이 가운데에서도 특히 환기시설은 그 운전 알고리즘이 가장 복잡하고 비상시 타 설비에 미치는 영향이 지대하다.

이들 설비들 가운데 주요 설비에 사용되고 있는 주된 센서들을 표 1에 수록하였다.

표 1에서 알 수 있는 바와 같이 환기설비에 가장 많은 센서가 사용되고 있으며, 다른 설비에는 거의 1~2

<표 1> 터널에 설치되는 대표적인 계측기

| 구분 | 센서 종류 | 검출 내용 | 기능 | 비고 |
|--------|----------|------------------------------|---------------------------------------|-------------|
| 환기설비 | 교통량 측정기 | 통과차량, 대수, 길이, 종류, 진행방향, 통과속도 | · 환기량산정 자료로 이용 · FTMS에 교통량 자료제공 가능 | |
| | 풍향 / 풍속계 | 터널 내외부의 풍향 및 풍속 측정 | 환기량 산정자료로 이용 | 터널 내·외부에 설치 |
| | CO 감지기 | 터널 내부 및 수직환기갱의 CO 농도 측정 | " | 다수 설치 |
| | 가시도 계측기 | 터널 내부의 가시도 측정 | " | |
| | 화재 감지기 | 터널내부의 화재 발생 감지 | 응급상황 발생시 방재설비의 작동여부 판단자료로 이용 | 다수 설치 |
| 조명설비 | 주광센서 | 터널외부의 조도 측정 | 터널 내부 조명설비 운전자료로 이용 | |
| 전기설비 | 정전감지기 | UPS내에 장착되어 전원의 공급여부 감지 | 비상 전원 가동 자료로 이용 | |
| 급·배수설비 | 수위감지기 | 급·배수 탱크내의 수위검출 | 응급상황 발생시 터널내의 배수설비 가동에 이용 | |
| 보일러설비 | 유위감지기 | 경유탱크내의 유위 검출 | | |

개의 센서가 사용되고 있는 실정이고 여기에 센서가 수록되지 않은 설비들은 용설설비나 가변표자판설비, 기상관측설비, 비상전화설비 등과 같이 사용자나 작동자가 임의로 구동하는 설비들과 라디오 재방송설비 또는 터널의 교통상황을 감시하기 위해 설치하는 CCTV 설비 등과 같이 별도의 센서가 없이 24시간 가동되는 설비들이다. 또한 수배전 직류전원설비 등과 같이 법적으로 임의의 변경이 불가능하도록 규제되어 있는 설비들에 설치되는 센서들은 생략하였다.

환기설비에는 통과한 차량이 배출하는 오염물질에 의해 오염된 내부 공기의 오염정도를 측정하기 위해 사용되는 CO 센서 및 가시도 계측기(visibility sensor로 표기되며 일반적으로 이를 VI 센서라 칭함)와 터널 내부를 통과하는 기류의 속도를 측정하는 풍향/풍속계, 그리고 화재 발생시 온도를 감지하기 위한 화재 감

지기가 포함되어 있다.

환기량 산정의 기초자료를 수집하기 위해 사용되는 교통량 감지기는 통과차량의 대수, 길이, 진행방향 및 점유율을 감지하여 3~5단계로 차종을 구별하며, 속도 측정계는 터널을 통과하는 차량의 속도를 측정하는 데에 이용된다.

이러한 센서들로부터 입력된 자료는 터널 내부의 공기 오염도를 기준값 이내로 유지하기 위하여 체트 팬이나 수직환기갱, 전기집진기 등을 구동하는 데에 활용된다.

터널 환기의 특성

터널은 차량 통과 후 기류가 정상 유동을 회복하기 전에 그 뒤를 이어 통과하는 타 차량에 의하여 다시 새로

운 기류가 형성되는 천이 과정의 연속이고 차량으로부터 배출된 오염물질의 확산에 소요되는 시간 및 환기 시설의 운전 상태에 따라 오염 농도가 희석되어 가는 과정에 소요되는 시간을 합한 만큼의 지연 시간을 갖는 지연-천이계로 요약할 수 있다.

외국의 경우에는 이러한 지연성 때문에 교통량을 측정하여 배출 오염물질의 양을 예측하고 이를 바탕으로 제트 팬 등의 환기기를 미리 운전하고 있으나 국내의 경우에는 차종별 오염물질 배출량의 기본자료가 미흡하여 환기량 산정에 적극적으로 활용하지 못하고 있는 실정이다.

국내 고속도로 터널 환기에 적용되고 있는 알고리즘은 터널 환기시설의 운영방안 부재로 인해 터널 내부의 오염농도에 따라 단순 대수제어를 수행하도록 프로그램이 작성된 데에서 기인한 것으로 판단되며, 앞서 정의한 바와 같이 터널이 지연-천이계의 특성을 갖는 대표적인 목적물임에도 지연 시간을 전혀 고려하지 않은 단순 대수제어가 지속될 경우 터널 내부의 오염농도는 요구되는 허용오염농도에 과도응답을 하게됨으로써 터널 내부의 오염농도 변화 진폭이 커지게 되고 이에 소요되는 동력 소모도 증가할 것으로 예상된다.

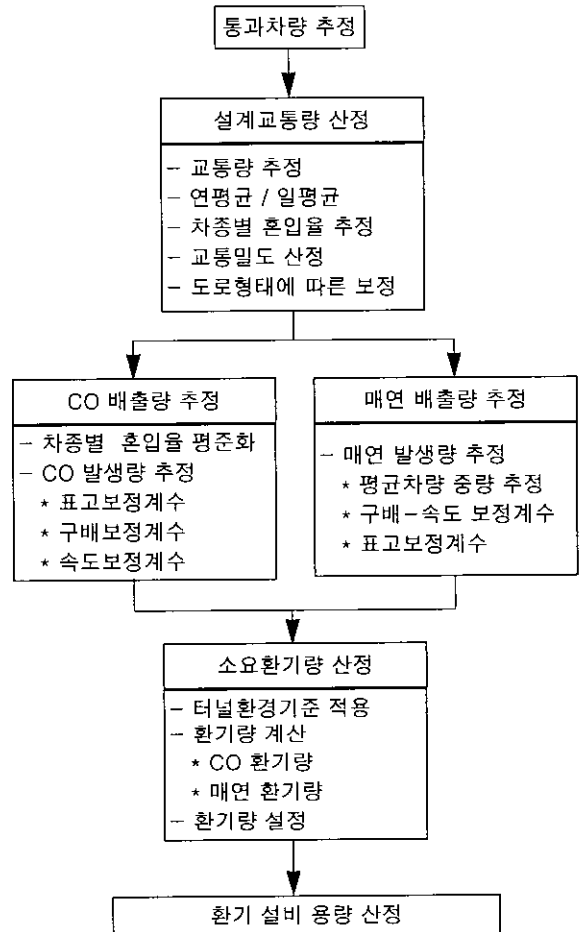
터널을 환기적인 측면에서 고려할 때 또 하나의 큰 특징은 터널의 형상이나 구배 등에 따라서 동일한 차량이 통과하더라도 오염물질 배출량이 다르게 나타나게 된다는 점이다.

이는 PIARC 등 외국의 터널 환기시설 설계 용량 산정 방법 또는 기준 등에서 각종 보정계수를 도입하게 된 주 요인으로 분석되며, 따라서 터널 환기 시설을 운전하는 데에 있어 일률적인 차종별 오염물질 배출량을 적용한다는 것은 무리가 있다.

여기에서 터널 설계시 종류식 환기방식에 의해 환기 시설의 소요 환기량을 설정하는 방식에 대하여 살펴보면 크게 유럽방식과 일본방식으로 대별되며, 이들은 다음과 같다.

일본방식

- 일본도로공단방식
- 일본도로협회방식
- 수도고속도로공단방식



[그림 1] PIARC 방식에 의한 소요환기량 산정 흐름도

유럽방식

- 국제상설도로회의방식(PIARC)
- 독일방식(RABT)
- 노르웨이방식

국내 고속도로 터널 설계에는 PIARC방식이 대부분 적용되고 있으며, 이 방식에 의해 터널 환기시설의 용량을 결정하는 과정을 그림 1에 수록하였다.

그림 1로부터 터널 환기 용량 선정에 있어 얼마나 많은 보정계수들이 사용되고 있는지를 알 수 있으며, 이러한 많은 보정계수들로 인하여 터널 환기 용량 산정이 불확실해지고 이 때문에 환기 용량이 과다 설

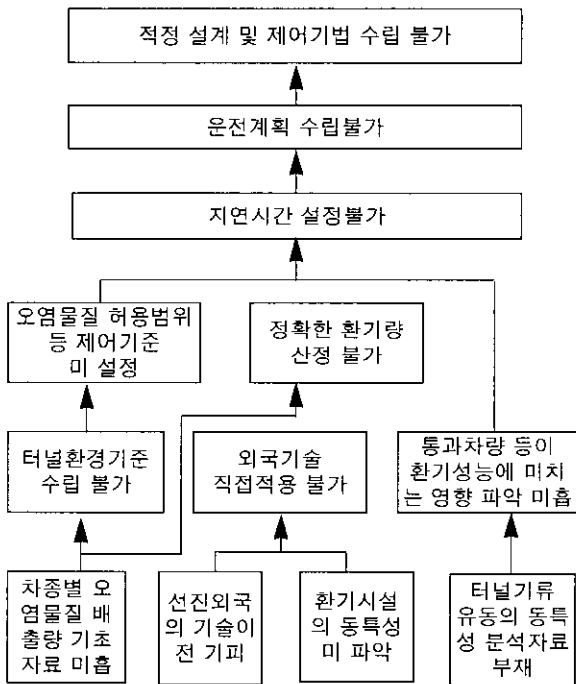
계되는 문제점을 내재하고 있는 현실이다.

따라서 이에 대한 대안으로 터널 환기시설의 제어 알고리즘 구현시 각 터널의 표고 및 형상에 따라 달라지게 될 차종별/속도별 오염물질 배출량의 대표 값을 각 터널마다 추정할 수 있는 별도의 알고리즘을 탑재하여 추정된 값을 운전 및 환기기 용량 설계에 활용하는 방법을 제안한다.

이러한 알고리즘이 성공적으로 구현되었을 경우에는 터널의 표고 및 경사 그리고 기타 주변 환경에 따른 다양한 오염물질 배출량의 대표값을 확보할 수 있을 것이며, 나아가 보다 정밀한 환기기 용량 산정의 기초자료로 활용되어 국내 환경에 적합한 고유의 설계기준까지도 마련할 수 있을 것으로 기대된다.

환기시설의 운전 알고리즘

그림 1에 나타난 바와 같이 터널의 설계 환기량 산정



[그림 2] 환기시설의 설계 및 운전에 영향을 미치는 영향인자 분석

에는 차종별 오염물질 배출량 및 각 차종별 표고보정계수, 속도보정계수, 구배보정계수, 속도-구배보정계수 등 많은 기초자료가 요구된다.

그러나 국내에는 이러한 기초자료가 거의 확보되어 있지 않으며, 이로 인해 선진 외국의 기술을 그대로 도입한다고 해도 외국의 차량과 국내 차량의 성능계수 및 오염물질 배출량이 달라 직접적인 적용이 불가능한 실정에 있다.

이러한 이유로 국내 터널의 환기시설은 일정한 운전기준이 없이 운전되어 왔으며, 타 시설에 비해 많은 정보를 습득할 수 있도록 다중 다수의 센서들이 설치되어 있음에도 불구하고 수집되는 정보를 무시한 채 시간대별로 스케줄 운전을 하거나 오염량에 따라 운전할 제트 팬의 대수를 결정하는 수준의 운전 알고리즘을 수립할 수밖에 없었다.

따라서 이러한 자료는 국내에서 확보할 수밖에 없으며, 이러한 자료가 확보되어야만 터널 환기시설을 적정용량으로 설계할 수 있고 사용 에너지를 절감할 수 있도록 운전 알고리즘을 수립할 수 있다.

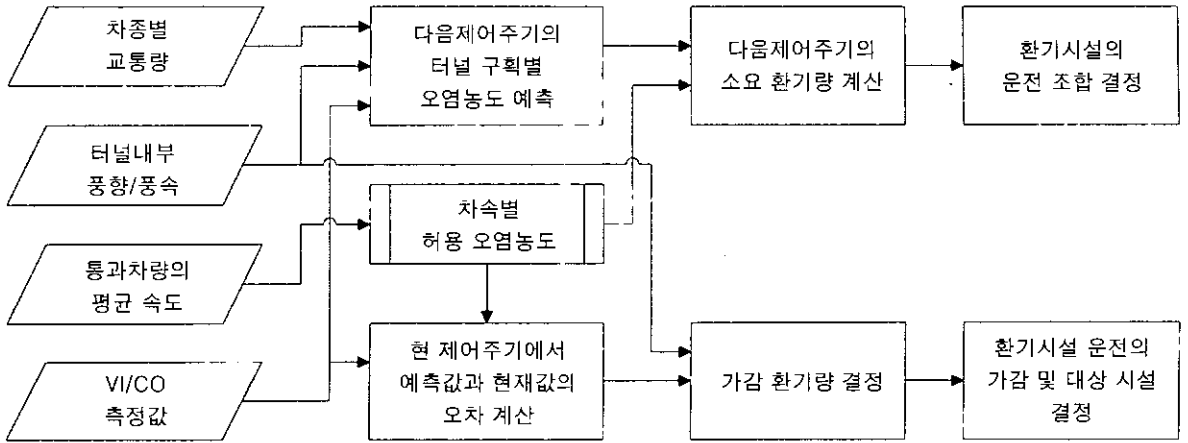
이러한 국내 터널 환기시설의 설계 및 운전에 영향을 미치는 인자들 간의 상관관계를 그림 2에 분석하여 수록하였다.

그림 2에서 알 수 있는 바와 같이 터널 환기시설의 적정설계 및 운전기법의 확보를 위해서는 다음의 4가지 요소를 해결할 수 있어야 한다.

- 차종별 오염물질 배출량 기초자료 미흡
- 선진외국의 기술이전 기피
- 환기시설의 동특성 미 파악
- 터널기류유동의 동특성 분석자료 부재

이 가운데 선진국의 기술이전 기피 사항은 국내 기술을 확보할 수 있다면 향후 문제시 될 사항이 아니므로 나머지 세가지 사항이 향후 해결해야 할 중요한 문제점이다.

환기시설의 동특성이 파악되지 않은 점과 터널 기류유동의 동특성 분석자료가 없다는 점은 자연-천이계로 정의한 터널의 특성을 전혀 파악하지 못하고 있다는 것과 일맥 상통하는 말이며, 이러한 자료는 터널 내부를 통과하는 차종, 차속, 대수, 환기시설의 운전상황



[그림 3] 터널 환기시설의 제어 알고리즘 구성 예

등에 따라 달라지게 되므로 몇몇 터널에서 수집된 자료만을 분석해서는 환기시설의 적정 운전에 의한 터널 내부 환경 유지라는 본래 환기시설의 목적을 달성하는 것이 불가능할 것으로 판단된다.

이러한 문제점을 해결하기 위한 예측제어와 피드백 제어의 한 예를 그림 3에 도시하였다.

그림 3에 나타난 터널 환기시설의 제어 알고리즘은 크게 두 부분으로 구성된다. 첫 번째는 그림의 윗부분이 나타내는 예측 알고리즘 부분으로서 이 부분에서는 터널을 통과한 차종별 통과대수 및 터널 내부의 풍향/풍속 그리고 측정된 VI/CO 값으로부터 다음 제어주기의 터널 구획별 오염농도를 예측하고 이렇게 예측된 값과 통과차량의 평균속도에 의해 결정되는 차종별 허용오염농도를 참조하여 다음 제어주기의 소요 환기량을 계산하며, 계산된 소요 환기량을 기초로 가장 경제적이고 효과적인 환기시설의 운전 조합을 결정하는 부분이다.

그림 3의 하부에 도시된 부분은 피드백 제어부분으로서 제어주기 중간에 수집되고 있는 현재의 통과차량 평균속도에 대한 VI/CO 기준값을 참고로 현재 측정된 VI/CO 값과 예측된 값의 차이를 계산한다. 만일 이 차이가 너무 크게 되면 터널 내부의 풍향/풍속을 고려하여 가감해야 할 환기량을 계산하고 결정된 가감 환기량에 대하여 가장 경제적이고 용이한 환기시설 운전량의 가감정도를 결정하게 된다.

물론 그림 3에 나타난 제어 알고리즘의 구현에는 많은 고려 사항들이 있으나 환기설비의 운전과 관련된 기초자료가 거의 전무한 국내의 실정을 감안할 때 빠른 기간 내에 보다 효과적으로 국내 실정에 적합한 제어 알고리즘 개발을 위한 노력이 수반되어야 할 것이다.

이외에 터널 내부의 가시거리를 간접적으로 측정하기 위하여 설치된 가시도 계측기는 오염물질의 농도에 따라 빛이 일정거리를 통과하는 데에 소멸된 비율을 측정하는 방식을 채택하고 있다. 터널 내부의 가시거리는 매연농도에 의해 영향을 받으며, 매연농도는 빛의 소멸율에 영향을 준다는 원리이다. 따라서 매연농도가 초과하여 가시거리가 짧아짐에 따라 가시거리를 확보하기 위해 환기시설을 운전하는 현행 제어 방식과 빛의 소멸율에 따라 조명등의 대수를 제어함으로써 소멸된 빛을 보상해주는 환기-조명설비의 연동제어를 활용한다면 보다 적은 에너지 소모로 원하는 소기의 성과를 달성할 수 있을 것으로 판단된다.

이상으로 본 고에서는 터널 환기시설의 운전과 관련하여 해결해야 할 문제점들을 살펴보고 이에 대한 대안을 제시하고자 하였으며, 모쪼록 터널 환기시설의 운전자료가 설계에 반영되고 새로운 설계안에 대한 운전이 이루어져 우리나라 실정에 맞는 고유의 환기시설 설계기법과 운전기법이 조속히 확립되길 기원한다. ㉔