# 터널 설비의 연동제어

최근 고속도로 터널의 TGMS 구축에 따라 요구되는 일반 상황 및 응급상황시 설비 시스템간의 연동제어 방안에 대해 기술하였음.

김 태 형

## 고속도로 터널의 현황

최근 터널의 장대화에 따라 차량의 안전운행을 위한 환기시설 및 교통관련시설, 재해 발생 시 신속대처를 위한 방재시설 그리고 터널 내 조도유지와 수전을 위한 전기시설 등 관련시설의 규모도 다양해지고 고도화되고 있다. 이러한 다양한 시설물을 경제적이고 효과적으로 유지·관리하고 나아가 도로를 효과적으로 관리할 수 있도록 일정구간내의 여러 터널을 한 장소에서 통합적으로 관리할 수 있는 터널통합관리시스템(이하 TGMS라 칭함)구축의 필요성이 제기되었으며, 한국도로공사에서는 영동선 확장 55㎞구간의 9개 터널을 대상으로 TGMS 시범구축사업을 추진하여 본격적인 사업에 착수하였다.

고속도로 터널은 99년 1월을 기준으로 부분 개통되어 사용하고 있는 대면 교통터널을 포함하여 64개소가 있으며, 이중 영동선의 마성, 구마선의 달성1, 달성2 및 중앙선의 다부 등 4개 터널에 환기시설이 갖추어져 있고 터널연장이 2km이하로 비교적 짧은 터널들이었으나, 최근 영동고속도로 확장구간의 둔내, 봉평, 진부 터널 등이 개통되어 규모나 시설 면에서 대형화되는 추세를 나타내고 있다.

고속도로망 신설계획에 따라 신규터널개소는 급격하게 증가할 것으로 예상되며, 2004년도까지 계획된 터널 가운데 1km이상의 장대터널만도 44개소에 이르고 이들 장대터널은 기존 터널에서 사용되었던 단순한 환기시설보다 복잡한 집진기 및 수직환기갱 등 새로운 시설들이 채택될 예정이다.

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

이러한 배경으로 본 고에서는 TGMS 구축에 따른 터널 시설물들을 적절하게 운영하기 위해 고려되어야할 사항들에 대해 검토해 보고자 한다.

## TGMS의 통합제어 운영방안

본 장에서는 TGMS 구축에 따라 단위터널 제어시와 커다란 차이가 없는 설비들은 제외하고 TGMS 구축 후 기존의 운영방식과는 다른 관점에서 운영되어야 하는 설비와 새로이 도입되어야 하는 개념들에 대해 고찰함으로써 터널 설비들의 통합제어 알고리듬의 수립시 고려사항들을 검토해보고자 한다.

현재 영동선 확장구간에 시범적으로 적용

김 태 형 한국건설기술연구원(thkim@kict.re.kr)

하게될 TGMS의 운영체제는 터널내의 교통상황이나 시스템의 동작상황에 따라서 크게 정상운영 체제와 비상운영 체제로 구분하고, 체제에 따른 운영을 위하여 통합시스템을 구성하는 시스템의 물리적 또는 논리적 계층과 위상에 따라 상위시스템제어와 하위시스템제어로 구분하고 있다.

또한 각 시스템의 운전 방법에 따라서 자동운전, 스케쥴운전, 수동운전으로 구분하고, 제어의 대상 설비에 따라서 환기설비제어, 조명설비제어, 전원설비제어, 방재설비제어, 교통류관리설비제어, 터널관리동설비제어 등으로 구별하고 있으며, 각각의 내용을 정리하여 표 1에 수록하였다.

터널시스템 운영에 있어서 전술한 비상운영의 개념은 두 가지 측면으로 대별할 수 있다. 즉 터널내의 교통사고 또는 화재발생으로 인해 도로의 소통상황이 비정상으로

〈표 1〉 Structural Architecture of TGMS

| 대 상 구 분 | 내 용 | 비고 |
|---|---|---|
| 운영체제 | 정상운영체제<br>비상운영체제 | |
| 시스템<br>계층별 제어 | 상위시스템 제어<br>하위시스템 제어 | fail<br>safe |
| 제어 목적물 | 환기설비 제어<br>전원설비 제어<br>조명설비 제어<br>방재설비 제어<br>• 소방<br>• 도로결빙방지<br>• 교통류관리설비 제어<br>• CCTV<br>• 가변정보표지판(VMS)<br>• 차선제어기(LCS)<br>• 비상전화/라디오재방송설비, 확성기, 관리동설비 제어<br>• 건축설비<br>• 전기설비<br>• 방범설비 | |
| 운전방식 | 자동운전<br>스케쥴운전<br>수동운전 | |

이루어지는 경우와 터널 내 도로상황은 정상이나 컴퓨터 또는 네트웍 시스템 자체의 장애발생으로 비상 운영할 경우이다. 일반적으로 교통사고와 화재사고 등 도로상황에 의한 비상운영체제에는 환기설비와 방재설비, 교통류관리설비 등이 주요한 제어 대상 설비에 포함된다. 비상사태의 원인 및 위치에 따라 연동되는 설비의 내용을 정리하여 표 2에 나타내었다.

또한 터널 시설의 제어 방법으로는 측정된 결과치와 기준치를 비교하여 목표하는 제어량과 일치하도록 제어하는 Feedback 제어와 인접한 터널의 측정된 상황정보를 이용하여 해당 터널의 영향을 미리 예측하여 제어량을 결정하는 Feed forward 방식이 있다. 또한 직접 측정되는 제어변수 값의 변화가 없더라도 타 설비의 특정한 측정값이나 변수값의 변화가 있을 경우 즉시 타 설비와 연계하여 제어하는 연동제어방식도 있다.

스케쥴운전은 검지기의 정확성과 부적절한 기준치가 문제될 경우는 완전 자동제어보다 오히려 효율적인 제어전략이 될 수 있으나, 충분한 자료검토를 바탕으로 수립되어야 실효를 거둘 수 있다.

〈표 2〉 Interlocking Apparatus at Emergency Condition

| 사태구분 | 내 용 | 연 동 설 비 |
|---|---|---|
| 교통사고 | 터널 내 | 환기설비, CCTV, VMS, LCS, 라디오재방송설비 |
| | 터널 외 | 환기설비, VMS, 라디오재방송설비 |
| 화재사고 | 터널 내 | 방재설비, 환기설비, CCTV, VMS, LCS, 라디오재방송설비 |
| | 터널 외 | 환기설비, VMS, 라디오재방송설비 |
| 기상악화 | 안개 및 호우 | 조명설비, VMS |
| | 결빙 | 융설설비, VMS, LCS |
| 시스템 고장 | 센터 시스템 | 전산기:개별터널시스템 하위제어<br>센터내 통신망:개별터널시스템 하위제어 |
| | 개별 터널 시스템 | 터널과 센터간 연결통신망:하위제어<br>개별터널 상위 자동제어시스템:최하위제어<br>개별터널 하위센서 및 PLC:제어불가 |

수동제어는 환기시설의 경우에 도로와 시스템의 상황에 맞게 운영자가 직접 제어하는 것으로 일반적으로 비상운영시 또는 시험운영시에 운영하는 제어방법이다. 또한 제어의 개념이 없는 비상전화, 터널재방송, 확성기방송 등은 대부분 수동제어방법으로 운영하게 된다.

설비별 제어변수와 적용할 수 있는 제어방법은 표 3과 같다.

TGMS 구축에 따른 설비의 통합 운영은 전술한 바와 같이 물리적 시스템 구성 요인에 의해 하드웨어부와 소프트웨어부의 두가지로 대별할 수 있다.

하드웨어부는 단위시스템의 위치 및 역할에 따라 상위시스템과 하위시스템으로 구성되어 있으며, 이들 사이의 통신을 위한 선로까지 예비시스템을 구성하도록 계획되어 있

〈표 3〉 Control Parameter and Operating Methods for Facilities

| 설 비 | 제 어 변 수 | 적용방법 | 구 동 기 |
|---|---|---|---|
| 환기설비 | CO, 가시거리, 풍향, 풍속, 교통량 | A, S, M | 젯트팬, 집진기, 환기갱 |
| 전기설비 | 전력, 전압, 전류, 역율, | A, M | 변전설비, 예비전원, 축 |
| • 전력설비 | 주파수 | | 전설비, UPS |
| • 조명설비 | 조도 | A, S, M | 터널내,터널외 |
| 방재설비 | | | |
| • 소방설비 | 열, 연기 | A, M | 유도표시,소화장비 |
| • 결빙방지 | 적설량, 노면습도 | A, M | |
| 교통류관리설비 | | | |
| • CCTV | 연동값 | A, S, M | |
| • VMS | 연동값 | A, S, M | |
| • LCS | 연동값 | A, M | |
| • 비상전화 | - | M | |
| • 재방송 | - | M | |
| • 확성기방송 | - | M | |
| 터널관리동설비 | | | |
| • 전기설비 | | A, S, M | |
| • 건축설비 | | A, S, M | |
| • 방범설비 | | A, S, M | |

주) 운전방법 중 A는 자동운전, S는 스케쥴운전, M은 수동운전을 의미함.

으므로 여기에서는 제어시스템 구성 요인 가운데 하드웨어부에 관해서는 논외로 한다.

이제 남은 소프트웨어부는 여러 가지 상황에 따른 운영전략에 따라 작성되어야 하는 알고리즘부분으로서 비상사태, FTMS와의 연계, 정상상태의 운전 및 설비간의 연동운전 등 많은 사항들이 고려되어야 하는 부분이다.

그러나 FTMS와의 연계 문제는 고속도로의 운영 및 관리에 대한 전반을 다루어야하는 문제이므로 이 또한 논외로 하며, 터널내부에 설치되는 설비들 가운데 제어알고리즘이 가장 복잡하고 현재까지도 그 제어방법 및 운전기준이 확립되지 않은 환기설비를 중심으로 비상사태 발생 요인 가운데 터널 내 화재발생의 상황 및 정상상태 제어방법에 대하여 논하기로 한다.

## ■ 터널 내 화재 발생시 설비 제어

화재와 관련된 연소과정의 구성요소는 화염과 불기둥 및 연소생성물 즉 연기로 구분할 수 있다.

연소가 진행됨에 따라 고온의 연소가스는 자연대류에 의해 위로 상승하게 되며, 뒤를 이어 주위의 공기가 그 자리를 채우면서 유입됨과 동시에 산화물질 또는 연료증기와 혼합되게 된다. 이러한 과정에서 주위의 공기에 의해 공급되는 산소와 가연성 증기의 혼합에 의한 산화작용으로 에너지가 열과 빛으로 방출되며, 이때 방출된 에너지 가운데 대부분은 연소영역 내의 가스 및 입자에 흡수되어 가스 및 입자들의 온도가 상승하게 된다. 온도가 크게 상승된 연소가스는 다시 부력에 의해 윗방향으로 상승하고 다시 주위의 공기를 유입시키면서 불기둥을 형성하게 된다.

따라서 화염이 성장함에 따라 부력에 의

한 연소가스의 상승작용은 더욱 활발해지며, 이로 인해 화재발생지점 주변의 기류속도도 점차 증가하여 연소에 필요한 산소가 원활하게 공급된다.

이러한 화재가 기류유동이 거의 없는 터널 내부에서 발생했을 경우 초기 점화단계에서 발생된 연기는 터널의 상층부에 충돌하게되고 가스는 상층부의 벽면을 따라 두 방향으로 나누어져 확산하게 될 것이다.

터널의 경우 입구와 출구가 모두 마련되어 있으므로 이렇게 확산된 연기는 입출구 모든 방향으로 방출되어야하나 이렇게되면 연소에 필요한 산소의 공급이 중단되어 화재가 진행되지 않으므로 입출구 주변의 기류상황에 의해 기류유동에 필요한 에너지가 적게 소모되는 어느 한방향으로 기류가 형성되며 이후 입구든 출구든 한 방향에서는 유입이 다른 한방향에서는 연기의 배출이 이루어지는 유동장을 형성하게 된다. 이러한 기류의 영향으로 터널 상부에 설치된 설비들은 일차적인 손상을 입게되며, 초기 기류의 방향을 어느쪽으로 유도하는가에 따라 터널 내부에 잔존하는 피난자들의 인명 및 설비들의 피해정도가 좌우되게 된다.

화재의 확산에 의해 기류유동의 속도는 앞서 설명한 바와 같이 화염이 성장함에 따라 급격하게 상승하게 된다. 이렇듯 유입되는 기류의 속도가 증가하게되면 배출되는 연기 또한 이 영향을 받아 고온의 연소가스가 점차 바닥면을 따라 이동하게 되며 이러한 현상을 코안다효과(Coanda effect)라고 한다. 이러한 코안다 효과로 인해 연소가스가 배출되는 방향의 노면의 온도는 급격하게 상승되어 노면의 파손과 터널 벽면의 손상 등 이차적인 피해를 입히게 된다.

만일 터널 내부에 수직환기갱이 설치되어 있을 경우 고온의 연소가스인 연기는 그 부력에 의하여 유동하는 데에 에너지가 적게 소모되는 수직환기갱을 통해 위로 분출하게 될 것이며 이러한 현상을 연돌효과(Chimney effect)라고 한다.

이 연돌효과는 외부 공기유입 작용을 더욱 가속화하여 화재의 진행을 더욱 빠르게 할 수 있으며, 수직환기갱의 위치에 따라 코안다 효과와 함께 화재의 확산을 가속화할 수 있다. 이렇게 두가지 효과의 상승작용에 의해 화재가 더욱 가속화되는 현상을 트렌치효과(Trench effect)라고 하며, 이는 지하공간의 화재 진행에 있어 매우 중요한 현상을 설명하고 있다.

따라서 터널 내부에서 수직환기갱을 어느 위치에 설치하는가하는 문제는 방재 및 정상상태 모두 터널 환기시설의 제어 및 운전에 중요한 영향을 미치는 인자이며, 효과적인 시설의 운전 및 비상사태 발생시 그 피해를 최소화하기 위해 터널을 몇 개의 구획으로 분할하여 설비를 제어하는 방안도 검토되어야 할 것이다.

또한 인간이 초속 2m/s이상의 기류유동에 노출되었을 때 보행에 불편을 느끼기 시작하며, 4m/s이상의 기류유동에서는 허리가 굽혀지기 시작하는 것으로 보고되고 있다. 또한 6m/s이상의 기류유동에서는 눈을 뜨기에 불편함을 느끼게 되므로 비상사태 발생시 주변상황을 판단하는 데에 장애를 느끼게 된다.

따라서 터널 내부에 화재가 발생했을 경우에는 터널 내부의 기류속도를 2m/s정도로 유지해야하나 평상시 터널 내부 기류유동 속도가 4~7m/s로 유지되고 있음을 감안하면, 이를 감속하기 위해 평시 운전하던 환기시설의 용량보다 방재용 환기시설의 용량이 더욱 커질 수 있다. 이러한 이유로 방재용 환기시설을 설계할 때 최소의 초기 투자비로 비상시 최대의 효과를 거두기 위해서는 앞서 설명한 화재의 진행상황에 따른 대처 시나리오

의 설정에 의해 터널 내 비상시 기류의 임계 속도를 유지하는 데에 최대로 허용할 수 있는 시간을 설정하는 것이 중요하다.

화재 발생 초기의 대처 시나리오가 충실할수록 방재설비 용량을 결정하는 기준 발열량의 설정값이 낮아져 방재설비에 소요되는 초기 투자비를 절감할 수 있을 뿐 만 아니라 초기진압에 의한 2차 피해의 감소 및 가장 중요한 인명피해도 감소시킬 수 있기 때문에 터널의 방재시스템 구축에는 비상사태 발생 초기의 대처시나리오 마련에 의한 설비의 연동제어계획 수립이 무엇보다 중요하다는 것을 다시 한번 강조하는 바이다.

## ■ 정상운영 상태 하에서 설비 제어

터널의 지연-천이계 특성을 고려할 만한 기초자료가 부족한 관계로 국내 터널의 환기시설은 터널의 특성에 관계없이 일률적으로 시간대별 제어계획을 수립하여 운전하는 스케쥴제어나, 현재 터널의 상태만을 기준으로 운전하는 Feedback제어를 하여왔다.

이 절에서는 지금까지의 시간대별 운전방식이나 현재 터널의 상태 측정값에만 의존하던 기존의 방식을 탈피하여 터널의 설계에 사용되는 각종 인자 및 터널의 특성을 고려한 운전방안을 제시함으로써 터널 환기시설의 제어뿐만 아니라 설계에도 직접 적용할 수 있는 자료를 확보할 수 있는 기틀을 마련하고자 한다.

터널은 동일 차량이 동일 속도로 통과하더라도 터널의 구배, 표고 및 길이 등의 위치적·기하학적 조건에 의해 통과 차량으로부터 배출되는 오염물질량이 다르며, 터널 내부의 기류유동 또한 터널을 통과하는 차량에 의해 발생된 유동이 정상상태를 유지하기 전에 뒤를 이어 통과하는 다른 차량에 의해 새로운 기류유동이 형성되는 천이유동의 연속이다. 또한 이러한 유동은 터널 입출구의 외부기류상태에 영향을 받으며, 터널 내부의 오염농도 또한 터널 통과차량으로부터 배출된 오염물질 확산 및 환기시설의 운전에 따른 희석에 상당한 시간지연을 가지고 있어 빠른 응답특성을 만족시키는 데에 주안점을 두었던 전형적인 제어방법으로는 제어성능을 만족시키기에 부적합한 지연-천이계의 독특한 시스템이다.

터널환기시설을 Feedback 제어만으로 운전할 경우 지연계의 특성을 갖는 터널의 물리적 특성으로 인하여 헌팅현상이 발생하게 되고 이러한 현상은 결국 터널의 적정환경 유지 불가 및 환기시설의 운전에 소요되는 에너지 비용의 상승을 초래하게 된다.

선진 외국의 경우 이러한 현상을 최소화하기 위하여 Feed-forward 제어뿐 만 아니라 그간 축적된 자료를 바탕으로 Fuzzy 및 인공지능을 이용한 제어기법을 도입하고 있다.

국내에 환기설비의 제어기법이 정착되지 못한 근본 이유는 상기 요인들 뿐 만 아니라

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

등의 기본적인 사항들이 주요 원인으로 분석되며, 이들을 해결할 수 있는 제어알고리즘의 수립 및 운영방법의 도입에 초점이 맞추어져야 할 것으로 생각한다.

이들 사항 가운데 설계 및 운전에 있어 그 파급효과가 가장 클 것으로 생각되는 사항은 차종별 오염물질 배출량 기초자료의 획득이다. 물론 여기에는 현재보다 더 나은 운전환경을 제공할 수 있는 운전을 수행하면서 기초자료를 수집 분석할 수 있는 기능이 포함되어야 한다는 전제 조건이 있다.

또한 여기에 지금까지 환기시설로 사용하지 않았던 집진기나 수직환기갱 등에 대한

제어방법도 동시에 확보되어야 한다는 부담이 있다.

스케쥴제어나 Fuzzy 및 인공지능을 이용한 제어는 그간에 많은 운전자료들이 축적되어 있어야 하므로 기초자료가 부족한 국내 실정으로는 아직 도입하기 이른 제어방법들로 판단된다.

따라서 현재의 Feedback 제어와 일종의 예측제어 개념인 Feed-forward 제어기법을 도입하는 것에 대해 고찰하기로 한다.

Feedback 제어는 터널의 현재 측정된 오염농도와 가시도에 따라 요구되는 오염농도 및 가시도를 만족시키기 위해 가동해야할 환기시설의 운전대수 및 종류를 선정하는 방법이다. 여기에는 제어변수와 입력변수가 모두 CO농도와 가시도 뿐이기 때문에 오염농도의 희석에 요구되는 지연시간에 대해서는 속수 무책일 뿐만 아니라 그것도 이 두 변수 중 대부분 CO농도 하나에 대해서만 자동제어를 하고 있는 실정이다.

그러나 TGMS가 구축되면 인접터널을 통과한 차량의 종류 및 대수, 평균주행속도 등을 통하여 향후 당해 터널에 가해질 부하와 시기를 예측할 수 있으며, 인접터널의 환기시설 운전에 따른 제어변수의 변화추이를 통하여 지연시간에 대한 정보를 간접적으로 예측할 수 있다.

따라서 TGMS 관리센터에서는 이러한 변화를 정량화할 수 있는 알고리즘이 개발되어 탑재되어야 하며, 전술한 바와 같이 동일한 차량이라 할지라도 터널의 지형적·위치적 특성에 따라 차량으로부터 배출되는 오염물질량이 다르므로 개별터널에서도 이들에 대한 자료를 수집하여 자체적으로 분석하고 제어에 활용할 수 있도록 하는 알고리즘이 포함되어야 할 것이다.

이렇게 함으로써 개별터널에서는 그 터널을 통과하는 차량/차종/속도에 따른 오염물질 배출량의 기초자료 및 확산에 소요되는 지연시간 자료를 확보하고 TGMS 관리센터에서는 이를 바탕으로 표고, 구배 등 터널의 형상 및 위치에 따른 영향을 분석하여 설계에 반영될 수 있도록 해야할 것이다.

또한 현재 조명설비는 측정된 조도에 따라 5단계(주간 맑음, 주간 흐림, 일몰일출조명, 야간조명, 심야조명) 또는 3단계로 대수제어하고 있으나, 인간공학적 견지에서 조도-매연농도-가시도에 대한 기초연구를 수행하여 빛의 개념이 아닌 인간의 시야에 초점을 맞춘 환기설비와의 연동운영이 요구된다.

본 고에서는 TGMS가 구축됨에 따라 기존의 단일 터널관리 시에 적용하였던 제어방법들로는 운영이 불가능하거나 새로이 추가되어야 할 제어 개념에 대하여 고찰하였다.

이러한 고찰 과정을 통하여 향후 연구되어야 할 분야를 지적하였고 통합제어알고리즘 수립 시에 고려되어야 할 사항들에 대하여 검토하였으며, TGMS에 따른 설비의 통합에 있어 그 알고리즘이 가장 복잡한 환기시설의 제어를 중심으로 운전 알고리즘에 내재되어 있던 문제점들의 해결방안과 국내 차량의 오염물질 배출량 등의 기초자료를 확보할 수 있는 환기시설의 운전전략을 제시하였다.

모쪼록 본 고에서 검토한 내용이 TGMS 구축에 따른 터널설비의 통합제어에 도움이 되기를 바란다.