

네트워크형 복층 터널 환기 시스템 설계 인자

박상훈, 이승준, 박요한, 김세민, 노장훈, 유용호, 김 진*

Design Factors for the Ventilation System of a Networked Double-deck Tunnel

Sang Hoon Park, Seung Jun Lee, Yo Han Park, Se Min Kim,
Jang Hoon Roh, Yong Ho Yoo, Jin Kim*

Abstract For effective utilization of downtown area, many studies about underground have been performed around the world, and double-deck tunnel have being operated in USA, Europe and China, etc. (A86 East Duplex in France, M30 tunnel project in Spain, SR-99 in seattle, USA, Yangtze river tunnel in China) In Korea, the research about network type double-deck tunnel in deep underground space is in progress to solve the traffic jam and secure the ground space. In this study, a number of factors required for double-deck tunnel in deep underground are analyzed through the existing ventilation design outline and unique ventilation design factors for network type double-deck tunnel are established by reviewing design cases of overseas double-deck tunnel.

Key words Networked tunnel, Ventilation Design factor, Double-deck road tunnel, Deep underground, NVP(Natural Ventilation Pressure)

초 록 전 세계적으로 도심지 공간의 효율적인 활용을 위한 지하 공간 이용방안에 대해 연구가 진행되어 왔고 미국, 유럽, 중국 등이 복층터널을 건설하여 운영 중이다. 대표적으로, 프랑스의 A86 East, 말레이시아 SMART 터널, 스페인 M30 프로젝트, 미국 시애틀 SR99, 중국 상하이 양쯔강 터널 등을 예로 들 수 있다. 이에 따라서 국내에서도 교통집중을 해소하고 지상 공간 확보를 위해 대심도에 위치하는 네트워크형 복층도로터널 운영에 대한 연구가 진행되고 있다. 그러므로 본 연구에서는 기존에 사용하고 있는 일반적인 도로터널의 환기설계 아웃라인의 리뷰를 통해 대심도 복층터널에 추가적으로 필요한 다양한 요소들을 분석해보고, 해외 복층 도로터널 설계사례들을 자세히 검토하여 환기방식과 종류에 따른 환기설계인자분석을 통해 네트워크형 복층 도로터널에 적용 가능한 설계인자를 도출해내고 특징적인 환기설계인자를 새롭게 정립해 본다.

핵심어 네트워크형 터널, 환기 설계 인자, 복층 도로 터널, 대심도, 자연환기력

1. 서 론

최근 국내의 차량 통행량 및 교통 수요량 증가로 인해 도로 교통 기반 시설이 발전하고 있으나, 늘어난 차

량에 비해 충분한 지상 공간의 확보가 어려워지고 있다. 그러한 이유로 지하 공간의 개발과 활용에 대한 관심이 증가하면서 지하 고속도로의 운영에 대한 연구가 다양하게 진행되고 있다¹⁾. 이미 선진국에서는 교통집중을 해소하고 지상녹지공간을 확보하기 위해 지하도로 건설을 확대하고 있으나, 국내는 대심도 지하도로에 대한 설계가 초기 연구단계에 그치고 있으며, 관련 핵심기술들에 대한 검토 역시 초기단계에 그치고 있다²⁾.

이에 따라서 도심지에 위치할 수 있는 대심도 지하도로의 운영 및 설계방안은 지하공간의 재창출이라는 목표아래 매우 활발하게 전 세계적으로 꾸준한 연구가 이

Received: Jan. 5, 2016

Revised: Jan. 20, 2016

Accepted: Jan. 20, 2016

***Corresponding Author:** Jin Kim

Tel) +82328607558, Fax) +82328601425

E-Mail) jinkim@inha.ac.kr

Dept. of Energy Resources Engineering, Inha University 100 inharo, Nam-gu, Incheon

루어지고 있는 실정이다. 국내에서도 이러한 대심도 지하 공간 활용을 위하여 지난 2006년 ‘U-Smart way 프로젝트’ 기본계획을 발표하였고, 기존에 운행 중인 ‘서부간선도로’의 지하화 설계를 시작으로 세계 최초로 네트워크를 가지는 복층 도로터널의 운영을 위한 사전 연구가 시작되었다³⁾. 네트워크형 복층 도로터널은 기존 도로터널에 비해 여러 장점들을 가지고 있다. 복층 도로터널은 지상 공간의 영향을 최소화하며, 지하 공간 활용 극대화, 경제성 증진의 이유로 도심지 터널 계획 시 적용성이 우수한 점이 부각되었으며³⁾, 전체 통행거리를 단축하며 오염 물질의 배출 총량의 감소를 기대할 수 있는 친환경적 효과까지 가지고 있다⁴⁾. 이러한 우수성으로 인해 해외에서는 이미 성공적인 복층 도로터널이 운영 중이며, 대표적인 예로 프랑스의 A86 East 터널, 말레이시아의 SMART 터널, 스페인의 M30 프로젝트, 미국의 SR99, 중국의 상하이 양쯔강 터널 등이 있다.

이러한 복층으로 건설된 도로터널들은 아직 전 세계적으로 시도되지 않은 네트워크형 복층 도로터널에 존재하는 분기부 및 합류부에서의 공기 유동에 관한 연구 사례가 전무하기 때문에 새로운 환기설계 기준을 정립할 기술 개발이 필요하다. 일반적인 도로터널에서는 보통 소요환기량을 측정하는데 있어서 마찰손실계수와 충격손실계수를 반영하는데, 네트워크형 복층 도로터널에서 존재하는 분기부 및 합류부에서는 일반적인 도로터널에 비해 더 크게 발생하는 충격손실계수에 대한 반영이 이뤄져야 할 것이다.

또한 기존의 도로터널과는 다르게 대심도에 위치하는 복층 도로터널의 경우 자연환기력에 대한 검토 역시 필요하다. 일반적인 도로터널에서의 소요 환기량을 결정하는 데 있어서 자연환기력 및 교통환기력은 큰 부분을 차지하는데 지하 대심도에 위치하는 복층 도로터널에서는 기존의 도로터널에 비해 자연환기력이 더 크게 발생하기 때문에 더욱 중요하다.

그러므로 본 연구를 통해 기존에 사용하고 있는 도로터널 환기설계 아웃라인을 통해 네트워크형 복층 도로터널 기준으로 검토하여 추가적으로 필요한 다양한 환기설계요인들을 분석하고, 앞서 언급한 해외의 성공적인 복층 도로터널 환기설계 사례들을 면밀히 검토하여 환기 방식과 종류, 그리고 환기설계인자 도출을 통해 향후 국내에 건설될 네트워크형 복층 도로터널의 환기 설계 지침을 마련하고자 선행 연구를 수행한다.

2. 환기 시스템 설계 아웃 라인

이번 연구를 통해 알아볼 대심도 네트워크형 복층

도로터널은 기존의 도심지에서 발생하는 교통정체 문제를 해결하기 위해 계획되었다. 도로터널의 환기 시스템을 설계하기 위해서는 먼저 대체적이고 규칙적인 아웃라인을 설정하여 각 단계에 맞는 설계방법들을 검토하며 실시하게 된다. 일반적인 도로터널과는 다르게 지하 대심도에 위치하는 네트워크형 복층 도로터널은 상·하층부 구조로 설계될 뿐만 아니라 네트워크형 구조(분기부·합류부)를 가지기 때문에 교통량 및 교통속도가 변할 수 있으며, 이에 따라 오염 물질 농도가 크게 차이날 수 있으므로 기존에 사용하던 환기 시스템 아웃라인을 따르기에는 한계가 있다. 그러므로 복층 도로터널의 환기설계를 위한 새로운 아웃라인이 필요할 것이다. 그러기 위해서는 먼저 기존의 일반적인 도로터널에서 사용하는 환기설계 아웃라인에 대한 검토가 이루어져야 한다. 아래 Fig. 1은 일반적인 도로터널의 환기설계 아웃라인에 대한 설명을 나타내고 있다.

일반적인 도로터널 환기설계는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 먼저 환기 기준을 설정하고, 국가별 관련 기준을 검토한 후 차량 정보 추정을 통해 어떠한 환기 시설을 계획할지 설정하고, 환기 설계를 검토하는 과정을 거쳐야 한다. 먼저 환기 기준 설정을 위해서는 일반적인 상황에서 차량 주행상태를 정상주행 상태와 교통 체증 상태로 구분하여 차종별 오염물질 배출량을 적용한 환기기준을 설정하고, 화재와 같은 비상상태에서 발생하는 연기를 제어할 수 있는 환기 기준을 각각 설정해야 한다.

대략적 환기 기준이 설정된다면 각 국가별로 참고하고 있는 규정들을 면밀히 검토하여 환기 기준을 설정하게 되는데, 대부분의 국가에서는 ‘세계도로협회 WRA (PIARC)’ 이나 ‘독일 RABT(Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln)’, ‘미국 NFPA502 (National Fire Protection Association)’에서 제시된 기준들을 사용하는 경우가 많다.

다음 단계로는 관련 규정 및 지침들을 참고하여 차량 정보를 추정해야 한다. 이 단계는 주로 차종별 오염물질 배출량, 차종구성, 차종항력계수 및 등가저항면적을 토대로 예상되는 차량의 구성과 이에 따른 교통환기력을 추정하기 위한 절차이며, 차량 정보 추정을 통

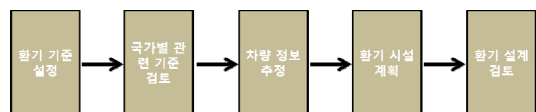


Fig. 1. Road Tunnel Ventilation Design Outline

해 기준환기량이 결정되므로 최대한 상세하게 설계해야 한다. 차량 정보 추정에 따라 기준환기량이 결정되면, 터널의 구배 및 표준높이에 대한 보정을 통해 정확한 소요환기량이 산출되어야 한다. 일반적인 도로터널에서의 소요환기량을 충족할 수 있는 자연환기력과 교통환기력에 대한 검토가 이뤄져야 한다. 자연환기력은 기계환기력을 사용하지 않을 때 터널 내에 발생하는 환기력으로 교통환기력과 자연저항풍력의 차이이며⁸⁾, 교통환기력은 도로터널 내 주행하는 차량의 피스톤효과에 의해 발생하는 환기력이다. 자연환기력과 교통환기력만으로 소요환기량을 충족시키지 못할 경우 기계환기력을 사용해야 한다.

차량 정보를 정확히 추정하고 소요환기량에 대한 검토가 이뤄진 다음에는 환기 시설의 계획 및 검토가 실행되어야 한다. 이 단계에서는 환기방법의 선정 및 선정된 환기방법을 적용하기 위한 기계 환기시설의 설계를 실시한다. 예를 들어, 도로터널 기계환기방식 중 하나인 종류식 환기방식을 채택하여 제트팬의 활용에 중점을 둔 경우에는 운영비용과 효율성을 고려하여 제트팬의 소요대수 및 설치 간격 등을 설계하고, 횡류식 환기방식을 채택하는 경우에는 연결 덕트의 압력손실 및 송풍기의 풍량·풍압을 고려하여 설계를 실시한다.

환기시설 설계가 완료되면 정상주행상태 및 비상상태에서의 환기설비 운영계획을 수립하여 설계된 환기시설들을 효과적으로 활용할 수 있는 방안을 계획해야 한다. 이러한 일련의 모든 과정들을 거쳐 도로터널 환기설계가 마무리 되면 최종 검토를 통해 시공 단계로 넘어가게 된다.

지금까지 일반적인 도로터널에서의 환기설계 아웃라인에 대해 검토하였다. 이러한 기존의 환기기준 설정 방법은 복층 도로터널에서도 적용될 수 있지만, 상·하층부에서 연결덕트가 분리되어 운영되고, 하층부로 급기된 공기가 상층부로 배기되는 횡류식 환기시스템을 갖는 복층 도로터널이 존재할 수 있으므로 환기 기준 설정에 있어서 환기시스템의 상·하층 분리여부에 따른 소요환기량 산정 및 교통량을 추정해야 한다. 또한 복층 도로터널 내 기류와 환기 방식에 따라 소요환기량 및 교통량, 오염물질 배출량이 달라질 수 있기 때문에 이에 대한 해외 네트워크형 도로터널 사례에 대한 추가적인 분석이 필요할 것이다. 이번 연구를 통해 알아볼 네트워크형 복층 도로터널은 대심도에 위치함에 따라 일반적인 도로터널에 비해 더 큰 자연환기력이 발생할 수 있다. 또한 복층으로 설계되고 네트워크형의 특징적인 구조(합류부·분기부)로 인해 충격손실에 의한 환기량 변화가 나타날 수 있으나, 기존의 도로터널

환기 기준에서는 이에 대한 언급이 없기 때문에 설계 과정에서 한계가 존재할 수 있으므로 환기설계 아웃라인에 따라 국가별 관련기준 검토 시 이와 같은 내용의 반영이 이뤄져야 할 것이다.

네트워크형 복층 도로터널은 대체적으로 총연장이 2 km 보다 길기 때문에 기존의 장대 도로터널과 같이 횡류식 환기 방식과 대 배기구 방식을 적용한 경우가 대부분이다⁵⁾. 그러나 일반적인 도로터널과는 다르게 복층 도로터널의 경우 상층부와 하층부에 각각 다른 기계환기방식을 조합하여 운영하기도 한다⁶⁾. 이렇게 환기 방식이 정해지고 나면 네트워크형 복층 도로터널의 자연환기력 및 교통 환기력을 검토해야 한다. 일반적인 도로터널에서 자연환기력에 영향을 주는 주요 변수로는 터널 내·외부의 고도와 온도 차이에 의한 공기 밀도 차이(굴뚝효과)와 터널 입·출구의 기압차 그리고 터널 양단에 작용하는 외부 풍압 차이로 크게 세 가지가 있다⁷⁾. 대심도에 위치하는 네트워크형 복층 도로터널은 터널 내·외부의 고도와 온도 차이에 의한 공기 밀도 차이가 기존의 도로터널에 비해 크게 나타나기 때문에 굴뚝효과에 의한 자연환기력이 중요한 변수이다. 하지만 네트워크형 복층 도로터널은 도심지에 위치하는 특성상 대심도에 건설되기 때문에 지형 및 풍압에 의한 자연환기력은 고려하지 않아도 될 것이다. 따라서 복층 도로터널의 환기 설계 단계에서 자연환기력을 추정하기 위해서는 터널 양단에 작용하는 풍압효과를 제거한 터널 내·외부의 고도와 온도 차이에 의한 공기 밀도 차이와 터널 입·출구부의 기압차로 인한 자연환기력을 계산하여 보다 더 정확한 자연환기력을 추정해야 한다.

앞서 언급한 대부분의 해외 복층 도로터널은 이러한 아웃라인을 바탕으로 환기설계를 진행하였으나, 이번 연구를 통해 설계할 네트워크형 복층 도로터널에서는 합류부·분기부에서 발생하는 충격손실과 기존의 도로터널과는 다른 자연환기력에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다. 그에 앞서 현재 해외 복층 도로터널 설계 사례를 통해 어떤 환기 방식을 운영하고 있는지에 대해 좀 더 자세히 분석해보고, 향후 건설될 대심도 복층 도로터널 환기설계인자에 반영할 것인가 알아본다.

3. 해외 복층 터널 설계사례

해외 복층 도로터널에서는 주로 우수한 환기성과 화재 시 즉시 배연이 가능한 횡류식 환기방식이 채택되고 있으며, 주행하는 차량에서 발생하는 교통환기력을 이용하며 경제적이고 유지·보수에 수월한 수직구 종류식 환기방식도 적용되고 있다. 현재 국내에는 복층

도로터널 운영사례가 전무하고, 그에 따라 자료수집에도 어려움이 존재하기 때문에 해외 복층 도로터널 설계사례를 통해 향후 국내에 건설될 대심도 복층 도로터널의 환기방식과 환기설계인자를 결정해서 원활한 교통 환경 조성 및 사고 예방에 중점을 둔다.

첫 번째로 프랑스의 A86 East 터널(Duplex)은 총연장 10.5 km의 소형차 전용 복층 도로터널이다. 아래 Fig. 2에서 보는 바와 같이 환기방식은 수직구에 설치된 대형 축류팬에서 덕트로 공기를 급배기하여 횡방향의 공기흐름을 만드는 횡류식 환기방식을 사용한다. 프랑스 A86 East 터널은 각 층에 횡류식 환기방식이 적용되고 있으며, 상층부의 경우 오른쪽 덕트로부터 신선한 공기가 급기된 후 오염된 공기는 왼쪽의 덕트로 배출되는 방식이다. 하층부의 경우에는 오른쪽에 설치된 덕트로부터 신선한 공기가 급기되어 왼쪽 통로를 통하여 바닥면에 설치된 덕트로 오염된 공기가 배출된다.

도로터널 기계환기방식 중 하나인 횡류식 환기방식에서 가장 중요한 설계 인자로는 송풍기의 풍량·풍압 결정과 급배기 덕트에서 공급 또는 흡입되는 공기량이 덕트 전 연장에서 균일하게 되도록 설계하는 것이고 이를 위해서는 차도 내의 압력분포, 덕트의 제원 및 배연포트의 위치, 크기, 형상 등을 고려해 설계해야 한다.

프랑스의 A86 East 터널(Duplex)은 복층구조로 설계되었고, 횡류식 환기방식을 사용하기 때문에 차도 내 풍속에 대한 영향을 고려하지 않는다. 그러나 총연장이 10.5 km로 일반적인 도로터널에 비해 긴 연장으로 터널 내 덕트의 길이가 길어지기 때문에 차도 내 정압 변동에 의한 환기부족현상이 일어날 수 있으며, 마찰손실 계수의 변동에 의한 환기 불균일성이 발생할 수 있다. 그러므로 터널 내 연결덕트의 분기부·합류부의 존재로 인해 발생하는 압력손실, 덕트전체압, 필요말단압력 등의 환기설계인자를 네트워크형 복층도로터널에 반영할

수 있을 것이다. 지금까지 건설된 해외 여러 복층터널 중 가장 우수하다 평가받는 프랑스 A86 East 터널에서 사용된 환기설계인자들은 아직 국내에서 사용된 사례가 전무하며, 최적 배연 풍량에 대한 기준이 명확하게 정립되지 못하고 있는 실정이기 때문에 프랑스 A86 East 터널에 사용된 환기방식을 면밀히 검토하고 연구하여 대심도 복층 도로터널에 맞는 환기설계인자를 도출하기 위한 노력이 필요하다.

두 번째로 말레이시아의 SMART 터널은 총연장 9.7 km로 건설되었고, 터널 내부에 약 3 km의 소형차 전용 복층 도로터널을 건설하여 운영 중이다. Fig. 3과 같이 SMART터널은 우기 시에 하천 범람에 따른 피해를 방지하기 위해 총 3단계의 운영모드를 가지고 있는데, 1단계는 폭풍이나 폭우가 없는 일반적인 상태에서 수로의 운영이 없는 정상 운영을 나타낸 모습이며, 2단계는 일반적인 강우 조건에서 도로터널 하층부를 수로로 운영하지만 도로터널은 정상운영을 하는 모습을 나타내고 있으며, 제 3단계에서는 강한 폭우 시 수로를 완전 개방하여 도로터널 구간을 완전 폐쇄하는 모습을 나타내고 있다. SMART 터널은 4개의 환기구(6개의 급·배기 송풍기)로 운영되고 있으며, 200 m마다 상·하층부 연결통로와 1 km 간격으로 대피로가 설치되어 있다⁴⁾.

Fig. 4에서 보는 바와 같이 환기방식은 기본적으로 종 방향의 공기흐름으로 환기를 진행하는 종류식 환기방식을 적용하지만 교통환기력만으로 환기가 어려운 상황에서는 대형 제트기류 장치를 이용해 공기를 급기하는 삭칼드(Saccardo) 환기방식을 적용한다. 삭칼드(Saccardo) 환기방식을 적용하여 운영 중인 SMART 터널의 환기 설계인자로는 급배기 노즐의 송압계수가 필요하다. 제트 기류와 터널 축 방향을 이루는 각도 역시 고려해야 하며, 수직구에 설치된 송풍기의 소요풍압을

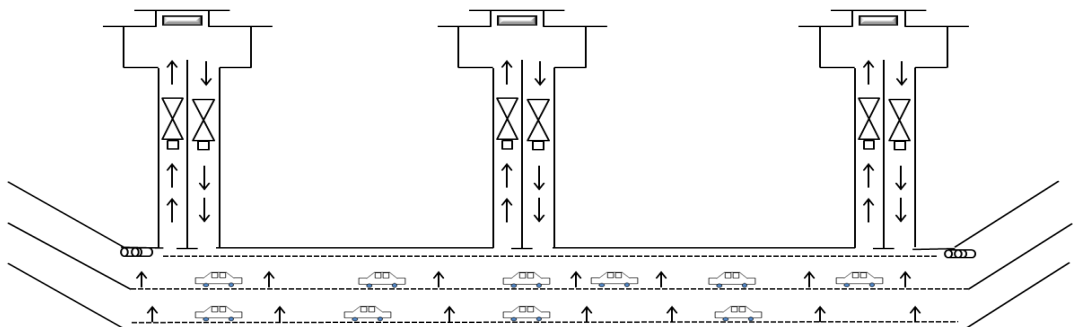


Fig. 2. A86 East Tunnel(Duplex) Ventilation System

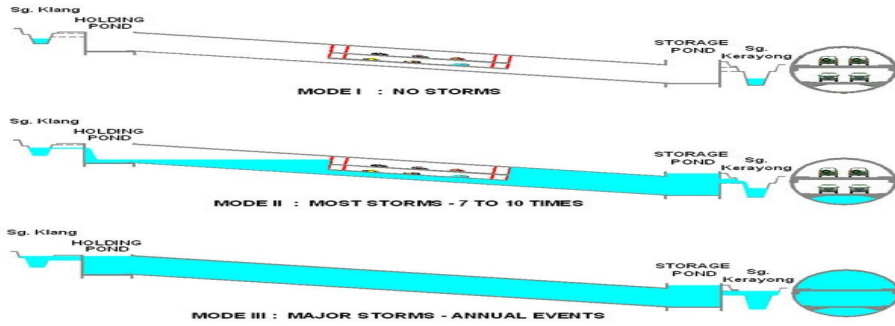


Fig. 3. Malaysia SMART Tunnel Operational Mode (modified from visualnews.com/smart-tunnel)

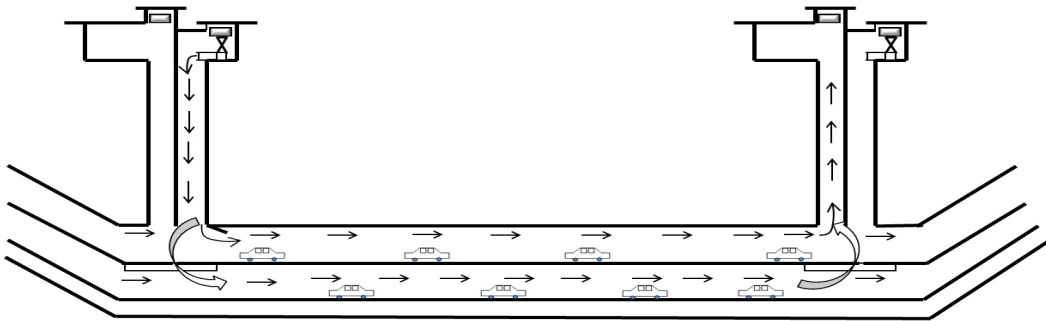


Fig. 4. Malaysia SMART Tunnel Ventilation System

선정하는 것이 중요하다. 또한 터널 입·출구부에 장착되어 공기흐름을 유발시키는 제트팬의 소요대수산정 역시 중요한 설계인자이다.

말레이시아의 SMART 터널은 복층터널로서 교통환기력을 유용하게 이용할 수 있는 삭칼드(Saccardo) 환기방식을 적용하여 운영하기 때문에 터널 내 공기밀도, 차량 등가저항면적, 차도 내 풍속 등을 설계인자로 고려해야 한다. 또한 대형 제트기류 장치가 터널 입구 측 환기소에 설치되기 때문에 터널입구손실계수와 차도마찰손실계수 역시 네트워크형 복층도로터널 설계에 반영되어야 할 것이다.

세 번째로 스페인의 M30 프로젝트는 총시공연장 99.5 km 중 도로터널이 55.7 km에 달하는 세계 최장의 도심지 터널 프로젝트로 전 차중 운행가능하게 설계되었으며 복층터널로 운영되는 구간의 경우 상층부는 높이 3.5 m의 3차선 도로로, 하층부는 비상차선 및 환기 풍도로 운영되고 있다¹⁶⁾. Fig. 5는 M30 복층도로터널의 기본적인 환기방식을 설명하는 그림이다. 환기 방식은 주로 터널 하층부에서 덕트를 통해 급기하고, 터널 내 오염된 공기를 상층부에 위치한 덕트를 통해

배기시켜주는 횡류식 환기 방식이 적용되고 있으며, 추가적으로 수직구를 설치하여 운영되고 있다. M30 복층도로터널은 여러 개의 터널이 구간별로 존재하기 때문에 각각 다른 환기방식(제트팬, 전기집진기)이 운영되고 있다.

M30 복층도로터널의 주요 환기설계인자로는 덕트에서 급·배기되는 공기량과 송풍기의 풍량, 설계 및 수직구의 설치위치 등이 있지만, 터널 연장이 길고 여러 터널들로 나누어지기 때문에 횡류식 환기방식이 힘든 구간에서는 제트팬을 이용한 종류식 환기방식을 사용하기도 한다. 이 구간의 설계 인자로는 터널 입·출구에서 발생하는 충격 손실계수와 벽면 마찰계수 그리고 제트팬의 설치 위치 및 간격 등을 고려해 설계하여야 한다.

이번 연구를 통해 알아본 스페인 마드리드 M30 프로젝트는 여러 개의 터널로 이루어져 있으며, 하나의 환기방식이 아닌 각 터널마다 구간 특성에 적합한 환기방식이 적용되고 있으므로 다양한 설계인자에 대한 연구가 필요하다. 먼저 횡류식 환기방식의 경우 복층터널로 건설되었기 때문에 프랑스 A86 East 터널(Duplex)

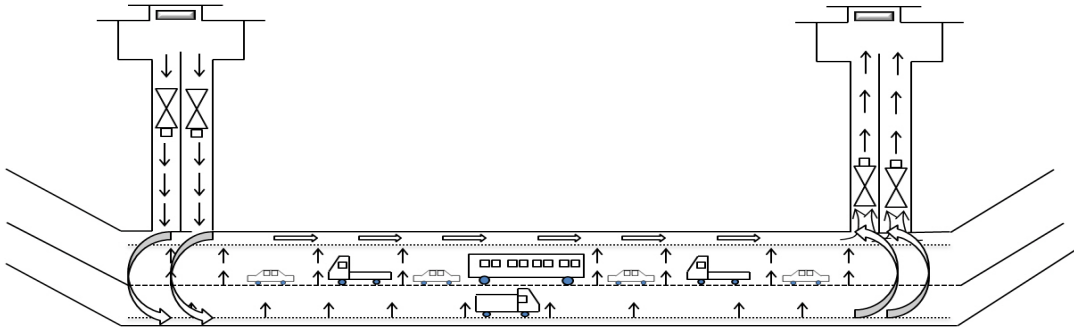


Fig. 5. Spain Madrid M30 Tunnel Ventilation System

과 마찬가지로 터널 내 연결덕트의 압력손실, 덕트 전압, 필요말단압력 등이 설계인자로 반영된다. 또한 제트팬 환기방식을 운영하는 복층도로터널 구간에서는 제트팬의 소요대수 산정이 중요한 설계인자인데, 제트팬 설치대수는 터널 벽면마찰과 터널 입·출구에 의한 압력손실, 자연환기력, 교통환기력 그리고 제트팬 설치 장소에서의 승압력 등의 인자들에 의해 산출된다. 이 중 자연환기력은 일반적인 도로터널과는 달리 대심도에 위치하는 네트워크형 복층터널 특성상 더 큰 값을 가지게 된다. 그러므로 자연환기력은 제트팬 설치간격과 총경비 그리고 소음 등과 같이 제트팬 소요대수 산정에 반영될 수 있을 것이다.

네 번째로 미국 시애틀의 Alaskan Way Viaduct SR99 터널은 1953년부터 운행되었던 고가도로를 지하 복층터널로 건설해 지진 및 자연재해에 대비하는 프로젝트를 통해 계획되었다. 터널 연장은 3.2 km의 전 차중 운행 가능한 복층 도로터널로 설계되었으며, 상층부는 남쪽을 향하는 하행선 도로이고 하층부는 북쪽을 향하는 상행선 도로이다¹⁷⁾.

아래 Fig. 6은 Alaskan Way Viaduct SR 99 터널의

기본적인 환기방식을 보여주는 그림이다. 평상시에는 교통환기력만으로 소요환기량을 충족하기 때문에 기계 환기방식을 사용하지 않지만, 교통량 급증으로 인한 상황에서는 덕트와 댐퍼를 통해 오염된 차도 내 공기를 배기시키는 배기 반회류식 환기방식을 적용하였다¹⁵⁾. 또한 터널 상·하층부의 공기 흐름의 균형을 효율적으로 관리해주는 포트가 설계되어있다¹⁷⁻¹⁸⁾.

배기 반회류식 환기방식으로 설계된 Alaskan Way Viaduct SR 99 터널의 주요 환기설계인자로는 송배풍기의 소요풍압, 연결덕트의 압력손실 및 교축 분기부의 손실계수 등이 있다. SR 99 터널은 도심지에 위치하는 특성상 터널 입·출구에서 오염공기를 배출하지 않고 환경적인 측면에서 큰 장점을 가지는 배기 반회류식 환기방식으로 설계하였으므로 배기 덕트의 정압차 및 말단동압, 필요시점압력이 주요 설계인자이다. 그러나 배기 반회류식 환기방식을 터널연장이 길고 교통량이 많은 도심지에 위치하는 복층도로터널의 환기방식으로 설계한다면, 소요환기량의 증가와 배기덕트의 단면적이 급격히 커질 수 있으므로 설계과정에서 주의해야 할 것이다.

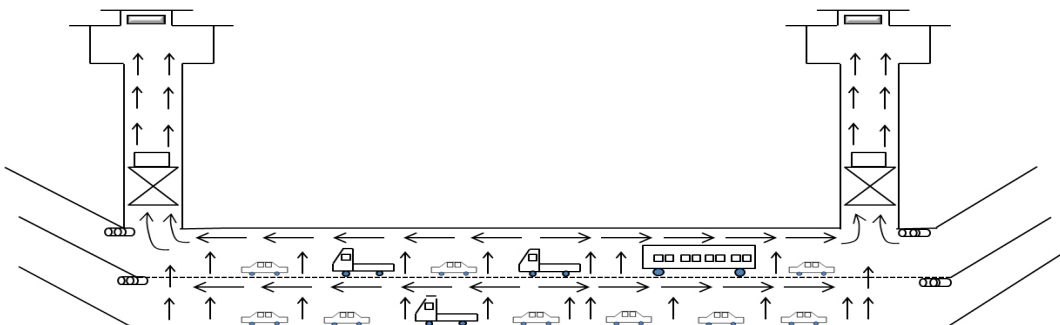


Fig. 6. Alaskan Way Viaduct SR 99 Tunnel Ventilation System

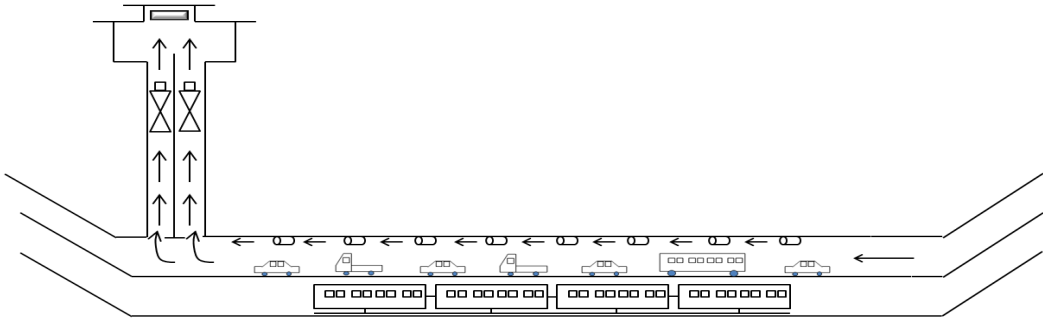


Fig. 7. Shanghai Yangtze River Tunnel Ventilation System

마지막으로 중국 상하이 양쯔강 터널·교량은 상하이 Pudong과 Chagxing Island 사이의 연장 9 km 해저터널, 그리고 Changxing Island과 Chongming Island 사이의 10.3 km 교량을 연결하는 총길이 25.5 km의 세계 최대 터널·교량이다. 상하이 양쯔강 터널의 공사를 위해 수심 10 m의 양쯔강 바닥에서 다시 10 m 밑으로 내려가 터널을 굴착하는 고난이도 공정을 통해 지난 2010년 완공되었다. 상하이 양쯔강 터널은 15.43 m로 세계 최대 직경을 가진 터널로 건설되었다. 터널 상층부에는 환기 및 방재를 위한 배기풍도와 전 차종 운행 가능한 3차선 고속도로가 설치되어 있고, 하층부에는 상하이 메트로 라인과 비상상황 발생 시 필요한 대피로가 설치되었다. 초기 설계 단계에서는 하층부 구간을 유지관리시설 및 대피도로로 적용하였으나, 추가적인 검토를 통해 환기방식의 변경 및 효율적인 단면사용을 위해 하층부에 경전철을 설치하고 피난시설을 길어깨(shoulder) 구간에 계단으로 설치하도록 변경되었다.

Fig. 7에서 보는 바와 같이 상하이 양쯔강 터널의 환기방식은 종류식 환기방식으로 운영되고 있으며, 수직구 집중배기 방식과 제트팬 환기방식을 조합하여 운영되고 있다. 터널에 설치된 제트팬은 도로상황이 혼잡할 경우에는 정상 작동하지만, 화재 발생 시 수직구에 설치된 축류팬을 가동시켜 덕트를 통해 연기를 외부로 배출할 경우 일시 중단된다. 터널 환기를 위한 수직구가 Pudong과 Chanxing Island에 설치되었고 각각 대형 환기장치와 화재 시 연기배출을 위한 축류팬이 설치되어있다¹⁹⁾. 복층 도로터널 하층부에 설치된 상하이 메트로 라인은 정상적인 운행상황에서 별다른 기계환기시설 없이 교통 환기력만으로 환기가 이뤄진다. 상하이 양쯔강 터널은 제트팬과 수직구를 조합한 환기방식을 채택하였기 때문에 환기설계인자로는 제트팬의 제트기류 속도와 면적 및 승압계수, 터널 입·출구 충격

손실계수와 벽면 마찰 손실계수, 연결덕트의 압력 손실 등이 필요하다.

중국 상하이 양쯔강 터널은 앞서 확인한 복층도로터널과는 다르게 하층부에 경전철이 운영되고 있고 상층부는 종류식 환기방식인 수직구 집중배기 환기방식과 제트팬 환기방식을 조합하여 사용하고 있기 때문에, 수직구의 설치부에서의 압력, 수직구의 마찰 및 입·출구 손실, 수직구 내의 풍속 등이 중요한 설계인자이다. 수직구 집중배기 환기방식을 사용하는 상하이 양쯔강 터널은 자연풍 및 교통량 변화에 의해 터널 입·출구 구간에 환기 불균형이 발생할 수 있기 때문에 안정적인 환기상태를 유지할 수 있는 제트팬 환기방식을 조합하여 사용하고 있다. 그동안 도로터널 환기 설계에 있어서 입구부에서의 압력손실만을 고려하여 설계하였지만, 이론상 출구부의 압력손실이 더 크기 때문에 그에 대한 반영이 이루어져야 할 것이다. 그러므로 터널 벽면 마찰과 터널 입·출구에 의한 압력손실, 자연환기력, 교통환기력, 제트팬 설치장소의 상승압력 및 수직구 설치부에서의 압력, 수직구의 마찰 및 입·출구손실 등의 설계인자들이 네트워크형 복층도로터널에 반영되어야 할 것이다.

지금까지 해외 복층 도로터널 설계사례를 통해 환기방식을 살펴본 바에 따르면, 주로 횡류식 환기 방식, 반횡류식 환기방식 또는 수직구 집중배기 환기 방식으로 운영되는 것으로 나타났다. 기존의 도로터널에서 환기 설계인자들은 주로 송풍기의 소요풍압과 덕트에서 급·배기되는 공기량, 수직구의 설치위치, 제트팬의 승압계수 등이 사용되었다. 한편, 기존의 도로터널에서 사용 가능한 환기설계인자인 송·배풍기의 용량산정, 벽면마찰과 터널 입·출구에서의 압력손실 및 덕트전체압 등은 해외 복층도로터널 사례연구를 통해 대입도에 위치하는 네트워크형 복층도로터널에도 적용 가능한 설계

인자로 나타났다. 이에 따라, 복층도로터널에서 주로 사용하는 환기방식으로 알려진 횡류식·반횡류식 환기 방식과 수직구 종류식 환기방식 그리고 대심도 건설로 인해 발생하는 자연환기력(지형, 풍압에 의한 영향을 고려하지 않음)에 대한 연구를 통해 네트워크형 복층 터널에 적용 가능한 인자를 도출해내고 특징적인 환기 설계인자를 새롭게 정립해야 할 것이다.

4. 네트워크형 복층터널 환기 설계 인자

앞서 조사한 해외 복층도로터널 환기설계 운영사례와 국내 일반도로터널 환기설계 지침서를 바탕으로 네트워크형 복층도로터널에 적용해야 하는 환기설계인자들을 정리해보고자 한다. 복층도로터널에도 일반 도로터널과 마찬가지로 다양한 환기방법이 적용되고 있음을 확인하였다. 그러므로 해외 복층도로터널에 주로 사용되는 횡류식·반횡류식 환기방식과 수직구 종류식 환기방식 그리고 자연환기력에 대한 연구를 통해 대심도 네트워크형 복층도로터널에 적용 가능한 환기설계인자가 무엇인지 도출해본다.

4.1 횡류식·반횡류식 환기방식 설계인자

횡류식 환기방식은 화재 시 배연에 우수한 장점을 가지고 있어 고가의 유지비용이 발생함에도 불구하고 복층도로터널에 널리 사용되는 환기방식 중 하나이며, 반횡류식 환기방식은 터널 갱구부에서 오염공기를 배출하지 않으므로 도심지에서 유효하게 사용되는 환기방식이다. 횡류식·반횡류식 환기방식은 종류식 환기방식과는 다르게 터널 내 덕트를 통해 공기를 급·배기하는 환기방식이기 때문에 덕트의 길이 및 단면적을 결정하는 것이 중요하다. 횡류식 환기방식이 복층도로터널에 적용되기 위해서는 상·하층부에 각각 급·배기 덕트가 설치되어야 한다. 일반적인 도로터널에서의 덕트는 터널의 하부와 상부에 각각 급·배기용으로 설치되는 경우가 대부분이지만, 복층도로터널의 경우 중간슬래브의 존재로 인해 덕트의 설치위치가 달라질 수 있다. 그러므로 덕트의 설치 위치에 따른 덕트 내 압력분포를 주요한 설계인자로 고려해야 한다. 예를 들어, 급·배기 덕트가 상·하층부의 상층부에 나란히 설치되거나 상층부의 상부와 하층부의 하부에 설치될 수도 있다. 이와 같은 경우에는 상층부의 급·배기 덕트와 하층부의 급·배기덕트의 총횡비가 크게 달라질 수 있기 때문에, 이는 경제적인 덕트의 길이가 달라질 수 있음을 의미한다. 이에 따라 덕트의 위치 및 면적변화에 따른 압력분포가 설계에 반영되어야 한다. 도로터널에서

횡류식·반횡류식 환기방식을 사용하는 경우, 환기덕트는 크게 연결덕트와 터널 내 덕트로 구분된다. 연결덕트란 수직구에서 터널까지를 이어주는 덕트를 말하며, 연결덕트의 압력손실은 아래 식(1)로 나타낼 수 있다.

$$P_c = \sum_n \zeta_n \cdot \frac{\rho}{2} V_n^2 + \sum_n \left(\lambda \frac{L}{D} \right)_n \cdot \frac{\rho}{2} V_n^2 = \frac{\rho}{2} V_b^2 \sum_n \zeta_n \left(\frac{Ab}{An} \right)^2 + \Sigma \left(\lambda \frac{L}{D} \right)_n \left(\frac{Ab}{An} \right)^2 \quad (1)$$

V_b : 터널덕트 시점풍속

ζ_n : 각 위치에서의 형상손실계수

λ_n : 각 위치에서의 마찰손실계수

V_n : 각 위치에서의 풍속

A_n : 각 위치에서의 덕트단면적

A_b : 터널덕트 시점 단면적

대체적으로 덕트 내 압력손실은 덕트 내 풍속에 비례하므로 단면적을 크게 할 경우 덕트 내 풍속이 작아지고 송풍기의 소요동력이 작아진다. 그러나 덕트단면적이 커지면 건설비의 증가는 불가피하다. 그러므로 환기덕트의 구조 및 단면모양, 배치에 관해서는 가장 경제적으로 유리한 방법으로 설계해야 하며, 환기효율을 높이기 위한 대배기구 방식의 적용이나 설계가 이뤄져야 한다. 그러나 지금까지 일반적인 도로터널에서는 사이즈가 작은 균일한 급·배기포트를 갖는 균일급기 또는 균일배기방식이 주류를 이루고 있었다. 따라서 상층부와 하층부를 갖는 복층도로터널에서 전 연장에 걸쳐 균일한 환기를 위해서는 송·배풍기의 소요풍압, 포트의 개도(opening)조정 및 덕트단면적 등의 인자들을 고려하여야 한다. 여기서 송풍기의 전체풍압은 수직구에서 배기된 공기가 연결덕트, 터널 내 설치된 덕트, 차도를 거쳐 갱구 또는 배기포트에서 배출되는 동안의 각종 압력손실의 총합계를 뜻하며, 횡류식 환기방식에서의 소요전체풍압은 급기덕트에서 차도로 흘러간 공기가 배기포트, 터널 내 덕트와 연결덕트를 거쳐 수직구를 통해 배출되는 동안의 압력손실의 총합이다. 또한 복층도로터널의 경우 급·배기 덕트가 상층부에 나란히 설치될 수 있다. 이런 경우에는 덕트의 총횡비가 달라질 수 있고 급·배기덕트의 정압차 및 말단동압, 필요시점 압력이 상·하층부에서 다를 수 있기 때문에 덕트의 길이가 상이할 수 있음을 고려해야 한다. 여기서 급기덕트의 정압차는 식 (2)로 나타낼 수 있으며, 배기덕트의 정압차는 식 (3)으로 계산된다.

$$P_{b(x)} = P_{b_0} + \left(\frac{\lambda}{3} \cdot \frac{L-x}{D} - 1\right)b \cdot \frac{\rho}{2} \cdot V_b^2 \quad (2)$$

P_{b_0} : 시점정압
 V_b : 시작면풍속
 x : 덕트시점
 λ : 벽면마찰손실계수

$$P_{ei} = P_{eo} + \left(\frac{\lambda}{3} \cdot \frac{L}{D} + 2\right) \times \frac{\rho}{2} V_{eo}^2 \quad (3)$$

P_{ei} : 덕트시작면정압
 P_{eo} : 말단정압
 λ : 벽면마찰손실계수
 V_{eo} : 말단풍속

또 다른 경우에는 복층도로터널에서 상층부의 상부와 하층부의 하부에 덕트가 설치되는 경우도 있다. 이는 프랑스 A86 East 터널과 같이 중간슬래브에 의해 환기가 상·하층부로 분리되어 이뤄지는 경우이며, 하층부에 덕트가 설치되면 환기효율이 떨어지기 때문에 공기흐름을 원활하게 발생하기 위하여 측면에 유도덕트를 설치할 수도 있다. 이런 경우 유도덕트의 폭이 좁아지는 특성에 따라 압력손실이 과다하게 발생할 수 있다. 그러므로 덕트의 길이에 따라 압력분포에 미치는 유도덕트의 영향이 중요한 설계인자로 반영될 수 있다. 또 다른 방식으로는 중간슬래브에서 상·하층부의 환기가 연결되어 운영되는 경우가 있는데 이는 스페인 M30 터널의 환기방식과 유사하다. 이때 상층부와 하층부의 교통방향이 다르다면 상층부로 급기되는 공기가 다른 차도내압을 거치게 되므로 급·배기덕트의 압력분포 차이에 영향을 크게 미칠 수 있다. 또한 횡류식·반횡류식 환기방식의 경우 터널 전 연장에 걸쳐 균일한 급·배기를 위해 덕트를 설치하게 되는데, 대심도 복층터널의 경우 기존의 도로터널에서와는 다르게 네트워크형 구조(합류부·분기부)로 인해 발생할 것으로 예상되는 덕트의 합류·분기부 충격손실에 대한 반영이 이뤄져야 할 것이다. 그러나 입체교차로의 환기방식을 횡류식으로 적용할 경우에는 본선과 연결로에 급기덕트와 배기덕트가 서로 복잡한 형태로 교차되므로 시공이 어렵고 유지관리도 곤란하기 때문에 이에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

지금까지 횡류식·반횡류식 환기방식을 살펴본 바에 따르면, 일반적인 도로터널에서 사용되던 설계인자로서 네트워크형 복층도로터널의 적용 가능하게 변형된

환기설계인자로는 ① 덕트 내 압력분포, ② 연결덕트의 압력손실, ③ 송·배풍기의 소요풍압, ④ 포트의 개도조정, ⑤ 급·배기덕트의 정압차 ⑥ 유도덕트의 압력분포 등이 설계에 반영되어야 할 것이다.

4.2 수직구 종류식 환기방식 설계인자

수직구를 사용한 종류식 환기방식은 대체적으로 제트팬 환기방식으로는 적용연장의 환기가 어려운 장대 도로터널에서 주로 적용되며, 수직구에서 차도 내 공기를 교환함으로써 종류환기방식의 적용 길이를 확대하는 방식이다. 이중 집중배기 환기방식의 환기에서는 수직구에 의해 분류되는 터널 좌·우구간의 풍량 균형을 잡는 것이 경제적으로 중요하다. 수직구 집중배기 환기방식에서 수직구의 위치는 자연환기에 의해 환기되는 경우에 터널입구로부터 유입되는 환기풍에 의한 오염물질농도가 허용농도에 근접하는 부근에 설치하는 것이 이상적이며 경제적이다. 또한 이 위치를 크게 벗어난 지형일 경우에는 위치선정과 동력비를 포함한 종합적 경제성을 비교하여야 한다. 배기구는 대체적으로 차도공간에 직각위치로 설치하는 경우가 대부분이다.

수직구 집중배기 환기방식은 주로 교통환기력을 기대할 수 없는 양방향 도로터널에 적용되지만, 도심지에 위치할 경우 일방향 교통터널에 적용되는 경우도 있으므로 두 가지 경우를 고려해야 한다. 일반적인 도로터널에서 집중배기 방식을 사용하는 경우 수직구에 설치된 배풍기로 터널 내 공기를 배기하는 부분에서 발생하는 합류 및 분기손실계수에 영향을 주는 합류관의 단면적비, 유량비, 합류각도 등이 설계인자로 고려되어야 한다.

중국 상하이 양쯔강 복층도로터널과 같이 수직구 집중배기 환기방식으로 설치되었지만 지형특성상 수직구가 터널 중앙부가 아닌 출구부에 설치된 경우에는 터널 입·출구에서 발생할 수 있는 환기 불균형을 억제하고 안정적인 환기상태를 유지하기 위해 제트팬 환기방식을 조합하여 사용하기도 한다. 복층도로터널에 종류식 환기방식을 적용할 경우, 상층부는 일반도로터널과 단면형상이 유사하기 때문에 제트팬 설치에 있어서 문제가 없다. 하지만 하층부의 경우, 제트팬 설치공간이 협소하기 때문에 터널 측면부에 설치하는 것을 고려해야 하므로 환기 효율의 저하가 발생할 수 있다. 또한 자연풍 및 상, 하 교통량의 변동에 의해 터널 내 환기상태에 불균형이 생길 수 있으므로 설계 시 주의해야 한다.

집중배기환기방식의 환기설계에 있어서 소요송풍기의 압력을 계산하는 것이 가장 중요한 요소이며, 수직

구의 설치부에서의 압력과 수직구의 마찰손실 그리고 입·출구손실의 합으로 계산한다. 그러나 복층터널 설계에서는 출구부에서의 손실이 입구부에서의 손실에 비해 훨씬 크다는 점을 고려하여, 출구부 손실과 입구부 손실을 따로 계산할 필요가 있다(식 (4)). 또한 네트워크형 구조(합류부·분기부)에 따른 차도 내 충격손실에 대한 반영 역시 이뤄져야 할 것이다. 수직구의 설치부에서 압력(ΔP_c)은 다음 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$\Delta P_c = (\zeta_c + \zeta_i + \lambda_r \frac{L}{D_r}) \frac{\rho}{2} V_r^2 + \Delta P_t + \Delta P_m \quad (4)$$

- ζ_c : 터널 출구 손실계수
- ζ_i : 터널 입구 손실계수
- λ_r : 차도 내 벽면마찰손실계수
- L : 갱구에서 수직구 설치부까지의 길이
- D_r : 차도대표치수
- ρ : 공기밀도
- V_r : 차도 내 풍속
- ΔP_t : 교통환기력
- ΔP_m : 기상, 온도차 및 자연풍에 의한 양 갱구 간 압력

수직구의 마찰 및 합류부·분기부 손실(ΔP_s)은 다음 식 (5)에서처럼 나타낼 수 있다. 앞서 설명한 바와 같이 식 (5)에서도 합류부 손실과 입구부 손실을 구분하여 계산할 필요가 있다.

$$\Delta P_s = (1 + \zeta_{ic} + \zeta_{jc} + \lambda_s \frac{L_s}{D_s}) \frac{\rho}{2} \cdot V_s^2 \quad (5)$$

- ζ_{ic} : 합류손실계수
- ζ_{jc} : 분류손실계수
- λ_s : 수직구의 마찰손실계수
- L_s : 수직구의 길이
- D_s : 수직구의 최대치수
- V_s : 수직구 내의 풍속

대심도 복층터널에서 수직구 종류식 환기방식을 사용하는 경우 분기구간은 본선부의 편측으로 접속되어 와류발생에 따른 정체구간 형성으로 기류편차가 발생하여 분기부 전체 환기효율이 저하될 것으로 예상된다. 이에 대한 대책으로 분기부에 기류의 흐름을 원활히 유도하여 분기효율을 증가시키는 장치인 칸막이벽(partition

wall)을 설치해 터널 내 유속저하를 최소화하고, 본선과 램프 터널간의 제트팬을 설치하여 유량비 제어를 통해 구간별 환기효율을 증대시킬 수 있을 것으로 예상된다⁵⁾.

지금까지 수직구 종류식 환기방식을 살펴본 바에 의하면, 네트워크형 복층도로터널에 적용 가능한 설계인자로는 ① 소요 송풍기의 압력, ② 수직구 설치부에서의 압력, ③ 수직구의 마찰 및 입·출구손실, ④ 단면적·유량비에 따른 충격손실 등이 설계에 반영되어야 할 것이다.

4.3 자연환기력

기존의 자연환기력의 계산은 지상터널에만 국한되어 있어 지하 대심도에 건설되는 네트워크형 복층터널에 적용하기에는 한계가 존재하였다. 그러므로 자연환기력에 영향을 미치는 여러 인자들을 분석하여 네트워크형 복층터널에 적합한 방법을 도출해본다. 자연환기력은 터널 내 차량통행에 의한 교통환기력 및 모든 환기 설비에 의한 환기력을 제외한 지형 및 기상 변수만에 의한 환기력이라 정의한다¹³⁾.

대체적으로 자연환기력은 터널 내·외부 기상 변수의 순간적인 변화에 따라 지속적으로 변화하지만, 대심도에 건설되는 복층도로터널은 기상 변수에 따른 영향이 크지 않을 것이다. 일반적인 도로터널에서의 자연환기력은 터널 내·외부의 고도와 온도 차이에 의한 공기밀도차(굴뚝효과), 터널 입·출구의 기압차 그리고 터널 양단에 작용하는 외부풍압차이 등 크게 3가지의 주요 변수에 의해 기인하는 것으로 요약된다. 이 중 터널 양단에 작용하는 외부풍압차이는 터널 입·출구의 형태와 터널 주변지형에 의해 발생한다. 하지만 네트워크형 복층도로터널은 대심도에 건설되기 때문에 지형 및 풍압에 의한 자연환기력에 대해서는 고려하지 않아도 될 것이다. 터널 입·출구의 기압차는 터널 입·출구의 기압에만 영향을 받아 발생하며 경정기압법을 통해 계산 가능하다. 압력차이가 단순한 고도차에 의한 압력차이인 경우, 기류의 이동을 발생시키지 않으므로 관측된 대기압은 고도차 및 온도차에 의한 영향을 제거하기 위해 터널평균 고도를 기준점으로 경정기압으로 환산할 수 있다. 터널 입·출구의 기압차에 의한 자연환기력은 아래 식 (6)을 통해 구할 수 있다.

$$P_r = P_0 \cdot \exp\left[\frac{g \cdot \Delta h}{R \cdot \left(273.15 + \frac{t + (t \cdot T \cdot \Delta h)}{2}\right) + e_m}\right] \quad (6)$$

- P_r : 정정기압
- P_0 : 원기압
- Δh : 고도차
- R : 건조기체상수
- g : 현지중력가속도
- T : 기온감률
- t : 온도
- e_m : 수증기영향보정치

터널 내·외부의 고도와 온도 차이에 의한 공기밀도 차이(굴뚝효과)는 터널 공기 통로 입구의 고도차와 터널 내·외부의 온도차에 의해 발생한다. 이러한 굴뚝효과에 의한 자연환기압력(Natural Ventilation Pressure, NVP) 계산방법에는 정역학적 방법과 열역학적 방법이 있다. 일반적으로 자연환기압력은 터널 내부의 기울기에 의해 야기되고, 터널 입·출구간 고도차, 외부온도차에 의존한다. 첫 번째로 정역학적 방법(Hydrostatic method)을 통한 자연환기력 산출 방법은 단순히 공기밀도차이에 의한 압력차로 발생되며 주로 온도변화에 민감하게 반응하지 않는 저심도 터널인 경우에 사용하는 방법으로 다음 식 (7), (8)으로 계산된다.

$$NVP = g\Delta h(\rho_{md} - \rho_{mu}) \tag{7}$$

$$NVP = \left(\frac{T_u - T_d}{T}\right)\rho g\Delta h \tag{8}$$

- md : 급기구의 공기밀도 평균값
- mu : 배기구의 공기밀도 평균값
- T_d : 급기구의 온도
- T_u : 배기구의 온도
- T : 평균온도를 의미하며, $\left(\frac{T_u + T_d}{2}\right)$ 로 계산가능
- ρ : 표준공기밀도
- Δh : 터널 심도

정역학적 방법으로 도로터널의 자연환기압력을 계산하는 경우, 겨울철에 터널 내부 온도가 외부 온도보다 높기 때문에 기류의 방향은 외부에서 내부로 향하게 되며, 여름의 경우에는 그 반대의 상황이 발생한다. 이러한 이유로 온도에 의한 자연환기압력의 영향력은 상당히 크게 작용하고 온도 및 고도에 큰 영향을 받기 때문에 온도변화에 민감하지 않은 정역학적 방법으로 복층터널의 자연환기력을 계산하기에는 타당하지 않다.

두 번째로 열역학적 방법(Thermodynamics Method)을 통한 자연환기압력을 산출하는 방법은 각 터널 구

간의 온도와 압력을 측정후, 열이 계에 한 일을 도출해서 계산하는 방법이다. 열역학적 방법으로 자연환기에너지(Natural Ventilation Energy, NVE)를 구하는 방법은 대체적으로 밀도차이와 높이차를 이용하는 계산에 비해 낮은 오차율을 보여주지만 그 계산 과정이 까다롭다는 단점이 존재한다. 자연환기에너지는 다음과 같이 정리할 수 있다. 터널 지하 공간 각각의 프로세스가 폴리트로픽 법칙(polytropic law)에 근사하는 경우, 각 세그먼트에 대해 자연환기에너지는 식 (9), (10)으로 계산 될 수 있다²⁰⁾.

$$\int_1^2 VDP = \frac{n}{n-1}R(T_2 - T_1) = R(T_2 - T_1)\frac{\ln(P_2/P_1)}{\ln(T_2/T_1)} \tag{9}$$

$$N_F = \frac{u_1^2 - u_2^2}{2} + (Z_1 - Z_2)g - \int_1^2 VDP \tag{10}$$

- $\int_1^2 VDP$: 일의 량 [kJ]
- n : 폴리트로픽 지수
- R : 기체상수 [J/kg.K]
- T : 절대온도 [K]
- N_F : 자연환기에너지 [NVE]
- u : 터널 내 공기속도 [m/s]
- z : 기압계의 위치 [m]
- ρ : 표준공기밀도 [kg/m³]
- P : 기압계의 압력 [kPa]

아래 Fig. 8에서 보는바와 같이, 터널 내부에 임의의 두 지점(2와 3사이)에서 차량운행 등에 의한 열원이 존재할 경우 자연환기력은 두 지점에서의 온도차에 의해 열전달이 발생하고 이에 따라 아래 식 (11)처럼 자연환기력에 변화가 발생한다.

$$NVP = \rho_{md}g(z_1 - z_2) - \rho_{mu}g(z_1 - z_2) =$$

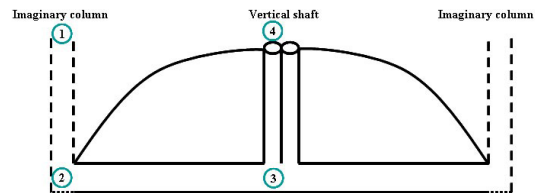


Fig. 8. The schematic of road tunnel with the vertical shaft

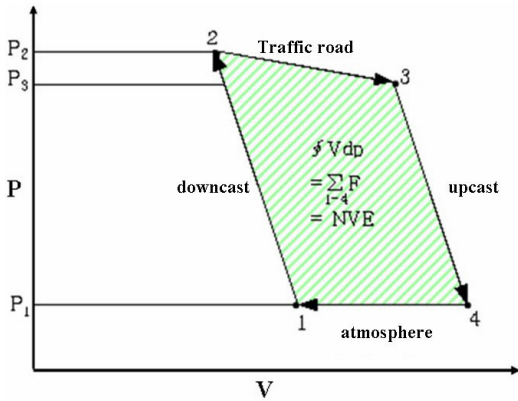


Fig. 9. P-V Diagram for naturally ventilated road tunnel

$$\begin{aligned}
 NVP &= \rho_{md}g(z_1 - z_2) - \rho_{mu}g(z_1 - z_2) \\
 &= g(z_1 - z_2)(\rho_{md} - \rho_{mu})
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

- NVP : 굴뚝효과에 의한 자연환기압력
- ρ_{md} : 배기구의 공기밀도 평균값
- ρ_{mu} : 급기구의 공기밀도 평균값

수직구와 터널 사이를 흐르는 순수한 공기흐름(net flow work)이 한 일은 Fig. 9에서의 역방향(4-3-2-1)으로 진행되며, 이것이 공기의 움직임을 발생시키고 유지시키는 기계적 에너지를 뜻하는 자연환기에너지(NVE)가 된다. 자연환기에너지(NVE)의 면적은 P-V 선도에서 다음 두 가지 요소에 영향을 받는데, 첫 번째로 터널부분(2-3지점)에 차량운동이나 조명 등의 열원이 존재한다면 자연환기에너지(NVE)는 증가하게 된다. 두 번째로는 각 수직갱을 뜻하는 1-2와 3-4 지점의 심도가 증가하여 압력차가 증가한다면 자연환기에너지(NVE) 역시 증가하게 된다. 즉, 추가되는 열과 심도가 증가할수록 P-V 선도에서의 면적이 커지고, 자연환기에너지(NVE)가 커지게 된다. 이 자연환기에너지(NVE)와 밀도의 곱이 아래 식 (12)으로 표현되는 자연환기압력(NVP)이다.

$$NVP = NVE \times \rho
 \tag{12}$$

- NVP : 자연환기압력
- NVE : 자연환기에너지
- ρ : 표준공기밀도

자연환기압력은 고도와 내·외부의 온도차에 의해 유

도되고 있다. 터널 내·외부의 온도차는 그 차이가 클수록 자연환기압력에 영향력이 커지며, 수직구가 없는 도로터널에 비해 수직구가 설치된 도로터널에서의 온도는 다른 요소에 비해 더 크게 변경된다. 즉, 수직구의 높이가 높아질수록 더 큰 자연환기압력이 발생한다. 네트워킹형 복층터널에 경우, 지하 대심도에 위치하므로 기존의 도로터널보다 긴 연장의 수직구가 설치되고 높은 고도를 가지므로 더욱 강력한 자연환기압력이 발생할 것이 예상되므로 설계 시 고려할 필요가 있다.

정역학적 방법의 경우 수두차이에 의한 압력변화를 이용하여 자연환기력을 구하기 때문에 열이 가진 에너지를 일로 전환하여 구하는 열역학적 방법보다 정확도가 떨어지게 된다. 또한 대심도에 위치하는 복층터널은 높은 고도차로 인해 더욱 큰 자연환기압력이 발생하므로 환기시스템의 큰 영향을 끼칠 것으로 생각된다. 따라서 열역학적 방법을 통한 자연환기력에 대한 평가가 면밀하게 이뤄져야 된다고 생각된다.

지금까지 살펴본 바에 따르면, 대심도 네트워킹형 복층도로터널의 환기 설계 단계에서 자연환기력을 추정하기 위해서는 ① 터널 내·외부의 고도와 온도차에 의한 공기밀도차이, ② 터널 입·출구부에서의 기압차를 설계에 반영해야 한다.

5. 결론

최근, 도심지에 위치하고 지하공간의 재창출이라는 목표 아래 대심도 복층터널의 운영 및 설계방안에 대한 연구가 꾸준히 이루어지고 있다. 그러한 이유로 국내에서도 대심도 지하 공간 활용을 위해 아직 전 세계적으로 시도되지 않은 네트워킹형 복층도로터널에 대한 필요성이 대두되어 사전 연구가 진행되었다. 본 연구에서는 기존에 운영되고 있던 도로터널 환기설계 아웃라인의 분석을 통해 네트워킹형 복층도로터널에 적용 가능한 새로운 아웃라인에 대한 검토를 수행하였고, 성공적으로 운영 중인 해외 복층터널 환기설계 사례들은 면밀히 분석하여 환기 방식과 종류 그리고 대심도에 위치하는 네트워킹형 복층도로터널에 적용 가능한 설계인자(덕트 내 압력분포, 연결덕트의 압력손실, 송·배풍기의 소요풍압, 유도덕트의 압력분포, 수직구 설치부에서의 압력, 수직구의 마찰 및 입·출구손실, 단면적·유량비에 따른 충격손실 등)를 알아보았다. 복층도로터널에 주로 적용되는 환기방식인 횡류식·반횡류식 환기방식과 수직구 종류식 환기방식 그리고 대심도 건설로 인한 자연환기력에 대한 연구를 통해 네트워킹형 복층도로터널에 적용 가능한 환기설계인자를 도출하여 제시하였다.

사 사

연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 2014년 건설기술연구사업의 ‘대심도 복층터널 설계 및 시공 기술개발(14SCIP-B088624-01)’ 연구단을 통해 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

References

1. Abdullah, Keizrul. 2004, “Stormwater Management and Road Tunnel (SMART) a lateral approach to flood mitigation works.” International Conference on Bridge Engineering and Hydraulic Structures, Selangor, Malaysia.
2. Arnau Clot Razquin, 2014, “A dynamical model of a double-deck circular tunnel embedded in a full-space”, Escola Tecnica Superior d'Enginyeries Industrial i Aeronautica de Terrassa Department of Mechanical Engineering.
3. Chan-Hoon Yoon, Min-Suk Kim, Jin Kim, 2006, “The evaluation of natural ventilation pressure in Korean long road tunnels with vertical shafts”, TUNNELLING AND UNDERGROUND SPACE TECHNOLOGY Vol. 21 No. 3 472p ~ 472p 0886-7798 SCI(E).
4. F. Feng, G. Karpusyuk, 2010, “Alaska Way Viaduct Replacement Project: SR 99 Bored Tunnel”, Washington state department of transportation, Federal Highway Administration, and City of Seattle.
5. Sean Cassidy, Jason Liu, 2010, “Anaysis of the Required Upstream Control Velocity for SR99 Tunnel Project (Alaska way) Ventilation”, HNTB Corporation.
6. Seung Han Kim, B.S.;M.S., 2010, “Large Tunnels for Transportation Purposes and Face Stability of Mechanically Driven Tunnels in Soft Ground”, The University of Texas.
7. Taylor & Fancis Group, 2008, “The Sanghai Yangtze River Tunnel - Theory, Design and Construction”, Huang(ed) London, ISBN 978-0-415-47161-9.
8. 국토해양부, 2009, 도로터널 방재시설 설치 및 관리지침, 행정 간행물 등록번호, 11-1611000-000411-01
9. 김경훈, 최종동, 전덕찬, 신일재, 심동현, 2010, 국내 최초 소형차 전용 도심지 대심도 복층터널 설계 사례, 한국지반공학회 추계 학술대회, 대심도복층터널편 13-167-183 pp. 168-183.
10. 김남영, 2014, “네트워크형 지하도로 입체교차로 내의 교통환기력에 의한 환기 특성”, 국민대학교 학위논문(박사), pp. 22-23.
11. 김남영, 조종복, 김재완, 2010, 도심지 대심도 장대지하차도의 환기와 방재 대책, 대한설비공학회 동계학술발표대회 논문집, pp 480-465.
12. 김세환, 최창림, 한석희, 조남승, 최연식, 김원근, 2012, 서울제물포터널 분기터널 설계 : 분기부 선형계획, 단면계획, 시공계획 및 환기·방재계획 방안 소개, 자연, 터널 그리고 지하공간 vol. 14 no. 6 pp. 12-18 2233-7482.
13. 김효규, 유지오, 이창우, 2014, 터널내 자연환기력(NVP) 적용방안 연구, 한국터널지하공간학회 논문집 16(3) 269-285.
14. 변상훈, 정재호, 전덕찬, 신일재, 심동현, 2011, 도심지 대심도 복층터널의 환기 및 방재 계획, 한국암반공학회지, vol. 21, no. 4, pp. 281-286.
15. 유영석, 2013, 현장실측을 통한 국내 일반광의 열역학적 자연환기력 연구, 인하대학교 에너지공학 전공 에너지자원공학전공 학위논문(석사), pp. 13-17.
16. 이보영, 유용호, 김진, 2004, “통계적 분석을 이용한 터널 환기시스템 적정설계변수의 산정 및 적용에 관한 연구.” 터널과 지하공간 14.5 : 373-380.
17. 이승철, 2013, 외부자연풍이 종류식 도로터널의 환기특성에 미치는 영향에 대한 연구, 대한설비관리학회지 18권 4호 (2013.12) pp. 41-49.
18. 이창우, 김남구, 2010, 지하고속도로 환기 및 방재 시스템, 대한토목학회지, vol 58, no. 2(358), pp. 48-72.
19. 이창우, 박홍채, 2009, 터널형 지하공간내의 자연환기력 분석, 터널과지하공간, vol. 19, no. 80, pp. 226-235.
20. 이호석, 홍기혁, 최창림, 강명구, 임재범, 문홍표, 2012, 네트워크형 지하 도로터널의 분기부에서 환기효율 향상방안에 대한 실험적 연구, 한국터널지하공간학회논문집, vol 14, no. 2, pp. 107-116.
21. 한국건설교통기술평가원, 2012, 대심도 지하 복층 터널 구축 기술 개발 기획; 대심도 교통-물류 네트워크 구축기술, 국토해양부, pp. 58-69.
22. 한국건설기술연구원, 2008, 지하공간 환경개선 및 방재기술 연구사업; 연구단 총괄 요약본, 국토해양부, pp 73-77.

박 상 훈

2015년 신한대학교 에너지환경공학과
공학사



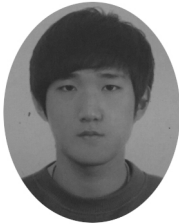
Tel: 010-3105-1630
E-mail: jsks4831630@naver.com
현재 인하대학교 에너지자원공학과 석사
과정

이 승 준



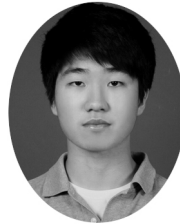
Tel: 010-3232-0887
E-mail: popo4816@naver.com
현재 인하대학교 에너지자원공학과 학사
과정

박 요 한



Tel: 010-6423-4431
E-mail: yafoo237@naver.com
현재 인하대학교 에너지자원공학과 학사
과정

김 세 민



Tel: 010-4195-7410
E-mail: tpals1121@naver.com
현재 인하대학교 에너지자원공학과 학사
과정

노 장 훈

2009년 인하대학교 환경공학과 공학사
2012년 인하대학교 에너지자원공학과
공학석사



Tel: 010-6421-4985
E-mail: iglord2@naver.com
현재 인하대학교 에너지자원공학과 박
사수료

유 용 호

1997년 인하대학교 자원공학과 공학사
1999년 인하대학교 자원공학과 공학석사
2005년 인하대학교 자원공학과 공학박사



Tel: 031-369-0516
E-mail: yhyoo@kict.re.kr
현재 한국건설기술연구원 화재연구소
수석연구원

김 진

1987년 인하대학교 자원공학과 공학사
1990년 미국 University of Kentucky 공학
석사/환기시스템
1995년 미국 University of Missouri-Rolla
공학박사/지하환경



Tel: 032-860-7558
E-mail: jinkim@inha.ac.kr
현재 인하대학교 에너지자원공학과 교수