

# Tunnelling Technology

## 터널 환기 방식

남창호 \_ 정회원, (주)범창종합기술 대표이사

### 1. 터널환기의 기원을 연 횡류환기방식

도로터널의 환기는 차량에서 배출되는 오염물질을 배출 또는 희석하여 터널내 환경을 허용농도이하로 유지함으로써 쾌적성과 안전을 확보하기 위한 것으로 도로터널에 대한 환기가 본격적으로 인식되기 시작한 것은 1920년대에 자동차가 널리 보급되면서 차량의 일상화 시대가 열리면서부터라고 볼 수 있다. 그 당시에도 영국의 Rotherithe 터널(1,913m)과 같은 장대터널이 있었으나 교통량이 그다지 많지 않았기 때문에 본격적인 환기의 필요성이 제기되지 않았으며, 터널과 같은 지하공간에 대한 환기로는 종류식 환기 방식에 의해서 광산의 갱도에 신선한 공기를 주입하는 정도였다.

그러나, 뉴욕시의 허드슨강을 통과하는 Holland 터널(2,610m)의 건설을 계획하면서 교통량의 증가에 따라 소요환기량이 급증하여 환기설계가 중요한 문제로 대두되게 되었으며, 또한 같은 시기에 피츠버그시의 Liberty터널에서 1924년 5월에 터널출구부근의 교통혼잡으로 차량이 터널내에서 정체하여 일산화탄소에 의해 중독되는 사고가 발생하였다. 이로 인하여 Holland 터널건설에 있어서 차량에서 배출되는 유독가스를 제거하기 위한 새로운 환기 시스템에 대한 요구가 증대하여 이에 대한 연구를 촉진하는 계기가 되었다.

따라서, 터널의 굴착공사가 원형단면의 쉴드(Shield)공

법에 의하여 추진된다는 점에 착안하여 그림 1에서 보는 바와 같이 터널 천정부를 배기덕트로, 차도하부를 급기덕트로 활용하는 환기방식인 횡류 환기방식을 제안하여 시공하게 되었다. 이 방식은 신선한 공기를 덕트를 통해서 터널의 깊숙한 지점까지 공급하고, 공기가 차도를 가로질러 흐르며 오염공기를 배출하기 때문에 기존의 종류 환기 방식의 최대 단점인 터널의 연장에 제한을 받는다는 결점을 해결할 수 있게 하여 환기 시스템에 있어서 터널연장에 대한 제한이 없어지게 되었다.

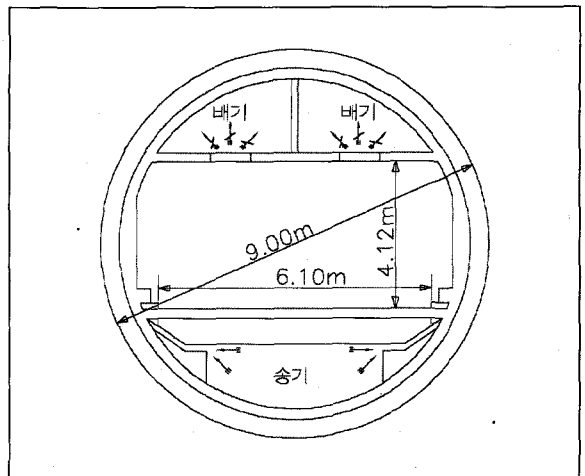


그림 1. Holland Tunnel의 횡단면도

이를 계기로 하여 비로소 대량의 교통이 예상되는 장대터널의 환기가 가능하게 되었으며, 이 방식은 1930년에

서 40년대까지 미국의 Lincoln 터널(2,355 m-1937년), Posey 튜브(1,080m-1928년), 미국과 캐나다를 연결하는 Windsor 터널(1,565m-1930년), 네덜란드의 Maas 터널(1,070m-1941년), 벨기에의 Anverse Scheld 터널(1,768m-1933년)등 많은 주요 터널에 채택되었다.

그 후에도 1960년대까지 일본의 간몽(關門)터널(3,461m-1958년), 네덜란드의 Velsen 터널(824m-1957년), I·J 터널(1,125m-1967년), 독일의 Wagenburg 터널(824m-1957년), 일본의 지요다(千代田) 터널(2,110m-1964년)등에서 그 예를 찾아볼 수 있다.

그러나 이 방식은 터널내에 배기 덕트 및 급기 덕트를 설치하기 위한 공간이 확보되어야 하기 때문에 해저터널과 같이 원형단면을 갖는 터널에서는 덕트를 위한 공간 확보가 용이하나, 육상터널에 있어서는 굴착단면이 증대하는 단점이 있다. 따라서 급·배기 덕트중 어느 하나에 의한 처리를 위한 시도가 이루어지게 되었다.

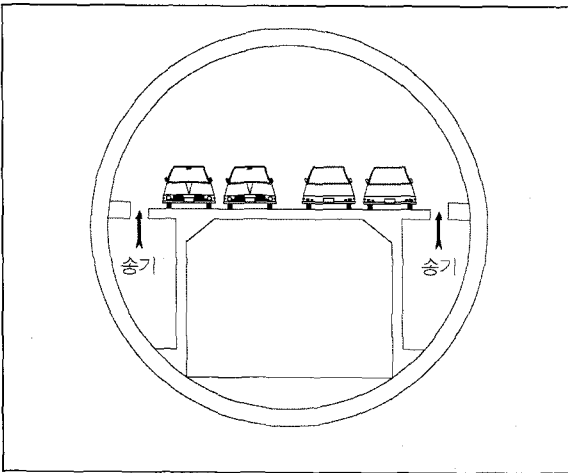


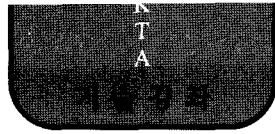
그림 2. Mersey Tunnel의 횡단면도

이와 같은 방식에 대한 최초의 시도는 영국의 Mersey 터널(3,220m, 지선을 포함하여 4,629m-1934년)에서 찾을 수 있으며, Mersey터널의 환기방식은 그림 2에 나타난 것과 같이 급기덕트로부터 신선공기를 급기하며, 급기되는 공기는 터널내 오염공기를 희석하여 차도를 통해 흐

르며 4개소에 설치된 수직갱에 의하여 천정으로부터 직접 배기하는 방식이다. 즉, 이 방식은 오늘날 급기 반횡류식의 근원으로 볼 수 있으며, 천정 공간을 활용할 수 있다는 잇점에서 오늘날 까지도 육상터널에서 많이 사용되고 있다. 이 방식은 1950년대 이후 60년대에 많이 도입되었으며 영국의 London Airport 터널(660m), 스위스의 Farney터널(430m), 미국의 Washyburn터널(894m-1950년), Boytown터널(917m), 베네수엘라의 Boqueron 터널(1,800m-1954년), 하바나터널(730m), 일본의 덴노상(天王山)터널(1,470m-1963년), 가지하라(梶原)터널(814m-1963년)등에서 그 예를 볼 수 있다.

이상에서 알아 본 바와 같이 70년대 이전에 터널의 환기방식은 횡류식 또는 반횡류식 환기방식이 주류를 이루었으나 일방통행의 경우, 차량에 의한 자연환기(피스톤효과)를 이용할 수 없다는 결점을 보완하기 위해서 기존의 환기방식에 대한 재검토가 이루어지면서 미국의 Squirrel Hill터널(1,270m-1953년)에서는 피스톤효과를 살리기 위해서 신선공기가 유입할 수 있는 터널의 전반부에서는 배기덕트만을 설치하고, 후반부에는 오염물질의 농도가 증대하므로 공기가 출구방향으로 배출될 수 있도록 급기덕트만을 설치하는 급·배기 반횡류식을 도입하였다. 이상과 같이 교통량이 많은 터널이나 장대터널의 보다 경제적인 환기를 위한 연구가 꾸준히 이어져 횡류식 환기방식에서 반횡류식 환기방식으로 발전적인 전환이 이루어지게 되었다.

그러나, 최근들어 교통량의 증가로 인하여 환기를 필요로 하지 않았던 짧은 터널에 이르기까지, 환기설비를 계획하지 않으면 안되게 되었고, 경제성 측면에서 횡류식이나 반횡류식과 같은 고비용의 환기시설이 철도터널의 분류식 환기방식이나 광산의 수직갱 환기방식으로 전환되면서 종류식 환기방식이 도입되게 되었다. 예를 들어 일방교통 터널인 미국 샌프란시스코의 Broadway터널(493m-1953년), 독일의 Lammer-Buckel터널(620m), Rendburg터널(812m), 프랑스의 Le Harvre터널



터널 환기 방식

(590m-1934년) 등에서는 분류식 환기방식을 채택하였고, 프랑스의 Cloud터널(822m-1958년)에서는 수직갱 방식을 채택하고 있다.

이상으로 1970년대 이전의 환기방식을 알아 보았으며, 70년대 이후에는 종류식 환기방식의 도입이 증가하여 많은 터널에서 종류식 환기방식을 채택하게 되는데 이에 대해서는 다음 절에서 알아보기로 한다.

여기서, 환기설비의 용량 및 시스템을 결정하는데 있어 가장 큰 영향을 미치는 환기의 대상 오염물질의 허용농도에 대하여 언급하기로 한다.

오염물질의 농도는 Holland터널에서 CO를 대상으로 측정한 것이 효시가 되었으며, 당시에 허용농도는 0.04%(400ppm)로 규제하였다.

또한 디젤자동차의 수요가 증가하면서 터널내 환경에 영향을 미치는 오염물질로 매연이 심각하게 대두되게 되어 처음에는 매연에 의한 장해정도가 CO의 농도에 비해 한다는 단순한 사고방식에 의하여 CO에 대한 허용농도를 강화하므로 매연에 대한 농도도 감소할 수 있다는 관점에서 Mersey터널에서는 허용농도를 0.025%를 적용하고, 피크시에 한하여 0.04%를 적용하기로 하였다.

그 후, 더욱 대폭적인 개선이 이루어져, 이를테면 Queens Midtown터널(1,955m-1940년), Broadway터널, Squirrel Hill터널 등의 최근의 터널에 있어서는 평상시는 0.015%, 피크시 0.025%를 적용하는 것이 일반화되었다. 일본에 있어서는, 간몽터널 개통 후 이 문제에 주목하여, 건설성 토목연구소, 일본도로공단 등에서 일련의 실험을 통하여 CO농도와는 별도로, 매연농도에 대한 환기량 산정 방식을 확립하였으며, 매연농도계를 제작하여, 간몽터널, 덴노상터널, 가지하라터널 등에 설치하였다.

1960년대에 이르러서는 미국의 Lincorn 터널, 영국의 Hyde Park Underpass (310m- 1963년) 터널 등에서 매연검출기의 설치하였으며, 그 밖에 많은 터널에서 매연문제를 해결하기 위하여 많은 연구를 수행하고 있는 실정이었다.

1970년대 이후에는 자동차 엔진의 성능이 발전함으로써, 오염물질의 발생량이 감소하여 CO에 대한 허용농도는 일반적으로 150ppm에서 100ppm정도로 강화되었고, 도시내 환경오염 등이 특히 문제가 되는 터널에 대해서는 50ppm을 적용하는 정도로 강화되게 되었으며, 이에 따라서 매연에 대한 규제도 강화되어 용량 규제에서 가시도에 직접 영향을 미치는 투과계수에 의한 허용기준을 정하게 되었다.

또한 1973년 국제적인 유류파동 후 에너지 절약에 대한 요망이 강해져 건설비 및 유지관리비(전기동력비)가 많이 소요되는 횡류환기방식에 대한 선호도가 식어졌다.

1980년대에 들어서서 일본에서는 강에즈터널을 중심으로 종류환기방식의 각종 조사 연구가 실시되어 종류환기방식 설계에 대한 기본계수를 정립하게 되었다.

특히, 교통환기력에 대한 계수가 정립되어 현재까지 보완하여 사용하고 있다. 당시 준공된 일본 주요 터널은 쓰르가터널(2,925m), 다 니이나바터널(1,355m), 우도산터널(3,573m), 가게이하기시터널(3,277m), 가게이니시터널(2,691m), 간상터널(2,198m), 요네야마터널(3,277m) 등이 종류환기방식이며, 1985년 이후에는 게이이나상터널(8,625m), 강에즈터널(10,926m) 등이 준공되면서 종류 환기방식이 자리잡게 되었다.

최근 한국도로공사에서는 터널내에도 갓길(비상도로)을 건설함에 있어 터널내공단면이 약 10㎡도 넓어졌다. 이런 변화는 교통환기력 증가를 가져왔고, 이런 현상은 종류환기방식을 더욱 유리하게 만들었다.

현재 국내고속도로 터널은 100% 종류환기 방식을 적용하고 있다.

## 2. 종류식 환기방식의 등장과 발전

종류식 환기방식은 터널의 입구나 수직갱에서 신선공기를 도입하여 터널의 종방향으로 흐름을 유지하면서 터

터널 환기 방식

널내 오염물질의 농도를 희석하고 배출하는 방식으로 횡류식 환기방식보다 시공면이나 유지 관리면에서 경제성이 우수한 방식으로 볼 수 있다. 이 방식은 70년대 축류팬 및 젯트팬의 발전과 더불어 급속도로 증가하였다. 미국의 Hampton도로터널(2,280m-1957년), Battery Street Subway터널(650m-1954년), Webster Street터널(1,018m-1963년), 네덜란드의 Velsen터널, 독일의 Wagenburg터널 등의 신설 터널에서는 모두 축류식 송풍기를, 일본의 간몽터널, 덴노상터널, 가지하라터널, 지요다터널 등에서도 역시 축류식 송풍기를 사용하고 있다. 축류식 송풍기에는 날개각도를 고정하는 고정식과, 운전중 날개각도를 조절하여 풍량의 변화에 따라 효율을 최대한으로 높일 수 있는 가변식 송풍기가 개발되어 널리 사용되고 있다.

오늘날, 종류환기방식에 사용되는 축류 송풍기로는 젯트팬이 주류를 이루고 있다. 젯트팬은 날개각도를 달리함으로써 송풍량을 조절할 수 있을 뿐 아니라, 역회전이 가능하고, 소요환기력을 여러개의 팬으로 분할 담당케 함으로써 소형화할 수 있으며, 분류를 효과적인 추력으로 전환할 수 있는 등 많은 장점을 갖고 있을뿐 아니라, 제어에 대한 대응능력도 뛰어나다. 터널내 화재 발생시에 대비하여 젯트팬 설치를 의무화하고 있는 것도 이와 같은 젯트팬 만이 가진 장점이 평가되었기 때문이라 할 수 있다. 젯트팬과 같은 운용으로 에너지전환이 이루어진 것으로 샷카르트(Saccardo)방식이 있으나, 이는 단독으로 사용되는 경우가 드물고, 다른 환기방식과 합동으로 사용되는 경우가 일반적이다. 종류식 환기방식으로 빼놓을 수 없는 것이 앞서서도 언급한 수직갱에 의한 방식이다.

이 방식은 환기류의 오염농도가 허용한계에 도달한 위치에 급·배기수직갱을 세워 차도공간의 오염공기를 신선공기와 교환하는 방식이다. 또, 수직갱 가운뎃배기기를 갖는 집중배기식이 있다. 따라서 수직갱 밑부분에는 저압권이 형성되어 터널 양갱구로부터 환기를 끌어들이게 됨으로써 갱구부근의 환경을 보전할 수 있으나, 일방향 통

행인 경우는 수직갱 후반부의 유동이 차량의 주행방향과 반대이므로 교통환기력이 저항으로 작용하는 불이익이 따르게 된다. 종류환기에서 빼놓을 수 없는 것이 전기집진기에 의한 매연의 청정효과이다. 오염공기를 바이패스통로를 통하여 집진기로 유도하여 매연이나 분진을 포집하고, 공기를 송풍기를 통하여 샷카르트 형식으로 차도로 되돌려줌으로써 환기력의 향상에도 기여할 수 있으며, 집진기에 의해서 정화된 유량만큼 갱구 유입량을 줄일 수 있는 이점이 있다. 그러나, 전기집진기는 매연이나 분진만을 제거하므로 CO나 NOx에 대해서는 별도의 검토가 필요하다. 이상 종류식에 대한 개략적인 설명을 하였으나, 어떠한 형식을 선택하느냐 하는 것은 교통조건과 터널조건에 따라 다르며, 설계자의 설계관점에 따라서도 양상을 달리할 수 있다. 터널이 장대하거나, 소요환기량이 과대한 경우에는 몇 가지 환기방식을 포함한 복합시스템을 구성함으로써 소기의 목적을 달성할 수 있다.

이를테면, 젯트팬(또는 샷카르트)+전기집진기, 젯트팬+수직갱, 젯트팬+수직갱+전기집진기와 같은 복합시스템을 생각할 수 있으며, 횡류식과 종류식을 합성한 시스템을 구성할 수도 있다. 1997년 완공을 본 동경만 횡단도로터널의 경우는 젯트팬+수직갱+전기집진기를 채용한 경우이다.

이상 도로터널 환기의 발전과정과 환기방식의 특징을 개략적으로 살펴보았으나, 앞으로 환기문제가 어떻게 발전되어 갈 것인가에 대해서는 다음의 두 가지 측면을 생각할 수 있다.

하나는 자동차의 엔진, 또는 연료의 개량에 의한 유독성 성분의 감소 추세로 소요환기량은 감소되는 반면 터널내 안전욕구가 점점 높아져 비상시 환기가 중요시되는 추세이고, 다른 하나는 전기적 또는 화학적 처리방법을 포함한 환기방법의 발전에 거는 기대감이라 할 수 있다.