

대면통행 터널의 환기설계와 자연환기력 적용방안

대면통행 터널에 대한 설계기준상의 미흡한 부분과 실무자 간 해석경향을 크게 두 가지 방법으로 비교·분석하고, 기 준공된 대면터널의 환기방식 적용사례와 일선 엔지니어링사의 연장별 설계경향을 조사하였다. 또한, 대면터널 내 자연환기력의 검토 및 적용 방법에 대해 기술하고자 한다.

개 요

양방향(대면통행) 터널은 도심지역을 제외하고 대부분 산악지형에 많이 건설되고 있다. 이들 노선은 지역 간 균형발전을 위한 교통편의 제공 측면이 강하기 때문에, 실제 교통량이 많지 않음에도 불구하고 민원 해소를 위한 목적으로 적극 검토되고 있다. 그러나 최근 계획되고 있는 이들 노선의 교통상황은 대부분 도로용량에 비해 실제 일교통량(AADT)이 현저히 낮은 경우가 많아 도로의 서비스 수준이 LOS C 이상(A, B, C) 수준이다. 그리고 교통량(V)과 도로용량(C)의 비율을 나타내는 V/C값이 0.5 이하인 상황에서 도로용량으로 환기계획을 수행하는 것은 비합리적일 수 있으며, 편익-비용(B/C) 측면에서도 노선 자체에 대한 타당성을 더욱 악화시킬 수 있다. 따라서 교통량이 많지 않은 양방향 터널에서의 환기계획 시 자연환기 가능성에 대한 충분한 검토가 필요해 보인다.

현재 국내외적으로 양방향 터널에 대한 환기용량 결정방법에 대한 표준화된 규정이 제시되지 못하고 있다. 이는 터널 내 방향별 교통환기력(piston effect)에 의한 기류형성과 터널갹구부 양단에서 작용하는 외부 자연환기력(NVP)의 변화로 인하여 터널 내 주 환기방향을 결정하기가 쉽

김효규

(주)주성지앤비

대표이사/공학박사

hgkim@gnbeng.com

홍유정

(주)주성지앤비

기술연구소연구원

yjhong@gnbeng.com

지 않기 때문이다. 또한, 최근 개정된 설계기준은 양방향 터널 내 자연환기력의 크기를 -1.5 m/s에서 -2.5 m/s로 상향 적용하고 있다. 이는 일방향 터널이나 양방향 터널이나 실제 외부 자연환기력의 크기를 동일하게 적용한다는 점에서 합리적인 방안으로 보인다. 그러나 외부 자연풍의 크기가 클수록 자연풍이 작용하는 방향으로 터널 내 환기방향을 설정하여 자연환기시킬 것인지, 아니면 최악조건을 고려하여 자연풍의 작용방향에 대한 반대방향으로 환기팬을 설치하여 강제환기(기계환기)할 것인지, 라는 문제가 제기되고 있다.

따라서 본 연구에서는 양방향 터널에서의 교통환기력과 자연환기력의 크기에 따른 환기방향 결정과 이와 관련한 설계기준 상의 몇 가지 개선대책을 일본과 국내 기준을 중심으로 모색해 보고자 한다.

터널 내 작용 환기력과 저항력

일반적인 터널환기 계획은 주행속도별로 소요환기량을 산출하고, 기계환기가 필요할 때 각종 터널 내 환기력(통기저항력, 교통환기력, 자연환기력 등)을 고려하여 소요승압력의 과부족을 계산한 후, 이를 대당 팬 승압력으로 나눈 값을 정수화하여 환기설비 대수로 결정하고 있다.

일방향 터널

일방향 터널에서는 주 환기방향을 교통환기력

이 작용하는 방향으로 설정하고, 외부자연풍을 저항력으로 고려하여 환기용량을 산출하고 있다(그림 1 (a)).

$$\text{압력평형식} : dP_r \pm dP_{mt} = dP_t (+dP_j)$$

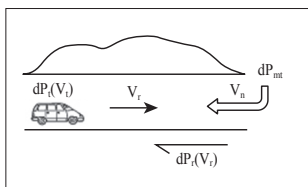
$$\text{소요승압력} : dP_o = dP_r \pm dP_{mt} - dP_t$$

$$\text{환기용량} : JF_{EA} = \frac{dP_r \pm dP_{mt} - dP_t}{dP_j}$$

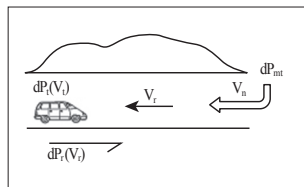
(단, $dP_0 > 0$)

이때 환기용량 산출을 위해 교통환기력(dP_r)과 팬 환기력(dP_j)의 방향은 같은 환기(기류)흐름 방향이 되고 통기저항력(dP_r)과 자연풍저항력(dP_{mt})은 반대방향으로 작용하게 된다. 따라서 통기저항력과 자연환기력(자연풍저항력)은 같은 방향이 된다.

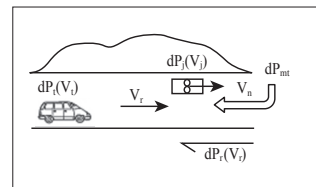
그러나 일방향 터널이라도 외부자연풍이 교통환기력과 통기저항력의 합보다 크게 작용한다면, 터널 내 기류흐름은 그림 1 (b-1)의 경우처럼 차량주행방향의 반대방향으로 형성될 가능성이 있다. 이때는 교통환기력이 저항력으로 작용하게 된다. 이러한 경우는 태풍과 같은 강풍이 부는 계절을 제외하면, 교통량이 극히 낮은 새벽 시간대에 종종 관찰되고 있다. 그러나 이때는 소요환기량이 극히 낮기 때문에 환기팬을 가동하여 차량주행방향으로 환기시킬 필요는 없다. 만일 그림 1 (b-2)처럼 환기팬을 가동시킨다면, 터널 내 기류는 그림 1 (a)와 같게 된다. 따라서 그림 1 (b-1)과 같은 경우에는



(a) 교통력 > 자연환기력
(주교통의 순풍기류)



(b-1) 교통력 < 자연환기력
(주교통의 역풍기류)



(b-2) 교통력 < 자연환기력
(주교통의 순풍 운전모드)

[그림 1] 일방향 터널의 작용 환기력

환기팬을 가동하기보다는 자연환기로 취급하는 것이 경제적 관점에서 합리적일 것이다. 반면 **그림 1 (a)**의 경우라도, 일방향 터널의 환기특징은 피스톤 효과(piston effect)가 우수하기 때문에 환기용량 산출 전 소요환기량에 대한 자연환기량을 사전에 검토하여 자연환기 가능여부를 관별해 둘 필요가 있다.

양방향 터널

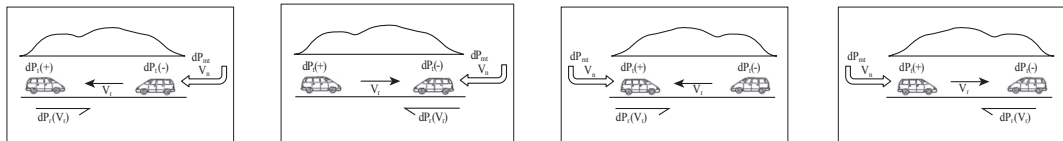
현재까지 양방향 터널의 환기계획은 그 토대가 되는 환기력과 저항력의 이해개념이 서로 달라 다소 편차를 보이고 있다. 이와 같은 이유로는 교통환기력과 외부자연풍의 크기 및 작용방향에 따라 터널 내 주기류 흐름 방향이 변하기 때문이다. 또한, 이때 어떤 방향으로 환기팬을 가동하여야 할 것인지에 대한 표준 운전모드가 제시되지 못하고 있기 때문이다.

먼저, 교통특성을 단순화하여 중방향 계수(D) 값을 0.5로 가정하고 방향별 차량의 주행속도를 동일하게 보는 동일차속(Equal vehicular speed, E.V.S) 법을 고려해 보자. 이 경우 외풍 자연풍의 영향이 없다면 터널 내 통기저항력은 교통환기력에 의존하게 되나 터널 내 기류흐름이 없다면 방향별 교통환기력은 서로 상쇄되어 환기가 불가능하게 된다. 그러나 설계기법상 외부 자연풍이 주어진다면, 어느 한 편 측으로 터널 내 기류흐름이 형성되고 외부 자연풍의 방향과 반대방향의 교통력이 주 교통력의 방향으로 작용하게 된다. 이는 교통환기력이 차

속과 터널 내 유속차의 제곱($dP_{Veh} \propto (V_t - V_r)^2$)에 비례하기 때문에 터널 내 기류흐름에 대한 반대방향의 교통력이 주교통력으로 작용하게 된다. 일본의 경우는 이러한 교통환기력을 저항력으로 간주하고 있다. 따라서 외부 자연풍이 있는 경우는 어느 방향으로든 기류흐름이 형성되고 교통환기력의 차이가 발생하게 된다. 이때 소요환기량에 대한 소요승압력의 부족으로 기계환기를 계획한다면, 교통환기력의 방향에 대한 순방향 혹은 역방향에 대한 2가지의 환기팬 운전모드가 형성된다.

그림 2는 방향별 교통량이 동일한 상황에서 외부 자연풍의 작용방향에 따라 터널 내 기류흐름 방향이 달라지는 4가지의 경우를 나타내고 있다. 그러나 동일차속법의 경우 **그림 2 (a)**와 **그림 2 (d)**, **(b)**와 **그림 2 (c)**는 동일한 상황을 나타내고 있으므로 자연풍의 작용방향에 대하여 동일한 방향으로 터널 내 기류가 형성되는 경우(**그림 2 (a)**, **(d)**)와 그 반대방향으로 기류가 형성되는 경우(**그림 2 (b)**, **(c)**)로 2가지 상황으로 요약된다. 그러나 방향별 교통량 대수와 차속 차이에 따른 교통력이 서로 다를 경우(차등차속법; Unequal vehicular speed, U.V.S)에는 외부자연풍의 영향에 관계없이 주교통력이 결정될 수 있고 주교통력(dP_j) 방향과 기류(V_r) 방향이 동일하게 형성될 수 있는 특징이 있다.

터널 내 교통량이 극히 적어 교통환기력의 영향을 무시할 수 있다면, 터널 내 기류유동은 외부자연풍에 의한 영향을 받게 된다. 따라서 일방향 터널과는 다르게 양방향 터널에서의 압력방정식은



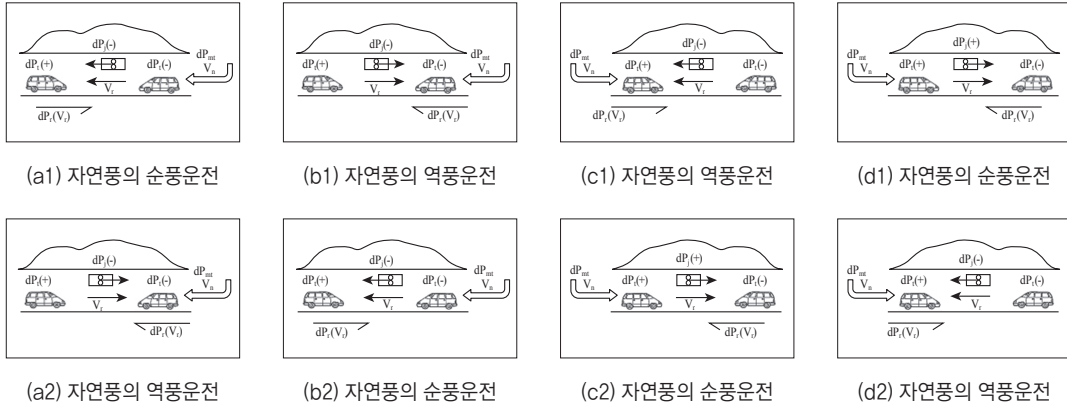
(a) 주교통(dP_+)의 역풍기류 (자연풍은 역풍조건)

(b) 주교통(dP_-)의 역풍기류 (자연풍은 순풍조건)

(c) 주교통(dP_+)의 역풍기류 (자연풍은 순풍조건)

(d) 주교통(dP_-)의 역풍기류 (자연풍은 역풍조건)

[그림 2] 양방향 터널의 작용 환기력



[그림 3] 그림 2에 따른 환기 운전모드

$dP_r = dP_{mt}$ 이 되고 통기저항력(dP_r)과 자연환기력(dP_{mt})의 방향은 서로 반대방향이 된다. 이럴 경우, **그림 2 (a)**와 **그림 2 (d)**는 가능한 조합이 성립되지만, **그림 2 (b)**와 **그림 2 (c)**처럼 통기저항력과 자연환기력의 방향이 동일하게 작용하는 것은 불가능한 조합이 된다. 그러나 일본의 경우처럼, 교통환기력의 영향을 무시할 수 없고 지체상황 조건을 고려하여 교통환기력을 저항력으로 간주한다면, 압력방정식은 $dP_r + dP_t = dP_{mt}$ 가 된다. 따라서 각각의 환기력은 터널 내 기류속도(V_r)와 외부자연풍압(dP_{mt})에 의한 터널 내 유도풍속(V_n)의 함수가 되므로, 터널 내 기류속도(V_r)에 관한 2차 방정식을 유도할 수 있고 이를 근의 공식으로 정리하면 터널 내 실풍속(V_r^*) 값을 구할 수 있다. 따라서 소요풍속($V_{req} = Q_{req} / A_r$)과 자연풍속(V_r^*)을 비교하면 자연환기 가능여부를 판별할 수 있다.

이상의 자연환기 판별을 통해 자연환기가 불가능하여 기계환기를 계획한다면, 환기팬의 작동 방향에 따라 **그림 3**의 8가지 운전모드에 대한 조합이 가능해진다. 그러나 방향별 주요통력(dP_t+ , dP_t-)에 대하여 자연풍의 순풍운전, 역풍운전이 있을 수 있는 4가지의 운전모드가 요약된다. 동일차속법에서는 **그림 3 (a1)**과 **그림 3 (b2)**, **(b1)**과

그림 3 (a2), **(c1)**과 **그림 3 (d2)**, **(d1)**과 **그림 3 (c2)**는 각각 동일한 경우를 나타내고 있다. 그러나 차등차속법에서는 반드시 동일하지는 않는데, 이는 주요통력의 방향, 자연풍의 크기, 팬 환기력의 상대적 크기에 따라 터널 내 기류방향이 결정되기 때문이다. 이때 환기방향을 터널 내 형성된 기류 방향으로 운전한다면, 최대 환기용량은 자연풍의 역풍운전 **그림 3 (b1)**, **(a2)**와 **그림 3 (c1)**, **(d2)**에서 결정되며 최소 환기용량은 **그림 3 (a1)**, **(b2)**와 **그림 3 (c2)**, **(d1)**에서 결정된다. 왜냐하면 후자의 경우에는 환기팬 운전방향이 외풍방향에 대하여 환기력으로 작용하며, 전자의 경우는 저항력으로 작용하기 때문이다. 따라서 갱구부의 오염물질의 확산을 제어할 필요가 있는 도심터널의 경우에는 최대 환기용량으로 계획할 필요가 있겠지만, 산악지형의 대면통행 터널에서는 어느 방향으로 환기시키든지 환기설비 용량이 최소로 요구되는 방향으로 환기설비를 운전할 필요가 있다.

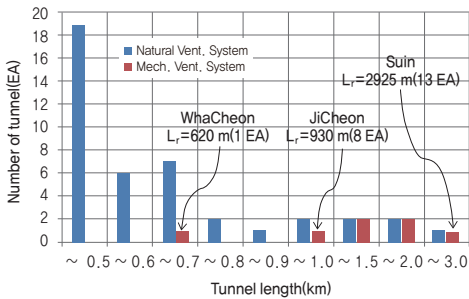
양방향 터널의 환기특성 분석

양방향 터널의 현황

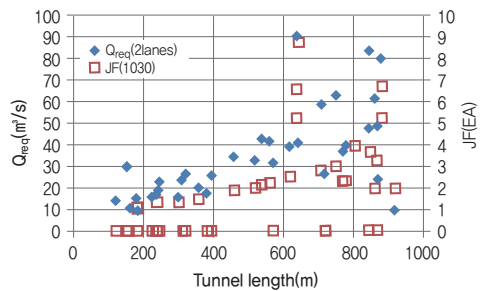
양방향 터널의 환기특성을 살펴보기에 앞서

기 운영 중인 국도 터널의 현황(2009년)을 조사하였다. 먼저 총 42개소 터널 중 1 km 미만에 환기팬이 설치된 터널은 **그림 4**와 같이 2개소(화천터널 620 m, 지천터널 935 m)인 것으로 조사되었다. 반면 최근 설계사례(총 55개소) 중 1 km 미만 터널(38개소)의 환기방식을 조사한 결과, 자연환기와 기계환기 방식이 교차하는 터널연장은 **그림 5**와 같이 약 250~900 m 정도로 분석되며 1 km 미만 터널에도 환기설비가 계획되고 있는 추세이다. **그림 6**은 설계 중인 터널 55개소의 연장별 소요풍속을 나타내고 있다. 자연환기 터널(15개소)과 기계환기 터널(40개소)의 소요풍속(V_{req})을 비교해 보면, 연장 1 km 이상 기계환기 터널은 0.7~4.4 m/s로 평균 2.3 m/s이며, 1 km 미만 기계환기 터널은 0.16~2.59 m/s로 평균 0.75 m/s, 자연환기 터널은 0.08~0.69 m/s로 평균 0.30 m/s 정도로 나타났다. 특히 500~1000 m 사이의 기계환기 터널의 평균 소요풍속은

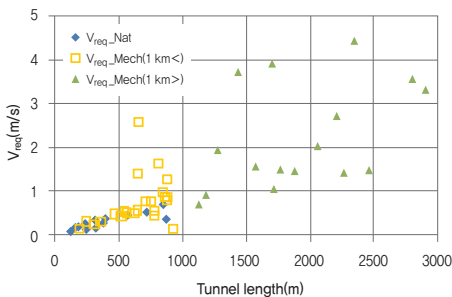
0.88 m/s로 대체로 1 m/s에 근접하는 경향을 보이고 있다(**그림 7**). 다음으로 연장 1 km를 기준으로 평균 소요풍속을 단면적이 $A_r=64 \text{ m}^2$ ($D_h=8.134 \text{ m}$)인 터널에 대하여 환기(통기)저항력(Pa)을 환산해 보았다. 1 km 이상의 기계환기 터널(2.31 m/s)은 14.9 Pa, 1 km 미만 기계환기 터널(0.75 m/s)은 1.59 Pa, 1 km 미만 자연환기 터널(0.30 m/s)은 0.25 Pa 정도이다. 따라서 제트팬 대당 승압력이 13~14 Pa 정도임을 감안한다면 1 km 미만 터널의 경우, 이들 소요풍속에 의한 통기저항력은 크지 않음을 알 수 있다. 이처럼 2010년을 기준으로 최근 5년 사이에 양방향 터널에서의 자연환기 가능연장이 급속히 축소되고 있는 이유로는 터널 내 허용농도 기준이 강화된 측면도 있겠지만, 외부자연풍의 적용기준이 -1.5 m/s에서 -2.5 m/s로 상향된 측면도 있다. 그러나 설계 시 적용되는 외부자연풍(저항력)의 크기가 증가된 이유는 동일한 지형(노선)상에 건설된



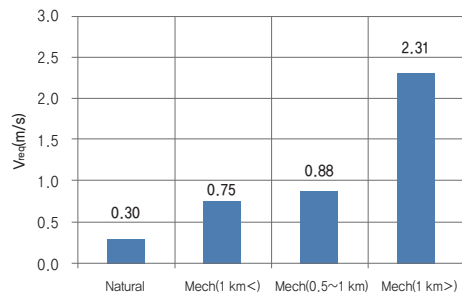
[그림 4] 개통중인 대면터널(2009년 기준)



[그림 5] 설계중인 대면터널(1 km 이하)



[그림 6] 연장별 소요풍속(V_{req})



[그림 7] 평균 소요풍속(V_{req})

동일한 단면을 가진 2개의 터널에 차량통행 방식차이로 인해 자연풍을 달리 적용할 수 없다는 측면에서 -2.5 m/s를 적용하고 있다. 따라서 최근 설계기법상에서 나타나고 있는 자연환기 가능 연장의 축소경향은 차량 엔진성능 향상에 따른 배출량의 감소경향을 적절히 반영하지 못한 측면이 있으므로 이를 개선하고자 본 논고에서는 양방향 터널의 환기특성에 기인한 자연환기 혹은 기계환기방식 결정에 대한 합리적인 방법을 제시하고자 한다.

최근 설계사별 설계사례를 분석한 결과 크게 2가지의 설계경향이 관찰되었다. 즉 '방법 1'은 소요환기량(Q_{req})을 처리하기 위한 소요풍속(V_{req})으로부터 터널 내 각종 환기력을 계산할 때, 외부자연풍의 방향성을 저항조건으로 보고 환기대수를 산출하는 방법이다. 즉, 소요승압력은 일방향 터널조건과 마찬가지로 $dP_o = dP_r \pm dP_{mt} - dP_t$ 로 표현되며, 터널 내 형성된 자연기류의 방향에는 관계없이 외부자연풍의 반대방향으로 강제환기시키는 방법이다. 이와 같은 방법은 도심터널 등과 같이 특정갱구로 배출된 공기량을 제어할 필요가 있을 때는 합리적인 방법이다. 반면 '방법 2'는 양방향 터널의 차량통행 특성상 터널 내 주교통력(dP_f) 방향과 환기제어(기류) 방향을 특정방향으로 단정적으로 결정할 수 없는 특성에 기인해, 외부자연풍이 작용하는 순방향 혹은 역방향에 따라 합리적인 방향으로 소요환기량을 처리하는 방법이다. 즉, 환기용량을 산출하기 전에 소요풍속(V_{req})과 자연환기풍속(V_r^*)의 절대값을 비교하여 자연환기가 가능할 경우는

환기설비를 계획하지 않고, 자연환기력의 부족분이 발생할 경우에만 기계환기 방식을 적용하는 방법이다. 이때의 소요승압력 계산방법은 전자의 계산방법과 동일하다.

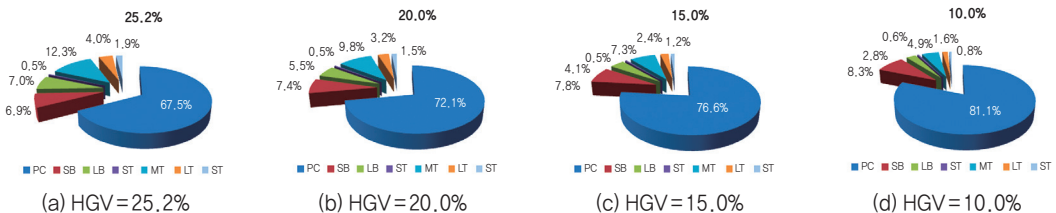
분석 개요

분석대상 터널은 일반국도상의 단면적(Case 1 : $A_r = 64 \text{ m}^2$, $D_h = 8.134 \text{ m}$)인 터널에 대하여 두 방법간의 환기방식 결정을 위한 비교검토를 수행하였다. 단, 종단경사는 $\pm 1\%$, 평균 계획고는 200 m, 외부 자연풍은 최대 2.5 m/s 그리고 D 값은 0.55으로 가정하였으며, 차종별 교통구성비는 그림 8과 같다. 기타 설계기법은 도로설계편람(617 환기시설)을 적용하여 계산하였다.

터널환기 용량 계산결과

표 1은 방법 1에 대한 연장별 제트팬 산출대수를 나타내고 있다. 동일차속법 기준으로 HGV 값이 20%를 상회하면, 400 m 이상 터널에는 제트팬이 필요한 것으로 분석되며, HGV 값이 20% 미만일 경우는 600 m 이상 터널에 제트팬이 필요한 것으로 분석된다. 반면 중방향계수(D)값 범위를 고려할 경우 400 m 이상 터널에 제트팬이 필요한 것으로 분석된다.

다음은 '방법 2'에 의한 연장별 소요풍속 및 실풍속을 계산하였다. 즉, 양방향 터널의 자연환기 가능성을 검토하기 위해서는 압력평형식을 살펴볼 필요가 있는데, 이는 앞서 양방향터널에서 살펴본 것



[그림 8] 대형차혼입률(HGV) 분포

〈표 1〉 방법 1에 의한 계산결과

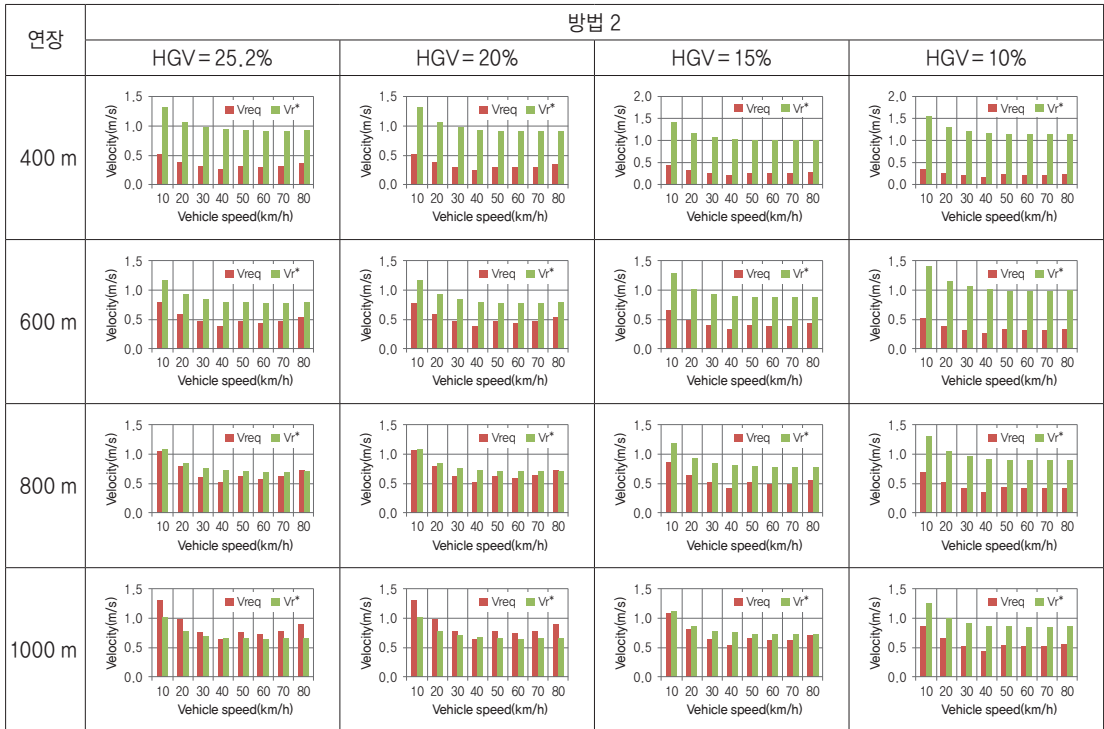
연장	방법 1(제트팬 : 1,030 mm)							
	HGV = 25.2%		HGV = 20%		HGV = 15%		HGV = 10%	
	동일	차등	동일	차등	동일	차등	동일	차등
200 m	0.69	0.98	0.67	0.93	0.65	0.88	0.63	0.83
400 m	1.16	1.68	1.05	1.54	0.96	1.42	0.89	1.29
600 m	1.83	2.57	1.58	2.29	1.38	2.04	1.23	1.81
800 m	2.72	3.67	2.28	3.16	1.91	2.77	1.64	2.40
1000 m	3.85	5.00	3.14	4.19	2.58	3.60	2.13	3.06

처럼 '통기저항력(dP_r) + 교통저항력(dP_t) = 외부자연풍(dP_{mi})'으로 계산할 수 있다. 이때 교통환기력은 저항력으로 작용하며, 외부자연풍의 크기에 의존하여 터널 내 기류가 형성된다. 즉, $\Delta P_t + \Delta P_r - \Delta P_{mi} = 0$ 에서 $a = \left(1 + \xi_c + \lambda \times \frac{L_r}{D_r}\right) \times \frac{\rho}{2}$, $b = \frac{A_m}{A_r} \frac{\rho}{2} \times n \times 4 \times V_t$, $c = \left(1 + \xi_c + \lambda \times \frac{L_r}{D_r}\right) \times \frac{\rho}{2} \times V_n^2$ 이므로

로 $a \cdot V_r^2 + b \cdot V_r - c = 0$ 에 대하여 V_r 에 대한 2차 방정식의 근의 공식을 풀면, $V_r^* = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2 \times a}$ 된다.

표 2를 살펴보면, 대형차혼입률(HGV) 20% 이상일 경우, 800 m 이상에서 기계환기가 필요한 것으로 분석되며, 20% 미만일 경우는 1 km까지 자연환기가 가능한 것으로 분석된다. 따라서 일반적인

〈표 2〉 방법 2에 의한 계산결과



국도터널일 경우, 방법 2의 경우는 800~1,000 m까지 자연환기가 가능함을 알 수 있다. 환기설비 대수 산정에 관해서는 자연풍 저항을 일괄적으로 2.5 m/s로 적용하기보다는 적정 자연풍 저항값을 도출한 후 해당터널의 자연풍 저항값을 적용하는 것이 바람직하다. 왜냐하면, 대면통행 터널에서의 기류(환기)방향이 정해져 있지 않기 때문에 자연풍이 크면 클수록 자연풍이 부는 방향으로 환기되는 현상이 발생하기 때문이다.

적정 외부자연풍과 환기용량 비교

다음으로 대면통행 터널에서 방향별 교통환기력이 서로 상쇄될 경우, 기류흐름은 외부 자연풍에 의해 형성된다. 따라서 역풍으로 자연환기가 될 경우 이를 저항으로 보고 기류 반대방향으로 환기설비를 설치하여 가동하는 것은 유지관리 측면이나 경제적인 측면에서 불합리할 수 있다. 따라서 외부자연풍의 크기를 역풍으로 최대값을 적용할 경

우 역방향으로 자연환기가 가능한 것으로 분석되나, 외풍에 의한 영향이 없으면 터널 내 기류형성이 없으므로 소요풍속보다 작아져 자연환기가 어렵게 되므로 이를 고려한 적정 외부 자연풍의 크기(V_n^*)를 분석할 필요가 있다. 예를 들어, 터널연장이 500 m이고 대형차혼입률(HGV)이 20%인 가정하에 외부자연풍에 대한 자연환기가능 여부를 살펴해보았다. 표 3은 적정 외부자연풍의 크기와 이에 따른 터널 내 압력평형식을 통해 환기설비의 소요대수를 산출한 결과이다. 이때의 압력평형식은 $dP_r \pm dP_{mt} = dP_t (+dP_j)$ 와 같이 되고, 소요승압력은 $dP_o = dP_r \pm dP_{mt} - dP_t$ 이 된다. 두 방법 간의 차이는 외부 자연풍의 크기를 '얼마로 적용할 것인가'이다. '방법 1'의 경우는 최악조건을 고려하여 환기팬을 가동한다는 전제조건에서 팬 방향의 역풍방향으로 자연저항풍($V_n = 2.5$ m/s)을 적용하여 제트팬을 산출한 결과이고, '방법 2'는 양방향 터널의 특성상 기류(환기)제어 방향을 확정할 수 없기 때문

〈표 3〉 방법 1, 2간의 비교결과

차속(km/h)	10 km/h	20 km/h	30 km/h	40 km/h	50 km/h	60 km/h	70 km/h	80 km/h
Q_{req} (m/s)	42.27	31.44	24.79	20.60	25.01	23.43	25.16	29.16
V_{req} (m/s)	0.66	0.49	0.39	0.32	0.39	0.37	0.39	0.46
외부자연풍 V_n (m/s)								
	방법1 V_n (m/s)	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
방법1 Jet Fan(EA)	1.27	1.25	1.20	1.15	1.23	1.21	1.23	1.30
방법2 V_n^* (m/s)	1.7	1.6	1.5	1.4	1.6	1.6	1.6	1.5
방법2 Jet Fan(EA)	0.80	0.75	0.65	0.56	0.72	0.70	0.73	0.79

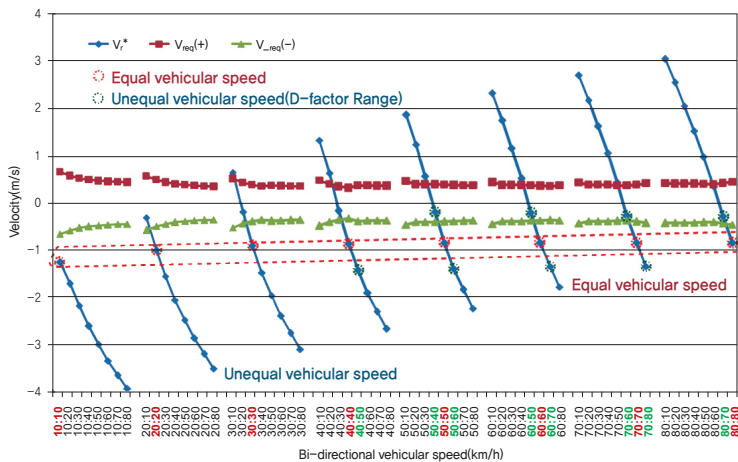
에 큰 자연풍($V_n = 2.5$ m/s 이상)이 불 경우는 방향성에 관계없이 어느 방향으로든 실풍속(V_r^*)이 소요풍속(V_{req})보다 크다면 자연환기를 시킬 수 있다는 것이다. 단, 자연환기량이 부족하여 기계환기가 필요한 경우는 적정 외부자연풍(V_n^*)을 고려하여 환기대수를 산출한 결과이다. 표 3에서 두 방법 간의 환기용량 차이는 '방법 2'가 '방법 1'에 비해 주행 속도별로 약 50~60% 정도 작게 나타나고 있다. 따라서 도로설계편람의 환기설계 기법상 '방법 1'에서는 기계환기가 필요한 것으로 분석되나, '방법 2'에서는 제트팬 대수가 1대 미만일 경우 자연환기로 처리할 수 있는 규정 때문에 자연환기가 가능한 것으로 분석된다. 본 예제의 경우, '방법 1'의 경우 터

널연장이 1m 되어도 제트팬 대수 0.44대 산출되는 문제점을 가지고 있어, 자연환기 가능 범위를 결정하기가 곤란한 단점이 있다. 향후 양방향 터널의 적정 환기방식 결정 및 환기용량 산출을 위해서는 '방법 2'에 대한 검토가 필요해 보인다.

그림 9는 차등차속(U.V.S)법을 고려할 경우, 외부자연풍 2.5 m/s 조건하에서의 터널 내 풍속분포를 나타내고 있다. 동일차속(E.V.S)법에서는 터널 내 실풍속이 소요풍속보다 커서 자연환기가 됨을 알 수 있다. 반면 차등차속을 적용하기 위해서는 중방향계수(D)값의 범위를 분석할 필요가 있다. $D=0.55$ 일 경우 방향별 중방향 비율은 0.45~0.55이므로 표 4와 같은 차등차속의 범위가 형성되며,

〈표 4〉 터널 내 차량대수의 비율분포($D=0.55$)

차속(km/h)	10	20	30	40	50	60	70	80
10	0.500	0.414	0.348	0.298	0.258	0.227	0.200	0.179
20	0.586	0.500	0.430	0.375	0.330	0.293	0.261	0.235
30	0.652	0.570	0.500	0.443	0.395	0.355	0.319	0.290
40	0.702	0.625	0.557	0.500	0.451	0.409	0.371	0.339
50	0.742	0.670	0.605	0.549	0.500	0.458	0.418	0.385
60	0.773	0.707	0.645	0.591	0.542	0.500	0.460	0.426
70	0.800	0.739	0.681	0.629	0.582	0.540	0.500	0.465
80	0.821	0.765	0.710	0.661	0.615	0.574	0.535	0.500



〈그림 9〉 터널 내 풍속 분포($L_t=500$ m, $G_t=\pm 1\%$, $HGV=20\%$)

터널 내 풍속을 살펴보면 **그림 9**와 같다. 붉은색 원형 점선으로 표시된 부분이 동일차속을 나타내고 있으며, 푸른색 원형 점선으로 표시된 부분이 차등차속 범위 중 중방향 계수(D) 값 이내의 검토 범위를 나타내고 있다. 삼각형과 사각형으로 채워진 부분인 $V_{req}(+)$ 와 $V_{req}(-)$ 는 방향별로 소요환기량을 단면적으로 나눈 소요풍속을 나타내고 있다. **그림 9**에서, 기준방향과 반대방향의 차량속도가 50:40, 60:50, 70:60, 80:70일 경우가 차등차속(UVS)법에 따른 기계환기의 검토가 필요한 영역이 된다. 그러나 양방향 터널의 특성상 이때 기류(환기) 제어방향을 어디로 할지에 따라 제트팬 대수가 달리 결정될 수 있다. 이에 대한 기준은 명확히 제시되어 있지 못하다. 다만 역풍(2.5 m/s)이 주어진 조건에서 반대방향으로 제어할 경우 1대 미만의 제트팬 대수가 결정될 수 있으며, 역풍을 이기고 기준방향으로 제어할 경우는 최대 2대의 제트팬($\Phi 1030$) 대수가 결정될 수 있다. 그러나 적정 외부자연풍($V_{n,*}$)을 적용할 경우 모두 1대 미만의 제트팬 대수가 산출되었다.

결론

국내 설계기준에는 양방향 터널에서의 환기방식 결정에 관한 구체적 언급이 없어 1 km 미만 터널의 경우 기계환기 및 자연환기 방식이 다양하게 계획되고 있다. 따라서 본 연구에서는 환기방식 결정에 관한 사항 중 특히 자연환기 방식의 검토에 관한 연구를 일반적인 국도터널을 대상으로 분석을 수행하였다. 이상의 연구내용을 정리하면 다음과 같다.

(1) 양방향 터널의 경우, 2009년 이전까지는 약 1 km까지 자연환기 터널이 건설되었으나, 최근 설계사례 조사에서는 1 km 미만 터널에 제트팬이 설치되는 사례가 크게 증가하고 있으면서 동

시에 자연환기 가능한 터널연장도 약 900 m 정도로 나타나고 있다. 이는 크게 두 가지 방법론에 기인한 것으로 분석되었다.

- (2) 먼저 '방법 1'은 일방향 터널과 같이 최악 조건의 자연풍저항력을 고려하고 있으나, 자연환기 검토방법론의 부재로 최악조건의 제트팬을 산출하고 있는 특성을 보이고 있다. 따라서 도심 터널에서는 적절한 방법론이지만, 산악터널에서는 다소 과한 설계용량을 도출하는 결과를 나타내는 것으로 분석되었다. 특히 자연환기가 가능한 터널연장 범위를 분석하기가 곤란한 단점이 있다.
- (3) 반면, '방법 2'는 양방향 터널의 특성인 기류(환기) 제어방향을 합리적으로 고려할 수 있어 외부 자연풍에 따른 자연환기가 가능한 터널연장을 '방법 1'에 비해 폭넓게 형성하고 있다. 따라서 오염물질의 배출방향을 고려할 필요가 없는 일반적인 산악지형에서는 적합한 분석방법이다.
- (4) 설계사례 중 자연환기 터널(15개소)과 기계환기 터널(40개소)의 소요풍속(V_{req})을 비교해 보면, 연장 1 km 이상 기계환기 터널은 0.7~4.4 m/s로 평균 2.3 m/s이며, 1 km 미만 기계환기 터널은 0.16~2.59 m/s로 평균 0.75 m/s, 자연환기 터널은 0.08~0.69 m/s로 평균 0.30 m/s 정도로 나타났다. 특히 500~1,000 m 사이의 기계환기 터널의 평균 소요풍속은 0.88 m/s로 대체로 1 m/s에 근접하는 경향을 보이고 있다.
- (5) 일반적인 국도터널을 대상으로 한 분석 결과, 대형차혼입률(HGV)에 따른 편차는 있지만, 대형차혼입률이 20%를 상회할 경우, '방법 1'에 의해서는 약 400 m까지, '방법 2'에 의해서는 800 m까지 자연환기가 가능함을 알 수 있었다. 반면 대형차혼입률이 20% 미만일 경우, '방법 1'에 의해서는 약 400~600 m까지, '방법 2'에 의해서는 800~1,000 m까지 자연환기가 가능함을 알

수 있었다.

- (6) 터널연장 500 m를 대상으로 분석한 결과, 두 방법 간의 환기용량 차이는 '방법 2'가 '방법 1'에 비해 주행속도별로 약 50~60% 정도 작게 나타나는 것으로 분석되었다. 따라서 도로설계편람의 환기설계 기법상 방법 1에서는 기계환기가 필요한 것으로 분석되나, 방법 2에서는 제트팬 대수가 1대 미만일 경우 자연환기로 처리할 수 있는 규정 때문에 자연환기가 가능한 것으로 분석되었다.
- (7) 현재 다양한 형태들의 방음터널, 지하박스형 터널들이 건설되고 있는데, '방법 1'에 의해 기계환기 방식의 적용은 건설공사비 상승을 가져올 수 있으며, 특히 통행량이 적고 외부자연풍의 크기가 큰 산악지형의 양방향 터널은 편익비용분석을 악화시키는 결과를 가져올 수 있다. 따라서 '방법 2'에 의한 자연환기 검토를 통해

합리적인 제트팬 기류(환기) 제어방향 선정과 용량산출이 필요해 보이며, 향후 환기기준 개정 시 이에 대한 반영이 필요하다고 생각한다.

참고문헌

1. 김효규, 송석현, 이창우, 2005, 대면통행 터널의 환기특성-동일차속과 차등차속을 중심으로, 터널지하공간학회, 제7권, 제1호, pp. 13-25.
2. 일본 도로협회, 2008, 도로터널 설계기준(환기편) 동해설, pp. 262-263.
3. 국토부, 2009, 도로터널의 방재시설 조사 및 설계, pp. 37-79.
4. 국토부, 2011, 도로설계편람(917. 환기시설), pp. 617-39~617-40.
5. 한국도로공사, 2011, 고속도로 터널 환기설계 기준, pp. 38-50. 