

고속도로 터널의 적정 환기용량 계획을 위한 원할 및 지체조건 판별모델 개발에 대한 연구

김효규^{1*}, 류지오², 이창우³

A Study on the development of a decision model on free flow and congested traffic conditions to determine the optimal ventilation capacity in highway tunnels

Hyo-Gyu Kim, Ji-Oh Yoo, Chang-Woo Lee

ABSTRACT According to the local highway tunnel ventilation guideline, ventilation capacity calculation should be performed at the speed ranging from 10 km/h to 80 km/h. This is so reasonable method considering uncongested and congested traffic conditions in urban tunnels. But recently due to low traffic volume and very low congestion frequency in rural highway tunnels, it seems to be an inadequate way to apply the guideline. Therefore the calculation should be performed separately for the free flow and congested traffic cases classified by the appropriate decision model. This paper aims at determining unnecessary running speed range for reasonable tunnel ventilation design, considering free flow and congested traffic conditions. Firstly, traffic volumes in highway tunnels were collected and if any, the causes of congestion were investigated. And with concept of 'margin speed' ($u - u_m$), the decision model on traffic congestion was developed. Applicability of the decision model was also analyzed with case study. According to the results, when design speed is 100 km/h, with V/C less than 0.1, then the range of unnecessary speed in tunnel ventilation design is less than 40 km/h; for $V/C \leq 0.35$, $V/C \leq 0.6$ and $V/C \leq 0.75$, the unnecessary speed ranges are found to be ≤ 30 , ≤ 20 and ≤ 10 km/h, respectively.

Keywords: Highway, tunnel ventilation, congested traffic model

요약 종전 환기설계기준에 따르면 전속도(10~80 km/h)를 대상으로 환기검토를 수행하였다. 이는 원할시 및 지체시 상황을 모두 고려한 환기계획이며 도심터널 등에서는 합리적인 방법이다. 그러나 최근 지방부 고속도로의 터널은 교통량이 낮고, 지체발생빈도가 매우 낮기 때문에 지정체를 모두 고려하여 환기계획을 수행하는 것은 다소 불합리성이 있다. 따라서 적정 환기계획을 위해 원할교통과 지체교통을 구분할 필요가 있으며, 교통류의 지정체에 따른 지정체 판별식을 개발할 필요성이 제기된다. 본 연구에서는 합리적 환기계획을 위해 지정체 여부에 따른 환기검토 제외속도를 결정하고자 하였다. 먼저 국내 고속도로상 지정체 교통량을 조사하고 지정체 원인을 분석하였다. 그리고 '여유속도' ($u - u_m$) 개념을 도입하여 지정체 판별모델을 개발하였으며 대상터널에 대한 그 적용성을 분석하였다. V/C 비율에 따른 환기검토 제외속도 분석결과, 설계속도 100 km/h 일 경우 V/C 가 0.1 이하일 경우는 40 km/h 이하, V/C 가 0.35 이하일 경우는 30 km/h 이하, V/C 가 0.6 이하일 경우는 20 km/h 이하, V/C 가 0.75 이하일 경우는 10 km/h 이하에서 환기검토 제외가 가능하였다.

주요어: 고속도로, 터널환기, 지정체 모델

접수일(2012.07.05), 수정일(2012.07.13), 게재확정일(2012.07.19)

¹㈜주성지앤비 대표이사

²신홍대학교 건축설비과 교수

³동아대학교 에너지·자원공학과 교수

*교신저자: 김효규 (E-mail: hgkim@gnbeng.com)

1. 서론

현행 국내 터널환기 설계기준을 살펴보면, WRA(구, PIARC) 방식에 따라 전 주행속도(10~80 km/h)를 분석대상으로 하고 있다. 이는 원활시(free flow)와 지정체시(congested flow)를 모두 포함한 주행속도(running speed)를 의미하며, 일반적인 환기계획은 지정체를 포함한 상황에서도 쾌적한 터널환경을 위해 지정체시 환기시설을 계획하고 있다.(국토해양부, 2010, 한국도로공사, 2002) 따라서 도심터널과 같이 출퇴근 교통량에 의한 러시아워의 지정체가 예상되는 터널의 경우에는 합리적인 환기설계 기준이 될 수 있다. 반면 지방부 고속도로 터널의 경우에는 지정체 발생빈도가 낮을 것으로 예상되며, 이 경우에도 전 주행속도를 모두 검토하여 환기계획을 하는 것은 시설투자비 대비 운전효율의 효과가 미흡하여 경제성이 부족할 것으로 예상된다. 따라서 합리적인 환기시설 계획을 위해서는 환기계획시 적용하는 환기검토 속도(10~80 km/h)에 대한 교통류의 지정체 판별모델 도입에 대한 검토가 필요하며, 이를 위해서는 교통류의 혼잡상태에 따른 지정체 판별개념에 대한 검토가 선행되어야 할 것으로 보인다. 이는 합리적인 환기시스템 구축을 위해 필수적인 요소이다.(유지오 등, 2002, 김효규 등, 2005a, 2007b, 이창우 등, 2009)

본 연구에서는 국내 고속도로 실측(VDS)자료로부터 획득한 지정체 발생요인을 분석한 후, 국내 교통류 특성과 환기계획 특성을 모두 고려한 적정 모델을 제시하고자 한다. 이는 지방부 고속도로 터널의 경우, 교통량이 적고 교통류 특성상 주행속도가 높고 지정체의 발생확률이 비교적 낮은 특성을 반영하기 위함이며, 지방부 고속도로 터널에 대한 적정 환기시설을 계획하기 위한 환기검토 제외속도를 찾는 데 그 목적이 있다.

2. 지정체 현황분석

2.1 지정체 속도규정

지정체 현황자료의 분석에 앞서 지정체 속도규정에 대해 살펴보하고자 한다. 표 1에서와 같이 지정체에 대한 속도규정은 도로의 운영관리 주체별로 상이하나 한국도로공사에서는 2011년 이후 30 km/h 이하에서 40 km/h 이하를 지정체 발생구간으로 정의하고 있다. 즉, 1996년부터 고속도로 정체 기준속도를 30 km/h로 적용하였으나, 2011년 4월에 정체 기준속도를 40 km/h로 상향 조정하였고, 요일별 정체특성을 반영하여 관리하고 있다. 표 2는 한국도로공사의 정체구간 선정기준을 나타내고 있다.

표 1. 도로의 운영주체별 원할-지정체 속도 규정(복기찬, 2009)

운영주체	정의		지표
한국도로공사 (지방부 고속도로)	소통원할	70 km/h 이상	속도
	서행	30~70 km/h	
	정체	30 km/h 미만	
서울도시고속도로 교통관리센터 (도시부 고속도로)	소통원할	50 km/h 이상	속도
	서행	30~50 km/h	
	정체	30 km/h 미만	
서울지방국토관리청 (국도)	소통원할	40 km/h 이상	속도
	서행	30~40 km/h	
	정체	20 km/h 미만	
대전시 ITS 센터 (도시부 도로)	혼잡구간에 대한 특정기준이 없으며, 14km/h 미만을 혼잡으로 정의		속도

표 2. 한국도로공사의 정체구간 선정기준(고속도로 교통정체 개선계획, 2011.7.18)

구 분		통행 속도	지속 시간	발생 빈도
2011. 4 이전	-	30 km/h 이하	2 시간/일 이상	10 일/월 이상
2011. 4 이후	평일	40 km/h 이하	1 시간/일 이상	8 일/월 이상
	주말		2 시간/일 이상	4 일/월 이상

2.2 고속도로 지정체 원인분석

현재 한국도로공사에서는 VDS 망을 통해 고속도로의 지정체 구간을 관리하고 있으며, 관리구간 83개 자료군을 획득하여 분석하였다. VDS 를 통해 획득한 자료를 지정체 발생원인을 누적 집계하여 그림 1에 나타내었다. 고속도로의 지정체 발생 주요원인은 합류차량 과다, 주말/평일 출퇴근 교통량 증가, 차로수 감소에 따른 원인이 가장 많은 것으로 분석되었다. 또한 설계단계에서 실제 교통량의 증가를 예측하기가 곤란하기 때문에 교통량의 예측부분을 제외하면 노선상의 합분류 여부, 차로수 감소 등과 같은 물리적 조건이 있는 경우에 지정체 발생 가능성이 높은 것으로 분석된다. 또한 화물차량이 많은 경우에도 지정체 발생 가능성이 있는데, 그림 2에서처럼 대형차혼입률(HGV)과 AADT 값은 반비례 관계에 있으며, 동일한 AADT 값이라도 대형차혼입률이 높을수록 도로용량을 초과하는 경향이 있다. 따라서 대형차혼입률이 증가할수록 지정체의 발생 빈도가 높아질 가능성이 있는 것으로 분석된다.

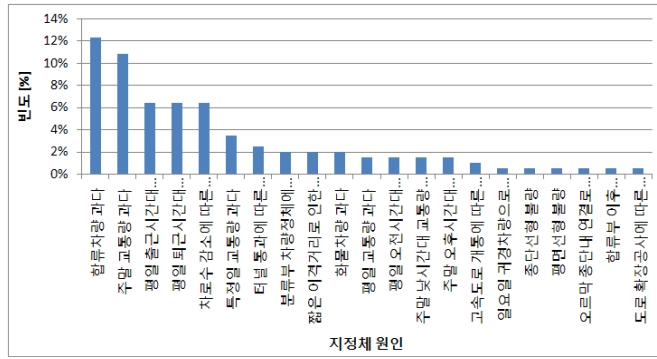


그림 1. 고속도로 지정체 원인

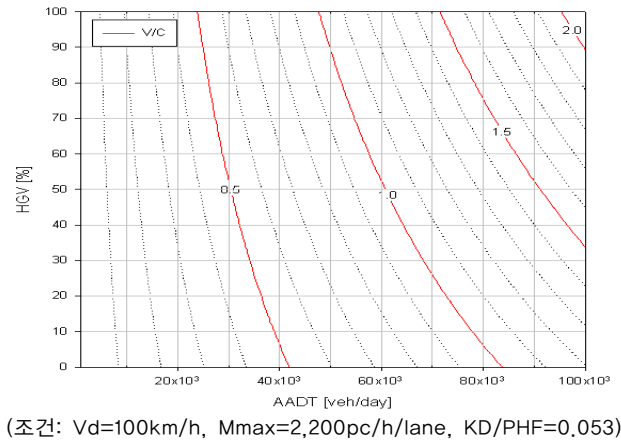


그림 2. 대형차혼입률(HGV)과 AADT 관계

2.3 지정체 교통량 분석

다음은 실제 노선의 교통량을 이용하여, 지정체 발생구간의 교통량의 범위를 차로수별로 분석해 보았다. 즉, 지점번호에 대한 교통량은 고속도로 통계연보의 AADT 값 자료를 이용하였으며, 2010년 자료가 없는 노선은 2009년 AADT 값을 이용하였다(한국도로공사, 2011).

먼저 차로수별 분석은 그림 3과 같으며, 계급구간은 25,000대/일로 분석하였다. 분석결과 왕복 4차로(편도2차로)는 25,000~150,000 대/일 분포를 나타내며, 최빈값은 75,000 대/일 부근에서 나타났다. 왕복6차로(편도3차로)는 50,000~200,000 대/일 분포를 나타내며, 최빈값은 125,000 대/일 부근에서 나타났다. 왕복8차로(편도4차로)는 100,000~250,000 대/일 분포를 나타내며, 최빈값은 150,000 대/일 부근에서 나타났다. 그리고 왕복10차로는 150,000~225,000 대/일 분포를 나타내며, 최빈값은 175,000 대/일 부근에서 나타났다.

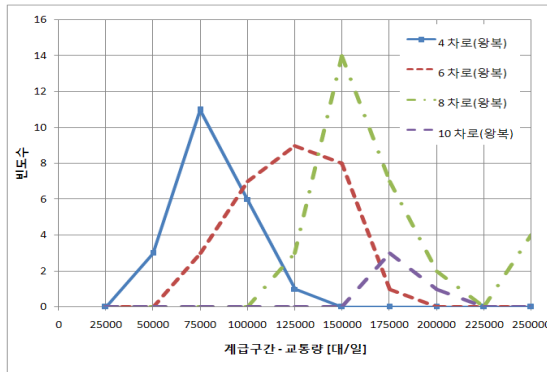


그림 3. (왕복)차로수별 AADT 분포(계급구간: 25,000 대/일)

다음은 차로수별 자료수의 부족으로 전체자료에 대하여 차로수를 편도 2차로 환산한 AADT 값을 가지고 이에 따른 지정체 발생 분석을 수행하였다. 분석 데이터에 대한 최소값은 34,609 대/일이며, 최대값은 120,945 대/일이다. 또한 평균(μ)값은 73,713 대/일이며, 표준편차(σ)는 17,723 대/일로 조사되었다. 표 3는 분석자료에 대한 계급구간을 5,000 대/일로 하였을 경우에 대한 표준정규 분포를 나타내고 있다. 지정체가 발생한 편도 2차로 환산기준 AADT 값은 34,609~120,945 대/일 이며, 평균값은 73,713 대/일에서 나타났다. 또한 AADT 값이 약 34,000 대/일 이하에서는 지정체 발생 자료가 나타나지 않았다. 누적확률분포의 2.5% 값을 최소 예상 지정체 교통량으로 고려할 경우, AADT 값이 약 39,000 대/일을 초과할 경우에 지정체 발생으로 간주할 수 있는 것으로 분석된다. 표 4는 지체구간의 AADT(대/일) 값을 승용차대수(pc)로 환산한 결과이다.

표 3. 2차로 환산 AADT 분포

〈정규분포(계급구간: 5,000 대/일)〉		〈표준정규분포〉			
구간	도수	정규분포	누적분포	$Z = \frac{X - \mu}{\sigma}$	비고
~16,665	0	1.27E-07	0.1%	- 3.22	누적확률분포값이 2.5%가 되는 계급값은 대략 39,000 (대/일)로 분석됨.
~32,689	0	1.54E-06	1.0%	- 2.31	
~38,910	3	3.27E-06	2.5%	- 1.96	
~44,422	4	5.74E-06	4.9%	- 1.65	
~51,010	7	9.91E-06	10.0%	- 1.28	
~73,716	46	2.25E-05	50.0%	- 0.00	

다음의 그림 4, 5는 3차로 및 4차로 환산 교통량(AADT)에 대한 표준정규분포를 정리하였다. 3차로 환산 교통량에 대한 AADT 값은 51,914~181,418 대/일이며, 평균값이 110,570 대/일, 표준편차가 26,584 대/일로 나타났다. 그리고 4차로 환산 교통량에 대한 AADT 값은 69,218~241,890 대/일이며, 평균값이 147,427 대/일, 표준편차가 35,445 대/일로 나타났다. 누적확률분포의 2.5% 값을 최소 예상 지정체 교통량으로 고려할 경우, 3차로 환산 AADT 값은 약 58,000 대/일, 4차로 환산 AADT 값은 약 78,000 대/일을 초과할 경우에 지정체 발생으로 간주할 수 있는 것으로 분석된다.

이상의 지정체 자료로부터 차로수별 지정체가 발생한 최소 교통량(누적확률분포의 2.5% 값을 최소 예상 지정체 교통량으로 고려할 고려)을 정리해 보면, (1) 왕복 4차로(편도 2차로) 환산 교통량(AADT)의 경우, 약 39,000 대/일 이상에서는 지정체 발생, (2) 왕복 6차로(편도 3차로) 환산 교통량(AADT)의 경우, 약 58,000 대/일 이상에서는 지정체 발생, (3) 왕복 8차로(편도 4차로) 환산 교통량(AADT)의 경우, 약 78,000 대/일 이상에서는 지정체 발생한 것으로 분석된다.

표 4. 지체구간의 AADT(대/일) 값을 승용차대수(pc)로 환산 결과

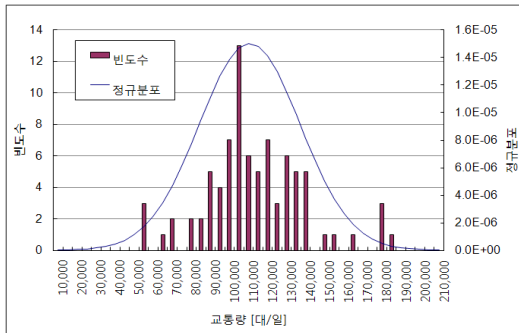
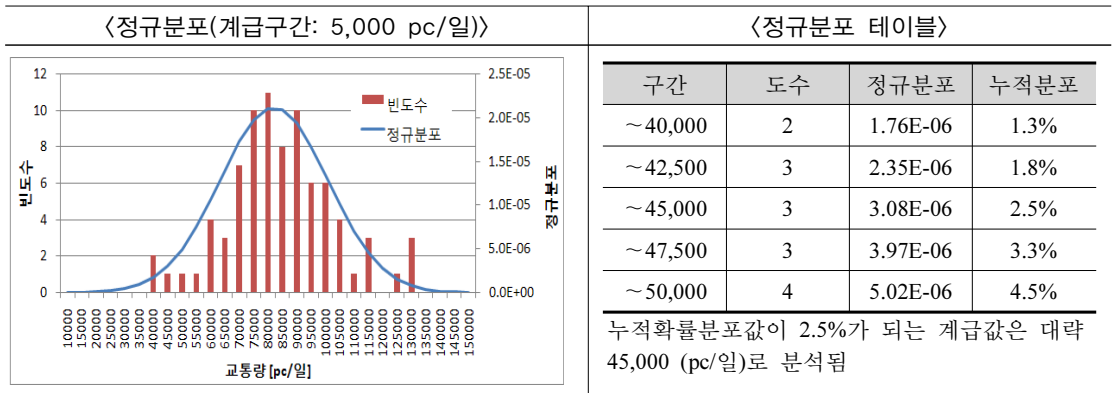


그림 4. 3차로 환산 AADT 분포

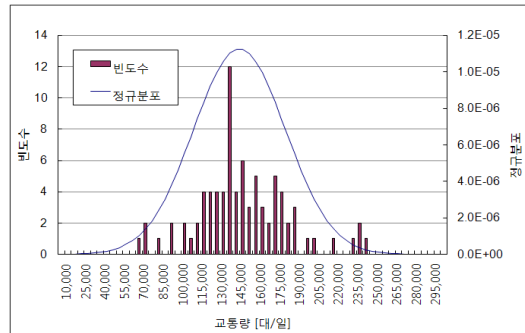
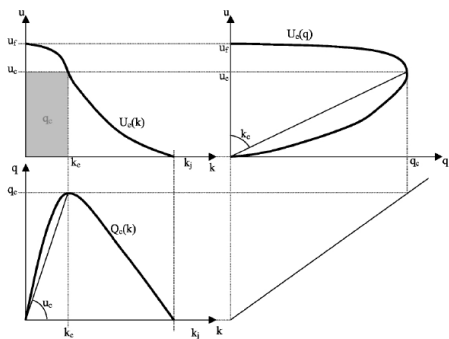


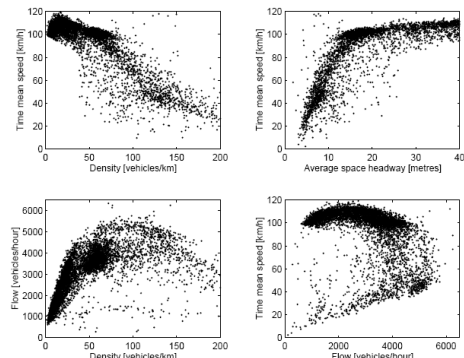
그림 5. 4차로 환산 AADT 분포

3. 지정체 모델의 이론적 개요

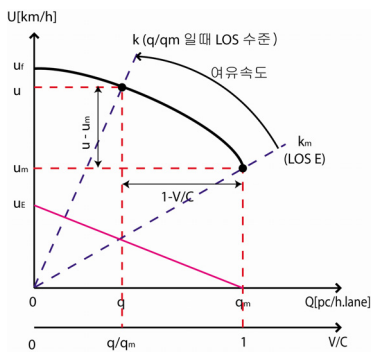
연속교통류에서의 차속(u)-교통량(q)-밀도(k)의 관계를 종합해 보면 그림 6(a)과 같다. 차속(u)-밀도(k) 관계도에서 보면 차속(u)과 밀도(k)는 반비례의 관계가 있고, 차속(u)-교통량(q) 관계도를 살펴보면 차속(u)과 교통량(q)은 우측으로 볼록한 포물선 형태의 분포를 나타내고 있으며, 임계차속(u_m or u_c) 이하 영역이 용량을 초과한 상태를 나타낸다. 또한 교통량(q)-밀도(k) 관계도에서 보면, 임계차속(u_m or u_c) 전까지는 교통량(q)이 증가하면 밀도(k)가 증가하다가 어느 시점(임계밀도; k_m or k_c)에 도달하면 다시 교통량(q)이 감소하는 현상이 발생한다. 일반적으로 임계밀도(k_m or k_c)를 기준으로 자유흐름(free flow)과 정체(congested flow) 구간으로 구별할 수 있다. 그러나 이 임계 밀도를 찾아내기가 어려운 실정이며, 현재까지 지정체 영역(u_m 이하의 영역)에서 지정체 속도를 판별할 수 있는 이론적인 모델은 없으며 불확실성이 큰 편이다(Roger et al., 1998, L.H. Immers et al., 2002, S.Maerivoet, 2008).



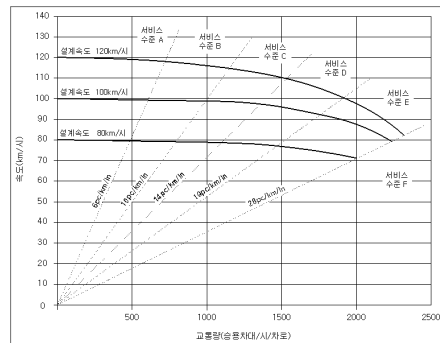
(a) 연속교통류의 이론적 모형(u - q - k 관계도)



(b) 실측자료(E17 Motorway)



(c) 지정체 모델 개념도



(d) u - q 선도(도로용량편람, 2001)

그림 6. 연속교통류의 u - q - k 관계도 및 지정체 모델의 개념도

따라서 본 연구에서는 원활영역(u_m 이상의 영역)에서 ‘여유속도’ 개념을 도입하여 상대적인 환기검토 제외속도를 검토하고자 한다. 그림 6(c)에서, ‘여유속도’는 수직성분($u - u_m$)과 수평성분($1-V/C$)으로 구분할 수 있으며, 이 여유속도의 상대적인 크기에 따라 환기검토 제외속도를 결정할 수 있다. 즉, 환기검토 제외속도는 V/C 가 ‘0’에 가까울수록 큰 값(u_E)을 가지며 V/C 가 ‘1’에 가까울수록 낮은 값(혹은 ‘0’)이 된다. 혹은 수직성분($u - u_m$) 차가 클수록 환기검토 제외속도는 커지고, u 가 u_m 에 근접할수록 지정체 발생확률이 높아 환기검토 제외속도는 없어진다.

그리고 u_E 값은 주어진 설계조건에서의 지정체가 발생하지 않는 상태를 가정한 경우로, (지체환기 설비용량 결정 제의를 위한) 원활시 최대 환기검토 제외속도를 의미한다. 이 값은 교통측면에서의 지정체 속도와 무관하며, 환기설비용량 결정 측면에서 도입된 개념이다. 따라서 환기검토 제외속도 U_{EV} 는 선형 1차원식으로 표현할 경우, u_E 와 V/C 만의 함수로 표현이 가능하다.

3.1 여유속도

지정체 모델의 개발과 관련하여, 예측교통량(계획교통량)이 적을수록 지정체 확률이 낮다고 할 수 있다. 이것은 환기기 용량을 산정할 때, 낮은 계획교통량에서는 낮은 차량속도에 대한 산정제외 근거를 합리화시켜 줄 수 있다. 반대로 높은 계획교통량은 어떤 요인에 의해 쉽게 도로용량을 초과할 확률이 더 높으며, 따라서 지정체를 대비한 낮은 차량속도에서 환기기의 용량을 검토해야 한다는 것을 의미한다고 할 수 있다. 이와 같은 논리로 도로용량편람에서 국내 실정에 맞게 연구된 교통량-속도-밀도 관계 그래프에서 80, 100, 120 km/h 설계속도의 도로용량 상태에서 속도(또는 지정체로 정의된 40~50 km/h)를 비교하여 환기기 용량산정시 제외속도를 결정하고자 한다. 즉, “(계획교통량에서의 속도) - (도로용량 상태(서비스수준 E 또는 지정체 정의 속도 40~50 km)에서의 속도) = 도로여유속도”이며, 즉, 지정체가 발생하기 전 감속할 수 있는 여유속도(margin speed)이다.

정리하면, 여유속도($u - u_m$)가 높을수록 지정체 확률이 낮다고 볼 수 있으므로, 이보다 낮은 속도에서 환기기 용량검토를 제외하는 것이다. 반대로 계획교통량이 도로용량 또는 지정체 속도에 가까워지면 지정체 확률이 높게 되는 것이므로 여유속도가 없거나 낮게 되어, 낮은 차량속도에서의 환기기 용량을 검토하여야 한다.

3.2 추정 주행속도

여유속도를 계산하기 위해서는 LOS 수준에 따른 (추정) 주행속도(u)의 계산이 필요하다. 만일 ‘속도-밀도’의 함수가 그린필드(Greenshields) 식으로 표현가능하다면, 주행속도(u)는 다음과 같이 추정할 수 있다.

즉, 연속교통류에서의 교통량(q), 속도(u), 밀도(k)의 상관관계는 식 (1)과 같다.

$$q = u k \tag{1}$$

여기서, q : 평균교통류율

k : 평균밀도

u : 공간평균속도(space mean speed)로 연속교통류에서는 주행속도(running speed)를 의미한다.

그리고 그린필드의 ‘속도-밀도’ 관계식에서 속도(u)는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$u = u_f \times \left(1 - \frac{k}{k_j}\right) \tag{2}$$

여기서, u : 주행속도(running speed)

u_f : 자유속도(free flow speed)

k : 평균밀도

k_j : 혼잡밀도로 정지상태에서의 밀도(jam density)를 의미한다.

따라서 (추정)주행속도(u)의 관계식 도출은 다음과 같다. 먼저, 계획교통량에서의 밀도(k)는 식 (1)에서 밀도(k)는 $k = \frac{q}{u}$ 와 같이 표현가능하며, k 를 식 (2)에 대입하면, 식 (2)는 식 (3)과 같이 표현된다. 그리고 이 식 (3)을 속도 u 에 관한 2차 함수로 표현하면 식 (4)가 되고, 식 (4)에서 속도(u)에 대한 2차함수의 근의 공식을 풀면 식 (5)가 유도된다. 또한 식 (5)에서 k_j 는 상수이고, u_f 를 설계속도라고 가정할 수 있으므로, 주행속도(u)는 계획교통량(q)에 대한 함수가 된다. 그리고, 계획교통량(q) 및 침투교통량(PDDHV)은 식 (6)과 식 (7)의 관계가 있으므로, 계획교통량(AADT)과 교통정수(K, D, PHF 등)를 알면, (추정)주행속도(u)를 산출할 수 있다.

$$u = u_f \times \left(1 - \frac{(q/u)}{k_j}\right) \tag{3}$$

$$k_j \cdot u^2 - k_j \cdot u_f \cdot u + u_f \cdot q = 0 \tag{4}$$

$$u = \frac{k_j \cdot u_f \pm \sqrt{(-k_j \cdot u_f)^2 - 4 \cdot k_j \cdot q \cdot u_f}}{2 \cdot k_j} \tag{5}$$

$$\text{계획교통량}(q) = \frac{\text{PDDHV} \times \Sigma \text{PCE}}{\text{Lane}} [\text{pc/h.lane}] \quad (6)$$

$$\text{첨두교통량(PDDHV)} = \frac{\text{AADT} \times K \times D}{\text{PHF}} [\text{대/h}] \quad (7)$$

그러나 계획교통량 측면에서 설계속도(80~120 km/h)에 따른 ‘속도-교통량’ 자료가 선도(혹은 테이블)로 제시되어 있으므로, 도로용량편람 상에서 제시된 값을 적용할 수 있다.

3.3 임계차속

그림 6 (a)과 같이 연속교통류의 ‘u-q-k’ 관계도에서 임계차속(u_c or u_m)은 최대교통류율일 때의 (임계)밀도상태에서의 속도를 의미한다. 이 임계차속은 측정자마다 상이한 결과를 제시할 수 있는데, 왜냐면, 임계밀도를 정확히 추정하기가 어렵기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 임계차속을 “道路容量便覽 改善 研究(第1段階)-最終報告書”(교통개발연구원, 1999)로 부터 참조하였다. 그린실드에 의하면 임계차속은 자유속도(u_f)의 1/2에 해당하므로 설계속도가 100 km/h일 경우 임계차속은 50 km/h 정도이다. 도철웅 등은 “고속도로의 한 차선당 통상적인 임계밀도를 1 km당 44대 정도이고, 고속도로의 중앙차선(1차선)에서의 임계차속은 대략 50 km/h이며, 갓길에 인접한 차선은 트럭과 버스의 교통량이 많기 때문에 약 40 km/h 정도이다” 라고 언급하고 있다. 또한 국내 도로용량편람에서는 임계밀도를 차선당 1 km에 28대로 규정하고, 설계속도에 따라 120 km/h 일 때 85 km/h, 100 km/h 일 때 80 km/h, 80 km/h 일 때 70 km/h를 제시하고 있다. 국외 자료에 따르면, 대체적인 혼잡흐름이 발생하는 임계밀도는 차선당 1 km에 25~30대(평균 27.9대) 정도로 보고되고 있다(미교통부, 1998, Roger et al., 1998, 도철웅, 2000).

4. 환기검토 제외속도의 제안식

앞서 살펴본 것처럼, 속도(u)-교통량(q) 관계도에서 교통량(q)를 용량(C)으로 나누면 V/C 값으로 표현이 가능하며 일반적인 V/C 값의 범위는 0~1사이의 값이 된다. 따라서 그림 6(c)의 개념도에서 독립변수 V/C, 종속변수 U_{EV} (환기검토 제외속도) 라 하면, 기울기가 $-u_E$ 이고, 절편값이 u_E 이므로, 선형가정조건($y=ax+b$)을 통해 $a=-u_E$, $b=u_E$ 이다. 따라서 환기검토 제외속도(U_{EV})은 다음의 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{제안식: } U_{EV} = u_E \times (1 - V/C) \tag{8}$$

여기서 V/C : 교통측면에서의 교통량과 용량의 비율값

u_E : 환기측면에서의 지체환기설비용량 결정 제위를 위한 원할시 (최대) 환기검토 제외속도 상수

4.1 최대 환기검토 제외속도 상수값 검토

전술한 바와 같이 최대 환기검토 제외속도 상수값(u_E)은 (지체환기설비용량 결정 제위를 위한) 원할시 환기검토 제외속도를 의미하는데, WRA(PIARC)의 보고서에서 이 값을 추정해 보고자한다. 먼저 PIARC 보고서를 살펴보면, 교통밀도 산정도를 그림 7와 같이 제시하고 있는데, 원할상태와 혼잡상태가 교차하는 구간은 40~50 km/h 구간임을 알 수 있다. 또한 환기설비 규모를 결정하기 위한 WRA(PIARC)의 기준을 살펴보면 표 5와 같고, 원할시 피크교통의 속도를 50 km/h 이상으로 표현하고 있다(PIARC, 1987, 2004).

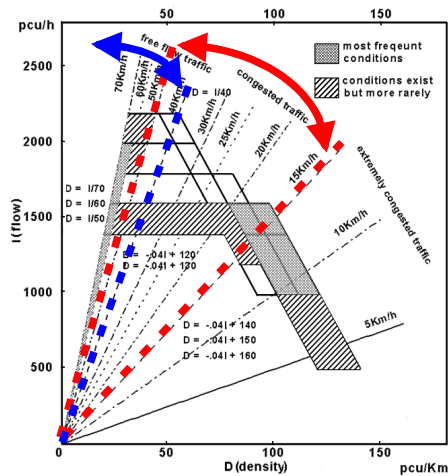


그림 7. 교통밀도 산정도(PIARC, 1987)

표 5. PIARC의 환기규모결정을 위한 규제기준(2004)

교통상태	CO(2010년 이후)	Smoke(가시도)	
		소멸계수(K)	투과율(τ)
원할 피크교통 50~100 km/h	70 ppm	0.005 m ⁻¹	60%
일상적인 혼잡교통	70 ppm	0.007 m ⁻¹	50%
예외적인 혼잡교통	100 ppm	0.009 m ⁻¹	40%

따라서 u_E 값은 40~50 km/h 이하로 추정된다. 또한 본 연구에서는 u_E 값을 설계속도별로 차등 적용하는 것이 합리적인 것으로 판단되는데, 왜냐하면 u_E 값을 설계속도에 상관없이 동일하게 적용하기 위해서는 각 설계속도별로 예상되는 $u_f - u_m$ 차이값의 범위가 서로 달라 적정한 보정값을 제안식에 추가해야 하는데, 이는 설계자가 단순 적용하기에는 제안식이 다소 복잡해질 소지가 있다. 예를 들어 원활시 환기검토 제외속도(u_E)값이 40 km/h 혹은 50 km/h 로 가정하여 일괄적으로 적용한다면, 환기검토 제외속도(U_{EV})식은 식 (9)와 같이 표현할 수 있다. 그리고 식 (9)를 적용하기 위해서는 K값의 보정이 필요하며, 표 6은 설계속도별 용량, 임계밀도, 용량상태의 속도(임계차속)는 “道路容量便覽 改善 研究(第1段階)-最終報告書.”(교통개발연구원(1999.8))를 참조하여 계산할 수 있다. 따라서 식 (9)는 식 (10) 처럼 표현할 수 있다.

또한 환기검토 제외속도(U_{EV})식을 식 (10) 처럼 적용하기 위해서는 u 값인 (추정)주행속도값을 산출하여야 한다. 먼저 계획교통량으로부터 (추정)주행속도 u 값의 산출방법은 원칙적으로 3.2절에서 전술한 방법에 따라 국내 고속도로 터널의 실측자료로부터 교통량(q)과 속도(u)의 관계에서 찾을 수 있을 것이다. 그러나 본 연구에서 도로용량편람(2000) 작성시 조사된 국내 자료로부터 u 값을 산출하는 것이 바람직하다고 판단된다. 이러한 방법으로는 첫째, 도로용량편람상의 선도(그래프)에서 찾는 방법(교통량-속도 선도)과 둘째, 도로용량편람(최종보고서)상의 테이블에서 찾는 방법(V/C비-속도 테이블)이 있을 수 있다.

$$U_{EV} = K \times (1 - V/C) \times (u - u_m) \quad (9)$$

여기서, V/C : 교통량과 용량과의 비율로 (1-V/C)는 ‘여유속도’에 대한 수평성분을 의미한다.

K : 설계속도에 따른 u_E 값에 대한 수직성분의 보정값이다.

($u_E=40$ km/h 일 경우, 120 km/h: 1.14, 100 km/h: 2.0, 80 km/h: 4.0)

($u_E=50$ km/h 일 경우, 120 km/h: 1.43, 100 km/h: 2.5, 80 k/hh: 5.0)

$u - u_m$: (추정)주행속도(u)와 임계차속(u_m)과의 차이로 ‘여유속도’에 대한 수직성분을 의미한다.

표 6. K값의 산출

설계속도 (km/h)	용량 (pc/h/ln)	임계밀도 (pc/km/ln)	용량상태의속도 (km/h)	$u_f - u_m$	u_E (km/h)	$K = \frac{u_E}{u_f - u_m}$
120	2,300	27	85	120-85=35	40	40 / 35 = 1.14
					50	50 / 35 = 1.43
100	2,200	28	80	100-80=20	40	40 / 20 = 2.00
					50	50 / 20 = 2.50
80	2,000	29	70	80-70=10	40	40 / 10 = 4.00
					50	50 / 10 = 5.00

$$U_{EV} = \left(\frac{u_E}{u_f - u_m}\right) \times (1 - V/C) \times (u - u_m) \quad \text{or} \quad U_{EV} = u_E \times (1 - V/C) \times \left(\frac{u - u_m}{u_f - u_m}\right) \quad (10)$$

여기서, V/C : 계획교통량 대 용량의 비율

u : 주어진 조건하에서의 (추정)주행속도로 도로용량편람의 선도(혹은 테이블) 값을 적용

u_f : 자유속도(혹은 설계속도)

u_m : 임계차속

u_E : 원활시 환기검토 (최대) 제외속도로 환기측면에서의 지정체 정의속도(40~50 km/h)를 의미함

4.2 최종 제안식

이상에서 검토한 것처럼 (원활시) 환기검토 제외속도(u_E)값을 차등 적용한 식 (8)은 적용하기에 간편한 반면, 식 (9)나 식 (10)의 형태로 u_E 값을 40 혹은 50 km/h 로 일괄 적용하는 것은 다소 복잡하고, u 값의 추정방법(선도 혹은 테이블 자료)에 따라 다소 논란이 있을 수 있을 것으로 보인다. 반면, 식 (8)은 설계단계에서 V/C 만으로 지정체 여부를 판별해야 하는 단점이 있어, 앞서 분석된 현황자료인 국내 고속도로 지정체 구간분석(VDS 자료)에서 제시한 누적확률분포의 2.5% 값을 최소 예상 지정체 교통량으로 고려할 경우 편도 2차로 환산 교통량이 39,000 대/일(및 45,000 pc/일) 이하에서 적용할 필요가 있다. 또한 지정체 원인 분석시 합분류에 의한 지정체 요인이 크므로, 이러한 조건이 터널출구부 전방에 있을 경우에는 식 (8)을 단순적용하는 것은 다소 무리가 있을 수 있다. 따라서 지금까지의 논의를 종합적으로 정리하면, 현단계 지방부 고속도로 터널에서의 지정체 판별식은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\text{최종식 : } U_{EV} = u_E \times (1 - V/C)$$

V/C : 교통량(V)과 용량(C)과의 비율

u_E : (지체환기설비용량 결정 제외를 위한) 원활시 환기검토 제외속도로 설계속도별로 임계차속의 1/2로 한다. 설계속도 120 km/h: $u_E=42.5$ km/h, 설계속도 100 km/h: $u_E=40$ km/h, 설계속도 80 km/h: $u_E=35$ km/h.

윗 식은 고속도로(지방부) 교통량에 대한 환기검토 제외속도식으로 원칙적으로 왕복 4차로(편도 2차로) 환산 교통량이 39,000대/일(및 45,000 pc/일) 이하일 경우에 적용하며, 터널출구부 전방 2 km 이내에 합분류부(진출입로, 틀게이트, 휴게소 등)가 있을 경우에는 적용하지 아니한다.

5. 적용성 검토

5.1 V/C에 따른 환기검토 제외속도의 판별

환기검토 제외속도(U_{EV})식은 V/C의 함수로 표현이 가능하므로, 각 설계속도별로 서비스수준에 따른 V/C 값을 기준으로 환기검토 제외속도를 판별해 보면 다음의 표 7과 같다. 설계속도 120 km/h 일 경우, LOS A 에서는 30 km/h 이하, LOS B 에서는 20 km/h 이하, LOS C 에서는 10 km/h 이하가 제외되며, LOS D~E 에서는 제외속도가 없는 것으로 분석되며, 설계속도 100 km/h 일 경우, LOS A 에서는 30 km/h 이하, LOS B~C 에서는 20 km/h 이하가 제외되며, LOS D~E 에서는 제외속도가 없는 것으로 분석되며, 설계속도 80 km/h 일 경우, LOS A 에서는 30 km/h 이하, LOS B 에서는 20 km/h 이하, LOS C 에서는 10 km/h 이하가 제외되며, LOS D~E 에서는 제외속도가 없는 것으로 분석된다.

그림 8은 설계속도 100 km/h 일때의 V/C비율에 따른 환기검토 제외속도를 나타내고 있으며, V/C 가 0.1 이하일 경우는 40 km/h 이하, V/C 가 0.35 이하일 경우는 30 km/h 이하, V/C 가 0.6 이하일 경우는 20 km/h 이하, V/C 가 0.75 이하일 경우는 10 km/h 이하에서 환기검토 제외속도가 분포하는 것으로 분석된다.

표 7. 설계속도별 V/C비율에 따른 환기검토 제외속도 판별

구분	V/C	속도	서비스수준	U_{EV}	제외속도	환기시설검토속도
설계속도: 120 km/h 임계차속: 85 km/h U_E : 42.5 km/h	0.3	118.0	A	30	30	40~80
	0.5	115.0	B	21	20	30~80
	0.65	110.0	C	15	10	20~80
	0.83	102.0	D	7	0	전속도
	1	85.0	E	0	0	전속도
설계속도: 100 km/h 임계차속: 80 km/h U_E : 40.0 km/h	0.27	99.0	A	29	30	40~80
	0.45	98.0	B	22	20	30~80
	0.61	96.0	C	16	20	30~80
	0.8	92.0	D	8	0	전속도
	1	80.0	E	0	0	전속도
설계속도: 80 km/h 임계차속: 70 km/h U_E : 35.0 km/h	0.25	79.0	A	26	30	40~80
	0.4	78.0	B	21	20	30~80
	0.58	76.0	C	15	10	20~80
	0.75	75.0	D	9	0	전속도
	1	70.0	E	0	0	전속도

(주) 제외속도는 환기검토 제외속도(U_{EV})값이 10 km/h 이상에서는 반올림(round)처리하며, 10 km/h 미만에서 버림(rounddown) 처리한다.

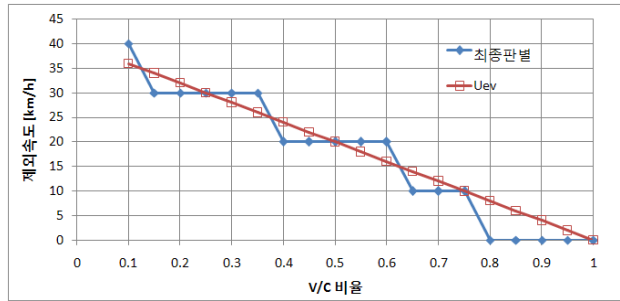


그림 8. V/C에 따른 U_{EV} 값 분포도(at 100 km/h 시)

5.2 환기설계속도에 따른 환기설비용량 변화량 검토

다음은 환기설계속도에 따른 환기용량의 변화를 알아보기 위해 기존 터널의 제원을 기준으로 비교연구(Case Study) 를 수행하였으며, 주요제원은 표 8~9와 같다.

표 8. 검토대상 터널제원

구분	예제터널	인제터널	금정터널	죽령터널	장성3터널	사패산터널	미시령터널	금성터널
AADT (대/일)	60,000	44,574	47,854	37,948	46,932	180,166	29,070	32,061
HGV(%)	30.1%	25.2%	22.5%	21.1%	27.2%	20.0%	17.5%	29.0%
KD/PHF(-)	평균	강원	경상	충청	전라	경기/수도	강원 (국도)	충청
차로수 (lane)	2	2	2	2	2	4	2	2
단면적(m ²)	75	75	75	75	75	125	64	75

표 9. 고속도로에 대한 교통공학정수(K, D, PHF)값

구분	고속도로	K30	K150(주1)	D30	D150	PHF(주3)
KHCM	도시	0.09	-	0.6	-	-
	지방	0.15	-	0.65	-	-
이장희 (주2)	경기/수도권	0.072	0.069	0.55	0.56	0.93
	전라권	0.104	0.088	0.58	0.58	0.91
	경상권	0.078	0.073	0.55	0.57	0.92
	강원권	0.103	0.093	0.56	0.54	0.92
	충청권	0.075	0.073	0.58	0.57	0.96
	평균값	0.086	0.079	0.564	0.564	0.928

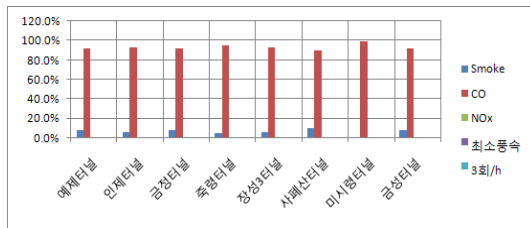
(주1) K150: 문미경 외(2004), '설계서비스수준을 고려한 설계시간순위 결정 방안', 교통학회

(주2) 이장희(2006), '고속도로설계를 위한 권역별 K값 및 D값의 적용방안에 관한 연구', 한양대학교

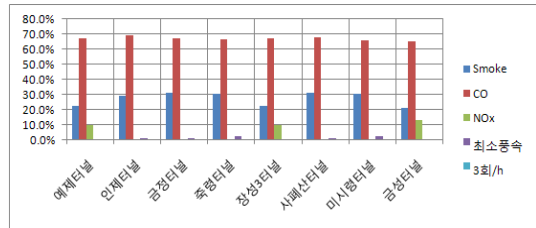
(주3) PHF: 한국도로공사(2011), '2010 고속도로 교통량', 한국도로공사

환기설계속도(환기검토 제외속도)별 소요환기량 결정요인을 분석하면 다음의 그림 9와 같다. 먼저, 제외속도가 없는 (a)의 경우, 환기설비용량을 결정하는 요인은 CO가 약 90% 이상, 매연은 약 10% 이내에서 주로 결정되었으며, 10 km/h를 제외한 (b)의 경우도, 약 65% 이상이 CO에서, 매연이 약 25% 수준, NOx 가 약 5% 이내에서 결정되었다. 반면 10~20 km/h를 제외한 (c)의 경우도 다소 CO가 높기는 하지만 대체적으로 CO, NOx, 매연이 각각 38%, 30%, 29% 정도씩 결정요인이 되었으며, 최소풍속 기준도 약 2.5% 정도 결정요인으로 작용한 것으로 분석된다.

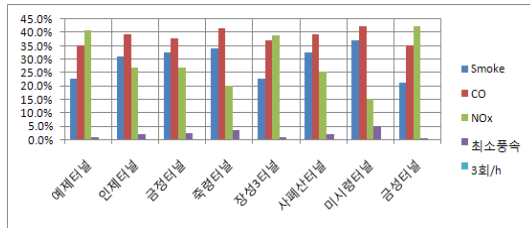
다음으로 제외속도가 10~30 km/h인 (d)의 경우를 살펴보면, NOx가 45%, 매연이 29%, CO 가 23%, 그리고 최소풍속이 3% 정도가 결정요인으로 작용하였으며, 제외속도가 10~40 km/h인 (e)의 경우는 NOx가 59%, 매연이 32%, CO 가 6%, 그리고 최속풍속이 3% 정도가 결정요인으로 작용하였다. 끝으로 제외속도가 10~50 km/h 인 경우를 분석하면, 약 70%가 NOx에서 결정되며, 매연 26%, 최소풍속 및 시간당 3회 환기량이 약 4% 정도가 결정요인인 것으로 분석되었으며, CO에 의한 영향은 거의 0% 수준인 것으로 분석된다.



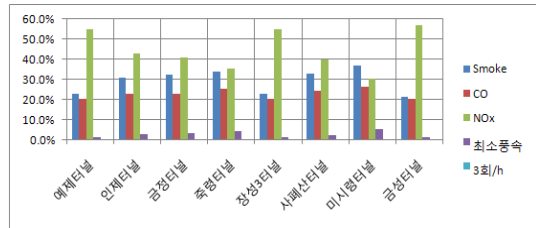
(a) 제외속도: 없음(→10~80 km/h 검토)



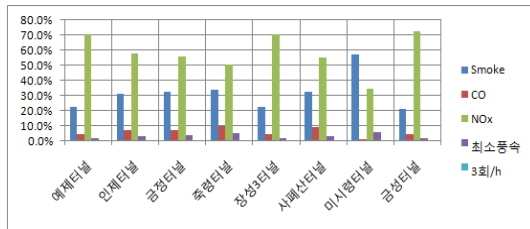
(b) 제외속도: 10 km/h 이하(→20~80 km/h 검토)



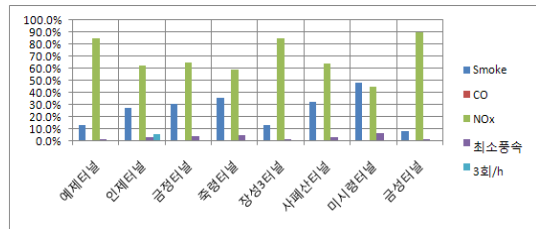
(c) 제외속도: 20 km/h 이하(→30~80 km/h 검토)



(d) 제외속도: 30 km/h 이하(→40~80 km/h 검토)



(e) 제외속도: 40 km/h 이하(→50~80 km/h 검토)



(f) 제외속도: 50 km/h 이하(→60~80 km/h 검토)

그림 9. 환기검토 제외속도별 환기설비용량 결정요인 분석

그림 9와 그림 10을 종합해 보면, 환기검토 제외속도(환기설계속도)가 커질수록 환기설비용량을 결정하는 요인으로 NOx의 영향이 커지며, 제외속도가 낮을수록 CO에 의한 영향이 커지는 것을 알 수 있다. 또한 환기검토 제외속도가 20~30 km/h 인 (c), (d)의 경우 매연, CO, NOx 의 결정요인이 비슷하게 분포하는 것으로 나타났다. 참고적으로 최소풍속 및 시간당 3회 환기량이 결정요인으로 미치는 경우는 환기설계속도가 높아질수록 약간씩 증가하는 경향을 나타내고 있다.

다음으로 실제 개별 터널에서의 환기설비용량의 증감을 알아보기 위해 인제터널을 대상으로 소요환기량 특성도(Qreq CM)를 작성하였다. 소요환기량 특성도란 x축을 종단경사(%), y축을 터널 연장(km)으로 하여 등소요환기량을 나타낸 선도를 의미한다. 따라서 등소요환기량, 환기설비용량 등을 함께 나타낼 경우 터널제원(종단경사, 터널연장) 등에 따른 환기설비규모를 쉽게 알 수 있다. (도로설계편람(2010)의 617.환기시설 편의 3.3.5 참조)

환기검토 제외속도(환기설계속도)가 높을수록 지정체 발생확률이 낮아지고, 따라서 차량의 주행속도가 높기 때문에 특정 환기방식(제트팬 방식 등)으로 가능한 터널의 연장은 증대될 것이다. 그림 11의 (a)~(f) 분석결과, 예를 들어 종단경사 -2%를 기준할 경우, 제트팬 10대로 환기 가능한 터널연장을 살펴보면, 제외속도가 없는 (a)의 경우가 약 2.4 km, 10 km/h를 제외한 (b)의 경우가

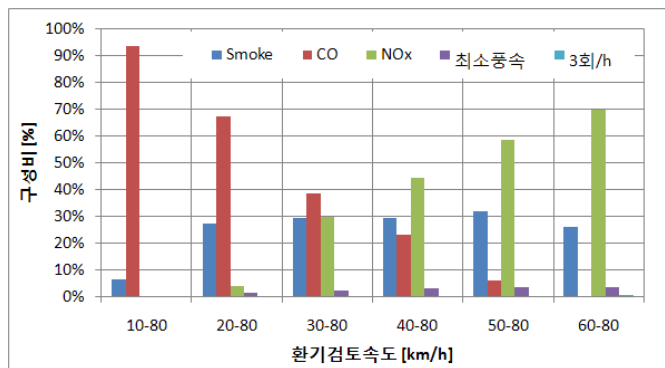


그림 10. 환기검토 제외속도별 소요환기량 결정요인 분석(전체터널)

표 10. 터널전체 소요환기량 결정요인 분석 - (0~10 km, -3.0~+3.0 % ; 총 3111Cases/1터널)

구분	10~80 km/h	20~80 km/h	30~80 km/h	40~80 km/h	50~80 km/h	60~80 km/h
Smoke	6.6%	27.6%	29.4%	29.4%	31.9%	26.3%
CO	93.3%	67.1%	38.5%	23.1%	6.2%	0.0%
NOx	0.0%	4.1%	29.7%	44.5%	58.5%	69.5%
최소풍속	0.1%	1.2%	2.4%	3.0%	3.4%	3.5%
3회/h	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.8%

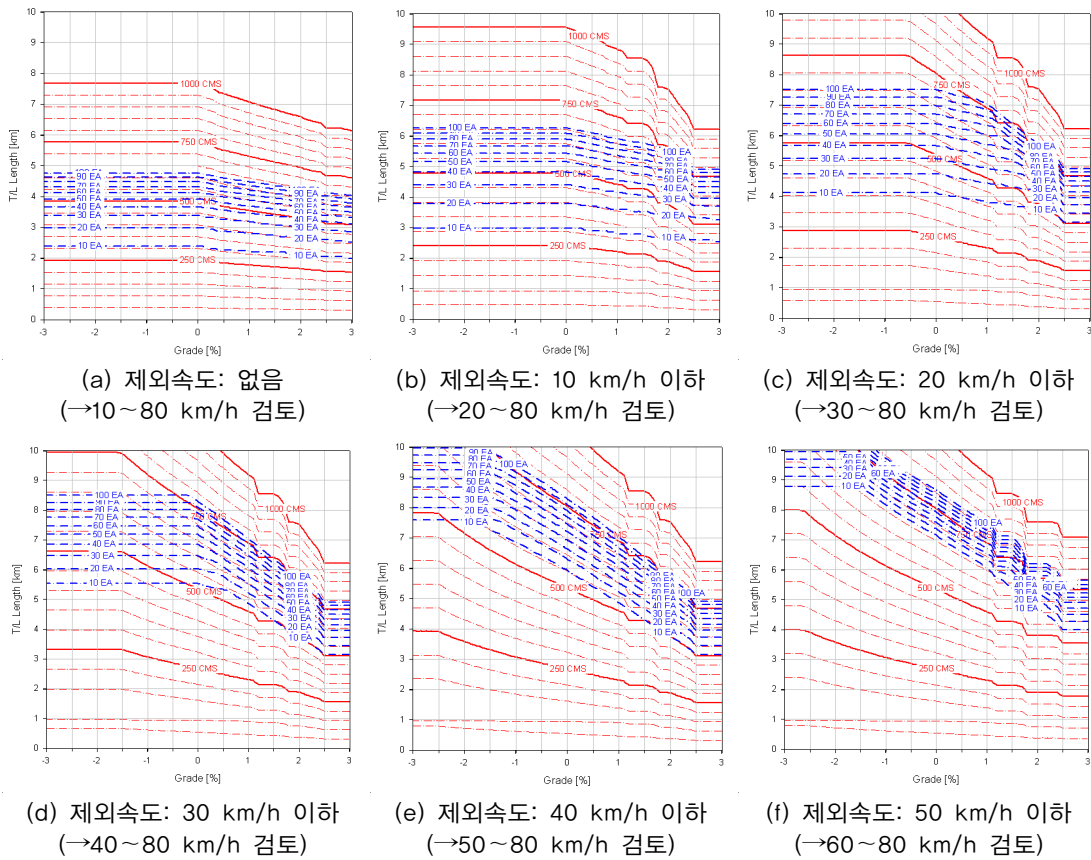


그림 11. 인제터널의 환기설계속도에 따른 소요환기량 특성도 비교

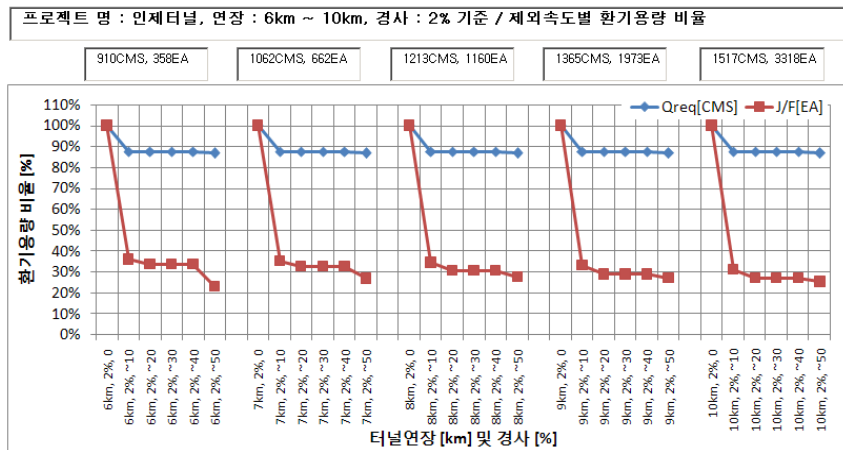


그림 12. 연장증가에 따른 환기설계속도별 소요환기량과 환기용량의 변화

약 3.0 km, 10~20 km/h를 제외한 (c)의 경우가 약 4.1 km, 10~30 km/h를 제외한 (d)의 경우가 약 5.5 km, 10~40 km/h를 제외한 (e)의 경우가 약 7.6 km, 10~50 km/h를 제외한 (f)의 경우가 약 8.8 km 정도로 분석된다.

그림 12는 연장을 증가하면서 환기검토 제외속도별로 소요환기량과 제트팬 대수의 변화를 보다 세분화하여 살펴보았다. 그림에서와 같이 환기설계속도가 1단계인 10km/h만 제외할 경우, 소요환기량은 대체적으로 10~20% 정도 감소하는 반면에, 단계별로 환기설비용량은 약 60% 이상 감소되는 것으로 나타났다.

6. 결 론

이상에서 지방부 고속도로의 합리적인 환기계획을 위해 교통량, 지형적 조건 등을 고려한 지정체 판별모델을 개발하고자 하였다. 먼저 국내 고속도로의 지정체 교통량 분포, 지정체 원인 분석 등을 수행하였으며, ‘여유속도’ 개념을 도입하여 지정체 판별모델을 구성하였다. 또한 기존 터널을 대상으로 그 적용성을 분석하였으며 이상의 내용을 요약하면 다음과 같다.

1. 지정체 원인에 대한 국내 교통량자료(VDS)의 분석결과, 왕복 4차로(편도 2차) 환산 AADT 값의 경우, 대략 39,000 대/일(및 45,000 pc/일) 이상에서 지정체가 발생하는 것으로 분석되며, 지정체 원인으로 교통량 증가 외에 합분류부(진출입로, 톨게이트, 요금소 등)가 있는 경우에 지정체가 많이 발생한 것으로 분석되었다.
2. 지정체 판별모델은 원할영역(u_m 이상의 영역)에서 ‘여유속도’ 개념을 도입하여 상대적인 환기검토 제외속도를 검토하는 것이 현 단계에서는 합리적인 것으로 판단되며, 지방부 고속도로의 합리적인 터널환기계획을 위한 지정체 판별 속도식은 식 (8)과 같이 구성할 수 있다.
3. 판별식의 적용성을 위한 V/C 비율에 따른 환기검토 제외속도의 분석결과, 설계속도 100 km/h 일 경우 V/C 가 0.1 이하일 경우는 40 km/h 이하, V/C 가 0.35 이하일 경우는 30 km/h 이하, V/C 가 0.6 이하일 경우는 20 km/h 이하, V/C 가 0.75 이하일 경우는 10 km/h 이하에서 환기검토 제외속도가 분포하는 것으로 분석된다.
4. 소요환기량의 결정요인을 분석한 결과, 환기검토 제외속도(환기설계속도)가 커질수록 환기설비용량을 결정하는 요인으로 NOx의 영향이 커지며, 제외속도가 낮을수록 CO에 의한 영향이 커지는 것으로 분석되며, 또한 최소풍속 및 시간당 3회 환기량이 결정요인으로 미치는 경우는 환기설계속도가 높아질수록 3~4% 수준에서 약간씩 증가하는 경향이 나타나는 것으로 분석된다.

5. 소요환기량 및 환기설비용량의 증감을 알아보기 위해 환기특성도(Qreq CM)에 의한 분석을 수행하였으며, 그 결과 인제터널의 경우 환기설계속도가 1단계인 10 km/h만 제외할 경우 소요환기량은 대체적으로 10~20% 정도 감소하는 반면에 단계별로 환기검토 제외속도값이 커질수록 환기설비용량은 약 60% 이상 감소되는 것으로 분석되었다. 따라서 지정체 발생빈도가 낮은 지방부 고속도로 터널의 환기설비용량의 감소 및 이에 따른 유지관리비용의 감소가 예상된다.

감사의 글

본 연구논문은 한국도로공사의 ‘고속도로 터널 환기시설 설계기준 보완용역’(2011년)으로 진행되었으며, 이에 감사드립니다.

기호정의

기호(용어)	단 위	정의 내용
AADT	veh/day	년평균 일교통량, Average Annual Daily Traffic
PDDHV	veh/h.lane	첨두 (중방향) 설계시간 교통량, Peak Directional Design Hourly Volume
PDHV	veh/h.2lanes	양방향 첨두 설계시간 교통량, Peak Design Hourly Volume
Mmax	pc/h.lane	최대교통량(도로용량), Maxium Capacity
$D_0(=k_j)$	pc/km.lane	정체시 교통밀도(Jam density)
K	-	설계시간 계수(일반적으로 30번째), Nth design hourly Factor
D	-	중방향 교통량의 비, Percentage of Heavy Dierrectional Traffic Volume
PHF	-	첨두시간 계수, Peak Hourly Factor
PCE	pc/veh	승용차환산계수, Passenger Car Equivalent
PCU	pc	승용차환산대수, Passenger Car equivalents Unit
HGV	%	대형차량 혹은 대형차혼입율, (Percentage of) Heavy Goods Vehicle
$q=uk$	veh/h	연속교통류에서의 교통량(q), 속도(u), 밀도(k)의 관계식
u_f	km/h	자유속도, Free flow speed
$u-u_m$	km/h	‘여유속도’로 ‘주행속도(u) - 임계속도(u_m)’를 의미함
q_m or q_c	veh/h	임계교통량
u_m or u_c	km/h	임계속도(차속)
k_m or k_c	veh/km	임계밀도
VDS	-	차량검지시스템, Vehicle Detection System
LOS	-	도로의 서비스 수준, Level of Service
U_{EV}	km/h	지정체 판별식의 환기검토 제외속도, $U_{EV} = U_E \times (1 - V/C)$
U_E	km/h	(지체환기설비용량 결정 제외를 위해) 원활시 환기검토 최대제외속도 로 환기측면에서 지정체 정의속도(40~50 km/h)를 의미함
V/C	-	(계획)교통량(V)과 (도로)용량(C)의 비
JF	-	제트팬, Jet Fan

참고 문헌

1. 교통개발연구원 (1999), “道路容量便覽 改善 研究(第1段階)-最終報告書-”, pp. 90-102.
2. 국토해양부 (2001), “도로용량편람”.
3. 국토해양부 (2010), “도로설계편람(617. 환기시설)”.
4. 김효규 외 (2005), “대면통행 터널의 환기특성 연구”, 터널지하공간학회, Vol. 7, No. 1, pp. 13-25.
5. 김효규 외 (2007), “경유승용차 도입이 터널 소요환기량에 미치는 영향분석”, 터널지하공간학회, Vol. 9, No. 3, pp. 309-321.
6. 도철웅 (2000), “교통공학원론”, pp. 68-71.
7. 문미경 외 (2004), “설계서비스수준을 고려한 설계시간순위 결정 방안”, 교통학회, pp. 60-62.
8. 미교통부 (1998), “Highway Capacity Manual”, pp. 3-1-3-40.
9. 복기찬 (2009), “고속도로 혼잡관리를 위한 종합소통지수 개발에 관한 연구”, 아주대(박사논문), pp. 5-7.
10. 유지오 외 (2002), “조합환기방식 터널의 환기기 운전단계에 관한 연구”, 터널지하공간학회, Vol. 4, No. 4, pp. 343-352.
11. 이장희 (2006), “고속도로설계를 위한 권역별 K값 및 D값의 적용방안에 관한 연구”, 한양대(석사논문), pp. 40-64.
12. 이창우 외 (2009), “장대도로터널의 자연환기력 예측 사례 연구”, 터널지하공간학회, Vol. 11, No. 4, pp. 395-401.
13. 한국도로공사 (2002), “고속도로 터널 환기시설 설계기준”.
14. 한국도로공사 (2011), “2010 고속도로 교통량”.
15. 한국도로공사 (2011), “고속도로 교통정체 개선 계획”, 별첨자료.
16. 한국도로공사, 적정차로수 산정을 위한 설계시간계수 연구(최종보고서), pp. 257-292.
17. Fred, L., Hall, unknown, “Traffic Stream Characteristics”, pp. 2-12-2-32.
18. Immers, L.H., Logghe, S. (2002), “Traffic Flow Theory”, pp. 10-14.
19. PIARC (1987), “Road Tunnels in the urban environment”, pp. 115-126.
20. PIARC (2004), “Road Tunnels: Vehicle Emissions and Air Demand for Ventilation”, pp. 14-15.
21. Roger 외 (1998), “Traffic Engineering”, pp. 309-330.
22. Sven Maerivoet 외 (2008), “Traffic Flow Theory”, pp. 16-25.