

도로터널의 제연용량 산정을 위한 정체차량대수 산정기법에 관한 연구 - 정체길이를 중심으로

유용호¹ · 김효규^{2*} · 류지오³

¹정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원

²정회원, ㈜주성지앤비 대표이사

³정회원, 신한대학교 자동차공학과 교수

A study on the calculation method for the number of vehicles in queue to determine the fire ventilation capacity in road tunnels - forced on the effect of queue length

Yong-Ho Yoo¹, Hyo-Gyu Kim^{2*}, Ji-Oh Ryu³

¹Senior Researcher, Fire Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

²CEO, JS G&B Inc.

³Professor, Dept. of Automotive Engineering, Shin-Han University

ABSTRACT: When the queue length of congestion vehicles in tunnel fire is extended beyond tunnel length, the capacity of smoke control system needs to be increased in line with ventilation resistance. However, the vehicle queue length is not defined, so a rational equation is necessary in current fire prevention guideline. This study is intended to propose an equation to calculate the queue length considering the number of vehicles in queue in tunnel fire and evaluate the applicability by tunnel length as well. When it comes to normal tunnel, it is necessary to compare the vehicle queue length with tunnel length up to the length of 1,200 m in a bid to avoid applying the vehicle queue length excessively in case of fire. As a result of evaluation of applicability to model a tunnel, saving the number of jet fan for smoke control appeared to be effective. Besides, quantitative approach to explain the vehicle queue length through the relationship between the percentage of large vehicles and tunnel length was presented. Consequently, when the queue length of the congestion vehicles exceeds the tunnel length in determining the capacity of smoke control system in case of fire, the number of vehicles beyond the tunnel length needs to be excluded from estimating the ventilation resistance by vehicles.

Keywords: Tunnel fire, Queue length, Congestion vehicles, Jet-fan for smoke control, Road tunnel

초 록: 터널 화재시 정체차량에 의한 정체길이가 터널연장을 초과할 경우, 환기저항의 증가에 따른 제연설비 용량의 증가가 발생하게 된다. 그러나 현행 방재지침에는 정체길이에 대한 정의가 없기 때문에 합리적 산출식의 제시가 필요하다. 본 연구에서는 터널 화재시 정체차량 대수에 의한 정체길이의 산정식을 제시하고, 터널연장별 적용성 분석을 수행하였다. 일반적인 터널의 경우, 화재시 정체길이의 과도한 적용을 방지하기 위해서는 터널연장 1,200 m 까지는 정체길이와 터널연장과의 상호비교가 필요한 것으로 분석되었고, 모델터널에 대한 적용성 평가결과 제연용 제트팬의 절감효과가 있는 것으로 분석되었다. 더불어 정체길이의 판별여부를 대형차흡입률과 터널연장의 관계로 설명할 수 있는 정량화 선도를 제시하였다. 결과적으로 제연설비 용량결정시, 정체차량에 의한 정체길이가 터널연장을 초과하는 경우에는 터널연장을 초과하는 차량대수는 차량에 의한 환기저항 산정에서 제외하는 것이 타당한 것으로 분석된다.

주요어: 터널화재, 정체길이, 정체차량, 제연용 제트팬, 도로터널

*Corresponding author: Hyo-Gyu Kim

E-mail: hgkim@gnbeng.com

Received November 27, 2015; Revised December 23, 2015;

Accepted January 6, 2016

1. 서론

2014년도 국내 터널현황 자료에 따르면 터널 중 80% 이상이 1,000 m 미만 터널로 분류되고 있다. 전체 1,659개소(튜브 수 기준)의 터널을 대상으로 터널연장등급을 살펴보면, 1등급(3,000 m 이상)이 1.5%, 2등급(1,000~3,000 m)이 18.0%, 3등급(500~1,000 m)이 35.0%, 4등급(500 m 이하)이 45.6%로 분포하고 있으며, 연장 1,000 m 이상 터널은 전체 도로터널의 약 19.5% 수준이다.(Kim, 2015)

중전 소방(관련)법에 따르면 연장기준으로 1,000 m 이상 터널에 제연설비를 설치하도록 규정하였으나, 현행 소방(관련)법 기준은 도로터널의 방재기준인 “도로터널 방재시설 설치 및 관리지침(국토교통부, 2009)”을 준용하여 위험도 지수에 의한 방재등급이 2등급 이상인 터널에 제연설비를 설치하도록 규정하고 있다. 따라서 연장기준으로 500 m 이상의 터널에도 제연설비가 설치될 수 있다.

제연설비가 설치될 경우, 화재시 터널 내 정체차량 대수를 고려하여 그 용량을 결정하도록 하고 있다. 그러나 터널내 정체차량 대수 산정을 위해서는 터널연장과 정체길이에 대한 합리적 검토가 선행되어야 하나, 방재기준에는 차량의 정체길이에 대한 정의가 없는 실정이다. 더불어 화재시 터널진입차단설비에 의해 터널차단에 소요되는 시간을 3분으로 하여 추가적인 차량의 진입을 고려하고 있기 때문에, 터널길이 가 짧은 경우에는 정체길이가 터널연장을 초과할 것으로 예상된다.

본 연구에서는 화재시 터널내 정체차량 대수를 산정하는 방법을 제시하였다. 합리적인 정체길이의 산정을 통해 차량의 정체길이가 터널연장을 초과할 경우, 정체구간의 길이를 터널연장 이내로 축소시킴으로써 이에 따른 터널내 환기저항력의 감소를 통한 제연팬 설치대수의 절감효과 및 설계단계에서 주요인자에 의한 정체길이의 정량적인 표현방법을 제시하고 있다.

2. 터널내 정체차량 대수 및 정체길이

2.1 화재시 차량 정체모델

화재시 차량의 정체길이는 Fig. 1에 나타난 터널내 정체차량의 특성을 고려하여 구할 수 있다. 차량의 정체특성은 화재지점을 기준으로 5개의 구간(Zone)으로 구분될 수 있으며 각 구간별 특성은 다음과 같다.

- Zone 1 : 터널폐쇄 후 화재후방에 차량이 존재하지 않는 구간
- Zone 2 : 터널차단 이전에 도착한 차량이 사고를 인식하지 못하고 계속 진행하는 구간
- Zone 3 : 차량이 정체한 구간
- Zone 4 : 화재하류의 차량이 없는 구간
- Zone 5 : 화재하류의 차량이 계속 진행하는 구간

여기서, 정체구간 길이(Zone 3의 길이)는 시간이 경과하면 증가하게 되는데, 제연팬 산정시 정체길이는 시

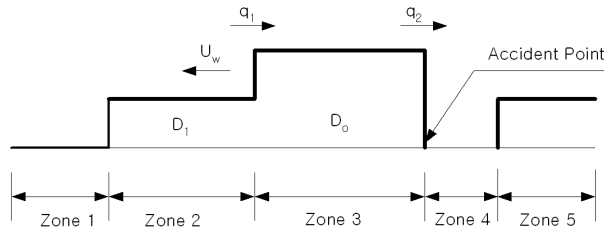


Fig. 1. Vehicle congestion model in case of tunnel fire

간이 충분히 경과한 후에 차량의 이동이 없는 상태에서 결정하게 된다. 화재시 풍속을 동적으로 해석하는 경우에는 정체길이의 증가속도(전파속도, speed of shock wave)를 고려하여 시간에 따른 정체길이를 Yang에 의해서 제시된 DICM (dynamic incident control model)을 적용하여 구할 수 있다. 또한 정체지점의 전파속도(speed of shock wave; U_w)는 식(1)과 같이 구한다(Yang 외, 1997).

$$U_w = \frac{q_1 - q_2}{D_1 - D_0} \quad (1)$$

여기서, q_1 은 정체지점의 시간교통량(traffic flow rate)(pc/hr), q_2 는 도착 시간교통량(pc/hr), D_0 는 정체시 교통밀도(pc/km), D_1 은 도착 교통류의 교통밀도(pc/km)이다.

화재시 터널내 방재시설의 설비용량을 결정하기 위해서는 환기저항으로 작용하는 터널 내 정체 차량대수를 산출하여야 한다. 화재시 터널 내 정체 차량대수는 화재위치를 터널 출구로 하여 정체차량 대수가 가장 많게 산정되는 조건을 적용하고 터널 차단에 소요되는 시간을 3분으로 가정하여 식 (2)와 같이 계산한다(국토교통부, 2009).

$$n = \frac{N \cdot L_r}{V_t} + N \cdot \frac{3}{60} \quad (2)$$

여기서, N 은 시간교통량(veh/hr), L_r 은 터널연장(km), V_t 은 화재전 주행속도(km/hr) 이며, 우변의 제1항은

화재발생 시점에서 터널내에 존재하는 차량대수, 제2항은 화재발생후 3분 동안에 터널내로 진입하는 차량대수를 의미한다.

식 (2)는 터널연장과 주행속도에 영향을 받기 때문에, 식을 통해 계산된 대수의 차량이 터널내에 정착할 경우 그 행렬의 길이(정체길이)가 터널연장을 초과하는 경우가 발생되고 있다. 본 연구에서는 화재시 차량의 정체길이 검토를 통해 합리적인 설계기준을 제시하고자 한다.

2.2 정체길이 산정식

화재시 터널내 총 정체길이(queue length)는 차종별 차량길리와 차량간 간격(gap)의 합으로 나타낼 수 있으며 다음에서 각각의 계산방법을 소개하고자 한다.

2.2.1 차량길이

차량의 길리는 도로설계편람(국토교통부, 2011)의 차종별 차량제원을 참고할 수 있으며, 차량의 평균길이는 차종별 차량길이(CL_i)와 혼입율(ϕ_i)을 가중 평균하여 식 (3)으로 계산할 수 있다.

$$CL_{avg} = \sum_{i=1}^{차종} (CL_i \cdot \phi_i) \quad (3)$$

여기서, CL_i 는 차종(i)별 차량길이(m), ϕ_i 는 차종(i)별 혼입률(%)이다.

Table 1은 차량의 평균길이의 계산 예를 나타낸 것으로, 이 경우 차량의 평균길이는 5.44 m로 산정된다.

Table 1. Calculation for the average length of vehicle(example)

Type	Passenger Car	Bus		Truck				Total
		Small	Large	Small	Middle	Large	Special	
Vehicles [veh]	30,066	3,069	3,098	211	5,475	1,489	866	44,274
Composition [%]	67.91	6.93	7.00	0.48	12.37	3.36	1.96	100
Length [m]	4.34	4.5	10.77	4.52	6.1	8.74	18.31	-
$CL_i \cdot \phi_i$ [m]	2.95	0.31	0.75	0.02	0.75	0.29	0.36	5.44

2.2.2 차간간격

정체시 전방차량과의 차간간격은 차량운전자 마다 상이하게 나타날 수 있으나, 본 연구에서는 차종에 관계없이 일정한 등간격으로 정착한다고 가정하였다. 차간간격(GL_{TH})은 차량간 후미부와 전두부 간의 거리(spatial gap)로 나타낼 수 있으며, 승용차(pc) 환산 대수로 표시되는 정체시 밀도(jam density) 개념을 도입하여 계산할 수 있다. 일반적으로 정체밀도(D_0)는 차로당 150~165 pc/km·lane 수준이며, 국내 도로 설계편람 및 WRA(구, PIARC) 보고서에 따르면 비도심지(국도/고속도로) 터널은 150 pc/km·lane, 도심지 터널은 165 pc/km·lane을 적용하고 있다.(국토교통부, 2011, PIARC, 2012) 따라서 승용차 환산대수로 1,000 m 당 150~165대(pc)가 터널내에 정착한다는 기준에 의해서 차간간격은 식 (4)와 같이 계산할 수 있다.

$$GL_{TH} = \frac{1,000}{D_0} - CL_{PC} \quad (4)$$

여기서, D_0 는 정체시 밀도(pc/km·lane), CL_{PC} 는 승용차의 길이(m)이다.

예를 들어, 국내 비도심지 터널의 경우는 정체밀도(D_0)가 150 pc/km·lane 이고, Table 1에 따른 승용차의 길이(CL_{PC})가 4.34 m 이므로 차간간격(GL_{TH})은 $1,000/150 - 4.34 = 2.33$ m 가 되고, 도심지 터널의 경우는 1.72 m 가 된다. 차종별 길이가 국내 보다 작은 편인(승용차 기준 4.0 m) 국외 정체길이에 대한 실측자료(정체군 200개)에 따르면, 평균 차간간격(GL_{TH})은 1.51~2.97 m(2.24 ± 0.73 m) 정도로 보고 되고 있다(PRIYANTO, 1999).

2.2.3 정체길이

전술한 바와 같이 대당 터널내 정체길이는 차량평균길이와 차간간격의 합으로 나타낼 수 있으며, 터널내 총 정체차량 대수를 고려한 화재시 정체길이(L_S)는

식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$L_S = (CL_{avg} + GL_{TH}) \cdot \frac{n}{Lane} \quad (5)$$

여기서, CL_{avg} 는 차량의 평균길이(전장) (m), GL_{TH} 는 차간 간격(선행차량 후미부에서 후행차량 전두부) (m), n 은 정체시 터널내 총 차량대수(veh/tunnel), Lane은 차로수(lane)이다.

2.3 혼입률과 연장에 따른 정체길이의 정량화

이상의 관계식을 통해 정체길이(L_S)를 산정하기 위한 일반적인 계산흐름은 다음과 같다. 즉, 주행속도(V_f)별로 교통밀도식(D_f)을 통해 시간교통량(N)을 계산하고, 식 (2)를 적용하여 터널내 정착대수(n)를 계산할 수 있다. 여기에 식 (5)를 적용하면 터널내 정체길이가 산정된다.

Fig. 2는 터널내 정체차량 대수에 의한 정체길이 산정시 계산흐름 및 주요 설계변수를 정리하여 나타내고 있다. 도로의 노선계획시 이미 최대교통량(M_{max}), 정체밀도(D_0) 등은 결정되어 있기 때문에, 차종별 혼입률(ϕ_i)과 터널연장(L_r)이 주요한 변수이고, 기타 변수들은 도로의 설계시 이미 알려진 변수(known variable)들이 된다. 따라서 교통량의 차종구성비에 따른 혼입률과 터널연장에 따른 화재시 정체길이의 정량화가 가능해 진다.

정체길이의 정량화를 위해 도로설계편람의 617. 환기시설 편에 제시된 예제터널의 교통량 제원을 대상으로 대형차 혼입률(HGV)을 변화하여 Table 2와 같은 교통량 자료를 획득하였다. 또한 노선의 설계속도 100 km/h 를 기준으로 최대교통량(M_{max})은 2,200 pc/hr·lane, 정체밀도(D_0)는 150~165 pc/km·lane을 적용하여 계산하였다.

Fig. 3은 차량의 주행속도에 따른 터널연장과 정체길이의 관계를 대형차 혼입률 별로 정리하여 나타내

고 있다. y축의 L_r/L_s 값은 터널연장을 정체길이로 나눈 값으로 1보다 작은 값은 정체길이가 터널연장을 초과하는 경우를 나타내고 있다. 따라서 1 미만의 영역에서는 정체차량의 길이가 과도하게 환기저항으로 계산될 수 있음을 의미한다.
대체적으로 전주행속도(10~80 km/hr)에서 y축 값

이 1 미만을 나타내는 연장범위는 800~900 m 미만에서 나타나고 있어 연장등급 3등급 터널에 제연설비를 설치할 경우는 화재시 정체길이에 대한 검토가 필요한 것으로 분석된다. 또한, 주행속도 10 km/hr를 기준으로 할 경우, 대형차혼용률에 따라 최대 1,700 m의 연장까지는 반드시 정체길이에 대한 검토가 필요하다.

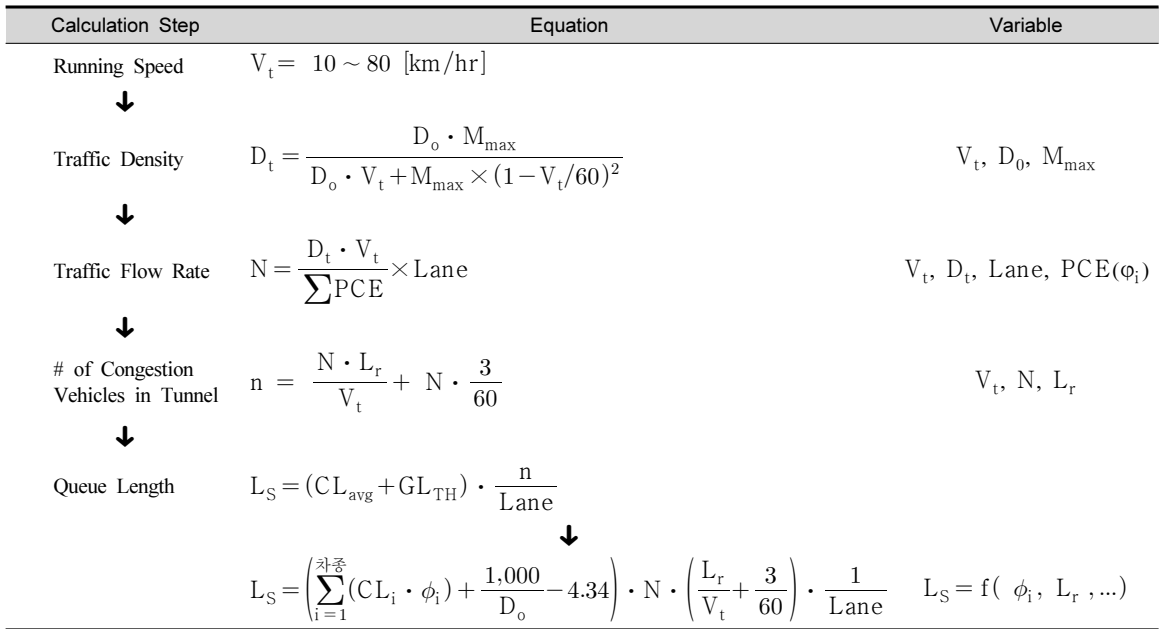


Fig. 2. Calculation flow for the queue length(L_S) in case of fire

Table 2. Traffic Data

Case	Passenger Car	Bus		Truck				Total	HGV (%)	CL_{avg} (m)	$\sum PCE$ (pc/veh)
		Small	Large	Small	Middle	Large	Special				
0	30,066	3,069	3,098	211	5,475	1,789	866	44,574	25.2%	5.467	1.136
	67.5%	6.9%	7.0%	0.5%	12.3%	4.0%	1.9%	100%			
1	81.1%	8.3%	2.8%	0.6%	4.9%	1.6%	0.8%	100%	10.0%	4.797	1.054
2	72.1%	7.4%	5.5%	0.5%	9.8%	3.2%	1.5%	100%	20.0%	5.238	1.108
3	63.1%	6.4%	8.3%	0.4%	14.6%	4.8%	2.3%	100%	30.0%	5.679	1.162
4	54.1%	5.5%	11.0%	0.4%	19.5%	6.4%	3.1%	100%	40.0%	6.120	1.215
5	45.1%	4.6%	13.8%	0.3%	24.4%	8.0%	3.9%	100%	50.0%	6.561	1.269
6	36.1%	3.7%	16.6%	0.3%	29.3%	9.6%	4.6%	100%	60.0%	7.002	1.323
7	27.0%	2.8%	19.3%	0.2%	34.1%	11.2%	5.4%	100%	70.0%	7.443	1.377
8	18.0%	1.8%	22.1%	0.1%	39.0%	12.7%	6.2%	100%	80.0%	7.885	1.431
9	9.0%	0.9%	24.8%	0.1%	43.9%	14.3%	6.9%	100%	90.0%	8.326	1.485

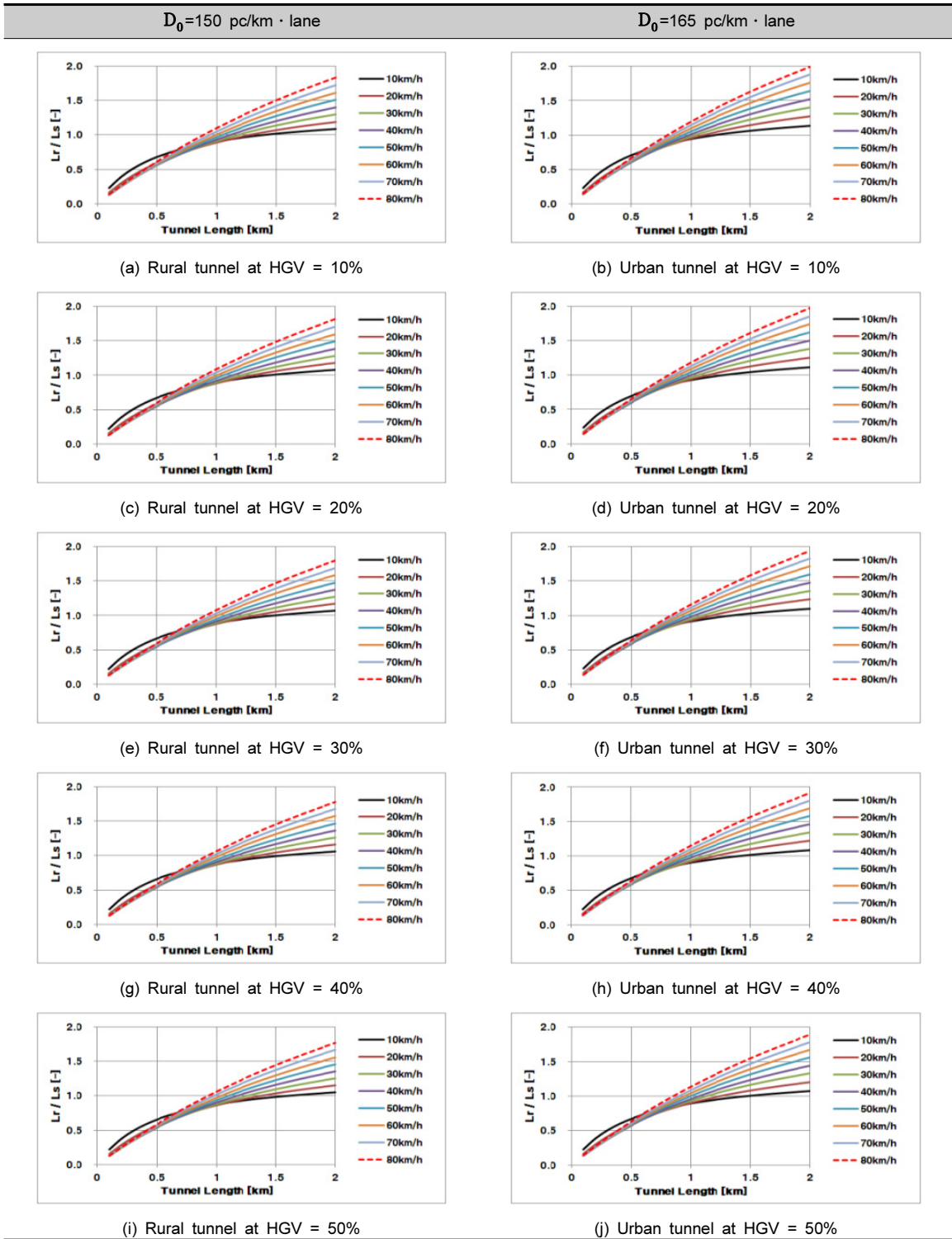


Fig. 3. Relationship between tunnel length(L_r) and the ratio of (L_r/L_s) by running speed(V_t)

터널유형별로 살펴보면, 고속국도와 같은 비도심지 터널($D_0=150$ pc/km·lane)은 주행속도 10 km/h를 기준할 경우, 정체길이가 터널연장을 초과하는 범위는 일반적인 대형차혼입률(HGV)의 범위인 10~50%에 서는 1,400~1,700 m의 터널연장에서 나타나고 있으며, 반면 동일한 조건에서의 도심지 터널($D_0=165$ pc/km·lane)의 경우는 1,200~1,400 m의 터널연장에서 나타나고 있다. 따라서 일반적인 터널의 경우 화재 시 정체길이의 과도한 적용을 방지하기 위해서는 터널연장 1,200 m 미만에서는 반드시 정체길이와 터널연장과의 상호비교가 필요하다.

다음으로 도심지 터널의 경우는 정체밀도(D_0) 값이 비도심지 터널보다 높기 때문에 더욱 많은 차량이 터널내에 정착할 것으로 예상되나, 본 분석에 나타난 결과는 동일한 혼입률(ϕ_i)과 차속(V_i)조건에서 비도심지 터널에서의 정체길이가 더욱 긴 것으로 나타났다. 이와 같은 이유는, 정체밀도(D_0)의 증가에 따른 시간교통량(N) 및 터널내 차량대수(n)는 높게 나타나지만, 차량의 평균길이(CL_{avg})는 변화가 없고, 차간간격(GL_{TH})은 좁아져 정체길이가 짧게 나타났기 때문이다.

이러한 현상은 도심지 터널과 비도심지 터널에서의 동일한 교통밀도값을 나타내기 위해서는 주행속도 (V_t) 값이 달라져야 하는 현상으로 설명되어야 한다.

즉, 교통공학 측면에서 연속교통류에 대한 ‘속도(u -밀도(k)’의 함수는 그린실드(Greenshields)의 공식으로 표현가능하며 식 (6)과 같다.

$$u = u_f \times \left(1 - \frac{k}{k_j}\right) \quad (6)$$

여기서, u 는 속도로 연속교통류에서는 주행속도 (running speed) (km/hr)를 의미하고, k 는 평균밀도 (veh/km), k_j 는 정체(혹은 혼잡)밀도(jam density) (veh/km), u_f 는 자유속도(free flow speed) (km/hr)로 노선상의 설계속도를 의미한다(Roger 외, 1998).

식 (6)에서 동일한 상태의 자유속도(u_f) 및 주행속도(u)를 유지하기 위해서는 정체밀도(k_j)의 증가에 따른 교통밀도(k)의 변화가 수반되어야 한다. 또한 연속교통류에서의 교통량(q), 속도(u), 밀도(k)의 상관관계는 $q = u \cdot k$ 이므로, 동일한 조건의 교통량(q)을 유지하면서 정체밀도(k_j)를 증가시키기 위해서는 주행속도(u)가 낮아져야 한다.

Fig. 4는 정체밀도(D_0)에 따른 교통밀도(D_t)의 변화를 나타내고 있으며, 도심지 터널의 교통밀도는 비도심지 터널에 비해 저속(30 km/hr 이하)구간에서 대체로 높게 나타나고 있다. 이처럼 저속시 교통밀도가 도심지 터널이 높기 때문에 비도심지 터널과 같은 교통밀도를 나타내기 위해서는 도심지 터널의 주행속

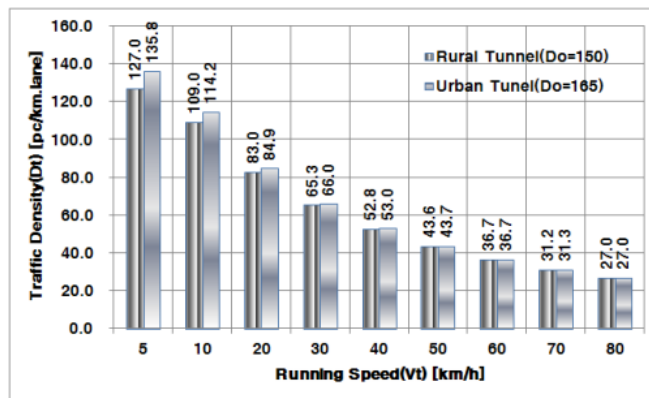


Fig. 4. Relationship between running speed(V_t) and traffic density(D_t) by jam density(D_0)

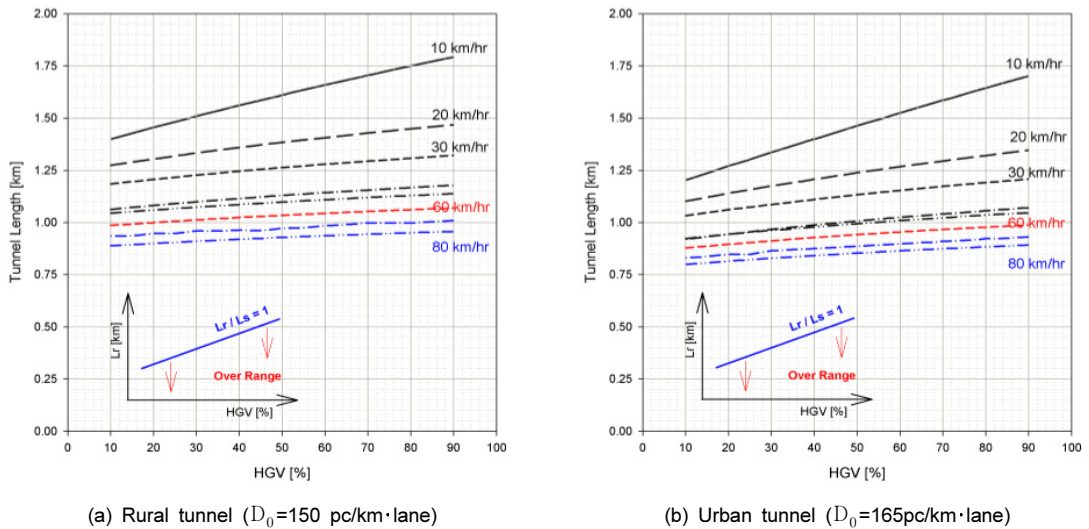


Fig. 5. Relationship between heavy goods vehicle composition(HGV) and tunnel length(L_r) by queue length

도가 비도심지 터널의 주행속도보다 다소 낮아져야함을 알 수 있다. 따라서 동일한 교통량이 통행하는 터널이라도 지역적 특성을 고려할 필요가 있으며, 도심지 터널처럼 정체밀도가 높은 지역에서는 비도심지 터널보다 낮은 단계의 저속구간(예를 들어 5 km/hr)에서 추가적인 환기검토가 필요한 이유가 된다.

이상의 검토결과에서 혼입률과 터널연장에 따른 정체길이를 정량화하면 Fig. 5와 같은 선도로 표현이 가능해진다. Fig. 5는 x축은 대형차혼입률(HGV), y축은 터널연장(L_r)으로 정의하고, 선도에 표현된 값은 주행속도(V_r)별로 터널연장을 정체길이로 나눈 값($L_r/L_s = 1$)을 나타내고 있다. 주행속도별 선도의 하한영역은 정체길이가 터널연장을 초과한 영역을 나타내고 있으므로, 제연설비용량 결정시 정체길이를

터널연장 이내로 축소시켜야 함을 알 수 있다. 또한 각 선도들은 혼입률별로 정체길이의 적용이 가능한 한계 터널연장을 나타내고 있다. 이러한 선도의 표현 방법으로 향후 중규모 터널에서의 정체길이에 대한 정량적이고 합리적 적용이 가능할 것으로 예상된다.

3. 정체길이와 제연팬 용량

정체차량에 의한 정체길이의 적용방안을 검토하기 위하여 연장별로 제연팬 설치대수를 분석하였다. 분석 대상터널의 제원은 Table 3과 같고 기타 계산조건은 도로설계편람(617. 환기시설)을 따랐다.

Fig. 6은 연장별 식 (5)에 의해 계산된 정체차량 대수(n)와 예상 정체길이(L_s) 그리고 터널내 정착

Table 3. Tunnel characteristics

Item	Value or Range	Remark
Tunnel length (m)	500, 600, 700, 800, 1000, 1200, 1400	$M_{max} = 2,200 \text{ pc/hr} \cdot \text{lane}$
Cross-sectional Area (m^2)	75	$D_o = 150 \text{ pc/km} \cdot \text{lane}$
Hydronic Diameter (m)	8.8	Lane = 2 lane
Traffic Date	Refer to Table 1	$CL_{avg} = 5.44 \text{ m}$
Critical velocity (m/s)	2.5	$GL_{TH} = 2.33 \text{ m}$

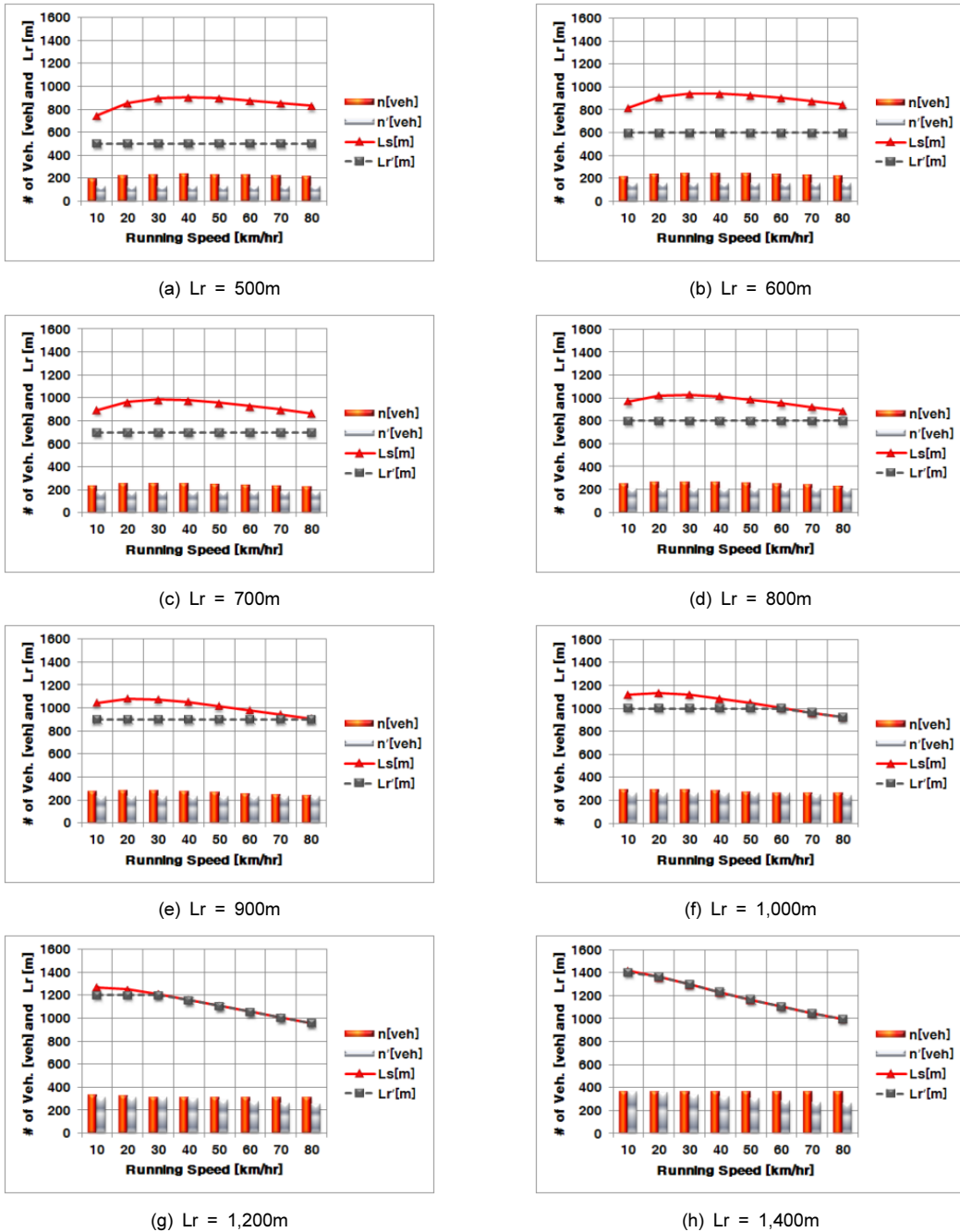


Fig. 6. Comparison of the number of congestion vehicles(n vs n') and queue length(L_s) by tunnel length(L_r)

가능한 정체차량 대수(n')와 이를 고려한 실제 정체길이(L_r')을 나타내고 있고, Table 4는 연장별 환기용량의 분석결과를 나타내고 있다.

대체적으로 화재전 주행속도가 낮은 경우에 정체길이가 증가하며, 또한 혼입율이 증가하면 정체길이가 증가하는 경향을 보이는 것으로 분석된다. 세부적으

로 터널연장 500~900 m 까지는 전속도(10~80 km/hr)에서 정체길이(L_s)가 터널연장(L_r)을 초과하는 것으로 나타났으며, 주행속도 10 km/hr 기준으로 연장 1,400 m 까지도 정체길이가 터널연장을 초과하는 것으로 나타났다. 정체길이가 터널연장을 초과한다는 것은 비합리적인 차량대수가 터널내에 점유하고 있다는 것을 말하며, 이로 인한 환기저항이 크게 작용하고 있음을 의미한다. 따라서 화재시 정체길이의 합리적 조정이 필요하다.

터널내 정체차량 대수(n)는 차량의 혼입률(ϕ_i)에 영향을 받는 시간교통량(N)과 주행속도(V_t)에 영향을 받으며, 정체길이(L_s) 또한 이에 영향을 받는다. 본 분석에서 정체길이는 화재전 주행속도를 10 km/h로 하는 경우에 연장이 1,400 m 이하, 60 km/h로 하는 경우에는 900 m 이하의 터널까지 정체길이가 터널연장을 초과하는 것으로 나타나고 있다. 또한 정체길이가 터널연장을 초과하는 경우, 제트팬 대수를 재산정하면 약 800 m 까지 제연팬($\Phi 1,250$) 대수가

Table 4. Changes in the number of jet-fans considering the queue length(L_s) by tunnel length(L_r)

Lr (m)	Vt (km/hr)	10	20	30	40	50	60	70	80
500	Det. for excess ($L_s > L_r$?)	Over	Over	Over	Over	Over	Over	Over	Over
	Current guides	4	4	4	4	4	4	4	4
	J/F [EA] This study	3	3	3	3	3	3	3	3
	Delta	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
600	Det. for excess ($L_s > L_r$?)	Over	Over	Over	Over	Over	Over	Over	Over
	Current guides	4	4	4	4	4	4	4	4
	J/F [EA] This study	3	3	3	3	3	3	3	3
	Delta	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
700	Det. for excess ($L_s > L_r$?)	Over	Over	Over	Over	Over	Over	Over	Over
	Current guides	4	4	4	4	4	4	4	4
	J/F [EA] This study	4	4	4	4	4	4	4	4
	Delta	0	0	0	0	0	0	0	0
800	Det. for excess ($L_s > L_r$?)	Over	Over	Over	Over	Over	Over	Over	Over
	Current guides	5	5	5	5	5	5	4	4
	J/F [EA] This study	4	4	4	4	4	4	4	4
	Delta	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0
900	Det. for excess ($L_s > L_r$?)	Over	Over	Over	Over	Over	Over	Over	Over
	Current guides	5	5	5	5	5	5	5	5
	J/F [EA] This study	5	5	5	5	5	5	5	5
	Delta	0	0	0	0	0	0	0	0
1,000	Det. for excess ($L_s > L_r$?)	Over	Over	Over	Over	Over	Over	-	-
	Current guides	5	5	5	5	5	5	5	5
	J/F [EA] This study	5	5	5	5	5	5	5	5
	Delta	0	0	0	0	0	0	0	0
1,200	Det. for excess ($L_s > L_r$?)	Over	Over	Over	-	-	-	-	-
	Current guides	6	6	6	6	5	5	5	5
	J/F [EA] This study	6	6	6	6	5	5	5	5
	Delta	0	0	0	0	0	0	0	0
1,400	Det. for excess ($L_s > L_r$?)	Over	-	-	-	-	-	-	-
	Current guides	6	6	6	6	6	6	6	5
	J/F [EA] This study	6	6	6	6	6	6	6	5
	Delta	0	0	0	0	0	0	0	0

1대 정도 감소하는 것으로 나타나고 있다. 따라서 터널 화재시 정체길이가 터널연장을 초과하는 경우는 연장을 초과하는 차량대수는 정체차량에 의한 환기저항 산정시 제외하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 터널 화재시 정체차량에 의한 정체길이가 터널연장을 초과할 경우, 환기저항의 증가에 따른 제연설비 용량의 증가가 발생하게 된다. 따라서 화재시 터널내 차량의 정체길이가 터널연장을 초과하는지 여부를 분석하였고, 정체길이에 대한 산출식과 설계변수에 따른 정체길이를 정량화할 수 있는 선도를 제시하였다. 또한 이를 통해 정체차량에 의한 정체길이가 터널연장을 초과할 경우는 제연설비 용량결정시 정체길이의 초과범위의 정체차량 대수를 제외할 것을 제시하였다. 이상의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 화재시 터널내 차량의 정체길이(L_S)는 차로(Lane) 당 터널내 차량대수(n)에 해당 차량의 평균길이(CL_{avg})와 차간간격(GL_{TH})을 고려하여 식 (5)를 제시하였다.

$$L_S = (CL_{avg} + GL_{TH}) \cdot \frac{n}{Lane}$$

2. 비도심지 터널($D_0=150$ pc/km·lane)은 주행속도 10 km/h를 기준할 경우, 정체차량에 의한 정체길이가 터널연장을 초과하는 범위는 일반적인 대형차 혼입률(HGV)의 범위인 10~50%에서는 1,400~1,700 m의 터널연장에서 나타나고 있으며, 반면 동일한 조건에서의 도심지 터널($D_0=165$ pc/km·lane)의 경우는 1,200~1,400 m의 터널연장에서 나타났다. 따라서 일반적인 터널의 경우 화재시 정체차량에 의한 정체길이의 과도한 적용을 방지하기 위해서는 터널연장 1,200 m 미만에서는 반드시 정체차량에 의한 정체길이와 터널연장과의 상

호비교가 필요한 것으로 분석된다.

3. 정체차량에 의한 정체길이는 터널연장이 동일할 지라도 화재전 주행속도 및 대형차혼입율에 영향을 받는 것으로 분석되었다. 즉, 터널연장이 짧은 경우에는 정체차량 대수에 의한 정체길이가 터널연장을 초과할 가능성이 증가하며, 본 모델터널에 대한 검토에서는 화재전 주행속도가 10 km/h일 경우는 터널연장이 1,400 m 이하, 60 km/h인 경우에는 터널연장이 900 m 이하인 경우에 정체차량 대수에 의한 정체길이가 터널연장을 초과하는 것으로 분석되었다. 또한 터널내 가능한 정체길이로부터 합리적인 정체차량 대수를 산출하고, 터널연장을 초과한 정체차량의 대수를 제외할 경우 제연설비 용량은 1대($\Phi 1,250$) 분의 감소효과가 있는 것으로 분석되었다.
4. 화재시 제연용량의 합리적 결정을 위해서는 정체길이를 고려한 정체차량 대수의 분석이 필요하며, 합리적 정체길이의 판별여부는 대형차혼입률(HGV)과 연장(L_r)의 관계로 정량화가 가능하다. 즉, 주행속도별로 터널연장을 정체길이로 나눈 선도($L_r/L_s = 1$)값을 통해 정체길이가 터널연장을 초과하는 범위를 손쉽게 파악할 수 있으므로, 설계 단계에서 유용한 틀로 활용 가능할 것으로 예상된다.
5. 제연설비 용량결정시 화재시 정체길이가 터널연장을 초과하는 경우에는 터널연장을 초과하는 차량대수는 정체차량에 의한 환기저항 산정시 제외하는 것이 타당한 것으로 분석되며, 향후 관련 기준의 (재)개정 작업시 반영이 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

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

기호정의

Symbols	Unit	Definition
V_t	km/hr	주행속도, Running Speed
L_t	m or km	터널연장, Tunnel Length
n	veh/tunnel	터널내 차량대수, the Number of Vehicle(s) in Tunnel
N	veh/hr	시간교통량, Traffic Flow Rate
Lane	lane	차선수, the Number of Lane(s)
ϕ_i	%	차종(i)별 혼입률, Composition of ith Vehicle
CL_i	m	차종(i)별 차량길이, Total Length of ith Vehicle
CL_{avg}	m	차량의 가중평균 길이(\sum 차종별길이 \times 혼입률)
GL_{TH}	m	차간간격(선행차량 후미부에서 후행차량 전두부), Spatial Gap
L_s	m	화재시 정체차량의 길이, Congestion(or Queue) Length in Case of Fire
M_{max}	pc/hr · lane	최대교통량(도로용량), Maxium Capacity
$D_o (=k_j)$	pc/km · lane	정체시 교통밀도, Jam density
D_t	pc/km · lane	교통밀도, Traffic density by WRA(PIARC)
K	-	설계시간 계수(일반적으로 30번째), Nth Design Hourly Factor
D	-	중방향 교통량의 비, Percentage of Heavy Directional Traffic Volume
PHF	-	첨두시간 계수, Peak Hourly Factor
PCE	pc/veh	승용차환산계수, Passenger Car Equivalents
$\sum PCE$	pc/veh	가중평균 승용차환산계수(\sum 혼입률 \times PCE)
HGV	%	대형차량 혹은 대형차혼입률, (Percentage of) Heavy Goods Vehicle
$q = u \cdot k$	veh/hr	연속교통류에서의 교통량(q), 속도(u), 밀도(k)의 관계식
u_f	km/hr	자유속도, Free Flow Speed
$q_{1,2}$	pc/hr	정체지점 1,2에서의 시간교통량, Traffic Flow Rate at Point 1,2
$D_{1,2}$	pc/km	도착지점 1,2 에서의 교통밀도, Traffic Density at Point 1,2
J/F	or [EA]	제트팬 (or 제트팬 대수), (the Number of) Jet Fan
L_t/L_s	-	터널연장(L_t)에 대한 정체길이(L_s)의 비, the Ratio of L_t over L_s
n'	veh/tunnel	실제 터널연장(L_t)에 정차 가능한 정체차량 대수
L_t'	m or km	실제 정체차량 대수(n')를 고려한 실제 정체길이

References

1. Kim, H.G. (2015), Revised Direction for “Guidelines for fire prevention equipment’s installation and management in road tunnels”, KARSE, Vol. 32, No. 03(2105-03), pp. 96-108.
2. Ministry of Land, Infrastructure and Transport of the Republic of Korea (2009), Guidelines for Fire Prevention Equipment’s Installation and Management in Road Tunnels, pp. 74-75.
3. Ministry of Land, Infrastructure and Transport of the Republic of Korea (2011), “Road design manual (617. Ventilation)”, pp. 617-5-617-9.
4. Priyanto, S. (1999), Queue Length Prediction for Mixed Traffic, Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 3, No. 6, pp. 115-123.
5. Roger, P., William, R., Elena, S. (1998), Traffic Engineering, pp. 309-330.
6. WRA (PIARC) (2012), “Road tunnels: vehicle emissions and air demand for ventilation”, pp. 10-13.
7. Yang X., Yang C., Yang P. (1997), Dynamic Traffic Control System for Urban Expressway, 4th World Congress on Intelligent Transport Systems, pp. 2-3.