

도로터널 화재시 차량의 항력계수가 제연용 제연팬에 미치는 영향에 대한 해석적 연구

유용호^{1*} · 유지오² · 김효규³

¹정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원

²정회원, 신한대학교 자동차공학과 교수

³정회원, (주)주성지앤비 대표이사

A numerical study on effects of drag coefficient of vehicle on jet fans in case of fire in road tunnels

Yong-Ho Yoo^{1*}, Ji-Oh Yoo², Hyo Gyu Kim³

¹Senior Researcher, Fire Research Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Gyeonggi-do, Korea

²Professor, Dep. of Automotive Engineering, Shin-Han University, Gyeonggi-do, Korea

³CEO, JS G&B Inc., Gyeonggi-do, Korea

ABSTRACT: The road tunnel install a vent for the purpose of ventilation and smoke control. Ventilation equipment capacity(number of jet fans) depends on from the condition that of the pressure and ventilation resistance. Pressure and the resistance under operating vehicle have affected on the drag coefficient. The drag coefficient of the tunnel have affected by the blockage effect and slipstream effects. However, when calculating the ventilation fan, are not properly consider taking into account such effects. Therefore, ventilation force may have been slightly overestimated. This paper describes the drag coefficient through a numerical analysis to calculate the equivalent resistance area that reflects the vehicle distance, and examined the equivalent resistance area. The ventilation coefficient corresponding to the result heavy vehicle mixing ratio of the present study was not clear. Equivalent resistance area had reduced by about 86% compared to the road design handbook current standards. Also it had analyzed and reduced to 62.2% compared to Korea Highway Corporation ventilation design criteria ratio, which is the old standard.

Keywords: Drag coefficient, Blockage effect, Equivalent resistance area, Tunnel fire

초 록: 도로터널에서는 환기 및 제연을 목적으로 제연팬을 설치하고 있다. 제연팬 용량(제트팬 댓수)은 환기저항 및 송압력이 평형이 되는 상태에서 결정되게 된다. 터널에 운행중이거나 정지된 차량에 의한 송압력 및 저항력은 차량의 항력계수에 영향을 받게 된다. 터널에서의 항력계수는 슬립스트림 효과(또는 shadow effect)와 폐색효과에 영향을 받게 되며, 환기팬 및 제연팬 산정시 이와 같은 효과를 적절히 고려하지 못하고 있는 실정으로 교통 환기력을 과대평가하고 있다. 이에 본 연구에서는 화재시 차량의 차간간격을 반영한 항력계수와 등가저항면적을 산정하기 위해서 터널에 실제로 차량이 정차하는 조건으로 모델링하여 수치해석을 통해 항력계수를 검토하였다. 본 연구 결과, 항력계수에 대형차량 혼입률이 미치는 영향은 명확하지 않으며, 등가저항면적은 현행 도로설계편람기준에 대비 약 86%, 또 구 기준인 한국도로공사 환기설계기준 대비 62.2%수준으로 감소하는 것으로 분석되었다.

주요어: 항력계수, 폐색효과, 등가저항면적, 도로터널 화재

*Corresponding author: Yong-Ho Yoo

E-mail: yhyoo@kict.re.kr

Received October 28, 2014; Revised November 7, 2014;

Accepted November 11, 2014

1. 서론

터널내 차량은 평상시에는 교통환기력에 의해서 환기를 위한 승압력을 발생시키며, 화재시에는 차량이 정차한 상태이기 때문에 환기를 방해하는 저항력을 발생시킨다. 차량에 의한 교통환기력 및 저항력은 차량의 항력(drag force)계수에 영향을 받는다.

터널에서 차량의 항력은 개방된 대기중에서 보다 차량에 의한 폐색효과(blockage effect) (J.S Wyler., 1974)에 의해 항력이 증가하게 하게 된다. 또한 터널내 화재상황에서는 차량이 정체되거나 정지하게 되어 선행하는 차량의 차간거리가 더 짧아지기 때문에 후류의 영향으로 차량 1대가 받는 항력보다 작은 항력이 작용하게 되는데 이를 슬립스트리밍 효과(slip streaming effect or shadow effect) (Marco Welse et al., 2006)라 한다.

따라서, 터널내 차량에 의한 교통 환기력이나 환기 저항력을 계산에서는 폐색효과에 의한 차량항력계수의 증가효과와 슬립스트리밍 효과에 의한 감소효과를 고려하여야 한다.

이에 본 연구에서는 터널 화재시 제연팬 산정을 위한 항력계수를 제시하는 것을 목표로 화재시 폐색 효과 및 슬립스트리밍 효과가 반영될 수 있도록 실제 상황과 같이 차량을 배치하고 수치해석 및 시뮬레이션을 통해서 항력계수를 검토하였다.

2. 터널 화재시 차량 항력계수

일반적으로 운영중이거나 정지해 있는 차량이 받는 항력은 식 (1)과 같다.

$$\Delta p = \rho C_D \frac{U_r^2}{2} A \quad [\text{Pa}] \quad (1)$$

여기서, U_r (m/s)는 터널내 풍속이고 개방된 대기중에서 차량의 항력계수를 C_{D0} 라고 하면, 터널내 차량의

항력계수 C_D 는 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$C_D = \alpha \beta C_{D0} \quad (2)$$

여기서, α : 슬립스트리밍 효과(slip streaming effect), β : 폐색효과(blockage effect)이다.

또한 터널내 n 대의 정체된 차량의 저항력(Δp_t)은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta p_t = \alpha \beta n \frac{A_m}{A_r} \frac{1}{2} \rho V_c^2 \quad (3)$$

여기서, C_D : free stream 차량 항력계수, V_c : 화재시 터널내 풍속, A_m : 차량등가저항면적 A_r : 터널 단면적이다.

따라서, 터널과 같은 밀폐 공간 내에서의 항력은 폐색효과에 의해서 일반적으로서 차량의 항력보다 증가하는 효과와 차량항력은 선두차량의 후류에 의한 슬립스트리밍 효과로 이하여 항력이 감소하는 효과가 동시에 발생하게 된다.

이에 대한 다수의 연구가 있으며, Glerum (1991)은 일정 간격을 유지한 차량행렬의 전체 항력은 개별 차량항력 합의 최대 50%에 불과하다고 보고하고 있다. 또한 PIARC는 1995년도 권고기준에서 혼잡교통 또는 정체상황인 경우 슬립스트리밍 효과에 의한 영향을 고려할 필요가 있으며, 차속 10 km/h 이하에서는 정상운행시보다 항력계수의 감소율이 최대 30%에 달할 수 있다고 밝히고 있다. 따라서, 차간거리가 매우 짧을 수 밖에 없는 화재시에는 전술한 효과가 보다 더 크게 나타날 것으로 예측할 수 있다.

Ohashi (2006)가 터널내 교통환기력을 구하기 위한 연구에서 사용한 슬립스트리밍효과 및 폐색율은 각 식 (4)와 식 (5)와 같다.

$$\alpha = 1 \quad \text{for } L_{vs}/D_{veh} \geq 16.75 \quad (4)$$

$$\alpha = -2.35 \times 10^{-3} (L_{vs}/D_{veh})^2 + 9.9064 \times 10^{-2} (L_{vs}/D_{veh})$$

$$\beta = 1 + 3.4(A_v/A_r) \quad (5)$$

여기서, L_{VS} : 차간간격(Front to tail spacing between vehicles on a lane), D_{veh} : 차량의 상당직경, A_v : 차량의 투영면적, A_r : 터널단면적이다.

또한, 등가저항면적은 식 (6)과 같이 정의하고 있다.

$$A_m = \alpha [0.74 + 5.8/A_r + (3.8 + 105/A_r)\gamma_L] \quad (6)$$

여기서, γ_L : 차량의 혼입율이다.

위의 분석내용에 의하면 슬립스트림효과가 발생하지 않을 경우, 차량의 평균등가직경을 2 m로 가정하면 차간거리는 $2 \times 16.75 = 33.5$ m 정도가 되어야 하고 화재시 차간거리를 2.5 m 정도로 가정하면 L_v/D_v 는 4~5 정도이며, 이 경우 $\alpha = 0.35 \sim 0.45$ 정도로 분석된다.

폐색효과에 경우에는 Japan Highway Public Corporation (1997)에서 식 (7)과 같이 제시하고 있다.

$$C_D = 0.0786 \times \sigma + 0.35 \quad (7)$$

여기서, σ : 폐색율(%), 차량전면투영면적/터널내공단면적)이고 이 식에서 폐색율 β 를 구하면 식 (8)과 같다.

$$C_D = 7.86 \times \frac{A_v}{A_r} + 0.35 = 0.35(1 + 22.5 \frac{A_v}{A_r}) \quad (8)$$

$$\beta = 1 + 22.5 \frac{A_v}{A_r}$$

폐색율(β)는 대형차 혼입률에 따라서 변하며, 대형차 혼입률이 20~40%일 때, 폐색율은 1.98~2.27 정도로 분석된다.

또한, 차량항력계수(C_D)는 표면마찰항력을 고려하지 않은 형상항력계수만을 의미하며 PIARC (1995)에서는 승용차($A_v=2$ m²) 및 트럭($A_v=3, 4, 5$ m²)의 터널내 항력계수를 각각 0.4 및 1.0으로 제안하고 있다. Table 1과 같이 일본의 경우, Ohashi (2006)가 인용한 항력계수는 소형 0.32, 대형 0.63을 제시하고 있으며, 국내의 경우 Shinhan University (2007)에서 유가 수치해석 및 모형실험을 통해서 소형 0.374, 대형 0.671을 제시하고 있다.

3. 해석모델 및 조건

본 연구에서는 화재로 인하여 터널에 차량이 정지하는 경우, 차간간격의 감소로 인한 차량항력의 감소를 검토하기 위하여 단면적 75 m², 연장 500 m의 터널에 약 400 m구간에 혼입률별로 차량의 배치한 후에 터널내 풍속을 2.5 m/s로 하여 수치해석에 의해서 차량의 항력계수를 검토하였다.

해석은 Fig. 1과 같이 상용 열유체 해석프로그램인 Fluent (Version 6.3)을 사용하였고, 해석격자는 Tetra 격자를 사용하였으며, 격자의 크기는 차량표면서는 0.15 m, 터널단면에서는 최대 0.4 m 크기로 하였다.

3.1 정지차량의 차간간격

정체차량은 터널입구로부터 50 m지점에서 약 400 m

Table 1. Drag coefficients in various cases

Application of rule	Drag coefficient			Projected area		
	Small	Large		Small	Large	
Japan Highway	0.32	0.63		2.3	7.2	
Neung-dong Tunnel(Korea)	0.374	0.671		-	-	
World Road Association	pc	van	bus, truck	pc	van	bus, truck
	0.4	1.0	1.0	2	3~5	7

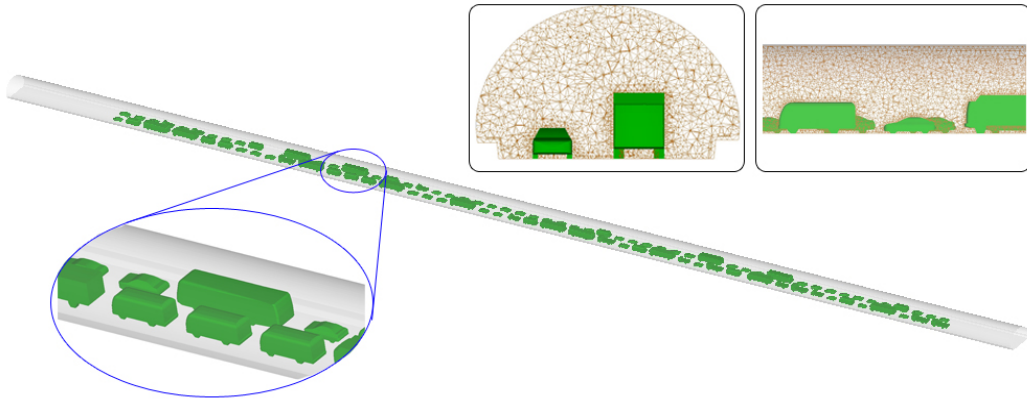


Fig. 1. Model overview

거리에 차량을 혼입률에 따라 무작위로 배치하였다. 차량배치를 위한 화재시 차간거리(L_{TH} ; 차량의 후미(tail)와 차량의 전두부(head)사이의 간격)는 정지시 교통밀도(D_o)가 150 PCU/km·Lane에 의해서 식 (9)와 같이 구하였다.

$$D_o(CL_{PC} + L_{TH}) = 1000 \quad (9)$$

$$L_{TH} = \frac{1000}{D_o} - CL_{PC}$$

여기서, D_o : 정지시 교통밀도(속도 $V=0$ km/hr, 150 pcu/km·Lane), CL_{PC} : 승용차의 차량길이(4.33 m, Ministry of Land (2013)의 승용차 전장 기준)이고, 따라서, 차간간격은 식 (10)과 같이 나타난다.

$$L_{TH} = 1000/150 - 4.34 = 2.33 \text{ m} \quad (10)$$

3.2 적응차종 및 차량 배치

Table 2는 해석모델의 적응 차종 구분과 제원을 나타낸 것이다. 적응 차종별 대표차량은 적응 차종별 차량제원을 분석하여 가장 근사한 값을 갖는 차량을 선정하였다. 또한, 해석에 적용한 대형차 혼입률은 20, 25, 30, 35, 40%이며, 약 400 m구간에 혼입률별로 차량배치를 하였다.

4. 해석결과분석

4.1 항력계수분석

본 연구에서는 화재시 실제와 같이 차량이 배치된 상태에서 차종별 항력계수 검토하기 위하여 선행연구로 모델차량을 최대한 실제형상과 근접하게 모델링하

Table 2. Specifications of vehicle

Model	PC (Personal car)		Bus		Truck		
	Small	Large	Small	Large	Small	Middle	Large
Whole of length	4.22	4.87	6.71	11.72	5.11	5.74	8.90
Full width	1.67	1.82	2.04	2.49	1.78	2.03	2.48
Overall height	1.46	1.48	2.76	3.30	1.94	2.31	3.16
Projected area	2.44	2.68	5.61	8.21	3.47	4.69	7.82
Car name	Verna	Sonata	County	Aero	Bongo	Mega truck (4.5ton)	Cargo Truck (11.5ton)

여 터널내 풍속변화에 따른 차량의 항력계수를 검토하였다.

Fig. 2는 승용차(대형)과 버스(대형)의 경우, 터널내에서 풍속에 따른 항력변화를 나타낸 것이다.

그림에서 풍속이 2.5 m/s일 때 항력이 약간 증대하며 풍속이 증가하면 항력이 약간 감소하는 경향을 보이나 그 차이는 아주 작은 것으로 나타나고 있다.

Table 3은 차량이 터널 내에서 단독으로 있는 경우에 수치해석에 의해서 구한 항력계수를 나타낸 것이다.

Fig. 3과 Fig. 4는 터널에 차량이 화재시 정체된 경우에 차로별로 차량 배치현황에 따른 차량별 항력계수 계산결과를 나타낸 것으로 제연풍은 450 m에서 0 m지점으로 불고 있는 상태이며, 대형차 혼입률이 25%인 경우이다.

그림에서 차종이 동일할지라도 항력계수가 상당한 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 상류측에 정지한 차량의 종류에 따른 후류의 영향 및 인접차로에 정지해있는 차량에 의한 풍속변화에 영향을 크게 받음을 의미한다. 특히, 전방에 정차한 차량이 트럭 등 대형차량인 경우, 승용차의 항력계수는 평균값보다 50%이상 감소하는 것으로 알 수 있다.

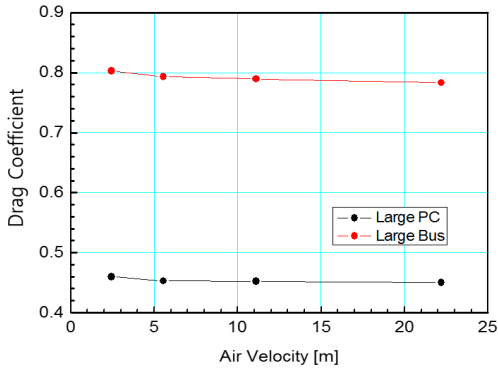


Fig. 2. Drag coefficient in accordance with air velocity

Table 3. Drag Coefficient of Car in single lane

Model	PC		Bus		Truck		
	Small	Large	Small	Large	Small	Mid	Large
Drag Coef.	0.425	0.450	0.564	0.753	0.841	1.024	1.103

4.2 차량종별 항력계수

전술한 방법으로 대형차 혼입률에 따른 차종별, 차로별 항력계수 산정결과를 정리하면 Table 4와 같다. Table 4에 의하면 차로에 따른 항력계수의 차이가 크게 나타나고 있으며, 승용차의 경우, 대형차 혼입률에 따라서 차이가 있으나, 2차로에 정차한 차량의 항력계수는 1차로에 정차한 차량보다 약 14~50%까지 감소하는 것으로 나타나고 있다.

이와 같은 현상은 2차로에 대형차량이 많기 때문에 슬립스트림 효과가 크게 발생하고 2차로의 풍속이 증가하여 항력이 증가하게 되나 본 계산에서는 풍속 증가를 반영하지 않고 평균풍속을 적용하였기 때문이다.

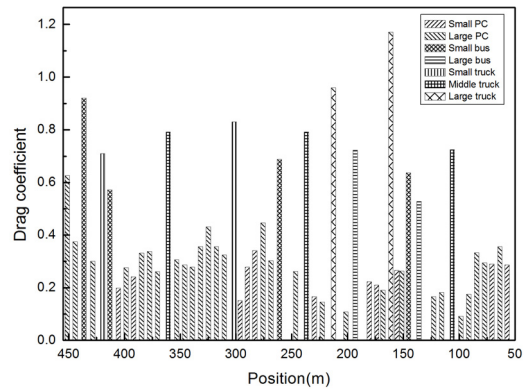


Fig. 3. Drag coefficient at fast lane

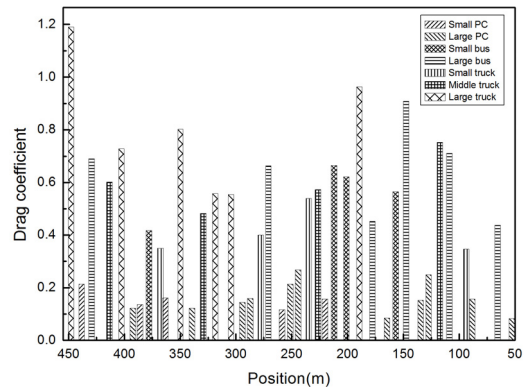


Fig. 4. Drag coefficient at lane slow line

이상의 검토에서 터널에 화재시 정차되는 차량의 항력계수는 선행차량의 종류 및 인접차로에 정차하여 있는 차량의 종류에 크게 영향을 받음을 알 수 있다.

차종별 항력계수는 차량이 정지한 차로에 따라서도 크게 차이가 발생하는 것으로 나타나고 있으며, 혼입률에 따른 차이는 일정한 경향은 없는 것으로 나타나고 있다. 따라서 차량의 항력계수는 상류측에 있는 차량과 측면에 정차한 차종에 따라서 크게 차이가 발생하는 것으로 판단된다.

Fig. 5는 혼입률 및 차종별 항력계수를 나타낸 것으로 차종별 평균은 승용차(소형) 0.210, 승용차(대형) 0.242, 버스(소형) 0.531, 버스(대형) 0.686, 트럭(소형) 0.464, 트럭(중형) 0.621, 트럭(대형) 0.829로 분석되었다. 이는 본 해석모델의 적용한 차량 1대의 항력계수 대비 50%~94%수준으로 감소율은 승용차의 항력계수 감소율이 가장 크게 나타나고 있다.

Table 4. Average of Drag coefficient at Lane

Mixing ratio	Lane	Classification	PC (Passenger car)		Bus		Truck		
			Small	Large	Small	Large	Small	Middle	Large
20	1	Number of car	16	26	4	3	3	0	1
		Drag coefficient	0.264	0.307	0.676	0.806	0.695	-	1.171
	2	Number of car	6	8	10	2	4	6	8
		Drag coefficient	0.171	0.152	0.440	0.642	0.305	0.539	0.807
	Drag coefficient Average		0.238	0.271	0.507	0.740	0.472	0.539	0.847
25	1	Number of car	12	28	4	2	2	3	1
		Drag coefficient	0.238	0.292	0.705	0.625	0.770	0.769	0.959
	2	Number of car	5	11	4	6	4	4	7
		Drag coefficient	0.157	0.160	0.567	0.644	0.409	0.602	0.799
	Drag coefficient Average		0.214	0.254	0.636	0.639	0.529	0.674	0.819
30	1	Number of car	7	30	2	4	1	4	2
		Drag coefficient	0.182	0.249	0.661	0.661	0.747	0.737	0.975
	2	Number of car	8	6	4	2	9	8	8
		Drag coefficient	0.140	0.134	0.523	0.697	0.426	0.590	0.806
	Drag coefficient Average		0.160	0.230	0.569	0.673	0.458	0.639	0.840
35	1	Number of car	10	24	5	3	2	4	2
		Drag coefficient	0.212	0.240	0.601	0.879	0.832	0.737	0.733
	2	Number of car	3	9	2	5	2	8	9
		Drag coefficient	0.289	0.137	0.285	0.679	0.286	0.588	0.770
	Drag coefficient Average		0.230	0.212	0.511	0.754	0.559	0.638	0.763
40	1	Number of car	9	19	6	5	3	3	2
		Drag coefficient	0.207	0.267	0.543	0.753	0.491	0.697	0.986
	2	Number of car	1	5	3	7	5	8	9
		Drag coefficient	0.089	0.156	0.311	0.588	0.294	0.558	0.854
	Drag coefficient Average		0.195	0.244	0.465	0.656	0.368	0.596	0.878
Average			0.211	0.242	0.531	0.686	0.464	0.621	0.829

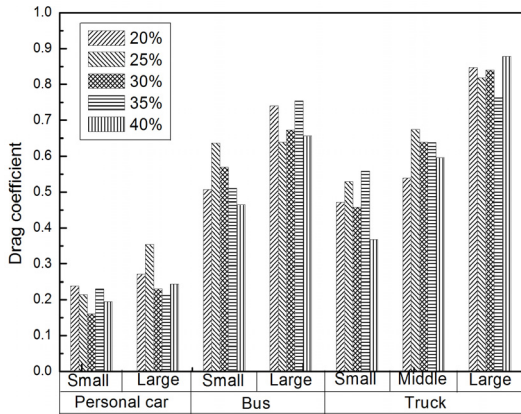


Fig. 5. Result of Drag Coefficient(mixing ratio)

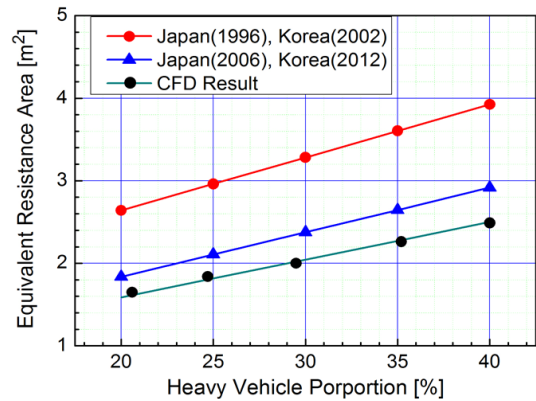


Fig. 6. Compared of equivalent resistance areas by design guidelines and CFD result

4.3 항력계수 및 등가저항 면적

본 연구에서는 항력계수 계산결과를 현행 설계기준과 비교하였다.

실제 도로를 점유하는 비율로 볼 수 있는 주행거리 계를 고려하여 소형과 대형으로 구분하는 항력계수와 등가저항면적으로 구하였으며 이는 Table 5에 나타난 바와 같다.

본 연구결과는 2002년 한국도로공사기준과 비교하여 항력계수는 소형, 50%, 대형 67.6%로 감소한다.

Fig. 6은 터널 단면적이 75 m²인 경우에 혼입률에 따른 등가저항면적을 비교하여 나타난 것이다. 등가저항면적은 본 연구에서 결과는 현행기준에 비하여 약 15%정도 감소하는 것으로 나타나고 있다.

Table 5. Drag coefficient and the equivalent resistance area along with CFD result and the design criteria

Design Criteria	Drag coef.		Equivalent resistance area	
	Small	Large	Small	Large
Present result	0.292	0.737	0.675	5.240
Korea High way (2002)	0.59	1.09	1.36	7.75
Japan High way (1996)	$Am = 0.8 + \frac{41.9}{Ar} + (1.68 + \frac{355}{Ar})\phi_L$			
Ministry of Land (2012)	$Am = 0.64 + \frac{8.84}{Ar} + (3.97 + \frac{107}{Ar})\phi_L$			

5. 결론

본 연구에서는 터널에서 폐색효과 및 슬립스트리밍 효과가 반영될 수 있도록 실제 차량의 정착거리를 고려하여 차종별 항력계수를 대형차 혼입율(20, 15, 30, 35, 40)을 변수로 하여 검토하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 화재로 인하여 터널에 정착된 차량의 항력계수는 선두차량의 차종 및 인접한 차량의 차종과 정착한 차로에 따라서 크게 영향을 받는 것으로 나타나고 있다.
2. 혼입률이 항력계수에 미치는 영향은 일정한 경향을 보이지는 않으나, 혼입율이 증가하면 대형차가 증가하기 때문에 등가저항면적은 증가하는 경향을 보이고 있다.
3. 항력계수는 차종별로 차량1대의 항력계수보다 최대 50%에서 6%정도 감소하는 것으로 나타나고 있으며, 선두차량의 영향을 보다 크게 받는 승용차의 감소형상이 보다 큰 것으로 평가되었다.
4. 등가저항면적은 현행 도로설계편람기준에 대비 약 85%, 구 기준인 한국도로공사 환기설계기준 대비 62.2%수준으로 감소하는 것으로 분석되었다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 2014년도 “(주요)경제성을 고려한 도로터널 환기설비 정비 및 관리 지침 제정연구”의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

1. Gelerum, A., Swart, L. (1991), “Ventilation of road tunnels”, KIVI, Dutch Ministry of Transport, Public Works and Water Management.
2. Japan Highway Public Corporation (1996), “Road tunnel technical standards”, Japan.
3. Japan Highway Public Corporation (1997), “Design guidelines.”, pp. 55-70.
4. Korea High Way Corporation (2002), “Highway tunnel ventilation design standards” Korea.
5. Marco Welse, Martin Schober, Alexander Orellano, (2006), “Slipstream velocities induced by trains.”, Proceedings of the 4th WSEAS International Conference on Fluid Mechanics and Aerodynamics pp. 26-28.
6. Ministry of Land (2012), “Road design manual”, Korea.
7. Ministry of Land (2013), “Road capacity handbook”, Korea.
8. Ohashi, H. (2006), “Longitudinal diffusion by passing vehicles in road tunnels correlation equation on longitudinal diffusion coef”, 12th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels.
9. PIARC (1995), Technical committee report on road tunnels, “Vehicle emissions, air demand, environment, longitudinal ventilation”, XXth World Road Congress.
10. Shinhan University (2007), “Neung-dong tunnel experimental production model and numerical simulation report” Korea.
11. Wyler, J.S. (1974), “Probe blockage effects in free jets and closed tunnels”, J. Eng. Gas Turbines Power, Vol. 94, No. 4, pp. 509-514.