

## 국내 도로터널 교통환기력 관련 현장 및 CFD 분석연구

이창우, 이경복, 조홍률 (동아대학교)

### 1. 서 론

터널내 환기속도는 교통환기력, 환기설비환기력, 입출구손실력, 벽면마찰손실력, 자연환기력들과 같은 다양한 환기력에 의하여 결정된다. 환기력 크기에 직접적인 영향을 미치는 주요 공기역학적 계수는 입구개구 손실계수, 벽면마찰계수, 제트팬 승압계수, 차량 항력계수 등이다. 입구개구손실계수는 일반적으로 환기속도 결정에 미치는 영향이 그다지 크지 않아 0.6을 적용하고 있으며 벽면마찰계수, 제트팬 승압계수, 차량 항력계수는 설계인자에 큰 영향을 받는 계수이다. 제트팬 승압계수는 해외에서 심도있게 수행된 바 있어 비교적 정확한 정량적 추정이 가능하나 벽면마찰계수는 벽면거칠기, 설비 또는 부착물의 거칠기에 영향을 할 때 반드시 full-scale 모델(현장)를 대상으로 한 연구가 필요한 계수이다. 차량항력에 직접적으로 받으므로 터널내부 벽면처리방법과 부착시설물이 다양한 국내 터널특성을 고려수는 차종구성, 차량특성 그리고 교통밀도에 좌우되는 계수이나 국내터널 설계시 적용하는 추정방법에는 첫째, 1990년대 초반 일본의 차량특성 및 차종별 보유비율에 근거한 차량 전면투영면적의 적용, 둘째, 슬립스트리밍(slip-streaming)효과를 고려하지 않고 단순한 폐색율(차량전면투영면적과 내공단면적 비)만을 고려하고 있는 심각한 문제점을 가지고 있다.

본 논문은 국내터널내 공기역학적계수 연구의 일환으로 수행하였으며 국내차량대수 및 형상을 고려한 전면투영면적과 스트리밍효과를 고려한 차량항력계수에 관한 연구의 수행을 목적으로 한다. 궁극적으로는 국내터널내에서의 교통환기력의 정확한 추정을 통하여 터널 환기시스템의 설계 및 운영을 최적화하고자 한다.

### 2. 전면투영면적

현재 국내에서 적용하고 있는 전면투영면적은 소형차  $2.31\text{m}^2$ , 대형차  $7.11\text{m}^2$ 이며 이는 1990년대초의 일본 차량보유대수, 차종구성비, 차종별 전면투영면적에 기초하여 도출한 일본기준을 그대로 적용하고 있는 것이다. 그러나 일본과 국내 차량대수 및 형상의 차이뿐만

아니라 국내 차량형상의 변화 및 차종구성비의 변화를 전혀 고려하고 있지 않은 문제를 가지고 있다.

Figure 1은 1997년부터 현재까지의 국내 총 등록 차량대수 와 이중 소형 및 대형차량의 등록대수의 변화추이를 보여주고 있다. 최근 8년동안 차량등록대수(건설기계로 분류되는 15톤 이상트럭 포함)는 50.0%증가하여 2005년 8월말 현재 총 15.23백만대에 달한다. 이 기간동안의 소형차 및 대형차(중형차 및 대형차)의 구성비는 2000년 95.5%, 4.5%, 2005년 95.6%, 4.4%로 비슷한 수준을 유지하고 있다. 본 연구에서는 국내 등록차량을 7개의 차종(승용차, 소형버스, 대형버스, 소형트럭, 중형트럭, 대형트럭, 특수트럭)으로 구분한 후 승용차, 소형버스, 소형트럭은 소형차로 나머지 차종은 대형차로 분류하였다. 이와 같은 동일한 분류방법은 일본도로공단(1997) 및 대만의 Jang and Chen(2002)의 경우에도 적용하고 있으며 이는 중형차의 전면투영면적이 대형차의 전면투영면적과 큰 차이를 보이고 있지 않은 사실에 기초하고 있다. 차종별 전면투영면적의 변화추이를 Table 1에 정리하였으며 Figure 2는 이중 소형차 및 대형차 전면투영면적 분포를 도시하였다.

Table 1. 차종별 전면투영면적 변화추이

차종	전면투영면적 (m <sup>2</sup> )						
	한국도로공사 설계기준 (1997제정, 2002년개정)	2000.12	2001.12	2002.12	2003.12	2004.12	2005.8
소형	2.31	3.12	3.10	3.11	3.11	3.11	3.11
대형	7.11	6.15	6.14	6.14	6.13	6.15	6.17

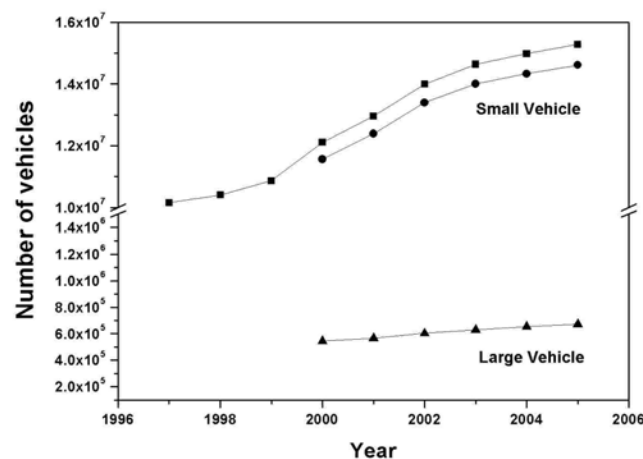
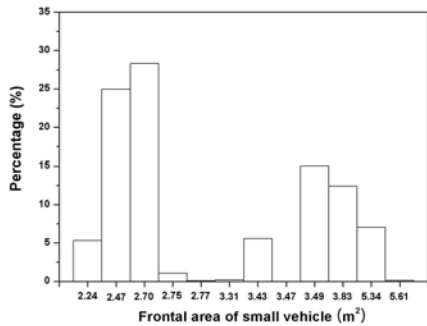
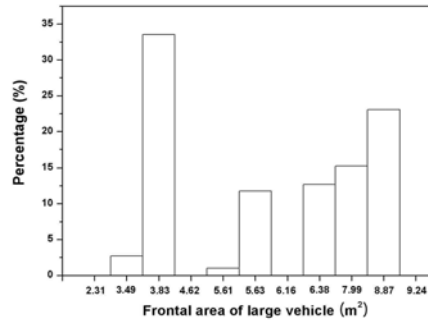


Figure 1. 차량등록대수 및 차종구성비 변화추이



a. 소형차 전면투영면적 분포



b. 대형차 전면투영면적 분포

Figure 2. 승용차 및 대형트럭 전면투영면적 분포

국내 차량의 형상변화, 보유대수의 증가, 차종구성비의 변화 등을 고려한 2005년 8월 기준의 차량 전면투영면적 가중평균은 Table 2에서 보는 바와 같이 소형 3.11m<sup>2</sup>, 대형 6.77m<sup>2</sup>이며 2000년 이후의 변화폭은 소형차 0.01m<sup>2</sup>, 대형차 0.03m<sup>2</sup> 정도로 변화폭은 미미한 편이다.

### 3. 차량항력계수

터널 내에서의 차량통행에 의한 교통환기력은 밀폐공간 내에서의 기류유동특성과 폐색율 (blockage ratio, 차량전면투영면적/터널내공단면적)을 고려하여 국내터널 환기설비 설계시 다음 식을 이용하여 교통환기력을 추정하고 있다.

$$\Delta P = \frac{\overline{A_v C_D}}{A_t} N \frac{1}{2} \rho (V_t - V_v)^2$$

$\Delta P$ : 교통환기력

$A_v$ : 차량전면투영면적

$C_D$ : 차량항력계수 (폐색율 고려)

$\rho$ : 공기밀도

$V_v$ : 차량속도

$A_t$ : 터널내공단면적

$N$ : 터널내 총차량대수

$V_t$ : 터널내 풍속

상기 교통환기력의 추정방법에는 몇가지 중요한 오차의 발생요인을 찾아 볼 수 있다.  $C_D$ , 차량항력계수는 개방공간과 터널과 같은 밀폐공간 내에서 큰 차이를 보이며 또한 교통밀도 즉 차량간격에도 큰 영향을 받는다. 차량항력은 차량 전면 및 후면에서 발생하는 형상항력 (form drag)와 표면마찰항력 (skin friction drag)로 나뉘어 지며 표면마찰항력은 전체항력의 10%정도에 불과한 것으로 알려지고 있다. 터널과 같은 밀폐공간 내에서의 항력은 자유 유동기류 내에서의 항력에 비하여 증가하며 증가속도는 폐색율에 비례한다. 그러나 차량항력은 앞차의 후미에서 발생하는 난류로 인해 뒤차의 항력이 감소하는 효과, 슬립 스트리밍

(slip streaming)효과가 발생하며 Glerum(1991)의 연구결과에 따르면 일정 간격을 유지한 차량 행렬의 전체 항력은 개별 차량항력 합의 최대 50%에 불과하다. 이에 기초하여 PIARC(1995)는 정체 상황 하에서의 슬립스트리밍 효과를 고려하여  $\overline{AvC_D}$ 를 30%까지 낮추도록 권고하고 있으며 정체 시는 30% 감소를 제안하고 있다. 따라서 슬립스트리밍 효과를 고려하지 않은 상기식은 교통환기력을 과다 추정하는 결과를 초래할 가능성이 높다.

### 3.1 슬립스트리밍 효과 분석

슬립스트리밍 효과를 분석하기 위하여 국내 도심터널 1개소, 고속도로터널 1개소를 대상으로 서비스수준 A, B, C, D 4종류 상황 하에서의 차량분포를 가정하여 정지 상태에서의 터널 내 압력분포를 CFD 분석하였다. 분석 대상차량은 전면투영면적  $2.31\text{m}^2$ 인 소형차 및  $7.11\text{m}^2$ 인 대형차이며 각 터널내에서의 2개 차종의 차량이 4종류의 서비스수준하에 놓여 있는 상황을 시나리오로 총 16경우를 CFD 분석하였다. CFD 모델로는 미국 Memorial터널 화재실험 연구를 통하여 개발된 Innovative Research사의 터널환기 전용 CFD 모델인 SOLVENT ver 1.0을 사용하였다. Table 2에 터널의 주요제원 및 차량배치 특성을 정리하였다. Figure 3 및 4는 도심터널내의 소형차 배치 경우(서비스수준 A) 및 고속도로터널 내의 대형차 배치 경우(서비스수준 A)에서의 차량분포형태 및 터널 mesh 형태를 보여주고 있다.

Table 2. CFD분석 대상 터널 및 차량 주요 제원

구분	내공 단면적 ( $\text{m}^2$ )	대표 직경 (m)	벽면 마찰 계수	차량간 거리 (터널내차량대수)							
				소형차 (1.54mx1.50m, L=4.5m)				대형차 (2.1mx3.4m, L=10.5m)			
				서비스수준				서비스수준			
				A	B	C	D	A	B	C	D
도심 터널 (L: 300m)	60.7	8.09	0.012	29 (16대)	25 (20대)	21 (22대)	15 (30대)	23 (16대)	17 (20대)	15 (22대)	12 (26대)
고속도로터 널 (L: 300m)	73.1	8.90	0.015	39 (12대)	33 (16대)	23 (20대)	18 (26대)	23 (16대)	21 (18대)	19 (20대)	12 (26대)

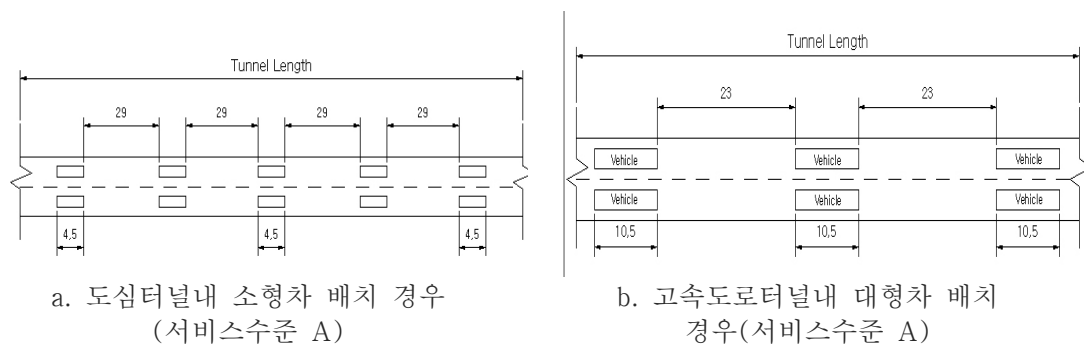
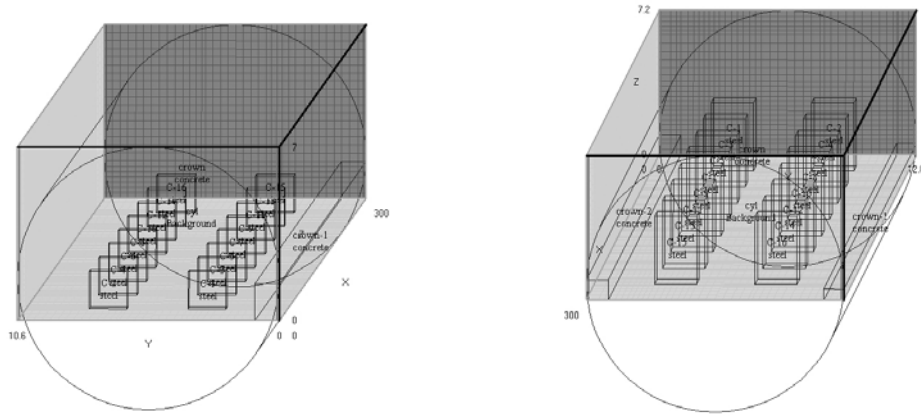


Figure 3. 터널내 차량분포

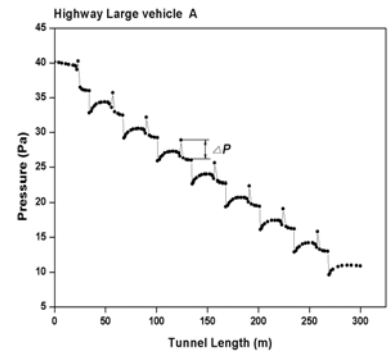
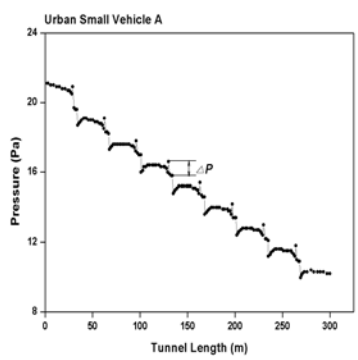


a. 도심터널내 소형차 배치 경우 (서비스수준 A)                      b. 고속도로터널내 대형차 배치 경우(서비스수준 A)

Figure 4. 분석터널 mesh 형태

CFD분석시의 경계조건으로는 입구경구면 유입풍속을 4m/s, 출구면 기압은 대기압을 가정하였으며 벽면마찰계수는 default 값을 적용한 후 터널내 차량을 모두 제거한 상황 하에서의 총 압력손실을 구한 후 벽면마찰계수를 역추정하여 계산하였다.

Figure 4는 차량배치 후의 터널내 압력분포의 CFD 분석결과중 일부이며 Figure 3과 같은 도심터널내의 소형차 배치 경우(서비스수준 A) 및 고속도로터널내 대형차 배치 경우(서비스수준 A)이다.  $\Delta P$ 는 차량 1대가 차지하는 길이, 즉 차량길이와 차간거리의 합, 내에서의 압력손실을 나타낸다. 차량 1대당 항력  $\Delta P$ 는 Table 3에서 보는바와 같이 서비스수준이 낮아져 차량간 간격이 좁아질수록 감소하며, 전면투영면적이 큰 대형차의 항력이 2.32~3.96Pa 정도로 소형차 0.63~0.80Pa에 비하여 상대적으로 크고, 내공단면이 도심터널에 비하여 20% 작은 도심터널의 경우가 고속도로보다 크게 나타나고 있다. 서비스수준이 감소할수록 항력은 감소하므로 슬립스트리밍의 현상을 명확하게 보여주고 있다. 서비스수준 A와 D의 경우에서의 항력 차이는 도심터널이 고속도로터널에 비하여 크게 나타나고 있다. 서비스수준 D 경우에서의  $\Delta P$ 는 서비스 수준 A에 비하여 0.78~0.83의 범위를 나타내므로 뚜렷한 슬립스트리밍 효과를 보여주고 있다.



a. 도심터널내 소형차 배치 경우 (서비스수준 A)                      b. 고속도로터널내 대형차 배치 경우(서비스수준 A)

Figure 4. 압력분포

Table 3. 서비스별 차량항력 변화

서비스 수준	고속도로터널				도심터널			
	소형차		대형차		소형차		대형차	
	$\Delta P$ (Pa)	Ratio	$\Delta P$ (Pa)	Ratio	$\Delta P$ (Pa)	Ratio	$\Delta P$ (Pa)	Ratio
Los A	0.76	1.00	2.91	1.00	0.80	1.00	3.96	1.00
Los B	0.75	0.98	2.85	0.98	0.76	0.95	3.63	0.92
Los C	0.68	0.89	2.77	0.95	0.71	0.89	3.51	0.89
Los D	0.63	0.83	2.32	0.78	0.66	0.83	3.15	0.80

### 3.2 $K_{blockage}$ 및 $C_D$ 분석

$K_{blockage}$ 는 터널내 밀폐단면상에서 이동하는 차량만에 의한 압력손실계수로 다음식과 같이 정의된다.  $K_{blockage}$ 는 터널 내에서 차량 1대가 점유하는 길이 (차량길이 + 차량간격)상에서의 차량 만에 의한 저항계수이므로 정상환기시의 환기력계산시 뿐만 아니라 방재설계의 정체차량에 의한 저항력을 계산하기 위한 필수적인 계수이다.

$$K_{blockage} = \frac{\Delta P - \Phi}{\frac{1}{2} \rho V_t^2}$$

$$\Phi = \frac{1}{2} \rho V_t^2 \frac{f_t}{d_t} \left[ l_t + \frac{l_v}{(1-\sigma)^2} \right]$$

$\Phi$  : 마찰손실                       $f_t$  : 벽면마찰계수  
 $d_t$  : 터널대표직경               $l_t$  : 차량간격  
 $l_v$  : 차량길이                       $\sigma$  : 폐색율

한편, 벽면마찰 및 차량항력 이외의 영향을 무시한 경우, 터널내 총압력손실은 벽면마찰 저항력과 차량항력의 합이므로 다음 식에서  $C_D$ 추정이 가능하다. 계산결과는 Table 4에 정리하였다.

$$\Delta P = f_t \frac{L}{d_t} \frac{1}{2} \rho V_t^2 + \frac{A_v C_D}{A_t} N \frac{1}{2} \rho V_t^2$$

$\Delta P$ : 터널내 총 압력손실       $L$ : 터널길이

Table 4.  $K_{blockage}$  및  $C_D$  분석결과

서비스 수준	고속도로터널				도심터널			
	소형차		대형차		소형차		대형차	
	$K_{blockage}$	$C_D$	$K_{blockage}$	$C_D$	$K_{blockage}$	$C_D$	$K_{blockage}$	$C_D$
Los A	0.006	1.40	0.265	1.76	0.038	1.27	0.391	1.80
Los B	0.019	1.34	0.263	1.70	0.035	1.18	0.363	1.65
Los C	0.027	1.13	0.257	1.68	0.046	1.10	0.353	1.59
Los D	0.030	1.04	0.219	1.38	0.044	0.96	0.317	1.47

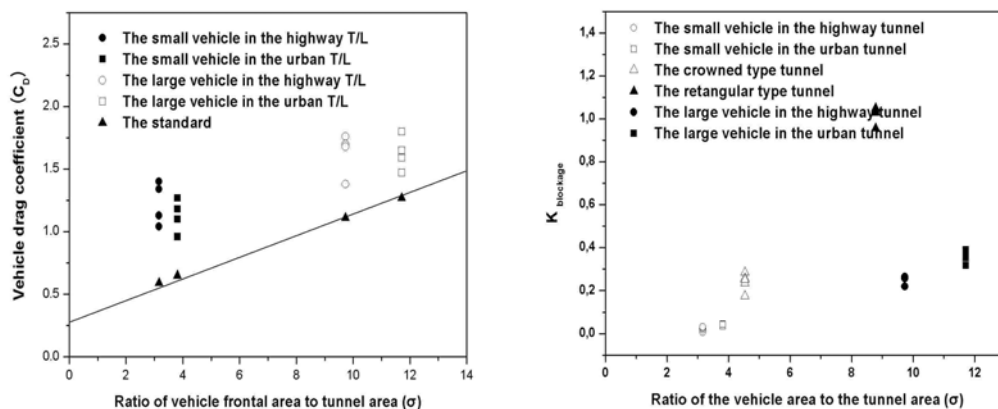
터널내 차량에 의한 폐색효과를 나타내는  $K_{blockage}$ 는 폐색율이 동일한 경우에도 차량간격과 차량길이의 상대적 크기에 따라서도 변화하고 있음을 알 수 있다.  $K_{blockage}$ 는 소형차의 경우가 0.006~0.044, 대형차의 경우가 0.265~0.317 범위를 보인다. 폐색율이 3.16 및 3.81%인 소형차의 경우 서비스수준이 낮아질수록 증가하는데 반하여 9.73 및 11.73%인 대형차의 경우는 반대로 감소하는 경향을 보인다. 한편, 미국 Memorial 터널 실험결과에서는 크라운터널(단면적 71.6m<sup>2</sup>, 차량 전면투영면적 3.24m<sup>2</sup>)에서의  $K_{blockage}$ 는 0.2404를 권고하고 있다.

국내 설계기준상의 차량항력계수  $C_D$ 는 다음과 같은 식으로 추정하며 차량배열 형태나 길이에 의한 영향을 고려하지 않고 단순히 폐색율만의 영향을 받도록 정의하고 있다. 본 연구결과에 동일한 정의의 항력계수를 적용할 경우 추정값은 Table 4와 같다. 항력계수는 서비스수준이 낮아질수록 모든 경우에 감소하고 있으며 범위는 1.04~1.80이다.

$$C_D = 0.0786\sigma + 0.36$$

$\sigma$ : 폐색율(차량전면투영면적/터널내공단면적)

Figure 5.a는 상기식에 의하여 계산한 항력계수와 Table 4의 서비스수준별 항력계수와 비교결과를, Figure 5.b는 Memorial 터널 실험결과와의 비교결과를 도시하고 있다. 서비스수준별 항력계수가 폐색율만을 이용하여 구한 식에 비하여 15~134%정도 크게 나타나고 있다. 차이의 원인으로는 상기식에서는 (1) 표면마찰항력을 고려하지 않고, (2) 차량형상 특히 전면투영면적, 차량길이 및 간격간의 관계를 고려하지 않고 있음을 들 수 있다. 그러나 표면마찰항력은 일반적으로 전체항력의 10%정도로 알려지고 있어 두 번째 원인의 기여도가 상대적으로 크다고 추측된다. 본 연구결과에서는 표면마찰항력을 고려하고 있으나 슬립스트리밍도 동시에 고려하였으므로 항력이 현저히 크게 나타난 것은 또 다른 요인을 추측해볼 수 있다. 그 중하나가 터널 단면의 형태이다. 미국 Memorial 터널 실험 연구에서는 크라운 및 직사각형 단면 터널을 실험대상으로 하였으며 Figure 5.b에서 보는 바와 같이 터널 단면형태에 따라 큰 차이를 보이며 크라운 형태 터널의 경우 동일한 단면형태를 가정한 본 연구결과와 유사한 수준을 보이고 있다.



a. 설계기준식과의 비교

b. Memorial 터널 실험결과와의 비교

Figure 5. 항력계수 비교

### 3.3 결과검토

슬립스트리밍효과의 분석결과 차량 1대당 항력은 도로의 서비스수준이 낮아져 차량간 간격이 상대적으로 좁아질수록 감소하며, 전면투영면적이 큰 대형차의 항력이 소형차에 비하여 상대적으로 크고, 내공단면이 작은 도심터널의 경우가 고속도로 경우보다 크게 나타나고 있다. 서비스수준 A와 D의 경우에서의 항력 차이는 도심터널이 고속도로터널에 비하여 크게 나타나고 있다. 서비스수준 D경우가 서비스수준 A에 비하여 0.78~0.83의 범위를 나타내는 뚜렷한 슬립스트리밍 효과를 보여주고 있다.

터널내 차량에 의한 폐색효과를 나타내는  $K_{blockage}$ 는 폐색율뿐만 아니라 차량간격과 차량길이의 상대적 크기에 따라서도 변화하고 있음을 알 수 있다.  $K_{blockage}$ 는 소형차의 경우가 0.006~0.044, 대형차의 경우가 0.265~0.317 범위를 보이며, 폐색율이 3.16 및 3.81%인 소형차의 경우 서비스수준이 낮아질수록 증가하는데 반하여 9.73 및 11.73%인 대형차의 경우는 반대로 감소하는 경향을 보인다. 한편, 미국 Memorial 터널 실험결과에서는 크라운 터널에서의  $K_{blockage}$ 는 0.2404를 권고하고 있다.

폐색율만의 영향을 고려한 차량항력계수  $C_D$ 는 항력계수는 서비스수준이 낮아질수록 모든 경우에 감소하고 있으며 범위는 1.04~1.80이다. 이는 국내설계기준에 적용하고 있는 식의 결과에 비하여 15~134%정도 크게 나타나고 있다. 차이의 원인으로는 (1) 표면마찰항력, (2) 차량형상 특히 전면투영면적, 차량길이 및 간격간의 관계, (3) 터널 단면의 형태를 들 수 있다. 특히 터널단면형태의 경우, 크라운 형태 터널단면을 고려한 본 연구결과가 동일한 형태의 미국 Memorial 터널실험 연구와 유사한 결과를 보이고 있다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 국내터널의 교통환기력 추정방법에 대한 연구의 일환으로 특히 차량항력에 관한 연구를 수행하였다. 전후방에 위치한 차량간의 공기역학적인 영향에 의한 슬립스트리밍효과, 터널내 차량에 의한 폐색효과를 나타내는  $K_{blockage}$ , 폐색율만의 영향을 고려한 차량항력계수  $C_D$ 에 관한 분석 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 도로의 서비스 수준변화에 따른 차량간격 차이에 따른 차량 1대당 항력의 크기는 분명한 차이를 보이고 있다. 항력은 서비스수준이 낮아져 차량간 간격이 좁아질수록 감소하며, 전면투영면적이 큰 대형차의 항력이 소형차에 비하여 상대적으로 크고, 내공단면적이 상대적으로 작은 도심터널의 경우가 고속도로 경우보다 크게 나타나고 있다. 서비스수준 D경우가 서비스수준 A에 비하여 0.78~0.83의 범위를 보인다.
- (2) 터널내 차량에 의한 폐색효과를 나타내는  $K_{blockage}$ 는 폐색율뿐만 아니라 차량간격과 차량길이의 상대적 크기에 따라서도 변화한다.  $K_{blockage}$ 는 소형차의 경우가 0.006~0.044, 대형차의 경우가 0.265~0.317 범위를 보이며, 소형차의 경우 서비스수준이 낮아질수록 증가하는데 반하여 대형차의 경우는 반대로 감소하는 경향을 보인다.
- (3) 폐색율만의 영향을 고려한 차량항력계수  $C_D$ 는 서비스수준이 낮아질수록 모든 경우에 감소하고 있으며 범위는 1.04~1.80이다. 국내설계기준에 적용하고 있는 식과 비교하여 15~134%정도 크게 나타나고 있으며, 차이의 요인으로는 첫째, 표면마찰항력, 둘째, 차량형상 특히 전면투영면적, 차량길이 및 간격간의 관계, 셋째, 터널 단면의



형태를 들 수 있다.

- (4) 국내터널의 교통환기력 추정을 통한 환기설비용량의 결정 그리고 정체차량에 의한 저항력 계산을 통한 방재설비용량의 결정시 현재의 국내설계기준에서와 같이 폐색을 만들 고려한 단순식을 적용에는 많은 문제가 있음을 알 수 있다.

#### ■ 참고문헌 ■

1. Glerum, L.S., et al., 1991, Ventilation of Road Tunnels, Royal Institute of Engineers (KIVI), Ministry of Transport, Public Works and Water Management
2. Permanent International Association of Road Congress (PIARC), 1995, Road Tunnels: Emissions, Ventilation, Environment, XXth World Road Congress in Montreal
3. 일본도로공단, 1997, 설계요령, 제3집 터널, pp. 55~70
4. Bruin, A.C., Maarsing, .R.A and Swart, L., 1997, New Attempts to Solve an Old Problem: Aerodynamic Measurements in New Vehicle Tunnels, Proceedings of the 9th Symposium on Arodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, pp. 3-23.
5. Anon., 1999, Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program, Phase IV Report, Bechtel/Parsons Brinckerhoff
6. 한국도로공사, 2002, 고속도로 환기시설 설계기준
7. Jang, H.M. and F. Chen, 2002, On the Determination of the Aerodynamic Coefficients of Highway Tunnels, J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 90, pp. 869~896