

단기 VDS자료로 수출입화물트럭이 집중하는 고속도로의 K-factor 추정에 관한 연구

† 김태곤 · 허인석* · 전재현**

† 한국해양대학교 건설공학과 교수, * 한국해양대학교 토목환경공학과 박사과정, ** 한국해양대학교 토목환경공학과 석사과정

K-factor Prediction in Import and Export Cargo Trucks-Concentrated Expressways by Short-Term VDS Data

† Tae-Gon Kim · In-Seok Heo* · Jae-Hyun Jeon**

† Civil Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 606-791, Republic of Korea

*Civil Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 606-791, Republic of Korea

**Civil Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 606-791, Republic of Korea

요 약 : 국내 경부고속도로와 남해고속도로는 부산항을 각각 남북방향과 동서방향으로 연계하며 20%이상의 중대형화물트럭 혼재율과 특정시간대 통행량이 집중되는 핵심 간선도로로 시간교통량계수(K-factor)에 대해 연구의 필요성을 깨닫게 되었다. 그리하여 본 연구에서는 경부고속도로와 남해고속도로의 기본구간에서 단기간동안 수집된 차량검지시스템(vehicle detection system, VDS)자료를 이용하여 고속도로의 K-factor와 K-factor추정치(estimate)사이의 상관분석을 통해서 고속도로의 K-factor추정모형 구축을 목적으로 연구하였다. 결과적으로 7일 VDS자료의 K-factor추정치(estimate)와 함께 파워(POW)모형이 K-factor를 추정에 높은 설명력과 신뢰성이 있음을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 고속도로, 교통특성, 시간교통량계수, 시간교통량계수의 추정치, 상관분석, 회귀모형

Abstract : Gyeongbu and Namhae expressways in the country, are the major arterial highways which are connected with the Busan port in the north-south and east-west directions, respectively, and required to study the traffic characteristics about the hourly volume factors(K-factor) by concentrated medium-size and large-size cargo trucks of 20% or higher in expressways. We therefore attempted to predict the K-factor in expressways through the correlation analysis between K-factor and K-factor estimates on the basis of the short-term VDS data collected at the basic segments of the above major expressways. As a result, power model appeared to be appropriate in predicting K-factor by the K-factor estimate based on VDS data for 7 days with a high explanatory power and validity.

Key words : expressway, traffic characteristics, K-factor, K-factor estimate, correlation analysis, regression model

1. 서 론

일반적으로 고속도로(Expressway)란 자동차전용도로로서 출퇴근시간대를 제외하고는 거의 자유흐름속도(free flow speed)를 유지하는 고속화도로라 할 수 있다. 그러나 국내 경부고속도로와 남해고속도로는 각각 남북방향과 동서방향으로 부산항과 연계된 간선도로로 수출입화물트럭이 집중하면서 종종 교통문제가 발생하고 있는 핵심축이다.

이러한 경부고속도로와 남해고속도로의 교통문제 해결을 위해서는 재정여건이 허용되는 범위 내에서 추가적인 시설확장과 더불어 기존 시설에 대한 시간교통량계수(K-factor)의 특성연구를 통해 고속도로 교통관리체계의 개선방안을 모색할 필요가 있다.

게다가 고속도로의 교통문제는 주로 연결로 접속구간이나

엇갈림구간에서 발생한다고 생각하는데, 경부고속도로와 남해고속도로는 연결로 접속구간이나 엇갈림구간뿐만 아니라 기본구간에서도 중대형차량의 혼재와 상충 등으로 종종 교통문제가 발생하고 있는 상황이다. 따라서 본 연구에서는 경부고속도로와 남해고속도로의 기본구간을 대상으로 단기 VDS 교통자료(교통량, 속도, 점유율 등)를 수집 분석하고, 다음으로 K-factor와 단기 K-factor추정치(estimate)사이의 상관특성을 토대로 최적의 K-factor추정모형을 구축 검증하며, 마지막으로 단기 K-factor추정치(estimate)를 이용하여 K-factor를 추정함으로써 고속도로의 교통관리체계를 개선할 수 있는 토대를 마련하고자 하였다.

한편, K-factor와 관련된 연구에서 미국의 Highway Capacity Manual(2000)에서는 'K-factor란 어느 분석대상시간에 발생하는 연평균일교통량(AADT)의 비율이다. 특히,

† Corresponding author : 종신회원, tgk@kmou.ac.kr 051)410-4462

* 정회원, heoindol@nate.com 051)410-4462

** 정회원, sksgl1@naver.com, 051)410-4462

K-factor는 AADT가 증가할수록 감소하고 높은 K-factor는 낮은 K-factor에 비해 더 빨리 감소하며 개발밀도가 증가할수록 K-factor는 감소하게 된다. 그리고 위락지역은 가장 높은 K-factor를 보이고 있고 지방지역, 부도심지역 및 도심지역순으로 점점 감소하고 있다.'라고 서술하고 있다. 또한 미국의 Crownover(2006)는 '미국의 Oregon주 교통량기록장치(automatic traffic recorder, ATR)에 의한 2일, 3일 및 7일간의 ATR자료를 토대로 K-factor와 K-factor추정치(estimate) 사이의 상관성을 연구하였다. 그 결과 7일간의 ATR자료를 토대로 한 K-factor추정치(estimate)가 K-factor와 통계적으로 잘 부합되는 것으로 나타났다.'라고 언급함으로써 단기자료를 토대로 K-factor의 추정 가능성을 확인할 수 있었다.

2. 자료 수집 및 분석

본 연구와 관련하여 경부고속도로(Ex-1)와 남해고속도로(Ex-10)는 Fig. 1과 Table 1에서도 알 수 있듯이 양방향 4~8차로의 전형적인 고속도로로 100km/h의 규정 속도에 20% 이상의 중대형화물트럭이 집중하고 있다. 그리하여 자료 수집을 위해 연구대상 고속도로(Ex-1과 Ex-10)의 180여개 기본구간 관측지점(km-point)으로부터 2주(2012년 6월 19일~7월 3일까지)동안 15분 단위의 차량검지시스템(vehicle detection system, VDS)자료를 수집하였고, 수집된 VDS자료 중에서 오류가 없는 VDS자료를 중심으로 자료 분석용 데이터베이스를 구축하였으며, 구축된 자료 분석용 데이터베이스는 1시간단위로 전환하여 교통량분석, 속도분석 및 점유율분석 등에 사용하였다.

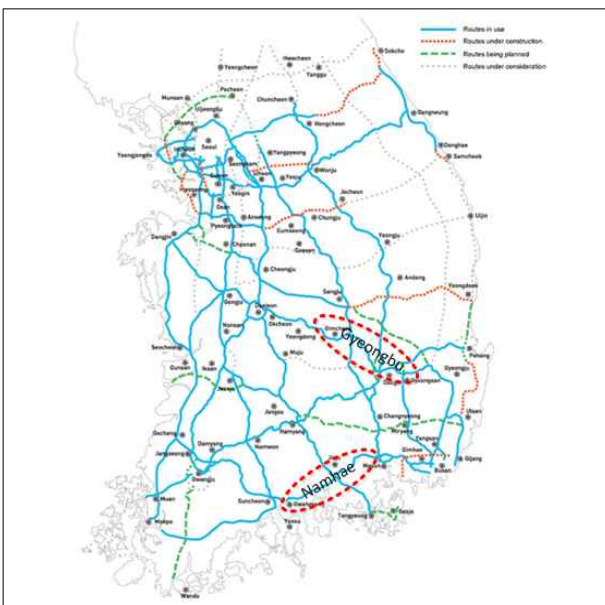


Fig. 1 Expressways under the study

Table 1 Characteristics of basic expressway segments

Specification	Ex-1	Ex-10
No. of lanes	4~8	4~8
Regulatory speed(km/h)	100	100
No. of km-points at basic segment	92	95
Percentage of medium-size vehicles(%)	3.9	3.5
Percentage of large-size vehicles(%)	17.5	17.1

2.1 교통량분석

교통량(flow)이란 단위시간당 차량대수(veh/h/1)로 다음 식(1)과 같은 과정을 통해 분석에 사용하였다(TRB, 1975).

$$q = \sum_{i=1}^4 \left(\frac{N}{t} \right)_i \quad (1)$$

여기서,

- q : flow rate for 1hour(veh/h/1)
- N : no. of vehicles observed for a unit time(veh)
- t : a unit time(15min)

결과적으로 Table 2와 Fig. 2에서 알 수 있듯이 연구대상 고속도로는 방향별로 서로 다른 통행특성을 보였다. 특히, 경부고속도로의 방향별 통행량 분석에서 북쪽방향에서는 오전시간대 약 710대(veh/h/1)로 첨두 특성을 보였고 남쪽방향에서는 오후시간대 약 850대(veh/h/1)로 첨두 특성을 보였다. 반면, 남해고속도로의 방향별 통행량 분석에서 동쪽방향에서는 오후시간대 약 600대(veh/h/1)로 첨두 특성을 보였고 서쪽방향에서는 오전시간대 약 580대(veh/h/1)로 첨두 특성을 보임으로써 고속도로의 방향별 서로 다른 통행특성을 확인할 수 있었다.

Table 2 Flow analysis in Ex-1 and Ex-10(veh/h/1)

	Ex-1		Ex-10	
	NB	Max	709	Max
Min		100	Min	41
Avg		466	Avg	313
AM Peak		709	AM Peak	-
PM Peak		-	PM Peak	598
SB	Max	852	Max	581
	Min	116	Min	46
	Avg	460	Avg	314
	AM Peak	-	AM Peak	581
	PM Peak	852	PM Peak	-

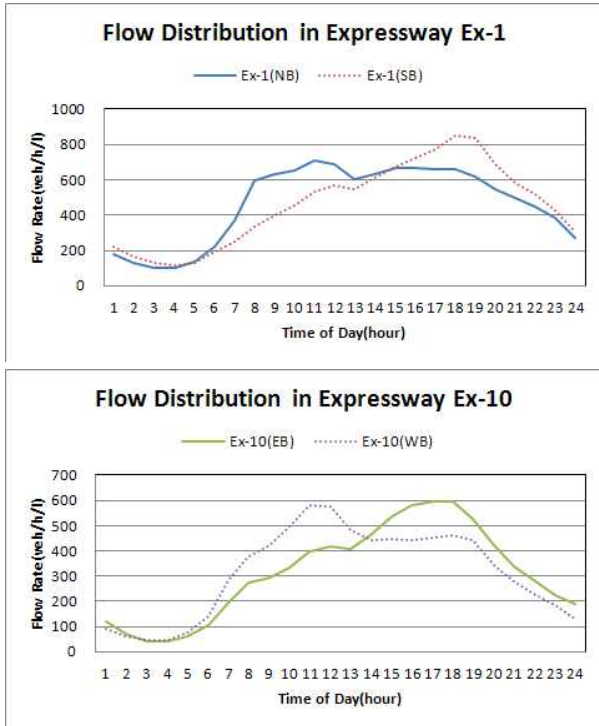


Fig. 2 Flow distribution in Ex-1 and Ex-10

2.2 속도분석

속도(speed)란 단위시간당 차량의 주행거리(km/h)로 다음 식(2)와 같은 과정을 통해 분석에 사용하였다(May, 1990).

$$u_s = \frac{3.6 \times d}{\bar{t}} = \frac{3.6 \times d}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{d}{u_i}\right)} \quad (2)$$

여기서,

- u_s : mean speed at station(km/h)
- d : distance between detectors at station(m)
- \bar{t} : mean travel time(sec)
- u_i : speed of each vehicle i (km/h)
- N : no. of vehicles observed for a unit time(veh)

결과적으로 Table 3와 Fig. 3에서 알 수 있듯이 연구대상 고속도로는 고속도로와 방향에 관계없이 거의 비슷한 속도특성을 보였다. 특히, 경부고속도로의 평균속도는 약 100km/h~101km/h로 나타났고 남해고속도로의 평균속도는 약 103km/h~104km/h로 다소 높게 나타났다. 또한, 경부고속도로와 남해고속도로는 오후 9시 이후에 속도가 다소 감소하였고 새벽 4시~5시 사이에는 속도가 급감함으로써 고속도로의 비슷한 속도특성을 확인할 수 있었다.

Table 3 Speed analysis in Ex-1 and Ex-10(km/h)

		Ex-1		Ex-10	
NB	Max	105	EB	Max	109
	Min	91		Min	93
	Avg	100		Avg	103
	AM Peak	103		AM Peak	-
	PM Peak	-		PM Peak	108
SB	Max	106	WB	Max	110
	Min	91		Min	93
	Avg	101		Avg	104
	AM Peak	-		AM Peak	108
	PM Peak	103		PM Peak	-

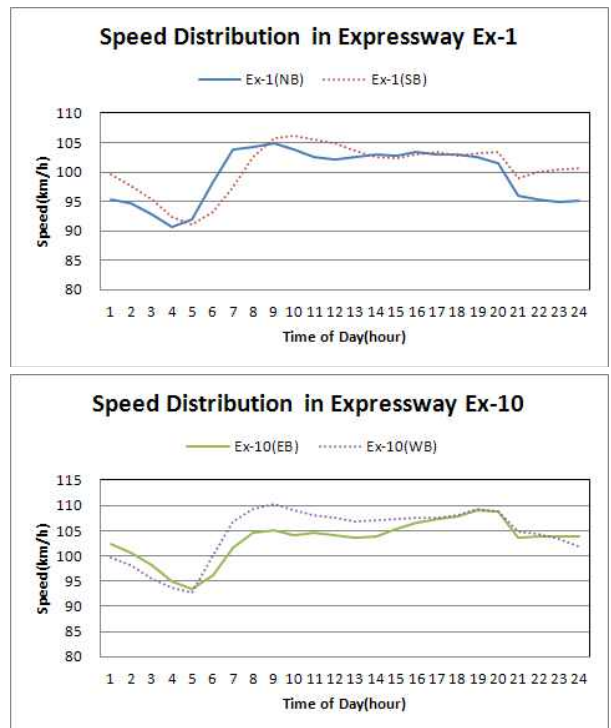


Fig. 3 Speed distribution in Ex-1 and Ex-10

2.3 점유율분석

점유율(occupancy)이란 차량의 점유시간비율(%)로 다음 식(3)과 같은 과정을 통해 분석에 사용하였다(May, 1990).

$$O = \frac{\sum_{i=1}^N (t_o)_i}{t} \quad (3)$$

여기서,

- O : occupancy(%)
- $(t_o)_i$: time that detector is occupied by i -th vehicle(sec)
- N : no. of vehicles observed for a unit time(veh)
- t : a unit time(15 min)

결과적으로 Table 4와 Fig. 4에서 알 수 있듯이 연구대상 고속도로는 방향별로 서로 다른 점유율특성을 보였다. 특히, 경부고속도로의 북쪽방향에서는 오전시간대 약 4.7%로 침두 특성을 보였고 남쪽방향에서는 오후시간대 약 5.4%로 침두 특성을 보였다. 반면, 남해고속도로의 동쪽방향에서는 오후 시간대 약 4.7%로 침두 특성을 보였고 서쪽방향에서는 오전 시간대 약 4.9%로 침두 특성을 보임으로써 고속도로의 방향 별 서로 다른 점유율특성을 확인할 수 있었다.

Table 4 Occupancy analysis in Ex-1 and Ex-10(%)

Ex-1			Ex-10		
NB	Max	4.7	EB	Max	4.7
	Min	1.2		Min	0.6
	Avg	3.3		Avg	2.8
	AM Peak	4.7		AM Peak	-
	PM Peak	-		PM Peak	4.7
SB	Max	5.4	WB	Max	4.9
	Min	1.3		Min	0.7
	Avg	3.1		Avg	2.8
	AM Peak	-		AM Peak	4.9
	PM Peak	5.4		PM Peak	-

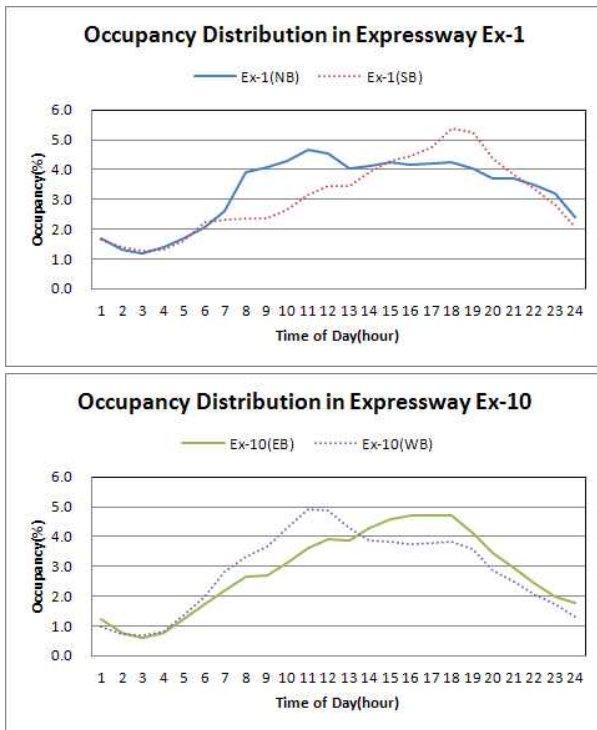


Fig. 4 Occupancy distribution in Ex-1 and Ex-10

이상의 자료 수집 및 분석결과로부터 연구대상 고속도로에 대해 방향별 서로 다른 침두 특성과 분포를 확인할 수 있었으므로 방향별 침두 특성과 분포를 고려한 고속도로 교통관리체계의 개선연구가 필요하다고 생각하였다.

3. K-factor와 K-factor추정치(estimate) 분석

위의 문헌연구를 토대로 K-factor(K)란 1년 중 어느 1시간에 발생하는 연평균일교통량(AADT)의 비율이고, K-factor추정치(estimate, K_j)란 단기간동안 어느 1시간에 발생하는 일평균교통량(ADT_j)의 비율로 다음 식 (4)와 (5)와 같은 과정을 통해 분석에 사용하였다.

$$K = \frac{q}{AADT} \quad (4)$$

$$K_j = \frac{q}{ADT_j} \quad (5)$$

여기서,

- K : K-factor
- q : hourly volume(veh/h)
- AADT : annual average daily traffic(veh/day)
- K_j : K-factor estimate
- ADT_j : average daily traffic for a short-term period $j(j=1, 3, 5, \text{ and } 7\text{days})$ (veh/day)

결과적으로 연구대상 고속도로에서 가장 높은 K-factor의 범위가 $0.07 \leq K < 0.15$ 로 나타났고, 가장 높은 K-factor추정치(estimate)의 범위는 $0.08 \leq K < 0.16$ 로 다소 높게 나타났다. 특히, 경부고속도로에서는 Table 5와 6 그리고 Fig. 5와 6에서 알 수 있듯이 K-factor의 분석결과가 K-factor추정치(estimate)의 분석결과보다 다소 낮게 나타났고, 남해고속도로에서는 K-factor의 분석결과가 K-factor추정치(estimate)의 분석결과보다 K_3 을 제외하고는 대체적으로 높게 나타났다. 또한, K-factor와 K-factor추정치(estimate)사이의 상관분석의 결과에서도 높은 상관특성을 유지하는 것으로 나타났다.

Table 5 Analysis of K and K_j in expressway Ex-1

Direction		K	K_1	K_3	K_5	K_7
NB	Max	0.078	0.083	0.091	0.088	0.086
	Min	0.004	0.005	0.005	0.005	0.005
	Avg	0.038	0.042	0.044	0.042	0.042
	r	-	0.998	1.000	1.000	1.000
SB	Max	0.087	0.088	0.097	0.100	0.099
	Min	0.005	0.006	0.005	0.005	0.005
	Avg	0.037	0.042	0.043	0.042	0.042
	r	-	0.997	1.000	1.000	1.000

Table 6 Analysis of K and K_j in expressway Ex-10

Direction		K	K ₁	K ₃	K ₅	K ₇
EB	Max	0.137	0.095	0.142	0.136	0.124
	Min	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
	Avg	0.044	0.042	0.046	0.045	0.042
	r	-	0.989	1.000	1.000	1.000
WB	Max	0.130	0.092	0.137	0.131	0.120
	Min	0.005	0.004	0.005	0.005	0.004
	Avg	0.044	0.042	0.046	0.044	0.042
	r	-	0.991	1.000	1.000	1.000

이상의 분석결과를 토대로 연구대상 고속도로에 대해 가장 높은 K-factor의 범위를 $0.07 \leq K < 0.15$ 로 설정하고 특히, K-factor와 상관특성이 높은 K-factor추정치(estimate; K₃, K₅ 및 K₇)에 대해 K-factor의 추정연구가 필요하다고 생각하였다.

4. 모형 구축 및 검증

위의 K-factor범위 내에서 K-factor와 K-factor추정치(estimate; K₃, K₅ 및 K₇)사이에서 적절한 모형관계를 검토하였으며, 검토된 모형의 유효성과 타당성을 평가하기 위해 상관관계분석과 대응표본 t-검정분석 등을 수행하였다.

4.1 모형 구축

모형구축에서 종속변수로는 K-factor를 사용하고 독립변수로는 K-factor추정치(estimate; K₃, K₅ 및 K₇)를 사용하여 검토한 곡선형태의 11개 회귀모형 중에서 결정계수(R²)를 기준으로 설명력이 높은 모형을 선정한 결과, 다음 식(6)과 같은 파워모형(POW)이 가장 적합한 것으로 나타났다.

$$POW : K = \beta_0 \times K_j^{\beta_1} \quad (6)$$

여기서,

- K : K-factor
- K_j : K-factor estimate(j=3, 5, and 7)
- β_i : regression coefficients(i=0, 1)

결과적으로 연구대상 고속도로의 K-factor범위는 모형구축과정에서 $0.07 \leq K < 0.11$ 과 $0.11 \leq K < 0.15$ 으로 구분되었다. 특히, 구분된 K-factor범위에서 모형의 결정계수(R²)를 비교해보면, Table 7과 Fig. 7에서 알 수 있듯이 모형의 결정계수(R²)가 각각 0.988~0.999과 0.998~0.999로 높게 나타났다. 또한, K-factor의 각 추정치(estimate)별 K-factor모형의 결정계수(R²)를 비교해보면, 위의 K-factor범위에서 추정치(estimate) K₃에 의한 모형의 결정계수(R²)가 각각 0.988과 0.999로 나타났고, 추정치(estimate) K₅에 의한 모형의 결정계수(R²)는 각각 0.998과 0.999로 나타났으며, 추정치(estimate) K₇에 의한 모형의 결정계수(R²)는 각각 0.999과 0.998로 나타남으로써 K-factor추정치(estimate)를 이용한 K-factor추정에서 구분된 K-factor범위 내 파워모형(POW)의 높은 설명력을 확인할 수 있었다.

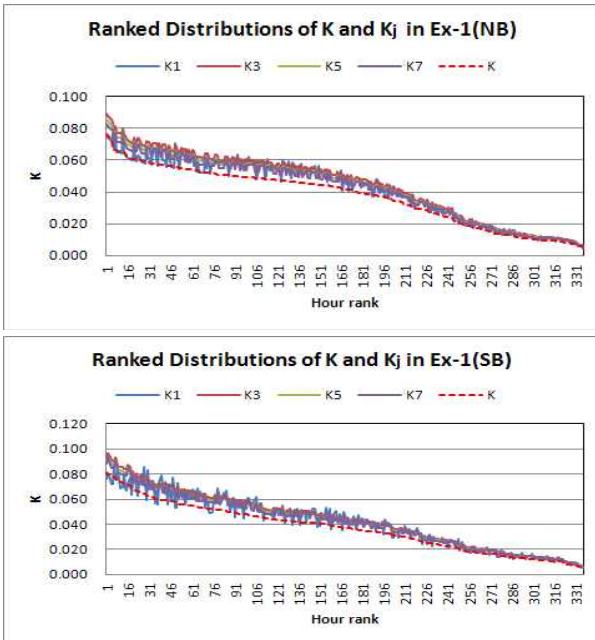


Fig. 5 Ranked distributions of K and K_j in Ex-1

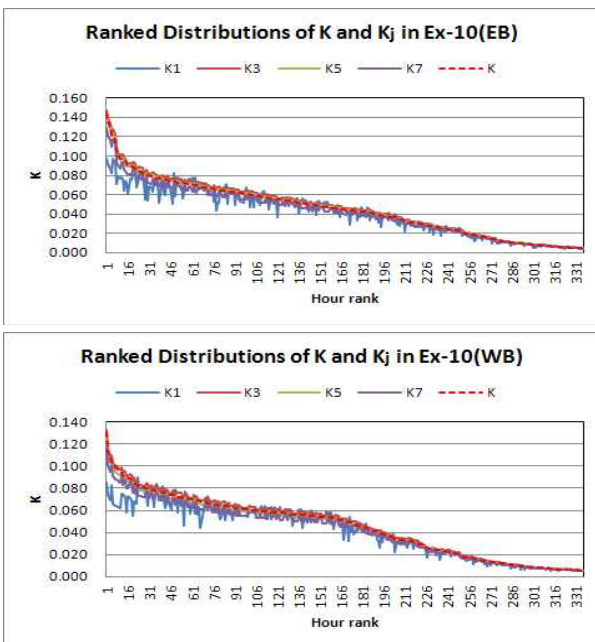


Fig. 6 Ranked distributions of K and K_j in Ex-10

Table 7 Regression models of K-factor in expressways

Range of K-factor		Model			
0.07 ≤ K < 0.11	K ₃	POW	K = 0.871 × K ₃ ^{1.000}		
		R ²	0.988	F-sig.	0.000
	K ₅	POW	K = 0.904 × K ₅ ^{1.000}		
		R ²	0.998	F-sig.	0.000
	K ₇	POW	K = 0.912 × K ₇ ^{1.001}		
		R ²	0.999	F-sig.	0.000
0.11 ≤ K < 0.15	K ₃	POW	K = 0.962 × K ₃ ^{1.000}		
		R ²	0.999	F-sig.	0.000
	K ₅	POW	K = 1.008 × K ₅ ^{1.001}		
		R ²	0.999	F-sig.	0.000
	K ₇	POW	K = 1.070 × K ₇ ^{1.001}		
		R ²	0.998	F-sig.	0.000

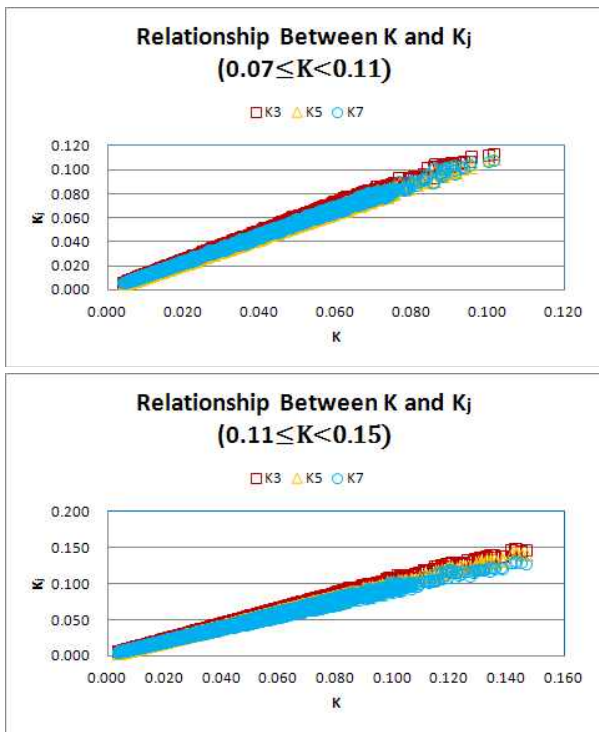


Fig. 7 K-factor models in expressways

4.2 모형 검증

모형구축에서 선정된 파워모형(POW)의 유효성을 검증하기 위해 관측된 K-factor자료 중에서 모형구축에 사용되지 않은 나머지 K-factor자료를 중심으로 검증을 실시하였다. 그리고 모형검증을 위해 예측된 K-factor(K_{exp})와 산정된 K-factor(K_{cal})사이에 다음 식(7)~(11)과 같이 상관관계분석 및 대응표본 t-검정분석을 실시하였다.

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n [(K_{cal})_i \times (K_{exp})_i] - [\sum_{i=1}^n (K_{cal})_i] \times [\sum_{i=1}^n (K_{exp})_i]}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n [(K_{cal})_i]^2 - [\sum_{i=1}^n (K_{cal})_i]^2} \times \sqrt{n \sum_{i=1}^n [(K_{exp})_i]^2 - [\sum_{i=1}^n (K_{exp})_i]^2}} \quad (7)$$

여기서,

- r : correlation coefficients
- $(K_{cal})_i$: i -th K-factor calculated
- $(K_{exp})_i$: i -th K-factor expected
- n : number of paired samples

또한,

$$t = \frac{\bar{D}}{\frac{s_D}{\sqrt{n}}} \quad (8)$$

$$\bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i \quad (9)$$

$$D_i = (K_{cal})_i - (K_{exp})_i \quad (10)$$

$$s_D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2}{n-1}} \quad (11)$$

여기서,

- t : t statistic of matched pairs samples
- s_D : standard deviation of difference in K_{cal} and K_{exp}
- \bar{D} : mean of difference in K_{cal} and K_{exp}
- D_i : difference in i -th K_{cal} and K_{exp}

결과적으로 Table 8과 Fig. 8에서 알 수 있듯이 모형의 상관관계분석에서는 상관계수(r)가 K-factor범위 0.07 ≤ K < 0.11에서 0.997~0.999로 나타났고, K-factor범위 0.11 ≤ K < 0.15에서 0.998~0.999로 높게 나타났다. 그러나 모형의 t-검정에서는 상당한 차이를 보였는데, K-factor범위 0.07 ≤ K < 0.11에서는 추정치(estimate; K₃, K₅ 및 K₇) 모두 수락 영역에 포함되는 것으로 나타났으나 K-factor범위 0.11 ≤ K < 0.15에서는 K₇만이 수락영역에 포함됨으로써 K₇을 이용한 고속도로의 K-factor 추정모형은 위에 제시된 모든 K-factor범위에서 신뢰성이 있다는 사실을 확인할 수 있었다.

Table 8 t-Test results of K-factor models

Range of K-factor	Correlation coefficient(r)	t-value	p-value	Result	
0.07 ≤ K < 0.11	K ₃	0.997	0.334	0.739	Accept
	K ₅	0.998	-0.505	0.613	Accept
	K ₇	0.999	1.909	0.056	Accept
0.12 ≤ K < 0.15	K ₃	0.999	4.376	0.000	Reject
	K ₅	0.999	7.235	0.000	Reject
	K ₇	0.998	-0.702	0.483	Accept

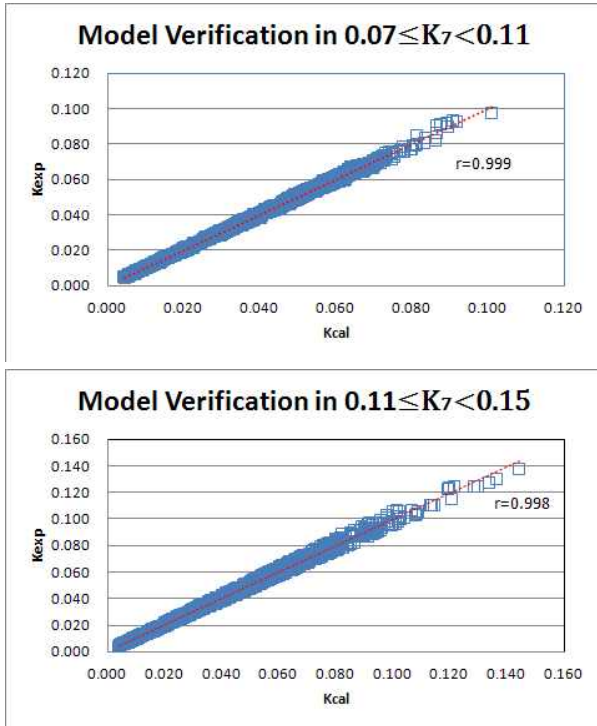


Fig. 8 Model verification in expressways

5. 결론 및 향후 연구과제

연구대상 고속도로의 기본구간에 대한 교통자료의 분석, K-factor와 단기 K-factor추정치(estimates; K_3 , K_5 및 K_7) 사이의 상관분석 그리고 모형구축 및 검증과정을 통해 다음과 같은 결론에 도달할 수 있었다.

i) 연구대상 고속도로는 방향별로 서로 다른 교통특성을 보였고 수출입화물트럭의 집중에 따른 고속도로의 안전성 개선을 위해서 시간대별 탄력요금제 적용과 같은 고속도로의 수요관리시스템을 제안할 수 있다.

ii) 연구대상 고속도로의 K-factor는 단기 VDS자료의 K-factor추정치(estimate)들과 양(+)의 상관특성을 보였고, 특히 7일 자료의 K-factor추정치(estimate)와 높은 상관특성을 유지하는 것으로 나타났음을 확인할 수 있다.

iii) 연구대상 고속도로의 K-factor추정을 위해 7일 자료의 K-factor추정치(estimate)를 이용한 추정모형으로는 파워모형(POW)이 가장 높은 설명력을 보였고 동시에 신뢰성이 있는 것으로 나타났음을 확인할 수 있다.

따라서 본 연구에서 구축 검증된 고속도로의 K-factor추정모형은 유사한 교통특성을 가지는 고속도로의 K-factor예측을 위한 척도로 사용할 수 있을 것으로 생각되며, 향후 다양한 교통특성을 고려한 고속도로에 대해 추가적인 연구가 계속 수행되어야 할 것으로 생각되었다.

References

- [1] AASHTO(2001), A Policy On Geometric Design of Highways and Streets, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C. 20001.
- [2] Crownover, D. R.(2006), Use of Short-term interval counts to determine K Factors, Oregon Department of Transportation, August.
- [3] Lapin, L. L.(1983), Probability and Statistics for Modern Engineering, PWS Publishers, Belmont, California.
- [4] May, A. D.(1990), Traffic Flow Fundamentals, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632.
- [5] TRB(1975), Traffic Flow Theory, Special Report 165, Transportation Research Board, Washington, D.C. 20001.
- [6] TRB(2000), Highway Capacity Manual, Special Report 209, Washington, D.C. 20001.

원고접수일 : 2013년 11월 1일
 심사완료일 : 2014년 2월 10일
 원고채택일 : 2014년 2월 11일