COSMOS 과포화시 초기대기차량 추정에 대한 연구

A study of Initial Queue Estimation for oversaturated Intersection based on COSMOS

이은미
(서울시립대학교, 석사과정)
(shorttoe@hanmail.net)

김영찬
(서울시립대학교, 교수)
(yckimm@uos.ac.kr)

박현석
(한국건설기술연구원, 연구원)
(hysupark@kict.re.kr)

Key Words : 과포화, 초기대기차량, 지체시간, COSMOS

목 차

Ⅰ. 서론
1. 연구의 배경 및 목적
2. 연구의 범위 및 내용
Ⅱ. 관련연구 검토
1. 국외문헌 고찰
2. 국내문헌 고찰
Ⅲ. 초기대기차량 추정 모형 개발
1. 초기대기차량의 의미
2. 초기대기차량과 COSMOS 대기길이와의 관계
3. 추정 방법론
Ⅳ. 적용 및 평가
1. 시나리오 구성
2. 시나리오 분석 결과
Ⅴ. 결론 및 향후 연구과제
참고문헌

Ⅰ. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

운전자에게 제공되는 실시간 교통정보 중 통행시간은 최적의 경로선택 결정에 중요한 정보가 되며, 운전자들은 비포화시보다 과포화시에 통행시간에 더 민감하게 반응한다. 그러나 국내외 단속류 통행시간 예측에 관한 연구는 교통류 관계식을 이용하거나 통계적 기반을 두고 많은 연구가 있으나, 이는 대부분 비포화시에 국한되어 있는 실정이다.

단속류 통행시간은 교차로 간 링크통행시간을 말하며, 교차로 신호제어시스템에 의해 지체를 경험하게 되어 연속류보다 통행시간 예측이 어렵다. 따라서 단속류 통행시간을 예측하기 위해서는 하류부 교차로에 의해 야기되는 지체시간을 정확하게 산정하는 것이 중요한 과제가 된다.

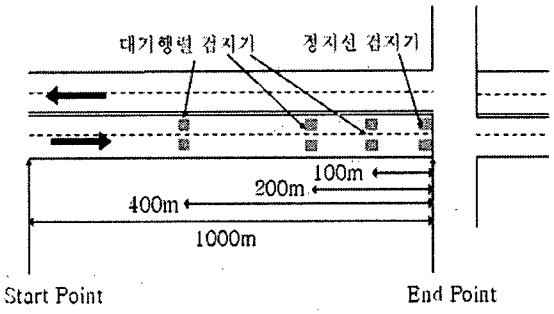
HCM 지체식은 가장 발달된 형태의 지체 산정식으로, 비포화 상태에 국한하여 개발된 Webster's delay 모형의 단점을 극복하여 과포화시에도 지체시간을 구할 수 있는 장점이 있다. HCM 지체식은 총지체를 균일지체 · 증분지체 · 추가지체로 구분하는데, 현재 과포화시 지체시간 산정에 관한 연구는 대부분 균일지체 · 증분지체에 관하여 이루어지고 있다. 또한 과포화시 총지체에 큰 영향을 미치는 추가지체 산정시 중요한 파라미터인 초기대기차량은 현장관측으로 구하고 있다.

본 연구는 과포화시 초기대기차량을 추정하는 방안을 제시하여 현장관측에 의존하던 기존방법을 개선하고, 이로써 정확한 지체시간을 산정하여 실시간 통행시간 제공에 목적이 있다. 또한 개발한 모형을 현실에서 적용하기 위해 서울,울산,제주 등에서 운영중인 신신호시스템(COSMOS)을 기반으로 한다.

2. 연구의 범위 및 내용

1) 연구의 범위

본 연구의 공간적 범위는 COSMOS 환경을 기반으로 <그림1>과 같은 신호교차로에 한하며, <표1>의 내용과 같다.



<그림 1> Test bed

<표 1> 연구의 범위

구분		내용
공간적 범위	시스템 체계	COSMOS 시스템 구축 · 운영
	도로조건	양방향 2차로 독립교차로, 평지
	운영조건	정주기식 2현시 체계
	교통조건	과포화시 직진 이동류만 고려
시간적 범위		주기별로 분석

2) 연구의 내용

본 연구는 COSMOS 환경에서 과포화시 초기대기차량을 추정하는 모형의 개발 부분과 적합도 검증을 위한 평가 부분으로 나누어지며 내용은 다음과 같다.

첫째, 과포화시 COSMOS 대기행렬 알고리즘을 통해 산출되는 대기길이를 이용하여 초기대기차량을 추정한다. 즉, 초기대기차량과 COSMOS 대기길이와의 관계를 정의하여 초기대기차량 추정 모형을 개발하여 현장관측에 의존하던 기존의 방법을 개선하고자 한다.

둘째, 이 연구의 평가 방안으로 미시적 모형인 VISSIM을 이용한다. 연구의 범위에서 선정된 연구대상 교차로를 시나리오별로 시뮬레이션하여 초기대기차량을 구하고, 이와 본 연구에서 개발된 모형을 통해 추정한 초기대기차량과 비교 분석하여 모형의 적합도를 검증한다.

II 관련연구 검토

1. 국외문헌 고찰

HCM 지체식은 분석기간 동안 차량당 평균제어지체를 산정하는 식으로서, 분석기간 이전의 해소되지 않은 잔여차량에 의해 야기되는 지체도 포함한다. 제어지체란 접근부의 감·가속지체 및 정지지체를 모두 합한 접근지체를 말하며 균일지체, 증분지체, 추가지체의 합으로 구하고 있다.

$$d = d_1(PF) + d_2 + d_3$$

$$d_1 = \frac{0.5C(1-\frac{g}{C})^2}{1-[\min(1,X)\frac{g}{C}]}$$

$$d_3 = \frac{1800Q_b(1+u)t}{cT}$$

여기서, d=차량당 평균제어지체 (sec/veh)

d_1=균일제어지체 (sec/veh)

PF=신호연동에 의한 연동보정계수

d_2=임의도착과 과포화를 나타내는 증분지체 (sec/veh)

d_3=분석기간 이전에 잔류한 과포화 대기행렬로 인한 추가지체 (sec/veh)

C=주기(sec)

g=해당 차로군에 할당된 유효녹색시간(sec)

X=해당 차로군의 포화도

k=증분지체계수

I=상류부 보정계수

c=해당 차로군의 용량(veh)

Q_b=초기대기차량(sec/veh)

T=분석기간 길이(h)

u=지체계수

t=수요불충족 기간(h)

HCM 지체식은 포화도(X)<1.0인 정상상태에 국한하여 개발된 Webster's delay 모형의 단점을 극복하여 과포화시에도 지체도 산정이 가능하다. 과포화시에는 연동의 연향을 기대할 수 없으므로 PF=1.0으로 하여 d_1,d_2 산정이 쉬운 반면, d_3를 산정하기 위해서는 초기대기차량(Q_b)을 추정해야 한다. <표 2>는 분석기간 시종점 초기대기차량의 유·무에 따라 d_3를 구분하고 있음을 나타낸다.

<표 2> 초기대기차량 유형 구분

구분	포화도 (X)	초기대기차량	
		분석기간 시점	분석기간 종점
I	X < 1.0	No	No
II	X ≥ 1.0	Yes	Yes
III	X < 1.0	No	No
IV	X < 1.0	Yes	Yes, but smaller
V	X ≥ 1.0	Yes	Yes, but larger

HCM은 <표2>에 구분된 초기대기차량 유형에 따라 d_3 산정식의 파라메타인 지체계수(u)와 수요불충족기간(t)을 다르게 산정할 것을 제시하고 있다.

$$t=0 \text{ if } Q_b=0,\ else\ t=\min\left\{T, \frac{Q_b}{c[1-\min(1,X)]}\right\}$$

$$u=0 \text{ if } t<T,\ else\ u=1-\frac{cT}{Q_b[1-\min(1,X)]}$$

HCM은 초기대기차량 산정식을 제시하고 있으나, 현장관측으로 얻어야 하는 변수를 포함하고 있다. 따라서 HCM 초기대기차량 산정식은 초기대기차량의 의미에 의한 개념식이며, 초기대기차량 산정에는 현장조사가 수반되어야 하는 어려움이 있다.

2. 국내문헌 고찰

도로용량편람 지체식은 차량당 평균제어지체를 균일지체 및 임의지체, 추가지체의 합으로 구하는 HCM 지체식을 기본으로 한다.

$$d = d_1(PF) + d_2 + d_3$$

도로용량편람은 분석기간 종점의 초기대기차량에 따라 <표 3>과 같이 유형을 구분하며, 이에 따라 균일지체(d_1)와 추가지체(d_3)를 다르게 산정하여 HCM과 마찬가지로 초기대기차량이 지체에 미치는 영향을 중요시하고 있다.<표4>

<표 3> 초기대기차량 유형 구분

구분	포화도 (X)	초기대기차량	
		분석기간 시점	분석기간 종점
I	X < 1.0	Yes	No
II	X < 1.0	Yes	Yes, but smaller
III	X < 1.0	Yes	Yes, but larger

<표 3> 초기대기차량 유형에 따른 d1,d3 산정식

구분	균일지체(d_1)	추가지체(d_3)
I	$\frac{0.5C(1-\frac{g}{C})^2}{1-[\min(1,X)\cdot\frac{g}{C}]}$	$\frac{1800Q_b^2}{cT(c-V)}$
II	$\frac{R^2}{2C(1-y)}+\frac{Q_bR}{2TS(1-y)}$	$\frac{3600Q_b}{c}-1800T(1-X)$
III	$\frac{R}{2}$	$\frac{3600Q_b}{c}$

여기서, R=적색신호 시간(sec)
y=교통량비(flow ratio)
S=해당 차로군의 포화교통량(vphg)
V=해당 차로군의 도착교통량(vph)

도로용량편람은 초기대기차량 산정식을 제시하지 않으며, 현장에서 차로군 별로 관측할 것을 권장하고 있다. 또한 설계 및 계획분석과 같이 초기대기차량을 현장조사 할 수 없는 경우에는 생략하도록 하고 있다.

김영찬 외에 의한 초기대기차량 추정에 대한 연구(2004)는 지점검지기의 점유율을 이용한 초기대기차량 추정 모형을 개발하였다.

$$Q_b = 3.342Occ - 107.052$$

위 모형은 300m 대기행렬 검지기 점유율(Occ)을 독립변수로 하고 초기대기차량(Q_b)을 종속변수로 하는 1차 선형 회귀식으로, 특정 교통상황에 국한되어 있다.

III 초기대기차량 추정 모형 개발

1. 초기대기차량의 의미

초기대기차량(Q_b)이란 분석기간 시작시, 교차로를 통과하지 못하고 링크에 남아있는 잔여차량을 말하며, 현장에서 차로군별로 관측하여 구한다.

HCM에서는 아래와 같은 식으로 산정하는데, 분석기간동안의 도착교통량과 용량과의 차가 초기대기차량이 됨을 알수 있다.

$$Q_{b(i+1)} = \max[0, Q_{b(i)} + cT(X_i - 1)]$$

$$cT(X_i-1) = cT(\frac{v_i}{c}-1) = cT(\frac{v_i-c}{c}) = T(v_i-c)$$

즉, $Q_{b(i+1)} = \max[0, Q_{b(i)} + T(v_i - c)]$

여기서, Qb(i+1)=분석기간 (i+1)시점의 초기대기차량(veh)
Qb(i)=분석기간 (i)시점의 초기대기차량(veh)
T=분석기간(hr)
v(i)=분석기간 (i)의 도착교통량(veh/h)
c=용량(veh/h)

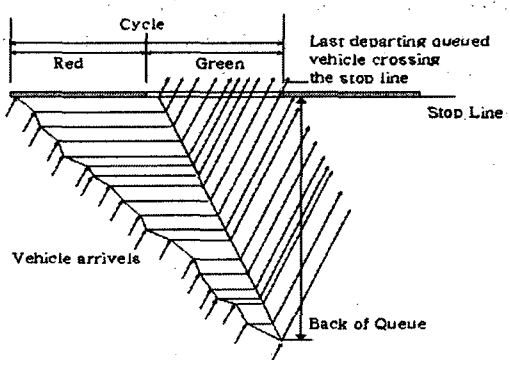
분석기간 시작전에 대기차량이 있으면 분석기간 초기에 도착한 차량은 대기행렬을 이루고, 이 대기차량들이 방출되는 동안 분석기간에 도착한 차량은 추가적인 지체를 경험하게 된다. 따라서 과포화시 정확한 초기대기차량 추정은 곧 신뢰성 높은 지체시간 산정으로 이어진다.

2. 초기대기차량과 COSMOS 대기길이와의 관계

분석기간을 한 주기(Red+Green)로 보면, 과포화시 현장관측에 의한 실제 대기길이는 Green 종료시 관측되며, 이때 COSMOS 대기길이는 현장관측 값을 모사한다. 이는 COSMOS 대기행렬 알고리즘이 참값을 모사하도록 현장에 적합한 운영자 설정값을 조정할수 있게 개발되었기 때문이다.

또한, 다음 주기 초기대기차량은 해당주기 Back of Queue[1] 에서 Green동안 정지선을 통과한 차량을 제한 것이다.

따라서, 과포화시 해당주기 COSMOS 대기길이에 존재하는 차량이 다음 주기 초기대기차량이라 할 수 있다.



<그림 2> Back of Queue

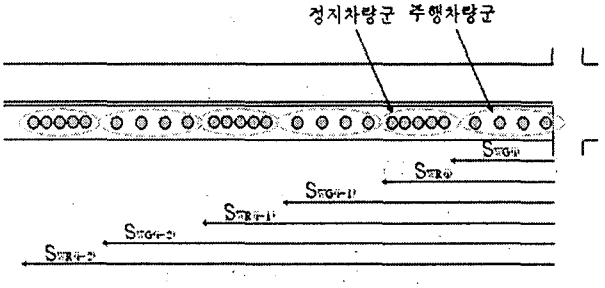
3. 초기대기차량 추정 방법론

1) 기본조건

본 연구에서는 COSMOS 대기행렬 알고리즘을 통한 대기길이가 정확하다는 것을 전제조건으로 하며, 분석기간은 한주기(Red+Green)로 한다. 또한 속도-밀도 모형은 Greenshield의 직선모형을 이용하는 것으로 한다.

2) 초기대기차량 추정 모형

본 모형은 과포화시 COSMOS 대기길이는 <그림3>처럼 주행중인 차량군과 정지중인 차량군으로 구성된다는 것을 기본으로 한다. 따라서 COSMOS 대기길이(m)에서 밀도가 다른 차량군내 차량대수를 각각 산정하여 합하면 초기대기차량(veh)이 된다.



<그림 3> COSMOS 대기길이의 구성

가. 차량군 분류

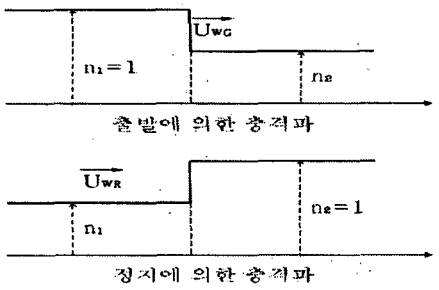
신호교차로는 정지선에서 출발에 의한 충격파와 정지에 이한 충격파가 발생하며, 출발에 의한 충격파내 차량은 주행하고 정지에 의한 충격파내 차량은 정지한다. 따라서 COSMOS 대기길이는 주행 차량군과 정지 차량군으로 분류된다.

1) HCM 2000, Appendix G, "Determination Of Back Of Queue"

나. 차량군 이동거리

해당주기가 종료되면, 주행 차량군의 이동거리는 출발에 의한 충격파의 이동거리와 같고, 정지 차량군의 이동거리는 정지에 의한 충격파의 이동거리와 같다. <그림3>에서 주행 차량군의 이동거리는 $S_{WG(i)}$, $S_{WG(i-1)}$, $S_{WG(i-2)}$,이고, 정지 차량군의 이동거리는 $S_{WR(i)}$, $S_{WR(i-1)}$, $S_{WR(i-2)}$,이다. 해당주기는 i이며, i-1은 전주기, i-2는 전전주기를 나타낸다. $S_{WG(i-2)}$를 예로 들면, 과포화로 인해 전전주기에 발생한 출발충격파가 해당주기 종료시까지 소멸되지 못하고 이동한 거리가 된다.

충격파의 이동거리는 충격파와 시간과의 곱이며, 충격파는 교통류 관계식과 Greenshield의 속도-밀도 직선모형에 의해 아래와 같다.



<그림 4> 충격파 해석도

$$\text{출발에 의한 충격파}(U_{WG}) = U_f[1-(n_1+n_2)] = -U_f \times n_2 = -\frac{1}{2}U_f$$

$$\text{정지에 의한 충격파}(U_{WR}) = U_f[1-(n_1+n_2)] = -U_f \times n_1 = -\frac{1}{2}U_f$$

여기서, U_f=자유속도(km/h)

$n_1=k_1/k_j$

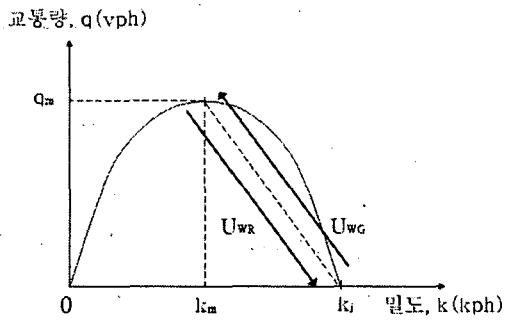
$n_2=k_2/k_j$

(출발 충격파에서 $k_1=k_j$, $k_2=k_m$)

(정지 충격파에서 $k_1=k_m$, $k_2=k_j$)

다. 차량군내 평균차두거리

평균차두거리(H)는 밀도의 역수로 구한다. Greenshield 직선모형에서 유도된 교통량-밀도포물선 곡선에서 주행 차량군의 밀도는 k_m이며, 정지 차량군의 밀도는 k_j가 된다.<그림5>



<그림 5> 교통량-밀도 포물선 곡선

주행 차량군의 평균차두거리(H_{WG}) =

정지 차량군의 평균차두거리(H_{WR}) =

라. 차량군내 차량대수

차량대수는 차량군의 이동거리를 차량군내 평균차두거리로 나눈 값이다.

$$\text{차량대수}(veh) = \frac{\text{차량군 이동거리}(m)}{\text{차량군내 평균차두거리}(m/veh)}$$

마. 초기대기차량 추정

위의 과정을 통하여 한주기동안 주행차량군내 최대차량대수와 정지차량군내 최대차량대수를 구할 수 있다. 주행차량군내 최대차량대수란, 과포화로 인하여 출발충격파가 소멸되지 못하고 한주기동안 이동한 거리에 존재하는 차량대수를 말한다. 정지차량군내 최대차량대수 또한 같은 의미를 지닌다.

과포화가 진행되어 대기행렬이 길어지게 되면 다수의 주행차량군과 정지차량군이 생성되지만, 각각의 주행차량군내 최대차량대수는 모두 같다. 즉, 전전주기 주행차량군내 최대차량대수와 전주기 주행차량군내 최대차량대수가 같다는 의미이다. 정지차량군내 최대차량대수도 동일하다.

또한 <나.차량군이동거리>에서 언급한 차량군 이동거리는 $S_{WG(i)} < S_{WR(i)} < S_{WG(i-1)} < S_{WR(i-1)} < S_{WG(i-2)} < S_{WR(i-2)}$의 관계를 가진다. 따라서 COSMOS 대기길이가 어느 범위에 속하느냐에 따라 COSMOS 대기길이에 존재하는 주행차량군 및 정지차량군의 개수가 결정된다.

따라서 초기대기차량은 아래와 같은 식으로 추정할 수 있다.

$$Q_b = V_{WG} \times N_{WG} + V_{WR} \times N_{WR} + \frac{L}{K_L}$$

Q_b = 초기대기차량(veh)

V_{WG} = 한주기 동안 주행차량군내 최대차량대수(veh)

V_{WR} = 한주기 동안 정지차량군내 최대차량대수(veh)

N_{WG} = COSMOS 대기길이에 포함된 주행 차량군 개수

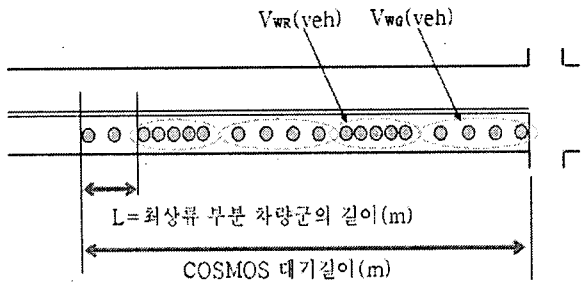
N_{WR} = COSMOS 대기길이에 포함된 정지 차량군 개수

L = 최상류 부분차량군의 길이(m)

K_L = 최상류 부분차량군의 밀도

(최상류 부분 차량군=주행차량군, $K_L=K_m$)

(최상류 부분 차량군=정지차량군, $K_L=K_j$)



<그림 6> 초기대기차량 추정모형 개념도

Ⅳ 적용 및 평가

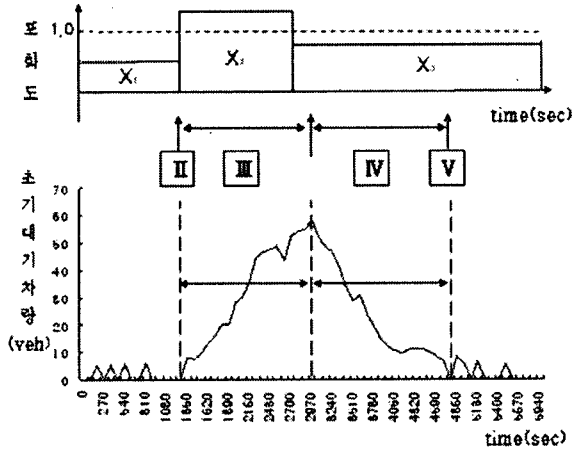
1. 시나리오 구성

모형의 신뢰도와 적합도를 평가하기 위하여 미시적 모형인 VISSIM을 이용하여 시뮬레이션 하였고, 다양한 교통상황을 구현하기 위해 포화도(X=v/c) 변화에 따라 <표4>와 같이 시나리오를 구성하였다.

<표 4> 시나리오 구성

구분		시나리오 1	시나리오 2	시나리오 3
주기(sec)		90	90	90
g/C		0.3	0.3	0.3
X	X_1	0.8	0.8	0.8
	X_2	1.1	1.2	1.3
	X_3	0.9	0.9	0.9

HCM에서 <표2>와 같이 분석기간 시종점 초기대기차량에 따라 5가지 경우로 구분하여 추가지체를 다르게 계산한다. 본 시나리오는 HCM의 과포화와 관련된 경우(<표2>에서의 Ⅱ, Ⅲ,Ⅳ,Ⅴ)를 나타내기 위하여 하나의 시나리오에 시간대별로 다른 포화도(X_1,X_2,X_3)를 구성하였다.



<그림 7> 시간대별 포화도 구성에 따른 초기대기차량 유형의 예시

2. 시나리오 분석 결과

1) 평가 방법

○ t 검정(쌍체비교)

각 분석단위(주기)별 VISSIM에 의한 초기대기차량과 모형에 의한 초기대기차량을 한 쌍으로 보고 쌍체비교를 수행하였는데, 이는 모형에 의해 추정된 초기대기차량이 실제 초기대기차량을 얼마나 잘 모사하고 있는지를 평가하기 위함이다.

귀무가설은 아래와 같다.

귀무가설(Ho) : $\mu_1 = \mu_2$

여기서, μ_1 : VISSIM에 의한 초기대기차량

μ_2 : 모형에 의한 초기대기차량

○ 상대적 평가지표

구축된 모형의 상대적 평가기준으로 활용한 지표는 다음과 같다.

• MARE(Mean Absolute Relation Error)

$$MARE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{|x(i)-\overline{x(i)}|}{x(i)}$$

• RMSE(Root Mean Square Error)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}|x(i)-\overline{x(i)}|^2}$$

2) 평가 결과

○ t 검정 결과

분석 시나리오 별로 t 검정을 수행한 결과는 <표5>와 같다. 본 연구에서 제시한 모형에 의한 초기대기차량 추정치는 5% 유의수준 내에서 VISSIM에 의한 초기대기차량과 모평균이 동일하다는 결론을 내릴 수 있다.

<표 5> 분석 시나리오별 t 검정 결과

시나리오	t 통계량	양측검정 기각치 (5% 유의수준)	판단
1	1.88	1.99	귀무가설 채택
2	1.71	1.99	귀무가설 채택
3	1.74	1.99	귀무가설 채택

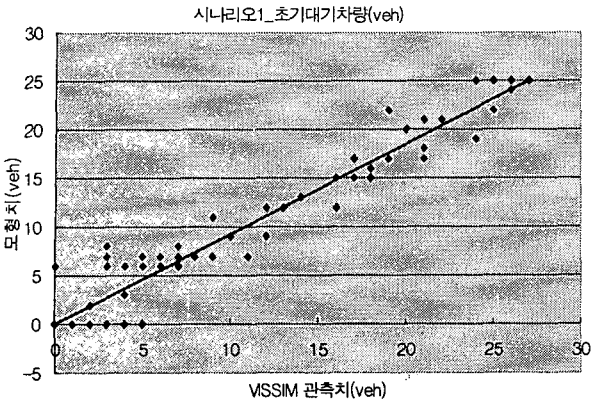
○ 상대적 평가지표 적용 결과

분석 시나리오 각각에 대해 모형에 의한 초기대기차량 추정치를 VISSIM에 의한 초기대기차량과 상대적 평가지표를 바탕으로 비교하여 <표6>와 같은 결과를 얻었다. 시나리오 1, 2에 비해 시나리오 3이 불안정한 값을 나타냄을 볼 수 있다. 본 모형은 포화도가 커질수록, 즉 극심한 과포화시에는 추정력이 다소 떨어진다고 할 수 있다.

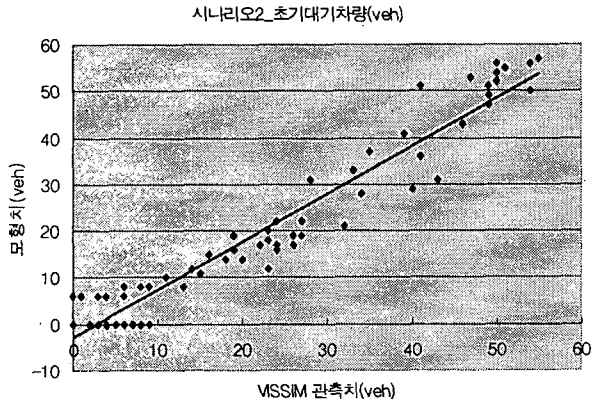
<표 6> 분석 시나리오별 상대적 평가지표 적용 결과

시나리오	MARE	RMSE
1	0.21	2.33
2	0.29	6.44
3	0.33	7.26

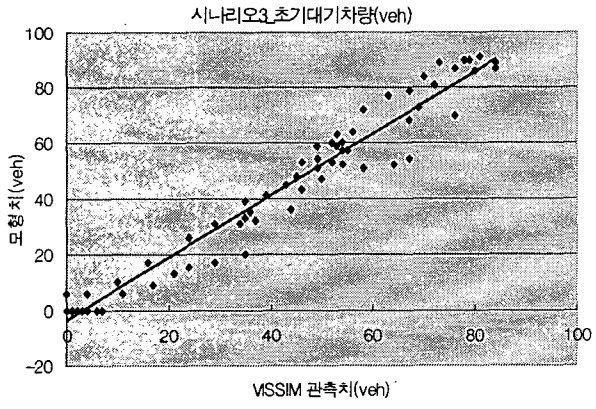
○ 산점도



<그림 8> 시나리오1_VISSIM에 의한 초기대기차량과 모형에 의한 초기대기차량과의 산점도



<그림 9> 시나리오2_VISSIM에 의한 초기대기차량과 모형에 의한 초기대기차량과의 산점도



<그림 10> 시나리오3_VISSIM에 의한 초기대기차량과 모형에 의한 초기대기차량과의 산점도

V 결론 및 향후 연구과제

본 연구는 과포화시 COSMOS 환경에서의 대기길이를 이용하여 초기대기차량을 추정하는 모형을 개발하였고, 다양한 교통상황을 구현하여 본 모형이 높은 추정력을 보임을 검증하였다. 다만, COSMOS 대기행렬 알고리즘의 한계로 인하여 대기길이가 500m 이상인 경우에는 추정력이 다소 떨어지는 경향이 있다.

그러나, 현재 초기대기차량을 추정함에 있어 현장관측법에 의존하고 있는 실정을 감안할 때, COSMOS 대기길이를 이용하여 초기대기차량을 추정하는 모형을 개발하는데 본 연구의 의의가 있다.

본 연구에서 개발된 모형은 과포화시 정확한 지체시간 산정을 가능하게 하여, 실시간 통행시간 추정 및 신호제어, 서비스 수준 산정 등에도 활용 가능하다. 설계 및 계획분석과 같이 초기대기차량을 현장조사 할 수 없는 경우에는 더더욱 그러하다.

개발된 모형은 VISSIM으로 다양한 교통상황을 구현하여 적합도를 평가하였는데, 이는 시뮬레이션 통해 시사점을 제시한 것이므로 향후 현장조사를 통한 현실 적용의 타당성 여부에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다.

또한 본 연구는 독립교차로에 제한된 것으로, 상류부 교차로 및 회전교통량의 영향을 반영하고 다양한 현시체계에 적용 가능하도록 모형을 완성해야 할 것이다.

참고문헌

1. Highway Capacity Manual, TRB, National Research Council, Appendix F, "Extension of signal models to incorporate effect of an initial queue", 2000
2. Akcelik, "HCM 2000 Back of Queue Model for Signalised Intersections", Akcelik&Associates Technical Note, 2001
3. Fadhely Viliria, "Comparison of Queue Length Models at Signalized Intersections", TRB, 2000
4. William R. McShane, Traffic Engineering 3rd, 2004
5. 건설교통부, 한국건설기술연구원, "2002년 실시간 신호제어 기능개선용역", 2003
6. 김영찬, 곽정화, "단속류 과포화시 검지기 점유율을 이용한 통행시간 예측", 대한교통학회 제 46회 학술대회 발표논문집, 2004
7. 도철웅, "교통공학원론", 청문각, 1999