

■ 論 文 ■

비보호 좌회전 지체도 추정모형의 개선

Improvement of the HCM Delay Estimation Model for Exclusive Permitted Left Turns

김진태

(한양대학교 첨단도로연구센터 연구교수)

목 차

I. 서론	1. 검증용 비보호 좌회전 지체도 자료군 구축
II. HCM 지체추정 모형의 고찰	2. CORSIM 모의실험의 특성 및 다중 모의실험 수행
1. 비포화 균일지체 추정모형	3. 비보호 좌회전 움직임 개별 제어지체 비교
2. 증분지체 추정모형	4. 비보호 좌회전 제어지체 자료군의 비교
3. 비보호 좌회전 지체도 추정에 따른 문제점	V. 결론 및 토의
III. 비보호 좌회전 균일지체 모형 개발	참고문헌
IV. 모형의 검증	

Key Words : 비보호 좌회전, HCM, 균일지체, 무작위지체, 증분지체

요 약

미국 도로용량편람(HCM)은 도심부 신호 교차로 운영상태 평가를 돕기 위하여 지체도 추정 수리모형을 제시하고 있다. 2000년도 개정판 HCM모형은 전문가들의 최근(up-to-date) 연구결과가 반영된 것이며 많은 교통공학자들에 의해 실무 및 연구에 활용되고 있다. HCM은 비보호 좌회전 움직임의 경우, 별도의 부가절차를 통해 포화교통류율을 보정할 것을 제시하고 있다. 그러나 HCM 지체도 산정 모형식은 보호현식 직진 움직임을 기준으로 설계된 모형이기 때문에 비보호 좌회전 움직임의 지체도를 과소 추정하는 문제점을 내재한다.

본 논문에서는 (1)HCM지체도 모형의 설계과정을 검토하고 (2)이를 토대로 HCM 지체도모형을 통한 비보호 좌회전 지체도 추정에 문제가 있음을 지적하고 (3)새로운 비보호 좌회전 지체도 추정 수리모형을 제안한다. 다양한 교통상황, 제어상황을 현장실험에서 통제함에 어려움이 있어 모의실험을 통한 제안모형의 검증을 수행하였다. 검증을 위해 마련된 120가지 경우의 다양한 비보호 좌회전 교통상황에서 (1)CORSIM 모의실험 지체도, (2)HCM 모형추정 지체도, (3)제안된 모형추정 지체도를 비교하였으며, 비교분석 결과 모의실험 지체도를 기준으로 HCM 지체도 추정모형은 설명력이 0.47로, 제안된 모형의 설명력은 0.77로 분석되었다.

본 논문은 과학기술부(한국과학재단)에서 지원한 첨단도로연구센터의 연구수행 결과입니다.

I. 서론

한국 및 미국의 도로용량편람(HCM, Highway Capacity Manual)은 신호교차로 시설물의 서비스 수준 평가지표로 지체도를 사용할 것을 정하고 있으며 이러한 평가를 돕기 위하여 지체도추정 수리모형을 제시하고 있다. HCM 지체도추정 수리모형은 신호교차로에서의 교통흐름상태 분석뿐만 아니라 신호운영 변수의 설계 등 여러 교통공학분야에서 중요하게 사용되고 있다. 미국 HCM 지체도추정 수리모형은 국제적으로 통용되는 대표적인 지체도추정 수리모형이다. 국내 도로용량편람(2001)에서도 미국 HCM의 지체도 추정모형을 변환한 모형을 제시하나 모형의 내용은 동일하다.

HCM지체도추정 수리모형은 보호현시(protected phase) 직진 차로군(lane group)의 진행특성을 토대로 마련되었다. 비보호 좌회전 움직임의 지체도 추정을 위하여 HCM은 비보호 좌회전 포화교통류율을 산정하고 이를 이용하여 HCM지체도추정 수리모형을 적용할 것을 제시한다.

그러나 비보호 좌회전 움직임의 진행 특성은 보호 현시 움직임의 특성과는 다르다. 비보호 좌회전 움직임은 대향 움직임(opposing movement) 차간간격(gap) 중 진행 가능한 간격을 수락하며 진행한다. 따라서 유효녹색시간 시작 이후 비보호 좌회전 움직임은 대향 대기행렬차량군이 처리되는 동안 비보호 진행할 수 없다. 대향 대기행렬 차량군 소멸 후 비로소 비보호진행을 위한 대향 차간간격 검토를 수행할 수 있다. 비보호 좌회전 움직임이 유효녹색시간의 시작과 함께 진행을 수행하지 못하는 이러한 특성은 유효녹색시간의 시작과 동시에 차량진행을 수행하는 보호 움직임의 특성과는 다르다.

이렇게 보호 움직임과 비보호 움직임간의 진행형태가 동일하지 않기 때문에 보호 움직임의 진행특성을 토대로 설계된 HCM지체도추정 수리모형을 적용하여 비보호 좌회전 지체도추정을 수행함에 무리가 있다. 본 연구에서는:

1. HCM 지체도 추정모형의 설계과정을 검토하여 HCM지체도 추정모형을 사용하여 비보호 좌회전 움직임의 지체도를 추정함에 무리가 있음을 지적하고

2. HCM 지체도 추정모형의 구성을 토대로 비보호 좌회전 움직임의 지체도 추정을 위한 모형을 개발하여 제안하고
3. 제안된 비보호 좌회전 지체도 추정모형과 HCM 모형으로 추정된 비보호 좌회전 움직임의 지체도를 비교한다.

추가로 HCM 지체도 모형의 설계과정을 검토하여 과포화 상황에서의 HCM지체도 모형의 문제점을 도출하였으며 이에 대한 토의를 결론부에 제시하였다.

II. HCM 지체추정모형의 고찰

HCM은 신호교차로 방향별 움직임의 서비스수준을 제어지체(control delay)를 지표로 하여 평가하도록 제시한다. 제어지체는 교차로에서 신호제어로 인하여 발생하는 지체이다. 제어지체는 차량상호지체(vehicle interaction delay)와 기하지체(geometric delay)를 포함하지 않는다. 차량상호지체는 동일방향으로 진행하는 차량들의 상호 상충작용으로 인하여 개개의 차량이 자유속도로 진행하지 못함에 따라 발생하는 지체이며, 기하지체는 교차로 기하구조의 특성으로 인하여 운전자가 자유속도로 진행하지 못하여 발생하는 지체이다. 차량상호지체는 전산모의실험을 통하여 추정이 가능하며, 기하지체는 호주에서 개발된 Signalized & Unsignalized Intersection Design & Research Aid(SIDRA) 전산모형을 통하여 추정을 할 수 있다.

HCM 지체도 추정모형의 구성은 식(1)과 같이 세 개 항으로 구성되어 있다. 각각은 비포화 균일지체(uniform delay), 증분지체(Incremental delay), 초기 대기행렬지체(initial queue delay)이다.

$$d = d_1 \times F_p + d_2 + d_3 \quad (1)$$

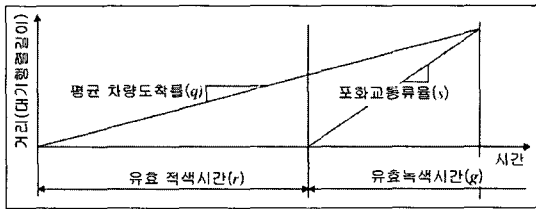
첫번째 항 d_1 은 비포화 균일지체이다. 비포화 균일지체는 보정계수 F_p 로 보정된다. 보정계수 F_p 는 상류 신호교차로 영향으로 비포화 균일지체 추정모형이 내재하는 균등차량도착가정이 위배되는 부분을 보정한다. 두 번째 항 d_2 는 증분지체이다. 증분지체는 (1)포화 균일지체, (2)비포화 무작위지체를 동시에 고려하는 지체이다. 세 번째 항 d_3 는 초기 대기행렬지체이며

분석대상 기간 전에 이미 교차로에 대기하여 있는 추
가차량의 영향으로 인한 추가 지체이다.

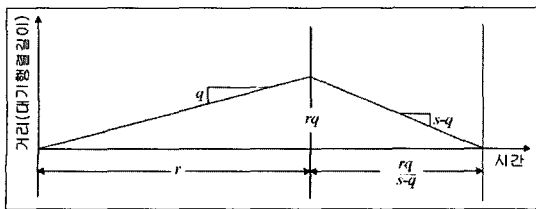
HCM비포화 균일지체 추정모형과 증분지체 추정
모형의 도출과정 및 해당 모형의 특성을 아래의 세부
단락에 정리하였다. 이를 통하여 HCM지체도 모형을
통한 비포화 좌회전 지체도의 추정에 무리가 있음을
도출하였으며 이와 더불어 HCM모형이 과포화 시 지
체도 추정에 무리가 있음을 제시한다.

1. 비포화 균일지체 추정모형

균일지체는 모든 차량이 균일분포를 따라 일정한
시간 간격으로 교차로로 유입되는 가정의 상태에서
측정되는 정지지체(stopped delay)이다. 차량균일도
착 가정에 따라, 도착하는 차량들의 차량도착율(q),
그리고 교차로 정지선에 대기하는 차량이 유효녹색시간
시작과 함께 교차로를 흘러 나가는 포화교통류율(s)
은 상수로 표현된다. <그림 1(a)>는 이러한 교통흐
름을 도식화한 시공도(time-space diagram)이다.
<그림 1(a)>는 유효녹색시간 및 유효적색시간에 따라
차량대기행렬이 변화하는 모습을 시공도 상에 나타낸
것이며 이 때 삼각도형의 면적이 차량의 누적 정지
시간이다. HCM은 <그림 1(a)>를 누적정지시간의 산
출이 용이하도록 <그림 2(b)>로 전환하였고 이를 누
적행렬 도형(QAP, Queue Accumulated Polygon)
이라고 정의한다.



(a) 대기행렬이론에 의한 대기행렬의 도식화



(b) 지체도 산정을 위하여 수정된 누적행렬도형(QAP)

<그림 1> 균일지체 추정모형에 사용된 도형

QAP의 면적은 누적정지시간과 동일하다. 균일지
체는 QAP 삼각도형의 면적($\frac{1}{2} \times$ 밑변 \times 높이)을 한 주
기에 도착하는 평균 도착차량의 수로 나누어 차량 평
균 지체를 산정한다(식(2) 참조).

$$d_1 = \frac{0.5 \times (r^2 q + r^2 q^2 / (s - q))}{qC} \tag{2}$$

여기서,

- d_1 : 비포화 균일지체(초/대)
- r : 유효적색시간(초)
- q : 평균 차량도착율(대/초)
- s : 포화교통류율(대/초)
- C : 주기(초)

HCM에서는 QAP를 토대로 비포화 균일지체를 추
정한다. HCM의 균일지체 추정모형은 식(3)과 동일하
며, 이는 식(2)를 기준으로 $r = C - g$ 로, $s = c \times C / g$ 로
치환한 수리식이다(식(3) 참조). 따라서 식(2)와 식(3)
는 동일하다.

$$d_1 = \frac{C}{2} \cdot \frac{(1 - g/C)^2}{(1 - X \cdot g/C)} \tag{3}$$

여기서

- X : 포화도(q/c)
- c : 용량(대/초)
- g : 유효녹색시간(초)

HCM 균일지체 추정모형은 QAP 삼각도형을 토대
로 정산되었으며, 삼각도형의 면적계산법에 의거한다.
따라서 HCM 균일지체 추정모형의 적용은 QAP가
삼각도형 모양으로 유지될 경우로 제한되며, QAP의
삼각도형모양의 유지는 비포화 상태로 제한된다. 따
라서 HCM의 균일지체 추정모형은 비포화 상태에서
만 유효하다. 과포화의 경우 QAP가 더 이상 삼각도
형의 형태를 유지하지 않게 되어 HCM 균일지체 추
정모형 자체는 의미가 없다. 모형의 특성으로 균일 지
체식으로 추정되는 최대 평균지체는 유효적색시간의
50%와 동일하다.

교차로로의 차량 유입이 차량군의 형태를 따르지
않음을 기본 가정으로 하는 모형의 단점을 보완하기
위하여 HCM은 연동 보정계수(progression factor)

를 적용하여 지체도를 보정할 것을 제시하고 있다. 차량도착이 상류 교차로의 신호에 영향을 받지 않아 차량군의 형태를 띠지 않을 경우 연동 보정계수는 1.0이며 영향을 받을 경우, 1.0과는 다른(크거나 작은) 보정계수 값으로 지체도를 보정한다.

2. 증분지체(Incremental delay) 추정모형

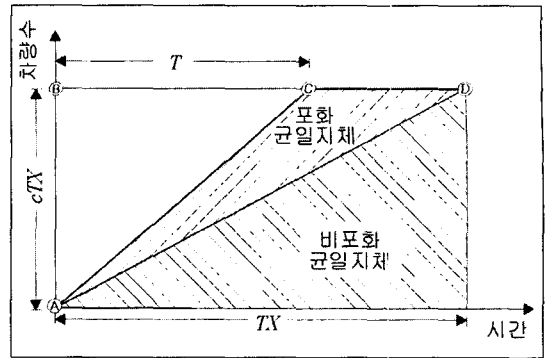
현장에서의 차량도착은 균일분포(일정한 차두간격을 가지며 도착함)를 따르지 않으므로 차량도착의 무작위성에 의하여 증가되는 추가분의 지체를 모형에 반영하여야 한다. 또 과포화의 경우 비포화 지체에서 증가되는 추가분의 지체가 모형에 반영되어야 한다. HCM에서는 이러한 추가분의 지체를 '증분지체'로 통합하여 추정할 것을 제시하고 있다. HCM의 증가지체는 '비포화 무작위 지체'와 '포화 균일지체' 그리고 '포화 무작위지체'를 포함하는 지체이다. 다음의 세부 단락을 과포화균일지체, 비포화 무작위 지체 모형 및 이들을 토대로 설명되는 HCM 증분지체 모형의 정산 과정을 제시한다.

1) 과포화 균일지체

과포화 균일지체는 포화도가 1.0을 초과할 경우에 발생하는 균일지체이다. 다시 말하면 포화 균일지체 추정모형으로 산출되는 최대 비포화 균일지체를 경계로 하여 과포화시 추가로 발생하는 균일지체가 과포화 균일지체이다. 과포화 균일지체는 HCM 균일지체모형에 의하여 추정되지 못한다. 이는 지적하였듯이 HCM 균일지체 모형이 QAP 삼각도형의 면적 산정 수식을 토대로 설계되었으며 과포화의 경우 QAP는 더 이상 삼각도형의 형태를 따르지 않기 때문이다.

과포화 상태의 경우 교차로 접근로로 유입된 차량이 한 주기 이상에 걸쳐 교차로를 통과하기 때문에 과포화 지체는 한 주기 이상의 기간을 분석기간으로 삼는다. 과포화 균일지체모형은 대기행렬이론을 토대로 도식화되어진 <그림 2>의 대기행렬도형을 토대로 설계된다. <그림 2>는 용량이 c 인 차로군(lane group)이 분석 시간 동안 포화도 $X(X > 1.0)$ 상태에서 운영되었을 경우의 시공도이다.

<그림 2>에서 선 A,D의 기울기는 용량(c)을 의미하며 과포화 균일지체는 삼각형 A,B,D의 면적에서



<그림 2> 과포화지체모형 산정을 위한 누적대기행렬 도형

삼각형 A,B,C의 면적을 감한 교통량으로 나눈 값으로 식(4)를 적용하여 추정한다.

$$d_o = 0.5T(X-1) \tag{4}$$

여기서,

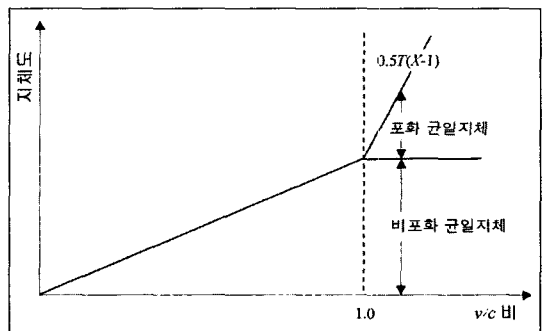
d_o : 과포화 균일지체(초)

T : 분석기간(시간)

X : 포화도

앞서 검토한 비포화 균일지체모형과 과포화 균일지체 모형의 합으로 설명되는 전체 균일지체를 <그림 3>에 도식화하였다. <그림 3>에 제시된 지체는 균일지체이며 무작위 지체는 고려되지 않은 것이다.

<그림 3>은 비포화 균일지체는 포화도가 1.0 일 시 그 값이 최대(QAP의 밑변이 주기와 동일한 경우)이며 포화도가 1.0을 초과할 경우 이러한 최대값은 고정된 상수로 적용되며 이에 추가로 과포화 시 과포화 균일지체가 발생 시작하는 것을 도식화 한 것이다.



<그림 3> 포화도의 변화에 따른 균일 지체의 변화

2) 비포화 무작위 지체

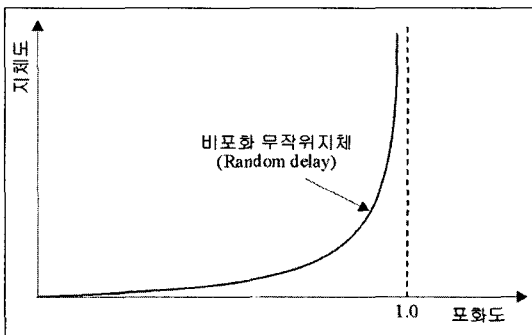
무작위 지체 산정모형은 Poisson 차량도착과 단순 대기행렬이론을 적용하여 Pollaczek과 Khintchine (1961)에 의하여 정립되었으며 식(5)와 같다. 단순 대기행렬 수리모형의 특성상 안정상태(steady state condition)만을 고려하여 교통량이 용량을 초과하지 않은 비포화 상태만을 고려하는 모형이다. Pollaczek과 Khintchine의 모형은 대기행렬 수리모형의 안정상태 제약성에 따라서 포화도가 1.0에 가까울수록 지체도는 발산한다(〈그림 4〉 참조).

$$d_r = \frac{kX}{c(1-X)} \tag{5}$$

여기서,

- d_r : 무작위 지체(random delay)(초)
- k : 도착률과 서비스율에 따른 상수
- X : 포화도, 교통량 대 용량비율
- c : 용량(대/초)

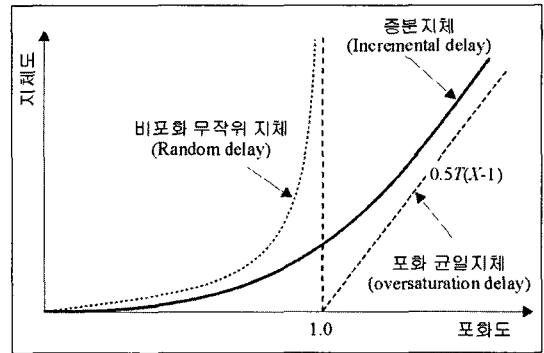
대기행렬이론을 적용한 Pollaczek과 Khintchine (1961)의 모형은 과포화 상태에서의 무작위지체를 고려할 수 없다. 과포화 무작위 지체는 대기행렬 수리모형 특성상 모형산정에 한계가 있어 수리모형에 의한 추정이 불가능하기 때문이다. 또한 비포화 무작위 지체모형은 포화도가 1.0 보다 작으며 1.0에 근접할 경우 지체도가 무한대로 증가하여 추정되는 지체도가 현실적이지 않다.



〈그림 4〉 포화도에 따른 무작위 지체의 변화

3) 증분지체

증분지체는 앞서 정리한 '과포화 균일지체 추정모형'과 '비포화 무작위 지체 추정모형'을 토대로 (1)비



〈그림 5〉 증분지체와 비포화 무작위지체, 과포화 균일지체와의 관계

포화 무작위 지체도를 보정하고 (2)과포화 무작위 지체도를 추정한다. 과포화 균일지체 추정모형과 비포화 무작위지체 추정모형, 그리고 이들을 토대로 설계되는 증분지체 추정모형의 관계를 도식화하여 〈그림 5〉에 제시하였다.

Pollaczek과 Khintchine(1961)의 모형이 포화도 1.0에 근접한 경우 지체도가 무한히 증가하는 단점과 포화 균일지체모형이 포화도가 1.0에 근접한 경우 지체도가 0.0에 근접하는 단점을 극복하기 위하여 이 두 모형에 의하여 설명되는 지체도를 연결하는 새로운 지체도 모형을 정의하였으며 이가 증분지체이다. 이러한 증분지체에 의하여 포화 무작위지체가 지체도 추정모형에 고려된다.

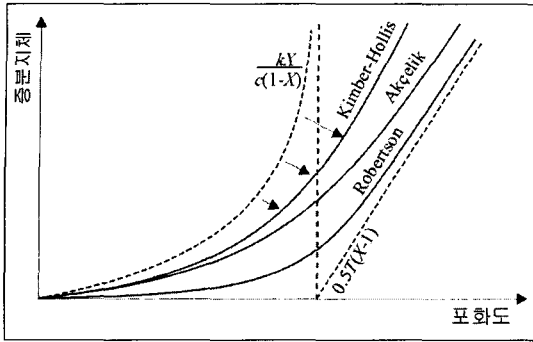
비포화 무작위 지체와 과포화 균일지체와의 관계를 연계하기 위하여 비포화 무작위 지체를 기준으로 좌표 변환(coordinate transformation)을 수행하여 식(6)의 증가지체가 설정되었다.

$$d = \frac{1}{2} \left[\sqrt{\left\{ \frac{1}{2}(1-X)T + \frac{k}{c} \right\}^2 + \frac{2kTX}{c}} - \frac{1}{2}(1-X)T - \frac{k}{c} \right] \tag{6}$$

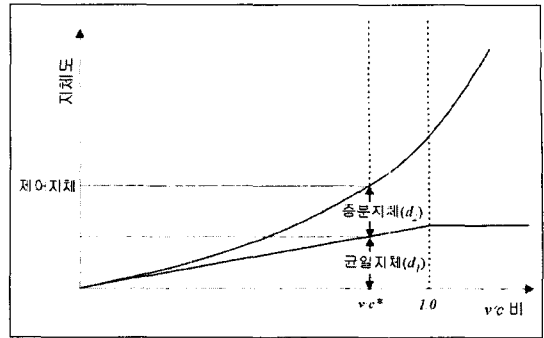
여기서 d : 증분지체(초)

이러한 좌표변환하는 방법을 기초로 하여 Kimber-Hollis(1979), Robertson(1979), Akelik(1981)에 의하여 제안된 증분지체 모형을 〈그림 6〉에 도식화하여 비교하였다.

Akelik(1981)은 증분지체 추정모형을 토대로 증분지체 추정을 위한 일반모형을 제시하였으며 식(7)과 같다.



〈그림 6〉 증분지체 모형식의 비교



〈그림 7〉 HCM 제어지체 추정모형의 구성

$$d = 900TX^n \left\{ (X-1) + \sqrt{(X-1)^2 + \frac{8kI(X-X_0)}{cT}} \right\} \quad (7)$$

여기서,

I : 차량도착 평균 대 분산의 비율

n : 추정계수

X_0 : 비포화 무작위 지체가 0 이하일 시 포화도¹⁾

1985년 개정판 HCM은 Akelik의 모형에 $T=0.25hr$ (15min), $k=0.5$, $I=1.0$, $n=2$, and $X_0=0$ 을 적용하고 정지지체추정을 위한 보정계수 0.76를 적용하여 식(8)을 증분지체 추정모형으로 사용할 것을 제시하였으며 1994년 개정판 HCM은 분석자들에게 k , I 계수 값을 필요에 따라 입력할 수 있도록 식(9)의 모형을 제시하였다.

$$d = 173X^2 \left\{ (X-1) + \sqrt{(X-1)^2 + \frac{16X}{c}} \right\} \quad (8)$$

$$d = 173X^2 \left\{ (X-1) + \sqrt{(X-1)^2 + \frac{8kIX}{c}} \right\} \quad (9)$$

1997년과 2000년 개정판 HCM은 식(10)의 증분지체 추정모형을 제시한다. 이 모형은 제어지체의 산정을 위하여 정지지체추정 보정계수 0.76의 적용을 배제한 것이며 Akelik의 일반식으로 추정되는 접근로 지체를 제어지체로 보정한 모형이다.

$$d = 900T \left\{ (X-1) + \sqrt{(X-1)^2 + \frac{8kIX}{cT}} \right\} \quad (10)$$

앞서 기술하였듯이 HCM은 지체도 추정모형은 비포화 균일지체 추정모형과 증분지체 추정모형에서 계산된 지체도의 합을 구하여 제어지체를 추정하도록 제시하고 있다. 따라서 HCM 지체도 추정모형이 정의하고 있는 d_1 과 d_2 에 계산되는 제어지체의 구성은 〈그림 7〉과 같다.

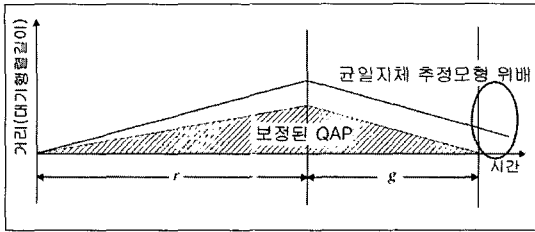
Hurdle(1984)은 비포화 무작위 지체와 과포화 균일지체를 연결하여 추정하는 HCM 증분지체 추정모형의 형태는 지체의 과다추정(overestimate)을 야기하고 있으며 그러한 과다추정 정도는 포화도가 1.0을 초과하여 커질 경우 더욱 심각하다고 지적하였으나 다른 대안이 없어 현재까지 지체도 추정모형의 중요 요소로 사용되고 있다.

Daniel et al.(1996)은 비포화 균일지체의 문제점을 인식하여 무작위 차량도착의 경우를 비포화 무작위 지체도 추정이 아닌 비포화 균일지체 추정모형에서 고려하는 모형을 연구하였다. 이러한 노력은 현재 HCM 지체도 추정모형이 내제하고 있는 문제점의 인식에서 출발하는 것이다.

3. 비보호 좌회전 지체도 추정에 따른 문제점

HCM비포화 균일지체 추정모형은 유효녹색시간의 시작과 동시에 보호현시로 보호 받으며 진행방향으로 진행함을 토대로 설계된 QAP를 기준으로 설계되었다. 따라서 HCM 지체도 추정모형의 적용은 유효녹색시간의 시작과 함께 차량이 진행하는 상황에서의 지체도 추정을 수행한다. 실제 비보호 좌회전 움직임의 진행은 이와 달리 유효녹색시간의 시작과 함께 진행이 시작

1) 비포화 무작위 지체는 수리모형 특성상 포화도 1.0을 기준으로 점대칭모양의 음수 지체선형이 나타나게 됨. 따라서 과포화 발생시 비포화 무작위지체 추정모형으로 계산되는 지체도는 음수이며 이를 반영하기 위한 변수임.



〈그림 8〉 비보호 좌회전 지체도 분석 시 HCM방법의 문제점

하지 않는다. 대향 방향의 대기행렬이 처리되기 전까지 비보호 좌회전은 정지선에서 대기하며 대기행렬이 처리된 후 비보호 대향 방향 차량간의 차간간격을 검색하며 진행을 수행한다. 이처럼 HCM에서 비포화 균일지체도 추정을 위하여 적용하고 있는 QAP의 모양은 실제 비보호 좌회전 차량의 QAP와 다르다.

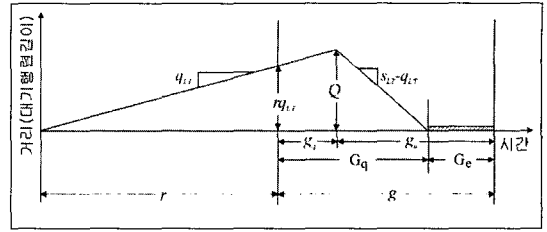
또 비보호 좌회전의 지체도 산정을 위하여 HCM은 비보호 좌회전의 포화교통류율을 추정하여 비포화 균일지체를 계산할 것을 제시하고 있다. 보정된 HCM 비보호 좌회전 포화교통류율은 직진의 포화교통류율보다 적으며, 이는 QAP에서 우측 변의 기울기가 완만해짐을 뜻한다. 완만하여진 기울기로 인하여 QAP 삼각도형의 형태유지 제약을 위배할 수 있는 가능성이 증가한다(〈그림 8〉 참조).

이러한 문제점은 최대 비포화 균일지체도 추정에 영향을 미친다. 낮아진 포화교통류율에 의하여 경우에 따라 QAP가 삼각도형 모양을 잃은 경우 QAP는 HCM 균일지체 모형으로의 적용을 위하여 삼각도형 모양이 되도록 QAP의 높이가 감소된다. QAP의 감소는 유효녹색시간에 처리되는 차량의 수 감소를 뜻하며 용량분석 측면에서는 이러한 결과가 바르다. 하지만 지체도 추정에서는 최대 비포화 균일지체를 감소 추정하는 결과가 나타난다.

이러한 HCM지체도추정모형의 문제점은 유효녹색시간의 시작과 동시에 비보호좌회전 차량이 정지선을 통과하며(좌회전 보정계수로 보정된 포화교통류율로) 진행함을 가정하는 QAP를 토대로 균일지체를 산정하기 때문이다.

III. 비보호 좌회전 균일지체모형 개발

비보호 좌회전의 비포화 균일지체도 추정을 위하여 비보호 좌회전의 진행행태를 근거로 비포화 비보호



〈그림 9〉 제안된 비보호 좌회전 균일지체 QAP

좌회전 균일지체 추정모형을 개발하였다. 합리적인 비포화 비보호 좌회전 균일지체 추정모형을 위하여 새로운 QAP를 설계하였으며 이를 〈그림 9〉에 제시하였다.

비보호 좌회전QAP의 정점은 HCM의 정의와는 달리 유효녹색시간의 시점이 아니다. 비보호 좌회전 차량은 녹색시간의 시작과 동시에 진행하지 않고 대향 방향 움직임의 대기행렬이 처리되는 시간(g_q)동안 정지선에서 대기한다. 대향 차량 움직임의 대기행렬 처리 후 대향 방향으로 흐르는 차량간의 간격을 찾아 진행을 수행함에 따라 정점은 g_q 의 종점이다. g_q 는 HCM 비보호 좌회전 포화교통류율 보정 파라미터이며 HCM에서 제시하는 모형식을 통하여 추정 가능하다.

비보호 좌회전의 최대 대기행렬 길이는 식(11)로 추정가능하며, 식(12)로 최대 비포화 균일지체의 추정에 해당되는 QAP의 최고정점을 추정할 수 있다.

$$Q = (r + g_q) \cdot q_{LT} \tag{11}$$

$$Q_{g_u} = g_u \cdot \max [s_{LT} - q_{LT}, 0] \tag{12}$$

여기서,

- Q : 추정 실제 대기행렬 길이(대)
- Q_{g_u} : QAP적용가능 최대 대기행렬길이(대)
- g_q : 대향 대기행렬 처리시간(초)
- g_u : g_u 를 제외한 유효녹색시간(초)
- q_{LT} : 비보호 좌회전 교통류 평균 차량도차량(대/초)
- s_{LT} : 비보호 좌회전의 포화교통류율(대/초)

비보호 좌회전 포화교통류율은 g_q 를 제외한 유효녹색시간에서의 좌회전 포화교통류율을 적용하기 위하여 Wu(1995)의 모형을 적용하였다. Wu(1995)의 비보호 좌회전 포화교통류율 추정모형은 식(13)과 같으며 모의실험자료를 토대로 설계된 모형이다.

$$S_{LT} = \frac{3600}{t_f} - (0.2t_c + 1.12)v_o + \frac{2t_c + 171}{10^5} v_o^2 - \frac{(1007 - 66t_c)}{10^9} v_o^3 \quad (13)$$

여기서,

- t_f : 평균 유출 차두시간(초)
- t_c : 임계 대향 차간간격(초)
- v_o : 대향 교통량(대/시)

임계 대향 차간간격 값으로는 2000년도 개정판 HCM에서 제시하고 있는 4.5초를 채택하여 적용하였다.

비보호 좌회전의 지체도 산정을 위하여 유효녹색시간을 비보호 좌회전 대기행렬 처리 전 시간과 후 시간으로 구분하여야 한다. 유효녹색시간에서 비보호 좌회전 대기행렬 처리 전 과 후 시간을 추정하기 위하여 각각 식(14)와 식(15)를 본 연구에서는 사용하였다. 식(14)는 보호현시의 경우 지체도 추정모형에 적용되는 QAP를 기초로 g_q 를 유효적색시간으로 처리하여 비보호 좌회전의 지체도 추정에 적합하도록 보정한 것이다.

$$G_q = \frac{q_{LT} \cdot (r + g_q)}{(s_{LT} - q_{LT})} + g_q \quad (14)$$

$$G_e = g - G_q \quad (15)$$

여기서,

- G_q : 대기행렬처리 전 유효녹색시간(초)
- G_e : 대기행렬처리 후 유효녹색시간(초)
- g : 유효녹색시간(초)

비보호좌회전 대기행렬 처리 후 비보호 좌회전이 정지선에서 대향 교통류의 차간간격 중에서 임계 차간간격보다 큰 간격을 찾으며 대기한다. 이때 평균 대기시간 <그림 9> G_e 빗금부분으로 표시된 지점에서 기하확률분포(Geometric Distribution)를 이용하여 추정할 수 있으며 식(16)과 같다. 임계 대향 차간간격 값으로는 2000년도 개정판 HCM에서 제시하고 있는 4.5초를 채택하여 적용하였다.

$$w = h_o \cdot \frac{1 - \exp(-t_c/h_o)}{\exp(-t_c/h_o)} \quad (16)$$

여기서,

- w : 대향 대기행렬 소멸 후 정지선에서 보호 좌회전 평균 진행대기시간(초/대)
- h_o : 대향 교통류의 평균 차간간격(초)

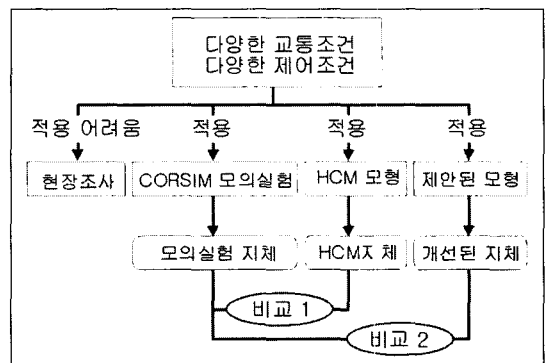
상기 정리된 세부 모형과 <그림 9>에 제시된 QAP를 토대로 본 연구에서 새롭게 설계한 비보호 좌회전의 비포화 균일분포모형은 식(10)과 같다.

$$d_1 = \min \left[\frac{Q(r + G_q)}{2 \cdot q_{LT} \cdot C} + w \cdot q_{LT} \cdot G_e, \frac{Q_{g_o}}{(2 - q_{LT})} \right] \quad (10)$$

이는 HCM 비포화 균일지체 모형(d_1)을 대체하는 모형이다. 제시된 모형은 비포화 균일지체 뿐만 아니라 대향 교통류 대기행렬 처리 후 정지선에서 대향 차량 간의 간격을 찾으며 임시 대기하는 비보호 좌회전 차량의 지체를 포함한다.

IV. 모형의 검증

모형의 검증을 위하여 현장에서 조사된 비보호 좌회전차량의 지체도와 제안된 모형에 의해 추정된 지체도와의 비교가 요구된다. 그러나 (1)다양한 대향 교통류 교통량 및 중차량 함유율 조건, (2)다양한 비보호 좌회전 교통류 교통량 및 중차량 함유율 조건을 현장실험에 반영하여 비교연구를 수행하기에 제약이 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 본 연구에서는 다양한 조건을 반영하는 모의실험을 토대로 비교검증에 사용할 자료군을 마련하였고 비교연구를 수행하였다. <그림 10>은 본 연구에 적용된 모형검증방법의 흐름도이다.



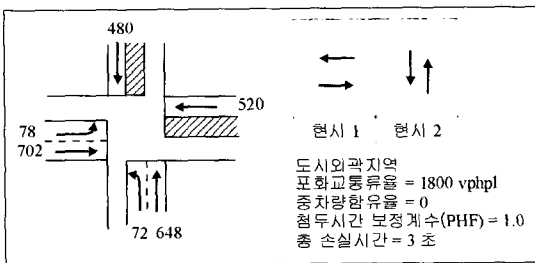
<그림 10> 모형검증방법 흐름도

모의실험 모형으로 은 미국 연방도로국의 지원으로 1980년대에 개발되고 지속적으로 수정되어온 Corridor Simulation(CORSIM)을 적용하였다. CORSIM에 내재된 Network Simulation(NETSIM) 모의실험은 여러 학자 및 연구자들에 의하여 다년간 수정 및 보완되어온 모형으로 많은 연구 및 실험을 통하여 미국 교통부에서 인정을 하고 있는 모형이다. Randy와 Courage (1998) 및 Chundury와 Wolsho(2000)는 CORSIM 모의실험의 결과와 현장자료와의 비교연구를 통하여 모형의 신뢰성이 통계적으로 유의 하다는 결론을 도출하였다. 따라서 본 연구에서도 제안된 모형에 의하여 추정된 지체도를 CORSIM 모의실험에서도 출된 지체도의 비교를 통하여 제안된 모형을 검증하였다.

1. 검증용 비보호 좌회전 지체도 자료군 구축

다양한 상황에서의 비보호 좌회전 지체도 자료군(Database)을 구축하기 위하여 <그림 11>과 같이 가상교차로를 설정하였다. <그림 11>은 가상교차로의 교차로 기하구조 조건, 신호제어조건 및 기본 교통조건을 나타낸다.

교통조건 다양성을 위하여 <그림 11>에 제시된 기본 교통조건을 토대로 <표 1>과 같이 교통량 수준, 접근로 비, 좌회전 비를 변화하여 다양한 교통량조건 변화를 실험에 반영하였다.



<그림 11> 검증 자료군 구축을 위한 가상 교차로 조건

<표 1> 다양한 교통조건 산출을 위한 교통량, 접근로비, 좌회전 비의 변화

비교	변화수준
교통량 수준(배)	0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2
접근로 비	50:50, 55:45, 60:40, 65:35, 70:30
좌회전 비	0.05%, 0.10%, 0.15%, 0.20%, 0.25%

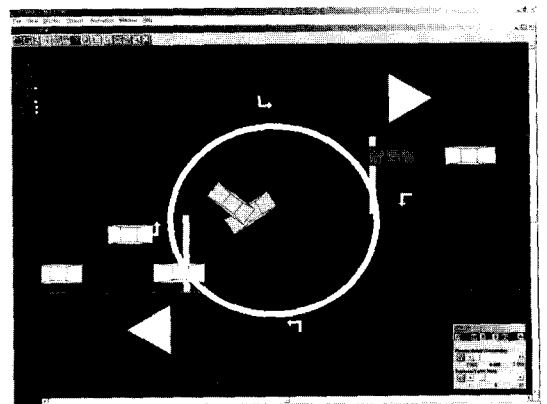
신호제어조건은 남북방향과 동서방향의 현시길이를 기준 교통량 비를 기준으로 0.52 대 0.48로 설정하였고 동일한 현시 비를 적용한 상태에서 주기길이를 60초, 90초, 120초, 150초로 변화하였다.

교통조건과 신호제어조건 변화의 조합으로 전체 120 경우의 상이한 교통상황에서의 비보호 좌회전 지체도 비교실험을 수행하였다.

2. CORSIM 모의실험의 특성 및 다중 모의실험 수행

CORSIM에서의 비보호 좌회전은 운전자의 간격수락모형을 적용한다. 난폭한 운전자 집단에서 여유로운 운전자 집단까지 10개의 운전자 특성을 가지는 운전자집단(driver's type)을 구성하고 각 집단에 할당된 임계간격보다 큰 간격이 발견될 시에는 운전자가 간격을 이용하여 비보호 진행을 수행한다. 이때 CORSIM에서 사용하고 있는 '운전자 인내수준변화'로 인하여 대기시간이 길어짐에 따라 운전자의 임계간격이 가장 난폭한 운전자 집단에 부여된 특정 수준까지 점차 줄어들게 된다. 이로 인하여 비보호 움직임 차량의 임계간격은 10개의 서로 다른 초기 값과 관계없이 최소 임계간격을 사용하게 되는 특성이 있으며 이러한 특성은 대량 교통량이 증가하게 될수록 심화된다. CORSIM모형의 적극적인(optimistic) 비보호 좌회전 특성으로 인하여 CORSIM지체도는 현장 지체에 비하여 다소 과소 추정되는 성향을 내재한다(<그림 12>참고).

교통류 모의실험은 초기값으로 입력되는 무작위 모수(random seed number)에 근거하여 발생하는 난



<그림 12> CORSIM의 적극적인 비보호 좌회전

수들을 토대로 운전자 군(driver's type), 차량발생, 차량주행 행태를 결정한다. 따라서 단독의 무작위 모수(random seed number)군을 사용하여 수행한 한번의 모의실험 결과는 하나의 특정한 교통상황만을 고려하는 것으로 편파적일 수 있다. 본 연구에서는 다양한 무작위 모수(random seed number)를 채택하여 다수의 모의실험을 수행한 후 다수의 제어지체를 수집하여 이를 평균한 값을 대표 값으로 모형의 검증에 사용하였다. 이는 수리모형(analytical model)을 통하여 추정하는 평균 제어 지체와 개념이 동일하다.

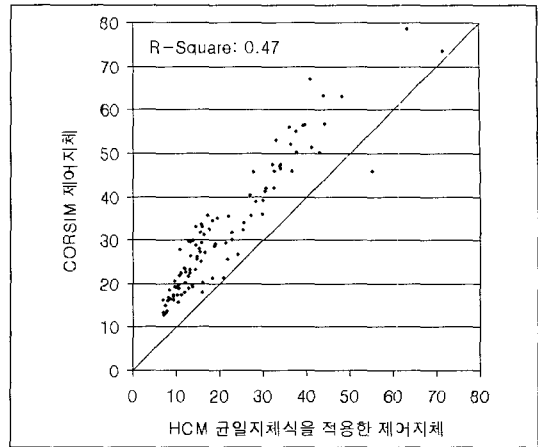
다수의 모의실험 제어방식으로 '표준편차제어'방식을 적용하였다. 표준편차제어방식은 10개의 다른 무작위 모수(random seed number)를 적용하여 먼저 10개의 다른 교통상황의 모의실험을 수행하였으며 이러한 10개의 표본의 표준편차가 (1)평균값의 10% 이내일 경우는 평균값을 대표 값으로 사용하고 (2)평균값의 10%를 초과할 경우에는 표준편차가 평균값의 10% 내에 들어올 때까지 새로운 무작위 모수(random seed number) 값을 추가하여 모의실험 샘플의 수를 늘리는 방법이다.

3. 비보호 좌회전 움직임 개별 제어지체 비교

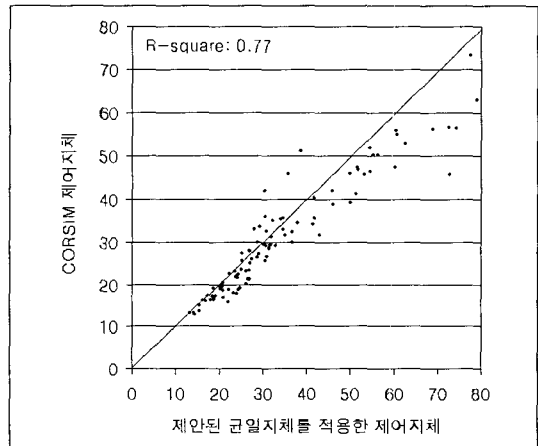
HCM에서 제시하는 지체도 산정 모형으로 추정된 평균제어지체와 제안된 모형으로 정산된 평균제어지체를 모의실험에서 도출된 평균제어지체를 기준으로 비교하였다. HCM 지체도 모형과 모의실험을 통하여 추정된 비보호 좌회전 제어지체의 비교결과를 <그림 13(a)>에 제시하였다. 제안된 지체도 모형식과 모의실험을 통하여 추정된 비보호 좌회전 제어지체의 비교결과를 <그림 13(b)>에 제시하였다.

HCM 지체도 추정모형의 비보호 좌회전 지체도 과소 추정특성이 <그림 13(a)>로 확인되었다. 이는 보호현시 움직임을 기준으로 설계된 'HCM 비포화 균일지체도 추정모형'의 적용으로 인한 것이다. 반면에 제안된 모형으로 추정된 비보호 좌회전 지체도는 HCM 지체도에 비하여 모의실험 추정 지체도와 보다 일대일 형태에 가까운 것으로 확인되었다(<그림 13(b)> 참고). HCM추정치체와 NETSIM 모의실험 지체와의 값은 0.47이고, 제안된 모형으로 추정된 지체와 NETSIM 모의실험 지체와의 값은 0.77이다.

제안된 모형으로 추정되는 지체도는 지체도 수준이



(a) HCM 제어지체와 CORSIM제어지체의 비교



(b) 제안된 모형으로 추정된 제어지체와 CORSIM 제어지체의 비교

<그림 13> 추정된 비보호 좌회전 제어지체의 비교

높아질수록 CORSIM모의실험 지체도보다 다소 높아지는 것으로 분석되었다. 이는 CORSIM이 포화도가 높아짐에 따라 전체 비보호 좌회전 차량 운전자들이 적극적인 주행행태를 띄게 되는 CORSIM 모의실험 단점에 의한 영향이다.

4. 비보호 좌회전 제어지체 자료군의 비교

HCM모형과 제안된 모형에 따른 지체도 추정의 안정성을 검토하기 위하여 다양한 120개의 교통상황에 따라 추정된 120개의 제어지체를 모집단으로 하는 서로 다른 3개의 표본집단(HCM지체, 제안된 모형 추정지체, CORSIM지체)의 비교를 수행하였다.

〈표 2〉 120개 지체도 표본집단의 특성비교

비교	CORSIM 산정 지체도	HCM 모형 추정 지체도	제안된 모형 추정 지체도
평균	48.33	29.55	56.35
분산	2544.13	812.84	5647.46

〈표 2〉는 〈그림 13〉에 도식화 각 표본집단 지체도의 평균과 분산을 정리하여 제시한 것이다.

CORSIM 자료군과 제안된 모형으로 추정된 지체도 자료군의 분산은 분산분석 결과 통계적으로 동일할 것으로 분석되었으나 HCM추정 지체도와 CORSIM 산정 지체도는 통계적으로 서로 다른 분산을 가지는 자료군이라는 결론이 도출되었다. 이러한 결론이 뜻하는 것은 HCM모형에 의하여 추정되는 지체는 주어진 교통상황의 변화에 따라 필요이상으로 민감하게 지체도의 증감이 이루어 지는 것을 의미하며, 이는 제시된 내용과 같이 균일지체가 급속히 최대균일지체로 도달하면서 증분지체로 인하여 지체의 변화가 심해지는 것을 반영한다.

V. 결론 및 토의

HCM 지체도 추정모형은 비보호 좌회전 지체도를 과소 추정하는 경향이 있으며 이는 HCM 지체도 추정방법이 비보호 좌회전 움직임의 특성과 다른 보호 현시 움직임을 토대로 설계되었기 때문이다. 본 연구에서 제시하고 있는 비보호 좌회전 지체도 추정모형은 기존모형에 비하여 모의실험결과를 토대로 비교하였을 시 설명력을 30% 정도 증가시킴을 확인하였다.

HCM 제어지체 추정모형에 의하여 계산된 지체도는 교통량 대 용량의 비가 1.0을 초과하는 경우,

1. 비포화 균일지체는 최대 균일지체(유효적색시간의 1/2)로 제한되어 과포화시 포화도의 변화에 따른 비포화 균일지체의 변화가 없어 모형의 의미가 적고
2. 증분지체는 증분지체 추정모형이 도출된 비포화 무작위 지체와 포화 균일지체 모형의 영향으로 수식의 영향으로 교통량 비 용량비가 증가할 경우 급격히 지체도가 증가하는 특성을 가진다.
3. 이러한 이유로 과포화의 경우 지체도 추정에 무리가 있다.

HCM 지체도 추정모형은 비포화 상태로 한정하여 그 신뢰성이 높으며 과포화시에는 지체도 추정에 무리가 있어 포화도가 1.00~1.20의 경우로 제한하여 그 추정치를 수용하고 있다. 보다 정확한 과포화 상태에서의 지체도 추정은 수리모형이 아닌 모의실험 전산모형을 통하여 수행할 수 있다.

2000년도 개정 HCM에서 제시하고 있는 최근의 연구결과를 반영한 HCM지체도 추정모형 조차도 포화도가 1.0을 초과할수록 높은 신뢰성을 유지하지 않는다. 이는 (1)현존하는 지체도 추정 수리모형이 균일지체와 증분지체로 구분하여 추정하는 구조를 유지하고 있기 때문이며, 또 (2)증분지체가 현장자료를 토대로 산정된 모형이 아니기 때문이다.

설명력이 높은 과포화 지체도 산정모형의 개발은 다양한 과포화 수준, 다양한 기하구조 조건에서의 현장 지체도 수준을 개발자가 대부분 파악하고 있어야 하는 상태를 요구하며 이는 도심부 도로망의 복잡성을 생각하면 사실상 어려운 것이 현실이다. 그러나 교통공학의 발전을 위하여 향후에 수행되어야 하는 필요연구 중의 하나이므로 향후 연구과제로 적극 제안한다.

제안된 모형의 적극적인 검증을 위하여 현장자료를 토대로 한 검증을 향후 연구과제로 제안한다.

참고문헌

1. Akelik, R.(1981), Traffic Signals: Capacity and Timing Analysis, Research Report 123, Australian Road Research Board, Victoria, Australia.
2. Chundury, S. and B. Wolsho(2000) Evaluation of the CORSIM Car-Following Model Using GPS Field Data, TRR 1710, pp.114~121.
3. Daniel, J., D. B. Fambro and N. M. Roupail (1996), Accounting for Nonrandom Arrivals in Estimate of Delay at Signalized Intersections, TRR 1555, pp.9~16.
4. Hurdle, V.F.(1984) Signalized Intersection Delay Models-A Primer for the Uninitiated, TRR 971, pp.96~105.
5. Kimber, R. M. and E. M. Hollies(1979) Traffic Queues and Delay at Road junctions.

- Laboratory Report 909, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, U.K.
6. Robertson, D. I.(1979) Traffic Models and Optimum Strategies of Control A review, International Symposium on Traffic Control Systems, edited by W. S. Homburger and L. Steinman, Vol.1. pp.262~288, Berkeley, CA, U.S.A.
 7. Showers, R. H. and K. G. Courage(1998), CORSIM Treatment of Gap Acceptance and Delay, TRB CD ROM.
 8. TRB(1985), Highway Capacity Manual, Transportation Research Board, Special Report 209, Washington, DC, U.S.A.
 9. TRB(1994), Highway Capacity Manual, Transportation Research Board, Special Report 209, Washington, DC, U.S.A.
 10. TRB(1997), Highway Capacity Manual, Transportation Research Board, Special Report 209, Washington, DC, U.S.A.
 11. TRB(2000), Highway Capacity Manual, Transportation Research Board, Special Report 209, Washington, DC, U.S.A.
 12. Wu, J.(1995) Evaluation and Enhancement of Opposed Left-turn Flow Analysis Methodology, Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, University of Florida, Gainesville, FL, U.S.A.
 13. 대한교통학회(2001) 도로용량편람, 건설교통부 제정.

✉ 주 작 성 자 : 김진태

✉ 논문투고일 : 2003. 2. 3

논문심사일 : 2003. 3. 3 (1차)

2003. 3. 28 (2차)

심사판정일 : 2003. 3. 28

✉ 반론접수기한 : 2003. 8. 31

path enumeration they restrict the number of feasible path set, thereby they can not precisely explain the travel behavior when the travel cost is varied in a network loading step. Another problem of the stochastic assignment models is stemmed from that they use heuristic approach in attaining optimal moving size, due to the difficulty for evaluation of their objective function.

This paper presents a logit-based stochastic assignment model and its solution algorithm to cope with the problems above. We also provide a stochastic user equilibrium condition of the model. The model is based on path where all feasible paths are enumerated in advance. This kind of method needs a more computing demand for running the model compared to the link-based one. However, there are same advantages. It could describe the travel behavior more exactly, and too much computing time does not require than we expect, because we calculate the path set only one time in initial step. Two numerical examples are also given in order to assess the model and to compare it with other methods.

Improvement of the HCM Delay Estimation Model for Exclusive Permitted Left Turns

KIM, Jin Tae

Highway Capacity Manual(HCM) provides an analytical delay estimation model to assist the evaluation of traffic at a signalized intersection. The model revised and included in the HCM published in the year 2000 reflects the results of recent studies and is utilized in various fields of transportation studies. For the implementation of the model in the case of permitted left turns, the HCM supplement provides a computational procedure to adjust the saturation flow rate of permitted left turns. The model however, is originally designed for a protected movement and thus underestimates the delay of permitted left turns due to its dif-

ference right-of-way nature.

This document describes (1) a review of the theoretical background of the HCM delay estimation model, (2) problems embedded in the model for the delay estimation of permitted left turns, (3) a proposed model developed in this study to improve the delay estimation for permitted left turns and (4) a set of verification tests. In order to reflect various traffic and control conditions in the test, simulation studies were performed to by using the field data based on 120 different permitted left-turn scenarios. Comparison studies conducted between sets of delays estimated by the HCM and the proposed models against a set of the CORSIM delays and showed that the proposed model improved the estimation of the permitted left-turn delays. The explanatory variable of the relationship between the HCM delay and the simulation delay was 0.47 and the one between the delay estimated by the proposed model and the simulation delay was 0.77.

Development of the RP and SP Combined using Error Component Method

KIM, Kang-Soo · CHO, Hye-Jin

SP data have been widely used in assessing new transport policies and transport related plans. However, one of criticisms of using SP is that respondents may show different reaction between hypothetical experiments and real life. In order to overcome the problem, combination of SP and RP data has been suggested and the combined methods have been being developed.

The purpose of this paper is to suggest a new SP and RP combined method using error component method and to verify the method. The error component method decomposes IID extreme value error into non-IID error component(s) and ar. IID error component. The method estimates both of component parameters and utility parameters in order to obtain relative variance of SP data and RP data.