

□ 論 文 □

신호교차로 지 모형  
信號交叉路 遲滯模型

Signalized Intersection Delay Model

김영섭  
金永燦

(交通開發研究院 先任研究員)

이청원  
李清圓

(交通開發研究院 研究員)

目 次

- |   |  |
|---|--|
| <p>I. 序 論</p> <p>II. 停止遲滯와 接近遲滯의 關係</p> <p style="padding-left: 20px;">1. 既存方法論</p> <p style="padding-left: 20px;">2. 遲滯轉換模型開發</p> <p style="padding-left: 20px;">3. 遲滯度 轉換式의 比較</p> <p style="padding-left: 20px;">4. 實用化 방안</p> | <p>III. 遲滯模型開發</p> <p style="padding-left: 20px;">1. 既存 遲滯度模型</p> <p style="padding-left: 20px;">2. 模型開發 方法論</p> <p style="padding-left: 20px;">3. 資料蒐集 및 整理</p> <p style="padding-left: 20px;">4. 分析結果</p> <p>IV. 結 論</p> |
|---|--|

ABSTRACT

Delay is an widely-used tool for evaluating the operation of signalized intersections. This paper presents two mathematical models: a model converting stop delay into approach delay; and a model estimating delay at isolated signalized intersection.

To develop the delay-conversion model, actual stop delay and approach delay experienced by individual vehicles were measured and then their relationship was formulated using mathematical procedure. The formula expressing the approach-delay to stop-delay ratio was a monotonously decreasing function of effective red time.

New delay model was developed based on the following criteria; the fitness to measured delay for undersaturated traffic condition, and the convergence to the deterministic overflow delay for oversaturated traffic condition. Performance of this model was better than those of other existing models based on the comparison study.

## I. 서 론

지체도(Delay)는 신호화된 교차로의 효과적 도로로서 우리나라뿐만 아니라 세계 여러나라에서도 널리 사용되고 있다. 주어진 교차로의 기하구조, 교통여건 및 신호여건에 따른 지체도추정을 위한 모형은 교차로운영의 현황분석 및 장애상황예측을 위하여 필수적으로 요구된다. 교차로 지체모형의 정확도가 신호현시전략이나 기하구조개선 등의 연구결과에 영향을 미치는 자명한 사실이다.

1960년을 전후하여 Webster<sup>1)</sup>, Miller<sup>2)</sup>, Newell<sup>3)</sup> 등에 의하여 Queuing Theory를 바탕으로 한 신호교차로 지체모형들이 처음 제시되었다. 그 후 이 분야의 연구는 꾸준히 계속되어 오늘날 상당한 수의 지체모형들이 개발되어 신호교차로분석에 이용되고 있다. 대표적인 지체모형으로는 HCM<sup>4)</sup>, Australia<sup>5)</sup>, Canada<sup>6)</sup>, TRANSYT-8<sup>7)</sup> 모형들을 들 수 있다.

이 모형들은 다소 상이한 결과를 내므로 실제 연구에 사용할 모형은 신중히 선택해야 함은 두말할 나위가 없다. 따라서, 객관적인 기준하에서 이 모형들을 평가하여 각각의 장단점을 파악할 필요성이 있다.

본 연구의 목적은 독립교차로의 실측지체도 자료를 이용하여 기존 지체모형의 적합성을 검토하며 정확성, 합리성 및 실용성에 입각하여 새로운 독립교차로 지체모형을 제시하는데 있다. 본고에서 제시되는 지체모형은 독립된 신호교차로 (Isolated Signalized Intersection)를 대상으로 정주기식 운영체계 (Fixed-Time Control)에서 응용될 수 있도록 개발되었다.

지체모형의 개발과 더불어 이루어져야 하는 과제로 정지지체와 접근지체간의 관계정립이 있다. 본 고에서는 이러한 두가지 지체의 관계식 개발에 관한 연구도 아울러 서술한다.

## II. 정지지체와 접근지체의 관계

정지지체(Stopped Delay)는 신호기의 영향으로 차량이 교차로접근부에 완전히 정지한 동안의 시간을 일컬으며, 접근지체(Approach Delay)는 차량이 전혀 지체됨이 없이 교차로를 통과할 경우에 비하여 신호의 영향으로 추가로 소요되는 지체시간이며, 접근지체는 감속지체, 정지지체, 가속지체로 이루어진다. 정지지체는 접근지체에 비하여 실측이 용이한 이유로 US HCM<sup>4)</sup>에서는 정지지체를 교차로 서비스수준 산정의 기준으로 사용한다. 하지만 통상 해석적인 방법으로 지체모형을 개발하면 접근지체가 解로서 유도되므로, 실측에 의한 정지지체와 모형에 의한 접근지체간의 관계를 규명할 필요성이 대두된다.

### 1. 기존방법론

US HCM은 개략적으로 접근지체는 정지지체의 1.3배인 것으로 규정하고 있지만 이러한 관계에 대한 근거자료는 구할 수 없었다. Lin<sup>8)</sup>과 Teply<sup>9)</sup>가 정지지체와 접근지체간의 관계식을 제시한 바 있다. 이들 두 사람은 공히 Queuing Diagram를 통하여 차량의 가감속도는 일정하다는 가정하에 양 지체간의 관계를 이론적으로 도출하였다. Teply<sup>9)</sup>가 제시한 관계식을 살펴 보면 다음과 같다.

$$\text{접근지체/정지지체} = r^2 / (r - t_a)^2$$

여기서,  $r$ 은 유효적색시간이며,  $t_a$ 는 감속지체시간을 말한다. 감속지체가 일정하다고 가정하면, 접근속도 50km/hr, 감속도 3.0m/sec<sup>2</sup>로 가정할 경우  $t_a$ 는 4.6초가 된다. 이 관계식에서 정지지체에 대한 접근지체의 비율은 상수가 아니라 신호시간에 따라 변하며, 특정현시(phase)에 대하여 유효적색시간이 증가함에 따라 이 비율은 점차 감소하는 양상을 보인다. 다시 말해서, 접근지체를 정지지체로 환산할 경우 US HCM 방식과 같이 일정한 비율을 적용함은 옳지 않으며, 신호시간에 따라 관계식을 이용하여 계산하여야 한다는 것이다.

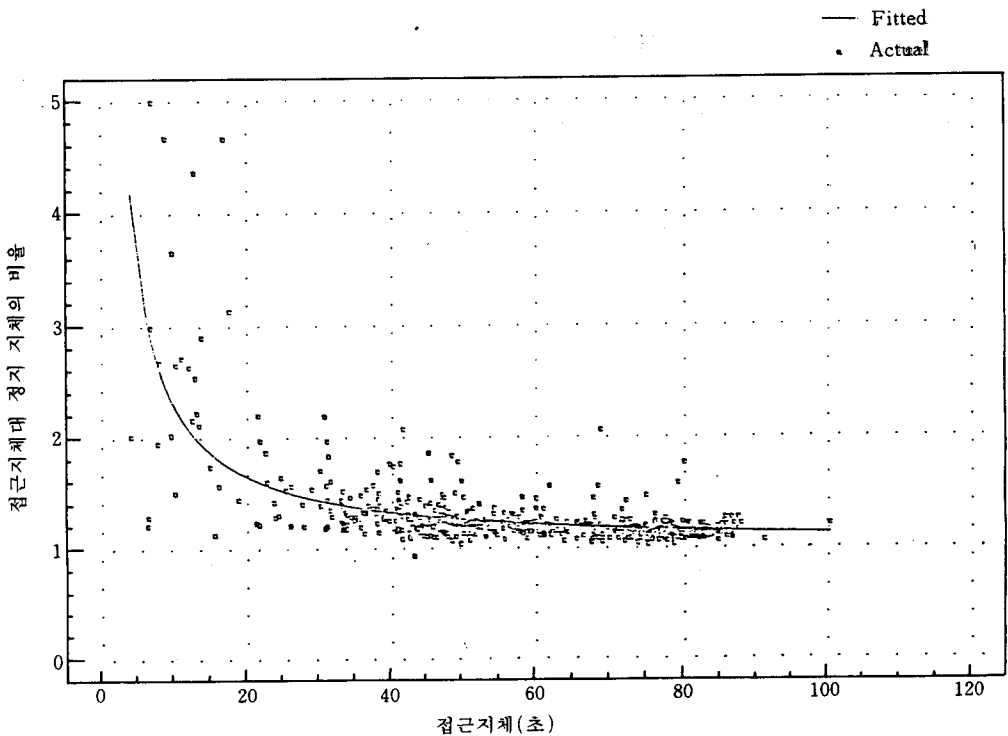
Lin<sup>8)</sup>은 접근지체와 정지지체의 환산식을 제시하는 대신에 등분포도착(Uniform Arrival)의 가정하에 정지지체식을 유도하였다. Lin은 접근지체와 정지지체간의 관계를 규명하는 데 있어 Teply와는 상이한 과정을 밟았지만 기존의 접근지체식과 자신의 정지지체식의 비교를 통하여 Teply와 동일한 결론을 얻었다. 즉, 접근지체와 정지지체의 환산비율은 상수가 아니라 변수로 취급되어야 한다는 것이다.

Lin과 Teply는 신호교차로 접근로에서 모든 차량의 가감속도는 일정하다는 전제하에서 Queueing Diagram을 통한 해석적 방법에 의해 모형을 개발하였다. 이러한 전제가 무리하다고는 생각하지 않으나 실제 현상의 측정에 근거한 모형의 개발이 바람직한 것으로 판단되어 본 연구에서는 양지체의 실측자료를 이용하여 모형을 개발하였다.

## 2. 지체전환모형개발

본 연구에서는 다양한 신호시간을 대상으로 교차로에서 차량의 정지와 출발과정을 추적하여 개별차량의 접근지체와 정지지체를 관측하였다. 해당 교차로에서 개별차량의 감속·정지·가속이 관측되도록 비디오 촬영기를 설치하여 촬영하였으며, 실내에서 촬영된 내용을 재생하면서 차량의 지체도를 직접 측정하였다.

실측에 의한 개별차량에 대한 정지지체와 접근지체간의 관계는 <그림 1>에 나타난다. 이 그림에서 횡축은 접근지체, 종축은 접근지체 - 대 - 정지지체의 비율이므로, 접근지체가 영(zero)에 가까와 질 수록 비율은 무한대가 되며 접근지체가 커짐에 따라 이 비율은 1에 접근한다. 이러한 성격을 띄는 곡선들을



<그림 1> 개별차량에 대한 정지지체와 접근지체의 관계

선정하여 Least Square에 의한 fitting을 시행한 결과 다음의 모형이 최적인 것으로 판명되었다.

$$\frac{d_s}{d_i} = 1 + \frac{\alpha}{d_i} \dots\dots\dots (1)$$

여기서,  $d_i$  = 개별차량의 접근지체(sec)  
 $d_s$  = 개별차량의 정지지체(sec)  
 $\alpha$  = 매개변수, 11.6

식(1)을 정리하면 개별차량에 대한 접근지체와 정지지체간의 관계는 다음과 같다.

$$d_i = \frac{d_s^2}{\alpha + d_s} \dots\dots\dots (2)$$

이상으로 실측자료를 이용한 접근지체와 정지지체간의 관계식을 제시하였다. 그런데, 이 식은 개개의 차량이 경험하는 지체에 대한 관계식이지만 통상 교차로분석에 사용되는 신호주기당 총차량에 대한 평균지체간의 관계식은 아니다. 따라서, 평균접근지체와 평균정지지체간의 전환식을 식(2)를 응용하여 실제 교차로분석에 적용 가능하도록 유도하였다.

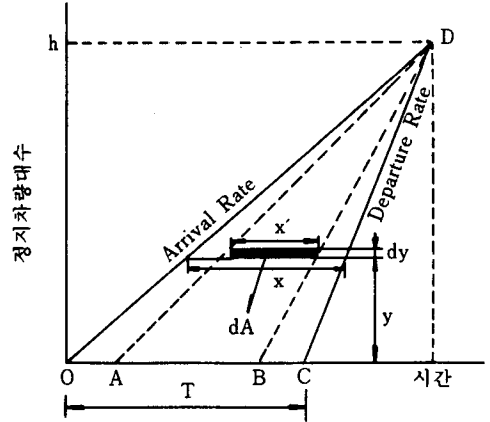
<그림 2>는 균일한 차량도착(Uniform Arrivals)의 전체하에 신호주기당 차량의 총접근지체와 총정지지체를 보여준다. 이 그림에서 총접근지체( $D_i$ )는  $\triangle OCD$ 의 면적과 같으며, 다음과 같이 표현된다.

$$D_i = \frac{Th}{2} \dots\dots\dots (3)$$

여기서,  $D_i$  = 총접근지체(sec-veh)  
 $T$  = 해당 Phase의 유효적색시간(sec)  
 $h$  = 최대 지체길이(veh).

한편, 총정지지체( $D_s$ )는 점 A, B, D, 로 둘러싸인 부분의 면적과 동일한데, 점 A와 점 D 그리고 점 B와 점 D를 연결하는 점선들은 직선이 아니며, 이 선들의 형태는 식(2)에 의하여 결정된다. 이 면적은 미소면적  $dA$ 를 구하여 전체면적이 되도록 적분하여 산출할 수 있다. 미소면적  $dA$ 는

$$dA = x' dy$$



<그림 2> 신호주기당 접근지체와 정지지체

이다, 그런데, 식(2)로부터,

$$x' = \frac{x^2}{\alpha + x}$$

따라서,

$$dA = \frac{(1 - \frac{y}{h})^2 T^2}{\alpha + (1 - \frac{y}{h})T} dy$$

총정지지체 ( $D_s$ )는 다음과 같다.

$$D_s = \int dA$$

$$= \int_0^h \frac{(1 - \frac{y}{h})^2 T^2}{\alpha + (1 - \frac{y}{h})T} dy$$

이 식을 적분하면,

$$D_s = \frac{h}{T} (\frac{T^2}{2} - \alpha T + \alpha^2 \ln(\alpha + T) - \alpha \ln \alpha) \dots\dots\dots (4)$$

정지지체에 대한 접근지체의 비율을 구하기 위하여, 식(3)을 식(4)로 나누면,

$$\frac{D_s}{D_i} = \frac{T^2}{T^2 - 2\alpha T + 2\alpha^2 \ln(\alpha + T) - 2\alpha \ln \alpha} \dots\dots\dots (5)$$

유도과정에서 지체도길이(h)는 소거되어서, 정지지체와 접근지체의 전환비율을 나타내는 식(5)는 유효적색시간만의 함수이며, 단조감소함수의 형태를 취한다. 다시 말해서, 특정

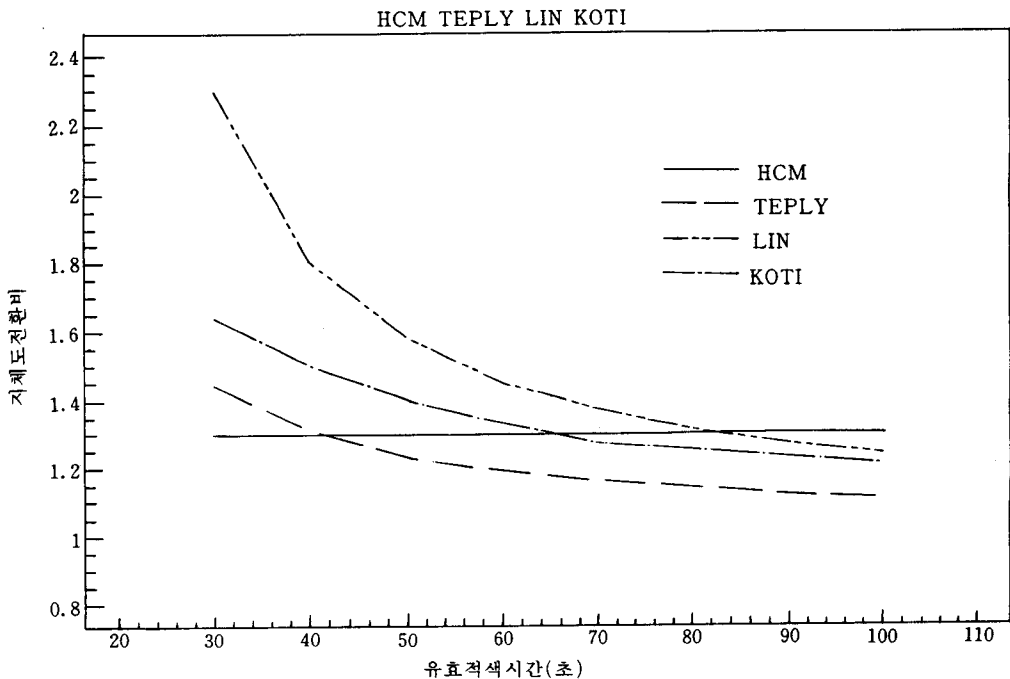
현시(Phase)의 유효적색시간이 증가함에 따라 정지지체에 대한 접근지체의 비는 점차 감소한다는 것을 의미하는데, 이러한 현상은 Lin과 Teply의 모형들에서도 마찬가지로 나타난다. 다음 절에서는 본 연구에서 개발된 양지체간의 새로운 관계식과 타 모형들의 결과를 비교하여 본다. 본 연구에서 제시된 지체전환식을 앞으로 「KOTI (Korea Transport Institute)전환식」이라 부른다.

3. 지체도 전환식의 비교

정지지체를 접근지체로 전환하기 방법으로 US HCM은 정지지체의 1.3배를 사용 할 것을 권하며, Teply과 Lin은 수학적 모형을 개발하여 양 지체간의 관계를 규명하려 하였다. 이들 모형과 본 연구에서 제시한 모형의 결과와의 상호비교는 의미있는 일이다. <그림 3>은 여러 모형들의 유효적색시간에 대한 결과치를 보여 준다. 이 그림에서 Teply과 Lin의 모형

들은 평균가감속시간을 필요로 하며, 본 비교에서는 현장실측으로 얻어진 4.5초의 감속시간과 5.5초의 가속시간을 사용하였다. 지체도 전환비율은 가감속시간의 가정에 따라 변하게 되는데 Teply의 모형에서는 감속시간을 1초만큼 증감시킬 때 전환비는 대략 3퍼센트의 변화가 나타났다. Lin의 모형은 다양한 변수를 사용하기 때문에 타 모형과의 정확한 비교는 제약이 따르지만 각 변수에 경험을 바탕으로 한 적절한 값을 대입하였으므로 별반 문제는 없으리라 본다.

<그림 3>의 결과에 따르면 Lin의 모형이 모형들 중에서 가장 큰 값을 가지며 특히 유효적색시간이 짧아질수록 그 차이는 점점 커진다. 다음으로 KOTI모형이 크며 Teply의 모형이 가장 작은 전환비를 보인다. Teply의 결과가 가장 작은 이유는 접근지체와 정지지체의 차에서 감속지체만을 고려하고 가속지체는 무시하였기 때문이다. KOTI모형에서는 유효



<그림 3>지체도 전환식의 비교

적색시간이 약 65초일 때 US HCM에서 추천한 1.3의 전환비가 나타난다.

4. 실용화 방안

본 연구에서 제시한 지체도 전환식은 개별 신호현시의 유효적색시간의 함수로 운영중인 신호시간에 결과치가 달라지게 된다. 그리고, 신호현시마다 별도의 전환비율을 산출해서 지체도를 전환해야 하는 번거로움이 있다. 신호교차로연구에서 정밀한 분석이 요구될 경우는 본 모형을 이용하여 신호현시별 전환비율을 구함이 바람직하지만 일반적인 교차로분석에서는 이러한 번거로움을 피해서 개략적인 수치를 사용해도 무방하다고 본다.

〈표 1〉은 서울시 전자교통신호 운영자료를 바탕으로 신호주기에 따라 산출한 지체도 전환비를 보여준다. 전체 신호운영자료중에서 약 10퍼센트의 표본을 무작위로 추출하여 각각의 신호운영자료에 대한 지체도 전환비를 산출한 후 신호자료의 분포에 따라 가중 평균하였다. 이러한 평균적인 전환비는 신호주기에 따라 세 그룹으로 나누어 직진과 좌회전현시에 대하여 별도로 제시하였다. 〈표 1〉에 제시된 지체도 전환비는 신호주기그룹과 현시종류에 따른 평균값으로서 일반적인 신호교차로 분석에서 정지지체와 접근지체를 상호 전환하고자 할 때 사용할 수 있는 가이드라인이다.

〈표 1〉신호주기에 따른 지체도 전환비

주 기	좌회전신호	직진신호	평 균
80초 이하	1.31	1.42	1.38
80~100초	1.24	1.34	1.31
100초 이상	1.20	1.27	1.25
평 균	1.24	1.32	1.29

〈표 1〉의 결과에 따르면 신호주기가 길어짐에 따라 전환비는 감소하는데, 그 이유는 신호주기가 길어지면 그 주기내의 신호현시시간(Phase Length)들과 유효적색시간들도 따

라서 길어지며, 유효적색시간이 길어지면 전환비는 감소 하기 때문이다. 또한 〈표 1〉로부터 좌회전신호의 지체도전환비가 직진신호에 비하여 작다는 사실을 알 수 있다. 이유는 일반적으로 좌회전현시 시간이 직진현시 시간보다 짧으므로 고정된 신호주기를 두고 볼때 좌회전현시의 유효적색시간이 직진현시보다 길어지기 때문이다. 특이한 사실은 서울시 신호운영자료를 이용한 지체도전환비의 전체 평균은 1.29로서 US HCM에서 제시한 1.3과 아주 유사하다는 것이다.

본 절에서는 신호교차로 분석과정에 있어서 중요한 위치를 차지하는 정지지체와 접근지체와의 관계를 규명하기 위한 방안으로 현장자료를 바탕으로 한 수학적모형을 제시하였으며, 본 모형의 실용성을 위하여 현행 서울시 신호운영자료를 근간으로 지체도 전환비의 가이드라인을 아울러 제시하였다. 다음 절에서는 신호교차로의 서비스수준을 밝히기 위하여 널리 사용되는 척도인 지체도 산정에 사용될 수 있는 수학적모형의 개발과정을 서술한다.

Ⅲ. 지체도모형개발

신호교차로 분석에서 중요한 평가척도인 지체도는 대상 교차로에서 실측한 값을 이용하여 교차로 상태를 판단함이 바람직하나, 현실적으로 지체도의 측정은 많은 비용이 소요되며 또한 계획단계에서는 지체도의 실측이 불가능하다. 따라서 교차로 기하구조개선이나 신호시간개선 등의 사업에서는 개선대안의 사전-사후 평가를 위하여 대부분의 경우 수학적모형에 의존한 지체도를 평가척도로 사용하게 된다. 국내외에서 다수의 지체도모형들이 개발되어 사용되고 있으나 이러한 모형들의 적합성을 실측자료를 기준으로 평가할 필요가 있다. 본절에서는 이러한 평가를 바탕으로 새로운 모형을 제시하며, 「KOTI(Korea Transport Institute)지체도모형」이라 부른다.

1. 기존 지체도모형

지난 30년간 다양한 지체도 모형들이 연구 개발되었으며, 그들 중 현재 일반적으로 사용되고 있는 모형들로는 HCM<sup>4)</sup>, Australia<sup>5)</sup>, Canada<sup>6)</sup>, TRANSYT-8<sup>7)</sup>모형들을 들 수 있다. 이 모형들은 나름대로의 적절한 이론을 바탕으로 개발되어 제각기 특성을 갖고 있기 때문에, 모형의 우수성을 이론적인 측면에서 비교 평가하기 보다는 실측지체도에 대한 적합여부에 따라 평가함이 타당하다고 본다. 국내에서는 서채연 등<sup>10)</sup>과 이철기<sup>11)</sup>가 지체도 모형을 제시한 바 있지만, 이 모형들은 간략화하는 과정에서 무리한 가정을 내포하고 있으므로 부적절하다고 판단되어 본 비교 평가에서 제외하였다.

Akcelik<sup>12)</sup>은 일반화된 지체식을 제시하여 모수(Parameter)들에 적절한 값을 대입하여 앞서 언급한 최근의 모형들을 일목요연하게 표현하였다. 이러한 일반식은 다음과 같다.

$$d = \frac{0.5c(1-u)^2}{1-ux} + 900Tx^m[(x-1) + \sqrt{(x-1)^2 + m(x-x_0)/QT}] \dots\dots (6)$$

여기서, d=평균접근지체(approach delay)

c=주기(sec)

u=유효녹색시간비, g/c

x=포화도

T=분석기간(시간)

Q=용량(대/시)

m, n=모수

x<sub>0</sub>=overflow delay가 발생하는 최초의 포화도(=a+bsg)

s=포화교통류(대/초)

g=유효녹색시간(초)

a, b=모수

지체도일반식인 <식 6>은 4개의 모수 (n, m, a, b)를 포함하며 <표 2>에서 열거된 값들을 대입하여 대표적인 지체도 모형들을 표현할 수 있다. 예를 들면, HCM지체식은 모수

n, m이 각각 2와 4이고 모수 a, b는 0인 모형이다. 이 표에서 Akcelik 모형은 Akcelik이 HCM모형의 단점을 보완하기 위하여 제안한 모형이다.

<표 2>대표적인 지체식의 모수 값

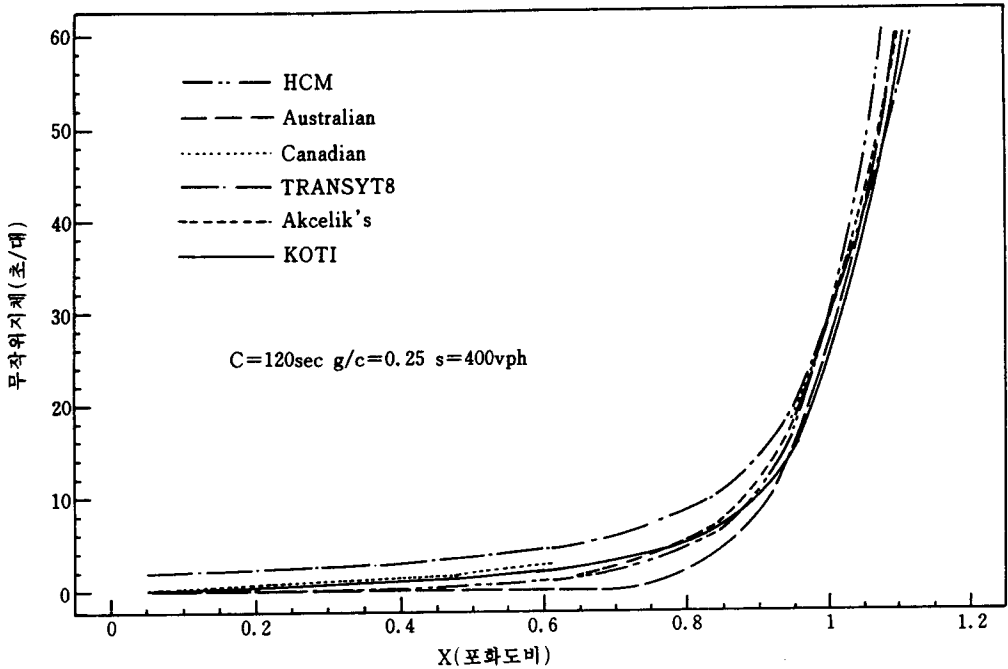
	n	m	a	b
HCM	2	4	0	0
Australian	0	12	0.67	1/600
Canadian	0	4	0	0
TRANSYT-8	-1	4	0	0
Akcelik	0	8	0.5	0

\*출처: Akcelik<sup>12)</sup>

<식 6>은 두개의 항으로 이루어지며, 첫째 항은 균일지체(Uniform Delay)를 나타내며, 둘째 항은 무작위지체(Random Delay)를 나타낸다. 첫째 항인 균일지체는 모형의 종류에 상관없이 일정하며, 여러 모형들의 차이점은 둘째 항인 무작위지체에서 나타난다. <그림 4>는 각종 지체도모형으로 산출된 무작위지체의 포화도(X, Degree of Saturation)에 따른 변화를 보여준다. 포화도가 1보다 작을 경우 TRANSYT-8 모형이 가장 큰 지체도를 보이며, Canadian 모형이 그 다음이고, Australian 모형이 가장 작은 지체도를 보인다. 포화도가 1보다 클 경우 다른 양상을 보이는 데, 이 점은 다음 절에서 구체적으로 논하기로 한다.

2. 모형개발 방법론

1960년도 전후에 개발된 전통적인 지체도 모형들은 이론적인 우수성에도 불구하고 실측자료와의 적합성을 향상시키는 방향으로 꾸준히 수정되어 오늘날에 이르렀다. 현재 널리 사용되고 있는 각국의 지체도 모형들은 충분한 현장실험을 거쳐 개발되었음에도 불구하고 다소 상이한 결과를 보이므로, 서울시에서 측정한 지체도를 중심으로 각 모형을 평가하고 미비한 점들을 밝혀내어 새로운 모형의 개발방향



〈그림 4〉지체도 모형 비교

을 정하였다. 본 연구에서 제시한 지체도 모형인 KOTI 모형은 이론적 측면에서 기존 모형의 향상을 기하기 보다는 Akcelik의 지체도 일반식(식 6)의 모수들을 조정(Calibration)하여 개발되었다. 기존모형의 평가와 KOTI 모형개발을 위한 모수조정은 다음의 원칙에 의하여 이루어졌다.

- ① 실측자료와의 근접성
- ② 모형결과의 합리성
- ③ 계산의 용이성

모형의 결과와 실측자료의 근접성은 통계적 방법을 통하여 평가하였다. 지체의 실측치와 모형치의 쌍을 회귀분석하여 기울기를 평가기준으로 삼았다. 이와 더불어 실측치와 모형치의 차이를 나타내는 RMS error을 통하여 평가하였다.

교통수요가 교차로 용량을 초과할 때의 교통상태를 과포화상태(Oversaturation)라 부른다. 지체도모형의 합리성은 이러한 과포화상

태의 설명력에서 강조된다. 일부 모형들은 저포화(Undersaturation)상태에 과도한 비중을 둔 결과 포화부분의 결과가 비현실적인 경우가 있다. 과포화상태하에서는 지체도가 시간의 흐름에 따라 달라지므로 신호주기당 Steady State의 가정하에 지체를 실측하거나 모형을 개발할 수 없다. 과포화상태의 지체도는 이론적으로 Time-Dependent Delay의 범주에 포함되며 차량도착형태에서 무작위도착의 효과(Random Arrival Effect)가 전체지체도에서 차지하는 부분은 미미하며, 교차로 용량에 대한 교통수요의 초과분이 지체도로 나타나게 된다.<sup>12, 13, 14)</sup> 따라서, 지체도 모형의 과포화상태에 대한 부분은 Input-Output Model에 의한 Deterministic Queueing Model에 접근됨이 바람직하다.

마지막으로 모형의 간편성을 평가기준으로 삼았다. 지나치게 간편성에 치우치면 모형의 질을 떨어뜨릴 위험이 있지만, 너무 복잡한



모형 역시 바람직 하지 못하다. 이러한 사항을 고려하여 기존 모형들을 평가하며 새로운 모형을 개발 하였다.

3. 자료수집 및 정리

모형개발의 필수단계의 하나가 실측지체의 수집이다. 본고에서는 독립교차로로 판단되는 서울시내 5개 교차로에서 접근방향 7개를 대상으로 선정하였으며 그 내용은 <표 3>과 <그림 5>에 나타난다. 대상 교차로에서 인접교차로간의 거리는 1100m에서 2900m의 범위로서, 편도 3내지 6차선의 양호한 기하구조를 갖고 주변마찰 또한 거의 없는 지역들이다.

현장의 교통류로부터 지체도를 측정하는 다양한 방법들 중에서 US HCM에서 제시하는 Point Sample Method을 본 연구에서 사용하였다. 이 방법으로 정지지체를 얻을 수 있으며, 간편하기 때문에 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 Video 촬영기를 이용하여 교통류를 화면에 담은 후에 재생시켜가며 정지지체를 산출하였다. 이때 정지지체관측 시간간격은 10초로 선정하였다. 총 지체도 자료수는 95개 이며 실측된 정지지체 값을 앞에서 제시한 「KOTI지체전환식」을 이용하여 접근지체로 전환하였다. 한편, 모형 개발시 필요한 포화교통류율은 US HCM의 제 9장 부록 IV에 제

<표 3> 조사지점의 특성

번호	교차로명	접근방향	차선수	상류부 신호교차로와의거리(m)
1	미도 아파트	NB	5	1,700
		WB	4	1,500
2	개포동 공무 원 아파트	EB	4	1,200
3	오금동	EB	3	2,400
		NB	3	2,400
4	풍납동	EB	4	1,100
5	상일동	NB	6	2,900

시된 "Direct Measurement of Prevailing Saturation Flow Rates"의 방법을 응용하여 해당교차로에서 직접관측하였다.

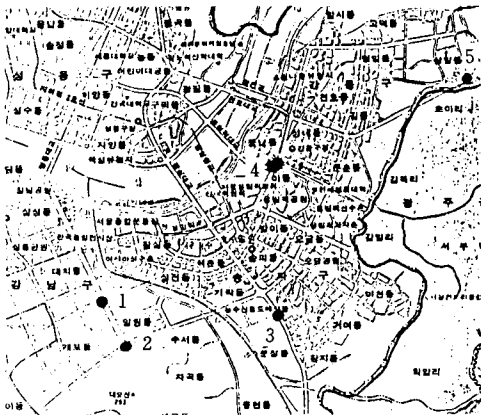
지체도는 교통량 - 대 - 용량비(Volume-to-Capacity Ratio)가 1보다 작은 경우를 대상으로 관측하였으며, 이러한 실측자료는 직진차선을 대상으로 수집되었으며 우회전과 직진이 혼용되는 최우측차선(Curb Lane)은 제외시켰다.

4. 분석결과

실측자료와의 근접성, 모형결과의 합리성, 그리고 계산의 용이성의 세가지 원칙에 입각하여 기존 지체모형들을 평가하고 새로운 모형인 KOTI지체모형을 Akcelik의 일반식(식 6)에서 모수들을 조정(Parameter Calibration)하여 개발하였다. 이상의 원칙을 고려하여 수많은 대안을 검토한 결과 본 연구에서는 다음과 같은 모수값을 취하는 모형을 제안한다.

$$n=0, m=3, a=b=0.$$

다음 소절에서는 KOTI 모형을 포함한 각종 모형들의 비교평가에 대한 결과를 서술한다. 대상 모형으로는 HCM, Australian, Canadian TRANSYT-8, Akcelik 그리고 KOTI 모형을 선정하였다. <식 6>의 분석시간, T는 15분을 채택하였다.



<그림 5> 지체도 조사지점

1) 저포화상태

본 소절에서는 지체도의 실측치와 모형을 통한 추정치간의 근접성을 비교한다. 그런데, 저포화상태에 국한된 실측자료를 사용하므로 결국 근접성평가는 저포화상태에서 모형의 비교라 할 수 있다. 모형의 평가는 실측치와 추정치 간의 회귀식과 RMS error를 척도로 하여 시행하였다.

<그림 6>은 지체도의 실측치와 각 모형의 추정치간의 비교를 보여주는 산포도이다. 각 그림에서 나타나는 대각선은 기울기가 1인 직선으로 산포도상의 점들이 이 직선에 가깝게 모여있을수록 해당 모형의 추정치가 실측치와 근접한다고 할 수 있다. 다시 말해서, 각 그림에 나타난 산포도의 회귀식 기울기가 1에 가까울수록 해당모형이 우수하다고 볼 수 있다. 각 모형에 대한 회귀식의 기울기는 <표 4>에 나타난다. Australian 모형이 0.98의 기울기가 가장 1에 가깝고, HCM, KOTI 그리고 Akcelik 모형의 순이다. 그외의 모형들은 부적절한 것으로 판단된다.

<표 4> 지체도의 실측치와 추정치의 비교

	모수값				회귀식		RMS
	n	m	a	b	기울기	R <sup>2</sup>	error*
HCM	2	4	0	0	1.03	0.87	6.93
Australian	0	12	0.67	1/600	0.98	0.85	6.86
Canadian	0	4	0	0	1.09	0.88	7.72
TRANSYT 8	-1	4	0	0	1.13	0.89	8.87
Akcelik	0	8	0.5	0	1.05	0.87	7.32
KOTI	0	3	0	0	1.04	0.88	6.63

$$*RMS\ error = \sqrt{\frac{\sum(\text{실측치} - \text{추정치})^2}{\text{표본수}}}$$

RMS Error는 실측치와 추정치의 근접성을 테스트하는 척도로 빈번히 사용되며, 값이 작을수록 해당 모형이 우수하다고 볼 수 있다. <표 4>로부터 KOTI 모형이 가장 작은 RMS Error를 보이며, Australian과 HCM 모형이

다음으로 큰 Error를 보인다.

이상의 분석으로 미루어 모형의 실측치에 관한 접근성의 측면에서는 KOTI, Australian, US HCM 모형들이 우수하다고 판단된다. 본 소절에서 이루어진 근접성의 평가는 저포화 교통상황을 대상으로 하였으며, 과포화상태의 평가는 다음 소절에서 논한다.

2) 과포화상태

과포화 교통상황에서는 신뢰성있는 지체도의 관측이 용이하지 못하므로 이론적인 합리성을 바탕으로 지체도 모형을 평가하기로 한다. 이미 언급한 바와 같이, 지체도 모형의 과포화부분은 Deterministic Overflow Delay와 일치함이 바람직하다. 이러한 Overflow Delay (D<sub>o</sub>)는 Input-Output Analysis에 의하여 Input이 Output을 초과한 양으로 표현할 수 있으며, 다음과 같다.

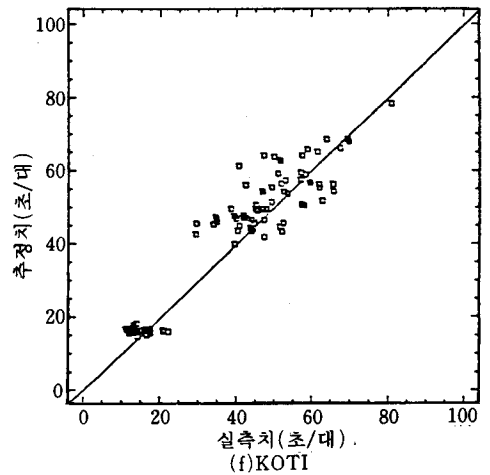
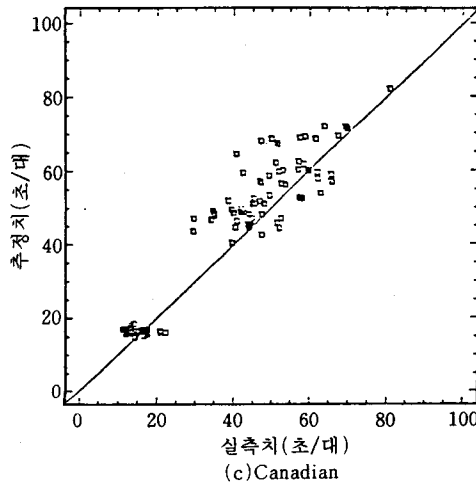
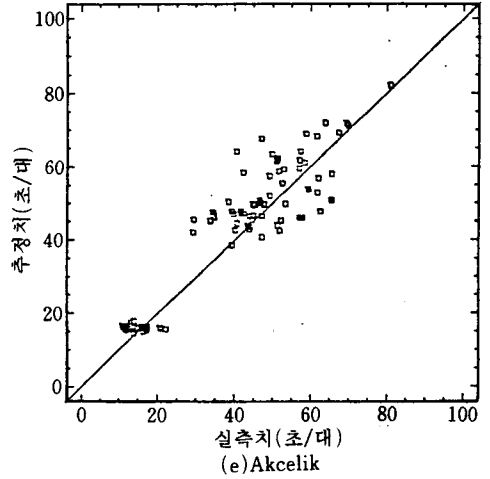
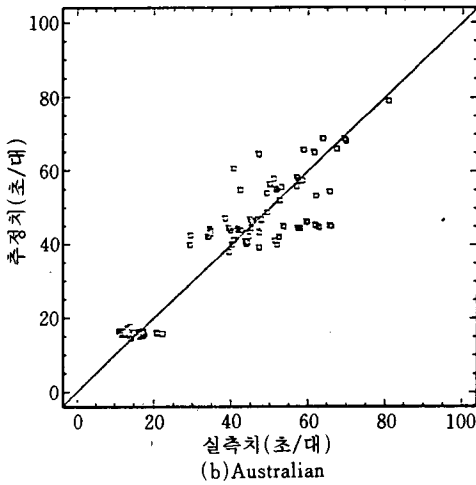
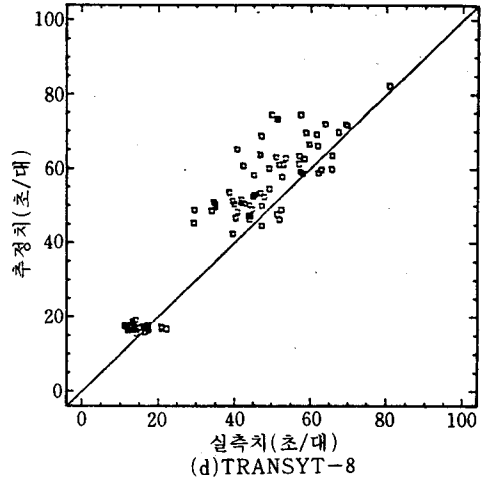
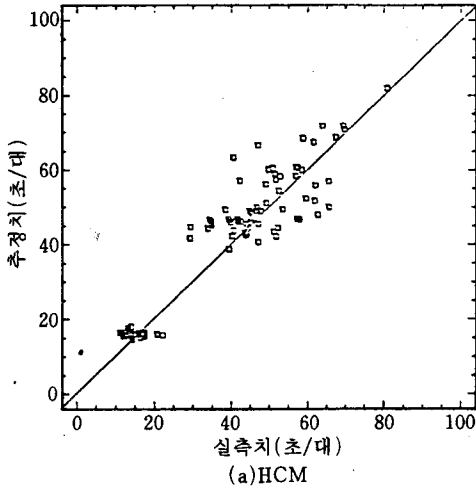
$$D_o = \frac{T}{2}(X-1)$$

여기서, T는 분석시간으로 15분으로 정하였으며, X는 교통량 - 대 - 용량의 비(volume-to-capacity ratio)로 과포화상태에서는 항상 1보다 크다.

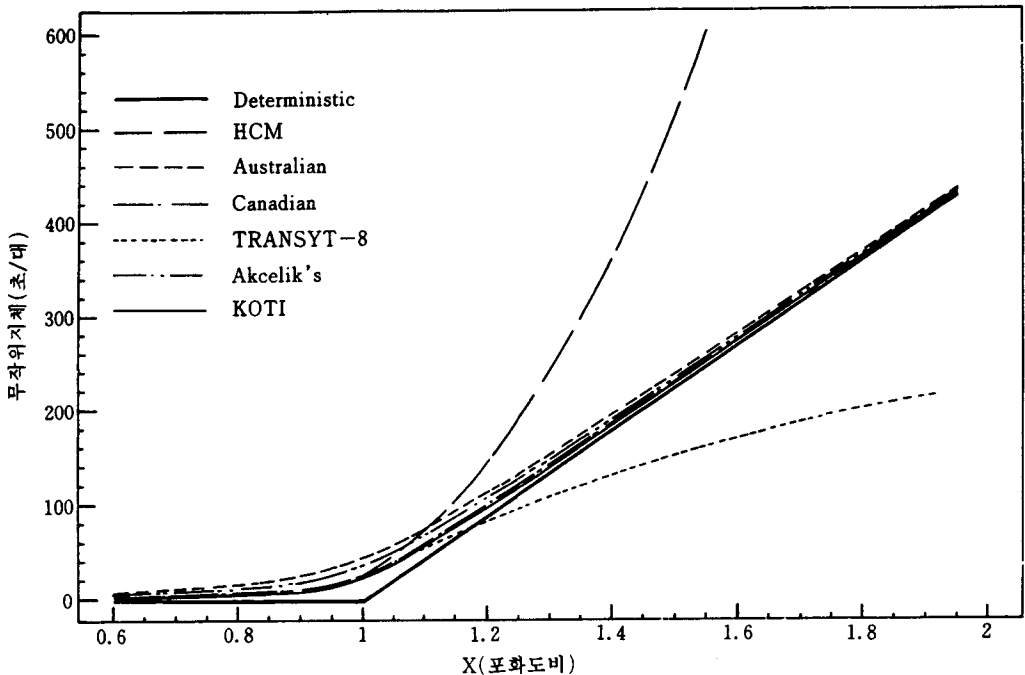
<그림 7>은 과포화상태에 대한 여러 지체도 모형의 추정결과를 보여준다. 이 그림에서 굵은 실선은 Deterministic Overflow Delay를 나타내는데, 각 모형의 결과치는 X가 증가함에 따라 이 실선에 접근해야 한다. 이 그림에서 HCM 모형은 과포화상태에서 지체도를 과대추정하며, TRANSYT-8 모형은 과소추정하여 바람직하지 못하다. 그외의 모형들은 과포화상황에서 합리적인 결과를 보인다.

3) 종합평가

여러가지 지체도모형들을 근접성과 합리성을 바탕으로 평가한 바 KOTI 모형과 Australian 모형이 가장 우수한 모형으로 판명되었다. 이들 모형은 평가단계에서 비슷한 결과를 보여 우열을 가리기가 용이하지 않다. 하지만, KOTI 모형은 Australian 모형에 비하여 간편성



〈그림 6〉각종 지체도모형에 대한 추정치와 실측치의 산포도



〈그림 7〉 과포화 상태에서 모형의 결과비교

면에서 장점이 있다. 〈표 4〉에서 KOTI 모형은 1개의 매개변수를 가진 반면, Australian 모형은 3개의 매개변수를 보유한다. Australian 모형은 교통량이 아주 적을 경우 무작위지체가 발생하지 않는다는 가정하에 매개변수 a와 b를 사용하여 모형을 조정하였다. 이러한 가정은 옳다고 볼 수는 있지만 매개변수 a와 b를 사용하지 않는 여타의 모형들에서 산출되는 무작위지체는 적은 교통량에서는 아주 미미한 양이므로 굳이 매개변수 a와 b를 추가하여 모형을 난해하게 할 필요는 없다고 본다. 지체도일반식(식 6)에서 매개변수 a와 b를 생략하면  $x_0$ 가 제거되므로 모형이 한결 간편해진다.

본 연구를 통해 제시된 KOTI 지체도모형을 다시 써보면 다음과 같다.

$$d = \frac{0.5c(1-u)^2}{1-ux} + 225 \left[ (x-1) + \sqrt{(x-1)^2 + 12x/Q} \right]$$

- 여기서, d=평균접근지체(초/대)
- c=주기(초)
- u=유효녹색 시간비
- x=포화도
- Q=용량(대/시)

IV. 결론

본 고에서는 신호교차로 분석에서 사용될 수 있는 지체도 산정모형을 현장자료를 바탕으로 개발하여 제시하였다. 기존의 지체도 모형들을 평가 검토하고 그 결과를 바탕으로 KOTI 지체도모형의 개발방향으로 삼았다. 지체도모형의 개발과 더불어 정지지체와 접근지체간의 관계를 고찰하였으며 지체전환모형을 제시하였다. 이러한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 내린다.

정지지체와 접근지체의 전환비율을 상수로 고정함은 옳지 못하며, 이 비율은 유효적색시

간 등과 같은 변수들의 함수로 표현되어야 한다. 실측자료를 이용하여 개발된 지체전환모형에 따르면 전환비율은 유효적색시간이 증가함에 따라 감소하게 되며, 신호주기가 증가함에 따라 역시 감소하는 추세를 보인다. 서울시 신호운영자료를 이용하여 서울시 전체 교차로의 평균 전환비를 추정한 결과 1.29의 값이 나왔는데, 이 값은 우연히 US HCM의 결과와 거의 일치한다. 지체도 전환시 각 신호현시마다 전환모형에 따라 양지체들을 전환함이 바람직하나 개략적인 분석에서는 평균전환비를 이용하여도 무방하리라 본다.

KOTI 지체도모형은 모형추정치의 실측 지체도에 대한 근접성면에서 기존의 유명 지체도모형들에 비하여 우수한 것으로 판단되었다. 그리고, 과포화상태에서 모형의 예측력 측면에서는 이론적인 근거하에 합리적인 결과가 산출되도록 모형개발과정에서 배려하였으며, 실용성 또한 강조되었다. KOTI 지체전환모형과 지체도산정모형은 본 연구의 결과물들로서 실제 신호교차로에 관련된 제반연구나 사업에 직접 사용될 수 있다.

본 연구에서는 독립교차로에서의 지체모형의 개발에 국한하였으며, 연동 교차로의 지체모형은 현재 연구중이다.

〈參 考 文 獻〉

1. Webster, F. V. "Traffic Signal Settings," Road Research Technical Paper No. 39, Her Majesty's Stationery Office, London, 1958.
2. Miller, A. J. "Settings for Fixed-Cycle Traffic Signals," Operations Research Quarterly 14, 1963, pp. 373-386.
3. Newell, G. F. "Approximation Methods for Queues with Application to the Fixed-Cycle Traffic Light," SIAM rev. v. 7, 1965, pp. 223-239.
4. TRB, Highway Capacity Manual, Special Report 209, TRB, 1985.
5. Akcelik, R. Traffic Signals: Capacity and Timing Analysis. Research Report ARR No. 123, Australian Road Research Board, 1981. (Fourth Reprint: 1989)
6. Teply, S. Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections, Institute of Transportation Engineers-District 7 and the University of Alberta, 1984.
7. Vincent, R.A., Mitchell, A.I., and Robertson, D.I., User Guide to TRANSYT Version 8. TRRL Report LR 888. United Kingdom: Transportation Road Research Laboratory, 1980.
8. Lin, F. "Applications of 1985 Highway Capacity Manual for Estimating Delays at Signalized Intersections," TRR 1225, TRB, 1989, pp. 18-23.
9. Teply, S. "Accuracy of Delay Surveys at Signalized Intersections," TRR 1225, TRB, 1989, pp. 24-32
10. 서채연 등. "TRANSYT-7F Delay Model에 의한 교차로 서비스 수준분석기준에 관한 연구." 대한교통학회지, 제 8권 제 2호, 1990.
11. 이철기. "신호등교차로에서의 지체예측에 관한 연구," 석사학위논문, 아주대학교, 1991.
12. Akcelik, R. "The Highway Capacity Manual Delay Formula for Signalized Intersections," ITE Journal, March 1988, pp. 23-27.
13. Hudle, V.F. "Signalized Intersection Delay Models-A Primer for the Uninitiated," TRR 971, TRB, ?, pp. 96-105.
14. Roupail, N.M. "Cycle-by-Cycle An-

alysis of Congested Flow at Signalized  
Intersections," ITE Journal, March 19

91, pp. 33-41.