

■ 論 文 ■

# 신호교차로 지체 산정 비교

## Comparison of Delay Estimates for Signalized Intersection

조 준 한

조 용 찬

김 성 호

(한양대학교 교통공학과 박사과정)

(한양대학교 교통공학과 석사과정)

(한양대학교 교통시스템공학과 부교수)

### 목 차

- I. 서론
  - II. 신호에 의한 지체 정의
  - III. 신호교차로 지체 모형
    - 1. 대기행렬모형
    - 2. 충격파 모형
    - 3. 정상상태 확률적 모형
    - 4. 시간중속 확률적 모형
    - 5. 거시적 시뮬레이션 모형
    - 6. 미시적 시뮬레이션 모형
  - IV. 분석 시나리오 작성
    - 1. 교통 조건
    - 2. 시뮬레이션 변수
  - V. 분석 결과
    - 1. 비포화 상태
    - 2. 포화 상태
  - VI. 결론 및 향후연구과제
- 참고문헌  
부록

Key Words : delay(control delay, approach delay, stopped delay), queue, shock wave, macro-deterministic simulation, micro-stochastic simulation

### 요 약

신호교차로의 용량 및 서비스수준을 분석하는데 지체를 기본적인 평가척도로 이용하고 있다. 지금까지 연구되어진 다양한 지체모형은 비포화와 포화상태를 고려한 교통조건하에서 교차로 신호운영전략 및 기하구조 개선에 중요한 척도로 이용되고 있다. 본 연구는 대기행렬모형, 충격파모형, 정상상태 확률적 모형, 시간중속 확률적 모형, 거시적 및 미시적 시뮬레이션 모형에 대한 지체를 비교·분석하였다. 분석결과를 보면, v/c ratio가 증가함에 따라 지체는 단조 증가형태를 띠고 있다. 비포화상태에서는 결정적모형과 확률적 모형의 지체 모두 비슷한 값으로 나타났으며, 포화상태에서는 1994 HCM모형을 제외하고는 모두 유사한 곡선의 패턴을 유지하면서 지체값은 어느정도 차이를 보이고 있다. 전통적인 대기행렬모형과 충격파모형은 이미 이론적으로 검증되었듯이 동일한 지체값이 나왔다. 정상상태 확률적 모형인 webster모형은 v/c=0.8이하에서는 2001 KHCM과 거의 동일한 값을 나타냈으며, v/c=1.0에 가까울수록 무한대로 증가하는 경향을 보이고 있다. 시간중속 확률적 모형은 결정적 포화상태모형을 접근선으로 하여 지체를 산정하기 때문에 점진적으로 단조증가 형태를 띠고 있다. 거시결정적 시뮬레이션인 TRANSYT-7F의 두 모형인 link-wise simulation과 step-wise simulation은 v/c=1.0까지는 2001 KHCM모형과 거의 동일한 값을 나타냈으며, v/c=1.0 이상에서는 step-wise simulation이 상대적으로 높게 나타났다. 미시확률적인 시뮬레이션인 NETSIM모형은 개별차량간의 상호작용과 교통량 변화에 따른 미시적인 운전자 행태를 모사하기 때문에 다른 모형에 비해 낮게 나타났다. 또한 TRANSYT-7F와 NETSIM을 비교하였을 때 지체값의 차이가 크게 나타난 것은 차량 행태 알고리즘이 다르기 때문에 이를 비교한다는 것은 큰 의미가 없을 것으로 판단된다.

In this paper, the primary objective of the research are to review the methods currently available for estimating the delay incurred by vehicles at signalized intersections. The paper compares the delay estimates from a deterministic queueing model, a model based on shock wave theory, the steady-state Webster model, the queue-based models defined in the 1994 and 2001 version of the Highway Capacity Manual, in addition to the delays estimated from the TRANSYT-7F macroscopic simulation and NETSIM microscopic simulation. More especially, this paper is to compare the delay estimates obtained using macroscopic and microscopic simulation tools against state-of-the-practice analytical models that are derived from deterministic queueing and shock wave analysis theory.

The results of the comparisons indicate that all delay models produce relatively similar results for signalized intersections with low traffic demand, but that increasing differences occur as the traffic demand approaches saturation. In particular, when the TRANSYT-7F and NETSIM are compared, it is highly differences as approach for traffic condition to over-saturation. Also, the NETSIM microscopic simulation is the lowest delay estimates among the various models.

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구번호 (R01-2003 -10764-0)에 의해 수행되었음

### I. 서론

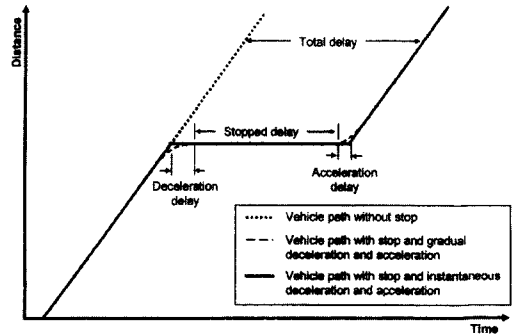
신호교차로의 용량 및 서비스수준을 분석함에 있어 지체(delay)는 가장 널리 이용되고 있는 효과척도이다. 이는 지체가 정량적인 값으로 관측이 가능하고, 경제적인 가치로의 전환이 가능하며, 누구나 쉽게 수치에 대한 이해가 빠르기 때문이다. 따라서 교차로에서의 지체는 현실성 있게 보다 정확히 예측이 되어야 한다. 특히 포화상태에서 정확하게 대기행렬길이, spillback 현상 등이 고려되어야 한다. 그러나 지체의 파라미터를 산정하는 것이 쉽지는 않다. 신호교차로에서 유발되는 지체를 산정하기 위해 이용되는 많은 지체모형들은 거시적(macroscopic)/미시적(microscopic), 결정적(deterministic)/확률적(stochastic) 관점에서 그 값들에 대한 일관성을 평가하는데는 상대적으로 많은 연구가 되지 않았다.

1960년을 전후하여 Webster(1958), Miller(1963), Newell(1965) 등에 의하여 대기행렬 이론을 바탕으로 신호교차로 지체모형들이 처음 제시되었다. 그 후 이 분야의 연구는 꾸준히 계속되어 오늘날 상당한 수의 지체모형들이 개발되어 신호교차로 분석에 이용되고 있다. 대표적인 지체모형으로는 대기행렬모형, 충격파, HCM(미국도로용량편람), KHCM(한국도로용량편람), TRANSYT-7F 모형 등을 들 수 있다.

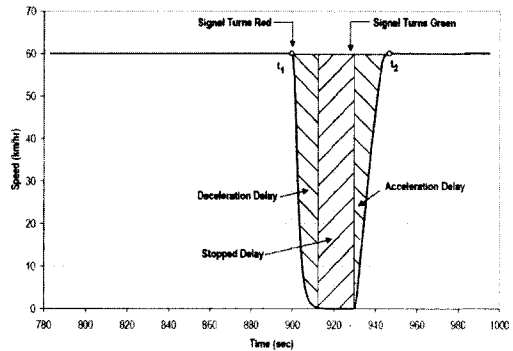
이 모형들은 v/c ratio가 증가함에 따라(특히, 포화상태) 다소 상이한 결과를 내므로 실무에서 사용할 모형은 신중히 선택해야 함은 두말할 나위가 없다. 따라서 이러한 모형들을 내포하고 있는 기본 가정을 중심으로 분류하여 각각의 상호비교를 통해 지체변화의 일관성에 대한 평가가 필요하다.

본 연구의 목적은 대기행렬모형, 충격파 모형, 정상상태(steady state) 확률적 모형, 시간종속 확률적 모형, 거시적 및 미시적 교통류 시뮬레이션 모형에 대한 지체를 v/c ratio의 변화에 따라 비교·분석하여 지체들간의 일관성을 평가하고자 한다. 이를 평가하기 위해서는 우선 신호교차로에서의 차량 지체에 대한 배경지식과 다양한 지체모형의 기본가정 및 이론이 기본적으로 뒷받침되어야 한다. 이러한 모형으로부터 지체 산정의 일관성에 대한 평가는 비포화화 및 포화상태를 고려한 교통조건하에서 신호교차로의 신호운영전략이나 기하구조개선 등에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

### II. 신호에 의한 지체 정의



〈그림 1〉 지체의 정의



〈그림 2〉 신호교차로에서의 속도 변화추이

〈그림 1〉과 같이 차량이 경험하는 총 지체(total delay)는 감속지체, 정지지체, 가속지체로 분류한다. 여기서의 총지체는 바로 접근지체(approach delay)를 말한다. 이러한 정의를 설명하기 위해 〈그림 2〉를 보면 적색시간이 시작할 때부터 다시 녹색시간이 켜진 후 희망하는 속도까지 가속하기 위해 신호교차로에서 정지하고 있는 차량의 속도변화 추이를 나타낸 것이다. 이를 보면 정지지체는 차량이 완전히 정지했을 때 유발되는 지체이고, 감속 및 가속지체는 감속 및 가속을 할 때 차량의 움직임에 의해 유발되는 지체이다.

차량이 한 구간을 통과하는데 소요되는 시간은 그 구간의 순행시간(cruising time)과 교차로 접근지체시간의 합이다. 순행시간은 주행시간(running time)에서 교차로에 의한 감속 및 가속시간을 뺀 시간이다. 따라서 총 통행시간은 주행시간과 정지지체의 합, 즉 순행시간과 접근지체의 합과 같다(도철웅, 2004).

따라서 신호교차로에서의 제어지체는 차량이 교차로를 횡단하는 동안 경험하는 실제 통행시간과 신호제어 없을 때 경험하는 통행시간의 차이로 계산할 수 있다.

또한 1992 KHCM모형, 1994 HCM모형까지는 신

호교차로 용량 및 서비스수준에 대한 효과적도(MOE)로 정지지체(stopped delay)를 사용하였는데, 1997 HCM모형, 2001 KHCM모형부터는 제어지체(control delay)을 사용한다. 제어지체는 신호제어로 인해 차로 군이 속도를 줄이거나 정지함에 따른 지체로서, 감속이나 정지함이 없을 때의 통행시간과 비교한 통행시간 증가분이다. 제어지체는 균일지체(uniform delay), 증분지체(incremental, overflow, random delay) 및 추가지체(initial queue delay)로 구성된다. 즉, 접근지체와 추가지체의 합으로 나타낼 수 있다. 여기서의 추가지체(initial queue delay)는 분석기간 시작 전에 대기 차량이 남아 있으면 이 대기차량이 방출되는 동안 분석기간에 도착한 차량이 감당해야 할 추가적인 지체를 말한다.

### III. 신호교차로 지체 모형

신호교차로의 용량과 서비스 수준 결정을 위한 지체 모형의 연구는 1960년대부터 비중있게 연구가 진행되어 왔으며, 최근에는 포화상태에서의 지체산정에 대해 많은 연구가 진행되고 있다.

Allsop(1972), Newell(1982), Hurdle(1984)은 일반적인 신호교차로 평균지체 예측모형을 세부적으로 언급하였으나 교통량 변화에 따른 지체의 변동(variation)을 정량화하지는 못하였다.

Akcelik는 1981년에 증분지체 추정모형을 토대로 일반모형을 제시하였으며, 1988년에는 1985 HCM, 1981 Australian, 1984 Canadian 도로용량 지체모형을 비교하였다. 또한 Akcelik et al(1993)은 포화상태의 추가지체를 고려한 다양한 교통량 변화에 따른 신호교차로 지체모형을 제안하였다.

Fambro et al(1997)는 기존 지체모형들의 한계를 설명하고 실측값과 시뮬레이션 값을 통해 이러한 문제점을 개선할 수 있는 방법론을 제시하였다. Dion et al (2004)은 비포화·포화상태를 구분하여 전통적인 지체모형과 미국, 호주, 캐나다 도로용량편람모형 및 INTEGRATION 지체모형을 비교하였다.

김영찬과 이청원(1991)은 정지지체와 접근지체의 관계를 고려하여 지체전환 모형을 제시하였으며 기존 지체모형에 대해 현장자료를 바탕으로 비교검토하고 그 결과를 바탕으로 새로운 지체모형을 개발하였다. 하동익(1997)은 정상상태(steady-state)를 가정한 기존

모형의 한계를 극복하기 위해 신호주기내의 시간대별 교통량 변화를 반영할 수 있는 time-dependent한 지체분석방법론을 제시하였다.

이러한 연구의 성과로 현재 많은 지체 모형들이 개발되었으며 이들을 크게 나누면 다음과 같다.

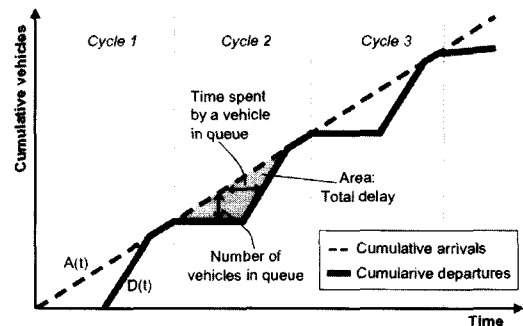
### 1. 대기행렬모형

전통적으로 대기행렬모형(deterministic queueing model)은 녹색시간동안 서비스 받는 차량수가 주기당 도착하는 차량수보다 큰 신호교차로에서의 지체를 산정한다. 이 모형은 높은 서비스율을 제공하는 시스템으로부터 서비스를 받고자 도착하는 차량에 대해 균일한 흐름으로 교차로를 접근하지만 상충하는 이동류의 교통량을 수용하기 위해서 서비스 받고자 하는 차량은 주기적으로 정지해야 한다.

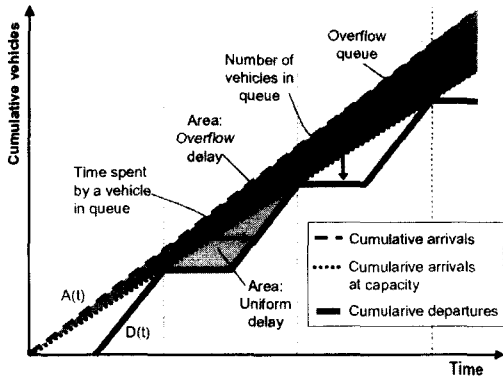
비포화상태의 대기행렬모형은 <그림 3>처럼 누적 출발량과 도착량을 가지고 표현한다. 출발량과 도착량 곡선 사이의 영역은 신호주기내 교차로를 통과하는 모든 차량에 의해 발생하는 총 균일지체를 나타낸다. 균일한 도착교통량과 서비스시간을 가정하면(예: D/D/1 대기행렬 시스템 경우) 식(1)과 (2)는 교차로를 통과하기 위해 시도하는 차량에 의해 매 신호주기동안 유발되는 평균 균일지체를 나타낸 것이다. 식(2)는 HCM 및 KHCM의 균일지체( $d_1$ ) 식과 동일하다.

$$d = \frac{r_e^2}{2C} \left( \frac{s}{s-v} \right) \tag{1}$$

$$d = \frac{C \left( 1 - \frac{g_e}{C} \right)^2}{2 \left( 1 - X \frac{g_e}{C} \right)} \tag{2}$$



<그림 3> 비포화 상태의 누적 출발-도착 곡선



〈그림 4〉 포화 상태의 누적 출발-도착 곡선

포화상태에서의 대기행렬모형은 교차로에 도착하는 차량수가 교통신호에 의해 제공받는 차량수를 초과하게 된다.

〈그림 4〉에서 보듯이 잔여하는 대기행렬이 커지게 된다. 과포화 지체(overflow delay)는 용량상태에서 서비스 받는 도착교통량 곡선과 실제 도착하는 곡선 사이의 영역을 의미한다. 이런 경우에서, 식(3)과 식(4)은 분석주기 T동안 방출되는 차량 수에 대한 평균지체를 표현된다.

$$d_0 = \frac{3600T}{2} \left( \frac{v}{c} - 1 \right) \tag{3}$$

$$d_0 = 900T \left( (X-1) + \sqrt{(X-1)^2} \right) \tag{4}$$

2. 충격파 모형

교통류를 유체와 같은 것으로 보고 이에 대한 수리역학적인 원리를 적용시킨 것이 교통류의 충격파이다. 충격파는 밀도와 교통량 변화의 전파운동을 말한다.

식(5)는 유체역학이론을 응용하여 제안되었는데, 교통량(volume), 밀도(density), 속도(speed)사이의 관계를 정의하였다. 식(5)를 사용하여 교통특성에서 변화되는 속도(충격파)가 도로를 따라 전파되는 것을 나타내고 있다.

$$v_i = k_i \cdot u_i \tag{5}$$

$$SW_{ij} = \frac{v_j - v_i}{k_j - k_i} \tag{6}$$

Michalopoulos et al(1981)은 대기행렬 길이를

제약조건으로 하여 교차로 총지체를 최소화하는 실시간 신호제어 알고리즘을 개발하였는데 여기에 충격파 이론을 적용하였다.

Dion et al(2004)은 신호교차로의 충격파 지체공식을 다음과 같이 정의하였다. 지체는 교통신호운영에 의해 발생한 증가분의 통행시간으로 표현하기 때문에 하나의 신호 주기 내에서 유발되는 총 지체는 교통신호가 있는 상태에서의 총 통행시간과 교통신호가 없는 상태에서의 총 통행시간의 차이를 가지고 계산할 수 있다. 이는 식(7)과 같다.

$$D = TT_{u(signals)} - TT_{u(no signals)} = 3600 \left[ \sum_{i=A,B,C} A_i k_i - \sum_{i=A,B,C} A_i k_c \right] \tag{7}$$

마지막으로, 식(8)은 교통신호 운영 때문에 개별차량에 의해 발생하는 평균 총 지체를 계산하기 위한 것이다.

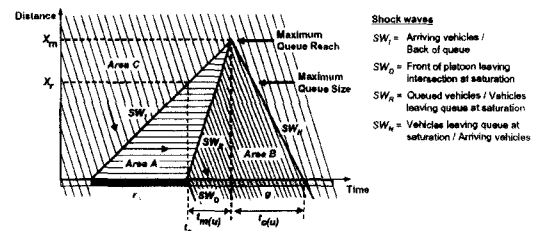
$$d = 3600 \frac{|x_{m(u)}|}{2 \cdot v \cdot C} \cdot [r_e \cdot (k_j - k_d) + (t_{m(u)} + t_{c(u)}) \cdot (k_d - k_a)] \tag{8}$$

$$x_{m(u)} = \frac{1}{3600} \left[ \frac{-v \cdot r_e \cdot s}{s(k_j - k_a) - v(k_j - k_d)} \right] \tag{9}$$

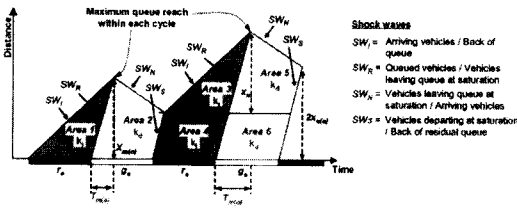
$$t_{m(u)} = \frac{v \cdot r_e \cdot (k_j - k_d)}{s(k_j - k_a) - v(k_j - k_d)} \tag{10}$$

$$t_{c(u)} = 3600 \left[ \frac{x_{m(u)}}{SW_N} \right] = 3600 |x_{m(u)}| \cdot \frac{k_a - k_d}{v - s} \tag{11}$$

충격파 이론은 포화상태에서 접근지체(approach delay)를 산정하는데도 사용한다. 이러한 경우 지체산정은 〈그림5〉에서 보여주듯이 비포화 상태의 경우와



〈그림 5〉 비포화상태의 충격파 개념도



〈그림 6〉 포화상태의 충격파 개념도

유사하다. 〈그림 6〉은 포화상태에서 처음 두 주기내에 대기행렬의 공간적, 시간적 변화를 충격파를 통해 보여 주고 있다. 충격파인  $SW_i$ ,  $SW_R$ ,  $SW_N$ 은 〈그림 5〉에서 제시한 충격파와 동일하게 생성된다. 그러나 이러한 경우 포화상태에서 적색시간 후에는 완전히 정지된 차량을 포함한 영역의 뒷부분에 위치하는 새로운 충격파  $SW_S$ 가 생성한다.

〈그림 6〉에서 영역 1, 3, 4는 모두 접근혼잡밀도 (approach jam density)에서 대기하고 있는 차량을 포함한다. 영역 2, 5, 6은 방출 밀도(discharge density)와 일치하는 밀도 및 포화유율에서 움직이는 차량에 의해 생성되어진다. 이러한 관측결과를 기초로 하여 영역 3, 5는 영역 1, 2와 동일하다. 또한 영역 4, 6의 면적을 알고 있다면 접근하는 차량에 의해 유발되는 지체산정은 단지 주기의 수만으로 구할 수 있다.

비포화상태와 마찬가지로, 포화상태에서 식 (12)와 (13)은 교통신호가 있는 경우와 없는 경우에 통행하는 차량에 의해 유발되는 총 통행시간을 산정하기 위해 〈그림 6〉으로부터 구한 것이다.

$$TT_{o(\text{signals})} = N \left\{ \left( \frac{x_{m(o)}}{2} \right) r_e \cdot k_j + \left( \frac{x_{m(o)} + x_{c(o)}}{2} \right) g_e \cdot k_d \right\} + \sum_{i=1}^{N-1} i \cdot x_{c(o)} \cdot (r_e \cdot k_j + g_e \cdot k_d) \quad (12)$$

$$TT_{o(\text{no signals})} = N \cdot k_a \left\{ \frac{x_{m(o)}}{2} r_e + \left( \frac{x_{m(o)} + x_{c(o)}}{2} \right) g_e \right\} + \sum_{i=1}^{N-1} i \cdot x_{c(o)} \cdot (r_e + g_e) \cdot k_a \quad (13)$$

$$x_{c(o)} = \left( \frac{C \cdot (v-s)}{3600k_j} \right) \quad (14)$$

마지막으로 포화상태의 평균지체는 식 (12)와 (13) 사이의 차이를 분석주기 T내에 출발차량 수로 나누어

계산하게 된다.

$$d_a = N \left\{ \frac{x_{m(o)}}{2} r_e \cdot (k_j - k_a) + \frac{(x_{m(o)} + x_{c(o)})}{2} g_e \cdot (k_d - k_a) \right\}$$

$$d_b = \sum_{i=1}^{N-1} i \cdot x_{c(o)} \{ r_e (k_j - k_a) + g_e (k_d - k_a) \}$$

$$d_c = s \cdot g_e \cdot N/3600$$

$$d = (d_a + d_b) / d_c \quad (15)$$

충격파이론과 대기행렬이론사이의 주된 차이는 교차로에 대기하고 있는 차량들의 형태에 있다. 대기행렬이론은 차량들이 교차로 정지선에 수직적(vertical)으로 쌓여있다고 가정하고 있다. 이는 정상적인 신호대기 차량의 형태를 취하지 않고 있어 차량의 공간적인 위치는 알 수 없지만 대기하고 있는 차량대수는 알 수 있다. 따라서 전체적인 대기행렬 형성과 차량소실 과정에 있어서의 지체산정에는 편기(bias)가 없다. 한편 충격파 모형은 차량이 수평적(horizontal)으로 대기하고 있다고 가정하고 있다. 여기서 두 모형의 차이점을 언급할 때 한 가지 유의할 점이 있다. 대기행렬이론에서의 수직적 대기행렬은 〈그림 3〉, 〈그림 4〉의 수직축에서 볼 수 있듯이 누적차량대수로 표기할 수 있고, 평균차랑길이를 반영하여 접근로 상에서의 대기행렬길이로도 표현할 수 있다. 이 때에는 더 이상 수직적인 대기행렬이론이 아니므로 개념이해에 혼동이 없어야 한다.

또한 충격파는 보다 더 현실적인 대기행렬 행태를 표현할 수 있고, 대기행렬모형에서는 얻을 수 없는 최대 대기행렬의 도착지점을 구할 수 있다. 이와 관련된 연구로, Hurdle and Son(2001)은 이 대기행렬모형과 충격파모형에 대해 고속도로 혼잡구간을 대상으로 교통류 분석을 하였다. 이 논문에서는 이 두 모형에서 구한 통행시간과 지체가 동일하게 나온 것을 예제를 통해 보여주고 있다.

### 3. 정상상태 확률적 모형

대기행렬과 충격파의 지체모형은 모두 균일도착을 가정한 반면, 확률적 지체모형은 차량 도착의 임의성을 고려하여 식을 정립하였다. 기본적으로 가장 널리 인용되고 있는 모형이 Webster 모형이다. Webster (1958)

는 poisson 도착율과 uniform 출발차두시간 간격을 가정하여 지체모형을 제안하였다.

$$d = \frac{C \left(1 - \frac{g_e}{C}\right)^2}{2 \left(1 - X \frac{g_e}{C}\right)} + \frac{X^2}{2v(1-X)} - 0.65 \left(\frac{C}{v^2}\right)^{1/3} X^{2+5\frac{g_e}{C}} \quad (16)$$

이 모형은 식 (16)에서도 표현했듯이 3개의 식으로 구성되어 있다. 첫째항은 균일한 도착과 출발을 가정한 경우의 지체로서, 대기행렬모형의 식(2)와 같다. 두번째 항은 임의도착형태를 고려한 추가적인 지체를 나타낸 것이다. 세 번째 항은 시뮬레이션 결과와 일관되게 하기 위해서 전체 예측된 지체의 5-15%정도 감소시키는 경험적인 요소이다.

정상상태 확률적 모형은 도착교통량이 교차로 용량을 초과하면 계산이 불가능하다. 또한 도착교통량이 교차로 용량에 이르면 지체는 무한대로 발생한다고 예측한다. 그러나 실제에 있어서는 일반적이거나 용량을 초과한 수요가 발생할 수 있으며, 무한대의 지체 역시 존재하지 않는다.

4. 시간종속 확률적 모형

위에서 설명한 확률적 지체 모형의 주된 결과는 교통수요가 포화상태에 인접할 때(V/C=1.0) 무한대로 증가하는 성격을 띠고 있다. 따라서 Akcelik(1988), McShane과 Roess(1990), Fambro와 Rouphail(1997)는 이러한 문제점을 보완하는 연구를 수행하였다. <그림 7>은 다양한 수요상태에서 이론적으로 행하여지는 지체산정모형을 제시한 것이다. 낮은 V/C

ratio하에서 이 모형은 일정한 균일도착을 가정한 대기행렬모형 지체에 의해 생성된 것과 유사한 지체가 나타난다. 수요가 증가함에 따라 임의 도착차량에 의한 지체 비중이 크게 나타나고, 한 주기 내에서 대기하고 있는 차량은 모두 소멸할 수 없다. 그리고 이 모형은 V/C ratio가 1.0에 근접할 때 Webster모형처럼 무한대로 가는 경향은 없지만 식(3)의 결정적 포화상태모형에 근접하게 되는 값으로 대신 산출한다. 이러한 지체모형이 Fitted time-dependent delay model이라고 한다.

이러한 접근방법은 이론적으로 정당한 기본원리에 의한 것은 아니지만 경험적인 근거에 의해 합리적인 결과를 도출하였으며, 이를 토대로 미국의 HCM (Highway Capacity Manual), 호주의 ACG(Australian Capacity Guide), 캐나다의 CCG(Canadian Capacity Guide), 한국의 KHCM(Korean Capacity Manual) 등의 신호교차로 용량 및 서비스수준의 지침서로 발전하게 되었다.

본 논문은 1992 KHCM모형, 1994 HCM모형, 2000 HCM모형, 2001 KHCM모형을 비교제시하고자 한다.

$$d = d_1 \cdot f_{PF} + d_2 + d_3 \cdot f_c \quad (17)$$

$$d_1 = \frac{0.5C \left(1 - \frac{g_e}{C}\right)^2}{1 - \frac{g_e}{C} \cdot \min(X, 1.0)} \quad (18)$$

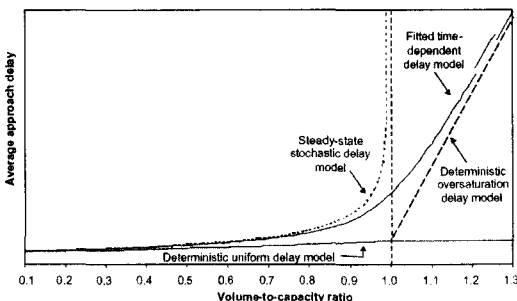
$$d_2 = 900X^n T \left[ (X-1) + \sqrt{(X-1)^2 + \frac{mkl}{cT} X} \right] \quad (19)$$

$$f_{PF} = \frac{(1-P)f_p}{1 - \frac{g_e}{C}} \quad (20)$$

<표 1> 도로용량편람 지체모형 변수

모형	parameter						
	$f_c$	$n$	$m$	$k$	$I$	$T$	$f_{PF}$
1992 KHCM	0	0	12	n/a	n/a	15분	1.0
1994 HCM	0	2	4~16	n/a	n/a	15분	1.0
2000 HCM	1	0	8	0.5	1.0	다양	1.0
2001 KHCM	1	0	4	n/a	n/a	다양	1.0

주) 1. 1992 KHCM모형에서는 분모의 min(X,1) 대신 X를 사용함.  
 2. 2001 KHCM모형은 k, i에 대해 언급을 하지 않았지만, 고정 시간 독립교차로에서 2000 HCM모형의  $m \cdot k \cdot i$  값은 4로 나타난다. 따라서 2000 HCM모형과 2001 KHCM모형은 같음.  
 3.  $f_{PF}$  경우, KHCM은 표를 이용하며, HCM은 식(20)을 이용함.



<그림 7> 시간종속 확률적 모형의 개념도

### 5. 거시적 시뮬레이션 모형 (TRANSYT 모형)

거시적 시뮬레이션 모형은 개별차량의 움직임이 아닌 링크 성능함수(volume-delay function)나 차량군(platoon)을 고려하여 지체를 산정한다. 특히 TRANSYT모형은 차량군내의 균일분포를 가정한 다른 거시적 시뮬레이션 모형과 달리 차량군 분산 알고리즘을 적용하였기 때문에 시간단계(time step)로 교통량에 따라 차량군의 퍼짐 정도를 달리하여 교통류를 분석할 수 있다.

TRANSYT모형은 버전에 따라 다른 지체모형을 사용하고 있다. 본 연구에서는 2000 HCM의 지체모형을 적용하고 있는 TRANSYT-7F release 10.1을 사용하였다. 2000 HCM모형과의 차이점을 본다면, TRANSYT-7F release 10.1의 제어지체는 2000 HCM모형과 동일하게 균일지체, 증분지체, 추가지체(initial queue delay)로 구성되어 있는데, TRANSYT에서는 단지 균일지체와 임의지체로 나타난다. 균일지체에는 추가지체(initial queue delay)가 포함되고, 임의지체는 증분지체(incremental delay)를 나타낸다.

TRANSYT모형에서의 균일지체는 내부 모듈인 uniform queue profile에 의해 계산되어지며, 식은 다음과 같다.

$$d_1 = \frac{\sum_{t=1}^N m_t}{N_s} \quad (21)$$

$$m_t = \max \{ (m_{t-1} + q_t - s_p), 0 \}$$

TRANSYT모형은 release 8이 나오면서 포화상태 일 때 현실을 제대로 반영하지 못한 이전의 문제점을 개선하기 위해 step-wise simulation 모형이 개발되었다. step-wise simulation은 정지선에 대기차량이 수직으로 쌓이는 것을 가정한 기존의 link-wise simulation 모형과 달리, 교통류 패턴이 하류부에서

<표 2> TRANSYT-7F의 두 시뮬레이션 모형

구분	전통적인 모형	새로운 모형
simulation	link-wise	step-wise
대기행렬	vertical queue	horizontal queue
모형 적용성	undersaturation	oversaturation
최적화 목적함수	delay & progression	throughputs & queue spillback(주)

주) 전통적인 모형의 최적화 목적함수 외에 추가적으로 개선된 목적함수임.

상류부로 진행되는 수평적 대기행렬 개념이 적용되어 queue spillback효과를 포함한 포화상태의 교통상황을 모델링할 수 있다. 조준한(2002)은 이 두 모형을 <표 2>와 같이 정리하였다.

### 6. 미시적 시뮬레이션 모형 (NETSIM 모형)

미시적 시뮬레이션 모형은 개별차량의 움직임을 추적할 수 있다. 차량 궤적은 일반적으로 차량추종(car-following), 차로변경(lane changing), 간격수락(gap acceptance) 모형에 의해 형성된다. 이러한 모형은 가상적인 교통조건, 매우 낮은 비포화 상태부터 매우 높은 과포화상태까지 분석이 가능하다.

개별차량의 움직임을 궤적으로 나타낼 수 있기 때문에 미시적 모형은 시뮬레이션한 것과 자유상태(free-flow)의 통행시간을 비교하여 다른 교통특성과 함께 통행하는 동안 개별차량에 의해 유발되는 지체를 결정할 수 있다. 그러므로 2001 KHCM모형과 같은 수리모형의 지체식이나 복잡한 교통상황의 평가를 산정하기 위해 요구되는 특정한 공식은 존재하지 않는다.

본 연구에서는 미시적 교통류 시뮬레이션인 NETSIM version 5.0을 사용하여 지체를 평가하고자 한다. 지체는 각 링크별 개별차량에 의해 계산되어지고 차량이 시뮬레이션 된 통행시간과 자유속도에서 경험한 차량의 통행시간의 차로 산정한다.

$$d = \int_{t=0}^T \left[ \frac{u_f - u(t)}{u_f} \right] dt \quad (22)$$

또한 미시확률적인 모형인 NETSIM은 차량행태모형의 파라미터에 따라 상당한 결과값의 차이를 보인다. 따라서 이에 대한 사전작업이 필요하다. 본 연구에서는 교차로에서 신호제어로 인해 발생하는 지체만을 다루기 때문에 주행 중에 발생하는 차량상호지체(vehicle interaction delay)는 포함되지 않는다. 차량상호지체는 동일방향으로 진행되는 차량들의 상호 상충작용에 의해 개별차량이 자유속도로 진행하지 못해 발생하는 지체로서, 본 연구에서는 차로변경으로 인한 가·감속은 제외하였다. 이러한 부분을 고려하여 분석 기하구조를 설정하고자 한다. 그리고 차량행태모형(차량추종, 차로변경, 간격수락)의 파라미터 보정(parameter calibration)에 대한 관련문헌을 살펴본 바, Wang(1999)은 FRESIM과 달리 주로

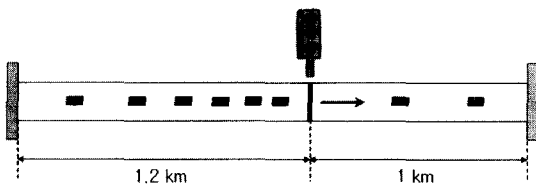
단속류를 분석하는 NETSIM은 차량행태모형의 파라메터를 기본값으로 사용하여도 결과값에 대한 민감도가 미비하다고 언급하였다.

### IV. 분석 시나리오 작성

다양한 모형으로부터 지체산정의 일관성 여부를 평가하기 위해 <그림 8>과 같은 동일한 네트워크에서 수행하였으며 다양한 교통상황을 고려하기 위해 v/c ratio를 0.1~1.4까지 0.1씩 증가시켜 분석하였다.

#### 1. 교통 조건

네트워크 내에는 승용차로만 구성되며 링크내에서의 자체적인 발생교통량과 주차활동은 없다고 가정하였다. 분석 네트워크는 1차로로서, 지형은 평지이며 분석대상 링크는 신호제어기부터 1.2km까지의 구간이다. 신호 제어는 고정시간 신호제어기로서 주기는 60초, 유효녹색시간(effective green interval)은 30초, 황색시간은 3초로 운영된다.



<그림 8> 분석 시나리오의 기하구조

#### 2. 시뮬레이션 변수

지체를 정확히 비교하기 위해서는 앞 절에 소개한 지체공식에 포함되어 있는 변수들을 동일하게 적용시켜야 한다. 본 시나리오에서는 포화교통유율은 차선당 1800 대/시, 자유속도는 60 km/h, 분석시간(T)은 15분으로 설정하였다.

### V. 분석 결과

4장에서 제시한 지체모형의 개념 정의가 조금씩 다르기 때문에 이를 먼저 정립하고자 한다. 본 논문에서 신호에 의해 발생하는 지체를 signal delay로 정의하고, 여기에는 접근지체(approach delay)와 제어지체

<표 3> signal delay의 개념 정의

signal delay	approach delay	대기행렬모형, 충격파모형, 파포화지체, webster모형, 1992KHCM <sup>(*)</sup> , 1994HCM <sup>(*)</sup>
	control delay	2001KHCM, T-7F(link-wise), T-7F(step-wise), NETSIM

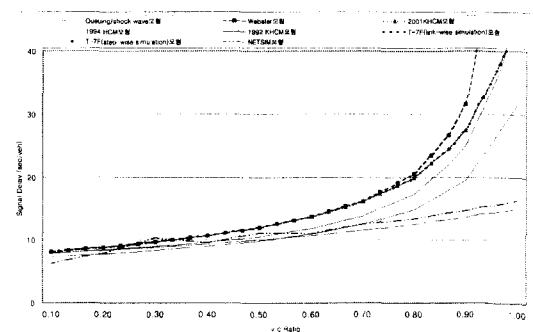
주) 정지지체에 1.32를 곱하여 접근지체로 환산함.

(control delay)를 포함한다. 자세한 내용은 <표3>과 같다.

#### 1. 비포화 상태

전체적으로 낮은 v/c ratio에서는 모든 지체모형이 비슷한 값을 가지며, v/c ratio가 높아짐에 따라 조금씩 차이를 보이고 있다.

대기행렬모형과 충격파모형은 이미 기존 논문에서 검증되었듯이 지체값이 동일하게 나왔으며, 여러 모형 중 가장 낮게 나타났다. 이는 두 모형이 기본적으로 공통적인 가정을 가지고 있기 때문이다. 첫째, 도착차량은 항상 일정한 비율로 균일하다는 것이다. 이런 결과로 신호교차로에 형성되는 대기행렬 차량은 항상 적색 신호가 켜지기 전에 완전히 소멸된다. 현실적으로 발생하는 차량의 임의성(randomness)이 없다고 가정하였다. 둘째, 모든 차량은 순간적으로 가·감속을 하는 것으로 가정한다. 대기행렬모형의 <그림 1>에서 알 수 있듯이 모든 순간적인 가·감속지체를 동등한 정지지체로 바꿀 수 있으며, 교차로를 통과하는 차량에 의해 유발되는 총지체를 직접적으로 구할 수 있다. 충격파모형에서는 <그림 5>에서 알 수 있듯이 개별차량의 궤적을 나타내는 곡선과 출발지에서 목적지로 이동할 때 궤적에서의 기울기 사이에 일정한 간격으로 표현이 가능하므로 이에 따른 교차로에서 발생하는 지체를 구할 수



<그림 9> 비포화상태의 지체 산정



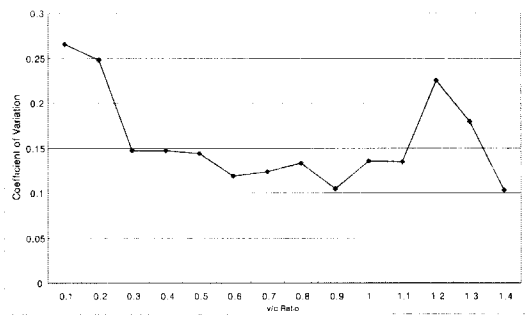
있다. 따라서 식(2)와 식(8)은 동일한 균일지체를 나타낸다.

도로용량편람모형을 살펴보면, 우선 2000 HCM모형과 2001 KHCM모형은 고정신호 독립교차로에서는 동일한 식으로 나타나므로 이 후부터는 "2001 KHCM" 모형만 언급하고자 한다. 1992 KHCM, 1994 HCM, 2001 KHCM모형은 v/c ratio가 증가할수록 지체도 함께 증가하는 경향을 띠고 있으며, 1992 KHCM과 1994 HCM 모형이 2001 KHCM모형보다 지체가 낮게 나타났다. 이런 결과가 나오는 이유는 <표1>의 parameter에서 알 수가 있다. 추가지체( $d_3$ )에 대한 조정계수인  $f_c$ 가 0인 1992 KHCM, 1994 HCM모형은 분석시작 전 포화상태의 대기행렬 존재에 대해 고려하지 못한다. 또한 1994 HCM모형에서 임의도착패턴 계수인  $m$ 이 16인 반면  $k, I$ 는 고려되지 않았으며,  $X(=v/c \text{ ratio})$ 의 제곱에 의해 낮은 지체값을 유도하고 있다. 1992 KHCM모형은  $m$ 이 12이고  $k, I$ 는 고려되지 않았으며, 1994 HCM모형과 차이점은 증분지체( $d_2$ )에서  $X$ 의 제곱이 없다는 것이다. 이러한 이유로 비포화상태에서 1994 HCM모형이 1992 KHCM모형보다 지체값이 더 낮게 나타났다.

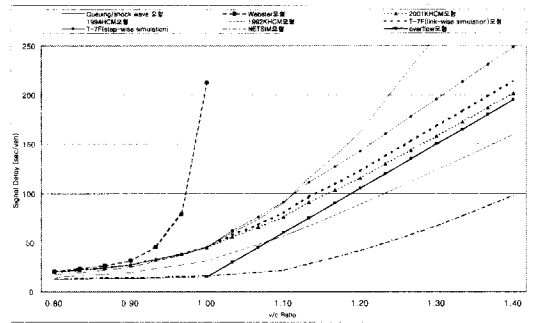
정상상태 확률적인 모형(steady-state stochastic model)인 webster식과 2001 KHCM모형을 비교해 볼 때, v/c ratio 0.8이하에서는 거의 동일한 값으로 나타났으며, v/c ratio 0.8 이상에서 webster식은 점진적으로 증가하다가 1.0으로 가까울수록 무한대로 가는 경향을 보인다. 그러나 실제에 있어서는 일반적으로 용량을 초과한 수요가 발생할 수 있으며 webster식과 같은 무한대의 지체는 현실에서 존재하지 않는다.

TRANSYT-7F release 10.1의 두가지 시뮬레이션 방법모형인 link-wise simulation과 step-wise simulation을 비교하면 v/c=1.0까지는 동일한 값을 나타내고 있다. 이는 상류부 교차로에서 보내진 도착 차량을 주기내 단위시간별로 환산되어 분석되는데 spillback현상이 뚜렷하게 나타나지 않는 경우에는 두 시뮬레이션 모형이 유사하게 나타난다. 또한 TRANSYT-7F모형과 2001 KHCM모형이 거의 동일한 값으로 나타나는 것을 보면, v/c=1.0까지는 2001 KHCM모형 대신 TRANSYT-7F 모형을 교차로 용량 및 서비스수준 분석에 사용하여도 아무런 영향이 없을 것으로 판단된다.

마지막으로 미시적 시뮬레이션인 NETSIM 모형은 개



<그림 10> NETSIM 모형의 COV 변화



<그림 11> 포화상태의 지체 산정

별차량이 임의로(random) 발생하여 차두거리(headway)에 따른 행태와 차량추종(car-following과 차로변경(lane changing)의 차량운전행태(driver behavior)에 의해 지체를 도출하게 되는데 다른 모형보다 상대적으로 낮게 나타났다. 본 연구에서는 이러한 특성을 고려하여 random seed를 달리하여 30번의 실행결과를 평균한 값을 사용하였다. 좀 더 정확한 분석을 위해 미시확률적 시뮬레이션인 NETSIM에 대한 자세한 지체변동(variability)을 보기 위해 각 v/c ratio에 따른 평균과 표준편차를 이용한 COV (coefficient of variation, 표준편차/평균)를 살펴해보았다. <그림 10>에서 보면, 매우 낮은 v/c ratio에서의 COV값은 차량간의 간격(spacing) 변화가 매우 다양하다는 것을 의미하며, 이런 이유로 임의도착 차량에 의해 유발되는 지체가 매우 작아져서 지체값이 낮게 나타났다.

COV는 v/c=0.9까지 감소하다가 그 이후부터는 다시 증가하는 것으로 나타났다. 이는 비포화상태에서 포화상태로 전이되는 시점에서 수요의 변동(demand fluctuation)이 증가하기 때문으로 판단된다. 또한 v/c=1.2 이상에서는 대기행렬길이가 크게 증가하여 혼잡상태가 악화됨에 따라 차량간의 움직임에 제약을 받게 되고 결국은 균일한 교통류 흐름의 패턴을 유지하게 되므로 COV가 낮아지게 되는 것으로 판단된다.

## 2. 포화 상태

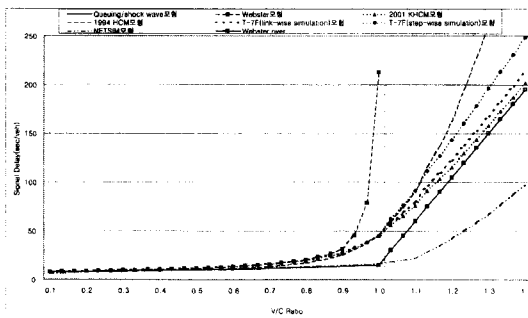
전반적으로 v/c ratio가 증가함에 따라 비포화상태와 달리 모형 성격에 따라 큰 차이를 보이고 있다.

먼저, 전통적인 대기행렬모형과 충격파 모형은 이미 기존 논문에서 검증되었듯이 동일한 값을 나타내고 있으며, <그림 7>에서 언급했듯이 두 모형은 deterministic uniform delay을 나타내기 때문에 v/c=1.0까지만 나타났다.

도로용량편람을 살펴보면, 1992 KHCM모형과 2001 KHCM모형은 일정한 간격을 두고 동일한 패턴의 곡선형태를 보이고 있다. 이 두 모형이 일정한 간격의 차이를 보이는 이유는 1992 KHCM모형에서 추가 지체( $d_3$ )를 고려하지 않았으며, 임의도착패턴 계수인  $m$ 의 경우에 1992 KHCM모형과 2001 KHCM모형 각각 12, 4로 고정되어 있기 때문이다.

또한, 1994 HCM모형은 다른 모형에 비해 지체값이 높게 나왔다. 특히 v/c=1.1 부근부터는 지체값이 급속도로 높아지는 경향을 보이고 있다. 이는 1994 HCM모형이 결정적 포화상태 모형(deterministic oversaturation model)에 의해 예측된 지체곡선을 점근선으로 하지 않고 있으며, 식(19)의 조정변수(adjustment parameter)  $X^2$  이 포함되어 있기 때문으로 분석된다. 이  $X^2$  조정변수는 초기 대기행렬이 없고 분석시간은 15분으로 고정된다는 가정을 보충하기 위해 포함되어졌으며, 1997 HCM모형부터는 없어진 변수이다.

TRANSYT-7F의 두 모형을 비교하면, link-wise simulation보다 step-wise simulation의 결과가 높게 나타났다. 그 이유는 link-wise simulation의 경우 모든 차량은 정적인 수직적 대기행렬(vertical queue)



<그림 12> v/c ratio에 따른 지체 산정

에 만나기 전에 링크의 전체길이를 주행하는 것을 가정으로 하기 때문에 대기행렬길이(queue length)에 대해 과소평가되는 결과를 초래하기 때문이다. 반면에 step-wise simulation은 각 time step에 대해 링크 진행순서와 교통류 패턴이 하류부에서 상류부로 진행되는 수평적 대기행렬(horizontal queue) 개념이 적용되었기 때문에 차량이 정지선이 아닌 back of queue에 도착하는 것으로 가정하여 대기행렬의 생성과 소실이 계산된다. 이 결과에서 흥미로운 것은 수요가 용량을 초과했을 때 발생하는 queue spillback 현상을 잘 표현하는 step-wise simulation보다 link-wise simulation이 2001 KHCM모형에 근사한 값을 나타내고 있다. 이는 기본적으로 이 두 모형 모두 수직적인 대기행렬 개념을 내포하고 있기 때문으로 판단된다.

미시적 시뮬레이션인 NETSIM은 전체적으로 다른 모형과 비교할때 가장 낮은 지체값을 보이고 있다. 이는 Entry 노드(centroid)에서 정지선까지 통행에 유발되는 임의성(randomness) 수준이 낮기 때문이다. 다시 말해 v/c ratio가 증가함에 따라 차량도착에 의한 임의성은 신호교차로의 하류부에서부터 형성되는 대기행렬에 의해 점진적으로 낮아지기 때문에 균일도착보다 더 낮은 결과를 초래하게 된다. 또 하나의 이유는 NETSIM의 차량발생분포가 균일분포가 아닌 음이항분포(negative exponential distribution)를 나타내는 비선형(nonlinear)함수로서, 시뮬레이션 실행시간이 커질수록 차량의 발생빈도는 분석 초기시간보다 현격하게 줄어드는 경향 때문에 일어나는 결과로도 분석이 된다.

거시결정적(macro-deterministic) 시뮬레이션인 TRANSYT-7F모형과 미시확률적(micro-stochastic) 시뮬레이션인 NETSIM모형을 비교하면 v/c ratio에 상관없이 NETSIM모형이 낮게 나타났다. v/c=0.6이하에서는 두 모형의 지체 차이가 비슷하게 나타났으나, v/c=0.9부터는 2배 이상의 지체차이를 나타내고 있다. 이러한 현상이 나타나는 가장 큰 원인으로서는 TRANSYT-7F모형은 차량군 분산(platoon dispersion)에 의해 교통패턴을 계산하는 반면, NETSIM모형은 개별 차량(individual vehicle)간의 상호작용을 통해 교통상황이 모사되어지기 때문이다. 즉, NETSIM모형은 차량간의 행태결과가 차량추종(car following), 차로변경(lane changing), 간격수락(gap acceptance) 알고리즘의 logic에 의해 결정되어지기 때문에 이를 비교하는데는 무리가 있을 것으로 판단된다.

마지막으로 <그림 12>를 보면, 결정적 포화상태 모형에 의해 예측된 곡선을 점근선으로 하여 수렴되는 모형은 2001 KHCM모형과 TRANSYT-7F의 link-wise simulation모형인 것으로 나타났다.

## VI. 결론 및 향후연구과제

지금까지 전통적인 대기행렬모형에서 미시적 시뮬레이션 모형까지 신호에 의해 발생하는 지체를 비교·분석하였다. 본 연구는 여러 가지 지체모형에서 고려되고 있는 여러 변수들을 알아보고 각각의 모형에서 가정하고 있는 조건들과 그에 따른 결과를 분석하였다. 또한 현재 신호교차로 용량 및 서비스수준을 평가하는 지침서인 2001 KHCM모형과 실무에서 많이 사용하고 있는 거시결정적 모형(macro-deterministic model)인 TRANSYT-7F release 10.1, 미시확률적 모형(micro-stochastic model)인 NETSIM을 비교평가하여 신호교차로 분석의 적용성도 함께 알아보고자 하였다. 이에 따른 결과를 정리하면 다음과 같다.

첫째, 전통적인 대기행렬모형과 충격과 모형은 이미 기존 논문에서 검증 되었듯이 동일한 지체값으로 나왔으며 이는 본문에서 설명하였듯이 이론적으로 동일할 수 밖에 없다. 정상상태 확률적 모형인 webster모형은  $v/c=0.8$ 이하에서는 2001 KHCM모형과 거의 동일한 값으로 나타났으며,  $v/c=0.8$ 이상에서는 점진적으로 증가하다가  $v/c=1.0$ 에 가까워지면서 무한대로 증가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 비현실적인 결과를 초래하기 때문에 이를 개선하기 위해 시간종속 확률적 모형(time dependent stochastic model)이 연구되었다.

이 모형은 결정적 포화상태 모형(deterministic oversaturation model)을 점근선으로 하여 지체를 산정하기 때문에 곡선이 점진적으로 단조증가 형태를 띠고 있으며, 이 점근선에 정확하게 수렴하는 모형은 2001 KHCM모형과 TRANSYT-7F의 link-wise simulation모형인 것으로 나타났다.

둘째, 전반적으로 지체곡선이  $v/c$  ratio가 증가함에 따라 단조증가(monotonically increasing)형태를 띠고 있다. 비포화상태( $v/c=0.6$ 이하)에서는 결정적(deterministic)모형과 확률적(stochastic)모형의 지체가 모두 상대적으로 비슷하게 나왔으며, 포화상태에서는 1994 HCM모형을 제외하고는 유사한 곡선의 패턴을 유지하고 있으면서도 각 모형의 기본적인 가정에

따라 차이를 보였다. 따라서, 비포화상태( $v/c=0.6$ 이하)에서는 어느 모형을 쓰더라도 지체값의 유효성(validation)에는 큰 영향을 주지 않을 것으로 판단되며, 포화상태에서는  $v/c$  ratio에 따라 변화폭(variation)이 크기 때문에 도로용량지침서인 2001 KHCM모형 위주로 교차로 분석을 해야할 것으로 판단된다. 하지만 본 연구 결과에서 알 수 있듯이 2001 KHCM모형이 실제 신호교차로에서 신호에 의한 지체를 정확하게 표현한 것이라고 장담할 수는 없다.

셋째, TRANSYT-7F모형은 release 8부터 전통적인 모형인 link-wise simulation과 포화상태의 queue spillback현상을 잘 표현하는 step-wise simulation이 함께 개발되면서 현재 release 10.1까지 이어지고 있다. 두 모형을 비교하면,  $v/c=1.0$ 까지는 동일한 값을 나타내고 있으며 이 값은 2001 KHCM과 거의 동일한 값을 나타내고 있다. 따라서 비포화 상태에서는 2001 KHCM모형 대신 신호최적화가 가능한 TRANSYT-7F모형을 쓰는 것이 효율적이라고 판단된다.  $v/c=1.0$  이상에서는  $v/c$  ratio가 커짐에 따라 두 모형의 지체값 차이도 함께 커지며, step-wise simulation의 결과값이 상대적으로 크게 나타났다. 이는 기본적으로 step-wise simulation은 수평적 대기행렬(horizontal queue) 개념이 적용되어 차량이 정지선이 아닌 back of queue에 도착하는 것으로 가정하여 지체가 계산되어지며, link-wise simulation의 경우 모든 차량은 정적인 수직적 대기행렬(vertical queue)에 만나기 전에 링크의 전체길이를 주행하는 것을 가정하기 때문에 대기행렬길이에 대해 과소평가되는 결과를 초래하기 때문에 판단된다. 또한 흥미로운 결과는 포화상태의 현실상황을 좀 더 정확하게 표현하는 step-wise simulation보다 link-wise simulation의 지체값이 2001 KHCM모형에 비교적 근소한 차이로 일치하고 있다. 이러한 현상이 나타나는 것은 위에서도 언급했듯이 link-wise simulation과 2001 KHCM모형은 대기행렬모형을 기반으로 적용되었기 때문으로 판단된다. 하지만 이러한 결과가 나오는 좀 더 정확하고 세부적인 원인분석은 필요할 것으로 보이며 이는 향후연구과제로 넘기기로 한다.

넷째, 미시적 시뮬레이션인 NETSIM은 차량발생분포를 음이항분포(negative exponential distribution)로 하였기 때문에 매우 낮은  $v/c$  ratio( $v/c=0.4$ 이하)에서는 차량이 너무 한산하여 임의도착 차량에 의해 유발되는 지체가 매우 작아서 지체값이 상대적으로 낮게

나타났으며, 매우 높은 v/c ratio( $v/c=1.1$ 이상)에서는 차량도착에 의한 임의성이 하류부에서 형성되는 대기행렬에 의해 점진적으로 낮아지기 때문에 균일도착보다 더 낮은 지체값을 나타내고 있다. 전체적으로 개별 차량의 운전행태 모형이 반영된 미시적 시뮬레이션 NETSIM이 증분지체(incremental delay)가 과소평가되면서 가장 낮은 값으로 나타났다.

다섯째, 거시결정적(macro-deterministic)모형인 TRANSYT-7F 모형과 미시확률적(micro-stochastic) 모형인 NETSIM모형의 지체를 비교하면 신호에 의해 발생하는 지체값이 상당한 차이를 보이고 있다. 일단 이러한 차이를 보이는 기본적인 이유는 TRANSYT-7F 모형은 차량군 분산(platoon dispersion)에 의해 교통 패턴을 계산하는 반면, NETSIM모형은 개별 차량(individual vehicle)간의 상호작용을 통해 교통상황이 모사되어진다. 즉, NETSIM모형은 차량간의 행태결과가 차량추종(car following), 차로변경(lane changing), 간격수락(gap acceptance) 알고리즘의 logic에 의해 결정되어진다. 이러한 두 모형의 기본적인 가정이 다르기 때문에 외생요인을 최소화함에도 불구하고 두 모형을 동일하게 비교하기에는 무리가 있을 것으로 보인다. 또한 두 모형 모두 내부 알고리즘에 대해서는 블랙박스화(black box)되어 있기 때문에 모형의 내재변수(embedded parameter)에 대한 보정(calibration)이 아무리 정확하다고 하더라도 분석가는 단지 거시결정적 모형인 TRANSYT모형보다는 미시확률적 모형인 NETSIM이 현실에 더 가깝게 모사한다고 판단할 수 밖에 없다.

향후 연구과제로는 첫째, 본 연구에서 작성한 기본적인 네트워크가 아닌 좀 더 복잡한 네트워크와 교통상황하에서 이러한 일관성(consistency)이 나타나는지 분석할 필요가 있다. 둘째, 거시적 모형과 미시적 모형의 결과값에 대한 차이를 좀 더 정확하게 규명하기 위해서는 자료 구득이 힘들긴 하지만 현장데이터를 가지고 비교분석할 필요가 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 도로용량편람(2001), 대한교통학회.
2. 조준환(2002), "TRANSYT-7F을 이용한 신호 현 시구성기법과 신호 최적화 전략", 한양대학교, 석사논문
3. 김영찬·이청원(1991), "신호교차로 지체모형", 대한교통학회지, 제9권 제2호, 대한교통학회, pp.27~40.
4. 하동익(1997), "신호교차로 지체체계 분석방법론 연구", 대한교통학회지, 제15권 제2호, 대한교통학회, pp.83~103.
5. 김진태(2003), "비보호 좌회전 지체도 추정모형의 개선", 대한교통학회지, 제21권 제2호, 대한교통학회, pp.107~118.
6. Webster F.V.(1958), "Traffic signal setting", Road Research Technical Paper No.39, Her Majesty's stationery office, London.
7. Webster F.V, Cobbe B.M.(1966), "Traffic Signals", Technical Paper 56, Road Research Laboratory, London.
8. Miller.(1963) A.J, "Setting of fixed-cycle traffic signals", Operations Research Quarterly 14, pp.373~386.
9. Newell G.F.(1965), "Approximation methods for queues with application to the fixed-cycle traffic light", SIAM Review 7, pp.223~240.
10. Allop, R.E.(1972), "Delay at a fixed time traffic signal I :Theoretical analysis, Transportation Science, vol.6, pp.260~285.
11. Newell G.F.(1982), "Applications of queueing theory, Chapman Hall, London.
12. Akcelik, R.(1981), "Traffic signals : capacity and timing analysis", Research Report 123, Australian Road Research Board, Victoria, Australia.
13. Akcelik, R, Roupail, N.M.(1993), "Estimation of delays at traffic signals for variable demand conditions", Transportation Research B, vol.27B, No.2, pp.109~131.
14. Hurdle V.F.(1964), "Signalized intersection delay models-A primer for the uninitiated", Transportation Research Record No.971.
15. Dion F, Rakha H, Kang Y.S.(2004), "Comparison of delay estimates at under-saturated and over-saturated pre-timed signalized intersections", Transportation Research partB 38.

16. Fambro D.B, Roupail N.M.(1997), Generalized delay model for signalized intersections and arterial streets, Transportation Research Record No.1572.
17. Michalopoulos P.G, Stephanopoulos G.(1981), "An application of shock wave theory to traffic signal control", Transportation Research partB 15.
18. Akcelik, R.(1988), "The highway capacity manual delay formula for signalized intersections", ITE Journal 58.
19. Heidemann, D.(1994), "Queue length and delay distributions at traffic signals", Transportation Research partB 28.
20. Hurdle V.F, Bongsoo Son.(2001), "Shock wave and cumulative arrival and departure models:partners without conflict", Transportation research board 80th annual meeting.
21. McShane, W.R., Roess, R.P(1990), "Traffic Engineering", Prentice Hall.
22. Austroads(1993), Traffic signals, Guide to traffic engineering practice, part7, Association of Australian State Road and Transport Authorities, Sydney, Australia.
23. Tepy(1995), Canadian Capacity Guide for signalized intersection, second edtion. Institute of Transportation Engineers, District 7, Canada.
24. Panos D.P, Wang Y(1999), "Simulation of a large freeway/arterial network with CORSIM, INTEGRATION and WATSim", TRB 78th Annual Meeting.
25. Highway Capacity Manual(1994), TRB, National Research Concl, Washington,D.C.
26. Highway Capacity Manual(2000), TRB, National Research Concl, Washington,D.C
27. Wallace C.E, Courage K.G, Hadi M.A, Gan A(1998), "Methodology for optimization signal timing, volume 4 : TRANSYT-7F user guide", FHWA.
28. Traffic network study tool : TRANSYT-7F, united states version(2004), McTrans center.
29. Traffic software integrated system, user's manual(1998), prepared by ITT systems and sciences, Inc. FHWA.

♣ 주 작 성 자 : 조준한

♣ 논문투고일 : 2004. 9. 17

논문심사일 : 2004. 12. 2 (1차)

2004. 12. 30 (2차)

2005. 1. 12 (3차)

심사판정일 : 2005. 1. 12

♣ 반론접수기한 : 2005. 6. 30

## 〈부록〉

본 논문에 언급한 지체모형 주요변수의 설명은 다음과 같다.

$A_i$ : 시공도에서 $i$ 영역의 면적	$s$ : 포화교통유율 (대/시)
$c$ : 교차로 접근용량 ( $s \cdot g_e / C$ ) (대/시)	$s_t$ : step $t$ 동안 출발하기 위한 차량 수
$C$ : 주기 (초)	$SW_{ij}$ : 영역 $i$ 와 $j$ 사이에 충격파 속도
$d$ : 차량당 평균지체 (초/대)	$SW_i$ : 도착차량과 back of queue사이 충격파
$D$ : 교차로 접근에 의해 발생하는 총 지체시간 (대·초)	$SW_D$ : 포화상태에서 교차로를 떠나는 차량군 앞부분에서의 충격파
$d_0$ : 결정적 과포화지체 (초/대)	$SW_R$ : 포화상태에서 대기차량과 출발차량사이의 충격파
$d_1$ : 균일지체 (초/대)	$SW_N$ : 포화상태에서 출발차량과 도착차량사이의 충격파
$d_2$ : 임의도착과 과포화에 의한 증분지체 (초/대)	$t_{c(n)}$ : 비포화 상태에서의 대기행렬차량 해소시간 (초)
$d_3$ : 분석 전 과포화로 인한 초기 대기행렬에 의한 추가지체 (초/대)	$t_{m(n)}$ : 비포화 상태에서의 최대대기행렬 형성시간 (초)
$f_{PF}$ : 연동계수	$T$ : 분석시간 (시)
$f_c$ : 추가지체( $d_3$ ) 요소의 조정계수	$TT_o$ : 과포화 상태에서 분석시간동안 교차로에 접근하는 총 통행시간 (대·초)
$f_p$ : 녹색시간동안 차량군 도착에 대한 조정계수(0.9~1.2)	$TT_u$ : 비포화 상태에서 분석시간동안 교차로에 접근하는 총 통행시간 (대·초)
$g_e$ : 유효녹색시간 (초)	$u_f$ : 자유속도 (km/h)
$k$ : 증분지체 계수	$u_i$ : 영역 $i$ 에서의 속도 (km/h)
$k_a$ : 접근밀도 (대/km)	$u(t)$ : 시간 $t$ 에서의 순간속도 (km/h)
$k_d$ : 방출밀도 (대/km)	$v$ : 도착교통유율 (대/시)
$k_i$ : 영역 $i$ 에서의 밀도 (대/km)	$v_i$ : 영역 $i$ 에서의 교통유율 (대/시)
$k_j$ : 혼잡밀도 (대/km)	$x_{c(o)}$ : 과포화상태에서 신호주기내에 증가하는 대기행렬길이 (km)
$I$ : 상류부 metering에 대한 조정계수	$x_{m(o)}$ : 과포화상태에서 신호주기내에 증가하는 최대 대기행렬길이 (km)
$n, m$ : 용량모형식 변수	$x_{m(n)}$ : 비포화상태에서 신호주기 내 최대 대기행렬길이 (km)
$N$ : 분석시간 동안의 주기 수	$X$ : 포화도 ( $v/c$ )
$N_s$ : 주기내의 step 수	
$m_t$ : step $t$ 동안 대기하고 있는 차량 수	
$P$ : 유효녹색시간 동안의 도착차량 비율	
$q_t$ : step $t$ 동안 도착하는 차량 수	
$r_e$ : 유효적색시간 (초)	

## 이론 및 모형

개별차량의 고유특성을 이용한 구간통행시간 산출기법 개발  
오 철

휴대폰 기지국 정보를 이용한 O/D 추정기법 연구  
김시곤 · 유병석 · 강승필

거리비례제 요금정책에 따른 K요금경로탐색  
이미영 · 백남철 · 문병섭 · 강원의