

■ 論 文 ■

간선도로 신호연동화 효율의 평가를 위한 지체도 모형의 해석적 연구

Analytical Study of Delay Model of Traffic Signal Progression Evaluation on Arterial

김 영 찬

(서울시립대학교 도시공학과 교수)

황 연 하

(서울시립대학교 도시공학과 박사과정)

목 차

- | | |
|----------------|-----------------|
| I. 서론 | 2. 차량군 지체도 모형개발 |
| II. 관련연구 검토 | IV. 모형적용 |
| III. 모형개발 | V. 결론 |
| 1. 기본전제 및 용어설명 | 참고문헌 |

요 약

신호 교차로의 지체도에 미치는 가장 큰 영향요소중의 하나는 신호연동인데 신호연동지체도 예측모형으로서 T7RANSTY-7F모형과 NETSIM모형이 가장 널리 사용되고 있다. 이는 컴퓨터 프로그래밍기법을 이용해야 하는 복잡함과 실행과정이 쉽지않다. 본 연구는 연동지체의 산정을 도로용량편람의 사용예처럼 간편하면서 시뮬레이션모형과 유사한 결과를 갖는 모형을 연구하기 위하여 이루어졌다. 연구의 범위는 차량군을 대상으로한 거시적모형이며 신호교차로 연동지체를 평가하는 해석적 모형이다. 그리고 정상류상태($v/c < 1$)를 대상으로 하면서 차량군지체만을 산정하는 모형이다.

본 연구방법은 차량군도착으로 형성되는 누적교통량·시간함수에 의한 지체도산정을 적분법으로서 두 개의 도착유형으로 구분하여 산출하였으며 본 연구결과로는 제안모형내에 차량군 연속진행의 도착패턴을 직접적으로 반영하였고 현실 특성에 부합된 차량군형태를 구성하였다. TRANSTY-7F모형과 유사한 결과를 도출하였으며 수계산으로도 적용할 수 있고 기존의 해석적 모형이 결여된 경우에 대한 지체도예측도 가능하였다.

I. 서론

도시부 도로망상의 신호교차로에서 차량의 도착이 무작위형태로 발견되는 것은 흔하지 않으며 인근 교차로 신호의 영향으로 차량군을 형성하게 된다. 또한 도착차량군이 하류부 녹색 현시에 통과하는 비율에 따라서 지체는 달라지게 된다.

차량군의 도착형태와 신호연동을 고려하여 교차로간 지체도를 예측하는 방법으로서 1994년 미국의 도로용량편람(Highway Capacity Manual :HCM)¹⁾에서는 도착의 형태를 6가지로 구분하고 현장관측을 통해 상응한 형태를 설정하고 이때의 차량군율(Platoon Rate)값을 찾아 연동보정계수(Progression Factor)를 사용하였다. 이러한 도착형태구분은 단지 차량군 도착 시점이나 교통량분포에 의한 개념적인 구분에 지나지 않으며 실제로 도착차량군의 길이와 높이(교통밀도)에 따라 하류부 녹색시간에 통과하는 양이 달라짐이 설명되지 않는다.

국내에서도 1992년 도로용량편람연구²⁾에서 연동신호에 따른 지체도 산정을 링크길이, 포화도, 움셋을 변수로한 중회귀식의 연동보정계수를 산출하였는데 시뮬레이션 결과에 한정됨으로서 움셋의 변화에 연속적이지 못하였다.

차량군을 유형의 형태로 전체하고 연동에 따른 지체도에측이 가능한 모형은 TRANSYT-7F³⁾와 PASSER-II⁴⁾, Roupail⁵⁾, NCHRP 339⁶⁾ 등이 있다. 하지만 앞의 두가지모형은 컴퓨터 프로그래밍방법을 사용해야 하고 간편한 적용이 어려우며 후자의 두가지모형은 해석적 방법을 사용하였으나 차량군 형태를 단순한 장방향으로 가정하여 실제의 차량군을 설명하는 데 부족하다. 특히 Roupail모형은 각 교통여건유형별로 적용방법이 상이하여 범용성이 결여되어 있으며 NCHRP모형은 도착차량군형태를 적색 및 녹색 시간의 평균 교통류로 환산하여 지체도를 산정함으로써 차량군 도착형태가 직접 반영된 지체도와는 차이가 있다. 또한 2개모형은 4현시와 같이 적색시간이 길어질 경우 지체도를 예측하지 못한다.

본 연구의 범위는 차량군을 대상으로한 거시적모형이며 신호교차로 연동지체를 평가하는 해석적 모형이다. 그리고 정상류상태를 대상으로하면서 차량

군지체만을 산정하는 모형이다. 본 연구의 목적으로는 연동신호와 차량군 연속진행의 도착패턴을 직접적으로 반영하고 현실 특성에 부합된 차량군형태를 도출하며, 수계산으로 적용이 가능하면서 그 결과도 우수하고 모든 경우의 지체도를 산정가능한 해석적모형을 개발하는 데 있다.

II. 관련연구 검토

교차로 서비스수준 평가의 척도로서 지체도를 사용하는 데 교차로간 신호연동에 따른 지체도 산정은 특히 중요한 부분을 이루고 있다. 1985년 HCM⁷⁾에서는 신호교차로간 신호연동의 질을 개선하기 위해 차량군도착의 형태를 5가지로 구분하고 현장관측을 통한 차량군 도착구분과 이때의 차량군율(Platoon Rate)값을 찾아 교차로간 연동을 보정하였다. 그후 Staniewicz⁸⁾은 차량군도착을 보다 구체화하여 차량군 선두차량의 도착 조건(녹색시간과 적색시간 도착)에 따른 평균여행시간 지체를 제시하였다.

Olszewski⁹⁾은 신호현시 단계별 도착률방법(step arrival rate model)을 제시하였는데 신호 현시별로 도착 차량군을 구분하고 각각 적색시간의 지체와 녹색시간의 소거지체의 합인 주기당 평균지체를 구하였다. 이에 반하여 Wallace¹⁰⁾는 하류부 녹색시간에 도착하는 차량의 비율을 사용하여 연속진행대비를(band rate)을 유도하였다. 하지만 상기의 방법은 차량군 구조와 분산영향을 고려하지 못했다.

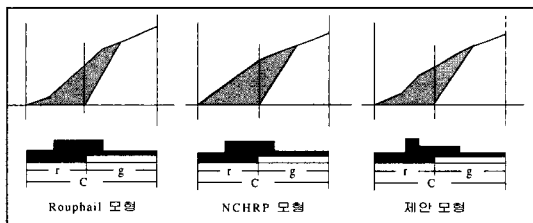
1994 HCM에서는 완전 연동을 포함하여 도착형태를 6가지로 구분하고 신호 연동 보정계수를 함수형태로 만들었으며 차량군율은 1985 HCM에서처럼 현장 관측에 의한 형태구분값을 적용하였지만 이를 녹색시 도착교통량비로 전환하여 사용하였다. 하지만 HCM은 유형의 차량군이 존재하지 않는다.

Roupail⁵⁾은 상·하류부간 출발, 도착교통량에 대해 장방향의 차량군 형태를 제시하였고 차량군 또한 연속진행 교통류와 비연속진행교통류로 구분하였으며 분산의 영향도 포함하였다. 차량군출발 도착 패턴에 의한 도식적 방법에 의하여 누적 지체를 계산하지만 모든 경우에 적용되지 않는 한계성을 갖고 있다. NCHRP모형⁶⁾에서는 Roupail의 차량군형태구조를 사용하였으나 차량군 도착 시간과 신호 움셋과의 관계에 의한 차량군 도착유형별 녹색시간 간격결정을

수식화하여 지체도산정을 간략화하였다. 하지만 <그림 1>에서 처럼 누적시간·교통량도에서 실제 차량군 도착에 의한 것과는 누적 교통량은 동일하더라도 누적교통량·시간은 차이가 있다. 즉 진한색부분과 같이 실제 차량군 도착에 의한 총지체면적과는 상이하다. 차량군 형태도 장방형이라고 가정하여 계산의 단순성은 확보하였으나 대기차량이나 주행차량등으로 교통류가 혼재될 수 있는 실제 차량군 형태와는 차이가 있다. 그만큼 지체도산정 결과의 오차가 발생하게 된다. 또한 적색시간내에서 차량군 도착이 달라질 경우에 NCHRP모형은 지체도가 동일한 것으로 예측하며 Rouphail모형은 이를 예측할 지체도 모형의 유형이 없으므로 적색시간이 긴 4현시에서는 적용이 곤란하다.

한편 국내에서 연구된 김원창¹¹⁾과 도로용량편람(건설부1992)에서는 연동 보정계수에 영향변수가 될 수 있는 링크길이, 포화도, 오프셋(offset)을 설정하여 중회귀식에 의하여 연동지체도를 산출하였다. 하지만 회귀모형식의 제약으로 인하여 결과의 연속성이 결여되어 있다.

따라서 NCHRP모형이 전제한 평균 교통량 도착에 의한 지체도 산정과 장방형 형태의 미비점을 보완하여 교통류 특성 구분에 의한 합리적 차량군 형태를 도출하고 실제 차량군 연속진행도착패턴에 의한 누적 지체도를 보다 정확하면서 간략한 산정방법으로 도출하기 위하여 본 연구가 실시되었다.



<그림 1> 모형별 차량군 형태 및 지체면적비교

III. 모형개발

1. 기본전제 및 용어설명

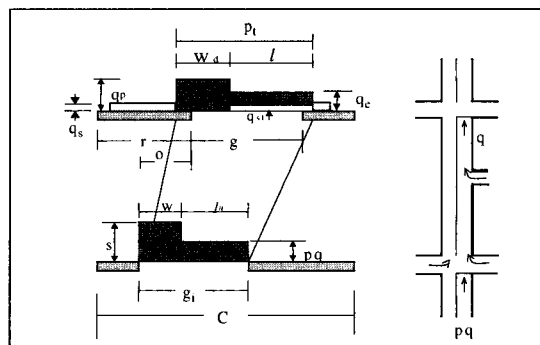
상·하류부 차량군형태는 연속진행차량군과 기타 2차교통류의 두가지로 구분한다. 이와 관련된 용어의 정의는 다음과 같다.

<교통류 항목>

- s : 포화교통류율(대/초)
- q : 주기당 평균교통류율(대/초)
- q_u : 상류부 직진차량군의 출발 평균교통류율(대/초)
- q_p : 상류부 직진차량군의 포화부분 하류부 도착 교통류율(대/초)
- q_e : 상류부 직진차량군의 평균부분 하류부 도착 교통류율(대/초)
- q_s : 상류부 2차교통류의 하류부 도착 교통류율(대/초)
- q_{s1} : q_s중 직진차량군의 평균부분에 유입된 교통류율(대/초)
- p : 하류부 직진차량군의 도착교통류에서 상류부 직진교통류의 비율

<신호항목>

- g_i : 상류부 직진 유효 녹색시간(초)
- g : 하류부 직진 유효 녹색시간(초)
- o : 상 하류부 녹색시간의 오프셋(초)
- T : 교차로간의 평균 통행시간(초)
- C : 주기길이(초)
- w : 상류부 직진차량군의 포화부분 길이(초)
- l_u : 상류부 직진차량군의 평균부분 길이(초)
- p_t : 하류부 도착 직진 차량군 전체길이(초)
- l : 하류부 도착 직진 차량군의 평균부분 길이(초)



<그림 2> 제안모형 차량군 형태

<그림 2>에서와 같이 상류부의 출발직진교통류에서 전반부(w)는 포화교통류로 후반부(l_u)는 평균 교통류로 구성된다. 2차교통류중 회전교통류는 직진교통류와 별개의 교통류로 분리되며 상류부교차로에서 하류

부교차로로 이동하면서 직진교통류와 동일하게 분산을 하며 또한 일부는 직진교통류와 만나면서 교밀도의 포화부분이 아닌 보다 저밀도의 평균부분에 분산된 양만큼 혼재되는 것으로 가정한다. 단 이면도로교통류는 평균하여 링크중간에서 진출입하지만 교통량은 상대적으로 적으므로 회전교통류와 동일하게 취급한다. 그리고 상·하류부 차량군간을 연계하는 중요한 변수로서 p는 하류부 직진차선군에 도착하는 교차도로와 이면도로로부터 유입되는 2차교통류((1-p)q)를 포함한 교통류(q)중에서 상류부 직진차량군으로부터 연속진행되어오는 직진교통류(pq)의 비율, 즉 상·하류부를 연속진행하는 직진교통류의 비율을 의미한다.

2. 차량군 지체도 모형 (Platoon Delay Model) 개발

1) 상·하류부 차량군 형태

상류부를 출발하는 연속진행차량군은 포화교통류 부분과 평균교통류부분으로 구분되는 데 차량군의 전반부인 포화부분의 길이는 다음과 같다.

$$w = \frac{(C - g_i)pq}{s - pq} \leq g_i \quad (1)$$

여기서 상류부 차량군의 평균 교통류 부분의 길이는 상류부 녹색시간에서 포화부분을 뺀것과 같다.

$$l_u = g_i - w \quad (2)$$

상류부 직진 녹색현시동안 연속진행되는 평균출발 교통류율은 다음과 같다.

$$q_u = \frac{pqC}{g_i} \quad (3)$$

상·하류부 차량군간의 분산관계는 Rouphail이 TRANSTY-7F와의 상관분석에서 유도한 차량군지수 (Platoon Index) 모형⁵⁾으로부터 다음과 같이 추정하였다.

$$q_t = (q_u - pq) \exp^{-0.01215T} + pq \quad (4)$$

여기서 q_t는 하류부도착 평균분산교통류이다. 식(3)과 식(4)에서 상류부 차량군과 하류부 분산 차량군간의 분산지수(Dispersion Index : DI)를 유도하면

$$DI = \frac{q_t}{q_u} = \frac{(C - g_i)}{C} \exp^{-0.01215T} + \frac{g_i}{C} \quad (5)$$

이다. 상 하류부 차량군 형태간의 면적이 동일하므로 하류부의 도착 차량군의 길이를 분산지수를 이용하여 구하면

$$p_t = \frac{g_i}{DI} \quad (6)$$

이다. 차량군 형태의 각부분에 대한 분산의 영향은 동일하므로 평균 교통류부분의 길이는 다음과 같다.

$$l = \frac{l_u}{DI} \quad (7)$$

상류부 직진차량군중 포화부분의 하류부 도착교통류는 포화교통류에 분산지수를 곱한 값이다.

$$q_p = sDI \quad (8)$$

된다. 그런데 2차교통류는 상류부 교차로 접근부에서 출발할 경우 직진차량군과 별도로 분산되지 않는 상태로 위치하게 된다. 이때의 교통량은

$$q_{s0} = (1 - p)q \frac{C}{C - g_i}$$

이다. 하류부로 진행하면서 분산을 할 경우 분산지수를 곱한 것만큼 감소하게 되므로 2차교통류는

$$q_s = q_{s0}DI \quad (9)$$

이 된다. 출발시의 교통량과 분산시의 교통량 차이만큼은 2차교통류에 대한 가정에서 처럼 직진차량군의 평균교통류부분에 유입된다면 그 교통류율은

$$q_{s1} = \frac{q_{s0}(C - g_i) - q_s(C - p_t)}{l} \quad (10)$$

이다. 상류부 직진차량군의 평균부분 하류부 도착교통류율은

$$q_e = pqDI + q_{s1} \quad (11)$$

이다. 즉 2차교통류는 하류부로 진행하면서 직진차량군중 과밀한 최소 차두간격의 포화부분보다는 평균부분에 보다 많이 혼재된다.

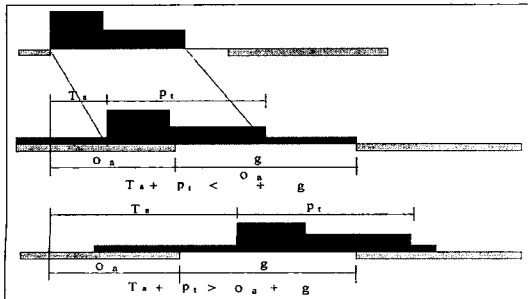
2) 차량군 지체도산정

직진차량군의 하류부 교차로에서의 지체상황을 두 가지로 구분하면 <그림 3>에서 보는 바와 같이 첫째는 직진 차량군이 적색시간이나 녹색시간에 도착하여 녹색시간에 모두 통과하는 경우와 두 번째는 직진 차량군이 녹색시간에 모두 통과하지 못하고 다음 적색시간에 일부 도착하여 대기행렬을 발생시키는 경우가 있다. 두가지의 도착은 옵셋과 도착시간에 따라서 달라지는데 이를 구별하기 위해서는 상·하류부 교차로간의 차량군 도착을 동일한 주기내로 설정할 필요가 있다. 이때 차량군이 하류부에 도착할 때 차량군 도착시간과 옵셋간의 차이가 길어질 경우에 대해서는 옵셋과 도착시간을 한주기내로 축소하여 조정한다.

$$o_a = [o + g] \text{ Modulo } C - g$$

$$T_a = [T + p_t] \text{ Modulo } C - p_t$$

여기서 o_a : 조정후 옵셋 T_a : 조정후 교차로간 통행시간이 된다.



<그림 3> 차량군 도착 구분

(1) 도착차량군이 녹색시간에 모두 통과하는 경우

차량군이 하류부 적색시간이나 녹색시간에 도착하여 녹색시간 종료전까지 모두 통과하는 경우로서 이때의 차량군 도착은

$$T_a + p_t \leq o_a + g$$

이다. 총지체는 적색시 도착지체(DR)와 녹색초기 발생하는 소거지체(DE)의 합이 되는 데 <그림 4>에서와 같이 다각형 $n_0n_1n_2n_3n_4n_5$ 의 면적과 같다. 다각형의 각 선분의 식은

$$\text{선분 } n_0n_1(L_1) : y_1 = q_s t \quad (12)$$

$$\text{선분 } n_1n_2(L_2) : y_1 = q_p t + h_1 \quad (13)$$

$$\text{선분 } n_2n_3(L_3) : y_1 = q_e t + h_2 \quad (14)$$

$$\text{선분 } n_3n_4(L_4) : y_1 = q_s t + h_3 \quad (15)$$

$$\text{선분 } n_4n_5(L_5) : y_1 = s(t - r) \quad (16)$$

이다. 각 식의 절편인 h_1, h_2, h_3 은 <그림 4>와 식(12)~식(15)에서 구하여진다.

$$h_1 = (q_s - q_p)(r - o_a + T_a) \quad (17)$$

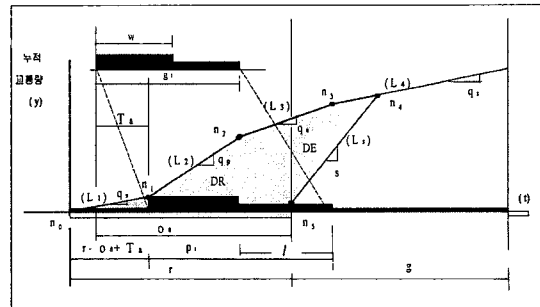
$$h_2 = (q_p - q_e)(r - o_a + T_a + p_t - l) + h_1 \quad (18)$$

$$h_3 = (q_e - q_s)(r - o_a + T_a + p_t) + h_2 \quad (19)$$

5개 선분의 식(12)~식(16)이 만나는 교점 n_1, n_2, n_3, n_4 의 t값을 구하면

$$t_{n_1} = \frac{h_1}{q_s - q_p}$$

$$t_{n_2} = \frac{h_2 - h_1}{q_p - q_e}$$



<그림 4> 차량군 도착형태(녹색시 전부통과)

$$t_{n_3} = \frac{h_3 - h_2}{q_e - q_s}$$

$$t_{n_4} = \frac{sr + h_3}{s - q_s}$$

이다. <그림 4>에서 출발 포화교통류를 나타내는 선분 L_s 와 만나는 선분 L_4 와의 교점의 t 값을 t_{up} 이라고 하면

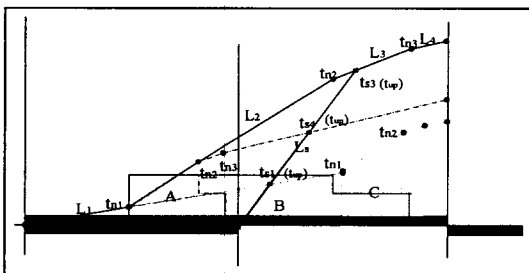
$$t_{up} = t_{n_4} \quad (20)$$

이 된다. 6 개의 교점 n_0-n_5 에 둘러싼 다각형의 면적을 S_s 라고 하면 이는 n_0 의 t 값에서 t_{up} 까지의 정적분이 된다.

$$S_s = \int_{t_n}^{t_c} y_1 dt + \int_{t_n}^{t_n} y_1 dt + \int_{t_n}^{t_{n_1}} y_1 dt + \int_{t_n}^{t_{n_2}} y_1 dt - \int_r^{t_{up}} y_1 dt \quad (21)$$

$$= -\frac{h_1^2}{2(q_s - q_p)} - \frac{(h_2 - h_1)^2}{2(q_p - q_e)} - \frac{(h_3 - h_2)^2}{2(q_e - q_s)} - \frac{(h_3 + sr)^2}{2(q_s - s)} - \frac{sr^2}{2}$$

여기서 t_{up} 는 정적분되는 마지막 선분에 대한 적분의 상한값으로서 최상한이라고 정의한다. <그림 5>에서 보는 바와 같이 $T_a + p_t \leq o_a + g$ 의 범위내에서 차량군 길이나 도착시점이 달라지더라도(차량군 A,B,C) 지체면적을 형성하는 선분은 차량군형태로 부터 4개가 만들어지고 4개의 선분의 순서는 일정하다. 또한 지체면적이 달라지면 4개선분 $L_i(i=1,2,4)$ 중에서 출발포화교통류선분 L_s 와 만나는 선분이 달라지면서 교점 t_{up} 이 달라진다. 즉 t_{up} 를 결정하면 변화된 지체면적



<그림 5> 차량군별 누적지체선분과 교점 관계도

의 정적분을 구할 수 있다. t_{up} 은 L_s 와 $L_i(i=1,2,4)$ 가 만나는 교점의 t 값인 $t_{si}(i=1,2,3,4)$ 중의 하나이므로 이를 구하기 위해서 먼저 교점 t_{n_i} 와 t_{si} 의 일반식을 구하면

$$t_{n_i} = \frac{h_i - h_{i-1}}{q_i - q_{i+1}}$$

$$t_{si} = \frac{h_i + sr}{s - q_{i+1}}$$

여기서 $i=1,2,3$ $q_1=q_4=q_s$, $q_2=q_p$, $q_3=q_e$, $h_0 = t_{n_0} = 0$ 이다. t_{up} 은 다음과 같은 관계에서 구할 수 있다.

- a) $t_{n_i} > r$ 이고 $t_{n_i} \geq t_{si}$ ($i=1,2,3$)이다.
- b) a)을 만족하는 t_{si} 중에서 i 가 최소화되는 값
- a)을 만족하는 t_{si} 이 존재하지 않을 경우 $t_{up} = t_{s4}$

t_{up} 가 결정될때의 i 를 j 라고하면 누적지체도 계산식 (21)를 다음과 같이 일반화할 수 있다.

$$S_s = \sum_{i=1}^j \frac{(h_i - h_{i-1})^2}{2(q_{i+1} - q_i)} + \frac{(h_j + sr)^2}{2(s - q_{j+1})} - \frac{sr^2}{2} \quad (22)$$

여기서 $q_1=q_4=q_s$, $q_2=q_p$, $q_3=q_e$, $h_0=0$ 이다.

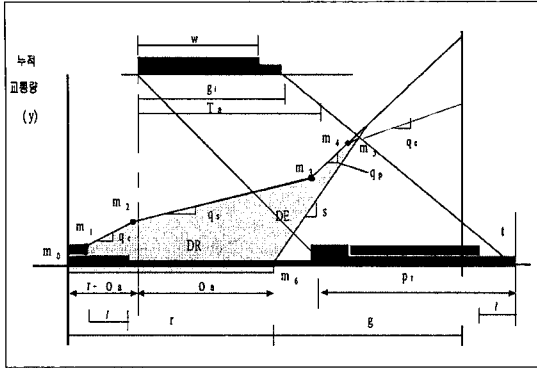
(2) 도착차량군이 하류부 녹색시간에 모두 통과하지 못하는 경우

직진차량군이 하류부 적색이나 녹색시간에 도착하였으나 녹색시간에 모두 통과 하지 못하고 다음 적색시간에 대기행렬을 발생시켰을 경우 이때의 차량군 도착은

$$T_a + p_t > o_a + g$$

이다.

<그림 6>에서는 직진 차량군의 후미중 포화부분이 도착할 경우와 평균부분(흰선과 점선)이 도착할 경우 두가지를 중복시킨 것으로서 두가지 경우를 포함한



〈그림 6〉 차량군 도착형태(대기 발생시)

총지체는 진한색 부분의 다각형면적과 같다. 이러한 면적을 형성하는 누적교통량은 선 $m_0m_1m_2m_3m_4m_5$ 이 되며 이의 각 구분의 선분에 대한 식과 각 식의 절편인 k_1, k_2, k_3, k_4 를 전향에서와 마찬가지로 방법으로 구한다. 그리고 7개의 교점 $m_0 - m_6$ 으로 둘러싼 다각형의 적분면적을 S_p 라고 하면

$$\begin{aligned}
 S_p &= \int_{t_m}^{t_m} y_2 dt + \int_{t_m}^{t_m} y_2 dt + \int_{t_m}^{t_m} y_2 dt \quad (23) \\
 &+ \int_{t_m}^{t_m} y_2 dt + \int_{t_m}^{t_m} y_2 dt - \int_r^{t_m} y_2 dt \\
 &= -\frac{k_1^2}{2(q_p - q_e)} - \frac{(k_2 - k_1)^2}{2(q_e - q_s)} - \frac{(k_3 - k_2)^2}{2(q_s - q_p)} \\
 &- \frac{(k_4 - k_3)^2}{2(q_p - q_e)} - \frac{(sr + k_4)^2}{2(q_m - s)} - \frac{sr^2}{2}
 \end{aligned}$$

이다. 식(23)이 모든 경우에 적용되기 위한 일반화방법은 2가지로서 첫째는 차량군형태로부터 만들어지는 선분의 수는 4개이므로 차량군 후미중 포화부분과 평균부분이 포함된 5개의 선분에서 정적분에 사용될 선분 4개를 선별한다. 두 번째는 전향에서와 마찬가지로 적분시의 최상한이 되는 t_{up} 를 결정한다. 첫 번째는 선분의 수를 4개로 하기 위해 다음조건에 따라 구분한다.

- a) $o_a + g < T_a + p_t < o_a + g + l$ 일때는
 $k_1 = 0, q_m = q_s$
- b) $T_a + p_t > o_a + g + l$ 일때는
 $k_4 = k_3, q_m = q_p$

두 번째는 t_{up} 는 L_s 와 $L_i(i=1,2,3,4)$ 가 만나는 교점인 $t_{si}(i=1,2,3,4)$ 중의 하나이므로 이를 선별하기 위해서 먼저 선분간의 교점 t_m 와 t_{si} 의 일반식을 구하면

$$\begin{aligned}
 t_{m_i} &= \frac{k_i - k_{i-1}}{q_i - q_{i+1}} \\
 t_{s_i} &= \frac{k_i + sr}{s - q_{i+1}} \quad (\text{단 } t_{m_i} = 0 \text{이면 } t_{s_i} = 0)
 \end{aligned}$$

여기서 $i=1,2,\dots,4$ $q_1 = q_4 = q_s, q_2 = q_p, q_3 = q_e$ 이다. t_{up} 은 전향에서와 마찬가지로 다음과 같은 관계에서 구할 수 있다.

- c) $t_{m_i} > r$ 이고 $t_{m_i} \geq t_{s_i} (i=1,2,3,4)$ 이다.
- d) c)에서의 t_{s_i} 가 존재할 때 t_{s_i} 중 i 가 최소되는 값
- c)에서의 t_{s_i} 가 존재하지 않고

$$\begin{cases} k_1 = 0 \text{ 일때 } t_{up} = t_{s_5} \\ k_4 = k_3 \text{ 일때 } t_{up} = t_{s_4} \end{cases}$$

t_{up} 가 결정될 때의 i 를 j 라고하면 누적지체도 계산식(23)를 다음과 같이 일반화할 수 있다.

$$s_s = \sum_{i=1}^j \frac{(k_i - k_{i-1})^2}{2(q_{i+1} - q_i)} + \frac{(k_j + sr)^2}{2(s - q_{j+1})} - \frac{sr^2}{2} \quad (24)$$

여기서 $q_1 = q_4 = q_p, q_2 = q_5 = q_e, q_3 = q_s$ 이다. 식(22), 식(24)에서 구한 총지체는 교차로 접근부에서의 접근지체이므로 이를 신호교차로 효과적도인 평균정지지체로 환산하기 위하여는 일반적으로

$$\text{정지지체} = \text{접근지체} / 1.3$$

와 같은 방법을 사용한다.

IV. 모형의 적용

모형의 적용목표는 제안모형에 의해 예측된 지체도와 TRANSYT-7F모형에서 예측된 지체도간의 근사 정도를 비교하여 제안모형의 예측능력을 확인하는 것이다. 적용방법은 NCHRP 모형을 비교모형으로 TRANSYT-7F모형을 기준 모형으로 설정하여 각 모

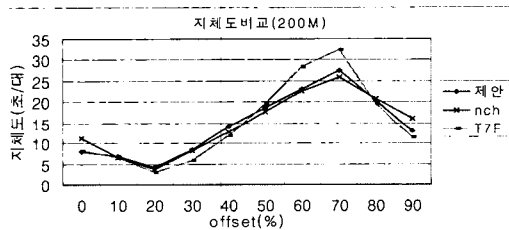
형간에 링크 거리별 읍셋변화별 지체도변화를 각모형별로 비교하였다. 지체도기준은 균일지체로 하였으며 NCHRP 모형과 제안모형은 랜덤지체를 무시한 차량균지체만을 대상으로 하였다. 사례 간선도로상에서의 교통특성은 다음과 같다. 주기(C)= 90초, 녹색시간비율 (g/C)=0.5, 포화도비 (q/c)=0.8 녹색시도착비율(p)=0.8, 속도(v)=40 km/h, 링크거리(d)=200, 400, 600m <그림 7>에서 보는 바와 같이 TRANSYT-7F와의 지체도비교에서 제안모형은 60-70% 읍셋을 제외하고는 큰 격차없이 비교적 고르게 분포하였다. NCHRP모형의 경우는 45% 읍셋이하에서는 계속해서 높고 이상에서는 대체로 낮게 예측되는 반면에 제안모형은 편향성이 적다. 모든 읍셋에 대해서 제안모형의 지체도 변화폭이나 최고 지체도값이 NCHRP모형의 것보다 큰데 이는 도착차량군의 선두부분의 높이가 보다 높은데서 기인하는 것으로 판단된다. 이것은 제안모형의 차량균형태가 장방형을 가

정한 NCHRP모형보다는 읍셋변화에 대한 지체도 변화에 민감함을 보여준다. <그림 8>과 <그림 9>에서도 마찬가지로 NCHRP모형은 일정 읍셋을 전후에서 대체로 높거나 낮은 경향을 나타낸 반면에 제안모형은 편향성이 적으며 특히 600M에서 대체로 TRANSYT-7F와 거의 유사한 지체도를 예측했다. 결국 제안모형은 모든 읍셋변화에 대해서 TRANSYT-7F의 결과에 근접한 지체도를 예측할 뿐아니라 NCHRP 모형보다도 TRANSYT-7F에 가까운 지체도를 예측하였다.

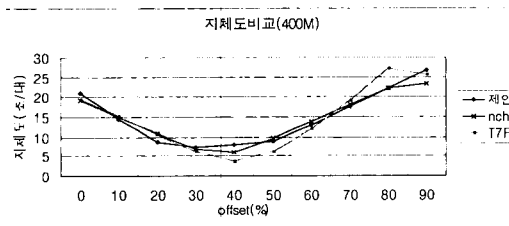
V. 결론

신호 교차로의 지체도에 미치는 가장 큰 영향요소 중의 하나는 신호연동인데 신호연동에 의한 지체도 예측은 TRANSYT-7F모형이 가장 널리 사용되고 있다. 하지만 TRANSYT-7F모형은 컴퓨터 프로그래밍 기법을 이용해야 하는 복잡함과 자료수집, 코딩 그리고 실행과정이 번거롭다. 본연구에서는 도로용량편람의 사용례에서처럼 응용이 간편하면서 또한 결과가 우수한 해석적 모형으로 대체하기 위하여 이루어졌으며 제안모형으로부터 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

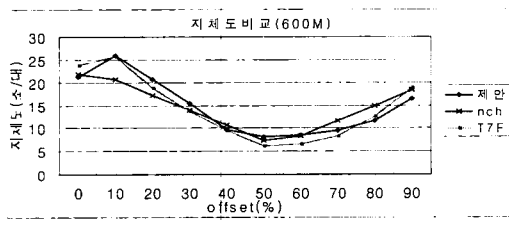
- ① 제안모형은 해석적 방법에 의한 것으로서 신호연동효율에 따른 지체도 발생량을 추정하였으며 그 결과 또한 TRANSYT-7F의 결과와 일관성 있는 지체도를 예측하였다.
- ② 기존의 해석적 모형인 NCHRP모형보다 TRANSYT-7F에 근접한 지체도를 예측하였다. 이러한 지체도 산정의 정확성은 장방형을 가정한 차량균형태보다는 현실성있는 본 연구의 차량균 형태에 기인한 것으로 분석되었다. 차량균형태는 직진 포화교통류와 평균교통류 그리고 회전교통류와 블록 내 유출입교통류와 같은 2차교통류로 구분하여 교통류특성에 부합되게 구성하였다.
- ③ 제안모형은 차량균 도착시점과 그때의 교통량에 의한 누적 교통량·시간분포를 적분법에 의해 산출하므로써 논리가 명확하고 단순하여 수계산으로도 연동지체도의 산출이 가능하다.
- ④ NCHRP모형이나 Roupail모형에서는 적색시간 간격내에서 차량균 도착이 달라질 수 있는 경우의 지체도를 예측하지 못하나 제안모형은 거의 모든



<그림 7> 모형별지체도(200M)



<그림 8> 모형별지체도(400M)



<그림 9> 모형별 지체도(600M)

경우에도 민감한 지체도를 예측할 수 있다. 앞으로의 연구과제로는 제안모형에 대한 차량군 형태 적용을 보다 현실화하도록 고려하며 차량군 분산에 대한 분산지수식을 새로이 정립하고 차량군 도착 구분에 따른 지체식을 단일한 통합식으로 유도하는 방안을 연구할 것이다. 그리고 모형의 평가에서 제안모형의 지체도 변화에 대한 민감도 분석과 TRANSTY-7F뿐 아니라 NETSIM 모형과도 비교하여 모형의 적합성을 검증하고자 한다. 더 나아가서는 HCM 방법과 같은 간편한 적용을 위하여 수계산 가능한 실용적인 방안을 유도하는 연구가 이루어지도록 하겠다.

참고문헌

1. Highway Capacity Manual,(1994) Special Report 209, 3rd Edition,Transportation Research Board,National Research Council, Washington,D.C.
2. 도로용량편람,(1992) 건설부.
3. K.G. Courage and C.J. Wallace,(1991) TRANSYT-7F User's Guide. Transportation Research Center, University of Florida, Gainesville, Florida, December.
4. E.C.P. Chang and C.J. Messer,(1991) PASSERII-90 Program User's Guide, Texas

Transportation Institute,Texas A&M University, June.

5. N.M. Roupail,(1988) "Delay Model for Mixed Platoon and Secondary Flows," Journal of Transportation Engineering, Vol 114, No 12.
6. National Cooperative Highway Research Program 339,(1991) Effects of the Quality of Traffic Signal Progression on Delay, TRB.
7. Highway Capacity Manual-1985,(1985) Special Report 209, Transportation Research Board, National Research Council Washington,D.C.
8. J.M.Staniwicz and H.S. Levinson,(1985) "Signal Delay with Platoon Arrivals," TRR 1005.
9. P.S.Olszewski,(1990)"traffic signal Delay Model for Nonuniform Arrivals," TRR 1287.
10. K.G.Courage and C.E. Wallace,(1988) "Modeling the Effect of Traffic Signal Progression on Delay," TRR 1194.
11. 김원창, 오영태, 이승환,(1992) "신호등이 있는 가로망상에서의 신호 연동화보정계수 산정모형", 대한교통학회지 제10권 제2호, 대한교통학회.
12. A. Manar and K.G. bass,(1996) "Traffic Platoon Dispersion Modeling on Arterial Streets," TRR 1566.