

■ 論 文 ■

충격파를 이용한 신호교차로 지체산정 모형 개발
(비포화 2차로 신호교차로 상에서의 버스혼합교통류 지체산정모형)
 Development of Shock Wave Delay Estimation Model for Mixed Traffic at
 Unsaturated Signalized Intersection

김 원 규
 (한국항공대학교 교수)

김 병 종
 (한국항공대학교 교수)

박 명 규
 (한국항공대학교 대학원)

— 목 차 —

I. 서론	III. 모형검증
II. 문헌고찰	III. 결론
III. 버스를 포함한 혼합교통류의 모형개발	참고문헌

Key Words : 신호교차로, 혼합교통류, 버스 정류장, 충격파, 지체산정
 shock wave, traffic signal, delay estimation, mixed traffic, approach delay

— 요 약 —

신호교차로는 교통 네트워크 상에서 지체가 발생하는 중요 지점이며, 또한 신호교차로의 운영 효율성은 전체 네트워크 성능에 결정적인 영향을 끼친다. 신호 교차로 상에서의 MOE(Measure of Effectiveness)는 다양한 기준으로 측정되고 있으며, 그 중 교통류의 지체는 운전자와 교통 전문가들이 일반적으로 가장 잘 이해하기 쉽고 중요한 MOE라 할 수 있다.

따라서, 신호 교차로 상에서 교차로에 유입되는 차량의 지체에 대한 측정은 교차로의 교통 성능의 평가를 위한 중요한 기준이 되며, 그에 따라 지체를 측정하기 위한 다양한 지체 산정 모형들이 개발되었다. 그러나 실제 교통류가 혼합교통류인데 반해, 지금까지의 지체 측정 모형 대부분은 동질 교통류를 가정한 연구로 수행 되었다. 그러므로, 본 연구에서는 버스와 승용차로 이루어진 비포화 혼합교통류 상황에서, 신호교차로와 버스 정류장에서 사이에서 발생하는 지체를 직접 산정하기 위한 모형을 개발하였다. 이 모형은 혼합교통류의 모든 교통상황을 반영한 모형이라기 보다는 2차로 도로에서 버스의 정차로 인한 지체현상을 설명하는데 주안점을 두었다. 모형의 검증은 지체 산정 모형과 시뮬레이션인 INTEGRATION의 결과값을 비교하여 모형적용에 대한 유효성을 평가 하였다.

평가결과 버스의 유입량에 대한 비교에서는 버스의 대수가 많아질수록 평균 지체량은 늘어나는 것으로 나타났다. 신호 교차로와 버스 정류장의 이격거리에 대한 비교에서는 버스가 전방차량의 영향을 받지 않는 경우 일정한 값을 유지하는 결과가 나타났다. INTEGRATION과 본 연구에서 개발한 모델과의 오차범위는 10% 내외로 나타났다.

Controlled traffic intersection is critical point in terms of transportation network performance, where the most of traffic congestion arises. One of the most important and favorable measure of effectiveness in the signal controlled intersection is approach delay. Although lots of efforts to develop traffic delay estimation models have been made throughout the years, most of them were focusing on homogeneous traffic flow. The purpose of this research is to develop a traffic delay estimation model for traffic flow mixed with bus based on the horizontal shockwave theory. Traffic simulation is performed to test the adaptation level of the model in generic environment. The result shows that the delay increases with increasing bus traffic. Overall model accuracy comparing simulation result is acceptable, that shows the error range around 10 percent.

I. 서론

1. 연구배경 및 목적

신호교차로는 교통네트워크 상에서 지체가 발생하는 중요 지점이며, 그러므로 신호교차로 운영 효율성이 전체 단속류 네트워크 성능에 결정적인 영향을 끼친다.

신호 교차로 상의 MOE(Measuer of Effectiveness) 중에서 교통류의 지체는 운전자와 교통 전문가들이 일반적으로 가장 이해하기 쉽고 중요한 MOE라 할 수 있다.

따라서, 신호 교차로 상에서 교차로에 유입되는 차량의 지체에 대한 측정은 교차로의 교통성능의 평가를 위한 중요한 기준이다. 지체는 현장 실측에 의해 조사되는 것이 가장 정확하다. 그러나 시간과 비용이 많이 들기 때문에 비현실적이며 시뮬레이션에 의해 평가되는 경우가 많다. 그러나 이 역시 적지 않은 비용을 초래하며 이러한 이유로 다양한 지체 산정 모델들이 개발되었다.

그러나 실제 교통류가 승용차, 버스 등으로 이루어진 혼합교통류인데 반해, 지금까지의 지체 측정 모델 대부분의 방법은 동질 교통류를 가정한 연구로 수행 되었다. 기존의 지체 산정 모델 중 일부는 버스 및 트럭 등에 환산계수를 적용함으로써 이러한 문제점을 보완하였으나 혼합교통류에 대한 직접적인 산정은 불가능하였다.

본 연구의 목적은 환산계수를 이용한 변환없이 Horizontal Shock Wave 모델을 이용하여 버스가 포함된 왕복 2차로 혼합 교통류의 지체산정 모형을 개발하는 것이다. 이 모형은 혼합교통류의 모든 교통상황을 반영한 모형이라기 보다는 2차로 도로에서 버스의 정차로 인한 지체현상을 설명하는데 주안점을 두었다.

2. 연구 범위와 방법

모형의 개발은 수평충격파이론(Horizontal Shock wave Theory)을 기본으로 하여 이루어졌다. 또한 시뮬레이션전산모형인 INTEGRATION을 이용하여 본 연구에서 개발된 혼합교통류지체모형의 산정결과를 비교 평가 하였다.

본 연구에서는 이론적 고찰을 통하여 신호 교차로 상의 지체 산정 방법론을 고찰하고 충격파이론을 이용한 혼합교통류지체산정모형개발의 타당성을 논의하였다. 또한 충격파이론을 이용한 개발 모형의 적용범위 및 전제

조건 등을 수립하고 혼합 교통류 모형을 개발하였다. 최종적으로 개발된 모형의 산정결과와 교통류 시뮬레이션인 INTEGRATION의 지체산정결과와 비교하여 모형 적용에 대한 유효성을 평가하였다.

II. 지체산정방법의 고찰

1. Webster 모형

Webster(1958)는 결정론적 대기행렬이론을 이용하여 아래와 같은 비포화 신호교차로 상의 지체산정 모형을 개발하였다.

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

2. HCM 2000 모형

HCM 2000에서는 HCM 1994 모형에서 발견된 몇 가지 문제점을 수정한 지체 산정 모형을 제안하였다. HCM 2000에서 차선당 차량의 평균 지체를 산정하기 위한 모형은 아래와 같다.(TRB, 1998)

$$d = d_1 \times PF + d_2 + d_3 \quad (2)$$

$$d_1 = \frac{0.5C \left(1 - \frac{g}{C}\right)^2}{\left(1 - Mn(1, X) \frac{g}{C}\right)} \quad (3)$$

$$d_2 = 900T \left[(X-1) + \sqrt{(X-1)^2 + \frac{8kIX}{cT}} \right] \quad (4)$$

$$PF = \frac{(1-P)F_p}{1 - \frac{g}{C}} \quad (5)$$

3. 비포화 신호교차로 상에서 지체를 산정하기 위한 수직대기행렬(VERTICAL QUEUING)모형

수직대기행렬모형은 결정론적 대기행렬이론의 기본 가정 및 유·출입 패턴을 그대로 따르고 있으며, 차량의 지체산정은 신호교차로의 적색현시 동안 발생한 대기행렬이 완전히 해소되는 시점까지의 총 지체를 산정하는 것으로 얻을 수 있으며 식(6), 식(7)과 같이 개발되었다.(Kang, 2000)

$$D = \frac{r^2 \cdot q}{2 \cdot 3600} \cdot \left(1 + \frac{q}{S-q}\right) \tag{6}$$

$$d = \frac{r^2}{2 \cdot C} \cdot \left(1 + \frac{q}{S-q}\right) = 0.5C \frac{\left(1 - \frac{g}{C}\right)^2}{\left(1 - X \frac{g}{C}\right)} \tag{7}$$

- 여기서, D : 총 지체 (seconds)
- d : 차량의 평균 지체 (seconds)
- r : 유효 적색 현시 (seconds)
- g : 유효 녹색 현시 (seconds)
- C : 신호 주기 (seconds)
- S : 포화 교통류율(vehicles/hour of green)
- c : 용량 ($S \times g/C$) (vehicles/hour)
- X : 도착량-용량 비율
- q : 도착율(vehicles/hour)

식(6), 식(7)에서 나타난 바와 같이 Kang의 수직대기행렬 지체산정모형은 차량이 균일한 패턴으로 유입한다고 가정하기 때문에 균일한 특성을 가진 단일 교통류의 지체 산정만이 가능하다.

4. 비포화 신호교차로 상에서 지체를 산정하기 위한 HORIZONTAL SHOCK WAVE 모형

Kang은 수평충격파이론을 이용하여 단일교통류의 지체산정모형을 개발하였다. 신호교차로 상에서의 지체는 신호운영에 의해 발생하는 추가 주행시간으로 나타낼 수 있으므로 신호주기동안 발생하는 총 지체는 신호 운영의 유무에 따른 주행시간의 비교를 통하여 산정할 수 있으며 식(8),식(9)에서 보는 바와 같다.(Kang, 2000)

$$\text{주행시간} = \sum_{i=A,B,C} A_i K_i \tag{8}$$

$$\begin{aligned} \text{지체} &= TT_{\text{with signals}} - TT_{\text{no signals}} \\ &= \sum_{i=A,B,C} [A_i(k_i - k_c)] \end{aligned} \tag{9}$$

- 여기서, TT : 주행 시간
- A_i : 면적 i 의 표면적
- k_i : 면적 i 의 밀도

또한 식(9)를 이용하여 신호 운영에 의해 야기되는

총 지체 모형과 평균 지체 모형을 식(10),식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$D = \frac{X_m}{2} \cdot [r \cdot (k_j - k_a) + (t_m + t_c) \cdot (k_d - k_a)] \tag{10}$$

$$d = \frac{X_m \cdot 3600}{2 \cdot q \cdot C} \cdot [r \cdot (k_j - k_a) + (t_m + t_c) \cdot (k_d - k_a)] \tag{11}$$

- 여기서, X_m : 최대 대기행렬 지점 (kilometers)
- $= t_m \cdot SW_R$
- $= \frac{q \cdot r \cdot S}{3600 \cdot [q \cdot (k_d - k_j) + S \cdot (k_j - k_a)]}$
- t_m : 최대 대기행렬 지점의 도달 시간 (seconds)
- $= \frac{-q \cdot r \cdot (k_d - k_j)}{3600 \cdot [q \cdot (k_d - k_j) + S \cdot (k_j - k_a)]}$
- t_c : 대기행렬 해소 시간 (seconds)
- $= x_m / SW_N$
- r : 유효 적색 간격 (seconds)
- k_j : 포화 밀도 (vehicles/kilometer)
- k_a : 유입 밀도 (vehicles/kilometer)
- k_d : 유출 밀도 (vehicles/kilometer)
- q : 도착율 (vehicles/hour)
- C : 주기 (seconds)

5. 지체산정 방법론의 검토

전술한 지체산정의 분석적 모형들은 크게 두가지 종류로 나눌 수 있다. 즉 웹스터 모형, HCM 모형, Kang's Vertical Queueing 모형과 같이 결정론적 Queueing이론을 바탕으로 한 모형들과 충격파이론을 이용한 모형들로 나눌 수 있다.

결정론적 Queueing 이론은 교차로 통과시의 도착율과 서비스율을 수학적으로 해석하는 것을 기본골자로 하기 때문에 병목이 발생하는 교차로 정지선 상류부의 상황 변화에 대한 분석이 어려운 문제점이 있다. 이에 반하여 충격파 이론은 병목지점의 상류부의 밀도 및 지체상황에 대한 세부적인 분석이 가능하다는 장점이 있어 혼합교통류의 지체산정이라는 본 연구의 목적에 적합하다. 그러므로 본 연구에서는 충격파이론을 바탕으로하여 혼합교통류의 지체산정모형을 개발하였다.

III. 버스를 중심으로한 혼합교통류 모형개발

1. 모형 개발의 목적

본 연구에서는 Kang의 단일교통류지체산정 모형에 적용된 수평 충격파이론 (Horizontal Shock wave Theory)을 기반으로하여 버스와 승용차로 구성된 혼합 교통류의 지체산정 모형을 개발 하였다. 본 연구에서는 단일 교통류 지체 모형에서 추가되는 지체 발생요인은 버스 정류장에 버스가 정차하는 경우만을 고려한다.

버스정류장에 버스가 정차할 경우 고려해야 할 지체 들은 버스정차기간동안 버스후미 차량에서 발생하는 지체와 신호 교차로에서 발생하는 지체, 그리고 버스 정류장과 신호교차로 사이 구간에서 발생하는 지체로 구분할 수 있으며, 본 연구에서는 이러한 각 지체를 산정하여 비포화 상황에서 버스의 유입대수에 따른 혼합교통류 지체 산정 모형을 개발하였다.

2. 모형 개발을 위한 기본전제

모형 개발을 위한 기본 전제는 다음과 같다.

- 포화 상태 이전의 비포화 상태만을 고려한다.
- 신호주기동안 버스의 유입지점은 차량의 선두에 위치 하며 한 신호주기동안에 한 대의 버스만이 존재한다.
- 승용차와 버스만으로 이루어진 혼합교통류로 구성 된다.
- 모든 차량의 운행 속도는 동일하다.
- 버스정차시간 동안 후미 차량의 차선 변경은 없는 것으로 한다.
- 버스는 전방 차량에 영향을 받지 않는다.

신호교차로에서 유입차량이 포화교통량을 넘어서거나 신호주기동안 버스의 유입지점이 일정하지 않으면 신호 주기마다 충격파의 형태가 달라지게 된다. 이러한 경우 신호주기마다 발생하는 지체가 동일하지 않으므로 버스의 유입시점은 신호주기동안 유입되는 차량의 선두에 위치하고, 전방 차량의 영향을 받지 않는다고 가정한다.

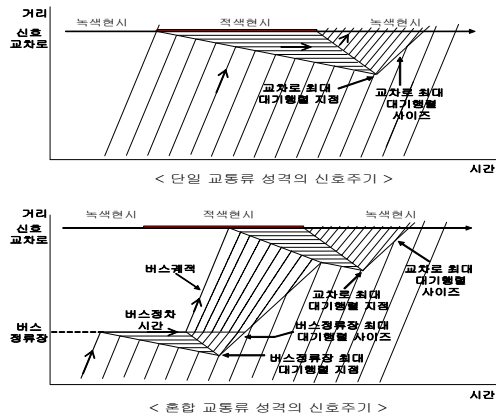
본 연구에서 개발한 모형은 신호교차로 전방의 버스 정류장에서 신호교차로까지의 지체를 산정하기 위한 것으로 트럭 등 여타 종류의 교통류들은 승용차와 동일하게 취급하였다.

III. 모형 개발

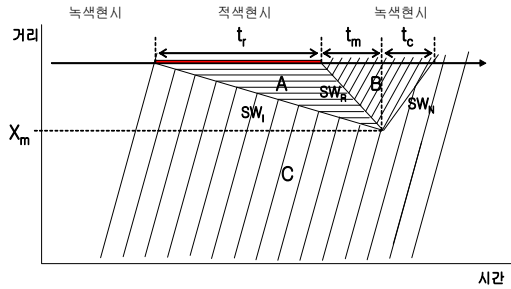
버스와 승용차로 구성된 혼합 교통류는 버스의 유입 대수에 따라 신호주기 교통류의 성격이 변하게 된다. 혼합교통류에서 시간당 버스의 유입대수가 시간당 신호주기의 횟수보다 적을 경우, 신호주기 단위별로 교통류의 성격을 분석해 보면 버스가 포함되지 않는 신호주기는 단일교통류 성격을 띠게 되며, 버스가 포함된 신호주기는 혼합교통류의 성격을 띠게 된다. <그림 1>은 신호주기별로 두 가지 교통류형태에 대한 차량의 궤적을 나타 낸 것으로 상단의 그림은 단일 교통류 성격의 신호주기 이며 하단의 그림은 혼합교통류 성격의 신호주기이다.

<그림 1>에서 보는 바와 같이 상단의 단일 교통류 성격의 신호주기에서의 충격파는 Horizontal Shock wave 모델과 동일하며, 하단의 혼합교통류 성격의 신호 주기에서 버스는 신호교차로 전방에 위치한 버스 정류장에 일정시간 정차하게 되고 버스 후방으로 대기행렬이 형성된다. 버스의 정차 후 출발 시 버스정류장에서 버스 정차기간 동안 후방에 발생한 대기행렬은 해소되고, 버스정류장에서 신호교차로에 도달하는 구간에서는 버스의 정차 시 발생한 대기행렬의 영향을 받는 차량군이 발생 한다. 적색 현시 동안 신호교차로에 도달한 차량은 대기 행렬을 이루는데 그 형태는 버스정차기간 및 버스정류장 에서 발생한 대기행렬의 영향을 받는다.

혼합교통류의 신호주기 및 신호주기 당 유입 교통량은 혼합교통류와 단일교통류가 동일하며 단일 교통류의 차량궤적 중 첫 번째 차량이 버스로 대체되어 버스정류장에 일정시간 정차하는 형태이다.



<그림 1> 단일 및 혼합 교통류 성격의 신호주기 내에서의 충격파



<그림 2> 단일교통류 성격의 신호주기 지체산정

혼합교통류의 지체를 산정하기 위해서 식(12)와 같이 시간당 버스가 포함된 혼합교통류 성격의 신호주기와 버스가 포함되지 않은 단일 교통류 성격의 신호 주기를 각각 산정하여 차량의 평균지체를 구한다. 모형의 단순화를 위하여 버스는 신호주기 당 1대씩 포함되는 것으로 가정하였으므로 시간당 전체신호주기 횟수에서 혼합교통류 성격의 신호주기는 버스의 대수와 동일하며 나머지는 단일교통류 성격의 신호주기가다.

$$D = \frac{(C \cdot BN \cdot D_B) + ((3600 - C \cdot BN) \times D_C)}{C \cdot q} \quad (12)$$

- 여기서, D : 혼합교통류의 평균 지체
- C : 신호주기 (sec)
- BN : 시간당 버스 유입량 (veh/sec)
- D_B : 혼합교통류 성격의 신호주기 총지체 (sec)
- D_C : 단일교통류 성격의 신호주기 총지체 (sec)
- q : 시간당 차량의 유입율 (sec)

식(12)를 이용하여 혼합교통류의 평균지체를 산정하기 위해서는 버스의 유입대수에 따라 단일교통류와 혼합교통류의 지체를 산정하여야 한다.

버스의 유입이 없는 단일 교통류에 대한 적색현시에 의한 지체는 <그림 2>에서 보는 바와 같이 Horizontal Shock Wave(수평충격파) 모형을 이용하여 산정할 수 있다.

식(13)과 같이 지체는 신호가 있을 경우 차량의 운행 시간에서 신호가 없을 경우 차량의 운행시간을 제외한 시간으로 산정될 수 있다.

지체 =

$$TT_{with\ signals} - TT_{no\ signals} = \sum_{i=A,B,C} [A_i(k_i - k_C)] \quad (13)$$

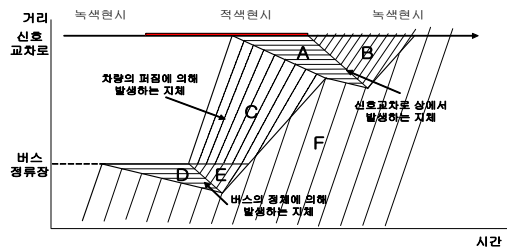
- 여기서, TT : 주행 시간
- A_i : 면적 i 의 표면적
- k_i : 면적 i 의 밀도
- k_C : 교통류 C 상태의 밀도

식(13)에 따라 단일교통류 성격의 적색현시 동안 발생한 총 지체는 식(14)와 같이 산정할 수 있다.

$$D_C = \frac{X_m}{2} \cdot [t_r \cdot (k_j - k_a) + (t_m + t_c) \cdot (k_d - k_a)] \quad (14)$$

- 여기서,
- D_C : 단일 교통류 성격의 신호주기 총지체(sec)
- X_m : 최대 대기행렬 지점 (km)
- t_m : 최대 대기행렬 지점의 도달 시간 (sec)
- t_c : 대기행렬 해소 시간 (sec)
- t_r : 유효 적색 시간 (sec)
- k_j : 포화 밀도 (veh/km)
- k_a : 유입 밀도 (veh/km)
- k_d : 유출 밀도 (veh/km)
- q : 도착율 (veh/h)
- C : 주기 (sec)
- S : 포화 교통류율 (veh/hour of green)

버스가 포함되어 있는 혼합교통류 성격의 신호주기는 <그림 3>과 같이 버스가 정류장에 정차하는 시간동안 후



<그림 3> 혼합교통류 성격의 신호주기 지체 구간

미 차량에 의해 발생하는 지체와 버스 정류장에서 신호 교차로까지 도달하는 거리동안 차량의 분산구간에서 발생하는 지체, 신호 교차로상에서 발생하는 지체로 나누어 산정해야 한다.

지체는 단일 교통류성격의 신호주기의 방법과 같은 형태로 산정한다.

$$\begin{aligned}
 \text{지체} &= TT_{with\ signals} - TT_{no\ signals} \\
 &= \sum_{i=A,B,C,D,E,F} [A_i(k_i - k_F)] \quad (15)
 \end{aligned}$$

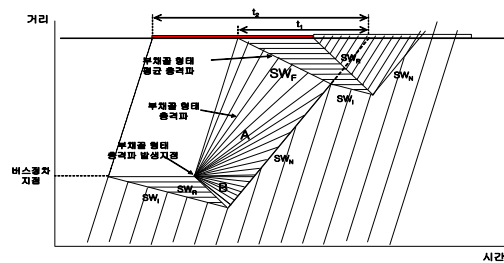
여기서, TT : 주행 시간
 A_i : 면적 i 의 표면적
 k_i : 면적 i 의 밀도

수평충격과 이론에서 대기행렬은 유출시점에 용량상태의 밀도(k_d)로 진행된다고 가정하고 있다. 그러나 실제로는 버스가 버스정류장에 정차한 후 다시 출발하는 경우 버스의 전방은 차량이 없는 상태가 되므로 버스는 자유속도로 진행하게 되고, 이 경우 버스 후방 차량들의 진행상태는 용량상태의 밀도에서 앞차와의 간격을 자유속도 상태의 밀도(k_a)가 될 때까지 서서히 늘려가며 진행되는 퍼짐(dispersion)현상이 발생한다고 가정한다. Daganzo(1997)는 Piece-wise Linear Problems에서 교통류상에 병목지점이 발생하면 이 지점을 지난 후 정체해소 지점에서 부채꼴 형태의 충격파가 발생한다고 설명하고 있다. <그림 4>에서 보는 바와 같이 버스 정류장의 정체해소 지점은 버스 정류장에서 버스의 정차가 종료되고 신호교차로 방향으로 진행이 시작되는 지점이다. 전술한 바와 같이 이 지점에 발생하는 충격파는 부채꼴 모양으로 발생한다. 이는 충격파가 일정한 방향으로만 나가는 것이 아니라 자유속도와 포화교통류의 경계사이에서 모든 방향으로 진행될 수 있음을 나타낸다. 부채꼴 형태의 충격파는 <그림 4>에서 A, B지점 모두에서 발생하지만 충격파 이론에서 신호교차로에서 발생한 대기행렬은 신호교차로를 빠져나가는 시점까지 용량상태의 교통류로 유출된다고 가정하므로 버스의 정차 후 발생한 대기행렬에서도 B지점에서는 용량상태의 교통류로 진행되고 A구간에 대해서만 차량군 퍼짐(Platoon Dispersion) 현상이 발생한다고 가정한다. 이는 주 병목지점인 신호교차로 정지선의 상류부 만이 본 연구에서 개발한 지체 모형의 분석대상이기 때문이다. 실제로 정지선을 지난

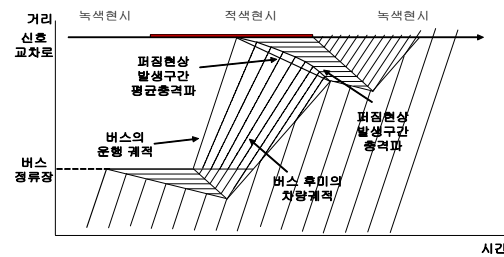
후의 차량군들은 차량군퍼짐현상을 보이며 다음 신호교차로의 대기행렬후미에 도달할 때까지 동일한 형태의 운행행태를 보이게 될 것이지만 본 연구에서 개발한 모형은 분석대상교차로 정지선의 상류부를 분석하는 것이 목적이므로 그 부분은 포함시키지 않았다.

따라서 본 모형은 버스정차 후 발생하는 대기행렬의 지점에서 버스 정차지점(X_b)까지는 용량상태(k_d)의 밀도로 차량이 진행하며 그 이후 지점부터 신호교차로에 도달하는 지점까지는 차량군의 퍼짐현상이 발생한다고 본다.

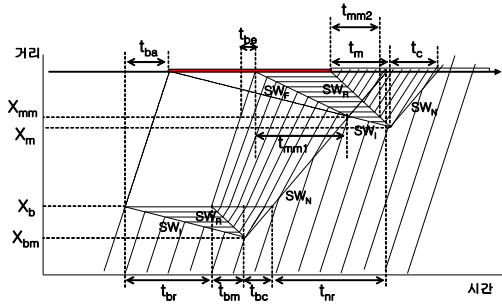
<그림 4>에서 A구간의 지체를 산정하기 위해서는 밀도를 알아야 하지만, A구간 내에서는 다양한 충격파가 발생하고 <그림 5>에서 나타나듯이 신호교차로 상에서 대기행렬과 퍼짐구간 사이에서 밀도차이에 의해 발생하는 충격파는 일정한 형태가 아닌 곡선 형태로 나타난다. 즉, 차량간의 밀도가 일정하지 않고 운행 지점에 따라 계속 변하게 되므로 특정 지점에서 개별 차량 간의 정확한 밀도는 알 수 없다. 그러므로 퍼짐 구간의 밀도는 퍼짐구간의 교통량(q_f)과 평균 충격파(SW_F)를 이용하여 산정된 직선형태의 평균밀도(k_f)를 사용한다. <그림 4>에서 t_2 시간동안의 유입 교통량이 버스의 정차로 인한 대기행렬 발생 후 t_1 시간 동안 유입되므로 퍼짐현상 발생구간의 교통량과 그에 따른 밀도는 식(16),식(17)에서 보는 바와 같다.



<그림 4> 퍼짐구간 내에서의 밀도 형태



<그림 5> 혼합교통류 퍼짐현상 발생구간



<그림 6> 혼합교통류 성격의 신호주기 산정방안

$$q_f = \frac{q_a \cdot t_2}{t_1} \tag{16}$$

$$k_j = k_j - \frac{q_f}{SW_F} \tag{17}$$

여기서, q_f : 피집현상 구간 교통량

q_a : 유입 교통량

k_j : 피집현상 구간 평균 밀도

k_j : 포화 밀도

SW_F : 피집현상 구간 내 평균 충격파

전술한 바와 같이 혼합교통류 성격의 신호주기별 지체는 버스가 정류장에 정차한 시간동안 후미차량에 의해 야기되는 지체와 버스정류장과 신호교차로 사이의 피집현상에 의해 야기되는 지체, 신호교차로 상에서 발생하는 지체로 구분하여 산정한다. 여기서 버스의 정차시간은 지체에 포함되지 않으므로 총 지체량에서 버스정차시간은 제외하였다.

혼합교통류 성격의 신호주기별 총 지체는 식(18)과 같이 산정할 수 있다.

$$D_B = D_{BS} + D_{BB} + D_{BF} - D_{BO} \tag{18}$$

$$D_{BS} = \left[\frac{(t_r - 2t_{br} + t_{mm2} - t_{mm1}) \cdot X_{mm}}{2} + \frac{(t_r + t_{mm2} - t_{br} - t_{mm1}) \cdot (X_m - X_{mm})}{2} \right] \cdot (k_j - k_a) + \frac{X_{bm}}{2} \cdot [t_{br} \cdot (k_j - k_a) + (t_{bm} + t_{bc}) \cdot (k_d - k_a)] \tag{19}$$

$$D_{BB} = \frac{X_{bm}}{2} \cdot [t_{br} \cdot (k_j - k_a) + (t_{bm} + t_{bc}) \cdot (k_d - k_a)] \tag{20}$$

$$D_{BF} = \left[\frac{(t_{mm1} + t_{bc}) \cdot X_{mm}}{2} + \frac{(t_{mm1} + t_{bc} + t_{bm} + t_{bc}) \cdot (X_b - X_{mm})}{2} \right] \cdot (k_f - k_a) \tag{21}$$

$$D_{BO} = \frac{X_{b0}}{2} \cdot [t_{br} \cdot (k_j - k_a) + (t_{bm} + t_{bc}) \cdot (k_d - k_a)] \tag{22}$$

여기서,

D_B : 혼합교통류 성격의 신호주기 총지체 (sec)

D_{BS} : 신호 교차로상에서 발생한 지체 (sec)

D_{BB} : 버스 정류장에서 발생한 지체 (sec)

D_{BF} : 피집현상구간에서 발생한 지체 (sec)

D_{BO} : 버스 정차 시간 (sec)

X_m : 신호 교차로상에서 최대 대기행렬 지점

$$= t_m \cdot SW_R$$

$$= \frac{q \cdot t_r \cdot S}{3600 \cdot [q \cdot (k_d - k_j) + S \cdot (k_j - k_a)]}$$

X_{mm} : 피집현상 종료 지점 (km)

$$= \frac{SW_I \cdot SW_N \cdot (t_{br} + t_{bm} - t_{ba}) + SW_I \cdot (X_b + X_{bm})}{SW_I + SW_N}$$

X_b : 신호교차로에서 버스정류장까지의 이격 거리

X_{b0} : 버스 정류장에서 버스의 대기행렬 지점

$$= t_{b0} \cdot SW_R$$

$$= \frac{t_{br} \cdot S}{3600 \cdot [(k_d - k_j) + S \cdot (k_j - k_a)]}$$

X_{bm} : 버스 정류장에서 최대 대기행렬 지점

$$= t_{bm} \cdot SW_R$$

$$= \frac{q \cdot t_{br} \cdot S}{3600 \cdot [q \cdot (k_d - k_j) + S \cdot (k_j - k_a)]}$$

t_m : 최대 대기행렬 지점의 도달 시간

$$= \frac{-q \cdot t_r \cdot (k_d - k_j)}{3600 \cdot [q \cdot (k_d - k_j) + S \cdot (k_j - k_a)]}$$

t_{mm1} : 피집현상 종료 시간 (seconds)

$$= \frac{X_{mm}}{SW_I} - t_{br}$$

t_{bm} : 버스정류장에서 최대 대기행렬 지점 도달시간

$$= \frac{-q \cdot t_{br} \cdot (k_d - k_j)}{3600 \cdot [q \cdot (k_d - k_j) + S \cdot (k_j - k_a)]}$$

t_{b0} : 버스정류장에서 버스한대의 대기행렬지점의

도달시간

$$= \frac{-t_{br} \cdot (k_d - k_j)}{3600 \cdot [(k_d - k_j) + S \cdot (k_j - k_a)]}$$

t_{bc} : 버스정류장에서 대기행렬 해소 시간 (sec)

$$= x_{bm} / SW_N$$

t_{be} : X_{mm} 에서 신호교차로까지 승용차의 도달시간

$$= \frac{3600 \cdot X_{mm}}{\text{자유속도}}$$

t_{ba} : 버스정류장에서 신호교차로까지 승용차의 도달시간 (sec)

$$= \frac{3600 \cdot X_b}{\text{자유속도}}$$

t_{nr} : 버스정류장에서 SWN의신호교차로 도달시간

$$= \frac{X_b}{SW_N}$$

t_{bc} : 포화 밀도 (veh/km)

t_{br} : 버스의 정류장 정차 시간 (sec)

SW_F : 퍼짐현상 구간 내 평균 충격파 (km/sec)

$$= \frac{X_{mm}}{t_{mm1}}$$

k_j : 퍼짐현상 구간 내 평균 밀도 (veh/km)

$$= f_j - \frac{q_f}{SW_F}$$

q : 도착율 (veh/h)

q_f : 퍼짐현상 구간 교통량 (veh/h)

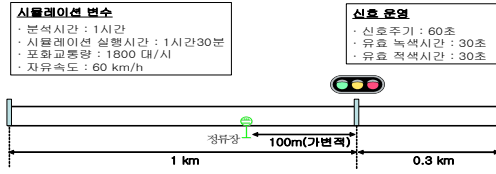
$$= \frac{q \cdot (t_{br} + t_{bm} + t_{bc} + t_{nr} - t_{ba})}{(t_{bm} + t_{bc} + t_{nr} - t_{ba})}$$

IV. 모형검증

본 연구에서는 모형의 유효성 검증을 위해 미시적 시뮬레이션 모형인 INTEGRATION을 사용하였고, 유효성 평가를 위해 시뮬레이션결과와 모형의 지체산정결과와의 상대적인 오차를 나타내는 MAPE를 이용하였다.

모형의 유효성 검증을 위한 기본적인 조건은 다음과 같다.

- 신호 교차로 전방 편도 1차선만 존재한다고 설정함
- 유효 적색 현시와 유효 녹색 현시를 각각 30초로 설정함
- 버스와 승용차의 속도는 같다고 설정함
- 버스의 정차시간은 15초라고 설정함
- 차로 당 포화교통량은 1800대/시로 설정함



<그림 7> 모형 검증을 위한 조건 설정

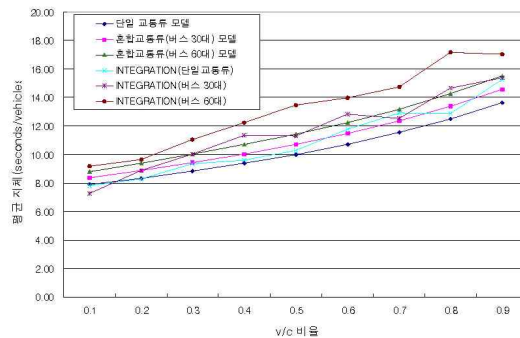
위의 조건을 바탕으로 비포화 상황의 교통량 수준별 지체측정을 위해 v/c 비율을 0.1~0.9까지 0.1단위로 변화시키면서 비교, 평가하였다.

1. 단일 교통류와 혼합 교통류의 지체도 변화

본 연구에서는 단일 교통류와 혼합교통류의 지체도 측정을 위해 시간당 버스의 유입대수가 각각 30, 60대인 경우의 지체를 산정하였다. 신호교차로에서 버스정류장까지의 기본 이격거리는 100m이고, 버스의 정류장 정차시간은 15초라고 설정하였다. 평균 지체도의 산정 결

<표 1> 버스 유입대수에 대한 지체도 변화 단위 : (초)

v/c		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
		0.6	0.7	0.8	0.9	
지체 산정 모형	단일교통류모형	7.89	8.33	8.82	9.38	10.00
		10.71	11.54	12.50	13.64	
	혼합교통류모형 (버스30대/시)	8.34	8.86	9.42	10.03	10.71
		11.48	12.36	13.37	14.57	
혼합교통류모형 (버스60대/시)	8.79	9.39	10.01	10.68	11.42	
	12.24	13.17	14.25	15.50		
시뮬레이션결과	단일교통류	7.81	8.30	8.85	9.61	10.28
		11.77	12.92	14.25	15.25	
	혼합교통류 (버스30대/시)	7.25	8.87	10.03	11.34	11.27
		12.81	12.54	14.63	15.36	
혼합교통류 (버스60대/시)	9.16	9.64	11.02	12.23	13.45	
	13.95	14.72	17.15	17.02		



<그림 8> 버스의 유입대수에 따른 지체도 변화

<표 2> MAPE 결과

교통류	MAPE
단일교통류	0.055
혼합교통류 (버스30대/시)	0.073
혼합교통류 (버스60대/시)	0.117

과는 <표 1>, <그림 8>에서 보는 바와 같다.

표에서 보는 바와 같이 v/c 비율이 높아질수록 차량의 평균 지체도는 증가하며 버스의 대수가 늘어날수록 차량의 평균 지체도가 상승하게 된다. 이러한 결과는 버스의 버스 정류장 정차 후 후방의 대기행렬이 신호교차로까지 도달하는 과정에서 퍼짐현상으로 인해 발생하는 지체도가 버스의 대수가 많아질수록 높아지기 때문이다.

모형의 유효성 평가를 위해 MAPE를 산정한 결과는 <표 2>와 같다. 단일교통류와 혼합교통류의 모형과 시뮬레이션 간의 평균 오차범위는 약 5.5~11.7%로 양호한 수준이라 할 수 있다. 단일 교통류에 비해 혼합교통류의 평균 오차범위는 버스의 대수가 늘어날수록 커진다.

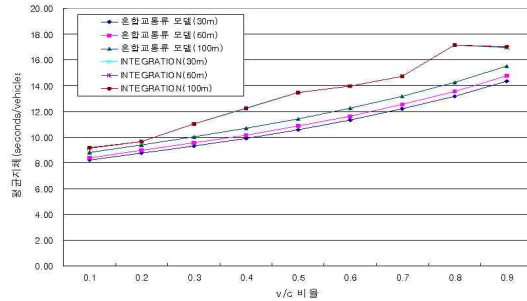
2. 신호 교차로와 버스 정류장의 이격거리에 따른 지체도 변화

신호 교차로와 버스 정류장의 이격거리에 따른 지체도 측정을 위해 혼합교통류의 시간 당 버스 유입대수 60대, 정차시간이 15초, 버스정류장의 이격거리가 30m, 50m, 100m인 경우를 각각 측정하여 혼합교통류 모형과 INTEGRATION의 지체도 변화를 측정하였으며, 결과는 <표 3>과 같다.

혼합교통류 모형과 INTEGRATION의 지체도는 교통량의 증가에 비례하여 증가한다. 그러나 INTEGRATION

<표 3> 이격거리에 따른 지체도 변화 단위 : (초)

v/c		단위 : (초)					
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	
정류장 이격 거리 (m)	혼합교통류 모형	30m	8.23	8.76	9.31	9.91	10.58
			11.33	12.19	13.18	14.36	
		50m	8.40	8.96	9.54	10.17	10.86
			11.63	12.52	13.54	14.74	
		100m	8.79	9.39	10.01	10.68	11.42
			12.24	13.17	14.25	15.50	
	INTEGRATION	30m	9.15	9.63	11.01	12.22	13.45
			13.95	14.72	17.15	16.96	
		50m	9.16	9.63	11.01	12.23	13.44
			13.95	14.72	17.15	16.99	
		100m	9.16	9.64	11.02	12.23	13.45
			13.95	14.72	17.16	17.02	



<그림 9> 버스정류장의 이격거리에 따른 지체도변화

의 경우 버스정류장의 위치변화에 대하여 지체도의 변화가 미미한 것에 비하여 혼합교통류 모형의 경우 신호교차로에서 버스정류장까지의 이격 거리가 멀어질수록 지체도가 소폭 상승함을 알 수 있다. 이는 이격거리가 크면 버스의 정류장 정차에 의해 교차로부터 먼 곳에서부터 차량군퍼짐현상을 보이며 교차로로 접근하게 되며 이 때의 불규칙한 밀도에 의해 추가로 지체가 발생하기 때문인 것으로 판단된다.

V. 결론 및 향후연구과제

본 연구에서는 2차로도로에서 버스가 정차하는 상황에서 신호교차로와 버스 정류장 사이에서 발생하는 지체를 산정하기 위한 지체산정 모형을 개발 하였다.

검증 결과 v/c 비율이 높고 버스의 대수가 늘어날수록 차량의 평균 지체도가 상승하는 것으로 나타났다. MAPE의 분석결과 본 연구의 지체 산정 모형과 INTEGRATION의 오차범위는 5.5%~11.7%의 오차범위를 가진다. 이는 단일교통류 모형의 오차범위에 비해 큰 차이가 없고 오차범위가 10%내외이므로 모형의 유효성이 있는 것으로 판단된다.

신호 교차로와 버스 정류장의 이격거리에 따른 지체도 변화에서는 INTEGRATION 경우 버스정류장의 위치변화에 대하여 지체도의 변화가 거의 없는 것에 비하여 본 연구의 지체산정 모형의 경우 신호교차로에서 버스정류장까지의 이격 거리가 멀어질수록 지체도가 소폭 상승하는 것으로 나타났다. 그러나 교차로 100m 이내에서는 모형의 유효성이 있다고 할 수 있으며 이러한 부분은 향후 퍼짐현상에 대한 세밀한 모형개발을 통하여 극복하여야 할 것이다.

본 연구는 다음과 같은 현실적인 한계점과 이에 따른 향후과제를 가진다.

첫째, 모형의 단순화를 위하여 여러 가지 가정을 두고

모형을 개발하였다. 이러한 가정들을 모형에 반영하여 모형을 갱신하는 것이 향후 후속과제의 주요 목표가 될 것이다.

둘째, 현실적인 여건에 의하여 현장자료에 의한 검증 을 하지 못하고 시뮬레이션의 결과와 비교하였다. 현장 자료에 의한 모형의 검증에 비해 시뮬레이션을 통한 이론적 모형의 검증이 완벽한 검증이 되지 못한다는 것은 주지의 사실인 바, 그럼에도 불구하고 국외 유수의 저널에 발표되는 많은 논문들이 검증된 시뮬레이션 모형을 사용하고 있다. 이는 공간적 대표성을 가질수 있는 일반적인 기하구조를 가진 교차로에서 다양한 교통상황에서의 Delay를 현장에서 측정한다는 것은 현실적으로 거의 불가능하기 때문이다. INTEGRATION은 1990년대 중반 발표된 이후 당시 ITS 관련분야를 평가할 수 있는 유일한 교통류시뮬레이션 모형으로 인식되었으며 이후 미시적인 부분의 모형의 보완이 이루어져 최근 발표된 저널에서는 단속류의 Analytic 모형의 미시적인 비교검증 tool로 이용 되는 등 그동안 학술적인연구를 통한 파라미터의 정산과 검증은 충분히 이루어졌다고 판단된다. 그러나 일부 시나리오에 대한 현장 관측자료를 이용한 검증작업은 방대한 작업이긴 하지만 향후에 반드시 이루어져야 할 부분으로 판단된다. 아울러 정시선 상류부의 상황이 적용되지 않은 대기행렬기반 모형과 본 모형과의 다각적인 연구가 향후에 이루어져야 할 것으로 판단된다.

본 연구는 교차로 신호와 인접하여 버스정류장이 있는 왕복 2차로 접근로라는 특수한 환경에서 특정시점에 버스가 도착하는 경우에 한하여 지체를 산정하는 식을 제시하였다는 한계를 가지며 향후 다양한 시설에서의 혼합교통류 상황에 대한 지체도 분석을 시행하기 위한 모형의 개선이 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

1. Akcelik, R.(1996), "Progression Factor for Queue Length and Other Queue-Related Statistics", Transportation Research Record 1555, TRB, National Research Council, Washington, D. C., pp.99~104.
2. Braun, S. M. and Ivan, J. N.(1996), "Estimating Intersection Approach Delay Using 1985 and 1994 Highway Capacity Manual Procedures", Transportation Research Record 1555, TRB, National Research Council, Washington, D. C., pp.23~32.
3. Carlos F. Daganzo(1997), Fundamentals of Transportation and Traffic Operations, Pergamon, 655 Avenue of the Americas, New York NY 10010
4. Kang, Y. S.(2000), "Delay, Stop and Queue Estimation for Uniform and Random Traffic Arrivals at Fixed-Time Signalized Intersections", Ph.D. Dissertation, Dept. of Civil Engineering, Virginia Tech, USA
5. May, A. D.(1990), Traffic Flow Fundamentals, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632.
6. McShane, W. R. and Roess, R. P.(1990), Traffic Engineering, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632.
7. Prevedouros, P. D. and Koga, C. A(1996), "Comparison of 1985 and 1994 HCM: Signalized Intersection Delay Estimates", ITE Journal, Vol. 66, No. 7, July, pp.26~30.
8. Transportation Research Board(1994), Special Report 209, Highway Capacity Manual, National Research Council, Washington D.C.
9. Transportation Research Board(1998), Special Report 209, Highway Capacity Manual 2000, Notional Research Council, Washington D.C.
10. Webster, F. V. and Cobbe, B. M.(1966), "Traffic Signal", Road Research, Technical Paper No. 56, Her Majesty's Stationery Office, London, England.

✉ 주 작성자 : 김원규

✉ 교신저자 : 김원규

✉ 논문투고일 : 2006. 6. 16

✉ 논문심사일 : 2006. 7. 4 (1차)

2008. 5. 14 (2차)

2008. 12. 10 (3차)

2009. 11. 20 (4차)

2010. 12. 15 (5차)

✉ 심사판정일 : 2010. 12. 15

✉ 반론접수기한 : 2011. 4. 30

✉ 3인 익명 심사필

✉ 1인 abstract 교정필