

■ 論 文 ■

### 확률모형을 이용한 엇갈림 구간의 교통류분석

Analysis of Traffic Flow on Weaving Sections Using Stochastic Models

이 승 준

이 정 도

최 재 성

(서울시립대학교 도시공학과 박사과정) (서울시립대학교 도시공학과 박사수료) (서울시립대학교 도시공학과 교수)

#### 목 차

- I. 서론
  - 1. 연구의 배경 및 목적
  - 2. 연구의 범위 및 방법론
  - 3. 기존 연구의 검토
- II. 엇갈림 구간의 교통류분석 방법
  - 1. 가정
  - 2. 차두간격 분포의 변화 및 엇갈림 영향권
  - 3. 차두간격 함수의 기본식
- III. 결론
- 참고문헌
- 부록

#### 요 약

기존 엇갈림 구간의 속도 및 서비스수준 분석에 관한 연구들은 현장조사를 통하여 엇갈림 구간 주행속도에 영향을 미치는 여러 요소 즉, 구간길이, 차로수, 교통량 등을 독립변수로 하는 회귀식을 도출하였다. 그러나 우리나라의 경우는 엇갈림 구간이 많이 존재하지 않으므로 기존 연구들처럼 현장조사를 통해 회귀식에 필요한 매개변수 값들을 추정하는데 어려움이 있다. 따라서, 엇갈림 구간의 속도추정 및 용량분석을 수행하기 위해 새로운 분석 방법론 개발의 필요성이 대두하게 되었다. 이를 위해 본 연구에서는 엇갈림 구간의 기본적인 특성을 규명하고 이를 수학적 확률식에 의거 엇갈림 구간 주행속도 예측모형을 개발함으로써, 분석대상 엇갈림 구간 수의 부족을 극복하고 범용적으로 적용될 수 있는 방법론을 모색하고자 하였다.

연구는 첫째, 엇갈림 영향권 파악, 둘째, 엇갈림 영향권에서의 차두간격 분포 파악, 셋째, 엇갈림 구간의 최대 가능 엇갈림 교통량 산정, 넷째, 이상적 엇갈림 구간 길이의 산정, 다섯째, 엇갈림 영향권의 속도 예측, 여섯째, 모형의 검증의 여섯 가지 범주로 구분되어 수행되었다. 특히 엇갈림 영향권의 속도 예측은 고속도로 기본구간의 속도와 엇갈림 영향권에서 발생하는 지체시간을 비교하여 결정하였다.

## 1. 서론

### 1. 연구의 배경 및 목적

기존 엇갈림 구간의 속도 및 서비스수준 분석에 관한 연구들은 현장조사를 통하여 엇갈림 구간 주행속도에 영향을 미치는 여러 요소 즉, 구간길이, 차로수, 교통량 등을 독립변수로 하는 회귀식을 도출하였다. 그러나 우리 나라의 경우는 엇갈림 구간이 많이 존재하지 않으므로 기존 연구들처럼 현장조사를 통해 회귀식에 필요한 매개변수 값들을 추정하는데 어려움이 있다. 따라서, 엇갈림 구간의 속도추정 및 용량분석을 수행하기 위해 새로운 분석 방법론 개발의 필요성이 대두하게 되었다. 이를 위해 본 연구에서는 엇갈림 구간의 기본적인 특성을 규명하고 이를 수학적 확률식에 의거 엇갈림 구간 주행속도 예측모형을 개발함으로써, 분석대상 엇갈림 구간 수의 부족을 극복하고 범용적으로 적용될 수 있는 방법론을 모색하고자 하였다.

### 2. 연구의 범위 및 방법론

#### 1) 연구의 수행 범위

연구의 수행 범위는 다음과 같이 크게 6가지 범주로 구분된다.

- 첫째, 엇갈림 영향권 파악
- 둘째, 엇갈림 영향권에서의 차두간격 분포 파악
- 셋째, 엇갈림 구간의 최대 가능 엇갈림 교통량 산정
- 넷째, 이상적 엇갈림 구간 길이의 산정
- 다섯째, 엇갈림 구간의 속도 예측
- 여섯째, 모형의 검증

#### 2) 연구의 방법론

연구는 수학적 확률식을 바탕으로 다음과 같은 4가지 방법에 의해 수행된다.

- 첫째, 고속도로 기본구간과 엇갈림 구간에 있어서 차두간격 분포의 변화를 파악
- 둘째, 새로이 생성된 엇갈림 영향권의 차두간격 분포를 이용하여 확률모형에 적용
- 셋째, 확률모형을 이용하여 엇갈림 시 발생하는 지체

#### 시간산정

넷째, 지체시간을 이용하여 엇갈림 교통류의 속도예측

### 3. 기존 연구의 검토

#### 1) Leisch, Piny 및 JHK Models

엇갈림 구간에 대한 Leisch, Piny 및 JHK Density Method의 속도예측식은 Leisch와 Piny 방법을 JHK에서 비교·분석한 후 최종적으로 개정된 식으로서 1985 US HCM 방법론의 근거가 되었다.

#### 2) Fazio

1985년 Fazio는 엇갈림 구간에 관한 그의 석사논문에서 차로수와 진입 및 기타 진출차로의 상대적인 위치를 토대로 엇갈림 차량이 수행하게 되는 차로변경수를 예측하는 회귀방정식을 개발하였다. JHK의 연구결과에 차로변경 변수를 첨가하여 수행한 이 연구는 적은 자료수로도 1985 US HCM보다 속도추정에 있어서 정확한 결과를 제시하고 있다. 분석과정은 JHK 방법과 유사하며, 이 방법은 엇갈림의 기하학적 형태에 따라 A,B,C형으로 구분하지 않아도 된다는 점에서 주목할 만 하다.

#### 3) 1994 US HCM

1994 US HCM은 엇갈림 형태를 Type A, B, C로 나누었으며, 제약과 비제약의 운행특성을 구분하여 회귀식 형태의 속도추정식을 개발하였다. 1994 US HCM은 단순 엇갈림 구간 분석 과정을 중점적으로 다루었으며, 복합 엇갈림 구간은 단순 엇갈림 구간의 분석 방법을 구간별로 나누어 적용하였다. 속도 예측 과정에서는 제약받지 않는 상태를 가정하여 속도를 계산한다. 그리고 주어진 상태에서 엇갈림 차량이 사용할 수 있는 최대 차로수( $Nw(max)$ )와 제약받지 않는 운행을 위해 엇갈림 차량이 사용해야 하는 차로수( $Nw$ )를 비교하여 제약 운행 여부를 검토한다

이상의 엇갈림 구간에 대한 연구들은 엇갈림 구간의 속도 추정을 위해 평균적인 도로 및 교통특성을 바탕으로 한 회귀식을 도출하였으므로, 우리나라와 같이 엇갈림 구간이 많이 존재하지 않는 경우에는 이러한 속도 추정식을 바로 현장에 적용하기가 곤란하다.

## II. 엇갈림 구간의 교통류분석 방법

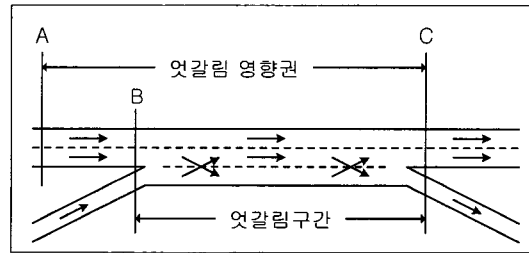
### 1. 가정

본 논문에서 사용한 가정은 다음과 같다.

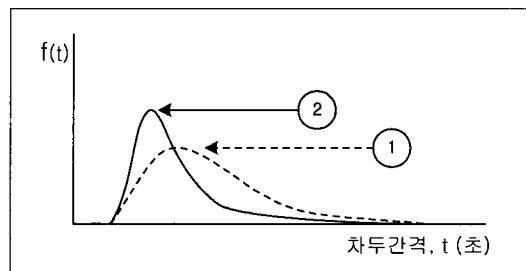
- 엇갈림 영향권 본선 접속차로의 차량 도착분포는 Pearson Type III Distribution( $k=2$ )의 변형을 따름.<sup>1)</sup>
- 엇갈림 구간 연결로의 차량 도착분포 역시 본선 접속차로와 같은 형태의 차량 도착분포를 따름.
- 본선의 진출 엇갈림 차량들은 엇갈림 구간 도착 전 모두 접속차로로 이동함.
- 엇갈림 주행을 통해 속도변화(감·가속)를 경험한 차량의 엇갈림 구간 내 평균 최소 차두간격은 기본 구간의 평균 최소 차두간격( $\alpha$ )보다 크며, 일정한 간격( $G_s$ )을 유지함.
- 엇갈림 차량은 엇갈림 기회가 주어질 때까지 강제 엇갈림을 수행하지 않고 주행 차로 상에서 주행하면서 대기함.
- 교통류는 승용차로만 구성됨.
- 본 연구에서 다루는 엇갈림 형태는 Type A에 한정함.

### 2. 차두간격 분포의 변화 및 엇갈림 영향권

일반적으로 엇갈림 구간은 <그림 1>에서 보는 바와 같이 B와 C 사이의 구간으로 정의된다. 그러나 엇갈림 구간에서 발생하는 지체의 영향은 엇갈림 구간뿐만 아니라 지체의 정도에 따라 엇갈림 구간 상류부까지 전파된다. 이러한 지체의 영향은 고속도로 기본구간과는 달리 속도의 저하를 유발하며 엇갈림 구간에만 제한되지 않으므로, 일정 상류부 구간을 포함한 엇갈림 영향권을 설정하여 엇갈림 분석을 수행하는 것이 필요하다. 엇갈림 구간에서 차량들의 엇갈림 주행 가능 여부는 본선 상류부 교통류에 의해 제공되는 엇갈림 기회에 달려있고 엇갈림 기회는 차두간격을 이용하여 확률적으로 계산할 수 있다. 그러나, 중요한 것은 기본구간의 차두간격 분포가 엇갈림 주행의 영향으로 엇갈림 영향권(구간 A~B)에 들어서서는 변한다는 것이다.



<그림 1> 엇갈림 구간 및 영향권



<그림 2> 엇갈림 구간 상류부에서의 차두간격 분포 변화

<그림 2>는 기본구간과 엇갈림 영향권 내 상류부(구간 A~B)의 차두간격 분포 변화의 예를 도시한 것이다. 고속도로 기본구간의 차량도착(차두간격) 분포가 <그림 2>의 ①과 같은 형태의 분포를 따른다고 하더라도 엇갈림 영향권 내 상류부(구간 A~B)의 차두간격 분포는 엇갈림 구간에서 발생하는 엇갈림 현상에 의해 그 분포 형태가 변화될 것이다. 즉, 엇갈림 구간 내의 증가된 차량 상호작용에 의해 엇갈림 영향권 내 상류부(구간 A~B)의 차두간격 분포는 <그림 2>의 ②와 같이 좌측으로 치우친 형태로 바뀌게 된다. 이 때 고속도로 기본구간에서의 차두간격 분포를 변화시키는 요인으로는 증가된 교통량 및 엇갈림 주행으로 인한 차량간의 상호작용을 들 수 있다.

### 3. 차두간격 함수의 기본식

Pearson Type III 분포의 확률밀도 함수는 식(1)과 같다.

$$f(t) = \frac{\lambda}{\Gamma(K)} \cdot [\lambda(t-a)]^{K-1} \cdot e^{-\lambda(t-a)} \quad (1)$$

여기서,

1) 부록 1. 참조



그러므로, 본선의 차두간격을 이용한 연결로로부터 본선으로의 최대 진입 가능 교통량은 다음과 같다.

$$Q_m \cdot (A + B) \quad (7)$$

여기서,

$Q_m$  : 본선 접속차로의 교통량(대/시)

### 2) 본선의 진출 교통류를 이용한 최대 진입 가능 교통량

본선으로부터 연결로로 진출하는 엇갈림 교통류로부터 제공되는 차두간격은 평균적으로 엇갈림 교통량수의 1/2만큼 제공되며, 차두간격의 크기는 본선 차두간격의 2배에 해당한다. 따라서, 본선으로부터 진출하는 엇갈림 교통류로 인해 제공되는 차두간격 확률밀도 함수는 본선의 차두간격 확률밀도 함수와는 다르며 다음과 같은 형태로 표현된다.

$$f_m(t) = \left(\frac{\lambda_m}{2}\right)^2 \cdot (t-a) \cdot e^{-\frac{\lambda_m}{2}(t-a)} \quad (8)$$

본선의 차두간격을 이용한 최대 진입 가능 교통량 산정과 같은 방식으로 구하면, 다음과 같이 C 및 D가 결정된다.

$$C = \frac{\lambda_m(T_c - a + \frac{2}{\lambda_m}) \cdot e^{-\frac{\lambda_m}{2}(T_c - a)}}{2[1 - e^{-\frac{\lambda_m}{2} \cdot t^*}]}$$

$$D = \frac{\lambda_m \cdot t^* \cdot e^{-\frac{\lambda_m}{2}(T_c + t^* - a)}}{2[1 - e^{-\frac{\lambda_m}{2} \cdot t^*}]^2}$$

그러므로, 본선으로부터 진출하는 엇갈림 교통류를 이용한 최대 진입 가능 교통량은 다음과 같다.

$$\frac{1}{2} \cdot Q_{w1} \cdot (C + D) \quad (9)$$

여기서,

$Q_{w1}$  : 본선 접속차로의 진출 교통량(대/시)

그런데, 본선 엇갈림 교통류를 통해 제공되는 차두

간격이 상당히 클 경우에는 엇갈림 주행이 발생하기 전에 연결로 교통류가 본선의 차두간격을 이용하여 합류할 수 있다. 이러한 중복 진입 교통량은 본선 차두간격 분포를 이용해 구할 수 있으며, 엇갈림 교통류의 앞과 뒤에서 차두간격이 발생하므로, 앞에서와 같은 방식으로 구하면 다음과 같이 표현된다.

$$Q_{w1} \cdot (A + B) \quad (10)$$

### 3) 최대 진입 가능 교통량

1)과 2)로부터 연결로에서 본선으로의 최대 진입 가능 교통량은 다음과 같다.

$$Q_{w2}^{\max} = Q_m \cdot (A+B) + \frac{1}{2} \cdot Q_{w1} \cdot (C+D) - Q_{w1} \cdot (A+B) \quad (11)$$

여기서,

$Q_{w2}^{\max}$  : 연결로에서 본선으로의 최대 진입 가능 교통량(대/시)

그러므로, 본선으로부터 연결로로 진출하는 최대 진출 가능 교통량은 다음과 같다.

$$Q_{w1}^{\max} = Q_r \cdot (A' + B') + \frac{1}{2} \cdot Q_{w2} \cdot (C' + D') - Q_{w2} \cdot (A' + B') \quad (12)$$

여기서,

$Q_{w1}^{\max}$  : 본선에서 연결로로의 최대 진출 가능 교통량(대/시)

$Q_r$  : 연결로 교통량(대/시)

$Q_{w2}$  : 연결로에서 본선으로의 진입 교통량(대/시)

$$A' = \frac{\lambda_r(T_c - a + \frac{1}{\lambda_r}) \cdot e^{-\lambda_r(T_c - a)}}{1 - e^{-\lambda_r \cdot t^*}}$$

$$B' = \frac{\lambda_r \cdot t^* \cdot e^{-\lambda_r(T_c + t^* - a)}}{[1 - e^{-\lambda_r \cdot t^*}]^2}$$

$$C' = \frac{\lambda_r(T_c - a + \frac{2}{\lambda_r}) \cdot e^{-\frac{\lambda_r}{2}(T_c - a)}}{2[1 - e^{-\frac{\lambda_r}{2} \cdot t^*}]}$$

$$D' = \frac{\lambda_r \cdot t^* \cdot e^{-\frac{\lambda_r}{2}(T_r+t^*-a)}}{2[1 - e^{-\frac{\lambda_r}{2} \cdot t^*}]^2}$$

4) 최대 가능 엇갈림 교통량

따라서, 엇갈림 교통류로만 구성된 최대 가능 엇갈림 교통량은 다음과 같이 구하게 된다.

$$Max(Q_{u1} + Q_{u2}) = Max(Q_m + Q_r) \tag{13}$$

s. t.

$$Q_{u1} = Q_m > 0$$

$$Q_{u2} = Q_r > 0$$

5. 이상적 엇갈림 구간 길이의 산정

램프 엇갈림 구간에서처럼 서로 평균 주행속도가 다른 두 교통류가 엇갈림 주행하기 위해서는 엇갈림 주행에 필요한 기회를 찾기 위해 대기 또는 저속주행을 해야할 것이다. 이 때, 이상적 엇갈림 구간 길이란 엇갈림을 위해 교통류가 대기 또는 저속주행하지 않고 평균 속도로 주행하면서 엇갈림 기회를 찾을 수 있는 길이를 의미한다. 따라서, 주어진 교통조건 하에서 엇갈림 구간의 길이가 이상적으로 설계된다면, 엇갈림 교통류는 엇갈림 주행을 위해 속도를 줄일 필요가 없을 것이다. 다음은 엇갈림 교통류 중 연결로에서 본선으로 진입하는 교통류에 대하여 대기시간과 엇갈림 구간 길이의 산정에 대하여 다루었으며, 본선에서 연결로로 진출하는 경우는 같은 방식으로 구할 수 있으므로 생략하였다.

1) 엇갈림 대기시간의 산정

연결로에서 본선으로 진입할 수 없는 확률은 본선의 차두간격 분포 중 Critical Gap보다 작은 차두간격 수에 의해 결정된다. 그러나 Critical Gap보다 작은 차두간격을 유지한 차량들 중에 연결로로 진출하려는 엇갈림 차량들이 존재한다면, 이 진출 차량들에 의해 본선으로 진입할 수 있는 기회는 늘어나게 되며, 진출 차량수의 1/2만큼이 진입기회로 이용될 것이다. 따라서, 엇갈림을 위한 대기시간은 본선 차두간격 분포로부터 결정된 대기시간에서 진출 엇

갈림 교통류로 인해 제공받는 시간만큼 줄어들게 된다.

시간에 따라 운전자의 Gap Acceptance가 변하지 않는다고 가정하면, 개별 대기시간은 기하분포를 이룬다. 따라서, 진입 엇갈림 주행을 할 수 없는 간격을 n번 기다려야할 확률( $P_n$ )은 다음과 같다.

$$P_n = p^n(1-p), \quad n = 1, 2, 3, \dots \tag{14}$$

여기서,

$p$ (진입 엇갈림 주행을 할 수 없는 확률) =

$$\int_a^{T_r} f_m(t) dt - \frac{Q_{u1}}{2Q_m} \left[ \int_{T_r}^{\infty} f_{\frac{m}{2}}(t) dt - 2 \int_{T_r}^{\infty} f_m(t) dt \right]$$

또한, 평균 대기간격 회수( $E(n)$ )은 다음과 같다.

$$E(n) = \frac{p}{1-p} = \frac{\int_a^{T_r} f_m(t) dt - \frac{Q_{u1}}{2Q_m} \left[ \int_{T_r}^{\infty} f_{\frac{m}{2}}(t) dt - 2 \int_{T_r}^{\infty} f_m(t) dt \right]}{\int_{T_r}^{\infty} f_m(t) dt + \frac{Q_{u1}}{2Q_m} \left[ \int_{T_r}^{\infty} f_{\frac{m}{2}}(t) dt - 2 \int_{T_r}^{\infty} f_m(t) dt \right]} \tag{15}$$

진입 엇갈림 주행을 할 수 없는 차두간격의 평균 길이( $E(L)$ ):

$$E(L) = \frac{\int_a^{T_r} t \cdot f_m(t) dt - \frac{Q_{u1}}{2Q_m} \left[ \int_{T_r}^{\infty} t \cdot f_{\frac{m}{2}}(t) dt - 2 \int_{T_r}^{\infty} t \cdot f_m(t) dt \right]}{p} \tag{16}$$

평균대기시간( $\mu_r$ ):

$$\mu_r = E(n) \cdot E(L) = \frac{\int_a^{T_r} t \cdot f_m(t) dt - \frac{Q_{u1}}{2Q_m} \left[ \int_{T_r}^{\infty} t \cdot f_{\frac{m}{2}}(t) dt - 2 \int_{T_r}^{\infty} t \cdot f_m(t) dt \right]}{\int_{T_r}^{\infty} f_m(t) dt + \frac{Q_{u1}}{2Q_m} \left[ \int_{T_r}^{\infty} f_{\frac{m}{2}}(t) dt - 2 \int_{T_r}^{\infty} f_m(t) dt \right]} \tag{17}$$

위와 같은 방식으로 본선에서 연결로로 진출하는 차량에 대한 평균 대기시간( $\mu_m$ )을 구하면 다음과 같다.

$$\mu_m = \frac{\int_a^{T_1} t \cdot f_r(t) dt - \frac{Q_{w2}}{2Q_r} \left[ \int_{T_1}^{\infty} t \cdot f_{r_2}(t) dt - 2 \int_{T_1}^{\infty} t \cdot f_r(t) dt \right]}{\int_{T_1}^{\infty} f_r(t) dt + \frac{Q_{w2}}{2Q_r} \left[ \int_{T_1}^{\infty} f_{r_2}(t) dt - 2 \int_{T_1}^{\infty} f_r(t) dt \right]} \quad (18)$$

2) 이상적 엇갈림 구간의 길이

본선 교통류와 연결로 교통류의 평균주행속도를 고려하면, 진입 엇갈림 주행 전 대기시간은 상대속도 차에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$T_{waiting}^r = \frac{V_m}{|V_m - V_r|} \cdot \mu_r, \quad V_m \neq V_r \quad (19)$$

여기서,

$V_m$  : 본선 교통류의 평균 주행속도(m/s)

$V_r$  : 연결로 교통류의 평균 주행속도(m/s)

진입 엇갈림 차량이 대기 이후 본선으로 진입할 때 필요한 가속(진입)거리 ( $S_{merging}^r$ )는 다음과 같다.

$$S_{merging}^r = \frac{V_m^2 - V_r^2}{2 \cdot Acc} \quad (20)$$

여기서,

$Acc$  : 평균 가속도(  $m/s^2$  )

또한 진입 엇갈림 차량이 주어진 진입기회를 활용하여 진입하지 못할 경우가 발생할 수 있으므로, 이를 대비하여 재차 진입을 시도할 수 있도록 안전시간 ( $T_{safety}^r$ )을 확보해 주어야한다. 이 때, 안전시간은  $T_{waiting}^r$ 의 상수 배로서, 다음과 같이 표현된다.

$$T_{safety}^r = c \cdot T_{waiting}^r \quad (21)$$

여기서,

$c$  : 상수

따라서, 진입 차량의 대기시간, 진입거리 및 안전거리를 고려하여 이상적 엇갈림 구간의 길이를 산출하면 다음과 같다.

$$L_r^* = (T_{waiting}^r + T_{safety}^r) \cdot V_r + S_{merging}^r = c^* \cdot T_{waiting}^r \cdot V_r + S_{merging}^r \quad (22)$$

여기서,

$c^*$  : 상수

또한, 본선에서 연결로로 진출하는 경우에 있어서,

$$T_{waiting}^m = \frac{V_r}{|V_m - V_r|} \cdot \mu_m, \quad V_m \neq V_r$$

$$S_{merging}^m = \frac{V_m^2 - V_r^2}{2 \cdot Dec}$$

$$T_{safety}^m = c \cdot T_{waiting}^m$$

이며, 같은 방식으로  $L_m^*$ 는 다음과 같이 결정된다.

$$L_m^* = (T_{waiting}^m + T_{safety}^m) \cdot V_m + S_{merging}^m = c^* \cdot T_{waiting}^m \cdot V_m + S_{merging}^m \quad (23)$$

여기서, 이상적 엇갈림 구간의 길이( $L^*$ )는  $L_r^*$ 와  $L_m^*$ 를 비교하여 더 큰 값으로 결정하여야 한다. 여기서, 이상적 엇갈림 구간의 길이( $L^*$ )는  $L_r^*$ 와  $L_m^*$ 를 비교하여 더 큰 값으로 결정하여야 한다. 한 가지 중요한 점은 안전한 엇갈림 주행을 위해  $c^*$ 는 1.0 이상이어야 하며, 바람직하지는 않지만, 엇갈림 구간의 최소 길이는  $c^*$ 가 1.0일 때가 된다. 만약  $c^*$ 가 1.0 이하라면 운전자는 엇갈림 주행을 위해 급격히 가·감속해야 하므로, 주행속도의 변화가 상대적으로 커져서 안전한 주행에 지장을 주게 된다.

6. 엇갈림 영향권의 속도 예측

1) 지체시간의 산정

(1) 대기시간과 지체시간의 관계

실제 엇갈림 구간의 길이( $\ell$ )가 정해져 있는 경우, 대기시간과 본선 및 연결로 교통류의 상대속도 차에 의해 연결로에서 본선으로 진입하는 차량들에 대한 평균 지체시간을 구하게 된다. 이에 대한 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mu_r^* &= \mu_r - \frac{\ell}{V_r} \cdot \frac{|V_m - V_r|}{V_m} \\ &= \mu_r - T_{travel}^r \cdot \frac{\mu_r}{T_{waiting}^r} \\ &= \mu_r \cdot \left(1 - \frac{T_{travel}^r}{T_{waiting}^r}\right), \text{ if } T_{travel}^r < T_{waiting}^r \\ \mu_r^* &= 0, \text{ if } T_{travel}^r \geq T_{waiting}^r \end{aligned} \quad (24)$$

여기서,

$\mu_r^*$  : 본선 진입 차량들에 대한 평균 지체시간(초)

$\ell$  : 실제 엇갈림 구간의 길이(m)

$T_{travel}^r$  : 연결로 차량이 지체를 경험하지 않고 엇갈림 구간을 주행한 시간(초)

같은 방식으로 본선에서 연결로로 진출하는 차량들에 대한 평균 지체시간은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mu_m^* &= \mu_m \cdot \left(1 - \frac{T_{travel}^m}{T_{waiting}^m}\right), \text{ if } T_{travel}^m < T_{waiting}^m \\ \mu_m^* &= 0, \text{ if } T_{travel}^m \geq T_{waiting}^m \end{aligned} \quad (25)$$

위의 식에서 알 수 있는 것은 엇갈림 구간의 길이가 지체시간에 영향을 미친다는 것이다.

**(2) 본선 진입 전 연결로 지체**

$\mu_r^*$ 는 연결로에서 진입 엇갈림 차량이 경험하는 지체시간이며, 이 지체가 후속 연결로 차량에게 얼마나 전파될 것인가를 구하여야 한다. 따라서, 1대의 진입 엇갈림 차량과 후속 차량에게 전파되는 총 지체시간( $D_r$ )은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} D_r &= \mu_r^*(= a_1) + \sum_{n=1}^N P(r)_{n+1} \cdot \int_a^{G_s+a_n} (G_s+a_n-t) \cdot f_r(t) dt (= a_{n+1}) \\ P(r)_2 &= 1 \\ P(r)_3 &= P(r)_2 \cdot \int_a^{G_s+a_1} f_r(t) dt \\ &\vdots \\ P(r)_n &= P(r)_{n-1} \cdot \int_a^{G_s+a_{n-2}} f_r(t) dt \end{aligned} \quad (26)$$

여기서,

$G_s$  : 엇갈림 차량이 엇갈림 주행을 마친 후 일정하게 유지하는 최소 차간간격(초)

지체시간 계산 과정은  $a_n$ 이 0( $\approx 0.1$ 초)에 수렴할 때 중단하게 된다.

**(3) 연결로 진출 전 본선 지체**

마찬가지로, 1대의 차량이 본선에서 연결로로 진출 시 본선 차량에게 전파되는 총 지체시간( $D_m$ )은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} D_m &= \mu_m^*(= a_1) + \sum_{n=1}^N P(m)_{n+1} \cdot \int_a^{G_s+a_n} (G_s+a_n-t) \cdot f_m(t) dt (= a_{n+1}) \end{aligned} \quad (27)$$

$$P(m)_2 = 1$$

$$P(m)_3 = P(m)_2 \cdot \int_a^{G_s+a_1} f_m(t) dt$$

$\vdots$

$$P(m)_n = P(m)_{n-1} \cdot \int_a^{G_s+a_{n-2}} f_m(t) dt$$

**(4) 연결로에서 진입하는 차량에 의해 발생하는 본선 지체**

연결로에서 진입하는 차량에 의해 본선에서 발생하는 지체는 "4. 최대 가능 엇갈림 교통량"에서 다룬 것과 같이 본선의 차두간격으로부터 결정되는 진입기회와 본선에서 연결로로 진출하는 차량에 의해 발생하는 진입기회 및 다중 진입을 확률적으로 계산하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$D_{mw} = \sum_{n=1}^N D_n^m = \sum_{n=1}^N (A_n^m + B_n^m - C_n^m) \quad (28)$$

**(5) 본선에서 진출하는 차량에 의해 발생하는 연결로 지체**

이에 대하여는 앞에서와 동일한 방식으로 구할 수 있다.

$$D_{rw} = \sum_{n=1}^N D_n^r = \sum_{n=1}^N (A_n^r + B_n^r - C_n^r) \quad (29)$$



(6) 본선에서 차량 진출 후 후속차량의 가속으로 인한 본선 지체의 감소

본선에서 연결로로 진출하는 차량에 의해 발생하는 gap을 이용하여 연결로로부터 본선으로 진입하는 차량이 없는 경우에는 본선 접속차로의 후속 차량 중 직진차량이 가속하여 따라붙는 현상이 발생하게 되므로, 오히려 지체의 감소가 발생하게 된다. 지체의 감소를 계산하기 위해서는 지체감소 횟수를 알아야 하며, 이는 본선의 진출 교통량과 후속 차량이 가속하여 따라 붙을 수 있는 범위(X) 내에서 진출 교통류를 이용하여 진입하는 교통량 및 본선 접속차로의 직진차량 비율을 구하여 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$S_m = \sum_{n=1}^{\infty} a_n^m \cdot \frac{Q_t}{Q_m} \cdot \left\{ Q_{w1} - \frac{Q_{w2} \cdot \frac{Q_{w1}}{2Q_m} \cdot \int_{T_r}^{T_r+X} f_{\frac{m}{2}}(t) dt}{\int_{T_r}^{\infty} f_m(t) dt + \frac{Q_{w1}}{2Q_m} \left[ \int_{T_r}^{\infty} f_{\frac{m}{2}}(t) dt - 2 \int_{T_r}^{\infty} f_m(t) dt \right]} \right\}$$

$$a_n^m = \int_a^X t \cdot f_m(t) dt \cdot \left[ \int_a^X f_m(t) dt \right]^{n-1} \quad (30)$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n^m = \frac{\int_a^X t \cdot f_m(t) dt}{1 - \int_a^X f_m(t) dt}$$

여기서,

$S_m$  : 본선에서 차량 진출 후 진입차량이 없는 경우, 후속차량의 가속으로 인한 본선의 총 지체 감소량(초)

$a_n^m$  : 본선에서 가속 시 n번 째 차량의 지체 감소량(초)

$X$  : 본선에서 연결로로 차량 진출 후 진입차량이 없는 경우, 진출차량의 후속차량 중 직진차량이 가속하여 선두차량에 따라 붙을 수 있는 최대 차두간격(초)

$Q_t$  :  $Q_m - Q_{w1}$  = 본선 접속차로의 직진 교통량 (대/시)

$$S_{mw} = \sum_{n=2}^{\infty} a_n^m \cdot \frac{Q_{w1}}{Q_m} \cdot \frac{Q_t}{Q_m} \cdot \left\{ Q_{w1} - \right.$$

$$\left. \frac{Q_{w2} \cdot \frac{Q_{w1}}{2Q_m} \cdot \int_{T_r}^{T_r+X} f_{\frac{m}{2}}(t) dt}{\int_{T_r}^{\infty} f_m(t) dt + \frac{Q_{w1}}{2Q_m} \left[ \int_{T_r}^{\infty} f_{\frac{m}{2}}(t) dt - 2 \int_{T_r}^{\infty} f_m(t) dt \right]} \right\} \quad (31)$$

여기서,

$S_{mw}$  : 본선에서 연결로로 진출하는 차량의 총 지체 감소량(초)

위의 식에서 내포하고 있는 가정은 다중진입이 허용되는 gap(예를 들어 두 대 이상의 차량이 진입할 수 있는 크기의 gap)에 1대라도 차량이 진입한다면 후속차량이 가속하지 않으며, 진입차량이 없을 때 가속 확률범위( $\alpha \sim X$ ) 내에 존재하는 최초 차량이 직진 차량일 경우에만 차량 가속이 일어난다는 것이다. 이 때, 후속 차량들은 선두 차량과의 차두간격을 가속전과 동일하게 유지하면서 가속하나, 후속 차량으로 갈수록 가속 확률이 작아져 지체 감소량도 줄어들게 된다. 차량 가속 확률범위의 상한 치 X는 엇갈림 구간의 길이와 차량의 가속능력에 따라 달라진다.

(7) 연결로에서 차량 진입 후 후속차량의 가속으로 인한 연결로 지체의 감소

$$S_r = \sum_{n=1}^{\infty} a_n^r \cdot \frac{Q_{rt}}{Q_r} \cdot \left\{ Q_{w2} - \frac{Q_{w1} \cdot \frac{Q_{w2}}{2Q_r} \cdot \int_{T_r}^{T_r+X} f_{\frac{r}{2}}(t) dt}{\int_{T_r}^{\infty} f_r(t) dt + \frac{Q_{w2}}{2Q_r} \left[ \int_{T_r}^{\infty} f_{\frac{r}{2}}(t) dt - 2 \int_{T_r}^{\infty} f_r(t) dt \right]} \right\}$$

$$a_n^r = \int_a^X t \cdot f_r(t) dt \cdot \left[ \int_a^X f_r(t) dt \right]^{n-1} \quad (32)$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n^r = \frac{\int_a^X t \cdot f_r(t) dt}{1 - \int_a^X f_r(t) dt}$$

여기서,

$S_r$  : 연결로에서 본선으로 차량 진입 후 본선에서 진출차량이 없는 경우, 후속차량의 가속으로 인한 연결로의 총 지체 감소량(초)

$a_n^r$  : 연결로에서 가속 시 n번 째 차량의 지체 감소량(초)

$Q_{rt} : Q_r - Q_{w2}$  = 연결로 접속차로의 직진 교통량 (대/시)

$$S_{rw} = \frac{\sum_{n=2}^{\infty} a_n^r \cdot \frac{Q_{w2}}{Q_r} \cdot \frac{Q_{rt}}{Q_r} \cdot \left\{ Q_{w2} - \frac{Q_{w1} \cdot \frac{Q_{w2}}{2Q_r} \cdot \int_{T_r}^{T_r+X} f_r(t) dt}{\int_{T_r}^{\infty} f_r(t) dt + \frac{Q_{w2}}{2Q_r} \left[ \int_{T_r}^{\infty} f_r(t) dt - 2 \int_{T_r}^{\infty} f_r(t) dt \right]} \right\}}{(33)}$$

여기서,

$S_{rw}$  : 연결로에서 본선으로 진입하는 차량의 총 지체 감소량(초)

2) 이동류별 속도예측

엇갈림 구간에서 발생하는 지체는 엇갈림 구간의 상류부로 전파되므로 엇갈림 교통류의 속도를 산정하는데 있어서, 대상구간을 엇갈림 영향권으로 확대하는 것이 필요하다. 엇갈림 영향권에서 연결로로부터 본선으로 진입하는 교통류에 대한 속도예측식은 다음과 같이 나타낼 수 있으며, 엇갈림 구간의 길이는 "5. 이상적 엇갈림 구간 길이의 산정"에서 다룬 바와 같이 최소길이 이상을 적용하였다.

(1) 본선 엇갈림 교통류의 속도예측식

$$S_{w1} = L \cdot \left[ \frac{\ell^*}{V_m} + T_{waiting}^m + D_{w1} + T_{merging}^m + \frac{(L - \ell^* - T_{waiting}^m \cdot V_m - S_{merging}^m)}{c_1 \cdot V_r} \right]^{-1} \quad (34)$$

$$D_{w1} = \mu_m^* + (D_m - \mu_m^*) \frac{Q_{w1}}{Q_m} + \frac{D_{mw}}{Q_m} - \frac{S_{mw}}{Q_{w1}}$$

$$T_{merging}^m = \frac{S_{merging}^m}{(V_m + V_r)/2} = \frac{V_m - V_r}{Dec}$$

$$\ell \geq T_{waiting}^m \cdot V_m + S_{merging}^m$$

여기서,

$S_{w1}$  : 본선 엇갈림 교통류의 속도(m/s)

$D_{w1}$  : 본선 엇갈림 교통류의 평균 지체시간(초/대)

$L(\ell + \ell^*)$  : 엇갈림 영향권의 길이(m)

$\ell^*$  : 엇갈림 영향권 내 상류부 구간의 길이(m)

$c_1$  : 상수

(2) 연결로 엇갈림 교통류의 속도예측식

$$S_{w2} = L \cdot \left[ \frac{\ell^*}{V_r} + T_{waiting}^r + D_{w2} + T_{merging}^r + \frac{(L - \ell^* - T_{waiting}^r \cdot V_r - S_{merging}^r)}{V_m} \right]^{-1} \quad (35)$$

$$D_{w2} = \mu_r^* + (D_r - \mu_r^*) \frac{Q_{w2}}{Q_r} + \frac{D_{rw}}{Q_r} - \frac{S_{rw}}{Q_{w2}}$$

$$T_{merging}^r = \frac{S_{merging}^r}{(V_m + V_r)/2} = \frac{V_m - V_r}{Acc}$$

$$\ell \geq T_{waiting}^r \cdot V_r + S_{merging}^r$$

여기서,

$S_{w2}$  : 연결로 엇갈림 교통류의 속도(m/s)

$D_{w2}$  : 연결로 엇갈림 교통류의 평균 지체시간(초/대)

(3) 본선 비엇갈림 교통류의 속도예측식

본선의 비엇갈림 교통류에 대한 속도예측식은 다음과 같다.

$$S_{nw1} = \frac{L}{\frac{L}{V_m^*} + \frac{Q_{rt}}{Q_{total}^m} \left[ D_{w1} - \mu_m^* + \frac{S_{mw}}{Q_{w1}} - \frac{(S_m - S_{mw})}{Q_r} \right]} \quad (36)$$

여기서,

$S_{nw1}$  : 본선 비엇갈림 교통류의 속도(m/s)

$V_m^*$  : 본선 상류부 전(全)차로 직진교통류의 평균속도(m/s)

$Q_{total}^m$  : 본선 전(全)차로의 총 직진 교통량(대/시)

(4) 연결로 비엇갈림 교통류의 속도예측식

연결로의 비엇갈림 교통류에 대한 속도예측식은 다음과 같다.

$$S_{nw2} = \frac{L}{\frac{L}{c_2 \cdot V_r^*} + \frac{Q_{rt}}{Q_{total}^r} \left[ D_{w2} - \mu_r^* + \frac{S_{rw}}{Q_{w2}} - \frac{(S_r - S_{rw})}{Q_r} \right]} \quad (37)$$

여기서,

$S_{nw2}$  : 연결로 비엇갈림 교통류의 속도(m/s)

$c_2$  : 상수

$V_r^*$  : 연결로 상류부 전(全)차로 직진교통류의 평균속도(m/s)

$Q_{total}^r$  : 연결로 전(全)차로의 총 직진 교통량(대/시)

### 7. 모형의 검증

본 연구를 통해 개발된 모형을 검증하기 위해 강변북로 마포대교 북단 부근의 엇갈림 구간에서 현장조사를 수행하였다. 현장조사를 통해 수집된 자료를 이용하여 각 매개변수의 값을 결정하였고 이와 함께 교통량 자료를 입력 변수로 하여 엇갈림 구간에서의 각 이동류별 속도를 추정하였다. <표 1>은 모형을 통해 추정된 각 이동류별 속도와 현장 조사 속도를 비교한 것이다.

<표 1> 실측 속도와 예측 속도의 비교 (단위:km/h)

이동류	관측시간	13:00	14:00	15:00	16:00	이동류별 평균 속도 편차
		~ 13:15	~ 14:15	~ 15:15	~ 16:15	
Sw1	실측 속도	64.3	60.4	66.8	62.1	-
	예측 속도	61.5	62.4	63.3	63.9	-
	속도 편차	2.8	2.0	3.5	1.8	2.5
Sw2	실측 속도	56.3	53.3	53.6	53.9	-
	예측 속도	54.3	54.8	55.1	55.5	-
	속도 편차	2.1	1.6	1.5	1.6	1.7
Snw1	실측 속도	69.6	66.6	64.6	65.6	-
	예측 속도	69.1	69.8	68.9	71.6	-
	속도 편차	0.6	3.2	4.3	6.0	3.5
Snw2	실측 속도	57.8	56.2	67.6	54.6	-
	예측 속도	57.2	59.0	60.1	62.2	-
	속도 편차	0.5	2.9	7.5	7.5	4.6

### III. 결론

지금까지 확률모형을 이용한 엇갈림 구간의 속도 추정에 관하여 살펴보았다. 확률모형이 기존의 연구들과 비교해 지니고 있는 장점은 보다 일반화된 이론적 구조를 취함으로서, 속도 추정식의 구축 시 범용

적으로 적용할 수 있다는 것이다. 즉, 이론 구조가 일반화된 형태를 따므로, 교통 및 운전자 특성 등이 지역적으로 서로 다른 경우에 이를 확률모형에 반영하여 엇갈림 구간에서의 속도를 추정할 수 있다(예를 들어 교통 및 운전자 특성이 지역적으로 차이가 날 때,  $\alpha$ ,  $T_c$ ,  $G_s$  등에 대하여 지역적으로 다른 값을 적용할 수 있다). 또한, 확률모형이 개별적인 운전자들의 행태를 모두 반영할 수는 없지만 속도 추정식에 반영된 가정 중 지체되거나 지체의 감소(가속하여 속도 회복)를 경험할 때, 선행 차량사이의 차두간격과 지체량 및  $G_s$  등을 동시에 고려함으로써, 추종이론이 안고 있는 한계점을 보완하였다. 즉, 추종이론에서는 선행 차량사이의 차두간격에 관계없이 후행 차량이 선두 차량에 반응한다는 것이나, 본 연구의 확률모형은 지체의 정도와 후행 차량이 선두 차량에 반응하는 확률범위를 구하여 적용하므로 항상 후행 차량이 선두 차량에 반응하지는 않는다.

그러나 확률모형은, 가정에 의해 극복해야 할 몇 가지 한계점들을 내포한다. 다음은 이러한 한계점을 극복하고 보다 정확한 속도 추정을 위하여 보완되어야 할 과제이다.

- 교통량 전 범위에 적용할 수 있고 보다 근사한 차두간격 확률밀도 함수의 개발
- 엇갈림 교통특성을 고려한 보다 미시적인 접근방법의 개발
- 엇갈림 구간뿐만 아니라 고속도로 전 구간으로 확대 적용할 수 있는 방법론의 개발
- 속도 및 교통량관계와 관련한 속도의 변화와 차량 가속원리의 규명

### 참고문헌

1. Drew, Donald R., Traffic Flow Theory and Control, McGraw-Hill, 1968.
2. Highway Capacity Manual, Special Report 209, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1994.
3. May, Adolf D., Traffic Flow Fundamentals, Prentice Hall, 1990.

**부록**

1. 일반적으로 연속류의 차량 도착 분포는 교통량이 적은 수준에서 지수분포, 중간 수준에서는 Pearson Type III 분포 그리고 교통량이 많은 수준에서는 상수(Constant) 분포가 적용될 수 있다. 본 논문에서는 어떠한 차량 도착 분포를 적용하더라도 엇갈림 구간에서 교통류의 속도를 추정할 수 있는 모형을 개발하였으나, 이론식의 전개와 현장 조사 속도(중간 교통량 수준 1,200~1,600대/시)와의 비교를 위해 차량 도착 분포를 K=2인 Pearson Type III 분포로 채택하였다.

현장 조사를 토대로 특정 교통량 수준에 대하여 K값을 추정할 수 있으나, 추정된 K값이 실수일 경우 Incomplete Gamma Function이 직접적으로 계산되지 않고 Taylor's Series와 같은 expansion을 사용하여 근사적으로 구해야 하는 번거로움이 있을 뿐만 아니라 remainder가 항상 존재하므로 解에 대한 신뢰도가 떨어진다. 그러나, K값을 추정된 실수에 가장 가까운 양의 정수로 선택할 경우에는, Incomplete Gamma Function이 쉽게 계산되며, 선택된 양의 정수 K값을 통해 lambda값을 재 계산함으로써 어느 정도 오차가 줄어드는 것으로 알려져 있다.

본 논문에서는 차량 도착 분포를 단순히 K=2인 경우로 국한하였으나, 고속도로 각 구간(기본구간, 합류부, 엇갈림 구간)에 대해 교통량 수준별로 차량 도착 분포를 조사하여 적합한 도착 분포 함수를 찾아내어 적용하는 것이 필요하다.

2. λ는 매개변수로서, 평균 차두간격(  $\bar{i}$  )과 사용자 선택 매개변수 K 및 α의 함수이다. 고속도로 기본구간에서 이틀 네 변수간에는 다음의 관계가 성립한다.

$$\lambda = \frac{K}{\bar{i} - \alpha}, \quad \bar{i} = \frac{3600}{Q}$$

그러나 엇갈림 구간 상류부 영향권에서는 같은 교통량 수준이라 하더라도 엇갈림의 영향으로 기본구간과는 다른 차량 도착 분포를 보인다. 따라서, 엇갈림

구간에 대한 매개변수 λ<sub>m</sub> 및 λ<sub>r</sub>은 이러한 엇갈림의 영향을 반영하며, 다음과 같이 표현된다.

$$\lambda_m = \frac{K}{\bar{i}_m - \alpha}, \quad \bar{i}_m = \frac{3600}{Q_m + Q_{w2} \cdot (1 - \frac{Q_{w1}}{Q_m})}$$

$$\lambda_r = \frac{K}{\bar{i}_r - \alpha}, \quad \bar{i}_r = \frac{3600}{Q_r + Q_{w1} \cdot (1 - \frac{Q_{w2}}{Q_r})}$$

$$3. B = \lambda_m \cdot e^{-\lambda_m(T_i - a)} \sum_{n=1}^{\infty} n t^* \cdot e^{-n t^* \cdot \lambda_m}$$

$$= \frac{\lambda_m \cdot t^* \cdot e^{-\lambda_m(T_i + t^* - a)}}{[1 - e^{-\lambda_m \cdot t^*}]^2}$$

여기서,

$$\sum_{n=1}^{\infty} n t^* \cdot e^{-n t^* \cdot \lambda_m} = - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{d}{d\lambda_m} [e^{-n t^* \cdot \lambda_m}]$$

$$\int \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} n t^* \cdot e^{-n t^* \cdot \lambda_m} \right\} d\lambda_m = - \sum_{n=1}^{\infty} [e^{-n t^* \cdot \lambda_m}]$$

$$= - \frac{e^{-t^* \cdot \lambda_m}}{1 - e^{-t^* \cdot \lambda_m}}$$

다시 위의 식을 미분하여 정리하면,

$$\sum_{n=1}^{\infty} n t^* \cdot e^{-n t^* \cdot \lambda_m} = - \frac{t^* \cdot e^{-\lambda_m \cdot t^*}}{[1 - e^{-\lambda_m \cdot t^*}]^2}$$

4. (1)

$$A_n = \left\{ \int_{T_i + (n-1)G_i}^{(n+1)G_i} [(n+1)G_i - t] \cdot f_m(t) dt (= a_1^n) + \sum_{i=1}^n P(A)_{i+1}^n \cdot \int_a^{G_i + a_i^n} [G_i + a_i^n - t] \cdot f_m(t) dt (= a_{i+1}^n) \right\}$$

$$\cdot \frac{Q_{w2} \left[ \int_a^{G_i} f_r(t) dt \right]^{n-1} \cdot \int_{T_i + (n-1)G_i}^{T_i + n t^*} f_m(t) dt}{\int_{T_i}^{\infty} f_m(t) dt + \frac{Q_{w1}}{2Q_m} \left[ \int_{T_i}^{\infty} f_m(t) dt - 2 \int_{T_i}^{\infty} f_m(t) dt \right]}$$

$$P(A)_2^n = \int_{T_i + (n-1)G_i}^{(n+1)G_i} f_m(t) dt$$

$$P(A)_3^n = P(A)_2^n \cdot \int_a^{G_i + a_i^n} f_m(t) dt$$

$$\vdots$$

$$P(A)_i^n = P(A)_{i-1}^n \cdot \int_a^{G_i + a_i^n} f_m(t) dt$$

(2)

$$\begin{aligned}
 B_n &= \left\{ \int_{T_i+(n-1)G}^{(n+1)G} [(n+1)G_s - t] \cdot f_m(t) dt (= b_i^n) + \right. \\
 &\left. \sum_{i=1}^n P(B)_{i+1}^n \cdot \int_a^{G_i+b_i^n} [G_s + b_i^n - t] \cdot f_m(t) dt (= b_{i+1}^n) \right\} \\
 &\cdot \frac{Q_{n2} \left[ \int_a^G f_r(t) dt \right]^{n-1} \cdot \frac{Q_{w1}}{2Q_m} \int_{T_i+(n-1)G}^{T_i+nt} f_m(t) dt}{\int_{T_i}^{\infty} f_m(t) dt + \frac{Q_{w1}}{2Q_m} \left[ \int_{T_i}^{\infty} f_m(t) dt - 2 \int_{T_i}^{\infty} f_m(t) dt \right]} \\
 P(B)_2^n &= \int_{T_i+(n-1)G}^{(n+1)G} f_m(t) dt \\
 P(B)_3^n &= P(B)_2^n \cdot \int_a^{G_i+b_i^n} f_m(t) dt \\
 &\vdots \\
 P(B)_i^n &= P(B)_{i-1}^n \cdot \int_a^{G_i+b_{i-1}^n} f_m(t) dt
 \end{aligned}$$

(3)

$$C_n = \left\{ \int_{T_i+(n-1)G}^{(n+1)G} [(n+1)G_s - t] \cdot f_m(t) dt (= c_i^n) \right\}$$

$$\begin{aligned}
 &\sum_{i=1}^n P(C)_{i+1}^n \cdot I \int_a^{G_i+c_i^n} [G_s + c_i^n - t] \cdot f_m(t) dt (= c_{i+1}^n) \left\{ \right. \\
 &\left. \frac{Q_{w2} \left[ \int_a^G f_r(t) dt \right]^{n-1} \cdot \frac{Q_{w1}}{2Q_m} \int_{T_i+(n-1)G}^{T_i+nt} f_m(t) dt}{\int_{T_i}^{\infty} f_m(t) dt + \frac{Q_{w1}}{2Q_m} \left[ \int_{T_i}^{\infty} f_m(t) dt - 2 \int_{T_i}^{\infty} f_m(t) dt \right]} \right. \\
 P(C)_2^n &= \int_{T_i+(n-1)G}^{(n+1)G} f_m(t) dt \\
 P(C)_3^n &= P(C)_2^n \cdot \int_a^{G_i+c_i^n} f_m(t) dt \\
 &\vdots \\
 P(C)_i^n &= P(C)_{i-1}^n \cdot \int_a^{G_i+c_{i-1}^n} f_m(t) dt
 \end{aligned}$$

여기서,  $a_i^n$ ,  $b_i^n$  및  $c_i^n$  이 각각 0( $\approx 0.1$ 초)에 수렴할 때  $A_n$ ,  $B_n$  및  $C_n$  이 결정되며,  $D_n$  이 0( $\approx 0.1$ 초)에 수렴할 때  $D_N$  이 결정되고 전체 지체시간 계산과정은 중단하게 된다.