

■ 論 文 ■

## 양방향 2차로 도로의 지체시간 산정을 이용한 승용차환산계수 결정이론

A Mathematical Model for Determination of PCE's Based on Delay  
for Two-Lane Two-Way Highway

**이 승 준**

(서울시립대학교 도시공학과 박사과정)

**최 재 성**

(서울시립대학교 도시공학과 교수)

### 목 차

- |  |   |
|--|---|
| <p>I. 서론</p> <p style="padding-left: 20px;">1. 연구의 배경 및 목적</p> <p style="padding-left: 20px;">2. 연구의 방법론</p> <p>II. 본론</p> <p style="padding-left: 20px;">1. 기존 연구의 검토</p> | <p style="padding-left: 20px;">2. 이론의 전개</p> <p style="padding-left: 20px;">3. 승용차환산계수의 결정</p> <p>III. 결론</p> <p>참고문헌</p> |
|--|---|

### 요 약

양방향 2차로 도로의 설계, 용량 및 운영분석의 단계에서 고려되어야 할 핵심사항으로 화물차와 같은 중차량이 교통류에 미치는 영향을 들 수 있다. 중차량이 교통류에 미치는 영향은 승용차환산계수로 표현할 수 있으며, 이는 교통류 운영분석의 주 MOE's로 사용되는 교통량, 운행속도, 지체시간, 주행의 자유 등에 대하여 중차량이 미치는 영향을 계산하여 승용차 몇 대에 해당하는가를 나타낸 것이다. PCE환산에 있어서 중요한 것은 중차량을 승용차로 환산하는 척도이며, 이러한 승용차 환산 척도는 계량화가 가능하고 교통류특성을 반영할 수 있는 특성을 지녀야 한다. 본 연구에서는 PCE 산정의 척도로서 지체시간을 선정하였으며, 이의 계산을 위하여 도로구간을 추월가능구간과 추월금지구간으로 나누어 지체시간을 계산하였다. PCE의 환산은 Werner와 Morrall이 제시한 것처럼 Walker's Method를 이용하여 교통류 상호간에 발생하는 지체시간과 중차량 1대의 유입으로 인해 유발되는 지체시간을 비교하여 결정하였다. 또한 추월가능 및 금지구간 뿐만 아니라, 추월가능구간과 추월금지구간이 조합되어 연속적으로 나타나는 도로구간의 평균 PCE를 산정할 수 있는 방법을 제시하였다.

## I. 서론

### 1. 연구의 배경 및 목적

양방향 2차로 도로의 설계, 용량 및 운영분석의 단계에서 고려되어야 할 핵심사항으로 화물차와 같은 중차량이 교통류에 미치는 영향을 들 수 있다. 중차량이 교통류에 미치는 영향은 승용차환산계수(이하 PCE)로 표현할 수 있으며, 이는 특정한 도로, 교통 및 교통제어 조건하에서 교통류 운영분석의 주 MOE's 로 사용되는 교통량, 운행속도, 지체시간, 주행의 자유 등에 대하여 중차량이 미치는 영향을 계산하여 승용차 몇 대에 해당하는가를 나타낸 것이다. PCE환산에 있어서 중요한 것은 중차량을 승용차로 환산하는 척도이며, 이러한 승용차 환산 척도는 계량화가 가능하고 확정적이며, 교통류특성을 반영할 수 있는 특성을 지녀야 한다.

본 연구는 승용차 환산의 효과척도를 규정하고 이에 부합하는 이론 및 방법론의 구축을 목적으로 한다.

### 2. 연구의 방법론

기존 연구에서는 PCE 환산의 척도로 속도-교통량관계, 추월율, 차두간격, platoon leader, 평균주행속도 및 지체시간(추월가능구간) 등이 사용되었다. 그러나 이와 같은 PCE환산의 척도들은 다양한 교통조건 하에서 나타나는 중차량의 영향을 일률적으로 반영하지 못하기 때문에 서비스수준별로 서로 다른 척도들이 사용되었으며, 특히 어느 하나의 척도만으로 PCE를 산정하는 것은 부적절할 것으로 판단되어 몇 가지의 PCE환산 척도들을 결합하여 모의실험을 통한 PCE산정 방법이 제시되기도 하였다. 본 연구에서는 여러 PCE환산 척도 중 지체시간을 선정하여 PCE산정 방법론을 제시하였는데, 이는 지체시간이 추월율과 평균주행속도 등을 복합적으로 고려한 요소이며, 중차량의 영향 또한 추월율과 평균주행속도로 표현되는 운전자 주행의 자유 및 교통운영의 질이라는 두 가지 차원에서 파악되어야 하기 때문이다.

본 연구에서는 중차량을 PCE로 환산하기 위하여, 도로구간을 추월가능구간과 추월금지구간으로 나누어 지체시간을 계산하였다. PCE의 환산은 Werner와

Morrall(1976)이 제시한 것처럼 Walker's Method를 이용하여 교통류 상호간에 발생하는 지체시간과 중차량 1대의 유입으로 인해 유발되는 지체시간을 비교하여 결정하였다. 또한 추월가능 및 금지구간 뿐만 아니라, 추월가능구간과 추월금지구간이 조합되어 연속적으로 나타나는 도로구간의 평균 PCE를 산정할 수 있는 방법을 제시하였다.

## II. 본론

### 1. 기존 연구의 검토

- **직접 PCE 산정 방법** : 직접 PCE 산정 방법은 교통류의 성능과 Equivalency criterion을 직접 연결하여 PCE를 산정하는 방법으로 용량을 비교하는 방법과 속도-교통량 관계를 이용하는 방법이 있다. 대표적 연구자들로는 Duncan(1974)과 Huber(1982) 등을 들 수 있다.
- **간접 PCE 산정 방법** : 간접 PCE 산정 방법은 교통류의 성능과 PCE 환산척도를 사용하여 PCE를 산정하는 방법으로서, 속도-교통량 관계를 이용하여 PCE를 산출할 때 발생하는 문제점을 해결하고 쉽게 측정 가능한 교통류 특성을 통해 PCE를 산출하기 위해 개발되었다. PCE 환산척도로는 추월율(Overtaking rate), 지체시간, 차두간격, Platoon leader 등이 있다. 이와 관련된 연구로는 Werner and Morrall(1974), Craus, et al.(1980), Cunagin and Messer(1983) 등이 있다.
- **수학적 모델에 의한 PCE 산정 방법** : 수학적 모델을 이용하여 PCE를 산정하는 방법의 대표적인 예는 트럭혼합비율에 따른 간섭효과를 적분방정식 모형에 의하여 제안한 Jacobs(1974)와 가장 빨리 주행하는 차량들의 평균속도를 효과척도로 설정하여 수학적 모델링과 현장 데이터 분석기법을 병행하여 PCE값을 산정한 Ashton, et al.(1968) 등을 들 수 있다.
- **Simulation 모형을 이용한 PCE 산정** : 다양한 도로조건 및 교통조건에서 PCE를 결정하기 위하여 simulation기법을 이용한 방법으로, Taylor, et al.(1972)와 St.John, et al.(1978)의 연구를 대표적인 예로 들 수 있다.

## 2. 이론의 전개

### 1) 가정 및 조건

- 차량 도착형태를 확률과정으로 간주하여 도착분포를 지수분포로 가정함(교통량수준은 비혼잡교통류에 국한함).
- 주 방향 교통류 상호간의 추월과 지체유발을 파악할 수 있도록, 속도급간(speed classification)별로 주 방향 교통류를 구분함.
- 대향 교통류에 대해서는 속도급간별로 구분하지 않고 평균속도로 주행하는 하나의 교통류로 가정함.
- 저속차량을 고속차량에 대한 서비스채널로 가정하여 M/G/1 Queueing System을 적용함.

### 2) 추월가능구간의 지체시간 계산

추월가능구간의 지체시간은 Normann(1942)의 연구로부터 제안된 평균추종시간과 Walker의 연구로부터 출발한 추월율의 개념(Werner & Morrall, 1974)을 이용하여 계산하였다.

#### ■ 추월 1회당 평균추종시간의 산정

Normann의 추월 1회당 평균추종시간 공식을 전개하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$t_i = \frac{v_o}{2(v_i + v_o)} \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_o T_{Ci}}}{\lambda_o e^{-\lambda_o T_{Ci}}} \quad (1)$$

여기서,

$t_i$  :  $i$  차량에 대한 추월 1회당 평균추종시간(초)

$v_o$  : 대향 교통류의 평균속도(km/h)

$v_i$  : 피추월차량의 평균속도(km/h)

$\lambda_o$  : 대향 교통류의 평균도착율(대/초)

$T_{Ci}$  :  $i$  차량 추월시 요구되는 대향 교통류의 최소 차간간격(초)

식(1)에 사용된 대향교통류의 최소 차간간격( $T_{Ci}$ )은 추월에 필요한 최소시간과 피추월차량 및 대향교통류의 상대속도에 따라 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_{Ci} = T_L \cdot \frac{(v_i + v_o)}{v_o} \quad (2)$$

여기서,

$T_L$  = 추월에 필요한 최소시간(초)<sup>1)</sup>

#### ■ 추월 1회당 평균지체시간의 산정

$$D_{ij} = t_i \left(1 - \frac{v_i}{v_j}\right), \quad v_i < v_j \quad (3)$$

여기서,

$D_{ij}$  :  $j$  차량의  $i$  차량 추월1회당 평균지체시간(초)

$v_j$  : 추월차량의 평균속도(km/h)

$j$  :  $i+1, i+2, \dots, i+n$

( $i+n$  = 가장 높은 속도급간의 차량을 의미함)

#### ■ 추월율의 산정

평균속도  $v_i$ 로 주행하는 차량들과  $v_j$ 로 주행하는 차량들 간의 추월율은 다음과 같다.

$$N_o = q_i q_j \left(\frac{1}{v_i} - \frac{1}{v_j}\right) \quad (4)$$

여기서,

$N_o$  : 평균속도  $v_i$ 와  $v_j$ 로 주행하는 차량들의 추월율(추월횟수/km/h)

$q_i$  : 피추월교통량(대/시)

$q_j$  : 추월교통량(대/시)

#### ■ 총 지체시간의 산정

$$TD_{ij}^P = \sum_{m=i}^{i+n-1} \sum_{k=m+1}^{i+n} q_m q_k D_{mk} \left(\frac{1}{v_m} - \frac{1}{v_k}\right) \quad (5)$$

여기서,

$TD_{ij}^P$  : 주 방향 교통류의 총 지체시간(초/km/h)

$P$  : Passing Zone

1) Stolz(1967) 및 Miller(1972)는 독일에서의 현장관측을 토대로 피추월차량의 속도에 관계없이 추월에 필요한 최소시간을 13초로 주장하고 있다.

■ 중차량 1대에 대한 추월율의 산정

$$N_T = \sum_{m=i}^{i+n} q_m \left( \frac{1}{v_T} - \frac{1}{v_m} \right) \quad (6)$$

여기서,

$N_T$  : 1대의 중차량에 대한 추월율(추월횟수/km/h)

■ 중차량 1대에 대한 총 지체시간의 산정

$$TD_T^p = \sum_{m=i}^{i+n} q_m D_{Tm} \left( \frac{1}{v_T} - \frac{1}{v_m} \right) \quad (7)$$

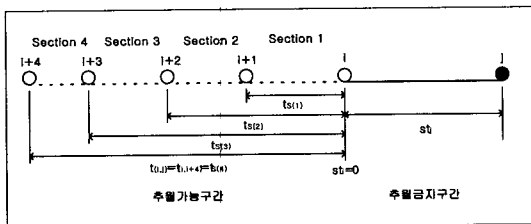
여기서,

$TD_T^p$  : 중차량 1대에 대한 총 지체시간(초/km/h)

3) 추월금지구간의 지체시간 계산

추월금지구간의 지체시간 계산은 본 연구를 통해 제시된 방법으로서, <그림 1>에서 보는 바와 같이 추월금지구간에서의 총 지체시간을  $i$  차량과  $j$  차량 ( $j = i+1, i+2, \dots, i+n$ ) 사이의 최대 지체 가능시간 ( $t_{(i,j)}$ )과 차량의 도착분포를 이용한 확률 식으로부터 구할 수 있다.  $i$  차량은 교통류 중 최저 속도로 주행하는 차량을 의미하며  $i+1, i+2$  차량으로 갈수록 높은 속도로 주행하는 차량을 의미한다.

Section 1 또는  $t_{S(1)}$ 은  $i$  차량이 추월금지구간에 진입했을 때 추월금지구간에서  $i+1$  차량이  $i$  차량에 의해 지체를 경험할 수 있는 최대 시간간격이 되며, Section 2는  $i+2$  차량이  $i+1$  차량에 의해 지체를 경험할 수 있는 최대 시간간격이 된다. 따라서,  $i+2$  차량이 추월금지구간에 진입한  $i$  차량에 의해서만 지체를 경험하기 위해서는 Section 2에 도착한



<그림 1> 추월금지구간에서의 지체시간 계산 개념도

$i+1$  차량 보다 앞서 도착해야 할 뿐만 아니라 Section 1에 도착한 다른  $i$  차량보다도 앞서 도착해야만 한다. 이 때, Section 1에 도착한  $i+1$  차량은 그 자신이 추월금지구간에 진입한  $i$  차량에 의해 지체를 경험하며, 지체되기 시작한 시점부터는  $i$  차량과 동일한 속도로 주행하므로,  $i+1$  차량 이후에 도착한  $i+2$  차량은 추월금지구간에 진입한  $i$  차량에 의해 지체를 경험하는 것과 같게 된다. 따라서 Section 1에서는 다른  $i$  차량의 도착이 유일한 고려 사항이 되며,  $i$  차량 보다 고속의 차량들이 추월금지구간에 진입한  $i$  차량에 의해서만 지체를 경험하기 위해서는 Section 1에 도착한 다른  $i$  차량 보다 앞서 도착해야 한다. Section 1에 다른  $i$  차량이 도착하지 않은 경우에는 Section 2에서  $i$  차량과  $i+1$  차량이 지체시간 계산 시 고려의 대상이 된다.

이와 같이 하여  $i$  차량이 교통류 내의 다른 고속 차량들에게 유발하는 지체 중  $i+1$  및  $i+2$  차량에게 유발하는 지체를 살펴보면 다음과 같다.

먼저  $i+1$  차량은  $i$  차량이 추월금지구간에 진입할 때, 시간간격  $t_{S(1)}$  내에 도착해야만 기준시점 ( $st_i$ )에 추월금지구간에 진입한  $i$  차량에 의해서 지체를 경험하게 되며, 다음과 같이 두 가지 경우가 존재할 수 있다.

- 시간간격  $t_{S(1)}$  내에 다른  $i$  차량의 도착이 없을 경우
- 시간간격  $t_{S(1)}$  내에 다른  $i$  차량이 도착하고  $i+1$  차량이 이에 앞서 도착하는 경우

또한  $i+2$  차량의 경우 역시  $i$  차량이 추월금지구간에 진입할 때, 시간간격  $t_{S(2)}$  내에 도착해야만 기준시점 ( $st_i$ )에 추월금지구간에 진입한  $i$  차량에 의해서 지체를 경험하게 되며 다음의 네 가지 경우가 존재할 수 있다.

- 시간간격  $t_{S(1)}$  내에 다른  $i$  차량이 도착하고  $i+2$  차량이 이에 앞서 도착하는 경우
- 시간간격  $t_{S(2)}$  내에 다른  $i$  차량은 도착하지 않을 때,  $i+2$  차량이 다른  $i$  차량에 앞서 도착하는 경우
- 시간간격  $t_{S(2)}$  내에  $i$  차량과  $i+1$  차량이 모두 도착하고  $i+2$  차량이 이 두 차량에 앞서 도착하는 경우
- 시간간격  $t_{S(1)}$  및  $t_{S(2)}$  내에 다른  $i$  차량이 도착

하지 않고  $t_{S(2)}$  내에  $i+1$  차량이 도착할 때,  $i+2$  차량이  $i+1$  차량에 앞서 도착하는 경우 - 시간간격  $t_{S(1)}$  및  $t_{S(2)}$  내에 다른  $i$  차량이 도착하지 않고 시간간격  $t_{S(2)}$  내에  $i+1$  차량도 도착하지 않는 경우

이와 같은 과정을 거치게 되면, 교통류 내에서 저속 차량이 그 보다 고속차량에게 유발하는 지체시간을 구할 수 있다. 다음의 <표 1>은 이러한 지체시간의 계산 결과를 보여주며, 이들 지체시간의 총 합은  $i$  차량에 의하여 추월금지구간에서 유발되는 평균지체시간( $D_i^N$ )이 된다. <표 1>에서 지체시간의 계산결과가 대각행렬의 음영부분과 음영부분의 오른쪽에 있는 비음영부분으로 나뉘는 것을 볼 수 있다. 여기서, 비음영부분은 음영부분의 계산결과를 토대로 구축된 일반식에  $j$  값을 대입하면 얻을 수 있다. 예를 들어  $u=1$ ,  $j=i+1$ 인 음영부분에서,  $D_{i,j}^{u,1}$ 은 <그림 1>에서 보는 바와 같이 Section 1 즉, 시간간격  $t_{S(1)}$  내에 다른  $i$  차량이 도착하고  $i+1$  차량이 이에 앞서 도착하여 기준시점의  $i$  차량에 의해서만 겪게되는 지체시간을 의미한다. 마찬가지로, 음영부분의 오른쪽에 있는 비음영부분( $j=i+2$ )의  $D_{i,j}^{u,1}$ 은 Section 1 즉, 시간간격  $t_{S(1)}$  내에 다른  $i$  차량이 도착할 때,  $i+2$  차량이

이에 앞서 도착하여 기준시점의  $i$  차량에 의해서만 겪게되는 지체시간을 의미한다. 또한 <표 1>에서, 각 Section에서 지체시간 계산 시 고려해야 할 저속차량의 종류는 각 Section number와 일치하는 것을 볼 수 있다. 즉, Section 1에서는  $i$  차량만이 지체시간 계산 시 고려되는 유일한 차량이 되며, Section 2에서는 두 차량 즉,  $i$  차량과  $i+1$  차량이 지체시간 계산 시 고려대상이 된다.

다음은 이러한 지체시간 계산 과정을 보다 일반화된 식으로 표현한 것이다.

(1)  $i$  차량이 유발하는 지체시간

①  $i$  차량이  $i+1$  차량에게 유발하는 지체시간( $j=i+1$ )

■ Section 1

■ Section 1에서 기준시점의  $i$  차량 외에 다른  $i$  차량이 도착할 때

$$D_{i,j}^{1,1} = \int_{t=st,0}^{t_{S(1)}} f(t)_i \cdot \int_{st_j=0}^{\infty} f(st_j) \cdot \int_{h=st_j}^{st_j+t} (st_j + t_{(i,j)} - h) \cdot f(h)_j \cdot dh \cdot dst_j \cdot dt = \int_{t=st,0}^{t_{S(1)}} f(t)_i \cdot D_{i,j}^t dt \quad (8)$$

<표 1>  $i$  차량이 유발하는 평균지체시간( $D_i^N$ ,  $N$ =No-passing Zone)

지체차량 구간	$j=i+1$	$j=i+2$	...	$j=i+n$
Section 1 (u=1)	$D_{i,j}^{u,1}$ [1 - $P_{ALL(u)}$ ] · $D_{i,j}^E$	$D_{i,j}^{u,1}$	$D_{i,j}^{u,1}$	$D_{i,j}^{u,1}$
Section 2 (u=2)	-	$D_{i,j}^{u,1}$ $D_{i,j}^{u,2}$ [1 - $P_{ALL(u)}$ ] · $D_{i,j}^E$	$D_{i,j}^{u,1}$ $D_{i,j}^{u,2}$	$D_{i,j}^{u,1}$ $D_{i,j}^{u,2}$
· · ·	-	-	$D_{i,j}^{u,1}$ $D_{i,j}^{u,2}$ · $D_{i,j}^{u,n-1}$ [1 - $P_{ALL(u)}$ ] · $D_{i,j}^E$	$D_{i,j}^{u,1}$ $D_{i,j}^{u,2}$ · $D_{i,j}^{u,n-1}$
Section u	-	-	-	$D_{i,j}^{u,1}$ $D_{i,j}^{u,2}$ · $D_{i,j}^{u,n}$ [1 - $P_{ALL(u)}$ ] · $D_{i,j}^E$

$$D_{i,j}^t = \int_{st_i=0}^{\infty} f(st_j) \cdot \int_{h=st_i}^{st_i+t} (st_j + t_{(i,j)} - h) \cdot f(h) \cdot dh \cdot dst_j$$

$$f(t)_i = \lambda_i \cdot e^{-\lambda_i \cdot t}$$

$$f(st_j) = \lambda_j \cdot e^{-\lambda_j \cdot st_j}$$

$$f(h)_j = \lambda_j \cdot e^{-\lambda_j \cdot h}$$

여기서,

$D_{i,j}^{1,1}$  : 기준시점의  $i$  차량 외에 다른 지체유발 차량( $i$  차량)이 Section 1에 도착할 때  $j$  차량이 기준시점의  $i$  차량에 의해서만 경험하는 평균지체시간

$D_{i,j}^t$  :  $j$  차량이 기준시점부터  $t$  시점까지 도착할 때, 기준시점의  $i$  차량에 의해서만 겪게되는 평균지체시간

$i$  : 교통류 내 최저 속도급간에 해당하는 차량

$j$  :  $i+1, i+2, \dots, i+n$

$st_i$  : 0 ( $i$  차량이 추월금지구간에 진입한 기준시점)

$st_j$  : 추월금지구간에 진입한 지체유발차량과 이보다 앞서 추월금지구간에 진입한 고속차량 사이의 시간간격

$t_{(i,j)}$  :  $i$  차량과  $j$  차량 사이의 최대 지체가능시간

$t_{S(1)}$  : 시점부터 Section 1 종점까지의 시간간격 (=  $t_{(i,i+1)}$ )

$t_{S(0)}$  : 0

$f(t)_i$  :  $i$  차량군의 도착 확률 밀도함수

$f(st_j)$  :  $st_j$  간격의 확률 밀도함수

$f(h)_j$  :  $j$  차량군의 도착 확률 밀도함수

$\lambda_i$  :  $i$  차량군의 평균도착율(대/초)

$\lambda_j$  :  $j$  차량군의 평균도착율(대/초)

$h$  : 차두간격(초)

- 시간간격  $t_{S(1)}$  동안 기준시점의  $i$  차량 외에 지체를 유발하는 다른  $i$  차량의 도착이 없을 때

$$[1 - P_{i(S1)}] \cdot \int_{st_i=0}^{\infty} f(st_j) \cdot \int_{h=st_i}^{st_i+t_{(i,j)}} (st_j + t_{(i,j)} - h) \cdot f(h) \cdot dh \cdot dst_j = [1 - P_{i(S1)}] \cdot D_{i,j}^E [1 - P_{i(ALL)}] \cdot D_{i,j}^E \quad (9)$$

$$[1 - P_{i(ALL)}] = [1 - P_{i(S1)}] = [1 - \int_{t=st_i}^{st_i+t_{S(1)}} f(t)_i dt]$$

$$D_{i,j}^E = \int_{st_i=0}^{\infty} f(st_j) \cdot \int_{h=st_i}^{st_i+t_{(i,j)}} (st_j + t_{(i,j)} - h) \cdot f(h) \cdot dh \cdot dst_j$$

여기서,

$[1 - P_{i(S1)}]$  : 기준시점의  $i$  차량 외에 Section 1에서 지체를 유발시키는 다른  $i$  차량이 도착하지 않을 확률

$[1 - P_{i(ALL)}]$  :  $j$  차량에게 지체를 유발할 수 있는 모든 대상구간에  $i$  차량이 도착하지 않을 확률

$D_{i,j}^E$  :  $j$  차량이 시간간격  $t_{(i,j)}$  동안 도착할 때 기준시점의  $i$  차량에 의해서만 겪게되는 평균지체시간

②  $i$  차량이  $i+2$  차량에게 유발하는 지체시간( $j=i+2$ )

i) Section 1 :  $D_{i,j}^{1,1}$

■ Section 2

- Section 2에서 지체유발 차량( $i, i+1$ ) 중 1대가 도착할 때

$$D_{i,j}^{2,1} = [1 - P_{i(S1+S2)}] \cdot \int_{st_{i+1}=0}^{\infty} f(st_{i+1}) \cdot \int_{t=st_{i+1}+t_{S(1)}}^{st_{i+1}+t_{S(2)}} f(t)_{i+1} \cdot D_{i,j}^t dt \cdot dst_{i+1} + [1 - P_{i+1(S2)}] \cdot \int_{t=t_{S(1)}}^{t_{S(2)}} f(t)_i \cdot D_{i,j}^t dt \quad (10)$$

위의 식에서  $i+1$  차량이  $i+2$  차량에게 지체를 유발할 수 있는 모든 구간은 Section 2이므로, 이와 같은 방식으로 전개하면 다음과 같은 일반화된 식을 얻을 수 있다.

$$D_{i,j}^{n,1} = \sum_{m=i}^{i+n-1} [1 - P_{i,m(ALL)}] \cdot [1 - P_{i+1,m(ALL)}] \cdot \dots \cdot [1 - P_{i+u-1,m(ALL)}] \cdot \int_{st_m=0}^{\infty} f(st_m) \cdot \int_{t=st_m+t_{S(u-1)}}^{st_m+t_{S(u)}} f(t)_m \cdot D_{i,j}^t dt \quad (11)$$

$$\begin{aligned}
 [1 - P_{i,m(ALL)}] &= [1 - P_{i(ALL)}], \text{ if } m \neq i, \\
 &= 1, \text{ if } m = i \\
 &\quad \vdots \\
 [1 - P_{i+u-1,m(ALL)}] &= [1 - P_{i+u-1(ALL)}], \\
 &\quad \text{if } m \neq i+u-1 \\
 &= 1, \text{ if } m = i+u-1 \\
 \int_{st_m=0}^{\infty} f(st_m) &= \int_{st_m=0}^{\infty} f(st_m), \text{ if } m \neq i \\
 &= 1, \text{ if } m = i
 \end{aligned}$$

여기서,

$D_{i,j}^{u,1}$  = Section u에서 지체를 유발할 수 있는 차량중 한 대만 도착할 때, j 차량이 기준시점의 i 차량에 의해서만 경험하는 지체시간  $[1 - P_{i+u-1(ALL)}] = j$  차량에게 지체를 유발할 수 있는 모든 대상구간에  $i+u-1$  차량이 도착하지 않을 확률  $t_{S(u)}$  = 기준시점부터 Section u 종점까지의 시간간격

- Section 2에 2대의 지체유발 차량(i, i+1)이 모두 도착할 때  
이 경우에 있어서 도착하는 각 차량(i, i+1)의 순서가 서로 바뀔 수 있으므로 경우의 수는  $2! = 2$  이다.

$$\begin{aligned}
 D_{i,j}^{2,2} &= \left\{ \int_{t=st_i+t_{S(1)}}^{st_i+t_{S(2)}} f(t)_i \cdot \int_{st_{i+1}=0}^{\infty} f(st_{i+1}) \right. \\
 &\quad \cdot \int_{r=st_{i+1}+t_{S(1)}}^{st_{i+1}+t} f(r)_{i+1} \cdot D_{i,j}^r dr dst_{i+1} dt \\
 &\quad + \int_{st_{i+1}=0}^{\infty} f(st_{i+1}) \cdot \int_{t=st_{i+1}+t_{S(1)}}^{st_{i+1}+t_{S(2)}} f(t)_{i+1} \\
 &\quad \cdot \left. \int_{r=st_i+t_{S(1)}}^{st_i+t} f(r)_i \cdot D_{i,j}^r dr dt dst_{i+1} \right\} \quad (12)
 \end{aligned}$$

여기서,

$D_{i,j}^{2,2}$  = Section 2에서 지체를 유발할 수 있는 차량(i 차량과 i+1 차량)이 모두 도착할 때 j 차량이 기준시점의 i 차량에 의해서만 경험하는 평균지체시간  $D_{i,j}^r = j$  차량이 기준시점부터 r시점까지 도착할 때, 기준시점의 i 차량에 의해서만 겪게되는 지체시간

- $t_{S(2)}$  시간간격 동안 기준시점의 i 차량 외에 지체를 유발할 수 있는 모든 종류의 차량(i 차량과

i+1 차량)이 도착하지 않을 때

$$\begin{aligned}
 &[1 - P_{i(S1+S2)}] \cdot [1 - P_{i+1(S2)}] \cdot D_{i,j}^E \\
 &= [1 - P_{i(ALL)}] \cdot [1 - P_{i+1(ALL)}] \cdot D_{i,j}^E \\
 &= [1 - P_{ALL(2)}] \cdot D_{i,j}^E \quad (13)
 \end{aligned}$$

따라서, 일반식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 &[1 - P_{ALL(u)}] \cdot D_{i,j}^E = [1 - P_{i(ALL)}] \cdots \\
 &[1 - P_{i+u-1(ALL)}] \cdot D_{i,j}^E \quad (14)
 \end{aligned}$$

여기서,

$[1 - P_{ALL(u)}] = j$  차량에게 지체를 유발할 수 있는 모든 차량이 시점부터 Section u까지 각각의 지체유발 구간에 도착하지 않을 확률

- ③ i 차량이 i+3 차량에게 유발하는 지체시간(j = i+3)  
i) Section 1 :  $D_{i,j}^{1,1}$   
ii) Section 2 :  $D_{i,j}^{2,1}, D_{i,j}^{2,2}$

■ Section 3

- Section 3에서 지체유발 차량(i, i+1, i+2)중 1대가 도착할 때  $D_{i,j}^{3,1} = D_{i,j}^{u,1}, (u=3)$
- Section 3에서 지체유발 차량(i, i+1, i+2)중 2대가 도착할 때  $D_{i,j}^{3,2}$ 는 다음의 세 가지 경우의 합으로 구할 수 있다.

$$D_{i,j}^{3,2} = \textcircled{1} + \textcircled{2} + \textcircled{3} \quad (15)$$

$$\begin{aligned}
 \textcircled{1} &= [1 - P_{i(ALL)}] \cdot \left\{ \int_{st_{i+1}=0}^{\infty} f(st_{i+1}) \cdot \int_{t=st_{i+1}+t_{S(2)}}^{st_{i+1}+t_{S(3)}} f(t)_{i+1} \right. \\
 &\quad \cdot \int_{st_{i+2}=0}^{\infty} f(st_{i+2}) \cdot \int_{r=st_{i+2}+t_{S(2)}}^{st_{i+2}+t} f(r)_{i+2} \\
 &\quad \cdot D_{i,j}^r dr dst_{i+2} dt dst_{i+1} + \int_{st_{i+2}=0}^{\infty} f(st_{i+2}) \\
 &\quad \cdot \int_{t=st_{i+2}+t_{S(2)}}^{st_{i+2}+t_{S(3)}} f(t)_{i+2} \cdot \int_{st_{i+1}=0}^{\infty} f(st_{i+1}) \\
 &\quad \cdot \left. \int_{r=st_{i+1}+t_{S(2)}}^{st_{i+1}+t} f(r)_{i+1} \cdot D_{i,j}^r dr dst_{i+1} dt dst_{i+2} \right\}
 \end{aligned}$$

$$\textcircled{2} = [1 - P_{i+1(ALL)}] \cdot \left\{ \int_{t=st_i+t_{S2}}^{st_i+t_{S3}} f(t)_i \cdot \int_{st_{i+2}=0}^{\infty} f(st_{i+2}) \cdot \int_{r=st_{i+2}+t_{S2}}^{st_{i+2}+t} f(r)_{i+2} \cdot D_{i,j}^r dr dst_{i+2} dt + \int_{st_{i+2}=0}^{\infty} f(st_{i+2}) \cdot \int_{t=st_{i+2}+t_{S2}}^{st_{i+2}+t_{S3}} f(t)_{i+2} \cdot \int_{r=st_i+t_{S2}}^{st_i+t} f(r)_i \cdot D_{i,j}^r dr dt dst_{i+2} \right\}$$

$$\textcircled{3} = [1 - P_{i+2(ALL)}] \cdot \left\{ \int_{t=st_i+t_{S2}}^{st_i+t_{S3}} f(t)_i \cdot \int_{st_{i+1}=0}^{\infty} f(st_{i+1}) \cdot \int_{r=st_{i+1}+t_{S2}}^{st_{i+1}+t} f(r)_{i+1} \cdot D_{i,j}^r dr dst_{i+1} dt + \int_{st_{i+1}=0}^{\infty} f(st_{i+1}) \cdot \int_{t=st_{i+1}+t_{S2}}^{st_{i+1}+t_{S3}} f(t)_{i+1} \cdot \int_{r=st_i+t_{S2}}^{st_i+t} f(r)_i \cdot D_{i,j}^r dr dt dst_{i+1} \right\}$$

■ Section 3에서 지체유발 차량( $i, i+1, i+2$ ) 3대가 모두 도착할 때 이 경우에 있어서 도착하는 각 차량( $i, i+1, i+2$ )의 순서가 서로 바뀔 수 있으므로 경우의 수는  $3! = 6$ 이다.

$$D_{i,j}^{3,3} = [1 - P_{ALL(2)}] \cdot \left\{ \int_{t=st_i+t_{S2}}^{st_i+t_{S3}} f(t)_i \cdot \int_{st_{i+1}=0}^{\infty} f(st_{i+1}) \cdot \int_{r=st_{i+1}+t_{S2}}^{st_{i+1}+t} f(r)_{i+1} \cdot \int_{st_{i+2}=0}^{\infty} f(st_{i+2}) \cdot \int_{k=st_{i+2}+t_{S2}}^{st_{i+2}+r} f(k)_{i+2} \cdot D_{i,j}^k dk dst_{i+2} dr dst_{i+1} dt + \dots + \int_{st_{i+2}=0}^{\infty} f(st_{i+2}) \cdot \int_{t=st_{i+2}+t_{S2}}^{st_{i+2}+t_{S3}} f(t)_{i+2} \cdot \int_{st_{i+1}=0}^{\infty} f(st_{i+1}) \cdot \int_{r=st_{i+1}+t_{S2}}^{st_{i+1}+t} f(r)_{i+1} \cdot \int_{k=st_i+t_{S2}}^{st_i+r} f(k)_i \cdot D_{i,j}^k dk dr dst_{i+1} dt dst_{i+2} \right\} \quad (16)$$

■  $t_{S(3)}$  시간간격 동안 기준시점의  $i$  차량 외에 지체를 유발할 수 있는 차량( $i, i+1, i+2$ )의 도착이 없을 때

$$[1 - P_{ALL(3)}] \cdot D_{i,j}^E = [1 - P_{ALL(u)}] \cdot D_{i,j}^E, \quad (u=3)$$

지금까지  $i$  차량에 의하여 지체가 유발될 수 있는 몇 가지 경우를 살펴보았다. 이와 같은 방식으로  $i+n$  차량이 추월금지구간에 진입한  $i$  차량에 의하여 지체되는 시간을 구할 수 있으며, <표 1>에 보는

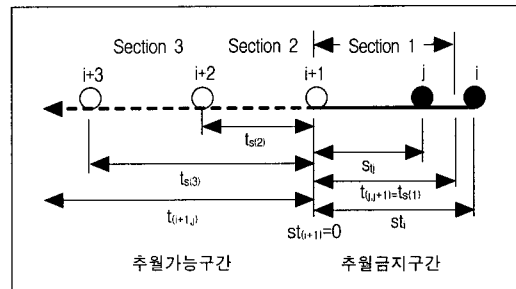
바와 같이 구한 모든 지체시간의 합은 추월금지구간에 진입한  $i$  차량에 의하여 유발되는 평균지체시간 ( $D_i^N$ )이 된다.

(2)  $i+1$  차량이 유발하는 지체시간

$$(j = i+2, i+3, \dots, i+n)$$

$i+1$  차량에 의한 지체시간 역시  $i$  차량에 의한 지체시간 계산과정과 동일한 방법으로 구할 수 있다.

다음의 <그림 2>는  $i+1$  차량이 유발하는 지체시간을 계산하기 위한 개념도이다.  $i+1$  차량이 지체를 유발하기 위해서는  $i$  차량이 추월금지구간에 진입한 이후  $t_{(i,i+1)} (= t_{S(1)})$  시간이 경과한 이후에  $i+1$  차량이 추월금지구간에 진입하여  $i+1$  차량이  $i$  차량에 의해 지체를 경험하지 않아야 한다. 따라서  $i+1$  차량이  $i+2$  차량에게 유발하는 지체시간을 구해보면 다음과 같다.



<그림 2>  $i+1$  차량이 유발하는 지체시간 계산 개념도

■ Section 2에 지체유발 차량( $i, i+1$ ) 중 한대가 도착할 때 ( $j = i+2$ )

$$D_{i+1,j}^{2,1} = [1 - P_{i(S1+S2)}] \cdot \int_{t=st_{i+1}}^{st_{i+1}+t_{S2}} f(t)_{i+1} \cdot D_{i+1,j}^t dt + [1 - P_{i+1(S2)}] \cdot \int_{st_i=t_{S(1)}}^{\infty} f(st_i) \cdot \int_{t=st_i}^{st_i+t_{S2}} f(t)_i \cdot D_{i+1,j}^t dt dst_i \quad (17)$$

$$D_{i+1,j}^t = \int_{st_i=0}^{\infty} f(st_i) \cdot \int_{h=st_i}^{st_i+t} (st_i + t_{(i+1,j)} - h) \cdot f(h)_j dh dst_i$$

■ Section 2에 지체유발 차량( $i, i+1$ ) 모두가 도착할 때



$$\begin{aligned}
 D_{i+1,j}^{2,2} = & \int_{st_i = t_{S(1)}}^{\infty} f(st_i) \cdot \int_{t = st_i}^{st_i + t_{S(2)}} f(t)_i \\
 & \cdot \int_{r = st_{i+1} = 0}^{st_{i+1} + t} f(r)_{i+1} \cdot D_{i+1,j}^r dt dst_i \\
 & + \int_{t = st_{i+1} = 0}^{st_{i+1} + t_{S(2)}} f(t)_{i+1} \cdot \int_{st_i = t_{S(1)}}^{\infty} f(st_i) \\
 & \cdot \int_{r = st_i}^{st_i + t} f(r)_i \cdot D_{i+1,j}^r dt dst_i \quad (18)
 \end{aligned}$$

■ Section 2에 지체유발 차량(  $i, i+1$ )이 모두 도착하지 않을 때

$$\begin{aligned}
 [1 - P_{ALL(2)}] \cdot D_{i+1,j}^E \\
 = [1 - P_{i(S1+S2)}] \cdot [1 - P_{i+1(S2)}] \cdot D_{i+1,j}^E \quad (19)
 \end{aligned}$$

$$[1 - P_{i(S1+S2)}] = \left[ 1 - \int_{st_i = t_{S(1)}}^{\infty} f(st_i) \cdot \int_{t = st_i - t_{S(1)}}^{st_i + t_{S(2)}} f(t)_i \right]$$

$$[1 - P_{i+1(S2)}] = \left[ 1 - \int_{t = st_{i+1} = 0}^{t_{S(2)}} f(t)_{i+1} \right]$$

$$\begin{aligned}
 D_{i+1,j}^E = & \int_{st_i = 0}^{\infty} f(st_i) \\
 & \cdot \int_{h = st_i}^{st_i + t_{(i+1),n}} (st_i + t_{(i+1),n} - h) \cdot f(h)_j dh
 \end{aligned}$$

이와 같은 방식으로 Section u( $u = 3, 4, \dots$ )에 대하여  $i+1$  차량에 의하여 유발되는 지체시간을 구할 수 있으며,  $j = i+3, \dots, i+n-1$  차량에 의하여 유발되는 지체시간도 구할 수 있다.

(3) 1대의 중차량이 유발하는 지체시간

$$(j = i, i+1, i+2, \dots, i+n)$$

다음의 <그림 3>은 1대의 중차량이 유발하는 지체시간을 계산하기 위한 개념도이다. 교통류 속에 1대의 중차량 T가 진입한 경우, Section T에서  $i$  차량의 지체시간을 구한 후 Section 1부터는 「(1)  $i$  차량이 유발하는 지체시간<sub>1</sub>」에서와 동일한 방식으로 중차량 T로부터 유발되는 지체시간을 구할 수 있다. Section T에서  $i$  차량이 경험하는 지체시간은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 D_{T,i}^E = & \int_{st_i = 0}^{\infty} f(st_i) \cdot \int_{h = st_i}^{st_i + t_{(T),n}} (st_i + t_{(T),n} - h) \cdot f(h)_i dh \\
 & \quad \quad \quad (20)
 \end{aligned}$$

따라서,  $D_{T,j}^t$  및  $D_{T,j}^E$ 는 다음과 같이 바뀌게 된다.

$$D_{T,j}^t = \int_{st_i = 0}^{\infty} f(st_i) \cdot \int_{h = st_i}^{st_i + t} (st_i + t_{(T),n} - h) \cdot f(h)_j dh \quad (21)$$

$$D_{T,j}^E = \int_{st_i = 0}^{\infty} f(st_i) \cdot \int_{h = st_i}^{st_i + t_{(T),n}} (st_i + t_{(T),n} - h) \cdot f(h)_j dh \quad (22)$$

(4) 추월금지구간의 총 지체시간

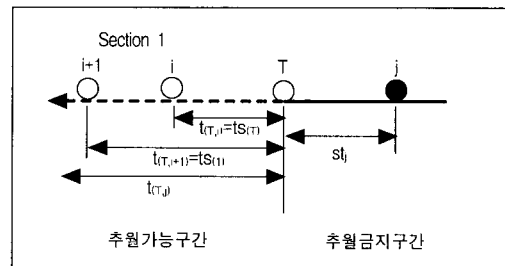
추월금지구간에서 교통류 상호간의 총 지체시간은 각 속도급간에서 지체를 유발하는 차량의 시간당 교통량과 평균 지체유발시간을 곱한 후, 이를 모두 더함으로써 구할 수 있다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$TD_{ij}^N = \sum_{m=i}^{i+n-1} q_m D_m^N \quad (23)$$

여기서,

$D_m^N$  :  $m$  속도급간에 속한 차량이 유발하는 평균지체시간 ( $m = i, i+1, \dots, i+n-1$ )

추월금지구간에서 중차량 1대에 의해 유발되는 평균 지체시간은 중차량이 교통류 내 다른 차량들에게 유발할 수 있는 지체시간의 총 합으로서,  $D_T^N$ 으로 표시된다.



<그림 3> 1대의 중차량이 유발하는 지체시간 계산 개념도

3. 승용차환산계수의 결정

1) 추월가능구간

추월가능구간에서의 PCE는 중차량 1대에 의해 발

생된 총 지체시간을 교통류 내에서 상호간에 발생한 총 지체시간으로 나누어 다음과 같이 결정된다.

$$PCE_T^P = \frac{TD_T^P}{TD_{ij}^P/Q} \quad (24)$$

여기서,

$PCE_T^P$  : 추월가능구간에서 중차량(  $T$  )의 승용차환산계수

$Q$  : 주 방향 교통량(대/시) (=  $\sum_{j=1}^n a_j$ )

### 2) 추월금지구간

추월금지구간에서의 PCE는 중차량 1대에 의해 유발되는 평균 지체시간을 교통류 내에서 상호간에 유발되는 총 지체시간으로 나누어 다음과 같이 결정된다.

$$PCE_T^N = \frac{D_T^N}{TD_{ij}^N/Q} \quad (25)$$

여기서,

$PCE_T^N$  : 추월금지구간에서 중차량(  $T$  )의 승용차환산계수

$D_T^N$  : 추월금지구간에서 중차량(  $T$  )가 유발하는 평균지체시간

### 3) 추월가능 및 금지구간이 혼재된 경우

일반적으로 도로는 추월가능구간과 추월금지구간이 혼재되어 있으므로, 일반 도로에서의 PCE를 기존의 많은 연구에서와 같이 추월가능구간의 PCE로만 표현하는 것은 정확한 PCE의 산정이라 할 수 없을 것이다. 따라서 본 연구에서는 추월가능구간과 추월금지구간이 혼재된 도로의 평균 PCE를 결정하기 위해 추월가능구간과 추월금지구간의 PCE를 산정하였으며, 일반도로의 평균 PCE 산정 식은 다음과 같다.

$$PCE_T = \frac{PCE_T^P \cdot \sum_{i=1}^n L_i^P + \sum_{j=1}^m (PCE_T^N)_j \cdot L_j^N}{L} \quad (26)$$

여기서,

$PCE_T$  : 추월가능구간과 추월금지구간이 혼재된

도로에서 중차량(  $T$  )의 승용차환산계수

$(PCE_T^N)_j$  :  $j$ 번째 추월금지구간의 승용차환산계수

$L_i^P$  :  $i$ 번째 추월가능구간의 길이

$L_j^N$  :  $j$ 번째 추월금지구간의 길이

$L$  : 도로의 총 길이

## III. 결론

본 연구는 중차량의 영향이 큰 양방향 2차로 도로에서 교통류의 질에 부합한 PCE를 산정하기 위해서, 계량화가 가능하고 교통류특성을 반영할 수 있는 효과적도로서 지체시간을 선정하였으며, 이의 계산을 위해 도로구간을 추월가능구간과 추월금지구간으로 나누었다. PCE의 환산은 추월가능구간과 추월금지구간에서 계산된 지체시간을 토대로 결정되었으며, 특히 추월가능구간과 추월금지구간이 혼재되어 조합적으로 나타나는 도로구간의 평균 PCE를 산정할 수 있는 방법을 제시하였다.

또한 비혼잡교통류에서 지체시간의 계산을 통한 중차량의 PCE값 산정은 독립된 개별적 방법으로서만이 아니라 1985 USHCM과 같이 서비스수준별로 다른 척도와 결합하여 모의실험을 이용한 PCE산정 방법에도 적용이 가능하다.

본 연구의 특징은 다음과 같다.

첫째, 주 방향 교통류를 속도급간별로 세분하여 교통류 상호간에 유발되는 지체시간을 확률식에 입각하여 계산하였다.

둘째, 기존에는 추월가능구간에 대해서만 PCE를 추정하였으나, 본 연구에서는 추월금지구간에서의 PCE 결정 방법론을 제시하였다.

셋째, 추월가능구간과 추월금지구간 뿐만 아니라 이 두 구간이 혼재되어 조합적으로 나타나는 도로구간에 적용할 수 있는 평균 PCE 산정 방법론을 제시하였다.

넷째, 기존 HCM에서 추월금지구간의 영향을 (v/c)에만 반영한 것과는 대조적으로, 본 연구에서는 추월금지구간의 영향을 PCE환산에 반영함으로써, 2차로 도로의 분석 방법에 새로운 접근 방향을 제시하였다.

이상의 연구를 통해 보완해야할 과제는 다음과 같다.

- 지체시간 계산시 차두간격 분포를 지수분포로 가정하였으나, 교통량 범위에 따른 차두간격 분포의 재

- 검토: 현재는 서비스수준 A-E의 범위 즉, 차두간격 분포가 지수분포로 가정될 수 있는 교통량 범위(대략 0-2,000대/시/양방향)에 대해서만 적용 가능함
- 추월가능구간에서 확정적으로 적용된 Critical Gap에 대한 분포의 결정 및 차량 주행속도에 따른 상대적인 Critical Gap의 적용가능성 검토
  - 추월가능구간의 PCE 산정시 대향교통류를 속도급간별로 세분하여 지체시간 계산
  - 교통류를 속도급간별로 구분할 때, 각 속도급간의 범위 규정(예로서, 본 논문에서는 교통류 상호간의 추월을 고려하기 위해 HCM에서 제시하고 있는 바와 같이 추월차량과 피추월차량 사이의 속도 차를 10kph로 설정하였음)
  - 도로의 설계 및 용량분석시 기존 HCM 방식은 도로의 연장 또는 추월가능구간 및 추월금지구간의 조합은 고려하지 않고 추월금지구간의 비율만을 분석에 포함하므로, 이러한 HCM 방법과 직접적으로 연계되어 PCE를 산정할 수 있는 방법론의 정립

**참고문헌**

1. Ashton, N.R., Buckley, D.J. and Miller, A.J.(1968). Some Aspects of Capacity and Queueing in The Vicinity of Slow Vehicles on A Rural Two-Lane Road. Proceedings 4th Australian Road Research Board Conference, 4(1), pp.595~612.
2. Brilon, W.(1977). Queueing Model of Two-Lane Rural Traffic. Transportation Research, 11, pp.95~107.
3. Craus, J., Polus, A. and Grinberg, I.(1980). A Revised Method for The Determination of Passenger Car Equivalencies. Transportation Research, 14A, pp.241~246.
4. Cunagin, W.D. and Messer, C.J.(1983). Passenger Car Equivalents for Rural Highways. US Transportation Research Board, Transportation Research Record 905, pp.61~68.
5. Duncan, N.C.(1974). Rural Speed/Flow Relations. UK Transport and Road Research Laboratory,

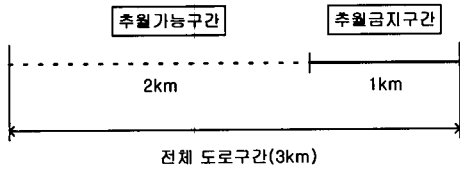
Laboratory Report 651.

6. Huber, M.J.(1982). Estimation of Passenger Car Equivalents of The Trucks in Traffic Stream. US Transportation Research Board, Transportation Research Record 869, pp.60~70.
7. Jacobs, F.(1974). Queues and Overtaking on Two-Lane Roads. Transportation and Traffic Theory(Ed Buckley), pp.181~202. Sydney: Reed
8. Miller, A.J.(1972). Nine Estimators of Gap Acceptance Parameters. Traffic Flow and Transportation(Ed. Newell), pp.215~235. New York: American Elsevier.
9. Normann, O.K.(1942). Results of Highway Capacity Studies. Public Roads, 23(4), pp.57~81.
10. St.John, A.D. and Glauz, W.D.(1978). Grade Effects on Traffic Flow Stability and Capacity. US Transportation Research Board, National Cooperative Highway Research Program Report 185.
11. Stolz, M.(1967). Visibility and Traffic Flow. German Academy of Traffic Science, Hamburg.
12. Taylor, M.A.P., Miller, A.J. and Ogden, K.W.(1972). Aspects of Traffic Flow on Grades. Proceedings 6th Australian Road Research Board Conference, 6(3), pp.232~247.
13. Wardrop, J.G.(1952). Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. Proceedings of The Institution of Civil Engineers, 2, pp.325~362.
14. Werner, A. and Morrall, J.F.(1976). The Effect of Recreational Vehicles on Highway Capacity. Proceedings Roads and Transportation Association of Canada Annual Conference, 1974, pp.432~475.
15. Werner, A. and Morrall, J.F.(1976). Passenger Car Equivalencies of Trucks, Buses and Recreational Vehicles for Rural Two-Lane Highways. US Transportation Research Board, Transportation Research Record 615, pp.79~87

[부록] PCE 계산 예제

다음은 PCE 산정 절차의 이해를 돕기 위한 간단한 예이다.

1. 도로조건



2. 교통조건 및 PCE 산정결과

〈예제 1〉 교통조건

주 방향 교통류			대향 교통류		
속도급간 (kph)	교통량	평균 도착율	평균속도 (kph)	교통량	평균 도착율
$v_T=40$ (중차량)	1대	-	60	400 대/시	1/9
$v_i=60$	300대/시	1/12			
$v_{i+1}=70$	200대/시	1/18			

〈예제 1〉 PCE 산정결과

구간	계산식	PCE값
(1) 추월 가능구간	$PCE_T^p = \frac{47.775}{780/500}$	30.63
(2) 추월 금지구간	$PCE_T^N = \frac{(9.48+0.75+11.14)}{(0.30+0.42)*(300/500)}$	49.47
(3) 추월 가능+금지	$PCE_T = \frac{(30.63*2)+(49.47*1)}{3}$	36.91

〈예제 2〉 교통조건

주 방향 교통류			대향 교통류		
속도급간 (kph)	교통량	평균 도착율	평균속도 (kph)	교통량	평균 도착율
$v_T=40$ (중차량)	1대	-	60	400 대/시	1/9
$v_i=60$	400대/시	1/9			
$v_{i+1}=70$	300대/시	1/12			
$v_{i+2}=80$	100대/시	1/36			

〈예제 2〉 PCE 산정결과

구간	계산식	PCE값
(1) 추월 가능구간	$PCE_T^p = \frac{84.925}{3455.96/800}$	19.66
(2) 추월 금지구간	$PCE_T^N = \frac{49.117}{982.4/800}$	39.99
(3) 추월 가능+금지	$PCE_T = \frac{(19.66*2)+(40*1)}{3}$	26.44

〈예제 3〉 교통조건

주 방향 교통류			대향 교통류		
속도급간 (kph)	교통량	평균 도착율	평균속도 (kph)	교통량	평균 도착율
$v_T=40$ (중차량)	100대/시	1/36	60	400 대/시	1/9
$v_i=60$	300대/시	1/12			
$v_{i+1}=70$	200대/시	1/18			

〈예제 3〉 PCE 산정결과

구간	계산식	PCE값
(1) 추월 가능구간 ( $PCE_T^p$ )	$\frac{(2272.5+25.5)/100}{780/500}$	30.63
(2) 추월 금지구간 ( $PCE_T^N$ )	$\frac{4.723+4.129+0.752+6.08+0.24+3.808}{(3.787+1.049+0.244)*(300/500)}$	6.47
(3) 추월 가능+금지 ( $PCE_T$ )	$\frac{(30.63*2)+(6.47*1)}{3}$	22.58

3. 지체시간 및 PCE 산정과정

다음의 지체시간 및 PCE 산정과정은 〈예제 1〉에 관한 계산과정만을 다룬 것이다.

1) 추월가능구간

(1) 추월을 위한 대향교통류의 최소 차간간격

$$T_{\alpha(70)} = T_L \frac{(v_i + v_o)}{v_o} = 13 \frac{(40+60)}{60} = 21.67(\text{초})$$

$$T_{\alpha(60)} = 13 \frac{(60+60)}{60} = 26(\text{초})$$

(2) 추월 1회당 평균추종시간

$$t_T = \frac{60}{2(40+60)} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{1}{9} \times 21.67}}{\frac{1}{9} e^{-\frac{1}{9} \times 21.67}} = 27.28(\text{초})$$

$$t_{60} = 38.19(\text{초})$$

(3) 추월 1회당 평균지체시간

$$D_{T-60} = t_T \left(1 - \frac{v_T}{v_{60}}\right) = 27.28 \times \left(1 - \frac{40}{60}\right) = 9.09(\text{초})$$

$$D_{T-70} = 11.69(\text{초})$$

$$D_{60-70} = 5.46(\text{초})$$

(4) 총 지체시간의 산정

$$TD_{T-60}^P = 300 \times 9.1 \times \left(\frac{1}{40} - \frac{1}{60}\right) = 22.725(\text{초})$$

$$TD_{T-70}^P = 200 \times 11.7 \times \left(\frac{1}{40} - \frac{1}{70}\right) = 25.05(\text{초})$$

$$TD_{T-70}^P = TD_{T-60}^P + TD_{T-70}^P = 47.775(\text{초})$$

$$TD_{60-70}^P = 300 \times 200 \times 5.5 \times \left(\frac{1}{60} - \frac{1}{70}\right) = 780(\text{초})$$

2) 추월금지구간

(1) i 차량이 유발하는 지체시간

① i 차량이 i+1 차량에게 유발하는 지체시간(j=i+1)

- Section 1에서 기준시점의 i 차량 외에 다른 i 차량이 도착할 때;

$$D_{i,j}^{1,1} = \int_{t=st_i}^{t_{s(1)}} f(t)_i \cdot \int_{st_j=0}^{\infty} f(st_j) \cdot \int_{h=st_i}^{st_j+t_{(i,n)}} (st_j+t_{(i,n)}-h) \cdot f(h)_j dh dst_j dt \quad (A)$$

식(A)를 계산하면 최종적으로 다음의 식을 얻게 된다.

$$D_{i,j}^{1,1} = \frac{1}{2} \cdot (t_{(i,n)} - \lambda_j) \cdot (1 - e^{-\lambda_i \cdot t_{s(1)}}) - \frac{1}{2} \cdot (t_{(i,n)} - \lambda_j) \cdot \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \lambda_j} \cdot (1 - e^{-(\lambda_i + \lambda_j) \cdot t_{s(1)}}) + \frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \lambda_j} \cdot \left[ \frac{1}{\lambda_i + \lambda_j} \cdot (1 - e^{-(\lambda_i + \lambda_j) \cdot t_{s(1)}}) - t_{s(1)} \cdot e^{-(\lambda_i + \lambda_j) \cdot t_{s(1)}} \right]$$

여기서,  $\lambda_i = 1/12$ ,  $\lambda_j = 1/18$ ,  $t_{s(1)} = t_{(i,n)} = 8.57$ 이므로,  $D_{i,j}^{1,1} = 0.30(\text{초})$ 가 된다.

- 시간간격  $t_{s(1)}$  동안 기준시점의 i 차량 외에 지체를 유발하는 다른 i 차량의 도착이 없을 때;

$$[1 - P_{i(s1)}] \cdot D_{i,j}^E = [1 - P_{i(s1)}] \cdot \int_{st_i=0}^{\infty} f(st_i) \cdot \int_{h=st_i}^{st_i+t_{(i,n)}} (st_i+t_{(i,n)}-h) \cdot f(h)_j dh dst_i \quad (B)$$

식(B)를 계산하면 최종적으로 다음의 식을 얻게 된다.

$$[1 - P_{i(s1)}] = [1 - \int_{t=0}^{t_{s(1)}} f(t)_i dt] = e^{-\lambda_i \cdot t_{s(1)}} \\ D_{i,j}^E = \int_{st_i=0}^{\infty} f(st_i) \cdot \int_{h=st_i}^{st_i+t_{(i,n)}} (st_i+t_{(i,n)}-h) \cdot f(h)_j dh dst_i = \frac{1}{2} \cdot \left[ t_{(i,n)} - \frac{1}{\lambda_j} \cdot (1 - e^{-\lambda_i \cdot t_{(i,n)}}) \right]$$

따라서,  $[1 - P_{i(s1)}] \cdot D_{i,j}^E = 0.42(\text{초})$

그러므로, i 차량이 i+1 차량에게 유발하는 평균지체시간은 다음과 같다.

$$D_i^N = 0.30 + 0.42 = 0.72(\text{초})$$

(2) 1대의 중차량이 유발하는 지체시간

① 중차량T가 i 차량에게 유발하는 지체시간

$$D_{T,i}^E = \int_{st_i=0}^{\infty} f(st_i) \cdot \int_{h=st_i}^{st_i+t_{(T,n)}} (st_i+t_{(T,n)}-h) \cdot f(h)_i dh dst_i \quad (C)$$

식(C)를 계산하면 최종적으로 다음의 식을 얻게 된다.

$$D_{T,i}^E = \frac{1}{2} \cdot \left[ t_{(T,n)} - \frac{1}{\lambda_i} \cdot (1 - e^{-\lambda_i \cdot t_{(T,n)}}) \right]$$

여기서,  $t_{(T,n)} = 30$ 이므로,  $D_{T,i}^E = 9.48(\text{초})$ 가 된다.

② 중차량T가 i+1 차량에게 유발하는 지체시간(j=i+1)

■ Section 1에  $i$  차량이 도착할 때;

$$D_{T,j}^{1,1} = \int_{st_i=0}^{\infty} f(st_i) \cdot \int_{t=st_i+t_{(T,n)}}^{st_i+t_{(T,n)}} f(t)_i \cdot \int_{st_j=0}^{\infty} f(st_j) \cdot \int_{h=st_i}^{st_i+t_{(T,n)}} (st_j+t_{(T,n)}-h) \cdot f(h)_j \cdot dh \, dst_j \, dt \, dst_i \quad (D)$$

식(D)를 계산하면 최종적으로 다음의 식을 얻게 된다.

$$D_{T,j}^{1,1} = \frac{1}{2} \cdot (t_{(T,n)} - \frac{1}{\lambda_j}) \cdot (e^{-\lambda_i \cdot t_{(T,n)}} - e^{-\lambda_i \cdot t_{(T,n)}}) \cdot \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cdot (t_{(T,n)} - \frac{1}{\lambda_j}) \cdot \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \lambda_j} \cdot (e^{-(\lambda_i + \lambda_j) \cdot t_{(T,n)}} - e^{-(\lambda_i + \lambda_j) \cdot t_{(T,n)}}) \cdot \frac{\lambda_i}{2\lambda_i + \lambda_j} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \lambda_j} \cdot \{ [t_{(T,n)} \cdot e^{-(\lambda_i + \lambda_j) \cdot t_{(T,n)}} - t_{(T,n)} \cdot e^{-(\lambda_i + \lambda_j) \cdot t_{(T,n)}} + \frac{1}{\lambda_i + \lambda_j} \cdot (e^{-(\lambda_i + \lambda_j) \cdot t_{(T,n)}} - e^{-(\lambda_i + \lambda_j) \cdot t_{(T,n)}})] \cdot \frac{\lambda_i}{2\lambda_i + \lambda_j} + (e^{-(\lambda_i + \lambda_j) \cdot t_{(T,n)}} - e^{-(\lambda_i + \lambda_j) \cdot t_{(T,n)}}) \cdot \frac{\lambda_i}{(2\lambda_i + \lambda_j)^2} \}$$

여기서,  $t_{(T,n)}=38.57$ 이므로,  $D_{T,j}^{1,1}=0.234$ (초)가 된다.

■ 시간간격  $t_{S(1)}$  동안  $i$  차량의 도착이 없을 때;

$$[1 - P_{i(S1)}] \cdot D_{T,j}^E = [1 - P_{i(S1)}] \cdot \int_{st_i=0}^{\infty} f(st_i) \cdot \int_{h=st_i}^{st_i+t_{(T,n)}} (st_i+t_{(T,n)}-h) \cdot f(h)_j \cdot dh \, dst_j \quad (E)$$

식(E)를 계산하면 최종적으로 다음의 식을 얻게 된다.

$$[1 - P_{i(S1)}] = [1 - \int_{st_i=0}^{\infty} f(st_i) \cdot \int_{t=st_i+t_{(T,n)}}^{st_i+t_{(T,n)}} f(t)_i \, dt \, dst_i] = [1 - \frac{1}{2} \cdot (e^{-\lambda_i \cdot t_{(T,n)}} - e^{-\lambda_i \cdot t_{(T,n)}})] D_{T,j}^E = \int_{st_i=0}^{\infty} f(st_i) \cdot \int_{h=st_i}^{st_i+t_{(T,n)}} (st_i+t_{(T,n)}-h)$$

$$\cdot f(h)_j \, dh \, dst_j = \frac{1}{2} \cdot [t_{(T,n)} - \frac{1}{\lambda_j} \cdot (1 - e^{-\lambda_j \cdot t_{(T,n)}})]$$

따라서,  $[1 - P_{i(S1)}] \cdot D_{T,j}^E = 0.979 \times 11.28 = 11.14$  (초)가 된다.

그러므로, 중차량T가 유발하는 평균지체시간은 다음과 같다.

$$D_T^N = 9.48 + 0.234 + 11.14 = 20.854 \text{ (초)}$$

#### 4. 승용차환산계수의 결정

##### (1) 추월가능구간

$$PCE_T^P = \frac{TD_T^P}{TD_{ij}^P/Q} = \frac{47.775}{780/500} = 30.63$$

##### (2) 추월금지구간

$$PCE_T^N = \frac{D_T^N}{TD_{ij}^N/Q} = \frac{21.37}{(0.72 \times 300)/500} = 49.47$$

##### (3) 추월가능 및 금지구간이 혼재된 경우

$$PCE_T = \frac{PCE_T^P \cdot \sum_{i=1}^m L_i^P + \sum_{j=1}^m (PCE_T^N)_j \cdot L_j^N}{L} = \frac{30.63 \times 2 + 49.47 \times 1}{3} = 36.91$$

#### 5. 맺음말

<예제 1>에서는 PCE값들이 지나치게 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 그러나 교통량과 속도구간이 증가한 <예제 2>에서는 추월가능구간과 추월금지구간의 PCE값이 모두 감소하였고, 중차량의 구성비만 증가한 <예제 3>에서는 추월금지구간의 PCE값이 큰 폭으로 감소하였다. 따라서, 실제적인 교통량, 속도구간 및 중차량 구성비를 반영한다면, 보다 현실적인 PCE 값을 구할 수 있을 것으로 예상되며, 추후 이를 현장 조사와 기존의 PCE 산출결과와 비교할 예정이다.