

신호교차로 보행자 지체모형 개발

장현호* · 윤병조**

Chang, Hyun-ho*, Yoon, Byoung-jo**

Development of Pedestrian Delay Model at Signalized Intersections

ABSTRACT

An accurate pedestrian-delay model is essential for the pedestrian-oriented evaluation of signalized intersection (SI). The crossing behaviors of pedestrians at signalized pedestrian crosswalks (SPCs) are various, and their arrival behaviors consist of two types, random and platoon. It is natural, hence, that the behaviors of pedestrian crossing and arrival should be considered in order to estimate accurate pedestrian delay. Despite this necessity, a simple pedestrian-delay model that cannot explain these behaviors of pedestrian movements is still recommended in Highway Capacity Manual (HCM). For these reasons, a pedestrian-delay model, suitable for various SPCs and SIs, is required to make pedestrian-oriented decisions on the design and operation of various SPCs and SIs. This paper proposes a novel pedestrian-delay model that is based on the behaviors of pedestrian crossing and arrival. The proposed model consists of two sub models: the one for SPC and the other for SI. The SPC delay model was developed based on the behaviors of pedestrian crossing during pedestrian green time. The SI delay model was designed based on the behaviors of pedestrian crossing and platoon arrival. The results of a numerical simulation showed that the proposed delay model can successfully overcome the under- and overestimation problems of the HCM model with explaining various behaviors of pedestrian crossing and arrival.

Key words : Signalized intersection, Pedestrian, Delay model, Pedestrian platoon, Arrival and crossing behavior

초 록

정확한 보행자 지체 모형은 보행자 중심의 신호교차로 평가에 있어 핵심 요소이다. 신호화된 보행자 횡단보도에서 녹색시간동안 보행자 횡단 행태는 매우 다양하며, 보행자의 도착 행태는 임의도착과 보행군으로 구성된다. 따라서 정확한 보행자 지체를 산정하기 위해서는 보행자의 횡단과 도착 행태가 고려되어야 한다. 이러한 필요성에도 불구하고, 도로용량편람(HCM)은 보행자 도착과 횡단 행태를 반영하지 않은 간략한 보행자 지체모형을 권고하고 있다. 이러한 이유로, 보행자 중심적인 신호교차로의 설계 및 운영에 대한 의사결정을 위해서는 다양한 신호화된 단일 횡단보도 및 신호교차로에 적합한 보행자 지체 모형이 요구되고 있다. 본 연구에서는 보행자의 도착과 횡단 행태를 기반으로 새로운 보행자 지체모형을 제시한다. 제안되는 모형은 신호화된 단일 횡단보도 보행자 지체모형과 신호교차로 보행자 지체모형으로 구성된다. 단일 횡단보도 지체모형은 보행자 녹색시간 동안 보행자 횡단 행태를 기반으로 개발되었다. 신호교차로 지체모형은 보행자 횡단과 보행군 도착 행태를 기반으로 개발되었다. 수치 모의실험을 통한 평가결과, 제안되는 지체모형은 다양한 보행자 횡단과 도착 행태를 고려하기 때문에 HCM 모형의 과대/과소추정 문제를 효과적으로 해결할 수 있음을 보였다.

검색어 : 신호교차로, 보행자, 지체 모형, 보행군, 도착 및 횡단 행태

* 서울대학교 BK조교수, 공학박사 (Seoul National University · netterk@hanmail.net)

** 정희원 · 교신저자 · 인천대학교 도시과학대학 도시공학과 교수, 공학박사

(Corresponding Author · Incheon National University · bjyoon63@inu.ac.kr)

Received February 12, 2018/ revised February 26, 2018/ accepted March 5, 2018

1. 연구의 배경 및 목적

도로교통 분야의 패러다임은 차량 중심에서 인간 중심으로 변화하고 있다. 이러한 패러다임의 변화 중 하나는 기존의 차량 중심적 교통신호운영의 보행자 중심적 신호운영으로 변화이다. 보행자 중심적 신호운영이 필요한 사례로 보행우선구역, 보차공존, 스쿨존, 실버존, 보행자 중심의 고밀도 중심 업무 지구 등을 들 수 있다. 현행 도로용량편람(highway capacity manual, HCM)에서는 신호교차로(signalized intersection, SI) 운영의 핵심 성능평가 지표로 차량 지체를 이용하고 있으며, 보행자의 지체는 고려하지 않고 있다. 그러나 신호교차로의 주된 교통주체는 차량과 보행자이다. 따라서 보행자 중심적 신호교차로 운영을 위해서는 차량의 지체와 더불어 보행자의 지체가 고려되어야 한다.

USHCM (2000, 2010, 2016)과 KHCM (2013)은 차량 지체모형과 보행자 지체모형을 구분하여 제시하고 있다. 차량 지체모형은 다양한 교통조건, 도로조건, 그리고 신호운영조건에 적합하도록 개발되어 활용되고 있다. 반면, 보행자 지체모형은 간략하게 제시되고 있는 실정이다. 신호화된 단일 횡단보도(Isolated pedestrian crosswalk, IPC)와 신호교차로 횡단보도(pedestrian crosswalk of signalized intersection, SPC)에서 보행자의 도착과 횡단 행태는 다르게 나타난다. IPC의 경우, 보행자의 임의 도착과 더불어 보행자 녹색시간 동안 횡단 행태는 다양하며, 횡단 행태는 도로 폭과 밀접히 관련된다. SPC의 경우, 보행자의 도착행태는 IPC의 도착 행태와 보행군(pedestrian platoon)으로 구분되며, 횡단 행태는 도착 행태와 밀접하게 연결된다. 따라서 보행자 지체모형은 IPC와 SPC로 구분되어야 한다. 그러나 HCM 보행자 지체 모형은 이상에서 설명한 보행자의 도착 및 횡단 특성을 고려할 수 없는 한계를 가지고 있다. 예로서, HCM 보행자 지체모형의 경우 주기시간 길이에 대한 보행자 녹색시간의 비가 동일하면 보행자의 지체는 동일하다. 다시 말해, 현행 HCM 보행자 지체 모형은 보행자 중심적인 IPC와 SPC의 설계/운영/평가에 적합하지 않다고 할 수 있겠다.

이상의 한계를 극복하기 위하여, 본 연구에서는 보행자의 도착과 횡단 행태를 기반으로 새로운 보행자 지체모형을 제시하도록 한다. 제시되는 보행자 지체모형은 IPC와 SPC로 구분된다. 수치모의실험(numerical simulation)을 통한 개발모형의 평가결과, 개발된 보행자 지체모형은 다양한 보행자 도착 및 횡단 행태조건에서 신뢰성 있는 보행자 지체를 평가할 수 있음을 보였다. 그리고 HCM모형의 과대/과소추정 문제를 효과적으로 해결하는 것으로 나타났다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 현행 보행자 지체모형을 고찰한 후 문제점을 도출하도록 한다. 3장에서는 IPC와 SPC를 고려한 모형의 개발 방향을 정립한 후, IPC와 SPC에서 보행자

행태를 고려한 보행자 지체모형을 제시하도록 한다. 개발모형의 평가와 적용 가능성은 4장에서 다루어지며, 5장은 본 연구의 결론과 향후 연구로 구성된다.

2. 기존 연구 및 문제점

본 연구의 목표는 HCM의 정적인 분석과정을 통하여 신호교차로의 보행자 지체를 보다 더 정확하게 산정하는 모형의 개발에 있다. 따라서 기존연구 고찰은 정적인 거시모형을 대상으로 하였으며, 고찰된 기존 모형의 한계를 도출하도록 한다.

2.1 기존 연구

신호교차로에서 보행자 지체모형의 개발에 관한 국내 연구는 전무한 실정이며, 국외의 경우도 일부 연구가 보고되고 있는 정도이다. 널리 이용되고 있는 보행자 지체모형은 USHCM (2000, 2010, 2016) 모형으로서 Eq. (1)과 같이 $f(C, g_e)$ 으로 구성되며, KHCM (2013)도 이를 동일하게 적용하고 있다. USHCM 모형은 Braun and Roddin (1978)에 의해 제시되었으며, 보행자의 도착률을 균일 도착으로 가정하고 누적대기를 기반으로 모형화되었다. 모형의 구조는 유효녹색시간 이후 추가적으로 도착한 후 신호를 준수하지 않는 보행자를 고려하지 못 하였기 때문에 실제 지체보다 지체를 높게 평가하는 단점이 있다.

$$d = \frac{(C - g_e)^2}{2C} \quad (1)$$

여기서, d : 평균 보행자 지체(초/인), g_e : 보행자 유효녹색시간 길이(초), 그리고 C : 신호주기길이(초)이다.

Braun and Roddin모형은 Pretty(1979)와 Roupail et al. (1998)에 의해 발전되었다. 보행자 신호를 준수하지 않는 보행자를 고려한 Eq. (2)와 같은 모형을 제시하였다. 그러나 유효녹색시간 이후에 추가 도착한 보행자의 횡단행태는 보행자 녹색신호의 길이와 도로 폭에 따라 다양하게 나타남으로 보다 정교한 수준에서 보행자 지체를 설명하지 못 하는 한계가 있다.

$$d = F \cdot \frac{(C - g_e)^2}{2C} \quad (2)$$

여기서, F 는 적색현시동안 도착한 보행자의 비율이다.

Virkler(1998)는 지체감소의 많은 부분이 소거현시(Clearance phase) 동안에 횡단보도에 진입한 보행자 때문이며, 이를 반영한 Eq. (3)과 같은 모형을 제시하였다. 그러나 기존 보행자 지체모형의

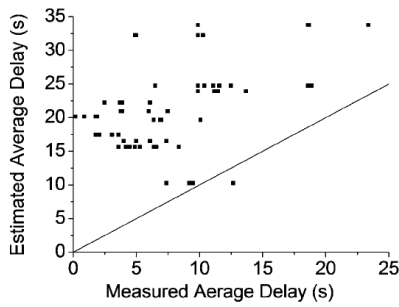


Fig. 1. Estimability of USHCM Model (Li et al., 2005)

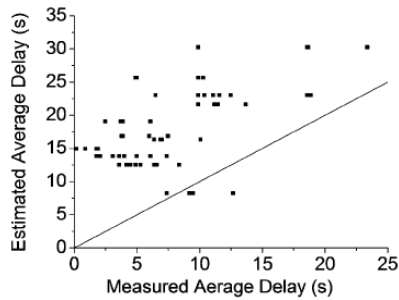


Fig. 2. Estimability of Virkler Model (Li et al., 2005)

과대평가 문제를 해결하지는 못 하였다.

$$d = \frac{[C - (g_c + 0.69A)]^2}{2C} \quad (3)$$

Li et al.(2005)은 Figs. 1~2와 같이 USHCM 모형과 Virkler 모형은 보행자 지체를 과대평가함을 지적하였으며, 교통법규 준수가 낮은 환경에서 무단횡단 보행자를 고려한 보행자 지체모형을 제시하였다.

2.2 기존 연구의 한계

기존 연구의 고찰 결과, 기존 지체모형은 균일도착 조건하에서 모형을 개발하였으며, 이는 다음의 두 가지 시사점을 가진다. 첫째, 신호화된 단일 횡단보도(Isolated pedestrian crosswalk, IPC)의 경우 균일도착 조건은 모형의 용도가 정적분석을 수행하기 위함임으로 합리적이라 판단된다(본 연구에서 IPC는 교차로와 교차로의 중간에 설치되거나 교차로와 분리되어 독립적으로 설치된 횡단보도를 의미한다). 그러나 유효녹색시간 즉, 초기 진입시간 이후 소거현시 동안 추가적으로 도착하여 횡단을 수행하는 보행자의 행태를 균일도착 조건으로 설정하는 것은 실제 보행자의 추가적인 횡단을 고려하기엔 적합하지 않다. 이는 다양한 보행자 계층별 보행속도에 따른 횡단능력의 차이, 횡단보도의 폭과 소거현시의 길이 등에 따라 추가적 횡단행태는 다양하기 때문이다. 따라서

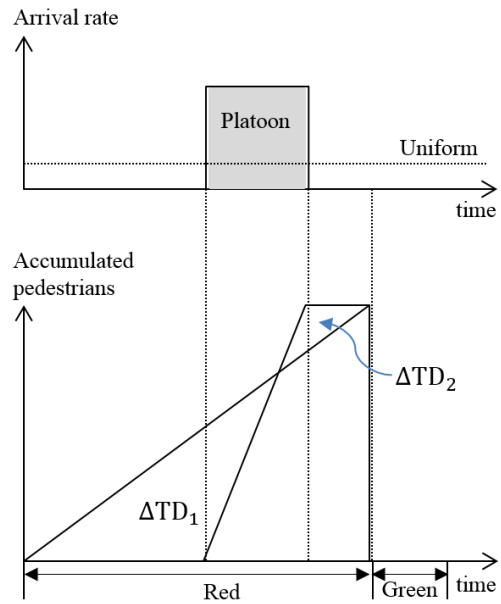


Fig. 3. Total-Delay Difference between Arrival Types

균일조건하에서 소거현시 동안 추가로 도착한 보행자 중 횡단을 수행하는 보행자의 구성비는 균일하지 않다. 기존 모형은 이러한 추가적인 횡단행태를 고려하지 않았으며, 이로 인해 지체를 과대평가한다.

둘째, 신호교차로 횡단보도(pedestrian crosswalk of signalized intersection, SPC)의 경우, 보행자 수요의 도착행태는 균일도착과 인접 횡단보도에서 도착하는 보행군 도착으로 구분할 수 있다(본 연구에서 보행군은 인접 횡단보도 신호의 단속에 의해 형성되는 보행군으로서 해당 횡단보도에 군집으로 도착하는 보행 교통량을 의미한다). 신호교차로에 설치된 횡단보도 간의 거리(m)는 일반적으로 짧으며, 도류섬을 이용한 경우 횡단보도간 거리는 0에 가깝다. 따라서 이전 횡단보도에서 출발한 보행군의 지체를 균일도착 조건하에 산정하게 되면 지체를 과대/과소평가하게 된다. Fig. 3은 도착행태(균일 도착과 보행군 도착)에 따른 총 지체의 차이를 보여주고 있다. 균일도착의 ΔTD_1 은 보행군 도착의 ΔTD_2 보다 크므로 균일도착 조건은 지체를 과대평가하게 되며, 보행군이 적색시간의 시작에 도착하면 과소추정의 문제가 발생한다. 이러한 과대/과소 추정문제는 L형(또는 T형)으로 횡단을 수행하는 보행 교통량이 증가함에 따라 증가하게 된다.

기존 보행자 모형의 과대/과소추정 문제는 이상의 두 가지 한계 때문으로 판단된다. 따라서 보행자 지체모형은 IPC 지체모형과 SPC 지체모형으로 구분되어야 한다. 그리고 지체모형은 보행군의 도착행태와 소거현시동안 추가적인 보행자 횡단을 고려해야 할 것으로 판단된다.

3. 보행자 지체모형의 개발

3.1 모형의 개발 방향

기존 연구의 한계에서 언급한 바와 같이, 보행자 지체는 소거현시 동안 추가 도착하는 보행자의 횡단여부와 도착행태에 따라 영향을 받게 된다. 그리고 신호교차로 횡단보도의 도착형태는 균일 도착과 보행군 도착으로 구분된다. 따라서 본 연구에서 제안되는 보행자 지체모형은 신호화된 단일 횡단보도(IPC)와 신호교차로 횡단보도(SPC)로 구분하여 개발하였다.

IPC 지체모형은 소거현시 동안에 추가 도착하는 보행자의 횡단 행태를 고려하도록 개발하였다. 소거현시 동안에 추가 도착한 보행자의 횡단 행태는 횡단보도의 폭 즉, 도로 폭과 횡단보도를 이용하는 보행자 계층에 따라 다르게 나타나기 때문에 주요한 모델링 고려사항이다. 예로서, 보행자 계층의 추가적인 횡단 행태는 일반 가로망, 스쿨존, 실버존, 환승센터, 보행자 중심의 고밀도 CBD 등에서 동일하지 않을 것이다. 이상의 고려로 개발된 IPC 지체모형은 IPC가 설치된 위치와 이를 이용하는 보행자 계층에 따라 차별화된 지체평가를 수행할 수 있다.

신호교차로 보행교통류의 특징은 신호의 단속에 의한 보행군의 형성이다. 따라서 SPC 지체모형은 균일도착과 보행군의 도착 형태를 기반으로 개발되었다. 신호교차로의 신호운영 방식과 기하구조에 따라 보행군은 다양한 도착 형태를 보인다. 예로서, 동시신호의 등화방향이 시계방향일 경우 시계방향으로 이동하는 보행군은 보행자 녹색등화 이전에 도착하지만 반시계방향으로 이동하는 보행군은 보행자 적색등화 이후에 도착한다. 이와 같이 보행군의 도착 형태와 보행자 지체의 관계는 필연적임으로, 상류부 횡단보도에서 형성된 보행군이 분석대상 횡단보도에 도착하는 시점을 기준으로 다양한 보행군 도착 형태를 설명하도록 하였다. 이상의 고려로, 개발된 SPC 지체모형은 동일한 주기시간 길이, 동일한 보행자 유효녹색시간 길이의 경우에도 보행군의 도착 특성에 따라 차별화된 보행자 지체 값을 산출한다. 따라서 다양한 신호운영과 교차로 기하구조에 대하여 보행자 중심적인 지체분석이 가능하다.

3.2 단일 횡단보도 지체모형 개발

신호화된 단일 횡단보도 지체모형의 개발은 보행자 녹색현시동안 도착하는 보행자의 횡단행태를 설정한 후, 모형을 개발하였다.

3.2.1 보행자의 횡단행태 설정

보행자의 횡단여부는 Fig. 4와 같이 다양하게 나타난다. ①보행자 녹색등화 이전에 도착한 보행자는 유효녹색시간(국내의 경우 초기 진입시간)에 보행자 포화교통유율로 진입한다. ②유효녹색시간 이후 일정시간 동안 도착한 보행자는 진입 후 횡단중인 선행

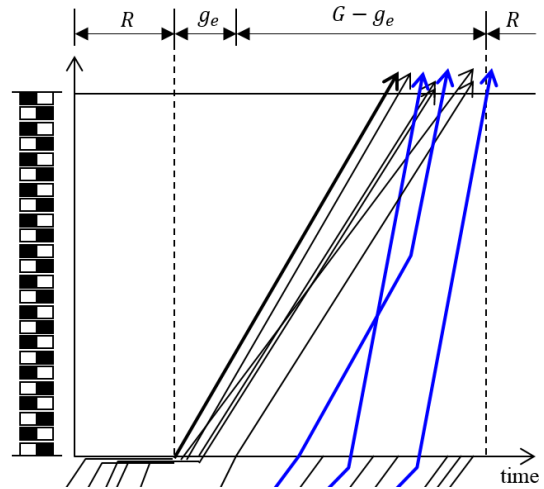


Fig. 4. Behaviors of Pedestrian Crossing at IPC

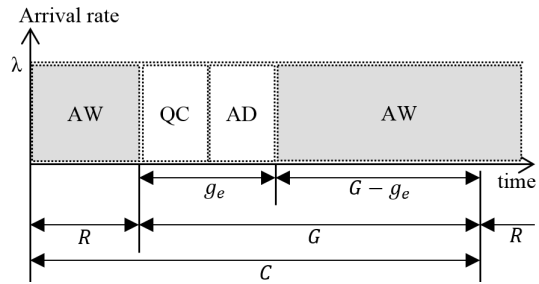


Fig. 5. Definition of Simple Pedestrian States

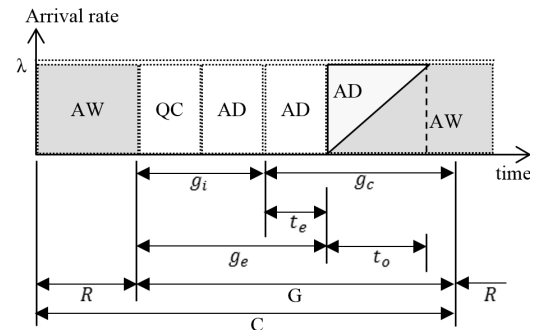


Fig. 6. Definition of Extended Pedestrian States

보행자를 따라 횡단한다. ③일정 시간이 경과한 후 딜레마 시간대에 도착한 보행자는 나머지 소거시간동안 자신의 (최대)보행능력을 고려하여 횡단여부를 결정한 후 횡단보도에 진입한다.

기존의 모형은 Fig. 5와 같은 균일 도착률을 기반으로 $f(C, g_e)$ 형태의 모형을 개발하였으며, $G - g_e$ 동안 추가로 도착하는 보행자의 횡단여부를 Eq. (1)과 같이 고려하지 않거나 Eq. (3)과 같이 g_e 을 연장하였다. 그리고 g_e 의 길이가 명확하지 않은 단점이 있다. 개별 횡단 보행자에 대한 실제 g_e 의 길이는 보행자의 (최대)횡단속

도 능력과 횡단보도의 길이에 따라 달라질 것으로 판단되며, 모형의 정산과 적용이 용이하지 않다(Figs. 5 and 6에서 AW: 도착-대기(arrival and waiting), QC: 대기소거(queue clearance), 그리고 AD: 도착-출발(arrival and departure)이다).

국내 보행자 현시는 초기진입현시(g_i)와 녹색점멸에 의한 소거 현시(g_o)로 운영되고 있다. 본 연구는 Fig. 5의 $G-g_e$ 동안 횡단하는 보행자를 보다 현실적으로 고려하기 위하여 Fig. 6과 같이 g_e 와 $G-g_e$ 로 구분하였다. $g_e (= g_i + t_e)$ 은 g_i (초기 진입시간)과 t_e (진입 연장시간)의 합으로 구성된다. 그리고 $G-g_e$ 시간동안 도착한 보행자의 횡단여부는 t_o (진입 딜레마 시간)동안 보행자의 판단에 의해 결정된다. t_o 시간 동안 도착하는 보행자의 횡단비율은 유효녹색기간에서 가까울수록 높으며 적색시간에 가까울수록 낮아진다. 또한 t_o 시간대 이후에 도착한 보행자는 횡단을 포기하는 것이 합리적이다.

3.2.2 단일로 보행자 지체모형

단일로 보행자 지체모형은 전통적인 In-out 대기행렬모형을 기반으로 개발하였다. 보행 교통량(q , 인/시)의 평균 도착률(λ , 인/초)은 $\lambda = q/3,600$ 이며, 보행자는 선호하는 위치에서 대기하는 경향이 있으므로 FIFO rule은 고려하지 않는다. 그리고 포화시 보행자 교통류율은 5,000(인/시)까지 도달하며(USHCM, 2000), 포화교통류율의 누적선은 수직에 가까움으로 수직으로 간주한다.

Fig. 7은 보행자 도착에 따른 대기여부와 누적 대기 보행자의 관계를 보여주고 있다. 대기 보행자는 진입 딜레마 시간(t_o , $t_o \leq (G-g_e)$)과 유효적색 시간($r_e = R + (G-g_i - t_e - t_o)$, $r_e \geq R$)에서 발생하게 된다. t_o 시간대의 시각 $t(0 \leq t \leq t_o)$ 에 도착한 보행자의 도착률에 대한 대기율은 $t \times (\lambda/t_o)$ 이며, r_e 시간대에 도착한 보행자의 대기율은 λ 이다. 따라서 시간대 t_o 와 r_e 동안

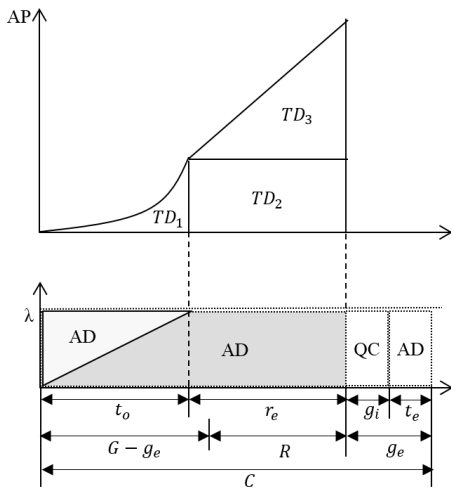


Fig. 7. Pedestrian States and Total Delays at IPC

누적된 대기보행자의 면적(TD_i)은 1주기 동안 총 보행자 대기시간이다. 따라서 총 보행자 대기시간(TD)은 Eq. (4)와 같다.

$$TD = TD_1 + TD_2 + TD_3 \quad (4)$$

t_o 시간동안 도착하여 대기한 총 보행자 대기시간은 $TD_1 + TD_2$ 이며, $\alpha = \lambda/t_o$ 로 놓으면 $TD_1 + TD_2$ 는 Eq. (5)와 같이 산정된다.

$$\begin{aligned} TD_1 + TD_2 &= \iint_0^{t_o} \alpha t dt + r_e \cdot \int_0^{t_o} \alpha t dt \\ &= \frac{\alpha \cdot t_o^3}{6} + r_e \cdot \frac{\alpha \cdot t_o^2}{2} \\ &= \frac{\alpha \cdot t_o^2}{2} \cdot \left(\frac{t_o}{3} + r_e \right) \end{aligned} \quad (5)$$

$\alpha = \lambda/t_o$ 을 Eq. (5)에 대입하면 t_o 시간동안 도착하여 대기를 경험하는 보행자의 총 대기시간($TD_1 + TD_2$)은 Eq. (6)과 같다.

$$TD_1 + TD_2 = \frac{\lambda \cdot t_o}{2} \cdot \left(\frac{t_o}{3} + r_e \right) \quad (6)$$

r_e 시간동안 도착하여 대기한 총 보행자 대기시간은 TD_3 이며, Eq. (7)과 같이 산정된다.

$$TD_3 = \frac{1}{2} \cdot r_e \cdot (\lambda \cdot r_e) = \frac{\lambda \cdot r_e^2}{2} \quad (7)$$

총 보행자 대기시간(TD)은 Eqs. (6) and (7)의 합임으로 다음의 Eq. (8)과 같다.

$$\begin{aligned} TD &= TD_1 + TD_2 + TD_3 \\ &= \frac{\lambda \cdot t_o}{2} \cdot \left(\frac{t_o}{3} + r_e \right) + \frac{\lambda \cdot r_e^2}{2} \end{aligned} \quad (8)$$

Eq. (8)은 한 주기당 총 보행자 대기시간이다. 따라서 평균 보행자 지체(\bar{d} , 초/인)는 Eq. (8)을 한 주기 동안 보행 수요 $\lambda \cdot C$ (인/주기)로 나누고, 유효적색시간 $r_e = C - (g_e + t_o)$ 을 대입하여 정리하면 Eq. (9)와 같다. Eq. (9)에서 $t_o = 0$ 로 놓으면 평균 보행자 지체는 Eq. (1)의 HCM모형과 동일하다.

$$\begin{aligned} \bar{d} &= \frac{1}{\lambda \cdot C} \cdot \left[\frac{\lambda \cdot t_o}{2} \cdot \left(\frac{t_o}{3} + r_e \right) + \frac{\lambda \cdot r_e^2}{2} \right] \\ &= \frac{1}{2C} \cdot \left[t_o \cdot \left(\frac{t_o}{3} + r_e \right) + \{ C - (g_e + t_o) \}^2 \right] \end{aligned} \quad (9)$$

3.3 교차로 지체모형 개발

신호교차로 횡단보도 보행수요는 접근로의 균일도착수요와 인접 횡단보도에서 도착하는 보행군 수요로 구성된다. 따라서 신호교차로 횡단보도 보행자 지체모형은 균일도착에 의해 발생하는 지체와 보행군 도착으로 발생하는 지체를 설명해야 한다. 균일도착에 의한 지체는 본 연구에서 제시된 단일 횡단보도 보행자 지체모형을 이용하여 산정이 가능하다. 그러나 보행군 도착에 의한 지체는 보행군의 도착률과 시간적 길이, 이전 횡단보도 대기공간에서 해당 횡단보도 대기공간까지 보행군 이동시간, 그리고 보행군의 해당 횡단보도(적색현시 기준으로) 도착시점에 따라 다양하게 나타난다. 따라서 신호교차로 보행자 지체모형은 ①도착 보행군의 도착률(λ_p , 인/초)과 시간적 길이(t_l , 초)의 산정, ②이전 횡단보도 대기공간에서 해당 횡단보도 대기공간까지 보행군의 이동 소요시간 산정(t_m , 초), 그리고 ③해당 횡단보도의 신호현시에 대한 보행군 도착시점 즉, 도착형태에 따른 보행자 지체모형을 제시하도록 한다.

3.3.1 보행군 형성 및 도착시간 산정

도착 보행군의 형태는 이전 횡단보도의 횡단 종료 지점에서 도착률(λ_p , 인/초)과 시간적 길이(t_l , 초)와 이전 횡단보도 횡단이후 접근로와 해당 횡단보도로의 회전비에 의해 결정되며, Fig. 8과 같다. $g_e + t_o$ 동안 진입하는 보행군의 수요(V_b , 인/주기)는 도착률(λ_b , 인/초)과 신호주기 길이(초)로 Eq. (10)과 같이 산정된다. 보행군의 선두가 횡단을 종료하는 시간(t_c , 초)는 횡단보도 길이(l_c , m), 횡단속도(s_c , m/s)로 Eq. (11)과 같이 산정된다. 그리고 t_o 의 종료 시 횡단보도를 진입한 보행자는 보행 녹색시간 G_b 의 종료시점에 도착함으로써 보행군의 시간적 길이(t_l , 초)는 Eq. (12)로 산정된다.

$$V_b = \lambda_b \cdot C \quad (10)$$

$$t_c = l_c / s_c \quad (11)$$

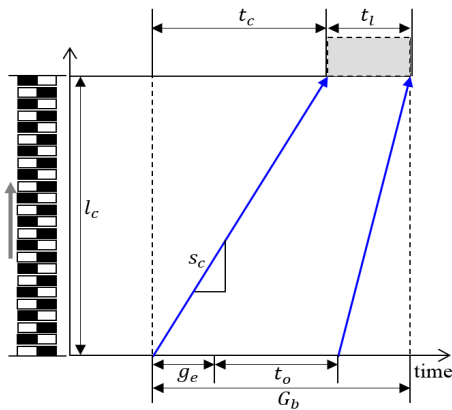


Fig. 8. Formation of Pedestrian Platoon at SPC

$$t_l = G_b - t_c \quad (12)$$

횡단 종료시점에서 보행군의 보행량(인/ t_l)은 한 주기동안 도착한 보행량(인/ C)과 같다(보행자의 경우 과포화로 인한 지체는 발생하지 않는다). 따라서 하루부 횡단보도에 도착하는 보행군의 평균 도착률(λ_p , 인/초)는 t_l , λ_b , C , 그리고 보행군이 발생하는 횡단보도(j)에서 보행군이 도착하는 하루부 횡단보도(i)로의 구성비(p_{ij} , %)를 이용하여 Eq. (13)과 같이 산정된다.

$$\lambda_p = \frac{\lambda_b \cdot C \cdot p_{ij}}{100 \cdot t_l} \quad (13)$$

횡단보도(j)에서 하루부 횡단보도(i)까지 보행군 이동시간(t_m , 초)은 횡단보도(j)의 길이(l_c , m), 보도(또는 도류화심)를 경유하는 횡단보도 대기공간간 거리(l_s , m), 횡단속도(s_c , m/s), 횡단보도간 이동 보행속도(s_s , m/s)를 이용하여 Eq. (14)와 같이 결정된다.

$$t_m = \frac{l_c}{s_c} + \frac{l_s}{s_s} \quad (14)$$

3.3.2 보행군 도착형태

횡단보도(j)에서 형성된 보행군이 횡단보도(i)에 도착하는 시점에 따라 보행군의 지체는 크게 변화한다. 따라서 보행군 도착형태를 정의한 후, 정의된 보행군의 도착형태에 따라 보행군 지체모형을 제시하도록 한다. 보행군의 도착형태는 분석대상 횡단보도 현시체계에서 적색등화 시점부터 보행군 선두의 도착시점까지 시간길이(t_a , 초)를 이용하여 정의하며, Fig. 9와 같다. 따라서 $t_a = R_j + t_m - t_{os}$ 이며, t_{os} 는 적색현시 등화시점간의 시간 차이(time offset)이다.

보행군이 형성되는 이전 횡단보도(j)의 녹색 등화시 하루부 횡단보도(i)는 일반적으로 적색현시이다(크로스 횡단보도의 경우는 단일로 지체모형으로 지체의 산정이 가능하다). 따라서 횡단보도(j, i)의 현시순서와 보행군 도착시점(t_a)을 이용하여 보행군 도착형태를 정의하면 Fig. 10과 같이 9개의 도착형태로 구분된다.

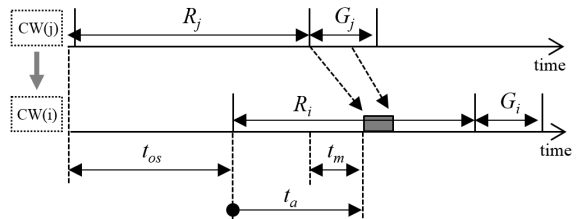


Fig. 9. Definition of Arrival Time Point of Platoon

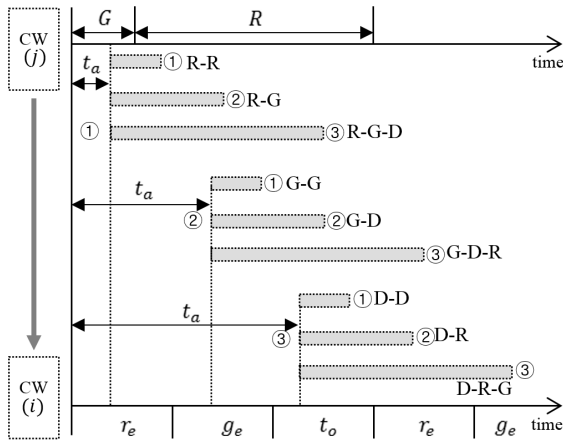


Fig. 10. Arrival Types of Pedestrian Platoon

도착형태 ①은 보행군의 선두가 유효적색시간(r_e)에 도착한 경우로서, 보행군의 후미가 유효적색시간(r_e)에 도착한 경우(①-①, R-R 형태), 보행군의 후미가 유효녹색시간(g_e)에 도착한 경우(①-②, R-G 형태), 보행군의 후미가 진입 딜레마 시간(t_o)에 도착한 경우(①-③, R-G-D 형태)로 구분된다.

도착형태 ②는 보행군의 선두가 유효녹색시간에 도착한 경우로서, 보행군의 후미가 유효녹색시간에 도착한 경우(②-①, G-G 형태), 보행군의 후미가 진입 딜레마 시간에 도착한 경우(②-②, G-D 형태), 보행군의 후미가 유효적색시간에 도착한 경우(②-③, G-D-R 형태)로 구분된다.

도착형태 ③은 보행군의 선두가 진입 딜레마 시간에 도착한 경우로서, 보행군의 후미가 진입 딜레마 시간에 도착한 경우(③-①, D-D 형태), 보행군의 후미가 유효적색시간에 도착한 경우(③-②, D-R 형태), 보행군의 후미가 유효녹색시간에 도착한 경우(③-③, D-R-G 형태)로 구분된다.

9가지 도착형태 중 G-G 형태는 대기가 발생하지 않으므로 최적의 경우이다. 따라서 대기가 발생하는 나머지 8가지 도착형태에 대한 보행군 지체 모형을 제시하도록 한다.

3.3.3 R-R 형태 보행군 지체모형

일반적으로 보행자 신호이후 (보행자 안전을 고려하여) 일정시간이 경과 후 차량의 신호가 전환됨으로 R-R형태는 가장 일반적인 보행군 도착형태라 할 수 있다. 보행군은 λ_p 로 t_l 동안 유효적색시간에 도착을 완료함으로 도착형태와 총 대기시간의 관계는 Fig. 11과 같다. 총 지체(TD_p)는 $TD_1 + TD_2$ 이며, t_a , λ_p , t_l , 그리고 $r_e - (t_a + t_l)$ 을 이용하여 Eq. (15)와 같이 산정된다. Eq. (15)을 주기당 보행군의 수요($\lambda_p \cdot t_l$)로 나누면 평균 보행자 지체(\bar{d}_p , 초/인)은 Eq. (16)과 같다. 여기서 $t_a < r_e$ 이고 $(t_a + t_l) \leq r_e$ 이다.

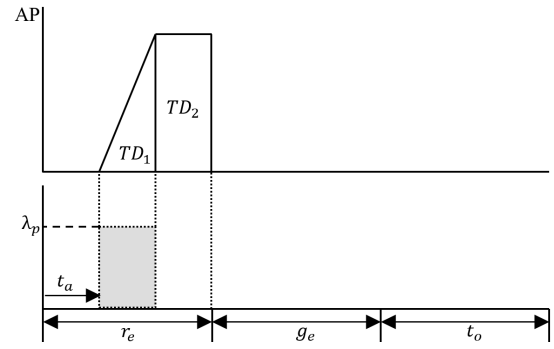


Fig. 11. R-R Type of Platoon Arrival and Total Delays

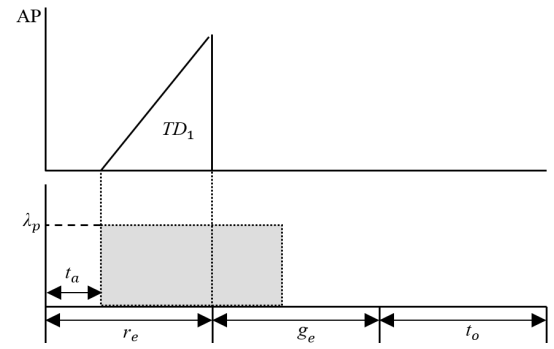


Fig. 12. R-G Type of Platoon Arrival and Total Delays

$$\begin{aligned}
 TD_p &= TD_1 + TD_2 & (15) \\
 &= \frac{1}{2} \cdot \lambda_p \cdot t_l^2 + (\lambda_p \cdot t_l) \cdot \{r_e - (t_a + t_l)\} \\
 &= \frac{\lambda_p \cdot t_l}{2} \cdot [t_l + 2\{r_e - (t_a + t_l)\}]
 \end{aligned}$$

$$\bar{d}_p = r_e - t_a - \frac{t_l}{2} \quad (16)$$

3.3.4 R-G 형태 보행군 지체모형

보행군은 λ_p 로 t_l 동안 유효적색시간과 유효녹색시간에 걸쳐 도착하게 됨으로 도착형태와 총 대기시간의 관계는 Fig. 12와 같다. 총 지체(TD_p)는 t_a , λ_p , t_l , 그리고 $r_e - t_a$ 을 이용하여 Eq. (17)과 같이 산정되며, Eq. (17)을 주기당 보행군의 보행수요($\lambda_p \cdot t_l$)로 나누면 평균 보행자 지체(\bar{d}_p , 초/인)은 Eq. (18)과 같다. 여기서 $t_a < r_e$ 이고 $r_e < (t_a + t_l)$ 이다.

$$TD_p = \frac{\lambda_p}{2} \cdot (r_e - t_a)^2 \quad (17)$$

$$\bar{d}_p = \frac{(r_e - t_a)^2}{2t_l} \quad (18)$$

3.3.5 R-G-D 형태 보행군 지체모형

보행군은 λ_p 로 t_l 동안 유효적색시간, 유효녹색시간, 그리고 진입 딜레마 시간에 걸쳐 도착하게 됨으로 도착형태와 총 대기시간의 관계는 Fig. 13과 같다.

총 지체(TD_p)는 $TD_1 + TD_2 + TD_3$ 이며, t_a , λ_p , t_l , 유효적색 시간에 도착한 보행군의 시간길이($r_e - t_a$), 진입 딜레마 시간에 도착한 보행군의 시간길이($t = t_a + t_l - (r_e + g_e)$), 시간길이(t) 동안 도착한 후 녹색등화까지 대기한 시간길이($t_r = C - (g_e + t)$), 그리고 $\alpha = \lambda_p/t_o$ 을 이용하여 Eq. (19)와 같이 계산된다. Eq. (19)을 주기당 보행군의 수요($\lambda_p \cdot t_l$)로 나누면 평균 보행자 지체 (\bar{d}_p , 초/인)은 Eq. (20)과 같다.

$$\begin{aligned}
 TD_p &= TD_1 + TD_2 + TD_3 & (19) \\
 &= \frac{\lambda_p(r_e - t_a)^2}{2} + \iint_0^t \alpha t dt + t_r \int_0^t \alpha t dt \\
 &= \frac{\lambda_p(r_e - t_a)^2}{2} + \frac{\alpha t^3}{6} + t_r \frac{\alpha t^2}{2} \\
 &= \frac{\lambda_p(r_e - t_a)^2}{2} + \frac{\alpha t^2}{2} \left(\frac{t}{3} + t_r \right) \\
 &= \frac{\lambda_p(r_e - t_a)^2}{2} + \frac{\lambda_p t^2}{2t_o} \left(C - g_e - \frac{2t}{3} \right)
 \end{aligned}$$

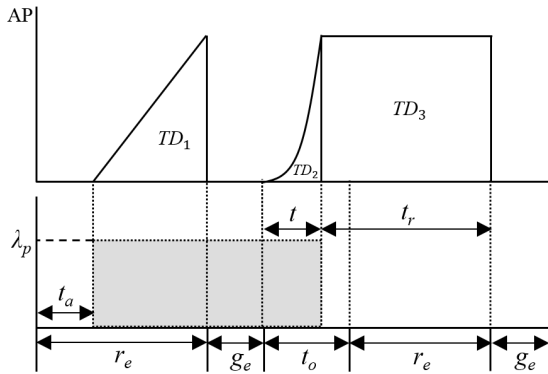


Fig. 13. R-G-D Type of Platoon Arrival and Total Delays

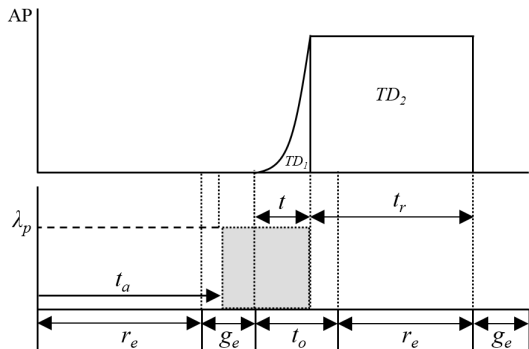


Fig. 14. G-D Type of Platoon Arrival and Total Delays

$$\bar{d}_p = \frac{(r_e - t_a)^2}{2t_l} + \frac{t^2}{t_l t_o} \left(C - g_e - \frac{2t}{3} \right) \quad (20)$$

3.3.6 G-D 형태 보행군 지체모형

보행군은 λ_p 로 t_l 동안 유효녹색시간과 진입 딜레마 시간에 걸쳐 도착하게 됨으로 도착형태와 총 대기시간의 관계는 Fig. 14와 같다. R-G-D와 G-D 보행군 형태는 횡단보도간 거리가 길고 부도로의 차량 이동류 녹색신호시간이 짧은 기형적인 교차로 구조와 신호운영에서 발생할 수 있다.

총 지체(TD_p)는 $TD_1 + TD_2$ 이며, t_a , λ_p , t_l , 진입 딜레마 시간에 도착한 보행군의 시간길이($t = t_a + t_l - (r_e + g_e)$), 시간길이(t) 동안 도착한 후 녹색등화까지 대기한 시간길이($t_r = C - (g_e + t)$), 그리고 $\alpha = \lambda_p/t_o$ 을 이용하여 Eq. (21)과 같이 계산된다. Eq. (21)을 주기당 보행군의 수요($\lambda_p \cdot t_l$)로 나누면 평균 보행자 지체 (\bar{d}_p , 초/인)은 Eq. (22)와 같다.

$$\begin{aligned}
 TD_p &= TD_1 + TD_2 & (21) \\
 &= \iint_0^t \alpha t dt + t_r \int_0^t \alpha t dt \\
 &= \frac{\alpha t^3}{6} + t_r \frac{\alpha t^2}{2} \\
 &= \frac{\alpha t^2}{2} \left(\frac{t}{3} + t_r \right) \\
 &= \frac{\lambda_p t^2}{2t_o} \left(C - g_e - \frac{2t}{3} \right)
 \end{aligned}$$

$$\bar{d}_p = \frac{t^2}{2t_l t_o} \left(C - g_e - \frac{2t}{3} \right) \quad (22)$$

3.3.7 G-D-R 형태 보행군 지체모형

보행군은 λ_p 로 t_l 동안 유효녹색시간, 진입 딜레마 시간, 그리고 유효적색시간에 걸쳐 도착하게 됨으로 도착형태와 총 대기시간의 관계는 Fig. 15와 같다. G-D-R 형태는 R-G-D와 G-D 형태와

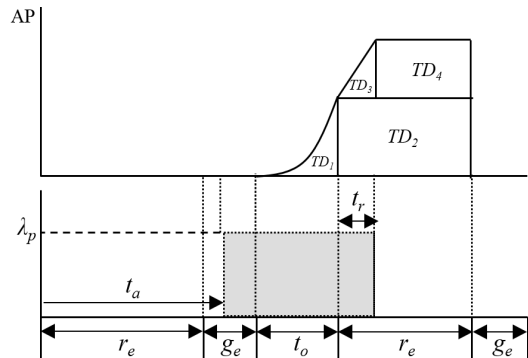


Fig. 15. G-D-R Type of Platoon Arrival and Total Delays

마찬가지로 횡단보도간 거리가 길고 부도로의 차량 이동류 녹색신호 시간이 짧은 기형적인 교차로 구조와 신호운영에서 발생할 수 있다.

총 지체(TD_p)는 $TD_1 + TD_2 + TD_3 + TD_4$ 이며, t_a , λ_p , t_l , 진입 딜레마 시간에 도착한 보행군의 시간길이(t_o), 적색신호에서 시간길이(t_r) 동안 도착한 후 녹색등화까지 대기한 시간길이($r_e - t_r$), 그리고 $\alpha = \lambda_p/t_o$ 을 이용하여 Eq. (23)과 같이 계산된다. Eq. (23)을 주기당 보행군의 수요($\lambda_p \cdot t_l$)로 나누면 평균 보행자 지체(\bar{d}_p , 초/인)은 Eq. (24)와 같다.

$$\begin{aligned}
 TD_p &= TD_1 + TD_2 + TD_3 + TD_4 & (23) \\
 &= \iint_0^{t_o} \alpha t dt + r_e \int_0^{t_o} \alpha t dt + \frac{\lambda_p t_r^2}{2} + \lambda_p t_r (r_e - t_r) \\
 &= \frac{\alpha t_o^3}{6} + r_e \frac{\alpha t_o^2}{2} + \frac{\lambda_p t_r}{2} (2r_e - t_r) \\
 &= \frac{\lambda_p t_o^2}{2t_o} \left(\frac{t_o}{3} + r_e \right) + \frac{\lambda_p t_r}{2} (2r_e - t_r)
 \end{aligned}$$

$$\bar{d}_p = \frac{t_o^2}{2t_l t_o} \left(\frac{t_o}{3} + r_e \right) + \frac{t_r}{2t_l} (2r_e - t_r) \quad (24)$$

3.3.8 D-D 형태 보행군 지체모형

보행군은 λ_p 로 t_l 동안 딜레마 시간동안에 도착을 완료함으로 도착형태와 총 대기시간의 관계는 Fig. 16과 같다.

총 지체(TD_p)는 $TD_1 + TD_2$ 이며, t_a , λ_p , t_l , 진입 딜레마 시간의 시점과 보행군의 선두가 도착한 시점의 시간차($t = t_a - (r_e + g_e)$), t_o 동안에 도착한 이후 녹색등화까지 대기한 시간길이($t_r = t_o + r_e - t - t_l$), 그리고 $\alpha = \lambda_p/t_o$ 을 이용하여 Eq. (25)와 같이 계산된다. Eq. (25)을 주기당 보행군의 수요($\lambda_p \cdot t_l$)로 나누면 평균 보행자 지체(\bar{d}_p , 초/인)은 Eq. (26)과 같다.

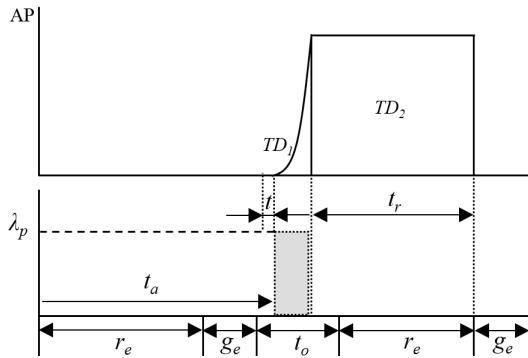


Fig. 16. D-D Type of Platoon Arrival and Total Delays

$$\begin{aligned}
 TD_p &= TD_1 + TD_2 & (25) \\
 &= \iint_0^{t+t_l} \alpha t dt - \iint_0^t \alpha t dt + t_r \left[\int_0^{t+t_l} \alpha t dt - \int_0^t \alpha t dt \right] \\
 &= \frac{\alpha}{6} \{ (t+t_l)^3 - (t)^3 \} + \frac{\alpha t_r}{2} \{ (t+t_l)^2 - (t)^2 \} \\
 &= \frac{\lambda_p}{6t_o} \{ (t+t_l)^3 - (t)^3 \} + \frac{\lambda_p t_r}{2t_o} \{ (t+t_l)^2 - (t)^2 \}
 \end{aligned}$$

$$\bar{d}_p = \frac{1}{6t_l t_o} \{ (t+t_l)^3 - (t)^3 \} + \frac{t_r}{2t_l t_o} \{ (t+t_l)^2 - (t)^2 \} \quad (26)$$

3.3.9 D-R 형태 보행군 지체모형

보행군은 λ_p 로 t_l 동안 딜레마 시간과 유효적색시간에 걸쳐 도착함으로 도착형태와 총 대기시간의 관계는 Fig. 17과 같다.

총 지체(TD_p)는 $TD_1 + TD_2 + TD_3 + TD_4$ 이며, t_a , λ_p , t_l , 진입 딜레마 시간의 시점과 보행군의 선두가 도착한 시각 간의 시간차($t = t_a - (r_e + g_e)$), r_e 동안에 도착한 일부 보행군의 시간길이($t_r = t_l - t_o + t$), 그리고 $\alpha = \lambda_p/t_o$ 을 이용하여 Eq. (27)과 같이 계산된다. Eq. (27)을 주기당 보행군의 수요($\lambda_p \cdot t_l$)로 나누면 평균 보행자 지체(\bar{d}_p , 초/인)은 Eq. (28)과 같다.

$$\begin{aligned}
 TD_p &= TD_1 + TD_2 + TD_3 + TD_4 & (27) \\
 &= \iint_t^{t_o} \alpha t dt + r_e \int_t^{t_o} \alpha t dt + \frac{\lambda_p t_r^2}{2} + \lambda_p t_r (r_e - t_r) \\
 &= \frac{\alpha (t_o^3 - t^3)}{6} + \frac{\alpha r_e (t_o^2 - t^2)}{2} + \frac{\lambda_p t_r (2r_e - t_r)}{2} \\
 &= \frac{\lambda_p (t_o^3 - t^3)}{6t_o} + \frac{\lambda_p r_e (t_o^2 - t^2)}{2t_o} + \frac{\lambda_p t_r (2r_e - t_r)}{2}
 \end{aligned}$$

$$\bar{d}_p = \frac{(t_o^3 - t^3)}{6t_l t_o} + \frac{r_e (t_o^2 - t^2)}{2t_l t_o} + \frac{t_r (2r_e - t_r)}{2t_l} \quad (28)$$

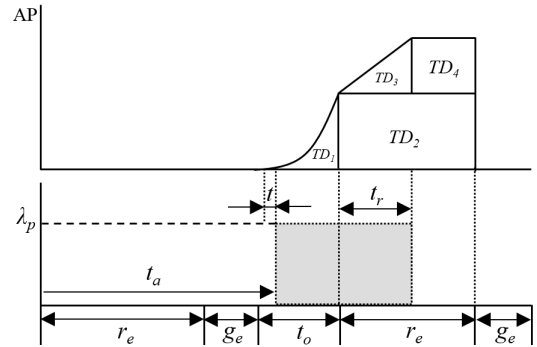


Fig. 17. D-R Type of Platoon Arrival and Total Delays

3.3.10 D-R-G 형태 보행군 지체모형

보행군은 λ_p 로 t_i 동안 진입 딜레마 시간, 유효적색시간, 그리고 유효녹색시간에 걸쳐 도착함으로써 도착형태와 총 대기시간의 관계는 Fig. 18과 같다.

총 지체(TD_p)는 $TD_1 + TD_2 + TD_3$ 이며, t_a , λ_p , t_i , 진입 딜레마 시간의 시점과 보행군의 선두가 도착한 시점의 시간차($t = t_a - (r_e + g_e)$), 그리고 $\alpha = \lambda_p/t_o$ 을 이용하여 Eq. (29)와 같이 계산된다. Eq. (29)을 주기당 보행군의 수요($\lambda_p \cdot t_i$)로 나누면 평균 보행자 지체(\bar{d}_p , 초/인)은 Eq. (30)과 같다.

$$\begin{aligned}
 TD_p &= TD_1 + TD_2 + TD_3 & (29) \\
 &= \iint_t^{t_o} \alpha t dt + r_e \int_t^{t_o} \alpha t dt + \frac{\lambda_p r_e^2}{2} \\
 &= \frac{\alpha(t_o^3 - t^3)}{6} + \frac{\alpha r_e(t_o^2 - t^2)}{2} + \frac{\lambda_p r_e^2}{2} \\
 &= \frac{\lambda_p(t_o^3 - t^3)}{6t_o} + \frac{\lambda_p r_e(t_o^2 - t^2)}{2t_o} + \frac{\lambda_p r_e^2}{2}
 \end{aligned}$$

$$\bar{d}_p = \frac{(t_o^3 - t^3)}{6t_o} + \frac{r_e(t_o^2 - t^2)}{2t_o} + \frac{r_e^2}{2t_o} \quad (30)$$

3.3.11 신호교차로 횡단보도 보행자 지체산정

신호교차로 횡단보도 보행자 지체는 Eq. (9)를 이용하여 접근로의 균일도착에 대한 평균 지체를 산정하고, 보행군의 도착형태에 따른 산정된 보행군 지체를 이용하여 Eq. (31)과 같이 해당 횡단보도 진행방향의 평균 대기지체(\bar{d} , 초/대)를 산정한다.

$$\bar{d} = \frac{q_u \cdot \bar{d}_u + q_p \cdot \bar{d}_p}{q_u + q_p} \quad (31)$$

여기서, q_u 와 q_p 는 (접근로) 균일도착 보행수요(인/시)와 보행군 수요(인/시)이며, \bar{d}_u 와 \bar{d}_p 는 (접근로) 균일도착의 평균지체(초/인)와 보행군의 평균지체(초/인)이다.

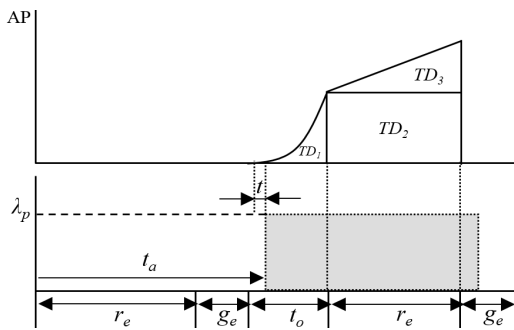


Fig. 18. D-R-G Type of Platoon Arrival and Total Delays

4. 개발모형의 평가

개발모형의 성능평가는 시나리오에 따른 수치 모의실험(numerical simulation)을 통해 수행되었으며, 비교대상으로 HCM 보행자 지체모형을 선정하였다. 그리고 성능평가는 단일 횡단보도(IPC) 모형과 신호교차로 횡단보도(SPC) 모형으로 분리/수행하였다.

4.1 단일 횡단보도 지체모형의 평가 결과

개발된 IPC 지체모형의 성능평가를 위한 시나리오는 다음과 같다. 신호운영조건은 $C=140$ 초, $G=40$ 초, $g_e=15$ 초이며, 진입 딜레마 시간대 길이(t_o)는 0~15초까지 설정하였다. 조건에 의해 IPC 지체모형(Eq. (9))의 유효적색시간(r_e , 초)은 ($r_e = C - (g_e + t_o)$ 임으로) 125초에서 110초까지 감소한다. 그리고 HCM모형(Eq. (10))에 의해 산정된 지체(초/인)는 55.8이다.

모의실험 분석결과는 Fig. 19와 같으며, IPC모형은 HCM모형의 20%수준까지 과대평가치를 조정할 수 있음을 보여주고 있다. 분석결과를 유효녹색시간 연장 변수인 t_e 와 (추가적인 횡단을 고려하기 위한) 횡단 딜레마 시간의 길이인 t_o 로 살펴보면 다음과 같다. $t_e=0$ 이고 $t_o=0$ 인 경우, HCM모형과 동일한 결과를 보이고 있으나, t_o 가 증가하면서 t_o 시간동안 추가적인 횡단이 수행됨에 따라 지체는 50.2 (10.1%)까지 감소하고 있다. $t_o=0$ 이고 t_e 가 5와 10으로 증가한 경우 (즉, IPC모형의 유효 녹색색시간이 20과 25로 증가함에 따라) 지체는 51.4 (7.8%)와 47.2 (15.4%) 감소하고 있다. 그리고 t_o 을 이용하여 진입 딜레마시간대 동안에 추가적인 횡단이 고려되는 경우, 지체는 47.5 (14.9%)에서 45.2 (19.1%)까지 감소하고 있다.

분석 결과, 단일 횡단보도에서 보행자 지체는 보행자의 횡단 행태를 결정하는 변수 (주기길이(C), 초기 보행자 진입 녹색색시간을 결정하는 도로 폭(m), 보행자 계층의 보행속도, 유효녹색시간 연장 값(t_e)과 횡단 딜레마 시간길이(t_o))에 따라 고려할 수준의 차이를

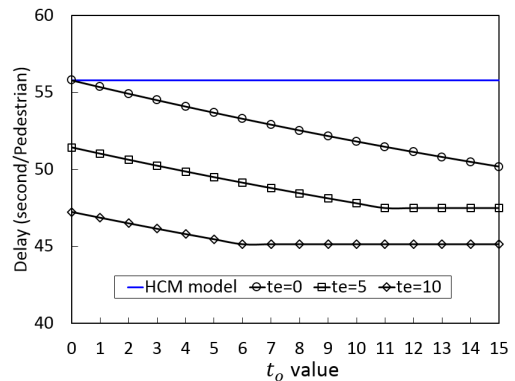


Fig. 19. Versatility of IPC Delay Model

보이며, 이러한 차이는 본 연구에서 제시한 IPC모형에 의해 효과적으로 설명될 수 있음을 보였다. 따라서 IPC모형의 파라미터인 t_e 와 t_o 를 적용할 경우 HCM모형보다 정교한 지체의 추정이 가능할 것으로 판단된다.

4.2 신호교차로 지체모형의 평가 결과

SPC 지체모형의 성능을 평가하기 위한 신호운영 조건은 $C=140$ 초, $G=40$ 초, $g_e=15$ 초이며, 보행자 횡단행태를 고려하기 위한 t_e 와 t_o 는 각각 5초로 설정하였다. 따라서 HCM모형에 의한 보행자 평균지체는 55.8초이며, IPC모형에 의한 보행자 평균지체는 49.5초이다. 이전 신호교차로 횡단보도에서 형성된 보행군의 도착형태는 R-R과 R-G가 일반적인 경우이다. 따라서 보행군 도착형태 시나리오는 R-R과 R-G로 그리고 보행군의 시간길이(t_a)은 15초로 설정하였다. 모의실험은 보행교통량에 대한 보행군의 비율(Rate of platoon, PR, 0.0~1.0)과 보행군 선두의 유효적색시간 동안 도착시점인 t_a 의 조합 시나리오로 수행하였다.

Fig. 20은 수치 모의실험 결과를 보여주고 있으며, 과 같으며, $t_a < 85.0$ 인 경우는 R-R 도착형태 그리고 $85.0 \leq t_a$ 인 경우는 R-G 도착형태이다. SPC모형의 지체는 PR이 1.0인 경우 0.0~92.5초까지 크게 변화하고 있으며, PR이 0.4인 경우 66.7~29.7초까지 변화하고 있다. 이는 신호교차로의 경우, HCM모형이나 IPC모형에 의해 산정된 지체는 보행군의 도착 형태에 따라 과소/과대 평가의 문제가 발생하며, 그 차이는 R-R 도착형태의 경우 $\pm (r_e - t_i)/2$ 까지 그리고 R-G 도착형태의 경우 추정된 지체의 수준까지 증가/감소할 수 있음을 의미한다.

$t_a < (r_e - t_i)/2$ 인 R-R형태의 경우, HCM과 IPC모형은 과소추정의 문제가 발생한다. 이러한 과소추정의 예로는 동시신호로 운영되는 신호교차로에서 차량신호의 등화방향이 시계방향이고 보행자의 이동방향이 반시계 방향인 경우 발생하게 된다. 다시 말해, 차량신호 등화방향의 반대 방향으로 이동하는 보행군은 3번의

차량신호 등화동안 대기를 수행해야 하기 때문이다.

$(r_e - t_i)/2 \leq t_a < (r_e - t_i)$ 인 R-R형태의 경우, HCM과 IPC모형은 과대추정의 문제가 발생한다. 이러한 과대추정 문제는 후행좌회전으로 운영되는 신호교차로에서 주로 발생하게 되며, 좌회전현시의 길이가 짧은 경우 (즉, t_a 이 큰 경우) 그리고 PR이 높은 경우에 증가하게 한다. 그리고 보행자 녹색시간동안의 차량 동시신호가 상대적으로 길고, 차량신호 등화방향과 동일한 방향으로 이동하는 보행군의 경우도 과대추정의 문제가 발생한다.

$(r_e - t_i) \leq t_a < r_e$ 인 R-G형태의 경우, HCM과 IPC모형은 과대추정의 문제가 최대에 달하며, 다음과 같은 경우에 발생하게 된다. 차량 동시신호시 형성된 보행군의 횡단이후 다음 동시신호에 보행군이 녹색시간으로 횡단을 수행하거나, 직진 2현시로 운영되는 차량 신호시 남북간 횡단 후 동시간 횡단을 수행하면 보행군의 대기시간은 짧아진다. 또한 T형 교차로에서 부도로에서 보행자 횡단 후 주도로 횡단시 과대추정의 문제가 발생한다. 이러한 과대추정의 문제는 $(r_e - t_a) \rightarrow +0.0$ 이고 PR이 증가함에 따라 증폭된다.

이상의 분석결과, 신호교차로의 신호운영조건은 다양한 보행군 도착형태를 형성하며, 보행군의 도착형태는 (보행군을 고려하지 않는) HCM 보행자 지체모형의 과대/과소 추정문제에 대한 주요 원인이다. 임의도착과 보행군 도착에 의한 지체를 개발된 IPC모형과 SPC모형으로 각각 산정하고, 산정된 지체를 보행군의 비율로 통합하면 다양한 신호운영 조건하에서 보행자 지체산정의 정확도를 획기적으로 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서 제시된 보행자 지체모형을 이용하면 보행자 중심적인 차별적인 신호운영을 평가할 수 있을 것이다.

5. 결론 및 향후연구

신호교차로의 주된 교통 주체는 차량과 보행자로 구분될 수 있으며, 신호교차로의 주요한 성능 지표로서 차량과 보행자의 지체가 널리 이용되고 있다. 따라서 HCM(2013)과 USHCM(2000, 2010, 2016)에서는 차량과 보행자의 지체를 평가하기 위한 모형을 각각 제시하고 있다. 그러나 차량 지체산정 모형은 현장에 적합하게 고도화된 반면, 보행자 지체산정 모형은 보행자의 이동행태를 고려하지 않는 간략한 방법을 제시하고 있다. 특히, 보행자 지체모형은 과도한 과대/과소 추정의 문제를 가지고 있다. 따라서 보행자 지향적 분석 패러다임에 적합하게 보행자 중심적인 차별화된 신호교차로의 설계 및 운영 분석을 위해서는 정확한 보행자 지체모형이 요구되고 있다.

이상의 현 보행자 지체모형의 한계를 극복하고 보행자 중심적인 신호운영 분석의 목표를 달성하기 위한 일환으로, 본 연구에서는 단일 횡단보도 적용을 위한 IP모형과 신호교차로 적용을 위한

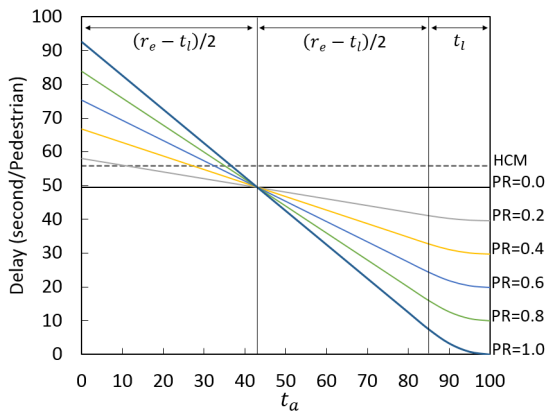


Fig. 20. Versatility of SPC Delay Model

SPC모형을 각각 분리하여 제시하였다. IPC모형은 보행자의 횡단 행태를 기반으로 추가 유효노색시간과 딜레마시간대에서 추가 횡단을 고려하도록 개발되었으며, HCM모형의 과대추정 문제를 효과적으로 극복할 수 있는 것으로 분석되었다. SPC모형은 신호교차로의 신호운영으로 형성된 보행군을 모형화하고, 보행군의 이동과 도착을 반영한 보행군 지체모형과 (보행군에 포함되는 않는 임의 도착을 반영한) IPC모형을 통합하여 개발되었다. SPC모형은 HCM모형의 과대/과소 추정문제를 극복할 뿐만 아니라 다양한 신호운영 조건하에서도 합리적이고 차별적인 보행자 지체를 산정할 수 있음을 보였다. 특히, 보행 교통류는 일반적으로 과포화가 발생하지 않고 보행자의 이동은 신호운영에 종속됨으로 본 연구에서 개발된 보행자 지체모형은 즉각적인 적용이 가능하다.

본 연구는 IPC와 SPC에 적합한 보행자 지체모형의 개발과 그 적용 가능성에 초점을 두었다. 따라서 다음의 향후 연구가 필요하다. 첫째, 현장 검증을 통한 모형의 검증과 정산이 필요하다. IPC모형의 경우, 차로 폭, 횡단보도의 위치 특성, 그리고 보행자 계층에 대한 파라미터의 검증과 정산이 필요하다. SPC모형의 경우, 다양한 신호운영조건에서 모형의 검증과 더불어 파라미터의 정산이 필요하다. 모형의 검증은 보행군의 형성 및 도착형태에 따라 수행되어야 한다. 그리고 보행군의 형태와 관련하여 포화시 보행군과 추가도착 보행군으로 구분하여 SPC모형의 정확도를 향상시킬 필요가 있다. 둘째, 신호교차로에서 보행군의 도착행태는 일반적으로 R-R과 R-G의 형태를 보임으로 적용성을 고려하여 모형을 정확한 수준에서 단순화하였다. 반면, 특수한 보행군 도착행태(R-G-D, G-D, G-D-R, D-D, D-R, D-R-G)는 다양한 변수가 도입되었으며, 하나의 일반화된 모형으로 간략화하지 않았다. 따라서 특수한 보행군 도착행태의 경우, 현장 검증을 통해 정확도를 향상시킴과 더불어

적용성을 고려하여 모형을 간략화할 필요가 있다. 마지막으로, 본 연구에서 제시된 모형은 독립 신호교차로를 대상으로 하고 있다. 따라서 신호교차로로 구성된 도로축 (또는 신호운영 그룹)에서 통행 경로 중심의 보행자 분석을 위해서는 교차로간 보행군의 경로로 모형을 확장/개발할 필요가 있다.

References

- Braun, R. and Roddin, M. (1978). "Quantifying the benefits of separating pedestrians and vehicles." NCHRP Report 189, TRB, National Research Council, Washington, D.C.
- Li, Q., Wang, Z., Yang, J. and Wang, J. (2005). "Pedestrian delay estimation at signalized intersections in developing cities." *Transportation Research Part A*, Vol. 39, pp. 61-73.
- Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (MOLIT) (2013). "Highway capacity manual." pp. 613-637 (in Korean).
- Pretty, R. (1979). "The delay to pedestrians and vehicles at signalized intersections." *ITE Journal*, Vol. 49, No. 5, pp. 20-23.
- Roughail, N., Hummer, J., Milazzo, I. I. J. and Allen, P. (1998). "Capacity analysis of pedestrian and bicycle facilities: recommended procedures for the pedestrians Chapter of the Highway Capacity Manual." Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- Transportation Research Board (TRB) (2000). *Highway capacity manual 2000*, National Research Council, Washington, D.C.
- Transportation Research Board (TRB) (2010). *Highway capacity manual 2010*, National Research Council, Washington, D.C.
- Transportation Research Board (TRB) (2016). *Highway capacity manual 2016*, National Research Council, Washington, D.C.
- Virkler, M. (1998). "Pedestrian compliance effects on signal delay." *Transportation Research Records*, No. 1636, pp. 88-91.