신호시간을 고려한 PPLT 효율성에 관한 연구

남상범¹ · 김주현^{2*} · 신언교³

¹안양대학교 도시정보공학과 석박사통합과정, ²안양대학교 도시정보공학과 교수,

³안양대학교 도시정보공학과 겸임교수

A Study on the Efficiency of Protected/Permitted Left-Turn (PPLT) by Variation of Signal Interval

NAM, Sangbum¹ · KIM, Ju Hyun^{2*} · SHIN, Eon Kyo³

¹The Ph.D. Program, Department of Urban Information Engineering, Anyang University, Gyeonggi 14028, Korea

²Professor, Department of Urban Information Engineering, Anyang University, Gyeonggi 14028, Korea

³Adjunct Professor, Department of Urban Information Engineering, Anyang University, Gyeonggi 14028, Korea

*Corresponding author: jhkim@anyang.ac.kr

Abstract

Many studies which considered volume and lanes of opposite straight traffic have been carried out to improve left-turn traffic flow at the signalized intersection. However, there were no studies reflect signal intervals which much influenced on the efficiency of the left-turn traffic flow. For the purpose of effective left-turn treatment, we considered signal intervals of the opposite straight traffic and left-turn traffic as well as the volume and lanes of opposite straight traffic. Based on the simulation results, left-turn delay of reduced significantly by the application of protected/permissive left-turn (PPLT) in case of congested left-turn traffic illustrated as left-turn signal time of 10 or 20second, but not as much as congested left-turn traffic in case of uncongested left-turn traffic such as left-turn signal time of 30second. Therefore, it is concluded that the heavier the left-turn traffic congestion, the greater the effect of protected/permissive left-turn (PPLT) in terms of reducing delay. Simulation results according to the variation of cycle length as well as the volume and signal interval of left-turn and opposite straight traffic can be used to find the best left-turn treatment among protected left-turn (PRLT), permissive left-turn (PELT) and protected/permissive left-turn (PPLT) at a signalized intersection.

Keywords: delay time, permissive left-turn (PELT), protected left-turn (PRLT), protected/permissive left-turn (PPLT), simulation

초록

지금까지 신호교차로의 좌회전 운영 효율성 향상을 위한 많은 연구가 수행되어 왔다. 하지만 대향 직진 차로수와 교통량만을 고려한 분석으로 교차로의 운영 효율성을 판단했다. 신호교차로의 효율성 판단 시 신호시간이 중요한 변수임에도 불구하고 이를 고려하여 체계적으로 분석한 연구는 없었다. 이에 본 연구에서는 대향 직진 신호시간, 좌회전 신호시간 등의 신호 조건을 포함시켜 좌회전 처리방안(PRLT, PELT, PPLT)을 분석했다. 또한 조건 변화에 따른 상호관계를 고려하여 교차로에서의 효율적인 좌회전 처리방안을 제시하였다. 분석 결과 좌회전 신호시간이 10, 20초로 짧아서 혼잡한 경우는 PPLT 적용 후 PRLT보다 좌회전 지체시간이 크게 감소하

J. Korean Soc. Transp.
Vol.36, No.5, pp.305-318, October 2018
<https://doi.org/10.7470/jkst.2018.36.5.305>

pISSN : 1229-1366
eISSN : 2234-4217

ARTICLE HISTORY

Received: 9 April 2018

Revised: 12 May 2018

Accepted: 26 October 2018

Copyright ©
Korean Society of Transportation

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

였다. 반면에 좌회전이 혼잡하지 않은 30초의 경우는 PPLT 도입 효과가 크지 않은 것으로 분석되었다. 따라서 좌회전 혼잡이 큰 교차로일수록 PPLT 도입 필요성이 높으며 도입 효과도 클 것으로 판단된다. 차로별 대향직진 교통량과 좌회전 교통량, 신호시간(대향직진 신호시간, 좌회전 신호시간, 신호주기) 등을 조사하여 시뮬레이션 결과에 적용하면 효율적인 좌회전 처리방식인 PPLT와 신호시간 운영계획 수립에 활용될 수 있다.

주요어: 지체시간, 비보호좌회전(PELT), 보호좌회전(PRLT), 보호/비보호좌회전(PPLT), 시뮬레이션

서론

1. 배경 및 목적

신호교차로에서 좌회전 교통량 처리 문제는 교차로 전체의 소통 상태에 큰 영향을 미치게 된다. 좌회전 교통량 처리 방법으로는 Table 1과 같이 보호좌회전(Protected Left-Turn, PRLT), 비보호좌회전(Permitted Left-Turn, PELT), 보호/비보호 좌회전(Protected/Permitted Left-Turn, PPLT) 등이 있다. 교차로 교통 혼잡이 심한 국내의 경우 비보호좌회전은 적용 가능한 곳이 많지 않은데 반해, PPLT는 Table 1의 3)과 같이 대향직진 신호시간에 비보호좌회전을 허용한 다음 계속되는 좌회전 신호에 보호좌회전이 허용되므로 직진용량을 감소시키지 않고 좌회전 용량을 증대시켜 교차로 소통개선에 도움을 줄 수 있어 도입이 확대되고 있다.

Table 1. Method of left turn operation

Method	1) PRLT	2) PELT	3) PPLT
Opposite straight			
Left-turn			

↔: Permitted left-turn, ↔: Protected left-turn

비보호좌회전의 운영조건으로는 대향직진 교통량, 대향직진 차로수 등이 주로 사용된다. 이는 비보호좌회전은 대향직진 차량의 차간간격을 이용하기 때문에 이를 고려하기 위해서이다. 무신호교차로에서의 비보호좌회전의 경우는 상기 두 가지 조건만을 고려해도 되지만 신호교차로의 비보호좌회전 용량은 대향직진 교통량과 대향직진 차로수 외에도 대향직진 대기차량 발생 및 소거시간과 대향 직진신호시간 등의 영향도 받게 된다. 그리고 PPLT는 신호교차로에서 존재하므로 상기 신호교차로의 비보호좌회전 용량에 영향을 미치는 조건 외에도 보호좌회전 용량에 영향을 미치는 좌회전 신호시간에도 영향을 받게 된다.

대부분의 기존 연구에서는 최적화된 신호시간, 대향직진 교통량, 차로수 변화만을 고려하여 PPLT 등 좌회전 처리방안을 결정하고 신호 특성은 고려하지 않았다. 그러나 Table 1과 같이 좌회전 운영방법에 따라 시간 특성이 변할 경우 신호최적화 조건은 변할 수 있다. 특히 PPLT의 경우에는 대향직진 신호시간이 직진은 물론 좌회전의 용량에도 영향을 미치기 때문에 더욱 그러하다.

따라서 본 연구에서는 대향직진 차로수, 방향별 교통량, 대향직진 신호시간, 좌회전 신호시간 등의 조건 변화에 따른 상호관계를 고려한 신호교차로 좌회전 처리방안(PRLT, PELT, PPLT)의 효율성을 분석·평가하여 교차로에서의 효율적인 좌회전 처리방안인 PPLT의 적용기준을 제시하고자 한다.

2. 연구 범위 및 방법

효율적인 좌회전 처리 방안(PRLT, PELT, PPLT)에 관한 기존 연구들은 신호시간을 최적화한 다음 그 신호를 토대로 좌회전 교통량 처리에 영향을 주는 변수로 대향직진 교통량이나 대향직진 차로 수 등을 이용하여 연구 결과를

제시했다. 그러나 최적신호시간은 좌회전 처리방안에 따라 변할 수 있기 때문에 기존 연구들은 PRLT, PELT, PPLT 등 어느 하나만을 대상으로 평가할 때는 유효하게 적용될 수 있지만 이들을 동시에 고려하여 평가하기는 어렵다. 특히, PPLT까지 포함되면 대향직진 교통용량은 물론 좌회전 교통용량까지 대향직진 신호시간의 영향을 받기 때문에 특정 신호시간을 전제로 좌회전 처리방안을 도출하는 것은 불합리하다.

본 연구에서는 신호교차로의 단속류 특성인 신호 대기시간(적색신호시간) 동안 발생하는 대기차량 발생과 소멸, 비보호좌회전 교차로에서의 대향직진 차량의 차간간격을 이용하는 특성이 잘 반영될 수 있도록 대향 직진차로와 좌회전차로를 쌍으로 대향직진 신호시간, 좌회전 신호시간 등의 신호조건을 기존 연구에서 적용한 변수에 포함시켜 좌회전 처리방안(PRLT, PELT, PPLT)을 분석하고자 한다.

주어진 신호조건에서 좌회전 처리방법 중 PPLT 효율성은 해당 좌회전의 대향직진 영향만을 받고 다른 PPLT 분석 단위(좌회전+대향직진)의 영향을 받지 않는다. 4지 교차로의 경우 Figure 1과 같이 4개의 PPLT 분석 단위가 생긴다. 각각 PPLT 분석단위의 신호시간은 교통량과 차로수 조건이 같더라도 교차로나 다른 PPLT 분석단위의 조건에 따라 다양하게 나타난다. 따라서 본 연구에서는 현재 PRLT로 운영되고 있는 교차로의 Figure 2와 같은 Dual ring 신호운영체제에서 좌회전 대향직진 분석단위별 PPLT운영으로 단축된 좌회전 신호시간을 활용하여 신호시간을 조정할 다음 교차로 전체에 대한 PPLT 최적 신호시간을 산정하는 순차적 방안을 제시한다.

Figure 1. Analysis unit of PPLT

Figure 2. Signal timing setting by dual ring system

또한 좌회전 교통량은 좌회전 혼잡시 효과 분석을 위해 충분한 교통량인 500대/시로 고정하여 분석한다.

Table 2. Analysis preconditions

Classification	Item
Geometric conditions	① Left-turn only lane ② Number of opposite straight lane (1, 2, 3lane)
Traffic conditions	① Opposite straight traffic volume (100, 200, 400, 600, 800, 1,000, 1,200volume/hour/lane) ② Critical gap 5.5second ③ Left-turn traffic volume fixed (500volume/hour, Left-turn jam crossroad) ④ Speed limit (60km/h) ⑤ Passenger car only
Signal conditions	① Cycle (120second) ② Opposite straight signal time (20 30, 40, 50second) ③ Left-turn signal time (0 (PELT), 10, 20, 30second)

Table 2와 같이 좌회전 처리방안 영향 변수들에 대한 다양한 시나리오를 작성하고 시뮬레이션을 통하여 지체시간과 교차로를 통과한 좌회전 교통량을 지표로 좌회전 처리방안을 비교평가 한다. 이를 위해 미시적 교통시뮬레이

선 프로그램인 VISSIM ver5.40으로 분석교차로를 시나리오별로 seed number 5개를 구축하여 시뮬레이션을 수행하고 평균값을 평가지표로 사용한다. 좌회전 처리방법(PRLT, PELT, PPLT) 시뮬레이션 구현 방법은 다음과 같다.

신호등 설치는 대향직진 차로와 좌회전 차로에 설치하고 PRLT와 PPLT 운영 방법에 따라 다음과 같이 현시를 부여한다.

- PRLT: 1현시 → 대향직진 2현시 → 좌회전 3, 4현시 → 교차도로 현시
- PPLT: 1현시 → 대향직진+좌회전 2현시 → 좌회전 3, 4현시 → 교차도로 현시

PPLT 1현시 좌회전 신호는 비신호좌회전 차량을 위한 것으로 Priority rule 설치는 대향직진 차량에 우선권을 부여하는 방법으로 비보호좌회전 차량에 의한 대향직진 차량에 영향이 없도록 설치한다. 이때 minimum gap time은 Table 3 도로용량편람(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2013)의 대향직진 교통량별 한 gap당 비보호좌회전 가능 대수를 이용하여 보간법으로 gap당 비보호좌회전 가능 대수가 1대일 때를 산정한 5.5초로 적용한다.

Table 3. Permitted left turn traffic volume per a gap between opposite straight traffic volumes

Vo	100	200	400	600	800	1,000	1,200	1,400	1,600	1,800
P	14.1	6.35	2.57	1.39	0.84	0.54	0.37	0.25	0.18	0.13

Vo: Opposite straight traffic(vph)

P: Average traffic volume to PELT straight traffic per gap

Conflict area 설치는 대향직진 차량에 우선권을 부여하는 것으로 비보호좌회전하는 차량에 의한 직진차량 영향을 파악하기 위한 것이다. 상충이 발생하지 않으면 문제가 없지만 모든 시뮬레이션 상황을 눈으로 확인하기 어려우므로 priority rule과 중복 설치하여 비보호좌회전 차량과 대향직진 차량 상충이 발생하지 않도록 하는 것이다. 즉 비보호좌회전하는 차량에 의한 직진차량의 영향을 파악하기 위한 것이다.

마지막으로 비보호좌회전차량이 대향직진 차량에 감속 등 영향을 미치면 안되므로 PRLT와 PPLT 시뮬레이션 결과를 이용하여 대향직진 차량의 지체시간 및 통과차량 등이 동일하지 검증한다.

선행연구 고찰

기존 연구는 좌회전 처리 방식에 따른 모형이나 모델링 관련 연구와 차로수 및 교통량 변화에 따른 좌회전 처리 방식의 선정에 관한 연구로 크게 구분된다. 본 연구는 대향직진 차로수, 방향별 교통량, 대향직진 및 좌회전 신호시간 등의 조건 변화에 따른 좌회전 처리방안의 효율성을 분석·평가하는데 목적이 있으므로 선행연구는 본 연구와 관련된 연구 위주로 고찰하고자 한다.

「교통신호기 설치 관리 매뉴얼(National Police Agency, 2011)」에서는 대향직진 교통량과 좌회전 교통량을 기준으로 PRLT와 PELT으로 운영 여부를 판단할 수 있는 기준을 제시하고 있다. 「평면교차로 설계지침(2004)」에서는 비보호좌회전 기준은 직진교통량(대/시)과 차로 운영별 좌회전 교통량(대/시)의 변화에 따라 결정하고 있다.

Agency(1987)는 간선도로상에서 PPLT를 적용하여 혼용 좌회전 운영 시에 통행시간 절감이 가능하나, 좌회전 교통사고 위험으로 혼용 좌회전 체계의 적용에 있어 안전적 측면을 강조했다, Bae(2003)는 PPLT 현시의 적용은 정주기식 제어기 보다는 완전감응식이나 교통량-밀도 제어기에서 더욱 큰 효과가 있으며, PPLT 현시의 적용에 따른 안전상의 문제는 신호현시의 순서와 비보호 표시 형태를 어떻게 하느냐에 따라 해결할 수 있다고 했다. 또한 Kim(2015)은 PPLT 효과를 분석하기 위하여 4지 신호교차로의 현황분석을 토대로 교통량 변화에 따른 VISSIM 교통모의분석, 차량당 평균지체시간 및 좌회전 통행시간을 분석하여 VISSIM 분석 결과를 바탕으로 교통량 변화에 따른 SSAM 모형 분석을 통해 상충횟수를 측정했고, Yun et al.(2015)은 미시교통시뮬레이션 모형을 기반으로 PRLT,

PELT, PPLT 신호운영 방안에 7개의 교통량 시나리오를 작성하여 각각의 이동성 지표와 안전성 지표를 추출하여 효율성과 안전성을 분석했다.

Park(2000)은 보호·비보호 혼용 좌회전으로 이용되는 교차로와 보호좌회전 운영교차로를 대상으로 좌회전 교통량, 대향직진 교통량, 교통량¹⁾, 지체시간, 정지 차량수 등의 교통류 특성을 이용하여 보호·비보호 혼용 좌회전 신호체계의 적용기준을 설정했고, Lee(2003)는 교차로에서의 지체를 줄이고 교차로 회전차량들을 원활하게 처리하기 위해 교통조건, 최적화 신호조건, 도로조건 등을 입력변수로 신호최적화와 모의실험이 동시에 가능한 Transty-7F를 분석하고 이를 검정하기 위해 미시적 시뮬레이션 프로그램인 TSIS (Netsim)을 이용하여 설치기준을 검증했다. 또한 Song(2010)은 좌회전 교통량, 대향직진 교통량, 대향직진 차로수를 파악하고 VISSIM을 적용한 시뮬레이션을 수행하여 PPLT의 현시기준 검증과 정주기식, 교통감응식 신호시간 계획에 따른 교차로 전체의 평균 제어지체시간을 비교하여 효과 분석을 시행했고, Won(2010)은 4차로 접근로 신호교차로에서 교차로 진입차로에 대한 대기행렬 및 차로 변경에 따른 상충 위험 감소로 인한 교차로 효율성 향상을 위한 교통운영체계의 기준을 제시했다.

Jang and Oh(2015)는 PPLT 신호운영에 대한 운전자 설문조사를 실시하고, 도로이용자(개인속성, 운전태도, PPLT의 기대심리 등)의 다양한 요인 등의 PPLT 만족도에 미치는 영향요인을 분석하였다.

PPLT와 관련된 기존 연구에서는 PPLT 운영상의 대향직진 차로수 및 대향직진 교통량에 따른 효율적 측면의 내용이 주를 이루고 있으며 대향직진 녹색시간, 좌회전 녹색시간 등의 신호조건 변화에 따른 PPLT의 효율성에 대한 분석은 미미한 실정이다. 기존 연구들이 좌회전 처리방안을 위하여 주로 사용한 좌회전교통량, 대향직진 차로수와 교통량, 교통량¹⁾이 동일하더라도 신호시간에 따라 대향직진과 좌회전 소통 상태는 크게 다를 수 있기 때문에 이들 변수만을 고려하여 좌회전 처리 방안을 결정하는 것은 한계가 있다.

분석 시나리오 작성

1. 분석 시나리오 개요

본 연구의 주 목적은 효율적인 좌회전 운영방안인 PPLT 효율성 분석을 위해 좌회전 교통량으로 혼잡이 발생하는 교차로를 대상으로 분석했다. 국내 좌회전 차로가 대부분 1차로인 현실을 감안하여 좌회전은 500대/시로 한정했다. 또한 대향직진 차로수가 증가할수록 비보호좌회전이 어려워지므로 대향직진 차로수는 3차로 이하로 제한했다. 제한속도는 60km/h로 설정하고, 차로폭과 링크 길이는 각각 3.5m, 600m로 설정하였다. 신호교차로에서 비보호좌회전은 대향직진의 영향만 받아 이들 두 접근로만을 평가대상으로 하므로 교차로 형태에는 구애 받지 않는다. 신호주기는 우리나라 신호주기 현황과 일반적으로 적용하는 범위를 고려하여 120초로 적용하고, 대향직진 녹색시간은 주기의 30~40%, 좌회전 녹색시간은 0~30초(0초는 비보호, 10초 단위)로 구분했다. 한편 비보호좌회전은 차로별 대향직진 교통량에 영향을 받기 때문에 다양한 대향 직진교통량 시나리오를 작성했다.

2. 대향직진 교통량 분석 시나리오

평면교차로 설계지침(2004)의 비보호 좌회전 기준은 직진교통량(대/시)과 차로 운영별 좌회전교통량(대/시)의 변화에 따라 결정되며, 그 기준은 Table 4와 같다.

본 연구에서는 상기 교통량 범위를 포함하고 용량을 초과할 때까지의 충분한 대향직진 교통량을 분석 시나리오에 포함시켜 대향직진 교통량은 차로당 100대/시, 200대/시, 400대/시, 600대/시, 800대/시, 1,000대/시, 1,200대/시로 설정하였다. 따라서 작성된 시나리오는 대향직진 차로수 3가지, 대향직진 차로별 교통량 7가지, 대향직진 녹색시간 4가지, 좌회전 녹색신호시간 4가지 등으로 구성되어 총 336개이다.

1) 대향직진교통량×좌회전교통량

Table 4. Criteria of permitted left turn traffic volume

Straight traffic volume (v/h)	Left turn traffic volume (v/h)		
	2lane	3lane	4lane
400	260	300	320
500	210	250	270
600	160	210	230
700	120	180	200
800	90	150	170
900		120	140
1,000		110	120
1,100		90	110
1,200		70	100
1,300		60	80
1,400		50	70
1,500			60
1,600			50
1,700			50
1,800			40

시뮬레이션 결과 분석

1. PPLT 적정성 분석

본 연구는 시뮬레이션을 기반으로 분석하므로 현실을 최대한 반영하도록 시뮬레이션을 구현하기 위해 PPLT 운영시 대향직진 차량과 비보호좌회전 차량 간의 상충 영향을 검토하였다. 비보호좌회전 차량이 대향직진 차량과 충돌하거나 감속 등의 영향을 주는 등의 상황 없이 진행하는지 검토하였다.

첫째, 상충발생 여부를 검토한 결과 대향직진 및 좌회전 차량의 소통 사이에 상충 없이 원활하게 시뮬레이션이 수행됨을 확인했다. 둘째, PPLT로 인한 대향직진 차량에 대한 비보호 좌회전의 영향을 검토한 결과(Table 5) 대부분 동일하며 일부만 미세한 차이를 보이는 것으로 나타났다. 따라서 비보호좌회전 차량이 대향직진 교통량 통행에는 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

Table 5. Delay time and vehicles passed intersection of opposite straight traffic (1lane) (unit: second/vehicle, vehicle/hour)

Opposite straight traffic volume			100		200		400		600		800	
Opposite straight time (s)	Left-turn time (s)	Classification	Delay	Passed vehicle	Delay	Passed vehicle	Delay	Passed vehicle	Delay	Passed vehicle	Delay	Passed vehicle
20	10	PRLT	36.1	92.6	36.8	185.8	46.6	378.2	154.3	499.8	174.6	501.4
		PPLT	36.1	92.6	36.8	185.8	46.6	378.2	154.3	499.8	174.6	501.4
30	10	PRLT	36.1	92.6	36.8	185.8	46.6	378.2	154.1	500.6	174.5	501.4
		PPLT	36.1	92.6	36.8	185.8	46.6	378.2	154.3	499.8	174.5	501.4
40	10	PRLT	36.1	92.6	36.8	185.8	46.6	378.2	154.1	500.6	174.5	501.4
		PPLT	36.1	92.6	36.8	185.8	46.6	378.2	154.1	500.6	174.4	501.6
50	10	PRLT	36.1	92.6	36.8	185.8	46.6	378.2	154.1	500.6	174.5	501.4
		PPLT	36.1	92.6	36.8	185.8	46.6	378.2	154.1	500.6	174.4	501.6
20	20	PRLT	28.7	92.6	31.4	185.6	34.8	376.8	46.4	572.4	112.6	658.2
		PPLT	28.7	92.6	31.4	185.6	34.8	376.8	46.4	572.4	112.6	658.2
30	20	PRLT	28.7	92.6	31.4	185.6	34.8	376.8	46.4	572.4	112.6	658.2
		PPLT	28.7	92.6	31.4	185.6	34.8	376.8	46.4	572.4	112.6	658.2
40	20	PRLT	28.7	92.6	31.4	185.6	34.8	376.8	46.4	572.4	112.6	658.2
		PPLT	28.7	92.6	31.4	185.6	34.8	376.8	46.4	572.4	112.6	658.2

Table 5. Delay time and vehicles passed intersection of opposite straight traffic (1lane) (continued)

Opposite straight traffic volume			100		200		400		600		800	
Opposite straight time (s)	Left-turn time (s)	Classification	Delay	Passed vehicle	Delay	Passed vehicle	Delay	Passed vehicle	Delay	Passed vehicle	Delay	Passed vehicle
50	20	PRLT	28.7	92.6	31.4	185.6	34.8	376.8	46.4	572.4	112.6	658.2
		PPLT	28.7	92.6	31.4	185.6	34.8	376.8	46.4	572.4	112.6	658.2
20	30	PRLT	23.8	92.2	24.2	185.4	27.4	376.0	31.0	570.8	46.4	755.6
		PPLT	23.8	92.2	24.2	185.4	27.4	376.0	31.0	570.8	46.4	755.6
30	30	PRLT	23.8	92.2	24.2	185.4	27.4	376.0	31.0	570.8	46.4	755.6
		PPLT	23.8	92.2	24.2	185.4	27.4	376.0	31.0	570.8	46.4	755.6
40	30	PRLT	23.8	92.2	24.2	185.4	27.4	376.0	31.0	570.8	46.4	755.6
		PPLT	23.8	92.2	24.2	185.4	27.4	376.0	31.0	570.8	46.4	755.6
50	30	PRLT	23.8	92.2	24.2	185.4	27.4	376.0	31.0	570.8	46.4	755.6
		PPLT	23.8	92.2	24.2	185.4	27.4	376.0	31.0	570.8	46.4	755.6

2. 시뮬레이션 결과 분석

분석 조건은 대향직진 교통량은 차로당 100대/시, 200대/시, 400대/시, 600대/시, 800대/시, 1,000대/시, 1,200대/시, 대향직진 차로수 1차로, 2차로, 3차로, 대향직진 녹색시간 20초, 30초, 40초, 50초, 좌회전 녹색신호시간 0초, 10초, 20초, 30초로 설정했다. 분석 결과 좌회전 지체가 서비스수준 F에 해당하는 220초가 초과하는 경우는 현실적으로 적용이 어려우며 시뮬레이션 결과로 제시하는 것이 비현실적임을 고려하여 좌회전 지체 220초 이하까지만 제시하여 결과를 나타냈다.

시뮬레이션 결과에 의하면 모든 시나리오에서 대향직진 교통량이 증가할수록 교차로 평균지체가 증가하고 비보호좌회전의 지체시간이 크게 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 차로당 대향직진 교통량이 동일하더라도 차로수가 증가할수록 좌회전 지체시간이 크게 증가하였다. 이는 차로당 교통량이 동일할 때 대향직진 차로수가 증가할수록 비보호좌회전 할 수 있는 차간간격을 찾기가 어렵기 때문이다. 또한 대향직진 시간이 길어질수록 좌회전 지체시간이 크게 감소하는 것으로 분석되었다. 이는 대향직진 신호시간이 증가할수록 대기차량이 소거된 후의 직진신호시간이 길어지기 때문에 이 시간 동안 긴 차간간격을 이용하여 비보호좌회전을 할 수 있기 때문이다. 분석 시나리오를 좌회전 신호시간 변화에 따라 상세하게 분석하면 다음과 같다.

1) 비보호좌회전 시 분석

Figure 3-5는 차로수별 대향직진 교통량과 대향직진 시간에 따른 비보호좌회전의 평균지체 결과이다. Figure 3은 대향직진 차로수가 1차로일 때 대향직진 교통량, 대향직진시간, 지체의 분석 결과이다. 먼저 대향직진 교통량 100대/시 경우에는 대향직진 시간이 40초 일 때 좌회전 지체시간이 102초/대에서 대향직진 시간이 50초 일 때 42초/대로 감소했으며 대향직진 교통량 200대/시인 경우에도 79초/대로 크게 감소하였다. Figure 4는 대향직진 차로수가 2차로일 때의 분석 결과이다. 1차로 분석 결과와 동일하게 대향직진 교통량이 증가하고 대향직진 시간이 감소할수록 비보호좌회전의 지체시간이 크게 증가했다. 대향직진 시간이 50초, 대향직진 교통량 100대/시에서만 좌회전 지체가 60초/대로 분석되었다. Figure 5는 대향직진 차로수가 3차로의 경우로 분석 경향은 대향직진 차로수 1, 2차로와 동일하게 나타났다. 대향직진 신호시간이 50초, 대향직진 교통량 100대/시에서만 좌회전 지체가 167초/대로 분석되었다.

분석 결과에 의하면 차로별 교통량이 동일한 상태에서 대향직진 차로수가 증가할수록 비보호좌회전으로 통과해야 할 차로수가 증가하게 되고, 대향직진 신호시간이 감소할수록 비보호좌회전이 가능한 시간(대기차량 소거 후 남은 직진신호시간)이 짧아지므로 대향직진 교통량의 임계간격을 이용한 비보호좌회전이 어려워져 지체가 증가하게

된다. 따라서 교차로를 PELT로 운영할 경우 대향직진 차로수와 대향직진 교통량은 물론 대향직진 신호시간을 고려할 경우 PELT 교차로의 운영 효율성을 크게 높일 수 있다.

Figure 3. Delay time of PELT left-turn traffic for 1lane

Figure 4. Delay time of PELT left-turn traffic for 2lane

Figure 5. Delay time of PELT left-turn traffic for 3lane

2) 좌회전 10초 시 분석

Figure 6-8은 차로수별 대향직진 교통량과 대향직진 시간에 따른 PPLT 좌회전의 평균지체 결과이다. 대향직진 차로수가 1차로인 Figure 6은 대향직진 시간이 30초인 경우에는 대향직진 교통량 100대/시에 좌회전 지체가 76초/대로 나타났다. 대향직진 시간이 40초인 경우 대향직진 교통량 100대/시, 200대/시에서 좌회전 지체가 각각 40, 61초/대로 나타났다. 대향직진 시간이 50초인 경우 대향직진 교통량 100대/시, 200대/시, 400대/시에서 좌회전 지체가 각각 29, 38, 217초/대로 나타났다. 대향직진 차로수가 2차로인 Figure 7은 1차로의 경우와 동일하게 대향직진 교통량이 증가할수록 좌회전 평균 지체시간이 크게 증가하고 대향직진 시간이 커질수록 PPLT의 지체시간이 감소한다. 대향직진 시간이 40초, 대향직진 교통량 100대/시에서 좌회전 지체 49초/대, 대향직진 시간이 50초인 경우 대향직진 교통량 100대/시, 200대/시에서 각각 지체시간이 34, 94초/대로 분석되었다. 대향직진 차로수가 3차로인 Figure 8은 대향직진 차로수 1, 2 차로와 동일하게 나타나, 대향직진 시간이 40초, 50초인 경우에 대향직진 교통량 100대/시에서 좌회전 지체가 각각 102초/대, 41초/대로 분석되었다.

PRLT의 경우는 좌회전 신호시간(10초)이 주어진 좌회전 교통량을 처리하기에는 신호시간이 부족하여 좌회전 지체시간이 220초를 크게 초과하는 것으로 분석되어 분석 결과를 제시하지 않았다.

분석 결과에 의하면 비보호좌회전과 마찬가지로 대향직진 차로수가 증가할수록 그리고 대향직진 신호시간이 감소할수록 지체가 증가하게 된다. 따라서 좌회전 신호시간 10초인 교차로를 PPLT로 운영할 경우 대향직진 차로수와 대향직진 교통량이 적고 대향직진 신호시간이 충분히 긴 경우 PPLT 교차로의 운영 효율성을 높일 수 있다.

Figure 6. Delay time of PPLT left-turn traffic for 1lane

Figure 7. Delay time of PPLT left-turn traffic for 2lane

Figure 8. Delay time of PPLT left-turn traffic for 3lane

3) 좌회전 20초 시 분석 결과

Figure 9-11은 차로수별 대향직진 교통량과 대향직진 시간에 따른 PPLT 좌회전의 평균지체 결과이다. Figure 9는 대향직진 차로수가 1차로의 분석 결과를 나타낸다. 좌회전 지체 결과값은 대향직진 시간이 20초, 대향직진 교통량 100대/시 경우 60초/대, 대향직진 시간이 30초이고 대향직진 교통량 100대/시, 200대/시 경우 각각 38, 53초/대로 양호한 수준으로 나타났다. 또한 대향직진 시간이 40초, 대향직진 교통량 100대/시, 200대/시, 400대/시에서 좌회전 지체가 각각 29, 36, 80초/대, 대향직진 시간이 50초, 대향직진 교통량 100대/시, 200대/시, 400대/시, 600대/시에서는 각각 21, 26, 43, 169초/대로 분석되었다.

대향직진 차로수가 2차로인 Figure 10은 대향직진 차로수 1차로와 동일하게 대향직진 교통량이 증가할수록 PPLT에서 평균지체가 증가하여 지체시간이 크게 증가한다. 또한 PPLT에서 대향직진 시간이 커질수록 대향직진 대기차량이 소거된 후 통과시간이 길어지기 때문에 대향직진 교통량의 임계간격이 증가하여 PPLT의 지체시간이 감소한다. 대향직진 시간이 20초, 대향직진 교통량 100대/시 경우 좌회전 지체가 117초/대이고 대향직진 시간이 30초이고 대향직진 교통량 100대/시, 200대/시 경우 좌회전 지체가 각각 45, 108초/대이고 대향직진 시간이 40초, 대향직진 교통량 100대/시, 200대/시에서 좌회전 지체가 각각 33, 49초/대이고 대향직진 시간이 50초, 대향직진 교통량 100대/시, 200대/시, 400대/시에서 좌회전 지체가 각각 24, 34, 132초/대로 분석되었다.

대향직진 차로수가 3차로인 Figure 11은 대향직진 차로수 1,2차로와 동일하게 나타나, 대향직진 시간이 20초, 대향직진 교통량 100대/시 경우 좌회전 지체가 170초/대이고 대향직진 시간이 30초이고 대향직진 교통량 100대/시에서 좌회전 지체가 55초/대이고 대향직진 시간이 40초, 대향직진 교통량 100대/시, 200대/시에서 좌회전 지체가 각각 37, 77초/대이고 대향직진 시간이 50초, 대향직진 교통량 100대/시, 200대/시, 400대/시에서 좌회전 지체가 각각 27, 47, 201초/대로 분석되었다. PRLT는 좌회전 신호시간(20초)을 이용하여 좌회전하므로 주어진 좌회전 교통량을 처리하기에는 신호시간이 부족하고 좌회전 지체시간이 220초를 크게 초과하여 분석 결과를 제시하지 않았다.

분석결과에 의하면 좌회전 신호시간이 20초인 경우 대향직진 교통량이 400대보다 많거나 대향직진 차로수가 3차로인 경우를 제외하면 대체적으로 PPLT 운영효과가 효율적으로 나타났다. 따라서 좌회전 신호시간이 10초인 경우보다 PPLT 운영의 효율적인 범위가 크게 증가하였다.

Figure 9. Delay time of PPLT left-turn traffic for 1lane

Figure 10. Delay time of PPLT left-turn traffic for 2lane

Figure 11. Delay time of PPLT left-turn traffic for 3lane

4) 좌회전 30초 시 분석 결과

Figure 12-17은 차로수별 대향직진 교통량과 대향직진 시간에 따른 PRLT 및 PPLT의 좌회전의 평균지체 결과이다. 대향직진 차로수가 1차로, PRLT인 Figure 12는 대향직진 교통량이 증가하더라도 PRLT는 주어진 충분한 좌회전 신호시간을 이용하여 좌회전하므로 좌회전 지체가 서비스수준 F(지체220초) 이하로 분석되었다. 대향직진 시간 및 대향직진 교통량 변화에도 좌회전 지체는 서비스수준 F(지체220초) 이하로 양호하게 분석되었다.

대향직진 차로수가 1차로이고, PPLT인 Figure 13은 대향직진 교통량이 증가하더라도 PPLT는 주어진 충분한 좌회전 신호시간과 비보호좌회전을 이용하여 좌회전하므로 좌회전 지체가 양호하게 분석되었고, 상대적으로 PRLT 대비 좌회전 지체시간은 감소하고 대향직진 시간 및 대향직진 교통량 변화에도 좌회전 지체는 서비스수준 F(지체220초) 이하로 양호하게 분석되었다. 대향직진 차로수가 2차로, PRLT인 Figure 14는 대향직진 차로수 1차로와 동일하게 좌회전 지체는 양호하게 분석되었고, 대향직진 차로수가 2차로이고, PPLT인 Figure 15도 대향직진 차로수 1차로와 동일하게 좌회전 지체는 서비스수준 F(지체220초) 이하로 양호하게 분석되었다. 또한 대향직진 차로수가 3차로이고, PRLT인 Figure 16은 대향직진 차로수 1,2차로와 동일하게 나타나, 좌회전 지체는 양호하게 분석되었고, 대향직진 차로수가 3차로이고, PPLT인 Figure 17도 대향직진 차로수 1,2차로와 동일하게 좌회전 지체는 서비스수준 F(지체220초) 이하로 양호하게 분석되었다.

분석결과에 의하면 좌회전 신호시간이 충분하여 조건에 상관없이 PRLT에서도 좌회전 지체가 서비스수준 F(지체220초) 이하로 양호하게 분석되었다. PPLT 운영시 대향직진 교통량 증가에 따라 지체시간이 경미하게 증가하는

것으로 분석되어 좌회전 신호시간이 10초, 20초인 경우보다 PPLT 도입 효과가 감소되었다. 따라서 PRLT로 운영되는 교차로에서 혼잡이 발생하는 경우에 PPLT를 도입하는 것이 좌회전 지체시간을 더욱 감소시키고 교차로 전체의 운영 효율성을 높일 것이다.

Figure 12. Delay time of PRLT left-turn traffic for 1lane

Figure 13. Delay time of PPLT left-turn traffic for 1lane

Figure 14. Delay time of PRLT left-turn traffic for 2lane

Figure 15. Delay time of PPLT left-turn traffic for 2lane

Figure 16. Delay time of PRLT left-turn traffic for 3lane

Figure 17. Delay time of PPLT left-turn traffic for 3lane

3. 시뮬레이션 분석 활용방안

현재 PRLT, PELT, PPLT 등 좌회전 신호 운영 최적화 프로그램은 전무한 실정이다. 따라서 본 연구의 시뮬레이션 분석 결과는 국내 좌회전 혼잡 신호교차로의 운영 효율성 향상을 위해 참고될 수 있다. 국내 좌회전 혼잡 신호교차로를 대상으로 차로별 대향직진 및 좌회전 교통량과 신호시간을 조사하여 시뮬레이션 결과와 비교하면 효율적인 좌회전 처리 방안인 PPLT 적용 및 신호시간 운영 계획 수립에 활용할 수 있다. 이에 따라 기존 좌회전 지체가 높은

PRLT 운영 교차로를 대상으로 효율적인 좌회전 운영 방안인 PPLT로 전환시 좌회전 지체시간을 증가시키지 않고 좌회전 신호시간을 감소시킬 수 있다. 또한 감소된 좌회전 시간으로 교차로 전체 지체시간 감소시키는 효과까지 기대할 수 있다.

신호주기 120초, 대향직진 차로수 1차로, 대향직진 교통량 200대/시인 교차로를 대상으로 본 연구 결과 활용 예를 제시하면 다음과 같다.

Table 6, 7은 대향직진 시간과 좌회전 신호시간 변화에 따른 PRLT/PELT/PPLT 운영에 따른 좌회전과 대향직진의 평균지체 결과이다. 좌회전시간 30초와 대향직진 시간 30초 일 때 PRLT를 PPLT로 전환하면 대향직진 지체는 36.8초/대로 영향을 주지 않으면서 좌회전 지체는 69.0초/대에서 34.2초/대 감소한다.

Table 6. Delay time of left-turn traffic (C: 120sec)

(unit: second/vehicle)

Left-turn time (s)		0 (PELT)	10	20	30
Opposite straight time (s)					
20	PRLT	1569.6	1245.8	499.6	73.0
	PPLT		1236.9	227.1	46.5
30	PRLT	842.4	1255.2	500.9	<u>69.0</u>
	PPLT		358.7	52.9	<u>34.8</u>
40	PRLT	406.3	1254.4	498.2	67.1
	PPLT		61.2	<u>35.8</u>	26.3
50	PRLT	79.0	1245.9	492.4	68.4
	PPLT		37.6	25.5	19.1

Table 7. Delay time of opposite straight traffic (C: 120sec)

(unit: second/vehicle)

Left-turn time (s)		0 (PELT)	10	20	30
Opposite straight time (s)					
20	PRLT	48.4	48.4	48.4	48.4
	PPLT	48.4	237.6	48.4	48.4
30	PRLT	36.8	36.8	36.8	<u>36.8</u>
	PPLT	36.8	36.8	36.8	<u>36.8</u>
40	PRLT	31.4	31.4	31.4	31.4
	PPLT	31.4	31.4	<u>31.4</u>	31.4
50	PRLT	24.2	24.2	24.2	24.2
	PPLT	24.2	24.2	24.2	24.2

1) PPLT 운영시 감소한 좌회전 시간을 대향직진 현시에 부여

Table 6, 7과 같이 좌회전시간 30초와 대향직진 시간 30초 일 때 PRLT를 PPLT로 전환하여 좌회전 지체를 유지하면서 줄일수 있는 신호시간 10초를 이용하여 대향직진 현시에 부여하여 좌회전 시간 20초와 대향직진 시간 40초로 전환하면 대향직진 지체는 36.8초/대에서 31.4초대, 좌회전 지체는 69.0초/대에서 35.8초/대로 감소한다.

2) PPLT 운영시 좌회전 지체를 유지하면서 줄일 수 있는 좌회전 시간을 신호주기 단축에 활용

좌회전시간 30초와 대향직진 시간 30초 일 때 PRLT를 PPLT로 전환하여 좌회전 지체를 유지하면서 줄일수 있는 신호시간 10초를 이용하여 주기를 120초에서 110초 감소시키면 Table 8, 9와 같이 대향직진 지체는 36.8초/대에서 35.5초/대, 좌회전 지체는 69.0초/대에서 34.4초/대로 감소한다.

Table 8. Delay time of left-turn traffic (C: 110sec)

(unit: second/vehicle)

Left-turn time (s)		0	10	20	30
Opposite straight time (s)		(PELT)			
20	PRLT	1350.1	1161.4	437.6	49.5
	PPLT		512.6	63.4	34.4
30	PRLT	553.5	1166.2	440.9	49.3
	PPLT		71.0	34.4	26.3
40	PRLT	85.5	1165.9	441.9	50.1
	PPLT		34.6	25.8	18.5
50	PRLT	35.6	1162.9	428.2	49.7
	PPLT		25.7	18.2	11.9

Table 9. Delay time of opposite straight traffic (C: 110sec)

(unit: second/vehicle)

Left-turn time (s)		0	10	20	30
Opposite straight time (s)		(PELT)			
20	PRLT	45.1	45.1	45.1	45.1
	PPLT	45.1	45.1	45.1	45.1
30	PRLT	35.5	35.5	35.5	35.5
	PPLT	35.5	35.5	35.5	35.5
40	PRLT	27.8	27.8	27.8	27.8
	PPLT	27.8	27.8	27.8	27.8
50	PRLT	21.4	21.4	21.4	21.4
	PPLT	21.4	21.4	21.4	21.4

위와 같은 방법으로 PPLT 분석단위별(4지교차로의 경우 4쌍)로 분석한 결과를 이용하여 PPLT로 운영되는 교차로의 신호현시, 신호주기 및 현시별 신호시간 등을 최적화해서 PPLT 운영 효율성을 향상시킬 수 있다.

결론

기존 신호교차로의 좌회전 운영 효율성 향상을 위한 많은 연구가 수행되어 왔다. 하지만 대향직진 차로수와 교통량만을 고려한 분석으로 교차로 효율성을 판단하였다. 신호교차로 효율성 판단 시 신호조건이 중요한 변수임에도 불구하고 이를 고려하여 체계적으로 분석한 연구는 없었다. 이에 본 연구에서는 신호 대기차량 발생과 소멸, 비보호 좌회전의 차간간격 이용 특성이 잘 반영될 수 있도록 대향직진 및 좌회전 신호시간 등 신호조건을 기존 연구에서 적용한 변수에 포함시켜 좌회전 혼잡 교차로를 대상으로 시나리오를 작성하여 시뮬레이션을 통해 분석했다. 시나리오는 대향직진 차로수와 교통량, 신호시간, 좌회전 녹색신호시간 등의 변화에 따라 설정하고 좌회전 혼잡교통량으로 500대/시를 적용하였다.

VISSIM을 이용한 시뮬레이션 분석의 PRLT/PELT/PPLT 적정성 확보를 위해 적정 임계간격을 설정하고 priority rule과 conflict area를 중복 설치하여 비보호좌회전 차량과 대향 직진차량과의 상충이 발생되지 않도록 하였다. 또한 대향 직진 차량에 대한 비보호좌회전 영향을 검토하여 시뮬레이션의 신뢰성이 확보되도록 하였다.

시뮬레이션 결과에 의하면 비보호좌회전시 대향직진 교통량이 증가할수록 평균지체가 증가하여 비보호좌회전의 지체시간이 크게 증가하고 대향직진 시간이 커질수록 대향직진 대기차량이 소거된 후 대향직진 통과시간(대향직진 교통량의 차간간격(GAP)이 증가하여 비보호좌회전이 가능한 시간)이 길어지기 때문에 지체시간이 감소한다. 또한 대향직진 차로수가 증가할수록 대향직진 교통량의 임계간격을 이용한 비보호좌회전은 어려워지고 지체가 증가한다. 좌회전이 혼잡한 좌회전 신호시간이 10, 20초인 경우는 PPLT 적용후 PRLT보다 좌회전 지체시간이 상당히 감소하였다. 반면에 좌회전이 혼잡하지 않은 30초인 경우는 그 효과가 보다 낮은 것으로 분석되었다. 따라서 좌회전 혼잡이 클수록 PPLT 도입 효과가 클 것으로 분석되어 이러한 교차로에 PPLT 도입이 요구된다.

본 논문에서 제시한 시뮬레이션 결과는 PRLT, PELT, PPLT 중에서 최적의 좌회전 처리방안을 산정하는 프로그램이 없는 현실에서 혼잡 신호교차로에 대해 효율적인 좌회전 처리 방식인 PPLT나 신호시간 설계에 활용할 수 있는 방안을 제시하였다. 즉 차로별 대향직진 및 좌회전의 교통량과 신호시간 및 신호주기를 조사하여 시뮬레이션 결과에 적용하면 효율적인 좌회전 처리방식인 PPLT 적용과 신호시간 운영계획 수립에 활용될 수 있다. 보다 효과적인 활용을 위해서는 향후 좌회전 교통량과 대향 직진 신호 대기시간에 영향을 미치는 신호주기에 대한 시나리오 분석이 요구될 것으로 판단된다. 또한 향후 좌회전 교통량이 많은 교차로의 운영 효율성 향상을 위해 좌회전 교통량 시나리오와 좌회전 포켓 길이 변화 등을 고려하여 분석한 연구도 이루어져야 할 것으로 보인다.

ORCID

NAM, Sangbum <http://orcid.org/0000-0002-5092-6333>

KIM, Ju Hyun <http://orcid.org/0000-0002-6642-5656>

SHIN, Eon Kyo <http://orcid.org/0000-0001-9401-0100>

References

- Agency (1987), Guideline for the Use of Protected/Permissive Left-Turn Phasing, ITE Journal.
- Bae W. J. (2003), A Study of Applying A Study of Applying Protected/Permissive Left-Turn Signal(PPLT) at Four-Legged Signalized Intersection, Myongji University, Masteral Dissertation.
- Jang T. Y., Oh D. H. (2015), Drivers' Satisfaction of Protected/Permitted Left Turn(PPLT) Signal Operation, The Institute of Transport Systems(KITS).
- Kim S. Y. (2015), A Study of Applying Protected/Permissive Left-Turn Signal(PPLT) at Four-Legged Signalized Intersection, Aju University, Masteral Dissertation.
- Lee D. H. (2003), A Study on Warrant of Protected/Permissive Left-Turn Signal Phasing, Myongji University, Masteral Dissertation.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2013), Korea Highway Capacity Manual(KHCM), South Korea, 227-228.
- National Police Agency (2011), Traffic Signal Control Manual (2011), South Korea, 16-17.
- Park J. S. (2000), A study on Warrant of Protected & Permissive Left-Turn Signal Systems, Hanyang University, Masteral Dissertation.
- Song C. J. (2010), A Study on Efficient Management of Protected/Permissive Left-Turn Traffic Flow, University of Seoul, Masteral Dissertation.
- Won Y. J. (2010), A Study about Control Plan of the Left Turn Traffic below Four Lanes, Pusan National University, Masteral Dissertation.
- Yun I. S., Park S. M., Heo N. W., Yoon J. E., Kim Y. S., Lee S. S. (2015), Study of Feasibility Analysis for the Protected-Permissive Left-Turn Signal control in Three-Leg Signalized Intersections Using a Microscopic Traffic Simulation Model, Korea Society of Road Engineers.