

# 미시교통시물레이션을 이용한 3지 교차로 보호-비보호 좌회전 도입 타당성 분석에 관한 연구

## Study of Feasibility Analysis for the Protected-Permissive Left-Turn Signal Control in Three-Leg Signalized Intersections Using a Microscopic Traffic Simulation Model

윤 일 수	Yun, Ilsoo	정희원 · 아주대학교 교통시스템공학과 부교수 (E-mail : ilsooyun@ajou.ac.kr)
박 상 민	Park, Sangmin	아주대학교 건설교통공학과 석사과정 (E-mail : stylecap@ajou.ac.kr)
허 낙 원	Heo, Nak Won	도로교통공단 교통과학연구원 연구원 (E-mail : nwheo@koroaod.or.kr)
윤 정 은	Yoon, Jung Eun	정희원 · 한국건설기술연구원 도로연구소 연구원 · 교신저자 (E-mail : yoon22@kict.re.kr)
김 영 선	Kim, Young Sun	아주대학교 교통연구센터 수석연구원 (E-mail : jjinying@ajou.ac.kr)
이 상 수	Lee, Sang Soo	정희원 · 아주대학교 교통시스템공학과 정교수 (E-mail : sslee@ajou.ac.kr)

### ABSTRACT

**PURPOSES :** This study evaluated the feasibility of implementing protected-permissive left-turn (PPLT) signals at three-leg signalized intersections.

**METHODS :** A three-leg signalized intersection with permissive left-turn was first selected. A VISSIM simulation model was constructed using data collected from the test site. The VISSIM network was calibrated by adjusting related parameter values in order to minimize the difference between the simulated and surveyed critical gap. The calibrated network was validated by the number of waiting left-turning vehicles per cycle. Finally, the mobility and safety measures were extracted from simulation runs in which permissive, protected left turns as well as PPLTs were realized based on diverse traffic volume scenarios.

**RESULTS :** The mobility-related measures of effectiveness (MOEs) of the case with PPLT outperformed the other two left-turn treatment scenarios. In particular, the average waiting time per cycle for the left-turn vehicles in the case with PPLT was reduced by 30 s. The safety-related MOEs of the case with PPLT were somewhat higher than those in the case with protected left-turns and much higher than those in the case with permissive left-turns.

**CONCLUSIONS :** Based on the mobility- and safety-related MOEs generated from the VISSIM simulation runs, the use of PPLT seems to be feasible at three-leg signalized intersections where the left-turn is permissive and a pedestrian signal exists at the conflicting approach. However, in order to use the PPLT in earnest, it is necessary to revise the road traffic act, traffic signs, and related manuals.

### Keywords

*Protected-Permissive Left-Turn, Simulation, Surrogate Safety Assessment Model, Critical Gap, Left-Turn Treatment*

Corresponding Author : Yoon, Jung Eun, Researcher  
(Daehwa-Dong) 283, Goyangdqe-ro, Ilsanseo-gu, Goyang-si,  
Gyeonggi-do, 10223, Korea  
Tel : +82.31.910.0682 Fax : +82.31.910.0746  
E-mail : yoon22@kict.re.kr

International Journal of Highway Engineering  
http://www.ksre.or.kr/  
ISSN 1738-7159 (print)  
ISSN 2287-3678 (Online)

Received Jan, 30, 2015 Revised Jul, 23, 2015 Accepted Jul, 23, 2015

# 1. 서론

## 1.1. 연구의 배경 및 목적

보호-비보호 좌회전은 비교적 교통량이 적은 신호교차로에 적용되는 특별한 좌회전 신호 운영 방법으로서 좌회전 신호 등화 시 좌회전하고자 하는 차량이 보호 좌회전을 할 수 있으며, 직진 신호 등화 시에도 대향차량이 없을 경우 비보호 좌회전을 할 수 있는 신호 시스템이다. 보호-비보호 좌회전 신호운영은 국내에서는 일부지역에서 시범사업 등을 통해 실험적으로 운영되고 있을 뿐이지만 미국, 일본 등에서는 Protected-Permissive Left-Turn(PPLT)라는 이름으로 좌회전 교통류를 효율적으로 처리하기 위한 방법으로서 사용되고 있다.

이러한 추세에 발맞추어 우리나라에서도 「교통운영체계 선진화 연구」(National Police Agency, 2010b)에서 국제적으로 통용되는 보호-비보호 좌회전 신호운영에 대한 방안을 제시한 바 있다. 이러한 연구의 일환으로서 국내에서는 군산시가 보호-비보호 좌회전 신호운영 시범사업 도시로 선정되어 3개의 교차로(미장로 사거리, 웨르빌 아파트 사거리, 신 보건소 사거리)에 표지판을 설치하고 보호-비보호 좌회전 신호를 운영한 바 있다. 하지만, 아직까지 관련 연구 및 홍보 부족 등으로 인하여 보호-비보호 좌회전 신호운영이 전국적으로 확산되지 못하고, 일부 지역에서 필요성에 따라 시범적으로 사용되고 있다. 또한 표준화된 설치 및 운영 기준, 그리고 관련 교통안내표지 형태 등이 마련되어 있지 않아 오히려 혼란이 가중되고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 보호-비보호 좌회전 신호운영을 본격적으로 확산시키기에 앞서 보호-비보호 좌회전 신호운영이 상대적으로 용이한 3지 신호교차로에 적용하고 그 효과를 과학적이고 체계적으로 분석함으로써 보호-비보호 좌회전 신호운영의 원활한 도입을 위한 기초 연구를 수행하고자 한다.

본 연구에서는 3지 신호교차로에서 횡단신호에 의해 발생하는 불합리한 신호를 개선하기 위한 방안으로서 보호-비보호 좌회전 신호운영의 도입 타당성을 수원시 사례를 이용하여 분석하고자 한다. 이를 위해 미시교통시물레이션을 이용하여 보호-비보호 좌회전 신호운영 도입의 타당성을 이동성(mobility)과 안전성(safety) 측면에서 종합적으로 도출하고자 한다. 또한 합리적인 보호-비보호 좌회전 신호운영의 도입방안을 제시하고자 한다.

## 1.2. 연구의 범위 및 방법

본 연구의 시간적 범위는 2014년이며, 공간적 범위는

수원시 인계동 효원공원 삼거리 신호교차로이다. 본 연구에서는 현재 비보호 좌회전으로 운영 중인 효원공원 삼거리 교차로에 비보호 좌회전, 보호 좌회전, 보호-비보호 좌회전(PPLT) 신호운영을 각각 적용하였을 때의 효과를 비교·평가하기 위해 교통량, 현시, 임계간격(critical gap) 등을 조사하였다. 조사된 자료를 바탕으로 미시교통시물레이션 S/W인 VISSIM ver.5.3을 이용하여 네트워크를 구축하였다. 구축된 네트워크에서 산출된 임계간격 값과 현장에서 조사된 임계간격 값을 이용하여 본 연구에서 구축된 네트워크가 현실 교통상황을 충분히 반영하고 있음을 확인하였다. 구축된 미시교통시물레이션 모형에 비보호 좌회전, 보호 좌회전, 보호-비보호 좌회전 신호운영을 각각 적용하였고, 이를 바탕으로 교통량 시나리오를 작성하여 연구를 수행하였다. 각각의 시나리오를 적용하여 미시교통시물레이션 S/W인 VISSIM의 Multi-run 기능을 이용하여 시물레이션들을 반복 수행하여 미리 선정된 이동성과 안전성 성과지표(measures of effectiveness; MOE)를 추출하여 서로 비교하였다. 본 연구에서 수행한 연구절차는 Fig. 1과 같다.

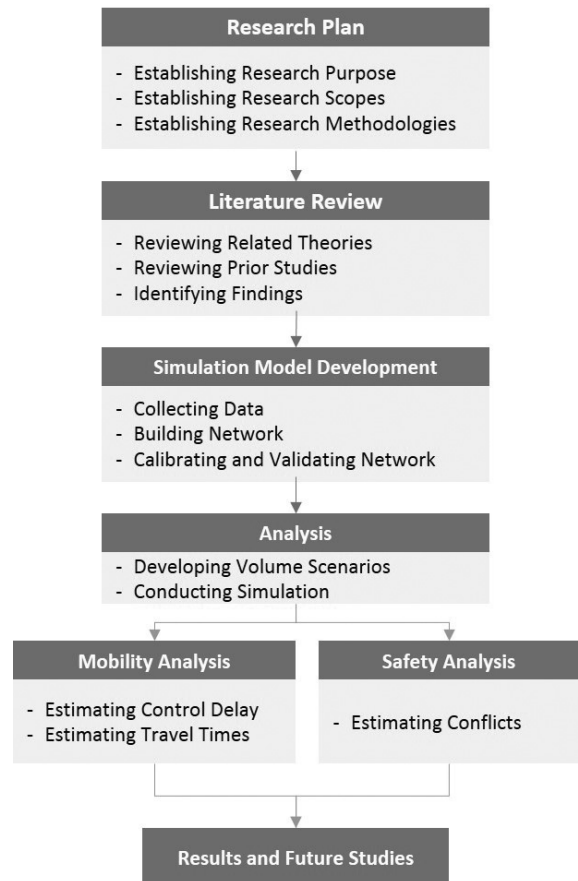


Fig. 1 Research Process

## 2. 이론적 고찰

### 2.1. 보호-비보호 좌회전 신호운영 개요

보호-비보호 좌회전(PPLT) 신호운영은 우리가 실제로 신호교차로에서 사용하고 있는 보호 좌회전(protected left-turn)과 비보호 좌회전(permissive left-turn)을 결합한 형태이다. 즉, 대향직진 교통량과 좌회전 교통량이 모두 적을 때는 비보호 좌회전을 사용할 수 있고, 대향직진과 좌회전 교통량이 모두 많을 때는 보호 좌회전을 사용할 수 있다. 하지만, 대향 직진 교통량과 좌회전 교통량이 보호 좌회전 신호운영을 위한 기준보다는 적고, 비보호 운영을 위한 기준보다는 많을 경우 보호-비보호 좌회전 신호운영이 고려될 수 있다. 보호-비보호 좌회전 신호운영은 미국, 일본 등 해외에서 이미 운영되고 있으며, 운영형태는 다음 Fig. 2와 같다. 참고로, 일본의 경우는 보호-비보호 우회전 신호운영이 이에 해당된다.



(a) Case of U.S.A.



(b) Case of Japan

Fig. 2 Usages in Foreign Countries

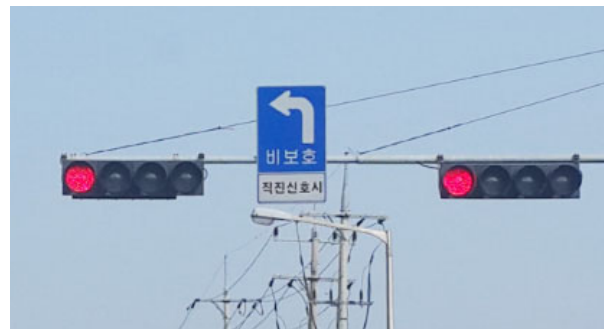
Source : U.S. Federal Highway Administration (<http://www.fhwa.dot.gov>)

하지만, 국내에서는 군산시 등에서 시범사업으로 설치된 적이 있으며, 일부 지자체에서 간헐적으로 사용하거나 사용을 검토하고 있다. 하지만 Fig. 3에서 보인 바와 같이 표준화된 교통안내표지 형태, 신호운영 방식, 설치 기준

등이 마련되어 있지 않고 또한 충분한 홍보 없이 운영되어 오히려 운전자들에게 혼란이 가중되고 있는 실정이다.



(a) Case of Gwacheon



(b) Case of Yongin

Fig. 3 Domestic Usages of PPLT

### 2.2. 관련 이론 및 기준 고찰

「교통신호기 설치 관리 매뉴얼」(National Police Agency, 2005)에서는 비보호 좌회전 기준 표를 제시하고 있으며, 대향직진 교통량과 좌회전 교통량이 차로

Table 1. Volume Warrant for Protected Left-Turn

Complicating through traffic volumes (veh/h)	Left-turn volumes(veh/h)		
	Two-lane approach*	Three-lane approach	Four-lane approach
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

Note: conflicting approach of left-turn traffic

별로 다음 Table 1보다 많을 때는 보호 좌회전, 적을 때는 비보호 좌회전으로 운영할 수 있다고 규정하였다.

최근 개정된 「교통신호기 설치 관리 매뉴얼」(National Police Agency, 2010a)의 제2장 신호기 설치기준의 차량신호기 설치 기준에서는 “비보호 좌회전 설치 기준을 침두 시 대향직진 교통량과 좌회전 교통량의 곱과 좌회전 교통량이 차로별로 다음 표보다 많을 때에는 보호 좌회전, 적을 때에는 비보호 좌회전으로 운영할 수 있다”고 규정하고 있다.

Table 2. Volume Warrant for Protected Left-Turn

No. of conflicting through lane	Product of volumes(veh <sup>2</sup> /h)	Left-turn volume(veh/h)
1	50,000 veh <sup>2</sup> /h	Maximum 90 veh/h
2	100,000 veh <sup>2</sup> /h	
3	150,000 veh <sup>2</sup> /h	

또한 교통사고 건수와 관련하여 좌회전 사고가 연간 4건 이하일 때 비보호 좌회전을 설치할 수 있다고 규정하고 있다. 그리고 비보호 좌회전 설치 시 권장 사항으로서 대향 차로수 3차로(직진) 이하의 도로, 별도의 비보호 좌회전 Bay 설치, 속도에 따라 충분한 시계 확보를 요구하고 있다.

### 2.3. 선행 연구 고찰

Road Traffic Agency(2012)의 「군산시에 도입된 보호-비보호 좌회전의 사전·사후 평가」(도로교통공단, 2012)에서는 비보호로 운영 중인 수송로의 3개 교차로에 보호-비보호 좌회전 신호운영 도입 후 구간통행속도는 평일 0.6~1.8km/h, 일요일 1.2~1.5km/h가 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 기존 비보호 좌회전 신호운영에서 보호-비보호 좌회전 신호운영 운영 시 좌회전 신호부여에 따른 직진차량의 유효녹색시간이 감소했기 때문인 것으로 밝히고 있다. 사업 후 보호-비보호 좌회전 적용구간 평균 통행시간은 평일 4.5~19.5초, 일요일 5.0~8.5초 증가하는 것으로 나타났으며, 사업 후 좌회전 대기길이는 평일 0.4~1.3대/주기, 일요일 0.4~0.5대/주기 감소하는 것으로 제시하고 있다.

Agent(1987)는 「Guideline for the Use of Protected/Permissive Left-Turn Phasing」에서 보호-비보호 좌회전 신호운영은 보호 좌회전 신호운영보다 시간은 절감되나 교통사고 발생 잠재성이 높아지는 관계로 다음과 같은 조건을 보일 때는 적용하지 않을 것

을 제안하고 있다.

- (1) 제한속도가 45mph 이상인 곳
- (2) 현재 보호 좌회전이 운영 중에 있고 제한속도가 35mph 이상인 곳
- (3) 좌회전 이동류가 3개 이상의 차로를 가로지를 경우
- (4) 교차로 기하구조로 인해 독립된 좌회전 신호등이 설치되어야 하는 곳
- (5) 접근로상 2개 차로 이상의 좌회전 전용차로가 제공되는 곳
- (6) 좌회전 교통사고문제가 있는 곳 (좌회전 사고건수가 연간 4건 이상 또는 2개월간 6건 이상)
- (7) 시거가 아래의 표보다 짧은 곳<sup>1)</sup>

Table 3. Criteria for Sight Distance by Speeds

Speeds(mph)	Sight distances(feet)
25	160
30	220
35	280
40	350
45	440
50	530
55	630

Bae(2002)는 「신호교차로에서 P/P(Protected/Permissive) 현시적용에 관한 연구」에서 좌회전 교통류가 비보호로 안전하게 교차로를 통과할 수 있는 차량대수를 제외하고 분석을 실시한 결과 교통류뿐 아니라 교차로 전체의 서비스 수준이 향상되었으며 완전감응식이나 교통량-밀도 신호제어 방식에서 더욱 큰 효과를 기대할 수 있다고 말하고 있다.

Song(2010)은 「효율적인 보호/비보호 좌회전 교통류 처리방안에 관한 연구」에서 정주기식, 교통 감응식, 그리고 교통량-밀도 신호제어 등 3가지 형태로 보호-비보호 좌회전 신호운영의 효과를 분석하였다. 분석 결과, 모든 신호제어방식에서 평균 제어지체가 감소하였으며, 특히 교통 감응식, 교통량-밀도 신호제어에서 더욱 큰 효과를 기대할 수 있다고 하였다. 그리고 안전성의 문제는 신호현시의 순서와 비보호 표시 형태를 통해 해결할 수 있으며, 운전자를 대상으로 충분한 교육과 홍보를 통해 해결할 수 있을 것이라고 주장하였다. 또한 좌회전 교통류 처리 기준 표를 Table 4와 같이 제시하였다.

1) 주: 속도는 85% 속도를 사용, 거리는 정지거리로 인지반응시간 1.5초, 노면마찰계수 0.2로 가정

Table 4. Volume Warrants for Permissive Left-turn and PPLT

Conflicting through traffic volume (veh/h)	Left-turn volumes (veh/h)					
	1 Conflicting through lane		2 Conflicting through lane		3 Conflicting through lane	
	Permissive left-turn	PPLT	Permissive left-turn	PPLT	Permissive left-turn	PPLT
50	240	920	220	880	180	740
100	240	920	220	880	180	720
200	220	880	200	860	160	700
300	200	820	180	780	140	680
400	180	640	160	620	120	540
500	160	520	160	520	120	500
600	140	440	120	420	100	360
700	140	400	120	400	100	320
800	120	360	100	340	80	300
900	120	340	100	320	80	280
1,000	100	280	80	260	60	240
1,100	80	280	60	260	40	220
1,200	80	260	60	220	40	200
1,300	60	220	40	200	40	160
1,400	60	220	40	200	40	140
1,500	40	200	40	180	40	140
1,600	20	200	20	180	20	140
1,700	20	180	20	160	20	120
1,800	20	180	20	160	20	120
1,900	20	160	20	140	20	100
2,000	20	160	20	140	20	100
2,100	0	140	0	120	0	80
2,200	0	120	0	100	0	60

## 2.4. 기존 연구와의 차이점

기존 연구들에서는 보호-비보호 좌회전 신호운영의 이동성에 초점을 맞추어 분석을 수행하였으나, 새로운 신호운영 방식을 도입하기 위해서는 안전성 평가가 함께 수행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 안전성 평가를 수행하였으며 안전성 평가는 FHWA에서 만들어진 SSAM(Surrogate Safety Assessment Model)을 이용하여 상충 횡수를 측정하였다. 상충 횡수의 측정은 VISSIM에서 추출된 차량경로데이터를 추출하여 대리 안전 척도를 분석할 수 있다.

## 3. 미시교통시뮬레이션 모형 구축

### 3.1. 분석대상교차로 선정 및 교통 현황

본 연구의 보호-비보호 좌회전 신호운영 도입에 따른 타당성 평가 대상 교차로로서 수원시 인계동에 위치한 효

원공원 삼거리 신호교차로를 선택하였다. 현재 효원공원 삼거리 신호교차로는 3지 형태의 교차로이다. 또한 주 분석 접근로는 서향 접근로(westbound approach)이며, 특히 이 접근로의 좌회전이 주 분석 대상이다. 현재 서향 접근로 좌회전은 비보호로 운영 중이며 양방 직진 신호시간동안 좌회전 차량이 적당한 간격(gap)을 이용하여 비보호 좌회전을 하고 있다. 하지만 동향 접근로(eastbound approach)상의 횡단보도 신호가 등화된 시간 동안은 다른 모든 현시가 적색으로 등화되기 때문에 통행권을 갖는 현시가 없다. 즉, 동향 접근로 상의 횡단보도 신호가 켜지는 동안 서향 접근로 상의 좌회전 차량이 아무런 문제없이 좌회전할 수 있음에도 불구하고 비보호 좌회전으로 운영되다 보니 신호시간을 낭비하고 있다. 또한 이러한 낭비되는 시간동안 차량들이 불법으로 좌회전하는 경우가 빈번하게 발생하여 무고한 운전자들을 범법자로 만들고 있는 실정이다. 이러한 3지 교차로의 불합리한 신호운영을 PPLT 도입을 통해 개선하고자 본 연구에서는 효원공원 삼거리 교차로를 선정하였다. 다음 그림은 대상 교차로의 기하구조와 교통량을 나타낸 것이다.

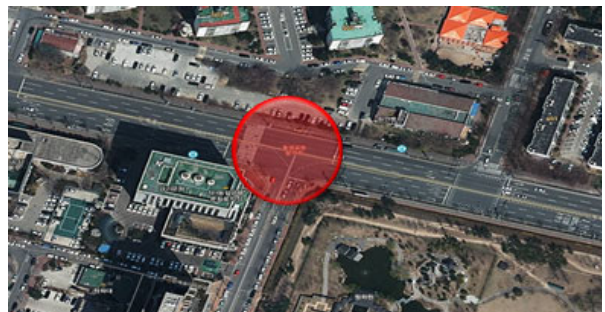


Fig. 4 Test Site

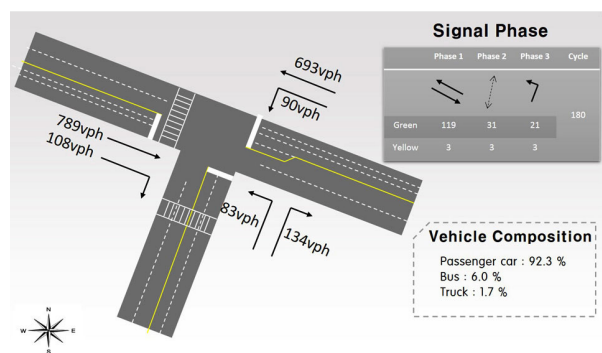


Fig. 5 Traffic Condition and Phasing Sequence of Test Site

### 3.2. 자료 수집

자료 수집은 미시교통시뮬레이션 프로그램인 VISSIM의 입력 값들을 구하기 위해 수행되었다. 우선

VISSIM 네트워크 구축 시 필요한 기하구조 자료, 교통량 자료, 신호운영 자료를 수집하였다. 기하구조 자료는 인터넷 포털 사이트인 Daum(<http://www.daum.net>)의 위성지도를 확인한 후 현장조사를 통해 변경여부 및 세부사항을 확인하였다. 교통량자료의 경우 2014년 4월 18일(금) 12시 00분부터 13시 00분까지 1시간 동안 비디오카메라를 이용하여 촬영한 후 비디오 판독을 통해 교통량을 측정하였다. 신호운영 자료는 수원시 교통정보센터의 협조를 받아 현재 사용중인 신호운영 Database를 제공받았다. 그 다음 구축된 미시교통시뮬레이션 모형의 유효성을 검증하기 위해 교통량 조사 시 촬영된 교차로전체 모습을 분석하여 좌회전 차량의 임계간격 및 주기당 좌회전 대기차량대수를 추출하였다.

### 3.3. 네트워크 구축 및 정산

미시교통시뮬레이션 S/W중 하나인 VISSIM은 국내에서 많이 사용되고 있고 보호, 비보호, PPLT 등 다양한 좌회전 신호운영이 가능하고 교통안전성 평가를 위한 자료를 생성할 수 있는 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 VISSIM ver. 5.3을 이용하여 네트워크를 구축하였다. 네트워크 구축 시 위성사진을 배경화면으로 하여 실제 도로모습과 동일하도록 구축하였다. 현장 조사를 통해 얻은 15분 간격 방향별 교통량과 현재 운영 중인 교통신호운영자료(주기 및 현시자료)를 입력하였다. 또한 네트워크를 대상 교차로와 유사한 상황으로 만들기 위해 Reduced Area, Priority Rule, Desired Speed 등을 조정하였다. 특히 Priority Rule에서 필요한 Min Gap 및 Min Headway 값은 현장조사를 통해 얻은 값을 입력하여 비보호 좌회전을 구축하여 대상 교차로의 교통상황을 잘 반영할 수 있도록 정산(Calibration)하였다(PTV, 2011). 미시교통시뮬레이션에서 구축된 네트워크는 Fig. 6과 같다.

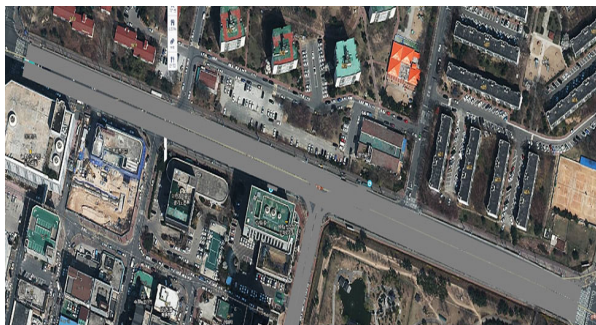


Fig. 6 VISSIM Network

미시교통시뮬레이션 S/W를 이용해 구축한 네트워크

가 대상 교차로의 실제 교통상황을 잘 반영하는지 확인하기 위해 현장에서 얻은 임계간격과 VISSIM에서 얻은 임계간격을 비교하였다. 임계간격이란 연속하는 앞뒤 차량사이에 또는 다른 차량이 합류하거나 교차하는데 필요한 차간간격을 말한다. 비보호 좌회전의 특성을 반영하는 효과적도로서 임계간격을 선정하였고, 현장에서 얻은 임계간격과 시뮬레이션을 통해 얻은 임계간격의 비교를 통해 구축된 네트워크가 현장상황을 잘 반영하는지 확인하였다. 다음 그림은 미시교통시뮬레이션의 네트워크와 현장에서 얻은 임계간격을 비교하여 나타낸 그림이다.

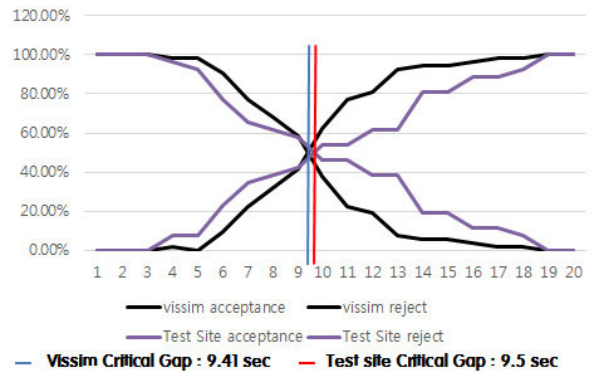


Fig. 7 Comparison of Critical Gaps Obtained from VISSIM Model and Test Site

또한 임계간격들의 관계가 유의한지 알아보기 위해 t-검정을 수행하였으며, 유의확률 0.2793이 유의수준 0.05보다 크므로 미시교통시뮬레이션과 현장에서 얻은 간격의 평균값이 통계적으로 같다는 결론을 얻어 구축된 네트워크가 유의하다고 판단되었다. 하지만 간격 값만 유의하고 다른 변수들이 유의하지 않을 수 있기 때문에 다른 변수를 통해 유효성 검증을 수행하였다. 유효성 검증을 위한 변수로서 주기당 좌회전 차량 대수를 사용하였으며, 현장 값과 시뮬레이션을 통해 추출된 값을 이용하여 t-검정을 수행하였다. 그 결과 유의확률이 0.0864로 0.05보다 크게 나타나 미시교통시뮬레이션을 통해 구축된 네트워크가 현장을 반영한다고 볼 수 있다. 또한 시뮬레이션의 애니메이션을 통해 차량들의 움직임이 이상 없음을 확인하였다.

## 4. 시뮬레이션 수행 및 민감도 분석 결과

### 4.1. 교통량 시나리오 구축

교통량이 증가할 때마다 이동성 지표와 안전성 지표

가 어떻게 변화하는지 알아보기 위해 전체 교통량의 -20%~+50%까지 10%단위로 교통량 시나리오를 구축하였다. 비보호 좌회전, 보호 좌회전, 보호-비보호 좌회전 신호운영에 동일한 교통량 시나리오를 사용하였다. 교통량 시나리오는 Table 5와 같다.

Table 5. Volume Scenarios (veh/hour)

Types	EB Volume			WB Volume			NB Volume			
	Total	Through	Right	Total	Through	Left	Total	Left	Right	
Volume from test site	897	789	108	783	693	90	217	83	134	
Scenario 1	-10%	807	710	97	705	624	81	195	75	121
Scenario 2	-20%	718	631	86	626	554	72	174	66	107
Scenario 3	+10%	987	868	119	861	762	99	239	91	147
Scenario 4	+20%	1076	947	130	940	832	108	260	100	161
Scenario 5	+30%	1166	1026	140	1018	901	117	282	108	174
Scenario 6	+40%	1256	1105	151	1096	970	126	304	116	188
Scenario 7	+50%	1346	1184	162	1175	1040	135	326	125	201

#### 4.2. 시나리오별 시뮬레이션 수행

전체 교통량 변화에 따른 이동성, 안전성 지표의 변화를 측정하기 위해 비보호 좌회전, 보호 좌회전, 보호-비보호 좌회전 신호운영 네트워크로 구분하여 동일한 교통량 시나리오를 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 미시교통시뮬레이션의 경우 난수(random number)에 따라 산출되는 지표들이 다르게 측정되기 때문에 반복수행(multi-run)을 수행하여야 한다. 각 7개의 시나리오에 대해 비보호 좌회전, 보호 좌회전, 보호-비보호 좌회전 대안별로 5번의 반복수행을 하여 분석의 정확도를 높일 수 있었다. 시나리오별 결과들을 이동성 지표와 안전성 지표로 정리하였다.

#### 4.3. 이동성 분석

VISSIM에서는 다양한 이동성 관련 지표들을 산출할 수 있다. 대표적으로 통과교통량, 통행속도, 통행시간, 지체, 정지 수 등의 네트워크의 성능지표를 다양한 형태로 생성할 수 있다. 본 연구에서는 네트워크 전체 개별 차량당 평균지체시간과 대상 좌회전 차로의 좌회전 통행시간을 이동성 지표의 MOE로서 생성하였다. 개별 차량당 평균지체시간과 좌회전 통행시간의 비교는 Fig. 8, Fig. 9와 같다.

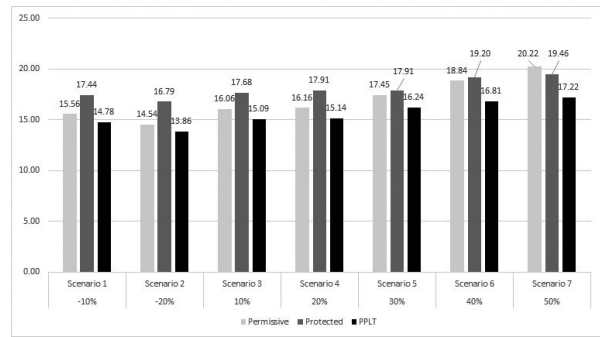


Fig. 8 Average Delay Times per Vehicles by Scenarios (seconds)

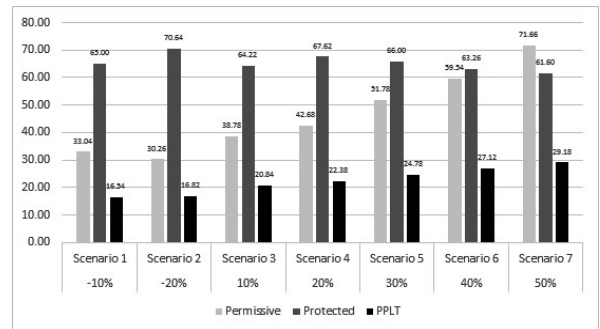


Fig. 9 Travel Times of Left-turn per Vehicle by Scenarios (seconds)

위 그림과 같이 개별 차량당 평균 지체시간은 모든 시나리오에서 보호-비보호 좌회전의 경우가 가장 낮게 나와 이동성에 있어서 우수한 것으로 나왔다. 하지만 시나리오 7(교통량 50% 증가)의 경우 보호 좌회전의 개별 차량당 평균 지체 시간은 19.5초이며, 보호-비보호 좌회전 신호운영의 개별 차량당 평균지체는 17.2초로 2.2초 차이가 난다. 하지만 좌회전 통과시간의 경우 시나리오 7에서 보호 좌회전의 61.6초에 비해 보호-비보호 좌회전 신호운영은 29.2초로 32.4초 차이를 나타낸다. 이는 보호-비보호 좌회전 신호운영이 네트워크 전체에 긍정적인 영향을 가지면서 좌회전 이동류의 소통을 원활하게 하는 효과를 입증하는 결과이다. 이는 보호-비보호 좌회전 신호운영의 경우 좌회전 이동차량이 신호주기 동안 보호 좌회전과 비보호 좌회전을 통해 대기시간을 최소화하여 이동하기 때문으로 볼 수 있다.

#### 4.4. 안전성 분석

본 연구에서 안전성 분석을 위해 미국 FHWA에서 개발한 S/W인 Surrogate Safety Assessment Model(SSAM)을 이용하여 시나리오별 안전도를 분석하였다(Gettman and Head, 2003). SSAM은 상충이론을 기반으로 미시교통시뮬레이션에서 추출되는 개별

차량 경로 데이터파일을 이용하여 상충(conflict)의 빈도를 측정 및 분석할 수 있다(Yun et al., 2011). SSAM은 교통사고 분석과 관련하여 다양한 사고 변수를 고려하여 자동적으로 상충분석을 수행하며, 각종 시나리오 또는 설계 대안에 대해 안전성을 검증하는 도구이다. 또한 개별차량 경로 데이터 파일의 분석을 통해 대리 안전 척도를 측정하며 대표적인 대리 안전 척도로는 Time to Collision(TTC), Post Encroachment(PET), Deceleration Rate(DR) 등이다. TTC란 차량 간의 현재위치, 속도, 경로를 기반으로 하여 충돌(Collision)에 이르기까지 걸리는 시간으로 본 연구에서는 TTC가 1.5 초 이하인 경우를 상충으로 판단하여 분석을 실시하였다. 상충지점을 유형별, TTC 데이터 값의 범위에 따라 네트워크상에 표시가 가능하다. 상충의 유형으로는 직각 충돌형 상충, 추돌형 상충, 차로 변경형 상충이 있다. 각각의 현시별 및 교통량 시나리오별로 총 상충을 측정한 결과는 Fig. 10과 같다.

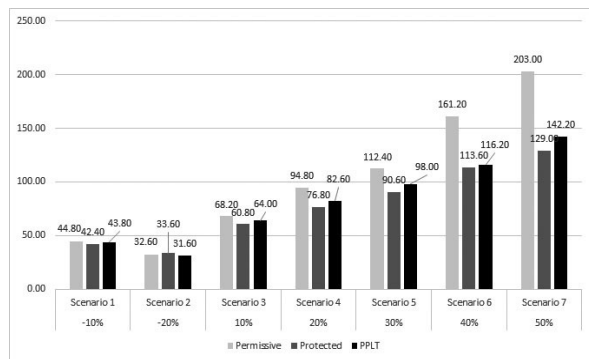


Fig. 10 Total Conflicts by Scenarios (times/h)

상충을 측정하는 결과 보호 좌회전 현시일 때 상충횟수가 가장 낮으며, 비보호 좌회전 신호일 때 상충이 높아지는 것을 볼 수 있다. 전체 교통량 비율이 낮은 시나리오 1과 시나리오 2의 신호운영에 따른 총 상충 횟수는 차이가 눈에 띄지 않으나 교통량 비율이 높아지는 시나리오 4부터는 상충횟수가 비보호 좌회전일 때 급격히 증가하고 있다. 보호-비보호 좌회전 신호운영의 경우 보호 좌회전 신호운영보다 상충횟수가 약간 높으나 비보호 좌회전보다는 상충횟수가 낮은 것으로 측정되었다.

본 연구에서는 보호-비보호 좌회전 신호운영과 보호 좌회전 신호운영의 상충횟수의 차이가 가장 많이 나는 Fig. 7의 시나리오 7에 대하여 통계적으로 차이가 있는지 분석하였다. 시나리오 7의 경우 각각 시뮬레이션을 5번씩 수행하였기 때문에 보호-비보호 좌회전 신호

운영과 보호 좌회전 신호운영의 평균 상충횟수의 차이를 t-검정을 이용하여 분석하기에는 자료수가 부족하다고 판단된다. 즉, 통계분석에 사용되는 샘플 수가 5개이기 때문에 t-검정을 수행하기 위해 필요한 정규성 및 등분산성을 만족시키기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 t-검정 대신 Wilcoxon의 부호 순위 검정을 유의수준 95%에서 수행하였다. Wilcoxon 부호순위 검정은 독립표본의 비모수 검정으로서, 미시교통시뮬레이션의 특성상 Random Seed의 영향으로 시뮬레이션 수행시 확률적으로 교통상황이 조금씩 다르게 반영이 되므로 대응표본으로 보기 어렵기 때문이다. 부호 순위 검정결과 유의확률이 0.043으로서 0.05보다 작기 때문에 대립가설을 채택하였으며, 이는 보호 좌회전 신호운영과 보호-비보호 좌회전 신호운영의 상충횟수가 시나리오 7에서 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 분석되었다.

Table 6. Result of Wilcoxon Signed Rank Test

Types	Protected Left-turn vs. PPLT
Z-value	-2.023
P-value	0.043

#### 4.5. 이동성 및 안전성 분석 결과 종합

미시교통시뮬레이션을 이용해 대상 교차로에 보호-비보호 좌회전을 적용하고 교통량 시나리오에 대해 이동성과 안전성을 평가한 결과 보호-비보호 좌회전 신호운영의 적용은 시나리오 6(대향 직진 교통량 1256vph, 좌회전 교통량 126vph) 이후인 시나리오 7(대향 직진 교통량 1346vph, 좌회전 교통량 135vph)에서 안전성이 조금씩 떨어지나 차량당 평균 지체시간은 차이가 나지 않는 것으로 나타났다. 이는 대향교통량이 많아지면서 비보호 좌회전을 하려는 차량들이 적당한 간격을 찾지 못한 것으로 분석되었다. 하지만 앞서 본 이동성 지표인 좌회전 통행시간 및 차량당 평균지체시간에서 시나리오 6까지는 안전성에도 영향을 주지 않으며 보호-비보호 좌회전 신호운영이 이동성 측면에서도 효율적인 것으로 분석되었다. 또한 송창진(2010)의 「효율적인 보호/비보호 좌회전 교통류 처리방안에 관한 연구」에서 제시한 Table 4의 좌회전 교통류처리 기준 표에 의해서도 시나리오 6의 교통량은 PPLT를 도입하는 것이 타당하다고 나타났다. 시나리오 7의 경우도 좌회전 교통량이 135vph로 비보호 좌회전보다는 PPLT도입이 타당한 것으로 나타났다.



## 5. 결론 및 향후 연구과제

### 5.1. 결론

현재 미국, 일본 등에서 이미 사용하며, 「교통운영체계 선진화방안 연구」(National Police Agency, 2010b)에서도 제시하고 있는 보호-비보호 좌회전(PPLT) 신호운영을 특정 형태의 3지 교차로에 도입했을 때의 이동성 및 안전성에 관한 타당성 분석을 수행하였다. 보호-비보호 좌회전 신호운영은 선행 연구에서 안전성에 관한 문제를 지적하였지만 계량화하지 못한 한계를 가지고 있었다. 본 연구에서는 SSAM을 이용해 상충횟수를 측정하여 안전성에 관한 평가를 수행하였다.

비보호 좌회전 차로가 있는 접근로 반대편에 횡단보도가 존재하는 3지 교차로인 효원공원 삼거리를 분석대상으로 하여 기하구조와 교통량 등을 파악하고 미시교통시뮬레이션 S/W인 VISSIM에 구현하였다. 분석의 정확도를 높이기 위해 구현한 VISSIM 네트워크를 검증하여 네트워크의 유효성을 확인하였다.

구축한 미시교통시뮬레이션 모형을 기반으로 비보호 좌회전, 보호 좌회전, 보호-비보호 좌회전 신호운영 방안 7개의 교통량 시나리오를 작성하여 각각의 이동성 지표와 안전성 지표를 추출하여 모든 교통량 시나리오에서 비보호 좌회전보다 보호-비보호 좌회전 신호운영 도입 시 교차로의 효율이 높아지며, 안전성에도 영향을 주지 않는다는 결론을 얻었다.

### 5.2. 연구의 한계 및 향후 연구과제

본 연구에서 수행하지 못한 4지교차로를 비롯한 다양한 도로조건, 교통상황, 신호운영방식을 종합적으로 검토하여 보호-비보호 좌회전 신호운영 도입의 타당성 검증에 이동성 및 안전성에 대해 수행할 필요를 가진다. 특히 보호 좌회전, 비보호 좌회전, 보호-비보호 좌회전 신호 운영 시 각각의 신호를 최적화하여 대안에 반영할 필요를 가진다. 또한 비보호 좌회전을 하기 위한 운전자의 인지반응시간 등 미시교통시뮬레이션 프로그램으로 측정이 어려운 변수들을 확인하기 위해 Virtual Reality(VR) 프로그램과 운전시뮬레이션을 활용하여 검증할 필요성을 가진다.

보호-비보호 좌회전 현시를 도입하기 위해서는 첫 번째, 법 개정을 통한 보호-비보호 좌회전 현시의 도입 여건 마련이 필요하다. 두 번째, KHCM 등 관련 매뉴얼을 확보하여 설계기준 및 현시적용 기준을 마련해야 한다. 세 번째, 보호-비보호 좌회전 현시에 대한 운전자 교육과 홍보를 통해 운전자 혼란을 감소시켜야 할 것으로 판

단된다.

### 5.3. 정책적 제언

본 연구의 수원시 인계동에 위치한 3지 교차로인 효원공원 삼거리와 같이 기하구조 특성을 고려하지 못하고 신호운영이 비효율적으로 운영되는 교차로에서는 보호-비보호 좌회전 신호운영을 도입 시 교차로 효율이 높아지는 것을 알 수 있었으며, 안전성에도 큰 영향을 미치지 않는다는 결론을 얻을 수 있었다. 하지만 현재 보호-비보호에 관한 표준화 된 교통안내표지 형태, 신호운영 방식, 설치 기준 등이 마련되어 있지 않고 또한 충분한 홍보없이 운영되어 오히려 운전자들에게 혼란이 가중되고 있는 실정이다. 도로교통법 시행규칙 별표 2에서는 ‘녹색등화 시 비보호 좌회전 표지 또는 비보호 좌회전 표시가 있는 곳에서는 좌회전 할 수 있다.’ 라고 명시하고 있으나, 보호-비보호 좌회전 신호의 설치를 위한 법규 개정이 필요하며, 교통신호기 설치관리 매뉴얼에 보호-비보호 좌회전 신호 설치 시 권장사항을 별도로 추가시킬 필요가 있다. 또한 기존 비보호 좌회전 표지보다 이해하기 쉽도록 본 연구에서는 표준화 된 교통 안내표지형태를 제안하고자 한다. 다음 그림은 보호-비보호 좌회전을 나타내는 교통안내표지의 제안이며, 기존 비보호 좌회전 표지에 직진 시 비보호로 표시하여 보호-비보호 좌회전 신호교차로임을 나타내는 것을 제안한다. 이는 운전자로 하여금 보호-비보호 좌회전 신호교차로임을 인식하게 하고 혼란을 방지할 수 있을 것으로 판단된다.



Fig. 11 Traffic Sign for Protected-Permissive Left-Turn

### 감사의 글

본 연구는 2014학년도 아주대학교 일반연구비 지원과 2010년도 교육과학기술부의 재원(NRF-2010-0028693) 및 2013년도 미래창조과학부의 재원(2013K1A1A2A02078326)

으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 글로벌연구실사업 연구임.

## REFERENCE

- Agent, K. R., 1987. Guideline for the Use of Protected/Permissive Left-Turn Phasing, ITE Journal, pp. 37-42.
- Bae, Y. J., 2003. A Study of Applying Protected/Permissive Left-turn Signal at Signalized Intersection, Master Thesis, Myongji University.
- Gettman, D. and Head, L., 2003. Surrogate Safety Measures From Traffic Simulation Models, Final Report, FHWA.
- National Police Agency, 2005. Manual for Traffic Signal System Installation and Management.
- National Police Agency, 2010a. Manual for Traffic Signal System Installation and Management.
- National Police Agency, 2010b. Study on the Advancement of Traffic Control and Operation Systems.
- PTV, 2011. VISSIM User Manual.
- Song, C., 2010. A Study on Efficient Management of Protected/Permissive Left-Turn Traffic Flow, Master Thesis, National University of Seoul.
- The Road Traffic Authority, 2012. Before-and-After Study for Protected/Permissive Left-Turn in the City of Gunsan.
- Yun, I., Lee, C., Choi, J., Ko, S., 2011. Safety Assessment of Signalized Intersection Using SSAM : A Case of Actuated Signal Control, The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems, Vol. 10, No. 6, pp. 4-10.