

## 신호교차로의 자전거 좌회전 운영방안 평가에 관한 연구

이충민<sup>1</sup> · 이상수<sup>1\*</sup> · 조한선<sup>2</sup> · 남두희<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 아주대학교 교통시스템공학과, <sup>2</sup> 한국교통연구원 교통안전도로본부, <sup>3</sup> 한성대학교 정보시스템공학과

### Assessment of Bicycle Left-turn Traffic Control Strategies at Signalized Intersections

LEE, Chung Min<sup>1</sup> · LEE, Sang Soo<sup>1\*</sup> · CHO, Hanseon<sup>2</sup> · NAM, Doohee<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Transportation System Engineering, Ajou University, Gyeonggi 443-749, Korea

<sup>2</sup> Department of Transport Safety & Highway, The Korea Transport Institute, Gyeonggi 411-701, Korea

<sup>3</sup> Department of Information Engineering, Hansung University, Seoul 136-792, Korea

#### Abstract

In this study, three signal control strategies such as Bike box, Hook-turn, and 6-phase were assessed for various traffic conditions at signalized intersections incorporating bicycle left-turn traffic. Results showed that the size of a waiting zone mainly affected the performance of signal control in both Bike box and Hook-turn. Both Bike box and Hook-turn yielded an identical vehicle delay, but Bike box produced less bicycle delay than Hook-turn by 2.5~29.9 sec/veh for undersaturated traffic conditions. For saturated traffic condition, Bike box produced less vehicle delay than Hook-turn and 6-phase strategies, but bicycle delay was found to increase at the 700 vph of bicycle traffic compared to 6-phase. Bicycle delay was greatly increased under Hook-turn and Bike box strategies when bicycle traffic was greater than 300 vph and 500 vph, respectively. It was also shown that bicycle delay could be significantly reduced by providing appropriate size of queueing space. In addition, Bike box was likely to yield less vehicle and bicycle delay than Hook-turn for traffic volume patterns investigated in this study.

본 연구는 자전거 좌회전 교통류를 수용한 신호교차로 운영방안으로 Bike Box, Hook-turn, 그리고 6현시의 3가지 방식을 다양한 교통상황 및 조건하에서 평가하였다. 분석결과, Bike Box 방식과 Hook-turn 방식 모두 대기공간의 크기가 신호운영 결과에 큰 영향을 미치는 것으로 파악되었다. 비포화 및 근포화 교통상황에서 Hook-turn과 Bike Box 방식은 자동차지체 차이는 거의 없으나 자전거 지체는 Hook-turn이 Bike Box 방식에 비해 2.5-29.9초/대 높게 나타났다. 6현시 방식은 Bike Box 방식에 비해 자동차와 자전거 지체가 모두 매우 크게 나타났다. 포화 교통상황에서는 Bike Box 방식이 Hook-turn과 6현시 운영에 비해 자동차지체는 작게 나타났으나, 자전거지체는 자전거 교통량이 700대/시에서 6현시 방식보다 오히려 증가하였다. 자전거지체는 Hook-turn 방식은 자전거 교통량이 300대/시 이후, Bike Box 방식은 500대/시 이후부터 지체가 급격하게 증가하였다. 그리고 Bike Box와 Hook-turn 방식 모두 대기공간이 증가시 자전거 지체가 매우 큰 폭으로 감소하였다. 또한 동서 및 북서 교통량 패턴 모두 Bike Box가 Hook-turn 방식보다 자동차와 자전거 지체가 작게 나타났다.

#### Keywords

bicycle traffic, bike box, bike signal, hook-turn, left-turn, simulation, signalized intersection  
자전거 교통량, 자전거박스, 자전거신호, 훅턴, 좌회전, 시뮬레이션, 신호교차로

\* : Corresponding Author

sslee@ajou.ac.kr, Phone: +82-31-219-2539, Fax: +82-31-215-7604

Received 1 April 2014, Accepted 6 November 2014

## 서론

### 1. 연구의 배경 및 목적

우리나라에서 행정안전부와 국토해양부의 주도아래 중앙정부와 지방정부에서는 각종 자전거 정책을 펴고 있다. 행정안전부는 시민의 출퇴근, 쇼핑 등 일상생활에서 편리하게 자전거를 이용할 수 있는 환경을 조성하고, 자전거길로 전국 주요도시를 연결하는 국가자전거도로 사업을 추진하고 있다. 「국가자전거도로 네트워크 구축사업」의 사업에 따르면 2010년부터 2019년까지 10년간 총연장 3,120km의 자전거도로를 계획하고 있다.

한국교통연구원 국가교통DB센터의 자료에 따르면 지난 10년간 서울, 부산, 대구, 인천, 광주, 대전, 울산의 7대 도시 자전거 수단 분담률은 0.8%에서 2.5%로 약 3배가량 증가하였다. 서울시의 경우 승용차 이용을 억제하고 보행자와 자전거 중심의 교통환경으로 개편하기 위해 「도심부 교통마스터플랜」을 수립하였으며 2012년까지 자전거 수단 분담률을 12.0%까지 증가시킬 계획이다. 이와 같은 시설 및 정책적 지원에 힘입어 향후 자전거 이용자가 증가할 것으로 예상된다.

도시부에서 자전거 이용자가 증가할 경우 교차로에서 차량과 자전거, 자전거와 보행자 등의 상충이 증가한다. 이에 교차로에서 자전거와 차량의 상충을 줄이고 자전거 이용자의 안전을 확보하기 위하여 자전거 이동류를 반영한 신호교차로 운영방안의 필요성이 대두된다. 창원시에서는 2011년 3월 국내 최초로 교통운영체계 선진화방안 중의 하나의 과제로서 자전거전용신호등을 설치하여 시범운영하였다(NPA, 2010). 자전거전용신호등이 설치된 창원시 종합운동장사거리는 시간당 100대 이상의 자전거 통행이 발생하는 횡단보도가 없는 교차로이다. 자전거전용신호는 기존 자동차의 방향과 동일한 방향으로만 통행할 수 있게 하였고 역주행은 금지하였다. 자전거 녹색신호는 자동차 녹색신호보다 1초 늦게 표시되며, 황색신호는 6초로 차량보다 3초 먼저 표시되도록 운영하였다. 그러나 이러한 운영기법이나 설계의 적정성에 대한 이론적인 근거가 확보되지 못하여 유의한 결과를 도출하는데 한계가 있다. 이는 자전거 교통류를 수용한 신호 운영 관련연구가 거의 없고, 교통상황이나 운영방식, 또는 자전거 통행방식에 대한 명확한 기준이나 연구가 없기 때문이다.

현재 도로교통법 제 25조에서는 “자전거의 운전자는 교차로에서 좌회전하려는 경우에는 미리 도로의 우측 가장자리로 붙어 서행하면서 교차로의 가장자리 부분을 이용하여 좌회전하여야 한다”고 명시하고 있다. 이는 자전거의 통행보다 자동차의 통행을 우선으로 생각하고 있는 것을 의미하고, 이러한 규정은 향후 자전거 이용 활성화를 전제로 할 때 수정이 필요하다. 그리고 이러한 자전거 좌회전 교통류의 교차로 통행방법이 운영 효율성 측면에서 적합한지에 대한 평가가 필요하다.

본 연구에서는 이와 같은 필요성을 바탕으로 자전거 좌회전 교통류를 수용하여 신호교차로를 효율적으로 운영하는 방안에 대한 평가를 다양한 운영조건을 변수로 하여 실시하고자 한다. 평가를 진행하는 과정에서 자전거는 차량과 비교하여 약자로 구분하여 자전거에 통행 우선권을 주는 방식을 기준으로 교차로 운영을 설계하였다. 자전거 좌회전을 위하여 검토한 대안은 자전거가 먼저 교차로를 통과할 수 있는 구조인 Bike Box 방식과, 자전거가 자동차보다 먼저 교차로를 통과할 수 있도록 대기공간을 자동차 앞에 두는 Hook-turn 방식, 그리고 자전거 좌회전 전용현시를 주는 6현시 방식 등 3가지이다. 이와 같은 방안에 대하여 다양한 교통상황, 대기공간의 크기와 교통패턴을 적용하여 평가하고, 각 방식별 효과를 비교 및 분석하고 이를 정리하여 결론을 제시하였다.

## 이론적 고찰

### 1. 자전거도로 설치기준

자전거도로의 설치 목적은 자동차, 자전거, 보행자의 복잡한 혼합교통을 배제하여 자전거 및 보행자가 안전하게 통행할 수 있도록 하는 것과, 이에 따라 교통안전에 기여하도록 하는 것이다. 도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙에서는 자전거도로는 다음과 같이 세 가지로 구분된다(MLTMA, 2010).

첫째, 자전거 전용도로로 자전거만이 통행할 수 있도록 분리대·연석, 기타 이와 유사한 시설물에 의하여 차도 및 보도와 구분하여 설치된 자전거도로를 말한다. 둘째, 자전거·보행자 겸용도로로 자전거 외에 보행자도 통행할 수 있도록 분리대, 연석, 기타 이와 유사한 시설물에 의하여 차도와 구분하거나 별도로 설치된 자전거도로를 말한다. 셋째, 자전거·자동차 겸용도로로 자전거 외에 자동차

도 일시 통행할 수 있도록 차도에 노면표시로 구분하여 설치된 자전거 도로를 말한다.

그리고 교차로에서 자전거의 통행은 우리나라는 일본의 경우와 유사하게 교차로의 가장자리를 따라 서행하도록 명시하고 있지만 유럽에서는 자전거를 위한 정지선이 차량의 정지선과 구별되어 있어 교차로에서 자전거가 차량보다 앞서 대기 할 수 있도록 하여 자전거의 통행 안전성에 보다 많은 배려를 하고 있다.

## 2. 기존 연구사례 고찰

Mok(2013)은 4지 신호교차로에서 효율적인 자전거 교통류 처리방안에 대한 연구를 수행하였다. 국내·외에서 주로 사용되는 4가지 통행방식에 대하여 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 분석결과 간접좌회전은 차량과 좌회전을 분리하여 이동시켜 자전거와 차량의 교통량에 따른 영향보다는 자전거의 이동방법에 따른 지체 증가가 큰 것으로 분석되었다. 직접좌회전은 간접좌회전에 비해 정지체제시간이나 정지횟수가 낮게 분석되었다.

Choi(2009)는 자전거의 이동성과 연속성을 높일 수 있는 교차로 신호운영방안을 평가하였다. 자전거 신호운영 방안은 Hook-turn 방식, 자전거 전용현시 추가, 그리고 보행자 횡단시간을 이용하는 3가지 방안을 Paramics 시뮬레이션으로 평가하였다. 분석결과 자전거 전용현시 추가의 경우 다른 대안들보다 자전거 지체의 변화폭이 현저히 작았으나 차량의 지체가 급격히 증가하는 특성이 나타났다. 평가된 방법 중 Hook-turn 방식을 이용하였을 때 교차로 전체에서 자전거와 차량의 통행을 통합하여 고려할 때, 비교적 지체의 증가가 적은 것으로 확인되었다.

Kim(2009)은 차량과 자전거가 함께 공존하며 교차로를 통과할 수 있는 방안으로 Bike Box형, Left turn lane형, 통합 Bike Box형으로 나누어 효과평가를 하였다. 교통신호운영 최적화 및 시뮬레이션이 가능한 Lisa+를 이용하여 효과분석을 시행하였고 효과척도는 손실시간과 주행시간을 이용하였다. 분석결과 자전거의 좌회전 비율과 좌회전 교통량에 상관없이 Left turn lane 형이 가장 좋은 것으로 제시하였다.

Joo et al.(2010)은 자전거의 주행속도 및 감속도 실험에서 자전거 이용자가 정지 상태에서부터 가속을 시작하여 50m 거리를 주행하는 동안의 평균속도는 약 14.2km/h, 가속도는 3.33m/sec<sup>2</sup>로 나타났으며, 주행

구간인 50-100m에서는 평균속도 18.7km/h로, 100m 터 이후에는 평균 1.72m/sec<sup>2</sup>의 감속도가 나타나는 것으로 결과를 제시하였다.

Lee(2010)는 Hook-turn 방식에 관한 운영 특성과 관련법을 비교하여 교차로에서 가장 적합한 대기 공간 위치를 삼지 및 사지교차로를 대상으로 분석하였다. 사지 교차로의 경우 자전거 대기공간을 정지선 앞 또는 교차로내의 공간에서 사용할 것을 제안하였다.

Heo(2011)는 3지교차로에서 자전거 좌회전 통행방법을 간접좌회전 방법, 전용차로에서 직접 좌회전하는 방법, Bike Box를 이용해 좌회전하는 방법으로 나누어 시뮬레이션을 실시하였다. 3지 신호교차로의 지체와 정지횟수를 분석한 결과 차량교통량이 많고 자전거교통량이 적은 곳에서는 간접좌회전방법, 차량교통량과 자전거교통량이 많은 곳에서는 전용차로에서 직접좌회전 방법, 그리고 차량교통량과 자전거교통량이 적은 곳에서는 Bike Box 방법이 적합한 것으로 나타났다.

Shladover et al.(2009)은 실제 현장 비디오 자료를 이용하여 각 방향별로 자전거 통과시간을 측정하여 제시하였다. 자전거는 rolling start와 standing start로 구분하여 분석하였고, 교차로 통과시간의 중간값은 12.9초, 80%의 값은 15.7초, 90%의 값은 17.4초 값으로 파악되었다.

Yu(2011)는 신호교차로에서 자전거의 통행특성(가감속 속도, 속도)등을 고려한 신호시간을 산정하는 방법을 제안하였다. 특히 자전거 군집을 대상으로 하여 교차로를 통과하는 자전거의 최소녹색시간을 계산하도록 제시하였다.

Moeur(1999)는 신호교차로에서 자전거에 대한 신호 운영 방법들을 체계적으로 검토하였다. 이와 같은 방법은 자전거 전용 주기 제공하는 법, 차량과 같이 직접 좌회전 하는 법, 투간식 횡단보도를 이용하는 법, 자전거 박스를 이용하는 법이다. 그리고 이와 같은 방법들에 대한 장단점을 운영효율과 안전 측면에서 제시하였다.

Liu et al.(2010)은 보행자-자전거 그룹과 좌회전 차량의 충돌 특성을 분석하고 현장에서 수집된 데이터를 조사하여 식(1)을 도출하였다.

$$q_s' = \frac{q_r^* R}{\frac{1}{t_{a,b}} * 1 + \int \left[ \frac{t_{a,b} - t_{c,b}}{H_f} \right] - q_s} \quad (1)$$

여기서,

$g_s'$  : 최소녹색시간 간격

$Q_r, Q_g$  : 적색시간, 녹색시간 도착비율

$R$  : 유효적색시간

$t_{cpb}$  : 보행자자전거와 좌회전차량의 임계간격

$H_f$  : 좌회전차량 차두시간

$t_{apb}$  : 보행자자전거와 좌회전차량의 평균간격

또한 이러한 자료를 이용하여 최소녹색시간을 결정하는 과정을 제시하였고, 이를 적용시 지체가 37.8% 감소하고 교차로의 서비스수준이 개선된 것으로 나타났다. 그러나 이러한 기법은 2현시의 단순한 교차로 운영을 전제로 하여 현실적인 적용 측면에서 보다 많은 고려가 필요하다.

국내의 연구사례를 살펴본 결과 현재까지 신호교차로에서 자전거를 수용하여 제어하는 방식에 대한 연구가 많이 이루어지지 않았고, 각 연구별로 접근방법과 효과 평가 지표도 다양하였다. 특히 Hook-turn 방식의 경우, 대기공간의 설정위치 및 크기에 따라 운영효과에 큰 영향을 주지만 기존 논문에는 논문에 적용된 구체적인 정보가 제시되지 않아 결과를 해석하는데 어려움이 있다. 또한 다양한 교통 패턴에 대한 고려가 없다는 한계점이 있다. 본 연구는 이러한 내용을 반영하여 실험 조건에 대한 환경을 제시하고 국내 도로환경에 적용 가능한 대안들에 대한 운영적 특성을 다양한 교통상황 및 패턴에 대하여 비교·분석하고 이를 제시하고자 한다.

## 효과평가 방법론

### 1. 자전거 신호제어 대안 검토

#### 1) Bike Box 방식

Bike Box 방식은 미국, 유럽 등에서 많이 사용하는 방식으로 자전거가 직접좌회전 하는 것을 말한다. 이는 자전거 전용차로 또는 전용차선에서 주행을 하던 자전거가 교차로에서 Bike Box로 진입하여 적색에서 녹색으로 신호 변경시 좌회전 또는 직진을 먼저 출발하도록 하는 방식이며, 영국에서는 자전거의 우선적인 출발을 법적으로 보장한다(DOT, 2010). 대기공간의 위치는 차량 정지선 앞 또는 횡단보도 앞에 설치할 수 있으며 차량의 분리신호뿐 아니라 동시신호에서도 운영을 할 수 있



Figure 1. Bike box operation

다. Bike Box방식의 장점은 차량이 자전거가 있음을 인식할 수 있게 하며 자전거의 이용자들은 차량의 매연으로부터 피할 수 있다. 또한 교차로에서 차량과 자전거의 동선을 분리하는 효과를 가져와 자전거의 통행 안전에 기여한다. Bike Box방식의 단점은 교통량이 많거나 교차로가 큰 경우 사용하는데 어려움이 있다. 따라서 해외의 경우 교통량이 1,000 vph, 2차선 이하의 도로에서 매우 효과적인 방법으로 평가되고 있다. 국내에는 신호교차로를 지나가는 교통량이 1,200 vph이며 85%주행속도가 50미만인 경우 적용을 적극 검토할 수 있다고 제시되어 있다(MLTMA, 2010).

#### 2) Hook-turn 방식

Hook-turn방식은 일본, 호주에서 많이 사용하는 방식으로 자전거가 간접좌회전 하는 것을 말한다. 이 방식은 좌회전 차로를 제공하기 어렵거나, 호주와 같이 tram운영에 따른 대기시간을 줄이기 위하여 도입되었고, 일반적인 좌회전 방식과는 다르게 차량 또는 자전거가 이동방향의 건너편으로 이동하여 건너편 차량의 흐름과 함께 이동하여 직진차량의 흐름을 개선할 수 있다. Hook-turn 방식의 장점은 자전거의 간접좌회전을 통해 차량과의 상충을 줄일 수 있으며, 자전거의 흐름에 방해를 주지 않는다. Hook-turn 방식의 단점은 자전거의 대기공간의 위치가 명확하지 않으며 대기공간의 크기 또

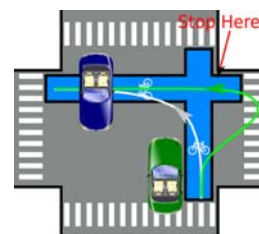


Figure 2. Hook-turn operation

한 정해진 규정이 없다. Hook-turn방식에서 자전거 대기공간은 보행자와 함께 인도위에 위치할 수 있으며 교차로 내 또는 차량의 정지선 앞에 위치할 수 있다. 해외의 경우 교통량이 많거나, 다차선 도로, 그리고 차선 변경이 위험한 경우에 효과적인 방법으로 평가되고 있다. 국내에서는 차량통행이 많은 간선도로에서 자전거 좌회전이 금지될 경우에 사용하도록 권장하고 있다 (MLTMA, 2010).

### 3) 6현시 방식

6현시 방식은 일반적인 4지교차로에서 분리 신호로 운영하는 현시에 좌회전하는 자전거 현시를 동-서 방향, 남-북 방향으로 추가한 방식이다. 이와 같이 6현시 운영에서 추가된 자전거 현시는 최소녹색시간만 주어 차량의 영향을 최소화 하도록 한다. 6현시 방식의 장점은 자전거가 이동하는데 있어 차량과의 상충이 없기 때문에 안전하게 이동할 수 있고 자전거전용신호를 이용할 수 있다. 반면 6현시의 단점은 자전거의 현시추가로 인하여 교차로의 지체가 증가하고 자전거신호를 고려해야하기 때문에 신호최적화 하는데 어려움이 있다.

## 2. 평가방법론

### 1) 평가절차

본 연구에서 수행된 평가절차는 Figure 3과 같다. 먼저 신호시간 최적화 모형과 평가 시뮬레이션 모형을 선정하고 통행방식, 자전거대수, 교통상황 등에 따른 시나리오를 구성한다. 구성된 시나리오를 바탕으로 기하구조, 교통량, 신호현시를 결정하고 이를 바탕으로 교통상황별, 대기공간 크기별, 차량의 교통량패턴에 따라 자동차지체와 자전거지체를 비교 분석하였다.

### 2) 평가 모형 및 시나리오 설정

신호운영에 맞는 신호시간을 최적화하기 위한 목적으로 Synchro를 적용하였고, 최적화된 신호시간을 이용한 평가는 VISSIM 프로그램을 사용하여 신호교차로에서 자동차와 자전거의 지체시간을 각각 수집하였다.

본 연구의 시나리오는 자전거의 교통량이 100-700대/시로 100대/시로 증가함에 따라 Bike Box, Hook-turn, 6현시의 3가지 대안에 대한 교통상황, 대기공간 크기, 교통패턴에 따른 변화를 비교분석하는 것으로 구

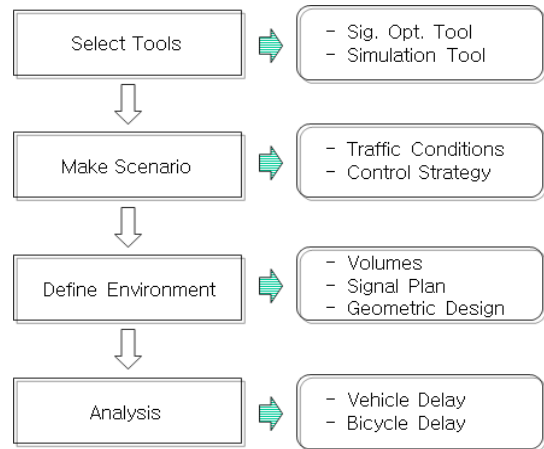


Figure 3. Evaluation process

성하였다. 시뮬레이션 결과 값의 신뢰도를 높이고 객관성을 확보하기 위하여 각 시나리오 마다 난수(Random seed)를 10회에 걸쳐 다르게 발생시켜 나온 결과의 평균값을 사용하였다.

교통상황은 비포화 상황( $v/c=0.6$ ), 근포화 상황( $v/c=0.8$ ), 그리고 포화 상황( $v/c=1.0$ )의 3가지로 구분하였다. 대기공간의 크기는 대소의 두 가지 형태만 고려하였다. 그리고 교통패턴은 자전거의 증가에 따라 교통량 패턴이 동-서측 및 북-서측으로 나타나는 두 경우로 구성하였다.

각 시나리오 별 신호운영 방식의 효율성을 분석하기 위하여 평균지체시간(average delay time)을 효과적으로 선정하였다(MLTMA, 2013).

### 3) 환경설정

본 연구의 기하조건은 자전거 전용도로가 설치되어 있고 차량은 편도 2차로에 좌회전 bay가 있는 교차로를 설정하여 구축하였다. 앞서 제시한 바와 같이 Bike Box와 Hook-turn 방식은 교차로의 크기에 따라 운영효과의 차이가 발생할 수 있으나, 본 연구에서는 두 가지 제어 방식의 접점인 편도 2차로 도로를 적용하였다. 교차로 길이는 500m, 좌회전 bay는 150m로 설정하였다. 좌회전 bay 길이는 도로의 구조·시설기준에 관한 규칙에 제시된 주기당 평균좌회전 차량수를 반영한 산정식을 적용하였다. 차량과 자전거의 속도는 50km/h, 15km/h로 각각 반영하였고, 도로폭원은 좌회전 bay 차로는 3.0m, 직진차로는 3.5m, 자전거전용도로는 2.0m를 적용하였다.

Bike Box방식에서 자전거 대기공간의 위치와 Hook-turn

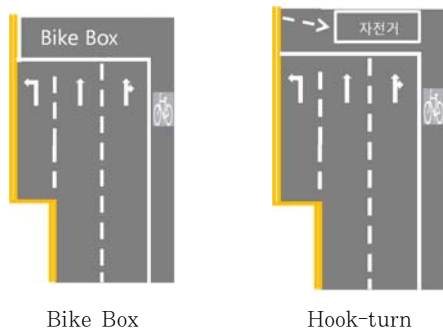


Figure 4. Location of bike queuing space

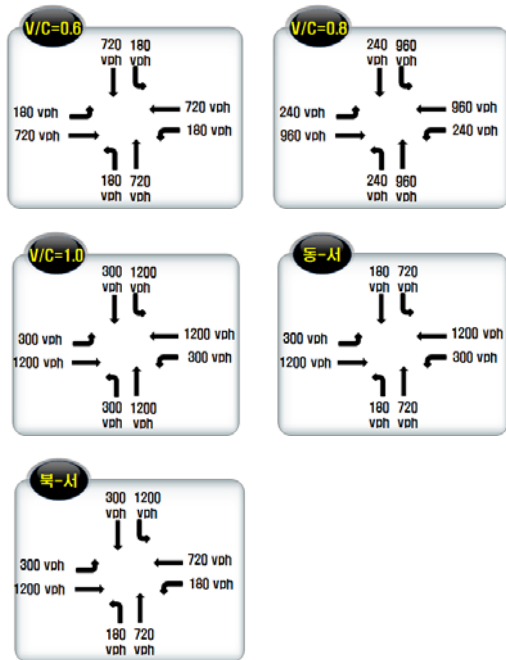


Figure 5. Traffic volume scenario

에서의 자전거 대기공간의 위치는 Figure 4와 같다. 대기공간 위치는 차량 정지선 앞에 설치하였으며 대기공간의 크기는 작은 경우는 4-6대의 자전거가 대기할 수 있으며 큰 경우에는 10-12대가 대기할 수 있는 공간으로 구성하였다.

교통량은 교통류의 흐름에 따라 각 방향별 유입 교통량을 달리 구성하였고 Figure 5와 같다. 편도 2차로 유입 교통량은 비포화시 900vph, 근포화시 1200vph, 포화시 1500vph로 각각 설정되었다. 방향별 비율은 좌회전 20%, 직진 80%로 동일하게 가정하였고, 차량 교통량은 고정된 상태에서 자전거의 교통량을 100대부터 700

대까지 100대씩 늘려가며 교통량을 설정하였다.

그리고 방향별 패턴을 평가하기 위한 교통량은 주 이동류는 1500vph, 그 외 방향별 이동류는 900vph를 적용하여 구성하였다. 좌회전 교통량 비율과 차량 및 자전거 교통량은 동일하게 구성하였다.

신호현시는 상기에 제시한 교통조건 및 기하조건을 기반으로 Synchro를 이용하여 최적신호시간을 도출하였다. 비포화, 근포화, 포화상황별로 Synchro를 적용하여 신호현시를 최적화한 결과, 최적신호주기는 각각 75초, 110초, 150초로 나타났다. Table 1은 포화상황시 최적화된 신호현시이다. 자전거의 경우 차량의 신호현시와 동일하게 적용하되 속도차이가 있으므로 자전거의 황색시간은 6초로 적용하였다. 이 황색시간은 AASHTO에서 제시한 자전거 신호등의 황색시간 산출공식을 적용하여 자전거의 평균속도 및 감속도 등을 적용하여 도출된 값이다.

6현시 운영의 경우는 최적화한 신호를 바탕으로 자전거 신호현시를 추가한 값을 적용하였고, 자전거의 신호현시는 식(2)을 이용하여 최소녹색시간을 적용하였다.

$$t_{\min} = t_1 + t_2 \tag{2}$$

여기서,

$t_1$  : 최대대기 자전거의 소멸시간

$t_2$  : 자전거 군집단이 반대편 마지막차선까지 도달하는 시간

자전거의 대수에 따라 최소녹색시간이 달라지기 때문에 교통상황(v/c)별로 주기당 35-50초가량의 신호현시가 추가되었다.

그리고 방향별로 설정된 두가지 패턴에 대하여 Synchro를 이용하여 신호현시를 최적화한 결과, 동-서축 패턴은 주기가 100초, 북-서축 패턴의 주기는 140초로 나타났다.

Table 1. Optimal signal plan for v/c=1.0

	$\phi_1$	$\phi_2$	$\phi_3$	$\phi_4$	C
phase					150
G	27	42	27	42	
Y	3	3	3	3	

## 평가결과 및 분석

### 1. 분석결과와 비교

#### 1) 교통상황별 결과

비포화 교통상황에서 분석된 결과는 Table 2와 같다. 자전거 교통량의 크기에 상관없이 Bike Box 방식이 Hook-turn 방식과 6현시 방식에 비해 자동차 지체와 자전거 지체 모두 작게 나타났다. 자전거 교통량에 따라 Hook-turn방식은 Bike Box방식에 비해 자동차 지체는 0-0.3초/대, 자전거 지체는 2.5-7.6초/대 크게 나타났다, 6현시 방식은 Bike Box방식에 비해 자동차 지체는 55.7-179.4초/대, 자전거 지체는 13.6-21.7초/대 많은 것으로 파악되었다.

그리고 Hook-turn방식은 6현시방식과 비교하여 자전거 및 자동차 지체가 모두 적은 것으로 파악되었다. 이와 같은 결과는 6현시 방식이 다른 두 방식에 비해 큰 신호주기를 갖지만 이를 이용하는 교통량이 적은 이유로 차량 및 자전거의 주기당 경험하는 손실시간이 증가하는 것으로 추정된다.

근포화 교통상황에서 분석된 결과는 Table 3과 같다. 근포화 교통상황의 결과도 비포화 상황과 같이 자전거 교통량의 크기에 상관없이 Bike Box 방식이 Hook-turn 방식과 6현시 방식에 비해 자동차 지체와 자전거 지체 모두 작게 나타났다. 그러나 자동차 교통량의 증가에 따라 자전거 및 자동차의 지체가 Table 2와 비교하여 크게 증가한 것을 알 수 있다.

Hook-turn방식은 Bike Box방식과 비교하여 자동차 지체는 차이가 거의 없으나 자전거지체는 자전거교통량이 증가할수록 그 차이가 크게 나타났다. 이는 Hook-turn 방식의 자전거 대기공간 크기가 Bike Box방식보다 작

기 때문에 자전거 교통량이 증가할 수록 주기실패(cycle failure)를 경험하는 자전거가 증가하기 때문이다. 그리고 Hook-turn방식은 6현시방식과 비교하여 자동차 지체가 적게 나타났지만, 자전거 지체는 자전거 교통량이 700대 이상인 경우에는 지체가 6현시 운영과 비교하여 큰 것으로 파악되었다.

포화 교통상황에서 분석된 결과는 Table 4와 같다. 포화 교통상황에서는 자전거의 교통량에 상관없이 Bike Box 방식이 Hook-turn 방식과 6현시 방식에 비해 자동차 지체는 작게 나타났으나, 자전거 지체는 자전거 교통량이 700대/시에서 6현시 방식보다 오히려 증가한 것으로 나타났다. 자전거 교통량에 따라 Hook-turn방식은 Bike Box방식에 비해 자동차 지체는 11.8-43.5초/대, 자전거 지체는 5.2-89.3초/대 많은 것으로 나타났다.

Hook-turn방식은 Bike Box방식과 비교하였을 때 자동차 지체가 크게 나타났는데 이는 Hook-turn방식은 자전거의 교통량이 직진하는 차량에 영향을 주는 반면 Bike Box방식은 좌회전 차량에 영향을 주기 때문인 것으로 파악된다. 포화 상황에서 자전거 지체는 Hook-turn 방식과 Bike Box방식 모두 대기공간의 크기에 영향을 받는데 Hook-turn방식은 자전거교통량이 300대/시 이

Table 2. Vehicle · bicycle delay at v/c=0.6

Bicycle volume (v/h)	Average delay (s/v)					
	Vehicle			Bicycle		
	Bike box	Hook turn	6φ	Bike box	Hook turn	6φ
100	26.9	27.0	82.6	22.3	25.6	35.9
200	27.4	27.6	92.7	22.9	25.5	37.0
300	27.8	27.8	102.8	23.3	26.6	38.1
400	28.3	28.5	106.6	24.1	27.8	38.0
500	28.7	28.8	110.5	24.2	28.3	37.9
600	29.0	29.3	159.6	24.0	30.0	41.9
700	29.4	29.5	208.8	24.2	31.9	46.0

Table 3. Vehicle · bicycle delay at v/c=0.8

Bicycle volume (v/h)	Average delay (s/v)					
	Vehicle			Bicycle		
	Bike box	Hook turn	6φ	Bike box	Hook turn	6φ
100	40.6	40.7	200.3	30.9	35.3	43.1
200	41.1	41.7	220.6	31.6	35.6	44.7
300	41.7	42.3	241.0	32.9	37.5	46.3
400	42.1	43.0	255.3	33.6	40.8	48.2
500	42.8	43.8	269.7	34.3	43.7	50.1
600	42.8	45.1	280.6	36.4	49.4	52.2
700	43.3	44.7	291.4	37.8	67.7	54.4

Table 4. Vehicle · bicycle delay at v/c=1.0

Bicycle volume (v/h)	Average delay (s/v)					
	Vehicle			Bicycle		
	Bike Box	Hook turn	6φ	Bike Box	Hook turn	6φ
100	95.7	107.6	254.7	41.6	46.9	52.1
200	95.9	119.1	258.8	42.7	48.4	55.1
300	96.3	127.7	262.8	42.4	53.2	58.0
400	96.9	135.2	268.0	45.5	60.8	60.1
500	98.5	139.3	273.3	48.0	77.1	62.1
600	98.8	142.3	275.9	54.0	111.5	64.9
700	98.9	141.4	278.5	71.6	161.0	67.7

후, Bike Box방식은 500대/시 이후부터 지체가 급격하게 증가하는 모습을 볼 수 있다. 그러므로 해당교차로의 자전거 교통수요에 적합한 대기공간을 제공하지 못한 경우, 교통상황을 크게 악화시킬 수 있는 요인이 될 수 있음을 확인 할 수 있다.

2) 대기공간 크기별 분석

앞서 분석된 대기공간의 영향을 확인하기 위하여 Table 4의 동일한 실험조건에서 대기공간의 크기만을 확대하여 추가적인 평가를 실시하였다.

Bike Box방식에 대한 평가결과는 Table 5에 제시되었으며, 자전거 대기공간의 대/소에 따른 자동차 지체는 차이가 거의 없게 나타났다. 그러나 자전거 지체의 경우 대기공간이 확대되면서 지체가 크게 감소한 것을 확인할 수 있다. 자전거 지체의 경우 500대/시 이후 지체가 10%이상 차이가 났으며 700대/시에는 60%이상 차이가 나는 것으로 나타났다.

Hook-turn 방식에 관한 평가결과는 Table 6과 같다. Hook-turn 방식에서 자전거 대기공간이 작을 때와 대기공간이 클 때를 비교하면, 자전거지체는 자전거교통량이 작을 때는 큰 차이가 없었지만 자전거 교통량이

300대/시 이후는 지체가 10%이상 차이가 났고, 700대/시에는 약 68% 지체가 감소한 것으로 나타났다. 반면 자동차지체는 자전거 교통량에 따라 2-8%가량 지체가 증가하였는데 이는 대기공간이 클 때 대기하는 자전거 교통량이 대기공간이 작을 때보다 증가하므로 자전거 뒤에서 대기하는 직진 차량에 더욱 큰 영향을 주기 때문으로 파악된다.

3) 패턴별 분석

동-서방향의 교통량이 많은 패턴에 대한 분석결과는 Table 7과 같다. 자전거 교통량에 상관없이 Bike Box 방식이 Hook-turn 방식과 비교하여 자동차 지체와 자전거 지체 모두 작게 나타났다.

Hook-turn방식은 Bike Box방식과 비교하였을 때 자동차 지체는 자전거 교통량이 300대/시 이하일 경우에는 지체차이가 1% 이내였지만 400대/시 이후부터 조금씩 증가하여 700대/시에는 6.6%의 지체차이가 발생하였다. 자전거 지체는 자전거 교통량이 100대/시일 경우에는 좌회전방식 차이로 인해 10%의 지체차이가 발생하였지만 700대/시일 경우에는 대기하는 자전거의 대수가 증가하면서 50%이상의 지체차이가 발생하였다.

Table 5. Vehicle · bicycle delay from bike box

Bicycle volume (v/h)	Average delay (s/v)			
	Vehicle		Bicycle	
	Space (small)	Space (large)	Space (small)	Space (large)
100	95.7	95.9	41.6	41.4
200	95.9	95.7	42.7	42.0
300	96.3	96.3	42.4	41.2
400	96.9	96.5	45.5	43.3
500	98.5	97.9	48.0	43.3
600	98.8	98.1	54.0	43.9
700	98.9	98.1	71.6	44.7

Table 7. Vehicle · bicycle delay from E-W pattern

Bicycle volume (v/h)	Average delay (s/v)			
	Vehicle		Bicycle	
	Bike box	Hook turn	Bike box	Hook turn
100	36.9	37.2	30.0	33.0
200	37.6	38.0	29.5	33.7
300	38.4	38.6	30.8	34.9
400	39.2	40.2	31.5	36.8
500	40.1	41.5	32.0	38.7
600	40.3	42.5	33.1	44.3
700	41.3	44.0	33.9	53.1

Table 6. Vehicle · bicycle delay from hook-turn

Bicycle volume (v/h)	Average delay (s/v)			
	Vehicle		Bicycle	
	Space (small)	Space (large)	Space (small)	Space (large)
100	107.6	112.0	46.9	45.9
200	119.1	124.7	48.4	45.9
300	127.7	130.5	53.2	47.4
400	135.2	138.5	60.8	48.7
500	139.3	143.3	77.1	49.5
600	142.3	147.9	111.5	50.3
700	141.4	153.2	161.0	51.5

Table 8. Vehicle · bicycle delay from N-W pattern

Bicycle volume (v/h)	Average delay (s/v)			
	Vehicle		Bicycle	
	Bike box	Hook turn	Bike box	Hook turn
100	68.4	77.4	39.1	44.8
200	69.4	84.9	40.0	45.5
300	70.1	90.9	40.7	48.0
400	70.4	95.8	42.4	54.7
500	69.9	101.2	43.7	64.1
600	70.8	104.3	49.0	94.0
700	71.9	104.5	60.4	131.3



동-서 교통량 패턴의 경우 근포화 상황에서의 패턴과 비슷한 양상으로 나타났다.

북-서방향의 교통량이 많은 패턴에 대한 분석결과는 Table 8과 같다. 자전거 교통량에 상관없이 Bike Box 방식이 Hook-turn 방식과 비교하여 자동차 지체와 자전거 지체 모두 작게 나타났다.

Hook-turn방식은 Bike Box방식과 비교하였을 때 자동차 지체는 자전거 교통량이 100대/시일 경우에는 지체가 13%, 700대/시일 경우 지체가 45%까지 증가하였다. 자전거 지체는 자동차 지체보다 변화 폭이 커서 자전거 교통량이 700대/시일 경우에는 2배 이상의 차이가 발생하였다. 이와 같은 결과는 신호주기가 동-서 패턴보다 길어졌고 자전거 대기공간이 부족하기 때문인 것으로 판단된다. 북-서 교통량 패턴의 경우 포화 상황에서의 패턴과 비슷한 양상으로 나타났다.

## 2. 통계적 분석

본 연구의 분석결과에 대한 신뢰성 검증은 이원 분산 분석으로 사용하였다. 이원 분산 분석은 하나의 종속 변인에 두 개의 독립변인이 주는 영향을 분석할 수 있고 독립변인별 영향 뿐 만 아니라 독립변인 간의 상호작용 효과도 검증할 수 있는 장점이 있다.

자동차 지체의 분산분석 결과는 Table 9에 제시되어 있다. 표에서 살펴보는 바와 같이 자전거 통행방식과 자전거 대수는 유의확률이 0.000로 나타났고, 이는 자전거 통행방식과 자전거 대수에 따라서 자동차 지체가 통계적인 차이가 있다는 것을 의미한다. 반면 대기공간은 유의확률이 0.377로 나타나 자동차 지체에 영향을 미치지 못하는 것을 알 수 있다.

자전거 지체에 대하여 Table 9와 동일한 변수를 이용하여 분산분석을 수행하였다. 검증결과 모든 변수에 대한 유의확률이 0.000으로 나타나, 자전거 지체는 자전

거 통행방식, 자전거 대수, 대기공간의 크기에 따라서 차이가 있는 것을 파악하였다. 또한 통행방식과 자전거대수의 상호작용, 통행방식 과 대기공간의 상호작용, 자전거대수와 대기공간의 상호작용에서도 유의확률이 0.000으로 나타나, 이러한 변수들 간의 상호작용도 통계적으로 유의한 것으로 확인되었다.

## 결론 및 향후 과제

본 연구에서는 자전거 좌회전 교통류를 수용한 신호 교차로 운영방안으로 Bike Box, Hook-turn, 그리고 6현시 운영의 3가지 대안을 평가하였다. 이를 위하여 다양한 교통상황, 대기공간 크기와 교통패턴을 고려하였고 각 방식별 효과를 VISSIM 시뮬레이션 모형을 이용하여 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

Bike Box방식과 Hook-turn 방식 모두 대기공간의 크기가 신호운영 결과와 직접적인 연관성이 큰 것으로 파악되었다. 대기공간 크기에 따른 분석결과, 대기공간 증가시 자전거 지체가 매우 큰 폭으로 감소하는 것을 확인하였다. 따라서 이 두 방식은 자전거 수요에 적합한 대기공간을 제공하지 못하면, 교통상황을 크게 악화시킬 수 있음을 확인하였다.

교통상황에 따른 분석결과, 비포화과 근포화 교통상황에서 Hook-turn방식과 Bike Box방식은 자동차 지체 차이는 0-2.2초/대로 거의 없었으나 자전거 지체는 Hook-turn 방식이 Bike Box 방식에 비해 2.5-29.9초/대 높게 나타났다. 6현시 방식은 Bike Box 방식에 비해 자동차 지체와 자전거 지체가 모두 매우 크게 나타났다.

포화 교통상황에서는 자전거의 교통량에 상관없이 Bike Box 방식이 Hook-turn 방식과 6현시 방식에 비해 자동차 지체는 작게 나타났으나, 자전거 지체는 자전거 교통량이 700대/시에서 6현시 방식보다 오히려 증가한 것으로 나타났다. 그리고 Hook-turn방식은 Bike Box 방식과 비교하여 자동차 지체가 크게 나타났는데 이는 Hook-turn방식은 자전거의 교통량이 직진하는 차량에 영향을 주는 반면 Bike Box방식은 좌회전 차량에 영향을 주기 때문이다. 또한, 자전거 지체는 Hook-turn방식은 자전거교통량이 300대/시 이후, Bike Box방식은 500대/시 이후부터 지체가 급격하게 증가하였다.

교통량 패턴에 따른 분석결과, 동-서 및 북-서 방향 패턴 모두 자전거 교통량에 상관없이 Bike Box 방식이 Hook-turn 방식과 비교하여 자동차 지체와 자전거 지

Table 9. ANOVA results for Vehicle delay

Source	Sum of square	DF	Mean square	F	p-value
A	1190975	2	595488	1063.49	0.000
B	17371	6	2895	5.17	0.000
S	438	1	438	0.78	0.377
A*B	9705	12	809	1.44	0.144
A*S	568	1	568	1.01	0.315
B*S	121	6	20	0.04	1.000
A*B*S	159	6	27	0.05	1.000
Error	176380	315	560		

A: alternative, B: bicycle volume, S: queuing space

체가 작게 나타났다. 그러나 북서 방향 패턴의 경우 지체의 차이가 보다 큰 것으로 파악되었다.

통계적인 분석결과, 자전거 통행방식, 대기공간의 크기, 자전거대수에 따라 자전거 지체가 큰 영향을 받는 것으로 확인되어 이러한 변수들에 대한 명확한 기준이 설정되는 것이 운영상 필요하다고 판단된다.

또한 본 연구의 내용을 향상하기 위하여 다음과 같은 추가 연구가 필요하다. 첫째, 본 연구에서는 보행자와 우회전 교통량을 제외하였지만 우회전 교통량을 고려한 추가 분석이 필요하다. 보행자와 우회전 교통량이 발생할 경우 자전거와의 상충이 불가피하며 우회전 교통량과 보행자로 인한 영향에 대한 효과의 분석이 필요하다고 판단된다. 둘째, Bike Box와 Hook-turn 방식은 차선수나 교차로의 크기와 같은 기하구조의 차이에 따라 운영 효과의 차이가 발생할 수 있는 바, 향후 교차의 크기에 따른 각 운영방식의 영향을 체계적으로 분석하여 제시하는 연구가 필요하다. 마지막으로, 본 연구 수행을 위한 현장자료를 수집하기 어려운 관계로 시뮬레이션 평가를 하였으나, 향후 이러한 시설이 설치되면 실제자료를 수집하여 효과를 평가하는 노력이 필요하다.

## ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea grant funded by the Korea government(MEST) (NRF-2010-0029450).

## REFERENCES

Choi K. H. (2009), A Study on the Signal Control for Bicycle Traffic at Signalized Intersection, Master Thesis, Seoul National University.

Department of Transport (2010), Know Your Traffic Signs, England.

Heo H. B., Kim E. C. (2011), A Study on Bike Signal Operation Methods at Three-Legged Intersections, J. Korean Soc. Transp., 29(5), Korean Society of Transportation, 157-167.

Joo D. H., Yeo W. W., Hyun C. S., Park B. H., Lee C. K., Ha D. I. (2010), A Study for Minimum Requirements Time of Bicycle Signal Clearance Interval, J. the Korea Inst. of ITS, 9(5), 59-66.

Kim T. K. (2009), Study on the Bicycle Signal Operation at

Signalized Intersections Including Bicycle Lanes, Master Thesis, Kongju National University.

Lee J. H. (2010), A Study on the Location of Waiting Space for Bicycle's Hook-turn at the Intersection, Master Thesis, Ajou University.

Liu H., Zhang J., Cheng D. (2008), Analytical Approach to Evaluating Transit Signal Priority, J. Transp. Sys. Eng. and Info. Tech., 8(2), Elsevier, 48-57.

Liu P., Yu Q., Rong J., Liu X., Liu J. (2010), Semi-Actuated Signal Algorithm Study for Two-Phase Signalized Intersections, Proc. of the 10th Int. Conf. of Chinese Transp. Prof.(ICCTP), 2086-2097, Beijing.

Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2010), National Standards on Cycling Structures and Facilities in Korea.

Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2013), Korean Highway Capacity Manual.

Moeur R. C. (1999), Bicycle-Specific Traffic Control, <http://www.richardcmoeur.com/docs/bikespectrctrl.pdf>.

Mok S. J., Kim E. C., Heo H. B. (2013), A Study on Efficient Management of Bicycle Traffic Flow at Four-legged Intersections, J. Highway Eng., 15(3), Korean Society of Road Engineers, 177-189.

National Police Agency (2010), Advanced Plans for Road Traffic Control.

Shladover S. E., Kim Z., Cao M., Sharafsaleh A., Li J. (2009), Bicyclist Intersection Crossing Times: Quantitative Measurements for Selecting Signal Timing, TRR 2128, TRB, 86-95.

Yu Q., Shi L. (2011), Study on Bicycle Signal Timing Algorithm at Signalized Intersection, Applied Mechanics and Materials, 71, 4044-4047.

- ✉ 주 작성자 : 이충민
- ✉ 교신저자 : 이상수
- ✉ 논문투고일 : 2014. 4. 1
- ✉ 논문심사일 : 2014. 5. 2 (1차)
- 2014. 8. 9 (2차)
- 2014. 11. 6 (3차)
- ✉ 심사판정일 : 2014. 11. 6
- ✉ 반론접수기한 : 2015. 4. 30
- ✉ 3인 익명 심사필
- ✉ 1인 abstract 교정필