

Hook-Turn 통행방식의 적정 자전거 대기공간 크기 결정에 관한 연구

A Study on Determining the Optimal Size of Bicycle Waiting Zone under Hook-Turn Operation

임 국 현*	김 남 선**	이 상 수***	남 두 희****	김 정 태*****
(Guk-Hyun Lim)	(Nam-Sun Kim)	(Sang-Soo Lee)	(Doohee Nam)	(Jeong-Tae Kim)
(KOTI)	(Police Science Institute)	(Ajou University)	(Hansung University)	(Korea Expressway Corporation)

요 약

본 연구는 자전거 대기공간 크기의 변화에 따른 Hook-Turn 방식의 운영효과를 파악하고, 신호교차로를 운영 시 요구되는 적정한 대기공간의 크기를 다양한 교통상황에서 평가하여 제공하는 목적으로 수행하였다. 이를 위하여 시뮬레이션 기법을 이용하여 다양한 차량조건, 자전거 교통량, RTOR 우회전 통행방식을 고려하여 자전거 및 차량 지체의 변화를 평가하였다. 평가 결과, 일반적으로 차량 지체는 자전거 대기공간에 큰 영향이 없으나, 자전거 지체는 대기공간이 증가함에 따라 감소되었다. 그리고 RTOR 적용시와 비적용시의 차량과 자전거 지체의 패턴은 유사하였지만, RTOR 비적용시 차량 지체는 약간 증가하였고, 자전거 지체는 감소하였다. 이러한 효과 차이는 우회전 교통량이 크게 증가하면 크게 변할 것으로 예상된다. RTOR 적용시에는 6대의 대기공간이 필요하나, 자전거 좌회전 교통량이 120대보다 많은 경우 9대의 대기공간을 제공하는 것이 권장된다. RTOR 비적용시에는 6대의 대기공간이 필요하나, 자전거 좌회전 교통량이 90대보다 많은 경우 12대의 대기공간을 제공하는 것이 권장된다.

핵심어 : 혹턴, 자전거 운영, 지체, 대기공간, RTOR

ABSTRACT

This study aims to evaluate the performance of Hook-turn operation with various sizes of bicycle waiting zone(WZ) and to determine the optimal size of bicycle WZ under various traffic and control circumstances. An extensive simulation study was performed to examine bicycle and vehicle delay trends for given experimental design. Results showed that vehicle delay was insensitive to the size of waiting zone, but bicycle delay was reduced as the size of waiting zone increased in general. The delay performance indicated a similar trend between with RTOR and without RTOR operation, but vehicle delay slightly increased and bicycle delay slightly decreased without RTOR. Regarding to optimal waiting zone size, 6 WZ was recommended for general conditions with RTOR, but 9 WZ was recommended when bicycle left-turn volume was greater than 120 v/h. 6 WZ was recommended for general conditions without RTOR, but 12 WZ was recommended when bicycle left-turn volume was greater than 90 v/h.

Key words : hook-turn, bicycle operation, delay, waiting zone, RTOR

† 이 논문은 2015년도 정부(국토교통부)의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임. (No.15TLRP-C105654-01, V2X 통신 인프라를 활용한 네트워크 신호운영 알고리즘 개발 및 성능검증)

* 주저자 : 한국교통연구원 연구원

** 교신저자 : 치안정책연구소 책임연구원

*** 공저자 : 아주대학교 교통공학과 교수

**** 공저자 : 한성대학교 정보시스템공학과 교수

***** 공저자 : 한국도로공사 재난안전처 재난대책팀장

† Corresponding author : Nam-Sun Kim(Police Science Institute), E-mail nsk@chol.com

† Received 31 August 2016, Accepted 29 September 2016; Accepted 4 October 2016

I. 서 론

1. 연구의 배경 및 목적

2008년 행정안전부가 발표한 “자전거 이용 활성화 종합대책”은 건강하고 행복한 저탄소 녹색성장 사회 구현을 목표로 하여 자전거의 교통수단 분담율을 제고하기 위한 추진전략을 발표하였다. 효율적인 추진을 위해 자전거 관련 법령과 제도정비, 자전거 인프라 확충, 교육·홍보강화 등 분야별로 체계적인 계획에 따라 정책을 추진하고 있다[1].

현재 우리나라는 도로교통법 제25조 3항에 ‘자전거의 운전자는 교차로에서 좌회전하려는 경우에는 미리 도로의 우측 가장자리로 붙어 서행하면서 교차로의 가장자리 부분을 이용하여 좌회전하여야 한다’고 명시되어 있다. 즉 자전거가 좌회전하기 위해 선 2번의 신호를 받아 이동하게 된다. 이에 따라 우리나라의 자전거 좌회전 방식은 Hook-Turn 방식의 시행을 예고하고 있다. 그러나 현재는 자전거 대기공간의 위치 및 규모에 대한 명확한 법적인 근거를 제공하고 있지 않고 교차로의 가장자리인 자전거도로 상에서 대기하도록 규정하고 있다. 이러한 모호한 규정은 자전거 이용자의 자발적인 이용 성향에 따라 매우 다양한 이용행태를 나타낼 수 있고, 이는 향후 자전거를 신호교차로에 수용하여 운영 시 교차로의 안전을 위협하는 큰 요인이 될 수 있다. 따라서 자전거를 차량과 비교하여 우선시하려는 정책의 큰 방향성과 친환경적 모드인 자전거 이용을 활성화하려는 정부의 입장을 고려할 때, 이와 관련된 보다 명확한 규정과 기준이 필요하다.

차량 앞에 자전거 이용자들을 고려한 대기공간을 만들게 되면 자전거 이용자의 안전은 증가하지만, 이러한 대기공간의 위치와 크기가 교차로 차량 교통흐름에 큰 영향을 미치게 된다. 일반적으로 대기공간이 너무 크면 교차로 면적이 커져서 상층 면적이 늘어나고 차량의 손실시간이 증가하여 차량의 지체에 나쁜 영향을 주게 되고, 또한 대기공간이 너

무 작으면 자전거의 이동성과 안전성에 나쁜 영향을 미치게 된다. 따라서 Hook-Turn 방식을 적용하여 신호교차로 운영 시 적절한 대기공간을 제공하는 것이 교차로를 이용하는 차량과 자전거의 운영효율을 결정하는 중요한 요소가 된다.

또한 도로교통법 시행규칙[별표 2] 신호기가 표시하는 신호의 종류 및 신호의 뜻에서 차량 신호 적색등화 시 ‘차마는 정지선, 횡단보도 및 교차로의 직전에서 정지하여야 한다. 다만, 신호에 따라 진행되는 다른 차마의 교통을 방해하지 아니하고 우회전할 수 있다.’라고 규정하여 적색신호에도 우회전을 할 수 있는 RTOR(Right Turn On Red)을 운영하고 있다. 이에 따라서 Hook-Turn의 대기공간 위치선정 시 우회전차로 앞에 설치할 경우 적색 시 우회전하는 차량의 진로를 방해하기 때문에 우회전 혹은 우회전공용차로 앞에 대기공간을 설치하는 것에 제약을 받는다. 따라서 RTOR을 적용하지 않는 유럽과 달리 우리나라의 신호교차로 운영 특성을 반영한 자전거 통행방식에 관한 연구가 필요하다.

본 연구는 자전거 대기공간 크기의 변화에 따른 Hook-Turn 방식의 운영 효과를 파악하고, 신호교차로 운영 시 요구되는 적절한 대기공간의 크기를 다양한 교통상황에서 파악하여 제공하는 것을 목적으로 한다. 이를 위하여 시뮬레이션 기법을 이용하여 다양한 차량 조건과 자전거 교통량이 반영된 환경에서 RTOR 우회전 통행방식의 적용 여부를 함께 고려하여 자전거 및 차량 지체의 변화를 평가하였다. 이러한 결과로부터 지체의 변화가 크게 나타나는 임계점을 통계적으로 확인하고 이를 이용하여 적정 대기공간의 크기를 도출하여 제시하였다.

II. 이론적 고찰

1. 자전거 교통특성

1) 설계 기준 자전거

자전거 도로 폭을 산정하는 데 있어서 자전거의

설계기준은 매우 중요한 요소이다. 자전거의 가장 두꺼운 부분인 핸들 폭은 특히 중요한 요소이므로 핸들 폭을 검토하여 적합한 규격을 적용해야 한다. 국내외의 설계기준 자전거 제원과 우리나라 기술표준원의 기준 등에서 자전거도로의 설계기준 자전거의 폭은 1.1m이며 길이는 1.9m로 제시하고 있다[2].

2) 자전거도로(신호교차로) 지체

신호교차로의 제어지체를 구성하는 세 가지 지체 중에서 자전거도로의 신호교차로의 지체는 균일지체만으로 산정하는데 이는 자전거 도로의 경우 과포화 상태인 경우는 극히 제한적이기 때문이다. 또한, 자전거 도로의 경우 연동계수(Progression Factor)는 지체에 큰 영향이 없다고 간주하여 1로 가정한다. 따라서 자전거 이용자를 위한 신호교차로에서의 효과적도는 일반적으로 다음 식과 같은 균일지체만 고려하여 평가한다[2].

$$d = \frac{0.5C(1 - \frac{g}{C})^2}{1 - [\frac{g}{C} \cdot Mn(\frac{V_{bike}}{c_{bike}}, 1)]} \dots\dots\dots (1)$$

여기서, g : 유효녹색시간

C : 주기

Vbike : 자전거 교통류율(vph)

cbike : 자전거 도로용량(vph)

3) 자전거도로 용량

자전거도로의 용량은 자전거 도로의 포화교통류율에 유효녹색시간의 총주기에 대한 비율을 곱하여 산출하는데 자전거 도로 포화교통류율은 기본조건 상태에서 3000vph에 보정계수를 이용한 값을 적용하여 사용하면 된다[2].

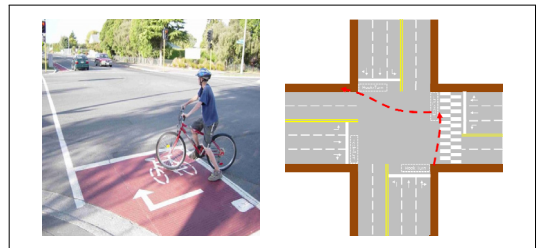
$$c_{bike} = S_{bike} \cdot \frac{g}{C} = 3000 \cdot f_w \cdot \frac{g}{C} \dots\dots\dots (2)$$

여기서, Sbike : 자전거도로 포화교통류율(vph)

fw : 자전거 도로 폭 보정계수

2. Hook-Turn 방식 개요

Hook-Turn 방식은 일본, 호주, 유럽에서 많이 사용하는 방식으로 <Fig. 1>과 같이 자전거가 2번의 신호를 받고 간접 좌회전하는 것을 말한다. 이 방식은 일반차량이 좌회전하는 방식과는 다르게 자전거가 이동방향의 건너편으로 이동하여 건너편 차량의 흐름과 함께 이동하며, 직진 차량의 흐름을 개선하기 위해 개발된 방식이다. Hook-Turn 방식의 장점은 자전거의 간접좌회전을 통해 차량과의 상충을 줄일 수 있으며, 자전거가 차량의 흐름에 방해가 주지 않는다는 것이고, 단점은 자전거 대기공간의 위치가 명확하지 않으며 대기공간의 크기 또한 정해진 규정이 없다는 것이다. Hook-Turn 방식에서 자전거의 대기공간은 보행자와 함께 위치할 수도 있으며 차량의 차선이용방법에 따라 교차로 내 또는 차량의 정지선 앞에 위치할 수 있다.



<Fig. 1> Hook-Turn waiting zone and passage ways

3. 기존 연구 고찰

Choi et al.(2008)은 자전거통행을 고려한 교차로 신호운영 방안에 관한 연구를 수행하였다. 자전거 교통량 증가에 따라서 필요한 시간이 보행자 횡단 신호시간보다 큰 경우에 Hook-Turn방식이 효율적이고, 그렇지 않을 경우에는 보행자 횡단시간을 이용한 방식의 신호운영이 효율적이라고 제시하였다[3].

Han et al.(2008)은 국내 교통여건을 고려한 자전거 전용신호 도입방안에 대한 연구를 수행하였다. 횡단보도와 자전거도로가 인접한 자전거 횡단도로에는 보행 신호등과 연계하여 영국의 Toucan Crossing 형태의 적용을 제안하였다. 그리고 횡단보도가 보행도로와 이격되어 설치된 경우에는 차량 신호와 연계한 자전거 신호등 형태(3색 등화체계)를 적용하는 것을 제안하였다[4].

Lee(2010)는 Hook-turn 방식에 관한 운영 특성과 관련법을 비교하여 교차로에서 가장 적합한 대기공간 위치를 삼지 및 사지교차로를 대상으로 분석하였다. 사지 교차로의 경우 자전거 대기공간을 정지선 앞 또는 교차로내의 공간에서 사용할 것을 제안하였다[5].

Mok et al.(2013)은 4지 신호교차로에서 효율적인 자전거 교통류 처리방안에 대한 연구를 수행하였다. 분석결과 간접좌회전은 차량과 좌회전을 분리하여 이동시켜 자전거와 차량의 교통량에 따른 영향보다는 자전거의 이동방법에 따른 지체 증가가 큰 것으로 분석되었다. 직접좌회전은 간접좌회전보다 정지지체시간이나 정지횟수가 낮게 분석되었다[6].

Lee et al.(2014)은 신호교차로의 자전거 제어기법 평가에 관한 연구를 수행하였다. 분석결과는 비포화, 근포화, 과포화 교통상황에서 Bike Box 방식이 Hook-Turn 방식보다 교통상황에 따른 영향을 적게 받았고, 자전거 대기공간이 크기가 자전거 지체에 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다[7].

Patric et al.(1998)은 신호교차로 용량에 미치는 자전거의 영향에 대해서 연구를 수행하였다. 자전거와 우회전 차량의 상충 지점을 자전거가 점유할 때의 녹색시간의 비율과 자전거 교통량의 관계를 선형회귀분석 모형을 이용하여 도출하였고, 자전거와 보행자가 함께 있는 교차로의 용량이 크게 감소할 수 있음을 제시하였다[8].

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, 투칸식 횡단보도를 이용하는 법, 자전거 박스를 이용하는 법이다. 그리고 이와 같은 방법들에 대한 장단점을 운영효율과 안전 측면에서 제시하였다[9].

Jennifer et al.(2012)은 신호 교차로에서 Bike box 적용시 효과에 대한 평가를 수행하였다. 설문조사에 응한 자전거이용자의 73%는 Bike box를 사용할 때 차량으로 보호받게 되어 더 안전함을 느낀다고 조사되었다[10].

Quan et al.(2011)은 신호교차로에서 자전거 신호 시간 알고리즘에 관한 연구를 수행하였다. 신호시간을 선정하는 방법으로 Cluster Center 개념을 적용하였고, $t_{\min} = t_1 + t_2$ 의 형태를 갖도록 제시하였다. t_1 은 가장 오래 대기한 자전거가 교차로를 통과하는 시간이고, t_2 는 자전거 군집이 반대편 마지막차선까지 도달하는 시간을 말한다[11].

Steven et al.(2009)는 자전거 교차로 횡단시간에 대한 연구를 수행하였다. 누적된 데이터를 활용하여 자전거 횡단시간을 고려한 적절한 신호시간을 재분배하게 되면 자전거가 넓은 간선도로도 안전하게 횡단할 수 있음을 보였다[12].

검토 결과, 최근 들어 자전거에 대한 교차로 통행방식 구분에 따른 통행방식별 비교평가 결과와 자전거 신호제어 알고리즘 등의 자전거 관련 연구가 활발하게 진행 중임을 확인하였다. 그러나 Hook-Turn 통행방식에서 대기공간의 크기가 차량과 자전거의 교통흐름에 미치는 영향을 분석하여 평가한 국내외 연구는 없는 실정이다. 특히 RTOR 적용 여부에 따라 실제적인 효과의 차이를 분석한 논문은 없으며, 본 연구는 제시된 연구목적을 달성하여

국내 자전거 신호 운영과 관련된 중요한 자료를 제공하고자 한다.

III. 평가 방법론

1. 시나리오 설정

본 연구에서 시나리오는 크게 교차로 운영방식에 따라 RTOR 적용과 RTOR 비적용으로 나누어 구성하였다. 첫 번째 시나리오는 신호교차로에 RTOR을 적용하는 경우이며, 방향별 자전거 교통량을 100대/시, 300대/시, 500대/시로 증가시키고, 자전거 좌회전 교통량 비율을 0.1, 0.2, 0.3, 0.4로 증가시키면서 대기공간의 크기를 3대, 6대, 9대, 12대, 15대로 변화를 주어 교통조건에 따른 적정 대기공간의 크기를 구하는 방식으로 시나리오를 구성하였다.

두 번째 시나리오는 신호교차로에 RTOR을 비적용하는 경우이며, 방향별 자전거 교통량을 100대/시, 300대/시, 500대/시로 증가시키고, 자전거 좌회전 교통량 비율을 0.1, 0.2, 0.3, 0.4로 증가시키면서 대기공간의 크기를 6대, 12대, 18대로 변화를 주어 교통조건에 따른 적정 대기공간의 크기를 구하는 시나리오를 구성하였다.

방향별 자전거 교통량을 500대/시까지로 설정한 이유는 자전거는 자동차와 달리 포화도(Degree of Saturation, DS) 비율이 높지 않을 것으로 가정하여 500대/시로 설정하였다. 그러나 자전거 좌회전 교통량 비율은 자전거 통행의 특성상 중·단거리이고, 다양한 목적지에 대한 접근이 가능하다고 판단하여 차량의 좌회전 비율보다 높은 0.4까지로 하여 시나리오를 구성하였다.

미시적 시뮬레이션 결과의 확률적인 변동성을 고려하여 각 시나리오 마다 Random Seed를 달리하여 10회 반복한 결과의 평균값을 계산하여 제시하였다.

2. 기하조건

본 연구의 기하조건은 자전거 전용도로가 차도의 우측에 설치되어 있고 편도 2차로에 좌회전 포켓(80m) 1차로가 설치되어있는 280m의 가상 교차로를 설정하였다.

차량과 자전거의 속도는 일반적인 도시부 도로에서 적용할 수 있는 속도를 적용하였다. 차량의 속도는 50km/h, 자전거의 속도는 15km/h로 설정하였다. 도로폭원 역시 도시부 도로에서 적용할 수 있는 폭원인 직진차로는 3.5m, 좌회전 차로는 3.0m로 설정하였으며 자전거 도로의 경우에는 2.0m로 설정하였다.

자전거 대기공간(Waiting Zone, WZ)의 크기는 설계기준 자전거의 제원을 적용하여 <Table 1>과 같이 설정하였다.

<Table 1> Specification of bicycle waiting zone

Category		Specifications				
W/ RTOR	WZ Size (Number)	3	6	9	12	15
	Width(m)	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3
	Length(m)	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0
W/O RTOR	WZ Size (Number)	6	12	18	-	-
	Width(m)	6.6	6.6	6.6	-	-
	Length(m)	2.0	4.0	6.0	-	-

3. 교통조건

1) 자전거 교통량

Hook-Turn을 시행 중인 경우 자전거 도로의 용량을 구하는 방법이 아직 명확히 제시되지 않았을 뿐더러 자전거는 차량과 달리 포화도 비율이 높지 않기 때문에 본 연구에서는 방향별 자전거 교통량을 100대/시와 300대/시, 500대/시로 구분하였고, 자전거의 우회전 교통량비율은 0.1로 설정하고 좌회전 비율의 변화에 따라 직진의 비율을 결정하였다. 그리고 모든 방향의 교통조건은 동일하게 설정하였다.

2) 차량 교통량

본 연구를 위하여 차량 교통량 조건은 포화도 1.0과 0.75의 두 가지 조건 수준으로 설정하였다. 이 동류 별 교통량비율은 직진 0.7, 좌회전 0.2, 우회전 0.1로 설정하였고, 방향별 교통량은 대기공간의 크기에 따른 차이를 명확히 알아 볼 수 있도록 네 방향 모두 같은 조건으로 설정하였다.

4. 신호조건

본 연구를 위한 신호시간은 앞에서 제시한 기하구조 및 교통조건을 기반으로 하여 신호최적화 프로그램인 **Synchro**를 적용하여 도출된 최적화된 신호시간을 적용하였다.

시뮬레이션 시나리오에 따라 대기공간의 크기가 점점 커지게 되면 차량 정지선이 뒤로 후퇴해서 교차로의 크기가 커져 일반적으로 사용하는 황색신호 시간인 3초로는 차량이 교차로를 완전히 빠져나갈 수 없게 된다. 따라서 시나리오 별 CASE의 원활한 비교를 위해서 황색신호시간을 4초로 통일하여 적용하였다.

자전거 전용신호의 경우 **AASHTO**에서 제시한 자전거 신호변환시간 산출 공식을 적용하여 황색시간을 적용하였으며, **Hook-Turn**의 특성상 차량의 직진신호에 따라서 자전거가 통행하도록 하였다[13].

이와 같은 방식으로 차량교통량 별로 최적화된 신호현시 계획은 다음 <Table 2>, <Table 3>과 같다.

<Table 2> Signal timing optimization(DS= 1.0)

Category	Φ1	Φ2	Φ3	Φ4	Cycle
Phase					
Green time(sec)	26	41/39	26	41/39	150
Yellow time(sec)	4	4/6	4	4/6	

<Table 3> Signal timing optimization(DS=0.75)

Category	Φ1	Φ2	Φ3	Φ4	Cycle
Phase					
Green time(sec)	17	35/33	17	35/33	120
Yellow time(sec)	4	4/6	4	4/6	

IV. 평가 및 결과분석

1. RTOR 적용

RTOR을 적용하여, 앞서 제시된 다양한 조건에서 자전거 교통량을 100대/시, 300대/시, 500대/시로 변화시켜 평가를 실시하였다. 계산된 차량과 자전거의 평균지체 값은 다음 <Table 4,5,6>에 제시되었다.

<Table 4> Average delay (W/ RTOR, bicycle 100 vph)

DS	Category	Bicycle left-turn volume flow	Delay(s/v)				
			WZ 3	WZ 6	WZ 9	WZ 12	WZ 15
1.0	Vehicle	0.1	149.4	150.0	150.4	150.0	150.7
		0.2	153.4	154.1	154.8	154.0	152.4
		0.3	156.7	154.9	155.3	155.3	155.5
		0.4	158.5	157.1	157.1	158.2	156.1
	Bicycle	0.1	43.0	42.1	41.9	41.9	41.9
		0.2	53.4	49.8	49.6	49.5	49.4
		0.3	64.5	56.5	55.6	55.3	55.2
		0.4	78.9	64.2	62.3	62.0	61.8
0.75	Vehicle	0.1	53.3	54.0	55.3	54.8	53.0
		0.2	55.2	54.2	56.0	56.0	55.4
		0.3	57.4	57.3	57.3	58.7	56.8
		0.4	58.0	58.8	58.6	59.2	58.2
	Bicycle	0.1	32.5	31.6	31.6	31.5	31.5
		0.2	39.1	36.8	36.7	36.6	36.5
		0.3	47.7	42.2	41.8	41.7	41.5
		0.4	56.0	47.0	46.7	46.4	46.2

<Table 5> Average delay
(W/ RTOR, bicycle 300 vph)

DS	Category	Bicycle left-turn volume flow	Delay(s/v)				
			WZ 3	WZ 6	WZ 9	WZ 12	WZ 15
1.0	Vehi cle	0.1	157.7	156.8	157.3	157.2	155.8
		0.2	160.8	162.6	162.4	162.2	162.4
		0.3	163.1	163.5	164.4	165.9	163.8
		0.4	163.5	166.1	166.9	167.8	166.1
	Bicy cle	0.1	47.6	43.1	42.8	42.8	42.7
		0.2	90.6	53.7	49.9	49.6	49.5
		0.3	404.3	78.8	57.1	55.9	55.7
		0.4	743.4	160.5	65.1	62.2	61.2
0.75	Vehi cle	0.1	58.7	59.5	58.5	60.9	57.7
		0.2	64.6	63.1	61.8	65.4	62.7
		0.3	65.8	68.1	67.7	69.8	65.0
		0.4	67.7	70.2	71.7	72.2	70.0
	Bicy cle	0.1	35.0	32.8	32.6	32.6	32.5
		0.2	53.0	39.9	38.4	38.3	38.2
		0.3	143.2	49.4	43.7	43.1	42.8
		0.4	356.4	64.7	48.9	47.6	47.1

<Table 6> Average delay
(W/ RTOR, bicycle 500 vph)

DS	Category	Bicycle left-turn volume flow	Delay(s/v)				
			WZ 3	WZ 6	WZ 9	WZ 12	WZ 15
1.0	Vehi cle	0.1	164.2	164.2	162.9	164.1	161.8
		0.2	165.9	168.6	169.0	168.9	167.5
		0.3	164.2	168.7	170.8	172.3	170.8
		0.4	164.0	167.3	173.8	176.1	175.4
	Bicy cle	0.1	70.9	46.1	45.3	45.2	45.1
		0.2	590.3	76.0	52.6	51.7	51.3
		0.3	1083.9	385.4	63.5	58.9	57.9
		0.4	1418.3	732.4	89.3	70.1	64.6
0.75	Vehi cle	0.1	64.0	68.0	65.6	65.8	66.3
		0.2	73.2	73.9	74.0	72.5	68.0
		0.3	68.7	78.9	81.1	84.6	79.3
		0.4	65.1	75.4	87.1	89.4	86.2
	Bicy cle	0.1	42.7	34.6	34.0	33.9	33.9
		0.2	231.7	46.5	39.5	38.9	38.7
		0.3	758.6	134.1	45.9	44.2	43.7
		0.4	1087.9	404.6	54.7	50.2	48.4

차량의 경우, 자전거 교통량 100대/시, 300대/시에서는 대기공간의 크기에 따른 지체의 변화가 없는 것으로 나타났다. 예를 들어 자전거 교통량이

100대/시이고 포화도 1.0인 경우, 자동차 지체가 158.5 초/대에서 156.1 초/대로 나타나 지체의 변화가 거의 없었다. 그러나 Table 6에서 보듯이, 자전거 교통량 500대/시에는 자전거 좌회전 교통량 비율이 높은 0.3, 0.4 의 조건에서 자동차 지체가 약간 증가한 것으로 나타났다. 이는 Hook-Turn 특성상 좌회전 하는 자전거는 차량 앞에서 대기하고 이동하기 때문에 차량 앞에서 대기하는 자전거의 증가에 따라 차량의 출발시간 증가와 상충이 증가하여 지체가 증가한 것으로 분석되었다.

자전거의 경우, 모든 자전거 교통량 조건에서 자전거 대기공간의 크기가 증가함에 따라 자전거 지체가 감소하였다. 또한 대기공간의 크기가 같은 경우, 자전거 좌회전 교통량 비율이 증가할수록 자전거의 지체가 증가하는 것으로 분석되었다. 이는 Hook-Turn은 자전거가 좌회전하기 위해서 2번의 신호를 대기하기 때문에 좌회전 하는 자전거가 늘어남에 따라 대기하는 신호의 시간이 길어져서 지체가 증가한 것으로 추정된다. 그리고 교통상황별로 적정한 대기공간의 크기가 확보되면 지체가 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있다.

차량포화도가 1.0에서 0.75로 감소한 경우, 차량과 자전거 지체는 모두 감소하였다. 따라서 차량포화도가 증가하는 상황에서는 차량과 자전거의 지체에 나쁜 영향을 줄 수 있음을 확인할 수 있다. 특히 <Table 6>의 결과에서 보듯이, 차량의 포화상태에서 자전거 대기공간을 작게 제공할 경우, 자전거 지체가 급격하게 증가하는 결과를 가져올 수 있음을 알 수 있다. 이러한 상태에서의 교차로 운영은 궁극적으로 자전거 교통의 안전에도 나쁜 영향을 미칠 수 있기 때문에 이러한 특성을 반영하여 적정한 대기공간을 제공하는 것이 필요하다.

2. RTOR 비적용

RTOR을 비적용하여, 앞서 제시된 다양한 조건에서 자전거 교통량을 100대/시, 300대/시, 500대/시로

변화시켜 평가를 실시하여 분석된 차량과 자전거의 평균지체 값은 다음 <Table 7,8,9>에 정리하였다.

RTOR을 비적용한 결과는 차량과 자전거 모두 동일한 대기공간크기에서 RTOR을 적용한 결과인 <Table 4,5,6>과 매우 유사한 패턴의 지체 변화를 나타내고 있는 것을 확인하였다. 그러나 동일한 대기공간 크기라도 차량과 자전거, 그리고 대기공간의 위치에 따른 구분이 달라져 지체의 정도에 약간의 차이가 발생하였다.

차량의 경우, 일반적으로 RTOR을 비적용한 경우 RTOR을 적용한 경우보다 차량의 지체가 같거나 약간 증가하였고, 특히 <Table 9>의 포화도가 1.0인 경우 지체의 변화가 가장 크게 확인되었다. 이는 RTOR을 적용한 경우 우회전 차량의 지체가 감소하여 차량의 지체변화에 긍정적인 영향을 미친 것으로 생각된다. 본 연구에서는 우회전 교통량을 차량의 비율로 적용하였기에 전체적인 접근 교통량이 증가한 경우, 이러한 지체의 감소가 크게 나타났고, 이러한 효과는 실제 교차로의 우회전 교통량의 크기에 따라 변화할 것으로 예상된다.

<Table 7> Average delay (W/O RTOR, bicycle 100 vph)

DS	Category	Bicycle left-turn volume flow	Delay(s/v)		
			WZ 6	WZ 12	WZ 18
1.0	Vehicle	0.1	151.6	151.7	151.5
		0.2	154.6	154.7	154.5
		0.3	156.6	156.5	154.8
		0.4	157.6	158.6	157.3
	Bicycle	0.1	42.0	41.8	41.7
		0.2	49.1	48.9	48.1
		0.3	55.6	54.1	54.0
		0.4	62.5	60.5	60.3
0.75	Vehicle	0.1	54.3	54.3	55.5
		0.2	56.9	57.1	57.5
		0.3	57.1	59.8	59.0
		0.4	58.9	60.7	58.2
	Bicycle	0.1	31.4	31.2	31.0
		0.2	36.1	35.8	35.4
		0.3	40.7	40.1	40.0
		0.4	43.2	43.1	42.9

<Table 8> Average delay (W/O RTOR, bicycle 300 vph)

DS	Category	Bicycle left-turn volume flow	Delay(s/v)		
			WZ 6	WZ 12	WZ 18
1.0	Vehicle	0.1	158.2	158.4	158.1
		0.2	161.6	161.7	161.8
		0.3	164.8	166.0	165.9
		0.4	167.1	168.0	168.1
	Bicycle	0.1	42.8	42.5	42.0
		0.2	50.8	48.3	48.0
		0.3	75.1	52.1	51.8
		0.4	157.1	57.8	57.4
0.75	Vehicle	0.1	57.6	59.0	58.1
		0.2	66.7	66.0	64.2
		0.3	67.7	67.9	68.7
		0.4	71.0	69.9	73.7
	Bicycle	0.1	32.3	32.0	31.9
		0.2	36.7	35.9	35.6
		0.3	45.4	38.6	38.4
		0.4	60.4	42.1	41.9

<Table 9> Average delay (W/O RTOR, bicycle 500 vph)

DS	Category	Bicycle left-turn volume flow	Delay(s/v)		
			WZ 6	WZ 12	WZ 18
1.0	Vehicle	0.1	165.4	165.8	165.7
		0.2	170.5	171.8	171.0
		0.3	172.8	173.3	173.3
		0.4	172.9	178.6	179.3
	Bicycle	0.1	45.3	44.9	44.5
		0.2	72.1	48.4	48.2
		0.3	382.2	54.4	54.1
		0.4	726.1	63.3	61.9
0.75	Vehicle	0.1	72.6	67.4	67.2
		0.2	78.8	77.1	77.6
		0.3	77.1	81.6	82.8
		0.4	77.4	82.8	87.1
	Bicycle	0.1	34.2	33.4	33.1
		0.2	42.3	34.6	34.3
		0.3	129.8	39.1	38.8
		0.4	397.8	42.0	41.6

자전거의 분석결과, 동일한 조건일 때 RTOR을 적용한 경우 RTOR을 비적용한 경우보다 지체가 같거나 약간 증가한 것으로 나타났다. 같은 크기의 대기공간이지만 RTOR 적용유무에 따라서 대기공간의 폭과 길이가 달라지는데, RTOR을 비적용한 경우 두 개 차선에 걸쳐 대기공간이 위치하므로 가장 앞 열에 대기하는 자전거 수가 증가하여 대기열의 길이가 짧아져 출발순실시간이 감소되어 자전거 지체가 감소될 수 있다. 이 경우에는 자전거 교통량이 많을수록 지체의 감소가 증가할 것으로 예상된다.

3. 통계적 검증

본 연구에서는 위에 제시된 결과를 이용하여, 대기공간 크기에 따른 차량과 자전거 지체의 차이를 통계적으로 검증하기 위하여 독립 변수가 1개인 여러 집단 간 평균을 비교할 수 있는 분석방법인 일원배치분산분석(One-way analysis of variance)를 사용하여 평가를 수행하였다. 그리고 Hook-Turn 통행방식의 자전거 적정 대기공간의 크기를 결정하기 위한 사후검정으로 집단 간의 동일 집단군을 판별해주는 Duncan의 다중범위 검정법을 적용하여 통계적 분석을 실시하였다. 이러한 분석은 통계분석프로그램인 SPSS를 이용하여 수행되었다.

1) 자전거 지체의 통계적 검증

포화도 1.0의 조건에서 자전거 지체에 대한 통계적 검증결과와 사후검정에 따른 동일 집단군의 분류 결과는 <Table 10>과 같다. 본 연구에서 자전거와 차량의 지체 차이를 검증하기 위하여 적용된 가설은 다음과 같다.

귀무가설 : 대기공간 크기에 의한 지체의 차이가 없다.

대립가설 : 대기공간 크기에 의한 지체의 차이가 있다.

RTOR 적용의 경우, 자전거 교통량이 100대/시이고 좌회전 비율이 0.1인 경우를 제외하곤 유의확률이 0.05보다 작아서 귀무가설을 기각하고 있다. 따라서 자전거교통량이 적은 경우를 제외한 대부분의 교통상황에서 대기공간의 크기가 자전거의 지체에 영향을 주는 것으로 나타났다.

RTOR 비적용의 경우, 자전거 교통량이 300대/시

이상이고 좌회전 비율이 높은 경우에 대부분 유의확률이 0.05보다 작아서 귀무가설을 기각하고 있다.

<Table 10> Statistical test result (DS=1.0, bicycle)

Category	Bicycle volume	Left-turn volume flow	p-value	Duncan same group category(waiting zone)		
				1group	2group	3group
W/ RT OR	100	0.1	0.432	N/A		
		0.2	0.000	3	6/9/12/15	-
		0.3	0.000	3	6/9/12/15	-
		0.4	0.000	3	6/9/12/15	-
	300	0.1	0.000	3	6/9/12/15	-
		0.2	0.000	3	6/9/12/15	-
		0.3	0.000	3	6/9/12/15	-
		0.4	0.000	3	6	9/12/15
	500	0.1	0.000	3	6/9/12/15	-
		0.2	0.000	3	6/9/12/15	-
		0.3	0.000	3	6	9/12/15
		0.4	0.000	3	6	9/12/15
W/O RT OR	100	0.1	0.898	N/A		
		0.2	0.140	N/A		
		0.3	0.138	N/A		
		0.4	0.068	N/A		
	300	0.1	0.264	N/A		
		0.2	0.071	N/A		
		0.3	0.001	6	12/18	-
		0.4	0.000	6	12/18	-
	500	0.1	0.394	N/A		
		0.2	0.000	6	12/18	-
		0.3	0.000	6	12/18	-
		0.4	0.000	6	12/18	-

2) 차량 지체의 통계적 검증

포화도 1.0의 조건에서 차량 지체에 대한 통계적 검증결과와 사후검정에 따른 동일 집단군의 분류 결과는 다음 <Table 11>에 제시되었다.

차량지체의 경우에는 RTOR 적용 여부에 관계없이 대부분의 경우 유의확률이 0.05보다 커서 귀무가설을 채택하였다. 그러나 자전거 교통량 500대/시이고, 좌회전 비이 0.4인 경우에만 귀무가설을 기각하였다. 따라서 일반적으로 자전거 대기공간의 크기가 차량의 지체에 영향을 주지 않지만, 자전거 교통량 많은 조건에서는 차량의 지체에 영향을 주는 것을 확인하였다.

<Table 11> Statistical test result
(DS=1.0, vehicle)

Category	Bicycle volume	Left-turn volume flow	p-value	Duncan same group category(waiting zone)		
				1group	2group	3group
W/ RT OR	100	0.1	0.956	N/A		
		0.2	0.741	N/A		
		0.3	0.870	N/A		
		0.4	0.686	N/A		
	300	0.1	0.811	N/A		
		0.2	0.870	N/A		
		0.3	0.412	N/A		
		0.4	0.125	N/A		
	500	0.1	0.495	N/A		
		0.2	0.230	N/A		
		0.3	0.105	N/A		
		0.4	0.000	3/6	9/12/15	-
W/O RT OR	100	0.1	0.987	N/A		
		0.2	0.995	N/A		
		0.3	0.457	N/A		
		0.4	0.733	N/A		
	300	0.1	0.973	N/A		
		0.2	0.979	N/A		
		0.3	0.653	N/A		
		0.4	0.704	N/A		
	500	0.1	0.970	N/A		
		0.2	0.717	N/A		
		0.3	0.928	N/A		
		0.4	0.000	6	12/18	-

4. 적정 대기공간의 크기

앞서 결과로부터, 자전거 교통량에 대한 적절한 대기공간을 제공하지 않으면 지체가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 분석결과와 통계적 검증 결과를 이용하여 적절한 대기공간의 크기를 산정하였고, 결과는 다음 <Table 12>에 제시하였다.

적정 대기공간의 크기는 자전거 지체의 변곡점과 통계적 그룹화 결과를 이용하여 해당 집단에서 가장 작은 대기공간을 적정 대기공간의 크기로 선정하였다. RTOR을 허용하는 경우, 일반적으로는 6대 정도의 공간이 필요하나, 좌회전 교통량이 많은 경우 9대 정도의 공간을 확보하는 것이 바람직하다. RTOR을 비 허용하는 경우에는 일반적으로는 6대 정도의 공간이 필요하나, 좌회전 교통량이 많은 경

우 12대 정도의 공간을 제공하면 운영상 바람직하다고 판단된다.

<Table 12> Optimal size of bicycle waiting zone

Category	Bicycle volume (vph)	Bicycle left-turn volume flow	Optimal waiting zone size	
			DS=1.0	DS=0.75
W/ RT OR	100	0.1	3	3
		0.2	6	3
		0.3	6	6
		0.4	6	6
	300	0.1	6	6
		0.2	6	6
		0.3	6	6
		0.4	9	6
	500	0.1	6	6
		0.2	6	6
		0.3	9	9
		0.4	9	9
W/O RT OR	100	0.1	6	6
		0.2	6	6
		0.3	6	6
		0.4	6	6
	300	0.1	6	6
		0.2	6	6
		0.3	12	6
		0.4	12	12
	500	0.1	6	6
		0.2	12	12
		0.3	12	12
		0.4	12	12

V. 결론

본 연구는 신호교차로 자전거 Hook-Turn 통행방식 적용을 위한 대기공간의 영향을 파악하고, 적정 대기공간의 크기를 산정하기 위하여 미시적 교통시뮬레이션 프로그램을 이용하여 차량 포화도, RTOR 적용유무, 자전거 교통량, 좌회전 자전거 회전비율을 달리하여 평가하였다.

RTOR 적용 시 차량의 지체는 대기공간의 크기와 큰 영향이 없으나, 자전거 좌회전 교통량이 많은 경우에는 지체가 약간 증가하였다. 자전거의 지체는 대기공간의 크기가 증가함에 따라 감소하였다. RTOR 비적용 시 나타난 차량과 자전거의 지체는 전체적으로

RTOR을 적용한 결과와 유사한 패턴을 나타내었다. 그러나 RTOR 비적용 시 차량 지체는 약간 증가하였고, 자전거 지체는 약간 감소하였다. 이러한 효과는 해당 접근로의 우회전 교통량의 크기에 따라 변화할 것으로 예상된다.

차량과 자전거 지체를 분석한 결과, 자전거 대기공간의 크기는 차량의 지체에는 영향을 미치지 않지만 자전거의 지체에는 중요한 요소로 작용하는 것으로 나타났다. 자전거 대기공간이 부족한 경우에는 자전거 지체가 급격하게 증가할 수 있음을 확인하였고, 수요에 대응하는 대기공간을 제공하면 지체가 안정화되는 패턴을 나타내는 것으로 나타났다. 따라서 적정한 대기공간을 확보하여 제공하는 것이 교차로 운영상 매우 중요한 요소가 될 수 있다.

적정한 대기공간의 크기는 다음과 같이 개략적으로 요약될 수 있다. RTOR 적용 시에는 6대의 대기공간이 필요하나, 자전거 좌회전 교통량이 120대보다 많은 경우에는 9대 정도의 대기공간을 제공하는 것이 타당하다. RTOR 비적용 시에는 6대의 대기공간이 필요하나, 자전거 좌회전 교통량이 90대보다 많은 경우 12대 정도의 대기공간을 제공하는 것이 타당하다. 본 연구에서 제안된 내용을 향후 다양한 포화도와 자전거 교통량, 자전거 교통량 회전비율, 그리고 다양한 기하구조 조건 하에서 평가하여 분석한다면 보다 정교한 기준을 제시할 수 있을 것으로 생각되며, 아울러 현장평가를 통하여 이러한 내용을 확인한다면 본 연구결과의 실용성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

REFERENCES

- [1] Ministry of Public Administration and Security(2008), *Activate cycling comprehensive measures*.
- [2] Ministry of land, Infrastructure, and Transport (2009), *Bicycle road infrastructure standards and management guidelines*.
- [3] Choi G. H. and Lee Y. I.(2008), "A Study on the Signal Control for Heterogenous Traffic at Signalized Intersection Considering Effect of Bicycles," *Proceeding of the 7th Conference of Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, pp.37-48.
- [4] Han W. S., Whang S. H., Hyun C. S., Lee H. W., Oh Y. T. and Lee C. K.(2008), "A Study on Introduction of Bike Exclusive Focused on Traffic Condition," *Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 7, no. 5, pp.77-89.
- [5] Lee J. H.(2010), *A Study on the Location of Waiting Space for Bicycle's Hook-turn at the Intersection*, Master Thesis, Ajou University.
- [6] Mok S. J., Kim E. C. and Heo H. B.(2013), "A Study on Efficient Management of Bicycle Traffic Flow at Four-Legged Intersections," *International Journal of Highway Engineering*, vol. 15, no. 3, pp.177-189.
- [7] Lee C. M., Lee S. S., Cho H. S. and Nam D. H.(2014), "Assessment of Bicycle Left-turn Traffic Control Strategies at Signalized Intersections," *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 32, no. 6, pp.579-588.
- [8] Patric D., Joseph E. and Roupail M.(1998), "Effect of Bicycles on Capacity of Signalized Intersections," *TRR 1646*, pp.87-95.
- [9] Moeur R. C.(1999), *Bicycle-Specific Traffic Control*, http://www.richardcmoeur.com/docs/bike_spectrctrl.pdf.
- [10] Jennifer D., Christopher M. and Nathan M.(2012), "Evaluation of Bike Boxes at Signalized Intersections," *Oregon Transportation Research and Education Consortium*, vol. 44, no. 1, pp.126-134.
- [11] Quan Y. and Dongye S.(2011), "Study on Bicycle Signal Timing Algorithm at Signalized Intersection," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 71, pp.4044-4047.
- [12] Steven E., Shladover, Kim Z., Meng C. and Ashkan S.(2009), "Bicyclist Intersection Crossing Times," *TRR 2128*, pp.86-95.
- [13] American Association of State Highway and Transportation Officials(1999), *Guide for the Development of Bicycle Facilities*.

저자소개



임 국 현(Lim, Guk-Hyun)
2014년 9월~현재 : 한국교통연구원 연구원
2012년 9월~2014년 9월 : 아주대학교 석사 졸업(교통공학 전공)
e-mail : ghlim0329@naver.com



김 남 선(Kim, Nam-Sun)
2005년 2월 : 아주대학교 박사(교통공학 전공)
1999년 2월 : 아주대학교 석사(교통공학 전공)
2015년 6월~현재 : 경찰청 경찰대학 치안정책연구소 책임연구원
e-mail : nsk@chol.com



이 상 수(Lee, Sang-Soo)
2000년 : Texas A&M University 박사 (교통전공)
2001년~2002년 : 한국건설기술연구원 선임연구원
2002년~현재 : 아주대학교 교통공학과 교수
e-mail : sslee@ajou.ac.kr



남 두 희(Nam, Doohee)
1996년 University of Washington 교통공학박사
1997년~1999년 : Washington State Dept. of Transportation
2000년 1월~2006년 8월 : 한국교통연구원 책임연구원
2006년 8월~현재 : 한성대학교 정보시스템공학과 교수
e-mail : doohee@hansung.ac.kr



김 정 태(Kim, Jeong-Tae)
2016년 아주대학교 박사과정 재학(교통공학전공)
2014년 11월~현재 : 한국도로공사 재난안전처 재난대책팀장
2006년 3월~2008년 8월 : 고려대학교 공학석사(CM전공)
1991년 10월~현재 : 한국도로공사 입사후 재직중
e-mail : kim1825@ex.co.kr