

혼합교통류 신호교차로에서 자전거교통 좌회전 통행방식 평가연구

Evaluation of Left-Turn Passages for Bicycle Traffic in Mixed Traffic Stream at Signalized Intersections

주 신 혜 Joo, Shinhye
오 철 Oh, Cheol
이 상 수 Lee, Sangsoo

정회원 · 한양대학교 교통공학과 석사수료 (E-mail : noble0401@hanyang.ac.kr)
정회원 · 한양대학교 교통·물류공학과 교수·교신저자 (E-mail : cheolo@hanyang.ac.kr)
아주대학교 교통공학과 교수 (E-mail : sslee@ajou.ac.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : This study proposes a novel method based on microscopic simulation models to evaluate bicycle passing ways in mixed traffic flow conditions at signalized intersections.

METHODS : Both operational efficiency and safety are taken into consideration in the evaluation. A widely used performance measure, delay, is used for evaluating the operational efficiency. Regarding the safety evaluation, surrogate safety measures (SSM) to represent traffic conflicts and the level of crash severity, DeltaS and Max.DeltaV, are applied in the proposed method.

RESULTS : Extensive simulations and statistical tests show that an integrated bike-box way is identified as the best in terms of operational efficiency and safety.

CONCLUSIONS : The proposed method and outcomes of this study will be valuable for bicycle traffic operations and facility design.

Keywords

mixed traffic flow, bicycle passing way, bike-Box, VISSIM, surrogate safety measures(SSM)

Corresponding Author : Oh, Cheol, Professor
Department of Transportation & Logistics Engineering,
Hanyang University, 55 Hanyangdaehak-Ro, Sangrok-Gu,
Ansan-Si, Gyeonggi-Do, 426-731, Korea
Tel : +82.31.400.5158 Fax : +82.31.436.8147
email : cheolo@hanyang.ac.kr

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

1. 서론

현재 국내·외 교통정책은 저탄소 녹색성장을 목표로 탄소저감 및 지속가능한 개발이라는 측면에서 차량 이외에 녹색교통수단에 초점을 두고 있다. 이에 정부는 녹색교통사업의 일환으로 자전거 이용 활성화를 적극 추진하고 있다. 이에 따라 자전거이용자가 점차 증가하고 있으며 자전거도로의 연장 또한 확대되는 추세이다. 자전거 시장의 규모 역시 빠르게 증가하고 있으며, 국내

몇몇 지자체는 자체적인 공공자전거 사업을 추진하고 있다. 또한, 자전거도로 및 자전거 교통안전시설 설치기준을 마련하여 시행하고 있다. 자전거도로 인프라와 관련한 설계기준은 마련되어 있으나 자전거 교통운영과 관련한 기준 및 연구는 미약한 실정이며, 자전거도로의 연결성 및 안전성 미확보로 교통사고 위험에 노출되어 있다. 특히, 현 차량 교통류와 자전거 교통류가 혼재하는 교차로에서의 통행방식, 신호운영 등과 관련한 연구

는 부족한 실정이다.

최근 간선도로변에 도입하는 자전거 전용도로가 설치되면서 자전거이용자가 급증하는 실정이며 이에 따라 자전거-보행자, 자전거-차량간의 상충이 빈번히 발생하여 교통사고 위험이 높은 상황이다. 현재 자전거는 교차로 횡단 시 보행자횡단보도 또는 보행자횡단보도에 부수적으로 자전거 횡단보도를 설치하여 이용하고 있다. 그러나 이와 같은 횡단행태는 보행자와 자전거간의 상충을 발생시키며 자전거의 이동성 및 연속성을 저하시킨다. 자전거 이용활성화를 위한 자전거 전용도로를 설치할 경우, 차량과의 상충으로 심각한 교통사고를 유발한다. 이와 같이 자전거-보행자, 자전거-차량의 혼재하는 상충구간에서의 자전거운영관리전략이 필요하다. 특히, 상충다발구간인 교차로에서는 각 수단간의 특성 차이를 반영하여 혼합교통류의 원활한 흐름을 보장하는 운영효율성과 혼합교통류간의 상충 등 안전성 측면을 모두 고려한 새로운 교차로 통행방법을 마련해야 한다.

따라서 본 연구에서는 혼합교통류의 운영효율성 측면과 안전성 측면을 고려한 신호교차로에서의 자전거 통행방식 평가방법론을 제시하고 기존의 통행방식을 대상으로 평가를 수행하였다.

본 연구의 2장에서는 신호교차로에서의 자전거 사고 분석 및 자전거이용자의 교차로 횡단과 신호운영에 관한 국내·외 기존문헌을 고찰하였으며, 3장에서는 분석 개요 및 시나리오 설계, 분석방법론을 제시하였다. 4장에서는 시뮬레이션을 통한 신호교차로에서의 자전거 통행방식의 운영효율성 및 안전성 분석결과를 제시하고, 5장에서는 본 연구에서 도출된 결론과 향후과제를 제시하였다.

2. 기존문헌 고찰

본 장에서는 신호교차로에서의 자전거 사고분석 및 자전거이용자의 교차로 횡단과 신호운영에 관한 국내·외에서 실시된 연구를 제시하였다.

오주택(2007)등은 안전성 측면에서 도시부 신호교차로의 자전거 사고에 영향을 미치는 영향인자들에 대한 분석을 시도하였다. 교차로 주변시설 및 교통량 등을 주요설명변수로 설정하여 포아송회귀모델을 제시하였다. 김도현(2008) 등은 사지교차로에서 발생한 자전거 사고 자료에 대한 분석 및 현장조사를 실시하였으며 다항로짓모형을 이용하여 자전거 사고유형 분석모형을 개발하였다. Kim et al.(2007)은 자전거-차량간 사고에서 자

전거이용자의 사고심각도에 영향을 미치는 요인을 다항로짓모형을 이용하여 분석하였다.

Chong et al.(2010)은 보행자-자전거, 자전거-차량 공유도로의 적절한 설계를 위해 사망자료를 이용하여 교통류간의 충돌사고 발생비율과 사고발생 심각도를 분석하였다. 공유도로에서 적절한 제어가 없다면 상충발생이 증가할 것이며 사고위험이 크다는 결론을 제시하였다. Carter et al.(2007)은 교차로 특성을 고려한 접근 우선순위를 이용하여 자전거 이용자를 위한 교차로 안전지표를 개발하였다.

이재영(2005) 등은 자전거의 교차로 통행방법에 대해 분류하고 좌회전 통행방법 적용을 위한 기준을 제시하였다. 자전거의 좌회전 방법을 좌회전차로를 부여하는 직접좌회전과 현재와 같이 직진횡단 후 대기하다가 신호시 횡단하는 간접좌회전을 제시하였으며, 직접좌회전을 위해서는 자동차통행이 시간당 1,200대, 자동차 통행속도 50kph를 제시하였다. 손영태(2007) 등은 자전거이용자가 교차로를 안전하게 횡단할 수 있는 시간(최소녹색시간, 소거손실시간 등)을 자전거 이용수요가 많은 현장에서 자전거이용자의 횡단특성에 따라 분석하였다. 횡단특성은 정지상태에서 출발하는 형태(Stopping), 주행중인 속도로 횡단하는 형태(Riding), 자전거를 끌고 가는 형태(Pulling) 등으로 구분하였다. 횡단속도 및 횡단거리를 이용하여 최소녹색시간 및 소거손실시간 산출 방법론을 제시하였다. 최광현(2008) 등은 교차로에서 자전거의 적합한 통행방법으로 직진 후 건너편 직진신호에서 좌회전이 이루어지는 'Hook-turn' 체계를 제안하였으며, 기존의 차량 위주의 신호운영방식에서 자전거 교통이 미치는 영향을 고려한 신호운영방안을 제시하였다.

Shladover et al.(2009)은 자전거 이용자를 위한 신호제공으로 그에 따른 자전거 이용자의 교차로 횡단행태를 분석하였다. 횡단속도 및 대기시간, 최종속도의 누적분포를 이용하여 신호현시를 산출하였다. Rouhieh and Alecsandru(2010)은 차량과 이용자의 안전성과 효율성을 제공할 수 있는 신호설계 방법론을 제시하였다. Neural-network model을 통해 독립신호, 차량연동, 자전거연동의 3가지 신호설계를 비교하였다. Koorey and Mangundu(2010)은 자전거와 일반차도의 결합으로 생기는 대기행렬로 인한 자전거 도로잠식 등에 관하여 조사하였다. 신호교차로 주변의 자전거 시설에 따른 차량행태를 분석하여 자전거 도로의 설계안을 제시하였다.

기존연구에서는 신호교차로에서의 자전거 사고자료

와 기하구조자료를 이용하여 자전거-차량 사고유형을 분석하였으며, 자전거 주행속도를 이용하여 신호현시 및 신호시간을 산출하였다. 본 연구에서는 자전거 교차로 횡단 통행방식을 정의하고 그에 따른 자전거전용도로 및 혼합교통류에서의 운영효율성 및 안전성을 고려한 자전거 통행방식 평가방법론에 초점을 맞추어 연구를 진행하였다.

3. 분석방법론

본 연구에서는 차량-자전거가 공존하는 혼합교통류 신호교차로에서의 안전하고 효율적인 통행방식 평가방법론을 제시하고자 한다. 따라서 차량과 자전거의 특성을 고려한 통행방식 및 그에 따른 교차로의 기하구조 설계와 교차로 운영효율성 및 안전성을 분석하였다. 선진국의 자전거 교차로 운영사례를 기반으로 자전거전용도로와 차도가 혼재하는 혼합교통류 신호교차로에서의 통행방식을 제시하였다. 각 통행방식별 시뮬레이션을 통해 평균지체 등을 도출하여 운영효율성을 평가하였으며, 교통안전대체지표(Surrogate Safety Measure: SSM)를 통해 안전성을 평가하여 최적 통행방식을 제시하고자 한다. Fig. 1에 연구흐름도를 제시하였다.

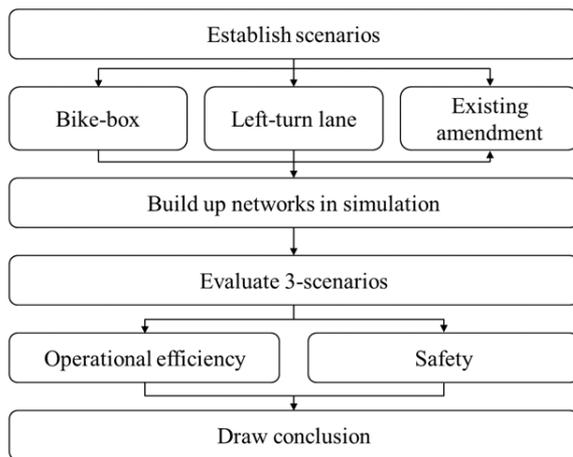


Fig. 1 Proposed Study Procedure

3.1. 자전거 주행특성

본 연구에서는 보다 현실성 및 신뢰성 높은 시뮬레이션 구현을 위하여 자전거의 주행특성인 속도를 정의하기 위한 실험을 수행하였다. 실험을 통해 수집된 자전거속도는 시뮬레이션 구현 시, 자전거의 설계속도에 적용하였다.

실험구간은 과속방지턱, 종단경사 등의 주행방해요인이 없고, 노면상태가 균일한 안정한 상태인 한양대학교

교내의 호수공원으로 선정하였다. 자전거GPS속도계를 장착한 실험자전거로 호수공원을 약 1.5km 5회 반복주행하여 자료를 수집하였다. 주행실험 결과 평균속도는 15.12kph로 도출되었다. 실험결과를 토대로 15kph를 자전거 주행속도로 설정하였다. Fig. 2에서 호수공원에서의 속도변화를 제시하였으며, 수집된 속도의 기술통계량을 Table 1에서 제시하였다. 한편, 고양시에서는 현재 운영되고 있는 공영자전거의 이름인 “FIFTEEN”은 자전거의 평균속도 15kph가 자전거의 적정 주행속도라는 것에서 착안하여 명명하였기 때문에 본 실험결과로 도출한 15kph의 주행속도는 타당한 것으로 판단된다.

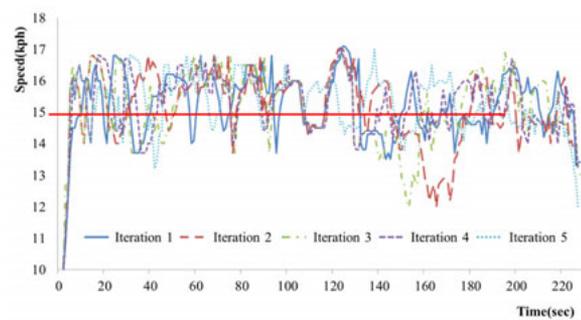


Fig. 2 Bicycle Speed Profiles

Table 1. Descriptive Statistics for Speed

	Travel distance (km)	Average of travel time (s)	Descriptive statistics(kph)		
			Average	Max. speed	Min. speed
1	1.48	352	15.16	17.1	5.7
2	1.52	367	15.06	17.0	4.8
3	1.49	356	15.10	16.9	6.7
4	1.51	360	15.09	17.3	5.3
5	1.48	350	15.21	17.2	4.6

3.2. 시나리오 설계

본 연구에서는 운영효율성을 평가하기 위해 VISSIM 5.10을 이용하여 네트워크 및 개별수단의 지체 등을 도출하였다. 또한 VISSIM을 통해 수집된 개별차량 및 자전거의 주행궤적을 적용하여 SSAM(Surrogate Safety Assessment Measure) S/W를 통해 안전성지표를 도출하여 각 시나리오별 안전성을 평가하였다.

본 연구에서의 시뮬레이션 기본환경을 Table 2에 제시하였다. 모든 방향 양방 2차로, 자전거 전용차로 1차로의 교차로의 기하구조를 구축하였으며, 교차로에 접근하는 모든 방향의 접근로 길이를 300m로 설계하였다. 또한 「자전거 도로 시설기준 및 관리지침(2009)」을

기준으로 하여 도로의 폭원은 차도 3.5m, 운행속도는 차량 50kph, 차량의 길이 5m로 설정하였다. 자전거의 특성을 반영하기 위하여 앞서 실험을 통해 도출한 자전거 속도 15kph, 자전거의 길이는 2m로 설정하였으며 자전거 전용도로 폭원은 1.5m, 자전거의 평균차두시간을 1.2로 설정하였다. 교통량은 MUTCD(Manual on Uniform Traffic Control Device)의 자전거 전용 신호 설치기준에서 제시하는 최소자전거 교통량 50대, 차량교통량은 300대일 경우와 최대 차량교통량 500대로 설정하였다.

v/c 는 1.0으로 가정하여 신호주기를 120초로 설정하였다. 신호현시 및 신호시간을 Fig. 3에 제시하였다. 신호최적화가 아닌 운영방식의 검토이므로 3개의 시나리

오의 기본 교통환경(교통량, 회전비율 등)을 동일하게 하여 동일현시를 적용하였을 때의 결과 값을 비교하도록 하였다. 따라서 회전비율이 직진 55%, 좌회전 40%, 우회전 5%로 동시신호를 적용하였다. 차량용 신호와 자전거용 신호가 분리된 신호로 8현시로 설정하였다.

자전거 교차로 통행방식 시나리오는 해외사례 및 국내사례 개선방안의 3개로 설정하고 그에 따른 결과 값을 분석하였다. 자전거 통행방식 시나리오는 회전교통류를 따로 구분하지 않고 대기공간을 마련하는 통합형 Bike-box방식(Scenario 1), 자전거 좌회전차로를 따로 부여하는 Left-turn lane방식(Scenario 2), 현재 운영방식의 개선(회전교통류 분리하지 않음, Scenario 3)등이다. Fig. 4에 3개의 시나리오를 제시하였다.

Table 2. Simulation Conditions

	Vehicle	Bicycle	note
Number of lane	4	2	Two way
Width of lane(m)	3.5	1.5	one lane
Design speed(kph)	50	15	reference (10)
Length of vehicle(m)	5	2	reference (7)
Design acceleration(m/s ²)	4.5	2.5	reference (8)
Headway(s)	0.5	1.2	reference (8)
Volume(vph)	300 / 500	50	$v/c=1.0$
Length of bike-box	-	5	reference (19)
Length of access link(m)	300		-
Rate of turn-vehicle(%)	Through : 55%, Left-turn : 40%, Right-turn : 5%		-
Simulation time(s)	3600		-
Number of iteration	30		-



Fig. 3 Signal Phase and Timing

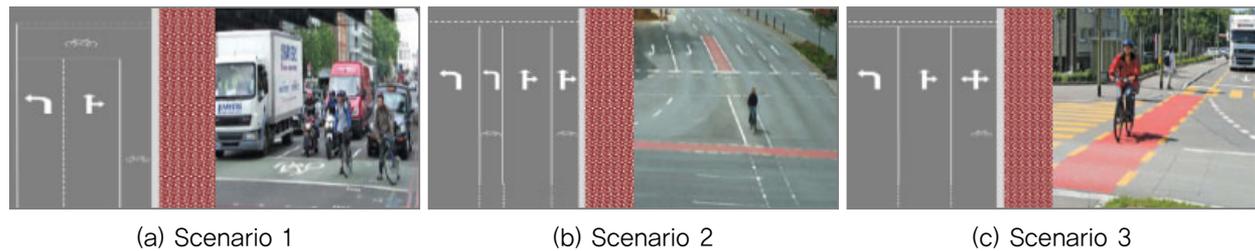
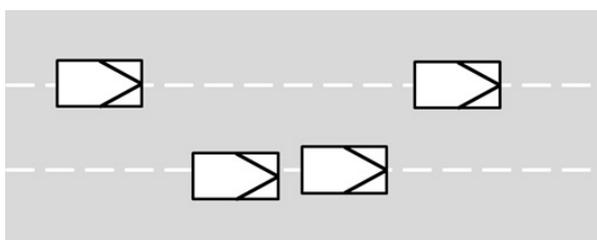


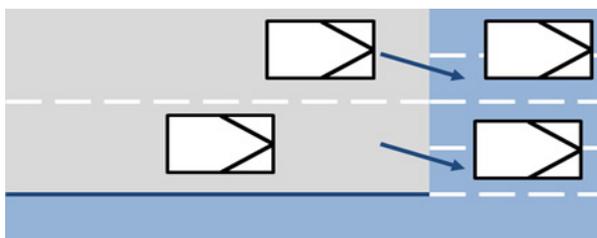
Fig. 4 Left-turn Passage Scenarios

3.2.1. Scenario 1 : 통합형 Bike-Box 방식

유럽 및 미국의 일부 도시에서 사용하고 있는 교차로의 통행방식으로 횡단보도 뒤에 자전거가 대기할 수 있는 공간을 만들고 그 뒤에 자동차 정지선을 설치하여 자전거교통류의 이동성 및 안전성을 보장해준다. 이 통행방식의 경우 자전거가 차량 앞에 대기함으로써 자전거 이용자의 시인성을 높여준다는 특징이 있다. 자전거 우선신호를 부여하여 자전거 교통류의 해소 후 차량신호를 부여하여 차량이 진행하는 방식이다. 통합형 Bike-box 방식은 자전거이용자가 좌회전을 위해 차량의 직진차선을 건너 좌회전 자전거 차선으로 이동 시 차량과의 상충으로 생기는 안전상의 문제점을 해결해주기 위한 방식으로 자전거 차선을 통해 교차로에 접근, 차량의 정지선 앞에 위치한 Bike-box로 이동하여 대기하는 방식이다(Fig. 4-(a) 참고). 자전거의 회전교통류를 Bike-Box내에서 분리함으로써 자전거의 안전성을 보장하는 방식이다. 본 연구에서는 Bike-box의 길이(자전거정지선에서 차량정지선까지의 거리)를 5m로 설정하였다. 시뮬레이션 상에서 링크구현 시 차로수로 인식하기 때문에 Bike-box와 같은 대기공간 구현에 한계가 있다. 따라서, 현실과 유사한 구현을 위하여 Fig. 5와 같이 차로폭이 좁을 경우 차량은 두 차로를 한 차로와 같이 사용하여 주행하기 때문에 이를 고려하여 Bike-box내 두 차로를 차량 한 차로로 인식하여 차량 주행이 가능하도록 구현하였다. 자전거의 Bike-box 진입 시 Priority rule을 적용하여 최소 gap-time 3.0(Default 값)일 때 자전거의 우선통행을 부여하였으며, 모든 Conflict Area에서 자전거의 우선통행을 부여하였다.



(a) Vehicle characteristic on narrowing lane in simulation



(b) Bike box

Fig. 5 Bike-box Simulation

3.2.2. Scenario 2 : Left-turn lane 방식

Left turn lane 방식은 독일 FSGV(Empfehlungen für Radverkehrsanlagen: 도로교통연구소)에서 제시한 방법으로 차량의 좌회전차선과 직진차선 사이에 자전거 좌회전차선을 설치하여 자전거이용자가 원만한 직접 좌회전을 진행할 수 있도록 해주는 방식이다. 이 통행방식의 경우 자전거의 회전교통류를 분리함으로써 개별자전거의 원활한 진행을 유도하며, 자전거가 차량의 전방을 가리지 않기 때문에 차량신호와 동시에 운영이 가능하고, 또한 직진과 좌회전의 분리 신호운영이 가능하다(Fig. 4-(b)). 시나리오 1과 마찬가지로 시뮬레이션 네트워크 구현 시, 자전거의 Bike-box 진입 시 Priority rule을 적용하여 최소 gap-time 3.0(Default 값)일 때 자전거의 우선통행을 부여하였으며, 모든 Conflict Area에서 자전거의 우선통행을 부여하였다.

3.2.3. Scenario 3 : 현 운영방식의 개선

현재 운영방식의 개선방안은 차도의 우측에 자전거 전용도로 설치 시 회전교통류를 분리하지 않고 한 차선 내에서 직진, 좌회전, 우회전을 모두 수행하는 방식이다. 현재 보행자 횡단보도 또는 횡단보도 옆 추가 자전거 횡단보도와 달리 도로에 직접 횡단로 및 자전거 전용신호기를 설치함으로써 자전거의 이동성 및 연속성을 확보할 수 있다(Fig. 4-(c)). 타 시나리오와 마찬가지로 시뮬레이션 구현 시 모든 Conflict Area에서 자전거의 우선통행을 부여하였다.

3.3. 분석지표

본 연구에서는 분석지표를 혼합교통류의 운영효율성을 평가할 수 있는 지표와 혼합교통류의 안전성을 평가할 수 있는 지표로 나누어 설정하였다. 운영효율성 지표로는 평균지체를 사용하였으며, 안전성 지표는 상충건수 및 사고심각도 지표(DeltaS, MaxDeltaV)로 설정하였다. 운영효율성 지표인 평균지체는 결과적으로 나타난 현상을 통해 도출되는 지표이며, 안전성 지표로 사용된 상충건수와 사고심각도 지표(DeltaS, MaxDeltaV)는 향후 사고발생 개연성에 대한 단기예측 결과값으로 두 평가지표는 운영효율성 및 안전성 분석에서 자주 사용되는 지표로 각 지표간의 상충발생은 없는 것으로 판단된다. 또한, 기존의 시뮬레이션을 이용한 교통관리전략 평가연구에서도 운영효율성 측면에서는 속도 또는 지체, 안전성 측면에서는 상충유형 및 건수를 사용한 바 있다(20-22).

3.3.1. 운영효율성 평가지표

혼합교통류의 운영효율성을 평가하는 지표로는 전체 네트워크상 모든 차종에 대한 평균지체 및 자전거 교통류의 평균지체, 교차로 반경 100m내 모든 차종에 대한 평균지체 및 자전거 교통류의 평균지체로 설정하였다. 지체는 교통흐름의 상태를 평가하는 척도의 일종으로 단속류에서 어느 일정한 구간을 이동하는 교통류가 교차로의 신호에 의해 통행시간이 증가할 때 그 증가된 시간을 포함한 총 통행시간을 의미한다. 본 연구에서는 자전거 교차로 통행을 포함한 혼합교통류의 지체를 비교하여 자전거 교차로 통행방식에 따른 혼합교통류 교차로의 운영효율성을 평가하였다.

3.3.2. 안전성 평가지표

혼합교통류의 안전성을 평가하는 지표로는 시뮬레이션의 주행궤적자료를 이용한 수단간 후미추돌, 교차상충, 차로변경으로 인한 상충 발생건수 추정 및 상충발생시 상충수단간 속도차를 판단지표로 사용하였다.

도로위를 주행하는 차량은 현재 주행중인 차선과 이웃한 차선을 주행하는 차량들과의 차량추종과 차로변경에 의하여 상호작용이 계속적으로 발생한다. 또한 교차로에서는 차량회전에 따른 상호작용이 발생하게 된다. 충돌을 회피하기 위하여 차선변경 및 속도 가·감속을 할 수 있다. 현재의 상태가 유지될 경우 후미추돌 및 상충이 발생하게 된다. 이때의 충돌을 나타내는 요소는 time-to-collision(TTC)이다. 따라서 TTC를 통해 상충발생위험을 판단하고, 자전거측면에서의 안전성 확보를 목적으로 발생한 개별상충에 대하여 자전거와 타수단간의 상충발생 건수를 도출하였다. 또한, 도출된 상충의 심각도를 판단하기 위하여 DeltaS와 Max.DeltaV를 분석지표로 활용하였다. 분석에 사용된 TTC, DeltaS, Max. DeltaV 등의 Surrogate Safety Measure(SSM)에 대한 정의는 다음과 같다.

■ TTC(Time-to-collision)

TTC는 현재의 속도 및 경로가 유지될 경우, 충돌이 발생하기까지의 시간으로 차간간격과 속도차에 의하여 산출된다. 본 연구에서는 TTC가 1.5초 이하일 경우 상충 발생으로 판단하게 된다(Gettman, 2003).

$$TTC = \frac{x_s(t) - x_f(t) - l_s}{v_s(t) - v_f(t)} \quad (1)$$

x_i : Position v_i : Speed

f : Front vehicle s : Subject Vehicle

l : Vehicle length

■ DeltaS

DeltaS는 상충발생 시, 최소 TTC일 때 상충 이벤트의 시간동안 차량간의 속도차로, 상충심각도에 영향을 미치는 변수이다. 차량간의 속도차는 충돌발생 시 충돌 속도에 영향을 미치게 되어 속도차가 클수록 심각한 사고를 유발하게 된다.

$$Delta S = \|v_s - v_f\| \text{ (if } TTC_{min}) \quad (2)$$

v_i : Speed

f : Front vehicle s : Subject Vehicle

■ Max.DeltaV

DeltaV는 상충발생 시 최소 TTC일 때 상충속도와 충돌지점에서 두 차량의 추정된 속도간의 변화량을 의미한다. 이때, 속도변화량의 최대값을 Max.DeltaV라 하며, DeltaS와 마찬가지로 상충심각도에 영향을 미치는 변수이다.

$$Max.DeltaV = MAX(\|v_f^{conflict} - v_f^{post}\|, \|v_s^{conflict} - v_s^{post}\|) \quad (3)$$

$v_i^{conflict}$: Conflict Velocity

v_i^{post} : Post Collision Velocity

f : Front Vehicle s : Subject Vehicle

따라서 자전거-차량간의 상충발생건수가 적을수록, 상충발생 시 두 차량간의 속도차가 작아 심각도가 작을수록 안전성이 우수한 것으로 판단하였다.

4. 분석결과

4.1. 교차로 통행방식별 분산분석

교차로 통행방식에 따라 각 시나리오별 30회의 시뮬레이션 결과를 수집하였다. 수집자료는 각 통행방식별 전체네트워크 평균지체, 교차로 100m반경 평균지체, 주행궤적 등을 수집하였다. 수집된 자료를 활용하여, 평균지체와 안전성을 계량화한 지표들을 산출하였다. 산출한 각 시나리오별 특성변수들의 평균이 차이가 있음을 통계적으로 검증하기 위하여 분산분석을 수행하였다.

분산분석을 수행한 결과 차량교통량이 300vph일 경

우, 전체네트워크 평균지체, 교차로 100m반경 평균지체, DeltaS, Max.DeltaV의 유의확률은 0.000로 각 시나리오별 통계적 차이가 유의한 것으로 도출되었다. 그러나 사후검정 결과, 운영효율성의 전체네트워크 및 교차로 100m 반경의 각 수단에 대한 평균의 집단간 차

이가 뚜렷하지 않는 것으로 도출되었다. 이는 운영효율성 측면에서 교통량이 적을 경우 좌회전 통행방식에 대한 각 시나리오별 유의미한 차이가 없는 것으로 해석된다. 반면에 안전성 지표인 DeltaS와 Max.DeltaV는 시나리오별 유의미한 차이가 있는 것으로 나타나, 각 시나

Table 3. ANOVA and Post-hoc Test

ANOVA		300 vph					500 vph				
		Sum of squares	df	Mean square	F-value	Sig.	Sum of squares	df	Mean square	F-value	Sig.
Average Delay	B/W groups	969.570	2	484.785	81.268	0.000	78123.049	2	39061.525	50.359	0.000
	Within groups	518.978	87	5.965			67481.950	87	775.655		
	Total	1488.548	89				145605.000	89			
Average Delay (Intersection 100m)	B/W groups	1378.515	2	689.257	19.564	0.000	27362.659	2	13681.330	213.084	0.000
	Within groups	3065.110	87	35.231			5585.955	87	64.206		
	Total	4443.625	89				32948.615	89			
TTC	B/W groups	7.614	2	3.807	432.485	0.000	2.237	2	1.118	311.686	0.000
	Within groups	0.766	87	0.009			0.312	87	0.004		
	Total	8.380	89				2.549	89			
DeltaS	B/W groups	92.818	2	46.409	445.781	0.000	18.875	2	9.438	191.786	0.000
	Within groups	9.057	87	0.104			4.281	87	0.049		
	Total	101.875	89				23.156	89			
MaxDeltaV	B/W groups	45.478	2	22.739	527.604	0.000	12.682	2	6.341	307.836	0.000
	Within groups	3.750	87	0.043			1.792	87	0.021		
	Total	49.227	89				14.475	89			
Post-hoc test		300 vph					500 vph				
		Scenario	Subset for alpha=0.05			Scenario	Subset for alpha=0.05				
			1	2	3		1	2	3		
Average Delay	I	57.1637			I	122.545					
	II		51.1150		II		142.917				
	III			49.5526	III			192.688			
	Sig.	1.000	1.000	1.000	Sig.	1.000	1.000	1.000			
Average Delay (Intersection 100m)	I	59.5100			I	50.387					
	II		52.4967		II		77.973				
	III			50.3433	III			92.418			
	Sig.	0.343	1.000	1.000	Sig.	1.000	1.000	1.000			
TTC	I	0.7233			I	0.808					
	II		0.1830		II		0.593				
	III			0.8553	III			0.979			
	Sig.	1.000	1.000	1.000	Sig.	1.000	1.000	1.000			
DeltaS	I	1.9350			I	2.078					
	II		4.3693		II		3.185				
	III			3.5953	III			2.478			
	Sig.	1.000	1.000	1.000	Sig.	1.000	1.000	1.000			
MaxDeltaV	I	1.1760			I	1.198	?	?			
	II		2.9070		II		1.307				
	III			1.8783	III			2.043			
	Sig.	1.000	1.000	1.000	Sig.	1.000	1.000	1.000			

리오별 좌회전 통행방식에 따라 사고심각도 차이가 유의한 것으로 판단된다. 따라서 교통량이 적을 경우의 좌회전 통행방식 평가는 안전성 평가만을 고려하였다. 차량의 교통량이 최대인 500vph일 경우, 전체네트워크 평균지체, 교차로 100m반경 평균지체, DeltaS, Max.DeltaV의 유의확률은 0.000으로 각 시나리오별 통계적 차이가 유의한 것으로 도출되었다. 또한, 사후검정결과 각 시나리오간의 평균적 차이가 있는 것으로 분석되었다. 따라서 각 시나리오별 평가지표를 이용한 비교평가는 유의할 것으로 판단하였다. Table 3에 분산분석 결과 및 사후검정 결과를 제시하였다.

4.2. 운영효율성 평가

차량 교통량이 300vph일 경우, 혼합교통류 전체네트워크의 평균지체는 모든 차종에 대해서는 시나리오 3인 현재 교차로 통행방법 개선방식이 가장 우수한 것으로 도출되었으나 자전거 교통류측면에서는 시나리오 1인 통합형 Bike-box 방식이 47.3초로 가장 우수한 통행방식으로 도출되었다. 또한 접근로의 warm-up구간을 제외한 교차로 100m반경을 분석한 결과 평균지체가 시나리오 3인 현재 교차로 통행방법 개선방식이 가장 우수한 것으로 도출되었으나 자전거 교통류측면에서는 시나리오 1인 통합형 Bike-box 방식이 46.8초로 가장 우수한 통행방식으로 도출되었다. 그러나 앞서 사후검정결과를 제시한 바와 같이 시나리오별 차이가 유의하지

않기 때문에 교통량이 적을 경우의 시나리오별 운영효율성 비교는 유의하지 않는 것으로 판단되어 통행방식 평가에서 제외하였다. 차량 교통량이 최대인 500vph일 경우, 혼합교통류 전체네트워크의 평균지체는 모든 차종에 대해서는 시나리오 3인 현재 교차로 통행방법 개선방식이 가장 우수한 것으로 도출되었다. 그러나 자전거 교통류측면에서는 시나리오 1인 통합형 Bike-box 방식이 47.3초로 가장 우수한 통행방식으로 도출되었다. 또한 접근로의 warm-up구간을 제외한 교차로 100m반경을 분석한 결과 평균지체가 모든 차종 50.4초, 자전거 교통류 10.4로 가장 우수한 것으로 도출되었다. 분석반경 축소는 분석되는 교통량 등의 차이가 있어 전체 네트워크 분석과의 결과차이가 있으나 교차로 인근의 자전거 교통류의 빠른 해소로, 차량의 지체 및 양보 없이 그대로 진행이 가능하기 때문에 위와 같은 결과가 도출되는 것으로 판단된다.

시나리오 1인 Bike-box 방식은 우선적으로 자전거 교통류 해소 후 차량에게 진입신호를 주기 때문에 자전거 교통류 측면에서 안전성이 우수한 것으로 판단된다. 시나리오 2인 Left-turn lane 방식은 자전거 교통류가 자전거 전용 좌회전차로에 진입하기 위하여 적절한 차량전용차로의 gap을 대기하게 되고, 자전거 전용 좌회전차로 진입 시 차량의 지체를 발생하기 때문에 운영효율성이 가장 낮은 것으로 판단된다. Table 4에 운영효율성 분석결과를 제시하였다.

Table 4. Result of Operational Efficiency

(a) Average delay per vehicle in whole network(s)

		300 vph			500 vph		
		Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
All Type		57.2	51.1	49.6	192.7	142.9	122.6
Car		58.8	51.2	49.5	207.4	151.5	129.7
HGV		60	53	52.3	218.2	158.6	136.2
Bike		47.3	50.2	49.8	47.3	55.2	49.8
Rank	Aspect of all type	3	2	1	3	2	1
	Aspect of bike	1	3	2	1	3	2

(b) Average delay per vehicle at intersection (within a radius of 100-m) (s)

		300 vph			500 vph		
		Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
All Type		59.5	52.5	50.3	50.4	92.4	78
Car		61.6	52.8	50.4	42.4	74.1	60.6
HGV		62	53.8	51.6	20.9	35.9	21.6
Bike		46.8	50.4	49.8	10.4	23.1	30
Rank	Aspect of all type	3	2	1	1	3	2
	Aspect of bike	1	3	2	1	3	2

4.3. 안전성 평가

차량교통량이 300vph일 경우, 혼합교통류 교차로의 상충발생건수 추정결과 시나리오 3인 현재 교차로 통행방법 개선방식이 평균 43.4회로 가장 적게 발생하였으나 이와 같은 결과는 동일수단과의 상충을 포함한 전체 상충발생건수로 혼합교통류에서의 안전성의 평가지표로는 적절하지 않다고 판단된다. 혼합교통류에서는 여러 교통수단이 혼재하는 상태이기 때문에 다른 수단간의 상충발생에 초점을 맞추어 상충발생 시 심각한 사고로 연결되는 자전거 교통류에 초점을 맞추어 분석을 수행하였다.

분석결과, 시나리오 1이 자전거-차량간의 상충발생수가 가장 적으며, 자전거 관련 상충건수가 가장 적게 발생하는 것으로 나타났다. 또한, 발생하는 상충에 대하여 사고심각도 측면에서 DeltaS와 MaxDeltaV를 분석한 결과, 시나리오 1은 DeltaS가 1.93kph, MaxDeltaV가 1.17 kph로 사고발생 시 가장 사고심각도가 낮을 것으로 판단된다.

교통량이 500vph일 경우의 혼합교통류 교차로의 상충발생건수 추정결과, 교통량이 적을 경우와 마찬가지로

로 시나리오 3인 현재 교차로 통행방법 개선방식이 평균 172.5회로 가장 적게 발생하였다. 그러나 이와 같은 결과는 앞서 설명한 바와 같이 혼합교통류에서의 안전성의 평가지표로는 적절하지 않다고 판단하여 수단간의 상충발생에 초점을 맞추어 분석하였다.

발생된 개별상충에 대하여 차종에 따른 상충건수를 분석한 결과 자전거와 관련한 상충건수가 평균 29.3회로 시나리오 1인 통합형 Bike-box가 가장 우수한 교차로 통행방식으로 도출되었다. 시나리오 2인 Left-turn lane방식은 자전거간의 상충발생은 가장 적으나 자전거 전용 좌회전차로를 진입하기 위한 차로변경으로 자전거-차량간의 상충이 과다하게 발생하는 것으로 판단된다. Table 5에 상충발생건수 결과를 제시하였다.

또한, 발생하는 상충에 대하여 사고심각도정도를 추정하기 위하여 SSM으로 선정한 DeltaS와 MaxDeltaV를 분석하였다. Table 6에 DeltaS와 MaxDeltaV의 결과를 제시하였다. 분석결과, DeltaS는 차량간의 속도차이가 클수록 충돌속도에 영향을 미치므로 속도차가 작을수록 안전성이 우수한 것으로 판단되며, 시나리오 1은 2.1kph로 가장 우수한 통행방식으로 도출되었다.

Table 5. Result of Conflict Analysis

		300 vph			500 vph		
		Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
Bike-related conflict	Bike-Vehicle	6.3	19.3	8.9	4.2	73.9	6.1
	Bike-Bike	18.3	6.8	19.4	25.1	8.6	25.2
	Total	24.6	26.1	28.3	29.3	82.5	31.3
Vehicle-to-vehicle Conflict		51.7	51.1	15.1	218.9	303.7	141.2
Number of conflicts(All types)		76.3	77.2	43.4	248.2	386.2	172.5

Table 6. Result of Surrogate Safety Measure(SSM)

(a) DeltaS

	300 vph					500 vph				
	Min	Max	Mean	Variance	Rank	Min	Max	Mean	Variance	Rank
Scenario 1	0	17.36	1.93	5.94	1	0	18.5	2.1	4.2	1
Scenario 2	0	14.88	4.37	5.46	3	0	15.4	3.2	5.7	3
Scenario 3	0	12.65	3.6	6.63	2	0	14.5	2.5	4.9	2

(b) MaxDeltaV

	300 vph					500 vph				
	Min	Max	Mean	Variance	Rank	Min	Max	Mean	Variance	Rank
Scenario 1	0	16.44	1.17	3.33	1	0	16.7	1.2	2.4	1
Scenario 2	0	13.05	2.91	3.12	3	0	14.8	2	3	3
Scenario 3	0	6.59	1.88	1.88	2	0	11.7	1.3	1.5	2

MaxDeltaV는 상충발생시 두 차량간의 최대 속도차로 속도차이가 클수록 충돌속도가 클 것으로 판단된다. 따라서 시나리오 1이 1.2kph로 가장 사고심각도가 낮을 것으로 판단된다.

충돌발생 시 충돌속도에 영향을 미치는 두 차량간의 속도차이가 가장 적은 것으로 도출된 시나리오 1인 통합형 Bike-box 통행방식이 안전성이 가장 우수한 통행방식으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 차량-자전거가 혼재하는 혼합교통류 신호교차로에서의 안전하고 효율적인 통행방식 도출 평가방법론을 제시하였다. 차량 및 자전거의 특성을 고려한 통행방식 및 그에 따른 교차로의 기하구조 설계와 교차로 안전성 및 운영효율성을 분석하였다. 선진국의 자전거 교차로 운영사례를 기반으로 자전거전용도로와 차도가 혼재하는 혼합교통류 신호교차로에서의 통행방식을 제시하였다. 각 통행방식별 시뮬레이션을 통해 평균지체등을 도출하여 운영효율성을 평가하였으며, 상충발생건수 및 SSM을 통해 안전성을 평가하였다.

자전거 교차로 통행방식 기본 시나리오를 3개로 설정하고 운영효율성 및 안전성을 분석하였다. 시나리오 1은 회전교통류를 따로 구분하지 않고 대기공간을 마련하는 통합형 Bike-box방식, 시나리오 2는 자전거 좌회전차로를 따로 부여하는 Left-turn lane방식, 시나리오 3은 현재 운영방식의 개선(회전교통류 분리하지 않음)이다. 각 통행방식별 혼합교통류의 운영효율성을 평가할 수 있는 지표인 평균지체와 혼합교통류의 안전성을 평가할 수 있는 지표로 상충건수 및 사고심각도에 영향을 미치는 DeltaS, Max.DeltaV를 설정하여 각 교차로 통행방식을 평가하였다.

분석결과 전체 네트워크 지체 및 총 상충발생건수로 판단할 경우, 시나리오 3이 우수한 것으로 도출된다. 그러나 본 연구에서는 혼합교통류에서 상대적으로 약자인 자전거에 초점을 맞추어 분석을 수행하였다. 따라서 운영효율성 측면에서는 교차로 내 지체 및 자전거 교통류에 지체를 평가지표로 이용하였으며, 안전성 측면에서는 자전거-차량간 상충건수, 상충발생 시 심각도를 평가지표로 선정하였다. 시뮬레이션의 혼합교통류 교차로의 평균지체 및 자전거 교통류의 평균지체 비교결과, 기본시나리오 1인 통합형 Bike-box방식이 가장 우수한 것으로 도출되었다. 또한 시나리오 1은 자전거와 차량

간의 상충건수가 가장 적고, 상충발생시 속도차가 가장 작아 사고심각도가 낮을 것으로 판단된다. 따라서 운영효율성과 안전성을 모두 고려하였을 경우, 차량정지선 전방에 대기공간을 마련함으로써, 자전거교통류의 안전하고 빠른 해소가 가능한 통합형 Bike-box가 가장 우수한 교차로 통행방식으로 도출되었다.

향후 본 연구의 신뢰성을 향상시키기 위해서는 다음과 같은 추가적인 연구가 수행되어야 한다.

첫째, 본 연구는 시뮬레이션을 통한 간접평가이므로 자전거와 차량간의 관계 및 행태를 분석하여 시뮬레이션 구현 시 파라미터 설정 및 정산과정을 통해 보완해야 할 것이다. 또한 설문조사 등을 통해 이용자측면에서의 평가가 이루어져야 할 것이다.

둘째, 각각의 교차로 통행방식에 적합한 신호현시 및 신호시간 최적화를 통해 통행방식의 운영효율성을 검증해야 할 것이다.

셋째, 본 연구에서 설정한 변수 외에 운영효율성 및 안전성을 평가할 수 있는 관련변수를 고려할 필요가 있으며, 다양한 교통환경(회전비율, 교통량 등)에서의 평가가 이루어져야 한다. 또한 전문가 설문조사 등을 통해 다기준의 평가 시, 평가지표간의 가중치를 산출하여 우선순위를 평가하는 추가연구가 수행되어야 할 것이다.

본 연구에서 제시한 통행방식 및 평가방법론은 자전거 전용도로 설계 및 자전거-차량, 자전거-보행자가 혼재하는 혼합교통류 상태에서의 교통운영 및 안전성 분석에 활용이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2010-0029449)

References

- Alecsandru, Ciprian, Rouhieh, Behzad, Huang, Kuo Cheng, 2010, Multimodal Signal Optimization of Urban Arterials and Bicycle Paths: Case Study, *Transportation Research Board Annual Meeting 2010 Paper #10-0536m*, pp.17
- Atkins Service commissioned by Transport for London, 2005, *Advanced Stop Line Variations Research Study*.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 1999, *Guide for the Development of Bicycle*
- Bachmann, Chris, Roorda, Matthew J., Abdulhai, Baher, Improved Time-to-Collision Definition for Simulating Traffic Conflicts

- on Truck-Only Infrastructure, Transportation Research Record: *Journal of the Transportation Research Board*, No. 2237, pp. 31-40.
- Carter, Daniel L, Hunter, William Wesley, Zegeer, Charles V, Stewart, J Richard, Huang, Herman F, 2007, Bicyclist Intersection Safety Index, Transportation Research Record: *Journal of the Transportation Research Board*, Issue 2031, pp 18~24
- Choi, K. H., and Lee, Y. I., 2008, A Study on the signal control for heterogenous traffic at signalized intersection considering effect of bicycles, *The Autumn Conference of Korea Institute of ITS 2008*, The Korea Institute of Intelligent Transport System, pp.37-45
- El-Tantawy, Samah, Djavadian, Shadi, Roorda, Matthew J., Abdulhai, Baher, 2011, Safety Evaluation of Truck Lane Restriction Strategies Using Microsimulation Modeling, Transportation Research Record: *Journal of the Transportation Research Board*, No. 2099, pp. 123-131.
- Federal Highway Administration (FHWA), 2009, *Manual in Uniform Traffic Control Devices*.
- Gettman, Douglas, L. Head, 2003, *Surrogate Safety Measures from Traffic Simulation Models Final Report*, Federal Highway Administration(FHWA)
- Kim, D. H., Cho, H. S., and Kim, E. C., 2008, A Study on Bicycle Accident Patterns at Urban Intersections, *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, Vol.10, No.4, Korean Society of Road Engineers, pp.117~125
- Kim, T. J., Oh, C., and Kang, K. P., 2011, Prediction of Rear-end Crash Potential using Vehicle Trajectory Data, *Journal of Korean Society of Transportation*, Vol.29, No.3, pp.73-82
- Kim, Joon-Ki, Sungyop Kim, Gudmundur F. Ulfarsson, Luis A. Porrello, 2007, Bicyclist injury severities in bicycle-motor vehicle accidents Original Research Article, *Accident Analysis & Prevention*, Volume 39, Issue 2, pp.238~251
- Koorey, Glen, Mangundu, Elizabeth, 2010, Effects on Motor Vehicle Behavior of Color and Width of Bicycle Facilities at Signalized Intersections, *Transportation Research Board Annual Meeting 2010 Paper #10-2030*, pp.15
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2009, *자전거 도로 신설기준 및 관리지침*
- Son, Y. T., Kim, J. H., Oh, Y. T., Kim, H. S. and Park, W. S., 2002, An Experimental Study on Fundamental Characteristics of Bicycle Flows, *The journal of Korean Society of Transportation*, Vol.20, No.4, Korean Society of Transportation, pp.19-26.
- Oh, J. T., Kim, E. C., and Ji, M. K., 2007, A Study of Bicycle Crash Analysis at Urban Signalized Intersections, *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, Vol.9, No.2, Korean Society of Road Engineers, pp.1~11
- Road Traffic Safety Authority, 2010, *자전거 교통안전시설 설치 기준 연구*
- Samba, David, Park, Byungkyu (Brian), Gardner, Brian, 2011, Evaluation of Large-Truck Transportation Alternatives with Safety, Mobility, Energy, and Emissions Analysis, Transportation Research Record: *Journal of the Transportation Research Board*, No. 2265, pp. 34-42.
- Shanley Chong, Roslyn Poulos, Jake Olivier, Wendy L. Watson, Raphael Grzebieta, 2010, Relative injury severity among vulnerable non-motorised road users: Comparative analysis of injury arising from bicycle-motor vehicle and bicycle-pedestrian collisions, *Accident Analysis & Prevention*, Volume 42, Issue 1, pp.290~296
- Shladover, Steven E, Kim, ZuWhan, Cao, Meng, Sharafsaleh, Mohammad, Li, Jing-Quan, 2009, Bicyclist Intersection Crossing Times: Quantitative Measurements for Selecting Signal Timing (With Discussion and Closure), Transportation Research Record: *Journal of the Transportation Research Board*, Issue 2128, pp 86~95
- Son, Y. T., Lee, J. G., Lee, S. H., and Kim, H. S., 2007, Analysis of Bicycle Crossing Times at Signalized Intersections for Providing Safer Right of Bicycle Users, *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, Vol.9, No.3, Korean Society of Road Engineers, pp.83~89
- 이재영, 김영옥, 양광식, 2005, *자전거 전용도로 네트 탐색 및 설계지침 연구*
(접수일 : 2012. 7. 20 / 심사일 : 2012. 7. 30 / 심사완료일 : 2012. 9. 27)