Int. J. Highw. Eng. Vol. 19 No. 1 : 81-90 FEBRUARY 2017
https://doi.org/10.7855/IJHE.2017.19.1.081

시뮬레이션 프로그램을 이용한 특수유형 회전교차로의 운영 효율성 분석

Simulated Operational Efficiency Analysis of Special Roundabouts

임 진 강 Lim, Jin Kang | 정회원 · 충북대학교 도시공학과 박사과정 (E-mail : plue@nate.com)
박 나 영 Park, Na Young | 정회원 · 충북대학교 도시공학과 석사과정 (E-mail : nnnasigi@naver.com)
박 병 호 Park, Byung Ho | 정회원 · 충북대학교 도시공학과 교수 · 교신저자 (E-mail : bhpark@chungbuk.ac.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : The goal of this study is to analyze the operational efficiencies of special roundabouts using simulated programs.

METHODS : This study primarily focuses on comparing the delays and traffic flow disturbances occurring at special roundabouts. In this study, the operational efficiencies of 450 scenarios (5 roundabout types × traffic volumes × directional ratios × measures) are analyzed according to the corresponding delays and traffic flow disturbances using VISSIM and SSAM.

RESULTS : The main results are as follows: 1) the Hamburger roundabouts are determined to yield the least common-type delays, 2) the amount of delays at Turbo and Flower roundabouts with respect to relatively increased right-turn-type delays, in addition to the amount of delays at the Left-turn slip-lane roundabout with respect to relatively increased left-turn-type delays, are found to be reduced as compared to the common-type delays. Lastly, common- and increased right-turn-type traffic flow disturbances at the Turbo roundabout and increased left-turn-type traffic flow disturbances at the Left-turn slip-lane roundabout are determined to be the most infrequent.

CONCLUSIONS : This study comparatively analyzes five roundabout types: standard, Flower, Turbo, Hamburger, and Left-turn slip-lane. The effectiveness of roundabouts can increase according to given traffic volume, directional ratio, and measure of effectiveness.

Keywords
Operational efficiency, Turbo roundabout, Flower roundabout, Left-turn slip-lane roundabout, Hamburger roundabout

Corresponding Author : Park, Byung Ho, Professor
Department of Urban Engineering, Chungbuk National University,
52 Naesudong-ro, Heungdeok-gu, Cheongju-si, Chungbuk, 28644, Korea
Tel : +82.43.261.2496 Fax : +82.43.264.2496
E-mail : bhpark@chungbuk.ac.kr

International Journal of Highway Engineering
http://www.ksre.or.kr/
ISSN 1738-7159 (print)
ISSN 2287-3678 (Online)
Received Aug. 19, 2016 Revised Nov. 24, 2016 Accepted Nov. 30, 2016

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

회전교차로의 도입은 2010년 회전교차로 설계지침이 발간되면서 전국적으로 활발히 이루어졌다. 회전교차로의 도입 이후 많은 홍보와 노력으로 현재는 정착단계에 있으며, 이에 따라 회전교차로의 도입효과가 나타나고 있다. 국민안전처는 2012년 회전교차로를 설치한 85개 지점을 대상으로 교통사고를 분석하였다. 그 결과 교통사고는 약 39% 감소하였으며, 사상자는 약 45% 감소하는 것으로 평가되었다(국민안전처, 2015).

이처럼 국내 회전교차로의 도입효과가 검증됨에 따라 설치지역은 더욱 확대될 예정이다. 국민안전처에서는 2022년까지 1,173개 지점에 회전교차로를 추가 설치하겠다고 밝히고 있다(국민안전처, 2015).

회전교차로 연구는 2000년 초반 기초연구부터 시작하여 현재까지 다양한 분야의 연구들이 진행되어 왔다. 국내 회전교차로 도입이 본격적으로 이루어질 수 있었던 것은 이러한 노력들의 결실이라 할 수 있다. 그러나

진행된 연구들의 흐름을 살펴보면, 국외연구들과는 다른 양상을 보인다.

오래전 회전교차로가 도입되었던 국외의 경우 사고 및 운영 관련 연구뿐만 아니라 교통상황에 따라 다양한 기하구조 형태로 발전된 특수유형의 회전교차로 연구가 진행되어 왔다. 이와는 달리 국내의 경우 사고 및 운영효과와 관련된 연구가 주를 이루고 있다. 이는 아직까지 회전교차로가 국내에서 정착단계에 이르고 있기 때문이며, 따라서 다양한 형태의 회전교차로 연구가 진행되기에는 한계가 있기 때문인 것으로 판단된다.

회전교차로에도 분명 여러 단점들이 있으며, 이를 극복하기 위해 다양한 형태의 회전교차로가 개발되어 왔다. 다양한 교통상황에 적합한 회전교차로가 도입된다면 회전교차로의 운영효과는 더욱 높아지기 때문에 국내에서도 이러한 연구가 반드시 진행되어야 할 것으로 판단된다.

이 연구는 국외에서 개발된 특수형태의 회전교차로를 대상으로 운영성과를 분석하는데 그 목적이 있다. 이 연구의 결과는 향후 국내 다양한 교통상황에 적합한 새로운 형태의 회전교차로를 개발하는데 크게 도움이 될 것으로 기대된다.

1.2. 연구의 내용 및 방법

이 연구는 특수유형의 회전교차로 운영을 평가하며, 연구의 과정은 다음과 같다.

첫째, 국외에서 연구된 다양한 형태의 회전교차로를 조사하며, 각 회전교차로별 특징을 검토한다. 둘째, 관련된 국내외 기존문헌을 검토한 후 연구의 차별성을 제시한다. 셋째, VISSIM을 이용하여 네트워크를 구축하며, 현실에 적합한 파라메타를 설정한다. 넷째, VISSIM과 SSAM(surrogate safety assessment model)을 통해 다양한 시나리오를 비교분석한다. 마지막으로 분석결과와 향후과제를 제시한다.

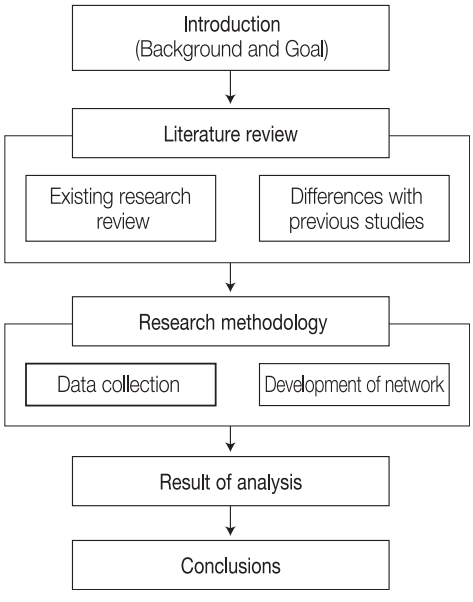

Fig. 1 Research Flow

2. 기존문헌 고찰

2.1. 특수유형 회전교차로

회전교차로는 로터리를 개선한 형태로 1960년대 영국에서 처음으로 개발되었으며, 일찍이 유럽, 미국, 호주 등 세계 여러 나라에서 도입되어 운영되어 왔다. 국내의 경우 2009년 교통운영체계 선진화 방안에 따라 회전교차로가 도입되기 시작했으며, 현재는 정착단계에 이르고 있다. 그러나 표준형태의 회전교차로만 운영되고 있는 국내와 달리 국외의 경우 현대에 이르기까지 많은 발전이 이루어져 왔으며, 기하구조, 교통상황 및 운영목적에 따라 다양한 형태의 회전교차로가 개발되어 도입되고 있다.

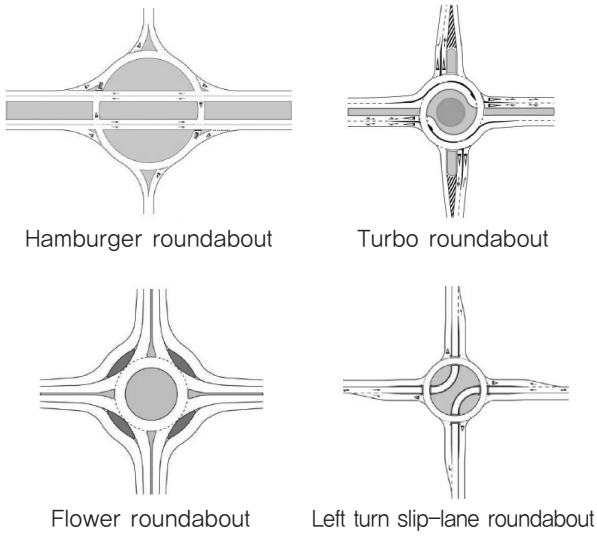

Fig. 2 Special Roundabouts

회전교차로는 신호 및 비신호교차로에 비해 상충지점 감소로 인해 안전성이 증진된다. 그러나 2차로 회전교차로 부터는 상충지점이 증가하여 사고발생 위험이 높아진다. 이러한 단점을 보완하기 위해 네덜란드에서는 1990년대 초반 Turbo 회전교차로를 개발하였다. Turbo 회전교차로는 회전부 내 차로변경이 불가능하며, 운전자가 진입부 이전에 진행방향을 사전에 결정하여 통과해야 하는 특징을 지니고 있다.

슬로베니아에서는 2차로 회전교차로의 안전성을 개선하기 위해 Turbo 회전교차로처럼 회전차량을 분리한 Flower 회전교차로를 개발하였다. 또한 회전교차로의 용량과 안전성을 증대시키기 위해 입체회전형 회전교차로인 Target 회전교차로를 개발하였다.

회전교차로의 경우 높은 진입교통량에서는 지체가 증가하는 단점이 있다. 이는 회전부 내 차간간격이 짧아지면서 접근차량이 내부로 진입하기 쉽지 않기 때문에 발생한다. 이러한 경우에는 신호운영을 통해 진입교통량을 제어함으로써 원활한 교통흐름을 유지시킨다.

회전교차로는 그 특징상 회전차량이 많을수록 지체가 증가한다. T. Tollazzi 등(2011)의 연구에 따르면 회전교차로에서 좌회전 교통량이 증가할수록 지체가 증가하며, 이는 해당 연구 외에도 국내·외 회전교차로 관련 많은 연구들의 분석결과를 통해 확인할 수 있다. 좌회전 교통량이 많은 특수한 지점에서의 도입을 위해 개발된 형태가 좌회전 입체 회전교차로이다. 주도로의 좌회전 차로를 입체화함으로써 용량을 증대시킨 유형이다.

Hamburger 회전교차로는 이미 잘 알려진 형태의 회전교차로이며, 전 세계에 설치되어 있는 형태이다. 주도로가 회전부 중앙을 관통한 형태이며, 직진교통량이 많은 지점에 설치된다.

이 외에도 덤벨, Dog-bone, C-roundabout 등 다양한 형태의 회전교차로가 존재한다.

2.2. 선행연구 고찰

이 연구와 기존 연구 간의 차별성을 제시하기 위해 회전교차로와 관련된 국내외 다양한 연구들을 검토하였다.

임진강 등(2011)은 3차로 회전교차로에 대한 연구를 진행하였다. 국외와는 달리 국내에서는 3차로 회전교차로 관련 연구가 진행되지 않은 점을 강조하였으며, VISSIM을 통해 회전교차로와 로터리간의 운영효과를 비교 분석하였다. 분석 결과 3차로 회전교차로는 로터리보다 운영효율이 1.8~2.0배에 이르는 것으로 평가되었다.

송기섭(2011)은 국내 Turbo 회전교차로 관련 연구가 진행되지 않은 점에 주목하여 국내 2차로 회전교차로의 대안으로 Turbo 회전교차로를 제안하였다. 저자는 VISSIM을 활용 분석하였으며, 4지 2차로 표준 회전교차로와 Turbo 회전교차로를 비교 분석하였다. 분석 결과 Turbo 회전교차로는 표준 회전교차로보다 약 10% 정도의 용량이 증대되는 것으로 분석되었다.

장기훈(2014)은 Turbo 회전교차로와 Flower 회전교차로 등 다양한 형태의 회전교차로의 운영효율을 분석하였다. VISSIM과 SSAM을 이용하여 운영효과를 결론으로 제시하였다. 분석 결과는 총 교통량 1,600vph 이하이고, 좌회전과 우회전 비율이 불균등한 경우 Flower 회전교차로, 1,600~2,000vph에서는 Turbo 회전교차로 설치가 바람직한 것으로 평가되었다.

박준(2015)은 회전교차로에 신호미터링 적용방안을 연구하였다. 이를 위해 저자는 VISSIM을 이용하였으며, 4지 1차로 회전교차로에서 다양한 시나리오 적용을 통해 신호미터링 도입을 분석하였다. 분석 결과 진입교통류의 좌회전 비율이 증가할수록 신호미터링을 통한 회전교차로의 지체감소 효과는 증가하는 것으로 평가되었다.

M. Tracza 등(2011)은 도시형 간선도로의 특징인 높은 교통량 문제를 해결하기 위해 다양한 유형의 회전교차로를 비교 분석하였다. 저자들은 Turbine 회전교차로, 신호운영 회전교차로 및 신호가 도입된 Turbo 회전교차로의 운영효과를 다양한 방법을 통해 평가하였다. 이 중 Turbine 회전교차로의 경우 2현시, 6현시 및 비신호로 분석하였으며, 그 결과 2현시에서 가장 높은 용량을 갖는 것으로 평가되었다.

T. Tollazzi 등(2011)은 2차로 회전교차로의 단점인 상충지점 증가를 보완하기 위해 Flower 회전교차로를 제안하였다. 저자들은 VISSIM을 통해 표준 2차로 회전교차로, Turbo 회전교차로 및 Flower 회전교차로의 운영효율을 분석하였으며, 그 결과 우회전 교통량이 증가할수록 Flower 회전교차로의 운영효율이 증가하는 것으로 평가되었다.

T. Tollazzi 등(2011)은 2차로 회전교차로의 상충지점을 제거하기 위해 입체 회전교차로인 Target 회전교차로를 개발하였다. 저자들은 VISSIM을 통해 운영효율을 분석한 결과 안전성 및 용량이 증대되는 것으로 평가되었다.

J. Sangster 등(2014)은 신호교차로를 기준으로 표준 회전교차로와 Hamburger 회전교차로를 비교분석하였다. 저자들은 분석을 위해 2가지 시뮬레이션 프로그램을 사용하였으며, 주도로와 부도로의 교통량 변화에 따라 운영효율을 평가하였다. 분석 결과 Hamburger 회전교차로가 표준 및 신호 회전교차로보다 지체측면에서 우수한 것으로 평가되었다.

2.3. 연구의 차별성

이 연구는 다양한 특수유형의 회전교차로 운영을 평가하며, 기존 연구들과는 다음과 같은 차별성을 지닌다.

Table 1. Differences with Previous Studies

Author	Year	Type of roundabout	MOE
J.K. Lim et al.	2011	Standard roundabout	delay
K.S. Song	2011	Standard and Turbo roundabouts	delay, speed
K.H. Jang	2014	Standard, Turbo and Flower roundabouts	delay, conflict
J. Park	2014	Standard and Signalized roundabouts	delay
T. Tollazzi et al.	2011	Standard, Turbo and Flower roundabouts	delay, queue
M. Tracza	2012	Turbine, Signalized and Signalized Turbo roundabouts	capacity, accident
T. Tollazzi et al.	2013	Standard and Target roundabouts	delay, queue
J. Sangster et al.	2014	Signalized intersection, Hamburger and Standard roundabouts	delay
This study	2015	Standard, Turbo, Flower, Hamburger and Left-turn slip-lane roundabouts	delay, conflict

첫째, 기존 특수유형 회전교차로 연구들은 주로 국외에서 연구가 진행되었으며 개별적 분석만 진행되어 왔다. 그러나 이 연구에서는 국내 교통현황이 반영된 다양한 특수유형 회전교차로를 동시 비교·분석하며, 다양한 시나리오를 적용하여 국내 적용방안을 도출한다.

둘째, 기존 회전교차로 연구들의 경우 대부분 지체, 속도 및 대기행렬 등의 분석에 국한되어 있다. 이 연구에서는 상충횟수를 분석하여 유형별 회전교차로의 안전성을 비교 검토한다.

3. 분석의 틀 설정

3.1. 분석프로그램

3.1.1. VISSIM

회전교차로의 운영을 평가할 수 있는 프로그램은 ARCADY, RODEL, aaSIDRA, KREISEL 및 VISSIM이 있으며, 국내에서는 대부분 aaSIDRA와 VISSIM을 활용한 연구가 주를 이루고 있다. VISSIM은 독일 PTV사에 의해 개발된 프로그램으로 운전자 행태를 기초로 하며, 차량추종모형을 기반으로 한 교통류 분석프로그램이다. 3D로 표현이 가능하여 시각적으로 특화되어 있는 것이 가장 큰 특징이며, 시뮬레이션 분석을 통해 지체, 속도, 통행시간, 통행거리 등 다양한 효과척도(MOE)의 결과를 얻을 수 있다(임진강, 2013).

3.1.2. SSAM

FHWA에서는 상충분석이 가능하고, 각종 시나리오 또는 설계 대안에 대한 안전성 검증을 위한 도구로서 SSAM을 개발하였다. SSAM의 주요 특징은 미시교통시뮬레이션모형에서 산출된 개별차량경로 자료를 이용하여 대리척도(surrogate measure)를 생산하는 것이다. VISSIM 분석에서 도출 가능한 개별차량경로 자료를 통해 SSAM에서 상충횟수 분석이 가능하다(장기훈, 2014).

3.2. 네트워크 구축 및 파라메타 설정

3.2.1. 자료수집

파라메타 설정에서 국내 현실을 반영하기 위해 교통량 자료와 속도자료를 수집한다. 교통량 자료의 경우 청주시 4지 교차로 11개 지점을 선정하여 첨두시간 교통량과 방향비를 조사한다. 속도자료의 경우 김제경찰서 오거리의 주행속도, 진입속도 및 회전속도 자료를 수집한다.

조사된 자료를 분석한 결과, 교통량 방향비는 주도로에서 좌회전 : 직진 : 우회전 비율이 평균 12:74:15%로 조사되며, 부도로는 평균 27:46:27%로 분석된다. 또한 주도로와 부도로의 교통량 비율은 65:35%로 평가된다.

속도는 크게 주행속도, 진입속도 및 회전속도로 조사되며, 분석 결과 각각 42.7km/h, 28.3km/h 및 24.2km/h로 분석된다.

부도로 교통량 방향비를 향후 시나리오에 적용하기 위해 조사된 11개 교차로 자료를 주도로의 교통량 비율을 기준으로 일반유형(회전교통량이 동등한 비율), 우회전 많은 유형 및 좌회전 많은 유형으로 분류한다. 분석결과, 일반유형의 경우 30:40:30%로 분석되어 회전비율이 거의 동일한 것으로 분석된다. 우회전과 좌회전이 많은 유형은 각각 27:51:21%과 21:49:30%로 분석된다. 이는 주도로에서 좌회전이 많을 경우 부도로에서는 우회전이, 주도로에서 우회전이 많을 경우 부도로에서는 좌회전이 많아지는 경향을 보인다.

Table 2. Directional Ratio and Speed Data

Classification	Data
Major road (left-turn : straight : right-turn)	12 : 74 : 15
Minor road (left-turn : straight : right-turn)	27 : 46 : 27
Traffic volume ratio(major : minor)	65 : 35
Average travel speed(km/h)	42.7
Average approach speed(km/h)	28.3
Average circulating speed(km/h)	24.2

3.2.2. 네트워크 구축 및 파라메타 설정

이 연구에서는 앞서 검토된 특수유형 회전교차로를 대상으로 운영을 평가한다. 표준 4지 2차로 회전교차로를 기준으로 Turbo 회전교차로, Flower 회전교차로, Hamburger 회전교차로 및 좌회전 입체 회전교차로를 분석하며, 이를 위해 VISSIM 프로그램에서 네트워크를 구축한다.

분석을 위해 다음과 같은 파라메타를 설정한다. 첫째, 조사된 속도자료와 같이 주행속도 42(38-45)km/h, 진입속도 28(25-32)km/h 및 회전속도 24(20-28)km/h로 설정한다. 다만 Hamburger 회전교차로의 직진차로와 좌회전 입체 회전교차로의 입체차로의 경우 진입속도가 아닌 주행속도로 적용한다. 둘째, 보행교통량은 없는 것으로 가정한다. 셋째, 임계간격(gap time)의 경우 도로용량편람에서 제시된 3.21초로 설정한다. 다만 특수유형 회전교차로도 표준 회전교차로와 동일한 방법으로 회전부로 진입하므로 해당 임계간격과 동일하다는 것을 가정하여 적용한다. 넷째, 버스 및 중차량비는 각각 5%를 적용한다. 다섯째, 주도로와 부도로의 교통량 방향비는 앞서 조사된 자료를 최대한 활용하여 적용한다. 마지막으로 U-turn 교통량은 없는 것으로 가정한다.

또한 2014 회전교차로 설계지침을 참고하여 다음과 같이 중앙교통섬 크기, 회전차로 폭 및 접근로 차로 폭을 설정한다.

Table 3. Geometric Structure Design

Classification	Dimension
Central island diameter(m)	38
Circulatory roadway width(m/lane)	5.5
Approach lane width(m)	3.5

Hamburger 회전교차로의 경우 신호가 운영되기 때문에 교통량별 최적신호 주기가 적용되어야 한다. 2현시의 신호로 구성되며, Webster 최적신호주기 공식을 적용하였고, 교통량별 주기를 40~120초 사이의 값으로 달리 적용한다.

SSAM 분석에서의 파라메타는 큰 보정없이 기본값으로 설정하여 분석을 진행한다.

구축된 네트워크를 사전 시뮬레이션하여 김제경찰서 오거리의 속도자료를 바탕으로 정산 및 검증을 수행하며, 사전 시뮬레이션 분석 결과 개별차량의 행태에서 큰 이상은 없는 것으로 분석된다.

3.3. 시나리오 설정

이 연구에서는 분석을 위해 총 4가지 조건을 기준으로 총 450개(5×15×3×2) 분석 시나리오를 작성한다.

조건 1은 회전교차로 유형이며 표준 회전교차로를 기준으로 Flower 회전교차로, Turbo 회전교차로, Hamburger 회전교차로 및 좌회전 입체 회전교차로를 분석한다. 해당 교차로들은 편도 2차로인 주도로와 편도 1차로인 부도로의 형태를 지닌다.

조건 2는 총 교통량이며, 400대/시에서 6,000대/시까지 분석한다. 교통량 비율은 앞서 조사된 바와 같이 주도로 65%와 부도로 35% 비율로 적용한다.

조건 3은 교통량 방향비로 설정한다. 첫 번째는 일반유형으로 직진교통량이 많고 회전교통량이 동등한 유형이다. 따라서 앞서 조사된 주도로 교통량 방향비를 보정하여 15: 70 :15%로 설정한다. 두 번째 유형은 우회전 많은 유형이다. 주도로의 우회전 교통량이 증가하는 것으로 10:60:30%로 가정한다. 세 번째 유형은 좌회전

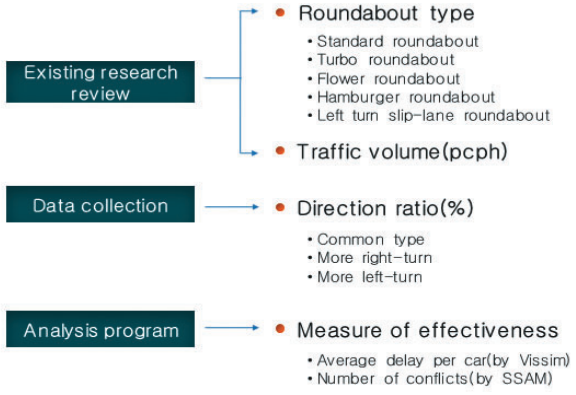

Fig. 3 Scenarios for Analysis

Table 4. Scenarios for analysis

Condition 1: Type of roundabout	Condition 2: Total traffic volume(pcph)	Condition 3: Directional ratio(%)	Condition 4: Measure of effectiveness
Standard roundabout	400~6,000 (major : minor = 65 : 35)	Common type 15 : 70 : 15 (major road) 30 : 40: 30 (minor road)	average delay per vehicle (sec/veh)
Flower roundabout			
Turbo roundabout		More left-turn 30: 60 : 10 (major road) 20 : 50 : 30 (minor road)	
Hamburger roundabout			number of conflicts
Left-turn slip-lane roundabout		More right-turn 10 : 60 : 30 (major road) 30 : 50 : 20 (minor road)	

많은 유형이며, 30:60:10%로 가정한다. 부도로의 방향비는 앞서 조사된 자료를 보정하여 각각의 유형에 적용한다. 일반유형에서는 30:40:30%로 적용하며, 우회전 많은 유형에서는 30:50:20%, 그리고 좌회전 많은 유형에서는 20:50:30%로 적용한다.

마지막으로 조건 4는 분석을 위한 효과척도이며, 평균제어지체와 상충횟수를 기준으로 분석한다.

이 연구에서는 시뮬레이션의 오차를 줄이기 위해 총 10회 분석하여 평균값을 사용한다.

4. 분석결과

4.1. 일반유형

회전교통량 비율이 동등한 일반유형의 분석결과는 Table 5와 같다.

지체를 분석한 결과 표준, Turbo 및 좌회전 입체 회전교차로가 총 진입교통량 3,600pcph에서 서비스수준 F에 도달하는 것으로 분석된다. Flower 회전교차로의 경우 2,800pcph에서 용량이 초과되는 것으로 분석되어, 다른 교차로들에 비해 지체가 높은 것으로 평가된

Table 5. Result of Analysis (Common Type)

Total traffic volume	Average delay per vehicle (sec/veh)					Number of conflict				
	Standard	Flower	Turbo	Left-turn slip lane	Hamburger	Standard	Flower	Turbo	Left-turn slip lane	Hamburger
400	2.32	2.54	2.11	2.04	6.99	1	1	0	1	1
800	3.54	4.02	3.03	3.82	7.24	3	3	2	3	2
1,200	3.92	5.35	4.24	4.12	8.52	7	5	2	5	4
1,600	5.43	13.54	5.67	5.24	9.27	8	7	3	7	5
2,000	6.92	18.58	8.84	7.87	10.99	21	18	3	17	10
2,400	11.24	45.60	13.01	11.64	12.57	43	33	12	38	18
2,800	16.72	68.54	21.34	17.21	15.98	62	57	16	54	33
3,200	40.24	91.72	48.92	46.14	23.32	105	93	37	80	52
3,600	62.32	109.54	63.74	61.32	36.98	140	117	55	103	78
4,000	74.54	125.76	85.90	77.54	45.24	179	146	74	118	94
4,400	90.80	138.88	101.62	92.32	53.26	218	172	99	138	116
4,800	108.65	158.92	117.22	114.32	58.77	256	190	123	160	147
5,200	123.21	165.71	128.32	127.24	73.52	280	212	141	187	167
5,600	138.54	177.23	144.52	139.76	94.89	317	240	157	216	189
6,000	154.22	193.52	158.76	157.78	108.50	337	271	178	253	210

Note: The shaded cells mean that the operation(delay time) LOS is F

Table 6. Type of Conflict (Common Type)

(Unit: %)

Classification	Standard	Flower	Turbo	Left-turn slip lane	Hamburger
crossing	4.4	2.3	1.2	2.1	0.4
rear- end	65.4	82.4	84.3	82.4	90.5
lane -change	30.2	15.3	14.5	15.5	9.1

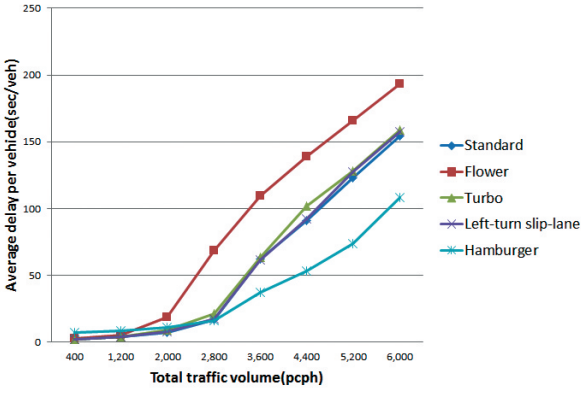

Fig. 4 Result of Delay Analysis (Common Type)

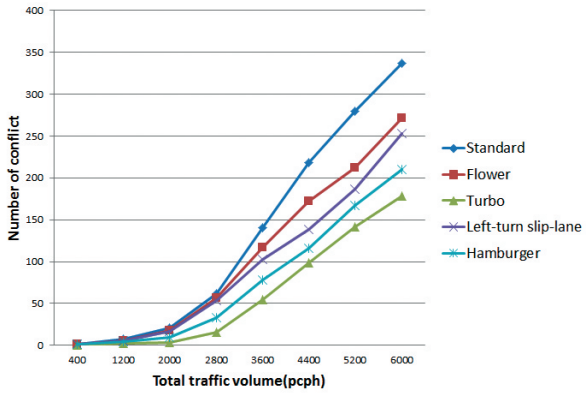

Fig. 5 Result of Conflict Analysis (Common Type)

다. 반면 Hamburger 회전교차로는 신호운영으로 인해 적은 교통량에서 다른 교차로 대비 지체가 높아지는 것으로 분석된다. 그러나 교통량이 증가함에 따라 타 교차로 대비 지체가 좋아져 4,400pcpch에서 서비스수준 F로 분석되어 모든 교차로 중 지체측면의 효과가 가장 좋은 것으로 평가된다. Fig. 4와 같이 전반적으로 일반유형에서 지체측면의 효과는 교통량 증가에 따라 Hamburger>표준>좌회전 입체>Turbo>Flower 순으로 평가된다.

SSAM 프로그램을 통해 상충횟수를 분석한 결과, 지체분석 결과와 다른 양상을 보인다. 서비스수준 F를 기준으로 Turbo 회전교차로의 상충횟수가 가장 적고, 표준 회전교차로가 가장 높은 것으로 분석된다. Fig. 5와 같이 전반적으로 교통량 증가에 따라 표준>Flower>좌회전 입체>Hamburger>Turbo 순으로 상충횟수가 높은 것으로 평가된다.

상충 유형별 비율을 살펴보면, 5개 회전교차로 모두 직각충돌형 상충에서 가장 낮은 값을 보이며, 추돌형 상충이 가장 높은 비율을 보이는 것으로 평가된다. 표준 회전교차로의 경우 다른 교차로 대비 차로변경형 상충

Table 7. Result of Analysis (More right-turn Type)

Total traffic volume	Average delay per vehicle (sec/veh)					Number of conflict				
	Standard	Flower	Turbo	Left-turn slip lane	Hamburger	Standard	Flower	Turbo	Left-turn slip lane	Hamburger
400	2.13	2.27	2.09	2.21	7.31	1	1	0	1	1
800	3.12	3.22	3.13	4.04	8.21	1	1	1	3	3
1,200	3.47	4.51	3.99	4.92	9.44	4	3	1	5	5
1,600	5.32	6.98	6.18	7.58	10.68	6	4	2	8	9
2,000	6.17	13.17	7.96	10.01	11.85	19	17	3	18	20
2,400	9.13	22.01	12.02	15.24	15.02	40	24	11	36	29
2,800	18.16	37.59	18.47	27.62	18.62	59	31	14	53	43
3,200	27.64	63.88	35.68	53.57	26.85	91	55	31	81	65
3,600	45.78	89.76	52.42	65.21	40.02	130	79	38	106	96
4,000	68.92	97.81	72.81	84.28	54.82	158	105	63	139	130
4,400	79.27	120.02	88.98	101.87	59.87	187	138	80	167	156
4,800	95.89	133.57	106.76	121.72	71.58	218	151	96	192	182
5,200	112.32	146.32	118.54	134.98	86.04	247	167	109	213	195
5,600	120.45	158.54	133.67	148.24	99.24	269	186	136	239	220
6,000	134.76	165.98	148.64	161.24	114.32	297	207	163	262	238

Note: The shaded cells mean that the LOS is F

Table 8. Type of Conflict (More right-turn Type)

(Unit: %)

Classification	Standard	Flower	Turbo	Left-turn slip lane	Hamburger
crossing	4.2	1.9	1.0	2.1	0.6
rear- end	66.4	88.3	85.7	83.2	88.2
lane -change	29.4	9.8	13.3	14.7	11.2

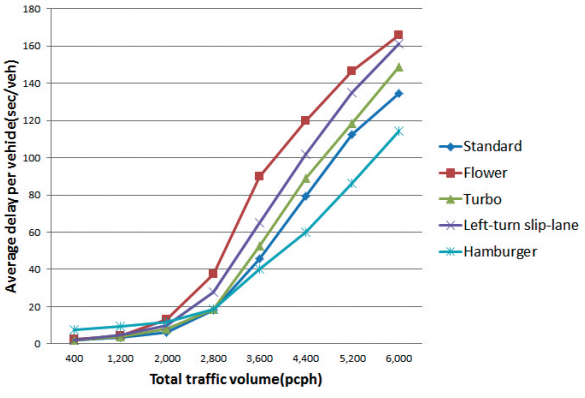

Fig. 6 Result of Delay Analysis (More right-turn Type)

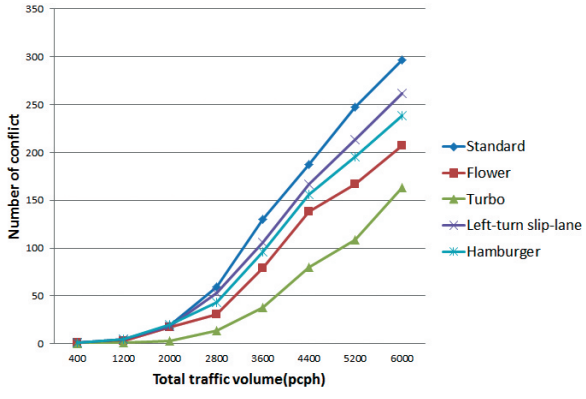

Fig. 7 Result of Conflict Analysis (More right-turn Type)

이 높게 나타나며, 이는 다른 교차로와 달리 회전부 내에서도 차로변경을 하는 차량의 빈도가 높게 나타나기 때문인 것으로 평가된다.

4.2. 우회전 많은 유형

우회전 많은 유형의 분석결과는 Table 7과 같다.

지체를 분석한 결과, 표준, Flower 및 Turbo 회전교차로는 일반유형 분석결과에 비하여 지체가 낮아지는 것으로 분석되며, 좌회전 입체 및 Hamburger 회전교차로의 지체는 증가하는 것으로 평가된다.

표준 및 Hamburger 회전교차로가 총 진입교통량 4,000pcph에서 서비스수준 F에 도달하여 다른 교차로 대비 지체가 낮은 것으로 분석된다. 반면에 Flower 및 좌회전 입체 회전교차로는 3,200pcph에서 용량이 초과되어 가장 높은 지체를 보이는 것으로 평가된다.

Fig. 6과 같이 전반적으로 우회전 많은 유형에서 지체측면의 효과는 교통량 증가에 따라 Hamburger>표준>Turbo>좌회전 입체>Flower 순으로 평가된다.

상충횟수를 분석한 결과, 일반유형과 같이 서비스수준 F를 기준으로 Turbo 회전교차로의 상충횟수가 가장 적은 것으로 분석된다. 다만 일반유형 대비 우회전 비율 증가에 따라 좌회전 입체 및 Hamburger 회전교차로는 상충횟수가 증가하며, Flower 회전교차로는 감소하는 것으로 분석된다. Fig. 7과 같이 전반적으로 교통량 증가에 따라 표준>좌회전 입체>Hamburger>Flower>Turbo 순으로 상충횟수가 높은 것으로 평가된다.

상충 유형별 비율을 살펴보면, 전반적으로 일반유형 분석결과와 유사한 것으로 평가되며, Hamburger을 제외한 모든 교차로에서 추돌형상충의 비율이 증가하는 것으로 분석된다.

4.3. 좌회전 많은 유형

좌회전 많은 유형의 분석결과는 Table 9와 같다.

지체를 분석한 결과, 좌회전 입체 회전교차로를 제외한 모든 교차로에서 일반유형 분석결과에 비해 지체가 증가하는 것으로 분석된다. 표준, Turbo 및 Hamburger 회전교차로가 총 진입교통량 3,200pcph에서 서비스수준 F에 도달하는 것으로 분석된다. 또한 Flower 회전교차로는 2,400pcph에서 용량이 초과되어 다른 교차로 대비 지체가 가장 높은 것으로 평가된다. 반면 좌회전 입체 회전교차로의 경우 4,400pcph에서 서비스수준 F에 도달하여 모든 교차로 중 지체가 가장 낮은 것으로 분석된다.

Fig. 8과 같이 전반적으로 좌회전 많은 유형에서의 지체측면의 효과는 교통량 증가에 따라 좌회전 입체>Hamburger>표준>Turbo>Flower 순으로 평가된다.

상충횟수를 분석한 결과, 일반유형과 우회전 많은 유형과는 다른 양상을 보인다. 서비스수준 F 기준 좌회전 입체 회전교차로의 상충횟수가 가장 적은 것으로 분석된다. 모든 교차로에서 상충횟수가 증가하며, 표준 회전교차로의 상충횟수가 가장 높은 것으로 평가된다. Fig. 9와 같이 전반적으로 교통량 증가에 따라 표준>Flower>Hamburger>Turbo>좌회전 입체 순으로 상충횟수가 높은 것으로 평가된다.

상충 유형별 비율을 살펴보면, 전반적으로 일반유형 분석결과와 유사한 흐름을 가지며, Hamburger을 제외한 모든 교차로에서 추돌형상충의 비율이 감소하는 것으로 분석된다.

4.4. 기존연구 분석결과와의 비교

이 연구는 표준, Flower, Turbo, 좌회전 입체 및 Hamburger 회전교차로의 운영을 평가하며, 기존연구를 검토한 결과 모든 교차로를 함께 분석한 연구는 없는 것으로 판단된다. 다만 표준 회전교차로를 기준으로 일부 특수유형 회전교차로와의 운영을 평가한 연구들은 다양하다.

장기훈(2014)과 T. Tollazzi 등(2011)은 표준, Turbo 및 Flower 회전교차로를 분석하고 있으며, 본 연구의 결과와 동일한 흐름을 갖는 것으로 분석된다.

송기섭(2011)은 표준 회전교차로와 Turbo 회전교차로를 비교·분석하고 있으며, 본 연구의 결과와 일부 차이를 보인다. 이는 분석 프로그램의 파라메타 설정 및 방향별 교통량 비율 등 다양한 시나리오 설정의 차이로 인해 발생한 것으로 판단된다.

J. Sangster 등(2014)은 신호교차로, 표준 및 Hamburger 회전교차로를 비교·분석하고 있으며, 분석결과는 본 연구의 결과와 동일한 흐름을 갖는 것으로 분석된다.

4.5. 특수유형 회전교차로 국내 적용방안

일반유형에서 나타난 결과와 같이 직진교통량이 많고 좌·우 회전교통량이 유사할 경우 운영적 측면과 안전성 측면에서 Hamburger 회전교차로가 유리한 것으로 분석된다. 다만 Hamburger 회전교차로의 경우 신호로 운영되므로, 교통량이 적을 경우에는 상충횟수가 가장

Table 9. Result of Analysis (More left-turn Type)

Total traffic volume	Average delay per vehicle (sec/veh)					Number of conflict				
	Standard	Flower	Turbo	Left-turn slip lane	Hamburger	Standard	Flower	Turbo	Left-turn slip lane	Hamburger
400	2.45	2.62	2.35	2.16	8.01	1	1	1	1	1
800	3.68	4.35	3.94	2.35	8.94	3	4	2	1	3
1,200	4.99	6.76	4.58	3.82	10.58	8	7	4	3	7
1,600	6.7	18.24	6.02	4.98	11.92	24	20	9	6	11
2,000	10.52	43.57	11.98	5.9	16.28	36	34	12	9	31
2,400	16.89	63.85	21.08	10.05	27.82	58	57	18	14	52
2,800	27.3	76.76	31.62	13.52	39.64	104	92	26	19	81
3,200	60.24	100.29	61.81	21.24	52.32	161	126	58	34	108
3,600	70.95	118.26	82.55	40.32	64.85	184	161	77	61	145
4,000	92.35	137.82	108.82	56.83	83.08	226	184	94	82	167
4,400	108.54	154.85	120.4	72.58	97.21	258	213	102	96	199
4,800	127.82	170.48	139.52	83.54	113.84	292	245	137	119	230
5,200	144.58	189.57	154.12	94.25	124.1	328	268	162	137	249
5,600	157.96	206.39	172.33	103.68	139.58	367	293	185	160	270
6,000	174.32	224.62	183.84	115.82	154.32	397	301	216	177	285

Note: The shaded cells mean that the LOS is F

Table 10. Type of Conflict (More left-turn Type)

(Unit: %)

Classification	Standard	Flower	Turbo	Left-turn slip lane	Hamburger
crossing	4.8	2.2	1.3	1.5	0.7
rear- end	63.1	79.6	85.2	87.3	87.6
lane -change	32.1	18.2	13.5	11.2	11.7

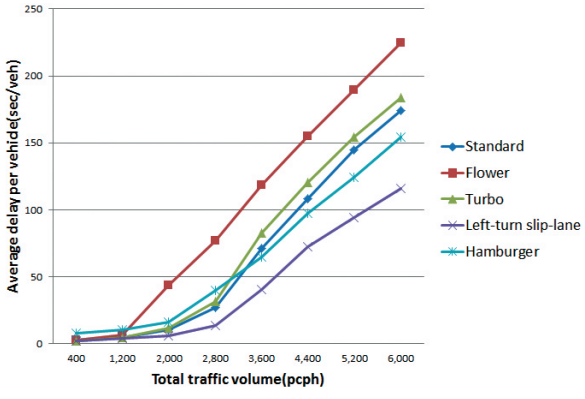

Fig. 8 Result of Delay Analysis (More left-turn Type)

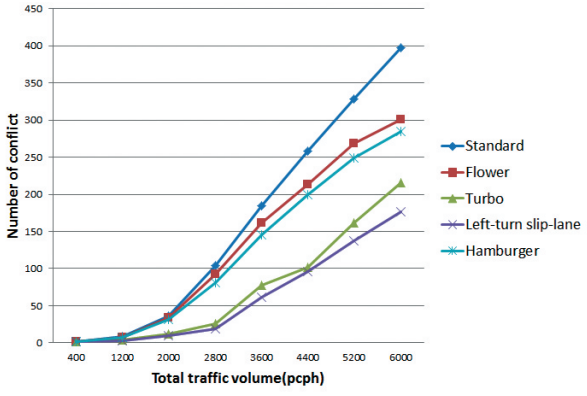

Fig. 9 Result of Conflict Analysis (More left-turn Type)

적은 Turbo 회전교차로의 적용이 고려되어야 할 것으로 판단된다.

기하구조 형태로 판단할 경우 우회전 교통량이 증가할수록 Flower 회전교차로가 유리할 것으로 보이나, 분석 결과는 다른 양상을 보인다. 우회전 교통량이 증가하는 경우에도 일반유형과 같이 Hamburger 회전교차로가 가장 유리한 것으로 분석되며, 교통량이 적을 경우에는 Turbo 회전교차로의 적용이 고려되어야 할 것으로 평가된다.

좌회전 교통량이 증가할 경우 운영적 측면과 안전성 측면 모두 좌회전 입체 회전교차로가 유리하다. 다만 좌회전 입체 회전교차로의 경우 건설비용이 과다할 수 있으므로, 교통량이 적을 경우에는 Turbo 회전교차로의 적용이 검토되어야 할 것으로 판단된다.

5. 결론

이 연구는 특수유형 회전교차로의 운영을 평가하며,

그 결과는 다음과 같다.

첫째, 일반유형의 경우 지체 측면에서 Hamburger 회전교차로의 운영이 가장 좋은 것으로 분석된다. 상충측면의 경우 Turbo 회전교차로의 상충횟수가 가장 적은 것으로 평가된다.

둘째, 우회전 교통량이 증가할수록 일반유형 분석결과에 비해 표준, Turbo 및 Flower 회전교차로의 지체가 감소하고, Hamburger 및 좌회전 입체 회전교차로는 증가하는 것으로 분석된다. 상충측면에서는 일반유형과 같이 Turbo 회전교차로의 상충횟수가 가장 적은 것으로 평가된다.

셋째, 좌회전 교통량이 증가할수록 좌회전 입체를 제외한 모든 교차로에서 지체가 증가하는 것으로 분석된다. 상충측면에서도 좌회전 입체 회전교차로가 가장 적은 것으로 평가된다.

이 연구는 기존연구에서 다루어지지 않았던 특수유형 회전교차로의 운영을 평가하였다. 연구에서 도출된 결과와 같이 교통량 방향비, 그리고 지체 및 안전성 측면에 따라 운영효율이 달라지는 것으로 분석된다. 그러나 이 연구에서는 건설비용, 토지비용 등 비용효과 측면을 분석하지 못한 한계가 있다. 향후 분석 결과에 대한 통계적 검증, 비용측면에서의 분석과 좀 더 다양한 특수유형의 회전교차로 분석이 필요하다. 또한 이러한 연구들이 지속적으로 이루어져 향후에는 국내 다양한 교통상황에 적합한 회전교차로의 도입이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

REFERENCES

Jang, K. H. 2014. A Study on Operation and Safety Assessment of Roundabout Types, Master's degree dissertation, University of Ajou.

Lim, J. K. 2013. Analysis of Transferring Effects from Rotary to Roundabout, Master's degree dissertation, University of Chungbuk.

Lim, J. K., Park, B. H. 2011. Effectiveness Analysis of 3-lane Roundabout by Scenario, Journal of Korea Planners Association, Vol. 46, No. 5, 223-231.

Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (2014), Roundabout Guideline.

Park J. 2015. Development of an Application for Signal Metering on Roundabouts, Master`s degree dissertation, University of Seoul.

Sangster, J., Rakha, H., Al-Kaisy, A. 2014. Comparative Analysis of the Through-about, Roundabout, and Conventional Signalized Intersection Designs, TRB 2015 Annual Meeting, 15-1886.

Song, K. S. 2011. Evaluation and Application of Turbo Roundabout as an Alternative to Two-lane Roundabouts, Ph.D. Dissertation, University of Ajou.

Tollazzi, T., Jovanovic, Rencelj, M.. 2013. New Type of Roundabout: Dual One-Lane Roundabouts on Two Levels with Right-Hand Turning Bypasses - 'Target Roundabout' -, Traffic&Transportation, Vol. 25, No. 5, 475-481.

Tollazzi, T., Rencelj, M., Turnsek, S. 2011. Slovenian Experiences with Alternative Types of Roundabouts - 'Turbo' and 'Flower' Roundabout-, Environmental Engineering 8th International Conference, 1220-1226.

Tollazzi, T. 2014. Modern Types of Roundabouts- Trends and Future Expectations, The 9th International Conference-Traffic Safety in the Local Community.

Tracz, M., Chodur, J. 2012. Performance and Safety of Roundabouts with Traffic Signals, Social and Behavioral Sciences, Vol. 53, 789-800.