

국내 나선형 교차로 도입을 위한 적정교통량 산정연구

A Study on the Estimation of Design Service Traffic Volume for Turbo Roundabout

송민수* · 이동민**

* 주저자 : 서울시립대학교 교통공학과 & 스마트시티학과 석사과정

** 교신저자 : 서울시립대학교 교통공학과 & 스마트시티학과 정교수

Min soo Song* · Dong min Lee**

* Dept. of Transportation Eng & Smart cities., Univ. of Seoul

** Professor, Dept. of Transportation Eng & Smart cities., Univ. of Seoul

† Corresponding author : Dongmin Lee, dmlee@uos.ac.kr

Vol.20 No.5(2021)

October, 2021
pp.45~58

pISSN 1738-0774
eISSN 2384-1729
<https://doi.org/10.12815/kits.2021.20.5.45>

Received 20 August 2021
Revised 13 September 2021
Accepted 13 October 2021

© 2021. The Korea Institute of
Intelligent Transport Systems. All
rights reserved.

요약

국내에서 운영중인 2차로 회전교차로는 합·분류 등에서 발생하는 상충, 진출·입차량과 회전차량간의 상충 등의 문제점이 있다. 해외에서는 2차로 회전교차로의 문제점을 해결하기 위해 주행경로를 도류화시켜 안전성과 효율성을 향상 시켜주는 나선형 회전교차로를 운영하고 있다. 본 연구에서는 나선형 회전교차로의 국내에 맞는 적정교통량 수준을 분석하기 위해 VISSIM을 이용하여 교통량수준, 방향별 회전교통량을 일정한 수준으로 증가시켰다. 나선형 회전교차로는 방향별 회전교통량에 의해 차이가 있지만 적정교통량은 2,400-2,800대/시인 것으로 분석되었다. 나선형 회전교차로는 좌회전·직진교통량에 의해 지체가 증가하는 것으로 분석되었으며, 좌회전 통행비율이 30% 이상인 경우 나선형 회전교차로보다 2차로 회전교차로와 신호교차로의 운영이 더 효율적인 것으로 분석되었다.

핵심어 : 나선형 회전교차로, 터보 회전교차로, 적정교통량, 교통시뮬레이션, VISSIM

ABSTRACT

It is generally known that a two-lane roundabout has some problems in safety such as increasing conflicts, typically merging and diverging conflicts and conflicts between entering traffic and exiting as well as turning traffic. To solve these problems, a turbo-roundabout had been developed and has successfully brought safer and more efficient operation in other countries. In this study, micro simulations using VISSIM were conducted to investigate the maximum value of service traffic volume. It was found that operation of turbo-roundabouts was influenced by traffic volume for each turning traffic, and the maximum values of traffic volume were values between 2,400 and 2,800 vehicles per hour as rates of traffic volume for each turning traffic. Typically, turbo-roundabouts have limited to operate in conditions with more than 30% for left-turning traffic volume.

Key words : Turbo roundabout, Traffic volume, VISSIM

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

회전교차로는 신호 없이 운영되는 평면교차로의 한 유형으로, 중앙에 위치한 중앙교통섬을 중심으로 교차로를 회전하여 통과하는 방식으로 운영된다. 이와 같은 운영방식은 교차로 운영의 안전성과 효율성을 높여주게 되어 2010년 이후 국내에서 회전교차로가 많이 설치되어 운영되고 있다. 하지만 회전교차로는 운전자들의 운전 미숙 혹은 회전교차로 운전방식에 대해 인식부족 등의 이유로 비정상적인 운전자 행태가 나타날 수 있으며, 이러한 비정상적인 운전행태는 회전교차로의 용량감소 및 교통사고 발생으로 이어질 수 있다. 특히, 2차로 회전교차로에서는 회전차량 간 엇갈림과 합·분류 등의 상충발생, 회전차량과 진출·입 차량 간 상충발생 등의 문제점들이 발생되며, 1차로 회전교차로에 비해 교통안전성과 효율성이 상대적으로 떨어지는 것으로 알려져 있다.

나선형 회전교차로는 1990년대 네덜란드에서 ‘Turbo Roundabout’라는 명칭으로 제안되었으며, 네덜란드, 슬로베니아, 미국 등에서는 2차로 회전교차로의 문제를 해결하기 위해 나선형 회전교차로가 도입되어 운영되었다. 나선형 회전교차로는 중앙교통섬이 나선형의 모양으로 구축되고 주행경로별 도류화를 적극적으로 하여 2차로 회전교차로의 안전성과 효율성을 높이는 특징을 가진 2차로 회전교차로이다. 나선형 회전교차로는 운전자들에게 적극적으로 주행 경로를 안내해주며 물리적으로 회전교차로 내에서 차로변경을 금지시켜 상충지점수 감소, 저속주행으로 안전성을 향상 시킬 수 있다. 이에 국내에서도 2차로 회전교차로의 안전성과 효율성 문제점들을 해결하고자 나선형 회전교차로 도입을 검토하고 있으며, 국내에서도 부산과 원주에 나선형 회전교차로와 유사한 형태의 회전교차로가 설치·운영되고 있다. 하지만 국내 실정에 맞춰 나선형 회전교차로의 적정교통량을 산정하는 연구는 전무하며, 나선형 회전교차로를 적용할 수 있는 적정교통량 수준 도출이 필요한 시점이다.

이에 본 연구에서는 네덜란드 나선형 회전교차로 기본유형을 대상으로 나선형 회전교차로 도입을 위한 적정교통량 수준 도출을 위해 미시적 교통시뮬레이션 분석을 수행하였다. 교통시뮬레이션을 통해 2차로 회전교차로·신호교차로와 비교하여 나선형 회전교차로의 계획기준 산정을 위한 적정교통량 기초분석 결과를 제시하였다.

2. 연구의 범위 및 수행절차

본 연구에서는 나선형 회전교차로의 국내·외 사례를 참고하여 적정교통량, 안전성과 효율성을 검토하였다. 이를 위해 미시적 교통시뮬레이션인 VISSIM(7.00)을 이용하여 나선형 회전교차로(Turbo roundabout), 2차로 회전교차로(2-lane Roundabout), 신호교차로(Signalized)의 지체시간을 확인하였다. 3개 유형의 교차로 중 나선형 회전교차로는 적정교통량 수준을 찾기 위해 지체시간이 급증하는 구간에 교통량을 더 세밀하게 나누어 분석하였다.

II. 기존문헌고찰

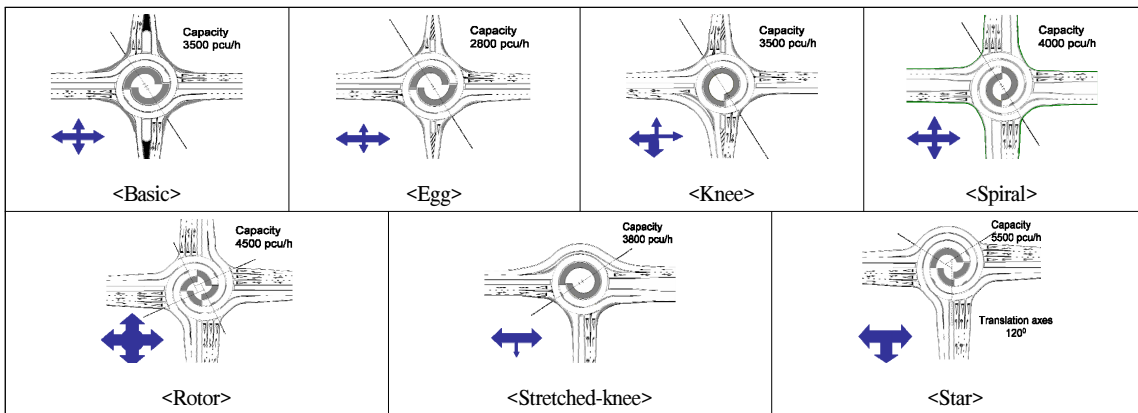
1. 나선형 회전교차로의 개념

나선형 회전교차로(Turbo Roundabout)는 2차로 회전교차로의 유형으로 중앙교통섬의 모양이 나선형 형태

로 설계된다. 나선형 회전교차로는 최초 1990년대 네덜란드에서 2차로 회전교차로의 운영문제점을 해결하기 위해 제안된 교차로이며, 네덜란드에서 제시한 유형과 모양은 <Table 1>과 <Fig. 1>에서 보는 바와 같다. 나선형 회전교차로는 회전교차로 진입 전 진행하고자 하는 경로에 따라 진입차로를 선택해야하며, 방향별 주행 차량간 상충을 감소시켜 효율성과 안전성을 높일 수 있는 특징이 있다. 그리고 부도로는 1차로에서만 직진과 좌회전 통행이 가능하므로 주도로와 부도로의 교통량 차이가 있는 교차로에 설치하는 것이 효율적이다. 나선형 회전교차로에는 회전차로에 차로분리시설이 설치되는데 차로분리시설은 차로변경을 감소시키고 주행경로를 명확히 제시함으로써 원활한 교통류 흐름제공과 불필요한 지체감소, 교통안전성효과를 향상 시키는 역할을 하게 된다.

<Table 1> Types and Characteristics of Netherland Turbo Roundabouts

Type	leg	Approach		Departure		Capacity(pcu/h)	Characteristic
		Major	Minor	Major	Minor		
Basic	4	2	2	2	1	3,500	A basic type
Egg	4	2	1	2	1	2,800	Low traffic volume
Knee	4	2	1-2	2	1-2	3,500	High right turning traffic volume
Spiral	4	3	2	2	2	4,000	High traffic volume
Rotor	4	3	3	2	2	4,500	Signalized operation
Streched-knee	3	2	2	2	1	3,800	High through traffic volume
Star	3	3	3	2	2	5,500	High traffic volume



<Fig. 1> Types of Netherland turbo roundabouts

2. 국내·외 연구 동향

국내에서는 2차로 회전교차로의 안전성과 효율성에 대하여 많은 연구가 진행되었지만, 나선형 회전교차로에 대한 연구는 아직 미비한 수준이며 관련 지침에서도 나선형 회전교차로에 대한 내용은 아직 포함되어 있지 않다. 반면, 국외에서는 나선형 회전교차로의 효과에 대한 실증연구사례가 다수 있다. 나선형 회전교차로 안전성 연구를 보면 신호교차로, 회전교차로에 비하여 충돌빈도수가 76%(Lambertus, 2009), 잠재적인 사고건수가 40~50%(Raffaele and Marco, 2015) 감소되는 것으로 나타났다. 기존 신호교차로에서 나선형 회전교차로 전환 후 사상자 발생율이 50% 감소되었으며(Wijk, 2009), 나선형 회전교차로는 상충지점을 감소시켜 2차로

회전교차로보다 안전성이 더 높은 것을 확인하였다(Elzbieta, 2015). 터보 회전교차로에서는 회전차로를 분리 시킴에 따라 교통운영측면의 효과를 높일수 있으며, 차로분리시설이 실선보다 돌출형일 때 더 잘 사용될 수 있다.(Lambertus, 2009). 한편 나선형 회전교차로에 대해 잘 이해하지 못하면 더 높은 사고율이 발생할 수 있음이 지적된 바 있다(Joe, 2018). 이는 국내 나선형회전교차로 도입을 위해 충분히 검토되어야 할 부분으로 판단된다.

교통량 수준에 따라 일정한 구간에서는 신호교차로보다 나선형 회전교차로의 지체시간이 더 적으며, 실제 도로환경에서는 터보 회전교차로의 지체시간은 회전교차로보다 짧았다고 분석된 바 있다(Raffaele and Federico, 2010). 교차로 접근 교통량이 시간당 3,000대~3,500대를 초과하지 않는 한 1차로형 회전교차로와 2차로형 회전교차로, 신호교차로 등에 비해 상당한 효율성을 제공할 수 있다(Raffaele and Federico, 2010). 나선형 회전교차로의 설치공간은 신호교차로와 비슷하며 건설비용은 신호교차로보다 많이 발생되지만 운영 비용과 사회적 비용은 더 적게 발생된다고 분석되었다(Wijk, 2009). <Table 2>는 국내·외 회전교차로들의 적정 교통량, 안전성과 효율성에 대한 분석방법을 정리한 결과이다. 기존 연구에서는 대부분 회전교차로의 용량, 지체시간, 안전성 등에 대해 분석하였다.

<Table 2> A summary of the Literation Review Results

Authors	Method	Authors	Method
Lee et al.(2013)	Analysis of Roundabout Effects using SIDRA	Luíset et al.(2014)	Analysis of Turbo Roundabout Effects using AMSUN
LIM and Choi(2018)	Analysis of Turbo Roundabout Effects using VISSIM	Engelsman and Uken(2007)	Analysis of Turbo Roundabout Effects using Quick-scan model
LIM and Park(2016)		Lee and You(2013)	Analysis of Roundabout Application
Yang et al.(2019)		Joe(2018)	Study Circular Intersection Designs
Fortuijn(2009)			
TOMAŽ et al. (2010)	Analysis of Turbo Roundabout Effects using VISSIM(5.20)	Elzbieta(2015)	Study safety turbo roundabout
Raffaele and Federico(2010)	Analysis of Turbo Roundabout Effects using Kreisel	Raffaele and Marco(2015)	

본 연구에서는 나선형 회전교차로, 2차로 회전교차로, 신호교차로 3개의 교차로를 교통시뮬레이션 프로그램인 VISSIM을 이용해서 교차로를 분석하였다. VISSIM 분석결과를 통해 3개 유형의 교차로에서 발생하는 지체시간을 분석하였다.

Ⅲ. 분석방법론

나선형 회전교차로, 2차로 회전교차로, 신호교차로 3개 유형의 교차로를 교통량 수준별 지체시간을 비교하였고, 나선형 회전교차로는 교통량 증가에 따라 급격하게 지체시간이 증가하는 교통량 수준에선 교통량을 세부적으로 구분하여 분석하였다. 1차 시뮬레이션 분석에서는 교통량 수준을 400대/시 단위로 증가시켜 변곡점 발생 구간을 분석하였고, 2차 시뮬레이션 분석에서는 지체시간이 급증하는 구간의 적정교통량을 파악하기 위해 교통량 수준을 50대/시 단위로 증가시켜 세밀하게 분석하였다. 2차 시뮬레이션 분석을 통해 나선형 회전교차로의 설계서비스수준(LOS)이 D에서 E로 넘어가는 부분을 분석하였다.

1. 시뮬레이션 프로그램

본 연구에서 교통시뮬레이션은 독일 PTV사의 VISSIM(7.00)을 이용하였다. 시뮬레이션 분석시간은 4,200초로 설정하였고, 현실성을 반영하기 위해 네트워크 안정화시간(Warm-up time) 600초를 고려하였다. 분석결과에 이용된 시간은 안정화시간(Warm up time) 600초를 제외한 600초부터 4,200초까지 3,600초에 대해서만 분석하였다. 임의적으로 특정한 수에 의해 시뮬레이션을 하는 Random Seed를 이용하였다.

2. 분석 시나리오 설정

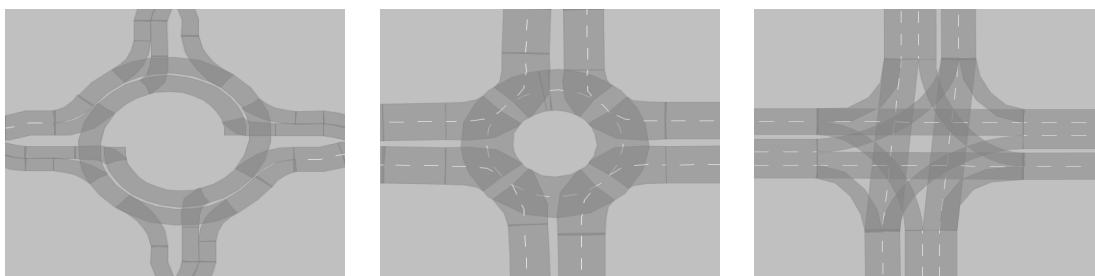
1) 시나리오 설정

본 연구에서는 분석을 위해 동일 조건에서 나선형 회전교차로와 2차로 회전교차로, 신호교차로의 교통량 수준별 시뮬레이션 분석을 각각 수행하여 그 결과를 비교하였다(Fig. 2). 교차로 운영효과를 평가하기 위해 나선형 회전교차로, 2차로 회전교차로, 신호교차로 3개 유형의 교차로를 1차 분석에서 교통량 수준 400대/시씩 증가시켜 800~3,600대/시까지 분석하여 지체시간이 급증하는 교통량 수준을 확인하였다. 2차 분석은 나선형 회전교차로의 변곡구간을 찾기 위해 교통량 수준을 50대/시씩 증가시켜 세부분석을 수행하였다. 각 분석에서는 방향별 교통류 비율을 적용시켜 회전차량에 따른 주도로와 부도로에서 발생하는 지체시간 변화도 함께 분석하였으며, 도출된 지체시간을 이용하여 서비스수준(LOS)을 결정하였다.

2) 시뮬레이션 분석을 위한 가정

시뮬레이션 분석은 오차를 최소화하기 위해 랜덤시드를 통해 10회 수행하고 결과의 평균값을 사용했으며, 시뮬레이션을 위한 도로기하구조 및 교통류의 세부조건은 다음과 같다.

- 차로폭 3.5m, 회전차로폭 5.0m
- 진출속도는 진입속도보다 5km/h 빠르다는 것을 가정
- 신호교차로는 4현시(160초), RTOR(Right Turns On Reds)
- 중차량 비율 0%
- 방향별 차로길이 2km



(a) A Turbo Roundabout

(b) A 2-lane Roundabout

(c) A Signalized Intersection

<Fig. 2> The Analyzed VISSIM Networks for the intersections

나선형 회전교차로에서는 주도로와 부도로의 교통량 차이와 접근차량의 방향별(좌회전, 직진, 우회전) 통행량 비율에 따라 교통운영 성능이 민감하게 차이가 난다. 이를 세밀하게 분석하기 위해 본 연구에서는 다음과 같은 교통류 비율을 적용하여 총 18개의 교통류 조건 기반 시나리오들을 구성하고 시뮬레이션 분석을 수행하였다.

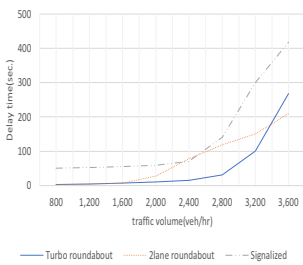
- 주도로 : 좌회전:직진:우회전(L:T:R, 1:6:3, 1:8:1, 2:6:2, 2:7:1, 3:5:2, 3:6:1)
- 부도로 : 좌회전:직진:우회전(L:T:R, 1:8:1, 2:7:1, 3:6:1)

IV. 적정교통량 산정을 위한 VISSIM 분석 결과

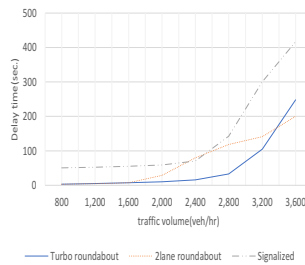
1. 시나리오별 분석 결과

1) 시나리오 #1

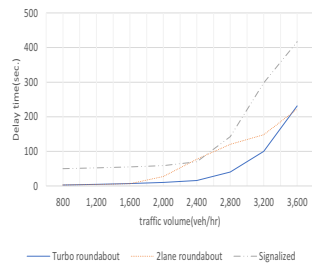
시나리오 #1에서는 주도로의 방향별 교통량 비율을 1:6:3(L:T:R)로 고정하고 부도로의 방향별 교통량 비율에 따른 교통량 수준별 세 가지 유형의 교차로 지체시간(초)을 분석하였다. <Fig. 3>, <Fig. 4>, <Fig. 5>에서 보는 바와 같이 세 가지 유형의 교차로에서 시뮬레이션 분석결과 교통량(대/시)이 증가할수록 지체시간(초)이 증가한 것으로 분석되었으며, 부도로의 좌회전 통행비율이 높을수록 지체시간(초)이 증가하는 것으로 분석되었다. 교통량 증가에 따른 지체시간 증가는 나선형 회전교차로에서 가장 양호한 것으로 분석되었다.



<Fig. 3> Delay for three intersection types as increases of traffic volume(Major1:6:3, Minor1:8:1)

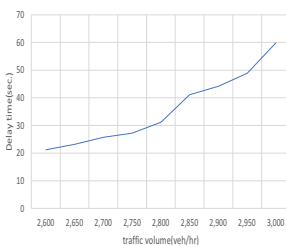


<Fig. 4> Delay for three intersection types as increases of traffic volume(Major1:6:3, Minor2:7:1)

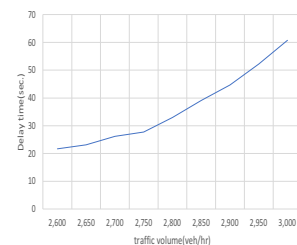


<Fig. 5> Delay for three intersection types as increases of traffic volume(Major1:6:3, Minor3:6:1)

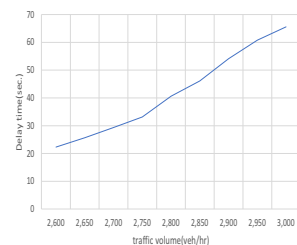
나선형 회전교차로 시뮬레이션 분석한 결과 시나리오#1에서는 교통량(대/시) 증가에 따라 지체시간(초)이 급증하는 교통량 수준은 2,800대/시 구간이 되었다. <Fig. 6>, <Fig. 7>, <Fig. 8>을 통해 변곡점 구간을 50대/시 단위로 세밀하게 분석한 결과 접근교통량이 2,750-2,800대/시 이후 교통량 증가에 따른 지체도 증가 패턴이 변화하여 해당 교통량 수준에서 서비스수준(LOS)이 D에서 E로 넘어가는 것으로 보여졌다.



<Fig. 6> TR increases of traffic volume(Major1:6:3, Minor1:8:1)



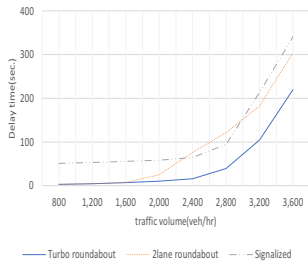
<Fig. 7> TR increases of traffic volume(Major1:6:3, Minor2:7:1)



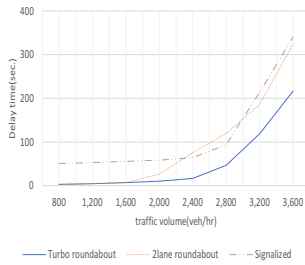
<Fig. 8> TR increases of traffic volume(Major1:6:3, Minor3:6:1)

2) 시나리오 #2

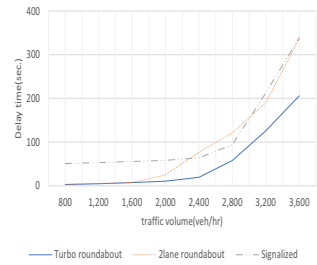
시나리오 #2에서도 교통량 증가에 따라 지체시간이 급증하는 교통량 수준에 대하여 교통량을 50대/시씩 증가시키며 시뮬레이션 분석을 추가적으로 수행한 결과, 접근교통량이 2,600-2,750대/시 이후 지체시간 증가 변화하여 서비스수준(LOS)이 D에서 E로 넘어가는 것으로 보여졌다(<Fig. 12>, <Fig. 13>, <Fig. 14>). 나선형 회전교차로는 1차로에서 좌회전 교통류와 직진 교통류가 주행하게 됨에 따라 좌회전 교통량 비율이 낮은 경우 불필요한 지체가 감소되어 시나리오 #1에 비하여 전반적으로 지체시간 증가가 더 뚜렷해짐을 확인할 수 있었다.



<Fig. 9> Delay for three intersection types as increases of traffic volume (Major1:8:1, Minor1:8:1)

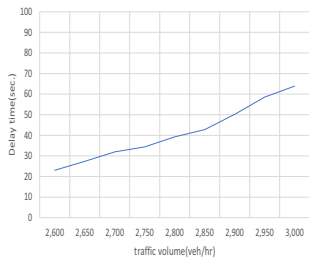


<Fig. 10> Delay for three intersection types as increases of traffic volume (Major1:8:1, Minor2:7:1)

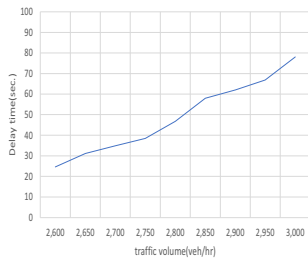


<Fig. 11> Delay for three intersection types as increases of traffic volume (Major1:8:1, Minor3:6:1)

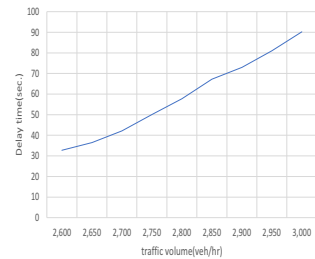
시나리오 #2에서도 교통량 증가에 따라 지체시간이 급증하는 교통량 수준에 대하여 교통량을 50대/시씩 증가시키며 시뮬레이션 분석을 추가적으로 수행한 결과, 접근교통량이 2,600-2,750대/시 이후 지체시간 증가 변화하여 서비스수준(LOS)이 D에서 E로 넘어가는 것으로 보여졌다(<Fig. 12>, <Fig. 13>, <Fig. 14>).



<Fig. 12> TR increases of traffic volume (Major1:8:1, Minor1:8:1)



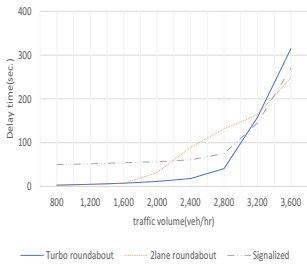
<Fig. 13> TR increases of traffic volume (Major1:8:1, Minor2:7:1)



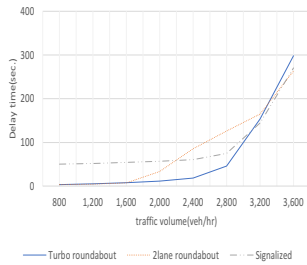
<Fig. 14> TR increases of traffic volume (Major1:8:1, Minor3:6:1)

3) 시나리오 #3

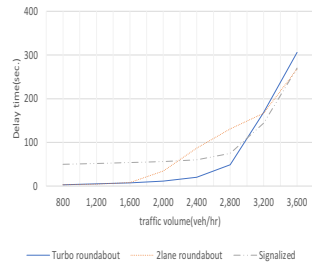
시나리오 #3에서는 주도로의 방향별 교통량 비율을 2:6:2(L:T:R)로 고정하고 부도로의 방향별 교통량 비율에 따른 교통량 수준별 세가지 유형의 교차로 지체시간(초)을 분석하였다. <Fig. 15>, <Fig. 16>, <Fig. 17> 그림에서 보는 바와 같이 시뮬레이션 분석결과 교통량(대/시)이 증가할수록 지체시간이 증가한 것으로 분석되었으며, 부도로의 좌회전 통행비율이 높을수록 지체시간(초)이 증가하는 것으로 분석되었다. 시나리오 #3에서 나선형 회전교차로와 2차로 회전교차로는 좌회전 통행비율이 20%로 증가함에 따라 시나리오 #1, #2에 비해 같은 교통량 수준에서 지체시간이 더 크게 증가하였다. 회전교차로 유형은 좌회전 통행비율이 증가할수록 지체도 커지는 것으로 보여졌다.



<Fig. 15> Delay for three intersection types as increases of traffic volume(Major2:6:2, Minor1:8:1)

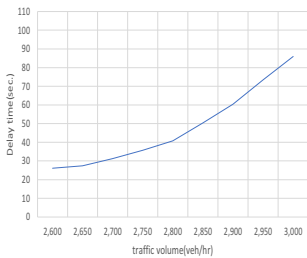


<Fig. 16> Delay for three intersection types as increases of traffic volume(Major2:6:2, Minor2:7:1)

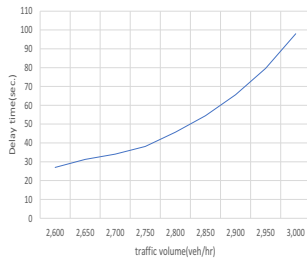


<Fig. 17> Delay for three intersection types as increases of traffic volume(Major2:6:2, Minor3:6:1)

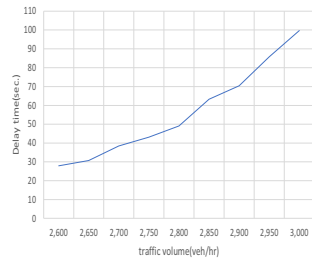
시나리오 #3에서도 지체시간이 급증하는 교통량 수준은 2,800대/시 구간으로 확인되었다. 변곡점 구간을 교통량 50대/시 단위로 세밀하게 분석한 결과 접근교통량이 2,650-2,700대/시 이후 서비스수준(LOS)이 D에서 E로 넘어가는 것으로 보여졌다(<Fig. 18>, <Fig. 19>, <Fig. 20>).



<Fig. 18> TR increases of traffic volume(Major2:6:2, Minor1:8:1)



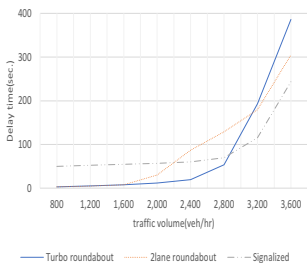
<Fig. 19> TR increases of traffic volume(Major2:6:2, Minor2:7:1)



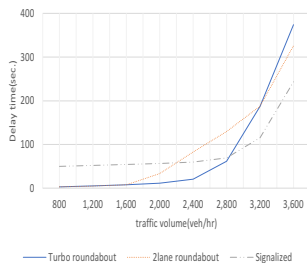
<Fig. 20> TR increases of traffic volume(Major2:6:2, Minor3:6:1)

4) 시나리오 #4

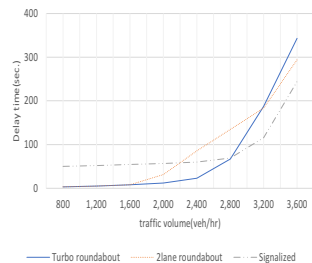
시나리오 #4에서는 주도로의 방향별 교통량 비율을 2:7:1(L:T:R)로 고정하고 부도로의 방향별 교통량 비율에 따른 교통량 수준별 세가지 유형의 교차로 지체시간(초)을 분석하였다. <Fig. 21>, <Fig. 22>, <Fig. 23> 그림에서 보는 바와 같이 시뮬레이션 분석결과 교통량(대/시)이 증가할수록 지체시간(초)이 증가한 것으로



<Fig. 21> Delay for three intersection types as increases of traffic volume(Major2:7:1, Minor1:8:1)



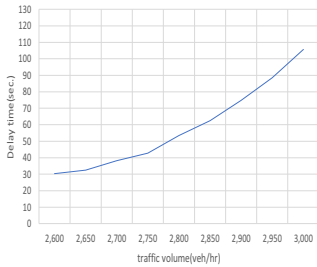
<Fig. 22> Delay for three intersection types as increases of traffic volume(Major2:7:1, Minor2:7:1)



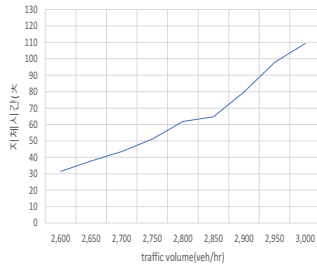
<Fig. 23> Delay for three intersection types as increases of traffic volume(Major2:7:1, Minor3:6:1)

분석되었으며, 부도로의 좌회전 통행비율이 높을수록 지체시간(초)이 증가하는 것으로 분석되었다. 시나리오 #4에서 회전교차로 유형은 시나리오 #3에 비해 지체시간(초)이 증가한 것으로 보여졌다. 신호교차로는 접근교통량이 약 3,100~3,200대/시 이후 2차로 회전교차로와 나선형 회전교차로에 비해 더 좋은 것으로 보여졌다.

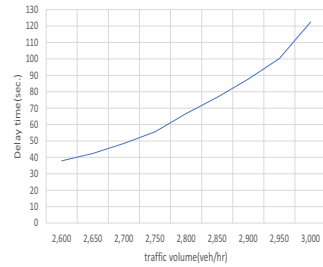
시나리오 #4에서 급증하는 교통량 수준에 대하여 교통량을 50대/시씩 증가시키며 시뮬레이션 분석을 추가적으로 수행한 결과, 접근교통량이 2,550-2,650대/시 이후 서비스수준(LOS)이 D에서 E로 넘어가는 것으로 확인되었다(<Fig. 24>, <Fig. 25>, <Fig. 26>).



<Fig. 24> TR increases of traffic volume(Major2:7:1, Minor1:8:1)



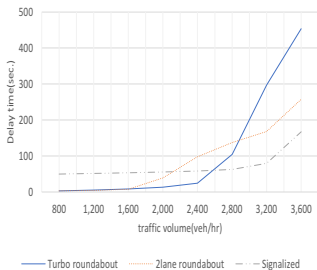
<Fig. 25> TR increases of traffic volume(Major2:7:1, Minor2:7:1)



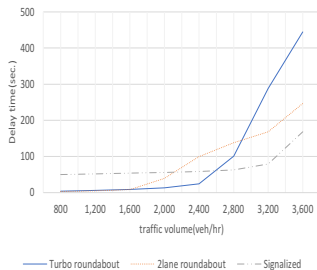
<Fig. 26> TR increases of traffic volume(Major2:7:1, Minor3:6:1)

5) 시나리오 #5

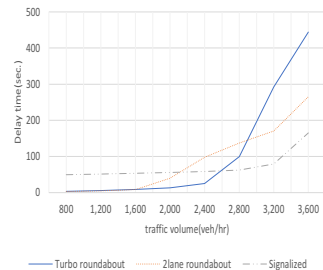
시나리오 #5에서는 주도로의 방향별 교통량 비율을 3:5:2(L:T:R)로 고정하고 부도로의 방향별 교통량 비율에 따른 교통량 수준별 세가지 유형의 교차로 지체시간(초)을 분석하였다. 시나리오 #5에서 주도로 좌회전 통행비율이 30% 수준이 되어 회전교차로 유형은 시나리오 #1~4에 비해 지체시간이 증가된 것으로 보여졌다 (<Fig. 27>, <Fig. 28>, <Fig. 29>).



<Fig. 27> Delay for three intersection types as increases of traffic volume(Major3:5:2, Minor1:8:1)

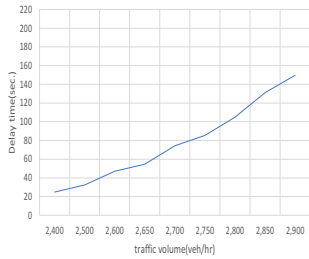


<Fig. 28> Delay for three intersection types as increases of traffic volume(Major3:5:2, Minor2:7:1)

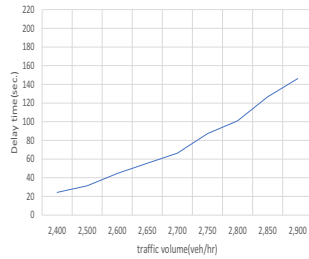


<Fig. 29> Delay for three intersection types as increases of traffic volume(Major3:5:2, Minor3:6:1)

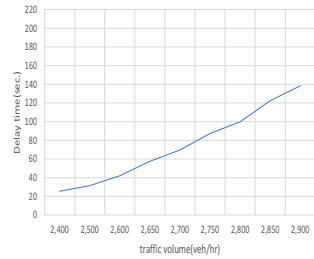
시나리오 #5에서 나선형 회전교차로를 세밀하게 시뮬레이션 분석한 결과 좌회전 통행비율이 증가함에 따라 접근교통량 수준이 2,500대/시 이후 서비스수준(LOS)이 D에서 E로 넘어가는 것으로 분석되었다(<Fig. 30>, <Fig. 31>, <Fig. 32>).



<Fig. 30> TR increases of traffic volume(Major3:5:2, Minor1:8:1)



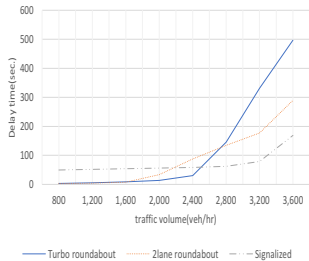
<Fig. 31> TR increases of traffic volume(Major3:5:2, Minor2:7:1)



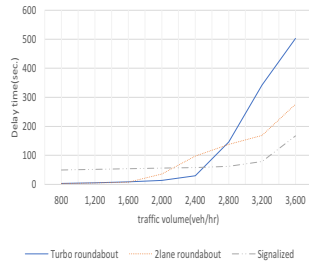
<Fig. 32> TR increases of traffic volume(Major3:5:2, Minor3:6:1)

6) 시나리오 #6

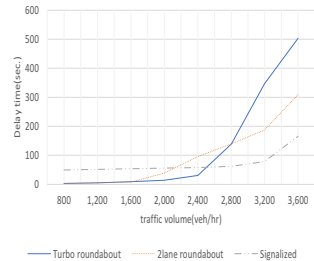
시나리오 #6에서는 주도로의 방향별 교통량 비율을 3:6:1(L:T:R)로 고정하고 부도로의 방향별 교통량 비율에 따른 교통량 수준별 세가지 유형의 교차로 지체시간(초)을 분석하였다. 시나리오 #6은 시나리오 #5에 비해 주도로 직진 통행비율이 높기 때문에 회전교차로 유형은 지체가 더 높은 것으로 보여졌다(<Fig. 33>, <Fig. 34>, <Fig. 35>).



<Fig. 33> Delay for three intersection types as increases of traffic volume(Major3:6:1, Minor1:8:1)

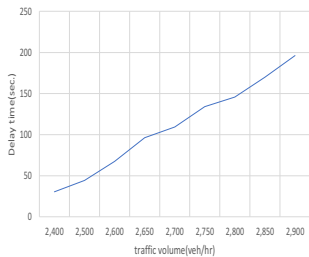


<Fig. 34> Delay for three intersection types as increases of traffic volume(Major3:6:1, Minor2:7:1)

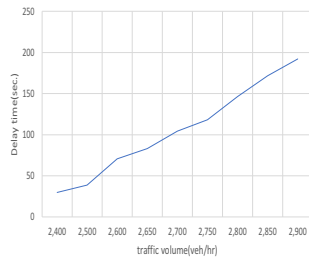


<Fig. 35> Delay for three intersection types as increases of traffic volume(Major3:6:1, Minor3:6:1)

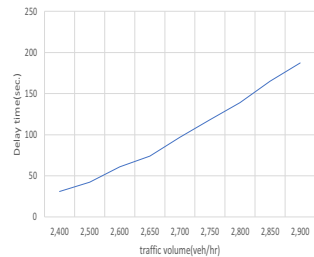
시나리오 #6에서 교통량 증가에 따라 지체시간이 급증하는 교통량 수준에 대하여 교통량을 50대/시씩 증가시키며 시뮬레이션 분석을 추가적으로 수행한 결과, 접근교통량이 2,400대/시 이후 서비스수준(LOS)이 D에서 E로 넘어가는 것으로 분석되었다(<Fig.36 >, <Fig. 37>, <Fig. 38>).



<Fig. 36> TR increases of traffic volume(Major3:6:1, Minor1:8:1)



<Fig. 37> TR increases of traffic volume(Major3:6:1, Minor2:7:1)



<Fig. 38> TR increases of traffic volume(Major3:6:1, Minor3:6:1)

2. 나선형 회전교차로 시나리오별 분석 결과 종합

나선형 회전교차로가 국내 도입되기 전 적정교통량 수준에 대해 분석할 필요가 있다. 적정교통량 수준을 찾기 위해 방향별 회전비율과 교통량 수준을 이용하여 변곡점을 찾고 변곡점 부근에서는 세밀하게 분석하였다.

시뮬레이션을 통해 분석한 결과 적정교통량 수준은 <Table 3>에 정리하였다. 나선형 회전교차로는 주도로 좌회전과 직진 통행비율이 높을수록 지체가 증가하여 교통량 수준이 감소하였고, 부도로 우회전 통행비율이 높을수록 지체가 감소하여 교통량 수준이 높은 것으로 분석되었다. 6개의 시나리오를 분석한 결과 나선형 회전교차로의 설계기준 교통량을 2,400대/시 이상으로 분석되었고 주·부방향 접근교통량과 교차로에서의 회전교통량에 따라 2,400~2,800대/시에서 교통량 증가에 따른 지체시간이 급변하게 확인할 수 있었다. 시뮬레이션 결과에 따라 평균제어지체가 회전교차로 효과적도인 서비스수준(LOS) D에서 E로 넘어가는 수준은 음영으로 표시하였다.

<Table 3> Delay change by traffic volume increase

Traffic volume (veh/h)	Main Approach																	
	1:6:3			1:8:1			2:6:2			2:7:1			3:5:2			3:6:1		
	Minor Approach																	
	1:8:1	2:7:1	3:6:1	1:8:1	2:7:1	3:6:1	1:8:1	2:7:1	3:6:1	1:8:1	2:7:1	3:6:1	1:8:1	2:7:1	3:6:1	1:8:1	2:7:1	3:6:1
2,000	10.4	10.3	10.3	10.5	10.4	10.5	11.5	11.5	11.6	12.0	11.7	11.9	13.4	13.4	13.4	14.2	13.9	14.2
2,400	15.4	15.7	15.9	16.0	16.6	19.0	18.3	18.3	20.2	19.6	20.7	22.8	25.0	24.4	25.4	30.4	29.8	30.9
2,500	17.7	18.3	18.3	19.1	21.3	23.9	22.4	22.6	24.8	23.4	25.2	27.2	32.3	31.5	31.5	44.1	38.7	42.3
2,600	21.2	21.7	22.3	23.0	24.6	32.7	26.1	27.0	27.9	27.4	28.0	33.3	47.1	44.7	42.1	67.4	70.5	60.8
2,650	23.2	23.1	25.7	27.3	31.2	36.5	27.4	31.2	30.8	30.3	31.4	38.0	54.5	55.6	57.5	96.2	83.1	74.0
2,700	25.7	26.2	29.3	32.0	34.9	42.1	31.3	34.1	38.5	32.5	37.7	42.4	74.3	66.4	69.5	109.3	104.4	97.0
2,750	27.2	27.8	33.2	34.4	38.4	50.1	35.7	38.2	43.1	38.2	43.6	48.5	85.3	87.1	87.4	133.9	118.2	118.3
2,800	31.2	33.0	40.7	39.2	46.8	57.7	40.8	45.8	49.1	42.7	51.1	55.6	105.0	101.0	99.8	145.7	146.2	139.0
2,850	41.1	39.1	46.1	42.7	58.0	67.2	50.4	54.5	63.2	53.5	61.9	66.6	131.1	126.7	122.4	169.9	171.7	165.1
2,900	44.2	44.7	54.1	50.2	62.1	73.0	60.4	65.6	70.4	62.4	64.7	76.6	149.8	146.1	138.3	196.2	192.1	187.2
2,950	48.9	52.3	60.8	58.6	66.9	81.0	73.4	79.7	85.7	74.8	79.8	87.7	178.9	168.1	176.0	220.1	216.0	214.1
3,000	59.8	60.8	65.6	63.9	78.0	90.2	86.0	98.0	99.7	88.5	97.8	100.2	198.1	189.6	187.9	245.3	244.7	236.2
3,200	100.8	104.7	100.0	104.8	118.8	125.7	158.3	153.7	168.8	105.7	109.2	187.5	296.9	288.2	292.1	330.9	342.6	347.2
3,600	267.8	247.8	231.0	219.8	216.7	205.8	315.1	298.5	306.0	386.4	374.1	343.2	453.7	444.7	444.5	497.0	502.7	503.6

V. 결론

회전교차로는 2010년 이후 안전성과 효율성을 인정받아 설치·운영되고 있다. 하지만 2차로 회전교차로에서는 운전 미숙, 회전교차로 운전방식에 대한 인식부족 등의 이유로 비정상적인 운전행태와 용량 감소, 교통사고 등이 발생되어 안전성과 효율성이 떨어지는 것으로 알려져 있다. 2차로 회전교차로의 문제점인 안전성

과 효율성을 해결하기 위해 2차로 회전교차로의 유형인 나선형 회전교차로를 국내 도입할 예정이다. 국내에서는 아직 나선형 회전교차로 적정교통량을 제시하고 있지 않기 때문에 본 연구에서는 나선형 회전교차로의 적정교통량을 분석하여 제시하였다.

본 연구에 사용된 시뮬레이션은 교통시뮬레이션 프로그램인 VISSIM(7.00)을 이용하여 진행했다. 우선 나선형 회전교차로, 2차로 회전교차로, 신호교차로 3개의 교차로를 교통량 수준 400대/시 단위로 증가시켜 각각 시뮬레이션 분석을 수행하여 그 결과들을 비교·분석하였다. 분석한 교차로 중 나선형 회전교차로의 접근교통량 2,400~3,000대/시에서 지체시간이 급증하는 구간을 교통량 수준 50대/시 단위로 증가시켜 변곡점과 서비스수준(LOS)을 분석하였다.

나선형 회전교차로, 2차로 회전교차로, 신호교차로 3가지 유형의 교차로를 분석하기 시나리오는 주도로 방향별 통행비율을 기준으로 시나리오를 6가지 구성하였다. 시나리오 #1에서는 우회전 통행비율이 좌회전 통행비율보다 높기에 회전교차로 유형의 교통량은 높게 나타났다. 나선형 회전교차로의 적정교통량을 파악하기 위해 세밀하게 분석한 결과 적정교통량이 2,750-2,800대/시 수준인 것으로 보여졌다. 시나리오 #2에서는 직진교통량이 가장 높게 설정했으며, 직진교통량이 높아짐에 따라 지체시간(초)은 시나리오 #1에 비해 증가하였다. 지체시간(초)이 증가함에 따라 나선형 회전교차로 적정교통량은 2,600-2,750대/시인 것으로 보여졌다. 시나리오 #3, #4는 좌회전 통행비율이 20%로 증가함에 따라 회전교차로 유형에서 지체시간이 증가하였다. 나선형 회전교차로의 적정교통량은 직진 통행비율에 따라 시나리오 #3에서는 2,650-2,700대/시, 시나리오 #4에서는 2,550-2,650대/시인 것으로 보여졌다. 시나리오 #5, #6은 좌회전 통행비율이 30%로 회전교차로 유형의 지체가 크게 증가한 것으로 분석되었다. 좌회전 통행비율 증가의 영향으로 나선형 회전교차로의 적정교통량 수준이 감소되었는데 시나리오 #5에서는 2,500대/시, 시나리오 #6에서는 2,400대/시인 것으로 분석되었다.

시나리오에 따라 교통량 수준 차이가 있지만 나선형 회전교차로의 적정교통량은 2,400-2,800대/시인 것으로 분석되었으며, 나선형 회전교차로는 좌회전 통행비율이 20%를 초과할 경우 다른 유형의 교차로를 설치하는 것이 교차로 운영에 유리한 것으로 분석되었다.

회전교차로의 좌회전 교통류는 회전차로의 약 75%를 주행한 후 교차로를 빠져나가기 때문에 일반적으로 좌회전 교통량에 영향을 많이 받게 된다. 이에 따라 회전교차로 설계지침(2014)에서는 좌회전 통행비율이 30~40%를 초과할 경우 회전교차로 설치를 지양하도록 설명하고 있다. 한편 나선형 회전교차로는 기하구조상 좌회전 통행량에 더 많이 영향받게 되어 좌회전 통행비율이 20%를 초과할 경우 나선형 회전교차로 설치에 의한 효과가 감소될 수 있다. 일반적으로 1차로에서만 통행이 가능한 나선형 회전교차로 특성 때문에 좌회전 통행이 많을수록 지체가 증가하는 것으로 분석되었다.

본 연구의 결과를 기반으로 나선형 회전교차로와 2차로 회전교차로는 주도로의 좌회전·직진 회전교통량과 교통량 수준에 의해 영향을 받는 것으로 보여졌다. 좌회전 교통량이 많아질수록 지체시간이 증가하는 것으로 보여졌으며, 좌회전 교통량이 증가할수록 신호교차로의 운영이 더 효율적인 것으로 보여졌다. 특히, 좌회전 통행비율이 30% 이상인 경우 나선형 회전교차로보다 2차로 회전교차로나 신호교차로의 운영이 더 효율적인 것으로 분석되었다.

본 연구의 한계로는 국내에서는 나선형 회전교차로가 구축되지 않아서 국내 주행행태를 반영한 간격수락 형태를 적용하지 못한 점이다. 국내 운전자들이 나선형 회전교차로를 통행할 때, 간격수락형태를 고려하게 된다면 교통안전 향상과 나선형 회전교차로 적정교통량이 변할 수 있다고 생각된다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 국토교통부의 「스마트시티 혁신인재육성사업(’19-’23)」으로 지원되었습니다. This work is financially supported by Korea Ministry of Land, Infrastructure and Transport(MOLIT) as 「Innovative Talent Education Program for Smart City」.

REFERENCES

- Elzbieta M.(2015), “The road safety at turbo roundabouts in Poland,” *Article in Archives of Transport*, vol. 33, no. 1, pp.57-67.
- Engelsman J. C. and Uke M.(2007), “Turbo roundabouts as an alternative to two lane roundabouts,” *Document Transformation Technologies cc, 26th Annual Southern African Transport Conference 2007*, pp.581-589.
- FHWA, *Turbo Roundabouts-Informational Primer*, FHWA Safety, p.6.
- Fortuijn L. G. H.(2009), “Turbo Roundabouts Estimation of Capacity,” *Transportation Research Board of the National Academies*, vol. 2130, no. 1, pp.83-92.
- Jaime B. and Jordi C.(2005), *Simulation Approaches in Transportation Analysis*, Springer, pp.57-98.
- Joe G.(2018), “Uniformity of Terminology for Circular Intersection Designs,” *Transportation Research Record*, vol. 2672, no. 34, pp.63-72.
- Lambertus G. H. F.(2009), “Turbo Roundabouts: Design Principles and Safety Performance,” *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2096, no. 1, pp.16-24.
- Lee D. M. and You J. H.(2013), “A Study on Appropriate Traffic Volume Calculation for Revitalizing Round about Installation,” *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 31, no. 6, pp.43-52.
- Lee D. M., You J. H., Kim D. H. and Lee S. K.(2013), “An Analysis of Roundabout Application Effects Based on Before and After Field Studies,” *International Journal of Highway Engineering*, vol. 15, no. 1, pp.111-119.
- Lim C. S. and Choi Y. W.(2018), “Effectiveness Analysis of Installation of Turbo Roundabouts,” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, vol. 38, no. 6, pp.925-932.
- Lim J. K. and Park B. H.(2016), “Operational Effects of Special Roundabouts at Large-Scale Rotaries,” *International Journal of Highway Engineering*, vol. 18, no. 1, pp.109-117.
- Raffaele M. and Federico B.(2010), “Comparative Analysis of Compact Multilane Roundabouts and Turbo-Roundabouts,” *Journal of Transportation Engineering*, vol. 136, no. 4, pp.316-322.
- Raffaele M. and Marco G.(2015), “Evaluation of the Safety Performance of Turbo Roundabouts by Means of a Potential Accident Rate Mode,” *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, vol. 10, no. 1, pp.28-38.
- Tomaž T. et al.(2010), “New type of roundabout: Roundabout with “depressed” lanes for right turning-“flower roundabout”,” *Traffic&Transportation*, vol. 23, no. 5, pp.353-358.
- Vasconcelos L. et al.(2014), “Turbo roundabouts: Multicriterion assessment on intersection capacity, safety, and emissions,” *Transportation Research Board of the National Academies*, vol. 2402, no.

1, pp.28-37.

WIJK W.(2009), *Turbo roundabouts a safe solution for Hungary*, Royal Haskoning, p.8.

Ynag T. Y., Lee Y. I. and Yoon T. K.(2019), “Application and Evaluation of Signal Metering at Special Roundabouts,” *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 18, no. 6, pp.96-109.