

# 특수유형 회전교차로 신호미터링 적용 및 평가

## Application and Evaluation of Signal Metering at Special Roundabouts

양 태 양\* · 이 영 인\*\* · 윤 태 관\*\*\*

\* 주저자 : 서울대학교 환경대학원 환경계획학과 석사과정

\*\* 교신저자 : 서울대학교 환경대학원 환경계획학과 교수

\*\*\* 공저자 : 국토연구원 국토인프라연구본부 책임연구원

Taeyang Yang\* · Younglhn Lee\*\* · Taekwan Yoon\*\*\*

\* Dept. of Environmental Planning, Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University

\*\* Dept. of Environmental Planning, Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University

\*\*\* National Infrastructure Research Division, Korea Research Institute for Human Settlements

† Corresponding author : Younglhn, Lee, yilee@snu.ac.kr

Vol.18 No.6(2019)

December, 2019

pp.96~109

pISSN 1738-0774

eISSN 2384-1729

[https://doi.org/10.12815/kits.](https://doi.org/10.12815/kits.2019.18.6.96)

2019.18.6.96

Received 15 October 2019

Revised 31 October 2019

Accepted 15 November 2019

© 2019. The Korea Institute of Intelligent Transport Systems. All rights reserved.

### 요 약

회전교차로는 불필요한 정체를 줄이고 교통사고를 감소시키기 위하여 적극적으로 설치되고 있다. 하지만 차로당 교통량이 450대 이상인 경우 도입이 어렵고 교통여건에 따라 특정방향에 지체가 집중될 수 있는 단점이 존재한다. 이러한 단점을 보완하기 위해 회전교차로에 신호미터링을 도입하였다. 신호미터링은 특정방향에 지체가 발생한 경우 인접한 진입 교통류에 적색신호를 부여하여 지체가 발생한 방향의 회전교차로 진입을 원활화하는 기법이다. 본 연구에서는 기존 일반 회전교차로와 특수유형 회전교차로인 Turbo형 회전교차로와 Flower형 회전교차로를 대상으로 신호미터링을 도입하여 회전교차로 유형별 신호미터링 도입 효과를 비교 분석하였다. 분석에는 VISSIM API를 이용하였으며, 분석결과 기존 회전교차로의 경우에만 신호미터링 알고리즘 도입 시 지체감소 효과를 보였다. Turbo형, Flower형 회전교차로의 경우 지체가 증가하는 것으로 나타나 기존 회전교차로의 경우에 신호미터링 알고리즘 도입 시 효율적인 교차로 운영이 가능한 것으로 분석되었다.

핵심어 : 회전교차로, 특수유형 회전교차로, 신호미터링, VISSIM, 교통운영

### ABSTRACT

Roundabouts are actively installed to reduce unnecessary congestion and reduce traffic accidents. However, it is difficult to apply more than 450 cars per hour. In addition, there is a downside to the concentration of delays in certain directions depending on traffic conditions. To compensate for these shortcomings, signal metering was introduced. Signal metering is a technique that gives red signals to adjacent left traffic flow in the event of a delay in a particular direction. The purpose of this study is comparing the effect of signal metering in conventional and special types (turbo roundabout, flower roundabout) of roundabout. VISSIM API is used for analysis. The analysis result show that only conventional roundabout signal metering algorithm reduce delay time per vehicle. As the result of the turbo roundabout and flower roundabout signal metering algorithm increase delay time per vehicle, signal metering algorithm can be applied in conventional roundabout.

Key words : Roundabout, Special roundabout, Signal metering, VISSIM, Traffic operation

## I. 서론

### 1. 연구배경

회전교차로는 신호등으로 인한 불필요한 정체를 줄이고 이에 따라 차량들의 통행시간을 감축시켜 탄소 배출량도 줄일 수 있는 교차로이다. 또한, 사고 발생 시 가장 큰 부상이 우려되는 반대 방향의 교통류와 정면충돌할 우려가 없고, 회전구간으로 인하여 차량들이 속도를 줄이게 되어 차대차, 차대사람 등 사고의 심각도를 줄일 수 있는 교차로이다. 하지만 다음과 같은 단점도 존재한다. 교통량이 많은 지역에 회전교차로를 도입할 경우, 진입교통량이 불균등한 경우 등 교통상황에 따라서 혼잡을 가중시킬 수 있다. 따라서 회전교차로는 교통량이 비교적 적은 곳에 설치가 가능하다. 또한, 1차로에서 2차로로 확장될 때 용량이 차로 수 만큼 증가하지 않는다. 국내 설계기준에 따르면 1차로형은 20,000대/일 이하, 2차로형은 32,000대/일 이하로 차로 수는 2배이지만 교통량 수준은 1.6배 증가하였다. 이러한 요인은 회전구간 내 혼잡에 기인한 것으로 보인다.

위와 같은 회전교차로의 단점을 보완하려는 방안들로 Turbo형 회전교차로와 Flower형 회전교차로가 있다. Turbo형 회전교차로는 1998년 네덜란드에서 최초로 소개되었다. 회전구간 내에서는 차로 변경이 불가능하며 회전구간 내에 진입하기 전에 차량이 좌회전, 직진, 우회전 방향을 미리 정하고 진입하는 교차로이다. 주로 최초로 소개 및 도입된 국가인 네덜란드와 독일, 슬로베니아 등 유럽에서 활발히 설치되고 있다. 독일의 경우 설치 전후 교통사고 비용과 사고율을 분석한 결과 두 가지 지표 모두 감소하는 효과를 얻었다.

4지 터보 회전교차로에는 <Fig. 1>과 같이 총 5가지 형태가 존재한다. Spiral형과 Rotor형의 경우 진입 차로 수가 편도 3차로 이상이다. 네덜란드에서 3차로 Turbo형 회전교차로에 대한 설계기준도 제시하고 있어 향후 교통량이 많은 곳에도 도입이 가능할 것으로 보인다.

Flower형 회전교차로의 경우 Turbo형 회전교차로와 마찬가지로 회전구간 내에서 차선변경이 불가능하다. 또한, 우회전 차로를 분리하여 직진 교통류와 우회전 교통류의 상충을 막아 Turbo형 회전교차로보다 상충 면적이 더 작은 교차로이다.



<Fig. 1> Four leg turbo roundabout variants

회전교차로 도입 시 교통량과 통행패턴에 큰 영향을 받는 단점을 보완하기 위한 방법으로 신호미터링 기법이 있다. 신호미터링 기법은 2000년대 들어서 회전교차로가 활발히 도입되면서 연구가 진행되고 있다. 신호미터링 기법은 주도로와 부도로를 구분하여 주도로의 정체가 발생할 경우 부도로의 진입을 통제하여 회전교차로 운영 효율을 높이는 기법이다. 정체 판단은 대기행렬의 길이를 이용하여 판단하며 대기행렬을 검지하기 위한 검지기는 보편적으로 50~120m 지점에 위치한다. 신호미터링 기법을 도입하게 되면 기존설계 지침에서 제시하고 있는 침두시 교통량이 차로당 450대/시를 일정 수준 이상 초과하여보다 폭넓은 회전교차로 도입이 가능하다.

## 2. 연구목적

본 연구에서는 회전교차로 도입을 활성화하고 지체감소 효과를 증대하기 위해 신호미터링 기법을 도입하여 평가하고자 한다. 일반 회전교차로를 보완하기 위해 제시된 Turbo형 회전교차로, Flower형 회전교차로에도 신호미터링을 도입하여 효과를 비교 분석하고자 한다. 기존의 연구가 주도로의 대기행렬 길이를 검지하여 부도로의 진입을 막는 방법으로 신호미터링이 시행되었다면 본 연구에서는 4방향 접근로의 대기행렬을 검지하여 신호미터링을 시행하였다. 모든 방향에서 대기행렬을 검지하여 신호미터링을 시행하는 경우 주도로, 부도로 구분이 모호한 곳, 4지 교차가 아닌 회전교차로, 방향별 교통량 격차가 큰 곳 등 다양한 경우에도 적용할 수 있어 폭넓은 적용이 가능한 신호미터링 알고리즘을 제시하고자 한다. 또한, 회전교차로 형태별 신호미터링 도입으로 효율적인 운영이 가능한 진입교통량 범위를 제시하여 신호미터링 도입 활성화에 기여하고자 한다.

## II. 관련 현황 및 선행 연구고찰

### 1. 회전교차로 관련 현황

회전교차로는 도로의 평면 교차 방식의 하나이다. 교차로의 중심부에 교통섬을 두어 차량이 이 교통섬을 우회하여 회전하며 통행하며, 회전구간 내 상층이 발상하는 경우 먼저 회전구간을 통행하고 있는 차량에게 우선권이 주어지는 교차로이다. 1960년대 영국에서 처음으로 도입하기 시작하였으며 이후 유럽과 미국 등에 설치되기 시작하였다.

회전교차로는 차량의 속도와 교통량을 줄여 보행자와 자전거 이용자의 도로 이용을 안전하고 편리하게 하는 교통정문화 기법의 한가지이다. 한국에서는 행정안전부에서 2010년부터 교통사고 예방 및 교통운영체계 선진화 방안의 일환으로 회전교차로 설치사업을 추진해오고 있다. 2018년까지 전국에 498개소가 설치되었으며 2019년에는 전국에 71개소를 추가로 설치할 계획이다. 이러한 사업의 일환으로 설치된 회전교차로에 대하여 설치 전후 효과를 분석한 결과는 다음과 같다. 설치 전인 2015년과 설치 후인 2017년의 교통사고 사상자 수, 사망자 수, 중상자 수, 통행시간을 비교하였다. 사상자 수는 147명에서 73명으로 74명, 50.3% 감소하였고, 사망자 수는 4명에서 0명, 100%, 중상자 수는 40명에서 16명, 63.6% 감소하였고, 통행시간은 29.2초에서 24.2초, 17.1% 감소하는 효과가 나타났다.

### 2. 선행 연구고찰 및 시사점

Džambas et al.(2017)는 유럽의 다양한 설계 방식을 살펴보고자 하였다. 설계기준이 처음 만들어진 네덜란드를 비롯하여 슬로베니아, 독일, 세르비아 및 크로아티아 등 5개 국가 간 Turbo형 회전교차로 설계기준을 설계절차별로 비교·분석하였다. 설계는 터보형 회전교차로의 형식 선정, 설계기준 자동차의 정의, 중앙교통섬 설계, 기타요소 설계 및 주행 경로 및 속도분석 총 5단계로 구분하였으며, 각 단계별로 국가별 기준과 규정 등을 제시하였다.

Park(2015)은 회전교차로의 운영 효율성을 유지하면서 신호교차로로 전환하는데 소요되는 비용을 절감시켜 효율적이고 경제적인 대응방안이 될 수 있는 회전교차로 신호미터링에 대한 효과분석을 수행하였다. 이를 위해 회전교차로 진입 차로별 교통량, 검지기 이격거리, 진입차로 통제시간 등에 대한 시나리오를 구축하

였다. 시나리오는 VISSIM으로 구축하였고 도입 전·후 효과를 분석하였다. 신호미터링 운영체계를 구축에는 VisVAP 모듈을 활용하였다. 분석결과 진입 교통류의 좌회전 비율이 증가할수록 신호미터링을 통한 회전교차로의 지체감소 효과는 증가하였으며 교통량 기준 분석결과는 다음과 같다. 교통량이 상대적으로 높아 주방향으로 인식되는 통제접근로(Controlling Approach)의 교통량이 시간당 450~650대, 교통량이 비교적 적어 부방향으로 인식되는 미터링접근로(Metered Approach)의 교통량이 시간당 300~500대일 때 신호미터링을 도입 시 지체감소 효과가 있는 것으로 나타났다.

Lim and Choi(2018)은 부산광역시에 위치한 모라1동 행정복지센터와 학생예술문화회관과 같은 3지 및 4지 교차로를 대상으로 분석하였다. 이러한 교차로의 경우 부도로 교통량이 작은 신호 교차로로 운영되고 있다. 기존 신호교차로와 Turbo형 회전교차로를 VISSIM을 통해 도입 효과를 비교 분석을 하였다. 시나리오는 1차로 Turbo형 회전교차로, 2차로 Turbo형 회전교차로 2가지에 대한 개선 전후의 운영 효과를 분석하였다. 분석결과로는 국내 주도로의 교통량 비율이 높고, 부도로의 교통량이 10~15% 이하인 경우 지체감소 효과가 높았다. 또한, 각 접근로별 진입교통량이 많고 좌회전 비율이 30% 이하로 적을 경우 지체감소 효과가 있는 것으로 분석되었다. 기존 3지교차로 및 4지교차로의 1차로형 회전교차로에 비해 Turbo형 회전교차로는 지체감소 효과가 매우 높았다. 1차로 Turbo형 회전교차로는 2차로 Turbo형 회전교차로에 비해 용지 면적이 적어 도로용량의 증대에도 더욱 효율적인 것으로 나타났다.

Lee et al.(2017)은 기존 연구들에서 회전교차로 신호 운영 및 보행 신호 운영 대한 연구가 다수 진행되었으나, 차량의 소통과 보행자의 안전을 동시에 고려한 신호미터링 운영에 관한 연구는 없다고 지적하였다. 2차로형 4지 회전교차로를 대상으로 교통류상태(진입교통량, 좌회전 비율)에 따른 시나리오를 설정하고 교통류 분석프로그램인 VISSIM의 COM Interface 활용하여 평가 분석을 수행하여 회전교차로 감응식 신호미터링 알고리즘을 제시하였다. 분석결과 마주 보는 두 진입로에 교통량이 집중된 상태(3,400대/시 이하) 그리고 인접한 두 진입로에 교통량이 집중된 상태(3,000~4,200대/시)의 교통량에서만 운영 효과가 있었다. 이러한 결과는 보행 신호 운영으로 인해 방향별 차량의 진출입로가 동시에 차단되어 보행 신호 동안 차량들이 대기하면서 지체가 증가한 것으로 나타났다.

Song(2011)은 2차로 회전교차로의 대안으로 국내 도입이나 연구 사례가 없는 Turbo형 회전교차로를 제시하였다. 진입교통량과 회전교통량 비율 등 다양한 조건에 대한 시나리오를 작성하고 VISSIM을 통하여 효과를 분석하였다. 분석결과로는 주도로의 흐름을 방해하는 부도로의 좌회전 직진 교통량이 증가할수록 통행속도는 감소, 지체시간은 증가하였다. 또한, 좌회전 비율이 낮을수록 더 많은 교통량 처리가 가능하며 우회전은 거의 영향을 미치지 않았다. 전체적으로 시나리오 분석결과를 보았을 때 일반 회전교차로보다 10% 더 많은 교통량을 처리할 수 있는 것으로 분석되었다.

Eom et al.(2015)는 부산광역시 덕포교차로를 대상으로 기존 신호교차로에서 회전교차로로 전환하고 교차로 인근 신호 읍셋을 조절하여 신호를 최적화하였다. 시나리오1은 기존 교차로, 시나리오2는 기존과 같은 읍셋 조건에서 회전교차로로 전환하였으며 시나리오 3은 최적화된 읍셋 조건에서 회전교차로로 전환한 시나리오로 구성하였다. 시나리오1에 비해 시나리오2에서는 오히려 지체가 증가하였지만 시나리오3 최적화된 신호에서는 지체가 감소하는 것으로 분석되었다.

Lim et al.(2017)은 일반 4지 2차로 회전교차로와 Turbo형 회전교차로, Flower형 회전교차로, Hamburger형 회전교차로, 좌회전 입체 회전교차로를 대상으로 다양한 교통량 조건에서 VISSIM과 SSAM을 이용하여 시뮬레이션하였다. Turbo형 회전교차로가 상충횟수가 적은 것으로 분석되었으며 일반 2차로 회전교차로, 좌회전 입체 회전교차로, Hamburger형 회전교차로에서 지체가 대체로 적은 것으로 분석되었다.

Jang and Lee(2015)은 일반 4지 2차로 회전교차로와 Flower형 회전교차로, Turbo형 회전교차로를 대상으로

다양한 교통량 조건에서 VISSIM과 SSAM을 이용하여 시뮬레이션하였다. 일반, Turbo형, Flower형 순서로 일반 회전교차로가 가장 지체가 작은 것으로 분석되었으며, Flower형, Turbo형, 일반 순서로 Flower형 회전교차로가 상충횟수가 가장 작은 것으로 분석되었다.

Ahn(2012)은 회전교차로 진입교통량 변화에 따른 운영효율성을 제고하기 위해 회전교차로 신호미터링 도입을 제안하였다. 다양한 회전교차로 형태 중 1차로형 4지 회전교차로를 대상으로 교통량 증가에 따른 신호미터링 전환기준과 운영방법을 제시하였다. SIDRA를 활용하여 도입 효과를 분석하였으며 효과적도로는 지체와 대기행렬길이를 이용하였다. 분석결과 주접근로의 진입교통량이 60%인 경우 교통량 1,000~1,800pc/h 일 때 평균지체와 대기행렬길이가 기존 회전교차로에 비해 감소하는 것으로 나타났다. 하지만 주접근로의 진입교통량이 50%이하인 경우에는 신호미터링으로 인한 개선효과가 없는 것으로 나타났다. 향후 연구과제로 다양한 유형의 회전교차로에 대한 분석과 기하구조 변화, 회전교통량 변화 등 다양한 시나리오에서의 적용을 남겼으며, 환경적인 측면에서의 효과도 분석이 필요하다고 하였다.

Akcelik(2011)은 호주 멜버른 회전교차로를 대상으로 신호미터링을 도입하여 SIDRA를 활용하여 효과를 분석하였으며 정지율 평균지체, 대기행렬길이를 효과적으로 이용하였다. Metered 접근로와 Controlling 접근로 두 가지로 접근로를 구분하여 Controlling 접근로에서 대기행렬이 검지되면 Metered 접근로에 적색 신호를 부여하는 방법으로 시행하였다. Metered 접근로의 정지선 지점은 15~25m 대기행렬 검지기는 50~120m 등의 값을 제시하여 효과를 분석하였다. 분석결과 Metered 접근로의 지체는 다소 증가하였으나, Controlling 접근로의 지체가 크게 감소하여, 회전교차로 운영 효율성이 증가하는 것으로 나타났다.

Martín-Gasulla et al.(2016)은 스페인에는 3만개 이상의 회전교차로가 있으며, 다수가 회전교차로 용량에 비해 교통량이 많거나 불균형한 통행 패턴으로 인하여 지체가 발생하고 있어 신호미터링 도입이 필요하다고 하였다. 이에 스페인 발렌시아에 위치한 회전교차로를 대상으로 VISSIM VisVAP 2.16 module을 활용하여 신호미터링 도입 효과를 분석하였다. Akcelik(2011)에서와 같이 Controlling 접근로에서 대기행렬이 검지되면 Metered 접근로에 적색 신호를 부여하는 방법으로 시행하였다. 효과적도로는 대기행렬길이와 평균 지체시간을 이용하였다. VISSIM VisVAP 2.16 module을 이용해 대기행렬검지 길이, 적색 신호 시간 등 400개 이상의 조합을 입력하여 효과적도를 최소로 하는 최적의 변수 값들을 도출하였다. 대기행렬길이는 50m, 최소 적색 시간은 15초, 최대 적색 시간 연장 시간 20초가 최적의 값인 것으로 나타났다. 최적의 값으로 신호미터링 기법을 도입하여 분석한 결과 상충 교통류가 1,200vph 일 때 신호미터링은 회전교차로의 용량을 600vph까지 증가시키는 것으로 나타났다.

기존 연구를 검토한 결과 Lim and Choi(2018)과 Song(2011)에서는 Turbo형 회전교차로가 일반 회전교차로에 비해 지체가 감소하는 것으로 분석되었으며, Lim et al(2017), Jang and Lee(2015)에서는 Turbo형, Flower형 회전교차로가 일반 회전교차로보다 지체가 큰 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 다양한 교통량 조건과 시뮬레이션에 쓰인 변수 값 차이가 기인한 것으로 보인다.

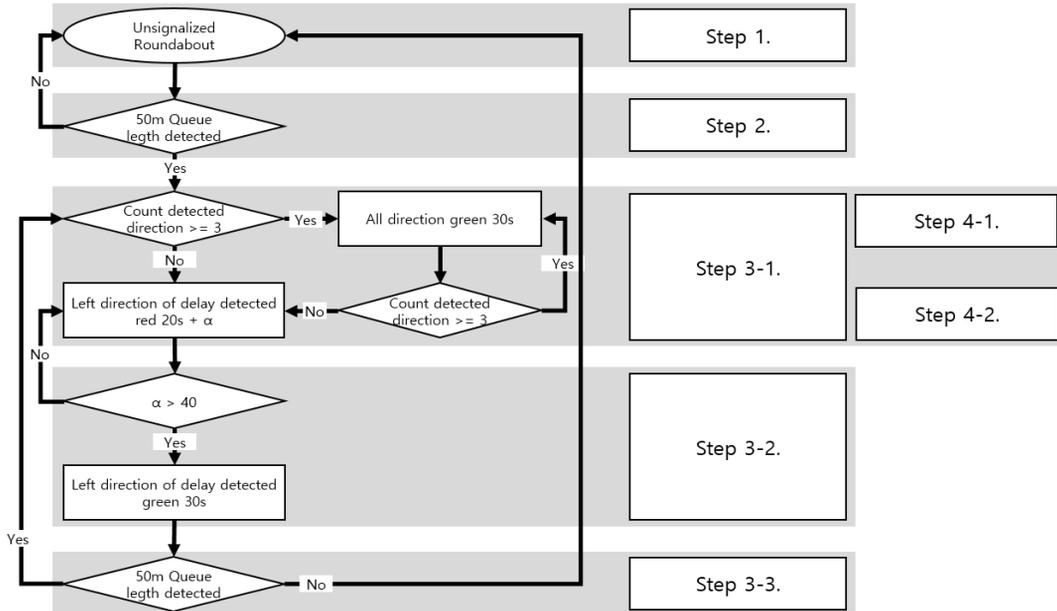
본 연구에서는 Busan Metropolitan City(2019)에서 조사된 교통량 자료를 이용하여 4지 교차로의 주도로와 부도로를 구분하였다. 주도로와 부도로 각각의 회전교통량 비율을 산정하였다. 그 후 일반적인 회전교통량 비율을 도출하여 분석 시나리오 구축에 이용하였다.

기존 연구에서는 주도로에서 대기행렬이 검지 될 경우 부도로 교통류 흐름을 적색 신호로 끊는 신호미터링이 시행되었다. 주도로 부도로의 구분이 명확하지 않거나 시간대에 따른 방향별 교통량에 대응하기 어렵다는 단점이 있다. 본 연구에서는 4방향 모두 대기행렬 검지기를 설치하고 신호미터링을 시행하였다. 이를 통해 다양한 상황에 적용가능하고, 기존 연구와 차별성을 가지는 신호미터링 알고리즘을 제시하고자 한다.

### Ⅲ. 신호미터링 알고리즘

본 연구에서는 회전교차로 구축에 용이한 미시적 시물레이션 모형인 VISSIM을 활용하여 분석에 필요한 네트워크를 구축하였다. 또한, Visual Basic 기반의 ComInterface를 이용하여 신호미터링 알고리즘을 구현하였다. 신호미터링 시행 전후를 평가하기 위한 효과적도로는 차량당 평균 지체를 이용하였다.

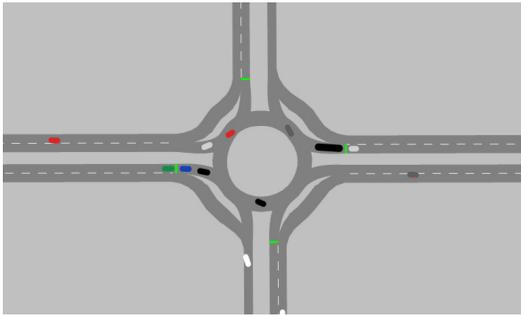
구현된 알고리즘의 흐름은 <Fig. 2>와 같다.



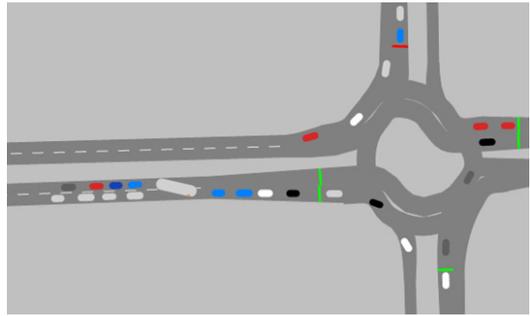
<Fig. 2> Signal metering algorithm

알고리즘은 다음과 같은 방법으로 진행된다.

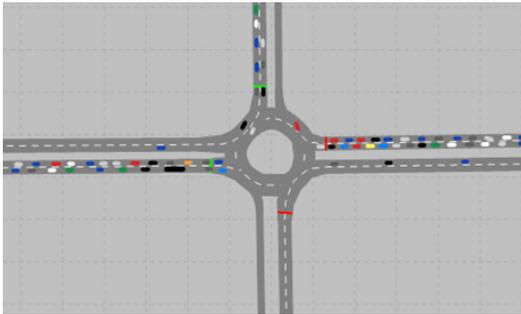
- Step 1. 교차로로 접근하는 모든 방향에 대하여 대기행렬 정보를 수집하며 대기행렬이 검지 되지 않는 평상시에는 비신호 회전교차로로 운영된다.
- Step 2. 대기행렬이 50m가 검지가 될 경우 몇 개의 방향에서 동시에 대기행렬이 검지가 되고 있는지 판단한다.
- Step 3-1. 대기행렬이 검지 되는 방향이 3개 미만일 때 대기행렬이 검지 된 왼쪽 방향에서 진입하는 교통류에  $20+\alpha$  초의 적색 신호를 부여하여 교차로 진입을 막는다.
- Step 3-2.  $\alpha$ 가 40 이상의 값을 가지게 될 경우, 즉 적색 신호가  $20+40$ 초 이상 주어지는 경우 적색 신호를 부여하였던 방향에 30초간 녹색 신호를 부여한다.
- Step 3-3 30초간 녹색 신호가 끝나고 대기행렬 검지 정보를 확인하고 검지가 되고 있는 경우 Step 2, 검지가 되지 않는 경우 Step 1로 돌아간다.
- Step 4-1. 대기행렬이 검지 되는 방향이 3개 이상인 경우 전 방향에 녹색 신호 30초를 부여한다.
- Step 4-2. 녹색 신호 30초가 지나면 다시 대기행렬이 몇 개의 방향에서 검지 되고 있는지 판단하고 3방향 이상에서 검지 되는 경우 Step 4-1, 3방향 미만에서 검지 되는 경우 step 3-1로 돌아간다.



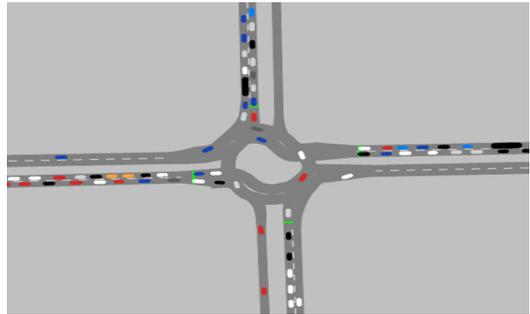
<Fig. 3> Unsignalized roundabout



<Fig. 4> Left direction of delay detected red



<Fig. 5> Red time exceeds 60 seconds



<Fig. 6> Queue detected direction  $\geq 3$

대기행렬은 정지선을 기준으로 하며 대기행렬 검지 길이의 경우 30m, 40m, 50m 적용결과 지체가 가장 적게 발생한 50m를 적용하였으며, 녹색 신호시간은 20초와 30초 중 지체가 가장 적게 발생하는 30초로 적용하여 분석하였다. <Fig. 3>은 모든 방향에서 대기행렬 50m가 검지 되지 않는 상황으로 비신호 회전교차로와 같은 방법으로 운영된다. <Fig. 4>은 대기행렬이 50m가 검지가 될 경우이다. 인접한 방향 중 대기행렬이 검지된 방향의 교통흐름에 가장 큰 방해줄 수 있는 대기행렬 검지 방향 기준 왼쪽방향에 적색 신호를 부여하게 된다. 이때 적색 신호시간은  $20 + \alpha$  초이다. 여기서  $\alpha$  초는 대기행렬 50m가 검지된 시점( $t_s$ )부터 대기행렬이 해소되어 대기행렬 50m 검지가 되지 않는 시점( $t_f$ )까지의 시간이며 최대 40의 값을 가진다. 즉 50m 대기행렬이 검지된 지속적으로 시간 만큼 녹색 신호가 계속 부여가 되며, 50m 대기행렬 검지가 끝나는 시간부터 20초간 녹색 신호가 추가로 부여가 된다.

$$\alpha = t_s - t_f \quad (1)$$

위와 같은 방법을 적용하게 될 경우 교통량이 많아 특정 방향에 대기행렬이 지속해서 50m가 검지 될 경우가 발생한다. 해당 방향의 왼쪽 진입로는 계속해서 적색 신호가 부여되어 차량이 진입할 수가 없게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 <Fig. 5>와 같은 조건을 부여하였다.

<Fig. 5>를 보면 서쪽에서 진입하는 차량들의 지체가 있음에도 북쪽에서 진입하는 방향의 신호가 녹색 신호인 것을 볼 수 있다. 지속적인 대기행렬 검지로 인한 적색 시간이 길어져 발생하는 지체를 막기 위해 적색 시간이 60초가 초과할 경우 녹색시간을 30초 부여하도록 설정하였다.

<Fig. 6>는 3방향 이상에서 대기행렬이 검지 되는 경우이다. 교통량 증가로 인하여 대기행렬 50m가 검지

되어 모든 방향에 적색 신호가 켜지거나 적색 시간 60초가 경과 되면 녹색시간이 30초씩 들어오게 되어 지체가 증가할 수 있다. 따라서 3방향 이상에서 대기행렬이 검지 되면 모든 방향에 녹색시간 30초를 부여하게 하였다. 30초가 지난 다음 3방향 미만으로 대기행렬이 검지 될 경우에는 <Fig. 4>와 <Fig. 5>의 방법으로 다시 신호미터링이 시행된다. 30초가 지난 다음에도 3방향 이상에서 대기행렬 50m가 검지 될 경우에는 다시 모든 방향에 녹색시간 30초를 부여하게 되며, 비신호 회전교차로로 운영된다. 또한, 모든 녹색 신호에서 적색 신호가 부여되는 경우에서 황색 신호 3초를 부여하였다.

#### IV. 적용 및 분석결과

##### 1. 시나리오 구축

알고리즘을 평가하기 위하여 총 5가지 시나리오에 대해서 적용하여 분석하였다. 초기 2,000vph에서 400vph씩 3,600vph 교통량을 증가시키는 방식으로 시나리오를 구성하였으며 내용은 다음 <Table 1>과 같다.

<Table 1> Traffic scenario

Direction	%	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Sum	100	2,000	2,400	2,800	3,200	3,600
West	33	662	794	926	1,059	1,191
South	17	338	406	474	541	609
East	33	662	794	926	1,059	1,191
North	17	338	406	474	541	609

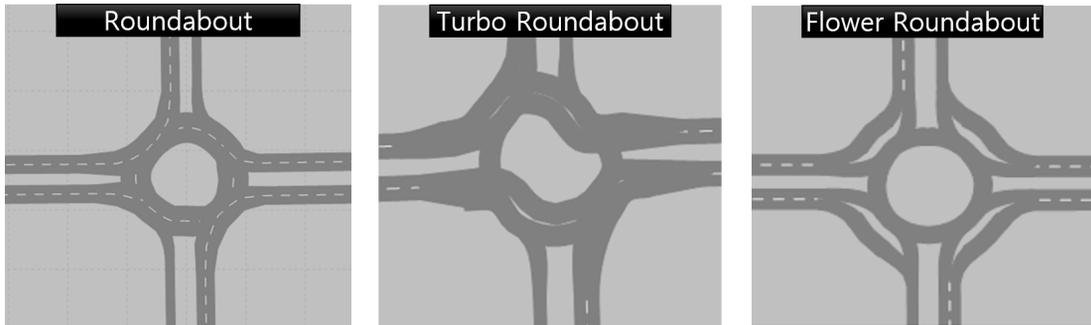
주도로라고 볼 수 있는 동, 서 방향과 부도로 볼 수 있는 남, 북 방향의 교통량 비는 66:34이며 승용차 90%, 트럭 5%, 버스 5%로 구성되어 있다. 여기서 회전교통량은 주도로의 경우 18:69:13으로 좌회전 18, 직진 69, 우회전 13 비율이며, 부도로의 경우 28:43:29로 좌회전 28, 직진 43, 우회전 29 비율로 설정하였다. 여기서 사용된 비율 값은 가장 일반적인 교차로 회전 방향별 교통량을 구하기 위하여 Busan Metropolitan City(2019)에서 제공하는 교차로 교통량 자료를 이용하였다. 4지교차로이며 4방향 모두에서 좌회전, 직진, 우회전이 가능한 동백사거리, 경제자유구역청 앞 교차로, 사하경찰서사거리, 곰내터널입구 교차로를 대상으로 주도로, 부도로를 구분하였다. 이후 주도로, 부도로 별 좌회전, 직진, 우회전 교통량 비율을 구하여 시뮬레이션에 적용하였다.

Random Seed는 42를 이용하였다. 시뮬레이션 시간은 4200초로 Warm up time 600초를 고려하여 시뮬레이션하였다. 이후 분석결과에 이용된 시간은 초기 600초를 제외한 600초부터 4200초까지 3600초에 대해서만 분석하였다.

본 연구에서는 회전교차로, Turbo형 회전교차로, Flower형 회전교차로 3개를 대상으로 신호미터링을 시행한 Do 시나리오와, 신호미터링을 시행하지 않은 Do-Not 시나리오 3 × 2 = 6가지 경우에 대해서 시뮬레이션 하였다. 추가로 교통량 차이에 따른 시나리오 5개로 총 3 × 2 × 5 = 30가지 시나리오에 대해서 분석하였다.

## 2. 네트워크 구축

네트워크 구축에는 VISSIM 8.00.15 버전을 활용하였다. 실제 교통상황에 가까운 시뮬레이션을 위하여 교차로로 진입하는 링크 길이는 300m 이상 설정하여, 교차로 진입 전 원활히 차선변경과 교통량이 공급될 수 있도록 하였다. 회전구간 내 속도는 회전교차로설계지침(MOLIT, 2014)에서 제시하고 있는 권장 설계속도 20~30km/h 중 20km/h로 설정하였다. Turbo형 회전교차로 종류 중 가장 기본적인 형태인 그림 1의 Basic 형태로 네트워크를 구축하였다. 회전구간 내 차선변경이 안 된다는 점과 진입 전 진행 방향에 따라 차로를 정하고 진입한다는 점을 고려하여 1개의 링크가 아닌 2개의 링크로 분리하여 진입로와 회전구간을 구성하였다. Džambas et al.(2017)를 참고하여 Turbo형 회전교차로를 설계하였다. 중심원지름은 24m, 회전구간 내 차로 폭은 5m로 설정하였다. 회전교차로의 경우 Turbo형 회전교차로와 같은 조건에서 분석하기 위하여 남북방향 진출로는 1차로로 설정하였으며 회전구간은 2차로로 설정하였다, 중심원지름은 20m, 회전구간 내 차로 폭은 5m로 설정하였다. Flower형 회전교차로도 중심원지름은 20m 회전구간 내 차로 폭은 5m로 설정하였다. VISSIM에서 구축된 네트워크는 <Fig. 7>과 같다.



<Fig. 7> VISSIM Roundabout Network

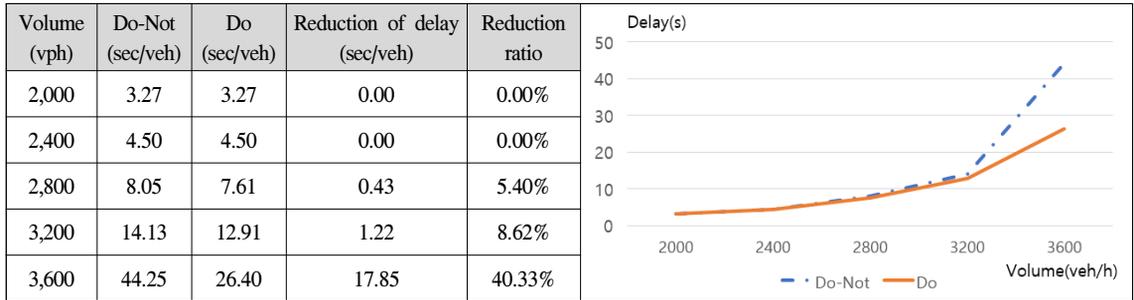
## 3. 분석결과

신호미터링 알고리즘의 효과를 측정하기 위하여 차량당 평균 지체를 효과적으로 사용하였다. 회전교차로와 Turbo형 회전교차로, Flower형 회전교차로에 대해서 신호미터링 시행 전과 후에 대해서 비교 분석하였다. 또한, 주도로와 부도로로 나누어 분석하여 차량당 평균 지체 변화를 분석하였다. 분석결과는 다음과 같다.

### 1) 회전교차로 분석결과

회전교차로에 신호미터링 알고리즘을 적용한 결과는 <Table 2>와 같다. 2,000 ~ 2,400vph 시나리오에서는 대기행렬이 50m가 넘어가는 경우가 발생하지 않아 신호미터링이 시행되지 않는 일반적인 회전교차로의 형태로 운영되었다. 2,800vph 시나리오부터 대기행렬이 50m 이상 검지되어 신호미터링이 시행되었다. 3,600vph 시나리오에서 가장 큰 효과를 보여 더 많은 교통량에서도 적용이 가능할 것으로 보인다. 주도로와 부도로로 나누어 효과를 보게 되면 <Table 3>와 같다.

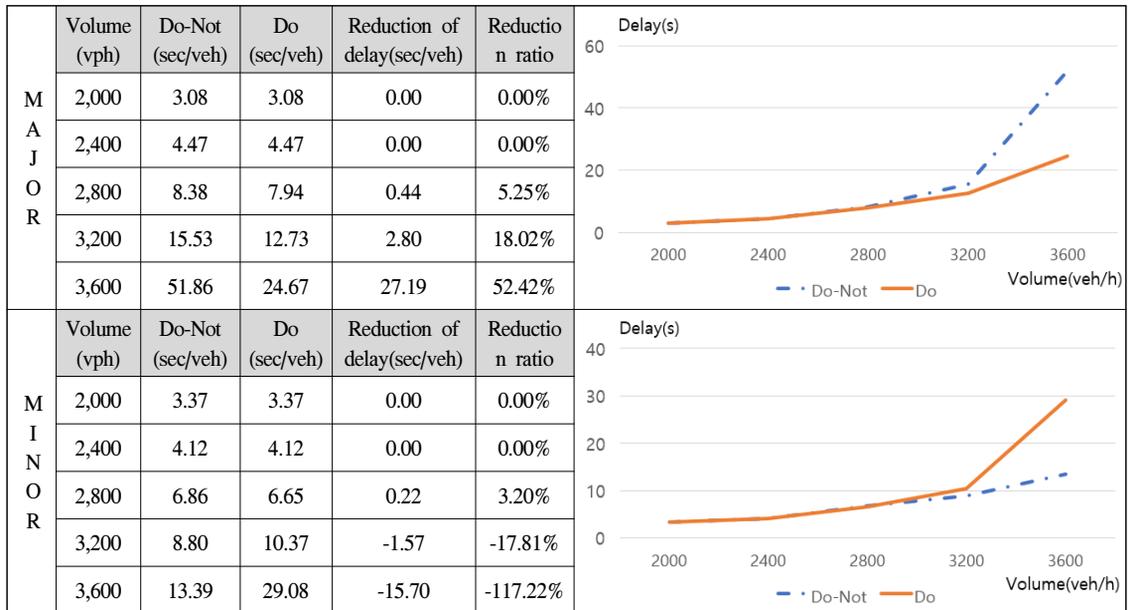
<Table 2> Roundabout result



주도로의 경우 모든 시나리오에서 차량당 지체시간이 신호미터링 시행 전과 같거나 감소하여 효과가 있었으며, 2,800 ~ 3,600vph에서 신호미터링을 시행할 경우 큰 효과를 보일 수 있는 것으로 나타났다. 부도로의 경우 3,200, 3,600vph 시나리오에서 지체가 증가하였다. 부도로의 차량당 지체시간 증가율이 주도로의 차량당 지체감소율보다 클어도 주도로의 교통량이 많아 전체교차로를 기준으로 차량당 지체시간을 산출하였을 때 시행하였을 때 지체시간이 감소하는 효과가 있는 것으로 나타났다.

또한, 3,600vph 시행 전 시나리오에서 차량당 지체시간은 주도로 51.86초, 부도로 13.39초로 주도로에 지체시간이 집중되었지만, 시행 후 차량당 지체시간이 주도로 24.67초, 부도로 29.08초로 특정 방향에 지체가 집중되는 현상을 방지할 수 있는 것으로 나타났다.

<Table 3> Roundabout major, minor road result



2) Turbo형 회전교차로 분석결과

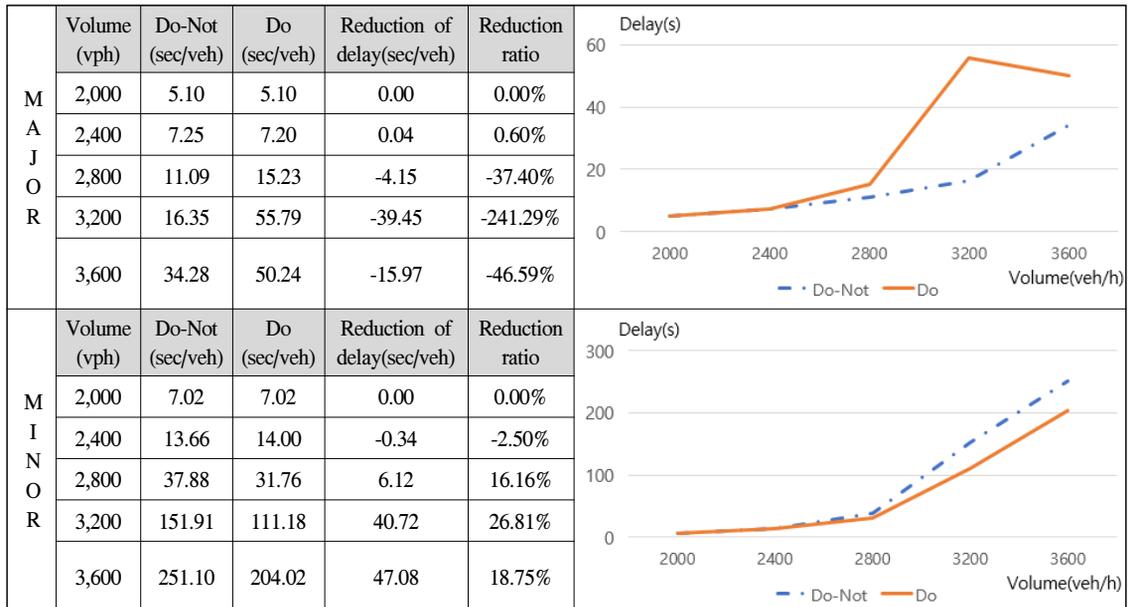
Turbo형 회전교차로에 신호미터링 알고리즘을 적용한 결과는 <Table 4>와 같다. 2,400 ~ 3,600vph 시나리오에서 오히려 차량당 지체시간이 증가하는 것으로 나타났다. 원인을 파악하기 위하여 주도로와 부도로로 나누어 효과를 분석하였으며 <Table 5>와 같다.

<Table 4> Turbo roundabout result



주도로의 경우 2,800 ~ 3,600vph 시나리오에서 차량당 지체시간이 신호미터링 시행 후 증가하는 것으로 나타났으며, 부도로의 경우 같은 시나리오에서 차량당 지체시간이 반대로 감소하는 것으로 나타났다. Turbo형 회전교차로의 경우 주도로에 비해서 부도로의 차량당 지체시간이 크게 나타났는데, 신호미터링 알고리즘은 이러한 부도로의 지체시간을 감소하는데 기여하였으나, 주도로에서의 지체시간 증가가 더 큰 영향을 미치게 되어 오히려 지체시간이 증가하는 것으로 나타났다. 특정 방향에 지체시간이 집중되는 것은 방지할 수 있으나 전체적인 지체시간은 증가하였다.

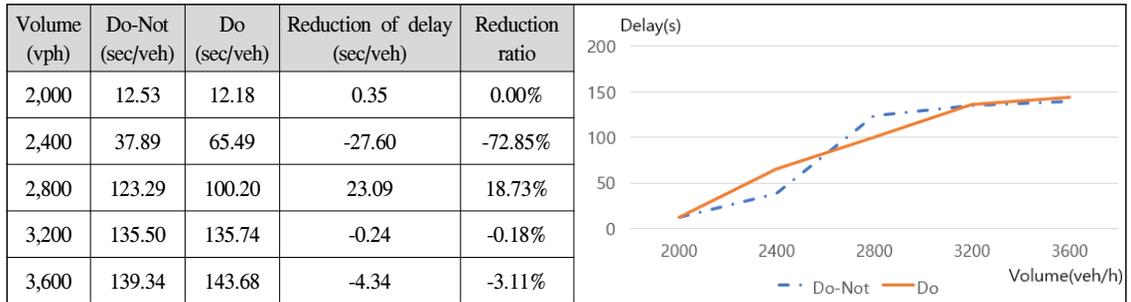
<Table 5> Turbo roundabout major, minor road result



3) Flower형 회전교차로 분석결과

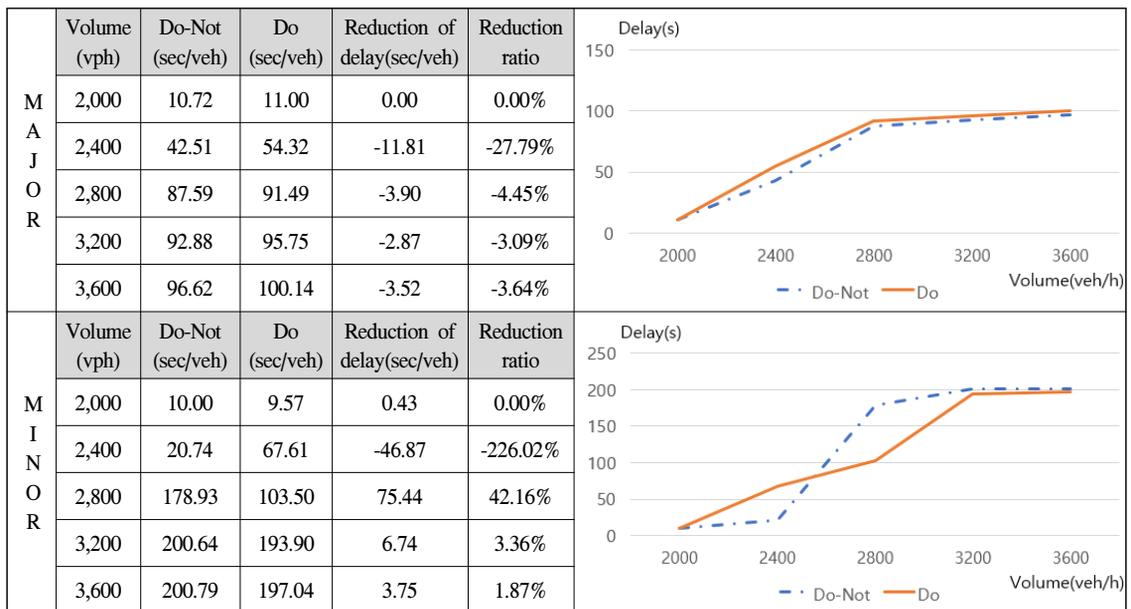
Flower형 회전교차로에 신호미터링 알고리즘을 적용한 결과는 <Table 6>와 같다. 2,800vph 시나리오에서만 차량당 지체시간이 감소하는 효과가 있었으며 다른 시나리오에서는 오히려 차량당 지체시간이 증가하는 것으로 나타났다. 원인을 파악하기 위하여 주도로와 부도로로 나누어 효과를 분석하였으며 <Table 7>과 같다.

<Table 6> Flower roundabout result



주도로의 경우 2,400 ~ 3,600vph 시나리오에서 차량당 지체시간이 신호미터링 시행 후 증가하는 것으로 나타났으며, 부도로의 경우 2,800 ~ 3,600vph 시나리오에서 차량당 지체시간이 감소하는 것으로 나타났다. Flower형 회전교차로는 주도로에 비해서 부도로의 차량당 지체시간이 크게 나타났다. 2,800vph 시나리오를 제외한 시나리오에서 신호미터링 알고리즘은 부도로의 지체시간을 감소하는데 기여하였으나, 주도로에서의 지체시간 증가가 더 큰 영향을 미치게 되어 오히려 지체시간이 증가하는 것으로 나타났다. 특정 방향에 지체시간이 집중되는 것은 방지할 수 있으나 전체적인 지체시간은 증가하였다.

<Table 7> Flower roundabout major, minor road result



## V. 결론 및 향후 과제

연구에서는 신호미터링 알고리즘을 회전교차로, Turbo형 회전교차로, Flower형 회전교차로에 도입하여 효과를 비교 분석하였으며 결론은 다음 3가지와 같다.

첫 번째로 신호미터링 알고리즘 도입 시 지체 불균형을 해소할 수 있다. 회전교차로, Turbo형 회전교차로, Flower형 회전교차로에서 모두 주도로와 부도로 중 상대적으로 지체가 많은 곳의 경우 지체가 감소하였고 지체가 적은 곳의 경우 지체가 증가하는 효과를 보였다. 교통량이 많은 주도로의 지체가 증가하는 Turbo형 회전교차로, Flower형 회전교차로의 경우 전체적인 차량당 지체시간이 증가하는 효과를 보였다.

두 번째로 회전교차로의 경우에만 운영 시 신호미터링을 도입할 경우 효율적인 운영으로 용량증대가 가능한 것으로 나타났다. 회전교차로의 경우 주도로 기준 463 ~ 596vphpl 시나리오에서도 큰 효과를 보였다. 국내 회전교차로 설계 지침에서 제시하고 있는 450vphpl을 초과할 경우 도입이 어렵지만, 회전교차로 전환 후 신호미터링을 도입할 경우 첨두시 용량증가로 인한 혼잡을 완화할 수 있을 것으로 보인다. Turbo형 회전교차로는 오히려 지체가 증가하는 것으로 나타났는데, Turbo형 회전교차로의 경우 주도로와 부도로의 구분이 명확하며 부도로의 좌회전 교통류가 적을 때 도입 효과가 있는 것으로 알려진 교차로로 신호미터링 도입으로 도입 전보다 주도로와 부도로의 구분이 모호해져 지체가 증가하는 것으로 나타났다. Flower형 회전교차로의 경우 물리적으로 구분된 우회전 차로로 인하여 4방향 모두 1개 차로만 신호 제어가 가능하여 효과가 미미한 것으로 나타났다.

세 번째로 신호미터링은 주도로와 부도로의 차량당 지체시간을 균형 맞추는 역할을 수행한다. 따라서 주도로의 차량당 지체시간이 부도로에 비해 큰 경우와 지나치게 특정 방향에 교통량이 집중되어 지체가 발생하는 경우에 적용할 경우 큰 효과를 볼 수 있다. Turbo형 회전교차로, Flower형 회전교차로의 경우도 주도로, 부도로 구분이 본 연구에서 적용한 시나리오보다 명확한 경우(부도로의 교통량과 지체시간이 감소한 시나리오)에 적용이 가능할 것으로 보인다.

본 연구에서 신호미터링 알고리즘을 회전교차로, Turbo형 회전교차로, Flower형 회전교차로에 대해 비교 분석한 결과 다음과 같은 2가지 향후 과제가 남는다.

첫 번째로 다양한 주도로, 부도로 교통여건 적용이 가능한 알고리즘을 도출할 필요가 있다. 회전교차로는 주도로, 부도로 교통량 비율과 회전교차로 종류에 따라 방향별 차량당 지체시간이 다양하게 나타난다. Turbo형 회전교차로와 Flower형 회전교차로의 경우 본 연구의 시나리오에서 부도로에 차량당 지체시간이 집중되어 신호미터링 알고리즘이 효과가 작게 나타났다. 이러한 문제를 해결하기 위한 녹색시간 20초,  $\alpha$  값 40초 등 알고리즘에서 사용한 변수 값 최적화 등 알고리즘 고도화가 필요하다.

두 번째로 보다 다양한 시나리오에 대한 분석이 필요하다. 본 연구에서는 회전교통량과 주도로, 부도로 교통량 비율을 가장 일반적인 상황으로 고정해 놓고 분석하였다. 또한, Random Seed를 활용하여 여러 번 시뮬레이션을 시행하는 등의 다양한 교통상황에 알고리즘을 적용하지 못하였다. 향후 다양한 시나리오와 다른 Random Seed를 이용하여 효과를 분석하여 신호미터링 알고리즘이 효과가 있는 시나리오와 없는 시나리오를 분류하여 제시할 필요가 있다.

## ACKNOWLEDGEMENTS

이 논문은 미래창조과학부 재원으로 경찰청과 치안과학기술 연구개발사업단의 지원을 받아 수행된 치안과학기술연구개발사업임. (POLICE-A-00001-05-405)

본 논문은 2019 한국ITS학회 추계학술대회에서 발표되었던 논문을 수정·보완하여 작성하였습니다.

## REFERENCES

- Ahn W. Y.(2012), "A Study on Roundabout Signal Metering Operation by Considering Entry Lane's Traffic Volume," *International Journal of Highway Engineering*, vol. 14, no. 2, pp.175-181.
- Akcelik R.(2011), "Roundabout metering signals: Capacity, performance and timing," *6th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service, Transportation Research Board*, Stockholm, Sweden. *Procedia - Social and Behavioural Sciences*, vol. 16, pp.686-696.
- Busan Metropolitan City(2019), *Traffic Survey in Busan*, pp.27-174.
- Džambas T. et al.(2017), "Geometric design of turbo roundabouts," *Technical Gazette*, vol. 24, no.1, pp.309-318.
- Eom J. E. et al.(2015), "Measurement of Effectiveness of Signal Optimized Roundabout," *International Journal of Highway Engineering*, vol. 17, no. 1, pp.91-98.
- Jang K. H. and Lee. S. S.(2015), "An Operation and Safety Assessment Study of Roundabout Types," *International Journal of Highway Engineering*, vol. 17, no. 5, pp.105-113.
- Lee S. et al.(2017), "A Dynamic Signal Metering Algorithm Development for Vehicles and Pedestrians at Roundabouts," *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 16, no. 6, pp.53-66.
- 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. et al.(2017), "Simulated Operational Efficiency Analysis of Special Roundabouts," *International Journal of Highway Engineering*, vol. 19, no. 1, pp.81-90.
- Martín-Gasulla M. et al.(2016), "Capacity and operational improvements of metering roundabouts in Spain," *Transportation Research Procedia*, vol. 15, pp.295-307.
- Minister of Land, Infrastructure and Transport, Korea(2013), *Highway Capacity Manual*, pp.490-521.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea(2014), *Roundabouts Design Manual*.
- Park J.(2015), *Development of an Application for Signal Metering on Roundabouts*, Graduate School of The University of Seoul, pp.48-49.
- Royal HaskoningDHV(2009), *Roundabouts - Application and design*, pp.60-92.
- Song K. S.(2011), *Evaluation and Application of Turbo Roundabout as an Alternative to Two-lane Roundabouts*, Ph.D. Dissertation, University of Ajou, pp.108-113.