

# 차량 및 보행자를 고려한 회전교차로 감응식 신호미터링 알고리즘 개발

## A Dynamic Signal Metering Algorithm Development for Vehicles and Pedestrians at Roundabouts

이 솔\* · 안 우 영\*\* · 이 선 하\*\*\*

\* 주저자 : 국립공주대학교 건설환경공학과 박사과정

\*\* 공저자 : 국립공주대학교 건설환경공학부 교수

\*\*\* 교신저자 : 국립공주대학교 건설환경공학부 교수

Sol Lee\* · Woo-Young Ahn\*\* · Seon-Ha Lee\*\*\*

\* Dept. of Civil and Environmental Engineering, Kongju National University

\*\* Dept. of Civil and Environmental Engineering, Kongju National University

\*\*\* Dept. of Civil and Environmental Engineering, Kongju National University

† Corresponding author : Seonha Lee, seonha@kongju.ac.kr

Vol.16 No.6(2017)

December, 2017

pp.53~66

ISSN 1738-0774(Print)

ISSN 2384-1729(On-line)

<https://doi.org/10.12815/kits.2017.16.6.53>

2017.16.6.53

Received 27 November 2017

Revised 5 December 2017

Accepted 7 December 2017

© 2017. The Korea Institute of Intelligent Transport Systems. All rights reserved.

### 요 약

최근 교통소통 및 교통안전 제고 측면에서 회전교차로 설치가 장려되고 있다. 비교적 교통량이 적고 보행자가 많지 않은 교차로에 설치되는 회전교차로는 진입속도가 낮고 차량과 보행자간 상충횟수가 상대적으로 적다는 이유로 신호등이 없는 비보호 횡단보도로 운영됨에 따라 보행자에 대한 안전보장이 미흡한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 2차로형 4지 회전교차로를 대상으로 차량의 소통과 보행자의 안전을 동시에 고려한 회전교차로 감응식 신호미터링 알고리즘을 개발하였으며, 3개 운영 시나리오(고정식 보행신호, 차량 신호미터링, 차량 및 보행자 신호미터링)에 대해 VISSIM을 활용하여 개선효과를 분석하였다.

분석결과 회전교차로에 고정식 보행신호를 설치하여 운영할 경우 차량 당 평균지체는 전체적으로 증가하는 것으로 분석되었으며, 특히 총 진입교통량 3,800대/시에서 최대 51.4초/대로 42.5%까지 증가하였다. 반면 보행자 Push Button과 차량 신호미터링을 접목하여 신호미터링을 운영할 경우 차량 당 평균지체는 총 진입교통량 3,000대/시에서 최대 40.6초/대로 42.7%까지 감소하였다.

핵심어 : 회전교차로, 비보호 횡단보도, 신호미터링, VISSIM, 보행자 Push Button

### ABSTRACT

In order to improve traffic flow and vehicular safety, installation of roundabouts is encouraging recently. Roundabouts are generally installed at which traffic flow and pedestrian flow is relatively low intersections. Roundabouts reduce vehicle speed, minimize vehicle weaving, and reduce critical conflict points. For these reasons, roundabouts are generally operated unprotected pedestrian crosswalk, thus a shortcoming for pedestrian safety always exists at roundabouts. The purpose of this study is developing a dynamic signal metering algorithm for traffic and pedestrian at four-way-approach with two-lane roundabouts in which three different operation algorithms(fixed-time pedestrian, vehicle signal metering, and vehicle and pedestrian signal metering) are suggested and its performance is tested by using VISSIM.

The results of the fixed pedestrian signal operation show that there is a big average delay increase in general and that increases up to 51.4 seconds/vehicle(42.5%) when the total number of approaching vehicle is 3,800 vehicle/hour. However, the results of the simultaneous dynamic signal metering operation for the vehicle and pedestrian crossing with push button show that there is a substantial average delay reduction up to 40.6 seconds/vehicle(42.7%) when the total number of approaching vehicle is 3,000 vehicle/hour.

Key words :Roundabouts, Unprotected Pedestrian Crosswalk, Signal Metering, VISSIM, Pedestrian Push Button

## I. 서 론

### 1. 연구의 배경 및 목적

최근 교통소통 및 교통안전 제고 측면에서 회전교차로 설치가 장려되고 있다. 국민안전처 주관으로 2013년부터 2022년까지 10개년 간 회전교차로 확대보급을 목표로, 신호통제 실효성이 낮은 교차로와 비신호 운영으로 통행우선권이 명확하지 않아 교통안전상 문제가 발생하는 교차로를 중심으로 회전교차로 활성화 사업을 진행하고 있다. 현재 회전교차로는 전국 730개소가 운영 중에 있으며 향후 세종시에서 80개소로 추가 설치할 계획을 밝혔다.

일반적으로 회전교차로는 비교적 적은 교통량(450대/시/차선 이하)에 설치되며, 차량과 보행자간 상충횟수가 상대적으로 적고 진입속도가 낮다는 이유로 신호등이 없는 비보호 횡단보도로 운영되고 있다. 그러나 출·퇴근 시간대 및 특정 시간대에는 교통량 및 보행량 증가로 인해 운영 효율성이 떨어지면서 회전교차로 본래의 기능이 상실된다. 이때 적절한 대응이 이루어지지 않으면 오히려 차량정체가 더 심해져 이용자들에게 불편을 초래할 수 있으며, 보행자의 안전까지 위협받을 수 있다. 미국, 영국, 호주 등 회전교차로가 오래전에 정착된 선진외국의 경우 첨두시 또는 비정상적인 교통수요 및 보행량 증가 시 지체발생에 대한 대처 방안으로 Signal Metering을 도입하여 part-time 형식으로 운영하고 있으며, 회전교차로 보행신호 설치기준을 제시하고 있다.

최근 일부 지자체에서는 초등학교 및 어린이 보호구역 인근에 위치한 회전교차로에 신호등 설치를 요구하는 시민들이 목소리가 커지고 있다. 이러한 상황에서 회전교차로 설치 이후 교통량 증가로 인한 반복정체 해소를 통해 불필요한 대기 및 지·정체를 감소하고 보행자의 안전성 제고를 위한 신호체계 운영기술이 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 교통량 증가로 회전교차로의 효율성 감소 시 원활한 소통과 함께 보행자의 안전을 고려한 회전교차로 감응식 신호미터링 알고리즘(Signal Metering Algorithm)을 제시하고자 한다.

### 2. 연구의 범위 및 방법

본 연구에서는 2차로형 4지 회전교차로를 대상으로 교통류상태(진입교통량, 좌회전비율)에 따른 시나리오를 설정하고 교통류 분석프로그램인 VISSIM을 활용하여 효과적도(차량 당 평균제어지체)를 분석하였다.

2차로형 4지 회전교차로를 대상으로 차량과 보행자를 동시에 고려한 감응식 신호미터링 운영 알고리즘에 대한 효과평가를 수행하였다. 연구수행방법은 다음과 같다.

첫째, 국내·외 연구에 대하여 회전교차로의 신호운영에 관한 연구와 회전교차로의 보행신호 운영에 관한 연구로 구분하여 선행연구에 대한 이론적 고찰을 수행하고 시사점 및 연구방향을 도출하였다.

둘째, 회전교차로 신호미터링을 위한 차량 및 보행자 검지체계를 구축하고 미터링 신호, 신호 연장여부, 보행신호(Push Button)를 설정하여 알고리즘을 개발하였다.

셋째, VISSIM에서 제공하는 COM Interface(Visual Basic Application)를 활용하여 무신호 회전교차로에 보행자가 횡단하는 상태인 신호미터링 미시행(Do-Not)과 신호미터링 시행(Do)에 대한 대안 I(고정식 보행신호운영), 대안 II(차량 신호미터링) 그리고 대안 III(차량 및 보행자를 고려한 감응식 신호미터링) 시나리오에 따른 분석을 수행하였다.

넷째, 시나리오별 지체감소에 대한 통계적 유의성은 대안별 시나리오에 대한 통계적 검증이 가능한 일원

분산분석(One-Way ANOVA)을 통하여 가설검증(hypothesis test)을 수행하였다. 다섯째, 효과분석 결과를 바탕으로 교통량 및 회전비율에 따른 차량 및 보행자를 동시에 고려한 회전교차로 감응식 신호미터링 알고리즘(Signal Metering Algorithm)을 제시하였다.

## II. 이론적 고찰

### 1. 선행 연구고찰 및 시사점

Akcelik(2004)는 모의상황분석을 통해 진입교통량의 불균등에 따라 회전교차로에 용량이 감소되며 중앙섬 직경, 회전차로 폭 등이 용량에 큰 영향을 미친다는 결과를 제시하였다. 또한 실제 회전교차로에서 주도로의 진입교통류 비율이 높아 진입교통량이 적음에도 불구하고 누적 회전교통량이 많아져 부도로 진입의 어려움 발생하여 회전교차로의 소통이 원활하지 못하는 운영사례를 조사하여 Signal Metering 도입의 필요성을 제시하였다.

Natalizio(2005)는 기존 연구들의 회전교차로 Signal Metering 도입효과에 대한 객관적인 수치를 제시하지 않음을 지적하고 이를 보완하기 위해 SIDRA를 활용하여 도입 전·후를 비교하여 Signal Metering 도입의 필요성을 증명하였으며, 관리진입로의 진입교통량, 미터링 진입로의 포화도(degree of saturation), 검지기 이격거리, 신호의 운영(blank or green) 및 정지(red)시간 길이 등을 포함하는 최적 운영방안을 도출하였다.

Qian1 et al.(2008)는 회전교차로는 용량을 초과하거나, 계속되는 정체 및 교통량 증가 구간에서는 신호교차로가 효과적이지만 그렇지 않을 경우 회전교차로가 장점을 보인다고 제시하였다. 또한 Metering 회전교차로는 진입 교통량 불균형 시 회전교차로의 단점을 해결할 수 있지만, 회전교차로 계획 시에는 차후 Metering 회전교차로의 전환을 고려해서는 안 된다고 주장하였다.

Akcelik(2011)은 호주 멜버른의 회전교차로에 Signal Metering 적용하여 회전 및 진입로 제어에 따른 지체 시간, 대기행렬길이, 정지율 등을 효과적으로 하여 회전교차로 Signal Metering 운영에 따른 효과분석을 수행하였다. 분석결과, 회전교차로에 일반적인 신호시간을 적용한 것 보다 더 낮은 신호주기를 제공하는 것으로 분석되었다.

Ahn and Lee(2013)는 단순히 교통량만 고려하기 보다는 회전교차로 내부에서의 회전교통량과 진입로에서의 진입교통량과의 관계를 포괄적으로 대변 할 수 있는 포화도(degree-of-saturation)를 사용하였고, SIDRA를 이용한 분석결과 Signal Metering은 두 진입로의 포화도 합이 0.3~1.0이고 미터링진입로의 교통량이 관리진입로의 교통량이 보다 작을 경우 운영효과가 있는 것으로 분석되었다. 특히 미터링진입로의 진입교통량이 통제진입로의 진입교통량보다 작고 두 진입로의 포화도비(V/C비) 합이 1.0보다 작아야 개선효과가 있는 것으로 분석되었다.

Park(2015)은 회전교차로 진입차로별 교통량, 검지기의 이격거리, 진입차로 통제시간 등에 대한 시나리오를 구축하여 VISSIM을 활용한 다양한 조건의 시뮬레이션을 통해 회전교차로 신호미터링의 도입 전·후 결과를 VISSIM에서 제공하는 VisVAP 모듈을 활용하여 분석하였다. 분석결과, 진입교통류의 좌회전 비율이 증가할 수록 신호미터링을 통한 회전교차로의 지체 감소 효과는 증가하였으며, 검지기 간격의 경우 40m일 때, 미터링 진입로의 적색시간 길이가 10초 혹은 20초 일 때, Controlling Approach의 교통량이 450~650대/시의 경우 신호미터링의 효과가 비교적 높은 것으로 분석되었다.

Lee and Ahn(2016)는 1차로형 4지 회전교차로를 대상으로 동적 신호미터링 운영알고리즘을 제시하였고, 효과분석은 VISSIM의 COM Interface(Visual Basic Application) 기능을 활용하였다. 분석결과 인접한 두 진입

로를 한 쌍(pair)으로 묶고 미터링진입로의 교통량이 통제진입로의 교통량 보다 작은 경우 실시간 Signal Metering 운영 효과가 높은 것으로 분석되었다. 특히, 1차로형 4지 회전교차로를 기준으로 총 진입교통량이 1,600대/시일 때 차량 당 평균지체가 70.9~102.2초/대로 73.8~77.8% 감소하는 것으로 분석되었다.

Martin-Gasulla et al.(2016)는 불균등한 교통량 패턴을 갖는 회전교차로의 운영을 개선하기 위해 미터링 시스템을 제시하였다. 분석결과, 미터링 시스템은 더 긴 대기행렬을 해소할 수 있으며 용량 증대는 길어진 간격의 비율 증가와 차량추종시간 감소로 인해 회전교차로에 진입하는 교통량이 증가 하는 것으로 나타났으며, 교통운영 및 불균등 교통류의 흐름이 개선되는 것으로 분석되었다.

Kim et al.(2011)는 도시부 1차로 회전교차로의 도시부의 경우 회전교차로 운영 효율에 큰 영향을 미치는 요소 중 하나인 보행량에 대한 영향 분석은 미비함을 지적하며 보행량에 따른 회전교차로의 효율분석 및 보행신호를 제시하였다. 분석결과, 도시부 회전교차로 설치 시 보행량이 200명/시 이하인 경우 회전교차로가 적합하며 보행량이 200명/시 이상인 경우는 펠리컨 신호가 있는 원형교차로, 보행량이 600명/시 보다 높으면서 교통량이 1,500대/시 이상인 경우는 정주기식 신호가 있는 신호교차로가 적합한 것으로 나타났다.

Moon et al.(2013)는 특정시간이나 침두시의 교통량 및 보행자수를 가정하여 보행자수에 따른 회전교차로의 접근로별 용량변화를 살펴보고, 보행자 수가 증가함에 따라 회전교차로에서의 보행신호 적용 타당성 및 그에 따른 신호운영 방안을 제시하였다. 현장자료를 이용한 시뮬레이션 분석을 통해 회전교차로 보행신호의 설치효과 및 적용방안을 검토하였으며, 보행신호를 적용한 회전교차로가 일반 회전교차로에 비해 지체감소 효과가 있는 것을 확인하였다.

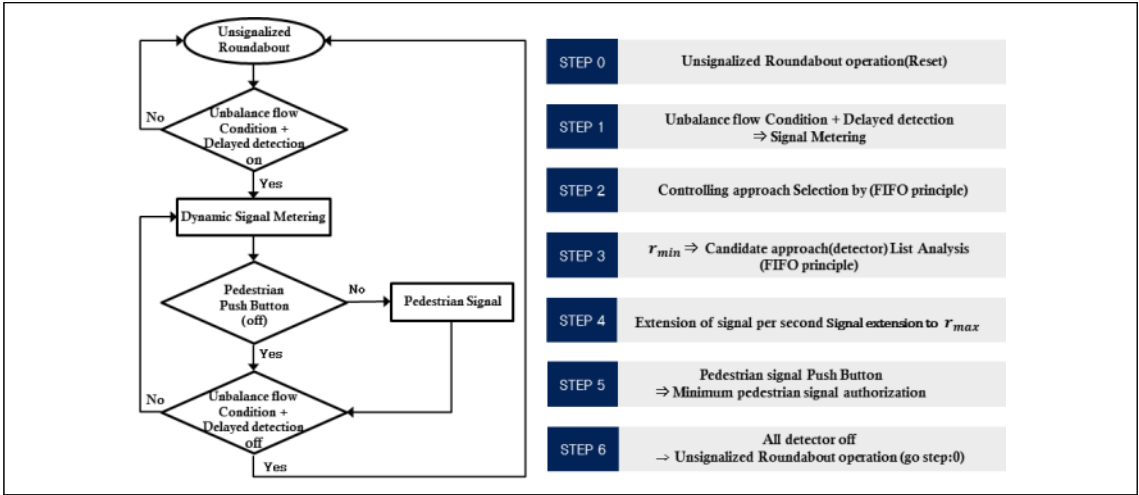
기존 연구검토 결과, 회전교차로 신호운영 및 보행신호 운영 대한 연구가 다수 진행되었으나, 차량의 소통과 보행자의 안전을 동시에 고려한 Singal Metering 운영에 대한 연구는 없다. 따라서 본 연구에서는 회전교차로 설치이후 교통량 증가 및 불균등한 교통상황 발생으로 인한 지체시간 증가에 따른 회전교차로의 효율성 감소 시 원활한 소통을 위한 차량 및 보행자를 고려한 감응식 신호미터링 알고리즘(Signal Metering Algorithm)을 개발하고자 한다.

### Ⅲ. 차량 및 보행자를 고려한 회전교차로 감응식 신호미터링 알고리즘 개발

#### 1. 차량 및 보행자를 고려한 감응식 신호미터링 운영방안

회전교차로에서 신호체계를 운영하는 것을 신호미터링(Signal Metering)이라 칭하며, 회전교차로 감응식 신호미터링(Signal Metering)이란, 평상시에는 무신호 회전교차로로 운영되다가 불균등 교통상황 발생 시 혼잡이 발생한 진입로의 좌측 진입로에 적색시간을 부여하여 혼잡이 발생한 진입로의 교통량이 빠르게 처리될 수 있도록 하는 방법이다. 즉 회전교차로의 소통이 원활하지 못할 경우, 좌측 진입로의 진입교통류를 통제함으로써 회전교통류에 적정 간격을 확보하여 교통류가 회전교차로에 원활히 진입할 수 있도록 하는 개념으로 회전교차로의 전반적인 혼잡을 완화할 수 있는 교차로 운영 기법이다.

회전교차로는 운영원리 특성상 차량이 우선권을 가지며, 보행량이 많을 경우 신호교차로로 전환 및 설치하는 것이 타당하다. 본 연구에서 개발하고자 하는 감응식 신호미터링은 주기적인 신호가 아니므로 보행신호는 보행자 Push Button에 의해 작동되는 형식(Pelican crossing)으로 설정하였으며, 각 진입로별 설치된 검지기(<Fig. 5> 참조)에 의해 차량의 대기행렬이 검지되면 신호미터링이 운영 된다. 이때, 보행신호는 신호미터링 운영 중에만 작동하며, 차량의 미터링 판단이 끝난 후에 보행자 횡단시간을 최소시간으로 부여해준다.



〈Fig. 1〉 Dynamic Signal Metering Algorithm for Vehicles and Pedestrians

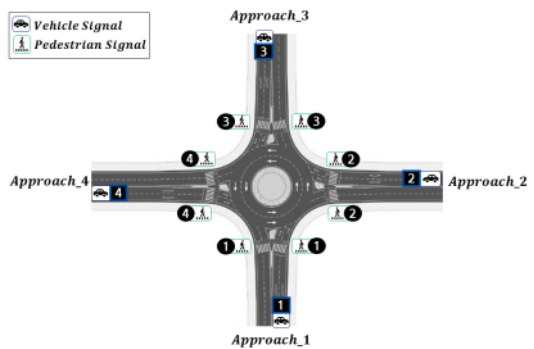
## 2. 차량 및 보행자를 고려한 감응식 신호미터링 알고리즘

본 연구에서는 2차로형 4지 회전교차로를 대상으로 보행자를 고려한 감응식 신호미터링 알고리즘(Signal Metering Algorithm)을 개발하였다. 모든 진입로에 설치된 차량 검지기 및 보행 검지기의 데이터 수집을 통해 차단진입로 및 미터링진입로가 선정되며, 미터링신호(적색신호) 연장 및 보행신호가 부여된다.

회전교차로 설계지침(MOLIT, 2014)에 따라 2차로형 4지 회전교차로 제원은 <Fig. 2>와 같으며, 차량 및 보행자를 고려한 감응식 신호미터링 운영을 위한 차량 및 보행신호 위치는 <Fig. 3>과 같다.



〈Fig. 2〉 Geometry of 4 legs with 2 lane entry roundabout



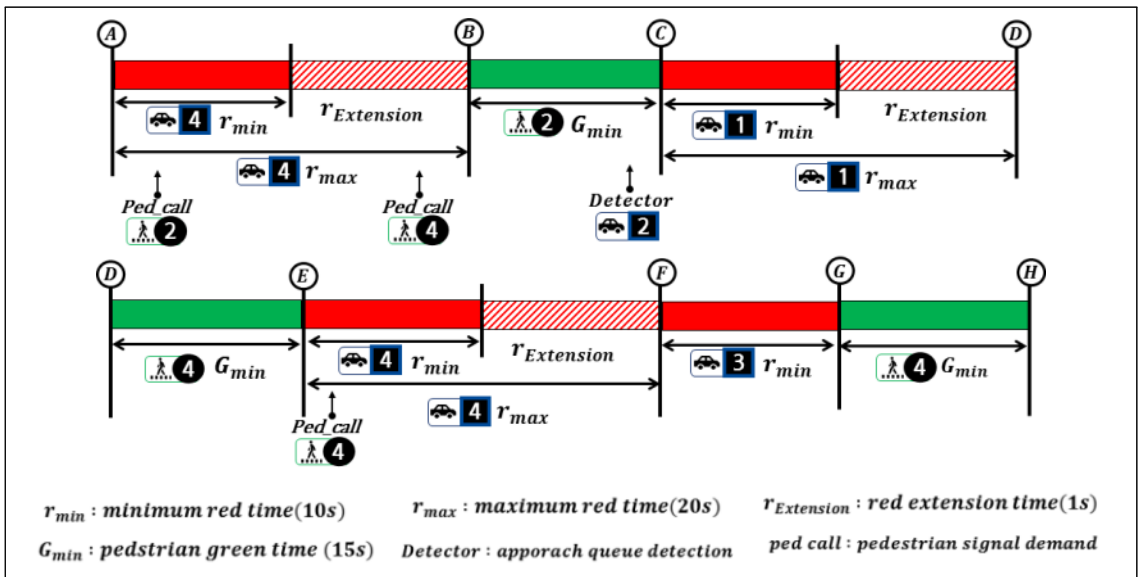
〈Fig. 3〉 Signal position of roundabout

신호구성은 다음 <Fig. 4>와 같이 최소 미터링신호시간( $r_{min}$ )이 부여된 후에 차량의 대기행렬이 검지되면 최대 미터링신호시간( $r_{max}$ )까지 신호가 연장된다. 미터링 신호시간 동안 보행신호수요(ped\_call)가 있어도 미터링 신호시간이 끝나는 시점인 B시점에서 보행횡단신호(Ped\_  $G_{min}$ )가 부여되는 것이다.

만약, 최소 미터링신호시간( $r_{min}$ )이 부여된 진입로에서 보행신호수요(ped\_call)가 있다면 진입로별 검지기를

판단하여 차량의 대기행렬이 검지된 진입로의 인접한 원편 진입로에 최소 미터링신호시간( $r_{min}$ )이 부여 되고, 최대 미터링신호시간( $r_{max}$ )까지 연장된다. 이때, 보행횡단신호( $Ped\_G_{min}$ )는 연장판단이 끝나는 시점인  $D$ 시점에서 부여된다.

만약, 최소 미터링신호시간( $r_{min}$ )이 부여된 진입로에서 보행신호수요( $ped\_call$ )가 있고 각 진입로별 검지기에 차량의 대기행렬이 검지되지 않으면, 인접한 원편 진입로에 최소 미터링신호시간( $r_{min}$ )이 부여된다. 즉, 한번 차량의 적색신호가 부여되면 연속으로 적색신호를 부여하지 않으므로 보행신호요청이 있어도 이전 보행시간동안 차량의 대기행렬이 검지되지 않은 존재차량들이 생기므로 이를 위한 최소 미터링신호시간 ( $r_{min}$ )이 부여( $F \sim G$  구간)되는 것이다. 이때, 보행횡단신호( $Ped\_G_{min}$ )는 최소 미터링신호가 끝나는 시점인  $G$ 시점에서 부여된다.



<Fig. 4> Signal composition of Dynamic Signal Metering algorithm

#### IV. 회전교차로 감응식 신호미터링 운영 알고리즘 평가

##### 1. 분석 시나리오 설정

본 연구에서는 2차로형 4지 회전교차로를 대상으로 불균등한 교통상황 발생 시 차량 및 보행자를 고려한 신호미터링 알고리즘 평가를 위해 미시행(Do-Not), 시행(Do)에 따른 시나리오를 4가지로 구분하였다.

미시행(Do-Not) : 무신호 회전교차로에 보행자가 횡단하는 상태

시행(Do) : 대안 I - 고정식 신호(주기:60초, 4현시) 운영

대안 II - 차량 신호미터링 운영

대안 III - 차량 및 보행자를 고려한 감응식 신호미터링 운영

각 대안별 비교를 위해 혼잡한 상황을 가정하여 총 진입교통량 2,200~5,000대/시 범위에서 400대 단위로 불균등한 교통상황인 마주보는 진입로의 교통량이 많은 경우(Case 1)와 인접한 진입로의 교통량이 많은 경우(Case 2)로 설정하였으며, 좌회전 비율 30%, 보행량 200명/시로 고정하여 총 64개의 시나리오 분석을 수행하였다.

본 연구에서는 도시부 회전교차로 설치 시 보행량이 200명/시 이하인 경우 회전교차로가 적합하며 보행량이 200명/시 이상인 경우는 펠리컨 신호가 있는 원형교차로가 적합(Kim et al., 2013)한 선행 연구결과를 바탕으로 보행량을 200명/시로 설정하였다.

〈Table 1〉 Scenario for the Simulation Analysis

	General Roundabout	Alternative I (Fixed Signal)	Alternative II (Signal Metering)	Alternative III (Signal Metering for Pedestrian)
Case 1				
Case 2				

## 2. 분석방법론

### 1) 분석도구 선정

VISSIM은 미시적인 시뮬레이션 분석 프로그램으로 신호제어 및 회전교차로를 포함한 다양한 형태의 교통류를 고려하여 분석이 가능하다는 장점이 있다. 이와 같은 장점을 가진 VISSIM에서 제공하는 COM Interface 기능을 활용하여 무신호 회전교차로 및 본 연구에서 제시한 차량 및 보행자를 고려한 감응식 신호미터링 운영 알고리즘을 서브루틴(subroutine)으로 연결하여 분석하였다.

### 2) 평가척도(MOE) 설정

국내 도로용량편람(MOLIT, 2013)에서 신호교차로와 회전교차로에 대한 운영 효율 분석 모형을 제시하고 있으며, 회전교차로의 운영효과를 평가하기 위해 신호교차로의 효과척도와 동일한 지체시간을 적용한다. 산정 방식은 신호교차로에 적용한 방식과 같이 회전교차로의 접근로에 따른 평균지체를 산정한 후 교통량 가중평균을 이용하여 회전교차로 평균지체를 산출하여 효과척도로 사용한다.

본 연구에서 제시한 차량 및 보행자를 고려한 회전교차로 감응식 신호미터링 운영 알고리즘 평가를 위해 도입 전·후 지체시간을 비교 및 분석하였다.

$$d = \frac{3,600}{C} + 900T \left[ \frac{V}{C} - 1 \sqrt{\left( \frac{V}{C} - 1 \right)^2 + \frac{\left( \frac{3,600}{C} \right) \frac{V}{C}}{450T}} \right] + 5 \times \min \left[ \frac{V}{C}, 1 \right] \quad (1)$$

여기서,  $d$  : 평균지체(초/대)

$V$  : 접근로 교통량( $vph$ )

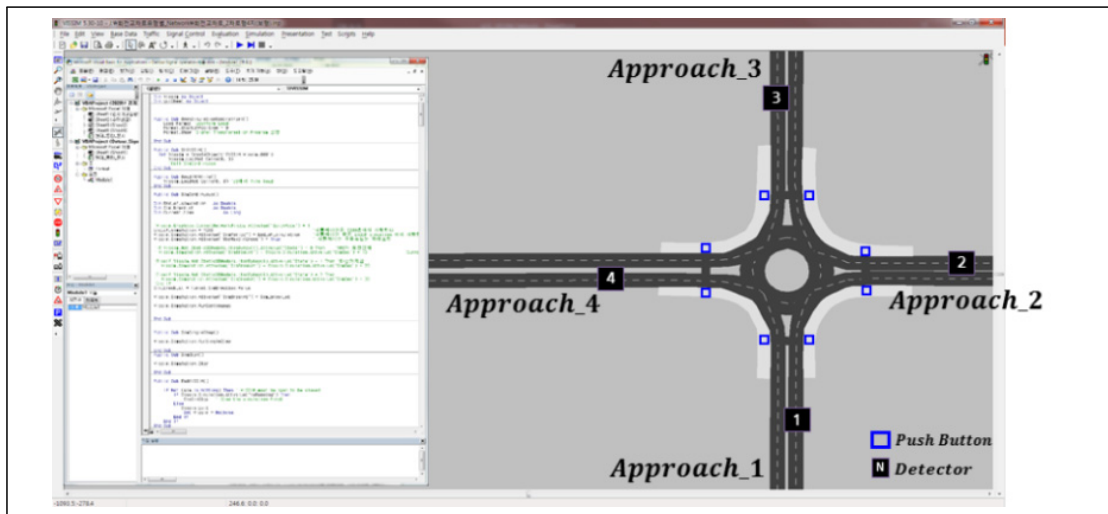
$C$  : 접근로 용량( $vph$ )

$T$  : 분석시간(15분 권장, 0.25)( $h$ )

### 3) 분석네트워크 구축

회전교차로설계지침(MOLIT, 2014)에 따라 2차로형 4지 회전교차로의 회전부 설계속도는 20km/h, 내접원 지름 30m, 중앙교통섬 지름 25m, 회전차로 폭 5m, 그리고 진입부 최대설계속도는 60km/h로 설정하였으며, 우회전비율은 좌회전 비율과 관계없이 모두 10%를 적용하여 승용차로만 구성된 교통량을 구성하였다.

차량검지기 이격거리는 50m로 설정하였으며, 보행자 Push Button에 의해 작동되는 Pelican crossing을 구현하기 위해 진입로별 횡단보도 대기선 앞에 검지기를 구축하였다. 회전차로 차두간격은 최소 0.05초로 적용하여 차량의 대기행렬로 인한 정체가 되고 있지 않은 경우에는 정지 없이 계속하여 진행 할 수 있도록 설정하였으며, 본 연구에서 개발한 감응식 신호미터링 알고리즘 적용을 위해 COM-Interface 모듈과 연계하여 분석값 도출을 통해 비교 및 분석이 용이하게 하였다.



<Fig. 5> Roundabout for Simulation

## 3. 통계적 유의성 검증

### 1) 분산분석(ANOVA: Analysis of Variance)

분산분석(ANOVA)은 Fisher가 제안한 F 검정을 사용하여 2개 이상 집단 간의 평균 차이를 검증하는 방법이다. 본 연구에서와 같이 독립변수와 종속변수가 각각 한 개씩인 4개의 집단을 비교할 때 집단 간 변화량



(between group variation)을 비교하는 방법으로 일원분산분석(One-way ANOVA)을 통해 집단 간 평균차이를 분석하고 집단간 수준별(pairwise) 차이정도를 알아보기 위해서는 추가로 사후검정(Post-hoc test)을 수행해야 한다.

$$F = \frac{S_{Between\ Groups}^2}{S_{Within\ Groups}^2} = \frac{\overline{D}_B / (N_B - 1)}{\overline{D}_W / (N_W - 1)} \quad (2)$$

여기서,  $\overline{D} : \Sigma(X - \bar{X})^2$

$B$  : 집단 간

$W$  : 집단 내

$N$  : 자유도

본 연구에서는 대안 I(고정식 보행신호운영), 대안 II(차량 신호미터링), 대안 III(차량 및 보행자를 고려한 감응식 신호미터링)에 따른 지체차이에 대한 통계적 유의성을 살펴보기 위해 일원분산분석을 수행하였다.

분석결과에 대한 통계적 유의성은 95% 신뢰구간에서 자유도(degree of freedom) 63개에 대하여 집단 간의 사후검증을 통해 각 대안 간의 평균 지체시간 차이를 다음 <Table 2>와 같이 비교하였다.

무신호 회전교차로와 대안 I의 평균값 차이는 -22.58초/대, 대안 II의 평균값 차이는 11.53초/대, 대안 III의 평균값 차이는 -4.94초/대로 대안별 평균값 간의 차이가 통계적으로 유의한 것으로 분석되었다.

<Table 2> Multiple Comparisons

(I) Class	(J) Class	Mean Difference(I-J)	Std.Error	Sig.	95% Confidence interval for Mean	
					Low Bound	Upper Bound
0	1	-22.58	7.727	***	-102.33	57.176
	2	11.53	7.727	.002	-68.22	91.289
	3	-4.94	7.727	.008	-84.70	74.811
1	0	22.58	7.727	***	-57.17	102.337
	2	34.11	7.727	***	-45.64	113.871
	3	17.63	7.727	.039	-62.12	97.392
2	0	-11.53	7.727	.002	-91.28	68.226
	1	-34.11	7.727	***	-113.87	45.644
	3	-16.47	7.727	.049	-96.23	63.279
3	0	4.94	7.727	.008	-74.81	84.704
	1	-17.63	7.727	.039	-97.39	62.123
	2	16.47	7.727	.049	-63.27	96.236

\*\*\*  $p(p\text{-value}) < .01$

### 3. 시나리오별 분석결과

#### 1) 운영대안 I (Fixed pedestrian signal)

<Table 3>은 운영대안 I의 Case1(40:20:30:10)과 Case2(40:20:10:30)의 분석결과를 정리한 것이다.

운영대안 I 의 Case1 경우 모든 진입교통량에서 차량 당 평균지체가 11.70~51.45초/대로 42.58~117.67% 증가하였다. 특히, 총 진입교통량 3,800대/시인 경우 차량 당 평균지체가 120.83초/대에서 172.28초/대로 42.58% 증가하여 가장 효과가 없는 것으로 분석되었다.

운영대안 I 의 Case2 경우 모든 진입교통량에서 차량 당 평균지체가 6.87~33.93초/대로 4.34~17.67% 증가하였다. 특히, 총 진입교통량 3,800대/시인 경우 차량 당 평균지체가 193.74초/대에서 227.67초/대로 42.58% 증가하여 가장 효과가 없는 것으로 분석되었다.

운영대안 I 의 Case1, Case2에 대한 종합분석 결과 보행신호 운영으로 인해 방향별 차량의 진출입로가 차단되어 모든 진입교통량에서 차량 당 평균지체가 증가하는 것으로 분석되었으며 특히, 총 진입교통량이 많아질수록 Case1의 경우 Case2에 비해 지체시간의 증가폭이 더 큰 것으로 분석되었다.

<Table 3> Analysis Result of Alternative I (Case 1 & Case 2)

Case 1 (40:20:30:10)				
Volume	Delay (sec/veh)		Delay Saving(sec/veh) (b)-(a)	Improvement of Percentage(%)
	Do-Not (a)	Do (b)		
2,200	9.95	21.65	11.70	117.67%
2,600	10.93	29.35	18.42	168.61%
3,000	17.55	43.05	25.50	145.26%
3,400	95.28	130.05	34.77	36.49%
3,800	120.83	172.28	51.45	42.58%
4,200	166.76	211.87	45.11	27.05%
4,600	189.40	232.44	43.03	22.72%
5,000	219.13	249.91	30.78	14.05%

Case 2 (40:20:10:30)				
Volume	Delay (sec/veh)		Delay Saving(sec/veh) (b)-(a)	Improvement of Percentage(%)
	Do-Not (a)	Do (b)		
2,200	10.86	20.91	10.05	92.52%
2,600	16.93	24.91	7.98	47.13%
3,000	77.97	89.37	11.40	14.62%
3,400	113.84	121.33	7.50	6.59%
3,800	123.78	139.51	15.73	12.71%
4,200	144.26	151.33	7.07	4.90%
4,600	158.57	165.45	6.87	4.34%
5,000	193.74	227.67	33.93	17.51%

2) 운영대안II(차량 신호미터링)

<Table 4>는 운영대안II의 Case1(40:20:30:10)과 Case2(40:20:30:10)의 분석결과를 정리한 것이다.

운영대안II의 Case1 경우 모든 진입교통량에서 차량 당 평균지체가 1.65~52.03초/대로 16.55~54.60% 감소

하였으며 특히, 총 진입교통량 3,400대/시인 경우 차량 당 평균지체가 95.28초/대에서 43.25초/대로 54.60% 감소하여 가장 큰 효과가 나타나는 것으로 분석되었다.

운영대안Ⅱ의 Case2 경우 모든 진입교통량에서 차량 당 평균지체가 0.93~46.24초/대로 0.48~59.30% 감소하였으며 특히, 총 진입교통량 3,000대/시인 경우 차량 당 평균지체가 77.97초/대에서 31.73초/대로 59.30% 감소하여 가장 큰 효과가 나타나는 것으로 분석되었다.

운영대안Ⅱ의 Case1, Case2에 대한 종합분석 결과 모든 진입교통량에서 차량 당 지체가 감소하는 것으로 분석되었으며, 총 진입교통량 3,400대/시 이상으로 많아질수록 차량 당 지체감소 폭이 작아지는 것으로 분석되었다.

<Table 4> Analysis Result of Alternative II (Case 1 & Case 2)

Case 1 (40:20:30:10)				
Volume	Delay (sec/veh)		Delay Saving(sec/veh) (b) - (a)	Improvement of Percentage(%)
	Do-Not (a)	Do (b)		
2,200	9.95	8.30	-1.65	-16.55%
2,600	10.93	9.04	-1.89	-17.28%
3,000	17.55	13.07	-4.48	-25.53%
3,400	95.28	43.25	-52.03	-54.60%
3,800	120.83	105.82	-15.01	-12.42%
4,200	166.76	153.63	-13.13	-7.87%
4,600	189.40	182.28	-7.12	-3.76%
5,000	219.13	216.45	-2.68	-1.22%

Case 2 (40:20:30:10)				
Volume	Delay (sec/veh)		Delay Saving(sec/veh) (b) - (a)	Improvement of Percentage(%)
	Do-Not (a)	Do (b)		
2,200	10.86	8.08	-2.78	-25.64%
2,600	16.93	13.18	-3.75	-22.15%
3,000	77.97	31.73	-46.24	-59.30%
3,400	113.84	98.84	-15.00	-13.17%
3,800	123.78	112.70	-11.08	-8.95%
4,200	144.26	138.68	-5.58	-3.87%
4,600	158.57	157.41	-1.16	-0.73%
5,000	193.74	192.81	-0.93	-0.48%

### 3) 운영대안 Ⅲ(차량 및 보행자를 고려한 감응식 신호미터링)

<Table 5>는 운영대안Ⅲ의 Case1(40:20:30:10)과 Case2(40:20:30:10)의 분석결과를 정리한 것이다.

운영대안Ⅲ의 Case1 경우 총 진입교통량 3,400대/시 이하의 교통량에서 차량 당 평균지체가 0.55~40.69초/대로 5.55~42.7% 감소하였으며 특히, 3,400대/시인 경우 차량 당 평균지체가 95.28초/대에서 54.59초/대로

42.71% 감소하여 가장 큰 효과가 나타나는 것으로 분석되었다. 반면에 총 진입교통량 3,800대/시 이상의 교통량에서는 차량 당 평균지체가 증가하여 효과가 없는 것으로 분석되었다.

운영대안Ⅲ의 Case2 경우 총 진입교통량 3,000~4,200대/시에서 차량 당 평균지체가 0.93~46.24초/대로 0.48~59.30% 감소하였으며 특히, 총 진입교통량 3,000대/시인 경우 차량 당 평균지체가 77.97초/대에서 69.39초/대로 11.00% 감소하여 가장 큰 효과가 나타나는 것으로 분석되었다.

운영대안Ⅲ의 Case1, Case2에 대한 종합분석 결과 마주보는 두 진입로에 교통량이 집중된 경우 3,400대/시 이하의 교통량에서 운영효과가 있으며, 인접한 두 진입로에 교통량이 집중된 경우 3,000~4,200대/시의 교통량에서만 지체감소효과가 나타나는 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 보행신호 운영으로 인해 방향별 차량의 진출입로가 동시에 차단되어 운영대안Ⅱ(차량 신호미터링) 보다 지체감소 효과가 적은 것으로 분석되었다.

<Table 5> Analysis Result of Alternative III(Case 1 & Case 2)

Case 1 (40:20:30:10)				
Volume	Delay (sec/veh)		Delay Saving(sec/veh) (b) - (a)	Improvement of Percentage(%)
	Do-Not (a)	Do (b)		
2,200	9.95	9.40	-0.55	-5.55%
2,600	10.93	10.15	-0.78	-7.18%
3,000	17.55	15.95	-1.60	-9.09%
3,400	95.28	54.59	-40.69	-42.71%
3,800	120.83	128.49	7.66	6.34%
4,200	166.76	181.89	15.13	9.07%
4,600	189.40	212.25	22.85	12.06%
5,000	219.13	244.19	25.06	11.44%

Case 2 (40:20:30:10)				
Volume	Delay (sec/veh)		Delay Saving(sec/veh) (b) - (a)	Improvement of Percentage(%)
	Do-Not (a)	Do (b)		
2,200	10.86	10.91	0.05	0.42%
2,600	16.93	20.51	3.58	21.17%
3,000	77.97	69.39	-8.58	-11.00%
3,400	113.84	112.06	-1.78	-1.57%
3,800	123.78	121.90	-1.88	-1.52%
4,200	144.26	142.20	-2.06	-1.43%
4,600	158.57	188.44	29.87	18.83%
5,000	193.74	226.61	32.87	16.96%

### V. 결론 및 향후 연구 과제

본 연구에서는 2차로형 4지 회전교차로를 대상으로 2개의 교통류 시나리오(마주보는 진입로의 교통량이 많은 경우와 인접한 진입로의 교통량이 많은 경우)와 좌회전 비율 30%를 반영하여 총 진입교통량 2,200~5,000

대/시의 범위에서 무신호 회전교차로에 보행자가 횡단하는 상태인 신호미터링 미시행(Do-Not)과 신호미터링 시행(Do)에 대한 대안 I(고정식 보행신호운영), 대안 II(차량 신호미터링) 그리고 대안 III(차량 및 보행자를 고려한 감응식 신호미터링) 시나리오에 따른 분석을 수행하였다. 실시간 제어상황과 연계한 효과검증을 위해 교통 분석용 시뮬레이션 프로그램인 VISSIM의 COM Interface 기능을 활용하여 평가분석을 수행하였으며, 본 연구의 분석결과를 바탕으로 보행신호를 고려한 회전교차로 감응식 신호미터링 알고리즘(Signal Metering Algorithm)을 제시하였다.

본 연구의 결과 운영대안 I의 Case1 & Case2 경우 모든 진입교통량에서 차량 당 평균지체가 증가하였으며, 보행신호 운영으로 인해 총 진입교통량이 많아질수록 차량 당 평균지체가 증가하는 것으로 분석되었다.

운영대안 II의 Case1 & Case2 경우 모든 진입교통량에서 차량 당 평균지체가 감소하였으며 특히, Case 2에서 진입교통량 3,000대/시인 경우 차량 당 평균지체가 77.97초/대에서 31.73초/대로 59.30% 감소하여 가장 큰 효과가 나타나는 것으로 분석되었다.

운영대안 III의 Case1 경우 총 진입교통량 3,400대/시 이하의 교통량에서 차량 당 평균지체가 0.55~40.69초/대로 5.55~42.7% 감소하였으며 특히, 3,400대/시인 경우 차량 당 평균지체가 95.28초/대에서 54.59초/대로 42.71% 감소하여 가장 큰 효과가 나타나는 것으로 분석되었다. 운영대안 III의 Case2 경우 총 진입교통량 3,000~4,200대/시에서 차량 당 평균지체가 0.93~46.24초/대로 0.48~59.30% 감소하였으며 특히, 총 진입교통량 3,000대/시인 경우 차량 당 평균지체가 77.97초/대에서 69.39초/대로 11.00% 감소하여 가장 큰 효과가 나타나는 것으로 분석되었다.

본 연구에서 개발한 차량 및 보행자를 고려한 신호미터링 운영 알고리즘은 마주보는 두 진입로에 교통량이 집중된 상태(3,400대/시 이하) 그리고 인접한 두 진입로에 교통량이 집중된 상태(3,000~4,200대/시)의 교통량에서만 운영효과가 있었다. 이러한 결과는 보행신호 운영으로 인해 방향별 차량의 진출입로가 동시에 차단되어 보행신호 동안 차량들이 대기하면서 지체가 증가한 것으로 나타났다. 이때 신호미터링 운영으로 대기 행렬이 발생한 진입로의 인접한 진입로에 적색신호를 부여하여 회전차로 내에 원활한 진입이 가능해져 전반적인 혼잡을 완화한 것이다.

본 연구는 차량만을 고려하는 신호미터링(운영대안 II)과는 달리 차량과 보행자를 동시에 고려하여 차량의 소통 및 보행자의 안전을 제고했다는 점에 의의를 가진다. 본 연구결과를 통해 특정시간대에 차량의 증가로 인해 보행안전에 위협을 받을 수 있는 어린이 보호구역 및 노인 보호구역 등의 인근 회전교차로에 적용한다면 차량의 소통과 보행자의 안전을 동시에 고려할 수 있는 효율적 운영방안이 될 것으로 기대된다.

본 연구에서는 효과분석 및 신호운영 측면에서 다음과 같은 한계를 갖는다. 따라서 향후 연구 시 다음과 같은 연구방안을 제안하며, 이를 보완한 추가적인 연구를 통해 한계점을 극복하고 보다 정확한 분석결과를 이끌어 낼 수 있을 것이다.

첫째, 혼잡교통상태 외에 다양한 교통량 및 보행자 시나리오를 고려한 동적 신호미터링 운영 알고리즘의 도출이 필요하다.

둘째, 단일 교차로가 아닌 네트워크 차원에서의 인접교차로의 영향을 고려한 동적 신호미터링 운영효과 분석이 필요하다.

셋째, 신호미터링 운영 알고리즘에 따른 효과평가 지표로 차량 당 평균지체 뿐만 아니라 차량 및 보행자 관점에서 안전도 및 상충 등 안전과 관련된 지표분석이 필요하다.

넷째, 향후 자율주행차량(autonomous vehicle)과 연계하여 회전교차로 주변에 커넥티드 차량(connected vehicle) 기법을 접목한 Smart Roundabout 운영에 대한 연구가 필요하다.

## ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 국토교통과학기술진흥원의 지역특성화사업(17RDRP-B066173-05) 지원으로 수행하였습니다.

## REFERENCES

- Ahn W. Y. and Lee S. Y.(2013), "Roundabout Signal Metering Operation Methods by Considering Approach Lane's Degree of Saturation," *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, vol. 15, no. 5, pp.217-226.
- Akcelik R.(2004), "Roundabouts With Unbalanced Flow Patterns," *Institute of Transportation Engineers Annual Meeting*, Lake Buena Vista, Florida, USA.
- 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.
- Cho H. S., Kim Y. C. and Ahn W. Y.(2016), "Estimation of Roundabout Capacity by Left-Turn Ratio," *Journal of Korea Institute of Intelligent Transportation Systems*, vol. 15, no. 1, pp.1-12.
- Qian Hong-bo et al.(2008), "The Development and Enlightenment of Signalized Roundabout," *Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), International Conference, IEEE*, 2, 538-542.
- Kim S. Y., Choi J. S., Lee S. I., Kim M. K., Kim Y. I. and Jeon B. K.(2011), "A Study of Roundabout Operation According to the Pedestrian Volume," *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, vol. 13, no. 4, pp.143-150.
- Lee S. and Ahn W. Y.(2016), "A Study on Dynamic Signal Metering Operation Method for Roundabouts Using VISSIM," *Journal of Korea Institute of Intelligent Transportation Systems*, vol. 15, no. 2, pp.74-84.
- Martin-Gasulla M. et al.(2016), "Capacity and operational improvements of metering roundabouts in Spain," *International Symposium on Enhancing Highway Performance*, vol. 15, pp.295-307.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea(2014), *Roundabouts Design Manual*.
- Ministry of Land, Transport and Maritime, Korea(2013), *Highway Capacity Manual*, pp.490-521.
- Moon J. B., Lee I. K. and Kim Y. C.(2013), "An Effectiveness Analysis of pedestrian crosswalk signal on roundabout," *Journal of Korea Institute of Intelligent Transportation Systems*, vol. 12, no. 2, pp.63-75.
- Natalizio E.(2005), "Roundabouts with Metering Signals," *Institute of Transportation Engineers Annual Meeting*, Melbourne, Australia, August.
- Park J.(2015), "Development of an Application for Signal Metering on Roundabouts," *Graduate School of The University of Seoul*, pp.48-49.