

# VISSIM을 활용한 회전교차로의 동적 신호미터링 운영방안 연구

## A Study on Dynamic Signal Metering Operation Method for Roundabouts Using VISSIM

이 솔\*

(Sol Lee)

(Kongju National University)

안 우 영\*\*

(Woo-Young Ahn)

(Kongju National University)

### 요 약

회전교차로(roundabouts) 설치이후 주변의 통행행태 변화로 인한 교통량 증가로 접근로별 교통류가 불균등(unbalanced flows)해질 경우 접근로에서 회전교차로 내부로의 진입이 어려워져 교차로 전체의 효율성이 떨어지게 된다. 본 연구에서는 회전교차로 본래의 기능을 최대한 유지하면서 운영효율성을 높이기 위한 신호미터링 운영방안으로 동적 신호미터링 운영알고리즘을 제시하였고, 효과분석은 VISSIM의 COM Interface(Visual Basic Application) 기능을 활용하였다. 본 연구결과 인접한 두 진입로를 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.

핵심어 : 회전교차로, 불균등, 동적 신호미터링, VISSIM, COM Interface

### ABSTRACT

After installing roundabouts, changes of travel behaviour in the vicinity of roundabouts can cause increasing traffic volumes and unbalanced flow conditions. In that cases, the efficiency of roundabouts as a whole intersections can drop due to the insufficient gap between vehicles in the circulating lanes. The purpose of this study is developing a dynamic signal metering operation method for roundabouts in which a real time Signal Metering operation algorithm is suggested and its performance is tested by using VISSIM COM Interface(Visual Basic Application). The results of the real time Signal Metering operation show that there is a substantial delay improvements when two adjoined approaches are combined together and the flows of metering approach are less than controlling approach. Especially, the total entering flow is around 1,600 vehicle/h gives the delay reduction per vehicle of 70.9~102.2(73.8~77.8%) seconds for four-lane-approach with one-lane roundabouts.

Key words : Roundabouts, Unbalanced Flow, Dynamic Signal Metering, VISSIM, COM Interface

† 이 논문은 2015년 공주대학교 학술연구지원사업의 연구지원에 의하여 수행되었습니다.

\* 주저자 : 국립공주대학교 도시·교통공학과 석사과정

\*\* 교신저자 : 국립공주대학교 건설환경공학부 교수

† Corresponding author : Woo-Young Ahn(Kongju National University), E-mail ahnwy@kongju.ac.kr

† Received 3 March 2016; reviewed 6 April 2016; Accepted 11 April 2016

## I. 서 론

### 1. 연구의 배경 및 목적

회전교차로(roundabouts)는 신호등이 없이 교차로 중앙에 설치된 원형교통섬을 중심으로 자동차들이 회전하여 교차로를 통과하도록 하는 평면교차로의 일종이다[1]. 녹색교통 활성화 차원에서 세계적으로 주목받고 있는 회전교차로는 신호교차로에 비해 상충점 감소 및 통행속도 감소로 인해 사망과 같은 심각한 교통사고를 큰 폭으로 줄여 안전성을 향상시키고, 에너지 및 배출가스로 인한 환경오염을 감소시킬 수 있다는 장점이 있다. 이러한 장점으로 국민안전처는 교통사고 예방을 위해 2020년까지 1,149개소를 추가로 설치할 계획을 발표하였다.

국토교통부의 회전교차로 설계지침(2014)에 따르면 회전교차로 계획시 기준교통량은 교차로 전체의 통과교통량(1차로형 20,000대/일 이하, 2차로형 32,000대/일 이하인 경우)을 기준으로 하되, 해당 교차로가 계획교통량 수준에 도달하면 신호교차로로 전환을 검토한다. 또한 진입로별 진입교통량이 균등하고 개별진입로의 차로당 첨두시 교통량이 약 125~450대/시 범위 내인 비신호 및 신호교차로는 교통소통 개선효과를 검토하여 회전교차로를 설치할 수 있도록 교통소통측면에서 설치기준을 정하고 있다[2]. 이처럼 회전교차로는 일정수준 이하의 교통상태에서 진입로별 교통류가 균등(balanced)할 경우 기존 신호교차로에 비해 운영효율성이 증대되나 설치이후 주변의 토지이용변화로 교통량이 증가하면서 진입로별 교통류가 불균등(unbalanced)해질 경우 진입로에서 회전교차로 내부로의 진입이 어려워져 효율성이 떨어지게 된다[3-5].

이미 오래전부터 회전교차가 정착된 영국, 호주 등에서는 특별이벤트, 운동경기 및 계절 등의 영향으로 인한 일시적 또는 주기적으로 교통량이 비정상적으로 높아지는 경우에 운영의 효율성을 높이기 위한 대책으로 회전교차로에 신호등을 설치하여 full-time이 아닌 part-time 신호교차로 형태로 특정시간대에만 신호등을 운영하고 있다.

따라서 본 연구에서는 회전교차로 설치이후 교통량증가로 신호교차로 설치에 대한 재검토를 하기 전에 회전교차로 본래의 기능을 최대한 유지하면서 운영효율성을 높이기 위한 동적 신호운영방안으로 실시간 Signal Metering 운영방법을 제시하였다. 본 연구에서 제시한 Signal Metering 운영알고리즘을 실시간 제어상황과 연계하여 효과를 검증하기 위해 VISSIM의 COM Interface(Visual Basic Application) 기능을 활용하였다.

### 2. 연구의 범위 및 방법

본 연구에서는 1차로형 4지 회전교차로를 대상으로 불균등 진입교통류상태(unbalanced approach flow conditions)에 따른 미터링 운영대안(대안 I, 대안 II), 교통량 시나리오(24개)를 설정하고, 총 48개 운영조합에 대한 효과측정(교차로 전체의 평균 지체) 분석은 교통시뮬레이션 프로그램인 VISSIM의 COM Interface 기능을 활용하였다. 회전교차로의 동적 신호운영에 따른 효과의 비교·평가는 다음과 같이 수행하였다.

첫째, 회전교차로의 일반적인 특징, 운영현황, Signal Metering 운영방법 등과 관련된 선행연구 검토를 통해 시사점 및 연구의 방향을 도출하였다.

둘째, 실시간 Signal Metering 분석을 위한 미터링 운영대안(대안 I 및 대안 II), 교통량 시나리오(24개) 및 시뮬레이션을 위한 회전교차로(1차로형 4지)를 구축하였다.

셋째, VISSIM에서 제공하는 COM Interface(Visual Basic Application)를 활용하여 회전교차로의 실시간 Signal Metering 운영알고리즘을 구축하였다.

넷째, 실시간 Signal Metering 도입 전·후 교통량 변화에 따른 시나리오별 분석결과에 대한 통계적 유의성은 쌍체비교(paired mean t-test)를 통하여 가설검증(hypothesis test)을 수행하였다.

다섯째, 회전교차로 전체의 제어지체 변화를 활용하여 실시간 Signal Metering의 도입효과를 분석하였다.

## II. 선행연구 고찰

Akcelik(2004)은 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[3]. 또한 Akcelik(2004, 2005)은 회전교차로를 대상으로 Signal Metering을 운영한 결과 평균 지체시간과 대기행렬길이 그리고 운영비용 및 배출가스가 감소된다는 결과를 제시하였다[3, 6].

Ahn(2012)은 진입교통량이 가장 많은 진입로와 인접한 상류부의 진입로를 한 쌍(pair)으로 묶어서 Signal Metering을 운영하는 것이 가장 효과적인 것으로 제시하였다. 총 진입교통량이 1,800~2,000pcu/시 이고 주진입로의 진입교통량비가 60% 이상일 때 지체는 30% 감소하였으나 진입교통량비가 그 이하인 경우 그리고 각 진입로별 진입교통량 및 회전교통량비(circulating flow proportion)가 균등할 경우에는 효과가 없는 것으로 분석되었다[4].

Ahn and Lee(2013)는 단순히 교통량만 고려하기보다는 회전교차로 내부에서의 회전교통량과 진입로에서의 진입교통량과의 관계를 포괄적으로 다변할 수 있는 포화도(degree-of-saturation)를 사용하였고, 회전교차로 Signal Metering 운영에 따른 효과를 얻기 위해서는 우선적으로 미터링진입로와 관리진입로의 선정이 가장 중요함을 제시하였다. 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[7].

Lee(2013)는 2차로형 4지 회전교차로를 대상으로

회전교차로의 진입교통량이 균등한 상태에서의 신호를 운영하는 경우(A)와 신호교차로로 전환하는 경우(B)의 전환 전·후의 지체의 변화량을 통해 지체 감소 효과를 분석하였다. 그 결과 A, B모두 지체 감소효과가 있지만 신호교차로로 전환하는 경우(B)보다 신호를 운영하는 경우(A)의 지체 감소영역이 넓어지고 감소하는 폭도 큰 것으로 분석되었으며, 회전교차로에 신호를 운영할 경우 회전교차로의 권장 범위를 125~450대/시/차로에서 최대 125~600대/시/차로까지 확대할 수 있다는 결과를 제시하였다 [8].

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 증가할수록 신호미터링을 통한 회전교차로의 지체 감소 효과는 증가하였으며 검지기 간격의 경우 40m일 때, 미터링 진입로의 적색 시간 길이가 10초 혹은 20초 일 때, Controlling Approach의 교통량이 450~650대/시의 경우 신호미터링의 효과가 비교적 높은 것으로 분석되었다[9].

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 증명하고, 관리진입로의 진입교통량, 미터링 진입로의 포화도(degree of saturation), 검지기의 이격거리, 신호의 운영(blank or green) 및 정지(red)시간 길이 등을 포함하는 최적 운영방안을 도출하였다[10].

기존연구의 검토결과 단순히 고정식신호에 대한 비교 및 평가만 진행되었다. 따라서 본 연구에서는 회전교차로 설치이후 교통량 증가로 인한 지체 시간 증가로 회전교차로의 효율성 감소 시 원활한 소통을 위한 회전교차로의 실시간 Signal Metering 운영방법 및 운영 알고리즘을 제시하고자 한다.

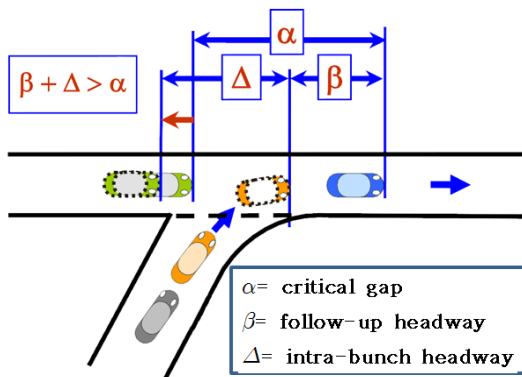
### Ⅲ. 실시간 Signal Metering 운영알고리즘 개발

#### 1. 실시간 Signal Metering 개념

##### 1) 기본개념

간격수락모형(Gap Acceptance Model)에 기초한 실시간 Signal Metering은 진입교통류의 불균형 발생으로 인해 회전교차로의 전체적인 소통이 원활하지 못할 경우 상류부(upstream) 접근로의 진입교통류(approach flow)를 통제하여 회전교통류(circulating flow)의 차량간격을 조정하는 개념이다[5]. 즉, 회전차로(circulating lane) 내의 자동차들간 시간간격이 접근로에서 진입하는데 필요한 시간보다 크면 진입이 가능하다[2].

임계간격(critical gap)이란 진입로에서 회전차로로 안전하게 진입하기 위해 허락되는 자동차들간 차두시간의 최소값(3.21초)으로 이 값보다 간격이 커야만 회전차로 내로 진입이 가능하다. 추종시간(follow up headway)이란 진입로에서 회전차로로 진입하는 자동차들간 평균 차두시간이다(3.15초). 회전차로 내 최소 차두간격(intra-bunch headway)이란 허락된 임계간격 범위에서 차량이 회전교차로에 진입 후 뒤따르는 후속차량과의 최소간격으로 정의된다(2.05초).



〈Fig. 1〉 Critical Gap, Follow-Up Headway and Intra-Bunch Headway

##### 2) 운영이론

회전교차로를 대상으로 실시간 Signal Metering을 운영하기 위해서는 통제진입로(controlling approach)와 미터링진입로(metering approach)의 선정이 가장 중요하다. 통제진입로와 미터링진입로의 선정은 가변적으로 접근로별 진입교통류 및 회전차로 내 회전교통류에 따라서 변하게 된다. 통제진입로란 회전차로의 교통량 증가 또는 진입차로의 교통량 증가로 대기행렬이 가장 길게 발생하여 혼잡하다고 판단되는 진입로이다. 미터링진입로란 통제진입로의 소통해소 및 회전차로 내 임계간격 확보를 위해 진입통제가 필요한 접근로이다. 이때 미터링진입로에 설치된 신호등에 적색신호를 부여하여 진입을 통제하고 회전차로 내 임계간격을 확보하는 것이 Signal Metering이다.

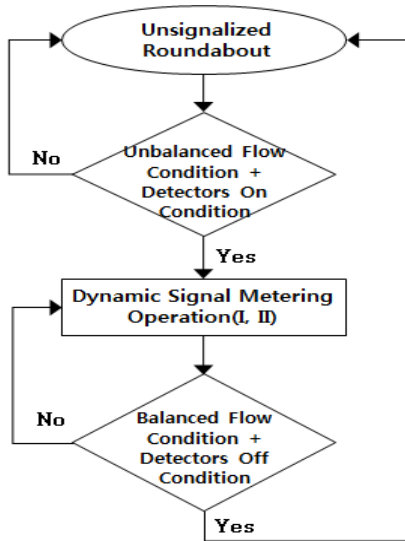
#### 2. 실시간 Signal Metering 운영알고리즘

본 연구에서는 1차로형 4지 회전교차로를 대상으로 실시간 Signal Metering 운영알고리즘을 개발하였다.

〈Fig. 2〉와 같이 회전교차로의 실시간 Signal Metering이란 평상시에는 무신호 회전교차로로 운영되다가 불균등 교통상황발생시 또는 진입로별로 설치된 검지기(detector)에 차량 점유시(대기행렬 발생시) 통제진입로와 미터링진입로를 미터링 운영대안에 따라서 선정하고 미터링진입로에 적색시간 연장을 통해 회전차로 내 임계간격을 확보하는 방법이다.

1차로형 4지 회전교차로의 모든 진입로에 설치된 검지기 집합을  $G = [D_m^i, S_m^j]$  그리고 후보검지기 집합을  $G^* = [D_m^i, S_m^j]$ 로 한다(여기서,  $m$ 은 검지기 번호 그리고  $i, j$ 는 검지기 점유상태 및 속도 상태). 만약 검지기( $D$ )가 비점유시  $i=0$ , 점유시  $i=1$  그리고 검지기의 속도( $S$ )가  $0\text{km/h}$ 보다 크면  $j=0$ , 그렇지 않으면  $j=1$ 로 한다. 후보검지기 집합  $G^*$ 은  $i=1$  그리고  $j=1$ 인 상태의 검지기를 의미한다.  $G$ 의 점유여부 및 속도에 따라서 실시간으로 통제진입로가

선정된다. 미터링진입로는 실시간 Signal Metering 운영조합(대안I, 대안II)에 따라서 선정된다(<Table 5> 참조). 최소미터링시간( $r_{min}$ ) 이후 미터링시간은  $t=r_{min}$ 에서 시작되어 최대미터링시간( $r_{max}$ )까지 1초 단위로 연장 된다( $\Delta t=1$ 초). 본 연구에서 모든 진입로의  $r_{min}=10$ 초 그리고  $r_{max}=20$ 초를 적용하였다.  $t=r_{min}$  이후부터 다음 미터링을 위한 후보검지기( $D^*$ )의 선정이 필요하다. 이때 후보검지기는 진입로별 검지기의 점유순서를 고려한 FIFO (first-in-first-out) 원칙에 따라서  $G^*$ 에서 선정된다. 만약 후보 검지기 집합이 빈 상태( $G^*=\phi$ )이면 다시 무신호 회전교차로 상태로 돌아간다.



<Fig. 2> Dynamic Signal Metering operation algorithm

통제진입로 선정, 미터링진입로 선정 및 미터링 시간(적색시간) 연장을 위한 실시간 Signal Metering의 세부 운영알고리즘은 다음과 같다.

- Step 0: 무신호 회전교차로 운영(초기화)
- Step 1: 통제진입로 선정( $G=[D_m^i, S_m^j]$  for  $i=1, j=1 \Rightarrow$  미터링진입로 선정)
- Step 2:  $t=r_{min}$ 에서 미터링시간 연장여부 판단

$$[D_m^i, S_m^j] \text{ for } i=1, j=1 \text{ and } r_{min} \leq t + \Delta t \leq r_{max}$$

- Step 3: FIFO 원칙에 따라서 후보검지기 리스트  $G^*$ 에서 통제진입로 선정( $[D_m^i, S_m^j]$  for  $i=1, j=1 \Rightarrow$  미터링진입로 선정)
- Step 4: 이때,  $G^*=\phi$  or  $t > r_{max} \Rightarrow$  goto Step 0

## IV. VISSIM을 활용한 Simulation 분석

### 1. 분석프로그램 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 Interface는 VBA(Visual Basic Application) 환경에서 코딩(coding)이 가능하며, C나 Java와 같은 다른 프로그래밍 언어에 비해 쉽게 이해할 수 있고 NET Framework이라는 가상실행 시스템상에서 작동한다. VISSIM의 COM Interface 기능을 활용할 경우 무신호 회전교차로 및 본 연구에서 제시한 실시간 Signal Metering 운영알고리즘을 서브루틴(subroutine)으로 연결하여 분석이 가능하다.

### 2. 분석 시나리오 작성

본 연구에서는 2개의 실시간 Signal Metering 운영대안과 4개의 교통량대안을 설정하였다.

운영대안 I은 Ahn and Lee(2013)가 제시한 바와 같이 통제진입로에 인접한 접근로를 한 쌍(pair)으로 묶어서 미터링 운영조합을 구성하였고[6], 운영대안 II는 통제진입로와 마주보는 접근로를 한 쌍(pair)으로 묶어서 미터링 운영조합을 구성하였다(<Fig. 5> 참조).

교통량대안(case 1~4)의 경우 총 진입교통량을 200대 단위로 1,200~2,200대/시 범위로 설정하였다. 교통량대안 case 1, 2의 경우 두 인접 진입로에 교통량이 집중된 경우로 무신호 회전교차로 운영 시체가 상대적으로 큰 경우이며, 교통량대안 case 3,

4는 마주보는 두 진입로에 교통량이 집중된 경우로 무신호 회전교차로 운영 시 지체가 상대적으로 작은 경우이다.

실시간 Signal Metering 운영 전·후의 효과를 평가하기 위한 분석절차는 다음과 같다.

첫째, 선정된 통제진입로를 기준으로 실시간 Signal Metering 운영대안을 다음과 같이 설정한다.

- 운영대안 I : 인접한 진입로(adjacent approach)를 미터링진입로로 선정
- 운영대안 II : 마주보는 진입로(opposite approach)를 미터링진입로로 선정

둘째, 진입로별 교통량의 비율을 고려한 분석 시나리오를 설정한다.

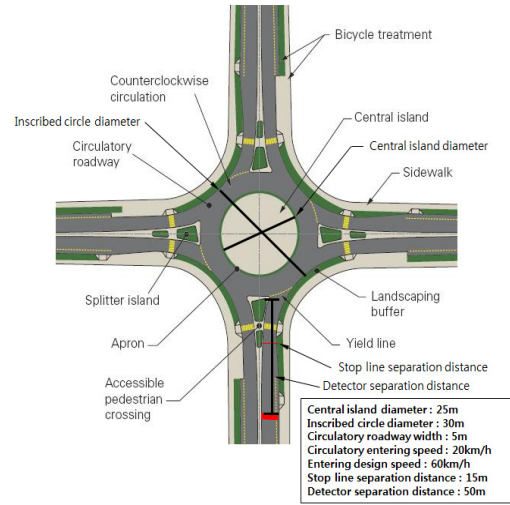
- 교통량대안 I : 인접한 진입로의 진입교통량이 많은 경우(지체가 큰 경우)
  - case 1: 교통량 비율 (40:40:10:10)
  - case 2: 교통량 비율 (50:30:10:10)
- 교통량대안 II : 마주보는 진입로의 진입교통량이 많은 경우(지체가 작은 경우)
  - case 3: 교통량 비율 (40:10:40:10)
  - case 4: 교통량 비율 (50:10:30:10)

셋째, 운영대안 I 과 운영대안 II에 대한 교통량 시나리오별 실시간 Signal Metering 운영 전·후 교차로 전체의 지체(차량 당 평균지체)를 평가한다.

### 3. Simulation 분석 교차로 제원

#### 1) 네트워크 구축

회전교차로설계지침(2014)에 따라 1차로형 4지 회전교차로의 회전부 설계속도는 20km/h, 내접원 지름 30m, 중앙교통섬 지름 25m, 회전차로 폭 5m, 그리고 진입부 최대설계속도는 60km/h로 설정하였다[2]. 실시간 Signal Metering을 위한 정지선의 이격거리는 15m, 검지기 이격거리는 50m로 설정하였으며, 좌회전 30%, 직진 60%, 우회전 10%의 비율로 승용차로만 구성된 교통량을 적용하였고, 도로의 경사는 평지로 하여 다음 <Fig. 3>과 같이 회전교차로를 구축하였다.



<Fig. 3> Geometry of 4 legs with 1 lane entry roundabout

#### 2) 통행우선권 (entry priority) 설정

회전교차로는 교차로 내부로 진입하고자 하는 자동차(entry flow)가 교차로 내부의 회전차로에서 주행하는 자동차(circulating flow)에게 양보하는 것을 기본원리로 한다[1]. 즉, 회전하는 자동차가 우선권을 갖는 것이다. VISSIM 시뮬레이션 분석을 위해 차량운행특성으로 최소 차간시간은 3.0초 그리고 최소 차간간격은 5.0m로 설정하였다.

### IV. 동적 Signal Metering 효과 분석

#### 1. 쌍체비교(paired mean t-test)

회전교차로 Signal Metering 시행 전 지체와 시행 후 지체 차이에 대한 통계적 유의성 검증을 수행하였다. 분석결과에 대한 통계적 유의성은 95% 신뢰구간에서 자유도(degree of freedom) 23의 단측검증 기각치( $t_{\alpha/2} = 1.714$ )에서 다음 식(1)과 같이 쌍체비교(paired mean t-test)를 통하여 검증하였다. 쌍체비교는 유형별 교통량변화에 대한 합동분산추정량(pooled variance estimator)을 사용한다. 대안별 평균값( $\mu$ )에 대한 귀무가설(null hypothesis)과 대립가설

(alternative hypothesis)을 설정하여 t-test를 수행하였다.

$$t = \frac{\bar{D}}{S_p / \sqrt{n}} \quad (1)$$

여기서,  $\bar{D} : \mu_1 - \mu_2$   
 $S_p : \text{Pooled Standard Deviation}$   
 $n : \text{샘플 수}$

24개의 교통량대안에 대한 무신호 회전교차로의 평균지체  $\mu_0 = 54.08$ 초/대, 운영대안 I의 평균지체  $\mu_1 = 44.49$ 초/대 그리고 운영대안II의 평균지체  $\mu_2 = 61.16$ 초/대로 분석되었다. 무신호 회전교차로와 대안 I 평균값 차이에 대한 t-value= 1.835, 무신호 회전교차로와 대안 II에 대한 평균값 차이에 대한 t-value=1.806 그리고 대안 I과 대안 II에 대한 평균값 차이에 대한 t-value=3.422로 분석 되었다. 쌍체비교 결과, 귀무가설( $\mu_0 = \mu_1 = \mu_2$ )을 기각(reject)하고 대립가설( $\mu_0 > \mu_1, \mu_0 > \mu_2$ )을 채택하여 두 평균값 간의 차이가 통계적으로 유의한 것으로 분석되었다.

## 2. 시나리오 분석 결과

### 1) 운영대안 I(case1, case2)

<Table 1>은 실시간 Signal Metering 운영대안 I의 case 1(40:40:10:10) 및 case 2(30:50:10:10)의 분석 결과를 정리한 것이다.

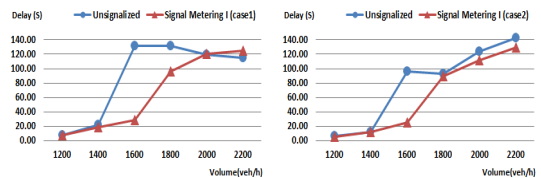
운영대안 I의 case 1과 같이 총 진입교통량이 1400~1,800대/시인 경우 차량 당 평균지체는 4.07~102.2초/대로 18.1~77.83% 감소하였다. 특히, 총 진입교통량이 1,600대/시 인 경우 차량 당 평균지체는 131.34초/대에서 29.12초/대로 77.83% 감소하였다. 반면 총 교통량이 2,000대/시 이상에서는 오히려 지체가 증가하는 것으로 분석되었다. 운영대안 I의 case2 경우 총 교통량이 1,600대/시 이상일 때 차량 당 평균지체는 2.83~70.95초/대 3.06~73.84% 감소하였다. 특히, 총 진입교통량이

1,600대/시 인 경우 차량 당 평균지체는 96.09초/대에서 25.14초/대로 73.84% 감소하였다.

운영대안 I의 case 1, 2에 대한 종합분석 결과 인접한 두 진입로에 교통량이 집중된 경우 통제진입로에 인접한 두 진입로를 한 쌍(pair)으로 묶고 미터링진입로의 교통량이 통제진입로의 교통량 보다 작거나 같은 경우 실시간 Signal Metering 운영 효과가 있는 것으로 분석되었다. 특히, 총 진입교통량이 1,600대/시일 때 가장 큰 효과가 나타나는 것으로 분석되었다.

<Table 1> Analysis result of alternative I(case 1, case 2)

Volume	Delay (sec/veh)		Delay Saving (sec/veh) (b)-(a)	Improvement of Percentage(%)	
	Do-Not (a)	Do (b)			
Case1	1,200	7.89	7.82	-0.07	-0.86
	1,400	22.46	18.39	-4.07	-18.14
	1,600	131.34	29.12	-102.22	-77.83
	1,800	131.83	96.15	-35.68	-27.07
	2,000	119.04	120.51	1.47	1.24
	2,200	115.01	125.35	10.33	8.98
Case2	1,200	6.80	5.85	-0.96	-14.06
	1,400	12.11	12.02	-0.09	-0.73
	1,600	96.09	25.14	-70.95	-73.84
	1,800	92.47	89.63	-2.83	-3.06
	2,000	123.72	112.09	-11.63	-9.40
	2,200	142.70	129.70	-13.00	-9.11



<Fig. 4> Analysis result of alternative I(case1, case2)

### 2) 운영대안 I (case3, case4)

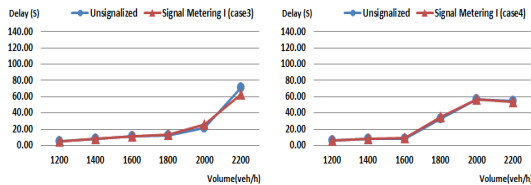
<Table 2>는 실시간 Signal Metering 운영대안 I의 case 3(40:10:40:10) 및 Case4(50:10:30:10)의 분석 결과를 정리한 것이다.

운영대안 I의 case 3과 같이 총 진입교통량이 2,200대/시인 경우 차량 당 평균지체는 71.10초/대에서 62.69초/대로 11.83% 감소하였다. 운영대안 I의 case4 경우 총 진입교통량이 2,200대/시인 경우 차량 당 평균지체는 55.05초/대에서 53.95초/대로 2.0% 감소하였다.

운영대안 I의 case 3, 4에 대한 종합분석 결과 마주보는 두 진입로에 교통량이 집중된 경우 통제진입로에 인접한 두 진입로를 한 쌍(pair)으로 묶을 경우 2,000대/시 이상의 교통량에서만 운영 효과가 있고 전반적으로 실시간 Signal Metering 운영 효과가 없는 것으로 분석되었다.

〈Table 2〉 Analysis result of alternative I(case 3, case 4

Volume	Delay (sec/veh)		Delay Saving (sec/veh) (b) - (a)	Improvement of Percentage(%)
	Do-Not (a)	Do (b)		
Case3	1,200	4.79	4.79	0.00
	1,400	8.06	8.54	0.48
	1,600	10.96	11.50	0.54
	1,800	12.05	13.06	1.00
	2,000	21.23	26.11	4.89
	2,200	71.10	62.69	-8.41
Case4	1,200	6.24	6.24	0.00
	1,400	8.34	8.34	0.00
	1,600	8.28	9.18	0.90
	1,800	33.33	35.17	1.83
	2,000	57.11	56.35	-0.76
	2,200	55.05	53.95	-1.10



〈Fig. 5〉 Analysis result of alternative I(case3, case4)

3) 운영대안 II(case1, case2)

〈Table 3〉은 실시간 Signal Metering 운영대안 II

의 case 1(40:40:10:10) 및 case 2(30:50:10:10)의 분석 결과를 정리한 것이다.

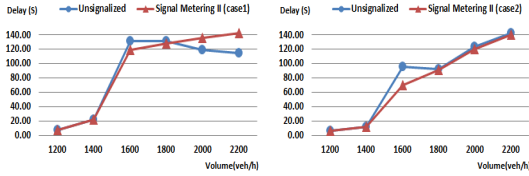
운영대안 II의 case 1과 같이 총 진입교통량이 1,200~1,800대/시인 경우 차량 당 평균지체는 0.12~12.11초/대로 1.56~9.22% 감소하였다. 특히, 총 진입교통량이 1,600대/시 인 경우 차량 당 평균지체는 131.34초/대에서 119.23초/대로 9.22% 감소하였다. 반면 총 교통량이 2,000대/시 이상에서는 오히려 지체가 증가하는 것으로 분석되었다. 운영대안 II의 case2 경우 총 교통량이 1,600대/시 이상 일 때 차량 당 평균지체는 1.40~26.39초/대로 1.52~27.47% 감소하였다. 특히, 총 진입교통량이 1,600대/시 인 경우 차량 당 평균지체는 96.09초/대에서 69.69초/대로 27.47% 감소하였다.

운영대안 II의 case 1, case 2에 대한 종합분석 결과 통제진입로와 마주보는 진입로를 한 쌍(pair)으로 묶고 미터링진입로의 교통량이 통제진입로의 교통량 보다 작거나 같은 경우 실시간 Signal Metering 운영 효과가 있는 것으로 분석되었다. 그러나 운영대안 I에 비해 차량 당 평균지체 감소효과가 크지 않은 것으로 분석되었다.

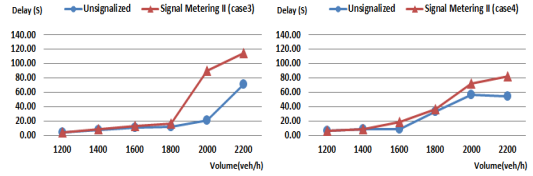
〈Table 3〉 Analysis result of alternative II(case 1, case 2)

Volume	Delay (sec/veh)		Delay Saving (sec/veh) (b) - (a)	Improvement of Percentage(%)
	Do-Not (a)	Do (b)		
Case1	1,200	7.89	7.76	-0.12
	1,400	22.46	21.94	-0.52
	1,600	131.34	119.23	-12.11
	1,800	131.83	127.72	-4.11
	2,000	119.04	135.59	16.55
	2,200	115.01	143.06	28.05
Case2	1,200	6.80	6.40	-0.40
	1,400	12.11	12.07	-0.04
	1,600	96.09	69.69	-26.39
	1,800	92.47	91.06	-1.40
	2,000	123.72	120.76	-2.96
	2,200	142.70	140.01	-2.69





<Fig. 6> Analysis result of alternative II (case1, case2)



<Fig. 7> Analysis result of alternative II (case3, case4)

4) 운영대안 II(Case3, Case4)

<Table 4>는 실시간 Signal Metering 운영대안 II의 case 3(40:10:40:10) 및 Case4(50:10:30:10)의 분석 결과를 정리한 것이다.

운영대안 II의 case 3, 4 모두 차량 당 평균지체의 변화가 없거나 오히려 증가하여 실시간 Signal Metering 운영 효과가 없는 것으로 분석되었다.

운영대안 II의 case 3, 4에 대한 종합분석 결과 본 교통량대안의 경우 마주보는 두 진입로에 교통량이 집중된 경우로 두 진입로를 한 쌍(pair)으로 묶을 경우 오히려 미터링진입로의 지체가 증가하여 실시간 Signal Metering 운영 효과가 없는 것으로 분석되었다.

<Table 4> Analysis result of alternative II(case 3, case 4)

Volume	Delay (sec/veh)		Delay Saving (sec/veh) (b) - (a)	Improvement of Percentage(%)	
	Do-Not (a)	Do (b)			
Case3	1,200	4.79	4.79	0.00	0.00
	1,400	8.06	8.58	0.52	6.47
	1,600	10.96	12.92	1.97	17.96
	1,800	12.05	16.67	4.62	38.32
	2,000	21.23	89.87	68.64	323.40
	2,200	71.10	114.33	43.22	60.78
Case4	1,200	6.24	6.24	0.00	0.00
	1,400	8.34	8.34	0.00	0.00
	1,600	8.28	18.99	10.71	129.34
	1,800	33.33	36.50	3.17	9.51
	2,000	57.11	72.45	15.34	26.86
	2,200	55.05	82.87	27.82	50.54

5) 운영대안별 조합패턴

<Table 5> Operating alternatives by combining patterns

Variable	Alternative I	Alternative II
Case1		
	○	○
Case2		
	●	○
Case3		
	△	×
Case4		
	△	×

●:운영효과(상), ○:운영효과(중), △:운영효과(하), ×:효과없음

V. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 회전교차로의 운영효율성을 높이기 위한 동적 신호운영방안으로 실시간 제어상황과 연계하여 효과를 검증하기 위해 교통 분석용 시뮬

레이션 프로그램인 VISSIM의 COM Interface 기능을 활용하여 실시간 Signal Metering 운영방안을 제시하였다. 1차로형 4지 회전교차로를 대상으로 2개의 운영대안 및 24개의 불균등 진입교통류 상태(unbalanced approach flow conditions)를 설정하여 본 연구에서 제시한 실시간 Signal Metering 운영알고리즘의 효과를 평가하였다.

본 연구의 분석결과 운영대안 I의 case1, case2와 같이 인접한 두 진입로에 교통량이 집중된 경우 통제진입로에 인접한 두 진입로를 한 쌍(pair)으로 묶고 미터링진입로의 교통량이 통제진입로의 교통량보다 작은 경우 실시간 Signal Metering 운영 효과가 있는 것으로 분석되었다. 특히, 총 진입교통량이 1,600대/시일 때 차량 당 평균지체가 131.34초/대에서 29.12초/대로 77.83% 감소하여 가장 큰 효과가 나타나는 것으로 분석되었다. 운영대안 I의 case3, case4와 같이 마주보는 두 진입로에 교통량이 집중된 경우는 무신호 회전교차로 운영 시 지체가 상대적으로 작은 경우로 총 진입교통량이 2,200대/시 이상의 교통량부터 실시간 Signal Metering 운영 효과가 나타나는 것으로 분석되었다.

운영대안 II의 case 1, 2는 인접한 두 진입로에 교통량이 집중된 경우이나 통제진입로와 마주보는 진입로를 한 쌍(pair)으로 묶어서 실시간 Signal Metering을 운영할 경우 차량 당 평균지체가 96.09초/대에서 69.69초/대로 27.47%로 감소는 하였지만 운영대안 I에 비해 차량 당 평균지체 감소효과가 크지 않은 것으로 분석되었다.

운영대안 II의 case 3, 4와 같이 마주보는 두 진입로에 교통량이 집중되어있고 무신호 회전교차로 운영 시 지체가 상대적으로 작은 경우에 마주보는 두 진입로를 한 쌍(pair)으로 묶을 경우 오히려 미터링 진입로의 지체가 증가하여 실시간 Signal Metering 운영 효과가 없는 것으로 분석되었다.

실시간 Signal Metering 운영 효과를 얻기 위해서는 첫째, 통제진입로(controlling approach)와 미터링 진입로(metering approach)의 선정이 가장 중요하다. 둘째, 진입교통량의 비율을 고려한 실시간 Signal Metering 운영조합 선정이 필요하다.

인접한 두 진입로에 교통량이 집중된 경우는 운영대안 I과 같이 인접한 두 진입로를 한 쌍(pair)으로 묶고 미터링진입로의 교통량이 통제진입로의 교통량보다 작은 경우 실시간 Signal Metering 운영 효과가 가장 큰 것으로 분석되었다. 반면 운영대안 II와 같이 마주보는 두 진입로를 한 쌍(pair)으로 묶었을 경우 운영대안 I에 비해 상대적으로 실시간 Signal Metering 운영 효과가 떨어지는 것으로 분석되었다.

마주보는 두 진입로에 교통량이 집중된 경우 역시 운영대안 I과 같이 인접한 두 진입로를 한 쌍(pair)으로 묶고 미터링진입로의 교통량이 통제진입로의 교통량보다 작은 경우 총 진입교통량이 2,000대/시 이상 교통량부터 실시간 Signal Metering 운영 효과가 있는 것으로 분석되었다.

본 연구에서 개발한 실시간 Signal Metering 운영 알고리즘은 각 진입로에 설치된 검지기(detector)의 점유여부 및 속도를 활용하여 통제진입로와 미터링 진입로를 선정하는 방식이다. 향후 연구에서는 회전교차로 전체의 혼잡도 및 접근로별 진입교통량을 복합적으로 고려한 다양한 조합의 미터링진입로 선정 알고리즘 개발이 필요하다. 또한 본 연구에서 분석한 1차로형 4지 회전교차로 외에 다양한 기하구조(3지 1, 2, 3차로 및 4지 2, 3차로) 및 보행자를 고려한 실시간 Signal Metering 운영효과 분석이 필요하다.

## REFERENCES

- [1] Ministry of Land, Transport and Maritime, Korea(2013), *Highway Capacity Manual*, pp.490-521.
- [2] Ministry of Land(2014), Infrastructure and Transport, Korea, *Roundabouts Design Manual*.
- [3] Akcelik R.(2004), "Roundabouts with unbalanced flow patterns," *ITE 2004 Annual Meeting*, Lake Buena Vista, Florida, USA, August 1-4.
- [4] 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.
- [5] Ahn W. Y., Lee S. Y. and Ahn G. G.(2011), "A Study on Signal Metering Performance Analysis for Roundabouts," *Journal of Transport Research*, vol. 18, no. 2, pp.1-11.
- [6] Akcelik R.(2005), "Capacity and Performance Analysis of Roundabout Metering Signals," *TRB National Roundabout Conference*,vail, Colorado, USA, 22-25 May.
- [7] Ahn W. Y. and Lee S. Y.(2013), "Roundabout Signal Metering Operation Methods by Considering Approach Lane's Degree of Saturation," *International Journal of Highway Engineering*, vol. 15, no. 5, pp.217-226.
- [8] Lee H. S.(2013), "A Study on The Effective Operation Strategy of Signalized Roundabouts," *Graduate School of Gachon University*, pp.57-59.
- [9] Park J.(2015), "Development of an Application for Signal Metering on Roundabouts," *Graduate School of The University of Seoul*, pp.48-49.
- [10] Natalizio E.(2005), "Roundabouts with Metering Signals," *Institute of Transportation Engineers 2005 Annual Meeting*, Melbourne, Australia, August.

저자소개



**이 솔 (Lee, Sol)**

2015년 3월 ~ 현재 : 국립공주대학교 도시교통공학과 석사과정

2014년 8월 : 국립공주대학교 공학사(도시·교통)

e-mail : thfdlqhd@kongju.ac.kr



**안 우 영 (Ahn, Woo-Young)**

2006년 4월 ~ 현재 : 국립공주대학교 건설환경공학부 교수

1993년 1월 ~ 2006년 3월 : 한국교통연구원, 부연구위원

2004년 9월 : 런던대학교(University College London) 공학박사(토목공학과)

1992년 12월 : Ohio State University 공학석사(도시계획과)

e-mail : ahnwy@kongju.ac.kr