

# 접근로별 포화도를 고려한 Roundabout Signal Metering 운영방법에 관한 연구

## Roundabout Signal Metering Operation Methods by Considering Approach Lane's Degree of Saturation

안우영 Ahn, Woo-Young  
이소영 Lee, So-Young

정희원 · 공주대학교 건설환경공학부 교수 · 교신저자 (E-mail: ahnwy@kongju.ac.kr)  
국토연구원 국토인프라연구본부 연구원 (E-mail: cookie0224@naver.com)

### ABSTRACT

**PURPOSES :** Under the capacity conditions with balanced approach flows, roundabouts give less delay than existing signalized intersections; however, flows over 450 vehicles/hour/lane with unbalanced approach flow conditions, roundabouts efficiency drops due to the short time difference between the critical gap and the follow-up headway. The purpose of this study is developing a roundabout Signal Metering operation method by considering approach lanes degree of saturation.

**METHODS :** A four-way-approach with one-lane roundabout is selected to compare the Signal Metering performance for the case of 16 different unbalanced flow conditions. Based on these traffic conditions, the performance is evaluated for 64 different cases of Signal Metering combinations by using SIDRA software. A degree of saturation(V/C ratio) sum for two adjoined approaches is used for the performance index of choosing Metered Approach and Controlling Approach.

**RESULTS :** When the V/C ratio sum is 0.29~0.81 and Metered Approach flow is less than Controlling Approach flow, the average delay saving per vehicle is about 7 seconds; however, after this range the delay saving decreases gradually until the V/C ratio sum reaches around 1.0. The range of V/C ratio sum 0.93~1.09 provides average delay saving per vehicle about 3 seconds. In case of V/C ratio sum is greater than 1.0 and the flows of Metered Approach is greater than Controlling Approach, the average delay per vehicle increases 3~11 times respectively.

**CONCLUSIONS :** As expected, the Signal Metering provides substantial improvements in delay saving for the case of V/C ratio sum is 0.3~1.0 under the traffic flow conditions of Metered Approach is less than Controlling Approach.

### Keywords

*critical gap, follow-up headway, degree of saturation, signal metering, SIDRA, metered approach, controlling approach*

Corresponding Author : Ahn, Woo-Young, Professor  
Department of Civil&Environmental Engineering, Kongju National University,  
275, Budae-Dong, Seobuk-Gu, Cheonan-Si, Chungnam, 330-717, Korea  
Tel : +82.41.521.9321 Fax : +82.41.568.0287  
E-mail : ahnwy@kongju.ac.kr

International Journal of Highway Engineering  
http://www.ijhe.or.kr/  
ISSN 1738-7159 (Print)  
ISSN 2287-3678 (Online)

## 1. 서론

### 1.1. 연구의 배경 및 목적

회전교차로(Roundabout)는 평면교차로의 일종으로

신호등이 없이 차량들이 교차로 중앙에 설치된 원형교  
통섬을 중심으로 회전해 통과하는 교차로 형식이다. 현  
재 국내에서 추진되고 있는 현대식 회전교차로는 교차

로 내부의 회전차량이 통행우선권을 가지게 되고 진입 차량이 양보하는 것을 기본원리로 하여 운영된다. 즉 회전교차로는 회전하는 차량에게 우선권이 있다. 일반적으로 회전교차로는 신호교차로에 비해 원형기하구조로 인한 상충점 감소 및 저속운행 유도로 직각충돌사고 및 정면충돌사고와 같은 심각한 교통사고를 큰 폭으로 감소시켜 안전성을 증진하고 신호교차로에서 발생하는 불필요한 지체를 감소하여 운영효율성을 높일 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 교통운영측면에서 회전교차로가 모든 교차로를 대체하여 그 효과를 극대화할 수 있는 것은 아니다. 교차로를 회전교차로 형식으로 채택하여 운영할 경우 접근로별 교통량, 주행속도, 가용면적, 보행량, 교차로기능 등을 종합적으로 고려하여 운영방식을 결정해야 한다.

국토해양부(현 국토교통부)의 회전교차로 설계지침(2010)에 따르면 회전교차로 계획 시 기준교통량은 교차로 전체의 통과교통량을 기준으로 하되, 회전교차로 교통량 수준은 1차로형 20,000대/일 이하, 2차로형 32,000대/일 이하인 경우에 적용하고, 해당 교차로가 계획 교통량 수준에 도달하면 신호교차로로 전환을 검토한다. 접근로별 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. 이처럼 회전교차로는 일정수준 이하의 교통상태에서 접근로별 교통류가 균등(balanced)할 경우 기존 신호교차로에 비해 운영효율성이 증대되나 설치 이후 주변의 토지이용변화로 교통량이 증가하면서 접근로별 교통류가 불균등(unbalanced)해질 경우 접근로에서 회전교차로 내부로의 진입이 어려워져 효율성이 떨어지게 된다(Akcelik, 2004).

미국, 영국, 호주 등 이미 회전교차가 오래전부터 정착된 선진외국의 경우 회전교차로에 신호등을 설치하여 full-time 운영체계가 아닌 part-time 운영체계로 첨두시 또는 비정상적인 교통수요 발생 시 대처하기 위해 Signal Metering을 도입하여 회전교차로를 신호교차로 형식으로 운영하고 있다(Akcelik, 2011).

따라서 본 연구는 회전교차로 설치 이후 교통량 증가로 신호교차로 설치에 대한 재검토를 하기 전에 회전교차로 본래의 기능을 최대한 살리면서 효율적으로 운영할 수 있는 방안으로 회전교차로 Signal Metering 운영방법 및 운영알고리즘을 제시하고 효과분석은 SIDRA를 활용하였다.

## 1.2. 연구의 범위 및 수행절차

본 연구에서는 1차로형 4지 회전교차로를 대상으로 불균등 교통류상태(unbalanced flow conditions)에 따른 시나리오를 설정하고 효과척도(평균지체) 분석은 SIDRA를 이용하였다. 본 연구에 사용된 SIDRA(Signalized and Unsignalized Intersection Design and Research Aid)는 호주의 ARRB(Australian Road Research Board)에 의해 신호교차로, 현대식 회전교차로, 비신호교차로 등과 같은 여러 유형의 교차로 운행형태 분석을 위해 개발되었으며, 기하구조 및 운전자의 행태를 고려한 지체, 대기행렬, 배출가스 등 다양한 효과척도(MOE)를 제시해주고 있다. 특히 미국 HCM 2010의 수락간격모형(gap-acceptance model)과 영국, 독일 등에서 사용하는 선형회귀모형(linear regression model)이 모두 내장되어 있기 때문에 현대식 회전교차로의 시행 효과 분석에 있어서 SIDRA는 다른 어떠한 프로그램보다 많은 장점을 가지고 있다.

접근로별 진입교통량과 회전교통량(좌·직·우)과의 관계를 포괄적으로 대변할 수 있는 포화도(Degree of Saturation)를 분석척도로 산출하여 총 64개의 Signal Metering 운영조합에 대한 분석을 수행하였다. 분석결과에 대한 통계적 유의성은 쌍체비교(Paired Mean t-test)를 통하여 검증하였다. 1차로형 4지 회전교차로를 대상으로 Signal Metering 운영에 따른 효과의 비교·평가는 다음과 같이 수행하였다.

첫째, 회전교차로의 운영관련 국·내외 연구동향에 대한 이론적 고찰을 수행하고 시사점 및 연구방향을 도출한다.

둘째, 회전교차로의 접근로별 진입교통량 변화(포화도 변화)를 고려한 Signal Metering 운영방법 및 평가를 위한 분석시나리오를 설정하고 SIDRA를 활용하여 효과를 분석한다.

셋째, Signal Metering 미시행(Do-Not) 및 시행(Do)에 따른 지체감소효과의 차이에 대한 통계적 유의성은 대안별 교통량변화 시나리오에 대한 통계적 검증이 가능한 쌍체비교(Paired Mean t-test)를 통하여 가설검증(hypothesis test)을 수행한다.

넷째, 효과분석된 최종 결과를 활용하여 접근로별 교통량 변화에 따른 Signal Metering 운영알고리즘(operation algorithm)을 구축하고 실시간 운영방안을 제시한다.

## 2. 선행연구의 고찰

국내 회전교차로관련 연구는 주로 회전교차로 설치에 따른 효과분석, 용량분석, 서비스수준분석 등이 대다수로 설치 이후 교통상황의 변화를 고려한 운영 및 관리에 대한 연구는 부족한 편이다.

박병호 등(2003)은 우리나라의 교차로 계획에서 진입교통량이 많아지면 단순히 신호등을 설치하는 관행을 벗어나 현대식 회전교차로를 적정 장소와 시기에 도입하는 노력이 요구된다고 제시하였다. 1차선의 경우 시간당 총 진입교통량이 2,000pcu 미만일 때, 2차선의 경우 시간당 총 진입교통량이 3,200pcu 미만일 때 신호교차로보다 평균 지체가 낮아 회전교차로가 효과적인 것으로 분석되었다.

김응철 등(2009)은 VISSIM을 이용하여 회전교차로를 대상으로 시뮬레이션 분석을 통하여 서비스 수준의 기준을 정립하였다. 지방지역 1차로 회전교차로의 경우 시간당 진입교통량이 1,700pcu 이상일 경우부터 지체가 급격히 증가하며 지방지역 2차로 회전교차로의 경우 시간당 진입교통량이 2,900pcu 이상일 경우부터 지체가 급격히 증가하는 것으로 분석되었다.

Akcelik(2004, 2008, 2011)은 진입교통량이 불균등해짐에 따라 회전교차로의 용량이 감소되며 중앙섬 직경, 회전차로 폭 등이 용량에 영향을 미친다는 결과를 제시하였다. 특히, 접근로의 진입교통량이 적음에도 불구하고 누적 회전교통량이 많아져 진입의 어려움 발생으로 인해 회전교차로의 소통이 원활하지 못할 경우 인위적으로 회전교통류(circulating flow)에 간격을 주기 위한 방안으로 Signal Metering 도입의 필요성을 제시하였다.

김태영 등(2012)은 국내 20개 회전교차로 통행에 대한 동영상 프레임 분석을 통해 임계간격을 측정하였다. 산출된 회전교차로의 임계간격은 2.58초로 분석되었으며, 도시지역은 2.74초, 지방지역은 2.42초로 분석되었다. 이는 국내 회전교차로의 임계간격이 국외 회전교차로의 임계간격보다 약 1.5~2.5초 더 적은 것으로 분석되었다.

안우영(2012)은 진입교통량이 가장 많은 접근로와 인접한 상류부의 접근로를 한 쌍(pair)으로 묶어서 Signal Metering을 운영하는 것이 가장 효과적인 것으로 제시하였다. 총 진입교통량이 1,800~2,000pcu/시 이고 주 접근로의 진입교통량비가 60% 이상일 때 지체는 30% 감소하였으나 진입교통량비가 그 이하인 경우 그리고 각 접근로별 진입교통량 및 회전교통량비(circulating

flow proportion)가 균등할 경우에는 효과가 없는 것으로 분석되었다. 본 연구에서는 단순히 접근로별 진입교통량만을 고려한 분석을 수행하였을 뿐 전체 교차로의 운영효율성을 극대화하기 위해 회전교통류(circulating flow)와 진입교통류(entering flow) 간의 관계를 동시에 고려한 포괄적인 분석은 수행하지 않았다.

## 3. Signal Metering의 개념 및 이론

### 3.1. 기본개념

간격수락모형(Gap Acceptance Model)에 기초한 Signal Metering은 진입교통류의 불균형 발생으로 인해 회전교차로의 전체적인 소통이 원활하지 못할 경우 상류부(upstream) 접근로의 진입교통류를 통제하여 회전교통류(circulating flow)의 차량간격을 조정하는 개념이다. 즉, 회전차로(circulating lane)의 시간간격이 접근로에서 진입하는데 필요한 시간보다 크거나 같으면 진입이 가능하다.

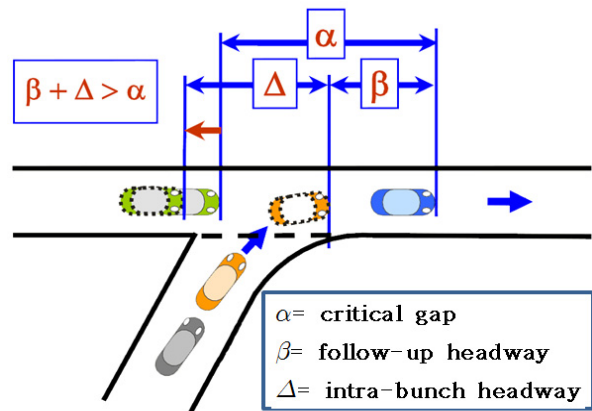


Fig. 1 Critical Gap, Follow-Up Headway and Intra-Bunch Headway

Fig. 1과 같이 임계간격(critical gap)이란 회전교차로 내에서 회전하고 있는 차량의 최소간격으로 진입차량이 회전교차로로 안전하게 진입하기 위해 허락되는 회전차로의 차량간 차두시간의 최소값으로 정의된다. 추종간격(follow up headway)은 진입차로에서 대기하고 있는 차량이 회전교차로 내로 진입하기 위한 시간 간격으로 진입차량의 대기행렬확산시간 또는 회전차량과 진입차량 간의 시간간격을 의미한다. 이때 허락된 임계간격 범위에서 차량이 회전교차로에 진입 후 뒤따르는 후속차량과의 최소간격을 차량군 최소간격(intra-bunch headway)으로 정의된다.

HCM(2000)에서 제시된 임계간격과 추종간격의 상

한 값과 하한 값은 각각 4.1~4.6초 그리고 2.6~3.1초이며, HCM(2010)에서 제시된 임계간격과 추종간격의 상한 값과 하한 값은 각각 4.4~4.8초 그리고 2.2~2.5초이다. 도로용량편람(2013)에서 제시하는 임계간격은 3.21초, 추종간격은 3.15초 그리고 최소 차두간격은 2.05초이다.

### 3.2. 운영 이론

#### 3.2.1. Signal Metering 구축

Fig. 2와 같이 회전교차로에 Signal Metering을 구축하여 운영하기 위해서는 관리접근로(Controlling Approach)와 미터링접근로(Metered Approach)를 선정해야 한다. 관리접근로와 미터링접근로의 선정은 가변적으로 교통량(진입교통량 및 회전교통량)에 따라서 변하게 된다. 일반적으로 관리접근로는 교통량이 상대적으로 많고 혼잡하여 회전교차로 내로 진입이 어려운 접근로를 선정하며, 해당 진입로의 정지선에서 50~100m 이상 떨어진 곳에 대기행렬검지기(queue detector)를 설치한다. 미터링접근로는 관리접근로상류부에 인접한 접근로를 선정하며, 신호등 운영을 통해 차량의 흐름을 통제하게 된다.

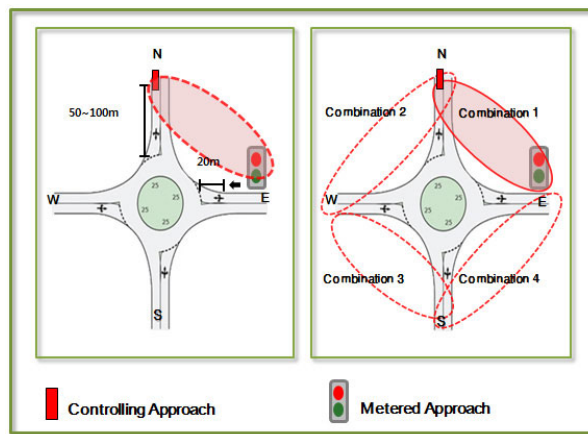


Fig. 2 Signal Metering Installations and Operating Combinations

#### 3.2.2. Signal Metering 운영방법

Fig. 3과 같이 접근로별 진입교통류의 비율이 일정하지 않고 한쪽에 치우치는 불균형 상태가 발생할 경우 회전교차로 전체의 운영효율성을 제고하기 위해 Signal Metering을 운영하게 되는 것이다. 일반적인 상황에서 미터링접근로는 녹색신호로(또는 꺼짐 상태) 운영되다가 관리접근로에 설치된 검지기에 차량이 특정시간 이상 점유 시(3초) 지체가 발생한 것으로 간주하고 진입통

제를 위해 미터링접근로의 신호등이 적색신호로 바뀌게 된다. 이후 통제접근로의 차량간격이 2.0~2.5초가 유지되면 미터링접근로의 신호등은 다시 녹색(또는 꺼짐 상태)으로 바뀌게 된다. 즉, 혼잡접근로의 차량 진입이 어려움이 발생할 때 인접접근로의 교통류 흐름에 일시적인 정지상태를 발생시켜 회전교통류의 임계간격을 증대시키고 최소 추종간격을 보장하여 회전교차로 내 원활한 진입을 가능하게 하는 것이다.

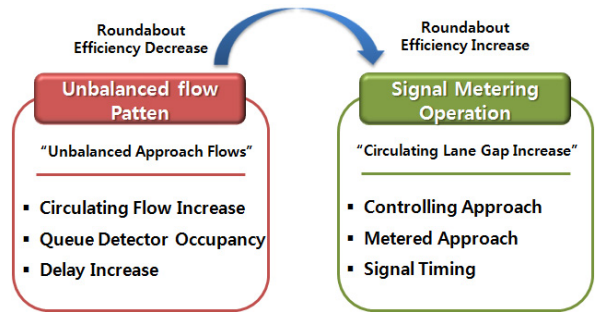


Fig. 3 Signal Metering Operation Concept

### 3.3. 용량 산출모형

회전교차로의 용량분석모형은 경험적 모형과 분석적 모형으로 나뉜다. 경험적 모형은 회귀모형과 같이 교차로의 기하구조 특성과 효과척도-용량과의 관계를 확률적으로 표현한 모형이고 분석적 모형은 운전자의 운전 특성과 효과척도-용량과의 관계를 간격수락이론에 근거하여 구현한 모형이다(도로용량편람, 2013). Akcelik(2004)은 두 모형간의 비교를 통해 경험적 모형의 경우 회전교통량이 적을 경우 타 모형에 비해 용량을 과소 추정하고 회전교통량이 클 경우 반대로 용량을 과다 추정하는 경향이 있는 것으로 분석하였다. 따라서 본 연구에서는 대표적인 분석적 모형인 간격수락모형을 이용하여 접근로별 용량을 산출하였다.

회전교차로는 신호교차로와 다르게 신호주기(cycle)를 알 수 없기 때문에 일반적으로 간격수락이론에 근거하여 용량(capacity)을 산출하게 된다. AUSTRROADS(1993)의 용량분석방법은 Troutbeck(1989)의 개념에 기초하고 있으며, 회전교차로의 기하구조, 회전교통량과 진입교통량간의 간격수락변수(gap acceptance parameters) 등이 중요한 파라미터로 작용된다. 이때 사용되는 파라미터 값으로는 임계간격과 추종간격을 기본 값으로 사용하게 된다.

간격수락모형에서는 회전교통량을 고려하여 진입가능시간(unblocked time period)과 진입불가능시간

(blocked time period)을 계산하게 된다. 진입가능시간은 회전교통량(circulating flow) 간에 충분한 시간간격이 유지됨에 따라서 진입로에서 차량이 회전교차로 내로 진입이 가능한 시간을 의미한다. 회전교차로의 진입로별 용량은 다음 Eq. (1)과 같이 계산된다.

$$Q_e = (3600/t_f)u_e \quad (1)$$

여기서,

- $Q_e$  : 접근로별 진입로 용량(pcu/시)
- $t_f$  : 접근로별 추종간격(초)
- $u_e$  : 접근로별 진입가능 시간비 (unblocked time ratio)

진입가능 시간비(unblocked time ratio)는 일반 신호교차로의 주기에 대한 유효녹색시간(effective green time)비와 같은 개념이다. 접근로별 진입가능 시간비는 다음 Eq. (2)와 같이 계산된다.

$$u_e = \max[u_{\min}, f_{adj}(1 - \Delta_c q_c + 0.5t_f \phi_c q_c) e^{-\lambda(t_c - \Delta_c)}] \quad (2)$$

$$u_{\min} = Q_m / s = t_f Q_m / 3600 \quad (3)$$

$$Q_m = \min(q_a, 60n_m) \quad (4)$$

$$\lambda = \phi_c q_c / (1 - \Delta_c q_c) \quad (5)$$

subject to  $q_c \leq 0.98 / \Delta_c$   
(if  $q_c > 0.98 / \Delta_c$ , set  $q_c = 0.98 / \Delta_c$ )

여기서,

- $u_e$  : 접근로별 진입가능 시간비
- $u_{\min}$  : 최소진입가능시간
- $f_{adj}$  : 회전교통량에 따른 진입로별 용량조정계수 (0.5~1.0)
- $Q_m$  : 최소용량(pcu/시)
- $q_a$  : 도착교통량(pcu/시)
- $n_m$  : 회전교차로 내부로 진입하는 1분 최소교통량(분)
- $s$  :  $3600/t_f =$  포화교통량(pcu/시)
- $t_f$  : 추종간격(초)
- $t_c$  : 임계간격(초)
- $\Delta_c$  : 회전교차로 내에서 차량군 최소차두간격(초)

(intra-bunch headway: 0.8~2.0초)

$\phi_c$  : 회전교차로 내에서 자유교통류(unbunch flow)의 비율(0.1~1.0)

$q_c$  : 회전교통량(pcu/초)

$\lambda$  : 도착분포계수( $\approx q_c$ )

회전교차로의 진입로별 용량은 Fig. 4와 같이 진입로 전방의 회전교통량에 따라 결정된다. 회전교통량이 0일 경우  $u_{\min}$ 은 1에 가까워져 접근로별 진입용량은 포화용량을 유지하나 점차 회전교통량이 증가하면서 용량은 감소하게 된다. 즉, 회전교통량이 증가함에 따라 진입가능 시간에 비례하여 진입로의 용량이 감소하게 되는 것이다.

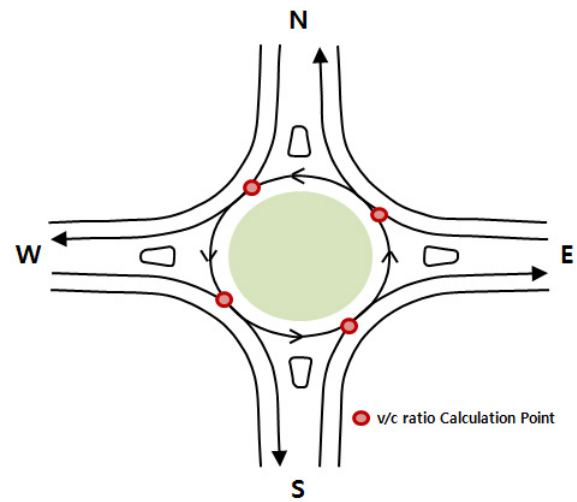


Fig. 4 Degree of Saturation(V/C ratio) Calculation Points

## 4. 분석 결과

### 4.1. 분석 시나리오 작성

본 연구에서는 회전교통량(좌·직·우)과 진입교통량의 관계를 포괄적으로 대변할 수 있는 포화도(V/C비)를 Signal Metering 조합을 위한 선정지표로 사용하였다. Fig. 5와 같이 4가지 경우의 접근로별 진입교통량 비율을 고려하여 각각 4개의 불균등한 교통상황을 설정하였다. 안우영(2012)이 제시한 바와 같이 인접한 접근

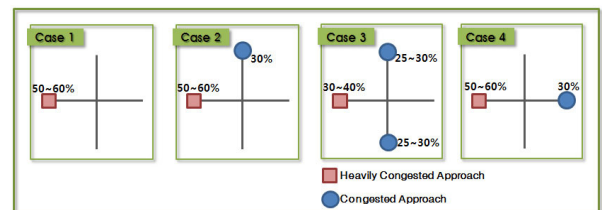


Fig. 5 Four Cases of Unbalanced Flow Conditions



로를 한 쌍(pair)으로 묶어서 Signal Metering 조합을 구성하였다. 따라서 Fig. 2와 같은 방법으로 총 64개의 Signal Metering 운영조합을 분석대안으로 선정하고 일반회전교차로 운영(Do-not case) 및 Signal Metering 운영(Do case)에 따른 지체를 비교하였다.

시나리오별 분석방법을 정리해 보면 Fig. 6과 같다.

첫째, 진입교통량이 방향별로 불균등한 경우를 대상으로 다양한 교통상황에 대한 분석 시나리오를 작성한다.

둘째, Signal Metering 미시행 시 회전교차로 전체의 지체를 분석하고 접근로별 포화도를 산출한다.

셋째, Signal Metering의 설치위치에 따른 운영효과를 분석하고 적정포화도합을 산출한다.

넷째, Paired-Mean t-test를 활용하여 시나리오별 운영효과에 대한 통계적 검증을 수행한다.

다섯째, 포화도 조합을 고려한 실시간 Signal Metering 운영알고리즘을 구축한다.

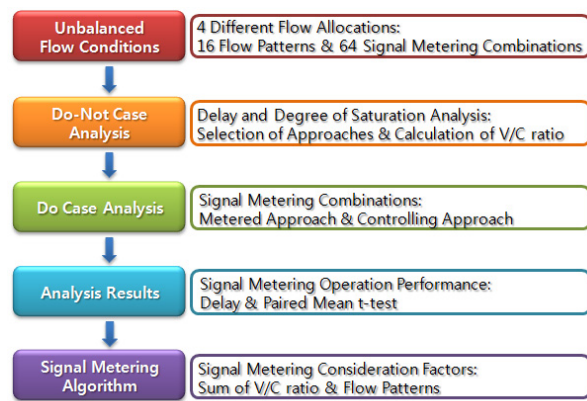


Fig. 6 Signal Metering Analysis Process

## 4.2. 분석 교차로 제원

본 연구에서는 1차로형 4지 회전교차로를 대상으로 총 진입교통량은 용량상태인 1,800pcu/시로 한다. 분석교차로의 제원은 회전교차로 설계지침(2010)의 기준을 준용하여 내접원 지름 30m, 중앙교통섬 지름 25m, 회전차로 폭 5m, 회전부 설계속도 20km/h 그리고 진입부 설계속도 60km/h로 설정하였다. Signal Metering을 위한 대기행렬 검지기는 정지선으로부터 50m에 설치하였다.

## 4.3. SIDRA 분석 결과

### 4.3.1. Case 1: 1개 진입로에 교통량 집중

Table 1은 1개 접근로의 진입교통량 비율이 50~60%일 때 Signal Metering 운영조합에 따른 분석 결과를

정리한 것이다.

조합 1(N-E)과 같이 두 접근로의 V/C비의 합이 0.39~0.63이고 미터링접근로의 진입교통량이 관리접근로의 진입교통량보다 작거나 같은 경우 Signal Metering 운영에 따른 효과가 있는 것으로 분석되었다. 조합 1의 경우 차량 당 평균지체가 1.3~6.4초로 2.4~14.3% 감소하였으며 나머지 조합의 경우 지체가 모두 증가하였다. 특히 V/C비의 합이 1.51이면서 미터링접근로의 진입교통량이 1,080pcu/시 그리고 관리접근로의 진입교통량이 234pcu/시인 대안 1-3의 S-W 조합의 경우 차량 당 평균지체가 9.1초에서 105.4초로 11배 이상 증가하였다.

Table 1. Signal Metering Analysis Results (Case 1)

Alternative	Approach Name	Do-Not Case				Do Case			
		Flow rate (veh/h)	Capacity (veh/h)	v/c ratio	Delay (sec/veh)	Metering Controlling	Combination Metered	v/c ratio sum	Delay (sec/veh)
1-1	N	252	1,147	0.22	101.9	N	E	0.50	99.5
	W	1,080	1,158	0.93		W	N	1.15	127.7
	S	234	350	0.67		S	W	1.60	433.2
	E	234	829	0.28		E	S	0.95	100.4
1-2	N	180	1,081	0.17	45.8	N	E	0.39	39.4
	W	1,260	1,076	1.17		W	N	1.34	85.9
	S	180	387	0.46		S	W	1.63	266.7
	E	180	818	0.22		E	S	0.68	48.3
1-3	N	252	1,126	0.22	9.1	N	E	0.63	7.8
	W	1,080	1,236	0.87		W	N	1.09	17.7
	S	234	366	0.64		S	W	1.51	105.4
	E	234	567	0.41		E	S	1.05	13.1
1-4	N	180	1,181	0.15	34.8	N	E	0.49	30.6
	W	1,260	1,277	0.98		W	N	1.13	39.4
	S	180	295	0.61		S	W	1.59	281.0
	E	180	532	0.34		E	S	0.95	36.7

### 4.3.2. Case 2: 인접한 2개 진입로에 교통량 집중

Table 2는 2개 접근로의 진입교통량 비율이 50~60% 그리고 30%일 때 Signal Metering 운영조합에 따른 분석 결과를 정리한 것이다.

조합 1(N-E) 및 조합 4(E-S)와 같이 두 접근로의 V/C비의 합이 0.29~0.70이고 미터링접근로의 진입교통량이 관리접근로의 진입교통량보다 작거나 같은 경우 Signal Metering 운영에 따른 효과가 있는 것으로 분석되었다. 조합 1의 경우 차량 당 평균지체가 2.4~17.9초로 8.7~78.2% 감소하였고 조합 4의 경우 차량 당 평균지체가 0.6~17.6초로 8.3~76.8% 감소하였다. 그 외 나머지 조합의 경우 지체가 모두 증가하였다. 특히 V/C비

의 합이 1.23이면서 미터링접근로의 진입교통량이 1,080pcu/시 그리고 관리접근로의 진입교통량이 90pcu/시인 대안 2-4의 S-W조합의 경우 차량 당 평균지체가 22.9초에서 205.8초로 8배 이상 증가하였다.

Table 2. Signal Metering Analysis Results (Case 2)

Alternative	Approach Name	Do-Not Case				Do Case			
		Flow rate (veh/h)	Capacity (veh/h)	v/c ratio	Delay (sec/veh)	Metering Combination		v/c ratio sum	Delay (sec/veh)
						Controlling	Metered		
2-1	N	540	1,150	0.47	65.0	N	E	0.66	52.4
	W	900	850	1.06		W	N	1.53	142.8
	S	180	482	0.37		S	W	1.43	282.0
	E	180	930	0.19		E	S	0.56	59.6
2-2	N	540	1,264	0.43	158.6	N	E	0.52	144.8
	W	1,080	892	1.21		W	N	1.64	256.4
	S	90	452	0.20		S	W	1.41	528.9
	E	90	982	0.09		E	S	0.29	147.6
2-3	N	540	1,186	0.45	7.2	N	E	0.70	4.8
	W	900	1,111	0.81		W	N	1.26	16.6
	S	180	467	0.38		S	W	1.19	49.6
	E	180	707	0.25		E	S	0.63	6.6
2-4	N	540	1,281	0.42	22.9	N	E	0.56	5.0
	W	1,080	1,129	0.96		W	N	1.38	83.0
	S	90	337	0.27		S	W	1.23	205.8
	E	90	661	0.14		E	S	0.41	5.3

#### 4.3.3. Case 3: 인접한 3개 접근로에 교통량 집중

Table 3은 인접한 3개 접근로의 진입교통량 비율이 30~40%, 25~30% 그리고 25~30%일 때 Signal

Table 3. Signal Metering Analysis Results (Case 3)

Alternative	Approach Name	Do-Not Case				Do Case			
		Flow rate (veh/h)	Capacity (veh/h)	v/c ratio	Delay (sec/veh)	Metering Combination		v/c ratio sum	Delay (sec/veh)
						Controlling	Metered		
3-1	N	540	1,025	0.53	9.5	N	E	0.79	6.2
	W	540	833	0.65		W	N	1.18	14.6
	S	540	716	0.75		S	W	1.40	17.8
	E	180	701	0.26		E	S	1.01	28.1
3-2	N	450	1,057	0.43	11.9	N	E	0.67	6.2
	W	720	917	0.78		W	N	1.21	17.6
	S	450	576	0.78		S	W	1.56	39.2
	E	180	734	0.24		E	S	1.02	32.2
3-3	N	540	1,063	0.51	6.5	N	E	0.80	5.6
	W	540	1,101	0.49		W	N	1.00	12.1
	S	540	796	0.68		S	W	1.17	9.9
	E	180	624	0.29		E	S	0.97	15.4
3-4	N	450	1,093	0.41	7.1	N	E	0.70	5.9
	W	720	1,147	0.63		W	N	1.04	9.6
	S	450	662	0.68		S	W	1.31	15.6
	E	180	621	0.29		E	S	0.97	15.6

Metering 운영조합에 따른 분석 결과를 정리한 것이다.

조합 1(N-E)과 같이 두 접근로의 V/C비의 합이 0.67~0.80이고 미터링접근로의 진입교통량이 관리접근로의 진입교통량보다 작거나 같은 경우 Signal Metering 운영에 따른 효과가 있는 것으로 분석되었다. 조합 1의 경우 차량 당 평균지체가 0.9~5.7초로 13.8~47.9% 감소하였으며 나머지 조합의 경우 지체가 모두 증가하였다. 특히 V/C비의 합이 1.56이면서 미터링접근로의 진입교통량이 720pcu/시 그리고 관리접근로의 진입교통량이 450pcu/시인 대안 3-2의 S-W조합의 경우 차량 당 평균지체가 11.9초에서 39.2초로 3배 이상 증가하였다.

#### 4.3.4. Case 4: 분리된 2개 접근로에 교통량 집중

Table 4는 2개 접근로의 진입교통량 비율이 50~60% 그리고 30%일 때 Signal Metering 운영조합에 따른 분석 결과를 정리한 것이다.

Table 4. Signal Metering Analysis Results (Case 4)

Alternative	Approach Name	Do-Not Case				Do Case			
		Flow rate (veh/h)	Capacity (veh/h)	v/c ratio	Delay (sec/veh)	Metering Combination		v/c ratio sum	Delay (sec/veh)
						Controlling	Metered		
4-1	N	180	816	0.22	11.0	N	E	0.82	15.8
	W	900	1,033	0.87		W	N	1.09	14.5
	S	180	488	0.37		S	W	1.24	90.4
	E	540	898	0.60		E	S	0.97	6.4
4-2	N	90	840	0.11	32.9	N	E	0.70	34.8
	W	1,080	1,102	0.98		W	N	1.09	29.2
	S	90	401	0.22		S	W	1.20	233.3
	E	540	912	0.59		E	S	0.81	19.3
4-3	N	180	920	0.20	7.6	N	E	0.93	20.5
	W	900	1,230	0.73		W	N	0.93	6.0
	S	180	567	0.32		S	W	1.05	21.3
	E	540	738	0.73		E	S	1.05	6.3
4-4	N	90	941	0.10	9.2	N	E	0.90	33.7
	W	1,080	1,266	0.85		W	N	0.95	6.6
	S	90	404	0.22		S	W	1.07	80.7
	E	540	672	0.80		E	S	1.02	5.6

조합 2(W-N) 및 조합 4(E-S)와 같이 두 접근로의 V/C비의 합이 0.81~1.09 이고 미터링접근로의 진입교통량이 관리접근로의 진입교통량보다 작거나 같은 경우 Signal Metering 운영에 따른 효과가 있는 것으로 분석되었다. 조합 2의 경우 차량 당 평균지체가 1.6~3.7초로 11.2~28.3% 감소하였고 조합 4의 경우 차량 당 평균지체가 1.3~13.7초로 17.1~41.8% 감소하였다. 그 외 나머지 조합의 경우 지체가 모두 증가하였다. 특히 두 접근로

의 V/C비 합이 1.07 이면서 미터링접근로의 진입교통량이 540pcu/시 그리고 관리접근로의 진입교통량이 90pcu/시인 대안 4-4의 S-W조합의 경우 차량 당 평균 지체가 9.2초에서 80.7초로 8배 이상 증가하였다.

#### 4.3.5. 대안별 분석 결과 종합

Table 5는 총 64개 Signal Metering 분석대안 중 개선효과가 있는 23개 운영조합에 대한 결과를 정리한 것이다.

Table 5. Signal Metering Analysis Results for the Minimum Delay Combinations

Case	Do-not	Do Signal Metering				
	Delay(A) (sec/veh)	Combinations	v/c ratio sum	Delay(B) (sec/veh)	Delay(A-B) (sec/veh)	Delay(1-(B/A)) (%)
Case 1	101.9	N+E	0.50	99.5	2.4	<b>2.4</b>
	45.8	N+E	<b>0.39</b>	39.4	<b>6.4</b>	14.0
	9.1	N+E	<b>0.63</b>	7.8	<b>1.3</b>	<b>14.3</b>
	34.8	N+E	0.49	30.6	4.2	12.3
Case 2	65.0	N+E	0.66	52.4	12.6	19.4
	65.0	E+S	0.56	59.6	5.4	8.3
	158.6	N+E	0.52	144.8	13.8	8.7
	158.6	E+S	<b>0.29</b>	147.6	11.0	<b>6.9</b>
	7.2	N+E	<b>0.70</b>	4.8	2.4	33.3
	7.2	E+S	0.63	6.6	<b>0.6</b>	8.3
	22.9	N+E	0.56	5.0	<b>17.9</b>	<b>78.2</b>
	22.9	E+S	0.41	5.3	17.6	76.9
Case 3	9.5	N+E	0.79	6.2	3.3	34.8
	11.9	N+E	<b>0.67</b>	6.2	<b>5.7</b>	<b>47.9</b>
	6.5	N+E	<b>0.80</b>	5.6	<b>0.9</b>	<b>13.9</b>
	7.1	N+E	0.70	5.9	1.2	16.9
Case 4	11.0	E+S	0.97	6.4	4.6	<b>41.8</b>
	32.9	W+N	<b>1.09</b>	29.2	3.7	<b>11.2</b>
	32.9	E+S	<b>0.81</b>	19.3	<b>13.6</b>	41.3
	7.6	W+N	0.93	6.0	1.6	21.1
	7.6	E+S	1.05	6.3	<b>1.3</b>	17.1
	9.2	W+N	0.95	6.6	2.6	28.3
Average	36.7	-	0.70	30.7	<b>5.9</b>	25.9

Case 1의 경우 V/C비의 합이 0.39~0.63일 때 차량 당 평균지체는 1.3~6.4초로 감소하였다. 특히 V/C비의 합이 0.39일 때 지체는 45.8초에서 39.6초로 14%(6.4초) 감소하였다. Case 2의 경우 V/C비의 합이 0.29~0.70일 때 차량 당 평균지체는 0.6~17.9초로 감소하였다. 특히 V/C비의 합이 0.56 일 때 지체는 22.9초에서 5.0초로 78.2%(17.9초) 감소하였다. Case 3의 경우 V/C비의 합이 0.67~0.80일 때 차량 당 평균지체는 0.9~5.7초로 감소하였다. 특히 V/C비의 합이 0.6일

때 지체는 11.9초에서 6.2초로 47.9%(5.7초) 감소하였다. Case 4의 경우 V/C비의 합이 0.81~1.09일 때 차량 당 평균지체는 1.3~13.6초로 감소하였다. 특히 V/C비의 합이 0.81일 때 지체는 32.9초에서 19.3초로 41.3%(13.6초) 감소하였다.

Table 5와 같이 23개 운영조합에 대한 지체감소효과 평균은 차량 당 약 6초로 분석되었다. Fig. 7과 같이 V/C비의 합이 0.29~0.81일 때 차량 당 지체는 평균적으로 약 7초 그리고 최대 17.9초 까지 감소되는 것으로 분석되었다. 그러나 V/C비의 합이 점차 증가하면서 0.93~1.09 사이에서는 차량 당 지체는 평균적으로 약 3초 감소되는 것으로 분석되었다.

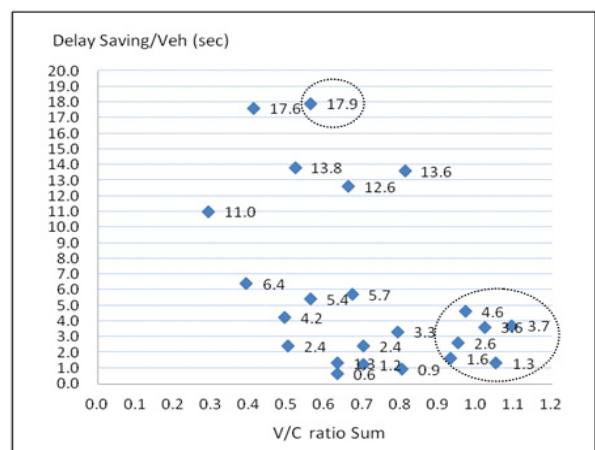


Fig. 7 Signal Metering Analysis Results (V/C ratio Sum vs. Delay Saving)

1차로형 4지 회전교차로의 Signal Metering 운영알고리즘(operation algorithm)을 정리해보면 다음 Fig.

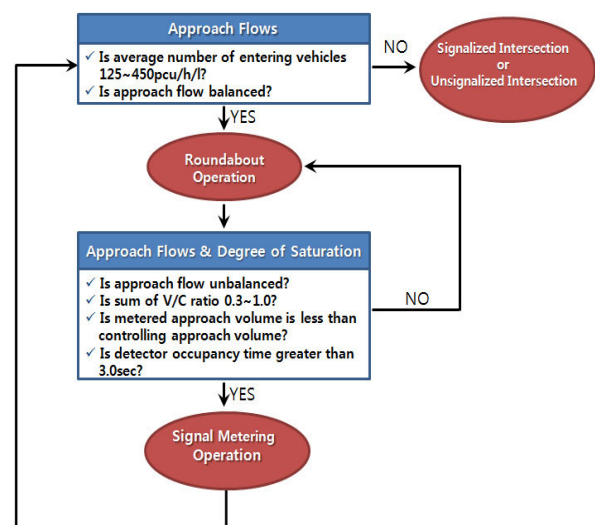


Fig. 8 Signal Metering Operation Algorithm for a Four Way Approach with One Lane Roundabout



8과 같다. 접근로별 진입교통량이 균등하고 차선 당 450pcu/시 이하일 때 일반회전교차로로 운영한다. 그러나 진입교통량이 불균등해지면서 혼잡이 발생하고 특정 진입로에 대기행렬이 발생할 경우 Signal Metering 운영으로 전환한다. 이때 미터링 접근로(Metered Approach)의 교통량이 관리접근로(Controlling Approach)의 교통량이 보다 작고 두 인접한 접근로의 V/C비의 합이 0.3~1.0인 진입로를 선택하여 운영한다. 혼잡이 완화되면 다시 일반회전교차로로 전환하여 운영한다.

#### 4.4. Paired Mean t-test 분석 결과

회전교차로 Signal Metering 시행 전 지체와 시행 후 지체 차이에 대한 통계적 유의성 검증을 수행하였다. Table 5의 분석결과에 대한 통계적 유의성은 95% 신뢰 구간에서 자유도(Degree of Freedom) 22의 단측검증 기각치  $t_{0.05} = 1.717$ 을 적용하여 Eq. (6)과 같이 쌍체비교(Paired Mean t-test)를 수행하여 검증하였다. 쌍체비교는 대안별 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.

$$t = \frac{\bar{D}}{S_p / \sqrt{n}} \quad (6)$$

여기서,  $\bar{D} : \mu_1 - \mu_2$

$S_p : \text{Pooled Standard Deviation}$

$n : \text{샘플 수}$

분석 결과 Signal Metering 미시행 시 차량 당 평균지체  $\mu_1 = 36.7$ 초 그리고 시행 시 차량 당 평균지체  $\mu_2 = 30.7$ 초로 분석되었다. 통계량  $t = 5.215$ 로 귀무가설( $\mu_1 - \mu_2 \leq 0$ )을 기각(reject)하고 대립가설( $\mu_1 - \mu_2 > 0$ )을 채택하여 두 평균값 간의 차이가 통계적으로 유의한 것으로 분석되었다.

### 5. 결론 및 향후 연구과제

최근 교통운영체계 선진화 방안에 따라 회전교차로가 전국적으로 확대되어 설치·운영되고 있다. 접근별 진입

교통량이 균등하고 차선 당 450대/시 이하인 경우 회전교차로가 신호교차로에 비해 운영효율성이 증대된다. 그러나 교통량이 증가하면서 접근로별 교통류가 불균등해질 경우 혼잡접근로에서 회전교차로 내부로의 진입이 어려워져 회전교차로의 효율성이 떨어지게 되면서 다시 신호교차로로 전환해야하는 문제점이 발생하게 된다.

본 연구에서는 1차로형 4지 회전교차로를 대상으로 회전교차로 설치이후 주변 토지이용의 변화로 교통량이 증가되고 접근로별 교통류가 불균등해질 경우 신호교차로 설치에 대해 재검토를 하기 전에 회전교차로 본래의 기능을 최대한 살리면서 효율적으로 운영할 수 있는 방안으로 회전교차로 Signal Metering 운영방법을 제시하고 효과분석은 SIDRA를 활용하였다. 회전교통량(좌·직·우)과 진입교통량과의 관계를 포괄적으로 대변할 수 있는 포화도(V/C비)를 Signal Metering 평가지표로 사용하여 미터링 접근로(Metered Approach)와 관리접근로(Controlling Approach)를 선정하였다.

본 연구의 결과 Signal Metering은 두 접근로의 포화도합이 0.3~1.0이고 미터링 접근로의 교통량이 관리 접근로의 교통량이 보다 작을 경우 운영효과가 있는 것으로 분석되었다. V/C비의 합이 0.29~0.81일 때 차량 당 지체는 평균적으로 약 7초 감소하였다. 특히 V/C비의 합이 0.56일 때 지체는 22.9초에서 5.0초로 78.2%(17.9초) 그리고 V/C비의 합이 0.81일 때 지체는 32.9초에서 19.3초로 41.3%(13.6초) 감소하였다. 그러나 V/C비의 합이 점차 증가하면서 0.93~1.09 사이에서 차량 당 지체는 평균적으로 약 3초 감소되는 것으로 분석되었다. 두 접근로의 V/C비의 합이 1.0보다 작더라도 미터링 접근로의 교통량이 관리 접근로의 교통량보다 크면 Signal Metering 효과가 없는 것으로 분석되었다. 특히, 두 접근로의 V/C비의 합이 1.0 이상이고 미터링 접근로의 교통량이 관리 접근로의 교통량보다 클 경우 차량 당 평균지체는 3~11배까지 증가하였다.

결론적으로 회전교차로 Signal Metering 운영에 따른 효과를 얻기 위해서는 우선적으로 미터링 접근로와 관리 접근로의 선정이 가장 중요하다. 따라서 본 연구에서는 단순히 접근교통량만 고려하기 보다는 회전교통량과 진입교통량과의 관계를 포괄적으로 대별할 수 있는 포화도를 사용하였다. 미터링 접근로는 관리 접근로의 상류부(upstream)에 인접한 접근로를 선정하여 한 쌍으로 묶어 구축한다. 이때 미터링 접근로의 진입교통량이 관리 접근로의 진입교통량보다 작아야 하고 두 접근로의 진입교통량과 회전교통량을 고려한 포화도(V/C비)의

합이 1.0보다 작아야 한다.

향후 연구 과제를 살펴보면 다음과 같다.

1. 본 연구는 1차로형 4지 회전교차로를 대상으로 Signal Metering 도입에 대한 효과분석을 수행하였다. 향후 3지 1, 2, 3차로 및 4지 2, 3차로 등 보행량을 고려한 다양한 유형의 회전교차로에 대한 분석이 필요 할 것이다.
2. 특히 본 연구에서는 인접한 두 접근로를 한 쌍으로 묶어서 Signal Metering을 구축하였으나 접근로별 다양한 교통상황을 고려해 볼 때 서로 떨어져있는 접근로간의 효과도 분석해볼 필요가 있다고 판단된다.
3. 본 연구에서 제시한 운영알고리즘을 실시간 제어상황과 연계(interface)하여 효과를 검증하기 위해서는 미시적 시뮬레이션 모형인 VISSIM 또는 PARAMICS 등과 API(Application of Programming Interface) 구축을 통해 그 효과의 재차 검증이 필요 하다고 판단된다.

## References

Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Korea, 2010. *Roundabouts Design Manual*(2010). (국토해양부, 2010. 회전교차로 설계지침(2010)).

Akcelik, R., 2004. "Roundabouts with unbalanced flow patterns", ITE Annual Meeting, Florida, USA.

Akcelik, R., 2004, "A Roundabout Case Study Comparing Capacity Estimates from Alternative Analytical Models", 2nd Urban Street Symposium, Anaheim, California, USA.

Akcelik, R., 2011, "Roundabout Metering Signals: Capacity, Performance and Timing", 6th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service, TRB, Stockholm, Sweden.

SIDRA 5.0 *Intersection User Guide*, 2010.

Transportation Research Board, USA, 2000. *Highway Capacity Manual 2000*.

Transportation Research Board, USA, 2010. *Highway Capacity Manual*(2010). "Volume 4: Applications Guide",

Ministry of Land, Transport and Maritime, Korea, 2013. *Highway Capacity Manual*(2013) (국토해양부, 2013. 도로용량편람(2013)).

Park, B., Song, D.(2003), "Modern Roundabout Feasibility Study", Chungbuk University. (박병호 · 송대섭, 2003. "교차로계획에서 현대식 회전교차로(Modern Roundabout)의 도입 타당성", 충북대학교 건설기술연구소 논문집 제22권.)

Kim, E., Ji, M.(2009), "A Study of Level of Service Criteria for Roundabouts", *Journal of Korea Society of Transportation*. Vol.27, No.1.

Akcelik, R., 2008, "An Investigation of the Performance of Roundabouts with Metering Signals", National Roundabout Conference, TRB, Kansas City, MO, USA.

Kim, T., Park, I., Park, B.(2012), "A Critical Gap Model for Roundabouts in Korea", *Journal of Korea Society of Transportation*. Vol.30, No.2.

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.

AUSTROADS(1993), "Roundabouts: Guide to Traffic Engineering Practice, Part 6", Association of Australian State and Transport Authorities, Sydney, Australia.

Troutbeck, R.J.(1989), "Evaluating the Performance of a Roundabout", Special Report SR45, ARRB Transportation Research Ltd, Vermont South, Australia.

(접수일 : 2013. 8. 14 / 심사일 : 2013. 8. 16 / 심사완료일 : 2013. 9. 23)