

# 교통량 불균형을 고려한 회전교차로와 신호교차로간 최적거리 산정에 관한 연구

안홍기\* · 김동선\*\* · 배기목\*\*\*

An, Hong Ki\*, Kim, Dong Sun\*\*, Bae, Gi Mok\*\*\*

## A Study of Optimal Distance between Signalized Intersections and Roundabouts Considering Unbalanced Traffic Conditions

### ABSTRACT

An important factor that causes delays at roundabouts is unbalanced traffic conditions. The majority of domestic studies have tended to focus on the proportion of entering traffic rather than conflicting traffic in order to explain unbalanced traffic conditions. Also, there is scant research on the proper distance between a signalized intersection and a roundabout. In this study, therefore, unbalanced traffic conditions and optimal distance between two intersections were analyzed using SIDRA software based on the Gajwa-ro roundabout in Icheon, where unbalanced traffic conditions occur during afternoon peak hours, and its position is 295 m from a signalized intersection. It was found that a state of unbalanced traffic conditions in the form of conflicting traffic caused delays at Gajwa-ro roundabout, and the queuing length on each approach was removed when there was 850 m of distance between two intersections.

**Key words** : Roundabout, Queuing length, SIDRA, Unbalanced traffic condition, Optimal distance

### 초 록

회전교차로 주변 지체 유발의 중요한 원인 중 하나는 교통량 불균형 상태라 할 수 있다. 그러나 국내연구에서는 교통량 불균형을 규명하는 연구에 있어 상충교통량보다 진입교통량 비율에 집중하는 경향이 있다. 또한 회전교차로 건설 시 지체와 관련한 인접 교차로와의 적정거리와 관련한 연구도 미흡하다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 실제 교통량 불균형이 발생하고 신호 교차로와 인접한 이천시 가좌로 회전교차로를 대상으로 교통량 불균형 및 적정거리 산정 연구를 SIDRA를 활용하여 분석하였다. 그 결과 가좌로 회전교차로는 상충교통량 측면에서 불균형 상태로 인해 회전교차로의 지체가 발생하였고 신호교차로와 거리가 850 m일 때부터 모든 접근로에서 대기행렬이 소멸하는 것으로 나타났다.

**검색어** : 회전교차로, 대기행렬, SIDRA, 교통량 불균형, 최적거리 산출

## 1. 서론

### 1.1 연구배경

2010년 국토교통부의 녹색교통 활성화 방안으로 도입이 시작된 국내 회전교차로는 짧은 역사와 더불어 교차로 내 불명확한 통행우선권으로 인해 회전교차로의 이점을 최대한 활용하지 못하고 있다(An et al., 2016; An and Kim, 2021). 그러나 신호교차로와 비교시 용량

\* 정희원 · Huaiyin Institute of Technology 교통공학부 교수 (Huaiyin Institute of Technology · hkan77@hyit.edu.cn)

\*\* 종신회원 · 교신저자 · 대진대학교 도시부동산공학과 교수 (Corresponding Author · Daejin University · kimdns@daejin.ac.kr)

\*\*\* 대진대학교 도시부동산공학과 교수 (Daejin University · oneway@daejin.ac.kr)

Received May 27, 2021/ revised June 7, 2021/ accepted June 20, 2021

증대, 안전성 증대 그리고 배기가스 저감의 효과로 인해 최근 중요성이 커지고 있으며 꾸준한 건설로 이어지고 있다(An et al., 2016).

위와 같이 다양한 장점을 가진 회전교차로이지만 다음과 같은 조건에서는 예측 가능한 혼잡이 발생한다. 첫째는 진입교통량이 회전교차로가 처리 가능한 수준을 넘는 경우이다. Ogden and Taylor(1996)에 따르면 회전교차로의 성능을 최대로 발휘 할 수 있는 교통량의 범위는 3,000대/일 ~ 20,000대/일 사이이다. 이보다 교통량이 많은 경우 신호교차로가 더 유리하다고 할 수 있다. 둘째는 회전교차로가 교통량 불균형 상태에 있을 경우이다. 교통량 불균형 상태에 놓인 회전교차로는 특정 접근로에 정체가 집중되는 현상이 발생한다. 이 경우 metering system을 적용하여 불균형 상태를 균형상태로 만들어 혼잡을 해소하는 방법이 다양하게 연구되고 있다. 마지막으로 신호교차로와 회전교차로가 근접할 경우 혼잡이 발생할 수 있다. 신호등에 의해 차량의 움직임이 통제되는 신호교차로와 달리 회전교차로는 운전자의 통행행태에 의해 운영이 된다. 따라서 신호교차로와 회전교차로간 사이의 간격이 너무 가깝다면 회전교차로를 통과한 차량이 신호교차로를 통과하지 못함으로 인해 정체가 발생할 수 있다.

최근 국내에서 회전교차로에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 그러나 주로 컴퓨터 software를 활용한 효과분석 및 신호교차로와 비교연구에 치중하고 있으며 앞서 설명한 혼잡해소에 대한 연구는 미비한 실정이다(An et al., 2015; Lee et al., 2013). 게다가 교통량 불균형을 설명함에 있어 상층교통량보다는 진입교통량을 중심의 연구가 집중되어 불균형 상태에 대한 보다 명확한 이해가 필요한 것으로 판단된다. 따라서 본 연구는 교통량 불균형에 대한

고찰을 시행하고 신호교차로와 회전교차로의 인접 시 적정거리 산정에 관한 연구를 수행하고자 한다. 분석에 필요한 교통량, 대기행렬길이, 신호시간 데이터는 경기도 이천시 가좌로 회전교차로를 대상으로 2020년 6월 9일 현장수집된 자료를 바탕으로 실시하였으며 교차로 분석에 널리 사용되는 SIDRA software를 이용하였다.

## 1.2 교통량 불균형 고찰

교통량 불균형은 회전교차로에서 차량의 지체를 발생시키는 주요 요인 중의 하나라고 할 수 있다(Ahn, 2012; An et al., 2015; An et al., 2016). 그러나 교통량 불균형 상태의 접근 방법에서 국내연구와 국외연구의 차이점이 존재한다.

국내연구에서는 교통량 불균형 상태를 진입교통량 관점에서 접근하고 있다(Ahn, 2012; An et al., 2015). Fig. 1에서 설명하듯이 (a)와 (b)의 1시간 진입교통량은 3,000대/시로 동일하다. 그러나 (a) 회전교차로는 각 접근로의 진입교통량이 750대/시로 균형적인데 반해 (b) 회전교차로는 2,100대/시의 진입교통량이 남측 접근로에 집중되어 있다. 따라서 (a) 교차로의 각 접근로는 전체 교통량 대비 25 %의 동일한 교통량 비율을 차지하지만 (b) 교차로에서는 남측 접근로가 70 %의 교통량을 차지하고 나머지 접근로는 10 %의 교통량 비율을 감당하게 된다. 이러한 불균형적인 진입교통량의 비율을 교통량 불균형이라 설명하고 있다.

이때 좌회전/직진/우회전 비율에 따라 발생하는 대기행렬 길이는 달라지며 회전교차로 전체의 교통량이 2,200대/시, 주 접근로의 교통량 비율이 70 %일 때 최대 1,580 m의 대기행렬이 생성되는 것으로 나타났다(Ahn, 2012).

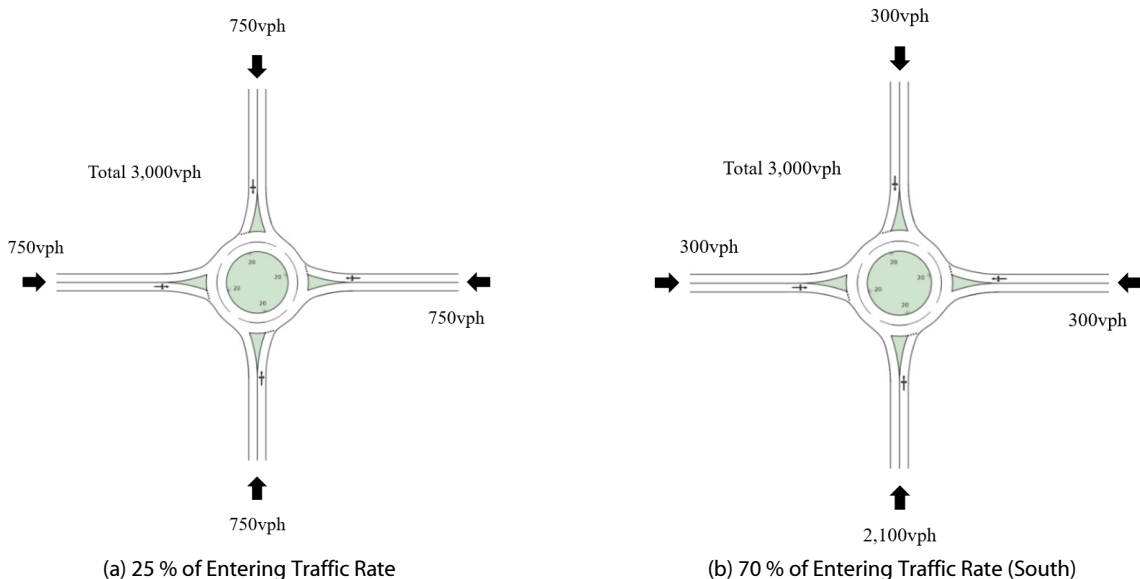


Fig. 1. Unbalanced Traffic Conditions by Entering Volume on Each Approach of the Roundabout

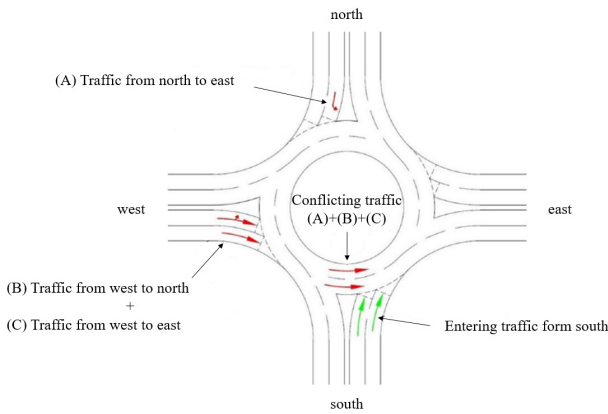


Fig. 2. Unbalanced Conditions by Conflicting Volume

반면, 국외 연구에서는 진입차량을 방해하는 상충교통량 비율을 바탕으로 불균형 상태를 설명하고 있다. 회전교차로에서 진입을 시도하는 차량은 이미 회전교차로에 진입해서 회전하고 있는 차량에게 우선권을 양보해야 한다. Fig. 2에서 설명하듯이 남측 접근로를 통해 진입하는 차량(녹색 화살표)은 북측 접근로를 통해 동측 접근로로 진출하는 우회전 차량(A) + 서측 접근로를 통해 북측 접근로로 진출하는 좌회전 차량(B) + 서측 접근로를 통해 동측 접근로로 진출하는 직진 차량(C)에 우선권을 양보해야 한다. 따라서 상충교통량(A+B+C)의 비율이 높을수록 남측 접근로의 지체도는 증가하게 된다.

실제 상충교통량에 의한 교통량 불균형 상태가 발생하는 호주 Old Belair Road의 회전교차로를 대상으로 한 연구에서 특정 접근로의 지체시간(337초/대)이 나머지 접근로보다 약 300초/대 더 소요되는 것으로 분석되었다(An et al., 2016).

## 2. 선행연구

회전교차로의 교통량 불균형에 대한 국내연구는 앞서 언급한 바와 같이 진입교통량에 집중하고 있다. Ahn(2012)은 회전교차로가 처리할 수 있는 용량상태에서 접근로별 교통량이 균등하면 지체가 발생하지 않지만 하나 혹은 두 개의 교차로에 교통량이 집중하게 되면 지체가 발생한다고 설명하였다. 또한 SIDRA software를 활용하여 주 접근로의 비율에 따른 혼잡을 분석하고 metering 시스템의 적용에 따른 효과분석을 실시하였다. 그 결과 주 접근로의 교통량 비율이 50% 이하일 경우는 metering 시스템의 효과가 미미한 것으로 나타났으며 총 진입교통량 1,800 - 2,000대/시, 주 진입로의 진입비율이 60~70%일 때 metering의 효과가 가장 큰 것으로 나타났다. Ahn and Lee(2013)은 교통량 불균형 상태를 균형상태로 전환시켜주는 metering 기법을 적용시키기 위해 신호등과 검지기의 위치를 산정에 SDIRA를 이용하였다.

진입로의 포화도를 고려하였으며 검지기가 위치하는 controlling approach보다 신호등이 설치되는 metering approach의 교통량이 적을 때 metering 기법의 효과가 우수한 것으로 나타났다. Park et al.(2015) 또한 교통량 불균형에 따른 metering 기법의 적용방안에 대한 연구를 실시하였다. 총 진입교통량 200 ~ 2,600대/시를 기준으로 좌회전/직진/우회전 비율에 따른 혼잡에 대한 연구를 VISSIM을 활용하여 진행하였다. An et al.(2015)는 SIDRA를 이용한 metering 회전교차로의 새로운 분석 방법을 제시하였다. 2개의 신호등으로 운영되는 회전교차로에 대해 4개의 교차로를 연결시키는 network 방법을 제안하였다. 실제 metering 기법으로 운영되고 있는 호주 Adelaide의 Old Blair road 회전교차로를 대상으로 분석을 실시하였으며 교통량 불균형 상태를 진입교통량의 비율로 정의하였다.

앞서 언급하였듯이 교통량 불균형으로 야기되는 지체를 해소하기 위해 교통량 균형상태로 전환 시켜주는 metering 기법에 대한 국내연구는 대부분 진입교통량을 기준으로 한 연구가 주를 이룬다. 그러나 교통량 불균형으로 인해 발생 되는 지체는 진입교통량뿐 아니라 O-D 패턴을 고려하는 점이 국외 연구의 핵심이라 할 수 있다.

Akçelik et al.(1996), Akçelik(2004; 2005)에 따르면 진입교통량 뿐 아니라 진출 교통량 즉 O-D의 패턴으로 교통량 불균형 현상을 설명하고 있다. 또한 회전교차로에서 진입차량은 다른 진입로를 통해 진입하는 차량들에 의해 영향을 받으므로 간격수락 값이 가장 중요하다고 정의하고 있다(Eq. (1)). 만약  $f_{od}$  값이 1에 가까우면 균형상태이지만 0.5에 가까우면 불균형 상태로 정의된다.

$$f_{od} = 1 - f_{qc}(p_{qd}p_{cd}) \quad (1)$$

여기서,  $f_{od}$ 는 O-D 파라미터,

$p_{qd}$ 는 주 접근로를 통해 진입한 차량 중 지체가 발생하는 회전차량의 비율,

$p_{cd}$ 는 전체 회전차량에서 주 접근로를 통해 진입한 차량의 비율, 그리고

$f_{qc}$ 는 O-D 파라미터 보정계수.

회전교차로 교통량 불균형에 대한 다른 연구는 Krogscheepers and Roebuck(2000)에 의해 수행되었다. Akçelik(2004; 2005)의 연구와 마찬가지로 회전교통량을 주요 파라미터로 정의하였으며 Eq. (2)와 같이 표현된다.

$$\rho_s = \frac{Q_{ws}}{Q_{es} + Q_{ns} + Q_{ws}} = \frac{Q_{ws}}{Q_{sc}} \quad (2)$$

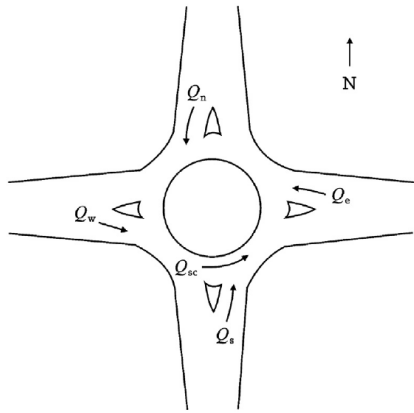


Fig. 3. Diagrammatic Explanation of Unbalanced Flows (from Krogscheepers and Roebuck, 2000)

여기서,  $\rho_s$  남측 접근로에 대한 불균형 비율,

- $Q_{ws}$  서측에서 진입하여 남측 진입로를 가로지르는 교통량;
- $Q_{es}$  동측에서 진입하여 남측 진입로를 가로지르는 교통량;
- $Q_{ns}$  북측에서 진입하여 북측 진입로를 가로지르는 교통량;
- 그리고
- $Q_{sc}$  남측 진입교통량을 가로막는 총 회전교통량.

Fig. 3과 같이 각 진입차로에서 진입하는 차량들은 우선권이 있는 회전 차량에 의해 진입이 방해받게 된다. 여기서  $\rho_s$ 는 “0”, “0.5”, 그리고 “1”의 세 가지 값으로 정의된다.  $\rho_s$ 의 값이 “0.5”에 가까우면 남측 진입로는 교통량 균형상태라 할 수 있으며 지체가 발생할 확률이 낮다. 반면  $\rho_s$ 의 값이 “0”이나 “1”에 가까우면 남측 진입로는 교통량 불균형 상태에 놓여있다고 할 수 있으며 지체가 발생할 가능성이 높다. 더 자세히 살펴보면  $\rho_s$ 의 값이 “0”에 가까우면 남측 진입로는 두 번째 상류부 진입로를 통해 회전하는 차량들(Fig. 2에서 북측 진입로)에 의해 진입이 차단된다.  $\rho_s$ 의 값이 “1”에 가까우면 첫 번째 상류부 진입로를 통해 회전하는 차량들(Fig. 2에서 서측 진입로)에 의해 진입이 방해받게 된다.

### 3. 연구대상지

#### 3.1 연구대상지 특징

본 연구는 실제 교통량 불균형 현상이 발생하고 인접 교차로와 충분하지 않은 거리로 인해 지체가 발생하는 이천시 가좌로 회전교차로를 대상으로 하였다. Fig. 4와 같이 가좌로 회전교차로는 1차로로 구성된 3개의 접근로로 구성되어 있으며, 오후 침두시 SK 하이닉스를 기점으로 하는 퇴근 차량들이 서측 및 남측 진입로에 집중됨으로 인해 혼잡이 발생되고 있다.

회전교차로 북측으로 약 295 m 떨어진 곳에 신호교차로가 위치



Fig. 4. Map Showing Gajwa-ro Roundabout and Queuing Length



Fig. 5. Congestion on the Circulating Lane

하며 회전교차로 북측 진출로의 정체가 발생하고 있다. 거기에 더해 교통량 불균형 현상으로 인한 대기행렬이 회전교차로 남측 접근로를 따라 약 585 m 발생한다(Fig. 4 참조).

Fig. 5와 같이 회전교차로 서측을 통해 진입하는 차량들은 회전 차로내 이미 정체가 있는 차량들로 인해 진입이 어려우며 110 m의 지체가 발생되고 있다.

#### 3.2 신호 및 교통량 특징

신호교차로 및 회전교차로의 중차량 비율은 각각 22 %, 10 %로 나타났다. 신호교차로는 Table 1에서 설명하듯이 4현시로 운영이 되며 오후 5시 45분에서 6시 45분까지 침두시간 신호주기는 162초로 조사되었다(각 현시마다 3초의 황색신호 적용).

신호교차로의 1시간 교통량은 동측 및 서측의 교통량이 북측 교통량보다 상대적으로 많은 2,000대/시 이상이고 남측 진입로를

Table 1. Signal Phases and Duration at a Signalized Intersection





Intersection	Signal display time (seconds)			
	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4
A				
Total 162s	Green 110s (Yellow 3s)	Green 10s (Yellow 3s)	Green 15s (Yellow 3s)	Green 15s (Yellow 3s)

Table 2. Traffic Volume for a Signalized Intersection

Description	North			West		
	Left	Straight	Right	Left	Straight	Right
Volume	29 vph	15 vph	11 vph	29 vph	2,104 vph	325 vph
1 h Total	55 vph			2,458 vph		
Description	South			East		
	Left	Straight	Right	Left	Straight	Right
Volume	1,220 vph	15 vph	735 vph	77 vph	1,980 vph	38 vph
1 h Total	1,970 vph			2,095 vph		

Table 3. Traffic Volume for the Roundabout

Description	North		West		South	
	Left turn	Right turn	Left turn	Right turn	Left turn	Right turn
Volume	220 vph	460 vph	495 vph	60 vph	172 vph	579 vph
1 h Total	680 vph		555 vph		751 vph	

통과하는 교통량은 1,970대/시로 나타났다(Table 2 참조).

회전교차로 각 접근로의 첨두시간 교통량은 Table 3과 같다. 북측, 서측, 남측 접근로의 교통량은 각각 680대/시, 555대/시, 751대/시로 비슷한 비율의 차량이 각 접근로를 통과하는 것으로 나타났다.

#### 4. 분석방법 및 결과

본 연구는 SIDRA를 활용하여 교통량 불균형 현상을 규정하는 데 있어 차이점을 나타내는 국내 방법과 국외 방법을 비교하고자 한다. SIDRA는 해석적 모형으로 편리성 및 정확한 결과값 도출로 인해 교차로 분석에 있어 널리 사용되고 있으며 특히 회전교차로의 모형설계 및 분석에 장점이 있다(An et al., 2017).

진입교통량의 비율에 중점을 두는 국내 연구방법은 총 교통량에 따른 접근로별 교통량 비율을 산출하고 국외 방법은 접근로별 진입교통량과 진입을 가로막는 상충교통량의 비율을 산출하여 지체도를 측정하였다. 그다음 신호교차로와 회전교차로의 간격을 50 m씩 증가시켜 지체가 발생하지 않는 적정거리를 산출하고자 하였다.

1단계: 교통량 불균형 예측

2단계: SIDRA network 기능을 활용한 신호교차로와 회전교차로의 거리 변경에 따른 지체도 분석(Fig. 6 참조).

가좌로 회전교차로의 각 접근로의 교통량 비율은 Table 4와 같이 북측 접근로 34.2 %, 서측 접근로 27.9 %, 남측 접근로 37.8 %로 분석되었다. 가장 비율이 높은 남측과 가장 비율이 낮은 서측의 차이는 10 % 이하이며 기존 연구에서 언급한 특정 접근로의 진입 교통량 비율이 50 %를 넘지 않는 균형적 상태라 할 수 있다.

하지만 상충교통량을 기준(각 접근로별 상충교통량 ÷ 진입교통량)으로 교통량 불균형을 분석하면 북측 접근로는 25.3 %(172대/시 ÷ 680대/시), 서측 접근로는 32.4 %(380대/시 ÷ 555대/시) 그리고 남측 접근로는 65.9 %(495대/시 ÷ 751대/시)로 남측 접근로의 비율이 높음을 알 수 있다. 다시 설명하면, 독립 회전교차로일 경우 남측 접근로 520 m, 서측 접근로 68 m, 북측 접근로 40 m의 대기행렬이 발생함으로 남측 접근로를 통해 진입하는 차량이 상충교통량에 의해 진입에 어려움을 겪을 확률이 높다고 할 수 있다.

Table 5는 회전교차로와 신호교차로의 간격을 300 m에서 900 m까지 50 m씩 증가시킨 후 두 교차로의 대기행렬을 분석한 결과이

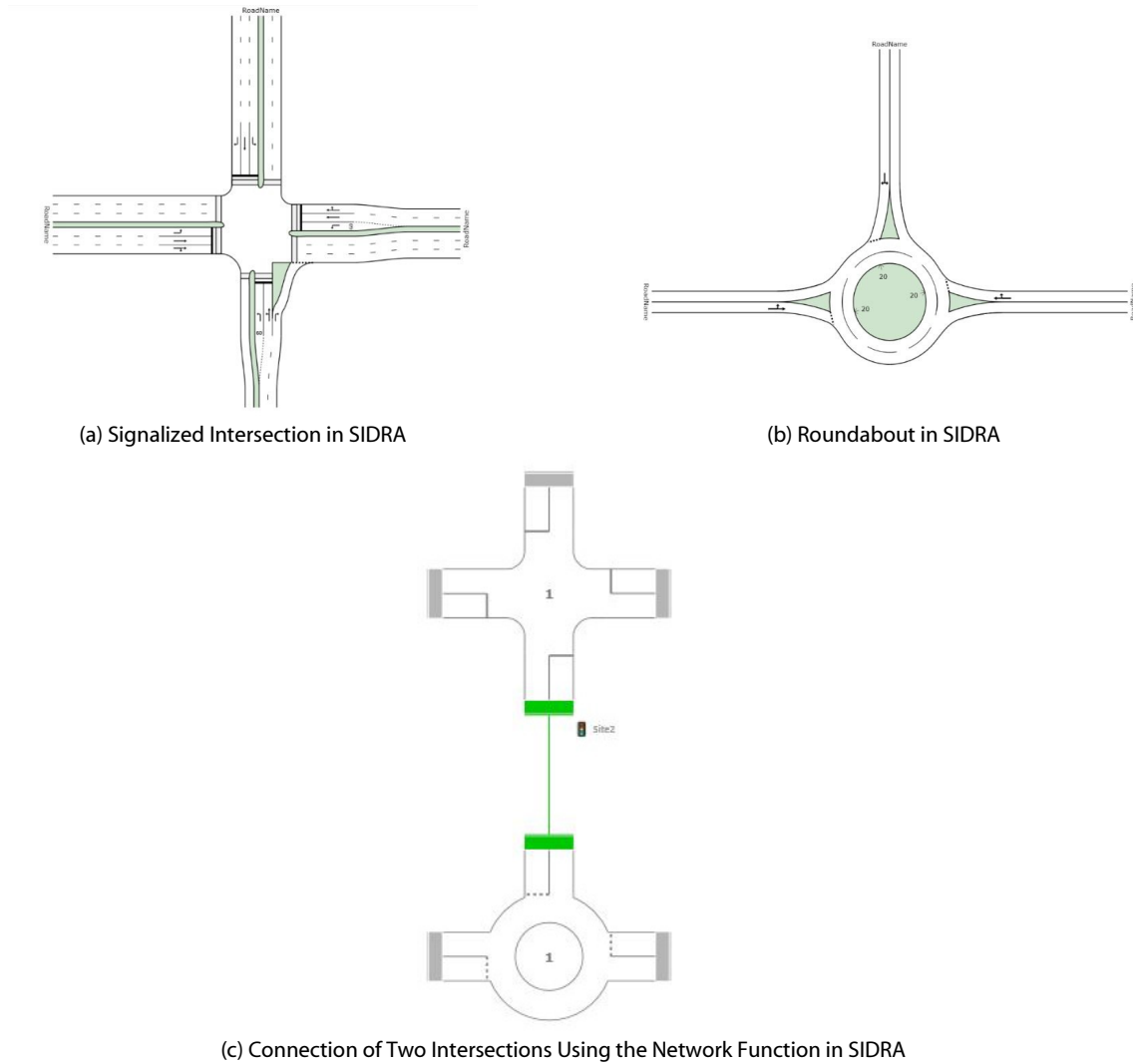


Fig. 6. Intersection Modeling Using SIDRA

Table 4. Traffic Flow Rate by Each Approach

Description	North		West		South	
	Left turn	Right turn	Left turn	Right turn	Left turn	Right turn
Percentage	34.2 %		27.9 %		37.8 %	
Percentage by direction	19.1 %	15.1 %	24.9 %	3.0 %	8.7 %	29.2 %

다. 교통량 불균형 상태와 더불어 신호교차로와 인접할 경우 대기행렬 길이는 증가하는 것으로 나타났다.

신호교차로의 경우 두 교차로의 거리 변화에 따른 대기행렬 길이는 남측 접근로를 제외하고 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 반면 남측 접근로의 경우 두 교차로의 거리가 증가할수록 대기행렬 길이 또한 증가하는 것으로 나타났다. 이는 가좌로 회전교차로의 남측 진입로를 통과하여 북측 진출로를 경유하는 교통량이 많기 때문으로 판단된다.

가좌로 회전교차로의 경우 두 교차로의 거리가 멀어질수록 전체 접근로의 대기행렬 길이 또한 감소하는 것으로 나타났다. 특히 600 m 거리에서 북측 접근로의 대기행렬이 사라졌으며 750 m의 거리일 때 서측 접근로를 통한 진입이 수월해지는 것으로 나타났다. 850 m의 거리일 때는 회전교차로의 모든 접근로에서 지체가 소멸되고 진입에 문제가 없는 것으로 분석 되었다. 따라서 가좌로 회전교차로는 지체를 고려할 때 신호교차로와 최소 850 m의 거리가 필요한 것으로 나타났다(Fig. 7 참조).



Table 5. Queuing Length with the Application of an Increment of 50 m Distance

Distance (m)	Queuing length (m)							Total length for roundabout
	Signalized intersection				Roundabout			
	North	East	South	West	North	South	West	
300	20	290	300	470	30	585	110	725
350	20	290	350	470	30	535	95	660
400	10	290	400	470	25	485	90	600
450	10	290	450	470	20	435	70	525
500	10	290	500	470	20	360	60	440
550	10	290	550	470	10	335	50	395
600	10	290	600	470	0	270	40	310
650	10	290	650	470	0	235	30	265
700	10	290	700	470	0	185	10	210
750	10	290	750	470	0	120	0	145
800	0	290	800	470	0	85	0	85
850	0	290	850	470	0	0	0	0
900	0	290	900	470	0	0	0	0

### 5. 결론

본 연구는 기존 회전교차로의 지체가 발생하는 요인 중 하나인 교통량 불균형 현상에 대해 기존 진입교통량 측면의 연구와는 다른 상충교통량 중심의 분석을 시행하였다는 데 의의가 있다. 또한 연구가 미흡한 회전교차로와 신호교차로의 지체를 해소할 수 있는 적정거리 산정에 관한 연구를 시행하였다.

실제 오후 첨두시 교통량 불균형 현상이 발생하고 신호교차로와 회전교차로의 적절하지 못한 위치로 인해 첨두시간 혼잡이 발생하는 이천시 가좌로 회전교차로를 대상으로 2020년 6월 9일 17:45~18:45 사이 교통량, 신호정보, 대기행렬, 주차량 비율을 조사하여 분석을 수행하였다. 그 결과 가좌로 회전교차로는 기존 연구(진입교통량 측면)에서는 교통량 균형상태로 판단되지만, 상충교통량 측면에서

분석 시 남측 접근로의 교통량 불균형이 65.9 %로 높게 나타났으며 이로 인해 회전교차로의 지체가 발생하는 것으로 나타났다. 또한 두 교차로의 거리가 멀어질수록 각 접근로의 대기행렬 길이가 감소하는 것으로 분석되었다. 특히 두 교차로의 거리가 600 m일 때 회전교차로 북측 접근로의 지체가 사라지기 시작하였으며 750 m일 때 서측 접근로의 지체가 해소되기 시작하여 850 m일 때부터 모든 접근로의 지체가 해소되는 것으로 분석되었다.

이상의 분석에서 살펴보았듯이 교통량 불균형 상태 및 인접한 교차로의 간격은 지체를 유발시키는 중요한 요인이라 할 수 있다. 따라서 본 연구는 신호교차로와 인접한 거리에 회전교차로의 건설이 필요한 경우 지체를 분석하는데 있어 도움이 될 것으로 기대된다.

향후 연구과제로는 더욱 다양한 교통 조건에서 교통량 불균형 현상을 규명해볼 필요가 있으며 4지 혹은 다차로 회전교차로의 연구 또한 필요할 것으로 판단된다.

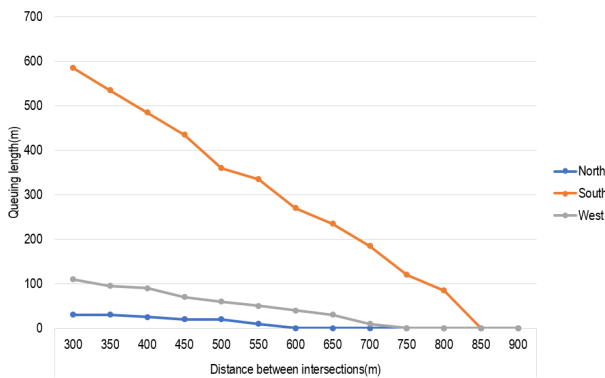


Fig. 7. Queuing Length on Each Approach at the Roundabout

### 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 (in Korean).

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 (in Korean).

Akçelik, R. (2004). *Roundabouts with unbalanced flow patterns*, ITE 2004 Annual Meeting.

- Akçelik, R. (2005). *Capacity and performance analysis of roundabout metering signals*, TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado, USA, pp. 22-25.
- Akçelik, R., Chung, E. and Besley, M. (1996). "Performance of roundabouts under heavy demand conditions." *Road and Transport Research*, Vol. 5, No. 2, pp. 36-50.
- An, H. K. and Kim, D. S. (2021). "A review of roundabout capacity model." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 41, No. 2, pp. 143-150 (in Korean).
- An, H. K., Yue, W. L. and Bae, G. M. (2016). "A study of delay time analysis at metering roundabout." *Legislation and Policy Studies*, Vol. 8, No. 2, pp. 345-367 (in Korean).
- An, H. K., Yue, W. L. and Kim, D. S. (2015). "A proposal of two signals roundabout analysis method using SIDRA6." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 35, No. 5, pp. 1111-1121 (in Korean).
- An, H. K., Yue, W. L. and Stazic, B. (2017). "Dual signal roundabout evaluation in Adelaide using SIDRA and AIMSUN." *Road & Transport Research*, Vol. 26, No. 2, pp. 36-49.
- Krogscheepers, J. and Roebuck, C. (2000). *Unbalanced traffic volumes at roundabouts*, In: Fourth International Symposium on Highway Capacity, Transportation Research Circular E-C018, Maui, Hawaii, pp. 446-458.
- Lee, D. M., You, J. H., Kim, D. H. and Lee, S. K. (2013). "An analysis of roundabout application effects based on before and after field studies." *International Journal of Highway Engineering*, KSRE, Vol. 15, No. 1, pp. 111-119 (in Korean).
- Ogden, K. W. and Taylor, S. Y. (1996). *Traffic engineering and management*, Institute of Transport Studies, Department of Civil Engineering, Monash University, Melbourne, Australia, Clayton, Vic.
- Park, J., Lee, D. M. and Kim, Y. B. (2015). "Development of an application for signal metering on roundabouts." *Proceedings of the KOR-KST Conference 73*, pp. 359-364 (in Korean).