

회전교차로 용량분석 방법에 대한 고찰

안홍기* · 김동선**

An, Hong Ki*, Kim, Dong Sun**

A Review of Roundabout Capacity Model

ABSTRACT

Roundabouts have been spreading out all over the world quickly with their attractions including capacity enhancement, safety increase and pollutant emission decrease. The history of Korean roundabout has already been 10 years. However, due to the accumulation of unclear right of way and insufficient data, the advantages of the roundabout are not fully utilized so far. Moreover, there are some differences in the capacity model of roundabouts compared to overseas capacity models. In addition, most research tend to concentrate in evaluation of roundabout performance using computer software. This paper, therefore, investigated overseas typical roundabout capacity models; empirical model and gap acceptance model, and then KHCM 2013 was compared to SIDRA model and USHCM 2010 model. It is expected that this paper will assist and guide practitioners in analyzing and estimating roundabout capacity more precise.

Key words : Roundabout capacity model, Gap acceptance model, Empirical model, Critical gap, Follow-up headway, Lane by lane theory

초록

회전교차로는 신호 교차로와 비교 시 용량증대, 안전성 증대 및 대기오염 감소 등의 장점으로 인해 국내외적으로 널리 사용되고 있다. 2011년 시 작된 국내 회전교차로의 역사는 어느덧 10년이 되었다. 그러나 여전히 불명확한 통행우선권 및 부족한 자료의 축적 그리고 해외 용량분석과 비교 시 차이점으로 인해 회전교차로의 장점을 최대한 활용하지 못한다고 볼 수 있다. 또한 국내 연구는 회전교차로 용량모형에 관한 연구보다는 회전교차로 설치 시 효과분석에 집중된 성향이 있다. 따라서 본 논문은 회전교차로의 대표적 모형인 경험적 모형과 간격수락 모형에 대해 살펴보고 호주와 SIDRA 모형과 미국의 USHCM 2010 모형을 국내 도로용량편람 2013 모형과 비교해 보았다. 향후 국내 회전교차로 용량의 예측 시, 더욱 정확한 용량분석에 도움이 되기를 기대한다.

검색어 : 회전교차로 용량, 간격수락 모형, 경험적 모형, 임계간격, 추종시간, 차로별 분석

1. 서론

교차로의 구조는 매우 복잡하며, 약 75 %의 지체 및 사고는 교차로 주위에서 발생함으로 원활하고 안전한 차량의 흐름을 이용자에게 확보해 주는 것은 교통공학자들에게 중요한 임무라 할 수 있다. 교차로는 크게 신호 교차로, 회전교차로 그리고 양보 및 정지 교차로로 나누어지며, 일 교통량에 따라 결정이 된다(Ogden and Taylor, 1996). 보통 20,000대/일 이상의 교통량에는 신호 교차로가 적합하고, 3,000대/일 이하의 교통량에는 정지 및 양보 교차로가 적합하며, 3,000대/일에서 20,000대/일 사이의 교통량 범위에서는 회전교차로가 우수한 효과를 나타내는 것으로 알려져 있다.

* 정회원 · Huaiyin Institute of Technology 교통공학과 교수 (Huaiyin Institute of Technology · hkan77@hyit.edu.cn)

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

Received October 31, 2020/ revised November 7, 2020/ accepted November 18, 2020

1960년대 영국에서 시작된 회전교차로는 먼저 진입한 회전 차량이 우선권을 가지므로 비슷한 형태이지만 진입 차량이 우선권을 가지는 로터리와는 운영방식이 다르다(Kim et al., 2010; Park et al., 2009). 회전교차로는 중앙섬을 우회 통과하기 위한 저속주행이 장려되며, 신호 교차로에 비해 적은 상층 지점으로 인해 안전성 증대의 장점이 있다. 따라서, 신호 교차로와 비교 시 뛰어난 효율성, 안전성 증대 그리고 대기오염 감소 효과로 인해 호주, 미국 및 유럽에서는 널리 사용이 되고 있다(An et al., 2016; Azhar and Svante, 2011).

일찍이 회전교차로의 이용이 활발한 나라들은 여러형태의 용량 모형식을 발전시켜왔고 이를 바탕으로 정확한 회전교차로의 성능을 예측하고 분석해오고 있다. 특히 회귀분석을 바탕으로 효과적도와 용량의 관계를 확률적으로 표현한 경험적 분석, 운전자의 운전행태와 용량의 관계를 바탕으로 예측한 간격수락 모형이 대표적이라 할 수 있다.

국내의 경우 효과적인 교차로 운영 및 사고 발생의 문제점을 해소하기 위해 2011년부터 속도 70 km/h 이하인 도로에 회전교차로가 적극적으로 도입되어 운영되고 있지만, 여전히 부족한 회전교차로의 수와 회전교차로 내 불명확한 통행우선권으로 인해 회전교차로의 정확한 운영 및 분석이 어려운 실정이다(MOLIT, 2013). 그 결과 회전교차로의 장점을 최대한 끌어내지 못한다고 볼 수 있다.

국내 회전교차로의 역사도 어느덧 10년이 되었음에도 불구하고, 여전히 국내 연구는 교통분석 software를 활용한 회전교차로의 효과분석이 주를 이룬다고 할 수 있으며(An et al., 2015; Lee et al., 2013) 보다 정확한 용량분석 모형에 관한 연구는 미미하다고 볼 수 있다.

따라서 본 논문은 널리 활용되고 있는 국외의 회전교차로 용량분석 방법에 대해서 알아보고 도로용량편람 2013(이하 KHCM 2013)의 용량분석 모형과 비교분석을 통해 더욱 발전한 국내 용량 분석 방법을 도출하는 데 도움이 되고자 한다.

2. 회전교차로의 특성

회전교차로 운영원리는 진입 차량이 회전 차량에 우선권을 양보하고, 회전 차량 사이에 충분한 간격을 확보했을 때 진입한다. 따라서, 회전교차로에서 임계간격 및 추종시간은 회전교차로 용량 분석에 있어 중요한 역할을 하며 이는 운전행태와 깊은 연관이 있다(Austrroads, 2009; Akçelik, 2012).

2.1 임계간격(Critical gap)

회전교차로에서 임계간격이란 진입 차량이 여러 대의 회전 차량과 만날 때 안전한 진입이 가능하다고 판단되는 회전 차량 사이의

시간 차이(Fig. 1(a))를 얘기한다(Cheng et al., 2008; Mensah et al., 2010; Xu and Tian, 2008). 회전교차로의 임계간격은 Fig. 1(b)와 같이 수락간격과 거부간격의 관계로 결정이 되며, 수락간격과 거부간격의 교차점은 임계간격으로 표현된다.

회전 차량 간의 차두시간이 짧으면 진입 차량은 안전하게 진입하기에 충분한 시간을 확보하지 못하게 되며, 차두시간이 길어지면 차량은 진입을 시도하게 된다. 임계간격은 현장에서 바로 도출할 수 없으므로 보편적으로 probit 모형과 logit 모형을 사용하지만, 최근에는 신뢰성이 우수한 logit 모형이 널리 사용되고 있다(Cheng et al., 2008).

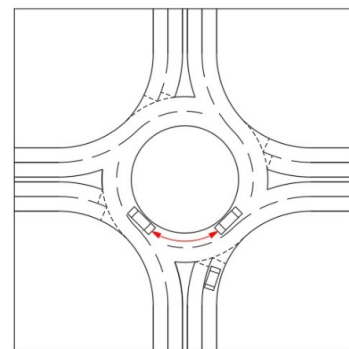
Logit 모형은 아래 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$p = \frac{e^{f(t)}}{1 + e^{f(t)}} \quad (1)$$

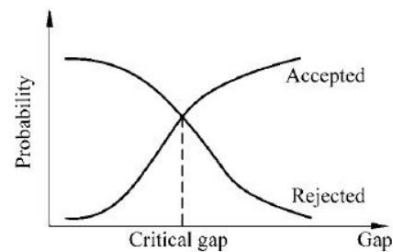
여기서, p 는 수락간격의 누적 확률값, t 는 수락간격의 시간(초), 그리고 $f(t)$ 는 시간 t 의 선형함수.

$$f(t) = a(t - b) \quad (2)$$

여기서, a 와 b 는 예측 상수, 그리고 b 는 평균 차두간격. Logit 모형의 장점은 선형회귀식으로 전환이 용이하다는 점이며, Eq. (3)과 같이 표현된다.



(a) Concept of Critical Gap



(b) Critical Gap in Logit Model

Fig. 1. Critical Gap

$$\ln \frac{p}{1-p} = a(t-b) \quad (3)$$

여기서, p 는 종속변수, 그리고 t 는 독립변수. 회전교차로의 임계간격은 Eq. (4)로부터 도출이 된다.

$$\frac{e^{a_{acc}(t_{cri}-b_{acc})}}{1+e^{a_{acc}(t_{cri}-b_{acc})}} = \frac{e^{a_{rej}(t_{cri}-b_{rej})}}{1+e^{a_{rej}(t_{cri}-b_{rej})}} \quad (4)$$

여기서, t_{cri} 는 임계간격, a_{acc} 와 b_{acc} 는 누적확률에 대한 수락간격 값, 그리고 a_{rej} 와 b_{rej} 는 누적확률에 대한 거부간격 값. 결과적으로 임계간격(t_{aci})는 Eq. (5)와 같이 나타난다.

$$t_{aci} = \frac{a_{acc}b_{acc} - a_{rej}b_{rej}}{a_{acc} - a_{rej}} \quad (5)$$

2.2 추종시간(Follow-up headway)

추종시간 역시 회전교차로 분석에 있어서 중요한 파라미터 중 하나이며 임계간격과 달리 현장에서 관측된 데이터에서 직접적인 도출이 가능하다. 추종시간은 Fig. 2와 같이 진입하는 차량 사이의 최소간격을 말하며 접근로별 평균 통과시간으로 계산할 수 있다(Xu and Tian, 2008).

Macioszek(2017)에 따르면, 추종시간은 Eq. (6)과 같이 나타낼 수 있으며 보편적으로 동일 회전교차로에서도 접근로별 다른 추종 시간 값이 관측되는 것이 특징이다.

$$t_f = t_f^a - t_f^b \quad (s) \quad (6)$$

여기서, t_f 는 간격시간(초), t_f^a 는 전 차량의 회전교차로 진입시간(초), 그리고 t_f^b 는 다음 차량의 회전교차로 진입시간(초).

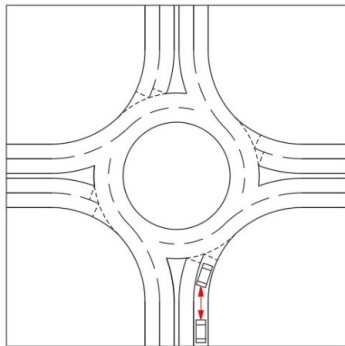


Fig. 2. Concept of Follow-Up Headway

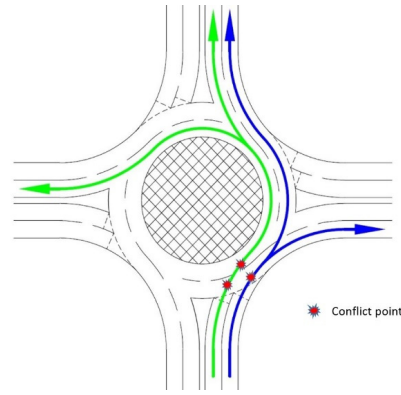


Fig. 3. Possible Conflict Point at a Multi-Lane Roundabout

2.3 차로별 분석(Lane by lane theory)

회전교차로 분석에서 또 다른 특징은 차로별 분석이라 할 수 있다. 다차로 회전교차로에서 차량의 통행 방향은 보편적으로 Fig. 3과 같이 진입 좌측차로(녹색: 직진 및 좌회전)과 진입 우측차로(파란색: 우회전 및 직진)으로 결정이 된다.

안전한 회전교차로 진입을 위해 진입 좌측차로는 회전차로의 내측 및 외측 차량의 차량 여부를 고려해야 하며 진입 우측차로는 회전차로내 외측 차량의 차량 여부를 고려하게 된다. 진입 좌측차로는 2개의 상충 가능 지점이 존재하며 진입 우측차로는 1개의 상충 가능 지점이 존재한다. 바로 이 상충 가능 지점의 차이가 임계간격의 차이를 만들어내며, 보통 진입 내측 차량의 임계간격이 외측 차량의 임계간격보다 항상 길게 나타난다(Ruijun and Boliang, 2010). 따라서 차로별 분석 이론은 더욱 정확한 회전교차로의 효율성 분석을 위해 필수적이라 할 수 있다(Akçelik, 1984; Akçelik, 1997).

3. 회전교차로 용량분석 모형

용량분석은 지체시간 및 대기행렬 분석과 함께 회전교차로의 효율성 평가에 있어서 중요한 파라미터 중 하나이다(Al-Madani, 2011). 회전교차로의 용량분석 모형에 관한 연구는 일찍이 영국, 호주 등 에서 발전되어 왔다. 초기에는 회전교차로의 용량을 위빙구간 내(weaving area) 차량 관계를 통해 도출하려 하였지만, 이 방법은 진입 차량과 회전 차량 간의 명확한 관계를 설명하지 못하는 단점이 있다. 그 결과, 간격수락 모형을 바탕으로 한 용량분석 방법이 더욱 주목받고 있다(Fortuijn, 2009). 간격수락 모형은 운전자의 운전행태에 따른 진입교통량을 가정하는 방법으로 진입 차량과 회전 차량과의 관계 설명이 용이하다.

앞서 언급했듯이, 회전교차로 용량분석 모형은 경험적 모형(empirical 모형)과 간격수락 모형(gap acceptance 모형)으로 구분된다(Akçelik, 2011; Al-Madani, 2011; Dixit, 2011; Flannery

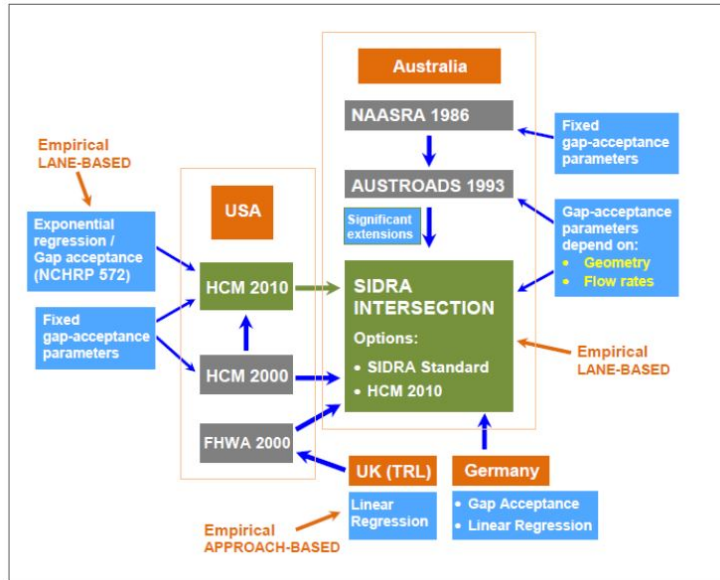


Fig. 4. Capacity Estimation Models (Akçelik, 2011)

et al., 2005; MOLIT, 2013; Waddell, 1997). Fig. 4와 같이 영국의 Transport and Road Research Laboratory (TRL) 모형은 경험적 모형을 바탕으로 용량분석 모형을 발전시켜왔으며, 미국의 Highway Capacity Manual (HCM) 2010 (TRB, 2010)의 경우 경험적 모형을 기초로 최근에는 간격수락 모형을 접목시켜 분석하고 있다. 호주는 일찍이 간격수락 모형을 바탕으로 회전교차로의 용량을 분석하고 있다.

3.1 경험적 모형(Empirical model)

경험적 모형은 영국의 TRL에서 시작되었으며 포화 교통 조건에서 다양한 기하학적 구조에 따라 관측된 데이터의 분석을 통해 발전되어 왔다. 경험적 모형은 Eq. (7)과 같이 교차로의 기하학적 특징에 따른 차량흐름을 바탕으로 회전교차로 진입용량과 회전차량의 관계를 선형관계(linear)로 표현한 모형이다(Akçelik, 2011; Flannery et al., 2005).

$$q_e = -f_c q_c + F \quad (7)$$

여기서, q_e 는 진입교통량(대/시), q_c 는 대상 진입로의 회전교통류율(대/시), 그리고 $f_c = 0.29 + 0.116w_e$. F는 Eq. (8)로부터 도출이 된다.

$$F = 329w_e + 35u + 2.4D - 135 \quad (8)$$

여기서, w_e 는 진입차로 넓이(m), u 는 회전차로 넓이(m), 그리고 D는 사이즈 팩터(m).

그러나 근래에는 경험적 모형에 대한 단점이 여러 학자들로부터 부각되고 있다. 그 중 Akçelik(2010; 2011)의 연구에 의하면, 경험적 모형은 회전차량이 존재하지 않을 때 회전교차로의 용량설명이 명확하지 않다는 점이다. Fig. 5와 같이 q_c (회전 교통류율)이 "0"이라고 가정하면, 회전교차로는 최대 용량을 가지게 된다. 그러

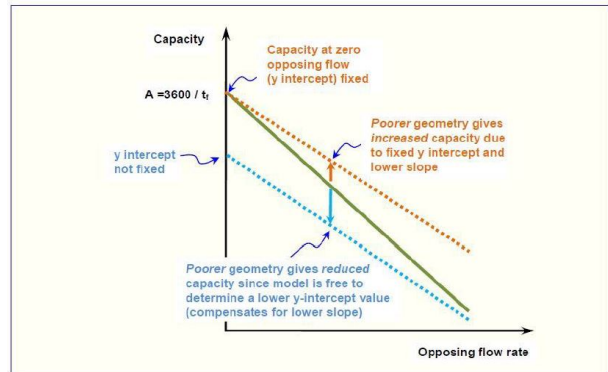


Fig. 5. Roundabout Capacity (Akçelik, 2011)

Table 1. Empirical Model

Model	Description
Empirical model	- Capacity is derived by intersection geometry features
	- The maximum capacity can be calculated even with poor geometry and a small number of rotating vehicles
	- In order for reliable capacity estimation, large amounts of data is necessary
	- Capacity varies depending on the amount of data
	- Capacity measurement is required when there is no entering traffic

나 경험적 모형에서는 회전교차로의 기하구조와 상관없이 최대의 용량을 나타내게 된다. 실제 현장에선 열악한 기하구조, 진입 차량의 시야가 방해되는 경사로 혹은 예각으로 이루어진 진입로 등은 회전교차로의 용량을 감소시키게 된다. 이는 운전자의 통행행태에 영향을 받는 회전교차로의 특성상 부적합한 설명이 된다.

또한 Table 1에서 설명하듯이 경험적 모형은 신뢰할 수 있는 모델을 얻기 위해 많은 양의 데이터가 필요하며, 실제로 결과의 신뢰성은 측정방식과 표본크기에 따라 달라지며 진입교통량이 없을 때 측정되어야 하는 단점이 있다(Macioszek, 2020).

3.2 간격수락 모형(Gap acceptance model)

간격수락 모형은 운전자의 통행 특성을 기반으로 진입 차량과 회전 차량 사이의 최대 용량을 고려하여 발전되어 온 모형이다 (Flannery et al., 2005). 경험적 모형은 호주 SIDRA (the Australian Signalised Intersection Design and Research Aid) 모형이 널리 사용되고 있으며 Eq. (9)와 같이 표현된다.

Eq. (9)에서 보듯이 간격수락 모형에서 임계간격(t_c)과 추종시간(t_f)은 회전교차로의 용량을 결정하는 데 매우 중요한 역할을 한다. 그 외 진입 차량의 방향성(f_{od}) 또한 회전교차로의 용량과 매우 밀접한 연관이 있다. 초기에는 회전교차로에서 차량의 흐름과 T-intersection과 같다고 간주했다. 그러나, 최근 연구에서는 각 진입로의 진입 차량은 다른 진입로의 진입 차량의 진입에 영향을 주는 회전교차로와 달리 T-intersection의 차량의 진입은 독립적인 움직임을 갖는다고 알려져 있다(Akçelik et al., 1996; Krogscheepers and Roebuck, 2000).

$$Q = s \times U = \frac{3600}{t_f} \times \max \left[u_{\min}, f_{od} (1 - \Delta_c q_{cs} + 0.5 t_f \phi_c q_c) e^{-\lambda(t_c - \Delta_c)} \right] \quad (9)$$

여기서, Q는 진입 용량(대/시), s는 포화교통류율(대/시), U 진입차량 출발시 녹색신호, 비율, u_{\min} 는 녹색신호의 최소값, f_{od} 는 OD 팩터, t_f 는 추종시간(초), t_c 는 임계간격 시간(초), Δ_c 는 회전차량의 차두간격(초), q_{cs} 는 회전교통량(pcu/초), ϕ_c 는 그룹화 되지 않은 회전차량 비율 그리고 λ 는 파라미터 값.

간격수락모형은 진입 차량의 운전행태에 따른 간격 수락값을 기본으로 하고 용량에 영향을 미치는 다른 파라미터의 가정이 필요하지 않기 때문에 간단하면서도 정확한 용량측정이 장점이라 할 수 있다(Table 2참조). 또한 높은 신뢰도를 바탕으로 전 세계적으로 가장 널리 사용되고 있다고 볼 수 있다(Marczak et al., 2013; Macioszek, 2020).

Table 2. Gap Acceptance Model

Model	Description
Gap acceptance model	- Most widely used with high confidence
	- Capacity is extracted according to driver's driving behavior
	- Parameter assumption is not necessary for capacity analysis
	- Ease of roundabout capacity analysis

4. 호주, 미국 그리고 국내의 다차로 회전교차로 용량분석 모형

호주의 용량분석 모형은 앞서 살펴보았듯이 간격수락 모형을 바탕으로 발전되어 왔으며, 차로별 분석 개념 또한 포함되어 있다. 용량분석 모형은 Eq. (9)와 같지만 접근로의 내측 및 외측의 임계간격은 추종시간, 회전차로 수, 회전교통량 그리고 진입차로 너비에 따라 Eq. (10)과 같이 나타난다(Akçelik, 2010).

$$t_c = (3.6 - 0.34w_L - 0.28n_c - 3.8 \times 10^{-4}q_c + 1 \times 10^{-7}q_c^2)t_{f_t} \quad (10)$$

여기서, t_c 는 임계간격(초), t_f 는 추종시간(초), w_L 는 평균 진입차로 너비(m), n_c 는 회전차로 수, 그리고 q_c 는 회전교통량(pcu/시).

추종시간 역시 주 접근차로(dominant lane)과 부접근차로(sub-dominant lane)으로 구별하여 분석하는 것이 특징이다(Eqs. (11) and (12) 참조).

$$t_{fd1} = t_{fo1} - 3.74 \times 10^{-4}q_c \text{ subject to } t_{fmin} \leq t_{fd1} \quad (11)$$

$$t_{fs1} = 2.149 + (0.5135t_{fd2} - 0.8735)r_{ds} \quad (12)$$

여기서, t_{fd1} 는 주 접근 차량의 추종시간(초), t_{fo1} 는 주 접근 차량의 추종시간 - 회전 차량이 없는 경우(초), f_{min} 는 최소 추종시간(초), t_{fs1} 는 부 접근 차량의 추종시간(초), t_{fs1} 는 진입 차량과 회전 차량의 비율에 따른 부 접근 차량의 조정된 추종시간, 그리고 r_{ds} 는 진입 차량 비율.

호주 SIDRA 회전교차로 용량모형은 차로별 분석 방법을 바탕으로 간격수락 모형을 사용한다. 여기서 임계간격과 추종시간은 회전 교차로의 용량을 결정하는데 중요한 파라미터라 할 수 있다.

미국의 회전교차로 모형은 HCM 2010 이후 차로별 분석 방법을 적용하고 있다. HCM 2000에서는 다차로 회전교차로에서 진입 차로를 구분하지 않는 통합분석 방법을 사용하였으나 최근에는 SIDRA 모형과 마찬가지로 회전교차로 내측 및 외측을 구분하여 더욱 정확한 용량을 분석하고 있다. Eq. (13)은 진입 내측차로의 용량을 나타내며 Eq. (14)는 진입 외측 차량의 용량을 나타낸다.

$$C_i = 1130e^{(-0.7 \times 10^{-3})V_{C_{pcc}}} \quad (13)$$

$$C_o = 1130e^{(-0.75 \times 10^{-3})V_{C_{pcc}}} \quad (14)$$

여기서, C_i 는 진입 내측차로 용량(pcu/h), C_o 는 진입 외측차로 용량(pcu/h), 그리고 $V_{C_{pcc}}$ 는 회전교통량과 상충교통량(pcu/h).

반면, KHCM 2013이 제시하는 국내 회전교차로 모형식은 아래 Eq. (15)와 같다.

$$c = \left[3600 \left(1 - \frac{v_c \times t_{\min}}{3600} \right) \times \frac{n_c}{t_f} \times e^{-\frac{v_c}{3600}(t_c - 0.05t_f - t_{\min})} \right] \times f_p \quad (15)$$

여기서, c 는 진입로의 용량(pcp/h), t_c 는 임계간격(초), t_f 는 추종시간(초), v_c 는 상충교통량(pcp/h), n_c 는 진입차로수 영향계수는 1.7, t_{\min} 는 회전차로 최소 차두간격(초), 그리고 f_p 는 횡단보행자 영향계수.

호주 및 미국의 용량 모형식과 구분되는 가장 뚜렷한 차이점은 차로별 분석이라고 볼 수 있다. An et al.(2016)의 연구에 따르면, 동일 회전교차로 분석 시 차로별 분석과 통합분석 시 내측 차로는 약 8초/대, 외측 차로는 약 15초/대의 지체시간 차이가 발생하는 것으로 나타났다.

또한 다차로 회전교차로의 진입로에서 외측 차로로 차량이 많이 집중되는 국내 통행 특성으로 인해 진입차로 영향계수를 산출하여 회전교차로의 용량을 분석하고 있다. 그러나 호주 또는 미국의 경우 회전교차로 내에서 차로변경이 어려우므로 교차로 진입 전 차로 선택을 완료한다(An et al., 2016). 보통 다차로 회전교차로에서 진입 좌측차로는 좌회전과 직진 차량이 이용하며, 진입 우측차로는 직진 및 우회전 차량이 사용하게 된다(Fig. 3 참조). 좌회전 혹은 우회전 교통량이 특별히 많은 경우 보통의 경우와는 다른 차로별 방향 재배열이 가능하다.

아래 그림은 호주 애들레이드의 Blythewood road 회전교차로와 Gorge road의 회전교차로의 방향 표지판을 나타낸 것이다. Fig. 6(a)와 같이 좌측차로는 좌회전과 직진 차량만 이용이 가능하며 우측차로는 좌회전, 직진 그리고 우회전 모두 이용이 가능하다(호주는 좌측방향 주행). 좌회전 교통량이 직진 및 우회전 교통량보다 월등히 많은 교차로에 주로 적용된다. 반대로 Fig. 6(b)는 좌회전 차로는 좌회전 및 직진이 가능하지만 우측 차로는 우회전 차량만 이용할 수 있다. 이 경우 우회전 차량의 비율이 좌회전 및 직진 차량보다 많은 교차로에 사용된다.

그러나 우리나라의 회전교차로 이용자들은 회전교차로에 대한 이해 부족으로 인해 교차로 진입 전 차로 선택을 하는 것이 아니라 때로는 회전교차로 내에서 빈번하게 차로변경을 시도하고 있다. 따라서 앞서 언급했듯이, 다차로 회전교차로에서 진출이 용이한 외측 차로로 차량이 집중되는 현상이 나타난다.

Table 3은 SIDRA, USHCM 2010 그리고 KHCM 2013의 용량을 분석한 결과이다. KHCM 2013의 “2차로 회전교차로 서비스수준”과 같은 2차로 4지 회전교차로를 대상으로 용량을 분석하였다. 동측 진입교통량 840대/시(좌회전 450대/시, 직진 300대/시, 우회전 90대/시), 남측 진입교통량 230대/시(좌회전 60대/시, 직진 120대/시, 우회전 50대/시), 서측 진입교통량 960대/시(좌회전 280대/시, 직진 620대/시, 우회전 60대/시), 북측 진입교통량 700대/시(좌회전 240대/시, 직진 60대/시, 우회전 400대/시)를 공통적으로 적용하였다.

동측 및 서측 접근로는 각각 100명/시, 150명/시의 횡단보행자가 있는 것으로 가정하고 남측 및 북측 접근로는 횡단보행자가 없는 것으로 간주하였다. 그리고 2%의 중차량 비율, 0.95의 침투시간 계수를 적용하였다. Lane by lane theory에 의해 차로별 달라지는 임계간격을 적용하는 SIDRA와 USHCM 2010에는 주 접근차로 3.35초와 부 접근차로 3.05초의 임계간격을 (평균 3.21초) 적용하였고 3.28초(주 접근차로)와 3.02초(부 접근차로)의 추종 시간을



(a) Blythewood Road Roundabout

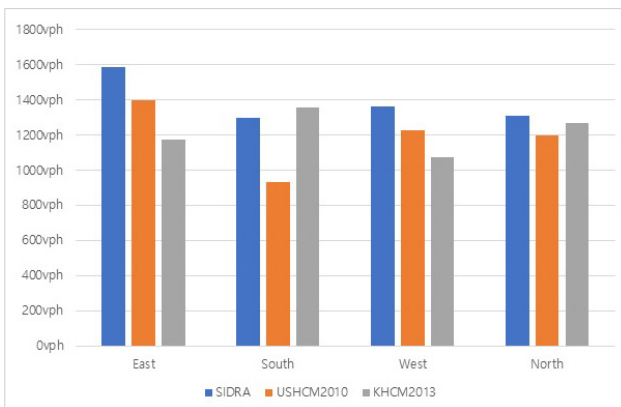


(b) Gorge Road Roundabout

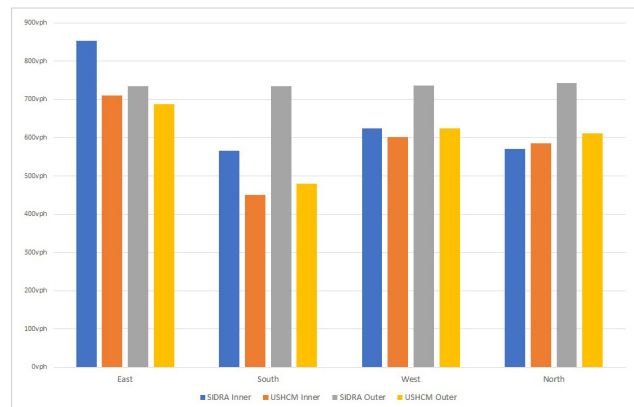
Fig. 6. Roundabout Direction Sign

Table 3. Comparison of Capacity between Three Models

Approach		Model				
		SIDRA		USHCM 2010		KHCM 2013
East	Inner	853 vph	1,588 vph	710 vph	1,397 vph	1,173 vph
	Outer	735 vph		687 vph		
South	Inner	565 vph	1,301 vph	451 vph	930 vph	1,354 vph
	Outer	736 vph		479 vph		
West	Inner	625 vph	1,361 vph	601 vph	1,226 vph	1,076 vph
	Outer	736 vph		625 vph		
North	Inner	570 vph	1,362 vph	586 vph	1,198 vph	1,266 vph
	Outer	792 vph		612 vph		



(a) Capacity by Approach



(b) Capacity by Lane

Fig. 7. Capacity Comparison between Different Models

(평균 3.15초) 각각 가정하였다. 그러나 KHCM 2013 모형에는 3.21초의 입계간격 및 3.15초의 추중 시간을 차로 구분없이 적용하였다.

Fig. 7(a)와 같이 각 모형별 회전교차로 용량은 다르게 나타났다. 동측 접근로는 SIDRA 모형의 용량이 1588 vph으로 가장 높게 분석되었으나 남측 접근로는 KHCM 2013 모형의 용량이 1354 vph로 가장 높은 것으로 나타났다.

그러나 Fig. 7(b)에서 보여주듯이 SIDRA 모형과 USHCM 2010모형은 내측 및 외측 차로의 용량 차이가 발생한다. 또한 O/D 패턴에 의해 내측 차로의 용량과 외측 차로의 용량이 상이함을 알 수 있다. 이는 좌회전 교통량이 많은 동측 진입로는 교차로 진입 전 내측 차로를 선택하게 되고 직진 및 우회전 교통량이 많은 남측, 서측, 북측 접근로는 외측 차로의 사용이 더 많음을 나타낸다. 그러나 KHCM 2013 모형은 내측 및 외측의 입계간격과 추중시간을 동일하다고 가정하기 때문에 보다 정밀한 차로별 분석이 어렵다는 단점이 있다.

5. 결론

2010년 회전교차로의 도입으로 국내에서도 회전교차로의 역사는 10년이 되었다. 중형급 규모의 안전한 교통량 처리를 위해 꾸준히 회전교차로의 설치가 증가하고 있지만, 여전히 불명확한 통행우선권으로 인해 회전교차로의 성능을 모두 발휘하고 있지 못한 실정이다. 게다가 국내 회전교차로에 관한 연구는 컴퓨터 software를 활용한 회전교차로의 효과분석, 특히 신호교차로와 회전교차로의 비교 분석이 주를 이룬다고 할 수 있다.

본 논문은 더욱 정확하고 정교한 회전교차로의 분석을 위한 기초연구로 용량분석 모형(경험적 모형 및 간격수락 모형)에 대해 살펴보고, 호주의 SIDRA 모형, 미국의 HCM 2010 모형 그리고 국내 KHCM 2013 모형을 비교해 보았다. 호주 및 미국의 회전교차로 모형은 차로별 분석을 토대로 내측 및 외측 진입 차로의 용량을 구별하여 계산하는 것이 특징이다. 반면 국내 모형은 차로별 분석 방법 대신에 차로를 통합해서 분석하는 방법을 택하고 있으며 이는 차로별 분석과 비교 시 많은 차이가 있다고 할 수 있다.

따라서 향후 회전교차로의 건설이 고려되는 교차로의 용량 예측 및 분석 시 입계간격, 추종시간, 차로별 분석 방법이 활용되어 보다 정확한 회전교차로의 효율성을 예측 및 분석할 수 있기를 기대한다.

References

- Akçelik, R. (1984). "SIDRA-2 does it lane by lane." *Proceedings of 12th ARRB Conference*, Hobart, Australia, pp. 137-149.
- Akçelik, R. (1997). "Lane-by-lane modelling of unequal lane use and flares at roundabouts and signalised intersections: The SIDRA solution." *Traffic Engineering and Control*, Vol. 38, No. 7, pp. 388-399.
- Akçelik, R. (2010). *SIDRA Intersection user guide: Part 4 - output guide*, Akcelik & Associates Pty Ltd., Greythorn, Australia.
- Akçelik, R. (2011). "Some common and differing aspects of alternative models for roundabout capacity and performance estimation." *TRB International Roundabout Conference*, Carmel, Indiana, USA.
- Akçelik, R. (2012). "Issues in performance assessment of sign-controlled intersections." *Proceedings of 25th ARRB Conference*, Perth, Australia.
- 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.
- Al-Madani, H. (2011). "A model to predict capacity of multi-lane roundabouts under high demand flows in bahrain." *International Journal of Sustainable Development and Planning*, Vol. 6, No. 1, pp. 21-33.
- 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).
- Austrroads (2009). *Guide to traffic management Part 3: Traffic studies and analysis*, Austrroads, Sydney, Australia.
- Azhar, A. M. and Svante, B. (2011). "Signal control of roundabouts." *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, Vol. 16, pp. 729-738.
- Cheng, J., Yang, X., Deng, W. and Huang, X. (2008). "Driver's critical gap calibration at urban roundabouts: A case study in China." *Tsinghua Science & Technology*, Vol. 13, No. 2, pp. 237-242.
- Dixit, V. V. (2011). "Modeling origin-destination effects on roundabout operations and inflow control." *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 138, No. 8, pp. 1016-1022.
- Flannery, A., Kharoufeh, J. P., Gautam, N. and Elefteriadou, L. (2005). "Queuing delay models for single-lane roundabouts." *Civil Engineering and Environmental Systems*, Vol. 22, No. 3, pp. 133-150.
- Fortuijn, L. G. H. (2009). "Turbo roundabouts: Estimation of capacity." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2130, No. 1, pp. 83-92.
- Kim, T. Y., Park, M. K. and Park, B. H. (2010). "A critical gap model for roundabouts in Korea." *Journal of Korean Society of Transportation*, KST, Vol. 30, No. 2, pp. 93-100 (in Korean).
- Krogscheepers, J. and Roebuck, C. (2000). "Unbalanced traffic volumes at roundabouts." *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).
- Macioszek, E. (2017). "The comparison of models for follow-up headway at roundabouts." *In Scientific And Technical Conference Transport Systems Theory And Practice*, Springer, Cham, pp. 16-26.
- Macioszek, E. (2020). "Roundabout entry capacity calculation - A case study based on roundabouts in Tokyo, Japan, and Tokyo surroundings." *Sustainability*, Vol. 12, No. 4, 1533.
- Marczak, F., Daamen, W. and Buisson, C. (2013). "Key variables of merging behaviour: Empirical comparison between two sites and assessment of gap acceptance theory." *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, Vol. 80, pp. 678-697.
- Mensah, S., Eshragh, S. and Faghri, A. (2010). "A critical gap analysis of modern roundabouts." *Transportation Research Board Annual Meeting*, Washington, DC.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2013). *Korea highway capacity manual*, Korea Institute of Construction Technology, The Korean Transport Institute, Korean Society of Transportation (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, B. H., Kim, T. Y., Han, S. W. and Yang, J. M. (2009). "Comparative analysis on the effectiveness of modern roundabouts and 4-legged signalized intersections." *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, KITS, Vol. 8, No. 2, pp. 27-35 (in Korean).
- Ruijun, G. and Boliang, L. (2010). "Traffic operation performances at roundabout weaving sections." *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, Vol. 10, No. 3, pp. 29-34.
- Transportation Research Board (TRB) (2010). *Highway capacity manual 2010*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC.
- Waddell, E. (1997). "Evolution of roundabout technology: A history-based literature review." *Compendium of Technical Papers, 67th annual meeting, Institute of Transportation Engineers*, Boston, USA.
- Xu, F. and Tian, Z. Z. (2008). "Driver behavior and gap-acceptance characteristics at roundabouts in California." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2071, no. 1, pp. 117-124.