

회전교차로의 통행특성에 근거한 용량 모형 개발

김태영¹ · 백태현² · 박병호^{3*}

¹ 포항공과대학교 산학협력연구소, ² 충북대학교 도시공학과, ³ 충북대학교 도시공학과

Development of Capacity Models Based on the Travel Characteristics at Roundabout

KIM, Tae Young¹ · BEAK, Tae Hun² · PARK, Byung Ho^{3*}

¹ University-Industrial Cooperation Research Institute, Pohang University of Science and Technology, Gyeongbuk 790-784, Korea

² Department of Urban Engineering, Chungbuk National University, Chungbuk 361-763, Korea

³ Department of Urban Engineering, Chungbuk National University, Chungbuk 361-763, Korea

Abstract

Recently, many studies have been undertaken regarding the of introduction at roundabout in Korea. The studies related to roundabout capacity, however, is insufficient. Thus, the goal of this study is to develop a capacity model based on real data. The main results are as follows. First, roundabout capacity in Korea was analyzed using HCM capacity model based on critical gap and following time estimated by Probit model. Entry capacity in Korea was evaluated to be similar to that of the U.S in the case of low circulating flow(Q_c), but higher in the case of high circulating flow(Q_c). Second, the basic capacity models in Korea were newly developed based on real traffic data. Third, models that consider geometric structure were developed based on the basic models. Finally, all of the developed models mentioned above were analyzed to be statistically significant.

최근 국내 회전교차로의 도입에 따라 다양한 연구가 수행되어 왔다. 하지만 회전교차로의 용량에 대한 연구는 아직 부족한 실정이다. 이에 이 연구의 목적은 실 자료를 바탕으로 용량 모형을 개발하는데 있다. 연구의 주요 결과는 다음과 같다. 첫째, 프로비트 모형을 이용하여 산정한 임계간격과 추종시간에 근거한 미국 HCM 용량모형을 이용하여 국내 회전교차로의 용량이 분석되었다. 국내의 진입용량은 회전교통류율(Q_c)이 적을 경우에는 미국과 비슷한 수준이지만, 회전교통류율(Q_c)이 많아지면 미국보다 높은 것으로 평가되었다. 둘째, 실 교통량 자료를 기반으로 국내 회전교차로의 기본용량모형이 새롭게 개발되었다. 셋째, 기본용량모형을 근거로 기하구조를 고려한 모형이 개발되었다. 마지막으로 위에서 개발된 모든 모형은 통계적으로 유의한 것으로 분석되었다.

Keywords

capacity models, design guidelines, model development, roundabout, travel characteristics
용량모형, 설계지침, 모형 개발, 회전교차로, 통행특성

* : Corresponding Author
bhpark@chungbuk.ac.kr, Phone: +82-43-261-2496, Fax: +82-43-264-2496

Received 29 May 2014, Accepted 2 September 2014

서론

1. 연구의 배경 및 목적

우리나라는 2000년 초반 '회전교차로'라는 용어가 도입되었으며, 최근까지 회전교차로에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다. 이러한 국내 회전교차로의 기본 유형은 진입차로에 따라 소형 회전교차로, 1차로 회전교차로, 2차로 회전교차로의 세 가지 유형으로 구분된다.

회전교차로는 용량증대, 유동성확보, 안전성 증진, 지체감소 및 환경적 측면에서 장점을 보이고 있다. 그 외에도 심미성 및 도시설계 요소 확보 측면에서 많은 장점이 있다. 그러나 용량제한 및 신호연동화인 경우 도입의 어려운 점 등에서 단점을 가지고 있다. 이에 국내에서는 많은 연구가 회전교차로의 도입에 따른 운영효율 확보에 초점을 두고 진행되어 왔다.

회전교차로는 좌회전 교통량이 적고 우회전교통량이 많은 교차로, 4지 이상의 교차로, 지방지역 교차로에서 직진이나 우회전이 포함된 교통사고가 많은 교차로, 시외곽 간선도로로서 우회전 교통량이 많고 속도가 높은 교차로 등 다양한 지점에 설치가 가능하다. 이에 현재 우리나라에서도 저탄소녹색성장에 따른 교통선진화 방안의 일환으로 회전교차로의 도입을 적극 검토하고 있으며, 이미 도입된 회전교차로의 사례(수원 고등동 오거리, 김제 경찰서오거리, 화전군 화전대교오거리 등)를 통해 그 효과를 입증해 가고 있다.

그렇지만 회전교차로의 용량에 대한 분석은 아직 부족한 것으로 판단되며, 실제 자료를 바탕으로 한 회전교차로의 통행행태 및 용량 모형에 대한 연구가 필요하다고 판단된다.

미국의 Highway Capacity Manual(HCM) 등 다양한 국외의 연구에서는 회전교차로의 서비스수준을 평가하기 위해서 그 나라의 실정에 맞게 개발된 용량모형을 활용한다. 또한 국내 교차로 및 도로의 용량을 산정하는 기준이 되는 도로용량편람(KHCM)에서 용량 모형을 제시하고 있다. 그러나 KHCM(2013)의 회전교차로 용량 모형은 자료의 부족 등을 이유로 모의실험을 통한 모형을 제시하고 있다. 또한 미국 HCM에서 다루고 있는 회전교차로는 미국의 자료를 토대로 개발된 것이기에 국내 실정과 차이가 발생 할 수 있다.

회전교차로의 서비스수준을 합리적으로 판단하고 적절한 설치 지점을 찾기 위해서는 실제 자료를 토대로 한

경험적 용량 모형의 개발이 필요하다고 판단된다. 또한 실제 용량에 영향을 주는 기하구조 변수를 찾는 것이 중요하다 판단된다. 이에 이 연구에서는 실제 국내에서 운영되는 회전교차로의 운영행태 및 기하구조를 바탕으로 회전교차로의 통행특성에 근거한 용량모형을 개발하는데 그 목적이 있다.

2. 연구의 내용 및 방법

본 연구는 국내 16개 지점의 회전교차로를 대상으로 용량모형을 개발하기 위해 회전교차로 통행특성 자료, 기하구조 자료, 교통량 자료를 수집하였다. 또한 수집된 자료를 바탕으로 회전교차로의 기본용량모형과 기하구조를 고려한 용량모형을 개발하였다.

본 연구의 1단계는 회전교차로의 용량모형을 개발하기 위한 연구의 방향을 설정하는 단계로, 국내·외 회전교차로 관련연구를 검토하였다. 2단계는 분석틀의 설정 단계는 연구에 필요한 자료수집과 연구방법론을 검토하는 단계로, 이를 위해 먼저 16개 회전교차로를 대상으로 통행행태, 기하구조, 교통량 자료를 수집하고, 수집된 자료를 분석한 방법론은 검토하였다. 3단계는 회전교차로 용량모형을 개발하는 단계로, 회전교차로의 특성을 가지는 교통량 및 기하구조 자료를 바탕으로 용량모형을 개발하였다. 회전교차로의 용량모형은 먼저 교통량에 따른 기본용량모형을 개발하고, 개발된 기본용량모형을 바탕으로 기하구조를 고려한 용량모형을 개발하였다. 마지막 단계에서는 앞에서 분석된 결과를 바탕으로 결론을 정리하고, 본 연구의 한계로 검토된 사항들과 이를 극복할 수 있는 향후 연구 과제를 제시할 것이다.

선행연구 검토 및 차별성

1. 선행연구 검토

회전교차로 용량에 대한 연구는 다음과 같다. Lee et al.(2002)이 연구한 현대식 회전교차로의 용량보정계수에 관한 연구에서는 현대식 회전교차로의 용량분석을 실시하는 경우 활용될 수 있는 새로운 형태의 용량보정계수의 도출을 연구하였다. 현재 세계 각국에서 사용하고 있는 회전교차로의 용량 모형들은 영국과 독일을 중심으로 한 경험식과 호주를 중심으로 한 이론식으로 대별된다. 두 가지 모형의 근본적인 차이점은 모형식의 도출을

위한 관찰 자료의 신뢰성에 있다. 즉 모형의 파라메타 정산을 위한 풍부한 자료가 있을 경우 경험식이 활용될 수 있는 반면, 경험식의 타당성을 입증하기 위하여 필요로 하는 자료수가 많지 않을 경우에는 이론식이 적합할 것으로 판단하고 있다.

Park et al.(2005)은 SIDRA를 이용한 4지 1차로 현대식 회전교차로의 효과평가라는 연구에서 현대식 회전교차로의 국내 도입을 위한 선행연구를 진행하고, 회전교차로의 운영효율이 다른 교차로 운영형태에 비해 효과적인 경우를 분석하였다. 저자들은 이 연구에서 1차로로 진입하는 4지교차로를 가정하고, 이 교차로에 교통량이 증가함에 따라 각기 다르게 나타나는 현대식 회전교차로, 신호교차로, 비신호교차로의 지체 및 용량을 비교 분석하여, 현대식 회전교차로의 효율적인 도입조건을 제시하고 있다.

Jeon et al.(2003)은 회전교차로의 진입용량은 회전교통류율과 기하구조에 의해서 결정되며, 여기서 기하구조 요소는 중앙교통섬 직경과 진입차로 폭 그리고 회전차로 폭으로 제시하였다. 이 연구는 회전교차로 용량 모형개발을 위해 국내 회전교차로 4개소에서 자료를 수집하였으며, 분석결과, 회전교차로 진입용량에 크게 영향을 주는 도로 조건은 중앙섬 직경과 회전차로 폭이며, 연구에서 개발한 국내의 진입용량 모형에서 얻은 용량은 독일과 이스라엘에서 개발된 모형의 진입용량보다 더 높은 것으로 분석하였다. 저자들은 그 이유를 연구에서 선택된 회전교차로의 외접원이 외국의 값보다 비교적 크며, 우리나라 운전자들의 수락간격이 다른 나라에 비해서 짧기 때문인 것으로 판단하고 있다.

Ko et al.(2000)의 연구에서는 수도권을 중심으로 총 11개소의 4지 비신호교차로에 대해서 임계간격과 추종시간을 분석하였다. 연구 결과, 임계간격은 3.8-5.4초로 나타났으며, 추종시간은 2.4-2.9초로 분석되었다.

HCM(2010)에서는 회전교차로의 용량에 대하여 1차로 회전교차로와 다차로 회전교차로에 대하여 제시하고 있다. 1차로 회전교차로의 경우 회전교차로의 진입용량에 영향을 미치는 가장 중요한 변수는 상충교통류 것으로 제시하고 있다. HCM(2010)에서 제시하는 1차로 회전교차로의 진입용량은 식(1)과 같다. HCM(2010)의 다차로 모형은 진입과 회전차로에 따라 다른 계수 값을 적용하였으며, 기본 식은 1차로 모형식과 같다.

$$C_{c,pc} = 1,130e^{(-1.0 \times 10^{-3})v_{c,pc}} \quad (1)$$

여기서, $C_{c,pc}$ 는 차로 용량이며, $V_{c,pc}$ 는 상충교통류이다.

KHCM(2013)에서는 회전교차로의 용량모형을 모의 실험을 통한 파라메타 결과 값으로 분석적 모형을 제시하였으며, 이는 식(2)와 같다. 경험적 모형은 분석 자료의 부족으로 제시하지 못한다고 밝히고 있다.

$$c = \left[3,600 \left(1 - \frac{V_c \times t_{\min}}{3,600} \right) \cdot \frac{n_c}{t_f} \cdot e^{-\frac{V_c}{3,600}(t_c - 0.5t_f - t_{\min})} \right] \times f_p \quad (2)$$

여기서, c 는 진입로의 용량(pcph), t_{\min} 은 회전차로 최소 차두간격(초), V_c 는 상충교통량(pcph), n_c 는 진입차로수 영향계수, t_c 는 임계간격(초), f_p 는 횡단 보행자 영향계수, 그리고 t_f 는 추종시간(초)이다.

Cheng Jie et al.(2008)은 프로빗 모형을 활용하여, 중국 도시부 회전교차로 운전자의 임계간격을 정산하였다. 저자들은 중국의 난징시내 3차로 회전교차로를 대상으로 수락간격과 거절간격을 측정하였다. 측정된 자료를 바탕으로 임계간격을 산출하였으며, 중국 도시부 회전교차로의 임계간격을 4.1-5.4초로 분석하였다.

Feng Xu and Zong Z. Tian(2007)은 캘리포니아 회전교차로의 운전자 행태와 수락간격 특성을 분석하기 위하여 회전교차로 운전자의 행태 특성에 대해 기술하고, 1차로 회전교차로와 다차로 회전교차로의 임계 차두간격과 추종 차두간격을 분석하였다. 연구 결과, 1차로 회전교차로의 경우에는 4.5-5.3초의 임계간격을 갖고, 다차로 회전교차로의 경우에는 4.4-5.1초의 임계간격을 갖는 것으로 분석되었다.

Ruijun Guo and Boliang Lin(2010)은 회전교차로 엇갈림 구간의 교통운영성과분석을 위해 회전교차로 엇갈림 구간에서의 합류, 분류 차량의 교통운영성과를 분석하였다. 분석대상 회전교차로는 중앙교통섬이 62m, 교차구간 길이 45m, 진입차로 2차로인 회전교차로이며, 임계간격은 2.7초 분석되었고, 평균 차두간격은 4.87초로 산정되었다.

Evdokia Vlahos et al.(2008)은 전방향 정지 교차로에서 회전교차로로 전환에 대한 연구를 진행하였다. 저자들은 다양한 시나리오 작성한 후, aaSIDRA를 사용하여 시뮬레이션을 분석하였다. 연구 결과, AWSC가 위치한 자리에 회전교차로 설치 시 용량은 평균 190%증

가, 지체는 49%가 감소, 대기행렬은 41%가 감소하는 것으로 분석되었다. 또한, 좌회전 차량의 비율이 올라갈 때 교차로 용량은 감소하고, 다른 효과측도는 증가하는 것으로 나타났다.

2. 연구의 차별성

이 연구는 국내에서 운영되고 있는 회전교차로의 기하구조, 운행행태, 교통량 등 다양한 자료를 수집하여, 수집된 자료를 바탕으로 한국형 회전교차로의 경험적 용량모형 개발의 기틀을 마련하는데 목적을 두고 있다. 이러한 연구는 국내 회전교차로의 기초연구 자료가 될 수 있을 뿐 아니라, 회전교차로 설계지침을 보완하는데 중요한 자료로 사용될 것으로 판단된다.

연구의 차별성은 다음과 같다. 첫째, 국내 16개 회전교차로의 기하구조, 속도, 통행행태, 수락간격 등 회전교차로 실제 운영 자료를 동영상 촬영을 통해 수집하여, 이를 바탕으로 회전교차로의 운행행태분석을 실시하였다. 이는 현재 우리나라의 회전교차로의 운행행태, 기하구조 등 실제 회전교차로의 현황 및 특성을 파악할 수 있는 연구가 될 것이며, 앞으로 우리나라 회전교차로 연구의 기초자료가 될 수 있을 것으로 판단된다.

둘째, 2000년 초반 회전교차로의 실제 운영자료 부족으로 진행되지 못했던 기존 연구의 한계점과 시뮬레이션 프로그램 분석에 머물렀던 연구의 한계점을 극복하기 위해, 이 연구에서는 16개 지방지역 회전교차로의 수락 및 거절간격, 추종시간, 교통량, 지체자료를 수집하여 한국형 회전교차로 용량모형을 개발하는데 중점을 두고 있

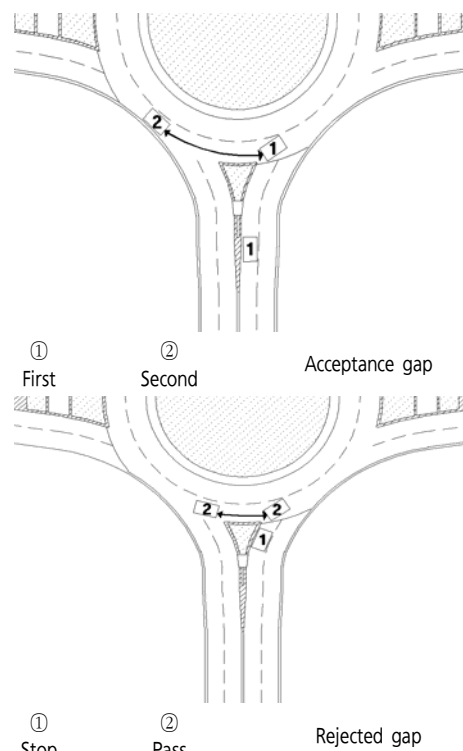
다. 또한 연구에서 개발된 기본 용량 모형을 기반으로, 기하구조를 고려한 1차로 및 2차로 회전교차로 용량모형을 개발하였다.

분석의 틀 설정

1. 회전교차로 통행자료 수집

국내 전체 회전교차로의 특성을 대변할 수 있도록 전국 16개의 조사지점을 선정하였다. 16개 회전교차로를 1차로와 2차로 회전교차로로 분류하였다. 분류 결과 1차로 형은 7개 지점이며, 2차로 형은 9개 지점이다. 선정된 회전교차로에서 동영상 분석을 통해 개별차량의 속도, 수락간격 및 거절간격을 수집하였다. 또한 CAD 도면을 통해 기하구조 자료를 수집하여 회전교차로 설계지침과의 적합성 판정 및 용량 모형 개발에 활용하였다.

용량모형을 개발하기 위해 각 회전교차로의 임계간격을 조사하였다. 임계간격은 진입도로의 차량이 진입하기



Source : KIM et al., 2012, A Critical Gap Model for Roundabouts in Korea, p.96

Figure 1. Definition of accepted and rejected gaps

Table 1. Summary of differences with previous studies

Type	Jeon et al. (2003)	Ko et al. (2000)	This study	
Analysis method	Simulation	Real data Analytical models	Real data	Empirical models
No. of roundabouts	-	4	16	
Type	KHCM(2013)	HCM(2000)	HCM(2010)	This study
Analysis method	Analytical models	Empirical models	Empirical models	Empirical models
Variables	Entry capacity, minimum headway etc. (7 variables)	Entry capacity, conflict flow, critical gap, follow-up time	Conflict flow	Circulating flow and geometry structure

위한 최소의 회전차로 차량 간의 간격을 의미한다.

우리나라 회전교차로의 경우 운전자들이 통행우선권이 명확하게 인지하지 못하고 있어, 진입차로의 차량이 우선권을 가지고 진입하는 경우가 종종 발생한다. 이러한 경우의 자료는 제외하고 수락간격과 거절간격은 회전차로 내 차량에게 통행우선권이 주어진 경우의 자료만을 수집하였다(통행우선권이 진입차로 내 차량에게 주어지는 경우는 회전교차로의 운영방식이 아닌 로터리 운영방식으로, 이 경우는 분석에서 제외하였다).

회전교차로 통행 자료는 동영상 촬영을 통한 프레임 분석(1초당 25프레임으로 분할)으로 수행하였으며, 동영상 촬영은 오전 및 오후 첨두 시간(07:00-09:00, 17:00-19:00)을 제외한 시간에 수행하였다. 이를 통해 수락 및 거절 간격을 수집하였다. 수락간격은 1차량이 통과할 경우 2차량과의 간격을 의미하며, 거절간격은 1차량은 정지하고 2차량이 지나갈 경우의 간격을 의미한다(Figure 1).

2. 분석방법론

이 연구에서는 임계간격과 기하구조 자료를 통해 회전교차로의 용량 모형을 개발하였다. 이에 조사된 수락

및 거절간격을 이용하여 임계간격을 산정해야 한다. 임계간격 산정은 프로빗 모형을 이용해서 산정하게 되며, 조사된 교통량 자료를 바탕으로 음지수, 선형회귀식, 2차식 등을 이용하여 용량모형을 개발하였다.

연구는 HCM(2000)에 제시된 용량 모형을 기반으로 연구를 진행하였다. HCM에서는 회전교차로의 용량에 대하여 1차로 회전교차로와 2차로 회전교차로에 대하여 제시하고 있다. 1차로 회전교차로의 경우 회전교차로의 진입용량에 영향을 미치는 가장 중요한 변수는 상충교통량, 임계간격과 추종시간인 것으로 제시하고 있다. 1차로 회전교차로의 진입용량은 식(3)과 같다.

$$Q_e = \frac{Q_{c,z} e^{-Q_e t_c / 3600}}{1 - e^{-Q_e t_f / 3600}} \tag{3}$$

여기서, Q_e 는 진입로 x 의 진입용량(pcp), Q_c 는 진입로 x 의 상충교통량(pcp), t_c 는 임계간격(초), 그리고 t_f 는 추종시간(초)이다.

2차로 회전교차로의 진입용량 모형식은 식(4)와 같다. 이 식은 진입 2차로 중 해당 차로에 해당하는 식이며, 2차로를 분석하기 위해서는 2개 차로를 각각 분석하는 것을 원칙으로 하고 있다.

Table 2. Data collection

No	Intersection Name	Roundabout type	Traffic volume (veh./h)	Mean of acceptance gap	Mean of rejected gap	Circulatory lane width	Circulatory diameter	Entry		Exit	
								Average number of lane	Average lane width	Average number of lane	Average lane width
1	Donghae City Hall Rotary	2	1,395	2.72	2.53	12.0	58	2.5	3.5	2.5	3.5
2	Hwacheon Bridge 5-leg Intersection	1	745	3.33	2.55	15.0	69	1	3.3	1	3.3
3	Oksan Geumjeong 1st Apartments	1	816	2.17	1.76	7.0	34	1	3.92	1.33	3.5
4	Gangyai Seopyeong Intersection	1	662	3.45	2.38	4.0	34	1	3.39	1	3.35
5	Wondong Intersection	2	801	2.19	1.71	7.0	29	1.5	5.38	1.5	3.63
6	Plaza No.1 Rotary	1	2,157	2.91	2.62	12.0	43	1	3.18	1	3.18
7	Dongsan 4-leg Intersection	2	1,149	3.23	2.94	8.0	41	1.5	3.75	1.5	3.88
8	Gimje CityHall 5-leg Intersection	2	1,263	3.14	2.57	8.0	38	1.8	3.35	1.8	3.35
9	Gimje Police Station 5-leg Intersection	2	1,014	2.83	2.24	9.0	42	1.4	3.5	1.4	3.45
10	Wolgok 3-leg Intersection	2	418	3.06	2.19	7.5	45	2	3.25	2	3.16
11	Jinan Rotary	1	256	3.09	1.56	6.0	29	1	3.42	1	3.42
12	County Office Rotary	2	590	2.75	1.86	10.0	40	1.2	3.25	1.2	3.55
13	Gyo-ri 4-leg Intersection	1	515	2.65	1.76	9.0	30	1	4.31	1	4.31
14	Kkotdongsan Rotary	1	1,544	2.65	1.82	9.5	43	1	3.75	1.33	3.21
15	Ojuk Plaza 4-leg Intersection	2	1,494	2.96	1.94	8.5	50	1.75	3.81	1.75	3.88
16	Bonggok Plaza 4-leg Intersection	2	1,905	2.94	2.26	9.0	54	2.25	3.56	2.25	3.56

$$C_{crit} = 1230e^{(-0.0009v_c)} \quad (4)$$

여기서, C_{crit} 는 진입차로 최대 진입교통량(pcph), 그리고 v_c 는 상충교통류(pcph)이다.

회전교차로 용량 모형 개발

1. 회전교차로 용량 검토

1) 임계간격산정

16개 회전교차로의 수락간격과 거절간격을 측정 한 결과는 Table 3과 같다. 총 271개의 수락간격 자료와 205개의 거절간격 자료를 측정하였으며, 이 자료를 바탕으로 누적분포를 산출하였다.

1차로 회전교차로와 2차로 회전교차로의 수락간격 및 거절간격 자료를 바탕으로 프로빗 모형을 개발한 결과는 Table 4와 같다. 모형들의 R^2 값이 0.924, 0.770, 0.830 및 0.838로 통계적으로 유의한 모형인 것으로 분석되었다.

개발된 모형을 바탕으로 임계간격을 분석한 결과, 1차로 회전교차로는 2.685, 2차로 회전교차로는 2.611 초인 것으로 분석되었다.

이를 기존 연구의 결과와의 비교한 결과는 Table 5와 같다. 대부분의 연구에서 임계간격이 4.0-6.0초로 나타나, 본 연구와 1.5-3.5초의 차이를 갖는 것으로 분석되었으며, Guo Ruijun(2010)연구에서 분석된 중국 회전

Table 3. Frequency and cumulative distribution of acceptance and rejected gap

Time(sec.)	Frequency		Cumulative distribution	
	Acceptance gap	Rejected gap	Acceptance gap	Rejected gap
0.5-1.0	-	4	-	1.951
1.0-1.5	10	31	3.690	17.073
1.5-2.0	27	55	13.653	43.902
2.0-2.5	49	46	31.734	66.341
2.5-3.0	72	28	58.302	80.000
3.0-3.5	58	12	79.704	85.853
3.5-4.0	24	11	88.560	91.219
4.0-4.5	16	8	94.464	95.121
4.5-5.0	7	2	97.047	96.097
5.0-5.5	3	3	98.154	97.561
5.5-6.0	5	5	100	100
Total	271	205	-	-

교차로의 임계간격만이 본 연구와 유사한 값으로 분석되었다.

이 연구에서 나타난 것처럼 임계간격이 작다는 것은 차량이 작은 간격을 가지고 진입한다는 의미이며, 이는 이 연구에서 분석된 국내 회전교차로의 용량이 국외의 회전교차로에서 분석된 용량보다 크게 나타날 수 있다는 것을 의미한다.

2) 추종시간 산정

추종시간은 앞 차량이 진입하고 후미차량이 진입하는 것을 의미하며, 그 시간은 앞 차량의 앞 범퍼와 뒷 차량의 앞 범퍼 간격을 의미한다. 조사된 16개의 회전교차로의 평균 추종시간은 3.28초로 분석된다.

HCM에 비해 국내 회전교차로의 수락간격이 짧은 것은 차량과의 간격이 좁아도 진입하는 운전행태가 많아 나타나는 결과임을 알 수 있다.

미국의 HCM 회전교차로 용량모형을 이용하여 임계간격과 추종시간만을 가지고 우리나라 회전교차로의 용량을 검토해 보았다. 그 결과 미국과 우리나라의 임계간격과 추종시간의 차이로 인해 국내 회전교차로의 진입용량이 미국의 회전교차로 진입용량보다 크다는 것을 파악할 수 있다. 하지만, 이는 실제 교통량 자료를 활용한 용량검토가 아니며, 실제 우리나라의 교통량 자료를 바탕

Table 4. Critical gap of 1- and 2-lane

Classification	1-lane roundabout		2-lane roundabout	
	Acceptance gap model	Rejected gap model	Acceptance gap model	Rejected gap model
a	3.254	-2.108	2.512	-2.660
b	2.87	2.40	2.90	2.34
R^2	0.924	0.770	0.830	0.838
Critical gap(sec.)	2.685		2.611	

Table 5. Comparison of critical gap

Classification	Critical gap(sec.)	
	1-lane	2-lane
U.S.A.(HCM 2000)	4.1-4.6	-
Germany	4.4	4.4
NCHRP 3-65	4.2-5.9	4.2-5.5
California	4.5-5.3	4.4-5.1
China(Cheng Jie)	4.1-5.4	
Guo Ruijun study	2.70	
1-lane and 2-lane	2.685	2.611

Source : KIM et al., 2012, A Critical Gap Model for Roundabouts in Korea, p.99

Table 6. Calibration of following time in Korea

No.of roundabout	No.of sample	Following time(sec.)
16	560	3.28

Table 7. Comparison of roundabout capacity using HCM

Circulating flow (pcph)	Korea		HCM	
	Korea	HCM	Korea	HCM
0	1,097	1,124	1,100	929
100	1,082	1,072	1,200	914
200	1,066	1,020	1,300	899
300	1,051	972	1,400	884
400	1,035	925	1,500	870
500	1,020	880	1,600	855
600	1,005	838	1,700	840
700	989	797	1,800	826
800	974	759	1,900	812
900	959	722	2,000	798
1,000	944	686	-	-

으로 만든 모형이 아니기 때문에 우리나라 회전교차로의 용량이라고 보기는 어렵다. 이에 우리나라 회전교차로의 용량모형을 실제 교통량 자료를 바탕으로 개발하는 것이 필요하다고 판단된다.

2. 용량모형 개발을 위한 교통량 자료

1) 1차로 회전교차로

국내 회전교차로는 교통량이 적기 때문에 1시간 교통량을 자료로 사용하는 경우 차량이 균집을 이루며 회전교차로로 진입하는 경우를 제외하면 포화용량 수준까지 이르는 경우를 16개 교차로에서는 발견하지 못하였다.

이에 진입차로와 회전차로의 최대 용량을 측정할 수 있도록, 한쪽 방향의 자유교통류 자료를 수집하고, 반대로 상충이 발생하는 경우의 자료는 진입차로에 대기차량이 발생하는 경우의 자료를 수집하였다. 수집된 자료 중 로터리 형식의 진입차로가 통행우선권을 가지는 자료는 제외하여, 최종적으로 회전교차로 용량검토를 위한 교통량 자료 셋을 구축하였다.

수집된 교통량 자료 중 포화용량 수준에 근접한 자료 인지에 대한 검증이 필요하다고 판단된다. 이를 위해서 미국 용량 모형(수락간격 및 거절간격 추천)에서 제시한 회전교통량 대비 진입교통량의 수준이 90%이상의 자료만을 사용하여 용량 모형 최종 자료를 선정하였다. 16개 교차로 중 1차로 회전교차로의 첫 번째 기준에 부합하는 수집된 진입교통량과 회전교통량의 자료는 총 114개이

며, 이 중 HCM용량식의 90%수준 이상 교통량 자료 15개를 최종 자료로 구성하여 용량모형을 개발하였다.

2) 2차로 회전교차로

16개 교차로 중 자료수집 기준에 부합하여 수집된 진입교통량과 회전교통량의 자료는 총 391개이며, 이 수집된 자료 중 HCM 80% 용량 수준 이상의 회전교차로의 용량에 근접한 자료만을 사용하였다. 2차로 회전교차로의 경우 1차로 회전교차로보다 자료는 많았지만, 미국 HCM 90% 수준에 만족하는 자료의 샘플수가 적어 80% 기준으로 하여 정리하였다. Figure 2 및 Figure 3은 모형 개발에 사용한 자료의 분포도를 나타낸다.

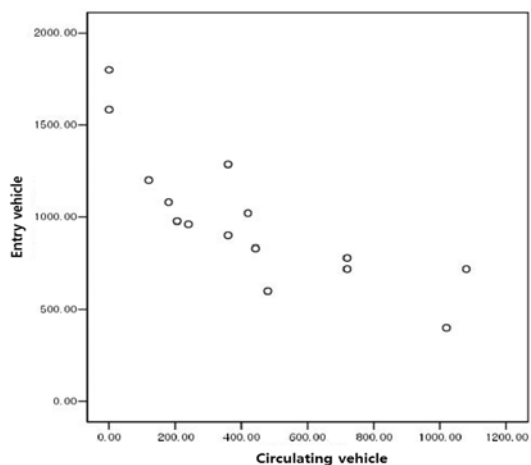


Figure 2. Traffic volume data of capacity level at 1-lane roundabout

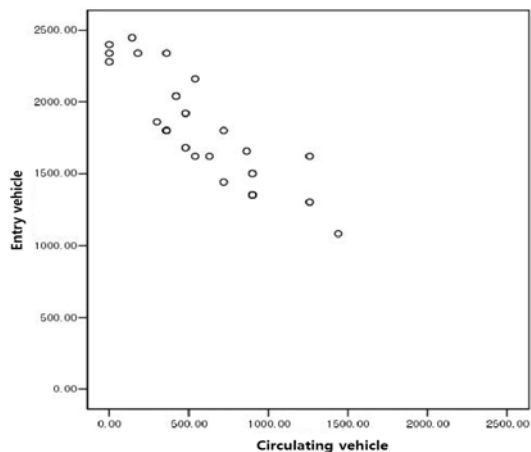


Figure 3. Traffic volume data of capacity level at 2-lane roundabout

3. 기본 용량모형 개발

1) 1차로 회전교차로

수락간격을 기반으로 용량모형을 개발하였다. 개발된 모형 중 2차 회귀식과 3차 회귀식의 경우 회전교통량이 많아짐에 따라 진입용량이 급격히 감소하거나 다시 증가하는 추세가 나타나 용량모형으로 적합하지 않는 것으로 판단되며, 음지수와 선형 회귀 모형식이 용량모형에 적합한 식으로 분석된다. 이 중 적합도가 가장 높고 합리적이라고 판단되는 음지수 모형을 최종모형으로 선정하였다.

개발된 모형은 진입용량과 회전교통류율과의 관계를 설명할 수 있는 모형으로 구축되었다. R^2 는 0.699이고, 상수와 회전교통량의 신뢰수준 99%에서 유의한 것으로 분석되었다.

1차로 회전교차로 기본 용량 모형의 추세선을 Figure 4에 제시하였다. 개발된 1차로 용량 모형의 경우 회전교통류율(Q_c)이 많더라도 진입차량이 회전차로 내로 진입이 가능한 모형의 특징을 가지고 있다.

2) 2차로 회전교차로

회전교차로 1차로 용량모형과 마찬가지로 2차 회귀식과 3차 회귀식의 경우 회전교통량이 많아짐에 따라 진입

용량이 급격히 감소하거나 다시 증가하는 추세가 나타나 용량모형으로 적합하지 않는 것으로 판단되었다.

2차로 회전교차로도 적합도가 높은 음지수 모형으로 용량모형을 산정하였다. R^2 는 0.774이고, 상수와 회전교통량의 신뢰수준 99%에서 유의한 것으로 분석되어, 회전교통류율과 진입용량을 잘 설명하는 모형식이 개발되었다.

2차로 회전교차로 기본 용량 모형의 추세선을 Figure 5에 제시하였다. 개발된 2차로 용량 모형의 경우 1차로

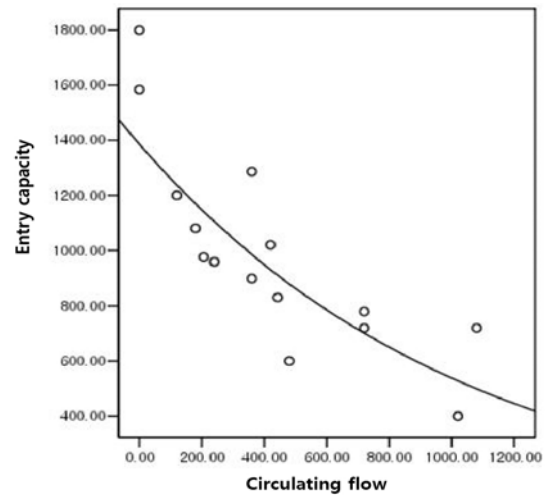


Figure 4. Graph of capacity model at 1-lane roundabout

Table 8. Goodness of fit of capacity model at the 1-lane roundabout

Model	R	R ²	Adj. R ²	Stan. error
Negative exponential	0.836	0.699	0.676	0.215
linear regression	0.814	0.663	0.637	227.76
quadratic	0.882	0.778	0.732	186.33
cubic	0.897	0.804	0.751	182.62

Table 9. Basic capacity model of 1-lane roundabout

Classification	Non-standardized coeff.		Standardized coeff.	t	p-value
	B	Std. error	Beta		
Ln (constant)	7.234171	0.091658	-	78.92608	8.09E-19
Circulating flow	-0.00095	0.000172	-0.83608	-5.49482	0.000103
Model	$Q_e = 1385.99e^{-0.00095Q_c}$				

Table 10. Goodness of fit of capacity model at the 2-lane roundabout

Model	R	R ²	Adj. R ²	Stan. error
Negative exponential	0.880	0.774	0.763	0.109
linear regression	0.850	0.722	0.708	205.1
quadratic	0.882	0.778	0.757	195.2
cubic	0.882	0.778	0.745	199.9

Table 11. Basic capacity model of 2-lane roundabout

Classification	Non-standardized coeff.		Standardized coeff.	t	p-value
	B	Std. error	Beta		
Ln (constant)	7.76495	0.039235	-	197.9084	2.94E-37
Circulating flow	-0.00049	5.64E-05	-0.87952	-8.66926	1.52E-08
Model	$Q_e = 2356.54e^{-0.00049Q_c}$				

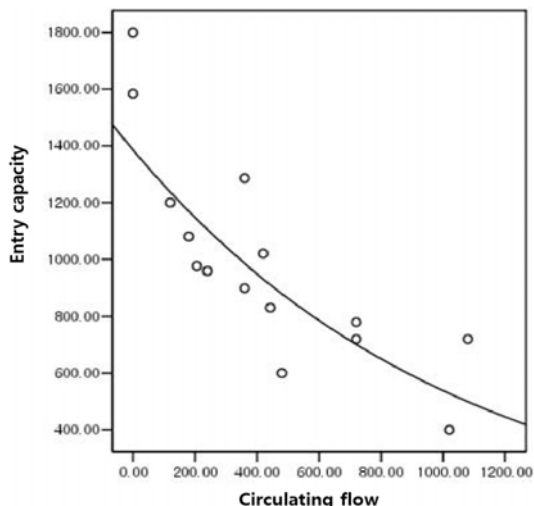


Figure 5. Graph of capacity model at 2-lane roundabout

회전교차로와 마찬가지로 회전교통류율(Q_c)이 많더라도 진입차량이 회전차로 내로 진입이 가능한 모형의 특징을 가지고 있다.

4. 기하구조를 고려한 용량모형 개발

앞서 개발한 용량모형은 우리나라의 회전교차로 진입 교통량과 회전교통량의 관계를 정립한 기본식이며, 이 식을 바탕으로 기하구조를 고려한 회전교차로 용량 모형을 개발하였다. 연구에서 사용한 기하구조 변수들은 HCM(2000), HCM(2010) 및 KHCM(2013)을 검토하여, 회전교차로 용량에 영향을 미친다고 판단되는 변수들을 활용하였다.

1) 1차로 회전교차로

회전교차로의 다양한 기하구조 변수를 고려하여 개발하였다. 기하구조 변수들은 국내 회전교차로 설계지침을 검토하여 설계지침을 벗어나지 않는 자료를 확인한 후 연구에서 활용하였다.

기하구조를 고려한 1차로 회전교차로 용량모형을 개발하였으며, 개발된 용량모형은 Table 13과 같다.

개발된 용량모형의 R^2 값은 0.831이고, 모형에 사용된 모든 변수의 유의확률이 0.1보다 작아 90% 신뢰수준에서 통계적으로 유의한 것으로 판단되었다. 기본 용량모형식과는 다르게 회전교통류율(Q_c)변수 이외에 3개의 기하구조 변수가 더 채택되었다. 채택된 변수는 진입

Table 12. Descriptive statistic of geometric variables at the 1-lane roundabout

Classification	N	Min	Max	Mean	Stan. deviation
Lane Width	15	3	5	3	0.5
Entry Width	15	4	6.5	6	0.7
Entry Angle	15	3	22	19	5.2
Entry Path Radius	15	2.7	28	19	7.6

Table 13. Capacity model of 1-lane roundabout considering geometric variables

Model	R	R ²	Adj. R ²	Standard error
1-lane roundabout	0.911742	0.831274	0.763783	0.183861

Classification	Non-standardized coeff.		Standardized coeff. Beta	t	p-value
	B	Std. error			
Constant	3.87367	1.59823	-	2.42372	0.03583
Circulating flow(Q_c)	-0.0007	0.00016	-0.6928	-4.6359	0.00092
Lane Width(LW)	0.53700	0.29499	0.73304	1.82038	0.09871
Entry Angle(EA)	0.05922	0.02903	0.81667	2.03963	0.06869
Entry Path Radius(EPR)	0.02022	0.00772	0.40698	2.61897	0.02564

$$Q_c = 48.11909 \cdot e^{-0.00078Q_c + 0.537LW + 0.0592EA + 0.020EPR}$$

도로 폭, 진입 각, 진입 반경이며, 이들 변수가 증가할수록 회전교차로의 용량이 커지는 것으로 분석된다.

2) 2차로 회전교차로

2차로 회전교차로 용량 모형도 모형개발에 선행하여, 국내 회전교차로 설계지침을 검토하여 설계지침을 벗어나지 않는 자료를 확인한다. 연구에 활용한 기하구조 변수들의 최소 및 최대값 그리고 평균 모두 설계지침을 벗어나지 않는 것으로 판단되었다.

기하구조를 고려한 2차로 회전교차로 용량모형을 개발하였으며, 개발된 용량모형은 Table 15와 같다. 개발된 용량모형식의 R^2 값은 0.810이고, 모형에 사용된 모든 변수의 유의확률이 0.1보다 작아 90% 신뢰수준에서 통계적으로 유의한 것으로 판단되었다. 기하구조 변수 중 모형에 채택된 변수는 차로 폭이며, 차로 폭이 커질수록 2차로 회전교차로의 진입용량이 커지는 모형이 개발되었다. 2차로 회전교차로 용량 모형에서는 1차로 모형

Table 14. Descriptive statistic of geometric variables at the 2-lane roundabout

Classification	N	Min	Max	Mean	Stan. deviation
Lane Width	24	3	3.75	3.4	0.3
Entry Width	24	7	11	7.8	1.0
Entry Angle	24	2	29	21.8	9.4
Entry Path Radius	24	11.5	208	57.9	53.2

과는 달리 진입각 및 진입 반경이 유의한 변수로 채택되지 않았다. 이는 2차로 회전교차로는 회전부로 진입할 때, 차로를 변경함으로 진입각 및 진입반경이 용량에 영향을 적게 주는 것으로 판단된다.

결론

1. 결론

현재 우리나라에서도 저탄소녹색성장에 따른 교통선진화 방안의 일환으로 회전교차로의 도입을 적극 검토하고 있으며, 이미 도입된 회전교차로의 사례를 통해 그 효과를 입증해 가고 있다. 하지만 국내 회전교차로의 용량 모형은 분석적 모형을 제시하고 있어 실제 자료를 바탕으로 한 회전교차로의 통행행태 및 용량검토에 대한 연구가 필요한 실정이다.

연구의 주요 결과는 다음과 같다.

첫째, 수락간격 및 거절간격 자료를 이용하여, 국내 회전교차로의 임계간격을 산정하였다. 프로빗 모형을 이용하여 산정한 국내 회전교차로 임계간격은 1차로 회전교차로는 2.685초, 2차로 회전교차로는 2.611초로 분석되었다. 이와 더불어 추종시간도 산정하였으며, 국내 회전교차로의 추종시간은 3.28초인 것으로 분석되었다.

둘째, 미국 HCM 용량모형을 이용하여 국내 회전교차로의 용량을 검토한다. 회전교통류율(Q_c)이 적을 경우에는 비슷한 수준의 진입용량을 가지는 것으로 분석되지만, 회전교통류율(Q_c)이 많아짐에 따라 국내의 진입용량이 미국의 경우보다 높은 것으로 분석되었다.

셋째, 실제 수집된 교통량 자료를 기반으로 국내 회전교차로의 기본 용량모형을 개발하였다. 기본용량모형은 음지수식을 이용하여 개발하며, 개발된 모형 모두 통계적으로 유의한 것으로 분석된다.

마지막으로 기본용량모형을 기반으로 기하구조 조건을 반영한 모형을 개발하였다. 1차로 회전교차로 용량모형은 진입로 폭(EW), 차로 폭(LW), 진입각(EA) 및 진

Table 15. Capacity model of 2-lane roundabout considering geometric variables

Model	R	R ²	Adj. R ²	Standard error
2-lane roundabout	0.899757	0.809563	0.791426	0.102183

Classification	Non-standardized coeff.		Standard ized coeff.	t	p-value
	B	Std. error	Beta		
Constant	7.65885	0.06474	-	118.294	3.8E-31
circulating flow(Q_c)	-0.0005	6.45E-05	-1.0113	-8.7215	2.01E-08
Lane Width(LW)	0.10157	0.05097	0.23105	1.9925	0.05947

$$Q_c = 2119.32 \cdot e^{-0.00056Q_c + 0.10157LW}$$

입반경(EPR)이 기하구조 변수로 채택되었으며, 2차로 회전교차로 용량모형은 차로 폭(LW)이 기하구조 변수로 채택되었다.

2. 연구의 한계점 및 향후 과제

현재 국내 회전교차로에서 차량통행은 통행우선권을 모두 준수하지 못하고 있어, 로터리 통행형식을 보이고 있는 측면이 있다. 이에 충분한 교통량 자료와 지체자료를 수집하지 못한 연구의 한계점이 있다. 이에 이 연구는 자료를 1분 단위 간격으로 나누어 수집하여 사용하였다. 이에 향후 충분한 자료를 수집하여 완벽한 운행행태를 바탕으로 한 회전교차로의 용량모형의 개발이 이루어져야 할 것으로 판단된다. 또한 이 연구는 수집된 자료의 부족으로 모형의 검증을 포함하지 못한 한계점이 있다. 이는 향후 반드시 필요한 부분으로 판단된다.

다음으로 개발된 모형은 보행교통량 등의 용량에 영향을 미치는 추가 변수를 고려하지 못하였다. 이를 보완하는 연구가 필요하다고 사료된다.

마지막으로 회전교차로의 용량을 증가시키는 요인으로 분석된 기하구조 변수들은 대부분 속도를 증가시키는 변수이다. 회전교차로에서의 속도 증가는 안전 측면에서 악영향을 미칠 수 있다고 판단된다. 이에 운영과 안전 측면에서 적절한 균형을 달성할 수 있는 변수의 적정 구간을 찾는 연구가 필요하다고 판단된다.

REFERENCES

Cheng J., Yang X., Deng W., Huang X. (2008), Driver's

