

VISSIM을 활용한 소규모 회전교차로의 지체 분석

조아해 · 박병호*

충북대학교 도시공학과

Delay Analysis of Small-scale Roundabouts Using VISSIM

CHO, Ah Hae · PARK, Byung Ho*

Department of Urban Engineering, Chungbuk National University, Chungju 28644, Korea

*Corresponding author: bpark@chungbuk.ac.kr

Abstract

This study deals with the small-scale roundabout. The purpose of this study is to analyze the average delay of vehicle in roundabout, and suggest the efficient planning and design standard. In pursuing the above, this study gives particular attentions to analyzing the average delay time according to the inscribed circle diameter, speed of circulatory roadway lane and traffic volume. The operational efficiencies of 96 scenarios (3 sizes of inscribed circle diameter \times 4 types of circulatory roadway speed \times traffic volume) are analyzed using VISSIM (Verkehr In Städten-SIMulationsmodell). The main results are as follows. First, the optimal design speed of small-scale roundabout are derived from the above scenario analysis. Second, the traffic volume of LOS D is estimated to be 2,180-2,740pcph. Third, the traffic volume of LOS F that is required to improve is above 2,780pcph. The results might be expected to give some implications to providing the countermeasures for the operational efficiency of roundabout.

keywords: average delay, circulatory roadway speed, inscribed circle diameter, small-scale roundabout, VISSIM

초록

이 연구는 소규모 회전교차로를 다루고 있다. 이 연구는 회전교차로의 평균지체를 분석하고 효율적인 계획 및 설계기준을 제시하는 데 그 목적이 있다. 이를 위해 이 연구에서는 내접원 지름, 회전차로의 속도 및 진입교통량에 따른 평균지체 분석에 중점을 두고 있다. 96개(3 \times 4 \times 8) 시나리오의 운영효율이 교통시뮬레이션 프로그램 VISSIM (Verkehr In Städten-SIMulationsmodell)을 사용하여 분석되었다. 연구의 주요 결과는 다음과 같다. 첫째, 시나리오 분석을 통해 소규모 회전교차로의 적정 설계속도가 도출되었다. 둘째, 서비스 수준 D에 도달하는 진입교통량은 2,180-2,740pcph인 것으로 분석되었다. 셋째, 분석 회전교차로에서 혼잡수준 F로 개선이 요구되는 교통량은 2,780pcph 이상으로 평가되었다. 연구 결과는 효율적인 회전교차로 운영을 위한 대응조치를 제공하는 데 몇 가지 함의를 줄 것으로 기대된다.

주요어: 평균 지체, 회전차로 속도, 내접원 지름, 소규모 회전교차로, VISSIM

J. Korean Soc. Transp.
Vol.35, No.5, pp.385-395, October 2017
<https://doi.org/10.7470/jkst.2017.35.5.385>

pISSN : 1229-1366
eISSN : 2234-4217

Received: 26 July 2017

Revised: 25 August 2017

Accepted: 30 October 2017

Copyright ©
Korean Society of Transportation

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

회전교차로에서는 회전차로를 주행하는 차량이 우선권을 가지며, 진입차량은 회전차량의 간격을 이용하여 연속적으로 교차로에 진입하게 된다. 이와 같은 특성으로 회전교차로는 일정 교통량 범위 내에서는 일반적인 유형의 교차로보다 지체가 적고, 용량이 증대되어 운영효율이 높다. 최근 국내에서도 회전교차로 설계지침을 발간하는 등 적극적인 정책으로 회전교차로가 증가하고 있으며, 다양한 연구를 통해 안전성 제고를 위한 방안도 마련되고 있다.

현재까지 진행된 회전교차로 연구는 대부분 기본유형에 해당하는 교차로를 중점적으로 다루고 있으며, 회전교차로의 안전과 지체와 관련하여 교통량과 관련된 변수들이 주로 선정된 바 있다. 이러한 연구에서는 교통량이 적을수록 회전교차로의 사고건수와 지체가 감소하는 결과가 도출되었다. 이는 교통량이 적은 소규모 교차로에서도 회전교차로의 효과를 최대로 발휘할 수 있음을 시사한다. 미국과 유럽 등 다양한 나라에서 교차로의 운영 효율을 증대시키기 위한 대안으로 소규모 회전교차로의 설치를 지향하고 있는 추세이다. 국내의 경우 한국교통연구원이 발표한 전국 주요 회전교차로에서도 소규모 회전교차로가 30% 이상이며, 계속하여 증가하고 있다. 따라서 소규모 회전교차로의 운영을 평가하고, 안전성 제고를 위한 다양한 연구는 필수적인 것으로 판단된다.

이 연구는 회전교차로의 유형 중에서 소규모 회전교차로를 중점적으로 다루며, 교차로의 지체감소를 위한 운영 효율을 평가하고 대안을 제시하는 데 그 목적이 있다. 특히 이 연구는 Design Principle of Roundabout(회전교차로 설계지침, 2014), Korea Highway Capacity Manual(도로용량편람, 2013) 및 Design Principle of Community Road Roundabout(생활도로형 회전교차로 설계지침, 2012)을 참고하여 내접원 지름과 회전부 주행속도에 따른 지체의 변화를 분석한다. 이는 소규모 회전교차로의 지체 감소를 위한 기준을 확립하는 데 크게 기여할 것으로 기대된다.

선행연구

1. 소형회전교차로 설계기준

회전교차로 유형과 관련하여 Design Principle of Roundabout(회전교차로 설계지침, 2014)에서는 회전교차로의 유형이 기본유형과 특수유형으로 구분되며, 설계기준자동차 및 진입차로수에 따라 소형 회전교차로, 1차로형 및 2차로형 회전교차로로 나뉜다.

Table 1. Design criteria of community road roundabout

Classification		Entry section			Circulatory roadway		
No. of lane	ADT	Max. design speed(km/h)	Width of lane(m)	Design speed (km/h)	ICD (m)	Central island diameter (m)	Width of lane (m)
Single-lane	20,000	40-50	3.0	20	14.0	6.0	4.0
						7.0	3.5
						8.0	3.0
			3.5	15.0	7.0	4.0	
					8.0	3.5	
					9.0	3.0	
					4.0	17.0	9.0
10.0	11.0	3.0	30	22.0	9.0	3.5+3.5	
					10.0	3.0+3.0	
					11.0	3.0	

source: Ministry of Security and Public Administration (2012), Design Principle of Community Road Roundabout.

Korea Highway Capacity Manual(도로용량편람, 2013)에서는 기본유형의 소형 회전교차로와 특수유형의 초소형 회전교차로로 구분된다. 소형 회전교차로일 경우, 회전부 설계속도 20-30km/h, 중앙교통섬 지름 13-17m, 진입

차로폭 3.5m, 그리고 회전차로폭 4.0-4.5m 등의 기하구조가 제시되고 있다. 초소형 회전교차로일 경우, 평균 주행 속도가 50km/h미만인 도시지역에 공간이 부족할 경우 최소 설계제원으로 설치될 수 있는 회전교차로로 정의된다.

Design Principle of Community Road Roundabout(생활도로형 회전교차로 설계지침, 2012)에서는 지역주민이 일상생활에 이용되는 행정구획 내부 도로를 대상으로 설치하는 소형회전교차로의 설계기준이 교통량과 기하구조에 따라 제시된다.

2. 선행연구 고찰

연구의 차별성을 제시하기 위해 회전교차로와 관련된 국내외 문헌을 검토한다. 회전교차로 관련 선행연구를 고찰한 결과, 일반유형에 속하는 회전교차로를 대상으로 하는 분석이 대다수인 것으로 확인되었다. Lim and Park (2011)은 VISSIM을 활용하여 회전교차로와 로터리의 운영효율을 비교 분석하였다. 저자들은 회전교차로가 로터리보다 1.8-2.0배 높은 운영효율을 가지는 것으로 평가하였다. Kim et al.(2015)은 VISSIM (Verkehr In Städten-SIMulationsmodell) 분석을 통해 회전교차로의 평균지체를 감소시키는 신호횡단보도의 최소이격거리를 산정하였다. Kang and Lee(2014)은 회전교차로에서 대각선 횡단보도 설치에 따른 차량의 지체를 분석하였다. 저자들은 회전교차로 설계지침에서 제시한 기준을 적용한 경우와 대각선 횡단보도를 설치한 경우를 비교하여 지체를 감소에 효과적인 개선된 횡단보도 설치기준을 제시하였다. Yongsheng et al.(2011)은 다중선형회귀모형을 이용해 미국 내 14개의 회전교차로 교통사고를 진입부 속도와 기하구조에 따라 분석하였다. Stijn et al.(2010)은 로지스틱회귀모형을 이용하여 회전교차로의 충돌위험요소와 상해정도에 영향을 미치는 요인을 비교 분석하였다. Bastian et al.(2007)은 VISSIM을 이용하여 1차로와 2차로 회전교차로 내 보행자 신호에 따른 회전교차로 운영효율을 분석하였다.

이 연구에서 다루는 소형회전교차로와 관련된 문헌을 고찰한 결과, 임계간격 및 교차로의 용량과 관련된 연구가 진행된 바 있었다. Lee et al.(2012)은 차종별, 회전교차로의 크기, 진입각도에 따라 임계간격을 달리 추정하여 소형회전교차로의 적정 임계간격을 산정하였다. 그 결과로 승용차의 평균 추종시간은 약 2.5-3.0초로 분석되었다. 관련된 회전교차로를 대상으로 한 연구를 고찰한 결과는 다음과 같다. Lee et al.(2010)은 소형 삼지 회전교차로의 용량 분석을 위한 승용차 환산계수를 산출하였다. 내접원 지름 15-30m의 내접원 지름을 가지는 회전교차로를 설치한 후 실험을 진행하였으며, 차종별로 적정 임계간격 및 추종시간을 추정하였다.

이 외 특수유형의 회전교차로 관련 연구는 다음과 같다. Lim et al.(2017)은 시뮬레이션 프로그램인 VISSIM을 이용하여 특수유형의 회전교차로를 교통량 및 교통량 방향비의 조건에 따라 시나리오별로 비교 분석하였다. 저자들은 Hamburger 회전교차로의 운영이 지체 측면에서 가장 우수하였으며, 우회전 교통량이 증가할수록 지체가 감소함을 확인하였다. 이에 따라 Hamburger 이외 특수 유형의 소형 회전교차로의 운영평가가 필요함을 시사하였다. Sangster et al.(2014)은 VISSIM을 사용하여 특수유형의 Hamburger 회전교차로와 표준 회전교차로의 운영효율을 비교 분석하였다. 저자들은 지체측면에서 Hamburger 회전교차로가 표준 회전교차로보다 우수한 것으로 평가하였다. Sergan et al.(2013)은 회전교차로의 최소 지체를 예측하기 위해 Turkey의 Izmir시 내 7개의 신호 교차로를 선정 한 후 첨두시간 교통량에 따라 다양한 모형을 사용하여 대상 교차로 간의 평균지체를 비교 분석하였다.

3. 연구의 차별성

이 연구는 회전교차로의 유형 중에서 소규모 회전교차로의 지체를 감소시키는 조치들을 제시하기 위한 연구로서, 기존 연구들과의 차별성은 다음과 같다. 첫째, 지금까지 진행된 회전교차로의 연구는 기본유형의 표준 회전교차로를 대상으로 한 연구가 대부분인 것으로 확인되었다. 이 연구는 소규모 회전교차로 중점적으로 다루고 있으며, 내접원 지름에 따라 분류하여 차량지체를 비교 분석한다. 둘째, 이 연구는 회전교차로의 내접원 지름에 따라 회전부의 속도를 변화시켜, 회전부의 속도와 내접원 지름에 따른 차량지체를 분석한다. 마지막으로, 시나리오별로 교통량을 변화시켜 회전교차로 유형과 서비스 수준에 해당되는 교통량을 산정하는 점에 이 연구의 차별성이 있다.

Table 2. Differences with previous studies

Author	Year	Type of roundabout	MOE
Lim et al.	2017	Turbo roundabout, Flower roundabout, Hamburger roundabout	delay, conflict
Kim et al.	2015	Standard roundabout	delay
Lim and Park	2011	Standard roundabout	delay
Sangster et al.	2014	Standard roundabout, Hamburger roundabout	delay
Sergan Tanyel et al.	2013	Standard roundabout	delay
Bastian Jonathan et al.	2007	Standard roundabout	delay
This study	2017	Small-size roundabout	delay

분석의 틀 설정

1. 분석프로그램

일반적으로 국내에서 회전교차로의 운영을 평가하기 위한 시뮬레이션 프로그램에는 aaSIDRA와 VISSIM이 주로 이용된다. 이 연구에서는 회전교차로 내접원 지름과 회전부의 속도에 따른 지체 변화를 분석하기 위해 미시적 교통시뮬레이션 프로그램 VISSIM이 사용되었다. 이 프로그램은 aaSIDRA와 비교하였을 때, 다양한 교통조건과 차로별 제어가 가능하며, 교통류의 교차로 진입 시 일괄적인 진입이 아닌 이산분포를 통한 무작위 진입을 구현한다는 점에서 현실적인 분석이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 또한 시간의 변화와 특성에 따른 교통운영분석이 가능하고 대안을 평가할 수 있어 교차로 지체 분석에 주로 이용된다.

2. 네트워크 구축 및 파라메타 설정

이 연구에서는 Design Principle of Roundabout, Korea Highway Capacity Manual 및 Design Principle of Community Road Roundabout에서 제시한 설계기준을 참고하여 소규모 회전교차로를 대상으로 내접원 지름과 회전부의 속도에 따라 차량지체를 분석한다. 이를 위해 내접원 지름이 17m와 22m일 경우에는 1차로형, 25m는 2차로형 회전교차로로 네트워크가 구축하였으며, 진입차로 폭은 3.5m, 그리고 회전차로 폭은 4.0m로 설정하였다. 기타 네트워크의 파라메타는 다음과 같다. 첫째, 차량의 주행 속도는 50km/h로 설정되며, 회전부의 속도로 감속하기 위해 20m의 감속구간을 설정하였다. 또한 회전부의 차량에 우선권을 주기 위해 우선규칙(priority rule)이 적용하였다. 둘째, 임계간격은 도로용량편람에서 제시한 회전교차로 적정 임계간격(gap time)인 3.21초를 적용하였다. 셋째, 생활도로형 회전교차로 설계지침을 확인한 결과, 내접원 직경 22-25m의 소형 회전교차로는 설계기준 자동차가 소형자동차이며, 소형 교차로는 대형차량의 통행이 없거나 적은 지역에 설치되는 것으로 확인된다. 이를 참고하여 버스 및 중차량은 없으며, 모두 승용차로만 구성하였다. 마지막으로 회전교차로는 기존 운영되는 신호 및 비신호 교차로에 비해 U-turn 및 보행교통량 비율이 적은 것으로 판단되어 보행교통량과 U-turn 교통량은 없는 것으로 가정하였다.

3. 시나리오 설정

이 연구에서는 소규모 회전교차로 설계지침을 참고하여 분석 시나리오를 설정하였으며, 그 내용은 다음과 같다.

첫째, 소형회전교차로의 설계 기준과 관련하여 관련 지침 Korea Highway Capacity Manual과 Design Principle of Community Road Roundabout에서 제시하는 소형회전교차로의 내접원 지름을 13-25m로 제시하고 있는 것으로 확인되었다. 이에 가장 작은 내접원 지름인 13m의 소형 회전교차로 분석을 진행하였으나, 평균지체의 변화가 두드러지게 나타나지 않는 것으로 나타나며, 17m 이상의 소형 회전교차로에서 의미 있는 평균지체 변화가 나타나는

것으로 분석된다. 이에 내접원 지름 17m와 25m인 네트워크를 구축하였으며, 분석을 위해 중간 값으로 22m를 추가하였다. 둘째, 기존의 소형 회전교차로 관련 설계지침에서는 소규모 회전교차로 회전부의 진입속도를 20-30km/h로 제시하고 있는 것으로 확인되었다. 이에, 20km/h와 30km/h의 회전부 설계속도와 그 중간 값인 25km/h를 분석하였다. 또한 연구자의 판단 결과, 소형 회전교차로는 최소한의 설계제원으로 설치되기 때문에 안전하고 효율적인 운영을 위해서는 회전부 진입전, 충분한 감속이 필히 요구될 것으로 판단된다. 이에 기존의 설계지침에서 제시하는 설계속도에 대한 재검토가 필요할 것으로 생각된다. 따라서 설계지침에서 제시하는 설계기준속도보다 낮은 회전속도인 15kph를 추가하였다. 셋째, 각 조건별 지체를 최소화할 수 있는 교통량을 산정하기 관련지침의 소형 회전교차로의 최대 일교통량인 약 3,400대/시를 감안하였다. 이에 각 진입로별로 최소 100대에서 최대 800대까지 증가시켰으며, 분석 회전교차로가 4지 회전교차로이기 때문에 진입교통량을 400-3,200pcph로 설정하여 분석하였다. 이 연구에서는 3개의 ICD, 4개의 회전차로 속도 및 8개의 진입교통량을 감안하는 총 96(3×4×8)개 시나리오의 평균지체가 분석되었다.

Table 3. Scenarios for analysis

Condition 1 Inscribed circle diameter (m)	Condition 2 Speed of circulatory roadway (kph)	Condition 3 Traffic volume (pcph)
17	15	400-3200
22	20	
	25	
25	30	

분석결과

1. 내접원 지름 17m

분석 회전교차로 중 가장 작은 내접원 지름인 17m일 경우의 지체 분석 결과는 다음과 같다.

모든 교통량 수준에서 회전부 차량 속도가 15km/h일 경우에 가장 낮은 지체를 나타내는 것으로 분석되었다. Table 4의 평균지체를 보면 진입교통량 2,800pcph에서 회전부 주행속도가 15kph일 때에는 51.313초의 평균지체가 발생하였다. 반면 회전부 속도가 가장 높은 30kph일 때에는 82.052초의 평균지체가 발생하는 것으로 나타났다. 이에 가장 높은 평균지체를 보이는 회전부 주행속도 30kph의 지체 82.052초와 이보다 감속된 회전부 주행속도 25kph일 때에는 약 3초 정도의 차이를 보이며, 가장 낮은 회전부 주행속도와의 약 30초 이상의 차이를 보이는 것으로 확인되었다. 따라서 내접원 지름이 17m인 회전교차로일 경우에는 지체측면에서 운영효율이 가장 높은 회전부의 차량의 속도가 15km/h인 것으로 판단되었다.

Table 4. Result of delay analysis (ICD 17m)

(average delay per vehicle, sec/veh)

Total traffic volume (pcph)	Speed of circulatory roadway (kph)			
	15	20	25	30
400	2.813	2.864	3.183	6.952
800	3.162	3.339	3.765	4.612
1200	4.284	4.669	4.804	5.686
1600	6.82	7.357	7.603	8.291
2000	17.439	22.379	22.606	28.818
2400	26.102	47.28	51.968	52.015
2800	51.313	69.504	78.362	82.052
3200	73.207	95.223	97.614	99.021

note:  :LOS C,  :LOS D,  :LOS E,  :LOS F

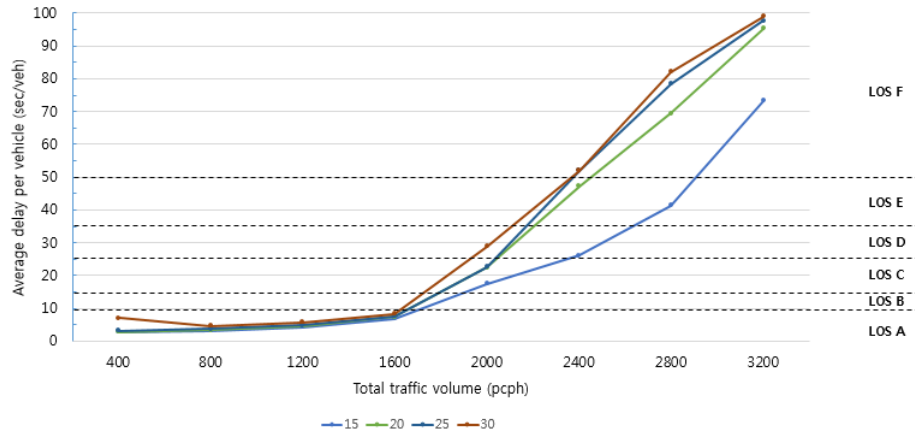


Figure 1. Graph of delay analysis (ICD 17M)

평균지체에 영향을 주는 요인을 파악하기 위해 회전차로의 속도와 진입교통량에 따른 다중선형회귀모형이 개발되었다. 모형의 종속변수(Y)를 평균지체의 ln값 그리고 독립변수를 진입교통량과 회전차로 속도(15, 20, 25, 30(kph)) 더미(dummy)를 활용하였다. 모형개발 결과, 평균지체에 영향을 주는 요인으로는 교통량과 회전차로 속도 15km/h(더미변수)가 선정되었다. 회전부의 속도 15km/h의 계수는 음(-)의 값을 가지며, 이는 회전부의 속도가 15km/h일 경우 평균지체가 감소되며, 이외 속도에서는 오히려 증가되는 것을 의미한다.

Table 5. Result of multiple linear regression model (ICD 17m)

Variable	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	
	B	Std. Error	Beta			
(Constant)	–	.419	.135	3.108	.004	
Traffic volume	X_1	.001	.000	.961	20.512	.000
Circulatory roadway speed : 15kph	X_2	-.342	.137	-.117	-2.499	.018
Average delay model					Adjusted R^2	
$\ln(Y_1) = 0.419 + 0.001X_1 - 0.342X_2$					0.932	

2. 내접원 지름 22m

분석 회전교차로 중 내접원 지름인 22m인 경우, 모든 범위의 진입교통량에서 평균지체가 가장 낮은 회전부의 차량 속도는 30km/h로 분석되었다. 감소효과의 차이를 비교한 결과, 진입교통량이 1,600대 이하일 경우에는 회전부의 차량속도가 증가함에 따라 평균 약 1.38초의 지체 차이를 보이지만, 진입교통량의 증가함에 따라 감소효과도 증가되는 것으로 분석되었다. 예를 들어, 진입교통량 2,400pcph일 경우, 회전부의 차량속도 증가에 따른 평균지체 차이는 최소 11초와 최대 22초인 것으로 평가되었다.

Table 6에서 제시된 바와 같이, 평균지체시간에 따라 서비스수준 C에 도달하는 교통량은 회전부의 속도 15km/h 일 경우 1,600pcph, 그리고 회전부의 속도 20km/h 이상일 경우엔 2,000pcph인 것으로 분석되었다. 또한 회전부의 차량 속도 15-20km/h에서는 2,800pcph에서 서비스수준 F에 도달하였다. 회전부의 차량 속도 25-30km/h에서는 진입교통량 3,200pcph에서 서비스수준 F에 도달하는 것으로 분석되었다. 또한 진입부 교통량은 2,800pcph 일 때, 회전부 주행속도에 따른 지체변화 폭이 가장 큰 것으로 평가되었다. 아울러 Figure 2와 같이, 회전부 주행속도에 따라 분석을 진행한 내접원 22m의 모든 시나리오에서 1,600pcph의 교통량 이상 수준에서 평균지체의 증가폭이 눈에 띄게 증가하는 것으로 나타났다.

Table 6. Result of delay analysis (ICD 22m)

(average delay per vehicle, sec/veh)

Total traffic volume (pcph)	Speed of circulatory roadway (kph)			
	15	20	25	30
400	5.981	2.212	1.893	1.842
800	3.641	2.794	2.368	2.191
1200	4.715	3.833	3.698	3.313
1600	7.32	6.632	6.386	5.849
2000	27.847	21.635	21.408	16.468
2400	48.044	46.997	36.309	25.131
2800	81.081	77.391	48.533	40.342
3200	98.05	96.643	94.252	72.236

note: ▨ :LOS C, ▩ :LOS D, ▭ :LOS E, ▮ :LOS F

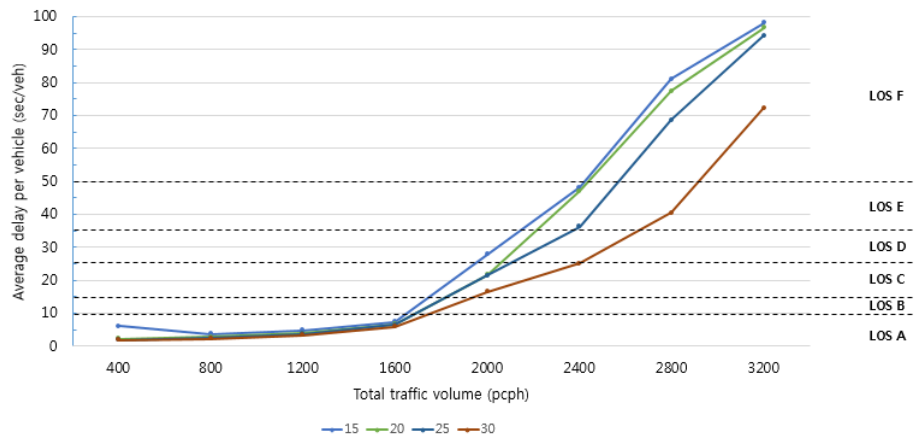


Figure 2. Graph of delay analysis (ICD 22m)

회전차로의 속도와 진입교통량에 따른 다중선형회귀모형을 개발한 결과, 교통량과 회전차로 속도 15km/h가 설명변수로 선정되었다. 선정된 변수 중 회전차로 속도가 15km/h의 계수 값을 분석한 결과, 내접원 지름 17m의 모형 개발 결과와는 달리 내접원 지름 22m에서는 양(+)의 값을 갖는 것으로 평가되었다. 즉, 내접원 지름 22m인 소규모 회전교차로에서는 회전부의 속도가 15km/h일 때에는 평균지체가 증가되며, 20-30km/h일 때에는 감소되는 것으로 분석되었다.

Table 7. Result of multiple linear regression model (ICD 22m)

Variable	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	
	B	Std. Error	Beta			
(Constant)	-	-.135	.139	-.970	.340	
Traffic volume	X_1	.001	.000	.964	21.710	.000
Circulatory roadway speed: 15kph	X_2	.377	.141	.119	2.670	.012
Accident model					Adjusted R^2	
$\ln(Y_2) = -0.135 + 0.001X_1 + 0.377X_2$					0.939	

3. 내접원 지름 25m

분석 회전교차로 중 내접원 지름인 25m인 경우, 모든 범위의 진입교통량에서 평균지체가 가장 낮은 회전부의 차량 속도는 30km/h일 경우로 분석되었다. 진입교통량이 1,600대 이하일 경우에는 회전부의 차량속도가 증가됨에 따라 평균 약 1.38초의 지체 차이를 보이지만, 진입교통량의 증가되면서 최대 50초 이상의 지체감소효과를 보이는 것으로 나타났다.

Table 8에서 나타나듯이, 평균지체시간에 따른 서비스수준을 비교하면 분석대상 회전부의 차량속도 범위인 15-25km/h일 경우는 진입교통량 2,000pcph에서, 그리고 30km/h일 경우에는 2,400pcph에서 서비스수준 C에 도달하는 것으로 판단되었다. 또한 회전부의 차량 속도 15-20km/h에서는 2,800pcph에서 서비스수준 F에 도달하는 것으로 평가되었다. 회전부의 차량 속도 25-30km/h에서는 진입교통량 3,200pcph에서 서비스수준 F에 도달하는 것으로 분석되었다. 아울러 회전부 주행속도에 따른 평균지체의 증가폭이 가장 큰 교통량은 2,800pcph이며, 1,600pcph 이상일 때 교통량이 증가함에 따라 평균지체의 증가폭이 큰 것으로 나타났다.

Table 8. Result of delay analysis (ICD 25m)

(average delay per vehicle, sec/veh)

Total traffic volume (pcph)	Speed of circulatory roadway (kph)			
	15	20	25	30
400	5.973	2.204	1.885	1.834
800	3.633	2.786	2.36	2.183
1200	4.707	3.825	3.69	3.305
1600	7.312	6.624	6.378	5.841
2000	27.839	21.627	21.4	14.46
2400	41.036	44.989	33.301	29.123
2800	81.073	77.383	38.525	30.334
3200	98.042	96.635	94.244	72.228

note:  :LOS C,  :LOS D,  :LOS E,  :LOS F

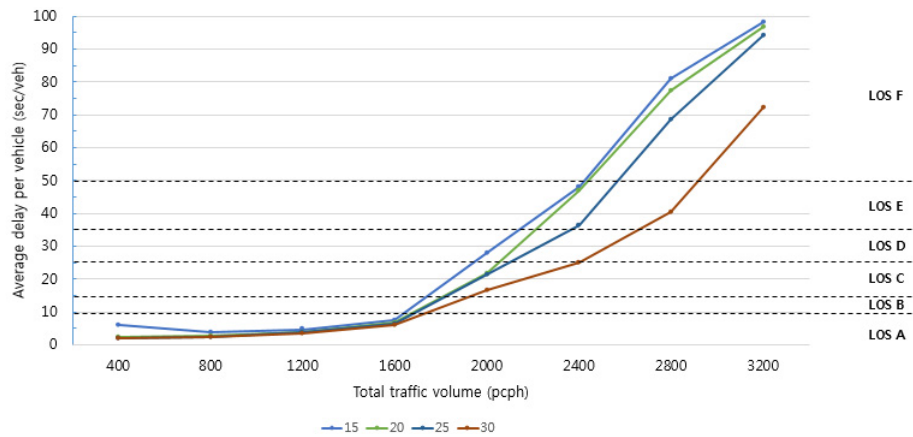


Figure 3. Graph of delay analysis (ICD 25m)

평균지체에 영향을 주는 요인을 파악하기 위해 회전차로의 속도와 진입교통량에 따른 다중선형회귀모형이 개발되었다. 모형개발 결과, 평균지체에 영향을 주는 요인으로 교통량과 회전차로의 속도 15km/h가 선정되었다. 선정된 변수 중에서 회전차로 속도가 15km/h인 경우는 내접원 지름 22m인 경우와 동일하게 변수의 계수가 양(+)의 값을 가지며, 평균지체가 증가되는 것으로 평가되었다.

Table 9. Result of multiple linear regression model (ICD 25m)

Variable	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients		t	Sig.	
	B	Std. Error	Beta				
(Constant)	-	-.134	.136		-.987	.332	
Traffic volume	X_1	.001	.000	.965	22.166	.000	
Circulatory roadway speed: 15kph	X_2	.372	.138	.117	2.697	.012	
Accident model						Adjusted R^2	
$\ln(Y_3) = -0.134 + 0.001X_1 + 0.372X_2$						0.941	

4. 결과논의

소규모 회전교차로의 운영을 평가하기 위해 내접원 지름과 회전부의 차량의 속도에 따라 지체를 분석한 결과를 논의하면 다음과 같다.

첫째, 내접원 지름 17m에서는 회전부 주행속도가 증가됨에 따라 평균지체가 증가되었으며, 이 외 유형에서는 속도가 증가함에 따라 지체가 감소하는 것으로 분석되었다. 내접원 지름 17m인 소규모 회전교차로의 적정 회전부의 주행속도는 15km/h, 그리고 내접원 지름 22m와 25m인 경우에는 회전부의 주행속도 30km/h에서 가장 낮은 평균 지체를 보이는 것으로 평가되었다. 반면, 내접원 지름이 22m 이상인 소형 회전교차로의 경우에는 회전부 주행속도가 증가할수록 평균지체가 감소하는 현상을 보이는 것으로 분석되었다. 이는 최소한의 교통섬을 가지는 내접원 지름 17m의 초소형 회전교차로는 교차로 전체의 면적도 다른 회전교차로에 비해 작기 때문에 회전부 주행차량이 높은 속도를 유지하여 통과하려면 진입로에서 상당한 지체가 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 내접원 지름 17m이하의 최소 내접원 지름을 가지는 초소형 회전교차로의 경우엔 회전부의 설계속도를 15km/h로 제한하여 지체를 줄이는 것이 적합한 것으로 판단되었다. 또한 회전부의 주행속도가 낮기 때문에 안전한 교차로 진입을 위해 회전부로 진입하기 전, 충분한 속도 감소가 필히 요구되는 것으로 평가되었다. 이에 따라 소규모 회전교차로의 효율적인 운영을 위해 교차로 진입 20m이전에 과속방지턱, 노면요철포장, 칼라포장 등 속도감소를 위한 시설이 설치되어야 할 것으로 판단되었다.

둘째, 평균지체에 영향을 끼치는 요인을 분석하기 위해 진입교통량과 회전차로 속도에 따른 평균지체모형을 개발한 결과, R^2 값 0.932-0.941인 설명력 높은 3개의 다중선형회귀모형이 개발되었다. 개발된 모든 모형에서 진입교통량과 회전차로의 주행속도 15km/h(더미변수)가 설명변수로 채택되었다. 특히 내접원 지름 17m의 평균지체 모형에서는 회전차로 속도가 15km/h일 경우 평균지체가 감소되며, 이외 속도에서는 증가되는 것으로 분석되었다. 그러나 내접원 지름 22m와 25m일 경우에는 회전차로의 주행속도가 15km/h일 경우 평균지체가 증가되었으며, 이 외 속도에서는 감소되는 것으로 평가되었다.

Table 10. Average delay model by inscribed circle diameter of small-scale diameter

Inscribed circle diameter	Average delay model
17m	$\ln(Y_1) = 0.419 + 0.001X_1 - 0.342X_2$
22m	$\ln(Y_2) = -0.135 + 0.001X_1 + 0.377X_2$
25m	$\ln(Y_3) = -0.134 + 0.001X_1 + 0.377X_2$

셋째, 모형개발에서 회전부의 주행속도 15km/h(더미변수)가 선정됨에 따라 일정 서비스수준에 도달하는 진입교통량이 도출되었다. 이러한 진입교통량은 내접원 지름과 회전부의 주행속도가 15km/h인 경우와 15km/h가 아닌 20km/h 이상인 경우로 구분되었다. 서비스수준 D에 도달하는 교통량은 내접원 지름 17m인 회전교차로에서 회전부의 주행속도가 15km/h인 경우에 2,523pcph인 것으로 분석되었다. 회전부의 주행속도가 15km/h가 아닌 경우엔 2,181pcph로 회전부의 주행속도 15km/h인 경우와 약 340대의 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이는 내접원 지름 17m인 회전교차로에서는 회전부 주행속도가 증가할수록 서비스 수준에 도달하는 진입교통량은 감소하는 것을 의미한다. 그 이유로 내접원 지름 17m의 평균지체시간이 회전부 주행속도가 증가할수록 평균지체가 높아져 이에 따라 교차로가 수용할 수 있는 도로 용량에서도 차이를 보이기 때문인 것으로 판단되었다.

아울러 Figure 4에서 나타나듯이, 내접원 지름 22m 및 25m인 경우의 평균지체모형은 거의 동일한 그래프 양상을 보였으며, 서비스수준 D에 도달하는 교통량 또한 유사한 것으로 분석되었다. 내접원 지름 22m 이상이며 회전부의 주행속도가 15km/h인 경우에는 약 2,357pcph에서, 그리고 회전부의 주행속도 15km/h가 아닌 경우엔 약 2,734pcph에서 서비스수준 D에 도달하는 것으로 나타났다.

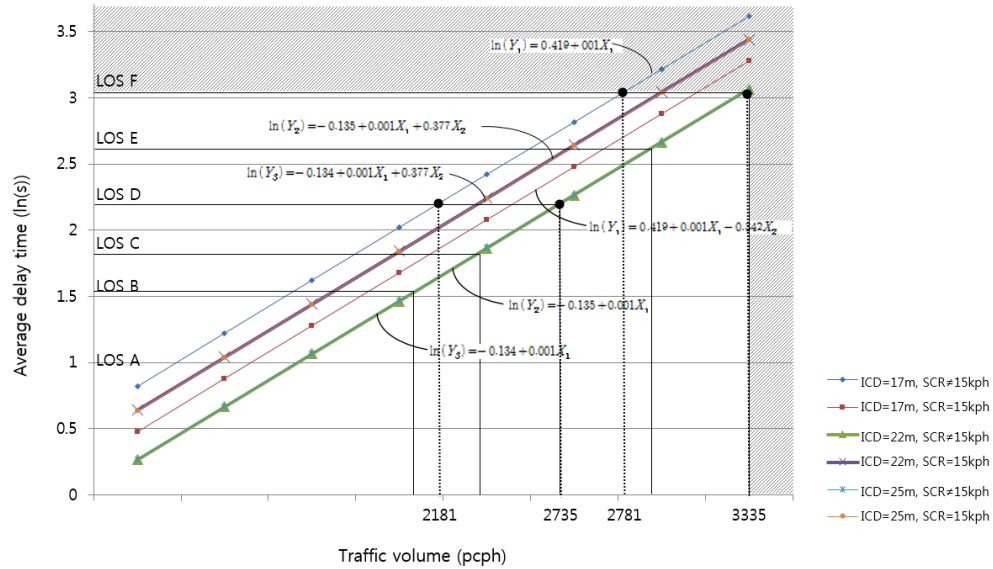


Figure 4. Comparison of LOS by scenario

넷째, 서비스수준 F로 개선이 요구되는 분석대상 회전교차로의 진입교통량은 다음과 같다. 내접원 지름 17m인 회전교차로에서는 회전부의 주행속도가 15km/h인 경우 진입교통량 2,957pcph에서, 그리고 15km/h가 아닌 경우에는 2,781pcph에서 서비스수준 F에 도달하였다. 내접원 지름이 22m 이상인 회전교차로에서는 회전부의 주행속도 15km/h인 경우에 3,122pcph, 그리고 15km/h가 아닌 경우엔 3,334pcph에서 서비스 수준 F에 도달하는 것으로 분석되었다. 이와 관련하여 회전교차로 관련 설계지침에서 소규모 회전교차로의 경우 최대 진입교통량을 3,400pcph로 제시하고 있지만 이 연구에서는 내접원 지름이 22-25m인 소형 회전교차로의 경우 약 3,100pcph 수준에서 서비스 수준 F에 도달하는 것으로 평가되었다. 이에 관련지침의 재검토가 필요할 것으로 판단되었다.

결론

이 연구는 소규모 회전교차로의 평균지체를 내접원 지름과 회전부의 주행속도에 따라 분석하여 운영효율을 판단한 연구로 주요 결론은 다음과 같다.

첫째, 내접원 지름, 회전차로의 주행속도 및 진입교통량이 고려된 총 96개의 시나리오 분석을 통해 소규모 회전교차로의 기하구조 조건에 적합한 설계속도가 도출되었다. 내접원 지름 17m인 회전교차로에서 평균지체와 진입교통량 측면에서 가장 효율적인 회전차로의 속도는 15km/h인 것으로 분석되었다. 이외 내접원 지름 22m 및 25m인 회전교차로에서는 회전차로 속도 25km/h가 적합한 설계속도로 평가되었다. 기존 회전교차로 설계지침에는 회전부의 주행속도가 내접원의 지름 및 교차로의 면적과 상관없이 일괄적으로 25km/h를 설계속도로 제시하였지만, 이 연구를 통해 내접원 직경에 따른 설계지침의 재검토가 필요한 것으로 판단되었다.

둘째, 분석을 진행한 17-25m의 내접원 지름을 가지는 소규모 교차로에서 서비스수준에 도달하는 진입교통량은 회전부의 주행속도에 따라 상이하였으며, 서비스 수준 D에 도달하는 진입교통량은 약 2,180-2,740pcph로 약 560대의 차이를 보이는 것으로 확인되었다. 소규모 회전교차로는 대부분 도심부에 설치되며, 도심부 교차로 설계기준 서비스 수준이 D인 것을 감안한다면, 내접원 지름에 따른 적정 회전부의 주행속도에 대한 고려도 필요한 것으로 평가되었다.

셋째, 혼잡수준 F로 교차로의 개선이 요구되는 교통량은 약 2,780pcph 이상인 것으로 분석되었다. 따라서 내접원 지름 25m 이하의 소규모 회전교차로를 설치할 경우에는 지체 감소를 위해 진입교통량에 대한 조사가 반드시 선행

되어야 할 것으로 판단되었다. 또한 진입교통량 2,780pcph 이상인 교차로일 때에는 소규모 회전교차로 신규 설치에 대한 재검토가 요구되는 것으로 분석되었다.

이 연구는 기존 소규모 회전교차로 관련지침을 참고하여 내접원 지름과 회전부의 주행속도에 따른 차량당 평균지체를 기준으로 운영 효율을 평가한 것으로, 현재 운영되고 있는 소형 회전교차로와의 비교분석은 진행되지 못한 한계점을 내포하고 있다. 또한 상충횡수, 사고가능성, 도로시설물의 유무에 따른 교통사고 발생률의 변화 등의 안전성에 대한 분석과 연구에서 제시한 지체에 영향을 주는 요인과 관련된 검증 및 교차로의 유형(4지 및 5지)에 따른 분석은 진행되지 못한 한계점도 가진다. 아울러, 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 기하구조 및 교통량을 증점적으로 고려하여 운전자의 행태 및 다양한 환경조건은 고려하지 못하였다. 따라서 현실에 반영함에 있어서 오차가 존재할 수 있는 제약사항이 포함된다. 향후 보다 다양한 기하구조 조건을 고려한 안전성에 대한 검증을 통한 소규모 회전교차로 분석이 진행된다면, 안전하고 효율적인 회전교차로의 운영을 위한 대책수립에 긍정적인 영향을 줄 것으로 기대된다.

REFERENCES

- Bastian J.S., Nagui M. R., Hughes R. (2007), Exploratory Analysis of Pedestrian Signalization Treatments, at One and Two-lane Roundabouts Using Microsimulation, TRB 2007 Annual Meeting.
- Go M. S., Lee Y. J. (2010), A Study on the Estimation of Critical Gaps at Small Roundabouts, The 60th Conference of KST, Korean Society of Transportation, 434-439.
- Kang S. I., Lee Y. W. (2014), An Analysis of the Vehicular Delay Caused by Scrambled Crosswalk Installation in a Roundabout, J. Korean Soc. Transp., 32(3), Korean Society of Transportation, 218-226.
- Kim Y. B., Lee D. M., Jun J. W., Cho H. S. (2016), An Estimation of the Minimum Distance Between a Roundabout and Signal Crosswalk Using VISSIM, J. Korean Soc. Transp., 33(4), Korean Society of Transportation, 337-347.
- Lee Y. J., Lee I. H., Lee D. M. (2010), Determination of Passenger Car Equivalents When Estimating Capacity at Small 3-leg Roundabouts, J. Korean Soc. Transp., 28(6), Korean Society of Transportation, 65-74.
- Lim J. K., Park B. H. (2011), Effectiveness Analysis of 3-lane Roundabout by Scenario, Journal of Korea Planners Association, 46(5), 223-231.
- Lim J. K., Park N. Y., Park B. H. (2017), Simulated Operational Efficiency Analysis of Special Roundabout, Korean Society of Road Engineers, 19(1), 81-90.
- Ministry of land, Infrastructure and Transport (2014), Roundabout Design Guidelines.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2013), Korea Highway Capacity Manual.
- Ministry of Security and Public Administration (2012), Design Principle of Community Road Roundabout.
- Sangster J., Rakha H. Al-Kaisy A. (2014), Comparative Analysis of the Through-about, Roundabout and Conventional Signalized Intersection Designs, TRB 2015 Annual Meeting.
- Sergan T., Kubra C., Mustafa S., Pelin C. (2013), Different Approaches to Minimum Delay Prediction at Single-lane Traffic Circle in Izmir, Turkey, Canadian Journal of Civil Engineering, 40(3), 274-284.
- Stijn D., Tom B., Erik N., Geert W. (2010), Externality of Risk and Crash Severity at Roundabouts, Accident Analysis and Prevention, 42, 1966-1973.
- Yongsheng C., Bhagwant P., Craig L. (2011), Effect of Speed on Roundabout Safety Performance- Implications for use of speed as a surrogate measure, TRB Annual Meeting.