

접근로별 교통량을 고려한 터보형 회전교차로도입 기준에 관한 연구

A Study on the Introduction Criteria of Turbo Roundabout by Considering Approach Lane's Traffic Volume

이 현 정* · 안 우 영** · 남 두 희***

* 주저자 : 국립공주대학교 도시융합시스템공학과 석사과정

** 교신저자 : 국립공주대학교 도시·교통공학과 교수

*** 공저자 : 한성대학교 스마트도시교통과 교수

Hyeon Jeong Lee* · Woo-Young Ahn** · Doo Hee Nam***

* Master's Student, Dept. of Urban Systems Engineering, Kongju National University

** Professor, Dept. of Urban & Transportation Engineering, Kongju National University

*** Professor, Dept. of Smart Urban & Transportation, Hansung University

† Corresponding author : Woo-Young Ahn, ahnwy@kongju.ac.kr

Vol. 23 No.5(2024)
October, 2024
pp.85~99

pISSN 1738-0774
eISSN 2384-1729
<https://doi.org/10.12815/kits.2024.23.5.85>

Received 15 October 2024
Revised 22 October 2024
Accepted 23 October 2024

© 2024. The Korean Society of
Intelligent Transport Systems. All
rights reserved.

요 약

터보형 회전교차로는 회전교차로 내부의 주행 경로를 분리하여 차선 변경 없이 회전교차로를 통과할 수 있는 회전교차로이다. 따라서 기존 2차로형 회전교차로의 합·분류 및 차선 변경 시 발생하는 상충 문제를 최소화할 수 있는 장점을 갖고 있다. 본 연구에서는 접근로별 교통량을 고려한 터보형 회전교차로 유형 도입 기준을 제시하고, 그 효과는 VISSIM을 통해 분석하였다. 분석 결과 진입교통량이 균등하고 2,000~2,600대/시 경우 2차로형 회전교차로, Basic(Turbo)의 도입이 타당한 것으로 분석되었다. 반면 진입교통량이 불균등하고 2,400~2,800대/시이면서 주도로가 서로 마주 보는 접근로일 때, Basic(Turbo), Egg(Turbo)가, 2,000~2,400대/시이면서 주도로가 서로 인접한 접근로일 때, Knee(Turbo)가 도입 타당한 것으로 분석되었다.

핵심어 : 터보형 회전교차로, VISSIM, 균등, 불균등

ABSTRACT

A turbo roundabout is a type of roundabout that allows vehicles to pass through the roundabout without changing lanes by separating the internal lanes. Thus, it has the advantage of minimizing conflicts arising from converging, diverging, and lane changing in existing two-lane roundabouts. In this study, the criteria for introducing a turbo roundabout are suggested by considering traffic volume conditions of the approach lane, and the results were analyzed using a VISSIM. The results showed that the 2-lane roundabout and basic(turbo) are the appropriate types when the approach traffic volume is a balanced condition with 2,000 - 2,600veh/h. On the other hand, basic(turbo) and egg(turbo) are appropriate types when the approach traffic volume is an unbalanced condition with 2,400 - 2,800veh/h under the condition of a major road grouped as an opposite combination. The major road is grouped as an adjacent combination when there is an approach volume of 2,000 - 2,400veh/h, and the knee(turbo) is the appropriate type in this case.

Key words : Turbo roundabout, VISSIM, Balanced condition, Unbalanced condition

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

회전교차로(Roundabouts)는 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. 회전교차로 설계 지침에 따른 2차로형 회전교차로는 단일 차선 회전교차로의 용량인 2,000대/시를 초과하고, 신호교차로의 전환 용량인 3,200대/시보다 적은 경우 도입되고 있는 무신호 교차로이다.

이론적으로 2차로형 회전교차로(일반형 회전교차로)는 회전교차로의 이점을 가짐과 동시에 단일 차선 회전교차로보다 더 많은 용량을 수용하는 것으로 보인다. 그러나 실제로는 차선 수가 늘어남에 따라 진·출입 차량과의 충돌, 회전차로 내 엇갈림(weaving)현상 등이 발생하여 용량 감소 및 안전 문제가 발생하고 있다. 또한, 접근로별 교통류가 불균등 해질 경우에도 회전부 진입이 어려워 운영 효율성이 감소하며 이를 해소하고자 Signal Metering 관련 연구가 진행되고 있으나(Ahn, 2012), 비신호교차로인 회전교차로에서 신호등을 도입하는 것은 다소 어려운 상황이다.

해외에서는 경험적으로 2차로형 회전교차로가 1차로형 회전교차로에 비해 용량이 30%만 증가한다고 보고 있으며 네덜란드, 프랑스, 스위스 등 많은 국가에서 안전상의 이유로 2차로형 회전교차로 설치를 권장하지 않는다(Pulvirenti et al., 2021). 국내에서도 2010~2018년 설치한 회전교차로의 설치 후 1년 교통사고를 분석한 결과 소형 및 1차로형 회전교차로에서는 42%의 교통사고가 감소하였지만, 2차로형 회전교차로에서는 교통사고가 0.4% 증가한 것으로 분석되었다(Korea Transportation Institute, 2022).

2차로형 회전교차로의 용량 감소 및 안전 문제를 해소하고자 1998년 네덜란드에서 터보형 회전교차로(Turbo Roundabout)가 개발되었다. 터보형 회전교차로는 해외에서 2차로형 회전교차로의 대안으로써 설치되고 있으며, 국내에서도 2022년 8월 회전교차로 설계지침을 개정하면서 터보형 회전교차로 설치 조건으로 처리용량과 기하구조 제원을 제시하였지만, 진입교통 상황과 터보형 회전교차로 유형별 적정 기준 고려하지 않아 설치를 결정하기 어려운 실정이다.

이에 본 연구에서는 일반 2차로형 회전교차로와 터보형 회전교차로 유형에 따른 접근로별 교통류의 불균등 비율 및 방향별 교통량을 고려하여 각 교차로의 적정교통량을 도출하였다. 상황에 따른 적합한 교차로 유형을 도출하고 이를 바탕으로 터보형 회전교차로 유형별 적정 도입 기준을 제시하였다.

2. 연구의 범위 및 수행절차

본 연구는 2차로형 회전교차로(일반형 회전교차로)와 국내 설계지침에서 제시하는 터보형 회전교차로(특수형 회전교차로) 7개 유형을 대상으로 연구를 진행하였다. 연구의 진행 과정은 다음과 같다.

첫째, 국내·외 터보형 회전교차로 관련 연구를 검토하여 터보형 회전교차로에 영향을 미치는 요인(균등 및 불균등 교통상황, 방향별 회전 교통량 비율 등)을 도출한다.

둘째, 도출된 요인을 바탕으로 다양한 분석 시나리오를 작성하고 마이크로시뮬레이션 프로그램인 VISSIM을 활용하여 회전교차로 유형별(일반형 및 특수형 회전교차로) 지체시간 및 서비스수준(LOS)을 분석한다.

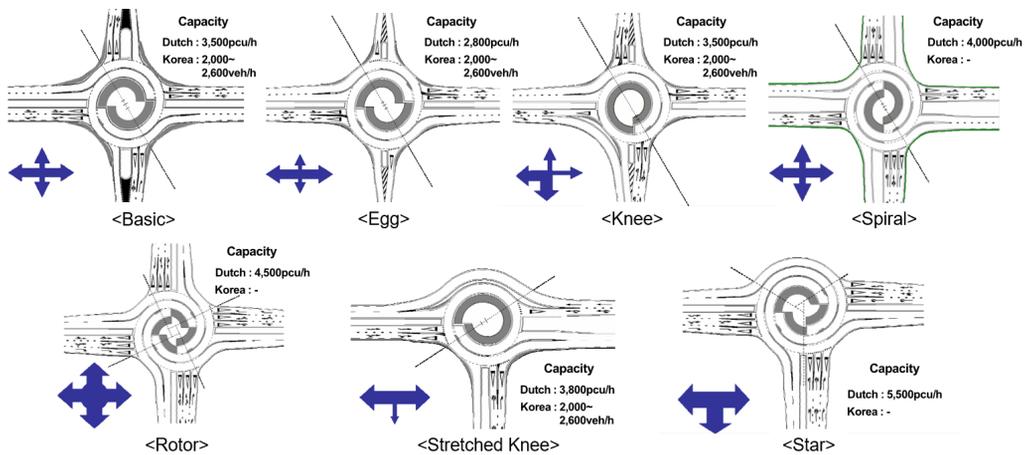
셋째, Two-Way ANOVA 분석을 통해 분석 결과의 통계적 유의성을 검증한 후 시나리오와 유형에 따라 도출된 적정교통량을 검토하여 터보형 회전교차로의 적정 도입 기준을 제시한다.

II. 이론적 고찰

1. 터보형 회전교차로(나선형 회전교차로)

터보형 회전교차로는 진·출입로와 회전부에서 차선을 물리적으로 분리하는 연속적인 나선형 경로로 구성된다. 운전자는 교차로 진입 전 진입 차로를 미리 선택하여 교차로에 진입한 후 차선을 변경하지 않은 상태로 교차로를 통과하게 된다. 이러한 터보형 회전교차로의 운영은 회전부 내의 상층 및 차선 변경 혼란 문제를 해결하는 장점을 갖고 있다.

터보형 회전교차로 유형은 진·출입로 차로수 및 주도로의 방향으로 구분되고 있으며 <Fig. 1>과 같이 해외와 국내의 차이점이 존재한다. 해외의 터보형 회전교차로는 7개의 유형으로 구분하고 있으며 대부분의 용량이 2차로형 회전교차로보다 높다. 국내에서는 회전부가 3차로 이상인 회전교차로를 지양하여 회전부가 2차로인 터보형 회전교차로의 유형을 제시하고, 용량은 유형별 구분이 없으며 2차로형 회전교차로보다 낮다.



<Fig. 1> Turbo Roundabout Type & Capacity

2. 선행연구검토

터보형 회전교차로는 2차로형 회전교차로의 대안으로써 그 성능을 평가하는 연구가 진행되고 있다. 국내에서는 VISSIM을 활용하여 터보형 회전교차로의 국내 적용 방안을 검토하고 있다. Song(2011)은 터보형 회전교차로의 용량이 2차로형 회전교차로보다 약 10% 높다고 하였으며, 터보형 회전교차로의 부도로의 교통량과 좌회전 교통량 비율 검토의 필요성을 강조하였다. Song and Lee(2021)는 주도로와 부도로의 방향별 교통량 비율에 따라 분석을 수행하였으며 터보형 회전교차로의 적정교통량을 2,400~2,800대/시로 제시하였다.

해외에서는 터보형 회전교차로의 교통운영, 안전성, 환경성 등의 측면에서 성능평가 연구가 활발하게 이루어지고 있다. Engelsman and Uken(2007)은 Quick-Scan Model을 활용하여 터보형 회전교차로의 교통량이 접근로 교통량 균형에 따라 3,000~3,500대/시일 때 1차로, 2차로형 회전교차로보다 효율성이 높다고 하였다. Anagnostopoulos and Kehagia(2018)는 2차로형 회전교차로가 터보형 회전교차로로 전환하였을 때 충돌 밀도가 더 낮고, 오염물질 배출량이 평균 30% 감소한 것을 확인하였다. Giuffrè et al.(2012)에서는 Gap Acceptance Model을 활용하여 터보형 회전교차로에서 주도로와 부도로의 교통량이 명확하게 차이가 나는 경우 더 효율

적인 교차로인 것을 확인하였다.

위의 선행연구를 <Table 1>과 같이 정리하였다. 선행연구를 검토하였을 때, 터보형 회전교차로는 2차로형 회전교차로보다 뛰어난 성능을 갖고 있으며 이는 특정한 상황에서 유효하다는 것을 알 수 있다. 국내 회전교차로 설계지침에서는 이러한 기준이 미흡하며 유형별로 고려되고 있지 않다. 국내연구에서도 터보형 회전교차로 기본형(Basic)을 대상으로 하고 있어 터보형 회전교차로의 유형에 따른 적정 도입 기준 연구는 부족한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 선행연구를 통해 도출한 요인을 바탕으로 기존 국내연구에서 고려되지 않은 다양한 유형의 터보형 회전교차로의 도입 기준을 제시하고자 한다.

<Table 1> Review of Turbo Roundabout Study Results

Author	Method	Variable
Song(2011)	VISSIM	- Major & Minor Road Turning Volume Rate
Song and Lee(2021)	VISSIM	- Major & Minor Road Turning Volume Rate
Engelsman and Uken(2007)	Quick-Scan Model	- Major & Minor Road Volume Rate
Anagnostopoulos and Kehagia(2018)	VISSIM	- Real-Time Volume Data
Giuffrè et al.(2012)	Gap Acceptance Mode	- Major & Minor Road Volume Rate

Ⅲ. 분석방법론

1. 분석도구 선정

회전교차로 용량 추정 모델은 경험적 회귀 모형, 간격수라이론, 미시적 시뮬레이션 모형의 세 가지 범주로 분류할 수 있다(Elhassy et al., 2020). 터보형 회전교차로의 설치 사례가 매우 적은 국내에서는 관측데이터의 필요성이 낮은 미시적 시뮬레이션 모형을 활용하여 분석하고 있다. 본 연구에서도 미시적 시뮬레이션 모형으로 터보형 회전교차로를 분석하고자 한다.

미시적 시뮬레이션 모형 중 VISSIM은 회전교차로 교통운영 시뮬레이션에 가장 적합한 프로그램이라는 의견이 지배적이며(Trueblood and Dale, 2003), 터보형 회전교차로를 개발한 Fortuijn(2009)은 터보형 회전교차로의 회전부 교통운영을 구현할 수 있는 VISSIM 분석을 권장하였다. 따라서, 본 연구에서는 터보형 회전교차로의 미시적 시뮬레이션 분석을 위한 프로그램으로 VISSIM(21.0)을 선정하였다.

2. 분석 시나리오 설정

본 연구에서는 선행연구 검토를 통해 도출한 요인을 바탕으로 세 가지의 조건을 고려하여 <Table 2>와 같이 시나리오를 설정하였다.

첫 번째 조건은 진입교통량이다. 200대 단위로 증가하면서 400~3,200대/시 범위의 지체시간을 산정하여 회전교차로 용량 기준인 서비스수준(LOS) E가 되기 직전 진입교통량을 적정교통량으로 산정하였다.

두 번째 조건은 교통량의 불균등 비율 및 조합이다. 불균등할수록 운영효율성이 높은 터보형 회전교차로 특징과 기하구조에 따른 주도로 방향을 고려하여 균등, 불균등 상황과 대향적 진입로가 주도로인 경우와 인접한 진입로가 주도로인 경우로 설정하였다.

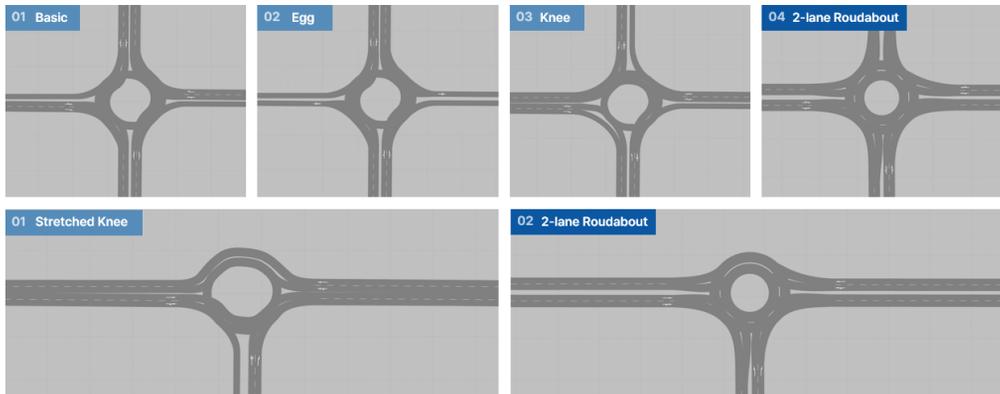
세 번째 조건은 부도로의 방향별 교통량 비율이다. 주도로의 좌회전, 직진, 우회전 비율은 2:7:1로 고정하고, 부도로의 좌회전 교통량이 많은 경우와 적은 경우로 설정하였다. 3지 회전교차로의 경우 접근로별 회전 방향의 차이로 통행에 영향을 주는 회전 방향을 고려하여 직진교통량을 우회전 교통량으로 전환하였다.

<Table 2> Analysis Scenario

Network	Scenario		Major & Minor Road Volume Rate	Major Road Volume Pattern	Minor Road Turning Volume Late (L:T:R)
4-Leg Roundabout	Scenario A	1	5:5	-	1:6:3
		2			3:6:1
	Scenario B	1	7:3(35:15:35:15)	Opposite	1:6:3
		2			3:6:1
	Scenario C	1	9:1(45:5:45:5)	Opposite	1:6:3
		2			3:6:1
	Scenario D	1	7:3(15:15:45:25)	Adjacent	1:6:3
		2			3:6:1
	Scenario E	1	9:1(5:5:55:35)	Adjacent	1:6:3
		2			3:6:1
3-Leg Roundabout	Scenario F	1	5:5	-	1:0:9
		2			3:0:7
	Scenario G	1	8:2	-	1:0:9
		2			3:0:7
	Scenario H	1	9:1	-	1:0:9
		2			3:0:7

3. 분석 네트워크 구축

분석 네트워크는 Korea Transportation Institute(2022)에서 제시하는 기하구조를 반영하여 구축하였다. 회전부 설계속도 20km/h, 차로폭 3.5m, 회전차로폭 5m, 진입부 최대설계속도는 50km/h로 설정하였으며, 중앙교통섬지



<Fig. 2> Turbo Roundabout Network in VISSIM

름은 2차로형 21m, 터보형 23m로 구축하였다. 중차량 비율은 0%이며, VISSIM 내에서 구축한 유형별 회전교차로는 다음 <Fig. 2>와 같다. 또한, VISSIM 내에서 회전교차로 규칙을 실현하기 위한 통행우선권(Priority Rule)으로 2차로형과 터보형 회전교차로의 최소 차간시간은 3.0초, 최소 차간간격은 5.0m로 설정하였다.

IV. 분석 결과

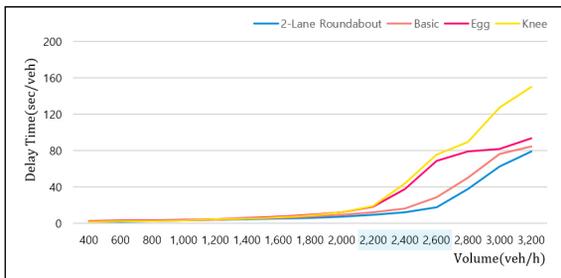
1. 시나리오별 분석 결과

1) 시나리오 A

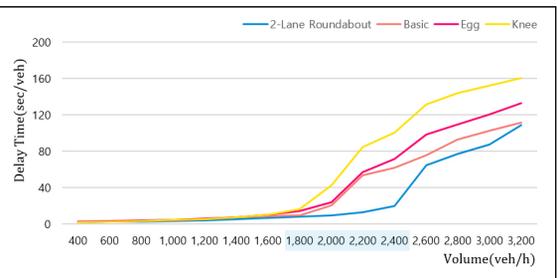
시나리오 A에서 2차로형 회전교차로와 터보형 회전교차로 유형별 차량당 지체시간(초/대)을 분석하였다. <Table 3>은 시나리오 A의 지체시간 분석값으로 서비스수준(LOS)이 A로 일정한 400~1,000대/시는 생략하며, 서비스수준(LOS)이 E 이상인 경우 음영으로 표시하였다. A-1에서는 2차로형 회전교차로, Basic은 2,600대/시, Egg, Knee는 2,200대/시 이후로, A-2에서는 2차로형 회전교차로는 2,400대/시, Basic, Egg는 2,000대/시, Knee는 1,800대/시 이후로 지체가 급격하게 증가하여 서비스수준(LOS)이 E~F로 도달하였다.

<Table 3> Scenario A Analysis Results

Delay Time(sec/veh)			Volume(veh/h)										
Turbo Roundabout Type & Scenario			1,200	1,400	1,600	1,800	2,000	2,200	2,400	2,600	2,800	3,000	3,200
A	1	2-Lane Roundabout	3.50	4.16	4.91	5.98	7.22	9.28	12.38	17.68	37.62	62.45	79.12
		Basic	4.06	4.96	5.89	7.39	9.33	12.32	16.24	28.83	49.74	76.21	84.37
		Egg	4.71	5.75	7.20	9.41	12.26	18.39	37.53	68.75	79.02	82.01	93.67
		Knee	4.23	5.23	6.67	8.77	12.36	19.20	43.50	75.42	89.46	127.25	150.09
	2	2-Lane Roundabout	4.01	4.99	6.29	7.59	9.29	13.02	19.52	64.24	76.94	87.09	108.51
		Basic	5.43	7.28	8.75	9.58	20.62	53.33	61.68	75.46	92.76	102.16	111.67
		Egg	5.61	7.51	9.90	13.94	24.10	57.18	71.09	98.44	109.33	120.32	132.81
		Knee	5.44	7.32	10.32	16.40	42.46	84.59	100.09	131.30	143.59	151.73	160.64



<Fig. 3> A-1 Delay Time Analysis Result



<Fig. 4> A-2 Delay Time Analysis Result

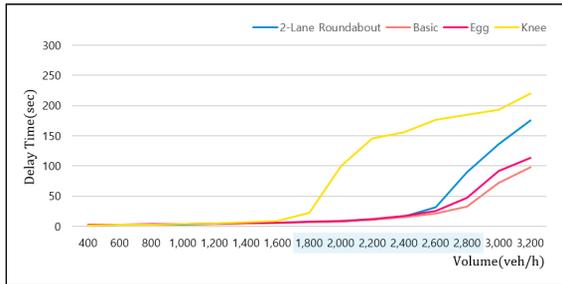
2) 시나리오 B

시나리오 B에서 2차로형 회전교차로와 터보형 회전교차로 유형별 차량당 지체시간(초/대)을 분석하였다.

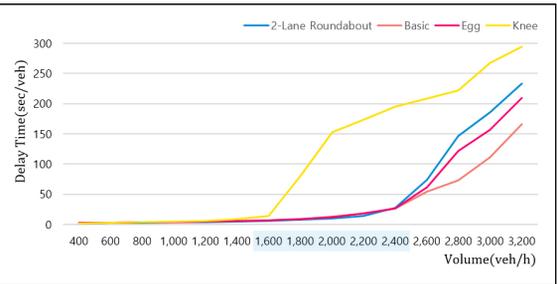
<Table 4>는 시나리오 B의 지체시간 분석값으로 서비스수준(LOS)이 A로 일정한 400~1,000대/시는 생략하며, 서비스수준(LOS)이 E 이상인 경우 음영으로 표시하였다. B-1에서는 Basic은 2,800대/시, 2차로형 회전교차로와 Egg는 2,600대/시, Knee는 1,800대/시 이후로, B-2에서는 2차로형 회전교차로, Basic, Egg 2,400대/시, Knee는 1,600대/시 이후로 지체가 급격하게 증가하여 서비스수준(LOS)이 E~F로 도달하였다.

<Table 4> Scenario B Analysis Results

Delay Time(sec/veh)		Volume(veh/h)											
Turbo Roundabout Type & Scenario		1,200	1,400	1,600	1,800	2,000	2,200	2,400	2,600	2,800	3,000	3,200	
B	1	2-Lane Roundabout	3.47	4.14	5.19	6.33	8.00	11.03	16.18	31.28	89.21	136.37	175.15
		Basic	3.70	4.42	5.39	6.48	8.18	11.01	14.52	20.98	32.38	72.28	97.41
		Egg	4.19	5.17	5.93	7.34	8.70	12.12	16.77	24.93	46.88	91.16	113.52
		Knee	4.79	6.43	9.26	22.34	99.90	145.44	155.31	176.06	185.09	193.39	220.18
	2	2-Lane Roundabout	3.79	4.64	5.60	7.28	9.69	13.66	27.64	74.01	146.48	186.16	233.14
		Basic	4.36	5.54	7.12	9.17	12.50	18.39	26.83	53.95	73.00	110.73	165.61
		Egg	4.56	5.72	7.09	9.00	11.72	17.64	26.80	61.18	121.66	156.28	209.71
		Knee	5.83	8.35	14.18	80.43	152.31	172.96	195.16	208.83	222.07	267.75	294.40



<Fig. 5> B-1 Delay Time Analysis Result



<Fig. 6> B-2 Delay Time Analysis Result

3) 시나리오 C

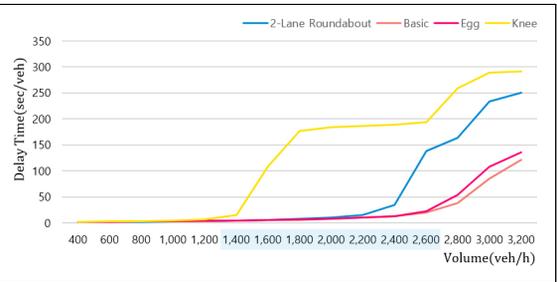
시나리오 C에서 2차로형 회전교차로와 터보형 회전교차로 유형별 차량당 지체시간(초/대)을 분석하였다. <Table 5>는 시나리오 C의 지체시간 분석값으로 서비스수준(LOS)이 A로 일정한 400~1,000대/시는 생략하며, 서비스수준(LOS)이 E 이상인 경우 음영으로 표시하였다. C-1에서는 Basic은 2,800대/시, Egg는 2,600대/시, 2차로형 회전교차로는 2,400대/시, Knee는 1,400대/시 이후로, C-2에서는 Basic, Egg는 2,600대/시, 2차로형 회전교차로는 2,400대/시, Knee는 1,400대/시 이후로 지체가 급격하게 증가하여 서비스수준(LOS)이 E~F로 도달하였다.

<Table 5> Scenario C Analysis Results

Delay Time(sec/veh)			Volume(veh/h)										
Turbo Roundabout Type & Scenario			1,200	1,400	1,600	1,800	2,000	2,200	2,400	2,600	2,800	3,000	3,200
C	1	2-Lane Roundabout	3.38	4.02	5.12	7.00	9.19	12.61	30.40	122.84	159.03	177.53	195.94
		Basic	3.36	3.85	4.67	5.49	6.78	8.72	11.48	16.62	26.14	62.75	100.84
		Egg	3.56	4.17	5.05	6.04	7.22	9.02	11.79	17.29	36.90	87.92	120.19
		Knee	6.32	11.98	80.38	167.61	177.40	178.19	181.20	184.01	193.69	253.96	273.89
	2	2-Lane Roundabout	3.52	4.19	5.36	7.25	9.87	14.46	34.53	137.95	163.44	233.86	250.63
		Basic	3.46	4.11	5.08	6.00	7.47	9.86	13.06	19.91	38.49	84.61	120.75
		Egg	3.79	4.40	5.29	6.53	7.93	9.67	13.25	21.94	53.44	108.09	136.03
		Knee	7.03	15.04	108.02	177.32	183.54	186.58	189.27	193.21	258.44	288.53	291.86



<Fig. 7> C-1 Analysis Result



<Fig. 8> C-2 Analysis Result

4) 시나리오 D

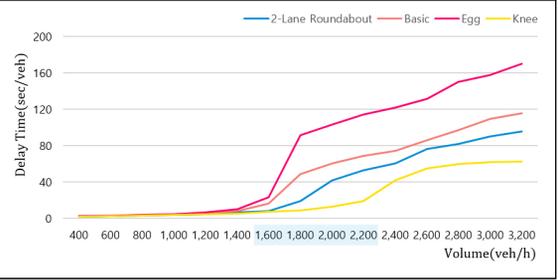
시나리오 D에서 2차로형 회전교차로와 터보형 회전교차로 유형별 차량당 지체시간(초/대)을 분석하였다. <Table 6>은 시나리오 D의 지체시간 분석값으로 서비스수준(LOS)이 A로 일정한 400~1,000대/시는 생략하며, 서비스수준(LOS)이 E 이상인 경우 음영으로 표시하였다. D-1에서는 Knee는 2,400대/시, 2차로형 회전교차로는 1,800대/시, Basic, Egg는 1,600대/시 이후로, D-2에서는 Knee는 2,200대/시, 2차로형 회전교차로는 1,800대/시, Basic, Egg는 1,600대/시 이후로 지체가 급격하게 증가하여 서비스수준(LOS)이 E~F로 도달하였다.

<Table 6> Scenario D Analysis Results

Delay Time(sec/veh)			Volume(veh/h)										
Turbo Roundabout Type & Scenario			1,200	1,400	1,600	1,800	2,000	2,200	2,400	2,600	2,800	3,000	3,200
D	1	2-Lane Roundabout	4.75	6.38	8.18	13.31	39.70	53.63	60.64	64.29	73.15	79.16	80.56
		Basic	5.44	7.22	11.72	38.44	57.36	64.91	71.40	82.60	98.69	103.83	118.74
		Egg	5.61	8.10	15.00	84.27	93.62	104.84	115.67	123.28	131.05	137.25	144.96
		Knee	3.63	4.40	5.49	6.68	8.64	12.57	21.71	35.43	55.99	57.94	59.42
	2	2-Lane Roundabout	4.59	6.35	8.16	18.70	41.64	52.99	60.16	75.94	81.41	89.72	95.32
		Basic	6.03	8.24	16.33	48.47	60.32	68.58	74.21	85.89	96.77	109.47	115.61
		Egg	6.43	10.11	23.27	91.12	103.01	113.90	121.76	131.09	149.90	157.73	169.96
		Knee	4.22	5.37	6.93	8.93	12.67	18.61	41.95	54.89	59.43	61.73	62.65



<Fig. 9> D-1 Analysis Result



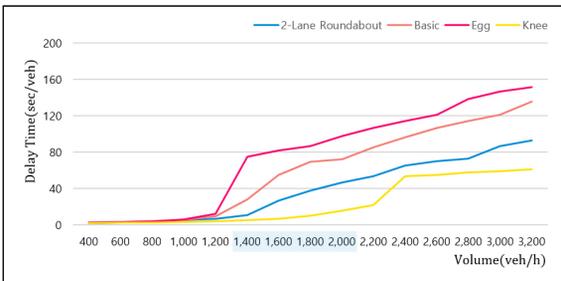
<Fig. 10> D-2 Analysis Result

5) 시나리오 E

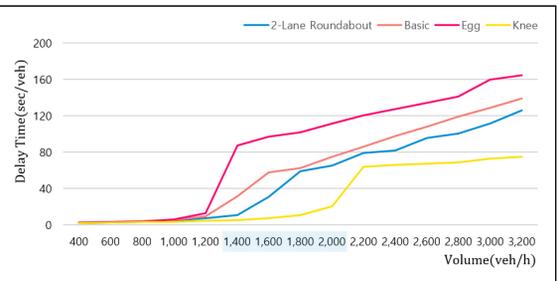
시나리오 E에서 2차로형 회전교차로와 터보형 회전교차로 유형별 차량당 지체시간(초/대)을 분석하였다. <Table 7>은 시나리오 E의 지체시간 분석값으로 서비스수준(LOS)이 A로 일정한 400~1,000대/시는 생략하며, 서비스수준(LOS)이 E 이상인 경우 음영으로 표시하였다. E-1, E-2에서는 Knee는 2,000대/시, 2차로형 회전교차로는 1,600대/시, Basic은 1,400대/시, Egg는 1,200대/시 이후로 지체가 급격하게 증가하여 서비스수준(LOS)이 E~F로 도달하였다.

<Table 7> Scenario E Analysis Results

Delay Time(sec/veh)		Volume(veh/h)											
		1,200	1,400	1,600	1,800	2,000	2,200	2,400	2,600	2,800	3,000	3,200	
E	1	2-Lane Roundabout	6.86	10.48	26.73	37.73	46.36	53.20	65.46	69.98	72.47	86.26	92.66
		Basic	9.10	27.91	54.67	69.57	72.37	84.83	96.24	106.40	114.35	121.13	135.72
		Egg	11.80	74.84	81.71	86.64	97.82	106.66	114.40	121.15	138.41	146.44	151.69
		Knee	3.98	5.01	6.78	10.00	15.27	41.50	53.70	55.03	57.70	58.68	61.05
	2	2-Lane Roundabout	6.94	10.57	30.51	58.91	65.32	78.81	81.50	95.19	100.02	111.61	125.90
		Basic	9.15	31.43	57.56	62.09	74.68	85.85	97.91	107.68	118.63	128.84	139.17
		Egg	12.51	87.11	96.68	101.60	111.41	120.47	127.06	134.43	141.31	159.33	164.46
		Knee	4.29	5.36	7.19	10.73	20.34	63.51	65.53	67.47	68.31	72.51	74.50



<Fig. 11> E-1 Analysis Result



<Fig. 12> E-2 Analysis Result

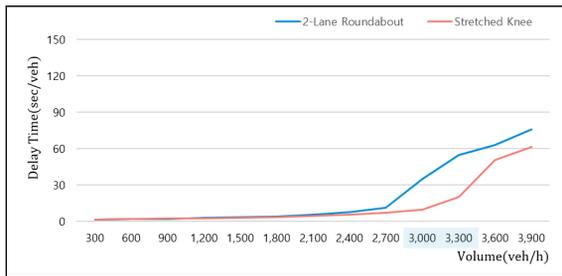
6) 시나리오 F

시나리오 F에서 2차로형 회전교차로와 터보형 회전교차로의 차량당 지체시간(초/대)을 분석하였다. <Table 8>은 시나리오 F의 지체시간 분석값으로 서비스수준(LOS)이 A로 일정한 300~1,800대/시는 생략하며, 서비스수준(LOS)이 E 이상인 경우 음영으로 표시하였다.

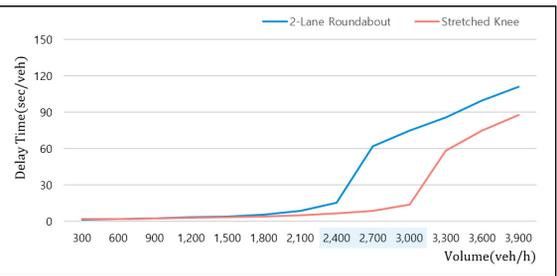
<Table 8> Scenario F Analysis Results

Delay Time(sec/veh)			Volume(veh/h)						
Turbo Roundabout Type & Scenario			2,100	2,400	2,700	3,000	3,300	3,600	3,900
F	1	2-Lane Roundabout	5.29	7.72	11.34	34.84	54.35	62.73	75.57
		Stretched Knee	4.19	5.19	6.83	9.82	20.06	50.53	61.33
	2	2-Lane Roundabout	8.53	15.25	61.77	74.85	85.53	99.67	110.79
		Stretched Knee	4.86	6.34	8.70	13.46	58.17	74.72	87.77

F-1에서는 Stretched Knee는 3,300대/시, 2차로형 회전교차로는 3,000대/시 이후로, F-2에서는 Stretched Knee는 3,000대/시, 2차로형 회전교차로는 2,400대/시 이후로 지체가 급격하게 증가하여 서비스수준(LOS)이 E~F로 도달하였다.



<Fig. 13> F-1 Analysis Result



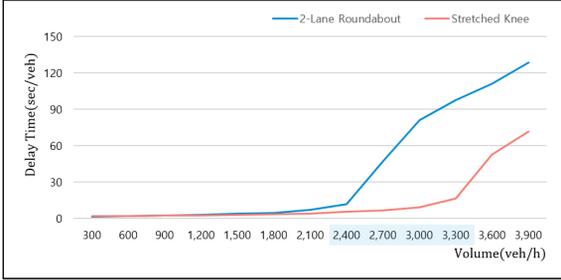
<Fig. 14> F-1 Analysis Result

7) 시나리오 G

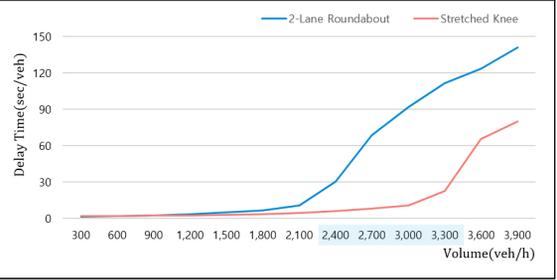
시나리오 G에서 2차로형 회전교차로와 터보형 회전교차로의 차량당 지체시간(초/대)을 분석하였다. <Table 9>는 시나리오 G의 지체시간 분석값으로 서비스수준(LOS)이 A로 일정한 300~1,800대/시는 생략하며, 서비스수준(LOS)이 E 이상인 경우 음영으로 표시하였다. G-1, G-2에서는 Stretched Knee는 3,300대/시, 2차로형 회전교차로는 2,400대/시 이후로 지체가 급격하게 증가하여 서비스수준(LOS)이 E~F로 도달하였다.

<Table 9> Scenario G Analysis Results

Delay Time(sec/veh)			Volume(veh/h)						
Turbo Roundabout Type & Scenario			2,100	2,400	2,700	3,000	3,300	3,600	3,900
G	1	2-Lane Roundabout	6.82	11.58	46.83	80.86	97.40	110.87	128.51
		Stretched Knee	4.05	5.20	6.67	9.28	16.03	52.74	71.68
	2	2-Lane Roundabout	10.80	30.35	68.74	91.83	111.52	123.12	140.90
		Stretched Knee	4.62	5.70	7.78	10.84	22.64	65.59	80.13



<Fig. 15> G-1 Analysis Result



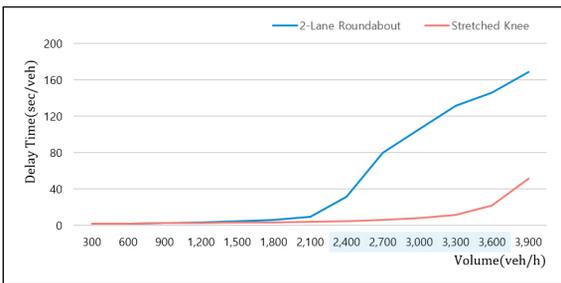
<Fig. 16> G-2 Analysis Result

8) 시나리오 H

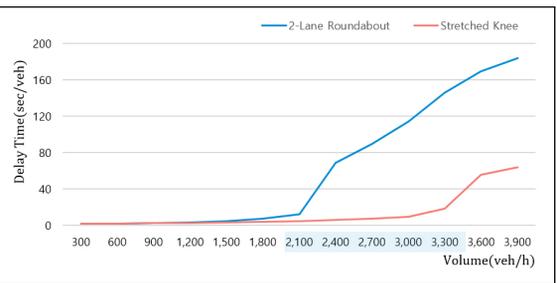
시나리오 H에서 2차로형 회전교차로와 터보형 회전교차로의 차량당 지체시간(초/대)을 분석하였다. <Table 10>은 시나리오 H의 지체시간 분석값으로 서비스수준(LOS)이 A로 일정한 300~1,800대/시는 생략하며, 서비스수준(LOS)이 E 이상인 경우 음영으로 표시하였다. H-1에서는 Stretched Knee는 3,600대/시, 2차로형 회전교차로는 2,400대/시 이후로, H-2에서는 Stretched Knee는 3,300대/시, 2차로형 회전교차로는 2,100대/시 이후로 지체가 급격하게 증가하여 서비스수준(LOS)이 E~F로 도달하였다.

<Table 10> Scenario H Analysis Results

Delay Time(sec/veh)		Volume(veh/h)							
		Turbo Roundabout Type & Scenario	2,100	2,400	2,700	3,000	3,300	3,600	3,900
H	1	2-Lane Roundabout	9.03	31.08	79.83	106.16	131.41	145.51	168.71
		Stretched Knee	3.88	4.72	5.93	7.77	11.18	21.84	51.68
	2	2-Lane Roundabout	12.08	68.58	89.06	113.82	146.03	169.02	183.45
		Stretched Knee	4.38	5.71	7.49	9.05	18.51	55.56	63.44



<Fig. 17> H-1 Analysis Result



<Fig. 18> H-2 Analysis Result

2. 통계적 검증

시나리오별 교차로 유형에 따른 지체시간의 차이에 대한 통계적 유의성 검증을 수행하기 위해 SPSS 27.0을 활용하여 이원분산분석(Two-way ANOVA)을 실시하였다. 독립변수는 시나리오와 교차로 유형, 종속변수는 평균 지체시간(초/대)으로 설정하였으며, 다음과 같이 귀무가설과 대립가설을 설정하였다.

귀무가설(Null Hypothesis) 1 : 시나리오에 따른 지체시간 차이는 없다.

대립가설(Alternative Hypothesis) 1 : 시나리오에 따른 지체시간 차이는 있다.

귀무가설(Null Hypothesis) 2 : 교차로 유형에 따른 지체시간 차이는 없다.

대립가설(Alternative Hypothesis) 2 : 교차로 유형에 따른 지체시간 차이는 있다.

1) 4지 회전교차로

<Table 11>은 4지 회전교차로에서 시나리오와 교차로 유형에 따른 지체시간 차이의 이원분산분석 결과이다. 모든 독립변수에 따른 유의확률 0.000으로 유의수준 0.05에서 통계적으로 유의하게 분석되었다. 따라서 귀무가설이 기각되고 대립가설이 채택되어 시나리오와 교차로 유형에 따른 지체시간 차이가 존재함을 알 수 있다. Scheffe 방식을 적용한 사후검정 결과로는 시나리오에 따른 평균 지체시간은 A<B<C<D<E 순으로 나타났다. 또한, 교차로 유형에 따른 동일집단군은 Knee>2차로형 회전교차로>Egg>Basic 순으로 나타났다.

<Table 11> Results of the Two-way ANOVA Analysis at 4-leg Roundabout

Independent Variable	Type III Sum of Squares	DF	Sum of Squares	F	P	Post-hoc (Scheffe)
Scenario	84051	4	21013	103.04	0.000	E>D>C>B>A
Intersection Type	64203	3	21401	104.94	0.000	d>a>c>b ¹⁾
Scenario*Intersection Type	450238	12	37520	183.99	0.000	-
Error	2272527	580	3918	-	-	-
Total	4507200	600	-	-	-	-
Modified Sum	2871019	599	-	-	-	-

DF : Degree of Freedom, F : F Statics, P : P-Value

2) 3지 회전교차로

<Table 12>는 3지 회전교차로에서 시나리오와 교차로 유형에 따른 지체시간 차이의 이원분산분석 결과이다. 모든 독립변수에 따른 유의확률 0.000으로 유의수준 0.05에서 통계적으로 유의하게 분석되었다. 따라서 귀무가설이 기각되고 대립가설이 채택되어 시나리오와 교차로 유형에 따른 지체시간 차이가 존재함을 알 수 있다. 3지 회전교차로의 사후검정은 표본이 3개 이상인 시나리오를 대상으로 분석하였다. 3지 회전교차로의

<Table 12> Results of the Two-way ANOVA Analysis at 3-leg Roundabout

Independent Variable	Type III Sum of Squares	DF	Sum of Squares	F	P	Post-hoc (Scheffe)
Scenario	2827	2	1414	13.80	0.000	F>G>H
Intersection Type	29649	1	29469	287.70	0.000	-
Scenario*Intersection Type	8908	2	4454	43.48	0.000	-
Error	7989	78	102	-	-	-
Total	430682	156	-	-	-	-
Modified Sum	296756	155	-	-	-	-

DF : Degree of Freedom, F : F Statics, P : P-Value

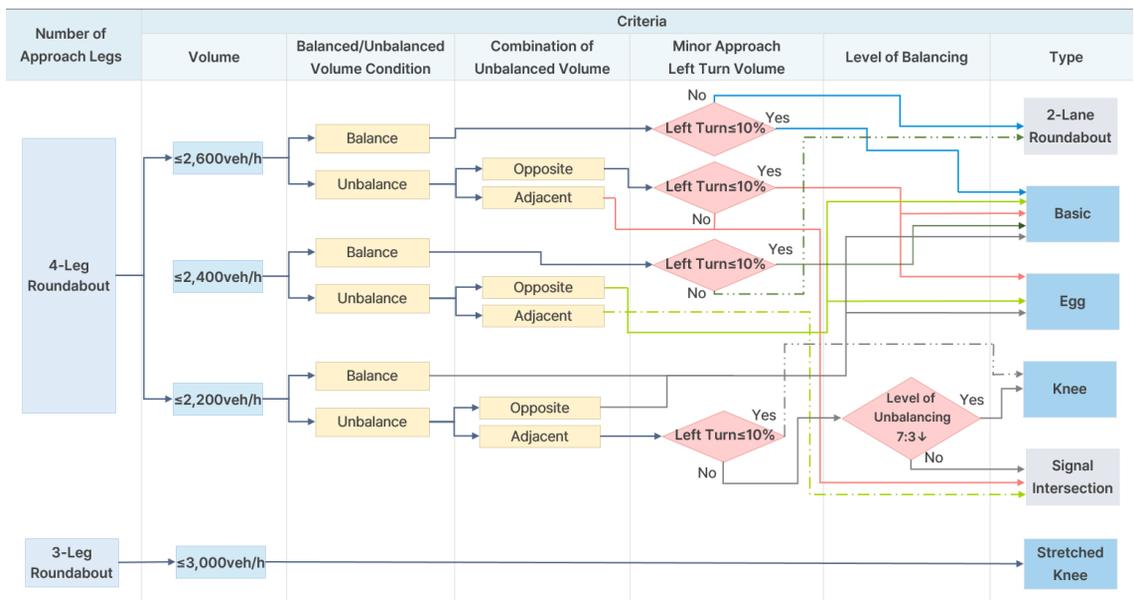
1) a=2차로형 회전교차로, b= Basic, c= Egg, d= Knee

사후검정은 표본이 3개 이상인 시나리오를 대상으로 분석하였다. Scheffe 방식을 적용한 사후분석 결과로는 F>G>H 순으로 나타났다.

3. 적정 도입 기준 도출

본 연구에서는 교통량 불균등 조합 및 비율과 부도로 좌회전 교통량을 통해 시나리오를 설정하고 그에 따른 회전교차로 유형별 적정교통량을 도출하였다. 또한, 이원분산분석(Two-way ANOVA)을 통해 분석 결과가 시나리오와 교차로 유형에 따라 차이가 존재함을 통계적으로 검증하였다.

시나리오에 따른 분석 결과를 바탕으로 2차로형 회전교차로와 터보형 회전교차로 유형별 도입 기준을 <Fig. 19>와 같이 도출하였다. 예를 들어 4지 회전교차로에서 진입교통량 2,100대/시이고 교통량이 불균등할 때, 대향적인 주도로운 경우 토지가용성에 따라 Basic과 Egg 중 선택하여 설치하는 것이 적합하며, 진입교통량 2,500대/시이고 교통량이 균등할 때 부도로 좌회전 비율이 10% 이하이면 Basic을 설치하는 것이 적합하다.



<Fig. 19> A Diagram for Turbo Roundabout Type Decision Process

V. 결 론

터보형 회전교차로는 2차로형 회전교차로의 잠재적 상충으로 인한 안전성 및 교통소통 측면의 문제를 해결하고자 개발된 회전교차로 유형이다. 국내에서도 터보형 회전교차로를 적용하기 위해 국내 설계지침에 도입 기준을 제시하였지만, 교통상황 및 유형이 고려되지 않아 터보형 회전교차로의 도입을 결정하기엔 다소 부족하다. 본 연구에서는 VISSIM을 활용하여 2차로형 회전교차로와 유형별 터보형 회전교차로의 지체시간과 적정교통량을 분석하여 적정 도입 기준을 제시하였다.

2차로형 회전교차로와 회전부가 2차로인 터보형 회전교차로를 대상으로 진입교통량, 주도로와 부도로의

교통량 비율 및 조합, 부도로의 방향별 교통량 비율에 따른 16개의 시나리오를 구성하였으며 주요 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

4지 2차로형 회전교차로의 시나리오 A에서는 A-1의 경우 2차로형 회전교차로와 Basic의 용량이 2,600대/시로 가장 높게 분석되었으며 A-2의 경우 2차로형 회전교차로의 적정교통량이 2,400대/시로 가장 높게 분석되었다. 균등한 경우에는 대체로 2차로형 회전교차로가 적합하나, 교통량이 적정교통량에 근접하지 않거나 부도로의 좌회전 비율이 10% 이하일 때는 교통안전 및 토지가용성 측면에서 Basic이 적합한 것으로 보인다. 시나리오 B, C에서는 Basic과 Egg의 적정교통량이 2,400~2,800대/시로 가장 높게 분석되었으며 부도로의 좌회전 비율이 낮고 교통량 불균등이 클수록 적정교통량이 증가하였다. 같은 터보형 회전교차로 유형인 Knee의 경우 적정교통량이 1,400~1,800대/시로 가장 낮게 분석되었다. 시나리오 D, E에서는 Knee의 적정교통량이 2,000~2,400대/시로 가장 높게 분석되었으며, 시나리오 B, C의 Basic, Egg와 달리 불균등이 클수록 Knee의 적정교통량이 감소하였다.

3지 2차로형 회전교차로는 모든 시나리오에서 Stretched Knee의 적정교통량이 3,000~3,600대/시로 가장 높게 분석되어 2차로형 회전교차로보다 터보형 회전교차로의 전환이 적합한 것으로 분석되었다.

결론적으로 2차로형 회전교차로와 터보형 회전교차로를 비교·분석하였을 때, 교통량 균등 정도 및 불균등 조합과 부도로 방향별 교통량 비율에 따라 적정 진입교통량과 유형이 결정되었다. 교통량이 균등할 때 교통량이 용량에 근접한 경우 2차로형 회전교차로가, 근접하지 않은 경우 Basic이 적합하며, 불균등할 때, 주도로가 대향적인 경우 Basic, Egg가, 주도로가 인접한 경우에는 Knee가 적합한 것으로 분석되었다.

본 연구는 2차로형 회전교차로와 터보형 회전교차로 유형별 교통상황에 따른 적정 교차로를 제시하였다. 회전교차로 도입 기준을 정량화하여 제시하고 그에 따른 적정 유형을 결정함으로써 터보형 회전교차로 설치 근거를 제시했다는 점에서 의의가 있다. 그러나 터보형 회전교차로의 포괄적인 분석으로 유형별 구체적인 분석이 부족하며 터보형 회전교차로의 임계간격을 2차로형 회전교차로와 동일하게 설정한 한계가 있다.

따라서 향후 연구에서는 유형별 특징을 활용한 분석이 필요하며 특히 Knee의 경우 주도로의 기준이 진입로가 아닌 진출로로 이를 고려한 분석이 필요하다. 또한, 국내 터보형 회전교차로의 임계간격을 개발하여 터보형 회전교차로와 2차로형 회전교차로의 정확한 비교가 필요하다

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.
- Anagnostopoulos, A. and Kehagia, F.(2018), “Turbo-roundabouts as an alternative to roundabouts in terms of traffic safety, capacity and pollutant emissions”, In *Proceedings of the 7th Pan-Hellenic Road Safety Conference*, Larissa, Greece, pp.11-12.
- Elhassy, Z., Abou-Senna, H., Shaaban, K. and Radwan, E.(2020), “The implications of converting a high-volume multilane roundabout into a turbo roundabout”, *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2020, no. 1, pp.12-23.
- Engelsman, J. C. and Uken, M.(2007), “Turbo roundabout as an alternative to two lane roundabouts”, *Document Transformation Technologies cc, 26th Annual Southern African Transport Conference*, pp.581-589.

- Fortuijn, L. G. H.(2009), “Turbo roundabouts estimation of capacity,” *Transportation Research Board of the National Academies*, vol. 2130, no. 1, pp.83-92.
- Giuffrè, O., Grana A. and Marino, S.(2012), “Comparing performance of turbo-roundabouts and double-lane Roundabouts”, *Modern Applied Science*, vol. 6, no. 10, pp.70-79.
- Korea Transportation Institute(2022), *2022 Korea roundabout policy research support project*, pp.268-273.
- Pulvirenti, G., Distefano, N., Leonardi, S. and Tollazzi, T.(2021), “Are double-lane roundabouts safe enough? A CHAID analysis of unsafe driving behaviors”, *Safety*, vol. 7, no. 1, pp.20-38.
- Song, G. S.(2011), *Evaluation and Application of Turbo Roundabout as an Alternative to Two-lane Roundabouts* Unpublished Doctoral dissertation, Ajou University, Gyeonggi-do.
- Song, M. S. and Lee, D. M.(2021), “A study on estimation of design service traffic volume for turbo roundabout”, *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 20, no. 5, pp.46-58.
- Trueblood, M. and Dale, J.(2003), “Simulating roundabouts with vissim”, In *Proceedings of the 2nd Urban Street Symposium*, Anaheim, California, pp.11-14.