

교차로에서의 좌회전 차로 전방 연장 기준 개발 연구

Study on the development of left turn lane front extension criteria at intersections

한대철¹

Dae-Cheol Han¹

요약

교차로 내 좌회전 차로 전방 연장은 상습 정체 구간에서의 교차로 용량을 증가시키는 효과가 존재한다. 하지만, 교차로 내부에 좌회전 차량이 대기함으로서, 상대적으로 좌회전 차량의 회전각이 작아 지는데 ‘좌회전 차로 전방 연장’의 길이가 지나치게 길 경우에는 교차로 내 좌회전 회전반경이 차량의 최소회전반경보다 작아져 좌회전 차량이 주행유도 차로를 벗어나는 경우가 발생한다. 이런 경우 맞은편의 좌회전차량과의 상충 가능성이 커져 교통사고 발생 가능성을 높이므로, 교차로 형태(3지, 4지교차로) 및 도로폭 등에 따른 적정 좌회전 유도차로 길이가 제시되어야 한다. 본 연구에서는 PC-CRASH 시뮬레이션을 사용하여 교차로 형태 및 주·부도로의 차선 수에 맞는 적정 좌회전 차로 전방 연장 길이를 산출하였으며, VISSIM 시뮬레이션을 이용하여 산출된 적정 좌회전 차로 전방 연장 길이를 설치하였을 때의 교차로 용량 증대 효과를 분석하였다. 분석 결과, 적정 좌회전 차로 전방 연장은 유형별로 4m~7m의 최대 좌회전 차로 전방 연장 길이가 도출되었으며, 10~20%의 좌회전 차로 용량 증대 효과가 발생하였다.

핵심어 : 교차로, 정체구간, 좌회전, 차로 연장, 안전성 분석

Abstract

The extension of the left-turn lane in an intersection has the effect of increasing the intersection capacity in chronically congested areas. However, since left-turning vehicles wait inside the intersection, the turning angle of the left-turning vehicles becomes relatively small. However, if the length of the ‘left-turn guidance lane’ is too long, the left-turning turning radius in the intersection becomes smaller than the minimum turning radius of the vehicle, and the left-turning vehicle may leave the guidance lane. In this case, the possibility of conflict with the left-turning vehicle on the opposite side increases, which increases the possibility of traffic accidents. Therefore, the appropriate length of the left-turn guidance lane should be presented according to the intersection type (3-way, 4-way intersection) and road width. In this study, the appropriate length of the left-turn guidance lane according to the intersection type and the number of lanes on the main and secondary roads was calculated using the PC-CRASH simulation, and the effect of increasing the intersection capacity when the appropriate length of the left-turn guidance lane calculated

¹ Department of Highway and Transportation Research, KICT, Gyeonggi-do, Korea [Principal Researcher]
e-mail: dchan@kict.re.kr (Corresponding author)

* 본 연구는 국토교통부 한국건설기술연구원 위탁사업으로 수행되었음(과제번호 20240266-004, 2024년 교통량 정보제공시스템(TMS) 운영 업무대행).

Received(October 13, 2024), Review Result(1st: November 2, 2024), Accepted(December 11, 2024), Published(December 31, 2024)



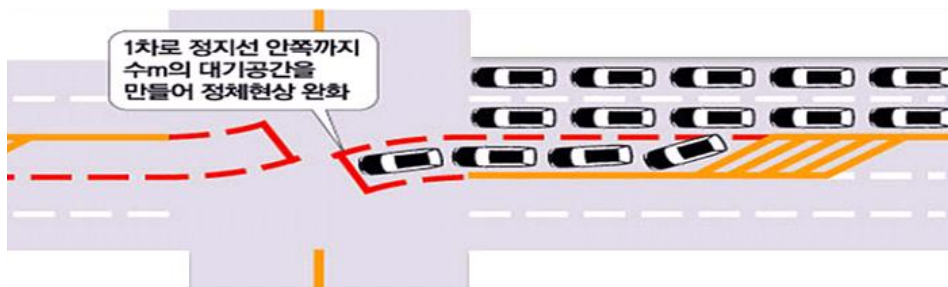
© 2024 The Authors. Published by NCISS.
This is an open access article licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.
To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>.

using the VISSIM simulation was analyzed. As a result of the analysis, the maximum length of the left turn guidance lane was derived as 4m to 7m for each type, and the capacity of the left turn lane increased by 10 to 20%.

Keyword : Intersection, Congestion section, Left turn, Lane expansion, Safety analysis

1. 서론

좌회전 차로 전방 연장은 2024년 현재 일본의 많은 교차로에 설치 운영 중에 있는 방법으로, [그림 1]과 같이 직진신호 동안 빈 공간인 좌회전 차로 앞쪽 교차로 내부에 좌회전 차량이 대기할 수 있도록 설치된 차로를 의미하는데 좌회전 통과 거리를 축소하여 교차로 내 공간 활용을 극대화 해 교차로 좌회전 용량을 증대시키는 효과가 있다 [1].



[그림 1] 좌회전 차로 전방 확장 방법

[Fig. 1] Method of Left turn lane forward extension

반대로, 적절치 못한 좌회전 차로 전방 연장 설치는 운전자에게 혼동을 일으키기가 쉽고, 오히려 교차로 운영상태가 악화될 수 있다. 현재 국내에는 교차로 환경(좌회전 교통량, 최소회전반경, 종단경사, 교차로면적 등)별로 좌회전 차로 전방 확장 설치 여부를 판단할 수 있는 정량적 기준이 없을 뿐만 아니라, 좌회전 차로 전방 확장의 적정 길이에 대한 기준도 존재하지 않는다.

좌회전 차로 전방 확장은 교차로 내부에 좌회전 차량이 대기함으로써, 상대적으로 좌회전 차량의 회전각이 작아지는데 좌회전 차로 전방 연장 길이가 지나치게 길 경우에는 교차로 내 좌회전 회전반경이 차량의 최소회전반경보다 작아져 좌회전 차량이 주행유도 차로를 벗어나는 경우가 발생한다 [2].

이런 경우 맞은편의 좌회전 차량과의 상충 가능성이 커져 교통사고 발생 가능성을 높이므로, 교차로 형태(3지, 4지교차로) 및 도로폭 등에 따른 적정 좌회전유도차로 길이가 제시되어야 한다 [3].

따라서 본 연구에서는 교차로 형태(3지, 4지교차로), 주도로 및 부도로의 차로수 별로 차량의 최소회전반경, 주행속도, 교통량 등을 고려한 적정 좌회전유도차로 기준을 개발하려고 한다.

연구대상 범위는 3지, 4지 직각교차로를 가상으로 설정하였으며, 교차로 크기는 주도로 왕복

4~8차로, 부도로 3~8차로로 지정하였다.

연구내용은 PC-CRASH 시뮬레이션을 바탕으로 차량의 최소 회전반경, 주행속도, 교통량 등을 고려한 적정 좌회전유도차로 적정 길이를 산출하며, 이 기준에 대하여 운영 측면의 효과분석을 실시하였다.

2. 좌회전 차로 전방 연장 기준 설정

2.1 좌회전 차로 전방 연장 기준 설정을 위한 시나리오 구성 방법론

다양한 도로환경 변화에 따른 차량별 최대 좌회전 차로 전방 연장 길이를 분석하기 위해서는 다양한 특성을 고려한 실험계획과 자료 구축이 필요하다.

실험계획을 작성할 때 고려되어야 할 사항으로는 크게 교차로 유형, 주도로 및 부도로 차선수, 차로폭, 주행차량 종류가 있다. 시뮬레이션을 활용한 자료 구축에는 다음 과정이 필요하다. 자료 구축에 적합한 프로그램을 선정하고, 시뮬레이션을 위한 교차로를 설계하고, 주요 변수를 설정하여야 한다. 또한, 개별 시나리오에 따라 시뮬레이션을 수행하고, 시뮬레이션 결과를 정리하고 자료를 구축한다 [4].

시뮬레이션을 통한 자료 구축은 실측을 통한 자료 구축이 어려운 경우에 널리 활용되는 방법이다. 교차로별 최대 좌회전 차로 전방 연장 길이를 분석하기 위해서는 다양한 도로환경에서 실제 교차로를 주행하는 차량의 수많은 특성 자료가 필요하다. 현실에서 이 같은 자료를 구축하기 위해서는 많은 장비와 예산 및 시간이 소요되게 된다 [5]. 따라서, 본 연구에서는 PC-CRASH 프로그램을 이용하여 각 교차로 유형에 맞는 최적화된 좌회전 차로 전방 연장 길이를 산출하였다.

2.2 시뮬레이션 대상 교차로 및 주요 변수 설정



[그림 2] 시뮬레이션 시나리오 분류과정

[Fig. 2] Simulation Scenario Classification Process

시뮬레이션에 앞서 좌회전 차로 전방 연장 적정 길이 산정을 위한 몇 가지 사항을 전제하였다. 첫 번째로는 좌회전 차량은 좌회전 유도차선을 따라 주도로 1차선에서 부도로 1차선으로 주행해야 한다. 두 번째로는 교차로의 형태에 따라 좌회전 차로 전방 연장의 길이는 차별적으로 설정되어야 한다. 세 번째로는 교차로의 교통 조건 및 도로 조건은 이상적인 상태이어야 하며, 3지, 4지 교차로에서만 설치되어야 한다. 이를 종합하여 [그림 2]와 같이 시나리오 분류과정을 도식화하였다.

위 분류과정을 통하여 다음 [표 1]과 같이 총 13개의 도로 형태에 따른 시나리오가 작성되었다.

[표 1] 주도로 및 부도로의 차로 수 변화에 따른 시나리오

[Table 1] Scenarios for changing the number of lanes on main and secondary roads

구분	주도로 차로수	부도로 차로수	N0.
3지교차로	왕복4차로	왕복3차로	1
		왕복4차로	2
	왕복6차로	왕복3차로	3
		왕복4차로	4
		왕복4차로	5
4지교차로	왕복4차로	왕복3차로	6
		왕복4차로	7
	왕복6차로	왕복4차로	8
		왕복5차로	9
		왕복6차로	10
	왕복8차로	왕복4차로	11
		왕복5차로	12
		왕복6차로	13
		왕복7차로	14
		왕복8차로	15

시나리오에 사용될 차량은 설계 자동차 중 소형자동차, 중·대형자동차에 국내에서 생산되는 대표적인 차량을 추가하여 총 5가지 차량으로 시뮬레이션하였다. 시나리오에 사용된 차량의 상세제원은 다음 [표 2]와 같다. 설계기준 자동차 중 트레일러 및 트레일러 연결차를 사용하지 않은 이유는 보편적으로 시내 교차로에서 트레일러의 통행이 거의 발생하지 않기 때문이다.

[표 2] 시뮬레이션에 사용된 차량의 상세제원

[Table 2] Detailed specifications of the vehicle used in the simulation

구분	폭	높이	길이	축간거리	앞내민 길이	뒷내민 길이
소형자동차	1.7	2.0	4.7	2.7	0.8	1.2
대형자동차	2.5	4.0	13.0	6.5	2.5	4.0
1600cc	1.6	1.4	4.2	2.44	0.84	0.9

2000cc	1.8	1.5	4.8	2.75	0.92	1.1
3000cc	1.8	1.5	4.86	2..81	0.97	1.1

시뮬레이션 시 각 차량의 교차로 내 좌회전 통과 속도는 25km/h로 설정하였는데, 미국에서는 교차로 내 좌회전 차량의 통과속도를 15~25km/h로 정의하고 있다 [1].

2.3 시나리오 시뮬레이션 분석 결과

도로 조건 및 차량 조건에 따른 시나리오 분석 결과는 [표 3]에 제시된 것과 같다.

[표 3] 시나리오별 최대 좌회전 전방 확장 길이 결과

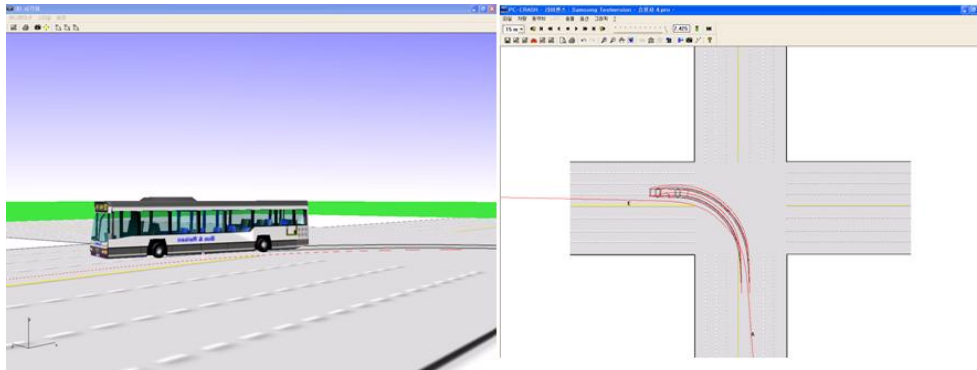
[Table 3] Results of maximum left turn lane length by scenario

구분	주도로 차로수	부도로 차로수	차량별 최대 좌회전 차로 전방 연장 길이(m)			
			1600cc	2000cc	3000cc	설계기준 자동차(소형 자동차)
3 지 교 차 로	왕복4차로	왕복3차로	4.44	4.31	4.17	4.37
		왕복4차로	4.52	4.42	4.35	4.50
	왕복 6차로	왕복3차로	4.60	4.52	4.41	4.56
		왕복4차로	4.55	4.50	4.41	4.54
	왕복 8차로	왕복3차로	4.87	4.77	4.64	4.80
		왕복4차로	4.32	4.21	4.14	4.30
4 지 교 차 로	왕복4차로	왕복3차로	4.54	4.44	4.31	4.51
		왕복4차로	4.59	4.51	4.37	4.55
	왕복6차로	왕복5차로	5.79	5.46	5.12	5.71
		왕복6차로	6.21	6.07	5.89	6.14
	왕복8차로	왕복4차로	4.87	4.77	4.64	4.80
		왕복5차로	6.04	5.88	5.78	6.01
		왕복6차로	6.45	6.27	6.09	6.41
		왕복7차로	7.39	7.10	6.79	7.17
	왕복8차로	7.65	7.32	7.08	7.52	

설계기준 자동차-대형 자동차(버스)는 모든 시나리오에서 25km/h로 교차로 통행시 좌회전 차로 전방 연장 내에서 안정적인 주행이 불가능하다. 실제 교차로에서 설계기준 자동차-대형 자동차(버스)가 대기행렬 처음에 위치하였을 경우, 좌회전 차로 전방 연장 설치 효과가 무시되므로, 설계기준 자동차-대형 자동차(버스)는 예외적으로 설계 기준 자동차-소형 자동차가 25km/h로 주행했을 때의 주행궤적과 유사한 주행궤적을 같은 주행속도를 산출하였다.

산출 결과 설계 기준 자동차-대형 자동차(버스)의 주행속도는 15km/h로 교차로 내에서 15km/h로 주행 시 교차로 내에서 맞은편 좌회전 차량과의 상충 없이 안정적으로 주행이 가능하다. [그림 3]

은 설계기준 대형 자동차(버스)의 시뮬레이션 과정을 나타낸 그림이다.



[그림 3] 설계기준 자동차-대형 자동차(버스) 시뮬레이션 과정

[Fig. 3] Simulation process of design criteria automobile-large vehicle(bus)

시뮬레이션 분석 결과를 바탕으로 다음 [표 4]와 같이 좌회전 전방 확장 길이 기준을 제시하였다.

[표 4] 좌회전 전방 확장 길이 기준

[Table 4] Standard for proper left turn forward extension length

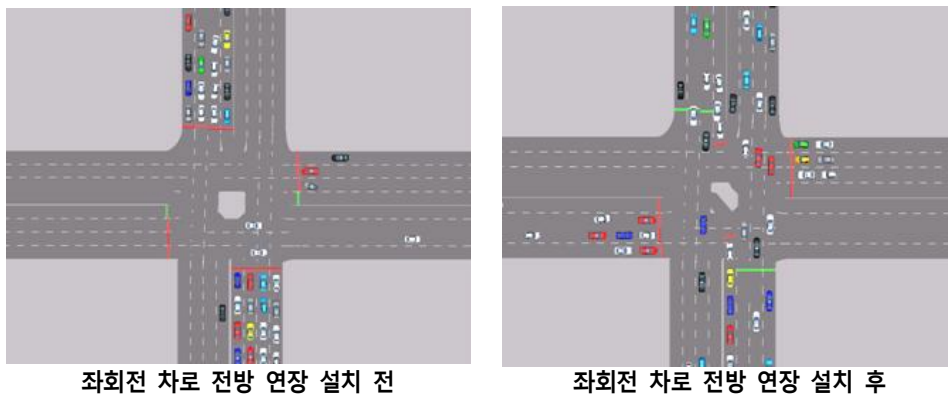
구분	주도로 차로수	부도로 차로수	적정 좌회전 전방 확장 길이
3지교차로	왕복4차로	왕복3차로	4m이하
	왕복 6차로	왕복3차로	4m이하
		왕복4차로	4m이하
	왕복 8차로	왕복3차로	4m이하
왕복4차로		4.5m이하	
4지 교차로	왕복4차로	왕복3차로	4m이하
		왕복4차로	4m이하
	왕복6차로	왕복4차로	4m이하
		왕복5차로	5m이하
		왕복6차로	5.5m이하
	왕복8차로	왕복4차로	4.5m이하
		왕복5차로	5.5m이하
		왕복6차로	6m이하
왕복7차로		6.5m이하	
	왕복8차로	7m이하	

3. 설치 기준에 따른 좌회전 전방 연장 효과 분석

3.1 효과 분석 방법론

현시 배분 결과를 적용하여 VISSIM 시뮬레이션을 시행하였다. 기본적인 효과분석 방법은 좌회전 차로 전방 연장 설치 전·후의 도로를 디자인하여 각각의 좌회전 및 직진 통과 교통량을 측정·비교하였다. 좌회전 교통량은 50~1,000대까지 50대씩 증가시키며, 직진 교통량의 100~2,000대까지 1,000대씩 증가시켰으며, 각 교차로 형태별 시뮬레이션 시간은 1회당 4,500초이며, 초기 900초는 네트워크 초기화 및 안정화에 소요되는 시간으로 분류하여, 효과분석에서 제외하였다.

즉, 후반 3,600(1시간)초 동안 검출된 결과를 최종 분석에 반영하였다. 직진 차로 용량의 경우 좌회전 차로의 테이퍼 길이에 따라 용량 변화폭이 변화하기 때문에 시뮬레이션 시 좌회전 차로의 테이퍼 길이를 10m, 20m, 30m 3가지로 나누어 시행하였다. [그림 4]는 좌회전 차로 전방 연장 설치 전 및 후의 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다.



[그림 4] 좌회전 차로 전방 연장 설치 전/후 시뮬레이션 사진

[Fig. 4] Before and after simulation photos of the left turn lane front extension installation

3.2 효과 분석 결과

좌회전 차로 전방 연장시 기존의 좌회전 차로 대기 공간(테이퍼) 길이가 10m일 경우는 [표 5]와 같이 좌회전 교통량을 시간당 45~127v/h 더 통과시킬 수 있었으며, 직진 차로의 용량도 최대 150v/h 증가하는 것으로 나타났다.

전체 구간에서 용량이 10~20% 증가하는 효과가 나타났으며, 특히 좌회전 차량의 교통량이 많은

구간에서는 그 효과가 더욱 클 것으로 판단된다.

[표 5] 교차로 형태별 효과 분석 결과- 테이퍼 길이 10m

[Table 5] Results of analysis of the effect by intersection type - Taper length 10m

구분	주도로 차로수	부도로 차로수	주도로 좌회전 교통량	좌회전 차로 용량 증대 효과	직진 차로 용량 증대 효과	적정 좌회전 전방 연장 길이
3 지 교 차로	왕복 4차로	왕복3차로	400v/h 이상	45v/h	70v/h	4m
		왕복6차로	400v/h 이상	87v/h	101v/h	4m
	왕복 8차로	왕복4차로	450v/h 이상	89v/h	109v/h	4m
		왕복3차로	500v/h 이상	90v/h	105v/h	4m
		왕복4차로	500v/h 이상	94v/h	109v/h	4.5m
		왕복5차로	550v/h 이상	99v/h	115v/h	5.5m
4 지 교 차로	왕복 4차로	왕복3차로	400v/h 이상	47v/h	66v/h	4m
		왕복4차로	400v/h 이상	53v/h	78v/h	4m
	왕복 6차로	왕복4차로	500v/h 이상	93v/h	103v/h	4m
		왕복5차로	550v/h 이상	102v/h	107v/h	5m
		왕복6차로	600v/h 이상	99v/h	115v/h	5.5m
	왕복 8차로	왕복4차로	550v/h 이상	89v/h	99v/h	4.5m
		왕복5차로	550v/h 이상	103v/h	130v/h	5.5m
		왕복6차로	600v/h 이상	117v/h	139v/h	6m
		왕복7차로	650v/h 이상	120v/h	144v/h	6.5m
		왕복8차로	650v/h 이상	127v/h	150v/h	7m

좌회전 차로 대기 공간(테이퍼) 길이가 20m일 경우는 [표 6]과 같이 좌회전 교통량을 시간당 61~131v/h 더 통과시킬 수 있었으며, 직진 차로의 용량도 최대 205v/h 증가하는 것으로 나타났다.

[표 6] 교차로 형태별 효과 분석 결과- 테이퍼 길이 20m

[Table 6] Results of analysis of the effect by intersection type - Taper length 20m

구분	주도로 차로수	부도로 차로수	주도로 좌회전 교통량	좌회전 차로 용량 증대 효과	직진 차로 용량 증대 효과	적정 좌회전 전방 연장 길이
3 지 교 차로	왕복 4차로	왕복3차로	400v/h 이상	61v/h	81v/h	4m
		왕복6차로	400v/h 이상	99v/h	121v/h	4m
	왕복 8차로	왕복4차로	450v/h 이상	101v/h	135v/h	4m
		왕복3차로	500v/h 이상	103v/h	137v/h	4m
		왕복4차로	500v/h 이상	105v/h	140v/h	4.5m
		왕복5차로	550v/h 이상	106v/h	151v/h	5m
4 지 교 차로	왕복 4차로	왕복3차로	400v/h 이상	61v/h	89v/h	4m
		왕복4차로	400v/h 이상	66v/h	97v/h	4m
	왕복 6차로	왕복4차로	500v/h 이상	97v/h	131v/h	4m
		왕복5차로	550v/h 이상	106v/h	151v/h	5m
		왕복6차로	600v/h 이상	111v/h	161v/h	5.5m
		왕복7차로	650v/h 이상	120v/h	171v/h	6m

	왕복 8차로	왕복4차로	550v/h 이상	93v/h	133v/h	4.5m
		왕복5차로	550v/h 이상	103v/h	154v/h	5.5m
		왕복6차로	600v/h 이상	119v/h	173v/h	6m
		왕복7차로	650v/h 이상	121v/h	181v/h	6.5m
		왕복8차로	650v/h 이상	131v/h	205v/h	7m

좌회전 차로 대기 공간(테이퍼) 길이가 30m일 경우는 [표 7]과 같이 좌회전 교통량을 시간당 52~125v/h 더 통과시킬 수 있었으며, 직진 차로의 용량도 최대 221v/h 증가하는 것으로 나타났다.

[표 7] 교차로 형태별 효과 분석 결과- 테이퍼 길이 30m

[Table 7] Results of analysis of the effect by intersection type - Taper length 30m

구분	주도로 차로수	부도로 차로수	주도로 좌회전 교통량	좌회전 차로 용량 증대 효과	직진 차로 용량 증대 효과	적정 좌회전 전방 연장 길이
3 지 교 차로	왕복 4차로	왕복3차로	400v/h 이상	52v/h	93v/h	4m
		왕복4차로	450v/h 이상	93v/h	151v/h	4m
	왕복 8차로	왕복3차로	500v/h 이상	94v/h	147v/h	4m
		왕복4차로	500v/h 이상	98v/h	161v/h	4.5m
		왕복5차로	550v/h 이상	105v/h	173v/h	5.5m
4 지 교 차로	왕복 4차로	왕복3차로	400v/h 이상	47v/h	98v/h	4m
		왕복4차로	400v/h 이상	53v/h	103v/h	4m
	왕복 6차로	왕복4차로	500v/h 이상	89v/h	151v/h	4m
		왕복5차로	550v/h 이상	94v/h	163v/h	5m
		왕복6차로	600v/h 이상	103v/h	171v/h	5.5m
	왕복 8차로	왕복4차로	550v/h 이상	95v/h	151v/h	4.5m
		왕복5차로	550v/h 이상	105v/h	173v/h	5.5m
		왕복6차로	600v/h 이상	116v/h	194v/h	6m
		왕복7차로	650v/h 이상	118v/h	206v/h	6.5m
		왕복8차로	650v/h 이상	125v/h	221v/h	7m

4. 결론

좌회전 차로 전방 연장에 대하여 PC-CRASH 시뮬레이션을 이용하여 교차로 유형별 적정 좌회전 차로 전방 연장 길이 기준을 제시하였다.

연구 결과, 주도로 차로수가 많더라도 부도로 차로수가 적을 경우 좌회전 차로 전방 연장의 길이가 4m 정도로 짧게 나왔다. 이는 차량의 회전반경 및 차량 주행속도가 복합적으로 반영되었기 때문에 좌회전 차로 전방 연장 설치 시 주도로뿐만 아니라 부도로도 고려해야 한다.

또한, VISSIM 시뮬레이션을 통해 위 기준에 따라 좌회전 차로의 전방 연장을 설치했을 때 좌회

전 차로의 용량 증대 효과를 분석하였다. 분석 결과, 교차로별로 용량 증대 폭은 다소 차이가 있었지만, 모든 교차로에서 용량 증대 효과가 나타났으며, 증가 폭은 10~20%에 이르렀다.

본 연구에서 제시한 좌회전 차로 전방 연장 설치 기준의 단점을 보완하기 위하여 향후 연구·보완되어야 할 몇 가지 사항을 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 기하구조를 반영하지 못하였다. 회전반경은 차량 제원 및 주행속도에 따라 크게 변화하지만, 도로 기하구조에 따른 회전반경 변화량도 무시할 수 없으며, 특히 교차각에 따라서 최소회전반경은 크게 변화한다. 향후 교차각 및 도로기하구조에 대한 연구를 보완하여 좌회전 차로 전방 연장 설치 기준에 좀 더 정확한 값들을 적용해야 할 것으로 판단된다.

둘째, 안전측면의 사고 발생 가능성과의 연계가 미흡하였다. 본 연구에서는 물리적 사고 가능성만을 고려하여, 잠재적 사고 가능성은 배제되었다. 향후 시범 설치 지역의 사고자료가 확보되면 안전 측면을 고려한 기준제시가 가능할 것으로 판단된다.

마지막으로 좌회전 차로 전방 연장에 대하여 교차로 내 운전자들이 혼동을 일으키지 않도록 홍보방안을 연구해야 한다. 신규 도입될 시설 및 운영 기준에 대해서는 시범설치시 홍보가 동반되어야 하지만, 홍보가 부족할 경우 많은 운전자들이 혼란을 겪을 수 있다. 좌회전 차로 전방 연장을 이해하지 못하여 직진신호 시에 좌회전 차로 전방 연장 차로로 진입하지 않는 운전자가 많을 경우 설치 효과는 감소할 수 밖에 없다. 향후 좌회전 차로 전방 연장에 대한 홍보와 교육이 더해진다면, 교통 선진화 방안으로 도입될 좌회전 차로 전방 연장이 큰 효과를 거둘 수 있을 것이다.

References

- [1] L. Zheng, T. Sayed, A. Tageldin, "Before-after safety analysis using extreme value theory: A case of left-turn bay extension", *Accident Analysis & Prevention*, vol. 121, December 2018, pp. 258-267, doi: 10.1016/j.aap.2018.07.029.
- [2] A. Tageldin, T. Sayed, K. Ismail, "Evaluating the safety and operational impacts of left-turn bay extension at signalized intersections using automated video analysis", *Accident Analysis & Prevention*, vol. 120, November 2018, pp. 13-27, doi: 10.1016/j.aap.2018.07.029.
- [3] Y. Guo, L. Zheng, T. Sayed, "A comparison of collision-based and conflict-based safety evaluation of left-turn bay extension", *Transportmetrica A: transport science*, vol. 16 no. 3, December 2019, pp. 676-694, doi: 10.1080/23249935.2020.1722286.
- [4] Z. Wei, Y. Zhang, X. Guo, X. Zhang, "Modeling capacity of through movement at signalized intersection affected by short left-turn bay under different signal settings", *Transportation research record*, vol. 2675, no. 9, April 2021, pp. 1209-1223, doi: 10.1177/03611981211006433.
- [5] H. K. Kim, S. B. Lee, H. R. Lee, S. J. Hong, H. R. Min, "Estimation of traffic safety improvement effect of forward collision warning", *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 20, no. 2, April 2021, pp. 43-57, doi: 10.12815/kits.2021.20.2.43.