

신호현시 순서와 통행량을 고려한 대각선 횡단보도 지체도 분석

Analysis of Traffic Delays at Scramble Crosswalks Considering Signal Phase Sequence and Traffic Volume

김수지* · 이주영** · 권영민***

* 주저자 : KAIST 조천식녹색교통대학원 박사과정

** 공저자 : KAIST 조천식녹색교통대학원 박사과정

*** 교신저자 : KAIST 기계기술연구소 연수연구원

Suji Kim* · Jooyoung Lee* · Yeongmin Kwon**

* The Cho Chun Shik Graduate School of Green Transportation, KAIST

** Mechanical Technology Research Center, KAIST

† Corresponding author : Yeongmin Kwon, ymkwon@kaist.ac.kr

Vol.19 No.3(2020)

June, 2020

pp.116~128

pISSN 1738-0774

eISSN 2384-1729

[https://doi.org/10.12815/kits.](https://doi.org/10.12815/kits.2020.19.3.116)

2020.19.3.116

Received 21 April 2020

Revised 8 May 2020

Accepted 15 June 2020

© 2020. The Korea Institute of
Intelligent Transport Systems. All
rights reserved.

요약

본 연구는 대각선 횡단보도의 설치기준 정립을 위한 기초 자료 구축을 목표로 교차로의 보행량 및 차량 교통량을 고려하여 대각선 횡단보도와 일반 횡단보도의 지체도를 비교하여 분석하였다. 도로구조와 신호현시를 가정하고 신호이론에 근거하여 지체도를 시간단위로 계산하였으며, 이때 차량 통행의 지체뿐만 아니라 보행자의 지체시간을 고려하였다. 산출한 지체도를 이용하여 일반 횡단보도 교차로와 대각선 횡단보도 교차로를 비교하고 대각선 횡단보도 설치 적정구간을 검토하였다. 또한 이 과정에서 교차로의 신호현시를 순환식과 비순환식으로 나누어 결과를 도출하였다. 분석 결과를 통해 본 연구는 주도로의 차량 통행비율이 높은 경우에 대각선 횡단보도의 도입이 일반 횡단보도의 운영보다 적절할 수 있다는 점을 확인하였으며, 대각선 횡단보도의 운영을 위해서는 순환식 신호현시보다 비순환식 신호현시의 적용이 적절하다는 것을 확인하였다. 그러나 비순환식 신호현시의 적용에서도 대각 횡단의 수요가 너무 적은 경우에는 대각선 횡단보도 적용이 적절하지 않을 수 있다는 것을 확인하였다. 본 연구는 대각선 횡단보도 설치 가능성 판단을 위해 신호현시순서와 교통량에 따른 지체도 비교분석연구로써 대각선 횡단보도 설치 기준을 정립하는데 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

핵심어 : 대각횡단, 대각선횡단보도, 지체도, 보행량, 교통량

ABSTRACT

This study compared the delays of scramble crosswalks and general crosswalks, considering the pedestrian and vehicle traffic at intersections. Based on the signal theory, this study used traffic delays as a measure of feasibility of installing scramble crosswalks. The road structure and length of signal lights were assumed to be specific numbers to calculate the delays in vehicles and pedestrians. With the computed delays, this study compared general crosswalks and scramble crosswalks, and evaluated the feasibility sections on the installation of scramble crosswalks using circular and non-circular signal phases, respectively. The analysis confirmed that the introduction of scramble crosswalks might be more appropriate when the traffic ratio on the main roads is high. In addition, the application of non-circular signal phases is more proper for the operation of scramble crosswalks than circular signal

phases. In the non-circular signaling system, however, it was shown that diagonal crosswalks might not be practical if the demand for diagonal crossing is too low. These results are expected to contribute to the development of basic guidelines for assessing the installment feasibility of scramble crosswalks in terms of traffic operation and efficiency.

Key words : Diagonal crossing, Pedestrian volume, Scramble crosswalk, Traffic delay, Traffic volume

1. 연구의 배경 및 목적

보행 횡단 지원 시설은 보행자가 도로를 횡단할 시 안전 및 편의 확보를 목적으로 하는 시설로서 횡단보도, 육교, 지하보도 등이 이에 해당된다. 보행 횡단 지원 시설 중 횡단보도는 우리 주변에서 가장 흔하게 접할 수 있는 기본적인 시설로서, 그 종류는 설치구조 및 운영방식에 따라 일반 횡단보도, 대각선 횡단보도, 스테퍼드 횡단보도, 고원식 횡단보도 등으로 나뉘어진다(Korean National Police Agency, 2019). 이 중 대각선 횡단보도는 교차로에서 보행자의 대각선 횡단을 허용하는 횡단시설로 교통신호에 보행전용현시를 부여하여 보행자의 도로 횡단 시 안전성을 높이는 것을 우선적인 목표로 한다. 해당 횡단보도는 보행신호 시 모든차량의 교차로 통과를 제한함으로써 보행자와 차량과의 충돌을 감소시켜 교통사고 방지에 높은 이점을 가진다. FHWA에서 미국 디트로이트 시 신호교차로를 대상으로 조사한 자료에 따르면 대각선 횡단보도 운영 시 충돌사고는 75.7% 감소, 부상 사고건수는 45.5% 감소, 전체 사고건수는 33.3% 감소하는 것으로 나타났다 (Rice, 2010).

이와 같이 대각선 횡단보도는 보행자의 도로 횡단을 안전하게 보장한다는 측면에서 큰 장점을 가지고 있어 국내뿐만 아니라 국외에서도 설치를 늘리고 있는 추세이다. 그러나 도로의 통행효율을 높여야 하는 교통운영 관점에서 대각선 횡단보도는 원활한 통행흐름을 저해할 수도 있다는 단점을 가지고 있다. 예를 들어 보행전용현시를 신호에 포함시킴으로써 신호간격 증가에 따른 차량 및 보행자의 대기시간을 증가시킬 수 있으며 녹색시간 비율 감소에 따른 교통용량 감소 등 여러 교통운영 측면의 문제점들을 가져올 수 있다. 따라서 대각선 횡단보도의 설치를 통해 보행자 안전성을 높이되 교차로의 교통흐름을 효율적으로 처리하기 위해서는 적정 설치기준을 마련하고 이를 뒷받침 할 여러 가지 분석연구들이 수반되어야 한다.

국내의 횡단보도 설치기준은 「도로교통법 제10조 도로의 횡단」의 횡단보도 설치 주체와 보행자의 도로 횡단 방법 등을 따르고 있다. 「도로교통법 시행규칙 제11조 횡단보도의 설치기준」에 따라 일반 횡단보도의 설치간격 및 설치대상지의 기준을 제시하고 있지만, 대각선 횡단보도에 대한 내용과 구체적인 설치기준은 포함하고 있지 않다. 대각선 횡단보도의 설치 및 권장 지역에 대한 내용은 경찰청 지침서인 ‘교통노면표시 설치관리 매뉴얼 (Korean National Police Agency, 2019)’에서 포함하고 있으나, 권장지역에 대한 기준은 ‘횡단보도의 설치위치는 보행자의 동선, 보행자 및 자동차의 통행량, 신호주기, 교차로간 거리 등에 따른 공학적 판단에 따른다’라고만 명시되어 있을 뿐 세부적인 기준이 부재한 상황이다.

국외에서는 대각선 횡단보도에 대한 다양한 지침들을 국내보다는 자세히 제시하고 있으나 대부분이 정량적인 설치기준을 제시하기보다는 통상적인 기준을 명시해 놓았다. 국외 기준들에서는 공통적으로 보행자가 많은 곳과 대각선 횡단 수요가 많은 곳을 설치 대상지로 고려해야 한다는 점을 강조하였고, 이와 더불어 설치로 인하여 교차로 운영 및 통행처리 효율성을 떨어뜨리지 않은 곳을 선택해야 한다는 것을 강조하고 있다. 호주 South Australia 주의 경우에는 다른 국가 및 지자체 기준들과 달리 대각보행량이 최소 10명/주기, 대각 횡단 수요가 전체 횡단보행자 중 10%이상과 같은 정량적인 기준을 제시하고 있으나 차량 및 신호현시 등에 대한 기준은 포함하고 있지 않다. 또한, 대각선 횡단보도로 인한 교차로의 운영 효율성을 판단할 수 있는 기

준은 아니다 (Table 1 참조).

대각선 횡단보도 설치기준 정립을 위한 통행측면 효율성 평가에 대한 연구는 꾸준히 진행되어왔다 (Table 2 참조). Son et al.(1997)에 의해 수행되어진 초기연구는 차량통행의 지체시간과 보행자 통행의 지체를 고려하여 기준을 제시하였고, 이후 Jang et al.(2007)은 교통량과 차선수, 횡단시간, 보행량을 기준으로 대각선 횡단보도 설치 전후의 차량 지체도를 비교분석하였다. Kim and Kim(2007)은 차량 지체도 뿐만 아니라 보행자 지체시간을 고려하여 통합적인 정량적 기준을 제시하였으며, Han et al.(2011)의 연구는 차량 지체시간과 보행자 횡단시간을 기준으로 대각선 횡단보도 설치 전후 분석을 수행하였다. Tu and Kazushi(2014) 연구에서는 시뮬레이션 기반으로 대각선 횡단보도 설치 전후 효과를 비교하였고, Jung et al.(2017) 또한 vissim 프로그램을 이용한 시뮬레이션 기반으로 교차로 유형별 차량통행의 지체도를 비교분석하여 대각선 횡단보도의 설치 효과를 분석하였다. Nam et al.(2019)은 교통량과 보행량을 함께 고려하여 신호운영방식에 따른 지체도를 산출하였고 그 결과 직좌동시 신호현시로 구성된 운영방식이 직진후좌회전 현시로 구성된 교차로보다 지체도 측면에서 대각선 횡단보도를 설치하기에 더 효율적이라는 것을 밝혔다. 이처럼 기존의 연구들은 차량통행의 지체도와 보행의 편의성을 함께 고려할 수 있는 연구를 진행하면서 발전되어왔으나, 교차로 신호현시의 특성에 따라 달라지는 도로상황에 대한 연구는 부족하였다. 따라서 본 연구는 보행량 및 차량 통행량 외에 신호현시 순서에 따른 지체도를 기반으로 대각선 횡단보도 설치 전후 효과 분석을 통해 대각선 횡단보도 설치 기준 정립에 기여할 수 있는 연구를 진행하고자 하였다.

본 연구는 교통운영 측면에서 대각선 횡단보도의 설치 타당성 판단을 위한 기초자료 구축에 기여하기 위하여, 신호현시 순서와 보행 통행량 및 차량 통행량에 따른 대각선 횡단보도의 설치 전후 지체도 비교분석을 목표로 하였다. 신호이론을 기반으로 순환식 및 비순환식 신호현시에 따른 대각선 횡단보도의 교통 효율성을 차량과 보행자의 지체도를 이용하여 평가하고 그 결과를 비교하는 이론적 접근방식을 이용하였다. 본 논문의 나머지 부분은 연구 방법, 분석 결과, 결론 세 가지 부분으로 구성된다. 연구 방법에서는 신호이론에 따른 보행자와 차량의 지체도를 산출하는 본 연구의 방법론에 대하여 설명한다. 제시한 방법론을 기반으로 교통량과 보행량에 따라 도출된 결과를 분석 결과 부분에서 정리 및 해석하고 마지막 결론 부분에서는 해당 연구 결과의 활용방안과 기여방안에 대해서 논의한다.

<Table 1> Worldwide guidelines for installation of scramble crosswalk

Country	Source	Contents
Victoria State, Australia	Manual of uniform traffic control devices <Part 14. Traffic signals - 6.1.2 Pedestrian may cross diagonally (scramble crossing)>	<ul style="list-style-type: none"> • Diagonal pedestrian crossings may be provided in central business districts where there are high pedestrian volumes, which affect the capacity of the intersection due to geometric restraints. • This facility is only installed when it would lead to a more efficient signal phasing operation. • Vehicular traffic is required to stop on all approaches to the intersection and pedestrians are permitted to cross the intersection diagonally. • Network standards shall be consulted when installation of this facility is contemplated. See Figure 5 for a typical diagonal pedestrian crossing arrangement.
South Australia, Australia	Traffic Management Operational Instructions <14.1. Scramble Pedestrian Crossing>	<ul style="list-style-type: none"> • Pedestrian flows should be very high. High may be considered to be a minimum of 10 per cycle. For example, if pedestrians are uniformly distributed and the cycle time is 150 seconds, the minimum pedestrian flow would need to be 240 per hour. • There should be a minimum of 10% of the pedestrian demand for the diagonal crossing.
New Zealand	Pedestrian Planning and Design Guide <15.16. Signalized Intersections>	<ul style="list-style-type: none"> • Consider exclusive phases that permit diagonal crossing where pedestrian needs predominate in the hierarchy of users (such as CBD streets), or where turning conflicts cannot be sufficiently well managed by other means.

<Table 2> Reviews of previous studies (An extension of the summary in Choi(2013))

Author(s)	Signal phases	Road geometric structure	Traffic volume	Pedestrian volume	Etc.
Son et al. 1997	<ul style="list-style-type: none"> • Simultaneous signal • left turn ahead signal 	• 4x4 two-way crosswalk	• 600~1,800(n/phase)	• 1:1 or 1:2 traffic volume	• Scramble crossing ratio: 20%, 30%, 40%
Jang. 2007	• 4 phase	• 3 one-way crosswalk	• 600~1,800(n/phase)	• High, middle, low	
Kim et al. 2007	-	• 3 one-way crosswalk	• 100~600(n/lane)	• 200~2,000/direction	• Right turn:10~50%
Han et al. 2011	<ul style="list-style-type: none"> • 2 phase • 3 phase • 4 phase 	<ul style="list-style-type: none"> • 4x2 two-way crosswalk • 4x4 two-way crosswalk • 6x4 two-way crosswalk 	• Degree of saturation: Low (0.3-0.4), Medium (0.5-0.6), High (0.8-0.9)	• Pedestrian conflicts: 0, 5, 10 times/cycle	<ul style="list-style-type: none"> • Unprotected left turn is operates at 2 and 3 phase • Right turn ratio: 20%, 50%, 100% of straight
Kang et al. 2014	-	• 4x2 two-way crosswalk	• Degree of saturation: 0.3-0.8	• 100~600/hr	<ul style="list-style-type: none"> • Straight: 50% • Left turn: 25% • Right turn: 25%
Lee, 2016	<ul style="list-style-type: none"> • 5 phase • 6 phase 	<ul style="list-style-type: none"> • EB,WB : 3 one-way crosswalk • SB,NB : 2 one-way crosswalk 	• Up to 480n/hr/lane	• 1400/hr	• Left turn: 300n/hr
Nam et al. 2019	<ul style="list-style-type: none"> • 4 phase • 5 phase 	<ul style="list-style-type: none"> • 4x4 two-way crosswalk • 4x2 two-way crosswalk • 2x2 two-way crosswalk 	• Up to 250n/hr/lane	-	

II. 연구 방법

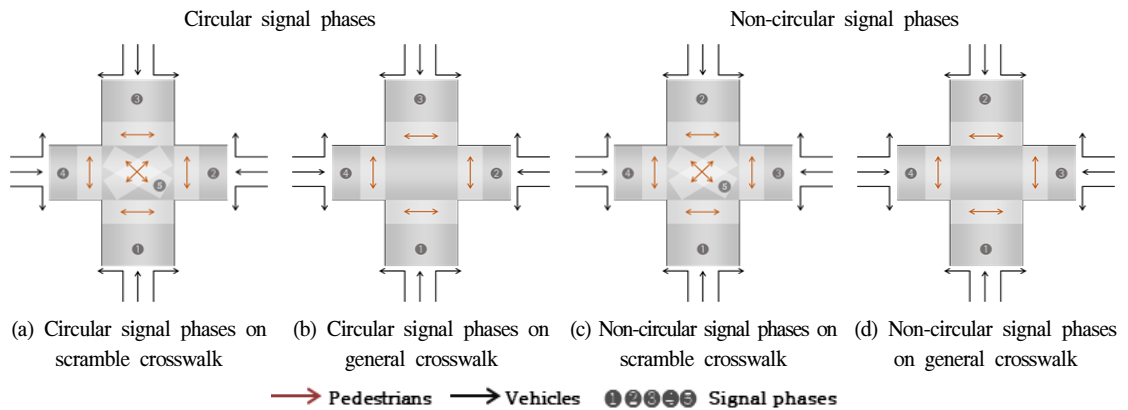
본 연구는 직관적인 이해를 위하여 도로구조 및 통행량 등을 가정한 후 이를 정량적으로 표현하고자 하였다. 이를 위해 특정 도로구조와 신호현시를 가정하고 신호이론에 따라 각각의 지체시간 식을 도출하였다. 동일한 도로구조에서 대각선 횡단보도 교차로와 일반 교차로의 주도로 교통량 비율과 대각보행량 증가에 따른 전체지체시간 (보행자지체시간 + 차량지체시간)을 비교한다. 또한 신호현시 순서에 따라서 보행자 지체시간이 다르게 산출되므로 이에 따른 대각선 횡단보도 지체도를 판단하기 위하여 신호현시 종류를 순환식과 비순환식 나누어 비교하였다.

1. 가정사항 설정

본 연구에서는 지체시간을 산출하기 위하여 기존 연구들의 결론을 참고하고 교통약자의 안전성을 확보하기 위해 실제 대각선 횡단보도가 설치된 곳 중 비포화 교통량을 가지고 있는 대전 소재 반석초등학교 앞 대각선 횡단보도를 기반으로 하여 연구의 범위를 계획하였다. 교통량이 포화상태인 교차로의 경우에는 이미 차량 지체도가 높아진 상태로 대각선 횡단보도를 설치한다고 가정할 시 지체도가 급증하여 설치가 부적합할 것으로 판단되기 때문이다. 해당 대상지의 도로구조, 통행량, 신호운영방식 등을 사전조사하고 본 연구의 분석범위를 다음과 같이 설계하였다.

그 범위의 세부 내용은 다음과 같다. 도로구조에 대해서는 4m의 차로 폭을 가지는 주도로 양방 4차로, 부도로 양방 2차로인 교차로 가정하였다. 대각 횡단길이는 도로폭, 길어깨 폭 등 실제적으로 보행자들이 지나가게

되는 길이를 고려하여 약 23m로 가정하였다. 도로를 통행하는 전체 차량 통행량은 40대/주기(1,028대/시)로 주도로 통행비율을 0.5~1로 변화시키면서 지체시간을 도출하였고, 보행자 통행량에 대해서는 통행비율이 방향별로 동일하다고 가정하고 대각 보행자 통행량을 0~20인/주기로 변화시키면서 지체시간을 도출하였다. 보행자의 통행속도는 교통약자 기준 0.8m/s를 기준으로 하여 보행자가 교차로를 통과하는 시간을 산출하였다. 전체 신호주기를 140초로 가정하였고 최소녹색시간을 고려하되 그 이상인 경우 통행비율에 따라 배정하였다. 도로의 차량통행을 위한 방향별 신호는 직좌동시신호로 가정하고 순환식 신호현시와 비순환식 신호현시로 나누어 아래 <Fig. 1>과 같이 설계하였다. Nam et al.(2019)의 연구에서 직좌동시신호 현시의 교차로 운영 방식이 대각선 횡단보도에 더 적합하다는 결과와 함께 사전조사하였던 실제 대상지 내 대각선 횡단보도 운영방식이 직좌 동시신호라는 것을 반영하여 연구의 신호체계를 해당 운영방식으로 가정하였다. 본 연구의 도로구조 같이 교차로의 규모가 작은 곳은 접근로의 폭이 좁아 별도의 좌회전 차로의 설치가 어려워 동시신호를 적용하는 경우가 많다. 신호현시 순서에 대해서는 순환식 신호현시를 반시계방향으로 차례대로 신호가 주어지는 것으로 가정하였으며, 비순환식 신호현시는 아래 그림과 같이 같은 도로의 방향별 신호가 연달아 주어지는 것으로 정의하였다.



<Fig. 1> Assumed signal phase sequence for general and scramble crosswalk

2. 신호현시에 따른 지체시간 산출 식 도출

앞에서 설정한 가정사항을 기반으로 순환식 신호현시와 비순환식 신호현시에 따라 각 방향별 산출 식을 도출하고 이를 이용하여 차량지체와 보행자지체 산출 식을 각각 유도하였다. 신호이론을 적용하여 일반 횡단보도 교차로와 대각선 횡단보도 교차로 각각 신호현시에 대한 방향별 녹색시간을 도출하였다. 황색시간은 3초로 동일하게 적용하고 전체 신호주기 140초 중 최소녹색시간을 포함하여, 방향별로 통행비율에 따라 녹색시간을 산출할 수 있도록 계산 식을 도출하였다. 일반 횡단보도 교차로와 달리 대각선 횡단보도 교차로의 경우 보행을 위한 신호가 차량통행을 위한 신호와 별도로 존재하므로 보행신호를 신호주기에 포함시켜 신호현시를 구성하였다. 대각선 횡단보도 교차로의 보행신호는 대각선 횡단길이와 보행속도에 의한 총 횡단시간 및 보행진입시간을 고려하여 36초로 지정하였다. 각 방향별 신호현시 산출 식은 순환식 및 비순환식 신호현시, 일반 횡단보도 및 대각선 횡단보도 종류에 따라 <Table 3>에 설명되어 있는 바와 같다.

도출한 방향별 신호현시 산출 식을 기반으로 주도로 및 부도로 지체와 보행자 지체 산출 식은 <Table 4>와 같이 정리되며 전체 지체시간은 해당 세 가지 지체시간(주도로 지체시간, 부도로 지체시간, 보행자 지체시간)의 합으로 계산한다.

<Table 3> Equations of signal timing by types of signal phases and crosswalk

Phases		1	2	3	4	5	
Circular signal	General crosswalk	Direction					-
		Green	$\frac{(C-12)x}{2}$	$\frac{(C-12)(1-x)}{2}$	$\frac{(C-12)x}{2}$	$\frac{(C-12)(1-x)}{2}$	-
		Yellow	3	3	3	3	-
	Scramble crosswalk	Direction					Pedestrian crossing
		Green	$\frac{(C-48)x}{2}$	$\frac{(C-48)(1-x)}{2}$	$\frac{(C-48)x}{2}$	$\frac{(C-48)(1-x)}{2}$	36
		Yellow	3	3	3	3	-
Non-circular signal	General intersection	Direction					-
		Green	$\frac{(C-12)x}{2}$	$\frac{(C-12)x}{2}$	$\frac{(C-12)(1-x)}{2}$	$\frac{(C-12)(1-x)}{2}$	-
		Yellow	3	3	3	3	-
	Scramble intersection	Direction					Pedestrian crossing
		Green	$\frac{(C-48)x}{2}$	$\frac{(C-48)x}{2}$	$\frac{(C-48)(1-x)}{2}$	$\frac{(C-48)(1-x)}{2}$	36
		Yellow	3	3	3	3	-

x = ratio of traffic volume on main road, T = total vehicle volume, C = cycle time of signal

<Table 4> Equations of delay times by types of signal phases and crosswalk

	General crosswalk	Scramble crosswalk
Circular signal	<ul style="list-style-type: none"> Traffic delay on main road = $\frac{xT}{4}[C - ((C-12)x/2)]$ Traffic delay on sub road = $\frac{(1-x)T}{4}[C - ((C-12)(1-x)/2)]$, Pedestrian delay = $\frac{yC}{2}$ 	<ul style="list-style-type: none"> Traffic delay on main road = $\frac{xT}{4}[C - ((C-48)x/2)]$ Traffic delay on sub road = $\frac{(1-x)T}{4}[C - ((C-48)(1-x)/2)]$, Pedestrian delay = $\frac{yC}{2}$
Non-circular signal	<ul style="list-style-type: none"> Traffic delay on main road = $\frac{xT}{4}[C - ((C-12)x/2)]$ Traffic delay on sub road = $\frac{(1-x)T}{4}[C - ((C-12)(1-x)/2)]$, Pedestrian delay = $\frac{3yC}{4}$ 	<ul style="list-style-type: none"> Traffic delay on main road = $\frac{xT}{4}[C - ((C-48)x/2)]$ Traffic delay on sub road = $\frac{(1-x)T}{4}[C - ((C-48)(1-x)/2)]$, Pedestrian delay = $\frac{yC}{2}$

x = ratio of traffic volume on main road, y = pedestrian volume, T = total vehicle volume, C = cycle time of signal

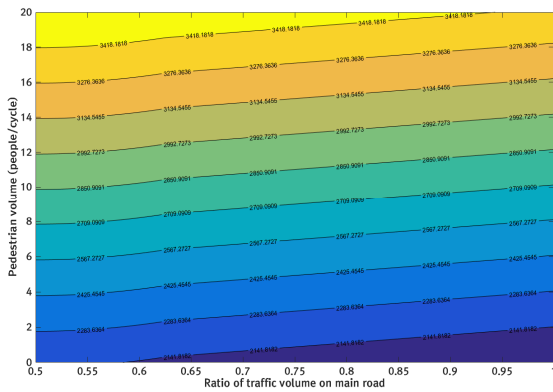
Ⅲ. 분석 결과

방법론에서 제시한 가정과 지체도 산출 식에 기반하여 분석 결과는 순환식 신호현시와 비순환식 신호현시 순서로 대각교차로와 일반교차로의 전체 지체시간 비교를 통해 설명된다. 설명을 위하여 대각선 보행량과 주도로 통행비율에 따른 지체도 그래프를 활용하였다. 순환식 신호현시 그래프는 <Fig. 2>에 비순환식 신호현시는 <Fig. 3>에 정리되어있다. Figure의 구성은 동일하며 그 구성은 다음과 같다. (a)와 (b)는 대각보행량과 주도로 통행비율에 따라 달라지는 전체 교차로 지체시간을 색의 변화에 따라 표현한 그래프이다. (c)는 대각보행량을 특정 값으로 고정하고 주도로 통행비율에 따라 달라지는 일반 횡단보도와 대각선 횡단보도 교차로의 지체시간을 비교하기 위한 그래프이며 (d)는 주도로 통행비율을 고정하고 대각보행량에 따른 지체시간을 비교하기 위한 그래프이다. (e)는 대각보행량, 주도로 통행비율, 지체시간을 3차원으로 일반 횡단보도와 대각선 횡단보도를 같은 그래프에 나타낸 것이다. 그리고 해당 그래프를 대각보행량과 주도로 통행비율에 따라 2차원화하여 지체정도를 동시에 비교할 수 있도록 표현하였다. 분석은 MATLAB 2016b를 이용하여 진행하였다.

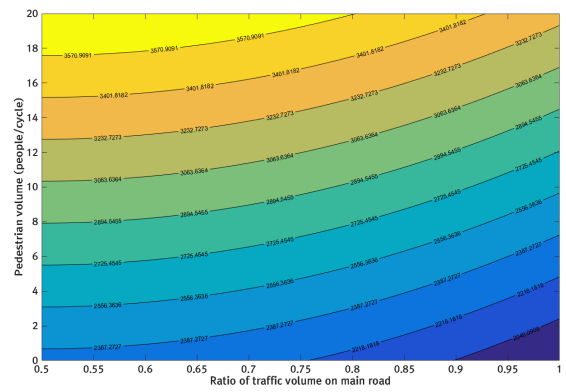
1. 순환식 신호현시

순환식 신호현시의 일반 횡단보도와 대각선 횡단보도 지체도 계산 결과는 위에서 언급한 바와 같이 <Fig. 2>와 같다. <Fig. 2(a), (b)>에서 지체시간은 색으로 표현되어있으며 파란색일수록 전체 지체시간이 적은 것을 노란색일수록 전체 지체시간이 높은 것을 나타낸다. 주도로 통행비율과 대각보행량에 따른 지체시간의 분포는 횡단보도의 종류에 따라 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 특히, 주도로 통행비율이 낮을 때는 같은 범위 내에서 일반 횡단보도 교차로의 지체시간 증가 폭이 대각교차로보다 높은 것으로 보이지만, 주도로의 통행비율이 높을 때는 대각선 횡단보도 교차로의 지체시간 증가 폭이 일반 횡단보도보다 높은 것으로 보여진다. 이는 <Fig. 2(c)>를 통해 더 정확히 관찰할 수 있다. 대각보행량 고정 시 주도로 통행비율이 증가함에 따라 두 경우 모두 전체지체시간이 감소하지만 대각교차로의 변화폭이 더 큰 것으로 나타난다. 대각보행량을 5.05인/주기로 고정했을 시 주도로 통행비율이 0.5일 경우 대각교차로의 통행지체시간이 일반교차로보다 약 10% 높으나, 해당 통행비율이 0.9를 넘어갈 경우 대각교차로의 통행지체시간이 더 낮아지는 것을 알 수 있었다. 반면에 <Fig. 2(d)>에서 보이는 바와 같이 주도로 통행비율을 0.95로 고정했을 시 일반 횡단보도의 교차로의 지체도가 좀 더 높지만 대각보행량이 증가함에 따라 일반교차로와 대각교차로가 영향을 받는 정도가 크게 다르지 않는 것으로 나타났다. 이는 두 교차로의 지체정도가 대각보행량에 따라 굉장히 평행적으로 변화한다는 것을 알려주는 결과이며 이는 <Fig. 2(e)>의 3차원 그래프를 통해 좀 더 정확하게 관찰할 수 있다.

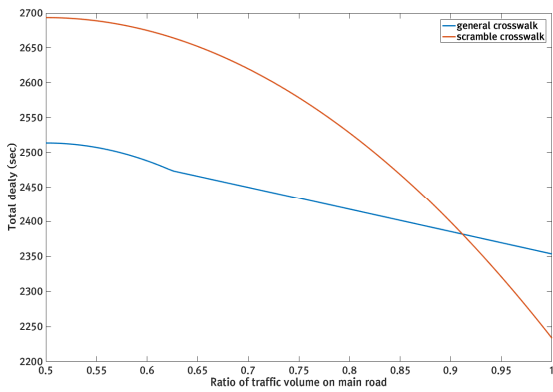
<Fig. 2(e)>는 차량의 주도로 통행비율과 대각보행량에 따른 일반 횡단보도와 대각선 횡단보도 교차로의 전체 지체시간을 비교하기 위한 그래프이다. 그래프로부터 교차로의 종류에 따라 실제 전체지체시간의 분포가 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 주도로 통행비율과 대각보행량의 범위가 같을 때 일반 횡단보도 교차로의 전체지체시간 증가 폭이 대각교차로보다 높은 것을 알 수 있다. 해당 그림에서의 Section 1은 일반 횡단보도 교차로의 지체시간이 대각선 횡단보도 교차로보다 낮은 경우이며, Section 2는 그와 반대인 경우이다. 전체 범위에서 일반교차로의 지체시간이 높은 부분이 현저히 작은 범위를 차지하는 것을 알 수 있으며, 대각보행량에는 관계없이 주도로 통행비율에 따라 대각선 횡단보도 지체도가 크게 달라지는 것을 볼 수 있다. 즉, 주도로 통행비율이 약 0.92일 때까지는 일반교차로의 지체도가 더 낮지만, 주도로 통행비율에 그 이상으로 높은 수준을 유지할 때는 대각교차로의 지체도가 일반교차로보다 낮은 것을 관찰할 수 있다.



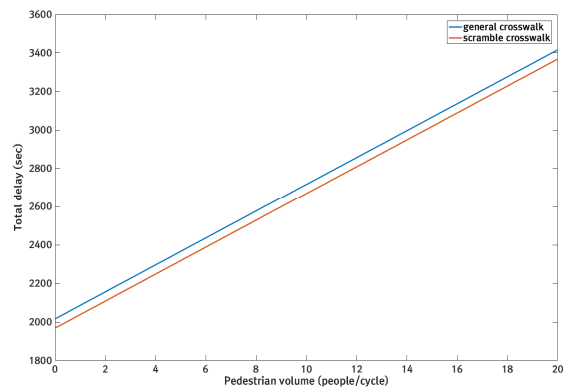
(a) total delay at general crosswalk



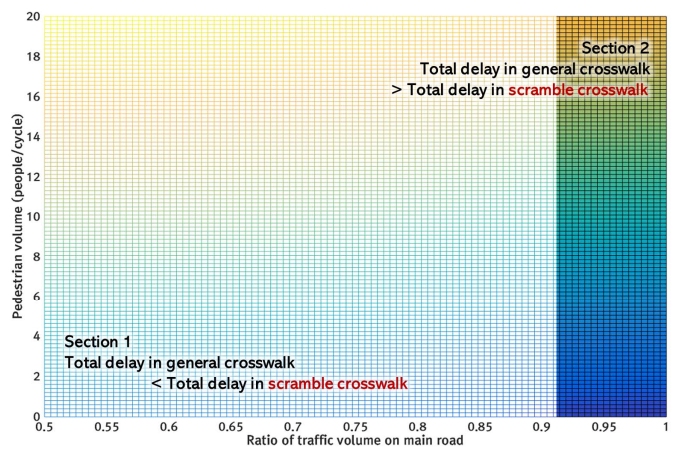
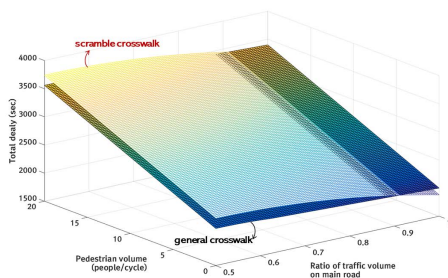
(b) total delay at scramble crosswalk



(c) total delay by traffic volume
(at 5.05 of pedestrian volume
on diagonal crossing)

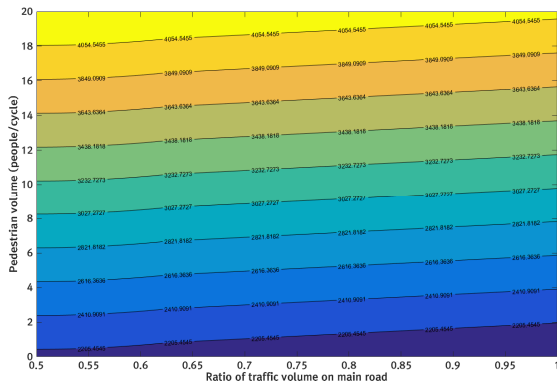


(d) total delay by pedestrian volume
on diagonal crossing
(at 0.95 of ratio of traffic volume on main road)

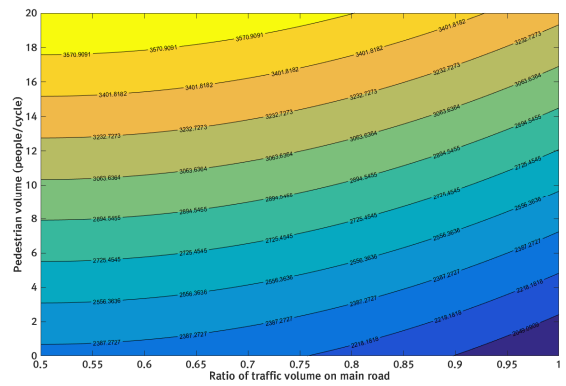


(e) total delay by traffic volume

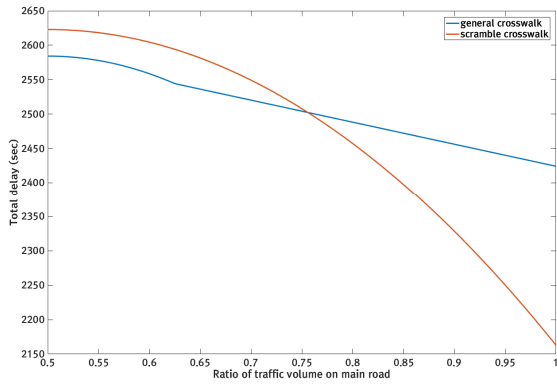
<Fig. 2> Results of circular signal phases



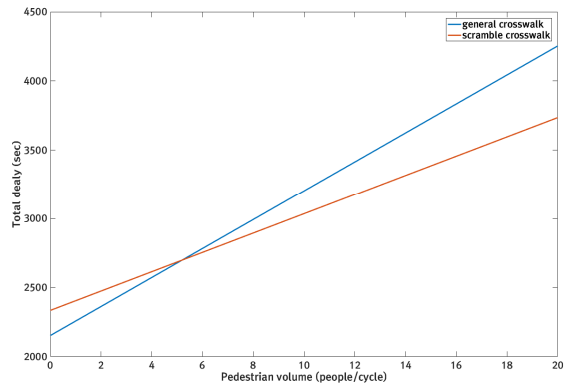
(a) total delay at general crosswalk



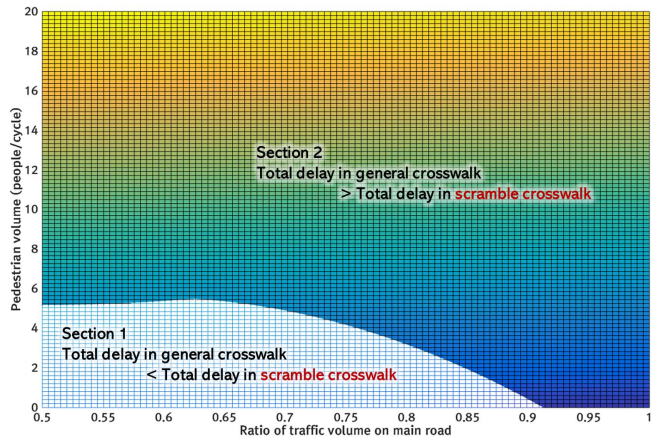
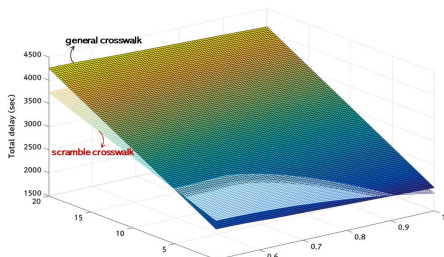
(b) total delay at scramble crosswalk



(c) total delay by traffic volume
(at 4.04 of pedestrian volume
on diagonal crossing)



(d) total delay by pedestrian volume
on diagonal crossing
(at 0.55 of ratio of traffic volume on main road)



(e) total delay by traffic volume

<Fig. 3> Results of non-circular signal phases

2. 비순환식 신호현시

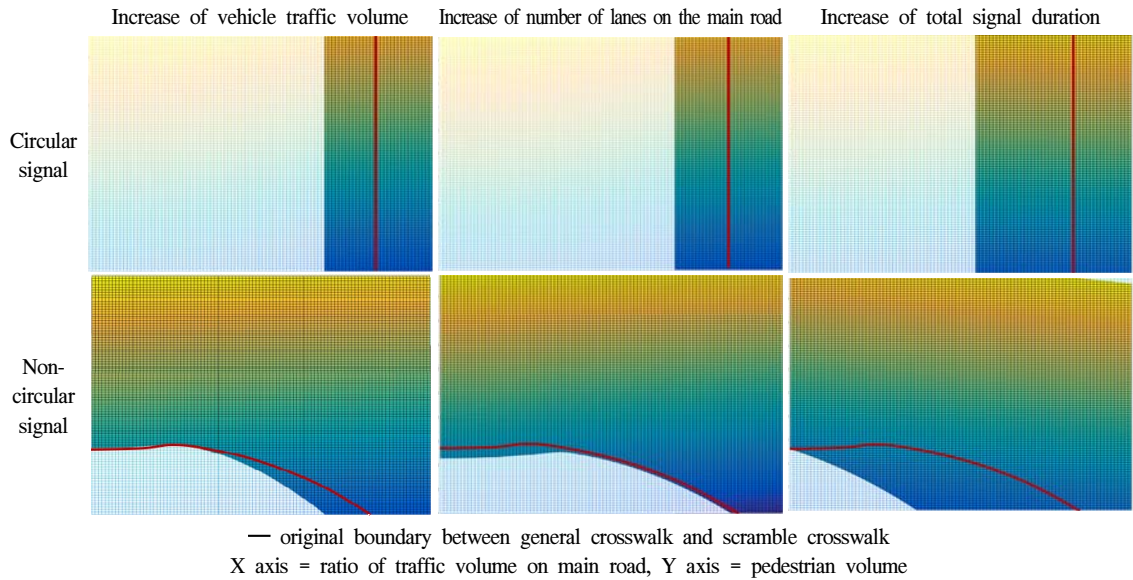
비순환식 신호현시에서의 결과는 <Fig. 3>에 정리되어있으며, 순환식 신호현시의 결과와 마찬가지로 교차로의 종류에 따라 전체지체 시간의 분포가 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 주도로 통행비율과 보행량이 같은 범위 내에서 동일하게 변화할 때 대각선 횡단보도 교차로의 전체 지체시간 증가 추세가 일반 횡단보도 교차로보다 빠른 것을 알 수 있다 (<Fig. 3(a), (b)> 참조). <Fig. 3(c)>에 보이는 바와 같이 대각 보행량 고정 시 주도로 통행비율이 증가함에 따라 두 경우 모두 전체지체시간이 감소하지만 대각교차로의 감소폭이 매우 큰 것을 알 수 있다. 대각 보행량을 4.04인/주기로 고정했을 시 주도로 통행비율이 0.5일 때는 지체정도에서 큰 차이를 보여주지 않지만, 해당 비율이 0.75를 기준으로 점점 커질수록 대각선 횡단보도 교차로의 지체시간은 일반교차로보다 큰 차이로 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 한편, 주도로 통행비율을 0.55로 고정했을 시에는 대각보행량이 증가함에 따라 두 경우 모두 전체 지체시간이 증가하지만 일반교차로의 기울기가 더 큰 것으로 나타났다. <Fig. 3(d)>에 보이는 바와 같이 대각 보행량이 5인/주기를 넘어갈 때 일반 횡단보도 교차로의 지체시간이 대각선 횡단보도 교차로의 지체시간을 넘어가는 것을 알 수 있다.

<Fig. 3(e)>를 통해 교차로의 유형에 따라 전체 지체시간의 분포가 다르게 나타나지만 이는 순환식 신호현시와는 완전히 다른 형태인 것을 알 수 있다. 순환식 신호현시와는 달리 대각보행량의 변화와 주도로 통행비율의 변화에 모두 큰 영향을 받으며 대각보행량과 주도로 통행량 비율이 모두 증가할수록 대각교차로의 지체도가 일반교차로의 지체도보다 낮은 것으로 나타났다. 대각보행량이 적을 때는 대각선 횡단보도 운영이 비효율적일 수 있지만, 대각보행량이 많아지면 대각선 횡단보도의 적용이 적절한 것으로 판단할 수 있다. 더불어서 순환식 신호현시보다 비순환식 신호현시에서 대각선 횡단보도 교차로의 적정범위 영역이 높은 것으로 보아 대각선 횡단보도를 운영하기에는 비순환식 신호현시를 적용하는 것이 더 적합하다고 할 수 있다.

3. 가정사항 변경에 따른 지체도 변화

본 연구는 대각선 횡단보도의 지체도를 정량적으로 나타내기 위하여 교차로의 구조, 신호현시를 가정하여 분석을 진행하였으나, 본 연구에서 제시한 방법은 다양한 도로상황 및 신호현시를 가지는 교차로에 적용할 수 있다. 각 가정사항의 변화에 따라 지체정도의 변화를 살펴보기 위하여 대표적으로 차량통행량의 증가, 주도로 차선수 증가, 신호주기 증가 3가지 경우를 추가로 검토하였다. (<Fig. 4> 참조).

첫 번째로 교통량이 증가하게 되면 순환식 신호현시와 비순환식 신호현시 모두 대각선 횡단보도 교차로 적정범위 증가하는 것으로 나타났다. 대각선 횡단보도의 지체도가 높게 나타났던 순환식 신호현시에서 범위의 변화가 두드러지게 나타나는데, 주도로 통행비율이 더 낮아져도 대각선 횡단보도의 지체시간이 일반 횡단보도 교차로보다 적어지는 것을 볼 수 있다. 두 번째로 주도로의 차로수가 증가하면 대각선 횡단보도의 적정범위는 순환식 신호현시에서는 상당히 증가하는 것으로 나타났으나 비순환식 신호현시에서는 주도로 통행비율이 낮을 때, 특히 0.5~0.65 범위에서, 대각선 횡단보도 교차로 지체도가 감소하였다. 이는 타 변수가 고정되었을 때 주도로 차선 수가 증가하게 되면, 즉 교통량 처리비율이 높아지게 되면, 대각선 횡단보도 교차로의 적정범위가 증가하는 것을 의미한다. 마지막으로 전체 신호주기가 길어지면 대각선 횡단보도 교차로 지체도 또한 감소하였다. 결과는 적정범위가 순환식 신호현시에서 늘어날 뿐 아니라, 비순환식 신호현시에서도 주도로 통행비율이 높을 때 대각선 횡단보도 교차로의 적정범위가 늘어난다는 것을 보여주었다.



<Fig. 4> Changes in delay times by changes in assumptions

4. 논의사항

연구의 결과는 기존 연구들과의 공통점과 차이점을 갖는다. 첫 번째로 Han et al.(2011)에서는 같은 주기 길이에서 일반 횡단보도를 대각선 횡단보도로 변경할 경우 보행자 지체시간이 감소된다고 하였으나 Nam et al.(2019)의 연구에서는 대각선 횡단보도를 설치한 후 보행자 지체시간이 악화될 수 있다고 하였다. 본 연구에서는 순환식 신호현시 순서에서는 보행자 지체시간이 크게 개선되지는 않지만 비순환식 신호현시 순서에서는 보행자의 지체시간이 매우 감소될 수 있다는 것을 보여주었다. 두 번째로 Han et al.(2011)은 같은 주기 길이에서 4현시를 가지고 있는 일반 횡단보도 교차로 대비 대각선 횡단보도를 설치 하여 4+보행자전용신호현시로 운영할 시 차량의 지체가 증가된다는 결과를 보여주었지만 본 연구에서는 차량의 지체시간이 무조건 증가하지는 않다는 것을 보여주었다. 이와 더불어 Han et al.(2011)은 대각선 횡단보도 권장지역으로 교차로 전반적인 관점에서 차량교통량의 포화도가 낮은 교차로를 제시하고 있는데 본 연구에서는 포화도가 높지 않은 교차로를 대상으로 분석을 시행한 결과 주도로의 교통량의 비율이 높은 곳에서 대각선 횡단보도에 대한 전체 지체시간이 감소되는 결과를 나타내었다. 이러한 결과는 신호현시 체계의 차이와 Han et al.(2011)의 연구에서는 각 세부 신호현시의 길이를 고정한 반면 본 연구에서는 신호이론에 기반하여 차량 교통량과 주도로 교통량 비율에 따른 각 세부 신호현시 길이를 조정하며 지체도를 산출하였기 때문으로 판단된다. 이는 Nam et al.(2019)의 연구에서 언급한 대각선 횡단보도 설치를 위한 적정 범위는 교통량, 신호운영 방식에 따라 다르게 도출될 수 있다는 결론을 뒷받침한다.

IV. 결 론

본 연구는 대각선 횡단보도 설치기준 정립을 위한 기존 연구 보완을 목표로 이론적 관점에서 교차로의 보행 및 차량통행량을 고려한 전체 지체도를 산출하고 대각선 횡단보도와 일반 횡단보도 교차로를 비교하여

분석하였다. 특정한 도로구조와 신호현시길이를 가정하고 신호이론에 근거하여 지체도 산출 식을 도출하고 시간단위로 계산하여 나타내었다. 이때 신호현시를 순환식과 비순환식으로 나누어 일반 횡단보도 교차로와 대각선 횡단보도 교차로의 지체도를 비교하여 결과를 해석하였다. 추가적으로 본 연구의 확장성 제시를 위하여 차량통행량 증가, 주도로 차선수 증가, 신호주기의 증가에 따른 대각선 횡단보도의 적정범위 변화를 살펴 보았다. 분석결과를 통해 본 연구는 주도로의 차량 통행비율이 높은 경우에 대각선 횡단보도의 도입이 일반 횡단보도보다 효율적일 수 있다는 점을 확인하였다. 또한 대각선 횡단보도의 운영을 위해서는 순환식 신호현시보다 비순환식 신호현시의 적용이 더 적합할 수 있다는 결과를 확인하였다. 그러나 비순환식 신호현시를 운영할 때 대각 횡단의 수요가 너무 적은 경우에는 대각선 횡단보도의 운영이 교통운영 효율성 측면에서 적정하지 않을 수 있다는 것 또한 확인하였다.

본 연구는 신호현시 순서에 따른 대각선 횡단보도 운영 적정 구간을 분석함으로써 기존연구들에서 다루지 못했던 부분을 보완하였다는 점에서 의미를 갖는다. 그러나 이론적인 분석으로 현실과의 괴리는 분명 존재한다. 첫 번째로 본 연구는 교차로 하나만을 대상으로 하여, 차량통행량 증가로 인한 대기행렬의 확산에 따른 지체도를 고려하지 못하였다. 두 번째로 보행자와 차량의 도착시간등을 고려하여 지체도를 세부적으로 분석하지 못하였다. 세 번째로 직좌동시신호만을 가정하여 지체도를 분석함으로써 다양한 신호 운영 방식에 대한 신호현시순서를 검토하지 못하였다. 마지막으로 대각선 횡단보도의 높은 안전성을 전제하고 지체도만을 분석하였으므로 설치 가능성 여부 판단을 위한 정확한 기준을 제시하지는 못한다. 따라서 앞에서 제시한 한계점들을 반영한 추후 연구 진행이 필요하다.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was supported by a grant(16TLRP-B079209-03) from Development of Pedestrian Assistance Systems for Transport vulnerable Program funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korean government.

REFERENCES

- Choi R.(2013), *Comparison of Internal and External Installation Standards of Scrambled Crosswalk and its Effectiveness Analysis*, Master Thesis, Gachon University.
- Department for Transport, Energy, and Infrastructure(1998), *Scramble Pedestrian Crossings Operational Instruction 14.1*, Government of South Australia.
- Han Y. H., Kim Y. C. and Yang C. H.(2011), "An analysis Procedure for Evaluating Pedestrian Scramble Construction," *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 29, no. 4, pp.73-83.
- Jang Y. J.(2007), *Analysis of vehicular delay on scrambled crosswalk*, Master Thesis, Yonsei University.
- Jung D. Y., LEE D. M., Jun J. W. and HAN D. C.(2017), "Analysis of the Effects of Scrambled Crosswalk Installation Depending on the Types of Intersections Using VISSIM," *International Journal of Highway Engineering*, vol. 19, no. 3, pp.71-81.
- Kang S. G. and Lee Y. W.(2014), "An Analysis of the Vehicular Delay Caused by Scrambled Crosswalk Installation in a Roundabout," *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 32, no. 3,

pp.218-226.

- Kim K. H. and Kim W. H.(2007), “Development of Warrants for Scrambled Crosswalk,” *Proceedings of the KOR-KST Conference*, vol. 52, pp.502-511.
- Korean National Police Agency(2019), *Traffic Signal Setting & Management Manual*.
- Lee D. H.(2016), *(A)development of warrants for scrambled crosswalk using ANP*, Master Thesis, Ajou University.
- Nam C. W., Kho S. Y. and Cho S. H.(2019), “Analysis on Installation Criteria for Scrambled Crosswalks Considering Vehicle and Pedestrian Traffic Volume,” *Journal of Korea Institute for Intelligent Transportation System*, vol. 18, no. 6, pp.60-75.
- NZ Transport Agency(2009), *Pedestrian planning and design guide*, New Zealand Government.
- Rice E.(2010), *Improving Safety by Providing All-Red Clearance Intervals and Larger Signal Lenses*, Federal Highway Administration U.S. Department of Transportation.
- Son K. H., Jang M. S. and Kim Y. C.(1997), “Development of Warrant for Scrambled Pedestrian Crossing,” *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 15, no. 2, pp.105-122.
- Tu T. V. and Sano K.(2014), “Simulation Based Analysis of Scramble Crossings at Signalized Intersections,” *International Journal of Transportation*, vol. 2, no. 2, pp.1-14.
- VicRoads(2015), *Manual of uniform traffic control devices*, State Government of Victoria.