

교통량과 보행량을 고려한 대각선 횡단보도 설치기준 정립 방안 연구

Analysis on Installation Criteria for Scrambled Crosswalks Considering Vehicle and Pedestrian Traffic Volume

남 찬 우* · 고 승 영** · 조 신 형***

* 주저자 : 서울지방경찰청 1기동단 경비과 경위

** 공저자: 서울대학교 건설환경공학부 교수

*** 교신저자 : 서울대학교 공학연구원 선임연구원

NAM, Chanwoo* · KHO, Seung-Young** · CHO, Shin-Hyung***

* Dept. of Seoul Police, Police, Seoul, Korea

** Dept. of Civil and Environmental Engineering, Seoul Nat'l Univ.

*** Institute of Engineering Research, Seoul Nat'l Univ.

† Corresponding author : Shin-Hyung Cho, shinhyungcho@snu.ac.kr

Vol.18 No.6(2019)

December, 2019

pp.60~75

pISSN 1738-0774

eISSN 2384-1729

[https://doi.org/10.12815/kits.](https://doi.org/10.12815/kits.2019.18.6.60)

2019.18.6.60

Received 27 November 2019

Revised 9 December 2019

Accepted 16 December 2019

© 2019. The Korea Institute of Intelligent Transport Systems. All rights reserved.

요 약

최근에 교통사고는 감소하고 있는 추세이나 상대적으로 심각도가 높은 보행자 사고에 대한 관심이 증대되고 있다. 횡단보도 상의 보행자 사고에 대한 개선을 위해 차량과 보행자의 상충을 줄여 안전한 보행환경을 보장할 수 있는 대각선 횡단보도가 설치되고 있다. 대각선 횡단보도 설치에 앞서 효율성 측면에서의 평가와 설치기준을 제시함으로써 교통량과 보행량 조사만으로 대각선 횡단보도 설치 적절성 여부를 판단할 수 있는 근거가 필요한 상황이다. 본 연구는 교통량과 보행량을 모두 고려한 신호 최적화 모형을 통하여 최적 주기를 도출하고 이를 바탕으로 대각선 횡단보도 설치 전·후 총 지체시간을 비교한다. 최적주기를 산출한 결과, 크게 두 가지 연구의 합의점을 도출해낼 수 있었다. 대각선 횡단보도 설치에 있어 비효율을 초래할 수 있는 차량 교통량 기준점이 존재한다. 또한, 신호 시스템별, 교차로 유형별 적정 설치 용량이 다르기 때문에 설치를 고려하는 횡단보도의 교통량 수준에 따른 적절한 판단기준을 제시하였다. 이러한 분석 결과를 바탕으로 대각선 횡단보도 설치 전후에 대한 시뮬레이션 결과를 통해 검증하였다. 대각선 횡단보도를 설치한 후 보행자의 지연시간이 증대될 수 있으나, 안전 확보를 위해서는 적정 교통량 수준을 고려하여 설치하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

핵심어 : 설치기준, 보행량, 대각선 횡단보도, 신호 최적화, 교통량

ABSTRACT

Nowadays, interest in safety of pedestrians who are relatively weak when compared with vehicles increases. Also, concern for pedestrian accidents on crosswalks increases. For these reasons, scrambled crosswalks which are considered to contribute pedestrian safety by reducing conflicts between vehicles and pedestrians are actively discussed and there are also a few intersections where they are actually installed. However, scrambled crosswalks must include all-red phase for all vehicle traffic flows, which inevitably leads to increase of lost time per cycle. Therefore, evaluation in terms of efficiency should be done before installation of scrambled crosswalks. This research suggests installation criteria for scrambled crosswalks so that it is possible to judge whether installation of

scrambled crosswalks is appropriate only by surveying vehicle traffic volume and pedestrian traffic volume. This research derives optimum cycle length from signal optimization models which considers both vehicle traffic volume and pedestrian traffic volume. From this optimum cycle length, this research compares total delay time before and after installation of scrambled crosswalks. From an analysis, two research results are derived. Firstly, there is critical traffic volume above which installation of scrambled crosswalks can not efficient. Secondly, appropriate areas for installation of scrambled crosswalks are different by each signal intersection or by each signal system and those difference vary. From these results, this research suggests installation criteria for scrambled crosswalks which consists of two steps. The delay time of the pedestrians may be increased after the diagonal crosswalk is installed, but it may be desirable to install in consideration of the appropriate traffic level to ensure safety.

Key words : Installation criteria, Pedestrian traffic volume, Scrambled crosswalk, Signal optimization, Vehicle traffic volume

I. 서론

사회가 발전할수록 교통안전에 대한 인식은 높아진다. 특히, 차량과 비교할 때 상대적으로 취약한 보행자의 안전에 관한 관심이 증가하고 있다. 한편, 2016년 경찰청 통계자료에 따르면, 보행자 교통사고 중 횡단보도 관련 사고는 사망자의 경우 64.1%, 부상자의 경우 54.2%를 차지함으로써 횡단보도 상의 보행자 안전에 대한 우려가 고조되고 있다. 이러한 맥락에서 차량과의 상충을 줄여 보행자의 안전에 효과적이라고 판단되는 대각선 횡단보도가 논의되고 있고 서울시 내에서도 많은 횡단보도에 설치되고 있다. 실제 일본 나가노현에서는 대각선 횡단보도 설치 전/후의 보행사고 건수를 분석하여 비교한 결과, 3년간 86개소에서 보행사고가 약 35.3% 감소한 것으로 나타났다 (Jang, 2015). 대각선 횡단보도의 경우 모든 차량 교통류들에 적색 신호를 부여하는 전 적색 현시를 반드시 포함해야 하므로, 전체 신호교차로 운영 측면에서 비효율을 초래할 우려가 있다. 반면, 전 적색 현시를 운영하였을 때 사고에 대한 감소효과가 약 28.0% 나타나는 사전/사후 분석결과를 제시하고 있다 (Park et al. 2012). 본 연구는 차량 교통량과 보행자 교통량을 모두 목적함수에 포함하는 지체시간 모형을 통해 대각선 횡단보도 설치 적정 교통량 수준을 제시하고자 하며, 이를 통해 교차로 교통량 조사만으로 대각선 횡단보도 설치 적절성 여부를 판단할 수 있도록 하고자 한다.

기존의 차량 중심 연구 경향은 차량 교통류의 교통량이 보행자 교통류의 교통량을 압도하는 경우에는 효과적일 수 있으나, 보행자 교통류의 교통량이 일정 수준 이상인 지역에서는 총 지체시간 측면에서 비효율을 초래할 수 있다는 점을 간과하고 있다. 본 연구는 기존의 차량 중심 연구 경향의 한계를 인식하고 이를 극복하기 위해 적정 교통량 산정의 기초가 되는 지체시간 모형 설정 시, 차량 교통량과 보행자 교통량을 모두 반영한다. 따라서 본 연구는 차량 교통량과 보행자 교통량을 모두 반영한 지체시간 모형을 통해 대각선 횡단보도 설치를 위한 적정 교통량을 제시하고자 한다. 본 연구에서는 선행연구 검토를 통하여 연구를 통해 개선할 수 있는 기여도를 선정하고 분석의 대상이 되는 교차로 유형과 신호현시를 결정한다. 각 교차로의 신호유형에 따라 달라지는 교차로의 지체시간에 대한 최적 목적함수를 이용한 모형을 설정한다. 각 교차로의 유형별 / 신호현시 유형별 차이를 비교하고 시뮬레이션 결과를 통하여 검증은 수행한다.

II. 선행 문헌 검토

본 연구가 차량 교통량과 보행자 교통량을 모두 반영하는 지체시간 모형을 통해 대각선 횡단보도 설치를 위한 적정 교통량을 제시하기에, 선행연구 고찰은 크게 두 가지 부분에서 이루어졌다. 첫째, 대각선 횡단보도 설치기준에 관한 연구이다. 둘째, 차량 교통류와 보행자 교통류를 모두 반영하는 신호 최적화 연구 동향이다.

1. 대각선 횡단보도 설치기준에 관한 연구

Son et al.(1997)의 연구에서는 차량 지체시간 모형과 독자적인 보행자 지체시간 모형을 통해 대각선 횡단보도에 대한 정량적 설치기준을 제시하고 있다. Jang et al.(2007)의 연구에서는 대각선 횡단보도 설치 전·후 차량 지체시간의 변화를 분석하고 있다. Kim and Kim(2007)의 연구에서는 효과 척도로 차량 지체시간과 보행자 지체시간을 모두 고려한 총 지체시간을 사용하고 있으며, Vissim 프로그램을 활용하여 총 지체시간을 구하고 있다. Jeon et al.(2009)의 연구에서는 차량 소통 측면과 보행자 안전 측면을 평가지표로 사용하여 분석을 수행하고 있다. Han et al.(2011)의 연구에서는 차량 지체시간과 보행자 횡단시간을 지표로 대각선 횡단보도 설치 전·후 분석을 수행하고 있다. Jeong(2013)의 연구에서는 교통소통과 보행편의에 가중치를 두어 반영한 편익에 관한 설치 전·후 분석을 수행하고 있다. Choi(2014)의 연구에서는 기존 선행연구들을 비교·분석하고 있다. Tu and Kazushi(2014)의 연구에서는 Paramics 프로그램을 활용하여 대각선 횡단보도 설치 전·후 차량 지체시간 변화를 분석하고 있다. Lee(2016)의 연구에서는 ANP 분석의 효과를 밝히기 위해 Vissim 프로그램을 활용하여 설치 전후 총 지체시간을 비교하였다.

대각선 횡단보도의 설치기준에 관해서는 국내에서 활발히 연구가 진행됐으며, 평가지표에 차량 관련 지표와 보행자 관련 지표를 모두 반영하는 방향으로 발전해왔다. 그러나 이러한 평가의 기초가 되는 신호 최적화 시 보행자에 대한 고려가 이루어지지 않고 있다는 한계가 있다. 이에 따라 본 연구는 차량 교통량과 보행자 교통량을 모두 반영한 모형을 설정하여 최적 신호를 구한 뒤, 이를 바탕으로 대각선 횡단보도 적정 설치 교통량을 구하고자 한다.

2. 신호 최적화 연구 동향

Sin and Kim(2004)의 연구에서는 보행자 교통류를 독립된 교통류로 인식하여 신호 최적화 모형을 개발하고 있다. Alhajyaseen et al.(2010)의 연구에서는 목적함수에 차량 지체시간과 보행자 지체시간을 모두 반영하는 모형을 설정하여 분석을 수행하고, 보행자 지체시간 산정시 반대편 보행자 군의 영향을 반영하고 있다. Guo and Lu(2016)의 연구는 차량 지체시간과 보행자 지체시간을 모두 반영하는 목적함수를 설정하여 분석을 수행하고 있고, 보행자 지체시간 산정 시 보행자를 순응 보행자와 비순응 보행자로 나누어 각각 지체시간 모형을 설정하고 있다. Yu et al.(2017)의 연구에서도 목적함수에 차량 지체시간과 보행자 지체시간을 모두 반영하고 있으며, 1단 횡단보도와 2단 횡단보도로 나누어 분석을 수행하고 있다.

국내에서는 차량 교통류와 보행자 교통류를 모두 반영하고 있는 신호 최적화 모형에 관한 연구가 미비한 실정이다. Sin and Kim(2004)의 논문이 신호 최적화 시 보행 교통류를 반영한다는 점에서 의의가 있으나, 목적함수에 보행자 관련 지표가 반영되지 않았다는 점에서 한계를 지닌다. 한편, 국외에서는 이와 관련한 많은 연구가 진행되고 있으며, 각각 특이점을 가진다고 판단된다. 본 논문은 이러한 경향에 맞춰 차량 지체시간과 보행자 지체시간을 모두 목적함수에 반영하여 모형을 구축하고 있고, 이를 바탕으로 대각선 횡단보도 설치 전·후 총 지체시간 차이를 분석하여 대각선 횡단보도 설치 적정 교통량을 제시하고자 한다.

Ⅲ. 연구 방법론

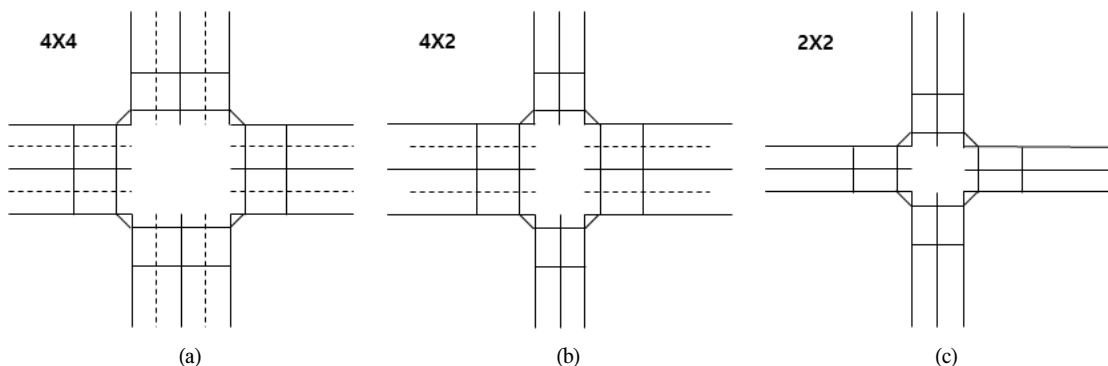
1. 연구의 방법론

전체적인 연구 과정은 다음과 같다. 첫째, 연구의 대상이 되는 교차로 유형을 선정한다. 둘째, 후술하는 연구의 기본적인 전제들을 충족하는 지체시간 모형을 설정한다. 셋째, Vissim 미시시뮬레이션 프로그램을 활용하여 설정한 모형을 검증한다. 넷째, 검증된 모형을 바탕으로 대각선 횡단보도 설치 전·후 분석을 수행한다.

본 연구는 크게 다음과 같이, 세 가지 연구 전제하고 있다. 첫째, 테스트 사이트가 비포화 교통량을 가지고 있는 신호 교차로라고 전제한다. 대각선 횡단보도 설치 시 차량 소통 측면에서는 주기 당 손실시간이 필연적으로 증가하게 되는데, 이미 포화 교통량을 가지고 있는 신호 교차로의 경우, 손실시간이 급격히 증가할 것으로 판단되어 대각선 횡단보도 설치가 비현실적이라고 판단되기 때문이다. 둘째, 보행자가 법을 준수한다고 전제한다. 현실에서는 녹색 점멸 신호 시 보행자가 횡단을 시작하는 경우가 존재한다. 그러나 대각선 횡단보도의 주된 목적 중 하나가 안전이라는 점에서 비교 대상이 되는 대각선 횡단보도 설치 전 신호 교차로에서는 모든 보행자가 법을 준수한다고 가정하는 것이 타당하다고 판단된다. 셋째, 보행자가 최단 통행 지식을 보유하고 있다고 가정한다. 두 번째와 세 번째 가정은 현실과 다를 수 있다는 문제가 있지만, 범법 행위에 대한 규제와 정보 제공으로 현실에 반영할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 교차로 유형 선정

2016년 12월 기준으로 서울시 내 79개 대각선 횡단보도가 있다. 이를 주도로의 양방향 차로 수를 기준으로 분류하면 1X1 교차로가 10개, 1X2 또는 2X1 교차로가 14개, 2X2 교차로가 34개, 그 외의 교차로가 21개로 구성되어 있다. 대각선 횡단보도의 경우에는 기하 구조에 따라 연구 모형이 달라지기 때문에, 연구의 공간적 범위를 제한할 필요가 있게 된다. 이에 따라 서울시 내 78개의 대각선 횡단보도 설치 신호교차로 중 58개에 해당하는 주도로의 양방향 차로 수가 4차로 이하인 도로가 교차하는 신호교차로로 연구의 공간적 범위를 제한한다. 제한된 범위에서 일반적이라고 판단되는 기하 구조를 가진 3개의 신호교차로를 테스트 사이트로 최종 선정한다. 3개의 신호교차로를 도시하면 <Fig. 1>과 같다.



<Fig. 1> Geometry of types of crosswalk: (a) 4x4 two-way crosswalk, (b) 4x2 two-way crosswalk, (c) 2x2 two-way crosswalk

신호 현시의 종류는 각 신호교차로의 상황에 따라 다양할 수 있지만, 본 연구에서는 일반적으로 적용되는 직·좌 동시 현시와 직진 후 좌회전 현시의 두 가지 시나리오를 적용하였다. 각 신호 현시를 기본으로 구성한 신호 시스템은 <Table 1>과 같다.

<Table 1> Two types of signal systems for each intersection

| Division | | 1 phase | 2 phase | 3 phase | 4 phase | 5 phase | |
|---|--------|------------|---------|---------|---------|---------|---|
| Protected left turn phases | Before | Vehicle | | | | | - |
| | | Pedestrian | | | | | - |
| | After | Vehicle | | | | | - |
| | | Pedestrian | - | - | - | - | |
| Through phases and exclusive left turn phases | Before | Vehicle | | | | | - |
| | | Pedestrian | | - | | - | - |
| | After | Vehicle | | | | | - |
| | | Pedestrian | - | - | - | - | |

3. 지체시간 모형 적용

지체시간 모형은 차량 지체시간과 보행자 지체시간을 합친 총 지체시간을 의미하며, 기본적으로 Webster의 균일지체 모형에 바탕을 둔다.

1) 설치 전 신호 시스템

설치 전 신호 시스템의 구성은 차량의 지체시간과 보행자의 지체시간의 합으로 구성할 수 있으며, 이 두 개의 지체시간의 합이 최소화되는 방안으로 신호현시를 구성할 수 있다.

$$\min \beta \sum_{i=1}^m D_i^{veh} + \sum_{i=1}^n D_i^{ped} \dots\dots\dots (1)$$

subject to

직좌 동시 현시:

$$x_i + y_i \geq 5 + FDW + AR, i = 1, 2, 3, 4 \dots\dots\dots (2)$$

$$x_i \geq v_i \times C \times h + Buffer, i = 1, 2, 3, 4 \dots\dots\dots (3)$$

직진 후 좌회전 현시:

$$x_i + y_i \geq 5 + FDW, i = 1, 3 \quad (4)$$

$$x_i \begin{cases} x_1 \geq 2 \times \max((1-r_1) \times v_1, (1-r_3) \times v_3) \times C \times h + Buffer \\ x_2 \geq 2 \times \max(r_1 \times v_1, r_3 \times v_3) \times C \times h + Buffer \\ x_3 \geq 2 \times \max((1-r_2) \times v_2, (1-r_4) \times v_4) \times C \times h + Buffer \\ x_4 \geq 2 \times \max(r_2 \times v_2, r_4 \times v_4) \times C \times h + Buffer \end{cases} \dots\dots\dots (5)$$

$$\sum_{i=1}^4 (x_i + y_i) = C \dots\dots\dots (6)$$

여기서, β = 가중치, i = 현시, m = 차량 지체의 종류, n = 보행자 지체의 종류, x_i = 차량 녹색 시간, y_i = 차량 황색 시간, FDW = 보행자 녹색 점멸 시간, AR = 보행자 전적 시간, v_i = 차량 교통량(n/sec), C = 주기, h = 차두시간

Equation 1은 목적함수를 뜻하며 차량 지체시간과 보행자 지체시간 항으로 나뉜다. Equation 2와 Equation 4는 대응하는 차량의 녹색 시간과 황색 시간의 합은 보행자의 최소 녹색 시간보다 커야 한다는 제약식이다. 직좌 동시 현시에서는 네 현시에 모두 적용되지만, 직진 후 좌회전 현시에서는 1현시와 3현시에만 적용되는 제약이다. Equation 3과 Equation 5는 차량이 비포화 상태를 유지하기 위한 제약식이다. Equation 6은 각 현시의 녹색 시간과 황색 시간의 합을 모두 합한 것은 주기가 된다는 등식 제약식이다.

목적함수를 구성하는 항을 자세히 살펴보면 다음과 같다.

D_i^{veh} 은 차량 지체를 나타내며 다음의 식으로 표현할 수 있으며, 아래 제시된 <Fig. 2(a)>에 제시된 영역의 넓이와 같다.

직좌 동시 현시:

$$D_i^{veh} = \frac{1}{2} \times \frac{s \times v_i \times (C - x_i)^2}{s - v_i} \dots\dots\dots (7)$$

직진 후 좌회전 현시:

$$D_1^{veh} = \sum_{k=1}^2 \frac{1}{2} \times \frac{s \times 2 \times v_{2k-1} \times (1 - r_{2k-1}) \times (C - x_1)^2}{s - 2 \times v_{2k-1} \times (1 - r_{2k-1})} \dots\dots\dots (8)$$

$$D_2^{veh} = \sum_{k=1}^2 \frac{1}{2} \times \frac{s \times 2 \times v_{2k-1} \times r_{2k-1} \times (C - x_2)^2}{s - 2 \times v_{2k-1} \times r_{2k-1}} \dots\dots\dots (9)$$

$$D_3^{veh} = \sum_{k=1}^2 \frac{1}{2} \times \frac{s \times 2 \times v_{2k} \times (1 - r_{2k}) \times (C - x_3)^2}{s - 2 \times v_{2k} \times (1 - r_{2k})} \dots\dots\dots (10)$$

$$D_4^{veh} = \sum_{k=1}^2 \frac{1}{2} \times \frac{s \times 2 \times v_{2k} \times r_{2k} \times (C - x_2)^2}{s - 2 \times v_{2k} \times r_{2k}} \dots\dots\dots (11)$$

여기서, s = 포화교통류율(n/sec)

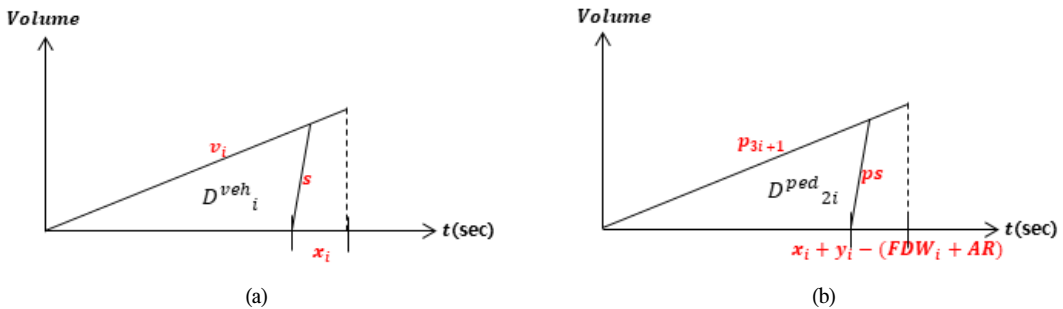
목적함수를 구성하는 보행자 지체 항인 $\sum_{i=1}^n D_i^{ped}$ 은 다시 두 개의 모형으로 나뉜다. D_{2i}^{ped} 와 D_{2i-1}^{ped} 로 나뉜다. 직좌 동시 현시의 경우에는 D_{2i}^{ped} 의 경우 대각으로 횡단하는 보행자의 영향을 받지 않기 때문에 D_i^{veh} 과 유사한 형태를 가진다. 반면, D_{2i-1}^{ped} 의 경우 대각으로 횡단하는 보행자의 영향을 받기 때문에 D_{2i}^{ped} 와 다르게 모형을 확정할 수 없는 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위하여 최댓값과 최솟값을 각각 구한다. D_{2i-1}^{ped} 의 최댓값은 <Fig. 3(a)>에 제시된 영역의 넓이와 같다.

직진 후 좌회전 현시에서는 D_{2i}^{ped} 의 경우 똑같은 형태의 함수식으로 구성되고 있으나, 직·좌 동시 신호의 설치 전 신호 시스템의 D_{2i-1}^{ped} 와 마찬가지로 모형을 확정할 수 없는 문제가 생기기 때문에 최솟값과 최댓값을 모두 구하여야 한다. 시계방향으로 횡단하는 방향의 보행자 지체를 D_{2i-1}^{ped} , 시계 반대 방향으로 횡단하는 방향의 보행자 지체를 D_{2i}^{ped} 로 한다. 한편, D_{2i-1}^{ped} 은 단순한 여러 항의 합으로 되어 있어서 수식으로 나타내기보다는 <Fig. 3(b)>의 그래프 상에 표현한다.

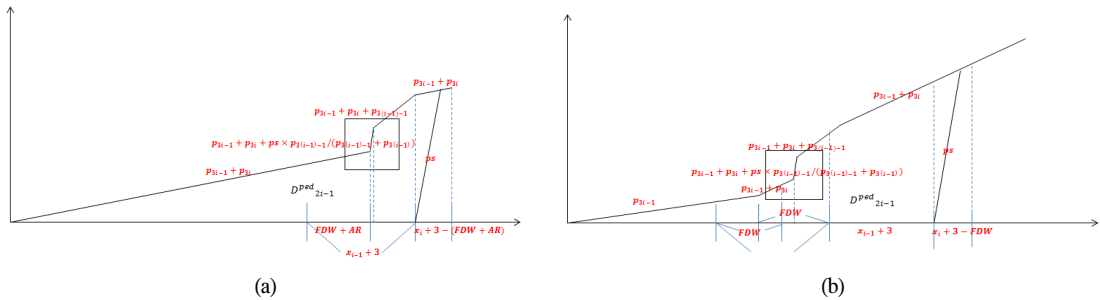
$$D_{2i}^{ped} = \frac{1}{2} \times \frac{ps \times p_{3i+1} \times (C - (x_i + y_i - (FDW + AR)))^2}{ps - p_{3i+1}} \dots\dots\dots (12)$$

여기서, ps = 포화보행교통류율(n/sec), FDW = 보행자 녹색 점멸 시간

D_{2i}^{ped} 은 아래 제시된 <Fig. 2(b)>에 제시된 영역의 넓이와 같다.



<Fig. 2> Graphical expression of delay before installing scrambled crosswalks; (a) D_i^{veh} , (b) D_{2i}^{ped}



<Fig. 3> Graphical expression of D_{2i-1}^{ped} ; (a) pedestrian delay in protected left turn phases, (b) pedestrian delay in through phases and exclusive left turn phases

설정된 모형의 주기인, C 는 가능한 최소주기 값으로 설정하기 때문에 차량 교통량 v_i 의 영향을 고려할 때의 최솟값 C_{des} 와 보행자 최소횡단시간의 영향을 받았을 때의 최솟값 C_{min} 중 최댓값이 C 가 된다 (Roess et al. 2010)

$$C_{des} = \frac{L}{1 - \left[\frac{V_c}{\frac{3600}{h} \times PHF \times (v/c)} \right]} \dots\dots\dots (13)$$

여기서, C_{des} = 적정 주기, L = 주기 당 총 손실시간(sec/cycle), h = 차두시간,
 v/c = 목표 용량에 대한 교통량 비율

$$L = \sum_i (l_1 + l_2) \dots\dots\dots (14)$$

여기서, $l_1 = 2(\text{sec/phase})$, $l_2 = Y - e$; e =차량의 황색 시간과 전 적색 시간 침투시간, 통상 $2(\text{sec/phase})$

C_{min} 은 보행자 최소횡단시간의 영향을 받는다.

$$C_{min} = (5 + FDW + AR) \times 4 \dots\dots\dots (15)$$

$$C = \max(C_{des}, C_{min}) \dots\dots\dots (16)$$

여기서, FDW = 녹색 점멸시간, AR = 보행자 전 적색 시간

식 (16)을 통해 모형에 사용되는 주기인 C 를 얻을 수 있다.

2) 설치 후 신호 시스템

설치 후 신호 시스템의 구성은 설치 전 신호 시스템과 마찬가지로 차량의 지체시간과 보행자의 지체시간의 합으로 구성할 수 있으나, 현시 구성의 차이로 인하여 보행자의 통행시간 지체가 보다 세분되게 된다. 또한, 차량의 지체시간과 보행자의 지체시간의 합이 최소화되는 방안으로 신호현시를 구성할 수 있다.

$$\min \beta \sum_{i=1}^m D_i^{veh} + \sum_{i=1}^n D_i^{ped} \dots\dots\dots (17)$$

subject to

$$x_5 \geq 5 \dots\dots\dots (18)$$

$$x_i \geq v_i \times C \times h + Buffer, i = 1, 2, 3, 4 \dots\dots\dots (19)$$

$$\sum_{i=1}^4 (x_i + y_i) + x_5 + FDW = C \dots\dots\dots (20)$$

여기서, β = 가중치, i = 현시, m = 차량 지체의 종류, n = 보행자 지체의 종류, x_i = 차량 녹색 시간, v_i = 차량 교통량(n/sec), h = 차두시간, y_i = 차량 황색 시간, FDW = 보행자 녹색 점멸 시간, C = 주기

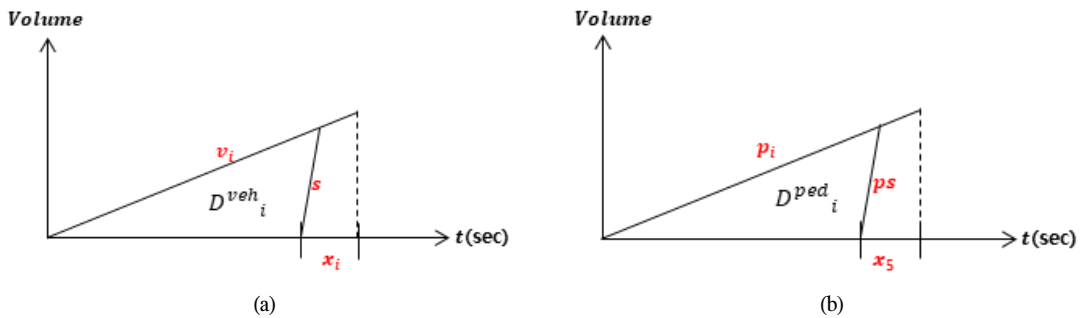
식 (17)은 설치 전 신호 시스템과 마찬가지로 차량의 지체시간과 보행자의 지체시간의 합으로 구성되어 있으며, 목적함수를 최소화하는 식을 구성하게 된다. 식 (18)은 최소 접근시간보다 보행자 녹색 시간이 크기 위한 제약식이다. 식 (19)는 차량이 비포화 상태를 유지하기 위한 제약식이다. 식 (20)은 차량에 할당되는 각 현시의 녹색시간과 황색시간의 합에 보행자 녹색시간과 녹색점멸시간을 모두 합한 것은 주기가 된다는 등식 제약식이다. 목적함수를 구성하는 항을 자세히 살펴보면 다음과 같다. D_i^{veh} 은 차량 지체를 의미하며, 설치

전 시스템에서의 식(7)과 같다. 반면에, 목적함수를 구성하는 보행자 지체 항인 $\sum_{i=1}^n D_i^{ped}$ 은 대각선 횡단보도 설치 전 시스템과 달리 하나의 모형으로 표현할 수 있으며, 이들 모두 서로에게 영향을 끼치지 않기 때문에 D_i^{veh} 와 유사한 형태를 가진다.

$$D_i^{ped} = \frac{1}{2} \times \frac{ps \times p_i \times (C - x_5)^2}{s - p_i} \dots\dots\dots (21)$$

여기서, ps = 포화보행교통류율(n/sec), FDW = 보행자 녹색 점멸 시간

D_i^{ped} 은 <Fig. 4>에 제시된 영역의 넓이와 같다.



<Fig. 4> Graphical expression of delay after installing scrambled crosswalks: (a) D_i^{veh} , (b) D_i^{ped}

모형에 사용되는 주기인 C 는 대각선 횡단보도 설치 전 신호시스템과는 달리 보행자 최소횡단시간의 영향을 받지 않기 때문에 식 (13)과 같이 C_{des} 을 구하는 것과 같다. 반면에, 손실시간의 경우에는 보행자의 녹색 시간과 녹색 점멸시간의 합이 손실시간으로 결정되기 때문에 식 (22)와 같이 표현된다.

$$L = \sum_i (l_1 + l_2) + (5 + FDW) \dots\dots\dots (22)$$

여기서, $l_1 = 2(\text{sec/phase})$, $l_2 = Y - e$, e =차량의 황색 시간과 전적색시간 침투시간, 통상 2(sec/phase), FDW = 보행자 녹색 점멸시간

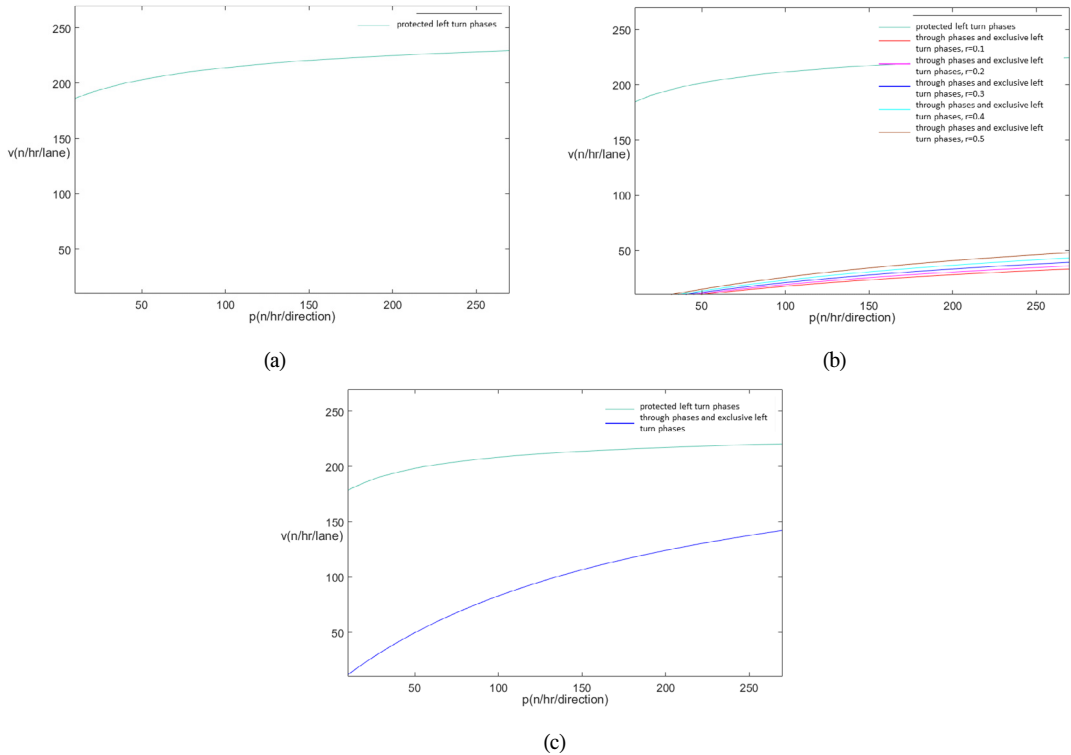
IV. 모형 적용

1. 분석 결과

1) 교차로 유형별 분석 결과

횡단보도의 한 방향 당 한 시간 당 인원수와 한 차로 당 한 시간 당 차량 대수 간의 관계를 비교하기 위하여 추체선을 이용하였다. 신호 교차로에서의 교통량(v)과 보행량(p) 간의 관계 및 직진 교통량 대비 좌회전 교통량의 비율(r)을 고려하여 적정 수준의 대각선 횡단보도의 적용 가능성을 비교하였다. x-y축 평면상에 그려진 곡선은 대각선 횡단보도 설치 전·후의 주기 당 총 지체시간이 같은 점을 이은 것이다. 그래프의 아래

영역은 대각선 횡단보도 설치 후 총 지체시간이 감소한 영역, 즉 대각선 횡단보도 설치로 인하여 효율성이 증가한 영역을 나타낸다. 현시 별 결과를 살펴보면 직·좌 동시 현시로 구성된 신호 시스템하에서는 차량이 180대(/시간/차로) 이하인 경우에는 대각선 횡단보도 설치가 효율성 측면에서 효과적인 것으로 나타났고 그 이상의 영역에서는 보행 교통량에 따라 대각선 횡단보도 설치가 효과적인지가 결정된다. 직진 후 좌회전 현시로 구성된 신호 시스템하에서의 결과를 살펴보면, 직·좌 동시 현시와 비교하면 효율적이라고 판단될 수 있는 영역이 미비함을 알 수 있다.



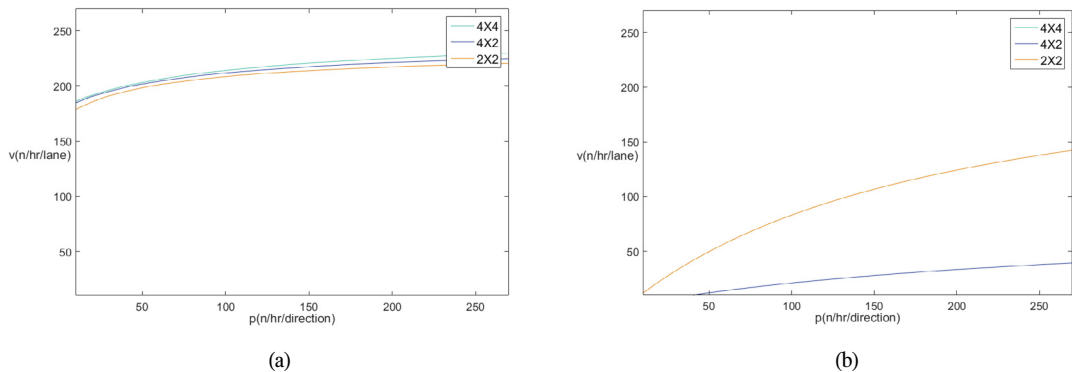
<Fig. 5> Graph of analysis results considering type of signal system; (a) 4×4 two-way crosswalk, (b) 4×2 two-way crosswalk, (c) 2×2 two-way crosswalk

본 연구에서 제시된 두 가지 시나리오는 신호교차로 운영에 있어 뚜렷한 차이를 비교할 수 있는 신호교차로 운영방법이다. 우선, 직좌 동시 신호의 경우에는 모든 방향의 교통량이 유사한 경우에 적용하는 방식으로 보행에 대해 전적 시간을 제공하면서 모든 방향의 교통량에 같은 지체시간을 주면서 차량과 보행자의 안전한 진행에 도움을 주게 된다. 또한, 직진 후 좌회전 신호의 경우에는 각 직진 방향 별로 교통량이 많고 좌회전의 교통량에 따라 처리할 수 있는 교통량이 결정되므로 상대적으로 교통량이 많은 교차로에 적용된다. 이 경우에는 전적 신호를 도입할 때, 좌회전 교통량이 많을수록 우회전, 좌회전 교통량의 통행에 영향을 적게 주기 때문에 효율적인 결과를 보인다. 하지만, 교차로의 방향별 교통량 비율이 낮아질수록 직좌 동시 신호가 유리하기 때문에 교차로의 운영방식을 변경하는 방식으로 결정된다.

2) 신호 유형별 분석 결과

본 연구에서 제시된 두 가지 신호 시나리오에 대해 세 가지 유형의 교차로별로 대각선 횡단보도의 설치에 따른 분석 결과를 비교하였다. 교통량과 보행량 간의 관계에 따라 직좌 동시 현시와 직진 후 좌회전 현시 간의 성능을 비교하였다.

<Fig. 6(a)>를 보면 알 수 있듯이, 직·좌 동시 현시의 경우 기하 구조에 따라 적정 설치 영역이 크게 변하지 않음을 확인할 수 있다. 양방향 4차로 X 양방향 4차로, 양방향 4차로 X 양방향 2차로의 경우 좌회전 비율에 따라 적정 설치 용량이 달라지기 때문에 두 경우 모두 $r=0.3$ 의 한 경우만을 비교하였다. <Fig. 6(b)>를 보면 직진 후 좌회전 현시의 경우 기하 구조에 따라 적정 설치 용량이 크게 달라지는 것을 알 수 있다. 그 이유는 교차하는 총 차로의 개수가 줄어들수록 대각선 횡단보도 설치 후 필요한 녹색 점멸시간이 감소하여 주기상의 이익을 얻을 수 있고, 2차로가 되면 비보호 좌회전을 도입해야 하므로 필요한 현시가 줄어들어 또한 주기상의 이익에 기여 할 수 있다. 이에 따라 대각선 횡단보도 설치의 효과가 더 커지게 된다.



<Fig. 6> Graph of analysis results of a signal system; (a) protected left turn phases, (b) through phases and exclusive left turn phases

2. 모형의 적정성 검토

본 연구의 모형은 차량과 보행자의 도착분포를 균일하다고 전제하고 있으므로 현실과 차이가 발생할 수 있다. 모형 상의 한계가 용인 가능한지 판단하기 위해 Vissim 미시시물레이션 프로그램 결과값과 비교하였다. 본 연구에서는 4x4 양방향 신호교차로에 대해서 시나리오 1의 신호전략을 도입했을 때, 발생하는 수학적 결과와 경험적 결과의 차이를 통하여 모형의 적정성을 검토한다. Vissim 미시시물레이션 프로그램은 차량과 보행자의 확률적 도착분포를 전제하고 있으며, RTOR (Right Turn On Red)이 구현 가능하다. 현실 데이터가 아닌 Vissim 미시시물레이션 프로그램 결과 값과 비교한 이유는 본 연구의 모형이 현실과는 다른 전제를 하고 있기 때문이다. Vissim 미시시물레이션 분석에서 사용되는 파라미터 값은 적정 수준의 값을 사용하고, 지체시간에 큰 영향을 미치는 보행 속도는 한국인의 기준을 적용하여 1.3m/s를 적용한다. 한편, Vissim 미시시물레이션 프로그램상 보행자의 녹색 점멸 신호 시 보행자가 횡단을 시작하기 때문에, 본 연구 모형 상의 두 번째 전제를 충족시키기 위해 녹색 점멸 대신 적색 점멸을 사용한다. 또한, 모형 상의 세 번째 전제를 충족시키기 위해 보행자가 최단 경로로 횡단하도록 보행자의 경로를 설정한다. 네트워크에 적용한 신호 시스템의 주기는 Matlab을 통해 구현한 본 모형의 주기 값을 사용한다.

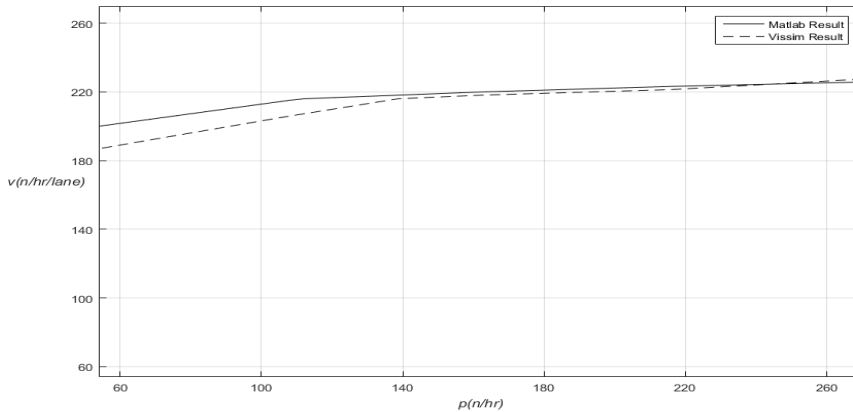
시뮬레이션 시행 방법은 다음과 같다. 기존 횡단보도의 경우 모든 차량 교통량에 대하여 주기가 88초로 동일하여, 20주기에 해당하는 1,760초 동안 시뮬레이션을 시행한 뒤 6주기~14주기의 주기 당 지체시간 값을 평균한다. 대각선 횡단보도의 경우 차량 교통량에 따라 주기 값이 변동하여 각 주기 값을 적용하고, 30주기에 해당하는 시간 동안 시뮬레이션을 시행한 뒤 11주기~20주기의 주기 당 지체시간 값을 평균한다.

본 연구에서 제시된 모형의 결과를 비교하기 위하여 Matlab을 활용하여 수학적인 결과를 도출하고, Vissim을 활용하여 실제 통행행태를 반영한 결과를 도출한 후에 총 지체시간의 값을 정량적으로 비교한다. 총 지체시간에 대해 Matlab과 Vissim을 통하여 분석한 결과는 다음 <Table 2>와 같다. 교통량과 보행량 간의 차이에 따라서 총 지체시간의 효과가 개선되는 것을 확인할 수 있다.

<Table 2> The differences of total delay between mathematical and empirical results

| Division | Mathematical total delay by Matlab program(sec/cycle) | | | | | | | Empirical total delay by Vissim program(sec/cycle) | | | | | | |
|----------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| | veh \ ped | 45 | 90 | 135 | 180 | 225 | 270 | veh \ ped | 45 | 90 | 135 | 180 | 225 | 270 |
| Before | 45 | 540 | 1,083 | 1,630 | 2,181 | 2,736 | 3,294 | 45 | 499 | 1,061 | 1,625 | 2,166 | 2,873 | 3,452 |
| | 90 | 540 | 1,083 | 1,630 | 2,181 | 2,736 | 3,294 | 90 | 499 | 1,061 | 1,625 | 2,166 | 2,873 | 3,452 |
| | 135 | 540 | 1,083 | 1,630 | 2,181 | 2,736 | 3,294 | 135 | 499 | 1,061 | 1,625 | 2,166 | 2,873 | 3,452 |
| | 180 | 540 | 1,083 | 1,630 | 2,181 | 2,736 | 3,294 | 180 | 499 | 1,061 | 1,625 | 2,166 | 2,873 | 3,452 |
| | 225 | 540 | 1,083 | 1,630 | 2,181 | 2,736 | 3,294 | 225 | 499 | 1,061 | 1,625 | 2,166 | 2,873 | 3,452 |
| | 270 | 540 | 1,083 | 1,630 | 2,181 | 2,736 | 3,294 | 270 | 499 | 1,061 | 1,625 | 2,166 | 2,873 | 3,452 |
| | veh \ ped | 45 | 90 | 135 | 180 | 225 | 270 | veh \ ped | 45 | 90 | 135 | 180 | 225 | 270 |
| After | 45 | 268 | 378 | 489 | 601 | 712 | 824 | 45 | 266 | 380 | 494 | 626 | 753 | 868 |
| | 90 | 537 | 682 | 826 | 972 | 1,117 | 1,263 | 90 | 558 | 704 | 831 | 1,003 | 1,147 | 1,296 |
| | 135 | 962 | 1,157 | 1,353 | 1,550 | 1,747 | 1,944 | 135 | 980 | 1,114 | 1,342 | 1,490 | 1,801 | 1,880 |
| | 180 | 1,681 | 1,962 | 2,241 | 2,521 | 2,802 | 3,083 | 180 | 1,582 | 1,847 | 2,206 | 2,362 | 2,687 | 3,068 |
| | 225 | 3,033 | 3,477 | 3,905 | 4,335 | 4,766 | 5,198 | 225 | 2,978 | 3,366 | 3,767 | 4,220 | 4,756 | 5,434 |
| | 270 | 6,015 | 6,822 | 7,568 | 8,315 | 9,065 | 9,816 | 270 | 6,889 | 7,878 | 8,517 | 9,043 | 10,049 | 11,085 |
| | veh \ ped | 45 | 90 | 135 | 180 | 225 | 270 | veh \ ped | 45 | 90 | 135 | 180 | 225 | 270 |

<Fig. 7>은 대각선 횡단보도 설치 전후의 주기 당 총 지연 시간이 같은 점을 연결하고 있다. 시간당 보행자 통행량 당 약 54인/주기 보행자 통행량에서 대각선 횡단보도의 설치하는 Matlab 프로그램의 경우 시간당 차선 당 차량 통행량 당 시간당 200대 이하에서 적절한 것으로 분석된다. Vissim 프로그램의 경우, 대각선 횡단보도 설치하는 54인/주기에 대해 185대의 교통량이 적절한 것으로 분석되었다. 따라서 보행자 통행량이 증가할수록 그 격차는 작아지고 약 240인/주기가 증가하면 관계는 반대가 되는 경향을 보인다. 본 연구의 범위에서, 가장 큰 차이는 모든 보행자 통행량에 대해 15대 수준에 있을 때 가장 큰 효과를 보이는 것으로 분석되었다. 이는 대각선 횡단보도 설치 전후의 주기 당 총 지연 시간이 같은 조합의 구성 요소가 되는 것을 확인하였다.



<Fig. 7> Comparison between appropriate traffic volume areas

본 결과는 두 가지에 의한 차이로 판단된다. Matlab 프로그램에서 주기 길이에 지연 시간이 증가하더라도 버퍼를 제공하지만, Vissim 프로그램에서는 한 주기 동안 교차로를 통과할 수 없는 일부 차량이 관측되었기 때문이다. 대각선 횡단보도 설치 후 경우의 이러한 추가 지연 시간의 범위는 대각선 횡단보도 설치 전 경우의 지연 시간보다 크기 때문으로 분석된다. 보행자 교통량이 증가함에 따라 Vissim 프로그램에서는 대각선 횡단보도를 설치하기 전에 보행자와 차량 간의 상충이 증가하여 대각선 횡단보도를 설치하기 전과 비교하면 차량의 지연 시간이 증가하게 되는 경향을 보이게 된다. 이러한 이유로 추정값이 더 작아 저 240인/통행의 보행자 교통량에서 간격이 더 작아지게 되고, 반면에 240인/통행의 보행자 교통량과의 관계가 역으로 나타나게 된다. 이러한 오차가 존재하기 때문에, 제안된 설치기준을 적용하는 경우, 차량 통행량과 보행자 통행량의 임계 값의 우선순위가 낮아져야 한다.

3. 논의사항

대각선 횡단보도의 기존 한국 설치기준은 Han et al.(2011)의 연구에 자세하게 제시되어 있다. 해당 연구와 비교하여 본 연구는 비슷한 결과와 다른 결과를 도출하고 있다. Han et al.(2011)의 연구에서는 신호 위상 수가 감소할 때 적절한 통행량 영역이 증가한다는 결과를 유사하게 도출하고 있다. Han et al.(2011)은 같은 주기 길이로 대각선 횡단보도를 설치한 후 보행자 지체시간의 개선 효과가 두드러진다고 제시하였다. 반면, 본 연구에서는 같은 주기 길이로 대각선 횡단보도를 설치한 후 보행자 지체시간이 더 나빠질 수 있음을 제시하였다. 해당 차이는 주로 두 부분을 기반으로 하고 있다. 한 부분은 효과 측정의 종류의 차이로 나타나고 있으며, 다른 부분은 점멸 녹색 시간을 처리하는 방법의 차이에 의해서 나타난다. 같은 사이클 길이에서 차이로 인해 대각선 횡단보도를 설치한 후 총 보행자 지연 시간이 증가할 수 있으며, 이는 보행자 효과 측정이 악화할 수 있음을 의미하고 있다.

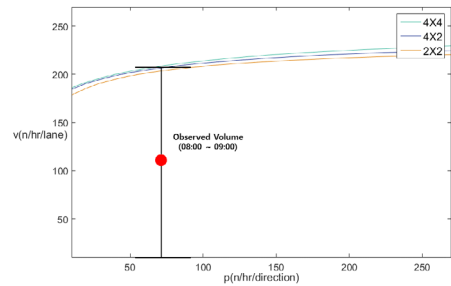
본 연구는 Han et al.(2011)의 연구와 달리 대각선 횡단보도 설치 전후의 주기 길이 변화를 반영하기 때문이다. 또한, 보행자 교통량이 증가함에 따라 보행자 지연 시간이 감소하는 영역이 존재한다. 본 연구와 연관된 해외 설치기준은 몇 가지 점을 유사한 특징으로 제시할 수 있다. 특히 정량적인 호주 설치기준은 본 연구 결과와 매우 유사하게 나타난다. 호주 설치기준은 단계에 따라 단계 수가 줄어들수록 적절한 교통량 영역의

크기가 증가하는 경향을 보인다.

실제 대각선 횡단보도가 운영되고 있는 지역의 교통량을 구득하여 본 연구의 결과를 적용하고 해당 지역의 대각선 횡단보도 설치가 적절한지 여부를 판단하였다. 아래 <Fig. 8(a)>에서는 실제 적용된 대각선 횡단보도의 설치현황이다. 2019년 12월 11일에 돌곶이로 136과 장위로 152가 만나는 사거리 교차로(4×2 교차로)를 대상으로 교통량 조사를 수행하였다. 해당 교차로는 2018년에 설치된 횡단보도로써 설치 후의 교통량에 대해 첨두시간대인 오전 08시~09시 사이에 교통량과 보행량을 측정하였으며, 해당 시간대의 총 교통량은 차량이 1,323대, 보행자가 268인으로 조사되었다. 따라서 $v=110$, $p=67$ 로 계산될 수 있으며, <Fig. 8(b)>에서는 관측된 교통량을 본 연구의 결과에 도시하여 비교한 결과이다. 해당 교차로에서의 대각선 횡단보도의 적용은 적절한 기준 범위 안에 있기 때문에 적절하게 설치되었다고 판단할 수 있다. 보행량과 교통량의 크기에 따라 설치가 적정한지 여부가 결정되기 때문에 교통량(v)가 현재보다 90n/hr/lane이 초과하게 되면 비효율을 발생할 가능성이 높아지게 됨을 알 수 있다. 따라서 교통량 변화에 따라 설치의 적정성 여부가 달라지는 특성을 판단할 수 있다.



(a)



(b)

<Fig. 8> Validation of result comparing between the result of simulation and observed volume;

(a) test site (Jangwi-ro and Dolgoji-ro intersection), (b) Validation result of observed volume

* Note) Captured by naver road view image

V. 결론

본 연구는 두 가지 주요 연구 결과를 도출하였다. 첫째, 대각선 횡단보도의 설치가 신호 교차로와 신호 시스템의 각 조합에 대해 효율적이지 않은 임계 통행량이 존재하는 것을 확인하였다. 두 번째로, 대각선 횡단보도를 설치하기 위한 적절한 교통량 지역은 신호 교차점 또는 신호 시스템에 따라 다르며 변동 범위로 다르다는 것을 확인하였다. 본 결과에서, 이 연구는 두 단계로 구성된 설치기준을 제안하였다.

본 연구에는 두 가지 주요한 함의점을 제시하였다. 첫째, 본 연구는 차량 통행량과 보행자 통행량을 모두 반영하는 지연 시간 모델을 공식화하였다. 지연 시간 모델을 기반으로 최적의 주기 길이를 도출할 수 있었다. 차량과 보행자 지표가 모두 분석의 측정 수단으로 사용되는 경우, 이 분석의 기초가 되는 지연 시간 모델이 차량과 보행자 지표 모두를 반영하는 것이 효율적인 것으로 분석되었다. 둘째, 본 연구는 모델의 결과를 Vissim 프로그램의 결과와 비교하여 모델을 검증하였다.

본 연구에는 다음과 같은 개선점이 있다. 첫째, 본 연구는 설치기준의 기초가 될 수 있는 대각선 횡단보도

설치를 위한 적절한 교통량 지역을 제안하였다. 이 결과, 대각선 횡단보도의 설치가 적절한지 아닌지는 차량 통행량과 보행자 통행량의 관계를 통하여 결정된다. 둘째, 본 연구는 세 개의 분석 대상을 설정하여 대각선 횡단보도를 설치하는 데 효율적인 방안을 제시하였다.

반면에, 본 연구에서는 일부 연구 결과가 현실과 다르게 분석되었으며, 서로 다른 유형의 신호교차로에 대한 다른 기준을 제시하였다. 설치기준의 일반화를 위해 추가 분석을 수행할 필요가 있어 차로 수를 변수로 처리하여 모형화하는 것이다. 또한, 대각선 횡단보도의 가장 큰 장점인 안전 측면에서의 개선을 목적함수에 반영하여 기존의 횡단보도에 비해서 지체시간의 증가는 가져오지만, 안전 측면의 개선으로 인한 설치의 타당성을 제시할 필요가 있다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구에 대한 서울대학교 공학연구원의 지원에도 감사를 드립니다.

REFERENCES

- Alhajyaseen W., Nakamura H. and Li M.(2010), “A Traffic Signal Optimization Strategy Consider Both Vehicular and Pedestrian Flows,” *89th Transportation Research Board Annual Meeting*, At Washington DC.
- Choi R.(2014), *Comparison of Internal and External Installation Standards of Scrambled Crosswalk and its Effectiveness Analysis*, Gachon University, Seongnam, Gyeonggi, South Korea.
- Guo R. and Lu X.(2016), “Delays for Both Pedestrians Classified and Vehicles at a Signalized Crosswalk,” *Journal of System Science Complex*, vol. 29, no. 1, pp.202-218.
- 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 I. J. (2015), *A Study on the Standards for Crosswalks*, Police Science Institute.
- Jang Y. J., Kim, H. J. and Son B. S.(2007), “Analysis of Vehicular Delay on Scrambled Crosswalk,” *Proceedings of the KOR-KST Conference*, vol. 2007, no. 1, pp.403-411.
- Jeon J. W., Lee S. B., Kim J. W. and Park J. T.(2009), “Development a Guideline for the Installation of Scrambled Crosswalk,” *Proceedings of the KOR-KST Conference*, vol. 2009, no. 1, pp.719-724.
- Jeong S. Y.(2013), *Development of Warrants for Scrambled Crosswalk*, Ajou University, Suwon, Gyeonggi, South Korea.
- Kim K. H. and Kim W. H.(2007), “Development of Warrants for Scrambled Crosswalk,” *Proceedings of the KOR-KST Conference*, vol. 2007, no. 3, pp.502-511.
- Lee D. H.(2016), *A Development of Warrants for Scrambled Crosswalk Using ANP*, Ajou University, Suwon, Gyeonggi, South Korea.
- Park B. H., Jung Y. I. and Kim K. H.(2012), “Traffic Accident Reduction Effects of the All-Red Clearance Interval (ARCI) Operation,” *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 30, no.

2, pp.21-27.

- Roess R. P., Prassas E. S. and McShane W. R.(2010), *Traffic Engineering 4th Edition*, Pearson, pp.461-525.
- Sin E. K. and Kim J. H.(2004), "A signal Optimization Model Integrating Traffic Movements and Pedestrian Crossings," *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 22, no. 7, pp.131-137.
- 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.
- Yu C., Ma W., Han K. and Yang X.(2017), "Optimization of Vehicle and Pedestrian Signals at Isolated Intersections," *Transportation Research Part B*, vol.98, pp.135-153.