확률 이론을 이용한 무신호 횡단보도의 보행섬 설치기준에 관한 연구

김수지¹ · 여지호¹ · 권영민^{2*}

¹한국과학기술원 조천식녹색교통대학원 박사과정, ²한국과학기술원 기계기술연구소 연수연구원

Study on the Guideline for a Pedestrian Island on No-signal Crosswalk Based on Probability Theory

KIM, Suji¹ · YEO, Jiho¹ · KWON, Yeongmin^{2*}

¹Ph.D. Candidate, CCS Graduate School for Green Transportation, Korean Institute of Science and Technology, Daejeon 34051, Korea

²Post-Doc Researcher, Mechanical Technology Research Center, Korean Institute of Science and Technology, Daejeon 34051, Korea

*Corresponding author: ymkwon@kaist.ac.kr

Abstract

Pedestrian crashes have been a serious issue in Korea for several years, and it has frequently occurred when pedestrians cross a street. Among the facilities to ensure safe pedestrian crossing, the pedestrian island has been considered as one of the useful facilities since it has the advantage of ensuring pedestrian safety at a low cost. But, in Korea, the pedestrian island is not well-known and the guideline for that is insufficient despite their benefits. For this reason, this study tried to suggest the instruction for the installation of pedestrian islands on no-signal streets. First, this study set the four scenarios for the number of cases of crossing street with two lanes and then calculated the probability of each scenario based on the probability theory. After then, this study reorganized the scenarios into three categories and interpreted the result. This study suggests a way to quantify the availability of pedestrian crossing by the different vehicle flow and pedestrian speed and define the sections to install pedestrian islands and signal flags.

Keywords: gap acceptance, pedestrian crossing, pedestrian island, pedestrian, probability theory

초록

국내 보행자 교통사고는 횡단 중에 빈번하게 일어나며, 특히 사람들의 보행이 주로 이루어지는 13m 미만 생활도로에서 사고위험이 높은 수준에 있다. 이를 해결하기 위한 여러 가지 보행안전 시설 중 보행섬은 적은 비용으로 보행자 도로 횡단 시 차량으로부터 안전한 대피공간을 제공함으로써 교통사고위험을 방지할 수 있다는 장점을 가진다. 그러나 국내에서는 보행섬이 주목을 받지 못하고 있으며 시설을 설치하기 위한 기준 또한 모호한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 생활도로를 대상으로 보행섬 설치기준을 구축하기 위한 연구를 진행하여 안전한 환경을 구축하는데 기여하고자 하였다. 생활도로에서 보행자가 횡단 가능한 경우의 수를 4가지의 시나리오로 나누어 확률 이론(probability theory)을 적용하여 표현하였다. 보행속도와 차량통행량을 기반으로 보행자 횡단 가능성 확률을 산출하고 그 결과를 보행섬과 신호등 필요

J. Korean Soc. Transp.
Vol.38, No.1, pp.14-25, February 2020
<https://doi.org/10.7470/jkst.2020.38.1.014>

pISSN : 1229-1366
eISSN : 2234-4217

ARTICLE HISTORY

Received: 19 November 2019

Revised: 9 January 2020

Accepted: 13 February 2020

Copyright ©
Korean Society of Transportation

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

성에 따라 3가지로 나누어 해석하였다. 본 연구 결과는 차량통행량과 보행속도 변화에 따른 보행안전, 편의에 영향을 미치는 정도를 확률적으로 정량화하여 제시하였으며, 보행섬뿐만 아니라 신호등 설치 시 효과적인 구간을 1차적으로 선별해 낼 수 있는 지표를 제시하여 안전시설 설치 측면에서 유용하게 쓰일 수 있을 것으로 사료된다.

주요어: 임계 간격, 보행자 횡단, 보행섬, 보행자, 확률 이론

연구의 배경 및 목적

국내 보행자 교통사고는 최근 5년간(2014-2018) 전체사고 발생건수의 21.8%, 전체사고 사망자수의 38.6%를 차지하며(TAAS) 다른 OECD 국가들과 비교하여 상당히 높은 수치를 기록하고 있다(IRTAD, 2018). 사고발생 위치를 보면 보행통행이 주로 이루어지는 도로 폭 '13m 미만'인 생활도로에서 사고가 주로 발생하였다. 또한 보행자 사고 중 '횡단 중' 사고 비율이 전체보행사고의 45.5%, 사망자수 비율이 56.3%로 상당한 부분을 차지하여 보행자 횡단 시 사고위험에 쉽게 노출되는 것을 알 수 있다. 이들 통계는 생활도로 횡단 시 보행자 보호를 위한 편의 및 안전 개선대책의 필요성을 시사하는 것으로, 이 중 국내외에서 효과가 검증된 보행안전시설을 집중적으로 검토할 필요성이 있다.

기존 보행자 횡단 안전을 위한 교통시설에는 교통신호기, 횡단보도, 차량속도 저감시설(고원식 교차로 및 횡단보도, 과속방지턱 등), 보행섬, 교통섬, 무단횡단 방지시설, 지하도, 육교, 음향안내시설, 조명시설 등 다양한 시설이 해당되며, 생활도로의 횡단 중 사고와 관련있는 무신호 횡단보도(no-signal crosswalk)의 안전을 확보하기 위해서는 고원식 횡단보도, 과속방지턱, 보행섬 등이 주로 고려된다.

무신호 횡단보도의 안전을 확보하기 위한 시설 중 보행섬(pedestrian islands or refuges)은 자동차도로 중간에 위치한 작은 섬 형태의 보도구간으로 보행자 횡단을 위하여 도로 위에 설치된 대기장소를 뜻한다. 차도의 폭이 교통약자(어린이, 노인, 장애인)를 포함한 보행자가 한 번의 녹색신호에 건너지 못할 정도로 넓거나, 신호등이 없는 도로의 경우 이 시설물 설치를 고려한다. 신호등이 없는 횡단보도는 보행자의 사고노출위험이 높아지게 되는데 보행섬은 차량운전자로부터 보행자를 더 잘 식별할 수 있게 함으로써 안전성을 높이는 효과를 가지기 때문이다(FHWA, 2017). FHWA 보고서에 따르면 횡단보도에 보행섬 설치 시 보행자 사고를 약 56%까지 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다(FHWA, 2017), 그 외에 차량통행의 지연시간을 감소시킬 수 있는 역할 수행(NZ Transport Agency, 2008), 다른 시설물들에 비하여 적은 설치 및 운영비용으로 교통사고의 감소를 유도할 수 있다는 점에서 장점을 가진다(U.K. Department of Transport, 1995). 이러한 장점에도 불구하고 국내에서는 보행섬 설치사례가 적으며 보행섬 설치를 위한 기준 또한 명확하지 않은 실정이다. 국외의 경우 국내보다 설치기준 등이 자세하지만 기준에 대한 근거들이 명확하지 않고 국내로 차용하기에는 부족한 점이 있다.

따라서 본 연구는 생활도로 무신호 횡단 시 보행자 안전확보를 위한 시설물 중 보행섬 설치에 대한 기준을 제시하는 것을 목표로 확률 이론(probability theory)을 기반으로 이론적인 연구를 진행하였다. 본 논문은 연구의 배경 및 목적, 기존 문헌 고찰, 연구의 방법, 분석 결과, 결론, 향후 연구방향 여섯 가지 부분으로 구성된다. 현재 연구의 배경 및 목적에서는 위에 기술된 바와 같이 생활도로를 대상으로 하는 보행섬 설치기준에 대한 연구의 필요성과 그에 따른 본 연구의 목적을 설명하였다. 두 번째 부분인 기존 문헌 고찰에서는 기존 보행섬에 대한 국내외 설치기준들과 관련 연구들에 대하여 검토한 내용과 시사점을 서술하였다. 세 번째로 연구의 방법 및 내용에서는 보행자의 무신호 횡단보도 횡단 가능성을 분석하기 위해 보행자의 횡단 가능성에 따라 구축한 시나리오들과, 이를 위한 가정사항, 확률 이론에 근거한 각 시나리오별 확률함수에 대해 설명하였다. 분석 결과에서는 해당 방법론에 따라 도출한 각 시나리오별 확률을 변수들에 따라 해석하고, 해당 결과가 최종적으로 보행섬을 설치하기 위한 기준에 어떻게 활용될 수 있는지에 대해 기술하였다. 결론에서는 앞에서 언급한 본 연구의 필요성과 결과에 따라 해당 연구의 기여방안에 대해서 논의하였고, 마지막으로 향후 연구방향에서는 본 연구의 한계점에 따라 수행되어야 할 연구들을 제시하였다.

기존 문헌 고찰

1. 국내외 보행섬 설치기준

국내에서는 ‘보행안전 및 편의증진에 관한 법률’(Ministry of Interior and Safety, 2017), ‘교통약자의 이동편의 증진법’(Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, 2019), ‘도로의 구조시설에 관한 규칙’(Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, 2015)에 따라 교통섬과 혼합하여 정의하거나, 그 외 보행우선구역사업 진행 시 설치시설물중의 하나로 ‘보행섬식 횡단보도’를 간단하게만 제시하고 있다. 이와 같은 국내에서 제시하고 있는 보행섬에 대한 내용들은 실제 생활도로에 보행섬을 설치하여 효율적으로 운영할 수 있는 구체적인 설치 기준이나 정보를 포함하지 않고 있다.

이에 반해 국외 여러 나라에서는 보행섬을 효율적으로 실제 도로에 설치하여 보행자의 안전을 확보하기 위해 국내보다 좀 더 구체적인 기준들을 제시하고 있으며, 이를 가로 및 도로 디자인을 위한 가이드라인의 일부로 포함시켜 권장하고 있다(Table 1 참조). 국외 보행섬의 설치기준을 검토한 결과 설치구역을 선정하기 위한 항목으로는 차로폭(차로수), 차량통행량, 차량속도가 주로 고려되었다. City of Alameda Public Works Department(2011)와 FHWA(2015)에서는 세 가지 항목에 대한 기준을 모두 포함하였으며, Queensland Department of Transport and Main Roads(2015)와 San Council of the City of San Diego(2002)는 차로폭(차로수)과 차량속도에 대한 기준을 포함하고 있었다. NZ Transport Agency(2008)는 차량통행량을 기준으로 하였고 New York State Department of Transportation(2015)과 San Francisco Planning Department(2010)는 차로폭(차로수)를 기준으로 설치가능구역을 선별하였다. 대부분 넓은 도로에 보행섬을 설치하는 것을 권장하였으나 Queensland와 New York에서는 횡단

Table 1. Guidelines of pedestrian island

City	Guidelines
Pedestrian planning and design guide, NZ Transport Agency, New Zealand (Aug, 2008)	<ul style="list-style-type: none"> • Site: Over 500 vehicles per hour • Width: Minimum 2.5m • Length: Minimum 8m
Traffic and Road Use Management, Department of Transport and Main Roads, State of Queensland, Australia (Apr, 2015)	<ul style="list-style-type: none"> • Site: Wide roadways (15m or greater and four lanes or more) • Two-lane roads are also available • Don't install where speed limit is >70km/h
Safe roads for a safer future FHWA, U.S. Department of Transportation (2015)	<ul style="list-style-type: none"> • Site: Curbed sections of multi-lane roadways areas with mixtures of significant pedestrian and vehicles areas with volumes greater than 12,000 vehicles per day intermediate or high travel speeds • Width: Minimum 1.2m
Highway Design Manual, New York State Department of Transportation, U.S. (Jun, 2015)	<ul style="list-style-type: none"> • Site: Wide roadways more than 18.3m or five lanes intersections or mid-block locations with shorter crossing distances • Width: Minimum 1.8m
Street Design Manual 2002, Council of the City of San Diego, U.S. (2002)	<ul style="list-style-type: none"> • Site: Wide streets with long pedestrian crossing times streets with speeds higher than 56.3km/h • Width: Minimum 1.2m
Pedestrian Design Guidelines City of Alameda, City of Alameda Public Works Department, U.S. (Jan, 2011)	<ul style="list-style-type: none"> • Site: Streets at intersections with four or more lanes streets with speeds higher than 56.3km/h or volumes greater than 12,000 vehicles per day high pedestrian volumes traffic calming desired complex or skewed intersections • Width: Minimum 1.8m
San Francisco Better Streets Plan, San Francisco Planning Department, U.S. (Dec, 2010)	<ul style="list-style-type: none"> • Site: Streets with high pedestrian activity crossing distances are long (18.3m or greater) near and within neighborhood retail areas, civic and institutional uses, schools and senior facilities locations with many transfers between transit lines unsignalized intersections with large numbers of pedestrians

시간이 상대적으로 짧고 좁은 도로에서도 설치가 가능하다는 것을 명시하였다. San Francisco는 다른 국외 사례에서는 다르게 근린상업지역, 학교, 어린이 및 노인부양시설 등 보행안전을 강화시켜야 할 구역들을 구체적으로 지목하여 설치를 권장하였다.

이와 같이 국외는 차로폭(차로수), 차량통행량, 차량속도의 항목에 대하여 각 나라 또는 도시에 맞게 적용하여 국내보다 자세한 설치권장 구역을 선별기준과 설치기준들을 제시하고 있다. 그러나 그 기준들의 근거는 여전히 부족하며, 본 연구에서 목표로 하는 생활도로에 대한 보행섬 설치기준은 제시조차 하지 않은 사례가 많았다. 따라서 국내 생활도로에 보행섬을 설치하기 위한 기준으로 차용하기에는 어려운 점이 있어 기존 국내외 가이드라인 외에 보행섬에 대한 연구들을 통해 보행섬 설치기준을 검토해 보고자 하였다.

2. 국내외 보행섬 관련 연구

보행섬에 대한 기존 연구는 보행자의 횡단 임계간격(gap acceptance)을 결정하는 원인분석, 보행섬 설치효과 분석, 보행섬 설치 준거정립 등이 행해졌다. 특히, 보행자 횡단 임계간격은 차량행렬 중 보행자가 도로를 횡단할 수 있는 적정 차량간격을 의미하는 것으로 보행섬 설치관련 연구 시 핵심이 되는 개념이다. 국외연구에서는 이에 영향을 줄 수 있는 요소로 Yannis et al.(2013)은 차량과 도로특성, Kadali and Vedagiri(2013), Pawar and Patil(2015)는 차량과 보행자의 특성을 선택하여 실제 조사데이터를 활용하여 분석하였다. 국내연구에서는 Kim et al.(2015)가 보행섬 유무에 따른 횡단보도를 비교분석 하였으며 Sim et al.(2013)는 보행교통섬 설치준거에 대한 연구를 Kim et al.(2009)는 퍼지이론을 이용한 보행자 임계간격 연구를 진행하였다.

기존 연구들은 보행섬에 대하여 여러 방면의 연구를 진행하였지만, 대부분 횡단보도가 있는 간선급 도로인 넓은 도로를 대상으로 하여 생활도로 보행섬 관련 연구는 부족하였으며 보행섬을 설치하기 위한 적정 도로 선정 기준 또는 그 근거에 대한 연구도 미비하였다. 따라서 현재 국내 생활도로 교통사고의 심각성을 해소하기 위한 하나의 수단인 보행섬에 대한 설치기준 연구를 진행할 필요가 있다고 판단되었다.

연구의 방법

본 연구는 보행사고가 빈번하게 일어나는 생활도로를 대상으로 선정하고 기존 국내외 설치기준과 문헌들을 바탕으로 중요요소로 인식된 차로폭, 차량통행량, 차량속도 중 차로폭, 차량통행량에 초점을 맞추어 보행섬 설치 구간선정에 기반이 될 수 있는 이론적 연구를 진행하였다. 차량속도의 경우에는 사고 심각성을 고려한 하나의 제약으로 본 연구의 대상인 생활도로 내 무신호 횡단보도에서는 차량들의 속도가 상대적으로 낮은 속도인 30~50km/h 이하(생활도로 제한속도 기준)로 주행한다는 것을 가정하고 차로폭, 차량통행량에 초점을 맞추어 연구 방법을 설계하였다. 이와 함께 보행속도에 대한 조건을 일반인과 교통약자로 나누어 포함하였다.

1. 가정

1) 차로폭 및 차로수

생활도로를 대상으로 하는 연구의 목적에 맞게 차로수를 가장 기본적인 생활도로 구조인 양방 2차로로 제한한다. 차로폭의 경우에는 ‘교통약자의 이동편의 증진법 시행규칙’의 ‘보행안전시설물의 구조 시설기준’에 따라 보행섬의 최소폭을 1.5m를 만족하여 설치할 수 있는 여유 너비를 고려하여 한 차로 당 4.0m로 설정한다. 보행자가 처음 만나게 되는 차선을 ‘a’ 라 정의하며, 두 번째로 만나게 되는 차선을 ‘b’ 라 정의한다. 이는 Figure 1과 같다.

Figure 1. Description of road with two lanes

2) 차량통행량

일정시간동안 횡단보도에 도착하는 차량대수를 무작위로 발생하는 연속적인 이산변수로 가정하고, 차량도착분포를 확률변수가 시간의 진행에 따라 변하는 과정을 의미하는 확률과정(stochastic process)을 이용하여 모사한다. 이때 차량대수의 도착확률이 포아송 과정(poisson process)을 따른다고 가정한다.

2. 방법론

포아송 과정이란 시간 t 동안 차량 도착 수 X 가 평균 λ 인 포아송분포(poisson distribution)를 따르며 그 차량 간격은 지수분포(exponential distribution)를 따른다는 것을 가정한다. 이때 두 차량 사이의 시간 간격은 서로 독립이며 평균은 $1/\lambda$ 이 되므로 일정 시간 t 내 도착하는 평균 차량의 수는 λt 로 표현될 수 있다. 이에 따라 이 과정은 $X \sim P(\lambda t)$ 로 정의된다.

도착 간 시간을 모형화하기 위한 지수분포는 간격 $h \geq 0$ 인 공간에서 확률밀도함수

$$f(h) = \lambda e^{-\lambda h} \quad (1)$$

를 가지며 $h < 0$ 에 대하여는 $f(h) = 0$ 을 가진다. 이때 평균과 표준편차는 $1/\lambda$ 로 동일하다.

누적분포함수는 $h \geq 0$ 에 대하여

$$P(H < h) = F(h) = 1 - e^{-\lambda h} \quad (2)$$

로, 차량간격 H 가 h 보다 작을 때의 확률값으로 해석할 수 있다.

이때 포아송 과정을 따르는 차량분포의 k 번째 차량까지의 시간간격의 합, 즉 k 번째 차량이 오기까지의 대기시간은 감마분포(gamma distribution)를 따르며 그 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$f(h) = \frac{\lambda^k x^{k-1} e^{-\lambda x}}{\Gamma(k)} \quad (3)$$

$\Gamma(k)$ 는 감마함수(gamma function)로 확률밀도함수의 총면적이 1이 되도록 하는 역할을 한다. $k=1$ 인 첫 번째 차량까지의 대기시간은 모수 λ 를 가지는 위의 지수분포와 동일하다.

이 연구에서는 위에서 설명한 포아송 과정을 활용하여 보행자가 횡단 시 경험할 수 있는 경우의 수를 확률로 표현하고자 하였고 그 세부내용은 아래와 같다.

3. 확률모형 구축

보행섬 설치기준의 근거를 이론적인 방법을 이용하여 제시하기 위한 확률모형을 구축하기 위해 우선 보행자가 횡단 시 경험할 수 있는 경우의 수를 차량도착분포에 근거하여 구상하였다. 양방향 2차로 도로에서 보행자 바로 앞에 있는 차선을 ‘a’, 그다음 차선을 ‘b’라고 하였을 때, 총 경우의 수는 Figure 2와 같이 4가지로 나누어 나타낼 수 있다.

Figure 2. Possible scenarios for pedestrian crossing

Scenario 1의 경우는 보행자가 도착하는 즉시 적정 차간간격이 나타나 차선 ‘a’를 대기시간 없이 건너는 경우와 적정 간격이 나타나기까지 기다렸다가 ‘a’ 차선을 건너는 경우를 통합하여 ‘a’를 건너 즉시 ‘b’차선에서 대기시간 없이 한 번에 바로 횡단할 수 있는 경우, Scenario 2는 ‘a’차선에서 1번 경우와 같이 건너 후 ‘b’차선은 건너기 위하여 대기시간이 필요한 경우, Scenario 3은 Scenario 1, 2 경우와 같이 ‘a’차선을 건넌지만 ‘b’차선을 건너지 못하는 경우, Scenario 4는 ‘a’차선부터 건널 수 없는 경우로 정의하였다. 이를 보행섬과 횡단보도의 필요성으로 재구성하면 Scenario 1의 경우는 보행섬과 신호등이 필요 없는 경우, Scenario 2의 경우는 보행섬을 통해 전체 차로 횡단 시 안전확보가 필요한 경우, Scenario 3과 4의 경우는 신호등을 설치하여 보행횡단시간을 보장해야 할 필요가 있는 경우이다.

이 네 가지 경우의 확률은 앞 방법론에서 설명한 포아송 과정을 이용하여 표현할 수 있다. $h_a, h_{a1}, h_b, h_{b1}, G$ 를 각각 ‘a’차선 차량의 차두간격(headway), ‘a’차선에서 보행자가 처음 마주칠 차량까지의 대기시간, ‘b’차선 차량의 차두간격, ‘b’차선에서 보행자가 처음 마주칠 차량까지의 대기시간, 임계간격으로 정의했을 때 각 확률식은 다음과 같이 도출된다.

$$(P(h_{a1} > G) + P(h_{a1} < G) \cdot P(h_a > G)) \cdot P(h_{b1} > G) = (e^{-\lambda_a G} + (1 - e^{-\lambda_a G}) \cdot e^{-\lambda_a G}) \cdot e^{-\lambda_b G} \quad (4)$$

$$(P(h_{a1} > G) + P(h_{a1} < G) \cdot P(h_a > G)) \cdot (P(h_{b1} < G) \cdot P(h_b > G)) = (e^{-\lambda_a G} + (1 - e^{-\lambda_a G}) \cdot e^{-\lambda_a G}) \cdot ((1 - e^{-\lambda_b G}) \cdot e^{-\lambda_b G}) \quad (5)$$

$$(P(h_{a1} > G) + P(h_{a1} < G) \cdot P(h_a > G)) \cdot (P(h_{b1} < G) \cdot P(h_b < G)) = (e^{-\lambda_a G} + (1 - e^{-\lambda_a G}) \cdot e^{-\lambda_a G}) \cdot ((1 - e^{-\lambda_b G}) \cdot (1 - e^{-\lambda_b G})) \quad (6)$$

$$P(h_{a1} < G) \cdot P(h_a < G) = (1 - e^{-\lambda_a G}) \cdot (1 - e^{-\lambda_a G}) \quad (7)$$

이 때 임계간격 G 는 Wan and Rouphail(2004)에 따라 Equation 8과 같이 정의한다.

$$G = L/S + F \quad (8)$$

여기서, L : crosswalk length

S : pedestrian's average walking speed

F : safety margin

예를 들어 보행평균속도를 2.0m/s, safety margin을 3.0초로 가정한다면 도로폭 4.0m일 때 보행자 임계간격, G 는 5.0초로 산정할 수 있다. 보행자는 교통약자와 일반인에 따라 다른 보행속도를 보이므로 본 연구에서는 보행속도를 경찰청 ‘교통신호기 설치관리 매뉴얼(Korean National Policy Agency, 2017)’에 따라 교통약자 0.8m/s, 일반인 1.0m/s로 설정하여 분석 결과를 도출하여 비교한다. 해당 Scenario 별 확률 계산 및 연구 결과의 도식화를 위하여 Mathworks사의 MATLAB 9.0을 사용하였다.

분석 결과

1. 보행속도와 도로폭에 따른 임계간격

연구 방법에서 설명한 바와 같이 보행속도는 경찰청 ‘교통신호기 설치관리 매뉴얼(Korean National Policy Agency, 2017)’에 따라 교통약자 0.8m/s, 일반인 1.0m/s로 설정하였고 본 연구의 가정에 따라 차로폭은 4.0m로 제한하였다. Equation 7에 따른 보행자 임계간격을 산정하기 위하여 safety margin을 3.0초로 설정하였으며 그 결과 보행자별 임계간격 G 는 Table 2와 같이 산출되었다.

Table 2. Gap acceptance by pedestrian speeds

Walking speed (m/s)		Lane width 4.0m
Vulnerable road users	0.8	8.0sec
Ordinary users	1.0	7.0sec

2. 차선별 차량통행량에 따른 확률

Table 2에서 계산된 두 가지 임계간격을 이용하여 차선 ‘a’, ‘b’ 각각의 차량통행량의 변화에 따라 확률이 어떻게 변화하는지 살펴보았다. 차량통행량을 0veh/hr부터 1,500veh/hr까지 10veh/hr 단위로 변화시키며 도출된 식에 대입하여 각 해당 통행량에 대한 확률값을 구하였다. 보행섬과 횡단보도 설치유무를 기준으로 크게 세 가지로 나누어 무신호에도 보행섬과 횡단보도가 필요 없는 경우 Equation 4: Scenario 1과 보행섬이 필요한 경우 Equation 5: Scenario 2, 신호등이 필요한 경우 Equation 6, Equation 7: Scenario 3&4에 대하여 각각 contour plot을 이용하여 나타내었으며 그 결과는 Figure 3과 같다.

Figure 3. Contour plots of probability by pedestrian speeds: (a) Scenario 1 with pedestrian speed 0.8m/s; (b) Scenario 2 with pedestrian speed 0.8m/s; (c) Scenario 3&4 with pedestrian speed 0.8m/s; (d) Scenario 1 with pedestrian speed 1.0m/s; (e) Scenario 3 with pedestrian speed 1.0m/s; (f) Scenario 1 with pedestrian speed 1.0m/s

Figure 3의 (a),(b),(c)는 교통약자에 대한 각 Scenario의 확률이고 (d),(e),(f)는 일반인에 대한 확률분포로서 노란색을 띠수록 횡단 가능성에 대한 확률값이 낮아지는 것을 파란색을 띠수록 확률값이 높아지는 것을 뜻한다. 교통약자가 일반인보다 횡단하기 위해 걸리는 시간이 더 소요되므로 그래프 분석 결과 모든 Scenario 상황에 대하여 횡단 가능성에 대한 확률이 교통약자에 대해 적게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 Table 3의 각 Scenario 1, 2의 최솟값, 중간값, 최댓값을 통해 수치로 재확인 할 수 있다.

Table 3. Probabilities of each scenario

Scenarios		Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3&4
Walking speed (m/s)				
0.8	Min.	0.0025	0.0000	0.0000
	Mid.	0.0601	0.0380	0.8980
	Max.	1.0000	0.2500	0.9951
1.0	Min.	0.0057	0.0000	0.0000
	Mid.	0.0894	0.0536	0.8515
	Max.	1.0000	0.2500	0.9889

Scenario 1은 'a'차선을 건넌 직후 대기시간 없이 바로 'b'차선을 통과하여 반대편에 도달할 수 있는 확률로 무신호에도 보행자가 도로를 횡단할 수 있는 가능성 정도를 나타낸다. 예를 들어 도출된 횡단 가능성 확률값이 0.6이라

면, 0.6에 해당하는 차량통행량 조건에서 보행자는 횡단 시도 10번 중 6번은 'a'를 건넌 후 'b'를 바로 건널 수 있다고 해석할 수 있다.

Scenario 2의 경우는 'a'차선을 건넌 후 'b'차선을 바로 건너지 못하여 대기시간을 가진 후 건너게 되는 확률로 차로 중간 대기 장소가 필요한 경우를 뜻한다. 'b'차선의 통행량이 작을 경우 대기시간 없이 건널 수 있는 확률, 즉 Scenario 1의 확률이 높아지므로 현 Scenario 2의 확률은 낮아지게 되고, 반대로 'b'차선의 통행량이 매우 커지게 되면 건널 수 없게 되므로 이때도 현 Scenario 2의 확률이 낮아지게 된다. 확률의 최댓값은 25%로 이 값의 확률을 도출하는 차량통행량 조건에서 보행섬을 설치할 경우 효율이 가장 좋다고 해석할 수 있다. 이 분석 결과를 바탕으로 특정 확률에 도달할 수 있는 차량통행량 조건구간을 도출할 수 있다. 예를 들어 횡단 가능성 확률을 20% 이상으로 만드는 차량통행량 구간은 그래프를 통해 추정할 수 있으며, 이때 각 차량통행량 구간은 보행속도가 0.8m/s일 때와 1.0m/s일 때 다르게 나타난다. 보행속도가 0.8m/s일 때는 'a'차선 통행량이 0-260veh/hr, 'b'차선 통행량이 150-570veh/hr인 구간, 보행속도가 1.0m/s일 때는 'a'차선 통행량이 0-300veh/hr, 'b'차선 통행량이 170-660veh/hr인 구간으로 Figure 3 (b)와 (e)에서 볼 수 있는 바와 같이 이 구간 내 타원형으로 분포되어 있다.

Scenario 3&4는 'a'를 건넌지만 'b'를 건너지 못하는 확률 또는 'a'조차 건너지 못하는 확률의 합으로 보행자의 횡단시간 확보를 위하여 신호등 설치가 필요한 지역으로 판단할 수 있다.

도출된 횡단 가능성에 대한 확률값을 통해 각 Scenario를 해석하기 위하여 보행속도가 1.0m/s이고 'a'차선의 통행량이 220veh/hr, 'b'차선의 통행량이 290veh/hr인 경우를 예로 선정하였다. 이때의 Scenario 1의 확률은 0.500, Scenario 2의 확률은 0.216, Scenario 3&4의 확률은 0.284이며, 이는 1,000번의 횡단 시도 중 500번은 'a'를 건넌 즉시 'b'를 바로 횡단, 216번은 기다림 후 'b'차선 횡단, 나머지 284번은 대상 도로를 횡단하지 못하게 된다고 해석할 수 있다. 주어진 가정사항 아래 Scenario 1의 확률이 0.500으로 Scenario 2와 Scenario 3&4보다 각 1.8배, 2.3배 높게 분석되어 이는 해당 구간에 보행섬 혹은 신호등을 설치하는 것이 상대적으로 비효율적일 수 있음을 시사한다.

위와 같이 본 연구는 양방 2차로 생활도로에서 통행량과 보행자속도에 따른 보행자 횡단 가능성을 확률이론에 따라 도출하고 이를 활용하여 보행섬 설치기준 마련을 위한 하나의 방법을 제안하였다. 이 결과를 통해 보행섬에 대한 일괄적인 기준을 정립하는 것이 아니라 차량통행량과, 보행자를 기반으로 합리적인 방법을 제시할 수 있다. 또한 방법을 통해 얻을 수 있는 정량적 지표인 확률을 이용하여 보행섬 또는 신호기 설치구간 선정을 위한 기초자료를 도출할 수 있다.

결론

본 연구는 국내 보행자의 생활도로 사고의 심각성을 파악하고 이를 해소하기 위한 보행안전시설 중 보행섬 설치 기준을 제시하기 위한 이론적인 분석을 수행하였다. 보행섬은 적은 비용으로 교통사고 감소 효과 등을 얻을 수 있다는 점에서 장점을 가지나 국내에서는 보행섬의 도입 및 운영이 제대로 이루어지지 않고 있으며, 시설을 설치하기 위한 기준 또한 모호하다. 연구를 진행하기 위하여 먼저 해외의 보행섬 기준들의 검토하였고, 이를 기반으로 연구를 설계하고 생활도로의 보행자 횡단가능성을 기반으로 기준을 제시하기 위하여 확률 이론을 적용하여 분석하였다. 보행자가 생활도로를 횡단하는 경우의 수를 4가지의 시나리오로 나누어 확률적 과정을 바탕으로 각 확률 식을 도출하였고, 교통약자와 일반인의 보행속도로 나누어 각 시나리오에 대한 확률을 계산하였다. 마지막으로 분석 결과를 바탕으로 무신호에도 보행섬과 횡단보도가 필요 없는 경우, 보행섬이 필요한 경우, 신호등이 필요한 경우로 크게 세 가지로 나누어 각 확률분포를 해석하였다.

본 연구결과를 활용하여 어떻게 보행섬 설치를 위한 기준을 제시할 수 있는지 증명하기 위하여 교통약자 보행속도를 기준으로 다음과 같이 기준에 따른 보행섬 및 신호등 설치구간을 예시로 설정해 보았다. 시각적으로 명확하게 보여주기 위하여 각 차선의 차량통행량을 동일하다고 가정한 뒤 차량통행량 별 각 시나리오의 확률분포를 나타내었고, Scenario 1은 보행섬 설치 시 안전을 더 도모할 수 있으므로 Scenario 2의 확률과 합하여 구간을 설정하였다.

그 결과 그림 Figure 4와 같이 차량통행량에 따른 시나리오별 확률값을 분포시킬 수 있으며 횡단 가능성 확률에 따라 기준을 20%와 80%로 설정하면 다음 그림과 같이 세 구간으로 나눌 수 있다. 보행섬이 설치되었을 때 보행자가 횡단보도를 건널 수 있는 확률이 80% 이상인 구간을 ‘보행섬설치권장구역’(Section 1)으로 지정하고, 확률이 20~80%인 구간을 ‘보행섬설치필요구간’(Section 2), 마지막으로 보행교통섬을 설치하여도 도로를 횡단할 수 있는 확률이 20%이하로 떨어지는 구간을 ‘신호등설치필요구역’(Section 3)으로 지정할 수 있다. 20%와 80%에 해당하는 차량교통량을 이용하여 다시 표현하면 해당 구간의 차선별 교통량이 180대/시 이하일 때는 ‘보행섬설치권장구역’으로 지정하고 교통량이 180~610대/시 일 때는 ‘보행섬설치필요구간’, 통행량이 610대/시 이상일 경우에는 ‘신호등설치필요구역’으로 지정할 수 있다.

Figure 4. Probability graph for volume of land and crossing availability

이와 같이 본 연구의 결과를 이용하여 보행섬 설치를 위한 기준 제시에 더불어 차량통행량과 보행속도 변화가 보행자 횡단에 미치는 영향 정도를 확률적으로 정량화 할 수 있었다. 도출된 수치를 기반으로 보행섬 설치에 효과적인 구간을 1차적으로 선별해 낼 수 있는 기회를 제공할 수 있으며, 신호등 설치가 필요한 구간 또한 선별해 낼 수 있는 기준도 동시에 제시하여 안전시설 설치 측면에서 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

향후 연구방향

본 연구는 확률이론을 이용하여 차량통행량과 보행속도에 따른 횡단가능성을 도출하고 보행섬 설치 기준 확립을 위한 기반을 제공했다는 점에서 의의를 가진다. 그러나 이론에 기반한 초기연구로서 실제적인 상황에서의 보행행태, 차량행태, 도로환경에 따른 변화를 반영하지 못했다는 점에서 다음과 같은 한계를 갖는다. 첫째, 보행자의 속성으로 보행속도와 safety margin만을 고려함으로써 실제적으로 보행자 횡단 시 반응하는 행태들을 고려하지 못하였다. 또한 현재 보행속도는 기존 법령에서 제시하는 보행속도 0.8m/s와 1.0m/s를 기준으로 연구를 진행하였지만 최근 교통약자 보행속도 기준에 대한 수정 등의 필요성이 제기되면서 이를 반영한 연구도 필요할 것으로 판단된다. 둘째, 차량행태 측면에서는 본 연구는 생활도로의 제한속도를 기가정하고 차로폭과 차량 통행량에 초점을 맞추어

연구를 진행하였으므로 실제 차량의 접근속도를 구체적으로 고려하지 못했다는 점에서 한계가 있다. 셋째, 도로환경 측면에서는 본 연구에서는 도로의 구조를 왕복 2차로로 설정함으로써 그 이상의 차로(3차로 이상)로 이루어진 생활도로에 대한 추가연구가 필요할 것으로 판단된다. 이와 더불어 생활도로의 보행섬 설치 전후 환경변화에 따른 주정차 문제, 시야각 확보 등을 고려할 수 있는 실제적인 환경을 반영한 추가연구도 수행되어야 한다. 따라서 향후에는 이를 반영할 수 있는 연구를 설계하고 이론적 연구와 함께 실제 대상지 기반의 실험적 연구를 통해 본 연구의 이론적 한계를 보완할 수 있는 연구를 진행할 예정이다.

Funding

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.

ORCID

KIM, Suji <http://orcid.org/0000-0003-0299-9367>

YEO, Jiho <http://orcid.org/0000-0001-6794-5584>

KWON, Yeongmin <http://orcid.org/0000-0002-1094-2451>

References

- City of Alameda Public Works Department (2011), Pedestrian Design Guidelines, City of Alameda, U.S.
- Council of the City of San Diego (2002), Street Design Manual 2002, City of San Diego, U.S.
- FHWA (2015), Safe Roads for a Safer Future: A Joint Safety Strategic Plan, U.S. Department of Transportation.
- FHWA (2017), Proven Safety Countermeasures: Medians and Pedestrian Crossing Islands in Urban and Suburban Areas, U.S. Department of Transportation. http://safety.fhwa.dot.gov/provencountermeasures/fhwa_sa_12_011.cfm.
- IRTAD (2018), Road Safety Annual Report 2018, International Transport Forum.
- Kadali B. R., Vedagiri P. (2013), Effect of Vehicular Lanes on Pedestrian Gap Acceptance Behaviour, *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 104, 678-687.
- Kim K. H., Kim D. H., Lee I. S., Lee D. H. (2009), Building a Model to Estimate Pedestrians' Critical Lags on Crosswalks, *Korean Society of Civil Engineers*, 29(1), 33-40.
- Kim T. H., Park J. J., Lee Y. H. (2015), Comparative Evaluation of Staggered Pedestrian Crossings and Pedestrian Crossings by Using Risk Analysis, *Korean Society of Civil Engineers*, 35(6), 1287-1295.
- Korean National Policy Agency (2017), Manual for Installation and Management of Transportation Signal, South Korea.
- KoROAD, Traffic Accident Analysis System, <http://taas.koroad.or.kr>.
- Ministry of Interior and Safety (2017), Pedestrian Safety and Convenience Enhancement Act, South Korea.
- Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (2015), Rule of Road Structure and Facilities, South Korea.
- Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (2019), Act on Promotion of the Transportation Convenience of Mobility Disadvantaged Persons, South Korea.
- New York State Department of Transportation (2015), Highway Design Manual, New York State, U.S.

- New Zealand Transport Agency (2008), Pedestrian Planning and Design Guide, New Zealand.
- Pawar D. S., Patil G. R. (2015), Pedestrian Temporal and Spatial Gap Acceptance at Mid-block Street Crossing in Developing World, *Journal of Safety Research* 52, 39-46.
- Queensland Department of Transport and Main Roads (2015), Traffic and Road Use Management, State of Queensland, Australia.
- San Francisco Planning Department (2010), San Francisco Better Streets Plan, San Francisco, U.S.
- Sim K. B., Kim J. H., Park K. W., Ha D. I. (2013), Study on the Installation Warrants of Staggered Crosswalk Traffic Island on Urban Streets : Focusing on Pedestrian Safety and Service Level, *Korean Institute of ITS*, 12(6), 97-107.
- U.K. Department of Transport (1995), The Design of Pedestrian Crossings, U.K.
- Wan B., Roupail N. M. (2004), Simulation of Pedestrian Crossing in Roundabout Areas using Arena, Paper submitted for publication and presentation at the 83rd TRB Annual Meeting in January 2004.
- Yannis G., Papadimitriou E., Theofilatos A. (2013), Pedestrian Gap Acceptance for Mid-block Street Crossing, *Transportation Planning and Technology*, 36(5), 450-462.