

확률기반 비신호교차로의 좌회전 전용차로 설치 기준 정립

Establishing Probability-Based Warrants for Left-Turn Lanes at Unsignalized Intersections

문 재 필*

* 주저자 및 교신저자 : 한국건설기술연구원 수석연구원

Jaepil Moon*

* Highway and Transportation Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Tech

† Corresponding author : Jaepil Moon, jpmoon@kict.re.kr

Vol.17 No.1(2018)

February, 2018

pp.42~54

ISSN 1738-0774(Print)

ISSN 2384-1729(On-line)

<https://doi.org/10.12815/kits>

2018.17.1.42

Received 2 November 2017

Revised 1 December 2017

Accepted 14 January 2018

© 2018. The Korea Institute of Intelligent Transport Systems. All rights reserved.

요 약

본 연구는 주도로의 우선 통행권을 부여하는 비신호교차로의 좌회전 전용차로 설치 권장 기준을 정립하기 위해 위험확률기반 모델을 적용하였다. 본 연구에서 적용한 위험확률 모델은 선두 차량의 좌회전과 이를 추종하는 직진 차량간의 잠재적 추돌사고 확률을 기반으로 한다. 전이된 음지수 분포와 복합모델 이론을 토대로 진행방향 교통량, 대향 교통량, 좌회전 비율의 함수로 2차로도로와 4차로도로에 대해 각각 기 모델(Kikuchi와 Chakroborty 모델)과 수정된 모델을 적용하였다. 각 모델은 변수 값(간격수락, 추종시간, 운전자 반응시간 등)들은 국내 조건을 반영하였다. 이런 모델을 기반으로 각 좌회전 차량 비율과 운영속도별 최대 허용 확률에 해당되는 진행방향과 대향 교통량을 평가하였다. 이를 통해 2차로도로와 4차로도로에서 좌회전 전용차로 설치 판단을 할 수 있는 기준을 제시하였다.

핵심어 : 위험확률, 비신호교차로, 좌회전 차로, 전용차로 설치 기준, 도로

ABSTRACT

This study is to establish the traffic volume-based warrants of left-turn lanes in unsignalized intersections based on a risk probability methodology. This study applied a risk probability of a potential rear-end collision between a left-turn vehicle and the immediately following through vehicle. With the shifted negative exponential model and the compound probability theorem, the risk probability can be expressed as the function of directional volumes, opposing volumes and the percentage of left-turns for a two-lane and four-lane highway, respectively. The warrants of installing left-turn lanes on unsignalized intersections were developed with the risk probability. The warrants define the total approaching and opposing volumes to encourage a left-turn lane as a function of operating speed, percentage of left-turn, and number of lanes.

Key words : risk probability, unsignalized intersections, left-turn lanes, warrants, roads

I. 서 론

평면교차로는 잦은 사고가 발생하는 대표적인 지점이다. Korean National Police Agency's Traffic Accident Statistics(2016)에 의하면, 전체 사고중 약 90%가 교차로부근에서 발생하는 것으로 나타났다. 전체 교통사고는 지속적으로 감소 추세인 반면에 교차로내 발생하는 교통사고는 약 두 배 이상 증가하고 있다. 이는 교차로의 교통상충지점은 32개로 일반 구간에 비해 교통사고 발생할 확률이 높기 때문이다. 또한 직진 차량과 회전 차량 간 속도 차이가 크기 때문에 부상 심각도가 일반 구간에 비해 높은 것으로 판단된다.

이러한 교통상충형태 중에서 회전 차량의 감속 혹은 회전하기 위한 대기로 인해 뒤따르는 차량의 추돌사고는 적절한 보조차로 설치를 함으로써 어느 정도 예방할 수 있다고 판단된다. 또한 직진 교통류와 분리시킴으로써 회전 교통류의 영향을 최소화 하여 교차로의 운영 효율성 증대를 꾀할 수 있다. 그러나 도로·교통 여건에 관계없이 모든 교차로에 회전 전용차로 차로를 설치하는 것은 비용측면에서 보면 과다설계가 될 수 있다.

신호교차로의 경우는 Korean Highway Capacity Manual(2013) 등을 통해 회전차로 설치여부를 판단할 수 있는 가이드라인이 있는 반면, 비신호교차로의 경우는 보조차로 설치 여부에 대한 정량적인 가이드라인이 없으며 설계자 혹은 정책 결정자의 경험을 통해 보조차로 설치 여부를 결정한다. 특히, 비신호교차로의 좌회전 전용차로 설치 기준에 대한 국내 관련 연구가 전무한 것으로 나타났다. 또한 현 'Korean Intersections Design Guideline(2004)'에서는 관련 정량적 기준을 제시하지 않고 우회전 전용차로 설치를 권장하는 정성적 기준(우회전 교통량이 많아 직진교통에 지장을 초래한다고 판단되는 경우, 우회전 자동차의 속도가 높은 경우, 교차각이 120도 이상이며 우회전 교통량이 많을 경우)만 제시하고 있다. 따라서, 도로·교통 여건에 따라 적절한 보조차로 설계가 필요하다는 점을 고려한다면 정량적 기준도 어느정도 중요하다고 판단된다. 국외의 경우는 좌회전 전용차로 관련 연구는 활발하게 수행된 것으로 나타났으며 대향 교통량, 접근 교통량 그리고 좌회전 교통량 관계를 기반으로 비신호교차로의 좌회전 전용차로 설치 기준을 제시하였다.

본 연구에서는 주도로의 우선 통행권을 부여하는 비신호교차로의 좌회전 전용차로 설치 권장 기준을 정립하고자 한다. 설치 권장 기준에 적용할 수 있는 평가 척도는 운영과 안전이다. 운영은 지체, 대기행렬 길이가 대표적인 척도이며, 안전은 사고건수와 사고확률이 적용 가능한 척도이다. McCoy et al.(1994), Potts et al.(2007)에서 우회전 전용차로 설치에 따른 경제적 비용 분석 결과에 의하면, 지체에 따른 경제적 편익은 상당히 미소한 반면, 사고 감소에 따른 경제적 편익은 상당히 큰 것으로 나타났다. 일반적으로 도로설계에서는 교통운영 효율성보다는 안전을 확보하는 차원에서 안전측면에서 각 설계요소별 기준을 정립하는 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 비신호교차로의 좌회전 전용차로 설치 여부에 대한 정량적 기준을 제안하기 위해 위험기반 확률 모델을 적용하는 방안을 고려하였다. 현재까지 적용하고 있는 미국의 AASHTO Green Book(2014)의 2차로도로의 비신호교차로에서 좌회전 전용차로 설치 기준은 대기행렬이론을 토대로 정립된 Harmelink(1967) 모델을 통해 정립되었다.

먼저, 기 수행된 문헌을 고찰하여 비신호교차로의 좌회전 전용차로 설치 기준을 정립하는 데 적절한 확률 모델 이론을 선정하였다. 선정된 모델을 통해 우리나라 도로·교통 여건에 맞는 모델로 재정립한 다음, 각 도로·교통 여건에 따른 확률분포도를 제시하였다. 최종적으로 이러한 확률분포도를 토대로 좌회전 전용차로 설치 기준을 최종적으로 제시하였다.

II. 기존연구 고찰

좌회전 차로 설치 기준 정립 시 적용한 척도(위험확률, 교통량, 경제성)에 따라 구분하여 관련 문헌을 검토하였다.

1. 위험확률 기반 기준

Harmelink(1967)는 위험확률 모델을 토대로 비신호교차로의 좌회전 전용차로 설치 기준을 제시하였다. Harmelink가 정립한 공식과 기준(진행방향 교통량, 대향 교통량, 운영속도, 좌회전교통량 비율 관계도)은 미국의 각 주에서 현재까지 가장 많이 참고하고 있다. 그는 도착과 서비스 교통류 분포도를 음이항 지수분포(Negative Exponential Distribution)를 토대로 지체모델(Queuing model)을 적용하였으며 Harmelink 모델은 다음과 같다.

$$\lambda = L \times (1 - L) \times V_A \times \frac{t_w + t_e}{(2/3)t_A} \text{ (2차로도로인 경우)}, \lambda = V_L \text{ (4차로도로인 경우)} \quad (1)$$

$$\mu = \frac{\text{unblocked time/hr}}{t_1}$$

$$1 - P(0) = \frac{\lambda}{\mu} \leq \alpha$$

여기서,

λ = 좌회전 차량 도착률

μ = 좌회전 서비스율

α = 대기하는 좌회전 차량에 의해 직진 차량이 지체될 확률

L = 좌회전 비율, V_L = 좌회전 교통량(대/시)

V_A = 진행방향 교통량(대/시), V_o = 대향 교통량(대/시)

G_c = 임계 간격수락(초)

t_e = 진행방향 차로에서 좌회전 차로로 진입하는 데 소요되는 시간(초)

t_1 = 좌회전하는 데 걸리는 시간(초)

$$t_w = \frac{3600}{V_o} \times \left(e^{\frac{V_c}{3600} G_c} - \frac{V_o}{3600} G_c - 1 \right)$$

= 좌회전을 위해 대향교통량에서 적절한 간격을 찾는 데 소요되는 시간(초)

Neuman(1985)은 Harmelink(1967)의 적용 원리와 자료를 토대로 2차로와 4차로 도로의 비신호교차로에서 좌회전 전용차로 설치 여부에 대한 가이드라인을 제시하였다. 각 그래프는 운영속도 40, 50, 60mph와 좌회전 교통량 비율 5, 10, 15, 20, 40% 조건을 포함하고 있다. 또한 Oppenlander and Bianchi(1990)는 Harmelink의 기준에 운영속도 30mph와 70mph, 좌회전 교통량 비율 0.5%와 50%를 추가하여 좌회전 전용차로 설치 기준을 보완하였다. Fitzpatrick and Wolf(2003)는 Harmelink 모델의 매개변수 값들(임계간격 수락(5.0초에서 5.5초로 변경), 좌회전 시 걸리는 시간(3.0초에서 4.3초로 변경), 정지상태에서 전용차로 통과 시 시간(1.9초에서 3.2초로 변경))을 현장 관측 조사 결과를 통해 수정하여 30, 50 그리고 70 mph의 운영속도별로 좌회전 전용차로 설치 여부를 판단하는 기준을 제시하였다. 그 밖에, 그들은 다양한 척도를 적용하여 정립한 관련 기준들을

비교·분석하였다. 전반적으로 지체로 기반으로 정립한 기준이 충돌 회피 혹은 안전기반으로 정립한 기준에 비해 낮은 교통량 수준에서 좌회전 전용차로 설치를 권장하지 않는 것으로 나타났다. 그 이유는 지체 감소보다는 사고 감소에 따른 편익비용이 높기 때문인 것으로 나타났다.

그러나 Kikuchi and Chakroborty(1991)은 AASHTO에서 적용하고 있는 Harmelink 모델의 문제점을 지적하고 Harmelink 모델을 기반으로 수정된 모델을 제시하였다. 그들은 지적인 Harmelink 모델의 문제점은 두 가지이다. 첫 번째는 도착률과 서비스율은 같은 단위이어야 하지만 Harmelink 모델의 도착률과 서비스율은 각각 좌회전과 직진 교통량과 관련이 있다는 것이다. 두 번째는 대향 교통량 기반 허용 가능한 임계간격수락을 토대로 좌회전 가능한 총 수이며 실제적으로 허용되는 수보다 많은 좌회전 수가 산정되는 것으로 나타났다. 그 이유는 각 개별 간격 수락에서 좌회전이 불가능한 남은 간격이 좌회전이 가능한 시간의 한 부분으로 합쳐서 계산하기 때문에 과대평가하는 것으로 지적하였다. 따라서 그들은 이런 문제점을 해결하기 위해 다음과 같은 수정된 모델을 제시하였다.

$$\lambda^* = L \cdot V_A \left[1 - e^{-\frac{(1-L)V_A}{3600}(t_w + t_e)} \right] \tag{2}$$

$$\mu^* = (1 - e^{-3\frac{V_o}{3600}}) \cdot V_o \cdot \sum_{n=1}^N n \left(e^{-\frac{V_o}{3600}(G_c + 3(n-1))} \right)$$

여기서,

λ = 직진차량이 뒤따르는 좌회전 차량 도착률

μ = 좌회전 가능한 최대 수

G_s = 추종시간(초)

G_c = 임계 간격수락(초)

N = 하나의 간격당 좌회전 가능한 최대 수

≈ 확률 {차두시간 $\geq G_c + N \cdot G_s$ } ≈ 0

L = 좌회전 비율, V_L = 좌회전 교통량(대/시)

V_A = 진행방향 교통량(대/시), V_o = 대향 교통량(대/시)

t_e = 좌회전 시점에서 진행방향 차로를 벗어나는 데 소요되는 시간(초)

$$t_w = \frac{3600}{V_o} \times \left(e^{\frac{V_o}{3600} G_c} - \frac{V_o}{3600} G_c - 1 \right)$$

= 좌회전을 위해 대향교통량에서 적절한 간격을 찾는 데 소요되는 시간(초)

수정된 모델을 기반으로 대향교통량, 운영속도, 좌회전 비율 조건별 좌회전 가능한 최대 수에 해당되는 진행방향 교통량을 제시하였다. 이의 기준 값은 운영속도 40mph의 경우는 0.02, 50mph의 경우는 0.015, 60mph의 경우는 0.01을 적용하였다. AASHTO의 값과 비교한 결과, AASHTO 값보다 높은 진행방향 교통량 기준값으로 나타났다.

2. 교통량 기반 기준

Modur et al.(1990)는 45mph보다 작은 간선도로에서 좌회전 전용차로 설치 여부를 결정하기 위한 가이드라인을 제시하였다. 이 가이드라인은 시뮬레이션으로부터 분석된 차량의 지체를 기반으로 관련 기준을 정립한

였다. 비록 이 가이드라인에서 제시한 기준을 만족하지 않더라도 좌회전과 관련된 안전문제가 발생한다면 좌회전 전용차로를 설치해야 한다고 주장하였다. Kikuchi and Chakroborty(1991)는 지체와 서비스수준 저하를 척도로 사용하여 대향 교통량과 진행방향 교통량의 관계를 이용하여 좌회전 전용차로 설치 여부를 판단하도록 제시하였다. Harmelink 모델 기반 기준과 비교한 결과, 그들이 정립한 기준이 더 높은 교통량 수준에서 전용차로 설치를 권장하는 것으로 나타났다. Ranade et al.(2007)는 비신호교차로에서 좌회전 전용차로 설치 여부 결정하기 위해 전용차로 설치에 따른 편익을 기반으로 하는 시스템을 개발하였다. 이 시스템에서 고려한 편익은 지체 감소, 정지 비율 감소, 연료 소비 효율성, 배기가스 배출량 감소에 의해 발생하는 비용에 해당된다. 이 시스템은 특정한 도로·교통 여건에 따른 좌회전 전용차로 설치에 따라 발생하는 편익을 예측하기 위해 신경망 기법(Multilayer Perception Neural Network(NNs))을 적용하였다. 이 시스템으로부터 정립된 기준은 Harmelink 모델에 비해 높은 교통량 수준에서 전용차로 설치를 권장하고 있는 것으로 나타났다.

3. 경제성 기반 기준

Fitzpatrick et al.(2010)는 기존 좌회전 전용차로 설치 기준은 한 가지 효과적도(교통운영 혹은 안전)를 기반으로 제시되었기 때문에 경제적으로 정당하기가 부족하다는 점을 지적하였다. 따라서 그들은 교통운영과 안전효과 척도를 고려하여 경제적 타당성(B/C)을 평가할 수 있는 새로운 기준안을 제시하였다. 이러한 경제적 타당성 평가를 통해 다양한 도로·교통여건에서 타당한 좌회전 전용차로 설치 기준을 표와 그래프로 개발하였다.

기 문헌을 검토한 결과, 경제적 편익·비용 기반 관련 기준을 정립하는 것이 더 타당한 것으로 판단된다. 그러나 미국의 도로안전매뉴얼(Highway Safety Manual, HSM)와 같은 교통사고 건수를 분석할 수 있는 국내 매뉴얼 부재로 안전효과를 정량화하기가 어렵기 때문에 본 연구에서는 위험확률 기반으로 관련 기준을 정립하였다.

Ⅲ. 확률모델 정립

2차로도로에 운영되는 비신호교차로의 좌회전 전용차로 설치 기준을 제시하기 위해 기 연구에서 검증된 Kikuchi와 Charkrobory의 위험기반 확률 모델을 적용하였으며 그 확률모델은 식(2)와 같다. 이 모델을 기반으로 우리나라의 임계간격수락, 좌회전 허용 시간 등을 적용하여 2차로도로의 교차로에서 좌회전 전용차로 설치 여부를 판단할 수 있는 기준을 정립하였다.

그러나 Kikuchi와 Charkrobory 모델은 2차로도로에만 적용할 수 있는 모델이다. 특히, 4차로도로의 경우는 좌회전을 위해 감속하거나 대기하고 있는 좌회전 차량을 피해하기 위해 직진 차량이 이웃 차로로 변경이 가능하다. 이를 반영하기 위하여 4차로도로에 적합한 확률모델 재정립이 필요하다. 본 연구에서는 Mounce (1983)와 Yang(2008)이 제시한 개념과 이론을 기반으로 4차로도로에 적용할 수 있는 확률모델을 재정립하였다. 1차로에서 직진 차량이 좌회전 차량을 추종하는 형태의 확률을 산정하기 위해 세 개의 확률적 정의(Probability statements)를 정립하였다. 첫 번째 확률적 정의는 교차로로 접근하는 선두 차량이 좌회전할 확률이다. 이것은 이항과정(Binomial process)에 의해 다음과 같이 평가된다.

$$P_{LT} = \frac{V_{LT}}{V_A} = L \tag{3}$$

여기서,

P_{LT} = 좌회전 차량 확률
 V_{LT} = 좌회전 교통량(대/시)
 V_A = 접근교통량(대/시)
 L = 좌회전 비율

두 번째 확률적 정의는 교차로로 접근하는 선두 차량이 직진 차량인 경우에 대한 확률이며 다음과 같이 평가된다.

$$P_{TH} = 1 - P_{LT} = 1 - L \quad (4)$$

여기서,

P_{TH} = 직진 차량의 확률
 P_{LT} = 좌회전 확률

세 번째 확률적 정의는 대기하는 좌회전 차량의 뒤로 도착하는 직진 차량의 확률과 회전을 위해 대기 혹은 감속하는 좌회전 차량을 회피하기 위해 이웃 차로로 변경이 불가능한 확률이다. 세 번째 확률적 정의는 다음과 같으며, 선두 차량과 추종 차량간 차량 자체의 길이로 인해 제로가 아닌 최소 차두시간을 반영하기 위해 전이된 음지수 분포를 고려하였다.

$$P_{LC} = (1 - e^{-\frac{(t_1 - \tau)(3600 - V_A)}{V_A}}) \quad (5)$$

$$P_{NLC} = (1 - e^{-\frac{(t_2 - \tau)(3600 - V_B)}{V_B}}) \quad (6)$$

여기서,

P_{LC} = 대기하는 좌회전 차량의 뒤로 한 대 이상의 직진 차량이 도착할 확률
 P_{NLC} = 회전을 위해 감속하는 혹은 대기하는 좌회전 차량을 회피하기 위한 이웃 차로로 변경이 불가능한 확률
 t_1 = 좌회전하는 데 걸리는 시간(초)

$$= t_w + t_e$$

t_e = 좌회전 시점에서 진행방향 차로를 벗어나는 데 소요되는 시간(초)

$$t_w = \frac{3600}{V_o} \times (e^{\frac{V_o}{3600} G_c} - \frac{V_o}{3600} G_c - 1)$$

= 좌회전을 위해 대향교통량에서 적절한 간격을 찾는 데 소요되는 시간(초)

V_A = 1차로에서 교차로로 접근하는 진행방향 교통량(대/시)

V_B = 2차로에서 교차로로 접근하는 진행방향 교통량(대/시)

τ = 최소 차두시간(초)

t_2 = 차로변경이 가능한 차두시간(초)

$$= S_1 + S_2 + BRT$$

S_1 = 차로변경하는 차량과 그 차로의 선두 차량간 안전한 차두시간(초)

S_2 = 차로변경하는 차량과 그 차로의 후미 차량간 안전한 차두시간(초)

BRT = 운전자 반응시간(초)

확률적 정의에 의한 각 사건들은 독립적으로 가정하며 복합확률(Compound probability) 이론에 의해 1차로에서 직진 차량이 좌회전 차량을 추종하는 형태의 차량 도착률(λ)은 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \lambda &= P_{LT} \times P_{TH} \times P_{LC} \times P_{NLC} \times V_A \\ &= L \times (1-L) \times (1 - e^{-\frac{(t_1 - \tau)(3600}{V_A} - \tau)}) \times (1 - e^{-\frac{(t_2 - \tau)(3600}{V_B} - \tau)}) \times V_A \end{aligned} \quad (6)$$

따라서, 2차로와 4차로도로의 비신호교차로에서 좌회전 전용차로 설치 권장영역 정립은 대기이론을 바탕으로 다음과 같다. 좌회전 가능한 최대 수는 Kikuchi와 Charkrobory의 모델에서 정립한 공식을 적용하였으며 최대 허용 확률은 AASHTO에서 사용한 값을 고려하였다.(<Table 1> 참조)

$$\begin{aligned} P(k) &= \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \cdot \left(1 - \frac{\lambda}{\mu}\right) \\ 1 - P(0) &= \frac{\lambda}{\mu} \leq \alpha \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,

$P(k)$ = 교차로에 좌회전 차량 k대 있을 확률

$1 - P(0)$ = λ/μ = 교차로에 하나 이상의 좌회전 차량(대기 혹은 서비스)이 있을 확률

μ = 좌회전 가능한 최대 수

$$= (1 - e^{-\frac{V_0}{3600}}) \cdot V_0 \cdot \sum_{n=1}^N n \left(e^{-\frac{V_0}{3600}(G_c + 3(n-1))} \right)$$

α = 최대 허용 확률

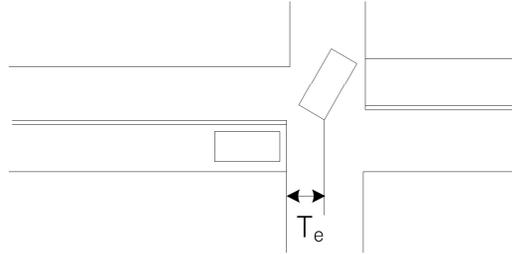
<Table 1> The maximum allowable probabilities(α) depending on approach speeds

Approach speed (km/h)	40	60	80
α	0.025	0.020	0.015

IV. 분석결과

1. 확률모델 적용

본 연구의 위험기반 확률모델의 변수값(G_c , G_s , t_c)들은 다음과 같이 적용하였다. 먼저 임계 간격수락(G_c)과 추종시간(G_s)은 한국도로용량편람에서 2차로와 4차로에 해당되는 제시한 값을 적용하였다. 즉, 2차로의 경우는 G_c 는 4.4초와 G_s 는 2.5초를 적용하였고, 4차로의 경우는 G_c 는 4.9초와 G_s 는 2.5초를 적용하였다. Fig. 1과 같이, 좌회전 시점에서 진행방향 차로를 완전히 벗어나는 데 걸리는 시간(t_c)은 현장에서 관측한 값을 적용하였다. 관측된 지점은 경기도 남양주시에 위치한 양수리교차로에서 비디오카메라로 수집된 133개 데이터를 토대로 t_c 값을 산정하였다. 그 결과는 <Table 2>와 같으며, 본 연구에서는 t_c 값을 1.94초 적용하였다.



(Fig. 1) Measuring time for a left-turning vehicle to clear itself from the advancing stream

(Table 2) Summary of the measured t_e

No. of sample	Mean t_e (sec)	Standard deviation of t_e (sec)	Maximum t_e (sec)	Minimum t_e (sec)
133	1.94	0.69	3.50	0.70

Moon and Kim(2015)에서 2차로도로 대상으로 현장에서 관측·평가한 최소 차두시간 0.99초를 적용하였다. 차로변경이 가능한 임계 차두시간(t_2)은 각 운영속도별 해당되는 정지시거 거리이며, ‘도로구조·시설 기준에 관한 규칙’에서 제시한 운전자 반응시간(BRT) 2.5초와 감속도 $3m/sec^2$ 를 적용하여 각 운영속도별로 t_2 를 산정하였다. 예를 들면, 정지시거 거리가 75m인 운영속도 60km/h인 경우에 대한 t_2 는 다음과 같이 산정된다.

$$= S_1 + S_2 + BRT$$

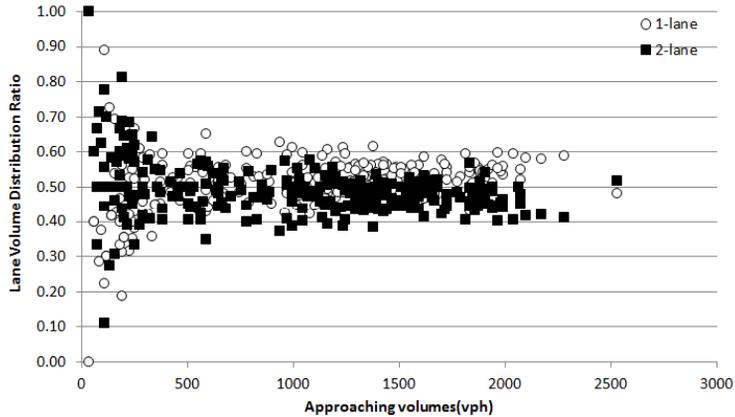
$$= \frac{75}{60 \times 0.277} + \frac{75}{60 \times 0.277} + 2.5 = 11.525\text{초}$$

위 방식을 적용하여 각 운영속도별로 t_{Bc} 값은 9.7초(40km/h), 11.5초(60km/h), 11.5초(80km/h)로 산정하였다.

그 밖에, 4차로의 각 교통량 수준별 각 차로별 교통량 분포 비율은 전체 접근 교통량의 50:50로 가정하였다. 가정한 차로별 교통량 분포부담이 적절한지 판단하기 위해 본 연구에서는 경기도 남양주시에 위치한 삼패사거리의 좌회전·우회전 전용차로가 설치된 한 접근로에서 이동식 검지기(NC-97)를 통해 24시간 동안 차로별 교통량 분포도를 관측한 결과를 분석하였다. 각 차로별 검지기 설치 지점은 교차지점으로부터 상류부 300m이다. 해당 지점의 관측된 교통량의 범위는 30~2600대/시이며, 좌회전 비율은 0~0.80, 우회전 비율은 0~0.30으로 나타났다. <Fig. 2>와 같이, 차로별로 교통량 분포비율은 동일한 것으로 나타났으며 통계적으로 두 차로간 교통량 차이가 있는지를 t-검정(양측 분포)을 수행하였다. 그 결과, 확률 값이 95% 유의수준에서 0.072로 차로간 차이는 통계적으로 유의하지 않는 것으로 나타났다.

통계적으로 차이가 없는 것으로 나타났다. 그러나 제한적으로 수집된 자료를 토대로 검토가 수행되었기 때문에 교차로의 각 차로별 교통량 분포 비율은 추가 조사를 통해 일반적인 경향을 분석할 필요가 있다.

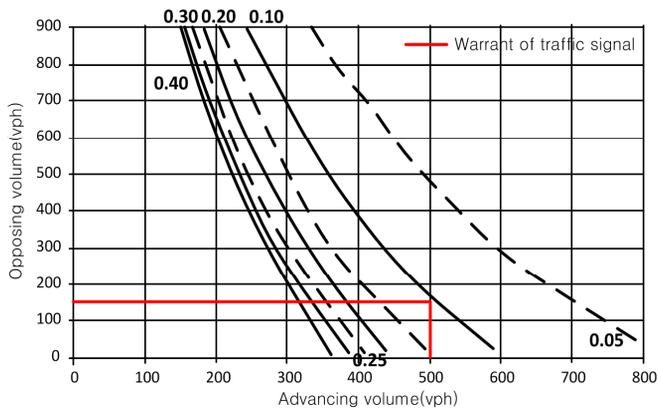
이렇게 산출되거나 가정한 각 확률모델의 매개변수값들을 적용하여 각 2차로도로와 4차로도로에 대해 대향 교통량 수준, 진행방향 교통량, 좌회전 비율에 따라 좌회전 전용차로 설치 권장 영역을 정립하였다.



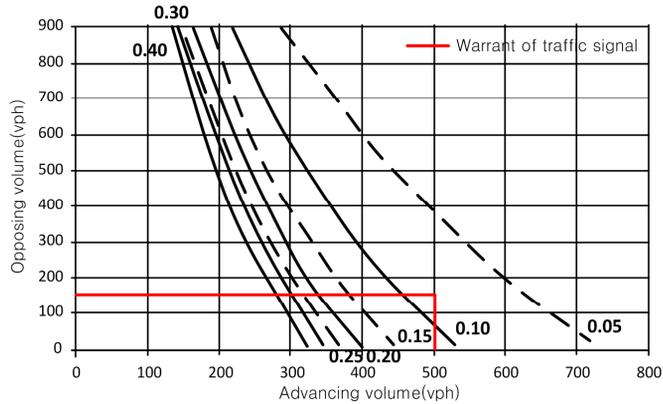
<Fig. 2> Lane volume distributions in an intersection

2. 2차로도로 분석결과

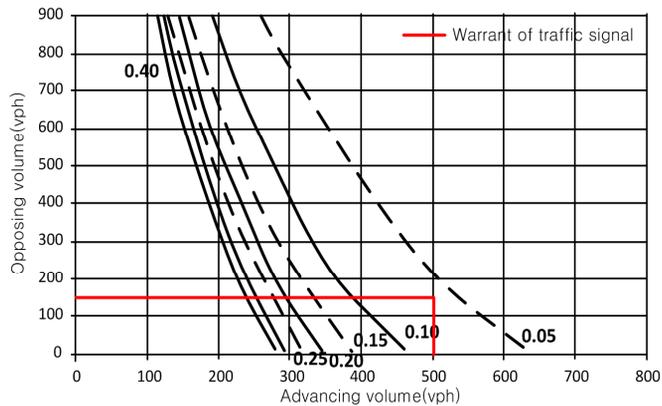
운영속도별로 Kikuchi와 Charkrobory의 위험기반 확률 모델을 적용한 결과는 <Fig. 3 ~ Fig. 4>에서 보여주고 있다. <Fig. 3>은 운영속도 40km/h, Fig. 4는 60km/h, Fig. 5는 80km/h에 해당된다. 각 확률 분포도는 좌회전 비율에 따라 최대 허용 확률에 해당되는 진행방향과 대향 교통량을 보여주고 있다. 본 연구에서 예상한대로 운영속도와 좌회전 비율이 증가할수록 한 대 이상의 좌회전 차량이 대기 혹은 서비스하고 있을 확률에 해당되는 교통량 수준이 낮아지는 경향을 보여주고 있다. 이러한 확률 분포도를 토대로 2차로도로의 비신호 교차로에서 좌회전 전용차로 설치 여부를 판단할 수 있는 자료로 활용이 가능하다고 판단된다. 즉, 각 좌회전 비율과 운영속도별로 제시된 경계선을 기준으로 각 경계선의 우측영역은 좌회전 전용차로 설치 권장 영역에 해당되며 좌측영역은 전용차로 권장하지 않는 영역으로 볼 수 있다. 또한 각 기준별로 경찰청의 교통신호기 설치 기준(주도로/부도로 1차로와 1차로)에 해당되는 교통량과 확률 모델 기반 전용차로 설치 기준을 비교하였다.



<Fig. 3> The probability of one or more left-turn vehicles in a intersection for two-lane highway with 40km/h of operating speed



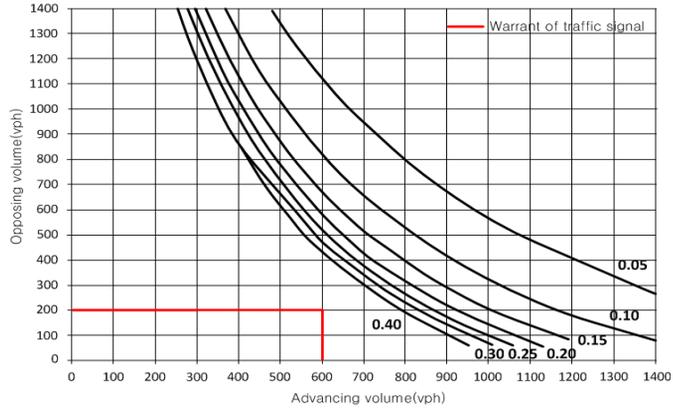
(Fig. 4) The probability of one or more left-turn vehicles in a intersection for two-lane highway with 60km/h of operating speed



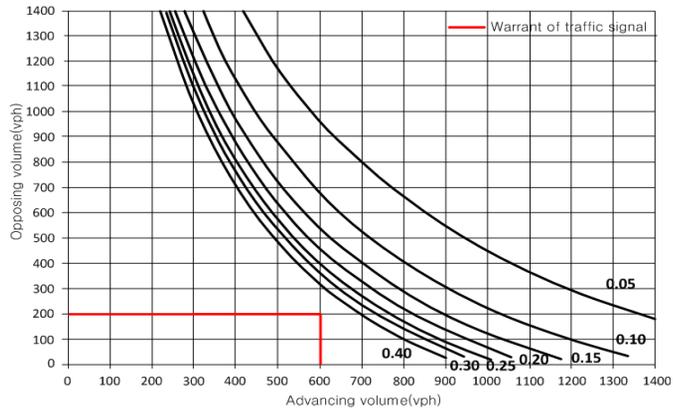
(Fig. 5) The probability of one or more left-turn vehicles in a intersection for two-lane highway with 80km/h of operating speed

3. 4차로도로 분석결과

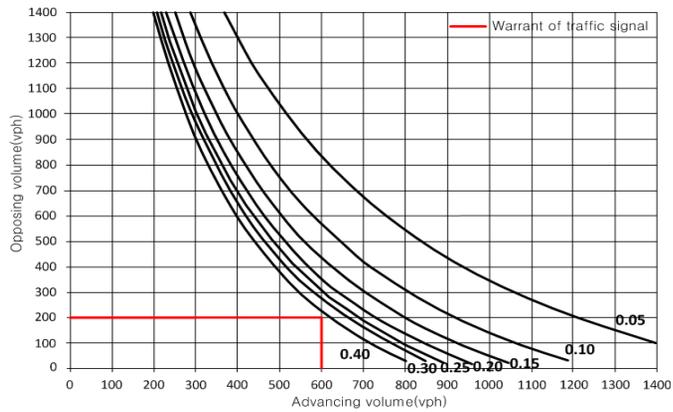
본 연구에서 정립한 4차로도로의 비신호교차로에서 한 대 이상의 좌회전 차량이 있을 확률 모델을 적용한 결과는 <Fig. 6~Fig. 8>에서 보여주고 있다. <Fig. 6>은 운영속도 40km/h, Fig. 7은 60km/h, Fig. 8은 80km/h에 해당된다. 각 확률 분포도는 좌회전 비율에 따라 최대 허용 확률에 해당되는 진행방향과 대향 교통량을 보여주고 있다. 2차로도로와 마찬가지로, 운영속도와 좌회전 비율이 증가할 수록 한 대 이상의 좌회전 차량이 대기 혹은 서비스하고 있을 확률에 해당되는 교통량 수준이 낮아지는 경향을 보여주고 있다. 이러한 확률 분포도를 토대로 4차로도로의 비신호교차로에서 좌회전 전용차로 설치 여부를 판단할 수 있는 자료로 활용이 가능하다고 판단된다. 즉, 각 경계선의 우측영역은 좌회전 전용차로 설치 권장 영역에 해당되며 좌측영역은 전용차로 권장하지 않는 영역으로 볼 수 있다. 또한 기준별로 경찰청의 교통신호기 설치 기준(주도로/부도로 2차로와 2차로)에 해당되는 교통량과 확률 모델 기반 전용차로 설치 기준을 비교하였다.



〈Fig. 6〉 The probability of one or more left-turn vehicles in a intersection for four-lane highway with 40km/h of operating speed



〈Fig. 7〉 The probability of one or more left-turn vehicles in a intersection for four-lane highway with 60km/h of operating speed



〈Fig. 8〉 The probability of one or more left-turn vehicles in a intersection for four-lane highway with 80km/h of operating speed

V. 결 론

본 연구는 선두 좌회전 차량과 추종하는 직진차량 간 충돌사고의 위험 확률을 기반으로 좌회전 전용차로 설치 여부에 대한 기준을 2차로도로와 4차로도로에 대해 각각 제안하였다. 2차로도로의 경우는 Kikuchi와 Charkrobory의 위험기반 확률 모델을 적용하였으며, 4차로도로는 Yang과 Mounce가 제시한 위험확률 개념을 기반으로 차로 변경 가능성 등 4차로도로에 맞게 재정립하였다. 또한 각 모델은 변수 값(간격수락, 추종시간, 운전자 반응시간 등)들은 국내 조건을 반영하였다. 이런 모델을 기반으로 각 좌회전 차량 비율과 운영속도별 최대 허용 확률에 해당되는 진행방향과 대향 교통량을 평가하였다. 이를 통해 2차로도로와 4차로도로에서 좌회전 전용차로 설치 판단을 할 수 있는 기준을 제시하였다.

비록 승용차에 비해 트럭은 운전자 위치가 높아서 트럭의 운전자는 승용차의 운전자에 비해 훨씬 더 멀리 볼 수 있기 때문에 트럭에 요구되는 긴 제동거리를 어느정도 보상할 수 있다고 판단하였지만, 트럭과 관련된 운영과 비율, 간격수락, 추종시간 등에 따라 미치는 영향정도를 정량화하여 확률모델에 고려할 필요가 있다. 또한 4차로도로에서 교차로로 접근하는 차로별 교통량 분포도와 확립이 필요하며, 4차로도로에 대한 일반화된 차두시간 모델 정립도 요구된다. 이를 통해 2차로와 4차로도로에 대해 더 일반화된 확률모델로 확장할 필요가 있다. 또한 본 연구에서는 2차로와 4차로도로를 대상으로 좌회전 전용차로 설치기준안을 제시하였지만, 4차로 초과 도로에서 비신호로 운영되는 교차로가 가능성이 있기 때문에 이에 대한 기준도 요구될 수 있다.

그 밖에, 본 연구에서 제시한 위험확률 모델 기반 기준은 도로노면에 설치하여 운영중인 검지기 혹은 자동차, 특히 자율자동차의 검지기를 통해 교통량, 차두시간 등 모델의 변수들을 관측하여 본 연구에서 정립한 모델을 기반으로 각 차량별로 실시간 잠재적 좌회전 위험정도를 평가하여 운전자에게 안전여부 정보를 제공하는데도 활용이 가능하다고 판단된다.

REFERENCES

- A Policy on Geometric Design of Highways and Streets(2011), AASHTO.
- Fitzpatrick K. and Wolf T.(2003), "Left-lane installation guidelines," *2nd Urban Street Symposium*, Transportation Research Board.
- Harmelink M. D.(1967), "Volume warrants for left-turn storage lanes at unsignalized grade intersections," *Highway Research Record*, 211, pp.1-18.
- Kikuchi S. and Chakroborty P.(1991), "Analysis of left-turn-lane warrants at unsignalized T-intersections on two-lane roadways," *Transportation Research Record*, 1327, pp.80-88.
- Korean Highway Capacity Manual(2013), Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- Korean Intersections Design Guideline(2004), Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- Korean National Police Agency's Traffic Accident Statistics, <http://www.police.go.kr>, 2017.05.20.
- McCoy P. T. and Bonneson J. A.(1996), "Volume warrants for free right-turn lanes at unsignalized intersections on rural two-lane highways," *Transportation Research Record*, 1523, Transportation Research Board, pp.83-90.
- McCoy P. T., Bonneson J. A., Atallah S. and Eitel D. S.(1994), "Guidelines for right-turn lanes on urban roadways," *Transportation Research Record*, 1445, Transportation Research Board, pp.130-137.
- Moon J. and Kim D.(2014), "A Study on headway distribution models of rural two lane roads,"

- International of Journal Highway Engineering*, vol. 16. no. 1. pp.49-56.
- Mounce J. M.(1983), "Influence of arterial access control and driveway design on energy consumption," *Transportation Research Record*, 901, Transportation Research Board, pp.42-46.
- Oppenlander J. C. and Bianchi J. C.(1990), "Guidelines for left-turn lanes," *ITE 1990 Compendium Paper*, Institute of Transportation Engineers.
- Potts I. B., Ringert J. F., Harwood D. W. and Bauer K. M.(2007), "Operational and safety effects of right-turn deceleration lanes on urban and suburban arterials," *Transportation Research Record*, 2023, Transportation Research Board, pp.52-62.
- Ranade S., Sadek A. W. and Ivan J. N.(2007), "Decision support system for predicting benefits of left-turn lanes at unsignalized intersections," *Transportation Research Record*, 2023, pp.28-36.
- Regulation on Geometric Design/Facilities Standards of Roads(2013), Minister of Land, Infrastructure and Transport.
- Yang J.(2008), "Risk-based volume warrants for free right-turn lanes on two-lane roadways," *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, vol. 134. no. 4. pp.155-162.