

접근속도와 상충지점 기반 동적황색신호시간 산정 연구

A Study on the Calculation of Dynamic Yellow Signal Time Based on Approach Speed and Collision Points

손 현 호* · 성 상 훈** · 이 철 기*** · 이 현 수****

* 주저자 : 도로교통공단 경기도지부 과장
 ** 교신저자 : 한국도로공사 세종안성건설사업단 단장
 *** 공저자 : 아주대학교 교통시스템공학과 교수
 **** 공저자 : (주)하나텍시스템 CIO

Hyunho Son* · Sanghoon Sung** · Choulki Lee*** · Hyeon Soo Lee****

* Senior Researcher, Dept. of Traffic Safety & Facility, Korea Road Traffic Authority
 ** Director, Dept. of Korea Expressway Corporation Sejonganseong Construction Office
 *** Professor, Dept of Transportation Eng, Ajou University
 **** CIO, Dept of Hanatech system

† Corresponding author : Sang Hoon Sung, sungsh@ex.co.kr

Vol. 22 No.4(2023)
 August, 2023
 pp.14~34

pISSN 1738-0774
 eISSN 2384-1729
<https://doi.org/10.12815/kits.2023.22.4.14>

Received 26 July 2023
 Revised 8 August 2023
 Accepted 13 August 2023

© 2023. The Korea Institute of
 Intelligent Transport Systems. All
 rights reserved.

요 약

본 연구의 목적은 신호교차로의 적정황색신호시간 산정을 위한 것으로, 황색신호시간 산정 시 접근속도와 교차로 폭에 따른 연관성을 알아보고 신호 운영에 따라 변화되는 교차로 내 상충과 딜레마구간을 최소화하여 교차로 운영 안전성을 확보하는 데 있다. 이를 위해 5개 교차로의 6824건의 자료를 수집 분석하였다. 주요 연구결과는 첫째, 차로별 개별차량 접근속도를 분석하고 방향별 상충을 고려해 교차로 폭을 정의하였다. 둘째, 기존 산식의 문제점을 보완한 접근속도와 상충 지점 기반 다중회귀모형식을 개발하였다. 셋째, 개발 산정식을 통해 접근속도와 교차로 폭에 따른 적정황색신호시간 적용 기준표를 제시하였으며,와의 관계를 이용해 황색신호시간과 딜레마구간을 교차 분석할 수 있는 산정표를 제시하여 황색신호시간 변화에 따른 딜레마 길이의 안전성을 판단하는 방안을 제시하였다.

핵심어 : 황색 신호시간, 교차로 상충, 딜레마구간, 교차로 안전성

ABSTRACT

The purpose of this study was to calculate the appropriate yellow-signal time for intersections, to find out the relationship between the approach speed and intersection width when calculating the time, and to secure safety by minimizing conflicts and dilemma sections in intersections that change according to the signal operation. For this purpose, 6,824 data points from 5 intersections were collected and analyzed. The main results of the study are as follows. First, the approach speed of individual vehicles in different lanes was analyzed, and the width of an intersection was defined by considering the conflict in each direction. Second, we developed a multiple regression model based on the approach speed and conflict points, which compensated for the problems of an existing formula. Third, a standard table is presented for applying the appropriate yellow-signal time according to the approach speed and intersection width based on a development formula. A method is also presented to determine the safety of the length of the dilemma according to the change in the yellow-light time by presenting a calculation table that can cross-analyze the yellow-signal time and a dilemma section using the relationship.

Key words : Yellow light time, Intersection conflict, Dilemma section, Intersection safety

I. 서 론

1. 연구 배경

법규 위반별 교통사고 통계는 신호 위반, 중앙선 침범, 안전운전의무 불이행 등 20개 항목으로 구분하고 있다. 이 중 안전운전의무 불이행은 전체 사고의 55.68%를 차지하고 있으나 포괄적이고 추상적인 의무 규정으로 사고원인 분석이 정확한 사고는 신호 위반이 11.08%로 가장 높다. 신호 교차로 운영은 물리적 요건과 교통량 등 환경적 요건을 고려하여 녹색, 황색, 적색의 세 가지 신호로 차량을 통제하여 교차로 운영 안전성을 확보한다. 특히 황색신호시간은 신호 위반사고와 관련성이 매우 높다. 경찰청은 교통신호기 설치 업무편람에 교차로 폭과 접근속도에 따른 황색신호시간을 규정하고 있다. 그러나 교차로 통과에 필요한 적정황색시간 보다 짧은 황색신호시간 적용 시 신호 위반, 교차로 내 사고 등의 원인이 된다. 또한, 황색신호시간이 적정요구 시간보다 적었을 때 딜레마구간이 발생한다. 딜레마구간과 황색신호시간은 교차로 운영 안전성과 관련된 중요한 시간적, 공간적 기준으로 속도와 시간, 차량 이동 거리에 따라 변화된다. 따라서, 황색신호시간 산정 시 속도는 개별차량의 접근속도를 시간 기준에 따라 평균한 값을 사용해야 하나 자료수집 한계로 통상적으로 접근속도 대신 운영속도를 기준으로 계산된 황색신호시간을 적용하고 있다. 교차로 접근 차량의 개별속도를 측정하여 시간경계로 구분하고 평균접근속도를 산정하여 황색신호시간 산정 시 이용한다면 현실 상황과 가까운 적정황색신호시간을 산정할 수 있을 것이다. 최근 딥러닝을 이용한 교통정보 수집시스템은 교차로에 접근하는 모든 차량의 속도 자료수집이 가능해졌다. 따라서, 시간대별 개별차량 접근속도, 황색신호시간에 따라 변화되는 딜레마구간을 고려하여 교차로 현황에 맞는 황색신호시간 산정과 딜레마구간 최소화 방법에 관련한 연구가 필요하다.

2. 연구 목적 및 필요성

본 연구의 목적은 교차로 접근로별 차로 운영 현황을 고려하여 실제 접근속도를 분석하고, 신호 운영에 따라 발생하는 차량 간 상충 지점에 관련하여 교차로 내 상충 소거 지점을 기준으로 황색신호시간 산정에 필요한 교차로길이를 재정의하여 딜레마구간을 최소화하는 방안에 관련한 연구를 수행하고자 한다. 또한, 기존 황색신호시간 산정식과 다른 방법으로 황색신호시간 결정식 모형을 개발하고 통계적으로 유의성이 있는지 검증하고, 황색신호시간과 딜레마구간 최소화 혼동행렬을 제시하고자 한다. 기존 연구는 대부분 황색신호시간이 신호 위반과 교통사고에 미치는 영향을 분석하거나 교차로 통과 시 필요한 실제 황색시간과 적정황색시간을 비교 분석한 연구가 대부분이었다. 그러나 개별차량의 접근속도와 차로별 접근속도, 신호 운영에 따른 교차로 상충 지점의 직접적인 관계를 고려하여 교차로길이를 재정의하고 황색신호시간과 딜레마구간 최소화의 관계를 증명한 연구는 없었다. 따라서, 연구를 통해 황색신호시간에 변화에 따라 발생하는 딜레마구간이 교차로 운영 안정성에 미치는 영향을 알아볼 필요성이 있다.

3. 연구의 차별성

신호 교차로 사고는 운전자 요인과 환경적 요인으로 구분할 수 있으며, 안정적 교차로 운영을 위해 황색신호시간과 전적색시간을 사용한다. 황색신호시간은 감속도, 인지 반응시간, 정지율, 접근속도, 교차로길이, 딜레마구간 등의 다양한 내외부적 영향을 받으며, 적정황색신호시간을 산정하기 위해 딜레마구간과 황색신호시간의 관계를 증명하고 개선하기 위한 연구들이 지속되고 있다. 그러나 교차로길이 산정은 물리적 환

경에 의한 요소로 정의하고 있으며 신호 운영에 따라 발생하는 이동류 방향을 고려한 상충 발생지점 기준에 따른 교차로길이 정의와 차로별 접근속도를 고려한 딜레마구간 최소화 관련 연구는 선행되지 않은 점에 착안하여 신호 운영에 따라 이동류 상충이 해소되는 지점을 기준으로 교차로길이를 재정의하고 차로별 접근속도에 따라 변화되는 딜레마구간을 최소화할 수 있는 황색 신호시간 매트릭스 기준표를 제안하는데 연구의 차별성이 있다.

II. 선행연구 고찰

1. 황색신호시간관련 연구

Gazis et al.(1960)에 의한 황색 신호식이 현재까지 사용되고 있으며, 딜레마 존을 신호 교차로에서 황색 신호가 시작된 경우 임계 감속도로 정지할 수도 없고, 황색 신호 종료 전 교차로를 완전히 통과할 수도 없는 시간 또는 구간으로 “Amber Light Dilemma”라고 정의, 최소황색 신호시간을 Equation(1)과 같이 정의하였다.

$$\tau = \delta + \frac{v_0}{2a} + \frac{W}{v_0} \dots\dots\dots (1)$$

Park et al.(2003)은 좌회전 교통류를 위한 황색 신호시간 산정 모형식을 딜레마구간 개념을 적용하여 정립하는데 주안점을 두고 교차로의 실제 황색 시간과 방법으로 산정한 황색 신호시간을 비교 분석하여 Equation(2)에 의해 타당성을 입증하였다.

$$\tau_L = \delta + \frac{v_{L1}}{\sqrt{a(a-a_L)} + a - a_L} + \frac{\sqrt{v_{L1}^2 + 2a + S - v_{L1}}}{a_+} \dots\dots\dots (2)$$

Lee and Lee(2014)은 교차로 안전성을 제고를 위해, 접근속도분포에 기초하여 차량이 통과할 때 경험할 것으로 기대되는 딜레마구간 길이를 산정하여 이를 위험도 평가 수치로 활용하고자 하였으며, 모형적용 결과 대체로 모든 접근로에서 딜레마구간이 발생, 이는 황색 신호시간이 잘못 적용된 결과인 것으로 분석하여 황색 신호시간을 재조정하여 딜레마구간의 크기 줄이는 방안과 단속카메라를 운영하는 방안에 관하여 연구하였다.

Lee et al.(2003)은 황색 신호현시에서 교차로 접근 차량의 운전자 행태에 관한 연구의 필요성을 제기하였으며, 운전자의 행태 즉, 정지 감속률과 운전자의 인지 반응시간, 정지율에 따른 딜레마구간의 범위를 도출하였으며, ITE(1994)에서 제시하는 값보다 크게 사용할 것을 제시하였다.

경찰청의 교통신호기 설치·관리 업무편람에서는 황색 신호시간은 5초를 넘지 않는 범위 안에서 전적색 시간을 활용하여 사용할 것을 Equation(3)과 같이 규정하고 있다.

$$Y = tb + \frac{v}{2a} + \frac{w+l}{v_0} - ts \dots\dots\dots (3)$$

Moon and Fred(2003)은 딜레마구간의 개념은 시간에 따라 결정되는 연속거리와 남은 거리의 정의를 통해

동적 딜레마구간을 정의하였으며 접근 차량의 속도와 가감속 비율의 변화로 인해 딜레마구간이 변화된다고 정의하였다.

$$D_{DZ} = X_S(0) - X(t') - X_c(t') = 0, 1, \dots, T_D \dots\dots\dots (4)$$

$$X_S(0) = \Delta T_v(0) + \frac{v^2(0)}{s[d(0) + G_g]} + D \dots\dots\dots (5)$$

$$X(t') = X(t'-1) + \frac{1}{2}[v(t'-1) + v(t')] \dots\dots\dots (6)$$

$$X_C(t') = \frac{1}{2} \sum_{t=t'}^{T_D} [v(t-1) + v(t)] \dots\dots\dots (7)$$

여기서, $X(t')$: stopping distance (m) at time t $X_c(t')$: continuation (passing) distance (m) at time t'
 ΔT_v : perception reaction time of drivers(s) $v(t')$: vehicle speed at time t'(m/sec)
 $d(t')$: deceleration rate at time t'(m/s²) G_g : denotes the acceleration rate of gravity (m/s²)
 D : indicates the distance from stop bar to gate (m) T_D : gate delay(s)

2. 신호교차로 안전성관련 연구

Jang et al.(2009)은 검지 속도를 기반으로 딜레마구간을 파악하여, 차량이 딜레마구간의 시작점에 도착하는 시점에서 녹색시간 동안 황색 신호시간을 연장하여 딜레마구간을 제거하도록 유도하는 신호 제어 알고리즘을 제안하였다. Park and Bae(2017)는 신호운영과 교통사고의 관계에서 전적색신호시간 운영에 따른 사고 감소 효과를 분석하기 위해 청주시 37개 신호 교차로를 대상으로 비교그룹 방법을 사용한 결과 사고 건수는 20%, 사상자 수는 28%, 전 적색 신호시간 운영에 따른 사고 건수 감소는 6~35%로 평가하였다.

Park and Bae(2017)은 신호교차로의 안전성 판단을 위한 연구에서 물리 조건 및 운영 조건의 범주별 요인에 대한 분석결과, 신호 위반사고에 가장 많이 영향을 미치는 요소 중 하나는 황색 신호시간과 이와 연관성이 있는 변수는 딜레마구간 크기와 접근속도 등으로 해석하였다. 연구 대상 교차로의 약 98%에서 실제 운영 중인 황색 신호시간이 계산식에 의한 황색 신호시간보다 짧으며, 그 평균값은 3.5초에 이르는 것으로 분석하였으며, 적정황색 시간의 제공이 다양한 신호 운영상의 제약조건 때문에 어렵다면, 딜레마 존을 주행하는 운전자에게 대한 경고 서비스나 딜레마 존 회피 제어의 적용을 통해 신호 위반사고를 예방 또는 감소시키는 기술적 방안의 고려가 필요하다고 할 수 있다고 정의하였다.

Ⅲ. 자료수집 및 분석

1. 자료 수집

자료수집의 공간적 범위는 부천시 신흥로에 있는 5개 교차로의 주도로 접근로를 대상으로 하였으며, 오전 첨두 조사대상 교차로는 교육청사거리, 꿈빛도서관사거리, 대학길사거리로 08시부터 30분간 자료를 수집하

였다. 오후 침두 조사대상 교차로는 약대교회사거리, 전화국사거리이며, 수도권 제1 순환고속도로와 경인고속도로를 통해 유입된 교통량이 길주로와 신흥로를 통해 주요 생활 밀집 지역인 신중동, 부천동, 심곡동, 중동의 주거중심 지역으로 집중되어 침두시가 늦게 형성되는 특성이 있어 오후 침두 조사는 20시부터 30분간 자료를 수집하였다. 수집자료는 <Table 1>의 속성과 같이 정의하였다.

<Table 1> Collected data property definition

Traffic volume properties	Number of vehicles passing the stop line	
Direction properties	Left turn only=2, Straight lane=1, Combination of straight and right turns=2 Right turn only=3,	
Speed properties	Measuring speed when passing the stop line	
Vehicle type (6 Types)	Sedan=1, Less than 9 seater	SUV=2, Less than 9 seater
	Truck=3, Less than 9 seater	Van=4, More than 9 seater and less than 15 seater
	Bus=5, More than 15	Motorcycle=6, Motorcycle

기술통계 및 빈도분석 결과, 수집표본 수는 오전 4918대, 오후 1906대이며, 차종 유효데이터는 오전 4905대, 오후 1879대이며, 속도 유효데이터는 오전 4858대, 오후 1879대로 분석되었다. 평균속도는 오전 24.48km/h, 오후 32.36km/h로 오후 침두시 속도가 7.88km/h 높게 나타났다. 차종 비율은 Sedan 이 67.05%와 60.94%로 가장 높았다. 차종별 속도는 이륜차를 제외하면 오전 침두시 Van의 속도가 25.31km/h로 가장 높았으며, 오후 침두는 SUV의 속도가 35.34km/h로 가장 높게 분석되었다. 과속 비율은 오후 침두시 승용차가 4.54%로 가장 높았으며, SUV, Truck 순이었다. 오전 침두시는 이륜차 외 과속 데이터가 존재하지 않았다. 정규성 검증은 왜도와 첨도를 사용하였으며, Snedecor and Cochran(1980)의 이론에 의해 정규성이 확인되었다.

<Table 2> Descriptive statistics result

		N	Missing Value	Avg	Standard Deviation	Skewness	Kurtosis
AM	Speed	4858	60	24.48	10.72	0.42	0.34
	Vehicle	4905	13				
PM	Speed	1879	27	32.36	20.84	1.33	3.72
	Vehicle	1879	27				

<Table 3> Frequency analysis result

	AM				PM			
	n	Ratio(%)	Avg speed(km/h)	Over speed(%)	n	Ratio(%)	Avg speed(km/h)	Over speed(%)
Sedan	3289	67.05	24.79		1145	60.94	32.01	4.54
SUV	683	13.92	23.85		279	14.85	35.34	8.24
Truck	386	7.87	22.15		236	12.56	31.67	4.24
Van	350	7.14	25.31		88	4.68	29.85	2.27
Bus	130	2.65	19.90		57	3.03	26.22	3.51
Motorcycle	67	1.37	33.51	1	74	3.94	29.91	4.05
Total	4905	100			1879	100		

2. 교차로 분석

교차로 분석은 Road Condition, Traffic Condition, Signal Condition, Lane Condition으로 분류하고 Road Condition은 차로 수와 교차로 간 거리, 교차로길이, 교차로 타입으로 구분하였다. Traffic Condition은 운영속도와 단속장비 유무로 세분화하였으며, Signal Condition은 신호주기와 황색시간으로 세분화하였다. Lane Condition은 유턴, 직진, 좌회전, 우회전, 직우 겸용차로 운영으로 구분하였다. 교차로 간 거리는 남→북, 북→남으로 구분하여 거리를 측정하였으며, 측정기준은 출발점 정지선부터 도착점의 제2신호등이 위치한 횡단보도 끝까지를 측정한 거리로 정의하였다.

<Table 4> Intersection analysis indicator definition

Division	Detail
Road Conditions(RC)	N(Number of Lanes), D(Intersection Distance), Ti(Traffic island), W(Intersection Width(m)), T(Intersection Type)
Traffic Condition(TC)	Os(Operating speed), TES(Traffic Enforcement System)
Signal Condition(SC)	C(Signal Cycle(sec)), Y(Yellow Time(sec))
Lane Condition(LC)	Lu(U-turn), Lt(Left turn), Th(Straight), Rt(Right turn), Th+Rt(Straight+Right turn)

<Table 5> Intersection analysis result

		N	D	Ti	W	T	Os	TES	C	Y	Lc
Yakdae Church	NB→SB	5			59.8	4	50		180	3	Lu+Lt1, Th3, Th+Rt1
	SB→NB	4	332		56.6					3	Lu+Lt1, Th2, Th+Rt1
Doseogwan	NB→SB	5	339		61.8	4	50	√	180	3	Lu+Lt1, Th3, Th+Rt1
	SB→NB	4	202		62.4					3	Lt1, Th3, Rt1
Gyoyug jiwoncheong	NB→SB	5	202	√	36.8	4	50		180	3	Lu+Lt1, Th3, Th+Rt1
	SB→NB	4		√	37.4					3	Lu+Lt1, Th2, Th+Rt1
Daehaggil T-junction	NB→SB	4			39.9	3	50		170	3	Lu+Lt1, Th2, Th+Rt1
	SB→NB	3	280		39.9					3	Th2, Rt1
Jeonhwagug	NB→SB	4	279		60	4	50		180	3	Lu+Lt1, Th2, Th+Rt1
	SB→NB	5			60					3	Lu+Lt1, Th3, Rt1

3. 교통량 및 속도 분석

교차로별 속도 분석은 결측값 외 데이터 클리닝을 통해 이상치를 제거하였다. 이상치 데이터 정의는 주행 패턴이 불분명한 이륜차, 차종 및 속도 미확인 데이터, 현시 종료 후 대기 차량의 데이터, 유턴 차량으로 정의하였다. 또한, 교차로 신호주기와 현시를 고려하여 대학길삼거리 41초, 교육지원청사거리 78초, 도서관사거리 72초, 전화국사거리 72초, 약대교회사거리 80초 이상의 차두시간 차량은 이상치 데이터로 처리하였다. <Table 4>는 차로별 교통량 및 속도 데이터 분석결과이다. 분석결과, 오전 교통량은 4753대, 오후 교통량은 1593대로 오전 첨두시가 2.98배 높았다. 방향별 교통량 비율은 직진 85.69%, 좌회전 4.77%, 우회전 9.53%로 직진비율이 상대적으로 높았으며, 방향별 평균속도는 직진 28.47km/h, 좌회전 19.63km/h, 우회전 21.14km/h로 좌회전이 가장 낮았다. 직진 평균속도는 오전 24.69km/h, 오후 34km/h로 오후 첨두시가 9.31km/h 높게 분석되었다.

교차로별 직진속도는 약대교회사거리 SB→NB가 42.3km/h로 가장 높았으며, 꿈빛도서관 SB→NB가 19.58km/h로 가장 낮았다. 교차로별 직진비율은 꿈빛도서관사거리가 92.86%로 가장 높았고, 전화국사거리가 69.42%로 가장 낮았다. 좌회전은 교육지원청사거리 NB→SB가 13.15km/h로 가장 낮았으며, 약대교회사거리 NB→SB가 26.64km/h로 가장 높았다. 약대교회사거리와 꿈빛도서관사거리는 좌회전보다 우회전 속도가 더 높게 나타났으며, 전체교차로 좌회전 속도는 직진속도의 68.79%로 분석되었다.

<Table 6> Traffic volume and speed analysis results by intersection

	Direction	Traffic Volume		Mean Speed(km/h)		Ratio(%)		T _H Avg speed(km/h)		
		N→S	S→N	N→S	S→N	N→S	S→N	N→S	S→N	
Yakdae Church crossroad	L _T	20	41	26.64	25.68	3.57	11.55	39.88	42.33	
	T _{H1}	186	124	44.63	44.86	33.16	34.93			
	T _{H2}	175	141	46.72	40.12	31.19	39.72			
	T _{H3}	124	41	43.74	41.93	22.1	11.55			
	T _H +R _T	T _H	21		24.41		3.74			
		R _T	35	8	27.81	33.55	6.24			2.25
Kkumbit Library Intersection	L _T	34	25	21.71	13.8	4.91	2.99	23.4	19.58	
	T _{H1}	231	277	26.3	20.62	33.38	33.17			
	T _{H2}	211	273	21.76	19.12	30.49	32.69			
	T _{H3}	176	211	23.2	19	25.43	25.27			
	T _H +R _T	T _H	39		22.37		5.64			
		R _T	1	49	29.2	21.04	0.14			5.87
Education Support Office Intersection	L _T	56	25	13.15	19.53	7.84	2.91%	21.81	25.27	
	T _{H1}	219	314	20.59	26.41	30.67	36.55			
	T _{H2}	203	292	21.24	25.1	28.43	33.99			
	T _{H3}	183	202	22.72	24.31	25.63	23.52			
	T _H +R _T	T _H	34		22.68		4.76			
		R _T	19	26	11.27	18.33	2.66			3.03
College Road three-way intersection	L _T	19		13.8		3		28.84	33.55	
	T _{H1}	251	336	30.56	34.07	39.65	32.94			
	T _{H2}	290	342	30.14	33.03	45.81	33.53			
	T _H +R _T	T _H	72		25.82		11.37			
		R _T	1	342	7.52	33.03	0.16			33.53
Telephone Office crossroad	L _T	40	43	20.19	22.22	13.07	11.59	27.83	24.04	
	T _{H1}	75	109	28.23	28.94	24.51	29.38			
	T _{H2}	129	113	27.97	26.23	42.16	30.46			
	T _{H3}	11	33	27.28	16.94	3.59	8.89			
	R _T	51	73	18.48	11.19	16.67	19.68			

IV. 연구방법론

1. 교차로 폭과 접근속도 정의

황색신호시간 결정 관련 변수는 차량의 접근속도, 인지반응시간, 감속도, 교차로 폭, 차량 길이가 있으며, 교차로 폭(W)은 국내외 관련 문헌 및 자료를 고찰한 결과 다양한 기준이 있음을 알 수 있었다. Gazis et al.(1960)은 교차로 폭에 대해 Stopping line과 Clearing line로 정의하였으며, 접근로의 정지선부터 교차로 통과 후 만나는 정지선까지로 정의하였다. Lee et al.(2007)은 딜레마존을 고려한 신호 위반 단속 허용범위에 관한 연구에서 교차로 횡단거리 W를 접근로 도로 폭으로 정의하였으며, 차량의 길이 L을 $W=w+L$ 로 정의하여 도로 폭에 포함하여 정의하였다. 도로교통법에서는 “교차로”란 둘 이상의 도로가 교차하는 부분으로 정의하고 있다. 통상적 의미의 교차로 폭은 정지선이 있다면 정지선을 넘어서는 부분 또는 중앙선 끝 지점을 교차로 폭이라고 볼 수 있으며, 중앙선이 없는 도로라면 차로의 휘어진 지점부터 교차로의 시작으로 볼 수 있다.

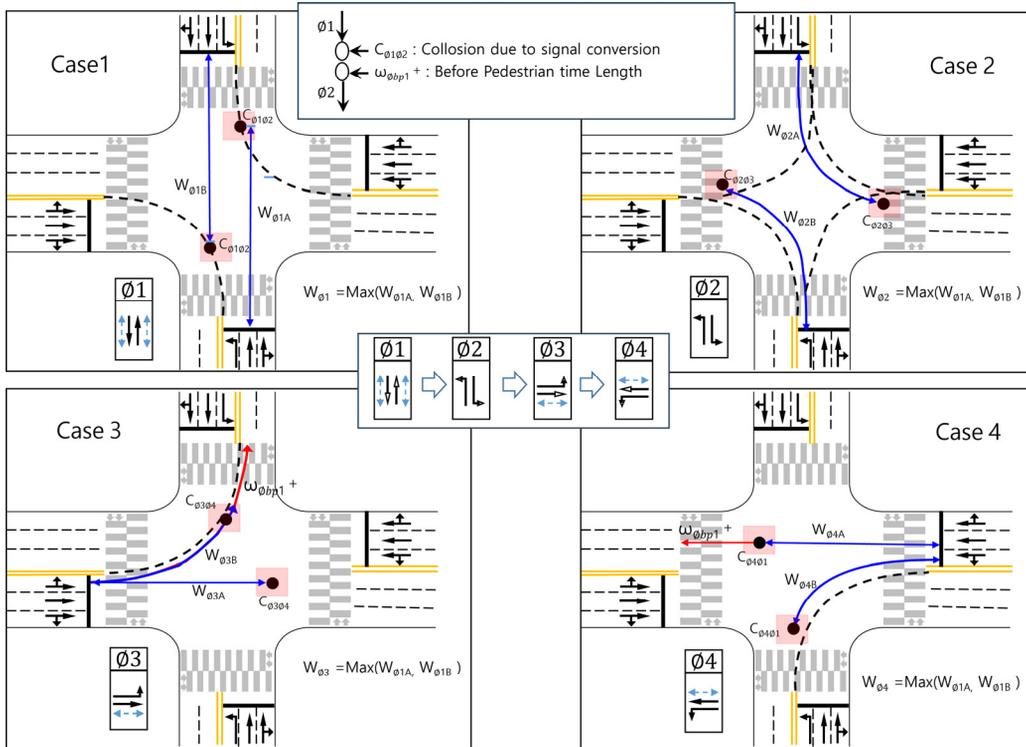
교차로 폭은 물리적 관점에 의한 정의를 주로 다루게 되지만, 신호 통제와 차로 운영 관점을 고려해 교차로 상충을 벗어나는 지점을 분석하였다. 교차로 안정성의 핵심은 교차로 내에서 발생 되는 교차지점의 상충, 보행자와의 상충 등을 효율적이고 안전하게 처리할 수 있도록 하는 것으로, 상충의 형태, 와 상충이 발생 위치 및 시기, 그리고 상충 교통류의 평균속도 등을 상세히 분석하여 가장 적절한 시간을 부여하여 운전자가 한 지점에서 되도록 단순한 의사결정 과정을 거치도록 하여야 한다. 즉, 물리적 요소와 운영요소를 고려한 교차로 폭이 적정황색시간 산정에 반영되어야 한다.

기존 문헌에서는 교차로 폭을 정지선부터 정지선까지 또는 접근로 도로경계 연장선으로 정의하였으나 본 연구를 통해 신호 현시 순서에 의해 이동류 방향성이 결정되고 이동류 상충이 발생하는 지점을 고려한 운영 관점의 교차로 폭으로 재정의하였다. 이상적인 교차로 폭은 이동류가 교차하는 지점에서 발생하는 상충이 해소되는 지점과 신호에 따라 교차로 통과 시 다음 현시가 오기 전 교차로 내 잔류 차량이 소거되는 지점으로 보는 것이 타당하다. 따라서, 황색시간에 차량이 주행하는 이동 거리를 <Fig. 2>과 같이 정의하였으며, 정지선 통과 차량이 상충을 벗어난 지점 위치를 이동 거리의 중점이라 정의하였다. 다시 말하면, 상충이 발생하는 지점에서 차량의 후미가 통과하는 지점이 곧 이동 거리의 끝 지점이다. 상충 지점 판단 기준은 신호 운영에 따라 발생하는 현시 이동류와 다음 현시 이동류 관계를 고려하여 신호 운영 현황과 교차로 구조, 차로 현황을 분석하여 차로별 상충 지점을 분석하고 서로 다른 교통류 상충은 이동 거리가 가장 긴 것을 기준으로 교차로 폭을 정의하였다. <Fig. 1>과 <Fig. 2>는 교차로 폭을 결정하는 단계와 황색시간에 따른 딜레마 존의 관계를 나타낸다.

속도는 도로시설 규모를 결정하는 설계속도와 설계확인속도가 있으며, 도로 운영 차원의 운영속도와 평균 주행속도로 분류하며, 일반적으로 황색신호시간 적용 시 운영속도를 기준으로 사용하고 있다. 운영속도는 자유로운 차량흐름이나 노면 습윤상태에서 승용차 속도를 측정하여 오름차순으로 정렬 후 85%째에 해당하는 속도를 정의하며, 안전운전에 필요한 합리적 속도의 최댓값을 나타내는 속도로 제한속도 규정과 현장 도로여건에 적합한 운영계획 수립 시 사용된다. 그러나 신호 통제에 의한 도심지 교차로 속도는 교통량과 내부마찰 등으로 인해 자유로운 차량흐름이라 볼 수 없다. 속도 분석결과 실제 접근속도는 운영속도와 차이가 있으며, 설계속도와 운영속도의 편차가 10km/h 이상이면 설계여건 변화, 운영여건 변화 등 검토가 필요하다.

<Table 6>에 따르면, 대상 교차로 평균속도는 약대교회사거리를 제외하면 운영속도와 10km/h 이상 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서, 황색신호시간은 개별차량 관점이 아닌 전체 차량의 실제 평균 주행 속도를 적용해야 한다. 운영속도는 변화되는 속도 특성을 반영하지 않고 일괄적 운영을 위해 사용한 백분위 속도

로 개별차량 접근속도 분석을 통해 전체 차량 관점의 실제 평균 주행 속도를 사용하는 것이 타당하다.



<Fig. 1> Conflict due to intersection width redefinition

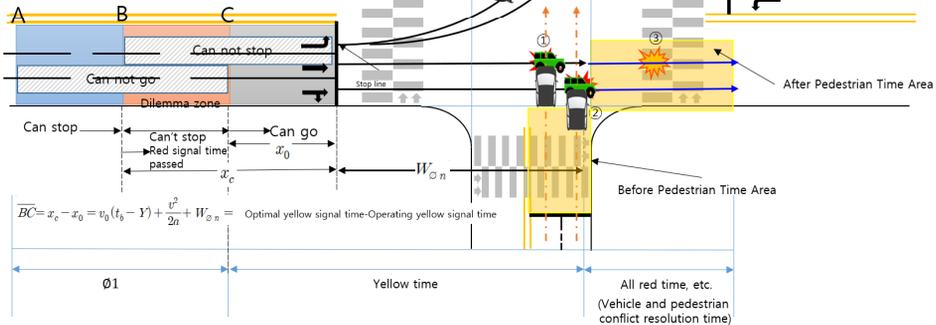
X_0 : Distance length during actual yellow signal time
 X_c : Stopping distance at maximum deceleration
 (Stop Distance=Free Running Distance+Braking Distance)

$W_{\varnothing n}$: Intersection length

- ① : Straight + Straight Collision
- ② : Straight + Turn right Collision
- ③ : Car + Pedestrian Collision
- ④ : Turn left + Straight Collision

$$x_0 = v_0 Y - (W_{\varnothing 3,4})$$

$$x_c = v_0 t_b + \frac{v_0^2}{2a}$$



<Fig. 2> Yellow signal time and dilemma section

<Table 7> Intersection width recalculation based on points of conflict

	direction	W(m)		W _{∅n} (m)		W _{∅n} - W(%)		v ₀ (km/h)		v ₀ (m/sec)		
		N→S	S→N	N→S	S→N	N→S	S→N	N→S	S→N	N→S	S→N	
Yakdae Church crossroad	L _T	49	32	42	24	-14.29	-25	26.64	25.68	7.40	7.13	
	T _{H1}	60	57	48	46	-20	-19.30	44.63	44.86	12.40	12.46	
	T _{H2}	60	57	48	46	-20	-19.30	46.72	40.12	12.98	11.14	
	T _{H3}	60	57	48	46	-20	-19.30	43.74	41.93	12.15	11.65	
	T _{HR}	60		48		-20		24.41		6.78		
Kkumbit Library Intersection	L _T	52	60	40	45	-23.08	-25	21.71	13.80	6.03	3.83	
	T _{H1}	62	62	48	54	-22.58	-12.90	26.30	20.62	7.31	5.73	
	T _{H2}	62	62	48	54	-22.58	-12.90	21.76	19.12	6.04	5.31	
	T _{H3}	62	62	48	54	-22.58	-12.90	23.20	19.00	6.44	5.28	
	T _{HR}	62		48		-22.58		22.37		6.21		
Education Support Office Intersection	L _T	41	41	24	26	-41.46	-36.59	13.15	19.53	3.65	5.43	
	T _{H1}	37	30	30	30	-18.92	0	20.59	26.41	5.72	7.34	
	T _{H2}	37	30	30	30	-18.92	0	21.24	25.10	5.90	6.97	
	T _{H3}	37	30	30	30	-18.92	0	22.72	24.31	6.31	6.75	
	T _{HR}	37		30		-18.92		22.68		6.30		
college road three-way intersection	L _T	40		26		-35		13.80		3.83		
	T _{H1}	40	40	31	38	-22.50	-5	30.56	34.07	8.49	9.46	
	T _{H2}	40	40	31	38	-22.50	-5	30.14	33.03	8.37	9.18	
	T _{HR}	40		31		-22.50		25.82		7.17		
telephone office crossroad	L _T	57	53	40	31	-29.82	-41.51	20.19	22.22	5.61	6.17	
	T _{H1}	60	60	46	42	-23.33	-30	28.23	28.94	7.84	8.04	
	T _{H2}	60	60	46	42	-23.33	-30	27.97	26.23	7.77	7.29	
	T _{H3}	60	60	46	42	-23.33	-30	27.28	16.94	7.58	4.71	
avg.			51.09	49.61	39.43	39.89	22.92	18.04	26.30	26.77	7.32	7.44

<Table 7>은 <Fig. 1>과 <Fig. 2>에 따라 재정의된 교차로 폭과 기존교차로 폭의 차이를 정리한 것으로 기존교차로 폭은 정지선에서 정지선까지를 기준으로 하여 측정된 것이다. 분석결과에 따르면, 재산정된 교차로 폭은 기존 대비 NS 방향은 22.92%가 줄었으며, SN 방향은 18.04%가 감소 되었다. 가장 많은 감소율은 전화국사거리 L_T로 NS 방향은 29.82%로 나타났으며, SN 방향은 41.51%로 나타났다.

V. 황색신호시간 산정 모형 개발

1. 황색신호시간 산정 절차

황색신호시간 산정 시 변수는 임계 감속도(5.0m/s²)와 정지인지반응(1.0초) 및 출발인지반응시간(1.5초), 차량 길이(5m)가 있으나 가장 큰 영향을 미치는 교차로 폭과 접근속도를 변수로 현실 적용이 가능한 회귀모형

을 개발하고자 한다. 모형식 정립을 위한 전제 조건은 다음과 같다. 황색신호 인지 후 교차로에 접근하여 상충 지점을 벗어나기까지 이동 거리는 <Fig. 2>의 진행 방향 차량 신호시간의 이동 거리+ $W_{\varnothing n}$ 이 된다.

이를 관계식으로 정리하면,

$$\frac{x_0 + W_{\varnothing n}}{V} \leq Y \dots\dots\dots (8)$$

가 되며, 황색신호시간 Y 는 교차로 접근 차량이 상충 지점을 벗어나는데 걸리는 시간으로 식(2)보다 커야 한다. 따라서 황색신호는 접근속도에 따라 다른 값을 갖는다.

교차로 정지선을 기준으로 x_0 구간은 황색신호시간에 이동할 수 있는 길이로 교차로를 안전하게 통과할 수 있는 거리를 의미한다. x_0 는 차량이 주어진 황색신호시간 Y 동안 주행하는 거리로 다음과 같다.

$$x_0 = v_0 Y - (W_{\varnothing n}) \dots\dots\dots (9)$$

여기서, v_0 는 접근속도, t_b 는 운전자의 인지반응시간, Y 는 황색시간, $W_{\varnothing n}$ 은 교차로 상충을 완전히 벗어나는 지점까지 길이로 정의된다. x_c 는 접근 차량이 교차로에 진입하기 전 최대 감속도로 정지선에 안전하게 정지할 수 있으며 최대 가속도로 적색신호에 교차로를 통과하게 되는 구간의 거리로 다음과 같다.

$$x_c = v_0 t_b + \frac{v_0^2}{2a} \dots\dots\dots (10)$$

Equation 8과 9의 관계는 $x_0 \geq x_c$ 인 경우 정지선에 정지할 수 있는 조건이며, 반대로 $x_0 \leq x_c$ 인 경우 급정지 또는 급가속을 유발하게 된다. 딜레마 존은 $x_0 < x < x_c$ 의 조건일 때 발생하며, 딜레마 존 길이는 Equation 11과 같다. 딜레마 길이는 적정황색시간과 실제황색시간의 차에 접근속도를 곱하여 산정한다.

$$D = x_c - x_0 = v_0(t_b - Y) + \frac{v^2}{2a} + W_{\varnothing n} = (\text{적정황색시간} - \text{실제황색시간}) \times v_0 \dots\dots\dots (11)$$

신호교차는 딜레마 길이가 최소일 때 안정성이 높아진다. 즉, $x_o = x_c$ 일 때 이상적 조건이며, x_c 는 최대 감속도로 정지선에 정지하는 최소 길이로 x_o 와 차이를 최소화하는 것이 중요하다. x_o 는 교차로를 접근 중인 차량이 등속도 주행 시 주어진 황색신호시간에 교차로를 통과할 수 있도록 주어진 시간에 대한 주행거리로 이미 정지선 통과 차량은 $Y_{\min} = \frac{W_{\varnothing n}}{v_o}$ 의 조건으로 교차로를 통과하지만 Y_{\min} 적용 시 정지선에 접근 중인 차량은 정지거리를 확보할 수 없으므로 현실적으로 Y_{\min} 을 적용할 수 없다. 따라서, 정지선에 접근 중인 차량은 $Y = Y_{\min} + Y_a$ 의 조건일 때 등속도로 안전하게 교차로를 통과할 수 있다. 여기서 Y_a 에 해당하는 주행거리가 x_0 이며, $x_0 = v_0 Y - (W_{\varnothing n})$ 가 된다. x_0 과 x_c 의 관계에서 딜레마 존은 $Y_{\max} = x_c + W_{\varnothing n} < x_c$ 인 조건일 때 발생한다. 반대의 조건 $Y_{\max} = x_c + W_{\varnothing n} > x_c$ 인 경우 옵션 구간이 발생하여 황색신호시간 내 정지선에 정지하거나 교차로를 통과할 수 있다. 따라서, 적정 황색신호시간 산정식은 $v_o Y - W_{\varnothing n} = v_o t_b + \frac{v^2}{2a}$ 일 때이며, 이를 관계식으로 정리하면 Equation 12와 Equation 13과 같다.

$$Y_D = \frac{v_o t_b + \frac{v^2}{2a} + W_{\emptyset n}}{v_o} \dots\dots\dots (12)$$

$$x_{d0} = Y_D - W_{\emptyset n} \dots\dots\dots (13)$$

여기서, $Y_D = DynamicYellowtime$, x_{d0} 는 Y_D 를 적용한 x_{d0}

<Table 8>은 Equation 12에 W , $W_{\emptyset n}$, V_{85} , V_r 을 적용하여 변화에 따른 황색신호시간 산정결과이다. case 1은 기존교차로 폭과 운영속도 50km/h를 기준으로 산정한 결과이며, case 2는 기존교차로 폭과 실제 접근속도를 적용한 결과이다. case 3은 재정의 교차로 폭과 차로별 접근속도를 적용하여 산정한 결과다. ‘case 1 - case 2’에서 가장 큰 차이의 평균을 보이는 교차로는 꿈빛도서관 SN으로 평균 8.31초 차이 났으며, 차로별 차이는 L_T 에서 11.47초로 가장 크게 나타났다. 반면, 약대교회사거리 SN은 평균 1.93초 차이가 났으며, 차로별 가장 작은 차이는 NS방향 T_{H2} 로 1.35초로 나타났다. ‘case 1 - case 3’에서 가장 큰 차이의 평균을 보이는 교차로는 꿈빛도서관 SN으로 평균 6.22초의 차이가 존재하였으며 차로별 차이는 L_T 에서 7.55초로 가장 크게 나타났다. 가장 작은 평균의 차이는 약대교회사거리 SN으로 평균 0.94초 차이가 났으며, 차로별 가장 작은 차이는 약대교회사거리 NS의 T_{H2} 로 0.43초였다. ‘case 1’으로 산정한 경우 안정적 신호 운영이 가능할 것으로 보이거나 실제 접근속도를 적용한 case 2와 case 3의 결과에서는 모두 큰 차이를 보여 교통류 변화에 따라 적절한 시간 확보가 필요한 것으로 분석되었다. 분석결과 일부 접근로는 신호변환시간 최대 규정인 9초 이상이 필요한 것으로 나타났다. 필요한 최소의 황색신호시간이 부족한 경우 x_o 의 위치가 정지선 후방이 아닌 교차로 내위치하게 되어 연속하여 진행되는 차량은 사고 위험에 노출된다. 계산된 황색신호시간 결과는 운영속도를 기준으로 신호 운영 시 기준 적용이 가능하나 실제 접근속도 기반으로 운영할 경우 기준 이상의 황색신호시간을 요구하게 된다. 즉, 운영속도 기준이 아닌 실제 접근속도를 기준으로 산정시 황색신호시간이 증가하는 것을 알 수 있다. 황색시간과 속도, 교차로 폭의 관계는 부(-)의 관계로 속도가 낮을수록, 교차로 폭이 클수록 황색신호시간을 길어지는 것으로 분석되었다.

<Table 8> Yellowtime calculation result according to the application formula

		case 1		case 2		case 3		case1-case2		case1-case3	
		Y		Y_D		Y_D					
		W, V_{85}		W, V_r		$W_{\emptyset n}$, V_r					
		NS	SN	NS	SN	NS	SN	NS	SN	NS	SN
Yakdae Church crossroad	L_T	4.78	3.55	8.36	6.20	7.42	5.08	-3.58	-2.65	-2.64	-1.53
	T_{H1}	5.57	5.35	7.08	6.82	6.11	5.94	-1.51	-1.47	-0.54	-0.59
	T_{H2}	5.57	5.35	6.92	7.23	6.00	6.24	-1.35	-1.88	-0.43	-0.89
	T_{H3}	5.57	5.35	7.15	7.06	6.17	6.11	-1.58	-1.71	-0.6	-0.76
	T_{HR}	5.57		10.53		8.76		-4.96		-3.19	
	Avg.								-2.60	-1.93	-1.48
Kkumbit Library Intersection	L_T	4.99	5.57	10.23	17.04	8.24	13.12	-5.24	-11.47	-3.25	-7.55
	T_{H1}	5.71	5.71	10.22	12.40	8.30	11.00	-4.51	-6.69	-2.59	-5.29
	T_{H2}	5.71	5.71	11.86	13.20	9.55	11.70	-6.15	-7.49	-3.84	-5.99

		case 1		case 2		case 3		case1-case2		case1-case3	
		Y		Y_D		Y_D					
		W, V_{85}		W, V_r		$W_{\varnothing n}, V_r$					
		NS	SN	NS	SN	NS	SN	NS	SN	NS	SN
	T_{H3}	5.71	5.71	11.27	13.28	9.09	11.76	-5.56	-7.57	-3.38	-6.05
	T_{HR}	5.71		11.60		9.35		-5.89		-3.64	
	Avg.							-5.47	-8.31	-3.34	-6.22
Education Support Office Intersection	L_T	4.20	4.20	12.59	9.10	7.94	6.34	-8.39	-4.9	-3.74	-2.14
	T_{H1}	3.91	3.41	8.04	5.82	6.82	5.82	-4.13	-2.41	-2.91	-2.41
	T_{H2}	3.91	3.41	7.86	6.00	6.67	6.00	-3.95	-2.59	-2.76	-2.59
	T_{H3}	3.91	3.41	7.49	6.12	6.38	6.12	-3.58	-2.71	-2.47	-2.71
	T_{HR}	3.91		7.50		6.39		-3.59		-2.48	
	Avg.							-4.73	-3.15	-2.87	-2.46
college road three-way intersection	L_T	4.13		11.82		8.17		-7.69		-4.04	
	T_{H1}	4.13	4.13	6.56	6.17	5.50	5.96	-2.43	-2.04	-1.37	-1.83
	T_{H2}	4.13	4.13	6.61	6.28	5.54	6.06	-2.48	-2.15	-1.41	-1.93
	T_{HR}	4.13		7.29		6.04		-3.16		-1.91	
	Avg.							-3.94	-2.10	-2.18	-1.88
telephone office crossroad	L_T	5.35	5.06	11.72	10.20	8.69	6.64	-6.37	-5.14	-3.34	-1.58
	T_{H1}	5.57	5.57	9.44	9.27	7.65	7.03	-3.87	-3.7	-2.08	-1.46
	T_{H2}	5.57	5.57	9.50	9.96	7.70	7.49	-3.93	-4.39	-2.13	-1.92
	T_{H3}	5.57	5.57	9.68	14.22	7.83	10.40	-4.11	-8.65	-2.26	-4.83
	Avg.							-4.57	-5.47	-2.45	-2.45

<Table 9>와 <Table 10>은 <Table 8>의 결과를 Equation 9와 10에 따라 산정된 x_0, x_c 결과를 나타낸다. ‘case 4’는 ‘ W, Y_r, V_{85} ’ 조건으로 산정한 x_0 결과로 대부분 음의 값으로 나타났다. 즉, 운영 중인 황색신호시간은 교차로를 통과할 수 있는 시간이 절대적으로 부족한 것을 의미하며, 교차로 폭보다 황색신호시간이 부족한 것으로 분석되었다. ‘case 5’는 ‘ W, Y_D, V_r ’ 조건으로 산정한 x_0 결과로 교육지원청 L_T 를 제외하고 모두 양(+)로 나타났으나 일부 접근로에서 9초 이상의 Y가 나타났다. ‘case 6’은 ‘ $W_{\varnothing n}, Y_D, V_r$ ’ 조건으로 산정한 x_0 결과로 모두 양(+)의 값으로 나타났으며, 이때 황색신호시간은 꿈빛도서관 T_{H1} 과 T_{H2}, T_{HR} 를 제외하고 모두 9초 이하로 적용 가능한 것으로 분석되었다. 분석결과를 종합해 보면, 교차로 폭 기준과 접근로 속도에 따라 x_0 값이 변화되었으며, 부족한 황색신호시간을 적용한 경우 x_0 의 위치가 교차로 내부에 위치하였으며, 재정 의된 교차로의 경우 적용 가능한 황색신호시간이 산정되었으며, ‘case 4와 5’에 비해 x_0 값이 증가한 것을 확인할 수 있다. 공간적 해석을 하면 x_0 의 위치에서 접근 중인 차량은 ‘최소황색신호시간+여유황색신호시간’ 동안 만큼의 이동 거리를 확보하여 안전하게 교차로를 통과할 수 있다. 즉, x_0 는 양(+)의 값을 가져야 하며 x_0 는 ‘0’보다 큰 $v_0 Y \geq W_{\varnothing n} + \alpha$ 의 조건이 성립되어야 한다. x_0 가 음(-)의 값으로 나타나면 교차로 진입은 불가능하며, 상충 발생 가능성은 증가한다.

<Table 9> x_0 Calculation result

		case 4		case 5		case 6		case4-case5		case4-case6	
		x_0		x_{d0}		x_{d0}					
		W, Y, V ₈₅		W, Y _D , V _r		W _{∅n} , Y _D , V _r					
		NS	SN	NS	SN	NS	SN	NS	SN	NS	SN
Yakdae Church crossroad	L _T	-12.33	4.67	7.88	7.22	12.88	12.22	-20.21	-2.55	-25.21	-7.55
	T _{H1}	-23.33	-20.33	22.77	22.99	27.77	27.99	-46.10	-43.32	-51.10	-48.32
	T _{H2}	-23.33	-20.33	24.82	18.56	29.82	23.56	-48.15	-38.89	-53.15	-43.89
	T _{H3}	-23.33	-20.33	21.91	20.21	26.91	25.21	-45.24	-40.54	-50.24	-45.54
	T _{HR}	-23.33		6.38		11.38		-29.71		-34.71	
	Avg.								-37.88	-31.33	-42.88
Kkumbit Library Intersection	L _T	-15.33	-23.33	4.67	0.30	9.67	5.30	-20.00	-23.63	-25.00	-28.63
	T _{H1}	-25.33	-25.33	7.64	4.01	12.64	9.01	-32.97	-29.34	-37.97	-34.34
	T _{H2}	-25.33	-25.33	4.70	3.13	9.70	8.13	-30.03	-28.46	-35.03	-33.46
	T _{H3}	-25.33	-25.33	5.60	3.06	10.60	8.06	-30.93	-28.39	-35.93	-33.39
	T _{HR}	-25.33		5.08		10.08		-30.41		-35.41	
	Avg.								-28.87	-27.46	-33.87
Education Support Office Intersection	L _T	-4.33	-4.33	-0.01	3.37	4.99	8.37	-4.32	-7.70	-9.32	-12.70
	T _{H1}	-0.33	6.67	3.99	7.72	8.99	12.72	-4.32	-1.05	-9.32	-6.05
	T _{H2}	-0.33	6.67	4.38	6.83	9.38	11.83	-4.71	-0.16	-9.71	-5.16
	T _{H3}	-0.33	6.67	5.29	6.31	10.29	11.31	-5.62	0.36	-10.62	-4.64
	T _{HR}	-0.33		5.27		10.27		-5.60		-10.60	
	Avg.								-4.91	-2.14	-9.91
college road three-way intersection	L _T	-3.33		0.30		5.30		-3.63		-8.63	
	T _{H1}	-3.33	-3.33	10.70	13.42	15.70	18.42	-14.03	-16.75	-19.03	-21.75
	T _{H2}	-3.33	-3.33	10.38	12.59	15.38	17.59	-13.71	-15.92	-18.71	-20.92
	T _{HR}	-3.33		7.32		12.32		-10.65		-15.65	
	Avg.								-10.50	-16.34	-15.50
telephone office crossroad	L _T	-20.33	-16.33	3.75	4.98	8.75	9.98	-24.08	-21.31	-29.08	-26.31
	T _{H1}	-23.33	-23.33	8.99	9.50	13.99	14.50	-32.32	-32.83	-37.32	-37.83
	T _{H2}	-23.33	-23.33	8.81	7.59	13.81	12.59	-32.14	-30.92	-37.14	-35.92
	T _{H3}	-23.33	-23.33	8.32	1.92	13.32	6.92	-31.65	-25.25	-36.65	-30.25
	Avg.								-30.05	-27.58	-35.05

<Table 10> x_c and $x_c - x_0$ Calculation result

		case 7		case 8		case 9		case 10		case 11	
		x_c		x_c		$x_c - x_0$		$x_c - x_0$		$x_c - x_0$	
		V ₈₅		V _r		case 7-case 4		case 8-case 5		case 8-case 6	
		NS	SN	NS	SN	NS	SN	NS	SN	NS	SN
Yakdae Church crossroads	L _T	33.18	33.18	12.88	12.22	45.51	28.51	5.00	5.00	0.00	0.00
	T _{H1}	33.18	33.18	27.77	27.99	56.51	53.51	5.00	5.00	0.00	0.00
	T _{H2}	33.18	33.18	29.82	23.56	56.51	53.51	5.00	5.00	0.00	0.00

		case 7		case 8		case 9		case 10		case 11	
		x_c		x_c		$x_c - x_0$		$x_c - x_0$		$x_c - x_0$	
		V_{85}		V_r		case 7-case 4		case 8-case 5		case 8-case 6	
		NS	SN	NS	SN	NS	SN	NS	SN	NS	SN
	T_{H3}	33.18	33.18	26.91	25.21	56.51	53.51	5.00	5.00	0.00	0.00
	T_{HR}	33.18		11.38		56.51		5.00		0.00	
	Avg.						54.31	47.26	5.00	5.00	0.00
Kkumbit Library Intersection	L_T	33.18	33.18	9.67	5.30	48.51	56.51	5.00	5.00	0.00	0.00
	T_{H1}	33.18	33.18	12.64	9.01	58.51	58.51	5.00	5.00	0.00	0.00
	T_{H2}	33.18	33.18	9.70	8.13	58.51	58.51	5.00	5.00	0.00	0.00
	T_{H3}	33.18	33.18	10.60	8.06	58.51	58.51	5.00	5.00	0.00	0.00
	T_{HR}	33.18		10.08		58.51		5.00		0.00	
	Avg.						56.51	58.01	5.00	5.00	0.00
Education Support Office Intersection	L_T	33.18	33.18	4.99	8.37	37.51	37.51	5.00	5.00	0.00	0.00
	T_{H1}	33.18	33.18	8.99	12.72	33.51	26.51	5.00	5.00	0.00	0.00
	T_{H2}	33.18	33.18	9.38	11.83	33.51	26.51	5.00	5.00	0.00	0.00
	T_{H3}	33.18	33.18	10.29	11.31	33.51	26.51	5.00	5.00	0.00	0.00
	T_{HR}	33.18		10.27		33.51		5.00		0.00	
	Avg.						34.31	29.26	5.00	5.00	0.00
college road three-way Intersection	L_T	33.18		5.30		36.51		5.00		0.00	
	T_{H1}	33.18	33.18	15.70	18.42	36.51	36.51	5.00	5.00	0.00	0.00
	T_{H2}	33.18	33.18	15.38	17.59	36.51	36.51	5.00	5.00	0.00	0.00
	T_{HR}	33.18		12.32		36.51		5.00		0.00	
	Avg.						36.51	36.51	5.00	5.00	0.00
telephone office crossroads	L_T	33.18	33.18	8.75	9.98	53.51	49.51	5.00	5.00	0.00	0.00
	T_{H1}	33.18	33.18	13.99	14.50	56.51	56.51	5.00	5.00	0.00	0.00
	T_{H2}	33.18	33.18	13.81	12.59	56.51	56.51	5.00	5.00	0.00	0.00
	T_{H3}	33.18	33.18	13.32	6.92	56.51	56.51	5.00	5.00	0.00	0.00
	Avg.						55.76	54.76	5.00	5.00	0.00

2. 황색신호시간 산정 모형 개발

황색신호시간은 교차로 폭과 접근속도에 따라 변화된다. 교차로 폭이 일정한 경우 접근속도가 커질수록 황색신호시간은 작아지며, 속도가 일정한 경우 교차로 폭이 커질수록 황색신호시간은 커진다. 즉, 교차로 폭과는 양의 선형관계에 있으며, 접근속도와는 음의 선형관계에 있다. 따라서, 접근속도와 교차로 폭을 독립변수로 선정하고 황색신호시간을 종속변수로 설정하여 다중회귀 분석하였다. 다중회귀분석은 2개 이상의 독립변수와 하나의 종속변수의 관계를 분석하는 통계기법으로 독립변수가 종속변수에 미치는 영향을 통계적으로 유의미한 결과인지 증명하며 이들 관계를 나타내는 함수식에 따라 결괏값 예측이 가능하다.

Equation (8)~(13)의 $v_r, W_{\emptyset n}$ 이 황색신호시간에 미치는 영향을 검증하고 어떠한 관계로 변화하는지 검증하기 위해 다중회귀분석을 실시하였다. 설명변수 선택방법은 모든 설명변수를 한 번에 투입하는 입력에 의한 선택으로 시행하였다. 회귀모형 유의성 검증은 ANOVA분석 결과를 통해 검증하였으며, 검정 통계량 $F = 134.680$, 유의확률 $p = 0.000$ 으로 유의수준 0.05보다 작아 유의수준 5% 하에서 회귀모형은 유의하였다. 회귀

모형의 적합성을 파악하기 위해 모형 요약의 $adj.R^2 = 0.924$ 로 1에 매우 가까우며 회귀선에 의해 설명되는 비율은 92.4%의 설명력을 나타냈다. 잔차의 독립성 여부를 판단하기 위한 Durbin-Watson의 통계량 결과를 보면, 통계량은 1.830으로 2에 가까워 잔차의 독립성이 있는 것으로 나타났으며, 자기 상관을 무시하므로 회귀 분석모형의 설명력을 확보하였다. 계수표의 접근속도 $\beta = -0.538(p < .001)$ 로 황색신호시간에 유의한 영향을 미치고 있었다. β 부호는 부(-)적이므로 접근속도가 1 증가하면 황색신호시간이 -0.538만큼 감소한다. 교차로 폭의 $\beta = 0.134(p < .001)$ 로 통계적으로 유의하게 나타났으며 β 부호는 정(+)적으로 교차로 폭이 1 증가하면 황색신호시간도 0.198만큼 증가하는 것으로 나타났다. 접근속도와 교차로 폭 중 어떤 조건이 황색신호시간에 영향을 더 미치는지 상대적 영향력을 알아보기 위해 표준화 계수의 β 값을 통해 비교해 보았다. 접근속도 $\beta = -1.024$, 교차로 폭 $\beta = 0.941$ 로 접근속도가 상대적으로 높은 영향력을 미친다고 할 수 있다. 공선성 결과는 $Tol = 0.729 > 0.1$, $VIF = 1.372 < 10$ 으로 공선성 문제가 없는 것으로 나타났다.

<Table 11> Regression model validity

model	unstandardized coefficient		standardized coefficient	t(p)	TOL	VIF
	B	SE	β			
(constant)	6.072	.343		17.704		
v_r	-.538	.036	-1.024	-14.875***	0.729	1.372
$W_{\varnothing n}$.134	.010	.941	13.667***	0.729	1.372
F(p)	134.680***					
$adj.R^2$	0.924					
Durbin-Watson	1.830					

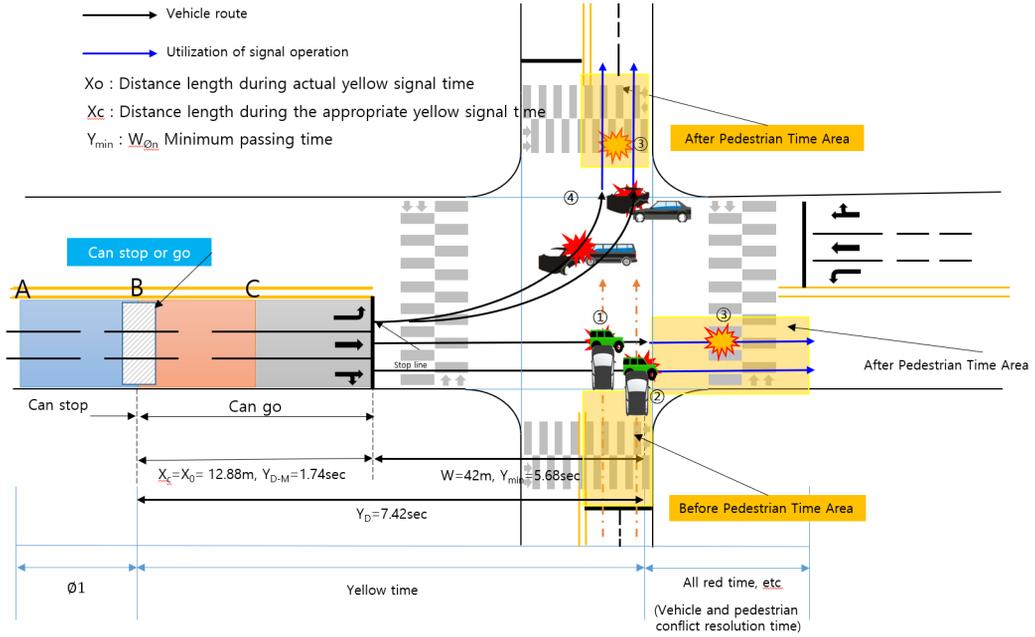
*p<.05, **p<.01, ***p<.001

추정된 다중회귀식은 Equation 14와 같으며, 실제 접근속도와 신호운영 방법에 따라 변화되는 교차로 폭을 적용한 동적황색신호시간으로 정의하였다.

$$Y_D' = 6.072 - 0.538 V_r + 0.134 W_{\varnothing n} \dots\dots\dots (14)$$

여기서 Y_D = 동적황색신호시간, V_r = 각차로별 접근속도의 평균(m/sec)

<Table 12>와 <Fig. 3>은 Equation 3과 14에 의해 산정된 차로별 황색신호시간 결과 및 예시이다. Equation 3에 의한 avg.Y는 $5.80 \leq Y \leq 10.03$ 사이에 존재하며 가장 높은 avg. Y는 꿈빛도서관 SN으로 10.30sec이며, 가장 높은 Y는 꿈빛도서관 T_{H3} 로 10.47sec로 나타났다. 반면 가장 적은 avg. Y는 약대교회사거리 SN으로 5.80sec이며, 가장 낮은 Y는 약대교회사거리 L_T 로 5.45sec로 분석되었다. 꿈빛사거리의 Y가 가장 크게 나온 이유는 다른 교차로에 비해 접근속도 평균이 제일 낮은 19.58km/h지만, 교차로 폭은 48m와 54m로 가장 긴 것을 원인으로 해석할 수 있다.



<Fig. 3> Y_D and x_e, x_0

<Table 12> Comparison of multiple regression yellow signal time calculation results

		Y(sec)		Y_D (sec)		Y- Y_D (sec)	
		NS	SN	NS	SN	NS	SN
Yakdae Church crossroads	L_T	7.72	5.45	7.42	5.08	-0.30	-0.37
	T_{H1}	5.83	5.53	6.11	5.94	0.28	0.41
	T_{H2}	5.52	6.24	6.00	6.24	0.48	0.00
	T_{H3}	5.97	5.97	6.17	6.11	0.20	0.14
	T_{HR}	8.86		8.76		-0.10	
	avg.	6.78	5.80	6.89	5.84	0.11	0.05
Kkumbit Library Intersection	L_T	8.19	10.04	8.24	13.12	0.05	3.08
	T_{H1}	8.57	10.23	8.30	11.00	-0.27	0.77
	T_{H2}	9.25	10.45	9.55	11.70	0.30	1.25
	T_{H3}	9.04	10.47	9.09	11.76	0.05	1.29
	T_{HR}	9.16		9.35		0.19	
	avg.	8.84	10.30	8.91	11.90	0.06	1.60
Education Support Office Intersection	L_T	7.32	6.64	7.94	6.34	0.62	-0.30
	T_{H1}	7.01	6.15	6.82	5.82	-0.19	-0.33
	T_{H2}	6.92	6.34	6.67	6.00	-0.25	-0.34
	T_{H3}	6.70	6.46	6.38	6.12	-0.32	-0.34
	T_{HR}	6.70		6.39		-0.31	
	avg.	6.93	6.40	6.84	6.07	-0.09	-0.33

		Y(sec)		Y _D '(sec)		Y-Y _D '(sec)	
		NS	SN	NS	SN	NS	SN
college road three-way Intersection	L _T	7.49		8.17		0.68	
	T _{H1}	5.66	6.07	5.50	5.96	-0.16	-0.11
	T _{H2}	5.72	6.23	5.54	6.06	-0.18	-0.17
	T _{HR}	6.37		6.04		-0.33	
	avg.	6.31	6.15	6.31	6.01	0.00	-0.07
telephone office crossroads	L _T	8.41	6.91	8.69	6.64	0.28	-0.27
	T _{H1}	8.02	7.38	7.65	7.03	-0.37	-0.35
	T _{H2}	8.06	7.78	7.70	7.49	-0.36	-0.29
	T _{H3}	8.16	9.17	7.83	10.40	-0.33	1.23
	avg.	8.16	7.81	6.37	7.89	-0.20	0.08

Equation 14에 의해 산정한 황색신호시간 결과는 기존 산정식인 Equation 3과 차이는 있었지만 avg. 비교시 큰 차이가 없는 것으로 나타나 회귀모형에 의한 황색신호 모형은 산정식으로 문제가 없는 것으로 판단할 수 있다. <Table 13>은 다중회귀모형에 의해 산정된 황색신호시간으로 접근속도와 교차로 폭의 상대적 위치에 따라 구분하였다. 산정결과에 의하면 계수표의 β의 부호에 따른 영향을 확인할 수 있다. 접근속도는 부(-)의 영향을 미치므로 값이 낮아질수록 황색신호시간이 증가하는 것을 알 수 있으며, 교차로 폭은 정(+)적 영향을 미치므로 교차로 폭 증가에 따라 황색신호시간도 증가하는 것을 확인할 수 있다. 회귀식에 따른 황색신호시간 최대는 13.21sec이며, 최소는 -3.87sec로 반영하기 어려운 결과도 포함되어 있었다. 따라서, 최댓값은 9sec로, 최솟값은 3sec로 정의하였으며, 기준제시의 근거는 <Table 13>과 <Table 14>의 x_c 와 x_0 의 관계에서 설명할 수 있다.

3. 회귀식에 의한 기준표 제시

<Table 13> Dynamic yellow signal time result table by regression equation

V _r	W _{∅n}	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
		15	5.84	6.51	7.18	7.85	8.52	9.19	9.86	10.53	11.2	11.87	12.54
20	5.09	5.76	6.43	7.1	7.77	8.44	9.11	9.78	10.45	11.12	11.79	12.46	
25	4.35	5.02	5.69	6.36	7.03	7.7	8.37	9.04	9.71	10.38	11.05	11.72	
30	3.6	4.27	4.94	5.61	6.28	6.95	7.62	8.29	8.96	9.63	10.3	10.97	
35	2.85	3.52	4.19	4.86	5.53	6.2	6.87	7.54	8.21	8.88	9.55	10.22	
40	2.1	2.77	3.44	4.11	4.78	5.45	6.12	6.79	7.46	8.13	8.8	9.47	
45	1.36	2.03	2.7	3.37	4.04	4.71	5.38	6.05	6.72	7.39	8.06	8.73	
50	0.61	1.28	1.95	2.62	3.29	3.96	4.63	5.3	5.97	6.64	7.31	7.98	
55	-0.14	0.53	1.2	1.87	2.54	3.21	3.88	4.55	5.22	5.89	6.56	7.23	
60	-0.88	-0.21	0.46	1.13	1.8	2.47	3.14	3.81	4.48	5.15	5.82	6.49	
65	-1.63	-0.96	-0.29	0.38	1.05	1.72	2.39	3.06	3.73	4.4	5.07	5.74	
70	-2.38	-1.71	-1.04	-0.37	0.3	0.97	1.64	2.31	2.98	3.65	4.32	4.99	
75	-3.13	-2.46	-1.79	-1.12	-0.45	0.22	0.89	1.56	2.23	2.9	3.57	4.24	
80	-3.87	-3.2	-2.53	-1.86	-1.19	-0.52	0.15	0.82	1.49	2.16	2.83	3.5	

여기서, W_{∅n} : 재정의된 교차로 폭, V_r : 차로별 접근속도의 방향별 평균. 음영 부분은 최대/최소값 적용

<Table 14> Dilemma Zone Matrix Calculated by the Regression Formula, $x_c - x_0$

Vr		$W_{\varnothing n}$											
		15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
x_0	15	10.00	9.17	8.33	3.33	2.50	-2.50	-7.50	-12.50	-17.50	-22.50	-27.50	-32.50
		x_c	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90
x_0	20	18.33	13.33	13.89	14.44	9.44	10.00	5.00	0.00	-5.00	-10.00	-15.00	-20.00
		x_c	8.64	8.64	8.64	8.64	8.64	8.64	8.64	8.64	8.64	8.64	8.64
x_0	25	19.72	26.67	16.67	18.61	20.56	15.56	17.50	12.50	7.50	2.50	-2.50	-7.50
		x_c	11.77	11.77	11.77	11.77	11.77	11.77	11.77	11.77	11.77	11.77	11.77
x_0	30	18.33	21.67	16.67	20.00	23.33	18.33	21.67	25.00	20.00	15.00	10.00	5.00
		x_c	15.28	15.28	15.28	15.28	15.28	15.28	15.28	15.28	15.28	15.28	15.28
x_0	35	14.17	18.89	23.61	18.61	23.33	28.06	23.06	27.78	32.50	27.50	22.50	17.50
		x_c	19.17	19.17	19.17	19.17	19.17	19.17	19.17	19.17	19.17	19.17	19.17
x_0	40	18.33	13.33	19.44	25.56	20.56	26.67	32.78	27.78	33.89	40.00	35.00	30.00
		x_c	23.46	23.46	23.46	23.46	23.46	23.46	23.46	23.46	23.46	23.46	23.46
x_0	45	10.00	17.50	12.50	20.00	27.50	22.50	30.00	37.50	32.50	40.00	47.50	42.50
		x_c	28.13	28.13	28.13	28.13	28.13	28.13	28.13	28.13	28.13	28.13	28.13
x_0	50	-1.11	7.78	2.78	11.67	20.56	15.56	24.44	33.33	28.33	37.22	46.11	41.11
		x_c	33.18	33.18	33.18	33.18	33.18	33.18	33.18	33.18	33.18	33.18	33.18
x_0	55	-30.28	-4.72	5.56	0.56	10.83	21.11	16.11	26.39	36.67	31.67	41.94	52.22
		x_c	38.62	38.62	38.62	38.62	38.62	38.62	38.62	38.62	38.62	38.62	38.62
x_0	60	-31.67	-36.67	-8.33	3.33	-1.67	10.00	21.67	16.67	28.33	40.00	35.00	46.67
		x_c	44.44	44.44	44.44	44.44	44.44	44.44	44.44	44.44	44.44	44.44	44.44
x_0	65	-51.11	-38.06	-43.06	-11.94	1.11	-3.89	9.17	22.22	17.22	30.28	43.33	38.33
		x_c	50.66	50.66	50.66	50.66	50.66	50.66	50.66	50.66	50.66	50.66	50.66
x_0	70	-73.33	-58.89	-63.89	-49.44	-15.56	-20.56	-6.11	8.33	3.33	17.78	32.22	27.22
		x_c	57.25	57.25	57.25	57.25	57.25	57.25	57.25	57.25	57.25	57.25	57.25
x_0	75	-98.33	-82.50	-66.67	-71.67	-55.83	-19.17	-24.17	-8.33	7.50	2.50	18.33	34.17
		x_c	64.24	64.24	64.24	64.24	64.24	64.24	64.24	64.24	64.24	64.24	64.24
x_0	80	-103.89	-108.89	-91.67	-74.44	-79.44	-62.22	-22.78	-27.78	-10.56	6.67	1.67	18.89
		x_c	71.60	71.60	71.60	71.60	71.60	71.60	71.60	71.60	71.60	71.60	71.60

<Table 13>에서 9초 이상의 황색신호시간이 산정되거나 3초 이하 또는 음수로 산정된 경우 <Table 14>와 매칭하여 해석하면 x_0 값이 (-)이거나, x_c 값보다 작은 경우 발생한다는 것을 확인하였다. 따라서, 황색신호시간의 최솟값과 최댓값 기준은 9초와 3초로 정의한 것에 대해 수치적 설명이 가능하다.

VI. 결론 및 향후 연구과제

본 연구는 적정 황색신호시간 산정을 위해 기존 문헌을 고찰한 결과 시간에 따라 변화하는 도심지 신호 운영 환경에 적합한 황색신호시간을 산정함에 부족한 점이 있다는 것에 착안한 것으로, 차로별 개별차량의 접근속도를 수집 분석하였으며, 정통적 방법에 의한 교차로 폭은 실제 황색시간을 운영하는 데 불리한 요소로 작용하는바, 신호 운영 현황을 고려하여 진행 현시와 다음 현시 이동류의 상충이 해소되는 지점으로 교차로 폭을 재정의한 결과를 기초자료로 활용하여 연구결과를 도출하였다. 수집 자료 속도 분석결과, 방향별 평균속도는 직진 28.47km/h, 좌회전 19.63km/h, 우회전 21.14km/h로 좌회전이 가장 낮은 것을 확인하였다. 직진 평균속도는 오전 24.69km/h, 오후 34km/h로 오후 침두시가 9.31km/h 높게 분석되었으며, 실제 접근속도와 운영속도 차이가 10km/h 이상으로 시간 변화에 따른 동적황색시간이 필요함을 확인하였다.

연구를 통해 새로운 교차로 폭 기준을 제시하였으며, 이동류가 교차하는 지점에서 발생하는 상충이 해소되는 지점과 신호에 따라 교차로 통과 시 다음 현시가 오기 전 교차로 내 잔류 차량이 소거되는 지점으로 정의하였다. 재정의에 따른 분석결과 NS 방향은 22.92%, SN 방향은 18.04%가 감소하였으며, 감소율이 가장 큰 교차로는 전화국사거리로 29.82%와 41.51%의 감소율로 나타났다.

이러한 요인들이 황색신호시간에 미치는 영향 및 관계를 비교 분석하기 위해 정통적 방법에 따른 결과와 다중회귀모형 결과를 비교하였다. 개발된 회귀식은 ANOVA분석, 검정 통계량 F를 통해 유의성을 검증하였다. 개발모형의 적합성은 $\text{adj. } R^2 = 0.924$ 로 92.4%의 설명력을 나타냈으며, Durbin-Watson의 통계량은 1.830으로 2에 가까워 잔차의 독립성을 확보하였다. 계수표 β 를 통해 접근속도는 부(-)적 영향을 미치며, 교차로 폭은 정(+)적 영향을 미치는 것을 확인하였다. 추정된 다중회귀식에 따른 황색신호시간은 실제 접근속도와 신호운영 방법에 따라 변화되므로 동적황색신호시간으로 정의하였다. 회귀식은 $W, W_{\varnothing n}, V_{85}, V_r$ 을 교차 적용하여 황색신호 시간, x_0, x_c , 딜레마 길이를 산정 비교하였다. x_0 는 W, Y_R, V_{85} 조건일 때 대부분 음(-)의 값으로 나타나 운영 중인 황색신호시간은 교차로 통과에 필요한 최소 시간을 확보하지 못하고 있는 것으로 나타나 교차로 폭보다 부족한 황색신호시간을 운영하는 것으로 분석되었다. 회귀식에 따른 황색신호시간 산정 결과는 13.21sec ~ -3.87sec 사이에 분포하였으며 정통적 방법에 따른 결과와 비교하였을 때 차이는 최대 1.6초로 모형식으로 이상이 없음을 확인하였다. 회귀식을 통해 산정된 황색신호시간은 접근속도와 교차로 폭으로 정리하여 황색신호시간 기준표를 제시하였으며, $x_c - x_0$ 의 딜레마 존 매트릭스를 통해 황색시간과 딜레마 길이의 관계를 간단히 해석하여 접근속도에 따른 황색신호시간 운영 시 딜레마 길이를 최소화하는 방안을 제시하였다.

연구에서 개발한 산정식과 회귀모형식, 딜레마 존 매트릭스는 접근속도 변화에 따라 교차로 환경에 가장 적합한 황색신호시간을 산정할 수 있도록 하였으며, 교차로 폭과 딜레마 구간의 관계에 대해 쉬운 해석이 가능하도록 제시하였으며, 개발 산정식은 도심지에 운영 중인 신호교차로의 접근로 방향별 개별차량 속도 수집이 가능하다면 안정적인 교차로 운영을 위한 황색신호시간을 적용하는 데 큰 무리가 없다고 판단된다.

본 연구는 접근속도와 교차로 폭이 황색신호시간 결정에 어떤 영향을 미치는지 알아보고 접근속도에 따라 변화되는 황색신호시간과 딜레마구간의 변화에 관해 연구한 것으로 황색신호시간 확보를 통한 교차로 안정성 확보에 의미가 있다. 아울러 본 연구에서 제시된 연구결과에 대한 활용성을 향상하고 적정황색신호시간 정의와 딜레마구간 최소화 정립을 위해 다음과 같은 후속 연구가 필요할 것으로 판단된다. 첫째, 본 연구에서 다루지 못한 잠재적 요인이 될 수 있는 차량별 개별 운전행태, 운전자의 요소 등의 인적 요소와 둘째, 황색신호시간 종료 후 교차로 내 잔류 차량, 대기행렬에 의한 차두거리의 손해, 차량 도착 특성 및 차량 유

형에 따른 특성, 신호기와 정지선 위치 등 외적 요소와의 관련성, 셋째, 접근속도가 아닌 교통량 해소와 잔류 차량개념을 적용한 추가적인 연구가 수행된다면 교차로 운영 안정성 확보에 도움이 될 것으로 판단된다.

REFERENCES

- Gazis, D., Herman, R. and Maradudin, A.(1960), “The problem of the amber signal light in traffic flow”, *Operations Research Incorporated*, vol. 8, pp.112-132.
- Han, E.(2020), “Development of effectiveness scale and application criteria for evaluating the effectiveness of pedestrian-friendly signal operation techniques”, *Korea Road Traffic Authority Traffic Science Institute, Research Report*, vol. 17, no. 37, pp.18-19.
- Jang, J. A., Choi, K. J. and Moon, Y. J.(2009), “Development of a Driver Safety Information Service Model Using Point Detectors at Signalized Intersections”, *Korean Society of Transportation*, vol. 27, no. 5, p.115.
- Lee, J. U., Lim, S. H. and Ryu, S. G.(2007), “A surveillance permissible range of traffic light violation considering a dilemma zone”, *Seoul Studies*, vol. 8, no. 2, p.157.
- Lee, S. G. and Lee, S. B.(2014), “A Study on Developing Intersection Dilemma Zone Evaluation Model”, *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 13, no. 1, pp.27-33.
- Lee, S. H., Lee, S. H. and Park, Y. N.(2003), “A Study on Driver Behavior and Dilemma Zone during Yellow Interval at Signalized Intersections”, *The Korea Transport Institute*, vol. 21, no. 4, pp.8-15.
- Moon, Y. J. and Coleman, F.(2003), “Dynamic dilemma zone based on driver behavior and car-following model at highway-rail intersections”, *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 37, no. 4, pp.323-344.
- Park, J. S. and Bae, K. S.(2017), “Development of Running Red Light Crash Modelling at Signalized Intersections for Safety Evaluation”, *The Korea Transport Institute*, vol. 24, no. 2, pp.41-51.
- Park, J. W., Son, B. S. and Yu, W.(2003), “A Method for Determining Yellow Time of Left-Turn Movement Based on Dilemma Zone Concept”, *Proceedings of the KOR-KST Conference*, vol. 44, pp.1-6.
- Snedecor, G. W. and Cochran, W. G.(1980), *Statistical Methods* (vol. 7, 7th ed.), Iowa State University Press, Ames, p.507.