

신호현시 순서가 교차로 신호운영 효율에 미치는 영향 분석 분석

An Effects of Signal Phase Plan on the Traffic Signal Operation of 4-legged Intersection

이 준 형* (Junhyung Lee)
(Yonsei University)

손 봉 수** (Bongsoo Son)
(Yonsei University)

· Corresponding author : Junhyung Lee(Yonsei University), E-mail takion0424@yonsei.ac.kr

요 약

본 연구에서는 직각교차 4지 신호교차로를 대상으로 다양한 신호현시 순서대안을 비교하여 교차로 하류부 도로의 통과교통량 처리능력을 극대화하는 신호현시 순서대안을 분석하였다. 현시배열 대안은 동서측과 남북측 도로의 직진과 좌회전 신호현시 배치순서에 따라 총 6개로 구성하였다. 이론적 분석에 따르면 동일한 목적링크를 향하는 신호현시를 신호주기 전체에 분산배치한 현시배열 대안2(동서측:직진 후 좌회전, 남북측:좌회전 후 직진)와 현시배열 대안5(동서측:좌회전 후 직진, 남북측:직진 후 좌회전)가 나머지 4개 현시배열 대안에 비하여 작은 최대지체가 발생하는 것으로 나타났다. 즉, 현시배열 대안에 따라 교차로가 최대지체의 수용가능 여부가 변화하는 용량상태 교차로에서 효과를 나타낼 수 있다. 미시 교통시뮬레이터인 PTV VISSIM F 7.0을 이용하여 각각의 현시배열 대안을 검증한 결과 용량상태를 넘어 서거나 미달한 교차로에서는 현시순서 대안의 변화에 따라 통과교통량의 변화가 매우 미미한 수준으로 나타났다. 그러나 용량상태인 평균제어지체 100초 내외의 교차로는 현시순서 대안에 따라 평균제어지체가 용량상태인 100초 안팎으로 변화하며 효과를 나타냈다. 이론적 분석결과와 동일하게 현시배열 대안2와 현시배열 대안5가 다른 현시배열 대안에 비하여 교차로 통과교통량 및 목적링크 통과교통량을 최소 3.8%에서 최대 5.1%까지 증대시킨 것으로 분석되었다.

핵심어 : 신호교차로, 신호현시 순서, 통과교통량, 최대 지체, 평균제어지체

ABSTRACT

This study analysis traffic phase order alternatives to maximize throughput. According to theoretical analysis alternative2(EW: left turn after through, NS: through after left turn) and alternative5(EW: through after left turn, NS: left turn after through) can minimize the maximum delay. Both alternatives split the phase that have the same destination link under the whole cycle length. This shows that phase order alternative can effect to the fully saturated intersection. In side of simulation analysis by microscopic traffic simulator PTV VISSIM F 7.0, each phase order alternatives can't effect throughput under the non saturated condition. However under the saturated condition, the average controlled delay of the intersection has been changed by phase order alternatives. The simulation analysis shows that alternative2 and alternative5 increase throughput 3.8% to 5.1% under the saturated condition.

Key words : Signalized Intersection, traffic phase, Throughput, Max Delay, Average Control Dealy

† 이 논문은 국토교통부의 U-City 석·박사과정 지원사업으로 지원되었습니다.

† 본 논문은 한국ITS학회 2015년도 춘계학술대회에 게재되었던 논문을 수정·보완하여 작성하였습니다.

* 주저자 및 교신저자 : 연세대학교 도시공학과 석박사통합과정

** 공저자 : 연세대학교 도시공학과 교수

† Received 1 June 2015; reviewed 26 June 2015; Accepted 14 July 2015

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

신호교차로의 효율적인 운영을 위하여 설계에 반영하고 있는 주된 요소는 방향별 교통량 수요이다. 이 방향별 교통량을 기반으로 신호주기와 각 현시별 녹색신호시간 등을 계산하게 된다. 이 과정에서 공학적인 분석이 배제된 채 주관적으로 설정되고 있는 것은 신호현시의 구성순서이다. 신호현시의 구성순서는 큰 틀에서 국가의 신호운영 현시순서를 따라서 결정되고, 세부적으로만 교통수요를 최단시간내에 처리하기 위하여 동시신호, 직진, 좌회전과 같은 독립현시(Single Ring)와 중첩현시(dual ring) 등을 적용한다. 하지만 현재의 신호현시 순서 결정 방법은 주로 동서남북 방향의 순차적 진행이나 주도로/부도로 여부에 따라 직진과 좌회전의 순차적 진행이 주로 이루어지고 있다.

교차로 하류부 도로가 포화된 상태에서는 녹색신호가 주어지더라도 차량들은 더 이상 진행하지 못하고 교차로 내부에 갇히게 된다. 이와 같은 현상은 주로 첨두시간대 포화된 교차로에서 많이 관측되며, 교차로 하류부 도로의 포화로 진행하지 못한 차량은 교차로 내 꼬리 물기로 이어져 교차로 운영 효율을 크게 저하시킨다. 따라서 본 연구에서는 방향별 신호현시를 신호주기 전체 시간동안 고르게 분산함으로써 교차로 하류부 도로가 앞선 신호현시에 진입한 교통수요를 충분히 처리한 이후에 다음 현시를 소화할 수 있는 신호현시 구성순서를 제시하고자 한다.

2. 연구의 방법

본 연구는 포화된 교차로에서 현시별로 주어진 녹색신호시간을 효율적으로 사용하기 위하여 교차로 하류부 소통상황을 개선할 수 있는 신호현시 순서를 제시하고자 한다.

분석의 대상은 단일 교차로로 한정하였으며, 초기 연구단계에서 분석의 용이성을 위하여 신호현시

의 종류를 동시신호와 Dual ring을 배제한 상태에서 동서방향 직진 및 좌회전, 남북방향 직진 및 좌회전으로 구성하는 간단한 형태의 직각교차 4지 신호교차로를 대상으로 연구를 진행하였다.

본 연구에서는 교통수요조건, 교차로 기하구조, 교통신호의 녹색신호시간 배정, 인접교차로 영향 등 교차로 운영효율에 영향을 줄 수 있는 모든 요인을 동일하게 통제된 상태에서 신호현시의 구성순서의 변화만을 이용하여 각 방향별 교차로 하류부 도로의 처리 교통량 효율증대와 교차로 전체의 통과교통량 증대효과를 분석한다.

우선 교통류 설명이론인 대기행렬이론을 이용하여 신호교차로를 통과하여 하류부 도로에 진입한 차량들의 누적 출발-도착곡선을 분석하고, 신호현시 순서변화에 따라 예상되는 최대지체를 산출하였다. 이후 이론적 분석내용을 검증하기 위하여 가능한 신호현시 조합 전체에 대하여 직진 현시에 방향별 진행 교통량에 따라 교차로 하류부를 진행하는 통과교통량이 시간당 어떻게 변화하는지를 미시 교통시뮬레이터 PTV VISSIM F 7.0을 이용하여 분석하였다.

II. 선행연구 및 관련이론 고찰

1. 신호교차로 설계

현재 신호교차로를 효율적으로 운영하기 위하여 검토하는 요소는 크게 신호주기, 녹색신호시간, 윽셋(연동), 신호현시 구성이다. 이 중 신호주기와 녹색신호시간 등은 방향별 교통량 수요와 차로별 포화 교통류율에 의하여 결정되며, 윽셋은 연동을 맞춰주고자 하는 인접 교차로와의 거리 등을 고려하여 연동폭이 최대화(Bandwidth maximize)되도록 설계된다. 그러나 신호현시의 구성순서는 독립된 각각의 현시를 사용하는 독립현시(Single Ring)과 일부 신호현시들이 서로 중첩되는 중첩현시(Dual Ring)으로 구분할 뿐 큰 틀에서 각 현시의 구성순서는 전문가의 주관이나 국가의 지침에 의해서 일정한하게 설정되고 있다.

2. 신호현시 구성기법

Shin, Dong-chul(1999)[1]은 현시배열을 “교차로에서 일정한 규칙에 의해 교통류와 보행자에게 통행권을 부여하는 일련의 현시순서”라고 정의하였으며, “교통사고 예방과 신호운영 극대화를 동시에 달성할 수 없다”고 설명하였다. 신호교차로에서의 현시배열은 적게는 2현시부터 최대 8현시까지 이용되고 있으며 보편적으로는 2현시나 4현시의 신호가 사용된다.

2현시 신호의 경우 4지 교차로에서 손실시간을 최소화하기 위하여 비보호 좌회전을 활용한 현시운영 방법이다. 이 경우 좌회전 현시는 별도로 제공되지 않으며, 양방향 직진신호 현시에 수락간격을 이용하여 비보호 좌회전을 하는 것이 보편적이다.

현재 국내 4지 교차로에서 가장 보편적으로 운영되고 있는 4현시 신호의 경우 직진 현시와, 좌회전 현시, 동시신호 현시 등으로 구성되어 있다. 동시신호가 아닌 직진 현시와 좌회전 현시를 사용할 경우의 현시배열 순서는 2010년 경찰청의 교통 운영체계 선진화 방안에 따라 좌회전 후 직진으로 운영되는 신호체계는 직진 후 좌회전 현시체계로 개편되었다. 이후 전국의 신호교차로는 좌회전 후 직진체계에서 직진 후 좌회전 체계로 일괄 변경되었다.

Hyo Seok Jang(2010) [2]의 연구에서는 선행 좌회전과 후행 좌회전 방식의 교차로 평균 제어지체 변화를 연구하였다. 이와 같이 신호현시 순서의 변화는 교차로 지체도 또는 안전도에 영향을 미치는 요소가 될 수 있다. 그럼에도 불구하고 2010년 경찰청의 교통 운영체계 선진화 사례에서 볼 수 있듯이 교통신호 현시의 구성순서는 국가적 통일성을 가지고 일괄적으로 결정되는 측면이 크다.

신호현시 구성에 따라 교차로의 운영효과를 분석한 선행연구에는 Jun-Han Cho(2004)[3]의 연구가 있다. Jun-Han Cho(2004)[3]은 총 13개의 신호현시를 제시하고, 네트워크 형태, V/C비, 통과교통량 대 좌회전 교통량 비율 등의 교통조건에 따라 최적현시를 도출하였다.

조준한의 연구는 그동안 전문가의 직관이나 국

가 지침에 따라서 결정되던 신호현시 순서를 다양한 교통조건에 따라 가장 적합한 신호현시를 제시하였다는 데에 의의가 있다. 그러나 조준한의 연구는 각각의 교통조건에서 이미 사용되고 있는 중첩신호, 동시신호, 양방 직진·좌회전 신호 등으로 구성된 대안 현시 중 가장 적합한 현시계획을 탐색하는 연구에 해당했다.

3. 신호교차로 효과척도

Korea Highway Capacity Manual(2013)[4]에서 제시하는 신호교차로의 서비스수준 평가지표는 차량당 평균제어지체이다. 평균제어지체의 크기에 따라 서비스수준을 A, B, C, D, E, F, FF, FFF의 8개 등급으로 분류한다. 차량당 평균제어지체는 분석 기간 동안 교차로에 도착한 차량들이 교차로의 진입부터 진출까지 소요된 손실시간의 평균을 의미한다.

<표 1>은 도로용량편람(2013)에서 제시하고 있는 신호교차로의 서비스 수준 기준이다. 서비스수준 E와 서비스수준 F의 경계에 해당하는 차량당 평균제어지체가 100초일 때, 해당 교차로는 용량상태에 도달한다. 차량당 평균제어지체 100초를 전후로 교차로의 포화여부가 결정되며 차량당 평균제어지체가 100초를 넘어설 경우 교차로 과포화에 의한 Spill-back이 발생할 수 있다.

<표 1> 신호교차로 서비스수준별 제어지체
<Table 1> Signalized intersection average controlled delay according to service level

Service Level	Average Controlled Delay
A	≤ 15sec
B	≤ 30sec
C	≤ 50sec
D	≤ 70sec
E	≤ 100sec
F	≤ 220sec
FF	≤ 340sec
FFF	> 340sec

4. 기존연구와의 차별성

Jun-Han Cho(2004)[3]의 연구는 지체도를 효과척

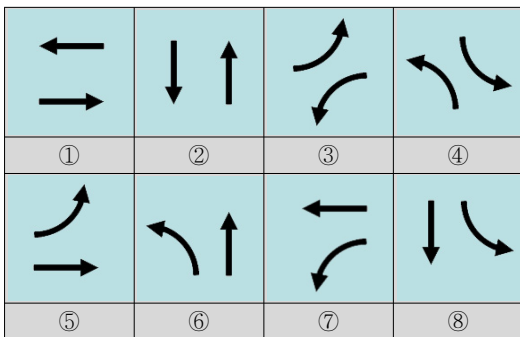
도로 설정하여 현재 사용되고 있는 현시배열 대안 중 최적 대안을 분석하였다. 또한 우리나라의 운전 관습상 익숙하지 않은 현시배열 대안은 분석의 대상에서 제외하였다. 그러나 본 연구는 교차로의 제어체계를 교통조건에 분류기준으로만 사용하고, 운영의 효율성은 신호현시의 배열에 따라 교차로 하류부 도로가 수용해야하는 교통수요의 부하를 고려하여, 하류부 도로의 통과 교통량 증감을 효과적으로 제시하였다. 또한 신호운영의 효율성 측면에서 공학적으로 제시가 가능한 모든 현시배열 대안에 대하여 신호운영 효율의 증감을 분석목표로 연구를 수행하였다.

III. 신호현시 구성

1. 신호현시 구성

본 연구에서 구성하는 신호의 현시 범위는 독립현시(Single Ring)으로 한정한다. 독립현시(Single Ring)은 특정방향의 통행수요가 없어도 증첩현시를 구성하지 아니한다.

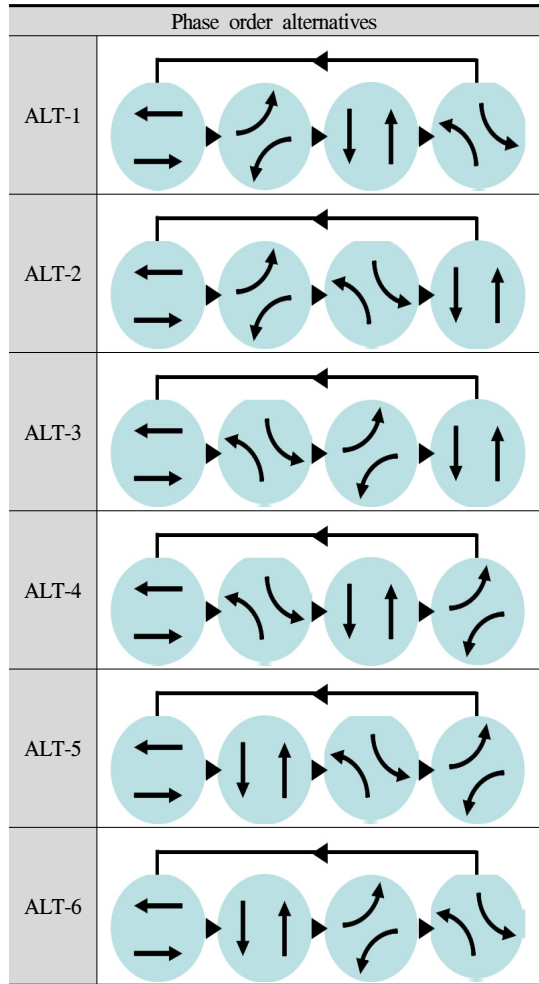
<그림 1>은 4지 교차로에서 독립현시(Single Ring) 기법으로 도출가능한 모든 현시의 종류 8개를 나열한 것이다. 본 연구에서는 동시신호를 제외한 ①, ②, ③, ④현시만을 연구의 범위로 한정한다.



<그림 1> 4지 교차로 Single Ring 현시의 종류
<Fig. 1> Case of single ring phase in 4-legged signalized intersection

2. 현시배열 대안

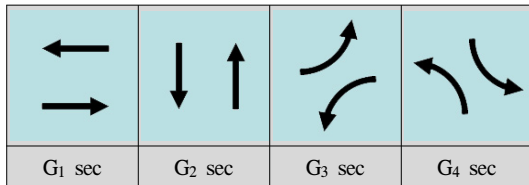
<그림 2>는 <그림 1>의 독립현시(Single Ring) 신호현시 중 분석대상으로 선정된 ①, ②, ③, ④ 신호현시를 토대로 조합이 가능한 연구대상 6개 현시순서 대안을 제시한 것이다. 4지교차로의 방향별 교통량 수요에 따라 교차로 하류부 도로가 처리해야 하는 교통수요는 동일한 목적링크를 가지는 신호현시의 통과교통량의 합과 같다. 즉, 예를 들어 <그림 1>에서 신호 ①과 ④는 동일한 목적링크를 가진 현시로서 두 현시의 교통량 합이 동서방향 목적링크가 처리해야하는 교통수요를 나타낸다.



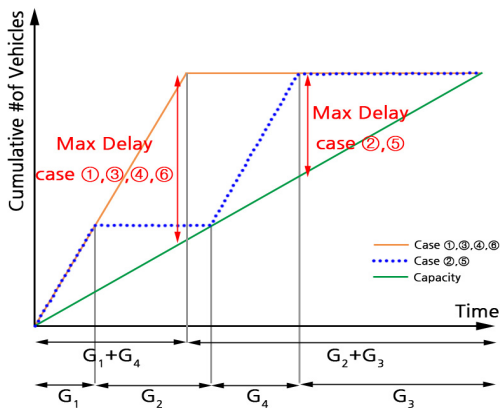
<그림 2> 분석대상 6개 현시순서 대안
<Fig. 2> 6 phase order alternatives

3. 이론적 분석

신호교차로의 신호주기를 C , 각 현시의 녹색시간을 <그림 3>과 같이 각각 G_1, G_2, G_3, G_4 라고 가정한다. 각 현시의 녹색시간동안 q veh/sec의 교통류가 용량 c veh/sec의 도로에 진입한다고 가정할 때 현시배열 대안에 따라 교차로 하류부 도로는 <그림 4>와 같은 $A(t)-D(t)$ 곡선을 나타낸다. 현시배열 대안 1, 3, 4, 6과 현시배열 대안 2, 5는 서로 유사한 누적 도착곡선을 그린다. 현시배열 대안 1, 3, 4, 6은 (G_1+G_4) 의 시간동안 동서방향 교차로 하류부를 향하는 신호현시가 집중된 후 G_2+G_3 의 시간동안 동서방향 신호가 배정되지 않아 도착하는 차량의 수가 없다. 반면 현시배열 대안 2, 5의 경우 전체 신호주기 C 중 동서방향 신호현시 G_1, G_3 가 각각 분리되어 계단식 누적 도착곡선을 그리게 된다.



<그림 3> 신호현시별 녹색신호 시간
<Fig. 3> Green time for each phases



<그림 4> 신호교차로 하류부의 누적 출발-도착곡선
<Fig. 4> Cumulative Arrival-Departure curve in the downstream of signalized intersection

하류부도로가 모든 교통수요를 수용할 수 있다면 이론적으로 모든 현시배열 대안이 신호주기 C 동

안 처리 가능한 누적 교통량은 동일하다. 그러나 현시배열 대안 1, 3, 4, 6의 최대 지체는 현시배열 대안 2, 5에 비하여 길다. 교차로 하류부 도로의 대기공간이 최대 지체를 수용할 수 없을 경우 녹색신호시간이 주어지더라도 차량들은 교차로 하류부로 진행하지 못하므로 도착곡선의 기울기가 감소하며, 신호주기 C 동안 처리 가능한 차량의 수는 감소한다. <그림 4>에 따르면 동일한 신호주기 C 동안 최대 지체의 규모는 현시배열 대안 1, 3, 4, 6이 현시배열 대안 2, 5보다 크기 때문에 교차로 하류부 도로가 최대지체를 수용하지 못할 확률은 더 크다.

<표 2>에서는 각 현시배열 대안에 대하여 이론적으로 예상되는 최대지체를 <그림 5>의 녹색신호시간 예시를 적용해 수치적으로 산출하였다. 동서남북 4방향의 교차로 하류부 도로 중 동서방향 하류부 도로에 대하여 도착 교통류 7 veh/sec, 용량 3 veh/sec라고 가정하고, 녹색 신호시간을 <그림 5>와 같이 정의할 때 <그림 2>의 현시배열 대안에 따른 누적 도착-출발 교통량과 최대지체(Max Delay)를 나타내면 <표 2>와 같다.

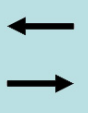
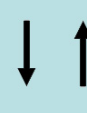

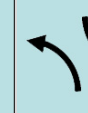
이와 같은 교통조건을 가지는 교차로에서 3번이상의 신호주기가 반복될 때 현시배열 대안 5 \geq 현시배열 대안 2 \geq 현시배열 대안 3 = 현시배열 대안 4 \geq 현시배열 대안 1 = 현시배열 대안 6의 순서로 작은 최대 지체를 나타낸다.

IV. 시뮬레이션의 설계

1. 시뮬레이션 분석환경

분석 네트워크는 일반적인 직각교차 4지교차로에 해당한다. 수행하고자 하는 시뮬레이션 분석은 <그림 4>와 <표 2>에서 대기행렬이론을 통해 분석한 현시배열 대안에 따른 최대지체의 규모와 그에 따른 신호운영 효율을 검증하는 데에 목적이 있다. 현시배열 대안에 따른 교차로 하류부의 교통수요 처리능력 향상은 최대지체가 교차로 하류부 도로의 수용능력을 넘어서는지 여부에 따른다. 따라서 교통조건은 교차로 하류부에 Over Flow발생여부에 따

라 구분하였다. 연동교차로의 경우 하류부 소통상태가 원활하지 않은 상태에서 회망통행시간을 근거로 설정된 교차로간 신호연동 옵션 값의 의미는 제

			
G ₁ sec	G ₂ sec	G ₃ sec	G ₄ sec
66 sec	50 sec	45 sec	39 sec

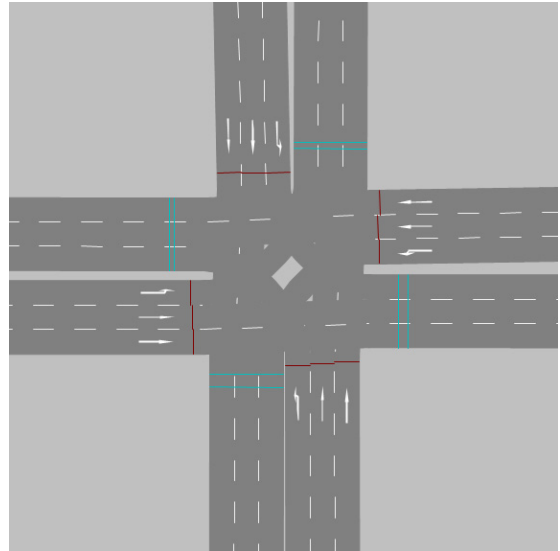
〈그림 5〉 현시배열 대안별 최대지체 산출을 위한 현시별 녹색신호시간 예시

〈Fig. 5〉 Green time to calculate example max delay

〈표 2〉 예시로 산출된 현시배열 대안별 최대 지체
〈Table 2〉 Example of Max Delay for each ALT

ALT	Time	A(t)	D(t)	Delay	Max Delay
ALT-1	0	0	0	0	264+156n
	66	462	198	264	
	111	462	333	129	
	161	462	462	0	
	200	735	579	156	
ALT-2	0	0	0	0	285+135n
	66	462	198	264	
	111	462	333	129	
	150	735	450	285	
	200	735	600	135	
ALT-3	0	0	0	0	420+135n
	66	462	198	264	
	105	735	315	420	
	150	735	450	285	
	200	735	600	135	
ALT-4	0	0	0	0	420+135n
	66	462	198	264	
	105	735	315	420	
	155	735	465	270	
	200	735	600	135	
ALT-5	0	0	0	0	270+135n
	66	462	198	264	
	116	462	348	114	
	155	735	465	270	
	200	735	600	135	
ALT-6	0	0	0	0	264+156n
	66	462	198	264	
	116	462	348	114	
	161	462	462	0	
	200	735	579	156	

n : number of cycle



〈그림 6〉 분석대상 4지교차로 기하구조
〈Fig. 6〉 Geometric design of analysis area

한적이라 판단하였다. 그리하여 분석의 범위를 단일교차로로 한정하고 일정한 주기에 따라 교차로 하류부 도로에서 미터링을 실시하였다.

교차로 기하구조는 <그림 6>과 같이 전용 좌회전 1차로, 전용 직진 2차로의 편도 3차로도도로 구성하였다. <그림 6>과 같은 기하구조를 갖는 교차로에 도착하는 교통류는 방향별 차선 수의 비율에 따라 직진 교통량에 대한 좌회전 교통량의 비는 0.5로 설정하였다.

2. 분석지표 및 변인의 통제

본 연구의 목적은 신호현시의 순서변화에 따라 교차로 하류부의 기능개선정도의 분석이다. 신호현시는 크게 직진신호와 좌회전 신호로 구분되고 우회전 교통류는 직진 교통류와 우측 차로를 공유하며 함께 이동한다. 그러나 본 연구에서는 직진교통류와 우회전 교통류의 비율에 따라 교차로 하류부 도로로 진입할 수 있는 차량의 수가 영향을 받지 않도록 우회전 교통량을 분석에서 제외하였다.

신호운영측면에서는 모든 신호현시 대안에 대하여 동일한 신호주기 (180초)와 녹색신호시간(직진 60초, 좌회전 30초), 황색신호 시간(3초) 등을 동일하





게 적용하였다. 또한 교차로에 접근하는 동서남북 접근로의 교통량을 1600veh/h으로 설정하고 하류부 도로의 교통량 처리능력도 동일하게 설정하였다.

3. 현시배열 대안의 설정

<그림 2>의 신호현시 대안을 180초의 신호주기에 대하여 <그림 7>과 같이 신호시간을 배정하였다. 각 신호대안에서 방향별 녹색신호시간과 황색신호시간은 동일하나 각 신호현시의 배정순서를 달리하고 서로 다른 현시배열 대안에 따른 교차로의 교통량 처리능력의 증대여부를 확인한다.

<표 3>은 <그림 7>의 현시배열 대안에 따라 신호를 운영할 때 동일한 방향의 하류부도로에 배정된 신호현시와의 시차를 나타낸다. 이 시차는 새로운 도착교통류 없이 앞선 현시에 진입한 교통류를 처리할 수 있는 시간을 의미한다.

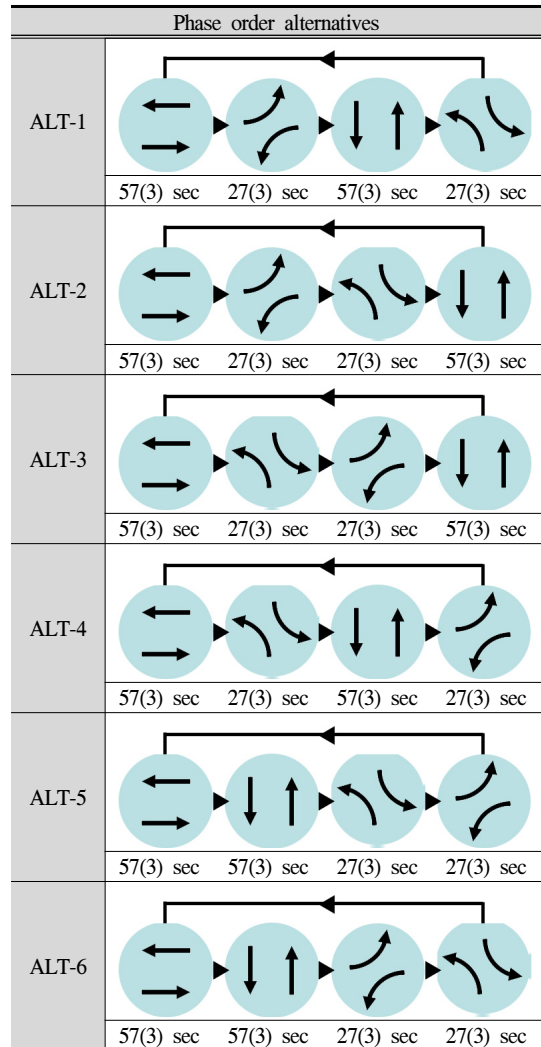
<표 3> 각 신호현시가 동일한 목적링크를 향하는 앞선 신호현시와 가지는 시간이격
<Table 3> The time gap with the same destination link

				
ALT-1	0 sec	90 sec	0 sec	90 sec
ALT-2	60 sec	60 sec	30 sec	30 sec
ALT-3	90 sec	90 sec	0 sec	0 sec
ALT-4	90 sec	0 sec	90 sec	0 sec
ALT-5	30 sec	30 sec	60 sec	60 sec
ALT-6	0 sec	0 sec	90 sec	90 sec

V. 시뮬레이션 분석결과

교차로 하류부 도로에 대하여 미터링을 실시하여 최대 지체길이가 도로의 수용가능 범위를 넘어서는지 여부에 따라 혼잡, 비혼잡으로 구분하고 3600초의 분석시간동안 각 방향별 하류부 도로의 통과교통량의 증감을 조사하였다.

시뮬레이션 분석에 사용된 랜덤시드의 수는 30개이다. 30개의 랜덤시드를 사용하였을 때 통과교통량 및 제어지체의 평균값이 0.5이내에서 변화하



<그림 7> 시뮬레이션 분석을 위한 신호현시 대안별 신호 시간 배정안

<Fig. 7> Set the green time for each traffic phase alternatives

여 99%이상의 신뢰도로 수렴함을 확인하였다.

1. 혼잡상태

교차로 하류부 도로의 용량을 300 veh/hour-lane으로 설정하고 <그림 7>의 현시배열 대안에 따라 시뮬레이션을 수행하였다. 이 때 각 현시배열 대안에 대한 평균지체는 <표 4>에 나타난 것과 같이 평균 182.16초로 <표 1>의 신호교차로 서비스수준에

따르면 LOS F에 해당한다.

LOS F에 해당하는 극심한 혼잡상태의 교차로에서 3600초의 분석시간동안 방향별 통과교통량은 <표 5>와 같다. 동일한 목적링크를 향하는 신호현시를 분산 배치한 현시배열 대안2와 현시배열 대안5가 다른 4개의 현시배열 대안보다 많은 통과교통량을 처리한 결과를 나타냈으나 그 효과는 0.27%~0.52%수준으로 매우 미미하다.

<표 6>과 <표 7>은 각각 신호현시 대안에 따라 동서남북방향 출발링크와 도착링크가 처리한 교통량을 나타낸다. 각 방향별 출발링크와 도착링크의 통과교통 처리량을 극대화한 현시배열 대안이 각기 달라 특정 현시배열 대안이 다른 현시배열 대안에 비하여 뚜렷하게 교차로 하류부 도로의 통과교통량 처리능력을 극대화한 것으로 보기 어려운 상태이다.

<표 4> 혼잡상태 교차로의 현시배열 대안별 교차로 평균 제어지체

<Table 4> Average controlled delay according to phase order alternatives in congested intersection

Phase order alternatives	Average Controlled Delay(sec)
ALT-1	178.51
ALT-2	180.81
ALT-3	182.06
ALT-4	182.28
ALT-5	180.70
ALT-6	182.57
Average	181.16

<표 5> 혼잡상태 교차로의 방향별 통과 교통량
<Table 5> Throughput under the congestion

Direction	ALT-1	ALT-2	ALT-3	ALT-4	ALT-5	ALT-6
T N-S	666	698	665	767	735	762
L N-E	248	176	142	142	224	250
T S-N	679	703	673	775	742	770
L S-W	252	181	144	145	226	255
T E-W	651	723	753	753	683	649
L E-S	246	221	253	150	178	148
T W-E	655	724	753	752	683	653
L W-N	248	223	253	152	184	153
Total	3,645	3,649	3,636	3,636	3,655	3,640
Rank	3	2	5	5	1	4

<표 6> 혼잡 상태 교차로의 출발링크 처리 교통량
<Table 6> Throughput of from link under the congestion

From Link	ALT-1	ALT-2	ALT-3	ALT-4	ALT-5	ALT-6
N	914	874	806	909	959	1,013
S	931	883	817	920	968	1,025
E	897	944	1,006	902	861	796
W	903	947	1,006	904	866	806

<표 7> 혼잡 상태 교차로의 도착링크 처리 교통량
<Table 7> Throughput of destination link under the congestion

Dst. Link	ALT-1	ALT-2	ALT-3	ALT-4	ALT-5	ALT-6
N	926	874	926	927	926	923
S	912	883	918	917	913	910
E	903	944	894	894	907	904
W	903	947	897	897	909	904

2. 비혼잡상태

교차로 하류부 도로의 용량을 1800 veh/hour-lane으로 설정하고 <그림 7>의 현시배열 대안에 따라 시뮬레이션을 수행하였다. 이 때 각 현시배열 대안에 대한 평균지체는 <표 8>에 나타난 것과 같이 평균 78.23초로 <표 1>의 신호교차로 서비스수준에 따라 LOS E에 해당한다.

현재 교차로의 서비스수준은 <표 1>에 따라 LOS E에 해당하나 LOS D(평균 제어지체 70초 이하)와 가깝고 LOS E와 LOS F의 경계에 해당하는 평균 제어지체 100초와는 차이를 나타내 용량상태에 이르지 않은 상태이다. 즉, 모든 교차로 하류부 도로에서 모든 현시배열 대안에 대하여 초과지체가 발생하지 않는다. 3600초의 분석시간동안 방향별 통과교통량은 <표 9>와 같다. 비혼잡 교차로에서 현시배열 대안에 따른 통과교통량 처리수준은 0.03%~0.41%수준으로 역시 현시배열 대안에 따른 통과교통량 증감변화가 거의 없는 것으로 나타난다. 어떠한 현시배열 대안을 채택하더라도 교차로 하류부 도로는 최대지체를 수용 가능한 상태이므로 현시배열 대안 선택에 따른 교차로 운영효율의 변화가 발생하지 않는다.

<표 10>과 <표 11>은 각각 신호현시 대안에 따라 동서남북 방향의 출발링크와 도착링크가 처리한 교통량을 나타냈다. 현시배열 대안에 따라 출발링크와 도착링크 모두 처리 교통량의 증감이 크지 않다.

<표 8> 비혼잡상태 교차로의 현시배열 대안별 교차로 평균 제어지체

<Table 8> Average controlled delay according to phase order alternatives in uncongested intersection

Phase order alternatives	Average Controlled Delay(sec)
ALT-1	78.59
ALT-2	77.70
ALT-3	78.12
ALT-4	78.27
ALT-5	78.09
ALT-6	78.59
Average	78.23

<표 9> 비혼잡상태 교차로의 방향별 통과 교통량
<Table 9> Throughput under the uncongested

Direction	ALT-1	ALT-2	ALT-3	ALT-4	ALT-5	ALT-6
T N-S	1,244	1,260	1,257	1,250	1,235	1,240
L N-E	344	339	331	331	342	343
T S-N	1,252	1,265	1,266	1,256	1,241	1,247
L S-W	348	343	335	336	346	348
T E-W	1,215	1,216	1,221	1,221	1,222	1,220
L E-S	336	336	341	342	345	340
T W-E	1,220	1,225	1,230	1,228	1,228	1,225
L W-N	337	336	341	343	346	341
Total	6,296	6,320	6,322	6,307	6,305	6,304
Rank	6	2	1	3	4	5

<표 10> 비혼잡 상태 교차로의 출발링크 처리 교통량
<Table 10> Throughput of from link under the uncongested

From Link	ALT-1	ALT-2	ALT-3	ALT-4	ALT-5	ALT-6
N	1,588	1,598	1,587	1,581	1,577	1,584
S	1,600	1,608	1,601	1,592	1,587	1,594
E	1,551	1,552	1,562	1,563	1,567	1,560
W	1,556	1,562	1,571	1,571	1,574	1,565

<표 11> 비혼잡 상태 교차로의 도착링크 처리 교통량
<Table 11> Throughput of destination link under the uncongested

Dst. Link	ALT-1	ALT-2	ALT-3	ALT-4	ALT-5	ALT-6
N	1,589	1,602	1,607	1,599	1,587	1,587
S	1,580	1,596	1,597	1,592	1,581	1,580
E	1,564	1,564	1,560	1,559	1,570	1,568
W	1,563	1,559	1,556	1,557	1,567	1,568

3. 용량상태

교차로 하류부 도로의 용량을 514 veh/hour-lane 으로 설정하고 <그림 7>의 현시배열 대안에 따라 시뮬레이션을 수행하였다. 각 현시배열 대안에 대한 평균지체는 <표 12>에 나타난 것과 같이 현시배열 대안에 따라 94.81초에서 100.77초로 차이를 보이며 평균 98.59초에 해당한다. 이와 같은 교차로 평균지체는 <표 1>의 신호교차로 서비스수준에 따라 LOS E와 LOS F의 경계에 해당하는 용량상태로 분석된다.

용량상태에 가까운 교차로에서 3600초의 분석시간동안 방향별 통과교통량은 <표 13>과 같다. 동일한 목적링크를 향하는 G1, G4 현시와 G2, G3 현시를 G1-G3-G4-G2와 G1-G2-G4-G3 으로 분산 배치한 현시배열 대안2와 현시배열 대안5가 다른 4개의 현시배열 대안에 비하여 최소 3.3%에서 최대 4.8% 많은 통과교통량을 처리했다. 이와 같은 결과는 현시배열 대안1, 3, 4, 6에서는 평균제어지체가 100초를 넘는 등 용량상태를 초과하여 교차로 하류부 도로가 최대지체를 수용하지 못하는 현상을 보이지만 현시배열 대안2 또는 현시배열 대안5의 경우 최대지체의 규모가 나머지 4개 현시배열 대안에 비하여 작아 교차로의 수용가능 범위 이내에 해당하는 것으로 분석된다.

세부적으로 총 8개의 방향별 교통량에 대해서는 <표 3>에 제시된 것과 같이 같은 목적 링크를 가지는 앞선 신호현시와의 시간차이에 따라서 증감이 발생하였으나, 교차로 전체의 운영효율 측면에서의 통과교통량은 각 현시를 고르게 배분한 현시배열 대안2와 현시배열 대안5가 가장 우수한 것으로 나타난다.

<표 14>와 <표 15>는 각각 현시배열 대안에 따라 동서남북방향 출발링크와 도착링크가 처리한 교통량을 나타낸다. 현시배열 대안2와 현시배열 대안5에서 목적링크의 통과교통량 처리능력이 크게 증대되었다. 나머지 현시배열 대안의 경우 목적링크가 용량상태를 초과하여 녹색신호시간에도 불구하고 더 이상 도착 교통량을 수용하지 못하였으나 현

시배열 대안2와 현시배열 대안5의 경우 각 방향별 교차로 하류부 도로에 도착하는 교통량을 신호주기 전체에 분산 수용하여 효율을 극대화할 수 있었다.

〈표 12〉 용량상태 교차로의 현시배열 대안별 교차로 평균 제어지체

〈Table 12〉 Average controlled delay according to phase order alternatives in fully saturated intersection

Phase order alternatives	Average Controlled Delay(sec)
ALT-1	100.14
ALT-2	94.81
ALT-3	100.63
ALT-4	100.37
ALT-5	94.84
ALT-6	100.77
Average	98.59

〈표 13〉 용량상태 교차로의 방향별 통과 교통량

〈Table 13〉 Throughput under the fully saturated intersection

Direction	ALT-1	ALT-2	ALT-3	ALT-4	ALT-5	ALT-6
T N-S	1,068	1,130	1,074	1,128	1,118	1,121
L N-E	338	314	252	253	332	337
T S-N	1,082	1,145	1,087	1,137	1,136	1,136
L S-W	341	319	256	258	334	342
T E-W	1,048	1,106	1,108	1,104	1,108	1,047
L E-S	331	326	334	263	319	261
T W-E	1,051	1,110	1,111	1,105	1,108	1,051
L W-N	331	327	335	266	319	263
Total	5,590	5,777	5,557	5,514	5,774	5,558
Rank	3	1	5	6	2	4

〈표 14〉 용량상태 교차로의 출발링크 처리 교통량

〈Table 14〉 Throughput of from link under the fully saturated intersection

From Link	ALT-1	ALT-2	ALT-3	ALT-4	ALT-5	ALT-6
N	1,406	1,445	1,327	1,381	1,450	1,458
S	1,423	1,464	1,343	1,395	1,470	1,477
E	1,379	1,432	1,442	1,367	1,427	1,308
W	1,382	1,437	1,446	1,371	1,427	1,315

〈표 15〉 용량상태 교차로의 도착링크 처리 교통량

〈Table 15〉 Throughput of destination link under the fully saturated intersection

Dst. Link	ALT-1	ALT-2	ALT-3	ALT-4	ALT-5	ALT-6
N	1,413	1,472	1,422	1,403	1,455	1,399
S	1,399	1,456	1,409	1,391	1,438	1,382
E	1,389	1,424	1,363	1,358	1,439	1,389
W	1,389	1,425	1,364	1,362	1,442	1,388

4. 종합분석

대기행렬이론을 이용한 이론적 분석에 따르면 현시배열 대안2와 현시배열 대안5는 나머지 4개의 현시배열 대안에 비하여 최대지체의 길이가 짧다. 따라서 교차로 하류부 도로가 신호현시에 따른 일시적 최대지체에 의하여 포화될 확률이 낮다. 교차로 하류부 도로가 포화된 경우 녹색신호에도 불구하고 차량들은 교차로에 진입할 수 없기 때문에 효율적인 교차로 운영이 이루어질 수 없다.

그럼에도 불구하고 시뮬레이션 분석결과에 따르면 혼잡상태와 비혼잡 상태에서 현시배열 대안2와 현시배열 대안5는 다른 현시배열 대안에 비하여 유의미한 통과교통량 증대효과를 나타내지 못했다. <그림 4>와 <표 2>의 이론적 분석결과에 따르면 현시배열 대안2와 현시배열 대안5가 나머지 4개의 현시배열 대안에 비하여 우수한 교차로 통과교통량 처리능력을 나타내기 위해서는 교차로 하류부 도로가 현시배열 대안1, 3, 4, 6에 의한 최대지체를 수용하지 못하는 과포화 상태에 있어야 한다.

따라서 교차로의 평균제어지체 100초에 가까운 용량상태에서는 시뮬레이션 분석 결과 현시배열 대안2와 현시배열 대안5가 3.3%~4.8%의 유의미한 통과교통량 처리능력 향상을 보여주었다. 즉, 용량상태에 가까운 교차로의 하류부는 Over Flow 발생 직전의 상태로서 현시순서의 조정을 통하여 Over Flow의 발생을 저지할 수 있다는 점이 증명되었다.

VI. 결론

현시배열 대안2 또는 현시배열 대안5로 4지 신호 교차로를 운영했을 때 교차로 하류부 도로의 과포화를 저감하고, 녹색신호시간을 효율적으로 사용함으로써 교차로의 교통량 처리능력이 증대되었다.

동일한 교통조건에서도 교차로내 꼬리 물기와 같은 현상이 이루어질 때 네트워크의 혼잡은 시간이 지날수록 가중된다. 그러나 본 연구에서 제시한 현시배열 대안2 또는 현시배열 대안5를 이용하여 교차로를 운영한다면 적정 범위 이내에서 교차로의

용량초과를 방지할 수 있어 교차로 내부로 진행차량이 넘쳐흐르는 Over Flow를 막고, 네트워크의 혼잡 요인을 저감할 수 있다는 데에 의의가 있다.

다만 본 연구에서 제시하고 있는 신호현시 순서 변화에 따른 분석의 한계는 교통조건을 단순화하고 교차로 신호 운영을 직진과 좌회전으로 단순화하였다는 데에 있다. 하지만 추후 연구에서는 격자구조 도로망을 가지는 대상지에 대하여 현시배열 대안2 또는 현시배열 대안5를 활용한 연동운영 방안에 대하여 연구의 필요성이 있다.

현 시점에서 무리한 현시순서의 변화는 운전자들에게 혼란을 초래하여 교통 안전상의 문제를 야기할 수 있으나 장기적으로 충분한 연구를 통하여 교차로 신호운영의 효율성 증대를 위한 방안으로 도입을 고려할 수 있을 것으로 기대된다. 가령 동서축 도로에 대하여 직진 후 좌회전, 남북축 도로에 대하여 좌회전 후 직진의 방식으로 운영할 때 교차로 간 연동운영을 포함한 교차로 운영의 일관성을 제시할 수 있을 것이다. 또한 시뮬레이션 분석결과를 통하여 알 수 있는 것과 같이 혼잡상태와 비혼잡 상태 교차로의 경우 현시배열 대안에 따른 신호 교차로 운영효율의 증감이 거의 없고, 용량상태에 근접한 교차로에서는 운영효율이 증대되었다. 따라서 이와 같은 신호운영은 특정한 시간대 또는 교차로에서만 제한적으로 시행하는 것이 아니라, 모든 교차로 및 시간대에 대하여 적용하여 운영하는 것이 합리적일 것으로 판단된다.

마지막으로 교차로의 운영효율을 증대시키기 위해서는 본 연구에서 제시한 신호현시의 운영순서

뿐만 아니라 신호의 주기나 녹색신호시간의 배정, 교차로간 연동 등 다양하게 고려해야할 사항들이 많다. 그러나 본 연구의 결과를 통해 확인할 수 있는 것은 기존의 교통조건 조사를 통해 설정한 최적 교차로 운영 및 설계기법을 유지하되, 설정된 각 현시의 순서를 결정함에 있어서 기존의 방식과 같이 국가의 지침 또는 전문가의 주관의 영향을 받지 아니하고 공학적 분석을 통해 하류부에 미치는 시간대별 부하의 정도를 고려한다면 더욱 효율적인 교차로 운영이 이루어질 수 있다고 판단된다.

REFERENCES

- [1] Shin, Dong-chul, "A Study on Application of Phase Based Method at Signalized Intersections", Master's Thesis, Graduated School of KyungSang Kwangju University, pp.5-10, 1999.
- [2] Hyo Seok Jang, "Study on Reducing Delay Depending on order of Leading or Lagging Left-Turn Signal Phasing at Urban Intersection", Master's Thesis, Seoul National University, pp.56-62, Feb. 2010.
- [3] Jun-Han Cho, "Phasing and Sequencing Design Techniques at a Signalized Intersection", Korea Society of Transportation, *Journal of Korean Society of Transportation*, vol.22, no.5, pp.19-33, Oct. 2004.
- [4] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, "Korea Highway Capacity Manual(3rd Edition)", 2013.

저자소개



이 준 형 (Lee, Junhyung)

2013년 3월~ 현재 : 연세대학교 대학원 도시공학과 석박사 통합과정

2009년 3월~2013년 2월 : 연세대학교 도시공학과 학사

e-mail : takion0424@yonsei.ac.kr



손 봉 수 (Son, Bongsoo)

2014년 2월~현재 : 연세대학교 공과대학장

2012년 2월~2014년 1월 : 연세대학교 학생복지처장

2002년 9월~현재 : 연세대학교 도시공학과 교수

1996년 9월~2002년 7월 : 서울시정개발연구원 도시교통연구부 연구위원

1990년 1월~1996년 7월 : 캐나다 Toronto대학교 토목공학과 박사(교통공학 전공)

1988년 1월~1990년 6월 : 캐나다 McMaster대학교 토목공학과 석사(교통공학 전공)

1978년 3월~1982년 2월 : 연세대학교 토목공학과 학사

e-mail : sbs@yonsei.ac.kr