

천안시 외곽지역의 감응식 신호운행을 위한 기초연구

Preliminary Study on Actuated Signal Control at Rural Area of Cheon-an City

박순용* 김동녕**
(Soon-Yong Park) (Dong-Nyong Kim)

요약

최근 대도시의 경우 교통정보센터 및 ITS센터 등을 통하여 도시부 신호교차로를 운영·관리하고 있으며, 천안시도 ITS 1,2,3차 사업을 통하여 2007년 교통정보센터를 설립하여, 버스정보시스템, 교통정보 수집 및 제공 시스템, 주차정보시스템, 그리고 신신호제어시스템 등을 운영하고 있다. 천안시 신호운영체계의 경우, 주요 축별로 신호기를 그룹화 하여 연동화 운영 중에 있으며, 교통량에 따라 실시간으로 주기와 협시가 변동되도록 운영하고 있다. 이와 같이 도시부 Network는 교통 대응식 (TRC; Traffic Responsive Control) 운영모드의 사용으로 교통지체 및 축별 속도 등의 향상을 확인하였다. 그러나 인접도시를 연결하는 지방부 지역의 경우는 전통적인 고정식 운영을 사용함으로써 신호운영효율이 낮은 것으로 확인되었다. 이에 지방부 독립신호교차로 형태의 신호교차로의 효율성 확대를 위해 감응식 운영모드의 사용 가능성을 검토하였다. 이를 위해 천안시 교통정보센터에서 운영하고 있는 신호교차로 중 천안 외곽지역의 신호교차로를 대상으로 감응식 신호제어를 운영하여, 이를 현재 운영 중인 고정식 제어와 비교해 보았다.

그 결과 현장 운영시 감응식 신호운영제어가 고정식 신호운영에 비해 지체감소 효과가 월등하였으며, 비최적화 고정식, 최적화 고정식, 비최적화 감응식, 그리고 최적화 감응식의 네 가지 Case의 시뮬레이션 지체비교에서는 최적화 고정식과 비최적화 및 최적화 감응식의 지체 차이는 통계적으로 차이가 없는 것으로 판명되었다. 이는 지방 중소도시의 경우, 도시부 이외의 지방부 성격을 갖는 신호교차로에서 있어서, 교통량 조사 등과 같은 부가적 노력 없이 신호교차로를 운영할 수 있는 감응식 신호제어 운영이 보다 효과적일 것으로 판단된다.

Abstract

Recently in Korea, in the case of metropolis, the urban signalized intersections are controlled by traffic information center or ITS center. Cheon-an City also established traffic information center through the 1st~3rd. ITS public construction and has managed this center that includes bus information service, traffic information collection and providing service, parking information service, and traffic responsive control system. In the Cheon-an metropolitan traffic signal operation, traffic signal controllers were grouped by the each main traffic flow axes and performed with coordinated signal timing for the signalized arterials, and also cycle and split changed by realtime traffic demands. Cheon-an urban traffic responsive control system was evaluated by intersection delay and speed, then it was verified that the delay decreased and vehicle speed improved. However, the rural signal control system to connect adjacency town was evaluated to have lower status than urban area due to the unimproved TOD (Time of day) plan. Therefore actuated signal control was examined for substitutive control system in isolated signal intersection. The aim of this article is to compare actuated signal control with TOD mode in the rural intersection of Cheon-an and to fine superiority of these two control mode, with evaluation of vehicle delay by using HCM(2000) method and by micro-simulation CORSIM. The result of field test show that actuated signal control gave better performance in delay comparison than the existing TOD signal control. And simulation outcome verified that non-optimized TOD has higher delay than optimized TOD mode, non-optimal actuated mode, and optimal actuated signal control mode. Particularly, these three modes delays had not different values according to the paired sample t-test. This is because small traffic demands were loaded in each links. This suggested actuated signal control is expected to be more effective than TOD mode in some rural isolated intersections which frequently need to survey for traffic volume.

Key words: Actuated signal control, optimized signal control, signalized intersection, control delay, delay field test

* 주저자 : 단국대학교 토목환경공학과 교통공학전공 박사과정

** 공저자 : 단국대학교 토목환경공학과 교수

† 논문접수일 : 2009년 6월 3일

† 논문심사일 : 2009년 6월 23일

† 게재확정일 : 2009년 6월 25일

I. 서론

90년대 중반 국내에 도입된 ITS는 96년 과천시역 시험사업을 필두로 2001년 모델도시 건설사업 이후 지자체를 대상으로 확산일로에 있으며, 천안시도 2005년부터 ITS 구축사업을 추진하였다. 천안시 ITS 구축 내용은 신호교차로 신호운영변수를 교통수요에 따라 실시간으로 갱신하여 운영효율성 증진을 지원하는 ‘첨단교통신호제어시스템’, 문제가 발생한 도로로 추가 유입을 억제하고 교통량을 분산시키기 위하여 도로 이용자들에게 교통정보를 제공하는 ‘교통정보 수집 및 제공 시스템’, 버스의 도착시간, 위치, 환승정보 등 대중교통 운행정보를 제공하는 ‘버스정보 시스템’, 그리고 공영주차장 등의 현재 주차 가능면수 및 위치를 VMS를 통해 알려주는 ‘주차정보 시스템’ 등이 포함되어 있다.

천안시 첨단교통신호제어의 경우, 주요 축별로 신호기를 그룹화 하여 연동화 운영 중에 있으며, 교통량에 따라 실시간으로 주기와 현시가 변동되도록 운영하고 있다. 이렇듯 도시부 Network는 교통 대응식 (TRC; Traffic Responsive Control) 운영모드의 사용으로 교통지체 및 축별 속도 등의 향상을 확인하였다. 그러나 인접도시를 연결하는 지방부 지역의 경우는 전통적인 고정식 운영으로 신호운영효율이 낮은 것으로 분석되었다 [1]. 이에 보다 효율적인 운영과 실시간 교통대응이 가능한 방안으로 감응식 신호제어 시스템이 논의되고 있다.

1. 연구의 목표 및 범위

본 연구는 천안시 교통정보센터에서 운영하고 있는 외곽지역의 신호교차로 중 감응식 신호제어 운영을 실시한 성거읍사무소4지 교차로를 대상으로, 감응식 신호제어 운영과 고정식 신호제어 운영의 효과 및 안정성을 비교 평가하는 기초연구로써 연구의 공간적 범위는 지방부 교차로 성격을 갖는 천안시 외곽의 성거읍사무소4지 교차로를 주요 대상으로 한정하였으며, 시간적 범위는 감응식 신호제어 운영과 고정식 신호제어 운영을 비교 할 수 있도록 각각 1

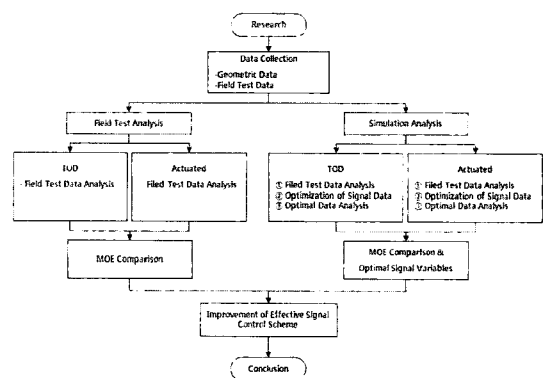
주일(월~금)간 운영하는 것으로 구성하였다.

2. 연구의 방법

본 연구에서는 천안시 외곽지역에서 기 운영되었던 고정식 신호제어 방식과 새로 설치·운영되었던 감응식 신호제어 방식에 대하여 HCM(2000)에서 제시된 지체산정 방식을 통해 비교 분석하였다. 이는 현재 대상 교차로 운영이 고정식으로 운영되고 있어서, 감응식 운영을 통한 현장 지체조사가 불가능하기 때문이었다. 또한 연구는 최적화 프로그램인 Synchro 5.0을 이용하여 감응식 및 고정식 신호제어의 최적화 운영변수를 도출하여 현장실험에서 사용되었던 운영변수들과의 시뮬레이션 비교를 실시하였다. 최적화 운영변수와 현장실험 운영변수와의 효과 비교를 위해 사용한 미시적 교통류 분석 프로그램은 CORISM5.1 이며, 각 네 가지 Case(고정식, 고정식 최적, 감응식, 감응식 최적)에 대한 운영조건(기하구조, 교통량 등)은 현장과 동일하도록 구성하였다.

II. 국내의 문헌고찰

감응식 신호제어를 위해서는 최적 주기 및 최적 녹색시간, 그리고 최적 오프셋(연동의 경우)에 관한 파라메타가 주요 변수로 작용된다. 그러나 국내 대부분의 기존 연구에서는 감응식 신호제어(Actuated Signal



<그림 1> 연구의 흐름
<Fig. 1> Research flowchart

Control)를 위한 신호 운영변수의 최적화 기법연구 보다는 교통대응식 신호제어(TRC; Traffic Responsive Control)에 관한 연구가 대부분을 차지하고 있는 실정이다.

1. 감응식 신호운영 평가

초기 HCM에서는 녹색시간의 효과적 포화도인 포화도 95% 아래의 조건에서 감응식 평가를 제안하였으며 [2, 3], 이에 관해 Akçelik [4]는 감응식의 실제 v/c 대비 효과가 더 작게 나타나는 것을 확인하였다. Kim, J. T. et al. [5]은 감응식 신호운영의 시나리오 평가를 위해 CORSIM 모형을 이용하여, HCM 분석 모형과 추정력을 비교하였다. 그 결과 HCM의 모형보다 향상된 설명력을 갖는 모형을 개발하였다.

2. 최대 녹색시간 선정

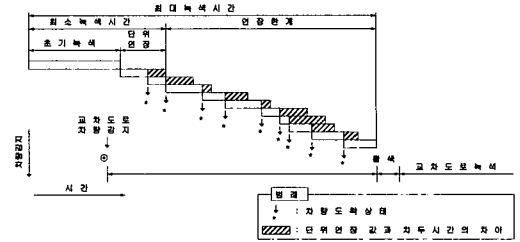
Kell et al. [6]은 엔지니어들이 감응식 운영을 위해 임의로 30~60초 사이에서 최대녹색시간을 설정하는 대신 최적화된 고정식 값의 1.25~1.5배 긴 값의 사용을 제안하였다. 그리고 Lin [7]은 평균지체와 최대녹색시간과의 관계를 시뮬레이션을 통해 증명하였으며, 침투시간계수(PHF)의 수준에 따른 최대녹색시간을 제시하였다. 또한 Kim, J. T. 와 K.G. Coutrag [8]은 위의 두 가지 방식, HCM에서 제시한 방식, 그리고 Genetic Algorithm을 이용한 CORSIM Searching Method에 대한 비교를 실시하여 v/c가 1보다 낮은 경우에 Searching Method가 다른 방식보다 우수함을 증명하였다.

Ⅲ. 감응식 신호제어 알고리즘

1. 기본개념

감응식 신호제어는 한 개 또는 그 이상의 접근로에 매설되어 있는 차량검지기에 의하여 파악된 교통량을 바탕으로 신속성 있게 신호시간을 조정한다.

감응식 신호제어의 신호시간은 매 주기마다 변하므로 독립교차로에 설치·운영하는 것이 보다 효과를 극대화하는 방안이 될 수 있다 [9].



<그림 2> 감응식 신호현시의 구조 [10]
<Fig. 2> Operation of an actuated phase [10]

감응식 신호제어에는 완전감응식(Full Actuated Control)과 반감응식(Semi-Actuated Control)의 두 가지 방식이 있다. 완전감응식 제어에서는 검지기가 모든 접근로에 있어 해당 방향의 신호시간이 연장, 단축 또는 생략될 수 있다. 반감응식 제어에서는 검지기가 부도로 예만 있어 정상시에는 녹색신호가 주도로방향에 유지되다가 부도로에 검지기를 통해 차량이 검지되면 녹색신호가 부도로로 이전되게 된다.

2. 현장적용 알고리즘

1) 감응식 신호제어 전략

현재 신호교차로에서 일어나고 있는 대기시간을 최소화 하고, 녹색시간 서비스를 극대화하며, 안전하고 편안하게 교차로를 통과하는 것을 목적으로 하였다. 감응식 신호제어를 통한 현시의 조기 종결 등이 가능하도록 구현하였으며, 단위연장시간(Unit Extension Interval)을 이용하여 최대녹색시간(Max. Green Time)까지 연장하여 해당 이동류의 서비스 수준을 확보하였다. 최소녹색시간(Min. Green Time)은 동일 현시의 보행자시간으로 설정하였다.

2) 최대·최소녹색시간의 결정

감응식 신호제어 시 최대녹색시간이 작아 차량의 단위연장이 최대녹색시간까지 계속된다면 고정식 신호제어 운영과 같은 운영 형태 및 효과를 가지게 될 것이며, 최대 녹색시간이 너무 크면 차량군 분산 형태에 따라 불필요한 단위연장이 일어나게 될 것이다. 본 현장실험에서는 최대녹색시간의 범위를 현재

운영 중인 고정식 신호제어의 주기 값을 사용 하였다. 이는 기존 문헌들에서 제시된 방식과는 상이하 나, 교통량이 많지 않아 감응식 운영에 미치는 영향 이 크지 않을 것으로 판단한 현장 엔지니어의 판단 때문이다. 또한 최소보행자 녹색시간을 최소녹색시 간으로 사용함으로써 보행권을 확보하였다.

3) 좌회전 단위연장시간의 결정

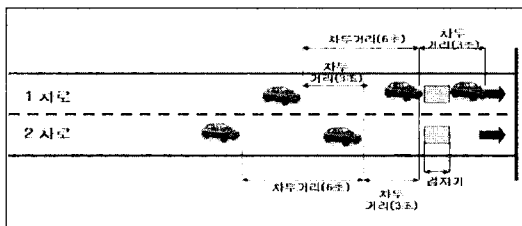
차량이 루프 검지기를 점유하고 있을 때에는 항상 녹색시간을 연장하여 주고, 계속 점유 상태가 지속 된다면 최대녹색시간까지 연장하도록 한다. 이때 적 용 단위연장시간은 회전차량의 속도에 따라 달라 질 수 있는데 그 값은 다음 <표 1>과 같다. 본 감응식 알고리즘에서의 회전차량 단위 연장 시간을 20km/h 맞추어 설정하였다.

4) 직진 단위연장시간의 결정

<그림 3>은 현재 사용되고 있는 검지기의 현황이 다. 현재 사용되고 있는 신호 제어기는 각 차로의 자 료를 실시간으로 받아 이 값을 통합적으로 운영한다.

<표 1> 속도에 따른 회전 교통량 적용 단위연장 시간
<Table 1> Extension time of turning approach according to the vehicle speed

차량의 속도 (km/h)	검지기 통과시간 (sec)	회방 단위 연장시간 (sec)	적용 단위 연장시간 (sec)
20	2.10	3	1.00
30	1.10	3	1.60
40	1.05	3	1.95



<그림 3> 2차로 직진 단위연장시간
<Fig. 3> Extension time at two through lanes

다시 말해서 1차로의 경우 단위연장시간 3초를 초과 하였더라도 2차로에서 단위연장시간 이내의 Call이 입력된다면 이 현시의 녹색시간은 계속 연장 된다. 만약 단위연장시간을 3초로 하고 위의 <그림 3>에서 와 같이 직진 2개 차로에 검지기를 설치한다면 이 도로를 운행하는 차량들은 최대 6초의 단위연장시간 을 가질 수 있다 [11-13].

따라서 실제 입력하고자 하는 단위연장시간보다 는 작은 값을 넣어주며, 이는 Gap Reduction으로 보 완하였다.

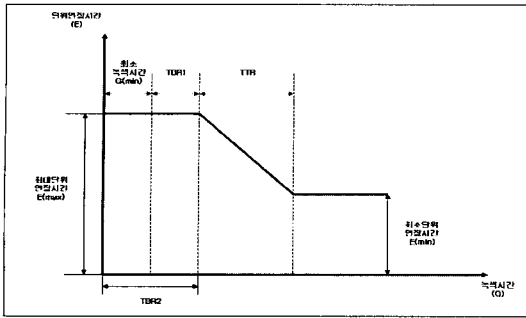
5) Gap Reduction[14]

이 기능은 상충하는(Conflict) 차선에서 차량이 대 기하는 시간이 길어질 경우 검지기가 Passage Time 을 조절해 줄 수 있는 기능이다. 이는 높은 접근로에 서 안전성을 확보할 수 있는 방법으로써 상류부에 설치되어 있는 검지기로 인하여 Allowable Gap이 길 어지는 경우 Gap Reduction 기능을 통해 녹색시간을 효과적으로 종료시키는 역할을 한다. Gap Reduction 에서 사용되는 시간변수는 다음과 같다.

- **Passage time** : 이 시간은 Vehicle interval과 같 으며, Minimum Green Interval을 초과해서 TBR(Time Before Reduction)에 설정된 시간이 경과하지 않았을 때까지는 계속 같은 값이 적용됨.

- **TBR(Time Before Reduction)** : 최초의 상대 (conflict) 차선 차량의 감지가 있을 후 간격 축소가 이루어지기 전까지 경과해야 할 시간임. 만약 감지 된 차량의 처리 요구가 해소되고 TBR시간이 지나지 않았다면, 초기화되어 다음번의 상대 차선처리 요구 가 있기 전까지는 사용되지 않음. TBR에 설정된 시 간이 경과하면 Passage time에 설정된 값과 Minimum Gap에 설정된 시간과의 차이가 축소되기 시작하여 Passage time 값이 Minimum Gap 값에 이를 때까지 계속됨.

- **TTR(Time To Reduce)** : Passage time이 Minimum Gap 까지 감소되는데 걸리는 시간 지정 값 으로서, 이를 통해 Gap Reduction 비율이 결정됨.



<그림 4> Gap reduction timing
<Fig. 4> Gap reduction timing

기존 NEMA 방식의 Gap Reduction의 축소 비율은 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$\text{축소비율} = \frac{(\text{Passenger Time}) - (\text{Minimum Gap})}{TTR} \quad (1)$$

<그림 4>와 같이 Gap Reduction을 실시할 경우 단위연장 시간은 다음과 같다.

- $0 < GC < TBR2$ 일 때,
단위연장시간 = 최대단위연장시간

- $TBR2 < GC < TBR2 + TTR$ 일 때,

$$U.E. = (E_{max} + \frac{E_{max} - E_{min}}{TTR} \times TBR2) + (\frac{E_{min} - E_{max}}{TTR} \times GC) \quad (2)$$

- $TBR2 + TTR < GC$ 일 때,
단위연장시간 = 최소단위연장시간

IV. 현장실험

대상 신호교차로 접근로 상류에서 접근차량의 85% 속도를 사용하여 직진 교통류에 대한 루프검지기 설치 위치가 선정되었으며, 이를 바탕으로 녹색 신호시간의 단위연장 및 Gap-Reduction을 실시하였다. 또한 하류부에서는 정지선 루프 검지기를 사용하여 주기 및 해당 녹색시간에 통과한 차량대수를 검지하여, 고정식 신호 운영과 감응식 신호운영에서

각각의 교차로 운영체제를 산출하여 비교할 수 있도록 하였다. 고정식 방식과 감응식 방식의 신호운영은 각각 1주일(월~금)간 실시하였다.

1. 현장실험 대상지 선정

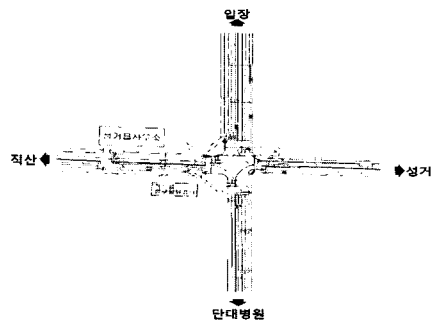
1) 대상 선정 기준

신호교차로의 연구에 있어서 교차로의 기하구조(접근로의 경사, 차로 수 및 폭, 주차차상대 등), 교통조건(중차량 구성비, 보행자횡단 활동, 주차활동 등), 신호조건(주기길이, 녹색시간, 황색시간 등) 등은 매우 중요한 역할을 한다. 그러나 모든 신호교차로가 일률적인 기준이 있는 것이 아니다. 따라서 연구의 주요 목적인 감응식 신호제어와 현재 운영 중인 고정식 방식과의 비교평가를 위해 다음과 같은 기준을 두어 실험대상 교차로를 선정하였다.

- 현재 신호제어기 운영체계가 TOD로 운영되는 곳
- 상류 및 하류부 800m 내에 다른 교차로가 없는 곳
- 주차 등에 의한 노면마찰이 최소인 곳
- 경사가 없으며, 차로 폭 3.0~3.5m인 곳
- 편도 2차로 이상·좌회전 전용 차선이 있는 곳
- 보행자의 영향이 최소인 곳

2) 대상지역의 기하구조

앞의 대상 교차로 선정기준에 의해 선정된 지점은 남북으로는 천안과 입장, 동서로는 성거와 직산이



<그림 5> 대상교차(성거읍사무소) 교차로 기하구조
<Fig. 5> Geometric design at target intersection

이어지는 천안시 외곽에 위치한 성거읍사무소4지 교차로로 이곳의 기하구조는 다음 <그림 5>와 같다.

2. 현장실험 운영변수

1) 고정식 운영변수

2008년 9월 고정식 운영현시체계 및 현시길이는 다음 <표 2>와 같다. 현재 운영 중인 현시길이는 요일별, 시간별 모두 같은 것으로 조사되었다.

2) 감응식 운영변수

2008년 9월 24(월)~9월 30일(화)까지 감응식으로 운영한 성거읍사무소4 교차로의 운영변수는 다음 <표 3>과 같다. 감응식 운영을 위한 현시조합은 대상 신호제어기의 인근 횡단보도와와의 연계로 인해 고정식과 같은 단일링(Single-Ring) 체계로 구성되었다. 이는 교차로 특성상 두 번째 현시인 남북 방향의 직진현시를 신호제어기 상에서 두 개의 현시로 분리하여 사용함으로써 듀얼링(Dual-Ring) 사용을 물리적으로 불가능 하게 하였기 때문이다. 이를 해결하기 위해서는 향후 신호제어기를 추가 설치하여 두개의 신호제어기를 연동 운영하는 방안 등과 같은 방식으로 해결할 수 있을 것으로 사료되나, 본 논문에서는 기존에 설치 운영된 현시 조합만을 사용하여 고정식과 동일한 조건에서 실험이 실시되었다.

<표 3> 성거읍사무소4의 감응식 운영변수
<Table 3> Actuated signal control variables

구분	현시(Phase, 초)				주기(초)	
	1	2	3	4		
감응식	Max G	25	105	40	40	210
	Min G	8	35	26	26	95
	TBR1	3	6	3	3	-
	TBR2	11	41	29	29	-
	TTR	11	30	29	29	-
	Min Gap	2	2	2	2	-
Max Gap	5	5	5	5	-	

3. 현장실험 방법 및 결과분석 방법

1) 현장실험 방법

본 실험은 교통신호제어기에 탑재된 감응식 신호 제어 알고리즘이 현장의 실제 교통상황 및 검지체계 하에서 어떻게 운영되는지 분석하는 것이 주요 목적이다. 이를 위해 동일한 시간대의 기존 고정식 신호 제어 운영 결과와 감응식 운영결과를 비교분석하여 감응식의 효율성 및 안정성을 분석하고자 하였다.

이를 위한 현장실험 기간 및 수집 자료는 다음 <표 4>와 같다.

<표 2> 성거읍사무소4의 고정식 운영변수
<Table 2> Pre-timed signal control variables

구분	현시(Phase, 초)				주기(초)	
	1	2	3	4		
정주기식	월	20(4)	86(4)	27(4)	27(4)	160
	화	20(4)	86(4)	27(4)	27(4)	160
	수	20(4)	86(4)	27(4)	27(4)	160
	목	20(4)	86(4)	27(4)	27(4)	160
	금	20(4)	86(4)	27(4)	27(4)	160

※ 09년 5월 현재 월~금의 주기 및 현시 운영은 동일

<표 4> 실험기간 및 수집자료
<Table 4> Field test collection data

구분	고정식	감응식
실험일시	2008.09.08(월) ~ 2008.09.12(금)	2008.09.24(수) ~ 2008.09.30(화)
실험시간대	00:00~24:00	00:00~06:00 10:00~24:00
자료수집	지점검지자료	○
	신호운영변수	○
	신호운영자료	○
	교통량 분석	○

※ 완전 감응식 실험시간 : 오전 Peak 제외

2) 결과분석 방법

신호운영 결과(고정식, 감응식)와 현장에 설치된 정지선검지체계(Loop 검지기)에서 산출된 교통량 자료를 이용하여 교차로 평균 차량 당 제어지체를 효과척도(MOE : Measure Of Effectiveness)로 사용하였다. 이는 현재 대상 교차로 운영이 고정식으로 운영되고 있어서, 감응식 운영을 통한 현장 지체조사가 불가능하기 때문이었다. 차량 당 제어지체 산정은 HCM(2000) 방식의 차량 당 교차로 평균 제어지체로서, 실험대상 교차로의 특성을 반영하여 균일지체 및 증분지체를 고려하였으며, 신호주기별로 신호지체를 산출하여 주기별 교통량에 대한 가중평균을 하여 평균 제어지체를 산정하였다.

적용된 HCM(2000) 신호지체 계산방법은 다음과 같다 [15].

$$d = d_1 + d_2 \tag{3}$$

여기서,

d = 차량 당 평균제어지체(초/대)

d_1 = 균일 제어지체(초/대)

d_2 = 증분지체

$$d_1 = \frac{0.5\alpha(1 - \frac{g}{C})^2}{1 - [\min(1, X) \frac{g}{C}]} \tag{4}$$

여기서,

Q_0 : 초기 대기차량 대수(대)

d_1 : 균일지체(초/대)

C : 주기(초)

g : 유효녹색시간(초) X : 해당 차로군의 포화도

R : 적색신호시간 (초)

y : 교통량비(flow ratio)=(v/s)

T : 분석시간 길이(시간)

S : 해당 차로군의 포화교통량($vphg$)

$$d_2 = 900 T [(X-1) + \sqrt{(X-1)^2 + \frac{4X}{cT}}] \tag{5}$$

여기서,

c : 해당 차로군의 용량(vph)

4. 현장실험 결과 분석

1) 수요교통량 분석

고정식 신호운영시 일주일 평균교통량은 13,664 (대/일) 이었으며, 월요일부터 금요일로 진행할수록 교통량은 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 감응식 신호운영시에는 교통량의 변화가 미비하였으며, 일 평균 교통량도 고정식 신호운영 기간에 비해 평균 2,718(대/일)대가 적은 것으로 확인되었다. 그러나 일일 교통량 변화 패턴은 유사한 것으로 나타났다.

고정식과 감응식 실험당시의 교통량이 유의한 차이가 있는가에 대하여 통계 패키지 프로그램인 SPSS 12.0k를 통해 일주일 전체 및 요일별 쌍표본 t검정분석 (Paired sample t-test)을 실시하였다. 그 결과 일주일 전체 및 요일별 교통량의 평균차이는 95%신뢰수준에서 통계적으로 상의하지 않은 것으로 검증되었다. 다음 <그림 6>은 일주일전체의 시간대별 교통량 t검정분석 결과를 보여주고 있다.

<표 5> 교통량 분석(단위: 대/일)
<Table 5> Analysis of demand volume(unit: veh/day)

구분	고정식	감응식
월	12,442	11,228
화	12,778	10,996
수	13,486	10,662
목	13,679	10,583
금	15,937	10,760
일주일 평균	13,664	10,846

대용표본 통계량

대용	TOD Volume	평균	N	표준편차	평균의 표준오차
1	ACT Volume	451.9083	120	292.05864	26.66118

대용표본 상관계수

대용	TOD Volume & ACT Volume	N	상관계수	유의확률
1		120	.937	.000

대용표본 검정

대용	TOD Volume - ACT Volume	평균치		차이의 95%신뢰구간		t	자유도	유의확률 (양측)	
		평균	표준편차	하한	상한				
1		117.44167	138.80721	12.67131	92.35121	142.53212	9.288	119	.000

<그림 6> 일주일전체 수요 교통량 쌍표본 t검증 결과
<Fig. 6> T-Paired test for week total demand volume

2) 주기 및 현시길이 분석

감응식 신호운영의 특성상, 주기길이 및 현시길이는 많은 변화를 보였다. 특히 남북방향의 직진현시인 2현시에서는 일주일 평균 40초가 단축되어 기존 대비 46%의 운영시간 단축효과가 있었으며, 1현시의 경우 평균 5초가 단축되어 기존대비 25%의 신호현시 단축효과가 있었다. 그러나 이와는 반대로 3, 4현시의 경우 각각 4초와 3초가 증가하였다. 신호운영 주기의 경우 일주일 평균 38초의 주기 감소효과가 있었으며, 이는 고정식에 비하여 23%의 주기감소 효과가 있는 것으로 나타났다.

3) 교차로지체 분석

전반적인 교차로 제어지체는 감응식 운영이 고정식 운영에 비해 우수한 것으로 확인되었다. 일주일 평균 제어지체의 감소효과는 고정식 대비 감응식이 18.2%나 향상된 것을 확인되었다. 이는 수요 교통량

<표 7> 현시길이 결과(단위: 초)

<Table 7> Phase length(unit: sec)

구분	고정식	감응식	증감(증감율%)
월	1현시	20	15 (-25.0)
	2현시	86	46 (-46.5)
	3현시	27	31 (+14.8)
	4현시	27	30 (+11.1)
화	1현시	20	15 (-25.0)
	2현시	86	46 (-46.5)
	3현시	27	31 (+14.8)
	4현시	27	30 (+11.1)
수	1현시	20	15 (-25.0)
	2현시	86	46 (-46.5)
	3현시	27	31 (+14.8)
	4현시	27	30 (+11.1)
목	1현시	20	16 (-20.0)
	2현시	86	46 (-46.5)
	3현시	27	30 (+11.1)
	4현시	27	30 (+11.1)
금	1현시	20	15 (-25.0)
	2현시	86	46 (-46.51)
	3현시	27	30 (+11.1)
	4현시	27	30 (+11.1)
일주일 평균	1현시	20	15 (-25.0)
	2현시	86	46 (-46.5)
	3현시	27	31 (+14.8)
	4현시	27	30 (+11.1)

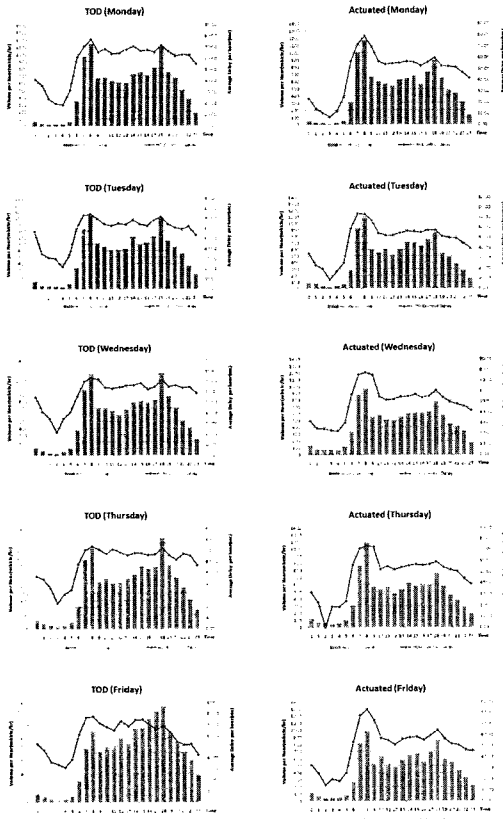
<표 6> 주기길이 결과(단위: 초)
<Table 6> Cycle length(unit: sec)

구분	고정식	감응식	증감(증감율, %)
월	최대	160	150 -10
	최소	160	95 -65
	평균	160	122 -38(23.7%)
화	최대	160	144 -16
	최소	160	95 -65
	평균	160	122 -38(23.7%)
수	최대	160	156 -4
	최소	160	95 -65
	평균	160	122 -38(23.7%)
목	최대	160	150 -10
	최소	160	95 -65
	평균	160	121 -39(24.4%)
금	최대	160	147 -13
	최소	160	95 -65
	평균	160	122 -38(23.7%)
일주일 평균	최대	160	149 -11
	최소	160	95 -65
	평균	160	122 -38(23.9%)

의 차이를 고려한다 하더라도 고정식에 비해 지체 감소 효과가 있는 것으로 판단된다. <그림 7>은 각 요일별 시간 평균제어지체를 보여주고 있으며, <표 8>은 요일별 평균 제어지체를 나타낸다.

<표 8> 주기 당 평균 제어지체(단위: 초)
<Table 8> Average control delay per cycle(unit: sec)

구분	고정식	감응식	증감(증감율, %)
월	57.25	46.57	-10.69 (-18.7)
화	57.79	47.25	-10.54 (-18.2)
수	59.04	48.95	-10.09 (-17.1)
목	59.35	47.04	-12.31 (-20.7)
금	59.36	49.67	-9.69 (-16.3)
일주일 평균	58.56	47.90	-10.66 (-18.2)



<그림 7> 요일별 제어지체 변화
<Fig. 7> Control delay from monday to friday

V. 시뮬레이션 실험

본 연구에서 현장실험은 동일한 교통량조건에서 실시되지 못하였다. 고정식방식과 감응식 방식의 주요 교통량이 서로 상이하였기 때문에 객관적 비교가 불가능한 부분이 존재하였다. 따라서 본 시뮬레이션 실험에서는 이러한 제한사항을 극복하여 보다 객관적인 비교가 가능하도록 하였다. 또한 고정식과 감응식의 최적화 후의 비교를 통하여 다양한 경우에 대하여 살펴보았다.

1. 신호운영의 최적화

1) 고정식 신호운영 최적화 방법

현재 운영 중인 고정식 신호제어 방식은 최적화

<표 9> 고정식 최적화 결과 운영변수

<Table 9> Optimized control variables of pre-timed signal control

구분	현시(Phase, 초)				주기(초)
	1	2	3	4	
고정식	9.5(4) 	20.5(4) 	20(4) 	20(4) 	70

프로그램인 Synchro5.0을 사용하여 최적 주기 및 현시 값을 도출하였다. 최적화시 교통량은 현장실험(고정식)에서 수집된 교통량을 사용하였으며, 그 결과 모든 요일 및 시간대에서 동일한 주기와 현시가 도출되었다. 이는 방향별 교통량이 작기 때문에 최소 주기 및 최소현시를 선택한 것으로 판단된다. 다음 <표 9>는 Synchro5.0의 최적화 구동 결과를 보여주고 있다.

2) 감응식 신호운영 최적화 방법

고정식 신호제어 방식과 동일하게 감응식 또한 최적화 프로그램인 Synchro5.0을 이용하여 각 시간대별 최적화 운영변수 중 주기길이 및 현시길이를 산출하였으며, 기타 Gap Reduction 변수는 기존과 동일하게

<표 10> 감응식 최적화 결과 운영변수

<Table 10> Optimized control variables of actuated signal control

구분	현시(Phase, 초)				주기(초)
	1	2	3	4	
Max G	10	35	26	26	95
Min G	8	21	20	20	70
TBR1	-	3	3	3	-
TBR2	-	24	23	23	-
TTR	-	10	10	10	-
Min Gap	-	2	2	2	-
Max Gap	-	5	5	5	-

사용하였다. 최적 주기 및 현시길이는 모든 시간대에서 동일하게 나타났다. 다음 <표 10>은 Synchro5.0의 최적화 구동 결과를 보여주고 있다.

상기 표에 제시된 바와 같이 감응식 최적화시 또한 현장과 동일한 비교를 위하여 듀얼링을 사용하지 않고 싱글링을 사용하여 신호운영 변수를 도출하였다.

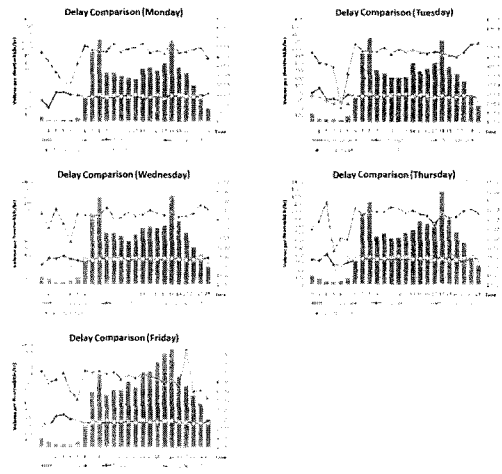
2. 고정식 및 감응식 신호운영의 지체비교

미시적 교통류 분석 프로그램인 CORSIM5.1을 사용하여 고정식 및 감응식 각각의 최적화와 비최적화 Case에 대해 월요일부터 금요일까지 교차로 제어지체를 분석하였다.

시뮬레이션을 통한 고정식 및 감응식 방식의 최적화 이전과 최적화 이후의 분석에서 이용되었던 운영 변수는 앞서 현장에서 사용하였던 운영변수와 최적화에 의해 도출된 운영변수를 이용하여 동일한 교통 조건으로 실시하였다.

시뮬레이션 결과 현장에서 운영된 고정식 신호운영 제어 대비 최적화된 고정식 방식과 비최적화 및 최적화 감응식 신호운영이 지체를 약 20초 정도 감

소시키는 것으로 확인되었다. 또한 최적화된 고정식 방식과 비최적화 및 최적화 감응식 신호운영의 지체는 통계적 검증인 T-Paired Test 결과 차이가 없는 것으로 나타났다. 일부 감응식 최적화 부분이 감응식 비최적화보다 지체가 미미하나마 증가한 부분은



<그림 8> 일주일 네 가지 Case의 지체 비교
<Fig. 8> Delay comparison of four case from Monday to Friday

<표 11> 시간당 평균 제어지체(단위: 초)
<Table 11> Average Control Delay per hour(unit: sec)

Contents	Time	Hour																								
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
Mon	Pre	N	47.23	42.72	36.71	30.61	31.60	41.54	51.16	49.04	47.92	47.96	51.90	47.60	49.20	50.12	52.23	47.26	48.50	46.97	53.23	47.06	48.09	48.65	49.85	44.42
		Op	21.43	17.72	25.79	26.07	24.76	24.29	23.72	23.66	23.27	22.88	22.79	24.01	23.68	24.17	21.59	23.57	23.48	23.33	24.61	23.47	23.63	23.34	23.24	25.13
	Act	N	22.96	22.66	28.99	29.53	22.36	26.31	23.30	23.32	24.67	23.66	24.02	24.04	24.06	23.97	23.70	23.28	23.70	23.19	23.83	24.06	23.21	24.44	22.30	23.75
		Op	22.96	22.66	28.99	29.53	22.36	26.31	23.32	23.46	24.81	23.07	23.96	23.41	22.97	24.44	23.77	23.18	24.32	22.30	24.07	24.59	23.62	23.05	22.83	23.75
Tue	Pre	N	47.41	42.03	41.27	39.70	17.94	36.23	51.82	48.25	47.71	47.78	50.05	46.60	49.14	47.75	48.80	47.57	47.12	47.87	46.67	45.93	44.92	47.55	51.74	52.37
		Op	25.67	28.30	22.35	22.34	21.62	24.88	23.84	23.76	23.77	24.19	23.44	24.59	24.21	24.01	24.43	23.49	24.07	23.26	23.94	24.18	22.78	24.47	24.00	22.77
	Act	N	24.02	23.69	21.21	19.82	22.36	19.60	22.50	24.60	23.95	22.99	23.95	23.98	25.03	23.81	23.36	23.88	24.52	24.42	23.87	24.08	24.53	23.90	23.99	22.00
		Op	20.78	24.62	24.13	17.56	22.21	22.26	23.49	23.74	24.83	23.51	23.96	24.06	24.74	24.93	23.66	24.45	24.16	22.98	23.85	22.92	23.36	23.73	25.41	22.29
Wed	Pre	N	48.31	40.79	50.61	43.23	33.45	47.98	47.47	46.67	47.32	51.17	45.93	45.85	48.87	46.87	47.75	49.86	48.37	47.43	48.13	46.48	47.01	48.12	52.73	50.45
		Op	20.69	24.11	24.06	25.41	23.88	23.03	22.33	23.63	24.64	23.51	24.40	24.47	22.65	23.77	23.55	23.75	23.41	23.36	24.60	23.75	23.26	23.35	23.49	24.20
	Act	N	23.69	20.69	28.19	29.13	20.55	25.33	23.55	24.03	25.31	23.82	23.85	24.67	23.96	23.29	23.35	23.98	22.96	23.61	24.16	23.94	25.16	23.66	24.25	22.09
		Op	23.02	20.69	28.19	29.13	20.55	25.33	23.17	23.25	23.82	23.86	23.49	23.68	23.60	23.98	23.62	24.00	23.64	23.94	23.96	23.51	23.23	23.17	24.08	22.39
Thu	Pre	N	39.97	44.34	54.16	28.35	35.21	34.61	50.75	47.31	49.25	49.32	49.05	51.56	50.87	48.34	49.88	47.87	47.25	42.30	47.87	46.03	46.41	49.40	50.38	48.34
		Op	23.50	23.01	26.45	20.81	20.60	22.01	23.25	23.83	24.03	23.59	23.47	23.25	23.52	23.29	23.51	23.11	24.32	23.30	24.73	23.28	23.45	21.84	24.73	23.82
	Act	N	19.53	25.32	23.68	17.86	20.73	24.26	23.47	23.14	23.98	23.35	24.56	23.78	24.75	24.38	22.97	23.59	23.93	23.41	24.07	22.97	23.35	22.81	22.48	23.01
		Op	19.24	25.32	23.68	17.86	20.73	24.26	23.30	23.70	24.81	23.63	23.72	24.41	25.08	24.72	23.81	23.89	24.17	23.26	23.62	23.03	23.17	23.93	25.11	23.01
Fri	Pre	N	51.20	44.73	46.64	50.16	40.33	36.03	51.66	50.61	51.26	49.35	50.35	46.49	48.76	47.39	49.65	47.94	47.30	44.55	46.70	43.04	62.80	40.08	40.69	36.51
		Op	23.23	21.47	26.86	22.73	23.55	25.10	22.64	23.31	24.06	24.11	23.94	24.15	24.05	23.96	24.02	23.29	24.04	24.07	24.24	23.98	22.26	22.74	22.72	22.82
	Act	N	22.16	21.69	24.68	22.73	23.55	25.10	22.64	23.31	24.06	24.11	23.94	24.15	24.05	23.96	24.02	23.29	24.04	24.07	24.24	23.98	22.26	22.74	22.72	22.82
		Op	22.39	21.69	24.68	22.73	23.55	24.28	22.27	23.41	23.73	24.30	23.60	23.73	23.27	24.58	23.43	23.56	24.26	24.27	23.79	23.24	22.56	22.72	22.72	22.78

※ Pre: Pre-timed Signal Control / Act: Actuated Signal Control / N: Non Optimal / Op: Optimal / : Minimum Control Delay

Gap Reduction의 TTR(Time To Reduction) 값이 달라 졌기 때문에 판단된다. 위의 <그림 8>은 네 가지 Case에 대한 각 요일별 평균 차량 당 체어지체를 보여주고 있다.

VI. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 지방부 독립신호교차로에서 고정식 신호운영방식 대신 감응식 신호운영제어의 효율적 활용가능성에 대하여 확인해 보았으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫 번째, 현장실험 운영시 수요 교통량이 동일하지는 않았으나, 감응식 운영이 교차로 지체 감소에는 더 효과가 있는 것으로 나타났다.

두 번째, 현장실험의 수요 교통량 차이를 보완하여 평가하기 위하여 동일 교통조건 하에서 최적화 이전 및 이후의 고정식과 최적화 이전 및 이후의 감응식 신호운영의 네 가지 Case에 대하여 시뮬레이션 분석을 실시하였다. 분석결과 전반적으로 감응식 운영이 지체 감소효과가 있는 것으로 나타났으며, 감응식 운영 중 최적화 이전과 이후의 지체 변화는 거의 없었다. 이는 교통량이 작아 최소 주기로 운영되었기 때문에 판단된다.

현재 많은 지방부 신호교차로 들이 고정식으로 운영되고 있다. 그러나 고정식 방식 또한 최적화 되지 못한 상태에서 운영됨으로써 불필요한 지체와 정체를 유발하고 있는 실정이다. 본 연구를 통해 확인해 본 결과 고정식운영의 최적화만으로도 차량의 지체를 감소하는 효과를 보였다. 그러나 고정식 방식의 특성상 교통량 조사를 통한 신호운영 변수의 변화가 쉽지 않다. 따라서 이러한 신호교차로들을 감응식으로 운영한다면, 교통량 조사 등과 같은 부가적 노력 없이 신호교차로의 운영을 보다 효과적으로 운영할 수 있을 것으로 판단된다.

향후 연구과제로는 본 연구에서 미진하였던 고정식과 감응식의 현장실험에 대하여 신호운영 기간을 연장하여 적절한 Data의 상대비교 연구가 추가 되어야 할 것이다. 이때 현장 지체조사를 통한 결과와 본 연구에서 사용하였던 HCM(2000) 지체산정 모형과

의 비교 검토도 추가되어야 할 것으로 사료된다. 또한 지역 및 정책적 여건에 의해 제한되었던 듀얼링(Dual-Ring) 사용을 통한 보다 적극적 감응식 운영에 대한 고찰이 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] (주)대중교통포럼, 천안시 지능형 교통체계(ITS) 구축사업 사전·사후 평가(최종보고서), 천안시, 2008. 3.
- [2] TRB, *Highway Capacity Manual*, 1985.
- [3] TRB, *Highway Capacity Manual*, 1984.
- [4] R. Akçelik, "Signal timing calculation methods for vehicle-actuated and fixed time signals," *ARRB, Transportation Research*, TO WD95/020, 1995.
- [5] J. T. Kim, M. S. Chang, B. S. Son, and T. W. Doh, "Development of an average green time estimation model for proper evaluation of traffic actuated operation," *대한교통학회지*, 제20권, 제3호, pp. 159-168, 2002. 6.
- [6] J. H. Kell and I. J. Fullerton, *Manual of Traffic Signal Design*, 2nd Ed., Prentice Hall, 1991.
- [7] F. B. Lin, "Optimal timings settings and detector lengths of presence mode full-actuated control," *Transportation Research Record 1010*, pp. 37-45, 1985.
- [8] J. T. Kim and K. G. Courage, *Evaluation and design maximum green time settings for traffic actuated control*, TRR, 2003.
- [9] 박창호, 전경수, 고승영, 김동녕, 김영찬, 서선덕, 설재훈, 윤항묵, 이성모, 장현봉, 최기주, 최재성, *교통공학개론*, 영지문화사, 2000. 9.
- [10] 도철웅, *교통공학원론(상)*, 청문각, 1996.
- [11] 오영태, 이철기, "실시간 교통신호제어를 위한 루프 검지기의 최적형태결정에 관한 연구," *대한교통학회*, 제13권, 제3호, pp. 67-86, 1995. 9.
- [12] P. S. Parsonson, *Use of EC-DC detector for signalization of high-speed intersection*, TRR 737, 1979.

- [13] P. S. Parsonson, *Signalization of high-speed, isolated intersections*, TRR 681, 1978. *Signal Design, ITE*, 1991.
- [14] J. H. Kell and I. J. Fullerton, *Manual of Traffic* [15] TRB, *Highway Capacity Manual*, 2000.

저자소개



박 순 용 (Park, Soon-Yong)

2008년 9월 ~ 현재 : 단국대학교 토목환경공학과 교통공학 박사과정 재학
2007년 11월 ~ 2008년 4월 : 한국교통연구원 육상교통연구본부 연구원
2004년 7월 ~ 2007년 3월 : 한국교통연구원 첨단교통연구실 연구원
2004년 8월 : 단국대학교 토목공학과 교통공학 석사
2000년 2월 : 단국대학교 토목공학과 공학 학사



김 동 녕 (Kim, Dong-Nyong)

2009년 9월 ~ 현재 : 단국대학교 공학대학 학장
1984년 9월 ~ 현재 : 단국대학교 토목환경공학과 교수
1981년 3월 ~ 1984년 8월 : 국토연구원 연구원
1990년 8월 : 서울대학교 토목공학과 공학 박사
1982년 2월 : 서울대학교 토목공학과 공학 석사
1976년 2월 : 서울대학교 토목공학과 공학 학사