▣ 論 文 ▣

영상검지기를 이용한 좌회전 감응식 신호제어전략 개발

Development and Evaluation of a Left-Turn Actuated Traffic Signal Control Strategy using Image Detectors

은 지 혜 (가평군청 건설교통과)
오 영 태 (아주대학교 환경건설교통공학 부교수)
윤 일 수 (아주대학교 환경건설교통공학부 조교수)
이 철 기 (아주대학교 ITS대학원 교수)
김 남 선 (치안정책연구소 책임연구관)
한 웅 구 (성남시청 건설교통국 교통기획과)

목 차

Ⅰ. 서론
1. 연구의 배경 및 목적
2. 연구의 범위 및 방법
Ⅱ. 기존연구고찰
Ⅲ. 좌회전 감응식 신호제어전략 개발
1. 검지체계 설계
2. 신호제어 알고리즘 개발
Ⅳ. 좌회전 감응식 신호제어전략 평가
1. 평가방법론
2. 결과 분석
Ⅴ. 결론 및 향후 연구과제
참고문헌

Key Words : 영상검지기, 교통신호제어, 좌회전 감응, 반감응, 감응신호
Image Detector, Traffic Signal Control, Left-Turn Actuated, Semi-Actuated, Actuated Signal

요 약

기존 루프검지기를 이용한 반감응 신호제어는 한정된 검지영역으로 인해 대기 차량수에 따른 초기녹색시간의 산정이 불가능하며, 좌회전 베이 측면에서 진입하는 차량과 중차량 및 U턴 차량으로 인해 비합리적인 현시 조기종결문제가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 감응현시의 초기녹색시간을 대기 차량수에 맞게 최적화하고, 검지영역 내 차량소거 여부를 파악함으로써 현시의 연장 및 조기종결을 결정하는 좌회전 감응식 신호제어전략을 개발하였다. 차량의 검지를 위해 영상검지기의 Video Image Tracking기술을 이용하였으며, 영상검지영역은 목적에 맞게 Zone in Zone방식의 3개 영역으로 구분하여 Zone1은 차량의 존재유무 파악, Zone2는 대기 차량수 파악, Zone3는 통과 차량수 파악의 기능을 수행하도록 설계하였다. CORSIM을 이용한 본 좌회전 감응제어의 현장 적용성 평가 결과, 정주기 제어, 반감응 제어(1), 반감응 제어(2)에 비해 Control delay가 각각 23.10%, 15.06%, 4.34% 감소하였으며, Queue time은 36.24%, 20.10%, 7.42%, Total time은 14.36%, 7.02%, 2.96% 감소하여 운영효율이 향상된 것으로 나타났다. 또한, 직진과 좌회전 v/c비에 따른 적용성 평가 결과, 직진교통량이 포화상태에 근접할수록, 좌회전 교통량이 적을수록 개선효과 큰 것으로 나타났다.

This paper discusses a method for optimizing the semi-actuated traffic signal control system by adjusting the initial interval according to the number of vehicles waiting for the green light in the actuated phase. We also present a Left-Turn actuated traffic signal control strategy that examines the vehicular noise in the detection area and determines the phase extension and the gap-out. In order to detect the vehicles in real-time, an image detector's Video Image Tracking technology was adopted. A 'Zone in Zone'method was implemented, and the image detection area is segmented into three zones: 1) Zone1 for verifying a vehicles obligatory presence, 2) Zone2 for counting the standby vehicles, and 3) Zone3 for examining the number of vehicles that have passed. The on-site assessment of the Left Turn Actuated Control is carried out using CORSIM, and the results show that the Control Delay decreased by 23.10%, 15.06%, and 4.34% compared to the delays resulted from pre-timed control, semi-actuated control-1 and semi-actuated control-2 traffic signal control systems respectively. The Queue Time also decreased by 36.24%, 20.10% and the Total Time by 14.36%, 7.02% for the same scenario. Which clearly demonstrates the operational efficiency. A sensitivity analysis reveals that the improvement from the propose traffic control strategy tends to increase as the through traffic volume reaches a saturated condition and the left-turn traffic volume decreases.

Ⅰ. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

국도 상의 교차로는 대부분 일정한 신호주기 및 현시순서, 연동값에 의해 운영되거나 신호제어기에 내장된 시간대별 신호시간(TOD), 요일별 신호시간(DOW) 및 특수일 신호시간 테이블(Holiday Plan Table)에 의해 운영되는 고정 주기식 신호체계방식으로 운영되고 있다. 이러한 고정 주기식 신호체계방식은 계절별, 요일별, 시간별로 교통량의 변동이 큰 국도의 교통특성을 잘 반영하지 못하기 때문에 신호시간의 낭비 및 주도로 상에 불필요한 지체를 야기하고, 비효율적 신호운영은 결국 차량의 신호위반 및 과속을 유발함으로써 심각한 교통사고의 원인이 되고 있다.

한편, 우리나라 일반국도 총 교차로 12,111개소 중 3지 교차로의 형태는 74%로, 4지 교차로 24%에 비해 그 수가 월등히 많다. 또한, 3지 교차로 중 약 73%는 주도로와 부도로가 만나는 형태의 교차로에 해당된다.[1] 이러한 사실은 국도 상의 신호운영에 있어서 주도로와 부도로가 교차하는 3지 교차로에 대한 더 많은 연구가 이루어져야함을 잘 보여준다.

주도로와 부도로의 구분이 명확한 3지교차로의 경우, 교통수요가 적은 부도로 방향에 검지기를 설치하고 차량의 call이 있을 경우에만 현시를 부여하는 반감응 신호제어가 효율적이다. 하지만 기존 루프검지기를 이용한 반감응 신호제어는 한정된 검지영역으로 인해 대기 차량수에 따른 초기녹색시간의 산정이 불가능하며, 좌회전 베이 측면에서 진입하는 차량과 중차량 및 U턴 차량으로 인해 비합리적인 현시 조기종결문제가 발생할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 영상검지기술을 활용하여 감응현시의 녹색시간을 차량수요에 맞게 최적화하고, 검지영역 내 잔여차량 파악을 통해 단위연장여부를 결정함으로써 기존 반감응 신호제어시스템의 고정된 초기녹색시간과 비합리적 조기종결로 인한 한계점을 보완할 수 있는 신호제어전략 및 검지체계의 개발을 목적으로 한다.

2. 연구의 범위 및 방법

1) 연구의 범위

(1) 내용적 범위

본 연구의 내용적 범위는 다음과 같다.

- 교통변수의 정의
  - 좌회전 감응식 신호제어 운영을 위해 필요한 교통변수 정의
- 영상검지기 차량검지방안 수립
  - 신뢰성 높은 교통변수의 수집을 위한 차량검지방식 수립
  - 검지 목적별 교통변수의 수집을 위한 영상검지영역의 분할 및 설정
- 신호운영 방안 수립
  - 좌회전 감응현시의 생략 및 조기종결 방안
  - 대기차량 수에 따른 초기녹색시간의 산정
- 좌회전 감응식 신호제어시스템 알고리즘 개발
  - 신호운영 방안을 수렴하는 알고리즘 개발
- 좌회전 감응식 신호제어시스템 평가
  - 시험대상 사이트 선정, 방향별 교통량에 따른 다양한 시나리오 설정
  - CORSIM을 이용한 정주기 신호제어, 반감응 신호제어와의 운영효율 비교·평가

(2) 공간적 범위

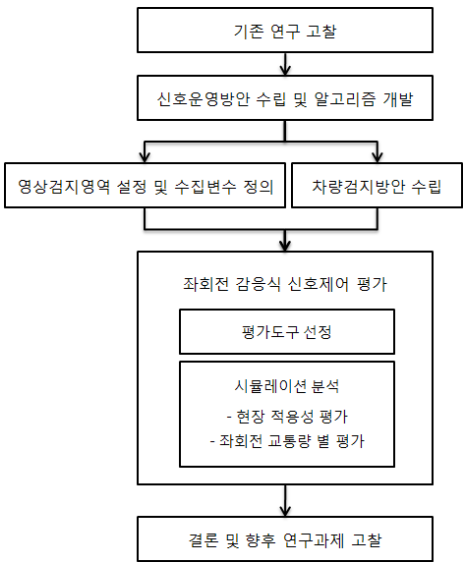
좌회전 감응식 신호제어시스템은 다음과 같은 교차로를 대상으로 한다.

- 주방향 교통량이 부방향 교통량에 비해 현저히 많은 3지교차로
- 주도로 좌회전 및 부도로의 교통수요 변동이 심한 교차로
- 비신호로 운영되어 사고의 위험성이 높은 교차로
- 루프검지기의 손상이 잦아 새로운 검지시스템의 도입이 요구되는 교차로

2) 연구의 방법

본 연구의 수행방법은 좌회전 감응식 신호제어전략에서 제시한 교통변수정의, 차량검지방안 및 신호운영방안을 알고리즘으로 구현한 후, 이를 CORSIM으로 평가하며 전체적인 연구의 진행은 〈그림 1〉과 같다.

1) 한국교통연구원, "일반국도의 신호운영 개선을 위한 연구", 2004



〈그림 1〉 연구의 방법

Ⅱ. 기존문헌고찰

차량의 안전과 원활한 통행소통을 위하여 설치한 신호교차로가 산업개발이 가속화되면서 차량의 급격한 증가로 인하여 지체의 주요한 원인 중 하나로 대두되면서 미국과 유럽을 중심으로 1970년대 후반부터 신호교차로의 효율적인 제어를 위한 연구가 활발하게 시작되었다.

초기에는 주로 도시 내의 교통 혼잡을 최소화시키는 연구가 주를 이루었으나, 최근에는 도시 내 신호 운영과 더불어 제어효과 측면에서 높은 효율을 보이는 지방부 도로로 연구의 범위가 확대되고 있다.

교통과학연구원의 연구에서는 지방지역 일반도로 독립교차로의 실시간 교통대응제어체계 개발을 실시하여, 제어기의 소프트웨어와 검지기 체계 등 하드웨어를 개선·보완한 시스템을 개발하여 현장실험을 실시하였다. 그 결과 지체와 딜레마존(Dilemma Zone)의 감소를 확인한 바 있다. 그러나 이것은 교통대응(TRC : Traffic Response Control)방식의 제어기로서 COSMOS (Cycle, Offset, Split Model of Seoul)제어기를 모체로 하고 있으므로, 실시간 제어(Real Time Control)와는 다소 차이가 있을 수 있다.[2)]

교통개발연구원에서는 고속으로 운영되는 일반국도의 연동신호제어 하에서 신호교차로 통과차량의 안전성을 높이는 딜레마감응 제어방법을 개발하였으며, 이를 평가하기 위한 HILS(Hardware in Loop System)의 개발도 함께 이루어졌다. HILS 장비를 통한 실내시험평가 및 일반국도 1호선 오산시, 화성시 관내 신호교차로에 시스템을 구축하여 현장평가를 실시한 결과, 교통소통 및 안전 측면에서 모두 효과를 입증하였다.[3)]

한국교통연구원에서는 고양시 관내를 지나는 지방도 310번 상의 6개 교차로를 대상으로 중요교차로의 차량검지체계로부터 얻어진 신호주기 정보를 반감응 제어를 위한 공통신호주기로 이용하여 인접 교차로와 연동하는 시스템을 구축하여 그 효과를 확인한 바 있다.[4)]

이 외에도 석종수(인철발전연구원, 2004), 이두선(단국대학교, 2006), 배광수(서울시립대학교, 2002), 이용일(서울시립대학교, 2004), 박순용(단국대학교, 2004), 정동우(인천대 대학원, 2009) 등이 지방부 도로의 감응신호제어시스템 도입의 타당성을 도출한 바 있으나, 검지체계의 변화를 통한 시스템 개선에 대한 연구는 미약하다.

따라서 본 논문에서는 영상검지기를 이용하여 다음과 같은 기존 루프검지기를 이용한 감응식 신호제어시스템의 한계점을 개선할 수 있는 신호제어전략을 개발하고자 한다.

〈표 1〉 신호제어 개발 전략

문제점	반감응제어 한계점	개발전략
고정된 초기녹색 시간	- 차량의 접근속도가 56km/h 이상인 경우 계측된 차량 대수에 맞는 초기 녹색시간을 정하는 것이 교통운영에 더욱 안정적임[5)] - 검지기 설치위치에 따라 초기녹색시간 고정 (차량수요에 민감하게 반응하지 못함)	대기 차량대수를 파악하여 매주기 적정 초기녹색시간을 산정 (가변 초기녹색시간)
비합리적 조기종결 문제	- Headway가 큰 중차량 및 U턴 차량에 의한 비합리적 조기종결로 인한 좌회전 차로 지체 발생 - 차로 측면에서 진입하는 추가차량을 검지하지 못할 가능성 존재	영상검지영역 내 잔여 차량 파악을 통한 조기종결 결정

2) 도로교통안전관리공단, 지역단위 실시간 교통신호제어체계 개발, 2002
3) 건설교통부, 국도상의 신호교차로의 소통 및 안전기능 고도화를 위한 교통신호제어기기 개발, 2004
4) 한국교통연구원, 반감응제어 신호기 설치사업 사업관리, 2005
5) Peter S. Parsonson, "Signalization of High-Speed, Isolated Intersections", TRR 681, 1978.

Ⅲ. 좌회전 감응식 신호제어전략 개발

1. 검지체계 설계

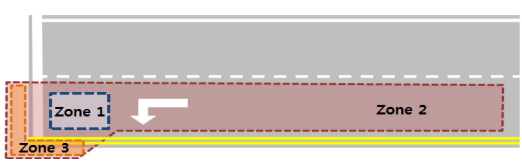
본 연구에서는 교통수요가 적은 부도로 및 주도로 좌회전 차량의 존재유무 및 대기차량 대수 파악을 위한 검지기로써 기존 루프검지기의 단점을 보완하며 실시간으로 자료를 처리할 수 있는 있는 Zone in Zone방식의 영상검지기술을 적용하였다.

1) 영상검지영역 설정방안

좌회전 감응식 신호제어를 위한 영상검지영역은 〈그림 2〉와 같이 Zone in Zone방식의 3개 영역으로 설정된다.

각 검지영역의 역할은 다음과 같다.

Zone1은 차량의 존재여부를 파악하여 감응현시의 부여 및 생략을 결정하며, Zone2는 상류부에서 진입하는 차량수를 계산하여 감응현시의 초기녹색시간을 산정하는 역할을 담당한다. 또한, Zone2는 Zone1의 검지 오류로 인해 차량이 존재함에도 불구하고 현시가 생략되는 현상을 방지하기 위해 영역 내 추적된 차량이 1대 이상인 경우 감응현시를 생략하지 않도록 하는 기능을 담당한다. Zone3는 감응현시 내에 교차로를 통과하는 차량 수(진출 차량수)를 파악하는 영역으로, Zone2 내 진입한 차량이 모두 소거(진입 차량수 - 진출 차량수)되었는지를 확인함으로써, 현시의 연장 및 조기종결을 결정하는 역할을 담당한다.



〈그림 2〉 영상검지영역의 설정

〈표 2〉 영상검지영역의 수집자료 및 용도

검지영역	수집자료	용도
Zone1 (Presence Zone)	차량의 존재유무	- 감응현시 부여유무 결정
Zone2 (Queue Zone)	진입 차량수	- 감응현시 부여유무 결정
	잔여(진입-진출) 차량수	- 진입 차량수를 파악하여 감응현시 초기녹색시간 산정
Zone3 (Passing Zone)	진출 차량수	- 잔여 차량이 모두 진출할 때까지 감응현시 연장 (단, 최대녹색시간 이내)

각 영역의 설정길이는 다음과 같다.

Zone1은 한 대 이상의 차량이 있음을 검지하면 조건을 만족하므로, 정지선으로부터 0.3m 이내에 약 4m의 길이로 설정하며, Zone3는 차량 진행시 검지영역을 통과할 수 있도록 정지선 전방에 설치하되, 차량이 정지선을 밟지 않고 회전 하는 경우를 고려하여 차로 측면으로 약 12m이상 연장하여 설정한다. Zone2의 길이는 Traffic Control Systems Handbook(FHWA)에서 제시하고 있는 안전정지 거리 이상이 되도록 설정함으로써, 안전정지 거리 내에 차량이 있을 경우 현시를 연장할 수 있도록 한다. 〈표 3〉은 황색신호에 반응하는 임계감속도를 5.0m/sec²로 했을 때 차량의 접근속도에 따른 안전정지거리 및 검지영역 설정 길이를 나타낸 것이다.

이와 같이 영상검지영역을 설정하면 좌회전 차량의 속도가 낮아 단위연장시간 내 차량이 교차로를 빠져나가지 못하더라도 녹색시간을 지속적으로 연장시켜줄 수 있기 때문에 현시가 불합리하게 조기종결 되는 문제를 해결할 수 있으며, 검지기의 set-back거리에 맞게 단위연장시간을 크게 설정하지 않아도 되기 때문에 교통수요에 보다 유연하고 민감하게 대응할 수 있는 장점이 있다.

〈표 3〉 Zone2 검지영역의 길이

접근속도 (kph)	감속거리 (m)	반응거리 (m)	안전정지 거리(m)[6]	검지영역 길이(m)
30	6.9	8.3	15.2	16
40	12.3	11.1	23.4	24
50	19.3	13.9	33.2	34
60	27.8	16.7	44.5	45
70	37.8	19.4	57.2	58
80	49.4	22.2	71.6	72

〈표 4〉 영상검지영역의 설정길이

검지영역	설정 길이	비고
Zone1 (Presence Zone)	정지선으로부터 0.3m이내에서부터 약 4m 연장	※ 각 검지영역은 검지기 설치 후 모니터링을 통해 현장상황에 맞게 튜닝작업이 필요함
Zone2 (Queue Zone)	교차로 접근속도에 따른 안전정지 거리 이상	
Zone3 (Passing Zone)	정지선 부근, 차로 측면으로 12m 연장	

6) FHWA, Traffic Control Systems Handbook, 1976

2) 차량 검지방안

검지영역 내 차량의 검지는 지점검지(Point Detection)방식과 지역검지(Area Detection)방식을 병행하며, 지역검지방식은 최근 주정차단속, 끼어들기단속 등에 많이 활용되고 있는 Video image Tracking방식을 활용한다.

(1) Zone1(Presence Zone), Zone3(Passing Zone)

Zone1과 Zone3에서는 차량의 존재유무를 파악하고, 정지선을 통과하는 차량의 대수를 Count하는데 유리한 '영상 Loop 또는 Bar방식'을 이용한다.

'영상 Loop 또는 Bar방식'은 Loop Coil 차량검지 방식과 동일하게 영상화면상에 직사각형 또는 Bar-type의 영상 Loop 또는 검지선(영상 line)을 설정하고, 이 위를 통과하는 차량의 영상 내 Pixels의 Grey level 변화를 분석하여 차량의 존재여부를 검출하는 방식으로써, 이를 통해 차량의 존재유무 및 통과차량 대수 뿐 아니라 〈그림 3〉에 제시된 식에 의하여 다양한 교통변수를 산출할 수 있다.

(2) Zone2(Queue Zone)

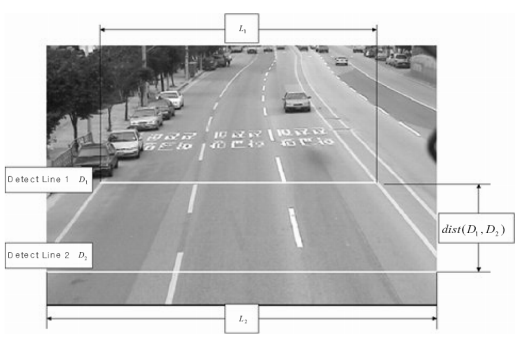
Zone2에서는 대기차량 수를 정확히 파악하는 것이 중요하므로, 기존 영상검지기의 Occlusion 문제를 해결하는데 용이한 'Video image Tracking방식'을 이용한다.

'Video image Tracking방식'은 영상 화면내의 차선별 또는 도로 내에 설정된 검지 Line 또는 검지영역(Area)내에 주행하는 차량에 의하여 발생되는 영상화소(Pixels)의 움직임을 추적하는 방식으로써, 검지영역에 진입하는 두 차량이 분리되어 Tracking이 시작되면 대기시에 Occlusion현상이 발생되더라도 개별차량으로 인식하게 되므로 대기차량 수 파악에 유리한 장점이 있다.

차량의 Tracking 과정은 다음과 같다.

- 비교 영상 추출 : 배경영상과 현재영상의 차이를 비교하여 차량 영상을 추출
- Morphology : 보정작업, 개별차량의 윤곽과 내부의 빈공간 채움 + 노이즈 제거
- 차량 트랙킹 : 개별차량의 중심좌표를 추출하여 부여된 개별차량 ID와 함께 저장
- 위의 과정 후, 영상에서 이전 프레임에서 추출된 개별차량의 중심좌표가 현재프레임에서 추출된 개별차량 영역 내에 포함되면 동일차량으로 인식하여 추적이 시작됨

〈그림 4〉는 교차로에 진입하는 차량을 대상으로 Video Image Tracking방식을 통해 대기차량 수를 파악한 실험결과이다. 실험 결과, 다른 차선에서 끼어든 첫 차량을 제외하고는 모두 정상적으로 추적, 분류되었으며, 다른 차선의 추적을 실행하면 첫 차량 또한 정상적으로 검지할 수 있는 것으로 파악되었다.



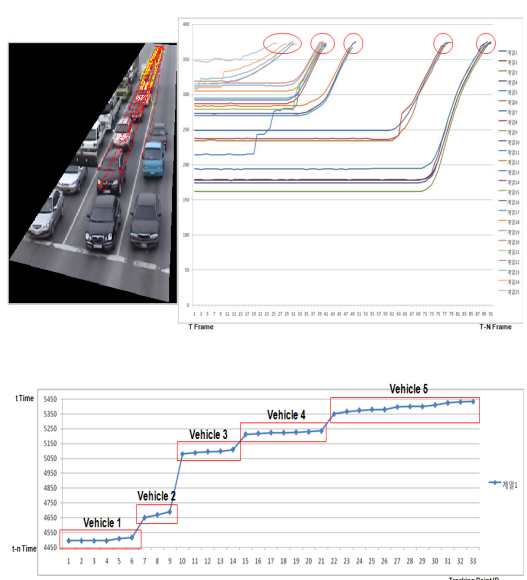
$$속도 = \frac{dist(D_1, D_2)}{T_1(n) - T_2(n)} = \frac{dist(D_1, D_2)}{\frac{1}{30} \times F(n)}$$

$$점유율 = (\frac{1}{L_1} \sum_{i=1}^{k} A_i) \times 100$$

$$차량길이 = (T_1^*(n) - T_1(n)) \times 속도$$

$$차간거리 = [T_1(n+1) - T_1^*(n)] \times 속도$$

〈그림 3〉 '영상 Loop 또는 Bar방식'을 이용한 교통변수 산출방법



〈그림 4〉 Corner point Tracking

2. 신호제어 알고리즘 개발

좌회전 감응식 신호제어 알고리즘은 현시생략여부 결정, 초기녹색시간 산정, 단위연장시간 적용으로 구성된다. 〈그림 5〉는 좌회전 감응식 신호제어 알고리즘의 flow chart이다.

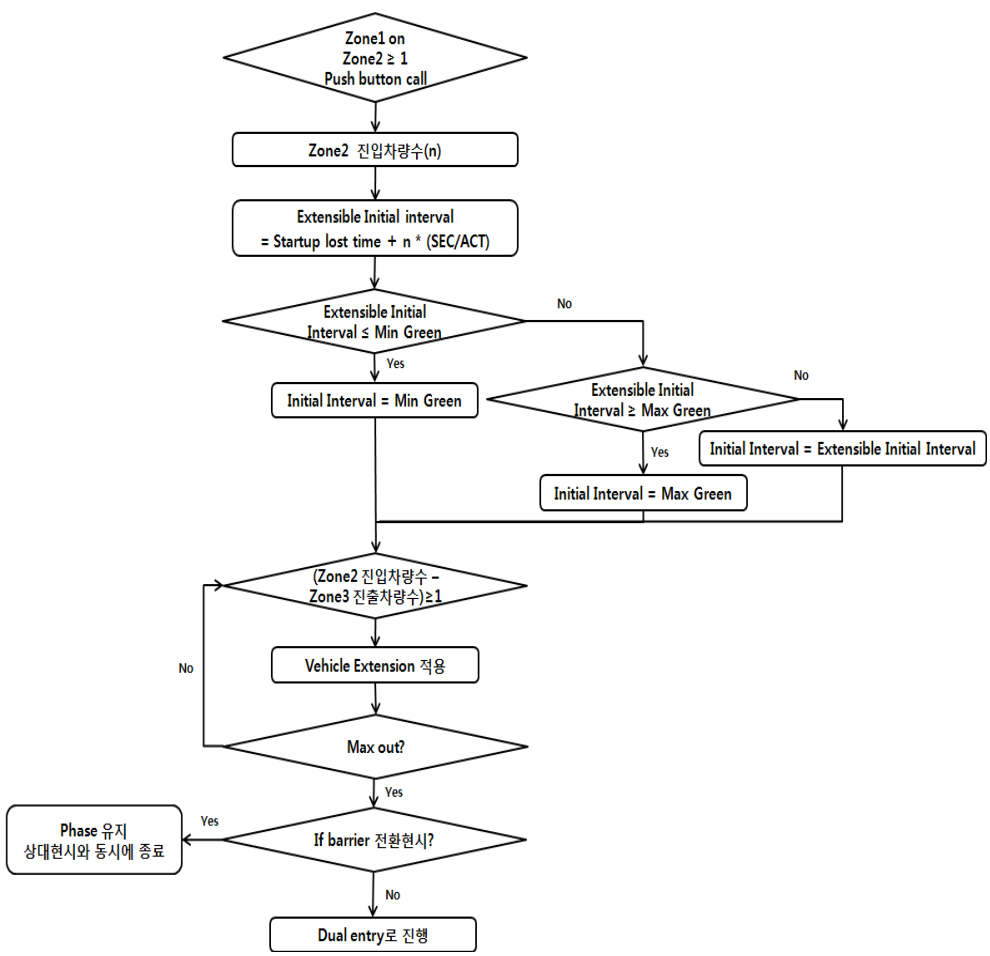
주방향 현시의 최소녹색시간(Minimum Green) 이후, 좌회전 차량의 존재유무를 파악하여 차량이 존재할 경우(Zone1 ON or Zone2≥1) 감응현시는 부여되며, 존재하지 않을 경우(Zone1 OFF or Zone2 〈1)는 생략된다. 이 때 감응현시의 초기녹색시간(Initial interval)은 Zone2 내에 추적된 차량 수에 의해 산정되며, 그 식은 다음과 같다.

$$EII = SLT + n \times (SEC/ACT) \quad (1)$$

where, EII : Extensible Initial Interval(sec)
SLT : Startup Lost Time(sec)
n : Zone2 내 추적된 차량수(veh)
SEC/ACT : 추적된 차량 당 초기녹색시간 증가값(sec)

초기녹색시간 이후, 감응현시의 연장 및 조기종결은 단위연장(Vehicle Extension)에 의해 결정된다. 단위연장은 검지영역 내 잔여 차량수가 한 대 이상일 경우 부여되며 영역 내 모든 차량이 소거될 때까지 계속되나 최대녹색시간 이 후로는 연장될 수 없다. 단위연장시간은 접근차량이 검지영역의 상류부에서 정지선까지 통과할 수 있는 시간으로, 그 식은 다음과 같다.

$$E = 3.6 \times L2 / AS \quad (2)$$



〈그림 5〉 좌회전 감응식 신호제어 Flow Chart

where, E : Vehicle Extension(sec)
L2 : Length of Zone2(m)
AS : Approach Speed(km/h)

더불어, 감응식 연동제어의 특징은 주방향 현시의 시작점이 아닌 종료되는 시점(Yield Point)에 각각을 맞춘다는 점이다. 따라서 본 알고리즘에 Background Cycle Length, Yield Point, Permissive Periods, Recall 등의 개념을 도입하면 인접교차로와 연동제어를 할 수 있다.

본 신호제어알고리즘은 별도의 신규 제어기 개발 없이 전자신호제어기 및 표준신호제어기에 탑재하여 활용이 가능하다. 그리고 영상검지기가 정상적으로 작동하지 않는다면 설정된 고정 주기식 신호체계방식으로 전환한다.

Ⅳ. 좌회전 감응식 신호제어전략 평가

1. 평가방법론

1) 평가도구 선정

본 시스템의 평가도구로는 미 연방 도로국(FHWA : Federal Highway Administration)에서 개발한 신호제어 운영의 가장 대표적인 미시적 시뮬레이터인 TSIS(Traffic Software Integrated System) 중 단속류 시뮬레이터인 CORSIM을 선정하였다. CORSIM은 많은 연구를 통해 신뢰할 수 있는 모의실험 도구로서 검증되고 수용되어 왔으며 실제로 박병규(2001), Randy와 Courage(1998) 및 Chundury와 Wolshon(2003)은 CORSIM을 통해 얻은 모의실험 자료가 통계적으로 현장 자료에 필적함을 연구결과를 통해 보여준 바 있다.

또한 CORSIM은 반감응 제어 및 Volume-density 제어와 같은 NEMA 감응제어를 기본기능으로 탑재하고 있어 추가적인 외부 어플리케이션의 작성이 요구되지 않는 점 또한 주요 선정사유에 해당된다.

2) 대상교차로 선정

본 시스템의 평가를 위한 대상교차로로는 오산 매홀중학교 삼거리를 선정하였다. 1번 국도 상에 위치한 매홀중학교 삼거리는 정주기 신호제어방식으로 운영되고 있으며, 인접교차로와의 간격이 500m이상인 독립교차로에 해당된다. 또한 매홀중학교 삼거리는 좌회전 교통량이 직진교통량의 10% 미만인 주도로와 부도로가 교차하는 일반적인 형태의 3지 교차로이기 때문에 본 시스템을 적용·평가하기에 적합하다고 판단하였다.

〈표 5〉 매홀중학교 삼거리 신호운영 현황

현시순서	∅1	∅3	∅3
이동류			
녹색시간(황색시간)	15(3)	18(3)	118(3)

〈표 6〉 매홀중학교 삼거리 교통 현황

이동류	주도로				부도로	
	북→남		남→북		동→서	
교통량 (pcph)	좌회전	직진	직진	우회전	좌회전	우회전
	120	1756	2107	164	153	349
평균 통행시간 (sec)	북(37.165', 127.066') →남(37.160', 127.069')		남(37.160', 127.069') →북(37.165', 127.066')		※ 시뮬레이션 모델 정산을 위한 자료로 활용	
	48		65			

현장조사는 2009년 10월 15일(목요일) 오후 첨두시간대(18:00~20:00)에 실시하였다. 매홀중학교 삼거리의 신호운영 및 교통현황 조사결과는 〈표 5〉, 〈표 6〉과 같다.

3) 분석 시나리오

시뮬레이션 분석 시나리오는 매홀중학교 삼거리의 현장적용성 평가(CASE 0)와 함께 좌회전과 직진의 v/c 비에 따른 효과(CASE 1~9)를 평가하기 위하여 다음과 같이 설정하였다.

위의 시나리오에 대해 각각 정주기(Pretimed) 신호제어방식, 반감응(Semi-actuated) 신호제어방식, 좌회전 감응제어방식을 적용하였을 경우를 비교·평가하였으며, 반감응 신호제어의 변수산정은 Traffic Control Systems Handbook과 Traffic Engineering(3rd

〈표 7〉 시뮬레이션 분석 시나리오

실제 교통량	v/c 상황별 시나리오			
	major (직진) / minor (회전)	v/c = 0.7	v/c = 1.0	v/c = 1.3
CASE 0	v/c = 0.2	CASE 1	CASE 4	CASE 7
	v/c = 0.5	CASE 2	CASE 5	CASE 8
	v/c = 0.7	CASE 3	CASE 6	CASE 9

〈표 8〉 시나리오별 적용 신호제어 방식

순번	제어방식	비고
1	정주기 제어	-
2	반감응.제어(1)	Traffic Control Systems Handbook
3	반감응.제어(2)	Traffic Engineering (3rd Edition)
4	좌회전 감응제어	-

Edition)에 제시된 방법을 이용하여 두 경우 모두 분석하였다.

Traffic Control Systems Handbook에 제시된 반감응 제어방식은 식 (3)과 같이 임계감속도, 반응시간, 접근속도의 함수로 검지기 후퇴거리를 결정 한 후, 검지기 후퇴거리에 따라 초기녹색시간 및 단위연장시간을 식 (4)에 의해 산정하게 된다.

$$G_{min} = 2.5 + 1.7(\frac{d}{6}) \quad (3)$$

$$P = \frac{d}{s} \quad (4)$$

where, G_{min} : initial interval(sec)
d : distance between detector and stop line(m)
2.5 : assumed start-up time(sec)
1.7 : assumed saturation headway (sec)
6 : assumed distance between stored vehicles(m)
P : Passage time(sec)
s : approach speed of vehicles (m/s)

Traffic Engineering(3rd Edition)에 제시된 반감응 제어방식은 적정 최소녹색시간(10초)을 설정한 후, 녹색시간에 맞게 식(5)를 이용하여 검지기 위치를 결정하고, 단위연장시간(3.5초)이 식(6)조건에 부합하는지를 판단함으로써 신호제어변수를 결정한다.

$$d = (G_{min} - 2.5)/1.7 \times 6 \quad (5)$$

$$P \geq D/1.47 \times (S - 5) \quad (6)$$

where, D : distance between detector and stop line(ft)
S : assumed start-up time(mph)

2. 결과 분석

시나리오에 대한 제어기법별 신호운영효율을 평가하기 위하여 다음과 같은 효과척도(MOE)를 선정하였다.

• CONTROL DELAY(sec/veh)
Control delay는 감속지체, 정지지체, 가속지체를 포함하며, CORSIM은 미시적 시뮬레이션으로 개개 차량의 행태를 추적하므로 제어지체의 정확한 산출이 가능하다.

• QUEUE TIME(veh-mins)
Control delay는 교차로를 통과한 차량만을 포함하기 때문에 교차로를 통과하지 않은 차량의 대기시간을 포함하는 Queue time을 MOE로 선정하였다.

• FUEL CONSUMPTION(GALLONS), EMISSION(HC, CO, NO)
차량의 연료소모와 배기가스로 인한 환경오염 정도를 파악하기 위해 각 제어기법 별 연료 소모량 및 HC, CO, NO 배출량을 함께 확인하였다.

• TOTAL TIME(veh-mins)
교차로 모든 차량들에 대한 link 상에서의 총시간을 비교하기 위해 Total time을 MOE로 선정하였다.

1) 현장 적용성 평가(CASE 0)

매홀중학교 삼거리의 신호제어방식 별 MOE 분석 결과, 좌회전 감응제어로 운영시 정주기 제어, 반감응 제어(1), 반감응 제어(2)에 비해 Control delay가 각각 23.10%, 15.06%, 4.34% 감소하였고, Queue time은 36.24%, 20.10%, 7.42%, Total time은 14.36%, 7.02%, 2.96% 감소하여 운영효율이 가장 좋은 것으로 분석되었으며, 연료소모량 및 HC, CO, NO 배출량 역시 가장 낮은 것으로 나타났다. 이동류별로 살펴보면, 이중 좌회전 현시의 조기종결로 녹색시간이 증가한 '남→북' 방향의 지체가 가장 크게 개선되었으며, 현시의 조기종결에도 불구하고 '동→서'방향 역시 지체가 소폭 감소한 것을 알 수 있다. 반면 '북→남'방향의 지체는 정주기 제어에 비해 11% 이상 감소하였지만, 반감응 제어에 비해서는 다소 증가한 것을 수 있는데 그 원인은 주도로의 좌회전 차량이 많았음에도 불구하고 반감응 제어 보다 민감한 좌회전 현시의 조기종결로 인한 것으로 판단된다.

〈표 9〉 CASE 0 시뮬레이션 결과값(trial1)

MOEs	DIRECTION	PRETIMED	SEMI-ACTUATED(1)	SEMI-ACTUATED(2)	Left-Turn Actuated
CONTROL DELAY (sec/veh)	북→남	7.14	5.86	6.00	6.29
	남→북	21.72	14.78	11.81	9.44
	동→서	42.86	44.29	39.84	39.42
QUEUE TIME (veh-min)	북→남	167.62	142.89	145.67	156.73
	남→북	467.08	278.53	204.76	147.81
	동→서	358.05	370.73	333.27	328.41
TOTAL TIME (veh-min)	NETWORK-WIDE	102.34	94.26	90.31	87.64
FUEL CONSUMPTION	GALLONS	213.21	206.32	203.94	202.37
EMISSION (grams/mile)	HC	6.84	6.81	6.83	6.82
	CO	534.18	533.39	539.77	541.97
	NO	25.29	25.07	24.99	24.87

〈표 10〉 CASE 0 시뮬레이션 결과값(trial2)

MOEs	DIRECTION	PRETIMED	SEMI-ACTUATED(1)	SEMI-ACTUATED(2)	Left-Turn Actuated
CONTROL DELAY (sec/veh)	북→남	6.77	5.47	5.61	5.98
	남→북	21.36	13.94	10.86	8.62
	동→서	43.11	44.38	38.89	37.78
QUEUE TIME (veh-min)	북→남	159.17	134.56	137.54	150.80
	남→북	448.30	252.45	179.43	127.80
	동→서	361.21	370.56	326.15	316.07
TOTAL TIME (veh-min)	NETWORK-WIDE	101.67	93.29	89.25	86.56
FUEL CONSUMPTION	GALLONS	213.10	206.33	203.88	202.28
EMISSION (grams/mile)	HC	6.90	6.89	6.88	6.90
	CO	540.13	543.40	546.38	549.77
	NO	25.37	25.18	25.05	24.97

2) v/c 상황별 평가(CASE 1~9)

직진 및 좌회전 v/c비에 따른 신호제어방식 별 MOE 분석 결과, 직진과 좌회전의 v/c비가 각각 1.0, 0.2일 때 좌회전 감응제어로 인한 효과가 가장 컸으며, 직진교통량이 포화상태에 근접할수록, 좌회전 교통량이 적을수록 개선효과 큰 것으로 나타났다. 또한, 직진 및 좌회전 v/c에 관계없이 좌회전 감응제어가 정주기 제어 보다 항상 운영효율이 좋은 것으로 났다. 하지만 좌회전의 v/c가 0.7로 높은 경우 좌회전 감응제어에 비해 반감응 제어가 효율적인 것으로 나타났는데, 이는 좌회전 감응제어가 반감응 제어에 비해 현시의 조기종결에 민감하게 반응하기 때문이라고 판단되며, 시뮬레이션 상에 반영되지 않은 U턴 차량 및 저속 주행차량에 의한 불합리적 조기종결에 의한 영향을 고려하면 실제 현장에서 보다 더 큰 효과가 있으리라 생각된다. 이동류 별 운영효율을 살펴보면, 이중 좌회전 조기종결 및 현시생략이 적용되는 '남→북'방향으로의 효과가 가장 높았으며, 좌회전 방향의 현시율 감소로 인해 '북→남'방향 및 '동→서'방향으로의 효과가 상대적으로 낮은 것으로 나타났다.

〈표 11〉 CASE 1~9 시뮬레이션 결과값
(CONTROL DELAY) (단위 : sec/veh)

시나리오	방향	Pretimed	Semi-Actuated(1)	Semi-Actuated(2)	Left-Turn Actuated
case1	북→남	7.3	3.8	3.6	3.5
	남→북	22	7	5	3.9
	동→서	37.2	35.3	35.6	33
case2	북→남	9.5	8.5	8.9	10.9
	남→북	21.5	11.1	9.8	8.2
	동→서	42.4	51	47.8	49.2
case3	북→남	13.1	14.1	13.8	14
	남→북	21	15.1	16.6	12.9
	동→서	149.9	91.3	122.3	151.6
case4	북→남	9.8	3.8	3.7	3.3
	남→북	75.8	17	12.6	6.9
	동→서	35.5	41.1	37.8	34.8
case5	북→남	12.5	8.6	9.1	9
	남→북	73.8	39.7	29.1	19.3
	동→서	44.4	56.9	57.8	52.3
case6	북→남	13.8	16.3	14.7	15.4
	남→북	67.4	55.6	61.1	53.7
	동→서	147	123	96.1	158.9
case7	북→남	25.2	13.1	12.8	13.1
	남→북	71.6	33.3	27.5	24.8
	동→서	35.8	34	40.8	36.1
case8	북→남	25.5	20.1	20	19.6
	남→북	71	43.6	40	34.4
	동→서	46.9	54.8	58.8	52.5
case9	북→남	25	26.1	25.3	24.4
	남→북	64.6	51.6	52.5	40.4
	동→서	158.2	146.3	145.3	157.7

〈표 12〉 CASE 1~9 시뮬레이션 결과값(QUEUE TIME)
(단위 : veh-min)

시나리오	방향	Pretimed	Semi-Actuated(1)	Semi-Actuated(2)	Left-Turn Actuated
case1	북→남	131.4	69.8	66.2	67
	남→북	380.7	98.9	65.4	46.1
	동→서	115.6	110.5	111.8	103.5
case2	북→남	199.5	180.7	190.4	244.1
	남→북	392.9	180.9	154.3	125.2
	동→서	324.3	402.1	368.9	384.4
case3	북→남	294.4	326	311.5	327.5
	남→북	397.3	266.2	301.5	220.8
	동→서	1660.3	1003.5	1375.7	1696.2
case4	북→남	223.9	86.3	83.1	76.7
	남→북	3294.3	306.3	198.9	89
	동→서	112	130.6	117.9	109.3
case5	북→남	331.1	229.6	239.8	242.9
	남→북	3260.2	991.6	685.1	407.5
	동→서	349.1	441.9	445	402.2
case6	북→남	389.1	472.6	415.4	460.1
	남→북	3164.5	2686.6	2533.6	1526.8
	동→서	1617.4	1414.7	1064.6	1765.1
case7	북→남	1671.9	1026.2	952.7	796.1
	남→북	3617.4	2517.3	2213	2067.3
	동→서	114.3	109.4	127.9	116.1
case8	북→남	1696.2	1505.5	1528.1	1474.6
	남→북	3574.9	2930.2	2683.4	2619.7
	동→서	360.9	431.5	455.4	405.9
case9	북→남	1693.6	1769.9	1759.3	1729.4
	남→북	3406.6	3143.7	3112.2	2837.2
	동→서	1773.6	1652.1	1654.1	1733.3

〈표 13〉 CASE 1~9 시뮬레이션 결과값(TOTAL TIME)
(단위 : veh-min)

시나리오	Pretimed	Semi-Actuated(1)	Semi-Actuated(2)	Left-Turn Actuated
case1	62.82	50.73	49.29	48.16
case2	74.31	68.3	67.24	67.01
case3	101.78	89.87	95.97	98.58
case4	168.48	94.25	89.71	81.78
case5	183.03	137.41	130.34	120.78
case6	211.26	205.66	196.25	186.72
case7	259.9	254.45	246.96	243.65
case8	274.65	281.45	281.05	281.75
case9	303.88	304.98	304.41	306.56

Ⅴ. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 3지교차로의 효율적이고 안정적인 신호운영을 위하여 좌회전 감응현시에 가변 초기녹색 시간의 개념을 도입하였으며, 차량의 검지를 위해 영상검지기의 Video Image Tracking기술을 이용하였다.

영상검지영역은 목적에 맞게 Zone in Zone방식의 3개 영역으로 구분하여 설정하였으며, Zone1은 차량의 존재유무 파악, Zone2는 대기 차량수 파악, Zone3는 통과차량 대수 파악의 기능을 수행하도록 설계하였다.

좌회전 감응식 신호제어 알고리즘은 현시생략여부 결정, 초기녹색시간 산정, 단위연장시간 적용으로 이루어진다. 좌회전 감응현시는 Zone1 내 차량이 검지되거나, Zone2 내 추적된 차량이 한 대 이상일 경우 부여되며, Zone2 내 추적된 차량대수에 의해 초기 녹색시간이 산정된다. 단위연장시간 부여 및 현시 조기종결은 Zone2 내 추적된 차량 수와 Zone3의 통과 차량 수의 비교를 통한 잔여차량 수의 유무에 의해 결정된다.

CORSIM을 이용한 본 좌회전 감응제어의 현장적용성 평가 결과, 정주기 제어, 반감응 제어(1), 반감응 제어(2)에 비해 Control delay가 각각 23.10%, 15.06%, 4.34% 감소하였으며, Queue time은 36.24%, 20.10%, 7.42%, Total time은 14.36%, 7.02%, 2.96% 감소하여 운영효율이 가장 좋은 것으로 나타났다. 또한, 직진 및 좌회전 v/c비에 따른 적용성 평가 결과, 직진교통량이 포화상태에 근접할수록, 좌회전 교통량이 적을수록 개선효과 큰 것으로 나타났다.

본 제어전략을 지방부도로의 불규칙적인 교통류 통행특성을 지닌 교차로에 적용시 주도로 통행량 증가 및 교통 혼잡 완화 등의 효과를 기대할 수 있으며, 기존 신호제어시스템과 연계한 운영방안을 수립함으로써 지속적인 시스템의 확대가 이루어 질 수 있으리라 판단된다.

또한, 영상검지기를 신호제어목적으로 활용함으로써 기존 매설형 검지기의 유지보수 방식의 문제점으로 인한 사회적 비용을 절약할 수 있으므로 장기적으로 보다 경제적이며, 신호제어에 영상검지기술 도입함으로서 세계적으로 교통신호 운영분야의 진일보한 발전으로 평가받을 수 있으리라 기대한다.

더불어, 본 제어전략의 안정적인 도입을 위해서는 추후 야간 및 날씨에 따른 영상검지기 검지자료 신뢰성 평가에 대한 연구가 이루어져야 하며, 본 제어전략을 이용한 감응식 연동제어의 효율성 검토가 필요하다. 또한, 현장제어기 간 무선통신을 이용한 교차로 연계제어 및 접근속도가 높은 교차로에 딜레마제어를 함께 적용하는 방안에 대한 연구가 추가적으로 수행되어야 한다.

알림: 본 논문은 대한교통학회 제61회 학술발표회(2009. 11. 6)에서 발표된 내용을 수정·보완하여 작성된 것입니다.

참고문헌

1. 한국교통연구원(2004), 일반국도의 신호운영 개선을 위한 연구.
2. 도로교통안전관리공단(2002), 지역단위 실시간 교통신호제어체계 개발.
3. 건설교통부(2004), 국도상의 신호교차로의 소통 및 안전기능 고도화를 위한 교통신호제어기기 개발.
4. 한국교통연구원(2005), 반감응제어 신호기 설치사업 사업관리.
5. 석종수(2004), 감응식 신호를 이용한 독립교차로 운영 효율화 방안, 인천발전연구원.
6. 이두선(2006), 독립 신호교차로에서의 완전감응식 신호제어에 관한 연구, 단국대 대학원.
7. 강민석(2008), 일반국도의 주방향 소통개선을 위한 연동형 반감응 신호제어, 서울시립대 대학원.
8. 배광수(2002), 독립교차로 딜레마존 제거를 위한 교통감응신호제어 알고리즘 개발 및 평가, 서울시립대 대학원.
9. 이용일(2004), 감응식 신호제어상에서 딜레마 제어를 고려한 연동신호개발 및 적용, 서울시립대 대학원.
10. 박순용(2004), 지방부 독립신호교차로에서 감응식 신호제어에 관한 연구, 단국대 대학원.
11. 정동우(2009), 3지 교차로에서 반감응 신호제어와 보행자작동신호기를 이용한 지체시간 감소에 관한 분석, 인천대 대학원.
12. 장진환 · 박창수 · 백남철 · 이미영(2005), 차량 속도별 영상검지기 성능분석, 대한교통학회지, 제23권 제5호, 대한교통학회, pp.105~112.
13. 조우종(2007), CCTV를 이용한 교통정보 수집 시스템의 구현, 아주대 ITS대학원.
14. 이대호(2001), 실시간 교통정보 처리를 위한 지능형 영상검지기, 경희대 대학원.
15. 이영노(2005), 영상처리를 이용한 루프 방식의 차량정보 추출 알고리즘에 관한 연구, 아주대 대학원.
16. 김대호 외(2005), U턴 차량을 고려한 좌회전 감응식 신호제어기법 개발, 대한토목학회.
17. Ilsoo Yun(2004), Evaluation of Stochastic Optimization Methods of Traffic Signal Control Settings for Coordinated Actuated Signal Systems, Korean Society of Civil Engineers, KSCE Journal of Civil Engineering.
18. Technical Committee 18, Southern section ITE((1974)), "Large-Area Detection at Intersection Approaches".
19. Technical Committee 18, Southern section ITE(1976), "Large-Area Detection at Intersection Approaches".
20. FHWA(1976), Traffic Control Systems Handbook.
21. Peter S. Parsonson(1978), "Signalization of High-Speed, Isolated Intersections", TRR 681.
22. ROGER P. ROESS(2002), TRAFFIC ENGINEERING 3rd Edition, Prentice Hall Publishing.

♧ 주 작 성 자 : 은지혜
♧ 교 신 저 자 : 은지혜
♧ 논문투고일 : 2010. 11. 26
♧ 논문심사일 : 2010. 12. 31 (1차)
2011. 4. 13 (2차)
♧ 심사판정일 : 2011. 4. 13
♧ 반론접수기한 : 2011. 8. 31
♧ 3인 익명 심사필
♧ 1인 abstract 교정필