

신호교차로의 정지선 검지기를 위한 수동형 적외선 검지기 알고리즘 개발 (점유시간을 중심으로)

Development of a Passive Infrared Detector Algorithm for the Stop-line Detector of a Signalized Intersection

정 석 민* 이 승 환** 김 남 선***
(Sok-Min, Jeong) (Seung-Hwan, Lee) (Nam-Sun, Kim)

요 약

본 논문은 신호교차로의 정지선 검지기를 위한 수동형적외선 검지기의 검지알고리즘의 개발이다. 신뢰성 있는 교통상황정보의 획득을 위하여 수동형 적외선 검지기의 기존검지영역(1.8×4.0m)에 세부검지영역을 설정하여 신호교차로에서 교통상황정보(교통량, 점유시간, 비점유시간)를 수집하였다. 기존검지영역(1.8×4.0m)의 수동형 적외선 검지기와 본 연구에서 개발한 알고리즘을 적용한 수동형 적외선 검지기를 각각 기존PIR과 제안PIR로 명명하였다. 이와 같이 개발된 알고리즘은 교통량, 점유시간, 비점유시간, 속도 및 차로변경 유무 정보를 수집할 수 있으나 본 연구에서 알고리즘의 평가는 교통량, 점유시간 및 비점유시간으로 한정하였다.

개발된 알고리즘의 수행과정과 단계별 연구내용은 다음과 같다.

- ① 제안 PIR의 검지영역은 1.8×4.0m의 영역에 1.8×0.6m 영역 2개(검지영역 1, 검지영역 3)와 1.8×1.78m 영역 1개(검지영역 2)이다.
- ② 비디오 카메라 촬영자료는 모니터 상에 수동형 적외선 검지기의 검지영역과 동일하게 영역을 설정하여 비디오 프레임 분석을 실시하였다.
- ③ 검지영역 1과 검지영역 3으로 점유시간, 비점유시간, 속도자료를 수집하고, 검지영역 1, 검지영역 2, 검지영역 3의 조합으로 차로변경 유무에 대한 정보를 수집할 수 있다.

알고리즘의 현장 적용성 검토 및 알고리즘 평가를 위하여 교통량, 점유시간, 비점유시간에 대한 평균절대편차(MAD), 평균절대비율오차(MAPE)를 정확도의 비교척도로 사용하였다. 그 결과 개발된 알고리즘을 적용한 제안검지기의 효과는 기존검지기보다 우수한 것으로 나타났고, 교통량, 점유시간 및 비점유시간은 각각 53%, 40%, 61%의 개선효과를 보였다.

Abstract

The purpose of this thesis is development of detection algorithm for stop-line detector. Detail detection area is set in basing detection area(1.8×4.0m) and traffic information(volume, occupancy, nonoccupancy) is collected by passive infrared detector at designing detection area.

The basis detection area(1.8×4.0m) is named existing PIR and detection area applied on development algorithm is named proposal PIR. The proposal PIR is collected data such volume, occupancy, nonoccupancy, speed and lane change, but this thesis

* 회원 : 아주대학교 교통연구센터 연구원

** 회원 : 아주대학교 환경·도시 공학부 교수

*** 회원 : 아주대학교 교통연구센터 교통운영연구실 수석연구원

† 논문접수일 : 2003년 4월 18일

is limited to evaluate for volume, occupancy and nonoccupancy

The procedure and each step of being developed algorithm is described in the next

- ① The detection area of proposal PIR is made up of 2 of 1.8×0.6m size(the detection area is named 1 and 3) and 1 of 1.8×1.78m size(the detection area is named 2)
- ② The image detection area is set on monitor to analyze outdoor photographing data then video frame analysis has been done by analyzer.
- ③ The occupancy, nonoccupancy and speed data of vehicle have been collected with the detection area 1 and 3 and lane change has been collected with combination of detection area 1, 2 and 3

The MAD and MAPE have been utilized to being compared with volume, occupancy and nonoccupancy for the field application and evaluation of a algorithm As the result, the proposal PIR data have been identified superior to the existing PIR data and the effect has been improved its information(volume, occupancy and nonoccupancy)

Key Words : 수동형 적외선, 알고리즘, 비디오 분석, 정지선 검지기

I. 서 론

1. 연구의 배경 및 목적

일반적으로 증가하는 교통혼잡은 수요인 도로의 이용자가 도로 및 교통시설물과 같은 공급체계와의 불균형으로 인하여 발생하는 것이다. 이러한 교통혼잡의 해결을 위한 방안으로 시설물의 공급, 교통수요관리, 기존 시설이용의 극대화, 새로운 기술의 적용으로 나누어 볼 수 있다. 이중 신기술의 적용 예로서 ITS(지능형교통체계 : Intelligent Transport Systems)를 들 수 있으며 이는 기존교통체계의 혼잡완화, 도로용량증대, 안전성 제고, 교통으로 야기되는 환경문제의 해결을 목표로 기존 교통체계에 컴퓨터, 통신, 실시간 자료처리기술 등을 접목시켜 효과적인 개선을 도모하기 위한 새로운 시도라 할 수 있겠다. 이러한 ITS에는 5가지 세부분야(ATMS, ATIS, APTS, CVO, AVHS)¹⁾가 있지만 특히 첨단교통관리시스템(ATMS)은 도로상의 각종 교통정보를 수집하고 처리하여 교통류를 제어 및 관리하고자 하는 분야로서 도로소통과 안전성증진을 위한 것이다. 도시간선도로의 첨단교통신호체계는 ATMS의 한 분야

로 교통정보수집체계인 검지기를 기반한 시스템이다.

이 시스템은 알고리즘 및 모든 제어전략이 검지기를 기반한 것으로 지점정보를 토대로 교통수요예측을 하게 된다. 현재에는 전세계적으로 교통기술의 활발한 연구에 힘입어 교통검지기기술이 급격히 발달하게 되어 다양한 검지기가 교통신호제어기술에 적용되기에 이르렀다. 이러한 다양한 교통검지기기술의 실용화 추세에 부응하여 도시간선도로의 교통신호제어에서 루프검지기 이외의 타검지기의 적용검토가 진행 혹은 계획되고 있다. 이를 위하여 신호차로에서 정지선검지기로의 적용을 위한 초기 단계로서 수동형 적외선검지기(Passive Infrared Detector, 이하 PIR)를 실험하여 본 결과 점유/비점유시간 및 교통량과 같은 교통상황변수의 정보는 신뢰도가 만족할 만한 수준이 아니어서 이를 높일 수 있는 검지알고리즘을 개발하여 실시간 신호제어시스템에의 적용성을 검토할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 위에서 제기된 수동형 적외선검지기의 문제점을 보완하기 위한 방법으로 검지영역을 설계해보고 그에 적용할 교통량, 점유/비점유시간, 속도검출 및 차로변경이 고려된 알고리즘을 개발하여 그 효과를 평가하고자 한다.

2. 연구의 내용 및 범위

실시간신호제어시스템(COSMOS: Cycle Offset Split MOdel for Seoul)에서 비점유시간은 포화도(DS:

1) ATMS: Advanced Traffic Management Systems(첨단교통관리시스템), ATIS: Advanced Traveler Information Systems(첨단운전자정보체계), APTS: Advanced Public Transportation Systems(첨단대중교통체계), AVHS: Advanced Vehicle & Highway Systems(첨단차량 및 도로체계), CVO: Commercial Vehicle Operations(첨단화물운송체계)

Degree of Saturation) 산정을 위한 중요 교통상황변수이다. 포화도는 정지선검지기에서 수집되는 점유/비점유시간을 이용하여 산출되는 파라미터로서 접근로에서 총 이용 가능한 녹색신호에 대하여 효율적으로 이용되는 녹색신호시간 비율로 정의되며, 신호제어변수인 주기길이(Cycle Length)²⁾, 오프셋(Offset)³⁾, 현시분할(Split)⁴⁾을 결정하는 중요 척도이다. 따라서 본 연구에서는 교통량, 점유/비점유시간의 수집을 목적으로 정지선검지기로서 PIR 검지기에 기반한 검지영역을 설계하고 검지알고리즘을 개발하는 것을 목표로 삼는다.

본 연구에서 다루게 될 구체적 연구내용은 다음과 같다.

첫째, 배경이론의 고찰 : 여러 가지 검지기의 이론과 국내의 검지기 설치사례에 대해 알아본다.

둘째, 검지영역의 설계 : 정확한 교통상황변수 수집을 위한 검지영역 설계를 한다.

셋째, 교통상황변수 수집을 위한 알고리즘 개발 : 교통상황변수 수집을 위해 설계한 PIR 검지기에 적용할 알고리즘을 개발한다.

넷째, 자료수집을 위한 현장실험 : 개발한 알고리즘의 평가를 위해 신호교차로의 접근로 중 1개 직진차로에 대하여 PIR검지기와 비디오 카메라를 이용하여 자료를 수집한다.

다섯째, 알고리즘의 평가 : 개발한 알고리즘의 평가는 루프검지기에블레이터 PIR(이하, 기존 PIR)를 통하여 수집한 자료와 개발한 알고리즘을 적용한 PIR(이하, 제안 PIR) 수집자료와의 비교를 통해 평가하고, 평가의 기준은 비디오 카메라로 실측한 자료와의 비교를 통해 이루어지도록 한다.

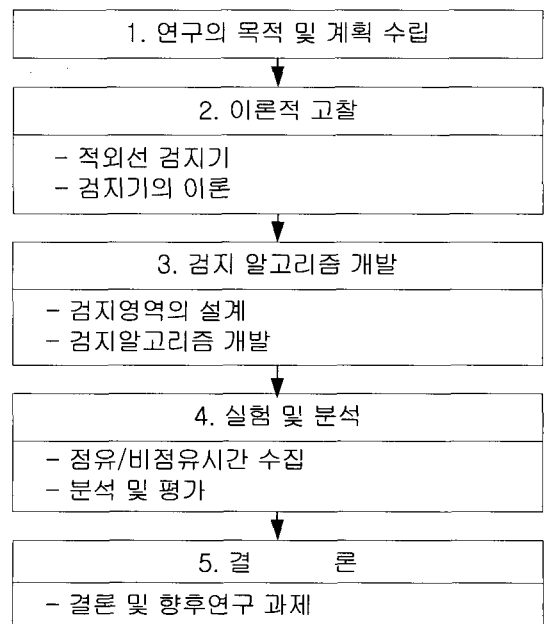
연구의 범위는 신호교차로의 접근로 중 1개 직진차로를 대상으로 하였고, 수집주기는 주기단위로

- 2) 신호등의 등화가 완전히 한 번 바뀌는 것 또는 그 시간의 길이
- 3) 어떤 기준시간으로부터 녹색등화가 꺼질 때까지의 시간차를 초 또는 주기의 %로 나타냄값
- 4) 한 주기 즉 주기길이내에서 녹색행시가 차지하는 비율을 말한다.
- 5) 검지기에서 직접 측정하는 개별차량의 교통상황변수는 점유시간과 비점유시간이다.

개별데이터에 대한 자료가 수집되어야 하므로, 매 주기당 개별 차량에 대한 자료수집을 실시하였다. 시간적으로는 평일 비점유시간을 고려하여 약 1시간 동안 자료를 수집하고, 포화도가 주기단위로 수집되는 점을 고려하여 수집된 개별데이터를 주기별로 나누어 주기단위 분석을 시행하였다. 수동형 적외선검지기는 일기조건이 불량한 경우(구름많음, 습도높음, 비가 옴 등) 맑은 날에 비해 대기의 온도가 높기 때문에 차량의 통과로 발생하는 신호가 감소하여 악천후에 민감하다는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 단점을 고려하여 악천후 상황에서 연구를 수행하였다.

한편, 검지영역은 기존의 정지선루프검지기의 크기(1.8×4.0m)를 기준으로 영역의 설계가 이루어졌고, 본 연구를 위해 개발한 알고리즘은 교통량, 점유/비점유시간 수집은 물론 정지선 검지기로서 속도자료수집과 차로변경 여부 판단을 할 수 있으나 본 논문에서는 속도와 차로변경에 대한 자료분석 및 평가는 제외하였다.

3. 연구수행절차



〈그림 1〉 연구수행 절차도

II. 본 론

1. 이론적 고찰

1) 능동형(Active) 적외선 검지기

가. 검지원리

능동형 검지기의 검지센서로는 주로 적외선 레이더를 사용하며, 검지영역을 향해 전파를 발사하여 목표물에 의해 반사된 전파를 수신 및 신호처리를 함으로써 교통정보를 얻는 방식이다.

나. 검지기의 레이더

능동형 검지기는 적외선 레이더를 센서로 사용한다. 적외선 레이더의 종류는 연속파 도플러 레이더(Continuous Wave Doppler Radar)와 주파수 변조 연속파(FMCW : Frequency Modulator Continuous Wave) 레이더가 있다.

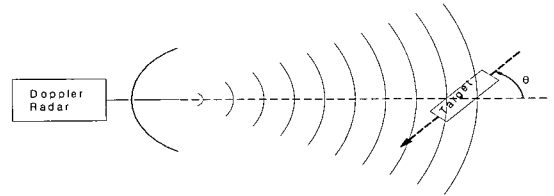
그 중에서도 적외선 레이더 센서로 주파수 변조 연속파 레이더가 가장 흔하게 사용되며, 목표물의 거리와 속도를 측정할 수 있다. 반면, 도플러 레이더는 주파수의 관측값 변화가 파동의 전파속도와 파원에 대한 관측자의 상대속도에 의존하기 때문에 속도를 측정할 수 있으나 정지한 목표물을 검출할 수 없어서 존재판단(Presence) 센서로 사용할 수 없다.

- 연속파(CW) 도플러 레이더

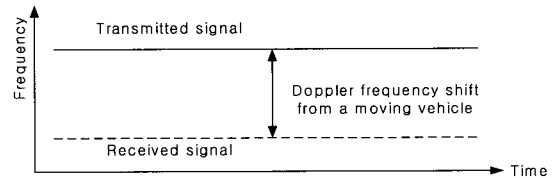
도플러효과는 전파나 음파 등의 파동원이 목표를 향하여 어떤 속도로 접근하면 그 주파수가 목표에서 관측되는 파동원이 주파수보다 높아지고, 반대로 멀어지면 낮아지는 현상을 말한다. 적외선 에너지가 움직이는 목표물에 의해 반사되어 되돌아오는 신호에는 주파수 편이(Shift)가 일어나며, 모든 도플러 레이더는 이 도플러효과를 이용한다.

주파수의 편이량(f_d)은 목표물의 상대적 이동속도와 정비례 관계로 발생하며, 목표물의 이동속도는 다음 식과 같다.

$$f_r = f_0 \pm f_d$$



〈그림 2〉 도플러 레이더



〈그림 3〉 도플러레이더의 주파수파형

$$f_d = \frac{2v(f_0)}{C} \cos \theta$$

$$f_r - f_0 = f_d = \frac{2v \cos \theta}{C}$$

$$v = \frac{C}{2 \cos \theta} \times \frac{f_d}{f_0}$$

가 된다.

여기서, f_d = 주파수편이량

f_r = 수신주파수

f_0 = 송신주파수(Hz)

C = 광속(2.98×10^8 m/sec)

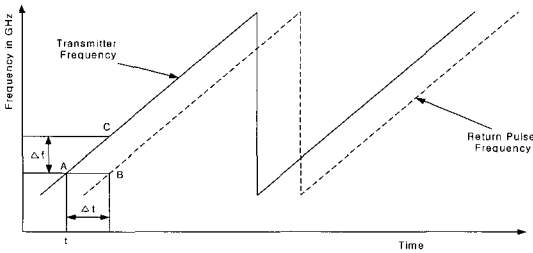
v = 목표물의 이동 속도(m/sec)

θ = 목표물의 이동축과 마이크로파 빔이 이루는 각도

- 주파수 변조 연속파(FMCW) 레이더

정지한 목표물의 거리는 레이더의 송신주파수를 직선적으로 가변 시키는 것을 주기적으로 되돌아오는 주파수와 현재 송신하는 주파수를 서로 비교함으로써 측정이 가능하다. 이와 같은 기능을 가진 레이더를 VCO트랜시버(Voltage Controlled Oscillator Transceiver)라 하며 일종의 주파수 변조 연속파 레이더(FMCW)이다.

송신신호와 수신신호사이에는 Δf 의 주파수편이가 발생하는데 그 이유는 되돌아오는 신호는 송수신기로부터 출발하여 목표물에 맞고 반사되어 다시 송



〈그림 4〉 주파수변조연속파레이더의 주파수파형

수신기로 돌아오는 경로를 광속으로 여행하는데 그때, 소요된 시간(Δt)과 상호 비교되기 때문이다. 레이더에서는 이 시간을 Transit Time이라 부르며, 목표물의 거리측정은 전파가 레이더와 목표물간을 왕복하는데 소요되는 시간인 Transit Time(t)에 광속(C)을 곱해서 얻을 수 있다.

$$t = \frac{(f_r - f_o)}{K}$$

$$R = \frac{t \times C}{2}$$

여기서, f_r = 송신주파수(Hz)

f_o =수신주파수(Hz)

K =송신기의 주파수변조율(Hz/sec)이다.

C =광속(2.98×10^8 m/sec)

T =Transit Time

R =거리(m)

2) 수동형(Passive) 적외선 검지기

가. 특성

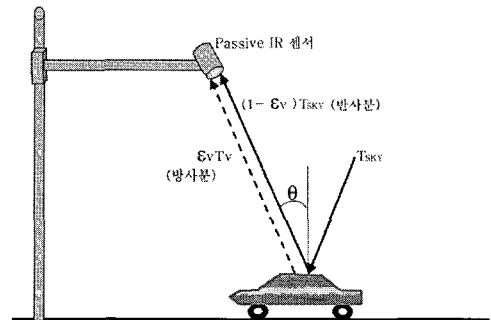
PIR(Passive Infrared Detector)의 동작원리는 열복사의 원리에 의해 도로(땅)의 표면에서 가시광선과 마이크로파는 물론, 적외선 에너지가 복사된다. 그 중에서 적외선에너지만을 검출하기 위해 공중에서 도로(땅)를 향하게 안테나를 설치하여, 도로위로 차량이 지나가면 차량에 의해 도로가 가리어 적외선 에너지가 차단되어 안테나에 적외선에너지가 수신되지 않도록 하는 원리에 의해 차량을 검출하는 차량검지기에 관한 것으로서 그 동작원리가 수동형(Passive)의 복사량 측정방식이기 때문에 능동형 방

식(FMCW데이터 방식)에 비해 전자파를 방사하지 않으므로 전자파 장애가 전혀 없으며 측주식 및 수직 설치 등의 다양한 설치법이 가능하며 유지/보수 시 차량 통행에 지장을 전혀 주지 않는 특징을 가진 차량검지기술이다.

나. 검지원리

적외선 센서는 검지영역(노면)에서 발생하는 적외선 에너지를 측정하는 원리로 동작한다. 검지 영역에 아무 물체도 없을 때 노면의 적외선 에너지 방출량과 차량이 검지 영역에 있을 때 적외선 에너지의 방출량에 차이가 발생하는 것에 의해 차량을 검출한다.

절대온도(-273℃) 이상에서는 어느 파장대역에서든 에너지 방출이 일어난다. 차량검출을 위한 적외선 센서가 동작하는 파장대역을 $8\mu\text{m}$ 내지 $14\mu\text{m}$ 의 범위를 사용하는데 그 이유는 이 파장대역이 구름이나 태양광선의 변화에 따른 영향을 가장 적게 받는 원적외선(Far Infrared) 영역이기 때문이다.



〈그림 5〉 PIR 검지기 원리

차량이 적외선 센서의 FOV(Field Of View)⁶⁾에 들어왔을 때 차량의 진입으로 인해 검출된 에너지에 변화가 발생한다. 이 에너지의 차이는 Radiative transfer theory에 의한다.

그림 5와 같이 차량의 방사율을 ϵ_v , 도로의 방사율을 ϵ_r , 차량의 온도(°K)를 T_v , 도로 표면의 온도를 T_r 이라고 하면 차량의 표면 온도 T_{bv} 는 다음과 같이 표시된다.

6) 적외선 검지기의 검지영역

$$T_{BV}(\theta, \Psi) = \epsilon_v T_v + (1 - \epsilon_v) T_{SKY}$$

하늘의 온도 T_{SKY} 는 대기와 은하계와 우주의 방사에 대한 함수이고, 여기서 각도 θ 는 최저점과 수직을 이루는 각이며, Ψ 는 지면(x-y축)과 이루는 각이다.

$\epsilon_v T_v$ 는 차량에서 방출되는 에너지로 휘도온도(Brightness temperature)로 표시한 것이다.

또한 $(1 - \epsilon_v) T_{SKY}$ 는 하늘 온도의 일부로서 금속의 차량으로부터 반사되어 적외선 센서로 들어오는 부분이다. 그리하여, 높은 방사율을 가진 표면일 경우에는 반사부분이 적어진다.

위에 제시된 식을 도로 표면에 적용하여 전개하면

$$T_{BR}(\theta, \Psi) = \epsilon_r T_r + (1 - \epsilon_r) T_{SKY}$$

이 된다.

차량의 표면 온도를 도로면의 표면 온도에서 감산한 온도차 $\Delta T_B(\theta, \Psi)$ 를 얻는데 이것은 적외선 센서가 검지영역을 차량이 통과할 때 FOV에서 얻어지는 것이다.

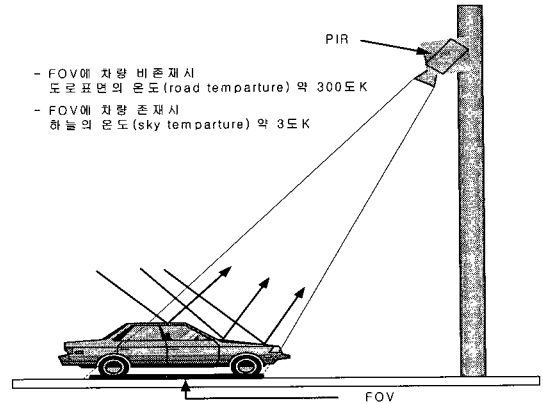
$$\Delta T_B(\theta, \Psi) = (\epsilon_r T_r - \epsilon_v T_v) + (\epsilon_v - \epsilon_r) T_{SKY}$$

이때, $T_r = T_v$ 이면

$$\Delta T_B(\theta, \Psi) = (\epsilon_r - \epsilon_v)(T_r - T_{SKY})$$

따라서 차량의 검지 영역 즉 FOV로 들어가면 온도 차이는 하늘과 노면의 온도차와 노면과 차량의 방사율 차이 곱으로 출력 신호가 발생한다. 방사율은 차량과 노면의 방사율의 차이에 해당한다. 온도항은 대기, 은하계 및 우주 복사 에너지에 의한 온도와 노면의 절대 온도 차와 같다. 흐릴 때, 습도가 높을 때, 비올 때 하늘 온도는 맑은 날보다 높아져 검지 신호의 크기가 적어지지만 차량 검지기는 단거리에서의 적외선 에너지 측정 응용에 해당하므로 설계를 적절히 함으로써 이 문제를 해결할 수 있다.

다음 그림 6은 PIR 검지기의 검지원리이다.



〈그림 6〉 PIR 검지원리

2. 검지알고리즘 개발

1) 검지영역 설계

(1) 설계배경

교통상태는 일반적으로 근포화 이하와 과포화 상태로 구분되며 교차로에서 양방향 신호제어에 중요한 것은 교통량을 근포화 이하의 상태로 유지시키는 것이다. 이를 위하여 정지선 검지기의 역할이 중요하며 실시간신호제어시스템에 설치된 정지선 루프검지기의 크기는 1.8×4.0m가 된다. 정지선 검지기로서 루프검지기를 대체하여 PIR검지기를 설치하였을 때 다음과 같은 문제점이 발견되었다.

- 2대의 차량이 검지영역을 동시에 점유할 때 1대로 인식
- 대형트럭 혹은 중소형 트럭과 같이 차고가 높은 차량일 경우 검지를 하지 못하는 오류
- 검지영역의 일부를 점유했을 경우 검지를 못하는 경우

PIR검지기의 영역을 루프검지기와 같은 규격으로 설계하였을 때 발생하는 문제점으로 인하여 루프검지 영역을 기본으로 PIR검지기에 적용할 세부 영역에 대한 설계를 하였다.

(2) 접근방법

실시간신호제어시스템에 설치된 정지선 루프검

지기의 크기 및 위치결정에 대한 연구가 있었고, 이를 통해 비점유시간과 속도와의 관계를 통하여 루프검지기의 크기는 1.8×4.0m로 설정되었다. 이에 따라 PIR검지기의 크기를 정지선 루프검지기 크기와 같이 1.8×4.0m로 설정하여 정지상태의 차량에 대한 회전반경을 고려하여 세부영역의 설계를 하였다.

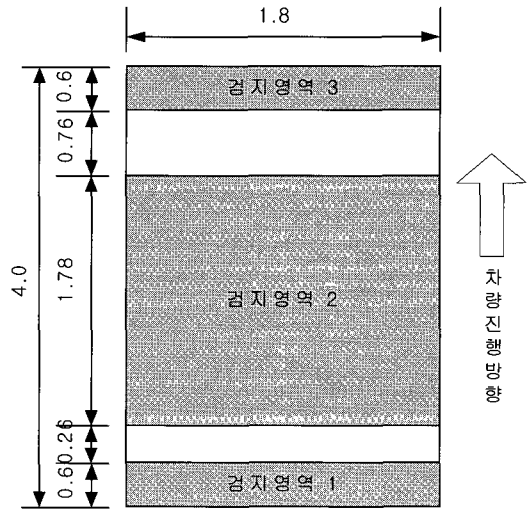
- 기존 루프검지기의 크기를 고려하여 설계
- 점유/비점유시간, 속도, 차로변경 유무를 고려하여 설계
- 설계차량의 최소회전 궤적과 최대회전 궤적을 고려하여 설계

(3) 검지영역 설정

PIR검지기 설계를 위한 기본적인 검지영역은 정지선 루프검지기의 크기(1.8×4.0m)에 따르고, 그 영역에서 수집정보의 종류를 고려하여 다시 세부영역으로 나누었다. 전체 검지영역에 세부 검지영역 1, 2 및 3이 존재하게 된다.

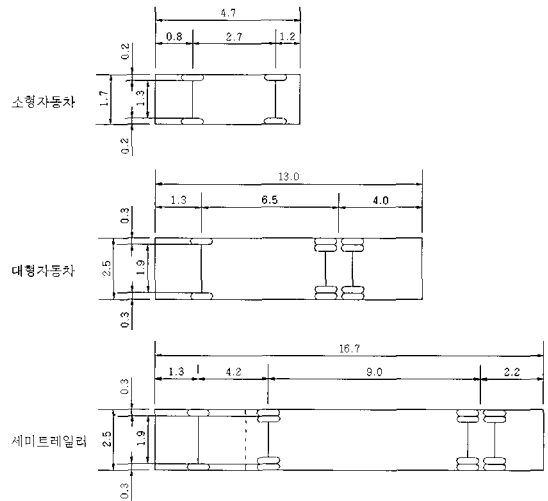
세부검지영역 1과 3영역의 폭은 두 대의 차량이 정지해 있을 경우를 고려한 최소 차간간격으로서 실 폭원은 0.609m 이지만, 최소 차간간격(sec)을 고려한 폭은 0.609m보다 작은 0.6m가 된다.

검지영역 2는 차량의 차로변경을 고려한 영역으로서, 정지한 차량이 차로변경을 위해 필요한 최소 회전반경과 최대회전반경을 산정하여 1.78m로 설정되었다. 검지영역 1과 3은 차량을 감지하여 점유/비점유, 속도를 수집하는 역할을 수행하고, 검지영역 1과 3으로 차로변경을 감지하게 된다. 세부검지영역은 다음 그림 7과 같다.



<그림 7> 검지영역(단위:m)

자동차의 치수, 성능에 관한 제원을 정하고 있다. 다음 그림 8은 설계기준 자동차의 제원이다.



<그림 8> 설계기준 자동차의 제원(단위:m)

(4) 검지영역 설계

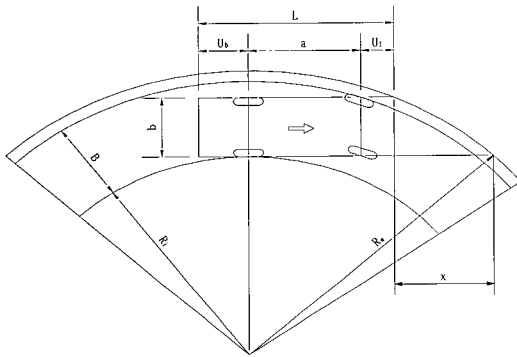
가. 설계기준 차량

도로상을 주행하는 차량에는 매우 다양한 형태가 있다. 이들 각 형태별로 도로를 설계한다는 것은 매우 복잡하며 실제로 여러 형태의 자동차가 공존하므로 이들을 대표하여 세가지의 설계기준 자동차로 규정하였다. 규정에 따라 설계기준 자동차를 소형자동차, 대형자동차, 세미트레일러의 세종류로서

나. 영역산정방법

일반적으로 자동차의 뒷바퀴는 뒤 차축에 직각으로 장치되어 있어 자동차가 주행중에 방향전환을 할 경우에는 앞바퀴로 회전하게 된다. 그림 9에서와 같이 자동차 앞바퀴 각각의 중심은 자동차가 회전하려는 중심점과 뒤차축의 연장선이 만나는 각도로 회전하여 방향을 전환하게 된다. 설계 자동차

의 폭원은 b 로서 정지한 차량이 회전을 하려 할 때 바깥쪽 곡선반경(R_w)으로 원을 그리며 회전하게 된다. 주행중인 차량의 회전반경과 정지한 차량의 그것을 비교하면 정지했을 경우 최소회전반경이 된다. 즉, 정지한 차량의 앞범퍼가 검지기의 leading edge에 접하였을 때 회전을 하면 최소 회전반경이 되고, 주행중에는 항상 최소회전반경보다 크다. 이때 같이 a 와 U_f 는 알고 있는 값이므로 R_i 와 R_w 를 이용하여 피타고라스 정리에 의해 x 의 값을 구할 수 있다. x 는 정지한 차량의 회전반경을 고려한 길이가 된다.



〈그림 9〉 회전반경 산정

$$a + U_f + x = \sqrt{R_w^2 + R_i^2}$$

$$x = \sqrt{R_w^2 + R_i^2} - a - U_f \text{ 가 된다.}$$

여기서, L : 자동차의 길이

b : 자동차의 폭

a : 차축간 거리

B : 자동차의 주행폭원

U_f : 앞내민길이

U_b : 뒤내민길이

R_i : 안쪽 곡선반경

R_w : 바깥쪽 곡선반경

x : 회전반경을 고려한 검지영역설정을 위한 길이

다. 대형설계자동차의 회전반경

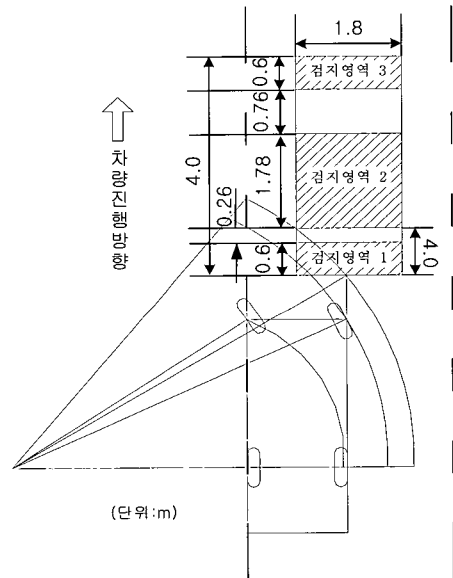
대형설계자동차의 회전반경은 위에서 제시한 바

와 같이 구하면 최소회전반경은 2.61m이고 최대회전반경은 3.77m가 된다. 하지만 최소회전반경과 최대회전궤적을 고려하여 검지영역 2를 설정하게 되면 검지영역 3과 겹쳐 4.37m가 되므로 정지선검지기의 검지영역으로 설정한 4.0m를 초과하여 차로변경을 위한 영역설정이 무의미해진다. 따라서 검지영역의 설계는 소형차량에 대해서만 고려한다.

라. 소형설계자동차의 회전반경

- 최소회전반경

검지기의 leading edge와 차량의 앞범퍼가 접하였을 때 정지한 차량이 그림 10과 같이 한차로의 왼쪽차선에 인접하여 회전한다고 가정하면 그때의 차량의 궤적은 최소가 된다. 이때 검지영역 3의 최소 검지영역설정을 위한 검지영역의 최소 길이가 산출된다. 이때 a 와 U_f 는 알고 있는 값이므로 R_i 와 R_w 를 이용하여 피타고라스 정리에 의해 x 의 값을 구할 수 있다. 정지한 차량의 회전궤적을 고려한 길이 x 는 0.86m가 된다



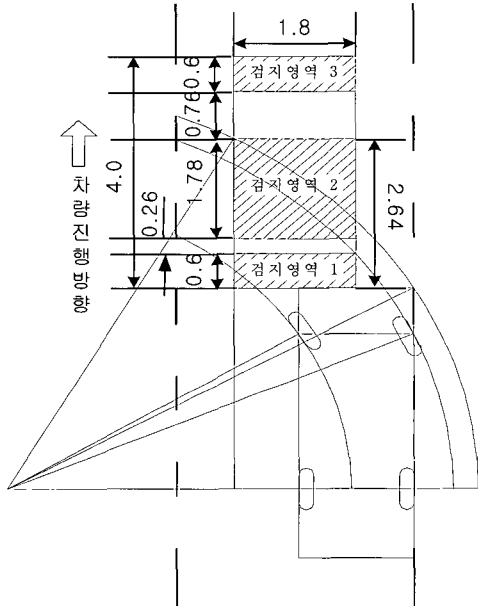
〈그림 10〉 최소회전반경(단위:m)

- 최대 회전반경

검지기의 leading edge와 맞닿은 정지차량이 오른쪽 차선에 인접하여 회전할 때 그때의 차량 궤적은

7) 검지영역의 상류 edge,(trailing edge: 검지영역의 하류 edge)

최대가 된다. 이때 검지영역 2의 최대검지영역설정을 위한 검지영역의 최대 길이가 산출된다. 이때 a와 Uf는 알고 있는 값이므로 Ri와 Rw를 이용하여 피타고라스 정리에 의해 x의 값을 구할 수 있다. x는 정지한 차량의 회전궤적을 고려한 길이로서 2.64m가 된다.(그림 11 참조)



(그림 11) 최대회전반경(단위:m)

2) 검지 알고리즘 개발

(1) 접근방법

정지선검지기의 검지알고리즘에 있어서 보다 정확한 점유/비점유시간의 수집을 위해 3개의 검지영역으로 나누었다. 각 검지영역의 역할 및 수집정보를 살펴보면

- 검지영역 1 : 차량의 진입을 인식
- 검지영역 1과 2 : lane change의 유무 인식
- 검지영역 1과 3 : 속도, 점유/비점유시간

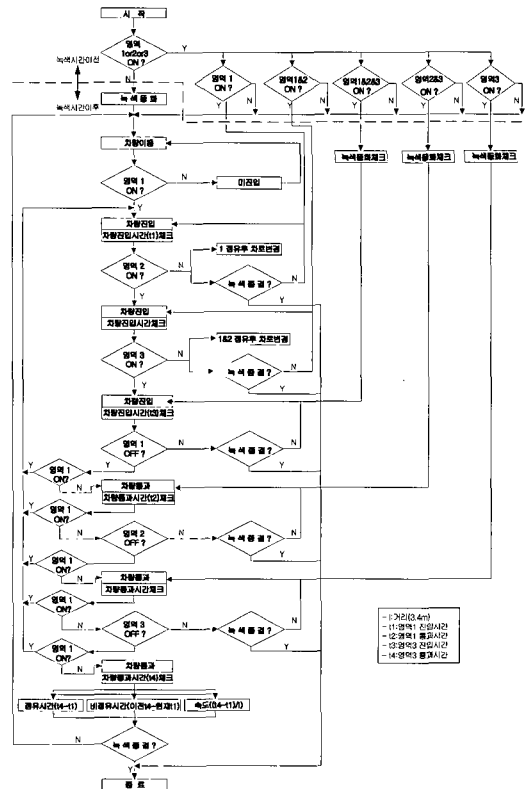
각 검지영역의 역할에 따라 알고리즘이 구현되어 교통상황변수의 수집이 이루어진다.

알고리즘의 개발에 있어서 다음과 같은 가정을 하였다.

- 통과차량은 검지영역을 1, 2 및 3을 연속적으로 통과해야 한다.
- 두 대의 연속된 차량의 차로변경은 없다.
- 녹색신호 시작시 맨 앞 차량은 차로변경이 없다.
- 한 대의 차량이 두 개 차로를 연속하여 변경할 수 없다.
- 후진하는 차량의 경우는 필요 없는 데이터로 간주를 하게 된다.

(2) 알고리즘 수행 절차

다음 그림 12는 알고리즘의 수행절차도 이다.

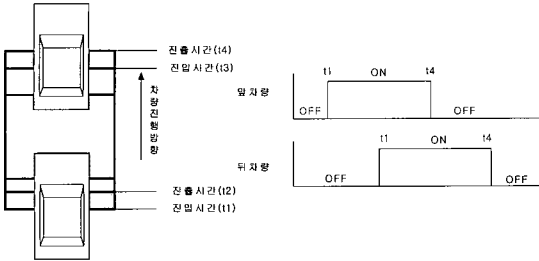


(그림 12) 알고리즘 수행절차도

(3) 점유/비점유시간산정

2대의 차량이 검지영역을 동시에 점유할 때 이를 1대로 인식하는 문제점의 해결 방안으로 알고리즘이 개발되었다. 여기서 점유/비점유시간을 산정하기 위한 알고리즘은 그림 13에서와 같이 선행차량의 검지영역 진출시간과 후행차량의 검지영역 진입시

간의 차이로 계산한다. 즉 개발 알고리즘의 점유시간은 진행차량의 t1과 t4의 차이고, 비점유시간은 앞차량의 t4와 뒤차량의 t1의 차이이다.



〈그림 13〉 알고리즘의 비점유시간 산정

(4) 속도산정

본 연구에서 제시한 알고리즘에서 속도는 짧은 구간내의 속도이기 때문에 지점속도(spot speed)⁸⁾의 개념을 적용하였다. 따라서 속도는 위의 첫 번째 그림에서 진행중인 차량의 진출시간(t2)와 진출시간(t4)의 차이로 산정한다. 여기서 3.4m는 기본검지영역4.0과 검지영역1의 폭 0.6m와의 차이이다.

$$\text{속도} = (t2 - t1) / 3.4$$

(5) 차로변경유무

주행중 차량의 행태는 알지르기, 차로변경 등과 같이 다양하게 나타나며, 검지영역 2는 실제로 차량이 주행 중 검지영역에서 차로변경을 하였을 때를 고려한 영역이 된다. 차로변경에 대한 각 검지영역의 검지순서를 살펴보면 다음과 같다. 여기서 Vs는 검지기가 설치된 차로에서 주행하는 차량이고, VBe는 옆차로에서 차로변경을 하는 차량이다.

3. 자료분석 및 평가

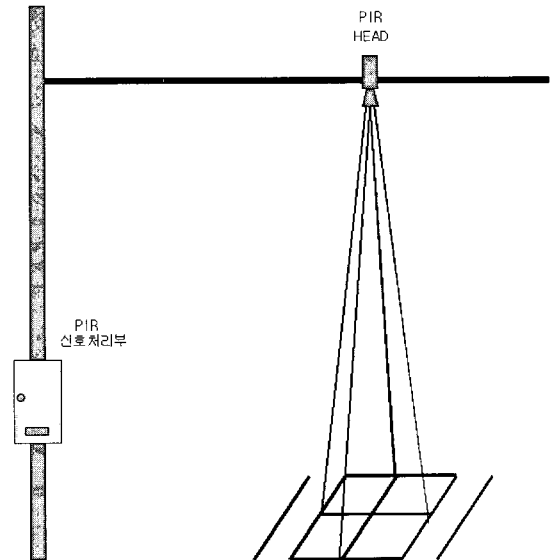
1) 실험방법

(1) 실험방법

가. PIR 실험

자료의 구축을 위한 실험은 PIR 검지기의 검지영역

역을 현재 정지선검지기인 루프영역과 같이 1.8×4.0m로 설정하여 차량 점유/비점유시간의 수집을 위해 현장실험을 실시하였다. 검지영역은 청 테이프를 이용하여 아스팔트 도로 위에 FOV를 사각형으로 표시하였다. PIR의 설치는 수직설치(overhead mount)와 측주식설치(side-fire)가 있는데 본 실험에서는 다음의 그림 14와 같이 수직설치를 하였다.



〈그림 14〉 PIR 설치 예

나. 비디오 촬영

교통공학 및 교통조사 등에서 널리 사용되는 비디오 카메라 촬영기법은 현장 교통자료 수집을 통해 실내에서 교통자료분석을 가능하게 하는 방법 중 하나이다. 이 방법은 현장에서 비디오 촬영으로 비디오 테이프에 자료를 녹화하고 실내에서 촬영된 자료를 비디오 분석기를 통해 처리한다.

CCTV나 영상검지기 등의 매체는 비디오 카메라 촬영기법과는 그 내용이 다르지만 실시간으로 현장의 교통상황을 파악하거나 현장의 속도나 이동시간 등의 교통파라미터를 수집하여 대상 도로나 대상구간의 혼잡정도, 사고유무 등을 파악하고 분석할 수 있는 것으로 1차 수집된 자료를 자동으로 가공·처리할 수 있는 장점이 있다.

비디오 카메라 촬영기법은 실내자료분석 시 반

8) 어느 특정지점 또는 짧은 구간 내의 속도

복적인 자료 추출 및 분석이 가능하며 한번 촬영으로 여러 가지 자료를 얻을 수 있다. 또한 현장 조사 인원 수를 줄일 수 있으며 한 지점뿐 만 아니라 넓은 지역을 한번에 조사할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 넓은 지역을 조사할 경우 조사지역 주변의 건물이나 지형지물을 사용하여야하고 비디오 촬영 시간이 장기화될 경우 비디오 테이프의 교체로 인해 자료수집이 중단될 수 있으며 비디오 촬영 이후 실내분석을 위한 추가 시간이 소요된다.

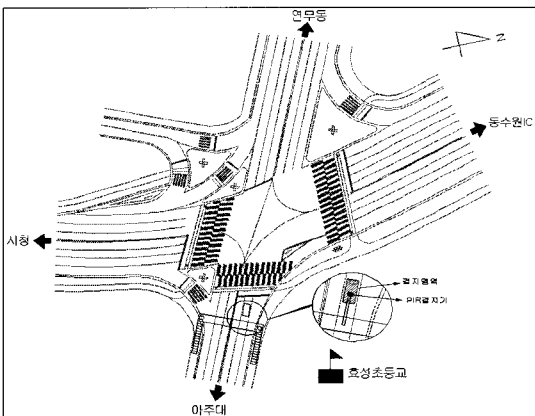
(2) 실험환경

가. 실험장소

포화도를 결정하는 교통상황변수 중 점유/비점유 시간을 직접 측정하고자 수원시 효성초등학교앞 사거리의 한 개 접근로(아주대 - 월드컵경기장 방향 2 차로)에 대하여 데이터 획득을 위하여 PIR자료 수집 및 비디오 카메라 촬영을 실시하였다.

- 실험일 : 2002. 11. 26. 화요일
- 촬영시간 : 오후 1:20 ~ 3:00
- 기상조건 : 흐리고 한때 눈과 비

다음의 그림 15는 실험사이트의 개략도이다.

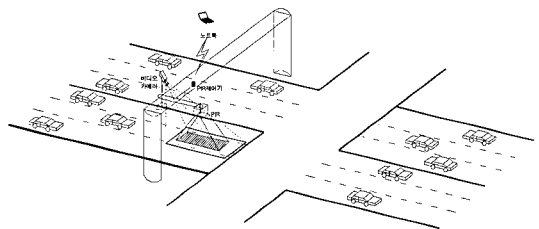


(그림 15) 실험장소(효성초등학교앞 사거리)

나. 실험환경

본 논문을 위한 실험은 수원시 효성초등학교앞 사거리의 육교에서 시행하였다. PIR 검지기는 도로로

부터 6.0m의 높이에 설치하였고, FOV의 영역은 정지선에서부터 차로쪽으로 0.5m를 이격하여 1.8×4.0m로 설정하였으며, PIR과 비디오카메라는 FOV에 대하여 수직으로 설치하였다. 아래의 그림 16과 같이 노트북 컴퓨터를 PIR 제어기(PIR local controller)에 연결하여 개별차량에 대한 점유/비점유시간 자료를 획득하였다. 또한 비디오카메라의 View는 차량의 진입과 진출의 확인을 용이하게 할 수 있도록 FOV에 대하여 수직으로 설치하였다.



(그림 16) 개략적 현장실험도

실험 순서는 다음과 같다.

- 차로에 수직이 되게 PIR 설치
- 촬영의 정확도를 고려하여 차로에 수직으로 비디오 카메라 설치
- 자료수집 준비상태점검
- 스톱워치를 이용하여 PIR 장비와 비디오카메라 장비의 정확한 시간동기와 작업실시
- 스톱워치를 이용하여 신호주기자료 및 녹색시간자료 수집
- 시험개시 및 동시 자료수집

2) 사용장비

(1) PIR

검지기는 신호교차로의 정지선 루프검지기를 대신하여 PIR을 사용하였으며, 설치는 도로를 향하도록 수직설치를 하였다.

(2) 노트북 컴퓨터

PIR의 제어기에 연결하여 점유/비점유시간 자료를 수집하기 위하여 노트북 컴퓨터를 이용하였다.

(3) 비디오 카메라

차로별 모든차량의 점유/비점유시간을 실측하기가 어렵기 때문에 비디오 카메라를 이용하였고, 녹화를 위하여 1대의 비디오카메라가 촬영에 이용되었다.

(4) 기타장비

녹화된 자료는 비디오프레임⁹⁾분석 기법을 이용하여 분석을 하였고, 촬영의 정확도 제고와 오차의 감소 및 정확한 데이터 수집을 위해 고층건물 옥상에서 비디오 촬영을 하였다. 프레임분석을 위하여 VTR과 TV를 각각 1대씩 이용하였으며, 주기 및 현시자료 수집은 스톱워치를 이용하였다.

3) 자료의 정리

(1) 비디오 자료의 정리

기준자료의 구축을 위해 비디오 카메라를 이용하여 촬영한 결과를 비디오프레임분석을 통하여 주어진 녹색시간내의 모든 차량에 대하여 교통량, 점유/비점유시간을 추출한다.

(2) PIR자료의 정리

기준자료와 비교평가를 하기 위한 대상자료를 마련하기 위해 비디오카메라 촬영에 의하여 기준자료를 획득하고, 대상자료로서 PIR 자료를 수집하였으며, PIR자료는 기존 PIR 자료와 제안 PIR 자료로 나누었다.

4) 자료분석

(1) 분석 방법

가. 비디오 자료 분석

현장에서 조사된 자료(속도, 점유시간, 비점유시간 등)를 분석하기 위해서는 실내에서 비디오분석을 하여야 한다. 주로 비디오 스크린 상에 참조점(reference point)를 표현하고 비디오 프레임에 따라 조사원의 수작업에 의해 정밀하게 분석을 하거나 자료 추출을 위한 프로그램을 이용하여 비디오에서

PC로 자료를 입력하는 방법이 있다. 그 밖의 방법으로는 자동(automated method)으로 비디오 자료를 컴퓨터에 입력하여 파일화 시키는 방법도 있다.

수작업에 의한 방법은 오차율이 낮아 적은 수의 샘플사이즈로도 분석이 가능하다는 장점이 있지만 시간이 많이 소요되는 단점이 있다. 이에 반하여 자동으로 자료를 추출하는 방법은 시간이 적게 소요되나 오차율이 수작업을 이용한 방법보다 크다는 단점이 있다. 그러나 현장의 검지기 자료와 함께 비디오 자료를 동시에 분석할 경우 오차율을 감소시킬 수 있다. 본 연구에서는 수작업을 통한 비디오 프레임 분석을 수행한다.

국내 비디오 시스템의 재생프레임 수가 일반적으로 초당 30프레임으로서 프레임 분석을 통한 점유시간과 비점유 시간을 산출하기로 한다.

비디오자료에 대한 분석은 다음과 같다.

- 비디오 스크린상에 FOV 영역 설정
- 차량의 FOV에 대한 검지시작프레임과 검지끝 프레임을 각각 추출
- 각 프레임을 시간(초)으로 환산
- 검지시작과 검지 끝에 대한 시간차이로 점유시간 및 비점유시간 산정
- 녹색시간 시작부터 종료되는 시점까지의 차량만 추출(녹색시간 자료이용)
- 주기당 점유시간 산정
- 주기당 교통량은 점유시간의 개수임
- 주기당 비점유시간 산정
- 주기당 점유시간 합 산출
- 주기당 비점유시간 합 산출

나. PIR 자료 분석

기존 PIR자료와 제안 PIR자료는 노트북 컴퓨터를 통하여 점유/비점유시간이 저장이 되므로 다음과 같은 방법으로 분석을 시행한다.

- 주기당 PIR자료에 대한 점유 및 비점유시간 정리
- 주기당 점유시간 산정
- 주기당 교통량은 점유시간의 개수임

9) 국내 비디오시스템의 재생 프레임수는 초당 30프레임이다.

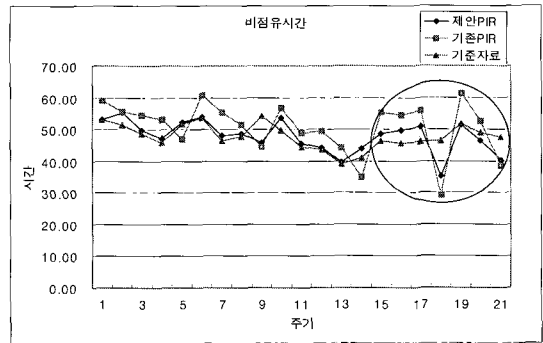
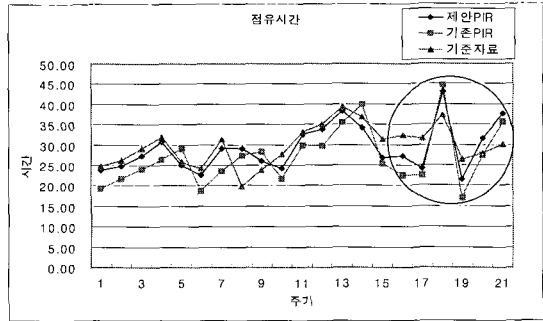
- 주기당 비점유시간 산정
- 주기당 점유시간 합 산출
- 주기당 비점유시간 합 산출

(2) 분석 결과

본 연구에서 수행한 교통량, 점유/비점유시간에 대한 비디오 분석자료와 PIR 자료는 주기단위로 분석을 시행하였다.

가. 교통량

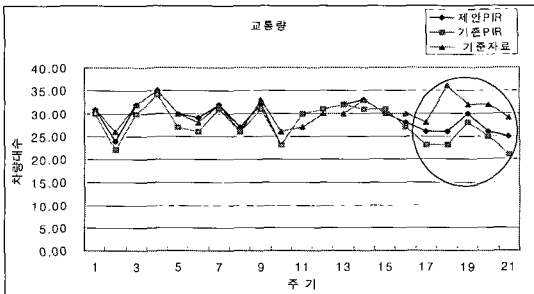
아래의 그래프는 비디오 분석자료와 기존PIR자료 및 제안PIR자료의 교통량에 대하여 주기단위 분석을 시행한 결과 그래프이다. 제안PIR의 교통량의 패턴은 실측치와 유사함을 알 수 있다. 아래의 그래프를 보면 기존검지기 및 제안검지기의 교통량이 실측교통량과 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 본 논문을 위한 실험이 악천후(눈과 비)에서 실시하였고, 실험현장의 상황의 갑작스런 기상이변에 기인한 것으로 판단된다.



5) 자료의 평가

(1) 방법선정

실험을 하여 얻은 자료를 통계적 방법을 사용하여 처리를 하면 결론을 명확히 해석할 수 있을 뿐만 아니라 분석하기도 용이하다. 분석한 자료의 정확도 비교분석을 위한 지표에는 여러 가지가 있으며, 본 연구에서는 평가를 위해 평균절대편차(Mean Absolute Deviation: MAD)와 평균절대비율오차(Mean Absolute Percentage Error: MAPE)를 사용하였다. 비교 분석 및 평가를 위한 요인의 의미는 다음과 같다.



나. 점유/비점유시간

아래의 그래프는 비디오 분석자료와 기존PIR자료 및 제안PIR자료의 점유시간과 비점유시간에 대하여 주기단위 분석을 시행한 결과 그래프이다. 그래프를 보면 점유시간과 비점유시간이 기준자료와 패턴이 유사함을 알 수 있다. 그래프의 원에 있는 데이터는 실측치와 차이가 보이는데 본 논문을 위한 실험은 악천후(흐리고 한때 눈과 비)에서 실시하였고, 알고리즘의 적용에서 점유/비점유시간이 실측값보다 다소 낮게 측정이 된 것은 실험현장 상황의 갑작스런 기상이변에 기인한 것으로 사료된다.

가. 평균절대편차(Mean Absolute Deviation: MAD)

일정기간동안 오차의 비교방법으로 오차의 확률 분포를 이용했다면 비교의 정확성을 가능하게 하기 위해서는 오차의 크기를 측정하는 것이 중요하다. 오차의 크기를 측정하기 위하여 일정기간동안 발생하는 모든 오차의 합계를 고려해야 한다. 그러나 오차의 합은 항상 0이기 때문에 이용할 수가 없다. 이 문제를 해결하는 방법으로 음과 양의 오차가 상쇄되는 것을 예방하는 오차의 절대값에 대한 검토가 있다.

◆ MAD

$$MAD = \frac{\sum_{i=1}^I |f_i - f_d|}{n} \quad \text{식(1)}$$

여기서, $i = i$ 번째 주기
 $I =$ 얻어진 자료의 총 단위시간의 개수
 $f_i = i$ 번째 단위시간에서의 기준자료의 값
 $f_d = i$ 번째 단위시간에서의 대상자료의 값

다. 평균절대비율오차(Mean Absolute Percentage Error:MAPE)

오차의 음과 양의 오차가 상쇄되는 것을 예방할 수 있는 또 다른 방법으로 상대적인 오차의 크기를 나타내는 평균절대비율오차가 있다. 다음은 절대비율오차평균을 나타낸 것이다.

◆ MAPE

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^I \left| \frac{f_i - f_d}{f_i} \right| \times 100}{n} \quad \text{식(2)}$$

여기서, $i = i$ 번째 주기
 $I =$ 얻어진 자료의 총 단위시간의 개수
 $f_i = i$ 번째 단위시간에서의 기준자료의 값
 $f_d = i$ 번째 단위시간에서의 대상자료의 값

(2) 알고리즘의 평가

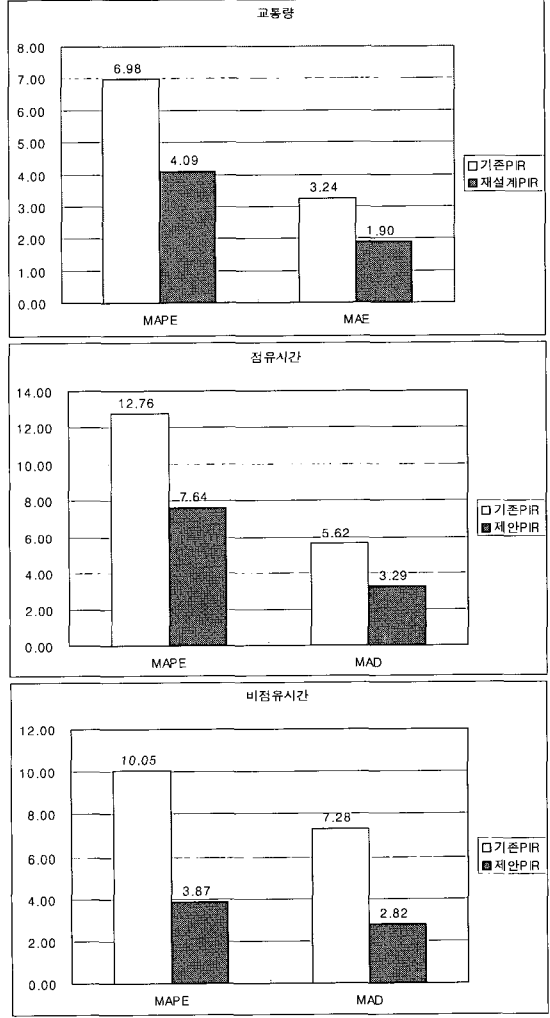
본 연구에서는 개발된 알고리즘의 평가를 위해 기존 PIR 자료와 제안 PIR 자료에 대하여 정확성을 측정하는데 사용되는 MAD와 MAPE를 사용하여 알고리즘을 평가하였다.

앞에서 제시한 식(1)과 식(2)를 이용하여 개발된 알고리즘을 적용한 PIR 자료와 기존 PIR 자료에 적용하면 표 1과 같다. 표에서 나타난 바와 같이 개발된 알고리즘을 적용한 결과 값이 기존결과 값보다 우수함을 알 수 있다.

<표 1> 알고리즘 평가결과

검지기	구분		교통량		점유시간		비점유시간	
	MAD	MAPE	MAD	MAPE	MAD	MAPE		
기존 PIR	3.24	6.93	5.62	12.76	7.28	10.05		
제안 PIR	1.90	4.09	3.29	7.64	2.82	3.87		
개선율(%)	53	53	41	40	61	61		

아래의 그래프는 점유시간과 비점유시간에 대한 평가지표인 MAD와 MAPE를 나타낸 것이다. 두 평가지표인 MAD와 MAPE가 점유시간과 비점유시간에 있어서 기존 PIR의 결과값보다 개발된 알고리즘을 적용한 PIR의 결과값이 우수함을 알 수 있다.



Ⅲ. 결론 및 향후 연구과제

본 논문은 수동형적외선 검지기를 기반한 검지 알고리즘을 개발하여 신호교차로를 대상으로 점유/비점유시간을 수집하는 것이 주목적이다. 또한 정지선 검지기의 대안 검지기로써 가능성을 검토하였다. 본 논문에서는 신뢰성 있는 교통상황정보

의 획득을 위하여 검지영역을 분할하고 수동형적외선 검지기에 적용할 검지영역을 설계하여 교통상황정보의 수집이 이루어졌으며, 이는 보다 유용한 교통상황변수를 추출하는 효율적인 방법이라 여겨진다.

이와 같이 개발된 알고리즘은 현장 적용성 검토 및 알고리즘 평가를 위하여 신호교차로의 1개차로에 설치된 수동형적외선 검지기로부터 자료를 수집한 후 이 자료를 바탕으로 교통량, 점유시간, 비점유시간에 대하여 평균절대편차, 평균절대비율오차를 정확도의 비교척도로 사용하였다. 그 결과 비점유시간의 경우에 개발된 알고리즘을 적용한 적외선 검지기의 효과는 기존 적외선 검지기보다 우수한 것으로 나타났다.

본 논문을 위한 실험은 악천후(흐리고 한때 눈과 비)에서 실시하였고, 알고리즘의 적용에서 비점유시간이 실측값보다 다소 낮게 측정이 된 것은 실험 현장 상황의 갑작스런 기상이변에 기인한 것으로 판단된다. 그러나 평가지표인 평균절대편차와 평균절대비율오차값으로 볼 때 본 알고리즘은 우수한 것으로 사료된다.

본 연구에서 수집자료의 매체가 된 수동형적외선 검지는 개발 및 상용화 초기 단계에 있다. 본 논문에서 제시된 알고리즘은 비점유시간의 교통량, 점유시간, 비점유시간에 대한 평가가 이루어졌으나 향후 비점유시간 외에 점유시간 경우, 좌회전차량 대수가 주기마다 많은 변화가 있을 경우 등 교통상황의 변화를 고려한 현장 적용성이 고려되어야 한다. 또한 점유시간, 비점유시간 외에 속도 및 차로 변경유무의 정보에 대한 알고리즘의 평가가 요구되며, 도시부 간선도로망에 적용하기 위해 단일차로가 아닌 다차로를 대상으로 한 알고리즘의 평가가 이루어져야 할 것이다. 끝으로 교통량, 점유시간 및 비점유시간이 실측치와 현저한 차이가 나는 것은 갑작스런 기상이변이 원인인 것으로 사료되므로, 기상이변에도 정확한 데이터를 수집할 수 있는 알고리즘의 개발이 필요하다.

참 고 문 헌

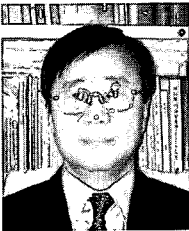
- [1] 건설교통부, 도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙 해설 및 지침, 2000.
- [2] 함효준, 최신 경제성공학, 동현출판사, 1999.
- [3] 김연형, 시계열 분석과 예측, 자유아카데미, 1990.
- [4] 김우철, 현대통계학, 영지문화사, 1996.
- [5] 도철용, 교통공학원론(상), 청문각, 1995.
- [6] 서울특별시 신신호시스템 기능개선 용역 최종 보고서, 서울지방경찰청, 도로교통안전관리공단, 1999.
- [7] 서울특별시 교통신호제어시스템개발 연구용역 시행 1차년도 결과보고서(신시스템개발연구), 서울특별시지방경찰청, 1991.
- [8] 2000년 신신호시스템 기능개선, 서울지방경찰청, 2001.
- [9] 차량용 대체검지기 활용방안 연구, 도로교통안전관리공단, 1999.
- [10] 고속도로 교통관리시스템(FTMS)을 위한 MCD 평가실험, 아주대학교 교통연구센터, 1998.
- [11] William R. McShane, TRAFFIC ENGINEERING, PRENTICE HALL, 1998.
- [12] Lawrence A. Klein, Sensor Technologies and Data Requirements for ITS, Artech House Publishers, 2001.
- [13] Sherman K. Stein, CALCULUS and ANALYTIC GEOMETRY, Addison-Wesley, 1990.
- [14] ITE, TRAFFIC DETECTOR HANDBOOK, Second Edition, 1990.
- [15] FHWA, TRAFFIC CONTROL SYSTEMS HANDBOOK, 1996.
- [16] TSIS User's Guide, FHWA 2000
- [17] http://webzine.ceric.net/lastsearch_01.html?aclass=28&ArticleID=104
- [18] <http://www.fhwa.dot.gov/ohim/tvtw/vdstits.pdf>
- [19] <http://www.dot.state.mn.us/guidestar/pdf/niteval/vol1test.pdf>

〈저자소개〉



정 석 민(Sok-Min, Jeong)

2001년 3월~2003년 2월 : 아주대학교 건설교통공학과(석사)
1993년 3월~2000년 2월 : 아주대학교 교통공학과(학사)
2003년 3월~현재 : 아주대학교 교통연구센터 연구원
1999년 9월~2001년 2년 : (주)삼안건설기술공사 사원



이 승 환(Seung-Hwan, Lee)

1969년~1975년 : 건설부 고속도로 건설공사 사무소
1975년~현재 : 아주대학교 전임강사, 조교수, 부교수, 교수
1987년~1990년 : 아주대학교 기획실장
1991년~현재 : 아주대학교 교통연구센터 소장
1995년~1996년 : 아주대학교 학생선발 본부장
1997년~1999년 : 아주대학교 환경·도시공학부장
1997년~1999년 : 대한교통학회 제 1 부회장
1994년~현재 : 경기도 도시계획 심의위원
1994년~현재 : ITS세계대회 국제이사
1995년~현재 : ISO TC204 한국 위원장



김 남 선(Nam-Sun, Kim)

1997년~1999년 : 아주대학교 건설교통공학과 교통공학(석사)
2000년~2001년 : 아주대학교 건설교통공학과 교통공학(박사수료)
1999년~1999년 : 아주대학교 교통연구센터 교통운영연구실 연구원
2002년~2002년 : 아주대학교 교통연구센터 교통운영연구실 선임연구원
2003년~2003년 : 아주대학교 교통연구센터 교통운영연구실 수석연구원