

딜레마 구간 최소화를 위한 감응식 신호제어전략의 개발

Development of an Actuated Traffic Signal Control Strategy to Minimize Dilemma Zone

김영찬*(Youngchan Kim), 허정아**(Huh Jung Ah)

Key Words : 딜레마 구간, 감응식 신호제어기, EC-DC검지기, 지방부 도로, 완전감응제어

요 약

지방부 도로의 신호교차로에서 발생하는 교통사고의 대부분은 충돌·추돌사고가 차지하고 있다. 교통 사고 감소와 소통 증진을 위해 지방부 도로 신호제어의 고급화 및 딜레마 구간 제어가 요구되고 있다.

본 논문에서는 딜레마 구간 내 차량 수를 최소화하기 위하여 기본적인 감응제어(actuated control)의 발전된 형태인 Volume-Density Control과 일본의 R형 검지기를 이용한 딜레마 구간 제어, 미국의 EC-DC Control을 딜레마 구간 제어전략으로 설정하였다. 제어전략의 효과분석은 최대녹색시간에 따른 분석, v/c 에 따른 분석을 실시하였으며 효과측도로는 안전 측면에서 딜레마 구간 내 차량 수, Max-Out Probability, 소통 측면에서 평균정지지체를 사용하였다. 이를 위해 일반국도상의 신호교차로를 효과분석 대상 교차로로 선정하여 딜레마 구간 제어 속도 범위를 설정하고 현장조사를 실시하여 시뮬레이터의 차량발생 기본 자료로 적용하였다.

시뮬레이터를 이용한 평가 결과 일본의 딜레마 구간 제어전략이 안전 측면에서, 미국의 EC-DC Control이 소통 측면에서 가장 효과적인 것으로 나타났다. 분석 결과를 바탕으로 효과적인 신호제어전략을 제시하였는데 이는 일본의 제어방식과 EC-DC Control의 정지선 검지기의 기능을 혼합한 것으로 안전 및 소통 측면에서 가장 효과적인 것으로 판단된다.

ABSTRACT

Most of the traffic accidents are a rear-end collision and a clash generated in the signalized intersection on the local roads. So, it is demanded that the high-quality of signal control and dilemma zone control. According to the cases generated by foreign countries, we established the strategies which are composed of Volume-Density Control, strategy of the dilemma zone control using R-detector (microwave detector) in Japan and EC-DC Control. MOEs(Measure of effectiveness) are car numbers in the dilemma zone, max-out probability in the safe side and the average stopping delay in the progress side.

We choose a signalized intersection in rural highway to analyze the effect of the strategies and practiced an on-the-spot survey. The result of the survey is applied to the basic data in the simulator. Consequently, strategy of the dilemma zone control using R-detector(microwave detector) in Japan is the best effective in the safe side and EC-DC control is the best in the progress side. Based on the result, we developed the effective strategy of the signal control. This strategy is composed of the strategy of Japan and the detector on the stopping line used in the EC-DC control. On the result of the analysis, new strategy is the best effective in two sides.

* 종신회원, 서울시립대, 교수, ** 비회원, 서울시정개발연구원, 연구원
논문접수일 : 2002. 10. 15

I. 서론

1. 연구의 목적

일반국도를 포함하는 지방부 도로는 도시부 도로보다 교차로간격이 넓어 독립제어와 연동제어의 경계가 명확하다. 교통량은 대체로 평일은 한산하며 주말이 혼잡하기 때문에 한산상태 제어가 주요 목표가 된다. 또한 교통량의 임의변동이 크기 때문에 감응식 제어의 필요성이 대두된다.

우리나라 교통사고 건수는 1980년대 연간 10% 내외의 증가를 보였으나, 1990년대에 들어 25만건 수준에서 머물고 있다. 사고건수의 증가는 멈추었으나, 교차로 접근로의 추돌사고 및 교차로 내의 충돌사고건수는 계속 증가하여 1990년 총사고건수에 대한 비율이 10%에서 1995년에는 18%를 차지하는 현상을 보이고 있다. 이는 교차로의 교통안전문제가 심각하다는 사실을 입증하고 있으며, 차량이 고속으로 질주하는 지방부 교차로에서 특히 심각한 교통안전문제로 대두되고 있다.

지방부 도로의 소통 증진을 위해서는 지방부 도로의 특성에 맞는 신호제어 방안의 과학화가 이루어져야 하며, 안전성 향상을 위해서는 재래식 신호제어에서 발생하게 되는 '딜레마 구간'(Dilemma Zone)해소를 위한 신호제어 방식이 요구된다.

본 연구에서는 지방부 도로의 신호제어에 합리적인 감응식 신호제어기를 이용하여 접근 속도가 높은 교차로의 딜레마 구간 문제를 해결하기 위한 방안을 제시한다. 또한 신호 제어 전략을 미시적 시뮬레이터를 통해 비교분석 하여 최적의 제어 전략을 제안하도록 한다.

2. 연구의 범위

국내의 지방부 도로의 신호시스템 현황은 지방부 도로의 특성에 적합한 신호제어 전략을 설정하는데 기초가 된다. 특히 우리나라 보다 발전된 형태의 제어를 실시하는 외국의 신호 시스템을 조사함으로써 신호제어 전략 설정에 참고하도록 한다. 딜레마 구간 최소화 전략은 감응식 신호제어기 하에서 구현이 가능하므로 본 연구에서는 미국에서 개발된 감응식 신호제어기의 현시 및 검지기 체계, 신호 운영상의 특징에 대해 알아보도록 한다.

딜레마 구간 최소화 전략을 설정하기에 앞서 딜레마 구간의 정의 및 범위를 설정한다. 딜레마 구간 최소화 전략은 외국에서 제안된 방식 중 가

장 효율적이며 현실적으로 적용이 가능한 방식을 설정하여 비교 평가한다. 제어 전략에 따른 효과 분석은 미시적 시뮬레이터를 통해 각 시나리오별로 평가한다. 독립교차로의 제어 전략에 따른 효과 척도는 소통 측면에서 신호 교차로의 효과 척도인 평균정지지체를 사용하며, 안전 측면에서는 딜레마 구간에 포함되는 차량수의 변화와 Max-Out Probability를 통해 확인하도록 한다. 효과 분석 결과를 토대로 딜레마 구간을 최소화 할 수 있는 신호제어전략을 개발한다.

II. 기존연구고찰

1. 국내의 지방부 신호시스템

국내 지방부 도로는 Cycle, Split, Offset이 고정되는 정주기식으로 운영되고 있다. 따라서 완전감응(Full Actuation)제어 교차로는 전무하며, 일부 반감응(Semi Actuation)제어를 시도하는 곳이 있다. 1990년대 중반부터는 국도 신호 연동화를 위하여 무선연동(Time-Based Coordination, TBC) 기술이 실용화되었다. 이는 현장 제어기의 시간을 맞추어 시간에 따르는 제어를 하게 함으로써 연동을 유도하는 방식이다. 외국의 지방부 신호제어기술은 미국이 가장 앞서 있다. 1960년대 초반부터 루프 검지기를 이용한 Area-Detection 방식의 감응제어를 시작했으며, Point-Detection 방식이 개발되면서 양 방식을 혼합된 형태로 신호기를 설치운영하고 있다. 미국에서는 NEMA(National Electrical Manufacturers Association)에서 1983년 2현시에서 8현시까지 완전감응제어로 운영이 가능한 제어기를 개발하여 사용하고 있다.

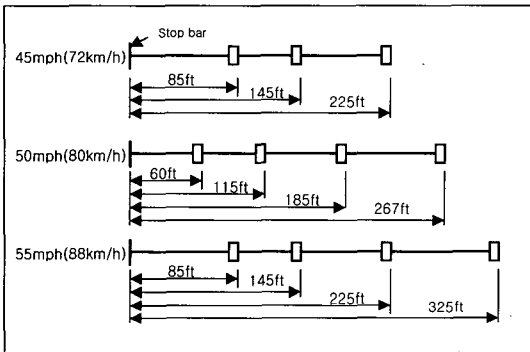
시스템제어 측면에서 지방부 신호시스템의 특징은 중앙관제센터가 없이 현장 교차로들에 지역 제어기군을 Master Controller와 Slave Controller로 기능을 분화하여, 현장에서 독자적으로 연동제어를 실시하는 것으로 미국에서 개발된 DART, FACTS, 그리고 BASYS가 대표적이다. DART(Dynamic Artery Responsive Traffic Signal System)는 지방부 간선도로 연동제어의 전형적인 시스템으로, 상류부 교차로로부터 Platoon이 검지되면 하류부 교차로들에 연속진행이 가능하도록 신호제어를 실시한다.

FACTS (Flexible Advanced Computer Traffic Signal System)는 UTCS 제1세대 시스템을 지

방부의 소형시스템으로 응용하여 개발한 것이다. BASYS (Basic Arterial System)는 무선연동(time-based coordination)을 사용하는 방식으로, 지방부 시스템 중 가장 초기적이며, 경제적인 연동 제어방식이다.

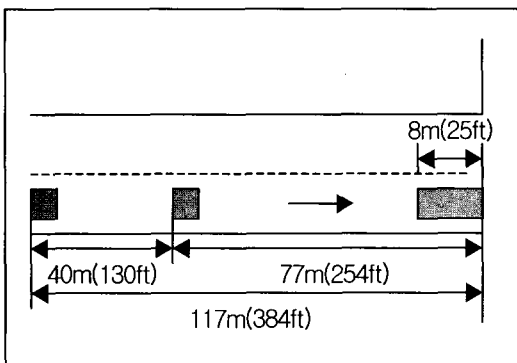
2. 외국의 딜레마 구간(Dilemma Zone) 제어 전략

미국의 딜레마 구간 제어전략은 Multiple - Point Detection System과 EC-DC Control로 나눌 수 있다. Multiple-Point Detection System은 교차로 접근로에 차량의 속도에 따라 복수개의 검지기를 배열하는 설계 방식으로 Beirele Method, Winston - Salem Method, SSITE Method가 있다.



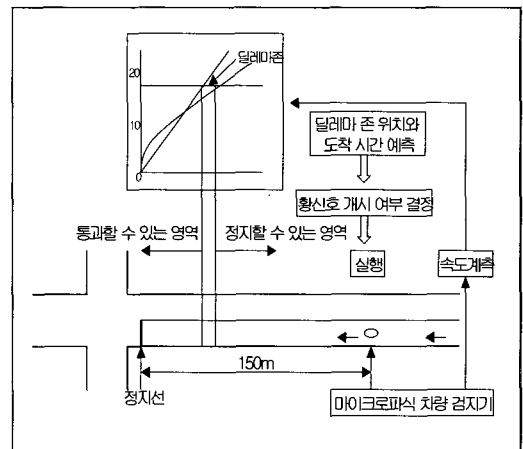
〈그림 1〉 Multiple-Point Detection

Multiple-Point Detection 방식의 과도한 검지기 사용 문제를 보완하기 위하여 1970년대 후반 EC-DC 검지기 기능을 활용하는 방식이 개발되었다. 이 방식은 검지기 수를 줄이면서 딜레마 구간을 보호할 수 있다는 장점을 갖는다.



〈그림 2〉 EC-DC Control

스웨덴의 LHOVRA는 루프 검지기를 사용하는 딜레마 감응제어 기능이 있으며, Multiple-Point Detection 방식으로 기본 원리는 미국식과 유사하다. 일본에서는 1990년대 초 R형 검지기(마이크로 웨이브 검지기의 일종)를 사용한 딜레마 감응 제어를 개발하였다. 교차로 상류부에 설치한 R형 검지기로 통과하는 차량의 속도를 관측한 다음, 해당 차량이 사전에 설정한 딜레마구간에 존재하는 경우는 녹색시간을 종료하지 않고 연장하는 것이다.



〈그림 3〉 일본의 딜레마 구간 제어방안

감응제어의 발전된 형태인 Volume-Density Control은 접근 속도가 높은 지방부 도로의 소통 및 안전을 고려한 신호제어 방식이다. 본 연구에서는 딜레마 구간 최소화 전략으로 Volume-Density Control과 일본의 'R형 검지기를 이용한 신호제어 수법', 그리고 미국의 EC-DC Control을 제안한다.

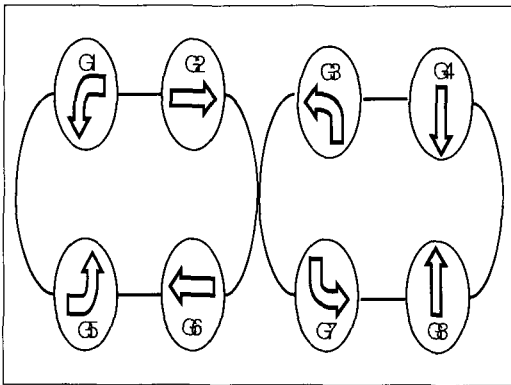
III. 감응식 신호제어기

딜레마 구간 최소화 전략은 감응식 신호제어기를 통해 운영이 가능하므로 감응식 신호제어기의 현시 및 검지기 체계, 신호 운영상의 특성에 대해 알아보도록 한다.

1. 현시 및 검지기 체계

감응제어의 현시(Phase)체계는 2현시에서 8현시까지 제어기를 통해 구현이 가능하다. 현시 조합은 Single Ring과 Dual Ring으로 구분된다. Si

ngle Ring은 두 개 이상의 이동류가 한 현시로 정의되어 같은 신호 시간을 받는 것이고, Dual Ring은 이동류 8개를 8현시로 표현하여 서로 다른 신호 시간을 받는다. 감응 제어에서는 Dual Ring 8현시를 기본 값으로 설정한다. 현시 진행 방법은 차량 감응이 없는 현시가 독립적으로 종료가능한가의 여부에 따라 Single Entry 와 Dual Entry로 나뉜다.



<그림 4> 8현시 체계

검지기의 검지 모드는 Presence Mode와 Pulse Mode로 나뉜다. Presence Mode는 검지기 내에 차량이 존재하는 동안 검지기 call의 "on" 상태를 유지하는 것으로 이는 "Long Loop"에 사용되며 Non-Locking Detection Memory로 운영된다. Pulse Mode는 0.1 ~ 0.15초 동안 "on" 상태를 인지하는 것으로 상류부 검지기에 사용되며 Locking Detection Memory로 운영된다. 제어기의 검지 모드는 차량이 검지 영역을 지나간 후에 제어기가 차량의 검지 여부를 기억하는지의 여부에 따라 Locking Detection Memory와 Non-Locking Detection Memory로 나뉜다. 검지기 크기에 따라 한 지점에서 차량의 통과를 검지하는 Small-Area Detector 와 검지 영역 내에 차량이 점유되는 시간만큼 차량을 인지하는 Large-Area Detector로 구분된다.

2. 신호 운영상의 특징

Volume-Density Control은 'IV.신호제어전략 설정'에서 다시 언급되므로 본 장에서 제외시켰다.

1) 완전감응제어(Full-Actuated Control)

완전감응제어는 교통량 변동이 크고 주도로와 부도로의 교통량 차이가 크지 않은 교차로의 신호 운영에 효과적이다. 완전감응제어에서 녹색 시간은 검지기의 차량 감응에 따르며 황색·적색 시간은 임의의 값을 지정 해준다. 녹색시간은 최소녹색시간에서 최대녹색시간까지 단위연장시간에 의해 연장된다.

2) 반감응제어(Semil-Actuated Control)

반감응제어는 주도로의 교통량이 부도로에 비해 많은 경우 비 감응 주 도로 현시의 녹색시간을 최대로 하여 교차로의 신호를 효율적으로 운영하는데 적용된다. 반감응제어의 신호 운영상의 특징으로는 Recall, Hold, Yield, Force-Off가 있다. Recall은 감응 현시의 녹색이 종료된 후 남은 시간을 주도로 비 감응 현시의 녹색 시간으로 사용하는 것으로 Min Recall과 Max Recall 값으로 결정된다. Hold는 비 감응 현시의 최소 녹색을 보장하기 위한 명령으로 주기 내에 일정시간(window)을 비 감응 현시로 유지한다. Yield는 비 감응 현시를 종료하는 시점으로 감응현시의 수요가 있거나 혹은 없는 경우에도 실행된다. 마지막으로 Force-Off는 감응 현시를 종료하기 위해 사용하는 현시별 지정 값으로 이전에 감응 현시가 종료하면 다음 감응 현시의 call이 있는 경우에는 다음 현시로 또는 call이 없는 경우에는 비 감응 현시에 recall 되어 주 방향 현시에 신호를 주게 된다. 감응 현시의 시작 시점은 연동 현시의 종료 시점, 즉 Yield Point로 보고 Force-Off 시점을 결정한다. 주도로의 비 감응 현시는 Yield Point에서 종료되며, 부도로의 감응 현시는 최소녹색시간 이후 차량감응에 따라 연장되며 Force-Off이후까지 연장될 수는 없다.

IV. 신호제어전략 설정

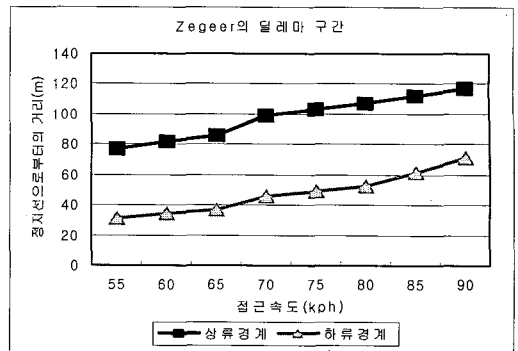
딜레마 구간에 대한 정의와 범위 설정을 명확히 하고 본 연구에서 목표로 하는 딜레마 구간의 범위를 설정하도록 한다. 외국의 딜레마 구간 제어전략을 바탕으로 현장에 적용 가능한 전략을 설정하여 이를 평가함으로써 전략별 장·단점을 분석하도록 한다.

1. 딜레마 구간의 정의 및 범위

미국의 May(1968)는 딜레마 구간(Dilemma Zone)을 황신호 개시시에 안전하게 정지하거나, 황신호 동안 교차로를 완전히 통과할 수 없는 영역으로 또한 모두가 가능한 영역을 옵션 구간(Option Zone)으로 정의하였다. Parsonson(1974)은 속도에 따른 정지 확률을 이용하여 딜레마 구간을 정의하였는데, 운전자의 90%가 황색 신호가 개시될 때 경계선에 도착하여 정지하려 하는 구간(Upstream)과 오직 10%의 운전자만이 정지하려고 하는 구간(Downstream)사이를 딜레마 구간이라 하였다. Zegeer(1977)는 Parsonson과 동일하게 속도에 따른 정지확률을 이용하여 딜레마 구간의 상류 경계(90%의 운전자가 정지)는 교차로로부터 4.5~5초 동안의 통행거리이고 하류 경계(10%의 운전자가 정지)는 교차로로부터 2~2.5초 동안의 통행거리로 정의하였다. 따라서 일반적인 딜레마 구간의 길이는 2.5~3초 통행거리이며, 검지기는 모든 딜레마 구간을 커버할 수 있는 상류부, 약 5초의 통행거리에 설치해야 한다고 정의하였다.

스웨덴 LHOVRA(1991)에서는 정지와 통과가 모두 가능하여 정지하려는 차량과 통과하려는 차량이 섞이면서 충돌사고가 발생하는 영역(Rear-end Collision)을 딜레마 구간으로 정의함으로써 위에서 언급한 옵션 구간을 딜레마 구간으로 설정하였다.

일본(1991)에서는 황색신호가 종료하는 시점까지 교차로를 통과하는 것과 무리 없이 정지선에서 정지하는 것을 할 수 없는 영역을 딜레마 구간, 양쪽 모두가 가능한 영역을 옵션 구간이라고 한다. 이를 총칭하여 딜레마 구간이라 부른다. 일본과 스웨덴의 경우 딜레마 구간의 하류 경계는 정지선으로부터의 거리가 아니라 하류 교차로의 Clearance Line(통과선)으로부터의 거리를 의미한다. 계산식에 의한 딜레마 구간은 인지반응 시간, 감속도 등에 영향을 받으며, 현장 적용시 교차로 간격, 차량 크기 등의 변수에 따라 범위가 바뀌므로 일반적인 딜레마 구간의 범위를 설정하여 제어 방안을 성립하는 것이 효과적이라고 판단되었다. 따라서 본 연구에서는 Parsonson과 Zegeer의 정지확률을 이용한 딜레마 구간 상·하류 경계를 제어 범위로 설정하였다. 이는 정지확률에 따라 접근속도별로 표준화된 값을 갖고 있으며 통행시간으로 일반화할 수 있다는 장점을 갖는다.



〈그림 6〉 딜레마 구간의 최소화 목표 범위

2. 딜레마 구간 최소화 전략 설정

딜레마 구간은 접근속도에 따라 범위가 결정되므로 전략 설정에 앞서 목표로 하는 제어속도 범위 설정이 요구된다. 외국의 딜레마 구간 제어 전략을 분석하여 적용방안을 제시한다.

1) 제어 속도 범위(Design Speed Range)

일본에서는 제어전략 효과 평가시 속도의 상·하한 범위로 30~90kph를 사용하였고, Volume-Density Control로 딜레마 구간 제어가 가능한 접근 속도 범위는 90kph 이하(90kph 딜레마 구간의 상류경계는 117m)이다. 일반적으로 검지기 위치설정시 목표로 하는 최고 속도는 교차로 접근로의 Free Flow 상태에서의 85%속도 이상이며, 최저 속도는 15%이하이다. 또한 상류 검지기의 속도 범위는 적어도 전체 교통량의 70%를 포함해야 한다. 따라서 국도 3호선 신대 사거리의 접근로 1,2 차로의 야간 접근속도를 조사한 결과 평균 15% 속도는 61kph이며, 85% 속도는 87kph로 나타났다. 따라서 제어 속도 범위는 55kph(High-Speed Approach로 구분되는 속도, 35mph)에서 90kph 사이로 한다.

2) 딜레마 구간 최소화 전략 설정

딜레마 구간 최소화 전략은 검지기 수의 최소화, 소통 및 안전측면에서의 효율성, 제어 알고리즘의 편이성 등을 고려하여 선정하였다. 전략은 Last Car Pass 기능을 갖는 Volume-Density Control과 일본의 딜레마 구간 제어 방안, 미국의 E C-DC Control로 나눌 수 있다. 미국의 Multiple Point Detection, 스웨덴의 LHOVRA는 검지기 수가 많고 제어 전략이 복잡하기 때문에 제어전략 설정 시 고려하지 않았다.

<표 1>딜레마 구간 최소화 전략 I, II, III, IV

신호 제어 전략	
I	Volume-Density Control - " Last Car Pass"제외
II	Volume-Density Control - " Last Car Pass"포함
III	일본의 'R형 검지기를 이용한 신호제어 수법'
IV	EC-DC Control

(1) 전략 I, II: Volume-Density Control

Volume-Density Control은 접근 속도가 높은 교차로의 딜레마 구간 보호를 위해 검지기를 상류부에 설치하여 운영하는 완전감응제어의 발전된 형태이다. 일반적인 감응제어의 기능 외에 최소녹색시간이 길어지는 것을 막기 위해 황·적색 신호시 차량 감응대수를 계산하여 초기녹색시간을 확장하는 Variable Initial Green, 검지기가 상류부에 설치되어 Allowable Gap이 길어지는 경우 불필요한 시간을 제거하기 위한 Gap-Reduction, 녹색 신호 종료시 딜레마 구간 보호를 위해 사용되는 Last Car Pass 기능을 갖는다. Last Car Pass는 Gap Reduction에 의해 제어가 단위 연장을 하다 Gap Out 되어 녹색을 종료할 때 마지막으로 검지기에 검지된 차량이 정지선을 통과할 수 있는 시간만큼 녹색을 연장한 후 종료시키는 기능으로 이 때 연장되는 시간은 검지된 차량이 등속도로 진행한다는 가정 하에 정지선까지 진행하는데 요구되는 시간으로 결정된다. 이는 마지막 차량의 딜레마 구간을 보호할 수 있다는 장점이 있으나, 그 뒤 차량이 연장 범위 내에 다시 딜레마 구간에 포함될 수 있다는 단점을 갖는다. 이 기능을 제외한 경우를 전략 I, 포함하는 경우를 전략 II로 설정하였다.

(2) 전략 III: 일본의 "R형 검지기를 이용한 신호제어 수법의 검토"

전략 I, II에서 마지막 차량이 정지선까지 이동한 후 종료하는 시점에 뒤 차량이 다시 딜레마 구간에 포함되는 문제를 해결하기 위해 일본의 딜레마 구간 제어 전략을 제안한다. 이를 Volume-Density Control에 적용하기 위해 검지기 위치는 일반적인 Volume-Density Control과 동일하게 120m로 한다. Variable Initial Green에 의한 초기 녹색 시간 산정도 위의 방법과 동일하다. 초기 녹색 시간이 종료된 후 Gap Reduction에

의해 녹색이 연장되다가 딜레마 구간에 포함되는 차량이 존재하면 그 차량이 딜레마 구간을 벗어날 수 있는 시간이 단위연장이 된다. 따라서 단위연장은 일정하지 않고 계속 변하게 된다. 전략 III은 차량이 정지선까지 이동할 수 있도록 녹색을 연장하는 것이 아니라 딜레마 구간에 포함되는 경우 딜레마 구간을 벗어날 수 있는 시간만큼만 녹색을 연장한다는 것, 뒤 차량이 다시 딜레마 구간에 포함되는 경우를 고려할 수 있다는 점에서 전략 II와 차이를 보인다. 이는 뒤 차량이 다시 딜레마 구간에 포함되는 문제를 보완해줄 수 있으나 녹색 연장이 길어져 Max-Out Probability가 커져 결국 마지막 차량의 딜레마 구간 보호가 이루어지지 않고, 교차로 전체의 지체를 증가시킨다는 단점을 갖는다.

(3) 전략 IV: EC-DC Control

전략 I·II와 III은 기본적으로 Volume-Density Control 알고리즘을 이용한 딜레마 구간 제어 방안으로 상류부 검지기 1기를 사용하기 때문에 검지기와 정지선사이 교통류 특성을 제어에 반영할 수 없다는 단점이 있다. 그러나 전략 IV는 한 차로 마다 정지선의 Large-Area 검지기와 상류부에 두 개의 Small-Area 검지기를 연속적으로 설치함으로써 정지선 검지기를 이용하여 최소녹색시간을 효과적으로 제공하며, 복수개의 상류부 검지기를 통해 Maximum Allowable Headway (MAH)를 줄임으로써 평균 지체를 감소시키며, 딜레마 구간을 고려한 검지기 위치 설정으로 딜레마 구간을 보호할 수 있다는 장점이 있다.

EC-DC란 Presence-Mode 검지기의 검지 특성을 나타내는 용어이다. EC(Extended-Call)는 일단 차량이 검지 되면 지정된 시간(0~15초)동안 검지기의 'ON' 상태를 연장하는 것으로 전형적으로 높은 속도의 접근로에서 두·세 개 이상의 검지기를 상류부에 설치하여 딜레마 구간을 보호하는데 사용된다. 제어기에 설정된 Extension Time + Passage Time은 두 Loop 검지기 사이의 최대통행시간으로 정의된다. DC (Delayed-Call)는 검지기의 call을 지정된 시간(0~30초)동안 지연시키는 것으로 이 시간 이전에 차량이 검지 영역을 떠나면 검지된 차량의 call은 제어기로 전달되지 않는다.(RTOR) 이 기능은 적색신호

동안 적용되며, 현시가 녹색으로 전환된 이후에는 Presence Mode로 Large-Area 검지기의 기능을 수행한다.

정지선 검지기는 소통 측면에서 교차로의 지체 최소화를 목적으로 설계한다. 정지선 검지기는 적색시 DC Mode로 call을 인지하고, RTOR을 구분하며, 녹색 개시시 EC Mode로 초기녹색 시간을 제공하는 역할을 한다. 검지기 길이는 서울시 신신호시스템의 정지선 검지기와 호환사용하기 위해 동일한 길이인 4m를 사용한다. 상류부 검지기는 안전 측면에서 딜레마 구간에 포함되는 차량수를 최소화하기 위해 설계한다. 상류부 첫 번째 검지기(D_F)는 제어 최고속도인 90kph의 딜레마 구간 상류 경계 이전인 120m에 설치하고, 상류부 두 번째 검지기(D_M)는 제어 최저속도인 55kph의 딜레마 구간 상류 경계 이전인 80m에 설치한다.

EC-DC Control의 신호운영변수로는 상류부 검지기의 단위연장폭, 정지선 검지기의 EC Mode의 단위연장, DC Mode의 Delay Setting이 있다. 여기서 단위연장은 검지기가 call을 인지하는 시간으로 차량의 검지기 통과시간과 Extension Setting을 더한 값으로 정의된다. 정지선 검지기의 경우에는 검지기 통과시간이 단위연장이 된다. 단위연장(1)은 D_F 에서 목표로 하는 속도의 차량이 검지 된 후 다음 검지기 까지 이동하는데 걸리는 최대통행시간으로 120m에서 80m 까지 40m를 40mph(65kph)이상의 차량이 이동할 수 있는 시간 2.2초가 되며, 단위연장(2)는 D_M 에서 목표로 하는 속도의 차량이 검지 된 후 딜레마 구간을 벗어나는데 걸리는 통행시간으로 40mph(65kph)이상의 차량이 딜레마 구간을 피해 녹색을 종료할 수 있는 시간인 2.3초가 된다. 정지선 검지기가 초기녹색시간을 제공하기 위해 EC Mode로 운영될 때 단위연장은 2초를 사용한다. Delay Setting은 검지기 길이와 차량길이의 합을 차량 속도로 나눈 값 3초를 적용하였다.

3. 효과판단 기준에 따른 전략 평가

High-Speed Approach에서 제어 방안의 효과를 판단하는 기준 7가지는 <표 2>와 같다.(Parsonson, 1979) 효과 판단 기준에 따라 각 제어 전략의 장·단점을 비교 분석해 보도록 한다.

<표 2> 효과판단 기준에 따른 전략별 평가

효과판단 기준	전략 II	전략 III	전략 IV
딜레마 구간 도착 이전에 차량 검지 가능성	○	○	○
딜레마 구간을 고려한 단위연장의 적절성	×	○	○
녹색종료(Gap-Out)시 딜레마 구간 내 차량 존재 가능성 (설계 속도로 접근)	○	×	×
녹색종료(Gap-Out)시 딜레마 구간 내 차량 존재 가능성 (설계 속도 이하로 접근)	○	×	×
이른 종료 없이 정지선 대기차량의 이동 가능성 False Call 검지 효율성	×	×	○
녹색시 좌회전 대기차량에 의한 직진차량 방해 여부	.	.	.

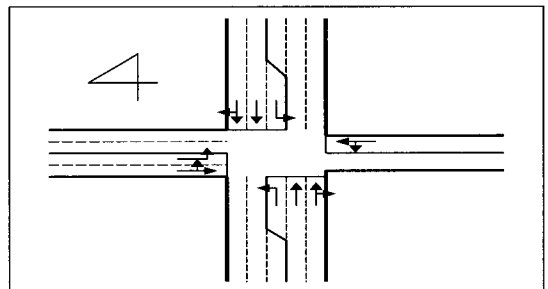
V. 신호제어전략 효과 분석

딜레마 구간 최소화 전략을 평가하기 위해 국도 3호선의 대상교차로를 선정하여 실제 기하구조 및 교통류 특성이 유사한 미시적 시뮬레이터를 이용하여 효과분석을 실시한다.

1. 대상 교차로 선정 및 현장 조사

1) 기하구조 및 현시체계

신호제어 전략 평가를 위해 일반국도에서 교통사고가 많은 교차로·주방향에 고속통행차량이 많은 교차로·선형이 양호한 교차로·독립교차로로 운영중인 교차로를 선정하였다. 또한 건설교통부의 '국도교통관리 시스템 구축사업'의 대상지역인 일반국도 3호선을 중점 검토하여 국도 3호선 경기도 광주군내 신대 사거리를 대상교차로로 선정하였다. 신대 사거리는 독립교차로로 주방향은 직진 2차로와 좌회전 bay가 있는 전형적인 High-Speed Approach이며, 부방향은 전형적인 Low-Speed Approach이다. 따라서 주방향은 딜레마 구간 최소화 전략에 따른 감응제어가 이루어져야 하며, 부방향은 완전감응제어가 효과적이다.



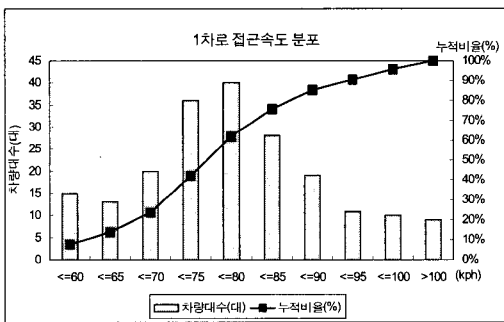
<그림 7> 효과분석 교차로 기하구조

2) 현장 조사결과

제어속도 범위 설정 및 시뮬레이터에 초기 진입속도 결정을 위해 Free Flow 상태의 접근 속도분포와 차두시간 분포를 조사하였다. 대상 접근로는 신대사거리의 상향(광주방향) 접근로이다.

(1) 접근 속도

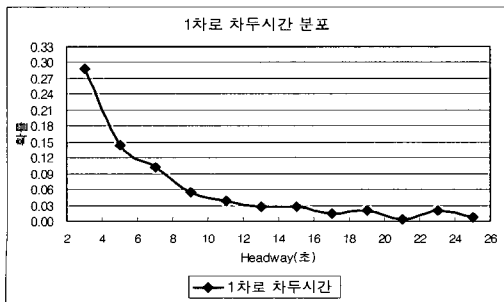
일반국도의 경우 주간보다 야간의 경우 접근속도가 높다. 따라서 평일야간 00:00~02:00(2시간)에 녹색신호 동안 대기차량에 의해 영향을 받지 않고 접근하는 차량을 대상으로 조사를 실시하였다. 1차로는 평균 접근속도 78.5kph, 2차로는 68.0kph이며 접근로 전체 평균 접근속도는 73.4kph이다. 15% 속도는 61.2kph, 85% 속도는 87.4kph로 나타났으며 χ^2 적합도 검정을 통해 1차로 속도 분포는 정규분포의 형태를 보이는 것으로 나타났다.



<그림 8> 신대사거리 1차로 접근속도 분포

(2) 차두시간 분포

차두시간은 정지선으로부터 상류부 100m에 비둘이를 설치하여 조사하였다. 30초 단위로 분석한 결과 평균 1.2대, 분산 1.3이었다. χ^2 적합도 검정 결과 차두시간은 포아송 분포를 보이는 것으로 나타났다. 따라서 신대 사거리 차두시간은 최소 차두시간 1.0초인 편의된 음지수 분포를 보였다.



<그림 9> 신대사거리 1차로 차두시간 분포

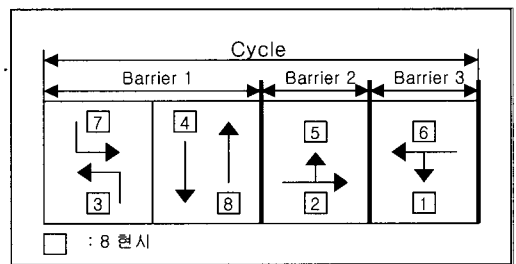
(3) 시뮬레이션 적용 방안

차량 진입속도는 평균 78.5kph, 표준편차 13.98인 정규분포에 따르며, 초기차량발생은 최소허용차두시간 1.0초인 편의된 음지수분포를 따른다.

2. 효과분석 시나리오

1) 분석 대상 조건

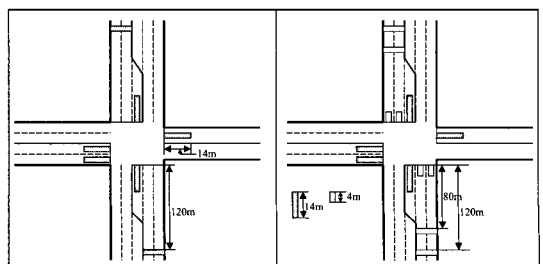
주방향은 전형적인 High-Speed Approach로 Dual Ring · 선형좌회전으로 운영하고, 부방향은 직진 · 좌회전 동시 신호로 완전감응제어로 운영한다. 주방향은 상시 우회전, 부방향은 우회전이 매우 적으므로 없는 것으로 가정한다.



<그림 10> 감응식 신호현시체계

주방향의 좌회전 최소녹색시간은 6초로하며 최대 녹색시간은 15초로 한다. 직진 현시는 제어 전략에 따라 초기 녹색시간과 단위 연장방법이 다르다. 전략 I, II, III의 Variable Initial Interval 산정은 Added Initial Timing에 의해 4대까지 10초를 최소 초기 녹색 시간으로 결정하고 2(초/감응)초로 초기 녹색시간을 증가시킨다. 전략 IV는 최소 녹색시간 설정 없이 정지선 검지기가 EC 모드로 운영될 때 결정된다. Volume-Density Control에서 Minimum Gap은 2.0초, Time to Reduce는 45초, Time Before Reduction은 0초를 적용한다.

부방향의 최소녹색시간은 좌회전 최소 녹색시간인 6초로하며 검지기를 이용하여 녹색을 연장한다. 최대 녹색시간은 Eastbound 현시는 30초, Westbound 현시는 15초로 한다.



<그림 11> 전략 I · II(좌), III(우) 검지기 체계

2) 분석 시나리오

(1) 최대녹색시간에 따른 비교분석

동일한 교통량 조건하에서 최대녹색시간을 변화시켜가며 그 효과를 비교해본다. 일정한 최대녹색시간 이후 결과가 동일한 경우에는 제외하였다.

<표 3> 분석 시나리오 I

분석 대상	전략 I (Last Car Pass 제외)	전략 II (Last Car Pass 포함)	전략 III	전략 IV
분석 조건	최대녹색시간 40 ~ 100 초, 5초 간격			

(2) V/C 비에 따른 비교분석

부방향 교통량은 동일하게 가정한 후 직진 교통량을 v/c 비 0.3과 0.6으로 나누어 분석을 실시하였다.

<표 4> 분석 시나리오 II

분석 대상	전략 I (Last Car Pass 제외)	전략 II (Last Car Pass 포함)	전략 III	전략 IV
분석 조건	v/c = 0.30 , v/c = 0.62			

3) 효과척도(MOE)

효과척도는 안전측면과 소통측면으로 나뉜다. 안전측면에서는 딜레마 구간에 포함되는 차량 수와 Max-Out Probability가 효과척도가 된다. 소통측면에서는 신호교차로의 서비스 수준 효과척도인 평균정지지체(Average Stopped Delay)를 효과척도로 하며 한 접근로의 모든 차량의 총 정지지체 시간을 총 진입 교통량으로 나눈 값(초/대)으로 계산된다.

3. 효과분석 결과

각 전략별로 5번씩 시뮬레이션하여 분석하였다.

1) 최대녹색시간에 따른 비교분석

전략 II는 전략 I과 동일하게 최대녹색시간이 증가함에 따라 Max-Out 되는 주기 수는 감소하나, Gap-Out 시 딜레마 구간에 포함되는 차량 수는 변화가 거의 없어 전략 II의 Last Car Pass의 기능은 딜레마 구간 제어시 큰 효과를 보이지 않는 것으로 판단된다. 특히 전략 I보다 전략 II를 실시한 경우 딜레마 구간에 포함되는 차량 수가 증가한 것은 Last Car Pass 이후 뒤 차량이 다시 딜레마 구간에 포함된 채 녹색이 종

<표 5> 효과분석 척도(MOE)

	안전측면		소통측면
효과분석 척도	녹색 종료시 딜레마 구간에 포함되는 차량 대수	Max-Out 주기 수	평균 정지지체 (sec/veh)
운영개선효과비교척도	$E_1 = \frac{Q_1 - Q_0}{Q_0}$	$M = \frac{Max-Out \text{ 주기수}}{\text{총주기수}} \times 100$	

<표 6> 최대녹색시간에 따른 효과분석 결과

		최대녹색시간(sec)					
		40	45	50	55	80	100
전략 I Last Car Pass제외	총 주기수	90	91	92	90	91	90
	딜레마 구간내 차량수	5	3	4	2	2	2
	Max-Out 주기수	5	2	1	0	0	0
	평균정지지체	5.87	6.12	6.01	6.08	6.03	6.10
전략 II Last Car Pass포함	총 주기수	95	90	90	85	87	89
	딜레마 구간내 차량수	8	7	5	5	4	4
	Max-Out 주기수	5	2	1	0	0	0
	평균정지지체	6.42	5.99	6.32	6.34	6.28	6.33
전략 III 일본의 딜레마 제어전략 적용	총 주기수	92	91	88	87	88	86
	딜레마 구간내 차량수	10	3	2	0	0	0
	Max-Out 주기수	9	3	2	0	0	0
	평균정지지체	5.97	6.08	6.18	6.23	6.16	6.20
전략 IV EC-DC Control 적용	총 주기수	85	84	86	86	85	85
	딜레마 구간내 차량수	16	15	12	11	3	1
	Max-Out 주기수	15	14	13	13	2	1
	평균정지지체	5.20	5.23	5.18	5.19	5.20	5.25

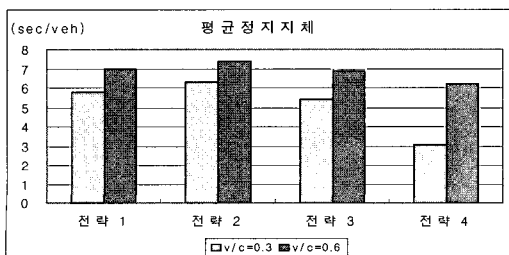
료되는 문제 때문이라고 판단된다. 전략 III의 경우 최대녹색시간이 증가하면 Max-Out 되는 경우가 감소하므로 딜레마 구간에 포함되는 차량수도 감소한다. 따라서 최대녹색시간이 중요한 변수로 작용하게 된다. 전략 IV는 평균정지지체가 효과적으로 감소되는 것을 볼 수 있다. 이는 정지선 검지기를 이용한 초기녹색시간 제공과 두 개의 검지기를 통한 단위 연장으로 주방향의 지체를 최소화 한 것이 주원인이 된다. 그러나 안전측면에서 볼 때 최대녹색시간에 큰 값을 적용하여도 Max-Out 이 되어 녹색신호 종료시 딜레마 구간 내 차량이 존재하는 결과를 보였다. 이는 상류부 두 개의 검지기 조합을 통해 녹색이 연장되므로 동시에 차량이 존재하지 않는 Gap-Out 시점이 쉽게 나타나지 않기 때문이다. <표 7>은 최대녹색시간 55초인 경우 전략 I, 즉 딜레마 구간 제어를 실시하지 않는 경우와 운영개선효과를 전략별로 비교 분석한 결과이다.

<표 7> 전략별 운영개선효과 비교분석 결과

운영개선효과 비교척도		전략 II	전략 III	전략 IV
안전측면	E_1	1.5	-1.0	4.5
	M (%)	0	0	15
소통측면	평균정지지체 (sec/veh)	6.34	6.23	5.19

2) V/C 비에 따른 비교분석

최대녹색시간에 따른 분석 결과 전략 IV가 소통 측면에서 가장 효과적인 것으로 나타났다. 최대녹색시간이 55초로 동일한 경우 v/c 비를 변화시켜가며 분석을 실시하였다. 교통량이 적은 경우(v/c=0.3)에는 전략 IV의 평균정지지체가 다른 전략에 비해 약 3초 정도 적은 것으로 나타났다. 교통량이 많은 경우(v/c=0.6)에는 전략 IV가 평균정지지체의 최소화는 가능하나 Max-Out 되는 주기 수와 딜레마 구간 내 차량 수 최소화에는 효과가 없는 것으로 나타났다.



<그림 12> V/C에 따른 소통측면 비교분석 결과

<표 8> V/C에 따른 안전측면 비교분석 결과

		전략 I	전략 II	전략 III	전략 IV
v/c =0.3	평균정지지체	5.80	6.30	5.43	3.05
	딜레마 구간 내 차량 수	3	4	0	3
	Max-Out Probability	0	0	0	4
v/c =0.6	평균정지지체	6.96	7.36	6.88	6.24
	딜레마 구간 내 차량 수	12	10	1	18
	Max-Out Probability	0	0	1	18

3) 효과분석 결론

전략 II의 Last Car Pass 기능은 검지된 마지막 차량이 정지선까지 이동하는 시간만큼 녹색을 연장함으로써 그 뒤 차량이 다시 딜레마 구간에 포함되는 경우가 발생하기 때문에 딜레마 구간 제어에 효과적이지 못한 것으로 나타났다. 전략 III의 경우에는 단위연장이 길어져 최대녹색시간이 짧은 경우에는 Max-Out Probability가 증가하며 딜레마 구간 내 포함되는 차량 수가 많이 나타났으나, 최대녹색시간이 적절하면 딜레마 구간 내 포함 차량 수를 최소화 할 수 있어 최적의 최대녹색시간 설정이 중요한 변수로 작용한다고 판단된다. 전략 IV의 경우에는 평균정지지체가 전략 I, II, III에 비해 적게 나타났다. 따라서 소통 측면에서는 전략 IV가 가장 효과적인 것으로 판단된다. 딜레마 구간 제어시에는 전략 III과 유사하게 최대녹색시간이 길어질수록 Max-Out Probability가 감소하며 딜레마 구간 내 포함 차량수도 감소하였으나, 전략 III이 최적의 최대녹색시간 이후에는 딜레마 구간 내 포함되는 차량수가 존재하지 않는 것과 달리 전략 IV는 최대녹색시간에 큰 값을 적용해도 딜레마 구간 내 차량이 완전히 제거되지 않는 것으로 나타났다. 이는 전략 III의 경우에는 Volume-Density Control의 Gap-Reduction 기능과 딜레마 구간 제어가 동시에 이루어지면서 Gap이 감소하기 때문에 Gap-Out이 일정시간 이후로는 모두 가능해지나 전략 IV의 경우에는 두 개의 상류부 검지기가 다른 Gap-Setting으로 운영되며 동시에 Gap-Out이 되는 경우가 일정하지 않기 때문으로 판단된다. 효과분석 결과를 토대로 다음 장에서는 딜레마 구간 최소화를 위한 새로운 전략을 개발하여 이를 평가해 보도록 한다.

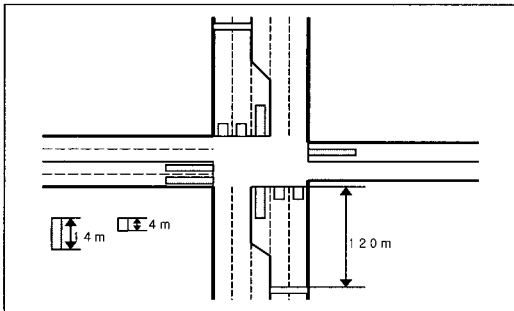
VI. 딜레마 구간 제어전략 개발

1. 신호제어전략 개발

안전 측면에서 최대녹색시간에 따라 딜레마 구간 내 차량 수와 Max-Out Probability를 최소화할 수 있는 일본의 딜레마 구간 제어전략과 소통 측면에서 초기녹색시간을 효과적으로 제공하며 RTOR을 구분하는 EC-DC Control의 정지선 검지기를 혼합하는 방식(이하 '전략 V')을 제안한다.

1) 검지기 체계

정지선 검지기는 적색 시 DC Mode로 call을 인지하고, RTOR을 구분하며, 녹색신호 개시시 EC Mode로 초기녹색시간을 제공하는 역할을 한다. 검지기 길이는 전략 IV(EC-DC Control)와 동일하게 4m로 한다. 상류부 검지기는 안전 측면에서 딜레마 구간에 포함되는 차량 수를 최소화하기 위해 전략 III(일본의 딜레마 구간 제어전략)과 동일하게 상류부 120m 전 차로에 걸쳐 설치한다.



〈그림 13〉 신호제어전략 검지기 체계

2) 신호운영 변수

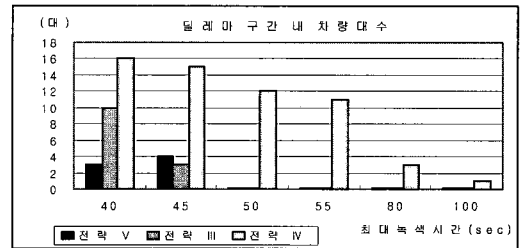
상류부 검지기의 단위연장은 전략 III(일본의 딜레마 구간 제어전략)과 동일하게 Gap Reduction과 딜레마 구간범위 내 존재하는 차량의 위치에 따라 결정한다. Gap Reduction에 의해 녹색이 연장되다가 딜레마 구간에 포함되는 차량이 존재하면 그 차량이 딜레마 구간을 벗어날 수 있는 시간이 단위 연장이 된다. 따라서 녹색신호 종료 시점은 딜레마 구간 내 차량이 존재하지 않는 시점이다. 정지선 검지기가 초기녹색시간을 제공하기 위해 EC Mode로 전환하여 운영될 때 단위연장은 2초로 한다. RTOR을 구분하기 위해 적용하는 Delay Setting은 전략 IV(EC-DC Control)에서와 동일하게 3초로 한다.

2. 신호제어전략 효과분석

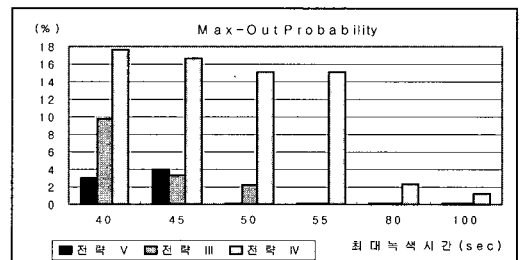
제 V장 '신호제어전략 효과분석'과 동일한 교차로를 대상으로 미시적 시뮬레이터를 통해 실시하였다.

1) 안전 측면

최대녹색시간에 따른 딜레마 구간 내 차량 수를 살펴보면 전략III(일본의 딜레마 구간 제어전략)이나 전략IV(EC-DC Control)보다 더 적은 최대녹색시간 이후 딜레마 구간 내 차량이 존재하지 않는 것으로 나타났다. 이는 Max-Out Probability에서도 명확히 나타나는데 기존 전략에 비해 녹색시간이 짧아지는 것을 볼 수 있다. 이는 정지선 검지기를 통한 초기녹색시간 제공이 녹색시간 감소에 효과적으로 작용했다는 것을 의미한다.



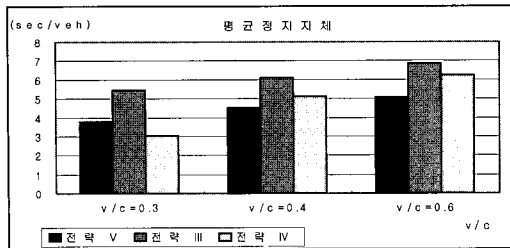
〈그림 14〉 전략별 딜레마 구간 내 차량대수



〈그림 15〉 전략별 Max-Out Probability

2) 소통 측면

평균정지지체(sec/veh)는 최대녹색시간 55초인 경우 비교 평가한 것으로 v/c=0.4, 0.6인 경우 새로운 전략이 전략 III이나 전략 IV보다 1~2초 정도 적은 것으로 나타났으며 v/c=0.3인 경우에는 전략 IV와 유사한 결과를 보였다. 이는 정지선 검지기의 초기녹색시간 제공이 Volume-Density Control의 Variable Initial Green에 의한 초기녹색시간 제공보다 지체 감소에 효과적인 것을 의미하며, 상류부 단일 검지기를 통한 녹색시간 연장이 두 개의 검지기를 사용했을 때 보다 효과적인 것으로 판단된다.



〈그림 16〉 전략별 평균정지지체

VII. 결 론

본 연구에서는 외국의 사례를 토대로 교차로의 소통 및 안전측면에서 효과적인 Volume-Density Control과 일본의 딜레마 구간 제어방안, EC-DC 검지기를 이용한 제어방안을 딜레마 구간 최소화 전략으로 설정하였다. 본 전략의 평가를 위해 국도 3호선의 대상교차로를 선정하여 현장 조사를 실시하였으며 조사결과는 시뮬레이터에 반영하여 실제 교차로의 교통상황과 유사한 조건 하에서 신호제어 전략을 평가하였다. 평가결과 각 제어전략은 각각 일정한 조건 하에서 딜레마 구간을 최소화 할 수 있다는 결론을 얻었다. 그러나 안전과 소통 양 측면을 모두 고려한 제어방안의 필요성이 요구됨에 따라 일본의 딜레마 구간 제어전략과 EC-DC Control의 정지선 검지기 기능을 혼합한 새로운 전략을 개발하였다. 분석 결과 새로운 신호제어전략은 안전 및 소통 측면에서 효과적인 것으로 나타났다.

향후에는 본 전략이 실제 현장에 적용되었을 때의 효과분석이 요구되며 본 전략을 토대로 우리나라 실정에 맞는 효과적인 지방부도로 신호제어전략이 개발되어야 할 것으로 보인다.

참고문헌

[1] C. V. Zegeer (1977), "Effectiveness of Green-Extension Systems at High-Speed Intersections", Kentucky Department of Transportation, Lexington, Research Rept. 472

[2] C. Wu, C. E. Lee, R. B. Machemehl and J. Williams (1982), "Effects of Multiple-Point Detectors on Delay and Accidents", TRR, 881, TRB, p1-3

[3] Feng-Bor Lin and M.C. Percy (1984), "Vehicle-Detector Interactions and Analysis of Traffic-Actuated Signal Controls", TRR, 971, TRB, p112-113

[4] James A. Bonneson, and Patrick T. McCoy (1994), "Manual of Traffic Detector Design", Civil Engineering Department University of Nebraska a - Lincoln, Nebraska, p13-28

[5] James A. Bonneson and Patrick T. McCoy (1996), "Traffic Detector Designs for Isolated Intersections", ITE, p42-47

[6] James H. Kell, Iris J. Fullerton(1991), "Manual of Traffic Signal Design", ITE, P150-155

[7] Lars Omfelt and Ake Larsson (1991), "LHOVRA: A Traffic Signal Control Strategy for Isolated Junctions". Swedish National Road Administration, p24-26

[8] Peter S. Parsonson (1978), "Signalization of High-Speed Isolated Intersections", TRR, 681, TRB, p34-36

[9] Peter S. Parsonson (1979), "Use of EC-DC Detector for Signalization of High-Speed Intersections", TRR, 737, TRB, p18-19

[10] Robert L. Gordon, Robert A. Reiss, Herman Haenel, E. Ryerson Case, Robert L. French, Abbas Mohaddes, and Ronald Wolcott (1985), "Traffic Control Systems Handbook", ITE, p5.12-5.18, p6.10-6.17

[11] 과학연구소보고교통편(1993), "딜레마 감응제어의 운영효과에 대한 평가 방법", p33-39

[12] 월간교통(1992), "딜레마 감응제어 - 특징과 운영상의 유의점", p73-84

[13] 1991, "R형 감지기를 이용한 신호제어 수법의 검토", 교통공학회지, 일본, p1-5



김영찬

83년 서울대학교 학사
 85년 서울대학교 석사
 90년 미국 TEXAS A&M 대학교 박사
 현재 서울시립대학교 교통공학과 부교수



허정아

2000년 2월 홍익대학교 도시공학과 학사
 2002년 2월 서울시립대학교 교통공학과 석사
 2002년 1월 ~ 현재 서울시정개발연구원

도시교통연구부 위촉연구원