

국도상에서 COSMOS 과포화 제어 알고리즘의 평가

Estimation of the COSMOS signal control algorithm with oversaturated condition on National Highway

백현수, 김영찬, 문학룡, 최남국

(서울시립대학교, 박사과정)(서울시립대학교, 교수)(한국건설기술연구원, 선임연구원)(서울지방국토관리청, 사무관)

Key Words : (과포화, 신호제어, 국도, 신신호시스템)

목 차

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적
2. 연구의 내용 및 방법

II. 기존 연구 검토

1. 국내 연구
2. 해외 연구

III. 국도신호운영 시범시스템

1. 시스템 구축현황

2. 시스템 구성

3. 신호제어 알고리즘

IV. 과포화 제어 알고리즘의 평가

1. 검지기 성능
2. 대기행렬 길이 예측
3. 과포화 제어 효과

V 결론 및 향후 연구과제

참고문헌

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

전체 도로 중 일반국도는 총 연장 14,234km(2003년 기준)로 고속도로와 함께 국가의 간선도로 역할을 하고 있다. 국도 중에서 시가지 구간은 신호교차로의 밀도가 높고 단속류의 특성을 나타내는 반면 시가지 외곽의 국도구간은 신호교차로의 밀도가 낮고 주방향의 녹색신호시간이 길어 연속류의 특성을 나타낸다. 시가지 외곽의 국도는 지역간을 연결하는 도로의 특성상 접근성보다는 이동성이 높은 비중을 차지하고 있다. 이동성이 높은 국도에 설치된 신호교차로는 신호시간만큼 용량을 저하시켜 연속류의 특성을 갖는 국도의 용량을 저하시킨다. 또한 국도상의 대부분의 신호교차로는 TOD 기반으로 운영되고 있어 교통수요의 변화에 따른 능동적인 제어를 하지 못하고 있다.

국도 교통신호의 적극적인 제어 필요성에 의해 건설교통부에서 2000년 국도 3호선 광주 용수리~도평리 구간의 3개 교차로에 신호운영 시범 시스템을 설치하였다. 제어 알고리즘은 서울시의 신신호 제어 알고리즘을 적용하였으며, 2004년에 대상지의 기하구조 개선과 신호제어 알고리즘의 부분 업그레이드를 시행하였다.

주방향 교통류의 비중이 높고 시간대별 증방향이 뚜렷한 국도의 특성상, 신호제어에서 중요한 부분은 좌회전 감응제어와 과포화시의 신호제어이다.

과포화시 신호제어의 경우, 과포화 운영의 효율에 따라 정체의 지속시간을 감소시킬 수 있으며, 국도의 소통능력 개선에 큰 역할을 한다. 따라서 국도신호운영시범 시스템을 기반으로 신신호시스템의 기능 중 과포화 제어에 대한 효과를 평가하고자 한다.

2. 연구의 내용 및 방법

본 연구는 경기도 광주에 설치한 국도 신호운영시범시스템을 기반으로 하여 국도에서의 신신호 시스템을 평가하고자 한다. 평가의 주 내용은 대기행렬의 길이 예측과 과포화에 대한 제어 알고리즘 수행 효과이다.

연구 방법은 다음과 같다.

첫째, 과포화 제어에 대한 기존의 연구를 검토하여 과포화 제어의 발전 방향과 국도상의 신호운영에서 고려할 내용을 검토한다.

둘째, 국도신호운영 시범 시스템을 검토하여, 국도신호 운영 시범시스템의 세부 알고리즘의 내용과 유형을 파악한다.

셋째, 현장에서 검지기별 교통량과 대기행렬을 측정하고, 지역 제어기에서 생성한 주기별 교통자료와 비교하여 검지기의 정확도를 검토한다.

넷째, 지역 제어기의 주기별, 검지기별 자료와 현장조사 자료를 이용하여 과포화 제어 알고리즘의 효과를 평가한다.

3. 기존연구 검토

1) 국내연구

과포화시의 신호제어에 대한 연구는 대기행렬의 계측과 과포화 신호제어 전략 수립이라는 두 가지 연구방향으로 모아진다.

대기행렬의 계측에 대한 연구는 대기행렬 모형을 이용하거나(하동익, 1994), 누적접유시간을 이용한 회귀모형을 이용하는 방법에서(조형기 외, 1996) 영상검지기를 이용하거나(이철기 외, 2002) 칼만 필터를 적용하는 방법(심소정 외, 2002)으로 그 추세가 바뀌었다.

과포화 신호제어 전략은 초기 선형계획을 이용한 생산성 최대화(김영찬, 1992)에서 신경망이나(홍유식, 1996) 유전자 알고리즘을 이용하는 방법(이영인, 2000)으로 변화하였으며, 신신호시스템(COSMOS)를 기반으로 하여 여유용량을 관리하고(이철기, 2002) 대기행렬을 동일하게 하는 신호제어전략(김홍진, 2002)에 대한 연구가 있었다.

2) 해외연구

Gordon(1968) 이전까지는 독립교차로의 고정시간제에서 발생하는 과포화 현상에 대한 연구가 주를 이루었으며, 독립교차로의 실시간 제어에서 대기행렬의 해소가 아닌 대기행렬의 확산 방지에 목적을 두고 신호제어 전략을 연구하였다.(Gordon, 1968)

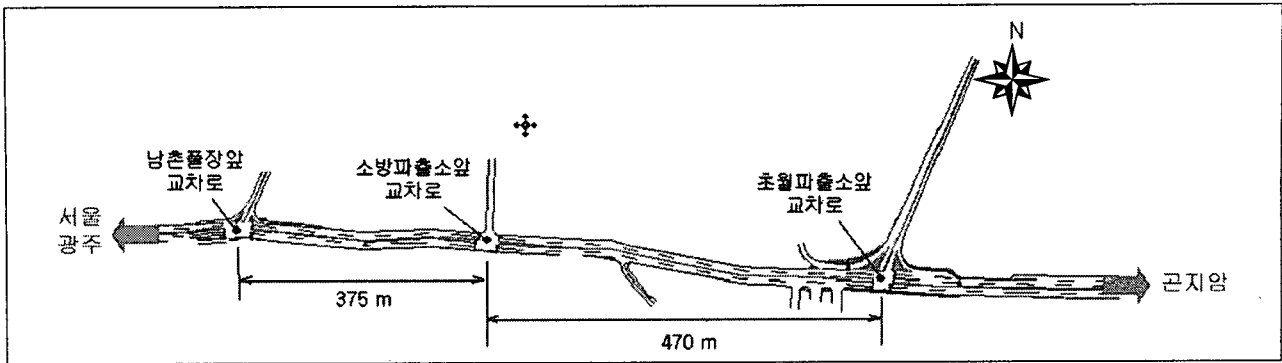
이후 대기행렬과 여유용량을 고려하고 과포화시에는 system의 throughput 을 최대화하는 것을 목적함수로 하는 것이 일반화 되었다.(Ghassan Abu-Lebdeh, 1997)

일본에서는 도로상에서 발생하는 차량의 이벤트를 추적하여 시뮬레이션하는 모형을 구축하였다.(Takeshi Inoue et. al, 1999) 홍콩과 중국에서는 주기변동기반 신호제어와(Hong K. Lo et. al.)와 차량의 연속진행을 고려한 최적신호 설계에 대한 연구가 있었다.(Tang-Hsien Chang et. al., 2004)

<표 1> 과포화 신호제어에 관한 국내외 연구

저자	연도	구분	적용범위	적용방법	개념 및 주요 내용
김영찬	1992	정적모형, 최적화모형	인접한 두 개 교차로	MILP	Max system productivity -output 최대화, 여유용량 이용을 제고, spillback 방지
이광훈	1993	동적모형	네트워크	Simulation	Split coordination -과포화시 인접 교차로와 신호현시를 연계하여 운영
김영찬	1994	동적 최적화 모형	다이아몬드 인터체인지	MILP	대기길이가 상한치를 넘지 않도록 신호시간을 계획
하동익	1994	동적모형	(대기행렬 길이)	discrete Markov chain	도착율과 출발율을 이용하여 전이확률을 계산, 대기행렬의 길이 예측
조형기 외	1996	정적모형	(대기행렬 길이)	회귀모형	누적접유시간을 독립변수, 대기길이를 종속변수로 하는 회귀모형 개발
홍유식 외	1996	동적모형	독립교차로	신경망	대기행렬 길이에 따른 녹색시간, 주기, 오프셋의 계산
안계형	1997	정적모형	가로축	Simulation	출발차두간격과 통행속도를 이용한 시뮬레이션 모형 개발
최병국	1997	정적모형	양방향 간선도로	MILP	대기행렬을 조절하여 통과교통량을 최대화 Internal Metering Policy
임용택	1998	정적모형	네트워크	수학 모형	접근로의 수용용량 고려한 신호제어 전략 차량들의 지체시간 최소화 전략
이영인 외	2000	동적모형	양방향 간선도로	유전자 알고리즘	대기차량 예측 후 유전자 알고리즘을 적용하여 신호시간 계획
이철기 외	2002	동적모형	네트워크	COSMOS	영상검지기 2대를 통해 대기행렬 길이 예측
김홍진	2002	동적모형	독립교차로	COSMOS	대기행렬 길이를 동일하게 하는 신호시간 계획
심소정 외	2002	동적모형	양방향 간선도로	칼만 필터	칼만 필터를 이용한 대기행렬 길이 예측 남산 1호 터널 구간에 적용
Gordon R. L.	1968	정적모형	일방통행 독립교차로	Z transfer function	두 접근로간의 대기행렬비와 여유용량비를 같게 하는 신호시간 계획
Ghassan Abu-Lebdeh et. al.	1997	동적모형	네트워크	유전자 알고리즘, Dynamic Programming	비포화시 : min disutility 과포화시 : max system throughput 대기행렬과 여유용량을 고려
Takeshi Inoue et. al.	1999	동적모형	네트워크	Event Scanning, Simulation	이벤트의 발생을 탐색하여 차량의 궤적을 구성함
Byungkyu Park et. al.	2000	동적모형	네트워크	유전자 알고리즘, Dynamic Programming	대기행렬을 변수로 하며, 통과량 최대화/평균지체 최소화/penalty function을 갖는 평균 지체의 최소화를 목적함수로 함
Hong K. Lo et. al.	2004	동적모형	양방향 간선도로	Cell Transmission/ 유전자 알고리즘	주기변동 기반 가변 녹색시간 제어 홍콩의 정체 구간에 적용
Tang-Hsien Chang et. al.	2004	동적모형	네트워크	Dynamic Programming	Performance Index(delay와 stop으로 구성) Maximal progression possibility(연속진행을 위한 최적신호를 설정)

II. 본론

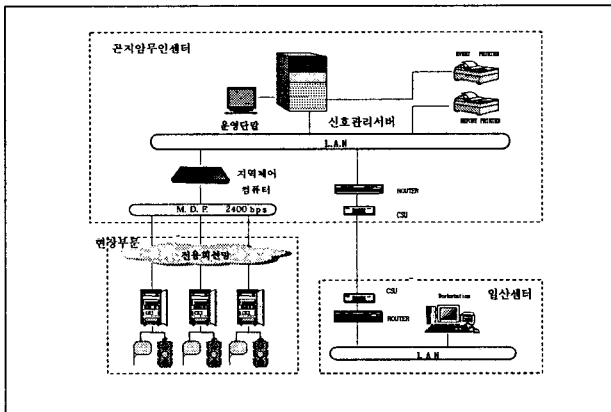


<그림 1> 국도 신호운영 시범 시스템 설치위치

1. 국도 신호운영 시범 시스템

1) 시스템 구성

국도신호운영 시범 시스템은 2000년 경기도 광주 용수리~도평리 구간의 3개 교차로(남촌풀장앞 교차로, 소방파출소앞 교차로, 초월파출소앞 교차로)를 대상으로 구축하였으며, 곤지암에 Local Controller의 기능을 하는 무인센터를 구축하였다.



<그림 2> 시스템 구성도

2) 신호제어 알고리즘

2000년 구축 당시 '신신호 시스템 기능개선 용역(1999년, 경찰청)'의 제어 알고리즘을 기반으로 구축하였으며, 2004년에 신호운영 알고리즘 중 과포화화 연관있는 포화도 산정 알고리즘과 대기행렬 예측 알고리즘, 녹색시간 배분 알고리즘을 '2000년 신신호 시스템 기능개선(2001, 경찰청)'의 개선 알고리즘으로 보완, 수정하였다.

(1) 대기행렬 길이 예측 알고리즘

아래의 식을 이용하여 대기행렬 검지용으로 설치한 100m, 200m, 400m 검지기의 주기별 평균속도를 구하여 i 시간대의 정체도($DOC(i)$)를 산정한다. $S1$ 과 $S2$ 는 각각 정체도 1.0 과 0에 대응하는 운영자 설정 속도이다.

<표 2> 신호제어 주요 알고리즘의 버전

구분	알고리즘	버전 (기능개선연도)
교통상황 변수 집 알고리즘	검지기 오정보처리 알고리즘	1999년
	오정보 판단 알고리즘	1999년
	포화도 산정 알고리즘	2001년
	포화교통류율 산정 알고리즘	1999년
	대기행렬예측 알고리즘	2001년
	속도산정 알고리즘	1999년
신호제어 변수 결정 알고리즘	검지기 Active 판단 알고리즘	1999년
	주기길이 결정 알고리즘	1999년
	녹색시간 배분 알고리즘, 과포화 시 녹색시간 보정 알고리즘	2001년
	오프셋패턴 선택 알고리즘	1999년
	SUB-AREA 결합분리 알고리즘	1999년

$$DOC(i) = 1 - \frac{V(i) - S1}{S2 - S1}$$

이렇게 산출한 정체도를 기준으로 임계정체도($THdoc$)가 존재하는 구간을 정하고 비례식으로 대기길이($D(i-1)$)를 결정한다. 이 대기길이와 과거 2주기의 대기길이를 이동평균하여 i 시간대의 대기길이($CLOC(i)$)를 산정한다.

$$D(i-1) = \frac{[(D(i) - D(i-1))] \times [THdoc - DOC(i-1)]}{[DOC(i) - DOC(i-1)]}$$

$$CLOC(i) = LOC(i) \times f0 + LOC(i-1) \times f1 + LOC(i-2) \times f2$$

(2) 과포화 제어 알고리즘

포화도($DS(i)$)가 1.0보다 큰 과포화시에는 대기행렬을 이용하여 주기별 포화도($CDS_i(t)$)를 결정한다.

$$CDS_i(t) = \frac{QueueLength_i(t)}{spaceHeadway} \times \frac{3600}{CurrentCycle(t) \times saturationFlow_i}$$

2. 과포화 제어 알고리즘의 평가

1) 검지기 성능 검토

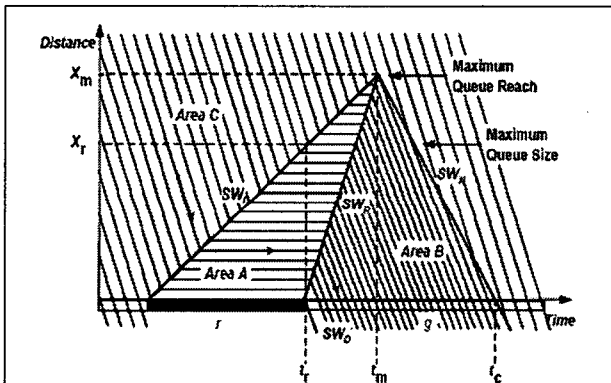
과포화 제어 알고리즘의 평가에 앞서 국도 신호운영 시범 시스템에 설치된 루프 검지기의 성능을 검토하였다. 루프 검지기의 기본 자료로 산출되는 교통량을 검지기 설치위치에서 각 15분씩 현장 조사하여 검증하였다.

좌회전 포켓이 분기하는 지점에 설치된 100m 대기행렬용 검지기는 포켓으로 분기하는 좌회전 차량까지 검지하여 분석 대상에서 제외하였다.

조사 분석 결과 조사대상 검지기 모두 교통량 기준 10%이내의 오차를 보였으며, 오차의 폭은 7%(18대)~9%(28대)로 나타나 안정적인 검지성능을 보였다.

2) 대기행렬 길이 추정

육안으로 차량의 속도를 결정하여 대기행렬의 길이를 구하는 것은 불가능하므로 현장에서 조사하는 대기행렬은 속도가 0km/h로 관측되는 지점을 대기행렬의 끝단으로 판단하여 조사하였다. 즉, 아래의 <그림 3>에서 Max Queue Reach에 해당하는 부분을 조사하였다. 불포화상태에서 과포화 상태로 전이되는 17:00~19:00 동안 주기별 대기행렬을 관측하여 검지기 값과 비교하였다.



Source : Delay, stop and queue estimation for uniform and random traffic arrivals at fixed-time signalized intersections (Youn-Soo Kang, 2000)

<그림 3> 충격파 분석 개념도

해당 구간 중 링크의 길이가 375m로 가장 짧은 구간과 700m 이상으로 링크가 긴 구간에 대해 실측 대기행렬 길이와 검지기 자료에서 산출된 대기행렬 길이를 비교하였다. 실측 대기행렬의 값을 신신호 알고리즘의 평활화 과정을 적용하여 금번주기, 전주기, 전전주기 대기행렬 길이에 각각 0.5, 0.3, 0.2의 가중치를 두어 평활화한 값을 함께 도시하였다.

전반적으로 유사한 경향을 나타내나 실측 대기행렬 길이에 비해 과추정 되었으며, 과포화시에는 대기행렬의 변화에 민감하게 반응하지 않았다. 이는 신신호시스템에서 한 주기 동안의 검지기 지점별 평균속도를 구하고, 평균속도를 사용자

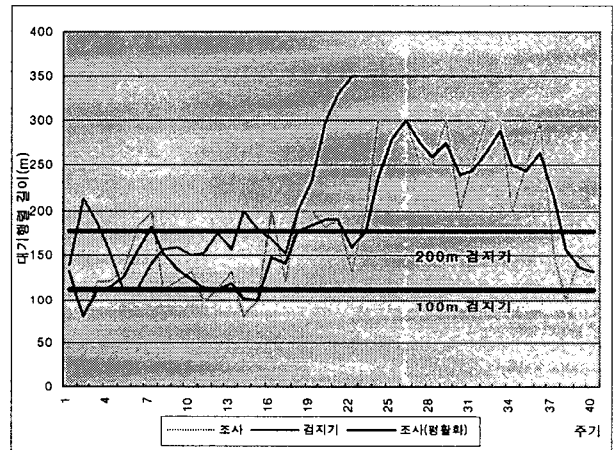
지정값에 근거하여 정체도로 환산한 후 임계정체도(기본값 : 0.7)가 존재하는 지점의 위치를 대기행렬로 정의하기 때문이다. 시스템상의 설정값이 $S1$ 이 15km/h이고 $S2$ 가 70km/h, 임계 정체도가 0.7인 경우, 임계 정체도에 해당하는 평균속도 값은

$$0.7 = 1 - \frac{v-15}{70-15}$$

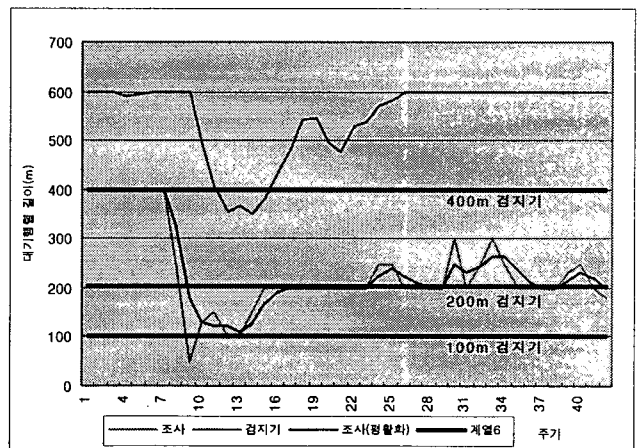
$v = 31.5\text{km/h}$ 이다. 즉, 한 주기 동안 통과하는 차량들의 평균속도가 31.5km/h 되는 지점을 대기행렬의 끝단으로 설정하는 것이다.

또한 대상지에 설치된 검지기는 단일 루프 검지기이며, 속도 산정시 평균차량길이를 4.5m로 적용하여 계산하기 때문에 중차량의 비율이 약 40%에 이르는 본 연구 대상지의 특성에 의해 과포화시에는 정체도와 대기행렬 길이를 과다 산정하는 현상이 발생한다.

또한 이러한 대기행렬 계산 방식 및 개념의 차이에 의해 대기행렬 끝단의 위치가 다른 영역에서 나타나는 현상이 발생한다. <그림 5>의 경우 10주기에서 22주기 사이의 실측 자료가 100m 검지기와 200m 검지기 사이에 존재함에도 불구하고, 예측값은 400m 검지기 밖에 존재하는 것으로 나타났다.



<그림 4> 짧은 링크의 대기행렬



<그림 5> 긴 링크의 대기행렬

<그림 4>와 <그림 5>에서 추정 대기행렬은 실측 대기행렬과 일정한 간격으로 유사한 추세를 보이며 과추정 되고 있음을 알 수 있다. 이는 대기행렬 길이의 추정에 관여하는 속도와 임계 정체도 등의 사용자 지정값을 보정해 주는 것을 통해 현실값에 가까운 대기행렬 길이를 추정할 수 있음을 의미한다.

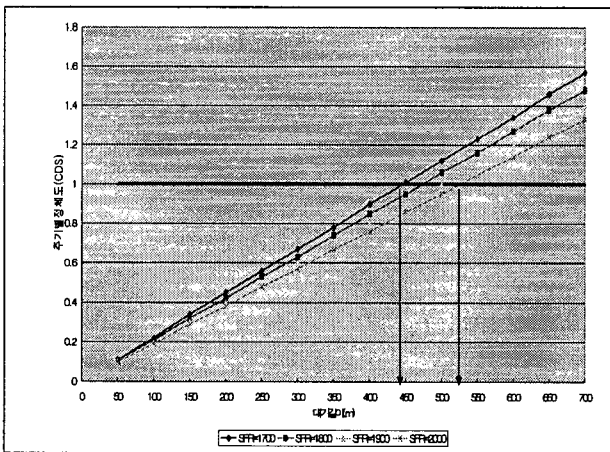
3) 과포화 제어

(1) 과포화 제어식에 대한 검토

과포화 제어식은 포화도가 1.0을 넘는 경우에 적용하는 식으로 대기행렬과 주기길이, 포화교통류율(SFR), headway에 의해 결정되며, headway는 6.3값을 입력값으로 사용하므로 대기행렬 길이와 포화교통류율에 의해 포화도 값이 결정된다.

$$CDS_i(t) = \frac{QueueLength_i(t)}{spaceHeadway} \times \frac{3600}{Current Cycle(t)} \times saturationFlow_i$$

주기가 150초이고 spaceHeadway가 6.3초인 경우 포화교통류율에 따른 대기길이의 포화도의 관계는 아래 그림과 같다. 포화교통류율이 1700대/시인 경우 포화도 값이 1.0인 대기길이는 약 450m이다. 과포화 제어의 기준 길이가 약 300m 전방에서 결정되는 상황을 고려하면 450m 미만에서는 대기행렬을 기반으로 한 CDS(주기별 포화도) 값과 불포화상태의 CDS값이 큰 차이가 나지 않게 된다.



<그림 6> 대기길이의 관계

(2) 과포화 제어 효과

대기행렬의 길이가 운영자 설정값 이상인 경우 대기행렬의 길이를 고려하여 녹색신호를 보정하는 알고리즘이 수행된다.

<표 3>은 오전 첨두시 과포화가 발생하기 시작하는 07시 40분경의 남촌플장앞 교차로의 서측 접근로에 대한 보정 CDS값과 다음 주기의 g/C 값을 살펴본 것이다.

<표 3> 과포화제어에 따른 보정CDS와 다음 주기의 g/C

주기수	DS	CDS	대기길이 (m)	보정CDS	다음주기의 g/C
1	80	11	250	-	0.66
2	73	10	440	99	0.89
3	85	12	550	158	0.88
4	89	12	600	164	0.89
5	97	13	600	165	0.9
6	91	15	600	163	0.88
7	92	15	600	154	0.88

과포화 제어에 의해 대기행렬이 300m를 넘어서는 두 번째 주기부터 녹색신호시간에 대한 보정이 이루어진다. 이는 CDS 값의 보정을 통해 수행된다. 다음 주기의 g/C값의 변화를 살펴보면, 1주기 불포화상태에서는 0.66에서 2주기 과포화상태에서는 0.89로 과포화가 발생하는 접근로에 많은 녹색시간을 할당하여 대기행렬의 추가 생성을 억제하고 있음이 확인된다.

III. 결론 및 향후 연구과제

국도상에 설치된 국도 신호운영시험 시스템의 운영자료와 현장 조사 및 분석을 통해 검지기의 성능과 실시간 신호제어 시스템의 제어 알고리즘을 검토하였다.

대기행렬 추정과 과포화 제어 알고리즘을 중심으로 검토한 결과, 교통량은 10%이내의 양호한 검지 결과를 보였으며, 대기행렬은 과추정되는 것으로 분석되었으나 추세가 실측값과 유사하고 실측값과의 차이가 일정하여 사용자 설정값의 조정을 통해 정확도의 제고가 가능하다.

과포화 제어에 따른 효과를 살펴본 결과, 과포화 상황에서 대기행렬의 길이에 의한 주기별 포화도값의 보정에 의해 다음 주기의 녹색시간 비율이 증가하고, 대기행렬의 추가적인 증가를 예방하는 것으로 분석되었다.

국도는 시내 교차로와 다른 교통특성을 보이고 있으므로, 국도에 설치한 실시간 신호제어 시스템은 효과적인 신호운영을 위해 설치 지역의 교통 특성을 조사, 분석하여 사용자 정의 입력값을 보정하는 작업이 필요하다.

향후 사용자 설정값을 조정하여 대기행렬 길이 추정의 정확도를 높인 후, 과포화 제어 알고리즘에 대한 평가를 수행하고, 각 변수에 대한 민감도를 분석하여 국도 신호시스템에서 사용자 변수값 설정에 대한 guide line을 제시하고자 한다.

참고문헌

1. 김영찬, 혼잡 신호교차로 제어를 위한 최적화 모형 개발, 대한교통학회지 Vol.10, pp.75-102, 1992
2. 김영찬, 과포화 다이아몬드형 인터체인지의 교통신호제어 모형의 개발, 대한교통학회지 Vol.12, pp.5-30, 1994

3. 김홍진 외, 과포화시 대기행렬 균형을 통한 교통신호제어 전략수립, 한국 ITS학회 논문지 제2권 제2호, pp.13-22, 2003
4. 심소정 외, Kalman filter를 활용한 대기행렬 예측 알고리즘 개발, 대한교통학회지 제20권 제5호, pp.145-152, 2002
5. 안계형, 과포화 교통상태에의 적용을 위한 시뮬레이션 모형 개발, 한국시뮬레이션학회 논문지 제6권 제2호, pp.15-29, 1997
6. 이광훈, 과포화상태에서의 split coordination 신호제어전략, 대한교통학회지 Vol.11, pp.87-103, 1993
7. 임용택, 혼잡시 신호제어 전략 연구, 대한교통학회지 제16권 제3호, pp.81-92, 1998
8. 이영인 외, 대기차량 최소화를 위한 주기변동 기반 동적 신호시간 결정모형 개발, 대한교통학회지 제18권 제2호, pp.73-89, 2000
9. 이철기 외, 대기길이 기반의 최적신호제어 알고리즘 개발, 대한교통학회지 제20권 제2호, pp.135-148, 2002
10. 조형기 외, 교차로의 대기행렬 예측 모형 구축에 관한 연구, 한국 정보처리 학회 논문지 제3권 제5호, pp. 1070-1081, 1996
11. 최병국, 과포화 간선도로의 실시간 신호처리, 대한교통학회지 제15권 제3호, pp.110-130, 1997
12. 하동익, 교차로 분석을 위한 불연속 대기행렬 모형 개발, 대한교통학회지 제12권 제4호, pp.89-97, 1994
13. 홍유식 외, 신경망을 이용한 최적 교통신호주기 결정, 한국 퍼지및 지능시스템학회 논문지, Vol.6, No.3, pp.51-62, 1996
14. 2002년 실시간 신호제어 시스템 기능개선 용역, 서울지방 경찰청, 2003
15. 국도 3호선 주요 교차로 신호운영 실시설계 최종보고서, 한국건설기술연구원, 2000
16. Byungkyu Park et. al., Enhanced genetic algorithm for signal timing optimization of oversaturated intersections, 79th TRB annual meeting, 2000
17. Ghassan Abu-Lebdeh et. al., Genetic algorithms for traffic signal control and queue management of oversaturated two-way arterials, TRR 1727, pp.61-67, 2000
18. Gordon G. L., A technique for control of traffic at critical intersections, 1968
19. Hong K. Lo et. al., Control strategies for oversaturated traffic, Journal of transportation engineering, vol.130, No.4, pp.466-478, 2004
20. Takeshi Inoue et. al., Traffic signal offset design using event scanning method simulation of traffic congestion, Electronics and communications in Japan, Part 3, Vol.82, No.8, pp.578-589, 1999
21. Tang-Hsien Chang et. al., Optimal signal timing for

an oversaturate intersection, Transportation research Part B 34, pp.471-491, 2000