

■ 論 文 ■

대기길이 기반의 최적 신호제어 알고리즘 개발

Development of the Optimal Signal Control Algorithm Based Queue Length

이 철 기

(서울지방경찰청 교통지도부 교통개선기획실장)

오 영 태

(아주대학교 환경·도시공학부 교수)

목 차

I. 서론	1. 주기산정 알고리즘
1. 연구배경 및 목적	2. 녹색시간산정 알고리즘
II. 연구내용 및 방법	V. 모의실험을 통한 검증
III. 대기길이 산정	1. 모의실험 환경
1. 개요	2. 시나리오 설정 및 모의실험 절차
2. 교통상황별 제어전략 구축	3. 분석결과
3. 영상기반의 대기길이 산정 알고리즘	VI. 결론 및 향후 연구과제
IV. 신호제어변수 구축	참고문헌

Key Words : 대기길이, 주기길이, 녹색시간, 실시간 신호제어, COSMOS

요 약

본 연구는 공간적 정보를 수집할 수 있는 영상검지기를 이용하여 대기길이를 산출하는 알고리즘을 개발하였다. 이 알고리즘은 접근로 상·하류부에 각각 영상검지기를 설치하여 대기길이를 측정하는 방법을 사용한다. 또한 산출된 대기길이를 기반으로 새로운 신호제어모형을 제시하였다. 특히, 대기길이 기반의 주기길이와 녹색시간을 산출하는 절차와 알고리즘을 제시하였다. 제시한 알고리즘에 대한 검증을 위해 네트워크 환경을 구축하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과, 제안 모형이 기존모형보다 운영효과가 높게 나타났다. 추가적인 연구로는 실시간 교통조건에 병행하여 본 알고리즘을 검증할 필요성이 있다.

1. 서론

1. 연구배경 및 목적

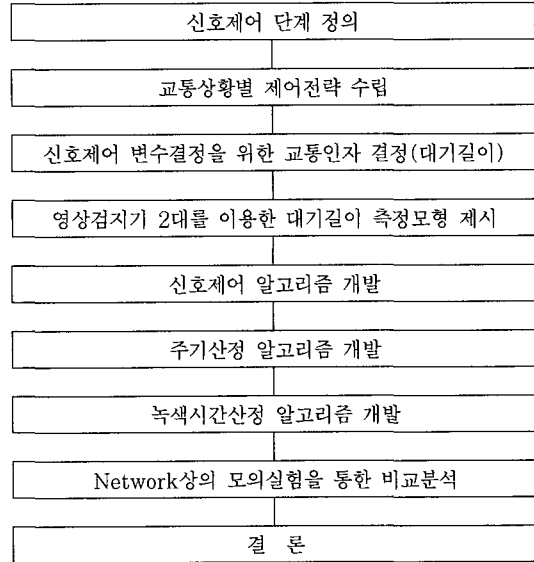
서울시는 ITS 사업의 일환으로 실시간 신호제어시스템(COSMOS: Cycle Offset Split Model for Seoul)을 개발하여 강남구 일원을 대상으로 시범적으로 설치·운영하였으며, 최근 몇 년간 알고리즘 기능개선 및 시스템 확장으로 2001년 현재 강남구 전역을 비롯해 체물포 축 등 266개의 지역제어기를 설치·운영하고 있다. 또한 월드컵 경기장 주변과 도봉로 축은 현재 공사 중에 있으며, 향후 서울시 전역으로 지속적인 확장이 이루어질 전망이다.

실시간 신호제어시스템은 알고리즘 및 모든 제어전략이 루프검지기에 근거를 둔 것으로서 지점정보를 토대로 교통수요를 예측함으로써 인한 예측의 한계성과 교차로 기하구조 및 운전행태의 다양성으로 인한 포화도 측정의 한계, 유지관리상의 어려운 점이 있다. 이 시스템의 개발 당시인 1991년도만 하여도 교통신호제어에 직접적으로 활용한 검지기는 전 세계적으로 루프검지기 이외에는 대안이 없었고, 또한 타 검지기가 실용화되어 있지 않았기 때문에 선택의 여지가 없어, 루프검지기 위주로 다양한 실험을 통한 적정 검지기를 결정하였다.

그러나 현재에는 다양한 교통검지기기술의 실용화 추세에 부응하여 교통신호제어에서 루프검지기의 단점을 보완할 수 있는 타 검지기의 검토와 이와 연계한 제어알고리즘 개발 및 전략구축이 절실히 요구되고 있는 실정이다. 이를 위하여 본 연구에서는 영상검지기의 주된 장점이라 할 수 있는 공간적 교통정보 중 영상차리기법을 이용한 대기길이를 측정하는 알고리즘을 제안하며, 이를 기반으로 실시간 신호제어를 위하여 대기길이에 의한 주기길이 및 녹색시간산정 모형을 개발한 후 Network상의 모의실험을 통한 효과검증을 실시하였다.

II. 연구내용 및 방법

본 연구에서는 영상검지기의 대기길이를 기반으로 한 최적 신호제어모형을 개발하고자 각 접근로별로 영상검지기 2대를 이용한 대기길이를 측정하는 알고리즘을 제시하며, 실제 Network을 대상으로 한 모의



〈그림 1〉 연구수행 흐름도

실험을 통한 검정을 실시하였다. 본 연구에서 다루게 될 구체적 연구내용은 다음과 같다.

첫째, 영상검지기를 이용한 대기길이 산정 알고리즘 제시

둘째, 대기길이를 이용한 신호제어 결정모형 개발

셋째, Network상의 모의실험을 통한 검증

본 연구는 교차로별 각 접근로의 유·출입부에 각각 1대씩의 영상검지기를 설치하여 대기길이를 측정하는 모형을 제시하고, 이를 토대로 측정된 대기길이가 정확하다는 가정 하에 최적주기 및 녹색시간 산정 알고리즘을 개발하여 기존 TOD(Time of Day)제어 방식과 모의실험을 통한 비교검정을 실시하였다. 연구수행을 위한 흐름도는 〈그림 1〉과 같다.

III. 대기길이 산정

1. 개요

정지선 검지기로부터 수집되는 정보를 이용한 교통수요 측정은 통과교통량만을 대상으로 하기 때문에 엄밀한 의미에서의 교통수요와는 상당한 차이가 있다. 도심부 도로에서 대기길이란 적색신호시간 동안 교차로를 통과하지 못한 차량에 대한 수요를 의미하며, 대기길이가 길어져 녹색신호시간 동안 모두 통과하지 못하는 경우에 잔여 차량의 대기길이를 파악하

여 해당 접근로에 녹색시간을 추가 반영함으로써 차량소통을 개선할 수 있다. 따라서 서울시에서는 각 접근로의 링크내에 존재하게 되는 차량의 대기길이를 파악하기 위해 정지선으로부터 100m, 200m, 400m 간격으로 대기길이 검지기를 설치하였으며, 지점정보를 근거로 공간정보를 획득하는 방법을 구축하여 교통신호제어에 사용하고 있다.

본 연구에서는 접근로 상류부와 하류부에 영상검지기 2대를 설치하여 유입부와 유출부의 교통상태를 대기길이에 의해 판단할 수 있도록 하였고, 그에 따른 주기길이를 녹색시간을 산출하도록 하였다.

2. 교통상황별 제어전략 구축

본 연구는 교차로 접근로별로 실시간으로 산출되는 영상기반의 대기길이에 따라 교통상황을 정의하고 그에 따른 제어전략이 자동 설정되어 최적의 신호제어 변수가 산출된다. 본 알고리즘에서 신호제어변수들은 해당 링크상의 대기길이에 따라 다른 목표를 가지고 산출된다. 또한, 대기길이는 접근로당 다른 교통상황이 전개될 수 있으므로 각 베리어상에 포함되는 접근로 상황 중 심각한 교통상황끼리의 조합에 따라 교차로의 교통상황으로 설정하고 이를 교차로의 제어목표

로 삼아 제어에 진입한다. 교차로 제어환경의 변환은 연속된 3주기가 같은 패턴의 교통상황으로 제공되는 경우에 이루어진다. 일단 교차로 차원에서의 교통상황이 규정되면 그에 따른 신호변수 산정의 목표가 <표 1>과 <표 2>에서 보여지는 바와 같이 설정된다.

3. 영상기반의 대기길이 산정 알고리즘

1) 대기길이 추정

현재 대기길이 = 이전 대기길이 + [(상류부로부터 유입된 차량수 - 이전 현시에 인접링크로 방출된 차량수) / 차로수 × 평균차두거리]

위의 기본개념을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

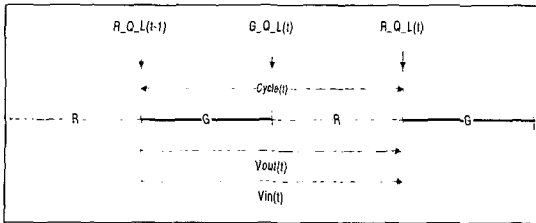
- $R_Q_L(0) = \{초기값 + [Vin(0)/Ln(in) - Vout(0)/Ln(out)] * \text{평균차두거리}\}$
- $R_Q_L(1) = \{R_Q_L(0) + [Vin(1)/Ln(in) - Vout(1)/Ln(out)] * \text{평균차두거리}\}$
- $R_Q_L(2) = \{R_Q_L(1) + [Vin(2)/Ln(in) - Vout(2)/Ln(out)] * \text{평균차두거리}\}$
- $R_Q_L(t) = \{R_Q_L(t-1) + [Vin(t)/Ln(in) - Vout(t)/Ln(out)] * \text{평균차두거리}\}$

<표 1> 교차로 교통상황 정의 및 제어목표

상황		정의	목표
비포화제어	한산 상황	한 현시내에 대기차량이 모두 방출되고 여유녹색시간이 존재하는 상황	차량의 안전한 통행
	정상 상황	한산상황에서 한 현시시간에 맞게 대기차량이 모두 방출되는 상황	지체 최소화 및 연동의 최적화
과포화제어	과포화 I	한 주기내에 대기차량이 모두 방출되지 않는 상황으로부터 녹색시간 종결 후 대기의 끝단이 정지선 영상검지기에 관찰되는 상황	최대교통량 유출제어 및 과포화 II 상황으로의 전개 억제
	과포화 II	정지선 영상검지기내에 대기의 끝단이 관찰되지는 않으나 대기차량의 끝단이 스피백 상황까지는 전개되지 않은 상태	각 방향 스토리지의 관리를 통한 스피백 상황 억제
스피백제어	스피백 상황	상류부 검지기의 스피백 예방검지 영역을 특정 차량이 일정시간(약 5초)이상 점유하고 있는 상황	Equity Offset 또는 Reverse Offset 적용

<표 2> 제어 단계별 신호변수 설정기준

상황		주기	현시	읍셋
비포화 제어	한산 상황	접근로별 대기길이에 따른 유동성 있는 주기길이 산정	대기길이의 비율에 따른 현시할당으로 지체시간 감소	패턴선택
	정상 상황			
과포화 제어	과포화 I	주기길이를 증가하기 쉽게 감소하기 어렵게 하여 정상상황으로의 유도	스토리지 관리를 통한 스피백 상황 방지	
	과포화 II			
스피백 제어	스피백 상황			계산된 읍셋값 적용



〈그림 2〉 입력자료 및 대기길이 판정 시점

여기서,

- $R_Q_L(t)$: t주기의 적색시간 종료후 대기길이
- Vin : 상류부로부터 C.I.로 유입되는 교통량
- $Vout$: C.I.로부터 인접 링크로 방출되는 교통량을 차로수로 나눈 값
- $Ln(in)$: 유입부 차로수
- $Ln(out)$: 유출부 차로수

대기길이 판정에 사용되는 주기별 입력변수들의 입력시점이 〈그림 2〉에 보여진다.

2) 대기길이 추정치에 대한 보완방안

위에서 설명된 대기길이 추정식에 의하여 산출되어지는 대기길이는 접근로내의 유·출입에 대한 영향, 횡단보도로 인한 영향, 평균 차두거리에 대한 보정이 고려되지 않은 바, 다음과 같은 다섯가지의 경우를 고려하여 매 주기별로 대기길이를 보정하게 된다. 수식상에 나타나는 기호는 〈그림 3〉과 〈그림 4〉에 설명된다.

[경우 1]

하류부 영상검지기상에 대기행렬의 끝단이 보이지 않고 상류부 영상검지기상에 대기행렬이 존재하는 경우

- $L1 + (L2 - d2) < R_Q_L < (Ln - d2)$: R_Q_L 값 인정
- $R_Q_L < L1 + (L2 - d2)$ 일 경우 : $R_Q_L = L1 + (L2 - d2)$
- $(Ln - d2) < R_Q_L$ 일 경우 : $R_Q_L = Ln - d2$

[경우 2]

하류부 영상검지기상에 대기행렬의 끝단이 보이지 않으나 상류부 영상검지기상에 대기행렬이 존재하지 않는 경우

- $L1 < R_Q_L < (Ln - L2)$: R_Q_L 값 인정

- $R_Q_L < L1$ 일 경우 : $R_Q_L = L1$
- $(Ln - L2) < R_Q_L$ 일 경우 : $R_Q_L = (Ln - L2)$

[경우 3]

하류부 영상검지기상에 대기행렬의 끝단이 보이고 상류부 영상검지기 내에서도 대기행렬이 존재하는 경우(횡단보도로 인한 또는 세가로 출입으로 인한 간섭현상)

- $d1 + (L2 - d2) < R_Q_L < (Ln - L1 - L2) + d1 + (L2 - d2)$: R_Q_L 값 인정
- $d1 + (L2 - d2) = R_Q_L$ 일 경우 : $R_Q_L = d1 + (L2 - d2)$
- $R_Q_L > (Ln - L1 - L2) + d1 + (L2 - d2)$ 일 경우 : $R_Q_L = (Ln - L1 - L2) + d1 + (L2 - d2)$

[경우 4]

하류부 영상검지기상에 대기행렬의 끝단이 보이고 상류부 영상검지기상에서는 대기행렬이 존재하지 않는 경우

- $d1 < R_Q_L < (Ln - L1 - L2) + d1$: R_Q_L 값 인정
- $d1 > R_Q_L$ 일 경우 : $R_Q_L = d1$
- $R_Q_L > (Ln - L1 - L2) + d1$ 일 경우 : $R_Q_L = (Ln - L1 - L2) + d1$

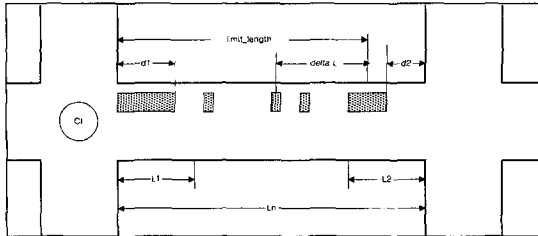
[경우 5]

t주기에서의 녹색시간 종료 후 일정기간 경과시 대기행렬의 말단이 하류부 영상검지기의 시거에 관찰되는 경우

- $R_Q_L(t-1) = G_Q_L(t) + Vout(g) * \text{평균차량길이}$

여기서,

- $G_Q_L(t)$: t시점의 녹색시간 종료로부터 단위시간 대기 후 대기길이 실측치
- $R_Q_L(t)$: t시점의 적색시간 종료 후 대기길이 추정치
- 일정시간 경과 : 적색시간 종료 후 대기형성을 위한 시간(운영자 설정값)
- $Vout(g)$: 녹색시간 중에 해당교차로를 통과한 차량



〈그림 3〉 영상검지기를 이용한 대기길이 산정 개념도

여기서,

- d1 : 하류부 영상검지기 내의 대기길이
- d2 : 상류부 영상검지기 가지거리 - 상류부 영상검지기내의 대기길이
- L1 : 상류부 영상검지기 가지거리
- L2 : 하류부 영상검지기 가지거리

3) 신호변수산정에 사용되는 최종 대기길이 산출

위의 과정을 거친 각 R_{Q_L}은 현재주기의 R_{Q_L}값과 이전 두 주기의 R_{Q_L}값을 가중 평균한 값에 타 차로들에 대한 임계차로 이용율을 곱한 후 신호제어에 사용되는 Q_L값으로 변환된다.

$$Q_L(t) = \{AT \cdot R_{Q_L}(t) + BT \cdot R_{Q_L}(t-1) + CT \cdot R_{Q_L}(t-2)\} \cdot a$$

여기서,

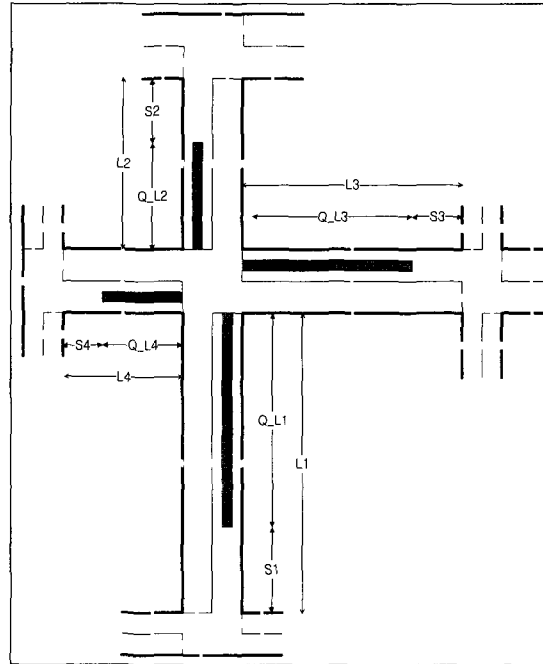
- AT, BT, CT : Q_L 산출시 사용되는 가중치 (AT+BT+CT=1)
- a : 임계차로 이용률

IV. 신호제어변수 구축

본 연구에서 최적주기 및 녹색시간 산정 알고리즘을 구축하기 위하여 신호제어변수 산정을 위한 도로상의 대기길이, 링크 길이, 스토리지는 〈그림 4〉에서 보여지는 외관을 따른다.

1. 주기산정 알고리즘

주기산정은 한산 및 정상상황에서는 해당 상황에서의 대기차량수에 따라 균등한 증감비율로 시간이 할당되지만 과포화 I 이상의 상황에서는 대기차량의 일



〈그림 4〉 신호제어전략구축을 위한 기하구조 및 교통상황 변수 정의

시적인 감소가 전체추이를 반영하는 것으로 보기에 위험성이 크다는 전제아래, 과포화 I 상황으로 진입하기 시작하면 주기길이의 증가는 쉽고 감소는 어렵게 하여 정상 상황으로의 복구에 노력한다.

[단계 1]

각 접근로상의 대기길이(Q_{L1}(t), Q_{L2}(t), Q_{L3}(t), Q_{L4}(t))를 입력받는다.

[단계 2]

한 베리어내에 포함되는 축들의 가장 긴 대기길이를 각각 구한다

$$MAX_Q1 = \text{Max}\{Q_{L1}(t), Q_{L2}(t)\}$$

$$MAX_Q2 = \text{Max}\{Q_{L3}(t), Q_{L4}(t)\}$$

[단계 3]

단계 2에서 구해진 각각의 대기길이를 평균 차두길이로 나누어 차량수를 구한 후 차두시간을 곱한다.

$$RL1 = \{MAX_Q1 / AVL\} \cdot h$$

$$RL2 = \{MAX_Q2 / AVL\} \cdot h$$

[단계 4]

이 값들을 합산한다. 이 합산 값이 현재 교차로에 놓인 대기길이가 해제되는데 소요되는 요구시간(RL)이 된다.

$$RL = RL1 + RL2$$

[단계 5]

$S_RL = RL + \text{yellow}$ 을 구한 후, 교차로 교통상황이 비포화인 경우 단계 6으로, 과포화 I 이상의 상황인 경우 단계 7로 진행한다.

[단계 6]

현재의 주기길이(CCL)와 구해진 요구주기시간(S_{RL})과의 차를 비교하여,

$$-AC \leq (S_RL - CCL) \leq AC \text{ 이면 } CL = CCL$$

$$(S_RL - CCL) \geq AC \text{ 이면 } CL = CCL + \Delta D$$

$$(S_RL - CCL) \leq -AC \text{ 이면 } CL = CCL - \Delta D$$

여기서, AC 및 주기증감분 ΔD는 운영자가 조절할 수 있다. 단계 8.로 진행

[단계 7]

현재의 주기길이(CCL)와 구해진 요구주기시간(RL)과의 차를 비교하여,

$$AC \leq (S_RL - CCL) \leq AC \text{ 이면 } CL = CCL$$

$(S_RL - CCL) \geq AC$ 이면 $CL = CCL + \Delta D$ 로 설정되며, $(S_RL - CCL) \leq -AC$ 이고 이전 8주기의 S_{RL}의 증가한 횟수와 감소한 횟수, 그리고 이전주기를 그대로 사용한 횟수를 산출하여 증가한 횟수가 감소한 횟수보다 많을 경우 $CL = CCL$ 로 설정하여 이전주기를 그대로 사용하고, 작거나 같을 경우에는 $CL = CCL - \Delta D$ 로 설정하여 사용하게 된다. 여기에서 8주기를 택한 이유는 동일한 교통류 특성을 유지하는 최대시간(즉 첨두 15분 이내에서는 교통조건이 불변)인 15분을 기준으로 하여 한 주기길이를 약 2분으로 가정하여 산정하였다.

[단계 8]

$$\text{최소주기 및 최대주기 조건인 } \text{Min } CL \leq CL \leq$$

Max CL을 만족시킨다.

2. 녹색시간산정 알고리즘

현시는 한산상황에서 과포화 I 상황까지는 대기길이 비율에 따른 현시율을 산정하여 대기시간을 최소화 하는 목적을 갖고, 과포화 II 상황 이후에서는 스톱 리지를 관리하는데 그 주안점을 두어 스피백 상황으로의 억제에 만전을 기한다. <그림 7>을 기준으로 교차로 교통상황에 따른 현시배분이 다음에 설명된다.

1) 한산상황에서 과포화 I 까지의 녹색시간 산정방법

해당 접근로의 대기길이의 비율에 따른 현시를 산정하여 지체시간을 최소화하는데 그 목적을 둔다.

[단계 1]

주기산정알고리즘에서 구해진 주기길이를 받아 그 길이가 확장주기길이보다 긴 경우 확장주기길이를, 그렇지 않을 경우 구해진 주기길이를 주기길이(CYCLE_LEN)로 설정한다.

[단계 2]

한 베리어 내에 포함되는 각 이동류의 요구시간 합을 이들의 요구시간의 합으로 나눈다. 이 값에 주기길이를 곱한 값이 베리어에 요구되는 시간이 된다.

$$R_TIME1 = RL1 / (RL1 + RL2)$$

$$R_TIME2 = 1 - R_TIME1$$

$$\text{Barrier1} = R_TIME1 * \text{CYCLE_LEN}$$

$$\text{Barrier2} = \text{CYCLE_LEN} - \text{Barrier1}$$

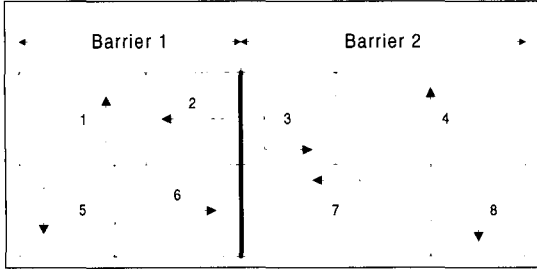
[단계 3] 최소 베리어 시간을 만족시킨다.

$$\text{Min Barrier1} \leq \text{Barrier1}$$

$$\text{Min Barrier1} \leq \text{Barrier1}$$

[단계 4]

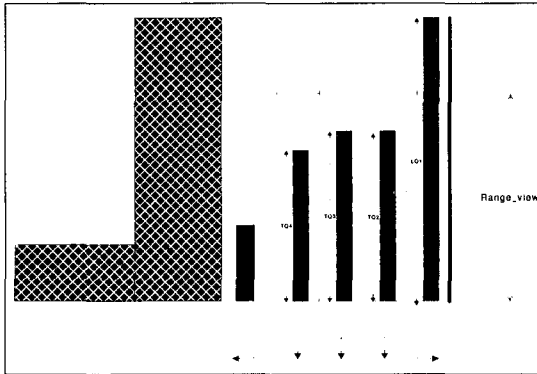
아래와 같은 4가지 경우로 나누어 각 베리어별 좌회전 신호와 직진 신호요구시간을 계산한다. 여기서 사용되는 숫자는 <그림 5>에 나타난 등화와 일치한다.



〈그림 5〉 교통군별 신호현시 설정(기본안)

[경우 1]

하류부 영상검지기상에 직진차로 위의 차량 끝단이 한 차로이라도 보이고 좌회전 차로의 경우 한 차로도 끝단이 보이지 않을 경우 : 직진 차로상에 놓인 대기길이의 차로당 평균차량수에 차두시간을 곱하여 직진 요구시간 비로 결정하고 영상 가시거리와 직진 평균 대기길이의 차에 차두시간을 곱한 값을 가시거리내의 좌회전 신호시간에 합산하여 좌회전 요구시간 비로 산출한다.



가. 좌회전 요구시간 :

$$gpt(i) = \frac{\left[\text{Range-view} + \left(\text{Range-view} - \frac{\sum^{n(T)} TQi}{n(T)} \right) \right]}{AVL} * h$$

나. 직진 요구시간 :

$$gpt(i+1) = \frac{\left[\frac{\sum^{n(T)} TQi}{n(T)} \right]}{AVL} * h$$

여기서,

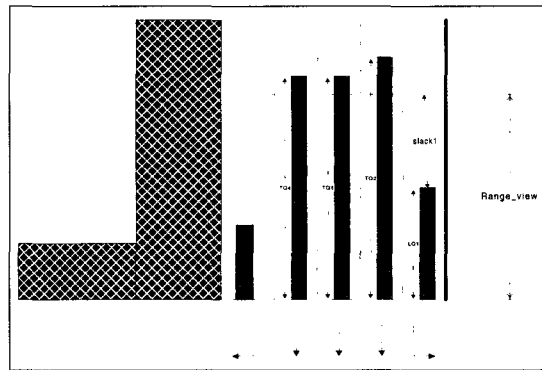
Range_view : 영상검지기 가시거리

- LQi : 좌회전 i차로의 대기길이
- TQi : 직진 i차로의 대기길이
- AVL : 평균차량길이
- h : 평균차두시간
- n(L) : 좌회전 차로수
- n(T) : 직진 차로수

특정 차로상의 직진 대기차량이 하류부 영상 검지기의 가시거리를 초과할 경우 $TQi = \text{Range_view}$, 또는 $LQi = \text{Range_view}$ 와 같이 설정한다.

[경우 2]

하류부 영상검지기상에 직진 차로 위의 차량 끝단이 한 차로도 보이지 않고 좌회전 차로의 경우 끝단이 보이는 경우 : 좌회전 차로 위의 평균 차량수를 계산하여 그 값에 차두시간을 곱한값을 좌회전 요구시간 비로 설정하고 기 계산된 대기길이값(Q-L)을 차량수로 환산한 후 차두시간을 곱하여 직진 요구시간 비로 설정한다.



가. 좌회전 요구시간 :

$$gpt(i) = \frac{\sum^{n(L)} LQi}{AVL} * h$$

나. 직진요구시간 :

$$gpt(i+1) = \frac{Q-L(t)}{AVL} * h$$

[경우 3]

직진 및 좌회전 차로상의 대기차량 끝단이 모두 보이는 경우 : 직진 및 좌회전 요구시간은 가시거리내의 평균 이동류별 대기길이를 차로당 차량수로 환산한 후 차

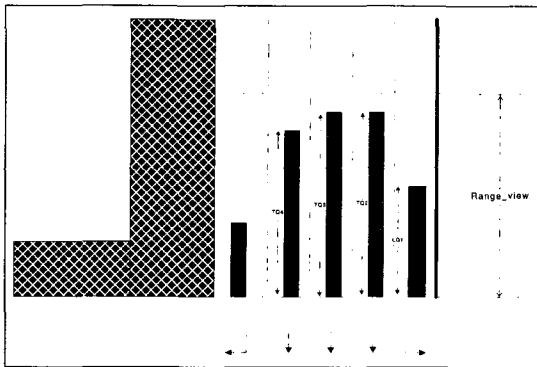
두시간을 곱하여 초기 이동류별 요구시간 비로 설정한다.

가. 좌회전 요구시간 :

$$gpt(i) = \frac{\sum^{n(L)} LQ_i}{\frac{n(L)}{AVL}} * h$$

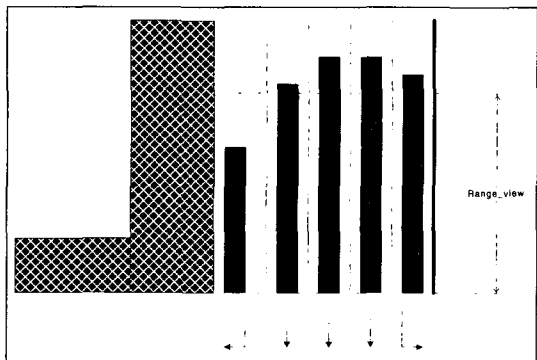
나. 직진 요구시간 :

$$gpt(i+1) = \frac{\sum^{n(T)} TQ_i}{\frac{n(T)}{AVL}} * h$$



[경우 4]

직진 및 좌회전 차로상의 대기차량 끝단이 모두 보이지 않는 경우 : 좌회전 이동류의 요구시간은 가시거리내의 차로당 차량수에 차두시간을 곱하여 초기 좌회전 요구시간 비로 설정하고, 단위시간당 방출 교통량이 상대적으로 많은(일반적으로 직진 차로수가 좌회전 차로수에 비해 많음으로 인한) 직진 이동류의 경우는 기 계산된 대기길이(Q_L)값을 차로당 차량수로 환산하고 차두시간을 곱한 후 그 값을 직진 요구시간 비로 설정한다.



가. 좌회전 요구시간 :

$$gpt(i) = \frac{Range-view}{AVL} * h$$

나. 직진 요구시간 :

$$gpt(i+1) = \frac{Q-L(t)}{AVL} * h$$

2) 과포화II상황에서의 녹색시간 산정방법

스토리지를 관리하여 스피백 상황으로의 전개를 억제하는 것을 목적으로 녹색현시를 할당한다.

[단계 1] 각 접근로의 스토리지(S_i)를 구한다.

$$S_i = L_i - Q_i$$

여기서,

L_i : 해당접근로의 링크길이

Q_i : 해당접근로상의 대기길이

[단계 2] 각 접근로에 해당하는 K값을 구한다.

$$K_i = \frac{\sum_{i=1}^4 S_i}{S_i}$$

여기서, K_i값은 아래와 같이 변형된 값이 사용될 수 있다. 이 변형된 식은 스토리지가 작고 링크길이가 긴 접근로에 더 많은 현시를 산정하여 줌으로서 각 접근로간 Cycle failure 수를 균등하게 하려는 시도에서 만들어 졌다. 즉 양방향 이용자들에게 공평한 신호시간의 배분에 역점을 두고 있다.

$$K_i = \frac{L_i}{S_i}$$

[단계 3]

한 배리어 내에 포함되는 각 이동류의 요구시간 합을 이들의 요구시간의 합으로 나눈다. 이 값에 주기 길이를 곱한 값이 배리어에 요구되는 시간이 된다.

$$MAX_K1 = MAX(K1, K2)$$

$$MAX_K2 = MAX(K3, K4)$$

$$\text{Barrier1} = \{ \text{MAX_K1} / (\text{MAX_K1} + \text{MAX_K2}) \} \\ * \text{CYCLE_LEN}$$

$$\text{Barrier2} = \text{CYCLE_LEN} - \text{Barrier1}$$

[단계 4]

최소 베리어시간을 만족시킨다. 한 베리어의 계산 값이 최소베리어 시간보다 작을 경우 해당 베리어 값을 최소 베리어 값으로 설정하고 그 여분의 시간은 나머지 하나의 베리어 값에서 제공된다.

$$\text{Min Barrier1} \leq \text{Barrier1}$$

$$\text{Min Barrier2} \leq \text{Barrier2}$$

[단계 5]

좌회전 Pocket상에 놓인 차량의 수에 각각에 해당하는 차두시간을 곱하여 초기 좌회전 시간으로 환산한다.

[단계 6]

초기 주기길이 값이 확장대기길이보다 클 경우 나머지 시간을 운영자에 의해 지정된 베리어에 할당한다.

V. 모의실험을 통한 검증

하나의 중요교차로와 다수개의 비중요교차로로 이루어진 제어단위에서 제안 알고리즘을 적용하였을 경우, 중요교차로에서는 물론 가로망 전체(Sub-area라는 제어단위)에 대하여 제어효율이 제고되는지 여부를 모의실험을 통하여 검증하고자 한다.

대기길이를 이용한 실시간 신호제어 알고리즘의 효율성 검증을 위해서는 개별 차량의 행태를 모의실험 할 수 있는 미시적 모의실험 모형(Microscopic simulation model)을 적용하는 것이 바람직하다. 기존 NETSIM 등과 같은 모형이 대표적인 미시적 모형으로서 그 적용성이 입증된 바 있으나 이 모형은 정주기와 NEMA 감응제어만을 수용하였기 때문에 본 제안 신호제어 알고리즘을 적용 평가할 수 없도록 되어있다. 따라서 본 연구에서는 신호변수산정 부분을 재조정하며 그에 따른 MOE를 평가하기 위하여 본 논문에서 제안한 실시간 신호제어 알고리즘 평가용으로 TRACSIM이라는 모의실험기를 사용하였다.

TRACSIM 모형은 도시부 교통류 분석을 위한 모

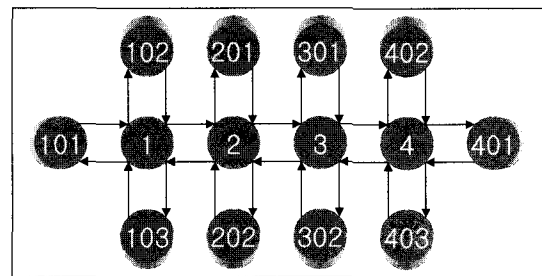
의실험모형으로서 미시적 모형을 채택하였으며, 모의 실험 구현방법은 이산사건(Discrete-event)에 따른 고정시간간격(Fixed time increment) 방식이다. 개발된 모의실험 모형의 고려대상 요소는 다음과 같다.

- 회전교통량, 대형차량 혼입을
- 신호제어변수(주기, 녹색시간비, 연동값)
- 신호현시순서(Dual/Sigle Ring)
- 신호시간 관리 방법(고정 및 TOD, 교통대응)
- 차로수, 포켓길이, 차로용도

1. 모의실험 환경

1) 분석대상 가로망 구조

<그림 6>은 본 검증에 적용될 가로망 구조를 나타내고 있는데 이 가로망은 현재 첨단교통신호제어시스템의 운영구간 중 주요축인 영동대로의 일부 구간이다.



<그림 6> 가로망 개략도

2) 교차로 신호현시 데이터

<표 3>은 분석 대상 가로망의 실제 AM PEAK (08:00-08:30)시의 교통상황을 T7F로 분석하여 최적화된 신호시간(주기, 윗셋, 녹색시간)을 도출한 것이다.

3) 입력 교통량

<표 4>는 분석대상구간의 실제 AM PEAK(08:00-08:30)시의 교통량을 조사한 것이다.

4) 링크 기하구조 데이터

<표 5>는 분석 가로망의 링크별 기하구조 데이터와 회전교통량 비를 보이는 데 회전교통량은 현장에서 실사된 교통량을 모의실험 입력자료의 형태에 맞게 회전비율(백분율)로 환산한 자료이다. 표의 비교

〈표 3〉 분석대상 가로망 교통현황

교차로 번호	교차로명	주기값(초)	오프셋(초)	신호현시				비고
				현시-1	현시-2	현시-3	현시-4	
1	용우 R	125	0					MI
				8	48	19	25	
2	쌍용아파트	125	58					C.I.
				20	39	10	31	
3	개원중고	125	93					MI
				37	33	6	24	
4	연금매점	125	84					MI
				21	33	46		

〈표 4〉 분석대상 가로망 교통량

교차로 번호	교통량(vph)	비고
101	2236	
102	1836	
103	1112	
202	2672	
203	2236	
302	1740	
303	584	
401	4174	
402	1108	
403	674	

〈표 5〉 분석대상 가로망 링크길이 및 회전교통량 비

링크	From Node	To Node	링크 거리	좌회전 포켓길이	차로수			회전교통량비 (%)			비고
					좌	직	우	좌	직	우	
1	1	101	500	-	1	3	1	-	-	-	Exit Link
2	101	1	500	60	1	4	1	15	80	5	Entry Link
3	1	103	500	-	-	2	1	-	-	-	Exit Link
4	103	1	500	150	-	2	1	36	41	23	Entry Link
5	2	1	540	50	1	3	1	6	89	5	
6	1	2	540	70	1	4	1	37	48	15	
7	1	102	500	-	-	2	1	-	-	-	Exit Link
8	102	1	500	65	1	1	1	15	58	27	Entry Link
9	203	2	500	85	1	1	1	14	70	16	Entry Link
10	2	203	500	-	-	2	1	-	-	-	Exit Link
11	3	2	630	120	1	4	1	17	70	13	
12	2	3	630	70	1	3	1	22	62	16	
13	2	202	500	-	-	2	1	-	-	-	Exit Link
14	202	2	500	47	-	3	1	0	66	34	Entry Link
15	303	3	500	70	1	1	1	57	35	8	Entry Link
16	3	303	500	-	1	1	1	-	-	-	Exit Link
17	4	3	330	40	-	3	1	6	93	1	
18	3	4	330	65	1	2	1	20	70	10	
19	3	302	500	-	1	1	1	-	-	-	Exit Link
20	302	3	500	0	1	1	1	1	25	74	Entry Link
21	403	4	500	0	-	2	1	0	50	50	Entry Link
22	4	403	500	70	1	1	1	-	-	-	Exit Link
23	401	4	500	30	1	2	1	20	70	10	Entry Link
24	4	401	500	-	1	2	1	-	-	-	Exit Link
25	4	402	500	-	1	1	1	-	-	-	Exit Link
26	402	4	500	0	1	1	1	0	50	50	Entry Link

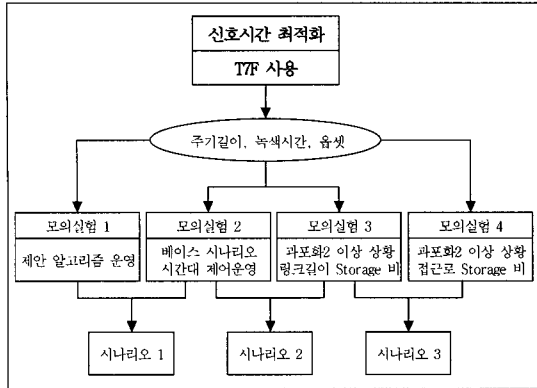
란에 Exit Link로 표시된 링크는 분석가로망에서 유출되는 External 링크로서, 분석결과에는 영향을 미치지 않는다. Entry Link는 유입교차로에서 차량이 발생되어 분석가로망으로 차량이 유입되는 링크이다.

2. 시나리오 설정 및 모의실험 절차

1) 시나리오 설정

- 시나리오 1 : 가로망에서 TOD제어와 제안알고리즘의 효율성 비교

대상 가로망에서 분석시간대의 최적화된 신호변수로서 시간대제어(TOD제어)로 운영하는 경우를 베이스 시나리오로 하고 제안 알고리즘에 의해 신호시간 운영을 하였을 경우의 효과척도를 가로망 전체 측면과 중요교차로를 중심으로 비교 평가한다.



〈그림 7〉 시나리오별 효과적도 비교분석 절차

- 시나리오 2 : TOD제어와 과포화-2 이상의 상황에서 제안 알고리즘의 효율성 비교

분석 가로망내 특정 링크의 유입교통량을 증가시켜 과포화-2 이상의 상황을 만들어 TOD제어와 본 고에서 제안하는 과포화시 녹색시간 배분 알고리즘의 효율성을 비교한다.

- 시나리오 3 : 과포화-2 이상의 상황에서 접근로 Storage비에 의한 녹색시간 배분과 링크길이에 대한 Storage 비에 의한 제어의 효율성 비교

과포화-2 이상의 교통상황에서 본 고에서 제안하는 2가지 녹색시간 배분방식인 접근로 Storage비에 의한 녹색시간 배분과 링크길이에 대한 Storage 비에 의한 제어의 효율성 비교한다.

2) 모의실험 절차

- 베이스 시나리오인 TOD제어의 최적신호시간 변수(녹색시간, 오프셋, 주기)를 T/F를 이용하여 도출한다.
- 최적화된 신호계획 자료를 입력으로 TOD 제어와 각 시나리오별 제안 제어알고리즘으로 모의실험 분석

3. 분석결과

1) 시나리오-1

실제 존재하는 가로망에 제안 알고리즘을 적용하였을 때와 기존의 TOD제어로 운영하였을 때를 비교하여 가로망 소통 효율이 어느 정도 개선되는지를 평가하기 위한 시나리오로써 분석 결과는 〈표 6〉과 같다.

- 분석시간: 30분

2) 시나리오-2

과포화-2 이상의 상황 발생시 분석 가로망내 특정 링크의 유입교통량을 증가시켜 과포화-2 이상의 상황을 만들어 TOD제어와 본 고에서 제안하는 과포화시 녹색시간 배분 알고리즘의 효율성을 비교하였을 때의 신호 운영 효율성을 비교한 결과는 〈표 7〉과 같다.

- 분석시간 : 15분

〈표 6〉 TOD제어 VS 제안알고리즘 효율성 비교

구분	효과적도	TOD 제어	제안알고리즘	개선율(%)	비고
가로망	총 처리교통량(veh)	19,267	21,002	9.0	
가로망	평균정지체(초/대)	118.8	91.2	23.2	
중요교차로	총 처리교통량(veh)	4,619	4,698	1.7	
중요교차로	평균 정지체(초/대)	67.8	49	27.7	
중요교차로	평균 대기차량수(대/차로)	14.9	13.1	12.1	
중요교차로	대기차량 편차	4.24	3.59	15.3	

〈표 7〉 TOD제어 VS 제안알고리즘(과포화-2이상) 효율성 비교

구분	효과적도	TOD 제어	제안알고리즘	개선율(%)	비고
가로망	총 처리교통량(veh)	6,671	8,207	23.0	
가로망	평균정지체(초/대)	128.7	94.7	26.4	
중요교차로	총 처리교통량(veh)	1,131	1,427	26.2	
중요교차로	평균 정지체(초/대)	135.0	78.0	42.2	
중요교차로	평균 대기차량수(대/차로)	30.1	26.7	11.3	
중요교차로	대기차량 편차	21.28	10.0	53.0	

〈표 8〉 TOD제어 VS 링크길이와 Storage비 효율성 비교

구분	효과척도	TOD 제어	제안알고리즘	개선율(%)	비고
가로망	총 처리교통량(veh)	6,671	8,223	23.3	
가로망	평균정지지체(초/대)	128.7	98.0	23.9	
중요교차로	총 처리교통량(veh)	1,131	1,393	23.2	
중요교차로	평균 정지지체(초/대)	135.0	84.0	37.8	
중요교차로	평균 대기차량수(대/차로)	30.1	28.0	7.0	
중요교차로	대기차량 편차	21.28	14.1	33.6	

〈표 9〉 링크길이별 Storage비 VS 접근로별 Storage비 효율성 비교

구분	효과척도	링크길이와 Storage비 방식	접근로별 Storage비 방식	개선율 (%)	비고
가로망	총 처리교통량(veh)	8,207	8,223	-0.2	
가로망	평균정지지체(초/대)	94.7	98.0	3.5	
중요교차로	총 처리교통량(veh)	1,427	1,393	2.4	
중요교차로	평균 정지지체(초/대)	78.0	84.0	7.7	
중요교차로	평균 대기차량수(대/차로)	26.7	28.0	4.9	
중요교차로	대기차량 편차	10.0	14.1	41.3	

3) 시나리오2-2

과포화-2 이상의 상황 발생시 기존의 TOD제어로 신호교차로를 운영하였을 때와 본 논문에서 제안하는 방법 중에 접근로의 링크 길이와 Storage비에 의해 녹색시간을 분배하였을 때의 신호 운영 효율성을 비교한 결과는 〈표 8〉과 같다.

- 분석시간 : 15분

4) 시나리오3

과포화-2 이상의 상황 발생시 접근로의 링크 길이와 Storage비에 의해 녹색시간을 분배하였을 때와 접근로의 Storage비에 의해 녹색시간을 분배하였을 때의 신호 운영 효율성을 비교한 결과는 〈표 9〉와 같다.

- 분석시간 : 15분

Ⅵ. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 대기길이를 측정하는 모형을 제안하고 대기길이를 이용한 실시간 신호제어전략 중 주기와 녹색시간산정 알고리즘을 구축하여 Network을 대상으로 한 모의실험을 통하여 기존 TOD와 비교·평가하였다. 검증에 위한 모의실험기는 개별차량의

행태를 실시간으로 모의실험 할 수 있는 TRACSIM을 사용하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 효율적인 신호제어를 위하여 신호제어단계를 비포화제어(한산 및 정상상황), 과포화제어(과포화 I 및 과포화 II), 앞막힘제어의 4단계로 정의하였다.

둘째, 대기길이를 측정하는 알고리즘을 제안하였다. 이것은 교차로 상·하류부에 각각 1대씩의 영상검지기를 설치하여 이전 주기의 대기길이, 차로별 유·출입 교통량과 영상검지기의 가시거리 내에 포착되는 대기길이를 측정하여 전 링크구간의 대기길이를 측정하는 방식이다. 보정을 위하여 링크구간의 이면도로에 의한 유·출입 교통량에 대한 영향, 횡단보도에 의한 영향 등을 감안한 5가지 경우의 상황을 고려하였다. 본 알고리즘에서는 오차를 보정하는 과정을 포함하고 있으며 검증은 수행하지 않았고, 추정 정확도가 우수하다고 가정하였다.

셋째, 실시간 신호제어전략의 주요제어변수인 주기산정 알고리즘을 개발하였다. 이것은 기존의 포화도 제어방식을 탈피하여 영상검지기에 의한 대기행렬길이를 기반으로 하였으며 특히 과포화시에는 좀더 신중하게 판단하여 제어를 하도록 구축되었다. 주기길이는 현재 및 이전 2주기의 대기행렬길이를 가중 평균하여 각 베리어상에서 방향별 최대 대기행렬길이를 토대로 결정하였으며, 현재의 주기와 요구주기의 차

가 기준값과 다르면 증가 및 감소시키도록 되어있다. 그러나 과포화시에는 증가는 비포화와 동일하나 감소는 일시적인 현상의 오판을 방지한다는 차원에서 좀더 신중하게 판단하도록 구축하였다.

기존의 신호제어는 포화도를 기반으로 하였으나 직접정보를 이용한 예측의 한계와 기하구조의 영향 및 차량이용행태의 다양성을 적절히 반영하지 못하며, 특히 과포화시의 수요교통량을 대변해주지 못하는 등의 한계가 도출되었다. 이러한 문제들을 해결할 수 있는 방안은 구간정보를 토대로 정확도가 높은 수요교통량(대기길이)을 측정하여 신호제어를 하는 것이다. 이를 위하여 본 연구에서는 영상검지기의 구간정보를 토대로 대기길이를 추정하는 알고리즘을 제시하였으나 검증이 되지 못하였으며, 또한 제어전략 중 옵션셋의 검토가 수행되지 못하였으므로 향후 이에 관한 연구가 요구된다. 또한 포화도에 의한 실시간 신호제어 전략과의 비교·평가가 요망된다.

참고문헌

1. 도철웅(1983), "직진교통의 좌회전차선 이용율 추정과 교차로용량 및 최적신호등시간 산정", 대한교통학회지, 제1권 제1호, 대한교통학회.
2. 도철웅(1983), "직진과 좌회전 신호순서 변화에 대한 교통차로 용량연구", 제2회 학술발표회 논문집, 대한교통학회.
3. 이상수(1995), "신호교차로의 실시간 교통제어를 위한 포화도산정 수정모형", 아주대학교 대학원 석사학위논문.
4. 이광훈(1992), "교통신호제어이론과 전략", pp.8~10.
5. 건설교통부(1995), "첨단도로교통체계 기본계획(1단계) 최종보고서", pp.9~62.
6. 도로교통안전협회(1992), "서울특별시 교통신호 제어시스템개발 연구용역시행 2차년도 최종보고서".
7. 도로교통안전협회(1993), "서울특별시 교통신호 제어시스템 기술개발(3차년도)현장제어기 및 검지기 개발 보고서".
8. 도로교통안전협회(1994), "신교통신호제어시스템 개선에 관한 연구", pp.14~123.
9. Alsop(1972), "Sensitivity of Delay at a Fixed-Time Traffic Signal to Small Errors in the

Observations Used for Calculating the Settings, "Traffic Flow and Transportation, Chapter 17, Elsevier Publishing Company, New York, New York.

10. Bleyl, R. L.(1967), "A Practical Computer Program for Designing Traffic Signal System Timing Plans", Highway Research Record 211. Highway Research Board, Washington, D.C., pp.19~33.
11. F. V. Webster, B. Sc. Ph.D. & B. M. Cobbe, B. Sc., A. M. I. E. E.(1996), "Traffic Signals", Road Research Technical Paper No. 56, pp.3~16, pp.46~76.
12. F.V. Webster, B.Sc. Ph.D.(1996), "Traffic Signal Settings", Road Research Technical Paper No. 39, pp.4~16.
13. Gerade Scemama(1991), "Traffic Control Practices in Urban Areas", Recherche Transports Securite-English Issue N°6, pp.17~30.
14. Hunt, P. B. et al.(1981), "SCOOT-A Traffic Responsive Method of Coordinating Signals", Transport and Road Research Laboratory Report No. LR-1014, Grothorne, Berkshire, England.
15. Hunt, P. B., et al.(1982), "The SCOOT On-Line Traffic Signal Optimization Technique", International Conference on Road Traffic Signalling, Institute of Electrical Engineers, London, England, pp.59~62.
16. P. B. Hunt, et al.(1981), "SCOOT(A traffic responsive method of coordinating signals)", TRRL.
17. P. B. Hunt(1982), "The SCOOT on-line traffic signal optimization technique", Traffic Engineering Control, pp.190~192.
18. P. R. Lowrie(1990), "SCATS(A traffic responsive method of controlling urban traffic)", RTA, Sydney, pp.4~13.
19. Robertson, D. I.(1969), "A Traffic Network Study Tool", Road Research Laboratory Report No. RL-253, Grothorne, Berkshire,

- England.
20. RTA(1990), "Presentation on SCATS to the delegation from Seoul Korea".
 21. TRB(1994), "Highway Capacity Manual", Special Report 209.
 22. Wallace, C. E., et al.(1982), TRANSYS-7F User's Manual. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
 23. William R. Mcshane & Roger P. Roess(1990), "Traffic Engineering", prentice hall polytechnic series in transportation, pp.380~416, pp.617~642.
 24. Yagoda, H. N., et al., "Forcast On-Line : Making UTCS Easier to Use", International Conference on Road Traffic Signalling, Institute of Electrical Engineers, London, pp.97~102.
 25. Yardeni, L. A.(1964), "Vehicular Traffic Control : A Time Space Design, "Institute of Traffic Engineers Proceedings. Washington, D.C., pp.59~74.

♣ 주 작 성 자 : 이철기

♣ 논문투고일 : 2002. 2. 19

논문심사일 : 2002. 3. 13 (1차)

2002. 4. 1 (2차)

2002. 4. 8 (3차)

심사판정일 : 2002. 4. 8

♣ 반론접수기간 : 2002. 8. 30