▣ 論 文 ▣

내부 미터링을 이용한 과포화 네트워크 신호제어 알고리즘 연구

A Study on Signal Control Algorithms using Internal Metering for an Oversaturated Network

송 명 균
(UC Berkeley 박사과정)

이 영 인
(서울대학교 환경대학원 교수)

목 차

Ⅰ. 서론
Ⅱ. 선행연구 고찰
Ⅲ. 알고리즘의 정립
1. 지체모형 정립
2. 내부미터링을 이용한 신호제어 모형
Ⅳ. 모의실험
1.모의실험 환경
2. 모의실험 결과
Ⅴ. 결론 및 향후과제
참고문헌

Key Words : 정지 지체, 접근 지체, 내부 미터링, 차량군 분산 모형, 임계대기행렬길이
Stopped time delay, Approach delay, Internal metering, Platoon dispersion model, Critical queue length

요 약

본 연구의 목적은 네트워크에 과포화가 발생했을 경우 차량들이 경험하는 총지체를 최소화시키기 위하여 내부미터링을 이용한 신호제어 알고리즘을 개발하는 것이다. 본 연구에서는 네트워크의 총지체를 계산하기 위하여 네트워크 상에 차량의 진입 및 진출을 검지할 수 있는 검지 시스템을 설치하였고 차량군 분산 모형을 이용하여 링크상에서 차량의 흐름을 추적하였다. 이어서 차량추적을 통하여 네트워크에서 모든 링크의 대기행렬 길이를 계산하였고 이를 이용하여 전체 네트워크의 정지지체를 구하고, 시공도를 이용하여 정지지체를 접근지체로 변환하였다. 계산된 지체를 기반으로 계산된 지체를 최소화 할 수 있는 내부미터링수준을 도출하는 알고리즘에 대하여 제안하였다. 본 연구에서 제시한 알고리즘의 효과성을 입증하기 위하여 미시적 모의실험 도구인 VISSIM을 이용한 모의실험을 실시하였다. 그 결과 본 연구에서 제시한 알고리즘을 가상 네트워크에 적용할 경우 차량들이 경험하는 평균지체는 82.3초/대로써 COSMOS 방식의 89.9초/대나 TOD 방식의 99.1초/대보다 낮은 값이 도출되었다. 이것은 본 연구에서 제시한 알고리즘이 과포화 네트워크의 신호제어에 효과적이라는 것을 나타내준다.

The aim of this research is to develop a signal control algorithm using internal metering to minimize total delay that vehicles go through, in case a network is oversaturated. To calculate total delay on the network, the authors first detect vehicles′ arrivals and departures in the network through the detecting system, and chase the vehicles′ flow in the links with a platoon dispersion model. Following these, the authors calculate the queue length in all the inks of the network through the chase of vehicles, deduce the stopped time delay, and finally convert the stopped time delay to the approach delay with a time-space diagram. Based on this calculated delay, an algorithm that calculates the level of the internal metering necessary to minimize the deduced approach delay is suggested. To verify effectiveness of this suggested algorithm, the authors also conduct simulation with the micro-simulator VISSIM. The result of the simulation shows that the average delay per vehicle is 82.3 sec/veh and this delay is lower than COSMOS (89.9sec/veh) and TOD (99.1sec/veh). It is concluded that this new signal control algorithm suggested in this paper is more effective in controlling an oversaturated network.

Ⅰ. 서론

현재 서울을 비롯한 많은 도시 네트워크상에서는, 지속적인 차량증가로 인하여 하루에도 수많은 교차로들이 과포화를 경험하고 있다. 일단 교차로가 과포화를 경험하게 되면 대기행렬의 증가로 인하여 차량들의 지체는 급속도로 증가하게 된다. 만일 제어할 수 없을 정도로 대기행렬 증가가 발생한다면 교차로 막힘(Blockage) 현상이 발생하게 되고, 녹색시간대에 차량방출이 원활하게 이루어지지 않아, 상류부 교차로까지 혼잡의 범위가 증가하게 되어 네트워크 혼잡(Grid-lock)의 원인이 되기도 한다.

이러한 교차로의 과포화 현상을 해결하기 위해서 과거 많은 연구가 있었고, 그 결과 과포화 네트워크에서의 지체를 줄일 수가 있었다. 하지만 기존의 연구들은 대기행렬 관리를 통하여 과포화 발생 시 진입교통량과 진출교통량이 똑같이 유지되도록 하는데 중점을 두었기 때문에, 연구를 통하여 감소된 지체 값이 과연 그 네트워크에서의 최소지체인지에 대해서는 알 수가 없다.

따라서 본 연구의 목적은 다음과 같이 크게 두 가지로 설정될 수 있다. 첫째, 네트워크상에 차량의 진입 및 진출을 검지하고 교통류의 흐름을 반영하여 최적의 신호시간 계산을 위한 네트워크의 총지체를 계산한다. 이를 위하여, 네트워크에 진입하는 차량들을 검지하기 위한 검지시스템을 설치한 후 차량군 분산 모형을 이용하여 차량을 흐름을 추적하여 차량들이 대기행렬을 형성하기 시작하는 시점부터 차량의 정지지체를 구하고, 도시부 네트워크에서의 차량의 시공도를 이용하여 정지지체를 접근지체로 환산하는 식을 도출한 뒤 접근지체를 구한다.

둘째, 네트워크상에 과포화가 발생할 경우 계산된 총지체를 최소화 할 수 있도록 내부미터링 기법을 이용하여 상류부의 녹색시간을 제어하는 알고리즘을 제시한다. 네크워크의 지체는 차량의 증가에 따라서 과포화가 발생하기 전까지는 거의 일정한 비율로 증가하다가, 일단 과포화가 발생하게 되면 지체는 급속도로 증가하게 된다. 따라서 임계교차로(Critical intersection)가 과포화가 되지 않도록 하기 위해서는 상류부 교차로에서 미터링이 필요하다. 이때 미터링은 네트워크의 총지체를 최소화하는 것을 그 목적으로 한다.

Ⅱ. 선행연구 고찰

1. 지체모형에 관한 연구

신호교차로의 용량 및 서비스수준을 분석함에 있어서 지체는 가장 널리 사용되고 있는 효과척도 가운데 하나이기 때문에, 1960년대부터 지체에 관한 많은 연구가 있었다.

Hurdle(1984)은 교차로 분석에 있어서 지체도의 정확한 측정이 필요하지만, 포화도가 1에 가까워질수록 지체도의 정확한 측정이 어렵기 때문에 현재 지체도를 구하는 이론들이 많은 가정을 내포하고 있다고 언급하였다.

하동익(1997)은 기존의 정상상태(steady-state)[1]를 가정한 많은 지체모형들이 현실 반영성이 떨어진다는 한계점과 과포화 상태에서의 지체예측은 지속시간에 가장 큰 영향을 받는다는 점을 고려하여, 이를 극복하기 위하여 신호주기내에 시간대별 교통량 변화를 반영할 수 있는 time-dependent[2]한 지체분석방법론을 제시하였다. 이 방법론은 대기행렬에 존재하는 차량들의 수에 따라서 지체를 계산하기 위하여 진입교통량, 포화교통류율, 신호제어정보, 링크용량, 연동효과를 변수로 사용하였다.

이와 같은 개념에 입각하여, Wann-Ming Wey (1999)는 네트워크에 진입하는 차량들에 대하여 차량군 분산모형을 적용하고, 차량이 네트워크에 진입하고 대기행렬을 형성하고 네트워크를 빠져나갈 때까지의 차량의 궤적을 추적하여 네트워크의 총 지체를 구할 수 있는 모형을 제안하였고 이를 수정된 혼합정수계획법을 이용하여 풀었다. 이 모형은 단위시간(Time Step)별로 네트워크 진입차량들이 겪고 있는 지체를 계산할 수 있기 때문에 교차로의 지체를 계산하는 미시적 모형으로써 실시간 교통제어를 목적으로 적용하는데 있어서 적합한 모형이다. 하지만 Wann-Ming Wey가 제시한 지체식은 진입차량이 대기행렬에 진입한 뒤 지체를 겪는다고 간주하기 때문에 엄밀히 말해 HCM(Highway Capacity Manual)에서 이용하는 제어지체(Control Delay)와 같은 개념은 아니다. 따라서 네트워크의 지체를 실시간으로 표현하기 위해서는 제시한 지체식을 보완해야 한다.

정지지체와 접근지체의 관계를 규명하기 위하여, Teply(1989)는 Queueing Diagram을 이용하여 정지지체와 접근지체간의 관계를 이론적으로 도출하였다. 그

1) 분석시간 T동안 도착교통률이 일정하고, 분석시간 T는 안정상태에 도달하기 위한 충분한 시간임을 가정한 모형
2) 과포화 교차로에서 지체는 지속시간에 가장 큰 영향을 받는다는 점을 고려하여 이를 반영하기 위한 모형

결과 기존의 HCM에서 제시하는 개념, 즉, 접근지체를 정지지체의 1.3배로 규정하는 것은 현실에 적합하지 않고 정지지체와 접근지체의 관계는 유효적색시간의 함수라는 것을 도출하였다. 하지만 접근지체와 정지지체의 차이를 감속지체로만 규정하고 가속지체는 무시하였기 때문에 접근지체가 실제보다 과소추정이 된다.

2. 과포화시 신호제어 모형에 관한 연구

과포화시 신호제어 모형에 관한 연구는 기존에도 많은 연구가 있었지만, 현실에 적용되어 많은 효과를 본 연구는 1990년대를 전후로 수행된 NCHRP 프로젝트 3-38(3)이라고 할 수 있다. 이 연구에서는 5가지의 목적을 두었는데, 스필백 현상을 방지하도록 대기차량길이를 관리하는 것, 차량유출률을 극대화 하는 것, 대기차량저장공간을 최대한 활용하는 것, 상충하는 교통류간에 형평성 있는 서비스를 제공하는 것, 차량의 정지수를 최소화 하는 것이 제어의 목적이다.

이 연구 이후에 이를 응용하는 많은 연구가 있었는데, 김영찬(1995)은 혼잡도로의 신호제어를 위해서 내부미터링기법을 국내에 적용하는 방법에 대하여 고찰하였다. 이 신호제어 방법은 상류부 교차로의 스필백(queue spillback)이 발생하지 않도록 대기차량 대기차량길이를 관리하는 동시에 이상적인 옵셋값을 제시하여 차량의 유출율을 극대화하는 알고리즘을 제안하는 것이다.

이승환(2003)은 현재 서울시에서 운영 중인 실시간 신호제어시스템은 포화도(DS)가 1이 넘어가는 시점부터 앞막힘 현상이 일어날 때까지의 상황에 대한 대기행렬 성장관리가 미흡하다는 점에 착안하여, 실시간 신호제어시스템하에 내부미터링(Internal Metering) 기법을 도입하여 과포화시 새로운 신호제어 전략은 제시하였다. 기존 COSMOS 시스템의 제어그룹(Sub-Area)을 유지한 상태에서 제어 전략을 제시하였으며 그 제어전략의 기본개념은 상류부의 유입량과 하류부의 유입량을 같도록 유입차량의 수요를 미터링하는 하는 것이었다.

Ⅲ. 알고리즘의 정립

1. 지체모형의 정립

Webster 모형과 같은 steady-state 지체모형은 분석시간대가 길고 분석시간대동안 차량도착이 같다고 가정하므로 시간대별 수요의 혹은 서비스율의 변화가 현저한 시스템의 분석으로는 적합하지 않다. 따라서 교차로의 최적신호시간 계산을 위해서는 steady-state 가정이 아닌 transient[3] 대기행렬 상태를 가정하여 지체를 계산해야 한다.

도시부 교차로의 교통상황은 지속적으로 변화하고 있고, 그에 따라 교차로의 신호시간도 갱신되어야만 교차로의 지체를 감소시킬 수 있다. 따라서 지체를 계산하기 위한 분석시간대는 신호주기 단위로 짧아져야할 필요가 있다. 만약 HCM과 같은 기존의 지체모형들처럼 최소분석시간대가 15분 이상이어야 할 경우, 이것은 신호시간 계산을 위해 이용될 수 없으며 분석시간대가 짧은 새로운 지체모형의 도입이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 교차로 지체를 매 time step, 매 주기마다 도출할 수 있는 모형을 제안할 것이다.

마지막으로 기존의 지체모형들은 도착교통률이 일정한 것으로 가정한다. 하지만 현실에서는 차량의 도착이 분석시간대 내에서 일정한 것이 아니고 변화하므로 이에 따라 실제 지체는 변화하게 된다. 따라서 보다 정확한 지체예측을 위해서는 시간대에 걸친 교통수요의 변화를 보다 세밀하게 반영하고 그에 따른 대기행렬의 변화를 분석할 수 있어야 한다. 따라서 본 연구에서는 차량의 진입을 실시간으로 검지할 수 있는 검지시스템을 설정하고 그에 따른 차량군의 이동을 파악하여 대기행렬에 도착하는 차량들의 움직임을 보다 세밀하게 반영할 것이다.

1) 교통류 모형

(1) 링크 진입 교통량 검지

링크 진입부에 검지기를 설치하여 링크 진입 차량들에 대한 차두간격을 구한다.

$$O_{cc} = \frac{L}{\Delta T}$$

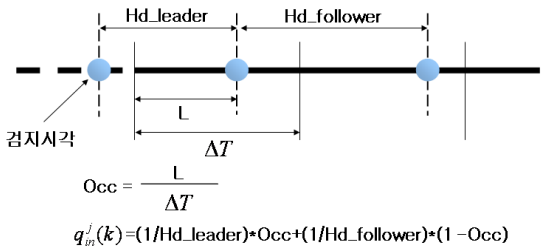
$$q_{in}^{j}(k) = \frac{1}{Hd\,leader} \times Occ + \frac{1}{Hd\,follower} \times (1 - Occ) \quad (1)$$

$$L' = L + Hd\,follower - time\,step$$

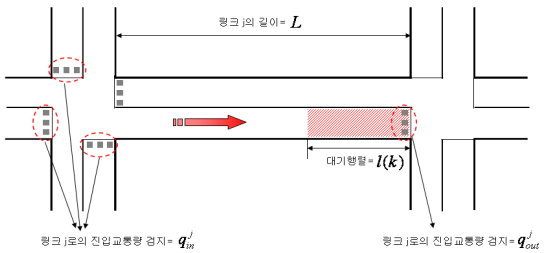
여기서,

$q_{\in}^{j}(k)$: $(k-1)\Delta T \le t \le k\Delta T$ 동안 j 링크로 진입하는 교통량

3) 분석시간동안 일정한 대기행렬을 유지하는 것이 아니라 매 time step마다 대기행렬이 변화함.



〈그림 1〉 교통류율의 전환



〈그림 2〉 링크와 대기행렬

ΔT : time step
$Hd\ leader$: 연속된 차두시간 중 전자
$Hd\ follower$: 연속된 차두시간 중 후자
Occ : 단위시간에 대한 차두시간의 점유시간
L : 단위시간의 시작 시점에서부터 차두시간이 끝나는 시점까지의 시간

(2) 링크상에서 차량의 이동

분석시간대별로 링크 진입 교통량을 검지한 후 차량군 분산 모형에 따라 링크상의 차량의 이동을 계산하여 다음 교차로의 대기행렬을 형성할 때까지의 과정을 모델링해야 한다. 즉, 이를 위하여 차량군 분산모형을 이용하면 식(2)와 같다.

$$q_s^j(k+\tau) = Fq_{in}^j(k) + (1-F)q_s^j(k+\tau-1) \qquad (2)$$

F : 완화계수(Smoothing factor)로써 $1/(1+\alpha\tau)$의 값을 가짐.
τ : $0.8 \times$자유속도로 링크를 주행한 시간(0.8은 경험적인 값)
α : 차량군 분산 계수로써 경험적으로 구한 값
$q_s^j(k)$: $(k-1)\Delta T \le t \le k\Delta T$동안 j 링크의 대기행렬의 끝단에 도달하는 교통량

(3) 혼잡링크 진출교통량 검지 및 대기행렬 산출

혼잡 링크에서의 대기행렬을 구하기 위해서는 우선적으로 녹색시간동안 혼잡 링크에서 어느 정도의 차량이 유출되었는지를 파악해야 한다. 이를 위하여 정지선에 설치된 정지선 검지기를 사용한다. 하류부 링크에서 녹색시간 동안 검지된 교통량을 파악하여 혼잡 링크의 대기행렬에서 빠져나간 차량 대수, 즉 진출 교통량을 구하면 혼잡 링크에 남아있는 차량의 대수를 구할 수 있다. 즉, 새로운 대기행렬은 기존에 대기형렬 속에 포함되어 있는 차량수에, 단위시간동안 도착한 차량수를 더하고, 단위시간동안 링크를 빠져나간 차량의 수를 빼주면 산출된다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$l_j(k) = l_j(k-1) + [q_s^j(k) - q_{out}^j(k)] \qquad (3)$$

$l_j(k)$: j 링크의 k 시점에서의 대기행렬
$q_{out}^j(k)$: $(k-1)\Delta T \le t \le k\Delta T$동안 j 링크를 빠져나가는 교통량

2) 지체식 수립

(1) 정지지체식 수립

본 연구의 목적은 과포화 네트워크에서 내부미터링을 이용하여 네트워크 전체의 지체를 최소화 할 수 있는 신호 제어 알고리즘을 개발하는데 있다. 따라서 모든 목표시간동안 교차로의 모든 링크에 존재하는 차량들의 대기행렬의 합으로 지체를 표현한다.

제안된 지체식은 식(4) 같다.

$$TD = \Delta T \sum_{n=1}^{N} \sum_{i=1}^{I} \sum_{k=1}^{K} l_{ni}(k) \qquad (4)$$

N : 교차로 수
I : 교차로에 연결된 링크 개수
K : 목표시간
$l_{ni}(k)$: n 교차로의 i 링크에서의 $(k\text{-}1)\triangle T \le t \le k\triangle t$ 동안의 대기차량 수

하지만 위에서 제시한 식은 차량이 과포화 교차로에서 대기행렬에 합류하고 교차로를 통과하기 위하여 출발할 때의 감·가속 지체(deceleration delay, acceleration dealy)를 고려하지 않은 모형이다. 즉, 제시된 식은

HCM에서 제시하는 정지지체의 개념과 같다고 할 수 있다. 따라서 위에서 제시된 식을 접근지체의 개념으로 바꾸어 주기 위해서는 또 하나의 과정이 필요하다. 비록 HCM에서 접근지체는 정지지체의 1.3배인 것으로 규정하고 있지만 이러한 관계에 대한 이론적 근거자료는 구할 수 없다. 따라서 Teply(1989)가 제시한 접근지체와 정지지체의 관계를 수정·추가 보완하여 위에서 제시한 정지지체식을 접근지체로 전환하도록 할 것이다.

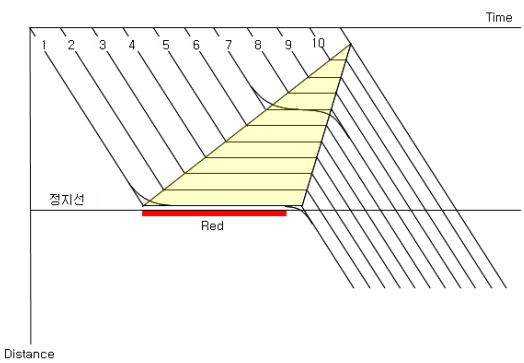
(2) 정지지체의 접근지체 변환

〈그림 3〉은 교차로에서 차량의 이동을 표현한 시공도이다. 그림에서 1번 차량의 경우 정지선에 도착했을 때 교차로에 적색신호가 켜졌기 때문에, 이 차량은 정지선 부근에서 서서히 속도를 줄여 정지한다. 그 후 녹색신호가 등화 되면, 이 차량은 서서히 가속하여 이 교차로를 빠져나간다. 하지만 7번 차량의 경우는 대기행렬 부근에 도착했을 때 서서히 감속하기는 하지만 완전히 정지하지는 않는다. 그 후 서서히 가속을 한 뒤 교차로를 빠져나가게 된다. 즉, 엄밀히 말해 7번 차량의 경우는 정지지체를 경험하지 않고 감·가속지체만을 경험하게 된다. 따라서 정확한 지체예측을 위해서는 정지지체를 접근지체로 변환하는 과정이 필요하다.

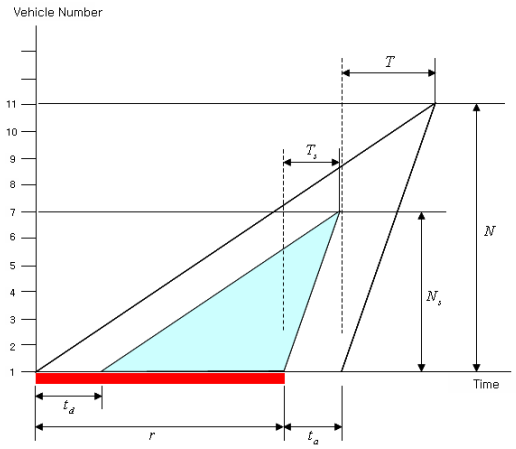
〈그림 3〉을 이용하여 접근지체와 정지지체 사이의 관계를 도출할 것이다. 우선 〈그림 3〉의 색칠되어 있는 부분을 〈그림 4〉와 같이 나타낼 수 있다.

〈그림 4〉에서 색칠되어 있는 부분이 정지지체를 나타낸다. 이 부분을 식으로 표현하면

$$D_s = \frac{1}{2}(r - t_d)N_s$$



〈그림 3〉 접근지체 계산을 위한 시공도



〈그림 4〉 정지지체와 접근지체의 관계

여기서,

D_s : 정지지체

r : 적색시간

t_d : 감속지체

N_s : 정지지체를 경험하는 총 차량수

또한, T_s를 녹색시간이 켜진 후 정지한 차량들이 없어질 때까지 걸린 시간으로 정의하면 다음과 같은 관계식을 도출할 수 있다.

$$\lambda(r - t_d + T_s) = \mu T_s$$

λ : 평균도착율(대/초)

μ : 평균서비스율(대/초)

위 관계식을 T_s로 정리하면

$$T_s = \frac{\lambda(r - t_d)}{\mu - \lambda}$$

또한, $N_s = \mu T_s$이므로

$$N_s = \frac{\mu\lambda(r - t_d)}{\mu - \lambda}$$

따라서, $D_s = \frac{\mu\lambda(r - t_d)^2}{2(\mu - \lambda)}$가 도출된다.

접근지체의 경우는

$D=\frac{1}{2}(r+t_a)N$이고 위와 마찬가지 방법을 이용하여 계산하면

$$D=\frac{\mu\lambda(r+t_a)^2}{2(\mu-\lambda)}$$가 도출된다.

D : 접근지체

t_a : 가속지체

따라서 접근지체와 정지지체의 관계는

$$\frac{D}{D_s}=\left[\frac{\mu\lambda(r+t_a)^2}{2(\mu-\lambda)}\right]\left[\frac{\mu\lambda(r-t_d)^2}{2(\mu-\lambda)}\right]^{-1}=\frac{(r+t_a)^2}{(r-t_d)^2} \quad (5)$$

$$\therefore\ D=D_s\cdot\frac{(r+t_a)^2}{(r-t_d)^2}$$으로 정의할 수 있다.

위 관계식을 살펴보면 접근지체와 정지지체의 관계는 HCM에서 제시하듯이 접근지체는 정지지체의 상수곱(1.3배)가 아니라 특정 방향의 적색시간에 따라 변화하는 값을 가진다. 다시 말해, 정지지체를 통해 접근지체를 구할 때 일정한 비율을 적용하여 도출하는 방식은 옳지 않고, 신호시간에 따라 관계식을 이용하여 도출해야한다.

따라서, 과포화 네트워크 제어를 위한 지체식을 식(6)과 같다.

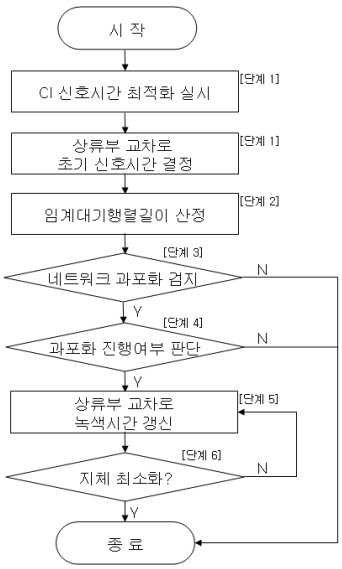
$$D_s=TD=\Delta T\sum_{n=1}^{N}\sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{K}l_{ni}(k)\ \text{이므로}$$

$$D=D_s\cdot\frac{(r+t_a)^2}{(r-t_d)^2}=\frac{(r+t_a)^2}{(r-t_d)^2}\Delta T\sum_{n=1}^{N}\sum_{i=2}^{I}\sum_{k=1}^{K}l_{ni}(k) \quad (6)$$

다음절에서는 이 식을 이용하여 metering을 이용한 신호제어 모형을 정립하도록 하겠다.

2. 내부미터링을 이용한 신호제어모형

네트워크에서 과포화가 발생할 경우 내부미터링을 이용한 신호제어 방법을 적용하기 위해서는 다음 주기의 신호시간을 계산하는 시점에서 〈그림 5〉의 절차가 수행되어야 한다.



〈그림 5〉 내부미터링 적용절차

【단계 1】 CI 신호시간 최적화 실시, 상류부 교차로 초기 신호시간 결정

- ○ 이 단계에서는 내부미터링을 고려하지 않은 상황에서 CI 및 상류부 교차로의 신호시간을 산정함.
- ○ 이 때 신호시간은 네트워크에 기본적으로 사용되고 있는 신호시스템의 방식에 따름.
- ○ 주기는 CI에서 계산된 주기를 공통주기로 사용하였음.

【단계 2】 임계대기행렬길이 산정

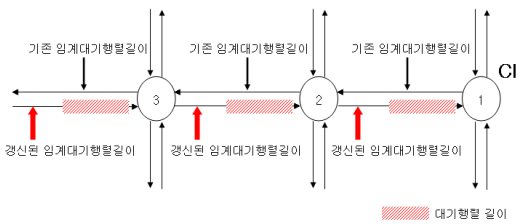
- ○ 네트워크의 과포화를 파악하기위한 기준으로 임계대기행렬길이(Critical queue length)의 기준을 정해야 함.
- ○ 각각의 링크에 대한 임계 대기행렬길이 Q_c는 각 교차로에서 산정된 다음주기의 녹색시간동안에 빠져나갈 수 있는 대기행렬의 길이로 산정함.
- ○ 임계 대기행렬길이의 선정 근거는 다음과 같음. 임계 교차로의 임의의 접근 링크의 대기행렬이 임계대기행렬보다 긴 경우 차량들은 최소 1주기 이상의 대기시간을 가져야 함. 따라서 상류부 링크가 과포화에 다다르지 않은 경우, 상류부 교차로의 녹색시간을 감소시켜, 두 교차로의 대기시간을 모두 1주기 이내로 유지하도록 하기 위한 내부미터링의 근거를 찾을 수 있음. 또한, 차량의 대기시간이 1주

기 이내인 경우에는 연동에 의한 지체감소효과를 얻을 수 있음.

○ 만일 제어대상 네트워크로의 진입교통량이 지속적으로 많아져 모든 교차로에서 대기행렬의 길이가 임계대기행렬보다 많아지는 경우가 발생하면 임계대기행렬의 길이를 2배로 확장함. 따라서 모든 교차로의 대기차량이 2주기 이내에 교차로를 빠져나갈 수 있도록 유도함.

○ 〈그림 6〉에서와 같이 제어대상 교차로가 1, 2, 3이 있는 경우 주방향에 대하여 모든 링크의 대기행렬길이가 초기 결정된 임계대기행렬길이보다 긴 경우 임계대기행렬길이를 두 배로 수정함.

○ 좌회전 베이의 용량제약이 직진 및 좌회전 교통량에 영향을 줄 수가 있으므로 만약 교차로 상에 좌회전 베이가 설치되어 있다면 임계대기행렬길이 산정에 있어서 이를 고려해야 함.



〈그림 6〉 임계대기행렬길이 갱신

【단계 3】 네트워크 과포화 검지

○ 임계 교차로의 임의의 접근 링크의 대기행렬 길이가 그 링크에서 정해진 임계대기행렬길이(Q_c) 이상인 경우 그 링크에 대하여 과포화를 선언함.

【단계 4】 과포화 진행여부 판단

○ 비록 네트워크 상에 과포화가 감지되었다고 하더라도 그 상황은 일시적인 상황이고, 다음 주기에 그 문제가 해결될 수 있기 때문에 발생된 과포화 상황이 지속적으로 이어지고 있는 상황인지에 대한 판단과정이 필요함.

○ 따라서 과포화 문제가 현재 지속적으로 증가하고 있다는 것을 증명하기 위해서는 네트워크 상에 과포화가 검지 되었을 때 이전 3 주기 동안 링크의 진입교통량이 링크의 진출교통량보다 많았을 경우 과포화가 계속적으로 진행하고 있다고 판단할 수 있음.

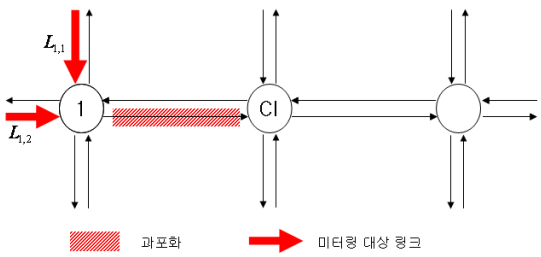
【단계 5】 상류부 교차로 녹색시간 갱신

○ L_{ni}를 n번 교차로의 i번 접근 링크라고 하면, 〈그림 7〉과 같은 상황이 발생되는 경우, 1번 교차로가 미터링 대상 교차로가 되고, 1번 교차로의 $L_{1,1}$링크의 좌회전 현시, $L_{1,2}$링크의 직진 현시의 녹색시간을 줄여주어야 함.

○ 녹색시간의 감소폭(ΔG)는 차량의 평균 차두간격인 2초로 설정하고 줄어든 녹색시간만큼의 시간을 같은 방향의 직진과 좌회전 신호시간에 더해주어 주기를 변함없이 유지함.[4)]

○ 주기 및 Barrier는 고정되어 있으며, 미터링된 신호시간은 최소녹색시간(min g)보다 같거나 커야 한다.

○ 〈그림 7〉의 경우처럼 과포화가 발생하는 경우 1번 교차로의 신호시간 변화는 〈그림 8〉과 같음.



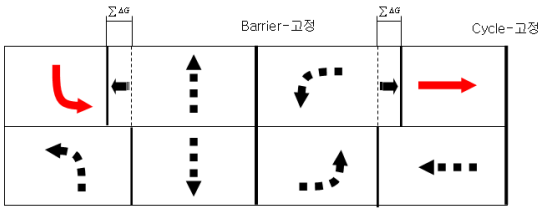
〈그림 7〉 내부미터링 대상링크 선정

【단계 6】 지체 최소화 여부 판단

○ 이전 단계에서처럼 임계교차로의 지체를 줄이기 위해서 임계교차로로 진입하는 상류부 교차로의 신호시간을 제어하게 되면 임계교차로와 상류부 교차로의 지체값이 변화됨.

○ 〈그림 8〉과 같이 상류부의 신호시간이 변경된 경우 주도로의 EB, 부도로의 NB 직진, WB의 좌회전 이동류의 지체는 감소할 것이고, 부도로의 SB 좌회전 EB 직진 이동류의 지체는 증가함. 따라서 그 감소된 지체와 증가된 지체의 차이가 가장 큰 경우 상류부의 신호시간을 결정하게 됨.

4) $L_{1,1}$의 좌회전 녹색시간이 2초가 줄어든 경우, $L_{1,1}$의 직진 녹색시간에 2초를 더해줌.



〈그림 8〉 미터링전과 후의 신호시간 변화

○ 즉, 지체계산의 범위는 임계교차로와 임계교차로의 지체를 감소시키기 위해 신호시간을 변경하는 상류부 교차로로 정할 수 있음.

○ 이 과정에서는 증분추적법(Incremental search)을 이용함. 즉, 미터링 대상 교차로의 대상 링크의 모든 녹색시간에 대하여 과포화 링크 및 미터링 대상 교차로의 지체를 구하고, 그 중 지체값을 최소화 시키는 녹색시간을 도출함.

Ⅳ. 모의실험

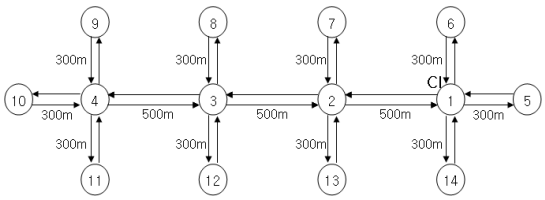
우선 본 연구에서 제시한 알고리즘을 수정된 내부미터링 알고리즘이라고 정할 것이다.

본 연구에서 제시한 알고리즘을 평가하기 위한 현장실험은 현실적으로 수행하기 어렵기 때문에 시뮬레이션 기법을 사용하여 평가를 실시하였다. 이를 구현하기 위하여 모의실험에는 교통류의 미시적 상황을 시뮬레이션 할 수 있고, 시뮬레이터 내에서 본 연구에서 제안한 알고리즘을 재현할 수 있는 Vissim 이용하였다. 이 때 본 연구에서 제시한 알고리즘을 구현하기 위하여 VISVAP 언어를 사용하였으며 이는 Vissim과 연동하여 Vissim의 네트워크 상에 설치되어 있는 검지기의 정보를 받아 이를 이용하여 본 연구에서 제시한 알고리즘을 수행하고 신호시간 정보를 다시 Vissim의 Signal controller로 보내주는 것을 수행하였다.

이를 위하여 임의의 네트워크를 구성하여 모의실험 대상 구간으로 선정하였고, 과포화가 발생하는 상황에 대한 일방향 미터링을 실시했을 때의 임계교차로와 상류부 교차로의 대기차량수의 변화 및 차량당 평균지체를 효과척도로 하여 모의실험을 실시하였다. 비교대상 알고리즘은 TOD 신호제어 방식과 서울형신호제어시스템(COSMOS)으로 선정하였다.

1. 모의실험 환경

모의실험을 위하여 구성한 가상 네트워크의 구조는



〈그림 9〉 모의실험 대상 네트워크

〈표 1〉 진입 교통량

교차로번호	진입교통량 (pcu/h)	교차로번호	진입교통량 (pcu/h)
5	400	10	2500
6	1650	11	400
7	400	12	400
8	400	13	400
9	400	14	1650

〈그림 9〉와 같으며 검지기 설치위치는 현재 COSMOS의 정지선 검지기 위치와 같은 위치에 각 차선별로 설치를 하였다.

〈그림 9〉에서 1번 교차로가 도로축의 임계교차로에 해당하며, 모든 도로는 3차선 도로로써 좌회전 전용차로가 한 차선을 차지한다.

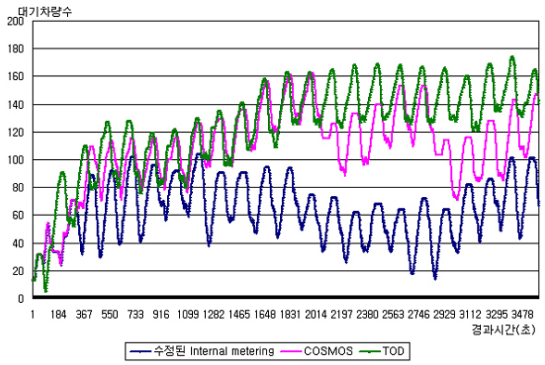
10→5의 교통축을 과포화로 만들기 위해서 10번 교차로에서 진입하는 교통량을 많게 하였고, 1번 교차로가 임계교차로임을 반영하기 위하여, 6번 및 14번 교차로에서의 진입 교통량도 다른 교차로들보다 많게 선정하였다. 각 교차로에서 진입교통량은 〈표 1〉과 같으며 모의실험 횟수는 Seed number를 바꾸어 가면서 5회 실시하여 결과의 평균값을 내었다.

2. 모의실험 결과

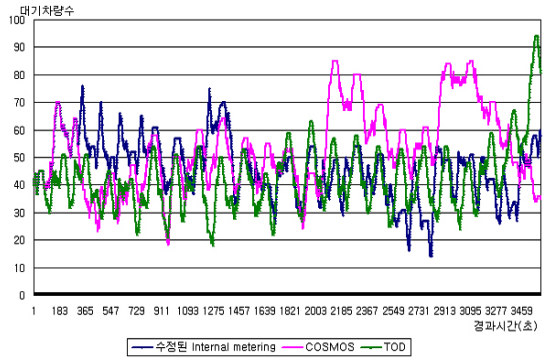
1) 대기행렬 길이의 변화

과포화가 발생하는 방향에 대한 대기차량수의 변화는 〈그림 10, 11, 12〉와 같다.

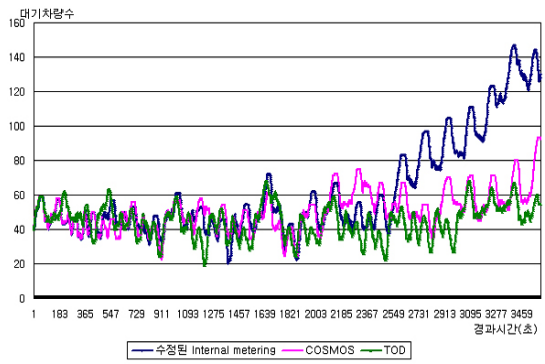
〈그림 10〉은 임계교차로로 진입하는 과포화 링크(2→1)의 대기차량수의 변화를 나타내고 있다. 그림과 표에서는 본 연구에서 제시한 수정된 내부미터링을 적용한 경우 대기차량수의 관리가 지속적으로 이루어져 일정한 정도를 넘지 않는 것으로 나타나고 있다. 이는 대기차량수가 임계대기차량수보다 커지는 경우 상류부 교차로에 내부미터링이 시행되기 때문이다. 즉 모의실험 시작 후 약 300초가 경과된 지점부터 2→1 링크의 대기차량수는



〈그림 10〉 2→1 링크의 대기차량수의 변화



〈그림 11〉 3→2 링크의 대기차량수의 변화



〈그림 12〉 4→3 링크의 대기차량수의 변화

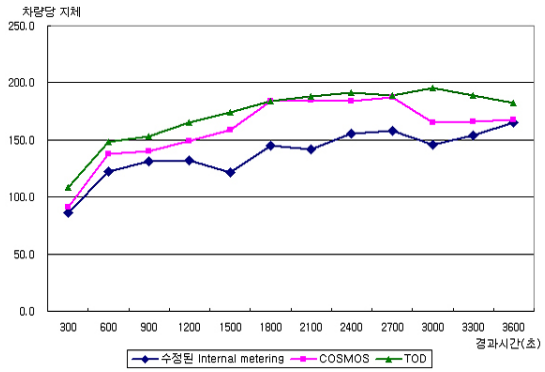
이미 임계대기차량수를 초과하였고 다음 주기부터 2번 교차로에 수정된 내부미터링이 적용되어 대기행렬이 지속적으로 관리된 반면, COSMOS나 TOD의 경우는 지속적으로 대기차량수가 증가하여 모의실험 시작 후 약 1600초가 지난 시점부터 링크의 거의 모든 공간에 대기차량이 서있는 것을 볼 수 있었다. 비록 COSMOS의 경우는 앞막힘 예방 알고리즘이 작동하고 2번 교차로의 다음 주기 신호조정이 이루어져서 대기행렬길이가 조금은 감소하였지만 TOD경우는 대기차량수가 줄어들지 않아서 지속적인 지체 증가의 원인이 되었다.

〈그림 11〉에서는 본 연구에서 제시한 수정된 내부미터링 알고리즘을 적용하였을 때 모의실험 초반부에는 대기차량수가 다른 신호제어 방식보다 많다는 것을 보여주고 있다. 이는 2번 교차로에 수정된 내부미터링이 적용되어 녹색시간이 감소됨에 기인한 것이다. 하지만 모의실험 중반부를 지나서는 COSMOS나 TOD 제어방식을 적용하였을 때 본 연구에서 제시한 알고리즘을 적용했을 때보다 대기차량수가 증가한 것을 볼 수 있다. 이는 수정된 내부미터링 알고리즘을 적용하였을 때 3→2 링크의 대기차량수가 증가함에 따라서 상류부 교차로인 3번 교차로에 다시 수정된 내부미터링이 적용되어 대기행렬길이가 감소하였기 때문이다. COSMOS 알고리즘을 적용하였을 때는 2→1 링크의 대기차량수가 증가함에 따라 앞막힘 예방 알고리즘이 작동하여 녹색시간이 종료되어 대기차량의 유출이 감소되었기 때문에 모의실험 후반부에 대기차량수가 증가하였다. 그 이후 다음 주기의 신호시간 최적화를 통해서 대기차량수가 감소하였지만 다시 하류부에서 앞막힘 예방 알고리즘이 작동하여 다시 대기차량수의 증감이 반복됨을 파악할 수 있다. TOD의 경우는 하류부의 대기차량수가 증가함에 따라 상류부 교차로에서 진입하는 차량들의 흐름에 방해를 주었기 때문에 모의실험 후반부에 대기차량수가 증가하였다.

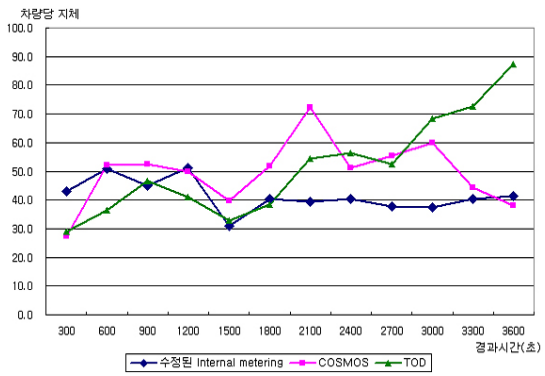
〈그림 12〉는 3→2 링크의 상류부 링크인 4→3 링크의 대기차량수의 변화를 나타낸 것이다. 4→3 링크는 임계교차로로부터 멀리 떨어져 있기 때문에 수정된 내부미터링이나 COSMOS의 앞막힘 예방 알고리즘이 적용이 거의 되지 않아 대기차량수의 변화가 세 알고리즘 모두 비슷한 것으로 나타내고 있다. 다만 본 연구에서 제시한 알고리즘을 적용하였을 때 모의실험 종반부에 3→2 링크의 대기차량수이 증가하자 수정된 내부미터링이 실행됨에 따라 4→3 링크의 대기차량수가 증가하였지만, 본 모의실험 과정에서 4번 교차로는 수정된 내부미터링 대상교차로의 범위에 포함되지 않아 4번 교차로에서 다시 수정된 내부미터링이 일어나지 않았기 때문에 4→3 링크의 대기차량수의 관리가 이루어지지 않았다.

2) 지체의 변화

〈그림 13〉은 1번 교차로(임계교차로)의 경과시간별 지체의 변화를 나타낸 표이다. 수정된 내부미터링을 적용하였을 경우 과포화 접근로(2→1 링크)의 지체가 감



〈그림 13〉 1번 교차로의 차량당 지체의 변화

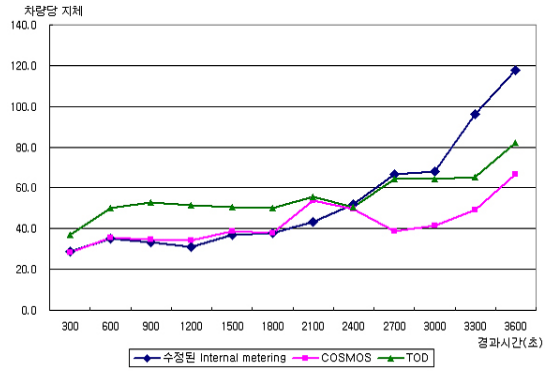


〈그림 14〉 2번 교차로의 차량당 지체의 변화

소함에 따라 교차로 전체의 지체도 감소하였다. 또한 COSMOS의 경우도 TOD와 거의 비슷하기는 하지만 전체적인 차량당 지체값이 TOD보다는 작은 것을 확인할 수 있다.

〈그림 14〉는 2번 교차로의 차량당 지체의 변화를 나타낸 것이다. 본 연구에서 제시한 알고리즘의 경우는 수정된 내부미터링이 적용됨에 따라 2번 교차로의 녹색시간이 감소되어 모의실험 초반에 다른 제어방식보다 지체값이 높게 나타났으나 2번 교차로로 접근하는 링크의 대기차량수의 증가로 인하여 3번 교차로에 미터링을 적용하여 2번 교차로로 접근하는 차량들을 제어하였기 때문에 시간이 경과함에 따라 교차로의 지체는 감소하고 있다. COSMOS와 TOD의 경우는 지체값의 차이를 거의 나타내지 않는다.

〈그림 15〉는 3번 교차로의 차량당 지체값의 변화를 나타낸 것이다. 여기서는 본 연구에서 제시한 알고리즘의 효과가 미미한 것으로 나타나고 있다. 이는 4번 교차로가 미터링 대상범위에 포함되지 않기 때문에 모의실험



〈그림 15〉 3번 교차로의 차량당 지체의 변화

〈표 2〉 네트워크 전체지체(대/초) 및 통과교통량(대/시)

	수정된 internal metering	COSMOS	TOD
네트워크 지체	82.3	89.8	99.1
네트워크 통과교통량	3694	3725	3627

후반부에 3번 교차로로 진입하는 차량들이 증가에 대처하지 못하기 때문이다.

〈표 2〉는 전체 대상네트워크에서 차량들이 경험하는 평균 지체를 나타낸 것이다. 이 값을 살펴보면 세 신호운영방식 가운데 본 연구에서 제시한 알고리즘이 가장 우수한 지표를 나타낸 것으로 나타내고 있다. 반면 COSMOS와 TOD는 본 연구에서 제시한 알고리즘보다 지체가 약 10초, 20초 정도 높은 것으로 나타났다.

Ⅴ. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 과포화 네크워크 상의 지체 최소화를 위하여 내부미터링을 적용한 신호제어 알고리즘에 관하여 제시를 하였다. 이를 위하여 실시간으로 진입하는 교통수요를 검지 및 추적하여 신호제어의 최적화를 위하여 필요한 지체식을 정립하였고, 이 지체식을 이용하고, 내부미터링 방식을 적용하여 과포화 네트워크의 지체를 최소화하기 위한 신호제어 방식을 구체화하였다. 또한 제시한 알고리즘의 효용성을 입증하기 위하여 미시적 교통시뮬레이터인 Vissim을 이용하여 모의실험을 실시하였다. 그 결과 본 연구에서 제시한 신호제어 방식이 다른 신호제어 방식보다 과포화 네트워크상의 대기행렬 관리나 차량당 지체의 감소 측면에서 좀 더 나은 결과를 보여주는 것을 파악하였다. 또한 본 연구의 알고리즘은 현재

서울시에서 사용하고 있는 검지기 시스템 기반으로 구축되었기 때문에 본 연구의 알고리즘을 실제 현장시스템에 적용하는 것에도 무리가 없을 것으로 판단됨에 따라 본 연구의 의미가 있다고 할 수 있다.

하지만 본 연구에는 몇 가지 한계점이 있으며 본 연구를 기반으로 하여 더욱 신뢰성이 있는 과포화 신호제어 방식을 구축하기 위해서는 몇 가지 보완사항이 필요하다. 본 연구에서는 한 교통축을 대상으로 알고리즘을 적용하였으나 실제 이 알고리즘을 사용하기 위해서는 네트워크를 확장하여 알고리즘을 적용하는 문제에 대하여 해결해야 한다. 이와 더불어 본 연구에서 제시한 알고리즘을 적용하기 위한 적정 네트워크 산정에 대해서도 추가 연구가 필요하다. 또한 본 연구에서는 우회전 교통량이 없다고 가정하였으나 실제 네트워크에서는 우회전 차량이 존재하므로 우회전 교통량에 대한 링크 진입 검지 방식의 신뢰성 확보에 대한 문제가 해결되어야 한다. 마지막으로 임계대기행렬의 계산에 있어서 좌회전 베이의 용량을 고려해야 하지만 본 연구에서는 좌회전 베이가 없고 좌회전 전용차선이 존재한다고 가정하였기 때문에 고려를 하지 못하였다. 하지만 실제 좌회전 베이가 존재하는 경우가 많기 때문에 이를 고려하여 임계대기행렬길이를 계산하는 방법이 필요하다.

참고문헌

1. 김영찬(1995), "혼잡도로의 신호제어를 위한 내부미터링 기법에 대한 고찰", 교통안전연구논집, 14, pp.123~135
2. 이승환·이상수·이성호(2003), "서울시 실시간 신호제어시스템(COSMOS)내 내부미터링 제어전략 도입 방안", 대한교통학회지, 21(4), 대한교통학회, pp.79~90
3. 이인원(1993), "서울시 교통수요 관리방안", 서울시정개발연구원.
4. 하동익(1997), "신호교차로 지체체계 분석방법론 연구", 대한교통학회지, 15(2), 대한교통학회, pp.83~103
5. Francois Dion·Hesham Rakha·Youn-Soo Kang(2004), "Compar- ison of delay estimates at under-saturated and over-saturated pre-timed signalized intersections", Transportation Research Part B 38: pp.99~122
6. Hurdle, V. F.(1984), "Signalized Intersection Delay Models - A Primer for the Uninitiated", Transportation Research Record No.971: pp.96~105
7. McShane, W.R.·Roess, R.P.(2004), Traffic Engineering, Prentice hall.
8. Teply, S.(1989), "Accuracy of Delay Surveys at Signalized Intersection", Transportation Research Record 1225: pp.24~32
9. TRANSYT-7F Users Guide(1998), University of Florida.
10. Wann-Ming Wey·R. Jayakrishnan(1999), "Network Traffic Signal Optimization Formulation with Embedded Platoon Dispersion Simulation", Transportation Research Record 1683: pp.150~159

♧ 주 작 성 자 : 송명균
♧ 교 신 저 자 : 송명균
♧ 논문투고일 : 2007. 5. 19
♧ 논문심사일 : 2007. 8. 7 (1차)
2007. 9. 18 (2차)
♧ 심사판정일 : 2007. 9. 18
♧ 반론접수기한 : 2008. 4. 30