

과포화 간선축을 위한 실시간 내부미터링 제어전략

Real-Time Internal Metering Policy for Oversaturated Arterials

이성호 (아주대, 박사과정) 이승환 (아주대, 교수) 이상수 (아주대, 조교수)

Key Words : 내부미터링, COSMOS, 대기행렬 관리, 과포화 제어, 축 제어, 앞막힘 현상

목 차

- I. 서론
- II. COSMOS 과포화제어전략 연구
 - 1. 현황분석
 - 2. 내부미터링 도입 필요성
- III. 내부미터링 관련 문헌¹⁾ 연구
 - 1. 국외 연구 사례
- 2. 국내 연구사례
- IV. COSMOS내의 실시간내부미터링제어 절차
- V. 실시간 내부미터링 효과분석
 - 1. 대상 지역 현황
 - 2. 시뮬레이터 입력자료
- VI. 결 론

I. 서 론

서울시는 심화되는 교통난 해소의 일환으로 '91년부터 '93년까지 현장의 교통상황에 따라 자동으로 신호시간을 산출해 주는 이른바 한국형 실시간 신호제어 시스템(이하 'COSMOS'라 함) 개발의 개발을 완료하고 '93년부터 '95년까지 현장시험과 시스템 검증을 거쳐 '97년 강남, 서초 일원 6개 지점에 개발시스템을 설치하여 시범운영을 실시한 바 있다. 이후 '99년부터 본격적으로 운영지역을 확대하여 현재 강남지역, 제물포로, 도봉로축 등 총 422개 교차로를 대상으로 운영을 하고 있으며, 향후 더욱 더 운영지역을 확대할 계획을 가지고 있다. 또한 '99년부터 매년 시스템 안정화를 위한 기능개선 사업을 꾸준히 수행 중에 있다.

그러나 매년 늘어나는 교통수요에 인해, 특히 과포화 교통상황의 해결능력이 상당히 저하되어, 보다 적절한 과포화 제어전략이 요구되고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 COSMOS의 기능개선 과제로 진행이 된 과포화시 제어전략의 하나로서, "실시간 내부미터링 제어전략(Real-Time Internal Metering Policy)"의 구현 방향을 현재 운영되고 있는 COSMOS 시스템 환경을 고려하여 제시하고자 한다.

II. COSMOS 과포화제어전략 연구

1. 현황분석

서울시 COSMOS의 과포화 제어전략 및 알고리즘은 다음의 <표 1>에 제시된 것과 같다.

1) KLD & TTI, "Internal Metering Policy for Oversaturated Networks", Vol.1, 1992.

<표 1> COSMOS 과포화 제어전략 종류/제어방법

제어전략	개선년도	제어방법
1. 녹색시간 산정 알고리즘	1999	(1) 유출부와 유입부 검지기 상태에 따른 녹색시간 보정 (2) 대기길이에 의한 과포화시 녹색시간보정
2. 앞막힘예방제어	1999	(1) 최소녹색시간 유지 (2) 최소녹색시간 무시
3. 대기길이 기반 녹색시간 배분 알고리즘	2000	저포화시는 포화도(DS)를 사용하며, 과포화시는 Queue length를 사용할 수 있는 주기단위포화도(CDS) 수정식 사용
4. Equity offset	2000	적정 형명 윗셋 값 산출

2. 내부미터링 도입 필요성

서울시 COSMOS 과포화 제어알고리즘은 대기행렬이 과포화기준 대기행렬길이(DS=1) 보다 클 경우 하류부의 녹색현시를 증가시켜줌으로서 방출량을 늘려주는 알고리즘(녹색시간 산정알고리즘, 대기행렬 기반 녹색시간 배분 알고리즘)과 앞막힘검지기를 통하여 대기행렬의 성장이 앞막힘현상을 야기시킬 것으로 예상되는 경우 상류부 녹색현시를 줄이거나 윗셋등을 고려하여 상류부유입교통량을 차단하는 알고리즘(앞막힘 예방 알고리즘, Equity offset)이다. 이는 중요교차로(이하 "C.I.")위주의 과포화 제어 알고리즘으로 비중요교차로(이하 "M.I.")를 포함한 간선축을 고려한 보다 적극적인으로 대기행렬길이의 형성 및 성장을 관리하는 알고리즘이 요구된다. 고로 과포화기준대기행렬길이 시점부터 대기행렬의 성장을 관리하여 일정 대기행렬길이를 유지하도록 상류부 및 하류부 녹색현시를 미터링하는 내부미터링 전략을 활용하는 것이 바람직하다. 또한 내부미터링은 대기행렬길이를 일정 길이로 관리함으로써 '링크 저장용량(Storage)의 활용 극대화'를 꾀할 수 있으며, 주요 간선축에 대한 '축 제어전략'으로도 활용할 수 있다.

III. 내부미터링 관련 문헌2) 연구

1. 국외 연구 사례

내부미터링에 관한 기본 알고리즘은 1992년 발표된 NCHRP 3-38(3)에서 IMPOST(Internal Metering Policy to Optimize Signal Timing)라고 명명된 제어 알고리즘이 최초이다. 이후 1997년에 IMPOST with Left Turn(좌회전 현시 고려) 연구와 최근 2000년에 발표된 실시간 제어 알고리즘인 RT/IMPOST(Real-Time/ IMPOST)가 있다. 아래는 NCHRP 3-38(3)에 제시된 내부미터링의 제어목적 및 목표와 기본제어 개념을 기술하였다.

1) 제어 목적 및 목표

- 제어목적: "과포화 상태에서 도로시스템의 수요 관리 및 생산성 최대화"를 위한 대기행렬길이를 관리하는 것.

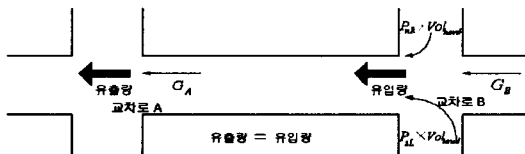
• 제어목표

- 앞막힘현상 방지 및 그 영향(예: 빈도수 및 범위)의 최소화를 위한 대기행렬 성장 제어
- 가용 서비스율(Service rate) 최대화
- 기존 도로 저장용량(Storage)의 효율적 사용
- 교차 교통류에 대한 형평성있는 서비스 제공

2) 제어전략의 기본 개념

• 녹색 시간 제어

링크의 하류부 유출량과 상류부 유입량이 같도록 상류부의 녹색현시를 조절하여 유입 차량 수요를 미터링을 한다. 아래 <그림 1>은 이를 도시하고 있다.



<그림 1> 녹색 현시 제어 개념도

• 윌셋 제어

하류부 정지선에서의 서비스율 최대화 및 앞막힘 현상이 일어나지 않는 범위 내에서의 유입차량군 압축을 통한 링크 저장공간의 효율적 사용이 가능하다.

2. 국내 연구사례

서울시 2002년 실시간 신호제어시스템 기능개선 과제 중에서 "COSMOS 환경을 고려한 내부미터링 제어전략"에 관한 연구가 발주 되어 총 3단계 연구 중에서 1단계 연구를 수행하였으며, 그 결과 내부미터링 제어전략을 위한 제어 범위 설정 원칙 및 검지기체계 및 제어기 체계 등에 관한 COSMOS 기본 적용환경을 정의하였다. 아래는 1단계 연구를 요약한 것이다.

1) 제어 범위 설정 원칙

- o 기존 COSMOS 시스템의 S.A.³⁾ 유지함

2) KLD & TTI, "Internal Metering Policy for Oversaturated Networks", Vol.1, 1992.

- o 별도의 내부미터링 제어구간을 사전에 설정함
- o 일직선 형태의 교통축을 대상으로 함
- o 내부미터링 제어구간에서 제외된 교차로들은 기존 COSMOS 알고리즘을 그대로 적용함
- o 하나의 내부미터링 제어구간은 주요 축상 C.I.부터 다음 C.I.전까지로 설정함

2) 검지기 체계

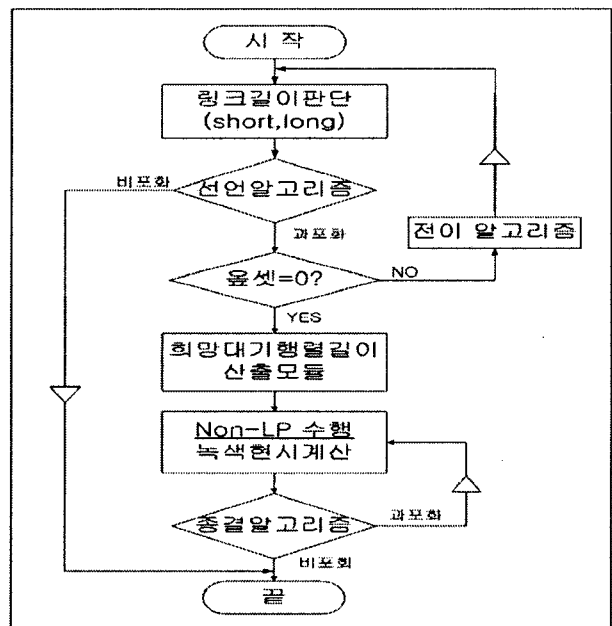
- o C.I - M.I. : 기존 COSMOS 체계 유지
- o M.I. - M.I. : 대기행렬 검지기 추가 설치(필수)
- o 만일 검지기가 설치 불가할 경우, 사전에 미리 현장조사를 통한 패턴값 적용.

3) 제어기 체계

- o 적용상 H/W적인 문제는 없으나, 우회전 및 Mid-block 검지기가 설치될 경우 L/C 에서 사용가능한 32개의 채널 외 추가 채널 설치 요구됨.

IV. COSMOS내의 실시간내부미터링제어 절차

본 연구를 통해 산출된 COSMOS 내에서의 실시간 내부미터링 적용 절차는 다음의 <그림 2>와 같다.



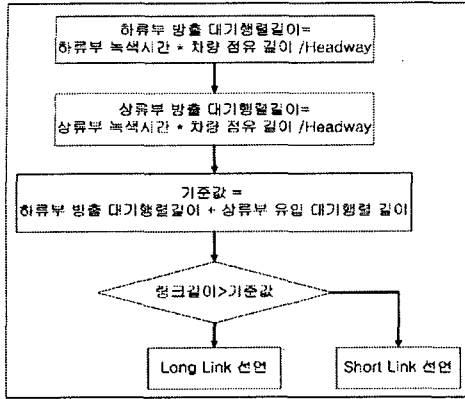
<그림 2> COSMOS 시스템의 내부미터링 적용절차

[1 단계] 링크길이 판단

본 연구에서 제시한 실시간 내부미터링 제어는 COSMOS 통신주기를 고려하여 내부미터링 제어 시 윌셋을 동시윌셋(Simultaneous Offset)을 사용함으로써 링크길이가 긴 경우에는 문제가 없음을 확인하였으나, 짧은 링크의 경우에 대해서는 특별한 관리전략이 필요하다는 판단에 따라 <그림 3>과 같이

3) S.A.(SubArea)는 COSMOS내의 중요교차로(C.I.)와 비중요교차로(M.I.)들의 그룹으로 하나의 제어 단위이다.

긴 링크와 짧은 링크를 구별하고, 짧은 링크에 대해서는 내부 미터링 선언 알고리즘과 종결 알고리즘에 특별 관리전략을 추가하였다.



<그림 3> 링크길이 판단 알고리즘

[2 단계] 선언 알고리즘

내부미터링 제어 전략은 COSMOS 시스템 내에 과포화 모듈 중 하나이다. 따라서 COSMOS 시스템 내에서 과포화 상황과 비포화 상황을 판별하여 내부미터링을 선언하고 종결해야 한다. 선언 및 종결 기준에 대한 주요 변수로 대기행렬길이를 사용한다.

- 선언 기준 대기행렬길이: 대기행렬길이 예측 값이 한 주기 내에 빠져나갈 수 있는 대기행렬길이 보다 큰 값

$$IMP_{start} = \alpha \cdot G_A \cdot L_V / t_{headway}$$

IMP_{start} : 내부미터링 선언 기준 대기행렬길이(m)

α : 운영자 가중치 값

(긴 링크 디폴트: 1.5, 적용가능 범위: 1.0 이상)

(짧은 링크 디폴트: 1.0, 적용가능 범위: 1.0 이상)

G_A : 미터링이 선언 시점에서 TOD에 저장되어있는 하류부 녹색시간 (sec)

L_V : 정지해 있는 대기행렬내의 평균 유효차량길이 (m)

$t_{headway}$: 직진 차량의 교차로 통과 차두시간 (sec/veh)

1) 긴 링크(Long Link)의 경우

현재의 대기행렬길이가 선언 기준 대기행렬길이보다 크고, 과거 2주기 대기행렬길이가 모두 한주기 내에 빠져나갈 수 있는 대기행렬길이보다 큰 경우, 해당 링크를 포함한 상류부 모든 링크를 내부미터링 제어 대상 링크로 선언한다.

2) 짧은 링크(Short Link)의 경우

현재의 대기행렬길이가 선언 기준 대기행렬길이보다 크고, 과거 1주기 대기행렬길이가 한주기 내에 빠져나갈 수 있는 대기행렬길이보다 큰 경우, 해당 링크를 포함한 상류부 모든 링

크를 내부미터링 제어 대상 링크로 선언한다.

[3 단계] 전이 알고리즘

미터링으로 선언된 모든 교차로들간의 상대유크셋이 '0'임을 확인하고, 아닌 경우에는 목표 유크셋을 '0'으로 설정하고 3주기 내 전이하도록 설정한다.

전이 과정중의 신호현시 값은 긴 링크의 경우는 현재 COSMOS 현시를 적용하고 짧은 링크의 경우는 상류부 녹색현시는 하류부 녹색현시에 맞추어 적용한다.

미터링이 선언된 모든 교차로들간의 상대유크셋이 '0'인 경우 다음 [4단계]를 실행한다.

[4 단계] 희망 대기행렬길이 산출 모듈

희망 대기행렬길이는 앞막힘 현상을 예방하고, 링크의 Storage를 최대한 활용할 수 있는 하류부 녹색시간이 시작할 때의 정지 대기행렬길이이다.

- 희망 대기행렬길이 산정식

$$r_0 = \frac{w}{(w + v)} \left[\frac{v(\mu - w)}{\mu \cdot w} (L - SafeBuffer) + L \right]$$

여기서,

r_0 : 관리하고자하는 희망대기행렬길이(m)

L : 정지해 있는 대기행렬내의 평균 유효차량길이 (m/veh)

μ : 대기행렬의 방출 충격과 상류부에 전달되는 속도(m/s)

v : 상류부 직진 녹색시간에 의해서 유입되는 차량군 내 선두차량의 평균 속도(m/s)

w : 상류부 유입 차량군이 하류부의 정지 대기행렬로 인한 충격과 속도 (m/s)

L : 하류부 정지선에서 상류부 교차로까지의 링크 길이 (m)

$t_{headway}$: 직진 차량의 교차로 통과 차두시간 (sec/veh)

$SafeBuffer$: 앞막힘 현상을 안전하게 예방하기 위한 여유 저장 공간이다. (m)

[5 단계] 최적 녹색현시 산출

현재의 대기행렬길이를 [4단계]에서 제시한 희망 대기행렬길이로 제어하기 위한 상·하류부 녹색시간을 산출한다.

한국형 실시간 내부미터링 제어전략은 제어구간 내 모든 링크의 대기행렬길이를 희망 대기행렬길이로 관리하기 위하여 아래 목적함수를 만족시키는 비선형 모형(Non-LP)을 이용하여 상·하류부 녹색현시를 산출한다.

- 목적함수

$$Min w_i \sum (r_{o,i} - \hat{r}_{o,i})^2 + w_i \sum (\bar{r}_{o,i} - \hat{r}_{o,i})^2$$

- 제약식

$$r_{o,i} = [r_{o,i}]_{est} + \Delta r_{o,i}$$

$$G_{B,i} \geq [G_{B,i}]_{\min}$$

$$G_{B,i} \leq [G_{B,i}]_{\max}$$

$\widehat{r}_{o,i}$: 희망 대기행렬길이

$r_{o,i}$: 현재의 NLP에 의해서 나오는 G_B, G_A 에 의해서 형성되는 다음 주기 예측 대기행렬길이

$|r_{o,i}|_{est}$: 현 주기에서 실측한 검지기 자료에 의한 대기행렬길이 예측 값

$\Delta r_{o,i}$: 다음 주기 대기행렬길이비의 변화량. 이는 현재의 NLP에 의해서 산출되는 G_B, G_A 에 의해 영향을 받는 값임.

w_i (가중치 값) : 현재 최적 대기행렬길이비와 현재의 대기행렬 예측 길이비의 비율이 0.6~1.3 으로 적다면, 가중치 값을 1로 가중치를 주지 않고, 만약 현재의 값이 최적 값과 차이가 많이 있다면, 그 비율만큼 가중치를 더해준다.

$$If \{ 0.6 < \frac{[r_{o,i}]_{est}}{\widehat{r}_{o,i}} < 1.3 \} then \{ w_i = 1 \}$$

$$else \{ w_i = 1 + \frac{[r_{o,i}]_{est}}{\widehat{r}_{o,i}} \}$$

G_A : 하류부 교차로의 녹색시간 (sec)

G_B : 상류부 교차로의 녹색시간 (sec)

$[G_A]_{\min}$: 하류부 교차로의 최소 녹색시간 (sec)

$[G_B]_{\min}$: 상류부 교차로의 최소 녹색시간 (sec)

[6 단계] 종결 알고리즘

선언된 내부미터링을 안정적으로 종결하기 위해서는 선언기준 대기행렬길이보다 적은 기준으로 종결기준 대기행렬길이를 제시하여야 한다. 이를 위한 종결 기준 대기행렬길이는 아래 식에 제시를 하였다. 또한 짧은 링크의 경우는 자체적으로 종결을 할 수 없으며 상류부 링크가 내부미터링을 종결할 때 함께 종결하도록 한다.

1) 긴(Long Link)의 경우

미터링 종결 기준 대기행렬길이: 대기행렬길이 예측 값이 한 주기 내에 빠져나갈 수 있는 대기행렬길이 보다 작은 값

$$IMP_{end} = \beta \cdot G_A \cdot L_V / t_{headway}$$

β : 운영자 가중치 값 (디폴트: 0.8, 적용가능 범위: 1.0 이하)

G_A : 내부미터링이 선언 시점에서 TOD에 저장되어있는 하류부 녹색시간 (sec)

L_V : 정지해 있는 대기행렬내의 평균 유효차량길이 (m)

$t_{headway}$: 직진 차량의 교차로 통과 차두시간 (sec/veh)

현재의 대기행렬길이가 위에서 제시한 내부미터링 종결기준 대기행렬길이보다 적고 이전 주기 대기행렬길이가 선언기준 대기행렬길이보다 적은 경우 내부미터링을 종결한다.

2) 짧은 링크(Short Link)의 경우

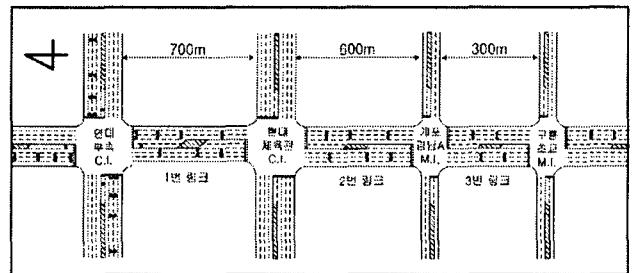
짧은 링크는 독립적으로 내부미터링 종결을 선언할 수 없으며, 이는 상류부 링크의 내부미터링 종결 선언시 함께 종결

V. 실시간 내부미터링 효과분석

1. 대상 지역 현황

1) 대상지역 기하구조 현황

<그림 4>는 본 고에서 제시하고 있는 실시간 내부미터링의 실내분석 대상지역의 기하구조 현황이다. 연대부속병원(7번), 현대체육관(20번), 개포경남(34번), 구룡초교(35번) 교차로들을 대상으로 하였다.



<그림 4> 대상지역의 기하구조

2) 대상지역 선정이유

본 시뮬레이션 대상 선정지역은 언주로에 있는 일직선상의 연대부속병원(7번), 현대체육관(20번), 개포경남(34번), 구룡초교(35번) 교차로들의 남북방향을 하나의 교통축으로 하여 내부미터링 대상 지역을 선정하였다.

현재 이 지점은 대기행렬의 성장 등으로 인하여 앞막힘현상이 아침 첨두시간에 시작하여 오후 첨두시까지 과포화상태가 지속되는 구간이며 이로 인한 앞막힘현상의 지속적인 유지로 인하여 주변 네트워크에 심각한 문제를 야기하는 구간이다. 따라서 하나의 내부미터링 대상으로 그룹을 묶어 내부미터링 효과분석을 실시하였다.

3)시뮬레이션 시나리오

시뮬레이션 시나리오는 과포화상태에서 실시간 내부미터링 실시여부에 따른 상황을 구분하여 분석하였다.

다음 <표 2>는 시뮬레이션 시나리오별 상황을 정리한 것이다.

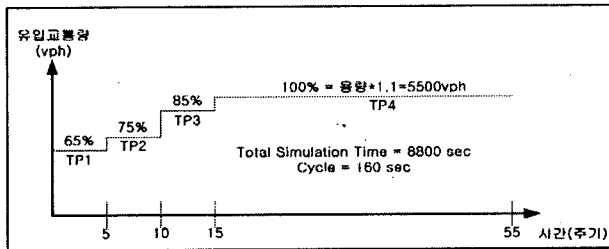
<표 2> 시뮬레이션 시나리오

구분	설명
COSMOS시뮬레이션 (미터링 전)	실제 신호운영자료를 바탕으로 한 과포화 상황 구현
내부미터링 시뮬레이션 (미터링 후)	위의 COSMOS시뮬레이션 상황을 바탕으로 한국형 실시간 내부미터링 적용

2. 시뮬레이터 입력자료

1) 시간에 따른 유입교통량 변화

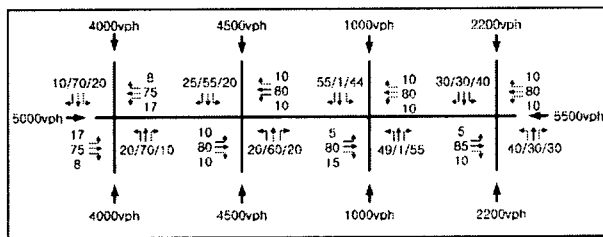
<그림 5>는 시뮬레이터 내에서 과포화상황을 재현하기 위하여 사용된 유입교통량의 시간에 따른 변화를 나타낸 것이다. 총 55주기(8800초)를 시뮬레이션 하였고 운영된 신호현시를 기반으로 계산한 각 교차로의 용량의 1.1배를 목표로 단계적으로 과포화상황을 재현하였다.



<그림 5> 시뮬레이터 내 시간에 따른 유입교통량 변화

2) 회전비율

<그림 6>은 시뮬레이터 내에 입력한 회전비율을 나타낸 것이다.



<그림 6> 시뮬레이터 내 회전비율 및 유입교통량

3. 결과분석

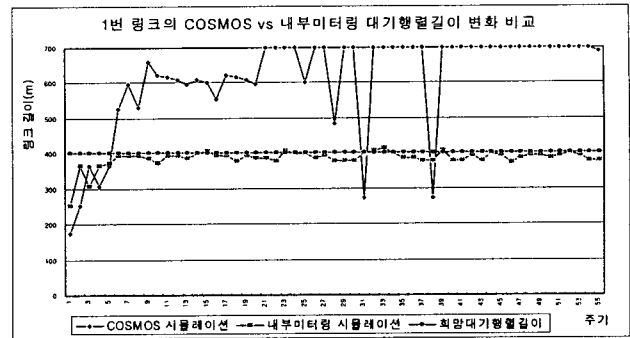
1) 대기행렬 변화

아래의 <그림 7>, <그림 8>, <그림 9>는 내부미터링 전/후의 시간에 따른 대기행렬길이를 나타내고 있다.

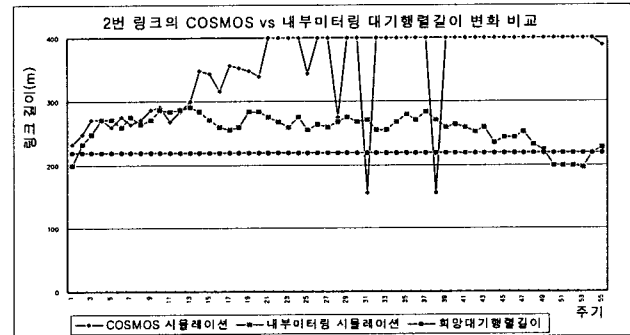
<그림 7>에서 내부미터링을 수행하지 않은 경우에는 22주기 후에 앞막힘현상이 나타나서 지속적인 혼잡이 일어나고 있다. 반면 내부미터링을 실시한 결과 대기행렬길이가 본 모형에서 제시하고 있는 희망 대기행렬길이인 400m에서 안정적으로 유지가 되고 있다. <그림 8>, <그림 9>의 링크구간에서도 <그림 7>과 유사한 결론을 얻을 수 있다.

이를 통하여 COSMOS 운영지역 중 앞막힘현상이 빈번히 일

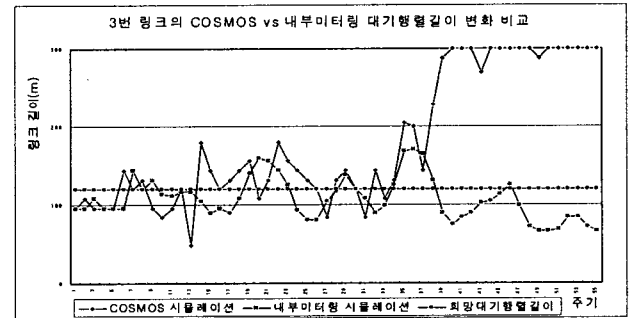
어나고 지속적인 혼잡구간에서 본 연구에서 제시한 내부미터링을 적용하여 대기행렬길이를 적절하게 관리할 수 있음을 확인하였다.



<그림 7> 연대부속병원~현대체육관 구간 내부미터링 전/후 대기행렬변화



<그림 8> 현대체육관~개포경남 구간 내부미터링 전/후 대기행렬변화



<그림 9> 개포경남~구룡초교 구간 내부미터링 전/후 대기행렬변화

2) 효과척도(MOE) 비교

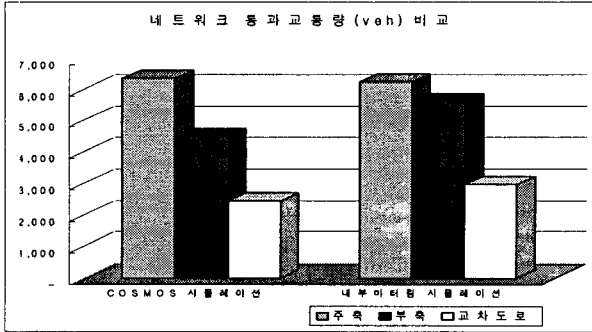
다음 <그림 10>, <그림 11>은 대상 네트워크를 주축과 부축, 교차도로축으로 구분하여 통과교통량과 개별차량 지체를 비교한 것이다.

<그림 10>에서 보면 통과교통량은 부축과 교차도로 축에서 각각 1,110대와 526대가 내부미터링 제어 전보다 교통량이 증가하였고 주축에서는 오히려 110대가 감소하였다.

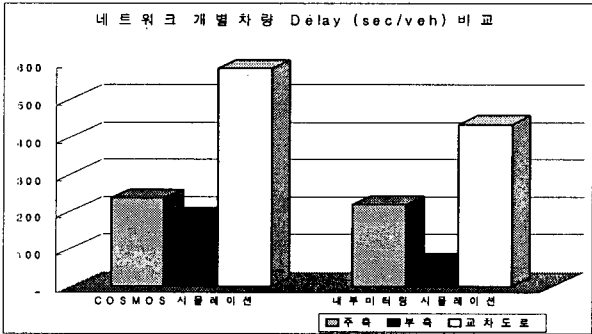
이는 내부미터링 시작과 동시에 대기행렬길이를 관리함으로써 대기행렬길이를 희망 대기행렬길이로 관리함에 따라 상류부의 직진현시가 미터링됨으로써 남는 현시시간을 부도로와 교차도로에 배분을 하였기 때문에 부도로와 교차도로의

통과교통량이 많아지게 되었다.

<그림 11>은 내부미터링 제어 전/후의 개별차량지체를 나타내고 있다. 주축의 경우 차량당 17초, 부축의 경우는 차량당 124초, 교차도로축은 차량당 148초가 줄어들었다.



<그림 10> 내부미터링 제어 전/후 통과교통량 비교



<그림 11> 내부미터링 제어 전/후 개별차량지체 비교

VI. 결 론

본 연구를 수행한 결과를 요약해 보면 다음과 같다.

- COSMOS 시스템의 통신주기 및 운영지역의 환경 등을 고려한 한국형 실시간 내부미터링을 위한 제어 절차 및 알고리즘을 개발하였다.

- 이를 시뮬레이터로 분석 해 본 결과 주축에 대해서는 안정적인 대기행렬관리로 인하여 앞막힘현상을 예방하여 부축과 교차도로는 주축현시에서 내부미터링 제어에 의하여 배분되지 못하는 현시를 배분받아 더 많은 교통량을 통과시키고 지체도 감소되었다.

- 또한 내부미터링 제어를 통하여 주 방향의 녹색현시가 줄어들었음에도 불구하고 통과교통량에 큰 차이가 없는 것은 과포화시에 하류부 앞막힘 현상등으로 인하여 상류부 교차로에서 교통량방출이 원활하게 이루어지지 않아서이다.

- 따라서 과포화시에는 과포화 이동류에 많은 양의 현시를 배분하는 것보다 상/하류부의 녹색시간과 그 사이의 대기행렬길이를 종합적으로 판단하여 적절한 현시를 결정해주는 내부미터링이 효과적인 제어를 하는 것을 확인하였다.

참고문헌

1. 서울시 지방 경찰청(1991), "서울시 교통신호제어 시스템 개발 연구 용역 1차년도 결과 보고서"
2. 서울시 지방 경찰청(1999), "신신호시스템기능개선용역"
3. 서울시 지방 경찰청(2000), "2000년 신신호시스템 기능개선"
4. NCHRP Report 3-38(3)(1992), "Internal Metering Policy for Oversaturation Networks"
5. McSHANE W. R., R. P. Roess and E. S. Prassas(1997), "Traffic Engineering", New Jersey, Prentice-Hall
6. 최병국(1997), "Adaptive signal control for Oversaturated Arterials", Ph. D., Dissertation, Polytechnic University.
7. 장진일(2000), "Formulation of a Real-time control policy for Oversaturated Arterials" Ph. D., Dissertation, Polytechnic University.
8. Abu-Lebdeh G. and R. F. Benekohal(1997), "Development of Traffic Control and Queue Management Procedures for Oversaturated Arterial", TRR 1603