

과포화 교통축에서의 비공통주기기반 신호운영방법론 개발

Development of Signal Operation Methodology

Based on Cycle Free Signal Timing in Oversaturated Urban Arterials

김 수 희

(아주대 교통연구센터 수석연구원)

이 철 기

(아주대 ITS대학원 교수)

오 영 태

(아주대 환경건설교통공학부 교수)

정 준 하

(도로교통안전관리공단 책임연구원)

목 차

I. 서론	III. 비공통주기기반의 신호운영방법론 개발
1. 연구의 배경 및 목적	1. 개발 방법론
2. 연구의 방법 및 범위	2. 모의실험 시나리오 구성
II. 이론적 고찰	3. 모의실험 수행 및 결과 분석
1. 과포화 신호제어전략	4. 신호운영 DB구축 방법론
2. 비공통주기기반의 신호제어 연구	5. 시스템 적용 방법론
3. 기존연구와의 비교	IV. 현장적용성 평가
	V. 결론 및 향후연구

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

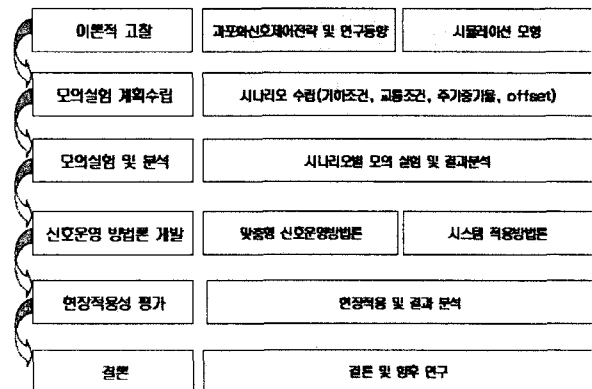
기존의 과포화 신호제어는 외국에서 이미 활발히 진행되어 왔으며, 링크길이기반의 대기행렬길이 유지 및 관리를 수행함으로써 주요축 연동 극대화 및 링크내 저장용량 극대화를 목표로 하는 내부미터링기법(IMP : Internal Metering Policy)의 연구가 수행되고 있다. 국내에서는 서울시 실시간 신호제어시스템(COSMOS)을 개발하여, 제어단위(SA)내 공통주기를 사용하고, 포화도(DS)가 1.0을 넘는 상태부터 추가 녹색시간을 부여하는 신호제어방식을 사용하고 있다. 또한, 교통축제어정책의 일환으로써, 과포화 제어전략의 하나인 “내부미터링 제어전략(IMP)을 도입하기 위한 기초적인 연구를 수행하였으며, 실시간 신호제어시스템(COSMOS)의 특성상 대기행렬검지기설치 등의 문제로 인해 적용되지 못한다. 이에, 정체근원 지점을 정확히 알고 있을 경우, 공통주기에서 벗어나 교차로의 주기를 변동시켜 상류부의 지체를 해소시키는 전략을 체계적으로 정립, 제시할 필요가 있다.

따라서, 본 연구의 목적은 과포화시 교통축에서의 현장맞춤형 비공통주기기반의 실시간신호제어를 위한 신호운영방법론을 개발하는 것이다.

2. 연구의 방법 및 범위

본 연구는 도시부 도로 교통축 과포화시, 과포화

진행 상황에 따라 일시적으로 중요교차로(CI)의 주기를 증가시켜, 중요교차로(CI)와 인접 비중요교차로(MI)와의 교통축의 주방향 현시 g/C(유효녹색시간/신호주기)부족분의 보완 및 주기증가로 인한 손실시간의 감소효과를 통해, 중요교차로(CI)의 용량을 증대시키며, 중요교차로(CI)의 주기증가를 통해 파급되는 인접교차로와의 오프셋(Offset)의 파괴영향을 최소화 하는 신호운영방법론을 개발하는 것이다.



<그림 1> 연구수행 절차도

주요 연구 내용으로는, 과포화시 신호제어전략에 대한 기존 연구의 검토를 수행하고, 현장상황을 최대한 반영하기 위해서, 현장 기하 및 교통, 신호조건을 토대로 다수의 실내 모의실험 시나리오를 작성하고 TRANSYT-7F, CORSIM를 이용하여 모의실험을 수행한 후, 주기증가로 인한 교통축 용량증대효과 및 교통류 특성을 파악하고, 각 시나리오별 최적주기증

가을선정 및 주기증가의 시종점 기준을 제시한다.

또한, 모의실험 결과분석을 토대로, 제어대상구간의 기하 및 교통, 신호조건이 반영된 현장 맞춤형 신호운영을 위한 신호데이터베이스 구축방법 및 시스템 적용방법을 개발하고, 개발된 비공통주기기반의 방법론의 효과 비교를 위하여, 과포화 발생이 잦은 교통축을 선정하고 현장 적용성 평가를 통해 개발 방법론을 평가한다.

II. 이론적 고찰

1. 과포화 신호제어전략

1) 내부미터링기법(Internal Metering Policy)

내부미터링(Internal Metering) 제어전략은 과포화시 신호제어 전략의 하나인 “생산성 최대화”와 “수요관리”라는 2가지 제어목적은 만족시키도록 설계되어진다. “수요관리”는 상류부 교차로의 녹색현시 제어를 통해서 가능해지며, 이때의 녹색현시는 과다한 수요로 인한 앞막힘을 예방하고 안정적인 대기행렬 형성 및 성장 관리를 위해서 하류부의 유출 교통량만큼만 상류부 유입교통량을 허용하게끔 산출한다.

국내 연구사례로는 이승환, 이상수, 이성호(2003)가 희망대기행렬산출을 통하여 한국형 내부미터링 제어 전략 개발을 위한 연구를 수행하여, 통과교통량 평균 7%, 개별차량지체 평균 27.8% 개선효과를 나타냈다.

국내 기존 신호제어시스템에는 비중요교차로(MI)에 대기행렬길이를 계측할 검지기의 설치가 되어 있지 않기 때문에, 내부미터링 제어기법은 현재까지 시스템에 적용하지는 않고 있다.

외국에서는 실제 개발단계를 거쳐 적용단계에 이르고 있다. 미국에서 IMPOST(IMPOST : Internal Metering Policy to Optimize Signal Timing 이하 “IMPOST”라 함)라고 명명된 제어 알고리즘이 최초로 연구되었으며, 이후 Lieberman, Chang(2006)은 MILP로 최적의 오프셋(Offset)과 대기행렬 산출하고 NLP로 매주기마다 녹색현시를 보정하고, Network내 간선축을 구분하고 등급을 지정 한 후, 우선제어 간선축을 선정하며 Network 전체에 대한 신호시간 계획을 수행하였다.

2) COSMOS 과포화 신호제어전략

현재 COSMOS는 녹색시간 산정 알고리즘, 앞막힘 예방제어, 대기길이 기반 녹색시간배분 알고리즘, 형평오프셋(Equity offset)의 4가지 종류의 과포화 제어전략이 있으며, 각 제어전략 알고리즘에 대한 S/W 구현 및 운영이 실시되고 있다.

2. 비공통주기기반의 신호제어 연구

이영인, 임재승, 윤경섭(2000)은 대기차량 및 지체도 최소화를 위한 주기변동기반 동적 신호시간 결정

모형을 개발하는 연구를 수행하였는데, 이 연구에서는 v/c (volume/capacity 이하 “ v/c ”라함) 0.7과 1.0의 상황에서의 대기차량 예측모형을 기초로 다음 주기에서의 대기차량을 예측한 후, 유전자 알고리즘 적용 신호시간 및 이동류별 지체시간을 산정했다.

또한, 주기시간을 교차로마다 각각 다르게 최적화, 주기종료시점 차이를 적합도 함수를 통해 주기마다 오프셋(Offset)의 보정을 수행하였으며, TRANSYT-7F 나 PASSER-II에 의한 방식과 비교, 통과 교통량, 지체시간 개선효과를 도출하였다. 상기 모형은 차량군이 생성되면 시간이 지나도 차량군의 형태가 유지된다고 가정하였는데, 차량군 분산을 고려해야하고, 시간에 따른 도착율의 변화를 통해 교통상황에 능동적으로 대처할 수 있는지에 대한 검증이 필요하다고 제시하고 있다.

이영인, 최완석(2002)은 대기차량길이와 평균지체도를 최소화하는 이중목적 변동주기 기반의 동적 신호시간 결정모형을 개발하고 유전자 알고리즘을 이용하여 신호 최적화 모형을 구축하고자 하였으며, 2개의 목적함수를 동시에 최적화 하는 동적신호시간 결정을 위한 것으로 목적함수는 대기차량길이 최소화, 지체도 최소화로 구성하였다. 상기 연구는 비포화 상태에서 정주기식보다 결과는 좋았지만 완전하게 대기차량을 소거하지 못하였고 주기 및 현시길이도 전체적으로 교통량에 비해 큰 값을 최적값으로 산출하였다. 실시간 신호 최적화에 유용하게 적용될 수 있는 주기 변동기반 및 다중 목적 신호최적화 모형의 적용 가능성을 보여주었다.

3. 기존연구와의 비교

1) 내부미터링기법(Internal Metering Policy)

본 연구는 중요교차로(CI)의 주기증가에 의한 교통축 주요 정체 교차로의 용량을 일시적으로 증가시켜 정체를 해소하는 방안으로써, 상류부 교통수요를 억제하여 하류부 교차로의 제어를 수행하는 방식에서 탈피하였다. 또한, 중요교차로(CI)의 대기행렬을 기반으로 v/c 를 유추하며, 이러한 v/c 기준을 통하여 주기증가의 시/종점을 선택하므로, 별도의 비중요교차로(MI)에 추가적인 대기행렬 검지기의 설치가 필요 없어, 기존의 COSMOS에 적용하기에도 용이하다.

2) COSMOS 과포화제어전략

본 연구에서는 과포화시 신호제어를 수행할 수 있도록 사전에 신호운영 데이터베이스를 구성하여 과포화 제어시작시점에 적절히 적용가능토록 하는 신호운영방식을 개발하는 것으로 운영자가 설정해야 하는 값을 최소화 하였으며, 주요 교통축의 통과교통량(Throughput)의 이동성 확보를 위하여 중요교차로(CI)의 주기증가를 통해 용량을 증대하는 방식을 제안하였다.

3) 비공통주기기반의 신호제어 연구

본 연구는 중요교차로(CI)의 과포화 상황이 급속도로 진행되어 앞막힘(Spillback)현상이 발생되고, 인접한 하류부교차로에 영향을 미쳐 하류부 교차로까지 과포화가 전이되는 상황과 같은 과포화 발생시에 적절히 대응할 수 있도록 v/c 1.2이상의 상황에 대한 신호운영 방안에 대한 연구이다. 또한, 제어 대상구간의 교통, 기하, 신호조건에 맞는 운영을 위한 사전 신호운영 데이터베이스(DB)를 구축하여 적용하는 방식으로 실시간 신호제어시스템의 최적해 산출의 시간이 거의 필요 없다.

4) g/C (유효녹색시간/신호주기)의 불균형

실시간 신호제어시스템(COSMOS)은 제어단위(SA)내에서 주로 오프셋(Offset)을 통한 연동을 고려해야 하므로 공통주기 제어를 수행한다.

그러나, 중요교차로(CI)는 교차하는 교통축의 방향별 교통수요가 비슷하므로, 각 축에 대해 g/C 비율이 5:5로 분할하여 제어하며, 비중요교차로(MI)는 주방향과 부방향의 비율이 일반적으로 교통수요가 7:3, 6:4정도로 형성되므로 g/C 비율도 비슷하게 나타난다. 이에, 교통축제어 측면에서는, 인접한 비중요교차로(MI)와의 g/C 비율의 차이가 발생하고 있으며, 이러한 차이로 인하여 중요교차로(CI)가 교통축의 주요 정체지점으로 발생하는 경우가 빈번하다고 할 수 있으며, 과포화시 중요교차로(CI)가 주요 병목지점으로 작용할 가능성 높아진다.

따라서, 본 연구에서 제시하는 신호제어방식은 중요교차로(CI)의 주기를 증가시켜 제어하는 방식으로써, 주기증가의 효과가 g/C 비율의 증가효과로 작용하도록 하며, 인접교차로와의 g/C 의 균형을 최대한 유지시키는 방식이라고 할 수 있다.

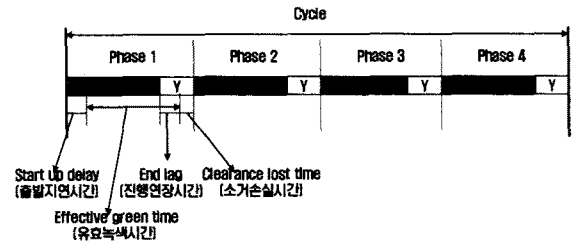
<표 1> 제어단위 내 교차로별 g/C 예시

	Φ1	Φ2	Φ3	Φ4	주기/ 비율
중요 교차로(CI)					
비중요 교차로(MI)					
교차로 1(MI)	18(3)	63(3)	30(3)	27(3)	150
g/C	0.14	0.44	0.22	0.20	1.00
교차로 2(CI)	14(3)	55(3)	14(3)	55(3)	150
g/C	0.11	0.39	0.11	0.39	1.00
교차로 3(MI)	19(3)	68(3)	26(3)	25(3)	150
g/C	0.15	0.47	0.19	0.19	1.00
교차로 4(MI)	19(3)	76(3)	22(3)	21(3)	150
g/C	0.15	0.53	0.16	0.16	1.00

5) 손실시간의 감소를 통한 용량증대

그림에서 차량이 이용할 수 있는 시간은 유효녹색시간으로써 현시당 출발지연시간 및 소거손실시간을 제거한 시간을 의미한다. 도로용량편람에 의하면 출발지연시간(Start-up delay) 2.3초, 진행연장시간

(end-lag time) 2초, 소거손실시간(Clearance lost time) 1초로 제시하고 있다. 예를 들어, 4현시 체계로 운영되는 교차로에서의 교통수요가 사용하지 못하는 시간은 $3.3\text{초} \times 4\text{현시} = 13.2\text{초(주기)}$ 이다.



<그림 2> 신호현시별 시간구성 형태

따라서, 신호주기가 증가하게 되면, 1시간 동안 주기의 개수가 감소하고, 주기가 감소함으로써, 매 주기마다 겪었던 손실시간이 주기갯수의 감소로 인해 교통수요가 이용하지 못하는 손실시간이 감소하게 된다. 이러한 손실시간의 감소는 신호주기가 점점 증가할수록 주기증가의 효과는 점점 줄어든다. 이것은 신호주기 길이는 커지지만 주기내 손실시간의 값은 고정되어 있기 때문이다. 이에, 본 연구에서는 이를 고려하여 주기증가의 비율을 최대 0%에서 최대 50%에 한정하도록 한다.

III. 비공통주기기반의 신호운영방법론 개발

1. 개발방법론

본 연구에서의 개발절차는 신호운영방법론 개발을 위한 계획을 수립하고, 모의실험을 통하여 실제 주기증가의 효과를 기하조건 및 교통조건, 신호조건에 따라 분석하도록 한다. 이러한 결과를 기초로 하여 비공통주기기반의 과포화 교통축 신호운영 방법론 및 기존 신호시스템 적용방법을 개발하고, 효과비교를 위해 내부미터링기법(IMP)과의 비교 및 현장적용을 위한 적용성 평가를 실시한다.

국내 도로조건(기하, 교통, 신호조건)을 최대한 반영하여, 국내 도로상에서 나타날 수 있는 상황을 객관적으로 일반화하여 모의실험 시나리오를 수립하여 모의실험을 수행한다. 모의실험 시 현장의 신호운영 상황을 기초로 한 모의실험을 수행하는 것이므로, 실제 현장 신호제어시스템에서 최적화된 신호운영변수인 TOD값을 기준으로 적용해야 하지만, 모의실험 환경이므로 TOD를 대체할 수 있도록 TRANSYT-7F에 의한 산출된 값을 최적신호변수로 사용하고, 본 연구의 제안방식인 주기증가를 수행한 신호 변수값을 사용하여 비교한다. CORSIM을 통해 최적신호변수 및 주기증가한 신호변수의 이 두가지 경우의 결과값 산출, 비교분석 및 평가를 수행한다.

이러한 모의실험 결과를 기반으로 하여 신호운영방법론인, 현장상황에 따른 현장맞춤형 신호운영DB 구축방법론을 개발하고, 기존 신호제어시스템에 적용할

수 있도록 적용방안을 개발하도록 하며, 개발된 방식의 현장적용을 위해 평가를 실시하도록 한다.



<그림 3> 개발 절차

2. 모의실험 시나리오 구성

본 모의실험은 주기증가에 따른 교통축의 영향분석을 통해 적정주기증가범위를 선정하고 개선효과를 분석하며, 궁극적으로 최적 주기증가율을 제시한다.

1) 모의실험 환경 및 수행시나리오

모의실험 시나리오 구성은 객관적 효과발생을 위한 시나리오작성을 목표로 한다. 이에, 실제 현장에서 발생할 수 있는 환경을 최대한 반영하여 일반화시킬 수 있도록 시나리오를 수립하도록 한다.

<표 2> 국내 기하구조 및 교통특성

구분	제시된 값
링크길이	도곡동길, 남부순환로, 영동대로, 언주로, 구성 범위 : 220~820m, 평균 500m
신호주기	120~160초, 최대 180초
차로수	중요교차로(CI) 직진:3.2차로, 좌회전:1.2차로
회전비율	강남대로 참조 : 직진 80%, 회전 20%

중요교차로(CI)의 위치별 조건은 교통축에서의 끝단에 위치할 경우와 내부에 위치할 경우로 구분하며, 링크길이는 서울시 COSMOS 운영구간의 링크길이 다양하며, 평균 500m 최대 800m이상의 링크가 존재하므로, 200~800m의 범위에서 200m씩 증가시켜 적용한다. 신호조건은 모의실험 상황이므로, 실제 현장 신호운영 시 적용하게 되는 신호변수를 대체하기 위하여 TRANSYT-7F를 통해 최적화된 신호변수를 적용한다. 본 모의실험에서는 90~150초 사이의 주기범위를 부여하여 최적신호주기를 기준으로 하여 적용하며, 최적화된 오프셋(Offset)을 산출한다. 또한, 기존 국내 신호운영상 256초까지 주기를 부여할 수 있다, 현장 신호운영상 최대 주기가 180초이며, 50% 주기를 증가시켰을 경우 270초가 되므로 50%보다 초과 증가시킬 경우, 실제 현장에 적용하기 어렵기 때

문에 50%로 한정한다.

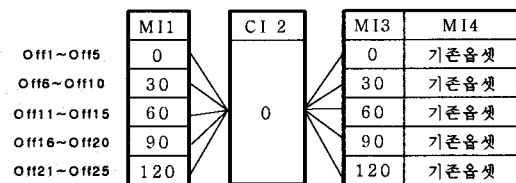
<표 3> 모의실험 시나리오 구성

항목	구성 내용
CI 위치	CI_1(축의 끝단), CI_2(축의 내부)
링크길이	200m, 400m, 600m, 800m
v/c	1.0, 1.2
신호조건	신호주기 150초, 현시배분
CI 주기 증가범위	신호주기 기준 10%단위로 50%까지 증가
오프셋 (offset)	CI와 인접MI와의 상대offset적용 (0%, 20%, 40%, 60%, 80%)
주기증가시 현시배분	주방향배분방식(M : 증가시간 100%배분) 공통배분방식(A: 증가시간 50%배분(주:부))

오프셋(Offset)의 적용은 주기증가로 인한 중요교차로(CI)와 인접한 비중요교차로(MI)와의 오프셋(Offset) 파괴로 인한 영향을 분석하고, 오프셋(Offset) 파괴의 영향이 최소가 되는 최적주기증가율을 선택하기 위하여 여러 가지의 다양한 오프셋(Offset)경우를 모두 적용하도록 한다. 또한, 이러한 오프셋(Offset)의 적용시, 비중요교차로(MI)와 인접 비중요교차로(MI)와의 오프셋(Offset)은 기존의 오프셋(Offset)을 유지하도록 하며, 중요교차로(CI)와 인접한 비중요교차로(MI)와의 오프셋(Offset)만을 상대오프셋(Offset)으로 적용 한다.



<그림 4> 상대오프셋(Offset)_CI 끝단 위치

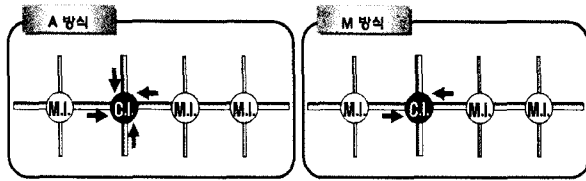


<그림 5> 상대오프셋(Offset)_CI 내부 위치

상대오프셋(Offset)은 중요교차로(CI)의 오프셋(Offset)을 "0"으로 변환하고, "0"으로 변환하였을 때의 차이만큼 인접 비중요교차로(MI)의 오프셋(Offset)을 더하거나 빼서 상대오프셋(Offset)으로 변환시킨다. 상대오프셋(Offset)으로 변환한 상황에서 비중요교차로(MI)의 상대오프셋(Offset)을 신호주기의 값을 기준으로 0%부터 80%까지 20%씩 증가시켜, 변화시켜 신호변수 입력자료를 준비한다. 즉 신호주기가 150초 일 경우 20%인 값 30초씩 증가시키게 된다.

주기증가에 따른 현시배분 방식은 두 가지로 구성한다. 중요교차로(CI)특성상 아래 그림과 같이 각 축별 교통수요의 비율이 비슷하므로, 주기증가시간의 50%씩 균등하게 배분하는 방식으로 A방식(A : All bound" 이하 "A방식" 이라 함)과 교통축의 주요 제

어측방향 즉, 주방향에 주기증가시간의 100%를 배분하는 방식으로 M방식(M : Main bound 이하 “M방식”이라 함)으로 구분하여 구성한다.

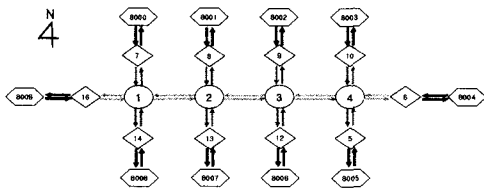


<그림 6> 주기증가에 따른 현시배분 방식

2) 모의실험 결과분석 시나리오

(1) 효과척도(MOE)선정

본 연구에서 모의실험의 효과척도(MOE)는 통과교통량(Throughput)과 지체도(Delay)로 선정한다. 과포화상황하에서는 교차로 생산성최대화(Maximum productivity)가 적절하며, 이에 효과척도는 처리교통량(Throughput)을 사용하는 것이 바람직하다. 또한, 일반적인 교차로 서비스수준을 나타내는 지체(Delay)를 선정하여 결과를 참고하도록 한다.



[그림 7] 분석대상 노드-링크체계

효과척도(MOE)는 분석대상 링크에 따라 3가지로 구분하는데, 주방향, 부방향, Network로 구분하여 분석을 수행한다.

$$\text{Throughput} = \frac{\text{Link Vol 1} + \text{Link Vol 2} + \dots + \text{Link Vol (n-1)} + \text{Link Vol n}}{n}$$

<그림 8> 통과교통량(Throughput) 산출 방식

$$\text{Delay} = \frac{(\text{Link Vol 1} \times \text{Link Delay 1}) + (\text{Link Vol 2} \times \text{Link Delay 2}) \dots + (\text{Link Vol (n)} \times \text{Link Delay (n)})}{(\text{Link Vol 1} + \text{Link Vol 2} + \dots + \text{Link Vol (n)})}$$

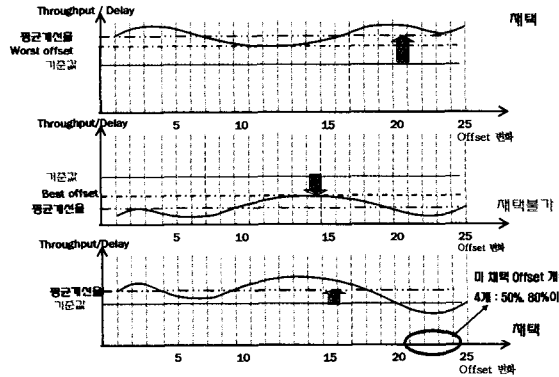
<그림 9> 지체도(Delay) 산출방식

지체도(Delay)의 산출방식은 아래와 같이 분석 대상 구간의 선정조건에 따라 선정된 해당 링크 교통량과 지체도를 이용하여 가중평균하여 산출한다. 단, 유출되는 링크의 경우 지체도가 “0”이므로 분석에서 제외한다.

(2) 오프셋(offset)영향을 고려한 최적주기증가범위

교통축내에서 중요교차로(CI)의 주기의 증가는 인접 비중요교차로(MI)와의 오프셋(Offset)이 깨지게 되므로, 교통축내부의 교통류의 심각한 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 오프셋(Offset)의 변화에 따른 교통축에 대한 영향 분석의 차원에서, 발생 가능한 모든 경우의 오프셋(Offset)을 적용해야 하지만, 불가능하므로,

가급적 다양한 오프셋(Offset)의 상황을 최대한 반영하여 주기증가로 인한 교통축내 교통류에 미치는 악영향을 최소화 시킬 수 있는 적정주기증가율을 도출하고, 향후 적용 한다. 아래 그림에서 X축은 해당 주기증가를 적용시, 각각의 오프셋(Offset)의 경우를 나열한 것이며, Y축의 개선효과를 구분하기 위하여 각 효과척도(MOE)의 결과값을 나타낸 것이다.



<그림 10> 주기증가를 채택 방법 개념도

다음은 적정주기증가를 채택방법에 대한 설명이다.

첫째, 각 오프셋(Offset)적용시의 결과값들을 오프셋(Offset) Case_1에서 오프셋(Offset) Case_25까지 나열한 결과 최저개선효과를 보이는 오프셋(Worst offset) 적용 결과값이 기준결과값보다 우월 할 경우, 해당 주기의 증가율은 채택된다.

둘째, 앞의 경우와 상반된 경우로, 각 오프셋(Offset) 적용시의 결과값들을 오프셋(Offset) Case_1에서 오프셋(Offset) Case_25까지 나열한 결과, 최고개선효과를 보이는 오프셋(Best offset) 적용 결과값이 기준 결과값보다 미달 할 경우, 해당 주기의 증가율은 채택불가로 판단하고, 해당주기증가율은 적용하지 않는다.

셋째, 전술한 두 개의 경우에도 속하지 않는 경우, 즉, 일부 오프셋(Offset)적용결과가 기준값보다 우월하지만, 나머지 오프셋(Offset)적용결과는 기준값에 미달할 경우, 전체 오프셋(Offset)의 개수에 우월한 오프셋(Offset)의 수가 80%이상인 경우, 해당 주기증가를 채택하도록 한다.

그러나, 세 번째 방법에 있어서 오프셋(Offset)의 개수가 80%이상일 경우에 주기증가를 채택하지만, 최악의 오프셋(Offset)이 선택될 경우에는 오히려 교통축 내 상황이 악화 될 가능성이 있다. 이러한 경우는, 향후 신호운영 적용 시, 운영자가 사전에 반드시 검토를 해야 할 상황에 해당되며 또한, 실제 신호운영에 적용할 경우, 최악의 오프셋(Offset)을 피해야 하며, 최고 개선효과를 나타내는 오프셋(Offset)을 사전에 파악하여 해당주기증가를 적용 시에는 최적 오프셋(Offset)을 사용하도록 한다.

(3) Reference Table 작성

Reference Table은 모의실험의 결과를 정리한 표

로써, 본 연구에서 필요로 하는 최적주기증가를 및 오프셋(Offset)선정을 위한 판단데이터이며, 향후, 신호 운영 적용 시에 최종적인 Reference Table에 제시된 주기증가를 사용하므로, 중요한 데이터베이스(DB) 역할을 한다. 또한, 효과척도(MOE)별, 중요교차로(CI)위치별, 링크길이별, 제어방식별, v/c(교통량/용량)별 등으로 구분하여 개선효과가 발생한 주기증가의 범위를 색깔로 표시하는 기초 Reference Table을 한 후, 최종적으로 하나의 Reference Table로 요약하도록 한다.

제어방식	주기증가율 (%)					개선효과 (%)
	10	20	30	40	50	
Network						0.5~5.5
주방향						4.7~6.1
부방향						0.9~5.5

Link 길이	제어 방식	Throughput		Delay	
		주기 증가율 (%)	개선 효과 (%)	주기 증가율 (%)	개선 효과 (%)
400	Network	10	6.8	10	7.7
	주방향	10	9.9	10	2.9
	부방향	10	1.5	10	8.6

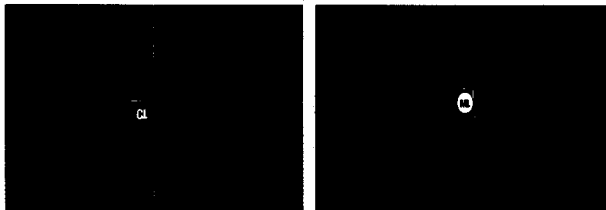
<그림 11> Reference Table 작성 예시

3. 모의실험 수행 및 결과분석

1) 모형 입력자료 구성

(1) 기하조건 구성

모의실험 환경은 4개의 교차로가 연결된 도시부 도로를 대상으로 제어단위(SA)로 설정하여 구성하였으며, 교통축 주방향 도로(동-서 축)은 양방향 6차로, 교통축 교차도로(남-북 축)은 양방향 4차로로 구성되어 있으나, 중요교차로(CI)의 경우, 교통수요의 비율이 비슷하므로 교차도로의 경우도 양방향 6차로로 구성하였다.



<그림 12> 중요 및 비중요교차로 기하구성

또한, 중요교차로(CI)의 위치에 따른 효과분석을 위하여 교통축의 끝단 NODE_1, 교통축의 내부 NODE_2로 구분하여 구성하였으며, 링크길이에 따른 효과분석을 위하여 200m, 400m, 600m, 800m의 4가지 경우로 구성하였다.

(2) 교통조건 및 신호조건 구성

본 연구는 과포화시의 상황을 반영하기 위해서, v/c 1.0과 v/c 1.2의 상황에 대하여 구성하였으며, 서울시 COSMOS 운영지역의 교통량 비율을 반영하여 직진 교통량 80%, 회전교통량 20%의 수준에 최대한 비슷하도록 구성하였고, 서울시 COSMOS 운영지역의 신호조건을 반영하여 중요교차로(CI)에 대해 교통축 주/부방향 g/C가 약 5:5, 비중요교차로(MI)에 대해 약 6:4 또는 7:3으로 구성하였으며, 4현시 체계로 운

영하도록 하며, 신호 주기는 교통축내 교차로 모두 150초로 TRANSYT-7F를 통한 최적 주기값으로 설정하였다.

(3) 모의실험 수행

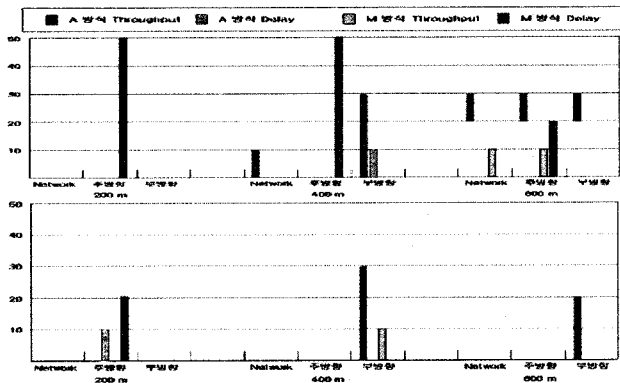
초기 평형(Equilibrium)시간을 최대값으로 설정하여 충분히 평형상태가 된 후, 모의실험이 수행되도록 하며, 객관적인 평가 결과를 위하여 조건별 시나리오마다 Random number seed를 3회에 걸쳐 다르게 발생시켜 나온 결과의 평균값을 해당 시나리오의 결과값으로 선정하였다.

앞서 설명한 각 조건들을 기본으로 하여 중요교차로(CI)의 위치 변화, v/c의 변화, 링크길이의 변화, 신호주기길이 증가의 변화, 신호주기증가에 따른 현시배분 방식에 따라 각 case별로 모의실험을 수행하고 분석을 실시하였으며, 각각의 상황 변수의 조합에 따른 모의실험 횟수는 약 6400회정도 수행하였으며, 모의실험시간은 7200초를 기준으로 수행하였다.

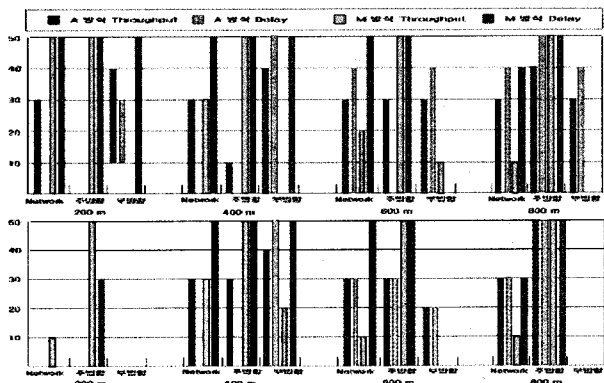
2). 모의실험 결과 분석

(1) v/c별 적정주기증가범위 분석

개선 주기증가율의 분포상에서 나타나듯이 v/c 1.0의 경우에는 주기증가로 인한 개선효과를 보이는 주기증가율이 범위가 적고, 불규칙하게 분포하고 있어서 현시배분방식에 따른 차이를 알 수 없다. 따라서, v/c 1.0의 상황에서는 주기증가의 효과는 미흡하다고 판단된다.



<그림 13> v/c 1.0 주기증가범위_CI 1(상), CI 2(하)



<그림 14> v/c 1.2 주기증가범위_CI 1(상), CI 2(하)

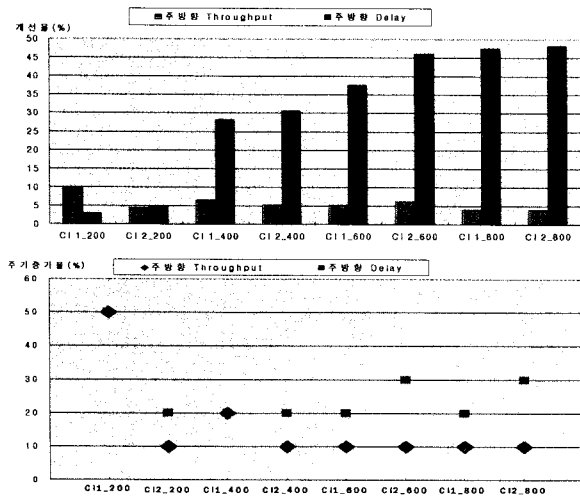
v/c 1.2 경우, 주기증가로 인한 개선효과를 보이는 주기증가율이 고르게 분포하고 있으며, 현시배분방식에 따르면, 전체적으로 개선효과가 발생하는 주기증가율의 분포가 고루 나타나고 있는 M방식이 A방식보다 개선효과가 더 있다고 볼 수 있다. 또한, 중요교차로(CI)의 위치상 교통축 끝단(CI 1)에 위치할 경우가 교통축내부(CI 2)에 위치한 경우보다 주기증가율의 범위가 더 많이 나타나고 있어, 교통축 끝단에 위치할 경우가 개선효과가 더 있다고 볼 수 있다.

특히, 링크길이가 짧은 경우, 200m링크는 중요교차로(CI)가 교통축 내부에 있는 경우 개선효과가 상대적으로 감소하는 분포를 나타내고 있다. 이러한 이유는 중요교차로(CI)의 용량증대로 인한 영향을 하류부인점 비중요교차로(CI)에 보이고 있다고 판단되며, 링크길이가 짧아서 교통류유입량의 증대영향을 받아 줄만한 링크길이를 확보하지 못했다고 볼 수 있다.

(2) 제어 목표별 개선효과 분석

① 교통축 주방향(축방향)

v/c 1.2의 상황에서, 최적 주기증가율에 따른 교통축 주방향의 개선효과는 통과교통량(Throughput)의 경우, 평균 개선율 5.6%로 나타났으며, 링크길이가 증가함에 따라 개선효과가 증가가 일정하게 나타나고 있다. 지체도(Delay)의 경우, 링크길이가 증가함에 따라, 개선효과 점차 증가하는 경향을 보이고 있으며, 링크길이 400m이상 평균 개선율 39.7%로 나타나고 있다. 최적 주기 증가범위는 200m의 경우를 제외하고는 일반적으로 10%~20% 수준을 보이고 있다.

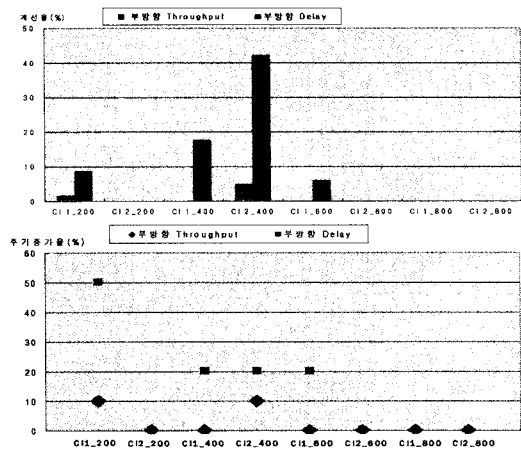


<그림 15> 주방향 개선효과 및 최적주기증가율

② 교통축 부방향(교차도로방향)

v/c 1.2의 상황에서, 최적 주기증가율에 따른 교통축 부방향의 개선효과는 400m에서 통과교통량(Throughput)과 지체도(Delay)의 개선효과가 나타난다. 링크길이 400m를 기준으로 짧거나 긴 링크의 경우, 개선효과를 거의 나타내지 않으며, 200m의 경우, v/c대비 대기행렬길이가 링크길이를 초과하는 이유

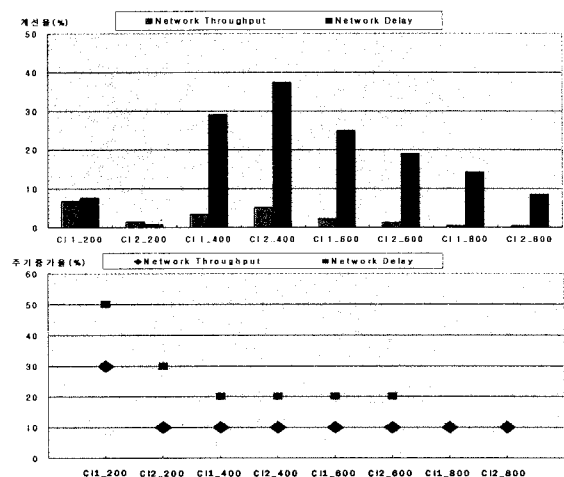
로 효과가 불규칙하다. 600m이상의 경우, 주방향효과 증가하지만, 링크길이가 증가함으로써, 앞막힘(Spillback)발생이 적어 주기증가효과가 감소되는 것으로 판단된다.



<그림 16> 부방향 개선효과 및 적주기증가율

③ Network 전체

v/c 1.2의 상황에서, 최적 주기증가율에 따른 교통축 Network 개선효과는 400m에서 통과교통량(Throughput)과 지체도(Delay)의 최대 개선효과가 나타나며, 400m를 기준으로 링크길이가 증가할수록 개선효과비율은 감소하는 경향을 나타내며, 200m를 제외하고 주기증가율이 10~20% 범위에서 최대 개선효과가 발생하였다. 링크길이 600m이상일 경우는 링크용량(Storage)이 증가하여 앞막힘(Spillback)감소로 인한 부방향 개선효과가 감소하여 전체적인 Network개선효과에 영향을 미치는 것으로 판단된다.



<그림 17> Network 개선효과 및 최적주기증가율

3). 모의실험 결과 종합

(1) v/c 및 주기증가율 범위

용량 증대의 효과는 v/c 1.2를 초과할 경우, 일반적으로 나타나는 것으로 판단되며, M방식의 현시배분방식을 적용한 주기증가율 10~20% 범위에서 최대의 개선효과가 나타난다. 따라서, 중요교차로(CI)는

비중요교차로(MI)의 교통측 주방향 현시만큼 주기를 증가시켜 중요교차로(CI)와 인접한 비중요교차로(MI)의 교통측 주방향의 g/C비율의 균형을 맞춘다면 개선효과를 충분히 볼 수 있다고 사료된다.

개선효과가 있는 주기증가율을 검토한 결과, v/c 1.0인 경우는 개선효과가 불규칙하므로, v/c 1.2인 경우에 대해서 제시하였다. 다음의 표는 최대의 개선효과를 나타내는 최적주기증가율과 개선효과를 정리한 결과이다.

<표 4> 최적 주기증가율에 의한 개선효과

링 크 (m)	CI 위치	제어 목표	CI 1 (교통측 끝단)				CI 2 (교통측 내부)			
			Throughput		Delay		Throughput		Delay	
			주기 증가율 (%)	개선 효과 (%)	주기 증가율 (%)	개선 효과 (%)	주기 증가율 (%)	개선 효과 (%)	주기 증가율 (%)	개선 효과 (%)
200	Network	주방향	30	6.8	50	7.7	10	1.4	30	0.7
		부방향	50	9.9	50	2.9	10	4.4	20	4.5
400	Network	주방향	10	3.4	20	28.9	10	5.1	20	37.3
		부방향	20	6.5	20	17.6	10	4.9	20	42.1
600	Network	주방향	10	2.2	20	24.9	10	1.3	20	18.9
		부방향	10	5.1	20	37.5	10	6.2	30	46.1
800	Network	주방향	10	0.4	10	14.2	10	0.4	10	8.5
		부방향	10	3.9	20	47.5	10	3.9	30	48.3

(2) 중요교차로(CI)의 위치 및 링크길이

중요교차로(CI)위치가 축 끝단에 있을 경우, 모의 실험상 링크길이와 상관없이 무한대 통과 가능하며, CI위치가 축 내부에 있을 경우 하류부 링크저장용량(Storage)의 영향을 받는 것으로 판단된다. 또한, 링크길이 200m일 경우, v/c 1.2시점 대기길이가 200m를 초과할 수 있으므로 불규칙하게 주기증가의 범위가 나타나고 있으며, 개선효과 또한 불규칙한 것으로 나타난다. 링크길이가 400m의 경우, 600m, 800m에 비해 앞막힘(Spillback) 발생빈도가 높아, 주기증가로 인한 앞막힘(Spillback) 해소 효과로 인한 부방향 개선효과가 큰 것으로 판단된다.

4. 신호운영DB 구축 방법론

모의 실험 시, 일반 도로환경에서 발생할 수 있는 조건들을 최대한 반영하려고 노력하였으나, 모든 도로의 상황에 일반적으로 주기증가율을 적용하기는 어렵다는 결론을 내렸다. 따라서, 현장상황을 최대한 동일하게 모사한 모의실험을 통해, 오프셋(Offset)의 영향을 최소화하는 최적주기증가율을 선정하여 신호운영에 적용할 수 있도록 신호운영 DB구축을 사전에 수행하는 현장 맞춤형 신호운영방법론을 개발한다.

1) 제어단위(SA)별로 대상구간 선정

과포화 발생빈도가 높은 구간을 우선적으로 선정한다. 즉, 중요교차로(CI)의 정체로 인하여 인접 비중요교차로(MI)로 앞막힘(Spillback)현상이 빈번히 발생

하는 구간(v/c 1.2이상)을 선정하도록 한다.

2) 현장상황을 모사한 모의실험 환경 구성

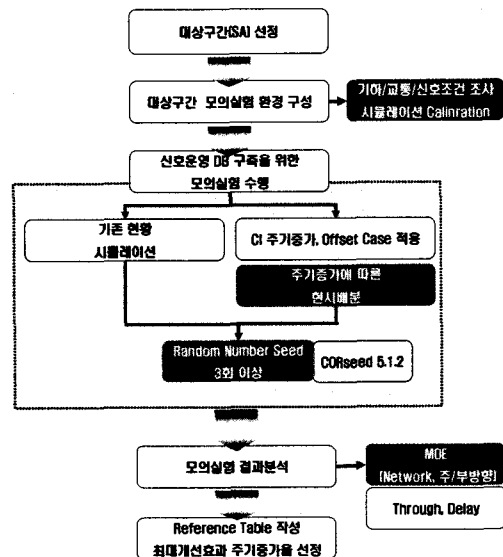
신호조건은 대상구간의 현장 신호운영 자료(TOD 자료 : 신호주기, 현시배분, 오프셋(Offset))가 해당되며, 교통조건은 교차로의 방향별 회전비율 및 매주기당 교통수요를 나타내주는 대기행렬길이를 측정하여 수집하며, 이러한 대기행렬 길이는 추후 시스템 적용 시, 교통상황의 변화를 나타내어 주는 v/c값으로 유추하는데 사용한다.

3) 모의실험 수행

현장 신호운영현황자료(TOD 자료)를 기반으로 한 모의실험과 이와 동시에, 본 연구에서 제안한 현장 TOD자료에 대하여 주기를 증가시키는 신호제어방식에 대한 모의실험을 수행한다. 모의실험의 객관적인 평가 결과를 위하여 조건별 시나리오마다 Random number seed를 3회이상 발생시켜 나온 결과의 평균값을 해당 시나리오의 결과값으로 선정한다.

4) 모의실험 결과 비교 분석

현황운영과 제안방식에 대한 모의실험 결과를 제어목표(Network, 교통측 주방향, 교통측부방향)별로 비교를 수행하며, 현황 결과값이 기준값이 되며, 제안방식의 주기증가율 및 주기증가방식, 오프셋(Offset) 등의 각 시나리오에 의한 결과값을 비교한다. 또한, 모의실험을 통해서 산출된 결과값 비교하여 Reference Table 작성 및 최적주기증가율 선정하여, 신호운영 DB로 저장한다.



<그림 18> 신호운영DB 구축절차

5. 시스템 적용 방법론

본 연구에서 제안한 신호제어 방식의 실시간 신호제어시스템 적용 시, 제어시작 및 종료의 기준을 규정하고, 현장 신호시스템 운영을 통하여, 제어의 기준이 되는 자료습득용이성, 지속적인 교통상황 모니터링 가능여부 등의 조건에 부합되도록 개발한다.

1) 교통상황 모니터링

과포화 상황으로의 전환여부를 중요교차로(CI)의 대기행렬 길이로부터 수집되는 대기행렬 길이를 기반으로 매 주기마다 v/c를 판단하도록 하며, 대기행렬길이가 설치되지 않았을 경우, 차선책으로써 포화도 DS값을 사용하도록 한다. 또한, 사전에 구축된 대상제어구간(SA)에 대한 맞춤형 신호운영 DB에서 제시하는 최적주기증가와 및 오프셋(Offset)을 기준으로 v/c에 따라, 대상구간 최적 주기 증가율에 따른 현시배분을 사전에 수행 한다.

2) 비공통주기기반 신호제어 시작

중요교차로(CI) 접근로 대기행렬의 길이를 기반으로 유추된 v/c 1.2 이상을 초과할 경우, 제어시작 판단을 수행하며, v/c 1.2인 기준대기행렬 길이와 비교하여 초과하는 횟수가 3주기 이상일 경우 제어를 시작한다. 횟수는 운영자의 설정값으로 지정할 수 있도록 한다.

대기행렬 길이에 의한 v/c 추정방법은 대상지역에 대한 현시배분 자료를 기반으로 v/c 1.0, 1.2의 대기행렬길이를 추정할 수 있다. 물론, COSMOS에서 DS값을 사용할 수도 있으나, 하류부 앞막힘현상(spillback) 발생시 DS값이 불규칙하게 산출될 가능성이 있다. 또한, 대기행렬은 교통수요적 의미가 있으며, 기존 신호제어시스템인 COSMOS에서 대기행렬길이의 측정이 가능하기 때문에 대기행렬길이를 v/c를 추정하도록 한다.

$$\text{대기행렬(m)} = \{ (g_i - L_{Ti}) / \text{headway} \} * 6.3\text{m}$$

여기서, g_i 는 대상접근로 교통축방향 직진에 배분된 녹색시간, L_{Ti} 는 손실시간, headway 1.8초(운영자 설정값), 차량 평균점유 길이는 6.3m로 한다.

상기의 식에 의해서 아래의 표와 같이 대기행렬길이를 추정할 수 있다. 여기서 대기행렬길이는 이상적 조건하의 값이므로 현장상황에 따라 적정하게 가중치를 두어 설정하도록 한다.

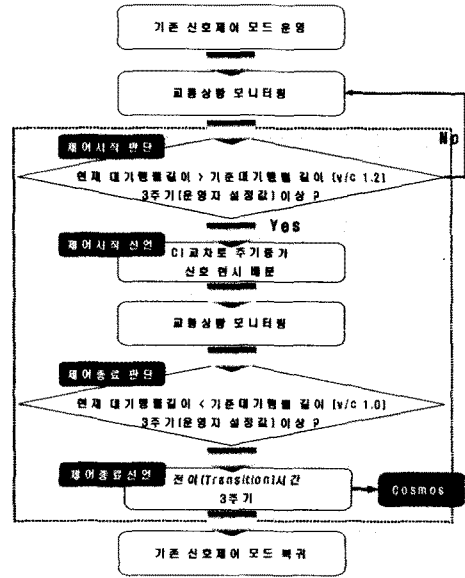
3) 비공통주기기반 신호제어 종료

중요교차로(CI) 접근로 대기행렬의 길이를 기반으로 유추된 v/c 1.0 이하로 떨어질 경우, 제어종료 선언을 하고, 기존 신호제어모드로 복귀를 시작한다. 여기에서, v/c 1.0을 제어종료 시점으로 규정한 이유는, 교통류 변화의 전이과정은 연속적으로 이루어지므로 비공통 주기기반 신호제어에 있어서 이력(Hysteresis)를 적용하도록 한다. 다시 말해서, 잦은 전이를 막기 위한 방법으로써 적용하도록 한다.

4) 기존 신호제어모드 복귀

비공통주기기반의 신호제어 종료가 선언되면, 기존 신호모드로 복귀하도록 한다. 복귀 시 COSMOS에서 H/W적인 동기설정 문제로 전이(Transition)를 수행하도록 하므로, 본 연구의 비공통주기기반의 신호제어

어방식에서도 전이(Transition)과정을 3주기 정도 갖도록 한다. 단, 비공통 주기기반 신호 운영모드 시작 시에는 필요 없다.

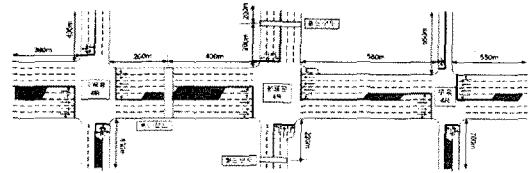


<그림 19> 시스템 적용방법 및 제어절차

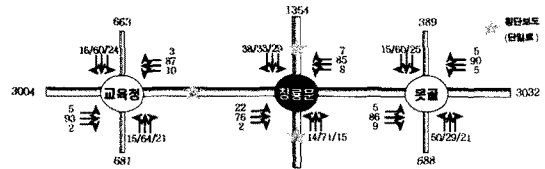
IV. 현장 적용성 평가

1. 평가 개요

본 연구의 현장 적용성 평가를 위하여 국도1호선 창릉문사거리를 포함한 제어단위(SA)를 대상지역으로 선정하였다.



<그림 20> 대상지역 기하구조



<그림 21> 대상지역 교통현황

교차로	Φ 1	Φ 2	Φ 3	Φ 4	Φ 5
4R	30(3)	66(3)	12(3)	28(3)	29(3)
offset					
151					

교차로	Φ 1	Φ 2	Φ 3	Φ 4	Φ 5
4R	31(3)	45(3)	26(3)	23(3)	40(3)
offset					
70					

교차로	Φ 1	Φ 2	Φ 3	Φ 4	Φ 5
4R	19(3)	54(3)	16(3)	40(3)	36(3)
offset					
43					

<그림 22> 대상지역 신호운영 현황

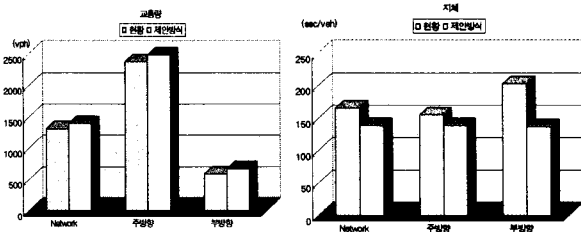
2. 현장 적용성 평가 결과

현장 적용성 평가 결과, Network, 주방향, 부방향 모두 개선효과를 나타내고 있다. Network의 통과교통량(Throughput) 주/부방향보다 적은이유는 해당

링크단위의 총 통과교통량을 기준으로 하므로 차로수가 많을수록 값이 커질 수 있으며, 교통축 교차도로의 차로수가 교통축주방향의 차로수에 비해 적으므로 값이 적어질 수 있다.

<표 6> 현장 적용성 평가결과

	통과교통량 (Throughput)			지체도(Delay)		
	현황	제안	개선율 (%)	현황	제안	개선율 (%)
Network	1312	1396	6	166.14	138.62	17
주방향	2380	2485	4	155.80	139.14	11
부방향	588	671	14	203.11	136.91	33



<그림 23> 현장 적용성 평가 결과

V. 결론 및 향후연구

본 연구에서는 과포화시 일시적으로 중요교차로(CI)의 주기를 증가시켜 중요교차로(CI) g/C 부족분의 보완 및 주기증가로 인한 손실시간 감소효과를 통해, 정체현상을 일시적으로 해소 시키는 비공통주기기의 신호운영방법론을 개발하였다.

주기증가 효과는 교통축 주방향 용량증대효과 및 인접교차로에 발생하는 앞막힘(Spillback)현상의 발생을 억제함으로써, 인접 비중요교차로(MI)의 교통축 교차도로의 용량개선에 도움을 주는 것으로 나타났다. 또한, 주기증가시 중요교차로(CI)의 접근로 길이 즉, 링크길이(Storage)의 영향 및 오프셋(Offset)의 영향에 따라 신호제어 효율의 변화가 있고, 중요교차로의 접근로의 링크길이와 충분히 확보되지 않을 경우에는 오히려 신호제어 효율을 감소시킬 가능성이 존재함을 알 수 있었다.

본 연구의 주요 특징으로는 첫째, 무분별한 주기증가보다는 제어단위(SA)별로 기하, 교통, 신호조건 등의 상황을 모사한 모의실험을 통해서 주기증가로 인한 오프셋(Offset)의 영향을 최소화하는 최적의 주기증가범위를 선정하여 시스템에 적용하는 현장 맞춤형 신호운영 방법론이라는 점이다. 둘째, 최적주기증가율이라는 신호운영 DB구축자료를 기반으로 신호제어시스템에 적용함으로써, 기존의 신호운영자가 설정해야 하는 값들의 난해함으로 인한 운영의 어려움을 어느 정도 감소시킨 점이다.

본 연구에서 미처 다루지 못한 향후의 추가 연구로는 다음과 같다.

무엇보다도 비공통주기기의 신호운영 시, 매 주기마다 실시간으로 변하는 교통상황에 대하여 운영적 측면에서 적극적인 대처방안에 대한 추가 연구가 필요하다는 것이다. 본 연구에서 개발한 신호운영 방법론 적용시, 개선효과는 있지만 교통의 집중이 과다하여 교통상황이 더 악화될 수 있는 가능성이 존재한다. 이러한 경우에 대해서는, 좀 더 세밀하고 동적인 대응을 할 수 있도록 v/c 1.2이상의 변화에 따른 주기증가를 변화 방안이 추가적으로 연구되어야 한다.

본 연구는 비공통주기기의 신호운영방식으로써, 주기증가로 인한 오프셋(Offset)의 영향을 최소화하려고 노력하였지만, 매 주기마다 오프셋(Offset)의 변화에는 적극적으로 대응하지 못하고 있다. 물론, 오프셋(Offset)의 영향을 최소화 하는 최적주기증가율을 선택하여 개선효과는 나타났지만, 향후 매주기마다 최적의 오프셋(Offset)의 산정 및 적용방안이 추가적으로 보완되어 진다면 현재의 결과보다 훨씬 개선효과가 클 것으로 판단된다.

참고 문헌

- [1] 서울지방경찰청, 2002년 신신호시스템 기능개선, 2003.
- [2] 서울시정개발연구원, 실시간 신호제어 시스템 검증, 평가, 2003.
- [3] 건설교통부, 도로용량편람, 2001.
- [4] 이승환, 이상수, 이성호, "서울시 실시간 신호제어 시스템(COSMOS)내 내부미터링 제어전략 도입 방안" 대한교통학회지 제21권 제4호, 2003.
- [5] 이영인, 최완석, "유전자 알고리즘을 이용한 이중목적 주기변동 신호시간 결정 모형 개발", 대한교통학회지 제20권 제5호, 2002.
- [6] 이영인, 임재승, 윤경섭, "대기차량 최소화를 위한 주기변동기반 동적 신호시간 결정모형 개발", 대한교통학회지 제18권 제2호, 2000.
- [7] 김영찬, "혼잡 신호교차로 제어를 위한 최적화 모형 개발", 대한교통학회지 제10권 제3호, 1992.
- [8] Edward B. Lieberman, Jinil Chang, Elena Shenk Prassas, "Formulation of Real-Time Control Policy for Oversaturated Arterials" Transportation Research Record, 2007.
- [9] Edward Lieberman, Jinil Chang, "Optimizing Traffic Signal Timing Through Network Decomposition" Journal Transportation Research Record, 2007.