

좌회전 제약에 따른 과포화 교차로 지체 완화 방안에 관한 연구

Delay Relief Method with Left-turn Prohibit for Oversaturated Intersection

정 인택
(서울대학교 환경대학원 석사과정)

이 영인
(서울대학교 환경대학원 교수)

Key Words : TOD, 실시간 신호제어시스템, 감응제어, 좌회전 제약, CORSIM-RTE

목 차

- I. 서론
 - II. 관련이론 및 선행연구 고찰
 - III. 연구 방법론 정립
 - IV. 연구의 검증 및 평가
 - V. 종합결론 및 향후과제
- 참고문헌

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

지속적인 소득수준의 향상에 따른 자동차 수요 증가는 대부분 도시지역에서 통행속도 저하 및 교통 혼잡을 초래하여 과도한 혼잡비용, 대기오염 증가 등 심각한 문제를 일으키고 있다. 특히 이러한 교통혼잡은 과거 출·퇴근 첨두시간 뿐만 아니라 비첨두시간에도 상시적인 지정체가 발생하고 있다. 또한 급속한 교통수요의 증가에 부합되는 충분한 교통시설을 공급하는 데는 한계가 있기 때문에 기존 도로망들에 대한 교통운영적인 측면이 강조되어야 한다.

단속류 네트워크에서 신호현시는 접근로 용량산정의 주요 변수이므로 과포화상황에서 진용좌회전을 허용하는 4현시 신호체계를 계속 유지하는 것은 각 방향별 통과용량을 감소시켜 심각한 지정체를 유발하게 되며, 더불어 가로구간내 Storage Capacity 감소와 Spillback 현상으로 인한 대기행렬을 발생시키게 된다.

위의 과포화상황에서의 기존 신호제어 방법들은 크게 내부미터링(Internal Metering)기법과 실시간 신호제어시스템 내 과포화 신호제어 알고리즘으로 나눌 수가 있다. 내부미터링의 경우 링크 기반 대기행렬 제어방법으로 주 교통축의 연동화 및 가로구간내 저장용량을 최대화하기 위한 기초적인 연구가 수행되었으나, 대기행렬 검지기 설치 문제로 인해 실시간 신호제어시스템에 적용되지 못하고 있는 실정이다.

실시간 신호제어시스템의 경우 제어단위 내 공통주기를 사용하고 포화도가 1이 넘는 과포화 상태에서 녹색시간 증가분을 단계적으로 부여하는 신호제어방법을 적용하고 있으나, 과포화 교통수요에 대한 시스템의 대처 능력이 한계에 이르게 되

어 보다 적절한 과포화 신호제어 전략이 요구되는 실정이다. 따라서, 본 연구의 목적은 TOD와 실시간 신호제어시스템으로 운영 중인 과포화 교차로에 대한 기하구조, 신호현시, 교통조건을 모의실험을 통해 구축하고 본 연구 신호제어 기법의 효과를 비교·분석하는 것이며, 신호현시, 교통량 등 각 교통상황에 따른 본 신호제어의 적용 기준을 정립하고 그 타당성을 검증하는 것이다.

2. 연구의 내용 및 범위

본 연구의 내용은 신호현시체계 조정에 따른 과포화 교차로의 지체 해소를 위한 신호제어 기법을 제시하고 그 운영효과를 분석하는 것으로 좌회전 이동류에 대한 제약을 통해 각 방향별 직진 신호시간의 비율을 증가시켜 직진 이동류의 용량 및 통과속도를 향상시킴으로써 교차로의 지체를 완화하는 방법을 말한다. 다만, 회전 제약으로 인한 회전이동류의 흐름은 직진후 U턴으로 유도하며, 이를 위해 충분한 교차로간의 간격, 각 방향별 우회전 전용차로, U턴 전용차로가 수반되어야 한다.

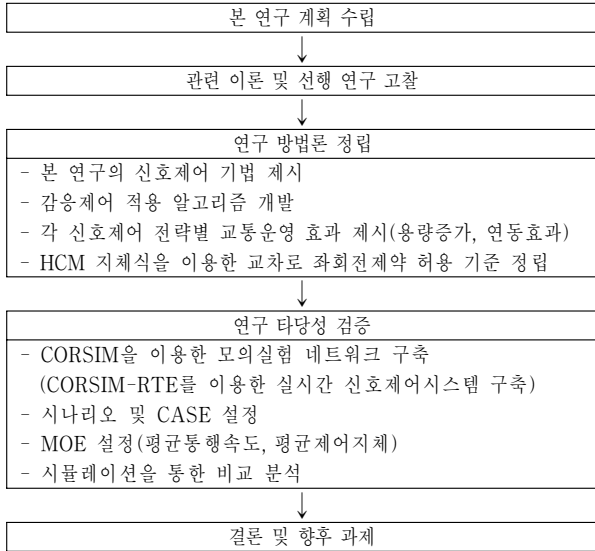
또한, 각 교통상황에 따른 본 신호제어 기법의 적용 기준을 정립하고 회전제약으로 인한 좌회전 Bay와 좌회전 전용차로는 U턴 전용차로로 활용이 가능하며, 직진 신호시간의 증가에 따른 용량 및 통과속도의 증가로 교차로 주기 감소 및 연동효과를 높일 수 있을 것이다.

위의 신호제어 방법에 대한 모의실험을 실시하여 각 신호운영방법에 따른 시행전·후의 MOE(평균통행속도, 지체, 통과교통량)효과를 분석하여 본 연구의 타당성을 검증한다.

3. 연구의 수행절차

본 연구에서는 신호현시체계를 조정하여 과포화 교차로의 지

체를 완화할 수 있는 신호제어 기법을 제안할 것이며, 신호제어 기법에 따른 운영효과 및 적용 기준을 제시할 것이다. 또한 가상의 시나리오를 설정하여 미시적 시뮬레이터를 이용하여 본 연구의 타당성을 검증할 것이다. 그 수행 절차는 다음과 같다.



[그림 1] 연구 수행절차

II. 관련이론 및 선행연구 고찰

1. 관련이론 검토

1) 내부미터링(Internal metering)제어 기법

① 기본개념

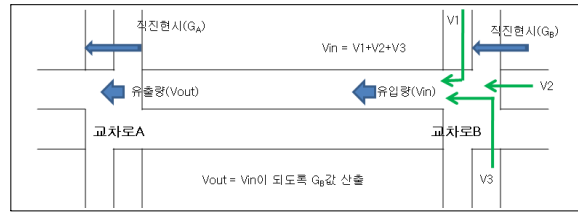
내부미터링은 네트워크상의 핵심 교차로에서 도착하거나 출발하는 차량의 분포에 영향을 주도록 혼잡 네트워크 내부의 제어전략을 사용하는 것으로 특히, 포화도(DS)가 1이 넘는 지점 혹은 구간에서 상류부 링크의 유입교통량을 제어하면서 과포화된 가로구간의 대기행렬길이를 안정적으로 유지할 수 있도록 관리하는 기법으로 앞막힘 현상으로 인한 교차로도의 통행 방해 등과 같은 네트워크 안의 교통류를 안정적으로 유지할 수 있다.

내부미터링 제어목적은 과다한 수요로 인한 앞막힘을 예방하고 안정적인 대기행렬 형성 및 성장관리를 위해서 하류부의 유출 교통량만큼만 상류부의 녹색현시를 제어하여 유입교통량을 허용하도록 하며, 또한 이상오프셋(Ideal offset), 대기행렬길이 제어를 통해 하류부의 녹색시간의 이용률을 최대화하고 교차로 Spillback으로 인한 앞막힘 현상을 방지하여 가로구간의 저장용량(Storage Capacity)을 극대화 하려고 한다.

② 녹색시간 제어

녹색시간 제어는 링크의 하류부 교차로의 유출량과 상류부 교차로의 유입량이 같아지도록 녹색 신호시간을 조절하여 유입 수요량을 제어함으로써 가로구간의 앞막힘 현상을 방지하

는 역할을 한다.



[그림 2] 녹색현시 제어 개념도

교차로A에서 유출되는 교통량(Vout)과 교차로B에서 각 방향별로 유입되는 교통량(Vin)이 같아지게 되도록 교차로B의 신호현시를 제어하여 GB를 산출한다.

③ 오프셋 제어

오프셋 제어 방법으로 크게 이상오프셋(Ideal Offset)과 형평오프셋(Equity Offset) 두 가지로 구분할 수 있다. 전자의 경우는 하류부에서 녹색 시간이 시작되고 정지 대기행렬의 끝단 차량이 움직이기 시작할 때 상류부의 차량군이 정지됨이 없이 자연스럽게 대기행렬의 끝단과 맞물려 진행할 수 있도록 하기 위한 오프셋 제어 방식이며, 후자의 경우는 하류부 교차로의 정지선에서의 서비스율을 최대화하고 앞막힘 현상이 일어나지 않는 범위에서 유입 차량군을 압축하여 가로구간의 저장용량을 효율적으로 사용할 수 있도록 오프셋을 제어하는 방법이다.

2) 실시간 신호제어시스템(실시간 신호제어시스템)¹⁾

① 개요

실시간신호 제어시스템(Cycle, Offset, Split Model for Seoul : 이하 실시간 신호제어시스템)은 서울지방경찰청에서 1991년부터 개발한 실시간 교통신호 제어시스템으로 교차로를 중심으로 각 접근로별로 필요위치에 설치된 차량 검지기에 의해 수집된 교통자료를 분석하여 도로상의 실제 교통상화에 가장 적합한 현시, 신호주기, 신호시간, 연동값 등을 자동으로 조절하고 운영하는 시스템이다. 또한 실시간 신호제어시스템의 제어 흐름은 루프검지기로부터 기초자료를 얻게 되며 지역 제어기에서 이 정보를 토대로 검지기 정보를 1차 처리한 후, 처리된 정보를 설정된 기간마다 지역컴퓨터에 제공하여 일련의 알고리즘을 거친 후 다시 지역 제어기로 전송하며, 지역 제어기에서 또한번 해당 지역에 맞는 신호시간을 산출하여 신호등에 출력하는 구조로 구성되어 있다.

이 시스템은 1993년 처음 노현로 상의 일부구간에 실시간 신호제어시스템을 시범 설치하여 테스트한 이후로 중앙컴퓨터 용량 증대, 신호운영 통합 등과 같은 시스템 기능 개선을 통하여 현재 371개소로 증설 운영 중에 있다.

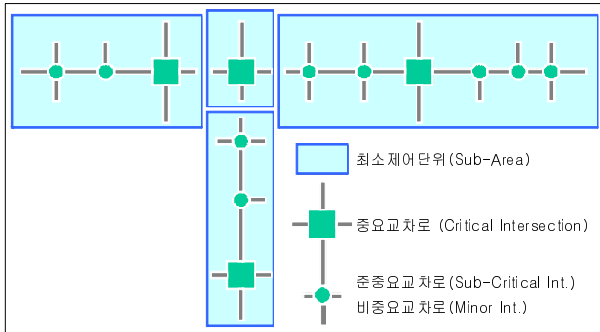
② 시스템 내 알고리즘 고찰

< 시스템 운영 체계 >

시스템의 제어대상이 되는 영역을 몇 개의 지역으로 구분하

1) 서울특별시 교통신호 제어시스템 관리자 매뉴얼, 서울특별시, 도로교통안전관리공단, 2008.2

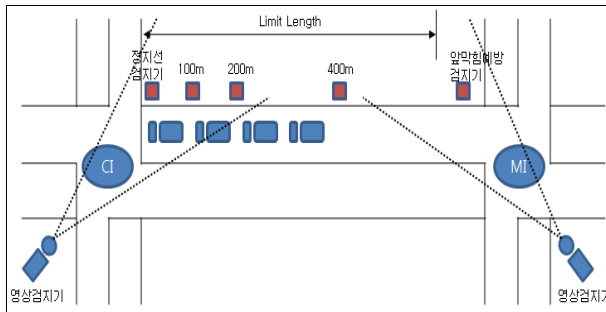
여 각 지역의 신호제어는 해당되는 신호제어 컴퓨터(Regional Computer)에서 관장한다. 구분된 지역은 교통상황이 유사한 교차로를 묶어 하나의 최소 제어단위가 된다. 이러한 최소 제어단위를 교차로그룹이라 부르며, 하나의 교차로 그룹내에는 1개의 중요교차로(Critical Intersection:CI)를 포함하고 있어야 하며, 최소 1개 교차로에서 많게는 20개 교차로까지 구성된다. 각 교차로 그룹 내에서 CI를 제외한 교차로를 비중요 교차로(Minor Intersection:MI)라고 한다.



[그림 3] 신호제어 운영단위

< 검지기체계 및 정보 >

검지기의 종류는 규격과 설치위치에 따라 정지선 루프검지기, 상류부 루프검지기, 지자기 검지기, 영상검지기로 구분된다.



[그림 4] 용도별 검지기 위치도

검지기 자료 산출과정은 먼저 검지기가 설치될 차로에서의 위치 및 검지기 길이 정보를 입력하고 매 time step(0.1초)마다 각 차로를 주행하는 차량들의 위치정보를 검색하여 검지기 위치와 비교하고 검지기 상을 주행하는 차량의 존재 여부를 파악하여 검지기의 on/off 상태를 판정 및 저장을 한다. 그 다음으로 해당차로의 현시 종료시점에서 현시동안의 검지기의 on/off 상태정보를 이용하여 교통량 및 점유율을 산출하게 된다.

< 적용 알고리즘 >

검지기로부터 수집한 자료의 교통상황 변수수집 알고리즘 현황과 신호제어변수 결정 알고리즘에 관한 현황은 아래와 같다.

<표 1> 교통상황 변수 수집 알고리즘 현황

번호	알고리즘	세부 알고리즘	적용시점
1	오정보 판단 알고리즘	오정보 판단 알고리즘	-
2	검지기 Active 판단 알고리즘	상류부 검지기 Active 판단 알고리즘	과포화시
3	포화도 산정 알고리즘	직진 포화도 알고리즘 좌회전 포화도 알고리즘	-
4	포화교통유율 산출 알고리즘	-	-
5	대기행렬길이 예측 알고리즘	-	과포화시
6	앞막힘 판단 알고리즘	-	과포화시
7	속도산정 알고리즘	-	-

<표 2> 신호제어변수 결정 알고리즘

번호	알고리즘	세부 알고리즘	적용시점
1	주기결정 알고리즘	-	-
2	녹색시간 배분 알고리즘	포화도비에 따른 녹색시간 배분 알고리즘	-
3		대기행렬길이를 이용한 FDS 보정 알고리즘	과포화시
4		검지기 상태에 따른 녹색시간 보정 알고리즘	과포화시
5		대기행렬 길이를 이용한 녹색시간 배분 알고리즘	과포화시
6	오프셋 결정 알고리즘	Equity Offset(형평 오프셋)	과포화시
7	감응제어 알고리즘	좌회전 감응제어(조기종결) 알고리즘	-
8		좌회전 감응제어(현시연장) 알고리즘	과포화시
9		앞막힘 예방제어 알고리즘	과포화시
10	오프셋 패턴 선택 알고리즘	-	-
11	제어단위(sub-Area)의 결합/분리 알고리즘	중요교차로 운영 알고리즘 준중요교차로 및 비중요교차로 운영 알고리즘	-

2. 선행연구 고찰

노동수(2004)는 서울시 실시간 신호제어시스템에서 운영되고 있는 과포화상태의 현시배분 알고리즘을 분석하여 문제점을 제시하고, 이를 해결할 수 있는 개선안을 제시하였다. 이 논문의 요점은 과포화제어를 실시하는 직진 이동류의 녹색시간이 늘어나는 만큼 좌회전제어를 하지 않는 좌회전 이동류의 녹색시간은 줄어들게 되므로 과포화제어가 계속될수록 직진 녹색시간이 늘어나기 때문에 좌회전은 녹색시간을 배분받지 못하는 문제점이 발생하게 된다. 이에 따라 FDS를 조절하여 좌회전 수요에 따라 적절하게 녹색시간이 할당되도록 기존의 알고리즘을 개선하여 적용한 결과 효과가 있는 것으로 분석되었다.

이성호(2004)는 국내 도시 간선도로 내에서의 실시간 내부미터링 제어전략을 수행할 수 있도록 시뮬레이션 환경을 개발하였으며, 그 결과 실시간 신호제어시스템 환경처럼 긴 링크들로 구성되어 있고 양방향 과포화현상이 빈번히 일어나는 교통환경에서 오프셋은 내부미터링 제어전략의 주요목표인 생산량 최대화에 큰 영향을 미치지 못함을 확인하였다. 그리고 “희망 대기행렬길이”는 미터링수행시 내부미터링 제어구간의 시스템 생산량에 큰 영향을 미치는 변수이며, 연구에서 제시한 “희망

대기행렬길이 산출식"이 시스템 생산량을 최대화할 수 있도록 적절하게 교통상황을 반영한다고 판단이 되며, 보다 안정적인 운영을 위해서 산출식에 운영자가 설정할 수 있는 여유저장공간(Safe Buffer)을 제공하였다.

김수희(2007)는 기존 과포화 교통축 신호제어전략은 주로 공 통주기를 유지하여 상류부 교차로의 교통수요조절 및 오프셋(Offset)조정하는 방법이 아닌 도시부 도로 교통축 과포화시 비공통주기 기반의 신호운영방법론을 개발하는 것으로서, 과 포화 진행 상황에 따라 일시적으로 중요교차로(CI)의 주기를 증가시켜, 중요교차로(CI)와 인접 비중요교차로(MI)와의 교통 축의 주방향 현시 g/C 비율상 부족분의 보완 및 주기 증가로 인한 손실시간의 감소효과를 통해, 중요교차로(CI)의 용량을 증대시킴, 중요교차로(CI)의 주기증가를 통해 과급되는 인접 교차로와의 오프셋(Offset)의 파괴영향 최소화 하는 신호운영방 법론 개발하였다. 국도 1호선상 교통축의 모의실험한 결과 비 공통주기기반 신호운영방식이 내부미터링기법(IMP)보다 통과 교통량(Throughput)이 6%증가하였고, 지체도는 17%감소하는 개선효과를 나타냈다. 그러나 매 주기마다 오프셋(Offset)의 변 화에는 적극적으로 대응하지 못했으며, v/c 1.2이상의 변화에 따른 주기증가를 변화 방안이 마련되어야 할 것이다

3. 기존 연구와의 차별성

기존 대기행렬길이 기반의 내부미터링(Internal Metering)기 법은 각 교차로의 모든 방향에 대기행렬 검지기를 설치해야 하므로 실시간 신호제어시스템에서는 중요교차로(CI)에만 대 기행렬 검지기가 설치되어 있어 이 기법을 적용하기가 곤란하 다.

또한 실시간 신호제어시스템에서 과포화시 신호제어 전략으 로 녹색시간 배분, 형평 오프셋(Equity Offset), 좌회전 감응, 앞 막힘 예방제어 알고리즘 등이 있지만, 실제 신호 운영시 운영 변수 설정에 운영자의 의존도가 높고 운영자가 설정해야 되는 변수들이 상당히 많기 때문에 적절한 변수 설정이 어렵다. 또 한 과포화 상황에서의 신호제어 대응이 다소 미흡하다.

따라서, 본 연구에서는 TOD와 실시간 신호제어시스템으로 운영중인 과포화 교차로를 대상으로 신호현시체계 조정에 따 른 제어기법을 적용하여 그 운영 효과를 제시하고, 이동류별 교통량 및 녹색시간비에 따른 좌회전 제약의 적용기준을 제시 한다. 또한 미시적 시뮬레이터를 이용하여 모의실험을 통한 본 연구의 신호제어 기법에 대한 타당성을 검증한다. .

III. 연구방법론 정립

1. 본 연구의 신호제어 기법 정립

1) 신호제어 개념

도시 과포화 교차로의 양방향 과포화상황($v/c > 1$)에서 계속적 으로 회전이동류의 흐름을 허용하는 4현시 신호체계를 유지하 는 것은 각 방향별 신호 운영에 대한 연속된 통과용량 제약으

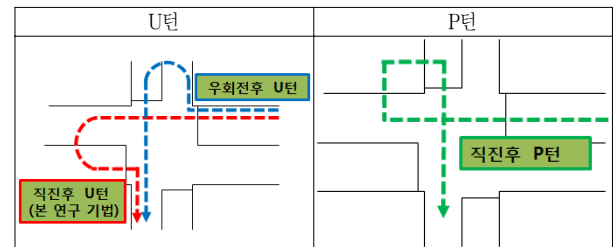
로 심각한 지정체를 유발하게 되며, 더불어 가로구간내 Storage Capacity 감소와 Spillback 현상으로 인한 대기행렬이 발생하여 통행속도 저하시켜 과도한 교통혼잡비용이 발생하게 된다.

여기서, 신호교차로의 용량은 신호시간에 제약을 받으므로 접근로별 직진 3차로는 좌회전 1차로의 용량보다 3배가 크며, 또한 직진 현시의 증가는 좌회전 현시의 증가 용량보다 3배의 효과가 발생하게 된다. 따라서 과포화 교통상황에 따라 정해 진 신호계획 내에서 양방향 혹은 주방향 회전이동류의 제약을 가하고 직진이동류에 대한 최대한의 직진신호시간을 부여하여 통과 용량 및 속도를 높임으로서 전체 교차로 접근로의 지체 시간을 감소시킬 수 있다.

2) 회전이동류에 대한 방향 기법

회전제약에 따른 우회처리 방안은 크게 U턴과 P턴으로 구분 할 수 있으며, U턴의 경우 아래의 그림에서 보는 바와 같이 직진후 U턴과 우회전후 U턴으로 나눌 수 있다. 여기서 운전 자들은 진행방향을 그대로 유지하면서 U턴을 할 수 있는 직 진후 U턴을 선호하기 때문에 이를 본 연구의 우회처리 방안 으로 적용하였다. 또한 U턴 차량의 유형에 따라 U턴 전용차 로, 좌회전·U턴 공용차로의 방식으로 운영되고 있다.

P턴의 경우 교차로 주변 이면도로를 이용하는 방식으로 각 방향별 직진현시에 영향을 받게 된다. 그러나 이면도로 내 보행자가 많거나 통과교통량의 이면도로 진입에 따른 민원 발생 시 P턴으로 운영하는 것은 곤란하다.



[그림 5] 좌회전 제약에 따른 방향 전환 기법

2. 연구방법론

단속류 네트워크의 용량이 신호주기에 대한 녹색시간 비의 영향을 크게 받는 것을 감안할 때 각 접근로의 v/c비가 1.0이 넘는 과포화 교차로에서 물리적으로 차로수를 추가하거나 확 폭하는 것 보다는 각 교차로 접근로의 용량을 증가시키기 위 해서 신호현시의 제어방법이 더 효과적이다. 따라서 본 연구 에서는 과포화 교차로의 소통 증진을 위하여 현시운영 방법에 따른 과포화 신호제어 기법을 제시한다.

먼저, 신호제어①의 경우 과포화 신호교차로에서 주·부방향 의 교통수요가 차이가 나는 교차로를 대상으로 주방향에 대한 회전이동류의 흐름을 제약하여 그 흐름을 직진후 U턴으로 전 환시키고, 주방향 직진 신호시간을 높여 통과 용량을 최대화 함으로서 전체 교차로 지체를 감소시키는 기법이다. 즉, 과포

화 상황에서 기존 4현시 운영체제에서 주방향에 대한 전용 좌회전을 직진후 U턴으로 유도하는 3현시 신호운영으로 전환하는 제어 방법이다. 이 경우 좌회전 제약에 따른 전환 교통량을 처리하기 위하여 주방향에 대한 U턴 전용차로가 필요하며, 또한 전환 이동류들의 weaving을 피하기 위해서 충분한 교차로 간격이 유지되어야 한다.

신호제어②의 경우 과포화 교차로에서 주·부방향의 교통수요가의 차이가 나지 않는 양방향 과포화 교차로를 대상으로 양방향에 대한 각 회전이동류의 흐름을 제약하여 그 흐름을 직진후 U턴으로 전환시킴으로서 양방향 직진 신호시간을 높여 통과 용량을 최대화함으로써 전체 교차로 지체를 감소시키는 기법이다. 즉, 과포화 상황에서 기존 4현시 운영체제에서 양방향에 대한 전용 좌회전을 직진후 U턴으로 유도하는 2현시 신호운영으로 전환하는 제어 방법이다. 이 경우 양방향 교차로 편도 3차로 이상의 간선도로 기능을 수행해야 하며, 마찬가지로 U턴을 위한 양방향으로 충분한 교차로 간격과 전용차로가 필요하다.

위의 신호제어 기법들에 대한 운영효과 및 적용기준을 제시하고 각 신호운영 방법에 따른 모의실험을 실시하여 연구의 타당성을 검증한다.

구분	신호제어①	신호제어②
당초		
개선		
	전용 좌회전 4현시에서 주방향 좌회전을 직진후 U턴으로 유도하는 3현시 체계로 전환 g1+g5: P턴, U턴으로 유도 g3+g7, g4+g8 : 고정 Barrier쪽은 유지하되 현시체계만 조정	전용 좌회전의 4현시에서 양방향 좌회전을 직진후 U턴으로 유도하는 2현시 체계로 전환 g1+g5, g3+g7 P턴, U턴으로 유도 양방향에 대한 직진 용량 증대 효과 Barrier쪽은 유지하되 현시체계만 조정

[그림 6] 좌회전 제약에 따른 방향 전환 기법

3. 본 신호제어 기법에 따른 운영 효과

본 연구의 신호제어 기법에 따른 운영효과를 평가하기 위해서 각 접근로 용량산정 및 연동효과를 분석하였다.

1) 용량산정

과포화 신호제어 기법에 따른 교차로 접근로의 용량 증대 효과를 분석하기 위해서 「도로용량편람(2004)」에 제시한 용량

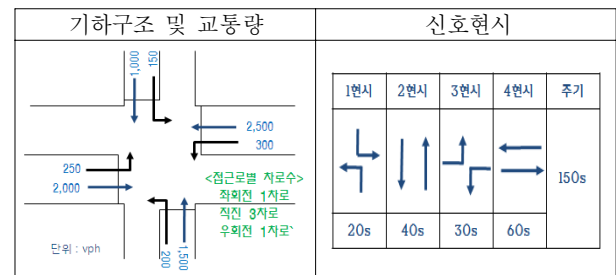
산정식을 이용하여 도출하였다.

전용 우회전 교통량은 용량산정에서 제외시켰으며, 각 현시별 용량 산정시 이동류는 임계이동류(Critical Movement)²⁾를 적용하였다.

$$c = 1,800 \times N \times (g_i / C)$$

여기서, c : 용량(대/시)
N : 차로수
g_i : i현시별 유효녹색시간(초)
C : 신호주기(초)

현시별 접근 용량 산정을 위하여 방향별 5차로(좌,우회전 각 1차로 포함), 전용 좌회전이 허용되는 4현시 신호운영중인 하나의 독립교차로에서 본 신호제어 기법에 따른 용량산정 효과를 분석하였다. 좌회전 제약에 따른 좌회전 차로의 기능은 U턴 전용차로로 변경 설치한다. 특히 중앙분리대가 3m이상인 가로구간일 경우는 각 교차로 간의 좌회전 Bay를 U턴 전용차로로 활용이 가능하다.



[그림 7] 용량산정을 위한 독립교차로 예시도

위의 용량산정 산출 방법은 다음과 같다.

[단계 1] 본 연구의 신호제어 전략에 따른 현시별 유효녹색시간을 산정한다.

	1현시	2현시	3현시	4현시	주기(sec)
당초	남북 좌회전	남북 직진	동서 좌회전	동서 직진	134
	16	36	26	56	
전략1	남북직진		동서 좌회전	동서 직진	134
	16		36	82	
전략2	남북직진		동서직진		134
	52		82		

[단계 2] 각 현시별 이동류의 v/c가 최대값을 갖는 Critical Movement 결정한다.

		1현시	2현시	3현시	4현시
임계 이동류	이동류 방향	NB LT	NB TH	WB LT	WB TH
	교통량(vph)	200	1,500	300	2,500
차로수		1	3	1	3

2) 임계이동류(Critical Movement)는 현시별 이동류 중 v/s비가 큰 이동류를 말한다.

[단계 3] 본 연구의 신호제어 기법에 따른 현시별 접근로 용량 산정한다.

		1현시	2현시	3현시	4현시	TOTAL
용량 (C)	현황	215	1,451	349	2,257	4,272
	기법①	215	1,451	3,304		4,970
	기법②	2,096		3,304		5,400
교통량 (V)	현황	200	1,500	300	2,500	4,500
	기법①	200	1,500	2,800		
	기법②	1,700		2,800		
V/C	현황	0.93	1.03	0.86	1.11	1.05
	기법①	0.93	1.03	0.85		0.91
	기법②	0.81		0.85		0.83

위의 용량산정 결과, 신호제어 기법에 따라 용량값이 소폭 증가하였으나, 이는 단순한 독립교차로의 현시별 접근 용량을 산정한 값이므로 대상지역을 확장하여 전체 네트워크 축으로 산정한다면 교통축에 대한 용량의 개선효과는 크게 될 것이다.

2) 연동효과

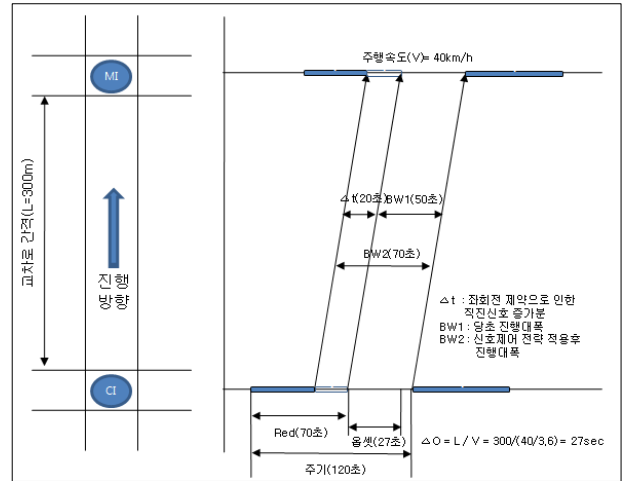
연동화는 신호교차로간 도로를 이용하는 차량을 정지시키지 않고 연속으로 진행시킴으로서 불필요한 정지에 의한 지체시간을 최소화하며, 효율적인 교통개선을 위하여 필요하다. 주행속도, 교차로의 간격, 주기와와의 관계에 따라 동시연동, 교차연동, 연속진행연동으로 구분할 수 있다. 또한 교통량의 많고 적음에 따라 연동의 방향을 바꾸게 되는데 그 중요한 변수가 옵셋³⁾이며, 이 값을 조정하여 교차로를 통과하는 차량이 다음 교차로의 신호를 이용할 때 정지 하지 않고 통과 할 수 있다.

본 연구의 신호제어 기법은 기존의 4현시 운영체제에서 좌회전 이동류를 제약하여 현시수를 감소시켜 직진통과 용량을 높이는 기법으로 이에 따른 주방향에 대한 직진 신호시간이 길어지게 됨에 따라 차량진행대폭(Band Width)⁴⁾이 커지게 된다. 그 결과 직진 이동류에 대한 통과속도가 증가하며, 각 교차로간의 연동을 조정하기가 쉬어 진다.

$$\Delta O = \frac{L}{V}$$

여기서, ΔO : 옵셋
 L : 링크 길이(m)
 V : 주행속도(m/sec)

- 3) 교차로간의 같은 진행방향 현시 시작지점의 차이를 말한다.
- 4) 차량이 도로상의 한쪽 끝에서 다른 쪽 끝까지 정해진 속도로 진행할 때 적색신호의 제약없이 통과할 수 있는 주기시간의 일부로써 진행대를 시간(초)로 나타낸 폭을 말한다.



[그림 8] 연동화 시공도

4. 좌회전 제약 적용 기준

본 연구의 신호제어 기법은 전용좌회전을 허용하는 기존 4현시 신호운영체제에서 방향별 교통수요에 따라 각 좌회전 이동류에 대해 제약을 가하고 좌회전 이동류를 직진후 U턴으로 전환시키면서 직진신호시간을 좀 더 높여 통과용량과 통행속도를 높이고자 하는 것이다. 여기서, 각 신호운영 방법에 따라 장·단점이 분명히 존재하기 때문에 본 신호제어 기법의 적용이 가능한 각 상황별 교통조건에 대한 판단 기준을 정립해야 한다.

1) 지체모형

각 현시체제에 따른 대상 교차로의 총 지체를 아래의 CASE 별 시나리오별로 비교·분석 하였으며, 지체 산정식은 HCM(1997)에서 제시하고 있는 Time dependent stochastic delay model을 이용하였다.

- Time dependent stochastic delay model -

$$d = d_1 \times f_{PF} + d_2 + d_3 \times f_r$$

$$d = 0.50C \frac{(1 - \frac{g_c}{C})^2}{(1 - \frac{C}{g_c} \min(X, 1.0))} + 900X^n T(X-1) + \sqrt{(X-1)^2 + \frac{mkl}{CT}(X-X_0)}$$

$$f_{PF} = \frac{(1-P)f_p}{1 - \frac{g_c}{C}}$$

2) 분석 방법

① 입력자료

지체도는 각 현시별 임계이동류에 대한 전체 교차로의 차로당 평균지체를 사용하며, 주기는 각 교통수요에 따른 TTF 최적신호시간을 적용하였다. 또한, 남북/동서방향 접근로는 동일한 기하구조와 교통조건을 가지고 현시비율은 50:50으로 직진 교통량에 대한 좌회전 교통량 비율은 최소녹색시간을 고려하여 직진 신호시간과 좌회전 신호시간 비율과 동일하게 적용하

였다.

좌회전 교통량 비율은 접근로 직진 1차로당 교통량에 대한 좌회전 교통량의 비로 좌회전 교통량의 비율이 직진교통량보다 높을 경우 전용좌회전에 대한 제약이 의미가 없기 때문에 직진교통량보다 작거나 같게하여 적용하였다.

② 평가지표

교통상황에 따른 현시체계별 적용기준 평가지표(EI)는 아래의 현시별 임계이동류의 평균지체에서 교통량을 곱한 전체 교차로 지체도를 지표로 설정하였다.

$$MIN EI = \sum_i (d_i \times v_i)$$

subject to

$$g_L < g_T, v_L < v_T$$

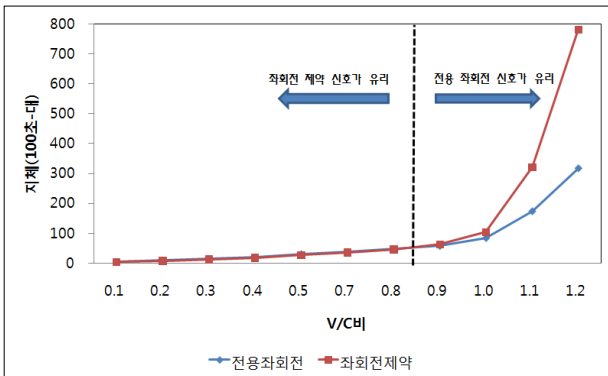
$$g_l + g_t = \frac{C}{2}$$

$$\min g_L = 10s, \min g_T = 30s, 100 \leq cycle \leq 180$$

교통량에 대한 민감도는 $\Delta v = 50$ 대, 접근로 1차로 직진교통량에 대한 좌회전 교통량의 비율의 민감도는 $\Delta v_L = 10\%$ 으로 하여 분석하였다.

3) 분석 결과

아래의 그림은 다양한 교통상황 중에 하나의 예로 접근로 1차로 직진교통량에 대한 좌회전 교통량의 비율이 60%일 때의 현시체계별 지체도 비교 그림으로서 접근로의 지체가 0.8이 넘어가는 순간부터는 좌회전 제약의 본 신호제어 기법보다 기존의 전용 좌회전 신호제어가 유리한 것으로 분석되었다.



[그림 9] 현시체계별 지체도 비교

아래의 표는 다양한 교통상황에서의 지체를 최소화하는 각 신호운영체계 적용 기준을 산정한 값으로 좌회전을 제약하는 본 신호제어 기법의 경우는 대체적으로 좌회전 교통량의 비율이 50%이하 일 때 다양한 v/c비 상황에서도 적용이 유리한 것으로 분석되었고, 반대로 기존의 전용좌회전 신호제어의 경우는 좌회전교통량의 비율이 70%초과하고 접근로 v/c가 0.3이상인 상황에서 유리한 것으로 분석되었다.

<표 3> 본 연구의 신호제어 적용 기준

구분	1차로 직진교통량에 대한 좌회전교통량 비율(%)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
접근로포화도 (v/c)	0.1	EI②	EI②	EI②	EI②	EI②	EI②	EI②	EI②	EI②
	0.2									
	0.3									
	0.4									
	0.5									
	0.6	EI①	EI①	EI①	EI①	EI①				
	0.7									
	0.8									
	0.9									
	1.0									
>1.0	EI①	EI①	EI①	EI①	EI①					

EI① : 기존 4현시 운영(전용좌회전)

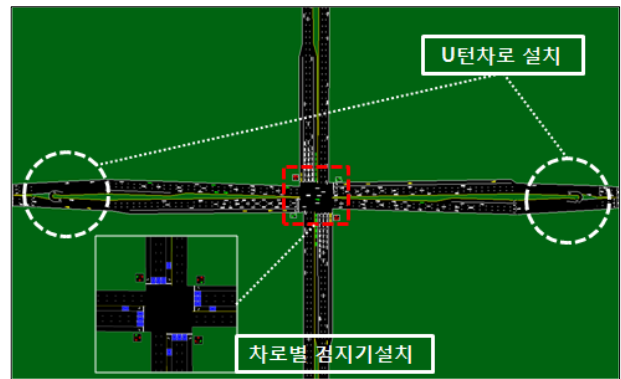
EI② : 본 연구 신호제어 기법(좌회전제약)

VI. 연구의 검증 및 평가

1. 분석자료 수집

미시적 시뮬레이터를 통한 본 신호제어 기법의 효과분석을 위해서 각 접근로의 기능이 동일한 교차로를 대상으로 각 방향별 유입교통량을 좌회전 15%, 직진 75%, 우회전 10%로 승용차로만 구성한다고 가정하였다.

본 연구의 모의실험 네트워크는 아래의 그림과 같으며, 각 방향별 좌회전 전용 1차로, 직진 3차로, 우회전 전용 1차로로 구성하였다.



[그림 10] 모의실험 네트워크

TOD의 경우는 전용좌회전을 허용하는 4현시 운영체계를 적용하고 각 시나리오마다 동일한 조건하에서 T7F를 활용하여 최적신호시간을 산출하여 적용하였고, 감응제어의 경우도 기존의 4현시 체계에서 모의실험 도구인 CORSIM-RTE를 이용하여 구현하였다. 마지막으로 본 신호제어 기법의 경우 좌회전 제약에 따른 현시를 조정하여 직진신호시간은 TOD의 최적신호시간에서 좌회전 신호시간을 직진신호시간에 합하여 산정하였다.

본 연구의 MOE로는 지체도, 통과교통량 및 평균통행속도를 이용하였다.

2. 시나리오 설정

실제 현장에서는 다양한 교통상황들이 발생하기 때문에 이를 최대한 고려하기 위해서 시간대별 교통량 변화에 따른 시나리오를 설정하고 그 결과를 분석하였다.

모의실험 시간은 3600초이며, 300초 단위로 Time Step을 지정하여 시간의 흐름에 따른 분석결과를 제시하였다.

본 모형의 평가를 위한 모의실험 시나리오는 총 2개로 TOD, 감응제어, 본 신호제어로 구분하여 네트워크 평균통행속도, 지체를 통하여 비교·분석하였다.

- 시나리오 1 : 네트워크 남북방향으로는 비포화 상황이며, 동서방향으로 과포화가 발생하는 상황으로 즉, 남북방향의 v/c비는 0.6→0.6, 동서방향의 v/c비는 0.6→1.0으로 변화도록 설정하여 본 신호제어 기법①을 적용하였다.
- 시나리오 2 : 네트워크 양방향에 대한 과포화 상황으로 즉, 남북방향의 v/c비는 0.6→1.0, 동서방향의 v/c비는 0.6→1.0으로 변화도록 설정하여 본 신호제어 기법②를 적용하였다.

아래의 표는 각 시나리오별 교통량 상황을 나타내는 표로 시간에 흐름에 따라 교통량을 변화하게 하여 좀 더 현실적인 모의실험이 되도록 하였다.

<표 4> 시나리오별 교통량 상황

구분		방향별 교통량(veh)			
		시나리오1		시나리오2	
		남북방향	동서방향	남북방향	동서방향
시간 (초)	0~1200	2,120	2,120	2,120	2,120
	1201~2400	2,120	2,660	2,660	2,660
	2401~3600	2,120	3,200	3,200	3,200

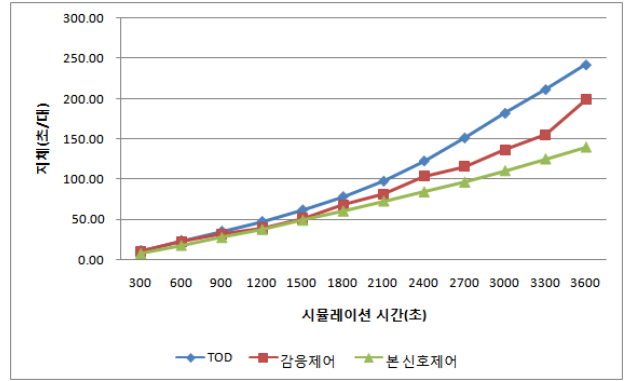
3. 결과 및 해석

1) 시나리오1

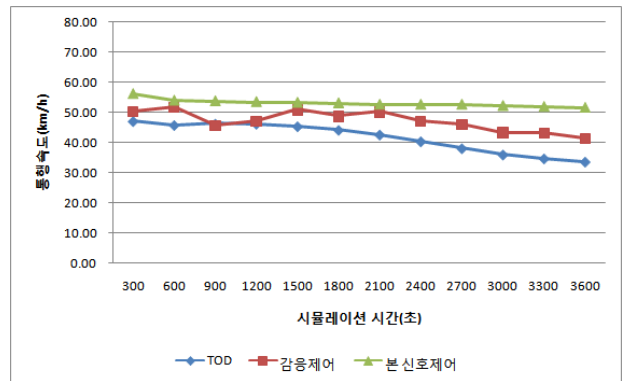
시나리오 1의 시뮬레이션 분석 결과, 대체적으로 본 신호제어 기법의 지체도가 기존 신호운영방법들보다 낮게 나타나고, 평균통행속도는 높게 분석되어 좀 더 효율적으로 분석되었다.

<표 5> 신호운영 방법에 따른 효과 평가(시나리오1)

시간 (sec)	전체 네트워크 지체도(초/대)			전체 네트워크 통행속도(km/h)		
	TOD	감응제어	본 신호제어	TOD	감응제어	본 신호제어
300	11.31	10.63	8.41	47.15	50.38	56.28
600	23.73	22.70	18.41	45.81	51.71	54.08
900	35.26	32.08	28.14	46.28	45.62	53.86
1200	47.44	39.32	38.29	46.24	47.09	53.61
1500	61.83	51.14	49.55	45.41	50.91	53.36
1800	78.39	68.06	61.06	44.19	48.74	53.18
2100	97.64	81.15	73.39	42.63	50.12	52.71
2400	122.79	103.58	84.48	40.36	47.07	52.71
2700	151.40	115.78	96.59	38.05	45.90	52.71
3000	182.26	136.17	110.79	35.96	43.35	52.27
3300	211.75	155.12	125.24	34.66	43.20	51.98
3600	242.50	198.60	139.87	33.57	41.41	51.66



[그림 11] 신호운영 방법에 따른 지체도 비교(시나리오1)



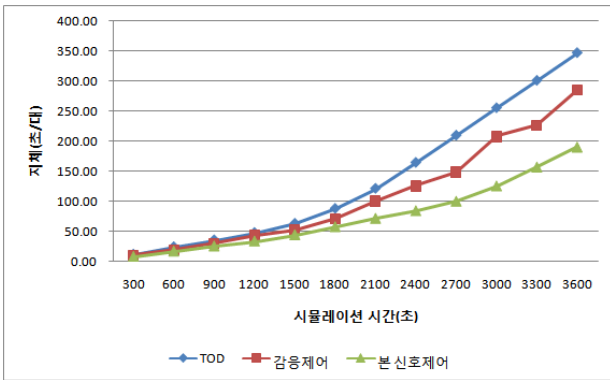
[그림 12] 신호운영 방법에 따른 통행속도 비교(시나리오2)

2) 시나리오2

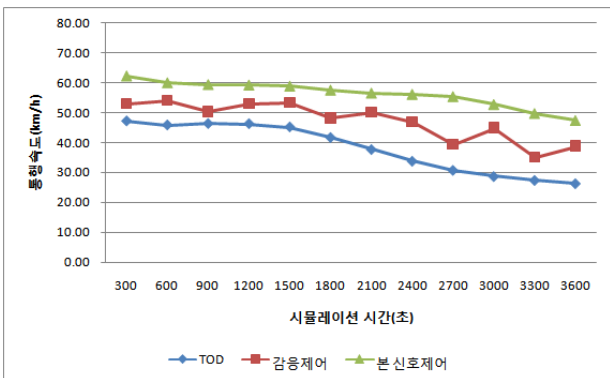
시나리오 2의 시뮬레이션 분석 결과, 본 신호제어 기법의 지체도가 기존 신호운영방법들보다 낮게 나타나고, 평균통행속도는 높게 분석되어 시나리오1의 교통상황보다 좀 더 효율적으로 분석되었다.

<표 6> 신호운영 방법에 따른 효과 평가(시나리오2)

시간 (sec)	전체 네트워크 지체도(초/대)			전체 네트워크 통행속도(km/h)		
	TOD	감응제어	본 신호제어	TOD	감응제어	본 신호제어
300	11.31	10.31	7.32	47.15	53.02	62.20
600	23.73	18.53	16.27	45.81	53.96	59.93
900	35.26	29.82	24.86	46.28	50.29	59.31
1200	47.44	42.92	33.08	46.24	52.95	59.17
1500	62.67	52.20	43.74	45.16	53.27	58.81
1800	87.64	71.32	57.20	41.62	48.08	57.47
2100	120.95	100.35	71.09	37.62	49.99	56.46
2400	164.11	125.38	83.93	33.72	46.90	56.06
2700	209.32	148.52	99.76	30.69	39.37	55.31
3000	255.11	207.45	125.36	28.63	44.85	52.67
3300	300.67	226.71	157.14	27.33	35.03	49.67
3600	346.78	285.03	190.45	26.24	38.72	47.33



[그림 13] 신호운영 방법에 따른 지체도 비교(시나리오2)



[그림 14] 신호운영 방법에 따른 통행속도 비교(시나리오2)

V. 종합결론 및 향후과제

본 연구는 과포화 교차로에 대한 지체 완화를 위해 현시운영 체계 조정을 통한 직진이동류의 신호시간을 최대화하는 기법을 적용하여 그 효과를 평가하였다. 또한, 본 신호제어 기법에 따른 용량 및 연동에 관한 운영효과를 제시하였으며, 직진 교통량에 대한 좌회전 비율, v/c비 등 각 교통 상황에 따른 좌회전 제약의 적용 기준을 정립하였다.

그 결과, 본 신호제어 기법의 경우 대체적으로 좌회전 교통량의 비율이 50%이하 일 때 다양한 v/c비 상황에서도 적용이 유리한 것으로 분석되었고, 반대로 기존의 전용좌회전 신호제어의 경우는 좌회전교통량의 비율이 70%초과하고 접근로 v/c가 0.3이상인 상황에서 유리한 것으로 분석되었다.

시나리오 별 효과 분석에서도 본 신호제어 기법이 다른 신호운영방법들 보다 더 효율적인 것으로 평가 되었다.

그러나 본 연구는 단순히 모의 네트워크를 대상으로 연구를 실시하여 실제 현장의 교차로에 대해서 직접적인 분석이 되지 못하였으며, 실시간으로 수많은 상황이 일어나는 실제 네트워크의 기하구조와 교통량을 바탕으로 분석을 실시할 필요성이 있다. 나아가 다양한 교통상황을 반영하는 시나리오 분석을 통한 모의실험 분석결과와 실제 현장에 적용하였을 때의 결과가 동일한 지에 대한 검증이 필요할 것으로 판단된다.

마지막으로 본 연구의 신호제어 기법을 실시간 신호제어시스템 내 적용할 수 있는 방안과 적용대상을 하나의 교차로가 아닌 도심 내 전체 교통축을 대상으로 하는 축 신호제어의 개념으로 확장하여 향후 연구가 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

‡ 국내문헌

1. 원재무 · 최재성(1999), "개정판 교통공학", 전영사
2. 도철웅(1999), "교통공학원론(상)", 청문각
3. 박창호외11명(2000), "교통공학개론" 영지문화사
4. 건설교통부(2000), "도로의 구조 · 시설기준에 관한 규칙 해설 및 지침"
5. 남백(2002), "과포화 신호교차로에서의 용량증대를 통한 혼잡관리방안에 관한 연구", 아주대학교
6. 이승환 · 이상수 · 이성호(2003), "서울시 실시간 신호제어시스템내 내부미터링 제어전략 도입방안", 「대한교통학회지」, 21(4): 79-90
7. 건설교통부(2004), "도로용량편람[2004]", 대한교통학회
8. 노동수(2004), "실시간 신호제어시스템에서 과포화상황에서의 현시배분방안 연구", 아주대학교
9. 이성호(2004), "과포화시 도시간선도로에서의 실시간 내부미터링 제어전략 개발", 아주대학교
10. 김수희(2007), "과포화 교통축에서의 비공통주기 기반 신호운영방법론 개발", 아주대학교
11. 송명균(2007), "Internal metering을 이용한 과포화 네트워크 신호제어 알고리즘에 관한 연구", 서울대학교
12. 서울특별시청 · 도로교통안전관리공단(2008), "서울특별시 교통신호 제어시스템 관리자 매뉴얼"
13. 서울특별시청 · 도로교통안전관리공단(2008), "교통신호 제어시스템 기술운영보고서(기술운영 및 주행조사)"

‡ 국외문헌

1. TRANSYT-7F Users Guide(1998), University of Florida.
2. Tang-Hsien Chang, Jen-Ting Lin(2000), "Optimal signal timing for an oversaturated intersection", Transportation Research Part B 34 (2000) 471-491, Department of Transportation Science, Tamkang University.
3. Tang-Hsien Chang, Guey-Yin Sun(2001), "SYNCHRONOUS SIGNAL CYCLE OPERATION FOR OVERSATURATED TRAFFIC NETWORKS", Journal of the Chinese Institute of Engineers, Vol.24, No. 1, pp. 95~102.
4. FHWA(2003), "CORSIM User's Guide/CORSIM Reference Manual Version 5.1"
5. FHWA(2003), "CORSIM Run-Time Extension(RTE) Developer's Guide"
6. McShane, W.R. · Roess, R.P.(2004), "Traffic Engineering", Prentice hall.
7. Edward B. Lieberman, Jinil Chang, "Optimizing Traffic Signal Timing Through Network Decomposition" Journal Transportation Research Record, 2007.