

간선도로 교차로의 TOD 시간계획 최적화 및 현장적용 평가

Optimization of TIME-OF-DAY and Estimation on the Field Application for Arterial Road

이 인 규

(서울시립대학교 교통공학과
박사과정)

이 호 상

(서울시립대학교 교통공학과
박사과정)

김 영 찬

(서울시립대학교 교통공학과 교수)

목 차

- I. 서론
 - 1. 연구의 배경 및 목적
 - 2. 연구의 범위 및 방법
 - II. 선행연구 고찰
 - III. TOD 시간계획 수립 방법
 - 1. 교통조사
 - 2. 제어단위 결정
 - 3. 시간경계 결정 방법론
 - 4. 신호 최적화
 - IV. 시뮬레이션 평가 및 현장적용
 - V. 시뮬레이션 평가
 - 1. VISSIM 모형과 데이터 구축
 - 2. 분석 시나리오
 - 3. 분석결과
 - 4. 현장적용 및 결과
 - VI. 결론 및 향후 연구과제
- 참고문헌

Key Words : 교통신호제어, TOD 시간계획, TOD 시간경계, 신호최적화, 현장평가
Traffic Signal Control, TOD Time Plan, TOD Break Point, Signal Optimization, Field Evaluation

요 약

최근에 활발히 진행된 ITS사업과 신호개선사업으로 인해 신호제어 시스템의 온라인화와 실시간 신호제어시스템이 도입되어 교통신호제어기의 첨단화가 진행되었다. 하지만 실시간 신호제어 운영변수 산정의 기초가 되고, 현재 가장 일반적으로 이용되는 신호교차로의 제어방법으로 사용되는 TOD제어의 운영을 위한 효과적인 신호시간계획을 위한 방법론이 부재되어 왔다. TOD 시간계획의 최적화를 수행하는 과정은 신호교차로의 효율성 제고를 위해 매우 중요한 작업이며, 최적화 수행과정의 정립이 필요한 실정이다. 본 연구에서는 TOD 시간계획 작성 시 가장 선행되어야 할 Sub Area 결정 방법과 침두시와 비침두시의 시간 경계를 결정하는 방법론에 대해서 정의하고, 각 방법론에 의해 결정된 시간경계 구간의 신호제어 변수를 신호최적화 모형을 통해 산출하였다. 최적화된 신호제어 변수의 효과를 분석하기 위해 서울시의 동2로 간선도로 구간에 새로운 TOD 시간계획을 적용하고 필드테스트를 수행하였으며, 이러한 TOD 시간계획의 적용 효과를 사진/사후 분석을 통해 검증하였다.

Traffic signal control is one of the most cost-effective means of improving urban mobility. With the recent progress of ITS (Intelligent Transportation System) and the installation of the real time traffic control systems, traffic signal control is conducted in online and real time. Normally, time-of-day (TOD) signal control is used with the system, but no definite methodology has yet been available for efficient TOD signal planing designing. Such method and process are in need to optimize the traffic signal timing plan. This paper proposes the optimization of TOD signal timings on arterials. The effects of the signal timings from the proposed method were assessed in the field. The proposed includes the methods determining the separation of the TOD break points and the TOD intervals. Those were tested on an arterial consisting of ten coordinated signalized intersections. It was found from the test results that the proposed TOD signal timing plans outperformed the previous signal timings.

1. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

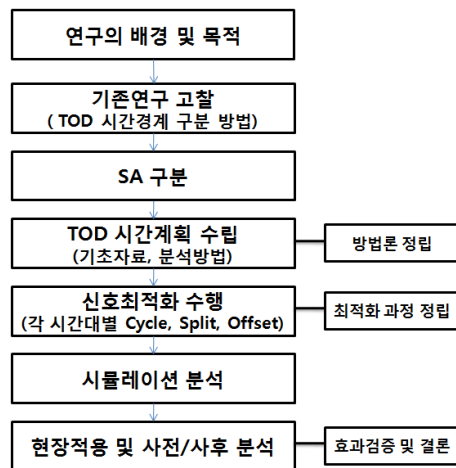
첨단 신호제어시스템을 활용한 다양한 신호제어유형 중 하나인 TOD(Time-Of-Day) 제어는 일중 동일한 교통량 패턴 또는 교통수요를 나타내는 시간대를 구분하여 시간그룹으로 구분함으로써 고정된 신호시간을 부여와 함께 효율적인 교차로 운영을 하는 신호제어 방법이다. 이때 적용되는 시간대별 신호운영변수 적용계획을 TOD 시간계획으로 정의한다.

그동안 활발히 진행되어 왔던 ITS사업과 여러 신호개선사업으로 인해 신호제어 시스템의 온라인화와 실시간 신호제어시스템이 도입되어 교통신호제어의 첨단화가 지속적으로 진행되어 왔다. 현재 가장 일반적인 신호교차로 제어방법으로 사용되고 있는 TOD제어의 신호시간계획 수립은 효과적인 신호제어를 위해 매우 중요한 작업이다. 이러한 TOD 신호제어가 적절한 신호시간계획으로 효율적으로 운영되었을 때, 가장 효과적인 신호교차로 운영 수단이 될 수 있다. 지금까지 이러한 중요성에도 불구하고 정량적 수치와 명확한 방법론에 의한 작업이 아닌, 운영자나 엔지니어의 경험에 의존하여 시간계획을 작성하는 경우나, 혹은 일반적인 첨두시간대와 비첨두시간대의 2가지 형태로 TOD 시간계획이 수립되는 경우도 있어왔다. 또한 TOD 시간경계 구분의 기준이 되는 교통량에 대한 명확한 정의가 부족하였고, 상·하행 중방향 교통량의 패턴변화를 고려하지 못하여 교통축의 연동효과가 떨어지는 문제가 발생하였다. 따라서 본 연구를 통해 TOD 시간계획 수립을 위한 명확한 방법론을 제시하고, 기존의 문제점을 해결하는 방안의 모색이 필요하다. 본 논문은 이를 위해 기존의 TOD 시간계획의 문제점을 보완하고, 현장분석을 위한 교통조사 방안, TOD 시간계획 수립과 신호최적화를 위한 프로세스를 정의하는 것을 연구의 목적으로 한다. TOD 시간계획 작성 시 가장 선행되어야 할 교통조사와 Sub Area 결정 방법을 제시하고, 정략적 기준에 의한 TOD 시간경계 결정과정을 정의하였다. 그리고 제안된 방법론에 의해 결정된 시간경계구간의 신호제어 변수를 신호최적화 모형을 통해 최적화하였고, 시뮬레이션 평가를 통해 효과를 검증하였다. 제안된 방법론에 의해 도출된 신호제어변수는 실제 서울시 동2로 신호개선 시범운영 사업구간에 적용하여, 사전/사

후 모니터링 분석을 통해 TOD 시간계획 최적화 효과를 검증하였다.

2. 연구의 범위 및 방법

본 연구는 단속류 신호교차로의 제어 유형 중 하나인 TOD 제어를 위한 시간계획의 산출과정을 정립하고, 그 효과를 검증하는데 목적이 있으며, 연구에서 제시된 방법론에 의해 산출된 신호제어 변수를 실제 현장에 적용하여 그 효과를 분석하였다. 서울특별시 중랑구 동2로의 동1로 지하차도부터 군자교사거리까지 총 10개 교차로를 대상으로, 2010년 4월 2일부터 5일까지 평일과 토요일, 일요일(공휴일)의 교통량, 속도, 대기행렬길이 등의 현장조사 자료와 GPS장치를 장착한 차량의 주행조사를 통해 분석한 데이터를 이용하여 연구를 수행하였다. 수집된 현황자료를 이용하여 정량적/정성적 방법에 의해 2개의 SA(Sub Area)를 구분하였고, 군집분석에 의한 TOD 시간경계 결정방법을 제안하였다. 평일·토요일·일요일의 각 TOD 시간경계에 대해서 간선축 신호최적화 프로그램을 통한 최적 신호제어 변수를 산출하였으며, 마이크로 시뮬레이터를 통해 그 효과를 검증하였다. 최종적으로 입증된 TOD 신호시간계획을 토대로 동2로의 대상구간 교차로에 2010년 7월 1일부터 새로운 TOD 시간계획을 적용하여 현장평가를 수행하였다. 최적화된 TOD 시간계획의 적용 효과를 분석하기 위해 7월 9일부터 11일까지 교통류 상태의 변화를 모니터링 하고, 사전/사후 분석을 수행하였다.



〈그림 1〉 연구의 수행과정

II. 관련 연구의 검토

TOD 시간계획과 관련된 연구는 시간경계의 최적화 방법론과 그에 따른 제어효과의 분석이 주를 이루고 있다. 특히 시간경계 구분에 있어 다양한 방법론이 개발되어 왔으며 그에 따른 편익을 시뮬레이션을 통해 증명하고 있다.

Smith(2001) 등은 계층적 군집분석 알고리즘을 이용한 Data mining 기법을 적용하여 최적 시간경계를 결정하는 방법론을 제시하였다. 계층적 군집분석 알고리즘을 토대로 TOD 시간경계에 대한 윤곽(outline)을 제시하는데 초점을 맞추었으나 주기변화의 최소 시간간격에 대한 고려가 없어 TOD 시간변화가 빈번하게 발생하였으며, 이에 따른 교통류 충격이 발생하였다. 또한 엔지니어의 직관으로 최적해를 산출하여 정량적 방법론으로는 부적합하였다. 이와 유사한 방법론으로 Scherer(2000) 등은 Data Mining tool을 통해 교통 조건에 따른 TOD 시간계획의 시간적 변동시기를 정의하였으며, 통계적 Clustering 분석과 TOD 시간계획을 시간대 별로 분류하는 연구를 수행하였다. 이 연구를 통해 시간경계의 이전 및 확장 등의 변동 시기를 정의하였다. 사례연구에서는 회귀 분석모형을 사용하여 교통 조건 변화에 따른 TOD 시간 간격을 자동적으로 모니터링 할 수 있다는 것을 증명하였고, 신호시간 설계 방안의 실효성에 대해서도 증명하였다.

Hauser(2001) 등은 Data Mining Tool을 이용하여 TOD 시간계획의 시간경계를 결정하는 방법론 개발을 연구하였다. ITS의 신호제어시스템과 결합한 모니터링 체계를 구축함으로써 시간경계를 결정하는 자동화 프로세스를 구축하였고, 시뮬레이션 분석을 통해 신호시간의 전이기간(Transition) 동안 발생하게 되는 비용을 분석하여 최적의 신호시간대를 구성하는 방법론을 개발하였다.

정영재(2008)는 비계층적(Non-hierarchical) 군집화 방법으로 K-Means Clustering 방법을 이용한 시간경계 구분방법을 독립교차로에 적용하였다. 이 방법을

통해 객관적이고 효율적인 TOD 시간간격을 산출하여 교차로의 지체를 감소시켰다. 하지만 K-mean method의 초기 군집 수에 대한 결정을 엔지니어링의 직관에 맡기고 있으며, 시간경계 구분이 모호한 구간에 대한 해결책이 미비하였다.

통계적 군집화 분석의 또 다른 연구로써 Park(2004)은 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)을 이용한 heuristic 군집화 기법을 이용하여 실제 적용이 가능한 자동화된 시간경계 프로세스를 작성하여 시간경계 값을 산출하였다. HCM을 기반으로 하여 GA를 사용한 최적해를 산출하였으나, 교차로간의 연동에 대한 고려가 없고, 연산 수행 시간이 오래 걸리는 단점이 있다.

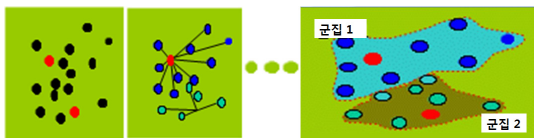
이와 유사하게 Lei Jia(2006) 등은 Artificial Immune Theory를 기반으로 하는 Data Clustering 알고리즘을 적용하였다. 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)을 기반으로 한 Hierarchical Clustering 기법적용을 통해 대규모 네트워크에서 수집되는 정보를 실시간으로 분석하여 군집화를 수행함으로써 TOD 시간계획의 시간경계를 결정할 수 있도록 하였다. 이 방법론은 현재 버지니아 교통국의 Northern Virginia Smart Signal System에 적용되어 운영 중에 있다.

Hua와 Faghri(2005)는 Dynamic Programming을 이용한 TOD 시간계획의 시간경계 결정 방법론을 개발하여 주기, 현시, 연동 등의 신호운영변수를 최적화하는 연구를 수행하였다. 분석시간대의 길이가 클 경우, 최적해를 찾는 과정에 많은 시간이 필요하고, 교통량에 너무 민감하게 결과값을 제시하는 문제를 나타내었다.

시뮬레이션 도구를 이용한 TOD 신호시간 산출 방법으로 Park(2008)은 TRANSYT-7F 프로그램을 이용하여 초기 시간경계 값을 결정하였다.

TRANSYT-7F로 각 단위시간대의 최적주기를 구하고, 이를 이용하여 동일한 주기의 시간대를 초기 시간경계 값을 결정한다. 이후에 Greedy Search Method를 이용하여 초기 시간경계 지점의 전후 15분 간격에 90분 범위를 시뮬레이션 도구를 이용하여 분석하고, 이때 산출된 결과값으로 지체시간이 낮은 구간을 Best Break Point로 선정하여 초기시간경계의 오류 가능성을 보정하였다.

선행연구에 대한 종합적인 검토 결과 대부분의 연구에서 계층적·비계층적인 군집화분석이나 GA 알고리즘에 의한 최적화 프로그램을 개발하여 적용하고 있으며, 일반적인 신호최적화 프로그램을 이용하여 동일한 패턴



〈그림 2〉 군집분석 개념

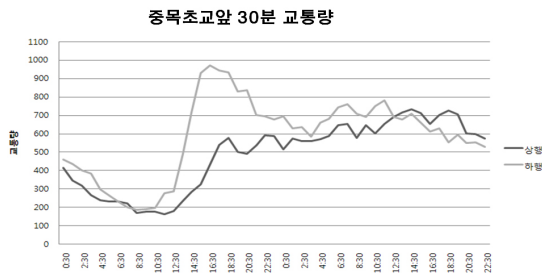
의 시간대를 구분하기도 하였다. 그러나 시간경계의 기준이 되는 교통량에 대한 명확한 정의가 부족하고, 상·하행 중방향 교통량의 패턴변화에 대한 고려가 부재하여 교통축의 연동효과가 떨어지는 문제점이 발생하여 이에 대한 보완이 요구된다.

III. TOD 시간계획 수립 방법

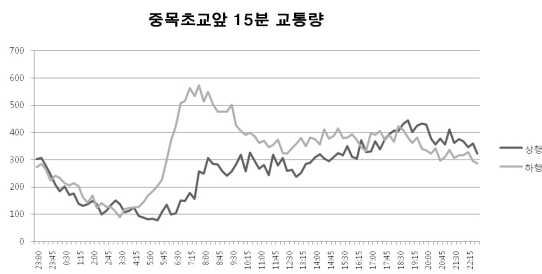
1. 교통조사

TOD 시간계획을 세우기 위해서는 일반적으로 서로 다른 통행패턴을 보일 것으로 예상되는 평일·토요일·일요일에 대하여 24시간동안의 주방향의 주요지점에서 통과교통량을 수집한다. 기계식 검지기를 사용하여 주방향 상/하행의 2개 이상 지점에서 모든 차로의 통과교통량을 조사하고, 24시간 동안의 교통량 및 속도, 점유율 등의 분석에 필요한 자료를 수집한다.

자료수집 및 분석시간 단위는 링크의 길이와 교차로의 신호주기를 고려하여 30분 단위로 결정한다. 동2로와 같이 160~180초의 주기를 사용하는 구간에서 15분 단위로 교통량을 산출하게 되면, 신호교차로 간의 간격이 좁고 신호주기가 짧을 경우에 교통량의 일시적 변동이 커지므로 동일 시간대의 잦은 군집의 변화가 발생될



〈그림 3〉 동2로 30분 가로교통량 조사결과 예시



〈그림 4〉 동2로 15분 가로교통량 조사결과 예시

가능성이 크다. 이러한 경우에 시간경계 결정이 어렵고, 잦은 신호시간 변경을 야기하므로 오히려 이동류의 지체를 유발할 가능성이 있다. 〈그림 4〉에서 동2로의 15분 교통량 조사결과를 살펴보면 교통량의 변동이 〈그림 3〉에 비해 많아진 것을 볼 수 있다.

이동류의 통행패턴을 분석한다는 의미에서 이러한 경우에는 30분 단위로 데이터를 수집하여 분석에 적용하는 것이 바람직하다.

2. 제어단위 결정

교차로의 효율적인 신호운영과 교차로 간 연동제어 운영을 위하여 교통류에 영향을 미치는 가로망 형태, 교통패턴의 변화, 주교통류의 방향 등을 고려하여 교통상황이 유사한 교차로를 묶어 하나의 그룹으로 구성하는데, 이를 제어단위(SA, Sub-Area)라 한다. 이러한 제어단위의 구성에 따라 교차로간의 연동효과가 다르게 나타난다. 본 연구의 분석구간인 동2로의 교차로를 대상으로 정성적 기준과 정량적 기준을 고려하여 SA를 구성하였으며, 그 기준은 다음과 같다.

동1로 지하차도와 군자교사거리는 지하차도가 포함된

〈표 1〉 SA 선정 기준

정성적 기준	정량적 기준
1. 교통패턴의 연속성	1. 신호제어기의 형태
2. 교차로 운영주체	2. 도로의 기능
3. 도로의 공사유무	3. 교차로 기하구조 형태
4. 미드블록의 방해	4. 교차로간 거리
5. 기타 고려요소	5. Coupling Index (CI = V/D ²) V: 양방향교통량(1000대/시) D: 교차로간 거리

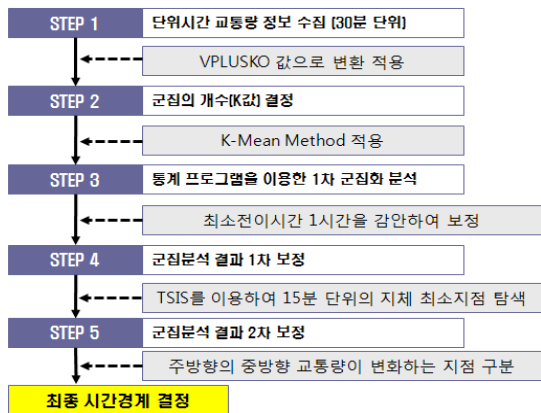


〈그림 5〉 분석구간의 제어단위 구성결과

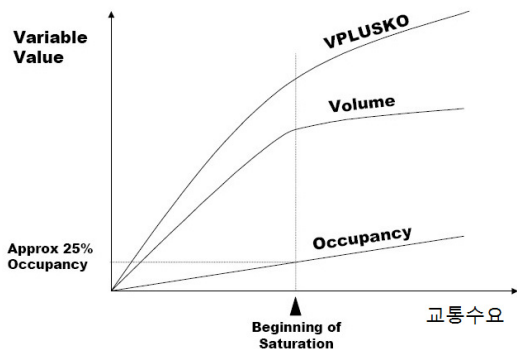
입체교차로로써 분석대상교차로와 서로 다른 교통류특성을 보이고, 장안교 사거리~면목4동치안센터는 교차로 간 거리가 600m를 초과하여 연동효과가 미약하므로 분리하였다. 따라서 단일로 횡단보도를 포함한 4개의 교차로와 6개의 교차로로 SA를 구성하였다. <그림 5>는 분석구간의 SA 구성결과이다.

3. 시간경계 결정 방법론

TOD 시간계획을 결정하기 위해 가장 중요한 과정중의 하나가 통행패턴에 따른 TOD 시간경계를 결정하는 과정이다. 효율적인 TOD제어를 위해서는 교통조사를 통한 정량적인 방법으로 정확한 제어단위 별 통행패턴을 분석하고, 명확한 방법론에 의해 TOD 시간경계를 결정하는 것이 필요하다. 다음과 같은 5단계의 시간경계 구



<그림 6> TOD 시간경계 결정 방법론



<그림 7> VPLUSKO 지표

자료: Advanced Signal Timing Concepts, Developed for the Institute of Transportation Engineering Educational Foundation Inc. pp.6~9.

분과정을 통해서 분석대상 구간의 24시간 통행패턴을 결정한다.

Step 1은 평일, 토요일, 일요일의 교통량과 점유율 등의 교통자료를 통행패턴 변화의 최소시간인 15분 단위로 수집한다. 15분 단위 교통량의 변동이 클 경우, 30분 단위의 교통량을 분석에 적용한다.

이때 교통량만으로 TOD 시간경계를 분석하게 되면, 서로 다른 교통상황에서 동일한 밀도값이 관측될 수 있다. 따라서 교통량 척도만으로 시간경계를 구분했을 경우에 나타날 수 있는 잘못된 교통상황 판단오류를 제거하기 위해서 VPLUSKO 값을 적용한다.

이때 사용되는 교통량은 양방향 30분 교통량 중 더 많은 중방향 교통량을 적용하여 사용한다. 방향별 최대 교통량을 사용함으로써 침두시간대와 같이 중방향이 분명한 교통패턴에서 중방향 교통류에 최적신호를 제공할 수 있다.

VPLUSKO는 교통량과 점유율의 선형결합식이 링크의 혼잡도와 선형적인 관계를 갖는다는 가정 하에 제안된 모형이다. 그 지표값의 정밀성은 떨어지지만 단순성에 비하여 어느 정도의 교통류 패턴변화의 예측력은 있어 개략적인 혼잡도 판정의 용도로는 사용될 수 있다고 판단된다.

$$VPLUSKO = VOL + K * OCC$$

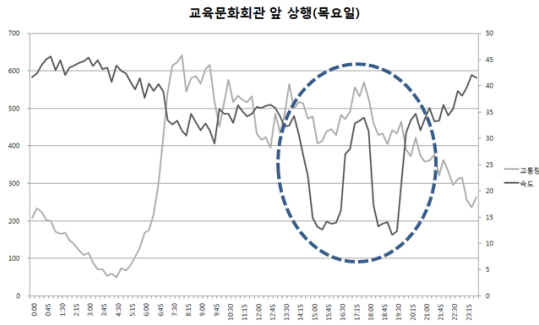
여기서, VOL : 단위시간 교통량(대)
 K : 교통량과 점유율의 가중치
 (User Define ≈ 20)
 OCC : 점유율

여기서 K값은 일반적인 신호교차로의 포화교통류를 2000(대/시)로 가정하고, 점유율 값이 100일 때 K값을 20을 사용하면 2000대의 교통량이 산출된다. 이와 같이 K값은 교통량과 점유율 간의 가중치를 나타내는 계수로써 일반적으로 20을 사용하며, 일반적인 도시부 도로의 VPLUSKO 값을 산출할 때 사용한다. (K값은 사용자가 임의로 설정하여 사용 가능)

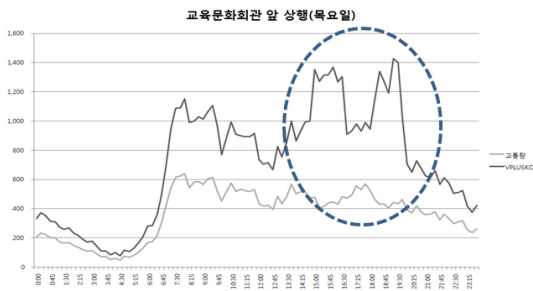
강남대로의 교육문화회관 앞 목요일 24시간 교통량 자료를 이용하여 VPLUSKO 값을 산출하여 보았다.

<그림 8>의 교통량-속도 그래프를 보면, 15시경에 교통량이 감소함에도 속도가 따라서 감소하는 현상을 볼 수 있다.

하지만 VPLUSKO-속도 그래프에서는 같은 시간대



〈그림 8〉 VPLUSKO 지표 적용 전



〈그림 9〉 VPLUSKO 지표 적용 후

의 위치에서 VPLUSKO 값이 크게 증가함을 보여주고 있어 교통량 척도만을 사용했을 경우 나타날 수 있는 잘못된 교통상황인지의 제거가 가능함을 보여주고 있다.

VPLUSKO의 적용효과는 위에서 보는 바와 같이 과포화시에 잘못된 교통상황을 인지하여 현황과 다른 교통패턴에 대한 TOD 시간계획을 도출하는 결과를 사전에 방지할 수 있다. 따라서 혼잡한 도로에 대해서는 교통량 대신 VPLUSKO 지표를 적용하여 시간경계 구분하는 변수로 사용하고, 비포화 상태의 도로에서는 조사된 교통량을 시간경계 구분의 지표로 활용하는 것이 바람직하다. 하지만 교통량 자료를 이용할 경우 반드시 시간대별 속도변화 그래프로 비교하여 이상치가 존재하는지 확인해야 한다.

Step 2는 시간경계의 총 개수를 결정하는 단계로서, 시간경계의 군집수를 사전에 산정하는 문제는 군집분석의 최적해 공간을 결정해주는 중요한 작업이다. 하지만 적절한 군집의 개수를 정하는 것은 아직까지 명확한 기준이 없어 연구자의 해석에 따라 방법론의 차이를 가지고 있다. 김기영(1990)은 일반적으로 적절한 군집수를 결정하기 위해서는 군집의 개수에 대응되는 판정기준의 값을 플롯(plot)하여, 그 값이 급격한 증가 혹은 감소가

발생하는 곳에서 대응되는 군집의 수를 이용한다고 하였다. 또한 송민경(2010)은 semi-partial R-square, pseudo-F, pseudo-t square, cubic clustering criterion 등의 방법으로 군집수를 분석하기도 하였다. 그러나 군집의 개수를 결정하는 분석방법마다 오차가 발생하고, 분석가의 주관이 개입되기 때문에 본 연구에서는 작업의 용이성을 고려하여 교통조사에 의해 작성된 교통량 곡선을 활용하였다. 그래프에서 변곡점의 수 및 양방향의 교통량 곡선이 교차하는 지점수를 군집의 개수로 정의하고, 그래프 상에서 교통량의 변화가 명확하게 나타나며 인접한 변곡점과 10% 이상의 교통량 차이가 발생하는 지점을 기준으로 교통패턴 변화를 판단하였다. 그 결과 〈그림 10〉과 같은 8개의 시간경계 수를 산출하였다.

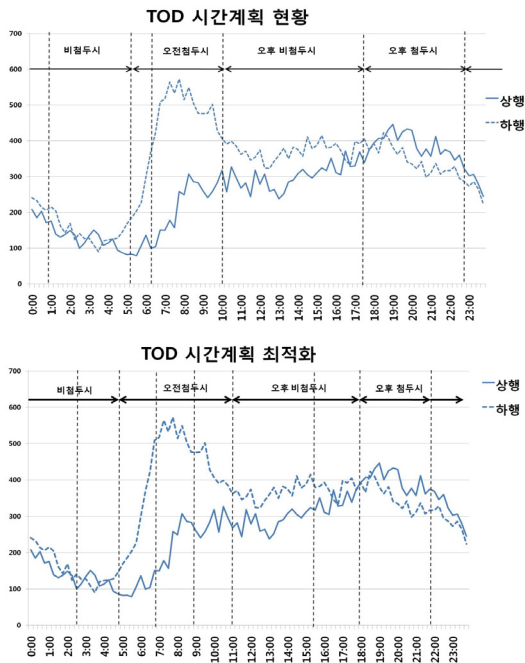
Step 3은 선정된 군집수를 토대로 통계 프로그램을 이용한 K-Means 군집화 방법을 사용한다.

MacQueen(1967)이 제안한 K-Means 군집화 방법은 큰 자료의 개체 군집화에 효율적이며, 데이터 저장공간 확보 등에 있어 용이한 이점이 있다. K-Means 군집화 방법을 이용한 분해적 알고리즘 과정은 다음 4가지 단계를 거친다.

- 1) k개의 임의의 개체를 초기 중심값으로 선택한다.
- 2) 남아있는 (n-k)개의 개체들을 군집들의 중심과 가장 가까운 군집으로 배정한다.
- 3) 개별 군집에 대해 거리의 제곱평균을 최소로 하는 새로운 중심점을 계산하며, 이때 산술평균이 적용된다.
- 4) 위의 둘째와 셋째의 과정을 계속적으로 반복한 후 어느 개체도 다른 군집에 재 배정되지 않을 때 최종 중심값(centroid)과 이 군집에 속하는 개체들의 그룹화는 종료하게 된다.

본 연구에서는 이러한 자료의 군집화를 위해 통계 프로그램인 SPSS를 사용하여 분석을 수행하여 초기 시간경계 값을 산출하였다.

Step 4는 주기변화의 최소 시간간격을 고려한 군집분석 결과에 대해 보정을 수행하는 과정이다. 산출된 시간경계 값을 현장에 적용함에 있어 신호시간의 변동이 잦을 시에 교통류에 영향을 미치는 지체 및 충격력을 완화하고, 사전에 방지하기 위해서는 주기변화의 최소 시간간격을 1시간으로 사용해야 한다. 시간경계 산출 결과에



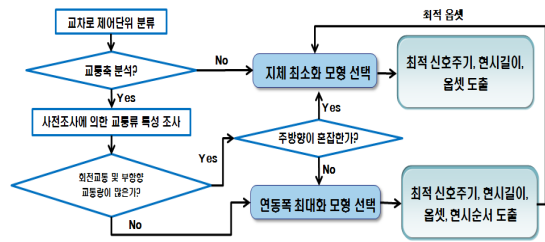
〈그림 10〉 TOD 시간계획 결정 결과

서 최소 시간간격이 1시간 미만일 경우, 인접 교통량 패턴 및 밀도 등 교통패턴이 유사한 군집단위로 이동하여 보정을 수행한다. K-Means 군집화 방법을 사용할 경우, 사용된 교통량의 수집주기에 따라 1시간미만의 군집이 발생하게 된다. 이러한 보정과정에서 시간경계의 구분이 모호할 경우에는 30분 단위로 이전시간대, 다음시간대, 1시간으로 보정하는 3가지 경우에 대하여 각각 시간경계를 이동하면서 시뮬레이션을 수행하고, 평균통행시간이 가장 낮은 시간을 보정된 시간경계로 결정한다. 본 논문에서는 VISSIM 모형을 사용하여 이에 대한 보정을 수행하였다.

Step 5는 상행과 하행교통량의 중방향 교통패턴에 대한 보정으로, 〈그림 10〉 TOD 시간계획 현황에서의 17시 30분에 교통상황처럼 상·하행 중방향이 바뀌는 교통패턴의 변화가 일어나는 시점에 대해서는 시간경계를 추가해야한다. 앞선 5개의 과정에 의해 K-Means 군집화를 분석대상구간에 적용한 결과, 다음과 같은 TOD 시간계획 결과가 도출되었다.

4. 신호 최적화

새로운 TOD 시간계획의 최적 신호제어 변수를 산출



〈그림 11〉 신호 최적화 과정

하기 위해서 교통조사를 통해 수집한 자료를 바탕으로 신호최적화 프로그램을 사용하여 신호최적화를 수행한다. 사업구간의 통행특성과 시설물 설치, 도로의 기능에 따라 신호최적화 모형을 다르게 적용해야 한다.

단일교차로 및 집·분산도로, 네트워크 형 교차로군의 경우에는 전체 네트워크의 지체감소가 중요하므로 T-7F나 Synchro 등의 지체최소화 모형을 이용하여 교차로 효율을 높인다.

주간선도로의 최적화에는 PASSER-V나 KS-Signal과 같은 연동폭 최대화 모형을 사용하여 주방향 진행차량의 통과폭을 최대화하고, 정지수를 최소화하여 교차로 이용효율을 극대화 한다.

본 연구에서는 최적화 프로그램으로 간선도로 연동폭 최대화 프로그램인 PASSER-V를 이용하여 SA 내의 신호제어 변수 중에서 주기, 율셋, 현시길이를 최적화하였고, 독립교차로의 경우에는 지체최소화 프로그램인 TRANSYT-7F를 사용하여 신호최적화를 수행하였다.

도로의 기능에 따라라도 신호최적화 모형을 다르게 적용해야 한다. 도로의 기능에 따른 최적화 모형 선택 기준은 단일교차로와 집분산도로 및 군집교차로군의 경우에 연동폭 최대화의 장점이 희석될 가능성이 많으므로 교차로의 지체를 최소화하는 모형을 선택하여 최적화를 수행한다.

간선도로나 중앙버스 전용차로는 주방향을 통과폭을 최대화하여 정지수를 감소시키는 선택을 위해 연동폭 최대화 모형이나 결합모형을 사용한다.

IV. 시뮬레이션 평가 및 현장적용

1. VISSIM 모형과 데이터 구축

새로운 TOD 시간계획의 효과를 분석하기 위한 시뮬레이션 모형으로 신호교차로의 다양한 모의 신호운영

〈표 2〉 VISSIM 모형의 보정 Parameter

Parameters		기본 Parameter	정산된 Parameter
Average standstill distance(m)		2	2
Saturation Flow Rate	Additive part of desired safety distance	2	2.6
	Multiple part of desired safety distance	3	3.6
Lane change distance(m)		200	250
Right-turn Desire speed(kph)		-	20~25
Number of Preceding vehicles		2	4

〈표 3〉 정산된 시뮬레이션 대기행렬 적합도

교차로명	대기행렬 보정(m)			
	시뮬레이션	현황	MANE	허용 오차범위 (10%)
중랑전화국	42.8	41	0.04	O
면목2동사거리	38.1	37	0.04	O
장안교사거리	53.0	57	0.07	O
면목4차안센터	32.7	35	0.05	O
장평교사거리	88.3	82	0.07	O
동곡삼거리	77.3	80	0.03	O

이 가능하며 평가지표로 지체와 대기행렬길이 등이 산정 가능한 VISSIM 모형을 선정하였다. VISSIM의 VISVAP 기능을 이용하여 24시간 동안의 TOD 신호시간계획 별 신호패턴을 구현하였다. 사업구간의 시뮬레이션 차량분포인 Random Seed를 바꿔가며 최소 3회 반복 시뮬레이션을 수행하여 결과값을 산출하였다.

분석 대상 구간인 동2로의 교차로 특성과 공사구간, 평일 및 주말 첨두시에 지·정체가 일어나는 정확한 현실모사를 위해 정확한 현황조사를 실시하고, Park (2006)의 연구와, FHWA(2004)에서 권고하는 변수에 대해서 정산(Calibration)을 수행하였다.

VISSIM 모형의 정산된 Parameter 값은 〈표 2〉와 같다.

현황과 시뮬레이션을 비교하기 위한 효과척도로서 평균통행시간과 평균대기행렬길이를 선정하여 비교하였다. 주행차량 조사법에 의한 실제 통행시간과 시뮬레이션상의 평균통행시간과 비교하였고, 교차로별 실제 대기행렬길이와 시뮬레이션의 최대대기행렬길이를 비교하였다. 보정시 현장값과 시뮬레이션값의 차이를 측정하는 척도로서 평균 절대 정규화오차(Mean Absolute Normalized

Error, MANE)를 사용하였다.

〈표 3〉에서는 대기행렬길이의 현장값과 시뮬레이션값을 비교하였다. 〈표 2〉에서 정산된 Parameter를 적용하였을 때 시뮬레이션의 산출값이 모두 현장값과 오차범위 안에 포함되는 것을 볼 수 있다.

2. 분석 시나리오

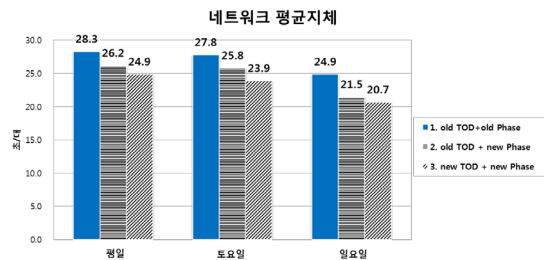
분석시간대는 평일·토요일·일요일에 대하여 24시간 분석을 수행하였고, TOD 시간계획의 최적화 효과와 신호변수 최적화 효과를 구분하기 위해서 〈표 4〉와 같이 3개의 시나리오를 나누어 분석하였다.

〈표 4〉 분석 시나리오

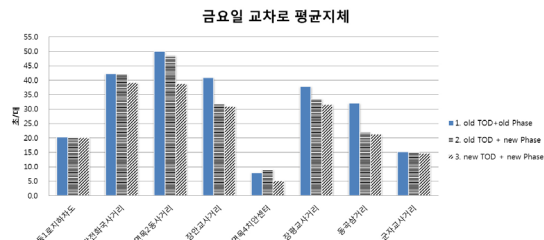
시나리오	내용
1. old TOD + old Phase	현황 TOD 시간대와 신호시간 분석
2. old TOD + new Phase	현황 TOD시간대 별 신호시간 최적화 - 주기, 녹색시간, Offset 최적화
3. new TOD + new Phase	TOD시간 및 신호시간 최적화 - 주기, 녹색시간, Offset 최적화

3. 분석결과

평일과 토요일, 일요일 24시간 네트워크 지체분석 결과, 시나리오 2의 신호제어변수 최적화는 약 7%의 지체



〈그림 12〉 요일별 24시간 네트워크 평균정지지체 (sec/veh)



〈그림 13〉 금요일 교차로 별 24시간 평균정지지체

감소 효과가 있는 것으로 나타났고, 시나리오 3의 TOD 시간계획 개선효과는 약 16%인 것으로 나타났다. 특히 토요일이나 일요일의 비침투 시간대에서 주방향의 연동 폭 증가로 인한 지체개선 효과가 크게 나타나는 것으로 분석되었다.

평일 교차로 별 평균정지지체를 보면, 잘못된 신호운영으로 교차로 지체가 발생했던 중랑전화국과 장안교사거리, 동곡삼거리에서 큰 폭으로 지체가 감소하였으며, 이와 마찬가지로 주말 교차로 평균지체는 임계 교차로인 장안교사거리와 장평교사거리에서 지체 감소폭이 크게 나타났다.

4. 현장적용 및 결과

현장 사전조사는 동1로 지하차도에서 군자교사거리까지 링크를 대상으로 2010년 4월 2일~4월 4일 까지 3일간 시행하였으며, 사후조사는 2010년 7월 1일~7월 12일까지 정상적인 신호운영 확인 및 모니터링을 위해 12일간 이루어 졌다.

사전·사후분석을 위해 교통량의 변화를 분석한 결과, 4월 대비 7월 교차로 교통량은 계절적 요인으로 인해 평균 4.98% 감소한 것으로 나타났다. 차량 평균 통행속도는 4월 대비 개선 후의 7월 평균통행속도가 15.84% 증가하였으며, 시간대별 통행속도를 분석한 결과 사전조사와 비교하여 최대 37.82% 까지 증가한 것으로 조사되었다.

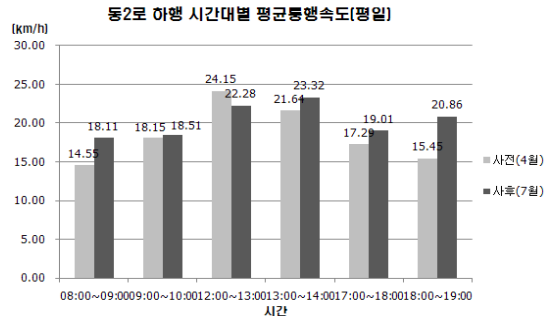
분석구간을 주행한 차량들의 평균 정지횟수는 4월 대비 7월에 평균 13.05% 감소하였고, 시간대별 정지횟수를 분석한 결과 사전조사와 비교하여 최대 33.69% 감소한 것으로 분석되었다.

대기행렬길이는 동2로 주방향에서 4월과 비교하여 12.23% 감소하였고, 시간대별로 대기행렬길이를 분석한 결과, 사전조사와 비교하여 최대 51.88% 감소한 것으로 분석되었다.

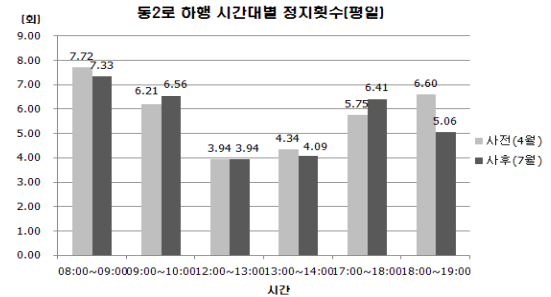
앞의 조사결과에서 보는바와 같이 현장적용 후 평균

〈표 5〉 조사항목 및 방법

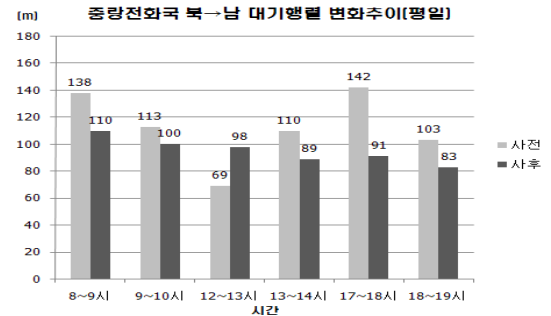
조사항목	조사방법
교차로 교통량	검지기 및 영상장비 활용
평균통행속도	영상장비 및 차량번호판조사, GPS 활용한 주행조사
대기행렬	조사원을 활용한 인력조사
정지횟수	GPS 활용한 주행조사



〈그림 14〉 평균 통행속도 분석 결과



〈그림 15〉 평균 정지횟수 분석 결과



〈그림 16〉 대기행렬길이 분석 결과

통행속도, 평균정지횟수, 대기행렬길이에서 뚜렷한 개선 효과가 나타났으며, 특히 주방향에 대한 지체감소 효과가 뚜렷하게 발생하고, 교차로 연동에 대한 평가지표인 정지횟수가 감소하고, 통행속도가 명확히 증가한 것을 확인할 수 있었다.

V. 결론 및 향후 연구과제

현재 가장 일반적인 신호교차로의 제어방법으로 사용되는 TOD제어의 운영을 위한 신호시간계획의 수립은 효과적인 신호제어를 위해 매우 중요한 과정이나, 지금

까지 신호시간경계 및 신호개선과정에 대한 일반적인 방법론 및 개선과정의 정립이 미흡하였다.

본 연구에서는 TOD 시간계획의 기본이 되는 SA 설정에 대해 정의하고, K-Means Method를 적용하여 시계열적 데이터를 바탕으로 시간경계를 구분하였다. TOD 설정기준으로 VPLUSKO 지표를 사용하여 기존에 교통량만으로 시간경계를 나누었던 문제를 보완하였으며, 초기시간경계 구분 후에 3단계의 보정과정을 제시하여 K-Means 군집화 방법을 보완하였다. 신호최적화 방법론을 통해 평일·토요일·일요일에 대한 각 TOD 시간대별 신호최적화를 수행하였고, 시뮬레이션과 현장적용을 통해 효과를 검증하였다.

서울시 중랑구 동2로에 개선된 신호시간을 적용하여 사전·사후 분석을 수행한 결과, 교차로 주요 평가지표인 평균 통행속도가 15.84% 증가하였고, 평균정지횟수와 대기행렬길어도 약 13% 정도 감소한 것으로 나타났다. 특히 비침투 시간대 지체가 크게 감소함으로써 비혼잡 시간대의 신호운영효율이 크게 향상된 것으로 나타났다.

향후 연구과제로서 K-Means 군집화의 기초가 되는 군집수(K값)를 명확히 결정하는 기준과 방법론에 대한 추가적인 연구가 필요하며, 신호전이(Transition)시 생기는 교통류에 대한 충격 및 지체를 고려하여 최소전이 시간의 분석 및 적정 시간에 대한 제시가 요구된다. 또한 본 연구를 바탕으로 일반 엔지니어들이 적용하기 쉽도록 자동화된 TOD 시간계획 산정 프로그램 개발 필요할 것으로 판단된다.

알림 : 본 논문은 대한교통학회 제63회 학술발표회 (2008.10.28)에서 발표된 내용을 수정·보완하여 작성된 것입니다.

참고문헌

1. 정영재 외(2008), 군집분석을 이용한 TOD 시간계획의 시간경계 결정 방법에 관한 연구.
2. 김기영·전명식(1990), 고려대학교 통계연구소 통계분석강의총서 9, SAS 군집분석, 자유아카데미.
3. 송민경·장훈(2010), 군집분석을 이용한 수도권 도시의 유형화에 관한 연구.
4. 강두양(2002), "군집분석알고리즘의 구현과 효율성 비교", 석사학위논문, 성균관대학교, pp.6~7.
5. Brian L. Smith, William T. Scherer, Trisha

- A. Hauser(2001), "Data-Mining Tools for the Support of Signal Timing plan Development", Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, No. 1768, TRB, Nation Research Council, Washington D.C. pp.141~147.
6. MacQueen. J.B.(1967), "Some methods for classification and analysis of multivariate observations", Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability Statistical Laboratory, University of California, pp.281~297.
7. Smith, B. L., Scherer, W. T. and Hauser, T. A.(2001), "Data-mining tools for the support of signal-timing plan development." Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1768, pp.141~147.
8. Park, Byungkyu, P. Santra, Ilsoo Yun, and Dohun Lee(2004), Optimization of Time-of-Day Breakpoints for Better Traffic Signal Control. Transportation Research Record.
9. J. Hua and A. Faghri(2005), "Dynamic Traffic Pattern Classification Using Artificial Neural NetWorks." Transportation Research Record 1399, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, pp.14~19.
10. Lei Jia, Licai Yang, Qingjie Kong, Shu Lin(2006), "Study of Artificial Immune Clustering Algorithm and Its Applications to Urban Traffic Control", International Journal of Information Technology, Vol.12, No.3, pp.128~137.
11. Brian Park(2006), Microscopic Simulation Model Calibration and Vallidation Handbook.
12. Brian. Park and and Joyoung Lee(2008), A Procedure for Determining Time-of-Day Break Points for Coordinated Actuated Traffic Signal Systems, KSCE Journal of Civil Engineering, vol.12.
13. Xiaodong Wang, Wayne Cottrell and Sichun

- Mu(2005), Using K-Means Clustering to Identify Time-of-Day Break Points for Traffic Signal Timing Plans, IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems Vienna, Austria, pp.13~16.
14. Byungkyu (Brian) Park, Pinaki Santra, Ilsoo Yun, and Do-Hoon Lee(2004), Optimization of Time-of-Day Breakpoints for Better Traffic Signal Control, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1867, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.217~223.
15. Advanced Signal Timing Concepts, Developed for the Institute of Transportation Engineering Educational Foundation Inc. pp.6~9.
16. VISSIM 5.30 User Manual, PTV Vision.
17. 서울특별시(2007), 서울형 통합교통신호체계 구축 (최종보고서).
18. 서울특별시, 서울지방경찰청(2009), 서울특별시 교통량 조사자료.

- ✻ 주 작성자 : 이인규
- ✻ 교신저자 : 김영찬
- ✻ 논문투고일 : 2010. 12. 28
- ✻ 논문심사일 : 2011. 4. 6 (1차)
2011. 6. 8 (2차)
2011. 6. 15 (3차)
- ✻ 심사판정일 : 2011. 6. 15
- ✻ 반론접수기한 : 2011. 12. 31
- ✻ 3인 익명 심사필
- ✻ 1인 abstract 교정필