

■ 論 文 ■

실시간신호제어 독립교차로 서비스수준 분석 방법론

LOS Analysis Frame for COSMOS at Isolated Intersections

김진태

(연세대학교 도시교통과학연구소
연구교수)

김강휘

(서울시정개발연구원 도시교통부
연구원)

이돈주

(한양대학교 교통시스템공학과
박사과정)

목 차

- I. 서론
 - II. 관련 연구 검토
 - 1. 평균 신호시간 추정
 - 2. 실시간신호제어시스템
 - III. 분석 방법론 개발
 - 1. 서비스수준 분석 틀
 - 2. 도로용량편람 설계분석 표
 - IV. 실험 적용
 - 1. 포화도추정모형 개발
 - 2. 현장 자료 수집
 - 3. 제안된 분석방법 적용
 - V. 결과분석
 - VI. 결론 및 향후연구
- 참고문헌

Key Words : 실시간신호제어, 신호교차로, 포화도, 서비스수준, 지체도
COSMOS, signalized intersection, degree of saturation, level of service, delay

요 약

국토해양부는 신호교차로 서비스수준 분석에 도로용량편람이 제시하는 방법의 적용을 장려하고 있으며 실시간신호제어교차로는 지능형교통체계 구축사업으로 그 숫자가 현장에서 꾸준히 증가하고 있다. 도로용량편람은 정주기식 신호교차로 서비스수준 분석방법에 국한하여 제시하고 있어 현장 실무자들은 실시간신호제어교차로 서비스수준 분석에 어려움을 경험하고 있다. 본 연구는 도로용량편람 수준에서 실시간신호제어교차로 서비스수준 분석의 기초가 되는 방법론을 제안하며 향후 추가로 수행되어야 하는 개발방향을 검토한다. 한 개의 신호교차로를 표본으로 세부 요소모형들을 간이 개발하여 검증한 결과 제안된 방법은 실제 현장 자료와 유사한 수준의 서비스 수준을 추정할 수 있음을 확인하였다.

The level of service (LOS) evaluation method of the Highway Capacity Manual (HCM) is limited to intersections with pre-timed signal operation, while advanced real-time traffic control systems have been expanding in the field. This paper proposes a preliminary framework for LOS analysis at isolated intersections controlled by COSMOS, the real-time traffic control systems robustly utilizing the degree of saturation as basic inputs. The proposed LOS evaluation framework was devised with a pilot model developed to estimate the average cycle length and green times of COSMOS. The validation test showed that the proposed framework was able to accurately project the LOS, which was separately evaluated based upon field data.

1. 서론

교통 실무자들은 교통영향평가, 교통체계관리, 정책 분석 등을 수행하며 전국의 현장 신호교차로 운영 상태를 평가 분석한다. 신호교차로를 평가할 때 서로 다른 분석 방법을 적용하면 모형의 차이로 인해 동일한 운영상황이라도 도출되는 분석결과가 조금씩 다르다. 이러한 분석결과의 차이는 최종 도출되는 정책 내용을 경우에 따라 변하게 할 수 있다. 현황이 다르게 이해될 수 있으며, 대안 설계의 적정성이 다르게 해석될 수도 있다. 전국 수준에서 도로시설의 문제를 편견 없이 이해하고, 편견 없는 정책과 계획 수립을 하기 위하여 하나의 평가 분석 방법을 기준 삼아 적용할 필요가 있으며, 이를 위하여 우리나라 도로용량편람(건설교통부, 2004)은 교통 실무자들이 참조하기 용이하도록 도로시설을 도로유형 및 교통특성별로 구분하고 각 시설별로 평가의 기준이 되는 분석 방법을 제시하고 있다.

도로용량편람(2004)은 독립신호교차로의 서비스 수준 측정지표로 "제어지체"를 규정한다. 도로용량편람은 현장에서의 지체도 자료수집이 어려운 경우 지체도 추정 모형을 활용하여 운전자의 평균 제어지체시간을 추정할 것을 제시한다. 지체도 추정을 위한 과정에 일련의 복잡한 분석이 수반되며, 이러한 분석에 신호교차로의 기하구조 조건, 교통 조건, 신호제어 조건을 설명하는 변수들이 기초 입력 자료로 사용된다.

신호교차로 평가분석의 주요 입력변수로 신호시간(예: 신호주기 길이 및 녹색시간 길이)자료가 있다. 도로용량편람은 신호시간 값들을 고정된 상수들로 처리하며 신호교차로를 평가한다. 이는 정주기식 신호제어로 분석대상 시간 동안 신호주기길이 및 녹색시간 길이가 변화가 없이 고정된 상황에 해당한다.

우리나라 현장에는 크게 세 종류의 신호제어시스템이 설치 운영되고 있다(서울지방경찰청, 2002). 종일 고정된 하나의 신호시간계획으로 운영되는 일반신호제어체계, 여러 개의 신호시간계획 중 하나를 선택 적용하는 전자신호체계, 교통수요에 따라 반응하며 신호시간을 갱신하는 실시간신호제어체계이다. 일반신호제어체계와 전자신호제어체계의 경우는 고정된 녹색시간 및 신호주기길이 자료 수집이 용이하다. 실시간신호제어체계에서의 신호시간은 교차로 현장 소통 상태에 따라 매 주기 단위로 변하기 때문에 도로용량편람이 요구하는 수준에서의 신호시간 자료의 수집이 불가능하다.

전국 광역 및 중소도시 지방자치단체에서는 지능형교통체계(ITS: Intelligent Transportation Systems) 구축사업을 통하여 실시간신호제어시스템을 현장에 지속적으로 신규·확대 설치하고 있다. 그러나 현장에서 증가하고 있는 실시간신호제어 신호교차로에 대한 서비스 수준 평가방법을 현재 도로용량편람이 제시하지 않는다. 교통영향평가, 교통체계관리, 정책분석 등에 수반되는 현장 실무에서의 실시간신호제어 신호교차로에 대한 서비스수준 평가는 객관적인 분석이 아닌 교통 실무자들의 개인적이며 주관적인 변칙 기술에 의존되고 있다.

도로용량편람은 실시간신호제어교차로 서비스 수준 평가방법을 제시할 필요가 있다. 현장에서 실시간신호제어 교차로 수가 꾸준히 증가하면서 평가방법의 필요성 또한 지속적으로 증가하고 있다. 도로용량편람 수준에서의 실시간신호제어교차로 서비스 수준 평가 방법이 개발은 많은 세부 항목들에 대한 기초 연구의 선행을 요구한다. 다양한 현장 상황을 일반적으로 설명하는 모형이어야 하기에 전국 단위의 현장 자료수집이 요구되며, 많은 자료와 많은 시간의 투입이 요구된다.

본 논문은 실시간신호제어교차로 서비스 수준 분석방법을 위한 기초연구로 실시간신호제어교차로 서비스수준 분석방법 틀을 제안한다. 본 연구의 목적은 세부 수리모형의 장기적이고 본격적인 개발에 앞서 평가의 전체적인 윤곽을 마련하는 분석방법의 틀을 마련하는 것으로 제한한다. 본 연구의 세부 연구목적은 아래와 같다.

- (1) 실시간신호제어교차로 서비스 수준 분석 방법의 기능적 요구사항의 정립
- (2) 실시간신호제어교차로 서비스 수준 분석 방법 기본 틀 개발 및 평가

본 연구의 범위는 독립신호교차로 서비스 수준 분석 방법으로 제한한다. 실시간신호제어체계로 운영되는 간선도로 서비스 수준 분석방법은 본 연구의 범위에서 제외한다.

II. 관련 연구 검토

미국, 캐나다, 호주, 일본 등 해외 여러 국가는 독립신호교차로 서비스분석을 위한 적용방법을 각 국의 도로용량편람을 통하여 규정한다(TRB, 2000; Canadian

ITE, 2006; Akçelik & Associates, 2007; 日本道路協會, 1984). 이들 도로용량편람 모두는 “제어지체”를 지표로 하는 독립신호교차로 서비스 수준 평가를 규정하며, 이들 모두 고정된 녹색시간과 주기길이 등의 신호시간 자료를 기초 입력 자료로 요구한다. 이들 독립신호교차로 서비스 수준 분석방법은 우선적으로 정주기식 신호제어 교차로로 그 범위가 제약된다. 이들 국가에서 개발한 SCATS, SCOOT, STREAM과 같은 첨단신호제어체계 신호운영 교차로의 서비스 수준 분석방법은 편람에 제시되어 있지 않다. 김성득 외(2001)는 한국도로용량편람과 미국HCM의 지체도 모형을 기준으로 신호교차로 서비스수준 결정방법을 비교하였으나 실시간신호제어시스템을 고려하지 못하였다.

1. 평균 신호시간 추정

미국 도로용량편람(TRB, 2000)은 감응신호제어교차로의 서비스 수준 분석방법을 부록에서 별도로 제시한다. 감응신호제어는 차량 검지정보를 토대로 녹색시간을 연장 및 종료하는 신호운영방식으로 매 주기단위로 녹색시간과 신호주기 길이가 일정하지 않다. 실시간으로 각 현시별 녹색시간 길이가 가변하기 때문에 첨단교통신호제어체계와 마찬가지로 현장에서 신호시간 기초 입력 자료를 수집하기 어렵다.

미국 도로용량편람(TRB, 2000)은 Courage 외(1996)의 연구결과를 적극 반영하였다. 감응신호제어교차로 서비스 수준 분석대상 시간대 동안 표출되는 각 현시별 녹색시간의 평균값과 전체 주기 길이의 평균값을 추정하고 도출된 평균 신호시간 값으로 정주기식 신호교차로 신호시간 값을 대체하도록 하며 기존의 신호교차로 서비스수준분석방법을 수행할 것을 제시한다.

감응신호제어교차로 평균녹색시간 추정을 위해 미국 도로용량편람(TRB, 2000)은 처음으로 반복 순환(iterative)법을 정식 도입하였다. 편람은 평균 녹색시간을 ‘대기행렬서비스시간’과 ‘녹색연장시간’으로 구분하여 추정한다. ‘대기행렬서비스시간’은 접근로에 정지한 대기차량들로 결정되는 녹색시간이며 ‘녹색연장시간’은 대기차량이 소거 이후 도착 차량들로 영향 받는 녹색시간이다. 평균 녹색시간은 최대녹색시간을 시작 값으로 이들 값을 점차 줄여가며 수렴해 가는 방법으로 추정된다.

김진태 외(2002)는 미국 도로용량편람이 제시하고 있는 감응신호제어교차로의 평균녹색시간 추정모형이 대

기행렬처리시간의 과소추정 문제, 적신호우회전교통량 처리로 인한 과대추정 문제를 지적하며 개선된 감응신호제어교차로 평균녹색시간 추정모형을 제안하였다. 김진태(2002)는 감응신호제어교차로 서비스 수준 분석방법을 활용하여 주요 신호운영변수인 “최대녹색시간”을 단정적으로 설계하는 방안을 새롭게 개발하였다.

2. 실시간신호제어시스템

실시간신호제어시스템(COSMOS: Cycle Offset Split Model of Seoul)은 국내에서 개발한 첨단교통신호제어시스템으로 검지기 점유시간 대 유효녹색시간의 비율로 각 움직임의 포화도를 추정하고 이를 토대로 신호주기 길이 및 녹색시간 길이를 실시간 설계 및 운용한다(서울지방경찰청, 2001, 2002, 2003). 실시간신호제어시스템은 교차로 내부 포화수준이 약 0.9 수준에서 유지되도록 조절하며 각 방향별 움직임의 교통류 대 포화교통류를 비를 균등하게 유지하도록 현시길이를 설계 한다(Kim et al, 2003).

III. 분석 방법론 개발

신호제어교차로의 서비스 수준 분석 방법은 각기 다른 신호제어방법이 적용되었을 때의 운영상의 차이점을 분석결과로 구분할 수 있어야 한다. 예를 들면 동일한 교차로에 정주기식 신호운영과 실시간신호제어운영을 적용할 시 이들 신호운영 방식의 차이를 분석모형이 효율적으로 설명할 수 있어야 한다. 이는 분석방법이 신호교차로 서비스 분석의 공통적인 내용을 포괄하고 있으면서 세부적으로 여러 가지 방식의 신호제어 특성을 반영할 수 있어야 함을 의미한다.

따라서 기준이 되는 분석방법은 신호제어방식과는 상관없이 크게 상이하지 않은 기초 입력 자료만을 사용하여야 한다. 이러한 기초 입력 자료는 현장에서 수집이 매우 용이하여야 한다. 예를 들면 교통신호제어센터 컴퓨터 서버에 기록되는 이력자료는 일반 교통 실무진들이 필요할 때마다 접근하기 쉽지 않다. 일반적인 현장조사를 통해 수집되는 자료만을 토대로 분석이 가능하여야 한다.

이와 더불어 기본적으로 동일한 서비스수준 평가지표와 동일한 서비스수준 경계치를 사용하여야 한다. 다음

은 실시간신호제어 신호교차로 서비스분석 방법이 준수하여야 하는 요구기능이다.

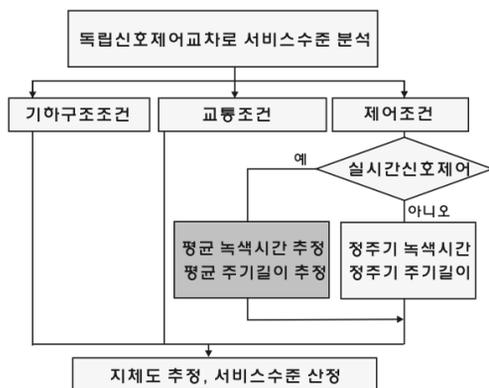
- (1) 교통조건 및 기하구조조건 분석방법은 기존의 정주기식 분석방법을 유지하여야 한다.
- (2) 기존의 분석방법과 내용적인 측면에서 상호 비교가 가능한(comparable) 방법이어야 한다.
- (3) 상시접근이 용이하지 않은 실시간신호제어 중앙 컴퓨터 이력자료의 활용을 배제하며 일반적으로 확보가 용이한 자료(예: 현장자료)를 활용한다.

상기 요구기능들을 만족하는 실시간신호제어교차로 서비스 수준 평가 방법론 마련을 위한 기초 분석 틀을 개발한다.

1. 서비스수준 분석 틀

실시간신호제어 서비스 수준 분석방법은 기존의 도로 용량편람이 제시하는 교통 조건 및 기하구조 조건과 관련된 내용을 그대로 수용한다. 기존의 독립신호교차로 서비스수준 분석은 기하구조조건, 교통조건, 제어조건으로 구분되는 기초입력 자료를 사용한다. 이러한 자료(조건)들은 서로 독립적이다. 신호제어방식이 변화한다고 기하구조조건 및 교통조건이 변화하지 않는다. 따라서 제어조건과 관련된 실시간신호제어시스템에서의 녹색시간 및 주기길이의 영향만을 분석에 반영한다. <그림 1>은 실시간신호제어시스템 서비스수준 분석방법 개요를 도식화한 것이다.

일반적으로 독립신호제어교차로에서의 제어조건 자료



<그림 1> 신호교차로 서비스수준 분석 틀

는 녹색시간 및 주기 길이이다. 정주기식 신호제어의 경우 신호시간 값은 상수이다. 그러나 실시간제어시스템에서는 고정된 녹색시간 및 주기길이가 없기 때문에 분석 대상 기간 동안 표출되는 여러 녹색시간 및 주기길이의 평균값으로 이들 신호시간 값을 대신 적용한다.

1) 포화도 추정모형의 필요

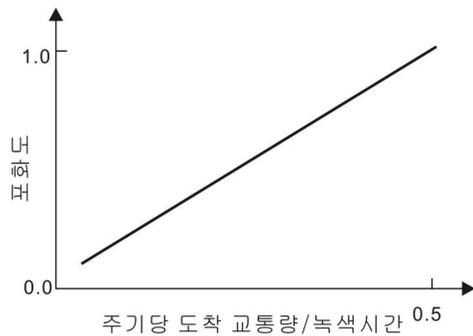
실시간신호제어시스템은 검지기 포화도를 기반으로 접근로 교통소통정보를 수집하고 이를 기반으로 신호시간을 설계한다(서울시, 2003). 평균 녹색시간과 평균 주기길이를 설계함에 있어 각 방향별 움직임의 포화도 자료는 매우 중요하다. 실시간신호제어시스템은 식(1)의 포화도 산정모형을 규정하며 사용하고 있다(서울지방경찰청, 2001).

$$DS = \frac{G - (\sum \psi - (N - hk) \times t - \pi)}{G} \quad (1)$$

여기서 DS는 포화도이고, G는 신호등에 표출되는 녹색시간의 길이이고, $\sum \psi$ 는 한 주기길이동안에 관측된 비점유시간의 합이고, N은 한 주기 동안 관측된 비점유시간의 수이고, t는 평균 포화 비점유시간이고, hk는 출발순실시간 동안에 관측된 차량대수, 그리고 π 는 출발순실시간을 겪는 차량들의 비점유시간이다.

실시간신호제어교차로 서비스수준 분석에는 평균 신호시간 추정을 위해 각 방향별로 포화도를 추정하는 과정이 반드시 수반되어야 한다. 포화도 값은 교통신호관제센터에서 이력자료로 실제 자료가 누적되고 있으나 서비스 수준 분석을 수행하는 현장 기술진들이 그러한 이력 자료로 접근이 용이하지 않기 때문에 서비스 수준 분석방법에서는 교통량과 같이 현장에서 수집 가능한 입력 변수만을 토대로 포화도를 추정하여야 한다.

<그림 2>는 포화도 추정모형의 개요도이다. 포화도 추정 과정에 교통량과 녹색시간 길이가 동시에 고려되어야 할 것이다. 교통량이 증가하면 포화도는 증가하며, 녹색시간의 길이가 증가하면 포화도는 반대로 감소한다. <그림 2>의 수직축은 포화도이며 수평축은 교통량과 녹색시간의 비율이다. 포화도 추정모형은 수직축과 수평축을 대각선으로 가로지르는 형태가 될 것이라 예측된다. 이러한 형태의 모형은 포화도 추정을 위하여 직진과 좌회전 별도로 구분하며 개발되어야 한다. 이는 정지선 부



〈그림 2〉 포화도 추정모형 예

근에 매설되는 검지기 위치가 직진과 좌회전에 따라 다르기 때문이다.

포화도 추정모형에는 교통량 자료와 더불어 녹색시간 길이가 입력 자료로 사용된다. 실시간신호교차로 서비스 수준 분석을 위해 평균 녹색시간을 추정하는 과정 중에 이처럼 녹색시간 길이가 입력 값으로 사용된다. 이는 평균녹색시간의 추정을 위하여 순환반복 추정방법이 적용되어야 함을 나타낸다.

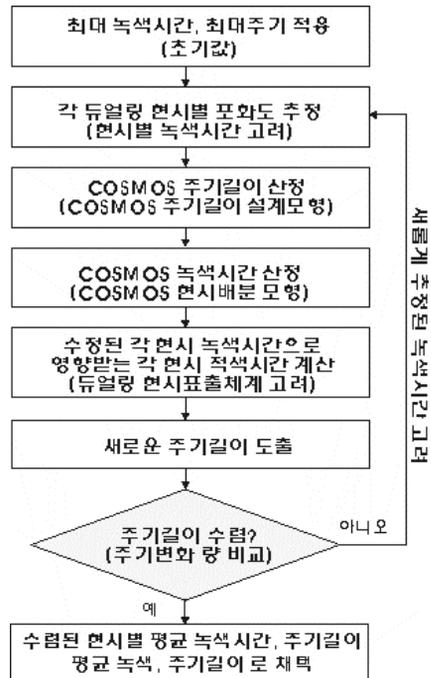
2) 순환반복 추정의 필요

실시간신호제어교차로에서의 녹색신호 시간은 정지선에 정지하는 차량들의 길이에 영향을 받는다. 대기행렬 차량의 숫자가 많을수록 검지기 점유시간은 길 것이며 (포화도 수준은 높으며), 높은 포화도 수준으로 인해 녹색시간은 길게 결정된다. 이러한 차량의 대기행렬 길이는 해당 현시 적색시간의 길이에 많은 영향을 받는다. 해당 적색시간은 다른 현시의 녹색시간 길이의 조합으로 결정된다.

이처럼 각 현시의 녹색 및 적색시간 길이는 타 현시 녹색 및 적색시간과 서로 밀접한 영향이 있다. 따라서 실시간신호제어교차로의 서비스수준 분석에 요구되는 신호교차로 평균 녹색시간 및 평균 주기길이 추정모형은 순환반복 과정을 필요로 한다. 평균 녹색시간 및 주기길이를 반복 추정하는 접근방법으로 두 가지 방안이 있다. 첫째는 최소녹색시간으로부터 점차 증가하며 평균값으로 수렴하는 방법이며, 둘째는 최대녹색시간으로부터 점차 감소하며 평균값으로 수렴하는 방법이다.

포화도가 낮은 상태일 경우 녹색신호시간 분산은 포화도가 높은 상태에서의 녹색신호시간 분산보다 적을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 추정의 오차를 줄일 수 있는 최대 녹색시간으로부터 출발(상대적으로 포

화도가 낮은 상태)하여 평균 녹색시간으로 감소추정(포화도를 높여감)하는 방법을 사용할 것을 제안한다. 〈그림 3〉은 최대녹색시간 및 최대 주기길이를 시작으로 순환반복 추정을 수행하는 흐름도이다.

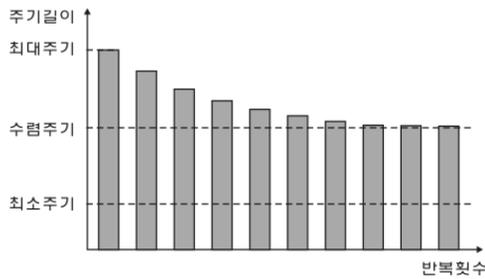


〈그림 3〉 평균 녹색 및 주기길이 순환반복 추정 흐름도

추정과정 동안 주기길이가 변함에 따라 “평균차량도착률(veh/sec)을 토대로 한 주기 당 도착 수요교통량을 갱신하며 분석에 사용한다. 최대 주기길이와 8개 현시의 최대녹색시간을 초기 값으로 시작하여 주기 당 도착차량수를 계산하고 포화도 추정모형을 적용하여 포화도를 추정한다. 추정된 포화도를 실시간신호제어시스템의 주기산정모형과 현시분할방법에 적용하여 새로운 주기길이와 녹색시간 길이를 산출한다. 이때 도출된 주기길이와 녹색시간 길이는 초기에 고려된 최대주기길이와 최대 녹색시간의 길이와 다르다(감소되었을 것이다). 해당 과정에서 도출된 주기길이와 녹색시간 길이를 토대로 다시금 동일한 분석과정을 순환 반복한다.

신호시간 순환반복 추정을 통해 주기길이 및 녹색시간은 점차 줄어든다. 순환반복 추정이 진행됨에 따라 점차 줄어드는 주기길이의 차이 역시 줄어든다. 이때 관측되는 주기길이의 차이가 일정 수준내로 들어오면 신호주기길이가 수렴된 것으로 간주하여 순환반복을 멈춘다.

〈그림 4〉는 순환반복을 통한 평균주기 수렴과정을 도식화한 그림이다.



〈그림 4〉 순환반복을 통한 평균주기 수렴

순환반복이 종료되며 도출된 최종 주기길기와 최종 녹색시간이 분석대상 시간대 실시간신호제어시스템의 평균 주기길기와 녹색시간이다. 이를 토대로 기존의 도로용량편람의 방법에 적용하여 서비스 수준 분석을 수행한다.

2. 도로용량편람 설계분석 표

도로용량편람은 현장 실무자들이 분석방법을 적용하

평균 주기길이 및 녹색시간 추정							
교차로명 :		도로조사기간 : 2006.07.17.15:30~15:45					
지점특성 : 일반업무지구		조사자 : 홍길동					
반복계산							
접근로 및 이동류	TH		WB		NB		SB
	LT	TH	LT	TH	LT	TH	LT
① 보정교통량(vph)							
② 최대주기길이							
③ 최대녹색시간							
④ 적색시간 산정 ¹⁾							
⑤ 녹색시간 보정							
⑥ 주기 당 교통량							
⑦ 포화도 추정							
⑧ ADS ²⁾							
⑨ 실시간 신호주기							
⑩ 현시분할							
⑪ 추정된 녹색시간							
⑫ 적색시간 산정 ³⁾							
⑬ 녹색시간 보정							
⑭ 주기수렴(○, ×)							
⑮ ×이면 ④로 이동							
⑯ 수렴 주기길이							
⑰ 수렴 녹색시간							

1) 듀얼링 현시조합을 반영하는 적색시간 보정
 2) ADS는 필요에 따라 MDS로 대체될 수 있음
 3) 듀얼링 현시조합을 반영하는 적색시간 보정

〈그림 5〉 제안된 실시간신호제어교차로 설계분석표

기에 용이하도록 분석의 시작에서 종료까지 흘러가는 일련의 분석절차를 설계분석표(worksheet)로 제시하고 있다. 미국 도로용량편람은 현장 실무자들은 컴퓨터를 실무에 적극 활용함을 인식하고 순환반복을 통한 분석방법을 도입하였다(TRB, 2000). 본 실시간신호제어 신호교차로 서비스 수준 분석방법도 컴퓨터가 적극적으로 사용되는 업무환경을 반영한 것으로 순환반복 방법을 도입한다.

컴퓨터로 실무를 적극 수행한다 하더라도 도로용량편람은 독자들에게 전체적인 이해를 돕기 위해 기존의 방법대로 분석표를 제시할 필요도 있다. 〈그림 5〉는 제안된 실시간신호제어교차로 서비스 수준 분석방법을 기존의 도로용량편람 설계분석표(worksheet) 양식으로 정리한 것이다. 추후 필요하다면 도로용량편람 개정 시 〈그림 5〉를 추가로 포함할 것을 제안한다.

IV. 실험 적용

제안된 실시간신호제어교차로 서비스수준 분석 방법을 실험하기 위하여 현재 실시간신호제어로 운영되는 신호교차로 한 곳(서울시 상암동 월드컵 경기장 교차로)을 선정하여 분석을 통해 도출된 지체도와 현장조사로 수집된 지체도를 비교하였다. 수집된 자료를 토대로 제안된 실시간신호제어교차로 서비스 수준 분석 방법을 적용하기 위하여 세부 포화도 추정모형을 개발하였다.

1. 포화도추정모형 개발

포화도 추정모형 개발을 위하여 서울지방경찰청 실시간신호제어시스템 서버컴퓨터로 부터 이력자료를 수집하였다. 상암동 월드컵 경기장 교차로에서 2005년 9월 및 10월 각 1주일씩 총 2주 동안의 실시간신호제어 운영된 이력자료로 총 336시간 동안의 신호운영 이력자료이다 (2회×7일/회×24시간/일).

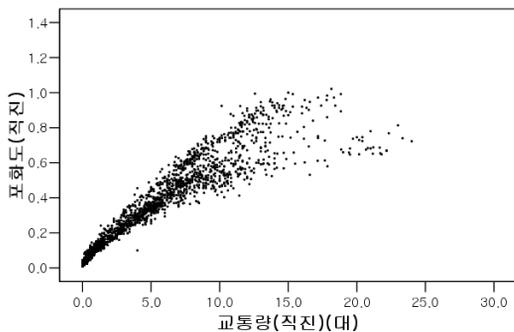
이력자료로부터 정지선 검지기 통과교통량 및 포화도 자료, 녹색시간, 주기길이 자료 등의 기초자료를 추출한 후, 통계분석 소프트웨어(SPSS)를 적용하여 포화도, 교통량(한 주기 동안에 도착한 차로별 교통량), 녹색시간 변수간의 상관관계를 검토하였다. 여기에서 상관관계 검토를 위해 사용된 교통량과 포화도 자료는 세 주기 단위의 평균 교통량과 평균 포화도이다.

매 주기단위로 수집된 원시자료는 현장의 세세한 현

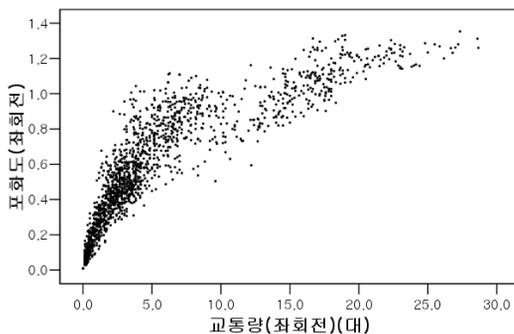
상 모두를 반영하여 진동의 폭이 크기 때문에 이들로부 터 일정한 패턴을 추출하기 어렵다. 세 주기 동안의 걸쳐 관측되는 교통량과 포화도의 평균값을 사용하여 분산이 적은 교통흐름 패턴을 추출하였다. 실제 실시간신호제어 시스템도 과거 세 주기 동안의 교통흐름 이력을 반영하여 현장의 일정한 교통흐름 패턴을 해석하고 있다.

1) 교통량과 포화도의 관계

직진 및 좌회전 교통량과 포화도와의 관계를 산점도 로 도식화하여 <그림 6>과 <그림 7>에 제시하였다.



<그림 6> 교통량과 포화도의 상관관계(직진)



<그림 7> 교통량과 포화도의 상관관계(좌회전)

이들 경우 모두 교통량이 적을 경우, 포화도의 분산 범위는 일정 수준 내로 좁게 되나 교통량이 많아질 경우 그 분산 범위가 넓어진다.

예를 들면 주기별 수평축인 주기별 교통량이 약 5대/ 차로 미만인 경우(<그림 6> 참조), 수직축과 연계되어 추정되는 포화도 변화폭은 약 ±0.1 수준으로 크지 않다.

그러나 수평축인 주기 별 직진 도착교통량이 15대/차로 인 경우(<그림 6> 참조), 수직축과 연계되어 추정되는 포화도 범위는 작게는 0.4에서 크게는 1.0수준으로 까 지 넓게 분산된다. 포화도가 0.4인 수준과 1.0인 수준은 극단적인 환산 상황과 극단적인 포화 상황에 해당하는 매우 다른 수준으로 교통량 변수 하나만으로 포화상황을 추정하기 어려움을 보여준다.

주요 원인 중 하나가 최소녹색시간이다. 최소녹색시 간은 신호교차로 횡단보도 보행자 녹색시간에 의하여 주 로 결정된다. 최소녹색시간은 교통량의 많고 적음과 관 계없이 항상 표출되는 녹색시간이기 때문에 교통량과 포 화도의 관계가 일정하지 않게 되어 이들의 관계가 설명 되기 어렵게 한다.

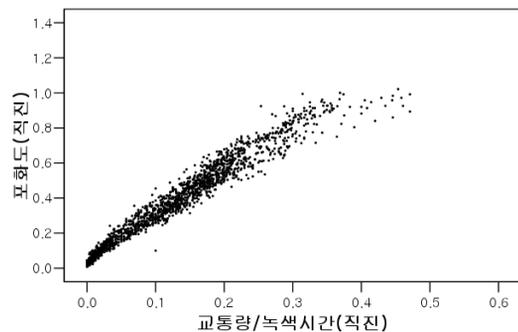
2) 녹색시간과 포화도의 관계

포화도와 녹색시간과의 관계를 산점도로 도식화하여 분석한 결과 이 두 변수는 무작위하게 퍼져 특정 패턴을 찾을 수 없음을 확인하였다. 녹색시간과 포화도 변수의 상관관계는 낮은 것으로 확인하였다.

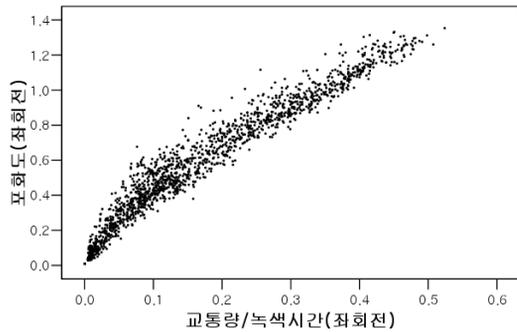
3) 교통량/녹색시간 비와 포화도와의 관계

교통량 및 녹색시간을 동시에 설명하는 교통량 대 녹 색시간의 비(v/g; volume to green time ratio)와 포 화도와의 관계를 <그림 8>과 <그림 9>의 산점도로 도식 화 하였다. 포화도와 v/g와의 상관관계는 신뢰수준 95% 에서 직진 0.98, 좌회전 0.97 이다.

포화도는 v/g와 비례하며 증가하는 경향을 보이나 그 증가의 폭은 감소한다. 수리모형으로 포화도를 추정하기 에 유리한 선형의 형태를 나타내고 있다. 이를 통하여 포



<그림 8> 녹색시간과 포화도의 상관관계(직진)



〈그림 9〉 녹색시간과 포화도의 상관관계(좌회전)

포화도를 추정함에 있어 교통량/녹색시간 비율을 설명변수로 적용함에 무리가 없음을 확인할 수 있다.

4) 포화도추정모형 채택

실시간신호제어교차로 서비스 수준 분석과정에 필요한 포화도 추정을 위하여 교통량/녹색시간 비율을 설명변수로 사용하는 네 개 모형 후보를 아래와 같이 설정하였다.

- (1) 선형모형 ($Y=aX+b$),
- (2) 지수모형 ($\ln(Y)=bX+a$ or $Y=ae^{bX}$),
- (3) 로그모형 ($Y=b\ln(X)+a$),
- (4) 급수모형 ($Y=aX^b$ or $\ln(Y)=b\times\ln(X)+\ln a$)

직진의 포화도 추정과 좌회전의 포화도 추정을 별도로 구분하여 후보 모형 네 개씩을 각각 개발하였다. 〈표 1〉은 분석된 각 모형의 설명력이다.

〈표 1〉 추정모형의 적합도 검정결과

모형		선형	지수	로그	급수
적합도 (R^2)	직진	0.956	0.699	0.766	0.959
	좌회전	0.940	0.562	0.838	0.943

모든 파라미터는 95% 신뢰수준에서 유의한 것으로 분석(t-테스트)되었으며 모형의 설명력은 선형모형과 급수모형의 설명력이 상대적으로 다른 모형에 비해 높다. 직진 포화도 추정을 위한 선형 및 급수모형은 식(2), 식(3)과 같으며, 좌회전 포화도 추정을 위한 선형 및 급수모형은 식(4), 식(5)와 같다.

$$DS = 0.0561 + 2.4878 \times (v/g) \quad (2)$$

$$\ln(DS) = 0.0515 + 0.0071 \times \ln(v/g) \quad (3)$$

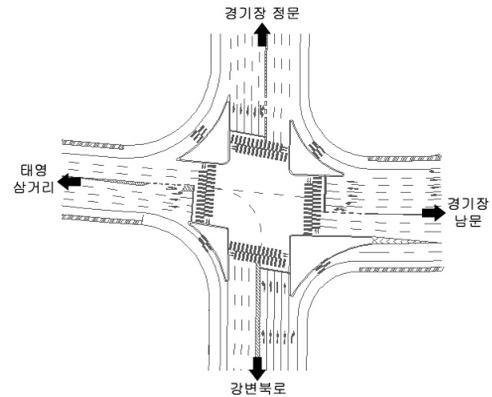
$$DS = 0.1262 + 2.6244 \times (v/g) \quad (4)$$

$$\ln(DS) = 0.0542 + 0.0073 \times \ln(v/g) \quad (5)$$

이들 모형 중 어느 하나가 우수하다고 판단 할 수 없다. 따라서 본 검증실험에는 선형 및 급수 모형 모두를 적용하였다.

2. 현장 자료 수집

제안된 모형으로 추정되는 지체도와 실제 현장조사를 통해 수집된 지체도를 비교하기 위해 현재 실시간신호제어로 운영되는 신호교차로 한 곳을 이를 기준으로 지체도를 비교하였다. 조사지점으로 선정된 상암동 월드컵경기장 교차로의 기하구조 형태는 〈그림 10〉과 같다. 현장조사는 평일(2005년 11월 16일, 수요일)에 방향별 움직임별 서비스수준이 A에서 F까지 고르게 수집되도록 비침투 시간을 대상으로 수행하였다.



〈그림 10〉 월드컵경기장 사거리 기하구조

모든 접근로의 직진차로는 3차로이며 동북쪽 접근로와 서남쪽 접근로에 각각 좌회전 회전전용차로가 2차로와 1차로씩 설치되어 있다. 동쪽 및 북쪽 접근로에 우회전 전용차로가 설치되어 있으며 서쪽 및 남쪽 방향 접근로에 공유차로가 설치되어 있다. 해당 교차로는 검지기 및 제어기 등의 현장 장비의 운영상태가 양호하며, 교통량이 적고 시간대별 변화가 심한 지점이다.

실시간신호제어교차로 서비스 수준 분석방법의 유의성을 실험을 목적으로 현장 자료를 수집하는 것이다. 현장 신호교차로 각 방향별 움직임의 서비스 수준이 A부터 F까지 고르게 관측되어야 하나 침투시간대에 이러한 범

위의 자료수집이 불가하다. 실시간신호제어시스템은 주로 주요 축 교차로에 설치되며 이러한 주요 교차로는 첨두시간대에 대부분 과포화 운영된다. 첨두시간대에 수집되는 자료의 서비스 수준은 E~F로 치우치게 되어 LOS A부터 LOS F 수준까지 자료를 평가에 반영할 수 없다.

본 연구에서는 동영상자료 수집 현장조사를 13:00~14:00 동안에 수행하였다. 동영상자료를 토대로 교차로 교통조건 및 현장 지체도 자료를 실험실에서 추출하였다. 지체도 자료는 '정지지체방법'을 통해 추출되었다. '정지지체방법'의 자세한 내용은 도로용량편람(건설교통부, 2004) 부록H를 참조할 수 있다. 해당방법을 통해 도출된 평균정지지체에 30%를 추가(stopped delay에서 approach delay로 전환)하여 제어지체를 추정하였다.

〈표 2〉는 현장 수집된 자료를 요약한다. 각 접근로별 방향별 평균접근지체는 직진의 경우 동향(EB) 35.1초, 서향(WB) 31.3초, 남향(SB) 25.4초, 북향(NB) 34.3초로 조사되었다. 좌회전의 경우 동향(EB) 60.7초, 서향(WB) 54.8초, 남향(SB) 32.2초, 북향(NB) 41.7초로 조사되었다. 교차로 전체 평균제어지체는 36.5초로 조사되었으며 현재의 도로용량편람 정의로 LOS C 수준이다.

〈표 2〉 현장 수집된 교통량 및 지체도 자료

구분	교통량	평균녹색시간 (센터자료)	지체도	LOS	
EB	좌회전	200	22	60.7	D
	직진	324	41	35.1	C
WB	좌회전	83	22	54.8	D
	직진	215	41	31.3	C
SB	좌회전	556	38	32.2	C
	직진	401	53	25.4	B
NB	좌회전	112	26	41.7	C
	직진	340	41	34.3	C
교차로 전체	-	-	36.5	C	

수집된 교통조건을 입력 자료로 사용하여 제안된 서비스수준 분석방법을 적용한 후 그 결과와 현장조사를 통해 수집된 지체도를 비교하였다. 평균 녹색시간과 평균 주기 길이를 추정한 후 PKHCS(Productive Korean Highway Capacity Software) 신호교차로 서비스 수준 분석프로그램(김진태, 2004)을 적용하였다.

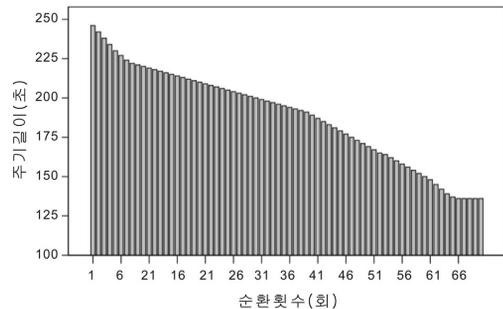
3. 제안된 분석방법 적용

제안된 순환반복 추정방법을 적용하여 최대 신호주기

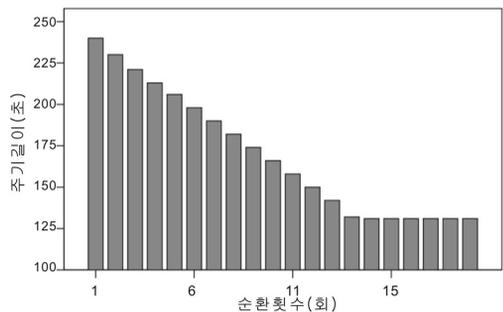
와 최대 녹색시간을 시작하여 평균 신호주기와 평균 녹색시간을 추정하였다. 주어진 신호시간을 토대로 포화도 추정모형을 적용하여 각 움직임의 포화도를 추정한 후 추정된 포화도를 토대로 실시간신호제어시스템의 신호주기길이 및 녹색시간을 계산하였다. 이때 계산된 신호주기길이가 입력된 신호주기길이 값과 다를 경우 신호주기길이가 수렴할 때 까지 반복해서 추정하였다. 본 실험에서의 포화도 추정을 위해 개발한 선형 및 급수모형을 적용하였을 시 수렴되는 신호주기 길이는 〈그림 11〉과 같다.

선형모형의 경우 총 66회, 급수모형의 경우 총 15회에 평균 신호시간으로 도출하는 것으로 관측되었다. 선형 및 급수모형을 적용하며 최종 도출한 평균 신호시간 값을 현장에서 동일 시간대에 실제 운영한 신호시간 값의 평균과 비교하여 〈표 3〉에 비교 제시하였다. 본 비교에 사용된 실제 현장운영 신호시간 값은 서울지방경찰청 실시간신호제어시스템 센터 서버로부터 수집된 자료이다. 이는 센터 서버에서 녹색시간을 산정하여 동일한 시간대에 현장 지역제어기로 하달한 신호시간 자료이다.

상기 신호시간을 평균 신호주기길이와 녹색시간을 기



(가) 선형모형 적용 시



(나) 급수모형 적용 시

〈그림 11〉 주기길이 수렴과정

〈표 3〉 평균주기 및 녹색시간 추정결과 비교

구분	현장자료 (센터자료)	선형모형		급수모형		
		녹색시간	차이	녹색시간	차이	
EB	좌회전	22	10	-12	10	-12
	직진	41	37	-4	37	+4
WB	좌회전	22	10	-12	10	-12
	직진	41	37	-4	37	-4
SB	좌회전	38	52	+14	47	+9
	직진	53	61	+8	52	-1
NB	좌회전	26	28	+2	32	+6
	직진	41	37	+4	37	-4
신호주기 길이		142	136	-	131	-

초입력 값으로 하는 도로용량편람 독립신호교차로 서비스 수준 분석방법을 PKHCS로 적용하여 상암동 월드컵 경기장 사거리의 서비스 수준을 분석하였다.

V. 결과분석

상기 추정된 평균 주기길이와 평균 녹색시간을 적용하며 추정한 제어지체 결과는 〈표 4〉와 같다. 추정된 제어지체를 현장조사를 통해 수집한 제어지체와 비교한 것이다.

〈표 4〉 제어지체 추정결과 비교

구분	현장지체 (현장자료)	선형모형		급수모형		
		제어지체	차이	제어지체	차이	
EB	좌회전	60.7	85.2	24.5	80.4	19.7
	직진	35.1	31.6	-3.5	29.4	-5.7
WB	좌회전	54.8	63.0	8.2	60.4	5.6
	직진	31.3	31.3	0.0	29.1	-2.2
SB	좌회전	32.2	23.4	-8.8	24.7	-7.5
	직진	25.4	16.3	-9.1	18.8	-6.6
NB	좌회전	41.7	47.2	5.5	41.3	-0.4
	직진	34.3	31.7	-2.6	29.5	-4.8
교차로전체		36.5	34.7	-1.8	33.7	-2.8

선형모형 및 급수모형을 적용하며 추정한 실시간신호 제어교차로의 제어지체는 비디오 분석을 통해 수집한 현장의 제어지체와 어느 정도 유사하나 차이가 존재한다. 동향(EB) 좌회전의 경우 급수모형은 +19.7초, 선형모형은 +24.5초로 타 움직임에 비해 그 차이가 크다. 실시간신호제어교차로의 좌회전검지기는 일반적으로 정지선 후방 12m에 설치되어야 하나 상암동 월드컵 경기장 사거리의 경우 동향(EB) 좌회전 베이 길이가 짧은 이유로 좌회전검지기가 정지선에 위치한다. 이로 인하여 해

당 움직임의 경우 차량의 점유시간이 타 지역 점유시간과 비교하여 상대적으로 다르기(크기) 때문인 것으로 판단된다.

도로용량편람에서 규정하는 서비스 수준 평가 기준에 의하여 〈표 4〉의 제어지체를 기준으로 〈표 5〉의 서비스 수준 분석 결과를 정리하였다. 실험분석대상인 상암동 월드컵경기장 사거리 전체 교차로 서비스 수준은 선형모형 및 급수모형 모두의 경우에서 LOS C로 현장조사의 경우와 동일한 것으로 분석되었다.

〈표 5〉 서비스수준 추정결과 비교

구분	현장자료	선형모형	급수모형	
EB	좌회전	D	E	E
	직진	C	C	B
WB	좌회전	D	D	D
	직진	C	C	B
SB	좌회전	C	B	B
	직진	B	B	B
NB	좌회전	C	C	C
	직진	C	C	B
교차로전체		C	C	C

동향(EB) 좌회전 검지기 설치위치의 영향으로 모형으로 추정된 서비스 수준은 "E"로 현장의 경우와 매우 다르다. 그러나 나머지 움직임의 경우 분석된 LOS 수준이 어느 정도 서로 유사하다. 〈표 5〉의 결과를 통하여 선형모형과 급수모형 중 어느 모형이 상대적으로 우수하다 판단하기 어렵다. 이들 모두 동향(EB) 좌회전 서비스 수준의 차이가 변할 경우 타 움직임의 분석결과도 상호 유기적으로 달라질 수 있다.

선형모형과 급수모형을 적용하여 추정하는 평균 신호 시간 추정 방법 중 우수한 모형을 선별하기 위하여 통계시험을 수행하였다. 통계시험은 모형을 통해 추정되는 제어지체를 통한 현장 제어지체의 추정능력 검증을 위함이다. 검증을 위하여 추정치와 관측치의 차이를 판정하는 RMSE(Root Mean Square Simulation Error)와 RMSPE(Root Mean Square Percent Simulation Error)를 기준방법으로 적용하였다. RMSE는 추정치와 관측치 편차의 제곱을 평균한 평방근으로 추정치와 관측치 간의 관련수준을 설명한다. RMSPE는 백분율단위로 전환한 것으로 RMSE의 측정단위 문제점을 극복한다. 검증결과 선형모형과 급수모형의 RMSE는 각각 10.46과 8.45이며, RMSPE는 각각 22.91과 18.95이다. 선형모형과 급수모형의 현장에 대한 설명력 또한 77.09%

와 81.5%로 급수모형의 설명력이 높은 것으로 분석되었다.

VI. 결론 및 향후연구

본 연구에서는 도로용량편람의 신호교차로 서비스수준 분석기법을 기반으로 한 실시간신호제어교차로 서비스수준 분석방법론을 제안하였다. 제안된 방법론의 실험 적용을 위하여 한 개의 실시간신호제어교차로(상암동 월드컵경기장 사거리)를 선정 한 후 2주 분량의 신호운영 이력자료로 포화도 추정모형을 간이 개발하였다. 해당 교차로에서 현장 조사된 지체도와 동일시간을 대상으로 제안된 모형으로 추정된 지체도를 비교하였으며 서비스수준을 비교하였다. 지체도를 추정하는 설명력은 포화도 추정모형이 급수모형일 경우가 81.5%로 선형모형일 경우인 77.1%보다 높은 것으로 분석되었다.

도로용량편람은 최종적으로 일반화된 분석 수리모형을 제시하여야 한다. 본 연구에서 도출한 결과는 간이 개발된 포화도 추정모형을 적용한 경우로 도출된 수치의 절대적 의미는 적다. 그러나 본 연구에서 제시하는 분석 방법론(포화도 추정모형의 사용, 평균 주기길이 및 평균 녹색시간의 반복 순환 추정, 평균 신호시간을 적용한 서비스 수준 분석)을 통하여 추정된 실시간신호제어교차로 서비스 수준이 현장 조사된 서비스 수준과 어느 정도 유사하게 도출되는 것을 확인하였다. 본 분석방법론을 토대로 보다 실시간신호교차로 서비스수준 분석방법이 마련될 수 있음을 확인하였음에 의미가 있다.

본 연구는 정주기 신호교차로로 국한되던 기존의 도로용량편람 서비스 수준 분석방법을 실시간신호제어교차로로 적용범위를 확장시키기 위한 기초연구이다. 지금까지 실시간신호제어교차로의 서비스 수준을 분석할 수 있는 방법이 부재하여 현장 실무진들의 애로가 많았으며, 현장에서 실시간신호제어교차로의 수가 계속적으로 증가하고 있는 것을 감안할 경우 본 연구의 의의는 적지 않다.

향후 연구로 다 수의 실시간신호제어교차로 이력자료를 토대로 일반적인 포화도 추정모형 개발을 제안한다. 여러 지점에 설치된 실시간신호제어시스템 중요교차로를 고르게 반영하여 일반화된 포화도 추정모형을 개발하여야 할 필요가 있다. 이때 연구에 반영되는 실시간신호제어시스템은 운영자에 의해 적절히 튜닝이 되어있어야 할 것이다. 이러한 이유로 가장 오래전에 설치된 서울시 실

시간신호제어시스템을 통하여 수집되는 전체 이력자료를 토대로 향후 연구를 수행할 것을 제안한다. 다양한 지점에서 추정된 지체도와 및 서비스 분석 결과와 현장 수집된 자료 값들과의 비교를 통하여 일반화된 분석방법론이 마련될 수 있을 것이다.

좌회전 포화도를 추정함에 일반적인 하나의 좌회전 포화도 추정모형을 적용할 경우 추정되는 오차의 범위가 크다. 좌회전 검지기 설치위치에 따라 추정되는 좌회전 포화도가 다르기 때문이다. 좌회전 검지기 설치지점을 별도로 구분하는 포화도 추정모형의 개발이 향후 연구에서 검토되어야 한다.

참고문헌

1. 건설교통부(2004), "도로용량편람".
2. 서울지방경찰청(2002), "실시간 신호제어시스템 실무해설집".
3. TRB(2000), "Highway Capacity Manual", Special Report 279, Washington, D.C.
4. Canadian ITE(2006), "Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections", ITE District 7.
5. Akçelik & Associates Pty Ltd(n.d.), "SIDRA solution", Retrieved November 30, 2007, from http://www.sidrasolutions.com/akcelik_company_team.htm
6. 日本道路協會(1984), "道路の交通容量".
7. 김성득·박창수·박원규(2001), "한국 도로용량편람과 미국 HCM 2000의 신호교차로 서비스수준 결정에 관한 고찰", 대한교통학회지, 제19권 제5호, 대한교통학회, pp.143~154.
8. Courage, K. G., D. F. Fambro, R. Akcelik, P. S. Lin, M. Anwar F. Vilorio (1996), "Capacity Analysis of Traffic-Actuated Intersections", NCHRP Project 3048 Final Report, University of Florida, TTI, ARRB, Gainesville, FL, the United States.
9. 김진태·장명순·손봉수·도철용(2002), "감응식 신호운영의 평가를 위한 평균녹색시간 추정모형 개발", 대한교통학회지, 제20권 제3호, 대한교통학회, pp. 159~168.
10. Kim J.T. and Courage K.G. (2002), "Evaluation

- and Design of Maximum Green Time Settings for Traffic-Actuated Control”, Transportation Research Record 1982, pp.246~255.
11. 서울지방경찰청(2001), “신신호시스템 기능개선”.
 12. 서울지방경찰청(2003), “실시간신호제어시스템 기능개선”.
 13. 서울시(2003), “신신호시스템 검증·평가”.
 14. Kim J.T., Lee J.Y. and Chang M.S.(2007), “Neural Network based Cycle Length Design Model for Real-time Traffic Signal Control”, in Press, Canadian Journal of Civil Engineering.
 15. 김진태(2004), “Productive Korean Highway Capacity Software (PKHCS) 신호교차로 용량분석 프로그램”, 대한민국, 소프트웨어 등록번호 2004-01-120-001690.

✉ 주 작성자 : 김진태

✉ 교신저자 : 김진태

✉ 논문투고일 : 2007. 12. 3

✉ 논문심사일 : 2008. 3. 10 (1차)

2008. 5. 26 (2차)

2008. 7. 7 (3차)

✉ 심사판정일 : 2008. 7. 7

✉ 반론접수기한 : 2008. 12. 31

✉ 3인 익명 심사필

✉ 1인 abstract 교정필