

■ 論 文 ■

# 간선도로 연동화 신호최적화 모형 KS-SIGNAL의 수행속도 향상을 위한 연구

A Study on Improvement of Run-Time in KS-SIGNAL,  
Traffic Signal Optimization Model for Coordinated Arterials

**박 찬 호**

(국토연구원 연구원)

**김 영 찬**

(서울시립대학교 도시공학과 부교수)

## 목 차

- |                                    |                 |
|------------------------------------|-----------------|
| I. 서론                              | 4. 모형식의 최종형태    |
| II. 관련연구 및 이론고찰                    | 5. 단계별 수행 결과    |
| III. 기존 모형식의 개선을 통한 수행속도<br>향상화 작업 | IV. 모형의 적용 및 평가 |
| 1. 기존 KS-SIGNAL모형식의 개선             | 1. 모형의 적용       |
| 2. MILP 최적화 루틴의 탑재                 | 2. 모형의 평가       |
| 3. 좌회전 현시조합에 관한 제약식 추가             | V. 결론           |
|                                    | 참고문헌            |

## 요 약

본 논문에서는 기개발된 간선도로 연동화 신호최적화 모형인 KS-SIGNAL의 최적화 수행속도를 향상시키기 위한 새로운 모형식을 개발하였다. 이를 위하여 기존 모형식의 수정, MILP 최적화 루틴의 탑재, 좌회전 현시순서와 관련한 제약식의 추가 등 3단계에 걸친 모형 개선 작업이 이루어졌으며, 그 결과 기존 모형식과 비교 99%이상의 최적화 수행시간 단축 효과를 창출하였다. 개발된 KS-SIGNAL 모형식은 여러 다양한 경우에 대해 모의실험을 실시한 결과 교통량보다는 교차로간 거리에 더욱 민감하게 반응함으로써 지체최소화모형 (TRANSYT-7F)보다는 통과폭최대화모형(PASSER-II)에 더 가까운 신호시간계획을 산출하였다. 더불어 본 모형식이 좌회전 현시순서를 최적화시키지 못하는 TRANSYT-7F 모형식과 통과폭을 최대화하나 통과폭 밖의 적진교통류를 고려하지 못하는 PASSER-II 모형식, 그리고 이들의 단점을 상호보완한 결합모형과 비교하여 더 적은 지체를 유발시키는 보다 더 효율적인 신호시간계획을 창출하는 것으로 분석되었다.

## 1. 서론

현재 교통선진국이라 불리는 미국과 유럽 등 대다수 국가의 교통관련 연구기관들에서는 간선도로 연동화와 관련하여 전산화된 소프트웨어를 개발, 상용화에 들어가 있는 상태다. 이들 교통운영 소프트웨어의 대표적인 예로는 TRANSYT-7F<sup>2)</sup>, PASSER-II<sup>3)</sup> 등이 있으며, 이들의 장점만을 부각시켜 개발된 AAP (Arterial Analysis Package)<sup>4)</sup> 등을 들 수 있다. 최근 우리 나라에서 교통운영 소프트웨어의 개발은 일부 연구기관 및 소수의 교통운영 학자들에 의해 관심의 대상이 되고 있으며, 특히 김영찬에 의해 연구된 간선도로 신호연동화 최적화 모형인 KS-SIGNAL<sup>1)</sup>을 그 대표적인 일례로 들 수 있다.

KS-SIGNAL은 연동대상이 되는 간선도로의 지체를 최소화하는 좌회전현시순서 최적화모형으로 기존의 대표적인 지체최소화 모형인 TRANSYT-7F와 통과폭 최대화 모형<sup>5)</sup>인 PASSER-II의 단점을 극복할 수 있는 보다 현실성 있는 간선도로 연동화 신호최적화 모형이다. 하지만, 기존의 KS-SIGNAL 모형식은 다수의 최적화 변수들과 관련된 과도한 제약식으로 인해 그 수행속도가 현저하게 저하되는 현상을 초래하였으며, 이는 교통운영 소프트웨어로의 개발 측면에 있어서도 큰 장애로 작용하였다.

본 논문에서는 위에서 제시한 바와 같이 기존 KS-SIGNAL의 모형식을 개선, 최적화 수행속도를 획기적으로 향상시키는 모형식을 새로이 제안하며, 이와 더불어 좌회전 현시순서의 조합과 관련된 제약식의 추가 등을 통해 최적화 수행시간 단축을 위한 새로운 방법론을 제시하는 것을 그 목적으로 한다. 또한 본 연구에서는 새로이 제시된 모형식의 수행속도를 극대화하는 방안으로 선형계획식을 최적화 하는 대표적 상업용 소프트웨어인 LINDO<sup>6)</sup>의 라이브러리를 탑재, 간선도로 신호연동화와 관련한 전문 소프트웨어를 개발하기 위한 기틀을 마련한다.

본 연구에서 논의하게 될 KS-SIGNAL 모형식은 간선도로 연동화를 위한 신호최적화 모형식으로서 다수의 정수변수와, 자유변수 그리고 이진변수들로 구성된 혼합정수선형계획법(MILP) 형태의 제약식을 최적화하는 작업을 수행하게 된다.

본 연구는 KS-SIGNAL의 최적화 수행속도를 현저히 향상시킴을 주목적으로 하며, 이를 위해 모형식

의 목적함수와 제약식의 일부를 새로이 수정·추가하고, 기타 전산화 작업과 관련하여 최적화 수행속도를 향상시킬 수 있는 제2의 방법론을 제시한다.

연구의 후반부에서는 새로이 제시된 모형식에 대해 좀 더 다양한 시나리오를 통해 민감도 분석을 실시, 기존의 TRANSYT-7F 및 PASSER-II 모형식과 상호비교를 통해 KS-SIGNAL 모형식의 성능을 분석·평가한다.

## II. 관련연구 및 이론고찰

간선도로 신호연동화 모형식으로는 그 전통적인 기법상 크게 지체최소화 통과폭최대화 모형 및 이들의 장점을 상호 결합한 통합모형이 있다.

지체최소화 모형인 TRANSYT-7F 모형은 지체시간과 정지시간의 선형함수로 표현되는 수행지수를 최소화하기 위해 언덕오름(Hill-Climbing)기법을 이용, 옅색과 녹색시간을 선택한 후 최적신호주기를 결정하게 된다. 지체최소화모형은 전체 교통시스템 측면에서 높은 효율성을 제공하므로 네트워크의 최적신호시간 계획에 이용되는 가장 범용적인 모형이나, 현시순서를 최적화하지 못하고 최적화시 사용되는 언덕오름기법상 국부최소값에 귀착될 가능성이 있으며, 연동방향 교통류의 통과폭을 증가시켜야 하는 간선도로 신호최적화에는 적절하지 못하다는 단점을 지니고 있다.

통과폭최대화 모형인 MAXBAND 모형은 간선도로 전구간에 대한 차량의 통과폭을 최대화하는 신호시간 계획을 산출하는 모형이다. 통과폭최대화 모형은 중앙방향 교통량 흐름을 반영, 연동방향 및 비연동방향의 통과폭의 합을 최대로 하는 모형으로 간선도로의 연동화를 위한 최적신호시간계획을 수립하는데 있어서 매우 합리적인 해를 도출하나, 부방향의 교통량 증가로 인한 지체를 간과하며, 시스템 내에 교통량이 많아질수록 좋지 못한 해를 도출시키는 단점을 지니고 있다.

또한 위 두가지 모형식을 결합한 형태의 간선도로 연동화 신호최적화 package인 AAP(Arterial Analysis Package)는 기존의 지체최소화 모형인 TRANSYT-7F와 통과폭최대화 모형인 PASSER-II의 장점을 부각시켜 통합된 환경하에서 간선도로 연동화에 관한 신호최적화가 가능하다. 그러나, AAP는 TRANSYT-7F 모형이 현시순서를 최적화하지 못하는 단점을

PASSER-II에 의해 선택이 가능하도록 하는 등, 양대 모형을 활용하여 다양한 시나리오에 대해서 최적화를 수행할 수 있으나, 이 역시 지체가 최소화된다거나 통과폭이 최대화된다고 보장받을 수 없다는 단점을 지니고 있다.

이와 비교해 볼 때 KS-SIGNAL 모형식은 위 모형식들의 단점을 극복, 보다 더 현실적인 교통류 형태를 기초로 하여 지체를 최소화하면서 좌회전 현시순서를 최적화시키는 간선도로 신호연동화 최적화 모형이다.

KS-SIGNAL 모형식은 혼합정수선형계획법으로 되어 있으며, 이를 풀기 위해 선형계획에서 정수계획해법 알고리즘으로 널리 사용되고 있는 분지한계법(Branch and Bound Method)을 사용하여 해를 구해낸다. 그러나 KS-SIGNAL의 최적화 모형식과 분지한계법에 의해 정식화된 모형식은 교차로수가  $n$  개인 경우  $(45n-3)$ 개의 제약식과  $(10n-9)$ 개의 연속변수,  $(n-1)$ 개의 정수변수,  $(10n-8)$ 개의 이진변수 및  $(4n-4)$ 개의 자유변수 등으로 구성되기 때문에 실제 신호변수의 최적화를 위한 computing processing time은 현저하게 저하되는 것으로 평가되었다. 이러한 이유로 분석대상 교차로수가 증가하면 최적해를 도출하기 위한 계산시간이 과도하게 기하급수적으로 증가되는 문제가 수반되며, 본 연구에서는 이러한 문제점들을 개선하기 위한 새로운 최적화 모형식을 개발하고자 한다.

### III. 기존 모형식의 개선을 통한 수행속도 향상화 작업

기존의 KS-SIGNAL 모형식은 앞절에서 제시한 바와 같이 신호최적화 루틴 수행시 과도한 수행시간으로 인해 실용화가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 지금부터 제시하는 각 단계별 작업에 의해 수행속도를 현저히 개선하고, 최종적으로는 전산화 작업을 통해 실용화를 도모하고자 한다.

이와 관련하여 본 연구에서는 최적화 수행속도 향상을 위한 단계별 작업을 실시하는데, 제1단계 작업으로 모형식의 개선을 통해 제약변수를 줄임으로써 최적화 수행속도를 향상시키며, 제2단계 작업에서는 최적화 시간단축의 극대화를 꾀하고자 MILP 최적화

라이브리리를 도입·탐재하기 위해 제약행렬식의 일부를 수정한다. 그리고, 마지막 제3단계 작업에서는 좌회전 현시조합 옵션과 관련된 제약행렬식을 추가함으로써 좌회전 현시순서와 관련한 모든 가능한 조합에 대해서 최적화 작업을 수행함에 따라 증가하는 최적화 수행시간을 단축시키는 방법론을 제시한다.

### 1. 기존 KS-SIGNAL 모형식의 개선

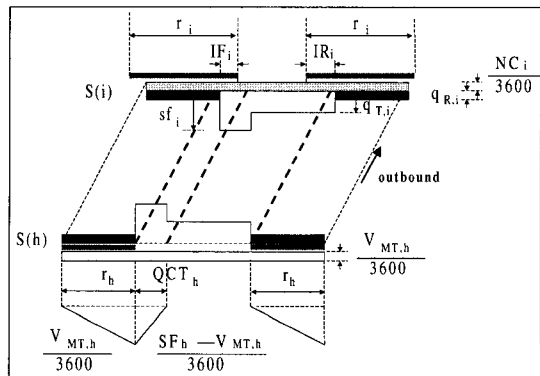
〈그림 1〉은 본 모형식에서의 차량 도착 및 출발 형태를 도시하고 있다. 상류부에서 적색시간동안 대기하고 있던 대기차량에 의해 형성되는 포화교통류에 의한 도착률( $sf_i$ )은 전주기 내내 걸쳐 발생한 교통량에 의해 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$sf_i = \frac{SF_h}{3600} \text{ (대/초)}$$

〈그림 1〉에서 사용된 용어는 다음과 같다.

- $r_i$  : 교차로  $i$ 의 적색시간으로 주기에대한 비율
- $IF_i$  : 교차로  $i$ 의 전방직진방해시간으로 주기에 대한 비율
- $IR_i$  : 교차로  $i$ 의 후방직진방해시간으로 주기에 대한 비율

포화교통류( $sf_i$ )이 전주기에 걸쳐 도착한 교통량으로부터 계산되는 관계로 직진차량 평균도착률( $q_{T,i}$ ) 역시 녹색시간 대신 전주기동안 도착한 교통량으로부터 산정된다. 반면, 회전차량 평균도착률( $q_{R,i}$ )은



〈그림 1〉 차량의 출발 및 도착 형태

적색시간 동안 부도로로부터 주도로로 유입된 교통량 으로부터 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$q_{T,i} = \frac{V_{MT,h} + NC_i}{3600} \text{ (대/초)}$$

$$q_{R,i} = \frac{V_{CR,h} + \bar{V}_{CL,h}}{r_h \times 3600} + \frac{NC_i}{3600} \text{ (대/초)}$$

링크내 진출입 교통량 ( $NC_i$ )은 전주기에 걸쳐 동일하게 분포하는 것으로 가정하며, 이는 입력값이 아닌 다음 식으로부터 계산되는 교통량이다.

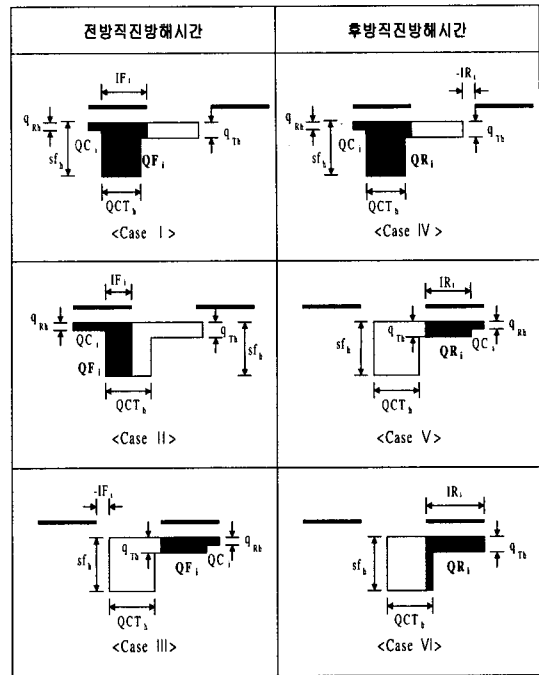
$$NC_i = (V_{MT,i} + V_{MR,i} + V_{ML,i}) - (V_{MT,h} + V_{CR,h} + \bar{V}_{CL,h}) \text{ (대/초)}$$

상류부 교차로에서 출발한 차량군의 형태는 차량군 분산 없이 하류부에 그대로 도착하나, 각 교차로마다 서로 다른 적색시간과 오프셋에 의해 <그림 2>와 같은 6가지의 대기차량 패턴을 형성하게 된다. 그림에서 어두운 부분이 적색시간에 의해 발생하는 대기차량이다.

상류부 교차로에서 적색시간에 대기하고 있던 대기행렬내의 차량들은 녹색시간이 시작되는 시점에서 포화교통류율로 소거되기 시작하며 이 차량들이 소거되는 시간은 다음식에 의해 산정할 수 있다.

$$QCT_i = \frac{V_{MT,i} \times r_i}{SF_i - V_{MT,i}}$$

기존의 KS-SIGNAL 모형식은 상류부 교차로의 교통류에 대한 정보가 제공되지 않는 연동화가로의 최초 교차로에 대해서만 위의 식에 의해 대기차량 소거시간을 산정하고, 나머지 교차로에 대한 대기차량 소거시간은 최적화 과정에서 변수로 취급하였다. 본 모형식에서는 위의 식을 전체 교차로에 대해 확장시켜 적용함으로써 최적화 제약행렬식에서는 대기차량 산정에 관한 변수를 상수값으로 대체할 수 있게 되었으며, 변수의 수 또한 감소됨으로 인해 최적화 수행속도를 향상시킬 수 있었다. 이러한 방법론은 기존모형식과 비교해 모형의 정확도에 있어 최적값에 이르지 못하는 단점을 지니나, 본 수정모형식이 추구하는바 100%이상의 수행속도 향상 결과를 가져왔으며, 최적화 결과 또한 기존의 대표적 모형식인



<그림 2> 대기차량 발생패턴

TRANSYT-7F와 PASSER-II와 비교하여 더 우수한 결과를 도출하였다.

<그림 2>에서와 같이 상류부에서 출발한 차량군은 해당교차로의 적색시간과 오프셋에 따라 서로 다른 도착패턴을 형성하게 되는데, 이때, 대기차량은 전방직진차량군 대기차량( $QF_i$ ), 후방직진차량군 대기차량( $QR_i$ ), 회전차량군 대기차량( $QC_i$ )으로 구분되며, 이들 대기차량의 소거시간은 주기에 대한 비율로 표현된다.

우선 전방직진차량군( $QF_i$ )에 대한 대기차량 소거시간( $QCTF_i$ )은 전방직진방해시간( $IF_i$ )이 상류부 교차로의 대기차량 소거시간( $QCT_h$ )보다 클 때 ( $case I$ )와 작을 때 ( $case II$ )가 다르게 발생되며, 이들 두 개의 식은  $IFFP_i$ 라는 변수를 이용하여 단일 식으로 표현할 수 있다.  $case III$ 은 직진방해시간이 음수인 경우로 전방직진차량군의 대기차량이 발생하지 않는 경우이다. 대기차량이 발생하는  $case I$ 과  $case II$ 는 다음과 같이 단일식으로 표현할 수 있다.

$$QCTF_i = sf_i \times IFP_i \times sh_i - sf_i \times IFFP_i \times sh_i + q_{T,i} \times IFFP_i \times sh_i$$

$$IFFP_i = \max\{0, IF_i - QCT_h\}$$

후방직진차량군( $QR_i$ )에 대한 대기차량 소거시간( $QCTR_i$ ) 역시 후방직진방해시간( $IR_i$ )에 상류부에서 포화교통류율( $sf_i$ )로 출발한 차량군이 포함될 때와 포함되지 않을때가 다르게 발생되며, 대기차량이 발생하는 case V 과 case VI에 대해 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$QCTR_i = q_{T,i} \times (IRP_i - IRRP_i) \times sh_i + sf_i \times IRRP_i \times sh_i$$

$$IRRP_i = \max\{0, QCT_h - IF_i - (1 - r_i)\}$$

위의 전방직진방해시간과 후방직진방해시간에 관한 식은 선형화된 형태로 다시 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$IFFP_i \geq 0$$

$$IFFP_i \geq IF_i - QCT_h$$

$$IFFP_i \leq MZ_{ff}$$

$$IFFP_i - (IF_i - QCT_h) \leq M(1 - Z_{ff})$$

$$\overline{IFFP}_h \geq 0$$

$$\overline{IFFP}_i \geq \overline{IF}_h - \overline{QCT}_i$$

$$\overline{IFFP}_i \leq M \times \overline{Z}_{ff}$$

$$\overline{IFFP}_i - (\overline{IF}_h - \overline{QCT}_i) \leq M(1 - \overline{Z}_{ff})$$

$$IRRP_i \geq 0$$

$$IRRP_i \geq QCT_h - IF_i - (1 - r_i)$$

$$IRRP_i \leq MZ_{rr}$$

$$IRRP_i - (QCT_h - IF_i - (1 - r_i)) \leq M(1 - Z_{rr})$$

$$\overline{IRRP}_h \geq 0$$

$$\overline{IRRP}_i \geq \overline{QCT}_i - \overline{IF}_h - (1 - \overline{r}_i)$$

$$\overline{IRRP}_i \leq M \times \overline{Z}_{rr}$$

$$\overline{IRRP}_i - (\overline{QCT}_i - \overline{IF}_h - (1 - \overline{r}_i)) \leq M \times (1 - \overline{Z}_{rr})$$

마지막으로 회전차량군( $QC_i$ )에 대한 방해시간은 적색시간중 직진방해시간을 제외한 시간으로 정의되나 직진방해시간이 음수인 경우에는 실제 적색시간보다 커지는 문제로 인해 비음조건이 추가되어야 한다. 회전차량군에 대한 대기차량 소거시간( $QCTC_i$ )은 직진방해시간 산정시 이용된 비음조건을 만족시키는 변수

$IFP_i, IRP_i$ 를 사용하여 다음식에 의해 산정할 수 있다.

$$QCTC_i = q_{R,i} \times (r_i - IFP_i - IRP_i) \times sh_i$$

따라서, 본 모형식의 목적함수로 사용될 교차로 접근로상의 총대기차량 소거시간은 전방직진차량군 대기시간과 후방직진차량군 대기시간, 그리고 회전차량군 대기시간을 모두 합산함으로써 산정할 수 있다.

$$QCT_i = QCTF_i + QCTR_i + QCTC_i$$

$$\overline{QCT}_i = \overline{QCTF}_i + \overline{QCTR}_i + \overline{QCTC}_i$$

위의 식들을 다시 정리하면, 최종 목적함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

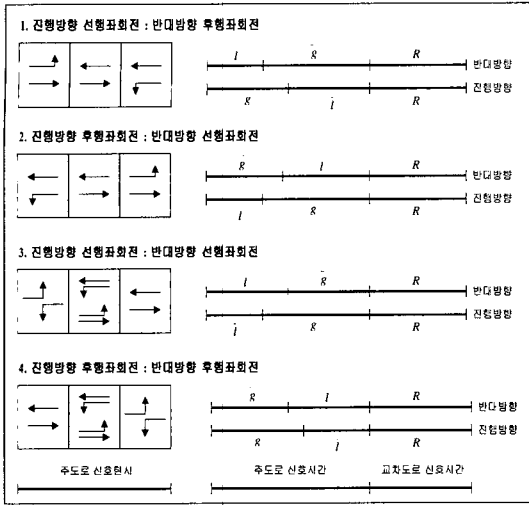
$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^N [sh_i(sf_i - q_{R,i})IFP_i + sh_i(q_{T,i} - q_{R,i})IRP_i + sh_i(sf_i - q_{T,i})(IRRP_i - IFFP_i) + sh_i(sf_i - q_{R,i})\overline{IFFP}_i + sh_i(q_{T,i} - q_{R,i})\overline{IRP}_i + sh_i(sf_i - q_{T,i})(\overline{IRRP}_i - \overline{IFFP}_i)]$$

## 2. MILP 최적화 루틴의 탑재

본 시스템에서는 최적화루틴의 수행속도를 극대화시키고자 상용 프로그램인 윈도우용 LINDO의 최적화 루틴의 탑재를 시도, 프로그래밍화하였다. 기존의 KS-SIGNAL 시스템에서는 MILP의 고전적 해법인 분지한계법(Branch and Bound Method)을 사용하는데, 직진방해시간이 직진차량의 흐름을 방해하는 경우 양의 값, 방해하지 않는 경우 음의 값으로 표현된다. 하지만, 실제 시간적인 개념상으로 음의 값은 존재할 수 없다는 비음조건에 의해 직진방해시간변수( $IF_i, IR_i, \overline{IF}_i, \overline{IR}_i$ )가 각각 2가지 변수로 사용되므로 수행속도 역시 기하급수적으로 증가되었다. 그러나, 본 시스템에는 LINDO의 최적화 루틴을 탑재함으로써 이들 직진방해시간변수는 모두 한가지 변수로서 표현할 수 있었으며, 자유변수의 수 또한 기존모형식의 절반으로 줄어들게 되었다. 그 결과 최적화 수행시간 역시 획기적으로 단축되었다.

## 3. 좌회전 현시조합에 관한 제약식 추가

시공도상에서 노드내 읍셋으로 표현되는 좌회전 현시



〈그림 3〉 좌회전 현시순서

순서의 최적화 제약조건은 간선도로의 연동화에 있어서 직진교통량의 통과폭을 극대화시키는데 있어 매우 중요한 요소이다. 본 연구에서는 연동대상이 되는 간선도로상의 지체를 최소화하기 위한 좌회전 현시순서를 찾아내기 위해 〈그림 3〉과 같이 통과폭 최대화 모형에서 사용하고 있는 중첩(overlap)이 가능한 4가지의 좌회전 현시순서 옵션을 사용한다.

기존의 KS-SIGNAL 모형식에서는 좌회전 현시순서의 조합에 있어 가능한 모든 경우에 대해 최적화를 수행하였으나, 본 모형식에서는 이들 좌회전 현시순서 조합 중 일부를 선택하여 최적화시킬 수 있는 제약식을 추가함으로써 해서 좀 더 유동적인 분석이 가능하도록 하였다. 이는 궁극적으로 간접적인 최적화 수행시간의 단축효과를 창출할 수 있는 방법론이기도 하다.

〈그림 3〉에서 사용된 용어는 다음과 같으며, 모두 주기에 대한 비율로 표현된다.

- $g_i(\bar{g}_i)$  : 교차로 i에서 직진 교통량에 대한 out-bound(inbound) 녹색시간
- $l_i(\bar{l}_i)$  : 교차로 i에서 outbound(inbound) 좌회전에 할당되는 시간
- $R_i$  : 교차로 i에서 교차도로의 통행제공을 위한 공통적색시간
- $r_i(\bar{r}_i)$  : 교차로 i에서 outbound(inbound) 직진에 대한 적색시간

$$r_i = R_i + \bar{l}_i$$

$$\bar{r}_i = R_i + l_i$$

〈그림 3〉에서  $\Delta_i$ 를  $l_i$ 와  $\bar{l}_i$ 로 나타내면 〈표 1〉과 같은데, 이진변수인  $\delta_i$ 와  $\bar{\delta}_i$ 를 사용하여 아래식과 같이 정리할 수 있다.

$$\Delta_i = \frac{1}{2} [(2\delta_i - 1)l_i - (2\bar{\delta}_i - 1)\bar{l}_i]$$

좌회전 현시순서에 대한 옵션을 최적화 제약행렬식에 포함시키기 위해서는 제약식이 〈표 1〉의 모든 조합에 대해 동일한 변수로서 표현되어야 하는데, 이때 부분적으로 2보다 큰 양수 M(big integer)을 사용해 이를 해결할 수 있다.

〈표 1〉 좌회전 현시순서 패턴

좌회전 현시순서	$\Delta_i$	$\delta_i$	$\bar{\delta}_i$
I	$-(1/2)(l_i + \bar{l}_i)$	0	1
II	$(1/2)(l_i + \bar{l}_i)$	1	0
III	$-(1/2)(l_i - \bar{l}_i)$	0	0
IV	$(1/2)(l_i - \bar{l}_i)$	1	1

선택옵션에 따른 행렬식을 표현하면 각각 다음과 같다.

- Option I :  $\delta_i - \bar{\delta}_i = -1$
- Option II :  $\delta_i - \bar{\delta}_i = 1$
- Option III :  $\delta_i + \bar{\delta}_i = 0$
- Option IV :  $\delta_i + \bar{\delta}_i = 2$
- Option I, II :  $\delta_i + \bar{\delta}_i = 1$
- Option I, III :  $M\delta_i + \bar{\delta}_i \leq 1$
- Option I, IV :  $\delta_i + M\bar{\delta}_i \geq M$
- Option II, III :  $\delta_i + M\bar{\delta}_i \leq 1$
- Option II, IV :  $M\delta_i + \bar{\delta}_i \geq M$
- Option III, IV :  $\delta_i - \bar{\delta}_i = 0$
- Option I, II, III :  $\delta_i + \bar{\delta}_i \leq 1$
- Option I, II, IV :  $\delta_i + \bar{\delta}_i \geq 1$
- Option I, III, IV :  $\delta_i - \bar{\delta}_i \leq 0$

Option II, III, IV :  $\delta_i - \bar{\delta}_i \geq 0$

Option I, II, III, IV :  $\delta_i + \bar{\delta}_i \geq 0$

(단,  $M$ 은 2이상의 모든 실수)

**4. 모형식의 최종형태**

세가지의 단계별 작업을 통해 최종적으로 도출된 모형식은 (N-1)개의 정수변수와 (12N-8)개의 이진 변수, (4N-4)개의 자유변수로 구성된다. 제약식은 좌회전 현시패턴에 대한 옵션이 추가됨으로 해서 총 (44N-43)개로 이루어진다.

Find  $IF_i, IR_i, \overline{IF}_i, \overline{IR}_i, \delta_i, \bar{\delta}_i, m_i$

**Objective Function**

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^N [sh_i(sf_i - q_{R,i})IFP_i + sh_i(q_{T,i} - q_{R,i})IRP_i + sh_i(sf_i - q_{T,i})(IRRP_i - IFFP_i) + sh_i(sf_i - q_{R,i})\overline{IFP}_i + sh_i(q_{T,i} - q_{R,i})\overline{IRP}_i + sh_i(sf_i - q_{T,i})(\overline{IRRP}_i - \overline{IFFP}_i) ]$$

**Constraints**

▶ 루프 제약식

$$\delta_h l_h - \delta_i l_i - \bar{\delta}_h \bar{l}_h + \bar{\delta}_i \bar{l}_i + t(h, i) \times Z + t(h, i) \times Z + IF_i - \overline{IR}_h + r_h - r_i = m_i$$

▶ 공통주기 제약식

$$1 - r_h = IF_i + (1 - r_i) + IR_i$$

$$1 - \bar{r}_i = \overline{IF}_h + (1 - \bar{r}_h) + \overline{IR}_h$$

▶ 직진방해시간 제약식

$$-(1 - r_i) \leq IF_i \leq r_i$$

$$-(1 - r_i) \leq IR_i \leq r_i$$

$$-(1 - \bar{r}_h) \leq \overline{IF}_h \leq \bar{r}_h$$

$$-(1 - \bar{r}_h) \leq \overline{IR}_h \leq \bar{r}_h$$

▶ 지체시간 비음조건 제약식

$$IFP_i \geq 0$$

$$IFP_i \geq IF_i$$

$$IFP_i \leq M \times Z_{fi}$$

$$IFP_i - IF_i \leq M(1 - Z_{fi})$$

$$\overline{IFP}_i \geq 0$$

$$\overline{IFP}_i \geq \overline{IF}_i$$

$$\overline{IFP}_i \leq M \times \overline{Z}_{fi}$$

$$\overline{IFP}_i - \overline{IF}_i \leq M(1 - \overline{Z}_{fi})$$

$$IRP_i \geq 0$$

$$IRP_i \geq IR_i$$

$$IRP_i \leq M \times Z_{ri}$$

$$IRP_i - IR_i \leq M(1 - Z_{ri})$$

$$\overline{IRP}_i \geq 0$$

$$\overline{IRP}_i \geq \overline{IR}_i$$

$$\overline{IRP}_i \leq M \times \overline{Z}_{ri}$$

$$\overline{IRP}_i - \overline{IR}_i \leq M(1 - \overline{Z}_{ri})$$

▶ 전방직진 방해시간에 의한 지체시간 일반화 제약식

$$IFFP_i \geq 0$$

$$IFFP_i \geq IF_i - QCT_h$$

$$IFFP_i \leq MZ_{ffi}$$

$$IFFP_i - (IF_i - QCT_h) \leq M(1 - Z_{ffi})$$

$$\overline{IFFP}_i \geq 0$$

$$\overline{IFFP}_i \geq \overline{IF}_i - \overline{QCT}_h$$

$$\overline{IFFP}_i \leq MZ_{ffi}$$

$$\overline{IFFP}_i - (\overline{IF}_i - \overline{QCT}_h) \leq M(1 - \overline{Z}_{ffi})$$

▶ 후방직진 방해시간에 의한 지체시간 일반화 제약식

$$IRRP_i \geq 0$$

$$IRRP_i \geq QCT_h - IF_i - (1 - r_i)$$

$$IRRP_i \leq MZ_{mi}$$

$$IRRP_i - (QCT_h - IF_i - (1 - r_i)) \leq M(1 - Z_{ffi})$$

$$\overline{IRRP}_i \geq 0$$

$$\overline{IRRP}_i \geq \overline{QCT}_h - \overline{IF}_i - (1 - \bar{r}_i)$$

$$\overline{IRRP}_i \leq MZ_{mri}$$

$$\overline{IRRP}_i - (\overline{QCT}_h - \overline{IF}_i - (1 - \bar{r}_i)) \leq M(1 - \overline{Z}_{ffi})$$

▶ 좌회전 현시패턴 제약식

Option I :  $\delta_i - \bar{\delta}_i = -1$

Option II :  $\delta_i - \bar{\delta}_i = 1$

Option III :  $\delta_i + \bar{\delta}_i = 0$

Option IV :  $\delta_i + \bar{\delta}_i = 2$

Option I, II :  $\delta_i + \bar{\delta}_i = 1$

Option I, III :  $M\delta_i + \bar{\delta}_i \leq 1$

Option I, IV :  $\delta_i + M\bar{\delta}_i \geq M$

Option II, III :  $\delta_i + M\bar{\delta}_i \leq 1$

Option II, IV :  $M\delta_i + \bar{\delta}_i \geq M$

Option III, IV :  $\delta_i - \bar{\delta}_i = 0$

Option I, II, III :  $\delta_i + \bar{\delta}_i \leq 1$

Option I, II, IV :  $\delta_i + \bar{\delta}_i \geq 1$

Option I, III, IV :  $\delta_i - \bar{\delta}_i \leq 0$

Option II, III, IV :  $\delta_i - \bar{\delta}_i \geq 0$

Option I, II, III, IV :  $\delta_i + \bar{\delta}_i \geq 0$

(단, M은 2이상의 모든 실수)

▶ 변수제약조건

$m_i = \text{integer}$

$\delta_i, \bar{\delta}_i, Z_{fi}, Z_{ri}, \bar{Z}_{fi}, \bar{Z}_{ri}, Z_{ffi}, Z_{rmi}, \bar{Z}_{ffi}, \bar{Z}_{rmi}$

= binary integer

$IF_i, IR_i, \bar{IF}_i, \bar{IR}_i = \text{free value}$

5. 단계별 수행 결과

최적화 수행시간 비교의 경우, 교통조건은 주방향 편도4차선(좌회전 전용차선 1개), 부방향 편도3차선(좌회전 전용차선 1개)에 대해 최적화 작업을 수행했으며, PC는 CPU MMX 200MHz, RAM 64M급을 사용했다.

1단계 작업으로 기존모형식에서 대기시간 산정변수를 모두 상수값으로 처리한 결과, 수행시간을 70% 이상 향상시킬 수 있었다. 이는 기존모형식과 비교하여 제약식에 이용된 변수의 수에서는 큰 차이가 없으나 대기시간 산정변수가 소거된 것 외에 기타 제약식에서 사용된 대기시간 변수들도 모두 상수로 처리됨

〈표 2〉 분석 단계별 수행시간 비교 (단위: 초)

구 분	기존모형식	1단계 수정	2단계 수정	3단계 수정
한산상태	1,285	390	3	2
정상상태	1,516	476	5	3
용량상태	1,400	412	3	2

로써 수반된 결과로 분석된다.

2단계 작업으로 윈도우즈용 LINDO 최적화 루틴을 탑재 후 수행한 결과, 〈표 2〉와 같이 1단계 결과와 비교해 역시 95%이상의 수행시간 단축효과가 나타났으며, 3단계 작업에 의해 좌회전 현시순서에 관한 제약식을 추가함으로 해서 2단계 작업결과와 비교 수행시간이 다시 30%이상 단축되었다.

IV. 모형의 적용 및 평가

1. 모형의 적용

모의실험은 도시부 간선도로로 4차교차로가 4개인 경우를 대상으로 실시하였는데, 교통량의 경우 주방향과 부방향의 직진교통량을 기준으로 한산상태(v/c=0.5), 정상상태(v/c=0.7), 용량상태(v/c=0.9)인 경우로 나누었으며, 교차로간 간격은 각 교차로별로 동일한 경우(300m, 500m, 700m)와 혼합된 경우로 구분하여 실시하였다. 주도로는 편도4차선, 부도로는 편도3차선에 각각 1개의 좌회전 전용차선을 지니고 있으며, 포화교통류율은 직진차선의 경우 1,750(vphplg), 좌회전차선의 경우 1,700(vphplg)으로 가정하였다. 링크내 차량속도는 60(kph)을, 황색시간 및 손실시간은 각각 4초씩 가정하였다. 모의실험 결과는 다음과 같다.

1) 전·후방직진방해시간

본 모형식은 연동 차량군 내에서 상류부에 대기하고 있던 차량이 포화교통류율로 빠져나가는 부분에 해당하는 전방직진방해시간의 최소화에 더 큰 비중을 두고 최적화 된다. 직진방해시간이 0이거나 음수인 경우는 직진차량이 하류부 적색시간에 의해 차량의 흐름을 방해받지 않는 경우에 해당하며 〈표 3〉과 〈표 4〉에서 보는 바와 같이 모든 경우에 대해 0이나 음수 혹은 0에 가까운 값을 취함으로써 본 최적화 모형식이 연동상태를 잘 반영하는 것으로 분석되었다.

〈표 3〉 전방직진방해시간

구 분	교차로1	교차로2	교차로3	교차로4
outbound	-	-.0004	.0000	.0031
inbound	.0000	.0015	.0001	-

주 : 링크거리 500m, 정상상태(v/c=0.5) 수치는 주기에 대한 비율



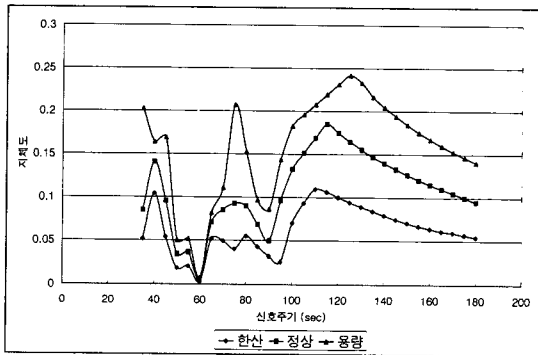
〈표 4〉 후방직진방해시간

구 분	교차로1	교차로2	교차로3	교차로4
outbound	-	-.0029	-.0048	.0000
inbound	.0029	.0048	.0000	-

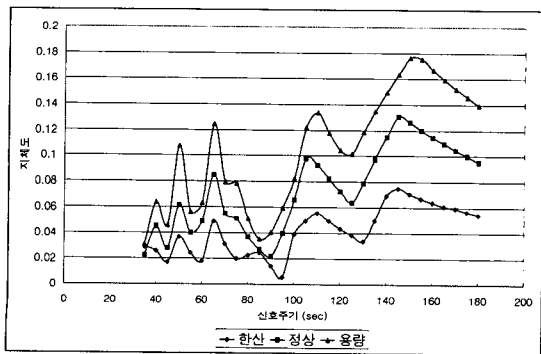
주 : 링크거리 500m, 정상상태( $v/c=0.5$ ) 수치는 주기에 대한 비율

2) 신호주기

지체최소화 모형인 TRANSYT-7F는 링크길이에 의한 영향보다는 교통량에 따라 신호주기가 증감하며, 통과폭 최대화 모형인 PASSER-II는 주기의 변화가 교통량보다는 교차로간 거리에 의해 더욱더 민감하게 변화한다. 이와 비교하여 KS-SIGNAL 모형식은 좌회전 현시순서를 최적화함으로써 지체를 최소화하지만, 간선도로 양방향의 전후방직진방해시간의 합을 최소로 하는 목적 함수 자체가 통과폭최대화 모형에서 교차로간 거리, 차량의 진행속도, 상류부 적색시간의 길이, 읍셋 등에 의한 루프방정식으로 표현되므로 교통량의 변화보다는 교차로간 거리의 변화에 더 민감한 결과를 도출한다. 따라서 본 모형식은 지체최소화모형보다는 통과폭최대화모형에 더욱더 가까운 결과를 도출하는 것으로 분석되었다.



〈그림 4〉 최적신호주기 (500m,500m,500m)



〈그림 5〉 최적신호주기 (700m,300m,500m)

〈표 5〉 최적신호주기

(단위:초)

구 분	T7F	PII	KS	
300m	한산	40	73	36
	정상	55	73	36
	용량	90	73	36
500m	한산	40	61	60
	정상	55	60	60
	용량	100	61	60
700m	한산	40	86	83
	정상	55	85	83
	용량	100	85	83
혼합	한산	40	99	95
	정상	55	99	91
	용량	100	99	84

〈그림 4〉와 〈그림 5〉는 모의실험을 통해 본 모형식에 의해 최적화된 주기를 나타내고 있다. 이때 X축은 주기를 나타내며, Y축은 지체도로서 전후방직진방해시간의 총합을 주기에 대한 비율로 표현한 값을 나타낸다.

모의실험은 현실상황에 적용하기보다는 이론의 타당성을 검증하기 위한 것이므로 최소녹색시간의 개념은 적용하지 않았다. 단, TRANSYT-7F의 분석과 동일한 상황을 가정하기 위해 주도로 및 부도로의 신호가 선행좌회전으로 운영된다는 가정하에 Driver Expectancy를 고려, 좌회전의 경우 7초, 직진의 경우 10초의 최소녹색시간을 부여했다.

KS-SIGNAL의 시나리오별 신호주기 최적화 결과를 살펴보면 거의 모든 경우에 대해 최적주기가 주어 진 차량진행 속도로부터 산출되는 주방향 및 부방향의 통행시간의 합으로 표현되는데, 이는 후방직진방해시간에 비해 상대적으로 더 많은 지체를 유발시키는 전방직진방해시간이 모두 음수나 0에 가까운 값으로 최적화됨으로써 읍셋 자체가 통행시간에 가까운 값으로 산출되었기 때문으로 분석된다. 모의실험결과 최적신호주기가 〈표 5〉에 제시되어 있다.

3) 읍셋

KS-SIGNAL 모형식에서의 읍셋이라 함은 상하류부의 녹색신호시간이 시작되는 시점간의 차를 의미한다. 여러 다양한 교통조건에 대해 최적화를 실시한 결과 〈표 6〉에서 보는 바와 같이 교통량이 포화상태가 아닌 경우 전방직진방해시간이 모두 0에 가까운 값으로 산출된다.

〈표 6〉 최적옵셋 (단위:초)

링크길이	교차로1	교차로2	교차로3	교차로4
300m	0	17.99	18.00	18.08
500m	0	29.97	30.00	30.19
700m	0	41.70	41.56	42.00
혼합	0	41.66	17.51	30.28

주 : 정상상태(v/c=0.5)인 경우

따라서 인접교차로를 2개씩 쌍으로 제어해 나가는 본 모형식에서의 최적옵셋은 실제 주어진 차량속도로부터 산정되는 교차로간 링크통행시간에 인접한 값이 실제 옵셋으로 최적화된다.

4) 좌회전 현시순서

각 시나리오별로 최적화 작업을 실시한 결과가 〈표 7〉에 제시되어 있으며, 교차로간 거리가 서로 다른 경우를 제외하고 최적주기에서의 각 교차로별 좌회전 현시순서가 모두 동일하게 설정되었다. 이는 교통량이 포화교통량 미만이고, 교차로간 거리가 동일하며, 각 교차로간 방향별 교통량의 차이가 크지 않았기 때문인 것으로 분석된다. 단, 최적주기가 아닌 경우에 대한 신호최적화 작업을 실시하는 경우에는 앞서의 옵셋 항목과 더불어 좌회전 현시순서는 주기에 따라 매우 민감하게 변화한다.

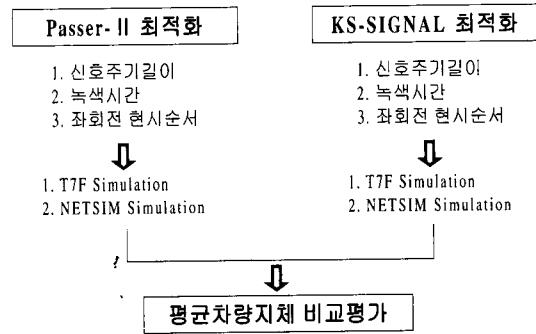
〈표 7〉 좌회전 현시순서

링크길이	교차로1	교차로2	교차로3	교차로4
300m	III	III	III	III
500m	III	III	III	III
700m	IV	IV	IV	IV
혼합	IV	I	II	I

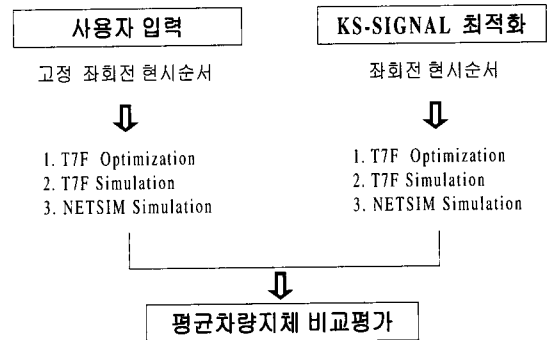
주 : 정상상태(v/c=0.5)인 경우

2. 모형의 평가

평가계획은 모두 3단계로 나누어 실시한다. 평가 제1단계에서는 〈그림 6〉과 같이 KS-SIGNAL을 PASSER-II와 비교·평가하게 된다. PASSER-II와 KS-SIGNAL에서 최적화 작업을 수행하여 신호주기, 녹색시간, 좌회전 현시순서 등이 산출되면, 이를 각각 TRANSYT-7F와 NETSIM을 통해 지체도를 상호비교한다.



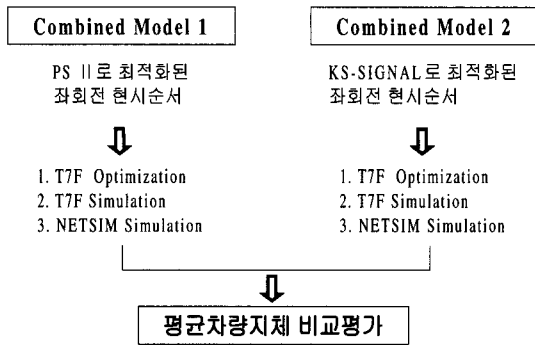
〈그림 6〉 평가계획 1



〈그림 7〉 평가계획 2

〈그림 7〉은 평가 제2단계를 나타내고 있으며 TRANSYT-7F와 KS-SIGNAL을 비교하는 단계이다. TRANSYT-7F는 지체최소화 모형으로 현시순서를 최적화시키지 못하므로 본 평가에서는 고정현시로 주방향 및 부방향에 대해 선행좌회전으로 신호시간 최적화 작업을 수행한다. 또한, KS-SIGNAL 모형식을 이와 동등한 조건에서 평가하기 위해 최적화된 여러 신호 시간 변수들 중에서 좌회전 현시순서만을 채택하여 TRANSYT-7F에서 다시 최적화 작업을 수행한다. 이 결과를 다시 TRANSYT-7F와 NETSIM에 입력하여 지체도를 상호비교한다.

평가 제3단계에서는 〈그림 8〉과 같이 지체최소화 모형과 통과폭 최대화모형의 결합모형을 KS-SIGNAL 모형과 상호 비교·평가한다. 통합모형의 좌회전 현시순서는 통과폭을 최대로 하는 PASSER-II에서 최적화된 결과를 빌어 설정하며, 이는 KS-SIGNAL에 의해 최적화된 좌회전 현시순서와 함께 TRANSYT-7F에 의해 각각 최적화 작업을 수행한 후 다시 TRANSYT-7F와 NETSIM에 의해 지체도를 상호 비교하게 된다.



〈그림 8〉 평가계획 3

〈표 8〉 평가결과 1 (단위:sec/veh)

구 분	T7F		NETSIM	
	PⅡ	KS	PⅡ	KS
지체도	21.0	19.7	32.2	25.4

〈표 9〉 평가결과 2 (단위:sec/veh)

구 분	T7F		NETSIM	
	T7F	KS	T7F	KS
지체도	21.8	17.8	20.5	20.3

〈표 10〉 평가결과 3 (단위:sec/veh)

구 분	T7F		NETSIM	
	PⅡ+T7F	KS	PⅡ+T7F	KS
지체도	18.3	17.8	21.0	20.3

〈표 8〉, 〈표 9〉 및 〈표 10〉는 앞서의 모형평가를 위한 시나리오별 결과를 나타내고 있다.

결과, KS-SIGNAL모형식이 좌회전 현시순서를 최적화시키지 못하는 TRANSYT-7F 모형식과 통과폭을 최대화하나 통과폭 밖의 직진교통류를 고려하지 못하는 PASSER-II 모형식, 또한 이들의 단점을 상호보완한 결합모형과 비교하여 더 적은 지체를 유발 시킴으로써 보다 효율적인 신호시간계획을 창출하는 것으로 분석되었다.

## V. 결론

기존의 KS-SIGNAL모형식은 간선도로 연동화 신호최적화 모형으로서 그 우수성이 입증되었음에도 불구하고 과도한 수행시간으로 인해 소프트웨어로의 개

발이 매우 어려웠다. 본 연구에서는 KS-SIGNAL의 최적화 수행속도를 향상시키기 위해 기존모형식의 수정, MILP 최적화 루틴 탑재, 좌회전 현시순서 제약식의 추가 등 총 3단계에 걸친 작업을 실시함으로써 기존 모형식과 비교 99%이상의 시간단축 효과를 창출했다.

본 KS-SIGNAL 모형식은 여러 다양한 경우에 대해 모의실험을 실시한 결과 교통량보다는 교차로간 거리에 더욱더 민감하게 반응함으로써 지체최소화 모형인 TRANSYT-7F보다는 통과폭 최대화 모형인 PASSER-II에 더 가까운 신호시간계획을 창출하는 것으로 분석되었다. 더불어 본 모형식이 지체를 최소화하나 좌회전 현시순서를 최적화하지 못하는 TRANSYT-7F 모형식과 통과폭을 최대화하나 통과폭 밖의 직진교통류를 고려하지 못하는 PASSER-II 모형식, 그리고 이들의 단점을 상호보완한 결합모형과 비교하여 더 적은 지체를 유발시키는 보다 효율적인 신호시간계획을 창출하는 것으로 분석되었다.

아울러 본 연구결과는 교통신호 최적화 소프트웨어의 개발이라는 측면에서 볼 때, 여러 다양한 시나리오에 대해 주기별로 신호최적화가 수행해야 함을 고려한다면 현재보다 더욱더 유의한 결과를 창출할 것으로 기대된다.

## 참고문헌

1. 신연교, 지체최소화를 위한 신호연동화모형 개발에 관한 연구, 서울시립대학교 대학원 교통공학박사학위논문, 1997.
2. Courage and Wallace, TRANSYT-7F User's Guide, Transportation Research Center, University of Florida, Gainesville, Florida, December, 1991.
3. Chang and Messer, PASSERII-90 Program User's Guide, Texas Transportation Institute Texas A&M University, June, 1991.
4. University of Florida, Arterial Analysis Package (AAP) User's Guide, Federal Highway Administration, December, 1990.
5. Little and Kelson, Optimal Signal Timing for Arterial Signal Systems, Federal Highway Administration, December, 1980.
6. Lindo Systems Inc., Lindo User's Manual,

- Lindo Systems Inc., Chicago, Illinois, 1996.
7. Gartner, Assmann, Lasaga, and Hou, A Multi-Band Approach to Arterial Traffic Signal Optimization, Transportation Re-search, Vol. 25B, pp.55~74, 1991.
8. Schrage, *User's Manual for Linear, Integer, and Quadratic Programming with Lindo*, The Scientific Press, 1986.