

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

(서울시립대학교 교통공학과 대학원)

김 영 찬

(서울시립대학교 도시공학과 부교수)

목	차
I. 서론	3. 좌회전 현시조합에 관한 제약식 추가
II. 관련연구 및 이론고찰	4. 모형식의 최종형태
III. 기존모형식의 개선을 통한 수행속도 향상화 작업	5. 단계별 수행 결과
1. 기존 KS-SIGNAL모형식의 개선	IV. 모형의 적용 및 평가
2. Lindo의 MILP 최적화루틴의 탑재	V. 결론 및 향후 연구과제 참고문헌

요 약

본 논문은 기개발된 간선도로 연동화 신호최적화 모형인 KS-SIGNAL의 최적화 수행속도를 향상하기 위한 새로운 모형식 및 방법론을 제시하고 평가하였다. 본 논문에서는 KS-SIGNAL의 최적화 수행속도 향상 및 시간단축을 위한 모형식의 수정, Lindo library의 탑재, 좌회전 현시순서에 관한 제약식 추가 등의 3단계 작업을 실시하였다.

첫번째 단계인 모형식의 수정에 있어서는 기존의 모형식에서 변수로 사용하던 대기차량 소거시간을 상수로 산정함으로써 일부 제약식 및 변수를 소거시킬 수 있었으며, 두번째 단계에서는 선형계획식의 해를 구하기 위한 툴로 사용되는 Window용 Lindo library를 탑재, 새로이 변형된 형식의 모형식을 제안한다. 마지막으로 세번째 단계에서는 좌회전 현시순서에 관한 제약식을 추가함으로써 최적화 작업에 대한 경우의 수를 줄임으로써 수행속도를 향상시키는 방법론에 대해 제시한다.

결론적으로 기존의 KS-SIGNAL과 비교해 최적화 수행속도는 99%이상 향상되었으며, 도출된 해 또한 타 모형식과 비교해 우수한 결과를 나타냈다.

I. 서론

현재 교통선진국이라 불리는 미국과 유럽의 대다수 국가의 교통관련 연구기관들에서는 간선도로 연동화와 관련하여 전산화된 소프트웨어를 개발, 상용화에 들어가 있는 상태다. 이들 교통운영 소프트웨어의 대표적인 예로는 Transyt-7f, PASSERⅡ 등의 있으며, Transyt-7f와 PASSERⅡ의 장점을 부각시킨 AAP(Arterial Analysis Package)등을 들 수 있다. 최근 우리 나라에서 교통운영 소프트웨어의 개발은 일부 연구기관 및 소수의 교통운영 학자들에 의해 관심의 대상이 되었으며, 특히 서울시립대학교 김영찬 교수에 의해 연구된 간선도로 신호연동화 최적화 모형인 KS-SIGNAL을 그 대표적인 일례로 들 수 있다.

이중 KS-SIGNAL은 연동대상이 되는 간선도로의 지체를 최소화하는 좌회전현시순서 최적화모형으로 기존의 대표적인 지체최소화 모형인 Transyt-7f와 통과폭 최대화 모형인 PASSERⅡ의 단점을 극복할 수 있는 더욱더 현실성 있는 간선도로 연동화 신호최적화 모형이다. 하지만, 기존의 KS-SIGNAL 모형식은 다수의 최적화변수들과 관련된 과다한 제약식으로 인해 그 수행속도가 현저하게 저하되는 현상을 초래하였으며, 이는 교통운영 소프트웨어의 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 수행속도 단축의 새로운 방법론 또한 제시함을 그 목적으로 한다. 또한 본 연구에서는 새로이 제시된 모형식의 수행속도를 극대화하는 방안으로 선형계획식을 최적화 하는 대표적 상업용 소프트웨어인 Lindo의 라이브러리를 탑재, 간선도로 신호연동화와 관련한 전문 소프트웨어를 개발하기 위한 기틀을 마련한다.

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

본 연구는 기존에 개발된 간선도로 연동화 신호최적화 모형인 KS-SIGNAL의 최적

화 수행속도를 현저히 향상시킴을 주목적으로 하여, 이를 위해 모형식의 목적함수와 제약식의 일부를 새로이 수정·추가하며, 기타 전산화 작업과 관련, 최적화 수행속도를 향상시킬 수 있는 제2의 방법론을 제시한다.

연구의 후반부에서는 새로이 제시된 모형식에 대해 좀더 다양한 시나리오를 통해 민감도 분석을 실시, 기존의 Transyt-7f 및 PASSERⅡ 모형식과 상호비교를 통해 KS-SIGNAL 모형식의 성능을 평가 및 분석한다.

II. 관련 연구 및 이론 고찰

간선도로 신호연동화 모형식으로는 전통적인 기법상 크게 차량의 지체최소화를 위한 지체최소화 모형과 차량의 통과폭을 최대로 하는 통과폭최대화 모형 및 이들의 장점을 상호 결합한 통합모형이 있다.

지체최소화 모형은 Transyt-7f모형이라고도 하며 지체시간과 정지시간의 선형함수로 표현되는 수행지수를 최소화하기 위해 언덕오름(Hill-Climbing)기법을 이용 offset과 녹색시간을 선택한 후 최적신호주기를 결정하게 된다. Transyt-7f모형은 전체 교통시스템 측면에서 높은 효율성을 제공하므로 network 최적신호시간계획에 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 모형은 MAXBAND모형이라고도 하며 간선도로 전구간에 대한 차량의 통과폭을 최대화하는 신호시간계획을 산출하는 모형이다. 통과폭최대화 모형은 중방향 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 많아 질수록 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 통과폭최

대화 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 모형식으로 (N-1)개의 정수변수, (10N-8)개의 이진변수, (8N-8)개의 자유변수로 구성된 총 (45N-45)개의 제약식을 지닌 혼합정수선형계획법 형태의 간선도로 신호연동화 최적화 모형이다.

KS-SIGNAL 최적화모형식은 혼합정수계획법으로 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 교차로 수가 n개인 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 어려우며, 따라서 본 연구에서는 지금부터 제시하는 각 단계별 작업에 의해 수행속도를 현저히 개선하고, 최종적으로는 전산화 작업을 통해 실제 실용화를 도모하고자 한다.

이와 관련하여 본 연구에서는 최적화 수

행속도 향상을 위한 단계별 작업을 실시하는데, 제1단계 작업으로 모형식의 개선을 통해 제약변수를 줄임으로써 최적화 수행속도를 향상시키며, 제2단계 작업에서는 최적화 시간단축의 극대화를 꾀하고자 Lindo 시스템상에서 사용되고 있는 최적화 루틴을 도입하기 위해 제약행렬식의 일부를 수정한다. 그리고, 마지막 3단계 작업에서는 좌회전 현시조합 옵션과 관련된 제약행렬식을 추가함으로써 좌회전 현시에 대해 가능한 모든 조합에 대해서 최적화 작업을 수행함으로써 인해 기인되는 최적화 수행시간의 증가를 단축시키는 방법론을 제시한다.

1. 기존 KS-SIGNAL 모형식의 개선

상류부 적색시간동안 대기하고 있던 대기차량에 의해 형성되는 포화교통류율에 의한 도착률(sf_i)은 전주기 내내 걸쳐 발생한 교통량에 의해 다음과 같이 산정할 수 있다.

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

포화교통류율(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 적색시간 동안 부도로로부터 주도로로 유입된 교통량으로부터 다음과 같이 산정된다.

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

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

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

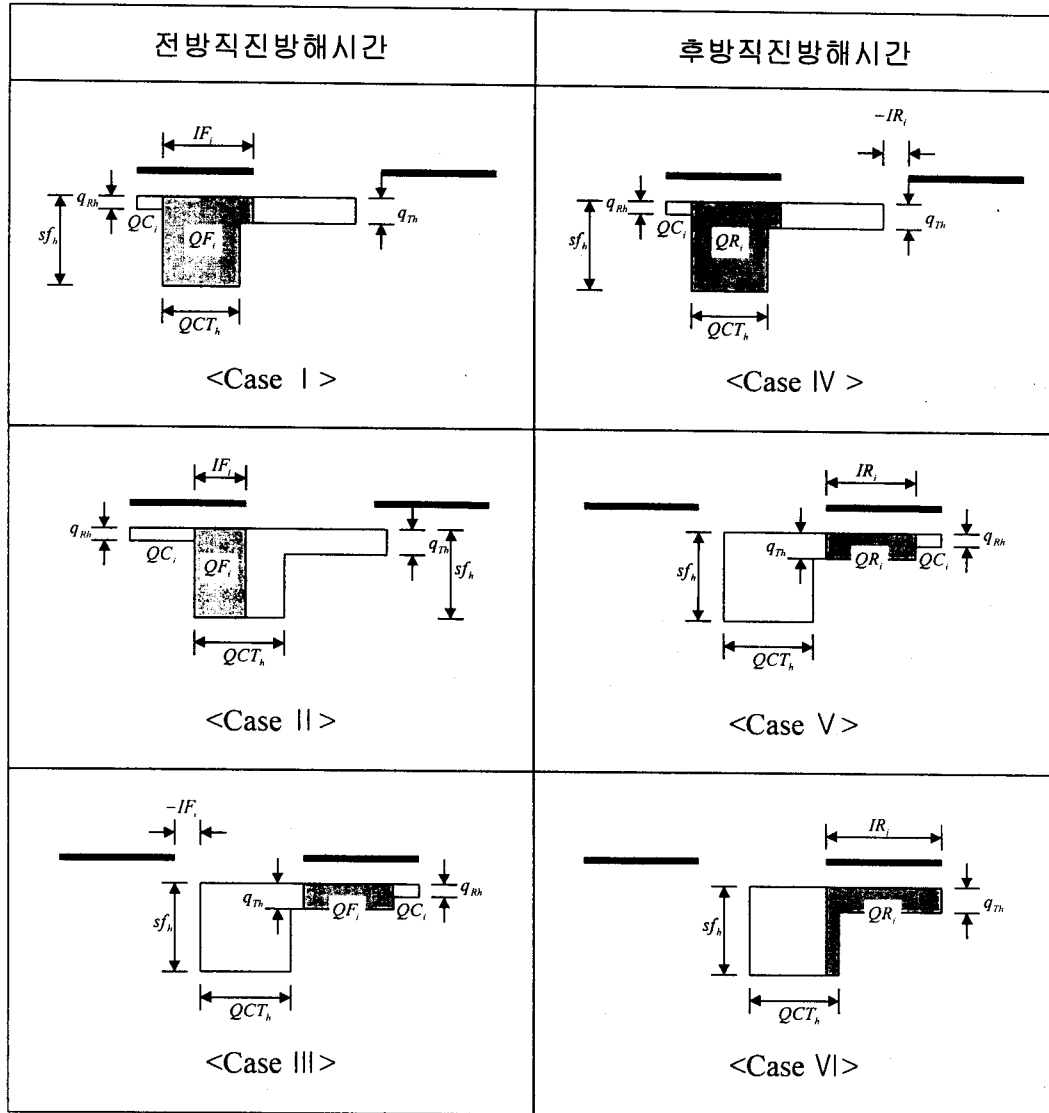
$$NC_i = (V_{MT,i} + V_{MR,i} + V_{ML,i}) - (V_{MT,h} + V_{CR,h} + \bar{V}_{CL,h}) \quad (\text{대/초})$$

상류부 교차로에서 출발한 차량군의 형태는 차량군분산 없이 하류부에 그대로 도착하나, 각 교차로마다 서로 다른 적색시간과 옵션에 의해 <그림1>과 같은 6가지의 대기

차량패턴을 형성하게 된다.

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

화 과정에서 변수로 취급하였다. 본 모형식에서는 위의 식을 전체 교차로에 대해 확장시켜 적용시킴으로써 해서 최적화 제약행렬식에서는 대기차량 산정에 관한 변수를 상수값으로 대체할 수 있게 되었으며, 변수 또한 감소됨으로 인해 최적화 수행속도를 향상시킬 수 있었다.



<그림1> 대기차량 발생패턴

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

기존의 KS-SIGNAL 모형식은 상류부 교차로의 교통류에 대한 정보가 제공되지 않는 연동화가로의 최초 교차로에 대해서만 위의 식에 의해 대기차량 소거시간을 산정하고, 나머지 교차로에 대한 대기차량은 최적

<그림1>에서와 같이 상류부에서 출발한 차량군은 해당교차로의 적색시간과 읍셋에 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.

기존 KS-SIGNAL 모형식에서의 목적함수는 제약식에서 변수로 사용되고 있는 각 교차로에서의 대기차량 소거시간변수의 합을 최소로 하는 것이었으나, 본 모형식에서는 각 교차로의 대기차량 소거시간을 적색시간과 교통량에 의해 상수로 산정하고 있으므로, 이를 대신해서 총대기차량 소거시간을 산정하는 식을 최소화하는 목적함수를 사용한다.

우선 전방직진차량군(QF_i)에 대한 대기차량 소거시간($QFTF_i$)은 전방직진방해시간(IF_i)이 상류교차로의 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 한 개의 식으로 표현할 수 있다. case III은 직진방해시간이 음수인 경우로 전방직진차량군의 대기차량이 발생하지 않는 경우이다. 대기차량이 발생하는 case I과 case II는 다음과 같이 단일식으로 표현할 수 있다.

후방직진차량군(QR_i)에 대한 대기차량 소거시간($QFTR_i$) 역시 후방직진방해시간(IR_i)에 상류부에서 포화교통류율(sf_i)로 출발한 차량군이 포함될 때와 포함되지 않을 때

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

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

가 다르게 발생되며, 대기차량이 발생하는 case V과 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.

$$IFFP_i \geq 0$$

$$IFFP_i \geq IF_i - QCT_h$$

$$IFFP_i \leq MZ_{ff}$$

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

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

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

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

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

$$IRRP_i \geq 0$$

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

$$IRRP_i \leq MZ_{mi}$$

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

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

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

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

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

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 목적함수 사용될 교차로 접근로상의 총대기차량(Q_i)은 전방직진차량군 대기시간과 후방직진차량군 대기시간, 그리고 회전차량군 대기시간을 모두 합산함으로써 산정할 수 있다.

$$QTC_i = QFTC_i + QRTC_i + QCTC_i$$

$$\overline{QTC}_i = \overline{QFTC}_i + \overline{QRTC}_i + \overline{QCTC}_i$$

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

$$\text{Minimize } \sum_i [sh_i (sf_i - q_{R,i}) IFP_i + sh_i (q_{T,i} - q_{R,i}) IRP_i]$$

$$+ sh_i(sf_i - q_{T,i})(IRRP_i - IFFP_i) + sh_i(sf_i - q_{R,i})\overline{IFP}_i$$

$$+ sh_i(q_{T,i} - q_{R,i})\overline{IRP}_i + sh_i(sf_i - q_{T,i})(\overline{IRRP}_i - \overline{IFFP}_i)]$$

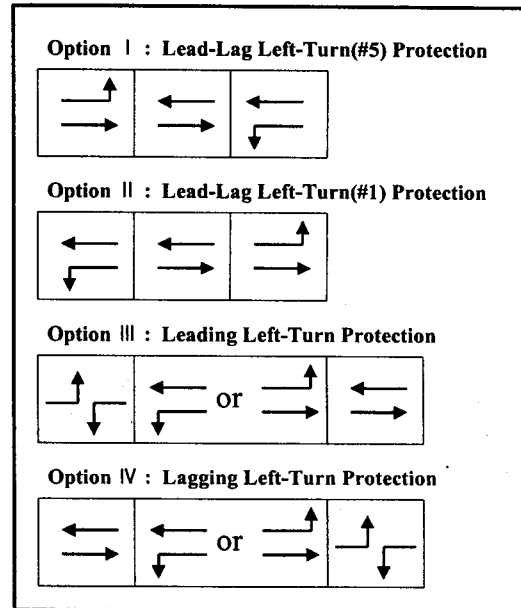
2. Lindo의 MILP 최적화 루틴의 탑재

본 시스템에서는 최적화루틴의 수행속도를 극대화시키고자 상용 프로그램인 윈도우용 Lindo 라이브러리의 탑재를 시도, 프로그래밍화하였다. 기존의 KS-SIGNAL 시스템에서는 MILP의 고전적 해법인 분지한계법(Branch and Bound Method)을 사용하는데, 직진방해시간의 경우 직진차량의 흐름을 방해하는 경우 양의 값, 방해하지 않는 경우 음의 값으로 표현되나, 실제 시간적 개념으로는 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 Lindo 라이브러리를 탑재함으로 해서 이들 직진방해시간변수는 모두 한가지 변수로서 표현되며, 결과 최적화 수행속도 역시 매우 단축되었다. 이에 따라 자유변수의 수가 기존모형식의 절반으로 줄어 들게 되었다.

3. 좌회전 현시조합에 관한 제약식 추가

간선도로의 연동화에 있어서도 좌회전 현시순서의 조정은 연동방향 직진교통량의 통과폭을 극대화시킬 수 있으며, 좌회전 현시순서의 최적화를 위한 제약조건은 시공도 상에서 중첩현시를 나타내는 노드내 옵션으로 표현할 수 있다. 본 연구에서는 지체를 최소화하기 위한 좌회전 현시순서를 찾아내기 위해 <그림2>와 같은 통과폭최대화 모형에서 사용하고 있는 좌회전 현시옵션을 사용한다.



<그림2> 좌회전 현시순서

기존 KS-SIGNAL 모형식에서는 모든 좌회전 현시조합에 있어 가능한 모든 경우에 대해 최적화를 수행한다. 본 모형식에서는 이들 좌회전 현시조합에 대해 일부를 선택 가능하도록 하는 제약식을 추가함으로 해서 좀 더 유동적인 분석이 가능하도록 하였으며, 궁극적으로는 최적화 수행속도를 간접적으로 줄일 수 있는 방법론을 제시하고 있다.

좌회전 현시조합에 대한 옵션을 최적화 제약행렬식에 포함시키기 위해서는 모든 조합에 대해 동일한 변수로서 표현되어야 하는데, 이때, 부분적으로 2보다 큰 양수 M을 사용해 동일한 변수를 지닌 제약식으로 나타낼 수 있다. 이에 대한 행렬식을 각각 표현하면 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	:	$\delta_i - \bar{\delta}_i = 0$

$$\begin{aligned}
\text{Option I, II, III} & : \delta_i + \bar{\delta}_i \leq 1 \\
\text{Option I, II, IV} & : \delta_i + \bar{\delta}_i \geq 1 \\
\text{Option I, III, IV} & : \delta_i - \bar{\delta}_i \leq 0 \\
\text{Option II, III, IV} & : \delta_i - \bar{\delta}_i \geq 0 \\
\text{Option I, II, III, IV} & : \delta_i + \bar{\delta}_i \geq 0 \\
& \text{(단, } M \text{은 2이상의 모든 실수)}
\end{aligned}$$

4. 모형식의 최종형태

3단계의 작업을 통해 최종적으로 도출된 모형식은 (N-1)개의 정수변수와 (12N-8)개의 이진변수, (4N-4)개의 자유변수로 구성된다. 제약식은 좌회전 현시패턴에 대한 옵션이 추가됨으로 해서 총 (44N-43)개로 이루어진다.

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

Objective Function

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

Constraints

▶ 루프 제약식

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

▶ 공동주기 제약식

$$\begin{aligned}
1 - r_h &= IF_i + (1 - r_i) + IR_i \\
1 - \bar{r}_i &= \overline{IF}_h + (1 - \bar{r}_h) + \overline{IR}_h
\end{aligned}$$

▶ 직진방해시간 제약식

$$\begin{aligned}
-(1 - r_i) &\leq IF_i \leq r_i \\
-(1 - r_i) &\leq IR_i \leq r_i \\
-(1 - \bar{r}_h) &\leq \overline{IF}_h \leq \bar{r}_h \\
-(1 - \bar{r}_h) &\leq \overline{IR}_h \leq \bar{r}_h
\end{aligned}$$

▶ 지체시간 비음조건 제약식

$$\begin{aligned}
IFP_i &\geq 0 \\
IFP_i &\geq IF_i \\
IFP_i &\leq M \times Z_{fi} \\
IFP_i - IF_i &\leq M(1 - Z_{fi})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\overline{IFP}_i &\geq 0 \\
\overline{IFP}_i &\geq \overline{IF}_i \\
\overline{IFP}_i &\leq M \times \overline{Z}_{fi} \\
\overline{IFP}_i - \overline{IF}_i &\leq M(1 - \overline{Z}_{fi}) \\
IRP_i &\geq 0 \\
IRP_i &\geq IR_i \\
IRP_i &\leq M \times Z_{ri} \\
IRP_i - IR_i &\leq M(1 - Z_{ri}) \\
\overline{IRP}_i &\geq 0 \\
\overline{IRP}_i &\geq \overline{IR}_i \\
\overline{IRP}_i &\leq M \times \overline{Z}_{ri} \\
\overline{IRP}_i - \overline{IR}_i &\leq M(1 - \overline{Z}_{ri})
\end{aligned}$$

▶ 전방직진 방해시간에 의한 지체시간 일반화 제약식

$$\begin{aligned}
IFFP_i &\geq 0 \\
IFFP_i &\geq IF_i - QCT_h \\
IFFP_i &\leq MZ_{ffi} \\
IFFP_i - (IF_i - QCT_h) &\leq M(1 - Z_{ffi}) \\
\overline{IFFP}_i &\geq 0 \\
\overline{IFFP}_i &\geq IF_i - \overline{QCT}_h \\
\overline{IFFP}_i &\leq M\overline{Z}_{ffi} \\
\overline{IFFP}_i - (\overline{IF}_i - \overline{QCT}_h) &\leq M(1 - \overline{Z}_{ffi})
\end{aligned}$$

▶ 후방직진 방해시간에 의한 지체시간 일반화 제약식

$$\begin{aligned}
IRRP_i &\geq 0 \\
IRRP_i &\geq QCT_h - IF_i - (1 - r_i) \\
IRRP_i &\leq MZ_{rri} \\
IRRP_i - (QCT_h - IF_i - (1 - r_i)) &\leq M(1 - Z_{rri}) \\
\overline{IRRP}_i &\geq 0 \\
\overline{IRRP}_i &\geq \overline{QCT}_h - \overline{IF}_i - (1 - \bar{r}_i) \\
\overline{IRRP}_i &\leq M\overline{Z}_{rri} \\
\overline{IRRP}_i - (\overline{QCT}_h - \overline{IF}_i - (1 - \bar{r}_i)) &\leq M(1 - \overline{Z}_{rri})
\end{aligned}$$

▶ 좌회전 현시패턴 제약식

(앞서의 좌회전 현시패턴 선택옵션에 따라)

$$\begin{aligned}
\text{Option I} & : \delta_i - \bar{\delta}_i = -1 \\
\text{Option II} & : \delta_i - \bar{\delta}_i = 1 \\
\text{Option III} & : \delta_i + \bar{\delta}_i = 0 \\
\text{Option IV} & : \delta_i + \bar{\delta}_i = 2 \\
\text{Option I, II} & : \delta_i + \bar{\delta}_i = 1
\end{aligned}$$

- 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)

▶ 변수제약조건

$m_i = \text{integer}$

$\delta_i, \bar{\delta}_i, Z_{fi}, Z_{ri}, \bar{Z}_{fi}, \bar{Z}_{ri}, Z_{ffi}, Z_{rri}, \bar{Z}_{ffi}, \bar{Z}_{rri}$
= binary integer

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

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 있었으며, 이는 기존모형식과 비교하여 제약식에 이용된 변수의 수에서는 큰 차이가 없으나 대기시간 산정변수가 소거된 것 외에 기타 제약식에서 사용된 대기시간 변수들도 모두 상수로 처리됨으로 해서 수반된 결과로 분석된다.

2단계 작업으로 윈도우즈용 Lindo 라이브러리를 탑재후 수행한 결과, 1단계 결과와 비교해 역시 95%이상의 수행시간 단축효과가 나타났으며, 3단계 작업에 의해 좌회전 현시순서에 관한 제약식을 추가함으로 해서 2단계 작업결과와 비교 수행시간이 30%이상 단축되었다.

는 60(kph)을 적용하였다.

모의실험 결과 지체를 가장 많이 유발시키는 변수인 전방직진방해시간의 값이 음수값이거나 0에 가까운 값으로 산정됨으로써, 실제 모형식이 연동화를 고려, 지체가 최소화되는 모형식임이 입증되었으며, 좌회전 현시순서 또한 교통조건 및 교통량에 따라 다

<표> 단계별 최적화 수행속도 향상 결과

구 분	기존모형식	1차수정식	2차수정식	3차수정식
한산상태 (v/c=0.5)	1285초	390초	3초	2초
정상상태 (v/c=0.7)	1516초	476초	5초	3초
용량상태 (v/c=0.9)	1400초	421초	3초	2초

IV. 모형의 적용 및 평가

모의실험계획은 교통량이 한산상태 (v/c=0.5), 정상상태(v/c=0.7), 용량상태 (v/c=0.9)인 경우로 나누어 실시하며, 교차로 간 간격은 모두 500m로 가정한다. 교통조건은 주방향 편도4차선(좌회전 전용차선 1개), 부방향 편도3차선(좌회전 전용차선 1개)에 대해 최적화 작업을 수행했으며, 포화교통류율은 직진차선의 경우 1,750(vphg), 좌회전차선의 경우 1,700(vphg)이고, 링크내 차량속도 5. 단계별 수행 결과

최적화 수행시간 비교의 경우, 교통조건은 주방향 편도4차선(좌회전 전용차선 1개),

양하게 도출됨으로써 좌회전 현시순서에 관한 제약식이 교통류 상태를 민감하게 반영함을 입증하였다.

V. 결론 및 향후 연구과제

기존의 KS-SIGNAL모형식은 간선도로 연동화 신호최적화 모형으로 우수성이 입증되었음에도 불구하고 과도한 수행시간으로 인해 소프트웨어로의 개발이 매우 어려웠다. 본 연구에서는 KS-SIGNAL의 최적화 수행속도를 향상시키기 위해 총 3단계에 걸친 작업을 실시함으로써 기존모형식과 비교 99%

<표1> 전방직진방해시간

구분	Outbound				Inbound			
	교1	교2	교3	교4	교1	교2	교3	교4
한산	-	0.000	-0.187	-0.001	-0.009	-0.400	-0.003	-
정상	-	0.000	-0.242	-0.003	-0.002	-0.348	-0.009	-
용량	-	0.010	0.120	0.006	0.000	0.000	0.000	-

주 : 수치는 주기에 대한 비율

이상의 시간단축 효과를 창출했다.

Guide, Transportation Research Center,

<표2> 후방직진방해시간

구분	Outbound				Inbound			
	교1	교2	교3	교4	교1	교2	교3	교4
한산	-	0.001	0.180	0.000	0.008	0.395	0.013	-
정상	-	0.003	0.240	-0.002	0.002	0.352	0.000	-
용량	-	-0.008	-0.121	-0.010	-0.002	0.000	-0.004	-

주 : 수치는 주기에 대한 비율

특히, 본 연구결과는 소프트웨어의 개발 측면에서 최적화 작업이 다양한 시나리오에 대해 여러 주기별로 최적화를 수행해야 함을 고려한다면 현재보다 더욱더 유의한 결과를 창출할 것으로 기대된다.

본 연구는 향후 다양한 시나리오에 대해 민감도 분석을 실시할 예정에 있으며, 이와 더불어 기존모형식과의 지체시간 비교 및 Transyt-7f와 PasserII 등의 타 모형식과도 결과를 비교 그 우수성을 입증하고자 한다.

참고문헌

1. 신언교, 지체최소화를 위한 신호연동화모형 개발에 관한 연구, 서울시립대학교 대학원 교통공학과 박사학위논문, 1997

2. Little and Kelson, Optimal Signal Timing for Arterial Signal Systems, Federal Highway Administration, December, 1980

3. Gartner, Assmann, Lasaga, and Hou, A Multi-Band Approach to Arterial Traffic Signal Optimization, Transportation Research, Vol. 25B, pp 55-74, 1991

4. University of Florida, Arterial Analysis Package (AAP) User's Guide, Federal Highway Administration, December, 1990

5. Courage and Wallace, Transyt-7f User's

University of Florida, Gainesville, Florida, December, 1991

6. Chang and Messer, PASSERII-90 Program User's Guide, Texas Transportation Institute Texas A&M University, June, 1991

7. Schrage, User's Manual for Linear, Integer, and Quadratic Programming with Lindo, The Scientific Press, 1986

8. Lindo Systems Inc., Lindo User's Manual, Lindo Systems Inc., Chicago, Illinois, 1996