

■ 論 文 ■

네트워크형 가로망의 교통신호제어 최적화 모형개발

Development of Optimization Model for Traffic Signal Timing in Grid Networks

김 영 찬

(서울시립대학교 도시공학과 부교수)

유 총 식

(서울시립대학교 교통공학과 대학원)

목 차

- I. 서론
- II. 관련연구 고찰
- III. 네트워크 신호최적화 모형
 - 1. 최적화 전략
 - 2. 유전자 알고리즘 적용을 위한 문제부호화
- 3. 적합도 함수
- IV. 모형적용 및 결과분석
- V. 결론
- 참고문헌

요 약

신호제어 최적화 모형식으로는 전통적으로 통과폭최대화모형과 지체최소화모형으로 구분되며, 이들 모형식을 기반으로 PASSER-IV, TRANSYT-7F 등의 프로그램이 사용되고 있다. 전자는 최종모형식의 형태가 양방향통과폭을 최대로 하는 혼합정수선형계획법(MILP)으로 표현되며, 후자인 TRANSYT-7F는 최적화방법으로 언덕오름기법(hill climbing)을 이용한다. 그러나 TRANSYT-7F는 최적화문제의 비선형형태로 인하여 국부최소값에 귀착될 가능성이 있으며, 현시순서를 모형내부에서 최적화하지 못하고 사용자가 사전에 정하여 입력하여야 한다. 또한 중첩현시를 계산하지 못하는 결정적인 약점을 갖고 있다. 본 연구에서는 기존에 신호시간 최적화를 위해 주로 이용되어 왔던 최적화방법들을 탈피해 진화 알고리즘의 하나인 유전자 알고리즘(genetic algorithm)을 이용하여 신호시간 요소들을 최적화 시키는 모형을 제시하였다. 제안한 모형을 NESIM을 통하여 TRANSYT-7F의 결과와 비교하였으며, 본 모형이 우수한 해를 산출할 수 있다는 결과를 얻었다.

이 논문은 1998년 학술진흥재단의 학술연구비에 의하여 지원되었음.

I. 서론

현재 우리나라는 계속해서 증가하는 차량과 이를 수용하지 못하는 열악한 도로상황으로 인해 교통혼잡이 날로 증가하고 있다. 선진국들은 도로와 차량 및 신호운영요소 등의 상호작용에 대한 과학적인 분석 및 운영기법에 관한 주연구분야인 교통운영(traffic operation)에 많은 투자와 연구를 실시하고 있다. 특히, 간선도로의 효율적인 교통처리와 안전을 도모하기 위한 방법으로는 교차로간 신호운영요소를 조정하여 차량을 연속적으로 진행시키는 신호연동화(progression)가 널리 사용되어 왔다.

일반적으로 신호연동화를 위한 주요변수는 주기(cycle length), 현시시간(green split), 오프셋(offset) 및 좌회전 현시순서(left-turn phase sequence)의 4가지로 구성된다. 이러한 신호시간 요소들을 최적화하는 모형은 크게 통과폭(bandwidth)모형과 지체도(delay)모형으로 나뉘어지며 이 두 모형을 같이 사용하여 좌회전현시순서 최적화와 지체를 줄이는 휴리스틱한 방법(heuristic method)도 제시되고 있다.

통과폭최대화모형은 신호시간계산과정에서 중첩현시 처리와 현시순서 최적화의 기능을 포함하기 위해 최종모형식을 혼합정수선형계획법으로 표현하고 이를 풀기 위하여 분지한계법(branch and bound method)을 사용한다. 반면, 지체최소화모형으로 대표적인 TRANSYT-7F¹⁾는 최적화방법으로 언덕오름기법을 이용하나 중첩현시와 현시순서를 최적화하지 못하고 전역 최적해를 구하지 못하고 있다.

본 연구에서는 지금까지 신호시간들을 최적화하기 위해 주로 이용되어 왔던 언덕오름기법, 혼합정수선형계획법 등과 같은 방법들을 탈피해 진화알고리즘의 하나인 유전자 알고리즘(genetic algorithm)²⁾을 이용하여 지체최소화모형을 기반으로 중첩현시와 현시순서를 최적화할 수 있는 최적화모형을 제시하고자 한다. 또한 연동화문제를 네트워크 문제로 확장 적용해봄으로써 네트워크 신호최적화에 대한 유전자 알고리즘의 적용가능성을 제시하고자 한다.

II. 관련연구 고찰

신호최적화 모형식으로는 전통적으로 크게 차량의 통과폭(bandwidth)을 최대로 하는 통과폭최대화 모

형과 차량의 지체(delay)를 최소화하기 위한 지체최소화모형 및 이들 장점을 응용한 결합모형 등이 있다. 통과폭최대화모형으로는 MAXBAND모형³⁾, BANDTOP모형⁴⁾, 연동기회모형⁵⁾, PASSER-II⁶⁾ 등이 있으며, PASSER-IV⁷⁾는 최대 20개의 간선도로로 이루어진 네트워크(network)까지 적용가능한 모형으로 교차로별 현시순서 최적화와 이중고리(dual-ring) 방식에 의한 신호시간패턴을 산출할 수 있다. 이들 대부분 모형들은 최종모형식의 형태가 양방향통과폭을 최대로 하는 혼합정수선형계획법으로 표현된다.

지체최소화모형으로 대표적인 TRANSYT-7F¹⁾는 최대 100개의 노드와 600개의 링크로 이루어진 연동대상 가로망의 최적 신호시간계획을 수립하는데 사용되는 대표적인 거시적 교통류 모형이다. 최적화 과정은 지체도와 정지회수의 선형조합함수로 표현되는 성과지수(performance index)를 효과측정의 기본변수로 하여 이 성과지수를 최소화하기 위하여 오프셋과 녹색시간을 일정한 크기로 변화를 주면서 반복적으로 계산을 수행하는 경사탐색법인 언덕오름(hill climbing) 기법을 이용하여 진행된다. 그러나 TRANSYT-7F¹⁾는 최적화문제의 비선형형태로 인하여 국부최소값에 귀착될 가능성을 내재하고 있고 현시순서를 사용자가 사전에 정하여 입력하여야 하며 중첩현시를 계산하지 못하는 결정적인 약점을 갖고 있다.

유전자 알고리즘²⁾은 자연생태계의 유전법칙(genetic rule)에 바탕을 둔 일종의 휴리스틱(heuristic) 탐색 알고리즘으로 주어진 문제의 탐색공간(searching space)내에서 최적화할 목적함수(object function) $f(X_1, X_2, \dots, X_m)$ 에 대해 후보해(candidate solution)들로 구성된 집단(population)을 가지고 탐색을 시작하며, 유전 연산(genetic operation)을 적용하여 이를 반복적인 과정을 통해서 발전시켜 나가는 진화 알고리즘이라 할 수 있다.

유전자 알고리즘에서 집단 내의 염색체들은 적합도 함수를 사용하여 모두 평가한 후, 비교적 우수한 유전자 구조를 갖고 있다고 판단되는 후보해를 보존시키고 열세한 후보해는 도태시킨다. 그 후 조상 세대에서 살아 남은 염색체들을 쌍으로 교배시켜 새로운 자손세대를 만들어내는데, 이 때 중요한 정보를 갖는 유전자 구조는 복제를 통해 그 특성이 자손에게 그대로 물려진다. 이러한 과정을 반복하는 동안 각 세대의 우수한 후보해의 유전자 구조가 자손에게 유전되어

```

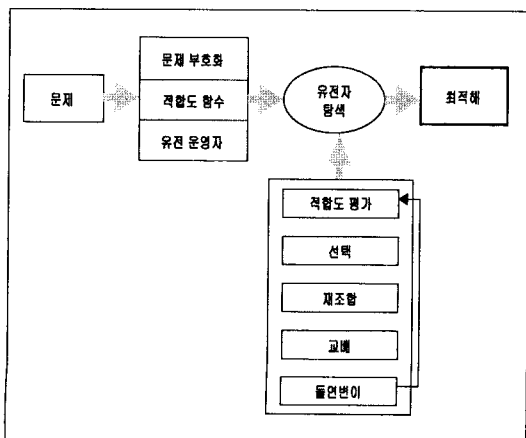
Procedure GA
begin
  t:=0;
  initialize P(t);
  evaluate structures in P(t);
  while (termination condition not satisfied) do
    begin
      t:=t+1;
      select P(t) from P(t-1)
      recombine structures in P(t);
      evaluate structures in P(t);
    end
  end.
  
```

〈그림 1〉 일반적인 유전자 알고리즘

새로운 환경에 점진적으로 적응하게 됨으로써 문제의 최적해에 수렴하게 된다. 이상의 유전자 알고리즘을 코드화하면 〈그림 1〉과 같이 표현할 수 있다.

유전자 알고리즘에서는 스트링으로 구성된 집단을 대상으로 문제를 풀어 나간다. 따라서 유전자 알고리즘을 어떤 문제에 적용시키기 위해서는 해당 문제의 후보해들을 조작이 쉽도록 편리한 자료구조로 표현해야 한다. 그리고 이들로 구성된 세대 내에서 각 개체들을 어떤 방법으로 선택하고, 어떻게 교배나 돌연변이를 만들어 낼 것인지를 결정해야 하는데, 이러한 모든 것들은 유전자 알고리즘의 해결 능력에 직접적인 영향을 끼친다. 유전자 알고리즘은 〈그림 2〉와 같은 흐름을 통해 최적해를 찾게 된다.

이러한 유전자 알고리즘은 기존의 최적화방법과는 다른 다음과 같은 몇 가지의 특징을 갖는다. 첫째, 유전자 알고리즘은 변수 그 자체의 값을 직접 사용하지 않는다는 점이다. 대신 변수의 값을 나타내는 코드 형태의 문자열을 사용한다. 주로 100101과 같은 이진 코드를 사용하는데 이러한 코드 형태의 변수 사용으



〈그림 2〉 유전자 알고리즘을 이용한 문제해결

로 얻을 수 있는 가장 큰 이점은 주어진 문제의 종류에 상관없는 일반화된 유전자 알고리즘의 설계가 가능하다는 것이다. 두 번째 특징은 집단(population)을 이용해서 최적해를 수행한다는 점이다. 기존의 방법들이 한 개체만을 이용하여 최적화를 수행하는 것에 비해서 집단을 통한 최적화는 전체 최적점에 수렴할 수 있는 더 높은 확률을 갖게 된다. 세 번째 특징은 오로지 목적함수만을 이용한다는 것이다. 이러한 특징은 첫 번째의 코드화된 표현과 함께 유전자 알고리즘의 적용범위를 넓히는 특징이 된다. 마지막으로 유전자 알고리즘은 확률론적인 변환규칙을 사용한다. 이는 더 나은 공간으로서의 탐색을 이끌기 때문에 하나의 선택수단으로 사용함을 의미한다. 즉, 예를 들어 높은 적합도를 갖는 개체들간의 교배에 있어서 그 짝짓기를 무작위로 행하는 것 등을 의미한다.

III. 네트워크 신호최적화모형

본 연구에서는 지체최소화모형을 기반으로 네트워크 신호최적화모형을 구축하였으며 기존의 지체최소화모형에서 최적화방법으로 주로 사용하는 언덕오름 기법을 탈피하여 유전자 알고리즘을 적용하였다.

1. 최적화 전략

본 연구에서 최적화하고자 하는 신호시간 요소는 주기, 녹색시간, 오프셋 및 각 교차로의 좌회전 현시순서이며 목적함수는 네트워크를 구성하는 교차로 전체의 평균지체(average delay)의 합을 최소화하는 것이다. 특히, 기존의 지체최소화모형과는 달리 본 연구에서는 현시순서에 해당하는 변수를 목적함수에 포함시켜 최적화가 이루어지도록 목적함수를 설정하였다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Find } C, G_{ij}, \phi, PS_i \\
 & \text{Minimization } \sum_i D_i(C, G_{ij}, \phi, P_i) \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{Subject to} \\
 & G_{n1} + G_{n2} = G_{n5} + G_{n6} \text{ for } i=1, \dots, N_i \quad (2)
 \end{aligned}$$

$$G_{n3} + G_{n4} = G_{n7} + G_{n8} \text{ for } i=1, \dots, N_i \quad (3)$$

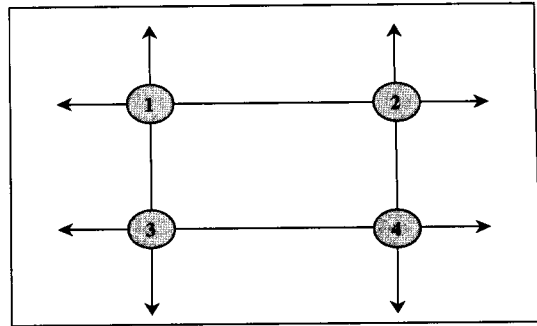
$$\sum_{j \in ring} G_{ij} = C \text{ for } i = 1, \dots, N_i \quad (4)$$

$$G_{ij} \geq MG_{ij} \text{ for } i = 1, \dots, N_i \text{ and } j = 1, \dots, N_m \quad (5)$$

$$MinC \leq C \leq MaxC \quad (6)$$

$$0 \leq \phi \leq C \quad (7)$$

$$G_{ij}, C, \phi \geq 0 \quad (8)$$



〈그림 3〉 샘플(sample) 네트워크

여기서,

- C : 주기길이(초)
- i : 교차로
- j : 각 교차로의 이동류(NEMA방식)
- G_{ij} : i 교차로 j 이동류의 녹색시간(초)
- ϕ : 옹셋(초)
- PS_i : 교차로 i의 좌회전 현시순서
- N_i : 총 교차로(수)
- N_m : 교차로의 총 이동류(수)
- D_i : 교차로 i의 Average delay(초/대)
- MG_{ij} : i 교차로 j 이동류의 최소녹색시간(초)
- MinC : 최소주기길이(초)
- MaxC : 최대주기길이(초)

식(1)은 목적함수로서 네트워크를 구성하는 교차로 전체의 평균지체의 합을 나타내며 식(2),(3) NEMA의 이중고리(dual ring) 현시체계와 관련한 barrier에 관한 제약조건을 나타낸다. 식(5),(6)은 주기 및 최소녹색시간과 관련한 제약조건을 나타내며 식(7),(8)은 옹셋의 범위 및 각 변수의 비음조건을 나타낸다.

2. 유전자 알고리즘 적용을 위한 문제부호화

최근에 교통분야의 신호시간 최적화 부분에서 박병규⁸⁾는 유전자 알고리즘 이용한 방법을 통해 간선도로상의 과포화상태에 대한 신호시간 최적화를 수행하였으며 본 연구에서는 네트워크 최적화문제에 그가 개발한 Coding/Decoding Scheme을 응용하였다.

유전자 알고리즘을 적용하기 위해서는 우선 매개변수들을 염색체 구조를 나타내는 비트스트링으로 표현해야 한다. 본 연구에서는 주기, 녹색시간, 옹셋 및 좌회전 현시순서를 결정변수로 잡았으며, 부호화(coding) 과정을 설명하기 위해 〈그림 3〉과 같은 교차로4개를 가진 임의의 네트워크를 가정하기로 한다.

다음은 〈그림 3〉과 같은 네트워크를 가정했을 때의 부호화(coding)의 예로써 결정변수는 총 32개로 구성하였으며 총 140개의 2진 비트수를 할당하였다. 즉, 주기 및 옹셋은 각각 6개씩의 비트를 할당하였으며 녹색시간에 해당하는 변수는 각각 5개씩의 비트수를 할당하였다. 또한 네트워크인 경우 세 번의 옹셋이 결정되면 나머지 한 번에 대한 옹셋이 결정되므로 옹셋에 대한 변수는 3개로 할당하였다. (참고로 여기서 옹셋은 교차로간 상대옹셋을 말한다.)

```
{ f1 ; f2 ; f3 ; f4 ; f5 ; f6 ; f7 ;
{101011:11101:10011:10011:11101:11111: 10001:
  f8 ; f9 ; f10 ; f11 ; f12 ; f13 ; f14 ;
11111: 10011 :11011:11001:11011:00001:11101 :
  f15 ; f16 ; f17 ; f18 ; f19 ; f20 ; f21 ;
11100 :10011:10010:01101 :01101:10000:11111 ;
f22 ; f23 ; f24 ; f25 ; f26 ; f27 ; f28 ; f29 ; f30 ;
11 : 01 : 11 : 00 : 10 : 10 : 11 : 00 :101011:
  f31 ; f32 }
101001 : 000111}
```

여기서,

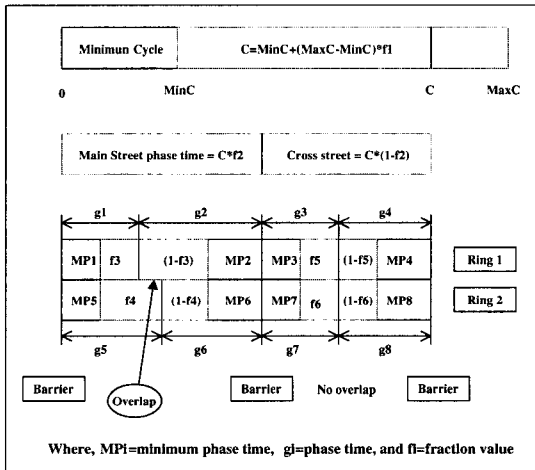
- f_1 : 주기에 해당하는 변수
- $f_2 \sim f_6$: 교차로 1의 녹색시간에 해당하는 변수

- $f_7 \sim f_{11}$: 교차로 2의 녹색시간에 해당하는 변수
- $f_{12} \sim f_{16}$: 교차로 3의 녹색시간에 해당하는 변수
- $f_{17} \sim f_{21}$: 교차로 4의 녹색시간에 해당하는 변수
- $f_{22} \sim f_{25}$: 교차로 1~4의 주도로(동서방향) 현시 순서에 해당하는 변수
- $f_{26} \sim f_{29}$: 교차로 1~4의 부도로(남북방향) 현시 순서에 해당하는 변수
- $f_{30} \sim f_{32}$: 옵셋에 해당하는 변수

반면, 위에서 부호화된 각 매개변수들이 실제의 값으로 전환(decoding)되는 과정을 설명하면 다음과 같다. 우선, 주기 및 녹색시간이 결정되는 과정은 박병규가 개발한 『A fraction-based decoding scheme』을 인용하였다. 이 방법은 주기범위 및 최소녹색시간 및 NEMA의 이중고리(dual-ring) 현시체계와 관련한 신호제어 제약조건을 해결하기 위한 것으로서 각 방향별 녹색시간은 비례적으로 각 이동류에 할당되도록 구성이 되어있다. <그림 4>는 이 방법을 보여주는 그림이다.

<그림 4>에서의 방법에 따라 주기 및 각 방향별 녹색시간은 실제의 값으로 전환되며 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

① $Cycle = MinC + (MaxC - MinC) \times f_1$



자료) Park, B.K. "Development of Genetic Algorithm-Based Signal Optimization Program for Oversaturated Intersection", Texas A&M University, pp.42, 1998.

<그림 4> A fraction-based decoding scheme

- ② $GM = mp_1 + mp_2 + (Cycle - MP) \times f_2$
- ③ $GC = mp_3 + mp_4 + (Cycle - MP) \times (1 - f_2)$
- ④ $G_1 = mp_1 + ((Cycle - MP) \times f_2) \times f_3$
- ⑤ $G_2 = mp_2 + ((Cycle - MP) \times f_2) \times (1 - f_3)$
- ⑥ $G_3 = mp_3 + ((Cycle - MP) \times (1 - f_2)) \times f_5$
- ⑦ $G_4 = mp_4 + ((Cycle - MP) \times (1 - f_2)) \times (1 - f_5)$
- ⑧ $G_5 = mp_5 + ((Cycle - MP) \times f_2) \times f_4$
- ⑨ $G_6 = mp_6 + ((Cycle - MP) \times f_2) \times (1 - f_4)$
- ⑩ $G_7 = mp_7 + ((Cycle - MP) \times (1 - f_2)) \times f_6$
- ⑪ $G_8 = mp_8 + ((Cycle - MP) \times (1 - f_2)) \times (1 - f_6)$

여기서,

$Cycle$: 주기길이(초)

GM : 주도로 녹색시간(초)

GC : 부도로 녹색시간(초)

$G_1 \sim G_8$: 각 방향별 녹색시간(초) (NEMA 방식)

mp_j : 이동류 j의 최소녹색시간(초)

MP : 최소녹색시간의 합 ($mp_1 + mp_2 + mp_3 + mp_4$ or $mp_5 + mp_6 + mp_7 + mp_8$) (초)

단, $\sum mp_i = \sum mp_j$ ($i=1 \sim 4, j=5 \sim 8$)

$f_1 \sim f_6$: 주기 및 녹색시간을 계산하기 위한 변수들로써 2진 비트로 부호화된 각 변수들이 식(9)를 통해서 실수(real number)로 전환된 값을 말함.

$$f_i = \frac{decimal(10101 \dots 001_2)}{2^{m_i} - 1} \quad (9)$$

여기서,

$decimal(string_2)$: 이진스트링을 10진수로 변환한 값

m_i : 유전자의 길이

본 연구에서 현시순서는 <그림 5>와 같이 중첩(overlap)이 가능한 4가지의 좌회전 현시옵션을 사용하였다. 그림에서 \bar{g} 는 직진교통량에 대한 outbound 및 inbound 방향의 녹색시간을, \bar{l} 는 outbound 및 inbound 방향의 좌회전에 할당되는 시간을 뜻하며 R은 교차도로의 통행을 제공하기 위한 공통 적색시간을 뜻한다. 따라서, 각 교차로의 좌회전 현시순서에

해당하는 변수에 각각 2개씩의 비트수를 할당함으로써 십진수로 전환되었을 경우, 4가지 옵션(option)중에 한 가지가 선택되도록 구성하였다.

반면, 옵션은 0과 주기사이의 범위를 갖게 되므로 다음 식을 통해서 실수(real number)로 전환된다.

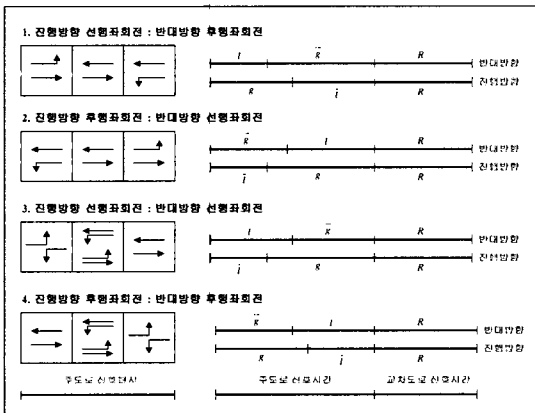
$$\phi = Cycle \times f_{30}$$

여기서,

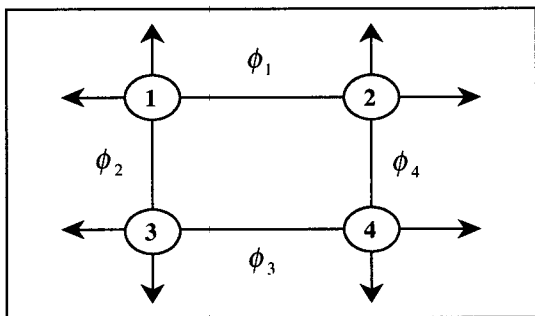
ϕ : 교차로간의 상대옵션(초)

f_{30} : 옵션을 계산하기 위한 변수로써 2진 비트로 부호화된 각 변수들이 식(8)를 통해서 실수(real number)로 전환된 값을 말함.

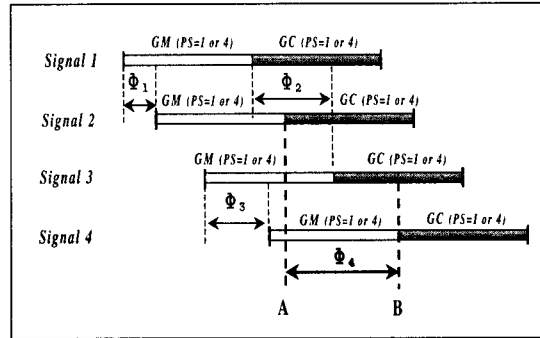
〈그림 6〉과 같은 네트워크인 경우 각 교차로간 상대 옵션에 해당하는 ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 이 결정되면 나머지 ϕ_4 는 자연적으로 결정이 된다.



〈그림 5〉 좌회전 현시순서 옵션



〈그림 6〉 옵션 발생과정



〈그림 7〉 옵션 결정과정-1

본 연구에서는 각 교차로에서의 직진방향 시작점을 옵션의 시작점으로 잡았으므로 주도로(동서방향) 및 부도로(남북방향)의 현시순서가 〈그림 5〉에서의 좌회전 현시순서 옵션 중 1번과 4번으로 고정되는 경우, ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 가 결정되면 ϕ_4 는 〈그림 7〉에서의 A시점과 B시점의 차가 되며, 식(10)을 통해서 ϕ_4 가 결정되도록 구성하였다.

$$\phi_4 = (GM^1 + \phi_2 + GC^3 + \phi_3 - GC^4) - (\phi_1 + GM^2) \tag{10}$$

여기서,

GM^i : i 교차로의 주도로 녹색시간(초)

GC^i : i 교차로의 부도로 녹색시간(초)

ϕ_1 : 교차로 1~2 사이의 상대옵션(초)

ϕ_2 : 교차로 1~3 사이의 상대옵션(초)

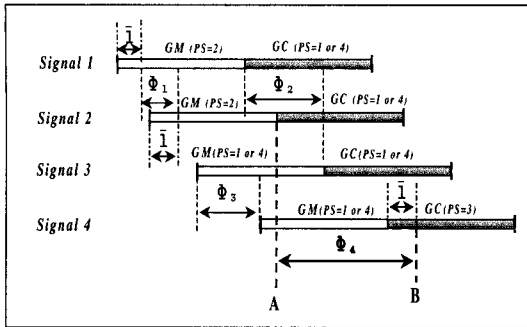
ϕ_3 : 교차로 3~4 사이의 상대옵션(초)

ϕ_4 : 교차로 2~4 사이의 상대옵션(초)

그러나 〈그림 8〉과 같이 주도로 및 부도로의 현시순서가 〈그림 5〉에서의 좌회전 현시순서 옵션 중 1번과 4번 이외의 현시순서 옵션으로 혼합된 경우 하나의 식으로는 표현이 안되며 다음의 알고리즘을 통해서 A, B 시점의 차이 ϕ_4 가 결정되도록 구성하였다.

1) 옵션(ϕ_4)결정 알고리즘

ϕ_4 는 각 교차로의 주도로 및 부도로의 좌회전 현시순서에 따라 〈그림 8〉과 같이 B 시점과 A 시점을 결정한 후 이 두 시점의 차이를 산정함으로써 결정된다.



〈그림 8〉 음셋 결정과정-2

【1단계】 Signal 1의 주도로 현시순서에 따라 다음과 같이 B 시점을 저장한다.

$$B = GM_1 - \begin{cases} \text{if } PS=1 \text{ or } 4 \text{ then } '0' \\ \text{if } PS=2 \text{ or } 3 \text{ then } 'g_1^1' \end{cases}$$

여기서,

PS : 현시순서 (각 번호는 〈그림 5〉에서의 좌회전 현시순서 옵션순서를 말함)

GM_i : Signal i의 주도로 녹색시간(초)

g_jⁱ : Signal i의 j방향 녹색시간(초)
(j=1~8, NEMA방식)

【2단계】 Signal 1의 부도로 현시순서에 따라 다음과 같이 B 시점을 수정한다.

$$B = B + \begin{cases} \text{if } PS=1 \text{ or } 4 \text{ then } '0' \\ \text{if } PS=2 \text{ or } 3 \text{ then } 'g_3^1' \end{cases} + \phi_2$$

【3단계】 Signal 3의 부도로 현시순서에 따라 다음과 같이 B 시점을 수정한다.

$$B = B - \begin{cases} \text{if } PS=1 \text{ or } 4 \text{ then } '0' \\ \text{if } PS=2 \text{ or } 3 \text{ then } 'g_3^3' \end{cases} + GC_3$$

여기서,

GC_i : Signal i의 부도로 녹색시간(초)

【4단계】 Signal 3의 주도로 현시순서에 따라 다음과 같이 B 시점을 수정한다.

$$B = B + \begin{cases} \text{if } PS=1 \text{ or } 4 \text{ then } '0' \\ \text{if } PS=2 \text{ or } 3 \text{ then } 'g_1^3' \end{cases} + \phi_3$$

【5단계】 Signal 4의 주도로 현시순서에 따라 다음과 같이 B 시점을 수정한다.

$$B = B - \begin{cases} \text{if } PS=1 \text{ or } 4 \text{ then } '0' \\ \text{if } PS=2 \text{ or } 3 \text{ then } 'g_1^4' \end{cases} + GM_4$$

【6단계】 Signal 4의 부도로 현시순서에 따라 다음과 같이 B 시점을 수정한다.

$$B = B + \begin{cases} \text{if } PS=1 \text{ or } 4 \text{ then } '0' \\ \text{if } PS=2 \text{ or } 3 \text{ then } 'g_3^4' \end{cases}$$

【7단계】 Signal 2의 주도로 현시순서에 따라 다음과 같이 새로운 A 시점을 저장한다.

$$A = \phi_1 + \begin{cases} \text{if } PS=1 \text{ or } 4 \text{ then } 'GM_2' \\ \text{if } PS=2 \text{ or } 3 \text{ then } 'GM_2 - g_1^2' \end{cases}$$

【8단계】 Signal 2의 부도로 현시순서에 따라 다음과 같이 A 시점을 수정한다.

$$A = A + \begin{cases} \text{if } PS=1 \text{ or } 4 \text{ then } '0' \\ \text{if } PS=2 \text{ or } 3 \text{ then } 'g_3^2' \end{cases}$$

【9단계】 최종적으로 ϕ_4 는 다음과 같이 계산된다.

$$\phi_4 = B - A$$

$$\left(\text{단, } \begin{cases} \text{if } \phi_4 \geq \text{Cycle} \text{ then } \phi_4 - (k \times \text{Cycle}) \\ \text{if } \phi_4 < 0 \text{ then } \phi_4 + \text{Cycle} \end{cases} \right)$$

여기서, k는 ϕ_4 를 주기로 나눈 몫

Coding 및 Decoding 과정을 거쳐 결정된 각 변수(주기, 녹색시간, 음셋 및 현시순서)들은 다음의 적합도 함수를 통해 적합도 값으로 전환된다.

3. 적합도 함수

신호등이 설치된 가로에서는 차량의 흐름이 신호제어 등에 의해 차량군을 형성하여 이동되며 이러한 차량군 도착은 하류부 교차로 녹색시간과 거의 일치할 때 지체도는 크게 감소한다. 따라서 본 연구에서 적합도 함수 정의를 위한 지체최소화모형(delay model)

은 크게 HCM모형과 NCHRP모형을 사용하였다. 즉, <그림 9>에서와 같이 연동방향인 이동류 EBT2와 WBT1은 차량군 분산을 고려한 NCHRP모형을 이용하여 연동보정계수(PF:Progression Adjustment Factor)값을 산출하고 이를 균일지체에 적용함으로써 교차로간 신호연동의 영향을 모형식에 반영하였으며, 그 외의 비연동 이동류에 대해서는 HCM모형을 사용하였다.

1) 비연동방향 지체도모형

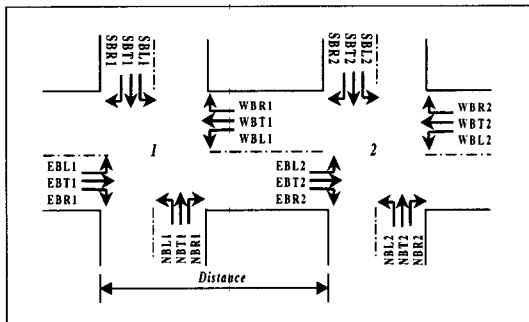
비연동 방향의 지체도 산정은 HCM모형을 이용하여 균일지체와 랜덤지체의 합으로 구성하였다.

$$d = d_1 + d_2$$

$$= 0.38 * C * \frac{(1 - g_i / C)^2}{[1 - (g_i / C) * X_i]} + 173X_i * [(X_i - 1) + \sqrt{(X_i - 1)^2 + (16X_i / c_i)}]$$

여기서,

- d : 차량당 평균정지지체(초/대)
- d_1 : 차량당 균일지체(초/대)
- d_2 : 차량당 랜덤지체(초/대)
- g_i : lane group i의 유효녹색시간(초)
- X_i : lane group i의 v/c ratio (= v_i / c_i , 여기서, $c_i = s_i * (g_i / C)$)
- s_i : lane group i의 포화교통류율(대/시)
- c_i : lane group i의 용량(대/시)



<그림 9> 교통류 구분

2) 연동방향 지체도모형

연동방향의 지체도 산정은 아래 식과 같이 연동보정계수(PF)를 고려한 균일지체와 랜덤지체의 합으로 구성을 하였다.

$$d = d_1 * PF + d_2$$

$$= \frac{C}{2} * \frac{(1 - g_i / C)^2}{1 - a_i / s_i} * PF + 173X_i * [(X_i - 1) + \sqrt{(X_i - 1)^2 + (16X_i / c_i)}]$$

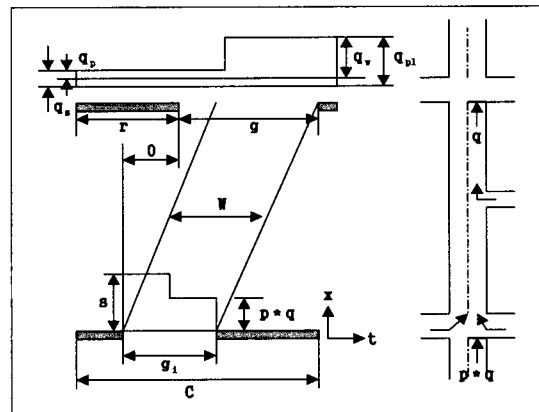
여기서,

- a : lane group i의 평균교통류율(대/초)
- s_i : lane group i의 포화교통류율(대/초)
- PF : 연동보정계수

연동보정계수(PF)는 NCHRP모형을 통해 산출하게 되는데 NCHRP모형과 타모형과의 기본적인 차이는 연속진행밴드를 차량군창(Platoon Window)이라는 새로운 정의로 접근한 것으로 두 개의 교통류형태로 구분된다. 그 하나는 연속진행차량군이고 다른 하나는 모든 2차 교통류를 포함하는 균일한 형태로 구분된다. NCHRP모형의 개념에 의한 차량군 형태를 도식화하면 <그림 10>과 같다.

그림에서 g, r 은 녹색 및 적색시간, p, q 은 상류부 녹색신호를 받고 하류부 접근로에 도착하는 교통량 비율 및 평균교통류율, q_{pl}, q_w 은 차량군 창내의 도착교통류율 및 교통류율, q_b, q_s 은 차량군 창밖의 연속 및 비연속진행교통류율, W 은 상류부 직진차량군의 포화부분 길이를 뜻하며 C, O, s 은 각각 주기, 옵셋 및 포화교통류율을 뜻한다.

NCHRP모형은 위와 같은 개념을 기반으로 차량군 도착시간과 신호 옵셋과의 관계에 의하여 차량군 도착유형별 녹색시간 간격결정을 수식화하고 총 10단계의



<그림 10> NCHRP모형의 차량군 형태

과정을 통해서 연동보정계수를 산정하며 이를 통하여 지체도 산정을 간략화하였다.

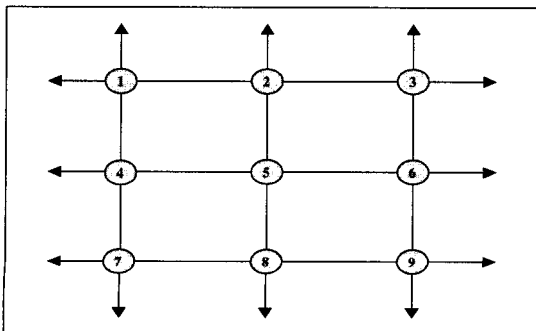
Ⅳ. 모형의 적용 및 결과분석

모의실험은 <그림 11>과 같은 도시부 4지교차로가 9개인 경우의 격자형 네트워크(closed network)를 대상으로 실시하였으며, 교차로간 간격은 동·서 방향의 경우 500m로, 남·북 방향의 경우는 300m로 동일하게 가정하였다. 반면, 교통량은 주방향(동·서 방향)과 부방향(남·북 방향)의 직진교통량을 기준으로 한산상태($v/c=0.5$), 정상상태($v/c=0.7$), 용량상태($v/c=0.9$) 및 세 가지 상태가 혼합된 경우로 구분하여 실시하였다.

주도로는 편도4차선, 부도로는 편도3차선에 1개의 좌회전 전용차선을 지니고 있으며, 포화교통류율은 직진차선의 경우 1,750(vphplg), 좌회전차선의 경우 1,700(vphplg)으로 가정하였다. 반면, 링크내 차량 속도는 60kph, 황색 및 손실시간은 각각 3초, 5초씩으로 가정하여 분석작업을 수행하였으며 주기의 최소 및 최대범위는 각각 50초, 100초로 가정하였다.

본 모형은 지체최소화모형으로 TRANSYT-7F를 통해 산출된 주기, 녹색시간, 오프셋 등과의 비교를 통해 결과를 분석하였으며, MOE(Measures of Effectiveness)로는 평균지체(average delay)를 토대로 그 성능을 평가하였다.

우선 본 모형을 통해 각 시나리오별로 최적화된 신호시간요소인 주기, 녹색시간 및 오프셋결과를 <표 1>, <표 2>, <표 3>과 같이 TRANSYT-7F와 상호 비교하였다. 단, 녹색시간의 경우 편의상 교차로 1을 기준으로 제시하였다.



<그림 11> 평가대상 네트워크

<표 1> 신호주기 산정결과 (단위:sec)

구 분	TRANSYT-7F	본모형
한산($v/c=0.5$)	55.0	50.8
정상($v/c=0.7$)	70.0	61.9
용량($v/c=0.9$)	100.0	70.0
혼합상태	100.0	66.3

<표 2> 녹색시간 산정결과 (단위:%)

구 분		g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	g8
한산 상태	T-7F	18	42	18	22	18	42	18	22
	본모형	20	30	20	30	20	30	20	30
정상 상태	T-7F	19	41	14	26	19	41	14	26
	본모형	16	38	18	28	19	35	17	29
용량 상태	T-7F	16	44	12	28	16	44	12	28
	본모형	16	42	19	23	23	35	14	28
혼합 상태	T-7F	15	54	11	20	15	54	11	20
	본모형	18	37	21	24	23	35	14	28

<표 3> 오프셋 산정결과 (단위:sec)

구 분		교1	교2	교3	교4	교5	교6	교7	교8	교9
한산 상태	T-7F	0	28	0	25	53	26	0	28	0
	본모형	0	25	0	11	37	12	38	12	37
정상 상태	T-7F	0	33	64	35	0	35	0	33	64
	본모형	0	21	48	33	60	19	2	26	2
용량 상태	T-7F	0	49	98	61	9	63	11	57	14
	본모형	0	25	54	62	4	52	21	39	59
혼합 상태	T-7F	0	55	96	23	71	75	93	25	92
	본모형	0	29	57	4	42	60	49	8	52

주) 여기서 오프셋은 절대오프셋(absolute offset)을 말함.

<표 1>에 따르면 교통량 증가에 따른 신호주기 증가추세가 서로 유사한 것으로 나타났으나 본 모형의 증가폭이 다소 적은 것으로 분석되었다. 반면, 각 방향별 녹색시간은 두 모형간에 서로 비슷한 추세를 보여주었으나 각 방향별 v/s 를 고려해볼 때 본 모형이 TRANSYT-7F에 비해 다소 민감하지 못한 것으로 분석되었다. 여기에는 각 방향별 녹색시간을 랜덤(random)으로 발생시키는 과정에서 최적해를 찾지 못한 경우, 부호화된 각 변수를 실수(real number)로 전환하는 방법상의 문제 등 복합적인 원인이 있는 바 추후에 지속적인 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다. 본 모형의 경우 교차로간 연동방향에 대해서는 NCHRP모형을 사용함으로써 속도와 링크거리에

따른 연동상황을 모형식에 반영하였는데 <표 3>에 따르면 오프셋이 통행시간에 가까운 값으로 산출된 것을 알 수 있다.

본 모형을 TRANSYT-7F와 동등한 조건에서 평가하기 위해 두 모형의 현시순서를 선행좌회전으로 동일하게 고정시킨 후 각 시나리오별로 최적화를 수행하였으며, 최적화된 신호시간계획을 NETSIM⁹⁾에 입력하여 지체도를 <표 4>와 같이 상호비교하였다.

<표 4>에 따르면 '한산'(v/c=0.5), '정상'(v/c=0.7) 상태에서는 지체도가 TRANSYT-7F보다 크게 산출되었으나 '용량'(v/c=0.9), '혼합'상태에서는 더 적은 지체도를 보여주었다, '한산'과 '정상'상태에서 TRANSYT-7F에 비해 높은 지체도를 보여주는 것은 최적화된 각 방향별 녹색시간이 TRANSYT-7F에 비해 민감하지 못한 것에 기인한 것으로 판단된다. 이외에도 본 모형에서 사용한 연동 지체도 모형이 TRANSYT-7F에 비해 단순하기 때문인 것으로 사료되는바 추후 연동지체도 모형에 관한 연구가 계속되어야 할 것으로 판단된다.

전술하였듯이 본 모형은 적합도함수에 좌회전 현시순서를 변수로 포함시켜 구성하였다. 따라서, 다음으로는 현시순서를 적합도함수에 포함시켜 최적화를 수행한 후, 최적화된 신호시간계획을 NETSIM에 입력하여 고정현시인 경우와의 지체도를 <표 5>와 같이 상호비교하였다.

<표 4> 현시순서 고정 후의 지체도 결과

(단위:sec/veh)

구 분	TRANSYT-7F	본모형
한산(v/c=0.5)	17.8	26.4
정상(v/c=0.7)	21.3	25.2
용량(v/c=0.9)	34.6	32.3
혼합상태	38.9	32.9

<표 5> 현시순서 최적화 후의 지체도 결과

(단위:sec/veh)

구 분	고정 현시순서	현시순서 최적화 후
한산(v/c=0.5)	26.4	24.7
정상(v/c=0.7)	25.2	24.3
용량(v/c=0.9)	32.3	31.7
혼합상태	32.9	28.6

<표 5>에 따르면 최적화된 현시순서를 입력하여 산출된 지체도가 고정현시인 경우에 비해 모두 적은 것으로 나타났다. 이는 주어진 교통조건에 따른 최적의 좌회전 현시순서가 반영되었기 때문으로 분석된다.

V. 결론

본 논문에서는 네트워크형 가로망의 교통신호제어 최적화 모형을 제시하였다. 신호시간계산과정에서 중첩현시 처리와 현시순서 최적화의 기능을 포함하기 위해서 전통적으로 혼합정수계획법을 이용하여 왔는데, 이 경우는 통과폭 최대화에 국한하고 지체 최소화에는 한계가 있다. TRANSYT-7F와 같은 지체 최소화 모형은 중첩현시와 현시순서를 최적화하지 못하고 있으며, 전역 최적해를 구하지 못하고 있다. 본 논문에서는 지체 최소화를 목표로 하며, 중첩현시와 현시순서를 다룰 수 있는 방안으로 유전자알고리즘을 적용한 최적화모형을 제시하였다.

지체도 최소화의 목적함수에 중첩현시와 현시순서를 포함할 경우 비선형 혼합정수법 형태가 되어, 전통적인 최적화 알고리즘으로 해를 구하기가 쉽지 않다. 유전자알고리즘을 이용하여 이러한 문제를 극복할 수 있었으며, 합리적인 수준의 최적해를 구할 수 있었다. 유전자알고리즘이 전역최적해를 제공하는 보장은 없으나, 언덕오름기법보다 전역최적해에 도달할 수 있는 가능성은 알고리즘 속성상 우수한 것으로 알려져 있다.

테스트 네트워크를 통하여 본 모형의 최적해와 TRANSYT-7F의 최적해를 비교하였다. NETSIM으로 상호 평가한 결과, 모형의 우수성이 분석되었다.

본 연구에서 네트워크는 격자형의 형태를 갖는 것으로 가정하였으나 향후 연구에서는 네트워크 형태 및 통행방법에 따른 네트워크 인식문제에 관한 연구가 수행되어야 할 것이다. 특히, 네트워크를 구성하는 교차로 수가 증가함에 따라 매개변수들을 포함하는 비트스트링의 증가로 수행속도가 저하되는 경우가 발생한다. 따라서, 향후에는 실수형 표현과 같은 문제부호화(coding/decoding scheme)에 관한 연구도 함께 병행되어야 할 것이다.

이외에도 최적의 신호시간계획을 창출하기 위해서는 최적화 방법 외에도, 모형에 구성되는 교통류 모형에 대한 추가연구도 필요하다.

참고문헌

1. Courage and Wallace, TRANSYT-7F User's Guide, Transportation Research Center, University of Florida, Gainesville, Florida, December, 1991.
2. Mitsuo Gen and Runwei Cheng, "Genetic Algorithm and Engineering Design", Ashikaga Institute of Technology, 1997.
3. J.D.C Little, "Optimal Signal Timing for Arterial Signal System", Federal Highway Administration, December, 1980.
4. H.S. Tsay and L.J. Lin, "New Algorithm for Solving the Maximum Progression Bandwidth", Transportation Research record 1194, pp 15~30, 1988.
5. C.E Wallace and K.G. Courage, "Arterial Progression-New Design Approach", Transportation Research record 881, 1982.
6. E.C.P. Chang and C.J. Messer, PASSERII-90 Program User's Guide, Texas Transportation Institute Texas A&M University, June, 1991.
7. N.A. Chaudhary and C.J. Messer, PASSER IV-96 User/Reference Manual, Texas Transportation Institute Texas A&M University, October, 1996.
8. Park, B.K., "Development of Genetic Algorithm-Based Signal Optimization Program for Oversaturated Intersection", Texas A&M University, 1998.
9. University of Florida, TRAF User Reference Guide, Federal Highway Administration, 1993.