

격자형 가로망의 교통신호제어 모형 연구

Development of Signal Optimization Model for Urban Network

유충식

(서울시립대학교 교통공학과 대학원)

김영찬

(서울시립대학교 도시공학과 부교수)

목 차

- | | |
|-----------------------------|-----------------|
| I. 서론 | IV. 모형적용 및 결과분석 |
| II. 기존문헌의 고찰 | V. 결론 및 제언 |
| III. 유전자 알고리즘을 이용한 신호최적화 모형 | 참고문헌 |
| 1. 간선도로에서의 신호최적화 모형 | |
| 2. 네트워크에서의 신호최적화 모형 | |

I. 서론

현재 우리나라는 계속해서 증가하는 차량과 이를 수용하지 못하는 열악한 도로상황으로 인해 교통혼잡이 날로 증가하고 있다. 따라서, 대도시 선진국들은 도로와 차량 및 신호운영요소 등의 상호작용에 대한 과학적인 분석 및 운영 기법에 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 간선도로의 신호연동화를 위한 주요변수는 주기(cycle length), 현시시간(green split), 오프셋(offset), 좌회전 현시순서(left-turn phase sequence)의 4가지로 구성된다. 본 연구¹⁾의 목적은 이들 신호시간을 최적화하는 새로운 알고리즘을 제시하는데 있다. 즉, 기존의 연동화모형 중 통과폭최대화모형은 주로 최종모형식을 혼합정수선형계획법(MILP)로 표현하고 이를 풀기 위하여 분지한계법(branch and bound method)을 주로 사용한다. 반면, 지체최소화모형으로 대표적인 TRANSYT-7F¹⁾는 차량의 지체도와 정지회수의 선형조합함수로 표

현되는 성과지수(performance index)를 효과측정의 기본변수로 하며, 최적화방법은 오프셋과 녹색시간을 일정한 크기로 변화를 주면서 반복적으로 계산을 수행하는 경사탐색법인 언덕오름(hill climbing)기법을 이용하나, 이 최적화방법은 언덕오름기법상 국부최소값에 귀착될 가능성을 내재하고 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 신호시간요소들을 최적화 시킴으로써 가능성 있는 새로운 방법론을 제시하고자 한다. 이를 위해 간선도로를 대상으로 통과폭최대화모형과 지체최소화모형에 기반을 두고 유전자 알고리즘을 이용한 신호최적화에 관한 연구를 수행하였으며, 이와 더불어 간선도로 연동화 문제를 네트워크 문제로 확장 적용해봄으로써 네트워크 신호최적화에 대한 유전자 알고리즘의 적용가능성을 제시하고자 한다.

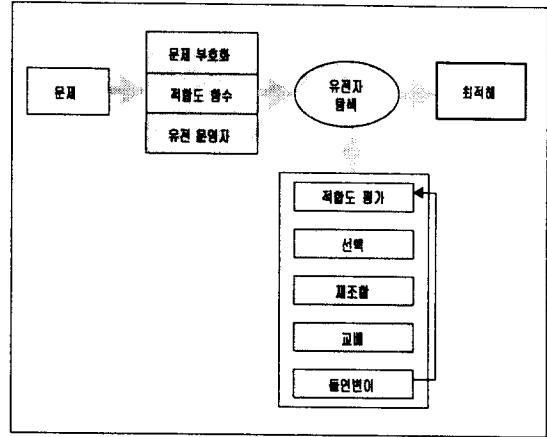
II. 기존문헌의 고찰

신호최적화 모형식으로는 전통적으로 크게 차량의 통과폭(bandwidth)을 최대화 하는 통과폭최대화 모형과 차량의 지체(delay)를 최소화하기 위한 지체최소화 모형 및 이들 장점을 응

1) "이 논문은 1998년 학술진흥재단의 학술연구비에 의하여 지원되었음."

용한 결합모형 등이 있다. 통과폭최대화모형으로는 MAXBAND모형, BANDTOP모형, 연동기회모형, PASSER-II 등이 있으며, PASSER-IV는 네트워크(network)까지 가능한 모형으로 이들 대부분 모형들은 최종모형식의 형태가 양방향통과폭을 최대로 하는 혼합정수선형계획법으로 표현된다. 또한, 지체최소화모형으로 대표적인 TRANSYT-7F는 세계적으로 가장 널리 사용되는 프로그램이나, 최적화문제의 비선형형태로 인하여 global optimal solution을 찾지 못하고 있다. 이외에도 TRANSYT-7F는 현시순서를 모형내부에서 최적화하지 못하고 사용자가 사전에 정하여 입력하여야 하며 중첩현시를 계산하지 못하는 결정적인 약점을 갖고 있다.

반면, 유전자 알고리즘은 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 알고리즘(evolutionary algorithm)이라 할 수 있다. 즉, 유전자 알고리즘에서 집단 내의 염색체들은 적합도 함수를 사용하여 모두 평가한 후, 비교적 우수한 유전자 구조를 갖고 있다고 판단되는 후보해를 보전시키고 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 새로운 환경에 점진적으로 적응하게 됨으로써 문제의 최적해에 수렴하게 된다. 따라서, 일단 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 문제 해결 능력에 직접적인 영향을 미친다. 요컨대, 유전자 알고리즘은 <그림 1>와 같은 흐름을 통해 최적해를 찾게 된다.



<그림 1> 유전자 알고리즘을 이용한 문제해결

이러한 유전자 알고리즘은 수학적 함수의 최적화, 가스 파이프라인의 최적화, 전력 송전망의 최적화 등 매우 다양한 분야의 최적화 문제에 적용될 수 있으며, 최근에는 지능제어와 관련하여 신경망과 퍼지로직과의 결합으로 적응 학습 및 최적화의 문제에 새로운 해결법으로 많은 새로운 시도를 하고 있다.

특히, 최근에 교통분야의 신호시간 최적화 부분에서 박병규³⁾는 유전자 알고리즘 이용한 방법을 통해 교차로에서의 과포화상태에 대한 신호시간 최적화를 수행한바 있는데, 시뮬레이션 모델 중 mesoscopic 모델을 기반으로 간선도로상의 신호시간 요소인 주기, 녹색시간, 오프셋 및 현시순서에 대한 최적화를 수행하였다. 본 연구에서도 그가 개발한 Coding/Decoding Scheme을 일부 수정하여 응용하였다.

III. 유전자 알고리즘을 이용한 신호최적화모형

1. 간선도로에서의 신호최적화 모형

간선도로에 대해서는 크게 통과폭최대화모형⁴⁾과 지체최소화모형 각각을 기반으로 유전자 알고리즘을 적용해 보았다. 우선, 유전자 알고리즘을 적용하기 위해서는 우선 매개변수들을 염색체 구조를 나타내는 비트스트링으로 표현해야 하는데 다음은 'GA-B'(통과폭모형을 기반으로 유전자 알고리즘을 이용한 신호최적화모형)와 'GA-D'(지체도모형을 기반으로 유전자 알고리즘을 이용한 신호최적화모형)의 Coding

류에 대해서는 HCM 모형을 사용하였다.

1) 비연동방향 지체도 모형

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

여기서,

d = 차량당 평균정지지체, sec/v도

g_i = lane group i의 유효녹색시간, sec

C = 주기길이, sec

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, vph

c_i = lane group i의 용량, vph

비연동방향에 대해서는 위 식과 같이 HCM 모형을 사용하여 균일지체와 랜덤지체의 합으로 구성하였다.

2) 연동방향 지체도 모형

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

여기서,

q = lane group i의 평균교통류율, vpspl

s_i = lane group i의 포화교통류율, vps

PF = 연동보정계수

신호등이 설치된 가로에서는 차량의 흐름이 신호제어 등에 의해 차량군을 형성하여 이동되며 차량군 도착은 하류부 교차로 녹색시간과 거의 일치할 때 지체도는 크게 감소되는 바와 같이 차량군 흐름은 지체도 수준에 영향을 끼친다. 따라서 연동방향 이동류에 대해서는 PF 값을 산출하여 신호연동의 영향을 모형식에 반영하였다. PF값은 NCHRP⁵⁾모형을 통해 산정되는데, NCHRP모형은 차량군 도착시간과 신호오프셋과의 관계에 의해 차량군 도착유형별 녹색시간 간격을 수식화하고 연동보정계수를 통하

여 지체도를 산정하는 거시적모형의 주요한 분석기초를 이루는 모형이다.

2. 네트워크에서의 신호최적화 모형

본 연구에서 네트워크(network)는 격자형의 형태를 갖는 것으로 간주하였으며 모든 링크는 양방향(two-way)으로 통행하는 것으로 가정하였다. 또한 'GA-N'(지체최소화모형을 기반으로 유전자 알고리즘을 이용한 네트워크 신호최적화모형)의 적합도함수는 GA-D와 동일하게 네트워크를 구성하는 교차로 전체의 평균지체(average delay)를 최소화하는 것이며, 좌회전 현시순서를 목적함수에 변수로 포함시켜 최적화가 이루어지도록 적합도함수를 설정하였다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

Find C, G_{ij}, ϕ, P

Maximization $(-1) * \sum_i^N D_i(C, G_{ij}, \phi, P_i)$

Subject to

$$G_{i1} + G_{i2} = G_{i5} + G_{i6} \text{ for } i = 1, \dots, N_i$$

$$G_{i3} + G_{i4} = G_{i7} + G_{i8} \text{ for } i = 1, \dots, N_i$$

$$\sum_{j=ring} G_{ij} = C \text{ for } i = 1, \dots, N_i$$

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

$$MinC \leq C \leq MaxC$$

$$0 \leq \phi \leq C$$

$$G_{ij}, C, \phi \geq 0$$

여기서,

C = 주기길이(초)

i = 교차로

j = 각 교차로의 이동류(NEMA방식)

G_{ij} = i 교차로 j 이동류의 녹색시간(초)

ϕ = 오프셋(초)

P_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

$MinC =$ 최소주기길이(초)

$MaxC =$ 최대주기길이(초)

반면, 오프셋의 경우, '0'과 'Cycle'사이의 임의의 오프셋을 발생시키는 과정은 GA-D와 동일하나 <그림 4>와 같은 Closed Network에서는 ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 이 발생되면 나머지 ϕ_4 는 다음 식을 통해서 자연스럽게 결정이 되도록 구성하였다. (단, 현시순서가 후행좌회전인 경우.)

$$\phi_4 = (Green_{Main}^1 + \phi_2 + Green_{Cross}^3 + \phi_3 - Green_{Cross}^4) - (\phi_1 + Green_{Main}^2)$$

여기서,

$Green_{Main}^i =$ i 교차로의 주도로 녹색시간, sec

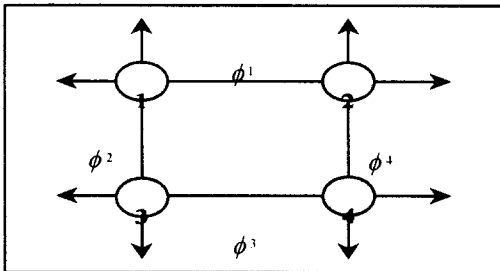
$Green_{Cross}^i =$ i 교차로의 부도로 녹색시간, sec

$\phi_1 =$ 교차로 1~2 사이의 상대오프셋, sec

$\phi_2 =$ 교차로 1~3 사이의 상대오프셋, sec

$\phi_3 =$ 교차로 3~4 사이의 상대오프셋, sec

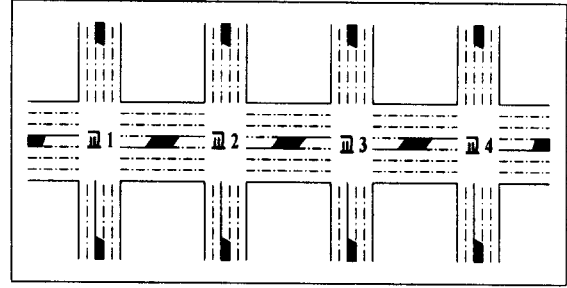
$\phi_4 =$ 교차로 2~4 사이의 상대오프셋, sec



<그림 4> Offset 발생과정

IV. 모형적용 및 결과분석

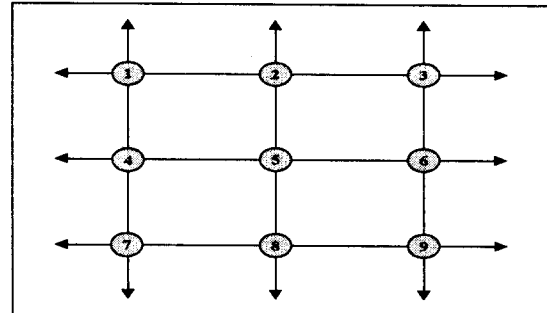
모형의 적용 및 평가를 위하여 GA-B와 GA-D는 <그림 5>와 같은 도시부 4지교차로가 4개인 경우를 대상으로 실시하였으며, GA-N은 <그림 6>와 같이 4지교차로가 9개인 격자형 네트워크에 적용하였다. GA-B인 경우, 교통량은 주방향과 부방향의 직진교통량을 기준으로 정상상태($v/c=0.7$)인 경우로 하였으며, 교차로간 간격은 각 교차로별로 동일한 경우(300m, 500m, 700m)와 혼합된 경우로 구분하여 실시하였다. 모형평가는 PASSER-II를 통해 산출된 MOE 즉, Bandwidth Efficiency와 Bandwidth Attainability를



<그림 5> 평가대상 간선도로

토대로 비교하였다. 특히, 모형의 적용은 크게 주기에 대한 변수를 목적함수에 포함시킨 경우와 아닌 경우로 나누어 살펴보았다.

GA-D는 교차로간 간격을 500m로 동일하게 가정하였으며, 교통량은 주방향과 부방향의 직진교통량을 기준으로 한산상태($v/c=0.5$), 정상상태($v/c=0.7$), 용량상태($v/c=0.9$)인 경우로 구분하여 실시하였다. 모형평가는 현시순서를 고정시킨 후 GA-D와 TRANSYT-7F의 최적화된 신호시간을 기반으로 NETSIM⁶⁾을 통해 지체도를 상호 비교하였다.



<그림 6> 평가대상 network

반면, GA-N은 교차로간 거리를 가로방향의 경우 500m로, 세로방향의 경우는 300m로 동일하게 가정하고 교통량은 주방향과 부방향의 직진교통량을 기준으로 한산상태($v/c=0.5$), 정상상태($v/c=0.7$), 용량상태($v/c=0.9$) 그리고 세 가지 상태가 혼합된 경우로 구분하여 실시하였다. 모형평가는 GA-D와 동일한 방식으로 NETSIM을 통한 지체도를 통해 분석작업을 수행하였다.

이외에, 주도로는 편도4차선, 부도로는 편도3차선에 1개의 전용차선을 지니고 있으며, 포화교통류율은 직진차선의 경우 1,750(vphplg), 좌회전차선의 경우 1,700(vphplg)으로 가정하였다.

<표 1>은 교차로 간격에 따른 PASSER-II와 GA-B간의 MOE 산정결과를 나타낸다. 반면, <표 2>와 <표 3>은 NETSIM을 통한 GA-

D와 GA-N의 지체도를 TRNSYT-7F와 비교한 것을 나타낸다.

<표 1>의 MOE 산정결과에 의하면 교차로간 거리가 300m와 500m인 경우에는 PASSER-II의 결과보다 우수한 MOE 수치를 보였으며, 교차로간 거리가 700m인 경우와 혼합된 경우에도 거의 유사한 MOE 값을 산정함으로써 optimal solution을 찾는 것으로 나타났다.

반면, <표 2>, <표 3>의 지체도 산정결과에 의하면 GA-D는 '정상'과 '용량'상태에서, GA-N은 '용량'과 '혼합'상태에서 TRNSYT-7F에 비해서 낮은 지체도를 보임으로써 효율적인 신호 시간계획을 창출하는 것으로 분석되었다.

<표 1> GA-B의 MOE 산정결과

거리	모형	Bandwidth Efficiency	Bandwidth Attainability
300m	PASSER-II	0.353	0.814
	GA-B	0.356	0.820
	GA-B *	0.377	0.871
500m	PASSER-II	0.371	0.878
	GA-B	0.373	0.882
	GA-B *	0.399	0.944
700m	PASSER-II	0.435	0.966
	GA-B	0.434	0.963
	GA-B *	0.444	0.986
혼합	PASSER-II	0.445	0.959
	GA-B	0.440	0.947
	GA-B *	0.420	0.904

주: *은 주기에 대한 변수를 적합도 함수에 포함시킨 경우를 나타냄.

<표 2> GA-D의 지체도 산정결과

(단위: sec/veh)

구분	TRNSYT-7F	GA-D
한산(v/c=0.5)	22.6	23.6
정상(v/c=0.7)	23.4	22.8
용량(v/c=0.9)	28.4	22.5

<표 3> GA-N의 지체도 산정결과

(단위: sec/veh)

구분	TRNSYT-7F	GA-D
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
혼합	38.9	32.9

V. 결론 및 제언

본 연구에서는 크게 간선도로와 격자형 네트워킹을 대상으로 유전자 알고리즘을 이용한 신호최적화에 관한 연구를 수행하였다. 즉, 간선도로에 대해서는 통과폭모형과 지체도모형을 기반으로 유전자 알고리즘을 각각 적용하였으며 네트워킹에 대해서는 지체도모형을 기반으로 유전자 알고리즘을 적용하였다. 또한, 각 시나리오별로 모형을 적용한 결과 효율적인 신호 시간계획을 창출하는 것으로 분석되었다.

유전자 알고리즘은 기존에 신호최적화를 위해 주로 사용되어 왔던 방법들과는 달리 주어진 문제의 속성에 따라 적합도함수를 다양하게 설정할 수 있으며 Coding/Decoding Scheme등을 달리하면서 그 결과를 검증할 수 있는 알고리즘으로 본 연구를 통해 그 가능성을 보여주었다.

본 연구에서 네트워크는 격자형의 형태를 갖는 것으로 가정하였으나 향후 연구에서는 네트워크 인식문제에 관한 연구가 수행되어야 하며 특히, 교차로 수가 증가함에 따라 매개변수들을 포함하는 비트스트링의 증가로 수행속도가 저하되는 경우가 발생된다. 따라서, 향후에는 실수형 표현과 같은 Coding/Decoding 방법에 관한 연구도 함께 병행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. Courage and Wallace, "TRNSYT-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. Park, B.K., "Development of Genetic Algorithm-Based Signal Optimization Program for Oversaturated Intersection", Texas A&M University, 1998.
4. Little and Kelson, "Optimal Signal Timing for Arterial Signal Systems", Federal Highway Administration, December, 1980.
5. TRB 339, "Effects of The Quality of Traffic Signal Progression on Delay", 1991.
6. University of Florida, "TRAF User Reference Guide", Federal Highway Administration, 1993.