

■ 論 文 ■

대기차량 최소화를 위한 주기변동기반 (Cycle-free based) 동적 신호시간 결정모형 개발

Development of a Cycle-free Based, Coordinated Dynamic Signal Timing
Model for Minimizing Queue-Lengths
(Using Genetic Algorithm)

이 영 인

(서울시립대학교 도시공학과 교수)

임 재 승

(서울시립대학교 교통공학과 대학원)

윤 경 섭

(서울시립대학교 대학원)

목 차

- I. 서론
 - 1. 연구의 배경
 - 2. 문제제기
 - II. 이론 및 모형 개발
 - 1. 연구의 기본전제 및 용어 설명
 - 2. 유전자 알고리즘의 Coding 및 Decoding 방법
 - 3. 적합도함수 설정
 - 4. 적합도함수의 대기차량길이 산출알고리즘
 - III. 모형의 적용결과 및 평가
 - 1. 적용대상 네트워크
 - 2. 모형 구현
 - 3. 모형의 적용결과
 - IV. 결론 및 제언
- 참고문헌

요 약

본 연구에서는 평균차량통행량 대신 매주기마다 입력되는 대기차량, 차량도착율을 기초로 대기차량을 최소화 하는 동적신호시간 결정모형을 개발하였다. 본 모형은 각 진입로에서의 대기차량예측모형을 기초로 하여 다음 주기에서의 대기차량을 예측한 후 유전자 알고리즘을 적용하여 신호시간을 산출하였다. 본 모형에서 산출된 신호주기와 녹색시간은 대기차량길이를 최소화하는 신호시간으로서 교차로간의 연동효과를 고려하여 실시간 교통 상황에 따라 주기별로 변화한다. 본 모형은 3개의 교차로로 구성되어 있는 간선도로를 대상으로 적용하였다. 이 모형은 MATLAB으로 구현하였으며, 동일한 조건 하에서 정주기식으로 신호시간을 주었을 때의 통과차량, 주기, 현시, 대기차량 등을 구하여 본 모형의 결과와 비교 및 평가를 실시하였다. 실험결과 비포화상태나 포화상태의 경우 모두 정주기식보다는 동적으로 신호를 계산하는 본 모형이 더 좋은 결과를 나타내었다. 또한, 적합도 함수를 변형하여 Inbound, Balanced, Outbound 연동상황을 설정하여 수행한 경우 주방향의 대기차량이 상대적으로 다른 방향에 비해 감소하였으며, 주방향에 대한 연동효과를 나타내었다.

1. 서론

1. 연구의 배경

기존의 신호시간 계산방법은 정주기식, 패턴선택 방식, 교통대응제어방식¹⁾의 3가지 형태로 구분된다.

정주기식은 이전에 수집된 교통자료를 기반으로 off-line 상태에서 요일별, 시간대별로 신호시간을 설정하는 방식이다. 패턴선택방식은 off-line으로 신호시간계획을 수립하고, 교통상황에 적합한 신호시간패턴을 선택하는 방식이다. 정주기식과 패턴선택방식을 위한 신호시간 결정모형으로는 지체도모형²⁾과 통과폭모형³⁾이 가장 일반적으로 이용되고 있다. 이들 모형은 비포화상황에서는 강점을 갖지만 실제의 링크교통량을 반영하지 못하고 교통량이 증가될수록 그 효과는 저하하게 된다. 또한, 지체도 모형 역시 널리 사용되지만 좌회전 현시순서를 최적화시켜주지 못한다는 단점을 가지고 있다. 최근에는 두 모형을 통합하려는 노력들이 진행되고 있으나 아직 나름대로의 한계를 보이고 있다.

교통대응제어방식의 경우 현재의 교통상황을 기반으로 하는 실시간 시간계획을 하기 위한 on-line 최적화과정을 포함하는데, 차량검지기과 예측된 교통량으로부터 얻어진 자료를 기반으로 하여 실시간으로 신호시간을 계산하고 실행하는 on-line 모델이다. 이 방식을 현재의 교통상황 하에 네트워크 내에 총지체와 정지수를 최소화하는 제어변수를 결정하기 위해 online optimization routine을 포함하는데, 이러한 방식¹⁾에는 영국의 SCOOT, 호주의 SCATS, 일본의 STREAM, 한국의 신신호시스템 등이 있다. 최근에는 유전자 알고리즘을 이용하여 신호시간을 결정하는 연구가 진행되고 있는데, 유전자 알고리즘⁵⁾은 자연의 진화원칙을 그대로 모방하는 계산모델로 1975년 John Holland에 의해 처음 알려진 이후, 지금까지 공학적인 측면에서 최적화문제를 해결하는데 이용되어왔다. 교통분야의 경우 1990년대부터 주로 교통량이 포화상태인 조건에서나 동적인 교통신호제어 모델에서 가장 중요한 요소인 신호현시 및 신호시간 등의 최적화 문제를 해결하기 위해 이용되었다.⁴⁾

2. 문제제기

기존의 신호시간 계산기법들은 교통축의 연동을 확

보하기 위하여 1~10개의 교차로로 구성되는 교차로 그룹을 대상으로 동일한 신호주기를 전제로 하여 신호시간을 결정한다. 이 경우 교차로간의 연동값(Offset)은 평균적인 교통상황을 가정하여 연동패턴을 설정하고 교통상황에 적합한 연동값을 선택하여 교통신호를 운영하고 있다. 그러나 현장교통상황에서 연동값(Offset)은 대기차량의 길이에 따라 신호주기별로 변화한다. 인접한 교차로의 최적 신호주기(이동류별 녹색시간의 변화에 의한)와 최적 연동값(주기별 대기차량수의 변화에 의한)이 실시간으로 변화할 경우 최적 신호주기와 최적 연동값을 동시에 만족하는 신호시간 산출은 매우 어렵다. 따라서 기존 신호시스템에서는 약 3주기의 Offset 전이과정을 통하여 적정 신호주기와 적정 연동값을 선택하는 방식을 이용하고 있다.

또한 기존의 연동모델들은 교차로 그룹별로 동일한 신호주기를 설정하고 평균적인 유입교통량을 측정후, 선형최적화 이론 또는 언덕 오름(Hill-Climbing)기법을 적용하여 최적 신호시간을 산출한다. 그러나 이 방법은 어디까지나 평균적인 자료에 대해서 계산한 것이기 때문에 실시간 최적화를 제공하기가 어렵다. 또한, 최적화이론을 이용하여 신호시간을 산출하는 경우에는 혼합정수계획법을 이용함으로써 국소적인 최적값으로 수렴할 위험성을 가지고 있다.

본 연구에서는 이러한 문제를 개선하기 위한 방안으로서 신호주기 변동(Cycle-free)을 기반으로 한 동적신호시간 결정모형을 개발하였다. 개발된 모형에서는 동적 신호시간을 산출하기 위하여 매주기별, 교차로 이동류별 차량도착율을 근거로 다음 주기에서의 이동류별 대기차량을 예측한 후, 유전자 알고리즘을 활용하여 대기차량을 최소화하는 신호시간 결정과정을 다음과 같이 정립하였다.

- ① 매 주기마다 실제 교차로에 진입하는 차량의 도착율을 근거로 다음 주기의 대기 차량수를 예측한다.
- ② 각 교차로의 최적신호주기를 계산하기 위하여 잠재적인 해의 집단(population)을 유지하면서 복합적인 방향으로 실행하여 전역해를 찾는다.
- ③ 유전자 알고리즘내 ①, ②의 과정을 반복 수행하여 이동류별 대기차량수를 최소화하는 신호주기와 이동류별 녹색시간을 신호주기별로 산출하며, 그 결과로 적정연동 값이 결정된다.

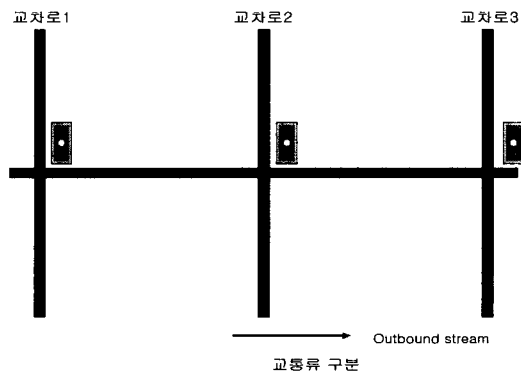
II. 이론 및 모델 개발

1. 연구의 기본전제 및 용어 설명

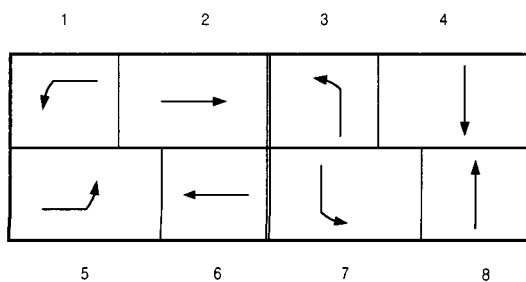
본 연구의 대상 Network의 일반적인 형태는 <그림 1>과 같이 설정하였으며, 신호현시체계는 NEMA체제로 가정하였다. 교차로 1과 3은 외곽교차로이며, 교차로 2는 중앙교차로로서 외곽접근로의 차량도착율은 일정한 값으로 가정하였다. 신호 교차로에서는 매주기마다 교통상황에 따라 녹색시간 끝에서의 대기차량의 길이를 최소화하기 위해서 신호주기 및 녹색시간이 계산된다. 대상 네트워크 내부접근로의 도착차량수는 매주기별로 계산되는 신호주기 및 녹색시간에 의해 결정된다.

이 논문에서 사용될 주요 기호는 다음 같다.

- k : 이동류 번호이다. ($1 \leq k \leq 8$)
- i : 교차로 번호이다. ($1 \leq i \leq 3$)
- n : 주기 번호이다.
- $g_i^k(n)$: i 번째 교차로에서 k 번째 이동류에 할당된 n 번째 주기의 녹색시간이다.



<그림 1> 연구대상 네트워크



<그림 2> Lead-Lead 패턴

$s_i^k(n)$: i 번째 교차로에서 k 번째 이동류가 녹색 시간 동안 Saturation Flow Rate로 빠져나가는 시간이다.

$C_i(n)$: i 번째 교차로에서의 n 번째 주기(의 길이)이다.

$T_S^k(n)$: 이웃 교차로 2번 이동류가 현교차로의 k 이동류에 Saturation Flow rate로 합류할 때의 도착율이다.

$T_A^k(n)$: 이웃 교차로 2번 이동류가 현교차로의 k 이동류에 Average Flow rate로 합류할 때의 도착율이다.

$L_S^k(n)$: 이웃 교차로 7번 이동류가 현교차로의 k 이동류에 Saturation Flow rate로 합류할 때의 도착율이다.

$L_A^k(n)$: 이웃 교차로 7번 이동류가 현교차로의 k 이동류에 Average Flow rate로 합류할 때의 도착율이다.

$R_A^k(n)$: 이웃 교차로 부도로 우회전 이동류가 현 교차로의 k 이동류에 Average Flow rate로 합류한다고 가정 할 때의 도착율이다.

d_k : 현 교차로에서 k 번째 이동류에 대한 서비스율이다

Q_{int}^k : 새 주기를 결정할 시점에서의 k 번째 이동류에 대한 대기차량수이다.

Q_S^k : k 번째 이동류의 녹색시간 시작 시각에서의 대기차량수이다.

Q_E^k : k 번째 이동류의 녹색시간 끝 시각에서의 대기차량수이다.

2. 유전자 알고리즘의 Coding 및 Decoding 방법

유전자 알고리즘은 1970대 초 John Holland에 의해 개발되었다. 유전자 알고리즘은 생물학적인 진화론(진화 및 유전원리)을 최적화문제를 풀기 위해 모방한 계산모델이다.^{4,5)}

1) Coding 방법

대기차량을 구하기 위한 유전자 알고리즘을 적용하기 위해 주기 및 녹색시간을 결정변수로 설정하였다. 교차로 1개를 고려해 볼 때 총 결정변수는 6개로 구성

되는데, 주기에 대한 변수가 6개 비트, 녹색시간에 대한 변수가 각각 5개 비트로서 총 31개의 2진 비트 수를 할당하였다.

$$\{f_1 : f_2 : f_3 : f_4 : f_5 : f_6\}$$

$$\{101011:11101:10011:10001:10101:10101\}$$

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

2) Decoding 방법

Coding된 2진 비트를 통해 주기 및 녹색시간을 산출하기 위해 Decoding을 수행하였다. Decoding 수행 과정은 다음 <그림 3>과 같다.⁴⁾

Decoding 과정의 예를 보이기 위해 최소 및 최대 주기의 범위를 각각 50초 및 120초로 가정하였을 때 주기는 다음과 같은 방식으로 Decoding이 이루어진다.

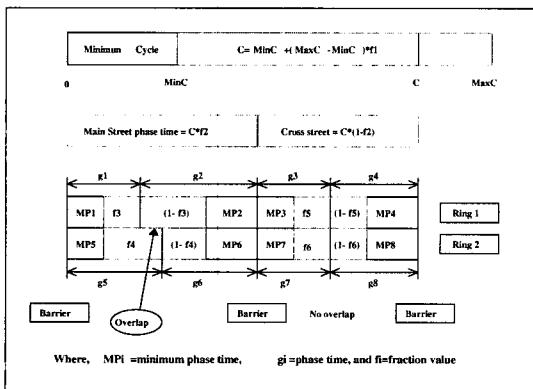
$$Cycle = MinC + (MaxC - MinC) \times f_1$$

여기서,

$MaxC$: 최대주기길이(초)

$MinC$: 최소주기길이(초)

특히, 여기서 주기에 해당하는 2진 비트수는 총 6개이므로 f_1 은 다음과 같은 과정을 통해 실수 값으로 전환된다.



<그림 3> A fraction-based decoding scheme

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

$$\{101101\}_2 = \{45\}_{10}, f_1 = \frac{45}{2^6 - 1} = 0.714$$

따라서, 결과적으로 주기는 다음과 같이 계산된다.

$$Cycle = 50 + (120 - 50) \times 0.714 = 100초$$

반면, 주도로(main street) 및 부도로(cross street)의 녹색시간은 f_2 를 이용하여 계산하게 되며 다음과 같은 방식으로 Decoding이 이루어진다.

$$Green_{MAIN} = mp_1 + mp_2 + (Cycle - MP) \times f_2$$

$$Green_{CROSS} = mp_3 + mp_4 + (Cycle - MP) \times (1 - f_2)$$

여기서,

mp_{ij} : i 교차로 j 이동류의 최소녹색시간(초)

MP_i : i 교차로 최소녹색시간의 합

$$Max (mp_1 + mp_2 + mp_3 + mp_4,$$

$$mp_5 + mp_6 + mp_7 + mp_8)$$

여기서, f_2 는 5개의 비트 수가 할당되었으며 이를 십진수로 전환하면 다음과 같다.

$$\{11101\}_2 = \{29\}_{10}, f_2 = \frac{29}{2^5 - 1} = 0.935$$

따라서, 결과적으로 주도로 및 부도로의 녹색시간은 다음과 같다.

$$(단, mp_1, mp_3, mp_5, mp_7 = 10초,$$

$$mp_2, mp_4, mp_6, mp_8 = 15초)$$

$$Green_{MAIN} = 10 + 15 + (100 - 50) \times 0.935 = 71초$$

$$Green_{CROSS} = 10 + 15 + (100 - 50) \times (1 - 0.935)$$

$$= 29초$$

또한, 각 이동류별 녹색시간은 $f_3 \sim f_6$ 을 통해 산출되며 그 예로 NEMA방식의 1,2번 녹색시간에 대해서만 그 Decoding과정을 보이고자 한다. 그 방식은 다음과 같다.

$$G_1 = mp_1 + ((Cycle - MP) \times f_2) \times f_3$$

$$G_2 = mp_2 + ((Cycle - MP) \times f_2) \times (1 - f_3)$$

여기서, f_3 역시 5개의 비트 수를 할당하였으며 이를 십진수로 전환하면 다음과 같다.

$$\{01010\}_2 = \{10\}_{10}, f_3 = \frac{10}{2^5 - 1} = 0.323$$

따라서, G_1, G_2 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} G_1 &= 10 + ((100 - 50) \times 0.935) \times 0.323 = 25 \text{ 초} \\ G_2 &= 15 + ((100 - 50) \times 0.935) \times (1 - 0.323) \\ &= 46 \text{ 초} \end{aligned}$$

위 예에서 보인 방식과 동일한 방법으로 $G_1 \sim G_8$ 까지 계산하면

- ① $Cycle = MinC + (MaxC - MinC) \times f_1$
- ② $Green_{main} = mp_1 + mp_2 + (Cycle - MP) \times f_2$
- ③ $Green_{cross} = mp_3 + mp_4 + (Cycle - MP) \times (1 - f_2)$
- 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 $G_8 = mp_8 + ((Cycle - MP) \times (1 - f_2)) \times (1 - f_6)$

3. 적합도함수 설정

본 연구에서 최적화하는 신호시간 요소는 개별교차로의 새로운 주기가 시작될 때마다 대기차량수를 최소화 하는 신호주기 및 녹색시간이다. 적합도함수는 개별교차로의 8개의 이동류의 대기차량수의 합으로 구성하였으며, 대기차량수를 최소화하는 각 결정변수의 최적해를 찾도록 적합도함수를 설정하였다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

Find C, G_{ij}

$$\text{Maximize } (-1) \times \sum_{i=1}^8 Q_E^k$$

Subject to

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

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

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

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

$$MinC \leq C \leq MaxC, G_{ij}, C \geq 0$$

여기서,

C : 주기길이(초)

i : 교차로

j : 각 교차로의 이동류(NEMA방식)

G_{ij} : i 교차로 j 이동류의 녹색시간(초)

N_i : 총 교차로 수

N_m : 교차로의 총 이동류 수

MG_{ij} : i 교차로 j 이동류의 최소녹색시간

$MinC$: 최소주기(초)

$MaxC$: 최대주기(초)

개별교차로의 신호시간은 모든(8방향) 이동류의 대기차량의 길이의 합을 최소화시키는 적합도함수에 의하여 산출된다. 개별교차로의 신호시간은 유전자 알고리즘을 적용하여 계산되는데, 이는 개별 교차로의 모든 이동류의 대기차량수를 최소화하는 신호시간이다. 즉, 구하여야 할 최적 해는 $\sum_{i=1}^8 Q_E^k$ 를 최소화하는 이동류별 녹색시간 및 신호주기이다.

그런데, 위의 적합도함수의 경우 따로 연동방향을 고려하여 최적의 연동값을 구하는 것이 아니라 각 교차로의 주기가 종료되는 시점마다 그 때의 모든 이동류의 녹색시간 끝에서의 대기차량길이의 합이 최소화되는 방향으로 주기 및 녹색시간을 산정하기 때문에, 완전한 연동효과를 보기는 힘들다.

그러나, 실제로 간선도로에서는 읍셋을 고려하는 것이 중요하기 때문에, 전략적인 측면에서 적합도함수를 각각 Balanced offset, Inbound offset, Outbound offset의 경우로 변형하여¹⁾ 신호시간을 산출할 수 있다.

1) Balanced offset은 이동류 1, 2, 5, 6에 Inbound offset은 이동류 1, 6에 Outbound offset은 2, 5에 각각 가중치를 두었으며, 나머지 이동류는 대기차량이 골고루 분산시키도록 적합도함수를 변형함.

1) Balanced Offset

$$FV = ((Q_E^1)^2 + (Q_E^2)^2 + (Q_E^5)^2 + (Q_E^6)^2) + ((Q_E^3 - Q_{ave})^2 + (Q_E^4 - Q_{ave})^2) + ((Q_E^7 - Q_{ave})^2 + (Q_E^8 - Q_{ave})^2)$$

2) Inbound Offset

$$FV = ((Q_E^1)^2 + (Q_E^6)^2) + ((Q_E^2 - Q_{ave})^2 + (Q_E^3 - Q_{ave})^2 + (Q_E^4 - Q_{ave})^2 + (Q_E^5 - Q_{ave})^2 + (Q_E^7 - Q_{ave})^2 + (Q_E^8 - Q_{ave})^2)$$

3) Outbound Offset

$$FV = ((Q_E^2)^2 + (Q_E^5)^2) + ((Q_E^1 - Q_{ave})^2 + (Q_E^3 - Q_{ave})^2 + (Q_E^4 - Q_{ave})^2 + (Q_E^6 - Q_{ave})^2 + (Q_E^7 - Q_{ave})^2 + (Q_E^8 - Q_{ave})^2)$$

여기서,

FV : 적합도함수

Q_E^k : k 이동류의 녹색시간 종료후 대기차량수 (k=1~8)

Q_{ave} : 8방향의 평균 대기차량수

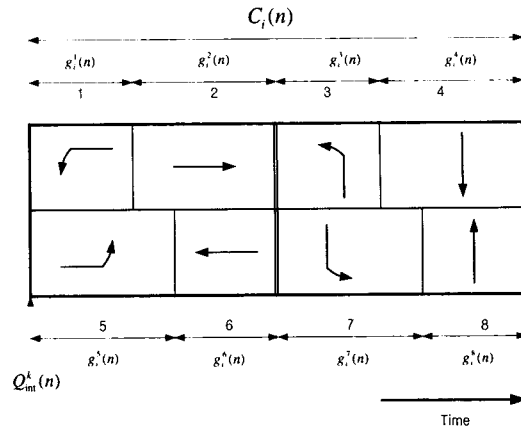
위의 적합도함수에서 각 대기차량 항은 교차로에서의 대기차량의 용량을 나누어준 값을 이용하였다.

4. 적합도함수의 대기차량길이 산출 알고리즘

1) 외곽접근로에서의 대기차량 산출

녹색시간이 끝나는 시점의 대기차량의 길이를 작게 하기 위해서 현시점(새주기, 새현시를 결정해야 하는 시점)에서의 대기차량의 수를 기준으로 하여 t 시간 이후의 대기차량의 수를 선형적인 방법으로 예측하여 그 크기를 최소화함으로써 대기차량의 길이를 최소화한다.

그 예로 2번 이동류의 대기차량의 길이를 구해보기로 한다. <그림 4>에서 보는 바와 같이 새로운 주기를 계산할 시점에서의 대기차량의 길이를 $Q_{int}^2(n)$ 라 하고, 차량도착율을 λ 라고 하면, $g_i^2(n)$ 의 끝 시점에서의 대기차량의 길이를 구하는 방법은 다음과 같다.



<그림 4> 이동류의 주기 및 녹색시간

즉 대기차량의 초기 값에 녹색시간이 끝날 때까지 초당 λ 의 도착율로 차량이 유입되므로 $\lambda \{g_i^1(n) + g_i^2(n)\}$ 의 항이 더해지고 녹색시간 동안 d_2 라는 비로 차량이 빠져나간다고 하면 총 빠져나가는 차량 수는 $d_2 \cdot g_i^2(n)$ 가 된다. 그래서 위 식을 정리하여 녹색시간 끝에서의 대기 차량의 대수 Q_E^2 를 구하면 아래와 같다

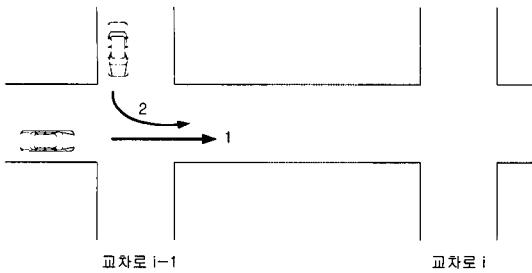
$$Q_E^2 = \max [Q_{int}^2(n) + \lambda \cdot \{g_i^1(n) + g_i^2(n)\} - d_2 \cdot g_i^2(n), 0]$$

나머지 이동류에 대해서도 앞과 동일한 방법으로 구한다.

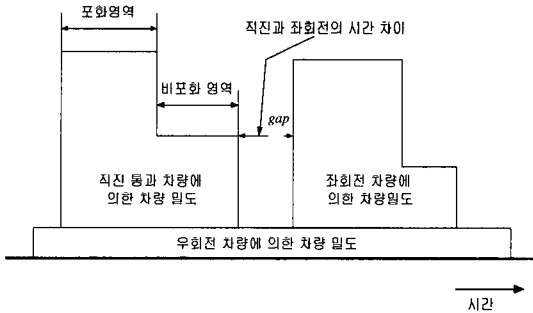
2) 중앙교차로에서의 대기차량 산출

중앙 교차로에서의 대기 차량수의 계산은 인접 교차로에서 출발한 차량군이 현 교차로에 도착하는 시점에 따라서 대기차량의 수가 달라지기 때문에 외곽 접근로 보다 좀 복잡하다. 즉 도착율이 외곽 교차로와는 달리 상수가 아니라 시간의 함수로 표현되어야 함을 의미한다. 중앙교차로에서도 역시 동일한 Lead-Lead 패턴의 신호가 적용되며, 직진 차량에 대해서 먼저 고찰해 보겠다.

옆 교차로와 연계가 되는 교차로에서의 예측되는 대기차량 길이는 시간에 따라 선형적 도착이 아니므로 전 교차로에서 현 교차로로 진입하는 차량의 시각이 매우 중요하다.



〈그림 5〉 선형화회전에서 차량의 출발순서



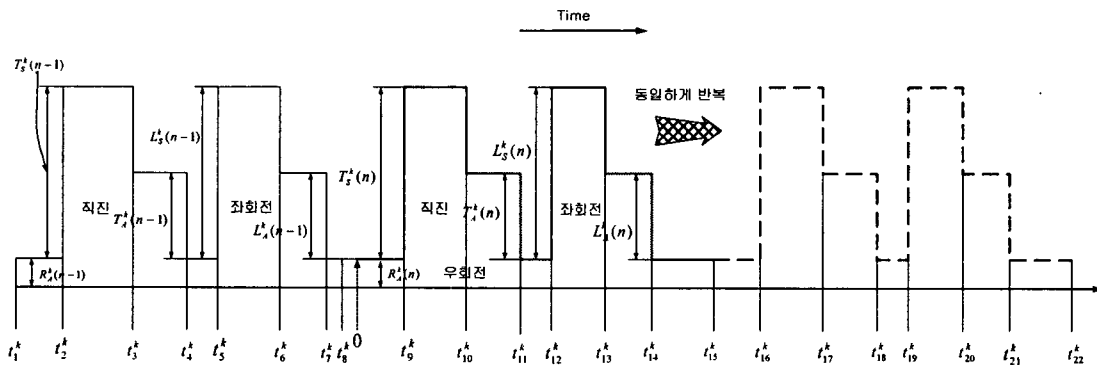
〈그림 6〉 중앙교차로에서의 도착율의 변화

단 여기서 모든 시간에 걸쳐 우회전 차량은 균일하게 도착한다고 보았고 출발시의 차량밀도가 링크사이를 이동하면서 형태가 크게 변하지 않는다고 가정하였다. 위 문제를 선형부등식으로 풀기 위해 도착율을 Saturation Flow rate로 도착하는 포화영역과 그렇지 않은 부분으로 나누어 사각형 모양으로 근사화하였다. 그러므로 위 〈그림 6〉과 같은 차량 도착 밀도를 갖는 차량군이 현 교차로에 도착한다고 가정하고 이에 대하여 녹색시간 끝에서의 대기 차량의 길이가 최소가 되도록 하는 현시와 주기를 결정한다. 본연구

는 신호주기의 변동을 기반으로 하는 동적 신호시간 결정모형의 초기연구로서 모형개발과정을 정립하기 위하여 차량통행특성을 가능한 단순화 시켰다.

〈그림 7〉은 전 주기의 도착율과 현주기에서 도착할 도착율을 함께 표현한 것이다. $t_0^k \sim t_8^k$ 는 전 주기를 나타내며, $t_9^k \sim t_{15}^k$ 는 인접 교차로의 가장 최근 주기를 나타낸다. $t_{16}^k \sim t_{22}^k$ 는 $t_9^k \sim t_{15}^k$ 사이의 도착율이 충분한 길이일 때는 필요가 없으나 불충분할 경우를 대비하여 동일한 도착율이 반복된다는 가정 하에 연장하여 계산한다. 0점은 시간 축 어디에서나 위치 가능하다. 위 도착율은 Unit Step함수²⁾의 합으로 표현이 가능하다.

$$\begin{aligned}
 f(t) = & R_A^k(n-1)\{u(t-t_1^k) - u(t-t_8^k)\} + \\
 & T_S^k(n-1)\{u(t-t_2^k) - u(t-t_3^k)\} + \\
 & T_A^k(n-1)\{u(t-t_3^k) - u(t-t_4^k)\} + \\
 & L_S^k(n-1)\{u(t-t_5^k) - u(t-t_6^k)\} + \\
 & L_A^k(n-1)\{u(t-t_6^k) - u(t-t_7^k)\} + \\
 & R_A^k(n)\{u(t-t_8^k) - u(t-t_{22}^k)\} + \\
 & T_S^k(n)\{u(t-t_9^k) - u(t-t_{10}^k)\} + \\
 & T_A^k(n)\{u(t-t_{10}^k) - u(t-t_{11}^k)\} + \\
 & L_S^k(n)\{u(t-t_{12}^k) - u(t-t_{13}^k)\} + \\
 & L_A^k(n)\{u(t-t_{13}^k) - u(t-t_{14}^k)\} + \\
 & T_S^k(n)\{u(t-t_{16}^k) - u(t-t_{17}^k)\} + \\
 & T_A^k(n)\{u(t-t_{17}^k) - u(t-t_{18}^k)\} + \\
 & L_S^k(n)\{u(t-t_{18}^k) - u(t-t_{19}^k)\} + \\
 & L_A^k(n)\{u(t-t_{20}^k) - u(t-t_{21}^k)\}
 \end{aligned}$$



〈그림 7〉 도착율 그림

2) 가로축을 t라 할 때 t가 0보다 클 때 함수값이 항상 1, 작을 때는 항상 0인 함수를 u(t)라고 함.

이를 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 f(t) = & R_A^k(n-1) \times u(t-t_1^k) \\
 & + T_S^k(n-1) \times u(t-t_2^k) \\
 & + \{T_A^k(n-1) - T_S^k(n-1)\} \times u(t-t_3^k) \\
 & - T_A^k(n-1) \times u(t-t_4^k) \\
 & + L_S^k(n-1) \times u(t-t_5^k) \\
 & + \{L_A^k(n-1) - L_S^k(n-1)\} \times u(t-t_6^k) \\
 & - L_A^k(n-1) \times u(t-t_7^k) \\
 & + \{R_A^k(n) - R_A^k(n-1)\} \times u(t-t_8^k) \\
 & + T_S^k(n) \times u(t-t_9^k) \\
 & + \{T_A^k(n) - T_S^k(n)\} \times u(t-t_{10}^k) \\
 & - T_A^k(n) \times u(t-t_{11}^k) \\
 & + L_S^k(n) \times u(t-t_{12}^k) \\
 & + \{L_A^k(n) - L_S^k(n)\} \times u(t-t_{13}^k) \\
 & - L_A^k(n) \times u(t-t_{14}^k) \\
 & + T_S^k(n) \times u(t-t_{16}^k) \\
 & + \{T_A^k(n) - T_S^k(n)\} \times u(t-t_{17}^k) \\
 & - T_A^k(n) \times u(t-t_{18}^k) + L_S^k(n) \times u(t-t_{19}^k) \\
 & + \{L_A^k(n) - L_S^k(n)\} \times u(t-t_{20}^k) \\
 & - L_A^k(n) \times u(t-t_{21}^k) \\
 & - R_A^k(n) \times u(t-t_{22}^k)
 \end{aligned}$$

만약 $t_j^k < 0$ 이면 ($j=1$ to 22) $t_j^k = 0$ 이다.

Unit Step 함수의 앞에 곱해지는 수는 상수이므로 이를 a_j 라고 하면

$$f(t) = \sum_{j=1}^{22} a_j \cdot u(t-t_j^k) \text{로 표현된다.}$$

일반적으로 녹색 시간이 t_s^k 에서부터 시작해서 t_e^k 에서 끝나며 서비스율이 d_k , 도착율 함수를 $f_k(t)$, 초기 대기 차량이 Q_{int}^k 라면 녹색시간 끝에서의 대기 차량 길이 Q_E^k 는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned}
 & \max\{Q_{int}^k + \int_0^{t_e^k} f_k(t) dt - d_k \cdot (t_e^k - t_s^k), 0\} \\
 & = \max\{Q_{int}^k + \int_0^{t_e^k} f_k(t) dt - d_k \cdot g_i^k(n), 0\}
 \end{aligned}$$

로 표현된다.

$f_k(t)$ 는 Unit Step 함수의 합으로 표현되므로 이는 다시 쓰면

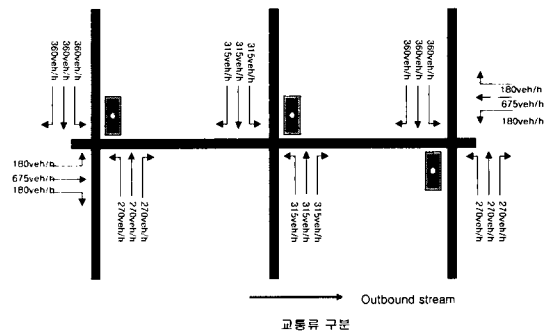
$$Q_E^k = \max\{Q_{int}^k + \sum_{j=1}^{22} a_j^k \cdot \max(t_e^k - t_j^k, 0) - d_k \cdot g_i^k(n), 0\}$$

이 된다.

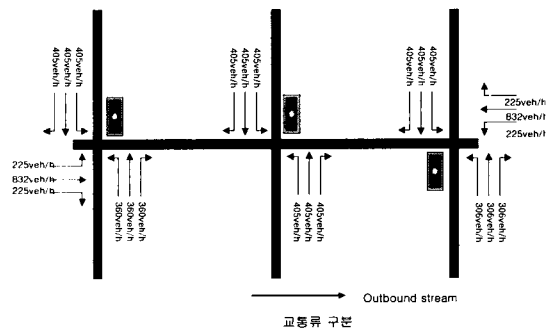
III. 모형의 적용결과 및 평가

1. 적용대상 네트워크

제안 모형은 다음 <그림 8, 9>와 같이 3개의 교차로를 가진 간선도로를 기준으로 교통상황이 비혼잡상태 ($V/C=0.8$)인 경우와 혼잡상태(V/C)1.0인 경우로 나누어 각각 15분씩 시뮬레이션을 실시하였다. 본연구는 모형개발의 초기연구로서 적용대상 네트워크의 차로수, 현시순서, 포화교통류율, 평균주행속도, 링크 길이, 유입교통량 등을 가능한 단순화시켰다. 본연구에서의 공통실험 조건은 다음과 같다.



<그림 8> 비혼잡상태에서의 외곽접근로 도착율



<그림 9> 혼잡상태에서의 외곽접근로 도착율

- 차로수 : 접근로별로 직진, 좌회전, 우회전 각각 1차로
- 현시순서 : Lead-Lead인 NEMA 현시체계
- 최소주기 : 57초, 최대주기 : 160초
- 최소녹색시간
 - 주방향(동-서) 직진이동류 : 18초
 - 부방향 직진 및 좌회전 이동류 : 13초
- 초기대기차량수 : 각 이동류별로 5대
- 포화교통류율 : 1800대/시
- 평균주행속도 : 40km/h
- 링크길이 : 500m
- 교통상황별 교통량 : 비혼잡상태(〈그림 8〉), 혼잡상태(〈그림 9〉)

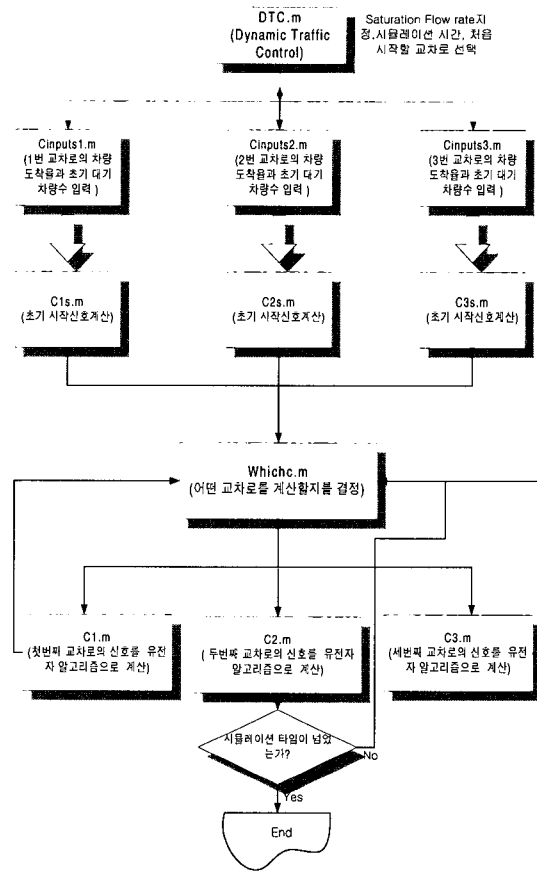
2. 모형 구현

프로그램은 MATLAB을 이용하여 구현하였는데, 프로그램이 실행되면 우선 포화교통류율 및 시뮬레이션시간을 입력한다. 각 교차로의 초기 대기차량수와 차량도착율을 통해 각 교차로의 초기 최적신호주기를 LP를 이용하여 구한다. 그 후, 교차로간 주기 시작시점이 다르기 때문에 주기의 위상을 정의하여 교차로간 상대적 시간 관계를 결정하게 되는데, 이 때 신호주기가 먼저 종결되는 교차로를 결정한 후 유전자 알고리즘을 이용하여 그 교차로에서 모든(8방향) 이동류의 녹색시간이 종결될 때 총대기차량수가 최소로 되는 최적신호시간 및 녹색시간을 계산하게 된다. 제안모형의 전체흐름도는 〈그림 10〉과 같다.

3. 모형의 적용결과

1) 기본전제

제안모형은 동적으로 교통상황에 따라 이동류별 대기차량수를 최소화하는 신호주기, 녹색시간, 연동값을 산출한다. 모형결과를 비교분석하기 위해서는 제안모형의 산출결과를 기존모형의 산출결과와 비교분석함이 필요하다. 그러나, 기존 모형의 경우 Off-line 신호시간 계획을 기본으로 하므로 매 주기마다 교통상황에 따라 대기차량의 길이를 최소화하는 방향으로 신호주기와



〈그림 10〉 제안모형 전체 흐름도

녹색시간이 달라지는 본 모형과 직접적으로 비교하기는 어렵다. 따라서 본 연구에서는 동일조건 하에서 정주기식³⁾으로 수행되었을 때의 통과차량수, 신호주기, 녹색시간, 대기차량수 등을 구하여 비교하였다.

〈표 1, 2〉는 제안모형의 결과를 비교분석하기 위하여 TRANSYT-7F에 의해 산출된 정주기식 신호시간이다. 이 정주기식 신호시간은 최적주기 및 녹색시간을 비혼잡상태와 혼잡상태로 구분하여 산출하였다.

〈표 1〉 비혼잡상태의 정주기식 신호시간 (TRANSYT-7F 산출결과, 단위:초)

구분	EB		WB		NB		SB	
	LT	TH	LT	TH	LT	TH	LT	TH
교1	21	39	26	26	21	39	26	26
교2	21	40	25	26	21	40	25	26
교3	21	39	26	26	21	39	26	26

3) 동일한 조건을 가지고 TRANSYT-7F에서 최적화를 통해 산출된 각 교차로의 주기 및 녹색시간을 정주기식의 TOD값으로 이용

〈표 2〉 혼잡상태의 정주기식 신호시간
(TRANSYT-7F 산출결과, 단위:초)

구분	EB		WB		NB		SB	
	LT	TH	LT	TH	LT	TH	LT	TH
교1	28	59	34	36	28	59	34	36
교2	29	55	36	37	29	55	36	37
교3	29	60	32	36	29	60	32	36

2) 결과분석

다음결과를 제안모형과 정주기식 신호시간의 결과로 산출된 신호주기, 녹색시간, 대기차량수, 통과차량수를 비혼잡상태와 혼잡상태로 구분하여 나타낸 것이다. 결과비교는 3개의 교차로 중 중앙교차로를 중심으로 설명하였다.

(1) 비혼잡상태(V/C=0.8)

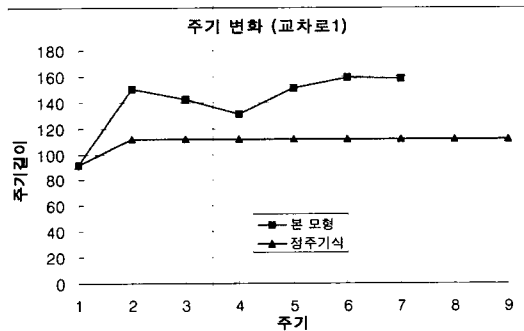
① 신호주기변화

제안모형에서는 이동류의 대기차량수의 총합을 최소화시키는 신호시간을 매주기별로 산출한다.

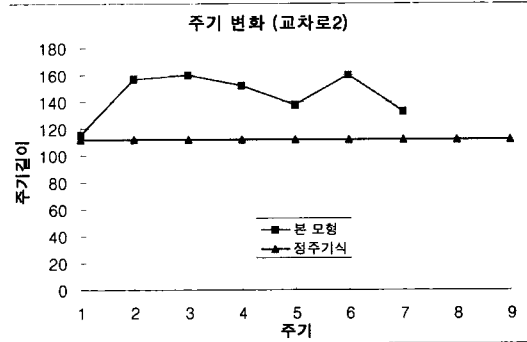
〈그림 11~13〉은 제안모형과 정주기식의 신호주기를 비교한 것이다. 분석결과 교차로 전체적으로 볼 때 제안모형의 주기가 정주기식의 주기보다 높은 값이 산출되었으며, 또한 매 주기에 따라 주기변동이 일어났다.

② 대기차량수

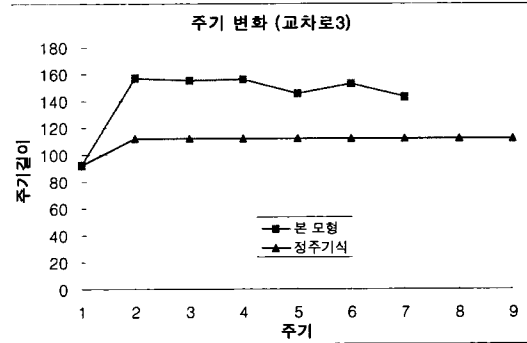
〈표 3~6〉는 제안모형과 정주기식 신호시간의 결과로 산출된 교차로별, 이동류별 대기차량수를 나타낸 것이다. 각 이동류별로 볼 때 정주기식의 경우 특정한 이동류에 대기차량이 크게 나타나는 반면, 제안모형의 경우 대기차량수가 적게 나타났다.



〈그림 11〉 교차로1의 주기변화



〈그림 12〉 교차로2의 주기변화



〈그림 13〉 교차로3의 주기변화

〈표 3〉 교차로1의 대기차량수(본모형)

교차로1	1	2	3	4	5	6	7	8	합	누계
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	1	2	0	0	0	1	0	4	4
4	0	0	0	0	0	0	1	0	1	5
5	1	0	0	0	0	0	0	0	1	6
6	0	5	3	0	2	1	0	0	11	17
7	1	2	0	3	0	1	5	0	12	29

〈표 4〉 교차로1의 대기차량수(정주기식)

교차로1	1	2	3	4	5	6	7	8	합	누계
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	3	0	0	0	0	0	0	3	3
3	0	6	0	0	0	1	0	0	7	10
4	0	9	0	0	0	3	0	0	12	22
5	0	12	0	0	0	5	0	0	17	39
6	0	15	0	0	0	7	0	0	22	61
7	0	18	0	0	0	9	0	0	27	88
8	0	21	0	0	0	12	0	0	33	121
9	0	24	0	0	0	15	0	0	39	160

〈표 5〉 교차로2의 대기차량수(본모형)

교차로2	1	2	3	4	5	6	7	8	합	누계
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	4	0	4	4
4	1	0	0	0	0	0	0	3	4	8
5	0	0	0	0	1	0	0	0	1	9
6	0	0	1	0	0	0	0	1	2	11
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11

〈표 6〉 교차로2의 대기차량수(정주기식)

교차로2	1	2	3	4	5	6	7	8	합	누계
1	0	0	2	3	0	0	2	3	10	10
2	0	0	1	1	0	0	1	1	4	14
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14

③ 통과차량수

〈표 7, 8〉는 제안모형과 정주기식 신호시간의 결과로 산출된 교차로별, 이동류별 통과차량수를 나타낸 것이다. 시뮬레이션시간(15분) 동안 제안 모형이 정주기식에 비해 더 많은 차량이 통과하였다.

〈표 7〉 교차로2의 통과차량수(본모형)

교차로2	1	2	3	4	5	6	7	8	합	누계
1	5	5	11	15	5	5	12	15	73	73
2	5	20	13	13	5	25	17	14	112	185
3	9	30	15	14	12	20	10	14	124	309
4	11	26	14	13	9	23	19	11	126	435
5	12	23	12	12	9	16	11	15	110	545
6	12	14	14	14	6	34	15	13	122	667
7	11	9	13	11	9	18	12	12	95	762

(2) 혼잡상태(V/C>1)

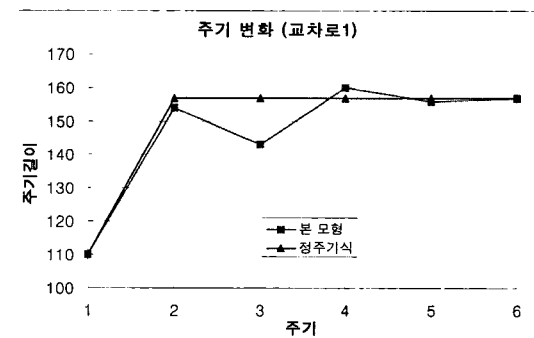
혼잡상태에서는 제안모형의 효과가 정주기식에 비하여 크게 개선된 것으로 분석되었다. 이는 적합도합수가 모든 방향의 대기차량수 총합의 최소화로 구성되었기 때문이다.

〈표 8〉 교차로2의 통과차량수(정주기식)

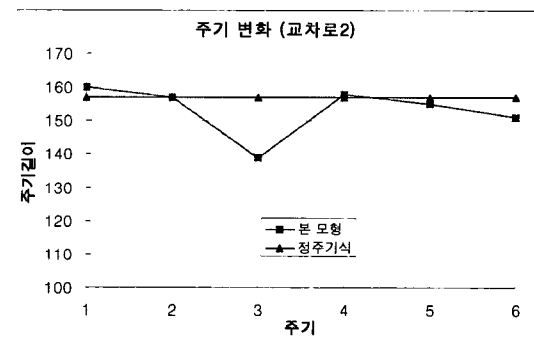
교차로2	1	2	3	4	5	6	7	8	합	누계
1	5	9	11	12	5	9	11	12	74	74
2	4	10	11	12	4	12	11	12	76	150
3	6	18	10	11	8	13	11	11	88	238
4	7	18	9	9	8	14	10	9	84	322
5	7	18	9	9	8	14	10	9	84	406
6	7	18	9	9	8	14	10	9	84	490
7	7	18	9	9	8	14	10	9	84	574
8	7	18	9	9	8	14	10	9	84	658
9	7	18	9	9	8	14	10	9	84	742

① 신호주기변화

〈그림 14~16〉은 제안모형과 정주기식의 신호주기를 비교한 것이다. 혼잡상태 역시 매주기마다 주기변동이 일어났다.



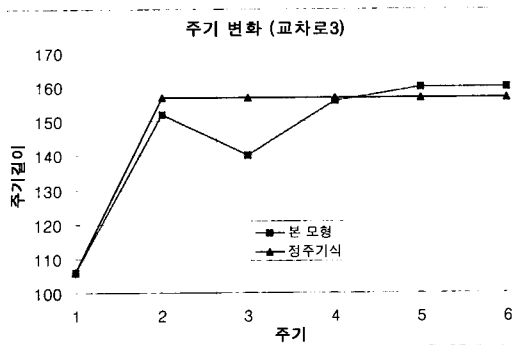
〈그림 14〉 교차로1의 주기변화



〈그림 15〉 교차로2의 주기변화

② 대기차량수

〈표 9~12〉은 제안모형과 정주기식 신호시간의 결과로 산출된 교차로별, 이동류별 대기차량수를 나타낸 것이다. 각 이동류별로 볼 때 정주기식의 경우보다 제안모형의 대기차량수가 적게 생성되었다.



〈그림 16〉 교차로3의 주기변화

〈표 9〉 교차로2의 대기차량수(본모형)

교차로2	1	2	3	4	5	6	7	8	합	누계
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	5	1	0	0	5	0	0	11	11
3	3	10	4	0	6	9	3	0	35	46
4	0	0	1	0	3	0	1	0	5	51
5	2	1	0	0	1	0	6	0	10	61
6	3	0	1	0	0	0	2	2	8	69

〈표 10〉 교차로2의 대기차량수(정주기식)

교차로2	1	2	3	4	5	6	7	8	합	누계
1	0	0	6	6	0	0	3	9	24	24
2	0	0	11	7	0	5	7	13	43	67
3	0	0	16	8	0	14	11	17	66	133
4	0	0	21	9	0	23	15	21	89	222
5	0	0	26	10	0	32	19	25	112	334
6	0	0	31	11	0	40	23	29	134	468

〈표 11〉 교차로3의 대기차량수(본모형)

교차로3	1	2	3	4	5	6	7	8	합	누계
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	2	0	1	0	1	4	4
3	0	1	0	0	2	6	0	4	13	17
4	0	7	0	2	0	15	2	2	28	45
5	1	10	5	0	0	24	2	5	47	92
6	4	9	6	0	1	27	6	0	53	145

〈표 12〉 교차로3의 대기차량수(정주기식)

교차로3	1	2	3	4	5	6	7	8	합	누계
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	1	0	6	4	0	11	11
3	0	2	0	2	0	19	10	0	33	44
4	0	4	0	3	0	32	16	0	55	99
5	0	5	0	4	0	45	22	0	76	175
6	0	7	0	5	0	58	28	0	98	273

③ 통과차량수

〈표 13~16〉은 제안모형과 정주기식 신호시간의 결과로 산출된 교차로별, 이동류별 통과차량수를 나타낸 것이다. 시뮬레이션시간 동안 제안모형이 정주기식보다 많은 차량이 통과하였다.

〈표 13〉 교차로1의 통과차량수(본모형)

교차로1	1	2	3	4	5	6	7	8	합	누계
1	5	22	19	29	20	5	21	27	148	148
2	4	30	14	17	12	13	18	14	122	270
3	5	23	15	16	9	20	15	16	119	389
4	12	36	19	6	10	38	13	14	148	537
5	11	20	10	29	9	22	22	17	140	677
6	8	35	17	13	7	36	15	15	146	823

〈표 14〉 교차로1의 통과차량수(정주기식)

교차로1	1	2	3	4	5	6	7	8	합	누계
1	5	15	13	18	11	5	14	17	98	98
2	1	28	13	17	11	4	16	16	106	204
3	12	28	13	17	13	18	16	18	135	339
4	12	28	13	17	13	18	16	20	137	476
5	12	28	13	17	13	18	16	22	139	615
6	12	28	13	17	13	18	16	24	141	756

〈표 15〉 교차로2의 통과차량수(본모형)

교차로2	1	2	3	4	5	6	7	8	합	누계
1	5	5	13	23	5	5	20	23	99	99
2	6	25	21	18	6	29	20	18	143	242
3	7	29	12	15	7	29	13	16	128	370
4	11	21	20	17	12	25	19	17	142	512
5	9	23	19	17	14	18	10	17	127	639
6	9	24	17	17	10	15	25	12	129	768

〈표 16〉 교차로2의 통과차량수(정주기식)

교차로2	1	2	3	4	5	6	7	8	합	누계
1	5	20	13	17	5	28	17	23	128	128
2	7	16	13	17	8	27	17	26	131	259
3	8	16	13	17	6	27	17	26	130	389
4	8	16	13	17	6	27	17	26	130	519
5	8	16	13	17	6	27	17	26	130	649
6	8	16	13	17	6	27	17	26	130	779

(3) 분석결과 요약

〈표 17, 18〉는 15분 시뮬레이션동안의 각교차로의

〈표 17〉 비혼잡 상태

비혼잡(V/C=0.8)		교차로1	교차로2	교차로3	합계
대기차량수	본 모형	29	11	42	82
	정주기식	160	14	186	360
통과차량수	본 모형	815	762	807	2384
	정주기식	814	742	772	2328

〈표 18〉 혼잡 상태

혼잡(V/C>1.0)		교차로1	교차로2	교차로3	합계
대기차량수	본 모형	190	69	145	404
	정주기식	335	468	273	1076
통과차량수	본 모형	823	768	791	2382
	정주기식	756	779	681	2216

대기차량수 및 통과차량수의 결과를 비교한 것이다. 분석결과를 보면 비포화상태나 포화상태인 경우 모두 본 모형이 정주기식보다 대기차량이 적게 발생되었으며, 녹색시간동안의 통과차량수의 경우 그다지 큰 차이가 나지는 않았지만 본 모형이 정주기식보다 많았다.⁴⁾

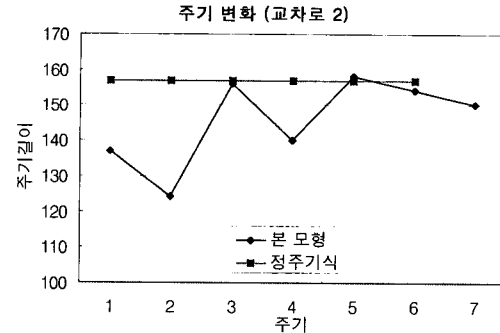
그 이유로는 정주기식은 초기에는 최적화가 가능하나, 시간이 지남에 따라 교통상황이 변화함에도 불구하고 주기 및 녹색시간이 변화하지 않는다. 이에 비해 본 모형의 경우 각 교차로마다 매 주기가 종결되고 새로운 주기가 시작될 시점에 그 때의 교통상황에 맞추어 최적의 주기 및 녹색시간이 계산되었기 때문이다.

3) 목적함수의 변형 및 적용

앞 절에서의 분석결과는 적합도함수를 교차로 총대기차량수의 최소화로 설정하여 분석한 결과이다. 그러나, 실제로 간선도로에서는 읍셋을 고려하는 것이 중요하기 때문에, 전략적인 측면에서 적합도함수를 각각 Balanced offset, Inbound offset, Outbound offset 의 경우로 변형하여 신호시간을 산출할 수 있다.

(1) Balanced offset (동서방향)

본절에서는 적합도함수를 동서방향 이동류의 대기차량수를 최소화시키는 Balanced Offset으로 변형하여 신호시간을 산출하였다. 분석결과 적합도함수에 따라 주방향에 가중치를 둔 동서방향 이동류의 대기차량수가 현저하게 줄었으며, 나머지 이동류에는 끌고루 대기차량수가 분산되었다. 〈그림 17〉은 balanced offset일 경우 교차로 2의 주기 변화를 나타낸 것이다.



〈그림 17〉 교차로2의 주기변화

〈표 19~22〉, 〈표 23~26〉은 각각 제안모형과 정주기식 신호시간의 결과로 산출된 교차로별, 이동류별 대기차량수 및 통과차량수를 나타낸 것이다. 결과에서와 같이 매주기마다 주방향(양방향) 직진이동류의 대기차량수가 현저하게 줄어들었으며, 주방향 직진이동류에 많은 차량이 통과하였다. 분석결과 교차로 2의 총대기차량수는 본모형은 512대/7주기로서 정주기식의 468대/7주기 보다 많이 산출되었다. 이는 적합도함수를 동서방향 이동류의 대기차량수를 최소화하도록 설정하였기 때문이며, 대향이동류인 1-5, 2-6, 3-7,

〈표 19〉 교차로1의 대기차량수(본모형)

교차로1	1	2	3	4	5	6	7	8	합
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	3	1	0	0	0	0	3	7
3	0	7	8	6	4	0	7	7	39
4	4	1	11	6	2	1	6	13	44
5	9	2	10	14	3	3	12	11	64
6	5	8	15	10	2	2	16	11	69
7	7	12	17	13	3	6	16	14	88
합	25	33	62	49	14	12	57	59	311

〈표 20〉 교차로1의 대기차량수(정주기식)

교차로1	1	2	3	4	5	6	7	8	합
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	9	4	1	0	0	3	2	19
3	0	17	7	2	0	5	8	4	43
4	0	25	10	3	0	10	13	6	67
5	0	33	13	4	0	15	18	8	91
6	0	41	16	5	0	20	23	10	115
합	0	125	50	15	0	50	65	30	335

4) 이 때 적합도함수는 교차로 1개의 모든 이동류의 대기차량대수를 최소화 함.

4-8 이동류의 대기차량수를 상호비교하면 본모형이 적절한 신호시간을 산출하고 있음을 쉽게 알 수 있다.

〈표 21〉 교차로2의 대기차량수(본모형)

교차로2	1	2	3	4	5	6	7	8	합
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	2	7	5	3	4	2	4	6	33
3	6	0	5	11	3	0	8	7	40
4	7	9	14	13	3	0	16	13	75
5	7	11	18	18	0	6	18	21	99
6	14	10	22	21	1	6	22	24	120
7	20	15	24	23	3	9	22	29	145
합	56	52	88	89	14	23	90	100	512

〈표 22〉 교차로2의 대기차량수(정주기식)

교차로2	1	2	3	4	5	6	7	8	합
1	0	0	6	6	0	0	3	9	24
2	0	0	11	7	0	5	7	13	43
3	0	0	16	8	0	14	11	17	66
4	0	0	21	9	0	23	15	21	89
5	0	0	26	10	0	32	19	25	112
6	0	0	31	11	0	40	23	29	134
합	0	0	111	51	0	114	78	114	468

〈표 23〉 교차로1의 통과차량수(본모형)

교차로1	1	2	3	4	5	6	7	8	합
1	5	15	13	18	11	5	14	17	98
2	5	29	14	17	6	14	18	12	115
3	9	37	10	10	6	40	10	10	132
4	6	37	11	18	12	31	19	10	144
5	8	36	18	10	8	36	10	18	144
6	14	29	8	22	12	31	14	16	146
7	10	32	16	16	8	34	19	13	148
합	57	215	90	111	63	191	104	96	927

〈표 24〉 교차로1의 통과차량수(정주기식)

교차로1	1	2	3	4	5	6	7	8	합
1	5	15	13	18	11	5	14	17	98
2	1	28	13	17	11	4	16	16	106
3	12	28	13	17	13	18	16	18	135
4	12	28	13	17	13	18	16	20	137
5	12	28	13	17	13	18	16	22	139
6	12	28	13	17	13	18	16	24	141
합	54	155	78	103	74	81	94	117	756

〈표 25〉 교차로2의 통과차량수(본모형)

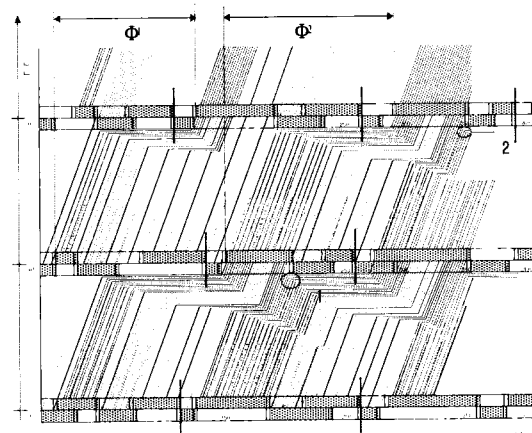
교차로2	1	2	3	4	5	6	7	8	합
1	5	5	14	20	5	5	13	20	87
2	7	26	12	11	5	28	16	8	113
3	6	39	18	10	16	28	12	16	145
4	11	34	6	14	15	26	10	10	126
5	12	35	14	13	21	12	16	11	134
6	6	38	14	14	13	30	13	15	143
7	5	35	15	15	11	26	18	12	137
합	52	212	93	97	86	155	98	92	885

〈표 26〉 교차로2의 통과차량수(정주기식)

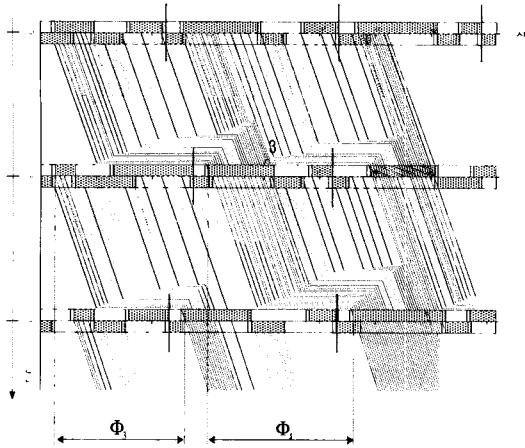
교차로2	1	2	3	4	5	6	7	8	합
1	5	20	13	17	5	28	17	23	128
2	7	16	13	17	8	27	17	26	131
3	8	16	13	17	6	27	17	26	130
4	8	16	13	17	6	27	17	26	130
5	8	16	13	17	6	27	17	26	130
6	8	16	13	17	6	27	17	26	130
합	44	100	78	102	37	163	102	153	779

다음 〈그림 18, 19〉는 Balanced offset일 경우 각각 2번 직진이동류(서→동), 6번 직진이동류(동→서)에 대한 시공도를 나타낸 것이다. 개별교차로의 녹색시간은 NEMA의 Dual-Ring 체계를 따라 나타내었다.

그림에서 개개의 선은 해당되는 녹색시간에 교차로를 통과하는 차량의 궤적을 나타내며, 일부점선은 각각 중간에 소거되는 차량을 나타낸다. 〈그림 18〉의 경우 2번 교차로의 두 번째 주기의 2번 직진의 녹색시간이



〈그림 18〉 Time-Space Diagram (서→동)

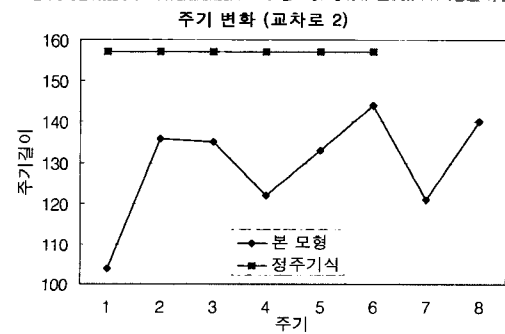


〈그림 19〉 Time-Space Diagram (동→서)

끝날 때 7대(1), 2의 경우는 3번 교차로의 3번째 주기의 2번 직진의 녹색시간이 끝날 때 5대(2)의 대기차량인 발생하며, 〈그림 19〉의 경우 2번 교차로의 두 번째 주기의 2번 직진의 녹색시간이 끝날 때 2대(3)의 대기차량인 발생한다. 또한 〈그림 18, 19〉를 통해 각각의 경우 주기 및 녹색시간을 계산할 때마다 그 때의 교통상황의 최적화를 위해 주기 및 녹색시간이 변화함에 따라 읍셋값의 변화도 있다는 것을 알 수 있다.

(2) Inbound offset (동→서)

본절에서는 적합도함수를 서쪽방향 이동류의 대기차량수를 최소화시키는 In-bound Offset으로 변형하여 신호시간을 산출하였다. 분석결과 서쪽방향 이동류의 대기차량수가 현저하게 줄었으며, 나머지 이동류에는 끌고루 대기차량수가 분산되었다. 〈그림 20〉은 inbound offset일 경우 교차로 2의 주기 변화를 나타낸다.



〈그림 20〉 교차로2의 주기변화

〈표 27, 28〉, 〈표 29, 30〉은 각각 제안모형과 정주기식 신호시간의 결과로 산출된 교차로별, 이동류별 대기차량수 및 통과차량수를 나타낸 것이다. 결과에서와 같이 매주기마다 주방향 직진이동류(동→서)의 대기차량이 줄어들었으며, 주방향 직진이동류에 많은 차량이 통과하였다. 분석결과 교차로 2의 총대기차량수는 본모형은 818대/7주기로서 정주기식의 468대/7주기 보다 많이 산출되었다. 이는 적합도함수를 서쪽방향 이동류(이동류번호 1, 6)의 대기차량수를 최소화하도록 설정하였기 때문으로서 교차로의 전체 대기차량 수는 많으나 In-bound 이동류, 특히 6번 이동류의 대기차량수는 현저하게 감소하여 제어 목표를 충분히 모형이 반영하고 있음을 알 수 있다.

〈표 27〉 교차로2의 대기차량수(본모형)

교차로2	1	2	3	4	5	6	7	8	합
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	6	2	6	2	1	3	5	25
3	3	12	10	10	9	0	9	13	66
4	7	22	18	13	15	0	14	19	108
5	5	27	19	19	16	0	18	19	123
6	9	27	26	24	19	0	27	24	156
7	10	26	26	24	22	5	27	24	164
8	8	26	22	32	27	7	28	26	176
합	42	146	123	128	110	13	126	130	818

〈표 28〉 교차로2의 대기차량수(정주기식)

교차로2	1	2	3	4	5	6	7	8	합
1	0	0	6	6	0	0	3	9	24
2	0	0	11	7	0	5	7	13	43
3	0	0	16	8	0	14	11	17	66
4	0	0	21	9	0	23	15	21	89
5	0	0	26	10	0	32	19	25	112
6	0	0	31	11	0	40	23	29	134
합	0	0	111	51	0	114	78	114	468

〈표 29〉 교차로2의 통과차량수(본모형)

교차로2	1	2	3	4	5	6	7	8	합
1	5	5	12	17	5	5	12	17	78
2	7	27	17	9	6	31	15	11	123
3	6	38	6	12	5	33	11	7	118
4	5	34	6	11	5	25	9	8	103
5	13	24	15	9	6	33	9	15	124
6	5	41	9	12	7	35	9	12	130
7	11	16	14	14	6	22	14	14	111
8	10	25	21	8	5	31	15	15	130
합	62	210	100	92	45	215	94	99	917

〈표 30〉 교차로2의 통과차량수(정주기식)

교차로2	1	2	3	4	5	6	7	8	합
1	5	20	13	17	5	28	17	23	128
2	7	16	13	17	8	27	17	26	131
3	8	16	13	17	6	27	17	26	130
4	8	16	13	17	6	27	17	26	130
5	8	16	13	17	6	27	17	26	130
6	8	16	13	17	6	27	17	26	130
합	44	100	78	102	37	163	102	153	779

〈표 32〉 교차로2의 대기차량수(정주기식)

교차로2	1	2	3	4	5	6	7	8	합
1	0	0	6	6	0	0	3	9	24
2	0	0	11	7	0	5	7	13	43
3	0	0	16	8	0	14	11	17	66
4	0	0	21	9	0	23	15	21	89
5	0	0	26	10	0	32	19	25	112
6	0	0	31	11	0	40	23	29	134
합	0	0	111	51	0	114	78	114	468

(3) Outbound offset (서→동)

본절에서는 적합도함수를 동쪽방향 이동류의 대기차량수를 최소화시키는 Out-bound Offset으로 변형하여 신호시간을 산출하였다. 분석결과 동쪽방향 이동류의 대기차량수가 현저하게 줄었으며, 나머지 이동류에는 끌고루 대기차량수가 분산되었다. 〈그림 21〉은 outbound offset일 경우 교차로 2의 주기 변화를 나타낸다.

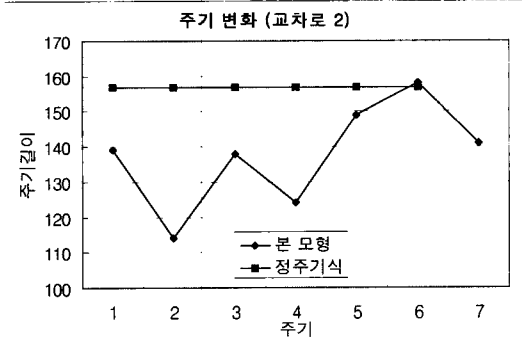
〈표 31, 32〉, 〈표 33, 34〉은 각각 제안모형과 정주기식 신호시간의 결과로 산출된 교차로별, 이동류별 대기차량수 및 통과차량수를 나타낸 것이다. 결과에서와 같이 매주기마다 주방향 직진이동류(서→동)의

〈표 33〉 교차로2의 통과차량수(본모형)

교차로2	1	2	3	4	5	6	7	8	합
1	5	5	14	21	5	5	13	20	88
2	5	31	10	6	8	21	9	7	97
3	5	32	12	13	10	27	12	13	124
4	6	22	14	15	12	15	15	14	113
5	5	54	5	5	14	33	5	5	126
6	6	27	19	22	12	10	14	27	137
7	7	32	13	14	9	23	21	6	125
합	39	203	87	96	70	134	89	92	810

〈표 34〉 교차로2의 통과차량수(정주기식)

교차로2	1	2	3	4	5	6	7	8	합
1	5	20	13	17	5	28	17	23	128
2	7	16	13	17	8	27	17	26	131
3	8	16	13	17	6	27	17	26	130
4	8	16	13	17	6	27	17	26	130
5	8	16	13	17	6	27	17	26	130
6	8	16	13	17	6	27	17	26	130
합	44	100	78	102	37	163	102	153	779



〈그림 21〉 교차로2의 주기변화

대기차량이 줄어들었으며, 주방향 직진이동류에 많은 차량이 통과함을 알 수 있다.

〈표 31〉 교차로2의 대기차량수(본모형)

교차로2	1	2	3	4	5	6	7	8	합
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	2	6	8	7	0	14	9	6	52
3	6	0	10	10	2	12	11	9	60
4	10	6	9	9	2	11	10	10	67
5	16	10	23	21	0	17	23	22	132
6	20	6	17	17	0	14	21	13	108
7	25	8	22	19	0	18	20	24	136
합	79	36	89	83	4	86	94	84	555

IV. 결론 및 제언

기존의 연동모델의 경우 고정된 주기 하에서 평균적인 유입교통량을 측정한 후 선형최적화 및 언덕오름기법 등을 적용하므로 실시간으로 교차로를 최적화하기 어려우며, 최적해를 찾는 데 있어서 지역해에 빠질 수도 있다. 본연구에서는 하류교차로의 이동류별 대기차량수를 상류교차로에서의 유입교통량을 이용하여 예측하고, 이동류별 대기차량수를 최소로 하는 최적주기 및 현시를 유전자 알고리즘을 이용하여 산출하였다.

분석결과 적합도 함수를 이동류의 전체 대기차량수를 최소화하도록 설정한 경우 비포화상태나 포화상태의 경우 모두 정주기식보다는 동적으로 신호를 계산하는 본 모형이 더 좋은 결과를 나타내었다. 또한 적합도 함수를 변형하여 주방향(In-bound 또는 Out-bound) 직진이동류의 대기차량수를 최소화하도록 설정한 경우 주방향 이동류의 대기차량이 상대적으로 다른 이동류에 비해 적게 산출되어 주방향에 대한 연동효과를 볼 수 있었다. 또한 따로 연동값을 고려하지 않고, 각 교차로의 주기가 종료되는 시점마다 그 때의 대기차량길이가 최소화되는 방향으로 주기 및 녹색시간을 산정 하였기 때문에, 주기 및 윽셋값도 변동하였다. 비포화상태에서는 본 모형의 경우 정주기식보다는 결과가 좋았지만 완전하게 대기차량을 소거시키지 못하였으며, 주기 및 녹색시간도 전체적으로 교통량에 비해 큰 값을 최적값으로 산출하였다. 이는 적합도 함수를 비포화상태의 일반적인 목적함수인 지체시간 최소화가 아닌 대기차량 최소화로 설정하였기 때문으로 분석된다. 이러한 문제를 보완하기 위하여 본연구진은 적합도 함수를 지체시간최소화로 설정하여 신호주기 변동 신호시간을 산출하는 연구를 현재 진행하고 있다.

본 연구에서는 가상의 자료를 사용하였기 때문에, 미시적인 시뮬레이션 및 현장실시를 통한 검증 및 프로그램의 속도향상이 필요하다. 또한 지금 현재의 모형은 차량군이 생성되면 시간이 지나도 차량군의 형태가 그대로 유지된다고 가정하였는데, 차량군 분산을 고려하여야 하며, 시간에 따라 도착율의 변화를 통해 교통상황에 더욱더 능동적으로 대처할 수 있는지에 대한 검증이 필요하다. 또한 유전자 알고리즘을

이용하여 최적 신호주기 및 녹색시간을 산출하는 과정에서 초기난수를 변화시키면 신호시간 산출결과가 달라지는 것을 확인할 수 있었다. 본연구는 신호주기 변동을 기반으로 한 최적신호시간 산출의 기초연구로서 이러한 문제는 향후 지속적인 연구를 통하여 보완할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Robert L. Gordon, Traffic Control Systems Handbook, FHWA-SA-95-032, 1996.
2. K. G. Courage and C E. Wallace, "TRANSYT-7F Users Guide", Transportation Research Centre, University of Florida, Gainesville, Florida, December, 1991.
3. John D.C. Little, "Optimal Signal Timing for Arterial Signal System", Federal Highway Administration, 1980.
4. Park B. K., "Development of Genetic Algorithm-Based Signal Optimization Program for Oversaturated Intersection", Texas A&M University, 1998.
5. 공성곤외, "유전자 알고리즘", 그린출판사, 1996
6. Matthew J. Huber, "Traffic Flow Theory", Department of Civil and Mineral Engineering University of Meinnosota.
7. 윤경섭, "대기차량 최소화를 위한 동적 교통 신호 연동모델", 서울시립대학교 대학원 제어계측공학과 석사학위 논문, 1999.