

■ 論 文 ■

## 도시부 도로 네트워크에서 교통신호제어와 결합된 경로기반 통행배정 모형 연구

A Methodology of Path based User Equilibrium Assignment  
in the Signalized Urban Road Networks

**한 동 희**

(서울대학교 환경대학원 박사과정)

**박 준 환**

(前 서울시정개발연구원 부연구위원)

**이 영 인**

(서울대학교 환경대학원 교수)

**임 강 원**

(서울대학교 환경대학원 교수)

— 목 차 —

- |  |   |
|--|---|
| <p>I. 서론</p> <p>II. 기존문헌고찰</p> <p>III. 모형의 구축</p> <p style="padding-left: 20px;">1. 모형의 개요</p> <p style="padding-left: 20px;">2. 신호제어변수 최적화 방법</p> | <p style="padding-left: 20px;">3. 통행배정모형</p> <p>IV. 모형의 검증 및 평가</p> <p style="padding-left: 20px;">1. 실험개요</p> <p style="padding-left: 20px;">2. 실험결과 및 분석</p> <p>V. 결론</p> <p>참고문헌</p> |
|--|---|

Key Words : 네트워크 신호최적화, 경로기반통행배정, 유전자 알고리즘, 신호지체산정, 교통망설계  
Signal Optimization, Bi-level Problem, Column Generation, Genetic Algorithm, Path Based Assignment

— 요 약 —

교통신호와 개별 통행자의 경로선택은 서로 상호작용하는 관계이다. 통행자의 경로 선택은 교통신호에 따라 결정될 수 있으며 또한 최적의 교통신호 역시 이동류별 교통량에 따라 달라지게된다. 본 연구는 양방향 링크를 포함하는 4현시 교차로로 구성된 네트워크에서 모든 이동류에 대하여 교통신호의 영향을 반영할 수 있는 통행배정 모형을 구축하고 이를 신호최적화 문제와 결합하여 네트워크의 총 지체를 최소화하는 신호제어변수와 통행배정 결과를 산출하는 모형을 bi-level problem으로 구축하였다. 본 연구에서 사용된 경로기반 통행배정 모형은 M.H. Xu 등이 제안한 Column Generation 방법의 일종인 heuristic Equilibrium Assignment 기법을 기반으로 하여 교차로의 이동류별 통행비용을 고려할 수 있도록 수정하여 구성하였으며 지체최소화를 목적함수로하는 신호최적화 방법론으로는 Genetic Algorithm을 사용하였다. 본 모형을 모의네트워크에 적용하여 실험한 결과 네트워크의 통행비용합수를 최소화하는 신호변수와 통행자의 경로선택 결과를 산출하였다.

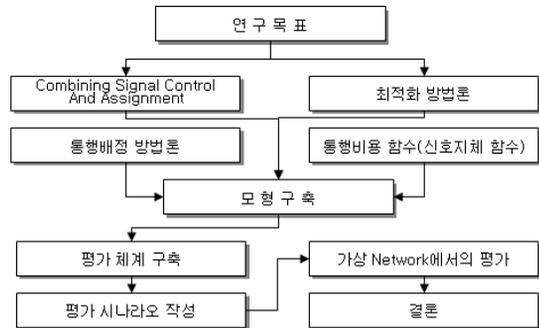
In an urban network controlled by traffic signals, there is an interaction between the signal timing and the routes chosen by individual road users. This study develops a bi level programming model for traffic signal optimization in networks with path based traffic assignment. In the bi level programming model, genetic algorithm approach has been proposed to solve upper level problem for a signalized road network. Path based traffic assignment using column generation technique which is proposed by M.H. Xu, is applied at the lower-level. Genetic Algorithm provides a feasible set of signal timings within specified lower and upper bounds signal timing variables and feeds into lower level problem. The performance of this model is investigated in numerical experiment in a sample network. In result, optimal signal settings and user equilibrium flows are made.

### 1. 서론

교통신호와 개별 통행자의 경로선택은 서로 상호작용하는 관계이다. 통행자의 경로 선택은 교통신호에 따라 결정될 수 있으며 또한 최적의 교통신호 역시 이동류별 교통량 즉 운전자들의 경로선택 결과에 따라 달라지게 된다. 이는 교통신호를 제어하는 관리자와 도로이용자간의 상호작용에 따라 교통상황이 결정되어지는 것을 의미한다. 도시부 도로망의 경우 신호지체로 인한 통행비용의 영향은 매우 크지만 전통적인 균형통행배정 모형에서는 대부분 신호교차로의 특성을 제대로 반영하지 못하고 있다. 그 이유는 전통적으로 미시적인 교차로 신호제어와 거시적인 통행배정모형이 별개의 분야로 연구되어 왔기 때문으로 판단된다. 따라서 교통공학적 측면에서 신호변수 결정 시 링크통행량은 외부에서 주어진 것으로 가정하여 왔으며, 교통계획측면에서 통행배정 시 교통신호에 따른 영향은 적절하게 고려되지 않는 경향이 있었다. 또한, 신호네트워크의 경우 통행비용(신호지체)의 영향은 두 개의 링크사이(노드)에서 발생하게 되는데 기존의 링크기반 통행배정 모형은 이를 적절하게 고려하기 힘든 구조를 가지고 있기 때문으로 판단된다.

교통신호를 반영하기위해 통행배정모형이 갖추어야할 조건을 살펴보면, 신호제어의 기본단위는 교차로내에서의 이동류이기 때문에 모든 통행량의 기본단위가 이동류가 되어야 한다는 점이다. 즉, 동일한 링크내의 서로다른 이동류(직진, 좌회전, 우회전)의 통행비용을 각각 반영할 수 있어야 한다. 또한 각각의 OD 쌍에 대한 모든 경로정보를 손쉽게 확인할 수 있어야 한다. 왜냐하면 신호지체는 특정 노드와 연결된 두 개의 링크사이에서 발생하기 때문에 단지 링크 교통량을 통해서만 통행비용을 계산할 수 없기 때문이다. 이와 같은 특성을 고려할때 경로기반 통행배정 기법의 연구가 필요한 것으로 판단되었다.

본 연구는 4현시 신호교차로로 구성된 네트워크의 모든 이동류에 대하여 교통신호의 영향을 반영할 수 있는 통행배정 모형을 구축하고, 이를 신호최적화 문제와 결합하여 네트워크의 총 지체를 최소화하는 신호제어변수와 사용자평형 통행배정 결과를 산출하는 모형을 bi-level 모형으로 구축하였다. 본 연구에서 사용된 경로기반 통행배정 모형은 M.H. Xu 등이 제안한 Column Generation



(그림 1) 연구수행체계

방법의 일종인 heuristic Equilibrium Assignment 기법<sup>1)</sup>을 기반으로 하여 교차로의 이동류별 통행비용을 고려할 수 있도록 수정하여 구축하였으며 신호최적화 방법론으로는 유전자알고리즘을 사용하였다. 연구 수행의 전체적인 체계는 (그림 1)과 같다.

### II. 기존연구고찰

도시부 도로망에서의 현실적인 통행배정을 위해서는 교통신호의 영향을 적절하게 고려하는 것이 매우 중요하다는 점에서 다양한 연구가 진행되어 왔다.

통행배정모형과 교차로의 신호제어의 결합은 Allsop (1974)가 시작하였고, 그 이후로 다양한 통행배정방법과 신호최적화 방법의 결합이 시도되었다. Allsop는 신호제어를 명시적으로 통행배정모형에 고려하였으며 순차 최적통행배정법을 사용하였다. Charlesworth (1977)는 기존의 통행배정모형에 TRANSYT 모형을 결합하였으며, Chen(1989)은 신호최적화를 상위문제로, 통행배정을 하위문제로 구성한 2단계 수리문제로 구성하였다. 이청원(1998)의 연구에서는 신호와 통행배정이 결합된 문제를 해결하기 위하여 다양한 방법론을 설정하여 비교하였는데, 통행비용함수로는 Webster 지체식을 사용하였고 문제해결을 위한 방법론으로는 시뮬레이티드 어닐링, 유전자알고리즘, 지역탐색법, iterative optimization and assignment 방법 등을 사용하였다. Halim Ceylan (2005)은 혼잡이 없는 교통망에서 확률적 통행배정기법과 TRANSYT모형을 이용하였으며 유전자 알고리즘을 통한 접근법을 제시하였다.

1) M.H. Xu, William H.K. Lam, H. Shao, G.F. Luan, A heuristic algorithm for network equilibration, Applied Mathematics and Computation 174 (2006) 430 - .446

신호제어와 통행배정을 결합한 모형의 특징은 크게 신호제어의 목적함수, 신호최적화 전략 그리고 통행배정방법 등으로 나누어 생각할 수 있다. 기존연구에서는 주로 webster 지체식과 webster의 신호전략을 사용하거나 최근에는 TRANSYT 모형을 이용하였으며 통행배정은 대부분 기존의 Frank-Wolfe 방법이 사용되었다. 다만, webster방법의 경우 과포화가 진행됨에 따라 지체가 무한대로 커지는 단점이 있으며 기존 통행배정모형의 경우 신호제어를 위한 교통량 자료를 산출하기 위해서는 경로교통량을 추정하는 모형(PFE: path flow estimator)이 필요하다.

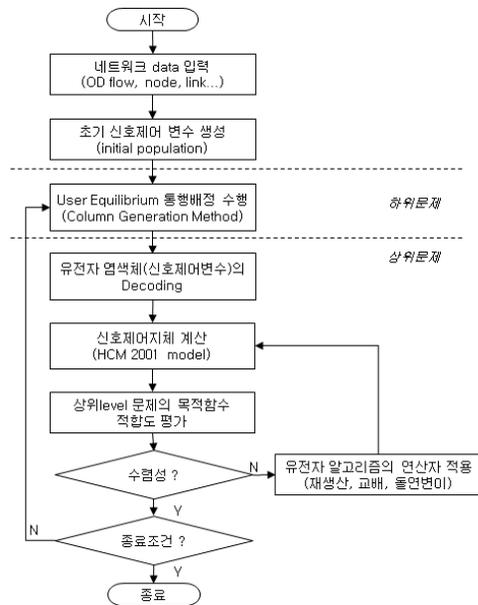
기존 연구와 비교되는 본 연구의 특징을 정리하면 다음과 같다. 교통신호의 영향은 동일한 링크에서도 진행방향(직진, 좌회전, 우회전)에 따라 다르게 발생하게 된다. 즉 통행배정을 위한 비용함수가 링크단위로 정의될 수 없기 때문에 기존의 배정모형을 적용하는데 어려움이 따르게 된다. 때문에 본 연구에서는 경로기반 통행배정 기법을 기반으로 위의 문제를 효과적으로 반영할 수 있는 통행배정모형을 구축하였다. 그리고 교통신호변수 설계를 위해서는, 기존에 교통량에 따라 신호를 결정하는 Webster 방식, 주차선(critical lane volume) 방법이 아닌 교통류의 균일지체와 증분지체 및 연동효과를 고려하는 HCM(2001)지체모형과 유전자 알고리즘을 결합하여 최적신호를 설계할 수 있는 모형을 구축하여 적용하였다.

### III. 모형의 구축

#### 1. 모형의 개요

본 모형에서는 통행배정과 신호최적화를 통해 교통망 내의 모든 차량의 평균 신호제어지체를 최소화하는 것을 목적함수로 설정하였다. bi level 문제로 구성된 본 모형의 전체 흐름도를 나타내면 <그림 2>와 같다.

본 모형의 목적함수는 신호지체를 최소화하는 신호제어변수와 균통행량을 산출하는 것이며 신호제어목표는 대상 네트워크상에 사용자 균형을 이룬 경로별 교통량의 제어지체를 최소화할 수 있는 신호변수(주기, 현시, 오프셋)를 산출하는 것이다. 여기서 사용자 균형을 이룬 경로란 최소한 1개 이상의 신호현시를 포함하는 경로를 의미한다. 본 모형의 목적함수는 상위문제의 목적함수와 동일하며 식(1)과 같다.



<그림 2> 모형의 구성

$$\text{Minimize } Z(q, \psi) = \sum_{l \in L} \sum_{m \in l} q_l^m \cdot D(\psi, q_l^m) \quad (1)$$

subject to  $\psi^l \leq \psi \leq \psi^u$

여기서,

$D(\psi, q_l^m)$  : 링크  $l$ 의 이동류  $m$ 의 평균신호제어 지체

$\psi$  : 신호제어변수(신호주기, 녹색시간 길이, 오프셋)

$\psi^l, \psi^u$  : 신호제어변수  $\psi$ 의 상위, 하위 한계

$q_l^m$  : 링크  $l$ 의 이동류  $m$ 의 교통량

$q = [q_a^m; \forall a \in L], L$  : 링크집합

$m$  : 이동류(직진, 좌회전, 우회전)

본 모형은 대상 네트워크상의 하류부 노드가 신호교차로인 모든 링크에 포함된 모든 이동류에 대하여 이동류별 교통량을 지체식(2001년 HCM식)에 곱하여 산출되는 총 지체를 최소화하는 것이다.

#### 2. 신호제어변수 최적화 방법

##### 1) 유전자 알고리즘 개요

일반적으로 네트워크의 최적 신호제어변수 설계는 비

블록문제이며, 네트워크의 크기가 커질수록 대부분의 경사탐색법(gradient based algorithm)으로는 해결이 어려운 것으로 알려져 있다<sup>2)</sup>. 신호최적화 문제에서는 유전자 알고리즘이 지역해의 위험성이 낮으며 다른 방법론과 비교하여 상대적으로 우수한 결과를 산출할 수 있는 것으로 연구된 바 있다<sup>3)</sup>.

본 연구에서는 모형의 상위수준 목적함수가 네트워크 상의 복수교차로의 신호변수설계인 점과 알고리즘의 효율성을 고려하여 최적화 방법론으로 유전자 알고리즘을 적용하였다. 유전자 알고리즘은 유전학과 자연의 진화를 수치적으로 모사한 확률 기반 탐색법으로 해를 찾는 데 있어 기존의 최적화 알고리즘들이 겪었던 함수의 연속성, 미분가능성, 선형성 등의 문제를 겪지 않아도 되는 장점이 있다. 그러나 많은 반복 계산으로 인해 계산 비용이 많이 필요한 문제에 대해서 적용이 어려운 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 실수코딩(real-coded)유전자 알고리즘과 엘리트 전략(elitist strategy)을 사용하였다. 실수 코딩의 경우 어떤 벡터  $X \in R^n$ 의 염색체  $s$ 의 염색체 길이  $l$ 은 벡터  $X$ 의 차원  $n$ 과 같게 되며, 복수개의 교차로의 신호제어변수와 같이 상당히 긴 염색체를 구성해야 하는 신호최적화의 경우 이진코딩에 비해 효율적인 방법이 될 수 있다고 판단된다. 연속적인 탐색공간에서는 유전자를 실수로 표현하는 것이 더 자연스러우며, 정확히 변수와 일대일 일치하는 실수유전자를 가짐으로써 정

밀도는 알고리즘을 수행하는 컴퓨터의 성능에만 영향을 받게 된다. 엘리트 전략은 모의진화과정에서 유전연산자의 확률적 속성으로 한 세대의 최적 개체가 살아남지 못하고 소멸되는 경우, 좋은 특성의 유전자를 잃게 되어 탐색이 침체되는 원인을 제거하기 위한 전략이다.

2) 유전자 염색체 및 코딩방법

유전자 염색체(Chromosome)는 교통망을 구성하는 신호교차로의 주기, 오프셋 및 녹색시간길이 등 교통신호 최적화를 위해 필요한 신호제어 변수로 구성되었다.

$$decision\ variable\ \psi : |C_1, C_2, \dots, C_n \parallel Bar_{1n}, Bar_{2n} \parallel$$

$$Offset_{1n}, Offset_{2n} \parallel Y_{11}, Y_{12}, \dots, Y_{14}, \dots, |Y_{n1}, Y_{n2}, \dots, Y_{n4}|$$

본 연구에서의 신호현시체계는 NEMA 방식의 Dual Ring 방식을 사용하였으며 실수코딩을 위해서 신호주기, 베리어 및 녹색시간 길이는 최소, 최대값 사이의 비율로, 오프셋은 기준교차로에 대한 상대오프셋으로 주기길이에 대한 비율로 표현하여 코딩하였다. 유전자 염색체의 encoding 과정 및 decoding과정은 다음과 같다.

(1) encoding 과정

$$rC_n = \frac{C_n - Min C_n}{Max C_n - Min C_n} , rOffset_n = Offset_n / C_n$$

$$rY_{1n} = \frac{g_{1n}}{g_{1n} + g_{2n}} , rY_{2n} = \frac{g_{3n}}{g_{3n} + g_{4n}}$$

$$rY_{3n} = \frac{g_{5n}}{g_{5n} + g_{6n}} , rY_{4n} = \frac{g_{7n}}{g_{7n} + g_{8n}}$$

$$rBar_{1n} = \frac{Max(Y_{1n}, Y_{3n})}{Max(Y_{1n}, Y_{3n}) + Max(Y_{2n}, Y_{4n})}$$

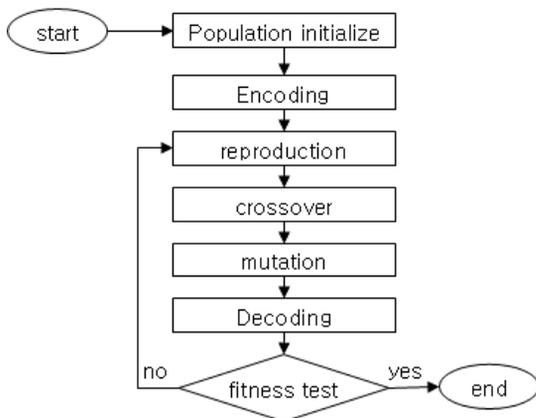
$$rBar_{2n} = \frac{Max(Y_{2n}, Y_{4n})}{Max(Y_{1n}, Y_{3n}) + Max(Y_{2n}, Y_{4n})}$$

(2) decoding 과정

$$C_n = (Max C_n - Min C_n) \cdot rC_n + Min C_n$$

$$Offset_n = rOffset_n \times C_n$$

$$barrier1 = \left( C_n - \sum_{i=1}^4 \min g_i \right) \cdot rBar_{1n} + \sum_{i=1}^2 \min g_i$$



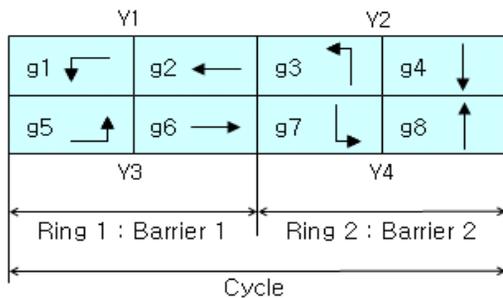
〈그림 3〉 유전자 알고리즘 흐름도

2) Chungwon Lee, Combined traffic signal control and traffic assignment : algorithm, implementation and numerical results, The university of texas at austin December, 1998  
 3) Halim Ceylan, Michael GH Bell, Genetic algorithm solution for stochastic equilibrium transportation networks under congestion, Transportation Research Part B 39 (2005) 169~185

$$\begin{aligned}
 barrier2 &= \left( C_n - \sum_{i=1}^4 \min g_i \right) \cdot rBar_{2n} + \sum_{i=3}^4 \min g_i \\
 g_{1n} &= \left( barrier1 - \sum_{i=1}^2 \min g_{in} \right) \cdot rY_{1n} + \min g_{1n} \\
 g_{2n} &= barrier1 - g_{1n} \\
 g_{3n} &= \left( barrier2 - \sum_{i=3}^4 \min g_{in} \right) \cdot rY_{2n} + \min g_{3n} \\
 g_{4n} &= barrier2 - g_{3n}
 \end{aligned}$$

여기서

- $rC_n$  : 교차로 n의 주기비율(min~max주기)
- $rOffset_n$  : 주기에 대한 옵셋비율(0초~주기길이)
- $g_1 \sim g_n$  : 교차로n의 1~8녹색신호시간(초)
- $ming_1 \sim g_8$  : 1~8 최소녹색시간(초)
- $barrier1$  : 신호베리어( $g_1+g_2$  또는  $g_5+g_6$ )(초)
- $barrier2$  : 신호베리어( $g_3+g_4$  또는  $g_7+g_8$ )(초)
- $rY_{1n}$  : 신호베리어 1에서의 g1비율
- $rBar_{1n}$  : 신호주기에서의 베리어비율
- $MaxC, MinC$  : 최대, 최소주기길이(초)



〈그림 4〉 Dual Ring & NEMA Phase system

### 3) 적합도 검정 (Fitness function)

각 세대별로 생성되는 염색체의 적합도는 개별 염색체의 신호제어변수에 따른 네트워크 상의 모든 차량들의 평균 신호지체로 결정되어진다.

적합도 함수는 HCM(2001)지체모형을 사용하였다.

$$\begin{aligned}
 d &= 0.50C \left[ \left( 1 - \frac{g_c}{C} \right) / \left( 1 - \frac{g_c}{C} \cdot \min(X, 1.0) \right) \right] \times PF \\
 &+ 900 \left[ (X-1) + \sqrt{(X-1)^2 + \frac{4}{cT} X} \right]
 \end{aligned}$$

여기서,

- $d$  : 신호제어지체(초/대)

- $d_1$  : 균일지체
- $d_2$  : 증분지체
- $C$  : 신호주기길이(초)
- $X$  : 해당 차로군의 포화도
- $g_e$  : 유효녹색시간(초)
- $c$  : 차로군의 용량(vph)
- $T$  : 분석시간길이 (시간)
- $PF$  : 연동계수

연동효과를 반영하기 위한 연동계수(PF)는 연동의 대상이 되는 이동류와 동일한 신호현시에 진행되는 모든 이동류에 적용하였다. 본 연구에서는 최적화과정을 통해 산출된 주기, 옵셋 및  $T_c$  값을 사용하여 산출된 옵셋편의울과 역시 최적화과정에서 계산된 현시율( $g/C$ )을 사용하여 〈표 1〉를 통해 연동계수를 산출하였다.

$$TVO = \frac{T_c - Offset}{C}$$

여기서

- $TVO$  : 옵셋 편의율
- $Offset$  : 신호연동을 위한 옵셋(초)
- $T_c$  : 신호에 의한 가·감속, 정지 등의 영향을 받지 않는 구간의 속도와 링크길이로부터 구한 시간 (초)

〈표 1〉 옵셋편의울과 g/C에 따른 연동계수(PF)

TVO	g/C								
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.0	1.04	0.86	0.76	0.71	0.71	0.73	0.78	0.8	1.06
0.1	0.62	0.56	0.54	0.55	0.58	0.64	0.72	0.81	0.92
0.2	1.04	0.81	0.59	0.55	0.58	0.64	0.72	0.81	0.92
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
0.8	1.04	1.11	1.20	1.31	1.43	1.47	1.58	1.76	1.00
0.9	1.04	1.11	1.15	1.08	1.0	1.09	1.17	1.32	1.59
1.0	1.03	1.01	0.89	0.80	0.74	0.71	0.71	0.81	1.08

### 3. 통행배정모형

신호제어와 통행배정을 연계한 기존의 연구들은 대부분 신호교차로 표현에 있어서 한계점을 가지고 있었다. 즉, 완전한 신호교차로의 형태가 아닌, 예를 들어 좌회전이 없거나 직진이동류로만 구성된 네트워크를 설정하고, 링크단위에

서 신호제어의 영향을 반영하였다. 그러나 현실적인 신호교차로의 표현과 본 모형에서 목표로 하는 네트워크 신호제어를 위해서는 다음과 같은 조건이 만족되어야 한다. 첫째 개별 노드(신호교차로)에 진입되는 링크의 교통량을 경로별(이동류별)로 분리하여 교차로의 이동류별 수요교통량을 파악할 수 있어야 하며, 둘째, 동일한 링크내에서 이동류별 통행비용함수의 설정이 효율적으로 가능해야 한다. 본 모형에서는 위의 조건을 만족시킬 수 있는 Column Generation 통행배정기법을 이용하여 모형을 구축하였다.

1) 통행비용함수

본 연구에서 링크 통행비용함수는 크게 두가지로 분류된다. 해당링크의 도착노드가 신호교차로가 아닌 경우는 일반적인 BPR 식을 사용하며, 해당링크의 도착링크가 신호교차로인 경우 HCM의 지체식이 포함된 링크비용함수식을 사용하였다.

case 1 : 링크의 도착노드가 신호교차로가 아닌 경우

$$T_a = T_a^0(1 + \alpha(\frac{f_a}{C_a})^\beta)$$

case 2 : 링크의 도착노드가 신호교차로인 경우

이 경우 하나의 링크를 대표하는 통행비용함수 정의될 수 없으며, 해당 링크는 그 링크가 포함하는 이동류별로 통행비용함수를 가지고 있어야 한다. 다만 초기 통행시간은 신호제어의 제약을 받지 않는 경우의 통행시간이므로 이동류와 상관없이 링크별로 정의가 가능하다.

$$T_a^m = T_a^0 + D_a^m(f_a^m, C, g^m)$$

위의 이동류별 통행비용함수식에 포함되는 지체는 HCM지체식으로 BPR 식과 유사한 단조증가의 형태를 가지고 있으며 지체식을 구성하는 주기, 녹색시간, 오프셋은 통행배정단계에서는 상수로 처리되기 때문에 통행배정결과는 유일해를 갖는다고 할 수 있다.

2) 통행배정모형(Column Generation Method)

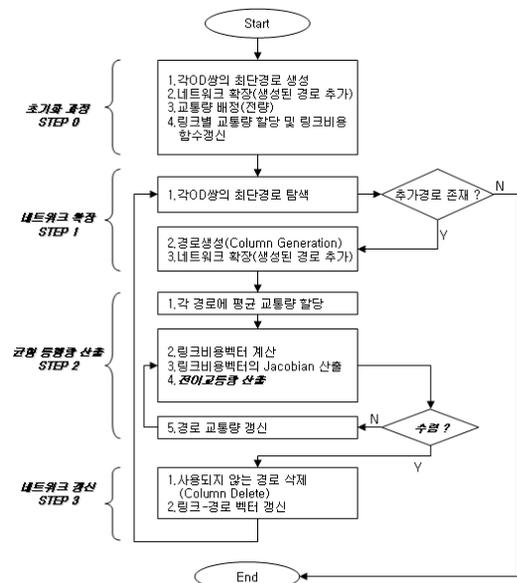
Column generation technique를 이용한 경로기반 통행배정기법의 장점은 첫째, 통행배정을 위해 모든 경로를 고려하지 않아도 되며 최종적으로 하나의 OD 쌍에 해당되는 교통량이 부과되는 경로가 수없이 많지 않은

한, 대규모 네트워크에서 수행될 때 이점이 있는 것이고, 둘째, 네트워크가 균형상태에 도달했을 때, 사용된 경로, 경로교통량, 링크교통량 정보를 가지고 있게 되며 마지막으로 셋째, 보다 빠른 수렴이 가능하다는 것이다. 본 연구에서는 Column generation method를 이용하여 통행배정 모형을 구축하였으며 최단경로탐색방법으로는 신호교차로의 연속적인 회전저항을 반영할 수 있는 링크기반탐색법을 사용하였다.

(1) 경로기반 통행배정 알고리즘

경로기반의 Column Generation 모형은 통행배정의 기본 단위를 개별링크가 아닌 OD 쌍을 연결하는 하나의 경로를 기본으로 한다. 개념적으로 정리하면 OD쌍 간에 더 작은 통행비용을 갖는 새로운 경로가 없을 때 까지 계속해서 새로운 경로를 생성(Column generate)하고 생성된 경로들의 통행비용이 모두 동일해지도록 통행을 배정하는 것이다. Column generation algorithm에서 OD 쌍 w의 교통량 정의는  $d_w = \sum_{p=1}^{|P_w^k|} f_w^k$ ,  $w = 1, 2, 3, \dots, N$ . 이며, 이때  $|P_w^k|$  는 k-th iteration에서 OD쌍 w에 대하여 생성된 path(column)의 집합을 의미한다. OD쌍 w에 대하여 생성된 path를 구성하는 링크집합  $A_w^k$  (incidence matrix) 이며  $x^k$ 는 link 교통량 벡터 ( $x^k = A^k f^k$ )를 나타낸다.

k-th iteration에서 link l에 대한 통행비용은  $\bar{c}_l^k$  로



〈그림 5〉 경로기반 통행배정 수행과정

정의된다. 모형에서는  $n_L \times n_L$  의 링크비용함수의 1차 도함수벡터 야코비안행렬  $J^k = \left[ \frac{\partial g_i}{\partial x_j^k} \right]$  의 determinant가 양정으로 전제되어야 하는데 본 모형에서 사용하는 통행비용함수(BPR식 및 HCM 식)가 모두 단조증가의 형태이므로 전제를 만족시킬 것으로 판단되며 따라서 본 모형의 통행배정 목적함수가 유일해를 갖는것을 보장할 수 있다. 경로 p의 비용벡터는 다음과 같이 정의된다.  $c_w^k = (A_w^k)^T \cdot \bar{c}^k$   $w = 1, 2, 3, \dots, N$ . 이 경우 사용자 평형 조건은 아래와 같다.

$$C_{w_p}^k - \lambda_w^k \begin{cases} = 0, & \text{if } f_{w_p}^k > 0 \\ \leq 0, & \text{if } f_{w_p}^k = 0 \end{cases}$$

$$p = 1, 2, \dots, |P_w^k|, \quad w = 1, 2, \dots, N$$

여기서  $\lambda_w^k$  는 OD pair w에 대한 최적통행비용이다. 균형상태의 조건은 주어진 OD쌍을 연결하는데 사용된 모든 경로에 대한 통행비용은 최소이며 동일하다는 것이다. 사용자 균형상태로 만들기 위한 통행배정은 OD pair를 구성하는 경로에 OD 교통량의 평균값을 할당하고 각 경로의 통행비용이 동일해지도록 교통량을 가감하는 것이다.

이를 위해서 각 경로의 평균통행비용  $\bar{\lambda}_w^k = \frac{1}{m} \sum_{f_w^k} c_w^k$  을 산출하고 이를 통하여 경로별 통행비용과 평균통행비용의 차이  $\delta C_w^k = [\bar{\lambda}_w^k - C_{w_p}^k, \bar{\lambda}_w^k - C_{w_p}^k, \dots, \bar{\lambda}_w^k - C_{w_p}^k]^T$  를 계산한다. 마지막으로 통행비용의 차이를 최소화하도록 경로의 전이교통량을 산출하는데 Euclidean Norm의 형태인 목적함수  $\min \| (A_w^k)^T J^k A_w^k \delta f_w^k - \delta C_w^k \|$  를 최소화 하는 전이교통량  $\delta f_w^k$  를 산출하여 새로운 경로교통량  $f_{w_p}^k := f_{w_p}^k + \delta f_{w_p}^k$  을 부과한다. 최종적으로 전이되는 교통량의 크기가 아주 작을 때까지 위의 과정을 반복하여 통행배정을 하게 된다.

**(2) 통행배정과정에서의 교통신호제어 반영**

본 연구에서 교통신호를 반영한 통행배정 모형으로 경로기반 알고리즘을 이용한 주된 이유는 알고리즘의 수행속도 단축 및 향후 대규모 네트워크 확장의 용이성 등이 있지만 가장 주요한 이유는 경로기반 통행배정알고리즘의 경우 균형상태에서의 사용된 경로, 경로교통량, 링크 교통량 등이 동시에 산출된다는 것이다. 신호제어를 위해서는 <그림 6>과 같이 링크의 교통량이 하류부 노드

에서 이동류별로 나뉘어 산출되어야 하는데 경로기반 통행배정 알고리즘의 경우 이와 같은 과정을 용이하게 해준다.

일반적인 통행배정 모형에서는  $n_L \times n_L$  의 링크통행비용함수의 1차 도함수 벡터 Jacobian matrix  $J^k = \left[ \frac{\partial g_i}{\partial x_j^k} \right]$  를 정의하게 된다. 그러나 신호제어를 위해서는 이동류별 교통량을 산출해야 하며 사용자 균형 통행배정의 비용함수 역시 이동류별로 구축되어야 한다. 따라서 링크의 하류부 노드가 신호교차로인 경우 그 링크는 하류부 신호교차로에서 직진, 좌회전, 우회전을 하는 차량들이 서로 다른 통행비용을 경험하게 되며 따라서 여러 개의 통행비용함수가 필요하게 된다. 그러므로 Jacobian matrix 역시 이동류별로 정의되어진다.

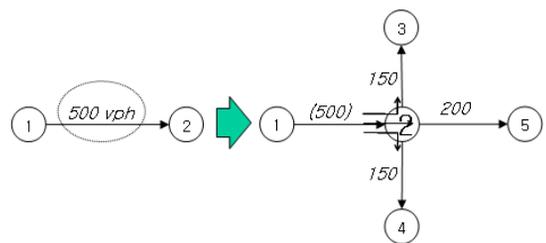
신호제어를 위한 Jacobian matrix  $J_m^k = \left[ \frac{\partial g_i}{\partial x_{j_m}^k} \right]$

여기서

- $j$  : 링크번호
- $g_i$  : 경로 i의 교통량
- $m$  : movement (직진, 우회전, 좌회전)
- $x_{j_m}^k$  : k번째 iteration에서 링크 j의 이동류 m 교통량

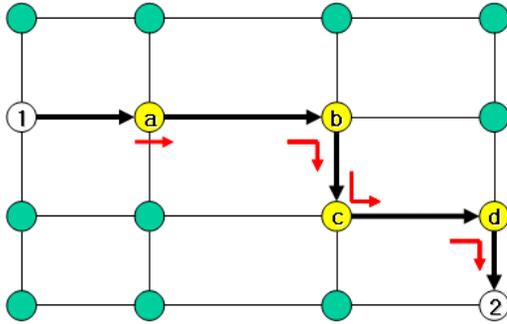
위와 같은 Jacobian matrix를 구성하기 위해서는 통행배정의 결과로  $x_{j_m}^k$  값이 산정되어야 하는데 경로기반의 통행배정기법인 Column generation 방법의 경우 위의 값을 매우 용이하게 얻어낼 수 있다.

Column generation 방법은 최종적인 균형통행량을 경로단위로 결정하기 때문에 최종적인 배정결과를 경로교통량을 통해 알 수 있다. 만약 <그림 7>과 같은 네트워크에서와 같이 OD 쌍1→2의 경로에 사용자균형통행배



<그림 6> 신호제어를 위한 링크교통량 표현

O	D	cost	vol	Path (link #)
1	2	100	200	①→(a)→(b)→(c)→(d)→②



〈그림 7〉 배정결과에서, 경로교통량의 표현

정의 결과로 총 100대의 차량이 배정되었다면 이 정보를 이용하여 경로를 구성하는 각 링크의 해당 이동류에 교통량이 배정된 결과를 알 수 있다.

통행배정모형 내의 경로탐색방법으로는 연속적인 회전지체(turn delay)의 반영이 가능한 링크기반 경로탐색알고리즘을 사용하여 모형을 구축하였다. 이 경우 경신호교차로를 표현하기 위해서 통상적인 교통망체계를 확장할 필요가 없다. 기존의 대부분의 연구에서는 신호교차로를 표현할 때 회전지체(turn delay)를 적용하기

위해 별도의 링크와 노드를 추가하게 된다. 이에 따라 단순한 네트워크 노드에서의 이동류의 수에 따라 링크 수와 노드수가 증가하게 된다. 그러나 경로기반 알고리즘의 경우 전체 네트워크에 대해 경로에 따른 이동류별 비용함수의 Jacobian matrix를 생성하는 것으로 노드, 링크의 추가 없이 교차로 회전지체를 반영할 수 있다. 통행배정수행을 위한 세부 과정은 다음과 같다.

【STEP 0】 최초 부분 네트워크 초기화  $G^k$

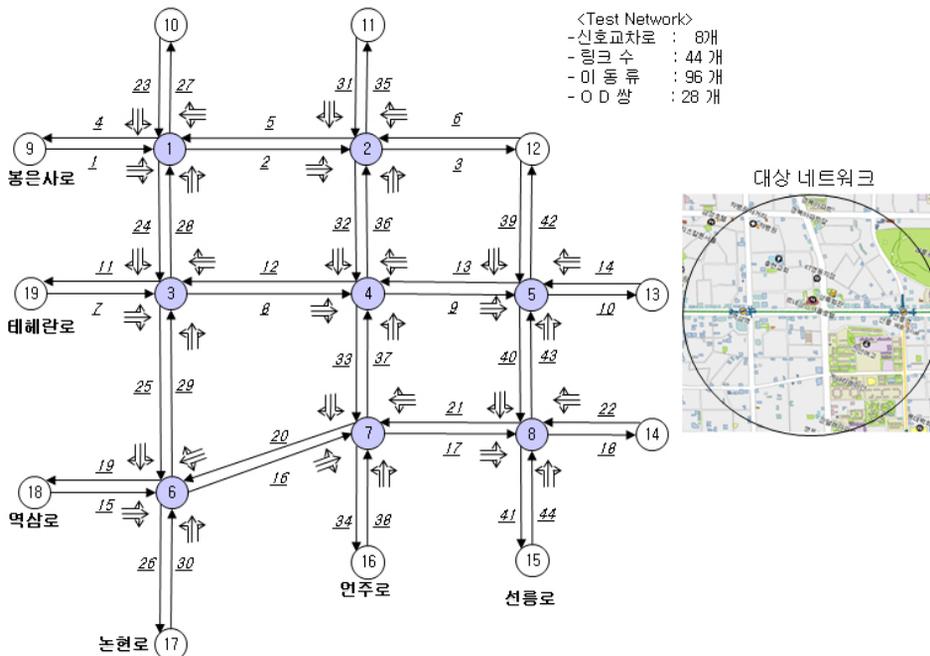
- ① 각 O/D쌍  $w$ 를 연결하는 초기 최단경로  $p_w$  산출
- ② 모든 O/D쌍의 각 경로  $p_w$ 에 수요  $d_w$ 의 배정
- ③ 이동류별 링크 교통량 벡터  $x^k$  산출
- ④ 링크 통행비용 벡터  $\tilde{c}_l^k$  및 OD쌍별 경로비용  $c_w^k$  산출

【STEP 1】 부분 네트워크  $G^k$ 의 확장

- ① 경로생성 : 비용이  $\lambda_w^k$  보다 작은 경로생성
- ② 추가될 경로가 없는 경우 종료, 아니면 [step 2]

【STEP 2】 부분 네트워크  $G^k$ 를 대상으로 균형해 산출

- ① 초기 교통량 배정 : 각O/D쌍의 교통량  $d_w$ 를 경로 집합  $P_w^k$ 에 속한 경로에 평균적으로 배정
- ② 재배정(Reassign)



〈그림 8〉 Test Network 및 OD Table

- ②-1 : 이동류별 링크통행비용벡터의  $J_m^k$  행렬 산출
- ②-2 : 각 경로의 통행비용의 차이를 최소화하는 경로별 전이교통량  $\delta f_k^w$  산출  

$$\min \| (\overline{A}_w^k)^T J_m^k \overline{A}_w^k \delta f_k^w - \delta C_w^k \| \text{ (가우스 소거법)}$$
- ②-3 경로 교통량 갱신  $f_{w_p}^k := f_{w_p}^k + \delta f_{w_p}^k$
- ③ 수렴성검증 :  $\sum_{w=1}^N \sum_i |\delta f_{w_p}^k| / d_w < \epsilon$ 면 종료

**[STEP 3] 교통량이 없는 경로 삭제(Drop)**

- ① 각 OD pair에 속한 경로에 대해  $f_{w_i}^k = 0$ 이면 경로집합  $P_w^k$ 에서  $p_{w_i}$  삭제
- ② link-path-matrix  $A_w^k, A^k$  업데이트 후 [Step1]로 이동

**IV. 모형의 검증 및 평가**

**1. 실험개요**

실험네트워크는 서울시 강남구의 일부지역(테헤란로의 역삼역, 선릉역부근)을 기준으로 설정하여 본 연구의 목적상 통행배정시 네트워크상의 모든 가능 경로가 발생되도록 신호현시체계 및 차로수를 수정하여 <그림 8>과 같이 구축되었다. OD 교통량 자료 <표 2>는 서울지방경찰청이 조사하여 서울시 교통국에서 제공하는 2004년도 지점별/연도별 가로교통량 자료 중 해당지역의 오전첨두시(8시~9시) 교통량 자료를 분석하여 사용하였다. 본 모형의 연동부분 반영을 위하여 연동축은 동서축의 테헤란로를 설정하였으며 4번 교차로를 기준으로 상대읍셋을 적용하였다.

본 연구에서 사용된 유전자알고리즘을 사용하는 신호최적화 모형의 효율성 평가를 위하여, 보편적으로 사용되는 주차선(Critical lane volume)방법과 통행배정을 결합한 모형을 구축하여 네트워크 통행비용을 비교분석하였다. 주차선(主車線) 신호결정방법의 신호주기 및 녹색신호시간계산 방법론은 다음과 같다.

$$C_{des} = L/1 - [V_c / (1615 \times PHF \times (v/c))]$$

$$g_{TOT} = C - L, \quad g_i = g_{TOT} \times (V_{ci} / V_c)$$

여기서

- $C_{des}$  : 희망주기길이(초)
- $L$  : 총손실시간

- $g_{TOT}$  : 유효녹색시간 합
- $g_i$  : 녹색시간길이
- $V_{ci}$  : 현시i의 주차선교통량(대)
- $V_c$  : 주차선교통량합(대)

<표 2> OD 교통량(대/시)

	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	계
11	232	-	-	-	-	237	209	249	192	266	209	1596
13	284	234	220	-	-	-	-	326	241	220	227	1755
16	416	389	299	299	444	353	-	-	-	-	280	2483
19	-	-	463	368	495	452	463	389	495	-	-	3128
계	932	623	982	667	939	1042	672	964	928	486	716	8962

**2. 실험결과 및 분석**

**(1) 모형의 검증결과 분석**

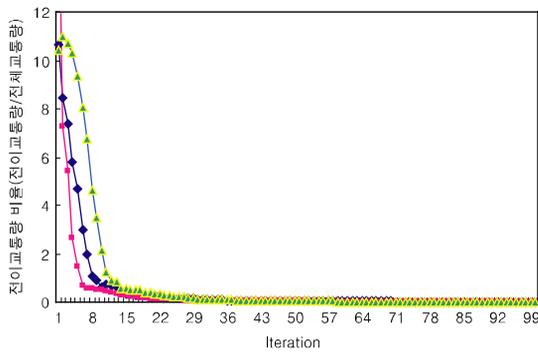
모형의 검증대상은 첫째, 신호교차로를 포함한 통행배정모형이 균형해를 찾는가 하는 것, 둘째 반복수행과정에서 유전자 알고리즘이 신호지체를 최적화하는 것 그리고 마지막으로 bi-level 문제로 구성되어 반복적으로 수행되는 신호최적화와 통행배정의 결과 전체 교통망의 신호제어지체가 감소하여 수렴하느냐는 것이다.

위의 실험조건에 따른 최종적인 통행배정 결과는 <표 3>과 같다.

위의 표에서와 같이 각 OD쌍에 대해 1개 이상의 경로가 할당된 경우 각 경로의 통행비용(path cost)은 동일하며 네트워크상의 교통량이 사용자 평형상태에 도달했음을 알 수 있다.

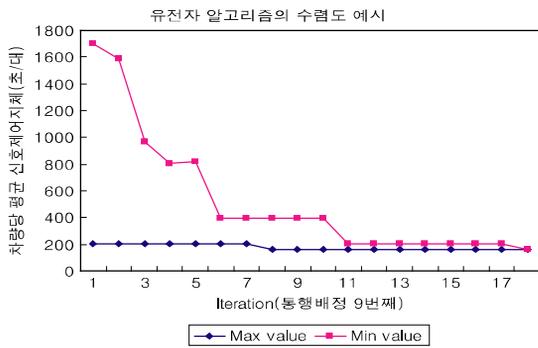
<표 3> 통행배정 결과

O	D	Vol	path Cost	path (link set)				
11	14	237	279	31	3	39	40	18
11	15	209	224	31	3	39	40	41
11	16	249	177	31	32	33	34	
11	17	51	267	31	5	24	25	26
11	17	141	267	31	32	33	20	26
13	17	188	297	14	40	21	20	26
13	17	53	297	14	13	33	20	26
:	:	:	:	:	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:	:	:	:
19	14	287	270	7	25	16	17	18
19	14	166	270	7	8	9	40	18
19	15	463	214	7	8	9	40	41
19	17	495	119	7	25	26		



〈그림 9〉 통행배정알고리즘의 목적함수 값

〈그림 9〉는 전체 교통량에 대한 전이교통량의 비율로 수렴조건 및 정지조건을 기준으로 변화하는 과정을 보여 주고 있다. 약 10회 정도의 반복수행후 전이비율(전이교통량/전체교통량)이 1% 미만으로 줄어들어 비교적 빠른 수렴 속도를 나타내는 것으로 판단된다.

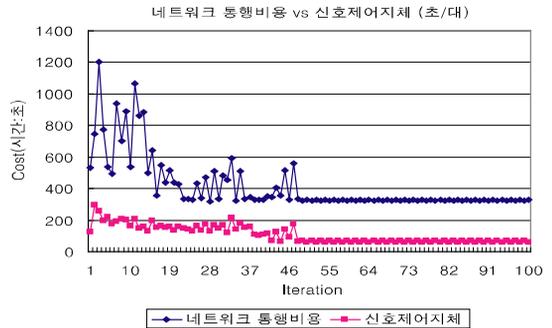


〈그림 10〉 유전자 알고리즘 수렴도

〈그림 10〉은 9번째 통행배정단계에서의 유전자 알고리즘에 의한 수렴도를 예시로 나타낸 것이다. 본 모형에서 유전자 알고리즘의 종료조건은 총 30개의 염색체의 최대값과 최소값의 차이(gap)가 동일해지는 것인데 18번째 Iteration에서 두 값의 차이가 동일해지는 것을 나타내고 있다.

통행배정과 신호제어최적화를 하위, 상위문제로 구성된 bi-level 문제의 수행 결과는 다음과 같다.

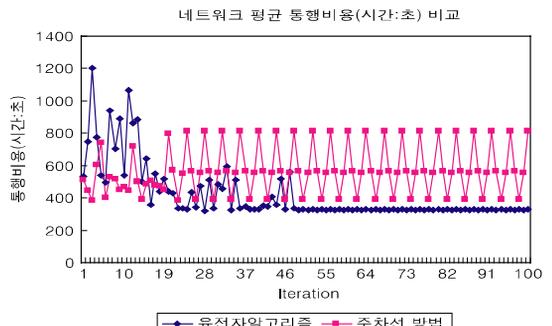
본 실험에서는 상하위 문제에 대하여 100회의 반복수행을 하였으며, 각 Iteration에서의 통행비용은 사용자 균형상태의 교통량에 의한 통행비용이며 평균지체값은 유전자 알고리즘을 통해 최적화된 결과이다. 결과에서 나타나듯이, 반복횟수가 증가할 수록 네트워크의 통행비용과 신호제어지체는 감소하며 일정한 값으로 수렴되는 것으로 나타났다.



〈그림 11〉 네트워크 통행비용 및 신호지체

(2) 신호최적화 모형의 효율성 평가결과 분석

유전자 알고리즘을 사용한 신호최적화 모형의 효율성을 평가하기위해 통행배정모형과 결합한 주차선 신호방법론을 구축하여 그 결과를 비교하였다. 모든 실험조건(OD 교통량, 최소주기 등의 신호제약)은 동일한 상황에서 평가를 수행하였다.



〈그림 12〉 신호최적화 방법별 통행비용 비교

〈그림 12〉에서와 같이 주차선 방법론에의한 신호최적화는 통행배정과의 반복적인 수행에서 일정한 패턴을 가지고 변동하는 것으로 나타났다. 100번의 반복수행과정에서의 네트워크 평균 통행비용(초/대)의 최소값은 368.6초로 산출되어 319.1초에 수렴된 유전자 알고리즘의 결과가 보다 효율적인 것으로 분석되었다.

V. 결론

본 연구에서는 신호지체를 반영한 통행배정 모형을 구축하였다. 주요 연구사항을 요약하면, 첫째, 신호제어와의 효율적인 결합을 위한 경로기반 통행배정 모형을

구축하여 경로교통량의 추정 등의 추가적인 과정이 없이 신호제어전략과의 결합이 가능하도록 모형을 구축하였다. 둘째, 일반적으로 유일해가 존재하지 않는 복수의 교차로 신호최적화문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 HCM 지체모형과 유전자 알고리즘을 이용하여 네트워크 신호최적화모형을 구축하였다. 유전자 알고리즘을 통한 신호최적화는 알고리즘의 수행속도 및 최소지체 탐색에서 만족할 만한 결과를 나타낸 것으로 판단된다. 이는 주차선 신호결정방법론과의 비교에서도 그 효율성을 확인할 수 있었다. 다만 비교결과에 대해서는 주차선 방법론이 알고리즘의 특성상 과포화상황에 대한 대처가 미흡하다는 점이 고려되어야 할 것이다.

마지막으로 본 연구에서 구축한 신호최적화와 통행배정을 bi-level program으로 구축한 모형을 통해서 네트워크의 총 통행비용을 최소화하는 해(최적신호제어변수 및 사용자 균형 통행량)를 산출한 것인데, 연구결과 비교적 일정한 값으로 수렴하는 결과를 확인할 수 있었다.

본 연구의 최종 목표는 도시부 네트워크에서 수집할 수 있는 자료를 이용하여 보다 정확한 현재의 교통상황을 파악하고 최적의 교통상황을 유지하도록 하는 전략을 구축하는데 있다. 이를 위한 향후 연구내용을 살펴보면, 통행배정 측면에서는 경로선택에 있어 확률적인 배정방법의 도입이 검토되어야 하며, 신호제어측면에서는 개별 차량의 미시적인 통행행태를 모형에 도입하는 부분이 필요하다. 또한 보다 정밀한 모형의 평가를 위해서는 향후, 다양한 교통상황 및 네트워크 형태에서 모형에 대한 검증 및 보완이 진행되어야 할 것이다.

**참고문헌**

1. 임강원(1986), "도시교통계획", 서울대학교 출판부.
2. 임강원·임용택(2003), "교통망분석론", 서울대학교 출판부.
3. 도철웅(1998), "교통공학원론(상)", 청문각.
4. 최기주(1995), "U-TURN을 포함한 가로망 표현 및 최단경로의 구현", 대한교통학회지, 제13권 제3호, 대한교통학회, pp.35~52.
5. 최기주·장원재(1998), "복합 교통망에서의 최적 경로산정 모형개발", 대한교통학회지, 제16권 제4호, 대한교통학회, pp.167~189.
6. 박준환(2007), "계층별 비유함수를 고려한 대중교

- 통 통행배정모형 개발에 관한 연구", 서울대학교 박사학위논문.
7. Y. Sheffi(1985), "Urban Transport Network", Prentice Hall.
8. Claudio Meneguzzer, Via Marzolo(1998), "STOCHASTIC USER EQUILIBRIUM ASSIGNMENT WITH TRAFFIC-RESPONSIVE SIGNAL CONTROL", 38th European Congress of the Regional Science Association Vienna, August 28 - September 1, 1998.
9. Chungwon Lee(1998), "Combined traffic signal control and traffic assignment : algorithm, implementation and numerical results", The university of texas at austin December.
10. Park B. K.(1998), "Development of Genetic Algorithm-Based Signal Optimization Program for Oversaturated Intersection", Texas A&M University.
11. S.C. Wong, Chao Yang , Hong K. Lo(2001), "A path-based traffic assignment algorithm based on the TRANSYT traffic model Transportation Research Part B 35, pp.163~181.
12. Michael J. Maher, Xiaoyan Zhang a, Dirck Van Vliet(2001), "A bi-level programming approach for trip matrix estimation and traffic control problems with stochastic user equilibrium link flows", Transportation Research Part B 35, pp.23~40.
13. Ernesto Cipriani, Gaetano Fusco b(2004), "Combined signal setting design and traffic assignment problem", European Journal of Operational Research 155, pp.569~583.
14. Francois Dion(2004), "Comparison of delay estimates at under saturated and over saturated pre-timed signalized intersection", Transportation Research part B 38, pp.99~122.
15. Halim Ceylan, Michael GH Bell(2005), "Genetic algorithm solution for stochastic equilibrium transportation networks under congestion", Transportation Research Part B 39, pp.169~185.
16. M.H. Xu, William H.K. Lam, H. Shao, G.F.

- Luan(2006), "A heuristic algorithm for network equilibration", Applied Mathematics and Computation 174, pp.430~446.
17. Dazhi Sun, Rahim F.Benekohal(2006), "Bi-level Programming Formulation and Heuristic Solution Approach for Dynamic Traffic Signal Optimization", Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering 21, pp.321~333.

✉ 주 작성 자 : 한동희

✉ 교 신 저 자 : 한동희

✉ 논문투고일 : 2007. 5. 19

✉ 논문심사일 : 2007. 7. 30 (1차)

2007. 9. 10 (2차)

2008. 3. 21 (3차)

✉ 심사관정일 : 2008. 3. 21

✉ 반론접수기한 : 2008. 8. 31

✉ 3인 익명 심사필

✉ 1인 abstract 교정필