

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)

이 영 인

(서울대학교 교수)

박 준 환

(서울시정개발연구원 부연구위원)

임 강 원

(서울대학교 교수)

목 차

- | | |
|------------------|-----------------|
| I. 서론 | IV. 모형의 검증 및 평가 |
| II. 기존연구고찰 | 1. 실험 개요 |
| III. 모형의 구축 | 2. 실험 결과 및 분석 |
| 1. 모형의 개요 | V. 결론 |
| 2. 신호제어변수 최적화 방법 | 참고문헌 |
| 3. 통행배정 모형 | |

I. 서론

교통신호와 개별 통행자의 경로선택은 서로 상호작용하는 관계이다. 통행자의 경로 선택은 교통신호에 따라 결정될 수 있으며 또한 최적의 교통신호 역시 이동류별 교통량에 따라 달라지게 된다. 이는 교통신호를 제어하는 관리자와 도로이용자간의 상호작용에 따라 교통상황이 결정되어지는 것을 의미하며 Stackelberg game의 문제로 정의될 수 있다. 만약 우리가 네트워크 상의 최적신호를 설계하려고 하거나 교통신호가 반영된 현실적인 통행배정결과를 얻고 싶다면 위의 문제에 깊은 관심을 가져야 할 것이다.

교통신호가 반영된 통행배정모형이 갖추어야 할 조건을 살펴보면, 신호제어의 기본단위는 교차로내에서의 이동류이기 때문에 모든 통행량의 기본단위가 이동류가 되어야 한다는 점이다. 물론 이동류별로 별도의 링크를 구성하여 적용하는 방법이 있지만 이 경우 네트워크 확장에 따라 링크의 수가 급격하게 증가하게 되며 통행배정의 과정이 복잡해지게 된다. 또한 각각의 OD 쌍에 대하여 개별 통행의 경로정보를 손쉽게 확인할 수 있어야 한다. 왜냐하면 신호지체는 특정 노드와 연결된 두 개의 링크사이에서 발생하기 때문에 단지 링크 교통량을 통해서

비용함수를 계산할 수 없기 때문이다. 이와 같은 특성을 고려할때 경로기반 통행배정 기법의 연구가 필요한 것으로 판단되었다.

본 연구는 실제 현장과 같은 양방향 링크를 포함하는 4현시 교차로로 구성된 Network에서 U turn을 제외한 모든 이동류에 대하여 교통신호의 영향을 반영할 수 있는 통행배정 모형을 구축하고 이를 신호최적화 문제와 결합하여 네트워크의 총 지체를 최소화하는 신호제어변수와 통행배정 결과를 산출하는 모형을 구축하였다.

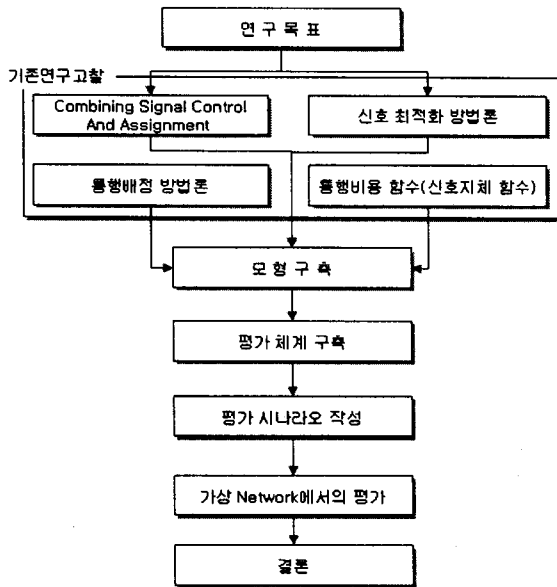
본 연구에서 사용된 경로기반 통행배정 모형은 M.H. Xu 등이 제한한 Column Generation 방법의 일종인 heuristic Equilibrium Assignment 기법¹⁾을 기반으로 하여 교차로의 이동류별 통행비용을 고려할 수 있도록 수정하여 구성하였으며 지체최소화를 목적함수로 하는 신호최적화 방법론으로는 Genetic Algorithm을 사용하였다. 최종적으로 이 두 개의 문제를 결합하여 bi level problem을 구성하여 Network의 통행비용함수를 최소화하는 신호변수와 통행자의 경로선택 결과를 산출하였다.

이 연구분야는 향후 지속적인 기술개발이 진

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

행되는 텔레메틱스, DSRC 등의 검지체계 하에서 실시간 동적 OD 자료의 정밀도가 보다 향상된다면 이를 이용한 실시간 Network 신호최적화 연구(ATMS) 및 실시간 경로정보제공(ATIS) 등 ITS 분야에 핵심전략으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

연구 수행의 전체적인 체계는 아래의 그림과 같다.



<그림 1> 연구수행체계

II. 기존연구 고찰

대도시 통행배정 모형에서 교차로의 지체로 인한 통행비용의 영향은 매우 크다. 그러나 전통적인 균형통행배정 모형들은 대부분 교차로의 특성을 제대로 고려하지 못하고 있는데 그 이유는 전통적으로 미시적인 교차로 신호제어와 거시적인 통행배정모형이 별개의 분야로 연구되어 왔기 때문에, 신호제어 시 링크통행량은 외부에서 주어진 것으로 가정하여 신호시간을 결정하였고, 통행배정 시 신호제어전략은 무시되는 경향이 있었다. 기술적인 측면에서 보면 신호교차로를 포함하는 네트워크의 경우 통행비용의 영향이 두 개의 링크사이에서 발생하게 되는데 기존의 링크기반의 통행배정 모형의 경우 이를 적절하게 고려하기 힘든 구조를 가지고 있으며 또한 신호영향을 고려하는 통행배정의 경우 데이터의 수집 및 컴퓨터 처리시간이 많이 소요된다.

통행배정모형과 교차로의 신호제어를 결합시키려는 시도는 Allsop(1974)가 시작하였는데

Allsop는 신호제어를 명시적으로 통행배정모형에 고려하였으며 순차최적통행배정법(iterative optimization assignment : IOA)를 알고리즘으로 제시하였으며 Charlesworth(1977)는 기존의 통행배정모형에 TRANSYT 모형을 결합하였으며, Dickson(1981)은 순차적 방법으로 구한 해가 일반적으로 총통행비용을 최소화하지 못한다는 것을 보여주었다. 결합모형을 게임이론으로 구성한 최초의 연구는 Fisk(1984)가 시작하였고 Chen(1989)은 이 결합모형을 신호최적화를 상위문제로, 통행배정을 하위문제로 구성한 2단계 수리문제(bilevel mathematical program)로 구성하였다.

이론적인 측면에서 통행배정과 신호제어의 결합모형은 신호제어 전략에 따라 비용함수가 단조증가를 이루지 못하기 때문에 불안정한 해를 가질 수 있음을 heydecker(1983)가 보여준 바 있으며, Smith(1979)는 webster의 신호전략이 다수의 해를 갖고 있음을 증명하고 안정적인 해를 갖기 위해서는 용량최대화 전략을 제시하였다. 또한 모형의 풀이방법으로 beckmann의 수학모형 대신에 변동부등식(variational inequalities) 형태로 구성하여 제시하였다.

통행배정과 신호제어의 결합모형의 해석 방법으로는 전역해 방법(global solution approach)과 IOA 기법이 주로 사용되고 있는데 전역해 방법은 Wardrop 균형상태에서 설계변수인 녹색시간을 결정하게 된다. 그러나 이 방법은 적용대상 가로망이 소규모이며 비용함수에 대한 가정이 비현실적이라는 점과 제약조건이 비볼록한 경우 지역해만이 보장된다는 한계가 있으며 IOA 기법은 통행배정과 신호제어를 순차적으로 반복하여 통행량과 교통신호가 상호 일치(mutually consistent)할 때까지 반복하여 수렴해를 얻게 된다.

이청원(1998)연구에서는 신호와 통행배정이 결합된 문제를 해결하기 위하여 다양한 방법론을 설정하여 비교하였는데, 통행시간최소화를 목적함수로 설정하였으며, 고정OD사용, 결정적 사용자 균형(deterministic user equilibrium) 상황에서의 최단시간경로 선택, 비용함수로는 BPR 식과 Webster의 지체식을 사용, 신호연동 고려안함 등을 기본 전제사항으로 설정하였다. 문제 해결을 위한 방법론으로는 Simulated Annealing, Genetic algorithm, Local search, iterative optimization and assignment 방법을 사용하여 결과를 비교하였고 결론적으로 매우 심각한 과포화 상황이 아닌 경우 Simulated Annealing과 genetic

algorithm이 global search method로는 훌륭한 것으로 나타났다.

Halim Ceylan(2005)은 혼잡이 없는 교통망에서 확률적 통행배정기법과 TRANSYT 모형을 이용하여 교통신호최적화문제에 대한 접근법을 제시하였다.

통행량을 네트워크에 부하하는 통행배정방법에는 용량과 확률요소를 고려하느냐의 여부에 따라 결정적 모형, 확률적 모형 및 고정수요 모형, 가변수요모형 등이 있으며 사용자의 계층수에 따라 단일사용자모형, 다중사용자모형 등 다양한 모형이 개발되었다. 최근에는 경로기반의 통행배정기법에 대한 연구가 진행되고 있는데 M.H. Xu(2006)은 컬럼발생기법을 사용한 고수요기반의 결정적 통행배정방법을 제안하였다. 이는 기존의 Frank-Wolfe 알고리즘이 수렴해 근처에 근접할수록 느려지는 현상을 해소한 것으로 통행배정과정의 효율성을 향상시켰다.

III. 모형의 구축

1. 모형의 개요

일반적으로 교통운영자의 목표는 교통시스템의 성능을 극대화하는 것이다. 따라서 교통신호 제어, 교통정보제공 등 각종 교통운영관리전략을 적절하게 활용하여 최종적으로 교통지체, 통과교통량, 통행시간, 연료소비, 소음, 공해 등의 요인을 최적화하는 것이다. 본 모형에서는 통행배정과 신호최적화를 통해 교통망내의 모든 차량의 평균 신호제어지체를 최소화하는 것을 목적함수로 설정하였다. bi level 문제로 구성된 본 모형의 전체 흐름도를 나타내면 그림2와 같다.

본 모형의 목적함수는 신호지체를 최소화하는 신호제어변수와 균통통행량을 산출하는 것이며 신호제어목표는 대상 교통신호 네트워크상에 사용자 균형을 이룬 경로별 교통량의 제어지체를 최소화할 수 있는 신호변수(주기, 현시)를 산출하는 것이다. 여기서 사용자 균형을 이룬 경로란 최소한 1개 이상의 신호현시를 경로 상에 포함하는 경로를 의미한다.

본 모형의 경우 네트워크상의 각 교차로의 주기 및 녹색시간길이를 최적화하는 것이 주요한 목표이다. 이 연구에서는 차량의 연동효과를 고려하지 않는다. 따라서 네트워크 상의 각 신

호교차로는 교차로별로 서로다른 주기를 적용하게 된다. 본 모형의 목적함수는 상위문제의 목적함수와 동일하며 아래와 같다.

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

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

여기서, $D(\psi, q_l^m)$ 은 링크 l 의 이동류 m 의 평균신호제어지체

ψ : 신호제어변수(신호주기, 녹색시간길이)

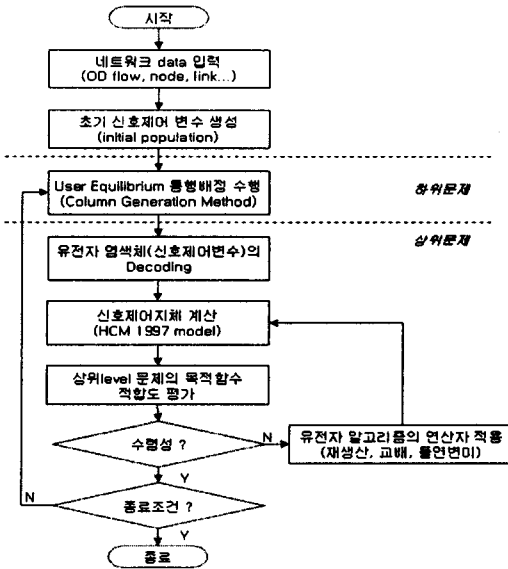
ψ^l, ψ^u : 신호제어변수 ψ 의 상위, 하위 한계

q_l^m : 링크 l 의 이동류 m 의 교통량

$q = [q_l^m; \forall a \in L]$

L : 링크집합

m : 이동류(직진, 좌회전, 우회전)



<그림 2> 모형의 구성

본 모형은 대상 네트워크상의 하류부 노드가 신호교차로인 모든 링크에 포함된 모든 이동류에 대하여 이동류별 교통량을 지체식에 곱하여 산출되는 총 지체를 최소화하는 것이다. 여기서 개별 교차로의 이동류별 지체는 1997년에 개정된 HCM 모형을 사용하였으며 신호주기, 현시, 이동류별 수요교통량에 의해 계산되어진다. 최소지체산출을 위한 최적화 방법으로는 유전자 알고리즘을 사용하였다.

2. 신호제어변수 최적화 방법

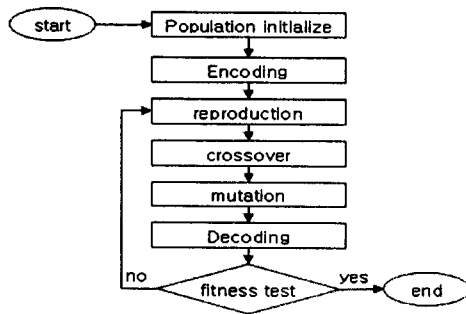
1) 유전자 알고리즘 개요

본 연구에서는 유전자 알고리즘을 이용하여 신호제어 변수를 최적화하였으며 다양한 유전자 알고리즘 중에서 실수코딩 유전자 알고리즘

(real-coded genetic algorithm)에 엘리트 전략 (elitist strategy)을 사용하였다.

연속적인 탐색공간 변수의 최적화 문제에 있어서는 유전자를 실수로 표현하는 것이 더 자연스러우며 실수코딩의 경우 정확히 변수와 일대일 일치하는 실수유전자를 가짐으로 해서 정밀도는 알고리즘을 수행하는 컴퓨터의 성능에만 영향을 받게된다. 또한 어떤 벡터 $X \in R^n$ 의 염색체 s 의 경우 염색체 길이 l 은 벡터 X 의 차원 n 과 같게 된다. 따라서 복수개의 교차로의 신호제어변수와 같이 상당히 긴 염색체를 구성해야 하는 신호최적화의 경우 실수코딩은 이진코딩방법에 비해 보다 효율적인 방법이 될 수 있다고 판단된다.

엘리트 전략은 유전자 알고리즘의 모의진화 과정에서 유전 연산자의 확률적 속성 때문에 한 세대의 최적 개체가 다음 세대에서 살아남지 못하고 소멸되는 경우가 발생하여, 좋은 특성을 가지는 유전자를 잃게되어 탐색이 침체되는 원인을 제거하기 위한 전략으로 집단 내에서 가장 강한 개체가 다음세대로 변경되지 않고 전달되는 것을 보장하는 전략이다.



<그림 3> 유전자 알고리즘 흐름도

2) 유전자 염색체 및 코딩방법

유전자 염색체(Chromosome)의 구성은 교통망을 구성하는 신호교차로의 주기 및 녹색시간길이 등 교통신호최적화를 위해 필요한 신호제어 변수로 구성되었다.

decision variable $\psi : |C_1, C_2, \dots, C_n \parallel Bar_1,$

$Bar_2, \dots, Bar_n \parallel Y_{11}, Y_{12}, \dots, Y_{14} \parallel, |Y_{n1}, Y_{n2}, \dots, Y_{n4}|$

본 연구에서의 신호현시체계는 NEMA 방식의 Dual Ring 방식을 사용하였으며 실수코딩을 위해서 신호주기, 베리어 및 녹색시간 길이는 최소, 최대값 사이의 비율로 표현하여 코딩하였다. 유전자 염색체의 encoding 과정 및 decoding과

정음 다음과 같다.

- encoding 과정

$$rC_n = \frac{C_n - \text{Min } C_n}{\text{Max } C_n - \text{Min } C_n}$$

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

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

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

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

- decoding 과정

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

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

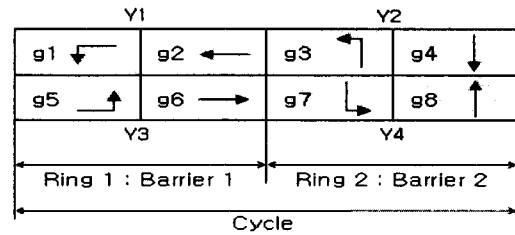
$$barrier2 = \left(C_n - \sum_{i=1}^4 \min g_i \right) \cdot rBar_{2n} + \sum_{i=3}^4 \min g_i$$

$$g_{1n} = \left(barrier1 - \sum_{i=1}^2 \min g_{in} \right) \cdot rY_{1n} + \min g_{1n}$$

$$g_{2n} = barrier1 - g_{1n}$$

$$g_{3n} = \left(barrier2 - \sum_{i=3}^4 \min g_{in} \right) \cdot rY_{2n} + \min g_{3n}$$

$$g_{4n} = barrier2 - g_{3n}$$



<그림 4> Dual Ring & NEMA Phase system

3) 적합도 검정 (Fitness function)

본 연구에서의 적합도 함수는 HCM(1997) 지체모형을 사용하였다.

$$d = d_1 \cdot PF + d_2 \quad (PF = 1)$$

$$d = 0.50 C \left[\left(1 - \frac{g_e}{C} \right)^2 / \left(1 - \frac{C}{g_e} \cdot \min(X, 1.0) \right) \right] + 900 \left[(X-1) + \sqrt{(X-1)^2 + \frac{4}{cT} X} \right]$$

여기서, d : 신호제어지체(초/대)

d_1 : 균일지체

d_2 : 과포화 영향을 나타내는 증분지체

- C : 신호주기길이(초)
- X : 해당 차로군의 포화도
- g_e : 유효녹색시간 길이(초)
- c : 해당 차로군의 용량(vph)
- T : 분석시간길이 (시간)

본 모형에서는 일반적인 형태의 유전자 알고리즘을 적용하고자 한다. 다만, 본 모형에서 각 세대별로 생성되는 염색체의 적합도 점정은 개별 염색체의 변수에 따른 제어지체를 계산하는 과정은 최적의 염색체 결정을 위한 중요한 요인으로 작용하게 된다.

3. 통행배정모형

신호제어와 통행배정을 연계한 기존의 연구들은 대부분 통행배정 측면의 네트워크를 대상으로 연구를 진행하였다. 즉, 완전한 신호교차로의 형태가 아닌, 예를 들어 좌회전이 없는 네트워크의 구성 등을 통하여 링크단위에서 신호제어의 영향을 반영하였다. 그러나 효과적이고 현실적인 신호시간 최적화와 본 모형에서 목표로 하는 신호제어를 위해서는 다음과 같은 조건이 만족되어야 한다. 첫째 개별 노드(신호교차로)에 진입되는 링크의 교통량을 경로별로 분리하여 교차로의 이동류별 수요교통량을 파악할 수 있어야 한다. 둘째, 경로기반 신호최적화 및 연동효과를 반영하기 위해서는 네트워크에 부과되는 모든 교통량이 어떤 경로에 할당되는지를 알 수 있어야 한다. 본 모형에서는 위의 조건을 만족시킬 수 있는 Column Generation 통행배정기법을 이용하여 모형을 구축하였다.

1) 통행비용함수

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

case 1 : 링크의 도착노드가 신호교차로가 아닌 경우

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

case 2 : 링크의 도착노드가 신호교차로인 경우

이 경우 하나의 링크를 대표하는 통행비용함수 정의될 수 없으며, 해당 링크는 그 링크가 포함

하는 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 있다. 또한 지체식을 구성하는 주기, 녹색시간길이는 통행배정단계에서는 상수로 처리되기 때문에 통행비용벡터의 Jacobian 행렬의 determinant는 positive definite로 전제할 수 있으며, 따라서 통행배정결과를 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 OD pair 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 OD쌍 w 의 교

통량 정의는 $d_w = \sum_{p=1}^{|P_w^k|} f_{w,p}^k$, $w = 1, 2, 3, \dots, N$. 이

며, 이때 $|P_w^k|$ 는 k-th iteration에서 OD pair w 에 대하여 생성된 path(generated column)의 집합을 의미한다. OD pair w 에 대하여 생성된 path

를 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 l 에 대한 통행비용은 \tilde{c}_l^k 로 정의된다. 모형에서는 $n_L \times n_L$ 의 링크통행비용함수의 1차 도함수 벡터 Jacobian matrix $J^k = \left[\frac{\partial g_i}{\partial x_j^k} \right]$ 의 determinant가 positive definite

로 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. 위의 전제에 따라 path p 의 비용벡터는 다음과 같이 정의된다. $c_w^k = (A_w^k)^T \cdot \tilde{c}^k \quad w = 1, 2, 3, \dots, N$. 이 경우 equilibrium 조건은 아래와 같다.

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

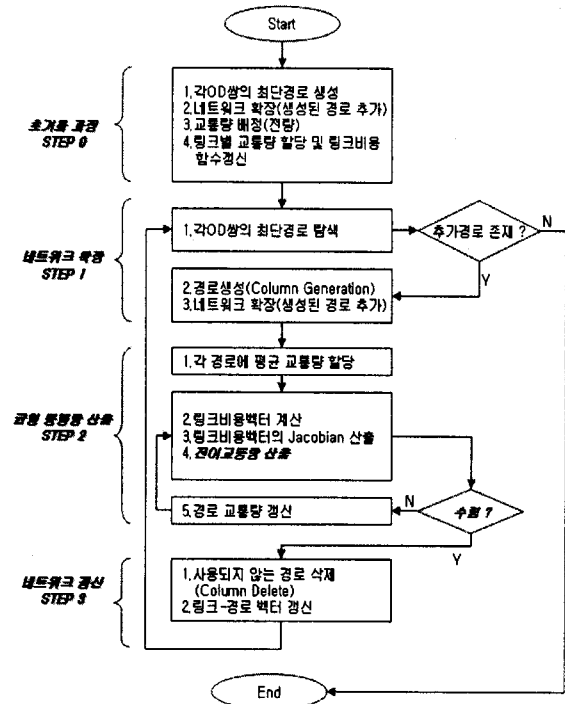
여기서, $p = 1, 2, \dots, |P_w^k|$
 $w = 1, 2, \dots, N$

주어진 OD 쌍을 연결하는데 사용된 모든 경로의 통행비용은 최소이면서 모두 같다. 여기서 λ_w^k 는 OD pair w 에 대한 최적통행비용이며 네트워크가 균형상태에 도달하기 전까지는 알수없다. 균형상태에 대한 조건을 서술하면, 주어진 OD쌍을 연결하는데 사용된 모든 경로에 대한 통행비용은 최소이며 모두 동일하다는 것이다.

생성된 경로로 구성되는 부분네트워크를 사용자 균형상태로 만들기 위한 통행배정은 OD pair를 구성하는 모든 경로에 평균적인 OD 교통량을 할당하고 모든 경로의 통행비용이 동일해지도록 각 경로의 교통량을 가감하는 것이다. 이를 위해서 먼저 각 경로의 평균통행비용 $\tilde{\lambda}_w^k = \frac{1}{m} \sum_{f_{w_p}^k} c_{w_p}^k$ 을 산출하고 이를 통하여 각

경로별 통행비용과 평균통행비용의 차이 $\delta C_w^k = [\tilde{\lambda}_w^k - C_{w_{p_1}}^k, \tilde{\lambda}_w^k - C_{w_{p_2}}^k, \dots, \tilde{\lambda}_w^k - C_{w_{p_m}}^k]^T$ 를 계산한다. 마지막으로 이 통행비용의 차이를 최소화하도록 각 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 $\delta f_{w_{p_i}}^k$ 를 산출하여 새로운 경로교통량 $f_{w_{p_i}}^k := f_{w_{p_i}}^k + \delta f_{w_{p_i}}^k$ 을 부과한다. 최종적으로 전이되는 교통량의 크기가 아주 작을 때까지, 즉 더

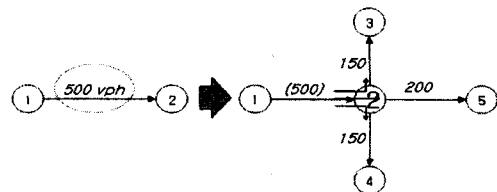
이상 전이할 교통량이 없을 때까지 위의 과정을 반복하여 통행배정을 하게 된다.



<그림 5> 경로기반 통행배정 수행과정

(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 아래의 그림5와 같이 링크의 교통량이 하류부 노드에서 이동류별로 나뉘어 산출되어야 하는데 경로기반 통행배정 알고리즘의 경우 이와 같은 과정을 용이하게 해준다.



<그림 6> 신호제어를 위한 링크교통량 표현

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.

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

여기서, j : 링크번호

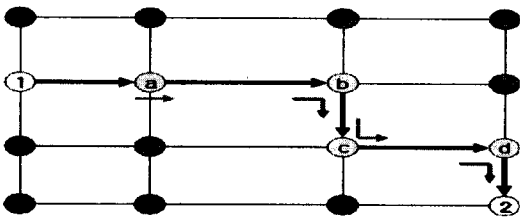
m : movement (직진, 우회전, 좌회전)

$x_{j_m}^k$: k번째 iteration에서 링크 j의 이동류 m 교통량

g_i : 경로 i의 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.

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



<그림8> 배정결과에서, 경로교통량의 표현

Column generation 방법은 최종적인 균형통행량을 경로단위로 결정하기 때문에 최종적인 배정결과를 경로교통량을 통해 알 수 있다. 만약 위의 그림과 같은 네트워크에서와 같이 OD 쌍1→2의 경로에 사용자균형통행배정의 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. 이와 같이 경로기반 통행배정 알고리즘과 링크기반 최단경로 탐색 알고리즘을 사용하는 경우 신호교차로를 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 네트워크도 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. 이는 모형의 수행속도 및 컴퓨터 메모리 측면에서 큰 효율성이 있을 것으로 판단된다. 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 초기부분네트워크 확장 $G^k := \text{span} \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$
- ③ link-path incidence matrix A_w^k 와 A^k 생성
- ④ 모든 O/D쌍의 각 경로 p_w 에 수요 d_w 의 배정
- ⑤ 이동류별 링크 교통량 벡터 x^k 산출
- ⑥ 링크 통행비용 벡터 \bar{c}_l^k 및 OD쌍별 경로비용 c_w^k 산출
- ⑦ $\lambda_w^k := c_w^k, w=1,2,\dots,N$.

[STEP 1] 부분 네트워크 G^k 의 확장

- ① 경로(Column)생성 : 각 O/D쌍에 대해 비용이 λ_w^k 보다 작은 경로가 있는 경우 이 경로를 생성시키고 해당 O/D쌍 w 를 연결하는 경로집합 P_w^k 에 포함
- ② 생성된 경로(Column)에 따라 부분네트워크 확장
- ③ 새로 추가될 경로가 없는 경우 알고리즘 종료, 아니면 [step 2]로 이동.

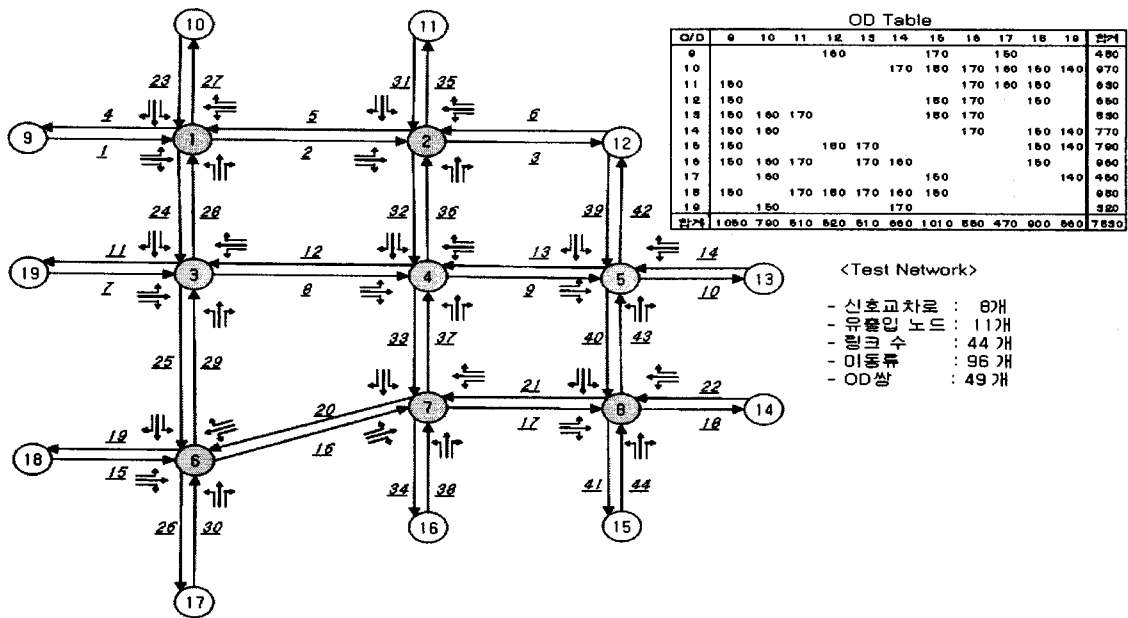
[STEP 2] 새로운 부분 네트워크인 G^k 를 대상으로 균형해 산출

- ① 초기 교통량 배정 : 각 O/D pair에 대해 수요 d_w 를 경로집합 P_w^k 에 속한 경로에 평균적으로 배정하여 경로교통량 f_w^k 산정 (OD쌍의 경로가 n 개면 각 경로에 $1/n$ 의 OD 교통량 배정)
- ② 재배정(Reassign)
 - ②-1 : 모든 O/D쌍에 대해 $x^k, c_w^k, \delta c_w^k$ 산출
 - ②-2 : 이동류별 링크통행비용벡터의 J_m^k 행렬 산출
 - ②-3 : 각 경로의 통행비용의 차이를 최소화하는 경로별 전이교통량 δf_w^k 산출

$$\min \| (\overline{A_w^k})^T J_m^k \overline{A_w^k} \delta f_w^k - \delta \overline{C_w^k} \| \text{ (가우스 소거법)}$$

$$\text{②-4 경로 교통량 갱신 } f_{w_n}^k := f_{w_n}^k + \delta f_{w_n}^k$$

- ③ 수렴성 검증 : 전체 경로교통량 중에서 전이되는 교통량의 절대값의 비율이 ϵ 보다 작으면 즉 $\sum_{w=1}^N \sum_i |\delta f_{w_n}^k| / d_w < \epsilon$ 이면 알고리즘 종료, 아니면 ② 재배정 단계로 이동



<그림 9> Test Network 형태 및 OD Table

[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 삭제

② link-path matrix A_w^k, A^k 업데이트 후 [Step1]로 이동

며 신호최적화를 위한 유전자알고리즘의 검색체 수(population)는 30개로 적용했다. 신호최적화와 통행배정의 반복수행은 총 100회를 수행하였다.

2. 실험결과 및 분석

IV. 모형의 검증 및 평가

1. 실험개요

본 모형의 비용함수는 하류부노드가 신호교차로인 경우와 아닌 경우로 구분된다. 신호교차로가 아닌 경우는 링크비용함수로 BPR함수를 사용하였고 다음과 같다.

$$\tilde{c}_i^k = t_i \left[1 + 0.15 \left(\frac{v}{c} \right)^4 \right] \text{ 신호교차로인 경우의 HCM}$$

delay 모형에 의한 비용함수는 다음과 같다.

$$\tilde{c}_i^k = t_i + 0.50C \left[\left(1 - \frac{g_e}{C} \right)^2 / \left(1 - \frac{C}{g_e} \cdot \min(X, 1.0) \right) \right]$$

$$+ 900 \left[(X-1) + \sqrt{(X-1)^2 + 4X} \right]$$

신호주기의 범위 및 녹색시간의 제약조건은 $60 \leq c \leq 200$, $10 \leq \phi \leq 80$ 으로 설정하였다.

Test Network는 총 19개의 node(신호교차로 8개)와 44개의 링크로 구성된 네트워크 상에 총 49개의 OD쌍을 설정하여 적용하였다. 균형통행배정을 위한 적합도 검정에서는 전이되는 교통량의 비율을 0.001 미만이 되는 것으로 설정하였으

본 실험을 통해 분석하고자 하는 항목은 크게 신호교차로를 포함한 통행배정모형이 균형해를 찾는가 하는 것과 bi-level 문제로 구성되어 반복적으로 수행되는 신호최적화와 통행배정의 결과 전체 교통망의 신호제어지체가 감소하여 수렴하는지를 확인하는 것이다.

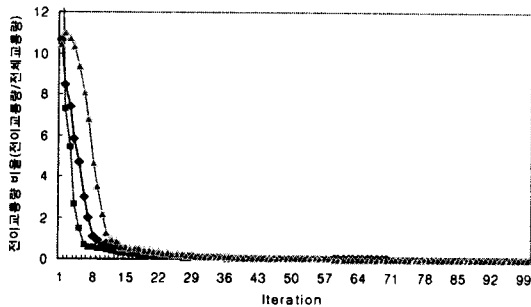
위의 실험조건에 따른 최종적인 통행배정(100번째 반복수행)결과는 아래의 표1과 같다.

[표 1] 통행배정 결과

O	D	Vol	path_Cost	Route									
9	12	160	166	1	2	3							
9	15	170	312	1	2	3	39	40	41				
9	17	150	199	1	24	25	26						
10	14	170	340	23	2	3	39	40	18				
10	15	56	338	23	24	8	9	40	41				
10	15	124	338	23	2	3	39	40	41				
10	16	144	289	23	24	25	16	34					
10	16	27	289	23	2	32	33	34					
10	17	160	206	23	24	25	26						
10	18	150	213	23	24	25	19						
10	19	140	131	23	24	11							
11	9	150	132	31	5	4							
11	16	170	188	31	32	33	34						
11	17	97	271	31	32	12	25	26					
11	17	63	272	31	32	33	20	26					
11	18	28	278	31	32	12	25	19					
11	18	122	278	31	32	33	20	19					
12	9	150	150	6	5	4							
12	15	180	146	39	40	41							
12	16	160	205	39	13	33	34						
12	16	10	205	6	32	33	34						
12	18	150	294	6	32	33	20	19					

13	9	150	267	14	42	6	5	4	
13	10	68	271	14	13	12	28	27	
13	10	92	271	14	42	6	5	27	
13	11	164	179	14	13	36	35		
13	11	6	179	14	42	6	35		
13	15	180	204	14	40	41			
13	16	170	211	14	13	33	34		
14	9	150	314	22	43	42	6	5	4
14	10	16	319	22	21	20	29	28	27
14	10	144	318	22	43	42	6	5	27
14	16	163	296	22	21	34			
14	16	8	296	22	43	13	33	34	
14	18	150	215	22	21	20	19		
14	19	140	284	22	21	37	12	11	
15	9	150	313	44	43	42	6	5	4
15	12	180	163	44	43	42			
15	13	170	167	44	43	10			
15	18	150	255	44	21	20	19		
15	19	140	283	44	43	13	12	11	
16	9	70	306	38	37	12	28	4	
16	9	81	306	38	37	36	5	4	
16	10	160	311	38	37	36	5	27	
16	11	170	183	38	37	36	35		
16	13	68	198	38	37	9	10		
16	13	103	198	38	17	43	10		
16	14	160	151	38	17	18			
16	18	150	168	38	20	19			
17	10	160	192	30	29	28	27		
17	15	150	276	30	16	17	41		
17	19	140	135	30	29	11			
18	9	150	598	15	29	28	4		
18	11	99	660	15	16	37	36	35	
18	11	71	660	15	29	8	36	35	
18	12	103	681	15	16	37	36	3	
18	12	77	682	15	29	8	36	3	
18	13	17	675	15	16	37	9	10	
18	13	153	674	15	29	8	9	10	
18	14	160	215	15	16	17	18		
18	15	150	256	15	16	17	41		
19	10	150	151	7	28	27			
19	14	170	274	7	8	33	17	18	

위의 표는 각 OD쌍에 대해 생성된 1개 이상의 경로와 경로에 할당된 교통량 및 경로통행비용을 나타내고 있다. 결과를 살펴보면, 동일한 OD 쌍에 할당된 경로의 통행비용은 거의 동일하며 네트워크상의 교통량이 사용자 평형 상태에 도달했음을 알 수 있다.

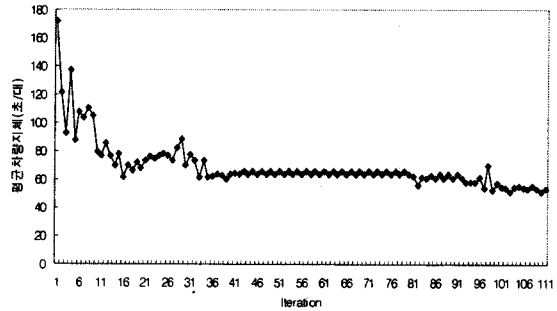


<그림 10> 통행배정알고리즘의 목적함수값

위의 그림은 전체 교통량에 대한 전이교통량의 비율로 수렴조건 및 정지조건을 기준으로 변화하는 과정을 보여주고 있다. 약 10회 정도의 반복수행후 전이비율(전이교통량/전체교통량)이 1% 미만으로 줄어들어 매우 빠른 수렴 속도를 나타내는 것으로 판단된다.

본 연구의 최종 목적은 통행배정과 신호제어 최적화를 하위, 상위문제로 구성한 bi-level 문제의 최적 해를 구할 수 있는지를 확인하려는

것이다. 이를 위해서 통행배정과 신호최적화를 반복(110회)하여 변화하는 네트워크 평균 신호 제어지체의 변화를 살펴보았다.



<그림 11> 네트워크 평균신호제어지체의 변화

위의 그림은 총 110회의 Iteration을 수행한 결과이다. 각 Iteration에서의 통행비용은 사용자 균형상태의 교통량에 의한 통행비용이며 평균지체값은 유전자 알고리즘을 통해 최적화된 결과이다. 결과에서 나타나듯이, 반복횟수가 증가할 수록 네트워크의 신호제어 지체는 감소하며 일정한 값으로 수렴되어 간다고 판단된다.

[표 2] 신호제어변수 최적화 결과

평균지체 (초/대)	node#	cycle (s)	현시별 녹색시간 길이							
			g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	g8
52.8	1	110	32	26	26	26	15	43	31	21
	2	80	22	20	18	20	16	26	18	20
	3	80	25	18	18	19	20	23	18	19
	4	80	26	19	18	17	17	28	15	20
	5	110	20	22	36	32	16	26	30	38
	6	80	27	21	15	17	24	24	16	16
	7	130	18	40	28	44	20	38	33	39
	8	90	28	24	15	23	28	24	18	20

최종 반복수행 후의 차로별 평균신호제어변수의 값은 표2와 같다. 모형의 반복수행결과 최초 균형통행배정 결과에 대해 최적화된 171.4초/대의 평균신호제어지체는 최종적으로 52.8초의 평균지체로 감소하였다.

V. 결론

본 연구에서는 신호지체를 반영한 통행배정 모형을 구축하였다. 주요 연구사항을 요약하면, 첫째, 신호지체를 산정하기 위한 교차로의 이동류별 교통량 산출이 용이하도록 모형을 구축한 것이다. 기존의 통행배정 모형에서도 이동류별 교통량을 산정하는 것이 가능하지만 이를 위해서는 기존 모형에 부가적인 자료처리방법론 및 알고리즘을 적용해야 하는 등 상당한 작업이 필요하며 노드링크의 추가등 네트워크의 확장이 필요하다.

그러나 본 연구에서 적용한 Column Generation 통행모형은 경로기반의 특성으로 인하여 비교적 용이하게 이러한 자료를 산출하는 것이 가능하고 따라서 Column Generation 통행모형의 기본 개념을 본 모형에 적용하였고 본 연구에서는 전이 교통량 산출 및 최단경로 탐색알고리즘 등을 추가적으로 구축하여 모형을 구성하였다.

둘째, 일반적으로 유일해가 존재하지 않는 복수의 교차로 신호최적화문제를 해결하기 위하여 본 모형에서는 유전자 알고리즘을 통하여 네트워크 신호최적화모형을 구축하였다. 유전자 알고리즘을 통한 신호최적화는 알고리즘의 수행속도 및 최소지체 탐색에서 만족할 만한 결과를 나타낸 것으로 판단된다.

셋째, 본 연구에서는 신호최적화와 통행배정을 bi-level 문제로 풀어보려는 시도를 했으며 그 방법으로 반복수행기법(iterative algorithm)을 적용하였다. 결과를 통한 분석으로는 통행배정과 신호최적화가 반복하여 수행되어가며 네트워크의 총 통행비용을 최소화하는 방향으로 신호지체가 수렴해가는 것으로 나타났다.

본 연구의 최종적인 지향점은 도시부 네트워크에서 수집할 수 있는 자료를 이용하여 보다 정확한 현재의 교통상황을 파악하고 최적의 교통상황을 유지하도록 하는 전략을 구축하는데 있다. 만약 실시간 동적 OD의 수집 및 예측과 실시간 네트워크 교통변수 제어, 강력한 교통정보의 제공기능이 전제된다면, 본 연구에서 구축된 모형은 교통변수 제어 및 정보제공의 방법론의 일부로 그 기능을 수행할 수 있을 것으로 예상된다. 이를 위해서는 관련분야의 많은 연구가 진행되어야 하며, 본 연구의 결과도 지속적으로 보완되어야 할 것이다. 특히, 신호제어변수 등과 같은 교통제어변수의 적용과 도로 네트워크의 표현에 있어서 보다 미시적인 방법론의 검토가 필요할 것이며, 개별차량의 미시적인 통행행태를 모형에 도입하는 부분에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 임강원, 도시교통계획-이론과 실제-, 서울대학교 출판부, 1986
2. 임강원, 임용택, 교통망분석론, 서울대학교 출판부, 2003
3. 최기주, Network Representation Schemes for U-turn and Implementation in the Vine - based Dijkstra Shortest Path algorithm, 대한교통학회 제13권 3호, 1995
4. 최기주, 장원재, 복합교통망에서의 최적경로 산정모형 개발, 대한교통학회지 제 16권 제4호, 1998, pp.167-189
5. 박준환, 계층별 비용함수를 고려한 대중교통 통행배정모형 개발에 관한 연구, 서울대학교 박사학위논문, 2007
6. Y. Sheffi, Urban Transport Network, Prentice Hall, 1985
7. Claudio Meneguzzo, Via Marzolo 9, STOCHASTIC USER EQUILIBRIUM ASSIGNMENT WITH TRAFFIC-RESPONSIVE SIGNAL CONTROL, 38th European Congress of the Regional Science Association Vienna, August 28 - September 1, 1998
8. Chungwon Lee, Combined traffic signal control and traffic assignment : algorithm, implementation and numerical results, The university of texas at austin December, 1998
9. Park B K, "Development of Genetic Algorithm-Based Signal Optimization Program for Oversaturated Intersection", Texas A&M University, 1998
10. S.C. Wong, Chao Yang, Hong K. Lo, A path-based traffic assignment algorithm based on the TRANSYT traffic model Transportation Research Part B 35 (2001) 163~181
11. Michael J. Maher, Xiaoyan Zhang, Dirck Van Vliet, A bi-level programming approach for trip matrix estimation and traffic control problems with stochastic user equilibrium link flows, Transportation Research Part B 35 (2001) 23~40
12. Ernesto Cipriani, Gaetano Fusco, Combined signal setting design and traffic assignment problem, European Journal of Operational Research 155 (2004) 569,583
13. Francois Dion, Comparison of delay estimates at under saturated and over saturated pre-timed signalized intersection, Transportation Research part B 38(2004) 99-122
14. Halim Ceylan, Michael GH Bell, Genetic algorithm solution for stochastic equilibrium transportation networks under congestion, Transportation Research Part B 39 (2005) 169~185
15. MH. Xu, William H.K. Lam, H. Shao, G.F. Luan, A heuristic algorithm for network equilibration, Applied Mathematics and Computation 174 (2006) 430 - 446
16. Dazhi Sun, Rahim F. Benekohal, Bi-level Programming Formulation and Heuristic Solution Approach for Dynamic Traffic Signal Optimization, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering 21 (2006) 321-333