

대중교통 통행배정모형 개발 및 통행량 기반 대중교통 기종점통행량 추정

A Transit Assignment Model and Transit Passenger OD Estimation from Passenger Counts

이 신 해

(서울시정개발연구원 연구원)

목 차

I. 서론	IV. Gradient 방법에 의한 대중교통 기종점통행량 추정
II. 이론 고찰	V. 결 론
III. 유전자 알고리즘을 이용한 대중교통 통행배정모형 개발	참 고 문 헌

요 약

교통혼잡 문제가 점점 심각해짐에 따라 대중교통의 중요성은 날로 부각되며, 대중교통을 지원하기 위한 정책들이 속속 입안되고 있어 대중교통을 심도 있게 분석할 수 있는 틀의 개발은 필연적이라 할 수 있다. 이에 본 연구는 대중교통 통행배정모형 개발과 대중교통 기종점통행량(OD) 추정을 목적으로 수행되었다.

대중교통 통행배정모형의 개발부분에서는 기존의 대중교통 통행배정모형이 개별차량과 다른 대중교통의 특성을 정확히 반영하고 있지 못하다는 한계를 극복하고자, 최적경로 탐색에는 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)을 통행량 배정에는 로짓모형을 기반으로 한 확률적 통행량 배정모형(Stochastic Network Loading Model)을 이용하여 TATSN 모형을 개발하였다.

그리고, 대중교통 기종점통행량의 추정은 전통적인 기종점통행량 추정 방법인 기종점조사 방법이 시간과 비용이 과대하게 소요된다는 단점을 인식하여 관측통행량을 이용하여 추정하는 방법을 제안하였다.

I. 서론

서울시를 비롯해 인구밀도가 높은 대부분의 대도시에서는 점점 심각해지는 교통혼잡 문제의 해결책을 대중교통에서 찾고 있으나, 대중교통의 통행배정기법 및 기종점통행량(OD) 추정기법은 개별차량에 비해 많이 개발되어 있지 않아, 대중교통에 관한 정책을 분석하는데 어려움을 겪고 있다.

대중교통 통행배정에 대해서는 Spiess-Florian(1989), De Cea-Fernandez(1993) 등이 대중교통의 특성을 고려한 통행배정모형을 개발한 바 있으나, 이 모형들 역시 대중교통의 다양한 특성을 반영하는 데에 한계를 가지고 있다.

한편, 대중교통 정책 수립 및 평가에서 통행배정모형과 더불어 반드시 필요한 것이 대중교통의 기종점통행량인데, 기종점통행량은 비단 대중교통과 관련된 분야뿐만 아니라 교통계획분야 전반에 걸쳐 가장 기본이 되는 자료이다.

기종점통행량을 구축하기 위해서 사용되는 대표적인 방법인 기종점조사(Origin-Destination survey) 방법은 현재에도 많이 사용되고 있기는 하나, 시간과 비용이 과다하게 소요된다는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하고자 관측교통량을 이용하여 기종점통행량을 추정하는 연구가 활발하게 진행되고 있는데, 이는 관측교통량이 갖는 다음과 같은 장점 때문이다.

첫째, 관측교통량은 기종점조사에 소요되는 비용에 비해 저렴한 비용으로 매우 유용한 자료를 얻을 수 있다.

둘째, 관측교통량은 조사하는 기법이 매우 발달하여 획득한 자료의 정확성이 높다.

셋째, 구축하고자하는 기종점통행량과 일치하는 시점의 자료를 쉽게 구할 수 있다.

그러나, 관측교통량을 이용하여 기종점통행량을 추정하는 대부분의 연구가 개별차량을 대상으로 한 것으로 이를 대중교통에 적용한 연구가 거의 없는 실정이다.

위와 같은 현실을 배경으로 본 연구에서는 연구의 목적을 다음과 같이 설정하였다.

첫째, 기존의 대중교통 통행배정 모형이 대중교통의 특성, 즉, 일정한 운행계획, 배차간격, 동일 수단간 또는 타 수단간의 환승 등을 고려하지 못하는 문제점을 개선하여 현실에 더욱 가까운 대중교통의 통행배정기법을 개발한다.

둘째, 개별차량에 국한되어 있던 관측교통량 기반 기종점통행량 추정 기법을 대중교통에 적용하여 관측통행량을 기반으로 대중교통 기종점통행량을 추정한다.

II. 이론 고찰

1. 대중교통 통행배정모형

대중교통 통행배정모형으로 가장 흔하게 사용되고 있는 최적전략(Optimal Strategy) 통행배정모형은 Spiess-Florian(1989)에 의해서 제안된 모형이다.

대중교통 이용자는 목적지까지 도착하기 위하여 경로 선택 방법을 다양하게 설정할 수 있는데, 이러한 경로 선택 방법들의 집합을 전략(Strategy)이라고 정의하였다. Spiess-Florian(1989)은 전략을 수학적으로 모형화 할 수 있도록, 승객이 통행 중에 얻을 수 있는 정보는 대기하고 있는 정류장에서 다음에 도착하는 노선이 무엇인가에 대한 정보밖에 없다고 가정하였다.

위와 같은 가정하에서 수립 될 수 있는 다수의 전략 중에 통행자의 평균통행시간(expected

travel time)을 최소화해주는 전략을 Spiess-Florian은 최적전략(Optimal Strategy)이라 하고, 모든 통행은 이 전략에 따라 이루어진다는 최적전략(Optimal Strategy)에 의한 통행배정모형을 개발하였다.

최적전략 모형에서 대중교통의 통행체계는 출발지에서 정류장까지의 접근, 정류장에서의 차량대기, 차량에 승차, 차량으로부터 하차, 두 정류장 사이의 도보, 정류장으로부터 목적지까지의 접근 등의 구성요소로 이루어지며 통행자의 통행비용은 이 구성요소에 드는 비용을 모두 포함하는 일반적인 개념으로 정의된다.

평균통행시간(expected travel time)을 최소화하는 최적전략을 수식으로 모형화하면 식 (2-1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 \text{Min} \quad & \sum_{a \in A} c_a v_a + \sum_{i \in I} \frac{v_i}{\sum_{a \in A_i^+} f_a} & (2-1) \\
 \text{s.t.} \quad & v_a \leq \frac{f_a}{\sum_{a' \in A_i^+} f_{a'}} v_i, \quad a \in \overline{A_i^+}, \quad i \in I \\
 & v_i = \sum_{a \in A_i^-} v_a + g_i, \quad i \in I \\
 & v_a \geq 0, \quad a \in A
 \end{aligned}$$

여기서, $A = \{a\}$: 링크(노선구간) 집합

$I = \{i\}$: 노드(정류장) 집합

\overline{A} : 주어진 전략에 포함되는 링크(노선구간) 집합,

$(\overline{A} \subseteq A)$

A_i^+ : 노드(정류장) i 에서 나가는 링크(노선구간) 집합

A_i^- : 노드(정류장) i 로 들어오는 링크(노선구간) 집합

$\overline{A_i^+}$: A_i^+ 에 속하는 링크(노선구간) 중에서 전략 \overline{A} 에 속하는 링크(노선구간) 집합, 즉, $A_i^+ \cap \overline{A}, \quad i \in I$

$\overline{A_i^-}$: A_i^- 에 속하는 링크(노선구간) 중에서 전략 \overline{A} 에 속하는 링크(노선구간) 집합, 즉, $A_i^- \cap \overline{A}, \quad i \in I$

g_i : 노드(정류장) i 에서 목적지 노드(정류장) s 로의 통행수요, $i \in I - \{s\}$

v_i : 노드(정류장) i 에서의 통행량

v_a : 링크(노선구간) a 의 통행량
 c_a : 링크(노선구간) a 의 통행시간
 f_a : 링크(노선구간) a 의 운행빈도

목적함수 식 (2-1)이 의미하는 것은 평균통행시간을 최소화하는 것을 의미하고 있는데, 첫 번째 항은 링크(노선구간)통행시간을 두 번째 항은 각 노드(정류장)에서의 대기시간을 나타내고 있다. 그리고 식 (2-1)의 제약식들은 각각 아래와 같은 의미를 지니고 있다.

첫째 제약식은 노드(정류장) i 의 통행량 v_i 가 $\overline{A_i^+}$ 에 속하는 링크(노선구간)로 배정되는 방법을 의미하는데, 노드(정류장) i 에 도착한 통행은 운행횟수에 비례하여 각 링크(노선구간)에 배정되게 된다.

$$P_a(\overline{A_i^+}) = \frac{f_a}{\sum_{a \in \overline{A_i^+}} f_a}, \quad a \in \overline{A_i^+} \quad (2-2)$$

$$v_a = P_a(\overline{A_i^+}) \cdot v_i$$

둘째 제약식은 각 노드(정류장)에서의 통행량이 보존되는 것을 의미하는데, 즉, 노드(정류장) i 의 총 통행량은 노드(정류장) i 에 도착하는 통행량과 노드(정류장) i 에서 새로이 발생하는 통행량의 합으로 표시된다는 것을 의미한다.

$$\begin{aligned}
 \sum_{a \in \overline{A_i^+}} v_a &= \sum_{a \in \overline{A_i^+}} [P_a(\overline{A_i^+}) \cdot v_i] \\
 &= \sum_{a \in \overline{A_i^+}} [P_a(\overline{A_i^+}) \cdot (\sum_{a \in \overline{A_i^-}} v_a + g_i)] \\
 &= \sum_{a \in \overline{A_i^-}} v_a + g_i \\
 \sum_{a \in \overline{A_i^+}} v_a - \sum_{a \in \overline{A_i^-}} v_a &= g_i
 \end{aligned} \quad (2-3)$$

2. 기종점통행량 추정

1) 정의 및 기본이론

관측교통량을 이용하여 기종점통행량을 추정하는 문제를 Cascetta와 Nguyen (1988)은 "관측교통량자료와 이용할 수 있는 기타의 자료를 최대한으로 활용하여 기종점통행량을 추정하

는 것"으로 정의하였다.¹⁾ 여기에서 관측교통량자료이외의 이용할 수 있는 기타의 자료에는 표본 기종점통행량, 사전에 알려져 있는 기종점통행량이 있다.

관측교통량을 이용하여 기종점통행량을 추정하는 것은 관측교통량이 기종점통행량의 통행 배정 (Assignment) 결과라는 점을 이용한 것인데, 관측교통량으로부터 기종점통행량을 추정하는 가장 중요한 원리는 각 기종점통행량이 사용하는 경로를 결정하는 것이다. 이 단계를 수식으로 표현하면 식 (2-4)와 같다.

$$\hat{v}_a = \sum_{ij} t_{ij} \cdot p_{ij}^a, \quad 0 \leq p_{ij}^a \leq 1 \quad (2-4)$$

여기서, t_{ij} = 기종점쌍 ij 의 통행량

p_{ij}^a = 기종점쌍 ij 의 링크 a 에 대한 선택확률

\hat{v}_a = 링크 a 의 관측교통량

연구대상지가 N 개 존으로 구성되어 있다면, 기종점쌍의 개수, 즉, 기종점통행량의 개수는 N^2 개인데, 식 (2-27)에 따라 N^2 개의 미지의 기종점통행량 t_{ij} 를 구하기 위해서는 N^2 개의 비종속(independent)이면서 일치(consistent)된 관측교통량 \hat{v}_a 가 있어야만 하나, 현실적으로 관측교통량을 N^2 만큼 확보하는 것은 어려운 일이다.

따라서, 미지의 기종점통행량 t_{ij} 에 비해 방정식이 수가 적어 유일한 해가 존재하지 않고 다수의 해가 발생하는, 즉, 주어진 관측교통량 조건을 만족시키는 다수의 추정 기종점통행량 q_{ij} 가 존재하는 문제가 발생한다. 이러한 문제를 극복하고 적절한 기종점통행량을 얻기 위한 방법을 일반적으로 구조적인 방법(structure method)과 비구조적인 방법(unstructure method)으로 구분한다.

구조적인 방법은 사전에 알려져 있는 기종점통행량이나 전수화한 기종점통행량, 또는 중력모형이나 직접수요모형 등으로 추정된 기종점통행량의 통행행태를 기종점통행량 추정시에 제약조건으로 부여하여 가능한 해의 수를 줄이는 것이고, 비구조적인 방법은 기종점통행량 추정에 필요한 추가 정보를 최소화하기 위하여 maximum likelihood 및 entropy maximization 를 이용하는 것이다.

2) 문제점

1) Cascetta E. and Nguyen S., "A unified framework for estimating or updating OD matrices from traffic counts", *Transportation Research B*, Vol. 22, pp. 437-455, 1988.

(1) 다수해 (multi solution) 발생

다수해가 발생에 대한 문제는 위에서도 언급하였듯이 관측교통량의 개수가 미지의 기종점 쌍의 개수보다 적어서 발생하는 문제이다. 즉, 관측교통량으로부터 기종점통행량을 추정하는 문제를 수학적으로 해석하면 부정방정식의 문제가 된다. 따라서 목적함수 및 제약식을 만족하는 해, 즉, 추정 기종점통행량이 다수 발생하게 된다.

따라서, 목적함수 및 제약식을 만족하는 기종점통행량 중에 신뢰할 수 있는 기종점통행량을 선택하는 과정이 관측교통량으로부터 기종점통행량을 추정하는 문제에서 생략되어서는 안 되는 과정이다.

(2) 종속성 (dependency)

종속성의 문제는 도로망 전체의 관측교통량 중 몇몇 구간의 관측교통량은 주변 링크교통량과 선형결합으로 이루어진다는 점에서 발생한다. 즉, 유출입이 같으면 링크간에는 선형종속관계가 형성되고 이러한 링크에 대해서는 추가적인 정보를 얻을 수 없다는 것이다. 이러한 종속성의 문제는 미지의 기종점통행량 개수만큼 관측통행량을 확보하는 것을 더욱 어렵게 만든다.

(3) 불일치 (inconsistency)

불일치의 문제는 첫째, 관측오차로 인해 총 유입통행량과 총 유출통행량이 일치하지 않는 관측교통량, 둘째, 상이한 시점에서 조사된 관측교통량, 셋째, 조사된 관측교통량을 잘 표현하지 못하는 통행배정모형 등의 원인으로 발생한다.

3) 추정기법 : Gradient 방법

기존의 기종점통행량 추정 기법들이 관측교통량 \hat{v}_a 가 배정교통량 v_a 와 일치한다는 제약조건하에 참(true) 기종점통행량 t_{ij} (기본 기종점통행량)²⁾와 추정 기종점통행량 q_{ij} 의 차이를 최소화시키는 것으로 목적함수를 구성한데 반해, Spiess(1990)³⁾가 제안한 Gradient 방법은 Bi-level구조를 하고 있으면서 관측교통량 \hat{v}_a 와 배정교통량 v_a 의 차를 최소화하는

2) Spiess는 이것을 참(true) 기종점통행량이라 하지 않고 "a-priori" 기종점통행량이라고 표현하였는데, 이는 참(true) 기종점통행량을 얻는 것이 불가능한 일이기 때문에 "a-priori" 기종점통행량이라고 표현한 것이다.

본 연구에서는 "a-priori" 기종점통행량을 기본 기종점통행량이라고 명명하였는데, 기본 기종점통행량으로 사용할 수 있는 대표적인 기종점통행량으로는 대규모 기종점조사를 통해 구축된 기종점통행량과 자동으로 집계되는 지하철역간 기종점통행량 등이 있다.

3) Spiess, H., "A gradient approach for the O-D matrix adjustment problem", EMME/2 support center, 1990.

목적함수를 구성함으로써 기존의 기종점통행량 추정기법들이 과다한 계산시간으로 인해 대규모네트워크에는 적용하기에 힘들었던 단점을 보완하였다. 또한 Gradient 방법은 기본 기종점통행량이 가지고 있는 정보를 가장 많이 포함한다는 장점이 있다.

Gradient 방법은 최급강하방향(steepest descent direction)을 따르는 볼록 최소화문제(convex minimization problem)로 구성되는데, 그에 따른 목적함수는 식 (2-5)와 같다.

$$\begin{aligned} \min Z(t_{ij}) &= \frac{1}{2} \sum_{a \in A} (v_a - \hat{v}_a)^2 & (2-5) \\ \text{s.t.} \quad v &= \text{assign}(t_{ij}) \end{aligned}$$

여기서,

$\text{assign}(t_{ij})$: 기종점통행량 t_{ij} 의 통행배정 결과로 나온 통행량을 표시하기 위한 유사함수(pseudo function)

v_a : 링크 a 의 배정교통량(assigned volume)

\hat{v}_a : 링크 a 의 관측교통량(observed volume)

식 (2-5)의 해, 즉, Gradient방법에 의한 추정 기종점통행량은 식 (2-6)과 같다.

$$q_{rs}^{\ell+1} = \begin{cases} t_{rs} & \ell = 0, \\ q_{rs}^{\ell} \left(1 - \lambda^{\ell} \left[\frac{\partial Z(q_{ij})}{\partial q_{rs}} \right]_{q_{rs}^{\ell}} \right) & \ell = 1, 2, 3, \dots \end{cases} \quad (2-6)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \frac{\partial Z(q_{ij})}{\partial q_{rs}} &= \sum_a \sum_k \delta_{rsk}^a \cdot p_{rs}^k \cdot (v_a - \hat{v}_a) \\ &= \sum_k p_{rs}^k \sum_a \delta_{rsk}^a \cdot (v_a - \hat{v}_a), \quad a \in \hat{A} \end{aligned}$$

\hat{A} = 관측교통량이 존재하는 링크집합, $\hat{A} \subseteq A$

$$v_a = \sum_r \sum_s \sum_k \delta_{rsk}^a \cdot f_{rs}^k, \quad a \in A$$

$$\delta_{rsk}^a = \begin{cases} 0 & \text{만약 } a \notin k \\ 1 & \text{만약 } a \in k \end{cases}$$

$$p_{rs}^k = \frac{f_{rs}^k}{q_{rs}}$$

$$q_{rs} \in q_{ij}, \quad t_{rs} \in t_{ij}$$

식 (2-6)에 의해서 기종점통행량을 추정하려면 해의 갱신을 위하여 이동의 크기(step length)가 있어야 하는데, 이동의 크기가 작으면 해의 갱신 폭이 적어 기종점통행량을 추정하는데 시간이 많이 소요되며, 이동의 크기가 너무 크면 수렴조건을 만족하는 해를 구하기가 어렵게 된다. 따라서 적절한 수준의 이동의 크기를 구하여야 하는데, 최적 이동의 크기는 식 (2-7)에 의해서 구한다.

$$\begin{aligned} \min_{\lambda} \quad & Z(q_{rs}(1 - \lambda(\frac{\partial Z(q_{ij})}{\partial q_{rs}}))) \quad (2-7) \\ \text{s.t.} \quad & \lambda \frac{\partial Z(q_{ij})}{\partial q_{rs}} \leq 1, \quad q_{rs} \in q_{ij}, \quad \forall rs \\ & q_{rs} > 0 \end{aligned}$$

식 (2-7)의 해, 즉 최적 이동의 크기 λ^* 는 식 (2-7)의 미분값, 식(2-8)을 "0"으로 하는 λ 값을 구하면 되는데, 그 과정은 다음과 같다.

$$\frac{\partial Z(\lambda)}{\partial \lambda} = \sum_a \frac{dv_a}{d\lambda} \frac{\partial Z(\lambda)}{\partial v_a} = \sum_a v'_a (v_a - \hat{v}_a + \lambda v'_a), \quad a \in \hat{A} \quad (2-8)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } v'_a &= \frac{dv_a}{d\lambda} = \sum_{rs} \frac{dq_{rs}}{d\lambda} \frac{\partial v_a}{\partial q_{rs}} \\ &= - \sum_{rs} q_{rs} (\sum_k p_{rs}^k \sum_a \delta_{rsk}^a (v_a - \hat{v}_a) (\sum_k \delta_{rsk}^a p_{rs}^k)), \quad a \in \hat{A} \end{aligned}$$

식 (2-8)을 "0"으로 하는 λ^* 는 식 (2-9)와 같다.

$$\lambda^* = \frac{\sum_a v'_a (\hat{v}_a - v_a)}{\sum_a v'_a{}^2}, \quad a \in \hat{A} \quad (2-9)$$

4) 추정 기종점통행량의 신뢰성 검정방법

관측교통량으로부터 기종점통행량을 추정하는 문제에서 중요한 것은 추정 기종점통행량의 신뢰도를 어떻게 검증하는가 하는 것이다. 왜냐하면, 관측교통량을 이용하여 기종점통행량을 추정하는 문제에 존재하는 문제점을 기술한 부분에서도 이미 언급한 바와 있지만 관측교통량을 이용하여 기종점통행량을 추정하는 문제는 다수해(multi solution)를 발생시키기 때문이다.

참(true) 기종점통행량은 알려져 있지 않은 상태로 존재하기 때문에 추정 기종점통행량의 신뢰도를 정확히 평가하는 것은 매우 어려운 일이다. 이에 추정 기종점통행량의 신뢰성은 신뢰성 평가과정에서 흔히 사용되는 통계적 방법인 평균자승근오차(Root Mean Square Error : RMSE), 상대평균자승근오차(Relative RMSE%), 상대평균절대오차(Relative Mean Absolute Error : RMAE%), F-검정 등과 더불어 MPRE(Maximum Possible Relative Error)⁴⁾에 의한 Re-value와 TLF(D (Trip Length Frequency Distribution)에 의해 평가된다.

3. 유전자 알고리즘

유전자 알고리즘(Genetic Algorithm : GA)은 다윈의 진화론과 멘델의 유전 이론에 근거한 자연진화과정을 최적해 탐색 알고리즘에 도입한 것으로서, 고전수학에서 풀기 힘든 문제를 해결하기 위해 1970년대 초 John Halland에 의해 개발되었다.

유전자 알고리즘은 해집합이 동시에 주어진 환경에 따라 최적의 상태로 진화하고 진화시 터득한 정보는 다음세대로 전달된다는 기본 원리를 바탕으로 하고 있다.

유전 알고리즘이 다른 최적화 방법과 다른 점은 다음과 같다.⁵⁾

- 파라미터를 코딩한 것을 직접 이용한다.
- 점(point)이 아닌 다점(multi points, : 군(population)) 탐색 방법이다.
- 탐색에 비용 정보(fitness function)를 이용하며, blind search를 한다. (해를 탐색하는데 있어 공간에 제한이 없으며, 기존의 최적화 알고리즘들이 겪었던 함수의 연속성, 미분 가능성, 선형성 등의 문제를 겪지 않아도 된다.)
- 결정론적인 규칙이 없고 확률적 연산자를 사용하여 수행된다.

이와 같은 특징으로 유전자 알고리즘은 계산에 의존한 최적화 방법에 비하여 전역해를 구할 가능성이 높으며 효율적이다.

1) 유전자 알고리즘의 구성요소

Michalewicz(1996)⁶⁾는 유전자 알고리즘의 구성요소를 다음의 5가지로 설명하였다.

- 유전자 알고리즘에서 사용할 수 있게 표현된 목적함수의 가능해(potential solution) 집합
- 다음 세대의 구성을 변경시키는 유전 연산자(genetic operator)
- 해의 적합도(fitness)에 따라 우수성을 평가할 수 있는 함수
- 선택 기법

4) H. Yang, Y. Iida, T. Sasaki, "An analysis of the reliability an origin-destination trip matrix estimated from traffic counts", *Transportation Research B*, Vol. 25, pp 351-363, 1991.

5) 심귀보, 진화 알고리즘 강의노트, <http://rics.cie.cau.ac.kr/EAs/GAs.html>

6) Z. Michalewicz, *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, Springer Verlag, 1996.

- 유전자 알고리즘에서 사용되는 다양한 모수(parameters)

(1) 염색체

유전자 알고리즘으로 최적해를 탐색하려면 목적함수에 맞는 가능해를 유전자 알고리즘의 양식에 맞게 표현하여야 하는데, 유전자 알고리즘에서는 가능해를 문자나 기호의 배열인 염색체(chromosome)로 표현한다. 그리고, 염색체를 구성하는 문자나 기호들을 유전자(gene)라 부른다.

염색체 표현의 유효성을 판단하기 위한 조건은 다음과 같은 것이 있다.

- 완전성(completeness) : 목적함수의 가능해는 모두 염색체로 표현되어야 한다.
- 건전성(soundness) : 유전자 알고리즘 공간상의 염색체는 목적함수 공간의 가능해에 대응되어야 한다.
- 비용장성(nonredundancy) : 염색체와 가능해는 1 대 1 대응을 가져야 한다.

(2) 유전 연산자

유전 연산자(genetic operator)란 초기 가능해로 생성된 집단을 갱신시켜, 다음 세대를 생성하는 과정에서 필요한 연산자로 중요한 유전 연산자에는 교배(crossover)와 돌연변이(mutation)가 있다.

교배는 2개의 염색체간에 구성하고 있는 유전자를 부분적으로 서로 바꿈으로써 새로운 개체를 생성하는 것이다. 이 때 부모의 형질이 자손에게 적절히 계승되어야 하는데, 교배기법으로는 단순교배, 복수점교배, 균일교배, 부분일치교배, 순서교배, 주기교배 등이 있다.

돌연변이란 염색체를 구성하는 임의의 유전자에 대하여 일정한 돌연변이 확률을 적용하여 대립 유전자의 값으로 바꾸는 것이다. 염색체와 근접한 새로운 염색체를 생성하는 과정이다.

(3) 적합도 함수

목적 함수(objective function)는 각 염색체의 적합도를 평가하는 가장 좋은 지표이다. 그러나 목적함수의 값의 범위는 문제마다 다르기 때문에 보통 정해진 구간 사이의 양수값을 갖도록 표준화된 값을 사용하는데, 대표적인 표준화 방법으로는 선형 표준화(linear scaling), σ 절단(σ truncation), 거듭제곱 표준화(power law scaling)가 있다.

그리고, 적합도 함수로 목적함수를 그대로 사용하지 않는 또 하나의 이유는 알고리즘 수행 초기에 우수해를 발견하여 전역해 탐색을 수행하지 않고, 지역해 탐색만으로 조기 종료하는 문제를 방지하기 위한 것이다.

(4) 선택 기법

적합도 함수를 기반으로 우수한 염색체는 살아남고 그렇지 못한 염색체는 도태되는 자연

선택 (natural selection) 현상을 모형화한 것이다. 여러 가지 선택기법들이 존재하지만 그 기본 원리는 더 좋은 개체들에게 특권을 부여한다는 것에 있어서 공통적이다. 일반적으로 널리 사용되는 선택 기법으로는 적합도 비례 선택 (proportionate selection), 기대치 선택법 (expected-value selection), 순위 선택법 (ranking selection), 토너먼트 선택법 (tournament selection), 엘리트 보존 선택 (elitist preserving selection), GENITOR 알고리즘이 있다.

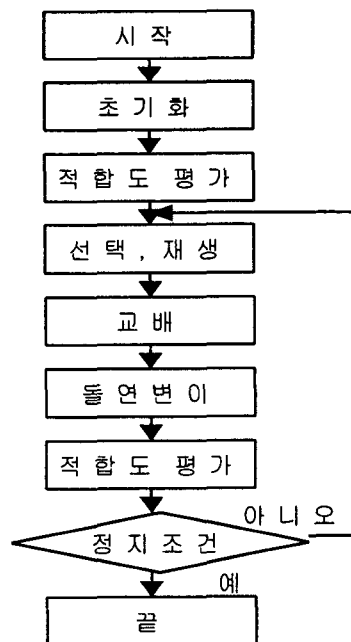
(5) 모수

유전자 알고리즘에서 다양한 모수 (parameter) 들을 사용하는데, 유전자 알고리즘의 연산과정에서 요구되는 대표적인 모수에는 우수염색체를 (x), 교배확률 (p_c), 돌연변이확률 (p_m), 모집단의 크기 (popsize), 최대 세대수 (max_gen) 등이 있다.

2) 유전자 알고리즘의 진행절차

위의 다섯 가지 구성요소를 바탕으로 유전자 알고리즘은 의 흐름은,

- 초기화 : 유전자로 구성되는 염색체를 바탕으로 적당한 크기 (popsize) 로 구성되는 모집단 (population) 을 생성하는 과정
- 평가 : 적합도 함수를 기반으로 생성된 염색체를 평가하는 과정
- 선택 및 재생 : 평가 결과를 이용하여 모집단을 재편성하는 과정
- 갱신 : 교배 및 돌연변이 연산자를 이용하여 모집단을 갱신시키는 과정을 순차적으로 거치면서 반복 진행되는데, 이를 간략히 표현하면 다음과 같다.

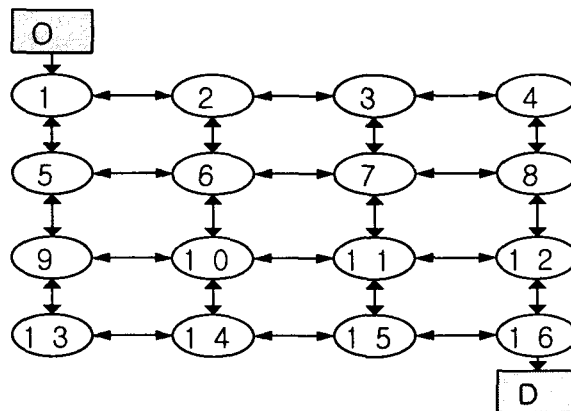


<그림 2-1> 유전자 알고리즘의 흐름도

Ⅲ. 유전자 알고리즘을 이용한 대중교통 통행배정모형 개발

1. 네트워크 차원에서의 유전자 알고리즘 해석

유전자 알고리즘의 초기화, 평가 및 선택, 교배 및 돌연변이를 통한 갱신 과정이 네트워크 차원에서 어떻게 적용되는가를 살펴보기 위하여 <그림 3-1>과 같은 가상 네트워크를 설정하였다.



<그림 3-1> 네트워크 예시

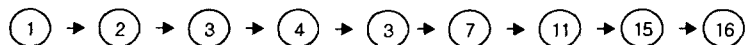
1) 초기화 (Initialization)

유전자 알고리즘의 첫 번째 단계는 목적함수의 가능해를 의미하는 염색체(chromosome)를 바탕으로 적당한 크기(popsize)의 모집단(population)을 생성하는 것이다. 이것을 네트워크 차원에서 해석하면 가능한 경로(path)집합을 생성하는 과정으로 해석할 수 있는데, 염색체는 경로에 해당되고, 염색체를 구성하는 유전자(gene)들은 경로를 구성하는 노드(node)에 해당된다.

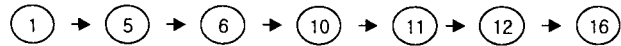
<그림 3-1>과 같은 네트워크에서 모집단을 생성하는 과정을 설명하면 다음과 같다.

우선, 기점(origin)과 종점(destination)을 연결하는 모든 경로는 네트워크의 가능해(potential solution)가 되는데, 우선 이들이 유전자 알고리즘이 인식하는 염색체로 표현하여야 한다. 만약, <그림 3-1>과 같은 네트워크상에서 임의의 경로 두 개를 다음과 같이 설정한다면,

○ path 1 :



○ path 2 :



그에 대응하는 유전자 알고리즘의 염색체 A, B 는 각각 다음과 같이 표현된다.

○ path 1 : $A = (g[1] \ g[2] \ g[3] \ g[4] \ g[5] \ g[6] \ g[7] \ g[8] \ g[9])$

$= (1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 3 \ 7 \ 11 \ 15 \ 16)$

○ path 2 : $B = (g[1] \ g[2] \ g[3] \ g[4] \ g[5] \ g[6] \ g[7])$

$= (1 \ 5 \ 6 \ 10 \ 11 \ 12 \ 16)$

둘째, 미리 설정한 모집단의 크기만큼 위와 같은 방법으로 염색체로 표현되는 임의의 경로를 생성시킨다.

2) 평가, 선택 및 재생

평가(Evaluation)단계는 초기화 과정에서 생성된 염색체들의 목적함수 적합도를 평가하는 것으로서, 적합도 함수의 값을 구하는 것이다.

선택(Selection)이란 평가과정에서 산출된 적합도 함수의 값을 기반으로 미리 설정한 선택 기법에 따라 염색체들을 재생시키거나 도태시켜 모집단을 재편성하는 과정이다.

이러한 평가와 선택 및 재생 과정을 네트워크 차원에서 해석하면, 초기화에서 생성된 경로들의 통행시간을 산출한 후, 산출된 통행시간을 기반으로 통행시간이 긴 경로는 가능해 집합에서 제외하고, 통행시간이 짧은 경로들만으로 가능해 집합을 재편성하는 것을 의미한다.

3) 교배 및 돌연변이

교배(Crossover)와 돌연변이(Mutation)는 재편성된 모집단으로부터 새로운 염색체를 생성시키는 과정이다.

교배 과정과 돌연변이 과정을 염색체로 표현하면 다음과 같으며,

○ 교배 과정(단순 교배) : 공통유전자 "11"

$A = (1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 3 \ 7 \ 11 \ 15 \ 16)$

$B = (1 \ 5 \ 6 \ 10 \ 11 \ 12 \ 16)$

↓ (교배)

$$A' = (1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 3 \ 7 \ 11 \ 12 \ 16)$$

$$B' = (1 \ 5 \ 6 \ 10 \ 11 \ 15 \ 16)$$

○ 돌연변이 과정 : 돌연변이 유전자 "6"

$$B = (1 \ 5 \ 6 \ 10 \ 11 \ 12 \ 16)$$

↓ (돌연변이)

$$B' = (1 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8 \ 12 \ 16)$$

이러한 과정을 네트워크 차원에서 해석하면, 초기 모집단에는 포함되지 않았던 새로운 경로가 모집단에 추가되는 것을 의미한다.

2. 유전자 알고리즘을 이용한 대중교통 통행배정 모형개발

1) 전제

Spiess-Florian (1989), De Cea-Fernandez (1993) 등 많은 연구자들이 대중교통이 일정한 노선을 가지고 운행한다는 특징, 대중교통에는 공통노선이 존재한다는 특징, 대중교통의 통행시간이 개별차량과는 다르게 구성된다는 특징 등을 고려한 대중교통 통행배정모형을 개발하였다.

그러나, 대중교통은 위에 언급된 특징 외에도 미리 정해진 배차계획에 의해 운행된다는 특징, 즉, 대중교통 통행자의 차량 승차시간은 개별차량의 경우와 같이 자신의 출발시간에 의해서만 결정되는 것이 아니고 자신의 출발시간과 대중교통 수단의 배차계획에 의해서 결정된다는 특징이 있고, 정류장 승객의 승하차 행태에 의해 대중교통 통행시간에 편차가 존재한다는 특징이 존재하는데 기존의 대중교통 통행배정모형에서는 이러한 점을 고려하지 못하였다.

이에 본 연구에서는 기존의 대중교통 통행배정모형이 고려하지 못한 위의 두 가지 특징을 고려하여 더욱 현실적인 대중교통 통행배정모형을 개발하였는데, 본 모형은 이승재·최인준 (2002) 등과 공동으로 수행한 결정적 네트워크 (Deterministic Network)를 기반으로 지하철의 통행배정모형을 개발한 연구를 확률적 네트워크 (Stochastic Network)를 기반으로 일반적인 대중교통 수단에 적용할 수 있도록 확장한 것인데, 이때에 차량의 용량을 고려할 수 있도록 하였다. 결정적 네트워크와 확률적 네트워크, 그리고 차량의 용량을 고려한 부분에 대해서는 뒤에서 자세하게 언급하기로 한다.

본 연구에서 개발한 대중교통 통행배정모형이 확률적 네트워크를 기반으로 하고있으며 배차간격을 고려할 수 있다는 측면에서 본 연구에서 개발한 모형을 "TATSN : Transit

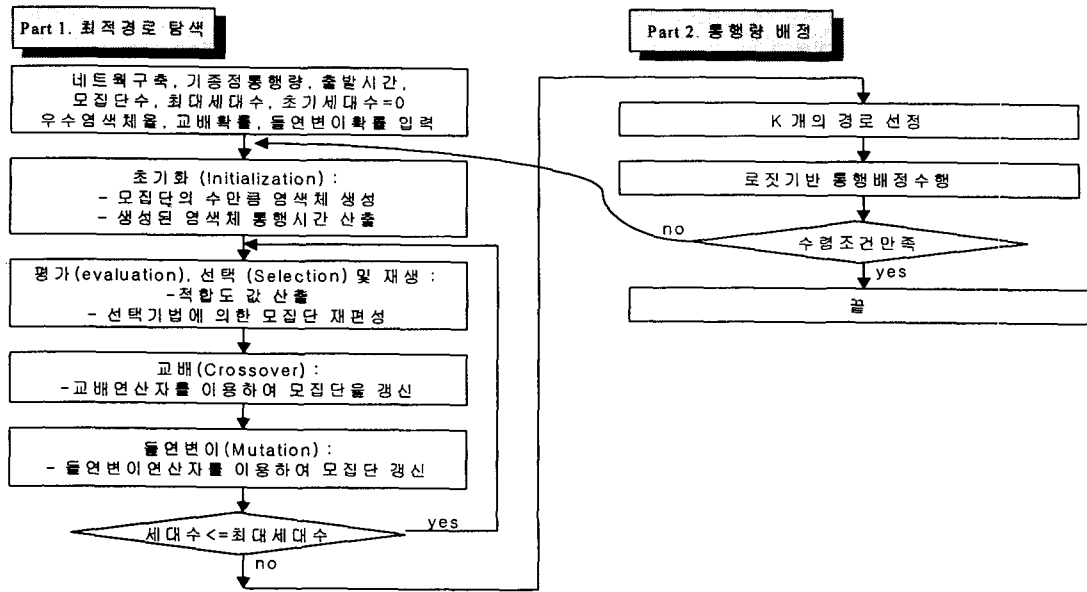
Assignment with Time Table in Stochastic Network”이라 명명하였다.

본 연구에서 TATSN모형의 개발을 위해 설정한 기본 전제는 다음과 같다.

- 전제 1 : 각 노선에는 사전에 결정된 배차간격이 존재하나, 그 배차간격은 일정하지 않아도 무방하다.
- 전제 2 : 통행자의 출발시간은 모형내의 생성되는 변수가 아니고, 기종점통행량과 함께 외부에서 주어진다.
- 전제 3 : 개별차량과의 관계는 고려하지 않았다. 즉, 대중교통의 통행시간은 개별차량 통행량에 의해 변화한지 않는다고 가정하였다.
- 전제 4 : 각 노선구간의 통행시간은 개별차량에 의한 도로혼잡 때문이 아니라 정류장 승객의 승하차 행태로 인하여 편차가 발생한다. 이를 본 논문에서는 확률적 네트워크(Stochastic Network)이라 하였다.
- 전제 5 : 통행자는 자신의 효용을 극대화하는 경로를 선택하는데, 효용은 통행시간만으로 구성된다.
- 전제 6 : 통행량 증가에 따라 발생하는 차내 혼잡을 통행시간 측면에서 반영하였기 때문에 통행량이 증가함에 따라 통행시간이 점차로 증가하는 것으로 하였다.
- 전제 7 : 전제 6의 통행량과 차량 용량의 문제를 풀기 위하여 이용한 모형은 반복 통행배정모형(Capacity Restraint)으로, 반드시 균형(User Equilibrium)조건을 만족시키지는 않는다.

모형 TATSN의 개발과정은 유전자 알고리즘을 이용하여 K 개의 최적경로를 구하는 과정, 통행량을 배정하는 과정으로 구분되는데, 최적경로 탐색에 유전자 알고리즘을 이용한 이유는 대중교통의 다양한 특성, 즉, 통행자의 통행시간, 각 노선의 불규칙한 배차간격, 노선구간 통행시간의 편차, 다수의 환승역에서 발생하는 노선간의 환승 등을 모두 고려한 최적경로 탐색에 기존의 알고리즘을 이용하는 것은 한계가 있기 때문이다.

TATSN 모형의 개발은 <그림 3-2>에 따라 진행된다.

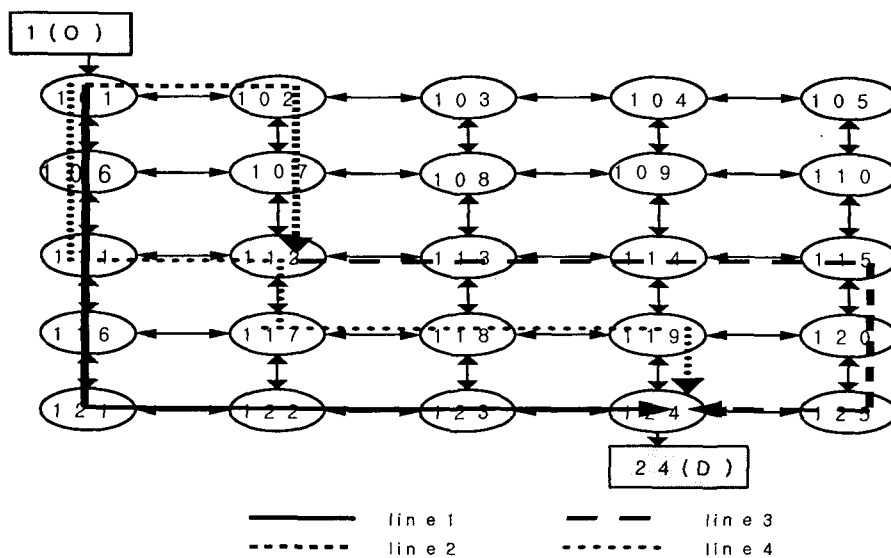


〈그림 3-2〉 유전자 알고리즘을 이용한 대중교통 통행배정모형 개발과정

2) 네트워크 구축 및 염색체의 표현

(1) 네트워크의 구축

본 연구에서 TATSN 모형을 개발하기 위하여 사용한 네트워크는 〈그림 3-3〉과 같은데, 분석 네트워크는 1개의 기종점쌍, 2개의 존 connector, 25개의 노드, 80개의 링크로 구성되어 있고, 그 네트워크 상에 4개의 대중교통 노선이 운행한다고 가정하였다. 그리고, 대중교통 노선 및 대중교통 운행속성은 〈표 3-1〉에 제시되어 있다.



〈그림 3-3〉 대중교통 노선도

〈표 3-1〉 통행량 및 노선정보

	노선 여정 (line itinerary)	통행시간 (분)	통행시간 분산	비고
노선 1	101	-	-	○ 운행속도 : 50km/h ○ 최초운행시간 : 7시 ○ 총운행횟수 : 9회
	106	2.832	0.450	
	111	3.132	0.900	
	116	2.892	0.550	
	121	2.604	1.175	
	122	4.164	0.650	
	123	2.460	0.850	
	124	2.856	0.250	
노선 2	101	-	-	○ 운행속도 : 25km/h ○ 최초운행시간 : 7시 ○ 총운행횟수 : 72회
	102	6.480	0.425	
	107	4.944	0.450	
	112	6.262	0.900	
노선 3	112	-	-	○ 운행속도 : 50km/h ○ 최초운행시간 : 7시 ○ 총운행횟수 : 36회
	113	3.420	0.600	
	114	2.580	0.475	
	115	3.084	1.175	
	120	3.156	1.200	
	125	2.676	0.650	
노선 4	101	-	-	○ 운행속도 : 25km/h ○ 최초운행시간 : 7시 ○ 총운행횟수 : 72회
	106	5.664	0.250	
	111	6.264	1.175	
	112	7.392	0.700	
	117	5.832	0.300	
	118	5.400	0.275	
	119	5.856	0.300	
	124	5.616	0.800	

〈표 3-1〉에는 각 노선별 노선여정과 노선여정에 소요되는 통행시간이 제시되어 있고 이와 더불어 통행시간의 분산값이 제시되어 있는데, 이는 개별차량에 의해서 발생하는 도로혼잡에 의해 변화되는 통행시간을 표현하기 위한 것이 아니라, 정류장 승객의 승하차 행태의 차이로 발생하는 통행시간의 편차를 표현하기 위한 것이다. 이를 본 연구에서는 확률적 네트워크(Stochastic Network)이라 하고, 노선여정의 통행시간이 불변하는 결정적 네트워크(Deterministic Network)과 상대적인 개념으로 정의하였는데, TATSN 모형은 확률적 네트워크를 기반으로 개발되었다.

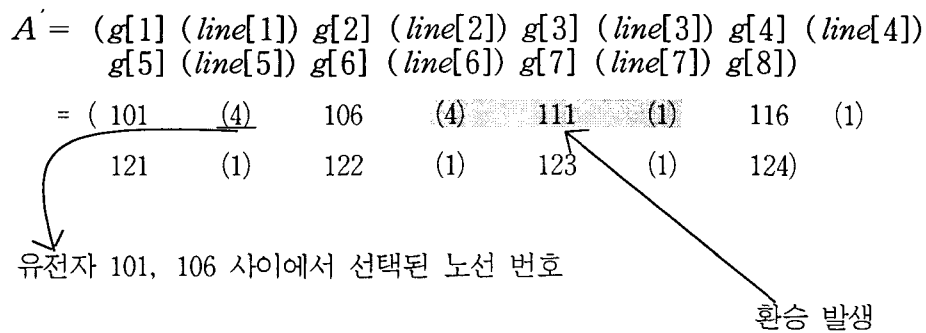
(2) 염색체의 표현

유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)을 이용하여 대중교통 통행배정모형을 개발하기 위해서는 경로를 유전자 알고리즘이 인식할 수 있게 염색체로 표현하여야 한다.

개별차량의 경우에는 염색체, 즉, 경로(path)를 노드들의 집합으로 표현하지만, 대중교

통의 경우 경로를 개별차량과 같은 방법으로 표현하면, 대중교통의 공통노선 (common line) 의 문제로 인해 하나의 염색체가 하나의 경로에 대응되지 않고, 다수의 경로에 대응되는 문제가 발생한다.

본 연구에서는 TATSN 모형 개발시에 위와 같은 공통노선 (common line) 문제를 인식하여, 다음과 같은 방법으로 염색체를 표현하였다.



또한 위와 같이 염색체를 표현하면 공통노선의 문제뿐만 아니라, 노선간의 환승 문제도 동시에 해결 할 수 있다. 즉, 위의 염색체 A'의 유전자 중에서 두 번째 유전자 g(2)와 세 번째 유전자 g(3) 사이를 운행하는 노선은 "4"인데 반해, 세 번째 유전자 g(3)과 네 번째 유전자 g(4) 사이를 운행하는 노선은 "1"로, 유전자 g(3)에서 노선 "4"와 노선 "1" 사이에 노선간 환승이 발생하였음을 알 수 있다.

3) 최적 경로 탐색

(1) 초기화 (Initialization)

초기화 과정에서는 모집단의 크기만큼 (population size : popsize) 만큼 염색체를 생성하고, 생성된 염색체들의 통행시간을 산출하였는데, 생성된 염색체들의 통행시간은 차량의 용량을 고려하기 위하여 노선구간의 통행시간을 통행량 증가에 따라 증가하는 비감소함수의 형태로 구성하였다.

(2) 선택 (Selection)

본 연구에서는 선택기법으로 엘리트 보전전략과 적합도 비례선택기법을 혼합하여 적용하였다. 이렇게 선택기법을 혼합하여 사용함으로써 우수한 염색체가 최적경로에서 제거되는 것을 방지하고, 초기에 탐색과정이 종료되는 것을 방지하였다.

(3) 교배 (Crossover)

교배과정에서는 일정한 교배확률⁷⁾에 따라 교배를 위한 염색체 쌍을 생성하고, 공통유전자를 선정하여 공통유전자 이후의 유전자들을 서로 교환한다.

(4) 돌연변이 (Mutation)

돌연변이과정에서는 일정한 돌연변이확률 (p_m)⁸⁾에 따라 모집단과는 전혀 다른 새로운 염색체를 생성하는 과정이다.

(5) 결과

초기화, 선택, 교배, 돌연변이 과정을 최대 세대수만큼 반복한 결과 산출된 최적 경로는 <표 3-2>와 같다.

<표 3-2> 경로탐색 결과

	경로	통행시간(분)
염색체 1	101 (1) 106 (1) 111 (1) 116 (1) 121 (1) 122 (1) 123 (1) 124	33.125984
염색체 2	101 (2) 102 (2) 107 (2) 112 (3) 113 (3) 114 (3) 115 (3) 120 (3) 125 (3) 124	35.564720
염색체 3	101 (2) 102 (2) 107 (2) 112 (3) 113 (3) 114 (3) 115 (3) 120 (3) 125 (3) 124	45.444649
염색체 4	101 (2) 102 (2) 107 (2) 112 (3) 113 (3) 114 (3) 115 (3) 120 (3) 125 (3) 124	45.881847
염색체 5	101 (2) 102 (2) 107 (2) 112 (3) 113 (3) 114 (3) 115 (3) 120 (3) 125 (3) 124	49.327171
염색체 6	101 (4) 106 (1) 111 (1) 116 (1) 121 (1) 122 (1) 123 (1) 124	49.374058
염색체 7	101 (2) 102 (2) 107 (2) 112 (4) 117 (4) 118 (4) 119 (4) 124	51.022316
염색체 8	101 (4) 106 (1) 111 (4) 112 (4) 117 (4) 118 (4) 119 (4) 124	51.122391
염색체 9	101 (2) 102 (2) 107 (2) 112 (4) 117 (4) 118 (4) 119 (4) 124	51.385384
염색체 10	101 (4) 106 (4) 111 (4) 112 (4) 117 (4) 118 (4) 119 (4) 124	52.534401

4) 통행 배정

TATSN 모형의 두 번째 단계는 첫 번째 단계에서 탐색된 최적경로에 통행량을 배정하는 것이다.

TATSN 모형에서 통행량을 배정하기 위해 사용한 모형은 통행자의 통행시간 인지 정도와 통행자의 이질성을 고려한 확률적 통행배정모형인데, 확률적 통행배정모형 중에서도 로짓모형을 이용하는 로짓기반 통행량 배정모형(Logit based loading Model)을 이용하였다.

7) 본 연구에서는 교배확률로 0.3값을 사용하였다.

8) 본 연구에서는 돌연변이확률로 0.2값을 사용하였다.

로짓모형은 효용극대화이론을 기반으로 한 선택이론에 근거하고 있는데, 본 연구에서는 로짓모형의 선택대안으로 돌연변이 과정에서 산출된 3개의 최적경로를 이용하였고, 각 선택대안의 효용함수는 식 (3-1)과 같이 통행시간만을 변수로 하여 구축하였다.

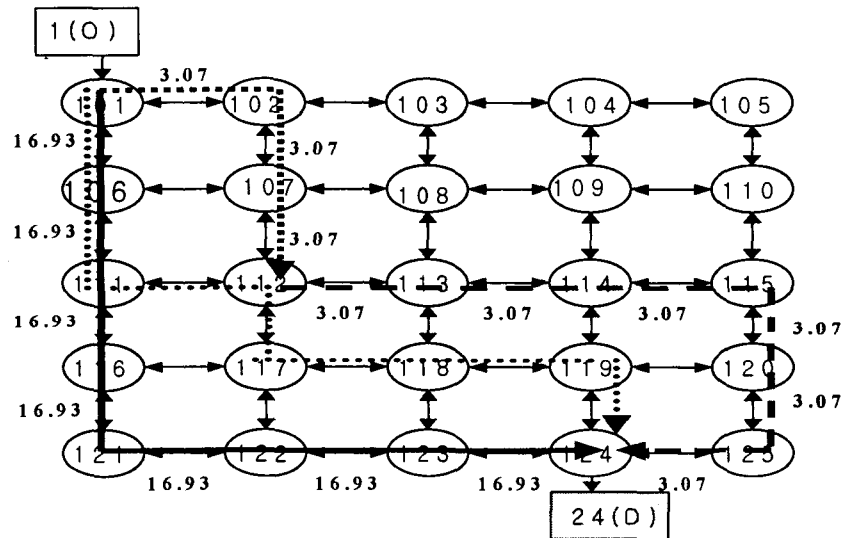
$$V_k = \theta \cdot c_k \quad (3-1)$$

여기서, V_k = 경로 k 의 관측 가능한 효용

c_k = 경로 k 의 통행시간(분)

θ = 정산계수⁹⁾

초기화 과정에서 이미 언급한 바와 같이, TATSN 모형에서는 차량의 용량을 고려하기 위하여 노선구간의 통행시간함수를 통행량 증가에 따라 증가하는 비감소함수로 구축하였고, 이러한 문제를 풀기 위한 알고리즘으로는 반복 통행배정모형 (Capacity Restraint) 을 이용하였다. 따라서 본 연구의 결과로 산출된 통행량은 균형 (User Equilibrium) 조건을 반드시 만족시키지는 않는다. 위에서 결정된 최적경로 3개에 통행량을 배정한 결과는 다음과 같다.



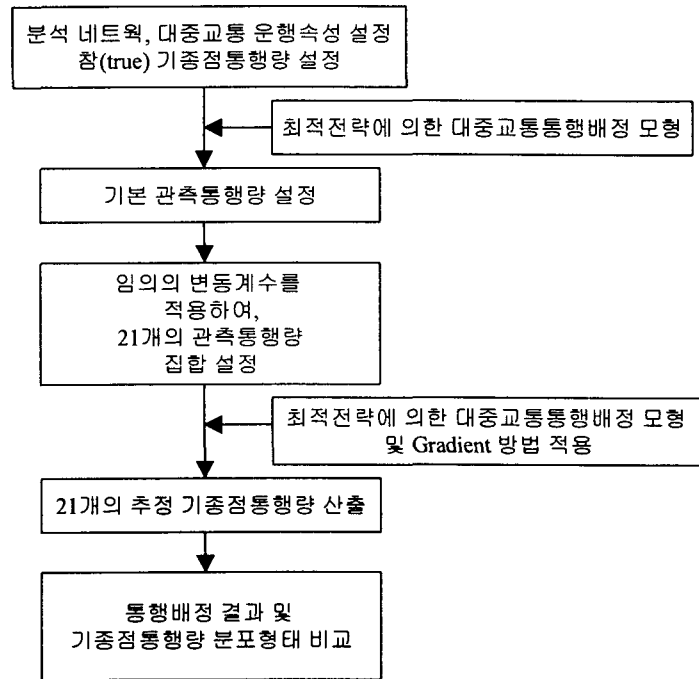
기 중 점 통 행 량 : 20

<그림 3-4> 통행배정 결과

9) 로짓 모형에서 각 선택대안의 효용함수를 구축하고 그 계수를 정산하는 것은 별도의 연구로 진행되어야 하며, 조사에 의한 정확한 자료가 뒷받침되어야 한다. 따라서, 로짓 모형의 효용함수를 구축하고 그 계수를 정산하는 것은 본 연구의 범위에서 제외하고, 본 연구에서는 θ 값으로 임의의 값 0.7을 이용하였다.

〈표 4-2〉 참(true) 기종점통행량

O \ D	1	2	3	4	Sum
1	-	257	374	299	930
2	318	-	288	235	841
3	455	501	-	485	1,441
4	201	299	325	-	825
Sum	974	1,057	987	1,019	4,037



〈그림 4-2〉 신뢰성평가 연구흐름도

2) 결과 분석

(1) 기종점통행량 추정결과 분석

추정된 기종점통행량의 분포가 참(true) 기종점통행량의 분포와 얼마나 유사한가를 분석하는 것이 추정된 기종점통행량을 평가하는데 가장 중요한 지표인데, 추정 기종점통행량의 분포가 참(true) 기종점통행량의 분포와 유사할수록 신뢰성이 높다고 할 수 있다.

본 연구에서는 추정 기종점통행량의 신뢰성을 검증하기 위한 지표로 기종점통행량 분포도, F-검정, MPRE에 의한 Re 값을 이용하였는데, 관측통행량의 크기에 따라 분포형태 유사정도에 약간씩의 차이는 있지만, 관측통행량의 크기가 기본 관측통행량 크기의 160% - 20% 사이에 있을 경우 유의수준 0.05에서 참(true) 기종점통행량과 추정 기종점통행량의 분

포는 동일한 것으로 나타났으며, MPRE에 의한 Re 값도 관측통행량이 기본 관측통행량에 가까워질수록 커지는 것으로 분석되어 관측통행량과 기본 관측통행량의 차이가 작을수록 추정 기종점통행량의 신뢰성이 높은 것으로 나타났다. 이는 교통환경에 급격한 변화가 없을 경우 기종점통행량 추정을 위하여 Gradient 방법을 이용하는 것이 타당하다는 것을 의미한다.

〈표 4-3〉 참(true) 기종점통행량과 추정 기종점통행량의 비교 (단위 : 통행)

존	변동계수 참 기종점통행량	200%	190%	180%	170%	160%	150%	140%	130%	120%	110%
		1→2	257	505.7	481.6	460.7	432.9	407.8	383.5	358.1	332.7
1→3	374	869.0	817.0	763.2	713.9	665.0	616.9	568.0	519.6	471.1	422.5
1→4	299	477.0	462.0	446.0	430.2	412.0	393.1	374.0	355.5	336.9	317.7
2→1	318	633.0	601.8	571.5	539.7	508.0	476.2	444.4	412.6	381.8	349.9
2→3	288	555.0	529.5	506.4	476.6	450.5	423.5	396.4	369.3	342.8	314.7
2→4	235	483.3	458.1	430.4	407.9	382.7	358.4	333.2	309.0	284.0	259.9
3→1	455	1019.1	960.7	904.2	846.3	790.7	734.8	679.0	623.5	567.4	511.6
3→2	501	991.9	943.7	897.5	846.2	797.1	747.1	697.9	648.7	599.5	550.3
3→4	485	856.1	821.3	786.7	754.7	715.8	677.1	638.6	599.6	561.3	522.7
4→1	201	289.7	282.6	276.0	271.1	261.3	250.7	240.3	230.4	220.2	210.7
4→2	299	604.9	573.6	541.0	511.9	481.3	451.7	421.1	390.6	360.0	329.5
4→3	325	528.9	511.0	493.0	474.1	453.0	432.1	411.0	389.5	367.9	346.6
F value	-	5.49	4.82	4.21	3.63	3.14	2.68	2.27	1.89	1.56	2.38
Pr>F	-	0.0088	0.0148	0.0250	0.0427	0.0708	0.1173	0.1907	0.3063	0.4756	0.1654
Re value	-	0.6788	0.6904	0.7035	0.7188	0.7374	0.7596	0.7869	0.8205	0.8635	0.9205

- 표 계속

존	변동계수 참 기종점통행량	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	0%
		1→2	257	231.3	206.4	180.5	154.4	129.2	103.1	77.0	51.0
1→3	374	325.7	277.2	229.1	181.3	134.1	87.0	43.5	19.2	2.0	374.0
1→4	299	280.3	260.8	241.9	222.7	202.9	182.0	158.5	115.8	65.0	299.0
2→1	318	286.1	254.1	223.1	191.1	159.0	127.0	95.0	64.0	32.0	318.0
2→3	288	260.4	232.6	204.6	177.1	148.1	118.9	89.9	63.6	52.0	288.0
2→4	235	211.1	186.3	162.7	138.4	115.3	91.4	68.5	43.3	0.0	235.0
3→1	455	398.1	341.1	282.7	223.4	160.8	91.7	0.0	0.0	0.0	455.0
3→2	501	451.7	402.3	352.8	303.1	251.9	201.6	151.5	102.0	51.8	501.0
3→4	485	447.7	410.4	374.5	339.7	308.1	285.4	283.3	187.3	93.3	485.0
4→1	201	191.7	183.5	175.8	170.0	166.5	170.9	197.0	131.0	66.0	201.0
4→2	299	268.5	238.1	207.8	177.6	148.7	119.0	89.4	59.6	28.8	299.0
4→3	325	303.3	281.8	259.9	237.7	215.9	193.0	166.5	120.8	68.0	325.0
F value	-	1.29	1.66	2.12	2.59	2.88	2.53	1.57	2.98	6.97	-
Pr>F	-	0.6842	0.4161	0.2294	0.1292	0.0936	0.1386	0.4638	0.0838	0.0032	-
Re value	-	0.9041	0.8061	0.7055	0.6001	0.4867	0.3498	0.0008	0.0008	0.0007	-

(2) 통행배정결과 분석

앞 부분의 추정 기종점통행량과 참(true) 기종점통행량의 구조를 비교하는 것이 산출된 다수해 중 신뢰성이 높은 기종점통행량을 선택하기 위한 것이라면, 통행배정결과를 분석하는 것은 산출된 해가 목적함수를 얼마나 잘 만족시키는가를 검토하기 위한 것인데, 분석결과

관측통행량과 Gradient방법을 이용하여 추정한 기종점통행량에 의한 배정통행량이 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타나, 관측통행량과 배정통행량의 차이를 최소화시키는 Gradient의 목적함수를 잘 만족시키는 것으로 나타났다.

〈표 4-4〉 관측통행량과 Gradient방법에 의해 추정된 기종점통행량 통행배정결과 비교 (단위 : 통행)

구 분	변동계수 노선여정		200%		190%		180%		170%		160%		150%		140%		
			G	O	G	O	G	O	G	O	G	O	G	O	G	O	
결 과	노선1	101 → 103	506	514	482	488	461	463	433	437	408	411	383	386	358	360	
		103 → 104	1,038	1,046	988	994	937	941	884	889	833	837	782	785	730	732	
		104 → 103	1,597	1,600	1,517	1,520	1,439	1,440	1,358	1,360	1,278	1,280	1,199	1,200	1,119	1,120	
		103 → 101	633	636	602	604	571	572	540	541	508	509	476	477	444	445	
	노선2	108 → 107	1,346	1,346	1,279	1,279	1,209	1,211	1,144	1,144	1,077	1,077	1,010	1,010	942	942	
		107 → 106	1,398	1,398	1,328	1,328	1,256	1,258	1,188	1,188	1,118	1,118	1,049	1,049	979	979	
		106 → 107	1,875	1,880	1,782	1,786	1,691	1,692	1,601	1,598	1,507	1,504	1,412	1,410	1,318	1,316	
		107 → 108	1,309	1,312	1,243	1,246	1,180	1,181	1,117	1,115	1,052	1,050	986	984	919	918	
	노선3	107 → 104	605	598	574	568	541	538	512	508	481	478	452	449	421	419	
		104 → 107	483	470	458	447	430	423	408	400	383	376	358	353	333	329	
	Objective function			0.4059		0.2717		0.0972		0.1340		0.0950		0.0612		0.0370	
	Maximum gradient			0.0125		0.0097		0.0054		0.0064		0.0052		0.0040		0.0031	
	Optimal step length			0.0078		0.0066		0.0045		0.0054		0.0047		0.0039		0.0032	

G : 추정 기종점통행량의 통행배정결과, O : 기본 관측통행량에 변동계수를 적용한 값

- 표 계속

구 분	변동계수 노선여정		130%		120%		110%		100%		90%		80%		70%		
			G	O	G	O	G	O	G	O	G	O	G	O	G	O	
결 과	노선1	101 → 103	333	334	307	308	283	283	-	257	231	231	206	206	180	180	
		103 → 104	678	680	627	628	575	575	-	523	472	471	419	418	367	366	
		104 → 103	1039	1040	960	960	880	880	-	800	720	720	640	640	561	560	
		103 → 101	413	416	382	382	350	350	-	318	286	286	254	254	223	223	
	노선2	108 → 107	875	875	808	808	740	740	-	673	606	606	538	538	471	471	
		107 → 106	909	909	839	839	769	769	-	699	629	629	559	559	489	489	
		106 → 107	1223	1222	1129	1128	1034	1034	-	940	846	846	751	752	657	658	
		107 → 108	854	853	788	787	722	722	-	656	590	590	525	525	458	459	
	노선3	107 → 104	391	389	360	359	330	329	-	299	269	269	238	239	208	209	
		104 → 107	309	306	284	282	260	259	-	235	211	212	186	188	163	165	
	Objective function			0.0189		0.0082		0.0016		-		0.0016		0.0052		0.0099	
	Maximum gradient			0.0022		0.0015		0.0007		-		0.0007		0.0012		0.0017	
	Optimal step length			0.0025		0.0015		0.0009		-		0.0010		0.0021		0.0034	

- 표 계속

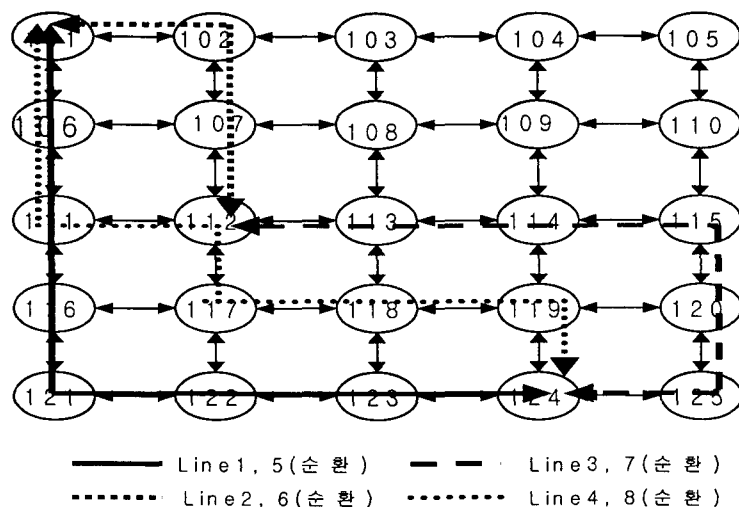
구분	변동계수 노선여정	60%		50%		40%		30%		20%		10%		0%		
		G	O	G	O	G	O	G	O	G	O	G	O	G	O	
결과	노선1	101 → 103	154	154	129	129	103	103	77	77	51	51	26	26	257	0
		103 → 104	315	314	263	262	210	209	158	157	107	105	52	52	523	0
		104 → 103	481	480	401	400	321	320	241	240	162	160	81	80	800	0
		103 → 101	191	191	159	159	127	127	95	95	64	64	32	32	318	0
	노선2	108 → 107	404	404	337	337	269	269	202	202	135	135	67	67	673	0
		107 → 106	419	419	350	350	280	280	210	210	140	140	70	70	699	0
		106 → 107	563	564	469	470	377	376	283	282	187	188	93	94	940	0
		107 → 108	393	394	327	328	263	262	197	197	131	131	66	66	656	0
	노선3	107 → 104	178	179	149	150	119	120	89	90	60	60	29	30	299	0
		104 → 107	138	141	115	118	91	94	68	71	43	47	0	24	235	0
	Objective function		0.0131		0.0132		0.0114		0.0112		0.0204		0.5781		-	
	Maximum gradient		0.0018		0.0018		0.0017		0.0018		0.00290		0.0010		-	
	Optimal step length		0.0047		0.0068		0.0089		0.0149		0.0280		0.0222		-	

2. TATSIN 모형과 Gradient 방법에 의한 대중교통 기종점통행량 추정

1) 기종점통행량 추정

본 연구에서 대중교통 기종점통행량을 추정하고자 사용한 네트워크는 TATSIN 모형을 개발할 때 사용한 네트워크를 확장하여 구축하였다. 즉, 25개의 노드, 80개의 일반링크로 구성된 가상 가로망 위를 4개의 노선이 편도 운행하도록 구축하였던 것을 가상의 노선 4개를 추가하는 방법으로 왕복 운행하도록 확장하였다.

본 연구에서 사용한 분석 네트워크와 기본 기종점통행량은 <그림 4-3>과 <표 4-5>와 같다.

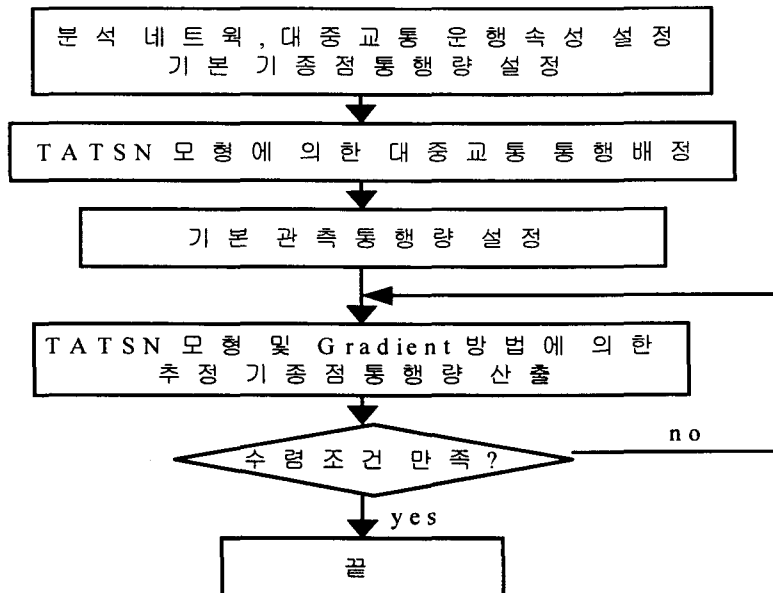


<그림 4-3> 분석 네트워크

〈표 4-5〉 기본 기종점통행량 및 출발시간

기점	종점	통행량	출발시간
119	106	20	7시 20분
101	124	20	7시 30분
102	113	10	7시 30분
101	125	30	7시 30분
101	119	25	7시 30분

TATSN 모형과 Gradient 방법을 이용하여 대중교통 기종점통행량을 추정하는 방법을 간략하게 도식화하면 〈그림 4-4〉와 같다.

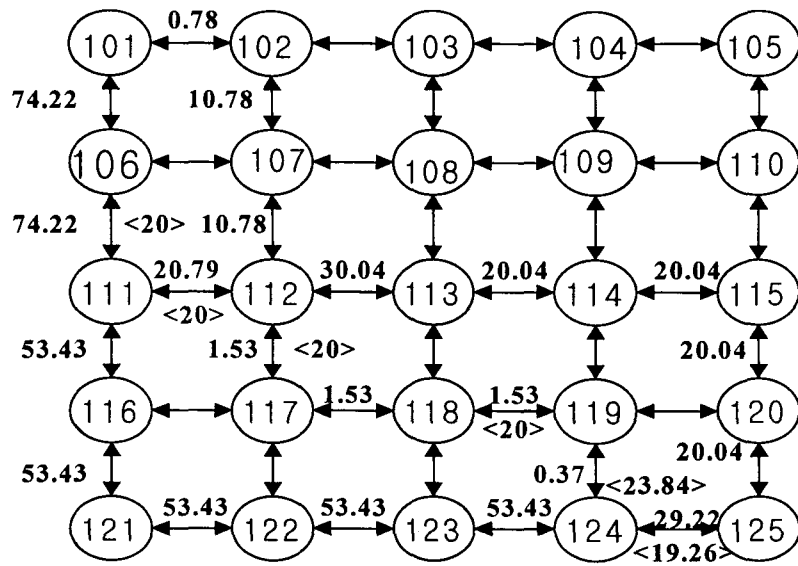


〈그림 4-4〉 기종점통행량 추정 흐름도

2) 통행배정결과 및 기종점통행량 추정결과

(1) 통행배정결과

위와 같은 네트워크 및 기종점통행량을 본 연구에서 개발한 대중교통 통행배정모형 TATSN에 적용시킨 결과 얻어진 배정통행량은 〈그림 4-5〉에 제시되어 있다.



<..> : ←, ↑ 방향

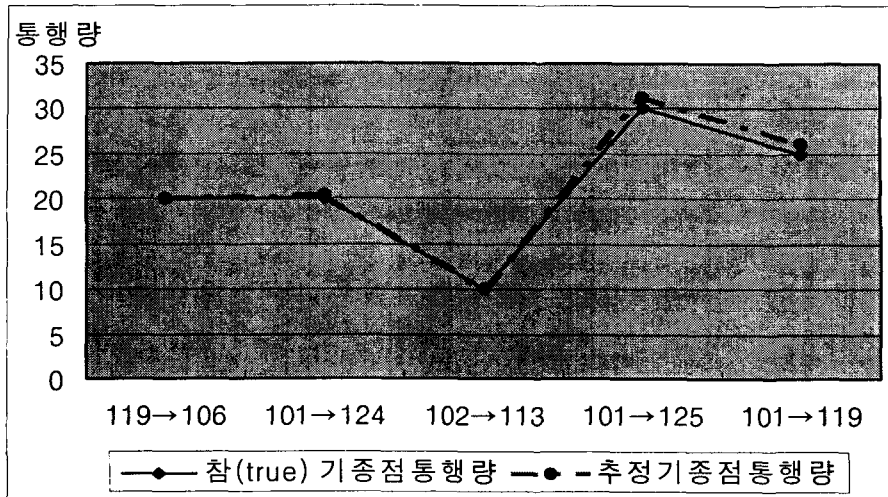
〈그림 4-5〉 통행배정 결과

(2) 기종점통행량 추정결과

위의 배정통행량을 관측통행량으로 설정하고, 위의 기종점통행량을 참(true) 기종점통행량으로 설정한 후, Gradient 방법을 이용하여 기종점통행량을 추정한 결과는 〈표 4-6〉과 〈그림 4-6〉과 같다.

〈표 4-6〉 기종점통행량 추정결과

기점	종점	참(true) 기종점통행량	추정 기종점통행량	오차 (%)
119	106	20	20.00000	0.00
101	124	20	20.42482	2.12
102	113	10	10.01345	0.13
101	125	30	31.29617	4.32
101	119	25	26.05635	4.23
F value	1.15			
Pr>F	0.8983			
Re value	0.973			



〈그림 4-6〉 기종점통행량 추정결과

참(true) 기종점통행량과 추정 기종점통행량과의 오차가 최대 5% 이내로 나타났고, MPRE에 의한 Re 값도 0.973으로 분석되어 추정 기종점통행량이 참(true) 기종점통행량의 특징을 잘 묘사하고 있는 것으로 나타났다.

그리고, 위에서 추정된 기종점통행량이 Gradient 방법의 목적함수를 -관측통행량과 배정통행량 차이의 최소화- 잘 만족시키는가를 평가하기 위하여, 추정된 기종점통행량을 다시 TATSN 모형에 적용하여 배정통행량을 산출한 후 관측 통행량을 비교하였다. 그 결과는 〈표 4-7〉에 제시되어 있는데, 배정통행량과 관측통행량의 오차가 작게 나타나 위에서 추정된 기종점통행량이 Gradient 방법의 목적함수를 잘 만족시키는 것으로 판단된다.

〈표 4-7〉 배정통행량 및 관측통행량 비교결과

from node	to node	추정 통행량 배정결과	관측 통행량	오차
101	102	0.77119	0.776153	0.64
102	101	0	0	-
101	106	73.81810	74.22385	0.55
106	101	0	0	-
102	107	10.76922	10.77615	0.06
107	102	0	0	-
106	111	73.81810	74.22385	0.55
111	106	20.00000	20	0
107	112	10.76922	10.77615	0.06
112	107	0	0	-
111	112	20.72205	20.79072	0.33
112	111	20.00000	20	0
111	116	53.09605	53.43313	0.63
116	111	0	0	-
112	113	29.97078	30.03798	0.22
113	112	0	0	-
112	117	1.52048	1.528893	0.55
117	112	20.00000	20	0
113	114	19.97275	20.03798	0.33
114	113	0	0	-
114	115	19.97275	20.03798	0.33

from node	to node	추정 통행량 배정결과	관측 통행량	오차
115	114	0	0	-
115	120	19.97275	20.03798	0.33
120	115	0	0	-
116	121	53.09605	53.43313	0.63
121	116	0	0	-
117	118	1.52048	1.528893	0.55
118	117	20.00000	20	0
118	119	1.52048	1.528893	0.55
119	118	20.00000	20	0
119	124	0.36653	0.36768	0.31
124	119	23.68974	23.83879	0.63
120	125	19.97275	20.03798	0.33
125	120	0	0	-
121	122	53.09605	53.43313	0.63
122	121	0	0	-
122	123	53.09605	53.43313	0.63
123	122	0	0	-
123	124	53.09605	53.43313	0.63
124	123	0	0	-
125	124	19.20156	19.26183	0.31
124	125	29.03698	29.22385	0.64

V. 결론

이상에서 본 연구의 서두에서 설정한 연구의 목표와 같이 대중교통 통행배정모형을 개발하고, 대중교통 기종점통행량을 추정하였다.

현재 점점 심각해져 가는 교통혼잡을 해결하고자 우리나라 뿐 만 아니라 세계 주요 도시에서도 대중교통의 중요성을 점점 더 인식하고 있다. 그리고 이러한 대중교통 중심의 정책을 수립하고 시행하기 위해서 없어서는 안 되는 것이 대중교통 기종점통행량 자료라는 것은 말할 필요도 없을 것이다.

본 연구는 이러한 문제의식에서부터 출발하여, 대중교통 통행배정모형 개발부분에서는 유

전자 알고리즘을 이용하여 기존의 모형보다 대중교통 수단이 가지는 특성을 더욱 고려할 수 있는 모형을 개발하였으며, 대중교통 기종점통행량 추정부분에서는 개별차량에 국한되어 사용되었던 Gradient방법을 대중교통 기종점통행량 추정에 적용하여 기종점조사를 통하지 않고 기종점통행량을 구할 수 있도록 하였다.

위와 같이 본 연구에서는 모형을 개발할 때에 현실을 더욱 잘 묘사하려고 최선을 다해 노력하였으나, 그럼에도 불구하고 다음과 같은 한계를 가지고 있다.

첫째, 본 연구의 대중교통 통행배정모형은 통행배정기법으로 로짓모형에 의한 다중경로 통행배정모형을 사용하였기 때문에 반드시 균형(User Equilibrium) 조건을 만족시키지 않는다.

둘째, 통행에 대한 정보를 바탕으로 통행자가 모형내에서 출발시간을 변경하거나 선택하는 것이 아니라, 통행자의 출발시간이 외부 입력값으로 주어지게 되어 있다.

셋째, 대중교통수단 중 지하철은 개별차량과 독립된 별도의 궤도시스템을 가지고 있지만, 버스는 개별차량과 같은 도로를 이용하고 있어 개별차량의 통행량이 버스의 통행시간에 영향을 미치고 있으나, 본 연구에서 개발한 모형 TATSN에서는 대중교통 수단의 통행시간은 개별차량의 영향을 받지 않는 것으로 가정하였다.

넷째, TATSN 모형에서는 최적경로 탐색에는 유전자 알고리즘을 통행배정기법으로는 로짓모형을 기반으로 한 다중경로 통행배정모형을 이용하였는데, 이때 로짓모형의 효용함수를 통행시간만으로 구성하였다.

다섯째, 본 연구에서 기종점통행량을 추정하는 방법으로 사용한 Gradient 방법은 기본 기종점통행량의 구조를 변경시키지 않으면서 목적함수를 만족시키는 해를 찾는다는 점에서 상당히 합리적인 방법이지만, Gradient 방법으로 구한 해가 반드시 전역해가 되지는 않는다.

이에 본 연구에서는 향후과제로 다음과 같은 것들을 제시하고자 한다.

첫째, 이미 개별차량에서는 통행배정모형으로 균형(User Equilibrium) 조건을 만족시키는 균형 통행배정모형을 이용하는 것이 일반화되어 있다. 이에 대중교통의 통행배정모형도 대중교통의 특징을 충분히 반영하면서 균형조건을 만족시키는 통행배정모형이 개발되어야 할 것이다.

둘째, 실시간 교통정보를 수집하고 제공하는 기술이 증가하면서 통행배정모형에 시간적인 요소가 포함된 동적 통행배정모형에 대한 연구가 활발하게 진행중이다. 이에 본 연구에서도 대중교통 통행배정모형에서 출발시간을 고려할 수 있게 하였지만, 통행자가 주어지는 정보에 따라 모형내에서 선택하게 한 것은 아니다. 따라서, 향후에는 출발시간을 모형내에서 선택할 수 있는 대중교통 통행배정모형이 개발되어야 할 것이다.

셋째, 버스와 같이 개별차량과 경쟁관계에 있는 모든 대중교통 수단을 현실적으로 고려하는 대중교통 통행배정모형이 개발되어야 한다. 즉, 대중교통 통행시간에 개별차량의 통행량이 미치는 영향을 고려한 대중교통 통행배정모형이 개발되어야 한다.

넷째, 기종점통행량 추정의 문제에 있어 기본 기종점통행량의 구조를 변화시키지 않으면

서 전역해를 찾는 알고리즘이 개발되어야 할 것이다.

다섯째, 관측통행량을 이용하여 기종점통행량을 추정하는 기법의 현실활용도를 높이기 위해서는 관측통행량을 조사하는 방법이 더욱 체계적으로 연구되어야 할 것이다.

□ 참고문헌

- 김종형, "Gradient 방법에 의한 통행량기반 수요추정연구", 서울시립대학교 박사학위논문, 2000.
- 김재영, "유전자 알고리즘을 이용한 연속형 변수의 가로망 설계 문제에 관한 연구". 서울대학교 석사학위논문, 1999.
- 김현명, 임용택, "유전알고리즘을 이용한 전역탐색 최단경로 알고리즘 개발", 대한교통학회지 제17권 제2호, 1999.
- 노정현, "교통계획-통행수요이론과 모형", 나남출판, 1999.
- 백승걸, "유전알고리즘을 이용한 링크관측교통량으로부터의 기종점 통행행렬 추정", 서울대학교 박사학위논문, 2001.
- 서울시정개발연구원, "서울시 교통센서스 및 데이터베이스 구축", 1997.
- 서울시정개발연구원, "서울시 종합교통분석체계정립 및 광역통행분석", 1999.
- 원제무, "도시교통론", 박영사, 1999.
- 유경상, "차량용량을 고려한 대중교통 사용자 평형 통행배정 모형 구축에 관한 연구", 서울대학교 석사학위논문, 1995.
- 윤혁렬, "용량을 고려한 대중교통 통행배정모형 구축에 관한 연구", 서울대학교 박사학위논문, 2000.
- 이승재, 김종형, "통행시간 분포를 이용한 교통량기반 추정 O/D의 신뢰성 평가에 관한 연구", 대한교통학회지 제18권 제2호, 2000.
- 이신해, 이승재 외 3인, "통행량 기반 대중교통 기종점통행량(O/D) 추정의 신뢰성 평가에 관한 연구", 대한교통학회지 제19권 제5호, 2001.
- 이성모, 유경상, 전경수 "차량용량을 고려한 대중교통 통행배정모형구축 관한 연구", 대한교통학회지 제14권 제3호, 1996.
- 이재섭, "대중교통 수단간 환승을 고려한 확률적 대중교통통행배정법의 개발", 한양대학교 석사학위논문, 1999.
- 임용택, 김현명, 백승걸, "유전알고리즘을 이용한 OD 추정모형의 개발과 적용에 관한 연구 - 서울시 내부순환도로를 대상으로 -", 대한교통학회지, 제18권 제4호, 2000.
- 장인성, "서비스시간 제한이 있는 복합교통망에서의 경로안내 시스템을 위한 유전자 알고리즘", 대한산업공학학회지, 제27권 제2호, 2001.
- B. G. Hutchinson, *Principles of urban transport systems planning*, Scripta Book, 1974.
- Campbell, M. E., "Assignment of Traffic to Expressways(an determined by diversion

- studies)", *Proceedings of Southwestern Association of State Highway officials*, 1951.
- Cascetta E., "Estimation of trip matrices from traffic counts and survey data : generalized least squares estimator", *Transportation Research B*, Vol. 18, pp.289-299, 1984.
 - Cascetta E. and Nguyen S., "A unified framework for estimating or updating OD matrices from traffic counts", *Transportation Reserch B*, Vol. 22, pp.437-455, 1988.
 - Chriqui, C. and Robillard, P., "Common bus lines", *Transportation Science* 9, pp.115-121, 1975.
 - De Cea J. and E.Fernandez, "Transit Assignment for Congested Public Transport System: An Equilibrium Model", *Transportation Science*, Vol. 27, No. 2, pp.133-147, 1993.
 - De Cea J. and E.Fernandez, "An Empirical Comparision of Equilibrium and Non-equilibrium Transit Assignment Models", *Traffic Engineering and Control*, Vol. 37, No. 7, 1996.
 - De Cea J. and E.Fernandez, "Transit Assignment to Minimal Routes : an Efficient New Algorirhm", *Traffic Engineering and Control*, Vol. 30, No. 10, 1989.
 - Dial, R.B., "A Probabilistic Multipath Traffic Assignment Model which Obviates Path Enumeration", *Transportation Research*, Vol.5, 1971.
 - Gen Cheng, *Genetic Algorithms and Enginccring Design*, John Wiley & Sons, Inc, 1997.
 - Hamdy A., *Operation Research*, Prentice-Hall International, Inc, 1997.
 - H. Yang and Y. Iida and Tsuna Sasaki, "The Equilibrium based origin destination matrix estimation problem", *Transportation Research B*, Vol. 28, pp.23-33, 1994.
 - H. Yang, "Optimal traffic counting locations for OD estimation", *Transportation Research B*, Vol. 32, pp.109-126, 1998.
 - H. Yang, "Heuristic algorithms for the bilevel origin-destination matrix estimation problem", *Transportation Research B*, Vol. 29, pp.231-242, 1995.
 - H. Yang, Y.Iida, and Tsuna Sasaki, "Estimation of OD matrices from link traffic counts on congested networks", *Transportation Research B*, Vol. 26, pp.417-434, 1992.
 - H. Yang, Y. Iida, and Tsuna Sasaki, "An analysis of the reliability an origin-destination trip matrix estimated from traffic counts", *Transportation Research B*, Vol. 25, pp.351-363, 1991.
 - IMRO, *EMME/2 User's Manual, Release 9*.
 - J.de D.Ortúzar and L.G. Willumsen, *Modelling Transport*, John Wiley & Sons, Inc, 1994.
 - Lee, S.H., Lee, S.J. and Lim, K.W., "The Estimation of Transit Origin and Destination Matrix Usting Traffic Counts", 9th WCTR, 2001.
 - Lee, S.H., Lee, S.J., Moon, S.Y. and Lim, K.W., "A Genetic Algorithm for Estimation of Transit Origin and Destination Matrix Using Traffic Count Techniques", EASTS in Hanoi, 2001.

- Le Clercq, F., "A public transport assignment method", *Traffic Engineering and Control* 13, 1972.
- Murchland, J. D., "Multipath Traffic Loading by the 'STOCH' Model when Congestion is Present", JDM-222, 1975.
- Oh, J. H., "Estimation of trip matrices from traffic counts : An equilibrium approach", Ph. D. Dissertation, University College London, 1991.
- Roy Tomas, *Traffic Assignment Techniques*, Avebury Technical, 1991.
- S. C. Wong and C. O. Tong, "Estimation of Time-Dependent Origin-Destination Matrices for Transit Networks", *Transportation Research B*, Vol. 32, pp. 35-48, 1998.
- Spiess, H., "A gradient approach for the O-D matrix adjustment problem", EMME/2 support center, 1990.
- Spiess, H., "Computing line-to-line transfer matrices with EMME/2", EMME/2 support center, 1992.
- Spiess, H., "Transit equilibrium assignment based on optimal strategies : An implementation in EMME/2", EMME/2 support center, 1993.
- Spiess, H. and Florian, M., "Optimal Strategies : A new assignment model for transit networks", *Transportation Research B*, Vol. 23, pp. 83-102, 1989.
- Spiess, H., "Conical Volume-Delay Functions", *Transportation Science*, Vol. 24, No. 2, pp. 153-158, 1990.
- Yoseff Seffi, *Urban Transportation Networks*, Prentice-Hall International, Inc, 1985.
- Z. Michalewicz, *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, Springer Verlag, 1996.
- 심귀보, 진화 알고리즘 강의노트, <http://rics.cie.cau.ac.kr/EAs/GAs.html>