

# 서비스시간 제한이 있는 복합교통망에서의 경로안내 시스템을 위한 유전자 알고리즘

장인성<sup>†</sup>

승실대학교 산업·정보시스템공학과

## A Genetic Algorithm for Route Guidance System in Intermodal Transportation Networks with Time-Schedule Constraints

In-Seong Chang

Department of Industrial / Information Systems Engineering, Soongsil University, Seoul, 156-743

The paper discusses the problem of finding the Origin-Destination(O-D) shortest paths in intermodal transportation networks with time-schedule constraints. The shortest path problem on the intermodal transportation network is concerned with finding a path with minimum distance, time, or cost from an origin to a destination using all possible transportation modalities. The time-schedule constraint requires that the departure time to travel from a transfer station to another node takes place only at one of pre-specified departure times. The scheduled departure times at the transfer station are the times when the passengers are allowed to leave the station to another node using the relative transportation modality. Therefore, the total time of a path in an intermodal transportation network subject to time-schedule constraints includes traveling time and transfer waiting time. In this paper, a genetic algorithm (GA) approach is developed to deal with this problem. The effectiveness of the GA approach is evaluated using several test problems.

**Keywords** : Genetic Algorithm, Shortest Path Problem, Intermodal Transportation Network, Time-Schedule Constraint, Route Guidance System

### 1. 서론

차세대 교통체계인 지능형 교통시스템(Intelligent Transportation System : ITS)의 범주에 속하는 경로안내 시스템(route guidance system)을 구현하기 위해서는 현실성이 반영된 합리적인 경로를 실시간(real time)으로 탐색할 수 있는 알고리즘의 개발이 필수적이다. 지금까지는 주로 자가용이 이용되어지는 개인교통망(private transportation network)에서 자가운전자에게 경로안내 서비스를 제공할 수 있는 알고리즘들이 개발되어져 왔지만 근래에 다수의 교통수단이 혼합된 복합교통망(intermodal transportation network)을 이용하는 여행자를 위한 경로안내 시스템의 필요성이 대두되고 있다. 현대 도시의 교

통망은 승용차와 대중교통수단인 노선버스·지하철·직행버스·고속버스·기차·항공기·정기선박 등과 같은 다수의 교통수단이 혼합된 복합교통망이다. 복합교통망에서의 경로 탐색은 출발지로부터 목적지까지 다수의 교통수단이 혼용 가능한 최단경로(multimodal path)를 산정하고자 하는 것이며 경로 계산 과정에 환승소요시간을 반영할 수 있어야만 한다.

환승소요시간은 탑승차량의 하차지점에서 환승하려는 차량의 승차지점까지의 도보소요시간에 환승을 위한 승차지점에서 환승차량이 이용 가능하기까지의 대기시간(환승대기시간)을 더한 것이다. 환승을 위한 도보소요시간은 일반인의 평균값을 이용해서 계산할 수 있지만 환승대기시간을 정확하게 추정하는 것은 쉽지 않다. 대부분의 대중교통수단은 미리 정해진 시간표에 따라 운행이 규칙적으로 이루어지는 것이 일반

<sup>†</sup> 연락저자: 장인성 교수, 156-743 서울시 동작구 상도5동 1-1 승실대학교 산업·정보시스템공학과, Fax : 02-825-1094, e-mail : ischang@saint.ssu.ac.kr  
2000년 10월 접수, 1회 수정 후, 2001년 1월 게재 확정.

적이기 때문에 이용자가 대중교통을 이용하려는 경우 승차지점에 도착하는 즉시 운행서비스를 받을 수 있는 것이 아니다. 이와 같이 운행을 위한 서비스시간이 제한(time-schedule constraints)되어짐으로써 환승대기시간은 이용자가 환승차량의 승차지점에 도착한 시간에 의존해서 변한다. 그러나 지금까지 개발된 복합교통망에서의 최단경로 알고리즘들은 환승을 위한 차량(수단)의 어떤 승차지점에서 차량이 이용 가능하기까지의 대기시간이 이용자가 환승차량의 승차지점에 도착한 시간과 관계없이 항상 일정하다는 것을 가정으로 개발되었기 때문에 이들을 적용해서는 서비스시간 제한이 고려된 합리적인 최단경로를 탐색할 수 없다. 그러므로 복합교통망 분석시 보다 정확한 자료로 제공되기 위해서는 복잡한 교통망의 이용형태뿐만 아니라 서비스시간 제한에 의한 환승대기시간의 변동을 반영할 수 있는 최단경로 알고리즘의 개발이 요구된다.

본 연구에서는 발전적 탐색기법(heuristic search method)중의 하나인 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm : GA)을 이용하여 서비스시간 제한이 존재하는 복합교통망의 합리적인 최단경로를 신속하게 효율적으로 도출할 수 있는 해법을 제시하고자 한다. 본 연구에서 개발된 알고리즘의 특징은 첫째, 환승행태를 반영하기 위해 환승 노드나 환승 링크를 추가하여 교통망을 변형하였던 기존의 연구와는 달리 교통망의 변형 없이 환승행태뿐만 아니라 서비스시간 제한에 의한 환승대기시간의 변동이 반영된 합리적인 최단경로를 탐색할 수 있다는 점과 둘째, 특정 노드들에 대해서만 단계별로 경로 계산이 수행되어지므로 모든 노드나 모든 링크에 대하여 단계별로 경로 계산을 수행하는 기존의 방법보다 계산속도가 상당히 빠르다는 점, 셋째, k 최단경로 알고리즘(Lawler, 1972)과 같이 최적경로 외에도 복수 개의 부가적인 경로를 함께 제공하기 때문에 수단의 이용요금과 편의성 등을 고려해서 이용자가 자신에게 가장 적합한 대체 경로를 선택할 수 있다는 점이다.

## 2. 기존 연구의 고찰

서비스시간 제한이 있는 최단경로문제는 여행자가 차량을 이용해서 어떤 노드를 통행할 수 있는 시간이 제한되는 교통망 상에서 최단경로를 탐색하는 문제이다. 지금까지 개발된 대부분의 최단경로 알고리즘들에서는 서비스시간 제한이 고려되지 않았으며 경로산정을 위해 순차적 탐색법을 채택하고 있다. 순차적 탐색법에 기초로 하는 이들 알고리즘들은 경로계산을 위해 전노드만을 검색하는 수형망 알고리즘(tree building algorithm)과 전전노드까지를 검색범위로 하는 덩굴망 알고리즘(vine building algorithm)의 두 가지 형태로 크게 분류할 수 있으며 Dijkstra 알고리즘(1959)은 수형망 알고리즘의 대표적인 예이다(Thomas, 1991). 순차적 탐색법은 다음과 같은 가정의 전제하에 최단경로를 탐색한다.

[가정 1] 동일한 노드가 최단경로 상에 두 번 이상 포함될 수 없다.

[가정 2] 기점 노드로부터 각 노드까지의 최단경로를 단계별로 계산하고 최종적으로 이들을 산술적으로 연결하면 기종점(origin-destination)간의 최단경로가 구축된다.

순차적 탐색법의 [가정 2]는 어떤 노드가 기종점을 있는 최단경로상에 놓여진다면 기점 노드에서 그 노드까지의 최단경로는 반드시 기종점을 있는 최단경로의 부분경로가 되어진다는 것을 의미하지만 이러한 가정은 환승이 발생하는 복합교통망에서는 성립되지 않는다. <그림 1>은 2개의 교통수단으로 구성된 복합교통망의 단순한 예로서 서비스시간 제한은 없다. 노드 1과 노드 5는 각각 기점과 종점을 나타낸다. 점선링크는 버스를 실선링크는 지하철을 나타내고 있으며 링크 위에 있는 숫자는 링크를 통과하는 데 소요되는 시간(분)을 나타낸다. 버스를 이용해서 노드 4에 도착한 경우 종점 노드 5로 향하기 위해 지하철로의 환승이 이루어지며 이때 버스에서 지하철로의 환승소요시간을 2분이라고 가정하자. <그림 1>의 복합교통망에는 기점과 종점을 있는 2개의 경로 ①-②-③-④-⑤와 ①-④-⑤가 존재한다. 경로 ①-②-③-④-⑤의 총 소요시간은 경로를 구성하는 각 링크의 통행시간과 노드 4에서의 환승소요시간 2분의 총합인 8분이다. 경로 ①-④-⑤의 총 소요시간은 경로를 구성하는 각 링크의 총합인 7분이다. 따라서 노드 1에서 노드 5까지의 최단경로는 총 소요시간이 7분인 경로 ①-④-⑤이다.

순차적 탐색법의 [가정 2]는 최단경로 ①-④-⑤의 부분경로 ①-④(소요시간 6분)는 또한 노드 1에서 노드 4까지의 최단경로이다라는 것을 의미하지만 노드 4까지의 최단경로는 실제로 ①-②-③-④이며 소요시간은 5분이다. <그림 1>의 복합교통망에 대하여 순차적 탐색법은 기점 노드 1로부터 노드 2, 3, 4까지의 최단경로를 단계별로 계산하고 최종적으로 노드 4까지의 최단경로인 부분경로 ①-②-③-④에 노드 5를 산술적으로 연결한 경로 ①-②-③-④-⑤를 최단경로로 탐색한다. 그러므로 순차적 탐색법을 이용해서는 합리적인 최단경로 ①-④-⑤를 탐색할 수 없다. [가정 2]가 복합교통망에서 성립되지 않는 이유는 복합교통망에서는 여행자가 다른 교통수단으로 전

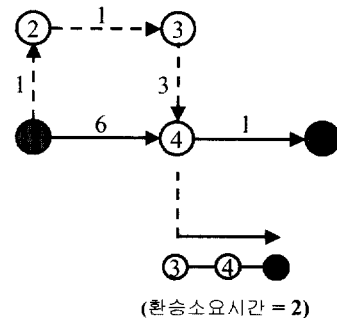


그림 1. 복합교통망.

환하는 경우에 환승소요시간이 발생하기 때문이다. 따라서 복합교통망에서의 환승행태가 고려된 최단경로를 산정하기 위해서는 경로 계산 과정에 환승소요시간을 반영할 수 있어야 하며 경로의 총 소요시간은 다음과 같다.

$$\text{총 소요시간} = \text{총 차량운행 서비스시간} + \text{총 환승소요시간}$$

여기서, 총 환승소요시간 = 총 환승도보소요시간 + 총 환승대기시간.

복합교통망에서의 최단경로를 탐색하기 위해 현재까지 수행된 연구들에서는 환승 노드뿐만 아니라 각 노드에서의 서비스시간 제한이 고려되지 않았으며, 확률분포 등을 이용해서 확정적으로 추정된 환승대기시간에 기초로 해서 최단경로를 탐색하고자 하였다. Spiess and Florian (1989)과 Modesti and Sciomachen (1998), Choi and Jang (1998)은 주어진 복합교통망을 변형하여 수단간의 환승행태를 교통망에 표현함으로써 기존의 순차적 탐색법을 적용할 수 있도록 하였다. Spiess and Florian (1989)과 Modesti and Sciomachen (1998)은 주어진 복합교통망에 환승 노드와 환승 링크를 추가하여 교통망을 확장하였으며 <그림 2>는 <그림 1>의 환승 노드 4를 2개의 노드로 분할하고 추가된 링크에 환승소요시간을 부과함으로써 <그림 1>을 확장시킨 교통망을 나타내고 있다. Choi and Jang (1998)은 <그림 3>과 같이 수단별 교통망을 독립적으로 계층화하여 다층 네트워크를 구성하고 환승이 이루어지는 수단별 교통망의 두 노드에 환승 링크를 추가함으로써 계층화된 다층 네트워크를 하나의 교통망으로 통합하였다.

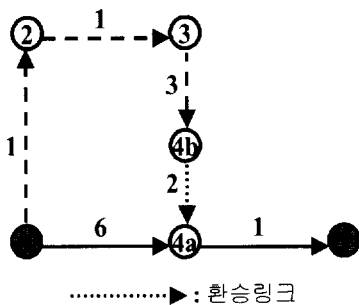


그림 2. <그림 1>의 확장교통망.

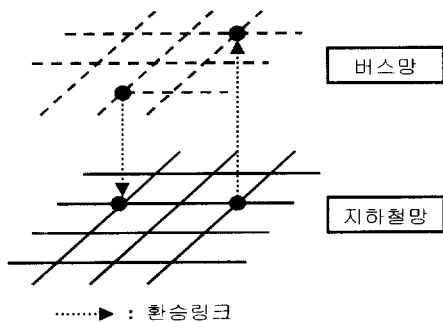


그림 3. 다층 네트워크.

이와 같이 환승 노드나 환승 링크를 추가하여 교통망을 확장하거나 통합하는 방법은 기존의 순차적 탐색법을 그대로 적용할 수 있다는 장점을 지니지만 교통망의 확장이나 통합에 많은 시간이 소비되는 단점을 가지고 있기 때문에 교통망의 규모가 크고 교통수단이 다수인 경우에는 적용하기가 어렵다. Kim *et al.* (1999)은 현노드의 전노드나 전전노드를 검색해서 기점 노드로부터 현노드까지의 최단경로를 구축하는 노드기반의 순차적 탐색법과는 달리 현링크의 전링크를 검색함으로써 기점 노드로부터 현링크의 종결 노드까지의 최단경로를 구축하는 링크기반의 최단경로탐색 알고리즘을 제시하였다. 링크기반의 최단경로탐색 알고리즘에서는 현링크의 전링크를 검색하기 때문에 링크 전환에 따른 환승을 고려할 수 있으며 교통망의 확장이나 통합 등의 추가적인 작업없이 환승행태가 반영된 합리적인 최단경로를 산정할 수 있다. 그러나 교통망을 구성하는 링크의 수는 일반적으로 노드수에 비해 3배 이상이 되며 (Lee *et al.*, 1996), 링크기반의 최단경로탐색 알고리즘은 경로계산이 모든 링크에 대해서 수행되므로 교통망의 규모가 대규모인 경우에는 많은 계산량이 요구되어져 비효율적이다.

이상과 같이 노드기반의 순차적 탐색법을 적용하기 위해서는 교통망을 확장하거나 통합함으로써 수단간의 환승행태를 교통망에 표현해야 함을 알 수 있다. 이에 반해서 링크기반의 최단경로탐색 알고리즘은 교통망의 확장이나 통합 등의 추가적인 작업이 필요 없다. 그러나 순차적 탐색법이 모든 노드에 대해서 단계별로 경로계산을 수행하는 데 반해 링크기반의 최단경로탐색 알고리즘은 모든 링크에 대해서 단계별로 경로 계산이 수행되므로 탐색속도가 느리다는 단점을 갖고 있음을 알 수 있다.

### 3. 서비스시간 제한이 있는 최단경로문제

서비스시간 제한이 있는 최단경로문제는 Chen and Tang (1997, 1998)에 의해서 소개되어졌다. Chen and Tang은 개인교통망을 이용하는 자가운전자가 특정 노드를 통행할 수 있는 시간이 사전에 제한되는 최단경로문제를 해결하고자 하였다. <그림 4>는 개인교통망의 일부를 나타내고 있으며 노드 5의 통행이 허용되는 시간이 (8분, 13분, 18분)으로 제한된다. 자가운전자가 승용차로 노드 4를 경유해서 노드 5에 도착한 시간이 10분인 경우 즉시 승용차로 노드 6이나 노드 7로 이동할 수 없다. 노드 5의 통행이 허용되는 가장 빠른 출발시간은 13분

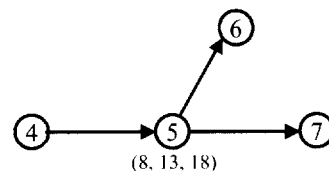


그림 4. 개인교통망에서의 서비스시간 제한.

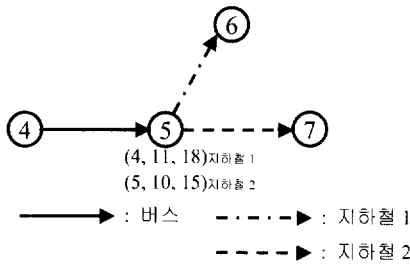


그림 5. 복합교통망에서의 서비스시간 제한.

으로 3분만큼의 대기시간이 소요된다. 따라서 경로 계산 과정에 대기시간이 반영되어야 하며 경로의 총 소요시간은 총 차량운행시간과 총 대기시간의 합으로 표현된다. 서비스시간 제한은 어떤 노드에서의 통행이 특정 시간대에서만 가능함을 나타내기 위해 사용되는 시간창(time window) (Desrochers and Soumis, 1988)을 일반화한 것으로서 복합교통망을 표현하기에 보다 실재적이다.

Chen and Tang (1998)은 서비스시간 제한이 반영된 최단경로를 탐색하기 위해 수형망 알고리즘의 대표적인 예인 Dijkstra 알고리즘을 확장한 MTT (minimum-total-time) 알고리즘을 개발하였다. Dijkstra 알고리즘은 기점으로부터 각 노드까지의 최단도착시간(earliest reaching time)을 계산하여 각 노드에 표지로 설정하지만, MTT 알고리즘에서는 기점으로부터 각 노드까지의 최단 도착시간뿐만 아니라 각 노드에서의 가장 빠른 출발가능시간(earliest leaving time)도 계산하여 각 노드에 표지로 설정한다. 따라서 MTT 알고리즘은 각 노드의 가장 빠른 출발가능시간을 고려해서 경로계산을 수행하기 때문에 합리적인 최단경로를 탐색할 수 있다. 그러나 MTT 알고리즘은 개인교통망을 대상으로 개발되었기 때문에 복합교통망에서의 환승문제를 해결할 수 없다.

복합교통망에서는 환승 노드뿐만 아니라 동일수단 내의 승객의 하차와 승차에 따른 지연에 의해 모든 노드에서 출발제한이 발생한다. 특히, 환승 노드에서는 출발시간이 이용 가능한 수단별로 제한되기 때문에 최단경로를 계산하기 위해서는 환승 노드에서 이용 가능한 수단들의 가장 빠른 출발가능시간을 모두 비교해야만 한다. <그림 5>는 복합교통망의 일부를 나타내고 있으며 환승 노드 5에서 지하철 1과 지하철 2를 이용할 수 있는 서비스시간이 각각 (4분, 11분, 18분), (5분, 10분, 15분)으로 제한된다. 환승 노드 5에서 지하철 1의 승차지점까지의 도보소요시간이 2분, 지하철 2의 승차지점까지의 도보소요시간이 3분이라 가정하자. 여행자가 지하철 1로 환승하기 위해 버스를 이용해서 노드 5에 3분에 도착하였다면 환승을 위한 지하철 1의 승차지점에는 5분에 도착하게 된다. 이때 지하철 1을 가장 빨리 이용할 수 있는 서비스시간은 11분이며 6분만큼의 대기시간이 소요된다. 반면에 여행자가 노드 5에 15분에 도착하였다면 지하철 1을 가장 빨리 이용할 수 있는 서비스시간은 18분이며 대기시간은 1분이다. 즉, 여행자가 환승하려는 차량의 승차지점에 도착한 시간에 따라서 차량의 서비스를 받기

까지의 대기시간이 달라진다. 또한 서비스시간 제한이 존재하는 복합교통망에서는 교통망에 존재하는 경로일지라도 환승이 불가능하기 때문에 현실적으로 통행할 수 없는 경우가 발생할 수 있다. 예를 들어서 환승 노드 5에 15분에 도착하였다면 지하철 1은 이용할 수 있지만 지하철 2를 이용할 수 있는 가장 늦은 서비스시간 15분을 초과하므로 지하철 2로의 환승은 불가능하다. 따라서 노드 7을 경유하는 경로는 현실적으로 통행 불가능한 경로이다.

그러므로, 서비스시간 제한을 갖는 복합교통망에서 합리적인 최단경로를 탐색하기 위해서는 환승태도뿐만 아니라 서비스시간 제한에 의한 환승대기시간의 변동을 고려해야하므로 매우 복잡하다. 본 연구에서는 동일한 수단을 이용해서 특정 노드를 경유하는 경우에는 노드에 도착하는 즉시 출발이 이루어진다고 가정한다(도착시간 = 출발시간). 즉, 복합교통망에서의 출발제한은 환승 노드만을 고려하는 것으로 가정한다.

#### 4. 서비스시간 제한이 있는 복합교통망에서의 최단 경로탐색을 위한 유전자 알고리즘

유전자 알고리즘에서는 대상이 되는 문제의 후보해들을 문자나 기호의 배열인 염색체(chromosome)로 표현하며 염색체를 구성하는 문자나 기호들을 유전자(gene)라 부른다. 이들 염색체들의 적당한 크기(population size)로 구성되는 모집단(population)을 생성하여 이들을 점차적으로 갱신함으로써 전역적인 최적해를 탐색하게 된다. 모집단의 생성과정을 초기화(initialization)라 하며 모집단의 갱신은 유전 연산자(genetic operator)에 해당되는 선택(selection), 교배(crossover), 돌연변이(mutation)의 세 가지 과정을 통해서 이루어지고 이를 1세대(generation)라 한다. 해의 탐색과정은 설정한 최대세대 수(maximum generation)에 도달할 때까지 반복되며 모집단을 이용한 병렬처리를 수행하기 때문에 탐색소요시간이 매우 짧다.

##### 4.1 모집단의 초기화

본 연구에서 다루는 문제는 교통망의 기점과 종점을 잇는 최단경로를 탐색하는 것이므로 교통망에 존재하는 모든 경로를 염색체에 대응시킬 수 있어야 하며 유전 연산자가 수행된 뒤 초래되는 결과는 교통망에 존재하는 경로를 나타내어야 한다. 유전자 알고리즘이 네트워크 모델에 적용된 대표적인 예는 순회판매원문제(traveling salesman problem)에서 찾을 수 있으며 순회해야 할 각 도시들의 순서를 조합으로 나열하여 염색체를 구성함으로써 후보해를 표현하고 있다 (Michalewicz, 1994). Choi et al.(1997)은 차량의 순회경로문제 (vehicle routing problem)에서 경유해야할 지점들의 순서를 먼저 결정하고 결정된 경유점 사이의 최적 주행경로를 탐색하기 위해 유전자 알고리즘을 적용하였으며 경유점 사이에 존재하는 임의의 경



- ② 만일  $c > pop\_size$ 이면 초기화 절차를 종료한다.
- [Step 3] ① 만일  $i \neq$  종점 노드이면  $\Psi_i = \emptyset, j = 1$ 로 설정하고 [Step 4]로 이동한다.
- ② 만일  $i =$  종점 노드이면  $c = c + 1$ 로 하고 [Step 2]로 재이동한다.
- [Step 4] ① 만일  $j \leq \max\{\text{노드 번호}\}$ 이면 선행관계행렬  $R$ 의 성분  $r_{ij}$ 를 조사하고 [Step 5]로 이동한다.
- ② 만일  $j > \max\{\text{노드 번호}\}$ 이면  $m = m + 1$ 로 하고 [Step 6]으로 이동한다.
- [Step 5] ① 만일  $r_{ij} = 1$ 이면  $\Psi_i = \Psi_i \cup \{j\}, j = j + 1$ 로 하고 [Step 4]로 재이동한다.
- ② 만일  $r_{ij} = 0$ 이면  $\Psi_i = \Psi_i, j = j + 1$ 로 하고 [Step 4]로 재이동한다.
- [Step 6] 집합  $\Psi_i$ 에서 하나의 노드  $k$ 를 임의로 선택해서  $g[m] = k$ 로 설정한다.
- [Step 7] ① 만일  $m < 3$ 이면  $i = k$ 로 하고 [Step 3]으로 재이동한다.
- ② 만일  $m \geq 3$ 이면 [Step 8]로 이동한다.
- [Step 8] ① 만일  $g[a] = g[m]$ 인  $a (1 \leq a < m - 1)$ 가 존재하면  $h = m - 1, \Psi_{g[h]} = \Psi_{g[h]} - \{g[h + 1], g[h - 1]\}$ 로 하고 [Step 9]로 이동한다.
- ② 만일  $g[a] = g[m]$ 인  $a (1 \leq a < m - 1)$ 가 존재하지 않으면  $i = k$ 로 하고 [Step 3]으로 재이동한다.
- [Step 9] ① 만일  $\Psi_{g[h]} \neq \emptyset$ 이면  $\Psi_{g[h]}$ 에서 하나의 노드  $q$ 를 임의로 선택하고  $g[h + 1] = q$ 로 수정한다.  $i = q, m = h + 1$ 로 하고 [Step 3]으로 재이동한다.
- ② 만일  $\Psi_{g[h]} = \emptyset$ 이면 [Step 10]으로 이동한다.
- [Step 10]  $h = h - 1, \Psi_{g[h]} = \Psi_{g[h]} - \{g[h + 1], g[h - 1]\}$ 로 하고 Step 9로 재이동한다.

[Step 8]의 ①은 염색체의 생성과정에서  $g[2]$  이후에 동일한 노드가 발생된 경우 이를 수정하기 위한 단계이다. 예를 들어, 단계적으로  $g[1] = 1, g[2] = 2, g[3] = 4, g[4] = 5, g[5] = 6, g[6] = 3, g[7] = 1$ 로 할당된 경우  $m = 7, k = 1$ 이고  $g[1] = g[7] = 1$ 이므로  $h = 6, \Psi_{g[h]} = \Psi_{g[h]} - \{g[h + 1], g[h - 1]\} = \emptyset$ 으로 수정된다.  $\Psi_{g[h]} = \emptyset$ 이므로 [Step 10]에서  $h = 5, \Psi_{g[h]} = \Psi_{g[h]} - \{g[h + 1], g[h - 1]\} = \{8, 9\} \neq \emptyset$ 으로 수정되고, [Step 9]의 ①에서  $q = 9$ 로 선택된 경우  $g[6] = 9, g[7] = 12$ 로 할당되어 동일한 노드가 중복되는 것이 방지된다.

#### 4.2 적응도 평가

본 연구에서는 목적함수인 기종점을 잇는 경로의 총 소요시간을 적응도(fitness) 평가함수로 사용해서 모집단을 구성하는 각 염색체(경로)에 대하여 해로서의 우수성을 평가하였다.  $n$ 개의 유전자로 구성되는 염색체  $A = (g[1] g[2] \dots g[n])$ 에 대해 적응도 평가함수  $eval(A)$ 를 계산하기 위해 다음과 같은

변수들을 정의하였다.

- $arrival(g[i])$ : 염색체(경로)  $A$ 의  $i$ 번째 유전자(노드)에 도착하는 시간
- $departure(g[i])$ : 경로  $A$ 의  $i$ 번째 노드를 출발하는 시간
- $mode(g[i], g[i + 1])$ : 경로  $A$ 의  $i$ 번째 노드와  $i + 1$ 번째 노드 사이를 운행하는 교통수단
- $service(g[i], g[i + 1])$ : 경로  $A$ 의  $i$ 번째 노드와  $i + 1$ 번째 노드 사이의 차량운행소요시간
- $walk(i, r, k)$ : 탑승차량인 수단  $r$ 의 하차지점  $i$ 에서 환승하고자 하는 수단  $k$ 의 승차지점까지의 도보소요시간
- $transfer(g[i])$ : 경로  $A$ 의  $i$ 번째 노드에서 수단전환을 위한 도보소요시간
- $TS(g[i], k) = (ts_1(g[i], k), ts_2(g[i], k), \dots, ts_m(g[i], k))$ : 환승 노드인 경로  $A$ 의  $i$ 번째 노드에서 환승하고자 하는 수단  $k$ 의 서비스 가능시간(운행시간표)

위에 정의된 변수들 중에서  $transfer(g[i])$ 는 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$transfer(g[i]) = walk(g[i], mode(g[i - 1], g[i]), mode(g[i], g[i + 1]))$$

여기서,  $walk(g[n], mode(g[n - 1], g[n]), mode(g[n], g[n + 1])) = 0$ . 경로의 총 소요시간은 마지막 노드에 도착하는 시간  $arrival(g[n])$ 이며, 따라서 적응도 평가함수  $eval(A)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$eval(A) = arrival(g[n])$$

마지막 노드의 도착시간  $arrival(g[n])$ 의 계산 과정은 다음과 같다.

#### [Procedure : Evaluation]

- [Step 1]  $i = 1, departure(g[1]) = 0$ 으로 초기화한다.
- [Step 2] ① 만일  $i \neq n - 1$ 이면 노드  $i + 1$ 의 도착시간을 다음과 같이 계산하고 [Step 3]으로 이동한다.
 
$$arrival(g[i + 1]) = departure(g[i]) + service(g[i], g[i + 1])$$
- ② 만일  $i = n - 1$ 이면 마지막 노드  $n$ 의 도착시간을 다음과 같이 계산하고 종료한다.
 
$$arrival(g[n]) = departure(g[i]) + service(g[i], g[i + 1])$$
- [Step 3] (1) 노드  $i + 1$ 의 출발시간을 다음과 같이 계산한다.
  - ① 만일  $mode(g[i], g[i + 1]) = mode(g[i + 1], g[i + 2])$ 인 경우  $departure(g[i + 1]) = arrival(g[i + 1])$

- ② 만일  $mode(g[i], g[i+1]) \neq mode(g[i+1], g[i+2]) = k$ 이고
- ㉠  $arrival(g[i+1]) + transfer(g[i+1]) \leq ts_1(g[i+1], k)$ 이면  $departure(g[i+1]) = ts_1(g[i+1], k)$
- ㉡  $ts_j(g[i+1], k) < arrival(g[i+1]) + transfer(g[i+1]) \leq ts_{j+1}(g[i+1], k)$ 이면  $departure(g[i+1]) = ts_{j+1}(g[i+1], k)$
- ㉢  $arrival(g[i+1]) + transfer(g[i+1]) > ts_m(g[i+1], k)$ 이면  $departure(g[i+1]) = \infty$
- (2)  $i = i + 1$ 로 하고 [Step 2]로 재이동한다.

[Step 3]의 (1) ㉡ ㉢은 수단  $k$ 로 환승하기 위해 환승 노드인 경로  $A$ 의  $i+1$ 번째 노드에 도착한 시간이 수단  $k$ 의 운행이 가능한 가장 늦은 출발시간  $ts_m(g[i+1], k)$ 을 초과한 경우를 나타내고 있다. 이 경우에 실제로 환승이 불가능하기 때문에 본 알고리즘에서는 경로  $A$ 의  $i+1$ 번째 노드를 출발할 수 있는 시간을 매우 큰 값( $\infty$ )으로 설정함으로써 경로  $A$ 가 최단경로가 되는 것을 방지하고 있다. 예를 들어, <그림 6>의 복합교통망에서 다음과 같은 경로  $A$ 를 고려해보자.

$$A = (g[1] \ g[2] \ g[3] \ g[4] \ g[5] \ g[6] \ g[7]) \\ = (1 \ 2 \ 4 \ 8 \ 10 \ 13 \ 15)$$

여행자가 경로  $A$ 를 이용하는 경우 노드 8에서 버스로부터 지하철 1로의 환승이 이루어진다. 여행자가 버스를 이용해서 노드 8에 도착한 시간이 14분, 환승 노드 8에서 지하철 1의 승차지점까지의 도보소요시간이 3분, 환승 노드 8에서 지하철 1을 이용 가능한 서비스시간이 (5분, 10분, 15분)이라 가정하자. 이때 지하철 1의 승차지점에 도착한 시간 17분이 지하철 1의 운행이 가능한 가장 늦은 출발시간 15분을 초과하기 때문에 노드 8에서 지하철 1로의 환승은 불가능하다. 따라서 경로  $A$ 는 <그림 6>의 복합교통망에 존재하는 경로이지만 실제로 통행 불가능한 경로이다. 상기의 평가절차는 노드 10으로 향하기 위해 노드 8을 출발할 수 있는 시간을 매우 큰 값으로 설정하기 때문에 결과적으로 경로  $A$ 를 낮게 평가하여 최단경로가 되는 것을 방지한다.

기존의 연구처럼 환승대기시간이 확정적인 복합교통망에 대해서는  $transfer(g[i])$ 를 노드  $i$ 에서 수단전환을 위한 환승 소요시간(도보소요시간 + 환승대기시간)으로 수정하고, [Step 3]에서의 노드  $i+1$ 의 출발시간을 다음과 같이 계산함으로써 최단경로를 탐색할 수 있다.

$$departure(g[i+1]) = arrival(g[i+1]) + transfer(g[i+1])$$

### 4.3 선택

선택이란 현재의 모집단을 갱신시키기 위한 준비단계로서 지정된 전략에 따라 우수한 염색체를 다음 세대로 복제(reproduction)시키거나 교배를 위한 염색체의 쌍을 만들기 위

해 현재의 모집단을 재편성하는 과정이다. 대표적인 선택전략으로써 엘리트 보존전략(elitist strategy)과 roulette wheel 전략 등이 있다. 본 연구에서는 두 전략을 결합한 혼합전략을 사용하였으며 그 절차는 다음과 같다.

#### [Procedure : Selection]

[Step 1] 엘리트 보존전략에 의해 현 모집단 중에서 적응도 평가함수의 결과치(목적값)가 우수한 상위  $x\%$ 의 염색체는 교배나 돌연변이의 대상이 되지 않도록 다음세대로 복제한다.

[Step 2] 현 모집단으로부터 roulette wheel 전략에 의해 모집단의 부족한 수  $N = (pop\_size - (pop\_size \times x\%))$ 만큼 목적값에 비례한 확률로 선택해서 모집단을 재편성한다.

이 과정에서 각 세대의 가장 우수한 염색체(경로)가 다음 세대에 유전되며 궁극적으로는 최적경로가 다음 세대에서 제거되어지는 것을 방지할 수 있다.

### 4.4 교배

교배는 재편성된 모집단으로부터 일정한 교배확률  $p_c$ 에 따라 교배를 위한 염색체의 쌍을 만들어 각 염색체의 유전자 교환을 통해 모체보다 우수한 염색체를 생성시키기 위한 단계이다. 일반적인 교배연산자로는 일점교배, 다점교배, 일양교배가 있으며 그 외에도 PMX (Partially Mapped Crossover), OX (Order Crossover), CX(Cycle Crossover) 등의 교배연산자가 다양한 문제에 적용되어져 왔다. 그러나 기존의 교배연산자를 경로를 구성하는 노드들의 배열인 본 알고리즘의 염색체에 적용하는 경우에는 교배연산자가 수행된 후 교통망에 존재하지 않는 경로가 발생한다.

본 연구에서는 상기의 일점 교배연산자를 제한된 염색체에 적용 가능하도록 수정하였다. 일점교배는 두 개의 염색체에 대해 교배위치를 임의로 한점 설정하고 후반의 유전자들을 교환한다. 본 연구에서는 기점 노드와 종점 노드를 제외한 두 염색체의 공통유전자(노드)를 교배위치로 선정하였다. 만일 두 염색체가 공통으로 소유하고 있는 유전자가 두 개 이상인 경우에는 그 중에서 임의로 하나의 유전자를 교배위치로 선정하였다. <그림 6>의 교통망에서 교배를 위해 선택된 한 쌍의 염색체  $A, B$ 가

$$A = (1 \ 2 \ 4 \ 7 \ 10 \ 13 \ 15)$$

$$B = (1 \ 3 \ 6 \ 5 \ 4 \ 8 \ 10 \ 11 \ 12 \ 14 \ 15)$$

인 경우, 두 염색체의 공통유전자는 4와 10이다. 유전자 4가 교배위치로 선정되었다면 유전자 4 후반의 유전자들을 서로 교환한다. 염색체  $A$ 와  $B$ 의 공통유전자 4 후반에 위치한 유전자들은 각각 노드 4에서 종점 노드 15까지의 부분경로를 나타낸

다. 따라서 유전자 4 후반에 위치한 유전자들을 교환한다는 것은 노드 4를 기점으로 하는 새로운 부분경로를 노드 4를 종점으로 하는 원래의 부분경로에 연결시키는 것을 의미하므로 그 결과는 항상 교통망에 존재하는 경로이다. 교배연산자가 수행된 후 생성되는 새로운 염색체  $A'$ ,  $B'$ 는 다음과 같으며 교통망에 존재하는 경로들이라는 것을 <그림 6>으로부터 알 수 있다.

$$A' = (1 \ 2 \ 4 \ 8 \ 10 \ 11 \ 12 \ 14 \ 15)$$

$$B' = (1 \ 3 \ 6 \ 5 \ 4 \ 7 \ 10 \ 13 \ 15)$$

#### 4.5 돌연변이

돌연변이란 각 염색체에 대해 일정한 돌연변이 확률  $p_m$ 으로 모체의 성질과는 전혀 다른 새로운 염색체를 발생시키는 과정이다. 본 연구에서는 염색체를 구성하는 유전자들 중에서 임의로 하나의 유전자를 선정하고 선정된 유전자 후반의 유전자들을 <그림 7>의 선행관계 행렬  $R$ 을 이용해서 교통망에 존재하는 새로운 부분경로가 되도록 재구성하였다. <그림 6>의 교통망에서 돌연변이를 위해 선택된 염색체가

$$A = (1 \ 2 \ 7 \ 10 \ 13 \ 15)$$

이고, 임의로 선정된 유전자가 4라면  $i=4$ 로 치환하여 선행관계 행렬  $R$ 을 이용해서 유전자 4 후반의 유전자들을 노드 4를 기점으로 하는 새로운 부분경로로 재구성한다.  $r_{4j}$ 에서  $j=8$ ,  $r_{8j}$ 에서  $j=12$ ,  $r_{12j}$ 에서  $j=14$ 가 선택되었다면 돌연변이가 수행된 후 생성되는 새로운 염색체  $A'$ 는 다음과 같다.

$$A' = (1 \ 2 \ 4 \ 8 \ 12 \ 14 \ 15)$$

#### 4.6 GA

제안된 유전자 알고리즘에 대한 전체적인 절차는 다음과 같으며,  $max\_gen$ 은 최대세대 수를 나타낸다.

##### [Procedure : GA]

- [Step 1] 매개변수들인  $pop\_size$ ,  $x$ ,  $p_c$ ,  $p_m$ ,  $max\_gen$ 의 값을 설정하고 세대수  $t$ 를 0으로 초기화한다.
- [Step 2] 모집단의 초기화 절차에 의하여  $pop\_size$ 개의 염색체로 구성된 모집단  $P(t)$ 를 생성한다.
- [Step 3] 적응도 평가절차에 의하여 모집단  $P(t)$ 를 구성하는 각 염색체를 평가한다.
- [Step 4] 만일  $t \leq max\_gen$ 이면 [Step 5]로 이동하고 그렇지 않으면 알고리즘을 종료한다.
- [Step 5] 선택절차에 의하여 모집단  $P(t)$ 를  $M$ 개의 우수한 염색체로 구성된 모집단  $P_M(t)$ 와  $N$ 개의 염색체로 구성된 모집단  $P_N(t)$ 로 재편성한다. 여기서  $M = pop\_size \times x\%$ ,  $N = pop\_size - M$ .
- [Step 6] 교배연산자를 이용해서 모집단  $P_N(t)$ 의  $N \times p_c$ 개

의 염색체가 갱신된 모집단  $P_N(t)$ '를 생성한다.

- [Step 7] 돌연변이 연산자를 이용해서 모집단  $P_N(t)$ '의  $N \times p_m$ 개의 염색체가 갱신된 모집단  $P_N(t)''$ 를 생성하고  $P(t+1) = P_M(t) + P_N(t)''$ 로 치환한다.  $t = t + 1$ 로 하고 [Step 3]으로 재이동한다.

### 5. 실험결과

제안된 알고리즘의 성능을 평가하기 위해서는 평가기준이 되는 문제를 확보하여 기존의 알고리즘과 비교해야만 한다. 그러나 본 연구과제에 대한 기존의 연구실적이 전무하기 때문에 제안된 알고리즘의 성능을 평가하는 것은 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 교통망에 존재하는 경로를 현실적으로 모두 나열할 수 있는 소규모의 복합교통망을 임의로 생성하여 제안된 알고리즘의 성능을 평가하였으며 알고리즘에서 사용되는 매개변수들의 적당한 값을 설정하였다. 제안된 알고리즘은 Borland C++ 5.02를 사용하여 구현되었으며 Pentium 200 MHz CPU, 64MB RAM를 장착한 IBM-PC에서 수행되었다. 성능평가를 위해 사용된 소규모 복합교통망은 4.1절의 <그림 6>에 예시된 네트워크로서 링크를 통과하는 데 소요되는 시간(분)은 양방향의 링크에 대해 동일한 것으로 가정한다. 환승 노드  $i=4, i=6, i=8, i=10, i=12$ 에서 수단전환을 위한 도보소요시간(분)  $walk(i, r, k)$ 은 <표 1>과 같으며 기호 \*는 해당하는 환승이 존재하지 않음을 나타낸다.

버스는 노드 1과 노드 12 사이를 양방향 10분 간격으로 3회 운행하기 때문에 타 교통수단으로부터 버스로 환승하는 경우 서비스시간이 제한된다. 지하철 1은 노드 1과 노드 15 사이를

표 1. 환승도보소요시간(분)

수 단		$walk(i, r, k)$				
$r$	$k$	$i=4$	$i=6$	$i=8$	$i=10$	$i=12$
버 스	지하철 1	*	*	3	*	*
버 스	지하철 2	5	*	*	*	4
버 스	지하철 3	6	*	*	*	3
지하철 1	버 스	*	*	4	*	*
지하철 1	지하철 2	*	3	*	*	*
지하철 1	지하철 3	*	*	*	2	*
지하철 2	버 스	5	*	*	*	2
지하철 2	지하철 1	*	3	*	*	*
지하철 2	지하철 3	3	*	*	*	5
지하철 3	버 스	5	*	*	*	3
지하철 3	지하철 1	*	*	*	6	*
지하철 3	지하철 2	2	*	*	*	4



양방향 5분 간격으로 4회 운행하고, 지하철 2와 3은 각각 노드 4와 노드 12, 노드 4와 노드 15 사이를 양방향 5분 간격으로 4회 운행한다. 따라서 환승 노드 10의 경우 지하철 1의 서비스 시간 제한은 노드 13방향으로 (31, 36, 41, 46)이고 노드 8의 방향으로 (8, 13, 18, 23)이다.

<그림 6>의 네트워크에는 동일한 노드가 중복되지 않는 경로로서 총 40개의 경로가 존재하며 이들 경로들을 모두 열거하여 비교함으로써 쉽게 최단경로  $p^* = \textcircled{1}-\textcircled{2}-\textcircled{4}-\textcircled{8}-\textcircled{12}-\textcircled{14}-\textcircled{15}$  (총 소요시간 36분)를 얻을 수 있다. 위 문제에 대하여 GA를 적용하기에 앞서서  $pop\_size = 10, x = 10\%, max\_gen = 30$ 으로 고정하고  $p_c$ 는 0.1부터 1.0까지 0.1단위로,  $p_m$ 은 0.05부터 1.0까지 0.05단위로 변화시키면서 5회 반복하여 알고리즘의 수행결과를 측정하였다. 실험결과  $p_m$ 은  $p_c$ 의 모두 경우에 대하여 0.05~0.4에서 바람직하였으며 특히  $p_m = 0.2$ 일 때 가장 우수한 결과를 보여주었다. <그림 8>은  $p_m = 0.2$ 일 때 30세대에서  $p_c$ 의 변화에 따른 적응도 평가치(총 소요시간)를 보여주고 있으며 반복 수행되어진 5회의 평균치를 나타낸다.

<그림 8>의 최소값과 최대값은 각각 30세대에서 가장 우수한 염색체와 가장 열등한 염색체의 적응도 평가치를 나타내고 있으며  $p_c$ 의 모든 값에 대하여 5회 모두 최소값으로서 최적값인 36이 탐색되었다. 평균값은 모집단의 평균 평가치를 나타낸다. <그림 9>는  $p_c$ 의 변화에 따른 알고리즘의 수렴정도를 나타내며 5회의 평균치이다.  $p_c = 0.3$ 에서는 평균적으로 16세대

에서 최단경로가 탐색되지만 그 밖의 경우에는 최단경로를 조기에 탐색하고 수렴하는 경향이 있다. 따라서  $p_m = 0.2, p_c = 0.3$ 이 적정값임을 알 수 있다.

반복실험의 5회째에서 마지막 세대의 모집단을 조사한 결과 최단경로인  $p^* = \textcircled{1}-\textcircled{2}-\textcircled{4}-\textcircled{8}-\textcircled{12}-\textcircled{14}-\textcircled{15}$  외에도  $p_1 = \textcircled{1}-\textcircled{3}-\textcircled{6}-\textcircled{8}-\textcircled{10}-\textcircled{13}-\textcircled{15}$  (총 소요시간 39분),  $p_2 = \textcircled{1}-\textcircled{2}-\textcircled{4}-\textcircled{7}-\textcircled{10}-\textcircled{13}-\textcircled{15}$  (총 소요시간 44분) 등이 탐색되어졌다. 특히 경로  $p_1$ 의 총 소요시간은 최단경로  $p^*$ 의 총 소요시간에 가까우며 환승없이 지하철 1을 이용하는 경로이다. 반면에 최단경로  $p^*$ 는 버스와 지하철 3이 이용된다. 환승에는 추가비용이 발생할 뿐만 아니라 에스컬레이터나 움직이는 보도(moving sidewalk)와 같은 환승 편의 시설이 미비한 경우에는 이용자에게 불편이 초래된다. 따라서 본 알고리즘에 의해 얻어진 부가적인 경로들은 여행자가 이용요금과 편의성 등을 고려해서 자신에게 가장 적합한 대체경로를 선택할 수 있는 정보로서 제공되어질 수 있다.

제안된 알고리즘의 성능을 40개의 노드와 130개의 링크, 12개의 환승 노드, 3개의 교통수단(버스, 지하철 1, 지하철 2)으로 구성된 중규모 복합교통망에 대하여 평가하였다. 각 링크의 통행시간(분)과 수단전환을 위한 도보소요시간(분)은 1과 10 사이의 정수를 임의로 발생하여 설정하였고, 버스는 5분 간격으로 3회, 지하철 1과 지하철 2는 10분 간격으로 3회 운행이 이루어지는 것으로 서비스시간을 제한하였다.  $pop\_size = 100, max\_gen = 500, p_m = 0.2, p_c = 0.3$ 으로 설정하여 수행한 결과를 세대별로 나타내면 <그림 10>과 같다.

<그림 10>의 결과는 세대별 가장 우수한 염색체의 적응도 평가치를 나타내며 0~208세대까지의 적응도 평가치는 505분이다. 이 값은 서비스시간 제한에 의해 환승이 불가능한 노드가 발생한 특정 경로를 나타낸다. 따라서 이 경로는 교통망에 존재하지만 실제로 통행이 불가능한 경로이다. 본 실험에서는 이와 같은 경로에 대해 환승이 불가능한 노드를 통행할 수 있는 시간을 500분으로 설정함으로써 낮게 평가되도록 하였다. 209세대에서 실제로 통행 가능한 경로(적응도 평가치 148분)가 처음으로 발생하였으며 257세대 이후에는 보다 더 우수한 염색체가 발견되지 않았다. 알고리즘의 수행시간은 58초로 매

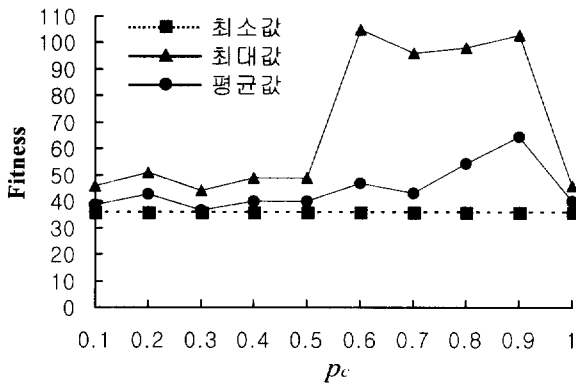


그림 8.  $p_c$ 의 변화에 따른 평가치의 분포( $p_m = 0.2$ , 세대 = 30).

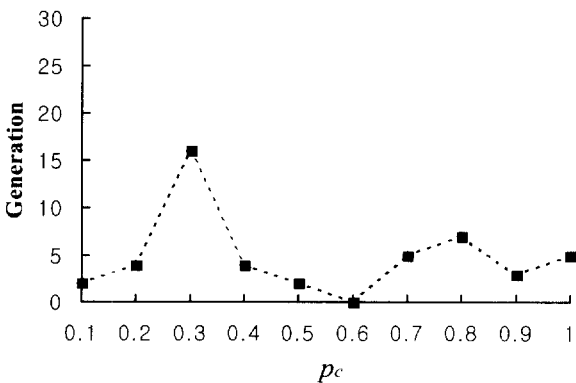


그림 9.  $p_c$ 의 변화에 따른 수렴정도( $p_m = 0.2$ ).

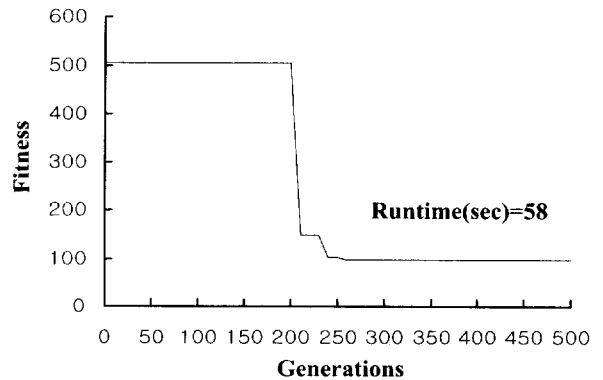


그림 10. 세대별 진화과정.

우 빠른 시간 안에 최단경로가 산출되는 것을 알 수 있으며 대도시의 교통망처럼 복잡하고 대규모인 복합교통망에 실제로 적용하는 경우에도 합리적인 최단경로를 실시간으로 제공할 수 있는 기법이라 고려된다.

## 6. 결론

본 연구에서는 다수의 교통수단이 혼합된 복합교통망에서 환승태뿐만 아니라 서비스시간 제한에 의한 환승대기시간의 변동이 반영된 합리적인 최단경로를 탐색할 수 있는 기법을 개발하기 위해 유전자 알고리즘을 적용하였다. 전통적인 알고리즘들은 개인교통망을 이용하는 자가운전자를 대상으로 경로안내 서비스를 위해 개발되었기 때문에 환승을 고려하지 않는다. 비록 최근에 복합교통망을 이용하는 여행자를 대상으로 경로안내 서비스를 위한 연구들이 수행되었지만 환승대기시간을 확정적으로 추정하고 서비스시간 제한을 고려하지 않기 때문에 현실성이 결여되어있다. 본 연구에서 개발된 알고리즘은 환승태를 반영하기 위해 환승 노드나 환승 링크를 추가하여 교통망을 변형하였던 기존의 연구와는 달리 교통망의 변형을 위한 추가적인 작업이 필요 없다. 소규모와 중규모의 가상 복합교통망에 대하여 제안된 알고리즘을 적용한 결과 합리적인 최단경로를 빠른 시간 안에 효율적으로 탐색할 수 있음이 입증되었으며 최적경로와 함께 제공되는 복수 개의 부가적인 경로들은 수단의 이용요금과 편의성 등을 고려해서 이용자가 자신에게 가장 적합한 대체 경로를 선택하기 위한 정보로서 유용하다.

수단별 링크의 통행시간이나 수단별 서비스시간 등의 데이터 수집에 어려움이 있기 때문에 가상 복합교통망을 이용하였으나, 추후 연구과제로는 실제의 데이터를 이용해서 각종 노선버스와 지하철이 연계된 서울과 같은 대도시의 복합교통망에 대하여 적용함으로써 대중교통 이용자를 위한 경로안내 시스템을 실제로 구축하는 연구가 필요하다.

## 참고문헌

- Chang, I. S. (2000), A Hybrid Model of  $A^*$  Search and Genetic Algorithms for ATIS under Multiple Objective Environment, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, **26**(4), 421-430.
- Chen, Y. L. and Tang, K. (1997), Shortest Paths in Time-Schedule Networks, *International Journal of Operations and Quantitative Management*, **3**, 157-173.
- Chen, Y. L. and Tang, K. (1998), Minimum Time Paths in a Network with Mixed Time Constraints, *Computers and Operations Research*, **25**, 793-805.
- Choi, G. S., Park, J. J. and Seo, K. S. (1997), Round Route Search Algorithm for Commercial Vehicle using Evolution Program, *Journal of Korean Society of Transportation*, **15**(4), 125-141.
- Choi, K. C. and Jang, W. J. (1998), A Model for Shortest Path Calculation on Intermodal Transportation Network, *Journal of Korean Society of Transportation*, **16**(4), 167-186.
- Desrochers, M. and Soumis, F. (1988), A Reoptimization Algorithm for the Shortest Path Problem with Time Windows, *European Journal of Operational Research*, **35**, 242-254.
- Dijkstra, E. W. (1959), A Note on Two Problems in Connection with Graphs, *Numerische Mathematik*, **1**, 269-271.
- Kim, H. M., Lim, Y. T. and Lee, S. J. (1999), Development of an Integrated Network Model for Mode Choice and Trip Assignment, *Journal of Korean Society of Transportation*, **17**(5), 87-98.
- Lawler, E. L. (1972), A procedure for computing the  $K$  best solutions to discrete optimization problems and its application to the shortest path problem, *Management Science*, **18**, 401-405.
- Lee, S. H., Choi, K. C. and Kim, W. G. (1996), An Integration of Searching Area Extraction Scheme and Bi-directional Link Searching Algorithm for the Urban ATIS Application, *Journal of Korean Society of Transportation*, **14**(3), 45-59.
- Michalewicz, Z. (1994), *Genetic Algorithm + Data Structure = Evolution Programs*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Modesti, P. and Sciomachen, A. (1998), A Utility Measure for Finding Multiobjective Shortest Paths in Urban Multimodal Transportation Networks, *European Journal of Operational Research*, **111**, 495-508.
- Spieß, H. and Florian, M. (1989), A New Assignment Model for Transit Networks, *Transportation Research*, **23B**, 83-102.
- Thomas, R. (1991), *Traffic Assignment Techniques*, Avebury Technical, England.