

유전자 알고리즘을 이용한 동적통행배정에 관한 연구

Dynamic Traffic Assignment Using Genetic Algorithm

박 경 철 박 창 호 전 경 수 이 성 모
Park, Kyung-Chul Park, Chang-Ho Chon, Kyung-Soo Rhee, Sung-Mo

요 旨

최근 교통문제를 해결하기 위한 방법으로 교통계획분야에 GIS나 ITS를 활용한 다양한 연구가 활발히 진행 중에 있다. 이와 함께 정보환경의 급격한 발달과 더불어 대안 경로의 선정, 또는 교통예보 서비스와 같은 온라인 상에서의 교통정보 제공이 이루어지고 있어 GIS 환경 내에서도 가로망의 교통량을 정확하게 예측할 수 있는 기능이 요구되고 있어 통행배정모형의 중요성이 증가하고 있다. 그런데, 전통적인 정적 통행배정모형은 급변하는 교통상황에 적합하지 않기 때문에 실시간 교통상황에 대한 교통흐름을 예측할 수 있는 동적 통행배정모형의 개발이 요구되고 있다.

그러나, 동적 통행배정모형은 시공간적인 변수들의 복잡성으로 인해서 그 최적해를 찾는 데 많은 수학적 어려움과 제약조건이 존재한다. 따라서, 이를 해결하기 위한 여러 가지 해법이 연구되어왔지만, 기존의 방법은 목적함수나 제약조건이 convex하지 않은 경우에는 적용이 불가능한 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 인공지능방법(Artificial Intelligence Technique)의 한 분야로 활발히 연구되고 있는 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)을 동적 통행배정 모형에 도입하여 그 해결 방법을 제시하였다. 논문에서 사용한 동적 통행배정모형은 제약조건이 convex하지 않은 Merchant-Nemhauser 모형이고, 새로운 해결기법으로 사용된 유전자 알고리즘은 일반적인 제약조건을 처리할 수 있다고 알려진 GENOCOP III 시스템이다.

새로 도입된 방법의 효율성과 유의성을 검증하기 위해 간단한 네트워크에 적용하였다. 그 결과 GENOCOP III 시스템이 계산과정의 효율성에 있어서 기존의 비선형 해법 알고리즘보다 우수한 것으로 입증되었다.

ABSTRACT

Dynamic traffic assignment(DTA) has been a topic of substantial research during the past decade. While DTA is gradually maturing, many aspects of DTA still need improvement, especially regarding its formulation and solution algorithm. Recently, with its promise for ITS(Intelligent Transportation System) and GIS(Geographic Information System) applications, DTA have received increasing attention. This potential also implies higher requirement for DTA modeling, especially regarding its solution efficiency for real-time implementation. But DTA have many mathematical difficulties in searching process due to the complexity of spatial and temporal variables. Although many solution algorithms have been studied, conventional methods cannot find the solution in case that objective function or constraints is not convex.

In this paper, the genetic algorithm to find the solution of DTA is applied and the Merchant-Nemhauser model is used as DTA model because it has a nonconvex constraint set. To handle the nonconvex constraint set, the GENOCOP III system which is a kind of the genetic algorithm is used in this study. Results for the sample network have been compared with the results of conventional method.

1. 서론

최근 교통문제를 해결하기 위한 방법으로 교통계획 분야에 GIS나 ITS를 활용한 다양한 연구가 세계적으로 활발히 진행 중에 있다.¹²⁾¹⁴⁾¹⁵⁾ 이와 함께 정보환경의 급격한 발달과 더불어 대안 경로의 선정, 또는 교통예보 서비스와 같은 온라인 상에서의 교통정보 제공이 이루어지고 있어 GIS 환경 내에서도 가로망의 교통량을 정확하게 예측할 수 있는 기능이 요구되고 있어 통행배정모형의 중요성이 증가하고 있다.

그런데 기존의 정적인 통행배정모형은 급변하는 교통상황에 적절하게 대응하지 못하는 문제를 가지고 있다. 또한, GIS-T와 ITS에서 Auto PC와 같은 새로운 차량용 장비의 표준이 가까운 시일 내에 사용될 수 있을 것이며, 이와 같은 차량과 운전자간의 상호작용에서 차량항법지원이나 데이터 통신 등에 대한 새로운 기법의 적용이 필수적이다.³⁾ 특히, 이러한 실시간 환경에서 최적경로의 탐색과 같은 기능이 가능하기 위해서는 정적인 아닌 동적으로 이루어지는 동적 통행배정이 더욱 필요하다고 할 수 있다.¹²⁾

그러나 동적 통행배정모형은 시공간적인 변수들의 복잡성으로 인해서 그 최적해를 찾는 데 많은 수학적 어려움이 존재한다. 따라서, 여러 가지 수학적 기법들이 연구되어 왔지만, 기존의 방법들은 제약조건과 목적함수가 convex한 경우에 있어서만 풀이가 가능하다는 단점을 가지고 있다.⁶⁾

본 연구에서는 최근 최적화 분야에 활발히 적용되고 있는 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)을 동적 통행배정모형의 새로운 해결 알고리즘으로 도입하였다. 연구에 사용된 동적 통행배정모형은 제약조건이 convex하지 않은 Merchant와 Nemhauser의 모형(1978)이고, 제약조건을 처리하기 위해 유전자 알고리즘 중 GENOCOP III 시스템을 사용하였다. 이를 이용해서 동적 통행배정모형의 해를 제시하였고, 그 결과를 검증하기 위해서 기존의 비선형해법 프로그램을 이용해서 구한 결과와 비교하였다.

2. 이론적 고찰

2.1. Merchant-Nemhauser 모형

2.1.1. 모형설명

Merchant와 Nemhauser는 1978년 다기점(Multiple origins)과 단일종점(Single destination)을 가진 네트워크에서의 동적 통행배정을 위한 이산시간(Discrete time) 모형을 제시하였다.⁵⁾

분석시간을 적당한 길이의 작은 시간간격 $\{t | t=0, 1, \dots, T\}$ 로 분해하면, 기본적으로 다음의 두 가지 방정식을 만족한다.

■ 상태 방정식(State Equation)

$$x_a^{t+1} = x_a^t - g_a(x_a^t) + d_a^t, t=0, 1, \dots, T-1 \quad (1)$$

■ 교통량보존 방정식(Traffic Conservation Equation)

$$\sum_{a \in A(n)} d_a^t = F^t(n) + \sum_{a \in B(n)} g_a(x_a^t) \quad (2)$$

$A(n)$: 노드 n 에서 진출하는 링크의 집합

$B(n)$: 노드 n 으로 진입하는 링크의 집합

$F^t(n)$: t 시간대에 노드 n 에 부과되는 외부교통량(OD)

이와 같은 기본적인 제약조건에 혼잡을 고려한 연속하고 감소하지 않는 convex한 비용함수 h_a 를 가정하면, 비용을 최소화시키는 문제 P 는 다음과 같다.

$$P = \min \sum_{t=1}^T \sum_{a=1}^A h_a(x_a^t) \quad (3)$$

$$\text{s.t. } x_a^{t+1} = x_a^t - g_a(x_a^t) + d_a^t,$$

$$t=0, 1, \dots, T-1, \forall a \in A$$

$$\sum_{a \in A(n)} d_a^t = F^t(n) + \sum_{a \in B(n)} g_a(x_a^t),$$

$$t=0, 1, \dots, T-1, \forall n \in N - \{n\}$$

$$x_a^0 = R_a \geq 0, \forall a \in A \quad (4)$$

$$d_a^t \geq 0, t=0, 1, \dots, T-1, \forall a \in A \quad (5)$$

$$x_a^t \geq 0, t=0, 1, \dots, T, \forall a \in A \quad (6)$$

2.1.2. Nonconvexity 문제점

Merchant-Nemhauser 모형은 유출량 함수 g_a 가 선형함수가 아닌 경우에 목적함수 P 에 대한 가능해 영역이 convex하지 않다는 문제를 가지고 있다.

이런 이유로 비록 비용함수 h_a 가 선형함수라고 해도 P 는 다수의 국지해(Local Optima)를 갖게 되고, 일반적인 방법으로는 최적해(Global Optima)를 찾을 수가 없게 된다.⁵⁾

2.2. 유전자 알고리즘

2.2.1. 유전자 알고리즘의 특징

유전자 알고리즘은 확률적인 알고리즘의 부류에 속해 있지만 방향성 있는 탐색과 확률탐색의 요소를 결합하였으므로 다른 알고리즘과는 상당히 다르다.⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹¹⁾

반면에 등반방법(Hill Climb Method)과 같은 경우, 시작점에 의해서 최적값이 좌우되고 국소 최적값만을 제공하게 되는 단점이 있다.

이런 단점을 유전자 알고리즘은 해결할 수 있어서 현존하는 방향성 있는 탐색방법보다 더 효율적이며 목적함수나 제약조건에 형태에도 제약을 받지 않기 때문에 더욱 광범위한 적용이 가능하다.

2.2.2. 유전자 알고리즘의 수행절차

1) 개체집단 초기화

제약조건에 맞는 범위 내에서 정해진 세대수에 맞는 이진수 형태의 1세대 염색체 개체집단을 만드는 과정이다. 이 과정은 일반적으로 임의의 발생기법을 이용한다.

2) 개체선택

초기화된 염색체 집단에서 우수한 개체를 선택하는 과정이다. 즉, 각 염색체의 우열을 평가할 수 있는 적합도에 비례하여 개체를 선택한다.

3) 교배연산

개체선택을 통해 선택된 개체들 중, 1쌍의 부모 염색체를 선택하여 서로의 특징을 교환하여 새로운 개체를 만드는 과정이다.

4) 돌연변이

이 연산은 부모 세대의 유전자 중에서 임의의 선택을 통해서 이진 표현 숫자를 조작하는 것이다. 즉, 0을 1로 바꾸거나 1을 0으로 바꾼다.

5) 새로운 세대로 진화

선택, 교배, 그리고 돌연변이를 한 후에 새로운 개체집단은 평가함수에 의해서 적합도 평가를 받는다. 이 평가는 다음 선택을 위한 확률분포를 만드는데 사용된다. 나머지 단계는 위의 단계들을 주기적으로 반복하면 되고, 결국 최상의 염색체가 최적해로 선택되어 진다.

2.2.3. 제약조건처리방법

제약조건의 처리문제는 유전자 알고리즘을 응용하고자 할 때, 부딪히는 가장 중요한 문제이다. 이를 처리하는 방법으로는 벌점(Penalty) 함수방법이나 해독기(Decoder) 또는 복구(Repair) 알고리즘을 이용하는 방법이 있다.

그러나 이와 같은 방법들은 문제에 따라 적용 방법이 달라지는 단점을 갖거나 다양한 문제를 다루기에는 역부족인 경우가 많다. 이런 이유로 일반적인 제약조건을 처리하기 위해 개발된 방법이 GENOCOP(Genetic Algorithm for Numerical Optimization for Constrained Problems) 시스템이다.⁹⁾¹¹⁾ 이 방법의 핵심은 다음과 같다.

① 등식 구속조건의 소거.

② 모든 염색체가 적합한 영역 내에 계속 머무는 것을 보장할 수 있는 유전 연산자들의 고안.

3. GENOCOP III 시스템

유전자 알고리즘은 여러 가지 장점을 가지고 있으면서도, 계산의 효율성과 함께 제약조건 처리에 많은 문제점을 가지고 있다.

이런 이유로 최근 몇 년 동안 유전자 알고리즘에서 제약조건을 다루기 위한 많은 시도가 있었다. 이중 선행적인 제약조건을 다룰 수 있는 방법이 GENOCOP 시스템이다.¹¹⁾ 본 연구에서는 GENOCOP 시스템에서 발전된 비선형 제약조건을 포함한 일반적인 제약조건을 다룰 수 있는 GENOCOP III 시스템을 도입하였다.

이 방법은 기존의 유전자 알고리즘과는 달리 실수 표현을 사용하며 추가적인 파라미터가 필요없기 때문에 계산이 매우 신속한 장점을 가지고 있다. 또한 제약조건에 구속을 받지 않기 때문에 다양한 최적화 문제에 적용이 가능하다.¹⁰⁾

본 연구에서 적용하려는 분야는 시공간적인 변수와 제약조건이 매우 복잡한 동적 통행배정 분야이다. 특히, 교통량과 관련된 제약조건에 의한 계산의 방대함으로 기존의 유전자 알고리즘으로는 효율적인 해결이 불가능하다. 따라서 GENOCOP III 시스템을 적용하여 그 해를 구하였다.

3.1. 초기화 과정

일반적인 최적화 문제는 목적함수와 제약조건으로 구성된다. 제약조건은 선형방정식, 선형부등식, 비선형방정식, 비선형부등식으로 구분할 수 있다. 이와 같은 최적화 문제를 등식의 소거과정으로 변수를 줄이고 부등식들을 적절히 수정하여 다음과 같이 표현하였다.

$$\begin{aligned} &\text{optimize } f(\bar{X}), \bar{X}=(x_1, \dots, x_n) \in R \\ &\text{s.t. } \bar{X} \in F \subseteq S \end{aligned}$$

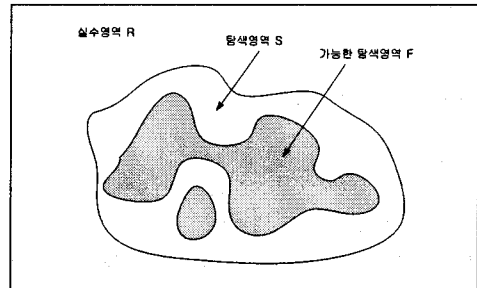
여기서, S 는 $S \subseteq R$ 인 탐색영역(search space)으로 정의하였고, F 는 $F \subseteq S$ 인 가능한 탐색영역(feasible search space)으로 정의하였다. 탐색영역 S 는 실수영역 R 에서 다음과 같은 형태로 정의한다.

$$\text{left}(k) \leq x_k \leq \text{right}(k), 1 \leq k \leq n$$

반면에 가능한 탐색영역 $F \subseteq S$ 는 m 개의 제약조건에 대해서 다음과 같이 정의한다.

$$g_j(\bar{X}) \leq 0, j=1, \dots, q$$

$$h_j(\bar{X}) = 0, j=q+1, \dots, m$$



<그림 1> 탐색영역과 가능한 탐색영역

GENOCOP III 시스템에서 개체집단은 두 가지 집단으로 초기화된다. 첫 번째 개체집단은 선형제약조건을 만족하는 탐색영역 S 에서 선택되어지고, 두 번째 개체집단은 모든 제약조건을 만족하는 가능한 탐색영역 F 에서 선택되어진다. 초기화과정은 일반적인 유전자 알고리즘과 같이 임의의 발생시키는 방법을 이용한다.

3.2. 유전연산자

3.2.1. 돌연변이

1) 균등돌연변이(Uniform Mutation)

이 유전연산자는 하나의 부모세대 염색체 $\bar{X} \in (x_1, \dots, x_k, \dots, x_n)$ 에 대해서 $k \in (1, \dots, n)$ 인 임의의 수를 발생시킨 뒤 k 번째 유전자를 변이시킨 다음세대 염색체 $\bar{X}' \in (x_1, \dots, x'_k, \dots, x_n)$ 을 만든다. 여기서, x'_k 는 정리된 제약조건 $\text{left}(k) \leq x_k \leq \text{right}(k)$ 사이에서 균등한 확률로 임의로 발생시킨 수이다.

2) 경계돌연변이(Boundary Mutation)

균등돌연변이가 변형된 형태로서, 변이되는 x'_k 의 값으로 경계값 $left(k)$ 또는 $right(k)$ 을 동일 확률로 취하는 연산이다.

3) 불균등돌연변이(Non-uniform Mutation)

염색체 $\overline{X} \in (x_1, \dots, x_k, \dots, x_n)$ 의 유전자 x_k 가 이동 가능한 유전자 중 하나로써 불균등 돌연변이의 대상으로 선택되었을 때, 이 연산의 적용 결과는 $\overline{X}' \in (x_1, \dots, x'_k, \dots, x_n)$ 가 된다. 이때, x'_k 값은 다음 식을 통해서 결정된다.

$$x'_k = \begin{cases} x_k + \Delta(t, (k) - x_k) & \text{임의수가 0일때} \\ x_k - \Delta(t, x_k - (k)) & \text{임의수가 1일때} \end{cases}$$

함수 $\Delta(t, y)$ 는 영역 $[0, y]$ 에서 값을 취하되, t 가 증가할수록 $\Delta(t, y)$ 값이 0에 가까워질 확률이 증가하는 성질을 갖는다.

3.2.2. 교배연산

1) 단순 교배(Simple Crossover)

일반적인 이진 돌연변이 연산자는 제약조건을 벗어나는 자손세대를 생성할 가능성을 가지고 있다. 이러한 문제를 피하기 위해서 파라미터 $a \in [0, 1]$ 을 이용해서 다음과 같은 교배 자손세대를 만든다. 이 방법을 통하여 만들어진 다음의 자손세대는 탐색영역에 항상 머물게 된다.

$$\overline{X}'_1 \in (x_1, \dots, x_k, y_{k+1} \cdot a + x_{k+1} \cdot (1-a), \dots, y_n \cdot a + x_n \cdot (1-a))$$

$$\overline{X}'_2 \in (y_1, \dots, y_n, x_{k+1} \cdot a + y_{k+1} \cdot (1-a), \dots, x_n \cdot a + y_n \cdot (1-a))$$

2) 산술적 교배(Arithmetical Crossover)

이 유전연산자는 두 벡터의 선형 결합으로 정의된다. 만약에 \overline{X}_1 와 \overline{X}_2 가 한 쌍의 부모세대가 선택되었다면, 유전연산결과의 자손세대는 다음과 같이 된다.

$$\overline{X}'_1 = a \cdot \overline{X}_1 + (1-a) \cdot \overline{X}_2$$

$$\overline{X}'_2 = a \cdot \overline{X}_2 + (1-a) \cdot \overline{X}_1$$

이 연산자도 탐색영역에 계속 머물기 위해서 $a \in [0, 1]$ 을 만족하는 변수를 이용한다.

3) 경험적 교배(Heuristic Crossover)

이 연산자는 Wright(1990)에 의해서 처음으로 제안되었다. 이 연산자는 다음과 같은 특이한 성질을 갖는 교배연산이다.

- ① 탐색방향의 결정에 목적함수 값이 사용된다.
- ② 단 하나의 자손세대만을 생성한다.
- ③ 자손세대가 아예 생겨나지 않을 수도 있다.

이 연산자는 부모세대 \overline{X}_1 와 \overline{X}_2 로 부터 하나의 자손세대 \overline{X}_3 을 다음과 같이 생성한다.

$$\overline{X}_3 = r \cdot (\overline{X}_2 - \overline{X}_1) + \overline{X}_2$$

여기서, r 은 0과 1 사이의 임의의 수이고, \overline{X}_2 는 부모세대 중 우수한 쪽이다.

3.3. 복구과정

3.3.1. 평가함수

GENOCOP III 시스템에 있어서 제약조건을 처리하기 위한 과정은 제약조건을 만족시키지 않고 가능한 영역을 벗어난 해를 가능한 영역으로 복구하는 방법을 이용한다.

이를 위한 별점함수는 다음 함수에 기초한다.

$$p_j(\overline{X}) = \begin{cases} \max\{0, g_j(\overline{X})\}, & 1 \leq j \leq q \\ |h_j(\overline{X})|, & q+1 \leq j \leq m \end{cases}$$

이 것은 j 번째 제약조건의 위반정도를 나타낸다. 이를 이용해서 평가함수를 구성하면 다음과 같다.

$$eval(\bar{X}) = f(\bar{X}) + \frac{1}{2r} \sum_{i=1}^m b_i^2(\bar{X})$$

벌점상수 r 의 초기값 r_0 는 주어지고 반복회수가 증가할수록 작아진다. 본 연구에서 쓰인 벌점상수의 초기값은 1 이고(즉 $g(r,0) = 1$), 다음과 같다.

$$g(r,t) = 10^{-1} \cdot g(r,t-1)$$

3.2.2. 복구과정

유전연산을 수행함에 있어서 문제가 되는 것은 탐색영역의 제약조건은 만족하지만 가능한 영역의 제약 조건은 만족하지 못하는 염색체들($\bar{S} \notin F$)이다. 이런 것들은 다음의 복구과정을 통해서 새로운 염색체로 대체된다.

[단계 1] 모든 제약조건을 만족하는 기준이 되는 참조염색체(\bar{R} : reference points)를 선택한다.

[단계 2] 탐색염색체들 중 $eval(\bar{S}) \neq f(\bar{S})$ 인 복구할 대상 염색체($\bar{S} \notin F$)를 선택한다.

[단계 3] \bar{S} 와 \bar{R} 사이의 염색체들 중 가능해 영역 조건을 만족하는 다음과 같은 임의염색체를 만든다.

$$\bar{Z} = a \cdot \bar{S} + (1-a) \cdot \bar{R}$$

여기서, a 는 $\langle 0, 1 \rangle$ 사이의 임의의 수로 \bar{Z} 가 가능한 영역에 포함하게 만들어주는 역할을 한다. 즉, 다음을 만족시킨다.

$$eval(\bar{Z}) = f(\bar{Z})$$

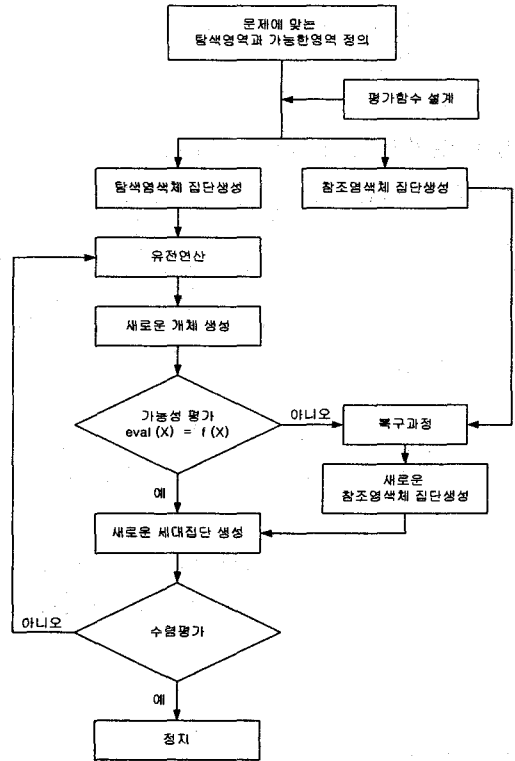
[단계 4] 만약 평가함수값 $f(\bar{Z})$ 가 $f(\bar{R})$ 보다 뛰어나다면 \bar{Z} 가 \bar{R} 을 대체하여 새로운 참조염색체가 된다.

[단계 5] 대체비율 P , 만큼 새로운 \bar{Z} 가 \bar{S} 을 대체하도록 위의 단계를 반복해서 실행한다.

3.4. 수행절차

앞 절에서 설명된 유전연산자와 복구과정을 이용한 GENOCOP III 시스템의 전체적인 수행절차는 다음과

같다.



<그림 2> GENOCOP III 시스템의 수행절차

[단계 1] 초기화

탐색염색체(search points) 집단과 참조염색체(reference points) 집단을 발생시킨다.

[단계 2] 새로운 개체집단생성

탐색염색체에 대해서 선형제약조건을 만족시키는 유전연산자를 이용해서 탐색영역 내에 새로운 개체를 생성한다.

[단계 3] 복구과정

탐색염색체들 중 가능한 영역 밖에 있는 염색체들을 수정하여 새로운 참조염색체 집단과 새로운 탐색염색체 집단을 만든다.

[단계 4] 최적해 검증

탐색염색체들 중 가장 우수한 개체를 평가한 뒤 수렴기준을 평가하여 만족하면 최적해로 인정하고 그렇지 않으면 단계 2 로 돌아간다.

4. 모형구축

4.1. 모형입력함수 도출

기본적인 모형은 Merchant와 Nemhauser(1978)의 모형을 활용하였고, 동적 사용자 최적상태의 목적함수를 만들기 위해서 수정된 Greenshield 모형을 도입하였다. 모형에 사용 변수들은 다음과 같다.

변수기호	변수 설명
n	노드집합
a	링크집합
t	분석시간
x_a^t	t시간대에 링크 a상의 차량수
d_a^t	t시간대에 링크 a로의 유입량
$g_a(x_a^t)$	t시간대에 링크 a의 유출함수
l_a	링크 a의 길이(km)
u_a^t	t시간대에 링크 a의 통행속도(km/시)
u_{max}	링크 a의 최대 통행속도(km/시)
u_{min}	링크 a의 최소 통행속도(km/시)
k_a^t	t시간대에 링크 a의 밀도(대/km)
k_j	jam상태의 밀도(대/시)
$T_a(x_a^t)$	t시간대의 링크 a의 통행시간

4.1.1. 링크 통행시간 함수

전통적인 BPR 함수는 교통류를 정적상태로 보는 가정을 내포하고 있으며, 이러한 가정은 시간에 따라 교통량이 변하는 동적인 교통 네트워크에서는 타당하지 않다.¹⁶⁾

본 연구에서는 새로운 링크 통행시간 함수를 만들기 위해서 다음의 수정된 Greenshield 모형을 이용하였다.¹⁴⁾

$$u_a^t = u_{min} + (u_{max} - u_{min}) \left(1 - \frac{k_a^t}{k_j}\right) \quad (7)$$

따라서, 링크 a의 통행시간은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$T_a(x_a^t) = \frac{l_a^2 k_j}{u_{max} k_j l_a - (u_{max} - u_{min}) x_a^t} \quad (8)$$

이 함수는 혼잡에 대한 비효율을 의미하며, 어떤 링크의 통행비용을 나타내는 단조 증가하는 연속함수이다.

4.1.2. 링크 유출량 함수

링크에서의 유출량은 그 링크의 물리적인 특징에 의해서 결정된다고 가정하면, 어떤 시간대의 유출량은 그 링크 상의 교통량과 같게 된다.⁵⁾

이미 알려진 교통량-밀도-속도 방정식은

$$Q = u \cdot k \quad (9)$$

이고, 따라서 유출량은 다음과 같다.

$$g(x_a^t) = u_{max} \frac{x_a^t}{l_a} - (u_{max} - u_{min}) \frac{(x_a^t)^2}{l_a^2 k_j} \quad (10)$$

위의 식은 어떤 링크의 유출량은 링크 상의 차량수에 의해서 결정된다는 것을 나타내고 있다.

최대 유출량은 $\frac{dg_a}{dx_a} = 0$ 이 되는 1차 미분 조건에서 다음과 같이 구해진다.

$$g_a(x_a^*) = \frac{u_{max}^2 k_j}{4(u_{max} - u_{min})} \quad (11)$$

4.1.3. 동적 사용자 최적과 동적 체계 최적 목적함수

일반적인 정적 통행배정모형에서 목적함수는 사용자 평형(User Equilibrium)과 체계 최적해(System

Optimal)의 두 가지로 구분된다.¹³⁾ 그러나 동적 통행 배정모형에서는 사용자들은 순간 순간 변하는 환경에 대응하여 경로를 선택하게 된다. 그러므로 동적 통행 배정에서는 더 이상 사용자 평형이라는 말을 사용하지 않고 동적 사용자 최적(Dynamic User Optimal)이라는 말을 사용한다.¹²⁾

이를 Wardrop의 사용자 평형원리를 이용하면 다음과 같이 정의할 수 있다.¹⁶⁾

「고려대상이 되는 매 시간마다 각각의 기종점 교통량에 대해, 모든 노드에서 종점까지 통행에 이용되는 모든 경로의 통행시간이 동일하고 그 시간이 최소 통행시간인 상태를 나타낸다.」

또한 동적 체계 최적(Dynamic System Optimal)은 매 순간마다 시스템의 총 통행비용을 최소화시키는 상태를 나타낸다.

■ 동적 사용자 최적해(DUO)의 목적함수

$$\min \sum_{a=1}^A \sum_{t=1}^T \int_{x_a} T_a(x) dx \quad (12)$$

■ 동적 체계 최적해(DSO)의 목적함수

$$\min \sum_{a=1}^A \sum_{t=1}^T x_a^t \cdot T_a(x_a^t) \quad (13)$$

4.1.4. 최소시간간격 결정

동적 통행배정모형에서는 어떤 시간대에 링크에 진입한 교통량은 동일 시간간격 동안에 그 링크를 통과할 수 없다는 것을 가정하고 있다. 따라서, 분석시간 간격은 다음 수식을 만족한다.

$$T < \min \left\{ \frac{l_a}{\text{링크 } a \text{의 } u_{\max}}, \forall a \right\} \quad (14)$$

4.2. 모형 정식화

1) 목적함수

동적 사용자 최적	$\min \sum_{a=1}^A \sum_{t=1}^T \int_{x_a} T_a(x) dx$
동적 체계 최적	$\min \sum_{a=1}^A \sum_{t=1}^T x_a^t \cdot T_a(x_a^t)$

2) 제약조건

① 상태방정식(State Equation)

$$x_a^{t+1} = x_a^t - g_a(x_a^t) + d_a^t, \quad t=0, 1, \dots, T-1$$

② 교통량보존방정식 (Traffic Conservation Equation)

$$\sum_{a \in A(n)} d_a^t = F^t(n) + \sum_{a \in B(n)} g_a(x_a^t)$$

$$t=0, 1, \dots, T-1, \quad \forall n \in N - \{n\}$$

A(n): 노드 n에서 진출하는 링크의 집합

B(n): 노드 n으로 진입하는 링크의 집합

F^t(n): t시간대에 노드 n에 부과되는 외부교통량(OD)

③ 링크 차량수 조건

링크에서의 최대 차량수는 그 링크의 임계밀도(k_j) 상태에서의 교통량이 된다.

$$0 \leq x_a \leq k_j \times l_a \quad (16)$$

분석시간 t=0에 대한 초기 조건은 모든 링크에 대해서 주어진다.

$$x_a^0 = R_a \geq 0, \quad \forall a \in A \quad (17)$$

④ 유출량 제약조건

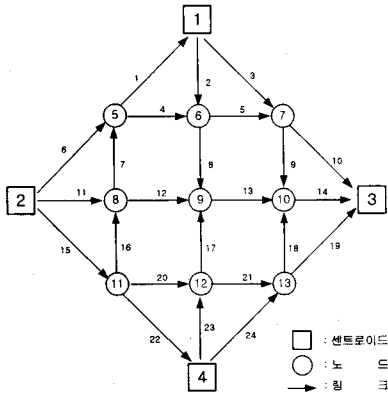
유출량은 앞에서 구한 최대 유출량 조건과 비음조건으로 이루어진다.

$$0 \leq d_a \leq \frac{u_{\max}^2 k_j}{4(u_{\max} - u_{\min})} \quad (18)$$

5. 모형적용 및 결과분석

5.1. 가상 네트워크 구성

본 연구에 쓰인 분석 대상 네트워크는 <그림 3>과 같다. 이 네트워크는 4개의 기·종점 노드와 9개의 일반 노드로 이루어졌다. 그리고 이를 24개의 링크로 연결하고 있다. 링크는 일방향이며, 고속도로급과 국도급 두 가지로 구분하였다.



<그림 3> 분석 대상 네트워크

<표 1> 링크의 물리적인 특징

링크번호	속성	길이 (km)	차선수	최대 속도 (km/시)	최저 속도 (km/시)	임계 밀도 (대/km)
1	국도	12	1	80	10	80
2	국도	8	1	60	10	80
3	국도	12	1	80	10	80
4	국도	8	1	60	10	80
5	국도	8	1	60	10	80
6	국로	12	1	80	10	80
7	국도	8	1	60	10	80
8	국도	8	1	60	10	80
9	국도	8	1	60	10	80
10	국도	12	1	80	10	80
11	고속도로	15	2	100	10	80
12	고속도로	15	2	100	10	80
13	고속도로	15	3	100	10	80
14	고속도로	15	4	100	10	80
15	국도	12	1	80	10	80
16	국도	8	1	60	10	80
17	국도	8	1	60	10	80
18	국도	8	1	60	10	80
19	국도	12	1	80	10	80
20	국도	8	1	60	10	80
21	국도	8	1	60	10	80
22	국도	12	1	80	10	80
23	국도	8	1	60	10	80
24	국도	12	1	80	10	80

각 링크에 대한 물리적인 특징은 다음 <표 1>과 같다. 최저속도와 임계밀도는 고속도로나 국도에 모두 동일한 값을 가정하였다.

5.1.1. 분석시간간격

가상 네트워크에서 가장 짧은 링크의 길이는 8km 이고, 이 링크의 최대 통행속도는 60km/대 이다. 이 경우 링크통행시간은 다음과 같다.

$$T < \frac{8km}{60km/hr} = 0.13hr = 8min$$

본 연구에서는 8분보다 작은 5분을 분석 시간간격으로 선택하고 전체 분석시간은 50분으로 정하였다.

5.1.2. 최대 유출량

링크의 차선당 최대 유출량은 식 (11)에 나타나 있다. 고속도로와 국도의 링크 속성을 이용해서 각 링크의 차선당 최대 유출량을 구해 보면 다음과 같다.

<표 2> 링크별 최대 유출량

구분	최대속도	차선당 유출량
국도	80km/시	152 대/5분
	60km/시	120 대/5분
고속도로	100km/시	185 대/5분

5.1.3. 외부입력 교통량

<표 3> 외부입력 교통량 (대/5분)

시간간격 \ 기점노드	노드1	노드2	노드3
1	120	390	100
2	130	450	150
3	135	510	185
4	130	480	150
5	115	560	180
6	130	590	140
7	100	615	130
8	110	620	150
9	130	590	130
10	125	570	140

5.1.4. 초기교통량조건

분석시작 시점($t=0$)에 대한 교통량은 국도에 대해서 각 링크 최대 차량수의 40%로 가정하였고, 고속도로에 대해서는 30%로 가정하였다.

5.2. 풀이과정

5.2.1. 제약조건과 결정변수

1) 제약조건

제약조건은 상태방정식 24개, 교통량 보존 방정식 12개, 최대 유출량 부등식 24개, 최대 수용 가능한 교통량 부등식 24개, 비음조건 부등식 48개로 구성되었다. 이중 부등식 조건 96개가 탐색영역 S 가 되고, 나머지 제약조건들이 가능한 영역 F 가 된다.

2) 결정변수

본 모형의 결정변수는 각 시간대별로 각 링크에서 유출되는 교통량 d_a^t 이다. 각 분석시간대별로 모두 24개인데, 이것들은 교통량 보존 방정식으로 서로 관계되어 있다. 예를 들어, 7번 노드의 경우,

$$d_9^t + d_{10}^t = g_3(x_3^t) + g_5(x_5^t)$$

와 같은 교통량 보존 방정식을 만족하기 때문에 d_9^t 와 d_{10}^t 중 하나만 결정변수로 결정되면 나머지 식에 의해서 계산된다. 이와 같은 방정식들을 고려해 보면 결정변수는 24개가 아니라 총 12개가 되고, 이를 GENOCOP III 시스템에 맞게 벡터 형식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\bar{D} = (d_1^t, d_2^t, d_5^t, d_6^t, d_7^t, d_9^t, d_{11}^t, d_{16}^t, d_{17}^t, d_{18}^t, d_{20}^t, d_{23}^t)$$

5.2.2. 진행절차

본 모형에 대해 GENOCOP III 시스템을 적용한 진

행절차는 다음과 같다.

- ① 주어진 초기 교통량 x_a^0 을 이용해서 $t=0$ 일 때의 d_a^0 을 계산한다.
- ② 상태방정식을 이용해서 x_a^1 에 대한 제약식을 구성한다.
- ③ 교통량 보존 방정식을 이용해서 d_a^1 에 대한 제약식을 구성한다.
- ④ 제약조건을 이용하여 탐색영역과 가능한 영역을 구성한다.
- ⑤ 결정변수 \bar{D} 에 대해서 탐색염색체집단과 참조염색체집단을 발생시킨다.
- ⑥ 탐색염색체집단에 대해서 유전연산을 적용하여 새로운 개체집단을 생성한다.
- ⑦ 새롭게 생성된 탐색염색체집단 중 제약조건을 벗어난 염색체들을 복구하여 새로운 참조염색체집단과 탐색염색체집단을 만든다.
- ⑧ 새롭게 생성된 참조염색체집단 중 가장 우수한 개체를 선택하여 다음 수렴조건을 검증한다.

$$\frac{(t=0\text{일때의 목적함수}) - (t=1\text{일때의 목적함수})}{t=0\text{일때의 목적함수}} \leq \epsilon$$
 성립하면, 시간대를 증가하여 2번 과정부터 반복하고, 그렇지 않으면 7번 과정으로 간다.
- ⑨ 모든 시간대에 대해서 결정변수 \bar{D} 가 결정되면 끝낸다.

5.3. 결과분석

GENOCOP III 시스템의 적용과정에서 참조세대크기는 5, 탐색세대크기는 20, 돌연변이와 교배확률은 25%, 탐색염색체대체비율은 25%로 정하여 해를 구하였다. 그 결과는 다음 <표 4>와 같다.

결정변수로 쓰인 링크 유출량을 제외한 링크의 유출량은 교통량 보존방정식에 의해서 계산되었다.

이 중 동적 사용자 최적인 경우 그 수렴값이 동적 사용자 최적상태를 나타내는지 검토하여 보았다. 이를 위해 노드 2와 노드 3을 연결하는 가장 이용이 많은 3개의 경로에 대해서 각 시간대별 통행시간을 분석해

보면 다음 <표 5>와 같다.

<표 4> 결정변수 결과 (단위: 대)

구분	결정변수	분석시간간격									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
동적 사용자 최적	d ₁	125	109	108	116	114	115	116	119	121	122
	d ₂	120	120	120	120	120	120	107	108	116	114
	d ₃	107	109	111	112	112	112	112	111	111	111
	d ₄	50	101	115	108	126	133	139	140	133	129
	d ₅	117	107	102	100	98	99	101	103	105	105
	d ₆	120	120	120	120	119	114	114	113	112	112
	d ₁₁	290	247	280	263	307	324	337	340	324	312
	d ₁₆	69	57	50	51	51	53	54	55	56	56
	d ₁₇	107	104	98	92	88	84	80	76	75	73
	d ₁₈	120	120	120	117	107	105	99	93	89	85
	d ₂₀	70	56	50	51	51	53	54	55	56	56
	d ₂₃	120	120	120	108	101	83	78	86	79	84
	동적 체계 최적	d ₁	125	112	118	116	114	114	116	118	120
d ₂		120	120	120	120	114	114	101	105	113	111
d ₃		107	109	111	110	110	109	109	107	107	107
d ₄		50	101	115	108	126	133	139	140	133	129
d ₅		94	101	95	93	89	90	92	94	96	96
d ₆		120	120	113	113	113	112	112	111	110	110
d ₁₁		290	247	280	263	307	323	337	340	324	313
d ₁₆		64	45	43	44	43	44	46	47	48	48
d ₁₇		107	103	95	89	83	80	76	72	71	69
d ₁₈		120	119	110	110	106	104	99	93	89	85
d ₂₀		64	45	44	44	43	44	46	47	48	48
d ₂₃		120	120	120	100	104	84	79	87	79	83

<표 5> 동적사용자최적상태에서의 통행시간 (단위: 시)

경로 시간	6→1→3→10	11→12→13→14	15→22→24→19
1	0.889	0.849	0.810
2	0.875	0.821	0.811
3	0.868	0.808	0.814
4	0.861	0.785	0.814
5	0.855	0.778	0.818
6	0.856	0.766	0.823
7	0.853	0.756	0.829
8	0.853	0.750	0.834
9	0.855	0.741	0.836
10	0.855	0.733	0.836

주) 각 경로는 링크번호로 표시하였음.

<표 5>를 살펴보면 3개의 경로 통행시간이 분석시간대마다 대체로 같다는 것을 확인할 수 있다. 즉, 모

형의 해가 동적 사용자 최적상태조건을 만족하고 있다는 것을 보여주고 있다.

본 연구에서 적용한 GENOCOP III 시스템의 정확성과 효율성을 검증하기 위해 비선형문제를 풀 수 있는 Excel 프로그램을 이용하여 모형의 해를 구해보았다.

Excel 프로그램은 비선형문제에 대해 선형근사와 반복계산 횟수가 적은 '준 뉴턴법'을 사용한다. '준 뉴턴법'은 계산과정에 초기값의 영향을 많이 받는다.⁶⁾ 따라서, 1차 수행과정에서는 결정변수의 초기값을 0으로 가정하여 수행하였고, 2차 수행과정에서는 1차 수행결과에서 구한 해의 인접치로 초기값을 보정한 후 계산하였다.

계산에 사용된 컴퓨터는 Pentium II Processor (333MHz)이며 동적 사용자 최적과 동적 체계 최적 목적함수에 대한 적용결과는 다음과 같다.

<표 6> 사용자 최적일 때의 수행결과

구분		목적함수값 (시)	계산시간 (초)
GENOCOP III System		16,390.22	10.2
준 뉴턴법	1차 수행	16,385.41	178.9
	2차 수행	16,389.76	46.2

<표 7> 체계 최적일 때의 수행결과

구분		목적함수값 (시)	계산시간 (초)
GENOCOP III System		19,511.94	9.4
준 뉴턴법	1차 수행	19,501.52	172.9
	2차 수행	19,512.91	59.7

<표 6>와 <표 7>를 살펴보면 목적함수 측면에 있어서는 기존의 비선형해법 알고리즘과 유전자 알고리즘이 거의 차이가 없다는 것을 알 수 있다. 그러나 계산시간 면에 있어서는 유전자 알고리즘이 기존의 비선형해법 알고리즘보다 효율적이란 것을 알 수 있다.

더욱이, '준 뉴턴법'에서 초기값을 최적해 인접치로 보정한 경우에 있어서는 GENOCOP III 시스템의 계

산시간이 '준 뉴튼법'에 비해서 1/10배정도 단축되어 보다 효율적인 수행결과를 보여주고 있다.

6. 결론 및 향후연구과제

본 연구에서는 GIS-T와 ITS의 효율성을 높이기 위해 보다 정확하게 교통량을 예측할 수 있는 동적 통행배정모형의 해결기법으로 유전자 알고리즘을 도입한 방법을 제시하고 있다. 특히, 제약조건이 convex하지 않기 때문에 기존의 비선형해법으로는 정확한 해결이 불가능한 문제에 대해서 그 적용가능성을 검증해 보았다.

유전자 알고리즘을 적용하기 위해서 기존의 Merchant-Nemhauser 모형과 교통류 이론을 이용하여 동적 통행배정모형을 구축하였고, GENOCOP III 시스템을 이용하여 그 해를 찾았다. 그 적용 가능성을 검증해 보기 위해 간단한 네트워크의 적용한 결과는 다음과 같다.

첫째, 가상 네트워크의 적용결과 유전자 알고리즘은 두 가지 목적함수에 대해서 수렴하였고 특히, 동적 사용자 최적상태의 해를 검증해 본 결과 유의한 해를 제시하고 있다는 것을 알 수 있다.

둘째, 기존 알고리즘과의 비교에 있어서, 목적함수 측면에서는 기존의 알고리즘과 같은 해를 제시하였고, 계산시간 측면에서는 매우 효율적인 결과를 보여주었다.

셋째, 유전자 알고리즘의 적용 과정에서 가장 큰 문제가 되는 것이 제약조건 처리와 계산과정의 효율성에 관한 것인데, GENOCOP III 시스템의 적용결과 매우 뛰어난 결과를 얻었다.

따라서 제약조건이나 목적함수가 convex하지 않은 동적 통행배정 분야에 있어서 유전자 알고리즘이 충분히 적용 가능하다는 것을 보여주고 있다. 더욱이, 제약조건을 효율적으로 처리할 수 있는 GENOCOP III 시스템을 이용하면 그 적용폭을 광범위하게 확장할 수 있을 것으로 기대된다. 이와 함께 동적 통행배정을 통해 예측된 교통량을 활용하면 교통과 관련된

GIS나 ITS의 효율을, 보다 높일 수 있을 것으로 기대된다.

연구수행과정에 있어서 나타난 한계점 및 향후연구과제는 다음과 같다.

첫째, 본 연구에 있어서 가장 기본이 되는 것은 통행시간 함수이다. 따라서, 시간에 따라 변하는 교통상황을 묘사할 수 있는 정확한 링크 통행시간 함수에 대한 연구가 필요하다.

둘째, 본 연구에 사용된 동적 통행배정모형은 다기점·단일종점에 관한 것인데, 보다 현실을 반영할 수 있는 다기점·다종점 모형에 관한 연구가 필요하다.

셋째, 동적 통행배정결과를 활용해서 교통분야의 GIS의 효율성을 높이기 위한 다양한 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

1. Adolf D. May, 'Traffic Flow Fundamentals', Prentice Hall, 1990.
2. Adel W. Sadek, Brian L. Smith, and Michael J. Demetsky, 'Dynamic Traffic Assignment: Genetic Algorithms Approach', TRR 1588, 1997.
3. Goodchild MF, 'GIS and transportation: Status and challenges', International Workshop on GIS-T and ITS, Chinese Univ. of Hong Kong, 1999.
4. Jayakrishnan R, Wei K. Tsai, and Anthony Chen, 'A Dynamic Traffic Assignment Model with Traffic-Flow Relationships', Transpn. Res.-C, Vol. 3, No. 1, pp. 51-72, 1995.
5. Merchant. D.k. and G.L. Nemhauser, 'A Model and An Algorithm for The Dynamic Traffic Assignment Problem', Transportation Science, Vol. 12, pp. 183-199, 1978.
6. Michael D. Intriligator, 'Mathematical Optimization and Economic Theory', Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1971.

7. Michalewicz, Z., and Attia, N., 'Evolutionary Optimization of Constrained Problems', Proceedings of the 3rd Annual Conference on Evolutionary Programming, A.V. Sebald and L.J. Fogel (editors), World Scientific Publishing, River Edge, NJ, pp.98-108, 1994.
8. Michalewicz, Z., 'Evolutionary Computation Techniques for Nonlinear Programming Problems', International Transactions in Operational Research, Vol.1, No.2, pp.223-240, 1994.
9. Michalewicz, Z., 'Genetic Algorithms, Numerical Optimization and Constraints', Proceedings of the 6th International Conference on Genetic Algorithms, Pittsburgh, pp. 151-158, 1995.
10. Michalewicz, Z. and Nazhiyath, G., 'Genocop III: A Co-evolutionary Algorithm for Numerical Optimization Problems with Nonlinear Constraints', Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Evolutionary Computation, Vol.2, Perth, pp.647-651, 1995.
11. Michalewicz, Z., 'Genetic Algorithms + Data structures = Evolution Programs', Springer-Verlag, 1996.
12. Ran B. and David Boyce, 'Modeling Dynamic Transportation Networks', Springer, 1996.
13. Sheffi Y., 'Urban Transportation Network', Prentice Hall, 1985.
14. 양인태, 김양문, 김연춘, '교통영향평가를 위한 GIS의 적용기법', 한국지형공간정보학회 논문집, 제4권, 제2호, pp.91~98, 1996.
15. 오명진, 'GIS를 이용한 도로교통의 최적경로 선정에 관한 연구', 한국지형공간정보학회 논문집, 제5권, 제2호, pp. 131~144, 1997.
16. 오세현, '최적제어이론을 이용한 동적 통행배정 모형의 적용에 관한 연구', 서울대학교, 1995.