

■ 論 文 ■

복합대중교통망의 링크표지갱신 다목적 경로탐색

A Link-Based Label Correcting Multi-Objective Shortest Paths Algorithm
in Multi-Modal Transit Networks

이 미 영

(국토연구원 책임연구원)

김 형 철

(경원대학교 도시계획학과 교수)

박 동 주

(서울시립대학교 교통공학과 교수)

신 성 일

(서울시정개발연구원 연구위원)

목 차

- | | |
|--|---|
| <p>I. 서론</p> <p>1. 연구의 배경</p> <p>2. 연구의 목적 및 범위</p> <p>II. 단일교통수단 교통망의 노드표지갱신 다목적 경로탐색 알고리즘</p> <p>1. 표식</p> <p>2. 노드기반 비지배경로 정의</p> <p>3. 다목적 노드표지갱신 알고리즘</p> | <p>III. 알고리즘 개발</p> <p>1. 표식</p> <p>2. 복합교통망의 표현</p> <p>3. 링크수단기반 비지배경로 정의</p> <p>4. 다목적 링크표지갱신 알고리즘</p> <p>IV. 사례연구</p> <p>V. 결론</p> <p>참고문헌</p> |
|--|---|

Key Words : 복합대중교통망, 링크표지갱신 알고리즘, 다목적 경로탐색, 비지배경로, 환승
Multi-Modal Transit Networks, Link-Based Label Correcting Algorithm, Multi-Objective Shortest Path, Non-Dominated Path, Transfer

요 약

교통망에서 출발지와 도착지를 연결하는 최적경로탐색(Optimum Shortest Path)의 기준은 통행시간, 통행비용, 통행요금, 통행거리 등 복수의 기준에서 단일기준(Single Attribute Objective)을 선정하여 선정된 기준에 대하여 최소화되는 경로를 탐색하는 것을 의미하며 최적경로 탐색기법으로 탐색이 가능하다. 다목적 경로탐색(Multi-Objective Shortest Paths)에서는 이들 복수의 기준(Multi-Objective)을 고려하여 경로를 탐색한다. 최근까지 다목적경로탐색에 대한 연구는 대부분 단일의 교통수단만으로 구성된 교통망에 대한 가정을 기반으로 이루어졌으며, 다수의 교통수단이 혼재된 교통망(Multi-Modal Transportation Network)에서 다목적경로탐색에 대한 연구는 환승에 대한 문제를 최적해법 차원에서 고려하지 않았으며, 교통정보 분야에서 일반적으로 적용되는 동적계획법(Dynamic Programming)에 기반한 알고리즘에 대한 연구는 다수단교통망에서 다목적경로탐색 문제에서 검토되지 않았다. 본 연구는 다수단교통망에서 다목적경로탐색 문제에서 최적 해를 도출하기 위한 동적계획법 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 Skriver & Andersen (2000)이 제시한 2기준 노드표지갱신 알고리즘을 기반으로 네트워크의 확장 없이 수단 간의 환승이 반영되도록 2기준 이상의 다기준 링크표지갱신 알고리즘으로 개발하는 방안으로 확대한다. 본 연구는 다기준 링크표지가 다수단 교통망에 적용했다는 점 이외에, 출발지에서 모든 링크까지 비지배경로를 탐색하는 과정이 효율적으로 이루어지도록 출발지에서 개별 링크까지의 비지배경로/트리(Path/Tree) 집합을 표지처럼 활용하였다. 다수단교통망에서 다목적경로탐색문제에 적합한 도시부의 대중교통망에 한정하여 경로탐색속성을 환승과 링크주행속성으로 구분하였다. 본 연구에서 제안된 알고리즘의 계산과정을 소규모 복합대중교통망을 통해 검증하였다.

Generally, optimum shortest path algorithms adopt single attribute objective among several attributes such as travel time, travel cost, travel fare and travel distance. On the other hand, multi-objective shortest path algorithms find the shortest paths in consideration with multi-objectives. Up to recently, the most of all researches about multi-objective shortest paths are proceeded only in single transportation mode networks. Although, there are some papers about multi-objective shortest paths with multi-modal transportation networks, they did not consider transfer problems in the optimal solution level. In particular, dynamic programming method was not dealt in multi-objective shortest path problems in multi-modal transportation networks. In this study, we propose a multi-objective shortest path algorithm including dynamic programming in order to find optimal solution in multi-modal transportation networks. That algorithm is based on two-objective node-based label correcting algorithm proposed by Skriver and Andersen in 2000 and transfer can be reflected without network expansion in this paper. In addition, we use non-dominated paths and tree sets as labels in order to improve effectiveness of searching non-dominated paths. We also classifies path finding attributes into transfer and link travel attribute in limited transit networks. Lastly, the calculation process of proposed algorithm is checked by computer programming in a small-scaled multi-modal transportation network.

1. 서론

1. 연구의 배경

일반적으로 교통망에서 출발지와 도착지를 연결하는 최적경로탐색(Optimum Shortest Path: OSP)의 기준은 통행시간, 통행비용, 통행요금, 통행거리 등 복수의 기준에서 단일기준(Single Attribute Objective)을 선정하여 선정된 기준에 대하여 최소화되는 경로를 탐색하는 것을 의미하며 최적경로 탐색기법(Moore, 1959; Dijkstra, 1959)으로 탐색이 가능하다. 한편 다목적 경로탐색(Multi-Objective Shortest Paths: MOSP)에서는 이들 복수의 기준(Multi-Objective)을 고려하여 경로를 탐색한다. 다목적경로탐색(MOSP)에 대한 활용에로서, 위험물질수송차량의 경로선정의 기준으로서 통행위험도 및 통행비용의 최소화의 두 가지 목적이 공존하는 가운데 경로를 선택한다 (Nizick et al, 1997; Meng et al, 2006). 이렇듯 다수의 기준이 고려되는 상황에서 단일의 최적경로에 대한 해법이 적합한 상황이 전개되기 어려우며, 다수의 기준을 고려하여 탐색된 최적경로의 해는 파레토-최적 (Pareto-Optimal) 또는 비지배 경로(Non Dominated Paths: NDP)의 집합이다.

최근까지 다목적경로탐색(MOSP)에 대한 연구는 대부분 단일의 교통수단만으로 구성된 교통망에 대한 가정을 기반으로 이루어졌으며, 이에 대한 내용을 간략하게 정리하면 <표 1>과 같다.

한편 다수의 교통수단이 혼재된 교통망(Multi-Modal

<표 1> 단일수단과 MOSP

Climaco & Martins (1982)	2기준 최적경로문제(Bi-criteria Shortest Paths: BSP)의 해법으로 K-최적경로탐색에 근거한 알고리즘 제안
Martins (1984)	모든 파레토-최적경로를 탐색하는 두 가지 알고리즘 제안, Hansen(1980)의 표지확정 (Label Setting) 기반 알고리즘 일반화
Corley & Moon (1985)	모든 파레토-최적 경로를 발견하는 표지갱신 (Label Correcting) 기반 알고리즘 제안
Zografos & Davis (1989)	위험물질차량의 경로선정을 위한 목적계획법(Object Programming) 도입
Brumbaugh-Smith & Shier (1989)	2기준 교통망에 대한 표지갱신 알고리즘 제안
Skriver & Andersen (2000)	Brumbaugh-Smith & Shier (1989)가 제안한 알고리즘에 대한 계산 효율성을 증가시키는 연구결과를 제시

Transportation Network: MMTN)에서 다목적경로탐색(MOSP)에 대한 연구는 수단 간에 환승에 대한 문제를 포함하는 것으로 최근 연구가 시작되고 있는 실정이다. 다수의 교통수단으로 구성된 교통망에서의 다목적경로탐색(MOSP)에 대한 기존 연구를 간략히 정리하면 <표 2>와 같다.

<표2> 다수단과 MOSP

Modesti & Sciomachen (1998)	다수단 도시 교통망에서 다목적경로탐색(MOSP) 문제에 대한 종합적인 접근을 시도하였으나 환승지점에서의 환승비용에 대한 고려는 이루어 지지 못함
Aifandopoulou et al (2006)	다수단 교통망에서 수단간 지체를 고려하여 혼합정수계획법(Mixed Integer Programming)에 기반을 둔 수식과 경험적인 해법(Heuristic Solution)을 제안하였으나 최적의 해를 도출하는 지에 대한 검토는 이루어지지 못함

그간의 다수단교통망(MMTN)에서 다목적경로탐색(MOSP)에 대한 선행연구를 종합할 때 환승에 대한 문제는 최적해법 차원에서 고려되지 않았으며, 특히 교통정보 분야에서 일반적으로 적용되는 동적계획법(Dynamic Programming)에 기반한 알고리즘에 대한 연구는 다수단교통망(MMTN)에서 다목적경로탐색(MOSP) 문제는 검토되지 않았다.

2. 연구의 목적 및 범위

본 연구에서는 다수단교통망(MMTN)에서 다목적경로탐색(MOSP) 문제에서 최적 해를 도출하기 위한 동적계획법 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 Skriver & Andersen (2000)이 제시한 2기준 노드표지갱신 알고리즘을 기반으로 네트워크의 확장 없이 수단간의 환승이 반영되도록 2기준 이상의 다기준 링크표지갱신 알고리즘으로 개발하는 방안으로 확대한다. Skriver & Andersen (2000)이 제시한 알고리즘과 본 연구에서 제시하는 알고리즘의 근본적인 차이는 다기준 링크표지를 다수단 교통망에 적용했다는 점 이외에, 출발지에서 모든 링크까지 비지배경로를 탐색하는 과정이 효율적으로 이루어지도록 출발지에서 개별 링크까지의 비지배경로/트리(Path/Tree, Climaco & Martins, 1982; Mote et al, 1991) 집합을 표지처럼 활용하였다는 점에 있다. 본 연구에서는 특히 다수단교통망(MMTN)에서

다목적경로탐색(MOSP)문제에 적합한 도시부의 대중교통망에 한정하여 경로탐색속성을 환승과 링크주행속성으로 구분하였다.

본 연구에서 제시하는 알고리즘은 Skriver & Andersen (2000)이 제시한 기법에서 Dijkstra(1959) 알고리즘을 활용한 것만 다를 뿐 이 부분도 본 알고리즘은 링크표지기법을 활용- 다수의 교통수단을 효율적으로 다룰 수 있는 이론적이고 현실 확장적인 측면에서 차이점을 보이고 있다. Skriver & Andersen(2000)이 제시한 알고리즘과 본 연구의 알고리즘과의 세부적인 차이점은 <표 3>과 같다.

<표 3> 두 알고리즘 차이점

	Skriver & Andersen	본 연구	비고
목적	Bi-Criteria	Multi-Criteria	수단의 다양화
수단	단일수단	복합수단	환승 스케줄고려
탐색 기법	노드기반	링크기반	환승 표현 용이
환승 표현	-	교차로 확장 없음	
복합 교통망 처리 가능성	-	링크-수단	다수의 교통수단 고려
	-	대규모 확대 네트워크	
확장성	부적합	적합	도시교통망 모형적용

II. 단일교통수단 교통망의 노드표지갱신 다목적 경로탐색 알고리즘

본 장에서는 Skriver & Andersen (2000)이 제안한 노드표지갱신 알고리즘에 대하여 설명한다.

1. 표식

먼저 Skriver & Andersen(2000)이 제안한 노드표지갱신 알고리즘에서 사용되는 표식을 살펴본다.

표식 중 i, j, k, r, s 는 노드를 의미하며, N, A 는 교통망의 노드 및 링크 집합을 의미한다. $[c_1^l, \dots, c_L^l]$ 는 L개의 링크 속성 값을 나타내며, $p(ri)$ 는 출발지 r에서 노드 i까지의 경로를 표시한다. $P[ri]$ 는 출발지 r에서 노드 i까지의 가능경로집합이며, $c_l^{p(ri)}$ 는 경로 $p(ri)$ 에서 속한 링크 l번째 링크속성의 합을 나타낸다. 이를 간략히 정리하면

아래와 같다.

- i, j, k : 일반노드
- r, s : 각각 출발지와 도착지 노드
- N : 교통망의 노드집합
- A : 교통망의 링크집합
- a, b : 링크-출발노드와 도착노드로 표현 $a(i, j)$
- $[c_1^l, \dots, c_L^l]$: L개의 링크 속성 값
- $p(ri)$: 출발지r에서 노드j까지의 경로 $\{r \rightarrow j_i \rightarrow \dots \rightarrow j_k \rightarrow i\}$
- $P[ri]$: 출발지r에서 노드j까지의 가능경로 집합 (feasible paths set)
- $c_l^{p(ri)}$: 경로 $p(ri)$ 에 속한 링크의 l번째 링크속성의 합

2. 노드기반 비지배경로 정의

다수의 기준을 고려하여 탐색된 최적 경로의 해는 파레토-최적(Pareto-Optimal) 또는 비지배경로(Non Dominated Path)의 집합으로 나타난다. Skriver & Andersen(2000)은 노드기반 비지배경로 집합을 다목적 경로탐색 알고리즘에 활용하였다.

이에 대한 내용 즉, 출발지 r에서 노드j까지 비지배경로를 정의하면 다음과 같다.

【정의 1】 : $p_1(ri)$ 과 $p_2(ri)$ 를 $P[ri]$ 에 속하면서 서로 다른 경로라고 하면, 두 경로 개별속성 l ($l = 1, \dots, L$)에 대하여 $c_l^{p_1(ri)} \leq c_l^{p_2(ri)}$ 이고 어떤 l값에 대하여, (여기서 l_1) $c_{l_1}^{p_1(ri)} < c_{l_1}^{p_2(ri)}$ 이 되면, $p_1(ri)$ 는 $p_2(ri)$ 를 지배(Dominate)한다고 정의한다.

【정의 2】 : $P[ri]$ 에 속하는 어떤 경로 $p(ri)$ 에 대하여 $P[ri]$ 에 속하는 다른 어떤 경로도 지배하지 못하면 비지배경로(Non Dominated Path)라고 정의한다.

3. 다목적 노드표지갱신 알고리즘

출발지r에서 모든 도착노드까지 통행시간과 통행비용

2기준에 대한 비지배경로를 표지갱신알고리즘으로 탐색하는 방안은 Brumbaugh -Smith & Shier (1989)와 Skriver & Andersen (2000)이 제안한 알고리즘이 있다.

Brumbaugh-Smith & Shier 알고리즘(이하 B-S)의 계산 효율성을 개선시킨 Skriver & Andersen 제시한 방법(이하 S-A)은 본 연구의 목적인 일반화된 다목적 알고리즘으로 확장이 가능하다. S-A의 방법과 B-S의 방법과의 차이는 S-A방법은 모든 노드까지의 $c_l^{(ri)}$ ($l=1, \dots, L$)을 초기화하기 위하여 L번의 최적경로탐색알고리즘을 수행하는데 있다. S-A알고리즘에서는 Dijkstra(1959) 알고리즘을 적용하였으며, 개략적인 알고리즘 수행과정은 다음과 같으며 자세한 노드표지갱신 과정에 대해서는 Brumbaugh-Smith & Shier (1989)에서 참조가 가능하다.

• 초기화:

$$c_l^{(ri)} = \infty, \quad \forall i \in N \setminus r, l = (1, \dots, L)$$

$$c_l^{(rr)} = 0, \quad \text{for } r, l = (1, \dots, L)$$

Dijkstra알고리즘 L번 수행으로

$$c_l^{(ri)}, \quad \forall i \in N, l = (1, \dots, L) \text{ 계산}$$

• 다목적 노드표지갱신:

[정의1]과 [정의2]를 만족하는 노드표지갱신과정 수행

III. 알고리즘 개발

1. 표식

우선 제안할 다목적경로탐색 기법에서 사용될 표식을 살펴보자.

$[d_1^b, \dots, d_D^b]$ 는 링크a와 링크b의 환승에서 발생하는 D개의 다른 환승속성 벡터를 나타내며, $[d_1^b, \dots, d_D^b, c_1^b, \dots, c_L^b]$ 는 링크a와 링크b의 환승에서 발생하는 D개의 다른 환승속성과 L개의 링크b 주행속성이 함께 표현된 벡터를 의미한다. 또한, $\Gamma_a^+(\Gamma_a^-)$ 는 링크a의 도착(출발)노드가 출발(도착)노드인 링크 집합을 나타낸다. $c_l^{(rb)}$ 는 경로 $p(rb)$ 에 속한 링크의 l번째 링크속성의 합, $d_l^{p(rb)}$ 는 $p(rb)$ 에 속한 인접 링크 간 l번째 환승속성의 합

을 의미한다. 이를 간략히 정리해보면 아래와 같다.

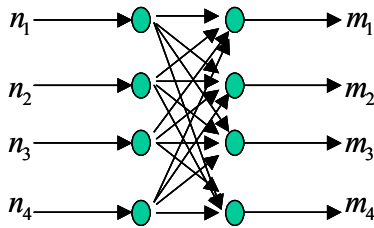
- $[d_1^b, \dots, d_D^b]$: 링크a와 링크b의 환승에서 발생하는 D개의 다른 환승속성 벡터
- $[d_1^b, \dots, d_D^b, c_1^b, \dots, c_L^b]$: 링크a와 링크b의 환승에서 발생하는 D개의 다른 환승속성과 L개의 링크b 주행속성이 함께 표현된 벡터
- $\Gamma_a^+(\Gamma_a^-)$: 링크a의 도착노드(출발노드)가 출발노드(도착노드)인 링크집합
- $p(rb)$: 출발지r에서 링크b까지의 경로 $\{a_1(r, j) \rightarrow \dots \rightarrow a_k \rightarrow b\}$
- $P[rb]$: 출발지r에서 링크b까지의 가능 경로집합(feasible path set)
- $c_l^{p(rb)}$: 경로 $p(rb)$ 에 속한 링크의 l번째 링크속성의 합
- $d_l^{p(rb)}$: 경로 $p(rb)$ 에 속한 인접링크 간 l번째 환승속성의 합

2. 복합교통망의 표현

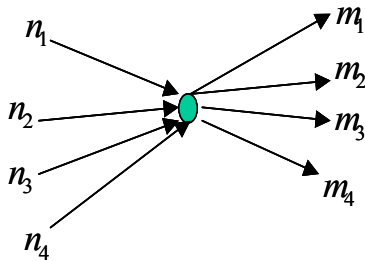
복합교통망은 하나의 링크에 다양한 교통수단이 통행이 가능하거나 또는 단일 수단이 단일 링크를 이용하는 경우로 나타난다. 2장의 노드표지를 활용하는 경우에는 환승노드에서 발생하는 행태를 표현하기 위해서 노드에서 수단 간에 모든 연결링크를 가상적으로 확대하는 방안이 주로 간주되었다.

<그림 1>은 환승지점에서 발생하는 수단 간의 모든 연결가능성을 표시한 것이다. 링크표지로 구성하게 되면 노드에서의 네트워크 확장은 불필요해지므로 링크를 통과하는 모든 수단을 단일링크로 처리하는 방법을 적용하였다. 이러한 방법은 기존에 제시되었던 링크기반 다수 경로 탐색알고리즘 (Namkoong et al, 1998)을 활용할 수 있다.

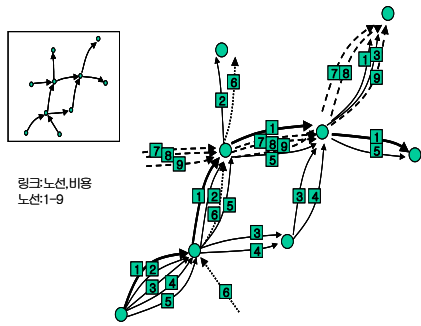
<그림 2>는 노드기반으로 환승지점을 표현한 것으로써 8개의 수단($n_1, n_2, n_3, n_4, m_1, m_2, m_3, m_4$)간에 환승시간을 고려하기 위하여 16개의 가상링크와 7개의 가상노드가 필요하다. <그림 2>는 동일한 환승지점을 링크기반으로 표현한 것으로써 보는 바와 같이 네트워크의 확장 없이 환승이 고려됨을 알 수 있다.



〈그림 1〉 노드기반의 환승노드와 수단 간의 표현



〈그림 2〉 링크기반의 환승노드와 수단 간의 표현



〈그림 3〉 복합대중 교통망의 수단-링크확장

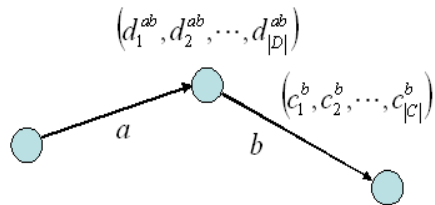
링크기반표지를 활용하여 환승구간의 네트워크 확장이 요구되지 않으며 링크를 통과하는 모든 수단을 기존의 경로탐색의 적용이 용이하게 하기 위하여 추가된 링크로서 표현한다. 〈그림 3〉은 4개의 환승이 가능한 노드와 10개 링크로 구성된 복합교통망을 9개 수단이 통과하는 교통망을 구성하기 위하여 31개 링크와 4개의 노드로 확대된 네트워크를 나타내고 있다. 추가되는 각각의 링크는 단일수단을 의미하며 출발노드와 목적노드 번호는 같으나 링크의 속성이 다르다(Duplicate links).

링크수단확장(Link Mode Expansion)의 표현에 의한 경로탐색문제는 이미 국내의 여러 연구에서 제시되었다. 이미영 등 (2006)은 이러한 링크수단확장 기법으로

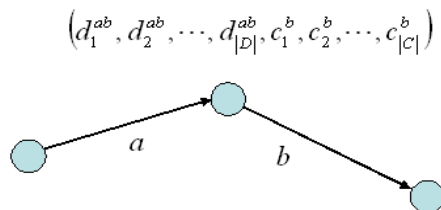
복합교통망을 표현하였고 링크표지기법을 적용하여 통합 대중교통망에서 거리비례제 요금부과에 순차적인 K개의 경로를 탐색하는 알고리즘에 적용하였다. 조종석(2006)은 제약조건이 존재하는 복합교통망을 링크수단확장기법으로 표현하였고 K최소시간경로를 탐색하는 링크표지기법 네트워크변형알고리즘을 구축하였다. 또한, 제시된 알고리즘의 계산복잡도(Computational complexities)가 다항식으로 표현되어 대규모 복합교통망으로 확장될 수 있음을 증명하였다(Polynomial). 박준환(2007)은 복합대중교통망의 경로기반 균형통행배정모형의 해법으로 제안한 컬럼생성기법(Column Generation)에 링크표지기법 링크수단기법을 적용하였다. 이들 국내 연구의 특징은 요금과 같은 통행비용 또는 통행시간 단일목적에 한정하여 진행되었으며 본 연구에서 고려하는 다수의 목적에 적용되지는 못하였다.

3. 링크수단기반 비지배경로 정의

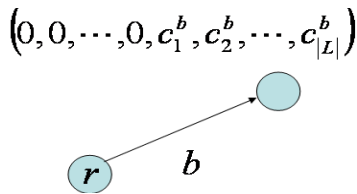
수단-링크확장으로 모든 수단이 링크로 표현되었으므로 링크는 수단을 포함한 링크속성으로 표현 가능하다. 인접된 두 링크-수단에 대하여 환승속성과 주행속성으로 구분하기 위하여 〈그림 4〉와 같이 인접링크a와 b는 D차원의 환승속성, 링크b는 L차원의 주행속성으로 표현되며, 〈그림 5〉와 같이 결합된 D+L차원의 결합벡터로 표현된다. 〈그림 6〉은 출발지에서 연결된 링크의 환승속성은 0으로 초기화되는 것을 보여주고 있다. 〈그림 5〉, 〈그림 6〉의 결합된 벡터 속성 값에 대하여 링크수단의 비지



〈그림 4〉 인접링크에 대한 환승속성과 주행속성의 구분



〈그림 5〉 인접링크에 대한 환승속성과 주행속성의 통합



〈그림 6〉 출발지r에서 연결된 링크에 대한 환승속성과 주행속성

배경로를 정의하면 〈정의 3〉과 〈정의 4〉와 같다.

【정의 3】 : $p_1(rb)$ 과 $p_2(rb)$ 를 $P[rb]$ 에 속하면서 서로 다른 경로라고 하면, 두 경로 환승속성과 주행속성의 개별속성 q ($q=1, \dots, D, D+1, \dots, D+L$)에 대하여 $c_q^{p_1(rb)} \leq c_q^{p_2(rb)}$ 이고 어떤 q 값에 대하여, (여기서는 q_1) $c_{q_1}^{p_1(rb)} < c_{q_1}^{p_2(rb)}$ 이면, $p_1(rb)$ 는 $p_2(rb)$ 를 지배(Dominate)한다고 정의한다.

【정의 4】 : $P[rb]$ 에 속하는 어떤 경로 $p(rb)$ 에 대하여 $P[rb]$ 에 속하는 다른 어떤 경로도 지배하지 못하면 비지배경로(Non Dominated Path)라고 정의한다. [정의 3]과 [정의 4]는 링크-수단으로 계산된 비지배경로이다. 실제교통망에서는 출발노드에서 어떤 노드까지의 경로로 표현되어야 하므로 노드기반 표지로 전환이 필요하다. [정의 5]에 의하여 노드기반으로 전환된 표지로 구축된다.

【정의 5】 : $P[rb]$ 에 속하는 경로 $p(rb)$ 가 $bINT_j^- \in A$ 로 한정되면서, [정의 3]과 [정의 4]를 만족하면 경로집합 $P[rj]$ 에 속하는 $p(rj)$ 경로가 노드기반으로 전환된 비지배경로이다.

4. 다목적 링크표지갱신 알고리즘

링크표지기반 복합교통망은 지금까지 단일 목적의 경로통행을 탐색하는 방안으로 구축되어 왔다. 이들 알고리즘은 교통망의 표현과 수단링크의 확장에 대해서는 동일하게 활용되고 있다.

수단-링크로 확장된 네트워크에 대하여 출발지r에서 모든 링크까지 다목적 링크표지갱신알고리즘은 크게 3가지로 분류- (1)초기화과정, (2)다목적 링크경로표지

갱신 (Link Path Label Correcting), (3)다목적 링크경로표지를 다목적 노드경로표지로 전환-된다. 초기화 과정에서 환승속성과 링크주행속성을 모두 고려하여 링크기반 최적경로(Namkoong et al, 1998)를 통하여 계산한다. 다목적 링크경로표지갱신에서는 출발지부터 모든 링크까지 [정의3]과 [정의4]를 만족하는 경로에 대해서는 경로전체를 표지로서 유지하는 것을 의미한다. 이 방법을 적용하면 계산에 소요되는 메모리는 매우 증가하나, 경로를 계산하기 위해 필요한 절차를 매우 단순한 논리로 구축할 수 있다. 마지막으로 출발지와 도착지는 노드로 표현되므로 링크경로표지를 노드경로표지화하는 과정으로서 [정의5]를 만족하도록 노드경로표지를 갱신한다.

초기화:

$$d_q^{p(rb)} = \infty, \forall b \in A \setminus \in \Gamma_r^+, q = (1, \dots, D)$$

$$c_q^{p(rb)} = \infty, \forall b \in A \setminus \in \Gamma_r^+, q = (D+1, \dots, D+L)$$

$$d_q^{p(rb)} = 0, \forall b \in \Gamma_r^+, q = (1, \dots, D)$$

$$c_q^{p(rb)} = c_q^b, \forall b \in \Gamma_r^+, q = (D+1, \dots, D+L)$$

〈표 4〉 알고리즘 계산과정

	링크	링크-수단-경로	링크수단 다목적 속성	
초기화	0-S2->1	0-S2->1	(4.0.0)	
	0-B2->2	0-B2->2	(3.1.0)	
	0-S1->3	0-S1->3	(0.0.0)	
	0-B1->5	0-B1->5	(0.0.0)	
	1-B2->4	1-B2->4	0-B1->5-B1->2-B2->1-B2->4	(1.3.1)
			0-S2->1-B2->4	(4.0.1)
			0-B2->2-B2->1-B2->4	(3.1.0)
	2-B2->1	2-B2->1	0-B1->5-B1->2-B2->1	(1.3.1)
			0-B2->2-B2->1	(3.1.0)
	3-S1->2	0-S1->3-S1->2	(2.2.0)	
5-B1->2	0-B1->5-B1->2	(1.3.0)		
링크 경로 표지 갱신	0-S2->1	0-S2->1	(4.0.0)	
	0-B2->2	0-B2->2	(3.1.0)	
	0-S1->3	0-S1->3	(0.0.0)	
	0-B1->5	0-B1->5	(0.0.0)	
	1-B2->4	1-B2->4	0-B1->5-B1->2-B2->1-B2->4	(1.3.1)
			0-S2->1-B2->4	(4.0.1)
			0-B2->2-B2->1-B2->4	(3.1.0)
			0-S1->3-S1->2-B2->1-B2->4	(2.2.2)
	2-B2->1	2-B2->1	0-B1->5-B1->2-B2->1	(1.3.1)
			0-B2->2-B2->1	(3.1.0)
			0-S1->3-S1->2-B2->1	(2.2.2)
	3-S1->2	0-S1->3-S1->2	(2.2.0)	
5-B1->2	0-B1->5-B1->2	(1.3.0)		

링크확정표지기반 알고리즘 (Namkoong, 1998)의 D+L번 수행과 함께 [정의 3]과 [정의 4]를 만족하는 다목적 링크수단 경로표지 초기화 및 계산한다.

$$d_q^{p(r,b)}, \forall b \in A \setminus \in \Gamma_r^+, q = (1, \dots, D),$$

$$c_q^{p(r,b)}, \forall b \in A \setminus \in \Gamma_r^+, q = (D+1, \dots, D+L),$$

• **다목적 링크-수단-경로 표지갱신:**

[정의 3]과 [정의 4]를 만족하는 링크경로 표지 확정 갱신과정수행

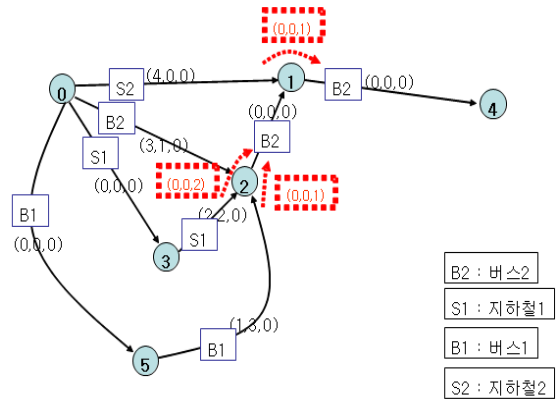
• **다목적 링크-수단-경로 표지의 다목적 노드-수단-경로 표지로 전환:**

[정의5]를 만족하는 탐색된 노드-수단-경로 표지계산

IV. 사례연구

사례연구에 적용되는 교통망은 노드6개 링크 8개의 복합대중교통망이며 2개의 지하철(S1, S2) 노선과 2개의 버스노선(B1, B2)으로 구성되어 있으며, <그림 6>과 같다. 고려되는 속성은 링크주행속성과 두 개의 환승속성으로 총 3개의 속성으로 구성된다. 여기서 주목해야 할 것은 전반부의 이론적인 구성에서는 비용벡터를 (환승속성, 주행속성) 순으로 설명했지만 본 사례연구에서는 이러한 속성의 구성이 다양하게 표현될 수 있다는 측면에서 (주행속성, 환승속성)의 순서로 변경했으므로 x와 y를 환승속성, z를 주행속성이라고 하면 비용벡터는 ((x, y), z)로 구성된다.

<그림 6>의 복합교통망에서 환승속성은 총 세 곳의 환승에서 발생하는데 0-S2-1에서 1-B2-4로 전환하면서 발생되고, 두 번째는 3-S1-2에서 2-B2-1로 전환하면서 발생된다. 마지막으로 5-B1-2에서 2-B2-1로 전환하면서 발생된다. 출발지 0에서 모든 노드경로표지를 구축하는 알고리즘의 구성과정은 Visual C++6.0기반의 Standard Template Library (STL)로 구축되었다. <표 4>는 초기화와 링크경로표지의 구축과정으로 [정의 3]과 [정의 4]를 만족하고 있으며, <표 5>는 링크경로표지를 노드경로표지로 전환한 것으로 [정의 5]를 만족하고 있다. 간단하나마 제안된 알고리즘이 복합대중교통의 다목적 경로탐색을 위하여 활용될 수 있음을 나타내었다.



<그림 6> 사례연구 교통망

<표 5> 노드-경로-표지 구축

노드	노드-수단-경로	노드수단 다목적 속성
1	0-S2->1	(4, 0, 0)
	0-B1->5-B1->2-B2->1	(1, 3, 1)
	0-B2->2-B2->1	(3, 1, 0)
	0-S1->3-S1->2-B2->1	(2, 2, 2)
2	0-B2->2	(3, 1, 0)
	0-S1->3-S1->2	(2, 2, 0)
	0-B1->5-B1->2	(1, 3, 0)
3	0-S1->3	(0, 0, 0)
4	0-B1->5-B1->2-B2->1-B2->4	(1, 3, 1)
	0-S2->1-B2->4	(4, 0, 1)
	0-B2->2-B2->1-B2->4	(3, 1, 0)
	0-S1->3-S1->2-B2->1-B2->4	(2, 2, 2)
5	0-B1->5	(0, 0, 0)

V. 결론

본 연구에서는 기존 유사 연구들에서 수행되지 못했던 복수의 대중교통수단이 존재하는 교통망에서 다목적 경로탐색을 위하여 수단 간 환승을 고려할 수 있는 링크 경로표지갱신 알고리즘을 제시하였다. 알고리즘을 구축하기 위하여 링크표지로 구축된 비지배경로를 재정의 하였으며, 링크경로표지를 갱신하는 방법과 링크경로표지를 노드경로표지로 전환하는 방안을 강구하였다. 또한, 사례연구를 통해서 알고리즘의 계산과정을 살펴보기도 하였다.

이와 같은 성과 외에 본 연구에서는 사례 연구를 소규모 복합대중교통망에서 실시하였는데, 좀 더 정확한 알고리즘의 검증을 위해 대규모 실제 가로망 적용에 대한 구체적인 사례가 제시될 필요가 있다.

참고문헌

1. 이미영 · 백남철 · 문병섭 · 강원의(2006), 거리비례제 요금정책에 따른 K요금경로탐색, 대한교통학회지, 제23권 제1호, 대한교통학회, pp.103~114.
2. 조종석(2006), 환승과 운행시간 스케줄을 고려한 통합교통망에서의 동적K경로탐색알고리즘, 서울대학교 박사학위논문.
3. 박준환(2007), 계층별 비용함수를 고려한 대중교통 통행배정모형 개발에 관한 연구, 서울대학교 박사학위논문.
4. Namgeung, S., Rho, J.-H. and Choi, J.-U. (1998) Development of the Tree-Based Path-Finding in Urban Transportation Networks, *Mathl. Comput. Modelling* Vol. 27, No. 9-11, pp.51~65.
5. Aifandopoulou, G., Ziliaskopoulos, A., and Chrisohoou, E. (2006) A Multi-Objective Optimum Path Algorithm for Passenger Pre-Trip Planning in Multimodal Transportation Networks, Transportation Research Board, Washington.
6. Brumbaugh-Smith, J., and Shoer, D. (1989) An Empirical Investigation of Some Bicriterion-Shortest Path Algorithms, *European Journal of Operational Research*, 43, pp.216~224.
7. Climaco, J.C.N. and Martins, E.Q.V., (1982) A Bicriterion Shortest Path Algorithm, *European Journal of Operational Research*, 11, pp.399~404.
8. Corley, H. W., and Moon, I. D. (1985) Shortest Path in Networks with Vector Weights, *Journal of Optimization Theory and Applications* 46(1), pp.79~86.
9. Dijkstra, E.W. (1959) A Note on Two Problems in Connexion with Graphs, *Numerishe Matematik*, Vol. 1, pp.269~271.
10. Hansen, P., (1980) Bicriterion Path Problems. In: Fandel, G., Gal, T. (Eds.), *Multiple Criteria Decision Making: Theory and Applications, Lectures Notes in Economics and in Mathematical Systems*, Vol. 177, Springer, Heidelberg, pp.109~127.
11. Lee, M. (2004) Transportation Network Models and Algorithms Considering Directional Delay and Prohibition for Intersection Movement, Ph.D. Dissertation, University of Wisconsin-Madison.
12. Martins, E.Q.V., (1984) On A Multicriteria Shortest Path Problem, *European Journal of Operational Research*, 16, pp.236~245.
13. Meng, Q., Lee, D.-H., and Cheu, R. L., (2005), Multiobjective Vehicle Routing and Scheduling Problem with Time Window Constraints in Hazardous Material Transportation, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 131, pp.699~707.
14. Modesti, P. and Sciomachen, A. (1998) An Utility Measure for Finding Multiobjective Shortest Paths in Urban Multimodal Transportation Networks, *European Journal of Operational Research* 111, pp.495~508.
15. Moore, E.F. (1959) The Shortest Path through A Maze, *Proceedings of the International Symposium on Theory of Switching*, Cambridge, MA: Harvard University Press, Vol. 2, pp.285~292.
16. Mote, J., Murthy, I., and Olson D.L. (1991) A Parametric Approach to Solving Bicriterion Shortest Path Problems, *European Journal of Operational Research*, 53, pp.81~92.
17. Nozick, L. K., List, G. F., and Turnquist, M. A. (1997), *Integrated Routing and Scheduling in Hazardous Materials Transportation*, *Transportation Science*, 31, pp.200~215.
18. Skriver, A.J.V. and Andersen, K.A. (2000) A Label Correcting Approach for Solving Bicriterion Shortest-Path Problems, *Computers & Operations Research*, 27, pp.507~524.

19. Zografos, K.G. and Davis, G.F. (1989) Multi-Objective Programming Approach for Routing

Hazardous Materials, Journal of Transportation Engineering, Vol. 115, pp.661~673.

✻ 주 작성자 : 이미영

✻ 교신저자 : 이미영

✻ 논문투고일 : 2007. 5. 19

✻ 논문심사일 : 2007. 7. 20 (1차)

2007. 10. 10 (2차)

2007. 12. 5 (3차)

2008. 2. 3 (4차)

✻ 심사판정일 : 2008. 2. 3

✻ 반론접수기한 : 2008. 6. 30