

사용자 맞춤형 대중교통 경로정보제공을 위한 다계층의 다목적 경로탐색기법 연구

A Multi-Objective Shortest Paths Finding Considering Multi-Class in A Multi-Modal Transit Network for Providing User-Customized Route Information

이 미 영* 박 제 진** 정 점 레*** 박 동 주****
(Mee-Young Lee) (Je-Jin Park) (Jeom-Rae Jeong) (Dong-Joo Park)

요 약

국내는 정보통신(IT) 기술의 발달을 기반으로 BIS, BMS, CNS 등을 통해 교통정보가 실시간적으로 제공되고 있어 유비쿼터스 기반의 첨단 통신기술이 정착되게 되면 개인의 취향에 적합한 맞춤형 (대중)교통정보가 가능할 것으로 전망된다. 대중교통 통행정보는 경로탐색알고리즘으로 구현되는데, 대중교통망은 일반가로망과는 달리 환승과 운행시간 특성을 포함하며 통행자가 경로를 선택하는 과정에서 통행시간, 환승횟수, 환승시간과 같은 복수의 제약 또는 목적의 고려가 요구된다.

본 연구에서는 사용자에게 영향을 미칠 수 있는 요인들을 복수의 목적으로 고려하여 경로를 탐색하며 탐색된 경로에 대하여 자의적으로 선택해 나가는 기법을 제안한다. 본 연구는 복합대중교통망을 대상으로 통행시간, 환승횟수, 환승시간 등과 같은 통행목적에 대하여 계층별로 별도의 다목적 경로를 탐색하는 방안을 강구하여 계층별로 적용 가능한 사용자 맞춤형 정보제공체계의 기본적인 접근이론을 개발한다. 제안된 다수단, 다계층, 다목적 경로탐색알고리즘은 링크표지에 근거하여 구축되어 복합교통망에 효율적으로 구동할 수 있으며, 수도권 도시철도의 실제 대규모 교통망에 적용한 사례연구를 통하여 다양한 계층을 고려한 경로계획모형(Path Planning)으로 활용될 수 있는 가능성을 예시하였다.

Abstract

Mass transit information should contribute many benefits to users. Especially transportation information technology is developing highly with information technology in Korea recently. Hereafter it is expected to provide customized transportation information to users individually with the advent of ubiquitous age in earnest. This public transportation information service can be realized by path finding algorithms in public transportation networks including travel and transfer attributes.

In this research, multi objectives such as travel time, transfer time, and number of transfer and so on are constructed with the primary facts influencing users. Moreover, the method reducing user's path finding alternatives arbitrarily is proposed by selecting the best alternative which provides maximum utility to users among non dominated paths. Therefore, the ultimate goal of this study proposes a multi objective shortest paths finding algorithm which can take into account multiple user classes in a transit network with multiple travel modes. The proposed algorithm is demonstrated based on the two case studies - a small toy network and the large-scaled Seoul Metropolitan subway network.

Key words: Public transportation information, multiple objectives, multiple modes, multiple classes, path planning

* 주저자 : 국토연구원 교통연구원 책임연구원(주저자)
** 공저자 : 한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원(교신저자)
*** 공저자 : 경기대학교 도시·교통공학과 박사과정
**** 공저자 : 서울시립대학교 도시과학대학 교통공학과 부교수
† 논문접수일 : 2008년 4월 30일
† 논문심사일 : 2008년 5월 8일
† 게재확정일 : 2008년 6월 3일

I. 서 론

대중교통 시스템의 발전과 함께 대중교통을 이용하는 여행자에 대한 교통정보제공의 필요성이 증대되고 있다. 여행자에게 제공되는 정보는 출발지부터 도착지까지의 통행시간, 통행요금, 환승횟수, 차내 혼잡도와 같이 대중교통을 이용하는 여행 특성들을 포함하는 정보를 통하여 대중교통 여행자의 편의를 도모하고 궁극적으로 대중교통 이용증진에 기여할 수 있다. BIS, BMS, CNS 등과 같은 정보통신기술을 기반으로 유비쿼터스 시대의 적합한 이용자 맞춤형 대중교통정보제공의 실현도 현실로 다가왔다.

대중교통 통행정보의 핵심은 대중교통망 상의 경로탐색알고리즘의 구현을 통하여 실현되나, 대중교통망은 일반가로망과는 달리 복수의 교통수단연계를 위한 환승과 운행시간 스케줄의 특성을 포함하며 다양한 통행자가 경로선택 과정에서 고려하는 통행거리, 통행요금, 환승횟수 등과 같은 복수의 통행목적에 대한 반영이 필요하다. 대중교통을 이용한 통행에서 최적의 경로선택을 위한 현실적인 방법 중의 하나는 경로의 선택에 영향을 미치는 요인들을 통행목적으로 정의하고 이용자가 선호하는 경로집합을 축소해 가면서 궁극적으로 사용자의 의도가 반영된 단일(또는 소수)의 최적 선택경로대안에 도달하는 것이다.

본 연구에서는 사용자에게 영향을 미칠 수 있는 요인들을 다수의 통행목적으로 구성하고 사용자의 경로탐색에 대한 선호도를 기반으로 자의적으로 축소해나가는 기법을 제안한다. 이를 위해 본 연구에서는 다수의 교통수단이 혼재된 복합대중교통망에서 다수의 사용자의 복수의 통행목적에 고려한 경로탐색알고리즘에 기반을 두어 환승횟수, 환승시간, 총통행시간 등 대중교통이용선택에 영향을 미치는 다양한 상황을 고려하여 최적의 통행경로에 도달하는 유비쿼터스 시대의 대중교통 이용자의 맞춤형 환승교통정보의 활용에 대하여 제안한다.

II. 선행 연구고찰

교통망에서 알고리즘을 적용하여 경로를 탐색할 때에는 다양한 요인들을 고려하는 것이 매우 중요하다. 일반적으로 현재의 복잡한 교통상황을 반영하여 경로를 탐색할 때 고려되는 요인으로는 통행자가 어떤 계층에 속하는가, 어떤 목적으로 통행하는가 그리고 어떤 수단을 이용하여 이동하는가로 요약하여 나타낼 수 있다.

현재까지 가장 기초적인 경로탐색 알고리즘은 단일수단에서 단일계층이 단일목적으로 통행하는 것을 가정으로 하였으며(Dijkstra, 1959; Moore, 1959), 1980년대 이후에서야 단일수단에서 다목적의 경로탐색기법(Multi-Objective Shortest Paths : MOSP)을 논의하기 시작했다. 2000년대에는 다수단의 복합교통망(Multi-Modal Transportation Network : MMTN)에서 다목적 경로탐색기법(MOSP)에 대한 연구가 등장하기 시작했다 [1, 2].

1. 단일수단과 다목적경로탐색 관련 연구

최근까지 다목적경로탐색(MOSP)에 대한 연구는 대부분 단일의 교통수단만으로 구성된 교통망에 대한 가정을 기반으로 이루어졌다. 우선 Climaco & Martins (1982)는 2기준 최적경로문제(Bicriteria Shortest Paths: BSP)의 해법으로서 복수의 경로에 대하여 순차적으로 발견하는 알고리즘을 K-최적경로탐색기법에 근거하여 제안하였다 [3]. Martins (1984)는 모든 파레토-최적경로 (Pareto Optimal Paths)를 탐색하는 표지확정(Label Setting) 알고리즘과 표지갱신(Label Correcting) 알고리즘을 제안하였다 [4]. Hansen (1980)은 표지확정 알고리즘을 일반화하는 기법에 대하여 논의하였다 [5]. Coreley & Moon (1985)는 모든 파레토-최적경로를 탐색하는 표지갱신 알고리즘을 제안하였다 [6]. Zografos & Davis(1989)는 위험물질차량의 경로선정을 위한 목적계획법(Object Programming)에 알고리즘을 도입하여 적용하였다 [7]. Brumbaugh-Smith & Shier(1989)는 2기준 교통망에 대하여 표지갱신 알고리즘을 제안하였다

[8]. Skriver & Andersen (2000)은 Brumbaugh-Smith & Shier의 알고리즘에 대하여 Dijkstra 알고리즘을 반복적으로 활용하여 계산효율성을 증가시키는 연구 결과를 제시하였다 [9].

2. 다수단과 다목적경로탐색 관련 연구

다수의 교통수단이 혼재된 교통망(Multi Modal Transportation Network: MMTN)에서 다목적경로탐색에 대한 연구는 수단 간에 환승에 대한 문제를 포함하는 것으로 최근 연구가 시작되고 있는 실정이다. 다수의 교통수단으로 구성된 교통망에서의 다목적경로탐색(MOSP)에 대한 기존 연구로서 Modesti & Sciomachen (1998)은 다수단 도시 교통망에서 MOSP문제에 대한 종합적인 접근을 시도하였으나 환승지점에서의 환승문제를 고려하지 못하는 한계가 존재한다 [10]. Aifandopoulou et al. (2006)은 다수단 교통망에서 수단간 지체를 고려하여 혼합정수계획법(Mixed Integer Programming)에 기반을 둔 수식과 경험적인 해법(Heuristic Solution)을 제안하였으나 최적의 해를 도출하는 지에 대한 검증은 시도되지 않았다 [11]. 이미영 외(2007)은 복합대중교통망에서 다목적경로를 탐색하는 최적해를 도출하는 링크표지기반 알고리즘을 최초로 제안하였다 [12]. 이미영 외(2007)은 Skriver & Andersen (2000)이 제안한 기법을 환승을 포함하는 복합교통망에서 다목적탐색기법에 적합하도록 알고리즘을 개선하는 방안을 제안하였다 [12].

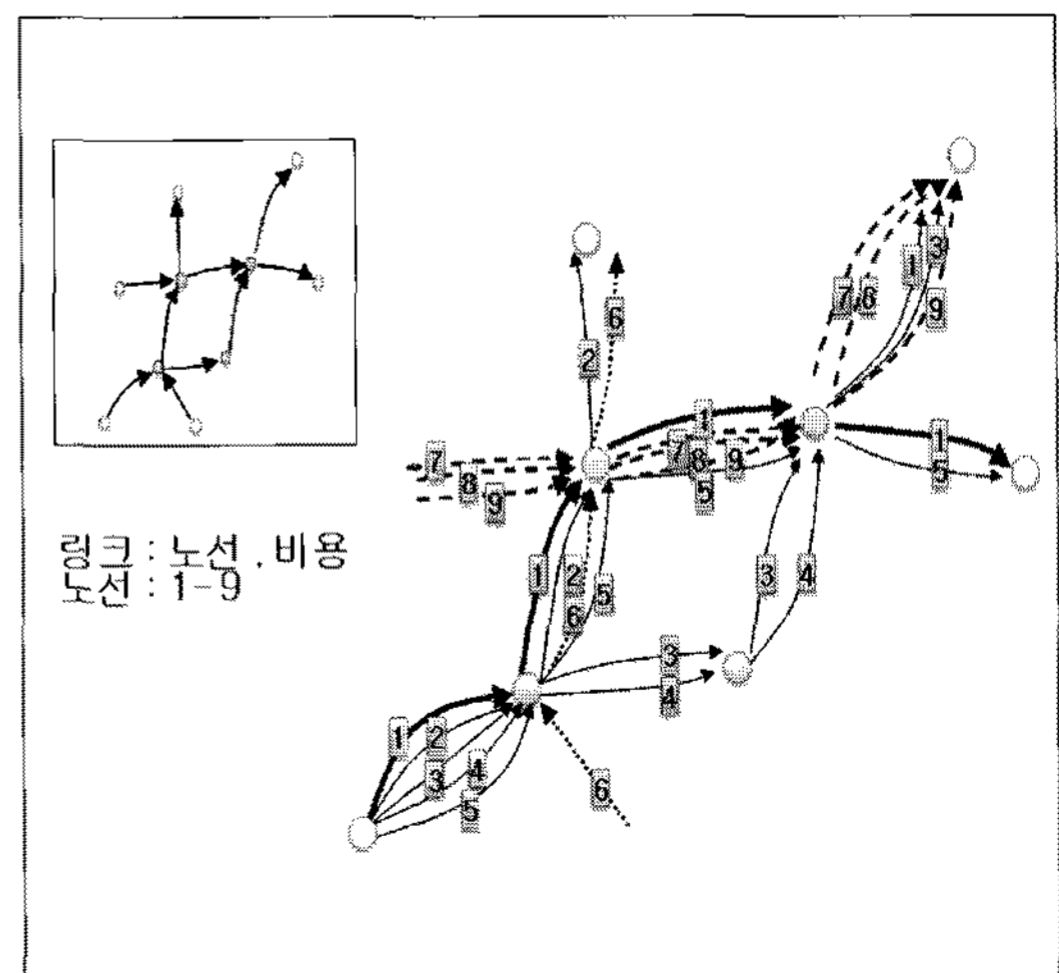
3. 기존연구와 본 연구의 차별성

지금까지 수행된 다수단교통망(MMTN)에서 다목적경로탐색(MOSP)에 대한 선행연구를 종합해 볼 때 다수단교통망(MMTN)에서 다목적경로탐색(MOSP)시 다계층(Multi-Class)을 고려한 문제는 전혀 검토되지 않았던 것으로 판단된다. 본 연구에서 이를 위한 알고리즘을 제안하고 실제 교통망에 적용하는 방안을 사례화하여 제시한다. 본 연구는 이미영 외(2007)이 제안한 수단-링크확장기법으로 구축된 교

통망을 중심으로 다수의 계층에 적용되는 방안을 강구한다 [12]. 계층별로 별도의 다수단교통망을 구축되고 각 교통망에 대하여 계층이 인식하는 수단 간에 발생하는 환승비용과 통행비용이 다르게 적용됨으로써 다수의 계층이 다수의 목적을 고려한 경로를 탐색하는 방안을 제안한다. 이를 위해 다수의 계층에 다목적 경로에 대한 개념적 정의를 비지배 경로 개념에 입각하여 정의하고 실제가로망에 적용하는 가능성을 제시한다.

Ⅲ. 다수단의 다계층, 다목적 경로탐색

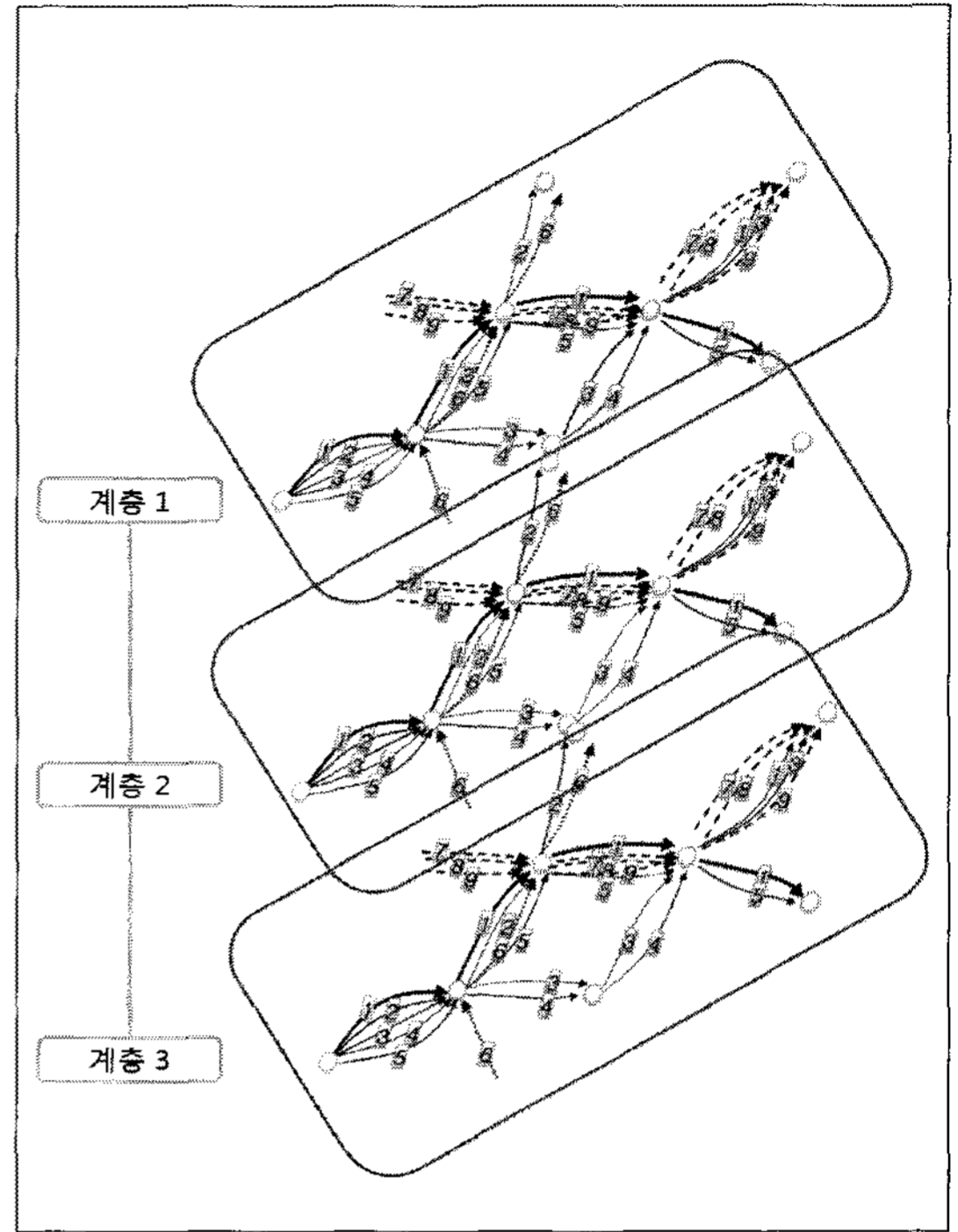
링크집합 Y , 노드집합 V , 통행수단집합 M 계층 집합을 Z 으로 각각 정의하면, 교통망을 표현하는 그래프 $G(Y, V, M, Z)$ 으로 표현된다. 이때 이미영 외(2007)에서 언급한 링크표지기반 수단-링크로 확장된 교통망은 링크를 통과하는 모든 교통수단이 개별 링크로 확장·표현하여 추가된 링크집합 Y^E 로 변화되고 수단은 삭제된 것으로 변형된 그래프는 $G^E(Y^E, V, Z)$ 으로 표현된다 [12]. <그림 1>은 복합대중교통망의 수단-링크로 확장된 형태를 나타내는 것을 예시한 것으로 10개 링크와 10개 노드의 교통망에 9개의 노선이 통과하는 경우 10개 링크와 31개 링크로 변형된 교통망을 나타낸다.



<그림 1> 복합대중교통망의 확장
<Fig. 1> Expansion of integrated transit network

$G^z(Y^z, V, Z)$ 에 대하여 $[d_{1,z}^{ab}, \dots, d_{D,z}^{ab}]$ 는 임의의 계층 z 이 교통망의 링크a와 링크b의 환승에서 발생되는 D개의 다른 환승속성 벡터를 나타내며, $[d_{1,z}^{ab}, \dots, d_{D,z}^{ab}, c_{1,z}^b, \dots, c_{L,z}^b]$ 는 임의의 계층 z 에서 링크a와 링크b의 환승에서 발생되는 D개의 다른 환승속성과 L개의 링크b 주행속성이 함께 표현된 벡터를 의미한다. 또한, $\Gamma_{a,z}^+(\Gamma_{a,z}^-)$ 는 임의의 계층 z 에서 링크a의 도착(출발)노드가 출발(도착)노드인 링크 집합을 나타낸다. $c_{i,z}^{p(rb)}$ 는 임의의 계층 z 에서 경로 $p_z(rb)$ 에 속한 링크의 i 번째 링크속성의 합을, $d_{i,z}^{p(rb)}$ 는 역시 임의의 계층 z 에서 $p_z(rb)$ 에 속한 인접 링크 간 i 번째 환승속성의 합을 의미한다. 이를 간략히 정리해 보면 다음과 같다.

- $[d_{1,z}^{ab}, \dots, d_{D,z}^{ab}]$
임의의 계층 z 에서 링크a와 링크b의 환승에서 발생되는 D개의 다른 환승속성 벡터
- $[d_{1,z}^{ab}, \dots, d_{D,z}^{ab}, c_{1,z}^b, \dots, c_{L,z}^b]$
임의의 계층 z 에서 링크a와 링크b의 환승에서 발생되는 D개의 다른 환승속성과 L개의 링크b 주행속성이 함께 표현된 벡터
- $\Gamma_{a,z}^+(\Gamma_{a,z}^-)$
임의의 계층 z 에서 링크a의 도착노드(출발노드)가 출발노드(도착노드)인 링크집합
- $p_z(rb)$
임의의 계층 z 에서 출발지r에서 링크b까지의 경로 $\{a_1(r,j) \rightarrow \dots \rightarrow a_k \rightarrow b\}$
- $P_z[rb]$
임의의 계층 z 에서 출발지r에서 링크b로의 가능경로집합 (feasible path set)으로 $p_z(rb)$ 이 구성요소
- $c_{i,z}^{p(rb)}$
임의의 계층 z 에서 경로 $p_z(rb)$ 에 속한 링크의 i 번째 링크속성의 합
- $d_{i,z}^{p(rb)}$
임의의 계층 z 에서 경로 $p_z(rb)$ 에 속한 인접 링크 간 i 번째 환승속성의 합



<그림 2> 계층 간 복합대중교통망의 구축
<Fig. 2> Construction of integrated transit network for user classes

<그림 1>의 복합대중교통망을 다계층을 반영하는 복합대중교통망으로 표현하면, 노드와 링크로 이루어지는 기본적인 네트워크는 변함이 없다. 다만 네트워크를 구성하는 속성(링크, 노드, 환승 등)의 변화가 생성된다고 볼 수 있다.

<그림 2>는 계층 간의 복합대중교통망의 수단-링크 구축을 도식화하여 나타낸 것이다. 여기서 계층은 인위적으로 3개로 구분하였다.

3. 계층의 다수단 다목적 비지배경로 정의

수단-링크확장으로 모든 수단이 링크로 표현되었으므로, 링크는 수단을 포함한 링크속성으로 표현 가능하다. 인접된 두 링크-수단에 대하여 환승속성과 주행속성으로 구분하기 위하여 <그림 3>과 같이 임의의 계층 z 에서 인접링크a와 b는 D차원의 환승속성, 링크b는 L차원의 주행속성으로 표현되면, <그림 4>와 같이 임의의 계층 z 에서 결합된 D+L차

원의 결합벡터로 표현된다. <그림5>는 임의의 계층 z에서 출발지에 연결된 링크의 환승속성은 0으로 초기화되는 것을 보여주고 있다. <그림 3>, <그림 4>의 결합된 벡터 속성 값에 대하여 링크수단의 비지배경로를 정의하면 [정의1], [정의2]와 같다.

[정의1]

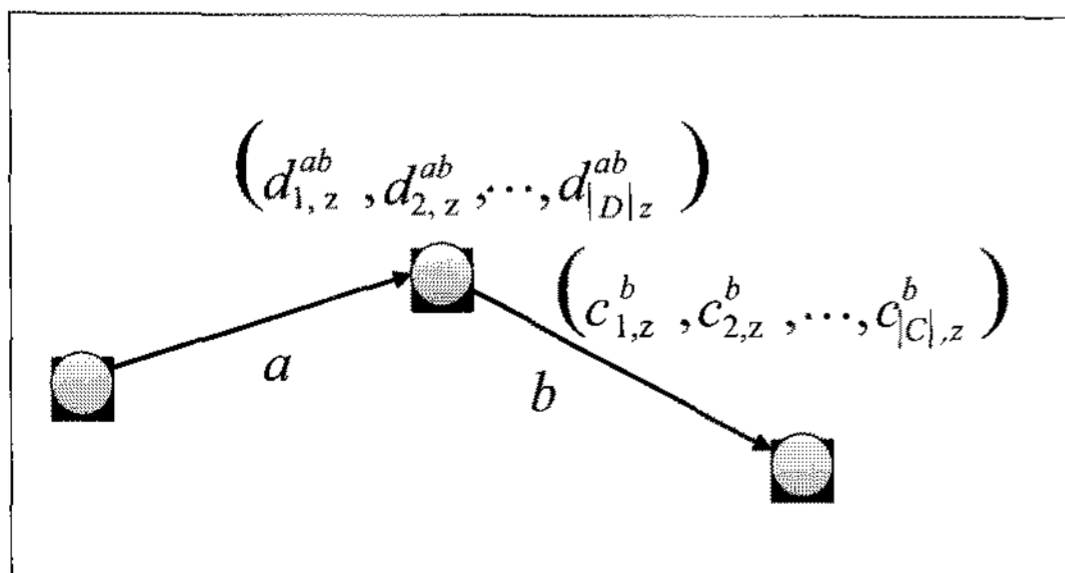
임의의 계층 z에 대하여 $p_{1,z}(rb)$ 과 $p_{2,z}(rb)$ 를 $P_z[rb]$ 에 속하면서 서로 다른 경로라고 하면, 두 경로 환승속성과 주행속성의 개별속성 $q(q=1, \dots, D, D+1, \dots, D+L)$ 에 대하여 $c_{q,z}^{p_1(rb)} \leq c_{q,z}^{p_2(rb)}$ 이고 어떤 q값(여기서는 q_1)에 대하여, $c_{q_1,z}^{p_1(rb)} < c_{q_1,z}^{p_2(rb)}$ 이면, $p_{1,z}(rb)$ 는 $p_{2,z}(rb)$ 를 지배(Dominate)한다고 정의한다.

[정의2]

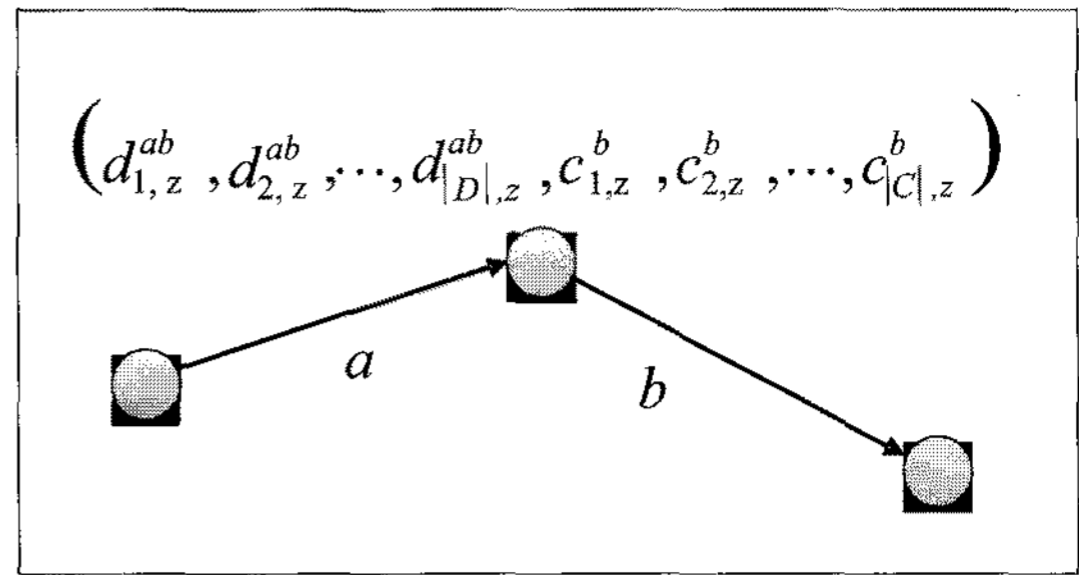
임의의 계층 z에서 $P_z[rb]$ 에 속하는 어떤 경로 $p_z(rb)$ 에 대하여 $P_z[rb]$ 에 속하는 다른 어떤 경로도 지배하지 못하면 비지배경로(Non Dominated Path)라고 정의한다. [정의1]과 [정의2]는 링크-수단으로 계산된 비지배경로이다. 실제교통망에서는 출발노드에서 어떤 노드까지의 경로로 표현되어야 하므로 노드기반 표지로 전환이 필요하다. [정의3]에 의하여 노드기반으로 전환된 표지로 구축된다.

[정의3]

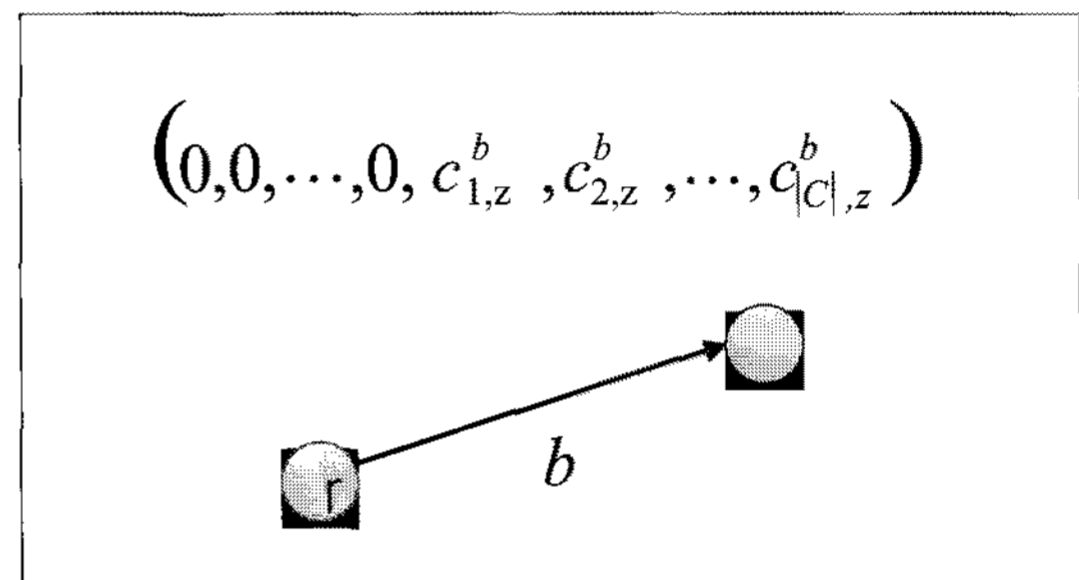
임의의 계층 z에 대하여 $P_z[rb]$ 에 속하는 경로 $p_z(rb)$ 가 $b \in \Gamma_{j,z}^- \in A$ 로 한정되면서, [정의1]과 [정



<그림 3> 계층z의 인접링크의 환승속성과 주행속성
<Fig. 3> Transfer and driving costs for the class z



<그림 4> 계층z의 인접링크의 환승속성과 주행속성의 통합
<Fig. 4> Combined transfer and driving costs for the class z



<그림 5> 출발지r에서 연결된 링크에 대한 계층z의 환승속성과 주행속성 표현
<Fig. 5> Combined transfer and driving costs for the class z for links going out from origin r

의2]를 만족하면 경로집합 $P_z[rj]$ 에 속하는 $p_z(rj)$ 경로가 노드기반으로 전환된 비지배경로이다.

4. 알고리즘

독립된 계층에 해당하는 수단-링크로 확장된 네트워크에 대하여 출발지r에서 모든 링크까지 다목적 링크표지갱신알고리즘은 크게 3가지로 분류- (1) 초기화과정, (2)다목적 링크경로표지갱신 (Link Path Label Correcting), (3)다목적 링크경로표지를 다목적 노드경로표지로 전환-된다. 초기화과정에서 환승속성과 링크주행속성을 모두 고려하여 링크기반 최적 경로를 통하여 계산한다. 다목적 링크경로표지갱신에서는 출발지부터 모든 링크까지 [정의1]과 [정의2]를 만족하는 경로에 대해서는 경로전체를 표지로서

유지하는 것을 의미한다. 마지막으로 출발지와 도착지는 노드로 표현되므로 링크경로표지를 노드경로표지화 하는 과정으로서 [정의3]을 만족하도록 노드경로표지를 갱신한다.

[초기화]

$$d_{q,z}^{p(rb)} = \infty, \forall b \in A \setminus \in \Gamma_{r,z}^+, q = (1, \dots, D)$$

$$c_{q,z}^{p(rb)} = \infty, \forall b \in A \setminus \in \Gamma_{r,z}^+, q = (D+1, \dots, D+L)$$

$$d_{q,z}^{p(rb)} = 0, \forall b \in \Gamma_{r,z}^+, q = (1, \dots, D)$$

$$c_{q,z}^{p(rb)} = c_{q,z}^b, \forall b \in \Gamma_{r,z}^+, q = (D+1, \dots, D+L)$$

링크확정표지기반 알고리즘 (Namkoong et al., 1998, Lee, 2004)의 D+L번 수행과 함께 [정의1]과 [정의2]를 만족하는 다목적 링크수단 경로표지의 초기화 및 계산을 하면 다음과 같다 [13, 14].

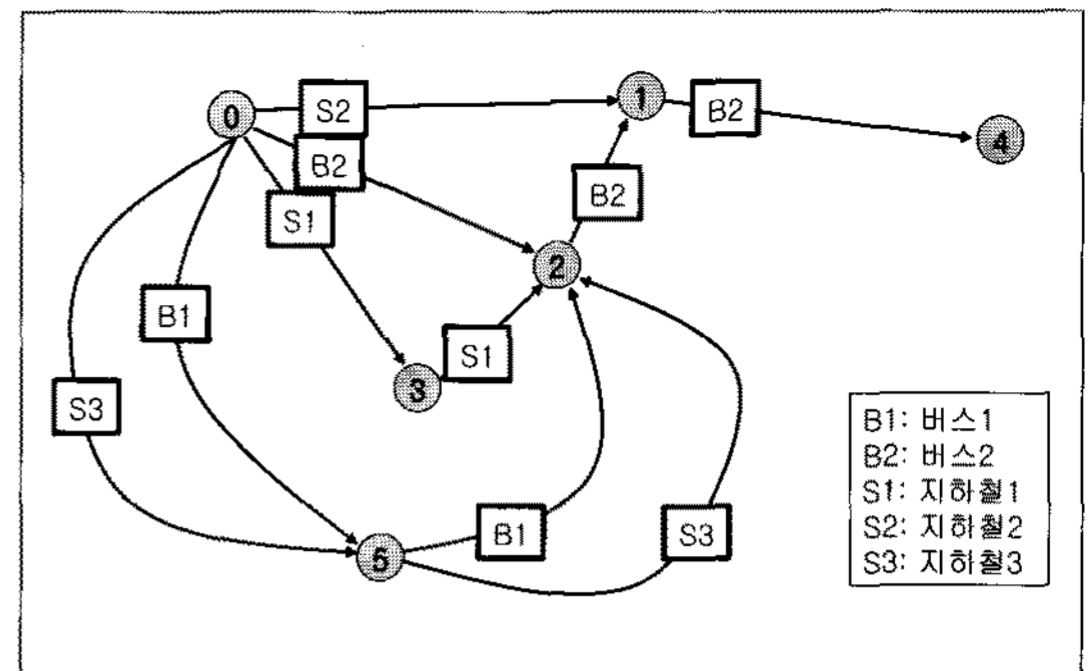
$$d_{q,z}^{p(rb)}, \forall b \in A \setminus \in \Gamma_{r,z}^+, q = (1, \dots, D)$$

$$c_{q,z}^{p(rb)}, \forall b \in A \setminus \in \Gamma_{r,z}^+, q = (D+1, \dots, D+L)$$

- 다목적 링크-수단-경로 표지갱신
[정의1]과 [정의2]를 만족하는 링크경로 표지 확정 갱신과정수행
- 다목적 링크-수단-경로 표지의 다목적 노드-수단-경로 표지로 전환
[정의3]을 만족하는 탐색된 노드-수단-경로 표지 계산

IV. 사례 연구

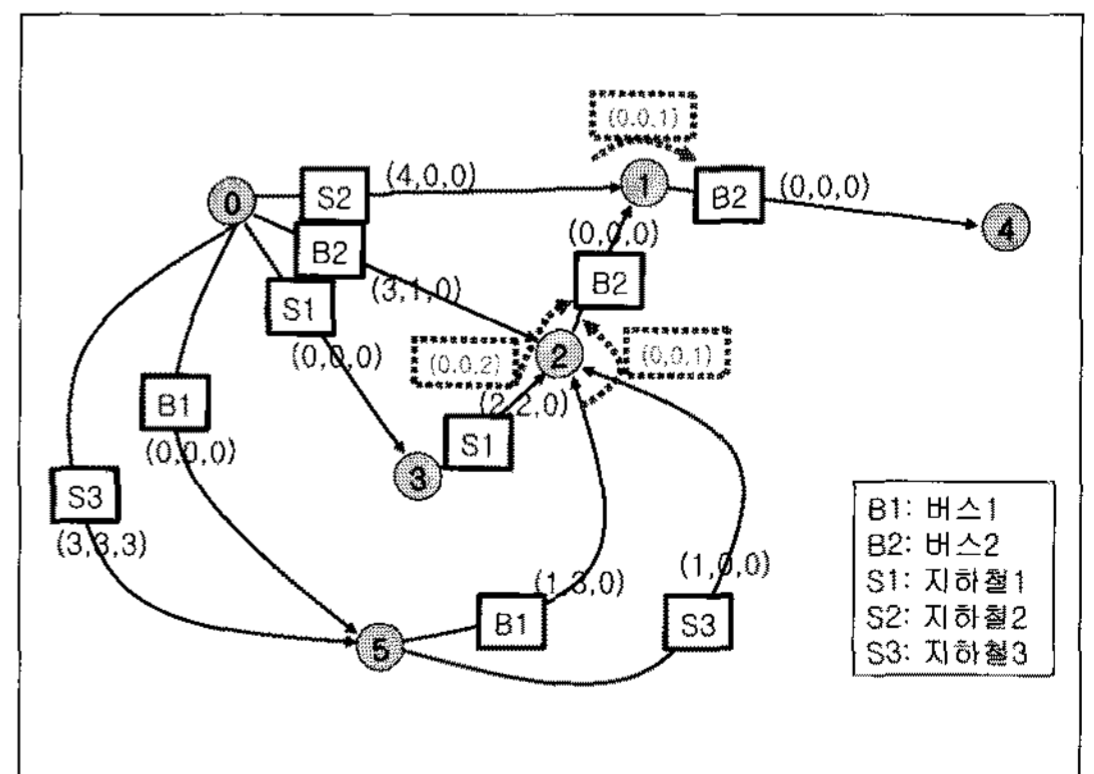
2가지 사례연구를 통하여 제안된 알고리즘을 검증한다. 우선 소규모 네트워크를 통하여 알고리즘의 수행과정을 자세하게 설명한다. 대규모 실제 도시철도 가로망을 적용하여 2가지 사례로서 저소득의 노인계층, 통행시간을 줄이려는 출근통행, 환승에 매우 부담이 큰 휠체어를 이용하는 장애인에 대한 정보제공을 차별성을 통하여 알고리즘의 실제 활용성에 대하여 검토한다.



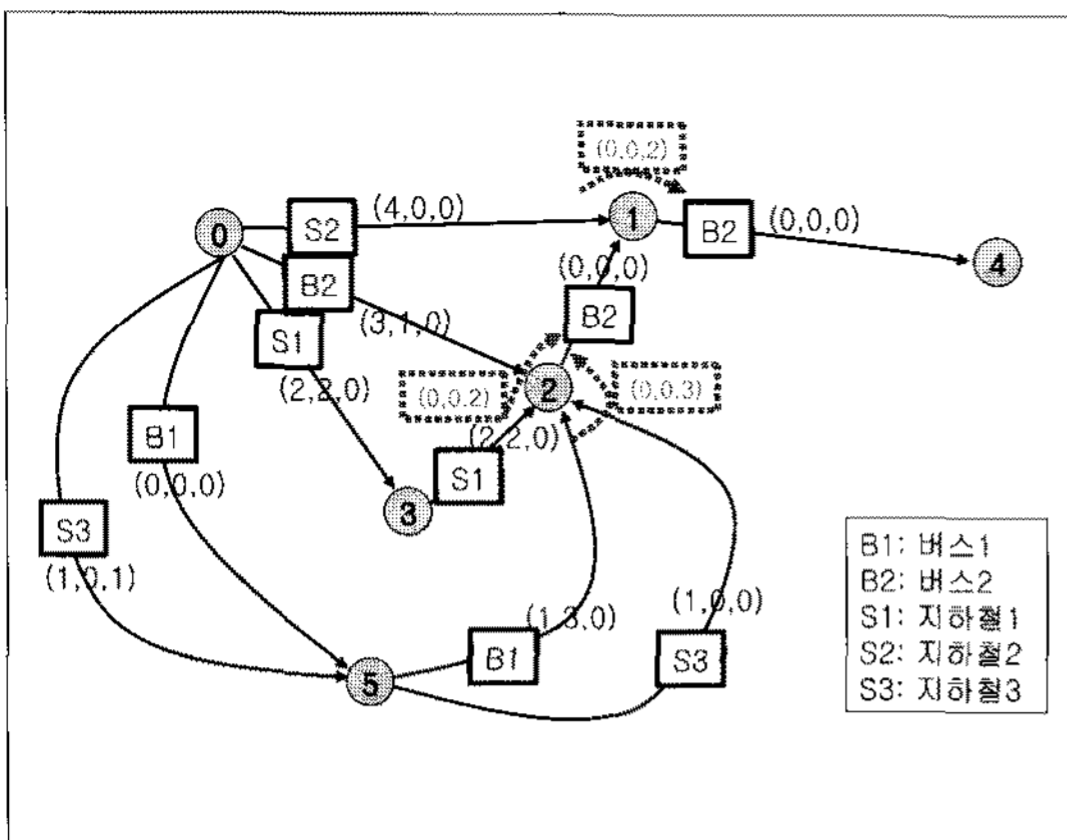
<그림 6> 사례연구 교통망
<Fig. 6> A toy network for case study

1. 알고리즘 검증

사례 연구에 적용되는 교통망은 <그림 6>과 같이 노드6개 링크 10개의 복합대중교통망이며 2개의 지하철(S1, S2, S3) 노선과 2개의 버스노선(B1, B2)으로 구성되어 있다. 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 주행속성, z를 환승속성이라고 하면 비용벡터는 ((x, y), z)로 구성된다.



<그림 7> 계층1의 교통망 및 속성
<Fig. 7> Network and costs for class 1



<그림 8> 계층2의 교통망 및 속성
 <Fig. 8> Network and costs for class 2

<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++6.0에서 지원되는 Standard Template Library (STL)로 구축되었다.

이렇게 구축된 교통망과 알고리즘을 다계층 분석을 위해 계층 간 속성을 구성하여 표현하면 <그림 7>, <그림 8>과 같다. 본 사례연구에서는 계층을 2개로 구분하여 분석을 실시하였으며, 각 계층별로 인지하는 주행속성과 환승속성이 다르므로 이를 감안하여 속성을 구성하였다.

<표 1>은 계층 1의 초기화와 링크경로표지의 구축과정으로 [정의1]과 [정의2]를 만족하고 있으며, <표 2>와 <표 3>은 계층 1과 계층 2의 링크경로표지를 노드경로표지로 전환한 것으로 [정의3]을 만족하고 있다.

사례연구를 통해 간단하나마 본 연구에서 제안된 알고리즘이 복합대중교통에서 다계층의 다목적 경로탐색을 위하여 활용될 수 있음을 확인할 수 있다.

계층2에 대한 변형된 통행속성과 환승속성에 대하여 <그림 8>과 같이 표현되었다는 가정 하에서 동일하게 알고리즘을 구성하였다. <그림 7>의 계층

1과의 차이는 0-S3→5의 주행속성이 (3,3,3)에서 (1,0,1)로 낮아졌고, 환승속성 0-S2-1에서 1-B2→4로의 환승속성이 (0,0,1)에서 (0,0,2)로 변경되었으며, 5-S3→2에서 2-B2→1로의 환승은 (0,0,1)에서 (0,0,3)로 변경되었다.

<표 1> 계층1의 알고리즘 계산과정
 <Table. 1> Calculation process for class 1

구분	링크	링크-수단-경로	링크수단 다목적속성
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)
	0-S3→5	0-S3→5	(1,0,1)
	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	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)	
5-S3→2	0-B1→5-S3→2	(3,3,3)	
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)
	0-S3→5	0-S3→5	(1,0,1)
	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	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)
	5-S3→2	0-B1→5-S3→2	(3,3,3)

<표 2> 계층1의 노드-경로-표지 구축
<Table 2> Node-path-label for class 1

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)

<표 3> 계층2의 알고리즘 계산과정
<Table 3> Calculation process for class 2

구분	링크	'링크-수단-경로	링크수단 다목적속성
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	(2,2,0)
	0-B1→5	0-B1→5	(0,0,0)
	0-S3→5	0-S3→5	(1,0,1)
	1-B2→4	0-B1→5-B1→2-B2→1-B2→4	(1,0,0)
	2-B2→1	0-B1→5-S3→2-B2→1	(1,0,0)
	3-S1→2	0-S1→3-S1→2	(4,4,0)
	5-B1→2	0-B1→5-B1→2	(1,3,0)
	5-S3→2	0-B1→5-S3→2	(1,0,0)
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	(2,2,0)
	0-B1→5	0-B1→5	(0,0,0)
	0-S3→5	0-S3→5	(1,0,1)
	1-B2→4	0-B1→5-S3→2-B2→1-B2→4	(1,0,0)
	2-B2→1	0-B1→5-S3→2-B2→1	(1,0,0)
	3-S1→2	0-S1→3-S1→2	(4,4,0)
	5-B1→2	0-B1→5-B1→2	(1,3,0)
	5-S3→2	0-B1→5-S3→2	(1,0,0)

<표 4> 계층2의 노드-경로-표지 구축
<Table 4> Node-path-label for class 2

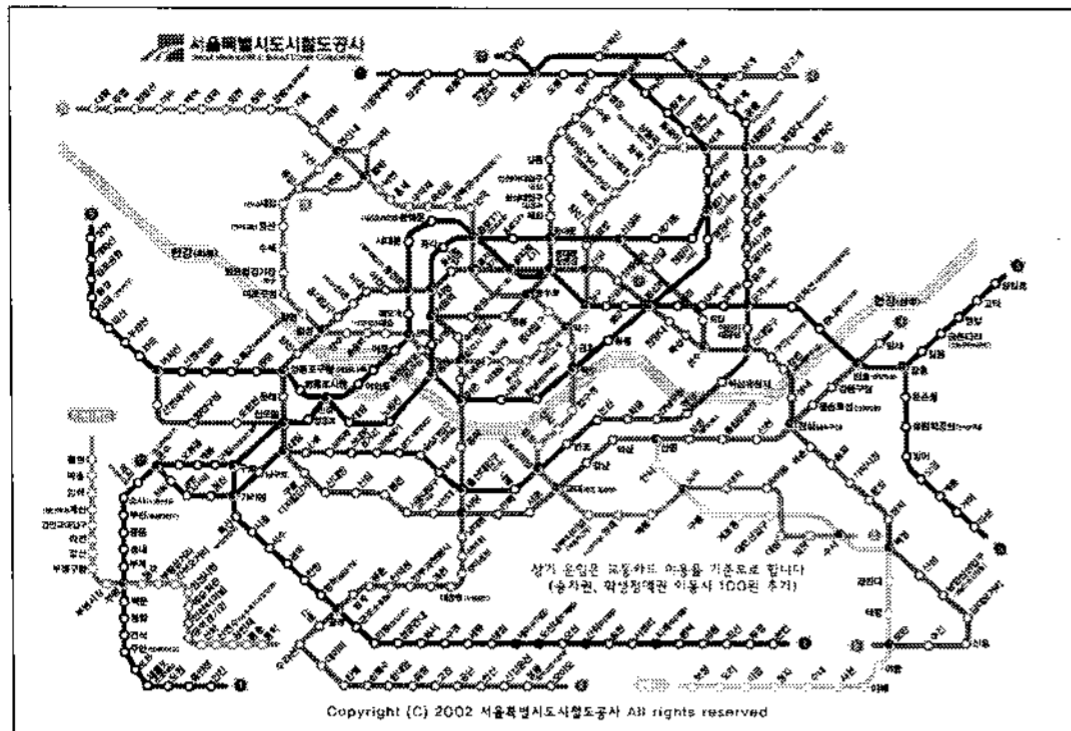
노드	노드-수단-경로	노드수단 다목적 속성
1	0-B1→5-S3→2-B2→1	(1,0,0)
2	0-B1→5-S3→2	(1,0,0)
3	0-S1→3	(2,2,0)
4	0-B1→5-S3→2-B2→1-B2→4	(1,0,0)
5	0-B1→5	(0,0,0)

계층2에 대한 알고리즘 수행 결과는 <표 3>과 <표 4>에 요약된 바와 같다. 전체적으로 링크표지 갱신과정에서 비지배경로가 적어지는 것을 확인할 수 있으며, 따라서 출발지에서 개별노드까지의 비지배경로의 수에도 영향을 받는 것으로 나타났다. 출발지에서 노드4까지의 비지배경로를 계층1과 계층2를 비교하면, 계층1에서는 4개의 비지배경로가 탐색되었으나, 계층2에서는 비지배경로는 1개로 탐색되었다.

2. 실제 교통망 적용 사례

제안된 경로알고리즘이 현실교통망과 같은 대규모 교통망에서도 이용자 맞춤형 정보제공 시스템과 같이 합리적인 의사결정과정에서 활용될 수 있는가를 검증하기 서울시 도시철도 및 수도권 철도망에 대하여 적용하였다. 실제 상황을 재연하기 위해 역간거리, 노선별 표정속도, 환승역별 환승시간 등의 실제 조사된 자료를 사용하였다. 우선 제안된 경로 탐색알고리즘 적용을 위해 사용한 서울시 및 수도권철도망은 2006년 5월 기준으로 철도 및 지하철역을 대표하는 362개의 노드, 804개의 링크, 60개(방향별로는 419개)의 환승노드(환승역)로 구성된다(<그림 9>).

각 역별 통과노선 및 역간 거리, 배차간격, 환승역별 환승시간 등은 <표 5>~<표 8>과 같으며, 철도 네트워크를 구축하기 위하여 사용된 자료는 노드자료, 링크자료, 각 호선의 평균표정속도자료, 환승통행 자료를 사용하였다.



<그림 9> 수도권 지하철 노선도
<Fig. 9> Metropolitan subway line map

<표 5> 입력 노드자료의 예
<Table 5> The example of input node data

노드 번호	역 이름	역 번호	x 좌표	y 좌표	환승 횟수	1 호선	2 호선	3 호선
1	의정부 북부	503	204038.42	469867.95	0	91	0	0
2	의정부	502	204117.17	468503.52	0	91	0	0
3	회룡	501	204117.17	467244.04	0	91	0	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

<표 6> 입력 링크자료 예
<Table 6> The example of input link data

링크번호	시작노드	도착노드	링크길이(km)	호선
1	1	2	1.2	91
2	2	3	1.6	91
3	2	1	1.2	91
4	3	4	1.4	91
5	3	2	1.6	91
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

<표 5>의 수도권 철도 노드자료 및 <표 6>의 링크자료는 도시철도운영기관에서 공식적으로 배포된 자료를 토대로 구축되었으며 노선별 표정속도자료는 서울시 도시철도공사 자료를 사용하였다.

통행시간은 구간통행시간과 환승시간으로 구성되며, 이때 역간통행시간은 노선별로 구해지며 적용된 통행시간함수는 식 (1)과 같다.

<표 7> 호선표기 및 표정속도
<Table 7> Line number and schedule speed

Notation	기관	호선	구간	표정속도 1(km/h)
1	서울지하철 공사	1	회기-용산	31.2
2		2	시청-시청	33.6
3		3	구파발-수서	34.0
4		4	당고개-남태령	35.8
5	서울도시 철도공사	5	방화-상일동	32.7
6		6	봉화산-용암	30.1
7		7	장암-온수	32.3
8		8	암사-모란	34.2
91	한국철도 공사	경원선	의정부북부-회기	36.0
92		분당선	선릉-보정	37.7
93		경부선	서울역-천안	46.2
94		안산선	금정-오이도	37.6
95		경인선	구로-인천	34.8
96		과천선	남태령-금정	45.0
97		일산선	지축-대화	41.8
98		중앙선	용산-덕소	40.8
99	인천지하철 공사	인천선	굴현-동막	32.6

자료 : 도시철도공사, 2004 수송계획

<표 8> 환승통행자료 예
<Table 8> The example of transfer travel data

환승 노드 번호	시작 노드	환승 노드	도착 노드	환승 소요 시간(분)	배차 간격 (분)	평균 대기 시간 (분)
1	도봉	도봉산	장암	1.78	3.00	1.50
2	도봉	도봉산	수락산	1.66	3.00	1.50
3	망월사	도봉산	장암	1.93	3.00	1.50
4	망월사	도봉산	수락산	1.80	3.00	1.50
5	장암	도봉산	도봉	1.78	3.00	1.50
6	수락산	도봉산	도봉	1.66	3.00	1.50

역간통행시간 (분)

$$= \frac{\text{역간통행거리 (km)}}{\text{노선별표정속도 (km/h)}} * 3600/60 \quad \text{식(1)}$$

환승시간은 환승소요시간자료와 (평균)대기시간으로 구성되는데, 환승소요시간은 서울시 도시철도 기본계획(2006)에서 조사된 환승통행실태 자료를 사용하였다. 환승소요시간의 정의는 환승 시작 역

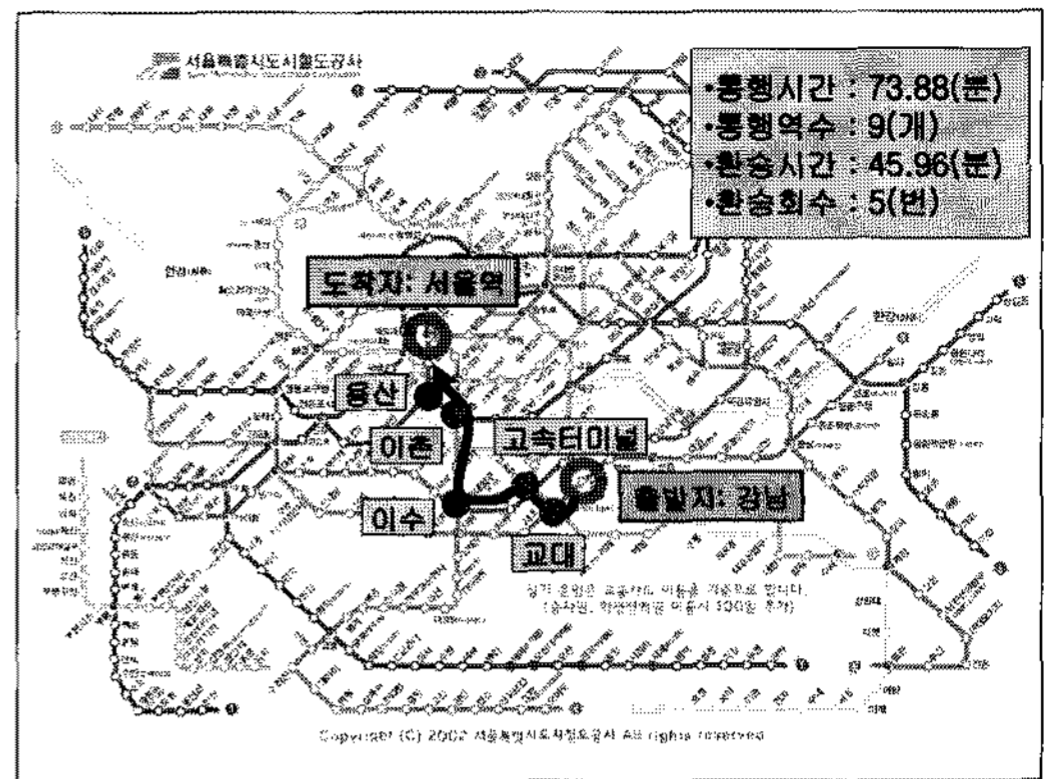
플랫폼의 중간에서 환승도착역의 플랫폼의 중간까지의 물리적 도보통행시간을 의미한다. 대기시간은 해당 호선에 대하여 평균배차간격의 1/2로 평균대기시간개념을 사용하였다.

본 연구에서 구축된 알고리즘을 토대로 강남역을 출발지하고 모든 역까지의 4가지 기준 (총통행시간, 통행역수, 환승소요시간, 환승횟수)에 대하여 비지배경로를 탐색하였다. 여기서 총통행시간과 통행역수는 링크속성을 의미하며 일반적으로 철도를 여행하는 이용자들이 무의식적으로 선택하는 기준으로 적용된다. 또한 환승시간과 환승횟수는 환승속성으로 철도이용자들이 환승의 불편도를 감안하여 경로를 선택하는 것은 이미 잘 알려져 있는 사실이다. 본 고에서는 대규모 네트워크를 토대로 일반통근자와 이동이 불편한 장애인, 임산부, 고령자와 같은 이동약자에 대하여 경로를 탐색하고 최종적으로 그들의 통행의 효용을 높이기 위해 적용하는 기준에 따라 경로를 확정한다는 시나리오를 구축한다. 여기서 일반통근자는 총통행시간을 이동약자는 환승횟수를 최소화하는 전략을 선호한다고 가정한다.

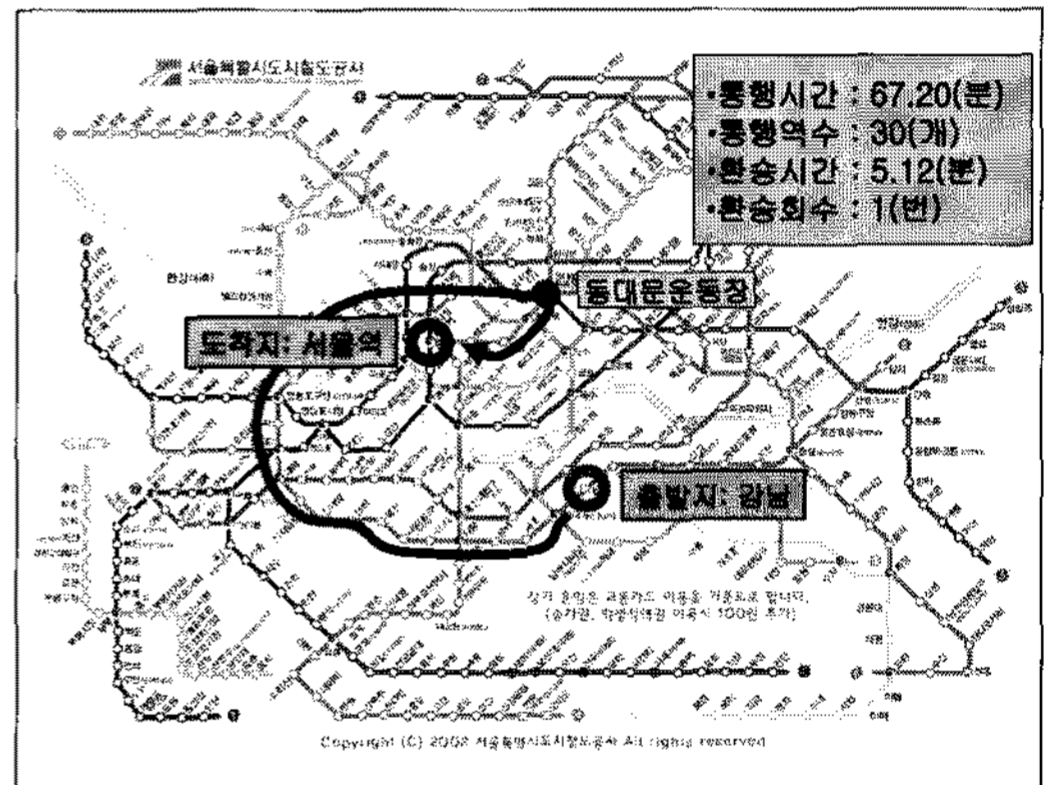
<표 9>의 제약조건을 토대로 강남역에서 모든 노드까지 다목적경로를 탐색하는데 소요된 시간은 약 1초 미만으로 대규모 교통망에도 효과적으로 활용될 수 있는 시스템적 기반은 이미 마련된 것으로 파악된다. 두 가지 경로쌍-강남과 서울역, 강남과 왕십리-에 대하여 탐색된 경로는 <그림 10>, <그림 17>과 같다. 우선 <그림 10>~<그림 14>는 강남과 서울역을 연결하는 비지배경로의 탐색결과이며, <그림 15>~<그림 17>은 강남과 왕십리를 연결하는 비지배경로의 탐색결과이다.

<표 9> 맞춤형 교통정보를 위한 제약조건
 <Table 9> Constraint condition for customized transportation information

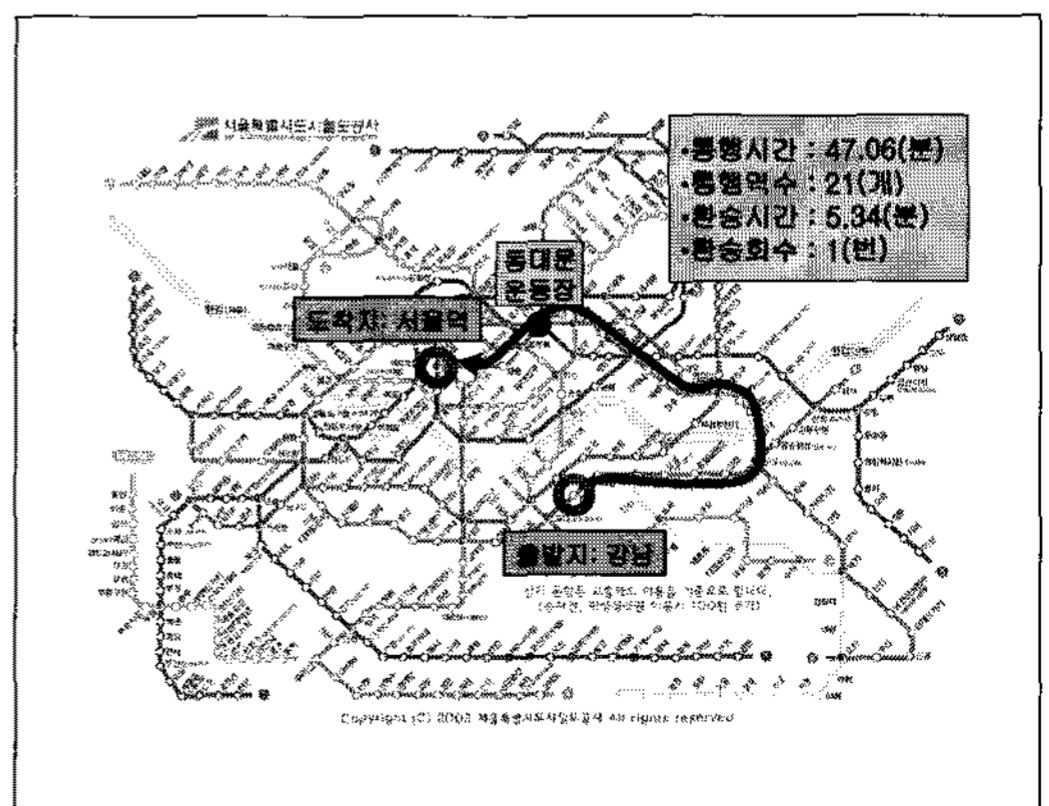
	시나리오 1	시나리오 2
제약 조건	· 일반통근자 · 총통행시간최소화	· 이동약자 · 환승이동최소화



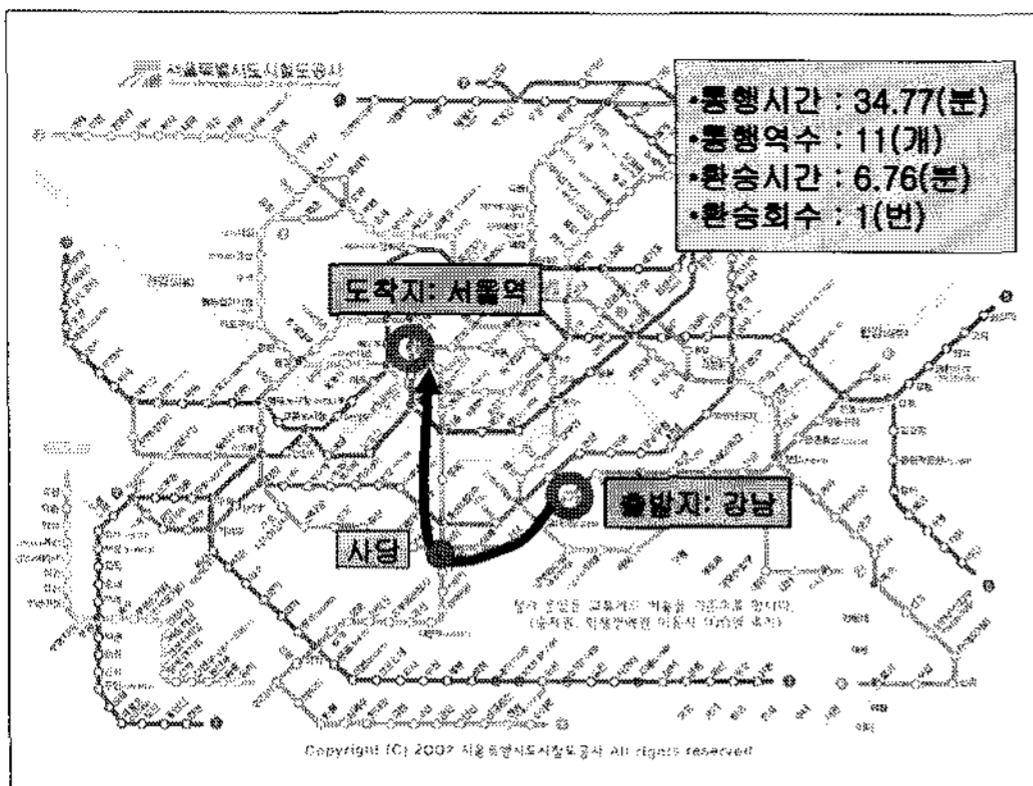
<그림 10> 강남-서울역 비지배경로(1)
 <Fig. 10> Non dominated path(1) between Gangnam to Seoul station



<그림 11> 강남-서울역 비지배경로(2)
 이동약자편의 최적안
 <Fig. 11> Non dominated path(2) between Gangnam to Seoul station: optimal path for the disabled

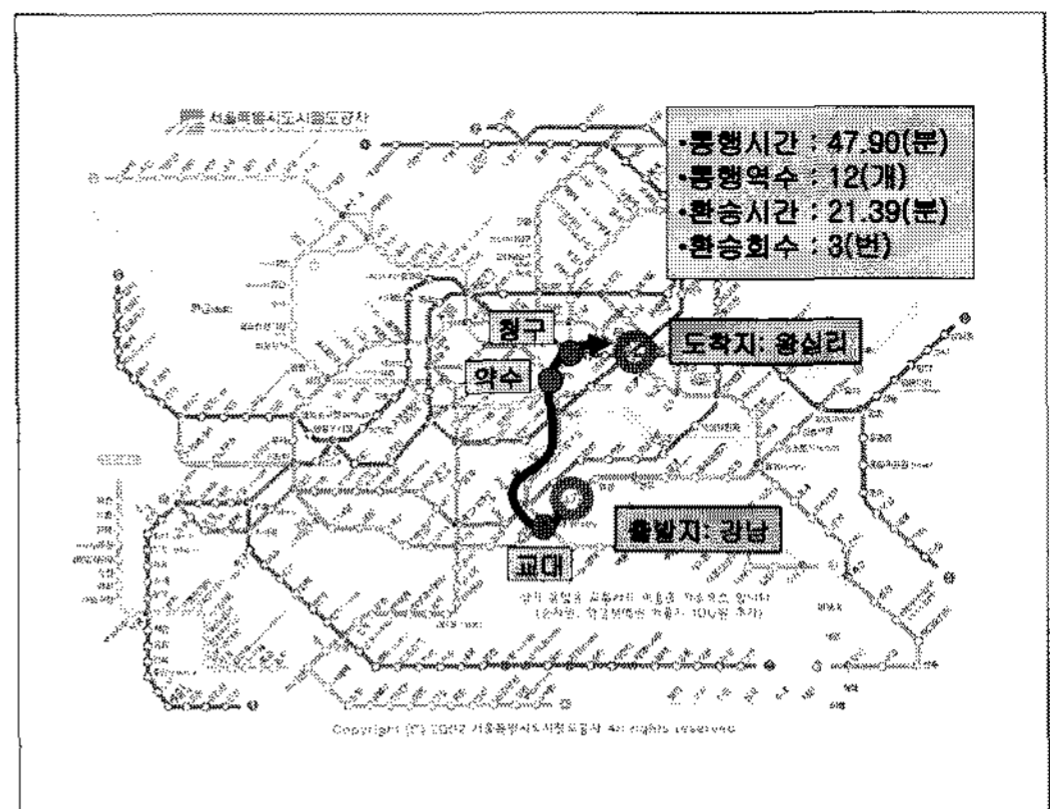


<그림 12> 강남-서울역 비지배경로(3)
 <Fig. 12> Non dominated path(3) between Gangnam to Seoul station



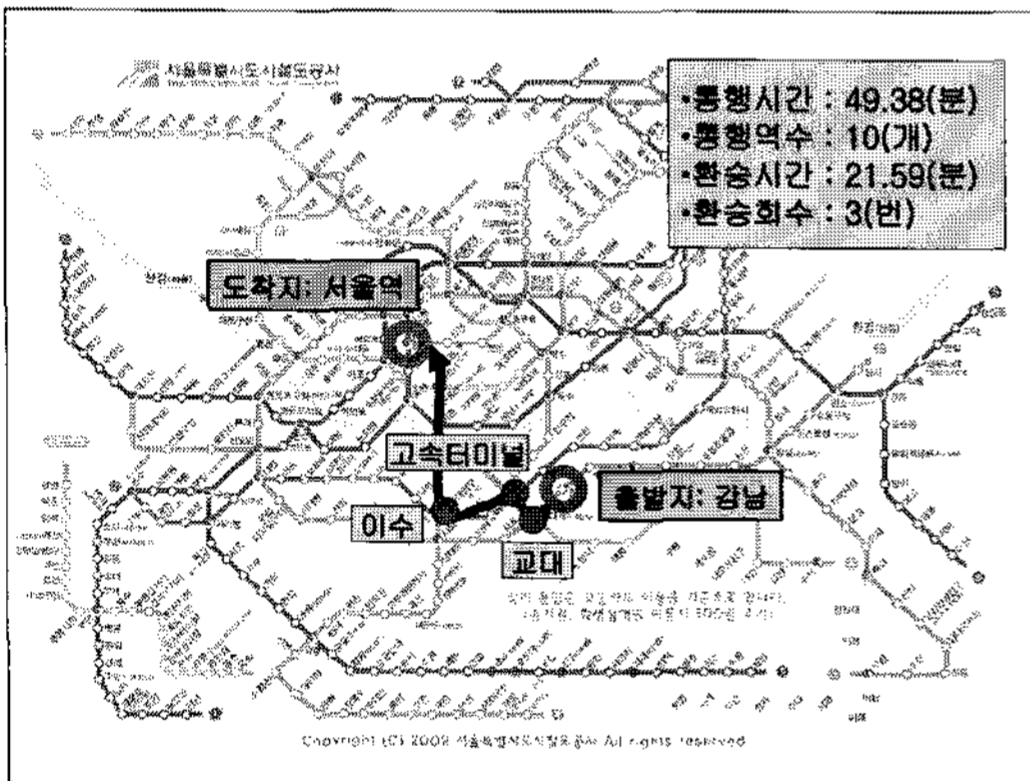
<그림 13> 강남-서울역 비지배경로(4)
통근자 시간감소 최적안

<Fig. 13> Non dominated path(4) between Gangnam to Seoul station: optimal path for commuters



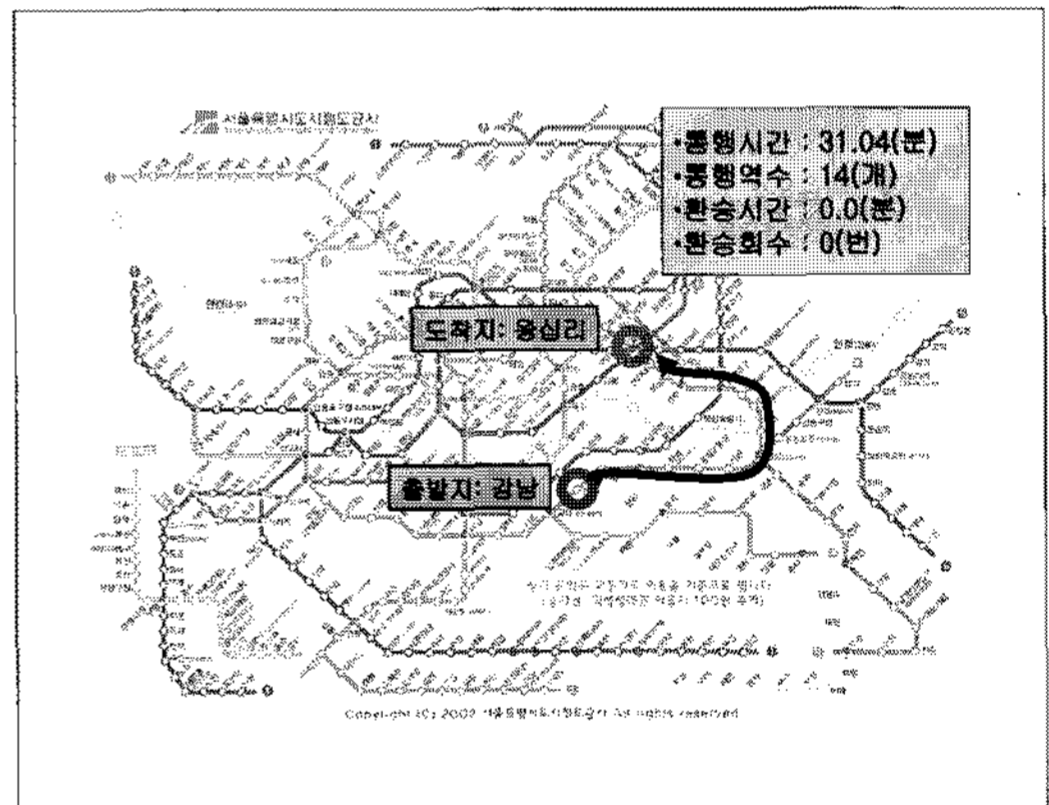
<그림 16> 강남-왕십리 비지배경로(2)

<Fig. 16> Non dominated path(2) between Gangnam to Wangsimri



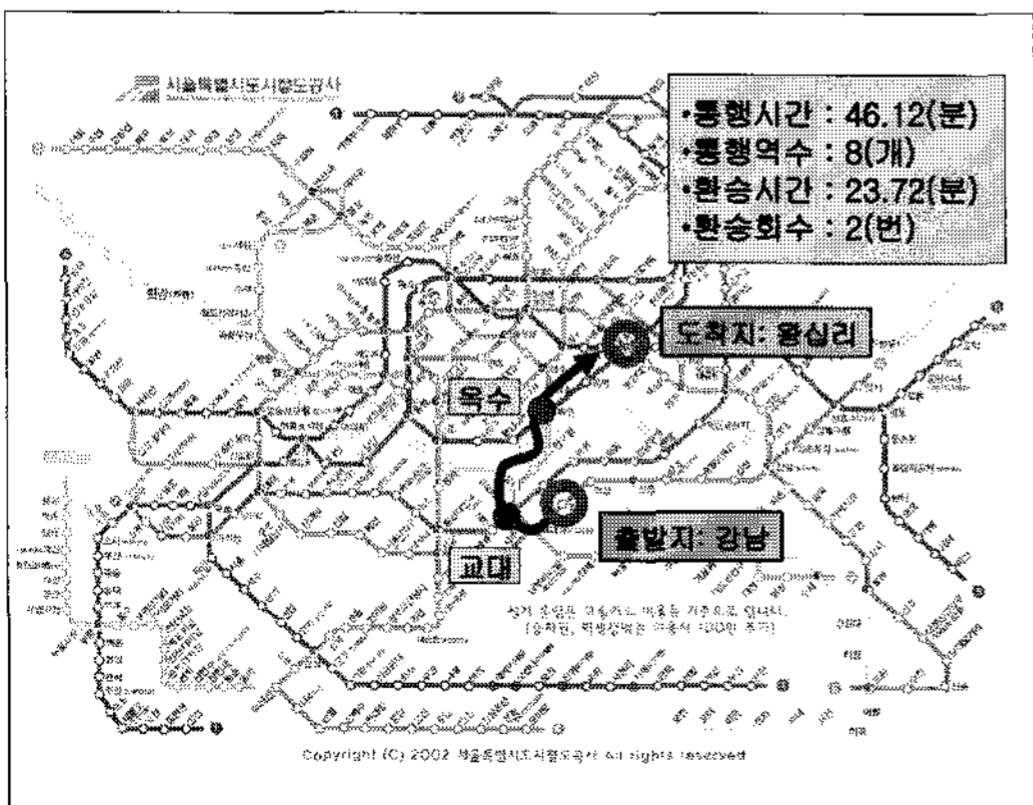
<그림 14> 강남-서울역 비지배경로(5)

<Fig. 14> Non dominated path(5) between Gangnam to Seoul station



<그림 17> 강남-왕십리 비지배경로(3)

통근자 및 이동약자 최적안
<Fig. 17> Non dominated path(3) between Gangnam to Wangsimri : optimal path for both the disabled and commuters



<그림 15> 강남-왕십리 비지배경로(1)

<Fig. 15> Non dominated path(1) between Gangnam to Wangsimri

<표 10>은 강남에서 서울역으로 접근하는 링크의 비지배경로를 탐색하고 강남에서 서울역까지의 노드 비지배경로로 다시 탐색되는 과정을 나타낸 것으로 최종적인 노드 비지배경로의 정의를 만족하는 것은 5개의 경로이다. 여기서 총통행시간이 가장 작은 경로는 4번째인 34.77(분)으로 통근목적의 경로에 적합하며, 환승이동시간이 가장 적게 사용되는 경로는 2번째인 5.12(분)으로 나타나, 이동편의가 필요한 약자에게 최적의 경로로 추천될 수 있다.

<표 10> 서울역까지 노드 비지배경로 선정
 <Table 10> Selection of non dominated paths to Seoul station

출발지→ 링크구분	링크속성		환승속성		비 지배 경로
	총통행 시간(분)	통행 역수 (개)	환승 시간 (분)	환승 횟수 (번)	
시청→ 서울역	43.43	15	12.59	2	X
	49.50	14	20.50	3	X
	49.71	22	6.37	1	X
남영→ 서울역	52.84	19	8.56	1	X
	73.88	9	45.96	5	O
회현→ 서울역	38.63	13	11.81	2	X
	67.20	30	5.12	1	O
	47.06	21	5.34	1	O
숙대입구→ 서울역	34.77	11	6.76	1	O
	49.38	10	21.59	3	O
	102.22	46	5.64	1	X

<표 11> 왕십리까지 노드 비지배경로 선정
 <Table 11> Selection for node based non dominated path to Wangsimri

출발지→ 노드구분	링크속성		환승속성		비 지배 경로
	총통행 시간(분)	통행 역수 (개)	환승 시간 (분)	환승 횟수 (번)	
왕십리	46.12	8	23.72	2	O
	31.04	14	0.00	0	O
	47.90	12	21.39	3	O

<표 11>은 강남에서 왕십리까지의 노드 비지배 경로를 나타낸 것으로 노드 비지배경로의 정의를 만족하는 것은 3개의 경로이다. 여기서 총통행시간이 가장 작은 경로는 2번째인 31.04(분)이고, 환승이 동시간 또한 2번째 경로 0.00(분)으로 나타나 통근자와 이동약자에게 최적의 경로로 추천될 수 있다.

V. 결 론

본 연구에서는 기존 유사 연구들에서 수행되지 못했던 복수의 대중교통수단이 존재하는 교통망에

서 다계층을 포함한 다목적경로탐색을 수행할 수 있는 알고리즘을 제시하였다. 알고리즘을 구축하기 위하여 링크표지로 구축된 비지배경로를 재정의하였으며, 링크경로표지를 갱신하는 방법과 링크경로표지를 노드경로표지로 전환하는 방안이 합리적임을 제시하였다. 또한, 사례연구를 통한 복합대중교통망에서 다계층을 고려한 다목적경로탐색 알고리즘의 계산과정을 통하여 제안된 알고리즘을 검증하였다.

대규모 수도권 도시철도 사례연구를 통하여 실제 계층별의 사용자 맞춤형 정보제공을 위한 활용 측면을 검토한 결과 시스템의 수행도에서도 만족하였고 실제 교통망에 적용 가능한 방안으로 확대될 수 있는 기반도 마련된 것으로 파악된다. 향후 다양한 계층에 적용될 수 있는 국가 대중교통 맞춤형 정보제공 알고리즘으로 적용되기를 기대해 본다.

참고문헌

- [1] E. W. Dijkstra, "A note on two problems in connexion with graphs," *Numerische Mathematik*, vol. 1, pp. 269-271, 1959.
- [2] E. F. Moore, "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, 1959.
- [3] J. C. N. Climaco and E. Q. V. Martins, "A bi-criterion shortest path algorithm," *European J. Operational Research*, vol. 11, pp 399-404, 1982.
- [4] E. Q. V. Martins, "On a multicriteria shortest path problem," *European J. Operational Research*, 16, pp. 236-245, 1984.
- [5] P. Hansen, "Multiple criteria decision making: theory and applications," *Lectures Notes in Economics and in Mathematical Systems*, vol. 177, Springer, Heidelberg, pp. 109-127, 1980.
- [6] H. W. Corley and I. D. Moon, "Shortest path in networks with vector weights," *J. Optimization Theory and Applications*, vol. 46, no. 1, pp. 79-86,

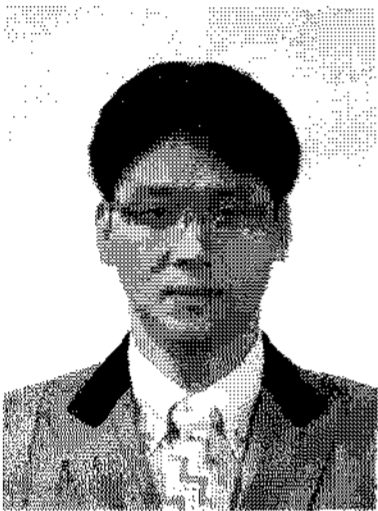
- June 1985.
- [7] K. G. Zografos and G. F. Davis, "Multi-objective programming approach for routing hazardous materials," *J. Transportation Engineering*, vol. 115, pp. 661-673, June 1989.
- [8] J. B. Smith and D. Shoer, "An empirical investigation of some bicriterion shortest path algorithms," *European J. Operational Research*, vol. 43, pp. 216-224, Feb. 1989.
- [9] A. J. V. Skriver, and K. A. Andersen, "A label correcting approach for solving bicriterion shortest-path problems," *Computers & Operations Research*, vol. 27, pp. 507-524, 2000.
- [10] P. Modesti and A. Sciomachen, "An utility measure for finding multi-objective shortest paths in urban multi-modal transportation networks," *European J. Operational Research*, vol. 111, pp. 495-508, Oct. 1998.
- [11] G. Aifandopoulou, A. Ziliaskopoulos, and E. Chrisohoou, "A multi-objective optimum path algorithm for passenger pre-trip planning in multimodal transportation networks," *Transportation Research Board*, Washington, 2006.
- [12] 이미영, 김형철, 박동주, 신성일, "복합대중교통망의 링크표지갱신 다목적 경로탐색," *대한교통학회지*, 제26권, 제1호, pp. 127-136, 2008. 2.
- [13] G. Nam, J. H. Rho, and J. U. Choi, "Development of the tree-based path-finding in urban transportation networks," *Mathl. Comput. Modelling*, vol. 27, no. 9-11, pp. 51-65, April 1998.
- [14] M. Lee, *Transportation network models and algorithms considering directional delay and prohibition for intersection movement*, Ph. D. Dissertation, University of Wisconsin-Madison, 2004.

저자소개



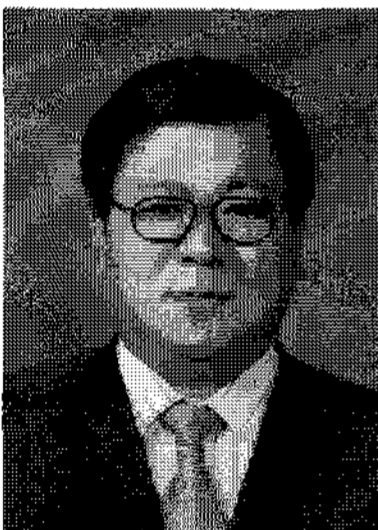
이 미 영 (Lee, Mee-Young)

2004년 2월 : Univ. of Wisconsin-Madison 토목공학과 (공학박사)
2004년 8월 ~ 2006년 7월 : 한국건설기술연구원 박사후 연구과정
2006년 8월 ~ 현재 : 국토연구원 교통연구실 책임연구원



박 재 진 (Park, Je-Jin)

1996년 2월 : 조선대학교 토목공학과 (공학사)
1999년 2월 : 전남대학교 토목공학과 도로/교통공학 전공 (공학석사)
2003년 2월 : 전남대학교 토목공학과 도로/교통공학 전공 (공학박사)
2003년 3월 ~ 2006년 1월 : 전남대학교 공업기술연구소 선임연구원
2006년 2월 ~ 2006년 10월 : 국토연구원 교통연구실 책임연구원
2006년 11월 ~ 현재 : 한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원



정 점 례 (Jeong, Jeom-Rae)

1991년 2월 : 서울대학교 환경대학원 환경계획학과 교통전공 (석사)
1995년 2월 : 서울시립대학교 도시계획학과 교통전공 (박사수료)
2007년 ~ 현재 : 경기대학교 도시·교통공학과 박사과정
2004년 ~ 2006년 : 서울특별시 강남구청 교통개선계획실 실장
2002년 ~ 현재 : (주)동해종합기술공사 대표이사



박 동 주 (Park, Dong-Joo)

1990년 2월 : 한양대학교 도시공학전공 (공학사)
1993년 8월 : 서울대학교 환경계획학과 교통전공 (도시계획학석사)
1998년 12월 : Texas A&M University 교통공학 전공 (공학박사)
2000년 4월 ~ 2002년 7월 : Asian Institute of Technology 토목공학과 조교수
2002년 9월 ~ 2005년 7월 : 공주대학교 건설환경공학부 도시/교통전공 부교수
2005년 8월 ~ 현재 : 서울시립대학교 도시과학대학 교통공학과 부교수