

■ 論 文 ■

거리비례제 요금정책에 따른 K요금경로탐색

Finding the K Least Fare Routes In the Distance-Based Fare Policy

이 미 영

(한국건설기술연구원 선임연구원)

문 병 섭

(한국건설기술연구원 선임연구원)

백 남 철

(한국건설기술연구원 선임연구원)

강 원 의

(한국건설기술연구원 수석연구원)

목 차

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> I. 서론 II. 이론적 배경 <ul style="list-style-type: none"> 1. 단일수단교통망의 최적경로탐색알고리즘 2. 복합교통망의 환승네트워크표현 3. 복합교통망의 최적경로탐색알고리즘 4. 단일수단교통망의 K경로탐색알고리즘 III. 알고리즘 개발 | <ul style="list-style-type: none"> 1. 거리비례제 요금부과방안 2. 복합교통망 표현 3. K요금경로탐색알고리즘 IV. 사례연구 V. 결론 참고문헌 |
|--|---|

Key Words : 다수경로탐색, 요금경로, 복합교통망, 거리비례제, 환승요금, 할증요금, 기본요금, 링크표식

요 약

서울시 대중교통체계개편에서 요금부과방안은 기본적으로 거리비례제에 근거하고 있다. 거리비례제에서 요금은 일정거리까지의 통행에 따른 기본요금과 수단간 환승에서 발생하는 환승요금, 일정거리 이상의 통행에 따른 할증요금으로 구분하여 부과된다. 본 연구는 거리비례제에 따른 요금부과 시 순차적으로 정렬된 K개의 요금경로를 탐색하는 K요금경로탐색알고리즘을 제안한다. 이를 위해 다수의 대중교통수단이 존재하는 복합교통망에서 링크표식기법을 적용하여 네트워크확장이 요구되지 않도록 하였으며, 동일링크를 통행하는 복수의 통행수단을 각각의 개별링크로 처리되도록 구축하였다. 따라서 본 연구에서 제안하는 K요금경로탐색알고리즘은 수단과 관련된 별도의 표식이 요구되지 않으므로 단일수단 교통망에 활용되는 K경로탐색알고리즘이 직접 적용될 수 있다. 본 연구는 또한 출발지에서 수단을 탑승한 이용자에게 요금이 부과되는 과정을 복합교통망에서 나타내기 위하여 출발지를 기준으로 탐색되는 인접된 두 링크에 대해서 기본요금, 환승요금, 할증요금이 계산되어 합산되는 과정을 수식으로 표현하였다. 이 수식을 K개의 원소를 포함하는 재귀벡터형태(Recursive Vector Formula)로 전환하여 K요금경로탐색을 위한 최적식과 알고리즘을 제안하였다. 간단한 사례연구를 통하여 알고리즘 수행과정을 검증하고 향후에 연구진행방향에 대하여 서술하였다.

The transit fare resulted from the renovation of public transit system in Seoul is basically determined based on the distance-based fare policy (DFP). In DFP, the total fare a passenger has to pay for is calculated by the basic-transfer-premium fare decision rule. The fixed amount of the basic fare is first imposed when a passenger get on a mode and it lasts within the basic travel distance. The transfer fare is additionally imposed when a passenger switches from one mode to another and the fare of the latter mode is higher than the former. The premium fare is also imposed if the travel distance begins to exceed the basic travel distance and increases at the proportion of the premium fare distance.

The purpose of this study is to propose an algorithm for finding K number of paths, paths that are sequentially sorted based on total amount of transit fare, under DFP of the distance-based fare policy. For this purpose, the link mode expansion technique is proposed in order to save notations associated with the travel modes. Thus the existing K shortest path algorithms adaptable for uni-modal network analysis are applicable to the analysis for inter-modal transportation networks. An optimality condition for finding the K shortest fare routes is derived and a corresponding algorithm is developed.

The case studies demonstrate that the proposed algorithm may play an important role to provide diverse public transit information considering fare, travel distance, travel time, and number of transfer

1. 서론

서울시 대중교통체계개편 이전의 대중교통요금은 승차 시 매번 요금을 지불하는 것으로 수단이용특성에 관계없이 요금을 부과하여 수익자 부담의 경제원칙에 불합리하다는 비평이 제기되어 왔다. 서울시는 대중교통체계개편 이후의 대중교통요금 부과체계를 거리비례제에 근거하여 시행할 의지를 보이고 있다. 거리비례제는 이용수단에 관계없이 이용한 거리만큼 요금을 부과하는 방안으로 일정거리까지의 통행에 따른 기본요금, 다수의 수단으로 환승 시 이용한 수단 중 가장 비싼 수단요금을 적용하는 환승요금, 기본요금에 해당하는 일정거리 이상의 통행거리에 대한 할증요금을 부과한다. 따라서 지하철과 버스로 구성된 서울시의 복합대중교통망에서 거리비례제는 기본요금, 환승요금, 할증요금을 고려하여 부과되는 것을 원칙으로 한다.

예를 들어(2004, 이미영외), 기본거리가 10Km인 버스와 지하철의 기본요금이 각각 550원과 800원이고, 5Km 마다 할증요금이 100원이 부과된다고 하자. <그림 1>과 같이 이용자가 단일수단의 버스로 15Km를 통행하면 10Km에 해당하는 기본요금 550원과 5Km에 해당하는 할증요금 100원이 합산된 650원이 부과된다. 그리고 <그림 2>와 같이 버스와 지하철의 복합교통수단을 이용하여 22Km를 통행한 경우, 버스탑승 시 10Km에 대한 기본요금 550원과 2Km 추가통행거리에 대한 할증요금 100원이 부과되며, 버스에서 지하철로 환승 시 수단간 서비스수준(요금) 차이에 대한 250원과, 지하철의 추가통행거리 10Km에 대한 할증요금 200원을 합산하여, 총 1100원(550+100+250+200)을 부과하게 된다.

<그림 2>를 대상으로 요금이 높은 수단에서 낮은 수단으로의 환승에 대해 동일한 요금이 계산되는 지 검토하기 위하여, <그림 2>의 두 통행수단의 요금이 역전되

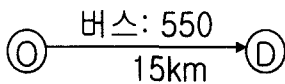
어 버스가 800원이고 지하철이 550원이라고 하자. 이 경우 우선 버스탑승 시 기본요금 800원, 2Km에 대한 추가통행거리에 대한 할증요금 100원, 지하철로 환승 시 수단간 서비스수준(요금)의 차이가 버스요금이 높기 때문에 0원, 지하철 이용에 따른 추가통행거리 10Km에 대한 할증요금 200원으로, 총 1100원(800+100+0+200)원이 부과되어 <그림 2>의 예와 동일한 요금이 계산된다.

거리비례제도의 시행에 따른 요금경로에 대한 정보는 대중교통 이용자뿐만 아니라 대중교통 정책수립에 있어서도 필요하다. 이용자는 통행비용을 줄이기 위하여 출발지와 도착지 간의 시간 경로정보뿐만 아니라 요금에 관련된 경로정보를 필요로 할 수 있다. 또한 향후 대중교통이용정책에서 이용자의 행태를 파악하기 위해서도 요금경로에 대한 예측적인 작업이 요구된다.

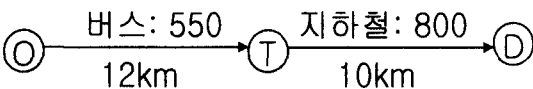
본 연구는 거리비례제 시행에 따라 순차적으로 정렬된 K개의 요금경로를 탐색하는 알고리즘(이하 K요금 경로탐색알고리즘)을 개발하는 것을 목적으로 한다. 다수의 대중교통 이 혼재된 복합교통망(Intermodal Transportation Network)에서 수단의 이용에 따른 기본요금, 환승요금, 할증요금이 적용되는 요금부과과정을 수식으로 제안하고, 제안된 수식을 기반으로 K개의 순차적인 요금경로를 탐색하는 링크표지확정기반 K요금경로탐색알고리즘을 개발한다. 또한 효율적인 컴퓨터의 수행과 교통망 분석을 위하여 환승지점에서 네트워킹의 확장이 요구되지 않고, 동일링크를 통과하는 모든 통행수단을 링크처럼 표현하는 링크표지의 활용방안을 강구한다.

본 연구에서 사용되는 기본 표식(Notations)은 다음과 같으며, 이론설명이 진행되면서 추가로 요구되는 표식은 필요에 따라 새롭게 재 정의 하도록 한다.

- K : 최대 탐색경로 수
- p, q, k : 1부터 K번째까지의 경로 중에서 개별 경로를 나타내는 경로지수
- r, s, i, j : 노드; 특히 r, s 는 각각 출발지와 도착지
- a, b, e : 링크, 특히 e 는 도착지 노드가 출발지 (r)인 가상링크
- n, m : 통행수단
- L : 링크집합



<그림 1> 기종점간 버ست통행



<그림 2> 기종점간 복합교통수단통행

- Q : 탐색링크집합
- N : 노드집합
- M : 탐색노드집합
- Ξ : 네트워크 상에 포함되어 있는 통행수단 집합
- $\Gamma_a^+ (\Gamma_a^-)$: 링크 a 의 도착노드(출발노드)가 시작노드(도착노드)인 링크집합
- $\Gamma_r^+ (\Gamma_r^-)$: 출발지 r 이 시작노드(도착노드)인 링크 집합
- c_a, c_{ij} : 링크 a (i, j)의 거리(Km)
- $c_{a,m}$: 링크 a 를 수단 m 으로 통행 시 통행비용
- d_{ab} : 링크 a 에서 b 로 통행 시 페널티
- d_{ab}^{mn} : 링크 a 를 m 수단으로 통행 중 링크 b 를 n 수단으로 환승 시 환승페널티
- p, k : 1부터 K 까지의 순서, 즉 $p, k = 1, \dots, K$
- π^r : 출발지 r 에서 노드 i 까지 최적경로
- $\boldsymbol{\pi}^r$: 출발지 r 에서 노드 i 까지의 K 개의 최소 비용(요금)벡터 $\boldsymbol{\pi}^r = \{\pi_1^r, \pi_2^r, \dots, \pi_K^r\}$
- π^{ra} : 출발지 r 에서 링크 a 의 도착지점까지의 최적경로
- $\boldsymbol{\pi}^{ra}$: 출발지 r 에서 링크 a 의 도착지점의 K 개의 최소비용(요금)벡터 $\boldsymbol{\pi}^{ra} = \{\pi_1^{ra}, \pi_2^{ra}, \dots, \pi_K^{ra}\}$
- T^{ra} : 출발지 r 에서 링크 a 의 도착지점까지의 최소요금(원)
- D^{ra} : 출발지 r 에서 링크 a 의 도착지점까지의 통행거리(Km)
- \mathbf{D}^{ra} : 출발지 r 에서 링크 a 의 도착지점까지의 K 개의 통행거리벡터 $\mathbf{D}^{ra} = \{D_1^{ra}, D_2^{ra}, \dots, D_K^{ra}\}$
- F_a : 링크(수단) a 를 통행 시 기본요금(원)
- F_a^n : 링크(수단) a 를 n 으로 통행 시 기본요금(원)
- Φ_{ek} : k 번째 경로에서 출발지와 연결된 링크(수단) e 의 기본요금(원)

- M_{More} : 단위거리 당 할증요금; 단위할증요금(원)
- D_{Basic} : 기본요금 적용거리; 기본거리구간(Km)
- D_{More} : 할증요금 적용거리; 단위할증거리(Km)
- θ^{ra} : 출발지 r 에서 링크 a 의 도착지점까지 최적경로에서 요금이 가장 비싼 수단의 기본요금(원)
- $\boldsymbol{\theta}^{ra}$: 출발지 r 에서 링크 a 의 도착지점까지의 K 개의 경로에서 각 경로를 진행하면서 가장 비싼 수단의 기본요금벡터 $\boldsymbol{\theta}^{ra} = \{\theta_1^{ra}, \theta_2^{ra}, \dots, \theta_K^{ra}\}$
- $\vartheta\{\min_k\{\}\}$: K 개의 원소로 구성된 두 벡터에서 K 개의 순차적인 최소값 K 개의 원소를 추출. 예를 들면, $\vartheta\{\min_{k=2}\{[4.5]^T, [3.7]^T\}\} = [3.4]^T$ 으로 두 번째 벡터의 첫 번째 원소인 3과 첫 번째 벡터의 첫 번째 원소인 4가 순차적인 $K(2)$ 개의 값으로 이루어진 벡터로 재구성함
- $\vartheta\{\text{same}_k\{\}\}$: $\vartheta\{\min_k\{\}\}$ 에서 추출된 표지와 동일하게 두 벡터에 적용하여 K 개의 원소를 추출. 예를 들면, 위의 $\vartheta\{\min_k\{\}\}$ 에서 새로운 벡터를 구성하기 사용된 벡터순서를 그대로 적용하면, 두 번째 벡터의 첫 번째 원소 값 7과 첫 번째 벡터의 첫 번째 원소인 4가 $K(2)$ 개의 값으로 이루어진 벡터로 재구성함. $\vartheta\{\text{samk}_{k=2}\{[4.5]^T, [7.6]^T\}\} = [7.4]^T$
- $\xi\{\min_k\{\}\}$: K 개의 원소로 구성된 벡터들에 대하여 k 가 1부터 K 까지 순서대로 진행 될 때, 최소값이 구분되는 벡터를 선택. 예를 들면, $\xi\{\min_{k=2}\{[4, \infty]^T, [4.6]^T, [4, \infty]^T\}\} = [4.6]^T$ (2번째 벡터의 2번째 원소에서 6이 나머지 두 벡터의 2번째 원소인 ∞ 와 비교하여 최소값으로 구분됨)
- $\psi\{\max_k\{\}\}$: K 개의 원소로 구성된 두 벡터에 대하여 k 가 1부터 K 까지 순서대로 진행 될 때 벡터의 k 번째 원소를 비교하여 최대값을 k 번째 원소로 구성된 벡터를 생성. 예를 들면, $\psi\{\max_{k=2}\{[4.6]^T, [3.8]^T\}\} = [4.8]^T$

II. 이론적 배경

본 절에서는 단일수단으로 구성된 교통망과 복합수단으로 구성된 복합교통망에서 적용 가능한 최단경로탐색알고리즘을 개관하고, 복합수단교통망의 표현방안에 대한 내용을 검토한다. 본 연구에서 제시하는 알고리즘은 링크표지확정(Link Label Setting)에 근거하므로 합축적인 서술을 위하여 표지확정기반 최적경로탐색알고리즘(Dijkstra, 1959)에 관계된 내용만을 포함한다.

1. 단일수단교통망의 최적경로탐색알고리즘

초기의 최적경로탐색알고리즘은 교통망에서 단일수단만이 존재한다고 가정한다. 단일수단의 최적경로탐색알고리즘은 최적경로를 탐색하기 위하여 노드표지(Node Label)와 링크표지(Link Label)를 적용하는 방안으로 대별된다.

노드표지를 이용하여 최적경로를 탐색하는 알고리즘은 출발지에서 노드를 탐색하는 과정에서 방문된 노드를 탐색노드집합(M)에 포함하며, 탐색노드의 선정은 M 에 포함된 노드 중에서 출발지에서 비용이 가장 작은 노드를 선택한다. 따라서 알고리즘은 노드 수 만큼 반복하여 각 노드까지의 비용을 계산하고 출발지에서 모든 노드까지 최소비용 경로를 탐색한다. 이 방법은 Dijkstra(1959)에 의해 제안되었다. 알고리즘의 경로탐색과정은 Bellman(1957)의 최적원리(Optimality Principle)에 근거한다. 식(1)은 출발지 r 에서 모든 노드까지의 최단경로비용을 나타내는 최적식(Optimality Equation)을 표현한 것으로 계산과정에서 두 개의 노드(i, j)를 동시에 고려하여 비용을 계산하므로 노드표지에 근거한다.

$$\pi^j = \min\{\pi^i + c_{ij} \mid \forall i \in \Gamma^-(j)\} \quad \forall j \in N \setminus r \quad (1)$$

$$\pi^r = 0$$

이 경우 π^i : 출발지 r 에서 노드 i 까지 최적통행비용

한편, 링크표지를 이용하여 최적경로를 탐색하는 방안은 링크를 노드처럼 활용하는 것이다. 출발지에서 모든 링크까지의 최단경로비용을 계산할 때, 연속된 2개의 링크를 노드처럼 고려하여 도착링크까지의 최단비용 경로를 탐색한다. 이때 탐색링크는 탐색링크집합(Q)

에 포함된 링크 중에서 출발지에서 가장 최소비용을 갖는 링크를 선정하며 알고리즘이 종료하기 위해서는 링크개수만큼의 반복횟수가 필요하다. 식(2)에서 출발지 r 에서 링크 b 의 도착지점-도착노드와는 다른 개념까지 최단경로비용을 계산하기 위해서는 두 개의 인접한 연속링크 a 와 b 를 고려한다. 링크표지는 노드표지와 달리 두 인접링크에서 발생하는 회전비용(d_{ab})을 네트워크의 확장 없이 고려할 수 있다. 또한 최적비용경로 탐색과정에서 노드기반의 원리가 링크기반에도 그대로 적용되므로 최적원리가 만족된다. 이 개념은 Potts & Oliver (1972)에 의해 처음 사용되었다. 링크표지에 의한 최적식은 식(2)와 같다.

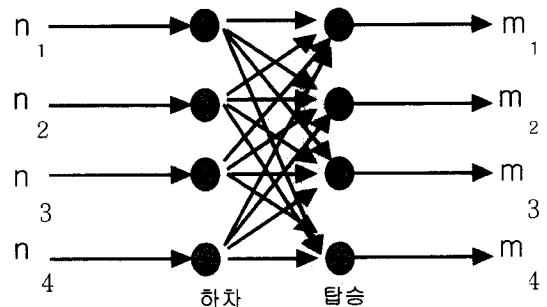
$$\pi^{rb} = \min\{\pi^{ra} + d_{ab} + c_b \mid \forall a \in \Gamma_b^-\} \quad \forall b \in L \setminus \Gamma_r^+ \quad (2)$$

$$\pi^{re} = c_e, \quad \forall e \in \Gamma_r^+$$

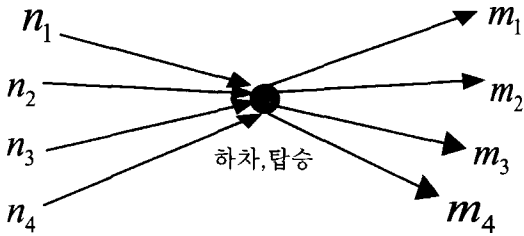
이 경우 π^{rb} : 출발지 r 에서 링크 b 의 도착노드까지 최적통행비용

2. 복합교통망의 환승네트워크표현

복합교통망에서 최적경로탐색알고리즘을 수행하기 위해서는 단일수단 교통망과 비교하여 수단 간의 환승(Transfer)에 대한 추가적인 고려가 필요하다. 환승표현의 경우 노드표지 기반 최적경로탐색알고리즘은 환승노드에서 발생하는 수단간 하차-탑승 행태를 표현하기 위해서 각 수단에 대한 모든 연결링크를 가상적으로 확대하는 방안이 주로 이용되었다. <그림 3>은 환승노드에서 발생하는 수단간 연결가능성을 모두 표시한 것이다. 4개의 수단간 환승요금을 고려하기 위해서는 8개의 가상노드와 16개의 가상의 환승링크가 필요하다.



<그림 3> 환승노드 및 수단링크의 확장 (노드기반)



(그림 4) 수단링크의 확장 (링크기반)

한편 링크표지기반 최적경로탐색알고리즘으로 네트워크를 구성하게 되면, (그림 4)에서 나타난 바와 같이 노드표지기반 최적경로탐색알고리즘과 같이 환승지점에서 네트워크를 확장하는 것이 필요하지 않다. 즉 하나의 노드에서 다수의 수단간 하차와 탑승행태가 완성된다. 이것은 식(2)에서처럼 2개의 인접링크(a와 b)에서 발생하는 회전비용 (d_{ab})을 최적경로탐색알고리즘에서 추가적인 네트워크의 확장 없이 고려할 수 있기 때문이다.

3. 복합교통망의 최적경로탐색알고리즘

복합교통망은 다수의 교통수단이 함께 존재하는 교통망이다. 복합교통망에서 최적경로의 탐색을 위해 노드기반알고리즘을 적용하면 최적원리가 만족되지 않는다. (김현명 & 임용택 (2000)). 복합교통망은 복수의 교통수단이 운영되므로 환승 시 환승이동 및 대기시간과 같은 환승페널티(Transfer Penalty)이 고려되어야 하며, 이 경우 최단경로 탐색 시 최적 해를 탐색하지 못할 가능성이 존재한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 기존의 여러 연구에서 교통망 확장(De Cea & Fernandez, 1989)하거나 확률적 방법(Tong & Richardson, 1984)을 이용하였으나 알고리즘의 비효율성을 증가시키거나 추가적인 계산비용을 요구하게 되었다.

이를 해결하기 하나의 대안책은 최적경로탐색알고리즘에 링크표지를 활용하는 것이다. 링크표지를 이용하게 되면 두 수단간 발생하는 환승비용을 네트워크 확장없이 회전지체(d_{ab}^{mn})처럼 고려할 수 있으므로 네트워크를 단순화하여 표현할 수 있으며 이는 계산비용의 감소와도 직접적으로 연결된다. 김현명 외(1999)는 복합교통망에서 환승비용을 고려하여 통행배정모형에 적용하기 위하여 링크표지기반 최적경로탐색알고리즘을 활용하였다.

장인성(2000)은 통합교통망에서 수단간 환승 시 발생하는 각기 다른 환승시간을 고려하기 위하여 링크표지기반 최적경로탐색알고리즘을 적용하였다. Ziliaskopoulos & Wardell (2000)은 시간종속적(Time Dependent) 복합교통망에서 환승지체(Switching Delay Time)를 고려하기 위하여 유사한 개념의 알고리즘을 개발하였다. 식(3)은 링크기반에 근거한 복수교통망에서 최적경로를 탐색하는 최적식을 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} \pi_n^{rb} &= \min \{ \pi_m^{ra} + d_{ab}^{mn} + c_b^n \mid \forall a \in \Gamma_b^-, \forall m \in \Xi \} \\ &\quad \forall b \in L \setminus \Gamma_r^+; \forall n \in \Xi \\ \pi_n^{re} &= c_e^n, \forall e \in \Gamma_r^+; \forall n \in \Xi \end{aligned} \quad (3)$$

이 경우 π_n^{rb} : 출발지 r에서 링크b까지 수단n을 이용하여 도달한 최적통행비용

4. 단일수단교통망의 K경로탐색알고리즘

단일수단교통망에서 K경로탐색알고리즘은 순차적으로 정렬된 K개의 경로를 탐색한다. 기존에 제안된 노드표지기반 K경로탐색알고리즘은 크게 2가지로서 대별된다: 첫째는 기존의 표지확정방법을 활용하는 방안이고, 두 번째는 네트워크의 변형을 통해 경로를 탐색하는 방안이다. 두 기법의 차이는 전자는 K개의 경로를 동시에 탐색하는 알고리즘을 적용하는 방식(Shier, 1979; Pollack, 1961; Bellman & Kalaba, 1968)으로 단일(모든)기점과 모든(단일)종점(One-to-All 또는 All-to-One) 탐색방식 이고, 후자는 k번째 경로탐색 시 최적경로탐색알고리즘을 적용하기 위하여 네트워크를 확장(Martins, 1984; Avezedo et al. 1993) 또는 부분적인 삭제(Yen, 1971)를 추구하는 방식으로 단일 기점과 종점(One-to-One)에 근거해서 경로를 탐색한다.

K개의 경로를 탐색하기 위하여 링크표지확정 K경로탐색알고리즘은 Lee(2004)에 의하여 처음 시도되었다. Lee(2004)는 링크표지 최적경로에서 교차지점에서 네트워크의 확장이 요구되지 않도록 Shier(1979)와 Yen(1971)이 제안한 알고리즘을 발전시켰다. 링크표지기반 K경로탐색알고리즘의 최적식은 식(4)와 같이 표현이 가능하다. K개의 링크표지를 동시에 고려하기 위하여 최적식에 K개의 원소(scalar)를 갖는 두 벡터 π^{rb} 와 Π^{ab} 를 도입하였으며, 네트워크의 확장이 요구

되지 않도록 회전비용(d_{ab})가 식(4)에 반영되었다.

$$\begin{aligned} \pi^{rb} &= \vartheta \left\{ \min_K \left\{ \Pi^{rab} \mid \forall a \in \Gamma_b^-, \forall b \in L \setminus \Gamma_r^+ \right\} \right\} \\ \pi^{ra} &= \{c_r, \infty, \dots, \infty\}, \forall e \in \Gamma_r^+ \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{이 경우 } \Pi^{rab} = \begin{bmatrix} \pi_1^{ra} + d_{ab} + c_b \\ \pi_2^{ra} + d_{ab} + c_b \\ \vdots \\ \pi_K^{ra} + d_{ab} + c_b \end{bmatrix}$$

이 경우

π^{rb} : 출발지 r 에서 링크 b 까지 K 개의 순차적인 비용을 갖는 경로비용벡터 $[\pi^{rb}]^T = \{\pi_1^{ra}, \pi_2^{ra}, \dots, \pi_K^{ra}\}$

복합교통망에서 K 경로탐색알고리즘에 대한 연구는 아직 미진한 바, 알려진 예가 극히 드물다. 일반적인 개념으로 이에 대한 최적식을 구성하면 식(5)와 같은 구성이 가능하다. K 개의 링크표지를 각 수단에 따라 동시에 고려하기 위하여 최적식에 모든 수단(n, m)과 관계된 표식이 포함되며, 각 수단(n)에 대해서 K 개의 원소(scalar)를 갖도록 두 벡터 π_n^{rb} 와 Π_{mn}^{rab} 를 도입되었고, 수단 간의 환승을 고려하기 위하여 네트워크의 확장이 요구되지 않도록 환승비용(d_{ab}^{mn})이 식(5)에 반영되었다.

$$\begin{aligned} \pi_n^{rb} &= \vartheta \left\{ \min_K \left\{ \Pi_{mn}^{rab} \mid \forall a \in \Gamma_b^-, \forall m \in \Xi \right\} \right\} \\ \forall b \in L \setminus \Gamma_r^+; \forall n \in \Xi \\ \pi_n^{ra} &= \{c_r, \infty, \dots, \infty\}, \forall e \in \Gamma_r^+; \forall n \in \Xi \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{이 경우 } \Pi_{mn}^{rab} = \begin{bmatrix} \pi_{m1}^{ra} + d_{ab}^{mn} + c_b^n \\ \pi_{m2}^{ra} + d_{ab}^{mn} + c_b^n \\ \vdots \\ \pi_{mK}^{ra} + d_{ab}^{mn} + c_b^n \end{bmatrix}$$

이 경우

π_n^{rb} : 출발지 r 에서 링크 b 까지 수단 n 을 이용하여 통행한 K 개의 순차적인 비용을 원소로 하는 통행비용벡터 $[\pi_n^{rb}]^T = \{\pi_{n1}^{rb}, \pi_{n2}^{rb}, \dots, \pi_{nK}^{rb}\}$

III. 알고리즘 개발

본 절에서 출발지를 기준으로 인접된 두 링크에 대하여 요금부과방안에 대한 식을 개발하고, 복합교통망

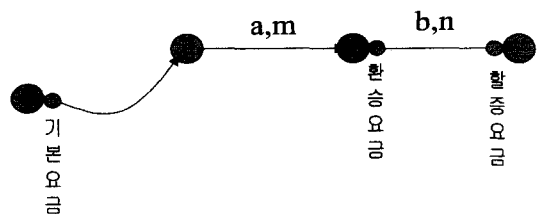
에 적용 가능한 링크표지 기반 K 요금경로탐색알고리즘 제한한다. 계산을 단순화 하기 위하여 복합교통망에서 동일링크에 통행하는 모든 통행수단이 확장된 링크로 처리하는 방안을 적용하여 수단에 대한 별도의 표식이 K 요금경로탐색알고리즘에 필요하지 않도록 한다.

1. 거리비례제 요금부과방안

거리비례제에 따른 요금부과는 크게 세 가지-기본요금, 환승요금, 할증요금-로 구분된다. <그림 5>는 출발지에서 임의의 링크 b 까지 최소요금을 계산하기 위하여 두 링크(a, b)간의 관계를 나타낸 것이다. 출발지에서 링크 a 의 도착지점까지의 서비스수단이 m 이면, 링크 a 의 도착지점까지 요금은 수단 m 을 기준으로 탑승시 기본요금이 적용된다. 링크 a 에서 링크 b 로 통행하기 위하여 수단 n 으로 환승하는 경우 수단 n 의 기본요금이 수단 m 보다 낮을 경우 환승요금은 부과되지 않으나, 수단 n 의 기본요금이 수단 m 보다 높을 경우 요금차이 만큼의 환승요금을 부과된다. 그리고 출발지 r 에서 링크 b 까지 거리에서 기본거리를 이상의 추가통행거리에 따라 할증요금을 부과한다.

식(6)은 위의 요금계산 과정을 수식으로 표현한 것으로 요금부과과정을 나타내는 3가지 부분으로 구성되어 있다. 출발지에서 링크 b 의 도착지점까지 요금을 계산하기 위해서는: 1) 출발지에서 처음 탑승한 수단의 기본요금 F_r , 2) 수단간 요금수준을 비교하여 수단의 요금차이에 따른 $\max[F_b - \theta^m, 0]$ 의 환승요금, 3) 링크 b 까지 통행한 추가통행거리($D^{rn} + c_b - D_{Basic}$)에 대한 할증요금을 합산하여 계산하게 된다.

할증요금이 계산되는 경우는 아래와 같이 실제통행거리($D^{rn} + c_b$)가 기본요금 통행거리(D_{Basic})와 비교하여 큰 때인데, 이때 계산과정에서 $\chi, \varepsilon, \Gamma$ 를 도입한 이유는 할증요금이 계산되는 경계지점에서 정확한 계산



<그림 5> 기본, 환승, 할증요금의 부과과정

과정을 나타내기 위해서다. 예를 들어 ϵ 가 없고 Γ 만 존재하면, $D^m + c_b$ 이 D_{Basic} 과 동일하다면 기본요금으로 포함되어, 할증요금은 0가 되어야 하나, χ 는 1이 되어 100원의 할증요금을 부과하게 된다. 또한 Γ 이 없고 ϵ 만 존재하거나 Γ 과 ϵ 이 함께 존재하지 않는 경우는 할증구간에서 한 단계 낮은 할증요금($-1 * D_{More}$)을 부과된다.

$$T^{rb} = \{F_e + \max[F_b - \theta r^a, 0] + F_{More} \cdot [\text{int}](\chi) \mid a \in \Gamma_b^-, e \in \Gamma_r^+, r; \forall b\} \quad (6)$$

$$\text{이 경우 } \chi = \left(\frac{\max[D^m + c_b - D_{Basic}, 0]}{D_{More}} - \epsilon \right) + \Gamma$$

ϵ : 아주 작은 실수(예를 들면, 0.0001)

$\Gamma = 1$

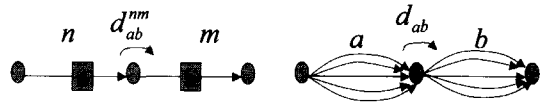
$[\text{int}]$ 는 실수의 정수부분(integer)

식(6)을 검증하기 위하여 서론에서 제시한 <그림 2>에서 예시된 복합교통망에서의 요금부과과정을 적용하여 보면 아래와 같다. 우선 버스의 기본요금 550원이 탑승과 함께 부과되며, 버스에서 지하철로의 환승 시 버스와 지하철의 기본요금 차액인 250원이 추가로 부과되며, 할증구간 12Km에 대한 300원의 요금이 더해져서 총 1100원의 요금이 계산되며, 이는 <그림 2>에서 산출된 요금액수와 동일한 값이다.

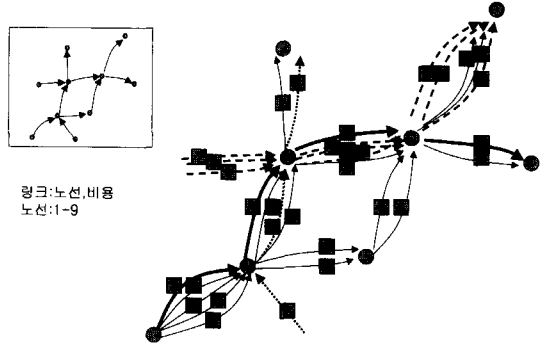
$$T^{rb} = \left\{ 550 + \max[800 - 550, 0] + 100 \cdot [\text{int}] \left(\frac{\max[2 + 10 - 10, 0]}{5} - 0.001 \right) + 1 \right\} = \{550 + 250 + 300\} = 1100$$

2. 복합교통망 표현

동일링크를 통행하는 복수수단을 표현하기 위한 본 연구에서 추구하는 방법은 동일링크에 통행하는 모든 수단을 링크로 처리하는 방안이다. 이 방법이 적용되면, 복합교통망에서는 출발노드와 도착노드가 동일하나 링크의 속성이 다른 복수의 링크를 포함하게 된다. 이 방법은 링크의 수가 노선 수에 비례하는 증가되는 단점이 있으나 수단의 특성이 링크로 반영되고 수단간 환승을 고려할 경우 수단 및 노선 특성에 따른 다각도의 분



<그림 6> 수단(n, m)의 환승요금 반영 및 동일링크에서 수단 확장



<그림 7> 복합교통망의 확장네트워크 예

석이가 가능하다는 장점이 있다(De Cea & Fernández, 1993). 또한 수단이 링크로 표현되었으므로 기존의 복합교통망에서 활용되고 있는 링크표지 기반 K경로탐색 알고리즘(Lee, 2004)을 적용하여 환승에 대한 처리가 용이하다. <그림 6>은 두 인접링크(a, b)를 통행하는 수단(m, n)에서 발생하는 환승비용(d_{ab}^{nm})을 수단링크확장을 통하여 수단이 제외된(d_{ab})로 단순화하여 고려되고 있음을 나타내고 있다. <그림 7>은 4개의 환승노드와 10개 링크로 구성된 네트워크를 9개 통행수단이 나타나도록 31개 링크로 확장한 예를 나타내고 있다.

동일링크에서 복수의 수단이 확장된 복합교통망을 표현하기 위하여 기존의 단일링크에 존재하는 모든 수단이 링크처럼 처리되므로 이에 대한 고려가 필요하다. 확장네트워크에서 집합에 대한 표식을 재정의하면 다음과 같다.

L^{Ξ} : 링크확장네트워크에서의 링크집합

N^{Ξ} : 링크확장네트워크에서의 노드집합

$G(L^{\Xi}, N^{\Xi})$: L^{Ξ}, N^{Ξ} 로 구성된 교통망

$\Gamma_a^{\Xi+} (\Gamma_a^{\Xi-})$: $G(L^{\Xi}, N^{\Xi})$ 에서 a의 도착(출발노드)가 시작(도착노드)인 링크집합

$\Gamma_r^{\Xi+} (\Gamma_r^{\Xi-})$: $G(L^{\Xi}, N^{\Xi})$ 에서 출발지r이 시작(도착노드)인 링크집합

식(7)은 식(6)의 복합교통망에서 K경로탐색알고리즘에 대한 최적식을 수단이 링크로 확장된 네트워크를

기반으로 재 표현된 것이다. 식(6)에서는 수단에 따른 표식이 따로 존재하였으나, 식(7)은 수단이 링크로 표시되었으므로, 모든 링크에 통과하는 각 수단이 단일의 링크로 처리된 네트워크로 변형이 가능하다. 따라서 단일수단의 교통망에서와 같이 최적식의 적용이 가능하며, 단지 다른 점은 네트워크에서 링크와 노드집합이 다르게 표현되었다는 것이다. 이를 기반으로 본 연구에서 제안하는 K요금경로탐색알고리즘은 식(7)의 최적식을 기반으로 표현된 단일수단 만이 존재하는 링크로 구성된 교통망이다.

$$\pi^{rb} = \vartheta \{ \min_{\mathbf{k}} \{ \Pi^{rab} \mid \forall a \in \Gamma_b^{\Xi-} \} \} \forall b \in L^{\Xi} \setminus \Gamma_r^{\Xi+}$$

$$\pi^{re} = \{ F_e, \infty, \dots, \infty \}, \forall e \in \Gamma_r^{\Xi+} \quad (7)$$

이 경우 $\Pi^{rab} = \begin{pmatrix} \pi_1^{ra} + d_{ab} + c_b \\ \pi_2^{ra} + d_{ab} + c_b \\ \vdots \\ \pi_k^{ra} + d_{ab} + c_b \end{pmatrix}$

이 경우

π^{rb} : 출발지 r에서 링크b까지 K개의 순차적인 비용을 갖는 경로비용벡터 $[\pi^{ra}]^T = \{ \pi_1^{ra}, \pi_2^{ra}, \dots, \pi_k^{ra} \}$

3. K요금경로 탐색알고리즘

식(6)에서 3단계 요금부과 계산과정을 식(7)의 단일수단으로 재 표현된 교통망에 대해서 최적식으로 표현하면 식(8)과 같다. 식(8)에서는 k번째 ($\leq K$) 요금 계산 과정이 3가지 부분으로 구성되어 있다. 출발지 r에서 링크b의 도착지점까지 k번째 경로의 요금을 계산하기 위해서는:

- 1) 경로k를 구성하는 출발지와 연결된 링크(수단)의 기본요금 Φ_k
- 2) k번째 경로의 수단(링크) 요금수준을 비교하여 도착링크(수단)와 출발링크(수단)의 요금차이에 따른 $\max[F_b - \theta_k^{ra}, 0]$ 차이 값이 환승요금
- 3) k번째 경로의 링크(수단) b의 도착지점까지 통행한 거리에서 기본거리 구간이상 ($D_k^{ra} + c_b - D_{Basic}$)에 대한 할증요금을 합하여 계산하게 된다

이때 k번째 경로에서 할증요금의 가산되는 경우는 통행거리($D_k^{ra} + c_b$)가 기본요금구간거리(D_{Basic})와 비

교하여 큰 때인데, 최적요금경로 산정식(6)과 동일하게 계산과정에서 $\chi_k, \varepsilon, \Gamma$ 의 도입은 할증요금이 계산되는 경계지점에서 정확한 계산을 유도한다.

$$\pi^{rb} = \vartheta \{ \min_{\mathbf{k}} \{ \Omega^{rab} \mid \forall a \in \Gamma_b^{\Xi-} \} \} \forall b \in L^{\Xi} \setminus \Gamma_r^{\Xi+}$$

$$\pi^{re} = \{ F_e, \infty, \dots, \infty \}, e \in \Gamma_r^{\Xi+} \quad (8)$$

이 경우 $\Omega^{rab} = \begin{pmatrix} \Phi_1 + \max[F_b - \theta_1^{ra}, 0] + F_{More} \cdot [\text{int}](\chi_1) \\ \Phi_2 + \max[F_b - \theta_2^{ra}, 0] + F_{More} \cdot [\text{int}](\chi_2) \\ \vdots \\ \Phi_k + \max[F_b - \theta_k^{ra}, 0] + F_{More} \cdot [\text{int}](\chi_k) \end{pmatrix}$

$$\chi_k = \left(\frac{\max[D_k^{ra} + c_b - D_{Basic}, 0]}{D_{More}} - \varepsilon \right) + \Gamma$$

이 경우

π^{rb} : 출발지 r에서 링크b까지 K개의 순차적인 요금을 갖는 요금비용벡터 $[\pi^{ra}]^T = \{ \pi_1^{ra}, \pi_2^{ra}, \dots, \pi_k^{ra} \}$

최적식(8)을 K요금경로탐색알고리즘으로 나타내면 아래와 같다. 식(8)에서 제시된 3단계 요금부과과정을 기준으로 설명하여 보면, Step1의 초기화에서 출발지와 연결된 링크e에 대해 F_e 의 기본요금이 부과된다. 이때 링크e가 기본거리 이상을 초과할 경우가 존재할 수 있으나, 출발지 다음 정류지점이 기본거리 이상을 초과한다는 개념은 현실적이지 않으므로 할증요금은 부과되지 않는다는 가정을 포함한다. Step2는 링크표지 확정 K경로알고리즘의 링크탐색과정과 동일한 해석을 포함하고 있다(Lee, 2004). 다음탐색링크는 출발지에서 탐색링크집합(Q)에 포함된 링크 중 요금벡터 중에서 원소의 값이 가장 적은 k번째가 구분되는 링크를 다음탐색링크로 선택하며($\xi\{\min\{\}\}$), Q가 공집합이면 알고리즘은 종료하게 되며, 링크의 도착지점으로 부과된 요금 값을 K개의 노드로 표현된 요금으로 나타내기 위하여 링크표지벡터를 노드표지벡터로 전환하는 과정을 수행한다. Step3에서는 출발지로부터 멀어져 있는 상황이므로 k번째 경로에 대하여 환승요금과 할증요금을 부과하는 계산 식이 포함되며 이때 기본요금에 대해서는 고려하지 않는다.

요금을 계산하기 위해서는 각 경로별로 출발지에서 각 링크까지의 통행거리와 이용한 수단 중에서 가장 비싼 요금도 알고리즘 상에서 관리되어야 하므로, 요금합수 $\vartheta\{\min_{\mathbf{k}}\{\}\}$ 에서 적용된 표지의 변경순서가 $\vartheta\{\text{same}_{\mathbf{k}}\{\}\}$

에 의해 거리벡터의 계산(D^{rb})에도 동일하게 적용되며, $\Psi\{\max_k\}$ 에 의해 최대서비스수단 요금벡터(θ^{rb})도 계산된다.

[Step 1] 초기화

$$\pi^{ra} : \{\infty, \infty, \dots, \infty\}, r; \forall a \in \Gamma^{\pm}$$

$$Q : \{\}$$

$$D^{ra} : \{c_r, 0, \dots, 0\}, r; \forall e \in \Gamma_r^{\pm}$$

$$\theta^{ra} : \{F_r, 0, \dots, 0\}, r; \forall e \in \Gamma_r^{\pm}$$

$$\pi^{re} : \{F_r, \infty, \dots, \infty\}, r; \otimes \in \Gamma_r^{\pm}$$

$$Q : Q \cup \{e\}, \forall e \in \Gamma_r^{\pm}$$

[Step 2] 다음탐색링크결정

$$\text{If } (Q = \{\}) : \pi^{ri} = \vartheta \{ \min_k \{ \pi^{ra} \mid \forall a \in \Gamma_i^{\pm} \} \}; r; \forall i \in N^{\pm}$$

$$\text{Else} : \xi \{ \min \{ \pi^{ra} \mid \forall a \in Q \} \} \text{에 의해 } a \text{ 선정}$$

$$Q = Q - \{a\}, \forall a \in Q$$

[Step 3] 다음링크($a \rightarrow b$)로 탐색확장

$$\text{If } (Q_i^{ab} < \pi_k^{rb}, \forall a \in \Gamma_b^{\pm}) :$$

$$\pi^{rb} = \vartheta \{ \min_k \{ Q_i^{ab}, \pi^{rb} \mid a \in \Gamma_b^{\pm} \} \}$$

$$D^{rb} = \vartheta \{ \text{same}_k \{ D^{ra} + [c_b]^T, D^{rb} \mid a \in \Gamma_b^{\pm} \} \}$$

$$\theta^{rb} = \Psi \{ \max_k \{ \theta^{ra}, [F_b]^T \mid a \in \Gamma_b^{\pm} \} \}$$

$$\text{이 경우 } [c_b]^T = [c_b, c_b, \dots, c_b]$$

$$[F_b]^T = [F_b, F_b, \dots, F_b]$$

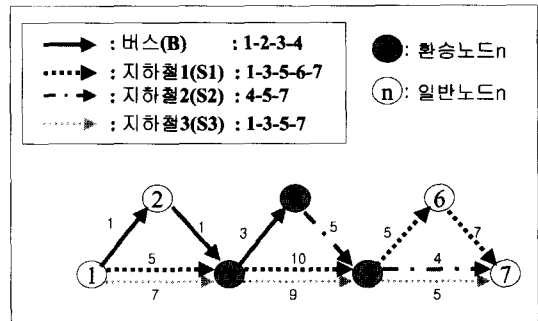
$$Q = Q \cup \{b\}$$

Goto Step 2

Else : Goto Step 2

IV. 사례연구

제안된 알고리즘을 검증하기 위해 간단한 복합교통망을 구축, 알고리즘의 수행과정을 검토한다. 적용된 네트워크는 <그림 8>에서 7개의 노드와 12개의 수단이 개별링크로 처리되어 있다. 네트워크에는 1개의 버스와 3개의 지하철 노선인 총 4개의 수단이 운행되고 있다. 각 수단을 연결하는 환승지점은 노드 3, 4, 5이고, 링크 상에 거리가 Km단위로 표시되어 있다. 버스와 지하철의 기본요금은 각각 600원과 800원이다. 각 수단의 기본통행거리와 할증거리는 각각 12Km와 6Km이다. 본 사례연구에서는 출발지1에서 도착지7까지 제안된 링크표지기반 K요금경로탐색알고리즘을 수행하여 탐색된 K개의 경로별로 기본요금, 환승요금, 할증요금, 통행거리, 환승횟수 등을 관찰하여 설명하는 것이다.



<그림 8> 적용된 복합교통망

본 알고리즘에서 부과한 제약조건에서 출발지에서 도착지점까지 도달하기 위하여 동일한 수단은 한번만 이용한다는 제약을 포함하였는바(Viable Path: Lozano & Storchi, 2001; Lozano & Storchi, 2002), 단일의 경로를 구성하기 위하여 동일한 수단을 복수로 이용하는 통행태는 현실교통망에서는 존재하지 않는다.

우선 경로수를 증가시켜(K=30) 최대가능경로를 탐색한 결과는 <표 1>와 같이 총 23개의 경로가 탐색되었다. 탐색된 경로의 요금을 살펴보면 최소요금인 900원으로 시작하여, 10번째 경로에서 1000원, 20번째 경로에서 1100원으로, 최소요금경로와 최대요금경로는 200원이 차이를 보이고 있다. 각 경로를 표현한 노드 순서와 이용된 통행수단에서 나타나듯이 출발지에서 단

<표 1> 출발지(1)에서 도착지(7)까지의 총 경로탐색

반복	요금 (원)	거리 (Km)	환승 회수	(도착지<-출발지) 순서의 경로
1	900	16	2	7-(S2)-5-(S1)-3-(B)-2-(B)-1
2	900	15	2	7-(S2)-5-(S3)-3-(B)-2-(B)-1
3	900	18	2	7-(S2)-5-(S3)-3-(S1)-1
4	900	14	1	7-(S2)-5-(S2)-4-(B)-3-(B)-1
5	900	17	2	7-(S2)-5-(S2)-4-(B)-3-(S1)-1
6	900	17	2	7-(S3)-5-(S1)-3-(B)-2-(B)-1
7	900	16	1	7-(S3)-5-(S3)-3-(B)-2-(B)-1
8	900	15	2	7-(S3)-5-(S2)-4-(B)-3-(B)-2-(B)-1
9	900	18	3	7-(S3)-5-(S2)-4-(B)-3-(S1)-1
10	1000	19	1	7-(S2)-5-(S1)-3-(S1)-1
11	1000	21	2	7-(S2)-5-(S1)-3-(S3)-1
12	1000	20	1	7-(S2)-5-(S3)-3-(S3)-1
13	1000	19	2	7-(S2)-5-(S2)-4-(B)-3-(S3)-1
14	1000	20	1	7-(S3)-5-(S1)-3-(S1)-1
15	1000	19	1	7-(S3)-5-(S3)-3-(S1)-1
16	1000	21	0	7-(S3)-5-(S3)-3-(S3)-1
17	1000	24	1	7-(S1)-6-(S1)-5-(S1)-3-(B)-2-(B)-1
18	1000	23	2	7-(S1)-6-(S1)-5-(S3)-3-(B)-2-(B)-1
19	1000	22	2	7-(S1)-6-(S1)-5-(S2)-4-(B)-3-(B)-2-(B)-1
20	1100	27	0	7-(S1)-6-(S1)-5-(S1)-3-(S1)-1
21	1100	29	1	7-(S1)-6-(S1)-5-(S1)-3-(S3)-1
22	1100	28	1	7-(S1)-6-(S1)-5-(S3)-3-(S3)-1
23	1100	27	3	7-(S1)-6-(S1)-5-(S2)-4-(B)-3-(S3)-1

B: 버스; S1:지하철1; S2:지하철2; S3:지하철3.
j-(S1)-i : 링크 (i,j)를 수단 S1을 이용하여 통행.

〈표 2〉 환승제약 1회와 K=2의 경로탐색과정

반복	전링크		다음링크		기본요금부과 (백원)	환승요금부과 (백원)	할증요금부과 (백원)	총부과요금 (백원)	통행거리 (Km)
	탐색링크	수단	탐색링크	수단					
0			1 → 2	B	(6.0)	(0.0)	(0.0)	(6.X)	(1.0)
			1 → 3	S1	(8.0)	(0.0)	(0.0)	(8.X)	(5.0)
			1 → 3	S3	(8.0)	(0.0)	(0.0)	(8.X)	(7.0)
1	1 → 2	B	1 → 3	S1	(8.0)	(0.0)	(0.0)	(8.X)	(5.0)
			1 → 3	S3	(8.0)	(0.0)	(0.0)	(8.X)	(7.0)
			2 → 3	B	(0.0)	(0.0)	(0.0)	(6.X)	(2.0)
2	2 → 3	B	1 → 3	S1	(8.0)	(0.0)	(0.0)	(8.X)	(5.0)
			1 → 3	S3	(8.0)	(0.0)	(0.0)	(8.X)	(7.0)
			3 → 4	B	(0.0)	(0.0)	(0.0) (0.0)	(6.X)	(5.0)
			3 → 5	S1	(0.0)	(2.0)	(0.0) (0.0)	(8.X)	(12.0)
3	3 → 4	B	3 → 5	S3	(0.0)	(2.0)	(0.0) (0.0)	(8.X)	(11.0)
			4 → 5	S2	(0.0)	(2.0)	(0.0)	(8.X)	(10.0)
			1 → 3	S3	(8.0)	(0.0)	(0.0)	(8.X)	(7.0)
4	1 → 3	S1	1 → 3	S3	(8.0)	(0.0)	(0.0)	(8.X)	(7.0)
			4 → 5	S2	(0.0)	(0.0)	(0.0)	(8.X)	(10.0)
			3 → 4	B	(0.0)	(0.0)	(2.0) (0.0)	(6.8)	(5.8)
			3 → 5	S1	(0.0)	(0.0)	(2.0) (2.0)	(8.9)	(12.15)
5	3 → 4	B	3 → 5	S3	(0.0)	(0.0)	(0.0)	(8.9)	(11.14)
			3 → 5	S1	(0.0)	(2.0)	(0.1)	(8.9)	(12.15)
			3 → 5	S3	(0.0)	(2.0)	(0.1)	(8.9)	(11.14)
6	3 → 5	S1	1 → 3	S3	(8.0)	(0.0)	(0.0)	(8.X)	(7.0)
			4 → 5	S2	(0.0)	(2.0)	(0.0)	(8.X)	(10.0)
			3 → 5	S3	(0.0)	(2.0)	(0.1)	(8.9)	(11.14)
			5 → 6	S1	(0.0)	(0.0)	(1.1)	(9.10)	(17.20)
			5 → 7	S2	(0.0)	(0.0)	(1.0)	(10.X)	(19.0)
7	3 → 5	S3	5 → 7	S3	(0.0)	(0.0)	(1.0)	(10.X)	(19.0)
			5 → 7	S1	(0.0)	(0.0)	(1.1)	(9.10)	(17.20)
			5 → 7	S2	(0.0)	(0.0)	(1.0)	(10.X)	(19.0)
			5 → 7	S3	(0.0)	(0.0)	(1.1)	(9.10)	(16.20)
8	1 → 3	S3	4 → 5	S2	(0.0)	(2.0)	(0.0)	(8.X)	(10.0)
			5 → 6	S1	(0.0)	(0.0)	(1.1)	(9.10)	(17.20)
			5 → 7	S2	(0.0)	(0.0)	(1.0)	(10.X)	(19.0)
			5 → 7	S3	(0.0)	(0.0)	(1.1)	(9.10)	(16.20)
9	4 → 5	S2	5 → 6	S1	(0.0)	(0.0)	(1.1)	(9.10)	(17.20)
			5 → 7*	S3	(0.0)	(0.0)	(1.1)	(9.10)	(16.20)
			5 → 7**	S2	(0.0)	(0.0)	(1.1)	(9.10)	(14.19)
10	5 → 6	S1	5 → 7	S3	(0.0)	(0.0)	(1.1)	(9.10)	(16.20)
			5 → 7	S2	(0.0)	(0.0)	(1.1)	(9.10)	(14.19)
			6 → 7	S1	(0.0)	(0.0)	(1.1)	(10.11)	(24.27)
11	5 → 7	S3	5 → 7	S2	(0.0)	(0.0)	(1.1)	(9.10)	(14.19)
			6 → 7	S1	(0.0)	(0.0)	(1.1)	(10.11)	(24.27)
12	5 → 7	S2	6 → 7	S1	(0.0)	(0.0)	(1.1)	(10.11)	(24.27)
13	6 → 7	S1	-	-	-	-	-	-	-

X: 무한대 요금. *: K=1경로. **: K=2경로.

(x,y) : 첫 번째 경로의 요금이 x이고 두 번째 경로의 요금이 y인 탐색링크.

일수단 만을 이용하여 목적지에 도달한 경우는 2개의 경로($k=16, 20$)이며 최대 3번의 환승을 통하여 목적지에 도달한 경로도 2개가 존재한다($k=9, 23$).

또한 경로1과 4와 같이 동일한 요금900원이 부과되었으나, 경로1의 순위가 높음에도 불구하고 경로1의 이동거리는 16Km로 경로4의 이동거리 14Km보다 장거리를 통행한 것으로 나타난다. 이러한 예는 요금을 기준으로 경로의 순서가 결정되나, 환승 등에 의한 수단이용의 특성이 반영되면 거리에 따른 요금관계가 선형으로 나타나지 않을 수 있음을 반영하는 것이다.

〈표 2〉는 링크표지기반 K요금경로탐색알고리즘의 수행과정을 평가하기 위하여 환승회수를 1회 이하 $K=2$ 의 제약조건을 부과하여, 기본요금, 환승요금, 할증요금의 부과과정을 알고리즘의 탐색과정과 함께 나타낸 결과이다. 알고리즘은 총14회의 반복계산과정을 마치고 수렴하였다. 반복0(Step1)에서 3개의 링크(수단)는 탐색과정이므로 버스는 600원 지하철은 800원이 각각 부과되었다. 반복회수 1부터 13회까지는 출발지에서 멀어지고 있는 상태이므로(Step3) 환승요금과 할증요금만 고려되며, 탐색과정에서 이미 탐색된 요금벡터(π^b)와 탐색링크에서 접근하는 요금벡터($\pi^w + [c_b, f]$)를 비교하여 새로운 요금벡터(π^b)가 구축된다($\mathcal{V}\{\min_k\}$). 이때 거리벡터(D^b)와 최대기본요금벡터(θ^b)는 요금벡터(π^b)의 표지가 정렬된 순서와 동일하게 구축된다($\mathcal{V}\{\text{same}_k\}$). Step2에서 Q 에 탐색링크가 존재하면 Q 에 포함된 링크들 중에서 $\mathcal{V}\{\min\}$ 벡터함수조건에 의하여 탐색링크가 선정된다. Q 에 링크가 존재하지 않으면 링크표지로 구축된 요금벡터를 노드표지로 구성된 요금벡터로 전환해야 하는데 도착지7과 연결된 모든 링크의 K개 요금을 대상으로 최소요금부터 순차적으로 정렬되도록 K개의 요금을 추출하여 요금벡터를 재 구축한다($\mathcal{V}\{\min_k\}$).

이 과정에 의해서 탐색된 결과는 아래에 나타난 2개의 경로로서, 두 경로 공히 900원의 요금이 계산되었고 한번의 환승회수를 보이고 있다. 그런데 주목할 만한 사항은 〈표 1〉에서 이미 이 두 경로가 탐색 되었으나 〈표 2〉에서는 경로의 순위가 역전된 것을 확인할 수 있다. 이 결과는 요금, 거리, 환승회수 등의 탐색기준을 달리 적용하면 경로의 우선순위가 변경될 수 있다는 의미로서, 첨단대중교통정보체계(APTS: Advanced Public Transportation System)의 경로정보제공의 측면에서

시사하는 바는 이용자에게 요금의 단일기준에 의한 최적의 경로정보라고 할지라도 환승이나 통행시간과 같은 타 기준의 측면에서 평가할 때 이용자에게 유용성이 떨어지는 경로로 재 평가될 수 있다는 것이다. 다시 설명하면, 이용자에게 보다 유용한 교통정보를 제공하기 위해서는 판단기준을 다양화하여 대중교통정보를 유용하게 가공하는 노력이 필요함을 암시하고 있다.

$k=1, 900\text{원}, 16\text{Km}$

7-(S3)-5-(S3)-3-(B)-2-(B)-1

$k=2, 900\text{원}, 14\text{Km}$

7-(S2)-5-(S2)-4-(B)-3-(B)-2-(B)-1

V. 결론

본 연구는 대중교통체계개편에 따른 거리비례제의 도입에 따라 이용자에게 다수의 요금경로정보를 제공하기 위한 방안으로 수행되었다. 우선 복합교통망에서 단일링크를 통행하는 복수의 통행수단을 개별링크로 처리되도록 표현하였으며, 노드에서 발생하는 수단간 환승에 대하여 네트워크확장이 요구되지 않도록 링크표지를 활용하는 방안을 제시하였다. 또한 일정거리까지의 통행에 따른 기본요금, 수단간 환승 시 발생하는 환승요금, 일정거리 이상의 통행에 따른 할증요금을 적용하는 요금산정방식을 제시하였다. 제시된 식을 링크표지로 표현된 최적식으로 재 구성하였으며, 이 최적식을 기반으로 순차적으로 정렬된 K개의 요금경로를 탐색하는 링크표지확정 K요금경로탐색알고리즘을 개발하였다.

알고리즘의 수행과정은 간단하게 구축된 소규모 네트워크를 통해 파악하였다. 알고리즘의 수행결과는 1) 최대 탐색경로와 2) 최대 환승회수와 요금의 2가지 시나리오로 구분하여 관찰되었다. 첫 번째 시나리오의 결과를 통해 제안된 알고리즘이 복합교통망에서 요금을 고려한 대안정보제공을 위해 활용성이 높다는 점을 확인하였다. 첫 번째와 두 번째 시나리오의 결과에서는 요금, 통행거리, 환승회수 등의 개별기준에 의해 각기 상이한 경로들이 탐색 될 수 있음을 보여주었다. 이는 경로정보를 제공하기 위하여 다양한 판단기준이 적용되는 경우에는 통행자들의 선호도를 고려하기 위한 노력이 필요함을 암시하고 있다. 예를 들면, 특정 통행자는 요금보다는 환승회수를 최소로 하는 통행정보를 필요로 하거나, 또 다른 통행자는 환승회수와 함께 요금도 적

게 부담하는 경로정보를 필요로 하는 경우가 나타날 수 있다. 이처럼 다양한 판단기준이 복합적으로 경로탐색에 적용될 수 있는 K경로탐색알고리즘에 대한 연구가 향후 연구로서 필요하다.

참고문헌

1. 김현명 · 임용택 · 이승재 (1999), 통합교통망 수단 선택-통행배정모형 개발에 관한 연구, 대한교통학회지, 제17권 제5호, pp.87~98.
 2. 김현명 · 임용택 (2000), 알고리즘을 이용한 전역 탐색 최단경로 알고리즘개발, 대한교통학회지, 제16권 제2호, pp.157~167.
 3. 이미영 · 백남철 · 남두희 · 신성일 (2004), 거리비례제 요금부과에 따른 최소요금경로탐색, 대한교통학회지, 제22권 제6호, pp.101~108.
 4. 장인성 (2000), 서비스시간 제약이 존재하는 도시부 복합교통망을 위한 링크기반의 최단경로탐색 알고리즘, 대한교통학회지, 제18권 제6호, pp.111~121.
 5. Azevedo J. A., Costa M. E. O. S., Madeira J.J.E.R.S., and Martins E.Q.V. (1993), An Algorithm from the Ranking of Shortest Paths, European Journal of Operational Research, Vol. 69, pp.97~106.
 6. Bellman R. and Kalaba R. (1968), On Kth Best Policies. J. SIAM 8, pp.582~588.
 7. Bellman R. (1957), Dynamic Programming, Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
 8. De Cea. J. and J.E. Fernández. (1989), Transit Assignment for Minimal Routes: An Efficient New Algorithm, Traffic Engng. Control, pp.492~494.
 9. De Cea. J. and J.E. Fernández. (1993), Transit Assignment for Congested Public Transport Systems: An Equilibrium Model, Transportation Science Vol. 27.
 10. Dijkstra E. W. (1959), A Note of Two Problems in Connected with Graphs. Numerical Mathematics. 1, pp.269~271.
 11. Lee M. (2004), Transportation Network Models and Algorithms Considering Directional Delay and Prohibition for Intersection Movement, Ph.D. Thesis, University of Wisconsin-Madison.
 12. Lozano A. & Storchi G. (2001), Shortest Viable Path Algorithm in Multimodal Networks, Transportation Research A 35(3), pp.225~241.
 13. Lozano A. & Storchi G. (2002), Shortest Viable Hyperpath in Multimodal Networks, Transportation Research B 36, pp.853~874.
 14. Martins E.Q.V. (1984), An Algorithm for Ranking Paths that May Contain Cycles, European Journal of Operational Research, Vol. 18, pp.123~130.
 15. Pollack M. (1961), The Kth Best Route Through A Network, Operations Research, Vol. 9, pp.578~580.
 16. Potts R.B. and Oliver R.M.(1972), Flows in Transportation Networks. Academic Press.
 17. Shier R. D. (1979), On Algorithms from Finding the k Shortest Paths in a Network, Networks, Vol. 9, pp.195~214.
 18. Tong C. O. and Richardson A. J.(1984), Computer Model for Finding the Time-Dependent Minimum Path in Transit Systems with Fixed Schedules, Journal of Advanced Transportation 18, pp. 145-161.
 19. Yen J.Y. (1971), Finding the K shortest Loopless Paths in a Network, Management Science, Vol.17, pp.711~715.
 20. Ziliaskopoulos A. and Wardell W. (2000), An Intermodal Optimum Path Algorithm for Multimodal Networks with Dynamic Arc Travel Times and Switching Delays. European Journal of Operational Research 125, pp.486~502.
- ✉ 주 작 성 자 : 이미영
 ✉ 논문투고일 : 2004. 11. 1
 논문심사일 : 2004. 12. 14 (1차)
 2005. 1. 7 (2차)
 2005. 1. 12 (3차)
 심사관정일 : 2005. 1. 12
 ✉ 반론접수기한 : 2005. 6. 30