

■ 論 文 ■

거리비례제 요금부과에 따른 최소요금경로탐색

Finding a Minimum Fare Route in the Distance-Based Fare System

이 미 영

(한국건설기술연구원 선임연구원)

남 두 희

(교통개발연구원 책임연구원)

백 남 철

(한국건설기술연구원 선임연구원)

신 성 일

(서울시정개발연구원 부연구위원)

목 차

- I. 서론
 - II. 이론적 배경
 - 1. 단일수단 교통망의 최적경로 탐색알고리즘
 - 2. 복합교통망에서의 최적경로 탐색알고리즘
 - 3. 복합교통망에서의 네트워크의 표현
 - III. 알고리즘의 개발
 - 1. 복합교통망의 표현
 - 2. 거리비례제 요금부과방안
 - 3. 최소요금경로 탐색알고리즘
 - IV. 사례연구
 - V. 결론
- 참고문헌

Key Words : 복합교통망, 거리비례제, 링크표지, 환승, 할증, 최소요금경로

요 약

서울시 대중교통개편에서 요금부과방안은 기본적으로 거리비례제체제(Distance-Based Fare System)에 근거하고 있다. 거리비례제에서 요금은 일정거리를 주행하는 기본요금과 수단간 환승에서 발생하는 환승요금, 일정거리 이상의 주행에 따른 할증요금으로 구분된다. 본 연구는 거리비례제에 따른 요금부과 시 최소요금경로를 탐색하는 방안을 제시한다. 이를 위해 다수의 수단이 존재하는 복합교통망의 환승지점에서 네트워크확장이 필요치 않도록 링크표지를 적용했다. 동일링크에서 복수통행수단의 표현이 가능하도록 수단에 따른 링크확장개념을 활용하였다. 따라서 본 연구에서는 제안하는 최소요금경로 알고리즘은 수단을 표현하기 위한 표식이 별도로 필요하지 않아, 기존의 링크표지 최적경로알고리즘의 적용이 가능하다. 또한 요금부과과정을 네트워크에 적용하기 위하여 출발지를 기준으로 표현된 연속된 두 링크에 대해 기본요금, 환승요금, 할증요금의 부과과정을 수식으로 표현하였다. 이 수식을 재귀(recursive)형태의 수식으로 전환하여 최소요금경로 탐색알고리즘을 제시하였다. 간단한 예제를 통하여 알고리즘 수행과정을 평가하였다.

1. 서론

기존의 대중교통요금정책은 승차 시 매번 요금을 지불하는 것으로 수단이용특성에 관계없이 요금을 부과하여 수익자 부담의 경제원칙에 불합리하다는 비평이 제기되어 왔다. 최근 서울시는 대중교통체계개편에서 기본요금부과체제를 거리비례제에 근거하여 시행할 의지를 보이고 있다. 거리비례제는 이용수단에 관계없이 이용한 거리만큼 요금을 부과하는 방안으로 일정거리에 대한 기본요금, 다수의 수단으로 환승 시 이용한 수단 중 가장 비싼 수단요금을 적용한 환승요금, 기본요금에 해당하는 일정거리 이상의 추가거리에 대한 할증요금을 부과한다. 따라서 통합대중교통수단의 거리비례제는 기본요금, 환승요금, 할증요금을 고려하여 부과 하는 것을 원칙으로 한다.

예를 들어, 기본구간거리 10Km에서 버스와 지하철의 기본요금이 각각 550원과 800원이고 5Km 마다 할증요금이 100원이 추가 부과된다고 하자. <그림 1>과 같이 이용자가 버스만을 탑승하여 15Km를 통행하기 위해서는 10Km에 해당하는 기본요금 550원과 5Km에 해당하는 할증요금 100원이 합산된 650원이 부과된다. 그리고 <그림 2>와 같이 버스와 지하철을 이용하여 22Km를 통행한 경우, 버스탑승 시 우선 링크(O-T)에 대하여 10Km에 대한 기본요금 550원과 2Km 추가거리에 대한 할증요금 100원이 부과되며, 지하철로 환승 시 링크(T-D)에 대하여 수단간 서비스 수준(요금) 차이에 대한 요금 250원이 부과하고, 지하철 이용 추가거리 10Km에 대한 할증요금 200원이 추가로 부과되어, 총 1000원(550+100(O-T)+250+200(T-D))을 부과되게 된다.

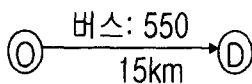
거리비례제 시행에 따른 최소요금경로는 대중교통 이용자뿐만 아니라 대중교통 정책수립에 있어서도 필요하다. 이용자는 통행비용을 줄이기 위하여 출발지와 도

착지 간의 최단시간 경로정보뿐만 아니라 최소요금 경로정보를 필요로 할 수 있다. 또한 향후 대중교통이용 정책에서 이용자의 행태를 파악하기 위해서도 최소요금 경로에 대한 예측적인 작업이 요구된다.

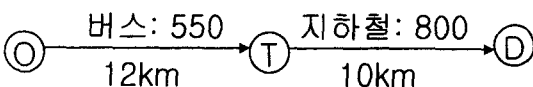
본 연구는 거리비례제 시행에 대한 최소요금경로 탐색알고리즘을 개발하는 것을 목적으로 한다. 다수의 대중교통 통행수단으로 구성된 복합교통망(Intermodal Transportation Network)에서 통행수단에 따라 기본요금, 환승요금, 할증요금으로 부과하는 수식을 제안하고, 제안된 수식을 기반으로 최소요금경로탐색을 위해 링크표지확정 최적경로알고리즘을 활용하는 방안을 제시한다.

본 연구에서 사용되는 표식(Notations)은 다음과 같다.

- r, s, i, j, k : 노드; 특히 r, s 는 각각 출발지와 도착지
- a, b, e : 링크
- n, m : 통행수단
- π^r : 출발지 r 에서 노드 i 까지 최적경로 (비용, 시간)
- π^{ra} : 출발지 r 에서 링크 a 의 도착지점까지의 최적경로 (비용, 시간, 거리)
- D^{ra} : 출발지 r 에서 링크 a 의 도착지점까지의 주행거리(Km)
- T^{ra} : 출발지 r 에서 링크 a 의 도착지점까지의 최소요금(원)
- T^r : 출발지 r 에서 노드 i 까지 최소요금(원)
- c_a, c_{ij} : 링크 $a(i, j)$ 의 통행비용(비용, 시간, 거리)
- $c_{a,m}$: 링크 $a(i, j)$ 를 수단 m 으로 주행 시 통행비용(비용, 시간, 거리)
- $B_{b,n}$: 링크 b 를 수단 n 으로 주행 시 기본요금(원)
- B_b : 링크(수단) b 로 주행 시 기본요금(원)
- θ^{ra} : 출발지 r 에서 링크 a 의 도착지점까지 최적경로에서 요금이 가장 비싼 수단의 기본요금(원)
- M_{More} : 단위거리 당 할증요금; 단위할증요금(원)
- D_{Basic} : 기본요금 적용거리; 기본거리구간(Km)



<그림 1> 기종점간 버스통행



<그림 2> 기종점간 복합교통수단통행

- D_{More} : 할증요금 적용거리; 단위할증거리(Km)
- L : 링크집합
- N : 노드집합
- A_r : 출발노드가 r 인 링크집합
- M : 탐색노드집합
- Q : 탐색링크집합
- B_s : 도착노드가 s 인 링크집합

II. 이론적 배경

본 절에서는 단일수단 교통망과 복합수단 교통망의 최단경로탐색 알고리즘을 살펴보고, 복합수단 교통망의 표현방안에 대한 내용을 검토한다. 본 연구에서 제시하는 알고리즘은 링크표지화정(Link Label Setting)에 근거하므로 함축적인 서술을 위하여 표지화정 최적경로 탐색 알고리즘(Dijkstra, 1959)에 관계된 내용만을 포함한다.

1. 단일수단 교통망의 최적경로 탐색알고리즘

최적경로 탐색알고리즘은 교통망에서 단일수단만이 존재한다고 가정한다. 단일수단 교통망에서 표지기법은 출발지에서 노드를 탐색해 나가는 과정에서 탐색된 노드를 탐색노드집합(M)에 포함하며, 다음노드탐색 시 출발지에서 비용이 가장 작은 노드를 다음 탐색노드로 지정한다. 알고리즘은 노드 수 만큼 반복하여 각 노드까지의 비용을 계산하고 출발지에서 모든 노드까지 최소비용 경로를 탐색한다. 이 방법은 Dijkstra(1959)에 의해 제안됐으며 현재 가장 많이 활용되고 있다. 알고리즘의 경로탐색과정은 Bellman(1957)의 최적원리(Optimality Principle)에 근거한다. 최적원리는 출발지에서 어느 특정 노드까지의 최단경로가 그 이전(predecessor)노드까지의 최단경로를 포함한다는 것을 의미한다. 식(1)은 출발지 r 에서 모든 노드까지의 최단 경로비용을 계산하는 것으로 링크비용탐색 시 하나의 링크에 연결된 두 개의 노드를 동시에 고려한다.

$$\pi^i = \min_{i,r} \{ \pi^r + c_{ij}, \pi^j \}, \forall i, j \in N; r \quad (1)$$

링크표지조정기법은 링크를 노드처럼 활용한다. 출

발지에서 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 링크가 선정되며, 알고리즘이 종료하기 위해서는 링크개수만큼의 반복횟수가 필요하다. 식(2)에서 출발지 r 에서 링크 b 의 도착지점-도착노드와는 다른개념임-까지 최단경로비용을 계산하기 위해서는 두 개의 인접한 연속링크 a 와 b 를 고려한다. 링크표지는 노드표지와 달리 두 인접링크에서 발생하는 회전비용(d_{ab})을 추가적인 네트워크의 확장 없이 고려할 수 있다. 최적비용경로 탐색과정에서 노드기반 최소비용경로 알고리즘에서 채택하고 있는 전노드 개념을 링크에 그대로 적용이 가능하므로 최적원리가 적용된다. 이 방법은 기본개념은 Potts & Oliver (1972)에 의해 본격적으로 활용되기 시작했다. 링크표지기법에 의한 최적 경로알고리즘의 수행과정은 식(2)와 같이 표현된다.

$$\pi^{rb} = \min_{a \in b} \{ \pi^{ra} + c_b + d_{ab}, \pi^{rb} \}, \forall a, b \in L; r \quad (2)$$

2. 복합교통망에서의 최적경로 탐색알고리즘

복합교통망은 다수의 교통수단이 함께 존재하는 교통망이다. 복합교통망에서 최적경로의 탐색을 위해 노드기반 알고리즘을 적용하면 최적원리가 만족되지 않는다. (김현명 & 임용택 (2000)). 복합교통망은 복수의 교통수단이 운영되므로 환승 시 환승시간이 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 된다.

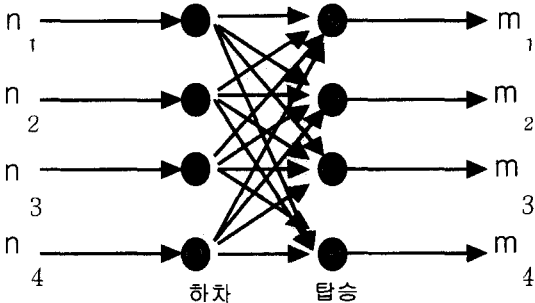
이러한 문제를 해결하기 위한 하나의 대안은 최적 경로알고리즘에 링크표지를 활용하는 것이다. 링크표지를 이용하게 되면 두 수단간 발생하는 환승비용을 네트워크 확장없이 회전지체(d_{ab})처럼 고려할 수 있으므로 네트워크를 단순화하여 표현할 수 있으며, 이는 계산비용의 감소와도 직접적으로 연결된다. 김현명 외(1999)는 통

합교통망에서 환승비용을 고려하여 통행배정모형에 적용하기 위하여 링크기반 최적경로알고리즘을 활용하였다. 장인성(2000)은 통합교통망에서 수단간 환승 시 발생하는 각기 다른 환승시간을 고려하기 위하여 링크기반 알고리즘을 적용하였다. Ziliaskopoulos & Wardell (2000)은 시간종속적(Time Dependent) 복합교통망에서 환승지체(Switching Delay Time)를 고려하기 위하여 유사한 개념의 알고리즘을 개발하였다.

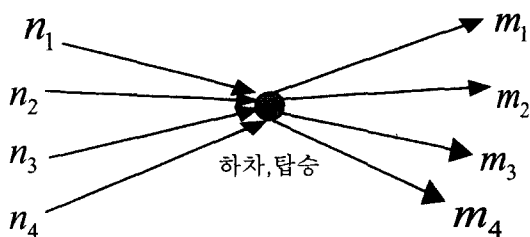
3. 복합교통망에서의 네트워크의 표현

복합교통망에서 최적경로알고리즘을 수행하기 위해서는 단일수단 교통망과 비교하여 수단 간의 환승(Transfer)에 대한 추가적인 고려가 필요하다. 환승표현의 경우 노드표지 알고리즘은 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.

링크기반 네트워크로 구성하게 되면, <그림 4>에서 보는 바와 같이 네트워크에서 링크를 주행하는 수단에



<그림 3> 환승노드 및 수단링크의 확장 (노드기반)



<그림 4> 수단링크의 확장 (링크기반)

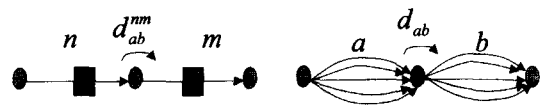
대한 확장은 필요하지만, 환승지점에서 기존의 링크기반처럼 네트워크를 확장하는 것이 필요하지 않다. 즉 하나의 노드에서 다수의 수단간 하차와 탑승행태가 완성된다.

III. 알고리즘의 개발

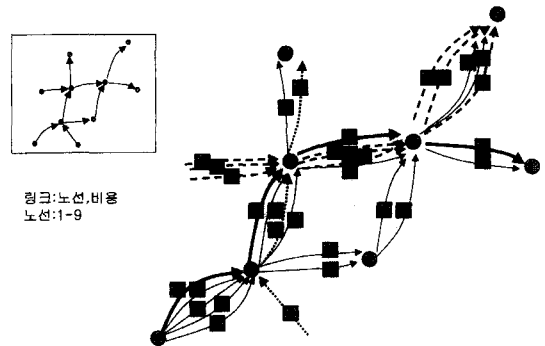
본 장에서는 복합교통망에서 동일링크에 통행하는 다수의 수단을 확장된 링크개념으로 처리하는 방안을 적용하여 수단에 대한 별도의 표시가 필요하지 않도록 한다. 또한 출발지를 기준으로 인접된 2개의 링크에 대해 요금부과방안에 대한 계산식을 제안하고, 이를 기반으로 복합교통망에서 적용 가능한 링크기반 최적경로 탐색알고리즘을 제시한다.

1. 복합교통망의 표현

동일링크를 통행하는 복수수단을 표현하기 위해서 본 연구에서 추구하는 방법은 동일링크를 주행하는 모든 수단을 각각의 링크로 확장하는 것이다. 이 방법을 적용하게 되면, 출발노드와 도착노드가 동일하나 링크의 속성(거리, 비용)이 다른 링크가 존재하게 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 분석이 가능하다는 장점이 있다(De Cea & Fernández,



<그림 5> 수단(n,m)의 환승요금 반영 및 동일링크에서 수단 확장



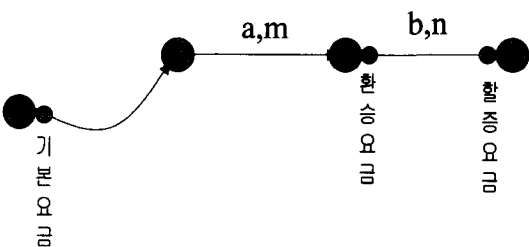
<그림 6> 통합교통망의 확장네트워크 예

1993). 또한 수단을 링크로 표현되었으므로 기존의 링크 기반최적경로 알고리즘을 적용하여 환승에 대한 처리가 가능하다. <그림 5>는 두 인접링크(a, b)를 주행하는 수단(m, n)에서 발생하는 환승요금 d_{ab}^{mn} 를 수단링크확장을 통하여 수단을 제외한 d_{ab} 로 단순화하여 고려됨을 나타내고 있다. <그림 6>은 4개의 환승노드와 10개 링크로 구성된 네트워크를 9개 수단이 통과하도록 31개 링크로 확장된 경우의 예이다.

2. 거리비례제 요금부과방안

거리비례제에 따른 요금부과는 크게 세 가지-기본요금, 환승요금, 할증요금-로 구분된다. <그림 7>은 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 탑승 시 기본요금이 적용된다. 링크 a 에서 링크 b 로 주행하기 위하여 수단 n 으로 환승하는 경우 수단 n 의 기본요금이 수단 m 보다 낮을 경우 환승요금은 없으나, 수단 n 의 기본요금이 수단 m 보다 높을 경우 요금차이만큼의 환승요금을 부과된다. 그리고 출발지 r 에서 도착지 b 까지 거리에서 기본거리 이상의 추가로 주행한 거리에 따라 할증요금을 부과한다.

식(3)은 위의 요금계산 과정을 수식으로 표현한 것으로 위의 요금부과과정을 나타내는 3가지 부분으로 구성되어 있다. 즉, 출발지에서 링크 b 까지 총 요금을 계산하기 위해서는: (1) 출발지에서 처음 탑승한 수단의 기본요금 B_e , (2) 수단간 요금수준을 비교하여 수단의 요금차이에 따라 $\max[B_b - \theta^{ra}, 0]$ 의 환승요금(원), (3) 링크 b 까지 주행한 추가주행거리($D^{ra} + c_b - D_{Basic}$)에



<그림 7> 기본, 환승, 할증요금의 부과과정

대한 할증요금(원)을 합하여 계산하게 된다.

할증요금을 계산하기 위하여 통행거리($D^{ra} + c_b$)가 D_{Basic} 과 비교하여 큰 경우에만 계산된다. 계산과정에서 χ, ϵ, Γ 가 도입한 이유는 할증요금이 가산되는 경계지점에서의 정확한 계산을 위해서다. 예를 들어 ϵ 가 없고 Γ 만 존재한다고 하자. 이때 $D^{ra} + c_b$ 가 D_{Basic} 과 동일하면 기본요금으로 계산되어야 하나, χ 는 1이 되어 100원을 부과되게 된다. 또한 Γ 이 없고 ϵ 만 존재하면 할증구간에서 한 단계 낮은 할증요금($-1 * D_{More}$)을 부과되게 된다.

$$T^{rb} = \left(\begin{matrix} B_e + \\ \max[B_b - \theta^{ra}, 0] + \\ [M_{More}] \cdot [\text{int}](Z) \end{matrix} \right)$$

$a = (i, j), b = (j, k); e \in A_r$ (3)

이 경우

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

ϵ : 아주 작은 실수(예를 들면, 0.0001)

$\Gamma = 1$

[int]는 실수의 정수부분(integer)

3. 최소요금경로탐색 알고리즘

식(3)의 요금부과 계산방식을 최소요금경로탐색을 위한 재귀식으로 변화시키면 식(4)와 같다. <그림 5,6>처럼 각 수단의 특성은 이미 링크확장개념으로 표현되어, 수단과 링크를 분리해서 고려할 필요가 없다. 식(3)의 요금부과방식이 재귀식으로 표현되어 동적프로그래밍(Dynamic Programming)의 적용이 가능하다.

$$T^{rb} = \min_{a \neq b} \left(\left(\begin{matrix} B_e + \\ \max[B_b - \theta^{ra}, 0] + \\ [M_{More}] \cdot (\text{int})(M_{More} \cdot Z) \end{matrix} \right), T^{rb} \right)$$

$\forall a = (i, j), b = (j, k) \in L; b \in A_j; e \in A_r, r$ (4)

$$Z = \begin{cases} 0 & \text{if } D^{ra} + c_b \leq D_{Basic} \\ \chi & \text{if } D^{ra} + c_b \phi D_{Basic} \end{cases}$$

이 경우

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

식(4)를 최소요금경로 탐색알고리즘으로 나타내면 다음과 같다. 위에서 제시한 3단계 요금부과과정을 기준으로 설명하면, 우선 Step1의 초기화에서 출발지에서 출발하는 링크 a 의 경우에 대해 B_a 의 기본요금을 부과하며, 링크 a 가 기본거리 이상을 초과하는 지에 따라 할증요금(Y)의 부과여부에 대해 검토한다. Step2에서는 표지확정 최적경로알고리즘의 링크탐색과정과 동일하게 (Dijkstra, 1959), 탐색링크는 출발지에서 링크의 도착지점까지의 요금이 최소인 링크를 우선 탐색하게 된다. 이때 다음탐색링크가 존재하지 않으면 알고리즘은 종료하게 되며, 링크표지에 근거하여 계산된 값을 노드표지로 재 계산된 요금형태로 전환한다. Step3에서는 출발지로부터 멀어져 있는 상황이므로 환승 및 할증요금을 부과하는 계산만 포함하며, 이때 기본요금은 고려되지 않는다.

[Step 1] 초기화

$$T^{ra} = \infty, \forall a \in L; r$$

$$Q = \emptyset$$

$$D^{ra} = c_a, a \in A_r; r$$

$$\theta^{ra} = B_a, a \in A_r; r$$

$$T^{ra} = \theta^{ra} + Y, a \in A_r; r$$

$$Q = Q \cup \{a\}, a \in A_r; r$$

$$Y = [M_{More}] \cdot [\text{int}]Z$$

$$Z = \begin{cases} 0 & \text{if } c_a \leq D_{Basic} \\ \chi & \text{if } c_a \phi D_{Basic} \end{cases}$$

이 경우

$$\chi = \left(\frac{\max[c_a - D_{Basic}, 0]}{D_{More}} - \epsilon \right) + \Gamma$$

[Step 2] 다음탐색링크결정

If ($Q = \phi$) : $T^i = \min[T^{ra}], \forall i \in N; a \in B_i$

Stop

Else : $a = \min[T^{ra}], a \in Q$

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

[Step 3] 다음링크($a \rightarrow b$)로 확장

If ($T^{ra} + X + Y < T^{rb}$)

$$T^{rb} = T^{ra} + X + Y$$

$$a = (i, j), b = (j, k) \in A_j, j \neq k; r$$

$$D^{rb} = D^{ra} + c_b, a = (i, j), b = (j, k) \in A_j, j \neq k; r$$

$$\theta^{rb} = \max[\theta^{ra}, B_b]$$

$$a = (i, j), b = (j, k) \in A_j, j \neq k; r$$

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

Go to Step 2

$$X = \max[B_b - \theta^{ra}, 0]$$

$$Y = [M_{More}] \cdot [\text{int}]Z$$

$$Z = \begin{cases} 0 & \text{if } D^{ra} + c_b \leq D_{Basic} \\ \chi & \text{if } D^{ra} + c_b \phi D_{Basic} \end{cases}$$

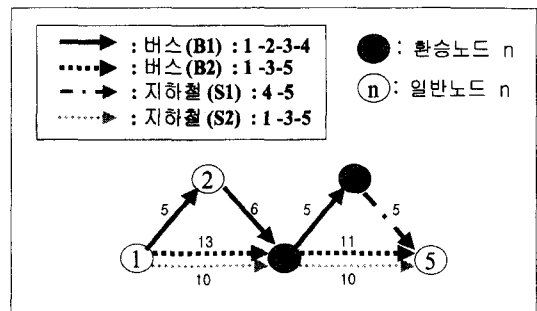
이 경우

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

Else : Go To Step 2

N. 사례연구

(그림 8)은 3.2절에서 제시된 알고리즘을 검증하기 위해 고안된 간단한 네트워크로 사례연구를 진행한다. 네트워크는 2개의 버스노선과 2개의 지하철노선으로 각각 구성되어 있고, 6개의 노드와 8개의 링크로 표현되어 있는 복합교통망이다. 일반노드 1과 5는 각각 출발지와 도착지이고, 노드 3과 4는 환승노드이며, 수단별 이동거리가 각 링크에 표현되어 있다. 버스와 지하철 4개의 노



(그림 8) 네트워크

선에 대해서는 <그림 8>의 우측 상단에 설명되어 있다. 출발지1에서 도착지 5까지 환승을 거치지 않고 단일수단 통행이 가능한 노선은 버스(B2)와 지하철(S2)이다. 이때 두 노선은 공히 2개의 동일링크(1->3, 3->5) 상에 주행하므로, 본 연구에서 제안하는 수단확장개념에 의해 출발노드와 도착노드가 동일하나 링크의 특성이 각기 다른 2개의 수단링크로 확장되도록 구축되었다. 예를 들면, 링크1->3에 대해 1->3(B2), 1->3(S2). 노드4에서 버스(B1)과 지하철(S1)과의 환승으로 목적지까지 연결되며, 노드3에서는 버스(B1), 버스(B2), 지하철(S2) 간의 환승이 각각 발생할 수 있다. 사례연구의 기본조건으로서 버스기본($B_{\text{버스}}$)은 600원, 지하철기본요금($B_{\text{지하철}}$)은 800원, 기본거리구간(D_{Basic})은 12Km, 할증거리구간(D_{More})은 6Km, 할증요금(M_{More})은 100원을 각각 적용하였다.

<표 1>은 네트워크에 대한 최소요금경로 탐색알고리즘 수행과정을 나타낸다. 링크의 수(수단의 수)만큼 총

<표 1> 최소요금탐색 알고리즘의 수행과정

반복 회수	링크(수단) 탐색		거리 (Km)	요금(원)			총 요금 (원)
	탐색링크	다음탐색링크		기본	환승	할증	
초기화	-	1->2(B1)	5	600	0	0	600
	-	1->3(B2)	13	600	0	100	700
	-	1->3(S2)	10	800	0	0	800
1	1->2(B1)	1->3(B2)	13	600	0	100	700
		1->3(S2)	10	800	0	0	800
		2->3(B1)	11	600	0	0	600
2	2->3(B1)	1->3(B2)	13	600	0	100	700
		1->3(S2)	10	800	0	0	800
		3->4(B1)	16	600	0	100	700
		3->5(B2)	22	600	0	200	800
		3->5(S2)	21	600	200	200	1000
3	1->3(B2)	1->3(S2)	10	800	0	0	800
		3->4(B1)	16	600	0	100	700
		3->5(B2)	22	600	0	200	800
		3->5(S2)	21	600	200	200	1000
4	3->4(B1)	1->3(S2)	10	800	0	0	800
		3->5(B2)	22	600	0	200	800
		3->5(S2)	21	600	0	200	1000
		4->5(S1)	21	600	200	200	1000
5	1->3(S2)	3->5(B2)	22	600	0	200	800
		3->5(S2)	21	600	0	200	1000
		4->5(S1)	21	600	200	200	1000
6	3->5(B2)	3->5(S2)	21	600	0	200	1000
		4->5(S1)	21	600	200	200	1000
7	3->5(S2)	4->5(S1)	21	600	200	200	1000
8	4->5(S1)	-	-	-	-	-	-

㉠: 다음탐색링크에서 최소요금링크(수단)

<표 2> 최소요금경로 트리

링크(수단)	전링크(수단)	거리(Km)	요금(원)	비고
1->2(B1)	-	5	600	기본 600원
1->3(B2)	-	13	700	
1->3(S2)	-	10	800	
2->3(B1)	1->2(B1)	11	600	
3->4(B1)	2->3(B1)	16	700	
3->5(B2)	2->3(B1)	22	800	버스 간 환승 할증 200원
3->5(S2)	2->3(B1)	21	1000	
4->5(S1)	3->4(B1)		1000	

8회 반복되었으며, 다음탐색링크집합에서 출발지로부터 기본요금, 환승요금, 할증요금을 합한 총요금이 가장 최소인 링크를 탐색링크로 선정된다. 예를 들면, 반복 회수1에서 탐색링크집합 Q 에서 3개의 링크(수단), $Q = \{1->3(B2), 1->3(S2), 2->3(B1)\}$,가 존재하는데 이때 출발지를 기준으로 최소요금이 600원이므로 600원이 부과된 링크(2->3(B1))이 탐색링크로 선정된다.

요금계산은 식(4)에서 제시한 바와 같이 적용되어 있다. 초기화에서 1->3(B2)구간이 기본거리 12Km이상 이므로 기본요금 이외에도 100원이 할증요금이 추가로 부과된다. 반복회수 3에서 1->3(B2)에서 3->5(S2)로 진행하는 경우 환승요금과 함께 추가적인 할증요금 100원이 징수되는 사항이 발생한다(Step 3).

출발지에서 모든 링크까지 최소요금 통행의 탐색이 가능한 최소요금 경로트리(<표 2>)를 통하여 도착지에서 출발지까지 역으로(Backward) 최적요금경로를 탐색하는 과정이 제시되었다. 목적지 노드5에 연결된 링크(수단)은 버스를 이용한 3->5(B)이며 이때 요금은 800원이 부과된다. 3->5(B)의 지원링크(수단)을 통하여 출발지까지 계속 탐색하여 가면, 최소요금경로는 버스통행 만을 이용한 1->2->3->5(B1->B1->B2)가 된다. 즉, 1->2(B1) 탑승 시 600원을 부과하고, 1->2(B1)에서 2->3(B1)의 동일수단으로 진행했으므로 환승요금이 부과되지 않았고 기본거리 12km를 초과하지 않아 할증요금이 부과되지 않았다. 2->3(B1)에서 3->5(B2)로 진행하는 경우에는 요금수준이 동일한 버스 간의 환승이 발생했으므로 환승요금이 발생하지 않았으나, 추가거리 10km에 대한 할증요금 200원(6km: 100원 + 100원)이 부과되어, 총 800원의 요금으로 출발지 1에서 도착지 5까지 최소요금으로 통행한다.

V. 결론

본 연구는 대중교통체계개편에 따른 거리비례제의 도입에 따라 최소요금경로를 탐색하기 위한 방안으로 수행되었다. 우선 복합교통망을 기반으로, 단일링크에 복수 통행수단이 존재하는 경우, 각각의 통행수단에 대해 확장된 링크로 표현하였고, 환승지점에서 발생하는 수단 간의 환승의 고려를 위해 노드확장이 요구되지 않도록 링크표지로 네트워크를 구성하는 방안을 제시하였다. 또한 일정거리를 통행하는 기본요금, 수단간 환승시 발생하는 환승요금, 일정거리 이상의 주행에 따른 할증요금이 적용될 수 있는 요금산정방식을 제시하였다. 제시된 계산식이 최소요금경로 탐색알고리즘으로 적용되도록 재귀식으로 전환하였다. 알고리즘의 수행과정은 수단(링크)표지확정 방식에 근거하여 계산하였다. 소규모 네트워크 평가를 통하여 알고리즘의 수행과정을 쉽게 이해되도록 구성하였다.

향후 연구과제로서, 수단 이용자의 다양한 효용을 반영한 다수경로탐색에 대한 연구가 필요하다. 예를 들어, 수단 이용자는 통행비용, 환승, 통행시간 등을 자신의 목적에 맞게 고려하거나, 또는 이들의 조합에 의한 인지비용을 최소화 하려고 할 수 있다. 이 경우 다양한 대안을 나열하여 이용자의 선택가능성을 높이는 방법으로 다수경로탐색 방안이 활용 가능하다.

참고문헌

1. 김현명·임용택·이승재(1999), 통합교통망 수단선택-통행배정모형 개발에 관한 연구, 대한교통학회지, 제17권 제5호, 대한교통학회, pp.87~98.
2. 김현명·임용택(2000), 알고리즘을 이용한 전역탐색 최단경로 알고리즘개발, 대한교통학회지, 제16권 제2호, 대한교통학회, pp.157~167.
3. 장인성(2000) 서비스시간 제약이 존재하는 도시부 복합교통망을 위한 링크기반의 최단경로탐색 알고리즘, 대한교통학회지, 제18권 제6호, 대한교통학회, pp.111~121.
4. Bellman R. (1957) Dynamic Programming, Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
5. De Cea. J. and J.E. Fernández. (1989) Transit Assignment for Minimal Routes: An Efficient New Algorithm, Traffic Engng. Control, pp.492~494.
6. De Cea. J. and J.E. Fernández. (1993) Transit Assignment for Congested Public Transport Systems: An Equilibrium Model, Transportation Science Vol.27.
7. Dijkstra E. W. (1959) A Note of Two Problems in Connected with Graphs. Numerical Mathematics. I, pp.269~271.
8. Potts R.B. and Oliver R.M.(1972) Flows in Transportation Networks. Academic Press.
9. 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.
10. 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. 6. 21

논문심사일 : 2004. 8. 25 (1차)

2004. 11. 2 (2차)

2004. 11. 8 (3차)

심사판정일 : 2004. 11. 8

✉ 반론접수기한 : 2005. 4. 30