

누적환승함수를 고려한 경험적 최적경로탐색 방안

A Heuristic Optimal Path Search Considering Cumulative Transfer Functions

신 성 일*

(Seongil Shin)
(The Seoul Institute)

백 남 철**

(Nam Cheol Baek)
(Korea Institute of
Civil Engineering and
Building Technology)

남 두 희***

(Doo Hee Nam)
(Hansung University)

요 약

환승누적함수에서 환승회수가 증가되면 환승비용에 대한 개별적인 환승의 영향이 선형 또는 비선형적으로 증가된다. 이 함수는 버스 또는 철도와 같이 대중교통노선에서 경로를 선택하는 승객의 행태를 효과적으로 설명한다. 이 함수로 통행시간이 더 소요되더라도 환승이 적은 대중교통노선을 선택하는 일반적인 상황의 구현이 가능하다. 그러나 환승누적함수가 포함되는 통행비용은 비가산성비용으로 최적경로탐색을 위해서 경로열거라는 어려운 상황을 포함한다.

본 연구는 환승누적함수를 고려하여 최적경로를 탐색하는 효과적인 방안을 제안하였다. 이를 위해 우선 환승누적함수가 포함되는 경우 경로탐색과정에서 나타나는 최적경로역전 현상을 설명하였다. 또한 복수의 경로를 탐색해서 최소의 비용경로를 최적경로로 선택하는 경험적인 방안을 제안하였다. 유입링크기반 전체경로삭제기법을 복수경로탐색기법으로 채택하여 알고리즘의 경로최적조건의 증명성에 기반하여 K개의 경로를 탐색하는 방안을 제안하였다. 환승계수를 도입하는 사례연구를 통하여 제안된 방안의 실제 교통망에 대한 활용성을 논의하였다.

핵심어 : 누적환승함수, 비가산성 통행비용, 경험적 최적경로탐색, K경로

ABSTRACT

In cumulative transfer functions, as number of transfer increase, the impact of individual transfer to transfer cost increase linearly or non linearly. This function can effectively explain various passengers's travel behavior who choose their travel routes in integrated transit line networks including bus and railway modes. Using the function, it is possible to simulate general situations such that even though more travel times are expected, less number of transfer routes are preferred. However, because travel cost with cumulative transfer function is known as non additive cost function types in route search algorithms, finding an optimal route in integrated transit networks is confronted by the insolvable enumeration of all routes in many cases.

This research proposes a methodology for finding an optimal path considering cumulative transfer function. For this purpose, the reversal phenomenon of optimal path generated in route search process is explained. Also a heuristic methodology for selecting an optimal route among multiple routes predefined by the K path algorithm. The incoming link based entire path deletion method is adopted for finding K ranking path thanks to the merit of security of route optimality condition. Through case studies the proposed methodology is discussed in terms of the applicability of real situations.

Key words : Cumulative Transfer Function, Non Additive Travel Cost, Heuristic Optimal Route Search, K Ranking Path

† 본 논문은 2016년 춘계학술대회에 발표되었던 논문을 수정·보완하여 작성하였습니다.

† 본 논문은 한성대학교 교내학술연구비 지원과제임

* 주저자 : 서울연구원 교통시스템연구실 연구위원

** 교신저자 : 한국건설기술연구원, ICT융합연구소 연구위원

*** 공저자 : 한성대학교 공과대학 정보시스템공학과 교수

† Corresponding author : Seongil Shin(The Seoul Institute), E-mail : ssi@si.re.kr

† Received 3 June 2016; reviewed 16 June 2016; Accepted 18 June 2016

I. 서 론

대중교통 이용승객에게 통행시간이 많이 소요되도 환승회수가 적은 통행경로를 선호하는 현상이 나타난다. 이러한 행태를 반영해서 수도권통합대중교통체계에서 최소시간뿐만 아니라 최소환승경로 정보도 함께 제공하는 시도가 진행되고 있다. 대중교통을 이용하는 승객행태의 뒷면에는 환승하기 불편함과 같은 주관적인 요소의 반영이 필요함을 알 수 있다.

본 연구에서 제안하는 ‘누적환승합수’이라는 용어는 환승에 대한 ‘느낌’을 정량화하는 개념이다. 누적환승합수는 환승회수가 늘어날수록 개별 환승 자체에서 발생하는 실제비용보다 더 많이(적게) 인식되도록 한다. 간단하게는, 출발지부터 환승이 발생하는 시점까지 환승의 영향을 파라메타로 반영하는 방법이 있으며, 선형 및 비선형함수 등 다양한 형태로 적용도 가능하다.

그러나 누적환승합수가 포함된 통행비용에서 경로탐색문제의 최적조건이 성립하지 않을 가능성이 존재한다. 누적환승합수가 포함되면 표지확정(Label Setting)과정에서 통행비용을 출발지부터 표지까지의 다시 산정해야한다. 따라서 기존의 동적계획법(Dynamic Programming)의 최적원리(Optimality Principle) 조건인 현재 및 이전표지 관계조건[1]이 모두 성립한다고 볼 수 없다. 이 문제는 경로열거문제를 발생시키는 비가산비용(Non Additive Cost)의 형태가 될 가능성을 포함한다[2]. 따라서 최적경로탐색이 완전한 해를 도출하는 방안으로서 경로열거와 함께 최적해를 선정하는 적절한 방안이 필요하다. 이러한 문제 때문에 비가산성비용을 포함하는 최적경로탐색은 문제 유형별로 접근하는 방식을 채택하고 있다[3, 4].

본 연구는 한정된 경로집합의 생성을 통하여 최적경로를 선정하는 효과적인 방안을 제안한다. 제안된 기법은 세 가지 측면 - 1) 복수경로탐색의 적용, 2) 최적해의 선정, 3) 실제 교통망에의 적용 - 에서 검토된다. 이를 위해 복수경로탐색을 위해서는 제안된 K경로탐색 알고리즘은 유입링크기반 전

체경로삭제기법[5, 6]을 통하여 최적해의 포함을 위한 실제 교통망에서 상한(Upper Bound)에 대하여 논의한다.

이 연구는 다음과 같은 순서로 진행된다. II장에서 누적환승합수가 포함되는 상황에서 최적경로탐색이 성립되지 않는 사례를 설명한다. III장에서는 최적경로탐색을 위해 K경로탐색 알고리즘을 활용하는 방안을 제안한다. IV장에서 결론과 연구과제를 요약한다.

II. 최적경로탐색과 누적환승합수

식(1)은 노드표지기반 최적비용을 탐색하는 과정을 나타낸다. <Fig. 1>은 식(1)을 도식화한 내용이다. 노드기반 최적경로탐색 알고리즘의 해를 도출하는 알고리즘 노드표지갱신[7]과 표지확정[8] 알고리즘이 알려져 있다. 표지갱신은 출발지부터 탐색이 진행되는 순서대로 다음 탐색노드를 결정하는 방법 (First In First Out)이다. 표지확정은 출발지에서 탐색된 노드 중에서 가장 비용이 적은 노드를 다음 탐색노드로 결정한다.

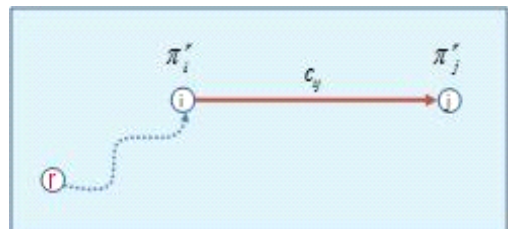
$$\pi_j^r = \min(\pi_i^r + c_{ij}, \pi_j^r) \quad (1)$$

r : 출발노드

(i, j) : (시작노드, 도착노드)로 구성된 링크

c_{ij} : 링크 (i, j) 의 통행비용

π_j^r : r 에서 j 까지 최적경로비용



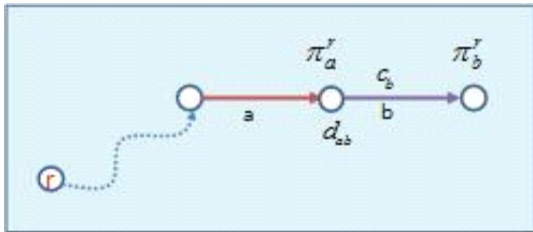
<Fig. 1> Concept of Node Label Based Optimal Path Search

식(2)은 환승비용(d_{ab})을 포함하는 링크표지기반 최적비용을 탐색하는 과정을 나타낸다. <Fig. 2>은 식(2)을 도식화한 내용이다. 최적경로탐색에서 d_{ab} 가 상수인 경우에 대해서 최적의 해를 도출하는 방안에 대해서는 연구되었다[9, 10].

주요개념은 탐색링크집합에서 가장 적은 비용의 링크를 선정하여 링크의 도착노드를 시작노드로 하는 링크표지를 확정한다. 이 방법을 이용해서 표지를 확정하는 과정은 기본적으로 노드표지 확정과정과 동일하다. 단지 출발지와 연결된 링크표지를 링크비용으로 확정표지화하고 출발 링크들에서 최소비용링크를 다음탐색링크로 선정하는 것이 차이점이다.

$$\pi_b^r = \min(\pi_a^r + d_{ab} + c_b, \pi_b^r), b \in T_a^+ \quad (2)$$

- a, b : 2개 노드(시작, 도착)로 구성된 링크
- π_b^r : r에서 b의 도착노드까지 최적경로비용
- d_{ab} : a에서 b로의 환승비용
- c_b : b로의 통행비용
- T_a^+ : a의 도착노드가 시작노드인 링크집합

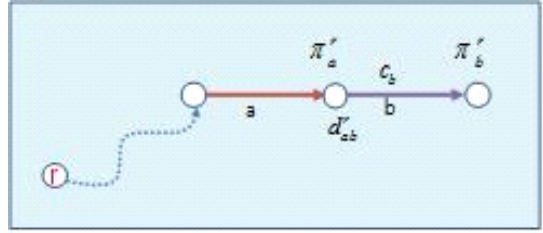


<Fig. 2> Concept of Link Label Based Optimal Path Search Considering Transfer Cost

누적환승합수 사례로서 식(2)의 d_{ab} 가 식(3)과 <Fig. 3>의 d_{ab}^r 로 변경된 상황에 대하여 최적경로수식이 성립을 검토한다. d_{ab} 는 a에서 b로 진행되는 환승비용을 의미한다. 그러나 d_{ab}^r 는 a에서 b로 환승하면서 출발지 r에서 누적되는 환승비용으로 적용된다.

$$\pi_b^r \approx \min(\pi_a^r + d_{ab}^r + c_b, \pi_b^r), b \in T_a^+ \quad (3)$$

d_{ab}^r : r에서 출발하여 a에서 b로의 누적환승비용

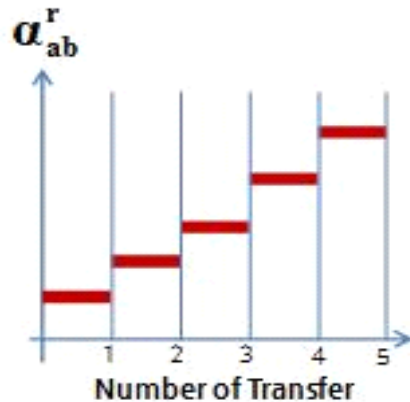


<Fig. 3> Concept of Link Label Based Optimal Path Search Considering Cumulative Transfer Cost

우선 d_{ab}^r 를 누적환승합수로 간단하게 적용하는 방안은 환승계수(Transfer Parameter)를 도입하는 것이다. <Fig. 4>의 α_{ab}^r 는 환승회수에 대하여 일정한 값으로 나타난다. 출발지부터 경로를 따라서 환승이 발생하는 순간 환승회수를 계산해서 비용에 대해 환승비용 d_{ab} 에 영향력을 나타내는 수치 α_{ab}^r 를 반영하는 방안이다.

$$d_{ab}^r = \alpha_{ab}^r \cdot d_{ab}, b \in T_a^+ \quad (4)$$

α_{ab}^r : r에서 출발, a에서 b로 환승회수에 대한 계수



<Fig. 4> Relationship Transfer Parameter and Number of Transfer

환승계수로 구축된 누적환승합수를 포함하여 토이네트워크에 대하여 최적조건이 성립하지 않는 상황을 검토한다. $d_{ab}=2$ 인 상황에 대하여 <Fig. 5>의 비용을 포함한 링크 8개, 노드 7개, 환승노드 5개로

구성된 토이네트워크에 최적경로탐색과정 적용한다. 이때 α_{ab}^r 는 <Fig. 6>와 같이 최대 4번까지 환승 파라미터 값으로 각각 1, 2, 4, 8 이다. r에서 b까지 경로는 3개 (A, B, C)이다.

$$\alpha_{ab}^r = \alpha_{ab}^r \cdot 2, b \in T_a^+ \quad (5)$$

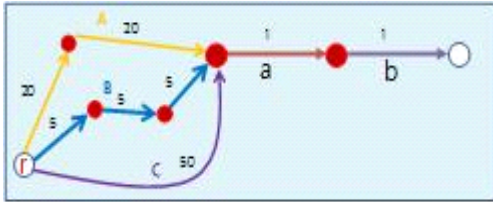
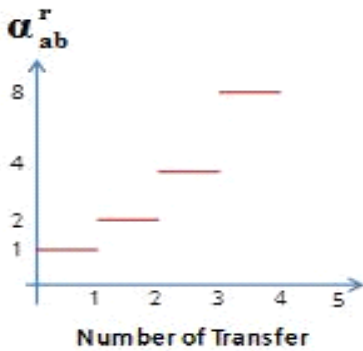
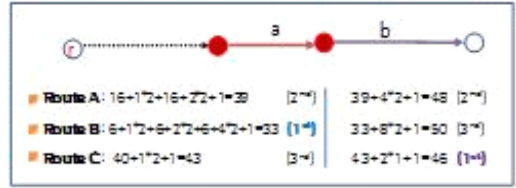


Fig. 5) Toy Network with Three Routes



<Fig. 6> Transfer Parameter Value with Total 4 Number of Transfer2

위의 네트워크에서 최적조건이 성립하기 위해서는 r에서 a까지의 최적경로는 반드시 r에서 b까지의 최적경로에서 b링크를 제외한 경로이어야 한다. <Fig. 7>에서 A, B, C 3개 경로에 대하여 a까지 비용은 각각 39, 33, 43으로 B경로가 최적경로이다. 그러나 a에서 b로 환승이 발생하는 순간 비용이 48, 50, 46으로 C경로가 최적이 되는 역전현상이 발생한다. 그럼에도 최적조건에 기반한 표지확정은 최종적으로 B경로가 최적이 되도록 진행된다.



<Fig. 7> Reversal of Optimal Route in Process of Link Label Setting

III. 경험적 최적경로탐색방안

<Fig. 7>의 사례에서 볼 때, 누적환승합수 포함으로 C경로가 최적경로로 올바르게 판단하는 방법은 A, B, C 세 경로를 열거하여 최적이 되는 경로선택으로 가능하다. 일반적으로 경로의 열거는 K경로탐색기법을 활용하나, 최적조건의 불일치로 인한 문제는 표지확정 문제를 발생시키며, 이는 탐색오류 및 경로중복 등의 문제로 확산될 가능성이 존재한다. 따라서 적합한 방안중 하나는 K경로탐색알고리즘을 이용하여 적정한 대안경로집합을 구성하고 최적경로를 확인하는 방법이다.

본 연구에서 제시하는 방법은 ‘최적경로집합조건’의 개념이다. ‘최적경로집합조건’이란 하나의 출발지에서 목적지까지 연결하는 복수의 경로로 구성된 경로집합으로서 모두 다른 경로로 구성되며, 모두 올바른 경로비용정보를 보유한다는 것이다. 최적경로집합조건 개념이 필요한 이유는 링크표지확정과정에서 최적조건이 만족되지 않아도 적합한 경로집합만 구성되면 그 경로집합에서 최적경로를 도출한다는 확신을 구하고자 하는 필요성에 기인한다. 다른 의미로서, 경로에 대한 적합한 통행비용이 도출되지 않더라도, 그 경로집합의 구성이 만족한다면 새롭게 통행정보를 구성할 수 있다는 개념이다. 이는 이미 도출된 경로를 따라서 비용을 재확인하는 방법으로 적용이 가능하다.

본 연구에서 최적경로집합조건을 만족하도록 구성하는 K경로탐색기법은 유입링크기반 전체경로삭제기법[6, 7]을 변형한 것이다. 전체경로삭제기법은 출발지와 도착지가 정해진 두 지점에서 K개의 경로를 구축하는 기법으로 이전 네트워크(N)에서 기

탐색된 경로를 모두 제거한 네트워크(N')를 구축하여 경로를 탐색하는 방안이다. N'에서는 기존에 탐색된 경로가 삭제되었으므로 누적환승합수가 포함되어도 표지확정 실패에 의한 경로중복문제는 발생하지 않는 장점이 있다.

유입링크기반 전체경로삭제 알고리즘은 네트워크 N에 대하여 2단계의 세부알고리즘을 수행한다 [5]. (1) 두 지점간 최적경로 p 발견을 위한 최적경로알고리즘과, (2) 새로운 네트워크 N'을 생성시키기 위한 경로삭제알고리즘이다.

개략적 개념은, 우선 최적경로 p가 탐색되면, 그 p경로를 네트워크 N에서 삭제하여 다시 최적경로 탐색을 수행한다는 것이다. 이때 새로운 노드와 링크를 네트워크 N에 추가하여 구성된 확장된 네트워크 N'은 경로 p를 제외한 모든 경로의 탐색이 가능하게 구축된다. N₁을 기본네트워크로 하여 순차적인 K개의 경로를 탐색한다는 것은 {N₁, N₂, ..., N_K}의 순차적인 네트워크를 구축함을 의미하며, 이 경우 j번째 네트워크 N_j로부터 j번째 경로 p_j가 탐색된다. 이 알고리즘의 경우 N의 링크 및 노드의 영구표지는 N'에서 영구표지로 남아있으며, N에서 삭제된 p의 부분경로가 N'의 최적경로설정에 포함된다는 사실에 근거하여 (K-1)번의 최적경로알고리즘 수행을 절약할 수 있다.

경로삭제알고리즘의 수행과정을 나타내기 위한 표식(Notations)으로서 네트워크 N의 경로 p는 다음과 같은 노드의 순서로 표현된다.

$$p = \{v_0, v_1, \dots, v_{m-1}, v_m\}$$

여기서 $v_0 = r$ 는 출발지, $v_m = s$ 는 도착지 노드이며 $m \geq 3$. 어느 노드 u와 연결된 유입링크(Incoming Links) 집합은 링크 및 노드집합 A 및 E에 대하여 다음과 같이 정의한다.

$$I(u) = \{(v, u) \in A | v, u \in E\}$$

경로 p를 삭제하여 네트워크 N'을 생성하기 위하

여 새로운 노드를 추가하고, 이들 노드에서 유입링크를 연결하며, p의 첫 번째 경로를 삭제하는 것이다. 알고리즘의 수행과정은 다음과 같다.

단계1

$$N = N \cup \{v_1, \dots, v_{m-1}\}$$

단계2

$$I(v_1) = \{(u, v_1) | (u, v_1) \in I(v_1); u \neq v_0\}$$

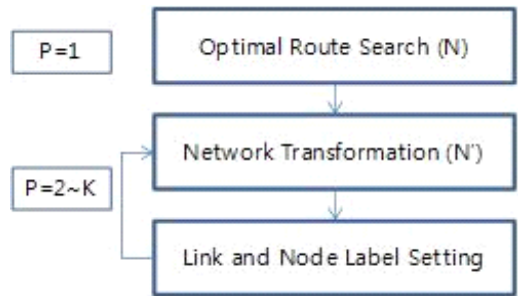
$$I(v_j) = \{(u, v_j) | (u, v_j) \in I(v_j); u \neq v_{j-1}\} \cup \{(v_{j-1}, v_j)\},$$

for any $j \in \{2, \dots, m-1\}$

단계3

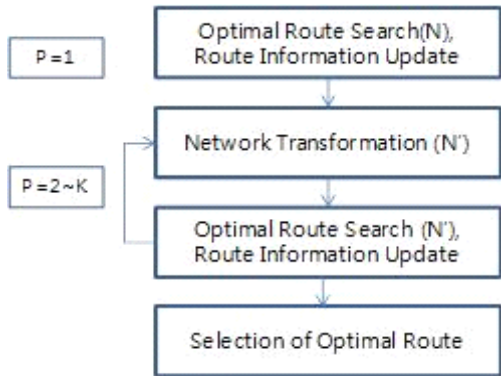
$$I(v_m) = I(v_m) - \{(v_{m-1}, v_m)\} \cup \{(v_{m-1}, v_m)\}$$

<Fig. 8>은 유입링크기반 전체경로삭제기법을 나타내며, N'에 대하여 최적경로를 탐색하지 않고 링크 및 노드표지를 확정한다.



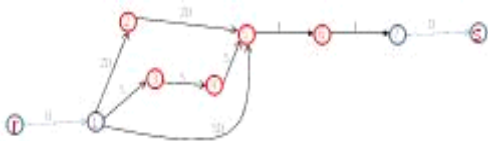
<Fig. 8> In-Coming Link Based Entire Path Deletion

<Fig. 9>은 새롭게 제안된 전체경로삭제기법이다. 일단 최적경로로 가정하고 표지확정을 진행한다. 탐색된 경로에 대하여 비용 등 정보를 갱신한다. 또한 현재까지 구축된 링크 및 노드표지 불확정성을 가정하여 출발지와 도착지를 연결하는 새로운 경로를 경로탐색을 통하여 구축한다. 최종적으로 구축된 경로 K개에 대하여 최적경로를 선정한다.

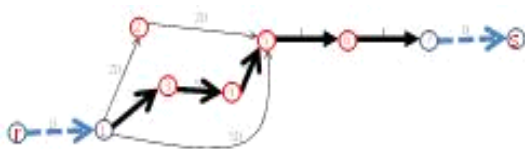


<Fig. 9> Revised In-Coming Link Based Entire Path Deletion

<Fig. 10>은 <Fig. 5>의 네트워크 N에 대하여 N_1 에 구축한 것이며, <Fig. 11>은 N_1 에 대하여 최적경로를 탐색한 것이다.



<Fig. 10> Transformation of Basis Network (N_1)



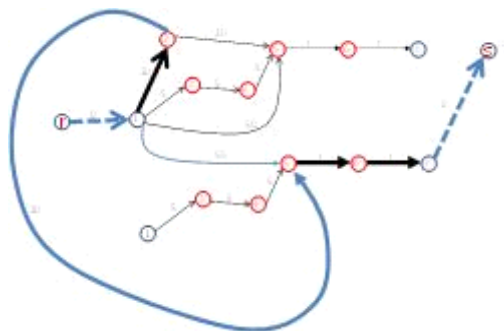
<Fig. 11> 1st Route Search of Network (N)

<Fig. 12>은 <Fig. 11>의 네트워크 N_1 에 대하여 탐색된 B경로와 N_1 에 대하여 유입링크기반 네트워크변형으로 N_2 을 구축한 것이다.

<Fig. 13>은 N_2 에 대한 최적경로탐색을 수행하여 경로 A가 도출됨을 보여준다.



<Fig. 12> Network Transformation (N_2)



<Fig. 13> 2nd Route Search of Network (N)

마지막으로 남은 경로는 C이며 $\min(48, 50, 46)=46$ 으로 C경로가 최적경로가 된다. 물론 C경로도 A경로와 N_2 로 유입링크기반 네트워크변형을 통하여 N_3 를 통하여 최적경로탐색으로 경로탐색이 가능하다. 중요한 점은 B, A, C경로 모두 본 연구에서 제시하는 ‘최적경로집합조건’에 만족하며 최적경로를 포함하는 집합으로 구성되어 있다는 점이다.

여기서 검토가 필요한 사항중 하나는 K 상한(Upper Bound)에 관한 것이다. 실제 대규모 망에서는 모든 경로를 열거하는 것은 불가능하다고 알려져 있다. 그러나 본 연구는 환승을 포함하는 대중교통 네트워크를 대상으로 복수경로를 탐색하는 것으로서, 일반적으로 대중교통망에서 최적경로를 포함하여 경로열거는 10개 미만으로 충분하며, 이는 현재의 계산 시스템으로 연산이 가능하다. 비가산성 비용의 최적해법은 결국 문제 맞춤형적으로 K민감도를 고려하는 방안이 적절하다.

IV. 결론

누적환승합수는 환승횟수가 늘어날수록 환승 자체에서 발생하는 실제비용보다 더 많이(적게) 인식 되도록 한다.

본 연구는 출발지부터 환승이 발생하는 시점까지 환승의 영향을 누적적으로 반영하는 최적경로탐색 수식을 제시했다. 또한 누적환승합수의 사례로서 파라메타로 반영하는 방법을 토이네트워크를 통해 검증했다. 누적환승합수가 포함된 통행비용은 비가산성 문제로서 경로열거가 요구됨을 증명했다. 경로열거에서 표지확정 문제를 우회하는 방안으로 최적경로집합조건을 제시했다. 이 조건을 구축하는 K경로탐색기법으로서 유입링크기반 전체경로삭제 기법을 수정하여 제안했다.

본 연구는 토이네트워크를 대상으로 결과의 타당성을 제시했으나, 대규모 현실 교통망에 대한 추가적인 검증이 필요할 것으로 판단된다. 특히 표지확정과정에서 발생하는 다양한 문제에 대해서는 향후 구체적으로 확인하는 절차가 필요하다. 최적경로탐색에 더하여 다수의 경로를 탐색하는 방안으로서 활용성을 확대하는 방안도 요구된다.

REFERENCES

[1] Bellman R.(1957), "Dynamic Programming," Princeton University Press, Princeton, New Jersey.

[2] Gabriel S. and Bernstein D.(1997), "The Traffic Equilibrium Problem with Nonadditive Path Costs," *Transportation Science*, vol. 20, no. 5, pp.337-348.

[3] Yang Y., Zhang X. and Meng Q.(2004), "Modeling Private Highways in Networks with Entry-Exit Based Toll Charges," *Transportation Research B*, vol. 38, pp.191-213.

[4] Chen P. and Nie Y.(2013), "Bicriterion Shortest Path Problem with A General Nonadditive Cost," *Social and Behavioral Sciences* 80, pp.553-575.

[5] Martins E. Q. V.(1984), "An Algorithm for Ranking

Paths that May Contain Cycles," *European Journal of Operational Research*, vol. 18, pp.123-130.

[6] 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.

[7] Shin S.(2004), "Finding the First K Shortest Loopless Paths in A Transportation Network," *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 22, no. 6, pp.121-131.

[8] Moore E. F.(1957), "The Shortest Path through A Maze," Proc. Int. Conf. on the Theory of Switching, Harvard Univ., Cambridge, MA.

[9] Dijkstra E. W.(1959), "A Note of Two Problems in Connected with Graphs," *Numer. Math.* 1, pp.269-271.

[10] Kirby R. F. and Potts R. B.(1969), "The Minimum Route Problem for Networks with Turn Penalties and Prohibitions," *Transportation Research* 3, pp.397-408.

[11] Lee M.(2015), "Transportation Network Models and Algorithms Considering Directional Delay and Prohibitions for Intersection Movement," Ph.D. Thesis, University of Wisconsin at Madison.

[12] Shier R. D.(1979), "On Algorithm from Finding the K Shortest Paths in A Network," *Networks*, vol. 9, pp.195-214.

[13] Yen J. Y.(1971), "Finding the K Shortest Loopless Paths in A Network," *Management Science*, vol. 17, pp.711-715.

[14] Pollack M.(1961), "The Kth Best Route Through A Network," *Operations Research*, vol. 9, pp.578-580.

[15] Bellman R. and Kalaba R.(1968), "On Kth Best Policies," *J. SIAM* 8, pp.5832-588.

저자소개



신 성 일 (Shin, Seongil)
2001년 University of Wisconsin-Madison 교통공학박사
2002년 2월 ~ 현재 : 서울연구원 교통시스템연구실 연구위원
e-mail : ssi@si.re.kr



백 남 철 (Baik, Nam Chul)
2002년 서울대학교 환경대학원 교통공학박사
1994년 4월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 ICT융합연구소 연구위원
e-mail : nc100@kict.re.kr



남 두 희 (Nam, Doo Hee)
1996년 University of Washington 교통공학박사
1997년 ~ 1999년 : Washington State Dept. of Transportation
2000년 1월 ~ 2006년 8월 : 한국교통연구원 책임연구원
2006년 8월 ~ 현재 : 한성대학교 정보시스템공학과 교수
e-mail : doohee@hansung.ac.kr