■ 論 文 ■

교통카드 기반자료를 활용한 복합대중교통망 구축 및 경로탐색 방안 연구

A Methodology of Multimodal Public Transportation Network Building and Path Searching Using Transportation Card Data

천 승 훈
(서울대학교 환경대학원 박사수료)

신 성 일
(서울시정개발연구원 연구위원)

이 영 인
(서울대학교 환경대학원 교수)

이 창 주
(서울대학교 환경대학원 석사과정)

목 차

Ⅰ. 서론
Ⅱ. 대중교통망의 특징 및 필요성
1. 대중교통망의 특징
2. 기존 대중교통망 구축 방법의 문제점
3. 새로운 대중교통망의 구축 필요성
Ⅲ. 기존 복합대중교통망 구축 방안
1. 노드기반 교통망 구축
2. 링크기반 교통망 구축
Ⅳ. 새로운 복합대중교통망 구축 제안
1. 복합대중교통망의 구축 방향
2. 정류장 기반 교통망 구축 방안
3. 단절된 링크의 연결 방안
4. 다수단 최적경로탐색 방안
5. 복합대중교통망의 구축
Ⅴ. 사례연구
Ⅵ. 결론
참고문헌

Key Words : 대중교통, 복합대중교통망, 경로탐색, 교통카드 자료, 링크기반 교통망
Public transportation, Multimodal Public Transportation Network, Path Searching, Transportation Card Data, Link-Based Transportation Network

요 약

도시의 교통문제 증가로 대중교통의 중요성과 역할에 대한 인식이 높아져가고 있다. 이러한 패러다임의 변화에 반해 기존 대중교통 통행배정과 관련한 연구는 여러 측면에서 한계가 있다. 복합대중교통망의 경우, 독립수단으로 이루어지는 도로교통과는 달리 수단간 환승, 운행시간 스케줄, 대기시간, 통행요금과 같은 복잡하고 다양한 특성을 포함하기 때문에 그 분석의 어려움은 배가 될 수밖에 없다. 특히, 수도권 대중교통 통합 환승할인제의 시행에 따른 대중교통 수단간 환승통행의 증가와 이에 따른 경로선택의 변화로 대중교통의 통행행태가 변하고 있으나, 기존의 대중교통교통망 구축방법으로는 이러한 변화를 반영하기에는 한계가 있다. 최근 첨단기술의 발달에 따라 대중교통이용자의 통행정보가 실시간으로 기록되는 첨단교통카드체계가 구축·운영 중에 있다. 이러한 첨단기술의 도입은 복합대중교통망 분석에 대한 새로운 접근방법에 대한 연구를 가능하게 하였다. 이에 본 연구에서는 교통카드자료의 통행정보를 효과적으로 활용할 수 있는 대중교통망을 구축하기 위해 정류장의 위치정보와 노선정보를 활용해서 새로운 복합대중교통망을 구축하는 방안을 다음과 같이 제시하였다.

첫째, 교통카드자료의 통행정보를 활용하기 위하여 정류장 기반의 통합교통망을 구축하는 방안을 제시하였다. 둘째, 컴퓨터 기반의 프로그래밍기법을 활용한 단절된 링크의 연결방안을 통해 대중교통의 환승문제를 해결하고자 하였다. 마지막으로, 복합대중교통망의 경로탐색에 있어 가장 큰 문제가 되는 다수단간의 경로탐색에 대한 방안을 제시하였다. 본 연구에서 제시한 방안으로 복합교통망을 구축할 경우, 기존 정류장 좌표와 대중교통의 노선정보를 그대로 활용하여 교통망을 구축할 수 있어 교통망 구축이 쉬울 뿐만 아니라, 환승링크 연결과 같은 별도의 교통망 작업 없이도 대규모 교통망에서의 활용이 가능해 진다.

Recognition for the importance and roles of public transportation is increasing because of traffic problems in many cities. In spite of this paradigm change, previous researches related with public transportation trip assignment have limits in some aspects. Especially, in case of multimodal public transportation networks, many characters should be considered such as transfers. operational time schedules, waiting time and travel cost. After metropolitan integrated transfer discount system was carried out, transfer trips are increasing among traffic modes and this takes the variation of users' route choices. Moreover, the advent of high-technology public transportation card called smart card, public transportation users' travel information can be recorded automatically and this gives many researchers new analytical methodology for multimodal public transportation networks.

In this paper, it is suggested that the methodology for establishment of brand new multimodal public transportation networks based on computer programming methods using transportation card data.

First, we propose the building method of integrated transportation networks based on bus and urban railroad stations in order to make full use of travel information from transportation card data. Second, it is offered how to connect the broken transfer links by computer-based programming techniques. This is very helpful to solve the transfer problems that existing transportation networks have. Lastly, we give the methodology for users' paths finding and network establishment among multi-modes in multimodal public transportation networks. By using proposed methodology in this research, it becomes easy to build multimodal public transportation networks with existing bus and urban railroad station coordinates. Also, without extra works including transfer links connection, it is possible to make large-scaled multimodal public transportation networks. In the end, this study can contribute to solve users' paths finding problem among multi-modes which is regarded as an unsolved issue in existing transportation networks.

본 논문은 국토해양부 국가교통핵심기술개발사업인 '교통연계 및 환승시스템 기술개발'의 지원을 받아 수행한 연구임(06 교통핵심 A02-02)

Ⅰ. 서론

서울시는 2004년 7월 1일을 기준으로 대대적인 대중교통체계 개편을 시행하였다. 이러한 대중교통체계 개편 이후 서울시에서는 교통카드로의 요금결재를 유도함으로써 교통카드 자료 분석을 통한 효율적 교통정책수립이 가능해 졌으며, 통합거리비례요금제 및 무료환승요금제 등의 새로운 요금체계로의 전환이 가능해짐에 따라 대중교통 서비스의 만족도를 높일 수 있을 뿐만 아니라 대중교통 수익금의 투명화를 통해 대중교통 운영의 효율성을 극대화시킬 수 있는 토대를 마련하였다.

또한, 통합거리비례요금제 및 무료환승요금제 등의 새로운 요금체계의 시행으로 인한 수단간 요금이 통합됨에 따라, 대중교통이용자들로 하여금 지하철과 버스 수단을 서로 다른 수단으로 인식하지 않고 대중교통 수단이라는 동일한 범주로 분류하게끔 인식이 변화되었다. 즉, 통행경로의 선택에 있어 더 이상 대중교통 수단 간의 구별은 큰 의미를 갖지 못하며, 경로선정에 있어서도 환승에 의한 복합적인 수단을 기준으로 하게 된다는 것이다.

기존의 대중교통 통행배정 모형은 대중교통 수단의 특성을 감안한 모형이라기보다는 개별차량의 통행배정이론을 적용한 것들이 대부분이었고 또한 버스나 지하철 등 단일수단을 기준으로 통행배정 모형을 구축함으로써 수단간 환승을 제대로 반영하지 못하는 경우가 많았다.

본 연구에서는 보다 현실적인 대중교통 통행배정을 위한 일환으로써, 교통카드로부터 수집되는 통행정보를 효과적으로 활용할 수 있도록 버스와 지하철을 포함한 복합 대중교통망의 구축 및 경로탐색 방안을 살펴보고자 한다.

Ⅱ. 대중교통망의 특징 및 필요성

1. 대중교통망의 특징

대중교통 교통망은 일반가로망에서 볼 수 없는 다른 여러 가지 특성들이 발생하는데, 1)노선의 중복성(Route Overlapping), 2)노선의 고정성(Fixed Route), 3) 환승(Transfer)체계의 존재, 4) FIFO(First-In-First-Out)제약조건의 파괴, 5) 링크통행비용의 시간의존성(Time-Dependent Link Cost), 6) 요금체계의 존재 등이다.

노선의 중복성은 일반 가로망에서의 최적경로 산정에는 고려되지 않는 요소로서, 동일한 가로를 주행하는 경우에도 수단, 노선의 종류에 따라서 여러 선택 대안이 존재함을 의미한다. 따라서 주행 중인 구간만을 탐색하는 것은 의미가 없으며, 해당 구간을 통행하는데 사용되는 수단과 노선에 대한 정보 역시 탐색되어야 한다.

노선의 고정성은 노선이 미리 예정된 경로만을 주행하는 것으로써, 일반가로망에서와 같이 중간에 사용자의 임의로 경로를 바꿀 수 없다는 것을 의미한다.

환승체계의 존재라는 것은 대중교통망은 노선의 고정성으로 인해 경로산출 시 환승문제를 고려하여야 하며, 환승소요시간, 대기시간, 환승횟수 등의 부가적인 문제들을 고려해야 한다는 것을 의미한다.

대중교통망에서는 교통수단 및 노선에 따라 평균주행속도나 물리적 운행경로가 다를 수 있으므로 링크에 선진입 차량이 링크에서 빠져 나오는 이른바 FIFO제약이 유지되지 않는데, 현재 일반 가로망에서 사용되는 대부분의 최적경로탐색 알고리즘은 이 FIFO제약을 가정하고 있으므로 이 특성으로 인해 기존의 알고리즘을 직접 사용하는데 있어 제약이 된다.

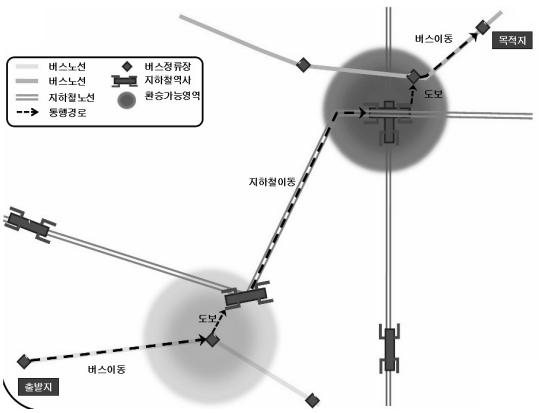
링크통행비용의 시간의존성이란 링크의 통행비용이 링크 진입시간에 따라서 가변적이라는 의미로써, 대중교통망의 경우, 운행 계획의 불규칙성 혹은 가로망의 교통상황에 따라서 이 값이 가변적일 수밖에 없다. 특히 이용자가 정류장에 도착하는 즉시 교통수단을 이용할 수 있는 것이 아니므로 이에 따른 대기시간도 링크 운행시간에 포함되어야 하므로 시간의존성이란 대중교통망의 경로산출시 기본적인 요소 중의 하나가 된다. 항공 및 철도 등 노선별 차두시간이 상대적으로 긴 대량운송수단에서는 이러한 특성이 두드러진다.

마지막으로 요금체계의 존재라는 측면은 선택된 교통수단에 따라 요금의 차이가 클 수 있으며, 이러한 요금차이는 이용자의 수단 선택에 중요한 영향을 미치는 요소가 된다는 것이다. 이 때문에 대중교통망에서는 이른바 k-path 등의 대안 경로 제시의 문제가 더욱 중요하게 된다. 반면, 일반 가로망에서의 경로탐색과는 달리 대중교통망에서는 회전제약 문제가 존재하지 않는다.

위에서 언급한 특징들로 인해 일반 가로망에서 사용되는 교통망 구축방법을 대중교통망에서도 동일하게 적용하여 사용될 수 없는 이유가 된다.

2. 기존 대중교통망 구축 방법의 문제점

기존 대중교통망의 경우, 일반 가로망 구축에서 적용



〈그림 1〉 복합대중교통망에서의 통행형태

하던 것과 같은 방식으로 행정동을 기반으로 구축되어 있다.

행정동을 기반으로 대중교통망을 구성할 경우, 통행배정 및 수요추정 시 여러 가지 문제들이 발생하게 된다.

첫째, 승차인원이 없는 정류장이 발생하게 된다. 하나의 행정동에서 여러 개의 정류장으로 노선을 배정할 경우, 행정동에서 발생하는 대중교통 이용자는 통행시간이 가장 짧은 경로를 선택하기 위해 도착지에 가장 가까운 정류장으로 모든 집중하기 때문이다.

둘째, 각 정류장의 승차인원이 실측치와 상이하게 배정되게 된다. 행정동 기반으로 수요를 추정할 경우 행정동의 외곽 지역 정류장에만 수요가 추정되는 경우가 발생하게 되는데, 이는 이용자들이 상대적으로 통행시간이 적게 소요되는 경로를 선택하기 때문이다.

셋째, 행정동 기반은 동일한 행정동 내의 지하철역이나 버스 정류장에서의 통행이 무시되어 실제 수요보다 과소 추정되는 문제가 발생하게 된다.

넷째, 지하철과 버스의 수단간 환승을 정확하게 표현하지 못한다는 점이다. 타 수단간 환승을 고려함에 있어 실제 정류장이 아닌 가상의 노드를 연결한 환승링크를 통하여 수단간 환승이 이루어지므로 실제 정류장을 연결한 환승링크보다 정확한 환승표현이 이루어지지 않는 문제점이 있다.

마지막으로, 교통망 구축 시 수작업으로 이루어지므로 교통망에 대한 모니터링이 어려울 뿐만 아니라, 교통망 변화 시 즉각적인 수정이 어렵다는 문제점이 있다.

3. 새로운 대중교통망의 구축 필요성

2004년 7월 1일부로 서울시를 중심으로 대중교통 중심의 교통체계로 개편됨에 따라 대중교통을 이용하는 통행자의 통행패턴이 변화하게 되었다. 특히, 대중교통 수단간 통합 환승할인제의 시행으로, 기존 단일수단별 단일통행으로 이루어지던 통행패턴이 다수단·다목적통행으로 통행패턴이 바뀌기 시작하였다. 따라서 이러한 변화된 통행패턴을 기존의 단일수단 중심의 교통망으로 분석하기에는 한계가 있을 수밖에 없고, 여러 수단간 통행패턴을 표현할 수 있는 새로운 복합대중교통망의 구축이 시급한 실정이다.

대중교통체계개편이후 교통카드 자료, 정류장 위치좌표 및 대중교통 노선자료의 확보가 가능해짐으로써, 정류장 기반 대중교통 O/D 및 교통망 구축이 가능해졌다.

따라서 이러한 자료를 이용하여 실제 대중교통을 이용하는 정류장 중심의 대중교통망을 구축한다면 기존의 방법으로 대중교통망 구축에 따른 문제점을 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 대중교통 체계의 계획, 운영, 평가 시 사용자와 관리자의 입장에서 필요한 분석이 가능해 졌다.

또한, 이러한 교통카드 자료를 활용한 대중교통망을 구축한다면 기존에 대중교통망 구축 시 인력에 의한 수작업으로 이루어지던 작업이 정류장의 위치좌표를 활용하여 프로그래밍 기법에 의해 자동으로 업데이트될 수 있다. 따라서 교통망 구축에 따른 모니터링의 어려움이 해결될 수 있을 뿐만 아니라, 교통망 변화 시 즉각적인 수정이 가능해짐에 따라 현실적인 교통망의 반영이 가능해 질 수 있다.

이밖에도 교통카드 자료를 활용하여 복합대중교통망을 구축할 경우, 프로그래밍 기법에 의해 단절된 링크에서도 수단간 환승에 대한 반영이 가능하게 되어, 동일 정류장에서의 환승뿐만 아니라, 단절된 링크에서의 도보에 의한 환승 또한 반영할 수 있게 된다. 따라서 기존에 단일수단에 대한 통행배정만 가능하던 것이 복합수단간의 환승을 반영한 통행배정이 가능해 졌을 뿐 아니라, 기존의 환승에 대한 복잡한 표현을 프로그래밍 기법을 통해 간단하게 표현할 수 있으므로 교통망 구축을 쉽게 할 수 있는 장점이 있다.

〈표 1〉 교통카드이용자료 활용방안의 장점

장점	내용
정확성	수집 자료의 정확성 및 신뢰성 증대
경제성	조사비용의 획기적 절감
지역성	모든 시간대 및 광범위한 지역에 걸친 자료 취득 가능
단축성	실시간 자료구축 또는 자료취득 시간의 단축
활용성	통행목적 파악을 위한 자료의 활용가능성 증대
확장성	방대한 자료 수집 가능 및 향후 정보 확장 가능
안전성	안전사고 및 돌발 상황 예방
범용성	다양한 목적으로의 교통카드 사용 가능

자료: 대중교통정책수립을 위한 교통카드자료 활용방안, 한국교통연구원, 2006

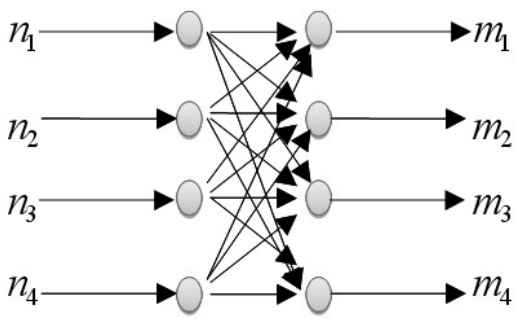
Ⅲ. 기존 복합대중교통망 구축 방안

1. 노드기반 교통망 구축

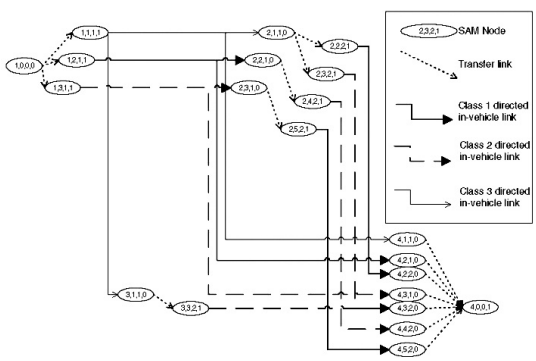
다수의 복합교통망에서 최적경로탐색을 위해 노드기반 알고리즘을 적용하면, 각 수단 간의 환승시간 고려로 Bellman의 최적원리가 만족되지 않는다(임강원, 임용택(2003)).

Bellman의 최적원리가 만족되지 않는 대표적인 경우는 회전금지가 존재하는 도로망이나 복합교통망의 경우이다. 이는 전통적인 노드 기반(Node-Based)의 경로탐색 알고리즘으로는 복합교통망의 최단경로를 찾을 수 없다는 것이다. 물론 기존의 여러 연구들을 통해 이러한 문제들을 극복할 수 있는 방법들이 개발된 바 있으나 대부분의 연구들이 교통망의 확장작업을 필요로 하거나, 확률적 방법을 이용한다는 점에서 알고리즘이 비효율적이거나 계산 비용이 대단히 크다.

복합교통망에서의 수단간 환승에 대한 문제를 풀기 위해 노드기반으로 환승과 수단간 연결을 동시에 확장하는 방법에 대한 연구가 이루어 졌으나(Lo et al(2003), Hamdouch et al(2006)), 이 역시 교통망의 규모가 증가하면 불능상태에 이르게 되어, 대규모 교통망에 적용하기에는 어려움이 있다.



〈그림 2〉 노드기반 알고리즘의 교통망 확장



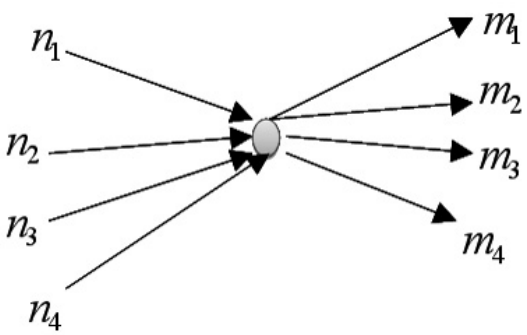
〈그림 3〉 노드기반의 교통망 확장 예

2. 링크기반 교통망 구축

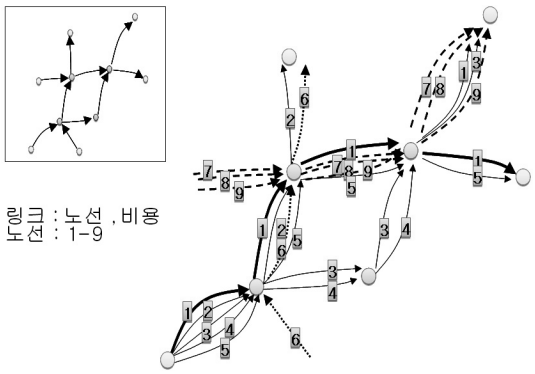
링크표지기반의 경로 탐색 알고리즘(LSPA, Link-Based Shortest Path Algorithm)은 최초로 Potts & Oliver(1972)가 P-turn을 고려하기 위하여 그 개념을 제시하였으나, 이를 복합교통망으로 발전시키지는 못했다.

링크기반 경로탐색 알고리즘은 각 링크의 종점에 대한 도착비용과 링크의 전 링크를 저장하여 경로를 탐색하기 때문에 교통망의 모든 연속 링크간의 회전비용, 또는 환승비용을 고려할 수 있다. 따라서 하나의 노드에 대해 하나의 전 노드와 최소 도착비용을 저장하는 전통적인 알고리즘이나 이를 개선한 덩굴망 알고리즘과 달리 하나의 노드에 대해 접근로 수만큼의 이전 링크와 도착비용이 저장되어 연속 회전 벌점이나 환승비용 문제를 해결할 수 있다. 또한, 그 동안 발표된 변형 알고리즘들에 비해 알고리즘의 구성이 단순해 쉽게 적용이 가능하고, 복합교통망에서의 탐색영역문제도 해결할 수 있는 장점이 있다.

복합교통망에 링크기반 알고리즘을 적용할 경우, 노드기반 알고리즘과 달리 별도의 추가적인 환승노드 및 환승링크가 필요하지 않게 되며, 링크표지를 이용할 경우 환승비용을 교통망 확장 없이 고려할 수 있으므로 교통망을 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라 링크기반 알고리즘은 노드기반 알고리즘과 달리, 동일한 노선의 중복이 존재하는 대중교통 교통망에서 링크를 기반으로 탐색하



〈그림 4〉 링크기반 알고리즘의 교통망 확장



〈그림 5〉 링크기반의 교통망 확장 예

기 때문에 다음 노드까지 어떤 노선을 이용하였는지 명확하게 판단할 수 있다.

복합교통망에서의 수단간 환승에 대한 문제를 풀기 위해 링크기반으로 환승과 수단간 연결을 동시에 확장하는 방법에 대한 연구가 이루어지고 있으며(신성일(2004), 조종석(2006), 박준환(2007)), 실제 링크의 수단 확장을 통해서 모든 수단이 개별링크로 처리되어 수단에 대한 별도의 고려 없이 알고리즘을 적용할 수 있다.

Ⅳ. 새로운 복합대중교통망 구축 제안

1. 복합대중교통망의 구축 방향

복합대중교통망은 독립수단으로 이루어지는 도로교통과 달리 수단간 환승, 운행시간 스케줄, 대기시간, 통행요금과 같은 복잡하고 다양한 특성을 가지고 있어 이들 특성들을 고려한 복합대중교통망의 구축 방안이 필요하다. 본 연구에서 제시하고자 하는 복합대중교통망의 구축방향은 다음과 같다.

첫째, 현재 수집되고 있는 교통카드자료는 정류장 기반으로 수집되고 있기 때문에 이를 활용하기 위한 정류장 기반의 대중교통망을 구축하도록 한다.

둘째, 환승체계의 구축을 위해 컴퓨터 프로그래밍 기법에 의한 가상 링크 및 환승체계 개념을 도입하였다. 이러한 가상 링크 및 환승체계 개념을 도입하면, 대중교통통합 환승할인제 시행 이후 실제로 빈번하게 발생되고 있는 수단간 환승문제인 복수의 정류장간의 환승처리가 가능해지며, 또한 단절된 교통망간의 연결도 별도의 환승 교통망을 연결하지 않더라도 연결이 가능해진다.

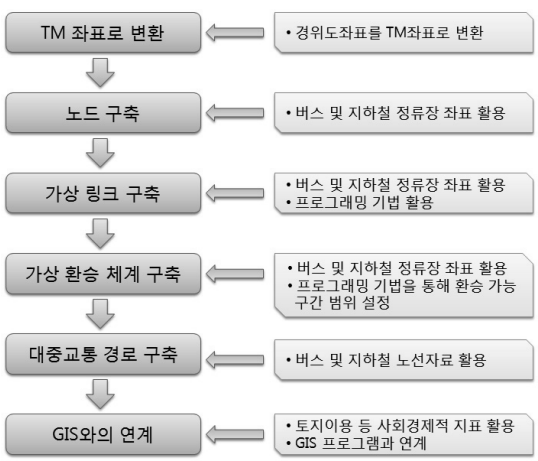
마지막으로, 최근 컴퓨터 하드웨어의 발달과 컴퓨터 공학의 발전으로 대규모 교통망의 처리가 일반컴퓨터에서도 가능해짐에 따라, 본 연구에서는 기본적으로 두 개의 링크를 이용하여 교통망을 구축하는 링크표지기반 교통망 개념을 적용하여 기존 교통망에 적용하도록 한다. 이는 개별 노선의 모든 정류장 쌍(pair)을 링크로 확장하는 것으로, 개별 노선을 구성하는 정류장과 정류장의 모든 쌍들이 교통망이 되도록 대중교통망을 구성하는 것이다.

2. 정류장 기반 교통망 구축 방안

교통카드 자료의 수집 및 이를 이용한 분석이 가능해짐에 따라 기존의 행정동 기반의 O/D와 교통망에 의한 분석방법은 앞서 살펴본 여러 가지 문제점들로 인해 효용성이 떨어질 수 밖에 없다. 이에 본 연구에서는 정류장 위치 좌표와 대중교통 노선자료를 기반으로 한 정류장 기반 대중교통 교통망 구축 방안을 제안하도록 한다.

이때 대중교통망은 자료의 특성상 버스와 지하철만을 대상으로 하며, 이에 대한 구축 과정은 〈그림 6〉과 같다.

기존 버스 및 지하철 정류장의 좌표는 경위도체계로 되어 있기 때문에 이를 거리계산이 가능한 TM (Transverse Mercator) 좌표로 변환할 필요성이 있다. TM좌표로 변환된 정류장 좌표로 노드를 구축하고 프로그래밍 기법을 활용하여 가상으로 링크와 환승체계를 구축한다. 끝으로 이렇게 구성된 교통망 상에 대중교통 노선자료를 활용하여 대중교통 경로를 구축하도록 한다.



〈그림 6〉 정류장 기반 교통망 구축방법

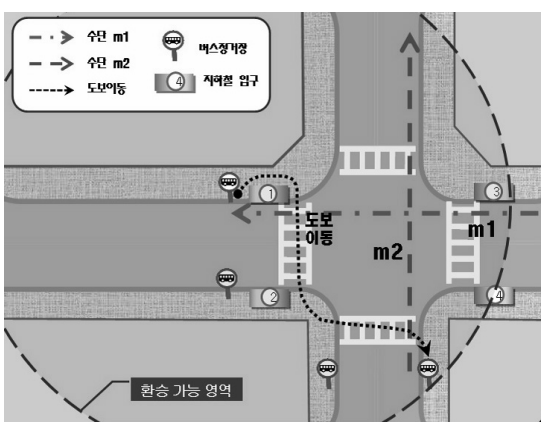
3. 단절된 링크의 연결 방안

대중교통망을 구축 시 가장 고려되어야 할 사항은 수단간 환승에 대한 처리이다. 기존에 교통망을 구축하는 방법을 살펴보면 단일수단에 대한 교통망만으로 구성하거나, 복합수단일 경우에도 모든 환승경로에 대한 링크를 일일이 연결하여 구축해야 되는 어려움이 있다. 따라서 연결된 환승링크의 경우에도 링크가 제대로 연결되어 있는지에 대한 모니터링이 불가능할 뿐만 아니라, 교통망 변화 시 이에 대한 즉각적인 교통망 수정이 어려운 게 현실이다. 또한 대중교통의 특성상 단일 정류장에서의 환승이 이루어지는 것이 아니고, 도보를 통해 복수의 정류장에서 환승이 이루어지므로 이에 대한 처리가 실질적으로 불가능하였다.

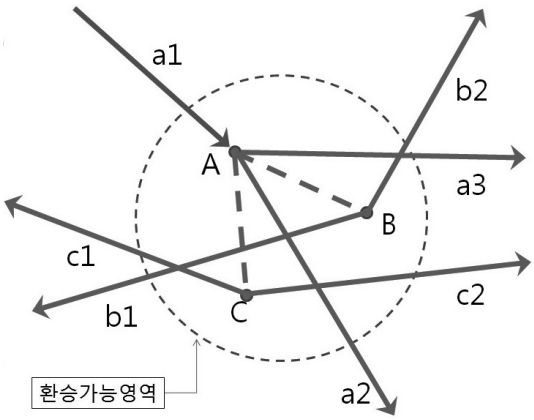
본 연구에서는 이러한 환승처리상의 문제점들을 해결하기 위해 프로그래밍 기법을 활용하도록 하며, 이를 통해 좌표거리를 계산하여 일정거리에 있는 노드들을 연결시켜주는 가상 링크 및 환승 체계를 구축하였다.

컴퓨터 프로그래밍 기법을 활용한 가상 링크 및 환승체계 구축방법은 버스 및 지하철 정류장 좌표를 이용하여 각 정류장 간 가상 링크를 구성하고, 이렇게 구성된 노드와 가상 링크를 기반으로 수단 간 환승이 이루어지는 정류장 및 일정거리(예, 500m) 이내의 정류장을 환승 가능 지역으로 표현하여 가상 환승 체계를 구축하는 방식이다.

이를 그림으로 나타내면 〈그림 7〉, 〈그림 8〉과 같다. 〈그림 8〉은 유입링크 a1을 통해 유입된 통행이 환승가능영역내의 유출링크 집합 {a2, a3, b1, b2, c1, c2}



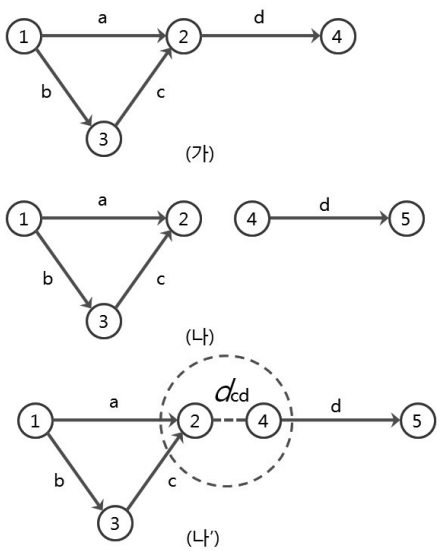
〈그림 7〉 가상 링크 및 환승체계



〈그림 8〉 가상링크 및 환승체계

내에서 환승을 통해 유출되는 경우를 나타낸다. 이때, A, B, C는 노드 즉 정류장이 되며, 환승은 동일 노드(A) 또는 다른 노드(B, C)에서 가능하게 된다. 환승가능영역내의 노드와 노드 간의 연결은 가상 즉 실제 상황 속에서는 도보로 연결되어지며, 이런 가상링크는 컴퓨터 프로그래밍의 자료 구조에 입력함으로써 간단하게 환승 교통망을 구축할 수 있게 된다.

〈그림 9〉의 (가)는 일반적인 교통망에서의 노드와 링크를 나타낸 것이고, (나)는 단절된 교통망을 나타낸 것이다. (나)와 같은 교통망의 경우, 일반적인 교통망 개념상으로는 두 개의 교통망이 별도로 존재하게 되므로 실제 노드 ①에서 노드 ⑤까지 이동경로가 존재하더라도

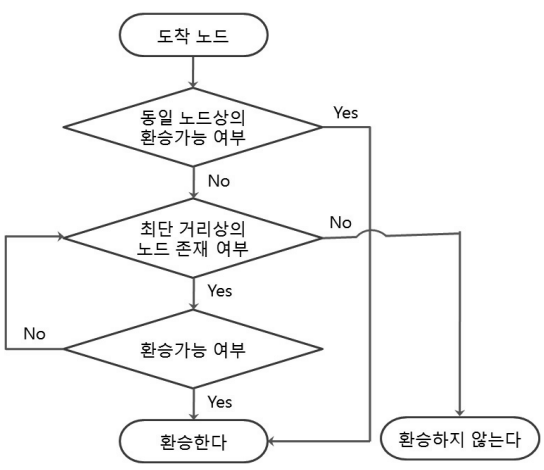


〈그림 9〉 단절된 링크 연결

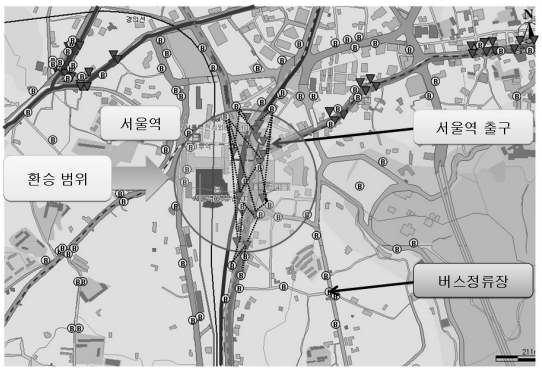
지금까지 이를 알고리즘으로 풀지 못했다. 본 연구에서는 이러한 단절된 링크를 (나')와 같이 환승가능영역 내에 있는 노드들을 가상링크로 연결하여 일반적인 경로탐색 알고리즘 구현이 가능해지도록 하였다. 이때, 단절된 링크는 다음과 같은 알고리즘에 의해 컴퓨터 프로그래밍 상에서 계산된 좌표거리를 통해 가상링크를 탐색하여 연결하게 된다.

이러한 가상 링크를 통해 환승 체계를 구축할 경우, 대중교통 교통망 간에 직접적으로 연결되어 있지 않더라도 현실에서 일반적으로 발생하는 복수의 정류장에서의 수단간 환승에 대한 고려를 할 수 있다. 그 뿐만이 아니라 기존의 방법처럼 일일이 환승 링크를 연결하지 않더라도 환승처리를 할 수 있기 때문에 환승 링크 연결에 따른 어려움 및 불확실성을 줄일 수 있게 된다.

〈그림 11〉은 이러한 가상링크 및 환승체계의 개념을 실제 서울역 주변의 버스정류장과 지하철역에 표현한 것이다. 서울역 주변에는 2개의 지하철노선과 79개의 버스운행노선이 운영되며, 지하철역 출구 14개와 버스정류장 25개가 존재하는 거대한 환승망을 갖추고 있다. 이러한 물리적인 요소 외에도 대중교통 통합 환승할인제를 시행한 이후 수단간 환승요금이 추가로 발생되지 않은 이유로 대중교통의 수단간 환승비율이 높아져 가고 있는 상황이다. 서울역의 경우를 보더라도, 실제 승객은 버스를 타고 와서 지하철로 환승하기도 하고, 버스를 타고 버스로 환승하기도 한다. 이때 승객들은 동일 정류장에서 뿐만 아니라, 다른 정류장으로 이동하여 환승을 하게 된다. 서울역의 경우처럼, 복잡한 환승교통망을 구축하기



〈그림 10〉 단절된 링크에서의 환승



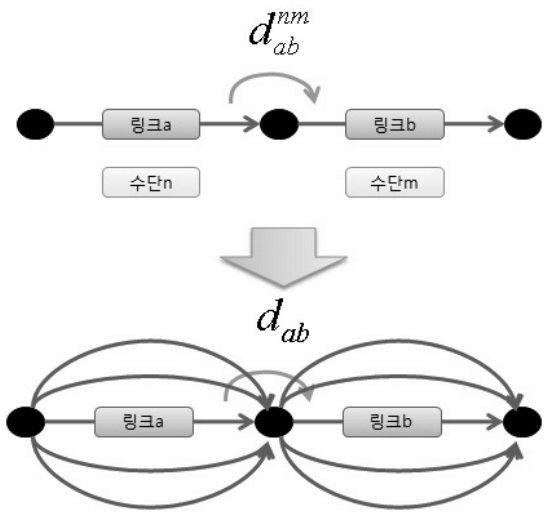
〈그림 11〉 서울역 주변 정류장 실태

위해서는 기존의 방법으로는 일일이 노드 간 환승링크를 추가로 연결해야하는 어려움이 발생되게 된다. 이러한 복잡한 환승체계를 컴퓨터 프로그래밍 기법을 활용하여 가상링크 및 환승 체계로 구축하게 되면, 별도의 수작업 없이도 간편하게 환승교통망을 구성할 수 있게 된다.

4. 다수단 최적경로탐색 방안

본 연구에서 제안한 복합대중교통망은 버스와 지하철, 환승을 위한 도로링크 등 여러 수단들을 함께 고려해야 하므로, 다양한 수단을 함께 고려하는 복합교통망에서의 최단경로 탐색알고리즘이 필요하다. 하나의 교통망에 승용차, 지하철, 버스 등 다수의 교통수단이 존재하고, 이들 간의 환승이 발생하는 경우 최단경로의 탐색은 상당히 어려운 문제가 된다. 최근까지 여러 최단경로 알고리즘들을 이용하여 이런 복합교통망의 최단경로문제를 풀기 위한 시도가 있었지만, 교통망 확장 등 상당한 추가비용이 소요되는 단점이 있다. 즉, 링크나 노드를 수단 수만큼 확장하여 수단 간의 환승을 완전하게 묘사해야만 했다. 따라서 노드확장이나 계층적 교통망을 통한 분할 탐색법은 교통망이 소규모이고 고려되는 수단이 간단할 경우에는 문제가 없으나 대규모교통망에서 버스와 같은 다수의 노선들을 고려해야 하는 경우에는 상당히 어려운 문제가 있다.

복합교통망에서 다수단을 반영하기 위해서 특히 동일 링크 상에 복수수단이 통행하는 경우, 본 연구에서는 동일 링크에 주행하는 모든 수단을 개별링크로 확장하여 표현한다. 이 방안은 링크의 수가 노선의 수에 비례하여 증가하는 단점을 가지고 있으나, 수단의 특성이 링크에 반영되어 수단 및 노선의 특성에 대한 다각적인 분석이 가능하다는 장점이 있다.



〈그림 12〉 수단 m,n의 환승요금 반영 및 수단링크확장

대중교통망과 같이 다수단이 존재하는 교통망에서 모든 수단을 개별링크로 확장하여 나타낼 경우, 환승비용에 대해서 단순화하여 나타낼 수 있다. 〈그림 12〉는 두 인접 링크(a,b)를 주행하는 수단 m, n에서 발생하는 환승비용 d_{ab}^{mn}을 링크확장을 통하여 d_{ab}로 단순화하여 나타낸 것이다.

이처럼 모든 수단을 개별링크로 처리하여 교통망을 구성하게 되면, 수단에 대한 별도의 고려 없이 다수단의 개념을 단일수단의 개념으로 변화시킬 수 있으므로 알고리즘을 쉽게 적용할 수 있게 된다.

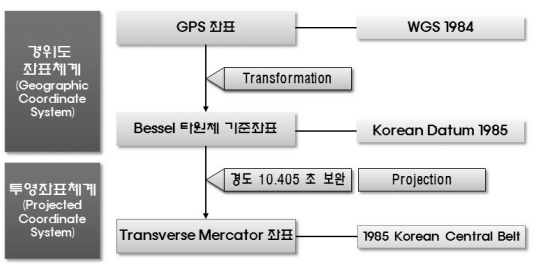
5. 복합대중교통망의 구축

현재 서울시에서 구축되어 있는 정류장의 위치좌표는 GPS기반의 경위도 좌표체계로 구축되어 있기 때문에, 이를 실제 노드로 활용하기 위해서는 거리계산이 가능한 TM (Transverse Mercator) 좌표로의 변환이 필요하다.

본 연구에서는 경위도 좌표를 TM 좌표로 변화하기 위해 GIS툴인 ArcGIS 9.0프로그램을 활용하였다.

〈표 2〉는 서울시의 노선별 정류장 위치좌표를 ArcGIS 9.0을 활용하여 TM 좌표로 변환한 결과이다.

교통카드 자료에는 〈표 2〉와 같이 정류장의 위치좌표뿐만 아니라, 노선정보가 포함되어 있기 때문에, 일단 TM 좌표를 이용해 노드를 구축하게 되면, 각 노드간의 링크는 대중교통 노선정보에 의해 자동으로 구축되게 된다. 이처럼 정류장을 기반으로 교통망을 구축할 경우, 문제가 되는 것은 대중교통 수단간 환승에 대한 부분이다. 즉, 버스와 지하철 환승 시 대중교통 이용자는 도보를 통해서 환승하는 것이 일반적인 상황이다. 비단 버스와 지하철간의 환승뿐만 아니라, 버스간의 환승일 경우에도 이처럼 도보에 의한 환승이 발생하고 있다. 이러한 도보에 의한 환승처리를 위해 본 연구에서는 단절된 링크의 연결방안을 제시하였다. 단절된 링크의 연결을 위해 앞서 기술한 바와 같이 컴퓨터 프로그래밍 기법을 활용하였으며, 이를 통해 가상으로 링크를 연결하게 되면 정류장을 기반으로 하는 복합대중교통망을 구축할 수 있게 된다.



〈그림 13〉 경위도 좌표의 TM 좌표 변환 과정

〈표 2〉 경위도 좌표의 TM 좌표로 변환 결과

조합 구분	버스노선ID	교통 수단명	노선명	정류장ID	정류장 명	정류장 순서	정류장 X좌표	정류장 Y좌표	진입각도	정류장누적	정류장 간차	행정동ID	행정동	경도_x	위도_y	x_tm	y_tm
시내	11110100	지선 버스	0013번(서울역 방향,보광동~ 서빙고동)	0008986	보광동 신동아 아파트	1	12700.087	3731.538	324	0	0	1103070	서울시 용산구 보광동	127.0014	37.5256	200060.715	447046.470
시내	11110100	지선 버스	0013번(서울역 방향,보광동~ 서빙고동)	0008965	기업은행보광동지점	2	12659.942	3731.693	324	358	358	1103070	서울시 용산구 보광동	126.9990	37.5282	199846.807	447333.938
시내	11110100	지선 버스	0013번(서울역 방향,보광동~ 서빙고동)	0008928	정수기 능대학	3	12659.789	3731.832	310	701	343	1103065	서울시 용산구 이태원1동	126.9965	37.5305	199622.305	447590.335
시내	11110100	지선 버스	0013번(서울역 방향,보광동~ 서빙고동)	0008916	보광동 입구	4	12659.650	3732.028	346	1134	433	1103065	서울시 용산구 이태원1동	126.9941	37.5338	199417.272	447954.396
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Ⅴ. 사례연구

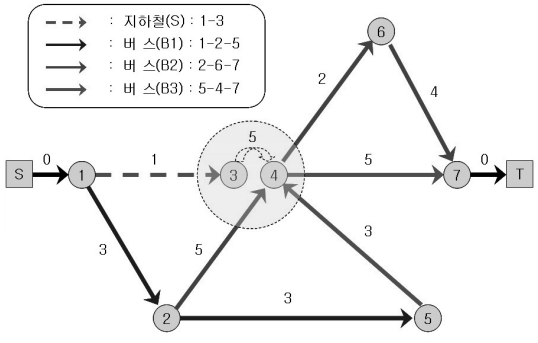
〈그림 14〉는 지하철 1개와 버스노선 3개로 구성된 복합교통망으로 버스와 버스는 동일노드에서 환승을 하지만, 지하철과 버스의 경우, 정류장의 좌표가 틀리게 되므로, 별도의 노드에서 환승이 발생하는 경우이다.

〈그림 14〉의 교통망을 출발링크에 대한 도착링크 집합으로 표현하면 아래와 같다. 이때, A①→②는 링크 ①→②를 출발하여 도착하는 링크의 집합이다.

A[S]→① = {①→②, ①→③}
A①→② = {②→④, ②→⑤}
A①→③ = {③⇢④→⑥, ③⇢④→⑦}
A②→④ = {④→⑥, ④→⑦}
A②→⑤ = {⑤→④}
A⑤→④ = {④→⑥, ④→⑦}
A④→⑥ = {⑥→⑦}
A④→⑦ = {⑦→[T]}
A⑥→⑦ = {⑦→[T]}

이를 링크기반 경로탐색방법에 의해 최단경로를 찾아보면 〈표 3〉와 같다.

〈그림 14〉와 같이 교통망이 구성되었을 경우, 일반적인 경로탐색방법에 의해 최단경로를 탐색하게 되면, 노드 ③과 노드 ④는 연결되어 있지 않으므로, 최단경로는 [S]→①→②→④→⑦→[T]가 된다. 그러나 실제 현실에서는 도보에 의해 노드 ③과 노드 ④가 연결되므로 [S]→①→③⇢④→⑦→[T]가 최단경로가 된다. 이와 동일한 개념으로, 가상링크를 통해 환승링크를 연결하는 방안으



〈그림 14〉 복합환승망 적용을 위한 교통망

〈표 3〉 가상링크 연결에 의한 링크기반 경로탐색 결과

출발링크	도착링크	비용	지원링크	환승비용
[S]→①	①→②	3	[S]→①	0
	①→③	1	[S]→①	0
①→③	③⇢④→⑥	8	①→③	5
	③⇢④→⑦	11	①→③	5
①→②	②→④	8	①→②	0
	②→⑤	6	①→②	0
②→④	④→⑥	10	②→④	0
	④→⑦	13	②→④	0
②→⑤	⑤→④	9	②→⑤	0
⑤→④	④→⑥	11	⑤→④	0
	④→⑦	14	⑤→④	0
④→⑥	⑥→⑦	12	④→⑥	0
④→⑦	⑦→[T]	11	④→⑦	0
⑥→⑦	⑦→[T]	12	⑥→⑦	0

로 링크기반 경로탐색을 수행하면 〈표 3〉과 같이 동일한 산출결과를 얻을 수 있게 된다.

Ⅵ. 결론

도시의 교통문제가 증가하면서 대중교통의 중요성과 역할에 대한 인식이 새로워지고 있다. 2004년부터 서울시를 중심으로 승용차보다는 대중교통을 중심으로 하는 교통체계개편 실태를 보더라도 교통의 패러다임이 확연히 바뀌고 있음을 실감할 수 있다.

이러한 패러다임의 변화에 반해 기존 대중교통 통행배정과 관련한 연구는 여러 측면에서 한계를 드러내고 있다. 복합대중교통망의 경우, 독립수단으로 이루어지는 도로교통과는 달리 수단간 환승, 운행시간 스케줄, 대기시간, 통행요금과 같은 복잡하고 다양한 특성을 포함하고 있기 때문에 그 활용 및 분석에 있어서 어려움은 배가 될 수밖에 없다.

이에 본 연구에서는 교통카드자료의 통행정보 활용과 컴퓨터 기반의 프로그래밍기법을 활용한 새로운 복합대중교통망의 구축방안을 제시하였다.

첫째, 교통카드자료의 통행정보를 활용하기 위하여 정류장 기반의 통합교통망을 구축하는 방안을 제시하였다. 정류장 기반의 복합교통망을 구축하게 되면 교통카드로부터 얻어지는 대중교통 이용자의 통행정보 활용이 가능해질 뿐만 아니라, 정류장의 위치정보와 노선정보를 활용하여 대중교통망을 자동적으로 구축하게 된다. 따라서 교통망의 구축이 쉬울 뿐만 아니라, 교통망의 수정을

손쉽게 할 수 있는 장점이 있다.

둘째, 컴퓨터 기반의 프로그래밍기법을 활용한 단절된 링크의 연결방안을 제시하였다. 복잡한 복합대중교통망의 구축을 위해 환승링크를 연결시켜주는 작업은 방대할 뿐만 아니라, 교통망에 대한 모니터링을 불가능하게 만든다. 또한 교통망의 변화에 따른 즉각적인 수정을 어렵게 만드는 이유가 된다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 프로그래밍기법에 의한 좌표거리를 계산하여 단절된 링크를 연결하는 가상의 링크체계를 구축하였으며, 이를 통해서 복잡한 환승체계를 구성하였다. 이러한 방법으로 교통망을 구축하게 되면, 교통망의 구축이 쉬울 뿐만 아니라, 즉각적인 교통망의 수정 및 모니터링이 가능하게 되어 운영의 편의성이 높은 교통망 구축이 가능해질 수 있다.

마지막으로, 복합대중교통망의 경로탐색에 있어 가장 큰 문제가 되는 다수단간의 교통망 구축 및 경로탐색에 대한 방안을 제시하였다. 노드기반의 교통망 구축방법으로 복합교통망을 구축할 때, 수단간 환승에 대한 문제를 풀기 위해 노드기반으로 환승과 수단간 연결을 동시에 확장하는 방법에 대한 연구가 있었으나, 이 역시 교통망의 규모가 증가하면 불능상태에 이르게 되어 대규모 교통망에 적용하기에는 어려움이 있다. 이에 본 연구에서는 링크기반의 교통망 구축방법을 적용하였다. 이 경우 모든 수단을 개별링크로 처리하여 교통망을 구성하게 되므로, 수단에 대한 별도의 고려 없이 다수단의 개념을 단일수단의 개념으로 변화시킬 수 있으므로 다수단에 대한 경로탐색 문제가 해결될 수 있게 된다. 또한 대중교통 수단간 환승에 대한 처리를 위해 단절된 구간을 가상으로 연결하여 교통망을 구축함으로써 도보에 의한 환승 문제를 포함하여 경로를 탐색할 수 있는 방안을 제시하였다.

최근 첨단기술의 발달에 따라 대중교통이용자의 통행정보가 실시간으로 기록되는 첨단교통카드체계가 구축·운영중에 있다. 이러한 첨단기술의 도입은 복합대중교통망 분석에 대한 새로운 접근방법에 대한 연구를 가능하게 하였다. 본 연구에서는 교통카드자료의 통행정보를 효과적으로 활용할 수 있는 대중교통망을 구축하기 위해 교통카드 자료에 포함되어 있는 정류장의 위치정보와 노선정보를 활용해서 새로운 복합대중교통망을 구축하는 방안을 제시하였다. 본 연구에서 제시한 방안으로 교통망을 구축할 경우, 기존 정류장 좌표를 그대로 활용하여 교통망을 구축할 수 있어 교통망 구축이 쉬울 뿐만 아니라, 환승링크 연결과 같은 별도의 교통망 작업 없이도 대규모 교통망에서 활용이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김익기(1998), "ATIS를 위한 수정형 덩굴망 최단경로 탐색 알고리즘의 개발", 대한교통학회지, 제16권 제2호, 대한교통학회, pp.157~167.
2. 김익기(2004), "수정형 덩굴망 최단경로 탐색 알고리즘을 이용한 다경로 생성 알고리즘의 개발", 대한교통학회지, 제22권 제2호, 대한교통학회, pp.121~130.
3. 김현명·임용택·이승재(1999), "통합교통망 수단선택-통행배정모형 개발에 관한 연구", 대한교통학회지, 제17권 제5호, 대한교통학회, pp.87~98.
4. 김현명, 임용택(2000), "알고리즘을 이용한 전역탐색 최단경로 알고리즘개발", 대한교통학회지, 제16권 제2호, pp.157-167.
5. 김현명·임용택(1999), "유전 알고리듬을 이용한 전역탐색 최단경로 알고리듬개발", 대한교통학회지, 제17권 제2호, 대한교통학회, pp.163~178.
   저자에게 확인받기
6. 노정현, 남궁성(1995), "도시가로망에 적합한 최단경로 탐색 기법의 개발", 대한국토계획학회지, 제30권 제5호.
7. 박경철·문정준·이성모·박창호(2007), "복합수단을 고려한 확률적 대중교통 통행배정모형 개발", 대한교통학회지, 제25권 제3호, 대한교통학회, pp.111~121.
8. 박준환·신성일·임용택·임강원(2007), "통합거리비례요금제와 차내혼잡을 반영하는 통합대중교통망 통행배정 모형 구축", 대한교통학회지, 제25권 제2호, 대한교통학회, pp.133~143.
9. 안형준·이영인(2007), "서울시 스마트카드 자료를 이용한 버스/지하철 정류장 기반 OD 및 네트워크 구축과 활용에 관한 연구", 교통 기술과 정책, 제4권 제4호, 대한교통학회, pp.31~59.
10. 이미영·유기윤·김정현·신성일(2003), "덩굴망 통행패턴을 고려한 One-To-One 다경로알고리즘", 대한교통학회지, 제21권 제6호, 대한교통학회, pp.89~99.
11. 이미영·백남철·남두희·신성일(2004), "거리비례제 요금부과에 따른 최소요금경로탐색", 대한교통학회지, 제22권 제6호, 대한교통학회, pp.101~108.
12. 이인묵(2004), "환승을 고려한 대중교통 최적경로 탐색 알고리즘", 서울대학교 대학원.
13. 임용택(2004), "일반가로망에서 교통정보제공을 위

한 n-path 알고리듬의 개발", 대한교통학회지, 제22권 제4호, 대한교통학회, pp.135~145.
14. 신성일(2004), "교통망에 적합한 K 비루프 경로 탐색 알고리즘", 대한교통학회지, 제22권 제6호, 대한교통학회, pp.121~131.
15. 장인성(2000), "서비스시간 제약이 존재하는 도시부 복합교통망을 위한 링크기반의 최단경로탐색 알고리즘", 대한교통학회지, 제18권 제6호, 대한교통학회, pp.111~121.
16. 조종석・신성일・문병섭・임강원(2006), "출발시간제약이 존재하는 동적 복합교통망의 K최소시간경로탐색", 대한교통학회지, 제24권 제3호, 대한교통학회, pp.167~176
17. 조종석・신성일・임강원・문병섭(2006), "복합교통망에서의 동적K최소시간경로탐색", 대한교통학회지, 제24권 제5호, 대한교통학회, pp.77~88
18. 최기주(1995), "U-turn을 포함한 가로망 표현 및 최단경로의 구현", 대한교통학회지, 제13권 제3호, 대한교통학회, pp.35~52.
19. 임강원・임용택(2003), "교통망분석론", 서울대학교 출판부.
20. Angelica Lozno, and Giovanni Storci(2001), "Shortest viable path algorithm in multimodal networks", Transportation Research Part A 35, pp.225~241.
21. 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.
22. Bellman R. and Kalaba R.(1968), "On Kth Best Policies". J. SIAM 8, pp.582~588.
23. Clarke S., Krikorian A., and Rausan J.(1963), "Computing the N Best Loopless Paths in A Network", Journal of SIAM, Vol. 11, No. 4, pp.1096~1102.
24. Daniele Pretolani(2000), "A directed hypergraph model for random time dependent shortest paths", European Journal of Operational Resarch 123, pp.315~324.
25. De Cea. J. and J.E. Fernandez.(1989), "Transit Assignment for Minimal Routes: An Efficient New Algorithm", Traffic Engng. Control, pp.492~494.
26. De Cea. J. and J.E. Fernandez.(1993), "Transit Assignment for Congested Public Transport Systems: An Equilibrium Model", Transportation Science Vol. 27.
27. Hong K. Lo, C.W. Yip, and K.H. Wan,(2003), "Modeling transfer and non-linear fare structure in multi-modal network", Transportation Research Part B 37, pp.149~170.
28. Younes Hamdouch, Michael Florian, Donald W. Hearn, and Siriphong Lawphongpanich(2007), "Congestion pricing for multi-model transportation systems", Transportation Research Part B 41, pp.275~291.

♧ 주 작 성 자 : 천승훈
♧ 교 신 저 자 : 천승훈
♧ 논문투고일 : 2008. 2. 23
♧ 논문심사일 : 2008. 4. 16 (1차)
2008. 4. 25 (2차)
♧ 심사판정일 : 2008. 4. 25
♧ 반론접수기한 : 2008. 10. 31
♧ 3인 익명 심사필
♧ 1인 abstract 교정필