

■ 論 文 ■

복합 교통망에서의 최적경로산정 모형개발

A Model for Shortest Path Calculation on Intermodal Transportation Network

최 기 주

(아주대학교 교통공학과 교수)

장 원 재

(아주대학교 교통연구센터 연구원)

목 차

- I. 서론
 - II. 관련 알고리즘의 고찰
 - 1. 일반가로망의 경로탐색 알고리즘
 - 2. 시간의존적 경로탐색 알고리즘
 - 3. 대중교통망의 특징
 - 4. 대중교통망의 구성요소
 - 5. 대중교통망 모형 및 알고리즘
 - III. 복합 교통망에서의 최적경로 산정 모형
 - 1. 수정 모형 및 알고리즘
 - 2. 통합 교통망
 - IV. 기타 관련문제들에 대한 고찰
 - 1. 환승 제한의 문제
 - 2. K-path의 문제
 - V. 모형의 구현
 - 1. 모형의 검증
 - 2. 교통망데이터의 생성
 - 3. 구현 결과
 - VI. 결론 및 향후 과제
- 참고문헌

요 약

자동차보급의 대중화와 함께 버스, 전철 등 대중교통체계의 지속적인 서비스 확충으로 인해 다양한 교통망의 이용행태가 나타나고 있다. 즉, 승용차를 이용하다가 대중교통수단을 이용하는 경우가 발생하게 되고 이러한 환경에서, 기타 통행대안들(예를 들면 목적지, 수단, 경로 등)이 효율적으로 연계 선택되어질 수 있도록 지원하여 전체 교통체계의 이용효율을 높일 수 있는 방안들이 강구되도록 요구되어지고 있다. 본고는 이런 관점에서 복합 교통망에서의 경로안내 체계의 구현을 위한 알고리즘개발과 평가를 주목적으로 한다. 즉, 복합교통망에서의 경로탐색모형과 이 모형에 적용가능한 경로탐색 알고리즘의 제시하고, 이를 위해 복합교통망의 한 축이 되는 대중 교통망의 특징을 분석하고 대중교통망에서의 경로탐색알고리즘을 평가하였으며 이를 바탕으로 일반가로망과의 최단경로구축의 통합방안을 제시하였다. 한편, 복합교통망에서의 경로탐색알고리즘이 갖추어야 특성, 및 이를 수용하는 적합한 수정 알고리즘을 아울러 제시하였다. 알고리즘의 구현과정을 필요한 데이터의 구축과정과 함께 도시함으로서 모형과 알고리즘에 대한 평가와 함께 실제 구현시 필요한 제반 사항들도 검토하였으며, 장래의 연구과제를 아울러 제시하였다.

I. 서론

교통과 컴퓨터/정보통신 기술의 접목으로 인해 도로의 소통상황 등과 같은 교통정보와 이를 바탕으로 출발지/목적지 사이에 적절한 경로를 제시해주는 경로안내 시스템이 등장하였다. 직관적 혹은 경험적 경로정보를 바탕으로 이루어져온 경로 선택 방식에서 인근 도로구간의 현재 소통상태에 대한 정보를 획득한 후 이를 바탕으로 경로를 재조정하는 방향으로 변화하고 있는 것이다. 이는 기본적으로 도로 보급의 증가로 인해 다수의 대안경로가 존재한다는 점과 차량의 기하급수적 증가로 인한 도로 혼잡의 증가, 도로내 시설 공사 및 공공 행사 등으로 인한 가로 상황의 가변성 등으로 인해 경로 선택의 필요성이 크게 증가하였다는 점에 기인한다. 자동차 보급의 증가에 비해 도로 보급율의 증가는 상대적으로 저조한 실정 이므로 도로 상황에 대한 정보와 이를 기반으로 하는 경로 안내 체계의 필요성이 상대적으로 크게 증가할 수밖에 없다. 자가 운전자를 대상으로 경로안내를 해 줄 수 있는 경로탐색 알고리즘들이 그간 꾸준히 개발되어왔으며, 이 알고리즘들은 경로안내 시스템과 더불어 전체 네트워크의 상태를 분석하고 예측하는 통행배정분야에도 널리 활용되어 왔다.

한편, 도로의 수요 및 공급의 불균형으로 말미암은 도심내의 교통체증의 폭발적 증가로 인해 대중교통시스템의 역할이 점차 높아가고 있으며, 과학 기술의 발전을 통해 대중교통 시스템의 질적, 양적인 확장, 대중교통의 활성화를 위한 복합 이용 체계 등으로 인해 대중교통수단을 이용한 경로안내시스템의 필요성이 나타나기 시작했다. 대중교통 시스템은 교통혼잡의 증가, 이로 인한 대중교통활성화 정책, 장거리여행의 증가 등으로 인해 질적, 양적으로 빠르게 변화하고 있다. 이용방식에 있어 사용자의 편의를 위해 복합적으로 변화하고 있으며 이용 수단의 종류도 지하철, 버스 등의 도시내 교통수단을 비롯하여 항공, 해상, 철도 등의 장거리 교통수단의 이용도 점차 빈번해지고 있다. 단 한번의 티켓 구매로 여러 수단을 연계하여 이용하는 복합 시스템이 점차 자리잡아가고 있다. 이로 인해 여러 대중교통 시스템에 대한 정보가 사용자에게 통합되어 전달되어 질 수 있는 정보

시스템의 제공이 점차 중요해지고 있다. 이를 위해서는 대중교통망에 대한 데이터베이스의 구축이 필요하며, 그 중에서도 노선 및 환승 정보의 구축이 시급한 부분이다. 이와 함께, 이러한 데이터베이스를 기반으로 하는 복합수단 경로안내 알고리즘의 개발이 필요하다. 이는 사용자의 요구에 부합하는 여행과정(다수의 교통수단 및 노선, 시간 등으로 구성되는)을 제공할 수 있기 때문이다. 이러한 시스템은 사용자로 하여금 경제적이며 시간도 적게 드는 여행 계획을 손쉽게 세울 수 있도록 도와주며, 전체 대중교통수단의 질적 향상과 균형적 이용, 교통시스템의 질적 관리 등이 가능하도록 할 수 있을 것이다. 더욱이 정보통신기술의 급격한 발전과 인터넷 등의 정보전달 매체의 대중화는 이러한 요구를 가속화하고 있다. 이와 함께 자동차 고유의 편의성과 대중교통시스템 사용의 불가결성으로 인해 대중교통수단과 자가 운전을 복합적으로 이용하는 경우도 발생하게 되었으며 이를 위한 경로안내시스템 역시 필요하게 되었다.

본 연구의 목적은 이러한 필요성에 부응하여 다수의 교통수단이 혼합된 복합교통망(inter-modal network)에서의 경로안내를 위한 네트워크 모형과 알고리즘을 제시하는 것으로서, 이용자에 대한 개별적 경로안내에 주안점을 두며, 따라서 두 지점 사이의 경로안내에 연구를 국한시켰다. 본 연구는 다음과 같은 내용으로 구성되었다.

II장에서는 기존 일반가로망(highway network)을 대상으로 하는 경로탐색 알고리즘을 고찰하였다. 여기에는 링크의 통행비용이 고정적인 경우와 가변적인 경우 모두를 검토하였다.

III장에서는 대중교통망(transit network)의 특성을 규명하고 이 특성에 부합하는 네트워크 모형과 알고리즘을 제시하였다. 대중교통망은 몇 가지 측면에서 일반가로망과 성격이 다르며, 이 때문에 일반 가로망의 알고리즘을 직접적으로 적용할 수 없다. 따라서 대중교통망의 특성에 맞는 네트워크 모형을 제시하였으며 이 모형에 맞는 수정 알고리즘을 제안하였다. 또한 대중교통망과 일반가로망의 경로탐색 정보의 차이점을 고찰하고 이 차이점을 해소하여 하나의 통합 교통망을 구성하는 방안을 제시하였다. 여기서 환승 센터를 중심으로 환승체계의 구축을 위한 방안과 도

착지점의 명시에 대한 문제를 고찰하였다.

IV장에서는 대중교통망 및 복합교통망과 관련된 부가문제로서 환승제한과 다수대안경로생성에 대한 문제를 검토하였다.

II장과 III장에서 모형과 알고리즘은 컴퓨터 프로그램을 통해 구현되었으며 V장에서 구현에 필요한 데이터의 구축 방안과 실현 예를 나타내었다.

II. 관련 알고리즘의 고찰

복합교통망은 서로 다른 특성을 가지는 교통망의 연계로 이루어진다. 이 때, 가로망은 특성에 따라 크게 두 가지로 나눌 수 있는데 하나는 도로이용자가 자신의 의지에 따라서 경로를 자유롭게 변경할 수 있는 일반 가로망(highway network)이고 다른 하나는 고정된 노선과 배차간격(headway)가 존재하는 대중교통망이다. 대중교통망에는 버스와 지하철을 비롯하여 고속버스, 철도, 항만, 항공을 망라할 수 있는데 각기 고유의 망체계를 가지며, 일반가로망이나 타 대중교통망과의 연계체계를 가지게 된다. 복합교통망에서의 경로탐색은 이러한 가로망의 특성을 모두 고려할 수 있어야 하므로 먼저 일반가로망과 대중교통망 각각을 대상으로 연구되어온 경로 탐색 알고리즘을 검토하는 것이 필요하며 이와 함께 경로안내 체계에 필요한 요소들에 대하여 본 절에서 살펴본다. 그리고 이를 바탕으로 두 체계를 하나의 체계로 통합하여 경로 안내에 활용할 수 있는 방안을 III절에서 제시한다.

1. 일반 가로망의 경로탐색 알고리즘

일반가로망을 대상으로 하는 경로탐색 알고리즘에 대해서는 1950년대 이후 이미 많은 연구가 진행되어 왔다. 최근에는 교차로에서의 회전금지 문제와 함께 가로망의 모든 노드를 탐색하는 전통적인 탐색 알고리즘 대신 탐색 영역을 제한하여 보다 신속히 최단경로를 탐색하려는 알고리즘들에 대한 연구가 많이 진행되었다(최기주, 1995; 남궁성, 1996).

일반 가로망의 알고리즘은 대부분 Bellman의 최적원리(principle of optimality)¹⁾에 의거하여 최적경로를 탐색한다. 일반적으로 교통망에서는 링크의 통행비용을 양의 값으로 상정하며, 이 경우 두 지점 사이의 최적경로 탐색에 가장 효율적인 알고리즘은 Dijkstra(1957) 알고리즘으로 알려져 있다. 이 알고리즘은 노드 탐색 과정의 각 반복 단계에서 최소 비용을 가지는 노드에 확정 "표지"(label)를 설정함으로써, 탐색 대상 노드의 수를 줄여나간다. 각 반복 과정에서 최소 비용을 가지는 노드에 확정 표지들 두는 것은 그 노드까지 도달하는데 필요한 최소의 비용이 이미 계산되었다는 것을 뜻하며, 이 때문에 링크의 통행 비용이 0보다 커야 한다는 제약 조건이 필요하다. 이 알고리즘은 최소의 경로비용을 가진 노드를 다음 탐색 노드로 삼음으로써 목적지까지 도달하는데 필요한 계산량을 최소화하기 때문에 두 지점사이의 경로를 탐색하는데 효과적이다.

한편, 일반적인 네트워크와는 달리 도시의 가로망에서는 특정방향으로의 회전금지나 진행 방향별로 서로 다른 회전 페널티가 존재할 수 있다. 회전금지가 존재하는 경우에는 유턴(u-turn)이나 피턴(p-turn) 등이 나타나 동일한 노드가 최적경로 내에 두 번 나타나거나 혹은 최적경로내의 부분경로가 최적경로가 되지 못하는 경우가 발생한다. 결국 이 경우에는 벨만의 최적원리를 손상시키게 되어 이에 기반한 수형망 알고리즘은 최적경로탐색에 실패하게 된다. 이 때문에 회전금지(혹은 회전페널티)를 고려할 수 있는 알고리즘에 대한 연구가 진행되어 왔는데 일반적으로 사용되는 알고리즘으로는 덩굴망 알고리즘과 링크표지 알고리즘이 있다.

덩굴망 알고리즘은 각 노드에 전노드를 보관하는 공간을 확장하여 전노드의 전노드(전전노드)까지 보관할 수 있게 함으로서 전술한 문제를 부분적으로 해결한다. 그러나 이 알고리즘은 좌회전금지가 연속된 경우에는 최적경로탐색에 실패하게 된다.

링크표지 알고리즘은 교차로 노드, 가로 링크라는 지금까지의 가로망에 대한 네트워크의 모형화 동식을 깨고 가로 노드, 교차로에서의 회전 링크라는 새로운

1) 두 노드 사이에 어떤 경로가 최적경로를 이루면 그 경로내의 임의의 부분 경로 역시 최적경로가 된다는 것임

개념의 네트워크를 사용한다는 점에서 알고리즘의 변화라기보다는 모형의 변화라고 볼 수 있다. 이 때문에 구현이 단순한 수형망 알고리즘을 사용해도 최적 경로를 탐색할 수 있다. 가로를 네트워크의 링크로 간주함으로써 이 네트워크에서의 최적경로는 네트워크의 링크가 FIFO(First-In, First-Out) 제약 조건을 따르는 경우 항상 벨만의 최적원리를 보존한다. 즉 이전까지의 네트워크 모형에서 문제가 되었던 두 가지 문제인 최적경로내에 동일한 노드가 두 번 발생하는 것²⁾과 회전금지로 인해 전체 최적경로의 부분경로가 최적경로가 되지 못하는 문제가 다음과 같은 이유로 인해 해결된다. 첫 번째 문제는 교차로를 노드로 간주했기 때문에 발생하는 것으로써 최적경로가 같은 교차로를 두 번 지나가는 것은 논리적으로 가능하지만 동일한 가로를 두 번 왕복하는 것은 있을 수 없다. 두 번째 좌회전 금지와 같은 문제는 이 모형에서는 고려할 필요가 없게 되는데 그 이유는 교차로에서 회전이 금지되었다면 해당 회전을 나타내는 네트워크 링크를 제거하면 되므로 이전의 모형에서처럼 이미 존재하는 링크와 링크 사이의 회전 규제를 추가적으로 고려할 필요가 없다.

위에서 언급한 바와 같이 링크표지 알고리즘은 네트워크 모형을 바꿈으로써 회전금지로 인해 발생하는 문제를 해결하였다. 이 모형에서는 네트워크의 노드 수가 가로의 수와 일치하므로 수행력(performance)이 가로의 수에 의존하게 되는데 교차로의 수에 비해 가로의 수가 상대적으로 적은 교통망에서는 비교적 빠른 수행력을 보인다. 링크표지법과 덩굴망알고리즘에 대한 비교는 남궁성(1996)에 나타나 있다.

2. 시간의존적(time-dependent) 경로 탐색 알고리즘

이는 ITS의 진행과 더불어 최근에 연구가 한창인 분야로서, 네트워크를 구성하는 각 링크의 통행비용이 시간에 따라 가변인 경우에 최단경로를 산정하는 문제로서 Cooke and Halsey(1966)에 의해 처음으로 제기되었다. 이 문제는 최근에 동적통행배정 분야에

서 응용할 목적으로 많이 연구되었는데(Ziliaskopoulos and Mahmassani, 1994) 경로안내 분야에서도 최근 적용되고 있는 추세이다. 특히 다양한 교통수단 사이의 상호 연계를 고려하는 복합교통망에서는 그 중요성이 커진다. 예를 들어 철도를 이용하는 경로의 경우, 불과 1, 2분의 도착시간 차이에 따라서 해당 교통수단의 이용여부가 가름되기도 하는데 결국 중간 지점에서의 작은 시간차이가 전체 통행시간에 상당한 영향을 끼치게 된다. 시간의존적 경로산정을 위해서는 통행시간에 대한 모형이 필요한데 여기에는 시간의 흐름에 따라서 링크의 통행시간이 연속적으로 변화한다고 가정하는 함수모형과 대상시간대를 일정한 시간 간격으로 분할하여 각 시간 간격에서는 동일한 통행시간을 적용하는 준정적(quasi-static) 통행시간모형이 있는데 아직은 후자가 주로 사용된다고 볼 수 있다.

Dreyfus(1969)는 Dijkstra의 정적인 경로산정 알고리즘을 일반화한 표지확정(label setting) 방식의 알고리즘을 제안한 바 있다. 이 방법은 하나의 출발시간에 대한 두 노드 사이의 시간의존적 경로를 산정한다. Dreyfus의 접근방식에서는 네트워크의 모든 링크에 대하여 FIFO(First-In-First-Out) 특성이 유지되어야만 한다. 그렇지 않은 경우, Dreyfus 알고리즘은 최단 경로 산출에 실패하게 된다. 이 사실은 몇몇 연구자들에 의해 이미 거론된 바 있으며 Dreyfus의 개략적 알고리즘은 다음과 같다.

- N : 네트워크의 모든 모드의 집합
- M_a : 영구표지(labeled)를 가진 노드의 집합
- M_b : 임시표지(unlabeled)를 가진 노드의 집합
- n_i : i번째 노드
- t_0 : 출발시간
- t_n : 노드 n에 도착하는 시간
- n_r : 출발노드
- n_s : 도착노드
- $n[n_a, 0, t_0]$: 노드 n에서의 경로정보(전노드, 누적 경로비용, 도착시간)
- $C(n_i, n_j, t)$: t시간에 n_i 에 도달했을 때의 n_i 부터

2) 이 문제는 본질적으로 두 번째 문제와 동일하며 두 번째 문제의 특수한 유형이라고 볼 수 있다.

n_j 까지의 링크 통행비용(통행시간, 거리 등)

$(C(n_i, n_j, t)) \geq 0$, 모든 i, j 에 대하여

$T(n_1, n_2, t)$: 시간 t 에 노드 n_1 에 진입하였을 때, n_2 에 도착 시간

$C(n_i)$: 출발노드와 노드 n_i 사이의 총 경로비용 (누적 경로비용)

단계 1. $k=1$. 출발노드(n_r)를 지정하고 전노드와 경로정보를 설정함 $n_r[-, 0, t_0]$

$$M_a = \{n_r\}, M_b = N - \{n_r\}$$

단계 2. $k=k+1$

다음의 조건을 만족하는 임시표지를 가진 노드 n_k 를 탐색

$$C(n_k) = \min\{C(n_y) + \min[C(n_y, n_k, t_{ny})]\}$$

$$n_y \in M_a, n_k \in M_b$$

$$M_a = M_a \cup \{n_k\}, n_k[n_y, C(n_y, n_k, t_{ny}), T(n_y, n_k, t_{ny})]$$

$$M_b = M_b - n_k$$

단계 3. 도착노드에 확정표지가 설정되었거나 모든 노드에 확정표지가 설정되었으면 종료. 그렇지 않으면 단계 2으로 감.

Orda and Rom(1990)은 FIFO에 제약 받지 않는 경우의 접근방법을 제안하였다. 이 방법은 모든 노드에서 대기(waiting)가 허용되는 경우에 각 방문노드에서의 최적대기시간(optimum waiting time)을 산정할 수 있으며, 출발노드 이외의 다른 모든 노드에서의 대기가 허용되지 않는 경우에 출발 노드에서의 최적 대기시간을 계산할 수 있다. 그러나 모든 노드에서의 대기가 허용되지 않는 경우 이들의 접근방식은 최적해를 효율적으로 찾아낼 수 없다.

시간의존적 경로 산정시에 고려되어야 할 문제는 첫째, 링크의 통행비용이 시간과 링크의 함수가 됨으로써, 경로 산정시의 기본 전제인 FIFO제약 조건이 훼손될 수 있다는 점이다. 일반 가로망에서는 시간변화에 따른 링크에서의 평균운행속도의 변화에 대한 제약조건을 설정함으로써 이 문제를 해결할 수 있다. Ran(1994)에 따르면 시간변화에 따른 운행속도의 변화율이 -1 보다 작거나 같은 경우 추월(overtaking)이

발생하며 따라서 이 값이 -1보다 커야 FIFO 조건이 유지된다.

그러나 일반 가로망에서 통행시간을 비용으로 산정하고 준정적(quasi-static) 통행시간모형을 이용하는 경우에는 비교적 용이하게 FIFO조건을 만족시킬 수 있다. 차량이 링크를 통과하는데 필요한 시간은 그 링크의 출발노드에 차량이 도착한 시간의 함수이다. 예를 들어, 만약 링크 1의 출발노드에 도착한 시간이 2시14분이고 2시에서 2시15분까지의 링크통행시간은 20분, 2시16분에서 2시30분까지의 링크통행시간이 10분이라면 위 차량(2시14분에 도착한 차량)이 링크 1을 빠져나올 때의 시간은 2시 34분이 되며, 후속차량이 2시 16분에 링크 1에 진입하였다면 이 차량은 2시 26분에 링크 1을 빠져나오게 된다. 따라서 FIFO제약 조건이 파괴된다.

FIFO제약조건을 만족시키기 위해서는 링크통행시간의 변화가 급격히 이루어지지 않아야 하며 이 한계는 1단위 시간이다. 즉 분단위로 계산한 경우에는 2개의 연속되는 통행시간 데이터의 차이가 1분 미만이어야 하며 초단위로 계산한 경우에는 1초 미만이어야 한다. 그러나 15분단위로 구성된 데이터에서는 이것은 불가능한 것이다(가능하도록 하기 위해서는 최소의 링크 통행시간이 15분이상이어야 한다. 이것 역시 불가능한 경우이다).

이를 처리하기 위해 링크의 통행시간을 그 링크로의 진입시간의 함수로 보되 진입시간 이후의 모든 링크통행시간을 함께 고려한다. 즉 길이가 $L(1)$ 인 링크 1로 진입할 때의 시간을 t_{in} 이라 하고 t_{in} 이 포함된 시간의 인덱스를 k 라고 하면 이 때의 링크통행시간은 $a(k)$ 가 되며 링크 1의 진출시간은 다음의 식에 의해 계산될 수 있다.

$$(t_{k+1}-t_{in}) * L(1)/a(k) + (t_{k+2}-t_{k+1}) * L(1)/a(k+1) + \dots + (t_{out}-t_{k+n}) * L(1) / a(k+n-1) = L(1)$$

위 식에서 $L(1)$ 을 $a(k)$ 로 나누면 주행속도가 되는데 여기에 $(t_{k+1}-t_{in})$ 을 곱하면 주행거리가 된다. 만약 이 거리가 전체 링크의 길이보다 길다면 이 차량은 t_{k+1} 이전에 링크에서 빠져나오게 되며 이 때에는 위 식 좌변에서 첫번째 항만 나타나고 t_{k+1} 은 t_{out} 이 된다. 만약 전체

링크의 길이보다 짧다면 이 차량은 다음 시간대의 링크통행시간으로 나머지 거리를 주행하게 된다. 이 과정을 반복하여 차량이 링크의 길이를 모두 여행할 수 있을 때까지 반복하면 차량이 링크에서 빠져나오는 시간을 산정할 수 있다. 이러한 구조에서는 위에서 제기한 FIFO제약 조건이 어떤 경우에도 만족하게 된다.

따라서, 위의 기본 알고리즘에서 링크 통행시간을 취득하는 부분을 링크진출시간-링크진입시간으로 대체하고 링크진출시간을 위식을 통해 계산하면 된다.

대중교통망(transit network)에서는 일반적으로 수단, 노선의 종류에 따라서 FIFO제약이 무시된다. FIFO제약이 무시되고 노드에서의 대기가 허용되지 않는다면 최단 경로 내에 순환로의 발생을 피할 수 없다(Orda and Rom, 1990).

둘째는 링크의 비용이 시간 이외의 다른 요소로 표현되는 경우, FIFO 제약에서와 같은 문제가 발생한다는 점이다. 예를 들면, 노드 i 에서 노드 j 로 진입시 두 개의 서로 다른 시간대 1, 2에 대하여 $t_1 < t_2$ 이고 $c_1 > c_2$ 라면(링크의 통행비용이 시간인 경우에는 이러한 문제가 발생하지 않는다) 노드 i 에서 j 로 진입하는 경로의 전체 경로비용이 오히려 더 커지는 경우가 발생한다. Dreyfus의 알고리즘에서는 링크의 비용합수를 시간으로 가정하였으므로 이러한 문제가 발생하지 않았다. 일반 가로망에서의 경로 산정시에는 이러한 가정이 보통이지만 대중교통망에서는 요금과 같은 주변 요소가 경로산정시의 링크통행비용이 될 가능성이 많으므로 이 경우의 해결책도 필요하다. 위에서 언급한 알고리즘들은 탐색 대상시간대를 분할하고 노드에 도착한 시간 이후의 후속시간대 모두에 대하여 경로 검색을 수행함으로써 FIFO문제를 해결한다.

3. 대중교통망의 특징

대중교통망(transit network)은 일반가로망과는 다른 여러 특성을 가지고 있다. 때문에 최적경로 탐색시에는 이와 같은 차이로 인해 발생하는 여러 문제들을 고려해야만 한다. 일반가로망과 다른 대중교통망 고유의 특징들을 나열하면 다음과 같은 것들이 있다.

1) 노선의 중복성(route overlapping), 2) 노선의 고정성(fixed route), 3) 환승(transfer) 체계의 존재, 4)

IFO(First-In-First-Out) 제약조건의 파괴, 5) 링크통행비용의 시간의존성(time-dependent link cost), 6) 요금 체계의 존재 등이다.

첫째, 노선의 중복성은 일반 가로망(highway network)에서의 최적경로 산정에는 고려되지 않는 요소로서, 동일한 가로를 주행하는 경우에도 수단, 노선의 종류에 따라서 여러 선택 대안이 존재함을 의미한다. 따라서 주행중인 구간만을 탐색하는 것은 의미가 없으며 해당 구간을 통행하는데 사용되는 수단과 노선에 대한 정보 역시 탐색되어야 한다. 둘째, 노선의 고정성은 노선이 미리 예정된 경로만을 주행하는 것으로서, 따라서 일반가로망에서와 같이 중간에 사용자의 임의로 경로를 바꿀 수 없다는 것을 의미한다. 셋째, 이로 인해 경로산출 시에 환승 문제를 고려해야 하며, 환승소요시간, 대기시간, 환승횟수 등의 부가적인 문제들을 고려해야 한다. 넷째, 교통수단 및 노선에 따라 평균주행속도나 물리적 운행경로가 다를 수 있으므로 링크에 선 진입 차량이 링크에서 먼저 빠져 나오는 이른바 FIFO제약이 유지되지 않는다. 현재 일반 가로망에서 사용되는 대부분의 최적경로 탐색 알고리즘은 이 FIFO제약을 가정하고 있으므로 이 특성으로 인해 기존의 알고리즘을 직접 사용하는데 있어 제약이 된다. 다섯째, 시간의존성(time-dependency)이란 링크의 통행비용이 링크 진입시간에 따라서 가변적이라는 의미로써, 대중교통망의 경우, 운행 계획의 불규칙성 혹은 가로망의 교통상황에 따라서 이 값이 가변적일 수 밖에 없다. 특히 이용자가 정류장에 도착하는 즉시 교통수단을 이용할 수 있는 것이 아니므로 이에 따른 대기시간도 링크 운행시간에 포함되어야 하므로 시간의존성이란 대중교통망의 경로산출시 기본적인 요소중의 하나이다.(항공 및 철도 등 노선별 차두시간-headway가 상대적으로 긴 대량운송수단에서는 이러한 특징이 두드러진다.) 마지막의 요금체계의 존재라는 측면은 선택된 교통수단에 따라 요금의 차이가 클 수 있으며, 이러한 요금 차이는 이용자의 수단 선택에 중요한 영향을 미치는 요소가 된다는 것이다. 이 때문에 대중교통망에서는 이른바 k-path 등의 대안경로 제시의 문제가 더욱 중요하게 된다. 반면, 일반 가로망에서의 경로탐색과는 달리 대중교통망에서는 회전제약 문제가 존재하지 않는다.

위에서 언급한 이유들로 인해 일반 가로망에서 사용되는 최적경로 탐색 알고리즘은 대중교통망에 직접 적용하여 사용될 수 없다. 따라서 별도의 알고리즘의 개발이 필요하다.

4. 대중교통망의 구성요소

대중교통망은 물리적 가로망(highway network) 위에서 구성되는 일종의 데이터베이스로 볼 수 있으며, 공간적인 요소로서 물리적 가로망, 노선(교통수단을 포함하는 의미의), 정류장(환승 체계를 포함) 등으로 구성되는데, 여기서 노선이란 정류장의 순서집합으로써, 노선이 경유하는 정류장과 물리적인 주행경로(링크, link)로 이루어진다. 시간적인 요소로서는 운행계획과 환승시간 등이 있는데 운행계획은 교통수단 및 노선에 따라서 부분적인 규칙성을 가지거나 불규칙적일 수 있다.

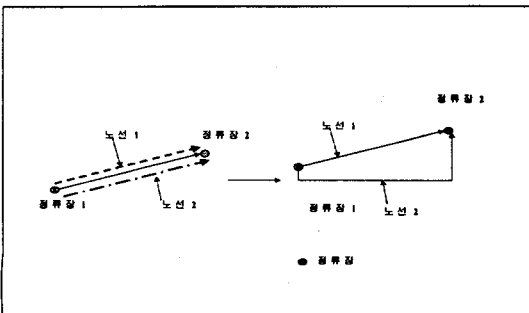
각 요소에 대한 개략적인 구성은 아래의 표와 같다.

〈표 1〉 노선데이터의 구조

노선	정류장(링크)
1	①-(2,3)-③-(4,9)-⑦
2-1	③-(2,3)-⑩-(4)-⑬
...	...

〈표 2〉 정류장, 환승데이터의 구조

정류장	가로번호 (링크번호)	환승가능 정류장
①	10(+)	③(10), ⑦(7)
②	7(-)	⑩(3), ⑬(11), ...
...



〈그림 1〉 대중교통망 노선의 확장

〈표 1〉은 노선의 데이터 구조를 나타낸다. 표에서 ①은 정류장을 (2,3)은 링크 번호 2와 3을 의미하며, 노선 1은 ①정류장에서 2,3번 링크를 통하여 ③, ⑦ 정류장을 경유하는 노선임을 의미한다.

〈표 2〉는 정류장과 정류장이 사용되는 가로의 번호, 그리고 해당 정류장에서 환승이 가능한 정류장의 번호와 도달 시간으로 구성되는 정류장 데이터를 나타낸다. 표에서 가로번호는 가로와 정류장이 접하는 인접링크의 번호이고 (+), (-)는 가로의 진행방향에 대하여 오른쪽, 혹은 왼쪽에 정류장이 존재함을 나타낸다. 환승가능 정류장은 해당 정류장에서 도보 혹은 대체 수단을 이용하여 환승이 가능한 인근 정류장의 번호와 환승에 소요되는 시간을 나타낸다.

〈표 3〉 정류장 도착시간 데이터의 구조

노선	정류장/도착 시간
1	①/(07:30-09:30-5, ...) ②/(07:37-09:37-5, ...), ...
2-1	③/(09:30, 11:20, ...) ⑬/(...)-...
...	...

〈표 3〉은 각 노선이 경유하는 정류장에서의 도착 혹은 출발 시간을 뜻하며, 정류장별로 데이터베이스가 구성된다. 위의 데이터형식은 여러 이용가능한 형식중의 하나이며, 정류장사이의 거리와 구간에서의 평균주행속도를 이용하여 일괄적으로 도착시간을 추정할 수 있다. 버스와 같이 차량의 정류장 도착시간이 비교적 불규칙한 교통수단에서는 도착시간의 '확률분포를 이용하여 예측대기시간을 구하는 것이 일반적이지만 본 고에서는 차량도착이 고정이라고 가정한다. 그러나 예측대기시간을 추정하여 적용하는 것도 가능하다.

대중교통망의 경우, 노선의 중복으로 인한 FIFO 조건이 유지되지 않는다는 점 때문에 일반 가로망에서의 경로탐색 알고리즘을 적용할 수 없게 된다. 따라서 이 문제를 일으키지 않도록 네트워크의 변경(혹은 확장)이 가능하다면 기존의 알고리즘을 사용할 수 있을 것이다. 〈그림 1〉과 같이 노선의 중복성으로 인한 FIFO의 제약문제는 노선별로 링크를 확장하는 방법으로 해결할 수 있다. 이 경우 동일한 노선에서는 선입차량이 먼저 도착하게 되므로 동일 노선내에서는

시간비용에 관한 FIFO가 유지된다고 볼 수 있다. 링크통행비용이 시간이외의 것(요금 등)이 되는 경우에도 FIFO조건을 충족시키기 위해서는 FIFO조건이 파괴되는 링크를 적절하게 분할함으로써 해결할 수 있다.

한편 버스나 지하철의 경우 정확한 도착시간의 예측이 사실상 불가능하며, 따라서 실제 경로탐색시에 사용되는 통행시간은 예측통행시간이다. 이 때, 이용하는 차량 탑승까지 일정한 양의 시간을 소비하게 되는데 일반적으로 이 시간은 해당 노선의 차두 시간과 일정한 관계가 있다. 이 여분의 대기 시간 또한 네트워크를 구성하는데 포함되어야 하는데 이 정보는 노선과 시간에 따라서 다르다.

5. 대중교통망 모형 및 알고리즘

대중교통망에서는 최적경로를 결정하는데 서로 다른 3가지의 개념이 존재한다. 첫째는 최적여행계획(itinerary)인데 이 개념은 여행에 사용되는 모든 노선과 정류장을 명시하는 것이다. 둘째는 최적여행경로(route)인데 이 것은 전체 여행에 사용된 정류장을 순서대로 명시하는 것이다. 따라서 최적여행계획과는 달리 필요에 따라서 노선을 선택할 수 있다. 세 번째는 최적여행전략(strategy)인데 이 것은 목적지로부터 도착지까지의 경로를 선택하는 여행자의 전략을 정의하는 규칙의 집합으로 정의되는데 이 것은 최적여행경로의 개념을 일반화시킨 것이라 볼 수 있다. 이와 같이 몇 개의 개념이 존재하는 이유는 동일한 운행구간을 가지는 여러 개의 노선이 존재할 가능성이 있으

며 이들의 운행계획이 정시 도착/출발에 의해서라기보다 일정한 배차간격으로 정의되기 때문이다. 이 때문에 최적경로 탐색시 정류장에서의 대기시간이 고려되어야 할 필요가 생기며 이 대기시간은 주로 배차간격의 일정 비율로 정의된다. 따라서 동일한 구간을 운행하는 두 개의 노선이 존재하고 그 구간 내를 여행하는 경우 대기 시간은 두 노선 배차간격의 혼합주기를 이용하여 정의되며 따라서 아무 노선이나 먼저 도착하는 것을 이용하는 것이 전체 여행시간을 줄이는데 도움이 된다.

대중교통망에서의 최적경로 탐색 알고리즘은 주로 정적통행배정분야에서 연구되었기 때문에 전체 여행시간을 최소화하는 방향의 두 번째나 세 번째 개념이 많이 사용된다(Thomas, 1991).

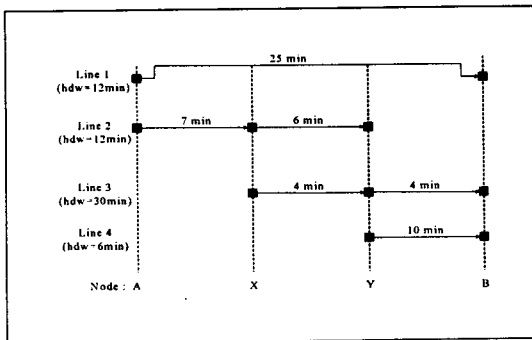
대중교통망은 일반가로망에 비해 더 많은 데이터를 가지므로 교통망의 네트워크 위상구조(topology)는 네트워크의 위상구조에 반영되는 데이터의 내용에 따라서 달라지게 되며 이로 인해 탐색 알고리즘도 달라지게 된다.

예를 들면, 물리적으로 동일한 가로에 여러 개의 노선이 운행하는 경우, 네트워크 위상구조에는 하나의 가로만을 반영하고 노선에 대한 정보는 여기에 부속되는 데이터로 간주할 수도 있는 반면, 모든 노선을 개별적인 링크로 간주하여 네트워크를 구성할 수도 있다. 이 때에는 노선정보는 네트워크 위상구조에 반영되어 있으므로 별도의 부속데이터로 추가될 필요가 없다. 이 두 경우는 각각의 장, 단점이 존재하며 각 경우에 따라서 탐색알고리즘도 달라져야 한다.

TRANSITNET(Lamb and Havers, 1970)에서는 네트워크 위상구조를 미리 구축하지 않고 데이터만을 이용하여 최적경로를 탐색한다. 이 알고리즘은 실행중에 구축해가는 방식을 사용하는데 그 방식이 일반가로망의 알고리즘을 적용한 것과 동일하다(Thomas, 1991).

Le Clercq(1972)는 개별 노선의 모든 정류장 쌍(pair)을 링크로 확장하는 모형을 제안하였다. 이 모형에서는 물리적인 링크는 물론 노선도 배제되며 개별 노선을 구성하는 정류장과 정류장의 모든 쌍들이 네트워크의 링크가 된다(Thomas, 1991).

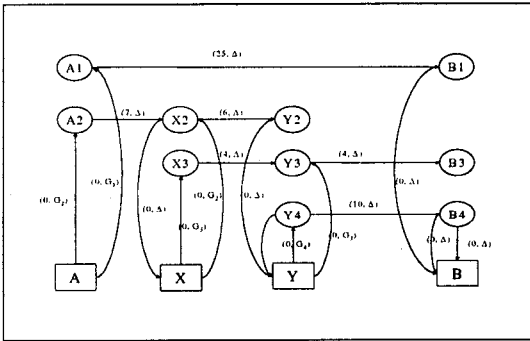
이 경우 일반가로망에서 사용되는 알고리즘을 직접 적용시킬 수 있는 장점이 있으나 네트워크의 크기



〈그림 2〉 대중교통망의 예(EMME/2)

가 매우 커지는 단점이 있다.

Spiess(1984)에서는 대중교통 통행배정(transit assignment) 모형에서 배정문제와 더불어 최적경로 탐색 모형을 제시하였다. 이 모형에서는 노드에서의 대기비용(Ga, waiting cost)과 통행 비용(ca, travel cost)을 링크로 확장하며, 대기비용은 노선차량의 차 두간격을 이용하여 미리 계산해 둠으로써, 확장 정적 네트워크(static network)를 형성한다. <그림 2>는 EMME/2에 소개된 예제 대중교통망이며 <그림 3>은 <그림 2>를 Spiess 모형에 의거하여 확장한 네트워크이다(EMME/2 User's Manual, 1994).



<그림 3> Spiess 확장 네트워크

<그림 3>과 같이 확장되어진 네트워크는 경로탐색 시에 일반 가로망 알고리즘을 사용할 수 있게 한다. 이 때 정류장의 확장이 필요한 이유는 정류장에서의 노선별 예측대기시간을 네트워크에 표현하기 위해서이다. 이 모형은 경로산정시 시간의존성을 고려하지 않으며 도시내 버스 및 지하철과 같이 일정한 차두시간을 가지는 경우를 고려한 모형이다.

일반적으로 많이 사용되는 대중교통망의 최적경로 모형은 물리적인 가로형태를 반영한 네트워크를 바탕으로 노선과 같은 관련 데이터를 네트워크의 속성데이터로 취급하고 이를 바탕으로 최적경로를 탐색하는 것으로 알려져 있다.

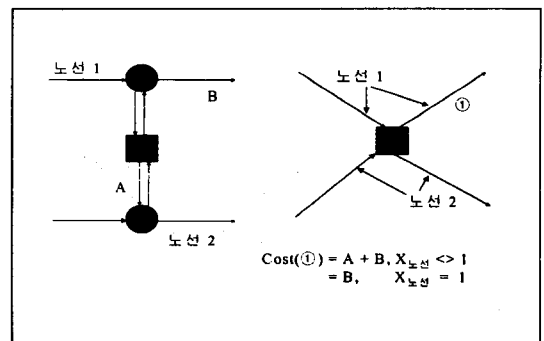
III. 복합교통망에서의 최적경로 산정모형

복합 교통망은 일반가로망과 여러 종류의 대중교

통망이 연계된 것이므로 위에서 언급한 바와 같이 링크의 시간 의존성을 고려할 수 있어야 한다. 또한 탐색이 어느 네트워크에서 시작되든지 여부와 관계없이 다른 특성을 가진 네트워크로 전이할 가능성이 있으므로 가급적 네트워크의 위상구조와 알고리즘이 한 가지 방식으로 통일되는 것이 합리적이다. 따라서 본 연구에서는 위에서 언급한 대중교통망의 여러 모형중에서 Spiess의 모형을 부분적으로 수정하여 시간의존성을 반영하면서 일반 가로망의 탐색알고리즘을 적용할 수 있도록 하였다. 먼저 대중교통망 모형과 알고리즘을 제시한 후 이를 바탕으로 복합 교통망에 대한 모형과 탐색방안을 제시한다.

1. 수정 모형 및 알고리즘

Spiess 대중교통망 모형에서는 노선의 확장을 통해 FIFO제약을 해결하며, 정류장에서의 대기시간을 네트워크에 고려하기 위해 정류장을 확장한다. 이 모형은 일반가로망의 알고리즘을 그대로 사용할 수 있다는 장점을 가지나 노선에 따라서 정류장이 확장되므로 네트워크의 크기가 매우 커지므로 탐색시간이 증가한다는 단점이 있다. 다음 그림과 같이 네트워크와 알고리즘을 수정함으로써 이 단점을 개선할 수 있다(<그림 4> 참조).



<그림 4> 수정 대중교통망 모형

그림에서 동일한 정류장을 지나는 모든 노선은 단지 하나의 정류장에 연결되며, 이로 인해 네트워크의 노드와 링크의 개수를 크게 줄일 수 있다. 이 때 문제는 예측대기시간을 반영하는 것인데 이는 알고리즘

의 수정을 통해 이를 수 있다. 노드에 도달한 경로정보에는 이전에 사용된 노선의 번호를 보관하며 다음 노드로 확장해나갈 때, 동일한 노선으로 확장하는 경우에는 링크비용에 평균예측대기시간을 포함시키지 않으며, 다른 노선으로 확장하는 경우에만 포함시킨다. <그림 4>의 예를 들면 노드 X에 도달하기위해 이용한 노선이 1이고 X에서 또다시 노선 1을 이용한다면 링크의 통행비용은 링크고유의 통행비용 B와 같으며 노드 X에서 다른 노선으로 갈아타는 경우 링크의 통행비용은 링크고유의 통행비용 B와 평균대기시간을 A라고 하면 이 A와의 합이 된다.

위의 수정 네트워크에서는 정류장을 나타내는 노드의 수를 감소시킴으로써 네트워크의 크기를 줄이며 예측대기시간은 알고리즘중에서 링크비용을 계산하는 부분에 반영된다. 이 네트워크는 대중교통망의 특성을 모두 네트워크와 알고리즘의 일부에 반영시키므로 일반가로망에서 사용되는 모든 종류의 최적경로탐색 알고리즘에 사용될 수 있다. 그러나 모든 종류의 대중교통망을 경유하는 최적경로를 산정하기 위해서는 위에서 언급한 바와 같이 링크통행비용의 시간의존성을 감안하여 경로탐색이 가능한 알고리즘이어야만 한다. 이러한 알고리즘에는 위에서 언급되었던 Orda and Rom(1990), Ziliaskopoulos and Mahmassani(1994), Dreyfus(1969) 등의 것들이 있으나 본 연구는 경로안 내체계를 위한 모형의 개발이 주 목적이므로 비교적 구현이 간단하면서 두 지점사이의 최적경로탐색이 가능한 Dreyfus의 알고리즘을 적절한 것으로 판단된다.

아래에 구현된 알고리즘은 Dijkstra의 경로탐색 알고리즘을 확장한 Dreyfus의 알고리즘이다. 따라서 알고리즘의 골격은 Dreyfus (혹은 Dijkstra)와 동일하다며 그 외의 경로탐색 알고리즘에의 적용 역시 가능하다.

■ 기호

- A : 아크의 집합; $(i, j) \neq (j, i)$
- N : 노드의 집합
- Q : 방문되었으나 영구표지를 가지지 않은 노드의 집합
- M_a : 영구표지를 가진 노드의 집합
- M_b : 임시표지를 가진 노드의 집합
- r : 출발노드

- s : 목적노드
- t_r : 출발시간
- c : 비용을 나타내는 변수
- $P(i)$: i노드의 전노드
- $C(i)$: i노드까지 도달하는데 필요한 총통행비용
- $C(i, j, t)$: t시간에 링크 (ij)를 통행하는데 필요한 비용
- $T(i)$: i노드에서의 도착시간
- $T(i, j, t)$: t시간에 노드 I에 도착한 차량이 링크 (i, j)를 빠져나오는(노드 j에 도착하는) 시간
- $R(i, j)$: A(i, j) 링크의 노선번호
- $W(i, j, k, t)$: t시간에 A(i, j) 링크의 노선에서 A(j, k) 링크의 노선으로 갈아타는데 필요한 대기시간
- $A^+(i)$: $\{j; (i, j) \in A\}$
- t_j : 시간을 저장하기 위한 임시변수
- c_j : 비용을 저장하기 위한 임시변수

■ 경로데이터 초기화

$$P(i) = 0, C(i) = \infty \{i \in N\}$$

$$P(r) = 0, C(r) = 0, T(r) = t_r$$

$$Q = Q \cup \{r\}$$

■ 다음 과정을 반복함

- 만약 $Q = \emptyset$ 이면 종료
- 다음의 조건을 만족하는 임시표지를 가진 노드 n_k 를 탐색
 - $C(k) = \min \{C(y) \mid n_y \in Q\}$
 - $Q = Q - \{n_k\}$
 - $M_a = M_a - \{n_k\}$
 - $M_b = M_a - \{n_k\}$
- $j \in A^+(k)$ 이고 $n_j \in M_b$ 인 모든 노드 j에 대하여 다음을 계산함
 - $R(P(k), k) = R(k, j)$ 이면
 - $c_j = C(k) + C(k, j, T(k)), t_j = T(k, j, T(k))$
 - $R(P(k), k) < R(k, j)$ 이면
 - $c_j = C(k) + C(k, j, T(k)) + W(P(k), k, j, T(k))$,
 - $t_j = T(k, j, T(k)) + W(P(k), k, j, T(k))$
 - $c_j < C(j)$ 이면

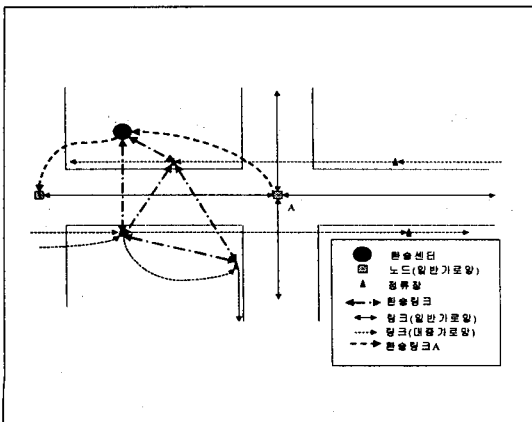
$$C(j) = C(k) + C(k, j, T(k))$$

$$T(j) = t_j$$

$$Q = Q \cup n_j$$

다층 네트워크의 구성

승용차-대중교통 사이의 환승은 환승센터와 같이 네트워크에서의 특정한 노드(정류장)에서만 가능한 경우와 승용차와 마찬가지로 경로선택의 자유를 가진 택시의 경우에서처럼 네트워크의 임의의 지점에서 환승이 가능한 경우 2가지로 나누어 볼 수 있다. 첫 번째 경우는 <그림 5>와 같이 대중 교통망과 일반 가로망 두 개의 계층화된 네트워크에서 환승이 가능한 정류장과 노드 사이에 환승링크를 추가하는 것으로써 환승을 모형화할 수 있다 (<그림 5>에서 "환승링크"는 대중교통체계 내에서의 환승을, "환승링크A"는 대중교통과 일반 가로망 사이에 발생하는 환승을 나타냄). 예를 들면, 일반 가로망에서 대중교통망으로의 전환이 가능하기 위해서는 환승 센터나 주차장과 같이 차량을 주차할 공간이 있는 지점이 필요하며, 이것이 가능한 곳의 인근 노드(일반 가로망의)와 정류장(대중교통망) 사이에 환승 링크를 추가하는 것이다. 이 링크는 승용차→대중교통으로의 전환에 필요한 경로와 비용을 의미한다. 역으로 대중교통수단으로부터 승용차로의 환승이 가능하기 위해서는 대중교통 정류장의 인근에 본인 소유의 차량이 존재하거나 차량 임대 가능해야 하는데 이 경우는 일반적이지 않다. 다층 네트워크에서는 두 개의 네트워크가 환승



<그림 5> 통합교통망 모형

링크를 중심으로 연결되어지므로 네트워크의 구성이 용이해진다. 그러나 두 종류의 네트워크는 탐색알고리즘에서 사용하는 모형이 다르므로 경로탐색을 위해서는 탐색위치에 따라서 두 종류의 알고리즘을 병행하여 구사해야 한다. 또한 출발지와 목적지는 일반 가로망에서의 노드이거나 대중교통망에서의 정류장이어야 한다.

2. 통합교통망 모형

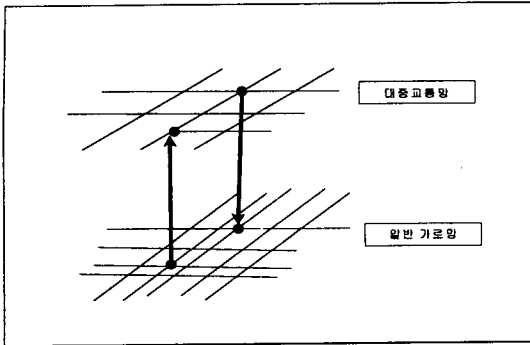
위에서 언급한 바와 같이 다층 네트워크에서는 두 종류의 서로 다른 네트워크를 동시에 탐색하여야 한다. 그러나 일반적으로 경로 탐색에 사용되는 알고리즘은 하나가 되는 것이 타당하며 위에서 언급한 바와 같이 복수의 계층으로 구성되어 복수의 알고리즘을 사용해야 하는 경우는 효율성과 효과성면에서 비효율적이기 쉽다. 따라서 가로망의 형태를 가급적 하나로 통합하는 방안이 필요하다. 이를 위해서는 보다 단순한 가로망데이터를 가지는 일반가로망을 대중교통망의 형태로 확장하여 하나로 통합하는 것이 용이한 방법이다.

대중교통망의 경로 탐색을 위하여 사용되는 경로 정보의 내용은 다음과 같다.

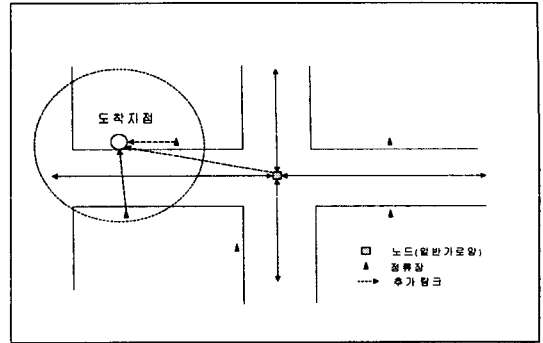
- 수단번호
- 노선번호
- 구간번호
- 구간시작정류장번호
- 구간종료정류장번호

이에 비하여 일반가로망에서는 수단번호, 노선번호가 필요없으며 구간번호, 구간시작노드번호, 구간종료노드번호 3가지로 구성된다. 따라서 통합교통망을 만들기 위해서는 가상의 수단 및 노선번호를 일반가로망의 모든 링크에 할당한다

일반 가로망의 경로정보를 확장한 후, <그림 6>에서 보는 바와 같이 두 교통망을 하나의 통합교통망으로 통합한다. 통합을 위해서는 환승이 가능한 지점들을 대상으로 추가 노드와 링크의 생성이 필요하다. 그림에서 환승센터는 환승이 가능한 지점을 뜻하며 여기에는 주차장, 렌트카센터 등이 포함된다. 환승센터



〈그림 6〉 다층 네트워크 구조



〈그림 7〉 도착 지점 모형

의 위치에 따라서 인근가로로부터 진입과 인근가로로의 진출을 나타낼 수 있는 환승링크들을 생성한다. (〈그림 5〉에서 환승링크A) 이 때, 가로에서의 위치를 고려하면 이 링크들은 일방향링크가 된다. 이 환승링크들은 네트워크의 혼잡상태에 따라서 통행시간이 가변적이다. 또한 환승센터로부터 도보 환승이 가능한 인근 대중교통시스템의 정류장으로 환승링크를 추가한다. 이 때 추가되는 링크들은 양방향 링크이다. 도보로의 환승링크들은 일정거리 이내에 존재하는 모든 대중교통망의 정류장과 정류장 사이에 생성된다. 이 네트워크는 경로정보의 형태가 하나로 통합되었으므로 하나의 알고리즘을 이용하여 경로탐색이 가능해진다.

출발, 도착지의 지정

일반가로망에서의 경로탐색은 노드를 기반으로 이루어진다. 따라서 차량이 링크의 중간에 존재하는 경우에도 탐색 시종점은 노드가 되어야 하며, 이 방식으로 인해 특별한 문제가 발생하지 않는다. 그러나 통합교통망에서는 사용자가 어느 층(대중교통망 혹은 일반가로망)에서 출발하는지에 따라서 경로탐색과정 이 상이하게 달라질 수 있다.

이용자가 일반가로망에 진입하기 위해서는 자동차를 직접 운행하는 경우이다. 따라서 경로탐색시 출발지점은 기존 알고리즘과 마찬가지로 일반가로망에서의 노드가 된다. 그러나 목적도착지점은 경로 선택에 따라서 노드나 정류장이 모두 가능해야만 한다. 따라서 이를 일반화하기 위해서는 도착지점을 노드와 정류장 모두로 표현할 수 있어야 한다. 이 경우는 도착지점을 노드와 정류장 2개를 지정하여 2개의 경로를

탐색하는 방식으로 이루어질 수 있다. 또하나의 방안은 도착 지점을 노드나 정류장으로 명시하는 대신 특정 가로에서의 상대적인 위치로 표현하는 것이다. 이 경우 특정 가로에서의 위치는 가로 번호와 가로의 시작지점으로부터의 상대 거리로 표현되며 이 지점에 가상의 도착노드를 생성한 후 이 가상도착노드와 가로의 양 끝단 노드 그리고 가로변에 위치하는 정류장 사이에 환승링크를 추가해준다. 이 경우 한번의 경로 탐색으로 원하는 경로를 얻을 수 있으나 가상도착노드 및 환승링크를 추가해야만 한다. 본 연구에서는 후자의 방법을 선택하였으며 이 개념은 〈그림 7〉에 나타나 있다.

결론적으로 복합교통망에서의 탐색알고리즘은 대중교통망의 그것과 동일한 것을 이용할 수 있다. 이미 통합가로망에서는 일반가로망의 링크들을 대중교통망의 링크형태로 일반화하였기 때문에 탐색이 가능해진다고 해석할 수 있다.

IV. 기타 관련 문제들에 대한 고찰

1. 환승 제한의 문제

다수의 노선을 이용하여 여행하는 경우 정류장에서 인근 정류장으로 환승을 해야할 필요성이 생긴다. 확장대중교통망을 이용하여 최적경로를 탐색하는 경우, 특정 목적의 경로를 찾아낼 수 있으나 이 경우 환승이 무제한으로 허용된다. 즉 목적 노드에 도달하기까지 알고리즘은 가능한 모든 링크

를 사용하며, 따라서 환승 횟수의 제한 등이 고려되지 않는다.

우리나라의 경우 환승 체계는 시간 소모 이외에도 교통 서비스의 질, 비용과 밀접한 연관을 가진다. 특히 특정지역사이를 여행할 때 필요한 환승횟수는 대중교통체계는 물론 전체 교통체계의 효율성 등을 판가름하는 기준이 될 수 있다. 따라서 환승 횟수의 제한이나 주어진 환승 횟수에 대한 최적 경로 산출 등이 필요하게 된다.

앞에서 기술한 바와 같이 환승이 무제한적으로 허용되는 경우에는 위에서 기술한 확장 네트워크를 이용하면 최적 경로를 산출할 수 있으나 환승 횟수에 제한이 주어지는 경우 문제가 발생한다. 예를 들면, 환승 정류장에서 두 개의 서로 다른 노선으로부터 동일한 정류장으로 환승하는 경우 환승에 따른 최적 노선(즉 전노드의 기록)의 비교가 불가능해진다. 환승 횟수가 환승 제한 횟수에 가까워지면, 다음 환승지에서 환승이 허용되지 않을 수 있기 때문이다.

위의 경우, 문제는 노드의 라벨 설정 시에 해당 노드까지의 경로비용만을 단순 비교하면 위와 같은 오류를 일으키게 된다는 것이다. 따라서 노드까지의 경로비용을 비교할 때, 경로 비용 이외에 여분의 정보, 이 경우 환승 횟수를 비교해야 한다.

이 경우 임의의 노드 i 에서의 경로 정보를 확장하여 위 문제를 해결할 수 있다.

일반적으로 최적경로 산출 알고리즘에서 사용되는 경로정보의 내용에는 1)이전 노드 번호, 2)총 경로비용 등 두 가지가 필요하다. 환승 횟수의 문제를 해결하기 위해서 고려되는 환승횟수(n) * 경로 정보 만큼의 경로 정보를 저장한다.

경로정보가 확장된 네트워크에서의 알고리즘은 일반적인 경로탐색 알고리즘에 다음의 과정이 추가된다. 노드 i 를 방문할 때, 전노드로부터의 환승 횟수가 동일한 것끼리 비교하는 것이다. 이 때, 방문되어진 노드들로 구성되는 큐는 노드의 번호와 함께 환승 횟수의 구분에 따라서 구성된다. 그러나 이 경우, 경로상의 순환로가 생성될 가능성이 나타나게 된다. 이 순환로는 환승 횟수가 2번 이상인 경우에만 나타날 가능성이 있다.

2. K-path 문제

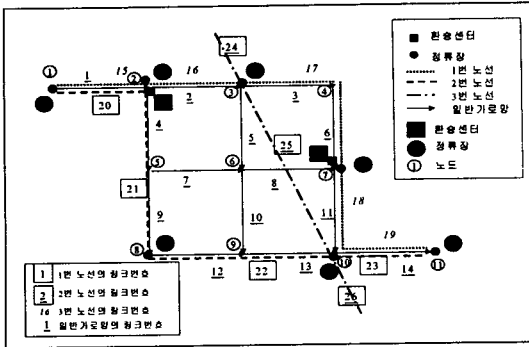
K-path문제는 두 개의 노드쌍(pair) 사이의 가능한 경로 중 k 개의 최적 경로를 산출하는 것으로서, 여러 문헌에서 논의된 바 있다.(Yen, 1971; Eppstein, 1994)

대중 교통망이나 복합교통망(대중교통망과 일반가로망의 혼합 형태)의 경우, 그 필요성이 일반 가로망을 사용하는 경우에 비해 매우 크다고 볼 수 있는데 그 이유는 대중교통망이 여러 제약 조건들을 가지며 이 제약 조건들로 인해 탐색되어진 최적 경로가 사용자로 하여금 받아들이기 어렵게 만드는 경우가 발생할 수 있다. 따라서 탐색의 주 목적 이외에 부수적인 정보가 경로 선택에 있어 중요한 변수가 될 수 있기 때문이다. 예를 들면, 사용자의 입장에서 볼 때 비슷한 통행 시간을 가지는 n 개의 경로가 존재한다면, 사용자는 이중 요금이 저렴한 경로를 선택할 수도 있다. 이 경우, 하나의 최적 경로는 사용자의 의도를 전혀 반영할 수 없다. 따라서 n 개의 대안 경로를 제시하는 것이 매우 중요해진다.

즉 다수의 교통수단을 이용한 최적 경로의 산출은 환승 및 여행 시간 등 기본적인 산출 대상 이외에도 요금과 편의성(쾌적성) 등의 질적 요소가 포함되고 선택이 몇 개의 복합적인 가치 기준에 의해 이루어지는 것이 일반적이므로 이는 일반 가로망의 최적경로 산출 시에도 적용이 되나 대중교통망의 경우, 수단사이의 편의성 차이가 두드러지므로, 이러한 요인의 고려가 매우 중요하다. 이 때문에 하나의 경로만을 탐색하는 것보다는 몇 개의 대안 경로와 경로에 대한 상세한 정보(편의성을 포함한)의 제공이 더욱 필요하다.

K-path문제는 경로내에 순환로가 허용되는 경우와 허용되지 않는 경우, 두 가지로 크게 나눌 수 있다. 순환로가 허용되는 알고리즘으로써 Hoffman과 Pavley, Bellman과 Kalaka, Sakarovitch, Eppstein 등이 있으며, 순환로가 허용되지 않는 알고리즘으로 Bock, Kantner, Haynes, Pollack, Clarke, Krikorian 및 Rausan, Sakarovitch, 그리고 Yen 등이 있다.(자세한 것은 Epsstein(1994)을 참조할 것) 교통망의 경우, 순환로를 포함하는 경로는 별 의미가 없으므로 순환로의 생성이 방지되는 알고리즘이 바람직하다. 그러나 교통망의 특성상 순환로가 발생할 가능성은 비교적

적기 때문에 순환로를 방지하지 못하는 알고리즘의 적용도 가능하다. 일반적으로 순환로를 허용하는 알고리즘들이 더 빠르다. 또한 대중교통망과 같이 시간 의존적(time-dependent) 특성을 가진 네트워크에서는 시간 의존적 경로 탐색이 가능해야 한다.



〈그림 8〉 샘플 네트워크

위의 순환로를 방지하면서 시간 의존적 경로탐색이 가능한 것으로 Yen 알고리즘이 있는데 이 알고리즘은 순환로가 없는 k개의 최적경로를 탐색하는 알고리즘으로서, 각각의 반복 단계에서 경로탐색을 다시 하여 시간의존적 경로 탐색을 가능하게 한다. 따라서 k번째 경로를 산출하기 위해서는 (k-1)개의 경로가 미리 계산되어야 한다.

V. 모형의 검증 및 구현

1. 모형의 검증

샘플 네트워크는 11개의 노드와 14개의 링크를 가지는 일반가로망과 3개의 노선과 7개의 정류장을 가지는 대중교통수단, 그리고 일반가로망으로부터 대중교통수단으로 전환할 수 있는 환승센터를 2개로 구성되었다.

알고리즘의 적합성을 검증하기 위해서 링크통행비용과 노선의 링크통행비용을 단순화하여 첨두시간대와 비첨두 시간대에 각각 하나씩의 값을 배정하였다. 즉 모든일반가로망링크의 통행비용은 시간대와 관계없이 첨두시 10분, 비첨두시 4분을 가정하였으며, 대중교통망 링크의 통행비용은 첨두와 비첨두에 관계

없이 동일하게 12분의 통행비용을 가정하였다. 또한 대중교통망은 정류장에서의 대기시간을 계산하기 위해 차두시간을 첨두시 5분, 비첨두시 10분을 가정하였다. 여기서 대기시간은 차두시간의 1/2을 사용하였다. 동일한 정류장에서 노선을 갈아타기위한 환승비용은 1분, 환승센터에서 정류장으로의 환승비용은 3분을 가정하였다.

출발점은 가상출발노드 101을 생성하여 이 노드로부터 일반가로망의 노드 1과 대중교통망의 정류장 12로 각각 연결시키고 이 가상링크들의 비용은 0으로 설정하였다. 도착점 역시 가상도착노드 102를 두어 정류장 18과 일반가로망의 노드 11사이를 연결시키고 비용을 0으로 설정하였다.

일반가로망은 노선번호를 0으로 설정하였고, 가상링크를 사용하는 경우는 100으로, 환승링크의 경우는 101로, 나머지 대중교통노선은 노선번호를 그대로 사용하였으며 출발시각은 0을 사용하였다.

위의 수행 결과, 비첨두시에는 101→(100) 1→(0) 2→(0) 3→(0) 4→(0) 7→(0) 10→(0) 11→(100) 102의 탐색 결과(실제로는 위의 경우에는 일반가로망의 모든 경로가 동일한 비용을 나타내므로 일반가로망의 모든 경로가 최적경로가 된다. 그러나 알고리즘에서는 이 중 임의의 한 개만이 선택된다)를 나타내었으며 일반가로망의 노드만이 사용되었다(괄호안은 사용된 노선의 번호를 나타낸다). 즉 자동차만을 이용하는 경우가 가장 빠르게 된다. 이 때의 여행시간은 24분으로 나타났다.

첨두시에는 101→(100) 12→(2) 13→(2) 15→(2) 17→(2) 18→(100) 102의 경로를 산출하였으며 총 여행시간은 505분이 산정되었다. 이 경우에는 대중교통수단의 노선 2만이 사용되었는데 그 이유는 출발지로부터 도착지까지 경유하는 링크의 수가 가장 적고 모든 링크는 동일한 통행시간을 가진다고 가정했기 때문이다.

환승센터를 이용하는 경우를 상정하기위해서 정류장 12와 13사이의 대중교통수단의 링크를 없애고 첨두시의 최적경로를 탐색한 결과는 경로는 101→(100) 1→(0) 2→(102) 13→(2) 15→(2) 17→(2) 18→(100) 102 이며, 총 여행시간은 515분으로 나타났다.

다음으로 대중교통망의 환승사용을 검증하기 위해 2번 노선의 링크 22의 통행비용을 30분으로 증가시키

고 대중교통망만을 이용하여 침두시의 최적경로를 검색하였다. 그결과 최적경로는 101→(100) 12→(1) 13→(1) 14→(3) 17→(2) 18→(100) 102 이며, 총 여행시간은 59.5분으로 나타났다.³⁾ 이 경우 예상대로 대중교통망내에서 환승이 나타났다.

2. 교통망 데이터의 생성

위에서 언급한 예제 네트워크는 네트워크의 위상 관계를 직접 입력하였으나 실제네트워크에서는 이 것이 거의 불가능하다. 따라서 실제 데이터를 구축하기 위한 현실적인 방안의 제시가 반드시 필요하다. 본 연구에서는 GIS(Geographic Information System)을 통해 대상 자료를 구축하는 방안을 제시한다. 사용된 GIS 시스템은 ARC/INFO이다. 일반적으로 일반 가로망의 구조는 대중교통망에 비해 단순하므로 자료 취득이 용이하나 대중교통망의 경우 몇 단계의 복잡한 과정을 거쳐야만 자료를 생성할 수 있다.

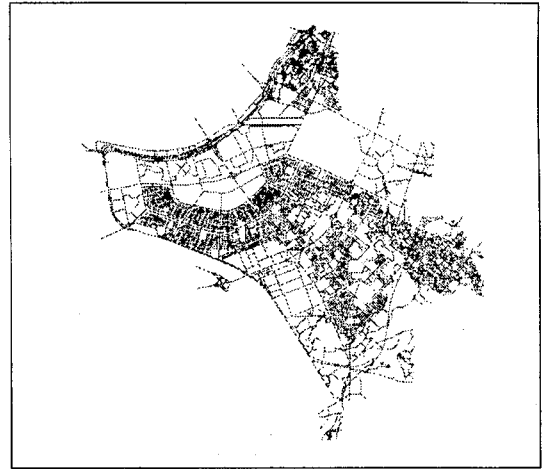
대중교통망의 다수의 교통수단(mode)과 각 수단내에 존재하는 다수의 노선, 그리고 이들 노선이 정차하는 정류장으로 구성된다. 또한 속성 데이터로서 각 노선별 정류장 도착시간 혹은 노선의 차두시간이 필요하다.

〈그림 9〉는 네트워크 구성에 사용된 송파구 일대의 가로망을 나타낸다. 이 네트워크는 소로까지 포함하여 매우 복잡하므로 대중교통망을 생성하는데 필요한 주요 도로만을 추출하였는데 〈그림 10〉에 나타내었다. 이 네트워크는 386개의 링크로 구성되어있다.

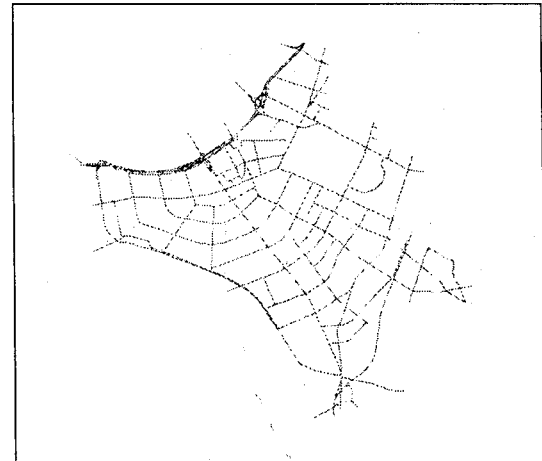
본 연구에서는 일반가로와 버스, 그리고 지하철 3가지만을 고려하여 대상 네트워크를 생성하였다. 〈표 4〉에는 버스와 지하철에 대하여 구축된 노선의 수와 정류장의 수를 집계하였다.

〈표 4〉 대상네트워크의 구성

항목	노선수	정류장수
버스	19	261
지하철	3	16



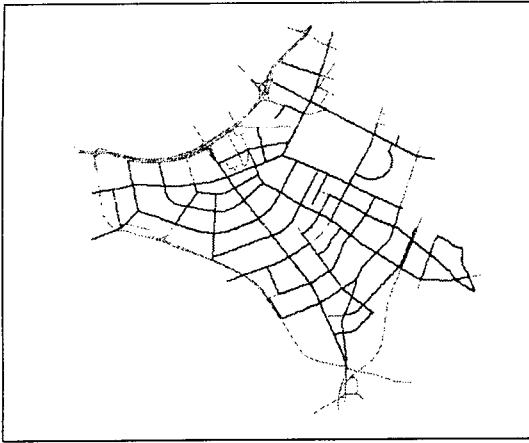
〈그림 9〉 평가 네트워크 I



〈그림 10〉 평가네트워크 II

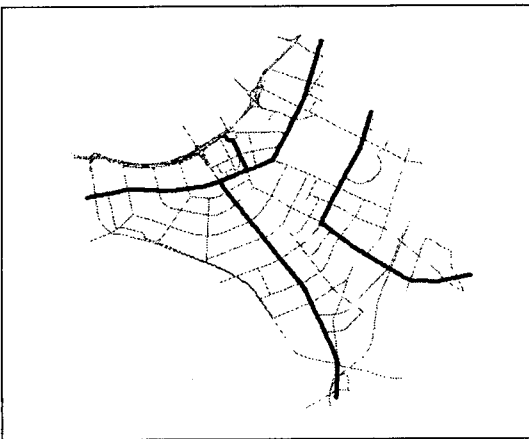
본 연구에서는 지하철과 버스가 각각 하나의 라우트 서브시스템으로 생성되었으며 각각 3, 19개의 노선을 구축하였다. 지하철의 노선은 실제 노선과 동일하게 구성되었으며, 버스의 경우 주요 도로를 모두 경유할 수 있도록 하였다. 〈그림 11〉은 구축된 버스 노선들을, 〈그림 12〉는 지하철 노선을 각각 나타낸다.

3) 이 예제에서는 혼합 frequency를 사용하지 않았다. 혼합 frequency를 사용하는 경우에는 총여행시간이 1.25분 감소한다. 혼합 frequency를 사용하는 경우는 참고문헌의 5와 14를 참조하기 바람.



<그림 11> 버스 노선도

노선데이터는 GIS로부터 텍스트 파일로 변환되어진다. 변환된 파일은 <표 5>와 같은 형식을 가진다. <표 5>는 버스노선을 GIS로부터 변환한 것으로서 표에서 시작위치는 섹션4)의 시작위치로써 아크5)의 시작노드로부터의 상대 거리를 의미한다. 여기서 상대 거리는 전체 아크의 길이를 100으로 보았을 때의 거리를 뜻한다. 종료위치는 섹션의 종료위치를 의미한다. 따라서 노선 1의 첫 번째 섹션은 아크 7의 출발노드에서 아크의 길이만큼 떨어져서 시작하여 출발노드까지로 구성되어있음을 알 수 있다



<그림 12> 지하철 노선도

<표 5> 대상 네트워크의 노선 데이터

노선번호	시작위치	종료위치	링크번호
1	100.0	0.0	7
1	100.0	0.0	13
1	0.0	100.0	31
1	0.0	100.0	39
1	0.0	100.0	51
1	100.0	0.0	63
1	100.0	0.0	78
1	100.0	0.0	101
1	100.0	0.0	145
1	100.0	0.0	177
...
2	0.0	100.0	350
2	0.0	100.0	347
...

정류장(Stops) 데이터의 생성

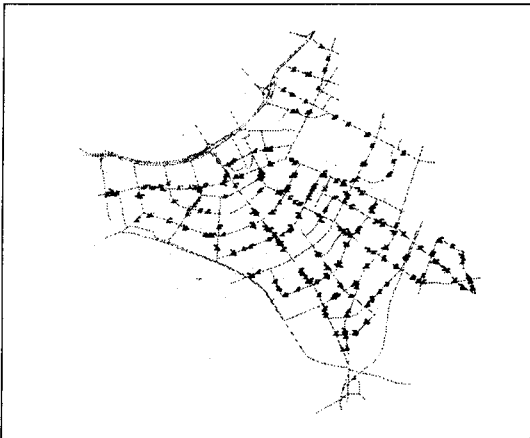
일반적으로 가로망이 선형으로 표현되는 바와 같이 정류장은 점형 위치 정보(point)로서 나타내어진다. 지하철의 경우와 같이 정류장의 위치가 고정되고 노선의 선형상에 위치한 경우에는 노드로 표현하는 것이 일반적이다. 그러나 버스 정류장과 같이 노드로 표현되기 어려운 경우, <그림 13>에서와 같이 별도의 점(point) 형태의 데이터로 입력한다. <표 6>은 입력 결과를 텍스트 형태로 나타낸 것이다. 이와 함께 각 정류장에는 그 정류장에서 정차하는 교통수단에 대한 정보를 가진다. <그림 13>은 구축된 버스 정류장을 <그림 14>는 지하철역을 나타낸다. 버스정류장과 지하철역의 개수는 각각 261, 16개소가 사용되었다.

정류장의 위치는 도로망도를 배경으로 입력되어지는 것이 일반적이다. 이 때 하나의 정류장은 하나의 링크에서만 사용될 수 있으며, 링크에서 일정 거리에 위치해야 한다. 교차로 부근에서는 두 개의 링크가 인접해 있으므로 정류장이 실제 사용되는 링크에 공간적으로 더 가깝게 위치해야 한다.

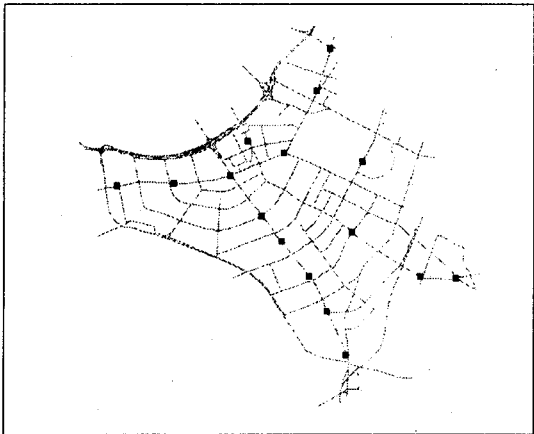
4) 섹션은 아크의 부분집합을 의미하며 GIS-T에서 사용되는 용어임.
 5) 아크는 링크와 마찬가지로 노드와 노드를 연결하는 선형사상임. 그러나 일반적으로 링크가 노드사이의 연결관계만을 지칭하는 것과는 달리 아크는 물리적인 형태(예를 들면 도로의 선형)를 포함하여 지칭하고 있음.

〈표 6〉 정류장 데이터구조

정류장 번호	X좌표	Y좌표	인접아크 번호	거리
1	210775.201	448328.126	13	14.410
2	210634.793	448602.250	8	0.622
3	210704.605	448087.066	13	17.541
4	210594.476	447689.692	31	16.607
...



〈그림 13〉 버스 정류장 위치도



〈그림 14〉 지하철역 위치도

환승 (Transfer) 데이터의 생성

동일 교통수단에서의 환승은 각 정류장에서 이루어질 수 있으나, 서로 다른 교통수단의 경우 두 개의 교통수단을 모두 가지는 정류장에서만 가능하다. 그러나 실제로는 도보에 의한 환승이 가능하므로 동일

교통수단일지라도 정류장에서 일정 거리에 포함되는 다른 정류장에서도 환승이 가능하도록해야 한다. 이를 위해 GIS의 공간 질의기능을 사용하여 환승 가능 정류장을 찾아내었다. 알고리즘에서는 이 정보를 바탕으로 환승을 위한 가상 링크를 시스템에서 자동으로 생성한다.

환승데이터는 각 정류장으로부터 도로로 접근할 수 있는 정류장과 정류장까지의 거리로 구성되며 이를 보행자 평균속도로 나누어 환승 시간을 계산한다. 〈표 7〉은 GIS로부터 추출한 환승 데이터이다. 환승가능거리는 250m로 규정하였다.

운행 계획(차두시간)의 생성

차두시간은 이용자가 정류장에 대기하는 시간과 밀접한 관계가 있다. 만약 정류장 도착시간이 정확히 예측 가능하다면 대기시간이 없게된다. 고속버스, 항공기, 철도 등이 여기에 해당한다. 본 연구에서는 일반버스 및 지하철이 각각 일정한 운행 계획을 가지며 따라서 이용자가 정류장에 도착하는 시간과 관계없이 일정 시간을 대기하는데 사용한다고 가정한다. 수단 및 노선 별로 첨두 시에는 3-9분, 비첨두 시에는 10-16분의 범위에서 차두시간을 임의로 설정하였다. 〈표 8〉은 사용된 수단, 노선별 차두 시간을 나타낸다. 버스 및 지하철의 평균 운행 속도는 각각 30km/h, 50km/h로 사용하였다.

네트워크 번호 체계의 구성

버스 및 지하철의 노선 및 정류장은 각각 독립적인 데이터로 생성되므로 번호체계가 서로 중복될 수 있다. 이 중복성은 수단에 대한 고유번호를 통해 구별이 가능하나 하나의 네트워크로 구성될 때 수단에 대한 정보를 별도로 보관하고 탐색시 매번 비교해야 하므로 하나의 번호체계로 통합하는 것이 효율적이다. 본 연구에서는 이를 위해 각 수단별로 일정한 숫자를 할당하여 일괄적으로 더해줌으로써 통일적인 번호체계를 구성하였다. 또한 노선의 경우 동일한 경로를 왕복하는 경우가 대부분이므로 왕복의 경우에는 노선의 구간의 번호를 +, -로 구별하여 사용하였다. 번호체계를 구성하기 위해 사용된 수단별 고유번호는 버스의 경우 0, 지하철의 경우 1000을 사용하였다.

<표 7> 환승 데이터 구조

버스정류장	지하철역	거리(m)
1	12	130.61109
4	11	170.06677
17	2	174.63033
18	3	135.90160
19	3	229.90516
20	3	130.45373
21	3	140.41022
22	3	185.33738
30	4	174.63983
43	9	249.77463
51	8	37.22492
52	8	181.85179
53	8	104.00667
...

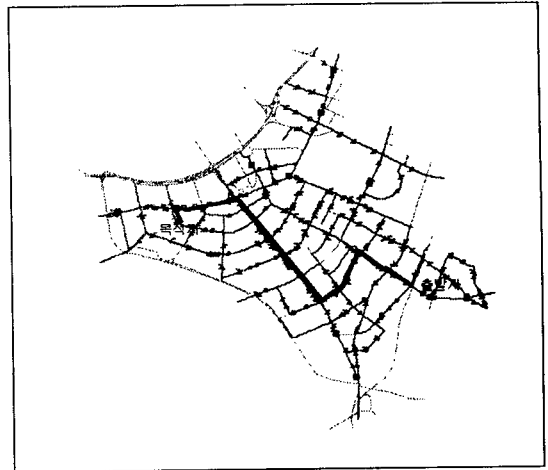
<표 8> 수단, 노선별 차두시간

교통수단	노선 번호	첨두시 차두시간	비첨두시 차두시간
1	1	5	10
1	2	6	12
1	3	7	11
1	4	4	12
1	5	5	13
1	6	6	15
1	7	5	14
1	8	8	13
1	9	6	16
1	10	3	12
1	11	4	14
1	12	5	14
1	13	5	13
1	14	6	12
1	15	5	14
1	16	6	15
1	17	4	16
1	18	9	13
2	1	5	10
2	2	6	11
2	3	5	11

시간대별 교통량 자료의 생성

본 연구는 시간의존적 경로 탐색 방식 알고리즘을 사용하므로 일반 가로망의 링크에대한 시간대별 교통량 데이터가 필요하다. 이 자료는 비선형 회귀 분석을 통해 얻어진 수식을 기반으로 무작위 할당

을 통해 각 링크별 일 교통량 데이터를 임의로 생성하였다. 하나의 링크당 하루를 15분 간격으로 96개의 교통량 자료를 생성한 후, BPR식을 이용 통행 시간을 산정하였다. 이 때 차량의 최대 속도는 60km/h로 설정하였다.

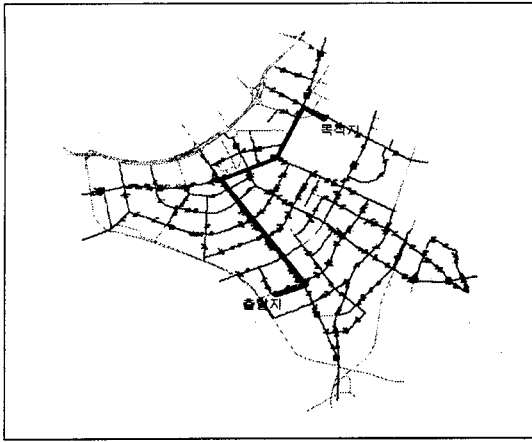


<그림 15> 통합가로망에서의 경로탐색 결과

3. 수행 결과

위의 과정을 거쳐 생성된 대중교통망과 통합교통망을 대상으로 알고리즘을 적용하였다. 대중교통망만을 이용한 탐색에서는 버스 19개 노선과 지하철 3개노선을 본 연구의 모형으로 변환한 후 경로탐색을 하였다. 변환된 교통망은 1132개의 링크로 확장되었다. 여기에는 정류장 사이의 도보환승 링크도 포함된다. <그림 15>는 탐색 결과를 나타낸다.

대중교통망과 일반가로망이 혼합된 통합교통망은 1132개의 대중교통망 링크와 736개의 일반가로망 링크, 그리고 일반가로망에서 대중교통망으로 환승하는데 필요한 10개의 링크 등 총 1878개의 링크가 생성되었으며, 오전 피크시의 최적경로는 자동차와 대중교통수단이 결합된 <그림 16>과 같은 탐색 결과를 나타내었다.



〈그림 16〉 대중교통망을 이용한 경로탐색 결과

VI. 결론 및 향후과제

컴퓨터/정보통신 등 신기술의 등장과 갈수록 복잡해지는 교통체계로 인해 사용자 개개인을 대상으로 하는 경로안내 체계의 필요성이 급증하고 있는 반면 이를 충족시킬 수 있는 현실적인 장치는 현재 전무한 상태이다. 따라서 이로 인한 사회적 손실을 막기 위한 대안 마련이 시급하다 할 수 있다. 이는 기본적인 도로 시설 투자와 함께 병행하여야 할 문제인데 그 이유는 효율적인 정보전달이 활성화되어야만 시설에 대한 효율적인 활용 및 제투자가 가능해지기 때문이다. 따라서 기본시설투자에만 급급하며 이를 도외시하는 것은 근시안적인 발상이라 할 수 있다.

본 연구에서는 그간 연구되어온 일반가로망과 대중교통망에서의 최적경로 산출 알고리즘에 대한 성과들을 정리하고 이를 바탕으로 통합적인 경로안내 체계에 사용될 수 있도록 네트워크의 모형과 알고리즘을 제시하고자 하였다.

이를 위해 먼저 일반가로망에서의 경로안내알고리즘들에 대한 검토와 함께 시간의존적 경로산출 문제에 대한 필요성과 알고리즘을 검토하였다. 또한 대중교통망 모형과 경로탐색 알고리즘들을 검토하여 이를 바탕으로 일반가로망과 동일한 알고리즘을 사용하여 최적경로를 탐색할 수 있는 네트워크 모형을 제시하였다. 마지막으로 이를 일반가로망과 연계하여 사용할 수 있는 방안을 제시하고 실제 구현과정을 보임으

로써 필요한 데이터와 구현 방안을 제시하였다.

본 연구의 성과는 대중교통체계를 비롯하여 최근 에 ITS의 분위기 확산에 따라서 인터넷(internet) GIS를 통해 최단경로의 제공 및 기타의 종합적인 경로안내 체계 구축에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

복합교통망에서의 경로안내를 위해서는 방대한 양의 데이터베이스 구축이 필요하며 이 데이터베이스는 지속적인 갱신체계를 통해 항상 최신의 상태로 유지되어야만 한다. 따라서 데이터 구축방안에 대한 구체적인 연구가 필요할 것이다. 이와 함께 다양한 사용자 서비스제공을 위한 관련 알고리즘들, 예를 들면 환승횟수제한시의 최적경로 산정 방안이나 여행시간과 더불어 대중교통망의 특성중 하나인 여행의 쾌적성 등의 여러 요인을 감안한 경로안내 방안 등에 대한 후속 연구가 필요할 것이다.

참고문헌

1. 강맹규(1991), "네트워크와 알고리즘", 박영사.
2. 남궁성(1996), "전문가시스템을 이용한 최적경로 탐색 시스템(X-PATH)의 개발", 한양대학교 대학원 박사학위논문.
3. 최기주(1995), "U-TURN을 포함한 가로망 표현 및 최단경로의 구현", 대한교통학회지 제13권 3호, pp.35~52.
4. 최기주·장원재(1997), "GIS데이터베이스를 이용한 대중교통망 개발", 대한교통학회지제15권 4호, pp.229~241.
5. K. L. Cooke and E. Halsey(1966), "The Shortest Route Through a Network with Time-Dependent Internodal Transit Times", Journal of Math. Anal. Appl., Vol.14, pp.492~498.
6. E. W. Dijkstra(1957), "Note On Two Problems In Connection With Graphs", Numerical Mathematics 1, pp.269~271.
7. A. Dolan & J. Aldous(1993), "Network and Algorithms", Wiley.
8. S. E. Dreyfus(1969), "An Appraisal of Some Shortest-Path Algorithms", Operations Research,

- Vol.17, pp.395~412.
9. ESRI(1994), "Network Analysis", Environmental Systems Research Institute, Inc.
 10. D. Eppstein(1994), "Finding the k Shortest Paths", 35th IEEE Symp. Foundation of Comp. Sci., SantaFe, pp.154~165.
 11. A. F. Han and Chien-Hua Hwang(1991), "Efficient Search Algorithms for Route Information Services of Direct and Connecting Transit Trips", Transportation Research Record 1358, pp.1~6.
 12. INRO(1994), "EMME/2 User's Manual", INRO.
 13. E. Moore(1957), "The Shortest Path Through A Maze", Proc. Of The Int'l Symposium On The Theory of Switching, pp.285~292.
 14. A. Orda and R. Rom(1990), "Shortest-Path and Minimum-Delay Algorithms in Networks with Time-Dependent Edge-Length", Journal of the ACM, Vol. 37, pp.607~625.
 15. Bin Ran(1994), "Dynamic Urban Transportation Models", Springer-Verlag.
 16. Y. Sheffi(1985), "Urban Transportation Network", Prentice-Hall.
 17. R. Thomas(1991), "Traffic Assignment Techniques", Avebury Technical.
 18. J. Y. Yen(1971), "Finding the K shortest loopless paths in a network", Management Science 17, pp.712~716.
 19. A. K. Ziliaskopoulos and H. S. Mahmassani(1994), "Time-Dependent, Shortest-Path Algorithm for Real-Time Intelligent Vehicle Highway System Application", Transportation Research Record 1408, pp.94~100.