

■ 論 文 ■

비모수 회귀분석을 이용한 실시간 통행시간 예측 기법 개발 및 평가 (서울시 버스를 중심으로)

Development and Evaluation of Real-time Travel Time Forecasting Model: Nonparametric Regression Analysis for the Seoul Transit System

박 신 형

(서울대학교 지구환경시스템공학부
석박사통합과정)

정 연 정

(서울대학교 지구환경시스템공학부
석사과정)

김 창 호

(美 일리노이 대학교 도시및지역계획학과·토목과
석좌교수·서울대학교 공학연구소 연구교수)

목 차

- I. 서론
 - 1. 연구의 배경 및 목적
 - 2. 연구의 범위 및 방법
 - II. 선행연구 고찰
 - III. 모형의 정립
 - 1. 대중교통 경로탐색 알고리즘
 - 2. 통행시간 예측 알고리즘
 - IV. 모형의 구현 및 평가
 - 1. 프로그램 개발
 - 2. 데이터베이스 구축
 - 3. 알고리즘의 평가 및 개선방안
 - V. 결론 및 향후 연구방안
- 참고문헌

Key Words : 경로안내, 통행시간예측, 비모수 회귀분석, 대중교통, 서울시, Dijkstra알고리즘, 환승

요 약

2004년 7월, 서울시는 대중교통 이용률을 높이고, 여러 교통 문제를 해소 또는 완화하기 위해 버스 중심의 대중교통체계로 대대적인 개편을 단행하였다. 중앙버스전용차로제가 확대 시행되었고, 광역, 간선, 지선, 순환의 네 가지 형태로 노선을 구분, 정비하였으며, 통합거리비례요금제 방식을 도입하였다. 이와 함께 BMS(Bus Management System)의 구축으로 서울시 버스 시스템 전반에 대한 관리 및 제어가 가능해 짐으로써 버스 이용자들에게 보다 신속, 정확하게 실시간 정보를 제공할 수 있게 되었다.

본 연구에서는 이러한 서울시의 새로운 대중교통체계에 맞추어, 선행연구를 통해 정립된 최적경로 탐색기법들을 적용하여 대중교통 최적경로를 산출하고, 기존의 여러 통행시간예측모형 비교를 통해 선정된 비모수 회귀분석 기법을 적용하여 주간선 및 보조간선 도로망에서의 대중교통 데이터에 기초한 통행시간 예측 응용 프로그램을 구현하였다. 그리고 구현된 프로그램의 정확성과 신속성 평가를 통해 실제 시스템에서의 적용가능성과 그 방안들을 제시하였다.

Since the 1st of July, 2004, the public transport system of the Seoul metropolitan area has been rearranged. In the new system, bus lines are divided into 4 classes—wide area, arterial road, branch, and rotation lines with renewed fare system based on the total distance travelled. Since central control center known as the Bus Management System (BMS) integrates the entire system operation, it now becomes feasible to collect travel information and provide it to the users scientifically and systematically.

The purpose of this study is to forecast transit travel time using real-time traffic data coming from both buses and subway. This is significant contribution since provision of real-time transit information and easy access to it would most likely boost the use of mass transit system, alleviating roadway congestion in the metropolitan area.

이 연구는 서울대학교 공학연구소의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

1. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

2004년 7월, 서울시는 대중교통 이용률을 높이고, 여러 교통 문제를 해소 또는 완화하기 위하여 대중교통 체계를 버스 중심으로 대대적인 개편을 단행하였다. 중앙버스전용차로제가 확대 시행되었고, 광역, 간선, 지선, 순환의 네 가지 형태로 노선을 구분하여 정비하였으며, 지하철과 연계하여 환승을 고려해 거리에 따라 요금을 부과하는 통합거리비례요금제 방식이 도입되었다. 이와 함께 BMS(Bus Management System)의 구축으로 서울시 버스 시스템 전반에 대한 관리 및 제어 가능해 짐으로써 보다 정확하고 신속하게 버스 이용자들에게 실시간 정보를 제공할 수 있게 되었다.

본 연구에서는 이러한 서울시의 새로운 대중교통 체계에 맞추어, 선행연구를 통해 정립된 최적경로 탐색기법들을 적용하여 대중교통 최적경로를 산출하고, 주간선 및 보조간선 도로망에서 수집된 대중교통 데이터에 기초한 통행시간 예측 응용 프로그램을 구현하였다. 그리고 구현된 프로그램의 정확성과 신속성 평가를 통해 실제 시스템에서의 적용가능성과 그 방안들을 제시하고자 한다.

2. 연구의 범위 및 방법

본 연구는 서초구, 강남구, 송파구, 경기도 분당시를 대상지역으로 하고, 교통수단으로는 지하철 2, 3, 7, 8호선 및 분당선, 그리고 이 지역을 운행하는 광역, 간선, 지선 버스 10개 노선을 대상으로 하였으며, 이 10개 노선들에 대해 2005년 1월 운행이력데이터를 수집, 활용하였다.

경로탐색 알고리즘으로는 지하철 네트워크에 대해 Dijkstra 알고리즘을, 버스 네트워크에 대해서는 환승을 고려한 DB탐색 기법을 적용하였다. 또한 통행시간 예측모형으로 널리 사용되는 여러 모형들의 장단점을 비교하여 최종적으로 비모수 회귀분석 기법을 핵심 알고리즘으로 선정, 이를 통해 통행시간을 예측하였다.

<표 1> 대상 교통수단 및 노선

수단	노선 수	노선번호	기점(종점)	종점(기점)
지하철	5	2호선 3호선 7호선 8호선 분당선	교대 압구정 고속터미널 잠실 신릉	잠실 수서 청담 복정 서현
간선버스	4	401 402 461 471	문정동 수서 문정동 신사역	고속터미널 신사역 남부터미널 세곡동
지선버스	4	3413 3422 4312 4420	잠실역 가락시장 문정동 복정역	수서경찰서 신사중학교 강남역 강남역
광역버스	2	9403 9406	구미동 오리역	잠실역 논현역

II. 선행연구 고찰

본 연구에서 지하철 최단경로탐색 알고리즘으로 채택한 Dijkstra 알고리즘은 Dijkstra(1959)에 의해 개발된 것으로 가장 효율적인 알고리즘으로 알려져 있으며, 이후 수많은 연구에 활용되고 있는 대표적인 최단 경로 알고리즘이다. 이 알고리즘은 최적원리, 즉 최단 경로의 부분경로 역시 최단경로라는 성질을 기초로 하여 개발되었다(강매규, 1991).

버스를 포함한 대중교통 경로탐색 알고리즘에 관한 연구로는 이인목(2004)의 연구를 들 수 있다. 이 연구에서는 수단 간의 환승을 처리하기 위해 환승링크를 추가한 Dijkstra 알고리즘과 검색 및 질의 등을 통한 DB 처리기법을 연구, 검토하였다. 그 결과로 이들의 장점을 결합하여 대중교통 경로탐색을 버스 탐색, 지하철 탐색, 버스-지하철 복합탐색으로 구분, 각각의 알고리즘을 수립하였다. 본 연구에서는 버스 탐색 알고리즘 부분에서 환승 가능 횟수를 2회로 늘려 사용하였고,⁶⁾ 이 연구가 서울시 대중교통체계가 개편되기 이전에 수행된 연구인 점을 감안하여 알고리즘의 가정 부분도 수정하여 적용하였다.

통행시간예측에 관한 연구는 국내외를 통해 많은 연구가 이루어졌고, 현재까지도 꾸준히 이루어지고 있다.

국내의 통행시간예측에 관한 연구에서 다루어지는 모형들은 크게 칼만 필터링, 신경망 모형, 비모수 회귀 분석 등이 대표적이다.

6) 서울시 대중교통체계 개편 이전에는 운행 수입을 늘리기 위해 한 노선이 이용자가 많은 주요지점을 최대한 거침으로써 1회 환승만으로도 거의 대부분 원하는 목적지에 도달할 수 있었다. 그러나 본 연구가 이루어진 시점인 체계 개편 후에는 노선을 직선화하고 지선버스-간선버스-지선버스의 형태로 이용할 수 있도록 노선을 구축하였기에 2회 환승까지 고려하였다.

칼만 필터는 Kalman(1960)과 Kalman and Buch에 의해 처음으로 소개되었으며 상태공간모형으로도 알려져 있다. 상태공간모형은 분석하고자 하는 시스템의 미래 현상을 현재의 상태와 미래의 입력값을 이용해 설명할 수 있음을 모델링 하는 것이다(이청원 외, 2002). 이에 대한 국내 연구로, 오세창 외(2003)는 고속도로 교통류에 대해 칼만 필터를 이용하여 5분 후 예측통행시간을 산출하였고, Lee and Choi(1998)는 링크통행시간을 예측하였으며, 이청원 외(2002)는 프로브차량에 의해 수집된 데이터를 이용, 각 링크별로 통행시간을 예측하여 경험경로통행시간을 추정하는 모형을 구축하고, 이를 남산권 네트워크에 적용하였다.

신경망 이론은 1943년 수학자 McCulloch과 Pitts에 의한 최초의 뉴런모델로 시작되었다. 신경망은 뇌의 정보처리과정을 수학적 측면에서 관철하여 컴퓨터로 실현시킨 것으로 적응성, 학습성, 병렬구조를 가지며, 이러한 특성으로 인하여 음성 또는 영상인식, 진단 및 예측으로 인한 의사결정시스템, 학습알고리즘을 이용한 비선형계의 예측 분야 등에 이용된다.7) 배상훈 외(2005)는 신경망 모형을 이용하여 승용차의 통행시간 데이터를 통해 광역버스 통행시간 예측모형을 개발하였고, 신승원·노정현(1998)은 시내버스 노선의 정류장간 운행시간 예측을 위해 이를 적용한 모형을 개발하였다. 이 외에도 고속도로 통행료 수납자료를 기반으로 신경망을 이용하여 통행시간 예측모형 개발한 강진규·남궁성(2002)의 연구와 신경망 이론에 칼만 필터기법을 연계하여 단위시간 동안의 여행시간을 예측함으로써 고속도로 여행시간정보를 제공할 수 있는 여행시간 추정 및 예측 알고리즘을 개발한 김남선 외(2000)의 연구도 있다. 또한 박병규 외(1995)는 신경망 이론에 의한 시계열 예측모형을 정립하여 링크 통행시간의 시계열 자료를 이용하여 장래 통행시간을 예측한 후, 이를 시계열 모형, 칼만 필터법 등으로 예측한 결과와 비교하여 신경망 이론의 상대적 우수성을 보였다.

비모수 회귀분석을 이용하여 통행시간을 예측한 연구는 타 모형에 비해 비교적 최근에 많이 이루어지고 있다. 우선 해외 연구사례로 Clark(2003)의 연구를 들 수 있다. Clark은 고속도로의 장래 상황을 정확히 예측하기 위한 방법으로 다변량 비모수 회귀분석법을 채택하여 런던의 교외순환 고속도로를 대상으로 속도, 교통량, 점유율을 변수로 설정, 장래 교통상황을 예측, 평가하였다. 또 다른 연구로 미국 북버지니아 순환고속도로의 15분 교통량을 예측한 연구(Smith et al

1997)와 런던 교외순환 고속도로에서 수집된 데이터로 모수적 기법과 비모수적 기법을 통해 각각 교통류를 예측하고 이를 비교한 연구가 있다(Smith et al 2002).

국내에 적용된 연구로 다음과 같은 연구들을 들 수 있다. You and Kim(2000)은 비모수 회귀분석 기법에 GIS(Geographic Information Systems)와 Machine Learning 기법을 적용한 복합 통행시간 예측 모형(Hybrid Travel Time Forecasting Model)을 개발하였다. 이 연구에서는 모형의 정확성 평가를 위해 고속도로에서는 루프 검지기, 시가지도로에서는 비콘에서 수집된 데이터를 이용한 시뮬레이터를 개발하였다. 박희원(2000)은 강남구 네트워크를 대상으로 비콘과 프로브차량을 통해 수집된 데이터를 이용하여 통행시간을 예측하였다. 데이터의 잡음을 제거하기 위해 전처리 과정으로 웨이블릿 변환기법을 적용하였으며 경로탐색을 위해 Dijkstra 알고리즘을 사용하였다.

본 연구에서 비모수 회귀분석 알고리즘을 핵심 알고리즘으로 채택하여 통행시간을 예측하였다는 점에서 위의 연구들과 많은 연관을 갖고 있다. 그러나 해외 연구 사례에서는 통행시간을 예측하기보다 주로 교통량 등 장래 교통상황을 예측하기 위해 이 기법을 많이 적용했고, You and Kim과 박희원의 연구는 대중교통이 아닌 가로 상을 주행하는 모든 차량들로부터 수집되는 검지기 자료를 이용한 링크 통행시간을 예측한 것인 반면, 본 연구는 각 노선 및 해당 노선의 차량별로 수집된 정류장 도착시각을 기반으로 버스 이용 시 예상 통행시간을 제공한다. 이 때 네트워크의 구성 방식에서도 차이가 난다. 주요 교차로를 노드로 하고 교차로 간 도로를 링크로 하는 방식과 달리 본 연구에서는 정류장을 노드로, 정류장 간을 링크로 네트워크를 구성한다. 따라서 정류장 도착시각을 이용할 경우 차내 시간에 교차로 대기시간 및 정류장에서의 정차시간이 모두 포함되기 때문에 침두시와 비침두시의 교통량에 따른 특성이 잠재적으로 반영되어 있다는 장점이 있다. 물론 미시적으로는 같은 시간대라도 개별 버스마다 교차로 대기 시간 등이 다소 다를 수 있어 장래 통행시간을 예측하는데 오차를 발생시키는 원인이 된다고 볼 수 있다. 하지만 각 차량별로 수집되는 1개월 치 이상의 거시적인 historical data를 기반으로 패턴 탐색을 함으로써 현재 상황과 가장 유사한 시계열 데이터를 추출하여 회귀식을 도출하므로, 오차로 인한 문제는 상쇄될 수 있다.

마지막으로 이인목(2004)은 앞서 기술한 환승을 고려한 DB탐색기법으로 예측한 경로에 대해 노선정보,

7) 배상훈 외(2005)의 연구에서 발제, 요약

정류장수, 요금 등의 정보와 함께 예측통행시간 정보를 제공하였다. 그러나 노선의 1회 운행시간을 해당노선의 정류장 개수로 나눈 평균값을 사용했다는 점에서 통행 시간 예측보다는 대중교통 경로정보 안내에 중점을 둔 연구라 할 수 있다.

III. 모형의 정립

1. 대중교통 경로탐색 알고리즘

1) Dijkstra 알고리즘

네트워크의 모든 링크가 비음수(nonnegative)의 통행비용을 가질 때 특정 노드로부터 다른 모든 노드까지의 최단경로를 구하는 가장 효율적인 알고리즘들 중의 하나가 바로 Dijkstra 알고리즘이다. 이 알고리즘은 기점으로 부터 다른 모든 노드까지의 총 길이가 최소가 되도록 구성하기 위해 노드를 "기점으로부터의 최소비용이 알려진 노드"와 "그 외의 노드"로 분류한다. 이렇게 분류된 집합을 이용하여 모든 노드들의 거리 표지를 무한대(∞)로 갖는 임시표지로 지정하고, 시작노드는 영(0)의 값을 갖는 영구표지로 지정한다. 시작노드에 연결된 노드들의 거리 표지는 초기에 지정된 상한값으로부터 시작노드에서 이들 노드까지의 실제 거리값들로 갱신됨과 동시에 임시표지로 지정된다. 그런 다음 이 임시표지로 지정된 노드들 중에서 시작노드로부터 가장 작은 링크 길이의 합을 갖는 노드를 다음 노드로 선택하고 이 노드를 영구표지로 지정한다. 이어지는 각 반복 단계에서 모든 노드들이 영구표지로 지정될 때까지 이러한 과정들이 반복적으로 수행된다(정희석, 2005).

본 연구에서는 지하철 경로 탐색 시 이 알고리즘을 적용하였다. <그림 1>에서와 같이 대상 지하철 노선들에 대해 네트워크 데이터를 구축하고, 통행비용을 역간 이동시간으로 부여하여 알고리즘을 수행하였다. 환승 시 걸리는 시간은 일반적으로 환승통로 통행시간과 탑승 시까지의 대기시간(보통 배차간격의 1/2)을 포함하는데, 하루 중 시간대에 따라 배차간격이 다르며 도보 이동속도도 사람마다 제각기 다르므로 본 연구에서는 평균 5분⁸⁾으로 가정하였다.

Dijkstra 알고리즘 적용을 위해 구축한 지하철 네트워크의 예는 <그림 1>과 같다.

ID	Orig_Stn	Dest_Stn	From_ID	To_ID	Cost
1	잠실	잠실	1	23	5
2	잠실	신천	1	2	23
3	신천	잠실	2	1	23
4	신천	홍합운동장	2	3	23
5	홍합운동장	신정	3	2	23
6	홍합운동장	삼정	3	4	23
7	삼정	홍합운동장	4	3	23
8	삼정	선릉	4	5	23
9	선릉	삼정	5	4	23
10	선릉	역삼	5	36	23
11	선릉	역삼	5	6	23
12	선릉	한티	36	37	1
13	역삼	선릉	6	5	23
14	역삼	강남	6	7	1
15	강남	역삼	7	6	1
16	강남	교대	7	8	23
17	교대	강남	8	7	23
18	교대	교대	8	13	5
19	양구정	신사	9	10	23
20	신사	양구정	10	9	23
21	신사	잠원	10	11	23
22	잠원	신사	11	10	23
23	잠원	고속터미널	11	12	23
24	고속터미널	교대	12	13	23
25	고속터미널	잠원	12	11	23
26	고속터미널	고속터미널	12	28	23
27	교대	교대	13	8	23
28	교대	고속터미널	13	12	23
29	교대	남부터미널	13	14	23
30	남부터미널	교대	14	13	23
31	남부터미널	양재	14	15	23
32	양재	남부터미널	15	14	23
33	양재	매봉	15	16	23
34	매봉	양재	16	15	23
35	매봉	도곡	16	17	23
36	도곡	매봉	17	16	23
37	도곡	도곡	17	36	23
38	도곡	마치	17	18	23
39	마치	도곡	18	17	23

<그림 1> 지하철 네트워크 구축 예시

이를 Dijkstra 알고리즘을 통해 구한 최단시간 경로는 <그림 2>와 같다.

ID	Orig_Stn	Dest_Stn	Distance	Fare
1	신천	잠실	1.2	800
2	신천	신천	0	800
3	신천	홍합운동장	1.2	800
4	신천	삼정	2.2	800
5	신천	선릉	3.5	800
6	신천	역삼	4.7	800
7	신천	강남	5.5	800
8	신천	교대	6.7	800
9	신천	양구정	11.9	800
10	신천	신사	10.4	800
11	신천	잠원	9.5	800
12	신천	고속터미널	8.3	800
13	신천	남부터미널	7.6	800
14	신천	양재	7.2	800
15	신천	매봉	6	800
16	신천	도곡	5.2	800
17	신천	마치	6	800
18	신천	한여울	6.8	800
19	신천	마형	7.7	800
20	신천	일원	8.9	800
21	신천	수서	10	800
22	신천	한티	4.5	800
23	신천	구름	5.8	800
24	신천	개포동	6.5	800
25	신천	대모산입구	7.1	800
26	신천	부평	8	800

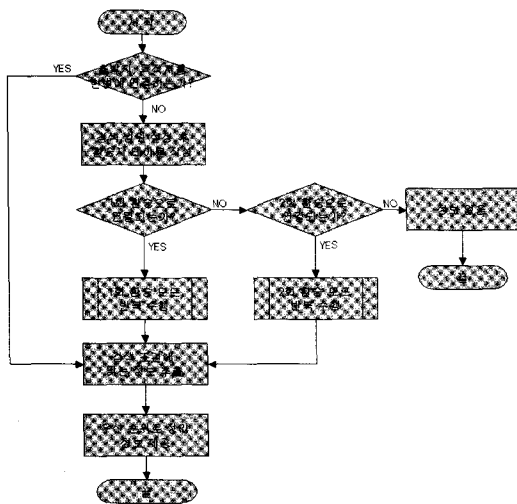
<그림 2> 지하철 최단시간경로 구현 예시

8) 환승통로 이동시간은 환승구간의 거리를 사람의 평균 도보이동 속도로 나누어 구할 수 있고, 평균대기시간은 시간대별 배차간격을 데이터베이스에 반영하여 구할 수 있으므로 환승시간을 하나의 변수로 둔다면 이론적·기술적으로는 그 값을 구할 수 있다. 하지만 환승통로 거리를 상대적으로 구하기 쉬운 지하철-지하철 간 환승뿐만 아니라 버스-지하철, 버스-버스 간 환승에 대해서도 개별 경우에 대해 모두 실측값을 얻기는 현실적으로 어렵다. 따라서 본 연구에서는 건설교통부·교통개발연구원(2003)의 연구에서 적용한 고정된 환승시간을 부여하였으며 이는 환승이 일어날 경우에 부여되는 일종의 시간적 페널티로 봐야 할 것이다.

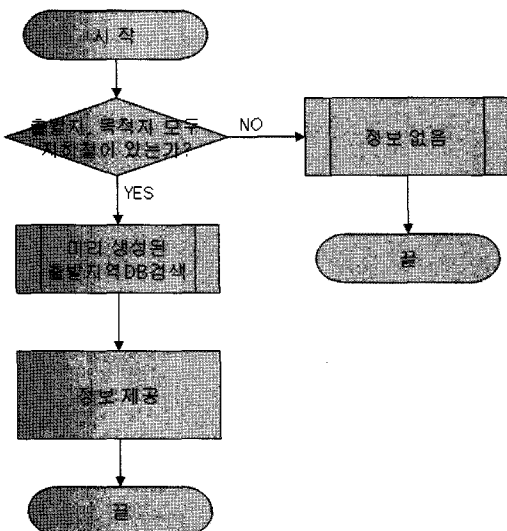
2) 환승을 고려한 DB 탐색 알고리즘

(1) 알고리즘의 개요

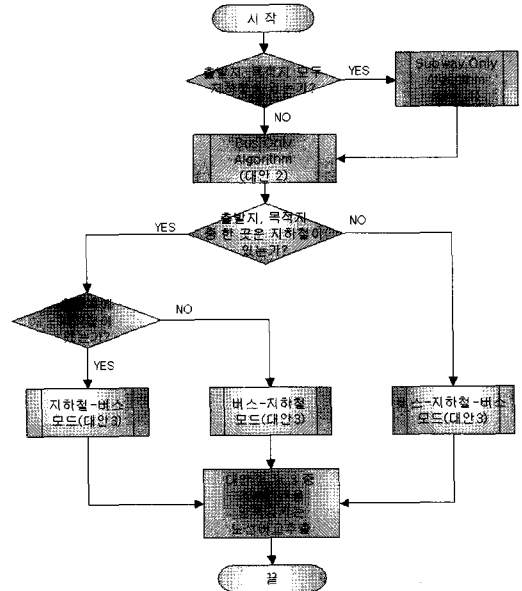
대중교통 경로탐색을 크게 버스탐색(〈그림 3〉), 지하철탐색(〈그림 4〉), 버스-지하철 통합탐색(〈그림 5〉)의 세 가지로 구분하고 각 세부 시스템의 알고리즘을 수립하여 최적의 노선 안내 결과를 산출해 낸다. 각 과정에서 서울시의 개편된 대중교통체계를 고려하여 DB 검색 및 질의 등의 DB 처리 기법을 알고리즘의 수행 기법으로 사용하며, 각각의 경우에 맞게 최적화 기법을 적용하여 최적의 해를 구해내는 알고리즘이다.



〈그림 3〉 버스 노선탐색 알고리즘



〈그림 4〉 지하철 노선탐색 알고리즘



〈그림 5〉 복합노선 탐색 알고리즘

(2) 알고리즘의 가정

- ① 서울시 대중교통 체계 개편 이후에는 지선버스-간선버스-지선버스 혹은 버스-지하철-버스와 같은 방식으로 대부분의 출발 정류장과 도착 정류장을 연결할 수 있으므로 환승은 최대 2회까지만 허용함
- ② 대부분의 노선이 불필요하게 돌아가는 경로가 없어지고 경로의 직선화가 이루어졌으므로, 경로정보 제공 시 최소 환승 위주로 함
- ③ 수단 간 환승 시 걸리는 시간은 다음과 같이 미리 정해진 값으로 부여
 - 버스 ↔ 버스 : 5분
 - 지하철 ↔ 지하철 : 5분
 - 지하철 ↔ 버스 : 7분
- ④ 버스 이용자의 환승은 노선이 밀집된 주요 환승지점인 이른바 '환승지'라는 곳에서만 이루어짐(거의 대부분의 환승은 주요 환승지점에서 환승이 이루어짐)
- ⑤ 버스 네트워크는 노드와 링크를 중심으로 하는 도로 네트워크 방식과는 달리 노선과 정류장을 기준으로 함

2. 통행시간 예측 알고리즘

1) 알고리즘의 선정

You and Kim(2000)은 각종 예측기법의 국내외 연

구를 통해 <표 2>와 같이 각각의 장단점을 정리하였다.

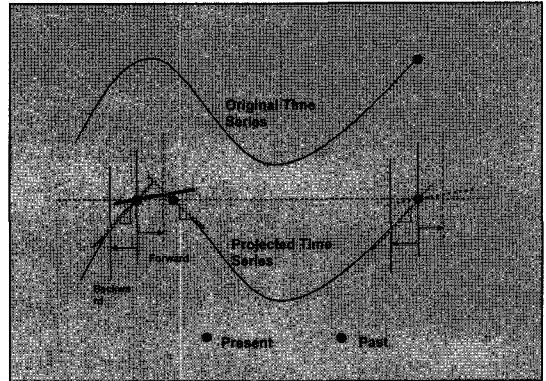
선정되는 예측 알고리즘은 우선적으로 과거 데이터베이스를 효율적으로 활용할 수 있어야 한다. 또한 실시간 데이터와도 연계할 수 있어야 하며, 이식성을 위해 간단명료해야 하고, 컴퓨터에서 프로그래밍 하였을 때 비교적 적은 양의 메모리 리소스를 이용하여 정확한 예측을 할 수 있어야 한다. 예측 알고리즘 선정을 위한 항목별 비교·평가 결과는 <표 3>과 같다.

배상훈·김영섭(2003)의 연구에서는 국내외에서의 예측모형 평가 결과를 정리하였는데, 그 중 순차적 평균, 시계열, 신경망, 비모수 회귀분석을 적용하여 통행시간을 예측한 결과, 비모수 회귀분석이 다른 방법들보다 월등히 우수하다고 평가한 사례도 있었다.

따라서 본 연구에서는 예측 방법을 간단명료하게 체계화하여 비교적 빠른 연산을 수행할 수 있고, 예측의 정확도면에서도 우수한 비모수 회귀분석 기법을 예측의 핵심알고리즘으로 선정하였다. 그 방법은 다음과 같다.

<그림 6>은 본 연구에서 구현된 예측 모형에 사용되

는 비모수 회귀분석을 개념적으로 설명하는 그림이다. 개념적으로 비선형 시스템의 시계열 데이터를 몇 개의 구간으로 쪼개어 각 구간의 선형식을 구한 후 과거의 데이터와 비교하면 현재의 기울기와 유사한 값을 갖는 경우들을 찾아낼 수 있는데, 이로부터 다가올 값을 예측할 수가 있다.



<그림 6> 예측에 사용되는 비모수 회귀분석의 개념도

<표 2> 통행시간 예측모형의 장·단점

모형	장점	단점
과거 프로파일	- 실행 속도가 빠름 - 쉽게 구현할 수 있음	- 단기간에 변할 수 있는 통행 추세를 감지하기 어려움
시계열 분석	- ARIMA 모형 등 많은 시계열분석 응용이 있음 - 체계적으로 정립되어 있음	- 결손데이터로 인한 예측의 어려움 - 모형의 매개변수 결정을 정형화하기 어려움
신경망 이론	- 비선형적이고 복잡한 차량 통행을 잘 대변함	- 이용자가 알 수 없는 블랙박스에서의 예측 - 신경망의 학습 과정이 매우 복잡함
비모수 회귀분석	- 패턴 인식 응용을 이용함 - 아무런 가정이 필요 없음	- 알고리즘의 탐색과정이 복잡함
교통류 시뮬레이션	- 다양한 상황을 모의 실험할 수 있음	- 시뮬레이션의 규모가 커질수록 연산시간이 매우 느려짐
동적 통행배정 모형	- 다양한 모형들이 개발되어 있음 - 모형들이 대체로 잘 알려져 있음	- 모형들이 대단위 대상의 적용에 용이하나 Micro-Simulation에는 부적합
전문가 시스템	- 각 예측에 사용된 매개변수를 활용하여 예측의 신뢰도를 높일 수 있음	- 지식기반의 활용을 정형화하는 것이 어려움

<표 3> 과거 데이터베이스와 실시간 데이터를 활용한 예측모형 개발을 위한 평가

평가항목 \ 예측기법	과거 DB 활용성	실시간 데이터 이용성	예측 알고리즘 이식성	프로그램 효율성	알고리즘 신뢰성	유고 발생시 적용성
과거 프로파일	○	×	○	○	×	×
시계열 분석	○	△	×	△	△	×
신경망 이론	○	△	×	×	○	△
비모수 회귀분석	○	○	○	△	△	△
교통류 시뮬레이션	△	○	△	△	△	△
동적 통행배정 모형	△	○	×	×	△	△
전문가 시스템	○	○	○	○

(○) 양호: (△) 보통: (×) 불량 (...) 해당 없음

2) 최근린 분석

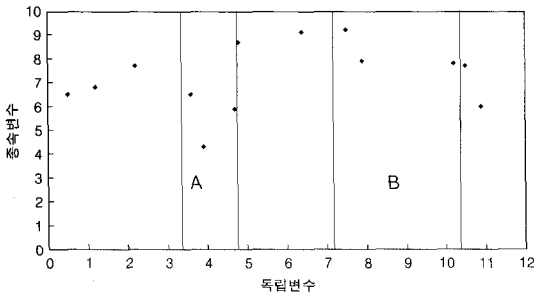
비모수 회귀분석에서 근접치를 찾기 위해 최근린 분석(k-Nearest Neighbor) 알고리즘이 많이 쓰이며 이를 수식으로 표현하면 아래와 같다(Härdle, 1990)

$$\hat{m}_k(x) = n^{-1} \sum_{i=1}^n W_{ki}(x) Y_i$$

$$W_{ki}(x) = \begin{cases} n/k, & \text{if } i \in J_x; \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

근접치 $\hat{m}_k(x)$ 는 가중치 $[W_{ki}(x)]_{i=1}^n$ 에 입력치를 곱한 값의 합을 평균하여 구한다. 이 때 J_x 는 X 에 대한 최근린 관측치들의 집합을 의미한다.

(그림 7)은 최근린 분석을 이용한 비모수 회귀분석의 예를 보여주고 있다. 이변수함수 $f(x)=y$ 에서 $x_A=4$ 이고 $x_B=9$ 인 경우에 y 값을 추정한다고 가정하자. 13개의 관측된 x, y 쌍들이 있다. 이때 $k=3$ 이라 정하면 근린 범위 A와 B가 결정된다. x_A 와 x_B 에 가장 가까운 각각 3개씩의 관측치들이 포함되며, y 추정치는 인근 관측치들의 평균을 구함으로써 얻어진다. 본 예에서 x_A 의 경우 세 인근 관측치의 y 값 6.5, 4.3, 5.9의 평균값인 5.6이 그리고 x_B 는 8.2가 추정값으로 얻어진다.



(그림 7) 최근린 분석의 예

3) 비모수 회귀분석의 응용과 패턴 탐색

(1) 1차 최근린 검색

본 연구에서 비모수 회귀분석의 응용은 과거 데이터 베이스를 이용해 다단계의 탐색과정을 거쳐 수행한다. 이를 위해 크게 2차례에 걸친 최근린 검색을 수행한다. 1차 최근린 검색에서는 먼저 현재의 시간 및 통행 데이터가 전송되면 가장 근사한 K개의 시계열을 과거 자료로부터 찾는다. 이때 사용자는 탐색 시간범위를 지정

할 수 있다. 전체적인 통행특성은 유사할 지라도 보다 미세한 수준에서의 특성은 일별로 다른 경우가 대부분 이므로(예를 들면, 오늘 아침의 소통상태가 내일 아침의 소통상태와 유사하다고 말할 수는 있지만 오늘 아침 7시 현재의 상태가 내일 같은 시각의 상태와 같은 경우는 매우 드물다) 사용자의 탐색범위 지정은 보다 근사한 값을 얻는데 매우 중요한 역할을 수행한다.

(2) 2차 최근린 검색

예측의 최소단위를 15분이라 하면 1차 최근린 검색을 통해 형성되어 현재 상황과 가장 유사한 K개의 과거 시계열들은 2차 최근린 검색을 통해 현재 시간대와 의 비교가 이루어진다. 이때 K개의 과거 시계열 데이터는 현재 관측된 시계열 데이터와 Paired t-검증을 통해 비교하여, 이 중에 가장 유사한 패턴을 보이는 k개의 시계열 데이터를 선택한다.

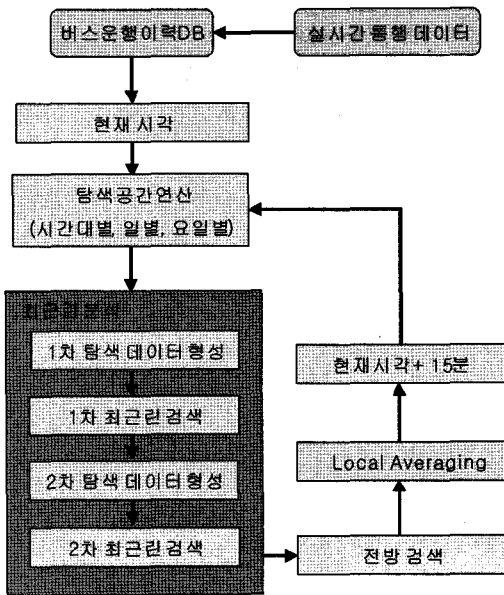
일반적으로 쌍체 비교에 이용되는 t-검증은 일련의 데이터 표본을 포함하는 두 집단이 같다고 할 수 있는지 혹은 그렇지 않은지를 판단하는데 이용된다. 그러나 본 연구에서와 같이 각 관측치와 과거 데이터가 쌍을 이루어 비교되어야 하는 경우(예를 들면 t(현재-15분) 관측치와 t(과거-15분) 데이터를 비교)에는 Paired t-검증이 보다 정확한 결과를 제공한다. 이 경우 각각의 쌍을 이루는 값들이 먼저 비교되어 이들 값 간의 거리가 구해지고, 이들 거리의 평균값과 표준편차를 계산하여 이들을 토대로 t-통계치를 산출해낼 수 있다. 이 과정을 도식화하면 다음과 같다.

$$\mu_j = \frac{\sum_{i=k}^N [\alpha(i) - h_j(i)]}{N}$$

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=k}^N [\alpha(i) - \mu_j]^2}{N-1}}$$

$$t_j = \frac{\mu_j}{[\frac{\sigma_j}{\sqrt{N-1}}]}$$

여기서 평균 μ_j 는 K개의 유사 시계열 중에서 j번째 시계열과 현재 관측치 시계열 α 와의 차를 합한 값이 과거의 유사 시계열 및 현재 시계열의 표본 개수 N으로 나누어 구하며, 표준편차 σ_j 를 구한 후 j번째 시계열의 Paired t-통계치 t_j 를 구하게 된다.



〈그림 8〉 비모수 회귀분석을 이용한 예측 알고리즘

이상과 같은 과정을 통하여 K개의 과거 시계열 데이터와 관측된 현재 시계열 데이터를 각각 비교하여 이 중 가장 작은 t값을 가지는 k개의 시계열 데이터를 추출하고 이와 연계된 미래의 시계열 데이터는 〈그림 8〉에 보인 것과 같이 전방검색을 통해 추출한다. 다시 말해 k개의 시계열 각각에 t+1부터 t+N까지의 속도값을 전방검색을 통해 인식하고, 이들 k×N개의 데이터 (k개 시계열 × 각 N개의 표본)와 현재 관측된 N개의 시계열 데이터 (t-N-1부터 t까지)를 함께 고려하여 회귀선을 도출한다. 도출된 회귀선을 통해 시간 t+N의 통행속도를 추정할 수 있다(Yoo and Kim, 2000).

IV. 모형의 구현 및 평가

1. 프로그램 개발

1) 개요

본 연구에서는 모형의 구현 및 평가를 위해 대중교통 경로 안내 및 통행시간 예측 프로그램을 개발하였다. 구현 환경으로, 운영체제는 Windows XP, RAM 512MB, CPU Pentium IV-3GHz이며, 프로그램 언어는 Visual Basic 6.0, DBMS는 MS Access 2002를 사용하였다.

2) 모듈의 구성

본 프로그램의 핵심 모듈은 크게 경로탐색 모듈과 통행시간 예측 모듈로 구성된다. 경로탐색 모듈은 이용자가 입력한 출발지와 목적지에 대해 통행시간과 운임 등을 고려하여 경로탐색 알고리즘에 따라 최적의 대중교통 통행 경로를 안내해 주는 모듈이며, 통행시간 예측 모듈은 비모수 회귀분석 알고리즘을 이용하여 실시간으로 수집되는 통행시간 및 속도 데이터에 따라 시간대별, 일별, 요일별 특성이 반영된 통행시간을 예측해 주는 모듈이다.

3) 프로그램의 가정

- 환승 시 이동 시간은 환승 수단에 따라 고정된 값을 부여하였음
- 광역노선의 경우 서울시에서는 버스 운행 데이터를 수집하지 않기 때문에 총 이동거리에 대해 버스 평균 속도를 20km/h로 가정하여 통행 시간을 산출하였음(2004년 9월 기준 강남대로 평균운행속도 = 17.2km/h)

2. 데이터베이스 구축

DB구축에 필요한 데이터는 다음과 같다.

- 버스(시내, 광역) 데이터 : 정류장정보(정류장명, 노선번호, 순번, X좌표, Y좌표), 노선정보(노선번호, 버스유형, 기본요금), 노선운행정보(출·도착 정류장, 정류장간 거리)
- 지하철 데이터 : 지하철 통행정보(출발역, 도착역, 거리, 요금), 지하철역(역명, 호선, 순번, 이동시간, 환승여부, 네트워크ID), 지하철네트워크(출발역, 도착역, 역간 통행시간)
- 환승 데이터 : 정류장ID, 지하철역ID, 역명

각 테이블에 대한 레코드 목록은 아래 예시와 같이 구성하였다.

〈표 4〉 버스노선정보 테이블 설계 예시

테이블ID	T_Bus_Line_Info	테이블명	BusLineInfo
순번	필드명	타입/길이	PK/NN
1	LineID	NUMBER(7)	PK, FK
2	LineNum	NUMBER(4)	FK
3	Type	CHAR(10)	
4	Fare	NUMBER(4)	

설명
 노선ID
 노선번호
 빨강(광역)/파랑(간선)/초록(지선)/노랑(순환)
 기본구간요금 (시내-800원, 광역-1400원)

〈표 5〉 버스 노선별 운행이력 테이블 설계 예시

테이블ID	P_(노선번호)		테이블명	(노선번호)
순번	필드명	타입/길이	PK/NN	설명
1	DATE	DATE	PK	날짜
2	DAY	VARCHAR(10)	PK	요일
3	정류장_1 ID	NUMBER(6)	PK	첫번째 정류장 ID
4	정류장_2 ID	NUMBER(6)		두번째 정류장 ID
5	정류장_3 ID	NUMBER(6)		세번째 정류장 ID
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

테이블 구축 예는 다음과 같다.

〈표 6〉 버스 노선 정보 구축 예시

LineID	LineNum	Type	Fare
3040100	401	파랑(간선)	800
3040200	402	파랑(간선)	800
3046100	461	파랑(간선)	800
3047100	471	파랑(간선)	800
4341300	3413	초록(지선)	800
4342200	3422	초록(지선)	800
4431200	4312	초록(지선)	800
4442000	4420	초록(지선)	800
5940300	9403	빨강(광역)	1400
5940600	9406	빨강(광역)	1400

3. 알고리즘의 평가 및 개선 방안

1) 알고리즘 구현 결과

먼저 출발지를 논현역에서 도곡역까지 버스모드(환승없음)에 대하여 수행하였고, 다음으로 강남역에서 가락시장역까지 설정하여 수행하였다. 〈그림 9〉, 〈그림 10〉은 위의 두 가지 버스모드에 대한 수행 결과이다.

이동노선	출발정류장	도착정류장	통행거리	통행시간	요금
402번 노선	논현역	도곡역	4.891km	16분 9초	800원

〈그림 9〉 버스모드(환승 없음) 탐색 결과

이동노선	출발정류장	환승정류장	도착정류장	통행거리	통행시간	요금
402번 노선	강남역	수서역... 401번 노선 환승	가락시장...	11.719km	43분 31초	900원

〈그림 10〉 버스모드(환승 있음) 탐색 결과

2) 알고리즘 결과의 검증 및 개선 방안

(1) 알고리즘의 신속성 평가

본 연구는 대중교통 정보제공 측면에서 모형을 평가하므로, 서비스 이용자들의 편의 및 서비스 질의 향상을 위해서 사용자의 요청에 대응하는 빠른 정보 제공이

〈표 7〉 탐색 수행 속도의 측정 결과

측정 항목	수행 시간(초)
버스 탐색(환승 없음)	4
버스 탐색(환승 있음)	11
지하철 탐색	1초 미만
버스-지하철 탐색(환승 없음)	5
버스-지하철 탐색(환승 있음)	12

매우 중요하다. 이에 각 탐색의 경우에 대하여 탐색 수행 속도를 측정하였다. 단, 대상지역을 서울시 및 분당 일부 지역으로 한정하였기 때문에 전체 지역에 대하여 수행할 때에는 이 결과보다는 다소 처리 시간이 증가할 것으로 판단된다.

프로그램 수행 속도 테스트 결과, 경로 탐색 시 검색되는 버스 노선이 많을수록, 출발지와 목적지 사이에 버스를 이용하여 통행하는 거리가 길수록, 그리고 환승 횟수가 많을수록 수행 속도가 크게 증가하였다. 이는 비모수 회귀분석을 적용한 통행시간 예측 모듈에서 최적경로를 이동하는 각각의 버스 노선에 대해 정류장 사이마다 최근린 분석 및 통행시간 예측이 이루어지기 때문이다. 이 문제는 다음과 같은 몇 가지 방법으로 해결할 수 있다.

① 데이터 구축 및 탐색 방식 변경

본 연구에서는 데이터 수집의 어려움과 다량의 결손 데이터로 인하여 통행시간 예측 모듈의 원활한 테스트를 위해 각 노선 별로 3주에서 1개월 치의 아침 7시~9시 사이의 버스 운행 이력 데이터를 구축하였고, 이를 통해 같은 경로를 이동하더라도 각각의 노선마다 비모수 회귀분석 알고리즘을 적용하여 중복 수행함으로써 통행시간을 예측하고 있다. (즉, A지점에서 B지점을 연결하는 노선이 401번, 402번 두 노선이라면 401번에 대해 A→B, 402번에 대해서도 A→B 탈 각 수행함) 이로 인해 프로그램에서 반복 수행 횟수가 크게 증가하여 전체적인 탐색속도를 저하시키고 있다. 하지만, 운행 이력 데이터를 노선별로 구축하지 않고, 정류장간 링크를 기준으로 구축하여 통행 시간을 예측한 후, 해당 구간을 이동하는 노선 정보를 따로 제공한다면, 통행시간 예측 과정을 대폭 줄이면서 동일한 정보를 제공할 수 있을 것이다.

② 지리정보 시스템(GIS)의 활용

지리정보 시스템은 이미 여러 분야에서 다양하게 응

용되고 있으며, 본 프로그램과 유사한 서비스를 제공하는 여러 사이트들도 이를 활용하여 정보를 제공하고 있다. 지리정보 시스템의 가장 큰 이점은 DB에만 의존하지 않고, 공간 검색과 분석, 연산을 통해 시스템 수행 속도를 크게 향상시킬 수 있다는 점이다. 뿐만 아니라 서비스 이용자들에게도 전자지도를 이용해 시각적인 정보를 제공할 수 있다는 장점이 있다.

③ 실제 서비스 제공 시와 유사한 환경 구축

본 연구에서는 연구결과를 테스트하기 위해 Desktop PC기반의 Stand-alone 형태의 프로그램을 개발하였으나 실제로 대중교통 이용자들에게 정보를 제공하기 위해서는 고성능 서버와 대용량 DBMS(DataBase Management System)를 기반으로 구축한다. 즉 서비스 이용자들(Client)이 요청한 정보에 대해 서버(Server)에서 정보를 처리하여 그 결과만 이용자들에게 전송해주는 Client-Server방식인 것이다. 또한 대용량 DBMS는 본 연구에서 사용한 Access DB에 비해 훨씬 효율적으로 데이터를 관리하고, 질의어나 View 등의 많은 기능을 제공하기 때문에 이를 모두 프로그램 언어로 처리할 수밖에 없었던 본 프로그램에 비해 기능이나 속도 면에서 훨씬 우수하다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서처럼 대량의 운행이력 데이터를 기반으로 통행시간을 예측하는 알고리즘을 수행함에 있어 데이터를 처리하는 시스템의 성능과 데이터를 관리하는 DBMS의 역할은 절대적이라 할 수 있으며, 이러한 환경을 구축한다면 탐색 속도를 크게 향상시킬 수 있을 것이다.

(2) 알고리즘의 정확성 평가

신속성과 더불어 제공되는 정보의 정확성 역시 시스템의 평가를 위한 중요한 척도가 된다. 정확성의 판단 근거로는 얼마나 정확하게 경로를 찾아내는지 하는 것과 그에 따른 예상 통행시간, 그리고 환승이 있을 경우에는 정확한 환승지와 통행 요금의 안내 등이 될 수 있다.

정확성의 평가를 위해 현재 대중교통 정보 서비스를 제공 중인 A사이트와 S사이트를 본 프로그램과 함께 비교하였다.

<표 8>과 <표 9>는 본 시스템과 A사이트, S사이트에 같은 출발지, 도착지를 입력하여 얻은 결과이다. 먼저 환승이 없는 경우, 주중에는 화요일, 주말에는 일요일을 선정하였고, 출발지는 논현역이며 도착지는 도곡역으로 설정하였다. 그 다음으로 환승이 있는 경우에도



<그림 11> 버스모드(환승 없음) 탐색 경로

<표 8> 경로 탐색 결과 비교 - 환승이 없는 경우 (논현역 → 도곡역)

모드	실제 행시간	본 시스템	A 사이트	S 사이트
버스탐색 (화요일)	19분 52초	19분 19초	23분	26분
버스탐색 (일요일)	16분 13초	13분 50초	23분	26분

<표 9> 경로 탐색 결과 비교 - 환승이 있는 경우 (강남역 → 가락시장역)

모드	실제 행시간	본 시스템	A 사이트	S 사이트
버스탐색 (화요일)	43분 17초	46분 54초	54분	58분
버스탐색 (일요일)	36분 19초	36분 39초	54분	58분

역시 화요일과 일요일을 선정하여, 강남역을 출발지로, 가락시장역을 도착지로 설정하였다.

세 시스템의 결과를 비교하면, 본 시스템은 비교적 교통량이 적은 일요일 아침 시간대의 통행시간이 주중인 화요일 아침 시간대 통행시간 보다 빠른 것으로 나타난 반면, 타 시스템은 요일에 상관없이 같은 결과를 제공하고 있다. 즉, 본 시스템은 시간대 및 요일별 특성을 고려하여 통행시간을 예측하는 알고리즘을 바탕으로 하고 있기 때문에 타 시스템보다 높은 정확도를 가진 정보를 제공하고 있음을 알 수 있다. <표 8>과 <표 9>에서의 실제 통행시간은 서울시 BMS에서 수집된 데이터 중 오전 8시 13분 45초를 출발 시점으로 한 통행시간을 나타내고, 본 시스템은 같은 시각을 기준으로 통행시간을 예측하였다. 두 개의 표에서 알 수 있듯이 본 시스템은 실시간 분석을 기반으로 통행시간을 예

측하였기 때문에 실제 통행시간과 오차가 거의 나지 않지만, 타 사이트는 평균적인 데이터를 바탕으로 정보를 제공하기 때문에, 요일별, 시간대별 특성을 전혀 고려하지 못한다. 따라서 본 시스템은 타 시스템보다 정확성 측면에서 매우 우수하다는 평가를 내릴 수 있다.

다음은 동일한 경로에 대해 본 프로그램에서 시간대별로 통행시간을 산출한 결과이다.

〈표 10〉 402번 노선 - 1월 19일 수요일, 대치역(은마아파트) ⇨ 강남역(직접연결)

시각	통행시간
7:00	12분 29초
7:15	15분 36초
7:30	13분 09초
7:45	14분 07초
8:00	13분 48초
8:15	12분 41초
8:30	16분 07초

〈표 11〉 402번 노선 - 1월 19일 수요일, 도곡역(출발지) ⇨ 양재역(환승지) ⇨ 세곡동(도착지)(1회 환승)

시각	통행시간
7:00	24분 00초
7:15	26분 47초
7:30	25분 06초
7:45	26분 04초
8:00	28분 21초
8:15	26분 47초
8:30	28분 43초

〈표 12〉 4420번 노선 - 1월 20일 목요일, 세곡동(출발지) ⇨ 지하철 수서역(환승지) ⇨ 지하철 도곡역(도착지)(버스-지하철 복합 환승)

시각	통행시간
7:00	18분 42초
7:15	19분 19초
7:30	19분 19초
7:45	19분 29초
8:00	19분 46초
8:15	19분 50초
8:30	18분 53초

위의 표에서 확인할 수 있듯이, 같은 요일, 비슷한 시간대에서도 검색 시각에 따라 다른 결과를 얻을 수 있다. 이는 요일이나 시간대와 상관없이 항상 같은 결과를 제공하는 타 시스템과 뚜렷이 구별되는 본 프로그램의 우수성이라 할 수 있다.

결론적으로 본 시스템을 타 사이트와 검증해본 결과, 탐색 속도 면에서는 크게 만족스러운 결과를 보여주지는 못했지만, 정확성 면에서는 아주 우수한 결과를 보여주고 있다. 특히 본 시스템은 요일별 특성 및 시간대별 특성을 고려하여 결과를 제공하기 때문에, 과거의 추세뿐만 아니라, 향후 실시간 데이터를 이용하여 보다 정확한 통행시간을 예측할 수 있고, 이러한 측면에서 타 사이트보다 비교 우위에 있음을 알 수 있다. 또한 본 모듈을 활용하여 실제 서비스 구현 시에 고성능, 대용량의 시스템 환경을 구축한다면 탐색 속도 문제도 크게 개선되어질 것으로 판단된다.

V. 결론 및 향후 연구방안

본 연구에서는 대중교통 최적경로 알고리즘과 비모수 회귀분석을 통한 실시간 통행시간 예측 알고리즘을 바탕으로 하여 대중교통 경로안내 및 통행시간 예측 프로그램을 구현하였고, 이를 통해 정확성과 신속성을 기준으로 알고리즘을 평가하였다. 그 결과, 시간대별, 요일별 통행특성이 반영된 예측 통행시간을 얻을 수 있었고, 실제 운행시간과 비교해 봤을 때 우수한 예측력을 보여주었다. 정보제공의 신속성 측면에서는 연산시간이 다소 오래 걸리는 단점이 있으나, 실제 서비스 조건에 적합한 시스템 환경을 구축하고, GIS 기법의 적용, 데이터베이스 구축 및 탐색 방식의 개선 등을 통해 충분히 개선시킬 수 있을 거라 사료된다.

다만, 버스로부터 수집되는 운행 데이터를 이용할 때 결손 및 잡음 데이터에 대한 보정 방안, 환승 및 대기시간, 배차간격의 고려, 승객들의 승차차 시간과 정류장 간 이동 시 교차로 신호 대기 시간 등의 처리 방안에 대한 연구가 계속 진행되어 그 결과를 반영할 수 있다면 알고리즘의 정확성을 더욱 높일 수 있을 것으로 판단된다. 또한 향후 서울뿐만 아니라 버스정보시스템(BIS: Bus Information System)을 구축, 운영 중인 지자체에서도 경로 안내를 통한 여행자 정보 제공에 충분히 활용 가능할 것이며, 대중교통 이용자들에게 매우 신속하고 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 강맹규(1991), "네트워크와 알고리즘", 박영사.

2. 강정규·남궁성(2002), "고속도로 통행료수납자료를 이용한 통행시간 예측모형 개발", 대한교통학회지, 제20권 제4호, 대한교통학회, pp.151~162.
3. 건설교통부·교통개발연구원(2003), "Mobile 위치 추적기반 교통정보안내 사업 제1차년도 최종보고서".
4. 박희원(2000), "비모수 회귀분석을 이용한 실시간 통행시간 예측 및 최적경로 산정모형 구축", 서울대학교 석사학위 논문.
5. 김남선·이승환·오영태(2000), "신경망을 이용한 고속도로 여행시간 추정 및 예측모형 개발", 대한교통학회지, 제18권 제1호, 대한교통학회, pp.47~59.
6. 박병규·노정현·정하욱(1995), "신경망 이론에 의한 링크 통행시간 예측모형의 개발", 대한교통학회지, 제13권 제1호, 대한교통학회, pp.95~110.
7. 배상훈·김영섭(2003), "실시간 버스위치데이터를 활용한 통행시간 추정", LBS학회지, 제1권 제1호.
8. 배상훈·임재현·정희진(2005), "신경망 모형을 이용한 광역버스통행시간 예측", LBS학회지, 제3권 제1호.
9. 신승원·노정현(1998), "웨이브렛 변환과 RBF 신경망을 이용한 경로통행시간 예측모형 개발 -시내버스 노선운행시간을 중심으로-", 대한교통학회지, 제16권 제4호, 대한교통학회, pp.153~164.
10. 오세창·김명하·백용현(2003), "차량검지기 교통량 데이터를 이용한 고속도로 통행시간 추정 및 예측모형 개발에 관한 연구", 대한교통학회지, 제21권 제5호, 대한교통학회, pp.83~95.
11. 이인목(2004), "환승을 고려한 대중교통 최적경로 탐색 알고리즘", 서울대학교 석사학위 논문.
12. 이청원·박지영·고승영(2002), "칼만필터를 이용한 경로통행시간 예측", 대한토목학회논문집, 제22권 제5-D호.
13. 정희석(2005), "Dijkstra 알고리즘을 응용한 동적 최단경로 탐색 알고리즘", 서울대학교 석사학위 논문.
14. Brian L. Smith, Michael J. Demetsky(1997), "Traffic Flow Forecasting: Comparison of Modeling Approaches", the Journal of Transportation Engineering, vol. 123, No. 4.
15. Brian L. Smith, Billy M. Williams and R. Keith Oswald(2002), "Comparison of parametric and nonparametric models for traffic flow forecast", Transportation Research Part C, Volume 10, Issue 4, pp. 303~321.
16. Härdle, W.(1990), "Applied Nonparametric Regression", Econometric Society Monographs, no. 19, Cambridge University Press.
17. Jinsoo You and T. J. Kim(2000), "Development and Evaluation of a Hybrid Travel Time Forecasting Model", Transportation Research Part C, Volume 8, Issues 1-6, pp.231~256.
18. Stephen Clark(2003), "Traffic Prediction Using Multivariate Nonparametric Regression", the Journal of Transportation Engineering", vol. 129, No. 2.
19. Young-Ihn Lee and Chan Young Choi (1998), "Development of link travel time prediction algorithm for urban express-way", Proceedings of 5th World Congress on ITS, Korea.

✉ 주 작 성 자 : 박신형

✉ 교 신 저 자 : 박신형

✉ 논문투고일 : 2005. 10. 29

✉ 논문심사일 : 2005. 11. 30 (1차)

2005. 12. 19 (2차)

✉ 심사판정일 : 2005. 12. 19

✉ 반론접수기한 : 2006. 6. 30