

■ 論 文 ■

도로 위계 구조를 고려한 동적 최적경로 탐색 기법개발

A Dynamic Shortest Path Finding Model using Hierarchical Road Networks

김 범 일

(한국교통연구원 연구원)

이 승 재

(서울시립대학교 교통공학부 부교수)

목 차

- I. 서론
 - II. 기존 문헌 사례 고찰
 - 1. 단기통행시간 예측모형
 - 2. 최적경로 탐색 알고리즘
 - 3. 도로위계구조를 반영한 탐색기법
 - III. 모형의 개발
 - 1. 링크통행시간 예측모형
 - 2. 링크통행시간 예측모형 비교 평가
 - IV. 도로위계구조를 고려한 탐색기법
 - 1. 기존 네트워크 및 경로탐색
 - 2. 간선도로 선택확률모형
 - 3. 모형 구축 및 적용
 - V. 모형의 평가
 - VI. 결론
- 참고문헌

Key Words: 도로위계구조, 동적최적경로탐색기법, 확률과정모형, 통행시간예측, Binary Logistic Regression

요 약

사람들은 지식을 저장할 때 독립적으로 분리하여 저장하기 않고 지식을 조직화하여 저장한다. 이와 같이 사람들이 지식을 위계적으로 저장하는 방법을 최적경로 탐색기법에 도입하고자 한다. 지금까지의 최적경로를 탐색하는 경우에는 각 링크의 통행비용만을 이용하여 교통정보를 제공하고 있다. 그 결과 실제 운전자들이 장거리 통행에서 최적경로를 탐색시 고속도로 선호도를 반영하는데 미흡하였다. 따라서 본 연구에서는 거리에 따른 경로탐색에 있어 binary logistic regression을 이용하여 간선도로 선택확률모형을 개발하여 장거리를 탐색할 때 도로의 위계를 반영하는 최적경로탐색기법을 도입하였다. 또한 최적 경로를 탐색할 경우에 기존 방법은 탐색 시점을 기준으로 한 교통상황을 기반으로 최적경로를 제공하였다. 이는 운전자가 실제로 주행을 하면서 경험하게 되는 링크의 통행시간과는 차이를 보이게 된다. 이런 단점을 해결하기 위해 링크의 통행시간을 예측하는 방안이 있다. 확률과정 모형을 이용하여 예측된 링크 통행시간을 기반으로 최적경로 탐색에 적용하였다. 확률과정 모형은 장기 예측에는 다른 모형보다 오차가 적게 발생하며, 데이터양이 많이 축적되어 있는 경우에 다른 예측기법보다 유리하다. 데이터가 균일하게 있지 않아도 적용이 가능하다.

도로 위계를 고려한 방법과 기존의 방법의 탐색속도를 비교한 결과 탐색 노드의 수가 증가함에 따라서 위계를 고려한 방법이 기존의 방법보다 탐색속도가 향상된다. 도로위계를 고려한 방법을 적용하여 탐색한 결과와 택시운전사들의 설문조사를 통해 얻어진 답안을 서로 비교한 결과 많이 일치함을 알 수 있었다.

When it comes to the process of information storage, people are likely to organize individual information into the forms of groups rather than independent attributes, and put them together in their brains. Likewise, in case of finding the shortest path, this study suggests that a Hierarchical Road Network(HRN) model should be selected to browse the most desirable route, since the HRN model takes the process mentioned above into account. Moreover, most of drivers make a decision to select a route from origin to destination by road hierarchy.

It says that the drivers feel difference between the link travel time which was measured by driving and the theoretical link travel time. There is a different solution which has predicted the link travel time to solve this problem. By using this solution, the link travel time is predicted based on link conditions from time to time. The predicated link travel time is used to search the shortest path. Stochastic Process model uses the historical patterns of travel time conditions on links.

The HRN model has compared favorably with the conventional shortest path finding model in terms of calculated speeds. Even more, the result of the shortest path using the HRN model has more similar to the survey results which was conducted to the taxi drivers. Taxi drivers have a strong knowledge of road conditions on the road networks and they are more likely to select a shortest path according to the real common sense.

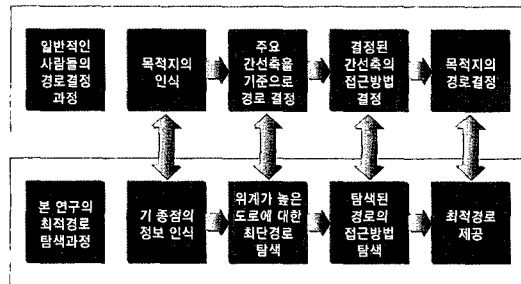
1. 서론

일반적으로 사람들이 지식을 습득하여 기억할 때 주어진 정보들의 상호관계를 고려하여 기억한다. 지식을 기억하는 방법 중에는 주어진 정보들을 위계적으로 조직화하여 저장하는 방법이 있다. 지식의 위계를 고려하는 방법을 최적경로탐색기법에 적용하려고 한다. 한 예로 택시운전사들을 대상으로 최적경로 설문 조사를 실시한 결과를 보면, 일산의 호수 공원에서 성남의 분당 중앙공원까지 가는 경로는 "자유로-강변북로-청담 대교-분당구청" 혹은 "자유로-강변북로-한남대교-경부고속도로-판교IC-분당"으로 가는 경로를 선정하였으며, 뱅뱅사거리 위치에서 선릉역으로 가는 경로는 "강남역-테헤란로-역삼역-선릉역"경로를 선정하였다. 경험이 풍부한 택시운전사들도 최적경로를 탐색할 경우에 일반적으로 거리가 짧은 단거리 통행보다는 장거리 통행은 주요 간선도로를 이용하여 경로를 선정한다. 이를 위해 택시운전사들을 통해 조사한 설문조사 자료를 이용하였다. 설문조사자료는 기종점 거리에 따른 간선도로 이용 여부 binary logistic regression기법을 통해 간선도로 선택 확률모형을 개발하였다. 기종점의 거리에 따라 단거리와 장거리를 구분하여 경로를 탐색하였다.

도로는 이동성과 접근성의 기능에 따라서 고속도로, 간선도로, 집산도로, 국지도로 등으로 구분되어 진다. 고속도로와 간선도로는 이동성 기능이 주 기능이고, 국지도로는 주 기능이 접근성이며, 집산도로는 간선도로와 국지도로의 중간 기능을 담당하고 있다. 이처럼 도로는 그 기능에 따라 각각의 역할이 나누어지는 것처럼 최적경로 탐색에 도로의 위계를 구분한다.

실제 도로상에서는 그 기능이 명확히 구분되어지는 않지만 사람들은 무의식적으로 도로의 기능을 고려하여 경로를 탐색하는 경향이 있다. 지금까지의 최적경로를 탐색하는 경우에는 도로의 기능을 고려하지 않고, 링크의 통행비용만을 이용하여 최적경로를 탐색하여 교통정보를 제공하고 있다. 그 결과 교통정보를 제공하는데 있어서 실제로 운전자들이 이용하는 경로와는 다른 경로를 제공하거나, 고속도로와 같은 도로의 기능이 높은 도로에 가중치를 주는 방법을 이용한다.

도로 위계를 고려한 최적경로 탐색 기법은 거리나 시간이 짧게 걸리는 경우에는 그 영향이 아주 미미하지만, 이동 거리가 점점 멀어지고, 시간이 많이 걸리는 경우에 사람들은 위계가 높은 도로를 선택하는 선호도가 높아지



〈그림 1〉 연구 진행 개념도

는 현실적인 접근을 시도하려고 한다. 또한 최적 경로를 탐색할 경우에 탐색 시점을 기준으로 한 교통상황을 기반으로 최적경로를 제공하였다. 이는 운전자가 실제로 주행을 하면서 경험하게 되는 링크의 통행시간과는 차이를 보이게 된다. 이런 단점을 해결하기 위해 링크의 통행시간을 예측하는 방안이 있다. 예측된 링크 통행시간을 기반으로 최적경로 탐색에 적용함으로써 시간에 따라 변화하는 링크의 상황을 반영하려고 한다.

지금까지 링크통행시간 예측에 대한 연구는 검지기에서 수집되는 교통량, 속도, 점유율과 같은 교통특성을 나타내는 변수들을 이용하여 시계열기법, 신경망모형, 칼만필터링 모형과 같은 예측기법에 따라 링크 통행시간의 정확도를 비교 검증하였다. 최적경로 탐색 알고리즘인 표지(label)에 따른 분류, 수형망 알고리즘, 덩굴망 알고리즘, 전문가시스템, 다경로 탐색방법인 K-shortest path 방법과 같은 다양한 방법을 적용한 경로탐색기법에 대한 연구가 이루어졌다. 하지만 예측된 링크의 통행시간을 기반으로 한 최적경로탐색에 대한 연구가 미비하다.

따라서 본 연구에서는 링크를 기반으로 각 링크의 통행시간을 예측을 하며, 예측된 통행시간을 바탕으로 동적최적경로 탐색기법을 적용한다. 경로 탐색에는 〈그림 1〉과 같이 사람들의 사고과정을 적용하여 도로의 위계를 구분하여 탐색한다.

II. 기존 문헌 사례 고찰

1. 단기통행시간 예측모형

국내의 통행시간 예측과 관련해서는 박병규(1995)는 신경망이론을 이용하여 강남 노선로의 노선 천주교회와 안세 병원간 링크의 통행시간을 예측모형을 개발하였다. ARIMA모형, 칼만필터링 모형과의 예측력을 비교한 결

과 신경망 모형이 가장 우수한 결과를 보였다. 조범철(1998)은 다중회귀분석, ARIMA 모형, 인공신경망, 칼만필터링 모형을 이용하여 1, 5, 10, 15분 후의 단기 속도를 예측했다. 예측 통행속도는 올림픽대로 중 한강대교 부근에 위치한 지점을 대상으로 하였으며, 그 결과 칼만필터링 모형이 우수한 결과를 보였다. 이영인(1998)은 칼만필터링 모형을 이용하여 올림픽 대로의 오전 7시~11시까지 1분 간격의 검지속도를 예측하였다. ARIMA 모형, 신경망 모형, 평활법을 이용하여 예측한 결과를 비교 분석한 결과 칼만 필터링 모형이 가장 예측력이 높았다. 김남선(2000)은 신경망을 이용한 고속도로 여행시간을 추정 및 예측한 결과 칼만 필터링 모형이 가장 우수한 결과를 보인다. 남궁성(1999)은 TCS(Toll Collection System)의 원시자료를 TLIS(Traffic and Logistics Information)을 통해 수집된 자료를 이용하여 칼만 필터링 모형, 신경망 모형, Pattern Matching 등의 모형에 적용해 본 결과 단기예측에는 칼만 필터링 모형이 장기예측에는 신경망 모형이 우수한 결과를 보였다.

최기주(1998)은 링크통행시간 산정하기 위해 GPS 단말기를 장착한 차량을 통해 얻어지는 자료를 이용하였으며, 이를 토대로 하여 링크통행시간정보를 산출하는 방법을 강남대로(한남대교 ~ 강남역 구간)를 대상으로 적용하였다. 장진환(2004)은 AVI를 이용하여 일반국도 1호선 상의 10km 구간을 대상으로 수집한 자료를 이용하여 칼만 필터링모형을 이용하여 통행시간을 예측하였다.

2. 최적경로 탐색 알고리즘

남궁성(1996)은 전문가 시스템을 이용하여 유효 탐색영역의 효과적인 설정을 통한탐색공간의 감소를 시도하였으며, 이용자의 다양한 특성과 선호를 반영하여 최적경로 탐색 방법을 개발하였다. 또한, 시간에 따른 통행비용 변화에 따른 최적경로 탐색 실패의 문제를 개선하기 위해 과거통행정보와 전문가의 지식을 이용하는 방법을 적용하였다. 전문가의 지식은 통행 경험이 많은 운전자(특히 택시기사)의 '최선(best)의 경유지'에 관한 지식을 바탕으로 경로의 탐색방향을 효과적으로 설정하고, 유효 탐색영역 설정 기법이 갖는 탐색영역을 줄이는 방법을 적용하였다.

이승환(1996)은 좌회전 금지 및 U-TURN, P-TURN을 고려하여 탐색 영역제한 방법 및 양방향 링크탐색 알고

리즘을 적용하여 경로탐색 방법을 적용하였다. 김익기(2004)의 연구에서는 "이성적 한계범위(rational upper boundary)"라는 통행자들의 행태적 개념을 도입하여 수정형 덩굴망 최단경로 탐색 알고리즘을 이용하여 다경로 생성 알고리즘을 개발하였다.

이미영(2005)은 경로인지비용을 반영하여 최적경로 탐색알고리즘을 제시하였다.

3. 도로위계를 반영한 탐색기법

1) 인지심리학

심리학의 한 분야인 인지심리학(cognitive psychology)은 "감각정보가 변형되고, 축소되고, 정교화 되고, 저장되고, 인출되고, 활용되는 모든 과정을 연구하는 학문이다"라고 Neisser(1967)은 정의 하였다. 심리학자들은 지식을 저장할 때 지식이 독립적으로 분리되어 저장되어 있지 않고 조직화되어 저장되어 있을 거라는 가정 아래에 연구가 이루어졌다. 그 모형 중에는 Collins와 Quillian의 위계적 망 모형이 있다.

위계적 망 모형의 중요한 전제는 개념이 망 안에 위계적으로 조직화되어 있다는 것이다. 이 연결은 상위 또는 하위 개념관계를 나타내며, 각 개념에는 여러 속성들이 서로 연결되어 저장되어 있다. 도로 설계시에 도로의 기능인 이동성과 접근성을 고려하여 고속도로, 주간선도로, 보조간선도로, 집산도로, 국지도로로 분류되어진다. 인지심리학의 위계망 모형에서 지식이 위계적으로 조직화되어 있다는 개념을 최적경로 탐색기법에 도입하고자 한다.

2) 도로 위계

김성언(2004)은 경로 탐색의 신속성과 저장 공간의 감소를 위하여 단계적으로 격자의 크기를 세분화하면서 함수의 최적값을 찾는 단계별 세분화 방법의 원리(Coarse Grid Method)의 개념 적용하였다. 첫 번째 단계에서는 주어진 전체 도로망에서 주요 간선도로의 주요 노드만을 고려하고, 두 번째 단계에서는 전체 도로망을 몇 개의 세부 도로망으로 나누고, 각 세부 도로망에서 적당한 도로의 적당한 노드들을 고려한다. 세 번째 단계에서는 각 세부 도로망을 다시 몇 개의 도로망으로 세분화 하는 방법을 이용하여 최단 경로를 탐색하는 기법을 적용하였다. 황준문(2001)은 도로의 기능을 분류를 교통량, 통행길이, 통행속도를 이용하여 이

들 특성이 높을수록 높은 위계를 가지게 된다. 위의 특성들을 대표할 수 있는 차량 주행거리(VKT)와 평균통행거리를 사용하였으며, 차선수와 구간 연장을 고려하기 위해 거리 차선당 VKT와 평균통행거리 지수를 사용하였다. 김익기(1995)은 통행자들이 통행거리에 비례하여 위계가 높은 도로를 선호하는 성향을 반영하여 노선배정기법에 적용하였다.

III. 모형의 개발

1. 링크통행시간 예측모형

1) 확률과정 모형

확률과정은 “연관성이 있는, 또는 첨자(index)가 붙어 있는 확률변수들의 집합”으로 정의할 수 있다. 즉 “ $\{X_t : t \in T\}$ 가 확률과정이다” 라고 할 때 이는 집합 T에 있는 모든 t에 대해서 X_t 를 “시점 t에서의 시스템의 상태”를 표현하는 것으로 해석한다.

확률과정 중 하나인 마코프 과정(Markov Process)이란 현재의 시점 t에서 나타난 어떤 시스템의 상태는 과거의 시점 t-1에서의 상태에만 영향을 받음을 의미한다. 즉, t-1 시점 이전에 이 시스템이 어떤 상태에 머물렀건, 현재의 상태는 한 시점 이전의 과거의 상태에만 영향을 받음을 의미한다. 이러한 성질을 이용하면, t+1 시점의 상태는 t의 상태를 이용하여 예측할 수 있게 된다. 일반적으로 시스템의 상태를 나타내는 행렬을 S라 하고, 이 상태가 전이되는 확률을 M이라 하면, 미래의 상태는 식(1)으로 표현이 가능하다.

$$S_{t+1} = MS_t \quad (1)$$

이러한, 마코프 과정을 링크통행시간예측 모형에 적용한다면 식(2)을 구성할 수 있다.

$$\bar{c}_{t+1} = M \bar{c}_t \quad (2)$$

여기서, \bar{c} 링크통행시간벡터를 나타낸다.

따라서 마코프 과정을 통해 미래의 통행시간을 예측할 때는 전이확률(M)을 계산하는 것이 중요하다. 그러

나 마코프 과정은 일반적으로 균형상태 (equilibrium state)로 진행되는 동안의 상태변화를 표현하는 것이기 때문에 통행시간 예측에 이 이론을 적용하는 것은 무리일 것으로 판단된다. 그러나 장기적인 통행시간의 패턴을 설명하기에는 유용한 모형이다. 가령 하루 동안 지속되는 통행시간의 변화를 모형화 할 수 있어, 30분 후 혹은 60분 후의 통행시간이 어떻게 변화해 나갈지 예측할 수 있다.

2) ARIMA를 이용한 통행시간 예측

ARIMA는 시계열 모형 중에서 가장 일반적인 형태이다. 시계열 모형 중 대표적인 자기회귀(AR: Auto-Regressive) 모형과 이동평균법(MA: Moving Average) 모형 그리고 이들을 결합시킨 ARMA 모형을 모두 포괄한다.

특히, ARIMA 모형은 단순히 AR 모형과 MA 모형을 결합시킨 ARMA 모형과 구별되는데 이는 원시 시계열자료를 정상시계열 자료로 전환시키는 차분과정을 거치기 때문이다.

그러나 대부분의 시계열 자료는 이러한 정상성을 만족시키지 못하는 경우가 많다. 평균이 시간에 따라 변하기도 하고, 분산이 상수가 아니라 증가하거나 감소한다. 그러나 AR 혹은 MA 등의 시계열 모형은 정상 시계열 자료를 기반으로 작성되었기 때문에 비정상 시계열 자료는 정상 시계열로 변환시켜야 한다. 이러한 변환은 대개 분산상수화와 평균 상수화를 통해 이루어진다. 분산상수화를 위해서는 시계열 자료를 log 변화시키거나 제곱근을 취한다. 한편 평균 상수화에서는 차분과정을 거치게 된다.

3) 칼만필터링을 이용한 통행시간 예측

상태방정식(state equation):

$$x_{k+1} = Ax_k + w_k \quad (3)$$

칼만필터링의 목적은 무작위 오차 (random error)를 지니는 관측치로부터 분석하려는 시스템의 상태를 예측하는 것이다. 칼만필터를 위한 상태방정식과 관측치에 대한 추정식은 식(4)와 같다.

관측방정식(observation equation):

$$z_k = Hx_k + v_k \quad (4)$$

여기서, x_k : k 시점에서 시스템의 상태
 z_k : 관측치
 w_k, v_k : random error
 A, H : 상수 행렬

위의 상태 방정식에 의하면, k+1 시점에서의 예측치 x_{k+1} 은 이전 (현재) 시점의 상태 x_k 와 그 때의 오차항 w_k 를 관련시켜 예측할 수 있다. 또한 현재시점 k에서 새로운 관측치 z_k 는 현재에 대한 예측치 x_k 와 현재의 오차항 v_k 를 관련시켜 계산할 수 있다. 칼만 필터에서는 예측치 x_k 와 오차항 w_k 의 분산 P_k 에 대한 초기치 x_0, P_0 가 주어진 상태 (a priori estimate)에서 상태 방정식으로 x_k 의 예측치 \hat{x} 를 구하고, \hat{x} 와 새로운 관측치 z_k 를 이용해 더 나은 x_k 를 다시 예측한다.

즉, 관측치를 포함시켜 새로운 예측치를 찾으므로 보다 현실에 가까워진 예측치를 구하게 된다. 새로운 예측치는 대개 \hat{x} 와 관측치 추정오차의 선형조합(linear combination)으로 이루어진다. 이때 칼만이득이라 불리는 'K' 상수를 대개 상수로 이용하며, 이 대개상수는 예측 오차를 최소화시키는 방법으로 추정된다. 위에 기술한 방식으로 시점 k를 바꿔가면서 모든 시점에 대한 상태를 예측하면, 전체적인 시점에 대해 예측이 가능하다.

2. 링크통행시간 예측모형 비교 평가

링크통행시간 예측모형을 평가하기 위하여 <표 1> 링크 통행시간을 예측하였다. 예측에 사용된 통행시간을 로티스의 2001년 12월 달의 1~3주 수요일 자료를 이용하여 12월 26일의 통행시간을 예측하였다. 모형의 정확도를 평가하기 위한 기준으로는 상대평균절대 오차율(MP)을 사용하였다.

$$MP(MARE \text{ Percent}) = MARE * 100$$

$$MARE = \frac{1}{N} \sum \frac{|X_{obs} - X_{prd}|}{X_{obs}} \quad (5)$$

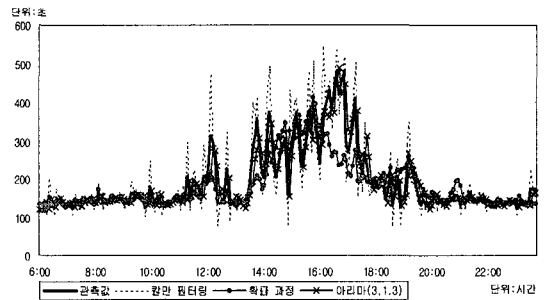
여기서, N : 링크의 총 개수
 t : 단위시간
 X_{obs} : 현장 실측자료
 X_{prd} : 모형으로부터 계산된 예측자료

<표 1> 링크 구간

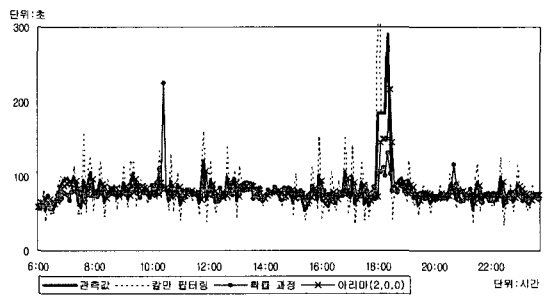
링크구간	링크 길이(m)
북한남삼거리 → 명동역	2406
한남로터리 → 북한남삼거리	1130

1) 링크별 예측모형 비교

<북한남삼거리→명동역> 링크와 <한남로터리→북한남삼거리> 링크에 대해서 칼만필터링 모형, 확률과정, ARIMA 모형을 이용하여 5분 후 예측통행시간을 예측한다. <북한남삼거리→명동역> 링크는 칼만필터링 모형이 다른 예측 모형에 비해 오차가 작고, <한남로터리→북한남삼거리> 링크는 확률과정 모형이 다른 예측기법에 비해 오차가 작다.



<그림 2> 북한남삼거리→명동역



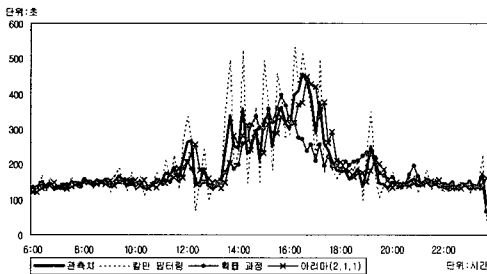
<그림 3> 한남로터리→북한남삼거리

<표 2> 예측모형에 따른 오차 비교

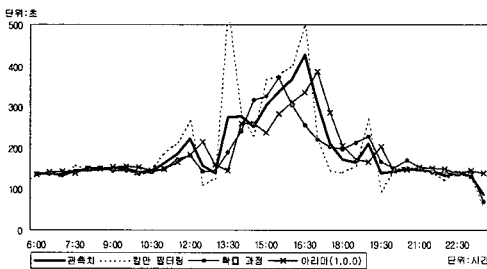
구간	예측모형	MP (%)
북한남삼거리 → 명동역	칼만필터링	11.49
	확률과정	12.92
	ARIMA(3,1,3)	11.50
한남로터리 → 북한남삼거리	칼만필터링	13.60
	확률과정	11.95
	ARIMA(2,0,0)	12.34

2) 예측시간 간격별 예측모형

〈북한남삼거리~명동역〉링크에 대하여 칼만필터링모형, 확률과정, ARIMA 모형을 이용하여 5분 후, 10분 후, 15분 후, 30분 후, 60분 후 예측값을 관측값과 비교한다. 〈북한남삼거리~명동역〉링크에 대해 적용해 본 결과 단기예측에는 간이 ARIMA 모형과 칼만 필터링 모형이 오차가 작다. 하지만 장기예측으로 갈수록 다른 모형에 비해 확률과정 모형이 오차가 작다.



〈그림 4〉 10분후 예측



〈그림 5〉 30분후 예측

〈표 3〉 예측통행시간 오차 비교

예측기법	예측시간	MP(%)
칼만 필터링	5분후	11.49
	10분후	13.17
	15분후	10.58
	30분후	13.28
	60분후	16.98
확률과정	5분후	12.92
	10분후	11.88
	15분후	10.95
	30분후	10.35
	60분후	8.54
ARIMA	5분후(3,1,3)	11.50
	10분후(2,1,1)	12.77
	15분후(1,0,0)	10.57
	30분후(1,0,0)	13.80
	60분후(1,0,1)	15.97

예측의 정확성을 비교하기 위해 다른 링크에도 ARIMA 모형, 칼만 필터링 모형, 확률과정모형을 적용하여 각 예측 알고리즘의 특징을 살펴보면 ARIMA모형은 확률론과 수리통계의 원리에 의존하는 모형으로 상황에 따라 적절한 모형을 선택할 수 있어서 예측의 신뢰도를 높일 수 있다. 하지만, 데이터의 형태에 따라 매번 다른 (p, d, q)를 추정해야 한다. 특히 실시간 정보를 Update 할 때마다 모형식별의 단계를 거쳐야 하므로 실질적으로 통행시간 예측에 적용하기는 어려움이 있다.

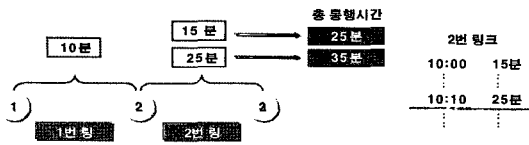
칼만 필터링 모형은 전반적으로 단기예측에는 다른 모형에 비해 오차가 작았으며 전체적인 통행 패턴을 잘 반영한다. 이는 통행시간을 예측할 때 실시간 자료를 이용하여 예측 오차를 보정하기 때문에 오차가 누적되는 것을 최소화시키는 장점이 있다. 이런 알고리즘 특성상 통행패턴이 급격히 변하거나, 돌발 상황이 발생한 구간에 대한 예측력이 뛰어나다. 하지만 30분 후 예측과 같이 장기 예측의 경우에는 전반적으로 오차가 증가하며, 변동폭이 확대되는 것을 볼 수 있다. 또한 통행시간 예측을 위해서는 데이터가 일정한 주기로 계속 있어야 하는 단점이 있다.

확률과정 모형은 Calibration Data와 Test Data의 통행패턴 차이에 크게 영향을 받으나, Data의 양이 많아서 편차가 작거나, 통행시간이 안정적인 링크에 대한 예측의 신뢰도는 다른 모형들보다 높다. 특히 30분 후 예측과 같은 장기 예측에서 칼만 필터링 모형에 비하여 정확도가 높았다. 장기 예측일수록 평균에 근거하여 통행시간을 예측하는 확률과정 모형의 예측력이 더 우수하다고 할 수 있다. 확률과정 모형은 통행시간을 예측할 때 기존 과거자료를 이용하기 때문에 돌발 상황 발생시에는 예측 정확도가 낮은 한계가 있다. 하지만 데이터양이 많이 축적되어 있는 경우에 다른 예측기법보다 유리하며, 데이터가 균일하게 있지 않아도 적용이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 확률과정모형을 토대로 동적경로제공을 위한 최적경로 탐색을 적용하였다.

IV. 도로위계구조를 고려한 탐색기법

1. 기존 네트워크 및 경로탐색

지금까지 최적경로 탐색에 이용되는 노드 링크 체계에서는 하나의 네트워크를 이용하여 탐색하는 방법을 이용하였다. 이는 운전자들이 도로 경로 선정에 있어서



〈그림 6〉 교통량 변화를 고려한 통행시간 예측

일반적으로 도로의 위계를 고려되어지는 현실을 반영하지 못하는 단점이 있다. 링크의 통행시간이 도로의 등급을 반영되어진다고 할 수 있지만 도로의 위계를 간접적으로 적용한 것으로 실질적으로 고려된 것은 아니다. 특히 장거리를 이용하는 경우에 상대적으로 도로의 위계를 고려하여 통행되어지는 경향이 있다.

도로의 위계를 고려하지 않고 링크의 통행시간만을 이용하여 최적경로를 구할 경우 최적인 값은 집산도로나 국지도로를 이용한 결과 값이 더 나은 결과를 보일 수 있다. 하지만 실제로 도로 주행상 운전자들은 도로의 선호도를 고려할 경우에 간선도로나 고속도로의 선호도를 고려하지 못하는 측면이 있다.

기존 최적경로 탐색 최적경로를 탐색할 때 이용되는 링크의 통행시간은 탐색하고자 하는 시점의 최적의 통행시간이다. 이는 운전자가 링크를 통행하는데 걸리는 시간을 고려하지 않아서 결국 실제 통행시간과 통행경로에도 변화가 발생할 수 있다.

〈그림 6〉는 운전자가 노드 1에서 노드 3을 지나갈 경우에 노드1인 시점에서 최적경로를 탐색할 경우의 통행시간은 기존의 방법의 경우에는 링크 1의 통행시간 10분과 링크 2의 통행시간 15분의 합인 25분이지만, 운전자가 링크2에 진입할 경우에 링크2의 통행시간의 변화에 의해 실제로는 링크 1의 통행시간 10분과 링크 2에 진입할 때의 링크 2의 통행시간 25분의 합인 총35분의 통행시간 정보를 제공해야 한다.

2. 간선도로 선택확률모형

운전자들은 주로 단거리 통행보다도 장거리 통행에 있어서 주요 간선도로를 이용하는 경향을 알아보고자 한다. 이를 위해 경로선택에서 운전자들이 출발지와 도착지간의 거리가 몇 km이상인 경우부터 간선도로(도시고속도로)를 선호하는지를 알아보고자 택시운전자들을 대상으로 하여 설문조사자료를 이용하였다.

설문조사의 출발지와 도착지는 서울시내 지역간, 서울 지역과 위성도시 간, 위성도시간의 3부류로 나눠 선호하

는 경로에 대해 조사를 하였다. 조사된 자료는 총 82건이다. 조사된 설문조사자료를 이용하여 운전자가 도시고속도로(내부순환도로, 올림픽대로, 강변북로, 동부간선도로, 서울시 외곽순환도로)를 이용한 경우(1), 이용하지 않은 경우(0)로 하여 binary Logistic regression 기법을 적용하였다. 사용한 통계패키지는 SPSS를 이용하였다.

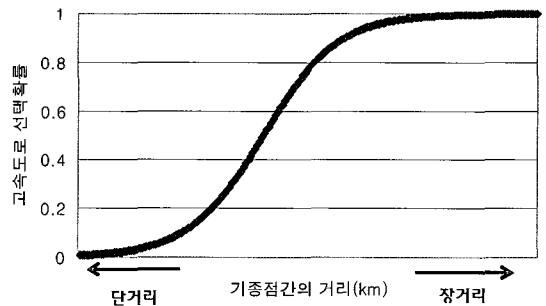
기종점간의 거리에 따라 간선도로(도시고속도로)의 선택확률이 S자 형태를 가질 것으로 가정하였다. Logistic regression은 식(6)과 같다.

$$p = \frac{1}{1 + \exp(-(\beta_0 + \beta_1 x))} \tag{6}$$

- p : 출발지와 도착지간의 직선거리에 따른 간선도로 선택 확률
- β_0, β_1 : 추정될 모수
- x : 출발지와 도착지간의 직선거리(km)

설문 조사된 기본적인 통계자료는 〈표 4〉와 같다. SPSS를 이용하여 도시고속도로 이용 확률을 살펴보면, 현 모델의 -2LL은 81.693이다. 이 때 Chi-square값은 30.221, 자유도 1 통계적으로 유의하다(유의 확률 0.000 < $\alpha=0.05$).

cut value가 0.5인 경우에 분류능력(Classification)은 74.47%를 보이고 있다. 거리에 따라 간선도로를 이용 확률은 식(7)과 같다. 식(7)을 이용하여 출발지와 도착지간의 거리에 따라 간선도로 이용 확률을 얻는다. 간선도로



〈그림 7〉 기종점간의 거리에 따른 도시고속도로 선택확률

〈표 4〉 기본적인 통계값 (단위: km/h)

평균	19.52
표준편차	11.58
최대	59.10
최저	2.20

선택 확률이 0.5를 넘을 경우에는 장거리 통행으로 도로 위계를 고려한 탐색을 하며, 확률이 0.5가 안 되는 경우에는 단거리 통행으로 도로의 위계를 고려하지 않고 탐색하는 방법을 적용하였다.

$$p = \frac{1}{1 + \exp(-(-2.068 + 0.169x))} \quad (7)$$

만일, 출발지와 도착지의 직선거리가 20km인 경우의 간선도로 선택확률은 79%이다.

$$p = \frac{1}{1 + \exp(-(-2.068 + 0.169 * 20))} = 0.79$$

〈표 5〉 SPSS 통계값 (단위:km/h)

통계값						
	B	S.E.	Wald	df	Sig.	Exp(B)
distance	0.169	0.041	16.743	1	0.000	1.184
Constant	-2.608	0.698	13.979	1	0.000	0.074

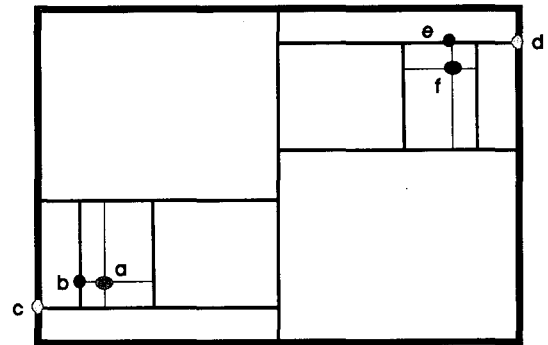
- -2 Log likelihood : 81.693
- Cox & Snell R Square : 0.308
- Nagelkerke R Square: 0.414
- Chi-square : 30.221

3. 모형 구축 및 적용

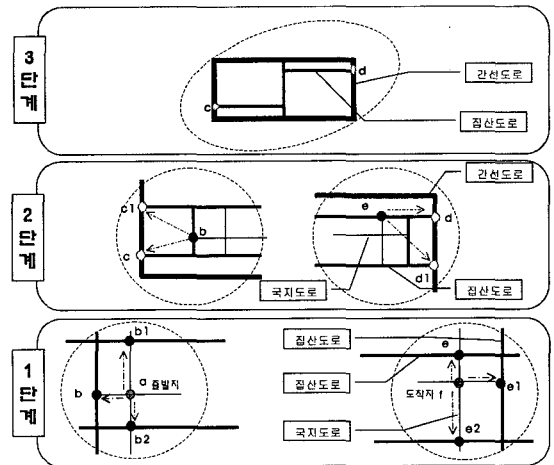
본 연구에서는 최적경로 탐색시 도로의 위계를 반영한 탐색기법을 도입하고자 한다. 동적으로 경로를 탐색하기 위하여 링크의 통행시간을 예측하였다. 통행시간 예측 기법에는 확률과정 모형을 이용하였다. 도로의 위계를 고려한 경로를 탐색을 위해 출발지와 목적지가 선택되면 현재의 노드에서 가장 가까운 기능이 높은 도로에 진입하기 위한 노드를 탐색하는 방법을 통해 경로를 탐색한다. 경로를 탐색할 경우에 확률과정을 통해 예측된 통행 비용값을 적용하여 동적탐색을 한다.

〈그림 8〉은 탐색네트워크 예를 나타낸다. 〈그림 9〉은 도로의 위계를 고려할 경우에 기본적인 최적경로 탐색 기법을 그림으로 나타낸 것이다. 도로 위계를 고려한 탐색은 3단계로 구분할 수 있다. 1단계에서는 우선 출발지(a)와 도착지(f)가 정해지면 출발지와 도착지의 거리가 장거리에 속한 지를 판단한다. 장거리에 속할 경우에는 각 노드가 속한 도로의 레벨을 파악한다. 〈그림 8〉에서는 출발지(a)와 도착지(f)가 국지도로이다. 이 경우에는 국지도로와 연결되어 있는 집산도로 중 가

장 가까운 노드를 선정한다. (출발지(a)에서는 b노드, 도착지(f)에서는 e노드, b노드와 e노드는 모두 국지도로와 집산도로가 연결되어 있는 노드이다). 선정된 노드(집산도로)에서 간선도로와 연결되어 있는 노드 중에서 가장 가까운 간선도로의 노드(e노드에서 가장 가까운 노드는 c노드, e노드에서 가장 가까운 노드 d노드)를 선택한다. 탐색에서 선택된 (b, c, d, e, f)의 각 노드들을 연결하여 최적의 경로를 탐색한다.



〈그림 8〉 최적경로 탐색 네트워크 예



〈그림 9〉 도로위계를 고려한 최적경로 탐색 절차

1) 네트워크 구축

도로 위계를 고려한 도로 네트워크를 구축하기 위해서 기본적으로 교통개발연구원에서 「2001년 전국 교통 DB 구축사업」에 의해 구축되어진 교통데이터를 이용하였다. 교통개발연구원에서 구축한 교통데이터에서는 도로의 등급이 4단계로 구분하였다. 도로의 등급을 살펴보면 〈표 6〉과 같다

〈표 6〉 교통망 레벨

레벨	개념	축척	해당도로
4	권역간 교통계획/분석	1:500,000	고속도로, 국도, 특별시 광역시내의 주요 간선축 도로
3	지역간 교통계획/분석	1:100,000	고속도로, 국도, 지방도, 특별시, 광역시, 일반시내의 주요 간선축 도로
2	지역내 교통계획/분석	1:25,000	양방향2차선(이면도로제외)
1	상세교통분석 /표출	1:5,000	1: 5,000에 소속된 전도로

교통망은 레벨 1(축척, 1:5000, 1:5000에 소속된 전도로), 레벨 2(축척, 1:25,000, 양방향 2차선 도로, 이면도로는 제외함), 레벨 3(축척, 1:100,000, 고속도로, 국도, 지방도, 특별시, 광역시, 일반시내의 주요 간선축 도로), 레벨 4(고속도로, 국도, 특별시, 광역시내의 주요 간선축 도로)로 구축되었다. 교통개발 연구원에서 구축한 교통망 데이터에서 레벨1, 레벨2, 레벨3의 네트워크를 자료를 이용하였다.

2) 네트워크 구성

링크 속성자료는 LINK_ID, FROM_NODE, TO_NODE, LENGTH, GROUP으로 구성되면, 노드 속성자료는 NODE_ID, X 좌표, Y 좌표, NETWORK LEVEL, 공유레벨로 구성한다. 노드 속성자료에서 공유레벨은 도로위계구조를 고려하여 탐색하기 위해 자신의 노드가 어떤 레벨에 속하는지와 자신보다 상위레벨 여부를 판단하기 위한 식별자이다.

〈표 7〉 링크 속성 자료

LINK_ID	FROM NODE	TO NODE	LENGTH	GROUP
20004	1002	1004	238.567	4
20005	1002	1003	225.045	4
.....
.....
20013	1215	1200	1242.515	1

〈표 8〉 노드 속성 자료

노드아이디	X 좌표	Y 좌표	네트워크 레벨	공유레벨
38463	304770.3	559939.3	2	1000
38465	304787.1	559557.9	2	1001
46227	315999.2	564671.8	3	2977
.....
340	315999.2	564671.8	3	2977

3) 확률과정모형 알고리즘

확률과정 모형은 적용한 통행시간예측 알고리즘은 〈표 9〉와 같다. 예측하고자하는 링크의 통행시간 데이터를 추출한다. 추출한 통행시간데이터와 바로 전 시간대의 통행시간과의 차이를 이용하여 같은 그룹에 속한 링크의 통행시간 차이를 비율을 이용하여 각 링크의 통행시간을 산출한다.

〈표 9〉 확률통행시간 예측 과정

1	예측 하고자 하는 모든 링크 시간 데이터 추출 예측 하는 날짜 및 시간대 선정
2	통행시간의 차이를 구함 예측 주기 전 주기와 그 이전 주기의 통행시간의 차이를 계산
3	그룹의 총 개수를 계산 통행속도의 차이 값의 그룹별 총 개수를 계산
4	전이 확률 계산 그룹 각각의 개수/ 그룹 총 개수
5	각 링크별 통행시간 계산 그룹 예측 통행시간 = 전 단계의 통행시간 + 각 구간 값 * 전이 확률

4) 동적 최적경로 탐색 알고리즘

본 연구에서는 운전자가 통행을 시작할 때의 교통상황을 기반으로 하지 않고, 운전자가 실제로 링크에 도달했을 경우 그 시간대의 링크의 통행시간의 예측을 통하여 이를 바탕으로 통행시간 정보를 제공하려고 한다. 시간의 변화에 따른 동적최적경로 탐색을 위해서 식 (8)과 같이 알고리즘을 수정하였다.

$$\begin{aligned}
 C_p^d(t) &= C_{n_1}(t) + C_{n_2}(t + C_{n_1}(t)) \\
 &\quad + C_{n_3}(t + C_{n_1}(t) + C_{n_2}(t + C_{n_1}(t))) \dots \\
 &\quad + C_{n_m}(t + C_{n_1}(t) + C_{n_2}(t + C_{n_1}(t)) \dots + C_{n_{m-1}}(t + C_{n_1}(t) + \dots + C_{n_{m-2}}(t)) \\
 C_p^n(t) &= c_{n_1}(t) + c_{n_2}(t) + \dots + c_{n_m}(t) \tag{8}
 \end{aligned}$$

여기서,

$C_p^d(t)$: 시간 t에 출발하여 경로 p를 이용할 때 동적통행시간

$C_p^n(t)$: 시간 t에 출발하여 경로 p를 이용할 때의 정적 통행시간

$c_a(t)$ 는 시간 t 에 link a 의 통행시간이고,

$$a_1, a_2, \dots, a_m \in p$$

위의 식에서 알 수 있듯이, 현실적 경로통행시간 $C_p^*(t)$ 는 운전자가 경로를 이루는 각 링크에 진입하는 시각에서 그 링크통행시간을 계산하여 이들을 합하여 계산하는 반면, 정적인 통행시간 $C_p^*(t)$ 는 운전자가 경로를 출발하는 시각에 경로를 이루는 모든 링크에서 나타난 통행시간을 그대로 합하여 계산한다. 예측 통행시간의 예측 주기는 5분단위로 하며, 탐색시간을 기준으로 하여 2시간까지의 예측 통행시간 적용하였다. 하지만, 실제로 통행시간의 예측 주기와 링크통행시간의 차이가 발생하는 경우가 있다. 이와 같은 경우에는 예측주기의 중간값을 적용하였다.

V. 모형의 평가

기존의 위계를 고려하지 않고 최적경로를 탐색할 경우 프로그램의 속도와 위계를 고려한 최적경로를 탐색하는 방법과의 프로그램 수행속도를 비교해 보았다.

1) 탐색 속도 비교

탐색속도 비교는 기존의 방법은 레벨이 가장 낮은 레벨1인 네트워크를 이용하고, 위계를 고려한 탐색방법은 교통개발연구원에서 구축한 레벨1, 레벨2, 레벨3의 네트워크를 기반으로 하여 출발지와 목적지를 탐색하는 시간을 측정하였다. 다음은 탐색시간을 비교하기 위해 각각 탐색하는 노드수와 링크수를 정리하였다.

도로의 위계를 구분하지 않고 탐색하는 기존방법과 위계를 고려하여 탐색속도를 측정해 보았다. 측정해 본

〈표 10〉 탐색 노드 수 및 링크 수

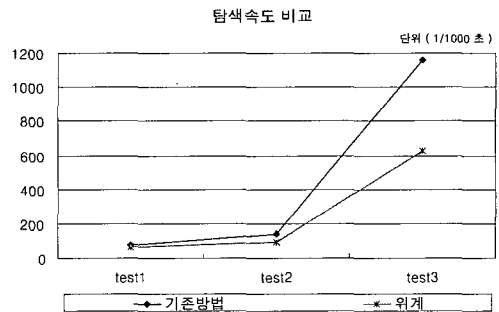
	기존 방법		위계를 고려한 방법	
	노드수	링크수	레벨	링크수
test1	343	511	레벨1	511
			레벨2	57
			레벨3	24
test2	843	1199	레벨1	1199
			레벨2	103
			레벨3	40
test3	1814	2515	레벨1	2515
			레벨2	219
			레벨3	91

결과 탐색하는 노드 수가 적을 경우에는 탐색속도 차이가 미미하지만 탐색하는 노드의 수가 증가할수록 탐색속도는 차이가 많이 나는 것을 알 수가 있다.

〈표 11〉 기존 방법과 위계를 고려한 탐색방법 속도 비교 (단위:10-3초)

	기존 방법	위계를 고려한 방법
test1	79	63
test2	140	94
test3	1157	625

〈컴퓨터 사양: Pentium 4, RAM 256〉



〈그림 10〉 속도비교 그래프

2) 동적탐색 통행시간 오차 비교

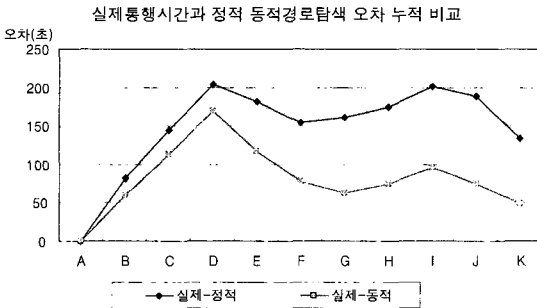
2003년 11월11일 명동역에서 양재역사거리까지의 9.4km구간의 통행시간 예측을 통해 동적으로 탐색하는 방법과 정적인 방법을 이용하여 실제 통행시간과의 비교를 하였다. 그 결과 실제 통행시간과의 오차를 비교해 보면, 정적으로 탐색한 통행시간보다 동적으로 탐색한 통행시간의 오차가 적게 나올 수 있었다.

〈표 12〉 명동역에서 양재역까지 기·종점 및 거리

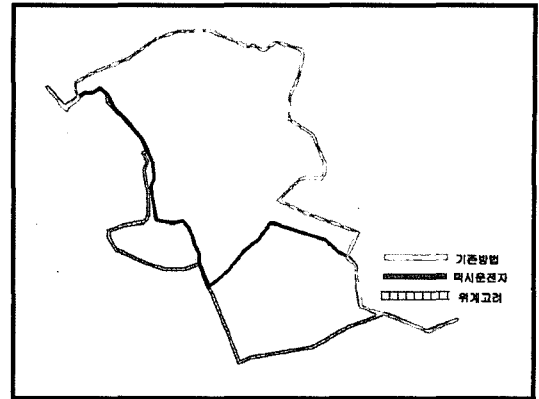
기점	종점	거리(M)	
명동역	북한남삼거리	2439.4	A
북한남삼거리	한남로터리	1126.5	B
한남로터리	한남대교북단	457.5	C
한남대교북단	한남 IC	1097.0	D
한남 IC	신사역	647.9	E
신사역	논현역	570.8	F
논현역	제일생명사거리	781.5	G
제일생명사거리	강남역	777.2	H
강남역	서초우성차파트	582.0	I
서초우성차파트	뱅뱅사거리	414.2	J
뱅뱅사거리	양재역사거리	590.41	K
총길이		9484.3	

〈표 13〉 정적·동적·실제통행시간 비교

구간	A	B	C	D	E	F
정적	165.7	292.4	379.1	520.2	613.4	760.2
동적	165.7	314.8	411.7	554.8	677.5	835.6
실제	165.7	374.7	524.5	723.9	794.6	914.1
구간	G	H	I	J	K	
정적	894.2	1021.4	1144.7	1206.7	1313.0	
동적	991.9	1121.4	1250.7	1320.4	1397.4	
실제	1054.7	1196.0	1345.7	1395.4	1446.3	



〈그림 11〉 실제 통행시간과 정적 동적 탐색 오차 누적 비교



〈그림 12〉 은평구청~가락시장 경로 비교

VI. 결론

본 연구에서는 사람들이 일반적으로 사물을 인식하는데 있어서 사물의 위계를 고려하여 인식하는 방법을 최적경로 탐색기법에 적용해 보았다. 또한 운전자들에게 교통 정보를 제공함에 있어 시간의 변화에 따라 변화하는 교통 상황을 반영하여 실제로 운전자가 경험하게 될 통행시간을 제공하기 위해 통행시간 예측 기법을 통해 예측된 통행시간을 기반으로 하여 동적최적경로탐색기법을 도입하였다.

동적최적경로를 제공하기 전에 링크의 통행시간 예측 모형의 검증은 하였다. 예측 모형의 검증은 칼만필터링, 확률과정, ARIMA모형을 적용하여 예측모형을 비교하였다. 그 결과 다른 모형에 비해서 확률과정 모형은 30분 후 예측과 같은 장기 예측에서 다른 모형에 비하여 정확도가 높았다. 돌발 상황발생 시에는 예측의 정확도가 낮아지는 단점이 있지만 데이터양이 많이 축적되어 있는 경우에 다른 예측기법보다 유리하며, 데이터가 균일하게 있지 않아도 적용이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 확률과정모형을 토대로 최적동적경로탐색기법을 적용하였다.

또한, 도로위계 선호도를 알아보고자 택시운전사의 설문 조사 자료를 바탕으로 binary logistic regression 기법을 이용하여 거리에 따른 간선도로 선택확률 모형을 개발하였다. 선택확률을 이용하여 기종점의 거리에 따라 도로위계를 이용한 탐색방법을 서울시 네트워크에 적용하였다. 도로 위계가 높아질수록 탐색하는 노드와 링크의 수가 줄어들게 되어 탐색속도가 향상되어짐을 알 수 있었다. 하지만 도로위계를 고려한 경로 탐색은 다양한 경로제공 방법 중에 하나의 방법으로 도로의 위계를 고려

3) 경로 비교

시간에 따라 변하는 링크의 통행시간을 예측하며 예측된 통행시간을 기반으로 서울시 네트워크를 기반으로 2시간 동안의 예측 통행시간자료를 이용하여 동적최적경로를 탐색하였다. 정적으로 탐색하는 기존방법과 택시운전사들의 설문조사, 도로 위계를 고려하여 동적으로 탐색한 각 방법에 대한 경로를 비교해 보았다.

한 예로, 은평구청에서 가락시장까지 경로를 비교하였다. 은평구청과 가락시장까지의 직선거리가 약 21km이며, 21km인 경우 간선도로 선택확률은 81%이다. 따라서 도로 위계를 고려하여 경로 탐색을 한다. 그 결과 기존방법의 경우 내부순환도로를 이용하지만, 택시운전사와 위계를 고려한 탐색 방법에서는 반포대교와 올림픽대로를 이용함을 알 수가 있다.

〈표 14〉 기존방법·택시운전자경로·위계고려한 경로 결과 비교

기존 방법	내부순환도로 - 강변북로 - 청담대교 - 동부간선도로
택시운전사	1 의주로 - 청파로 - 반포대교 - 올림픽대교 - 남부순환로 2 내부순환도로 - 강변북로 - 잠실대교 - 올림픽대교
거리	의주로 - 청계천로 - 왕십리길- 구의로 - 잠실대교 - 송파대로
위계 시간	의주로 - 한강로 - 이태원로 - 반포대교 - 올림픽대교 - 남부순환로

한 탐색으로 인해 최적해를 보장할 수 없는 단점은 있다. 하지만, 최적경로 탐색에 있어서 하나의 탐색방법으로 기종점의 거리가 멀어질수록 위계가 높은 도로에 대한 선호도를 경로 탐색에 적용하려고 하였다.

향후 연구내용으로 현실적으로 도로의 기능을 명확히 구분하는 연구가 진행되어지고, 도로의 위계를 반영한 네트워크 구축이 되면 대안경로제공의 탐색방법으로 적용될 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김남선·이승환·오영태(2000), "신경망을 이용한 고속도로 여행시간 추정 및 예측모형 개발", 대한교통학회지, 제18권 제1호, 대한교통학회, pp.47~59.
2. 김범일(2004), "도로위계 구조를 고려한 동적최적 경로 탐색 기법 개발", 서울시립대학교 석사논문.
3. 김성인·김현기(2004), "복잡한 대규모의 도로망에서 실시간 경로 탐색을 위한 단계별 세분화 방법" 대한교통학회지, 제22권 제5호, 대한교통학회, pp.61~73.
4. 김익기·김태중(1995), "도로위계구조를 고려한 노선배정기법에 관한 연구", 대한교통학회지, 제13권 제3호, 대한교통학회, pp.19~33.
5. 김익기(2004), "수정형 덩굴망 최단경로 탐색 알고리즘을 이용한 다경로 생성 알고리즘의 개발" 대한교통학회지, 제22권 제2호, 대한교통학회, pp.121~130.
6. 남궁성·노정현(1996), "전문가시스템을 이용한 최적경로탐색(X-PATH) 시스템의 개발" 대한교통학회지, 제14권 제1호, 대한교통학회, pp.51~67.
7. 남궁성·윤일수·조범철(1999), "TCS 자료를 이용한 고속도로 통행시간 예측", 대한교통학회 제36회 추계학술대회, 대한교통학회, pp.489~494.
8. 박병규·노정현·정하옥(1995), "신경망 이론에 의한 링크 통행시간 예측모형의 개발", 대한교통학회지, 제13권 제1호, 대한교통학회, pp.95~110.
9. 이미영·백남철·문병섭·강원의(2005), "경로인지 비용을 반영한 사용자최적통행배정모형", 대한교통학회지, 제23권 제2호, 대한교통학회, pp.117~130.
10. 이승환·최기주·김원길(1996), "도시부 ATIS 효율적 적용을 위한 탐색영역기법 및 양방향 링크탐색 알고리즘의 구현", 대한교통학회지, 제14권 제3호, 대한교통학회, pp.45~59.
11. 이영인·최찬영(1998), "칼만 필터링을 이용한 구간 속도 예측에 관한 연구", 대한교통학회지 제34회 추계학술대회, 대한교통학회, pp.21~30.
12. 이정모, "인지심리학", 학지사, pp.180~186.
13. 장진환·백남철·김성현·변상철(2004), "AVI 자료를 이용한 동적 통행시간 예측", 대한교통학회지, 제22권 제7호, 대한교통학회, pp.169~175.
14. 조범철·이승재(1998), "적응성 있는 단기간 속도 예측모형 개발에 관한 연구", 대한교통학회 제34회 추계학술대회, 대한교통학회, pp.265~274.
15. 최기주·신치현(1998), "GPS와 GIS를 이용한 링크통행시간 예측기법", 대한교통학회지, 제16권 제2호, 대한교통학회, pp.197~207.
16. 황준문·조중래·손영태(2001), "경로 교통량 시뮬레이션 기법을 이용한 간선구간 설정 방법론 연구", 대한교통학회지, 제19권 제5호, 대한교통학회, pp.85~97.
17. "SK 최적경로 시스템 신뢰도 검증 및 향상 방안 연구", 2002, pp.189~200.
18. Pie H.L. Bovy ·Eliahu Stern, "Route Choice: Wayfinding in Transport Networks", KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS.

♣ 주 작 성 자 : 김범일

♣ 교 신 저 자 : 이승재

♣ 논문투고일 : 2005. 3. 24

논문심사일 : 2005. 5. 21 (1차)

2005. 6. 1 (2차)

2005. 7. 10 (3차)

2005. 9. 8 (4차)

심사판정일 : 2005. 9. 8

♣ 반론접수기한 : 2006. 2. 28