

# 예측통행시간 기반 동적경로탐색시스템 개발

Dynamic Path Finding System using Travel Time Prediction

강연수

조범철

김범일

(교통개발연구원, 연구위원) (교통개발연구원, 연구원) (교통개발연구원, 연구원)

Key Words : 확률과정모형, 링크 통행시간 예측 알고리즘, 경로기반 통행시간 예측 알고리즘, 동적최적경로 탐색기법

## 목 차

### I. 서론

1. 연구개발의 배경
2. 연구 목적 및 범위
3. 연구 흐름도

### II. 국내·외 기술개발 현황

1. 연구 사례
2. 시스템 구축사례
3. 소 결

### III. 통행시간 예측 기법 개발

### 1. 통행시간 예측 기법 개발

#### 2. 소결

### IV. 동적최적경로 탐색기법 개발

1. 경로기반 통행시간 예측알고리즘 개발
2. 동적 최적경로 탐색기법 개발
3. 네트워크 DB설계
4. 연구 적용 결과

### V. 결론

### VI. 참고 문헌

## I. 서론

### 1. 연구개발의 배경

현재 도로 및 교통시설은 공급에 비해 급격히 증가하는 자동차의 증가 추세를 따라가지 못하고 있다. 또한 교통시설의 공급에는 많은 제약이 있어서, 기존시설을 최대한 효율적으로 이용하기 위한 방안으로 통신, 전자 기술을 교통 분야에 도입하여 교통문제를 해결하고자 많은 연구가 진행 중이다.

운전자들에게 교통수단의 통행경로, 통행시간 통행비용과 같은 교통정보를 제공함으로써 운전자들이 보다 편히 시설을 이용할 수 있을 뿐만 아니라 기존시설을 보다 효율적으로 이용할 수도 있다.

기존의 최적경로탐색 정보 제공 시스템은 현재의 교통상황을 기반으로 하여 교통정보를 제공해 주고 있다. 이는 실제 시간이 지남에 따라 변하는 교통상황을 반영해 주지 못하게 되어 운전자가 직접 경험하게 되는 통행시간과 실제 최적교통정보의 통행시간과 통행경로에서 차이가 발생하게 된다.

본 연구에서는 실시간(real-time) 정보가 아닌 예측된(predicted) 교통정보를 제공할 수 있는 교통모형을 개발하고자 한다. 이를 위해 통행시간 예측 알고리즘을 선정한다. 선정된 예측 알고리즘을 이용하여 통행시간 예측을 하며, 예측된 통행시간을 기반으로 서울시 네트워크에 동적최적경로 탐색한다.

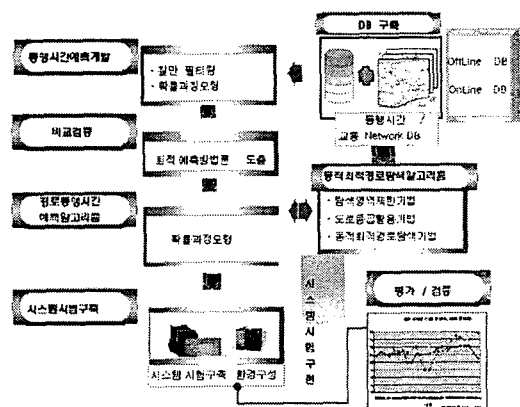
또한 동적최적 탐색에 다양한 기법을 적용해 본다. 향후에 예측통행시간의 신뢰도 향상을 위한 연구를 통해 실생활에 직접 적용해 볼 수 있다.

### 2. 연구 목적 및 범위

본 연구의 목적은 실시간으로 들어오는 통행속도정보를 이용하여 미래의 교통상황을 예측하고 예측된 통행시간을 바탕으로 동적최적경로를 사용자들에게 정보제공시스템을 구축하고자 한다.

통행시간 예측 모형은 칼만 필터링 모형과 확률과정 모형을 이용하여 보다 나은 예측 모형을 비교평가를 통하여 신뢰도가 높은 예측모형을 이용하여 경로통행시간 예측 알고리즘을 개발하고, 예측된 통행시간을 기반으로 하여 동적최적경로 기법을 이용하여 서울시 전체 네트워크에 적용해 본다.

### 3. 연구 흐름도



<그림 1> 연구흐름도

## II. 국내·외 기술개발의 현황

### 1. 연구 사례

국내의 통행시간 예측과 관련해서는 박병규(1995)는 신경망이론을 이용하여 강남 논현로의 논현 천주교회와 안세 병원간 링크의 통행시간을 예측모형을 개발하였다. ARIMA모형, 칼만 필터링 모형과의 예측력을 비교한 결과 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 중한강대교 부근에 위치한 지점을 대상으로 하였으며, 그 결과 칼만필터링 모형이 우수한 결과를 보였다. 이영인(1998)은 칼만필터링 모형을 이용하여 올림픽 대로의 오전 7시 ~ 11시 까지 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(2000)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. 「승용차 길안내를 위한 멀티미디어 서비스 체계 개발」에서는 서울시 28개축 주요 간선도로 축을 대상으로 하여 통행시간 예측 모형을 적용해 보았다. 통행시간 예측을 위해 적용한 예측 모형으로는 칼만 필터링, 확률과정모형, ARIMA모형을 적용하였으며 그 결과 단기예측에는 칼만 필터링 모형이 장기 예측에는 확률과정 모형이 상대적으로 예측 신뢰도가 높았다.

Darry Paterson은 통행시간 예측 모형RCP(Recursive Cell Processing Model)을 기존 모형의 예측력과 비교하였다. RCP는 통행시간 예측에 적용성이 좋으며, 어떠한 간선도로상에서도 적용이 가능하였다. Rui Wang은 여러 예측모형의 성능을 비교 평가한 결과 신경망 모형이 우수한 결과를 보였다.

### 2. 시스템 구축사례

국내에 구축된 최적경로제공 시스템으로는 로드아이 ( www.roadi.com), 건설 교통 종합 정보센터 (road.moct.go.kr), 남산권 교통 정보(natis.seoul.go.kr), 서울 도시 고속도로 교통안내(www.smartwaty.seoul.kr), 교통방송(www.tbs.seoul.kr),로드플러스(www.roadplus.co.kr) 등이 있다.

로드아이는 로티스에서 제공하는 최적경로 탐색 인터넷 홈페이지이다. 로티스는 위치 비콘과 조사차량을 이용하여 구간통행속도를 계산한다. 실시간 통행속도를 이용하여 정적으로 탐색을 하여 출발지에서 목적지까지의 구간별 속도정보와 최단거리 및 최단 시간 정보를 제공해 주고 있다. 건설교통종합정보센터에서는 경로 탐색방법은 적용되지 않으며, 실시간으로 통행속도 정보를 제공해 주고 있다. 남산권 교통정보에서는 남산터널의 통과예상시간 정보를 제공해 주고 있고, 서울도시고속도로 교통안내에서도 실시간 통행시간 정보를 제공해 주고

있다. 교통방송에서는 별도의 정보처리과정을 거치지 않고 통신원에 의한 정보제공과 서울시와 서울지방경찰청에서 제공하는 CCTV, 로티스에서 제공하는 5분 단위 실시간 교통정보를 이용하여 교통상황을 제공해 주고 있다. 한국도로공사에서 제공하는 로드플러스에서는 통행시간을 예측한 교통정보를 제공해 주고 있다.

일본은 도로교통정보통신시스템인 VICS라는 교통정보센터에서 교통정보를 실시간으로 제공하고 있다. 그 이외의 다른 최적경로 제공 시스템에서는 아직 구축단계이거나, 교통정보를 제공할 경우에도 실시간 교통정보나 정적인 경로 탐색결과를 제공하고 있다.

### 3. 소 결

국내에서는 통행시간 예측을 통한 동적최적경로시스템(Dynamic Optimal Path Finding System) 제공 및 구축사례가 없다. 지금까지 교통정보는 정적으로 제공해 주고 있어서 본 연구에서는 동적으로 예측된 교통정보를 제공할 시험 시스템을 구축함으로써 향후 최적경로를 이용하는데 보다 나은 서비스를 제공해 줄 수 있을 것이다. 통행시간 예측 및 동적최적경로를 운전자들에게 제공함으로써 효율적인 교통류관리가 가능하며, 이를 통해 교통 혼잡에 의해 발생하게 되는 사회손실 비용을 이전 시스템에 비해 훨씬 더 절감할 수 있을 것이다.

## III. 통행시간 예측 기법 개발

### 1. 통행시간 예측 기법 개발

#### 1) 칼만 필터링모형

##### (1) 개요

칼만 필터링 모형은 무작위 변동(random perturbation)을 발생시키는 동적체계에 적용되는 최적상태 예측과정으로 이산적 실시간에 언어진 잡음 섞인 정보로부터 동적체계의 미지 상태에 대한 최적예측을 위한 선형, 불편(unbiased), 최소오차분산(minimum error variance)의 특성을 지닌 반복적 알고리즘이다. 칼만 필터링 모형은 상태방정식과 관측방정식으로 구성되어 있다.

$$\text{상태방정식 : } X_k = \Phi_{k-1} X_{k-1} + w_{k-1}$$

$$\text{관측 방정식 : } Z_k = H_k X_k + v_k$$

여기서,  $X_k$  : 시점 k에서의 상태 벡터

$\Phi_k$  : 시점 k에서 다음 시점 k+1로의 전이행렬

$w_k$  : 통행시간 자체의 오차 벡터

$Z_k$  : 시점 k에서의 관측값을 표시하는 벡터

$H_k$  : 시점 k에서 관측벡터와 상태벡터와의 관계를 표시하는 행렬

$v_k$  : 통행시간을 측정할 때 생기는 측정오차벡터

$K_k$  : 시점 k에서의 칼만 이득 행렬

**(2) 알고리즘**

통행시간 예측을 위해 사용하는 자료는 현재 시간대에 올라오는 측정치와 각 예측주기 전 자료를 이용한다.

<b>칼만이득 계산</b>	
수식	$(K = P(-) * H / (H * P(-) * H + R))$
input	통행속도 추정치 오차 공분산( P(-) ), 측정 에러분산(R) H = 1
output	칼만이득(K)
<b>측정값에 의해 업데이트 이후 통행속도(x(+))를 계산함</b>	
수식	$x(+) = x(-) + K * (z - H * x(-))$
input	예측 주기 이전 통행속도(x(-)), 칼만이득(K), 측정된 속도자료(z)
output	계산된 이후 통행속도(x(+))
<b>통행속도 오차 공분산(P(+))을 계산</b>	
수식	$P(+) = (I - K * H) * P(-)$
input	예측 주기 이전 통행속도 오차 공분산(P(-)), 칼만 이득(K)
output	오차 공분산(P(+))를 계산
<b>다음 예측 주기 통행속도 이전 상태 (x(-))을 계산함</b>	
수식	$x(-) = A * x(+)$
input	전이행렬 (A), 예측 주기 이후 통행속도(x(+))
output	계산된 이전 통행속도 (x(-))
<b>다음 예측 주기 통행속도 오차 공분산(P(-))를 계산함</b>	
수식	$P(-) = A * P(+) * A + R$
input	전이행렬(A), 오차공분산(P(+)), 상태 에러분산(R)
output	output : 계산된 이전 공분산(P(-))

**(3) 알고리즘 평가**

로티스의 2003년 11월 11일 7시부터 9시까지 데이터를 이용하여 예측주기별로 통행시간을 예측하였다. 예측한 통행시간 오차는 mae방법을 이용하였다.

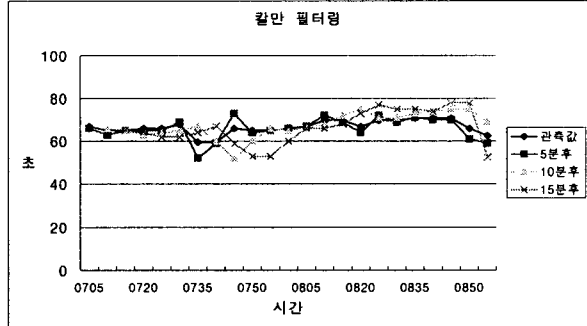
**<표 1> 검증구간**

구분	구간	길이	비고
도시 고속도로	한남대교 복단 -> 동호대교 강변북로 지점	1355.28	평가 기준: mae
	동호대교 강변북로 지점 -> 동부간선도로입구	1082.41m	
시내 도로	신사역 -> 논현역	570.79	
	한남IC -> 신사역	570.79	

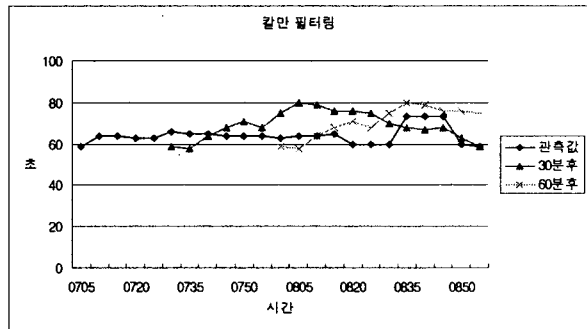
도시고속도로의 <한남대교 복단->동호대교 강변북로지점>의 통행시간은 <그림 2>과 같이 전반적으로 관측값과 예측값이 비슷한 유형의 패턴을 보이고 있다. 예측 시간 간격이 5분후 예측에서는 1.8초 30분후 예측에서는 8.42초로 전반적으로 통행패턴은 따라가지만 오차는 예측간격이 늘어남에 따라 오차도 증가한다.

**<표 2> 칼만 필터링을 이용한 시간 간격별 오차**

구분	5분후	10분후	15분후	30분후	60분후
mae(초)	1.8	5.0	5.84	8.42	8.18



**<그림 2> 칼만필터링을 이용한 5분,10분,15분 후 예측**



**<그림 3> 칼만필터링을 이용한 30분,60분 후 예측**

**<표 3> 예측시간대별 오차**

구분	5분후	10분후	15분후	30분후	60분후
동호대교 강변북로 지점-> 동부간선도로입구	4.28	6.39	7.69	8.14	7.79
신사역-> 논현역	2.81	25.34	33.55	50.52	26.51
한남IC-> 신사역	20.05	30.77	34.46	40.32	22.30

4개의 링크에 대해서 예측한 결과를 보면 예측시간간격이 늘어남에 따라서 전반적으로 오차가 증가함을 알 수가 있다. 특히 도시 고속도로보다는 시내도로에서 오차가 더 크게 발생하는데 이는 시내도로에서의 통행패턴의 변화가 도시 고속도로보다 통행패턴의 변화가 심하게 일어나기 때문이다. 통행패턴은 시내도로가 도시고속도로에 비해 신호등이나 교차로와 같은 교통시설물의 영향을 많이 받기 때문이다.

**1) 확률과정 모형**

**(1) 개요**

확률과정(stochastic process or random process)은 시간의 흐름에 따라 변화하는 우연현상의 수학적 모형으로 즉 우연의 시간 t에서 값을 가지는 확률변수를  $X_t(\omega)$ ,  $\omega \in \Omega$ 라고 할 때, 집

합  $\{X_t(\omega): t > 0, \omega \in \Omega\}$ 를 확률과정이라 하며, 통계학에서는 이것을 시계열(時系列)이라 한다. 다른 말로 “연관성이 있는, 또는 첨자(index)가 붙어 있는 확률변수들의 집합”으로 정의할 수 있음. 즉, “  $\{X_t: t \in T\}$  가 확률과정이며 이는 집합 T에 있는 모든 t에 대해서  $X_t$ 가 확률변수임을 나타낸다. 대부분의 경우 첨자 t는 시간을 나타내므로  $X_t$ 를 “시점 t에서의 시스템의 상태”를 표현하는 것으로 해석한다.

**(2) 알고리즘**

확률과정의 특성은  $\{X_1, X_2, \dots, X_{10}\}$ 이라고 하는 확률변수집합이 주어졌을 때, 이에 대한 확률적 정보는 이들의 결합분포함수

$$F(x_1, x_2, \dots, x_{10}) = P[X_1 \leq x_1, X_2 \leq x_2, \dots, X_{10} \leq x_{10}]$$

를 앞으로써 모두 얻을 수 있음. 예를 들어  $\{X_1, X_2, \dots, X_{10}\}$  이 서로 독립이고 동일분포를 가진다고 하면 (i, i, d),  $F(x) = P[X_1 \leq x]$ 만 가지고서  $\{X_1, \dots, X_{10}\}$  에 대한 모든 것을 알 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} F(x_1, x_2, \dots, x_{10}) &= P[X_1 \leq x_1, \dots, X_{10} \leq x_{10}] \\ &= P[X_1 \leq x_1] \dots P[X_{10} \leq x_{10}] \\ &= F(x_1) \dots F(x_{10}) \end{aligned}$$

$\{X_t: t \in T\}$  를 이산형 상태공간의 확률과정이라 하고 T는 실수집합이고, 이산상태의 확률과정에서 다음의 마코프 성질을 만족하면 이때의 확률과정을 마코프 과정이라고 한다.

상태공간내의 모든  $k_1, \dots, k_n, k_{n+1}$ 에 대하여,  $t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_{n+1}$ 이 T의 원소이고  $n=0, 1, 2, \dots$ 일 때, 시점  $t_1, \dots, t_n$ 에서의 상태를 알고 있다는 조건 하에서 시점  $t_{n+1}$ 의 상태가  $k_{n+1}$ 일 확률을 나타내고 있다.

$$P[X_{t_{n+1}} = k_{n+1} | X_{t_n} = k_n, \dots, X_{t_1} = k_1]$$

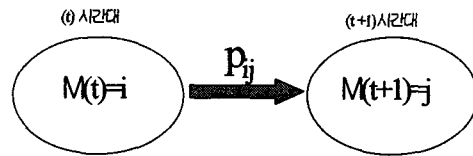
여기서, 시점  $t_n$ 을 현재

$t_1, \dots, t_{n-1}$ 은 과거

$t_{n+1}$ 은 미래가 됨.

Markov 성질에 의하면, 미래는 현재가 주어졌 있는 조건 하에서 과거와는 독립이라는 것을 알 수 있다. 따라서 markov process에서는 현재 상태만 알고 있으면, 과거의 상태들이 어떠한가 라는 추가정보를 미래에 대한 판단에 전혀 필요가 없다는 것이다. 이와 같이 그 전 시간대의 상태를 무시하고 t

시간대에서 t+1 시간대로 상태변화를 나타내는 확률을 1단계 전이확률이라 함. Markov chain의 1단계 전이확률을 구하기 위한 확률 과정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.



$$P_{ij} = \Pr[M(t+1)=j | M(t)=i]$$

<그림 4> 확률과정 표현식

여기서,  $\mu(t) : t$  시간대의 상태=i

$\mu(t+1) : t+1$  시간대의 상태=j

$p_{ij} : t$  시간대의 상태가 i이면서

t+1 시간대의 상태가 j일 확률

이산시간 markov chain의 전이확률(transition probability) 상태공간 뿐만 아니라 매개변수집합 T도 이산형인 경우 markov chain은  $\{X_1, X_2, \dots\}$  와 같은 형태를 가진다. 이때, 아래와 같은 확률을 전이확률(transition probability)이라고 한다.

$$P[X_{n+1} = j | X_n = i]$$

특히,  $p_{ij} = \Pr[X_{n+1} = j | X_n = i]$ 를 1단계 전이확률(one-step transition probability)이라고 하고, 또한 1단계 전이확률에서는  $X_n = i$ 인 조건 하에서  $X_{n+1}$ 은 반드시 어떤 값을 가져야 하므로 모든 i에 대하여  $\sum_j p_{ij} = 1$ 이 성립한다. 1단계 전이확률을 행렬로 표현하면 다음과 같이 나타내어질 수 있다.

$$P = (p_{ij}) = \begin{pmatrix} p_{00} & p_{01} & \dots \\ p_{10} & p_{11} & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}$$

**(3) 알고리즘 평가**

로티스의 2003년 11월 11일 7시에서 9시까지 데이터를 이용하여 예측주기별로 통행시간을 예측하였다. 예측한 통행시간 오차는 mae방법을 이용하였다.

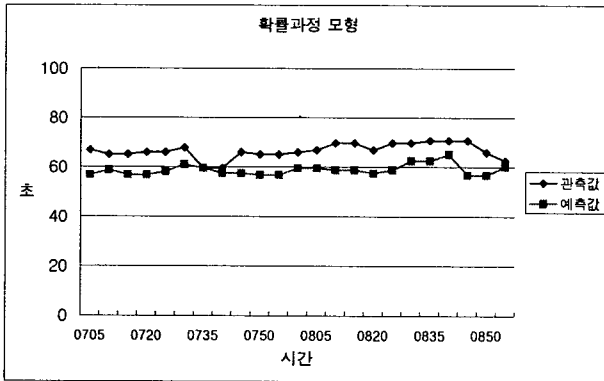
<표 4> 검증구간

구분	구간	길이	비고
도시 고속도로	한남대교 북단 -> 동호대교 강변북로 지점	1355.28	평가 기준: mae
	동호대교 강변북로 지점 -> 동부간선도로입구	1082.41m	
시내	신사역 ->논현역	570.79	
도로	한남c -> 신사역	570.79	

도시고속도로의 한남대교 복단-> 동호대교 강변북로 지점을 확률과정 모형을 적용하여 통행시간을 예측한 결과 mae가 7.75초이다.

<표 5> 확률과정 모형을 이용한 시간 간격별 오차

	5분후	10분후	15분후	30분 후	60분 후
mae(초)	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75



<그림 5> 확률과정 모형을 이용한 예측값과 관측값

<표 6> 예측시간대별 오차

구분	5분후	10분후	15분후	30분후	60분후
동호대교 강변북로 지점-> 동부간선도로입구	10.44	10.44	10.44	10.44	10.44
신사역-> 논현역	35.02	35.02	35.02	35.02	35.02
한남IC-> 신사역	34.66	34.66	34.66	34.66	34.66

오차를 비교해 보면 도시고속도로에서는 오차가 10초 이내로 적지만 시내도로에서는 오차가 35초 내외의 시내도로에서 오차가 더 크다. 도시고속도로의 통행시간 속도 변화보다는 시내도로에서 통행속도의 변동 폭이 크기 때문이다

## 2. 소결

칼만 필터링은 다른 모형에 비하여 모형구조가 비교적 단순하고 입력 자료가 많지 않으며 또한 분석시간단위의 조정이 용이할 뿐만 아니라 5분 후-15분 후 예측과 같은 단기 예측에 그 정확도가 높다. 칼만 필터링 모형은 예측 통행시간이 전체적인 통행 패턴을 잘 반영한다.

칼만 필터링 예측 기법은 통행시간을 예측할 때 실시간 자료를 이용하여 예측 오차를 보정하기 때문에 오차가 누적되는 것을 최소화시킨다. 이런 알고리즘 특성상 통행패턴이 급격히 변하거나, 돌발 상황이 발생한 구간에 대한 예측력이 뛰어나지만 예측주기가 길어질 수록 통행시간 예측오차는 증가하며, 변동폭이 확대되는 것을 볼 수 있다.

확률과정 모형은 칼만필터링 모형과 달리 예측주기가 길어질 수록 다른 예측기법에 비해 정확도가 높다. 장기 예측일수록

평균에 근거하여 통행시간을 예측하는 확률과정 모형의 예측력이 더 우수하다고 할 수 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 높은 반면, 돌발상황이 발생하거나 Calibration Data와 Test Data의 통행시간 편차가 클 경우, 예측의 신뢰도는 매우 낮은 한계가 있다. 본 연구에서는 확률과정모형을 이용하여 동적최적경로 탐색기법을 적용하였다.

## IV. 동적최적경로 탐색기법 개발

### 1. 경로기반 통행시간 예측알고리즘 개발

지금까지는 통행시간 예측을 하나의 링크에 대해서만 적용하였다. 이를 경로기반 통행시간 예측 알고리즘 적용을 위해서 하나의 도로축에 적용하여 실험 검증하였다.

적용 도로는 내부순환도로의 마포구청역에서 성동구청까지의 구간을 대상으로 적용시간대는 오전 7시 50분에서 마포구청역을 출발하며 총 예측시간은 오전 8시 30분까지이다. 총 거리는 약 18.7 Km이며 각 구간은 마포구청역 -> 연가교 -> 홍은사거리 -> 홍은 IC -> 내부순환로 평창 -> 정릉램프 앞 -> 월암교 -> 월곡 IC -> 성동구청으로 이루어졌다.

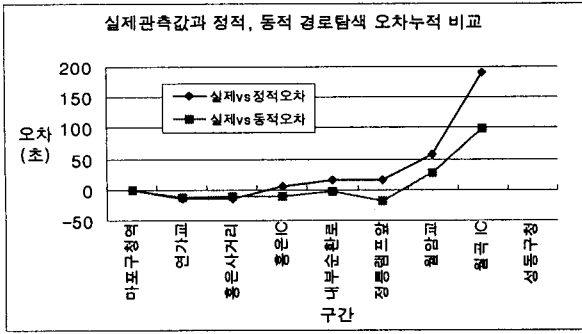
통행시간 예측 모형으로는 확률과정 모형을 적용하여 실제로 걸리는 통행시간과 기존의 정적으로 교통정보를 제공하는 방법과 예측된 통행시간을 기반으로 교통정보를 제공하는 동적인 방법을 비교하였다.

<표 7> 경로기반 통행시간 예측 구간

기점	종점	구간별 거리(m)
마포구청역(a)	연가교(b)	2020.06
연가교(b)	홍은사거리(c)	3258.45
홍은사거리(c)	홍은 IC(d)	729.48
홍은 IC(d)	내부순환로 평창(e)	2555.60
내부순환로 평창(e)	정릉 램프앞(f)	3190.82
정릉 램프앞(f)	월암교(g)	2567.37
월암교(g)	월곡 IC(h)	841.60
월곡 IC(h)	성동구청(i)	3512.65
총 길이		18676.03

마포구청역 -> 성동구청까지 내부 순환도로를 이용하여 통행시간을 비교한 결과, 실제 통행시간과 정적, 동적 경로 탐색 오차를 비교한 결과 예측된 통행시간을 기반으로 한 통행시간이 정적인 방법에 비해 오차가 적었다. 실제통행시간과 정적인 방법, 동적인 방법의 누적통행시간으로 총 누적 통행시간은 실제데이터의 경우에는 1474.2초, 예측된 통행시간에 기반을 둔 동적경로인 경우에는 1376.0초, 정적인 데이터를 사용한 경우에는 1284.3초가 걸린다.

실제데이터와 예측된 통행시간 사이에는 오차가 약 100초, 실제데이터와 정적인 데이터의 경우에는 약 190초의 통행시간 오차가 발생한다.



<그림 6> 실제값과 정적 동적 경로탐색 오차누적비교

<표 8> 구간별 누적 통행시간

구분	a -> b	b -> c	c -> d	d -> e	e -> f	f -> g	g -> h	h -> i
실제	110.2	325.1	370.4	719.2	922.9	1065.1	1144.6	1474.2
정적	110.2	340.2	384.7	713.3	908.0	1050.2	1086.7	1284.3
동적	110.2	338.4	380.4	728.6	925.4	1082.4	1117.9	1376.0

하나의 도로축에 대해서 기존의 정적인 방법과 예측된 통행시간을 이용하여 통행시간을 비교한 결과 정적으로 통행시간 정보를 제공하는 것보다는 예측된 통행시간을 기반으로 하여 교통정보를 제공하는 경우가 실제 통행시간과 오차가 적게 나올 수 있었다. 따라서 예측된 통행시간을 이용하여 동적으로 통행경로를 제공할 경우에 정적인 방법에 의해 경로를 제공하는 것에 비해 더 정확한 교통정보를 제공해 줄 수 있음을 알 수 있다.

## 2. 동적 최적경로 탐색기법 개발

### 1) 개요

최적경로 탐색에 있어 Dijkstra 알고리즘을 많이 사용되어 진다. 하지만, 동적경로로 최적경로를 탐색하기 위해서는 기존의 Dijkstra 알고리즘 수정하여 시간의 변화에 따른 통행시간의 변화를 반영할 필요가 있다.

본 연구에서는 순간적(instantaneous)이 아닌 실질적(ideal or realistic)인 경로통행시간도출을 그 목적으로 한다. 즉, 단순히 운전자가 통행 시작할 때의 교통상황을 기반으로 실제로 경로를 따라 주행함에 따라 경험하게 될 링크별 통행시간을 미리 예측해서 경로통행시간을 제공하고자 한다.

위와 같은 동적경로통행시간은 다음의 수식으로 보다 명확하게 설명될 수 있다.

$$C_p^d(t) = c_{a_1}(t) + c_{a_2}(t + c_{a_1}(t)) + \dots + c_{a_m}(t + c_{a_1}(t) + c_{a_2}(t + c_{a_1}(t)) + \dots + c_{a_{m-1}}(t + c_{a_1}(t) + \dots + c_{a_{m-2}}(t)))$$

$$C_p^n(t) = c_{a_1}(t) + c_{a_2}(t) + \dots + c_{a_m}(t)$$

$$C_p^m(t) = c_{a_1} + c_{a_2} + \dots + c_{a_m}$$

여기서,  $C_p^d(t)$ 는 시간 t에 출발하여 경로 p를 이용할 때의 동적경로통행시간,

$C_p^n(t)$ 는 시간 t에 출발하여 경로 p를 이용할 때의 정적 경로통행시간,

$C_p^m(t)$ 는 시간 t에 출발하여 경로 p를 이용할 때의 경로 p의 이동 경로

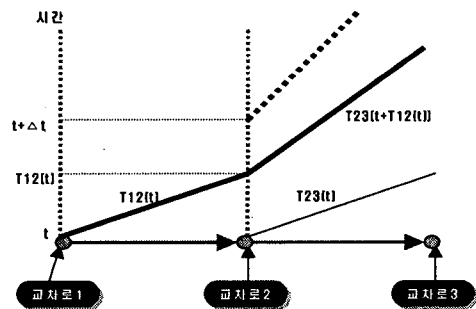
$c_a(t)$ 는 시간 t에 link a의 통행시간이고,

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

위의 식에서 볼 수 있듯이, 현실적 경로통행시간  $C_p^d(t)$ 는 운전자가 경로를 이루는 각 링크에 진입하는 시각에서 그 링크통행시간을 계산하여 이들을 합하여 계산하는 반면, 순간적 경로통행시간  $C_p^n(t)$ 는 운전자가 경로를 출발하는 시각에 경로를 이루는 모든 링크에서 나타난 통행시간을 그대로 합하여 계산하여 보다 현실적인 경로통행시간을 도출한다.  $C_p^m(t)$ 는 시간에 관계없이 가장 짧은 거리를 합한 것으로 시간대에 따라 교통량의 변화를 전혀 고려하지 않았다. 이는 야간이나 새벽과 같은 교통량이 적은 지역에서는 동적최적경로와 유사한 경로를 보이지만 시간에 따라 통행시간이 바뀌는 도로에서 교통정보를 제공하기에는 부적절하다.

### 2) 최적경로 탐색 방법

개별 링크별 통행시간 예측결과를 경로단위로 조합하여 통행시간을 산출한다.



<그림 7> 예측간격과 링크통행시간과 차이

그러나 여기서 링크별 예측한 통행시간결과를 조합하여 경로별 통행시간을 예측하게 될 때 예측주기와 링크통행예측시간이 상이한 문제가 발생한다. 즉, 위의 그림과 같이 각 링크별로  $t + \Delta t$ 와  $T12(t)$ 간의 통행시간간격오차가 발생한다. 이를 해결하기 위해서 본 연구에서는 통행시간 예측을 모두 5분 단위 예측 간격으로 예측하고, 예측 간격 사이 시간대에 해당하는 링크통행시간을 보간법으로 대체하는 방법을 적용하였다.

### 3) 탐색영역 제한

탐색영역제한 기법은 시간변화적인 네트워크(time-dependent

network)에서 방대한 링크간의 조합을 이루고 있는 경로에 대한 경우의 수를 계산하기에는 실제 시스템에서 상당히 많은 시간을 필요하다.

따라서 운전자의 일반적인 행태를 반영하여 탐색영역을 제한함으로써 신뢰성을 유지하는 범위 내에서 효과적으로 경로를 탐색하기 위하여 본 기법을 도입하였다.

적용이 간단하면서도 기존의 최적경로탐색 알고리즘과 유사한 경로 탐색 결과를 나타낸다는 점에서 의의가 있다.

#### 4) 동적최적경로 탐색 알고리즘

기존의 알고리즘은 정적인 탐색으로 시간의 변화에 따른 동적 최적경로 탐색을 위해서는 알고리즘 수정이 필요하다.

동적최적경로탐색기법을 요약하면 아래와 같은 식 얻을 수 있다.

$$C_1^{arr}(s) = 0$$

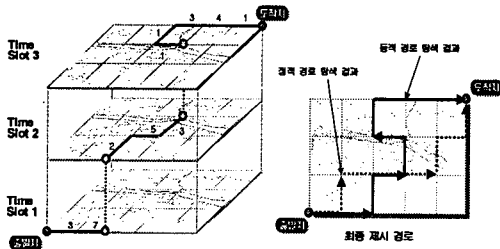
$$C_j^{arr}(s) = \min_{i \neq j} [C_i^{arr}(s) + t_a(C_i^{arr}(s))]$$

여기서,

$C_j^{arr}(s)$  는 시간대  $s$ 에 기점을 출발하여 노드  $j$ 에 도착하기까지의 비용

$t_a(C_i^{arr}(s))$  는  $C_i^{arr}(s)$  에 링크  $j$ 로 진입한 운전자의 동적 통행시간

이를 시간변화적인 네트워크(time-dependent network) 상에서 표현하면 아래와 같은 경로를 얻을 수 있다.



<그림 8> 동적최적경로탐색기법

#### 5) 도로 위계를 고려한 탐색

대다수의 거의 모든 여행자는 통행속도가 높은 도로를 이용하고자하는 심리가 있다. 이를 교통공학적인 측면에서 도로의 위계를 분리함으로써 수행속도의 제고 및 사용자들이 최적경로로 인지할 수 있는 경로를 제공함으로써 그 신뢰성을 높이는 데 목적이 있다.

도로의 이동성(고속도로 등 연속류, 진출입제한 정도, 연동화 정도 등)이 높은 도로부터 도로탐색등급을 구분·부여하여 동적최적경로탐색 시 활용한다. 탐색제한기법으로 탐색영역 내에 속하지 않은 도로라도 그 이동성이 높은 도로(도로탐색등급이 높은 도로)는 최단경로탐색 대상도로로 선정되게 함으로써 실제 운전자 행태를 반영한 경로를 최적경로로 선정할 수 있도록 유도 할 뿐만 아니라, 탐색속도에서 향상시킬 수 있다.

전체 네트워크를 하나의 레벨로 탐색할 경우에는 탐색 대상이

되는 링크나 노드의 개수가 매우 많아서 탐색이 오래 걸리게 된다, 탐색속도의 향상 시키기 위해 전체링크를 여러 개의 레벨로 분리하였다. 이를 통해 탐색할 대상이 많이 줄어들어 탐색시간도 그만큼 줄일 수 있다.

네트워크를 일반도로와 도시고속도로의 2개 레벨로 분리하였다. 또한, 하위레벨에서 상위레벨로 진입하거나, 상위레벨에서 하위레벨로 진입하기 위해 거쳐야만 하는 노드를 엔터노드라고 하였다.

#### 6) 링크의 통행비용 계산

링크의 통행비용은 5분마다 저장된 링크의 통행속도 pattern 데이터를 이용하여 얻을 수 있다. 만약 5분, 10분, 15분 등의 시간이 아닌 경우에는 데이터를 선형 관계를 이용하여 계산한다. 링크의 운행비용은 링크의 길이와 패턴데이터 5분 간격으로 저장된 링크의 속도를 이용하여 산출한다.

통행시간  $t$ 에서의 링크의 비용은 다음과 같이 구함

$$t = t' + r \quad (t' \text{은 } 5\text{분 단위의 시간})$$

$v1$  =  $t'$ 에서의 링크 통행 속도

$v2$  =  $t' + 5$ 에서의 링크 통행 속도

$v1, v2$ 는 패턴데이터에서 구할 수 있음

이 때 시간  $t$ 에서의 링크 통행 속도  $v$ 는

$$v = v1 + (v2 - v1) * r / 5$$

여기서  $t$  : 링크의 진입시간

$t'$  : 예측 간격

$r$  : 링크 진입시간과 예측 간격의 차이

$$\text{cost} = (\text{링크 길이}) / v$$

### 3. 네트워크DB설계

Network DB는 링크와 노드간의 진행방향 정보를 독립적으로 연결할 수 있도록 설계하였으며, 노드의 경우 정보제공을 위해서 위치에 대한 정보를 입력한다. 링크와 통행속도 정보와 연결될 수 있도록 설계하였다.

<표 9> 링크 DB

ST_N ODE	OLIN K_ID	ED_N ODE	ILINK _ID	GIS_D IST	ST_NODE_ NAME	ED_NODE_ NAME	도로구분
1	1	2	4	533	도봉산공원	도봉산입구	일반도로
2	3	3	1	758	도봉산입구	도봉역앞	일반도로
6	1	7	2	638	노원교	수락초등학교	도시 고속도로
...	...	...	...	...	...	...	...

<표 10> 노드 DB

NODE_ ID	NODE_ _NAME	A_LOC	L_LOC	PROV_ID	GU_ID	DONG_ID
1	도봉산공원	203713	464947	서울특별시	도봉구	도봉제1동
2	도봉산입구	204243	464994	서울특별시	도봉구	
3	도봉역앞	20214	464240	서울특별시	도봉구	도봉제2동
...	...	...	...	...	...	...

<표 11> 통행속도DB

IDX5	LTIME	ST_NODE	OLINK_ID	SPEED
84	0700	317	5	19
84	0700	317	1	33
...	...	...	...	...

#### 4. 연구 적용 결과

##### 1) 탐색기법이 비교 적용

최적경로 탐색 시 정적 탐색 방법과 동적 탐색방법으로 분류하였다. 각각의 방법에 탐색속도를 줄이면서 보다 현실적으로 접근하기 위한 방법들로 탐색영역을 제약하는 방법, 도로 위계를 구분하거나, 고속도로에 가중치를 부여하는 방법의 조합 등을 적용하였다.

<표 12> 탐색기법 구분

구분	탐색분류	탐색 영역	도로위계구분	통행시간
실시	Static1	전체	X	실시간
	Static2	영역제한	X	실시간
	Static3	영역제한	O	실시간
예측값	Dynamic1	전체	X	예측값
	Dynamic2	영역제한	X	예측값
	Dynamic3	영역제한	O	예측값
실제값 <sup>1)</sup>	Real1	전체	X	실제데이터
	Real2	영역제한	X	실제데이터
	Real3	영역제한	O	실제데이터

탐색경로에 있어서 Static1번 Static2번, Dynamic1번 Dynamic2번의 경로가 같은데 이는 탐색영역을 제한할 때 충분한 영역설정을 한 결과로써 통행경로에는 영향을 끼치지 않으면서 탐색 수행속도를 향상시킬 수 있음을 뜻한다.

##### 2) 최적경로 탐색 속도 비교

최적경로 탐색 기법별로 탐색속도를 비교하기 위하여 “드림랜드 앞 ~ 문래동 사거리” 지점을 선정하였다. 탐색기법별 탐색속도는 정적(Static)탐색 방법이 동적(Dynamic)탐색에 비해 수행속도가 빠르다. 이는 정적 탐색 방법은 하나의 통행시간 테이블에서 탐색이 수행되지만, 동적 탐색 방법은 시간의 누적됨에 따라서 다른 통행시간 테이블을 적용되기 때문에 수행 속도 면에서 느리다. 전체영역을 대상으로 탐색하는 방법 보다는 탐색영역을 제한하거나, 도로 위계를 고려하는 방법이 수행 속도 면에서 많은 향상을 보인다.

<표 13> 탐색기법별 탐색소요시간(초)

구분	실시간	예측값	실제값
1	11.22	14.83	16.636
2	11.05	15.91	14.64
3	4.83	6.83	7.80

1) 실제로 시간이 지난 후 모든 경로에 대해서 최적경로를 탐색하였을 경우 가장 시간이 적게 걸리는 경로

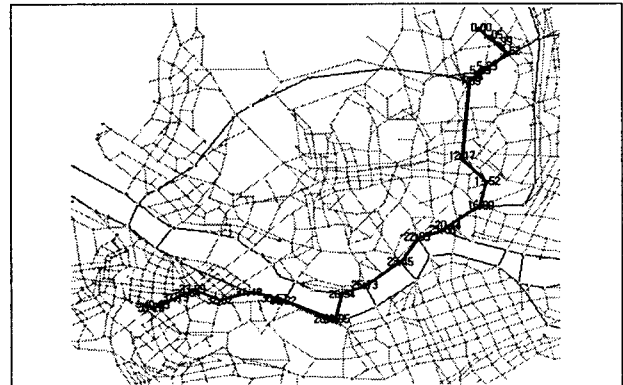
##### 3) 통행기법별 통행 시간 및 통행 경로 비교

탐색기법별 경로통행시간을 비교해 보면 실제 데이터와 정적 탐색방법이 동적 탐색방법에 비해 오차가 적다. 예측된 통행시간의 오차들의 누적으로 인해 차이가 난다.

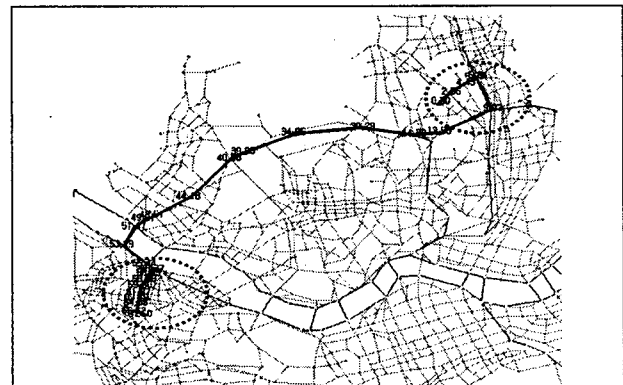
<표 14> 탐색기법별 통행시간(분)

구분	실시간	예측값	실제값
1 통행시간	39.96	29.83	40.93
2 통행시간	39.96	29.83	40.93
3 통행시간	54.03	36.60	67.60

전반적으로 통행경로를 살펴보면 동적최적경로 탐색방법이 정적최적경로 탐색 방법에 비해 유사한 경로를 따르고 있다. 도로의 위계를 고려한 경우에는 탐색방법이 출발지점에서 가장 가까운 도시고속도로의 램프를 이용하므로 실제의 탐색경로와는 다르다. 하지만 실제 탐색 경로와는 차이가 나지 않아 네비게이션 적용에는 문제가 없다.

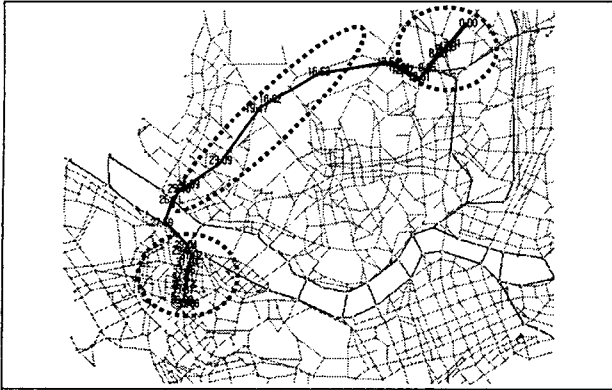


탐색방법: Real1, Real2  
주요 이동 경로: 내부순환도로 - 동작대교 - 강변북로 - 올림픽대로

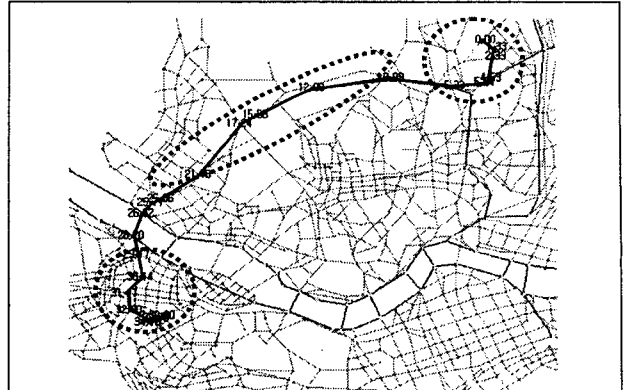


탐색방법: Real3  
주요 이동 경로: 내부순환도로 - 성산대교 - 올림픽대로

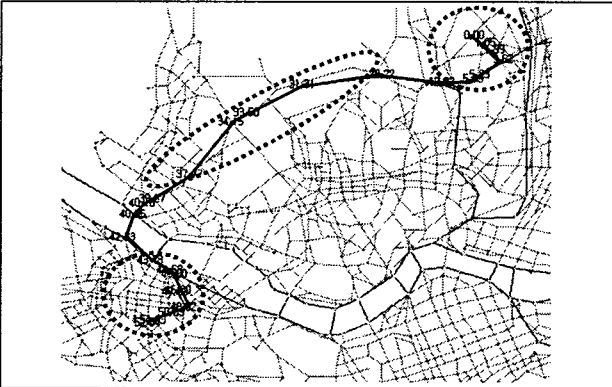




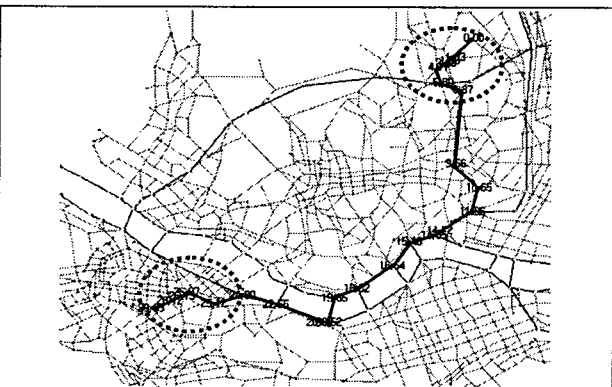
탐색방법	Static1, Static2
주요 이동 경로	내부순환도로 - 성산대교 - 올림픽대로



탐색방법	Dynamic3
주요 이동 경로	내부순환도로 - 성산대교 - 올림픽대로



탐색방법	Static3
주요 이동 경로	내부순환도로 - 성산대교 - 올림픽대로



탐색방법	Dynamic1, Dynamic2
주요 이동 경로	내부순환도로 - 강변북로 - 올림픽대로

## V. 결론

확률과정 모형을 적용하여 통행시간을 예측하였다. 예측된 통행시간을 바탕으로 하여 동적최적경로 탐색을 하였다. 그 결과 통행경로에는 실제데이터와 많은 일치점을 보이지만 통행시간 예측에는 오차의 누적으로 인해 실제 통행시간과는 차이를 보이고 있다.

앞으로의 연구에서는 통행시간의 예측 및 동적최적경로의 향상을 위한 연구 및 실제 시스템을 적용을 위한 노력이 필요할 것이다. 또한 서울시뿐만 아니라 다른 지역에도 적용을 하기 위한 Calibration과정이 필요할 것이다.

## VI. 참고문헌

1. 김익기, ATIS를 위한 수정형 덩굴망 최단경로 탐색 알고리즘 개발, 대한교통학회지 제16권 제2호, 1998
2. 박병규, 노정현, 정하옥, 신경망이론에 의한 링크 통행시간 예측모형의 개발, 대한교통학회지 제13권 제1호, 1995
3. 조범철, 이승재, 적응성 있는 단기간 속도 예측모형 개발에 관한 연구, 1998
4. 이영인, 최찬영, 칼만 필터링을 이용한 구간 속도 예측에 관한 연구, 1998
5. 김남선, 이승환, 오영태, 신경망을 이용한 고속도로 여행시간 추정 및 예측모형 개발, 대한교통학회지 제18권 제1호, 2000
6. 남궁성, 윤일수, 조범철, TCS 자료를 이용한 고속도로 통행시간 예측, 2000
7. 김범일, 도로위계 구조를 고려한 동적최적경로 탐색 기법 개발, 석사논문, 2004
8. Darryn Paterson, Geoff Rose, Dynamic Travel Time Estimation on Instrumented Freeways, ITS World Congress, 1999
9. Simon Cohen, Christophe Nouveliere, Travel Time on Urban Controlled Links: A Neural Network Approach, ITS World Congress, 1997
10. Rui Wang, Hideki Nakamura, Short Term Prediction Works in Traffic Engineering: The State-of-The-Art, ITS World Congress, 2002