

하이패스 DSRC 자료를 활용한 고속도로 오프라인 경로통행시간 추정기법 개발

심상우^{1*} · 최기주² · 이상수² · 남궁성³

¹ 아주대학교 교통연구센터, ² 아주대학교 교통시스템공학과, ³ 한국도로공사 도로교통연구원

An Expressway Path Travel Time Estimation Using Hi-pass DSRC Off-Line Travel Data

SHIM, Sangwoo^{1*} · CHOI, Keechoo² · LEE, Sangsoo² · NAMKOONG, Seong J.³

¹ Transportation Research Institute, Ajou University, Gyeonggi 443-749, Korea

² Department of Transportation Systems Engineering, Ajou University, Gyeonggi 443-749, Korea

³ Expressway and Transportation Research Institute, Korea Expressway Corporation, Gyeonggi 445-812, Korea

Abstract

Korea Expressway Corporation has been utilizing vehicles equipped with dedicated short range communication (DSRC) based on-board equipment (OBE) for collecting path travel times. A path based method (PBM) estimates the path travel time using probe vehicles traveling whole links on the path, so it is not always possible to obtain sufficient samples for calculating path travel time in the DSRC system. Having this problem in utilizing DSRC for travel time information, this study attempted to estimate path travel time with the help of a link based method (LBM) and examined whether the LBM can be used for obtaining reliable path travel times. Some comparisons were made and identified that the MAPE difference between the LBM and the PBM estimates are less than 3%, signaling that LBM can be used as a proxy for PBM in case of sparse sample conditions. Some limitations and a future research agenda have also been proposed.

DSRC의 원래 목적은 통행료 수집이었으나, 최근 한국도로공사는 DSRC 기반의 하이패스시스템을 교통정보체계에 응용하여 노변기지국간의 링크통행시간과 기·중점의 경로통행시간을 수집하는데 활용하고 있다. 기·중점을 통과한 차량을 통해 경로통행시간을 추정하는 경로기반방식(PBM: Path-based Method)은 수집표본수가 적고, 통과차량이 없을 경우 경로통행시간을 산출할 수 없는 문제점이 있는바, 링크기반방식(LBM: Link-based Method)을 제시하였다. 이는 실제 차량 궤적과 상이할 수 있는 문제점이 있으나 본 연구에서는 하이패스 DSRC 자료의 특성을 고려한 고속도로 경로통행시간 추정 모형 개발을 목적으로 개발되었다. LBM과 PBM의 경로통행시간 비교를 시도하였고, 그 결과 MAPE가 3% 이내로 나타났다. 이러한 결과로 볼 때 LBM을 통해 신뢰성 있는 경로통행시간을 추정할 수 있는 것으로 판단된다. 약간의 한계와 장래연구항목에 대해서도 제시하였다.

Key Words

DSRC, LBM, Path Travel Time, PBM, Probe Link Travel Time
DSRC, 링크기반방식, 경로통행시간, 경로기반방식, Probe 링크통행시간

* : Corresponding Author
artmania@ajou.ac.kr, Phone: +82-31-219-2541, Fax: +82-31-219-2965

Received 16 January 2013, Accepted 20 March 2013

1. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

자동차 등록대수는 꾸준히 증가하여 2012년 12월 기준으로 1,887만대의 차량이 등록되었으며, 최근 3년의 통계로 볼 때 연평균 51만대 정도 증가하고 있다. 이러한 자동차 증가에 따라 고속도로 연장 역시 꾸준히 증가하여 2012년 9월 현재 민자노선을 포함하여 31개 노선 3,734km의 고속도로가 개통되어 운영 중에 있다. 그러나 교통수요 증가에 따른 도로의 신설·확장을 통한 공급의 확대는 한계가 있으므로 1990년대부터 국내에서는 첨단기술을 활용하여 기존 도로시설의 운영효율을 극대화하는 지능형교통체계가 도입되었고 한국도로공사는 1993년 고속도로교통관리시스템 구축을 시작하여 현재는 고속도로 전체 노선에 구축하여 운영 중에 있다.

한국도로공사 고속도로교통관리시스템의 자료 수집은 VDS (Vehicle Detection System)와 TCS (Toll Collection System)를 통해 이루어지고 있다. VDS의 경우 어느 한 지점에 설치된 2개 검지기의 검지 시간 차이를 통해 산출된 지점속도를 공간평균속도로 환산하여 통행시간을 추정하고 있는데 이러한 자료는 해당 지점의 신뢰성 및 실시간성은 높은 반면 지점속도를 공간평균속도로 환산하기 때문에 교통정보로 제공되는 구간에 대한 신뢰도는 떨어지며, 오류 자료의 비율이 평균 14-15%¹⁾가 발생하는 문제점이 있다. 이에 비해 구간검지체계인 TCS 자료의 경우 영업소를 출발한 차량이 다른 영업소에 도착해야 자료를 수집할 수 있는데 구간 길이가 너무 길어 시간차집(Time lag)이 크며, 출발지와 도착지 기준의 통행시간은 수집할 수 있으나 차량이 이용한 경로를 확인할 수 없는 문제점이 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 한국도로공사에서는 700만대 이상 보급된 하이패스단말기(OBE: On-board Equipment, 이하 OBE)를 프로브로 활용하는 단거리전용통신(DSRC: Dedicated Short Range Communication, 이하 DSRC) 기반의 하이패스 교통정보시스템을 29개 노선, 3,587km 구간에 904개 노변장치(RSE: Roadside Equipment, 이하 RSE)를 평균 3.9km 단위로 구축하였다(2012년 9월 기준).

이와 같은 하이패스 교통정보시스템은 DSRC를 이용

하여 OBU와 RSE의 통신을 통해 수집된 OBU ID, RSE 수신시간, 차종 등의 자료인 하이패스 DSRC 자료²⁾를 기반으로 하며, 두 지점간 동일한 OBU ID를 가지는 차량의 RSE 수신시간 차이를 통해 해당 차량의 링크통행시간을 산출할 수 있다. 또한 기·종점의 통행시간은 알 수 있으나 경로를 확인할 수 없는 TCS 방식과 달리 RSE에 수신된 OBU ID의 궤적을 추적할 경우 해당 차량의 기·종점에 대한 경로까지 파악할 수 있는 장점이 있다. 이러한 점을 볼 때 하이패스 DSRC 교통자료의 경로통행시간은 해당 경로 전체를 이용한 차량을 대상으로 경로통행시간을 추정하는 경로기반방식(PBM: Path based Method, 이하 PBM)과 링크통행시간을 이용하여 산출하는 링크기반방식(LBM: Link based Method, 이하 LBM)과 같이 다양한 방법으로 산출할 수 있으나 이들 방식이 서로 동일한지에 대한 연구는 크게 이루어지지 않은 상황이다.

수집표본수가 충분할 경우에는 PBM으로 추정된 경로통행시간의 정확도가 더 우수하지만 수집표본수가 부족할 경우에는 정확도가 떨어지는 문제가 있다. 반면 LBM은 수집표본수는 대부분 충분하나 실제 경로통행시간의 시공도와는 차이가 발생하는 문제점이 있으므로 이들에 대한 비교가 필요하다. 즉, LBM으로 추정된 경로통행시간이 PBM으로 산출된 결과와 동일하다면 경로에 대한 수집표본수가 적어 경로통행시간의 정확도가 떨어지는 문제를 해결할 수 있기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 두 방식의 경로통행시간 비교를 통해 LBM의 경로통행시간 추정 기법을 개발하는 것을 목적으로 한다.

2. 연구 방법 및 범위

본 연구는 다음과 같은 순서로 진행된다. 우선 관련 분야 연구사례를 검토한 후 시사점을 살펴본 후 경부선 서울-대전 구간에서 수집된 원시자료 중 승용차를 대상으로 경로길이에 따른 하이패스 DSRC 자료의 수집표본수(건/5분)을 분석을 통해 PBM과 LBM의 적용 가능성을 검토하였다. PBM과 LBM으로 산출된 경로통행시간 비교분석을 통해 LBM의 정확도를 분석하고, 대응표본 t검정을 통해 이들 통행시간 통계적으로 동일 여부를 분석하였고, 마지막으로 연구결과를 정리하고 향후 과제를 제시하였다.

원시자료에는 이상치가 포함되어 있기 때문에 이상치

1) 차량검지기 자료의 효율적 수집저장 및 관리체계 연구, 한국도로공사, 2006.12

2) 단거리전용통신(DSRC)을 이용하여 하이패스단말기와 노변장치의 통신을 통해 수집된 자료를 말함

제거 없이 PBM과 LBM으로 경로통행시간을 산출하면 정확도가 저하될 수 있다. 이에 본 연구에서는 중위절대편차법(Median Absolute Deviation, 이하 MAD)을 이용하여 이상치를 제거한 후에 경로통행시간을 산출하여 비교분석하였다.

II. 관련연구 고찰

1. 관련 연구 사례

Quiroga C. and Bullock D. (1998), Choi K. and Shin C. (1998)는 GPS와 GIS를 이용하여 수신된 GPS 좌표를 버퍼를 이용해 통과교차로에 매칭시켜 교차로통과시간을 구한 후 두 노드간의 시간차를 이용해 통행시간을 산출하는 방법론을 제시하였다. 또한 Shim S. and Choi K. (2006)는 GPS Probe의 링크미통과데이터의 유형을 구분하고 특히 혼잡시에 실제보다 늦게 혼잡정보를 제공하는 문제점을 제시하였다. 이를 해결하기 위해 대기행렬소멸 길이와 신호현시 등을 추정하여 링크통행시간 추정 기법을 개발하였다.

Yoshikazu et al. (2000)은 TCS 데이터를 활용하여 패턴매칭법으로 고속도로 경로통행시간을 추정하였는데 다른 검지장치의 보완 없이 현장에서 쉽게 적용할 수 있는 장점이 있으나 과거와 현재의 패턴이 동일하게 나타난다는 가정을 전제로 하기 때문에 교통상황이 급격하게 변화하는 경우에 적용하기 어려운 문제가 있다.

Chen M. and Chien S. (2001)은 시뮬레이션을 통해 산출한 LBM과 PBM 기반 경로통행시간을 이용하여 단기 고속도로 통행시간을 예측하는 연구를 수행하였으며, 그 결과 두 방식의 차이는 크지 않으나 PBM의 경로통행시간을 이용할 때 정확도가 다소 좋은 것으로 나타났다.

Kang J. and Namkoong S. (2002)은 TCS 데이터를 기반으로 TCS 데이터의 속성과 시계열적 패턴을 규명하고, 이를 바탕으로 모듈라 신경망 모델을 이용하여 통행시간 추정 모델을 개발하였으며, Lee E. and Kim J. (2002)은 지점검지기의 교통량과 TCS 자료를 입력자료로 하는 인공신경망을 이용하여 시간차집을 고려한 장거리 통행시간을 추정하는 모델을 제시하였다. Xie et al. (2004)은 다층신경망 및 다항회귀모형을 통해 통행시간을 추정하였고, 다층신경망 모형이 다항회귀모형에 비해 우수하다고 제시하였다. Wei C. and Lee Y. (2007)은 ANN (Artificial Neural Network)을 기반으로 GPS 프로

브 및 지점검지기, 유도자료 등을 통합하여 고속도로 통행시간을 추정하는 모형을 제시하였으며, 통행경로별로 MAPE (Mean Absolute Percentage Error)가 20% 이내로 신뢰성 있는 교통정보를 생성하는 것으로 나타났다.

Zhang X. and Rice J. (2003)은 프로브 통행시간과 지점검지기 통행시간의 선형관계를 통해 회귀식을 추정하여 통행시간을 추정하였으며, Rice J. and Zwet E. (2004)는 교통상황이 현저하게 변화하지 않을 경우 현재의 통행시간과 장래 통행시간 사이에는 선형관계가 있다는 경험을 기반으로 회귀식을 통해 통행시간을 추정하였다. Chen et al. (2004)는 이력자료의 경로통행시간과 순간통행시간 (Instantaneous Travel time) 합의 선형관계를 이용하여 경로통행시간을 추정하였다.

Thomas R. and Robert M. (2003)는 Phoenix 지역의 I-17 구간에 대한 VDS의 이력자료 통행시간을 이용하여 도착지점을 기준으로 출발시점까지 VDS 통행시간을 역추적하여 경로통행시간을 산출하였고 프로브의 통행시간과 비교할 때 이력자료를 활용하여 산출한 결과가 더 좋은 것으로 나타났다.

Namkoong S. (2005)은 TCS 데이터의 출발시간과 도착시간을 이용하여 PIFAB (Progressive Iterative Forward and Backward) 알고리즘을 개발하여 경로 통행시간을 산출하였는데 제시된 알고리즘은 경로 내에 존재하는 모든 영업소간의 통행시간 데이터가 충분히 확보되었을 때만 통행시간 추정이 가능하며 통행시간 자료가 충분하지 못한 결측 구간에 대해서는 산출이 어려운 문제가 있다. Lee H. and Jeon K. (2009)는 집계시점과 통행시점의 차이를 밸런스 팩터(Balance Factor)로 정의하고 이를 PIFAB 알고리즘에 적용한 개선방안을 제시하였다.

Kim et al. (2006)는 AVI (Automatic Vehicle Identification) 자료를 이용하여 경로통행시간의 실시간 추정방법에 대하여 연구하였다. 출발시각기준 실시간 통행시간 추정에는 추정오차와 시간차집이 발생하는데 이는 링크 길이에 영향을 받으므로 경로 단위보다는 링크 단위로 통행시간을 추정하는 것이 오차가 작아짐을 제시하였다.

Oliver D. and Nour-Eddin E. (2006)은 인접구간 ETCS (Electronic Toll Collection System) 데이터를 이용하여 단거리 영업소간 통행시간을 추정하였으나 도시부와 같이 단거리 통행이 잦은 지역에서는 이와 같은 방법이 가능하지만 장거리 통행이 다수인 도시외곽지역에서는 적용

하기가 곤란하며, 통행시간 계산 시 서로 다른 입·출구 램프 이용시간에 대한 영향을 고려하지 못했다.

Soriguera et al. (2007)는 고속도로상의 본선영업소에서 출발한 단일구간에 대하여 TCS 자료를 이용하여 인접한 두 영업소의 본선구간 통행시간과 출구 램프 통행시간 및 요금 정산시간을 포함한 통행시간을 추정하였으나 단위구간별로 서로 상이한 램프 진출입시간을 반영하지 못하였고 통행시간 집계 시 결측치에 대한 문제를 해결하지 못하였으며, 단위구간 설정 시 구간의 소통상황 변화가 동일하다는 가정을 하였으나 단위구간이 길어질 경우 단위구간의 통행시간 변동이 심하여 하나의 대표치를 나타낼 수 없는 문제가 나타났다.

Yu J. (2008)은 VDS의 실시간성과 AVI의 현실반영 특성을 반영하여 통행시간 추정 모형을 개발하였는데 VDS를 통해 측정된 교차로간의 순행통행시간과 교차로 통과지체(AVI 통행시간-VDS 순행통행시간의 합)로 분류하였고, 교차로 통과지체는 종점부 AVI를 통과하여야 측정이 가능한 문제점을 해결하기 위해 과거 자료를 기반으로 다항회귀식을 통해 추정하였다.

Jintanakul et al. (2008)는 샘플수가 작은 프로브 데이터를 이용하여 고속도로 구간 통행시간분포를 추정하기 위해 계층적 베이저안 혼합모형을 개발하였고, 시뮬레이션 분석을 통해 제안모형과 각 구간별 실제 통행시간분포가 거의 유사하게 나타났다.

Sun et al. (2008)는 차량통행시간 제적만을 이용하여 통행시간을 추정하는 방법을 제시하였으며, 속도와 밀도자료를 동시에 이용하는 기존 방식과 달리 속도만을 Piecewise Truncated Quadratic 형태로 분석함으로써 실제 적용성이 매우 우수한 것으로 나타났다.

Pu et al. (2008)는 버스과 일반 차량의 속도 이력 자료의 관계와 실시간 버스 통행정보를 이용한 실시간 통행시간 추정 방법론으로 베이저안 기법을 제안하였고, 시뮬레이션 분석 결과 제안 기법을 통해 추정된 통행시간이 일반 교통상황을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 또한 Pu et al. (2009)는 버스 프로브를 이용하여 도시부 도로의 통행시간을 추정하기 위해 선형회귀와 상대공간 모형을 이용하여 버스과 일반차량의 관계 정량화를 통해 통행시간과 속도를 추정하였다.

Ban et al. (2010)은 이력자료의 순간통행시간 합과 현재의 순간통행시간 합의 차이에 파라미터를 적용한 값과 이력자료의 경로통행시간을 합산하여 경로통행시간을 추정하였다.

2. 시사점 도출

기존 연구 검토 결과 Chen M. and Chien S. (2001)이 유사한 연구를 수행하였으나 실제 자료가 아닌 시뮬레이션 분석 결과를 기반으로 제시하였고, 그 결과 PBM이 LBM에 비해 좀 더 정확하나 차이가 크지 않은 것으로 나타났다. 대부분의 경로통행시간 추정 연구는 기·종점에 대한 통행시간 자료를 대상으로 이루어지는 PBM이거나 순간통행시간의 합과 이력자료의 경로통행시간의 관련성을 이용한 회귀식을 통해 추정하는 연구이다. 또한 대부분 유·출입 및 연결로 통행시간이 포함된 TCS 자료를 이용하였기 때문에 IC 단위의 링크통행시간을 이용한 LBM을 적용하여 이를 제거하였다. 그러나 고속도로 통행특성상 단거리 통행이 적기 때문에 TCS 자료 이용 시 결측 발생 빈도가 높으며, 전방과 후방 탐색을 반복하여야 하기 때문에 많은 시간이 소요되어 적용이 어려운 문제가 있다. 반면 하이패스 DSRC 자료는 PBM과 LBM의 경로통행시간 추정이 모두 가능하며, RSE간의 통행시간을 기반으로 하므로 RSE에 문제가 없다면 TCS 자료에 비해 결측 발생 빈도가 상대적으로 작은 장점이 있다. 따라서 두 방식을 통해 산출된 결과를 비교분석하여 하이패스 DSRC 자료에 적합한 경로통행시간 추정 방법론을 개발할 필요가 있다.

III. 하이패스 DSRC 자료 수집표본수 분석

1. 하이패스 DSRC 자료 이상치 제거

하이패스 DSRC 자료는 하이패스단말기를 장착한 차량을 기반으로 수집되며, 현재 하이패스단말기를 장착할 수 있는 차종은 승용차와 버스, 4.5톤 미만의 화물차이다. 차종별 통행시간을 비교하기 위해 경부선 서울 TG-수원 IC(하행 방면) 구간의 버스과 승용차 통행시간의 산점도를 그린 결과 Figure 1과 같이 서로 상이하게 나타났다.

이는 버스전용차로로 인해 정체 시에도 버스는 통행시간의 변화가 크지 않으나 승용차는 정체변화에 따라 통행시간 변화가 크기 때문이다. 이러한 이유로 본 연구에서는 승용차를 대상으로 분석을 수행하였다.

승용차를 대상으로 하더라도 여전히 통행시간의 차이가 큰 이상치들이 존재하므로 본 연구에서는 현재 TCS에서 적용하고 있는 MAD를 이용하여 이를 제거하였으

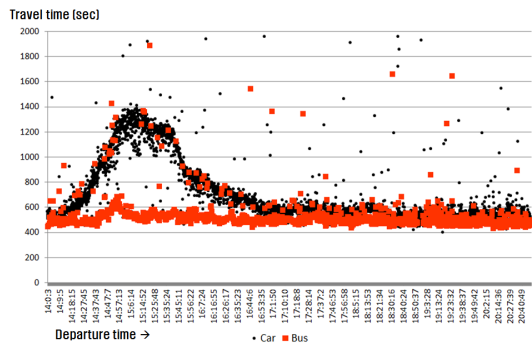


Figure 1. Comparison travel time: car vs. bus

며, 식(1)과 같다.

$$Z_i^{MAD} = \frac{|x_i - x_{med}|}{MAD} \tag{1}$$

$$MAD = \alpha \times \text{median}|x_i - x_{med}|$$

여기서, MAD : 중위절대편차

Z_i^{MAD} : MAD에 의한 Z값

x_i : i번째 데이터

x_{med} : x 데이터 계열의 중앙값

α : 조정계수(1.4826)

2. 하이패스 DSRC 자료 수집표본수 분석

PBM으로 경로통행시간을 산출하기 위해서는 최소표본수를 만족하여야 한다. 이에 본 연구에서는 Chen M. and Chien S. (2000), Lee Y. and Lee J. (2002)의 연구에서 적용된 통계적 표본결정식을 준용하였으며, 식(2)와 같다. 본 연구에서는 최대허용오차율 5%, 신뢰수준 95%를 적용하여 경부선 서울-대전 구간에서 수집된 5월 10일 자료를 기반으로 최소표본수를 산정한 결과 13.4대/5분가 필요한 것으로 나타났다.

$$n \geq \left\{ \frac{\Phi^{-1} \left\{ \frac{(1+r)}{2} \right\} \cdot \sigma}{\epsilon_{max}} \right\}^2 \tag{2}$$

여기서, n : 최소표본수

r : 신뢰수준

σ : 모집단 통행시간의 표준편차

μ : 모집단의 평균통행시간

ϵ_{max} : 최대허용오차율

Table 1. The number of probes by the length of path

Section	Length (km)	# of probes (veh/5 min)
Seoul TG→Suwon IC	10.9	56
Seoul TG→Giheong IC	16.1	44
Seoul TG→Osan IC	25.1	30
Seoul TG→Anseong IC	43.2	16
Seoul TG→Cheonan IC	63.2	8
Seoul TG→Daejeon IC	131.2	2

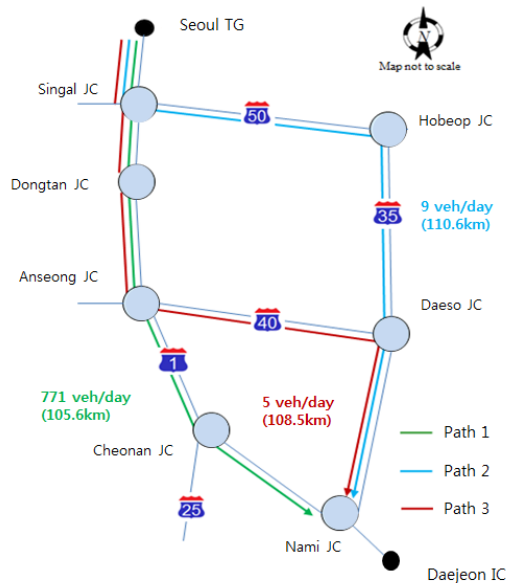


Figure 2. The number of probes by paths

이상치를 제거한 후 경로길이에 따른 5분 평균 수집건수를 분석한 결과는 Table 1과 같다. 서울 TG 기점 시 경로길이가 길어질수록 수집건수는 감소하는 것으로 나타났다. 천안 IC 이후로는 최소표본수를 만족하지 못하고 있어 PBM을 적용하기는 어려운 것으로 나타났다.

또한 서울-대전의 경우 Figure 2과 같이 5km 내외의 차이를 보이는 3개의 경로를 이용할 수 있으나, 경로 1을 제외한 나머지 경로는 하루에 10대 미만의 차량이 이용한 것으로 나타나, 주로 이용하는 경로가 아닐 경우 PBM으로는 경로통행시간을 산출할 수 없는 문제점이 나타났다.

반면 IC 단위의 5분 평균 수집건수는 Table 2와 같이 모두 최소표본수를 만족하는 것으로 나타났으며, 이러한 결과를 볼 때 이보다 작은 RSE-RSE 단위 링크의 수집건수 역시 최소표본수를 만족시킬 수 있을 것으로 판단된다.

Table 2. The number of probes by sections

Section	# of probes (veh/5 min)
Seoul TG→Suwon IC	56
Suwon IC→Giheong IC	57
Giheong IC→Giheung-Dongtan IC	47
Giheung-Dongtan IC→Osan IC	42
Osan IC→Anseong IC	32
Anseong IC→Cheonan IC	42
Cheonan IC→Mokcheon IC	23
Mokcheon IC→Cheongju IC	22
Cheongju IC→Cheongwon IC	17
Cheongwon IC→Sintanjin IC	29
Sintanjin IC→Daejeon IC	16

이러한 결과로 볼 때 장거리 경로통행시간의 경우 수집건수가 작아 PBM으로는 산출하기 어려운 반면 LBM은 이러한 문제 해결이 가능하므로 LBM의 추정 기법 개발이 필요할 것으로 사료된다.

IV. LBM을 이용한 경로통행시간 추정

1. 경로통행시간 추정 방법론

전술한 바와 같이 PBM의 경우 최소표본수보다 수집건수가 작기 때문에 적용이 어려우므로 본 연구에서는 링크통행시간을 이용한 LBM을 적용하여 경로통행시간을 추정하였다.

LBM을 적용한 경로통행시간 추정은 출발시각을 기준으로 집계된 각 링크통행시간을 이용하며, 집계주기(5분) 내에서는 통행시간 변화 없이 유사하다고 가정하였다. 이러한 가정을 기반으로 하면 각 링크의 출발시각은

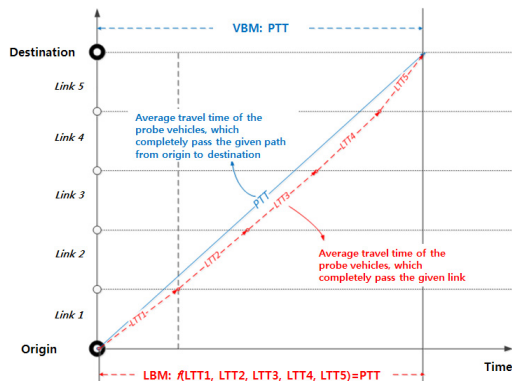


Figure 3. Path travel time estimation method: PBM vs. LBM

전 링크 출발시각에 해당 링크통행시간을 합산한 값이 되므로 Figure 3과 같이 기점에서 종점방향으로 링크단위 전진탐색법을 적용하면 경로통행시간이 산출되며, 식 (3)과 같다.

$$RTT = \sum_{i=1}^n LTT_i(S_i) \quad (3)$$

$$S_i = S_{i-1} + LTT_{i-1}, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$s. t. \quad LTT_0 = 0, S_0 = \text{Start time}$$

여기서,

RTT : 기점과 종점의 경로통행시간

$LTT_i(S_i)$: S_i 의 경로 내 i 번째 링크통행시간

S_i : 링크 i 의 출발시각

S_0 : 기점 출발시각

n : 경로 내 링크의 개수

2. 경로통행시간 추정 기법 평가

LBM을 이용한 경로통행시간 추정 기법의 적용 가능성을 평가하기 위해 경부선 2010년 5월 10일 10시-19시 자료를 이용하여 분석하였으며, 분석구간은 최소표본수를 만족하는 안성IC→서울TG 상행 구간을 대상으로 하였다. 또한 다양한 구간길이에 대한 비교를 위해 IC 단위로 6개 구간을 비교하였다. 이 때 비교 지표는 MAE (Mean Absolute Error)와 MAPE (Mean Absolute Percentage Error)를 사용하였으며, PBM의 경로통행시간을 참값으로 가정하여 평가하였다.

$$MAE = \frac{\sum_{t=1}^n |RTT_{link,t} - RTT_{route,t}|}{n} \quad (4)$$

$$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{|RTT_{link,t} - RTT_{route,t}|}{RTT_{route,t}}}{n} \quad (5)$$

여기서,

$RTT_{link,t}$: 집계간격 t 의 LBM 경로통행시간

$RTT_{route,t}$: 집계간격 t 의 PBM 경로통행시간

n : 집계간격 t 의 수

LBM을 이용한 경로통행시간 추정 기법을 적용한 결과 경로길이가 길어질수록 오차는 증가하는 추세를 보이

Table 3. Estimation error of LBM

구간	Length (km)	# of Link	MAE (초)	MAPE (%)
Suwon IC→Seoul TG	10.9	4	3.7	0.7
Giheong IC→Suwon IC	5.2	2	19.0	3.3
Osan IC→Giheong IC	9.0	6	8.6	2.4
Anseong IC→Osan IC	18.1	4	8.9	1.5
Osan IC→Suwon IC	14.2	8	60.0	3.4
Anseong IC→Seoul TG	43.2	16	108.0	4.2

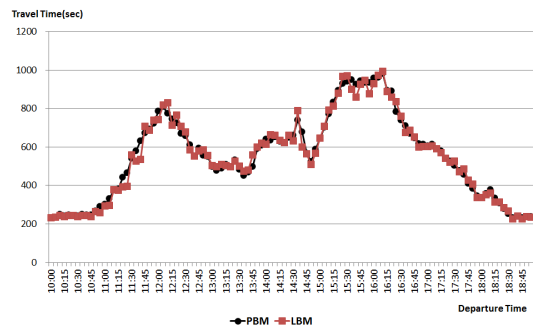


Figure 4. Path travel time using PBM and LBM (Giheong IC → Suwon IC)

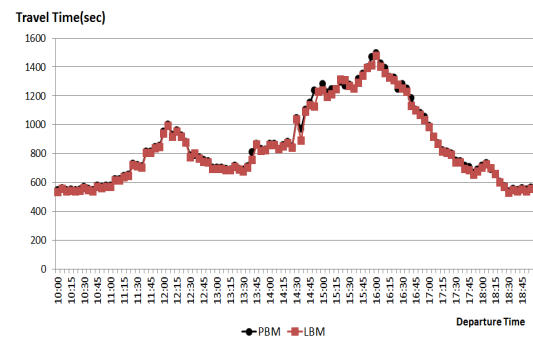


Figure 5. Path travel time using PBM and LBM (Osan IC → Suwon IC)

나 전체적으로 MAPE가 5% 미만으로 적용 가능성은 높은 것으로 나타났다. 세부적으로 보면 5.2km로 가장 짧은 구간인 기흥 IC→수원 IC 구간의 오차가 18.1 km 인 안성 IC→오산 IC 구간보다 높게 나타났다.

그 이유는 먼저 기흥 IC→수원 IC 구간은 정체 발생으로 인해 소통상황 변화가 발생한 반면 안성 IC→오산 IC 구간은 소통원활로 소통상황 변화가 거의 없었기 때문이다. 이는 소통상황의 변화가 없다면 PBM과 LBM의 시공도 궤적이 유사하게 나타나지만 소통상황 변화가 발생하면 두 방식의 시공도 차이가 다소 발생한다는 것을 의미한다. 또한 경로길이가 짧으면 참값으로 가정할

Table 4. Result of paired T-test on section

Section	Paired Differences		t	Degree of freedom	P-value
	Mean	SE			
Seoul TG - Suwon IC	1.19	0.62	1.92	107	0.06
Suwon IC - Giheong IC	-1.45	2.8	-0.52	107	0.61
Giheong IC - Osan IC	1.32	1.73	0.77	107	0.45
Osan IC - Anseong IC	2.71	1.93	1.40	107	0.17
Suwon IC - Osan IC	-0.17	0.12	-1.43	107	0.16
Seoul TG - Anseong IC	-0.27	0.17	-1.59	107	0.12

PBM의 경로통행시간도 감소하게 되므로 동일한 차이가 나더라도 비율 척도인 MAPE는 증가하게 되므로 기흥 IC→수원 IC 구간과 오산 IC→수원 IC 구간의 MAE는 40초 정도 차이가 나지만 MAPE는 유사하게 나타났다.

출발시간 기준으로 집계된 두 방식의 경로통행시간을 비교한 그래프는 Figure 4, 5와 같다. 구간길이가 짧은 기흥 IC→수원 IC 구간과 구간길이가 긴 오산 IC→수원 IC 구간 모두 LBM으로 산출한 경로통행시간이 PBM으로 산출된 결과와 유사하게 나타났다.

그러나 정체가 발생할 경우 LBM의 경로통행시간이 정체 시점에서 약간 우측으로 이동하는 경향을 보이고 있는데 이는 집계주기 내에 통행시간 변화가 일어나 기본 가정을 만족시키지 못할 경우에 발생하는 것으로 나타났다.

PBM과 LBM의 경로통행시간을 비교한 결과 5% 미만의 오차를 보이고 있으나 이는 수치적 차이이므로 통계적 검정을 통해 두 통행시간이 동일하지 확인하였다. 통계적 검정은 유의수준 5%에서 대응표본 T-test를 수행하였으며, 이 때 귀무가설은 식(6)과 같다.

$$\begin{aligned}
 H_0 &: \mu_{path-based} = \mu_{link-based} \\
 H_1 &: \mu_{path-based} \neq \mu_{link-based}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

여기서, $\mu_{path-based}$: PBM 경로통행시간
 $\mu_{link-based}$: LBM 경로통행시간

대응표본 T-test 결과를 살펴보면 P-value가 모두 유의수준인 0.05보다 크게 나타나 귀무가설을 채택하며, 이는 통계적으로 볼 때 두 방식으로 산출된 경로통행시간의 차이는 없는 것을 의미한다. 일부 구간에 적용한

결과지만 이러한 결과로 볼 때 경로에 대한 최소표본수 만족 여부에 따라 대표성이 변화하는 PBM보다 LBM으로 산출하는 것이 더 효율적이라고 판단된다.

V. 결론

한국도로공사에서는 700만대 이상 보급된 하이패스 단말기를 프로브로 활용하는 DSRC 기반의 하이패스 교통정보시스템을 29개 노선, 3,587km 구간에 구축하여 운영하고 있다. 하이패스 교통정보시스템에서 수집되는 하이패스 DSRC 교통자료의 경로통행시간은 해당 경로 전체를 이용한 차량을 대상으로 경로통행시간을 추정하는 PBM과 링크통행시간을 이용하여 산출하는 LBM과 같이 다양한 방법으로 산출할 수 있으나 이들 방식이 서로 동일하지에 대한 연구는 크게 이루어지지 않은 상황이다. 따라서 본 연구에서는 두 방식의 경로통행시간 비교를 통해 LBM의 경로통행시간 추정 기법을 개발하는 것을 목적으로 한다.

PBM을 적용하기 위해서는 최소표본수를 만족하여야 하나 경로길이가 길어질수록 수집표본수는 감소하여 장거리의 경우 이를 만족시키지 못하는 것으로 나타난 반면 링크 단위로는 최소표본수를 만족시키는 것으로 나타났다. 또한 LBM의 경로통행시간 추정 기법을 적용한 결과를 PBM과 비교한 결과 MAPE가 5% 미만으로 나타났다. 통계적 검정 결과 역시 동일한 것으로 나타났다. 이는 본 연구에서 제시한 LBM의 경로통행시간 추정 기법 적용이 가능한 것을 의미하므로 장거리 경로통행시간 추정 시 본 연구 결과를 활용할 수 있을 것이다.

그러나 전이시간대와 같이 교통상황이 변화하는 시간대에서는 집계주기 내에 통행시간 변화가 일어나며, 이는 본 연구의 기본 가정을 만족시키지 못하였다. 그 결과 LBM의 경로통행시간이 약간 우측으로 이동하여 PBM에 비해 통행시간이 증가하는 시점이 다소 늦게 나타나고 있다. 이는 동일 집계주기라도 전이시간대의 경우 출발시간이 늦을수록 통행시간이 증가하는 추세를 보이고 있으나 본 연구에서는 출발시간에 관계없이 동일 집계주기에서는 평균통행시간으로 동일하게 적용하기 때문에 발생하고 있다. 따라서 이렇게 집계주기 내에 통행시간의 변화가 있을 경우를 보완하는 연구가 추가로 이루어질 필요가 있다.

본 연구의 경우 분석대상구간이 수집표본수가 많은 경부선만을 대상으로 나타난 결과이다. 그러나 다른 노

선 및 지방부의 경우 본 연구의 분석대상구간과 상이한 특성을 보일 수 있으므로 다양한 노선 및 구간에 대한 분석을 통해 본 연구 결과를 확대 적용할 필요가 있을 것이다. 또한 평일에 대한 자료를 기반으로 하였기 때문에 교통량이 상대적으로 더 많아 평일과 다른 통행패턴을 보이는 주말에 대한 분석도 추가적으로 수행할 필요가 있으며, 돌발상황과 같은 비반복정체가 발생하는 경우 역시 반복정체와 상이하게 나타나므로 이에 대한 분석도 요구된다.

LBM의 경우 경로길이가 길어질수록 링크의 수가 증가하게 되어 오차가 증가하는 추세를 보이고 있으며, 결측 발생으로 인해 경로통행시간을 산출할 수 없는 확률이 증가하게 되는 문제점이 있다. 따라서 LBM을 이용하여 경로통행시간을 추정하기에 적절한 공간적 집계범위에 대한 연구가 추가적으로 필요할 것이며, 이를 통해 PBM과 LBM을 연계하여 적용하는 방안을 마련하여야 할 것이다.

또한 시간적 집계범위를 실시간 교통정보 제공주기인 5분으로 설정하여 분석했기 때문에 집계범위에 따른 수집표본수 변화를 확인하지 못한 한계가 있다. 예를 들어 시간적 집계범위를 15분으로 확대시키면 수집표본수 문제가 해결될 수 있기 때문이다. 그러므로 시간적 집계범위에 따른 수집표본수 분석 및 이에 적합한 경로통행시간 추정 방법론을 개발하여야 할 것이다.

마지막으로 하이패스 DSRC 교통자료에 대한 전처리 기법에 대한 연구가 필요할 것이다. LBM 및 PBM 모두 평균통행시간을 왜곡시킬 수 있는 이상치 제거 및 보정 처리 등의 과정이 잘 이루어져야 경로통행시간의 신뢰도가 증가할 수 있기 때문이다. 본 연구에서는 하이패스 DSRC 교통자료의 특성을 일부 분석하였으나 전처리를 위해서는 세부적인 특성 분석이 필요할 것이다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by DSRC Data and funded by Korea Expressway Corporation and the National Research Foundation of Korea grant funded by the Korea government(MSIP) (NRF-2010-0029446).

REFERENCES

Ban X. J., Li Y., Skabardonis A., Margulici J. D.

- (2010), Performance Evaluation of Travel-Time Estimation Methods for Real-Time Traffic Applications, *J. Intell. Transp. Syst.*, Vol.14, Issue 2, Taylor and Francis, pp.54-67.
- Chen C., Skabardonis A., Varaiya P. (2004), A System for Displaying Travel Times on Changeable Message Signs, *Proceedings of 83rd TRB Annual Meeting*, Washington D.C.
- Chen M., Chein S. (2000), Determining the Number of Probe Vehicles for Freeway Travel Estimation Using Microscopic Simulation, *Transp. Res. Rec.*, No.1719, pp.61-68.
- Chen M., Chein S. (2001), Dynamic Freeway Travel Time Prediction Using Probe Vehicle Data: Link-based vs. Path-based, *Proceedings of TRB 80th Annual Meeting*, Washington D.C.
- Choi K. C., Shin C. H. (1998), Link Travel Time Derivation Using GPS and GIS, *J. Korean Soc. Transp.*, Vol.16, No.2, Korean Society of Transportation, pp.197-207.
- Jintanakul K., Chu L., Jayakrishnan R. (2008), A Bayesian Mixture Model for Estimating Freeway Travel Time Distributions Using Small Probe Samples from Multiple Days, *Proceedings of TRB 89th Annual Meeting*, Washington D.C.
- Kang J. K., Namkoong S. (2002), Development of The Freeway Operating Time Prediction Model Using Toll Collection System Data, *J. Korean Soc. Transp.*, Vol.20, No.4, Korean Society of Transportation, pp.151-162.
- Kim J. J., Rho J. H., Park D. J. (2006), On-Line Departure time based link travel time estimation using Spatial Detection System, *J. Korean Soc. Transp.*, Vol.24, No.2, Korean Society of Transportation, pp.157-168.
- Lee E. E., Kim J. H. (2002), Development of a Freeway Travel Time Forecasting Model for Long Distance Section with Due Regard to Time-lag, *J. Korean Soc. Transp.*, Vol.20, No.4, Korean Society of Transportation, pp.51-61.
- Lee H. S., Jeon K. S. (2009), A Path Travel Time Estimation Study on Expressway using TCS Link Travel Time, *J. Korean Soc. Transp.*, Vol.27, No.5, Korean Society of Transportation, pp.209-221.
- Lee Y. I., Lee J. H. (2002), A Study on Link Travel Time Estimating Methodology for Traffic Information Service, *J. Korean Soc. Transp.*, Vol.20, No.3, Korean Society of Transportation, pp.55-67.
- Namkoong S. (2005), Progressive Iterative Forward and Backward (PIFAB) Search Method to Estimate Path-Travel Time on Freeways Using Toll Collection System Data, *J. Korean Soc. Transp.*, Vol.23, No.5, Korean Society of Transportation, pp.147-155.
- Oliver D., Nour-Eddin E. (2006), Innovative Processing of Toll Collection Data, *LICIT report*, No.0604.
- Pu W., Lin J., Long L. (2008), Real-Time Estimation of Urban Street Segment Travel Time Using Buses as Speed Probes, *Proceedings of 89th TRB Annual Meeting*, Washington, D.C.
- Pu W., Lin J., Long L. (2009), Estimation of Urban Street Segment Travel Time Using Buses as Real-time Speed Probes, *Proceedings of 90th TRB Annual Meeting*, Washington, D.C.
- Quiroga C., Bullock D. (1998), Travel Time Studies with Global Positioning and Geographic Information Systems: An Integrated Methodology, *Transp. Res. Part C*, Vol.6C, Issue 1-2, ELSEVIER, pp.101-127.
- Rice J., Zwet E. (2004), A Simple and Effective Method for Predicting Travel Times on Freeways, *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, Vol.5, Issue 3, *IEEE Transactions*, pp.200-207.
- Shim S. W., Choi K. C. (2006), Link Travel Time Estimation Using Uncompleted Link-passing GPS Probe Data in Congested Traffic Condition, *J. Korean Soc. Transp.*, Vol.24, No.5, Korean Society of Transportation, pp.7-18.
- Soriguera F. Thorson L., Robuste F. (2007), Travel Time Measurement Using Toll Infrastructure, *Transp. Res. Rec.*, Issue 2027, *Transportation Research Board*, pp.99-107.
- Sun L., Yang J., Mahmassani H. (2008), Travel Time Estimation based on Piecewise Truncated Quadratic Speed Trajectory, *Transp. Res. Part A*, Vol.42,

- Issue 1, ELSEVIER, pp.173-186.
- Thomas R., Robert M. (2003), Using Archived Data to Estimate Predicted Travel Time in the Phoenix Area, Proceedings of 13th ITS America 2003 Annual Meeting, Minneapolis.
- Wei C., Lee Y. (2007), Development of Freeway Travel Time Forecasting Models by Integrating Different Sources of Traffic Data, IEEE Trans. Veh. Technol., Vol.56, Issue 6-2, IEEE Transactions, pp.3682-3694.
- Xie C., Cheu R., Lee D. (2004), Improving Arterial Link Travel Time Estimation by Data Fusion, Proceedings of 84th TRB Annual Meeting, Washington D.C.
- Yoshikazu O., Hideki U., Masao K. (2000), Travel Time Prediction Method for Expressway Using Toll Collection System Data, Proceedings of 7th ITS World Congress, Torino.
- Yu J. H. (2008), Real-time Travel Time Estimation Model Using Point-based and Link-based Data, J. Korean Soc. Road Eng., Vol.10, No.1, Korean Society of Road Engineers, pp.155-164.
- Zhang X., Rice J. (2003), Short-term Travel Time Prediction, Transp. Res. Part C, Vol.11, Issue 3-4, ELSEVIER, pp.187-210.
- ☞ 주 작성자 : 심상우
 ☞ 교신저자 : 심상우
 ☞ 논문투고일 : 2013. 1. 16
 ☞ 논문심사일 : 2013. 3. 9 (1차)
 2013. 3. 20 (2차)
 ☞ 심사판정일 : 2013. 3. 20
 ☞ 반론접수기한 : 2013. 10. 30
 ☞ 3인 익명 심사필
 ☞ 1인 abstract 교정필