

하이패스 DSRC 기반의 경로통행시간 산정을 위한 공간적 집계방안 산정에 관한 연구

A Study on Spatial Aggregation Method for Path Travel Time Estimation using Hi-Pass DSRC System

이 환 필 Lee, Hwanpil
심 상 우 Shim, Sangwoo
최 윤 택 Choi, Yuntaek
김 동 인 Kim, Dongin

정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 교통연구실 (E-mail : hplee@ex.co.kr)
아주대학교 TOD기반지속가능도시교통연구센터 연구교수 · 교신저자 (E-mail : artmania@ajou.ac.kr)
한국도로공사 환경품질처 (E-mail : cytk_2000@ex.co.kr)
한국도로공사 냉정부산건설사업단 (E-mail : kdi@ex.co.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : This investigational survey is to observe a proper spatial aggregation method for path travel time estimation using the hi-pass DSRC system.

METHODS : The links which connect the nodes of section detectors location are used for path travel time estimation traditionally. It makes some problem such as increasing accumulation errors and processing times. In this background, the new links composition methods for spatial aggregation are considered by using some types of nodes as IC, JC, RSE combination. Path travel times estimated by new aggregation methods are compared with PBM travel times by MAE, MAPE and statistical hypothesis tests.

RESULTS : The results of minimum sample size and missing rate for 5 minutes aggregation interval are satisfied except for JC link path travel time in Seoul TG~Kuemho JC. Thus, it was additionally observed for minimum sample size satisfaction. In 15, 30 minutes and 1 hour aggregation intervals, all conditions are satisfied by the minimum sample size criteria. For accuracy test and statistical hypothesis test, it has been proved that RSE, Conzone, IC, JC links have equivalent errors and statistical characteristics.

CONCLUSIONS : There are some errors between the PBM and the LBM methods that come from dropping vehicles by rest areas. Consequently, this survey result means each of links compositions are available for the estimation of path travel time when PBM vehicles are missed.

Keywords

Hi-pass, DSRC, path travel time, spatial aggregation method, travel time estimation

Corresponding Author : Shim, Sangwoo, Research Professor
TOD-based Sustainable City Transportation Research Center,
Ajou University, 206 Worldcup-ro, Yongtong-gu, Suwon-si,
Gyeonggi-do, 443-749, Korea
Tel : +82.31.219.2541 Fax : +82.31.219.2965
E-mail : artmania@ajou.ac.kr

International Journal of Highway Engineering

<http://www.ijhe.or.kr/>

ISSN 1738-7159 (Print)

ISSN 2287-3678 (Online)

Received Feb. 24, 2014 Revised Feb. 27, 2014 Accepted May. 8, 2014

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

한국도로공사는 2013년 8월 기준 3,913km, 32개 노선(일부 민자관리노선 제외) 전체구간에 고속도로 교통

관리시스템(Freeway Traffic Management System, 이하 FTMS)을 구축, 운영 중이다. FTMS에서는 차량 검지시스템(Vehicle Detection System, 이하 VDS), 하이패스 교통정보시스템, 차종분류시스템(Automatic Vehicle Classification) 등을 통한 직접 수집정보와 요금징수를 위한 톨게이트요금징수시스템(Toll Collection System, 이하 TCS)의 연계수집 정보를 활용해 교통류를 실시간 제어하고 이용자에게 교통정보를 제공하고 있다.

이 중, 하이패스 교통정보시스템은 근거리 전용 통신방식(Dedicated Short Range Communication, 이하 DSRC)을 이용, 하이패스용 차량단말기(On-Board Unit, 이하 OBU)와 노변기지국(Roadside Equipment, 이하 RSE)간 통신을 통해 수집된 OBU ID, RSE 통신시각, 차종 등의 자료를 기반으로 연속된 RSE를 통과하는 동일 OBU ID의 시간차를 계산하여 구간통행시간을 산출하는 시스템이다. 2013년 8월 기준으로 OBU는 국내 전체 차량등록대수 3대당 1대 정도인 약 860만대가 보급되어 있으며, 전국 916개소에 설치된 RSE에서는 평균 약 1,100만건/일의 하이패스 OBU 통과이력을 수집하고 있다. 이런 점을 볼 때 하이패스 교통정보시스템은 프로브 기반의 고속도로 교통정보를 수집하는 주요 시스템으로 활용성이 크게 증대되고 있는 현실이다. 경로통행시간의 주요 수집수단이었던 TCS의 한계점으로 지적된 시·종점 통과차량의 세부통행궤적 확인 및 세부경로별 통행시간 산출이 불가능한 점과 시·종점 휴게소체류차량의 분류가 불가능한 점을 하이패스 교통정보시스템에서는 해결할 수 있다. 또한, 지점 교통정보 수집수단인 VDS의 수집교통정보인 지점속도를 구간속도로 변환하는 추정과정에서 발생하는 구간통행속도 신뢰도 저하의 문제점도 해결가능하다.

하이패스 교통정보시스템에서 경로통행시간을 산출하기 위해서는 해당경로 전체를 통과한 차량을 대상으로 통행시간을 산출하는 것이 이상적인 방법이다. 하지만 통행거리가 긴 중·장거리 통행이나 통행빈도가 적은 경로의 통행은 통행량 과소로 인한 결측이나 수집표본수 부족에 의한 대표성 미확보 현상이 빈번하게 발생한다. 이러한 경우의 대안으로 경로를 세분화한 링크통행시간을 집계하여 경로통행시간을 추정하는 방안이 사용되고 있지만 실제 경로통행시간에 가장 근사한 통행시간을 추정할 수 있는 공간적 분할 및 집계범위에 대한 연구는 충분히 이루어지지 않은 실정이다. 이러한 배경에서 본 연구는 중·장거리 통행에서 경로통행시간 산정

시 합리적인 링크단위별 공간집계방식을 검토하는 것을 목적으로 한다.

1.2. 연구의 범위 및 방법

본 연구의 공간적 범위는 시·종점 통행거리가 100km 이상 중·장거리 경로로 한정하였다. 시·종점이 동일하더라도 다양한 통행경로가 존재하므로 통행경로별 통행시간의 편차를 없애기 위하여 시·종점간 최빈경로를 이용한 차량만을 연구대상으로 하였다. 또한 차종별 통행시간 편차를 최소화하기 위해 승용차¹⁾를 분석대상차량으로 설정하였다.

실시간(Real-Time Data, On-Line) 데이터는 구간 검지방식의 특성상 통행이 완료된 이후에 데이터를 수집할 수 있기 때문에 도착시간 기준으로 집계되며, 통행을 모두 완료한 상황이 아닐 수 있으므로 출발, 도착기준으로 모두 분류가 가능하고 모든 차량의 도착이 완료된 상태인 이력데이터(Historical Data, Off-Line)를 대상으로 연구를 수행하였다.

연구절차는 선행연구에 대한 검토를 통해 시사점을 살펴본 후, 실제 하이패스 교통정보시스템에서 수집된 원시자료에 대해 전처리과정을 통해 분석가능한 데이터로 가공하여 본 연구에서 설정한 공간적 집계방법별로 최소표본수 만족여부, 결측률을 분석하였다. 이후, 잠값으로 설정한 실제 시·종점을 모두 통과한 차량으로 산출한 경로통행시간과 단위구간별로 집계한 경로통행시간의 차이 분석을 통해 정확도 분석을 실시하였으며 공간적 집계단위별로 산출된 통행시간의 통계적 유의성을 분석하였다. 마지막으로 분석결과에 기반한 연구결과 및 향후 과제를 제시하였다.

2. 기존 연구사례 검토

2.1. 기존 연구사례 검토

Chen et al.(2001)은 시뮬레이션 결과로 획득한 반복적 혼잡상황의 프로브 데이터를 이용해서 경로기반과 링크합산기반의 경로통행시간 예측을 수행하였다. 링크합산기반과 경로기반 예측통행시간을 실제값과 비교한 결과 경로기반 예측통행시간의 정확도가 나은 것으로 나타났다.

유소영 등(2004)은 링크 및 경로통행시간 산정, 예측

1) TCS의 차종분류체계에서 1, 6종만을 대상으로 함

을 위한 루프검지기 자료의 최적 시간집계간격 설정을 위해 CVMSE(Cross Validated Mean Square Error) 방법을 통해 분석한 결과 3~5분이 적정 집계간격을 도출하였다.

Oliver et al.(2006)의 지점검지기와 TCS자료를 이용한 고속도로 통행시간산정 및 단기예측방법론에 관한 연구에서 인접구간 TCS 데이터를 이용하여 단거리 영업소간 통행시간을 산정하였다. 하지만, 단거리 통행이 잦은 도시부 지역과 같은 경우에는 이러한 방법이 가능하지만 장거리 통행일 경우에는 적용하기가 곤란하다는 결론을 도출하였다.

김재진(2006)의 연구에서는 출발시간 기준 On-line 통행시간 산정 알고리즘의 개발, 추정오차와 통행시간 산출 구간길이, 혼잡수준의 관계 분석, 시간처짐 간격과 구간길이 및 혼잡수준의 관계분석을 실시하였다. 통행시간 정보를 위한 공간적 최적설계를 위한 분석결과는 On-line 통행시간 정보제공을 위해서 경로단위보다 동적특성을 반영한 링크단위의 통행시간 정보제공이 오차가 더 적게 나타나며 이에 따른 적정구간길이는 약 4km, 시간적 최적설계안은 4분으로 제시하였다.

Park et al.(2009)는 링크통행시간 산정, 경로통행시간 산정, 링크통행시간 예측, 경로통행시간 예측 등의 4개의 항목에 대한 최적 집계시간 간격을 정의하기 위해 텍사스 휴스턴의 AVI 자료를 통해 MSE(Mean Square Error)를 이용해서 항목별 최적 집계시간 간격을 분석하였다. 분석결과 최적 집계시간 간격은 통행시간처리의 목적 및 교통류 상태와 상관관계가 있는 것으로 분석되었다.

김낙주 등(2011)은 구간검지체계의 설치기준 연구를 위해 구간검지체계의 정확도에 영향을 미치는 요인들로 혼잡구간 통행속도, 교통자료 집계간격, 혼잡구간 범위, 혼잡규모를 요인으로 설정하여 요인별 검지기 설치간격을 도출하였다. 요인별 분석결과를 통해 지방부 주말 지정체구간과 도시부 상습 지정체구간의 최적 지점 및 구간검지기 본선 설치간격을 제시하였다.

심상우 등(2013)은 고속도로 하이패스 교통정보시스템의 경로통행시간 추정방법으로 시·종점을 모두 통과한 차량을 대상으로 하는 경로기반방식(Path-Based Method, 이하 PBM)이 아닌 경로의 세부링크를 동적으로 시·공간 합산 집계하는 링크기반방식(Link-Based Method, 이하 LBM)을 제시하였다. 단거리 통행인 서울~안성구간 하이패스 교통정보시스템 자료를 이용하여 PBM과 LBM 방식 경로통행시간 분석결과 평균절대비

율오차인 MAPE(Mean Absolute Percentage Error)가 3%로 나타났다.

2.2. 기존 연구의 시사점

선행 연구는 대부분 통행시간 예측, 최적시간 집계간격 설정, 검지기 설치간격 등을 위주로 수행되었다. 검토한 기존 연구 중 Chen et al.(2001)의 연구는 실제 자료가 아닌 시뮬레이션을 통해서 수집된 자료의 예측정확도를 비교하는데 링크합산 경로통행시간과 경로기반 통행시간을 이용하였다는 본 연구와 차이가 있다. 김재진(2006)의 연구는 본 연구 범위와는 다르게 On-line 통행시간을 위한 공간적 집계방식에 대한 연구를 수행하였으며 세부 공간집계방식을 구간검지기 설치단위인 LBM으로 고정한 상황에 대해서 연구를 수행하였다.

심상우 등(2013)의 연구에서는 Off-line 경로통행시간 산출을 위해 RSE 링크기반의 LBM 방식을 적용하여 PBM 방식의 경로통행시간을 보완하는 방안을 검토하였다. PBM 통행시간 대비 LBM 방식의 통행시간 정확도를 분석하여 대체가능성을 검토하였으나 공간적 집계기준을 김재진(2006)의 연구와 동일한 교통정보수집 매체로 구성된 링크방식으로 한정해서 분석하였다. 또한, 수집표본수 확보가 어려우며 PBM, LBM 통행시간이 유사하지 않은 중·장거리 통행에 대한 검토를 수행하지 않았다.

구간 고속도로 통행시간 산정을 위한 주 검지수단은 TCS였으며, 선행연구에서는 대부분 TCS 시·종점 통행 데이터를 이용하여 통행시간을 산정하였다. 하지만, TCS를 기반으로 한 선행연구결과를 본 연구의 대상인 하이패스 교통정보시스템에 적용하기에는 검지방식, 구조 등이 틀리므로 한계가 존재한다. 따라서 시·종점 데이터뿐만 아니라 차량운행궤적, 고속도로 본선 구간별 통행시간 및 소통상태를 알 수 있는 하이패스 교통정보시스템²⁾의 특징을 충분히 반영한 경로통행시간 산정방법론을 개발할 필요가 있다.

3. 데이터 분석 및 경로통행시간 추정

3.1. 전제조건

데이터 분석 및 경로통행시간 추정을 위해서 본 연구의 전제조건을 다음과 같이 설정하였다.

2) 시스템 정식명칭은 “하이패스 교통정보시스템”이나 일반적으로 DSRC로 통칭하며 본 연구에서도 DSRC로 통칭함

국내 FTMS에서 대부분 사용하고 있는 시간적 집계 간격인 5분을 기초로 데이터를 분석하며, 필요 시 추가 분석을 실시하였다. DSRC는 현재 한국도로공사에서 제시하는 기준설치간격인 3~6km³⁾이며 출발시각 기준의 이력데이터를 기준데이터로 사용하였다. 또한 공간적 집계방식별 비교를 위해 PBM 방식의 경로통행시간을 참값으로 가정하였다.

3.2. 공간적 집계방식의 설정

기존 연구에서 LBM 기반 통행시간 산정 시 링크의 의미는 시·중점간 경로를 보다 세분화시켜 놓은 구간으로 링크를 구성하는 노드는 대부분 구간검지장비의 설치위치이며 각 노드를 연결한 링크를 기본단위링크로 정의하고 있다.

LBM 방식의 경로통행시간은 경로를 구성하는 세부 링크 통행시간을 시·공간적으로 동적 합산하여 경로통행시간을 산정하며 중·장거리 구간이나 표본수 확보가 어려운 시간대에 시·중점간을 통행한 차량이 존재하지 않을 경우 경로통행시간을 보완하기 위한 방안으로 활용되고 있다.

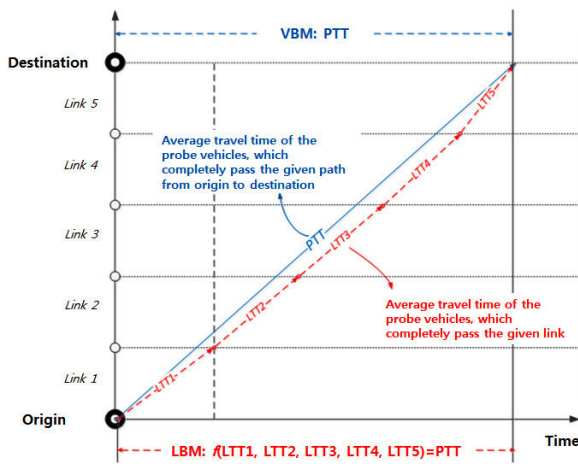


Fig. 1 Definition of PBM, LBM in Literature Review and this Study (Shim et al. (2013))

고속도로 네트워크에는 나들목(Interchange, 이하 IC)과 분기점(Junction, 이하 JC), 톨게이트(Tollgate, 이하 TG) 등과 ITS 장비운영측면에서 VDS, RSE 설치 지점 등 다양한 종류의 지점속성이 존재한다. 본 연구에서 LBM 방식 통행시간산출 링크를 JC, IC, Conzone, RSE 링크 등 4개 방식으로 구성했다. 이 중, Conzone

3) 서비스 수준 A~C : 설치간격 5~6km, 서비스수준 D~F : 설치간격 3~4km

링크는 FTMS에서 교통류 관리를 위해 사용하는 개념으로 고속도로에 위치한 주요 노드(IC, JC, 본선형 TG⁴⁾)를 연결한 링크로 IC~IC/JC, JC~IC/JC 형태로 링크가 구성되게 된다.

3.3. 데이터 전처리

무선검지방식의 특성상 통신반경 내 차량 진입 후 통과때까지 통신이 수차례 발생하므로 동일차량의 통신중복현상이 발생한다. 또한, 인접도로를 통과하는 OBU 장착차량 검지, RSE 이상, 톨게이트 회차차량, IC 인근 설치 RSE, 갓길 정차차량 등에 의해 불규칙한 통행패턴이 발생할 수 있다.⁵⁾ 이러한 불규칙 통행패턴, 중복 및 이상데이터 제거를 위해 이상치 및 오류데이터 제거 과정을 수행하였다.

현재 하이패스 단말기가 장착가능한 차종은 승용차와 버스, 4.5톤 미만의 화물차이며, 본 연구에서는 표본수 확보가 용이하고 일반적 통행특성을 보이는 승용차만을 대상으로 전처리하여 분석에 활용하였다.

분석에 사용된 데이터의 세부사항은 다음과 같다.

- 데이터 수집일시 : 2013년 5월 12일~25일(14일간)
- 노선선정 : 노선별 경로선택비율이 가장 높은 노선⁷⁾
- 구간: 서울TG~대전IC(경부선, 통행길이 126.6km)
서울TG~금호JC(경부선-영동선-중부내륙선-경부선, 통행길이 247.0km)
- 통행방향 : 하행

3.3.1. 이상치 제거

이상치 제거를 위한 기법은 선행연구인 한국도로공사 도로교통연구원(2012)에서 제시, 적용하고 있는 오류데이터, 중복데이터, 1, 2차 이상치 제거 등의 전처리과정을 동일하게 적용하였다.⁸⁾ 해당 연구에서 제시하고 있는 1차 이상치 제거조건은 다음 Eq. (1a), (1b)와 같다.

$$TT_i > \alpha \cdot TT_{i-1} \text{ and } TT_{i-1} + TT_{i+1} < TT_i \quad (1a)$$

4) 본선형 톨게이트는 고속도로 본선에 위치하여 교통류를 단절시키므로 FTMS에서 IC나 JC와 같이 동일한 노드로 취급

5) 이러한 현상은 다양한 원인에 의해 발생하며, 전처리과정에서 제거하지만 완전제거는 어려우며, 데이터 신뢰도 저하의 원인이 됨

6) 전처리과정은 원시데이터를 교통정보화 시키기 전 비정상데이터, 이상치 등을 제거하는 과정을 통칭함

7) 사전에 데이터 분석을 통해 주 통행경로를 산출

8) 현재 한국도로공사 하이패스 교통정보시스템의 적용과정과 동일함

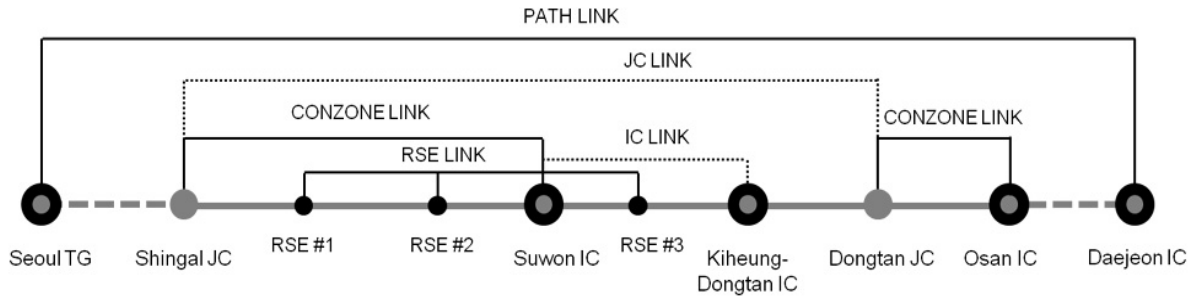


Fig. 2 Composition of Node-Link Structure in Expressway and Spatial Aggregate Unit for Path Travel Time Estimation

$$TT_i < \frac{TT_{i-1}}{\alpha} \text{ and } TT_{i-1} < TT_i + TT_{i+1} \quad (1b)$$

여기서, TT : 개별차량의 통행시간

i : 출발시각 기준으로 정렬될 차량순서

α : 이상치 판정을 위한 파라미터 ($\alpha = 2$)

2차 이상치 제거는 1차 이상치 제거 후 남은 자료의 평균통행속도를 이용하여 이상치를 제거하였으며 세부적인 제거방법은 다음 Eq. (2)와 같다.

$$V_i < \bar{V}_i \cdot (1 - \beta) \text{ or } V_i > \bar{V}_i \cdot (1 + \beta) \quad (2)$$

여기서, V_i : 개별차량의 통행속도

\bar{V}_i : t 집계주기의 평균통행속도

β : 이상치 판정을 위한 파라미터 ($\beta = 0.3$)

중복데이터 및 1, 2차 이상치 제거를 수행한 후의 데이터 변화는 Table 1~2와 같다.

Table 1. Results of Preprocessing for Each Link
Composition Method (Seoul TG~Daejeon IC)

Spatial Aggregate Unit	Num. of Data	Num. of 1st Outlier Filtering	Num. of 2nd Outlier Filtering	Ratio of Outlier
RSE Link	5,826,889	55,853	61,144	2.01%
Conzone Link	3,046,522	46,992	47,053	3.09%
IC Link	1,897,652	54,198	46,032	5.28%
JC Link	1,405,286	38,099	43,353	5.80%
Path Link	9,819	178	265	4.51%

Table 2. Results of Preprocessing for Each Link
Composition Method (Seoul TG~Keumho JC)

Spatial Aggregate Unit	Num. of Data	Num. of 1st Outlier Filtering	Num. of 2nd Outlier Filtering	Ratio of Outlier
RSE Link	5,645,673	57,292	57,449	2.03%
Conzone Link	2,763,091	47,226	36,317	3.02%
IC Link	1,868,692	42,725	37,089	4.27%
JC Link	754,415	15,263	16,766	4.25%
Path Link	4,405	63	47	2.50%

3.3.2. 공간적 집계단위별 수집표본수 및 결측률

표본수 및 결측률 분석을 위해서 이상치 제거 후 대부분의 교통정보 시간적 집계단위인 5분을 기준으로 데이터를 집계하였다. 공간적 집계단위에 따른 5분 평균 수집표본수와 5분 집계시간대에 통행 데이터가 존재하지 않는 링크의 비율인 결측률을 분석한 결과는 Table 3~4와 같다.

Table 3. Number of Probes and Missing Rates by Spatial Aggregation Unit (Seoul TG~Daejeon IC)

Spatial Aggregate Unit	# of Average Probes (veh/5min)	Missing Rate (%/day)
RSE Link	40	4.2
Conzone Link	41	4.3
IC Link	37	4.5
JC Link	36	6.0
Path Link	2	27.0

Table 4. Number of Probes and Missing Rates by Spatial Aggregation Unit (Seoul TG~Keumho JC)

Spatial Aggregate Unit	# of Average Probes (veh/5min)	Missing Rate (%/day)
RSE Link	25	4.3
Conzone Link	26	5.5
IC Link	22	4.2
JC Link	26	11.3
Path Link	1	30.1

중·장거리구간 모두 동일하게 공간적 집계단위가 증가함에 따라 수집표본수는 감소하고, 결측률도 증가하고 있다. 특히, PBM 방식 Path 링크는 LBM 방식의 링크조합보다 월등히 높은 결측률을 나타내고 있는 것으로 나타났다. 이러한 원인은 공간적 집계단위가 작은 경우는 서로 다른 시·중점을 가지더라도 해당 구간을 통과하는 차량이 모두 수집되지만 PBM Path 링크 방식은 동일 기·중점을 통과한 차량만 수집되므로 장거리 통행이 많지 않은 경우 결측률이 상대적으로 높게 나타나기 때문이다.⁹⁾

선행연구인 심상우 등(2013)의 연구에서 산정된 서울 TG~대전IC 구간 최소표본수(13.4대/5분)를 동일하게 적용하였을 때 LBM 방식은 집계방법별로 최소표본수를 모두 만족시키고 있다. 서울TG~금호JC 구간도 LBM 방식의 최소표본수를 모두 만족시키고 있으며 결측률은 서울TG~대전IC 구간 4.75%, 서울TG~금호JC 구간 6.33% 정도로 크지 않은 것으로 나타났다.

참값으로 설정한 PBM 방식 Path 링크의 최소표본수는 기준 최소표본수보다 훨씬 낮은 표본수를 나타내고 있으며, 결측률은 서울TG~대전IC구간은 27%, 서울TG~금호JC은 30.1%로 분석되었다. 이러한 결과는 중·장거리구간에 대한 경로통행시간 산출을 위해 PBM 방식만 적용할 경우 최소표본수가 미확보 될 확률이 클 수 있음을 의미하며 현재의 분석결과로 PBM 방식의 교통정보를 생성할 때 약 30% 주기에서 교통정보가 생성되지 않음을 나타낸다. 이에 따라, PBM 방식만 사용하여 경로통행시간을 산출한다면 제공정보의 대표성 보장이 어려우며, 결측주기 과다로 정보제공의 안정성을 확보하기 어려움이 예상된다. 또한, PBM 방식에 비해서 안정적이고 표본수 확보가 용이한 LBM 방식이 경로통행시간을 추정하는 방법 중 하나의 대안이며, PBM 방식을 우선으로 하되 결측시간대에 대해서 LBM 방식으로 경로통행시간을 보완하는 것이 바람직하다.

3.4. 공간적 집계단위별 경로통행시간 비교

3.4.1. 공간적 집계단위별 대표성 만족여부 분석

LBM 방식 경로통행시간과 PBM 방식 경로통행시간

9) LBM Conzone 링크방식의 세부구간인 신갈JC~수원IC는 시·중점이 다르더라도 해당 구간을 통과만 한다면 유효표본에 해당하고 이러한 짧은 구간을 연결하여 집계하므로 유효표본 확보가 용이하나 PBM Path 링크에서는 서울TG~대전IC의 구간을 통과한 차량만이 유효표본에 해당되므로 통행거리 증가에 따라 유효표본수는 감소

과의 정확도를 비교하기 위해 이상치 및 중복데이터가 제거된 원시데이터를 이용하여 LBM 방식의 링크구성별 통행시간을 시·공간 동적 합산하여 경로통행시간을 산정하였다.

시·공간 동적 합산방법에서 각 링크의 출발시간은 전 링크 출발시간에 해당 링크통행시간을 합산한 값이 되므로 다음 Eq. (3)과 같다.

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

$$S_i = S_{i-1} + LTT_{i-1}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

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

여기서, RTT : 시점과 종점의 경로통행시간

$LTT_i(S_i)$: S_i 의 경로 내 i 번째 링크통행시간

S_i : 링크 i 의 출발시간

S_0 : 시점 출발시간

n : 경로 내 링크의 개수

참값으로 설정한 PBM 방식의 통행시간 중 대표성이 확보된 통행시간만을 대상으로 정확도를 분석해야 한다. 주기별로 통행시간의 대표성 만족여부 파악을 위해 Srinivasan and Jovanis(1996), Chen and Chien(2000), 심상우 등(2013) 등 기존 주요연구에서 적용한 통행시간 산정에 필요한 최소표본수의 통계적 결정식을 적용하여 최소표본수를 산출하였으며 적용식은 Eq. (4)와 같다.

$$n \geq \left\{ \frac{\Phi^{-1} \left\{ \frac{(1+r)}{2} \right\} \cdot \frac{\sigma}{\mu}}{\epsilon_{\max}} \right\}^2 \quad (4)$$

여기서, n : 최소표본수

r : 신뢰수준

σ : 모집단 통행시간의 표준편차

μ : 모집단의 평균통행시간

ϵ_{\max} : 최대허용오차율

해당 표본수 결정식을 준용하여 적용하였을 때, PBM 방식의 5분당 최소표본수 기준은 중거리구간인 서울 TG~대전IC는 22대, 장거리구간인 서울TG~금호JC는

48대로 산출되었으나 실제 수집된 표본수는 이를 만족시키지 못하고 있다.

LBM 방식의 공간집계방식별로 산출된 최소표본수와 실제 수집 평균표본수를 분석한 결과 장거리구간 중 서울TG~금호JC의 JC 링크 합산방식을 제외하고는 모두 만족시키고 있는 것으로 나타났다. 5분당 평균표본수, 실제 수집 평균표본수, 공간적 집계단위별 최소표본수와 만족여부에 대한 분석결과는 Table 5~6과 같다.

Table 5. Examination Results of Minimum Probes(5min) (Seoul TG~Daejeon IC)

Spatial aggregate unit	Minimum probes (veh/5min)	# of Aver.Probes (veh/5min)	Satisfaction or Failure
RSE Link	27	40	Satisfy
Conzone Link	21	41	Satisfy
IC Link	24	37	Satisfy
JC Link	21	36	Satisfy
Path Link	22	2	Fail

Table 6. Examination Results of Minimum Probes(5min) (Seoul TG~Keumho JC)

Spatial aggregate unit	Minimum probes (veh/5min)	# of Aver.Probes (veh/5min)	Satisfaction or Failure
RSE Link	19	25	Satisfy
Conzone Link	19	26	Satisfy
IC Link	15	22	Satisfy
JC Link	30	26	Fail
Path Link	48	1	Fail

5분 단위 표본수 만족여부 분석결과 장거리구간인 서울TG~금호JC 구간 중 LBM 방식의 JC 링크는 최소표본수를 만족시키지 못하고 있으므로 최소표본수 만족 여부를 확인하기 위해 시간적 단위의 확장을 통한 추가 분석을 실시하였다.

추가분석 시간단위는 15분, 30분, 1시간이며 분석결과 전체 분석시간대에서 LBM 방식의 모든 공간집계방식 방법에서 최소표본수를 만족시키고 있는 것으로 확인되었다. 그러나, 기준값인 PBM 방식의 Path 링크는 15분, 30분, 1시간 모두 실제 수집표본수가 최소표본수를 만족시키지 못하고 있는 것으로 나타났다. 집계시간단위별 최소표본수 만족여부는 Table 7~9와 같다.

Table 7. Examination Results of Minimum Probes(15min) (Seoul TG~Keumho JC)

Spatial aggregate unit	Minimum probes (veh/15min)	# of Aver.Probes (veh/15min)	Satisfaction or Failure
RSE Link	17	79	Satisfy
Conzone Link	18	81	Satisfy
IC Link	14	70	Satisfy
JC Link	25	79	Satisfy
Path Link	31	3	Fail

Table 8. Examination Results of Minimum Probes(30min) (Seoul TG~Keumho JC)

Spatial aggregate unit	Minimum probes (veh/30min)	# of Aver.Probes (veh/30min)	Satisfaction or Failure
RSE Link	16	163	Satisfy
Conzone Link	17	165	Satisfy
IC Link	13	143	Satisfy
JC Link	24	159	Satisfy
Path Link	21	6	Fail

Table 9. Examination Results of Minimum Probes(1hour) (Seoul TG~Keumho JC)

Spatial aggregate unit	Minimum probes (veh/1hour)	# of Aver.Probes (veh/1hour)	Satisfaction or Failure
RSE Link	16	333	Satisfy
Conzone Link	16	334	Satisfy
IC Link	12	289	Satisfy
JC Link	22	387	Satisfy
Path Link	15	14	Fail

3.4.2. 공간적 집계단위별 통행시간 정확도 분석

정확도 분석 기준자료인 PBM 방식의 Path 링크 집계단위는 최소표본수를 만족시키지 못하므로 대표성을 가지는 표본수를 결정하여야 한다. 이에 본 연구에서는 Wang and Nakamura(2013)의 지점검지기와 프로브의 조합을 통한 고속도로 통행시간 산출에 관련된 연구에서 제시한 프로브 차량의 최소구성대수인 5대를 준용하여 5대 이상의 표본수를 나타내는 주기에 대해서만 PBM 방식과 LBM 방식의 경로통행시간을 비교하였다.

공간적 집계단위별 경로통행시간을 비교하기 위해 5분단위 통행시간에 대해서 PBM 방식의 Path 링크 통행시간을 참값으로 설정하고 LBM 링크별 산출 통행시간을 비교하였다. 분석을 위한 지표는 평균절대오차(Mean Absolute Error, 이하 MAE)와 평균절대비율오차(MAPE)를 사용하였다. 산출식은 Eq. (5), (6)과 같다.

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

$$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{|RTT_{link,t} - RTT_{route,t}|}{RTT_{route,t}}}{n} \quad (6)$$

여기서, $RTT_{link,t}$: 집계시간 t 의 공간적 집계단위별 LBM 경로통행시간

$RTT_{route,t}$: 집계시간 t 의 PBM 경로통행시간

n : 집계간격 t 의 수

통행거리별로 산출된 MAE, MAPE에 대한 분석결과는 Table 10~11과 같다.

Table 10. Error Estimation Results by Spatial Aggregation Unit (Seoul TG~Daejeon IC)

Spatial aggregate unit	MAE (min)	MAPE (%)
RSE Link	15.5	13.7
Conzone Link	15.0	13.4
IC Link	15.0	13.4
JC Link	14.7	12.9

Table 11. Error Estimation Results by Spatial Aggregation Unit (Seoul TG~Keumho JC)

Spatial aggregate unit	MAE (min)	MAPE (%)
RSE Link	22.3	12.4
Conzone Link	20.5	11.4
IC Link	19.5	10.8
JC Link	19.4	10.8

중거리구간인 서울TG~대전IC구간 LBM 방식의 산출통행시간 분석결과 평균 MAE가 15분 내외, MAPE가 약 13% 정도로 나타났다. 장거리구간인 서울TG~금호JC는 MAE가 20분 내외, MAPE가 약 12%로 중거리구간에 비해 다소 높게 나타났다. 또한, 서울TG~금호JC 구간이 서울TG~대전IC 구간에 비해 MAE가 크지만 MAPE가 작은 이유는 서울TG~대구IC 구간의 Path 링크 기반 경로통행시간이 더 크기 때문이다.

LBM 방식과 PBM 방식 경로통행시간의 오차 발생 이유는 중·장거리 통행 시 발생하는 휴게소 이용차량의 통행시간 포함여부이다. LBM 기반 경로통행시간은 휴게소 이용차량의 링크통행시간 과다로 인해 전처리과정

에서 이상치로 제거될 확률이 높으며, 휴게소 이용차량이 제거된 통행시간값들을 합산하여 경로통행시간 산출하게 된다. 반면에 PBM 기반의 경로통행시간 산출 시에는 대부분의 차량이 휴게소를 이용하는 비중이 높으므로 이상치로 제거될 확률이 낮은 것이 원인이다. 이러한 결과는 LBM 방식의 통행시간을 산출할 때, 휴게소 이용차량의 빈도가 낮은 단거리 통행이 중·장거리 통행 보다 낮은 오차를 나타낼 것으로 추론할 수 있다.

공간적 집계단위별 분석결과 가장 짧은 집계단위인 RSE 링크단위의 산출통행시간이 MAE 및 MAPE가 가장 크게 나타났으며, 공간적 집계단위가 확장될수록 오차가 감소하는 것으로 분석되었다. 서울TG~대전IC와 서울TG~금호JC 구간의 공간적 집계단위별 통행시간 변화추이는 Fig. 3, 4와 같다.

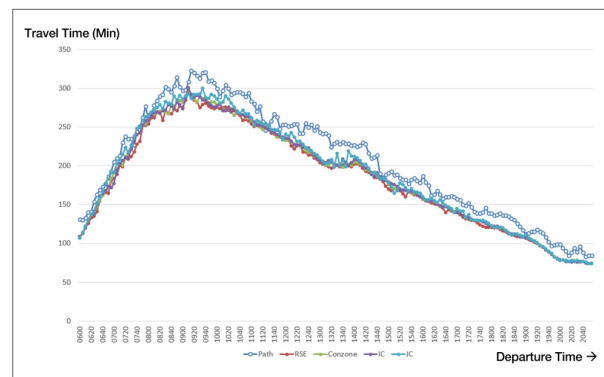


Fig. 3 PBM vs. LBM by Spatial Aggregate Unit in 17th May, 2013 (Seoul TG~Daejeon IC)

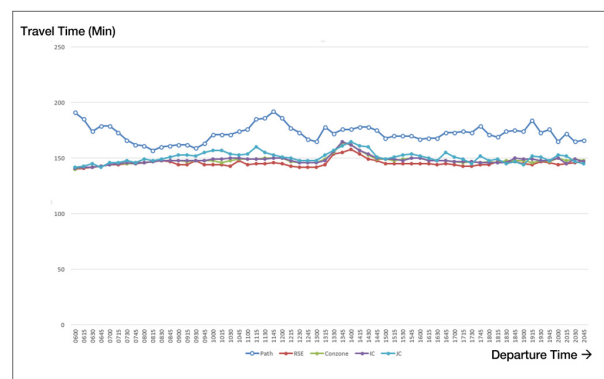


Fig. 4 PBM vs. LBM by Spatial Aggregate Unit in 16th May, 2013 (Seoul TG~Keumho JC)

추이분석 결과 Path 링크 기반 통행시간의 변동에 따라 LBM 기반의 경로통행시간의 추세도 유사하게 변동하는 패턴을 나타내고 있다. 하지만, 전술한 바와 같이 휴게소 이용차량으로 인해 PBM, LBM 방식간 일정수준 경로통행시간의 차이가 발생하며 PBM 방식의 통행

시간이 LBM 방식의 경로통행시간에 비해 크게 나타나고 있다.

3.4.3. 공간적 집계단위별 동일성에 대한 통계적 검정

LBM 방식의 공간적 집계단위별로 오차는 거의 유사하게 나타났으나 이는 수치적 차이이므로 통계적 검정을 통해 공간적 집계단위별 경로통행시간이 동일한지 분석하였다. 통계적 검정은 유의수준 5%에서 일원분산 분석을 수행하였으며, 귀무가설은 Eq. (7)과 같다.

$$\begin{aligned}
 H_0 : \mu_{RSE} &= \mu_{Conzone} = \mu_{IC} = \mu_{JC} \\
 H_1 : \mu_{RSE} &\neq \mu_{Conzone} \neq \mu_{IC} \neq \mu_{JC}
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

- 여기서, μ_{RSE} : RSE Link 기반 LBM 경로통행시간
- $\mu_{Conzone}$: Conzone Link 기반 LBM 경로통행시간
- μ_{IC} : IC Link 기반 LBM 경로통행시간
- μ_{JC} : JC Link 기반 LBM 경로통행시간

분산분석 결과, 서울TG~대전IC 구간 P-value는 0.98, 서울TG~금호JC 구간 P-value는 0.14로 유의수준인 0.05보다 크게 나타나 귀무가설을 채택하는 것으로 나타났다.

Table 12. Result of One-way ANOVA (Seoul TG~Daejeon IC)

Source of Variation	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	F	P-value
Between Treatment	531.3	3	177.1	0.07	0.98
Error	6,003,671.7	2,472	2,428.7		
Total	6,004,203.0	2,475			

Table 13. Result of One-way ANOVA (Seoul TG~Keumho JC)

Source of Variation	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	F	P-value
Between Treatment	586.8	3	195.6	1.85	0.14
Error	28,267.9	268	105.5		
Total	28,854.7	271			

이는 통계적으로 LBM 방식의 집계단위별 경로통행시간이 각 방식별로 차이가 없는 것을 나타내며 PBM

방식이 최소표본수를 만족시키지 못해서 LBM 방식으로 경로통행시간을 산출하여야 할 시에 공간적 집계단위별로 생성한 LBM 방식의 집계단위별로 산출한 경로통행시간이 통계적으로 동일하므로 집계단위에 따라 큰 영향을 받지 않음을 의미한다. 즉, 매 시간마다 통행시간정보를 산출, 제공해야 하는 교통관리시스템에서 표본수 확보가 어려운 중·장거리 통행에 대해서는 시스템 처리시간, 부하 등을 고려하여 IC, JC 등 다양한 집계방식의 고려가 가능하다.

4. 결론 및 향후 연구과제

경로통행시간은 고속도로 이용자 측면에서 통행경로 선택 시 유용한 정보로서 시·종점을 통과한 차량의 통행시간을 기반으로 산정된다. 단거리 통행에서는 경로통행시간 산정을 위한 표본수의 확보가 용이하지만, 통행거리가 증가하는 중·장거리 통행은 집계시간 간격 내 대표성을 가지기 위한 표본수 확보가 어렵고 이에 따라 정보제공이 불가능한 결측시간대가 증가하게 된다. 이러한 점을 보완하고자 시·종점 사이의 경로를 세분화된 링크로 구분하고 링크별 통행시간을 동적합산하여 경로통행시간을 산정하는 방식이 대안으로 현재에도 사용되고 있다. 본 연구에서는 링크통행시간 동적합산방안에서 합리적인 공간적 집계기준에 대한 검토를 수행하였다.

공간적 집계기준에 대한 분석을 위해 현재 한국도로공사에 설치된 하이패스 교통정보시스템의 원시데이터를 활용해서 중·장거리 통행인 서울TG~대전IC, 서울TG~금호JC 구간에 대해 PBM, LBM 방식의 경로통행시간을 산정하였다. LBM 방식 경로통행시간 산정을 위하여 고속도로 주요노드들을 결합하여 RSE, Conzone, IC, JC 링크로 대안을 설정하였고, 각 LBM 방식과 PBM 방식에 대해서 표본수 만족여부, 결측률, 경로통행시간 등의 비교와 LBM 방식의 통계적 동질성 여부에 대한 분산분석을 실시하였다. 본 연구의 주요결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

첫째, 중·장거리 통행인 서울TG~대전IC, 서울TG~대구IC 구간의 공간적 집계단위에 따른 경로통행시간 분석 결과 가장 많은 집계횟수를 나타내는 RSE 링크가 가장 높은 오차를 나타내며, 공간적 집계단위가 클수록 오차는 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 공간적 집계단위가 증가할수록 개별 차량의 통행시간 분산이 증가하여 개별차량의 행태를 반영하고 실제 차량의

통행패턴과 유사해지는 반면에 공간적 집계간격이 줄어들수록 단위구간별 통행시간의 분산이 줄어들게 되므로 실제 차량의 통행패턴과 차이가 발생하게 되기 때문인 것으로 판단된다. 다만, 이러한 결과를 일반화하기 위해서는 다양한 통행조건에 대한 연구의 보완이 필요하다.

둘째, 참값으로 가정한 PBM 방식의 경로통행시간을 기준으로 LBM 방식의 집계단위별 경로통행시간의 오차를 비교한 결과 집계단위별 경로통행시간별 오차의 차이는 크게 나타나지 않았으며, LBM 집계방식별 차이에 대한 통계적 검정결과 집계방식별 차이는 없는 것으로 분석되었다. 이는 PBM Path 링크를 이용한 경로통행시간 산출 시 최소표본수를 만족시키지 못할 경우 현재 LBM 방식으로 보완하고 있는데, 경로통행시간 보완 시 시스템 처리시간, 부하 등을 고려하여 다양한 대안을 적용할 수 있다는 것을 의미한다.

셋째, 선행 연구결과를 보면 서울TG~안성IC 사이의 단거리 통행에서는 PBM 방식과 LBM 방식이 오차가 유사하게 나타난 반면 본 연구결과 중·장거리 통행에서는 PBM 방식과 LBM 방식의 경로통행시간이 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이는 통행거리 증가에 따라 개별차량의 통행시간 분산이 증가하기 때문이며 이러한 원인으로는 운전행태, 휴게소 이용차량의 휴게소 체류시간의 편차가 주된 이유로 판단된다. 또한, 통행시간의 변동추세에 대한 확인결과 LBM과 PBM 방식이 유사한 패턴으로 변동되는 특징을 확인할 수 있었다.

이와 같은 연구결과를 기반으로 할 때 이용자의 활용성이 높은 정보인 경로통행시간을 수집표본수에 따라 JC 단위, IC 단위, Conzone 단위, RSE 단위와 같이 단계적인 검토를 통해 경로통행시간을 추정할 수 있다. 또한 이러한 방법을 적용하면 시·종점이 동일하나 다수의 경로가 있을 경우에도 각 경로별 통행시간 추정이 가능하므로 경로별 통행시간 예측이나 우위경로 파악 등에도 활용될 수 있을 것이다. 그러나 본 연구 결과를 기반으로 보다 정확한 경로통행시간을 산출하기 위해서는 휴게소 체류시간을 보정할 수 있는 추정모형 개발을 통해 LBM, PBM 방식의 경로통행시간이 통계적으로 동일하다는 것을 확보할 필요가 있다. 휴게소 체류시간의 추정모형은 휴게소 체류시간에 대한 행태분석이 선행되어야 하며 행태분석결과를 토대로 통행거리, 소통상태에 따른 휴게소 체류시간 모형을 구축하여 LBM 방식으로 산출된 통행시간에 상황별 휴게소 체류시간을 가중하여 경로통행시간을 산출하는 연구가 뒤따라야 할 것이다.

References

- Chen, M., Chien, S. I., 2000. Determining the number of probe vehicles for freeway travel time estimation by microscopic simulation. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1719(1), 61-68.
- Chen, M., and S. I. J. Chien., 2001. Dynamic Freeway Travel-Time Prediction with Probe Vehicle Data: Link Based Versus Path Based, *Journal of the Transportation Research Board*, No. 1768, TRB, National Research Council, Washington, D. C., 2001, 157-161.
- Kim, J. J., 2006. An Optimal Design and Operation of the Section-related Data Collecting System for Travel Time Information Focusing on Uninterrupted Traffic Flow, Ph. D. Thesis, Hanyang University
(김재진, 2006. 통행시간 정보 제공을 위한 구간 데이터 수집체계의 최적설계 및 운영: 연속류를 중심으로, 한양대학교 박사학위 논문)
- Kim, N. J., Lee, S. J., Oh, S. C., Son, Y. T., 2011. A Study on Optimal Traffic Detection Systems by Introduction of Section Detection System, *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, Vol 10., No. 3., 47-63
(김낙주, 이승준, 오세창, 손영태, 2011. 구간검지체계 도입을 통한 교통검지체계 설치기준 연구, 한국ITS학회논문지, Vol. 10, No. 3, 47-63)
- Korea Expressway Research Institute, 2012. Development of a Traffic Information System using the Method of Automatic Vehicle Identification based on hi-pass System
(한국도로공사 도로교통연구원, 2012. 하이패스 교통정보시스템 확대운영방안 연구)
- Oliver D., Nour-Eddin E., 2006. Innovative Processing of Toll Collection Data, LICIT rep., No. 0604
- Park, D., Rilett, L. R., Gajewski, B. J., Spiegelman, C. H., Choi, C., 2009. Identifying optimal data aggregation interval sizes for link and corridor travel time estimation and forecasting, *Transportation*, Vol., 36 No., 1, 77-95.
- Srinivasan, K. K., Jovanis, P. P., 1996. Determination of number of probe vehicles required for reliable travel time measurement in urban network. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1537(1), 15-22.
- Shim, S. W., Choi, K. J., Lee, S. S., Namkoong, S., 2013. An Expressway Path Travel Time Estimation Using Hi-pass DSRC Off-Line Travel Data, *Journal of Korean Society of Transportation*, Vol 31., No. 3., 45-54
(심상우, 최기주, 이상수, 남궁성, 2013. 하이패스 DSRC 자료를 활용한 고속도로 오프라인 경로통행시간 추정기법개발, 대한교통학회지, Vol. 31, No. 3, 45-54)
- Wang, R., Nakamura, H., 2004. Expressway travel time estimation by using the combination of detector and probe vehicle data, *Proceeding of 11th ITS World Congress*, Nagoya, Japan
- Yu, S. Y., Noh, J. H., Park, D. J., 2004. Investigating Optimal

Aggregation Interval Size of Loop Detector Data for Travel Time Estimation and Prediction, Journal of Korean Society of Transportation, Vol 22., No. 6., 109-119

(유소영, 노정현, 박동주, 2004. 통행시간 추정 및 예측을 위한 루프검지기 자료의 최적 집계간격 결정, 대한교통학회지, Vol. 22, No. 6, 109-119)