

■ 論 文 ■

프로브 차량 기반 표본 OD의 전수화 기법

A Methodology for Expanding Sample OD Based on Probe Vehicle

백 승 걸

(한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원)

정 소 영

(한국도로공사 도로교통연구원 연구원)

김 현 명

(UC.Irvine, Ph.D)

최 기 주

(아주대학교 환경건설교통공학부 교수)

목 차

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> I. 서론 II. 기존문헌 검토 <ul style="list-style-type: none"> 1. 이용정보에 따른 OD 추정 연구 2. 링크 상의 표본조사자료를 이용한 OD 추정 연구 3. 전수화 기법 연구 III. 프로브 차량으로부터의 정적 표본OD 산정 <ul style="list-style-type: none"> 1. 프로브 차량 수집 정보 2. 프로브 차량 OD의 장·단점 3. 프로브 차량 실시간OD로부터 정적 | <ul style="list-style-type: none"> 표본OD 산정 IV. 표본OD의 전수화 알고리즘 개발 <ul style="list-style-type: none"> 1. 전수화의 필요성 2. 변수 설정 3. 전수화 알고리즘 V. 사례분석 <ul style="list-style-type: none"> 1. 입력 자료 2. 분석 결과 VI. 결론 참고문헌 |
|--|---|

Key Words : 표본OD, 전수화, 프로브 차량, 통행 기준점표, 표본링크이용비
 Sample OD, Expansion, Probe Car, trip OD matrix, sample link proportion

요 약

기준점자료(Origin-Destination 자료: 이하 OD)는 교통수요예측에 있어 필수적인 정보로서 이를 실제조사하거나 또는 추정하기 위하여 수많은 기법들이 활용되었다. 기존의 OD 추정기법은 일정한 가구 표본을 추출하여 이를 전수화하는 것이 일반적이었으나, 정확도의 문제점을 내포하고 있었다. 이를 보완하기 위하여 링크 교통량, 표본링크이용비 등의 추가 정보를 활용하여 OD를 추정하는 연구들이 지속적으로 이루어지고 있다. 본 연구는 프로브 차량자료에서 수집된 정보를 추가 정보로 활용하여 OD를 추정하는 연구로 시·공간적으로 변동하는 정적 표본을 찾아내는 것을 목표로 한다. 본 연구에서는 각 링크의 교통량 오차율을 목적함수로 설정하였으며, 가상 네트워크에 대한 사례분석 결과 전수화된 OD와 실제OD 간의 MAE는 약 5.28%로 나타났다. 유비쿼터스 환경 하에서 획득된 다양한 실시간 정보는 본 연구에서 제시된 방법에 의해 활용될 수 있을 것으로 판단되며, 이와 관련한 연구의 한계와 향후 과제를 제시하였다.

As a fundamental input to the travel demand forecasting, OD has been always a concern in obtaining the accurate link traffic volume. Numerous methods were applied thus far without a complete success. Some existing OD estimation techniques generally extract regular samples and expand those sample into population. These methods, however, leaves some to be desired in terms of accuracy. To complement such problems, research on estimating OD using additional information such as link traffic volume as well as sample link use rate have been accomplished. In this paper, a new approach for estimating static origin-destination (OD) using probe vehicle has been proposed. More specifically, this paper tried to search an effective sample rate which varies over time and space. In a sample test network study, the traffic volume error rate of each link was set as objective function in solving the problem. As a key result the MAE (mean absolute error) between expanded OD and actual OD was identified as about 5.28%. The developed methodology could be applied with similar cases. Some limitations and future research agenda have also been discussed.

I. 서론

OD는 통행의 출발지 및 목적지에 대한 정보로서 이는 경로 선택 및 통행배분 등 교통계획 측면에서 필수적인 교통정보이다. OD 수요 추정을 위하여 수많은 접근법들이 제시되었으며, 최근 경로 안내 시스템이나 교통관리시스템 등 교통운영 및 평가를 위한 수요예측의 중요성이 높아짐에 따라 정적OD 예측에서 동적OD 예측으로의 전환이 요구되고 있다.

OD는 일반적으로 행정동을 기반으로 추정되며, 해당 지역에서 표본을 추출하여 표본OD를 작성한 후 이를 전수화하는 것이 일반적이었다. 그러나 전통적인 OD 추정 기법은 비용, 노동력, 시간이 많이 소요되며, 표본의 오차, 전수화 과정에서의 오차 등을 내포한다.

이러한 문제점들을 보완하기 위하여 링크교통량으로부터 통행과정을 역으로 거슬러 OD를 추정하는 기법들이 지속적으로 연구되고 있다. 링크교통량으로부터 OD를 추정하는 방법은 직접 관측이 불가능한 OD 자료와 관측된 링크교통량과의 인과관계를 설정하여 링크교통량으로부터 OD를 추정하는 것으로 목적통행별로 구분하지 않아도 되며, 교통량 자동 수집기술을 이용하여 용이하게 구할 수 있다는 장점을 지닌다. 그러나 초기 해에 영향을 많이 받으며, 유일 해를 선정하기가 어려워 기존 OD 등 추가정보를 요구한다.

일반적으로 대규모 가구방문조사를 통해 구축되는 기존OD는 조사 오차나 사회·경제적 변화로 인하여 신뢰도가 저하되는 경우가 많다. 따라서 해의 정확도를 높이기 위해서는 비용이 비교적 소요되더라도 링크교통량과 기존 OD외에 추가정보를 확보할 필요가 있다. 이러한 추가정보는 가능해의 범위를 좁혀 추정OD의 정확도를 증진시킬 수 있다.

최근에는 산업 전 분야에서 유비쿼터스 환경 구축을 위한 다양한 시도가 이루어지고 있으며, 특히 교통·물류 분야에서는 교통정보 수집체계 및 이를 응용한 서비스 개발의 필요성이 매년 증가하고 있다. 프로브 차량과 무선통신기술을 ITS에 접목한 교통정보 수집체계는 그 대표적인 사례이다. 프로브 차량을 통해 실시간 데이터 수집이 가능하므로 교통관리, 교통정보 제공 등에 활용될 수 있으며, 리더기를 통해 수집되는 프로브 차량 정보를 이용하여 차량의 기·종점 확인이 가능하므로 시간대별 정적OD를 산정할 수 있다.

프로브 차량을 이용한 OD 추정 기법은 리더기를 통해 수집되는 프로브 차량의 경로 정보를 추가정보로 활용하여 차량 기종점을 파악하는 기법으로 시간대별 OD 확보가 가능하다. 또한 통행배분 map을 이용하지 않아도 되며, 실시간 자료를 활용할 수 있으므로 교통관리, 교통정보 제공 목적뿐만 아니라 실시간OD를 시간대별 OD로 전환하여 기존OD 조사를 보완, 강화할 수 있게 된다. 이에 반해 통행 목적을 파악하기 어려우며, 사회경제지표를 이용한 장래 통행수요 예측이 어렵다는 단점도 지닌다.

전통적 OD 추정기법들은 일정한 표본율로 교통존별 표본조사를 수행한 후 가구 수, 차량보유대수와 같은 사회·경제적 지표를 기반으로 전수화하는 것이 일반적이었다. 그러나 프로브 차량을 통해 수집된 정보는 교통존이 아닌 네트워크를 기반으로 하여 수집되는 정보이므로 각 기종점별로 일정 표본율을 유지하기 어려우며, 자료 수집시간에 따라 표본율이 변동하기 때문에 시간적·공간적인 전수화가 필요하다.

본 연구는 프로브 차량을 통해 수집되는 실시간 동적 데이터를 기반으로 산정된 표본OD를 전수화하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 전수화된 링크교통량과 관측 링크교통량을 비교하여 오차를 검토하였다. 본 연구는 기존 문헌 검토, 프로브 차량정보를 활용한 정적 표본 OD 산정, 표본OD 전수화 알고리즘 개발, 사례 분석을 통한 알고리즘 검증으로 이루어지며, 실제 데이터를 통한 전수화 알고리즘의 수정 및 보완을 향후 연구로 제시하였다.

II. 기존문헌 검토

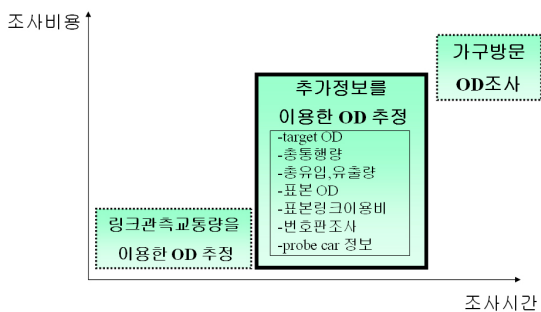
1. 이용정보에 따른 OD 추정 연구

OD 추정 문제는 본질적으로 자료수집 비용과 도출 결과의 정확성 간에 상충(trade-off) 관계를 갖는다(Kuwahara 등, 1987). 가구방문조사와 링크관측교통량 자료만을 이용하는 기법은 이러한 상충관계의 극단적인 두 예이다.

관측교통량만을 이용한 OD 추정은 과소설정문제에 의해 유일한 해를 선정하기가 어렵다. 또한 관측교통량은 상이한 관측시간으로 인한 변동(variation)과 관측오차가 존재한다. 일반적으로 가구방문조사를 통해 구축하는 기존OD는 대규모 조사대상지역, 낮은 표본율, 조사 및

응답의 부정확성 등으로 오차나 신뢰도의 범위가 상대적으로 크다. 또한 기존OD는 대부분 정기적인 대규모 조사를 통해 구하는 것으로, 해당지역의 사회경제적 변수가 안정적이지 못한 곳에서는 신뢰성이 낮다. 따라서 추정해의 정확도를 높이기 위해서는 비용이 다소 소요되더라도 관측교통량과 기존 OD 외에 “추가정보(additional information or data)”를 확보하여 OD를 추정하는 것이 필요하다. 이 경우 해의 정확도 증가정도와 조사비용의 증가수준이 추가로 정보를 확보하여야 하는지의 판단기준이 될 수 있다.

OD 통행 추정에 이용된 추가정보는 Tamin 등(1989)의 존별 사회경제적 변수, Cascetta 등(1984)의 표본OD, Carey 등(1981)과 Spiess (1987)의 존별 유입·유출량, Kuwahara 등(1987)의 도로변 면접조사자료, Landau 등(1982)의 코든라인 조사자료 등이 있다. Watling(1994)은 차량번호판 조사를 통해 기종점을 파악하였으며, 김시곤 등(2005)은 휴대폰 기지국 정보를 이용하여 OD를 추정하였다.



(그림 1) 이용정보에 따른 OD 추정기법 구분

2. 링크 상의 표본조사자료를 이용한 OD 추정 연구

링크 상에서의 표본조사기법에는 도로변 면접조사(road-side interview)와 코든라인조사(cordonline survey)가 있다. 이는 대상지역의 특정지점들(일반적으로 “screenline” 또는 “cordonline”에 위치)에서 운전자 면접조사를 통해 일부 링크의 링크이용비 행렬, 즉 표본링크이용비를 구하는 것이다.

Landau 등(1982)은 코든라인조사에 의해 구한 관측교통량과 코든라인을 통과하는 표본OD를 이용한 최우추정법에 의해 전체OD를 추정하였다.

Kuwahara 등(1987)은 도로변의 특정지점에서 OD 조사와 교통량관측으로 수집된 자료들을 결합하여 분석

지역 전체에 대한 OD를 추정하는 기법을 제시하였다.

Lo 등(1996, 1999)은 확률적 링크선택비와 OD 통행량 정보, 관측교통량을 결합하여 OD 추정을 하는 통계적 기법(최우추정법, 베이저안 추론기법)을 제안하였다. Lo 등(1996, 1999)이 언급한 표본OD와 링크선택비는 실제로는 거의 확보가 불가능한 대상지역 전체에 대한 자료이다.

Hyodo 등(2001)은 각 링크에서의 설문조사자료와 관측교통량의 차이를 최소화하는 최소자승법을 제시하였는데, OD 통행량 표본오차와 링크교통량 관측오차를 고려하지 않아 안정적인 모형추정력을 보인다고 하기 어렵다. 표본조사자료를 이용한 OD 추정 연구들은 백승걸 등(2002)에 자세히 기술되어 있다.

3. 전수화 기법 연구

한국교통연구원(2007)은 2005년 지역간 기종점통행량 조사를 수행하였으며, 이를 전수화하여 전국 167개 교통존 간 기종점통행량 자료를 구축하였다. 이 연구에서는 전국 지역간 승용차 여객 기종점통행량을 전수화하는 방법을 중점적으로 검토하였다. 승용차의 경우 지점별 노측면접조사자료와 지역간 교통통계자료를 활용하여 모집단 대비 5%의 표본OD를 구축하였으며, 통과교통량이 배제된 교통존별 발생량/도착량을 이용하여 전수화하였다. 전수화된 결과는 screen line에 따라 보정하되, 링크의 배분량과 관측량을 비교하여 오차율이 극단적인 경우는 select link analysis를 수행하여 OD를 보정하였다. 그러나 이와 같은 전통적인 기법은 전수조사가 어렵기 때문에 누락조사지점으로 인한 전수화 오차 보정이 필요하다.

이신해(2004)는 전수화지표와 전수화계수를 활용하여 기종점통행량을 구축하였다. 전수화지표는 표본자료로 모집단을 추정할 때 기준으로 사용하는 변수를 의미하는 것으로, 개인특성 및 통행특성에 대한 모집단이 미흡한 이유로 통계청의 인구·주택 총조사 자료를 모집단으로 활용한 가구특성 변수를 전수화지표로 사용하였다. 전수화계수는 가구·가구원·통행 전수화계수로 분류할 수 있으며, 2차원 분할표, 목표년도 인구 등을 이용하여 산정한다. 특히 통행특성을 반영하는 통행 전수화계수의 경우 과소응답 보완조사, 통행목적별·수단별로 보정계수를 산출하여 보정한다.

김시곤 등(2005)은 3주간의 택시 통행분포를 이용하여 OD를 산출하고 전수화하였다. 전수화는 표본 추출에 의한 결과로부터 모표본을 구하는 방식과 동일하게 산정하였으며, 택시 1대당 평균 운행횟수에 총 운행차량대수를 곱하여 전수화하였다.

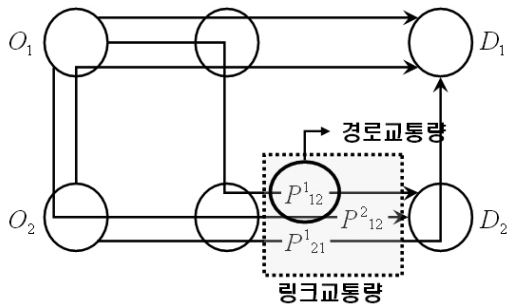
III. 프로브 차량으로부터의 정적 표본OD 산정

1. 프로브 차량 수집 정보

교통정보를 수집하는 수단은 검지기(루프, 영상, 초음파 검지기 등), AVI, CCTV, GPS, 프로브 차량정보 등 여러 가지가 있으며, 수집수단에 따라 구축 목적, 수집 정보 등이 차이가 생긴다. 검지기를 통한 교통정보는 교통량, 점유율, 속도 등과 같은 지점정보로 그 지점에 대한 소통 정보(속도, 교통량)를 수집할 수 있으며, 신호기에 설치하는 경우 신호제어 및 운영도 가능하다. AVI는 통행시간 산정 등 구간정보를 수집하기 위한 장비로서 교차로 간 신호연동이 가능하며, 구간 소통 상태를 파악할 수 있다.

본 연구에서 활용하는 프로브 차량정보는 GPS와 같이 통행경로 등의 네트워크 정보를 수집하며, 이를 기반으로 하여 링크교통량, 경로별 통행시간, 통행 기종점 산정 등이 가능하다.

〈그림 2〉는 링크 상에서 도출 가능한 정보들을 나타내는 사례네트워크로, O_1, O_2 는 기점, D_1, D_2 는 종점을 나타낸다. P_{12}^1, P_{12}^2 는 기점 O_1 에서 출발하여 종점 D_2



| | | 기종점 | 경로 | 통행시간 |
|-----------|------------|-----|----|------|
| OD 통행량 | P_{12}^1 | 1→2 | 1 | |
| | P_{12}^2 | | 2 | |
| | P_{21}^1 | 2→1 | 1 | |

〈그림 2〉 링크에서 도출 가능한 정보(예)

로 가는 통행의 경로 1,2의 통행량이며, P_{21}^1 은 기점 O_2 에서 출발하여 종점 D_1 로 가는 통행의 경로 1의 통행량을 나타낸다. 여기서 P_{12}^1, P_{12}^2 은 OD 쌍 $O_1 D_2$ 간의 링크이용 OD 통행량이며, $P_{12}^1, P_{12}^2, P_{21}^1$ 은 모두 합하여 링크교통량을 나타낸다. 따라서 링크 상에서 도출 가능한 정보들은 링크교통량, 링크이용 OD 통행량(표본링크이용교통량), 경로교통량 순으로 세부적인 정보가 된다.

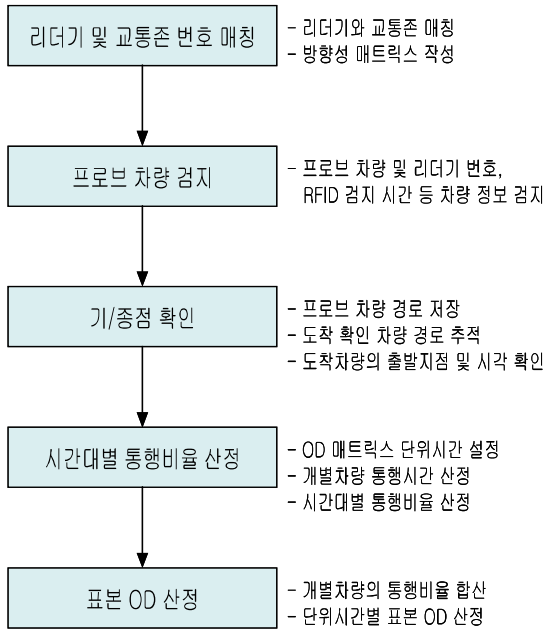
2. 프로브 차량 OD의 장·단점

프로브 차량을 이용한 OD 추정기법은 특정 시간 동안 네트워크 내 여러 지점에서 차량 번호판을 조사하여 동일 번호를 가지는 차량을 매칭시켜 해당 시간대 동안의 통행 기종점을 파악하는 기법으로 차량의 경로 확보가 가능하므로 차량 추적이 가능하며, 시간대별 대규모 실시간OD 확보가 가능하다는 장점을 지닌다. 또 실시간 OD 행렬의 수집·가공을 통해 OD를 산정하므로 통행 배분 map을 이용하지 않아도 되며, 실시간 자료를 확보할 수 있으므로 교통관리, 교통정보 제공 목적뿐만 아니라 기존OD의 보완 및 강화도 가능하다. 반면 차량 기반의 자료이므로 통행목적 파악이 어려우며, 통행발생이 포함되지 않아 사회·경제지표를 이용한 장래 통행 수요 예측이 어렵다는 단점도 지닌다. 또 기종점 쌍 간 출발, 도착 통행을 정의하는 과정에서 오차가 발생할 가능성이 있으며, 미관측 오차, 프로브 차량의 표본 오차, 전수화 오차 등 많은 오차 발생 가능성도 지니고 있다. 구축비용이 소요되며, 리더기가 설치된 권역에서만 기종점 추정이 가능하다는 점도 고려해야 한다.

3. 프로브 차량 실시간 OD로부터 정적 표본OD 산정

프로브 차량정보로부터 표본 OD를 산정하는 과정은 〈그림 3〉과 같이 5단계로 구성되며, 백승걸 등(2007)에 자세하게 기술되어 있다.

1단계는 리더기와 교통존의 번호를 일치시키고, 방향성 매트릭스를 작성하는 단계로 본 연구에서는 도로 네트워크를 경계로 하는 블록 단위의 교통존을 설정하였으며, 표본OD의 기종점 데이터를 수집하기 위하여 방향성 매트릭스를 작성하였다. 2단계는 프로브 차량 및 리더기 번호, 검지시간을 기록하는 과정으로 통행을 순차적으로 기록하다가 차량이 일정시간 미관측되거나, 관측구역 외



〈그림 3〉 표본OD 산정 과정

부로 나가는 경우 통행을 종료하고, 경로를 추적하여 기 중점을 확인한다(3단계).

산정된 OD는 통행시간에 따라 시간대별로 달라지는 통행 특성을 반영할 수 있도록 단위시간을 정의하여 이에 맞추어 통행시간을 배분하였다. 단위시간별로 배분된 통행시간은 전체 통행시간에 대한 비율을 산정하여 표본 OD에 적용하였으며(4단계), 개별차량별 통행비율을 합산하여 최종적으로 표본OD를 산정하게 된다.

IV. 표본OD의 전수화 알고리즘 개발

1. 전수화의 필요성

〈그림 4〉는 전통적인 OD 조사기법에 의해 확보되는 OD 행렬을 나타낸 것으로 교통존별 일정 표본율로 표본조사를 수행한 후 가구 수, 차량보유대수 등과 같은 사회·경제적 지표를 이용하여 전수화하는 것이 일반적이다.

전수화 자료의 신뢰성을 높이기 위해서는 전수화의 기초자료가 되는 교통조사자료가 모집단의 통행특성을 반영할 수 있도록 정확하게 작성되어야 하나, 조사자료상의 누락정보, 비응답자료 등에 의한 오차가 발생하게 된다. 표본OD 조사(sample OD survey)를 통하여 이러한 문제점을 어느 정도 보완할 수 있으나 표본율을 일

| | | | | | | |
|---|---|---|---|-----|---|--|
| | D | | | | | |
| 0 | | 1 | 2 | ... | j | |
| 1 | | | | | | |
| 2 | | | | | | |
| : | | | | | | |
| i | | | | | | |

〈그림 4〉 전통적인 OD 조사기법

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|----|
| | D | | | | | | |
| 0 | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 합계 |
| 1 | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | |

〈그림 5〉 표본링크이용비로부터의 OD 추정(예)

정 수준 이상으로 하는 경우 조사비용과 시간이 전통적인 기법만큼 소요되며, 표본율이 낮을 경우에는 추가정보로서의 신뢰성이 크게 저하된다는 문제를 가지고 있다. 따라서 대상지역 전체에 대한 표본OD를 추가정보로 이용하는 것은 현실적으로 적합하지 않다.

그 외에도 링크 상에서 도출 가능한 정보들을 추가정보로 활용하여 자료의 오차를 보완하는 방법이 있다. 링크 상에서의 표본OD 조사는 부분적인 링크이용비만 도출하기 때문에 대상지역 전체에 대한 표본OD 조사와는 구별된다.

〈그림 5〉는 표본링크이용비를 이용한 OD 추정기법의 이용정보유형을 예로서 비교한 것으로 행은 OD 쌍, 열은 링크를 나타낸다. 각 셀은 OD 통행량이 관측링크를 통행하는 비율을 나타내며, 행의 합은 각 OD 쌍의 통행량, 열의 합은 각 링크의 관측교통량을 나타낸다. 이론적으로 모든 링크에서 모든 OD 통행량을 조사한다면 OD 통행량을 직접 구할 수 있으나 현실적으로는 〈그림 5〉와 같이 일부 링크에 대해서만 관측교통량과 링크이용비를 산정할 수 있으며, 조사링크의 OD 통행량도 전체 OD 통행량 중 일부 OD 통행량을 나타낸다. 〈그림 5〉에서 음영부분은 교통량 관측 또는 표본링크이용비 조사가 이루어진 곳을 나타낸다. 〈그림 5〉는 총 6개의 링크 중 4개 링크(2번, 3번, 4번, 6번 링크)에서 교통량이 관측되

| | | | | |
|-------|---|---|----|---|
| 0 \ D | 1 | 2 | .. | j |
| 1 | | ■ | ■ | |
| 2 | | | ■ | ■ |
| : | ■ | ■ | | |
| i | ■ | | ■ | |

〈그림 6〉 프로브 차량을 이용한 표본OD 표본율

고 2개 링크(2번, 5번 링크)에서 표본링크이용비가 조사된 사례를 나타낸 것이다.

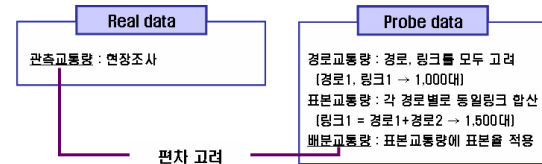
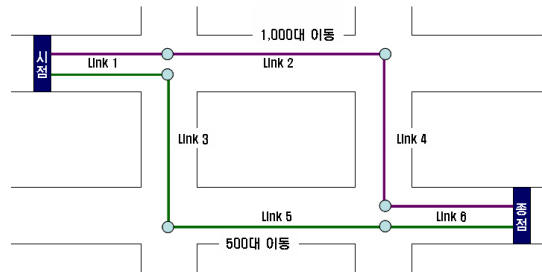
본 연구에서는 프로브 차량의 경로 정보를 추가정보로 활용하여 표본OD를 산정하였다. 이는 〈그림 5〉와 같이 일부 링크가 아닌 모든 링크에 대해 OD와 표본링크이용비가 조사되는 대신 태그를 부착한 일부 차량에 대한 데이터라는 한계가 있다. 그러므로 전통적인 조사기법과는 다르게 각 기종점별로 일정 표본율을 산정하기 어려우며 (〈그림 6〉 참조), 표본 데이터가 누락되는 기종점도 발생하게 된다. 또 리더기가 미설치된 구간이나 설치지역 외부로 프로브 차량이 통행하는 경우 표본이 확보되기 어려우며, 시간대에 따라 표본율이 변화하게 된다.

이러한 문제점을 해결하기 위해서는 일부 차량에 대해 수집된 정보를 전체 차량으로 전수화하는 과정이 필요하다. 전수화 과정은 시간대별로, 기종점별로 변화하는 표본율을 산정할 수 있어야 하며, 장기간의 데이터 축적을 통하여 누락되는 데이터가 발생하지 않도록 해야 한다. 미설치 구간에 대한 OD를 산정하기 위하여 리더기가 설치된 링크를 경계로 하는 블록 단위의 교통존을 설정하고, 설치지역 외부는 외부 교통존으로 산정하였다.

본 연구는 시간대별 기종점별 적정 표본율을 산정하는 알고리즘 개발을 목적으로 하며, 프로브 차량의 경로 정보를 기반으로 배분된 링크교통량과 관측교통량의 오차를 일정 범위 내에 수렴하게 함으로써 전수화 알고리즘의 신뢰성을 확보하였다.

2. 변수 설정

링크의 적정 표본율은 관측교통량과 배분교통량의 편차를 최소화할 수 있어야 한다. 관측교통량은 현장조사를 통한 조사교통량을 의미하며, 배분교통량은 표본교통량에



〈그림 7〉 변수 설정(예)

각 링크별 표본율을 적용하여 산정한다(〈그림 7〉 참조).

본 연구는 기종점별 적정 표본율을 산정하는 것을 목적으로 하므로 기종점별 표본율을 독립변수로 설정하고, 표본율에 따라서 변화하는 배분교통량과 관측교통량의 편차를 관측교통량으로 나눈 오차율을 링크별로 합산한 값을 종속변수로 설정하였다. 편차는 관측교통량과 배분교통량의 차를 나타내므로 합산할 때 서로 상쇄될 우려가 있어 제곱오차를 사용하였으며, 이를 고려한 목적함수는 식(1)과 같다.

$$L(\rho^{ij}) = \sum_a \left[\frac{x_a - \bar{x}_a}{x_a} \right]^2 \tag{1}$$

여기서, $L(\rho^{ij})$: ρ^{ij} 에 대한 오차율의 총합

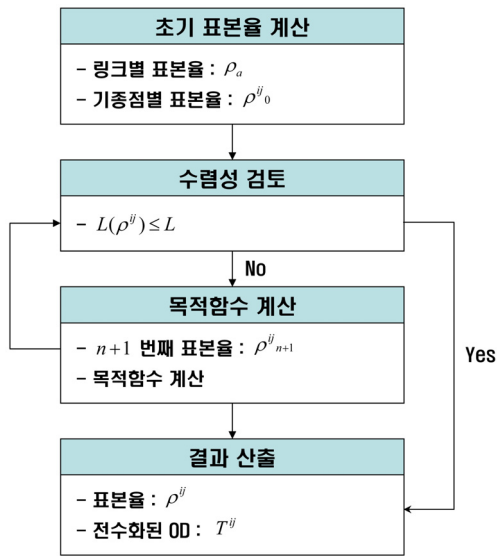
ρ^{ij} : 기종점 ij 간 표본율

x_a : 링크 a 의 배분교통량

\bar{x}_a : 링크 a 의 관측교통량

3. 전수화 알고리즘

전수화 알고리즘은 〈그림 8〉과 같이 4단계(초기 표본율 계산, 수렴성 검토, 목적함수 계산, 결과 산출)로 구성된다. 먼저 표본교통량과 관측교통량을 비교하여 각 링크별 표본율을 산정한 후 이를 기종점별 표본율로 변환한다(1단계). 산정된 기종점별 표본율은 전수화된 OD를 계산할 때 사용된다. 알고리즘은 상수로 지정되는 목표값에 도달할



〈그림 8〉 전수화 알고리즘

때까지 반복되며, 목적함수인 관측교통량과 배분교통량의 오차율은 Newton-Raphson method를 통해 조정된다.

1) 초기 표본을 계산

본 연구에서는 기존OD가 존재하지 않기 때문에 관측 교통량과 배분교통량의 비교를 통해서만 표본을 산정이 가능하다. 그러나 OD는 기종점별로 작성되므로 링크와 기종점에 대한 정보를 모두 포함하고 있는 표본링크이용비를 이용하여 기종점별 표본율로 전환하였다.

(1) 링크별 표본율 ρ_a 계산

$$\rho_a = \frac{\hat{x}_a}{\bar{x}_a} = \frac{\sum_{ij} t^{ij} \cdot R_a^{ij}}{x_a} \quad (2)$$

여기서, ρ_a : 링크 a 의 표본율
 \hat{x}_a : 링크 a 의 표분교통량
 \bar{x}_a : 링크 a 의 관측교통량
 t^{ij} : 표본OD
 R_a^{ij} : ij 통행량의 링크 a 이용비

(2) 기종점별 표본율 ρ_0^{ij} 계산

기종점별 표본율 ρ_0^{ij} 는 표본링크이용비를 가중치로 이

용하여 식(3)과 같이 가중평균으로 산정하였다.

$$\rho_0^{ij} = \frac{\sum_a \rho_a \times R_a^{ij}}{\sum_a R_a^{ij}} = \frac{\rho_1 \times R_1^{ij} + \rho_2 \times R_2^{ij} + \dots}{R_1^{ij} + R_2^{ij} + \dots} \quad (3)$$

2) 수렴성 검토

목적함수인 오차율을 산정하여 일정 범위 내에 수렴하는지 여부를 검토하였다. 수렴하지 않는 경우 $n+1$ 번째 표본율을 산정하여 편차를 조정하며, 수렴하는 경우 적정 표본율 및 전수화된 OD를 산정하게 된다.

$$L(\rho^{ij}) = \sum_a \left[\frac{x_a - \bar{x}_a}{x_a} \right]^2 \leq L \quad (4)$$

여기서, $L(\rho^{ij})$: ρ^{ij} 에 따른 오차율의 총합

ρ^{ij} : 기종점 ij 간 표본율

x_a : 링크 a 의 배분교통량

$$\left(= \sum_{ij} \frac{t^{ij} \cdot R_a^{ij}}{\rho_0^{ij}} \right)$$

\bar{x}_a : 링크 a 의 관측교통량

t^{ij} : 표본OD

R_a^{ij} : ij 통행량의 링크 a 이용비

수렴성을 검토하는 식(4)의 상수 L 은 네트워크의 크기, 기종점 수, 통행량 등을 고려하여 임의로 설정할 수 있다.

3) 편차 조정

목적함수가 일정 범위 내에 수렴하지 못하는 경우 Newton-Raphson method에 따라 ρ_{n+1}^{ij} 을 산정한다.

$$\rho_{n+1}^{ij} = \rho_n^{ij} - \frac{L(\rho_n^{ij})}{L'(\rho_n^{ij})} \quad (5)$$

여기서, ρ_{n+1}^{ij} : $n+1$ 번째 표본율

ρ_n^{ij} : n 번째 표본율

$L(\rho_n^{ij})$: n 번째 오차율

목적함수인 $L(\rho^{ij})$ 의 편미분은 식(6)과 같다.

$$L'(\rho^{ij}) = 2 \sum_a \left[\frac{x_a - \bar{x}_a}{x_a} \right] \times x_a' \quad (6)$$

여기서, $L'(\rho^{ij})$: $L(\rho^{ij})$ 의 편미분

$$x_a' : x_a \text{의 편미분} \left(= - \sum_{ij} \frac{t^{ij} \times R_a^{ij}}{(\rho^{ij})^2} \right)$$

식(5)과 식(6)에 의해서 $n+1$ 번째 표본율은 식(7)과 같이 산정된다.

$$\rho_{n+1}^{ij} = \rho_n^{ij} - \frac{\sum_a \left[\frac{x_a - \bar{x}_a}{x_a} \right]^2}{2 \sum_a \left[\frac{x_a - \bar{x}_a}{x_a} \right] \times x_a'} \quad (7)$$

4) 결과 산출

목적함수가 일정 범위 내에 수렴하게 되면 ρ^{ij} 에 따라 전수화된 OD를 산정하게 된다.

$$T^{ij} = \frac{t^{ij}}{\rho^{ij}} \quad (8)$$

여기서, T^{ij} : 전수화된 OD

t^{ij} : 표본OD

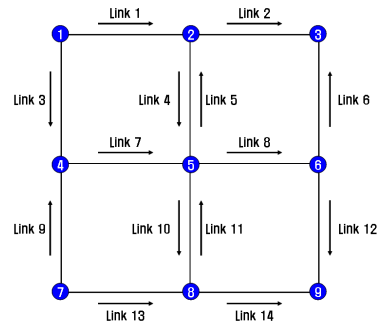
ρ^{ij} : 기종점 ij 간 표본율

V. 사례분석

1. 입력 자료

본 연구에서 제시한 전수화 알고리즘을 검증하기 위한 <그림 9>와 같은 가상 네트워크를 가정하여 사례분석을 수행하였다. 네트워크는 총 9개의 노드로 구성되며, 3개의 시점(1번, 5번, 7번)과 3개의 종점(3번, 5번, 9번)을 지닌다.

프르브 차량 정보는 태그를 부착한 일부 차량에 대해서만 수집되며 실제 OD가 없는 경우가 일반적이나, 본 연구에서는 알고리즘의 이상 여부를 검토하기 위하여 실제OD를 가정하였다. 표본OD는 표본율 3%에 20%의 random 변수를 적용하여 생성하였으며, <표 1>에 실제 OD, 표본율, 표본OD를 제시하였다.



<그림 9> 사례분석 네트워크

<표 1> 실제OD, 표본율, 표본OD

| | | | | |
|------|--------|--------|---------|---------|
| 기종점 | 1-3 | 1-5 | 1-9 | 5-3 |
| 실제OD | 37,759 | 51,615 | 73,893 | 100,148 |
| 표본율 | 3.13% | 2.85% | 3.08% | 3.06% |
| 표본OD | 1,183 | 1,472 | 2,278 | 3,060 |
| 기종점 | 5-9 | 7-3 | 7-5 | 7-9 |
| 실제OD | 70,259 | 41,271 | 109,298 | 54,443 |
| 표본율 | 2.86% | 3.03% | 2.82% | 3.10% |
| 표본OD | 2,006 | 1,250 | 3,091 | 1,687 |

<표 2> 표본링크이용비

| | | | | |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|
| 기종점 링크번호 \ 기종점 링크번호 | 1-3 | 1-5 | 1-9 | 5-3 |
| 1 | 1.000 | 0.299 | 0.299 | 0.000 |
| 2 | 0.947 | 0.000 | 0.000 | 0.706 |
| 3 | 0.000 | 0.701 | 0.701 | 0.000 |
| 4 | 0.053 | 0.299 | 0.299 | 0.000 |
| 5 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.706 |
| 6 | 0.053 | 0.000 | 0.000 | 0.294 |
| 7 | 0.000 | 0.701 | 0.701 | 0.000 |
| 8 | 0.053 | 0.000 | 0.642 | 0.294 |
| 9 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 10 | 0.000 | 0.000 | 0.358 | 0.000 |
| 11 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 12 | 0.000 | 0.000 | 0.642 | 0.000 |
| 13 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 14 | 0.000 | 0.000 | 0.358 | 0.000 |
| 기종점 링크번호 \ 기종점 링크번호 | 5-9 | 7-3 | 7-5 | 7-9 |
| 1 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 2 | 0.000 | 0.706 | 0.000 | 0.000 |
| 3 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 4 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 5 | 0.000 | 0.706 | 0.000 | 0.000 |
| 6 | 0.000 | 0.294 | 0.000 | 0.000 |
| 7 | 0.000 | 0.776 | 0.776 | 0.000 |
| 8 | 0.642 | 0.294 | 0.000 | 0.000 |
| 9 | 0.000 | 0.776 | 0.776 | 0.000 |
| 10 | 0.358 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 11 | 0.000 | 0.224 | 0.224 | 0.000 |
| 12 | 0.642 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 13 | 0.000 | 0.224 | 0.224 | 1.000 |
| 14 | 0.358 | 0.000 | 0.000 | 1.000 |

〈표 3〉 관측교통량

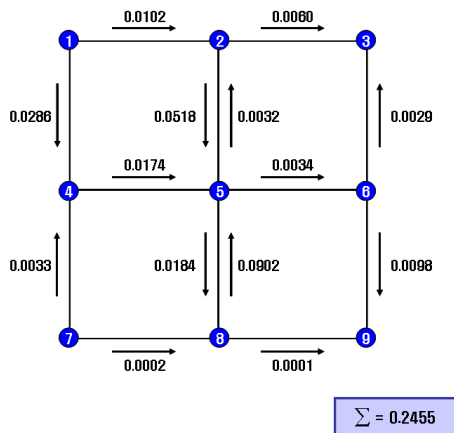
| 링크 번호 | 교통량 | 링크 번호 | 교통량 |
|-------|---------|-------|---------|
| 1 | 89,591 | 8 | 130,881 |
| 2 | 131,882 | 9 | 106,923 |
| 3 | 75,199 | 10 | 60,694 |
| 4 | 51,505 | 11 | 46,660 |
| 5 | 95,897 | 12 | 85,584 |
| 6 | 47,012 | 13 | 96,965 |
| 7 | 177,563 | 14 | 115,484 |

〈표 2〉는 표본OD를 이용하여 산정한 표본링크이용비로 경로 기반의 유전알고리즘을 이용하여 다양한 경로 선택비의 조합 최적화를 수행하였다. 본 연구에서 이용한 표본링크이용비로부터의 OD 추정에 대한 알고리즘은 백승걸(2002)에 상세히 기술되어 있다.

관측교통량은 실제OD를 사례네트워크에 통행배분한 후 2%의 random 변수를 적용하여 산정하였다.

2. 분석 결과

본 연구에서는 관측교통량과 배분교통량이 약 15%의 오차를 가진다고 가정하고, 14개의 링크에서 생길 수 있는 제곱오차를 모두 합산하여 $L = 0.315$ 로 가정하였다. 또 전수화 알고리즘은 목적함수인 $L(p^{ij})$ 가 L 에 수렴하는 경우 종료하게 되어 있으므로 알고리즘이 조기에 종료되는 것을 방지하기 위하여 알고리즘 반복횟수를 100회로 가정하여 반복횟수 이내에서 목적함수를 최소로 하는 표본을 p^{ij} 를 산정할 수 있도록 하였다. 목표함수인 $L(p^{ij})$ 는 0.2455로 나타났으며(〈그림 10〉 참조),



〈그림 10〉 표본을 분석 결과

〈표 4〉 전수화 결과

| 기종점 | 1-3 | 1-5 | 1-9 | 5-3 |
|--------|--------|--------|---------|---------|
| 표본OD | 1,183 | 1,472 | 2,278 | 3,060 |
| 표본율 | 2.75% | 3.04% | 2.96% | 3.01% |
| 전수화된OD | 43,048 | 48,466 | 76,949 | 101,715 |
| 기종점 | 5-9 | 7-3 | 7-5 | 7-9 |
| 표본OD | 2,006 | 1,250 | 3,091 | 1,687 |
| 표본율 | 2.88% | 2.99% | 2.97% | 2.67% |
| 전수화된OD | 69,563 | 41,793 | 103,955 | 63,288 |

분석 결과는 〈표 4〉와 같다.

전수화된 OD와 실제OD 간의 차이를 비교하기 위하여 식(9)의 Relative Mean Absolute Error (MAE) 기법을 사용하였다.

$$MAE(\%) = \frac{\sum_{ij \in IJ} |T^{ij} - T^{ij,real}|}{\sum_{ij \in IJ} T^{ij,real}} \times 100 \quad (9)$$

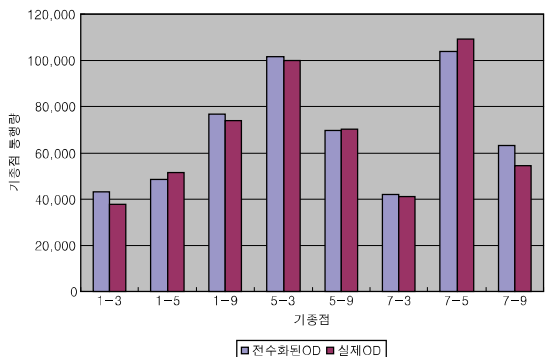
여기서, T^{ij} : 전수화된 OD

$T^{ij,real}$: 실제 OD

〈표 5〉와 〈그림 11〉은 전수화된 OD와 실제OD 간의 차이를 비교한 것으로 MAE는 5.28%로 나타났다.

〈표 5〉 전수화된 OD와 실제OD 비교

| 기종점 | 1-3 | 1-5 | 1-9 | 5-3 |
|--------|--------|--------|---------|---------|
| 전수화된OD | 43,048 | 48,466 | 76,949 | 101,715 |
| 실제OD | 37,759 | 51,615 | 73,893 | 100,148 |
| 기종점 | 5-9 | 7-3 | 7-5 | 7-9 |
| 전수화된OD | 69,563 | 41,793 | 103,955 | 63,288 |
| 실제OD | 70,259 | 41,271 | 109,298 | 54,443 |



〈그림 11〉 전수화 결과 비교

VI. 결론

최근 산업 전 분야에서 유비쿼터스 환경 구축을 위한 다양한 시도가 이루어지고 있으며, 특히 교통·물류 분야에서는 교통정보 수집체계 및 이를 응용한 서비스 개발의 필요성이 매년 증가하고 있다. 프로브 차량과 무선통신기술을 ITS에 접목한 교통정보 수집체계는 그 대표적인 사례이다. 프로브 차량을 통해 실시간 데이터 수집이 가능하므로 교통관리, 교통정보 제공 등에 활용될 수 있으며, 리더기를 통해 수집되는 프로브 차량 정보를 이용하여 차량의 기·종점 확인이 가능하므로 시간대별 정적OD를 산정할 수 있다.

프로브 차량으로부터의 실시간 위치정보를 활용하여 정적 표본OD를 산정할 수 있다. 그러나 프로브 차량을 통해 수집된 표본OD는 태그가 부착된 일부 차량만을 대상으로 하고, 각 기종점별로 일정 표본율을 유지하기 어려우며, 자료수집 시간대에 따라 표본율이 변동하기 때문에 시간적·공간적인 전수화가 필요하다.

본 연구에서는 프로브 차량을 통해 수집되는 실시간 데이터를 기반으로 산정된 표본OD를 전수화하기 위해 시간대별·기종점별로 변화하는 표본율을 산정하는 알고리즘을 개발하였다. 이를 위해 전수화된 링크교통량과 관측 링크교통량을 비교하여 오차율을 검토하였다. 또한 가상 네트워크를 통한 사례분석을 통하여 알고리즘을 검증하였다. 사례분석 결과 전수화된 OD와 실제 OD 간의 MAE는 5.28%로 나타났다.

향후 연구는 다음과 같다. 첫째, 본 연구에서 산정된 표본OD를 기존의 OD 조사에 보완하여 신뢰도를 향상시키는 방안이다. 프로브 차량 정보를 이용하여 산정된 OD는 통행 목적이 불분명하며, 장래 수요예측이 어렵다는 단점을 지니기 때문에 기존OD와의 결합을 통하여 이러한 단점을 보완하는 연구가 필요하다. 둘째, 가상 네트워크가 아닌 실제 네트워크에서의 자료를 이용하여 알고리즘의 적용성을 제시가 필요하다. 이는 제주시를 대상으로 수행된 “유비쿼터스 환경의 차세대 국가 교통정보 수집체계 개발 및 시범사업”의 연구 결과를 활용하여 제시할 예정이다. 셋째, 실제OD가 없어 추정결과의 정확도를 검증할 수 없는 경우 이를 보완하는 방법이 필요하다.

참고문헌

1. 백승걸·정소영·김범진(2007), “RFID 프로브 차량을 이용한 정적 표본 OD 추정”, 대한토목학회 정기학술대회.
2. 김시곤·유병석·강승필(2005), “휴대폰 기지국 정보를 이용한 O/D 추정기법 연구”, 대한교통학회지, 제23권 제1호, 대한교통학회, pp.93~102.
3. 백승걸·김현명·신동호(2002), “표본링크이용비를 추가정보로 이용한 OD 행렬 추정”, 대한교통학회지, 제20권 제4호, 대한교통학회, pp.83~93.
4. 백승걸(2001), “유전알고리즘을 이용한 링크관측 교통량으로부터의 기종점 통행행렬 추정”, 서울대학교 대학원 박사학위논문.
5. 손기민(2004), “Mobile 위치정보를 이용한 동적 OD 생성방안 기초연구”, 서울시정개발연구원.
6. Bruce Hellinga(2001), “Comparative assessment of AVI tag matching algorithms for estimating vehicle travel times”, Transportation Research 80th.
7. Cascetta E.(1984), “Estimation of trip matrices from traffic counts and survey data : generalized least squares estimator”, Transpn. Res. 18B, pp.289~299.
8. Carey, M. C. Hendrickson, K. Siddharthan (1981), “A Method for Direct Estimation of Origin/Destination Trip Matrices”, Transp. Sci. pp.32-49.
9. Hyodo T., Takahashi Y. and Tsuboi T. (2001), “A study on estimation method of table by traffic count data and on-street questionnaire survey”, journal of EASTS 2001, Vol.4. No.3
10. Kuwahara M, Sullivan E. C.(1987), “Estimating OD matrices from roadside survey data”, Transpn. Res. 21B, pp.233~248.
11. Landau U., Hauer E., and Geva I.(1982), “Estimation of cross-cordon OD flows from cordon studies”, Transportation Research Record, 891, pp.5~10.
12. Lo H. P. and N. Zhang and Lam W. H. K. (1996), “Estimation of and OD matrix with random link choice proportions : a statistical approach”, Transpn. Res. 30B, pp.309~324.
13. Lo H. P. N. Zhang, and W. H. K. Lam(1999), “Decomposition Algorithm for statistical

estimation of OD matrix with random link choice proportions from traffic counts”, TR33B, pp.369-385.

14. Spiess H.(1987), “A Maximum likelihood model for estimating O-D matrices”, Transpn. Res. 21B, pp.395~412.

15. Tamin O. Z. and Willumsen G.(1989), “Transport demand model estimation from traffic counts”, Transpn. Vol.16 3-2.

16. Watling D. P.(1984), “Maximum likelihood Estimation of OD matrices from a partial registration plate number”, Transpn. Res. 28B, pp.289-314.

- ☞ 주 작성 자 : 백승걸
- ☞ 교 신 저 자 : 백승걸
- ☞ 논문투고일 : 2007. 11. 10
- ☞ 논문심사일 : 2008. 3. 10 (1차)
2008. 3. 21 (2차)
- ☞ 심사판정일 : 2008. 3. 21
- ☞ 반론접수기한 : 2008. 8. 31
- ☞ 3인 익명 심사필
- ☞ 1인 abstract 교정필