

거시-미시 순차적 교통시뮬레이션 방법과 부분상세지구의 동적 O/D 추정

이진학¹ · 김익기^{2*} · 김대현³

¹ 서울연구원, ² 한양대학교 교통물류공학과, ³ 두산건설(주)

Macroscopic-Microscopic Sequential Traffic Simulation Analysis and Dynamic O/D Estimation for Sub-area

LEE, Jin Hak¹ · KIM, Ikki^{2*} · KIM, Dae Hyun³

¹ The Seoul Institute, Seoul 137-071, Korea

² Dept. of Transportation & Logistics Eng., Hanyang University-ERICA campus at Ansan, Gyeonggi 426-791, Korea

³ Doosan Engineering & Construction, Seoul 135-010, Korea

Abstract

The study suggested a method to improve analysis accuracy such that the interactive effects of transportation changes between outside and inside of sub-areas were sequentially considered in the analysis by linking a macroscopic network analysis and a microscopic traffic simulation. A dynamic O/D estimation method was developed for practical implement of sub-area microscopic simulation analysis by using the results of macroscopic network analysis, the results of selected link analysis at the cordon line of the sub-area, departure time data of household travel survey, timely observed traffic volume data at the cordon. This estimated dynamic O/D for the sub-area made it possible to analyze traffic phenomena in details. Various detailed phenomena such as traffic queues, delay at intersection, and conflicts between vehicles, which is impossible to be grasped through a macroscopic analysis, can be analyzed with the dynamic microscopic traffic analysis. Through implementing an empirical study and validation, the study provided a reference result about accuracy of a microscopic traffic simulation of a sub-area to help its application for real transportation policy analysis.

본 연구에서는 거시적 넓은 지역에 대한 교통 분석과 부분상세지구(sub-area)의 교통 분석을 서로 단계적으로 연계하며 상호 교통 환경 변화에 대한 영향을 동시적으로 함께 반영하여 방법을 제안했다. 이와 같은 거시적-미시적 연계 분석을 위해 거시적 네트워크 분석, sub-area analysis, 가구통행실태의 출발시각 자료, 부분상세지구의 경계지점에서 시간대별 관측 링크 교통량 자료를 융합 분석함으로써 부분지구에 대한 동적 O/D 교통량을 추정하는 실무적 방법을 제안하였다. 이렇게 추정된 동적 O/D 교통량을 입력 자료로 하여 부분상세지구에 대해 미시 교통류 시뮬레이션 분석을 실행함으로써 다양한 국소적 지구의 교통정책 분석을 가능하게 하였다. 이와 같은 미시적 동적 분석은 거시적 네트워크 분석으로는 파악할 수가 없었던 대기행렬, 교차로 지체, 차량 간 상충 등의 분석을 가능하게 한다. 따라서 교통정책의 효과를 미세한 교통현상 변화까지 분석이 가능하도록 하였다. 또한 본 연구에서는 실제 사례연구를 통해 거시적-미시적 연계 분석에 의한 부분상세지구 미시 교통류 시뮬레이션 결과의 현실 설명력에 대한 검증 분석도 수행하여 미시적 동적 분석의 정책 활용 가능성에 대한 참고적 자료를 제공하였다.

Keywords

household travel survey, dynamic OD, microscopic traffic simulation, static OD, subarea analysis
가구통행실태조사, 동적 OD, 미시적 동적교통 시뮬레이션, 정적 OD, 부분상세지구 분석

*: Corresponding Author

ikkikim@hanyang.ac.kr, Phone: +82-031-400-5152, Fax: +82-031-436-8147

Received 25 February 2013, Accepted 8 October 2014

서론

1. 연구의 배경 및 목적

최근 다양한 정보를 제공하면서 통행자의 반응과 그에 따른 교통시스템의 변화를 상세하고 구체적인 수준까지 추정하고 이를 정책 결정에 활용하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한 도심 내의 혼잡 등에 따른 동적 현상을 분석하기 위한 미시 교통류 시뮬레이션 개발에 대한 관심이 증가하고 있는 추세이다. 이러한 미시 교통류 시뮬레이션으로 동적 현상을 분석하기 위해서는 상세한 가로망에 대한 정보, 교통운영 자료, 시뮬레이션 정산을 위한 교통량, 지체, 속도, 통행시간 등의 교통 데이터가 필요하게 된다. 특히 시간대별 출발-도착지점 간의 교통량 자료가 필요하기 때문에 동적 O/D 구축을 위한 수학적이고 학술적 연구가 과거부터 이루어져 왔다. 하지만 아직까지 현실적 정책분석에 적용에는 한계가 있으며, 또한 실무적 활용도가 높은 방법론이 보편화 되어 있지 못한 상황이다. 하지만 미시적 상세분석에 의한 정책분석의 필요성은 점차 커지고 있으며, 또한 정책결정 과정에서 더욱 효용성이 증대할 것으로 기대되고 있다. 따라서 거시적 시스템 분석결과와 연계된 미시적 상세분석에 대한 연구가 국제적으로도 관심을 받고 있는 것이다.

교통관리시스템(FTMS, Freeway Traffic Management System)과 진출입 램프에 설치되어 있는 AVI(Automated Vehicle Identification)시스템 등을 통해 수집되는 교통 데이터를 활용하여 동적O/D를 추정하는 방법 등과 같은 연구가 시도되어져 왔다. 하지만 이러한 교통 센서에서 획득한 교통 데이터를 활용하여 참값과 유사한 동적 O/D를 추정하는데 있어서 이론적 방법론의 한계와 함께 많은 시간과 비용이 요구되므로 실무적 적용에 어려움이 있다. 광역적 범위를 포함하는 정적(static) O/D 자료에 의한 분석과 국부적 지구를 대상으로 미시적 분석을 위한 동적(Dynamic) O/D를 각각 독립적으로 분석할 경우에 전체와 부분의 시스템적 연결성이 무시되어진다. 즉 넓은 전체 시스템 상에서의 교통환경변화가 부분에 해당하는 국소적 지역에 미치는 영향을 반영할 수 없다는 한계점이 있다. 그 이유는 외곽존으로 집합화 표현한 상태에서는 국소지역 내의 교통개선으로 그 외곽에서의 노선변경 등과 같은 통행행태 변화를 반영할 수가 없기 때문이다. 국소적 지점만 독립적으로

분석할 때에는 그 외부 지역을 외부 존(External zone)으로 처리하기 때문에 고정된 값으로 처리가 되는 외부 존 O/D로는 외부지역에서의 교통 환경변화를 고려할 수 없게 되는 것이다. 따라서 본 연구에서는 광역차원에서의 정적 O/D를 통한 네트워크 분석과 국소적 지점 주변의 동적 관측 자료를 함께 융합 분석을 함으로써 광역차원의 교통 환경변화가 특정 국소적 지점에 영향을 주는 효과를 반영한 미시교통시뮬레이션 방법을 제시하고자 하는 것이다. 또한 이와 같은 분석을 위해서 전체 시스템의 정적 O/D에서 국소적 지역 분석을 위한 부분상세지구의 동적 O/D를 구축하는 실무적 적용 가능한 방법을 제안하고자 한다. 그럼으로써 정책에 관심이 있는 국소적 지점의 Corridor Analysis나 세부적 네트워크 분석을 광역적 교통 환경의 변화를 반영하면서도 국소적 지역에 대해서는 미시 교통류 시뮬레이션 분석을 가능하도록 할 수가 있다. 이와 같은 미시적 동적 네트워크 분석은 정적 분석으로는 파악할 수 없는 대기행렬에 의한 지체와 차량 간의 상충에 대한 분석을 가능하게 한다.

문헌고찰

1. 기존 연구 고찰

Doblas and Benitez(2005)의 연구와 같이 교통량을 추정하는 방법으로는 링크의 교통량을 관측하여 기존의 O/D 패턴을 수정 현행화하는 연구가 조사비용 및 노력의 절약을 위해 관심을 받아왔다. Yim and Lam(1998), Gan, Yang and Wong(2005)의 연구는 이와 같은 분석기법에 있어 어떤 지점의 링크에서 교통량을 관측해야 참값 O/D에 가깝게 추정될 것인가를 연구하였으며, Timms(2001)은 개념적인 방법론에 대해 과거 연구를 요약 정리하였다. 하지만 이와 같은 연구는 기초적 O/D 자료를 필요로 하며 복잡한 수학적 추정 절차를 요구하고 있어, 자료가 부족하고 짧은 기간 내에 수시로 이루어져야 할 실무적 정책분석으로서 부분상세지구에 적용하는 우리나라 현실적 상황에서는 응용하는데 어려움이 많다.

Choi et al.(2009)은 광역범위의 정적 O/D와 경로 기반의 노선배정기법을 이용하여 광역 범위 중 부분적 지역에 대한 정적 O/D를 추정하였다. 이때 노선배정기법이 유일해가 이론적으로 없음을 인식하고 엔트로피를 목적함수에 포함시키고 부분상세지구 내의 교차로 관측 교통량을 입력 자료로 한 후 초기 정적O/D를 우선 추정

하였다. 추정된 정적 O/D 교통량과 경로기반의 노선배 정기법을 이용하여 반복적으로 시간대별 관측 지점 교통량과 유사하게 할 수 있는 동적 O/D를 추정하는 방법을 제안하였다.

정적 O/D를 활용하여 동적 O/D를 추정하는 연구와 관련하여서는 Vickery(1969)의 출발시간 선택 모형을 효용함수로 변형시켜 이 효용함수를 가지고 연속적 로짓 모형(continuous logit)을 사용하여 동적 O/D를 생성한바가 있다(de Palma and Marchal, 1999).

de Palma and Marchal(1999)는 비용함수를 사용하여 동적 O/D를 추정하였으며 이는 전체 통행비용이 통행시간 비용과 통행지체비용으로 구성되었으며, 통행비용은 다시 자유속도 상태의 비용과 정체시의 비용으로 구성하였다. 즉 이 연구는 총량의 정적 O/D를 활용하되 출근 통행목적과 같이 활동 목적지의 도착시각이 알려져 있을 때 출발시각을 모형에 의해 결정하여 동적 O/D를 추정하는 방법이다. Marchal and de Palma(2001)도 출발시각 선택모형을 이용하여 동적 O/D를 추정하여 프랑스 파리에 응용한 사례를 보여주었다. 하지만 de Palma가 제시한 방법을 적용하기 위해서는 기대 도착시간과 같은 기초 입력자료 구축이 필요하나 이는 현실적 한계점이 있어 실제 정책분석 사용에는 어려움이 있는 접근방법이다. Nambisan and Pulugurtha(2001)의 동적 OD 추정방법도 출발시각과 도착시각에 대한 자료를 기본 자료로 요구되고 있다. 또한 Kim(2002)도 예정된 도착시각을 알고 있는 상태에서 출발시각 선택모형을 적용하여 동적 OD를 추정하는 방법론으로 실무적 적용상에서 역시 자료의 한계가 있다.

또한 de Palma(1999)의 방법은 정적 O/D를 이용한 동적 O/D 생성 방법으로써 외부(external)에서 내부(Internal)로 유입되는 O/D, 외부에서 외부로 통하는 O/D의 경우 분석지역으로 유입되는 도착시간을 알아야 동적 O/D 추정이 가능하다는 제약성을 역시 지니고 있다. 또한 가변 통행시간 변수로써 QTC(Queuing Time Cost)가 있어 메조스코픽 시뮬레이션(mesoscopic simulation)에서는 표현이 가능하나 실무적 교통정책에 보편적으로 많이 사용되고 있는 상용프로그램인 TransCAD, Emme/3 등의 정적(static)이며 거시적(macroscopic) 시뮬레이션에서는 표현하기 어렵다는 단점을 지니고 있다. 따라서 본 연구에서는 정적 O/D와 거시적 교통 시뮬레이션 프로그램을 사용하여 넓은 지역의 분석결과를 반영하면서도 국소적인 좁은 지역에 대해서도 미시적 분

석을 일관성 있게 동시에 할 수 있는 방법을 제시하고자 하였다. 즉 본 연구에서는 서울연구원, 경기개발연구원 및 인천개발연구원에서 연구를 수행하고, 수도권본부와 한국교통연구원 DB센터를 통해 공식 제공되고 있는 수도권 O/D자료와 네트워크 자료를 활용하면서, 거시적 교통 시뮬레이션 프로그램인 TransCAD 5.0(2008)에 의한 정적 분석결과와 시간대별 실측 교통량 관측 자료를 함께 활용함으로써 실무적 분석에서 용이하게 동적 O/D를 추정할 수 있는 방법을 제안하고자 한 것이다.

본론

1. 정적 O/D 활용한 동적 O/D 추정 구축방법

일반적으로 동적 O/D를 사용하는 미시교통시뮬레이션 분석은 전국 또는 도시 전체지역을 대상으로 분석하기 보다는 대기행렬의 길이, 차량 간 상충 및 지체 등 국소적 지구나 도로축, 교차로에 대한 상세분석을 목적으로 하는 경우가 많다. 따라서 넓은 지역을 대상으로 하는 경로선택 변화와 분석 관심 대상인 좁은 지구내의 교통흐름 패턴 변화 간의 상호적 영향을 함께 반영하기 위해 본 연구에서는 Figure 1에 요약된 것과 같이 세 단계의 분석으로 구분하여 방법론을 제시하였다.

첫 번째 단계는 거시적(macroscopic) 분석단계로서 전체와 부분 지역 간의 교통패턴 관계를 분석하는 단계

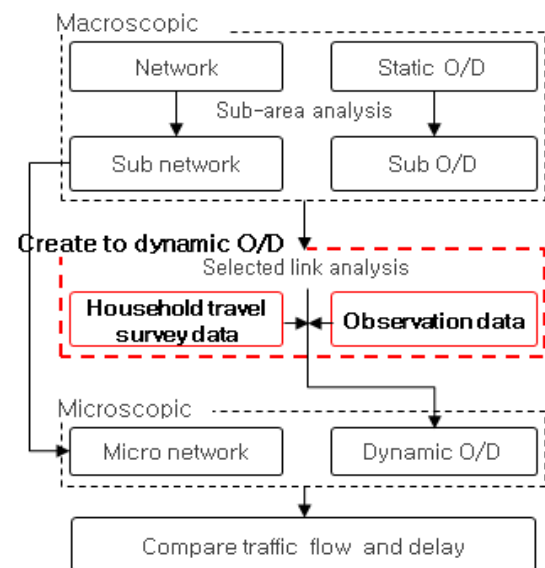


Figure 1. Three analysis stages of the study

이며, 두 번째 단계는 동적 O/D 추정 단계로 가구통행 실태조사와 지점 교통량 조사자료를 활용하여 통행배정 분석결과와 연계하며 동적 O/D를 추정하게 된다. 세 번째 단계는 미시적 (microscopic) 분석단계로서 전체 중 일부지역에 대해서 앞 단계에서 추정된 동적 O/D와 상세화된 네트워크를 활용하여 상세한 분석이 이루어지는 단계이다.

각 분석 단계별로 그 내용을 좀 더 구체적으로 설명하면 다음과 같다. 첫 번째 분석단계인 거시적 네트워크 분석 (macroscopic network analysis) 단계에서는 전체 중 일부 지역에 특히 관심을 갖고 전체 시스템과 연계하며 설정된 부분적 지역의 교통특성을 파악하는 단계이다. 즉 전체 지역 중 일부 지역에 해당하는 부분상세지구 (sub-area) 경계지점에서 유출입하는 교통패턴을 전체 시스템에 해당하는 도시 또는 광역권의 네트워크와 연계시켜 교통패턴을 파악하는 단계이다. 이 단계에서는 부분상세지구의 경계를 설정하고, 주어진 하루 단위의 정적 O/D를 이용하여 부분상세지구의 경계지점과 지구의 내부 존들 간의 정적 O/D 패턴을 추정하는 분석이 이루어진다. 즉 상세부분지구로 진입 또는 통과하는 통행이 부분상세지구의 외부에 위치한 어느 교통존에서 오고 가는지 파악하기 위해 Selected link analysis이 수행된다. 이와 같은 분석을 위해 본 연구에서는 거시적 교통수요분석 상용 프로그램인 TransCAD 5.0을 사용하여 분석을 수행하였다.

이 분석단계에서 광역지역의 각 교통존별 O/D 통행 중에 부분상세지구 s 경계에 위치한 링크 l 로 유출입하는 하루 O/D통행량의 패턴, 즉 링크 l 을 지나가며 출발점이 교통존 i 이고 도착점이 교통존 j 인 하루 O/D 통행량인 $OD_{i,jl}^*$ 의 자료가 구축되어지게 된다.

두 번째 단계는 부분상세지구의 미시교통시물레이션 분석을 위해 동적 O/D를 추정하고 구축하는 단계이다. 즉 첫 번째 단계에서 구축된 부분상세지구의 하루단위 정적 O/D를 분석시간대의 시간간격(time slice)별 동적 O/D를 추정 구축하는 단계이다. 이와 같은 시간간격별 O/D 패턴을 실측 관측치에서 파악하기 위해 가구통행실태 표본조사 자료와 링크 관측교통량 자료를 본 연구에서는 활용하였다. 즉 가구통행실태 표본자료에서는 출발시각 기준의 시간대별 통행량 분포 기초자료를 구축하였고, 부분상세지구 경계에 위치한 링크에서는 각 방향별 시간대별 지구 유출입 교통량 조사 자료를 활용하였다.

도로 링크관측자료는 전수 자료라고 할 수 있는 총량 개념의 시간간격별 교통량을 파악할 수 있는 장점이 있으나 통행의 목적과 기종점을 파악할 수 없는 한계점을 가지고 있다. 반면에 가구통행실태조사 자료의 경우는 기종점과 통행목적, 출발시각 등 구체적 통행특성자료와 통행자의 정보에 대한 자료의 확보가 가능하나 자료자체가 표본자료이기 때문에 근본적으로 표본오차(sampling error)가 존재하는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 자료의 융합을 통해 상호 단점을 보완 구축하는 방향을 추구하였다. 그럼으로써 미시적 동적 교통시물레이션 분석을 위한 기초자료인 부분상세지구의 동적 O/D를 추정 구축하고자 한 것이다.

본 연구에서 제안된 부분상세지구의 동적 O/D 구축 과정은 아래와 같다.

① 전체 연구지역 내의 한 부분에 해당하는 부분상세지구의 경계에 해당하는 특정 링크 l 에 대해 Selected link analysis를 수행한다. Selected link analysis 결과로써 부분상세지구를 기준으로 외부-내부통행(E-I; external-internal trip), 내부-외부통행(I-E; internal-external trip), 외부-외부통행(E-E; external-external trip) 중 링크 l 을 지나 교통존 J 로 가는 하루 O/D 통행량($OD_{i,J}^*$)의 추정 값이 산출되게 된다. 또한 가구통행실태 표본자료의 개별 통행자 통행 자료에 각 통행자의 출발지점과 출발시각 자료가 있으므로, 특정 출발 교통존에서 특정 도착 교통존까지의 시간대별 출발 통행량 분포를 파악할 수가 있다. 따라서 부분상세지구를 기준으로 경계에 있는 링크 l 를 통과하는 모든 E-I, I-E, E-E 통행에 대해 출발 교통존의 출발시각에 링크 l 까지 도달하는 최단경로 시간을 더해서 링크 l 를 통과할 당시의 시간대(time slice)별 통행량 자료를 식(1)과 같이 계산을 할 수가 있다. 이와 같은 표본자료를 활용하여 링크 l 의 하루 전체 통행량 중에 각 시간대별 통행량의 분포 비율을 식(2)와 같이 추정 산출이 가능하게 된다.

$$F_{l|J,t}^h = \sum_{i \in S} f_{i|l,J}^h \quad \forall t, J \tag{1}$$

$$R_{l|J,t}^h = \frac{F_{l|J,t}^h}{\sum_{t'=1}^T F_{l|J,t'}^h} \quad \forall t, J \tag{2}$$

여기서

$f_{t|l,i}^h$: 가구통행실태 표본자료 h에서 각 통행자가 교통존 i에서 특정 도착 교통존 J(E-I, I-E, E-E 통행 모두)로 가는 통행으로 부분상세지구 경계에 있는 링크 l을 지나 가는 시점이 t 시간대에 해당하는 통행량
 $F_{l|l,t}^h$: 시점 t 시간대에 링크 l에서 특정 도착 교통존 J로 가는 표본 총 통행량
 $R_{l|l,t}^h$: 하루 전체 통행량 중 t 시간대에 링크 l을 지나 특정 도착교통존 J로 가는 통행량의 비율

② 경계선(cordon line)의 링크에서 부분상세지구로 진입하는 교통량의 관측자료를 활용하여 링크 l에서의 출발시각 기준의 시간간격별 교통량 비율을 산출한다. 이를 산출하는 수식은 식(3)과 같다.

$$R_{lt}^r = \frac{f_{lt}^r}{\sum_{t'=1}^T f_{lt'}^r} \tag{3}$$

여기서

f_{lt}^r : 부분상세지구 경계에 있는 링크 l의 t 시간대의 지점 r의 노측 관측 교통량
 R_{lt}^r : 부분상세지구 경계에 있는 링크 l에서 하루 전체 교통량 중에 t 시간대 지점 r의 관측 교통량이 차지하는 비율

③ 첫 번째 단계에서 구축한 하루 단위의 정적 O/D 교통량, 즉 링크 l을 거쳐 부분상세지구로의 진입 교통량을 동적 O/D로 세분화 추정 구축한다. 이때 관측자료에서 산출된 R_{lt}^r 와 가구통행실태 표본자료에서 산출된 $R_{l|l,t}^h$ 을 비교하며 그 합리성을 검증 후에 $R_{l|l,t}^h$ 값을 적용하여 사용하도록 한다. 그 계산 수식은 식(4)와 같다.

$$OD_{l,l}^t = f_{lt}^r \times \frac{OD_{l,l}^s}{\sum_j OD_{l,j}^s} \times R_{l|l,t}^h \tag{4}$$

여기서

$OD_{l,l}^t$: 링크 l 대표하는 부분상세지구의 외부존(external zone)에서 부분상세지구의 특정 교통존 J까지 시간대 t의 O/D 교통량
 $OD_{l,l}^s$: Selected link analysis를 통해 구축된 링크 l에서 sub-area의 특정 교통존 J까지의 하루단위 정적 O/D 교통량

부분상세지구 내부에 있는 교통존 간 O/D 통행량은 하루단위 정적 O/D 통행량에 가구통행실태 표본자료의 시간대별 통행량 분포비율을 곱하여 산출한 초기 값을 먼저 구하도록 한다. 그 후에 시간대별로 지구내부의 도로지점 관측 교통량과 동적노선배정 분석결과와 비교 검증하며 관측 교통량과 유사하도록 정산과정을 거치며 최종 동적 O/D로 구축하게 된다. 이와 같은 방법으로 계산하게 되면 하루 단위의 정적 O/D 셀(cell) 교통량이 영의 값이 아닐 경우에는 동적 O/D의 셀도 항상 영 아닌 양의 값을 갖게 된다. 이와 같은 정산 과정에서 관측 교통량과 동적노선배정 추정 교통량 사이의 오차를 최소화할 수 있도록 수렴할 때까지 반복계산하는 방법도 추가할 수 있으나, 본 연구에서는 실무적 적용 가능성을 위해 단순화하여 이와 같은 과정은 생략하였다.

세 번째 분석단계에서는 미시교통시물레이션 분석을 위한 상세한 네트워크를 구축하는 것이 우선 이루어져야 한다. 그 다음에는 앞 단계에서 구축된 부분상세지구의 동적 O/D자료를 입력 자료로 하여 미시교통시물레이션(microscopic traffic simulation) 분석을 수행하는 것이다. 그리고 그 분석결과와 각 링크의 시간대별 관측 교통량과 비교 검증하는 절차가 포함되는 것이 바람직하다. 즉 기준년도 특정 시점의 교통패턴에 대해 미시적 교통시물레이션 분석결과와 현실 묘사력이 합리적 수준 안에 도달하여 정책분석에 활용될 수 있는지를 검토할 필요가 있다.

부분상세지구에 대한 상세한 네트워크 자료와 시간간격별 동적 O/D자료가 구축되면 다양한 섬세한 교통정책들에 대해 미시교통시물레이션이 가능하게 된다. 즉 미시교통시물레이션 네트워크 정산 절차를 거치며 관측된 현실의 교통패턴을 유사하게 묘사가 된다고 검증된 이후는 이 지구 내에서의 다양한 교통정책에 대한 효과 분석을 수행할 준비가 완료된 것이다. 본 연구의 사례연구 분석에서의 미시교통시물레이션 분석을 위해 Trans-Modeler 2.6을 이용하였다.

2. 동적 O/D구축과 미시적 시뮬레이션의 사례분석

사례 연구로는 국부적인 지구에서의 도로체계가 변화되는 교통정책이 직접 영향권 밖의 광범위한 지역에 영향을 주어 통행자들의 노선선택 변화가 광범위한 지역에서도 일어날 수 있는 경우를 고려하였다. 따라서 국부적 지구의 도로정책이 부분상세지구의 통과교통 패턴에도 영향을 줄 수가 있어 전체와 부분이 연계된 분석이 필요한 사례 분석인 것이다. 분석의 근본적인 목적이 국부적 지구 내에서의 정책적 효과를 상세히 알고자 하는 것이므로, 전체와 부분과의 연계성이 고려된 후에는 부분상세지구에 대한 상세한 미시적 교통시뮬레이션 분석을 요구하는 사례를 보여주어야 한 것이다. 그럼으로써 거시적 정적분석에서는 분석이 가능하지 않은 교차로 지체, 대기행렬 분석 및 차량 간 상충 등의 상세하고 구체적인 분석결과를 제시하여 교통정책 의사결정의 정교성을 높이고자 한 것이다. 사례 연구로는 서울지역의 경인고속도로의 종점부 신월IC에서 여의도 남단의 88대로 및 경인로를 연결하는 지하차도 건설계획이라는 가상적 교통정책에 대한 분석을 사례연구로 하였다.

본 사례연구는 앞에서 설명한 3단계의 분석과정을 거치며 분석이 이루어졌다. 즉 첫 번째 분석 단계로 거시교통시뮬레이션 분석을 통해 정책상의 직접영향권에 해당하는 통과교통 패턴의 변화를 분석하고, 두 번째 단계로 관측 및 설문조사 자료를 이용하여 동적 O/D를 추정한 후에, 세 번째 단계에서는 직접영향권인 부분상세지구에 대해 동적 O/D를 활용하여 미시적 동적 교통시뮬레이션 분석을 수행하였다.

1) 거시적 분석을 통한 부분상세지구의 통행 분석

거시적 차원의 분석을 위해 적용된 자료는 2010년을 기준년도로 하는 서울 및 수도권 네트워크와 정적 O/D를 활용하였다. 사례의 국부적 교통정책의 직접 영향권



Figure 2. The sub-area from Seoul metropolitan area

인 상세부분지구는 신월 IC에서 여의도까지 경쟁적 노선으로 고려되는 교통축을 포함하도록 경계를 설정하였다. 이와 같이 설정 구축된 부분상세지구의 공간적 범위와 위치는 Figure 2에 도면에 도식화하여 표현되었다.

이렇게 수도권 네트워크에서 부분적으로 오른편 부분상세구역의 상세한 네트워크를 적합하게 분석할 수가 있도록 내부 교통존(internal zone)을 14개로 더욱 세분화하였다. 또한 부분상세지구의 외부지역과 오고 가는 통행의 시점과 종점을 대표하는 외곽 교통존(external zone)은 cordon line 경계에 걸쳐져 있는 교통축을 기준으로 46개 외곽존으로 표현하였다. 이와 같은 부분상세지구(sub-area) 자료를 구축하기 위해 본 연구에서는 거시적 교통시뮬레이션 상용 프로그램인 TransCAD 5.0을 이용하였으며, 이 프로그램의 기능 중에 하나인 Sub-area Analysis 기능을 이용하여 부분상세지구의 하루 단위의 정적 O/D 자료를 구축하였다. 출발시각 기준의 동적 O/D를 추정하는데 필요한 자료를 구축하기 위해 Selected link analysis도 이 단계에서 이루어졌다. 즉 부분상세지구 외부의 존에서 지구 경계에까지 도달하는데 소요되는 통행시간과 교통량을 파악하기 위해 각 경계선에 위치한 링크에 대해 각각 Selected link analysis가 거시적 정적 분석단계에서 이루어졌다.

2) 부분상세지구에 대한 동적 O/D 자료의 구축

TransCAD sub-area analysis 기능의 분석결과로 구축된 하루 기준 정적 O/D를 가구통행실태 표본자료에서 출발시각 기준으로 지구 경계지점에 도착되는 시간으로 시간대별 통행량 자료와 시간대별 통행량 비율 자료를 구축하는 단계가 수행되었다. 이 분석과정에서 부분상세지구의 경계로 진입, 진출하는 통행의 O/D 쌍의 수가 지나치게 많아 O/D쌍별로 부분상세지구의 경계에 도착하는 시각을 산출에 어려움이 있어 미미한 통행량을 갖는 O/D쌍에 대해서는 일괄적 단순화하는 분석을 적용하였다. 즉, 부분상세지역 O/D 전체 통행량의 80 percentile 교통량으로 구성되는 O/D쌍에 대해서만 계산하여 나머지 한두 통행만 존재하는 나머지 O/D 쌍에 대해서는 서울시 전체 통행의 출발시각 기준 분포비율을 일괄적으로 적용하였다.

본 연구에서 제시한 동적 O/D 추정을 위해서는 부분상세지구의 경계선으로 진입하는 총 교통량과 각 시간대별 교통량 비율의 자료가 필요하게 된다. 지구의 경계에

위치한 교통축별로 시간대별 링크 교통량이 전수 조사자료로 고려할 수가 있으므로, 부분상세지구에 진입하는 시간대별 교통량은 이용 가능한 자료 중에 가장 정확한 자료라고 할 수 있는 것이다. 하지만 부분상세지구 경계의 모든 링크 지점에 대해 자료를 수집하는 것은 시간과 경비의 제약으로 현실적으로 어렵다.

본 사례연구에서도 이와 같은 제약으로 주요 축 8개 구간에 대해서만 24시간 조사 자료를 수집하게 되었다. 그 결과 8개 교통축의 시간대별 관측조사 자료를 기준으로 지구전체의 집약적 개념의 시간대별 교통량 분포 비율을 산출하였으며 그 결과는 Table 1과 같다. 또한 가구통행실태조사 표본자료의 출발시간 기준의 표본 동적 O/D를 이용하여 외부 존에서 부분상세지구의 경계(cordon line) 링크에 도달하는 통행시간을 고려한 집합적 통행량 분석도 이루어졌다. 그 분석 결과도 Table 1에 함께 정리되어 비교하였다. 각 시간대별 교통량의 비율을 도식적으로 보여준 것은 Figure 3과 같다.

Table 1. Number of vehicles or trips and its ratio to daily traffic volume at each time interval

(unit: veh, %)

| Hours | F_{it}^r (observed) | R_{it}^r (%) | $\sum_p^p F_{it}^{hp}$ (sample) | R_{it}^h (%) |
|-------|--------------------------|-------------------|------------------------------------|-------------------|
| 0-1 | 28,088 | 2.83 | 5,353 | 0.37 |
| 1-2 | 21,650 | 2.18 | 187 | 0.01 |
| 2-3 | 16,271 | 1.64 | 311 | 0.02 |
| 3-4 | 12,967 | 1.31 | 666 | 0.05 |
| 4-5 | 13,497 | 1.36 | 3,004 | 0.21 |
| 5-6 | 20,324 | 2.05 | 11,956 | 0.83 |
| 6-7 | 36,128 | 3.64 | 43,848 | 3.05 |
| 7-8 | 53,777 | 5.42 | 156,373 | 10.87 |
| 8-9 | 57,695 | 5.82 | 218,245 | 15.18 |
| 9-10 | 51,925 | 5.24 | 66,758 | 4.64 |
| 10-11 | 50,027 | 5.05 | 57,676 | 4.01 |
| 11-12 | 48,910 | 4.93 | 46,228 | 3.21 |
| 12-13 | 46,261 | 4.67 | 47,143 | 3.28 |
| 13-14 | 49,752 | 5.02 | 64,853 | 4.51 |
| 14-15 | 50,717 | 5.12 | 76,474 | 5.32 |
| 15-16 | 51,350 | 5.18 | 91,395 | 6.36 |
| 16-17 | 51,904 | 5.24 | 89,813 | 6.25 |
| 17-18 | 53,287 | 5.38 | 89,300 | 6.21 |
| 18-19 | 55,180 | 5.57 | 121,749 | 8.47 |
| 19-20 | 51,755 | 5.22 | 82,567 | 5.74 |
| 20-21 | 47,757 | 4.82 | 59,297 | 4.12 |
| 21-22 | 45,185 | 4.56 | 47,293 | 3.29 |
| 22-23 | 41,637 | 4.20 | 39,333 | 2.74 |
| 23-24 | 35,278 | 3.56 | 18,186 | 1.26 |
| Total | 991,322 | 100 | 1,438,008 | 100 |

Table 1과 Figure 3에서 볼 수 있듯이 가구통행실태조사 자료에 기반한 시간대별 통행량 분포와 cordon line 지점에서의 관측 교통량에 의한 시간대별 통행량 분포에서 오전 첨두와 오후 첨두의 시간대는 같게 나왔으나 각 시간대별 교통량 비율은 차이가 많이 나고 있음을 알 수가 있다. 본 연구에서는 가구통행실태자료가 표본자료라는 점을 고려할 때 사례연구와 같이 시간대별 교통 분포패턴에 두 방법 간에 차이가 발생 시에는 지점 관측교통량을 기준으로 수정 조정하는 것이 좀 더 현실적이라 판단하여 동적 O/D 교통량 추정 구축시 관측 교통량의 시간대별 분포를 기준으로 구축하였다. 즉 앞에서 설명한 식(4)를 기준으로 동적 O/D를 구축하여 본 사례분석을 수행하였다.

Figure 4는 사례연구지역의 부분상세지구에서 주요 구간에 대해 중간 통행량을 살펴보기 위해 외곽존을 간략하게 6개로만 표시한 그림이다. 앞 절에서 설명한 방법론을 적용하여 정적 O/D를 시간대별 통행량 비율을 적용하여 추정된 주요 외곽존(external zone) 간의 1시간 단위 동적O/D는 Table 2에 정리된 것과 같다. 하루 중 가장 교통상태가 가장 안 좋은 8시에서 9시의 통행량을 예시로 정리한 것이다. 동일한 방법으로 하루 24시간의 동적 O/D는 구축될 수가 있다.

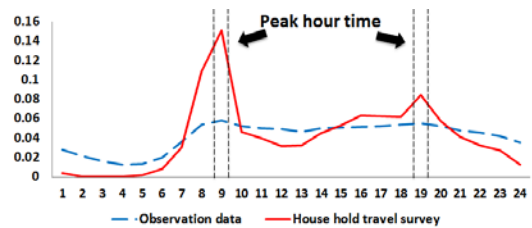


Figure 3. A graph plotting the RF_t^{obs} and RS_t^h ratios along time slices

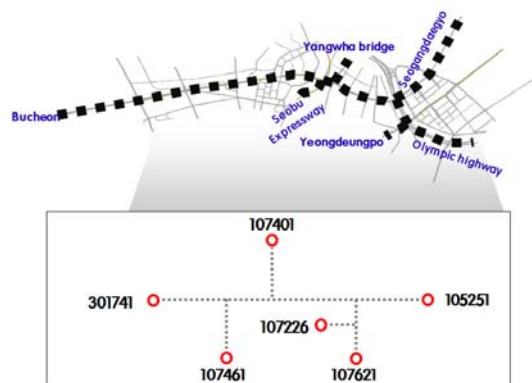


Figure 4. The main section of centroid

Table 2. The result of dynamic O/D (8-9AM)

| Centroid | 105251 | 107226 | 107401 | 107461 | 107621 | 301741 |
|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 105251 (Seogang daegyo) | - | 213 | 0 | 128 | 0 | 658 |
| 107226 (Yeongdeungpo) | 72 | - | 1 | 0 | 145 | 0 |
| 107401 (Yangwha bridge) | 0 | 0 | - | 873 | 0 | 1,527 |
| 107461 (Seobu Expressway) | 40 | 0 | 395 | - | 12 | 2 |
| 107621 (Olympic highway) | 0 | 222 | 0 | 152 | - | 549 |
| 301741 (Bucheon) | 694 | 0 | 639 | 0 | 285 | - |

3) 부분상세지구의 미시적 교통시뮬레이션 분석

부분상세지구에 대한 미시적 교통시뮬레이션 분석을 수행하기 위해서는 거시적 네트워크의 링크 및 노드 정보에 해당하는 차로, 교차로 체계 및 신호체계에 대한 상세한 정보가 포함된 네트워크 구축이 먼저 수행되어야만 한다. 즉 거시교통시뮬레이션에서는 교차로에서의 지체를 집약적 하나의 저항(impedance)으로 일반적으로 처리하고 있지만, 미시교통시뮬레이션에서는 차량 한 대 한 대의 동적 교통흐름을 묘사하여야 하므로 교차로별 신호현시도 구체적으로 네트워크에 함께 구축되어야 한다. 본 연구에서는 미시교통시뮬레이션 분석을 위한 TransModeler 2.6에서 분석이 가능하도록 네트워크를 정교화 및 상세화를 수행하였다. 미시교통시뮬레이션 분석을 위해 링크(link), 링크구간(segment), 차로(lane), 교차로신호(signal), 차로연결가상링크(lane connector), 존중심점(centroid) 등에 대해 가능한 현실과 유사하게 묘사할 수 있도록 네트워크를 정교화하는 과정을 거치게 되는 것이다. 본 사례연구의 부분상세지구를 상세화하여 구축된 전체적 네트워크 형태는 Figure 5와 같다.

Figure 6은 Figure 5에서 하나 하나의 점(node)으로 보이는 것들이 상세화되고, 네트워크를 정교화 하여 현실 묘사력을 높여가는 과정을 예시로 보여준 그림이다. 즉 교차로의 차로 연결성(connectivity)을 현실적 분석이 가능하도록 하는 정교화 과정에서 수정 전·후의 차이점을 보여주는 예제이다.

본 연구에서는 경인고속도로-여의도 축은 분석 상 중요하므로 이 구간에 해당하는 10개 지점에 대해서는 『서

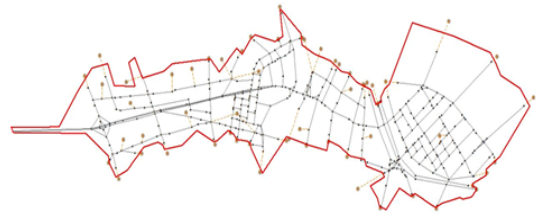


Figure 5. Sub-area network for microscopic traffic simulation analysis

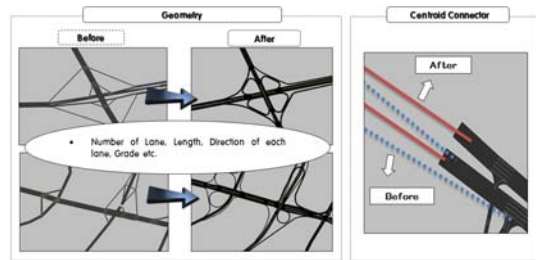


Figure 6. Building microscopic network by modifying macroscopic network in detail

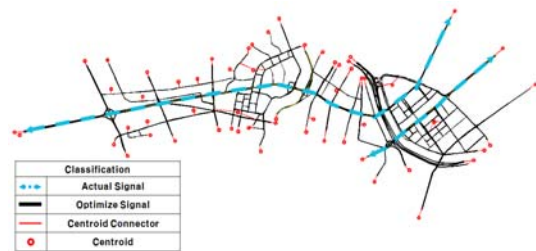


Figure 7. Locations of intersections for actual observed signal phase and for computer optimized signal phase

울시 교통안전 시설 정보』를 활용하여 실제 신호현시를 입력하였다. 반면에 그 외의 주변 교차로에 대해서는 TransModeler 2.6에서의 Optimizing Signal Timing Plans를 적용하여 교통량대비 최적의 신호 현시를 입력하였다. Optimizing Signal Timing Plans은 Webster's Model을 기초로 교통량대비 교차로의 손실시간을 최소화하는 방법이다. 다만 인접교차로간의 Offset은 고려하지 않고 독립 교차로임을 가정하고 교차로별 신호현시를 산정하였다. Figure 7은 실질적인 교차로 신호현시를 입력한 지점과 최적화 현시를 입력한 지점을 구분하여 표현한 그림이다.

본 연구 사례분석에서는 가장 교통상태가 안 좋은 오전 침두시 오전 8-9시 사이를 대상으로 분석 결과 예를 보여주고자 한다. 부분상세지구의 동적 분석에서 초기의 교통량 없는 상태에서 동적 O/D 교통량을 처음 노선 배

정할 경우, 각 구간별 교통량이 과소 추정되어 현실적 교통패턴을 정확하게 묘사할 수 없는 문제점이 있다. 그래서 다른 일반적인 동적 분석의 경우와 같이 본 연구 사례 분석에서도 부분상세지구를 차량이 관통하는데 걸리는 시간보다 충분히 큰 값만큼 시간대를 앞당겨 교통시뮬레이션 분석을 수행하였다. 즉 오전 8-9시 시간대의 교통패턴을 파악하기 위해 오전 7-9시 기간에 대해 미시교통시뮬레이션 분석을 수행하였다.

미시교통시뮬레이션 분석은 그 분석방법이 수학적 유일해(unique solution)를 갖는 모형에 의한 것이 아니고 각 통행자 및 운전자의 행태에 대한 확률적 결정원칙으로 시뮬레이션을 수행하는 것이므로 분석할 때마다 동일한 분석 결과를 제공하지 못하고 매번 다른 값을 제공하게 된다. 따라서 이와 같은 시뮬레이션 분석결과를 활용하기 위해서는 수차례의 분석 결과에 대한 평균값이 평균적인 현실 교통패턴을 대표한다고 가정하는 것이 일반적이다. 그래서 본 연구의 사례분석에서도 10회의 시뮬레이션 분석을 반복 수행하여 평균값을 사용하였다.

사례분석의 가상적 교통정책인 신월IC-여의도 간 지하차도 건설정책에 대한 효과분석을 하기 위해서는 미시교통시뮬레이션 분석 결과가 기준년도의 전형적 시간대 현실 교통패턴을 유사하게 설명하는가를 검증하는 것이 우선되어야 할 것이다. 즉 정책 수행 이전의 기존 관측 교통패턴을 교통시뮬레이션 모형이 유의성 있게 설명할 수 있어야 정책에 의한 환경변화에 따른 교통패턴의 변화를 신뢰성 있게 예측할 수 있게 되는 것이다. 따라서 본 연구에서 제시한 동적 O/D 추정 방법을 이용하여 미시교통시뮬레이션 분석한 결과가 얼마나 현실 관측 교통패턴과 유사하게 설명할 수 있을지를 비교 검증하는 분석을 수행하였다.

사례분석의 미시교통시뮬레이션 분석결과를 검증하기 위한 지점은 Figure 8에 도식되어 있는 10개 교차로를 사용하였다. 각 교차로의 방향별 시간간격별 관측 교통



Figure 8. Location of 10 intersection for validation of simulation results

량과 지체상태를 시뮬레이션 결과 교통량과 지체상태와 비교하여 시뮬레이션의 현실 묘사력 정확성을 검증하여 보았다.

10개 교차로의 진행 방향별로 구성된 총 36개 검증 관측 자료를 시뮬레이션 분석결과 교통량과 비교하여 교통량의 오차와 그 오차율을 정리한 것이 Figure 9와 Figure 10과 같다.

정리된 그림에서 알 수 있듯이 비교적 정확하게 잘 맞는 교차로 지점이 있는가 하면 그 오차의 크기가 커서 잘못된 정책 결정으로 유도될 수 있을 정도인 지점도 있음을 알 수가 있다.

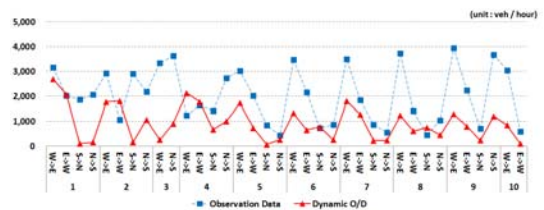


Figure 9. Simulated vs. observed directional traffic volume at 10 intersections

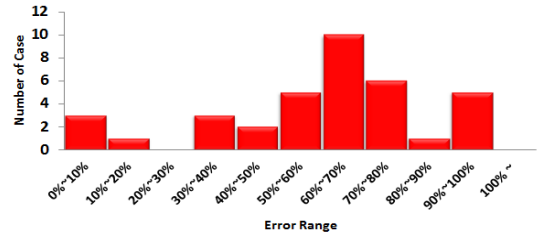


Figure 10. Number of cases for each interval of absolute percentage error

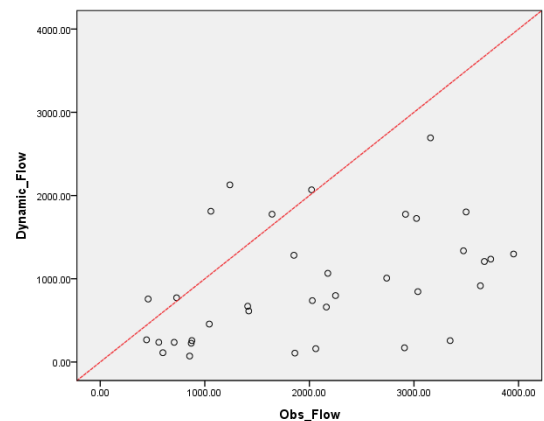


Figure 11. Scatter diagram of simulated vs. observed traffic volumes

36개 방향별 교통량 오차가 각각 얼마나 크게 나는가를 구체적으로 보여주는 것이 Figure 11의 산포도 그래프이다. 즉 45도 직선상에 있으면 시뮬레이션 결과와 관측값이 정확히 같음을 의미하고, 45도 직선 위에 있으면 과대추정, 직선 아래에 있으면 과소추정을 의미하는 것이다.

Figure 9, Figure 10, Figure 11에서 표현된 오차들에 대한 원인은 단순히 동적 O/D 추정의 오차에 기인한 것만은 아닌 것이다. 즉 O/D추정 상의 오차 외에도 미시교통시뮬레이션에 포함된 여러 가지 parameter 값 정산 상의 부정확성으로 인한 오차가 복합적으로 종합해서 나타난 오류라고 볼 수가 있는 것이다. 이와 같은 오류를 최소화하기 위해 본 연구에서는 파라미터(parameter) 값을 합리적 범주 내에서 조정하면서 현실적 교통류 현상과 가장 유사한 상태로 표현하기 위한 네트워크 정산(network calibration) 과정을 수행하였다. 하지만 그 정산 과정이 수학적으로 정착된 방법이 부족해 시행착오(try and error)를 반복하면서 그 중 가장 좋은 결과를 내는 파라미터 값을 선택하였다. 하지만 이와 같은 노력에도 불구하고 시뮬레이션 분석이 현실 교통패턴을 아주 정확하게 묘사하기에는 규명하기 어려운 복합적 오차 원인으로 인하여 정확성 향상에는 한계가 존재할 수밖에 없었다.

각 교차로에서의 평균 지체시간에 대해 관측치와 시

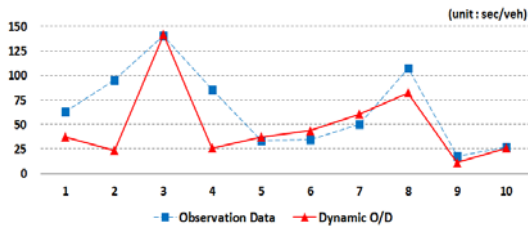


Figure 12. Simulated delay vs. observed delay at 10 intersections

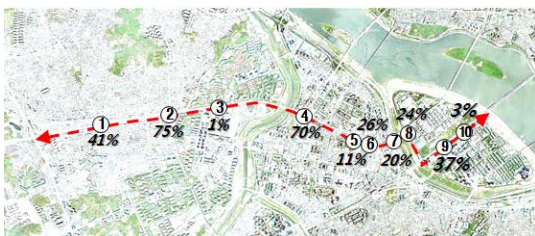


Figure 13. Average percentage error in delay at 10 intersections

뮬레이션 분석결과를 도표로 비교한 것이 Figure 12와 같으며, 시뮬레이션 결과 지체 오차율을 정리한 것은 Figure 13와 같다.

10개 교차로에서의 시뮬레이션 분석 결과 지체 정도가 관측치와 얼마나 크게 오차가 나는가를 보여주는 것이 Figure 14의 산포도 그래프이다.

두 개 지점을 제외하고는 비교적 지체 정도가 관측치와 유사한 결과를 보여주고 있다. 하지만 교차로의 지체 정도는 결국은 교통량과 상관관계가 있으므로 유사한 결과의 경향이 있게 마련이기 때문에 교통량의 오차와 마찬가지로 잘 맞는 교차로 지점이 있는가 하면 그 오차의 크기가 매우 크게 달라 잘못된 정책 결정으로 유도할 정도의 오차도 존재함을 보여주고 있는 것이다.

본 연구에서의 사례분석에서 볼 수 있듯이 제시한 방법론에 의해 실무적으로 적용이 가능하며 기존 방법보다 정확성의 향상을 가져올 수 있는 부분상세지구의 동적 O/D를 구축할 수 있게 되었다. 하지만 정부의 공식적 자료 부족, 세부지역에 대한 상세자료 수집의 시간적 재정적 한계로 인해 제약된 조사 자료를 가지고 분석하는데는 한계가 있음을 알 수 있다. 즉 교통정책 분석 상 부분상세지구에 대한 미시교통시뮬레이션 분석이 필요할 경우 잘못된 정책판단이 되지 않게 일정 오류 범위 내의 정확성 확보하기 위한 기초적 자료가 아직 부족함을 보여주고 있다. 따라서 현실적인 미시적 네트워크 교통시뮬레이션 분석을 위해서는 정부의 기초자료 구축이 보강되고, 세부지역에 대한 조사 자료 구축을 체계적으로 가능하게 지원할 수 있는 제도가 좀 더 필요할 것으로 보인다.

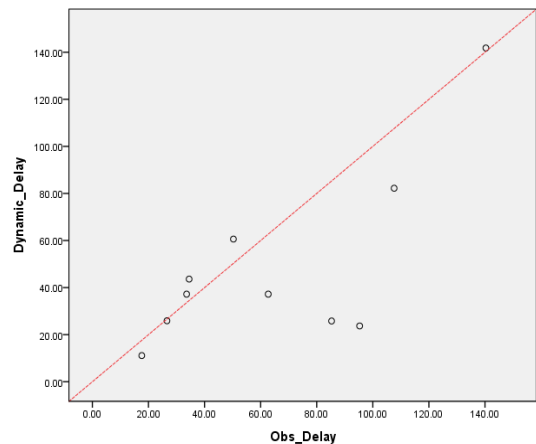


Figure 14. Scatter Diagram of simulated vs. observed delays at intersections

결론

단지 또는 건축물 개발에 따른 교통영향평가 또한 도시부 소규모의 도로의 신설 및 확장 사업의 효과분석을 미시교통시뮬레이션(microscopic traffic simulation) 분석 방법을 수행하는 경우가 우리나라에서 최근에 점차 늘고 있다. 하지만 이와 같은 분석을 위한 입력 자료인 동적 O/D의 실무적 구축방법이나 미시적 분석의 정확성에 대한 연구는 부족한 상태이다. 따라서 정확성에 대한 확신이 아직은 부족한 상태에서 정책분석 응용 분야에 확대되고 있다. 또한 거시적 분석과 미시적 분석의 연계 융합적 분석에 대한 필요성도 인식되어가고 있다. 즉 정책 대상이 국소적 지구인 부분상세지구(sub-area)에 해당하는 분석이라도 미시적 분석에만 국한하는 것이 아니라, 국소적 지구와 광역적 지역의 환경변화에 의한 두 지역 간의 상호 영향을 동시적으로 연계 분석할 필요성에 대한 인식이다. 그래서 본 연구에서는 거시적 넓은 지역에 대한 분석과 미시적 부분상세지구의 분석을 서로 단계적으로 연계하여 전체-부분 간 상호 영향을 분석에 반영하는 분석방법을 제시하였다. 즉 부분상세지구가 포함된 넓은 지역의 거시적인 정적 네트워크 분석(macrosopic & static network analysis) 결과, selected link analysis 결과, 가구통행실태 조사자료, 관측 링크 교통량 자료를 융합하여 부분상세지구의 동적 O/D를 추정할 수 있는 방법을 제안하였다. 이와 같이 추정된 동적 O/D는 거시적 분석과 미시적 분석의 연계적 영향분석을 가능하게 하였다.

본 연구에서 제시한 분석 방법에 대해 이해를 높이고, 또한 시뮬레이션 분석 결과의 신뢰성을 검증하기 위해 서울의 경인고속도로 신월IC에서 여의도까지의 가상적인 지하도로 건설 사업을 사례 연구를 수행하였다. 사례 연구를 통해 거시적 분석방법으로는 가능하지 않았던 부분상세지구에 있어 교차로 지체, 교차로 신호체계 반영, 대기행렬, 차량 간 상충에 의한 지체 등과 같은 분석 결과를 미시적 분석으로 인해 가능하게 됨을 보여 주었다. 또한 교통 시뮬레이션 결과와 실측 관측 자료를 비교 검증함으로써 교통정책 의사결정 과정에서 미시교통시뮬레이션 분석의 활용 가능성에 대한 참고 자료를 제공하였다. 연구에서는 부분상세지구의 동적 O/D자료 구축과 미시교통시뮬레이션분석을 위해서는 좀 더 상세하고 구체적인 국가적 기초자료 구축이 더욱 필요하며, 각 지구의 분석을 위한 지구적 특성을 파악할 수 있는 기초 링크

교통량조사도 분석의 정확성 향상을 위해 더욱 필요하다는 점을 사례연구를 통해 보여주었다.

REFERENCES

- Caliper (2008), TransCAD 5.0 User Guide.
- Caliper (2010), TransModeler 2.6 User Guide.
- Choi C., Jayakrishnan R., Kim H., Yang I., Lee J. (2009), Dynamic Origin & Destination Estimation Using Dynamic Traffic Simulation Model in an Urban Arterial Corridor, Transportation Research Record, 2133, 133-141.
- de Palma A., Marchal F. (1999), Analysis of Travel Cost Components Using Large-scale Dynamic Traffic Models, Transportation Research Record, 1676, 177-183.
- Doblas J., Benitez F. G. (2005), An Approach to Estimating and Updating Origin-destination Matrices Based Upon Traffic Counts Preserving the Prior Structure of a Survey Matrix, Transportation Research B, 39, 565-591.
- Gan L., Yang H., Wong S. C. (2005), Traffic Counting Location and Error Bound in Origin-Destination Matrix Estimation Problems, Journal of Transportation Engineering, 131(7), 524-534.
- Kim Sung (2002), Generating Dynamic O-D Table for Sub-area Analysis by Using System-wide Static O-D Table, Master thesis at Hanyang University, South Korea.
- Marchal F., de Palma A. (2001), Dynamic Traffic Analysis with Static Data: Guidelines with Application to Paris, Transportation Research Record, 1752, 76-83.
- Nambisan S. S., Pulugurtha S. S. (2001), Estimating Time-dependent Origin-Destination Trip Tables with Trips Originating in Multiple Time Slices, Transportation Research Record, 1752, 133-139.
- Timms P. (2001), A Philosophical Context for Methods to Estimate Origin-destination Trip Matrices Using Link Counts, Transport Reviews, 21(3), 269-301.
- Vickrey W. S. (1969), Congestion Theory and Transportation Investment, American Economic Review(Paper and Proceedings), 59, 251-261.
- Yim P. K., Lam W. H. K. (1998), Evaluation of Count Location Selection Methods for Estimation of O-D Matrices, Journal of Transportation Engineering, 124(4), 376-383.

알림 : 본 논문은 대한교통학회 제67회 학술발표회(2012. 10.20)에서 발표된 내용을 수정·보완하여 작성된 것입니다.

✎ 주 작 성 자 : 이진학

✎ 교 신 저 자 : 김익기

✎ 논문투고일 : 2013. 2. 25

✎ 논문심사일 : 2013. 4. 4 (1차)

2014. 9. 14 (2차)

2014. 10. 8 (3차)

✎ 심사판정일 : 2014. 10. 8

✎ 반론접수기한 : 2015. 4. 30

✎ 3인 익명 심사필

✎ 1인 abstract 교정필