

■ 論 文 ■

시·공간 활동인구 추정에 의한 통행수요 예측

Estimating Travel Demand by Using a Spatial-Temporal Activity Presence-Based Approach

엄진기

(한국철도기술연구원 선임연구원)

목 차

- I. 서론
 - 1. 연구의 배경 및 목적
 - 2. 기존 연구 고찰
- II. 시공간 활동인구 및 통행량 추정
 - 1. 분석자료
 - 2. 활동인구 및 활동 정의
 - 3. 활동스케줄 구축
- III. 실측자료 비교 검증
 - 1. 활동인구 추정 및 검증
 - 2. 통행량 추정 및 검증
- IV. 결론 및 향후 연구 주제
참고문헌

Key Words : 활동기반모형, 활동스케줄, 활동인구, 통행수요, 시·공간 활동용량
 Activity-Based Approach, Activity Presence-Based Approach, Spatial-temporal Activity, Travel Demand, activity Capacity

요 약

기존의 4단계 교통수요추정 모형은 거시적인 장래 교통수요 예측을 위해 사용되어 왔으나 정확성에 대한 문제가 지속적으로 제기되어 왔다. 장래 수요추정의 정확성을 높이기 위해서는 신뢰성 있는 자료의 확보, 장래 사회·경제 지표의 예측의 합리성 등 근본적 해결방법이 있으며 모형의 추정방법을 달리하는 것도 상당히 중요한 해결방법이라 하겠다. 과거와 달리 교통수요추정 모형은 단순히 교통인프라 구축에 따른 교통수요추정과 같은 거시적인 분석뿐만 아니라 교통수요관리정책의 효과분석, 교통운영분석의 적용 등 미시적인 분석에 대한 요구가 증대되고 있다. 본 연구에서는 인간의 활동에 기반을 둔 활동기반 교통수요추정에 대하여 소개하며 통행자의 일일 활동에 대한 조사를 기반으로 한 시·공간 활동인구 추정을 통한 통행수요를 예측하였다. 연구결과 개별 건물단위의 시간대별 활동인구의 추정은 비교적 정확한 것으로 분석되었으며 예측된 통행수요 또한 정확성이 높은 것으로 나타났다. 본 연구의 결과는 인간의 활동에 기반을 둔 시·공간 활동기반모형은 거시적인 교통수요추정뿐만 아니라 미시적 추정이 가능하므로 다양한 미시적 교통체계분석에 활용될 수 있을 것으로 기대되며 이를 위해 활동기반 자료와 토지이용에 대한 공간자료(GIS)의 확보가 필수적이라 하겠다.

The conventional four-step travel demand model is still widely used as the state-of-practice in most transportation planning agencies even though it does not provide reliable estimates of travel demand. In order to improve the accuracy of travel demand estimation, implementing an alternative approach would be critical as much as acquiring reliable socioeconomic and travel data. Recently, the role of travel demand model is diverse to satisfy the needs of microscopic analysis regarding various policies of travel demand management and traffic operations. In this context, the activity-based approach for travel demand estimation is introduced and a case study of developing a spatial-temporal activity presence-based approach that estimates travel demand through forecasting number of people present at certain place and time is accomplished. Results show that the spatial-temporal activity presence-based approach provides reliable estimates of both number of people present and trips actually people made. It is expected that the proposed approach will provide better estimates and be used in not only long-term transport plans but short-term transport impact studies with respect to various transport policies. Finally, in order to introduce the spatial-temporal activity presence-based approach, the data such as activity-based travel diary and land use based on geographic information system are essential.

1. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

전통적인 4단계 교통수요추정 모형의 주요 단점은 모형의 특성상 교통존(TAZ)단위의 집합화(aggreated)된 자료를 이용하기 때문에 개개인의 통행행태를 반영하지 못하는 문제점을 가지고 있다. 즉, 같은 교통존 내에 속한 가구나 개인은 똑같은 통행패턴을 가진다는 가정으로 인해 4단계 중 통행발생 및 통행분포 모형의 결과가 신뢰성이 낮으며 이로 인해 교통존을 기반으로 한 장래 교통시설에 대한 수요추정에만 국한하여 널리 사용되고 있으며 추정된 교통수요에 대한 정확성 및 신뢰성에 대한 의구심이 지속적으로 제기되어 왔다. 또한 현재의 다양한 교통서비스 정책에 대한 분석에 적용하기 어려우므로 전통적인 4단계 수요추정 모형을 대체할 새로운 방법론에 대한 연구가 지속되고 있는 것이 현실이다.

활동기반(activity-based) 모형은 전통적 방법론을 대체하기 위해 최근 10년간 많은 연구가 진행되고 있는 방법론으로서 교통수요를 인간 활동의 부산물로 정의하고 있다. 즉, 인간의 통행은 개개인이 일일 활동스케줄에 의해 시간과 장소, 교통수단 등을 결정하며 이러한 활동을 수행하기 위해 파생되는 공간이동을 통행으로 정의하고 있다. 따라서 대부분의 활동기반 모형은 모든 활동과 활동을 위한 출발시간, 목적지, 교통수단 등을 선택의 문제로 접근하고 있으며 이로 인해 개인들의 통행행태를 모형에 반영할 수 있는 장점이 있다.

활동기반 모형은 이론적으로 기존 수요추정모형 보다 우수하나 모형의 복잡함과 모형의 정산을 위한 분석시간 및 자료가 상당히 요구됨에 따라 실제 적용된 사례가 많지 않은 것이 현실이다. 따라서 기존의 4단계 교통수요추정모형과 비교하여 교통수요 추정결과가 얼마나 우수한지에 대한 직접적인 비교 사례연구가 거의 없는 실정이며 현실적으로 적용하기에는 많은 시행착오와 절차가 필요하다고 하겠다.

본 연구에서는 활동기반 교통수요추정 모형의 연구동향에 대하여 소개하며 모형의 실제 적용을 위해 개인의 일일 활동을 기반으로 한 시·공간 활동인구 추정과 이에 따른 통행수요를 예측하였으며 실측치와 비교를 통해서 모형의 적합도와 향후 활동기반 모형의 적용방안에 대하여 제시하도록 한다.

2. 기존 연구 고찰

1) 활동기반모형(Activity-Based Model)

활동기반모형의 기본 개념은 통행에 대한 정의를 인간의 활동(activity)에 의해 파생되는 것이라고 정의를 하였다. 전통적인 교통수요 추정모형에서는 통행자체를 목적으로 하고 통행을 출발지와 목적지로 구분하여 모형을 구성한 것에 반해 활동기반모형은 인간의 활동과 활동에 의해 파생된 통행을 개인 또는 가구단위의 특성을 주어진 시간, 교통수단, 교통망 및 기타 제약조건에 따라 모형화 하는 것이다. 이러한 혁신적인 개념은 Hägerstrand (1970)의 시-공간 프리즘(time-space prism)에서부터 출발하였으며 Chapin(1974)은 통행에 대하여 인간 활동의 참여에 대한 결과로서 나타나는 것이라 정의하였다. 이러한 인간의 활동은 특정한 제약(constraints)에 의해 시간과 공간적으로 영향을 받게 되는데, Hägerstrand 는 3가지 활동 제약에 대하여 다음과 같이 정의하였다.

- 능력제약(capability constraints)
- 결합제약(coupling constraints)
- 권한제약(authority constraints)

능력제약(capability constraints)은 잠자기(sleeping), 식사(eating)와 같은 인간의 생물학적 제약을 의미한다. 즉, 인간의 일일 활동 중에 이러한 활동을 위한 시간은 반드시 포함되어야 하기 때문이다. 다음으로 결합제약(coupling constraints)은 같은 시간과 장소에 존재하는 사람들의 활동에 대한 제약을 의미하는 것으로 업무 관련 회의(meeting) 활동이 이에 해당되며, 이는 회의에 참석 사람들이 같은 시간과 공간에 존재하며 다른 활동을 할 수 없는 경우에 해당된다. 권한제약(authority constraints)은 다양한 종류의 규제를 의미하는데 가게의 영업시간, 병원의 진료시간 등이 이에 해당되는데 영업시간 내에서만 이러한 시설과 관련된 활동들이 이루어질 수 있기 때문이다. 제시된 3가지 활동 제약들을 종합적으로 검토해야만 시·공간 인간 활동의 내용을 정확히 추정이 가능할 것으로 알려져 있다.

2) 활동기반모형 적용사례

기존의 전통적인 교통수요추정을 대체하기 위한 활동기반모형의 개발은 다양하게 이루어지고 있으나 현실적

〈표 1〉 활동기반모형 적용사례 비교

모형	모형특징	모형의 복잡성	자료요구 정도	소요 연산시간	적용사례
ALBATROSS	활동법칙기반(rule-based)	높음	높음	높음	Rotterdam(Netherlands)
AMOS	스케줄보정	높음	높음	높음	Washington, D.C.(U.S.)
PCATS	총효용극대화	높음	보통	높음	Osaka & Kyoto(Japan)
Portland Model	네스티트로깃	보통	보통	높음	Portland(U.S.)
CentreSIM	활동인구기반	낮음	보통	보통	Pennsylvania(U.S.)

으로 실제 적용사례는 많지 않으며 대부분은 아직까지 연구단계에 머물고 있는 실정이다. 다음에 제시한 4가지 모형은 전통적인 4단계 교통수요 추정을 대체하기 위한 대표적인 활동기반 모형으로서 모형의 개발목적이 서로 다르고 적용된 방법론에 차이가 있다.

- Random-utility-based models(Portland model by Bowman and Ben-Akiva, 2000),
- Computational process approaches(PCATS by Kitamura and Fujii, 1998, and AMOS by Pendyala et al., 1998).
- Rule-based approaches(e.g. ALBATROSS by Arentze and Timmermans, 2000)
- Activity presence-based approach(CentreSIM, 2002).

Bowman and Ben-Akiva(2000)는 일 단위 개인 활동 스케줄 모형을 개발하여 미국 오페곤주 폴틀랜드에 적용하였는데 전통적인 교통수요 모형과 비슷하나 통행(trip)기반이 아닌 여행(tour: 출발점과 도착지점을 하나의 여행으로 정의)을 기반으로 한 모형이다. 여행(tour)에 속한 각 활동들은 시·공간적으로 서로 연결되어 있으며 여행은 다시 주요여행(primary tours), 부수적 여행(secondary tours) 등으로 구분하여 각 여행별 목적지, 교통수단, 시간선택 등이 네스티드 로깃모형으로 구축되었다. 인간의 각 활동들과 수반되는 여행과의 연결 되는 매카니즘을 잘 설명하고 있지만 여행과 관련된 모든 선택(114개)을 로깃모형으로 구현함으로써 실용적으로 사용하기에 모형의 정산 및 검증에 상당한 시간이 소요되는 문제점이 있다.

Kitamura and Fujii(1998)은 Hågerstrand(1970)의 시-공간 프리즘(time-space prism) 개념을 구현한 시스템(PCATS: Prism-Constrained Activity-Travel Simulator)을 개발하였다. 모형에서는 활동들을 사전에 정해진 장소에서 일어나는 고정(fixed)된 활동과 고정된

활동들 사이에 일어나는 유동적(flexible)활동으로 구분하였다. 시·공간 프리즘은 통행속도, 장소, 고정 활동의 시간에 의하여 구축되었으며 유동적 활동은 고정 활동 내에서 제약되어있다. 모형에서 개인의 효용(utility)의 합이 최대가 되는 활동과 연관된 교통수단에 대하여 선택하는 것으로 정의 되었다. 기존의 가구통행실태조사 자료를 그대로 사용할 수 있는 장점이 있으나 많은 하위단계의 모형이 존재함으로서 복잡하고 연산시간이 많이 소요되는 단점이 있다.

Arentze and Timmermans(2000)은 ALBATROSS (A Learning Based Transportation Oriented Simulation System)를 개발하였는데 개인의 효용극대화 이론을 기반으로 하는 모형과 달리 순차적인 활동이 아닌 개인의 활동의 중요도를 기반으로 한 모형이다. 출근시차제, 쇼핑물의 영업시간 연장 등의 외부환경 변화에 개인의 활동의 변화가 어떻게 이루어지는지에 대해 행태분석에 목적을 두었다. 개인의 활동에 대한 다년간에 걸친 방대한 자료의 구축이 행태분석에 상당히 중요하므로 자료구축에 많은 시간과 비용이 필요하며 타 지역에서 활용하기가 어렵다는 단점이 있다.

CentreSim(2001)은 시·공간 활동기반 모형으로서 처음으로 기존 4단계 교통수요분석기법 내에서 적용 가능하도록 개발되었고 개별 건물이나 교통존(TAZ)단위로 시·공간 활동인구 추정을 기반으로 한 활동인구기반(Activity presence-based approach) 접근법이다.

지리정보를 기반으로 하여 시각적으로 이해가 편하고 기존의 가구통행 자료를 활용할 수 있는 장점이 있으며 기존 4단계 수요모형의 통행발생을 보완하여 통행량 추정의 정확성을 개선하는 데에 목적이 있으나 정확성 개선여부에 대한 실증적인 검증이 되지 않았다.

타 활동기반 모형과 달리 먼저 활동인구를 공간적으로 배치하고 동시에 일련의 활동들을 배정하는 특징이 있으나 공간활동용량 추정시 존단위의 인구 및 고용자수와 교통유발원단위를 적용하였다. 통행수요는 단순히 시간대별 공간 활동인구의 차이로 정의함으로서 유·출입인구에 대한 고려가 미흡한 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 활동기반 모형의 적용에 있어 이해하기 쉬운 활동인구기반(Activity presence-based approach) 접근법을 기반으로 하여 통행수요를 추정하여 정확성을 분석하고자 한다. 기존 방법론과 달리 공간 활동용량 추정을 목적지 선택모형을 고려하도록 한다.

통행수요 추정 또한 개인의 주어진 활동, 활동시간에 따른 통행확률을 활동단위로 적용하여 기존 방법론을 개선하도록 한다. 그동안 활동기반 교통수요모형은 모형개발에 초점이 맞추어져 개발된 모형의 추정결과에 대한 검증이 이루어지지 못함으로써 신뢰도를 가지기 어려웠다(Rossi, 2005). 본 연구에서는 추정된 공간 활동인구 및 통행수요(건물단위 통행발생 및 도착량)를 실제 조사된 자료와 비교하여 추정의 정확성을 검증하는데 목적이 있다.

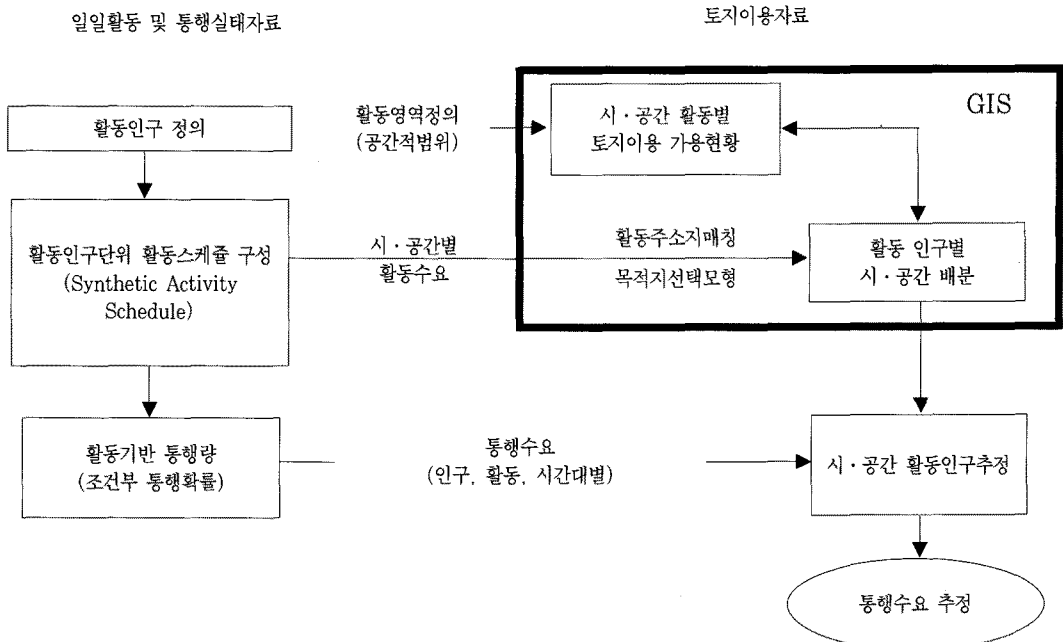
II. 시공간 활동인구 및 통행량 추정

〈그림 1〉은 본 연구에서 적용한 활동인구기반 통행수요추정 과정을 제시하고 있다. 이용 자료는 크게 일일활동 및 통행실태자료와 토지이용 및 산업체현황 등 GIS 자료로 구분된다. 일일활동자료는 활동인구 정의와 활동스케줄 구축에 활용되며 통행실태는 활동에 따른 통행수요를 추정하는데 이용하였다. 개별 활동이 이루어진 장

소는 GIS를 이용하여 활동주소지를 지도에 표현하여 각 활동과 토지이용 자료를 연결함으로써 목적지 선택모형에 활용하였다. 다음으로 목적지 선택모형으로부터 공간 활동용량을 결정하여 활동인구를 활동스케줄에 따라 공간적으로 분포시켰다. 통행수요는 공간적으로 분포된 활동인구로부터 통행할 확률을 적용하여 추정하였으며 본 연구에서 추정된 통행수요는 건물단위의 유·출입 통행량이다. 건물단위로 통행량을 추정함으로써 특정시간대의 활동인구수와 통행량을 실측자료와 비교하였다. 단계별 세부 내용은 활동기반 통행실태 조사 자료를 바탕으로 설명하도록 한다.

1. 분석자료

본 연구에는 시·공간 활동인구 추정 및 통행수요예측을 위해 2001년 미국 노스캐롤라이나 주립대학교 교통부(NCSU DOT)에서 수행하였던 대학생 활동기반 통행실태 자료를 이용하였다. 조사방법은 설문지를 작성하여 임의로 선정된 학생들에게 우편으로 발송한 후 회신하여 자료를 확보하였다. 〈표 2〉는 조사 자료의 회수 결과를 보여주고 있다. 2001년 기준 약 3만명의 학생인구 중 약 5%인 1500명에게 설문하여 이들 중 843명(약 3%)이 설문에 응하였다. 설문지에는 성별, 나이, 학



〈그림 1〉 본 연구의 시·공간 활동인구 및 통행량 추정 과정도

년, 수강학점, 주거지 위치, 운전면허여부, 차량소유여부 등 개인의 인적사항과 평일 하루를 기준으로 발생한 모든 활동에 대하여 활동의 종류, 활동이 일어난 장소, 통행 출발·도착시간, 통행수단 등에 대하여 구체적으로 조사되었다.

〈표 2〉 활동기반 통행실태조사 회수결과

구분	거주 구분(학생수(%))		계
	학교내	학교외부	
1학년	159(90.3%)	17(9.7%)	176
2학년	130(79.8%)	33(20.2%)	163
3학년	78(51.0%)	75(49.0%)	153
4학년	46(30.1%)	107(69.9%)	153
대학원	16(8.1%)	182(91.9%)	198
계	429(50.9%)	414(49.1%)	843(100.0%)

자료) NCSU DOT, 2001

2. 활동(Activity) 인구 및 활동 정의

활동인구의 정의는 분석대상 지역의 개별 건물단위 또는 교통존(TAZ)의 시·공간 활동인구를 추정하기 위해 필요한 과정으로서 전통적인 통행수요 추정방법과 동일하게 분석대상 지역 내에 거주하는 활동인구와 외부 존에서 유입되어 분석대상 지역 내에서 활동하는 인구로 정의 한다.

본 연구에서는 활동인구 및 통행수요 예측에 대한 검증용 용이하게 하기위해서 활동인구를 노스캐롤라이나 주립대 대학생(대학원포함)으로 정의하였다. 즉, 활동기반 통행실태조사가 수행된 2001년 봄 학기에 등록된 전체 학생 수를 기준년도 활동인구로 정의하였다.

다음으로 활동인구(학생들)의 하루 활동에 대한 활동 스케줄을 구축하기 위해 활동에 대한 정의가 필요하다. 활동은 종류가 상당히 다양하므로 특성에 따라 그룹화 하는 것이 필요하다. 이러한 구분은 분석의 목적이나 활용방안에 따라 다양하게 나누질 수 있으며 특히 통행행태와 관련된 연구에서는 보다 다양한 구분이 가능하다.

〈표 3〉은 개인의 활동에 대한 본 연구에서의 구분을 나타낸다.

- 가정활동(Home/Maintenance)
- 업무·학교활동(Work/School)
- 쇼핑활동(Shopping)
- 여가활동(Recreation)
- 기타활동(Other)

〈표 3〉 활동(activity)의 구분

구분	활동
(1) 가정활동	청소/수리 및 관리 식사 샤워/드레스
(2) 업무/학교활동	업무 학교활동(학생) 자원봉사업무
(3) 쇼핑활동	백화점 식품점/약국 잡화점 비디오대여 기타서비스
(4) 여가활동	체력단련 영화감상 체육활동 비디오감상 산책 외식 휴식 조깅/자전거타기 등
(5) 기타활동	병원 학생수송 은행업무 심부름/배달 방문 중요행사

가정활동은 집에서 일어날 수 있는 여러 가지 활동을 포함하는데 식사, 청소, TV시청 등이 해당되며, 업무 및 학교활동은 업무 및 업무관련 회의활동을 포함한다. 쇼핑은 물건을 구매하는 모든 활동을 의미하여 여가활동은 운동, 영화관람, 취미생활 등으로 정의 하였다. 이런 범주에 포함되지 않은 다른 활동들은 기타활동에 포함하였다.

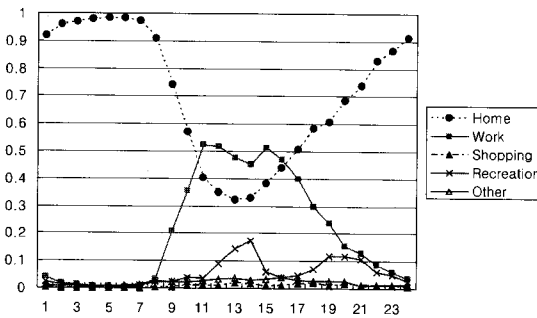
3. 활동스케줄(Activity Schedule) 구축

활동스케줄은 하루 중에 일어난 모든 활동들의 시간적인 순서집합인데 구성요소는 다음과 같다.

- 활동 빈도(Activity frequency)
- 활동 지속기간 및 시간 분배(activity duration and time allocation)
- 공간 분배(spatial or space allocation)
- 출발시간 결정(departure time decision)
- 정지 및 통행 사슬 특성(stop and trip chain characteristics)

활동지속 시간은 활동의 종류에 따라 다양할 수 있으나 분석의 목적에 따라 활동시간의 분배를 분단위 또는 시간단위로 조정이 가능하다. 각각의 활동의 종류와 지속 시간, 다음 활동을 위한 출발시간, 활동사슬의 특성 등은 가구단위 개인의 활동기반 조사를 통해서 얻어 질 수 있다. 활동스케줄을 구성하는 각각의 항목들은 개별적으로 모형화 할 수 있으며 이러한 개별 구성 요소를 결합하여 일일 활동스케줄(activity schedule)을 구축할 수 있다.

본 연구에서는 활동스케줄의 복잡성을 단순화하고 활동기반 수요예측모형에 적용이 쉬운 활동프로파일(activity profile)을 구축하도록 한다. 활동프로파일은 활동스케줄에 대한 모형구축 시 요구되는 많은 변수추정을 하지 않고 활동기반모형에 적용할 수 있는 장점이 있다(Ma, 1997, Bhat&Koppleman, 1999). 활동프로파일은 개인의 활동순서(activity sequence), 시간(hour), 활동지속시간(duration)에 대한 자료를 기반으로 각 활동인구 그룹별로 집합화(aggregate)하여 각 시간 t에 활동 j를 수행할 비율을 구하게 된다. <그림 2>는 노스캐롤라이나 주립대 학생들의 활동프로파일로서 시간대별 활동을 그림으로 표현한 것이다.



<그림 2> 학생들의 24시간 활동 프로파일

그림에서 보는 바와 같이 오전 9시 이후에 수업 및 연구관련 활동이 증가하고 정오와 저녁시간에는 여가활동 및 쇼핑활동이 증가하며 오후 9시 이후부터 다음날 오전까지는 가정활동이 주를 이루게 됨을 알 수 있다.

4. 공간적 활동용량 설정

활동인구를 공간적으로 분포시키기 위해 목적지의 토지이용별, 즉 건물용도 또는 사업자등록, 고용자수 등의 정보를 이용하여 각각의 활동에 대한 용량을 정의한다.

활동용량이 큰 토지이용은 많은 사람들이 활동을 수행할 수 있다. 이러한 활동용량은 본 연구에서는 활동인구의 목적지 선호도를 고려한 목적지 선택모형(Destination choice model)을 구축하여 상대적인 활동용량(relative activity capacity)을 구하였다.

각 활동별 활동자(i)의 목적지 선택을 위한 효용함수는 다음과 같다.

$$U_{id} = \alpha_d + \beta_{dp}P_i + \beta_{dT}T_i + \epsilon_{id} \tag{1}$$

- 여기서, U_{id} : 목적지 d에 대한 개인 i의 효용
- α_d : 특정 목적지 d에 대한 상수
- β_d : 추정 파라메타
- ϵ_{id} : 임의확률 구성요소(Gumbel 분포)
- P_i, T_i : 개인 i의 성향 및 통행 속성 벡터

활동자의 목적지 선택을 활동에 대한 효용극대화로 가정을 하면 목적지 선택을 위한 확률은 다항로짓모형(Multinomial Logit Model)에 추정된 파라메타와 다음 식에 의해 결정된다.

$$P_{id} = \frac{e^{U_{id}}}{\sum_{d \in D_i} e^{U_{id}}} \tag{2}$$

- 여기서, P_{id} : 개인 i의 목적지 d를 선택할 확률
- U_{id} : 개인 i의 목적지 d에 대한 효용
- D_i : 개인 i의 모든 선택가능한 목적지 대안

본 연구에서는 학생들의 모든 일일활동자료와 학교건물정보를 연계하여 활동이 일어난 장소를 GIS의 주소매칭 기능을 통해 확보하였다. 목적지선택모형은 자료의 제약으로 인해 모든 목적지(건물)을 대상으로 구축하기 어려우므로 건물의 기능별로 크게 8개 선택대안, 즉 중속변수를 강의실, 도서관, 학생 복지시설, 기숙사, 연구동, 사무동(교무과), 체육시설, 기타시설로 구성하였다. <표 4>는 목적지선택 모형을 구축하기 위해 최종적으로 선택된 변수와 코딩내용을 나타내고 있다.

변수선택을 위해 변수 간 상관관계여부를 검사하여 최종적으로 개인특성변수와 통행시간변수가 포함되었다. 본 연구에서는 다항로짓모형 추정을 위해 SAS(v.9.1.)의

〈표 4〉 목적지선택모형 선택변수

변수명	변수 설명	코딩
Age	나이	Continuous
Credit	등록학점	Continuous
Gender	성별	1: Male 0: Female
Estatus	학력사항	1: Under 0: Graduate
Sstatus	학생신분	1: Full-time 0: Part-time
Residence	주거사항	1: On-campus 0: Off-campus
License	운전면허소유	1: Yes 0: No
Employment	직업사항	1 if full-time worker 1 if part-time worker 1 if volunteer 1 if unemployed
Ttime*	통행시간(분)	Continuous

CATMOD 프로그램을 사용하였으며 최우추정(Maximum Likelihood)을 활용하여 계수 값을 추정하였다.

〈표 5〉는 활동별 목적지 선택 모형 전체의 적합도를 나타내는 것으로 각 변수가 결과에 미치는 영향을 나타낸다. SAS CATMOD에서는 각각의 활동별 목적지 선택 모형의 유의성을 Rho-square 대신 Log-likelihood 값으로 제시하며 p-value의 값이 클수록 모형의 적합성이 높다고 할 수 있다(Paul D. Allison, 1999). 제시된 목적지 선택모형은 p-value가 모두 1.0이어서 적합한 것으로 판정되었다. 목적지 선택모형 중 쇼핑목적지에 대해서는 모형의 변수가 추정되지 않았는데 이는 학

생들의 학교 캠퍼스 내에서 쇼핑활동이 많지 않음으로 인해 모형추정을 위한 자료가 충분하지 못하였다.

〈표 6, 7, 8〉은 학교/업무(School/Work)활동, 여가(Recreation)활동, 기타(Other) 활동 등에 대한 목적지 선택모형 추정결과이다. 학교/업무 활동에 대한 목적지 선택모형 추정결과를 살펴보면 학생의 나이가 증가할수록 강의실, 연구실, 기숙사 등 전반적인 시설에 대한 선호도가 낮은 것으로 나타났으며 이는 나이가 많은 학생들이 대부분 파트타임 학생으로 구성되어 있기 때문인 것으로 분석된다. 학점을 많이 이수하는 학생들의 경우 기숙사, 학교사무실 등에 대한 선호도가 도서관 등 학업 시설에 비해 낮은 것으로 나타났다. 학교기숙사(On-campus resident)에 주거하는 학생들은 기숙사와 학교체육시설에 대한 선호도가 학교외부에 거주하는 학생들에 비해 높은 것으로 나타났다. 통행시간은 도서관을 선택하는 학생들에게 (-)음의 관계에 있는 것으로 추정되었지만 다른 변수에 비해 목적지 선택에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었다. 여가(Recreation)활동에 대한 목적지 선택모형 결과를 보면 성별, 주거사항 등이 영향을 미치는 변수인 것으로 분석되었다. 남학생이 여학생에 비해 도서관, 학생회관, 기숙사, 체육관 등에 대한 선호도가 높은 것으로 나타났다.

기타(Other)활동에 대한 결과는 자료의 부족 등으로 인해 '나이' 변수에 대해서만 통계적으로 유효한 것으로 나타났다. 즉, 나이가 많을수록 강의실, 학생회관, 기숙사에 대한 선호도가 낮은 것으로 분석되었다.

〈표 5〉 목적지선택모형 변수들에 대한 최우추정(Maximum Likelihood Analysis of Variance) 결과

변수	활동(Activity)					
	학교/업무(School/Work)		여가(Recreation)		기타(Other)	
	χ^2	Pr > χ^2	χ^2	Pr > χ^2	χ^2	Pr > χ^2
Age	21.31	0.0033**	—	—	12.74	0.0786
Credits	15.32	0.0321*	—	—	5.91	0.5499
Gender	5.38	0.6137	35.44	<0.0001**	—	—
Estatus	—	—	—	—	—	—
Sstatus	—	—	—	—	—	—
Residence	18.77	0.0089**	59.87	<0.0001**	—	—
License	—	—	—	—	—	—
Empl.	—	—	—	—	—	—
Ttime	16.39	0.0218*	—	—	—	—
N	1,560		627		97	
DF	7		6		7	
LL ratio	1431.10(df:6e3)		140.26(df:402)		265.99(df:581)	
p-value	1.0000		1.0000		1.0000	

주: 전체분석 유효 자료수 2293. 신뢰도수준: **p<0.05, ***p<0.01. 추정된 파라메타의 신뢰도 수준이 90%이하인 경우 파라메타 값을 생략하였음.

〈표 6〉 학교/업무(School/Work) 활동에 따른 목적지 선택모형 추정결과

변수	목적지(건물)					
	강의실	도서관	기숙사	연구실	학교 사무실	체육관
Intercept	8.8461**	5.3247**	7.8205*	8.3718*	7.9237*	8.0961*
Credit	—	—	-0.3409*	-0.2524	-0.2842*	—
Residence	—	—	2.8306*	—	—	1.8191
Age	-0.0753*	—	-0.1432	-0.1679*	-0.1342	-0.1972*
Travel Time	—	-0.0883*	—	—	—	—

주: 신뢰도수준: **p<0.05, ***p<0.01. '기타시설'을 기준으로 하여 파라메타를 추정함.
추정된 파라메타의 신뢰도 수준이 90%이하인 경우 파라메타 값을 생략하였음.

〈표 7〉 여가(Recreation)활동에 따른 목적지 선택모형 추정결과

변수	목적지(건물)					
	강의실	도서관	학생회관	기숙사	학교사무실	체육관
Intercept	2.3937**	—	2.5483**	—	—	2.0012
Gender	—	2.7096*	2.2264**	1.6962*	—	2.4708**
Residence	—	-3.5345*	—	—	—	—

주: 신뢰도수준: **p<0.05, ***p<0.01. '기타시설'을 기준으로 하여 추정함.
추정된 파라메타의 신뢰도 수준이 90%이하인 경우 파라메타 값을 생략하였음.

〈표 8〉 기타(Other)활동에 대한 목적지 선택모형 추정결과

Variable	목적지(건물)		
	강의실	학생회관	기숙사
Intercept	6.2477	21.7019*	17.9458**
Age	-0.1351	-0.8008*	-0.6019**

주: 신뢰도수준: **p<0.05, ***p<0.01. '기타시설'을 기준으로 하여 추정함.

활동별 목적지 선택모형의 결과를 바탕으로 각 개별 건물의 활동용량은 개별 건물을 목적지 그룹(8개)으로 구분한 뒤 개별 건물의 면적에 활동별 목적지선택 확률을 적용하여 개별건물의 상대적인 활동용량을 설정하였다. 즉, 전체 건물에 대하여 목적지선택 모형을 추정하기 어려우므로 식(3)과 같이 개별 건물을 목적지선택모형에 포함된 8개 그룹으로 구분하고 활동별로 추정된 목적지선택 확률을 개별 건물의 속성(면적)곱하여 전체건물의 총합대비 개별건물의 상대적인 비율을 건물단위 용량으로 설정하였다.

$$RC_i^j = \frac{p_d^j \times S_{i \in d}}{\sum_i (p_d^j \times S_{i \in d})} \quad (3)$$

여기서, RC_i^j : 건물i의 활동j를 위한 공간용량
 p_d^j : 활동j를 위한 건물타입 d를 선택할 확률
 $S_{i \in d}$: 건물타입 d에 속한 건물 i의 면적(1,000 sq-feet)

개별건물단위의 활동용량이 클수록 보다 많은 수의 활동인구가 유입될 수 있음을 의미한다.

5. 활동인구의 시·공간적 배분

앞에서 언급한 시간단위 활동 스케줄(프로파일)에 의해 각 시간대별 활동에 참여할 비율이 결정되면 전체 활동 인구수를 통해 각 시간대별 활동별 활동인구수가 결정이 된다. 활동인구는 다시 활동의 공간적 목적지 선택에 의한 공간 활동용량이 결정 되면 다음 수식(4)와 같이 시간 및 공간별로 활동인구의 배분이 가능하다. 즉, 시·공간별 활동인구의 추정이 가능하게 된다.

$$Z_{i,j,g}(t) = P_{jg}(t) \cdot N_g \cdot RC_{ij}^j \quad (4)$$

여기서, $Z_{i,j,g}(t)$: 시간(t)에 존 i에 존재하는 활동인구 g에 속한 사람들 중 j 활동을 하고 있는 사람의 수
 $P_{jg}(t)$: 시간(t)에 활동 j를 수행할 비율
 N_g : 활동인구 g에 속하는 사람의 수
 RC_{ij}^j : 활동 j에 대한 존 i에서의 공간활동용량

본 연구에서는 학교캠퍼스의 각 시설물(건물)단위로 학생들을 시간대별로 배분시킴으로서 시·공간 활동인구

(Activity Presence)를 추정하였다. 추정된 활동인구와 실측자료의 비교 결과는 다음 장에서 제시하였다.

6. 통행수요 추정

통행량 추정은 활동자료를 이용하여 시간대별 목적지별 활동자들 중에서 실제로 통행할 확률 (conditional travel probabilities) 모형을 구축한 후 이를 시공간적으로 배분된 활동인구에 적용하여 추정한다. 다음 식은 주어진 시간(t)과 특정 활동(j)을 하는 활동인구그룹(g)에 속한 사람들이 통행을 할 확률을 나타낸다.

$$P(Y=k|j, g, t) \tag{5}$$

여기서, k : 통행

j : 활동 타입

g : 활동인구 그룹

t : 시간대(1-24hr)

시간대별로 활동인구의 통행확률은 다항로짓모형(Multinomial Logit Model)에 의해 추정하였으며 추정된 통행은 개인의 효용을 최대한 만족시키는 것이 가장한다. 추정된 통행확률은 시간대별, 활동별, 활동그룹별 추정된 활동인구에 적용되어 시간대별 통행량이 결과적으로 산출된다. 즉 존(i)에서 시간(t)에 발생되는 통행량은 추정된 활동인구수와 통행확률을 적용하여 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$Z_{i,j,g}(t) \times P(Y=k|j, g, t) \tag{6}$$

추정된 통행량은 통행발생과 도착으로 구분하여 추정할 필요가 있으며 통행발생 도착량의 추정은 다음 식에서 보는 바와 같다. 통행발생은 존(i)에서 활동인구그룹(g)에 속하고, 활동(j)을 하던 활동인구중 시간(t)에 발생한 통행량으로 정의한다. 도착통행은 발생통행량과 같으나 시간(t-1)에 이루어진 통행으로 정의한다. 도착통행의 특성상 발생한 통행에 대한 도착의 개념이므로 시간(t-1)에 발생한 통행으로 가정한다. 이는 연쇄활동(activity chain)의 개념으로 설명되는데 현재의 활동은 이전활동으로부터 연결되어있고 다음활동의 이전활동으로 정의되기 때문이다. 시간(t)는 분석의 기준에 따라 분단위(minute) 또는 시간단위(hour)로 필요에 의해

서 정의될 수 있다.

$$P_{i,g}(t) = \left(\sum_j Z_{i,j,g}(t) \cdot P(trip|j, g, t) \right) \tag{7}$$

$$A_{i,g}(t) = \left(\sum_j Z_{i,j,g}(t) \cdot P(trip|j, g, t-1) \right) \tag{8}$$

여기서, $P_{i,g}(t)$: 존 i에서 시간(t)에 활동하는 인구 g의 발생 통행량

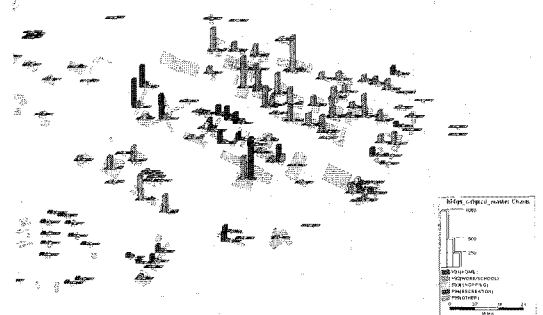
$A_{i,g}(t)$: 존 i에서 시간(t)에 활동하는 인구g의 도착 통행량

III. 실측자료 비교 검증

1. 활동인구 추정 및 검증

시간대별 활동인구의 추정은 앞에서 제시한 방법론을 통하여 전체 학생인구를 시간대별 활동스케줄(activity profile)을 통해 각 시간대별 몇 명의 학생들이 어떤 활동을 할 것인지를 추정하게 되며, 추정된 활동인구(대학생)는 공간적 활동용량에 따라 공간적으로 분포시킨다. <그림 3>은 오전 9시-10시의 각 건물별로 추정된 활동별 학생 수를 보여주고 있다. 막대그래프의 크기는 해당 시간대에 각각의 활동을 위해 건물에 존재하고 있는 학생 수를 표현하고 있다.

시공간 활동인구의 검증자료는 학생들의 수업등록 자료에 나와 있는 수업시간과 장소 등의 전산화된 자료를 통해 강의실별 시간대별 학생 수를 파악하였으며 이렇게 파악된 자료와 추정된 활동(학교활동)인구를 비교하였다. 활동인구 추정치와 실측치의 직접적인 비교를 위해



<그림 3> 건물별 학생들의 시·공간 활동인구 추정 (09:00-10:00)

〈표 9〉 건물별 활동인구 추정 결과

건물명	추정 학생수	등록 학생수	%Deviation
Jordan Hall	1570	1229	27.8%
Biltmore Hall	2840	1304	117.7%
Schaub Food Science Building	642	234	174.5%
D.S. Weaver Labs	1066	1011	5.4%
Harrelson Hall	19414	11438	69.7%
Kilgore Hall	1320	966	36.7%
Nelson Hall	7864	6338	24.1%
Bostian Hall	2821	3514	-19.7%
Williams Hall	3879	2162	79.4%
David Clark Laboratories	1313	553	137.2%
Polk Hall	2059	896	129.7%
Gardner Hall	2982	1190	150.5%
Broughton Hall	4134	2442	69.3%
Mann Hall	4217	2157	95.5%
Riddick Engineering Labs	5083	3266	55.6%
Daniels Hall	4267	4302	-0.8%
Withers Hall	3589	5997	-40.1%
Kamphoefner Hall	1599	334	378.3%
Brooks Hall	1333	814	63.8%
Leazar Hall	442	1261	-65.0%
Poe Hall	6023	5390	11.7%
Carmichael Gymnasium	4929	3782	30.3%
Textile Building	1968	1950	0.9%
Winston Hall	3991	4503	-11.4%
Caldwell Hall	2948	2092	40.9%
Tompkins Hall	4616	4236	9.0%
Reynolds Coliseum	44	273	-83.9%
Price Music Center	144	584	-75.4%
Dabney Hall	6439	2865	124.8%
Cox Hall	2808	1508	86.2%
Total	106342	78590	35.3%

강의실 용도로 사용되고 있는 30개 건물에 대해서 각 시 간대별로 비교하였다.

〈표 9〉는 건물별 학교활동의 추정 학생 수와 실측 학생 수를 직접비교한 결과를 보여주고 있다. 실측치는 수업을 받는 학생 수인데 반해, 추정치는 수업을 포함한 모든 학교활동(수업, 학습, 기타 연구활동 등)을 포함하고 있음에 따라 다소 차이를 보이고 있으나 활동인구 추정 이 양호하게 수행되었음을 보이고 있다.

〈표 10〉은 활동인구에 대한 시·공간 실측치와 추정 치의 적합도를 R2 값을 통해 제시하였다.

〈표 10〉 인구 추정치와 관측치의 비교 결과

구분	관측자료 수	R2
공간대비(건물)	30	0.8132
시간대비 (임의 1시간)	13	0.6649

$$R^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^n (obs_i \times est_i) - \frac{(\sum_{i=1}^n obs_i) \cdot (\sum_{i=1}^n est_i)}{n} \right)^2}{\left(\sum_{i=1}^n est_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n est_i)^2}{n} \right) \times \left(\sum_{i=1}^n obs_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n obs_i)^2}{n} \right)}$$

여기서, obs_i : 건물i의 실제 학생수(수업기준)

est_i : 건물i의 실제 학생수(전체 학교활동)

n : 총 건물의 수

전체 30개의 강의실 용도로 사용되는 건물에 대한 비 교결과 공간적으로 추정된 학생 수(추정치)는 실측치에

〈표 11〉 활동인구 추정치와 관측치의 비교 결과

건물명	시간대		관측치			추정치			%Deviation		
	시작	종료	유입	유출	소계	유입	유출	소계	유입	유출	계
Library	15:00	16:00	306	264	570	275	325	600	-10.1%	23.1%	5.3%
Talley Std Center	10:00	11:00	320	269	589	264	317	581	-17.5%	17.8%	-1.4%
Broughton Hall	15:00	16:00	51	52	103	120	142	262	136.0%	172.9%	154.7%
Winston Hall	13:00	14:00	179	156	336	130	118	248	-27.5%	-24.5%	-26.1%
Caldwell Hall	16:00	17:00	49	43	92	61	81	142	23.5%	88.1%	53.6%
Tomkins Hall	16:00	17:00	112	98	210	91	120	211	-18.8%	22.8%	0.6%
Mann Hall	13:00	14:00	31	84	115	113	109	222	267.0%	30.0%	93.7%
Patterson Hall	9:00	10:00	38	28	67	13	10	23	-66.2%	-64.6%	-65.5%
Poe Hall	11:00	12:00	320	331	652	224	240	464	-30.1%	-27.6%	-28.8%
Dabney	12:00	13:00	122	180	302	233	237	470	91.1%	31.3%	55.4%
Cox	12:00	13:00	60	89	149	103	107	210	71.3%	20.3%	40.8%
Polk Hall	11:00	12:00	93	83	176	81	85	166	-12.9%	2.4%	-5.7%
Daniels Hall	16:00	17:00	61	65	126	81	106	187	33.1%	62.5%	48.3%
Park shop	9:00	10:00	30	33	63	23	17	40	-22.6%	-48.2%	-36.0%
계			1773	1776	3549	1812	2014	3826	2.2%	13.4%	7.8%

대비하여 81%의 적합도를 보임에 따라 비교적 정확하게 추정되었으며, 전체 13시간에 대하여 추정된 학생 수 또한 실측된 학생 수 대비 약 66%의 적합도를 보이는 것으로 나타났다.

2. 통행량 추정 및 검증

본 연구에서는 모든 건물과 전체 시간대에 대한 전수 조사의 어려움으로 인해 14개의 강의 건물을 대상으로 임의의 1시간 통행량을 관측하여 검증자료를 구축하였다. 통행량 관측은 조사원이 선택한 임의의 한 시간에 대하여 건물의 모든 유·출입구에서 수행되었다.

통행량은 앞에서 언급한 바와 같이 시공간적으로 분포된 활동인구에 추정된 조건부 통행(trip) 확률을 적용함으로써 예측되었다.

〈표 11〉은 건물별로 관측된 통행량과 예측된 통행량을 비교한 표이다. 전체 14개 건물의 총 유입에 대한 예측 통행량은 관측 통행량과 비교하여 2.2% 오차를 보이고 있으며, 유출 통행량은 관측량과 비교하여 약 13%의 오차를 보임에 따라 활동인구 추정에 따른 통행량 예측이 상당히 정확함을 보이고 있다.

개별 건물별로는 오차의 범위가 다양하게 나타나고 있으나 전체적으로 건물의 활동용량이 큰 경우에 상대적으로 많은 통행의 유입과 유출을 보임에 따라 관측된 통행량과 유사한 결과를 보이고 있음을 알 수 있다.

본 연구에서 제시한 방법론에 의해 추정된 통행량이 정산(calibration)되지 않은 점을 고려하였을 때 이러한 결과는 상당히 고무적이라 할 수 있다.

본 연구의 활동기반 모형의 정산대상은 활동스케줄과 관련하여 활동별 활동지속시간, 활동의 수, 활동시작 및 종료시점 등에 대한 정산이 될 수 있으며 목적지 선택모형과 관련하여 건물별 또는 준별 활동인구 자료와 비교하여 차이를 보정하는 과정 등이 포함 될 수 있다. 일반적으로 정산된 모형은 정산되지 않은 모형에 비해 예측력이 우수함에 따라 이러한 정산과정을 거쳤을 경우 보다 정확한 결과가 예상된다.

IV. 결론 및 향후 연구 주제

기존의 교통수요모형은 교통존(TAZ)단위의 집합화(aggregated)된 자료를 이용하여 교통수요를 추정하기 때문에 개개인의 통행행태를 반영하지 못하는 문제점을

가지고 있다. 본 연구에서는 이러한 기존 교통수요모형의 단점을 보완할 수 있는 시공간 활동인구 추정을 통한 교통수요예측 방법론에 대하여 제시하였다.

활동기반 모형에서는 통행을 개인의 활동에 의해 유발되는 부수적인 행위로 정의하였으므로 개인의 활동에 대한 분석이 필수적이며 통행량을 예측하기 위해서는 이러한 개인의 활동들이 시간적 공간적으로 어떻게 연관되어 있는지에 대한 분석이 필요하다. 따라서 이러한 방법론을 적용하기 위해서는 기존의 가구통행실태 조사보다 복잡한 활동기반(activity-based) 통행실태 조사 자료의 확보가 필수적이며 공간적인 활동범위의 지정과 활동용량을 정의하기 위해 분석공간에 대한 지리정보(Geographic Information System) 데이터의 확보가 중요하다.

본 연구에서는 국내 자료의 제한으로 인해 미국 노스캐롤라이나 주립대 학생들의 캠퍼스 활동 및 통행실태 자료를 이용하여 분석사례를 소개하였다. 분석결과 추정된 캠퍼스 내의 시공간 학업(School)활동학생 수는 실측치와 비교한 결과 비교적 정확하게 추정된 것으로 나타났다. 특히, 공간적인 활동인구에 대한 추정이 정확하게 수행되었는데 이는 각각의 활동에 대하여 공간적인 선호도와 GIS자료에 포함된 건물의 용도, 면적, 시설내용 등에 대한 자료의 역할이 큰 것으로 판단된다. 통행량 예측은 추정된 활동인구에 확률개념을 적용하여 통행발생과 도착량을 예측하였으며 관측치와 비교한 결과 우수한 예측 결과를 보이는 것으로 나타났다.

이러한 방법론의 기대효과로서 활동기반 교통수요모형은 거시적 교통수요예측 뿐만 아니라 미시적 분석을 가능하게 하므로 다양한 교통수요관리(TDM) 정책의 효과분석에 유용하게 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

향후 연구는 본 연구에서 소개된 활동기반 교통수요모형을 국내 적용하기 위해 활동기반 통행실태의 조사와 공간정보에 대한 자료의 구축이 필수적이며, 활동기반교통수요 추정방법이라는 새로운 분석방법의 적합성과 우수성에 대한 검증을 위해 다양한 적용사례 연구가 필요할 것으로 예상된다.

참고문헌

1. Hägerstrand, T.(1970), "What about people in regional science?," Regional Science Association Papers, Vol. 24, pp.7~21.

2. Chapin, F.S. (1974), "Human Activity Patterns in the City," Wiley, New York.
3. Activity-based modeling system for travel demand forecasting, Travel Model Improvement Program, U.S. Department of Transportation, 1995.
4. A system of activity-based models for Portland, Oregon, Travel Model Improvement Program, U.S. Department of Transportation, 1998.
5. Activity and Tour-based model seminar, Cambridge systematics, Inc, 2004.
6. Arentze, T. and Timmermans, H.(2000), "ALBATROSS: A Learning Based Transportation Oriented Simulation System," European Institute of Retailing and Service Studies.
7. Timmermans, H.J.P., T.A. Arentze and C.H. Joh (2000), "Modeling learning and evolutionary adaptation processes in activity settings: Theory and numerical simulations," Transportation Research Record, Vol. 1718, pp.27~33.
8. Bhat, Ch., and F.S. Koppelman. "A Retrospective and Prospective Survey of Time-Use Research." Transportation(Kluwer Academic Publisher) 26(1999): pp.119~139.
9. Ma, June. "An Activity-Based Approach and Micro-simulated Travel Forecasting System: A Pragmatic Synthetic Scheduling Approach." PhD Thesis, The Pennsylvania State University, Department of Civil and Environmental Engineering, University Park, Pennsylvania(1997).
10. McNally, M. G. "The Activity-Based Approach." In Handbook of Transport Modelling.
11. Bowman, J.L. and Ben-Akiva, M.E.(2000), "Activity based disaggregate travel demand model system with activity schedules," Transportation Research Part A, Vol.35, pp.1~28.
12. Pendyala, R.M., Kitamura, R. and Reddy, D.V.G.P.(1998), "Application of an activity-based travel demand model incorporating a rule-based algorithm," Environment and Planning B, Vol.25,pp.753~772.
13. Kitamura, R., Lula and Pas E.(1993) "AMOS: An activity-based, flexible and truly behavioral tool for evaluation of TDM measures," PTRC.
14. Kuhnau, J.L.,(2001) "Activity-Based Travel Demand Modeling within the Urban Transportation planning System", Master Thesis, The Pennsylvania State University, Department of Civil and Environmental Engineering, University Park, Pennsylvania.
15. Allison, Paul David(1999) Logistic regression using the SAS system: theory and application, SAS Institute Inc, Cary.

✉ 주 작 성 자 : 엄진기

✉ 교 신 저 자 : 엄진기

✉ 논문투고일 : 2008. 1. 18

✉ 논문심사일 : 2008. 3. 10 (1차)

2008. 5. 17 (2차)

2008. 9. 9 (3차)

✉ 심사판정일 : 2008. 9. 9

✉ 반론접수기한 : 2009. 2. 28

✉ 3인 익명 심사필

✉ 1인 abstract 교정필