

통합토지이용 교통모형의 운용 방안에 관한 연구*

김주영** · 이승재***

A Study of Operation Mechanisms of the Integrated Land-Use-Transportation*

Joo Young Kim** · Seung Jae Lee***

요약 : 본 연구는 토지이용-교통 통합모델 구축을 위한 사전연구로서 PECAS, DELTA, UrbanSim 등 국내외의 적용모델들을 고찰하고, 토지이용-교통 통합모델의 실제 적용을 위해 CUBE-LAND를 사례로 하여 수요와 공급모델 등 전반적인 운용원리를 파악하여 통합모델 구축을 위한 기반을 마련하는 데 연구의 목적이 있다. CUBE-LAND의 경우 미시경제학의 소비자 이론을 기반으로 교통시스템과 토지이용의 관계를 구명하는 모형으로, 수요와 공급 사이의 평형에 도달하기 위해 Bid-Rent 함수를 이용하여 부동산의 수요와 공급을 조절하게 된다. 이를 통하여 수요와 공급의 상호작용 관계 분석이 가능하고, 토지이용과 교통체계의 상호 연관성을 분석할 수 있다. 이는 지속가능한 교통 및 도시정책을 평가하고 시나리오 분석을 수행하는 데 매우 활용성이 높다고 볼 수 있다. 향후 서울시에 통합토지이용 교통모델을 구축하고 계획지원시스템으로 활용하기 위한 사전연구로서 CUBE-LAND는 큰 역할을 할 것이며, 본 연구는 이를 위한 사전연구의 의미를 가질 수 있을 것이다.

주제어 : 토지이용 교통 통합모델, CUBE-LAND, 지속가능성, 입찰지대함수

ABSTRACT : We examined domestic and international trends as this study is prior study to build a land use-transportation integrated model. This study aimed to Analyze PECAS, DELTA, UrbanSim, other models used internationally and understood domestic model development trends. To use a land use-transportation integrated model, We analyzed the principles of demand and supply model according to CUBE-LAND case. CUBE-LAND forecasts land use and transportation system by simulating the real estate market under the economic conditions. CUBE-LAND controls the real estate market using a bid-rent function to achieve equilibrium of supply and demand. Using CUBE-LAND makes it possible to analyze the interaction of supply and demand relationship, land use and transportation relationship. It has high usability to evaluate the sustainable transport, urban policy and analysis of scenario. CUBE-LAND will be important role to use planning support system and construct land use-transportation integrated model in Seoul. This study will be contributive prior study for develop the land use and transportation integrated model.

Key Words : Land-use Transportation model, CUBE-LAND, Sustainability, Bid-Rend function

* 이 논문은 2010년도 서울시립대학교 교내학술연구비에 의하여 연구되었습니다.

** 서울시립대학교 박사과정(Ph. D. Student, University of Seoul)

*** 서울시립대학교 교수(Professor, University of Seoul), 교신저자(E-mail: sjlee@uos.ac.kr, Tel: 02-2210-2172)

I. 서론

최근 우리 사회를 비롯한 전 세계의 공통적인 관심사 중 하나는 에너지위기와 기후변화에 대처하는 것이다. 최근 신고유가 기록이 보여주듯이 에너지원의 대부분을 수입에 의존하는 우리나라는 '지속가능성' 측면에서 매우 큰 취약점을 내포하고 있다. 지속가능한 도시발전을 위해 저에너지 소비형의 도시공간구조를 지향해야 한다는 주장이 공감대를 형성하고 있으며, 도시에서 발생하는 온실가스를 저감시키기 위해서는 건물과 수송부문의 에너지 소비를 줄여야 하는데, 에너지 소비는 다양한 도시 활동으로 인해 발생하므로 여기에 영향을 미치는 공간구조 및 토지이용 정책과 교통 정책의 중요성이 강조되고 있다(이승일, 2010). 또한 도시민의 사회·경제활동에 미치는 영향을 최소화하며 도시구조와 다양한 물리적 시설에 저탄소 녹색성장의 기준에 부합하는 기준을 적용하기 위한 토지이용정책 및 교통정책의 시행은 오랜 시간과 막대한 비용이 필요하므로 도시민의 라이프스타일과 생활패턴의 변화를 고려한 토지이용-교통 통합모델이 필요하다.

토지이용계획은 도시지역 내의 한정된 토지를 도시에 필요한 활동과 환경성 확보를 위하여 합리적으로 사용·구분하는 계획이며, 교통계획은 이와같이 용도별로 구분된 토지의 내부 또는 상호간에 일어나는 도시 활동에 따라 발생하는 사람이나 물자의 유동을 처리하기 위한 계획이다. 도시계획 입장에서 보면 전자는 지역, 지구의 지정 등에 의한 용도규제이며, 후자는 도시 시설로서의 건설계획과 운용관리계획이 중심이 된다. 토지이용계획은 교통의 발생 원인이 되는 시설이나 건축물의 입지를 유도·규제하며, 한편 도시 시설로 정비된 교통, 공원, 공공시설 등을 점유한 도시 시설 건

축물의 입지, 즉 토지이용에 큰 영향을 미친다. 이러한 관계를 살펴본 결과 토지이용계획과 교통계획은 상호간에 밀접한 관계가 있다고 할 수 있다. 즉 토지이용이 교통을 유발시키지만, 교통은 또다시 토지이용에 변화를 초래한다. 흔히 도시에서의 교통문제는 이러한 토지이용과 교통의 인과적 상관관계 속에서 상호간의 부조화에 의해 발생된다. 이러한 맥락에서 토지이용과 교통의 통합 모형의 중요성이 강조된다.

지금까지 국내 도시환경에 적합한 교통과 토지이용에 관한 통합모형을 구현하기 위해 많은 연구가 시도되고 있다. 그러나 실제로 통합토지이용-교통모형을 수행할 수 있는 작동 가능한 소프트웨어의 활용과 데이터베이스 구축이 어렵기 때문에 실증적으로 활용되지 못하고 있는 실정이다. 교통계획가의 경우 교통수요는 외생적으로 주어지는 것으로 받아들여 4단계 모형을 운영해왔기 때문에 수요에 대응하는 공급능력 체계를 수립하는 것이 상당히 어려웠다. 반면에 토지이용 계획가들의 경우 다양한 경제활동의 입지가 토지이용의 변화 및 통행수요에 상당히 영향을 주는 동시에 교통부문의 투자에 따라서 토지이용이 영향을 받고 있음에도 불구하고, 실제로 토지이용계획 수립 시에 교통체계와의 상호작용을 파악하는 데 어려움이 있었다(이희연·김동완, 2006).

본 연구의 목적은 지속가능한 도시발전을 위해 필요한 통합토지이용-교통모형의 사전단계로서 토지이용-교통모형의 연구동향과 통합모형의 운용 방안에 대한 연구를 수행하고자 하는 것이다. 이를 통하여 궁극적으로는 토지이용-교통과의 상호 영향력을 분석하는 기반을 마련하고, 에너지 효율적인 도시 공간구조 구축 및 지속가능한 도시를 조성하는 정책 수립의 기반을 마련하고자 한다.

II. 토지이용-교통 통합모델 연구 동향

1. 국외 통합 토지이용-교통모형 개발

미국의 경우 1960년대부터 이론적 모형 개발을 시작하였으며, 그동안 다양한 모형의 개발과 적용 단계를 거쳐 현재는 다수의 MPO 또는 TMA에서 통합모형을 사용 중에 있다. 특히 미국의 146개 MPO 및 TMA 가운데 46%는 토지이용모형과 교통모형을 함께 운용하고 있는 것으로 나타났다. 운용되고 있는 토지이용모형으로는 자체 개발모형(22%), UrbanSim(15%), UPLAN 등 GIS 기반의 모형(12%), PECAS(9%), 정성적인 모형(9%), LTLUP(6%)이 있다. 또한 운용되고 있는 교통모형은 TransCAD(39%)와 CUBE(36%)가 대다수를 차지하고 있으며, 그 외에 EMMIE, TRANSPLAN, VOSOM 등이 운용되고 있는 것으로 나타났다(김유승, 2011).

국외의 토지이용-교통모형 관련 연구는 활발하게 진행되고 있으며, 구체적으로 모형의 소개와 비교·평가에서부터 모odel 이론과 모델링기법의 개발, 적용, 각종 정책평가에의 활용 등 다양한 용도로 모형이 사용되고 있다. 연구동향을 살펴보면 특정도시에 대하여 연구단계에 머물고 있는 모형(KI, STASA, ILUMASS, POLIS, CUF, IRPUD 등)부터 패키지 형태로 개발되어 다수의 도시에 적용 중인 모형(DELT A, MEPLAN, TRANUS, UrbanSim, PECAS, CUBE LAND 등)에 이르기까지 다양한 도시 통합모형을 쉽게 접할 수 있다(Wegener, 2004; Hunt et al., 2005).

현재 활발하게 사용 중인 도시통합모형은 다이내믹 모형(정확히 quasi-dynamic model)이 대부분이다. 도시통합모형을 이용하여 지속가능한 도시정책의 효과를 평가한 대표적인 사례로 EU프

로젝트인 SPARTACUS(3개 유럽도시에 대하여 MEPLAN 모형을 사용하여 환경문제를 포함한 지속가능한 도시정책의 장기적 영향을 비교·평가)와 PROPOLIS(7개 유럽도시에 대하여 TRANUS, MEPLAN, IRPUD를 적용하여 지속가능한 도시정책의 영향을 비교·평가)가 있다.

〈표 1〉 도시통합모형의 유형구분

구분		통합모형
정적 모형		IMREL(1991) DSCMOD(1992) MUSSA(1992)
		LILT(1983) DRAM/EMPAL(1983) METROPILUS(1995)
		MEPLAN(1969) TRANUS(1989)
동적 모형	엔트로피 기반	IRPUD(1982) DELTA(1998) UrbanSim(1998)
	공간경제 기반	

토지이용-교통모형은 실제 도시에 적용하여 정책 및 계획과정을 지원할 목적으로 활용하는 것이 필요하므로 가동성은 무엇보다 중요하다. 주로 북미의 도시와 유럽에서 활발하게 적용되는 모형들 중심으로 지역경제모형인 PECAS와 토지시장모형인 DELTA가 있다.

PECAS는 MEPLAN과 TRANUS와 같이 투입-산출모형이면서 역동성과 비집계성 측면이 개선된 모형로 상품, 서비스, 고용 등의 생산, 소비, 교환의 과정을 Technical coefficients(기술계수)로 나타내는 준-동적-균형구조(quasi dynamic equilibrium structure)를 기반으로 한다.

PECAS 내 공간적 경제시스템의 4가지 기본모듈은 시간, 입지, 토지(미개발), 개발토지의 취급

2. 국내 통합토지이용-교통모형 개발

아직까지 국내에 적용한 토지이용-교통모형은 없으나 기반이 되는 연구는 소수의 도시 및 교통 분야의 학자를 통하여 수행되었다. 관련된 연구는 기존 모델이론의 설명, 기존 모델의 비교·분석, 기존 모델의 국내적용, 모델 개발 등의 유형으로 구분될 수 있다.

첫 번째 유형으로 서구에서 활용되고 있는 모델의 이론과 운용기법을 소개하고 비교·분석한 연구는 다음과 같다. 김익기(1994)의 경우 Lowry-type 모델로서 ITLUP, Mills-type의 비선형 모델로서 김창호(1986)의 모델, 확률균형모델로서 김익기(1994)의 모델을 사례로 하여 이론적으로 비교·분석하였고 분석결과 Lowry-type 모델은 이론적 논리성은 부족하나 적용이 용이하고, Mills-type 모델은 투입-산출모델을 접목하여 일반균형상태를 설명할 수 있으나 예측력에 한계가 있으며, 확률균형모델은 이론적 일반균형상태를 충족하여 예측력이 있으나 현실적으로 적용하기 어렵다고 평가하였다. 이희연·김동완(2006)의 경우 토지이용-교통모델의 이론적 토대를 이루는 공간 미시경제모델, 공간상호작용모델, 공간선택모델을 고찰하였고, 김태경 외(2009)는 토지이용-교통모델을 도시성장관리모델로 정의하고, 기존 모델 중에서 미국의 대도시에서 활발하게 사용하고 있는 G-LUM, PECAS, UrbanSim을 사례로 삼아 세부 실행구조를 분석하였다.

두 번째 유형으로 서구에서 개발한 모델을 국내 도시 또는 국가에 실험적으로 적용한 연구가 있다. 김광식(2003)은 시드니 지역에 적용하여 활용 중인 TERSIS의 특성을 파악하여 서울시에 대한 적용 가능성을 검토하였으나 주요 모델변수의 파라미터가 상이하므로 서울과 같이 인구가 조밀

한 도시에는 적용하기 힘들다는 결론을 도출하였다. 권일 외(2004)의 경우 정책 중심의 규범적인 모델로서 GIS를 이용하여 수도권을 대상으로 인구증가에 따른 신규 시가지 개발의 필요량을 보전 지향 시나리오와 개발지향 시나리오에 대하여 각각 추정하였으나 양질의 다양한 공간정보의 부족으로 정교한 분석이 어려웠고, 기 구축된 정보의 활용도 보안문제 등으로 인하여 사용이 제한되었음을 모델도입과 활용의 문제점으로 제시하였다. 이희연(2007)의 경우 활용가능성이 높은 TRANUS를 용인시에 적용하여 도시성장관리 정책들의 장기적 효과와 영향력을 분석하여 토지이용-교통모델의 중요성을 확인하였고, 김태경 외(2009)는 G-LUM을 이용하여 경기도의 성장관리모델을 구축하였고 2000년과 2005년 두 시점에 대해 수도권 65개 시군구에 대한 고용자 수와 가구원 수, 토지이용자료 등을 분석자료로 사용하였다.

세 번째 유형으로 서구의 모델을 개선하였으나 실제 도시에 적용하지 않고 이론적으로 모델을 개발한 유형이 있다. Rho(1988)의 경우 김창호(1986) 모델의 비선형계획 모델의 해법을 개발하고 Chicago지역에 적용하여 가동가능성을 보여주었다. 김익기(1994)의 경우 Anas(1982)가 제안한 확률균형개념(Stochastic equilibrium concept)을 이용한 확률균형모형을 개발하고 가상도시를 대상으로 컴퓨터 프로그램의 개발을 통한 시뮬레이션 분석을 시행하였다. 유상균(2010)의 경우 이론 모형들과의 가장 큰 차이점은 기존 이론모형들에서 매우 간략하게 다루었던 교통부분의 한계점을 개선하고자 통행경로, 통행수단, 그리고 통행시간대를 모형내부에 추가하여 연구를 수행하였다.

앞서 살펴본 바와 같이 국내 연구는 아직까지 기존 기술모형의 보완 및 발전단계로서 평가될 수 있고, 정밀한 모형의 구축을 위해 실측자료의 필

요성 외에도, 각종 정책평가 등 다양한 용도로 통합모형을 사용하기 위한 모델링 기법 및 모델 운용방안에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Ⅲ. 토지이용-교통 통합모델의 운용 메커니즘

앞에서 살펴본 바와 같이 토지이용-교통 통합모델의 경우 해외의 많은 연구에서 실제 사례에 적용되고 있음을 알 수 있다. 또한 국내연구의 경우에도 통합모델구축에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있으나 실제 적용사례는 미흡하다고 판단된다.

따라서 본 논문에서는 토지이용-교통 통합모델의 실제 적용을 위해 현재 구현이 가능하도록 프로그램화되어 있는 소프트웨어 중 CUBE-LAND를 사례로 하여 통합모델의 운용메커니즘을 살펴보고 한다.

1. 토지이용-교통 모델의 구조

1) 입출력 구조

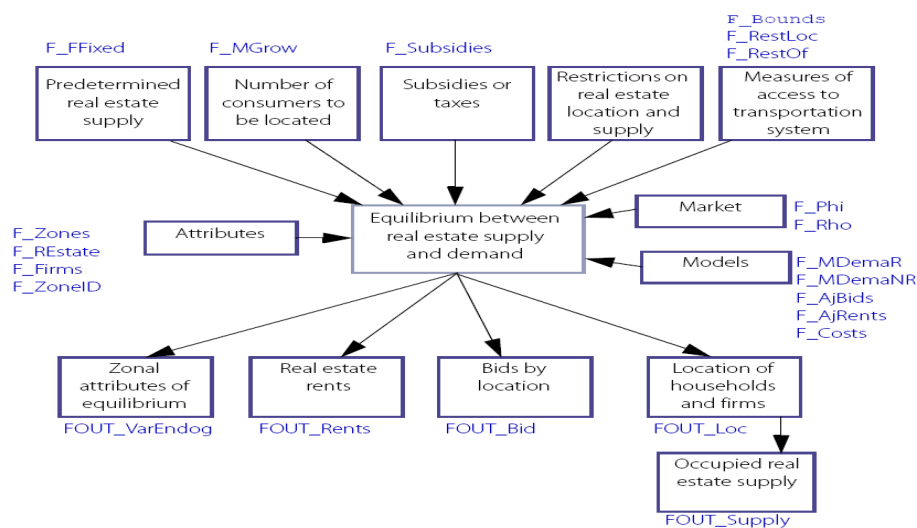
CUBE의 경우 ArcGIS와 연계된 교통-토지이

용과 연관된 모델로 토지이용, 가격, 주거지 및 직장 위치 등을 고려한 부동산시장 시뮬레이터이다. 그중 CUBE-LAND는 미국 Citilabs사에서 개발한 토지이용예측모델로서 도시의 부동산 시장을 설명 및 예측하고, 시뮬레이션 하기 위해 사용할 수 있는 프로그램으로서 CUBE VOYAGER와 연계하여 토지이용과 교통 간의 상호관계를 파악할 수 있다.

CUBE-LAND는 미시경제학의 소비자 이론을 기반으로 교통시스템과 토지이용의 관계를 규명한다. 시장균형을 결정하기 위한 접근방법은 Supply-Demand-Rent의 상호의존적 모델들로 이루어져 있으며, 각 모델들을 연구자가 Script로 직접 입력할 수 있다.

CUBE-LAND에 쓰이는 Input 데이터와 Output 데이터의 내용과 형태는 <그림 4>와 같다.

CUBE-LAND시뮬레이션은 도시에서의 경제적인 측면에서 의미가 있는 접근 방법을 사용하는 데, 그 접근 방법은 각각의 장소에 대한 접근성과 일치하며 한 지역에서의 장래에 예상되는 개발계획과 관련된다.



<그림 4> Cube Land의 입출력 구조

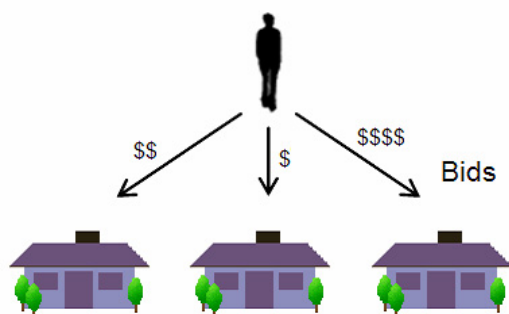
일반적인 특성은 Willingness to pay에 의한 인간의 행태예측으로 경제적 측면을 고려하여 부동산 유형별 주거와 기업의 입지모형을 포함한다.

2) 수요와 공급의 평형

CUBE-LAND는 미시경제학적 이론을 기반으로 교통시스템의 변화와 토지사용 측면의 변화 사이에서 일정한 관계를 분석한다.

분석의 기본은 수요와 공급의 평형을 유지하는 것으로 대별될 수 있는데 CUBE-LAND의 접근법은 수요와 공급과 임차료 등 세 개의 독립적인 모형을 구성하고, 가장 높은 입찰 소비자에게 할당되는 행동이론을 모형의 기반으로 한다.

수요모형에서 토지이용 선택과정은 가격의 결정과 지불의 적절성, 그리고 시장에서 각각의 공급 옵션 등을 고려한다. 주로 Bid함수를 이용한 경매이론이 사용되는데 이는 최대효용을 갖는 소비자가 입찰되는 것을 기반으로 한다.

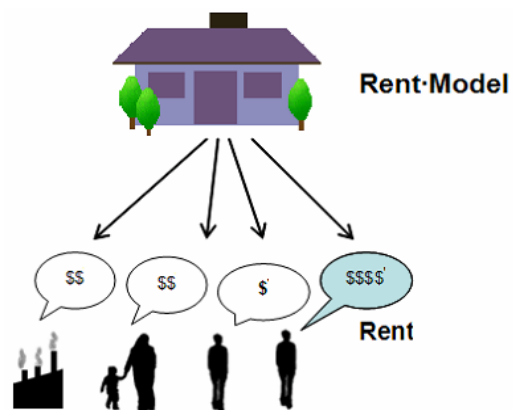


〈그림 5〉 거주속성과 위치에 기반한 소비자 입찰

공급모형은 이익의 극대화를 기반으로 한다. 이익 극대화를 위해 각 지역에서 제공하는 부동산의 양을 결정하게 되고 임차료와 생산 유지비용은 Logit 타입의 확률적 모델에 의하여 공급모형이 구성된다.

균형모형의 경우 공급모형과 수요모형을 연결

한다. 경매이론에서 수요자의 효용극대화 원리와 공급자의 이익극대화 원리에 의하여 임차료 모델이 구성된다. 다음은 Rent모형의 개념도를 나타내는데 그림에서와 같이 공급자는 Rent모형을 통해 수요자들에게서 이익극대화의 원리를 실현하고, 수요자는 효용극대화의 원리를 통해 공급자를 선택하게 된다.



〈그림 6〉 균형모델 개념도

전반적으로 CUBE-LAND의 경우 수요모형, 공급모형, 균형모형로 구성되며 수요와 공급 사이의 평형을 이끄는 상황을 예측한다. 평형에 도달하기 위하여 각 지역에서 부동산의 수요와 공급을 조절하게 되며 이러한 과정에서 임차료의 가치와 토지사용 등과 같은 변수들을 정의하게 된다. CUBE-LAND를 구성하는 세부 모형의 경우 다음에서 설명하는 바와 같이 운용메커니즘이 구성되어 있다.

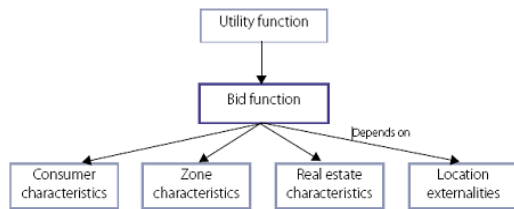
2. 수요모형의 구조

1) Bid함수

수요모형의 경우 기본적으로 경제학의 원리, 즉 소비자는 합리적이고 효용극대화를 하는 경제주

체라고 가정한다. 효용함수는 소비자의 선호가 나타나고 각 범주의 선호에 의존하는 일련의 매개변수를 가지고 있다.

토지이용에 관련된 수요를 계산하기 위하여 Bid함수를 이용하게 되는데, 이 경우 소비자의 특성을 나타내는 함수로 세대구성원 수, 소득, 세대의 나이가 고려되고, 부동산 특성으로는 건축지역, 면적, 높이, 접근성, 지역의 평균소득, 주거와 비주거지역 차이 등이 고려된다.



〈그림 7〉 Bid함수 특성

〈그림 7〉에서 볼 수 있듯이 Bid함수를 이용하여 각 대안에 대하여 소비자의 Willingness to pay를 계산하여 효용을 계산하게 된다. 이때에는 소비자의 특성, 존의 특성, 부동산가격, 장소적 특성 등의 요소가 고려될 수 있다.

2) 수요계산

토지에 대한 수요는 Bid함수를 기반으로 주거지, 업무지역의 특성에 따라 계산되어진다.

초기 수요의 계산에서는 입력자료에 따라 소비자들이 위치된다고 가정한다. B_{hvi} 는 위치한 지역 i 의 부동산 종류 v 에 대한 소비자 범주 h 의 입찰로 정의된다. 주어진 공급에 따라 각 세대 h 가 지역 i 에 v 타입의 건물에 위치할 확률 $p_{h/vi}$ 는 식 (1)과 같다.

$$P_{h/vi} = \begin{cases} 0 & h \notin \Omega_{vi} \\ \frac{\Phi_{hvi} H_h \exp(\mu B_{hvi})}{\sum_{g \in \Omega_{vi}} \Phi_{gvi} H_g \exp(\mu B_{gvi})} & h \in \Omega_{vi} \end{cases} \quad (1)$$

여기서,

- H_h = 범주 h 에 존재하는 총 소비자의 수
 H 는 도시의 총 소비자 수
 $H_h \in [0, H]$
- μ = MNL과 연관된 scale factor
 $\mu = 1$ 은 모델 결과에 영향을 미치지 않는다고 가정한다.
- Ω_{vi} = vi 에 지역의 경매에서 경쟁하는 소비자들의 집합
- Φ_{hvi} = cutoff function, 가정에 대한 소득 제한과 회사에 대한 예산 제한을 포함, 가정이나 회사가 경매에 참여할 때 지불능력을 초과하는 것을 예방

식 (1)에서 보면 범주 h 안에 소비자가 경매에 참여하지 않는다면 v 에 위치하는 가능성 i 는 0이고, 경매에 참여한다면 가능성 i 는 Cutoff function Φ 에 의해 가중되는 다항식의 Logit으로 주어진다.

CUBE-LAND의 모델은 이산 선택 모델의 프레임워크 안에서 임의의 효용 이론에 따라 소비자가 지역을 결정한다. 이 모델에서 효용은 해당하는 개인의 선호와 그들의 특성과 연관된다. 이 효용함수를 계산하기 위하여 각 지역에서 소비자들의 Willingness to pay 함수는 부동산 경매에서 소비자들의 입찰가로 나타나는데 이때 소비자의 행동이나 다양성, 자료의 오류나 개인속성차이 등을 포함하는 임의적 요소와 입찰가격의 결정적 요소를 포함한다. 입찰가를 결정짓는 요소는 식 (2)와 같은 형식을 가지고 있다.

$$B_{hvi} = I_h - (b_n + b) + b_{hvi} + t_{hvi} + \alpha_{hvi} \quad (2)$$

여기서,

- I_h = 월수입. 임차료와 입찰 통화 단위
- b_h = 동일한 수입 측면의 효용
수입의 한계의 효용으로 나눈 효용
 $b_h \in [0, I_h]$
- b = 임차료 및 입찰 수준
- b_{hvi} = 재산 v 와 지역 i 의 특성 집합의 평가 구성 요소
- t_{hvi} = 에이전트 h , 부동산 v 및 지역 i 에 대한 보조금 또는 세금. 이것은 간접적으로 입찰함수에 의존하지 않는 시나리오 변수
- α_{hvi} = 각 소비자 h 와 재산 v , 지역 i 의 calibration 상수

입찰함수 b_{hvi} 는 임의의 요소를 가지고 있는데 이 요소는 수요모델이 v 타입의 건물이 있는 지역 i 의 입찰이 있는 경매에 이길 각 세대 h 의 $P_{h/vi}$ 의 확률을 결정한다. CMNL이라 부르는 Constrained multinomial Logit에 의해 수요를 가정하는 것을 기반으로 한다. 이것은 고정된 공급에 의한 수요를 업데이트한 것이 적용된 식 (1)에 의해 주어진다.

Cutoff function인 Φ_{hvi} 는 소비자 범주인 h 가 지역 종류인 vi 의 경매에 참여할 확률과 일치한다. 그리고 Cutoff function인 Φ_{hvi} 는 활성화됐을 때 참여할 가능성이 줄어드는 각 경매에 참여하는 에이전트에게 다른 제약을 의미하는 가능성의 집합으로 구성된 가능성으로 정의된다.

이러한 함수는 식 (3)과 같이 정의된다.

$$\Phi_{hvi} = \Phi_{hvi}^e \cdot \Phi_{hvi}^l \cdot \prod_k^{K_{hvi}} \Phi_{hvi}^k \quad (3)$$

여기서, Φ_{hvi}^e 는 지역이 정의된 도시 안에서 미리 결정된 지역 구조물을 정의하는 외재성 요소이다. Φ_{hvi}^l 는 소비자 수입 제한을 표시한다. 이는 현재 주택의 경우에만 적용된다. K_{hvi} 는 에이전트 h 와 재산 v , 지역 i 에 의한 총 수요 제한을 나타내며 Φ_{hvi}^k 는 지역 종류에 불균형성에 의한 선형 제한을 표현한다.

모든 이런 제한은 'Binomial Logit'이라 불리는 함수에 따라서 모델이 통합된다. 예를 들어 예산 제한에 대한 공식은 식(4)와 같다.

$$\Phi_{hvi}^l = \frac{1}{1 + \exp(\omega \cdot (B_{hvi} - I_h + \theta))} \quad (4)$$

여기서,

- $\theta = \frac{1}{\omega} \ln\left(\frac{1-\eta}{\eta}\right)$
- ω 와 η 는 고정되었으며 모델 작성자에 의해 제공된 외재성 요소
- $\omega \geq 0$
- $\eta \in (0, 1)$

3. 공급모델의 구조

공급모델은 다양한 부동산 요소들 중 임차료와 비용 측면에서 가장 많은 이익을 가져다줄 수 있는 지역에 부동산을 공급하는 기본원리를 가지고 있다. 이때 같은 시기에 여러 장소에 여러 종류의 부동산을 만드는 데 드는 잠재적으로 적은 비용을 반영한 부동산 건축에서 잠재적 규모의 경제를 고려한다.

이러한 공급은 식 (5)에 의해 결정된다.

$$S_{vi} = H \times P_{vi} \quad (5)$$

여기서,

- H = 도시 안에 있는 총 에이전트
- P_{vi} = 지역 i 에서의 주택 v 가 건설될 확률

수요모델에서 보듯이 가능성은 CMNL에 기초하여 정의되는데 사용하는 Cutoff function은 식 (6)과 같다.

$$P_{vi} = \frac{p_{vi} \exp(\lambda \pi_{vi})}{\sum_{v \in \Gamma_v} p_{vj} \exp(\lambda \pi_{vj})} \quad (6)$$

여기서, π_{vi} 는 각 단위 vi 에 의한 이익함수이다. 이 단위는 지역 i 에서의 재산 v 종류의 판매로 얻은 이득에 해당한다. λ 는 MNL과 연관된 Scale factor이다.

지불하려는 의지가 임의의 변수임을 감안할 때, 이 변수는 불확실한 임차료의 정도를 가지고 있다. 공급 S_{vi} 는 P_{vi} 에 대한 함수이다. 이는 식 (6)에 나타나 있다.

이익은 부동산 개발에 의해 만들어진다. 지역 i 에서 v 종류의 부동산인 π_{vi} 으로 표시되는 부동산 개발은 부동산 생산비용과 임차료의 사이에서 정의된다.

$$\pi_{vi} = r_{vi} - c_{vi} \quad (7)$$

지역 vi 에 대한 생산비용 c_{vi} 에 의해 정의되는 동안 임차료인 r_{vi} 는 공급모델에 대한 입력값이다.

$$c_{vi} = a_{vi} + b_{vi}(S) \quad (8)$$

여기서,

- a_{vi} = 비용으로부터의 외생변수, $a_{vi} \geq 0$
- b_{vi} = 도시의 모든 부동산 공급효과를 나타내는 내생변수, 예를 들어 건축을 위한 토지구매 시 은행의 이자 등을 고려하는 값

Cutoff functions인 p_{vi} 은 지역 i 에서의 부동산 공급 v 를 제한한다.

$$p_{vi} = p_{vi}^e \cdot p_{vi}^\pi \cdot \prod_n^{N_{vi}} p_{vi}^n \quad (9)$$

여기서,

- p_{vi}^e = 외생변수로 모델 작성자에 의한 선택 $p_{vi}^e \in [0,1]$ 이것은 도시에서 미리 정해진 공급구조로 정의됨. 어떤 종류의 건축물을 허용하지 않는 지역 같은 특별한 상황을 제외하고는 이 요소는 대개 1의 값을 가짐.
- p_{vi}^π = 이익의 상한값
- N_{vi} = vi 조합에 의한 공급 제한
- P_{vi}^n = 상수 R^K 와 Q^K 를 포함한 제한 k 와 같은 공급의 비평균 선형성 제한을 나타냄.

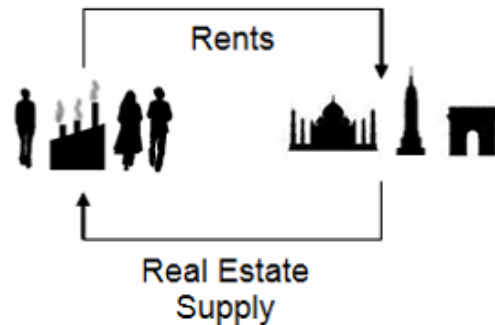
제한은 식 (10)과 같다.

$$\sum_{hvi} R_{hvi}^k S_v \leq Q^k \quad (10)$$

4. 평형모델의 구조

이 모델은 시장 평형을 정의하는 방정식에서 공급과 수요의 모델을 이용하여 재산 경매의 결과로 평형가격을 정의하고 도시 시장에서 수요 초과와 상황으로 인해 평형가격이 결정된다.

<그림 8>과 같이 임차료는 수요와 공급의 모델로 연결된다.



<그림 8> 임차료의 수요와 공급관계

〈그림 8〉에서 소비자는 시장에서 그들의 지불에 대한 의사를 결정한다. 그리고 각 지역의 경매는 임대료에 해당하는 최고 입찰가를 선정한다. 이러한 입찰료로 인하여 공급 에이전트는 그들의 이익을 결정하고 각 영역에서 생산한 가장 권장하는 유형의 부동산을 결정한다. 새로운 시장 공급을 기반으로 하여 세대와 회사는 그들의 지불하려는 의지를 재평가한다. 그렇게 하여 입찰료와 지역은 조절된다.

이 상호작용은 시장이 평형에 도달할 때까지 유지한다. 이러한 상황에서 지역을 변경하려는 소비자들을 위한 인센티브는 없다. 또한 다음과 같은 조건을 충족해야 한다.

- 모든 회사와 세대는 위치에 대한 입찰가를 만들었고 하나의 속성에 대한 경매를 했다.

- 공급 에이전트는 새로운 부동산을 만들 만한 인센티브가 없다. 토론 주제는 다음과 같다.

• 입찰료 모델의 설명

입찰료 모델은 시장에서 부동산을 거래하기 위한 돈의 양을 결정한다. 입찰료는 가장 높은 입찰의 가치를 예상하여 결정된다. 그러한 가치는 임의의 입찰 경매에서 결과로 예상되는 값이다. 수요 모델에서 정의되는 입찰의 경우 가치는 다음과 같다.

$$r_{vi} = \frac{1}{\mu} \ln \sum_{g \in \Omega_{vi}} \Phi_{hvi} H_h \exp(\mu B_{hvi} + \gamma) \quad (2.15)$$

$1/\mu$ 항을 제외하고 Euler 상수 γ ($\gamma = 0.577$)와 나머지 항들은 수요모델에서 정의된다. $1/\mu$ 항은 모델에서 주어지며 입찰료 모델의 조정에서 얻어진다.

• 지역 상황

“모든 소비자 에이전트는 존재한다”라는 상황을 만나기 위해 다음의 방정식이 확인되어야 한다.

$$\sum_{vi} P_{h/vi} \cdot S_{vi} = H_h \quad (2.16)$$

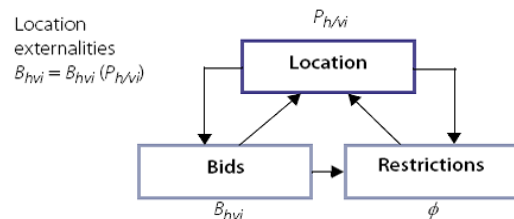
실행될 수 있는 조건과 배타적인 평형 솔루션을 위해 도시에서 총 수요와 공급은 동일해야 한다. 이는 다음을 바탕으로 CUBE-LAND에서 보증된다.

$$H = \sum_h H_h = \sum_{vi} S_{vi} \quad (2.17)$$

평형상태에서 만나게 되는 이러한 상황을 위해 모델은 입찰 매개변수 b_h 를 조절한다.

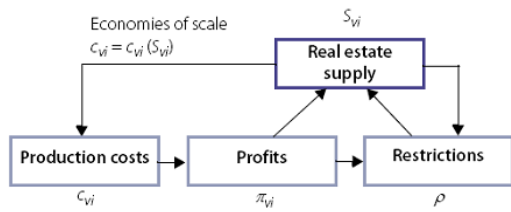
매개변수 b_h 만 상대적인 관점에서 결정될 수 있다. 이것은 절대 매개변수를 찾을 수 없다. 이러한 불확정성의 결과로 평형상태를 얻은 입찰과 임대료 둘 다 상대적이다. 불확실한 매개변수가 지역의 솔루션에 영향을 미칠 수 없는 것과 평형상태에서 공급을 지적하는 것은 중요하다.

소비자 사이의 상호작용 - 〈그림 9〉와 같이 주어진 공급을 위해 지역의 외부적 성질은 모델링된 변수 사이에 의존성을 만든다. 소비자의 위치 선정은 입찰 함수와 이를 제한하는 조건에 따라 결정된다. 여기서 제한조건의 경우 분석지역의 외부적 특성에 따라 결정된다.



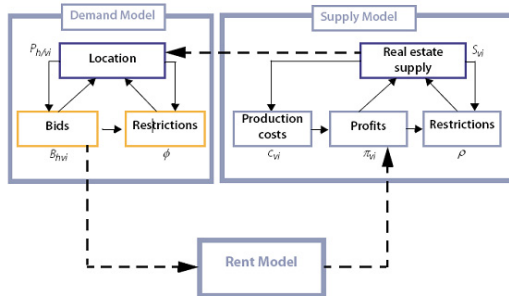
〈그림 9〉 소비자 사이의 상호작용

공급 에이전트 사이의 상호작용 - 특정 영역에 대한 부동산의 유형의 부동산 공급은 〈그림 10〉에서 그려진 부분마다 규모의 경제의 존재 때문에 전체 도시의 공급에 의존하게 된다.



〈그림 10〉 공급 에이전트 사이의 상호작용

부동산 생산에서 부동산 공급은 이익과 제한의 함수이다. 이러한 제한들은 공급과 이익에 의존한다. 이러한 이익은 비용에 의존하는데 규모의 경제의 존재 때문에 이러한 비용은 부동산 공급에 의존한다.



〈그림 11〉 수요와 공급 사이의 상호작용

수요와 공급 사이의 상호작용 - 임대료는 모델의 내생변수와 경매과정을 통해 결정되기 때문에 그들은 이전 부분에서 설명했던 부동산 생산자와 소비자 사이의 연결이다. 이러한 평형문제를 풀기 위해 사용하는 CUBE-LAND의 해법은 다음과 같다.

• 1단계: 데이터 읽기

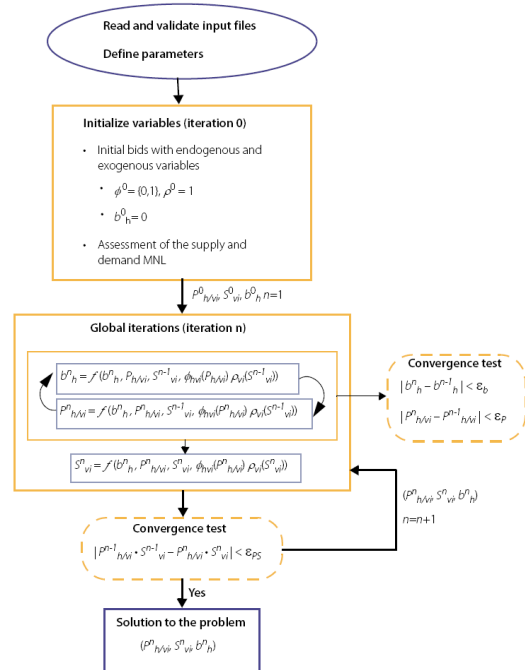
입력 데이터는 읽기 및 실행 제어 매개변수를 정의한다. 이러한 모든 정보는 데이터가 미리 정의된 가능한 범위 내에서 존재하는 것을 확인

• 2단계: Iteration 0

입찰과 연관된 변수 b_h 는 모든 소비자 범주 h 를 위해 0의 값으로 초기화된다. 변수 ϕ 와 p 는 1이나 0으로 초기화된다. 에이전트 초기 지역은 입찰 함수의 내생 속성의 초기상태에 따라 결정된다. 입찰의 외인성 요소와 공급의 고정비용이 주어지고, 이러한 데이터와 함께 입찰과 임차료, 수요, 이익과 부동산 공급의 초기치가 계산된다.

• 3단계: Iteration n

먼저 하나는 고정된 수요에 의한 입찰로 결정된다. 임차료를 계산하고, 이러한 정보를 바탕으로



〈그림 12〉 수요와 공급의 평형문제 솔루션

로 제한조건을 고려하여 위치가 결정된다. 입찰과 지역은 상호 의존적인 것이 주어지면 그들 둘 모두 수렴될 때까지 반복해야 한다.

부동산 공급은 새로운 임차료와 해당 제한의 함수로 계산된다.

- 4단계: Convergence test

위치에 대한 이전의 반복(n-1)에서 차이가 적은 허용 수준보다 낮을 경우 이 값을 수용하고 그렇지 않다면 변수를 업데이트하여 다시 3단계를 수행한다.

IV. 결과 및 고찰

최근 에너지 위기와 기후변화협약 등 시대적 변화가 요구하는 저탄소 녹색성장을 위해 탄소제로형 도시구축은 녹색혁명이라 불리는 전세계적 트렌드에 부합하기 위한 가장 핵심적인 부분이다. 에너지 효율적인 도시구축을 위해 가장 큰 영향을 미치는 부문은 교통체계와 토지이용 부분의 상호 작용이라고 볼 수 있다. 특히 토지이용 계획에 따라 교통에너지 소모를 근본적으로 감소시킬 수 있다는 주장이 제기됨에 따라 교통계획과 토지이용 계획의 통합적인 정책이 도시민의 사회·경제활동에 미치는 영향을 최소화하며 도시구조와 다양한 물리적 시설을 저탄소 녹색성장의 기준에 부합하는 기준으로 만들 수 있다.

본 논문에서는 토지이용-교통 통합모델 구축을 위한 사전연구로서 국내외 연구 동향을 고찰하였다. 그리고 실제로 통합모델을 운용하기 위해서 CUBE-LAND를 사례로 하여 수요와 공급 모델 등 전반적인 운용원리에 대하여 파악하였다. CUBE-LAND의 경우 미시경제학의 소비자 이론을 기반으로 교통시스템과 토지이용의 관계를 구

명하며, 지역별 입지에 따른 임차료와 수요와의 관계를 토대로 수요와 공급 사이의 평형에 도달하기 위하여 각 지역에서 부동산의 수요와 공급을 조절하게 된다. 이러한 과정에서 Bid-Rent 함수에 의해 임차료의 가치와 토지사용 등의 변수가 정의되고, 이는 지속가능한 교통 및 도시정책을 평가하고 시나리오 분석을 수행하는 데 매우 활용성이 높다고 볼 수 있다. 특히 수요와 공급이 평형에 도달하기 위한 과정에서 토지이용 규제나 신도시 개발 계획들이 활동입지와 토지이용 패턴, 그리고 교통체계에 어떻게 영향을 미치는지, 또는 교통개선이나 통행비용의 변화가 도시에서 일어나고 있는 각종 활동의 입지와 분포를 어떻게 변화시킬 것인지에 대해 다양한 시나리오를 구축하고 이를 시뮬레이션한 후, 그 결과를 비교하여 최선의 방안을 선택하는 데 통합토지이용 교통모델의 유용성은 매우 크다고 볼 수 있다.

지속가능한 개발은 교통과 토지이용 정책을 함께 고려하여 시너지 효과를 창출할 수 있도록 해야 하며 구미국가에서는 이에 대한 환경적·경제적·사회적 파급효과를 분석하고 평가하기 위해 다양한 방법론을 도입하고 있다. 그중에서 통합모형을 이용하여 토지이용 및 교통정책의 결과를 예측하는 방법은 다양한 관련변수들을 고정된 채로 하나의 관심 변수만의 영향을 측정할 수 있고 정책의 효과성 및 실현가능성을 진단하고 다양한 시나리오 분석을 할 수 있는 장점이 있다. 그러나 모형 운영에 필요한 방대한 자료, 예산 및 기술상 운용의 어려움 등 여러 제약을 가지고 있는 것이 사실이다. 특히 분석을 위한 자료 취득에 있어 많은 어려움을 가지고 있다. 통합모델 구축을 위해 통계청자료 외에도 센서스자료, 과세대장자료 등 구득가능한 자료 외에도 세대별 가구수입, 부동산 임차비용 등 국내 실정에 따라 취득할 수 없는 자료 등이 존재한

다. 따라서 통합모델 구축을 위해서는 모델에 대한 이론적인 연구 외에도, 분석을 위해 필요한 데이터를 구득할 수 있는 방법과 Bid-Rent 함수 등의 주요 모델링을 위한 데이터 구축을 위하여 전세자료를 월세자료로 변경하는 방법 등 국내 현실에 부합하도록 입출력자료를 변환 및 생성할 수 있는 방안에 대한 연구가 선행되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 권일 · 김정옥 · 최봉문, 2004, “계획지원시스템을 이용한 수도권 시가지 성장 예측 시뮬레이션”, 『대한국토도시계획학회』, 제39권 제7호: 69~85.
- 김광식, 2003, 『교통, 토지 이용, 환경 영향 분석 시뮬레이션 모형의 적용사례 연구』, 한호재단.
- 김유승, 2011, “미국의 통합 토지이용-교통모형 개발과 운용 현황”, 『도로정책브리프』, 제47호.
- 김익기, 1994, “토지이용-교통모형의 이론적 비교분석”, 『국토계획』, 제29권: 135~155, 대한국토·도시계획학회.
- _____, 1995, “장기 교통정책 분석을 위한 모형”, 『국토 및 도시계획학회지』, 제30권 제1호: 155~167.
- 김창호, 1986, “도시부 토지이용과 교통의 복합모형”, 『대한교통학회지』, 제3권 제1호: 94~105.
- 김태경 · 박헌수 · 권대한, 2009, 『도시성장관리모형 구축을 위한 기초연구』, 경기개발연구원.
- 노정현 · 류재영, 1995, “토지이용-교통 통합모형을 이용한 공간계획 평가기법의 개발”, 『국토계획』, 제76권: 205~222, 대한국토·도시계획학회.
- 유상균, 2010, “경로선택을 고려한 토지이용-교통 모형의 개발”, 『대한국토도시계획학회』, 제45권 제1호: 123~138.
- 이승일, 2010, “저탄소·에너지절약도시 구현을 위한 우리나라 대도시의 토지이용-교통모형 개발방향”, 45/175호: 265~281, 대한국토 도시계획학회.
- 이승재 · 손지연, 2010, “통합 토지이용 교통모형을 이용한 교통정책평가에 관한 연구(Ⅰ): 기존사례연구를 중심으로”, 『한국ITS학회지』, 제9권 제1호: 111~120.
- 이희연, 2007, “도시성장관리를 위한 계획지원시스템의 활용방안에 관한 연구”, 『대한국토계획학회지』, 제42권 제3호: 23~45.
- 이희연 · 김동완, 2006, “토지이용-교통 통합모델의 이론적 토대와 운용 메카니즘에 관한 소고”, 『환경논총』, 제44권: 47~76, 서울대학교 환경대학원.
- Abraham, J. E., Weidner, T. J., Gliebe, J., Willison, C., and Hunt, J. D., 2005, “Three Methods for Synthesizing Baseyear Built Form for use in Integrated Land Use-Transport Models”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No.1902: 114~123.
- Anas, Alex, 1982, “Residential location markets and urban transportation: Economic theory, econometrics, and policy analysis with discrete choice models”, *Academic Press*, xiv: 263.
- David Simmonds Consultancy, 2004, Introduction to the DELTA package(product documentation: www.davidsimmonds.com).
- Hunt, J. D. and Abraham, J. E., 2005, “Design and implementation of PECAS: A generalized system for the allocation of economic production, exchange and consumption quantities”, *Foundations of Integrated Land-Use and Transportation Models: Assumptions and New Conceptual Frameworks*, 217~238, Elsevier, Oxford UK.
- _____, 2009, “PECAS - for Spatial Economic Modelling: Theoretical Formulation”, *Unpublished report*, 29~31.
- Hunt, J. D., Kriger, D. S., Miller, E. J., 2005, “Current operation urban land-use-transport modeling framework: A review”, *Transport Review*, Vol. 25 No. 3: 329~376.
- Noth, M., Borning, A., and Waddell, P., 2000, “An Extensible, Modular Architecture for Simulating Urban Development, Transportation, and Environmental Impacts”, Submitted for publication: draft available from <http://www.urbansim.org>.
- Rho, J. H., 1998, “Implementation and Evaluation of a Three-Dimensional Urban Activity Model”, Ph. D. Dissertation, University of Illinois at Urbana Champaign.
- Simmonds, D. and Feldman, O., 2005, “Land-use modelling with DELTA: update and experience”, *Presented at CUPUM '05: The Ninth International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management, London*.

- Waddell, P., 2001, "Between Politics and Planning: UrbanSim as a Decision Support System for Metropolitan Planning", in Klosterman, R. E. and Brail, R.(eds), *Building Urban Planning Support Systems: Combining Information, Models, Visualization*, Center for Urban Policy Research and Environmental Systems Research Institute.
- Wegener, M., 2004, "Overview of land use transport models", in Hensher, D., Button, K. J., Haynes, K. E. and Stopher, P. R.(eds.), *Handbook in Transport*, Vol. 5. Transport, Geography and Spatial Systems, 127~146, Oxford: Pergamon/Elsevier.

원 고 접 수 일 : 2011년 12월 14일

1차심사완료일 : 2011년 12월 29일

최종원고채택일 : 2012년 1월 12일