

주유지역선택확률을 고려한 교통에너지 소비량 추정 및 도시공간구조의 차별적 영향분석

The Estimation of Transportation Energy Consumption Considering Gas Station Choice Probability and the Differential Effects of Urban Spatial Structure

김승남 서울대학교 건설환경공학부 박사과정(제1저자)
Kim Seungnam Ph.D. Student, Dept. of Civil and Environmental Eng.,
Seoul National Univ.(Primary Author)
(enfey@hanmail.net)

안건혁 서울대학교 건설환경공학부 교수
Ahn Kunhyuck Professor, Dept. of Civil and Environmental Eng.,
Seoul National Univ.
(ahnkh@snu.ac.kr)

목 차

- I. 서론
 - 1. 연구의 배경 및 목적
 - 2. 연구의 대상 및 범위
 - 3. 연구 내용 및 방법
- II. 선행연구 검토
 - 1. 관련 연구 동향
 - 2. 선행연구의 한계점 및 연구문제
- III. 지역별 교통에너지 소비량 추정
 - 1. 지역별 유류판매가격 산정
 - 2. 교통에너지 소비량 추정방법과 기본가정
 - 3. 주유지역선택확률 함수의 설정
 - 4. 교통에너지 소비량 추정과 추정결과의 해석
- IV. 교통에너지 소비에 영향을 미치는 공간구조특성 분석
 - 1. 변수의 설정
 - 2. 추정 모형
 - 3. 분석결과와 해석
- V. 결론
 - 1. 연구결과 및 정책적 함의
 - 2. 연구의 의의 및 한계

※ 본 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 20090076997). 또한 본 논문은 서울대학교 공학연구소와 서울대학교 SIR(안전하고 지속가능한 사회기반건설) BK21 사업단의 연구비 지원으로 수행되었음.

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

지난 2008년 한국은 세계경제 위기와 함께 국제유가의 변동성이 극에 달하는 신(新)에너지 위기 시대를 경험하였다. 현재는 경기침체 여파로 유가가 반락하였으나, 화석연료의 고갈과 유가 변동성 증가로 에너지가 무기화되고 있는 국제사회의 흐름에서 에너지 자급률이 5%에 채 미치지 못하는 한국의 상황은 여전히 불안정하다고 할 수 있다. 아울러 온실가스 배출 저감이 국제사회의 최우선 의제로 대두되면서 우리나라의 감축의무 또한 강화될 것으로 예상되고 있어, 에너지 소비절감을 위한 국가차원의 노력이 절실한 상황이다. 특히 도로교통 부문은 국가 전체 에너지 소비의 약 20% 가량을 차지하고 있으며 자체수급이 어려운 화석연료에 대한 의존도가 매우 높아, 유가 상승으로 인한 경제수지 악화과 환경오염 및 기후변화의 주요 원인으로 지적되고 있다.

이에 따라, 도시·교통 분야에서는 에너지 절약형 공간구조에 대한 논의들이 진행되어 왔다. 그중 대표적인 개념으로 압축도시 이론을 들 수 있으며, 이는 압축형 공간구조의 효율성에 대한 학계의 논쟁과정(Compact City Debates)을 통해 발전해왔다. 그러나 이러한 이론의 국내 적용가능성에 대해서는 아직까지 명확한 합의점에 다다르지 못하고 있으며, 연구 방법론 측면에서도 몇 가지 한계를 보이고 있어 이에 대해 지속적인 연구가 필요하다.

따라서 본 연구는 지역 간 승용차 O/D 통행량과 지역별 유류판매가격을 이용해 교통에너지(도로부문 휘발유 소비량) 소비량을 추정하고, 공간회귀분

석을 통해 교통에너지 소비에 영향을 미치는 도시 공간구조 특성을 밝힘으로써 에너지 절약형 공간구조에 대한 정책적 함의를 도출하는 것을 목적으로 한다.

2. 연구의 대상 및 범위

본 연구의 시간적 범위는 2006년으로 설정하였으며, 2006년 외의 자료를 이용한 경우 별도로 명시하였다. 연구의 공간적 범위는 많은 인구와 에너지 소비가 집중되어 있는 수도권으로 설정하였다. 이때 수도권으로 포함된 지역은 서울특별시, 인천광역시, 경기도이며 도서 지역으로 구성된 인천광역시 옹진군은 연구의 분석과정에 부적합하여 연구 대상에서 제외했다.

분석의 공간적 단위는 기본적으로 시·군·구 단위로 하였으며, 인구분포의 압축도를 산정하는 과정에서는 읍·면·동 단위의 분석을 시행하였다. 단, 경기도의 수원시, 성남시, 안양시, 부천시, 안산시, 고양시, 용인시의 경우, 교통에너지 소비 자료가 시단위로 집계되고 있으므로, 이들 도시에 대해서는 시 단위로 분석을 시행하였다. 이러한 기준에 의해서 65개 수도권 시·군·구가 본 연구의 분석 대상으로 설정되었다¹⁾.

3. 연구 내용 및 방법

본 연구의 본문은 크게 세 개의 장으로 구성된다. 먼저 제2장에서는 교통에너지 소비와 관련된 선행 연구를 검토한다. 제3장에서는 승용차 O/D 통행량과 유류판매가격을 이용해 주유지역선택확률 함수를 도출하고, 이를 토대로 휘발유 소비량을 ‘내부통

1) 65개의 관측치는 통계모형에서 결코 작은 관측치가 아님(이영성, 2008: p46).

행내부소비', '유출통행내부소비', '유출통행외부소비', '유입통행내부소비', '유입통행외부소비' 등과 같이 통행유형별로 나누어 추정한다. 마지막으로, 제4장에서는 도시공간구조가 휘발유 소비량에 미치는 영향을 공간회귀분석(Spatial Regression)을 통해 분석한다. 이와 같은 과정은 선행연구에서 사용한 종속변수의 한계점을 극복함과 동시에, 도시공간구조 특성의 차별적인 영향을 분석해낼 수 있는 장점을 지니고 있다.

이때, 공간자료의 수집 및 분석과 통계 분석 과정에서 Arc Map 9.2, SPSS 12.0K, GeoDa 0.9.5-i 등의 프로그램을 이용했다.

II. 선행연구 검토

1. 관련 연구 동향

기능주의에 입각한 근대도시계획은 도심공동화와 시가지의 외연적 확산(Sprawl)이라는 에너지 비효율적 도시공간구조를 초래했다. 이에 대한 반성으

로 지속가능한 도시계획에 대한 논의가 시작되었으며, 그중 가장 대표적인 개념으로 압축도시 이론을 들 수 있다. 압축도시 이론은 고밀개발과 직주근접의 토지이용형태를 구축함으로써, 교통에너지 소비를 최소화하고자 하는 도시계획 개념이다. 그러나 압축도시의 효율성에 대한 논의는 지역과 학자에 따라 의견이 다르고, 최근까지 학계의 주요한 연구문제가 되어 왔다. 고밀압축개발의 효율성을 주장한 대표적 연구자인 Newman and Kenworthy(1989)는 도심과 교외의 밀도 증가가 에너지 절약 측면에서 효과적이며, 대중교통수단의 확충에도 적합한 형태라고 주장했다. 이에 반해 Gordon and Richardson(1989)과 Breheny(1995) 등은 도시공간구조 외에 차량연비나 연료가격이 더 큰 영향을 미칠 수 있다는 가능성을 제기했다.

국내에서도 이러한 연구문제를 검증하기 위한 논의가 진행되었다. 도시공간구조의 에너지 절감 효과를 검증하기 위한 연구방법은 크게 가상도시를 대상으로 한 시뮬레이션 연구와 실제 도시를 대상으로 한 실증연구로 구분되며, 후자는 다시 도시

표 1_ 도시공간구조와 교통에너지 소비의 관계를 다룬 국내 선행연구

연구자	대상지역	분석방법	주요 공간변수	교통에너지 변수
안건혁 (2000)	22개 중소도시	상관분석	인구 및 고용 지니계수와 평균 편차거리, 총밀도, 순밀도, 총면적, 도로밀도 등	1인당 도로부문 에너지 소비량
황금희 외 (2001)	수도권 시·군·구	회귀분석	인구밀도, 고용밀도, 지니계수와 Moran's I 값을 이용한 집중/분산 더미변수, 내부통행비율, 서울로부터의 거리, 승용·승합차비율 등	통근 통행당 도로부문 에너지 소비량, 주행거리
심교연 (2001)	61(23)개 중소도시	단순회귀 비교분석	인구밀도, 인구 및 고용 지니계수, 중심지 분포패턴(단핵/다핵), 수단 분담률 등	1인당 도로부문 에너지 소비량
이명훈 외 (2003)	77개 도시	회귀분석	밀도, 엔트로피 지수, 도시 분산도, 도시화율, 1인당 지방세, 면적, 1인당 자동차수, 경제활동 인구 등	1인당 도로부문 에너지 소비량, O/D 통행량
남기찬 외 (2008)	수도권 읍·면·동	상관분석	종합압축지수(TCI): 상이성 지수, 타일 지수, 엔트로피 지수, Moran's I, Geary's C 등 다섯 가지 지표의 선형결합	총 통행거리, 총 통행량

출처: 김승남. 2008. "압축도시 개발이 교통에너지 소비와 대기오염 농도에 미치는 영향". 서울대학교 석사학위 논문. p40. 재정리.

공간구조의 집합적인 효과에 주목하는 연구흐름과, 개인의 통행특성에 주목하는 연구흐름으로 구분된다²⁾. 본 연구는 이 중 도시 특성의 집합적인 효과에 주목한 Newman and Kenworthy(1989)의 전통적인 접근법에 초점을 맞추고 있다. 이와 관련된 국내 선행연구를 정리하면 <표 1>과 같다.

선행연구를 살펴보면, 대부분의 연구가 도시밀도와 압축도에 집중하고 있음을 알 수 있다. 이 중, 밀도와 교통에너지 사이의 부(-)의 관계는 모든 연구에서 대체적으로 유사한 결과를 보였다. 그러나 도시의 집중·분산 정도와 교통에너지 소비의 관계에 대해서는 엇갈리는 결과를 보였는데, 이는 공간지표에 대한 해석의 차이와 분석 자료의 시차에 의해 발생한 문제라고 판단된다. 따라서 이에 대한 보다 정밀한 분석이 필요하다.

2. 선행연구의 한계점 및 연구문제

지금까지 살펴본 논의들은 다음과 같은 몇 가지 한계점을 지니고 있다.

첫째는 종속변수 선택의 문제다. 도시 자체가 공간상에 독립적인 개체로 존재할 수 없기 때문에, 많은 연구에서 사용되고 있는 유류소비량 자료는 지역 내부 통행뿐만 아니라 주변 도시와의 상호작용에 의해 영향을 받게 된다. Newman and Kenworthy(1989)의 연구가 분석대상 간의 공간적 독립성을 어느 정도 담보할 수 있는 전 세계의 대도시권을 대상으로 분석을 진행했다는 측면에서, 그들의 접근방법을 공간적으로 인접한 분석대상에 적용하는 것은 큰 문제를 야기할 수 있다. 이에 따라, 도시 간의 상호작용을 무시할 수 없는 수도권을 대상으로 한 몇몇

연구(황금희 외, 2001; 남기찬 외, 2008)의 경우 총차량주행거리(Vehicle-Km Traveled)를 종속변수로 활용하기도 하였으나, 이 또한 유류소비량의 정확한 지표가 될 수는 없다.

둘째, 기존 논의는 주로 도시공간구조의 형태적인 측면에만 집중하고 있으며, 경제적 측면, 특히, 유류가격의 영향에 대한 논의는 거의 이루어지지 않고 있다. 물론 경제학 분야에서 유류소비량의 가격탄력성에 대한 연구가 이루어져 왔으나, 유류판매가격의 공간적 차이가 지역의 유류소비량에 미치는 영향에 대한 논의는 거의 이루어지지 않았다. 유류판매가격은 지역 간 통행차량의 주유지역 선택확률을 결정하는 요인으로서, 도시교통 분야의 연구에 활용 가치가 큰 자료다. 우리나라에서도 2008년 4월 이후, 지역별 유류판매가격이 공개됨에 따라 이에 대한 분석적 연구가 진행될 필요가 있다.

마지막으로 분석의 통계학적 방법론 측면에서, 공간자료(Spatial Data)를 활용한 대부분의 선행연구는 자료의 공간적 종속성(Spatial Dependence)에 의해 발생하는 자기상관(Auto-correlation) 효과를 고려하지 못한 한계점을 보이고 있다. 이는 특히, 수도권과 같이 각 지자체가 공간적으로 인접해 있으며 지역 간 상호작용이 활발한 지역에서 더욱 심각한 문제를 야기할 수 있다.

따라서 제3장과 제4장에서는 이와 같은 선행연구의 한계를 해결하기 위한 구체적인 연구방법과 연구결과를 설명한다.

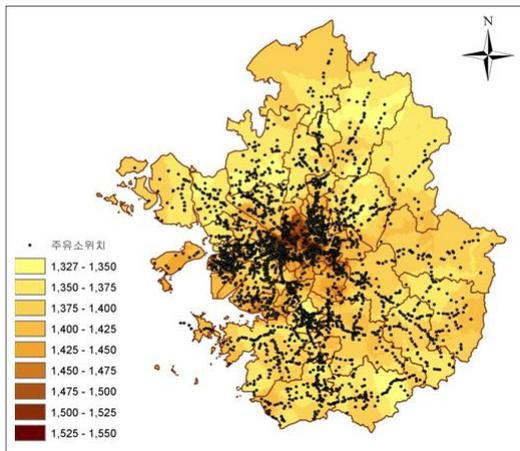
2) 조상규, 2008. "가구 유형에 따른 주거 및 고용 입지와 통근 행태의 관계 변화: 서울시 사례연구". 서울대학교 박사학위 논문. p10.

III. 지역별 교통에너지 소비량 추정

1. 지역별 유류판매가격 산정

교통에너지 소비량을 추정하기 위해서는 우선적으로 지역별 휘발유 판매가격을 산출해야 한다. 이를 위해 2008년 11월 16일을 기준으로 Opinet(주유소 종합정보 시스템)에서 제공되는 유류가격을 수집하여 분석하였다. 자료구축 방법은 다음과 같다. 먼저 수도권 소재 3,001개 주유소의 판매가격을 GIS Map상에 점(point)으로 나타내고, 이를 Kriging 기법으로 추정(Interpolate)하여 유류 판매가격을 300m×300m 단위의 Cell로 나타낸다. 최종적으로 각 행정구역에 포함된 모든 Cell의 평균가격을 산출하여 지역별 휘발유 가격을 산출하였으며, 결과는 <그림 1>과 같다.

그림 1 _ 수도권 지역별 휘발유 판매가격



2. 교통에너지 소비량 추정방법과 기본가정

지역별 교통에너지 소비량의 추정은 지역 간 승용차 O/D 통행량과 지역 간 직선거리의 곱으로 도출된 총 차량주행거리³⁾(VKT/day)와 지역별 유류판매가격을 이용해 도출한다. 기본적으로 도로부문 휘발유 소비량은 승용차에 의해 전량 소비되므로⁴⁾, 휘발유 소비량이 승용차 통행거리와 비례한다고 가정할 수 있다. 그러나 한국석유공사에서 제공하는 지역별 도로부문 휘발유 소비량 자료는 지역기반(Regional-based) 통행거리와 정확하게 비례하지는 않는다. 지역에서 유출된 통행의 일부가 지역 외부에서 주유하거나, 외부에서 지역 내로 유입된 통행의 일부가 지역 내에서 휘발유를 소비할 수 있기 때문이다. 따라서 지역기반 유류소비량을 정확하게 산정하기 위해서는 유류소비량을 ‘내부통행내부소비량’, ‘유출통행내부소비량’, ‘유입통행내부소비량’의 합으로 나타내는 것이 바람직하다. 이와 같은 관계를 수식화하면 <식 1>과 같다.

$$TC_i = NC_i + OFC_i + IFC_i \quad <식 1>$$

TC_i = i 지역의 총 유류소비량

NC_i = i 지역 내부통행에 의한 유류소비량

OFC_i = i 지역의 유출통행 중 i 지역에서 소비된 유류

IFC_i = i 지역으로의 유입통행 중 i 지역에서 소비된 유류

이때 내부통행의 경우 직관적으로 대부분의 유류가 지역 내부에서 소비된다고 가정할 수 있지만, 유출통행이나 유입통행의 경우 총 통행거리의 어

3) 읍·면·동 단위로 VKT를 산정한 후, 시·군·구 단위로 합산하였음. 이때, 동일 소존 내에서의 통행거리는 200m로 가정하였으며, 이는 소존 간 통행거리 중 가장 짧은 거리를 감안하여 선택한 거리임. 이러한 방법이 미시적인 분석에서는 문제를 발생시킬 수 있으나, 동 간 모든 통행의 통행거리를 일괄적으로 동 중심 간의 거리로 가정하는 본 연구의 접근방법하에서는 거시적인 관점에서 큰 문제가 되지 않음.

4) 산업자원부. 2006. 2005년도 에너지총조사 보고서. 서울 : 에너지경제연구원. p184.

는 비율만큼 지역 내부에서 소비되는지를 파악하기는 어렵다. 따라서 본 연구에서는 지역 간 통행의 주유지역선택확률이 지역 간 유류가격의 차이에 의해 발생할 것이라는 가정⁵⁾하에, 수도권 내 모든 존 간 통행에 대한 주유지역선택확률 행렬을 도출했다. 이를 통해 해당 지역을 통과하는 차량의 총 이동거리 중 어느 정도가 해당지역 내부 또는 외부에서 소비되는지를 확률적으로 추론할 수 있다. 추정을 위한 기본적인 가정은 아래와 같다.

- 가정 1. 연간 휘발유 소비량은 1일 총 승용차통행거리에 비례
- 가정 2. 출발지역과 도착지역이 같은 통행의 경우 해당 지역에서 모든 유류를 소비
- 가정 3. 두 지역 간 1일 총 통행거리에 해당되는 유류는 반드시 출발지 또는 도착지에서 소비되며 기타 지역에서의 소비는 가정하지 않음
- 가정 4. 지역 간 통행의 경우 주유지역선택확률은 두 지역의 유류판매가격 차이에 의해 결정되며, 보다 싼 지역에서 주유할 확률이 높아짐
- 가정 5. 지역 간 유류가격이 동일한 경우 출발지역에서 주유할 확률이 높음
- 가정 6. 지역 간 유류가격 차이와 주유확률은 선형관계
- 가정 7. 수도권 전체 통행을 분석대상으로 하며, 수도권 이외 지역과의 상호작용은 고려하지 않음

3. 주유지역선택확률 함수의 설정

1) 주유지역선택확률 함수

지역 간 통행의 경우 확률적으로 가격이 상대적으로

싼 지역에서 휘발유를 소비할 가능성이 크다. 그러나 가격이 싼 지역에서 모든 소비가 이루어지는 것은 아니다. 따라서 주유지역선택확률 함수를 설정하기 위해서는 퍼지집합 이론을 적용할 필요가 있다. 퍼지집합 이론은 각 대상이 어떤 집합에 속하거나 또는 속하지 않는다는 이분법적인 논리로부터 벗어나, 집합에 속하는 정도를 소속 함수(Membership Function)로 나타냄으로써 집합에 포함될 확률을 수학적으로 나타낼 수 있다는 개념이다. 이와 같은 개념을 적용해 본 연구에서는 지역 간 총 통행의 경우 출발지와 도착지에서 각각 어느 정도의 유류가 소비되는지를 확률적으로 나타냈으며, 이를 주유지역선택확률 함수라고 명했다.

퍼지이론에서 가정하는 소속 함수는 매우 다양하나 본 연구에서는 가장 간단한 형태인 선형함수를 가정하였다. A지역에서 B지역으로 유출하는 통행이 A지역에서 주유할 확률을 함수로 표현하면 <그림 2> 및 <식 2>와 같다.

$$OP_{AB_A} = \frac{\max OP + \min OP}{2} - \frac{\max OP - \min OP}{2(\max Pr - \min Pr)} \times (Pr_A - Pr_B)$$

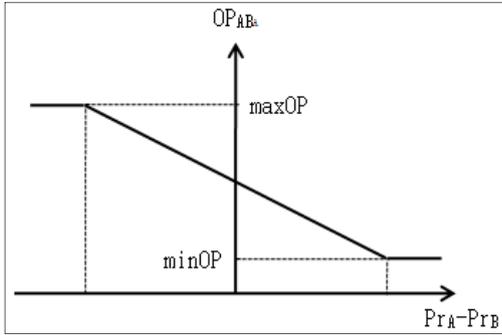
<식 2>

OP_{AB_A} = A에서 B지역으로의 유출통행이 A지역에서 주유할 확률
 $\max OP$ = 유출통행이 출발지에서 주유할 최대확률(최대 임계치)
 $\min OP$ = 유출통행이 출발지에서 주유할 최소확률(최소 임계치)
 $\max Pr$ = 수도권에서 가장 가격이 비싼 지역의 유류가격
 $\min Pr$ = 수도권에서 가장 가격이 싼 지역의 유류가격
 Pr_A = A지역의 유류가격
 Pr_B = B지역의 유류가격
 단, $A \neq B$ (\therefore 가정 2); $0 < OP_{AB_A} < 1$

5) 이미 많은 연구에서 유류가격과 유류소비량의 부(-)의 관계를 밝히고 있으며, 산업자원부의 2005년 에너지 총 조사 보고서에도 전체 조사 대상자 중 40% 가량이 가격을 기준으로 주유소를 선택한다는 결과를 제시하였음. 그 예로 서울의 주유소 선택기준은 아래의 표와 같다(산업자원부, 2006. p670).

선택기준	집에서 가까운 곳	가격이 싼 곳	정유회사의 상표	서비스가 좋은 곳	주유소의 규모	주유소의 신뢰성
선택확률(%)	37.4	40.2	14.5	6.5	0.0	1.4

그림 2_ 주유지역선택확률 함수



<그림 2>와 <식 2>에서 보는 바와 같이 함수의 형태는 선형관계를 보이고, A지역이 선택될 확률은 두 지역 간 가격 차이가 수도권 내에서 발생할 수 있는 최대 가격 차이가 될 때 가장 큰 값이 되도록 가정했다. <식 2>에서 모든 가격 변수는 주어졌 있는 값이므로 최종적인 함수의 형태는 $maxOP$ 와 $minOP$ 값에 의해 결정된다. 여기서 현실적으로 해당지역에서 발생하는 유출통행이 모두 해당지역에서 주유하거나, 모두 외부 지역에서 주유를 하는 일은 없으므로, 두 변수는 <식 3>의 관계를 갖게 된다.

$$0 < minOP < maxOP < 1 \quad <식 3>$$

마찬가지로 타 지역에서 A지역으로 유입되는 통행이 A지역에서 주유할 확률은 <식 4>와 같다.

$$IP_{BA_A} = \frac{maxIP + minIP}{2} - \frac{maxIP - minIP}{2(maxPr - minPr)} \times (Pr_A - Pr_B) \quad <식 4>$$

IP_{BA_A} = B에서 A지역으로의 유입통행이 A지역에서 주유할 확률
 $maxIP$ = 유입통행이 도착지에서 주유할 최대확률(최대 임계치)
 $minIP$ = 유입통행이 도착지에서 주유할 최소확률(최소 임계치)
 $maxPr$ = 수도권 전체에서 가장 가격이 비싼 지역의 유류가격
 $minPr$ = 수도권 전체에서 가장 가격이 싼 지역의 유류가격
 Pr_A = A지역의 유류가격

Pr_B = B지역의 유류가격

단, $A \neq B$ (∵ 가정2); $0 < IP_{BA_A} < 1$

그러나 유출통행과 유입통행의 최대·최소 확률 임계치가 각기 다르기 때문에 두 함수가 정확하게 일치하지는 않는다. 일반적으로 출발지와 도착지의 유류가격이 같은 경우, 출발지에서 주유할 확률이 높기 때문에 <식 2>의 y절편값은 0.5 이상이 되며 <식 4>의 y절편값은 0.5 이하가 된다(<식 5> 참조). 또한 가정 3에 의해 4개의 변수는 <식 6>과 같은 관계를 갖게 된다.

$$\frac{minIP + maxIP}{2} < 0.5 < \frac{minOP + maxOP}{2} \quad <식 5>$$

$$minIP + maxOP = minOP + maxIP = 1 \quad <식 6>$$

이처럼 연구의 가정에 의해 <식 2~6>의 관계가 도출되나, 이 관계식만으로는 정확한 임계치 값을 도출해낼 수 없다. 따라서 다음 절에서는 위의 함수에 의해 추정된 휘발유 소비량과 실제 소비량과의 적합성 검증을 통해, <식 2~6>을 만족하는 최적의 최대·최소 임계치($minOP$, $maxOP$, $minIP$, $maxIP$)를 결정한다.

2) 실제 휘발유 소비량과의 적합성 검증을 통한 최대·최소 확률 임계치의 결정

<식 1>과 같이, 지역의 휘발유 소비량은 내부통행 소비량, 유출통행내부소비량, 유입통행내부소비량의 합으로 도출된다. 이를, 주유지역선택확률 함수를 이용해 일반화하면 <식 7>과 같다.

$$TC_i = NC_i + OFC_{i_i} + IFC_{i_i} \propto VKT_{ii} + \sum_j^N VKT_{ij} \cdot OP_{i_j} + \sum_j^N VKT_{ji} \cdot IP_{j_i} \quad <식 7>$$

VKT_{ij} = i에서 j지역으로의 총 승용차주행거리

직관적으로 다른 조건이 동일하다면 지역의 휘발유 소비량은 지역에서 소비될 것으로 기대되는 총 VKT와 비례한다. 따라서 총 VKT와 휘발유 소비량의 상관관계가 가장 높아질 때까지 네 개의 임계치를 변화시킴으로써 가장 적합한 주유지역선택확률 함수를 도출할 수 있다. 단, 이때 모든 임계치들은 <식 3, 5, 6>의 관계식을 만족해야 한다. <식 6>에 의해 minIP와 maxIP는 minOP와 maxOP에 의해 결정될 수 있으므로, <식 3>과 <식 5>를 만족하는 모든 쌍(minOP, maxOP)에 대해 0.1 단위로 값을 증가시키면서 추정된 VKT 값과 실제 휘발유 소비량 간의 Pearson 상관계수 값을 <표 2>와 같이 도출하였다.

위의 결과를 살펴보면 대체적으로 두 값의 평균인 y절편값이 증가할수록 상관관계가 높아지다가, 절편값 0.8 이상에서 상관관계가 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 주유지역선택확률 함수를 최적화하는 임계치는 maxOP=0.9, minOP=0.7, maxIP=0.3, minIP=0.1이 된다. 이 값과 수도권 유통판매가격 중 최대값과 최소값을 <식 2>와 <식 4>에 대입하면, 아래와 같이 최종적인 함수식이 도출된다.

$$OP_{AB_A} = 0.8 - \frac{0.2}{2(149)} \times (Pr_A - Pr_B) \quad \text{<식 8>}$$

$$IP_{BA_A} = 0.2 - \frac{0.2}{2(149)} \times (Pr_A - Pr_B) \quad \text{<식 9>}$$

$$149 = \max P_r - \min P_r$$

따라서 <식 8>과 <식 9>의 y절편 값은 각각 0.7과 0.1이 되며, 두 식은 두 지역의 유통가격 차이 (Pr_A - Pr_B)에 의해서 최종적인 형태가 결정되는 함수가 된다. 이 함수는 지역의 유통통행량 중 적어도 70%는 출발지역에서 주유를 하며, 최소 10%는 도착지역에서 주유를 한다는 것을 의미한다. 또한

표 2_ 추정된 VKT와 휘발유 소비량 간의 상관관계

Pearson 상관계수(양쪽)	maxOP			
	0.6	0.7	0.8	0.9
minOP	0.2			0.9010
	0.3		0.9127	0.9080
	0.4		0.9189	0.9170
	0.5	0.9190	0.9210	0.9197
	0.6		0.9197	0.9208
	0.7			0.9202
	0.8			0.9206

두 지역 간 유통가격이 같을 경우, 확률적으로 출발지에서 약 80%, 도착지에서 약 20%의 유통가 소비된다는 것을 알 수 있다.

4. 교통에너지 소비량 추정과 추정결과의 해석

<식 8>과 <식 9>를 <식 7>에 대입하고 회귀분석을 이용해 TC_i를 총 VKT에 대한 함수로 추정하면 다음과 같은 회귀식을 도출할 수 있다.

$$\widehat{TC}_i = \alpha + \beta(VKT_{ii} + \sum_j^N VKT_{ij} \cdot OP_{ij} + \sum_j^N VKT_{ji} \cdot IP_{ji}) \quad \text{<식 10>}$$

α = 상수항: -8078.993

β = 총 VKT에 대한 회귀계수: 172.569

R = 0.9214, R² = 0.849

VKT의 단위: 1,000km

TC_i의 단위: ₩(158.9l)

전 지역 간 VKT행렬과 유출, 유입 주유확률 행렬 그리고 위에서 도출된 회귀계수를 이용해, 통행 유형별 소비량을 추정할 수 있다. 먼저 내부통행 소비량은 출발지와 도착지가 같은 내부통행 총 VKT를 <식 10>에 대입함으로써 간단히 추정된다. 다른 값들은 아래의 <식 11, 12>를 통해 산출된

VKT 값을 이용해 추정할 수 있다.

$$V \cdot OP = \begin{bmatrix} VKT_{AA} & VKT_{AB} & VKT_{AC} \dots \\ VKT_{BA} & VKT_{BB} & VKT_{BC} \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & OP_{AB_A} & OP_{AC_A} \dots \\ OP_{BA_A} & 0 & OP_{BC_A} \dots \\ \vdots & \vdots & 0 \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots \dots \end{bmatrix} \quad \text{<식 11>}$$

$$V \cdot IP = \begin{bmatrix} VKT_{AA} & VKT_{AB} & VKT_{AC} \dots \\ VKT_{BA} & VKT_{BB} & VKT_{BC} \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & IP_{BA_A} & IP_{CA_A} \dots \\ IP_{AB_A} & 0 & IP_{CB_A} \dots \\ \vdots & \vdots & 0 \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots \dots \end{bmatrix} \quad \text{<식 12>}$$

V: 지역 간 VKT 행렬

OP: 유출통행의 주유지역선택확률 행렬, <식 8>의 행렬형태

IP: 유입통행의 주유지역선택확률 행렬, <식 9>의 행렬형태

V와 OP의 곱행렬에서 i행의 행 합산은 i지역의 유출통행내부소비 VKT를 의미하며, j열의 열 합산은 j지역에 유입된 통행이 외부에서 소비한 VKT를 의미한다. 마찬가지로 V와 IP의 곱행렬에서 행 합산은 유출통행의 외부소비를, 열 합산은 유입통행의 내부소비를 의미한다. 이때 출발지와 도착지가 같은 통행은 별도로 계산되었기 때문에, 주유확률 행렬의 대각 방향 원소는 모두 0이 된다. 이

렇게 도출된 값을 <식 10>의 회귀식에 대입함으로써 통행 유형별 휘발유 소비량을 추정할 수 있다.

상위 10개 구·시·군의 실제 휘발유 소비량을 추정한 결과는 <표 3>과 같다. 결과를 살펴보면 실제 휘발유 소비량과 J(A+B+D) 열의 값이 다소 차이를 보이는데, 이와 같은 추정오차가 발생한 이유는 본 연구의 가정과 현실세계의 통행행태가 정확하게 일치하지 않기 때문이다. 그러나 전반적으로 그 오차가 크지 않아, 이 추정값을 이용해 도시공간구조특성의 영향을 분석하는 것에 큰 무리는 없을 것으로 판단된다.

이처럼 교통에너지 소비량을 세분화하여 추정할 경우, 도시특성이 미치는 영향을 해당과 주변지역으로 분리해서 분석할 수 있다는 장점이 있다. 이중 도시 분야에서 가장 중요한 의미를 갖는 변수는 지역기반통행(G: A+B+C)에 의한 유류소비량 이므로, 다음 장에서는 이 변수에 대한 분석결과와 다른 변수에 대한 결과를 비교하여 해석함으로써 공간정책에 대한 함의를 도출한다.

표 3_ 휘발유 소비량 상위 10개 도시의 추정결과

(단위: 1bb/년)

구분	A. 내부 통행	B. 유출통행 내부소비	C. 유출통행 외부소비	D. 유입통행 내부소비	E. 유입통행 외부소비	F. A+B	G. A+B+C	H. D+E	I. A+B+C+D+E	J. A+B+D	실제 휘발유 소비량
용인	270,547	785,505	166,542	222,316	813,955	1,064,131	1,238,752	1,044,350	2,291,181	1,294,526	1,441,946
수원	249,734	815,998	159,294	221,109	755,196	1,073,811	1,241,184	984,384	2,233,647	1,302,999	1,387,680
고양	249,277	798,938	158,102	201,741	702,261	1,056,294	1,222,475	912,082	2,142,636	1,266,114	1,351,855
강남	70,248	920,693	303,072	166,765	989,253	999,021	1,310,172	1,164,097	2,482,348	1,173,864	1,295,960
서초	33,469	615,589	171,352	124,221	611,063	657,137	836,567	743,363	1,588,009	789,437	1,274,284
성남	171,862	767,734	201,843	187,371	837,472	947,675	1,157,596	1,032,922	2,198,598	1,143,125	1,035,570
부천	100,287	553,206	109,335	151,163	534,457	661,572	778,986	693,699	1,480,764	820,814	750,995
화성	146,578	508,363	112,582	158,527	613,241	663,020	783,681	779,846	1,571,606	829,625	725,312
시흥	72,714	380,700	82,411	103,889	410,706	461,493	551,983	522,674	1,082,737	573,461	715,112
송파	50,576	598,378	155,769	135,594	611,718	657,033	820,881	755,391	1,584,350	800,706	706,155

주: 1bb ≙ 158.91임

IV. 교통에너지 소비에 영향을 미치는 공간구조특성 분석

제4장에서는 위에서 도출한 휘발유 소비량 추정값을 토대로, 휘발유 소비량에 영향을 미치는 도시공간구조 특성을 공간회귀분석을 통해 분석한다. 본 연구에서 밝히고자 하는 교통에너지 소비량 결정요인을 함수관계로 나타내면 <식 13>과 같으며, 이러한 관계를 규명하기 위해 선행연구 검토를 통해 다음과 같은 분석변수를 설정하였다.

$$1인당 휘발유 소비량 = f(\text{도시공간구조, 도로교통환경, 주유환경, 경제수준})$$

<식 13>

1. 변수의 설정

1) 종속변수

종속변수는 Newman and Kenworthy(1989)의 연구와 같이 1인당 휘발유 소비량으로 설정했다. 구체적으로는 제3장에서 도출한 추정값 A, F, G, H, J를 인수로 나누어 5개의 변수를 산정함으로써, 종속변수의 차이에 따른 공간특성 변수의 차별적 영향을 비교분석할 수 있도록 했다.

2) 도시공간구조 특성 변수

도시공간구조와 관련된 변수에서는 크게 도시밀도, 도시공간구조의 압축 정도, 공간적 입지 등을 대표할 수 있는 변수를 설정했다. 먼저 밀도 변수

로는 가장 대표적으로 사용되는 시가지 인구밀도를 사용했다. 공간구조의 압축도를 나타내는 변수로는 행정구역이 얼마나 압축적(Compact)으로 도시화되어 있는지를 나타내는 도시지역 면적비율 변수와, 인구분포의 집중도를 나타내는 인구밀도 상대 엔트로피 지수를 이용했다. 본래 엔트로피 지수는 수식상에 면적 개념을 포함하고 있지 않기 때문에⁶⁾, 행정구역 내 읍면동의 면적이 불규칙할 경우 인구분포의 압축도를 정확하게 판단할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 <식 14>와 같이 인구밀도에 대한 상대 엔트로피 지수를 산정하여 정확도를 높였다. I_d 가 클수록 인구의 압축도가 높은 것을 의미하며, 따라서 I_d 값과 교통에너지 소비량은 반비례할 것이라고 기대할 수 있다.

$$I_d = \ln(N) - \sum_{i=1}^N \left(\frac{D_i}{D_t}\right) \ln\left(1/\frac{D_i}{D_t}\right) \quad \text{<식 14>}$$

I_d : 인구밀도 상대 엔트로피 지수, N : 행정동 수

D_i : 행정동 i 의 밀도, $D_t = \sum_{i=1}^N (D_i)$

마지막으로 공간적 입지 변수로는 Hansen Type 광역적 고용접근성 지표⁷⁾를 사용했다. 이 지표는 Cervero(1997), 조상규(2008), 김희철(2009) 등의 논문에서 고용과의 접근성을 나타내는 지표로서 활용되었다. 광역적 접근성 지표는 <식 15>와 같이 표현되며, 일반적으로 이 값이 작을수록 도심성이 약한 지역으로서 장거리 통행이 많아지게 된다.

$$RA_i = \sum_j Emp_j \cdot e^{(\beta d_{ij})} \quad \text{<식 15>}$$

RA_i = i 지역의 광역적 고용 접근성

Emp_j = j 지역의 고용수(인)

β = 거리에 따른 통행 저항 계수

6) 즉, 모든 행정구역의 면적이 동일한 경우에만 정확한 지표가 됨.

d_{ij} = i 에서 j 까지의 거리(km)

이때 고용자료는 2006년 사업체기초통계조사 자료를 이용했으며, 저항계수 β 는 김희철(2009)의 연구⁷⁾에서 사용한 -0.280 을 이용했다. 이는 통행거리가 1km 증가할 때마다 총 통행량이 약 28% 감소한다는 것을 의미한다⁸⁾.

3) 도로교통 변수

도로교통 변수는 크게 대중교통 서비스 수준 변수와 도로특성 변수로 구분된다. 먼저 대중교통 서비스 수준 변수는 버스정류장 밀도와 지하철 역세권 면적비율을 사용했다. 버스정류장 밀도는 대중교통 서비스에 대한 접근성 수준과 서비스의 다양성을 동시에 측정하기 위해, 각 정류장을 지나가는 모든 버스 노선의 수를 가중합산하여 산출했다.

$$BUS_i = \frac{\sum_{j=1}^n L_{ij}}{Area_i} \quad \text{<식 16>}$$

BUS_i = i 지역의 버스정류장 밀도(개/km²)

L_{ij} = i 지역 j 번째 버스정류장의 버스 노선 수

$Area_i$ = i 지역의 도시지역 면적

지하철의 경우, 역사의 밀도보다는 얼마나 넓은 면적이 역세권에 포함됨으로써 많은 거주자의 접근 용이성을 높여주느냐가 더욱 중요한 지표가 될 수 있으므로, 전체 도시화 면적 중 역세권 면적 비율을 변수로 이용했다. 이때, 정류장(또는 역사)이

행정구역 경계상에 위치할 경우 양쪽 지역에서 모두 이용이 가능하므로, 행정구역 경계에서 보행권(500m) 내에 있는 정류장(또는 역사)은 양쪽 행정 구역에 모두 포함되도록 하였다.

도로특성 변수로는 도로용량을 나타내는 차량 한 대당 도로면적을 사용했으며, 또한 도로 내에 얼마나 잦은 속도변화 지점이 있는지를 파악하기 위해 노드(Nodes) 밀도 변수를 사용했다. 일반적으로 가로의 특성을 나타내는 변수로 연결성 지수(Connectivity Index=Links/Nodes)를 많이 사용하나, 본 연구에서는 밀도 변수와의 강한 공선성 문제로 인해 변수로 채택하지 않았다⁹⁾.

4) 기타 변수

이외에도 교통에너지 소비에 영향을 미치는 요인은 다양하다. 우선 종속변수 자체가 주유소에서 소비된 유류의 합으로 구성되어 있기 때문에, 주유소 특성에 의해 영향을 받게 될 것이다. 따라서 해당 지역에 주유소 개수가 많을수록 총 소비량이 커지는 경향을 반영하기 위해 주유소 밀도를 설명변수로 추가했다. 또한, 주유지역선택확률 함수에서 미처 반영하지 못했을 수 있는 가격효과를 분석하기 위해 지역별 판매가격을 변수로 추가했다. 마지막으로 휘발유 소비량은 거주민의 경제수준에 의해 큰 영향을 받을 수 있으므로, 경제수준을 대리하는 변수로 1인당 부동산 보유세 변수를 추가하였다.

7) 김희철(2009)의 연구는 본 연구와 같은 시점의 같은 자료를 이용해 광역적 고용접근성을 산출했기 때문에 별도로 저항계수 값을 산출하지 않고 김희철의 연구결과 값을 이용하였음.

8) 이 값은 조상규의 선행연구에서 사용한 값(-0.276)과도 유사함. 보다 자세한 내용은 조상규(2008, p48)와 김희철(2009, p52)의 연구를 참고.

9) 노드란 차량이 도로를 주행함에 있어 '속도의 변화가 발생하는 곳'을 의미하며, 노드의 유형으로는 교차로, 교량시종점, 고가도로 시종점, 도로의 시종점, 지하철도시종점, 터널시종점, 행정경계, IC/JC 등이 있다. 그리고 링크란 속도변화 발생점인 '노드와 노드를 연결한 선'을 의미하며, 링크의 유형으로는 도로, 교량, 고가도로, 지하차도, 터널 등이 있음[국가교통정보센터 (<http://road.moct.go.kr>)]

표 4 _ 분석변수의 기초통계량

구분	변수명	변수 설명	mean	S.D.	min	max	unit
중속변수	NC/capita	내부통행소비량/인구	0.16	0.24	-0.08	1.28	bb/인×년
	NC+OFC_I/capita	내부통행소비량+유출통행내부소비량/인구	1.16	0.80	0.34	4.15	bb/인×년
	NC+OFC/capita	내부통행소비량+유출통행총소비/인구	1.41	0.96	0.42	4.86	bb/인×년
	IFC/capita	유입통행총소비량/인구	1.21	0.81	0.40	4.22	bb/인×년
	T̂C/capita	지역총소비량/인구	2.65	1.77	0.85	8.91	bb/인×년
도시공간 구조 특성 변수	Density	시가지 인구밀도(인구/도시지역 면적)	125.47	91.54	6.54	305.31	인/ha
	UR	시가지 면적비율(도시지역/행정구역 면적)	63.12	29.99	3.78	100.00	%
	Entropy	인구밀도 상대 엔트로피 지수	0.03	1.10	-4.99	1.45	-
	RA	Hansen Type 광역적 고용집근성	267019.6	200670.3	4373.73	862543.1	-
도로교통 변수	Bus	버스정류장 밀도(2008년)	14.26	7.96	3.92	48.22	개/km²
	Subway	역세권 면적비율(역세권면적/도시지역면적)	0.43	0.51	0.00	2.53	-
	Road	차량 한 대당 도로면적	0.01	0.01	0.002	0.06	km²/대
	Node	노드 밀도(2007년)	10.08	6.96	0.47	27.35	개/km²
주유소 관련 변수	Price	평균 휘발유 판매가격(2008년 11월 16일)	1403.86	36.09	1340.00	1489.00	원
	Station	주유소 밀도	0.76	0.52	0.03	2.04	개/km²
경제수준	Economy	1인당 부동산세	149.74	118.97	57.45	773.59	만 원/인

지금까지 설명한 모든 변수에 대한 요약과 기초 통계량은 <표 4>와 같다.

2. 추정 모형

본 연구에서는 대상지역인 수도권에서 발생할 수 있는 공간적 자기상관 효과를 고려하기 위해 공간 회귀분석(Spatial Regression)을 시행했다. 이는 중속변수로 사용되는 에너지 소비량이 주변지역과 완전하게 독립적이지 않으며, 인접한 지역의 영향을 받아 어떠한 경향성을 띠게 될 가능성이 크기 때문이다. 이러한 문제는 OLS를 통해 도출된 기준

회귀식에 공간가중치 행렬(Spatial Weight Matrix)을 적용함으로써 해결할 수 있다¹⁰⁾.

공간회귀분석의 대표적 모형으로는 Spatial Lag Model(SLM or SAR)과 Spatial Error Model(SEM) 등이 있으며, 구체적인 수식은 <식 17>, <식 18>과 같다¹¹⁾.

• *spatial - lag* :

$$y = \rho W y + X \beta + \epsilon, \quad \epsilon \sim N(0, \sigma^2 I) \quad \text{<식 17>}$$

• *spatial - error* :

$$y = X \beta + \epsilon$$

$$\epsilon = \lambda W \epsilon + \epsilon, \quad \epsilon \sim (0, \sigma^2 I) \quad \text{<식 18>}$$

10) 공간가중치 행렬은 공간적 인접도를 어떤 방식으로 정의하느냐에 따라 다양하게 적용할 수 있으나, 본 연구에서는 일반적으로 가장 널리 사용되는 Queen Contiguity 방법을 사용하였음.

11) 송영일. 2008. "공간패널모형을 적용한 지역 간 R&D 스피로버의 사회적 네트워크 효과 분석". 서울대학교 박사학위 논문. p36.

y : 종속변수 벡터, X : 독립변수 벡터
 W : 공간가중치 행렬, ϵ, e : 오차항 벡터
 β : 계수 벡터, ρ, λ : 공간 자기상관 계수

SLM 모형은 종속변수 간의 자기상관 그리고 종속변수와 오차항 간의 자기상관을 모두 고려한 것이며, SEM 모형은 오차항 간의 자기상관만을 고려한 모형이다¹²⁾. 이 중 분석자료에 적합한 모형은 OLS 추정을 통해 도출된 통계량에 의해 결정되는데, 일반적으로 알려져 있는 지표로는 LM (Lagrange Multiplier)과 R-LM(Robust LM) 등이 있다. 본 연구에서는 OLS 분석결과 R-LM 지표의 유의성이 검정되어, SEM 모형을 선택하여 분석을 시행하였다. 또한 GeoDa 프로그램에서는 독립변수들 간의 공선성 검토가 되지 않기 때문에 SPSS에서의 OLS 추정을 동시에 시행하였다. OLS와 SEM 모형의 추정결과는 <표 5>와 같다.

3. 분석결과와 해석

분석결과에 대한 해석은 크게 1) 모형의 적합도와 공간회귀 분석결과, 2) 도시특성 변수의 영향, 3) 종속변수의 차이에 따른 도시특성 변수의 영향력 차이에 대한 해석순으로 나누어 설명한다.

1) 모형의 적합도와 공간회귀 분석에 대한 해석

먼저 분석모형의 적합도를 살펴보면 대부분의 모형에서 0.7 이상의 양호한 결정계수를 보여, 교통에너지 소비에 영향을 미치는 대부분의 영향요인이 모형에 포함되었다고 판단된다. 또한 공선성 통계량 역

시 수용할 수 있는 수준으로 나타나 연구의 분석모형은 대체적으로 적합하다고 판단된다.

추정모형에 따른 적합도를 살펴보면, OLS에 비해 SEM 모형에서 결정계수가 더 높게 도출되었으며, 변수의 영향력에 대한 유의수준도 대체적으로 향상되었다. 따라서 본 연구에서 사용된 공간자료는 공간적 종속성을 내포하고 있었으며, 공간가중치 행렬을 분석모형에 적용함으로써 이러한 문제가 어느 정도 해소된 것으로 판단된다. 이 점은 오차항 간의 자기상관성을 나타내는 계수인 Lambda(λ)값이 모든 모형에서 통계적으로 유의하게 나타난 것에서도 확인할 수 있다.

2) 도시특성 변수의 영향에 대한 해석

도시특성 변수를 비롯한 독립변수의 영향에 대한 해석은 1인당 내부기반 총 소비량을 종속변수로 한 모형(8변 모형)을 중심으로 설명한다. 8변 모형의 모든 변수는 유의수준 5% 이내에서 유의성을 보였으며, 표준화된 회귀계수값¹³⁾을 비교한 결과 도로용량, 경제수준 변수가 상대적으로 종속변수에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 각 변수의 영향을 해석해보자.

먼저 도시특성 변수들에 대한 결과를 보면, 밀도, 도시화 면적비율, 인구분포의 압축도가 높을수록 1인당 교통에너지 소비가 적어지는 것으로 나타났다. 이는 일반적으로 고밀압축도시에서는 가까운 거리에 선택 가능한 고용과 시설이 많이 입지하게 되고, 또한 통행목적지 간의 이동거리가 짧아져 교통에너지 소비가 최소화되는 것으로 해석할 수 있

12) 정소양. 2008. "GIS와 공간통계를 이용한 도시범위의 공간패턴 및 영향요인 분석-서울시 사례연구". 서울대학교 석사학위 논문. p71.

13) 표준화된 회귀계수 값은 지면 관계상 분석결과 표에는 제시하지 않았음.

표 5_ 교통에너지 소비량에 영향을 미치는 도시공간구조 특성 분석결과(OLS, SEM)

OLS	1. NC/capita 내부통행 내부소비/인		2. NC+OFC_I/capita 내부기반 내부소비/인		3. NC+OFC/capita 내부기반 총소비/인		4. IFC/capita 외부기반 총소비/인		5. \widehat{TC} /capita 지역 총소비/인		VIF
	B	t	B	t	B	t	B	t	B	t	
(상수)	-0.890	-0.664	-5.895	-1.540	-8.282	-1.855*	-4.961	-1.320	-12.949	-1.597	
Density	-0.001	-1.194	-0.003	-1.993*	-0.003	-2.061**	-0.003	-1.916*	-0.006	-2.044**	5.577
UR	-0.006	-2.999***	-0.013	-2.457**	-0.015	-2.409**	-0.009	-1.722*	-0.024	-2.074**	8.687
Entropy	-0.037	-1.895*	-0.095	-1.682*	-0.110	-1.673*	-0.075	-1.356	-0.181	-1.516	1.244
RA	>0.001	-0.334	>0.001	-2.857***	>0.001	-3.102***	>0.001	-2.948***	>0.001	-3.101***	6.000
Bus	-0.004	-1.291	-0.022	-2.438**	-0.026	-2.460**	-0.021	-2.304**	-0.047	-2.427***	1.726
Subway	0.012	0.175	0.361	1.831*	0.473	2.059**	0.440	2.276**	0.930	2.231***	3.306
Road	7.461	2.864***	31.288	4.205***	36.235	4.175***	25.492	3.490***	63.945	4.057***	2.840
Node	0.005	0.830	0.039	2.402**	0.048	2.500**	0.037	2.299**	0.085	2.445**	4.238
Price	0.001	0.973	0.005	1.824*	0.007	2.119**	0.004	1.541	0.011	1.846*	3.481
Station	0.124	1.293	0.631	2.312**	0.758	2.378**	0.519	1.938*	1.267	2.190**	6.559
Economy	>0.000	-0.371	0.003	3.236***	0.004	3.694***	0.004	4.769***	0.008	4.260***	3.682
SEM	6. NC/capita 내부통행 내부소비/인		7. NC+OFC_I/capita 내부기반 내부소비/인		8. NC+OFC/capita 내부기반 총소비/인		9. IFC/capita 외부기반 총소비/인		10. \widehat{TC} /capita 지역 총소비/인		
변수	B	t	B	t	B	t	B	t	B	t	
(상수)	-0.987	-0.917	-6.499	-2.008**	-9.006	-2.354**	-5.029	-1.517	-13.665	-1.939*	
Density	>0.001	-0.442	-0.002	-1.947*	-0.003	-2.069**	-0.003	-2.025**	-0.006	-2.109**	
UR	-0.006	-4.533***	-0.016	-3.613***	-0.018	-3.434***	-0.011	-2.389**	-0.028	-2.920***	
Entropy	-0.042	-2.890***	-0.099	-2.217**	-0.113	-2.129**	-0.059	-1.262	-0.165	-1.673*	
RA	>0.001	0.083	>0.001	-2.902***	>0.001	-3.205***	>0.001	-3.052***	0.000	-3.205***	
Bus	-0.008	-2.966***	-0.032	-4.064***	-0.037	-3.908***	-0.026	-3.185***	-0.062	-3.612***	
Subway	-0.003	-0.050	0.384	2.115**	0.496	2.333**	0.476	2.652***	0.998	2.577***	
Road	5.679	2.824***	30.674	5.028***	35.867	4.961***	25.772	4.084***	64.177	4.803***	
Node	0.008	1.625	0.043	2.891***	0.051	2.952***	0.036	2.461**	0.087	2.731***	
Price	0.001	1.349	0.006	2.416**	0.008	2.726***	0.004	1.809*	0.012	2.278**	
Station	0.079	1.082	0.580	2.620***	0.709	2.703***	0.530	2.309**	1.236	2.547**	
Economy	>0.001	-0.504	0.003	4.136***	0.004	4.650***	0.004	5.656***	0.008	5.203***	
Lambda	0.663	5.953***	0.504	3.602***	0.456	3.098***	0.315	1.900*	0.394	2.522**	
적합도	R^2	Adj. R^2	R^2	Adj. R^2	R^2	Adj. R^2	R^2	Adj. R^2	R^2	Adj. R^2	
OLS	0.666	0.597	0.745	0.692	0.760	0.710	0.762	0.713	0.768	0.720	
SEM	0.735		0.776		0.783		0.773		0.785		

주: ***는 1%, **는 5%, * 10% 유의수준; N=65

다. 또한 고밀압축개발은 대중교통 등의 기반시설 확충을 용이하게 하기 때문에, 자가용 이용확률이 감소하는 효과가 나타났을 것이라 기대할 수 있다.

이러한 연구결과는 서구에서 주장된 압축도시 계획 이론이 고밀도 지역인 우리나라의 수도권에서도 적용 가능하다는 시사점을 준다. 마찬가지로 광역적

고용 접근성이 높아질수록 지역기반 에너지 소비가 적어지는 것으로 나타났다. 이는 고용 접근성이 좋은 지역에서는 직장뿐만 아니라 많은 서비스 시설이 집중되어 있기 때문에 통근거리와 여가통행거리가 모두 감소하기 때문인 것으로 판단된다.

다음으로 도로교통 변수에 대한 결과를 살펴보자. 버스 서비스 변수는 예상대로 부(-)의 관계를 보였으나, 지하철 서비스 변수는 예상과 상반되는 결과를 보였다. 이런 경우 우선적으로 공선성의 문제를 고려해볼 수 있으나, 지하철 서비스 변수에 대한 VIF 값이 비교적 작아 공선성의 문제는 아닌 것으로 판단된다. 생각해볼 수 있는 가정은 지하철 역세권 면적 비율의 증가가 개인의 통행수단 변화로 직접 연결되지 않을 수도 있다는 것이다. 역세권 면적 비율이 크더라도, 역세권 내에 많은 인구가 거주하지 않을 수 있으며, 거시적인 측면에서 개인의 통행수단 선택이 보행권 500m와 무관하게 결정될 수도 있다. 집합적 자료를 이용한 본 연구에서는 개인의 행태에 대한 구체적인 해석에 한계가 있기 때문에 이러한 가정에 대한 판단은 후속 연구를 통해 이루어져야 할 것이다.

도로용량과 에너지 소비량은 예상대로 정(+)의 관계를 보였다. 그러나 노드 밀도에 대한 분석결과는 논란의 여지가 있을 수 있다. 노드 밀도는 도시 블록의 조밀성을 나타내는 지표로 활용되는데, 일반적으로 노드 밀도가 높을수록 블록이 조밀하다고 할 수 있다. 이 경우 대단위 블록(Super Block)에 비해 非동력 통행수단의 선택확률이 높아지고 목적지까지 도달하는 길(Routes)의 종류가 다양해진다. 그러나 이러한 이론은 주로 커뮤니티 수준의 공간위계에서 적용될 수 있으며, 본 연구에서와 같이 도시단위의 분석에서는 적용할 수 없다. 도시단위의 분석에서는 주로 간선도로 내의 노드만이 집계되므로 이는 곧 주요 도로의 연장과 비례한다고

볼 수 있다. 이와 같은 이유에서 노드밀도 변수는 도로용량 변수와 같이 에너지 소비량과 양(+)의 관계를 보인 것으로 해석된다.

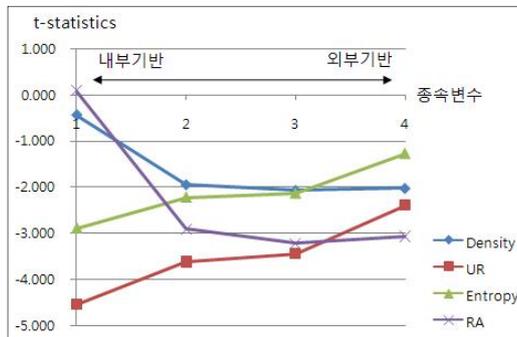
본 연구와 같이 집계적 자료를 이용한 회귀분석을 시행할 경우 설정된 변수가 의도치 않은 효과를 보이는 경우가 많아 변수의 선정과 해석에 신중을 기해야 한다. 특히, 교통에너지 소비량에 대한 회귀분석을 시행할 경우에는 본 연구에서와 같이 도로용량에 대한 변수를 반드시 포함하는 것이 중요하다. 이론적으로 도로가 충분히 갖춰져 있는 곳에서 차량에너지 소비가 많아질 것이라는 결과를 기대할 수 있기 때문이기도 하지만, 만약 도로용량 변수를 포함하지 않을 경우 도로용량과 밀접한 관련이 있는 버스정류장 밀도의 변수가 교통에너지 소비와 양(+)의 관계를 보이게 되는 경우가 자주 발생하기 때문이다.

마지막으로 주유소 관련 변수와 경제수준 변수에 대한 결과를 살펴보자. 종속변수 자체가 행정구역 내 모든 주유소의 총 판매량을 통해 추정되었기 때문에 주유소 밀도에 대한 결과는 직관적으로 명확하다. 반면 유류가격에 대한 결과는 예상과 상반되는 결과를 보였는데, 이는 종속변수를 추정하는 과정에서 이미 가격효과가 반영되었기 때문인 것으로 판단된다. 경제수준 변수에 대한 결과는 경제력이 높을수록 에너지 소비가 많은 것으로 나타나, 합리적인 결과라고 판단된다.

3) 종속변수에 따른 주요 변수의 영향력 차이에 대한 해석

종속변수에 따라서 도시특성 변수의 영향이 다르게 나타나는 것에 대한 해석에 앞서, 회귀분석에서 사용된 5개 종속변수의 성격에 대한 이해가 필요하다. <표 5>를 기준으로, 1번에서 4번까지는 좌측에

그림 3_ 종속변수별 공간구조특성 변수의 t-통계량



위치할수록 지역기반 통행 에너지 소비량을 대표하는 성격을 띠며, 우측에 위치할수록 지역내부 기반 통행에 외부기반 통행이 포함된 것을 의미한다⁴⁾. 내부기반 총 에너지 소비량을 나타내는 3(8)번 변수를 기준으로 1~4(6~9)번 변수에 대한 분석 결과를 비교해보자⁵⁾. 종속변수가 다른 회귀모형의 통계치를 직접적으로 비교하는 것은 무리가 있으나, 종속변수의 성격이 일정한 방향으로 변화해갈 때 모형 내에서의 상대적인 영향력의 크기를 나타내는 표준화 회귀계수값이 변화해가는 방향성을 통해 독립변수와 종속변수의 관계를 보다 다양한 관점에서 해석할 수 있다⁶⁾. <그림 3>은 종속변수에 따른 도시공간구조 특성 변수의 t-통계량 변화를 나타내는 그래프다.

<그림 3>을 보면 종속변수가 외부기반 통행 관련 변수로 변화해 갈수록 도시의 압축도를 나타내는 변수인 UR과 Entropy의 t-통계량 절대값은 감소하는 경향(=점차 유의성이 떨어지는 경향)을 보인다. 이는 도시내부의 압축 정도를 나타내는 지표인 UR과 Entropy값의 증가는 도시 내부의 통행 감

소에는 큰 영향을 미치지만, 유출통행의 감소에는 상대적으로 작은 영향만을 미친다는 것을 의미한다. 이러한 경향은 압축개발이 도시내부에 직장이거나 서비스 시설과 같은 다양한 통행목적지를 가까운 거리에 입지시킴으로써 내부 통행거리를 감소시켜 주지만, 압축도가 높아지더라도 통행목적지의 절대적인 양이 증가하는 것은 아니므로 유출통행 수요를 감소시키지는 못하기 때문에 나타난 결과다. 이는 다음과 같은 두 가지 함의를 갖는다.

첫째, 특정 지역의 압축도 증가는 지역 기반 통행 중 내부이동 통행만의 에너지 소비를 절감할 수 있으므로, 압축화를 통해 그 지역의 총 에너지 소비를 절감하기 위해서는 해당 지역을 포함한 보다 넓은 지역의 압축화가 이루어져야 한다.

둘째, 지역의 교통에너지 소비량은 지역 내부의 압축도보다는 해당 지역을 포함하는 더 넓은 지역의 압축도에 의해 영향을 받는 것이므로, 엄밀하게 따져보면 지역기반소비량_i = f(압축도_i)의 선형 함수 관계는 성립하지 않는다. 따라서 향후 연구에서는 분석 모형의 구성에 있어서 <식 19>와 같은 관계를 고려하는 것이 바람직하다.

$$\text{지역기반소비량}_i = f(\text{압축도}_i) \quad \text{<식 19>}$$

압축도_i = 지역_i를 포함한 보다 넓은 지역_i의 압축도

한편, 변수 Density와 RA는 종속변수가 외부기반 통행 관련 변수로 변화해 갈수록 t-통계량이 증가하는 경향(=점차 유의성이 증가하는 경향)을 보인다. 내부통행 내부소비량 변수에 대해서는 유의미한 영향을 미치지 못했으나, 유출통행을 포함한

14) 6~10번 변수도 1~5번 변수와 같은 의미를 가짐.

15) 5번 변수는 실제로 집계되고 있는 도로부문 휘발유 소비량과 같은 의미를 갖는 변수로서, 이와 동일한 변수를 사용한 기존 연구와의 비교를 가능하게하기 위해 분석에 포함하였음.

16) 본 연구에서는 지면관계상 표준화된 회귀계수 값을 제시하지 않았으므로, 이와 유사한 경향을 보이는 t-통계량을 중심으로 설명함.

내부기반 변수에 대해서는 유의미한 영향을 끼쳤으며 심지어 외부기반 통행의 감소에도 영향을 끼쳤다. 이는 RA 변수 자체가 주변지역의 고용 총량을 의미하는 것이므로, RA의 증가가 내부 소비량 감소보다는 장거리 유출통행 감소에 효과적인 것으로 해석할 수 있다. 또한 RA가 높은 지역은 공간적으로 인접해 있을 것이므로, RA가 높은 곳으로의 유입 통행은 먼 곳에서보다는 가까운 곳에서 유입될 확률이 높다. 따라서 RA의 증가는 주변 지역의 지역기반 통행 에너지 소비 절감에도 기여할 수 있다.

밀도에 의한 영향도 비슷하게 해석된다. 본 연구에서 인구밀도 변수를 사용하기는 했으나, 시·군·구 단위에서의 인구밀도는 인구뿐만 아니라, 고용, 서비스의 집적 정도 등 전반적인 도시개발 밀도와 비슷한 경향을 보인다. 따라서 인구밀도의 증가는 해당 지역 내 통행목적지 존재 확률의 증가를 의미하고, 이로 인해 유출유입 통행에 의한 에너지 소비가 감소하게 된다. 이로부터 저밀개발보다는 고밀개발이, 중심지와 멀리 떨어진 곳에서의 개발보다는 고용 중심지 근처에서의 충전 개발(Infill Development)이 에너지 절감 측면에서 보다 바람직하다는 공간 정책적 함의를 도출할 수 있다.

V. 결론

1. 연구결과 및 정책적 함의

본 연구에서는 도시공간구조 특성이 교통에너지 소비에 미치는 영향을 분석하기 위해 수도권 65개 행정구역을 대상으로 공간회귀분석을 시행했다.

첫 단계에서는 지역 간 승용차 VKT와 유류판매

가격 차이를 토대로 도출된 주유지역선택확률 함수를 이용해, 통행유형별 휘발유소비량을 이 과정에서 실제소비량과 추정값의 적합도 검정을 통해, 최적의 주유지역선택확률 함수를 도출했다. 이 함수에 의해 지역 간 통행에서 출발지와 도착지의 유류판매가격이 같을 경우, 출발지에서 휘발유를 소비할 확률이 약 80% 정도라는 사실을 발견했다.

두 번째 단계에서는 첫 단계에서 도출된 통행유형별 유류소비량에 대한 공간회귀분석을 시행했다. 먼저 도시공간특성 변수의 효과 분석을 통해, 도시밀도와 압축도가 높아질수록 휘발유 소비가 감소하는 경향을 확인했다. 8번 모형을 이용해 추정해본 결과, 도시밀도 및 압축도 관련 변수를 한 단위 증가시켰을 때 수도권에서만 연간 약 50만kl(7천억 원 가량)의 휘발유를 절약할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 서구에서 제안된 압축도시 계획이론의 고밀화·압축화 정책이 우리나라의 수도권에서도 적용 가능한 정책이라고 판단된다¹⁷⁾.

다음으로 종속변수에 따라서 다르게 나타나는 공간구조특성 변수의 영향에 대한 해석을 통해, 공간정책의 효과가 정책에 따라서 공간적으로 다르게 나타날 수 있음을 발견했다. 이 과정을 통해 도출한 정책적 함의는 다음과 같다.

첫째, 압축화 정책은 지역 내부통행 에너지 소비 절감에는 기여할 수 있으나, 지역기반 유출통행에는 큰 영향을 미치지 못한다. 일반적으로 지역기반 통행에서, 유출통행이 월등히 많은 비중을 차지하기 때문에, 사실상 지역단위에서의 압축화 정책이 지역의 에너지 소비량 절감에 미치는 영향은 매우 미미하다고 볼 수 있다. 따라서 압축화 정책은 해당지역을 포함한 보다 광역적인 범위에서 이루어

17) 그러나 이러한 결과는 계량모형을 통해 단순하게 추정해본 것에 불과하며, 정확한 예측을 위해서는 보다 다양한 접근방법이 필요함.

표 6_ 고밀압축개발의 효과 추정

독립변수	1단위 증가의 효과 (l/명·년)	수도권 총 효과 (kl/년)	수도권 총 효과 (억 원/년)
Density	-0.4767	-11,253	-162
UR	-2.8602	-67,515	-964
Entropy	-17.9557	-423,846	-6,049
RA	-0.0001	-2	-0.034
합계	-21.2927	-502,616	-7,174

주: 1) 수도권 총 인구는 2,360만 5,099명, 휘발유 1l의 가격은 당시 수도권 전체 평균인 1,427.76원을 가정함.
 2) 각 변수에 의한 효과는 비표준화 회귀계수를 통해 도출된 값이므로, 변수 간의 상대비교는 할 수 없음.
 3) 이해를 돕기 위해 kl 단위를 l단위로 환산하여 제시함.

어져야 한다.

둘째, 고밀화 정책과 고용집근성의 증가는 지역 내부통행 감소에는 효과적이지 못하지만, 지역기반 유출통행과 지역으로의 유입통행 에너지 소비를 절감하는 데는 효과적이다. 이는 지역 내외의 고용증가가 해당 지역을 포함한 인접지역의 통행수요 감소에 긍정적이며, 이러한 정책이 주변지역과의 상호작용을 통해 시너지 효과를 나타낼 수 있음을 의미한다. 따라서 교외개발보다는 고용 중심지 근처에서의 충전개발(Infill Development)이 에너지 절감 측면에서 보다 바람직한 정책이 될 수 있다.

2. 연구의 의의 및 한계

이와 같은 연구결과와 함의를 종합해 볼 때, 본 연구는 교통에너지 효율적 도시공간구조로 알려져 있는 압축도시의 효율성을 입증한 연구로서, 다음과 같은 학술적, 방법론적 의의를 갖는다.

첫째, 본 연구에서는 주유지역선택확률 함수를 적용하여 통행 유형별 유류소비량을 추정함으로써, 선행연구의 한계를 극복함과 동시에 보다 다각적이고 정확한 연구를 가능케 했다.

둘째, 본 연구는 지금까지 일반적으로 알려져 왔던 공간특성의 영향이 통행 유형의 공간적 차이에 따라서 다르게 나타날 수 있다는 사실을 발견했다는 점에서 의의가 있다. 이는, 향후 공간정책을 시행하거나 학술 연구를 위한 분석단위 또는 모형을 설정하는 데 있어서 도움을 줄 것으로 기대된다.

그러나 본 연구에서 휘발유 소비량을 추정하기 위해 사용된 주유지역선택확률 함수는 근본적으로 연구의 7가지 가정에 의한 것으로서, 실세계에서 이러한 가정이 반드시 성립하는 것은 아니므로 본 연구의 결과는 오차를 가질 수밖에 없다.

또한 본 연구를 통해 주장하고 있는 고밀화·압축화 정책은 교통에너지 소비절감 측면에서는 바람직할 수 있으나, 이와 동시에 의도치 않은 외부효과를 발생시킬 수 있다. 예를 들어 고밀화·압축화 정책은 특정지역의 대기오염 농도를 한계수치 이상으로 증가시킴으로써 쾌적한 환경가치 공유에 대한 공간적 형평성을 해칠 수 있다. 따라서 본 연구의 논지를 보다 확고히 하기 위해서는 에너지 절감효과에 대한 검증뿐만 아니라 그로 인해 발생할 수 있는 외부효과에 대한 검증이 동시에 이루어져야 하며, 이는 향후 수행되어야 할 중요한 연구과제가 될 것이다.

참고문헌

김승남. 2008. “압축도시 개발이 교통에너지 소비와 대기오염 농도에 미치는 영향”. 서울대학교 석사학위 논문.

김희철. 2009. “압축도시 계획요소가 소득계층별 통행행태에 미치는 영향”. 서울대학교 석사학위 논문.

남기찬 · 김홍석 · 손민수. 2008. “인구압축도와 교통에너지와의 관계 연구 - 압축지표를 활용하여”. 국토계획 제43권 제2호. 서울 : 대한국토 · 도시계획학회. pp155-166.

산업자원부. 2006. 2005년도 에너지총조사 보고서. 서울 : 에너지경제연구원.

송영일. 2008. “공간패널모형을 적용한 지역 간 R&D 스페일오버의 사회적 네트워크 효과 분석”. 서울대학교 박사학위 논문.

심교연. 2001. “도시의 규모 및 밀도와 중심지 분포 패턴이 교통에너지 소비에 미치는 영향 분석 - 국내 중소도시를 대상으로”. 서울대학교 박사학위 논문.

안건혁. 2000. “도시형태와 에너지활용과의 관계 연구”. 국토계획 제35권 제2호. 서울 : 대한국토 · 도시계획학회. pp9-17.

이명훈 · 김선희 · 정진규. 2003. “국토공간에서의 수송에너지 변화요인에 관한 연구”. 국토연구 제39권. 경기 : 국토연구원. pp131-146.

이영성. 2008. “우리나라 광역시 · 도의 총요소생산성과 결정요인”. 국토연구 제57권. 경기 : 국토연구원. pp39-53.

정소양. 2008. “GIS와 공간통계를 이용한 도시범죄의 공간패턴 및 영향요인 분석 - 서울시 사례연구”. 서울대학교 석사학위 논문.

조상규. 2008. “가구 유형에 따른 주거 및 고용 입지와 통근행태의 관계 변화 - 서울시 사례연구”. 서울대학교 박사학위 논문.

황금희 · 천혜영 · 나혜진. 2001. 교통에너지절약형 도시성장패턴 구축을 위한 토지이용 전략 - 수도권 인구 · 고용밀도를 대상으로 한 시론적 연구. 경기 : 경기개발연구원.

Breheny, M. J. 1995. “The Compact City and Transportation Energy Consumption”. *Transactions of the Institute of British Geographers* vol.20, no.10. Blackwell Publishing. pp81-101.

Cervero, R and K, Kockelman. 1997. “Travel Demand and the 3Ds: Density, Diversity and Design”. *Transportation Research D* vol.2, no.3. U.S. : Transportation Research Board. pp199-219.

Gorden, Peter. and Harry Richardson. 1989. “Gasoline Consumption and Cities: A reply”. *Journal of the American Planning Association* vol.55. U.S. : American Planning Association. pp342-346.

Newman, Peter W. G. and Jeffrey R. Kenworthy. 1989. “Gasoline Consumption and Cities”. *Journal of the American Planning Association* vol.55, no.1. U.S. : American Planning Association. pp24-37.

- 논문 접수일: 2009. 4.20
- 심사 시작일: 2009. 4.23
- 심사 완료일: 2009. 5.12

ABSTRACT

The Estimation of Transportation Energy Consumption Considering Gas Station Choice Probability and the Differential Effects of Urban Spatial Structure

Keywords: Transportation Energy, Urban Spatial Structure, Oil Price, Gas Station Choice Probability Function, Spatial Regression

The purpose of this study is to examine the effects of urban spatial structure on transportation energy consumption. For this, gasoline consumption in each area was estimated by using Gas Station Choice Probability Function and Vehicle Km Traveled(VKT). And these data analyzed through spatial regression. The main results of this study are as follow. First, oil consumption probability is 80% in departure area, if the oil price is same between departure and destination area. Second, compactness policy is effective only on inner travel reduction. Third, higher density and higher job accessibility can reduce not only outflow consumption but also inflow consumption, so that can create synergy effects in surrounding areas. These results lead us to the conclusion that effects of urban spatial structure are different in spatially different area. Therefore, we need to change of existing urban spatial policy based on these results.

주유지역선택확률을 고려한 교통에너지 소비량 추정 및 도시공간구조의 차별적 영향분석

주제어: 교통에너지, 도시공간구조, 유류가격, 주유지역선택확률 함수, 공간회귀분석

본 연구에서는 도시공간구조 특성이 교통에너지 소비에 미치는 영향을 공간적으로 구분하여 분석하기 위해 수도권 65개 행정구역을 대상으로 실증분석을 시행했다. 이를 위해 먼저, 지역 간 승용차 VKT와 유류판매가격 차이를 토대로 주유지역선택확률 함수를 도출하고, 이를 이용해 전 지역의 휘발유 소비량을 ‘내부통행내부소비’, ‘유출통행내부소비’, ‘유출통행외부소비’, ‘유입통행내부소비’, ‘유입통행외부소비’로 나누어 추정했다. 다음으로 추정된 휘발유 소비량을 종속변수로 하는 공간통계 분석을 시행함으로써, 도시공간구조가 미치는 영향을 분석했다. 연구의 주요 결과는 다음과 같다. 첫째, 주유지역선택확률 함수에 의해 지역 간 통행에서 출발지와 도착지의 유류판매가격이 같을 경우, 출발지에서 휘발유를 소비할 확률은 약 80% 정도인 것으로 나타났다. 둘째, 압축화 정책의 효과는 해당 지역 내부통행에서 더욱 크게 나타나며, 해당 지역에서의 유출유입 통행에는 큰 영향을 미치지 못한다. 셋째, 고밀화와 고용집근성 증가 정책은 내부통행에 대해서는 비효과적이지만, 유출유입 통행 감소에 긍정적인 영향을 끼침으로써, 공간적인 시너지 효과를 창출한다. 이러한 결과는 지금까지 일반적으로 알려져 왔던 정책의 효과가 공간적으로 다르게 나타날 수 있다는 점을 시사하는 것으로서, 이를 근거로 앞으로의 도시공간정책에 변화가 필요할 것이다.