



효율성 분석을 활용한 지자체 에너지 소비에 영향을 미치는 도시특성 분석*

Analysis of the Urban Characteristics Affecting Local Energy Consumption Using Efficiency Analysis

동아현** · 강정은***

Dong, Ah Hyeon · Kang, Jung Eun

Abstract

Energy consumption varies across cities, depending on their characteristics. This study aimed to provide basic information to develop suitable energy policies for any Korean local government by analyzing their energy consumption efficiency. Before the analysis, which was conducted in two stages, urban characteristics were classified into five categories based on previous research: urban spatial and demographic, urban transportation, urban industry-economy, urban energy policy, and urban climate. Based on these categories, seventeen urban characteristics were selected, of which eight were found to be significant. In the first stage, the relationships between urban characteristics and energy usage in municipalities were clarified using multiple regression analysis. The second stage involved applying data envelopment analysis to examine how the local governments' urban characteristics affect energy consumption efficiency, and what urban characteristics can be adjusted to contribute to increasing it. As a result, each variable's effect on each local government's energy consumption was found to be different. Thus, policies will differ to suit the characteristics of local governments. These findings are expected to become a guideline for establishing suitable policies for each local government's specific conditions regarding the development of local energy plans.

주제어 도시특성, 에너지 소비, 효율성 분석, 자료포락분석

Keywords Urban Characteristics, Energy Consumption, Efficiency Analysis, Data Envelopment Analysis

1. 서론

기후변화는 생태계 변화, 해수면 상승, 이상 기후 등의 원인이 되며 인간에게 직간접적으로 큰 영향을 미친다. IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)는 기후변화의 주요 원인으로 화석연료의 소비로 발생하는 온실가스의 급격한 증가를 들고 있으며, 세계 온실가스 배출의 70% 이상이 도시에서 발생한

다고 보고하고 있다. 도시는 개발의 집중 정도가 큰 공간이기 때문에, 기후변화로 발생하는 부정적인 영향의 피해 규모도 상대적으로 크다. 다시 말해, 도시는 기후변화를 초래하는 공간이면서 동시에 기후변화로 인한 피해를 가장 많이 받는 곳이다. 이에 국제사회는 기후변화 문제 해결을 위한 도시 차원에서의 다양한 노력을 강조하고 있다(Kamal-Chaoui and Alexis, 2009; 강정은 외, 2011; IPCC, 2014).

* 본 논문은 동아현의 석사학위논문을 수정·보완한 것이며, 국토교통부의 스마트시티 혁신인재육성사업의 지원을 받아 수행됨.

** Ph.D. Student, Department of Urban Planning and Engineering, Pusan National University (First Author: hyun_dong215@pusan.ac.kr)

*** Associate Professor, Department of Urban Planning and Engineering, Pusan National University (Corresponding Author: jekang@pusan.ac.kr)

2016년 기준, 우리나라의 온실가스 배출량은 전년도 대비 0.2% 증가한 6억 9,410만 톤이며 국내 온실가스 배출량은 꾸준히 증가하고 있다(환경부 온실가스종합정보센터, 2018). 2018년 배출량 격차보고서(Emissions Gap Report 2018)에 따르면, 전 세계 온실가스 배출의 78%를 차지하는 주요 20개국(G20) 중 한국을 포함한 7개 국가가 2030년까지 각국이 정한 감축기여분을 달성하지 못할 것으로 예측된다(UNEP, 2018).

국내 온실가스 배출량을 분야별로 살펴보면(2016년 기준), 에너지 소비에서 배출되는 온실가스가 87.1%, 산업공정에서 배출되는 양이 7.4%, 농업분야 온실가스 배출은 3.1%를 차지하고 있어, 에너지 사용으로부터 발생하는 온실가스의 비중이 가장 크다(환경부 온실가스종합정보센터, 2018). 우리나라는 에너지 소비 세계 10위, 전력 소비 8위로 에너지 다소비형 국가이다(에너지경제연구원, 2018). 특히, 1인당 에너지 소비량은 5.73toe로 OECD 국가들의 평균(4.10toe)보다도 약 40%를 더 소비하고 있다(에너지경제연구원, 2017). 미국, EU 등 주요 선진국들이 에너지 소비 관리를 통해 온실가스 감축에 적극적으로 동참하고 있는 것처럼 우리나라도 에너지 소비를 관리하고 에너지 소비를 줄이기 위한 적극적이고 다양한 노력이 필요한 상태라고 할 수 있다(김지효·심성희, 2015).

우리나라의 에너지 정책은 에너지 공급을 담당하는 공급관리 정책과 에너지 부하관리, 에너지 효율향상 등 에너지 사용을 관리하는 수요관리 정책으로 분류된다(김지효·심성희, 2015). 공급관리 정책은 장기적인 에너지 수요를 예측하여 에너지를 안정적으로 공급하는 역할로 주로 중앙정부가 담당하고 있으며, 에너지 수요관리는 「에너지이용합리화법」에 따라 5년 단위의 지역에너지 계획을 수립하여 관리하도록 하고 있다. 에너지 소비는 지역 특성에 따라 다른 소비특성을 보이기 때문에 지역특성을 고려한 에너지 소비정책 수립은 매우 중요하다. 그러나 현재까지는 16개 주요 광역지자체 기준으로 계획이 수립되고 있어 기초지자체 차원의 특성을 반영한 정책 마련은 미흡한 실정이다.

에너지 소비에는 개인이나 가계의 행태나 특성이 영향을 미치기도 하지만 지역 및 도시단위의 다양한 요소가 영향을 미친다. 최근 도시특성을 고려한 에너지 소비와 관련된 연구가 다수 이루어지고 있으나, 대부분의 연구가 도시산업, 경제 특성 등 도시의 일부 특성만을 고려하고 있어, 지자체 에너지 소비에 실제 영향을 미치는 도시 공간적 특성, 도시별 기후특성, 에너지 정책 등 다양한 요소를 함께 고려하고 있지는 못하다. 또한, 많은 연구가 일부 지역권을 대상으로 하거나, 교통에너지 혹은 전력과 같은 일부 에너지원에 한정하여 연구가 수행되어 지자체의 종합적인 에너지 소비에 대한 연구들이 추가적으로 이루어질 필요가 있다.

이에 본 연구는 국내 218개 지자체를 대상으로 공간 및 인구, 환경적, 정책적 특성을 포함한 다양한 도시특성이 에너지 소비에 어떤 영향을 미치는지 살펴보고자 한다. 특히, 본 연구는 도시별

로 에너지 소비에 영향을 미치는 특성을 비교하고 지역 맞춤형 방안을 마련하는 데 시사점을 제공하기 위해 효율성 분석기법을 활용하였다. 지자체별 상대적 효율성은 도시특성요소를 투입요소로, 총에너지 소비량을 산출요소로 설정하여 자료포락분석을 활용하여 분석하였다.

II. 선행연구 검토

1. 에너지 소비에 영향을 미치는 도시특성 연구

다수의 선행연구들이 도시특성요소와 교통에너지 사용 간의 관계에 초점을 맞추어 연구를 수행한 바 있다. 김경태·송재민(2015), 김리영·서원석(2011), 송기욱·남진(2009), 남창우·권오서(2005) 등의 국내연구는 인구밀도, 혼합토지이용비율, 도시공간구성, 토지이용계획, 교통수단과 접근성, 연결성 등의 도시공간특성이 교통에너지 소비와 밀접한 관계가 있음을 밝혔다. 그러나, 도시의 규모와 특성에 따라 교통에너지 소비에 영향을 주는 요소가 다르며 영향력의 크기도 달라 도시의 특성을 고려한 에너지 정책이 필요함을 주장하였다. Benoit(2009)는 도시의 교통에너지 소비 요인으로 도시의 인구밀도, 공간밀도, 교통수단의 분포, 교통수단의 효율성 등이 있으며 올바른 토지이용정책을 통해 교통에너지 소비를 줄일 수 있음을 밝히고 있다.

압축도시 형태가 에너지 소비에 미치는 영향에 대한 연구는 국내외에서 다양하게 논의되었다. Newman and Kenworthy(1989)의 연구는 세계의 32개 도시를 대상으로 자가용 자동차의 교통에너지 소비량을 비교하기 위하여 도시의 1인당 가솔린 소비량과 토지이용 간의 관계를 분석하였다. 그 결과 인구밀도가 높은 도시는 목적지와 주거지역이 근접할 가능성이 높아 교통에너지 소비가 감소하는 것으로 나타났다. Ewing and Cervero(2010)의 연구는 압축된 형태의 도시개발이 시민들의 대중교통 수요와 보행을 유도하기 때문에, 도시의 밀도와 사람들의 활동을 변화시키는 것은 에너지 소비를 줄이는 데 기여할 수 있음을 주장하였다. 이 때, 압축도시 공간구조의 특징으로 밀도, 혼합토지이용도 등이 대표적인 지표로 사용되고 있었다. Mindali et al.(2004)의 연구 역시 도시의 교통시스템 및 토지이용패턴이 에너지 소비를 야기할 수 있으며, 도시의 밀도에 영향을 주는 혼합토지이용이 에너지 소비를 줄이는 데 기여한다고 주장하였다. Cervero and Kockelman(1997)의 연구도 앞선 연구들과 같이 도시의 밀도, 다양성, 디자인이 교통에너지수요에 영향을 미침을 언급하며, 토지이용의 다양성이 교통에너지 소비를 줄일 수 있도록 장려함을 발견했다. 국내연구로 이동성·문태훈(2017), 김리영·서원석(2011)의 연구는, 도시의 혼합토지이용비율이 에너지 소비를 줄이는 것에 기여하고 있음을 밝히고 있다. Newman and Kenworthy(2006)는 도시의 교통에너지 소비를 줄이기 위해 자동차 의존성을 줄이는

것이 필요하며, 대중교통 서비스 수준을 포함하여 도시의 밀도, 연결성의 강화가 필요함을 언급하고 있다.

도시는 교통에너지뿐만 아니라 다양한 에너지요소가 소비되는 공간이다. 이에, 교통에너지 외 다양한 에너지를 함께 고려한 연구들도 이루어지고 있다. Yao(2011)는 베이징의 도시지역에서 사용되고 있는 총에너지 소비량과 도시의 공간밀도 간 관계가 있음을 밝히고 있으며, 공간밀도와 인구밀도를 함께 고려하여 에너지 소비량을 줄일 수 있다고 주장하고 있다. Alberini et al.(2011)는 미국의 가정에서 소비되는 가스 및 전기에 대한 수요를 조사하였으며, 이때, 각각의 에너지 소비에 영향을 미치는 요인으로 집의 노후도, 가정의 소득수준 등이 있음을 밝히고 있다.

국내연구로는 정민선 외(2015)가 수도권 60개 구·군을 대상으로 순밀도, 녹지비율, 고용밀도, 통행량, 환경보호예산, 재정자립도를 도시특성지표로 활용하여 석유 및 전기에너지 소비와의 관계를 살펴보았다. 정재원 외(2015)와 이상현·오규식(2013)은 서울시 행정동을 분석단위로 가구특성, 경제특성, 주택의 물리적 특성, 도시공간특성, 교통시설특성 등이 에너지 소비에 미치는 영향을 다중회귀분석, 상관분석 등을 활용하여 살펴보았다. 남궁근 외(2010)는 특별시 및 광역시와 77개 시급 도시를 대상으로 도시특성(인구밀도, 주거·상업·공업지역 면적, 주택수, 도로연장, 자동차 등록대수, 소득세)과 에너지 소비 간의 상관성을 분석하고 요인분석을 활용하여 도시 유형을 구분한 후 에너지 소비패턴을 분석하였다. 고재경 외(2015)는 경기도 지역의 31개 시군을 대상으로 최종에너지 소비량을 지수분해기법을 활용하여 1인당 GRDP(생산효과), 에너지 집약도 효과(에너지 효율성 개선), 인구효과(인구변화)가 에너지 소비변화에 어떻게 영향을 미쳤는지 살펴보고, 군집분석을 통해 기초지자체를 유형화하고 차별화된 정책수립을 위한 자료로 활용하고자 하였다. 많은 연구들이 에너지 소비에 영향을 미치는 변수로 지역의 경제적 여건을 고려했으며 지역경제를 나타내는 지표로 지역내총생산(Gross Regional Domestic Product, GRDP) 등을 분석에 활용하였다. 김호영·이상원(2011)은 인천광역시를 대상으로 에너지 소비에 영향을 미치는 요인을 분석한 결과, 지역경제수준이 높으면 지역의 에너지 소비량도 증가하는 것으로 나타났다.

최근 1인가구의 증가와 노인가구의 증가로 가구형태의 변화가 일어나고 있다. 가구는 에너지를 소비하는 주체이므로, 가구의 변화가 에너지 소비에 영향을 줄 것으로 예상된다(신동현 외, 2015). 정재원 외(2015)는 가구 규모와 같은 가구특성이 에너지 소비에 영향을 미치므로 가구특성을 고려한 에너지 소비특성분석이 필요함을 언급하고 있다. 최막중·정이레(2018)의 연구는 가구의 에너지 소비구조를 분석하였으며, 그 결과 가구원 수가 에너지 소비에 양(+)의 관계가 있음을 밝히기도 했다.

선행연구들은 지역별 특성을 고려한 연구의 필요성과 함께 여러 기초지자체로 연구범위가 확대되어야 한다는 주장을 제기하

며 최근에는 전국 시군구를 대상으로 한 연구가 수행되기 시작했다. 박종문(2018)은 전국 시군구를 대상으로 가구특성, 주택특성, 도시특성 등이 가구 에너지 소비에 미치는 영향을 다중회귀분석으로 살펴보았다. 양혜미·송재민(2017)은 에너지 부문별로 지역을 군집화하고 군별로 도시특성(지역밀도 특성, 교통특성, 경제특성, 산업특성)이 에너지 소비에 미치는 영향을 다중회귀분석을 활용하여 분석을 수행하였다. 그 결과 각각의 시군구는 상이한 에너지 소비패턴을 가지고 있으며, 군집별로도 에너지 소비에 영향을 미치는 특성들이 다름을 확인하였다.

에너지 소비에 영향을 미치는 요소로 최근 새롭게 연구되고 있는 것은 기후변화로 인한 기후특성이다. 기후변화로 인한 영향들이 실제 에너지 소비 증가에 영향을 미치는 사례들이 나타나면서, 에너지 소비에 있어 기후요소를 주요 영향 요소로 인식해야 한다는 연구들이 나타나고 있다. 이동성·문태훈(2017), 정준호·허인혜(2015), 정지훈 외(2014), 임현진 외(2013) 등의 연구는 지구온난화로 인한 기후변화가 우리나라의 에너지 소비량에 미치는 영향을 분석하였으며, 에너지 소비량과 기후변화 간에 밀접한 관련성이 있는 것을 밝히고 있다. 기후변화가 전 지구적 현상이나, 각 지역별로 그 영향의 정도에 차이가 있으므로 기후변화와 연계된 에너지 소비 패턴의 변화 역시 연구가 필요한 상황이다.

이러한 국내외 선행연구를 검토하여 다음의 시사점을 도출하고, 본 연구의 차별성을 확보하고자 하였다. 우선, 에너지 소비에 영향을 미치는 도시특성은 어떤 에너지에 초점을 맞추고 있는지에 따라 다양하게 도출될 수 있다. 교통에너지, 가구에너지 등 특정 에너지 부문에 초점을 맞춘 미시적인 연구들도 의미 있지만, 본 연구는 지자체 에너지 수요관리 전반에 초점을 맞추는 만큼 도시내의 활동에 사용되는 모든 에너지의 총합인 총에너지사용량을 에너지 소비 변수로 활용하고자 한다. 따라서 에너지 소비에 영향을 미치는 도시특성요소도 최근 관심을 받고 있는 기후요소와 함께 다수의 선행연구들이 다루고 있는 도시공간, 도시교통, 도시경제 및 산업 요소를 포함하고, 선행연구들이 거의 고려하지 못한 정책적 요소까지 함께 포함하고자 하였다. 셋째, 거의 모든 선행연구들이 지역에 따라 에너지 소비에 영향을 미치는 요소와 요소별 영향력에 차이가 있으며 이를 고려하여 정책수립이 이루어져야 하는 것에 동의하고 있다. 그러나 다수의 연구에서 통계적 기법인 다중회귀분석이나 상관분석을 활용하여 전체 연구지역을 대상으로 어떤 도시특성요소가 에너지 소비에 영향을 미치는지를 분석하는 것에 집중해 왔다. 최근에는 지역 간 차이를 살펴보기 위해 변수 중 도시지역, 농촌지역 등을 식별할 수 있는 변수를 추가하거나, 군집분석을 활용하여 군집을 식별하고 군집별로 별도로 분석을 수행하는 방식을 취하기도 했다. 군집을 구분하여 살펴보는 방식도 의미 있지만 이러한 경우는 군집 간 비교는 용이하나, 군집 내 지역들의 특성을 고려하거나 비교할 수 없는 약점이 있다. 이에 본 연구는 개별 지자체의 특성을 고려할 수 있고

지자체 간 비교가 가능한 방식으로 투입요소에 대한 산출요소의 효율성을 검증할 수 있는 자료포락분석법을 활용하여 지자체별로 도시특성요소에 대한 에너지 소비 영향을 분석하고자 한다. 이어지는 절에서는 자료포락분석법을 활용한 선행연구를 면밀히 살펴보았다.

2. 자료포락분석을 활용한 효율성 분석 연구

자료포락분석의 효율성 측정 기법은 효과성에 대한 절대적인 기준을 설정하기 어려운 요소들의 상대적인 효과성을 측정하는 방법이며, 절대적 수치로 효과성을 비교하기 어려운 공공부문에서 자주 활용되고 있다(이은진·문상호, 2006; 임병학 외, 2009; 최원철 외, 2013; Fancello et al., 2014; 정재명, 2015; Deilmann et al., 2018; 양희진·윤희연, 2019). 자료포락분석은 공공부문의 효율성을 측정할 뿐만 아니라 비효율의 원인을 도출하고 개선하고 목표를 설정하는 것에 활용되고 있다(조정문 외, 2017). 이때 공공기관의 효율성이란 투입한 인적·재정·물적 자원에 대하여 해당 기관이나 지자체가 달성한 성과의 수준으로 주로 정의된다.

Fancello et al.(2014)는 도로시스템을 평가하기 위해 도로의 접근성, 유지보수, 안전, 대중교통을 투입요소로 설정하여 도로 서비스 수준(산출요소)을 향상시키기 위한 효율성을 분석하였다. 양희진·윤희연(2019)은 서울시 자치구별 폭염 대응정책의 효율성을 분석하기 위해 자료포락분석법을 사용하였다. 다양한 대응정책들을 투입요소로, 정책의 성과인 산출요소는 온열질환상병지수, 온열질환지출지수를 활용하였다. Deilmann et al.(2018)는 그간 공공행정 평가나 경제, 생산 관련 분야에서 주로 이용되던 자료포락분석을 도시지역 분석에 적용하여 도시문제 해결에도 활용될 수 있음을 제안하였다. 해당 연구는 구조적, 생태적, 사회적 측면에서 효율적인 지역과 그렇지 않은 지역을 구분하여, 더욱 효율적인 도시가 되기 위한 지역별 전략을 도출하고자 했다.

자료포락분석을 환경이슈에 적용한 연구들도 수행되었는데 Üstün(2015)은 터키 도시를 대상으로 수자원 및 환경예산을 투입요소로 보고, 고체폐기물 총량, 하수도 이용자수, 식수공급대상자, PM₁₀ 농도, SO₂ 농도 등을 산출요소로 하여 환경의 질 개선에 대한 효율성을 평가하였다. 홍하연·이주연(2013)은 녹색건축설계요소를 투입요소로 온실가스 저감량을 산출요소로 효율성을 분석하였다. 그 결과 16개 광역지자체 중 서울, 인천, 울산, 충남, 경남이 상대적으로 효율적인 지자체이며 나머지 11개 지자체는 비효율적인 측면이 발견되어 지자체별 정책 방향을 제시하기도 했다. 제현정·이승일(2012)은 서울시 25개 구를 대상으로 자료포락분석을 활용하여 토지이용패턴, 공간구조, 교통수요, 지역경제구조, 자원의 이용 등을 투입요소로 대기질의 개선효과를 산출요소로 분석을 수행하였으며 효율성이 낮은 행정구에 대해서는 잔여값을 확인하여 개별 구의 대기질을 개선하는 방안을 제시하기도 하였다.

자료포락분석을 활용하여 에너지 효율성을 분석한 연구도 이루어졌는데 박창수·서윤석(2017)은 16개 시·도의 제조업 부문 에너지 효율성을 분석하였으며, 대기업의 생산액 비중이 높고, 에너지다소비업종의 생산액 비중이 작고, 전력사용의 비중이 클수록 에너지 효율성에는 긍정적인 영향을 미치는 것으로 분석하였다. 김광욱·강상목(2016)은 16개 지자체에 대해 지역 총생산, 노동, 자본 등 지자체의 산업특성만을 고려하여 에너지 소비량을 평가하였다. 민동기(2010)는 제조업의 전력사용에 초점을 맞춘 효율성 연구를 수행한 바 있다. 현재까지 자료포락분석을 활용한 에너지 소비 효율성 연구는 주로 산업부문에서 이루어진 것을 확인할 수 있었다.

선행연구의 검토를 통해 자료포락분석은 비시장적 재화인 다양한 도시요소를 투입요소로 의사결정단위인 지자체의 에너지 소비량을 산출요소로 효율성을 비교하고 평가할 수 있으므로 그간 연구들을 확장하여 본 연구의 방법론으로 활용하고자 한다.

III. 연구방법론

1. 분석과정 및 연구범위

본 연구의 목표는 지자체의 에너지 소비에 영향을 미치는 도시 특성을 살펴보고, 타 지자체와의 효율성 비교를 통해 정책적 시사점을 도출하는 것이다. 이를 위해 본 연구는 2단계로 구분하여 진행되었다. 1단계는 지자체별 특성을 분석하기에 앞서 전체 지역을 대상으로 에너지 소비에 영향을 미치는 도시특성요소를 식별하는 단계이다. 이 단계에서는 선행연구를 기반으로 도출한 도시공간 및 인구특성, 도시교통특성, 도시경제·산업특성 도시에너지정책특성, 도시기후특성별 주요 변수들을 독립변수로 총에너지 소비량을 종속변수로 다중회귀분석을 실시하였다. 2단계는 1단계에서 도출된 총에너지 소비량에 통계적으로 유의미한 영향을 미치는 변수들을 투입요소로, 에너지 소비량을 산출요소로 하여 지역별 상대적인 효율성을 비교하는 자료포락분석을 실시하였다. 2단계를 통해 개별 도시특성요소가 에너지 소비 감소에 어떤 영향을 미치는지 지자체 간 비교를 수행할 수 있었다.

앞서 언급했듯이 기초지자체를 연구의 분석단위로 설정하였으며, 지역에너지통계 데이터 확보가 가능하고, 에너지 소비에 있어 이례적인 특성이 없는 218개 시군구¹⁾를 연구 대상으로 선정하였다. 연구는 도시특성과 시군구 에너지 통계자료가 모두 확보되는 가장 최근 연도인 2015년을 기준으로 수행되었다.

2. 다중회귀분석모형

1단계의 다중회귀분석에 활용된 변수는 <표 1>과 같다.

종속변수인 총에너지 소비량은 정창봉 외(2016)에서 제공하는

Table 1. Definition of variables and data sources

		Variable definition (Unit)	Source
Dependent variable	Total energy consumption (1,000 toe)		Korea Energy Economics Institute Yearbook of Regional Energy Statistics
		Spatial and demographic characteristics	Resident registration population
Mixed land use ratio (%)	Korea Land and Housing Corporation Statistics of Urban Planning		
Average household size	Statistics Korea Regional Basic Statistics		
Transportation characteristics	Road area (m ²)	Ministry of Land, Infrastructure and Transport Yearbook of road statistics	
	Number of total registered car	Ministry of the Interior and Safety Korean Urban Statistics	
	Transport share ratio of bus (%)	The Korea Transport Institute Korea Transport Database	
Independent variable	Economic · industrial characteristics	GRDP (Gross Regional Domestic Product) (1,000,000 won)	Statistics Korea Regional Basic Statistics
		Financial Independence ratio (%)	Korean Urban Statistics Regional Basic Statistics
	The number of energy consumption industry	The number of energy consumption industry	Ministry of the Interior and Safety Korean Urban Statistics
		The number of energy consumption industry employment	Ministry of the Interior and Safety Yearbook of Road Statistics
		The amount of production in energy consumption (won)	Ministry of the Interior and Safety Korean Urban Statistics
	Policy characteristics	The number of public officer	Statistics Korea Korean Urban Statistics
		Local tax expenditure in energy policy for infrastructure (won)	Settle accounts of local government
		Local tax expenditure in energy policy for home and appliances (won)	Settle accounts of local government
		Local tax expenditure in energy policy for transportation (won)	Settle accounts of local government
		Local tax expenditure in energy policy for industry (won)	Settle accounts of local government
Climate characteristic	Cooling/heating degree-day (degree-day)	Korea Meteorological Administration Meteorological Information Portal Service System	

시군구 에너지통계를 활용하였으며, 석탄, 석유, 천연가스, 도시가스, 전력, 열에너지, 신재생에너지 소비량의 총합을 의미한다.

독립변수인 도시특성변수는 선행연구를 기반으로 공간 및 인구특성, 교통특성, 경제·산업특성, 정책특성, 기후특성으로 구분하여 변수를 구성하였다. 에너지 소비에 영향을 미치는 도시공간 및 인구특성으로는 주민등록인구수, 혼합토지이용비율, 평균가구원수로 선정하였고, 교통특성은 도로면적과 자동차등록대수, 버스수송분담률을 주요 변수로 포함하였다. 이때, 혼합토지이용비율은 토지이용의 혼합정도와 기능의 압축정도를 설명하는 변수로, 선행연구(서원석·김리영, 2010; 이동성·문태훈, 2017)를 기반으로 도시 내 다양한 기능이 혼합되고 밀도 높은 개발이 가능한 용도지역인 상업지역과 준주거지역의 비중을 계산하는 식 (1)

을 활용하여 도출하였다.

$$\frac{(\text{상업지역} + \text{준주거지역})}{(\text{주거지역} + \text{상업지역} + \text{공업지역})} \times 100 \quad (1)$$

도시경제·산업특성은 지역내총생산(GRDP), 재정자립도와 에너지다소비업종 사업체수, 에너지다소비업종 종사자수, 에너지다소비업종 매출액으로 구성하였다. 이때, 광업 및 제조업은 에너지를 많이 소비하는 대표적인 산업으로 본 연구에서 에너지다소비업종은 광업·제조업으로 정의하였다.

도시의 정책특성은 각 지자체에서 에너지 소비를 줄이기 위한 행정적 노력을 평가할 수 있는 변수로, 본 연구에서는 에너지

소비 관련 정책에 대한 투자규모와 공무원 수를 변수로 포함하였다. 에너지 소비정책은 UNECE(United Nations Economic Commission for Europe)에서 제공하는 에너지 효율 모범정책의 구분에 따라 에너지 기반조성정책, 가정·기기 정책, 교통정책, 산업부문 에너지 정책으로 구분하였다(UNECE, 2014). 기반조성 정책은 전략계획 목표 마련, 지방정부의 참여촉진, 재정정책, 정부보조금지원 등 에너지 소비를 줄이기 위한 정책기반을 조성하는 정책이다. 가정·기기부분의 정책은 고효율 가전기기 보급, 고효율 조명 보급, 주택 단열 및 효율화 설비 설치 등 가정 및 기기의 개보수를 통한 에너지 효율증진 정책이다. 교통정책은 교통부문의 재정정책, 수송용 차량의 연비규제 및 등급제, 친환경 교통수단 보급을 위한 재정지원, 대중교통 활성화 등 교통부문의 에너지 소비를 줄이기 위한 정책이다. 산업정책은 상업용 건물의 에너지 효율 개선, 에너지 관리역량 구축, 산업기기 에너지 최저효율제, 에너지 경영시스템 도입 등 자발적 에너지 효율증진을 유도하는 정책이다. 각 정책별 투자규모는 지자체의 결산서를 기반으로 정책별 사업 세출액을 대리변수로 사용하였다. 도시기후 특성은 각 지자체의 냉난방도일을 변수로 활용하였다. “냉난방도일”은 냉방도일과 난방도일의 합으로, 기상청의 기준온도와 김해동 외(2004)를 토대로 도출하였다. 이때, 난방도일의 기준온도는 18도, 냉방도일의 기준온도는 24도로 설정하였다.

본 연구에서는 다중회귀분석에 앞서 회귀모델의 가정을 준수하는지 살펴보았다. 독립변수들의 다중공선성(multicollinearity)을 진단하기 위하여 공차한계와 분산팽창계수(variance inflation factor, VIF)를 분석하였다. 변수의 공차한계가 0.175에서 0.925의 범위를 가져 0.1보다 크고, 분산팽창계수는 1.082부터 5.719까지의 범위를 가지고 있어 10보다 작으므로 공선성의 문제는 없었다. 또한, 종속변수인 에너지사용량과 독립변수들 간의 선형관계, 오차의 정규성과 등분산성을 확인한 후 분석이 진행되었다.

3. 자료포락분석

자료포락분석법(Data Envelopment Analysis, DEA)은 다수의 투입과 산출을 가지고 있는 집단 간 상대적인 효율성을 평가하는 방법이다. 본 연구에서는 다중회귀분석의 결과로 도출된 에너지 소비에 통계적으로 의미 있는 영향을 미치는 도시특성요소를 투입변수로, 에너지 소비량을 산출요소로 자료포락 분석을 시행하였다. 이때 효율성 분석의 가정에 맞도록 산출요소인 에너지사용량이 클 때 상대적으로 효율성이 작은 값을 가지도록 변환하였다. 이를 위해 에너지 소비량의 역수에 10000을 곱하여 생산성의 가정을 만족하도록 에너지 소비량 변수를 변환하였다. 본 방법은 해석의 편의성과 생산성의 가정을 만족하기 위하여 여러 선행연구(제현정·이승일, 2012; 양희진·윤희연, 2019)에서 활용되고 있다.

자료포락분석은 효율성을 생산요소의 투입에 대한 산출요소의

비율로 설명하며, 분석대상이 되는 의사결정단위의 기술적 효율성(Technical Efficiency, TE)을 분석할 수 있다. 기술적 효율성(TE)은 효율적인 대상인 효율성 프런티어(efficient frontier)와 동일한 산출을 생산하기 위하여 투입물을 절감할 수 있는 정도를 의미하며, 이때 효율성에 대한 평가는 선형계획법에 의하여 평가 대상이 되는 의사결정단위의 투입, 산출요소를 활용하여 효율성 프런티어로부터 떨어져 있는 정도로 측정할 수 있다(Farrell, 1957; 박만희, 2008). 기술적 효율성(TE)은 규모의 효율성(Scale Efficiency, SE)과 순기술효율성(Pure Technical Efficiency, PET)의 곱으로 표현된다.

모형의 기본유형은 크게 규모의 수익에 대한 가정에 따라 CCR 모형(Charnes et al., 1978)과 BCC 모형이 있다. CCR모형은 규모수익의 불변(Constant Return to Scale, CRS)을 가정하고 의사결정단위의 기술적 효율성(TE)을 측정할 수 있는 모형이며, 자료포락분석모형의 가장 기초가 되는 모형이라 할 수 있다. CCR모형은 규모에 대한 수익이 불변하는 투입, 산출 구조를 가지고 있으며 규모에 대한 수익 불변이란 투입 구조를 확장하는 만큼, 산출 역시 늘어나는 것으로 투입과 산출이 동일한 비율로 증가하는 형태이며 다음 식 (2)과 같다.

$$\begin{aligned}
 \text{Max. } \theta_0 &= \sum_{r=1}^s u_r y_{r0} \\
 \text{s.t. } \sum_{i=1}^m v_i x_{i0} &= 1 \\
 \sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} &\leq 0 \\
 v_i, u_r &\geq \varepsilon \geq 0 \\
 i &= 1, 2, \dots, n \\
 x &= \text{투입변수}, y = \text{산출변수}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

이에 반해 BCC(Banker et al., 1984) 모형은 규모수익가변(Variable Returns to Scale, VRS)을 가정하고 규모의 효과성(SE)을 제외한 순기술효율성(PTE)을 측정할 수 있는 모형이다. BCC모형은 투입요소나 산출요소가 평균치와 비교하여 크게 차이가 나는 의사결정단위가 있는 경우, 효율성 점수를 지나치게 높게 평가될 수 있는 단점이 있다. 본 연구에 포함된 지자체들 가운데 특성과 환경이 상대적으로 큰 차이가 있는 곳들이 있음을 고려해 본 연구에서는 CCR모형을 중심으로 분석이 이루어졌다.

선택한 CCR모형으로 지자체별로 투입요소와 산출요소를 고려한 상대적 효율성 값이 계산되는 점을 전제로, 본 연구에서는 지자체별로 개별 도시특성요소가 효율성에 어떤 영향을 미치는지를 분석해야 한다. 이를 위해 산출요소는 그대로 두고 투입변수인 도시특성요소를 하나씩 제거하여 효율성 값의 변화를 분석하는 방식을 사용하였다. 모든 변수를 투입한 모형을 기준모형으로 하고, 도시특성변수를 제거한 각각의 효율성 모형을 변수제거모형으로

한다. 이때, 기준모형과 변수제거모형의 효율성 차이값이 양(+)인 경우, 제거한 도시특성변수가 에너지 소비 효율성에 기여하거나, 유사한 해당 도시특성을 지닌 다른 도시에 비해 에너지 소비가 적어 에너지 소비에 있어 효율적인 도시임을 의미한다. 반대로, 효율성 차이값이 음(-)인 경우, 제거한 도시특성변수가 에너지 소비 효율성을 저해하는 요소이거나, 비슷한 해당 도시특성을 가진 도시들에 비해 에너지 소비량이 많아 에너지 소비에 있어 효율성이 낮은 도시로 해석될 수 있다. 또한, 효율성 차이값의 절댓값이 클수록 효율성에 미치는 영향력의 크기가 큰 것으로 해석된다.

IV. 분석결과

1. 에너지 소비에 영향을 미치는 도시특성요소

본 절에서는 선행연구를 기반으로 도출된 17개의 도시특성요소들이 에너지 소비에 미치는 영향을 다중회귀분석 활용하여 분

석하였으며, 그 결과는 <표 2>와 같다. 이 모형의 설명력은 80% 수준으로 상대적으로 높은 설명력을 보였다.

분석결과, 도시교통특성 요소 중 도로면적과 자동차등록대수가, 도시경제·산업특성 중에서는 GRDP, 광업 및 제조업 생산액과 광업 및 제조업 종사자수, 도시정책특성 중에서는 가정·기기 부문 에너지정책 투자와 교통부문 에너지정책 투자가 통계적으로 유의미한 것으로 나타났다. 다시 말해, 도로면적이 넓으며, 자동차등록대수가 많은 지자체가 그렇지 않은 지자체보다 에너지 사용량이 많은 것으로 나타났다. 또한, GRDP가 높고, 에너지를 많이 소비하는 광업 및 제조업 업체의 생산액이 많고, 관련 종사자가 많은 지자체가 그렇지 않은 지자체보다 많은 에너지를 사용하고 있었으며 이러한 결과는 이동성·문태훈(2017), 양혜미·송재민(2017)의 연구 결과와도 유사하게 나타났다.

혼합토지이용비율 변수는 도시의 압축적 공간구조를 나타내는 변수로 활용하였으며, 다수의 선행연구(Mindali et al., 2004; 김리영·서원석, 2011; 이동성·문태훈, 2017)는 교통에너지 소비

Table 2. Result of multiple regression analysis

Parameter	Variable	Unstandardized regression coefficient	Standardized regression coefficient	t-value	Sig.
	Constant	-220.188	0.070	-1.387	0.167
Spatial and demographic characteristics	Resident registration population	1.501E-04	0.070	0.998	0.319
	Mixed land use ratio	0.340	0.006	0.156	0.877
	Average household size	6.407	0.015	0.285	0.776
Traffic characteristics	Road area	1.119E-05	0.128	2.396	0.018**
	Number of total registered car	0.002	0.428	7.110	0.000***
	Transport share ratio of bus	-0.192	-0.004	-0.096	0.924
Economic · industrial characteristics	Financial Independence ratio	-0.606	-0.017	-0.292	0.770
	GRDP	1.286E-05	0.215	3.958	0.000***
	The number of energy consumption industry	0.016	0.025	0.630	0.529
	The number of energy consumption industry employment	0.002	0.099	1.692	0.092*
	The amount of production in energy consumption industry	8.581E-06	0.261	5.923	0.000***
Policy characteristics	The number of public officer	-0.013	-0.020	-0.442	0.659
	Local tax expenditure in energy policy for infrastructure	-1.244E-09	-0.004	-0.117	0.907
	Local tax expenditure in energy policy for home and appliances	-1.132E-07	-0.067	-1.803	0.073*
	Local tax expenditure in energy policy for transportation	-2.561E-09	0.073	2.014	0.045**
	Local tax expenditure in energy policy for industry	-1.138E-09	-0.003	-0.082	0.935
Climate characteristic	Cooling/Heating Degree-day	0.117	0.068	1.935	0.054*
R^2	0.814	Adjusted R^2		0.799	

* < 0.1 level, ** < 0.05 level and *** < 0.01 level

를 줄이는 데 영향을 미치는 것으로 나타났으나 본 연구에서는 통계적 유의성을 나타내지 못했다. 혼합토지이용은 교통에너지 소비 감소에는 영향을 미치나, 본 연구에서 초점을 맞춘 전체 에너지 소비량에는 교통에너지와 산업에너지 등 다양한 에너지원이 포함되어 있어 그 영향력이 상대적으로 낮은 것으로 판단된다.

정책특성 가운데 가정·기기부문에 대한 투자가 많은 지자체는 그렇지 않은 지자체보다 총에너지사용량이 낮은 것으로 나타나 에너지 효율이 높은 시설로의 교체 등 가정·기기부문의 정책은 에너지 소비감소에 기여하는 것으로 나타났다. 또한, 지자체의 교통부문 정책 투자가 많을수록 에너지 소비는 감소하는 것으로 나타났다. 교통부문의 정책은 대중교통의 효율화, 전기자동차 보급 등을 포함하며 이러한 정책은 교통체계를 변화시켜 교통량을 줄이고 에너지 소비를 감소시키는 데 기여하는 것으로 나타났다. 기반조성부문의 투자와 산업부문의 에너지 정책에 대한 투자는 통계적으로 유의미한 결과를 나타내지 않았다. 기반조성의 경우, 법규제정 등 정책적, 제도적 기반을 조성하는 것으로 단기적 효과보다는 정책적 파급효과를 고려한 장기적인 분석이 필요할 것으로 판단된다. 산업부문의 정책들 또한 단기적 성과보다는 장기적으로 파급효과를 가져올 수 있는 정책들로 현재 통계적 유의성이 나타나지는 않으나 가시적인 성과를 위해서는 지속적인 투자가 필요할 것으로 사료된다.

냉난방도일의 변화는 에너지사용량 증가에 통계적으로 유의미한 영향을 미쳐 냉난방도일이 증가할수록 지자체들의 에너지사용량도 크게 증가하는 것으로 나타났다.

2. 지자체별 도시특성요소가 에너지 소비에 미치는 영향 분석

본 절에서는 회귀분석에서 도출된 8개의 도시특성요소를 투입요소로 자료포락분석을 실시하였으며, 앞서 방법론에서 언급한 대로 8개의 모든 변수를 투입한 모형을 기준모형으로 하고, 개별 도시특성변수를 제거한 효율성 모형을 변수제거모형으로 효율성 값의 차이를 계산하였다.

우선, 전체 지자체에 대한 기준모형 효율성점수 및 개별 변수 제거모형의 효율성 값은 다음 <표 3>과 같다. 지자체 전체의 효율성 평균점수는 CCR모형을 기준으로 0.777(1점 만점 대비)로 나타났으며, 개별 변수 제거 후 효율성 값의 차이를 살펴보면 모든 변수가 양의 값으로 에너지 소비 감소에 기여하는 변수들이 재확인되었다.

전체 지자체를 대상으로 했을 때 냉난방도일, 에너지다소비업종 종사자수와 가정·기기부문 에너지정책 투자의 영향력이 상대적으로 크며, GRDP, 교통부문 에너지정책 투자는 현재까지는 영향력이 상대적으로 크지 않은 것으로 나타났다. 이러한 결과를 통해 해당 도시가 가지고 있는 기후특성, 산업특성이 에너지 소비에 영향력이 큼을 재확인하였다. 에너지 소비 감소에 긍정적인

Table 3. Average of efficiency score gap after removal of urban characteristics variables

Variable	Efficiency score after variable removal	Gap
Reference model efficiency score	0.777	
Road area	0.760	0.017
Number of total registered car	0.772	0.005
GRDP	0.776	0.001
The number of energy consumption industry employment	0.751	0.025
The amount of production in energy consumption industry	0.768	0.009
Local tax expenditure in energy policy for home and appliances	0.758	0.019
Local tax expenditure in energy policy for transportation	0.767	0.009
Degree-day	0.498	0.279

영향을 미침에도 영향력이 상대적으로 낮은 변수들은 해당 변수에 대한 정책적 노력을 통해 에너지 소비에 대한 효율성을 증대할 수 있으므로, 에너지 소비 감소에 기여할 여지가 많은 변수라 할 수 있겠다.

다음으로 각 도시특성변수들이 개별도시에 미치는 영향을 정리하였다(<표 4> 참조). 먼저 도로면적변수를 제거한 결과이다. 인천 동구, 경북 성주군, 경기 의왕시 등의 도시들은 도로면적을 제거하였을 때, 효율성 값이 크게 감소하는 도시들로 유사한 도로면적을 가진 도시들에 비해 에너지 소비량이 적은 도시라 하겠다. 이에 반해 서울 구로구, 부산 사하구와 동래구는 도로면적 변수 제거에 따른 효율성 값의 변화가 가장 적은 도시들로 유사한 도로면적을 가진 다른 지역들에 비해 에너지 소비량이 높은 도시들이다. 인천 동구, 부산 동구, 경남 고성군 등은 자동차등록대수를 제거한 결과 효율성 점수가 크게 감소하였기 때문에, 자동차등록대수가 유사한 다른 지자체들과 비교하여 에너지 소비량이 상대적으로 적은 도시임을 확인할 수 있었다. 반면 경남 의령군, 인천 중구, 전북 무주군 등은 유사한 자동차대수를 가진 지자체에 비해 에너지 소비가 높은 지역들로 자동차의 에너지 효율을 증대시키거나 대중교통 활성화 등의 방향을 모색하여 교통에서 발생하는 에너지 소비량을 줄일 필요가 있겠다.

부산 북구, 전남 강진군, 경기 양평군은 유사한 지역내총생산(GRDP)을 가진 지역들에 비해 에너지 소비량이 적은 도시로 판단되며, 반면 충북 괴산, 경기 하남, 강원 태백은 비슷한 지역총생산(GRDP)을 가진 도시들에 비해 에너지 소비가 많은 지역들로 나타났다. 경북 울진군, 전남 보성군, 광주 남구 등의 도시는 유사한 에너지다소비업종 종사자수를 가진 도시들에 비해 에너지 소비량이 적은 도시로 나타났으며, 대구 서구, 대전 유성구, 서울 종로구 등은 유사한 에너지다소비업종 종사자수를 가진 다

Table 4. Top and bottom cities of efficiency score gap after removal of urban characteristic variables

Variable	Regions	Efficiency score	Variable removal efficiency score	Gap	Variable	Regions	Efficiency score	Variable removal efficiency score	Gap
Road area	Dong-gu, Incheon	0.781	0.666	0.114	The amount of production in energy consumption industry	Dong-gu, Gwangju	1.000	0.767	0.233
	Seongju-gun, Gyeongbuk	0.893	0.847	0.046		Gwacheon, Gyeonggi	0.814	0.799	0.016
	Uiwang, Gyeonggi	0.764	0.735	0.029		Gapyeong, Gyeonggi	0.708	0.700	0.007
	Dongnae-gu, Busan	0.752	0.751	0.001		Namhae-gun, Gyeongnam	1.000	0.998	0.002
	Saha-gu, Busan	0.651	0.650	0.001		Suseong-gu, Daegu	0.751	0.748	0.002
	Guro-gu, Seoul	0.698	0.696	0.001		Yeonje-gu, Busan	0.902	0.900	0.001
Number of total registered car	Dong-gu, Incheon	0.781	0.634	0.147	Local tax expenditure in energy policy for home and appliances	Gwangjin-gu, Seoul	0.849	0.594	0.255
	Dong-gu, Busan	0.991	0.891	0.100		Gwangmyeong, Gyeonggi	0.871	0.622	0.249
	Goseong-gun, Gyeongnam	1.000	0.925	0.075		Yuseong-gu, Daejeon	0.772	0.524	0.248
	Uiryeong-gum, Gyeongnam	1.000	0.999	0.001		Uiryeong-gun, Gyeongnam	1.000	0.998	0.002
	Jung-gu, Incheon	0.103	0.102	0.001		Hadong-gun, Gyeongnam	0.846	0.844	0.002
	Muju, Jeonbuk	0.928	0.926	0.002		Yeongyang-gun, Gyeongbuk	1.000	0.999	0.001
GRDP	Buk-gu, Busan	0.783	0.760	0.023	Local tax expenditure in energy policy for transportation	Dalseo-gu, Daegu	0.589	0.500	0.089
	Gangjin-gun, Jeonnam	0.909	0.889	0.020		Cheorwon-gun, Gangwon	0.859	0.779	0.080
	Yangpyeong-gun, Gyeonggi	0.674	0.653	0.020		Yeongju, Gyeongju	0.752	0.676	0.075
	Goesan, Chungbuk	0.745	0.745	0.001		Goryeong-gun, Gyeongbuk	0.920	0.919	0.001
	Hanam, Gyeonggi	0.579	0.579	0.001		Jangseong-gun, Jeonnam	0.807	0.806	0.001
	Taebaek, Kangwon	0.739	0.738	0.001		Jung-gu, Incheon	0.103	0.102	0.001
The number of energy consumption industry employment	Uljin-gun, Gyeongbuk	0.940	0.791	0.149	Degree-day	Jinju, Gyeongnam	0.754	0.045	0.709
	Boseong-gun, Jeonnam	1.000	0.861	0.139		Jeongeup, Jeonbuk	0.844	0.150	0.694
	Nam-gu, Gwangju	0.942	0.854	0.089		Tongyeong, Gyeongnam	0.828	0.150	0.678
	Seo-gu, Daegu	0.644	0.643	0.001		Hamyang-gun, Gyeongnam	0.986	0.982	0.004
	Yuseong-gu, Daejeon	0.772	0.771	0.001		Gokseong-gun, Jeonnam	0.985	0.981	0.004
	Jongno-gu, Seoul	0.665	0.664	0.001		Yecheon-gun, Gyeongbuk	0.978	0.977	0.001

른 지역에 비해 에너지 소비량이 높은 도시로 나타났다. 또한, 비슷한 에너지다소비업종 생산액을 가진 다른 지역들과 비교해 광주 동구, 경기 과천시, 경기 가평군 등의 도시들은 에너지 소비량이 적고, 반면 경남 남해, 대구 수성구, 부산 연제구 등은 에너지 소비량이 높은 것으로 나타나 에너지다소비업종을 대상으로 에너지 소비효율성을 높이기 위한 정책이 필요한 곳으로 나타났다.

다음으로 도시정책변수인 가정·기기부문, 교통부문 에너지정책 세출액 변수를 하나씩 제거한 효율성 점수 변화 값이다. 지자체의 투자는 정책에 대한 지자체의 노력을 가장 잘 알 수 있는 지표이므로 지자체의 에너지정책들이 에너지 소비를 줄이는 데 어떤 영향을 미치는지 파악할 수 있다.

가정·기기부문 에너지정책 세출액변수를 제거하는 경우, 서울 광진구, 경기 광명시, 대전 유성구 등의 도시에서 효율성 점수가 크게 감소되는 추세를 보이고 있다. 이들 지자체는 가정·기기부문의 에너지 소비를 줄이기 위한 정책들이 도시의 에너지 소비를 줄이는 것에 긍정적인 영향력을 발휘하고 있는 도시로 판단된다. 이와 반대로 경남 의령군, 경남 하동군, 경북 영양군 등의 소도시는 해당 부분의 정책투자 노력이 에너지 소비 감축에 크게 기여하지는 못하는 것으로 나타났다.

교통부문 에너지정책 세출액 변수를 제거하는 경우, 대구 달서구, 강원 철원군, 경북 영주시 등의 도시는 교통부문의 에너지 정책 투자가 에너지 소비를 줄이는 데 크게 기여하고 있는 것으로 나타났다. 이에 반해 경북 고령군, 전남 장성군, 인천 중구 등은 교통부문 투자가 해당 지자체의 에너지 소비를 줄이는 데 크게 기여하지는 못하므로 이에 대한 대책이 마련될 필요가 있다.

앞서 언급했듯이 냉난방도일은 에너지 소비에 가장 큰 영향을 미치는 변수로 경남 진주시, 전북 정읍시, 경남 통영시 등의 도시에서는 유사한 수준의 냉난방도일 도시와 비교해 에너지 소비량이 적은 도시로 나타났으며, 경남 함양군, 전남 곡성군, 경북 예천군 등은 반대로 에너지 소비량이 높은 것으로 나타났다.

지금까지 살펴본 개별 변수의 영향은 지자체별 전반적 에너지 효율성 상황을 판단하고 정책대안을 제안하기에는 한계가 있어, 개별 지자체별로 에너지 소비 효율성에 영향을 미치는 모든 변수들을 고려하여 종합적으로 살펴보는 것이 필요하다. 이에 본 연구에서는 가장 효율성 점수가 높은 지자체와 효율성 점수가 낮은 지자체를 대상으로 모든 변수들을 고려한 방사형 그래프를 도출하였다(〈그림 1〉 참조). 점선으로 표시된 완벽한 팔각형이 기준이 되는 기본그래프이며 변수별로 기본그래프보다 바깥쪽에 위치하

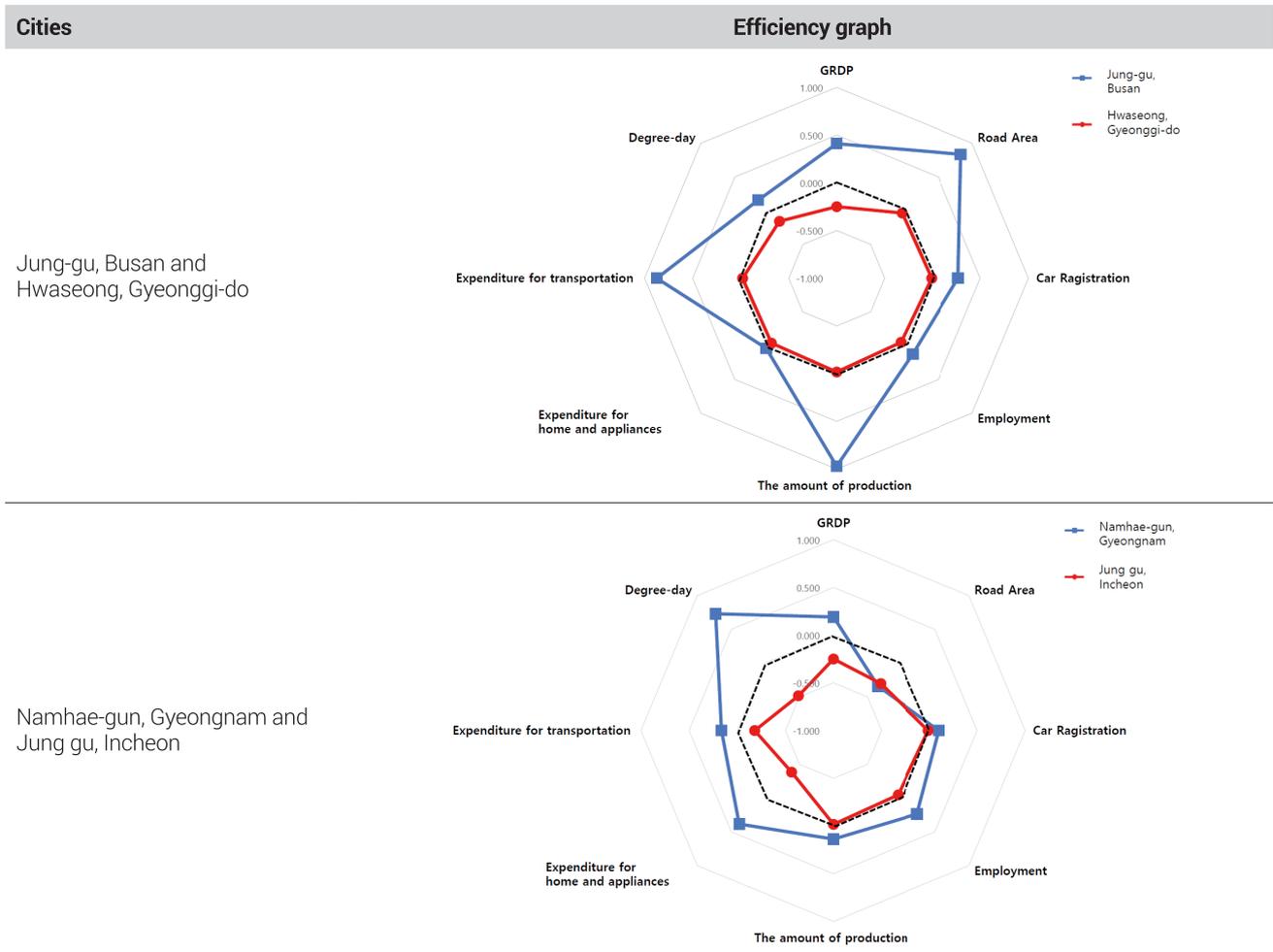


Figure 1. Comparison of efficiency graph of top and bottom cities

는 경우는 해당 변수가 에너지 소비 효율성에 기여하며, 기본그래프 안쪽에 위치하는 경우는 그 반대의 상황이라고 하겠다. 전체적으로 팔각형의 면적이 큰 경우가 에너지 소비 효율성이 높은 지자체이며 면적이 작은 경우는 반대로 해석할 수 있다. 모든 지자체에 대해 방사형 그래프를 도출하는 것이 가능하나, 본 논문에서는 효율성 점수가 큰 도시와 낮은 도시들을 대상으로 주요 내용을 정리하였다. 이때, 효율성이 높은 도시는 사각형, 효율성이 낮은 도시는 동그라미로 나타났다.

부산 중구와 경남 남해군은 다른 도시와 비교하였을 때 에너지 소비 효율성이 매우 높으며(효율성 점수 1), <그림 1>에서 사각형 표식의 그래프로 나타났다. 상단에 있는 도시는 부산 중구, 하단에 있는 도시는 경남 남해군이다. 두 도시의 그래프는 모든 도시 특성변수에서 굵은 선으로 표시된 팔각형으로 표시된 기본그래프보다 바깥쪽에 위치하며 팔각형의 면적이 크다. 부산 중구는 비슷한 도로면적, 에너지다소비업종 생산액, 교통부문 에너지정책 세출액을 가진 도시들보다 에너지 소비 효율성이 훨씬 높은 경향이 있다. 경남 남해군은 비슷한 냉난방도일, 가정·기기부문 에너지정책 세출액을 가지는 다른 도시들보다 에너지 소비 효율성이 훨씬 높으나, 도로면적의 경우 기준그래프보다 아래에 있어 도로

교통과 연계하여 에너지 소비 효율성을 높일 필요가 있을 것으로 판단된다.

이에 반해 경기 화성시와 인천 중구의 효율성 점수는 각각 0.097과 0.103으로 매우 낮은 것으로 나타났으며, 다른 도시들과 비교하였을 때, 에너지 소비를 비효율적으로 하는 도시라 할 수 있다. 경기 화성시와 인천 중구는 <그림 1>에서 동그라미 표식의 그래프로 나타났으며, 두 도시의 효율성 그래프가 대부분의 도시 특성요소에서 기준그래프(0)보다 안쪽에 있다. 이는 도시특성의 많은 부분에서 개선의 여지가 많은 것으로 해석된다. 경기 화성시는 비슷한 GRDP와 냉난방도일 수준인 다른 지역에 비해 에너지 소비 효율이 매우 낮은 편으로 나타났다. 또한, 인천 중구의 경우, 대부분의 변수들이 기준 그래프 아래에 위치하고 있어 도시의 에너지 소비효율성을 증대하기 위하여 전반에 걸친 노력이 필요한 것으로 판단된다.

또한, 같은 효율성 점수를 가진 지자체여도 각각의 변수는 지역별로 상이한 영향력을 가진다. 이를 규명하기 위해 효율성 점수가 동일한 두 지자체를 비교한 결과는 다음과 같다(<그림 2> 참조).

0.668로 동일한 효율성 점수를 가지는 충북 진천군과 서울 강북구를 비교한 결과이다. 충북 진천군은 비슷한 GRDP, 에너지

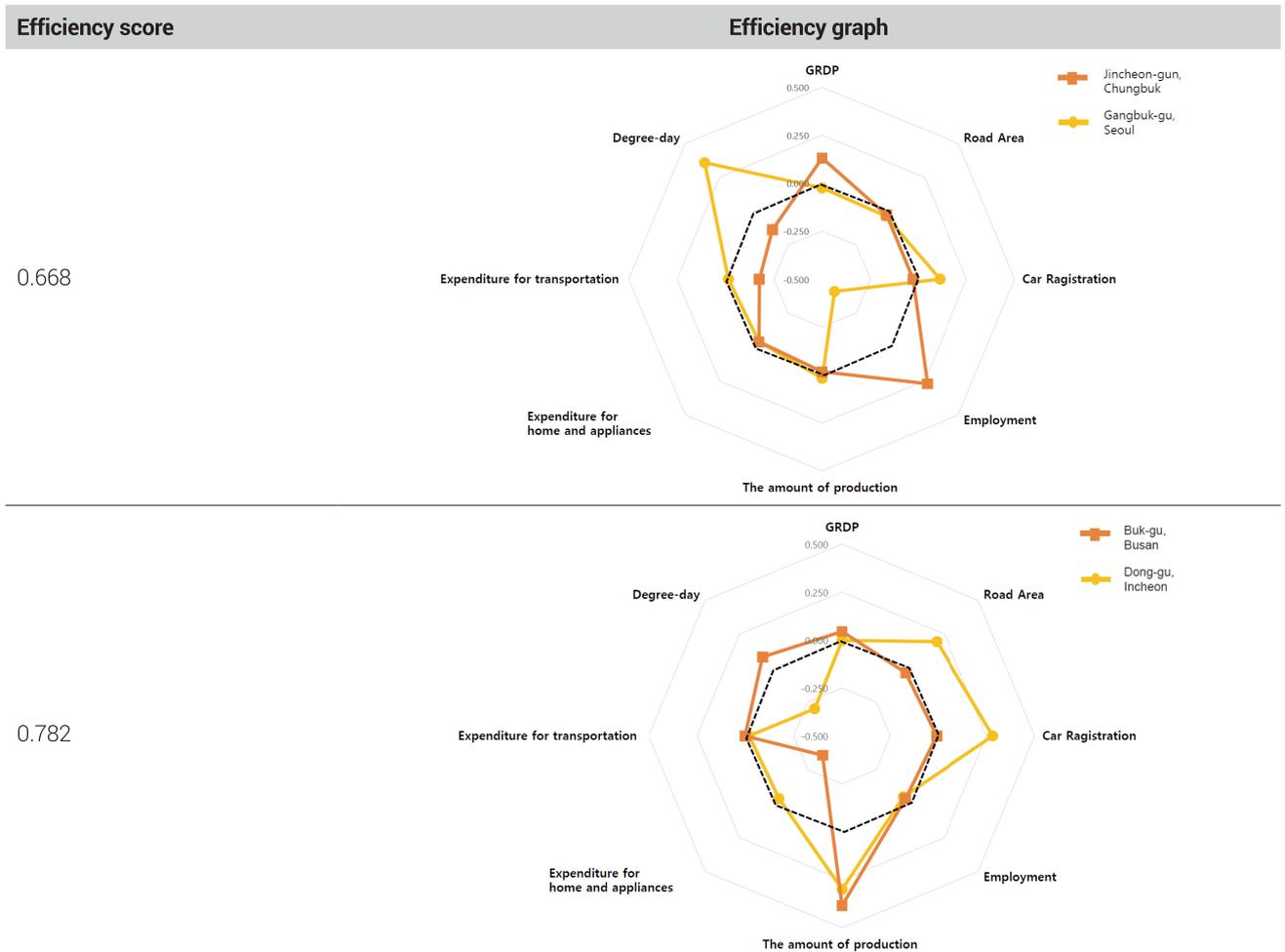


Figure 2. Comparison of efficiency graph of cities with the same score

다소비업종 종사자수를 가진 지자체에 비해 에너지 소비효율성이 높은 반면, 비슷한 냉난방도일, 도로면적, 자동차등록대수를 가진 지자체에 비해서는 에너지 소비효율이 낮으며 특히 교통부문의 에너지 정책 세출액의 효과가 낮은 것으로 나타나 이에 대한 개선이 필요할 것으로 보인다. 이에 비해 서울 강북구는 비슷한 냉난방도일, 자동차등록대수를 가진 지자체보다는 에너지 소비효율이 높고 반면 비슷한 에너지다소비업종 종사자수를 가진 지자체들보다는 에너지 효율성이 많이 낮아 산업부문에서의 개선에 대한 노력이 필요한 것으로 나타났다.

0.782의 동일한 효율성 점수를 가지는 부산 북구와 인천 동구를 비교하면 부산 북구는 에너지다소비업종 생산액과 냉난방도일 수준이 비슷한 지자체에 비해 에너지 소비 효율이 높은 도시로 나타나고 있으나, 가정·기기부문 에너지정책 투자의 효율성이 매우 낮아 이 부분에 대한 개선의 여지가 많다고 할 수 있다. 인천 동구는 유사한 도로면적, 자동차등록대수, 에너지다소비업종 생산액을 가진 다른 지역들과 비교해서는 에너지 효율성이 높은 편이나 유사한 냉난방도일을 가진 지자체에 비해서 에너지 효율이 매우 낮고, 가정·기기부문 에너지정책 투자에 대한 효과도 상대적으로 떨어지므로 이에 대한 대책이 필요한 상황이다.

본 절에서는 개별 도시특성이 에너지 소비효율에 어떻게 영향을 미치는지를 살펴보고, 지자체별로 개별 변수들의 영향력이 다르므로 지자체는 각자의 에너지 소비 효율성과 도시특성요소의 영향력 등을 고려하여 계획과 정책을 수립하고 이행하는 것이 필요함을 확인하였다.

V. 결론 및 시사점

기후변화의 심화와 함께 국제사회는 기후변화 대응을 위한 지자체의 역할과 노력을 강조하고 있다. 현재 우리나라는 광역단위의 지역에너지계획 수립이 이루어지고 있으나, 기초지자체의 에너지계획은 별도로 마련되고 있지 않다. 지자체 실정에 맞는 에너지계획 수립을 위해 선행되어야 하는 것은 지자체의 에너지 소비에 대한 다양한 분석과 이를 분석할 수 있는 방법론이다.

이에 본 연구는 전국 218개의 시군구를 대상으로 어떠한 도시특성이 지역에너지 소비에 영향을 미치는지, 각 지자체별 도시특성의 영향이 어떠한지를 다중회귀분석과 효율성 분석 기법인 자료포락분석을 이용하며 분석하였다.

우선, 어떤 도시특성요소가 에너지 소비에 영향을 미치는지를 판단하기 위해 전체 시군구를 대상으로 다중회귀분석을 시행하였다. 17개의 도시특성 변수 중 8개의 변수(도로면적, 자동차등록대수, GRDP, 에너지다소비업종 종사자수, 에너지다소비업종 생산액, 가정·기기부문 에너지정책 세출액, 교통부문 에너지정책 세출액, 냉난방도일)가 총에너지 소비에 유의미하게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 지자체별로 각각의 도시특성요소의 영향을

분석하기 위해 8개 변수를 투입요소로, 에너지 소비량을 산출요소로 상대적 효율성을 분석하였다. 전반적으로 부산 중구, 경남 남해군, 경남 의령군, 광주 동구, 전남 보성시 등이 상대적으로 효율성이 높은 지자체로, 경기 화성시, 인천 중구, 경남 창원시, 충북 청주시 등이 상대적으로 효율성이 낮은 지자체로 나타났다. 지자체 간 상대적 효율성에도 차이가 존재할 뿐만 아니라 지자체별로 개별 변수의 영향력도 차이가 크므로, 개별 지자체는 각자의 특성을 고려한 정책 마련이 필요하다.

도시특성요소 가운데 도로특성이나 자동차등록대수와 같은 교통에너지 소비와 관련된 변수들의 에너지 소비효율이 낮은 경우, 다시 말해 유사한 조건의 다른 지역들에 비해 에너지 소비가 많은 지자체들은 대중교통의 이용을 높이고, 개인차량의 이용을 줄이도록 하는 등 교통에너지 소비를 줄이기 위한 정책 시행을 우선으로 할 필요가 있다. 에너지다소비업종 종사자수, 에너지다소비업종 생산액 등 산업부문의 도시특성요소와 관련된 비효율성이 나타나는 지자체들은 산업 에너지 소비량 감축을 위한 배출총량규제, 에너지사용량 신고제, 에너지 절약기술의 개발 및 적용, 상업용 건물의 에너지 효율 개선 등의 정책을 시행하여 산업부문에서 발생하는 에너지 소비량을 저감하는 노력을 시행할 수 있을 것이다. 본 연구에서 포함한 정책변수들은 가정·기기부문, 교통부문의 에너지 저감을 위한 정책에 투입되는 비용을 기반으로 적용되었으므로 부문별 정책노력의 효과가 미미한 지자체는 현재 실행하고 있는 정책들의 실효성을 높이기 위한 평가와 피드백이 필요할 것으로 판단된다. 해당 도시가 다른 지자체들보다 기후요인에 영향을 많이 받는 지자체라면 냉난방에너지와 관련된 다양한 정책들, 예를 들어 실내온도 규제, 기존건물 및 창문에 대한 성능개선을 통한 에너지 효율 개선, 재생에너지를 활용한 냉난방시스템 운영 등을 정책적으로 반영하도록 노력해야 할 것이다.

본 연구는 218개 기초지자체에 대해 총에너지 소비량에 대한 분석을 실시하였다는 점에서 기존의 연구들이 가졌던 연구범위(광역지자체 단위 또는 특정 에너지원에 대한 분석)의 한계를 보완했다는 점에서 의의가 있다. 또한 총에너지 소비에 영향을 미치는 도시특성을 도시공간특성, 교통특성, 경제·산업 특성뿐 아니라 정책특성, 기후특성까지 포함하여 분석을 시행하였다는 점은 의미가 크다. 특히 지자체에서 관련 에너지 정책의 이행에 실제 사용된 세출액 자료를 활용하여 정책특성을 반영하였고 지자체에 따라서 정책적 효과가 다를 수 있음을 확인하였다. 그러나 이러한 포괄적인 분석이 개별 에너지원에 대한 심화분석이 가지는 정밀함을 함께 가지기 어려운 한계점 역시 존재하므로 추후 연구는 이에 대한 고려가 필요할 것으로 사료된다.

앞서 언급한 대로 본 연구는 개별 도시의 상대적인 비교를 위해 기존의 에너지 소비와 도시특성 간의 관계 분석에서 잘 활용되지 않았던 자료포락분석 방법을 사용하였다. 이를 통해 지역별 특성에 대한 상대적 비교가 가능하며, 지역의 특성을 정량적으로 제

시켰다는 점에서는 의미가 있다. 그러나, 제시된 효율성 점수는 의사결정단위(지자체) 간 상대적인 효율성이며, 절대적인 효율성이 아니다. 다시 말해, 효율성 점수가 1로 나타난 지자체의 에너지 소비 효율성이 완벽하다고 보기는 힘든 한계점이 존재한다.

도시는 에너지를 소비하는 가장 주된 공간이며, 에너지와 관련된 문제를 해결하는 데에도 가장 중요한 공간이다. 특히 여러 정책적 노력의 실현공간이므로 도시공간에서의 에너지 수요관리 연구는 지속적으로 이루어질 필요가 있다. 특히 본 연구에서 살펴본 바와 같이 각각의 도시특성요소가 개별 지자체에 미치는 영향력이 모두 다르므로, 현재 에너지계획이 수립되고 시행되고 있는 수준인 국가, 광역지자체 차원뿐만 아니라 기초지자체 차원에서 에너지 소비를 줄이고, 에너지 소비의 효율성을 달성하기 위한 논의가 이루어질 필요가 있다. 지자체 차원의 에너지 소비 관리에 대한 논의에 본 연구가 기초자료로서 활용되기를 기대한다.

주1. 2015년 에너지 통계자료가 활용 가능한 227개 지자체 중 에너지 소비가 다른 지역과 비교해 매우 큰 상위 8개 지역(전남 여수시, 충남 서산시, 전남 광양시, 울산 남구, 경북 포항시, 충남 당진시, 울산 울주군, 인천 서구)이 제외되었으며, 제주도의 경우 데이터 확보의 문제로 제외하였다.

인용문헌
References

1. 강정은·이명진·구유성·조광우·이재욱, 2011. 「기후변화 적응형 도시 리뉴얼 전략 수립: 그린인프라의 방재효과 및 적용방안」, 서울: 한국환경정책·평가연구원.
Kang, J.E., Lee, M.J., Goo, Y.S., Jo, G.W., and Lee, J.W., 2011. *Urban Renewal Strategy for Adapting to Climate Change: Use of Green Infrastructure on Flood Mitigation*, Seoul: Korea Environment Institute.
2. 고재경·김성욱·주정현, 2015. “기초지자체 에너지 소비 변화 요인 및 특성 분석: 경기도 지역을 중심으로”, 「지방행정연구」, 29(2): 127-152.
Koh, J.K., Kim, S.W., and Chu, J.H., 2015. “An Analysis on Characteristics of Changing Energy Consumption Pattern of Municipalities in Gyeonggi-Do”, *The Korea Local Administration Review*, 29(2): 127-152.
3. 김경태·송재민, 2015. “도시 공간 특성이 교통에너지 소비에 미치는 영향”, 「한국지역개발학회지」, 27(2): 117-138.
Kim, K.T. and Song, J.M., 2015. “The Impact of Urban Spatial Form on Energy Consumption in the Transportation Sector”, *Journal of the Korean Regional Development Association*, 27(2): 117-138.
4. 김광욱·강상목, 2016. “Non-radial Data Envelopment Analysis를 적용한 지역별 에너지 및 이산화탄소 저감 가능성 추정”, 「자원·환경경제연구」, 25(2): 299-320.
Kim, K.U. and Kang, S.M., 2016. “Estimating Potential Energy Consumption and Carbon Emission Reduction in South Korea Using Non-Radial Data Envelopment Analysis Approach”, *Environmental and Resource Economics Review*, 25(2): 299-320.

5. 김리영·서원석, 2011. “압축도시 특성이 지역별 교통에너지 소비에 미치는 영향 분석: 수도권·비수도권간의 차이를 중심으로”, 「한국지역개발학회지」, 23(1): 33-54.
Kim, L.Y. and Seo, W.S., 2011. “The Impacts of Compact City Characteristics on Transportation Energy Consumptions at Regional Level: The Difference between Sudokwon and Non-Sudokwon Areas”, *Journal of The Korean Regional Development Association*, 23(1): 33-54.
6. 김지효·심성희, 2015. 「정책변화 대응을 위한 에너지수요관리 정책의 법적 기반 및 정책수단 체계화 연구」, 울산: 에너지경제연구원.
Kim, J.H. and Sim, S.H., 2015. *A Study on the Legal Foundation and the Systematization of Energy Demand Management Policies to Respond to Policy Changes*, Ulsan: Korea Energy Economics Institute.
7. 김해동·박명희·송경숙, 2004. “냉난방도일을 이용한 우리나라 주요 도시의 도시승온화현상 특성 분석”, 「한국환경과학회지」, 13(3): 189-196.
Kim, H.D., Park, M.H., and Song, K.S., 2004. “Analysis of Urban Warming Phenomenon Using Degree Days in Major Korean Cities”, *Journal of Environmental Science International*, 13(3): 189-196.
8. 김호영·이상원, 2011. “인천지역 석유류 에너지 소비 분석에 관한 연구-1995년~2009년을 중심으로”, 「경상논집」, 25(2): 23-57.
Kim, H.Y. and Lee S.W., 2011. “A Study of Energy Consumption of Petroleum in Incheon - Around from 1995 to 2009”, *Bulletin of the Institute of Business and Economic Research*, 25(2): 23-57.
9. 남궁근·최병선·원미연, 2010. “에너지 소비특성에 따른 도시유형별 정책방향 연구”, 「국토계획」, 45(1): 237-250.
Nam Koong, K., Choi, B.S., and Won, M.Y., 2010. “A Study on the Energy Policy Guidelines for Korean Cities Based on Energy Consumption Characteristics”, *The Journal of Korea Planners Association*, 45(1): 237-250.
10. 남창우·권오서, 2005. “우리나라 중소도시의 교통에너지 소비특성에 관한 연구”, 「한국지방자치연구」, 7(2): 169-187.
Na, C.W. and Gwon, O.S. 2005. “A Study on the Relation Analysis between the Characteristics of Transportation Energy Consumption and Urban Forms”, *Korean Local Government Review*, 7(2): 169-187.
11. 민동기, 2010. “제조업 전력 사용 효율성 제고를 통한 온실가스(CO2)감축 잠재량 추정에 관한 연구”, 「환경정책」, 9(3): 143-160.
Min, D.K., 2010. “A Study on the CO2 Reduction Potential by Means of Increased Efficiency of the Electricity”, *Journal of Environmental Policy*, 9(3): 143-160.
12. 박만희, 2008. 「효율성과 생산성분석」, 파주: 한국학술정보(주).
Park, M.H., 2008. *Efficiency and Productivity Analysis*, Paju: Korea Research.
13. 박종문, 2018. “지역 유형에 따른 가구전력소비의 영향 요인 비교 연구”, 「한국지역개발학회지」, 30(2): 193-220.
Park, J.M., 2018. “A Comparison of Factors Affecting Household Electricity Consumption by Regional Types”, *Journal of the Korean Regional Development Association*, 30(2): 193-220.
14. 박창수·서윤석, 2017. “우리나라 16개 시·도의 제조업부문 총요소 에너지 효율성 및 결정요인 분석”, 「지역연구」, 33(1): 3-16.
Park, C.S. and Seo, Y.S., 2017. “Regional Total Factor Energy Efficiency and its Determinants of the Korean Manufacturing Sector”, *Journal of the Korean Regional Science Association*, 33(1): 3-16.
15. 서원석·김리영, 2010. “토지이용 특성과 도시압축성의 관계분석

- 연구”, 『한국지역개발학회지』, 22(3): 81-95.
- Seo, W.S. and Kim, L.Y., 2010. “An Analysis of the Relationship between Land Use Patterns and Urban Compactness”, *Journal of The Korean Regional Development Association*, 22(3): 81-95.
16. 송기욱·남진, 2009. “압축형 도시특성요소가 교통에너지 소비에 미치는 영향에 관한 실증분석”, 『국토계획』, 44(5): 193-206.
Song, K.W. and Nam, J., 2009. “Analysis on the Effects of Compact City Characteristics on Transportation Energy Consumption”, *Journal of Korea Planning Association*, 44(5): 193-206.
 17. 신동현·조하현·장민우, 2015. “소득 수준에 따른 한국 도시 가구의 전력소비행태 이질성과 전기요금개편 효과 분석”, 『에너지경제연구』, 14(3): 27-81.
Shin, D.H., Jo, H.H., and Jang, M.W., 2015. “An Analysis on the Heterogeneity of Residential Electricity Consumption Depending on Income Level: Evidence from Urban Household in South Korea”, *Korea Energy Economics Review*, 14(3): 27-81.
 18. 양혜미·송재민, 2017. “에너지 소비특성에 따른 도시 유형화 및 유형별 특성 분석”, 『한국지역개발학회지』, 29(3): 113-134.
Yang, H.M. and Song, J.M., 2017. “Typology of Energy Consumption Patterns in Cities and Analysis of Their Characteristics by Type”, *Journal of the Korean Regional Development Association*, 29(3): 113-134.
 19. 양희진·윤희연, 2019. “도시 폭염 대응정책의 성과 효율성: 서울시 온열질환 상병자수 및 의료지출을 대상으로”, 『도시행정학보』, 32(1): 31-45.
Yang, H.J. and Yoon, H.Y., 2019. “Measuring the Efficiency of Heat-Wave Action Programs in Urban Environments: Using Heat-Related Illness Data in Seoul, South Korea”, *Journal of the Korean Urban Management Association*, 32(1): 31-45.
 20. 에너지경제연구원, 2017. 『2017 자주 찾는 에너지통계』, 울산.
Korea Energy Economics Institute, 2017. *2017 Frequent Energy Statistics*, Ulsan.
 21. 에너지경제연구원, 2018. 『2018 에너지통계연보』, 울산.
Korea Energy Economics Institute, 2019. *2018 Yearbook of Energy Statistics*, Ulsan.
 22. 이동성·문태훈, 2017. “도시특성과 기후특성이 지역 에너지사용량에 미치는 영향에 관한 연구”, 『한국지역개발학회지』, 29(1): 1-22.
Lee, D.S. and Moon, T.H., 2017. “The Impacts of Urban and Climate Characteristics on Regional Energy Consumptions”, *Journal of the Korean Regional Development Association*, 29(1): 1-22.
 23. 이상현·오규식, 2013. “도시 공간형태와 에너지 효율 간의 관계 분석 - 서울시를 중심으로 -”, 『국토계획』, 48(2): 139-153
Lee, S.H. and Oh, K.S., 2013. “Analyzing the relationship between Urban Spatial form and Energy Efficiency - The Case of Seoul, Korea -”, *Journal of Korea Planning Association*, 48(2): 139-153
 24. 이은진·문상호, 2006. “광역자치단체 공공서비스의 효율성과 정책우선순위 분석 -DEA와 AHP 분석기법을 중심으로 -”, 『정책분석평가학회보』, 17(1): 1-28.
Lee, E.J. and Moon, S.H., 2006. “Assessing Efficiency and Policy Priority of Local Governments Public Services - Evidence from DEA/AHP Analysis -”, *Korean Journal of Policy Analysis and Evaluation*, 17(1): 1-28.
 25. 임병학·홍한국·임광혁, 2009. DEA/Window 분석을 통한 지방자치단체의 시대별 효율성 변화에 관한 연구: 부산광역시 자치구
를 중심으로”, 『한국컨텐츠학회논문지』, 9(7): 276-284.
Hong, H.K. and Leem, B.H., 2009. “Using DEA/Window Analysis to Measure the Relative Efficiency of Local Government over Times: Focusing on Districts of Busan Metropolitan City”, *The Journal of the Korea Contents Association*, 9(7): 276-284.
 26. 임현진·정수관·원두환, 2013. “지구온난화가 가정부문 에너지 소비량에 미치는 영향 분석: 전력수요를 중심으로”, 『에너지경제연구』, 12(2): 33-58.
Lim, H.J., Jung, S.K., and Won, D.H., 2013. “An Analysis of the Impact of Global Warming on Residential Energy Consumption: Focused on the Case of Electricity Consumption”, *Korean Energy Economic Review*, 12(2): 33-58.
 27. 정민선·조희선·변병설, 2015. “도시특성요소가 온실가스 배출에 미치는 영향 -수도권 지역을 중심으로-”, 『국토지리학회지』, 49(3): 297-306.
Jung, M.S., Cho, H.S., and Byun, B.S., 2015. “Effects of Urban Characteristics on Green House Gas Emissions from Seoul Metropolitan Area”, *The Geographical Journal of Korea*, 49(3): 297-306.
 28. 정재명, 2015. “부트스트랩 자료포락분석과 Malmquist 생산성 지수를 활용한 지방정부 민원행정서비스의 효율성 분석-경상남도 18개 지방자치단체를 중심으로-”, 『정책분석평가학회보』, 25(3): 259-288.
Jung, J.M., 2015. “An Analysis on the Efficiency of the Civil Appeals in the Local Governments of Gyeong-nam”, *Korean Journal of Policy Analysis and Evaluation*, 25(3): 259-288.
 29. 정재원·이창효·이승일, 2015. “서울시 행정동별 가구의 에너지 소비량에 영향을 미치는 요인의 통합적 분석”, 『국토계획』, 50(8): 75-94.
Jung, J.O., Yi, C.H., and Lee, S.I., “An Integrative Analysis of the Factors Affecting the Household Energy Consumption in Seoul”, *Journal of Korea Planning Association*, 50(8): 75-94.
 30. 정준호·허인혜, 2015. “기온변화가 전력소비에 미친 효과의 추정 -서울시의 경우-”, 『기후연구』, 10(2): 193-207.
Jeong, J.H. and Heo, I.H., 2015. “Estimating the Impact of Temperature Change on Electricity Consumption in Seoul”, *Journal of Climate Research*, 10(2): 193-207.
 31. 정지훈·김주홍·김백민·김재진·유진호·오종열, 2014. “미래 기후변화에 따른 가정 및 상업 부문 에너지수요 변화 추정”, 『대기』, 24(4): 515-522.
Jeong, J.H., Kim, J.H., Kim, B.M., Kim, J.J., Yoo, J.H., and Oh, J.R., 2014. “Estimation of Energy Use in Residential and Commercial Sectors Attributable to Future Climate Change”, *Atmosphere*, 24(4): 515-522.
 32. 정창봉·김종익·이보혜·이현·이가현, 2016. 『지역에너지통계 시군구 세분화 방안』, 울산: 에너지경제연구원.
Jung, C.B., Kim, J.I., Lee, B.H., Lee, H., and Lee, G.H., 2016. *A Study on the Classification of Regional Energy Statistics in Korea*, Ulsan: Korea Energy Economics Institute.
 33. 계현정·이승일, 2012. “서울시 도시특성요소와 대기질 시계열 효율성 분석”, 『도시정책연구』, 3(2): 5-19.
Je, H.J. and Lee, S.L., 2012. “A Time-Series Efficiency Analysis of Urban Characteristics Factors and the Air Quality for the City of Seoul”, *Journal of Urban Policies*, 3(2): 5-19.
 34. 조정문·이동욱·전의찬, 2017. “자료포락분석법을 이용한 녹색매장 지정제도의 정책 효과 분석”, 『환경정책』, 25(3): 119-137.

- Cho, S.M., Lee, D.W., and Jeon, E.C., 2017. "Analysis of the Policy Effectiveness of the Green Store Designation System Using the Data Envelopment Analysis Method", *Journal of Environmental Policy and Administration*, 25(3): 119-137.
35. 최막중·정이래, 2018. "소득수준과 주택특성에 따른 난방에너지 소비의 역진적 인과구조", 「국토계획」, 53(6): 101-116.
Choi, M.J. and Chung, I.R., 2018. "The Regressive Causal Structure of Heating Energy Consumption Affected by Household Income and Housing Characteristics", *Journal of Korea Planning Association*, 53(6): 101-116.
36. 최원철·이종근·이만형, 2013. "자료포락분석(DEA) 기법에 근거한 시·군의 도시공공서비스 공급 효율성과 영향요인 분석", 「지역연구」, 29(1): 49-65.
Choi, W.C., Lee, J.G., and Lee, M.H., 2013. "Measuring Efficiency and Impact Indicators of Urban Public Service Provisions Based on the DEA Methods in City and County Governments", *Journal of the Korean Regional Science Association*, 29(1): 49-65.
37. 홍하연·이주형, 2013. "DEA모형을 이용한 지역별 친환경주택단지계획 요소에 따른 온실가스 감축 효율성 분석", 「LHI Journal」, 4(1): 33-42.
Hong, H.Y. and Lee, J.H., 2013. "Efficiency Analysis of Greenhouse Gas Reduction according to Local Eco-Friendly Housing Development Planned Element Using DEA Models", *LHI Journal*, 4(1): 33-42.
38. 환경부 온실가스종합정보센터, 2018. 「2018 국가 온실가스 인벤토리 보고서」, 서울.
Ministry of Environment, 2018. *2018 Greenhouse Gas Inventory Report of Korea*, Seoul.
39. Alberini, A., Gans, W., and Velez-Lopez, D., 2011. "Residential Consumption of Gas and Electricity in the U.S.: The Role of Prices and Income", *Energy Economics*, 2011(3): 870-881.
40. Banker, R.D., Charnes, A., and Cooper, W.W., 1984. "Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis", *Management Science*, 30(9): 1078-1092.
41. Benoit, L., 2009. "Urban Transport Energy Consumption: Determinants and Strategies for Its Reduction -An Analysis of the Literature-", *SAPIENS*, 2(3): 1-17 (Article No. 914).
42. Cervero, R. and Kockelman, K., 1997. "Travel Demand and the 3Ds: Density, Diversity, and Design", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2(3): 199-219.
43. Charnes, A., Cooper, W.W., and Rhodes, E.L., 1978. "Measuring the Efficiency of Decision Making Units", *European Journal of Operational Research*, 2(6): 429-444.
44. Deilmann, C., Hennersdorf, J., Lehmann, I., and Reißmann, D., 2018. "Data Envelopment Analysis of Urban Efficiency —Interpretative Methods to Make DEA a Heuristic Tool", *Ecological Indicators*, 84: 607-618.
45. Ewing, R. and Cervero, R., 2010. "Travel and the Built Environment: A Meta-Analysis", *Journal of the American Planning Association*, 76(3): 265-294.
46. Fancello, G., Uccheddu, B., and Fadda, P., 2014. "Data Envelopment Analysis (D.E.A.) for Urban Road System Performance Assessment", *Procedia*, 111: 780-789.
47. Farrell, M.J., 1957. "The Measurement of Productive Efficiency", *Journal of the Royal Statistical Society Series A*, 120(3): 253-290.
48. IPCC, 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report*, Geneva.
49. Kamal-Chaoui, L. and Alexis R. (eds.), 2009. *Competitive Cities and Climate Change*, OECD: Paris.
50. Mindali, O., Raveh, A., and Salomon, I., 2003. "Urban Density and Energy Consumption: A New Look at Old Statistics", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 38(2): 143-162.
51. Newman, P.W.G. and Kenworthy, J.R., 1989. "Gasoline Consumption and Cities: A Comparison of U.S. Cities with a Global Survey", *Journal of the American Planning Association*, 55(1): 24-37.
52. Newman, P. and Kenworthy, J., 2006. "Urban Design to Reduce Automobile Dependence", *Opolis*, 2(1): 35-52.
53. UNECE, 2014. *Best Policy Practices for Promoting Efficiency*, Geneva.
54. UNEP, 2018. *Emissions Gap Report 2018*, Nairobi.
55. ÜSTÜN, A.K., 2015. "Evaluating Environmental Efficiency of Turkish Cities by Data Environment Analysis", *Global NEST*, 17(2): 281-290.
56. Yao, Y., 2011. "Energy Consumption and Space Density in Urban Area", *Energy Procedia*, 2011(5): 895-899.

Date Received 2020-02-28
 Reviewed(1st) 2020-03-17
 Date Revised 2020-06-17
 Reviewed(2nd) 2020-06-25
 Date Accepted 2020-06-25
 Final Received 2020-07-07