

# 광역지방자치단체 온실가스 배출의 영향 요인 탐색: 패널회귀 및 지수분해 분석을 중심으로\*

진 상 현\*\*

## 국문요약

2024년은 윤석열 정부가 지방분권법과 국가균형발전법을 통합해 지방시대위원회를 출범시킨 이후의 첫해라는 측면에서 특별한 의미를 지니고 있다. 또한 2021년에 제정된 「탄소중립·녹색성장 기본법」이 시행에 들어가면서, 지자체들이 기후변화 대응계획을 본격적으로 수립해야 하는 원년이라는 측면에서도 중요한 시기이다. 이러한 지방자치 및 탄소중립의 시대를 맞이해, 본 논문은 광역 시·도의 온실가스 배출 특성을 분석함으로써 지역의 기후 대응을 지원하려는 연구 목적을 지니고 있다. 구체적으로는 패널회귀분석과 지수분해분석을 이용해 인구·소득·집약도가 온실가스 배출에 미쳤던 영향 요인을 파악하고자 한다. 패널분석의 결과에 따르면, 이들 세 변수는 모두 양의 관계를 지니고 있었으며, 인구의 영향력이 가장 큰 것으로 확인되었다. 다만 지수분해분석에서는 집약도가 지난 10년 동안 하락함으로써, 지자체의 온실가스 배출을 줄이는 저감 효과를 가져왔다는 사실까지 밝혀낼 수 있었다. 그렇지만 패널회귀분석에서는 이들 세 가지 변수로 전체 온실가스 변화의 절반 정도만을 해석할 수 있었기 때문에, 다른 독립변수를 추가함으로써 설명되지 않았던 변화 요인의 파악이 필요하다는 함의가 도출되었다. 결론적으로는 전체 지자체를 대상으로 변수의 제약이 없는 패널회귀분석을 통해 설명 요인을 찾아낸 뒤, 개별 지방정부의 차원에서 지수분해분석을 통해 지역의 온실가스 배출 특성 및 추세를 확인하는 방식으로 분석기법 상호 간의 보완이 가능하다는 정책적 함의가 제시될 수 있었다.

주제어: 패널데이터, 지수이론, 탄소중립, 기후변화, LMDI

## I. 서론: 지방시대의 기후 위기

윤석열 정부는 2022년 출범과 더불어 “다시 도약하는 대한민국, 함께 잘 사는 국민의 나라”라는 비전을 제시했다. 그리고 취임 1년 자료집에서는, 청와대를 국민에게 개방했을 뿐만 아니라 자유민주주의와 시장경제 시스템을 복원하는 실적을 거둔 것으로 평가할 수 있었다. 이러한 정부 성과에 대해 국민들은 대통령의 북한 대응 및 복지 정책 관련 만족도가 높았던 반면에, 공직 인사 및 경제

\* 본 논문은 2024년 한국환경정책학회의 춘계학술대회에서 발표된 바 있으며, 자료의 조사 및 수집을 도와 준 임호영 군에게 감사드리는 바이다.

\*\* 경북대학교 행정학부 교수, 공공문제연구소·지역개발연구소 겸임 연구원

정책에 대해서는 부정적인 견해의 상반된 평가를 보여주고 있다. 이처럼 집권 증반기로 접어드는 지금의 시점이, 현 정부의 입장에서는 국정 운영에 대한 중간 평가뿐만 아니라 국가 개혁의 지속적 추진이라는 측면에서 중요한 시기일 수밖에 없다(대한민국정부, 2022, 2023; 한국갤럽, 2023).

특히 2024년은 자치·분권이라는 측면에서 중요한 의미를 지니고 있다. 실제로 윤석열 정부는 전년도에 「지방자치분권 및 지역균형발전에 관한 특별법」을 제정함으로써, 대통령 직속 ‘지방시대위원회’를 출범시킬 수 있었다. 이 위원회는 기존의 국가균형발전위원회와 자치분권위원회를 통합한 조직이라는 특징을 지닌다.<sup>1)</sup> 그렇지만 이들 위원회는 각기 다른 법률에 기반할 뿐만 아니라, 다른 목적을 지녔다는 측면에서도 통합에 대한 논란이 존재한다. 예를 들면, 균형발전위원회는 낙후 지역을 발전시키기 위해 중앙정부가 주도적으로 예산을 지출하고 행정력을 발휘해야 하는 총괄 기관의 역할을 맡게 된다. 반면에 자치분권위원회는 과도하게 집중된 중앙정부의 권한을 광역 및 기초 지자체에 이양함으로써 풀뿌리 민주주의를 활성화시키려는 목적을 가지고 있다. 이처럼 상이한 취지에 상반된 추진 방식을 지닌 별개의 조직을 지방이라는 이름 때문에 통합시킨다는 정부의 방침이 바람직한지, 혹은 이질적인 조직을 통합시킴으로써 상승효과를 일으킬 수 있을 것인지에 대해서는, 사회적·학술적 논란이 여전히 진행 중인 실정이다(조성규, 2022).

한편으로 2024년은 지방정부의 기후변화 정책이라는 측면에서도 중요한 전환이 이루어지는 시기이다. 왜냐하면 1992년 기후변화협약의 체결 이후 중앙정부 중심으로 추진되었던 기후 대응이 지방자치단체 차원에서 본격화되는 시점일 뿐만 아니라, 특히 지금은 기초지자체까지도 탄소중립 계획을 수립해야 하는 상황이 만들어졌기 때문이다(진상현, 2022). 실제로 2021년에 제정된 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」은 11조에서 광역자치단체에게도 「탄소중립·녹색성장 기본계획」의 수립 의무를 명시하고 있다. 그래도 광역지자체는 유관 계획을 수립했던 경험을 지니고 있기 때문에, 큰 부담이 되지 않을 수도 있다. 반면에 기초지자체의 입장에서는 상당한 부담이 될 수밖에 없다. 직접적으로 동법 12조는 시·군·구의 경우에도 국가 및 광역의 계획을 고려해서 「탄소중립·녹색성장 기본계획」을 수립하도록 요구하고 있다. 현재 윤석열 정부는 2023년에 국가 계획을 발표했으며, 광역지방자치단체들은 지역별 계획의 수립을 마무리하는 중이다. 그렇지만 기초지자체는 2024년부터 계획 수립에 착수해, 2025년까지는 전부 제출해야 하는 실정이다.<sup>2)</sup>

이에 본 논문은 지역의 기후변화 대응이 중요해진 지금의 시점에서 지방자치단체의 온실가스 배출 관련 영향 요인을 밝혀냄으로써 정책적 함의를 도출하고자 한다. 구체적으로는 데이터 확보가 가능한 광역지자체를 중심으로 패널회귀분석이라는 전통적 통계 기법을 적용할 뿐만 아니라, 지수분해분석이라는 자원경제학의 계량 모형을 도입함으로써 분석기법을 다양하게 확대할 계획이다. 한편으로는 이들 두 가지 분석의 결과를 비교함으로써, 방법론적인 특성의 차이에 대한 확인도 가능할 것이다. 이러한 연구 목적을 달성하기 위해, 다음의 2장에서는 먼저 광역 및 기초 지방자치단체의 기후변화 대응 현황에 대해 개괄적으로 살펴보고자 한다.

1) “지방시대 구현을 위한 제도적 기반 다진다”, 관계부처 합동 보도자료, 2023.6.6.

2) “「2050 탄소중립 달성과 녹색성장 실현」을 위한 윤석열 정부 탄소중립·녹색성장 청사진 공개”, 국무조정실 보도자료, 2023.3.21.

## II. 지방자치단체의 기후변화 대응 현황

### 1. 광역지방자치단체

광역지자체에서 “에너지” 관련 계획을 수립해 온 역사는 상대적으로 긴 편이다. 1991년 지방자치단체의 의원 선거가 부활했을 뿐만 아니라 1995년에 자치단체장을 동시 선출하면서, 지방자치의 시대가 본격화되었다(진상현, 2018). 이에 상공자원부도 1993년에 「지역에너지계획 활성화 방안」을 발표하면서, 지방정부의 참여 확대를 시도했다. 구체적으로는 대전·경남·제주를 시범으로 지역에너지계획을 수립했을 뿐만 아니라, 이듬해에는 지자체 공무원에 대한 국내외 연수를 통한 역량 강화까지 추진했을 정도였다(배정환 외, 2006). 그렇지만 당시만 해도 법률 근거 없이 진행되었기 때문에, 1995년 「에너지이용합리화법」의 개정을 통해 ‘제5조 지역에너지계획’ 항목이 추가되면서, 그제야 본격적으로 활성화될 수 있었다(이종성 외, 2010; 산업통상자원부, 2019).

이후 2006년에 「에너지기본법」이 새로 제정되면서, 지역에너지계획의 법적 기반이 체계화되기 시작했다. 왜냐하면 기존의 「에너지이용합리화법」은 수요관리에 국한된 법률이기 때문에, 신재생 에너지를 포함한 지방자치단체의 전력 생산 같은 공급 측면을 포함하지 못했던 개념적 한계를 지녔기 때문이다. 게다가 에너지기본법의 ‘제7조 지역에너지계획의 수립’ 2항은 온실가스 저감 대책을 포함하도록 규정함으로써, 지자체 기후변화 대책의 제도적 기반까지도 제공할 수 있었다. 최근인 2020년에 동시 수립된 지역에너지 계획은 5·6차에 달할 정도로, 광역자치단체는 이미 상당한 경험을 축적한 상태이다(오용석·진상현, 2016; 고재경·진상현, 2021; 진상현·오수미, 2020).

반면에 광역지자체의 “기후변화” 관련 계획의 역사는 상대적으로 짧은 편이다. 실제로 지방정부의 기후 대책이 본격화되었던 시점은 2008년이였다. 당시 국무총리실에서는 기존의 대기환경보전법과 에너지기본법 같은 법률에 혼재된 기후변화 관련 규정들을 정리할 뿐만 아니라, 탄소 배출권 거래제를 도입하려는 의도로 「기후변화대책기본법」을 발의했다.<sup>3)</sup> 그렇지만 같은 해 8월에 이명박 대통령이 ‘저탄소 녹색성장’이라는 정책 기조를 제시하면서, 2009년 「저탄소 녹색성장 기본법」의 대체 입법을 통해 새로운 법률 체계가 마련되고 말았다. 그 무렵에 발표된 중앙정부의 ‘기후변화대응 종합기본계획’에 의거해, 시·도 지자체도 기후변화 대응 계획을 수립하기 시작했다.

그렇지만 광역지방자치단체의 “기후변화” 대응은 선도적이었던 “지역에너지” 계획에 비해 시기가 늦을 뿐만 아니라, 체계적 혼선이 존재한다는 측면에서 더 큰 문제가 있었다. 먼저 기존에 논의되던 기후변화법을 대신해 녹색성장법이 제정되면서, 내용적 충돌이 발생했다. 예를 들면, 녹색성장기본법은 지방정부로 하여금 ‘녹색성장 추진계획’을, 동법 시행령은 ‘기후변화 적응 계획’을 수립하도록 요구하는 역설적 상황이 만들어졌다. 이에 서울시는 2011년에 ‘제1차 기후변화 적응 대책 세부 시행계획’을 작성했으며, 2017년에는 온실가스 감축이라는 완화 정책까지 포함된 ‘제2차 기후변화대응 종합계획’을 수립했다(조항문·이윤혜, 2017).<sup>4)</sup> 반면에 대구시는 조례를 근거로

3) 물론 중앙정부 차원에서는 1999년부터 기후변화 대응 계획을 수립했었지만, 2008년 이전까지만 해도 사실상 아무런 노력을 기울이지 않았던 무의사 결정의 상태였다는 평가가 내려진 바 있다(진상현, 2022).

2010년부터 완화를 포함하는 '기후변화대응 기본계획'을 작성했을 뿐만 아니라, 2012년과 2016년에는 별도의 '기후 적응 세부 시행계획'까지도 수립한 바 있다(남광현, 2010; 대구광역시, 2020). 게다가 내용적인 측면에서 온실가스 감축 부문이 중복되는 유관 법정계획인 녹색성장계획도 병행해서 만들어지는 실정이었다(설홍수, 2015).

이처럼 혼란스러운 상황임에도 불구하고 2021년 국회에서는 탄소중립을 추진하려는 민주당과 녹색성장을 존속시키려는 국민의힘 사이의 이해타산이 맞아떨어지면서, 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」이 새로 제정되고 말았다. 그로 인해 시·도지사는 계획기간을 10년으로 하는 지역의 탄소중립·녹색성장 기본계획을 5년마다 수립하게 되었다. 결과적으로 광역지자체의 기후변화 대응 및 온실가스 감축은 10여 년의 짧은 역사 속에, 기후적응·녹색성장·탄소중립이 뒤섞인 혼란에 직면해 있다.

## 2. 기초지방자치단체

앞에서 살펴보았듯이 광역지자체는 지방시대의 출현과 더불어서 지역에너지계획을 수립해 온 경험을 축적하고 있다. 물론 기후변화 대응과 관련하여 법률 체계의 충돌 및 변화로 인해 혼란스럽기는 했지만, 그래도 이명박 정부 이래로 역량을 갖춰가고 있다. 반면에 기초 지방자치단체의 경우에는 전혀 준비가 되어져 있지 않을 뿐 아니라, 심지어 온실가스 감축 같은 거시적 문제에 대해서는 중앙정부가 담당할 업무이지, 자치단체에서 담당할 일이 아니라고 간주하는 인식적 한계까지 지니고 있었다. 경기연구원에서 진행되었던 설문조사에서도 기후변화 관련 완화 정책인 온실가스 감축 사업이 중요하다라는 견해가 중앙정부에서 강했던 반면에, 적응 정책의 중요성을 강조했던 응답의 경우에는 기초지자체에서 더 높았던 차이가 나타날 정도였다(고재경, 2011).

실제로 기초 지방정부에서 그나마 체계적으로 방침을 마련했던 기후 대응 분야는 적응 정책뿐이었다. 구체적으로 「녹색성장기본법」 시행령 38조는 중앙정부나 시·도지사뿐만 아니라, 시·군·구청장에게도 기후 적응 관련 계획을 수립하도록 규정하고 있다. 이에 주무 부서인 환경부는 광역에 이어 기초지자체를 대상으로 2014년부터 계획 수립 가이드라인을 제공해 오고 있다. 2015년부터는 시범사업으로 수립되었던 계획들을 공유하고 있으며, 지금은 포털 사이트를 통해 226개 시·군·구의 계획을 공개할 뿐만 아니라, 평가·점검 및 관리를 담당해 오고 있다.<sup>5)</sup>

이처럼 기초지자체는 지난 10여 년 동안 기후위기 관련 적응에 국한해서 계획 수립 및 정책적 대응의 역량이 축적된 상태이다. 그렇지만 이번에 새로 제정된 탄소중립기본법은 시·군·구의 경우에도 시·도와 마찬가지로 계획기간 10년의 탄소중립·녹색성장 기본계획을 5년마다 수립하도록 규정하고 있다. 이제는 광역뿐만 아니라 기초 자치단체도 기후 대응 및 온실가스 감축의 주체로

4) 다만 법적 강제 요건이 아니었던 2010년 이전에도, 지방정부와 연구원 차원에서는 지자체의 기후변화 대응 방안에 대한 논의가 상당히 이루어진 바 있다. 특히 자치단체장의 관심과 의지에 따라, 어느 정도 실행력을 갖춘 기후정책이 시행되는 지역들도 있었다(김운수, 2001; 진상현·김운수, 2010).

5) 국가 기후위기 적응 포털(<https://kaccc.kei.re.kr/portal>) 참조

역할을 맡아야 하는 상황이 되었다. 다만 본 논문은 이제 막 책임을 맡게 된 기초지자체가 아니라, 상당한 기간 동안 에너지·기후 관련 역량과 데이터를 축적한 광역지자체를 대상으로 패널회귀분석과 지수분해분석을 이용해 지역의 온실가스 배출 관련 영향 요인을 탐색하고자 한다. 이에 다음의 3장에서는 이들 두 가지 방법론 및 분석기법에 대한 개괄적 검토가 이루어질 예정이다.

### Ⅲ. 방법론 및 분석기법

#### 1. 패널회귀분석 개요

##### 1) 분석기법의 등장 배경 및 역사

본 논문에서 활용하려는 횡단면 자료와 시계열 자료가 결합된 형태의 패널데이터에 대한 회귀 분석의 등장은 1977년 파리 컨퍼런스가 직접적인 계기였다.<sup>6)</sup> 물론 패널회귀분석의 역사를 훨씬 더 이전으로 보기도 한다.<sup>7)</sup> 그렇지만 현대적인 패널데이터 분석의 본격적인 출현 배경은 1960년 대의 미국이었다. 당시 미국은 2차 세계대전 직후의 급격한 경제성장을 경험했음에도 불구하고, 정치·사회적 혼란뿐만 아니라 자국민 5명 가운데 1명이 빈곤선 이하에서 살아갈 정도로 심각한 어려움을 겪고 있었다. 이에 미국 정부는 ‘빈곤과의 전쟁’을 선포했던 존슨 행정부의 정책 효과를 평가하기 위해 1968년부터 가구 패널조사를 실시해 기초자료를 수집하기 시작했다. 그 무렵의 패널데이터는 5,000가구를 포함할 정도의 대규모였을 뿐만 아니라, 현재까지도 80,000명을 대상으로 진행되는 중요한 기초자료로 자리잡은 상태이다. 이에 유럽도 1994년부터 가구 단위의 조사를 실시하고 있으며, 지금은 중국과 케냐를 포함한 개발도상국에서도 패널데이터 조사가 이루어질 정도이다(Hsiao, 2007; Sarafidis, & Wansbeek, 2021).

이처럼 사회조사를 위한 패널데이터가 구축되던 시기에, 미국의 36개 주정부를 대상으로 13년 동안의 천연가스 수요를 분석했던 기념비적인 연구가 발표되었다(Balestra & Nerlove, 1966). 이후 이 연구의 공저자 가운데 한 명이 1977년 파리 컨퍼런스를 주도하면서, 패널회귀분석이 본격적으

6) 당시 학술대회에서는 패널회귀분석의 이론적 기초가 정립되었을 뿐만 아니라, 다양한 실증 분석 사례들이 발표되었다. 이듬해 국제 학술지인 『경제·통계학 연보(Annals of Economics and Statistics)』의 특별호에 이 컨퍼런스의 논문들이 게재되면서, 분석기법이 체계화되기 시작했다. 이후 20주년을 즈음해서는 동일한 학술지에 패널데이터 분석에 관한 두 번째 특별호가 발간되었으며, 40년 기념으로는 그리스 마케도니아 대학에서 국제 컨퍼런스가 다시 개최되었을 정도였다(Bonhomme & Davezies, 2019; Sarafidis, & Wansbeek, 2021).

7) 구체적으로는 방법론적인 측면에서 1805년과 1809년에 발표되었던 천문학계의 최소자승법이 현대적 분석기법의 기원이라는 설명이 이루어진 바 있으며, 보다 직접적으로는 영국 천문학자인 George Biddell Airy의 1861년 논문에서 활용되었던 패널데이터 분산 모형과의 관련성이 언급되고도 있다. 이후 Fisher나 Henderson 같은 학자들의 연구가 축적되면서, 패널회귀분석의 기초가 마련될 수 있었다(Nerlove, 2002; Vijayamohan, 2016).

로 체계화되기 시작했다. 지금은 계량경제학에서 가장 많이 활용되는 분석기법으로 자리잡았으며, 이 분야의 인용률이 높은 논문들 가운데 4분의 1이 패널데이터 분석일 뿐만 아니라, 지난 30년 동안에 가장 많이 언급된 학술논문도 '동적 자료를 이용한 패널회귀분석 연구'로 알려져 있다 (Vijayamohan, 2016; Sarafidis & Wansbeek, 2021).

## 2) 선행 연구 및 분석 모형

앞에서 살펴본 바와 같이, 계량경제학을 중심으로 체계화되었던 패널회귀분석은 행정학 분야에서도 적극적으로 활용되고 있다(Eom et al., 2008). 예를 들면, 미국에서는 1994년 연방정부 내부에서 여성 및 소수자의 비중 변화를 분석한 연구가 발표되었으며, 2000년에는 지방정부의 과도한 재정 확대를 억제하기 위해 콜로라도 주정부가 도입했던 세금 및 지출 상한제의 효과를 검토했던 논문도 발간된 바 있다. 마찬가지로 2006년에는 뉴욕 주에서 실시되었던 학교 면세 프로그램이 납세자의 감시 동기를 떨어뜨림으로써 지방정부의 능률 저하를 가져왔다는 패널 연구도 흥미로울 수 있다. 특히 본 논문의 연구 주제인 온실가스 배출량과 관련해서도 132개국의 패널데이터를 이용한 논문도 발표된 바 있다. 구체적으로 이 연구에서는 1960년부터 2010년까지의 장기 데이터를 활용함으로써, 2050년의 미래 배출량까지도 전망할 수 있었다(Hwang, 2016).

물론 국내 행정학 분야에서도 패널회귀분석이 적극적으로 활용되고 있다. 예를 들면, 1989년부터 2007년까지의 지역 격차가 자치 분권에 미쳤던 영향, 2005년에서 2009년 사이에 서울시 25개 자치구의 경찰 인력 배치 및 민간 치안 활동의 범죄 예방 효과, 중앙정부의 국고 보조금이나 지방교부세 같은 이전 재원이 기초지자체에 가져왔던 경제성장 효과를 분석하기 위해 2009년부터 2015년까지의 패널데이터를 활용한 논문들이 발표된 바 있다(김성배, 2011; 조일형·권기현, 2011; 김민창·김예찬, 2019).

이러한 패널회귀분석의 기본 모형은 <식 1>과 같이 간략한 선형 방정식으로 표현될 수 있다. 구체적으로는 종속변수인 지역별 온실가스 배출량(CO<sub>2</sub>)을 설명하기 위한 세 가지 독립변수로 '인구(population)', '1인당 지역내 총생산(affluence)', '집약도(intensity)'를 포함하고 있다.<sup>8)</sup> 다만 패널회귀분석의 기본식은 오차항이 지역과 시간 특성이라는 두가지 요소로 구성된다는 측면에서 일반적인 선형회귀분석과는 차이를 지닌다. 또한 이들 오차항을 변하지 않는 특정 수치로 간주하는지, 아니면 확률적 분포로 설정하는지에 따라서 '고정효과모형(fixed effect model)'과 '확률효과모형(random effect model)'으로 구분된다. 이러한 특징으로 인해 패널회귀분석은 시계열 자료의 기간

8) 패널회귀분석에서는 이들 외에도 산업구조, 차량 보유 대수, 수송 부담률, 발전원 비중 등의 다양한 독립변수들이 추가될 수 있다. 특히 패널데이터 분석은 다중공선성 문제로부터도 비교적 자유롭기 때문에, 자료 획득이 가능하고 자유도의 문제만 없다면 변수를 추가함으로써 설명력을 높일 수도 있다. 실제로 김소연·류수열(2021)은 본 논문과 달리 패널모형에 도시화율을 추가했지만, 통계적으로는 유의미하지 않은 것으로 나타났다. 반면에 다음 절에서 설명될 LMDI 분해분석은 지수의 논리적 정합성이라는 제약이 강하기 때문에, 이들 세 가지 이외의 변수를 추가하기가 상대적으로 어려운 실정이다. 게다가 본 논문은 이들 두 가지 방법론의 잔차 비교라는 학술적 목적도 지니고 있기 때문에, 지수분해분석과 마찬가지로 패널회귀분석의 경우에도 동일하게 3개의 변수만을 모형에 포함시켰다.

이 제한적임에도 불구하고 관측치의 숫자가 늘어나기 때문에, 자유도의 문제를 해소할 수 있다. 한편으로는 일반적인 선형회귀분석에서 발생하는 독립변수들 사이의 다중공선성 문제로부터 어느 정도 자유롭다는 장점도 지니고 있다(조일형·권기현, 2011; 류수열 외, 2014).

최근 들어서는 기존의 짧은 기간에 여러 관측치를 대상으로 수행되었던 패널회귀분석의 한계마저 보완해 나가고 있다. 즉, 분석 기간이 상대적으로 긴 시계열의 패널데이터를 이용하는 분석에 적합한 기법들도 개발되는 추세이다(전승훈 외, 2004; 박추환, 2008; Ashley & Sun, 2016; Xu, 2016). 다만 본 논문은 2010년부터 2019년까지라는 10년에 걸친 16개 광역지자체를 대상으로 분석할 예정이기 때문에, <식 1>에 기반한 패널회귀분석을 통상적인 방식으로 진행하고자 한다. 이때 패널분석의 절차는 다음과 같다(Park, 2011). 먼저 고정효과모형과 확률효과모형에 대한 패널회귀분석을 각각 시행한 뒤, 이들 두 가지 모형이 일반적인 선형회귀분석에 비해 유의미한지를 판단하기 위해 F검정 및 LM(Lagrange Multiplier) 테스트가 이루어져야 한다. 이후에는 이들 두 가지 모형 가운데 타당한 패널회귀모형을 찾아내기 위해 하우스만(Hausman) 검정이 진행될 필요가 있다. 끝으로서는 이렇게 선정된 모형에 대해 시간 효과의 고정성을 판단하기 위한 분산 분석이 수행됨으로써, 최종 모형이 결정될 수 있다.

$$CO_{2it} = a + \beta_1 Population_{it} + \beta_2 Affluence_{it} + \beta_3 Intensity_{it} + \epsilon_{it} \quad \langle \text{식 1} \rangle$$

$$\epsilon_{it} = \mu_i + \lambda_t + v_{it}$$

$CO_2$ =온실가스 배출량,  $Population$ =인구,  $Affluence$ =1인당 GRDP,  $Intensity$ = $CO_2/GRDP$

$i$ =지역,  $t$ =년도,  $\mu_i$ =지역 특성,  $\lambda_t$ =시간 효과,  $v_{it}$ =확률적 교란항

## 2. 지수분해분석 개요

### 1) 분석기법의 등장 배경 및 역사

패널회귀분석이 50여 년의 역사를 지닌 것과 달리 ‘지수분해분석(index decomposition analysis)’은 30년 가량의 비교적 짧은 역사를 지니고 있다.<sup>9)</sup> 길게 보면, 1978년 제조업 부문에 에너지 절약 효과를 추정한 연구나, 1979년 영국의 에너지 수요를 분석했던 논문들이 출발점으로 간주되기도 한다.<sup>10)</sup> 그렇지만 1980년대 중반 이전의 초창기 연구들은 직관적이고 단순한 형태의 분

9) 물론 패널데이터 분석이 천문학 연구의 오랜 기원을 지닌 것과 마찬가지로, 지수를 이용해서 사회현상을 해석하려는 노력도 상당한 역사적 뿌리를 지니고 있다. 이러한 지수 이론은 제품의 물량과 가격을 결합해서 특성을 드러내는 경제학 분야의 전통적 논의를 가리킨다. 예를 들면, 소비자·생산자 물가 지수나 구매력 평가 같은 지수들이 지금도 적극적으로 활용되고 있다. 이러한 경제학 분야의 가장 오래된 지수 가운데 하나는 프랑스 경제학자인 Dutot이 1738년에 제시했던 산식이다. 이후 미국의 계량경제학자인 Fisher는 1922년에 시간 변화를 고려한 이상적인 지수까지 고안했을 정도였다(Boer & Rodrigues, 2020).

10) 현재 가장 많이 활용되는 LMDI 분해분석의 경우에는 1929년 Montgomery와 1974년 Varta가 제안했던 지수와 밀접하게 관련되는 것으로도 알려져 있다(Boer & Rodrigues, 2020).

해분석일 뿐이었다. 이후 1987년 산업 부문의 에너지 소비 요인에 대한 분석 및 1988년 에너지 집약도를 이용한 논문들이 발표되면서, 비로소 분석기법의 이론적 기반이 갖춰지게 되었다(Ang & Zhang, 2000).

그렇지만 본격적으로는 1994년 싱가포르 국립대학 교수인 Ang의 주도하에 방법론이 체계화될 수 있었다(Ang, 2004). 사실 '지수분해분석'이라는 이름도 2000년 Ang 교수에 의해 붙여졌을 정도였다(Ang, 2015). 게다가 당시까지만 해도 분석기법적인 측면에서는 AMDI(Arithmetic Mean Divisia Index)와 LMDI(Logarithmic Mean Divisia Index)라는 두 가지 방식이 경합 중인 상태였다. 그렇지만 1987년에 먼저 등장했던 AMDI는 '요소 역전(factor reversal) 테스트'를 통과하지 못했을 뿐만 아니라, '0'값이 포함된 자료의 분석이 불가능하다는 한계를 지니고 있었다. 이에 Ang(2004, 2005)은 여러 가지 지수분해분석 기법들을 비교한 뒤, LMDI 분해분석이 가장 바람직하다는 결론을 도출해낼 수 있었다. 덕분에 지금의 연구자들은 대부분 LMDI 분해를 분석기법으로 채택하는 실정이다(Xiang et al., 2022; Wang & Yang, 2023).<sup>11)</sup>

이러한 논의 과정을 거친 지수분해분석은 현재 학계에서 활발히 적용되고 있다. 예를 들면, 1995년 이전까지만 해도 관련 논문이 55건에 불과했지만, 2004년까지는 125건으로 늘어났으며, 이후 10년 동안에는 379건으로 급격히 팽창한 상태이다(Ang, 2015). 게다가 최근의 연구 결과에 따르면, 2016년부터 2021년까지 5년 사이에만 983건의 논문이 발간되었으며, 2023년 현재 지수분해분석 관련 논문은 10,000건이 넘게 검색될 정도라고 한다(Wang & Yang, 2023). 이처럼 방법론적 체계가 확립되었을 뿐만 아니라 전 세계에서 활용되고 있음에도 불구하고, 아직까지는 전문 분석 프로그램이 별도로 존재하지 않아서, 학자들마다 다양한 통계 패키지를 활용해 분석하는 방식으로 개별적인 연구가 진행되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 목적으로 근래에는 프로그래밍 언어인 파이썬(Python)을 활용해 손쉽게 지수분해분석을 시도할 수 있도록, 'PyLMDI'라는 개방형 플랫폼까지 구축된 상태이다(Xiang et al., 2022).<sup>12)</sup>

## 2) 선행 연구 및 분석 모형

앞에서 살펴보았듯이 지수분해분석은 에너지 부문의 소비량 변화를 설명하기 위해 개발된 분석기법이다. 그렇지만 기후변화협약 체결 이후로는 온실가스 배출 특성을 분석하기 위한 목적으로 더 많이 활용되는 추세이다. 심지어는 1992년부터 2012년 사이에 발표된 이산화탄소 배출 특성에 관한 80편의 지수분해분석에 대한 메타 평가까지 진행되었을 정도이다(Xu & Ang, 2013). 한편으로 스위스에서는 도시의 주요 온실가스 배출원인 건물 부문으로 국한해 분해분석을 적용함으로써 이산화탄소 감축 전략까지 도출했던 선행연구도 발표된 바 있다(Mavromatidis et al., 2016). 특

11) 최근에는 기존의 LMDI 분해분석이 에너지 믹스 및 경제산업 구조의 변화를 적절히 해석하지 못하기 때문에, 대안적인 분석기법으로 '마샬-에지워스 구조효과(Marshall-Edgeworth with Structure Effects) 모형'이 개발된 바 있다. 그렇지만 이 모형은 학계에서의 검증이 완료되지 않았으며, 아직까지 연구자들에 의해 가장 폭넓게 활용되는 분석기법은 여전히 LMDI 분해분석인 실정이다(Roux & Plank, 2022).

12) PyLMDI 플랫폼은 2021년부터 운영되고 있다(<https://github.com/xiwangxiang/PyLMDI>).



히 과거 데이터가 아니라, 2040년을 목표로 설정했던 미래의 온실가스 배출 시나리오에 대한 LMDI 방식의 분해분석 연구도 흥미로울 수 있다(Ang & Goh, 2019).

이에 국내에서도 기후변화 분야에 지수분해분석을 적용한 연구들이 늘어나는 경향을 보이고 있다. 예를 들면, 1998년부터 2018년까지의 온실가스 배출 데이터를 활용함으로써 한국의 이산화탄소 원단위 변화 요인을 밝혀낸 논문이 발표된 바 있다(진태영·김도원, 2021). 한편으로는 분석 단위를 조직 수준으로 낮춰서 배출권거래제의 참여기업을 대상으로 생산·구조·집약도·배출계수라는 네 가지 요인으로 분석한 연구 결과도 공개된 상태이다(김문정·허은영, 2020).

물론 온실가스뿐만 아니라 전통적인 에너지 소비 영역에 대한 분석도 활발히 진행되고 있다. 예를 들면, 산업 부문의 전력 및 에너지 소비 요인을 분석한 연구, 제조업 부문의 전력화 현상에 대한 논문, 농업용 전기 소비량에 관한 연구 등도 꾸준히 발표되고 있다(임재규·김종익, 2014; 한준, 2015; 문혜정·이기훈, 2018). 특히 한국의 제조업 부문을 대상으로는 에너지 소비뿐만 아니라 온실가스 배출량의 변화에 대한 LMDI 분석이 반복적으로 진행되면서, 학계와 정부의 지속적인 관심과 모니터링이 이루어지는 실정이다(Jeong & Kim, 2013; Kim, 2017).

반면에 본 논문은 지방자치단체를 분석 대상으로 설정하고 있다는 측면에서, 선행연구들과 차이가 있다. 물론 지자체를 대상으로 지수분해분석을 수행했던 연구들도 존재하며, 이들의 경우에는 본 논문과의 차별점 확인이라는 측면에서 보다 자세한 검토가 필요할 수 있다. 특히 지수분해 분석의 경우에는 개별 지자체를 대상으로도 분석이 가능하기 때문에, 광역자치단체 단독으로 에너지 소비 및 온실가스 배출 특성을 분석한 연구들이 여러 차례 발표된 바 있다. 예를 들면, 서울시를 대상으로 2002년부터 2017년까지 전력 소비량의 변화를 인구, 소득, 에너지 집약도, 1인당 에너지 소비량, 전력화 비율이라는 다섯 가지 요인으로 분해한 논문이 대표적인 사례이다(한준·정연미, 2020). 마찬가지로 경기도와 관련해서는 1996년부터 2011년까지의 에너지 소비량을 인구·생산·원단위라는 세 가지 요인으로 구분해서 해석했던 연구 결과도 공개된 바 있다(고재경 외, 2015).<sup>13)</sup> 한편으로는 인천광역시를 대상으로 2002년부터 2020년까지 가정·상업·산업·수송·공공이라는 5개 부문에서 전력 소비량의 변화를 분석했던 논문도 발표될 수 있었다(한준, 2023).

이들 선행연구들이 개별 지역을 단독으로 분석했던 것과 달리, 복수의 지방자치단체를 대상으로 지수분해분석이 실행된 경우도 있다. 먼저 16개 시·도를 대상으로 1990년부터 2006년 사이의 에너지 소비 특성을 인구·생산·원단위라는 3개 요인으로 분해한 뒤, 광역시와 도지역으로 구분해서 분석했던 논문이 지역 차원의 선도적인 연구이다(진상현·황인창, 2009a). 이후에는 분석모형에 에너지원별 비중 및 배출계수를 추가함으로써, 지자체의 기후변화 대응 관련 정책적 함의로 발전시킨 논문도 발표된 바 있다(진상현·황인창, 2009b).<sup>14)</sup> 한편으로는 이들 선행연구가 에너지 부문에 국한되었던 한계에서 벗어나서, 폐기물·산업공정·토지이용 등이 포함된 전체 온실가스 배출

13) 이 연구는 광역인 경기도뿐만 아니라 31개의 기초자치단체에 대한 지수분해분석을 통해, 저성장·저효율, 중성장·고효율, 고성장·고효율이라는 하위 유형을 찾아냈다는 측면에서 의미를 지니고 있다(고재경 외, 2015).

14) 또한 진상현·황인창(2009b)은 온실가스 배출 상위 8개 지자체를 중심으로, 유사한 지역의 특성을 비교함으로써, 연구 결과 및 정책적 함의를 정교화시킬 수 있었다.

량을 산정해서 지자체의 특성을 분석한 뒤, 지역별 유형화를 시도했던 연구도 흥미로울 수 있다 (진상현·정경화, 2013).<sup>15)</sup>

따라서 본 논문은 특정 지자체에 국한되지 않는다는 측면에서, 이들 3편의 선행연구와 공통점을 지니고 있다. 반면에 이 연구들이 개별 지자체에 대한 분석 결과를 몇 가지 유형으로 분류하거나 쌍대 비교를 통해 정책적 함의를 도출했던 것과 달리, 본 논문은 광역지자체의 평균적인 온실가스 배출 요인을 분석함으로써 일반화된 함의를 제시한다는 측면에서 차이를 지니고 있다. 또한 본 논문은 단순 지수분해분석에 국한되지 않고, 패널회귀분석 결과와의 비교를 통해 방법론적인 특성의 차이를 파악하려는 목적을 지녔다는 측면에서도 선행연구와는 차별화될 수 있다.<sup>16)</sup>

그렇다면 이제는 본 논문에서 활용하려는 LMDI 분해분석 모형에 대해 본격적으로 살펴볼 필요가 있다. 다만 본 논문의 연구 목적은 새로운 모형의 개발이 아니라, 지방자치단체의 온실가스 배출 요인 탐색 및 패널회귀분석과의 차이 확인이기 때문에, 선행연구에서 적용되었던 분석 모형을 그대로 사용하고자 한다(진상현·정경화, 2013). 즉, 온실가스 배출량을 인구·소득·집약도라는 기본적인 세 가지 요인으로 분해할 것이다. 구체적으로 <식 2>에서 분해 요소인 P는 인구(population), A는 소득(affluence), I는 집약도(intensity)의 약자를 가리킨다.<sup>17)</sup>

이때 본 논문은 지방자치단체의 온실가스 배출 관련 영향 요인 파악에 일차적인 목적을 지니고 있기 때문에, 자원경제학 분야의 연구와 달리 지수분해분석에 대한 수리적인 설명은 가급적 생략하고자 한다. 그렇지만 한편으로는 패널회귀분석과의 비교라는 부가적인 목적도 지니고 있기 때문에, 잔차 논란에 대해서는 조금 더 구체적으로 검토할 필요가 있다. 앞에서 살펴보았듯이 분석 결과에 잔차가 남지 않는다는 장점 덕분에, 지금은 LMDI 분해분석에 대한 연구자들의 관심이 높아진 상태이다. 그렇지만 Muller(2006)는 잔차가 존재하는 게 자연스러우며, 잔차를 없애야 하는

15) 문혜정·이기훈(2019)의 연구는 “지역에너지 소비 변화의 영향 분석”이라는 제목을 가지고 있기는 하지만, 국가 에너지 소비량의 변화라는 종속변수를 설명하기 위해 지자체의 에너지 소비량이 독립변수로 활용되었기 때문에, 지방자치단체에 대한 연구라기 보다는 한국에 대한 연구로 분류하는 게 타당하다.

16) 지수분해분석은 최근 들어 관광, 자연재해, 신용보증 같은 다른 영역으로 확대 적용되는 추세이다 (Mussini, 2020; 최충익, 2014; 진용주 외, 2021). 물론 분석기법이 특정 주제에 국한될 필요는 없으며, 방법론의 확장이라는 측면에서 바람직할 수 있다. 다만 연구자들은 지수(index) 분석의 기본적인 논리구조에서 벗어나지 말아야 한다. 즉, 지수분해분석은 종속변수를 몇 개의 복합적인 지수로 분해함으로써 사회현상을 해석할 수 있는 방법론이다. 예를 들면, 1인당 GDP는 각 나라의 소득 수준을 의미하면, GDP 대비 에너지 소비량은 경제활동에 투입된 집약도로 이해된다. 이처럼 일반적으로 통용되는 지수를 활용해 종속변수인 온실가스 배출량이나 에너지 소비량의 변화를 해석한다는 측면에서 LMDI 분석기법은 의미를 지닌다. 따라서 지수분해분석을 무분별하게 적용할 경우에는 무의미한 지수와 수치들로 분해되는 문제가 발생한다. 단적인 예를 들자면, 온실가스 배출량을 인구, 1인당 반려동물 수, 반려동물 당 공원면적, 공원면적 당 온실가스 배출량으로 분해되는 모형을 구성할 수 있다. 그렇지만 이들 지수의 논리적 정합성이 확보되지 못한다면, 연구 결과 및 해석의 신뢰도가 낮아질 수밖에 없다. 마찬가지로 에너지 및 환경 분야에서도 지수분해 방정식을 지나치게 세분화해서 논쟁적인 지표들을 추가하는 것도 바람직하지 않다. 따라서 연구자들은 LMDI 분석에서 분해되는 지수의 현실적·해석적 의미가 중요하다는 사실을 유념할 필요가 있다.

17) 환경오염(Impact)과 관련해서는, 인구·소득·기술의 약자를 이용해 IPAT 항등식이라고도 불린다(진상현·황인창, 2009a).

이론적 근거도 부족하다며 비판한 바 있다. 게다가 이 무렵에는 잔차가 포함된 지수분해분석이 국제에너지기구(IEA)의 연구 모형에 포함되기도 하였다. 그렇지만 Ang이 미국 제조업을 대상으로 0.65%, 화물운송 분야에서는 0.48%, 여객수송 부문에서 0.01%의 잔차가 존재한다는 연구 결과를 제시하며 IEA 보고서를 반박한 뒤, 지금은 LMDI 분석이 가장 보편적인 모형으로 채택되는 실정이다(Ang & Liu, 2007). 그렇지만 이들 잔차의 타당성 논쟁은 지수분해분석 모형 내부의 논의일 뿐이지, 본 논문에서 비교하려는 패널회귀분석의 잔차와는 다른 개념일 수 있다. 이에 실증적 분석에 기반한 잔차 해석의 차이에 대해서는, 다음의 4장에서 본격적으로 다뤄질 것이다.

$$CO_2 = \frac{CO_2}{GRDP} \times \frac{GRDP}{POP} \times POP = I \times A \times P \quad \langle \text{식 2} \rangle$$

$CO_2$ =온실가스 배출량,  $GRDP$ =지역내 총생산,  $POP$ =인구  
 $I$ =집약도( $GRDP$ 당  $CO_2$ ),  $A$ =소득(1인당  $GRPD$ ),  $P$ =인구

## IV. 광역지자체의 온실가스 배출 요인 분석

### 1. 분석 데이터 개요

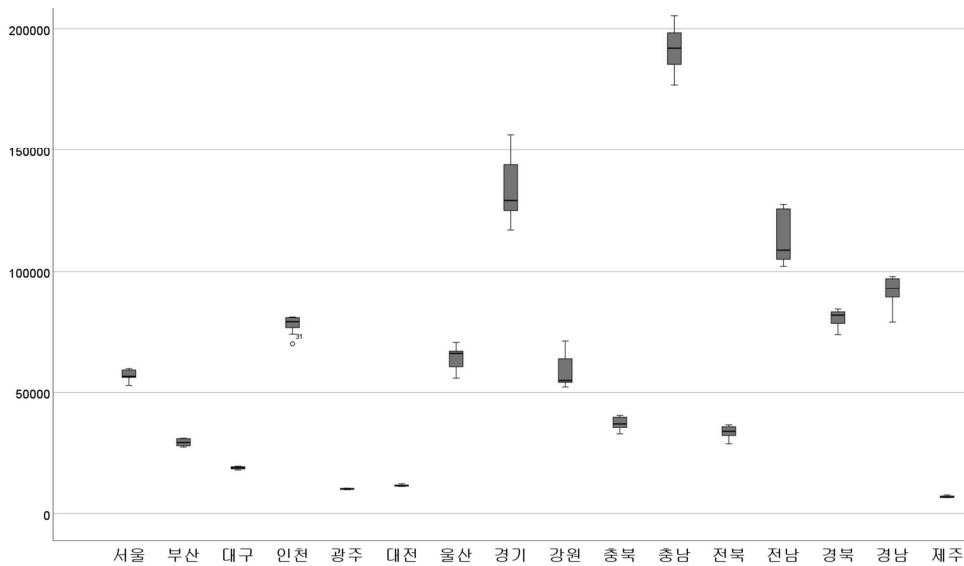
광역지방자치단체는 2024년 현재 17개이다. 그렇지만 본 논문에서 분석 대상으로 설정한 지역은 16개이다. 왜냐하면 2012년에 추가된 세종특별자치시는 역사가 짧을 뿐만 아니라 인구가 38만 명에 불과해서, 행정적 의미를 지닐 수 있겠지만 데이터 분석이라는 측면에서는 무의미하기 때문이다. 특히 지수분해분석처럼 지자체의 평균값을 이용할 때에는, 이런 극단치의 포함으로 인한 통계 분석의 왜곡 문제가 발생할 수 있다. 그럼에도 불구하고 세종시의 자료를 분석에서 배제하는 것은 바람직하지 않기 때문에, 분리 이전과 마찬가지로 통계치는 충남에 포함시키는 방식으로 처리되었다.

다음으로 분석 기간은 2010년부터 2019년까지이다. 이때 최근 데이터가 누락된 이유는 온실가스 배출량 때문이다. 구체적으로는 이산화탄소 인벤토리가 에너지 소비량을 포함하는 다른 통계를 활용해서 산정되기 때문에, 일반 자료에 비해 공표가 늦은 편이다. 참고로 2024년 현재 공표된 최근의 온실가스 자료는 2021년 배출량이다. 그렇지만 2020년부터 2022년까지는 코로나 팬데믹으로 인해 경제성장이 침체되었던 예외적 시기였기 때문에, 본 논문에서는 직전인 2019년까지의 자료만을 대상으로 분석이 진행되었다.

한편으로 선행연구들은 기후변화 협약의 기준 연도가 1990년이기 때문에, 이후의 20년 가까운 시계열 데이터를 활용해서 분석했던 경우가 많이 있다(진상현·황인창, 2009a, 2009b; 진상현·정경화, 2013; 김소연·류수열, 2021). 그렇지만 이들의 연구는 정부의 공식적인 온실가스 배출량이 아니라, 연구자 개인 혹은 기관 차원에서 산정한 수치를 사용했던 한계를 지니고 있다.<sup>18)</sup> 이러한 문제

를 해결하기 위해, 국가 배출량의 산정을 담당했던 환경부 산하의 온실가스종합정보센터는 2020년부터 지자체를 대상으로 온실가스 배출량을 시범적으로 발표해 오고 있다.<sup>19)</sup> 이에 본 논문에서는 선행연구와 달리 정부의 공식 자료를 이용해서 2010년부터 2019년 사이의 자료만을 분석에 활용하고자 한다.

이러한 지역의 온실가스 배출 관련 영향 요인을 파악하기 위해 활용될 자료는 인구와 지역내 총생산이라는 두 가지 데이터이다. 이때 ‘인구’에는 주민등록상의 내국인뿐만 아니라 등록 외국인도 포함되었다. 왜냐하면 정치적 투표권과 무관하게 외국인도 지역주민으로서의 권리를 지닐 뿐만 아니라, 지역의 경제성장 및 온실가스 배출에도 기여하는 주체이기 때문이다. 다음으로 ‘지역내 총생산’은 물가 상승률로 인한 가치의 변화를 고려해야 하기 때문에, 분석 기간 전체의 데이터를 2015년 기준 불변가격으로 환산해서 활용했다. 다음의 <그림 1>은 본 논문의 종속변수인 지역별 온실가스 배출량의 분포를 상자 그림 형태로 보여주고 있다.



<그림 5> 지역별 온실가스 배출량의 분포 (Gg CO<sub>2</sub>eq., 2010~2019년)

18) 실제로 최근 연구에서 조차 연구자 개인 차원의 온실가스 배출량 산정이라는 한계로 인해 산업공정, 토지이용 변화, 이산화탄소 흡수가 고려되지 않은 채, 에너지 부문에 국한해서 분석이 이루어졌을 정도이다(김소연·류수열, 2021).

19) 그렇지만 아직까지도 정부의 시범사업으로 인해 방법론 및 계산식이 확정되지 않은 상태일 뿐만 아니라 교통 및 폐기물 부문의 기준이 다르기 때문에, 과거의 공표 자료와 2023년에 공개된 데이터의 수치가 일치하지 않는 실정이다. 게다가 2020년에 산정된 자료는 1990년부터 2018년까지의 배출량이었지만, 최근 데이터는 2010년부터 2021년에 국한된 자료라는 측면에서 시간적 차이도 지니고 있다(온실가스종합정보센터 홈페이지 [www.gir.go.kr](http://www.gir.go.kr) 참조).

## 2. 지수분해분석 결과

본 논문에서는 광역지방자치단체의 온실가스 배출 요인을 밝혀내기 위해 패널회귀분석과 지수분해분석이라는 두 가지 계량적 기법을 채택하고 있다. 특히 본 논문은 이들 방법론의 분석기법 관련 차이점 파악이라는 학술적 목적도 지니고 있기 때문에, 잔차가 발생하지 않는 지수분해분석의 결과를 먼저 살펴본 뒤, 패널회귀분석의 오차와 비교하는 순서로 설명하고자 한다. 다만 패널회귀분석이 16개 광역지자체의 시계열 자료를 이용해서, 온실가스 배출량과 인구·소득·집약도의 인과관계를 분석하는 것과 달리, 지수분해분석은 개별 지역의 시계열 데이터만으로도 온실가스 배출에 미친 영향 요인의 파악이 가능하다는 점에서 차이가 있다. 그럼에도 불구하고 본 논문은 광역 지자체의 개별적인 성향을 보여주기 보다는 전체 지역의 일반적인 특성을 보여주려는 목적을 지니고 있기 때문에, 16개 시·도의 평균값을 이용해서 지수분해분석을 시도했다. 결과적으로 광역지자체의 2019년 평균 인구는 342만 명이고, 지역내 총생산액은 115조 원이며, 온실가스 배출량은 6536만 톤이었다.

구체적으로 온실가스 배출량은 2010년 5987만 톤에서, 2013년 6433만 톤까지 증가했다가 2년간 하락한 뒤, 다시 반등해 2018년 6778만 톤으로 최고치를 기록했던, 전반적 증가 추세 및 미시적 등락의 경향을 보여주었다. 반면에 인구는 2010년 334만 명부터 2019년까지 꾸준히 늘어났다. 마찬가지로 지역내 총생산도 2010년 89조에서 출발해, 이명박·박근혜·문재인 정부를 거치며 2019년까지 지속적으로 증가할 수 있었다. 이들 입력 변수를 ‘인구 효과’뿐만 아니라, 1인당 지역내 총생산이라는 ‘소득 효과’와 지역내 총생산 대비 온실가스 배출이라는 ‘집약도 효과’로 구분해서 분석한 결과는 <그림 2>와 같다.

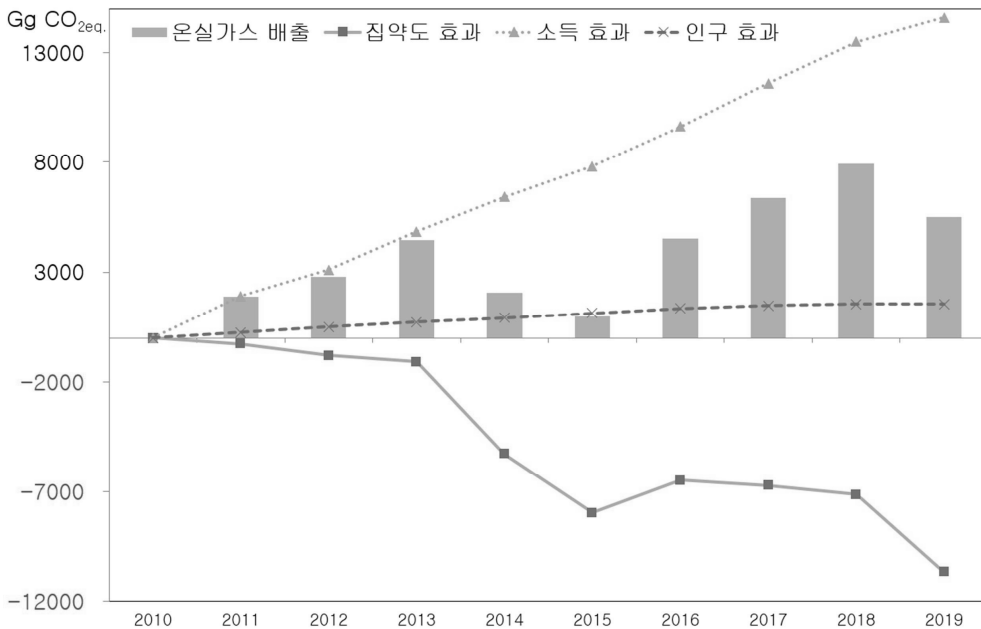
먼저 광역지자체의 온실가스 배출량 증가에 기여했던 요인은 인구와 소득이라는 두 가지였다. 즉, 인구는 분석 기간 동안 꾸준히 늘어나면서, 지역의 온실가스 배출을 늘리는 원인으로 작동했다. 한편으로는 지역의 경제활동이 가속화되면서, 그로 인한 온실가스 배출이 지수적으로 증가하는 모습을 확인할 수 있었다. 그렇지만 현실에서 지자체의 온실가스 배출량은 그렇게 급격히 늘어나지는 않았다. 왜냐하면 지역의 온실가스 배출을 억제하는 요인으로 집약도가 효과를 발휘했기 때문이다.

다만 <그림 2>에서 확인되듯이, 인구 및 소득 효과가 일방적인 증가 추세로 지역의 온실가스 배출을 견인했던 것과 달리, 집약도 효과는 지속적인 감축 추세에도 불구하고 몇 차례 등락의 변화를 보이고 있다. 먼저 2010년부터 2013년까지는 별다른 감축 효과가 없었지만, 2014년과 2015년에 상당한 저감 효과를 보인 것으로 나타났다. 이는 2011년 국가적인 차원의 대규모 정전 사태로 인해, 전력 부족 문제를 해결하기 위한 천연가스 복합화력발전소가 건설 3년 만에 완공되면서 석탄 발전의 비중이 줄어들었기 때문이다. 한편으로는 이명박 정부에서 「저탄소 녹색성장」으로 국정 기조의 전환을 제시하며 2012년에 도입했던 ‘온실가스 목표관리제’ 및 2015년부터 실시되었던 ‘탄소 배출권 거래제’ 같은 정책들이 효과를 발휘했을 수도 있다.<sup>20)</sup>

20) “2015년 국가 온실가스 배출량, 전년 대비 0.2% 증가에 그쳐”, 국무조정실 보도자료, 2017.12.19.

이후의 2016년부터 2018년까지는 온실가스 배출량이 반등하면서 감축 효과가 약화되고 말았다. 이는 국제적인 저유가 상황으로 인한 화석연료의 비중 확대뿐만 아니라, 겨울철의 추위로 인한 난방 연료의 소비 증가와도 관련이 있다.<sup>21)</sup> 한편으로는 국내 최대의 온실가스 배출 부문인 철강 업체의 연료탄 사용 확대도 원인 가운데 하나로 여겨진다.<sup>22)</sup> 이후 2019년으로 접어들면서, 문재인 정부의 석탄발전소 폐쇄라는 에너지 전환 정책이 성과를 거둔 덕분에, 집약도 효과의 강화를 통해 온실가스 배출을 다시금 억제할 수 있었다.<sup>23)</sup>

이러한 지수분해분석의 결과를 정리하면 다음과 같다. 먼저, 지자체의 온실가스 배출을 늘리는 요인은 인구와 소득이라는 두 가지였다. 그렇지만 인구 효과는 상대적으로 크지 않았으며, 1인당 지역내 총생산이라는 소득 효과에 의한 온실가스 배출 증가가 컸던 것으로 확인되었다. 반면에 광역지방자치단체에서 온실가스 배출을 억제할 수 있는 요인은 집약도 효과 하나뿐이라는 한계를 지니고 있었다. 게다가 분석 기간에도 집약도 효과는 감축을 가속하거나 저감 속도를 둔화시키는 변동성을 지닌 것으로 확인되었다. 그로 인해 지자체의 온실가스 배출량도 등락을 보이고 있었다.



〈그림 6〉 광역지자체 온실가스 배출 요인의 지수분해분석 결과

### 3. 패널회귀분석 결과

다음으로는 광역지자체의 패널데이터를 이용해 고정효과 및 확률효과 모형에 대한 회귀분석이

21) “2016년 온실가스 배출량 6억 9,410만 톤, 전년 대비 0.2% 증가”, 환경부 보도자료, 2018.9.19.

22) “2017년 온실가스 배출량 7억 9백만 톤, 전년 대비 2.4% 증가”, 환경부 보도자료, 2019.10.7.

23) “2019년 온실가스 배출량 전년 대비 3.5% 감소, 7억 137만 톤”, 환경부 보도자료, 2021.12.29.

진행되었다.<sup>24)</sup> 분석 결과에 따르면, 고정효과모형과 확률효과모형은 모두 통상적인 최소자승법에 기반한 OLS분석이 아니라 패널회귀분석이 타당한 것으로 나타났다.<sup>25)</sup> 다음으로는 이들 두 가지 모형의 오차 가정에 대한 적합성을 판단하기 위해 하우스만(Hausman) 검정이 시도되었다. 결과적으로는 카이제곱이 65.18로 p값이 기준치보다 작았기 때문에, 귀무가설인 확률효과모형을 기각하고 고정효과모형을 채택할 수 있었다. 이는 광역지방자치단체들이 무작위적인 확률 분포를 따르기보다는, 지역 고유의 특성을 지니는 것으로 해석이 가능했다.

그렇다면 이제는 16개 광역 자치단체에 개별적으로 '더미(dummy) 변수'를 부여하는 고정효과모형을 대상으로 시간 변수에 대해 검토할 필요가 있다. 즉, 지자체가 고유의 특성을 지니고 있어서 각각의 지역에 대해 더미 변수가 부여되었던 것과 마찬가지로, 분석 기간인 2010년 이후 10년 동안의 시계열 변수에 대해서도 시간 더미가 설정되어야 하는지에 대한 통계적 판단이 이루어져야 한다. 구체적으로는 연도별 가변수를 추가해서 고정효과모형에 대한 패널회귀분석을 수행한 뒤, 이들 시간 변수의 유의미성에 대해 검토가 진행되었다. 검정 결과에 따르면, 연도별 시간 변수의 분포가 확률적으로 분포한다는 귀무가설이 채택되었다.<sup>26)</sup> 이에 본 논문에서 패널회귀분석의 최적 모형으로는 시간과 관련해서 확률적 오차가 존재하는 반면에, 집단별로는 고유의 특성이 존재한다는 고정효과모형이 최종적으로 선택될 수 있었다.

이런 과정을 통해서 결정된 패널회귀 모형의 분석 결과는 다음과 같다. 먼저 광역지방자치단체의 온실가스 배출량이라는 종속변수를 설명하기 위한 세 가지 독립변수였던, 인구·소득·집약도의 계수가 모두 양의 값을 지니고 있었다. 따라서 이는 독립변수가 한 단위 증가할 경우에 지역의 온실가스 배출량이 늘어난다는, 예측가능했던 분석 결과라고 판단된다. 또한 이들 세 변수의 p값도 기준치 이하로 모두 유의미했다.<sup>27)</sup> 구체적으로는 인구 1명이 증가할 때, 해당 지역의 온실가스가 1년에 20톤 추가 배출되는 것으로 나타났다. 마찬가지로 1인당 소득이 100만 원 늘어날 경우에는 1.4톤, 지역내 총생산 대비 이산화탄소로 정의되는 집약도가 높아지는 상황에서는 온실가스 배출량이 59킬로그램 늘어나고 있었다.<sup>28)</sup>

따라서 2010년 이후의 시계열·횡단면 자료를 이용한 패널회귀분석의 결과에 따르면, 광역지자

24) 패널회귀분석을 위해 본 논문에서는 Stata 18.0 통계 패키지 프로그램이 활용되었다.

25) 고정효과모형은 F값(15, 141)이 657이었으며, 확률효과모형은 카이제곱(3)이 561이었다

26) 이때 F값(9, 132)이 0.97이었으며, 여기에 해당하는 p값은 0.46이었다.

27) 선행연구에서도 광역지자체의 온실가스 배출 특성에 대해 패널회귀분석을 수행한 결과, 인구·소득·집약도의 계수가 모두 양의 값을 지닌 것으로 나타났다. 다만 이 연구는 패널분석의 설명력을 확인하거나, 지수분해분석과의 비교가 없었다는 측면에서 본 논문과는 차이가 있다(김소연·류수열, 2021).

28) 정부는 한국의 1인당 온실가스 배출량이 12.7톤이고, 국내 총생산 10억 원당 온실가스 배출량이 357톤이라고 발표한 바 있다. 따라서 본 논문의 패널회귀분석 결과와는 수치상으로 차이가 있다. 그렇지만 이들 공식 통계는 단순 평균값인 반면에, 본 논문에서 분석 결과의 계수값은 다른 요인을 통제한 상태에서 인구 혹은 소득의 변화가 온실가스 배출에 미쳤던 영향이기 때문에, 이러한 차이가 존재할 수밖에 없다. 다만 정부 측 공식 발표 자료와의 비교를 통해서, 이번 패널회귀분석의 계수값들이 어느 정도 타당할 뿐만 아니라 분석 결과의 방향이 올바른 것으로 판단할 수 있다("2020년 온실가스 배출량 전년 대비 6.4% 감소, 6억 5,622만 톤", 환경부 보도자료, 2022.10.25).

체에서 인구가 늘어나거나 경제적 소득이 증가할 경우에는 온실가스 배출이 함께 늘어나며, 탄소 집약적인 산업 및 소비 구조로 전환될 때에도 지역의 온실가스 배출량이 늘어나는 것으로 판단되었다. 다만 이들 세 변수의 상대적 영향력을 확인하기 위해서는 표준 점수로 변환해서 패널회귀분석을 시행할 필요가 있다. 이러한 추가 분석의 결과에 따르면, 인구·소득·집약도의 표준화 계수가 각각 1.43, 0.28, 0.57이었다. 그렇다면 온실가스 배출은 인구 증가에 의한 영향이 가장 컸으며, 다음으로는 집약도와 소득의 순인 것으로 확인되었다.<sup>29)</sup>

한편으로 본 논문은 지자체의 온실가스 배출 관련 영향 요인 탐색뿐만 아니라 지수분해분석과의 결과 비교라는 목적도 함께 지니고 있다. 이때 LMDI 분해분석은 이론적으로 잔차가 남지 않는 상태에서 지역의 온실가스 배출량을 인구·소득·집약도라는 세 가지 지수의 변화로 완벽하게 설명할 수 있다는 장점이 있다. 반면에 패널회귀분석의 결정계수는 지수분해분석과 상이한 결과를 보여주고 있다. 먼저 이들 세 개의 독립변수에 의해 해석이 가능했던 '집단내 설명력'은 82%로 상당히 높았던 반면에, 지자체 사이의 분포에 대한 '집단간 설명력'은 51%로 비교적 낮은 수준이었다. 결과적으로 '전반적인 설명력'로 동일하게 51%로 높지 않은 편이었다. 정리하자면, 광역지방자치단체의 온실가스 배출량은 인구·소득·집약도라는 3개의 변수에 의해 전체 변화의 절반 정도만이 설명될 뿐이지, 나머지 49%는 다른 변수에 의해 추가적으로 설명되어야 할 것으로 판단된다.

〈표 1〉 광역지자체 온실가스 배출의 영향 요인에 대한 패널회귀분석 결과

변수	단위	계수	표준오차	t값	p값
인구 (population)	명	0.02	0.001	15.27	0.000
소득 (1인당 GRDP)	백 만원 / 명	0.00146	0.097	14.96	0.000
집약도 (탄소/GRDP)	Gg CO <sub>2</sub> eq./ 백 만원	0.000059	3.010	19.61	0.000
상수항		-99943.54	6415.149	-15.58	0.000

## V. 결론 및 함의

본 논문은 2010년 이후의 시계열·횡단면 자료를 이용해 광역지자체의 온실가스 배출 관련 영향 요인을 파악하기 위한 의도로 기획되었다. 먼저 패널회귀분석 결과에 따르면, 지역의 이산화탄소

29) 이는 지수분해분석에서 인구 증가로 인한 온실가스 배출 증가의 영향력이 작았던 것과 상반되는 결과이다. 이러한 차이는 지수분해분석이 기준년 대비 특정 연도의 온실가스 배출량의 변화를 인구의 증감으로 해석하는 것과 달리, 패널분석에서는 전체 기간의 점진적 인구 증가가 과거 10년 동안의 지속적인 온실가스 배출량 증가에 미쳤던 영향으로 해석되었기 때문일 수 있다. 마찬가지로 패널회귀분석에서는 집약도의 계수가 양의 값을 지녔지만, LMDI 분해분석에서는 집약도의 하락으로 인한 온실가스 배출의 감축 효과를 밝혀냈다는 측면에서도, 이들 두 분석기법은 결과 해석에서 상이한 특성을 보일 수밖에 없다. 다만 이처럼 흥미로운 차이점에 대해서는, 이들 두 가지 분석기법의 방법론적 차별성뿐만 아니라 결과 및 해석의 차이에 대한 이론적 연구가 향후에 후속으로 진행되어야 할 것이다.



배출량은 인구·소득·집약도와 양의 관계를 지니고 있었으며, 그중에서는 인구 증가의 영향이 가장 큰 것으로 확인되었다. 반면에 지수분해분석의 결과를 보면, 마찬가지로 지자체의 온실가스 배출이 인구 및 소득과 관련되기는 했지만, 집약도의 경우에는 유일하게 효율 개선을 통해 지역의 이산화탄소 감축에 기여한 것으로 나타났다. 이처럼 본 논문은 이들 두 가지 방법론의 특징과 차이점을 비교하려는 학술적인 목적 또한 지니고 있다. 따라서 이들 분석 결과의 장단점에 대해 각각 살펴보면 다음과 같다.

먼저 지수분해분석은 집약도의 감축 효과에서 확인되듯이, 특정 지수의 변화로 인한 온실가스 배출량의 저감 효과까지 보여준다는 장점을 지니고 있다. 또한 패널분석이 전체 기간의 평균적인 인과관계만을 해석하는 반면에, LMDI 분해분석은 연차별 배출량의 미세한 변화까지 설명할 수 있다는 강점도 가지고 있었다. 그렇지만 이번 지수분해분석은 16개 광역지자체의 평균값을 이용했기 때문에, 사실상 국가 전체에 대한 분석결과와 큰 차이가 없다는 한계도 내포되어져 있었다. 한편으로 잔차의 부재는 지수분해분석이라는 방법론이 지니는 본질적 한계일 수 있다.

반면에 패널회귀분석은 지수분해분석이 보여주지 못했던 잔차를 세 가지 차원에서 보여준다는 측면에서 장점을 지니고 있다. 특히 분석모형의 지역간 및 지역내 설명력의 차이를 구분해서 제시할 뿐만 아니라, 세 개의 독립변수로 구성된 패널회귀분석의 전반적인 잔차까지도 명시할 수 있었다. 구체적으로는 패널데이터에 기반한 회귀분석의 결과에 따르면, 인구·소득·집약도의 설명력이 49%에 불과하기 때문에, 나머지 절반 정도의 잔차는 다른 요인에 의해 발생한다는 판단이 가능했다.

이처럼 본 논문은 지자체의 온실가스 배출 요인을 분석하기 위한 방법론으로서 패널회귀분석과 지수분해분석을 모두 적용해 보았으며, 분석 결과를 바탕으로 방법론에 대한 비교까지도 진행할 수 있었다. 다만 이들 두 가지 방법론은 사실상 다른 목적을 가질 뿐만 아니라 다른 특성을 분석하기 위한 분석기법이라는 측면에서 근본적 차이를 지니고 있다. 먼저 패널회귀분석은 지자체의 시계열 및 횡단면 자료를 이용한 변수들 사이의 인과관계 파악에 분석기법의 목적이 있다. 즉, 패널회귀분석은 궁극적으로 “변수들의 관계”에 초점을 두고 있다. 반면에 지수분해분석은 단일 지역의 시계열 자료만으로 온실가스 배출 요인을 분석할 수 있다는 측면에서 연구 목적이 다를 수밖에 없다. 즉, 지수분해분석은 “특정 지역”에 관심을 가지고 종속변수의 변화를 복합적인 지수의 변화로 설명한다는 측면에서 차이가 있다.

결론적으로 기후위기의 심화 및 정부의 탄소중립 선언으로 인해 지자체의 온실가스 감축이 중요해지는 지금의 상황에서는 특정 대상에 초점을 맞추는 지수분해분석이 개별 지역의 특성을 분석하는 유용한 방법론으로 활용될 수 있을 것이다. 다만 본 논문에서는 지자체별 시계열 분석 결과의 제시가 현실적 제약으로 인해 불가능했기 때문에, 이와 관련된 추가 분석은 후속 연구를 통해 보완될 필요가 있다. 반면에 패널회귀분석은 LMDI 분해분석이 항등식이라는 태생적 한계를 지니는 것과 달리, 다양한 독립변수들을 추가할 수 있다는 측면에서 장점을 지닌다. 예를 들면, 지역의 온실가스 온실가스 배출량은 인구·소득·집약도뿐만 아니라 대중교통 분담률, 친환경 소비패턴, 공원녹지 보급률 등의 변수를 추가함으로써 보다 풍부한 특성 분석이 가능할 수 있다. 따라서 다양한 독립변수를 포함시킨 패널회귀분석을 통해 지자체들 사이의 공통적이고 일반적인 설명 요

인을 찾아낸 뒤, 지수분해분석을 통해 개별 지역의 온실가스 배출 특성 및 추세를 확인하는 방식으로 분석기법 상호 간의 보완이 가능할 것이다. 다만 서론에서 언급했듯이 2024년부터 기초지자체의 탄소중립 기본계획 수립이 중요해지는 상황임에도 불구하고, 본 논문은 시·군·구 데이터의 부재로 인해 광역지자체를 대상으로 분석을 진행했던 한계를 지니고 있다. 따라서 향후에는 정부 차원의 온실가스 배출량 및 통계 자료의 구축·보완을 통해, 과학적 특성 분석 및 예측에 기반한 기초 지방자치단체의 탄소중립 계획이 수립되어야 할 것이다.

## 참고문헌

- 고재경. (2011). 「기후변화 완화와 적응 정책 통합방안 연구」, 경기연구원.
- 고재경·김성욱·주정현. (2015). 기초지자체 에너지 소비 변화 요인 및 특성 분석: 경기도 지역을 중심으로, 「지방행정연구」, 29(2): 127-152.
- 고재경·진상현. (2021). 경기도 지역에너지계획의 도민 참여 과정: 민주주의의 학습 효과를 중심으로, 「NGO연구」, 16(2): 107-142.
- 김문정·허은녕. (2020). LMDI 방법론을 이용한 국내 배출권거래제 참여기업의 배출량 변화 요인 분해분석, 「한국혁신학회지」, 15(2): 349-367.
- 김민창·김예찬. (2019). 중앙정부 이전 재원이 시·군 기초자치단체 지역경제 성장에 미치는 영향: 도구 변수를 활용한 패널회귀분석, 「지방정부연구」, 23(3): 53-77.
- 김성배. (2011). 패널회귀분석을 이용한 지방분권과 지역 격차의 관련성 분석, 「지역연구」, 27(4): 41-64.
- 김소연·류수열. (2021) 우리나라 이산화탄소 배출량 결정요인 분석: 횡단면 의존성과 계수 이질성을 고려하여, 「한국경제지리학회지」, 24(4): 400-410.
- 김운수. (2001). 「기후변화협약 이행에 따른 서울시 대응 방안 연구」, 서울시정개발연구원.
- 남광현. (2010). 「대구광역시 기후변화대응 기본계획 및 연차별 시행계획 수립」, 대구경북연구원.
- 대구광역시. (2020). 「2030 대구광역시 기후변화대응 종합계획」.
- 대한민국정부. (2023). 「윤석열 정부, 자유민주주의와 시장경제 복원의 1년: 국정과제 30대 핵심 성과」.
- 류수열·최기홍·고승환·윤성민. (2014). 산업구조의 다양성이 실업과 고용불안정에 미치는 영향: 패널회귀모형을 이용한 지역경제 분석, 「한국경제지리학회지」, 17(1): 129-146.
- 문혜정·이기훈. (2018). LMDI 방법론을 이용한 농사용 전력 요금 할인 정책의 문제점 분석, 「에너지공학」, 27(3): 10-20.
- 문혜정·이기훈. (2019). 다계층 LMDI 분해법을 이용한 지역에너지 소비 변화의 영향 분석, 「경영경제연구」, 41(2): 221-243.
- 박추환. (2008). 지역별 연구개발(R&D) 재정투자가 총생산에 미치는 영향: 패널회귀와 포지셔닝 분석을 중심으로, 「지역사회연구」, 16(3): 153-173.

- 배정환·김진오·조상민. (2026). 「지역균형발전을 위한 지역에너지사업 추진전략 및 경제적 파급 효과 분석: 바이오 및 폐기물 에너지를 중심으로」, 에너지경제연구원.
- 산업통상자원부. (2019). 「2019년 지역에너지계획 수립 가이드라인」.
- 설홍수. (2015). 「제2차 대구광역시 녹색성장 5개년 계획」, 대구경북연구원.
- 송영일. (2019). 기후변화 적응 정책의 방향과 개선 과제, 「보건복지포럼」, 269: 32-42.
- 오용석·진상현. (2016). 시민참여 기법을 도입한 대구광역시 지역에너지계획의 수립 과정 분석, 「환경사회학연구」, 20(2): 237-283.
- 이종성·오정익·유정현·안한근. (2010). 「공동주택 단지내 신재생에너지 적용을 위한 성능평가 및 도입방안 연구」, 한국토지주택공사 토지주택연구원.
- 임재규·김종익. (2014). 국내 산업 부문의 전력·에너지 소비효율 비교·분석: LMDI 요인분해 방법론 활용, 「에너지경제연구」, 13(1): 121-143.
- 전승훈·강성호·임병인. (2004). 선형패널자료 분석방법에 관한 비교 연구, 「통계연구」, 9(2): 1-24.
- 조성규. (2022). 지방시대위원회의 지방자치법제상 기능과 과제, 「공법연구」, 51(2): 25-52.
- 조일형·권기현. (2011). 서울시 성범죄 예방 정책의 효과분석: 이분산성을 고려한 패널데이터 회귀모형을 중심으로, 「지방행정연구」, 25(2): 439-468.
- 조항문·이윤혜. (2017). 「서울특별시 기후변화대응 종합계획 수립연구」, 서울연구원.
- 진상현. (2018). 에너지 자치·분권의 개념 및 방향: 공공기관을 중심으로, 「지방정부연구」, 22(3): 31-58.
- 진상현. (2022). 한국의 기후변화정책 관련 의제설정 유형 및 과정, 「NGO연구」, 17(3): 41-83.
- 진상현·김운수. (2010). 「지자체 전력부문 온실가스 배출에 관한 기초연구」, 서울시정개발연구원.
- 진상현·오수미. (2020). 지역에너지계획의 시민참여과정 분석: 대구 시민원탁회의를 중심으로, 「융합사회와 공공정책」, 14(3): 34-69.
- 진상현·정경화. (2013). 지역별 온실가스 배출 특성에 관한 연구: 지수분해분석을 중심으로, 「한국정책과학학회보」, 17(2): 1-26.
- 진상현·황인창. (2009a). 지수분해분석을 이용한 지자체의 에너지 소비 특성에 관한 연구, 「자원·환경경제연구」, 18(4): 557-586.
- 진상현·황인창. (2009b). 지자체의 온실가스 배출 특성에 관한 지수분해분석, 「환경정책」, 17(3): 101-128.
- 진용주·오인하·이철규·서철. (2021). LMDI 요인분해 분석을 이용한 신용보증 성장의 변화 요인 연구, 「중소기업금융연구」, 41(3): 1-40.
- 진태영·김도원. (2021). 생산이론 기반 분해 및 로그평균 디비지아 지수를 이용한 국내 탄소 원단위 변화 요인 분석, 「에너지경제연구」, 20(1): 105-138.
- 최충익. (2014). 도시화와 재해피해 그리고 경제성장에 관한 지수분해분석, 「국토계획」, 49(3): 195-209.
- 한준. (2015). LMDI 요인 분해분석을 이용한 우리나라 제조업 전력화 현상에 관한 연구, 「에너지공학」, 24(1): 137-148.
- 한준. (2020). 국내 생활폐기물 분야 플라스틱 비재활용 처리량 요인분해 연구, 「환경정책」, 28(2):

79-100.

- 한준. (2023). LMDI를 활용한 인천시 전기 소비 요인분해분석, 『환경정책』, 31(1): 75-95.
- 한준·정연미. (2020). LMDI를 활용한 서울시 전력 소비량 특성 연구, 『환경정책』, 28(2): 131-151.
- Ang, B.W. (2004). Decomposition analysis for policymaking in energy: which is the preferred method?, *Energy Policy*, 32: 1131-1139.
- Ang, B.W. (2005). The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide, *Energy Policy*, 33: 867-871.
- Ang, B.W. (2015). LMDI decomposition approach: A guide for implementation, *Energy Policy*, 86: 233-238.
- Ang, B.W., & F.Q. Zhang. (2000). A survey of index decomposition analysis in energy and environmental studies, *Energy*, 25: 1149-1176.
- Ang, B.W., & Na Liu. (2007). Energy decomposition analysis: IEA model versus other methods, *Energy Policy*, 35: 1426-1432.
- Ang, B.W., & Tian Goh. (2019). Index decomposition analysis for comparing emission scenarios: Applications and challenges, *Energy Economics*, 83: 74-87.
- Ashley, Richard A., & Xiaojin Sun. (2016). Subset-Continuous-Updating GMM Estimators for Dynamic Panel Data Models, *Econometrics*, 4(47): 1-13.
- Balestra, Pietro & Marc Nerlove. (1966). Pooling Cross Section and Time Series Data in the Estimation of a Dynamic Model: The Demand for Natural Gas, *Econometrica*, 34(3): 585-612.
- Boer, Paul de, & João F. D. Rodrigues. (2020). Decomposition analysis: when to use which method?, *Economic Systems Research*, 32(1): 1-28.
- Bonhomme, Stéphane, & Laurent Davezies. (2019). Panel Data, Old and New, *Annals of Economics and Statistics*, 134: 1-4.
- Eom, Tae Ho, Sock Hwan Lee, & Hua Xu. (2008). Introduction to Panel Data Analysis: Concepts and Practices, edited by Gerald J. Miller & Kaifeng Yang, *Handbook of Research Methods in Public Administration*, 2<sup>nd</sup> edition, CRC Press.
- Hsiao, Cheng. (2007). Panel data analysis: advantages and challenges, *Test*, 16: 1-22.
- Hwang, In Chang. (2016). A Stochastic Kaya Model and Its Implications for Climate Policy, *Journal of Environmental Policy and Administration*, 24(1): 1-25.
- Jeong, Kyonghwa, & Suyi Kim. (2013). LMDI decomposition analysis of greenhouse gas emissions in the Korean manufacturing sector, *Energy Policy*, 62: 1245-1253.
- Kim, Suyi. (2017). LMDI Decomposition Analysis of Energy Consumption in the Korean Manufacturing Sector, *Sustainability*, 9(202): 1-17.
- Mavromatidis, Georgios, Kristina Orehounig, Peter Richner, & Jan Carmeliet. (2016). A strategy for reducing CO<sub>2</sub> emissions from buildings with the Kaya identity: A Swiss energy system analysis and a case study, *Energy Policy*, 88: 343-354.

- Muller, Adrian. (2006). Putting decomposition of energy use and pollution on a firm footing: clarifications on the residual, zero and negative values and strategies to assess the performance of decomposition methods, *Working Papers in Economics 215*, University of Gothenburg, Department of Economics, 1-25.
- Mussini, Mauro. (2020). An index decomposition analysis of tourism demand change, *Annals of Tourism Research*, 85(102902): 1-5.
- Nerlove, Marc. (2002). *Essays in Panel Data Econometrics*, Cambridge University Press.
- Park, Hun Myoung. (2011) Practical Guides to Panel Data Modeling: A Step by Step Analysis Using Stata, *Tutorial Working Paper*, International University of Japan.
- Roux, Nicolas, & Barbara Plank. (2022). The misinterpretation of structure effects of the LMDI and an alternative index decomposition, *Methods X*, 9(101698): 1-12.
- Sarafidis, Vasilis, & Tom Wansbeek. (2021). Celebrating 40 years of panel data analysis: Past, present and future, *Journal of Econometrics*, 220: 215-226.
- Vijayamohanan, Pillai N. (2016). Panel Data Analysis with Stata Part 1: Fixed Effects and Random Effects Models, *MPRA Paper*, 76869: 1-56.
- Wang, Hui, & Yafei Yang. (2023). Decomposition analysis applied to energy and emissions: A literature review, *Frontiers of Engineering Management*, 10(4): 625-639.
- Xiang, Xiwang, Xin Ma, Zhili Ma, Minda Ma, & Weiguang Cai. (2022). Python-LMDI: A Tool for Index Decomposition Analysis of Building Carbon Emissions, *Buildings*, 12(83): 1-13.
- Xu, Wen. (2016). Estimation of Dynamic Panel Data Models with Stochastic Volatility Using Particle Filters, *Econometrics*, 4(39): 1-13.
- Xu, X.Y., & B.W. Ang. (2013). Index decomposition analysis applied to CO<sub>2</sub> emission studies, *Ecological Economics*, 93: 313-329.

진상현(陳尙炫): 경북대학교 행정학부에 재직 중이며, 공공문제연구소·지역개발연구소의 겸임연구원이다. 주요 관심 분야는 에너지·기후변화정책이며, “에너지 자치·분권의 개념 및 방향”, “경기도 지역에너지 계획의 도민 참여 과정”, “정책결정과정의 절차적 합리성 분석: 서울에너지공사를 중심으로”, “시민참여 기법을 도입한 대구광역시 지역에너지계획의 수립과정 분석”, “Home appliances’ rebound effects estimated by a modified nonlinear model”, “The effectiveness of energy efficiency improvement in a developing country”, “Dilemma of energy efficiency improvement: market failure, government failure and rebound Effect” 등의 논문과 저서를 발표한 바 있다(upperhm@knu.ac.kr).

### Abstract

## Panel Data Regression and Index Decomposition Analysis of Greenhouse Gas Emission in Regional Local Governments

Sang-hyeon Jin

The year of 2024 has an important meaning because the current administration declared the era of localization and enacted the “Special Act on Decentralization and Balanced Regional Development.” In addition, it is another critical year for the reason that the local governments should establish their master plans on climate change as the “Framework Act on Low Carbon, Green Growth” took effect in 2021. Therefore, this study attempts to analyze the characteristics of greenhouse gas emissions in local governments. Specifically, it adopts Panel Data Regression and Index Decomposition Analysis to identify the effects of population, income, and intensity on the emission of carbon dioxide. As a result of the panel data regression, these three independent variables have a positive relationship with the dependent variable, and population has the largest effect. In contrast, the index decomposition analysis shows that intensity has actually decreased the total amount of greenhouse gases since 2010. However, the panel data regression suggests that only half of the total distribution could be explained by these three independent variables. Therefore, other variables should be added to explain the residuals of emission increase. In conclusion, individual local governments can utilize index decomposition analyses to investigate their emission patterns, while they need to execute panel data regression to identify other policy measures’ effectiveness like public transportation, environment-friendly consumption behaviors, and ratios of green spaces.

Keywords: panel data, index theory, carbon neutrality, climate change, Logarithmic Mean Divisia Index