

Research Paper

도시화가 1인당 탄소 배출에 미치는 영향

황민섭 · 이응균

고려대학교

The impact of urbanization on per capita CO₂ emissions

Minsup Hwang · Eungkyoon Lee

Korea University

요약 : 본 연구는 도시화가 1인당 탄소 배출에 미치는 영향을 도시화와 소득 수준 간의 교호 작용을 중심으로 분석하였다. 이를 위해 84개 국가에 대한 패널 자료를 고정효과 모형을 통해 회귀분석하고 동시에 Pooled LS 모형 및 패널 GLS 모형과도 비교하였다. 그 결과 1인당 탄소배출과 도시화는 비선형적 관계를 이루는 것으로 나타났다. 즉 저소득 국가에서 도시로의 인구 집중이 1인당 탄소 배출을 증가시키는 반면, 고소득 국가에서는 오히려 반대의 효과가 나타났다. 이러한 본 연구의 결과는 도시의 압축성(compactness)과 에너지 소비 패턴에 대한 논의로 확장할 수 있으며, 이를 통해 지속가능한 도시개발을 위한 연구와 정책 개발의 토대를 제공할 수 있다.

주요어 : 도시화, 탄소 배출, 패널 고정효과 모형

Abstract : This research examines the impacts of urban population growth on per capita CO₂ emissions with particular focus on the interaction effect between urbanization and income levels. Employing the Panel Fixed Effects model together with the Pooled LS and Panel GLS models, the research reported here analyzes the relevant data on 84 countries. The statistical results show a non-linear(an inverted-U) relationship between urbanization and per capita CO₂ emissions; that is, while the urban agglomeration leads to increases in per capita CO₂ emissions for low income countries, this adverse impact does not hold true for high income countries. The research findings can contribute to addressing broad issues of urban compactness and patterns of energy consumption that should be considered by those concerned about the sustainable urban development.

Keywords : urbanization, CO₂ emissions, panel fixed effects model

First Author: Minsup Hwang, BK21 Plus Team, Dept. of Public Administration, Korea University, Seoul 02841, Korea, Tel: +82-2-2149-1126, E-mail: bohemi@korea.ac.kr

Corresponding Author: Eungkyoon Lee, Dept. of Public Administration, Korea University, Seoul 02841, Korea, Tel: +82-2-3290-2287, E-mail: elee@korea.ac.kr

Received: 11 July, 2016. Revised: 13 September, 2016. Accepted: 20 September, 2016.

I. 서론

2015년을 기준으로 전 세계 인구 중 약 40억 명이 도시에 살고 있다. 도시화는 지속적으로 진행되어 2050년에는 이보다 23억 명이 늘어난 63억 명의 인구가 도시에 살 것으로 예측된다(United Nations 2015). 전 세계 도시화율 증가에 가장 큰 기여를 하고 있는 국가는 인도(18%), 중국(13%), 미국(4%) 등으로 2050년까지 전 세계 도시화 증가의 35% 이상을 차지할 것으로 보인다(Centre for Liveable Cities 2014). 동시에 이 국가들은 전 세계 온실가스 배출의 최상위 국가들이기도 하다.

도시화는 자본의 축적에 따른 이익을 창출하기도 하지만, 동시에 과밀에 따른 비경제성(diseconomies)을 보여주기도 한다(Bertinelli & Black 2004). 좀 더 구체적으로, 도시화가 진행됨에 따라 인적 자본이 집적하게 되면 이는 곧 혁신을 가속화시켜 경제개발에 기여하는 결과를 낳는다. 그러나 동시에 이러한 도시로의 인구 집중(agglomeration)이 정부 정책에 의해 제대로 관리되지 못할 경우, 환경오염 등을 심화시켜 삶의 질이 저하되는 문제를 발생시킨다. 특히 도시화로 인한 온실가스 배출 문제는 이의 가장 대표적인 예라고 볼 수 있다(Centre for Liveable Cities 2014).

1997년 교토의정서가 온실가스 감축을 전 세계적인 화두로 제기한 이래, 2000년대에 접어들면서 도시화와 탄소 배출 간의 관계에 대한 연구가 본격적으로 이뤄졌다. 초기에는 주로 인구(population)가 탄소 배출에 미치는 영향을 중심으로 연구가 진행됐다(Dietz & Rosa 1997; Hamilton & Turton 2002; Shi 2003). 이후 이러한 인구 요인과 더불어 도시화를 탄소 배출의 주요한 독립변수로 고려하는 연구가 시도되었다(Cole & Neumayer 2004; Martinez-Zarzoso & Maruotti 2011). 이들 연구에 의하면 도시화와 탄소 배출 간의 관계는 양면적이다. 생산 측면에서 도시로의 인구 집중은 규모의 경제(economies of scale)를 실현하게 되고 이로 인해 에너지 사용의 효율성이 증대되어 탄소 배출이 줄 수 있다. 그러나 다른 한편으로 과도한 인구 집중은 지역 환경의 회복

력에 손상을 입힐 뿐만 아니라 해당 국가의 산업 구조에 따라서 오히려 탄소 배출을 증가시킬 수도 있다.

현대 도시계획이 지향하는 압축적(compact) 형태의 도시에서는 토지를 집약적으로 사용하게 된다. 이에 따라 이동 거리가 줄고, 지역난방이 가능해지는 등 에너지 사용의 효율성이 증대되어 탄소 배출이 줄어들 것으로 기대된다(UN-Habitat 2015; Chen et al., 2008). 그러나 동시에 도시 지역의 경계선이 확장됨에 따라 그 인구와 면적이 지나치게 커지게 되면 이러한 집적의 이익은 감소할 수도 있다. 그러나 도시화 변수로 인구 30만 명 이상의 도시화율¹⁾을 사용하는 기존 연구는 도시화가 탄소 배출에 미치는 긍정적·부정적 효과를 명확하게 드러낼 수 없다는 한계를 가진다. 따라서 본 연구는 도시화에 따른 집적의 경제성이나 도시 확장에 따른 비경제성을 효과적으로 측정하기 위해 인구 100만 명 이상의 거대도시(metropolis)²⁾에 초점을 맞추고자 한다.

이러한 맥락에서 본 연구는 다음의 두 질문에 대한 답을 제시하는 것을 목적으로 삼는다. 첫째, 도시화가 해당 국가의 탄소 배출에 어떠한 영향을 미치는가? 앞서 살펴본 바와 같이 도시화의 결과로 집적에 따른 규모의 경제와 규모의 불경제가 동시에 발생할 수 있고 이에 따라 탄소 배출 역시 달라진다. 따라서 본 연구는 인구 100만 명 이상의 거대도시를 형성하고 있는 전 세계 84개 국가의 패널 데이터를 통해 도시화가 탄소배출에 미치는 영향을 실증적으로 분석한다.

둘째, 도시화와 탄소 배출 간의 관계는 국가의 소득 수준에 따라 어떻게 변화하는가? 본 연구는 도시화가 국가의 소득 수준에 따라 탄소 배출에 다른 영향을 미친다고 가정한다. 소득 수준이 낮은 국가에서는 탄소 배출을 증가시키지만, 일정 소득 수준 이상

1) 대부분의 기존 연구들은 도시화율에 대한 데이터를 World Bank에서 제공하는 인구 30만명 이상의 도시에 사는 인구 비율로 측정하였음.

2) 거대도시는 사전적으로 '인구와 여러 가지 사회적 기능이 고도로 집중화된 현대의 대도시'로 정의되며, 보통 인구가 백만 명을 넘으며, 한 나라의 정치·경제·문화 등을 통합하는 기능을 하는 도시를 의미함(<http://krdic.naver.com/>).

에서는 오히려 탄소 배출을 감소시킨다는 가설을 설정하고 이를 검증하고자 한다.

도시화와 탄소 배출 간의 관계는 우리나라에서도 중요한 문제이다. 우리나라 역시 도시화에 따른 규모의 경제와 규모의 불경제가 동시에 발생하고 있다. 서울이라는 인구 1000만 명 이상의 거대도시는 산업화 과정에서 집적에 따른 규모의 경제를 발생시켰다. 그러나 동시에 주변 지역으로 도시가 점차 팽창됨에 따라 규모의 불경제가 집적을 통한 이익을 초과하는 현상들이 나타나고 있다. 따라서 도시화가 탄소 배출에 미치는 영향을 분석하는 본 연구는 향후 지속가능한 도시개발을 위한 실증적 근거를 제공할 수 있다는 점에서 정책적 의의를 갖는다.

II. 이론적 고찰

1. 환경에 대한 영향 요인 모형

환경에 영향을 미치는 요인을 규명하는 실증 모형은 Commoner와 Ehrlich & Holdren 사이의 오랜 논쟁을 통해 확립되었다. Ehrlich & Holdren(1971)은 인구가 환경에 대한 영향 요인 중 가장 중요한 요인임을 주장한 최초의 연구이다. 이들은 $I = P \cdot F$ 의 모형³⁾을 통해 한 국가의 환경에 대한 영향은 국민 한 사람이 환경에 미치는 영향과 총 국민수를 곱하여 측정할 수 있다고 주장하여 환경에 핵심적 영향을 끼치는 요인이 인구라는 것을 밝혔다. 여기서 F는 국민 한 사람이 국가 환경에 미치는 영향에 관한 함수인데, 이들은 F 함수에서도 인구가 주요 변수로 작용한다고 주장함으로써 인구 요인이 전체 함수에서 비선형적인 영향을 미친다고 봤다.

이에 대해 Commoner는 저서(1971)와 공동 연구(Commoner, Corr & Stamler 1971)를 통해 인구 증가가 환경에 미치는 영향은 미미하며, 미국에서 나타나는 환경변화는 대부분 생산기술의 변화에서 기인한다는 가설을 제시했다. 특히 그는 Ehrlich & Holdren(1971)의 $I = P \cdot F$ 모형에서 F 함수는 인구를 변수로 하는 것이 아니라 소득(Affluence)과 기술(Technology)을 변수로 해야 하며, 전체 모형에서

인구(P)나 소득(A) 요인보다는 기술(T) 요인이 환경에 더 큰 영향을 미친다고 주장하였다. Commoner et al. (1971)의 이러한 비판을 Ehrlich & Holdren (1972)는 후속 연구를 통해 반박하였다. 이들은 $I = PAT$ 모형을 적용하더라도 여전히 인구가 환경에 가장 크게 영향을 미치는 요인이라는 점을 데이터를 통해 검증하였다.

이후의 연구들은 $I = PAT$ 모형을 조금씩 변형시키는 방향으로 진행되었다. 예를 들어 T를 소비 수준(C)과 소비 한 단위당 환경에 대한 영향(T)으로 구분한 $I = PACT$ 모형(Waggoner & Ausubel 2002), 행동(B) 변수를 추가한 $I = PBAT$ 모형(Schulze 2002) 등이 그것이다.

그러나 비례관계에 기반하고 있는 $I = PAT$ 의 모형들은 요인 사이의 상호의존적 관계를 나타낼 수 없다는 결함이 존재한다(Dietz & Rosa 1994; Lee & Kang 2012). 또한 환경 영향에 대한 미래 예측이 불가능하다는 문제점도 가지고 있다. 이에 따라 각 변수들을 분해하여 확실적인 모형으로 재구성할 필요성이 제기되었고, Dietz & Rosa(1994, 1997)는 STIRPAT(STochastic Impacts by Regression on Population, Affluence, and Technology) 모형을 제시하였다. 초기의 STIRPAT 모형은 기술요인(T)을 따로 구성하지 않고 오차항 속에 포함시켰는데, 이후 연구에서 기술요인을 추가하였다.

2. 도시화와 탄소배출

탄소 배출에 영향을 미치는 요인에 대한 기존 연구들은 앞서 언급한 $I = PAT$ 모형에 의존하고 있다. 일반 환경과 마찬가지로 한 국가의 탄소 배출 역시 인구, 소득, 기술에 의해 영향을 받는다는 것이다. 지구 온난화 문제가 전 세계적인 의제로 부상했던 1990년대 중반을 기점으로 탄소배출 영향요인에 대한 초기 연구에는 주로 인구 요인에 초점을 맞춘 것들이 많았다(Dietz & Rosa 1997; Hamilton & Turton 2002; Shi 2003). 특히 Shi(2003)는 1975년부터 1996년까지

3) I=환경에 대한 영향(Impact), P=인구(Population), F=1인당 환경영향함수(Function).

지 93개국의 패널 데이터를 활용하여 이산화탄소 총 배출량에 영향을 미치는 요인을 분석하였는데 PAT 중에서 인구 요인이 탄소 배출과 상관관계가 1에 가까운 연관성을 가지고 있음을 밝혀 인구가 탄소 배출에 미치는 영향을 강조하였다.

반면 탄소 배출에 대한 도시화의 영향은 변수 선정이나, 데이터의 구조, 연구 모형 등에 따라 결과가 다소 엇갈리는 경향이 있다. 몇몇 연구는 도시화가 에너지 수요를 증가시키고 이에 따라 탄소 배출도 증가되었다고 주장하였다(Parikh & Shukla 1995; York et al, 2003; Cole & Neumayer 2004; Fan et al, 2006; Poumanwong & Kaneko 2010; Martinez-Zarzoso & Maruotti 2011). 특히 Parikh & Shukla

(1995)는 도시화가 온실가스 배출에 미치는 영향을 실증적으로 밝힌 최초의 연구에 속한다. 이들은 도시화가 세 가지 방식을 통해 에너지 소비에 영향을 미치고 이로 인해 에너지 소비량뿐만 아니라 온실가스 배출이 증가한다는 것을 증명하였다. 이들이 밝힌 도시화가 에너지 소비에 영향을 미치는 세 가지 방식은 다음과 같다. 첫째, 도시화로 인해 전통적 연료에서 현대적 연료로 에너지 사용이 전환되고 이로 인해 에너지 사용이 증가한다. 둘째, 도시화는 재화와 서비스에 대한 수요를 대폭 증가시키는데 재화와 서비스 생산 과정에 이미 에너지 소비 증가가 내재되어 있다. 셋째, 도시화로 인해 가정의 생활 패턴이나 교통 체계가 변화하고 그에 따라 에너지 소비가 증가한다.

Table 1. Studies on the impact of urbanization on CO₂ emissions

Authors	Data	Dependent variables	Main independent variables	Impact of urbanization
Parikh & Shukla (1995)	1965-1987, 78 countries, Panel	greenhouse gases (CO ₂ , CH ₄ , CFCs) emissions, energy use	GNP per capita, share of agriculture in GDP, population density, urbanization rate	+(***)
Shi(2003)	1975-1996, 93 countries, Panel	CO ₂ emissions	GDP per capita, population, share of manufacturing in GDP, share of services in GDP, percent population of working-age	none
York et al.(2003)	1996, 142 countries, Cross-sectional	ecological footprint	urbanization rate, GDP per capita, population, capitalism dummy, percent population of working-age	+(***)
Cole & Neumayer (2004)	1975-1998, 86 countries, Panel	CO ₂ emissions SO ₂ emissions	urbanization rate, GDP per capita, population, share of manufacturing in GDP, percent population of working-age, energy efficiency	+(*)
Liddle(2004)	1960-2000 (10-year intervals), 23 countries, Panel	road energy use	urbanization rate, GDP per capita, population density	-(*)
Fan et al.(2006)	1975-2000, 208 countries, Panel	CO ₂ emissions	urbanization rate, GDP per capita, population, percent population of working-age, energy efficiency	H-I: + UM-I: + LM-I: + L-I: +
Chen et al.(2008)	1997-2002, 45 cities(China), Panel	AEP (16 environmental indicators)	cities' compactness (urbanization rate, population density etc.)	-(***)
Poumanwong & Kaneko(2010)	1975-2005, 99 countries, Panel	CO ₂ emissions, energy use	urbanization rate, GDP per capita, population, share of manufacturing in GDP, share of services in GDP	H-I: + M-I: +(***) L-I: +(***)
Martinez & Maruotti(2011)	1975-2003, 88 developing countries, Panel	CO ₂ emissions	past CO ₂ emissions, urbanization rate, GDP per capita, population, share of manufacturing in GDP, percent population of working-age, energy efficiency	+(*)

*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

이와 반대로 도시화가 대중교통이나 다른 공공 인프라 사용의 효율을 증대시키기 때문에 에너지 사용과 탄소 배출을 줄인다고 주장하는 연구도 존재한다(Liddle 2004; Chen et al. 2008). Liddle(2004)은 1960년부터 2000년까지 10년 간격의 OECD 23개국 패널 데이터를 활용하여 높은 도시화와 인구밀도가 도로에서 사용되는 에너지 양을 감소시킨다는 사실을 밝혔다. Chen et al.(2008)의 경우 1997년부터 2002년까지 중국 45개 도시 데이터를 활용하여 도시화율이나 인구밀도 등의 도시 압축성(compactness)이 높아질수록 가정의 에너지 소비가 낮아진다는 것을 밝혔다.

이상의 논의를 바탕으로 탄소배출에서 도시화가 미치는 영향에 대한 기존 연구를 정리하면 Table 1과 같다.

Table 1은 도시화가 탄소 배출에 미치는 영향이 연구에 따라 정반대의 결과를 낳기도 한다는 것을 보여준다. 또한 도시화로 인해 탄소 배출이 증가한다고 주장하는 연구 중에서도 도시화가 미치는 영향의 정도가 서로 다르게 나타난다. 이는 앞서 언급한대로 변수 선택이나 데이터, 연구 모형 등의 차이에서 기인하는 것이라고 볼 수 있다.

3. 도시화와 소득의 교호작용

소득과 환경오염 간의 관계에 대해 일부 연구는 환경 쿠즈네츠 곡선(이하 EKC, Environmental Kuznets Curve)의 가설을 검증하였다(York et al. 2003; Dinda 2004). EKC는 1인당 소득과 환경 오염이 역 U자 형태의 비선형적 관계에 있다는 가설인데, 경제 개발 초기에 소득이 증가할 때는 환경오염이 심해지다가 어느 정도 소득 수준을 넘어서게 되면 환경오염이 오히려 줄어든다는 것이다. York et al.(2003)와 Dinda(2004)는 EKC 가설을 1인당 소득에 관한 변수를 제곱하여 모형에 추가함으로써 증명하고자 하였다.

본 연구는 환경 쿠즈네츠 곡선에 관한 기존 연구들과는 달리 도시화와 소득의 교호작용이 존재하는지 여부를 검증하고자 하였다. EKC 가설은 환경에 대한 소득 변수의 독립적인 비선형적 관계를 보는 것이

데 비해, 본 연구는 도시화가 국가의 경제개발 단계, 즉 소득 수준에 따라 탄소 배출에 다른 양태로 영향을 미친다고 가정하였다. 이는 탄소 배출에 대한 도시화의 영향이 기존 연구들처럼 양(+) 혹은 음(-)이라는 일방향으로만 작용한다고 가정하는 것이 아니라 소득 변수와 상호작용하여 방향이 바뀔 수 있다는 것을 의미하는 것이다.

Fan et al.(2006), Poumanwong & Kaneko(2010) 등 일부 연구는 분석 모형 자체를 소득에 따라 분리하여 그 차이를 보고자 하였지만, 소득에 따라 탄소 배출에 대한 도시화의 영향이 다르게 나타나지는 않았다. 소득 수준을 다르게 설정한 모든 연구 모형에서 도시화가 탄소 배출에 미치는 영향은 동일하게 양(+)의 계수 값을 보였다. 그러나 이러한 결과는 연구 모형 설정 자체의 문제에서 기인한 것이다. 연구 모형을 분리할 경우 연구자가 보고자 하는 변수 외에 다른 변수의 영향 역시 달라질 수밖에 없으며, 분리한 모형들 간의 결과 비교만으로는 소득 수준별 도시화의 영향을 엄밀히 파악하기는 어렵다.

반면 Lee & Kang(2012)의 연구는 도시화를 4단계로 구분하여 분석하였다. 각 단계별로 탄소 배출에 대한 도시화의 영향이 차이가 있는지 여부를 검증하였는데 도시화율이 70%를 넘어설 경우 탄소 배출이 낮아진다는 사실이 드러났다. 도시화와 탄소 배출 간의 비선형적 관계를 밝혔다는데 큰 의의가 있으나 이는 환경과 소득 간의 쿠즈네츠 곡선에 대한 가설과 같이 특정 변수의 독립적인 비선형 관계를 분석한 것이므로 소득이나 도시화 같은 변수가 어떤 메커니즘을 통해 비선형 관계를 나타내는지에 대한 설명이 부족하다는 한계를 지닌다.

III. 분석 방법

1. 연구범위와 방법

본 연구는 공간적 범위로 총 84개의 국가를 분석 대상으로 삼았으며,⁴⁾ 시간적 범위는 2005년부터

4) 본 연구의 분석대상 84개 국가는 다음과 같다. Afghanistan, Algeria, Argentina, Armenia, Australia, Austria,

2011년까지 7년간의 자료를 활용하였다. 데이터는 World Bank⁵⁾와 United Nations⁶⁾의 자료를 활용하였는데 일부 국가의 경우 심각한 결측치가 있어 이를 제외하고 균형패널 형태로 데이터를 구축하였다. 본 연구에서 활용한 패널 회귀분석의 경우 데이터에서 국가 간의 차이를 드러내는 국가효과에 대한 변수를 확률변수로 볼 것인지, 아니면 확률변수가 아닌 추정해야 할 모수로 간주할 것인지에 따라 확률효과(random effects) 모형과 고정효과(fixed effects) 모형으로 추정방법이 달라진다. 이에 대한 하우스만 검정(Hausman Test) 결과 카이제곱 추정량이 200.34, p값이 0.0000으로 0.01보다 작기 때문에 1% 유의수준에서 확률효과 모형의 추정량이 일치추정량이라는 귀무가설을 기각하게 된다. 즉, 본 연구의 분석 모형은 고정효과 모형이 적합하며, 이를 통해 연구 모형을 설정하였다.

통계 분석은 STATA 12.0 프로그램을 활용하였다. 특히 연구 모형이 데이터 신뢰성에 의해 영향을 받지 않기 위해 패널 고정효과 모형⁷⁾ 외에 pooled LS(Least Squares) 모형, 패널 회귀모형에 흔히 발생하는 이분산성(heteroskedasticity)과 자기상관(autocorrelation) 등 회귀모형의 기본 가정 위배를 고려한 패널 GLS(Panel Generalized Least Squares) 모형으로 동시에 분석 결과를 제시하였다.

2. 가설 및 분석모형 설정

앞서 제시한 이론적 논의를 바탕으로 본 연구는 다음과 같은 가설을 설정하였다.

(가설) 도시화는 소득수준이 낮은 국가에서는 탄소 배출을 증가시키지만, 어느 소득수준을 넘어설 경우 오히려 탄소 배출을 감소시킨다.

이러한 본 연구의 가설은 도시로의 인구 집중, 즉 도시화와 탄소 배출 사이의 역 U자 형의 비선형적 관계를 의미하는 것이다. 이는 소득 수준과 환경 영향 간의 비선형적인 관계를 의미하는 환경 쿠즈네츠 곡선의 가설과는 다른 것으로, 본 연구에서 소득 수준은 도시화 변수와의 교호 작용을 발생시키는 매개로서의 역할을 담당한다.

본 연구는 탄소 배출에 미치는 영향 요인을 분석하기 위해 Dietz & Rosa(1994, 1997)가 제시한 STIRPAT (STochastic Impacts by Regression on Population, Affluence, and Technology) 모형을 활용하였다. 특히 패널 데이터를 활용하기 때문에 Dietz & Rosa의 기본 모형에 시간추세와 국가효과를 고려하고 이를 선형화하기 위해 자연로그를 취한 모형을 구성하였으며 이는 구체적으로 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\ln I_{it} = a + b \ln P_{it} + c \ln A_{it} + d \ln T_{it} + Y_t + C_i + e_{it} \quad (1)$$

I = Impact, P = Population, A = Affluence,
T = Technology, Y = Year dummy,
C = Country dummy, e = error term

식 (1)은 패널 데이터를 활용했던 기존 연구들이 사용한 기본 모형이다. 그러나 이렇게 연구 모형에 인구 요인을 포함시킬 경우 모형의 설명력(R^2)이 지나

Azerbaijan, Bangladesh, Belarus, Belgium, Bolivia, Brazil, Bulgaria, Cambodia, Canada, Chile, China, Colombia, Costa Rica, Cuba, Czech Republic, Denmark, Dominican Republic, Ecuador, Egypt, El Salvador, Finland, France, Georgia, Germany, Ghana, Greece, Guatemala, Hungary, India, Indonesia, Ireland, Italy, Japan, Jordan, Kazakhstan, Kenya, Kuwait, Libya, Malaysia, Mexico, Mongolia, Morocco, Mozambique, Nepal, Netherlands, New Zealand, Niger, Pakistan, Panama, Paraguay, Peru, Philippines, Poland, Portugal, Republic of Korea, Romania, Russian Federation, Rwanda, Saudi Arabia, Senegal, Serbia, South Africa, Spain, Sweden, Switzerland, Thailand, Tunisia, Turkey, Uganda, Ukraine, United Kingdom, United Republic of Tanzania, United States of America, Uruguay, Uzbekistan, Venezuela, Viet Nam, Zambia

5) World Bank: World Bank Open Data, Washington D. C.: World Bank; [downloaded May 10, 2016]. Available from: <http://data.worldbank.org/>

6) United Nations: UN Data, New York: United Nations; [downloaded May 10, 2016]. Available from: <http://data.un.org/>

7) 연구에서 활용한 고정효과 모형에 자기상관 존재여부를 검정한 결과 LM 통계량 LM ($\rho=0$)의 값이 673.10, $\text{Pr}(\chi^2(1) = 0.0000$ 으로 나타났다. p값이 유의확률 0.01보다 작기 때문에 1% 유의수준에서 자기상관이 존재하는 것으로 드러났다. 따라서 고정효과 모형에서 자기상관이 존재할 경우, 즉 AR(1) 오차항이 존재할 때 사용하는 명령어 xtregar을 활용하여 고정효과 모형을 추정하였다.

치게 높아지는 경향이 있다. 인구 요인을 모형에 그대로 활용했던 연구들은 대부분 R² 값이 0.97 이상으로 매우 높게 나왔다. 물론 해당 값이 높다는 사실이 모형의 한계를 보여주는 것은 아니다. 하지만 본 연구의 관심은 인구수에 있지 않으므로 도시화의 영향을 더 명확하게 보기 위해 위의 식 (1)에서 인구수의 영향을 차감한 모형으로 변형하여 활용하였다. 즉, 기존 연구에서는 종속변수로 연간 탄소 배출 총량을 활용했다면 본 연구에서는 1인당 탄소 배출량을 종속변수로 활용하며, 이에 따라 독립변수들도 인구수의 영향을 차감시켰다.

그리고 본 연구의 중심 독립변수로 거대도시에 사는 인구 비중(M), 즉 인구 수 100만 명 이상의 도시에 사는 인구의 비중을 추가시켰고, 그 외에 소득(A) 변수는 1인당 GDP, 기술 수준을 나타내는 변수(T)로는 제조업에서 발생하는 GDP를 국가 전체 GDP로 나누는 제조업 비중을 활용하였다. 기술 수준을 나타내는 변수의 경우 기존 연구에서 몇 가지 프락시(proxy) 변수가 활용되었는데 그 중에서 기존 연구에서 가장 많이 활용되는 것이 제조업의 비중에 관한 변수이다 (Shi 2003; Cole & Neumaver 2004; Poumanwong & Kaneko 2010; Martinez & Maruotti 2011). 이들 연구가 제조업을 기술 변수에 대한 프락시 변수로 활용하는 논거는 다른 1차 산업이나 3차 서비스 산업에 비해 제조업에서 산업기술을 많이 활용하기 때문이다. 이에 대해 논란의 여지가 없는 것은 아니나 본 연구에서도 제조업 비중을 기술 수준에 대한 프락시 변수로 활용하였다.

또한 도시화와 소득 사이의 교호효과를 검정하기 위해 본 연구 모형에서는 도시화 변수(M)와 소득 변수(A)를 곱한 교차항을 변수로 사용하였다. 종속변수인 1인당 탄소 배출에 대해, 도시화 변수(M)의 추정 계수가 통계적으로 유의미한 양(+)의 값을 나타내고, 도시화 변수와 소득 변수를 곱한 교차항의 추정 계수가 음(-)의 값으로 통계적으로 유의미한 계수가 나온다면 본 연구의 가설이 성립되는 것으로 판단하였다.

이상의 논의를 바탕으로 본 연구의 최종 분석 모형을 설정하면 식 (2)와 같다.

$$\ln F_{it} = a + b_1 \ln M_{it} + b_2 \ln A_{it} + b_3 (\ln M \times \ln A)_{it} + b_4 \ln T_{it} + Y_t + C_i + e_{it} \quad (2)$$

F = impact per capita
 (= I/P, I = impact, P = population),
 M = urbanization rate,
 A = affluence, M×A = urbanization×affluence,
 T = technology, Y = year dummy,
 C = country dummy, e = error term,
 i = country, t=year

식 (2)에서 국가효과(C_i)는 국가별로 고유한 값을 나타내며, 시간에 따라 변하지 않는 특성을 가진 변수를 의미한다. 본 연구에서는 하우스만 검정에 따라 해당 변수가 확률변수가 아니라 모수의 성격을 가지는 것으로 나타났으므로 고정효과 모형을 활용하였다. 시간효과(Y_t)의 경우 동일한 기간에서는 모든 국가가 같은 값을 가진다고 가정되지만, 시간이 변하게 될 경우 값이 달라지는 특성을 가진 변수이다.

3. 변수 설정

본 연구의 종속변수 F는 1인당 CO₂ 배출량을 사용하였고, 독립변수로는 도시화 변수 M의 경우 전체 인구에서 인구 100만 명 이상의 도시에 사는 인구의 비중을 활용하였다. 소득 수준에 관한 변수 A는 2005년 기준 PPP로 환산한 1인당 GDP 자료를 활용하였으며, 기술 변수인 T는 기존 연구에서 프락시 변수로 활용되었던 제조업 비중에 관한 자료를 이용하였다.

이를 정리하여 연구분석틀과 함께 나타내면 Figure 1과 같다.

Figure 1에 나타난 본 연구 모형은 환경에 대해 영향을 미치는 요인을 최초로 분석한 Ehrlich & Holdren (1971)의 I = P · F 모형을 기반으로 하고 있다. 여기서 양변을 P, 즉 전체 인구수로 나누면 F = I / P 가 되고, 이는 F가 국민 1인당 환경에 미치는 영향에 관한 함수라는 것을 의미한다. 본 연구는 도시화(M), 소득(A), 기술수준(T)을 이 F 함수의 독립변수로 고려하여 인과관계를 추정하였고, 도시화와 소득의 교호효과를 검정하기 위해 두 변수의 교차항(M · A)을 고려하였다. 본 연구의 이러한 개념적 도식을 정리하

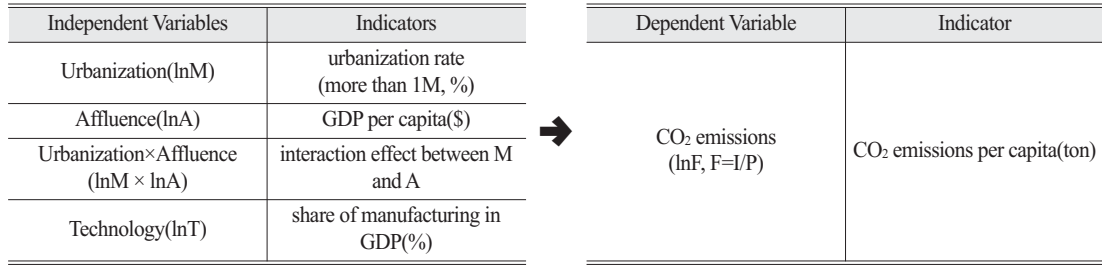


Figure 1. Description of the variables used in the analysis

면 식 (3)과 식 (4)로 정리할 수 있다.

$$F = M \cdot A \cdot T \quad (3)$$

$$I = P \cdot M \cdot A \cdot T \quad (4)$$

F = impact per capita
 (= I/P, I = impact, P = population),
 M = urbanization rate, A=affluence, T=technology

위의 모형에 포함되지 않은 독립변수로 기존 연구들은 인구 요인에 해당하는 노동가능 인구의 비중, 기술 요인에서는 GDP에서 차지하는 서비스업의 비중, 에너지 효율 등을 고려하였으나 해당 연구에서 큰 의미가 발견되지는 않았다. 따라서 본 연구에서는 모형의 간소화를 위해 변수의 수를 최소화하였다.

IV. 분석 결과

1. 기초 통계 분석

본 연구는 전 세계 84개국의 7년간의 패널 데이터를 활용하여 1인당 탄소배출량에 영향을 미치는 요인들을 찾고자 하였다. 변수에 대한 기초적인 통계량을 정리하면 Table 2와 같다.

Figure 2는 1인당 탄소 배출과 도시화의 관계, 1인당 탄소 배출과 소득과의 관계를 산점도를 통해 그린 것이다. 대부분의 기존 연구결과와 같이 도시화나 소득 변수 모두 탄소 배출과 양(+)의 관계를 보여주었다. 그러나 Shi(2003)의 연구결과와 같이 도시화보다는 소득 변수가 더 뚜렷한 양(+)의 상관관계를 나타내었다.

Table 2. Descriptive information on the variables

Variable		Mean	Std Dev.	Min	Max	Obs.
CO ₂ emissions (LnF)	overall	0.9872	1.4467	-2.9356	3.4390	N = 588
	between		1.4491	-2.8914	3.4070	n = 84
	within		0.1205	-0.0141	2.0430	T = 7
Urbanization (LnM)	overall	2.9717	0.6517	1.1408	4.3117	N = 588
	between		0.6547	1.2009	4.2726	n = 84
	within		0.0235	2.8786	3.0660	T = 7
Affluence(LnA)	overall	8.6690	1.4927	5.5208	11.3834	N = 588
	between		1.4848	5.7556	11.1232	n = 84
	within		0.2145	7.7227	9.2653	T = 7
LnM × LnA	overall	26.2008	8.3743	6.5936	47.0210	N = 588
	between		8.3832	7.3649	45.5264	n = 84
	within		0.7548	23.1508	28.9612	T = 7
Technology (LnT)	overall	3.4035	0.3255	2.4216	4.3902	N = 588
	between		0.3218	2.5289	4.3588	n = 84
	within		0.0588	3.1440	3.6198	T = 7

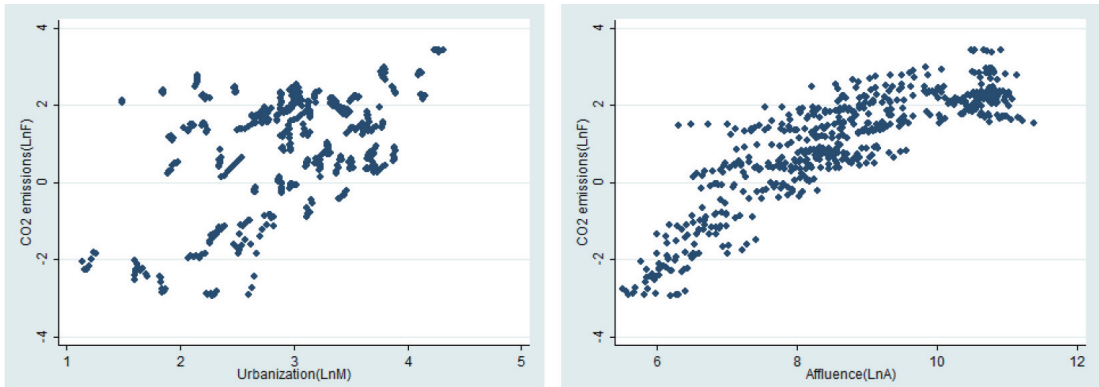


Figure 2. Scatter plot: CO₂ and urbanization and CO₂ and affluence

2. 분석결과 논의

본 연구는 기본적으로 패널 고정효과(Panel Fixed Effects) 모형을 활용하였다. 그러나 데이터의 특성상 통합(Pooled) LS 모형과 패널 일반화 회귀모형(Panel GLS)의 결과를 함께 제시하였다. 이는 계수 추정에 대한 비교를 용이하게 하고, 데이터의 신뢰성에 의해 발생할 수 있는 모형의 오류를 줄이기 위한 것이다. 결과적으로는 세 통계모형에서 거의 동일한 결과가 나타났다.

세 통계 모형의 계수 추정 결과는 Table 3과 같다. 기존의 연구(Parikh & Shukla 1995; York et al. 2003; Cole & Neumayer 2004; Fan et al. 2006; Pomanwong & Kaneko 2010; Martinez-Zarzoso & Maruotti 2011) 결과와 같이 본 연구의 주요 관심 변수인 도시화 변수는 탄소 배출과 양(+)의 인과관계를 보여주었다. 즉, 도시화가 증가할수록 해당 국가의 1인당 탄소 배출은 증가하는 것으로 드러났다. 또한 다른 두 독립변수인 소득과 기술 수준 역시 기존

의 연구 결과와 동일한 결과를 보여주었다. 1인당 소득 수준이 높아질수록, 그리고 해당 국가의 GDP에서 제조업이 차지하는 비중이 높아질수록 탄소 배출이 늘어나는 것으로 나타났다.

본 연구는 회귀방정식의 양변에 자연로그를 취하여 모형을 구성하였다. 이 때 추정 계수는 일반 회귀 모형이 가지는 의미와 다르다. 독립변수의 변화율에 따른 종속변수의 변화율 사이의 비를 의미하는 것이므로 탄력성의 의미를 지닌다. 패널 고정효과 모형을 통해 본 연구의 결과를 고찰할 때 도시화율 1%의 증가는 1인당 탄소배출을 약 1.9% 이상 증가시키는 것으로 해석할 수 있다.

소득 수준 역시 1인당 탄소 배출을 늘리는데 영향력이 큰 변수로 나타났다. 1인당 GDP 1% 증가가 1인당 탄소배출을 약 0.6% 증가시키는 효과를 보였으며, 탄력성의 정도 측면에서는 도시화 변수보다는 약 하지만 세 모형에서 일관되게 양의 인과관계를 보여주었다. 이는 주거나 교통 이용 패턴과 밀접한 관련

Table 3. Estimation results for per capita CO₂ emissions models

	Pooled LS	Panel GLS	Panel FE
Urbanization(lnM)	0.8937(4.06)***	1.7576(9.25)***	1.8756(4.27)***
Affluence(lnA)	1.0014(14.09)***	1.0758(17.77)***	0.5987(5.14)***
lnM × lnA	-0.0898(-3.62)***	-0.1639(-8.09)***	-0.0857(-3.41)***
Technology(lnT)	1.3018(15.99)***	0.6770(10.42)***	-0.0232(-0.33)
Constant	-12.4266(-21.30)***	-11.5754(-20.60)***	-4.5234(-8.18)***
R ²	0.8297	-	0.5832
Observations	588	588	588

Notes: t-values are shown in parentheses. *** p<0.01

이 있다. 1인당 소득 수준이 늘어날수록 토지를 더 많이 활용하는 주거 형태를 선호하게 되고, 교통 역시 대중교통보다는 개인 교통수단을 많이 활용하게 되어 전체적으로 에너지 이용의 효율이 떨어지기 때문이다(Centre for Liveable Cities 2014; UN-Habitat 2015).

그러나 본 연구의 중심 모델인 고정효과 모형에서 기술 변수는 통계적으로 유의미하지는 않았으나 음(-)의 관계로 나타났다. 제조업의 비중이 높아질수록 오히려 탄소 배출이 줄어든다는 것을 의미하는 것인데, 통계적으로 의미 있는 결과는 아니었으나 이에 대한 설명은 기술 수준에 대한 프락시 변수로서 제조업 비중이 적합한지 여부와 함께 추가적인 연구와 논의가 필요해 보인다.

본 연구의 가설 검증에 있어 핵심은 도시화와 소득의 교차항 추정계수 값의 부호이다. 이는 세 모형 모두 통계적으로 유의미한 음(-)의 값이 나왔다. 위에서 살펴본 것처럼 도시화 변수가 통계적으로 유의미한 양(+)의 값이 나왔기 때문에 교차항이 음(-)이라는 것은 소득이 높을(+) 때에는 도시화 증가가 탄소 배출을 감소시키는 효과를 가진다는 것이고, 소득이 낮을(-) 때에는 도시화 증가가 탄소 배출을 증가시킨다는 의미로 해석할 수 있다. 이는 본 연구의 가설인 “도시화는 소득수준이 낮은 국가에서는 탄소 배출을 증가시키지만, 어느 소득수준을 넘어설 경우 오히려 탄소 배출을 감소시킨다”라는 사실을 정확하게 지지해 주는 결과이다. 도시화와 탄소 배출은 국가 소득 수준에 기초하여 역 U자 형의 비선형적 관계를 보이는 것을 알 수 있다.

V. 결론

이미 탄소 배출량에 대한 측정은 개별 기업 수준에서는 물론, 도시나 국가 단위에서도 에너지원의 형태, 에너지 사용 및 공급 형태 등을 고려하여 거의 정확하게 이뤄지고 있다. 이런 현실을 감안할 때 본 연구의 목적은 회귀방정식을 통해 개별 도시의 탄소 배출량을 추정하고 예측하는 것이 아니라, 거대도시화라는 거시적 현상 자체가 탄소배출과 맺고 있는 관계

를 인과적으로 파악하는 데 있다.

도시화와 탄소 배출 사이의 관계를 분석한 본 연구는 두 가지 측면에서 의미를 갖는다. 첫째, 지속 가능한 도시의 규모에 대해 함의점을 제공한다. 본 연구는 도시화의 기준을 인구 수 100만 명 이상의 거대도시 인구 비중으로 한정하였다. 본 연구 결과에 따르면 인구 100만 명 이상의 거대도시를 기준으로 했을 때 도시화율이 1% 증가할수록 국민의 1인당 탄소배출량은 약 1.9% 늘어난다는 사실이 나타났다. 인구 30만 명을 기준으로 했던 기존 연구에서 도시화율 1%의 증가가 대체적으로 1인당 탄소배출량을 0.24%에서 0.6% 증가시켰던 결과와 비교한다면(Martinez-Zarzoso & Maruotti 2011; Fan et al. 2006; Cole & Neumayer 2004) 거대도시의 탄소배출에 대한 영향이 훨씬 큰 것으로 나타났다. 중국을 비롯한 수많은 개발도상국들은 인구 수백 만 명 이상의 거대 거점도시들을 형성하여 이를 중심으로 지역을 개발하는 정책을 추진하고 있다. 그러나 본 연구의 결과를 통해 볼 때 거대도시 중심의 지역개발 정책은 환경적 지속가능성 측면에서는 재고될 필요가 있다.

둘째, 이러한 관계가 모든 국가에 적용되는 것은 아니었으며 소득 수준에 따라 도시화와 탄소배출 간의 관계는 정 반대의 결과를 나타냈다. 소득 수준이 낮은 국가에서는 도시화에 따른 긍정적 효과보다는 집적에 따른 불경제가 더 크기 때문에 도시화와 탄소배출 간의 정(+)의 관계가 성립하지만, 소득 수준이 높은 국가에서는 도시화로 인한 인구 집적의 긍정적 효과가 나타나 거대도시 형성이 탄소 배출을 오히려 줄여주는 것으로 나타났다. 탄소배출에 있어 도시화와 소득 수준 사이의 교호작용의 존재는 거대도시로의 인구 집중이 해당 국가의 소득 수준에 따라 탄소 배출에 다른 영향을 미칠 수 있다는 사실을 의미하기 때문에 특히, 개발도상국들의 도시 개발 정책에 더 큰 함의를 제공할 수 있다.

또한 기존 연구들이 도시화 자체만의 영향을 논했다는 점과 비교해볼 때, 본 연구는 소득 수준과의 교호작용 존재를 밝힘으로써 탄소 배출에 대한 실증적 논의의 차원을 확장시킬 수 있다. 국가의 소득 수준에 따른 도시 확장 유형을 구분한 연구들(Centre for

Liveable Cities 2014; UN-Habitat 2015)에 따르면 저소득 지역에서의 거대도시 형성은 주로 분절적 패턴(fragmented patterns)을 가지고 나타나는데, 이러한 분절적 패턴의 거대도시는 도시 외곽에는 고급 주거지역이, 도심 내부에는 고밀도의 상업 시설, 업무 중심 지구, 생산 시설 등이 입지하는 모습을 나타낸다. 이 때, 이렇게 분절된 지역들을 연결시키는 것은 대규모의 고속도로뿐이며 이는 곧 높은 교통 비용을 유발하고 도시 전체의 에너지 사용 효율을 매우 떨어뜨린다. 반면, 고소득 지역에서 거대 도시 형성은 주로 압축적 패턴(compact patterns)으로 나타나는데, 이러한 패턴의 거대도시는 접근성을 향상시키고, 사회 기반시설이나 도시서비스 공급을 비용 효율적으로 만들어 자연과 자원의 낭비를 줄일 수 있다.

이렇게 소득 수준에 따라 거대도시 형성의 유형이 달라진다는 점은 본 연구 결과의 해석에 있어 일정한 제약점으로 작동할 수 있다. 본 연구는 소득 수준이라는 변수를 매개로 도시화와 탄소 배출 사이에 역 U자형의 관계가 발생한다는 점을 밝혔다. 그러나 소득 수준이라는 변수 뒤에 도시화 유형이라는 잠재적 영향 요인이 존재할 수 있기 때문에 이를 해석하는 데 주의를 기울여야 한다는 것이다. 이 때 도시화 유형이라는 것은 인구밀도 등 도시의 압축성(compactness)과 해당 도시의 에너지 이용 패턴 및 토지이용 정책에 의해 주로 결정되는 것을 의미한다(UN-Habitat 2015). 본 연구에서는 자료 수집의 한계로 인해 도시화 유형에 따른 변수를 직접적으로 고려하지는 못했으나 향후 이러한 연구가 이루어진다면 지속가능한 도시개발에 대한 보다 더 확장된 논의의 토대를 제공할 수 있을 것이다.

References

- Bertinelli L, Black D. 2004. Urbanization and growth. *Journal of Urban Economics*. 56: 80-96.
- Centre for Liveable Cities. 2014. *New Lenses on Future Cities: A New Lens Scenarios Supplement*. Singapore: Shell International
- BV.
- Chen H, Jia B, Lau SSY. 2008. Sustainable urban form for Chinese compact cities: Challenges of a rapid urbanized economy. *Habitat International*. 32: 28-40.
- Cole MA, Neumayer E. 2004. Examining the impact of demographic factors on air pollution. *Population and Environment*. 26(1): 5-21.
- Commoner B. 1971. *The Closing Circle: Nature, Man, and Technology*. New York: Knopf.
- Commoner B, Corr M, Stamler PJ. 1971. The causes of pollution. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*. 13(3): 2-19.
- Dietz T, Rosa EA. 1994. Rethinking the environmental impact of population, affluence, technology. *Human Ecology Review*. Summer/Autumn(1): 277-300.
- Dietz T, Rosa EA. 1997. Effects of population and affluence on CO₂ emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. 94(1): 175-179.
- Dinda S. 2004. Environmental Kuznets Curve Hypothesis: A Survey. *Ecological Economics*. 49: 431-455.
- Ehrlich PR, Holdren JP. 1971. Impact of population growth. *Science*. 171(3977): 1212-1217.
- Ehrlich PR, Holdren JP. 1972. A bulletin dialogue on the 'Closing Circle'. *Critique: One dimensional ecology*. *Bulletin of the Atomic Scientists*. 28(5): 16-27.
- Fan Y, Liu LC, Wu G, Wei YM. 2006. Analyzing impact factors of CO₂ emissions using the STIRPAT model. *Environmental Impact Assessment Review*. 26: 377-395.
- Hamilton C, Turton H. 2002. Determinants of emissions growth in OECD countries.

- Energy Policy. 30(1): 63-71.
- Lee HJ, Kang MG. 2012. Relationship between urbanization and CO₂ emissions: A cross-country panel data analysis. Journal of The Korean Regional Development Association. 24(5): 125-144. [Korean Literature]
- Liddle B. 2004. Demographic dynamics and per capita environmental impact: Using panel regressions and household decompositions to examine population and transport. Population and Environment. 26(1): 23-39.
- Martinez-Zarzoso I, Maruotti A. 2011. The impact of urbanization on CO₂ emissions: Evidence from developing countries. Ecological Economics. 70: 1344-1353.
- Parikh J, Shukla V. 1995. Urbanization, energy use and greenhouse effects in economic development: Results from a cross-national study of developing countries. Global Environmental Change. 5(2): 87-103.
- Poumanyong P, Kaneko S. 2010. Does urbanization lead to less energy use and lower CO₂ emissions? A cross-country analysis. Ecological Economics. 70: 434-444.
- Schulze PC. 2002. I=PBAT. Ecological Economics. 40(2): 149-150.
- Shi A. 2003. The impact of population pressure on global carbon dioxide emissions, 1975-1996: evidence from pooled cross-country data. Ecological Economics. 44(1): 29-42.
- United Nations. 2015. World Population Prospects: The 2015 Revision. New York: UN Population Division.
- United Nations-Habitat. 2015. Urban Planning for City Leaders. Nairobi: UN-Habitat.
- Waggoner PE, Ausubel JH. 2002. A framework for sustainability science: A renovated IPAT identity. Proceedings of the National Academy of Sciences. 99(12): 7860-7865.
- York R, Rosa EA, Dietz T. 2003. Footprints on the Earth: The environmental consequences of modernity. American Sociological Review. 68(2): 279-300.