

국가별 소득수준에 따른 1인당 CO₂ 배출량 수렴 분석[†]

조향숙*

요약 : 본 연구는 152개 국가의 불균형 패널 자료를 활용하여 1980~2013년 기간의 국가별 소득수준에 따른 1인당 CO₂ 배출 수렴 현상을 시그마 수렴 모형과 베타 수렴 모형을 통해 분석하였다. 절대적 베타 수렴과 시그마 수렴 현상은 CO₂ 배출 감축을 위한 국가별 정책 상황에 따라 소득 그룹별로, 기간별로 상이하게 나타났다. 조건부 베타 수렴 분석 결과, 고소득 국가에서 1인당 소득의 증가가 1인당 CO₂ 배출량 수렴에 기여하였으며 제도의 수준과 기술의 수준이 높을수록 소득의 증가가 배출량 수렴 속도를 더 빠르게 감소시키는 것으로 나타났다. 중소득 국가는 1인당 소득의 증가가 1인당 CO₂ 배출량 수렴에 영향을 미쳤으나, 제도의 수준은 유의미하지 않게 나타났다. 반면 중소득 국가와 저소득 국가의 기술 수준 향상은 1인당 CO₂ 배출량 수렴 속도를 늦추는 것으로 나타나 배출량 증가에 기여하는 것으로 분석되었다.

주제어 : 1인당 CO₂ 배출 수렴, 베타 수렴, 시그마 수렴, 제도, 기술수준

JEL 분류 : Q2, O3

접수일(2018년 8월 31일), 수정일(2018년 9월 13일), 게재확정일(2018년 11월 13일)

[†] 본 논문의 개선을 위하여 조언해주신 성균관대학교 이광석 교수님과 익명의 두 분 심사위원께 감사를 드립니다.

* 성균관대학교 경제학과, 박사과정, 교신저자(e-mail: hscho2014@skku.edu)

Convergence in Per Capita CO₂ Emission by Income Group

Hyangsuk Cho*

ABSTRACT : This study investigates the convergence in per capita CO₂ emission by income group for an unbalanced panel of 152 countries from 1980 to 2013 using beta and sigma convergence model. Absolute beta and sigma convergence differed by CO₂ emission reduction policies in each countries. Conditional beta convergence shows that per capita income has a negative effect on growth in per capita CO₂ emission. In particular, better-quality institutions and technology accelerated the negative effect of per capita income on the speed of convergence of per capita CO₂ emission in high-income countries. For middle-income countries, the growth of income affected the convergence of CO₂ emission per capita, but institutional quality has an insignificant impact. On the other hand, improvements in the level of technology have a mitigating effect on the negative impact of income in middle-income and low-income countries, contributing to the increase in CO₂ emission.

Keywords : Convergence, CO₂ emission, Beta convergence, Sigma convergence, Institutions, level of technology

Received: August 31, 2018. Revised: September 13, 2018. Accepted: November 13, 2018.

* Ph.D Candidate, Department of Economics, Sungkyunkwan University, Corresponding author(e-mail: hscho2014@skku.edu)

I. 서론

지구온난화로 인한 기후변화는 국제사회의 큰 관심을 끌고 있는 이슈 중 하나이다. 화석연료를 기반으로 경제성장을 이룬 선진국들은 1992년 채택된 유엔기후변화협약 (UNFCCC) 이후로 기후변화의 주요 원인인 온실가스 배출을 감축하기 위해 다양한 환경정책을 실행해 오고 있다. 그러나 경제 성장에 박차를 가하고 있거나 경제 발전 초기 단계에 있는 개도국은 환경보호를 위한 노력의 중심에는 벗어나 있으며, 경제성장과 오염간의 상충관계를 넘어선 지속가능한 성장의 혜택이 개도국에 다다르기에는 아직 역부족인 듯하다.

2015년 프랑스에서 개최된 ‘제21차 유엔기후변화협약 당사국 총회’(Conference of Parties 21, COP21)¹⁾에서는 지구평균기온 1.5°C 이하 상승 억제가 국제사회의 최종 목표임을 명시하였으나, 감축 정책에 대해서는 기후변화에 취약한 개도국과 이미 경제발전을 이룬 선진국의 입장 차이로 의견 충돌이 있었다. 또한 각 나라별 온실가스 감축목표 실행에 대한 실질적 효력에 대해서도 이견이 있었다. 반면 탄소배출량에 책임이 큰 선진국들이 개도국의 기후변화 대응을 위한 지원 자금을 조달하기로 약속하는 등 일부분의 성과도 있었다. 이후 ‘COP21’의 후속 논의를 진행하기 위해 2016년 모로코에서 개최된 ‘COP22’에서 감축목표 이행과 기후재원 등의 의제들을 논의하였으나 선진국과 개도국 사이의 입장 차이는 여전히 좁혀지지 않고 있다.²⁾

그렇다면 선진국과 개도국의 CO₂ 배출량은 얼마나 많은 차이를 보일까? World Bank의 기준에 따른 소득수준별³⁾ 각 국가 그룹의 총 CO₂ 배출현황을 살펴보면 고소득 국가 그룹의 총 CO₂ 배출량은 1990년 대비 2013년에 14.8% 증가하였다. 반면 중상위 소득 국가 그룹과 중하위 소득 국가 그룹은 1990년 대비 2013년 각각 212.9%, 217.5%로 증가하

-
- 1) 유엔기후변화협약에 소속된 약 195개 협약 당사국이 2015년 개최한 기후변화 국제회의를 말하며, 2020년 이후 적용될 신기후체제 합의문인 '파리협정(Paris Agreement)'을 채택하여 선진국과 개도국 모두의 온실가스 감축 노력을 유도하는 기후변화 대응정책을 수립하였다.
 - 2) 주요 배출국에 해당하는 인도는 1인당 CO₂ 배출량 수렴 접근법을 고려해 선진국이 더 많은 감축을 해야 한다고 주장하였으나, EU는 선진국과 개도국 간 1인당 CO₂ 배출량이 점진적으로 수렴해서 같아지는 장기적인 관점이 필요하다는 의견을 내세운 바 있다(에너지경제연구원, 2009).
 - 3) World Bank의 소득수준별 국가 분류 기준에 따르면, 2016년 1인당 GNI를 기준으로 고소득 국가는 \$12,476 이상, 중상위 국가는 \$4,036~\$12,475, 중하위 국가는 \$1,026~\$4,035, 저소득 국가는 \$1,025 이하이다.

였으며, 저소득 국가 그룹은 120.2%로 증가하였다.⁴⁾ 이 수치를 비교해보면 개도국에 위치한 저소득 국가 그룹의 배출량 증가율이 현저하게 높다는 것을 확인 할 수 있다. 선진국은 온실가스 감축의 실현을 위해 관련 제도와 정책을 법으로 제정하고 있으며, 특히 신재생에너지 보급 확대를 위한 법제도의 구축·이행을 실행하여 사회적 수용성도 높이고 있다. 또한 선진국의 각 정부는 녹색 산업 지원 및 청정 기술 투자를 통한 에너지 효율성 증대 등 탈탄소화를 위한 노력을 가하고 있다. 그러나 경제 개발로 인해 에너지 다소비 중심의 2차 산업 비중이 높은 개도국은 기후변화 대응을 위한 정책 실행과 제도적 기반 마련에 어려움이 있을 것으로 생각된다. 이러한 논의 하에서 경제 개발 초기에 탄소 배출량이 높았던 선진국보다 탄소 배출량이 낮았던 개도국이 시간이 지남에 따라 더 높은 배출 증가율을 보이는 수렴가설이 성립할 수 있으며, 경제성장과 탄소 배출 수렴의 관계에 어떤 요인이 영향을 미치는지에 대한 추가적인 논의가 필요하다.

현재까지 진행된 CO₂ 배출 수렴에 대한 연구는 주로 국가별 수렴 현상 분석이 주를 이루었으며, 수렴에 영향을 미치는 요인에 대한 최근의 연구는 산업 비중(화석연료 비중)과 청정에너지 비중 등 에너지 구조 변화에 대해 초점을 맞추었다. 그러나 국가별 CO₂ 배출 수렴 현상의 존재 여부는 경제성장뿐만 아니라 온실가스 규제를 실현할 수 있는 국가의 제도 수준과 관련 기술 투자 등 정책 실행에 크게 영향을 받았을 것으로 생각된다. 따라서 본 연구는 사회적·법적 제도 장치의 질적 수준과 정부의 R&D 지출액을 CO₂ 배출 수렴모형에 반영하여 분석하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 II장에서는 1인당 CO₂ 배출량 수렴 현상에 대한 이론적 배경과 선행연구를 살펴보고, 제 III장에서는 실증분석을 위한 분석방법 및 분석 자료를 검토한다. 제 IV장에서는 CO₂ 배출 수렴모형의 실증분석 결과를 정리하고, 제 V장에서 본 논문의 결론을 제시하였다.

4) World Bank, World Development Indicators 2017.

II. 이론적 배경 및 선행연구

1. 이론적 배경

Solow(1956)와 Swan(1956)의 신고전학과 성장모형에 의해 제시된 수렴 가설 (Convergence Hypothesis)은 Baumol(1986)의 연구를 시작으로 최근까지 방대한 연구들을 통해 지속적으로 논의되어 왔다. 수렴가설이란, 초기에 1인당 소득이 낮은 국가들(후진국)이 1인당 소득이 높은 국가들(선진국)에 비해 경제성장이 더 빠르게 진행되어 장기적으로 모든 국가 간 1인당 소득격차가 줄어들고 동일한 소득 수준으로 수렴하게 되는 현상을 말한다.

기존의 문헌들에서 수렴 현상은 크게 베타 수렴과 시그마 수렴으로 나누어 분석 되어 왔다. Baumol(1986)에 의해 소개된 베타 수렴은 초기의 소득수준과 연간 소득증가율 간에 음(-)의 관계가 성립하는 경우 소득수준이 수렴한다고 본다. 한편, 시그마 수렴은 Sala-i-Martin(1996)에 의해 도입된 개념으로 시간이 경과하면서 국가 간 소득의 격차가 점차 감소되면 소득수준이 수렴한다고 보는 것이다. 즉, 국가 간 소득의 분산(dispersion)이 줄어드는 것을 말한다.⁵⁾

이후, Barro and Sala-i-Martin(1991, 1992)은 베타 수렴과 시그마 수렴에 대해 심도 있는 연구를 진행하였다. 특히 Barro and Sala-i-Martin(1996)의 연구에서 베타 수렴을 절대적 베타 수렴과 조건부 베타 수렴으로 나누어 설명하였다.⁶⁾ 절대적 베타 수렴은 모든 국가가 동일한 정상 상태(Steady State)를 가진다고 가정하지만, 이와 달리 조건부 베타 수렴은 국가별로 소득수준이 다른 정상 상태를 가지기 때문에 소득수준이 각 국가의 정

5) 시그마 수렴 모형: $\sigma_{t+T} < \sigma_t$

시그마 수렴모형에서 σ_t 는 t 기의 국가 간 $\log(y_{i,t})$ 의 표준편차를 의미하며, 시간이 지남에 따라 그 값이 감소하는 경우 시그마 수렴이 나타난다.

6) ① 절대적 베타 수렴 모형: $\gamma_{i,t+T} = \alpha - \beta \log(y_{i,t}) + \epsilon_{i,t}$, $\beta > 0$

② 조건부 베타 수렴 모형: $\gamma_{i,t+T} = a - b \log(y_{i,t}) + \psi X_{i,t} + \epsilon_{i,t,t+T}$,

where $b = (1 - e^{-\beta T})/T$, $\beta > 0$ once $X_{i,t}$ is held

절대적 베타 수렴모형에서 $\log(y_{i,t})$ 는 t 기에 발생한 i 국가의 1인당 GDP 로그 값을 의미하며, $\gamma_{i,t+T}$ 는 $\log(y_{i,t+T}/y_{i,t})$ 로 i 국가의 연평균 1인당 GDP 성장률을 나타낸다. β 의 값이 양(+)의 부호를 가지면 절대적 베타 수렴이 나타난다. 조건부 베타 수렴 모형에서 $X_{i,t}$ 는 국가의 정상 상태를 일정하게 유지하는 변수들의 벡터(vector)로서 $X_{i,t}$ 의 값이 일정하게 유지되고 β 의 값이 양의 부호를 가지면 조건부 베타 수렴이 나타난다.

상 상태에서 멀리 떨어진 국가일수록 경제성장률이 빠르게 나타나는 상대적 수렴 현상이 나타난다고 보는 것이다.

Brock and Taylor(2010)는 전통적인 Solow 모형을 확장한 Green Solow 모형을 통해 탄소배출의 수렴 가설을 이론적·실증적으로 제시하였으며 초기 1인당 배출량과 1인당 배출량 증가율 간에 음(-)의 관계가 나타나면 베타 수렴한다고 보았다. 즉, 초기에 오염 배출이 낮은 국가들이 오염 배출이 높은 국가에 비해 더 높은 오염 배출 증가율을 보여 국가 간 1인당 배출량 수준이 수렴하는 것을 말한다.

Green Solow 모형은 Stokey(1998), Aghion and Howitt(1988), Brock and Taylor(2003)와 같이 전통적인 Solow 모형에 환경오염과 경제성장 간의 관계를 연구한 대표적인 연구들을 거쳐 발전되었다.⁷⁾ Stokey Alternative 모형은 오염 배출량(E)을 오염배출 감축비용 비율(θ)의 감소함수의 형태인 $e(\theta) = (1 - \theta)^\beta$ 로 설정하였다($\beta > 1$). 즉, 오염 배출 감축비용 비율의 지속적 증가를 가정하였기 때문에 오염배출이 환경오염 저감기술을 발전시켜 배출이 감소하지만, 생산과 성장의 저하를 가져오는 결과가 도출된다. Aghion and Howitt(1998)의 연구는 최종재에 해당하는 생산물이 중간재인 에너지(I)에 영향을 받는 함수를 설정하고 에너지 사용을 통해 오염이 발생한다고 가정하였다. Stokey 모형과 달리 오염배출 함수를 $E = I\Omega e(\theta) \equiv I\Omega[1 - \theta]^\beta$ 로 설정하여 오염배출집약도(Ω)와 오염배출 감축비용 비율(θ)이 일정하다고 가정하였다. 따라서 에너지집약산업의 비중이 작아지면 오염배출이 감소하게 되지만, 생산수준과 장기성장률 또한 하락하게 된다. Brock and Taylor(2003)의 연구는 내생적 성장모형에 기초하여 Kindergarten Rule 모형을 제시하였다. 오염(P)을 산출물로 인해 발생하는 오염량(Y^G)에서 저감된 오염량(Y^A)을 뺀 것으로 정의하고, 저감된 오염량은 오염배출 감축비용 비율(θ)에 의해 영향을 받는다고 가정하였다. 이 비율이 모형에서 최댓값을 유지하면 오염량은 감소하고 경제가 균형성장(balanced growth)을 달성할 수 있다고 보았다.

반면, Green Solow 모형은 앞서 언급한 연구들과 달리, 오염배출 감축비용 비율(θ)이 일정하더라도 오염배출집약도(Ω)의 감소를 통해 오염배출이 지속적으로 감소한다고 보았다. 따라서 오염배출 감축으로 인해 생산수준이 감소하지만 장기성장률에는 영향

7) 모형에 대한 자세한 설명은 Brock and Taylor(2004b) 참조.

을 미치지 않는 결과를 보였으며, 모형을 통해 도출된 오염배출 성장률과 자본축적 방정식을 통해 1인당 탄소배출 수렴가설을 제시하였다. 1인당 탄소배출 수렴에 대한 기존의 연구들은 수렴 가설에 단순히 오염 변수를 대입하여 분석한 것에 그쳤으나, Green Solow 모형은 오염배출과 오염배출 감축활동을 Solow 모형에 도입하여 모형 내에서 탄소배출 수렴 방정식을 발전시켰다.

2. 국내외 선행연구

오염배출 수렴 가설로서 CO₂ 배출 수렴에 대한 분석은 크게 베타 수렴과 시그마 수렴, 확률적 수렴의 방법으로 나누어 분석되어 왔다.⁸⁾

국외 선행연구를 살펴보면, Strazicich and List(2003)에 의해 CO₂ 배출량의 베타 수렴에 대한 연구가 처음 시도되었다. 이들의 연구는 1960~1997년까지 OECD 21개 국가를 대상으로 횡단면 분석을 진행하였으며, 평균 겨울 온도와 휘발유 가격의 상승으로 1인당 CO₂ 배출량의 증가율이 감소하여 조건부 베타 수렴 현상이 나타남을 확인했다. Nguyen Van(2005)은 1966~1996년의 횡단면 자료와 패널 자료를 이용하여 26개의 선진국과 100개 국가를 대상으로 CO₂ 배출 수렴 현상을 분석했다. 분석 결과, 횡단면 자료에 대해 선진국은 베타 수렴과 시그마 수렴이 존재하였으나, 전체 국가를 대상으로는 수렴이 존재하지 않았다. 또한 환경 쿠즈네츠 곡선 가설을 연결 지어 선진국의 배출 수렴 현상으로 인해 환경쿠즈네츠 곡선(Environmental Kuznets Curve, EKC)의 전환점 이후 하향하는 부분이 아래로 이동하게 된다고 주장했다. McKibbin and Stegman(2005)의 연구는 OECD 26개국의 1900~1999년 자료와 97개국의 1950~1999년 자료를 통해 베타 수렴과 시그마 수렴을 분석하였다. 이 연구에서 베타 수렴보다 시그마 수렴이 CO₂ 배출량과 더 강력한 상관관계를 가졌으며, OECD 국가는 1인당 CO₂ 배출량이 수렴하였지만 전체 국가를 대상으로는 수렴 현상이 나타나지 않았다.

시그마 수렴에 대해 초점을 맞춘 연구를 보면, Aldy(2006)는 OECD 23개 국가와 88개 국가의 1960~2000년 자료를 활용하여 시그마 수렴을 추정하였다. 88개 국가의 자료에서는 초기 배출량이 낮은 국가들보다 초기 배출량이 높았던 국가들이 1인당 CO₂ 배출량

8) Pettersson, Maddison, Acar, and Söderholm(2014)의 연구는 CO₂ 배출 수렴에 대한 다양한 이론적·실증적 논문을 소개하였다.

의 성장률이 더 증가하여 시그마 수렴이 나타나지 않았지만 OECD 국가에 대해서는 시그마 수렴이 나타났다. Panopoulou and Pantelidis(2009)는 1960~2003년까지 128개 국가를 대상으로 1인당 CO₂ 배출량의 시그마 수렴과 수렴 클럽이 존재하는지의 여부를 분석하였으며, 전체 국가 표본에서는 시그마 수렴이 존재하지 않았으나 유럽통화연맹국(EMU)과 OECD 국가에서 각 국가의 1인당 CO₂ 배출량이 그룹 내 평균 배출량으로 수렴하는 시그마 수렴 클럽이 존재했다.

최근에는 CO₂ 배출량에 영향을 주는 요인들을 통해 조건부 베타 수렴 현상을 분석한 연구들이 진행되었다. 본 연구의 모형에 바탕이 된 Brock and Taylor(2010)의 연구는 전통적인 Solow 모형을 확장한 접근법으로 1960~1999년까지 173개 국가의 횡단면 자료를 통해 절대적 베타 수렴과 조건부 베타 수렴에 대해 분석하였으며, 두 가지 수렴 현상이 모두 나타난 것으로 확인되었다. 조건부 베타 수렴에서는 저축률과 자본의 감가상각률의 상승이 1인당 CO₂ 배출량 수렴에 영향을 미친다는 것을 보였으며, Solow 모형의 규모수익감소와 기술진보로 인한 1인당 CO₂ 배출량의 수렴이 환경쿠즈네츠 곡선의 도출과 밀접한 관련이 있음을 밝혔다. Jobert, Karanfil and Tykhonenko(2010)는 1971~2006년 동안 유럽의 22개 국가에서 절대적 베타 수렴과 조건부 베타 수렴이 존재하는지에 대해 추정하였다. 분석 결과 절대적 베타 수렴이 존재했고, GDP에서 2차 산업이 차지하는 비중의 감소가 1인당 CO₂ 배출량 감소에 기여하여 조건부 베타 수렴도 나타났다. Camarero, Picazo-Tadeo, and Tamarit(2013a)의 연구는 1960~2008년의 기간 동안 OECD 23개국에서 CO₂ 집약도(GDP당 CO₂ 배출량)에 대해 시그마 수렴과 수렴 클럽이 나타나는지 분석하였다. 그 결과 분류된 4개의 국가 그룹⁹⁾에서 수렴 클럽이 나타남을 보였다. Runar, Amin, and Patrik(2017)은 124개 국가를 OECD 국가와 Non-OECD 국가, 고소득 국가와 저소득 국가로 분류하여 1985~2010년의 기간 동안 1인당 CO₂ 배출량의 절대적 베타 수렴과 조건부 베타 수렴을 분석하였다. 전체 국가 표본과 모든 그룹에서 절대적 베타 수렴이 존재하였으며, 1인당 소득과 제도변수를 고려한 조건부 베타 수렴은 전체 국가 표본, OECD 국가, 고소득 국가에서 유의한 영향을 미쳤다. 이들의 연구에서 제도의

9) ① 수렴 클럽 1: 그리스, 포르투갈, ② 수렴 클럽 2: 호주, 핀란드, 일본, 뉴질랜드, 노르웨이, 스위스, ③ 수렴 클럽 3: 오스트리아, 캐나다, 덴마크, 네덜란드, ④ 수렴 클럽 4: 벨기에, 프랑스, 독일, 이스라엘, 아일랜드, 스웨덴, 영국

질이 CO₂ 배출량에 미치는 영향을 직접효과와 간접효과로 나누어 추정하였는데, 제도의 질이 높아짐에 따라 직접적으로 배출량을 줄이지만 다른 한편으로는 높은 수준의 제도가 경제성장을 촉진시켜 배출량을 늘릴 수 있다는 결과를 도출했다. 최종적으로 이 두 효과를 합하면 제도의 질이 높아짐에 따라 1인당 CO₂ 배출량이 증가하는 것으로 나타났다.

국내의 선행연구에서 오염배출의 수렴 가설 연구는 확률적 수렴 가설을 이용한 조성택·조용성(2009), 김지욱(2010, 2013)의 연구가 있으며, 동태적 패널 임계 분석을 사용한 김재혁·조하현(2017)의 연구가 있다. 조성택·조용성(2009)은 교토의정서 상의 의무감축국가와 비의무감축국가로 분석대상을 분류하고 1971~2002년까지 CO₂ 집약도 증가율의 베타 수렴을 추정하였다. 검정결과 선진국으로 구성된 의무감축국가에서 베타 수렴 현상이 나타났다. 김지욱(2010)은 내생적 다중 구조변화와 상호간 의존성을 고려하는 패널 정상성 검정 방법을 통해 1971~2007년까지 아시아 11개국의 1인당 CO₂ 배출량의 확률적 수렴을 분석하였다. 분석 결과 장기 균형 수준으로 수렴이 이루어지고 있지만 EKC 가설은 성립하지 않는다는 것을 보였다. 김지욱(2013)의 연구에서는 앞서 연구한 분석기간을 2009년까지 연장시켜 모수 및 비 모수 패널 회귀분석을 통해 아시아 11개국의 확률적 수렴을 추정하였으며, 비모수 추정에 의해 확률적 수렴 현상이 나타난 것으로 확인되었다. 김재혁·조하현(2017)은 105개국의 1965~2011년 시계열 자료를 바탕으로 지역별 그룹에 대해서는 1인당 탄소배출 수렴가설을 추정하였고 소득별 그룹에 대해서는 EKC를 의미하는 소득과 탄소배출의 탈동조화 현상을 분석하였다. 전체국가, 유럽, 아메리카, MENA 지역에서 제조업의 비중과 청정에너지 비중에 따라 조건부 수렴이 성립하였고, 고소득 그룹에서만 EKC 가설이 성립하였다.

본 연구는 선행연구들에서 사용된 1인당 CO₂ 배출량 수렴가설을 바탕으로 분석을 진행하되, 이전의 연구들과 두 가지 면에서 차별성 있는 연구를 진행하였다. 첫째, 방법론적인 측면에서 Brock and Taylor(2010)의 Green Solow 모형에 제도의 질을 고려한 확장된 Solow 모형을 고려하였다. 즉, 더 나은 제도적 장치가 궁극적으로 요소의 생산성을 높일 수 있다는 가정 하에 분석을 진행하였다. 둘째, 실증적 분석 측면에서 조건부 수렴과 관련한 선행연구들이 고려하지 않은 제도의 질과 기술수준을 포함하여 추정하였다. 이것은 제도의 질과 기술수준이 경제성장과 CO₂ 배출량 수렴의 관계에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위함이다.¹⁰⁾

III. 분석 방법 및 분석 자료

1. 분석 방법

Brock and Taylor(2010)가 제시한 Green Solow 모형의 생산함수는 $Y = F(K, BL)$ 로 정의되며, 본 연구에서는 제도가 기술수준과 자본의 생산에 미치는 영향을 고려한 조건부 베타 수렴을 추정하기 위해 식 (1)과 같이 생산함수를 설정한다.

$$Y = F(K, BL) = B^{(I-1)} K^{\alpha I} (BL)^{1-\alpha I} \quad (1)$$

여기서 Y 는 자본(K)과 노동(L)에 의해 생산되는 부가가치를, B 는 노동확장적 기술진보(Labor augmenting technology progress)를 의미하며, 생산함수 $F(\cdot)$ 는 규모수익불변(Constant returns to scale, CRS)을 가정한다. I 는 제도의 질을 의미하며 $I \in [0, 1]$ 의 값을 가진다. 상대적으로 가장 높은 제도의 질($I = 1$)을 가지면 전통적인 Solow 모형과 동일한 생산함수를 가지게 되며,¹¹⁾ 자본에 대한 탄력성은 제도의 영향을 받는다고 가정한다. 즉, 제도의 질이 높을수록 자본의 생산성을 증대시킨다. $B^{(I-1)}$ 은 제도의 외부효과로 제도의 질이 열악할수록 기술진보로 인한 생산성의 향상을 충분히 증가시키지 못함을 의미한다.

자본의 축적(\dot{K}), 노동의 증가(\dot{L}), 기술의 진보(\dot{B})는 식 (2)와 같이 정의되며 s 는 저축률을, δ 는 감가상각률을 의미한다. 인구증가율(n)과 기술진보율(g_I)은 외생적으로 주어진다고 가정한다.

$$\dot{K} = sY - \delta K, \quad \dot{L} = nL, \quad \dot{B} = g_I B \quad (2)$$

10) Runar, Amin, and Patrik(2017)에서도 제도의 질을 고려하여 조건부 베타 수렴을 추정하였으나 제도의 질이 배출량에 미치는 직접효과와 제도의 질이 경제성장에 영향을 미쳐 배출량의 증감을 결정하는 간접효과를 통해 설명하였다. 그러나 본 연구는 제도의 질을 상호작용효과를 갖는 변수로 보고 경제성장이 배출량에 미치는 효과가 제도의 질에 따라 결정된다는 것을 설명한다.

11) 제도가 생산과정에 영향을 미치지 않는 Solow 모형을 말한다.

$$\lim_{I \rightarrow 1} B^{(1-\alpha)I} K^{\alpha I} L^{1-\alpha I} = K^{\alpha} (BL)^{1-\alpha}$$

다음으로 오염배출량(E)은 경제활동(F)에 의해 발생한 배출량에서 감축한 오염배출량을 차감한 것으로 정의하며, 오염배출량의 방정식은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 E &= \Omega F - \Omega A(F, F^A) \\
 &= \Omega F \left[1 - A\left(1, \frac{F^A}{F}\right) \right] \\
 &= \Omega F a(\theta) \\
 \text{단, } a(\theta) &\equiv \left[1 - A\left(1, \frac{F^A}{F}\right) \right], \theta = \frac{F^A}{F}
 \end{aligned} \tag{3}$$

Ω 는 부가가치 1단위당 오염배출량, $A(\cdot)$ 는 경제활동(F)과 오염배출량 저감 노력(F^A)에 의해 구성된 함수로 규모의 수익불변을 가정하며, 오염배출량(Ω)을 저감하는 외생적 기술진보율은 g_A 로 가정한다. $a'(\theta) < 0$, $a''(\theta) > 0$ 이 성립하므로 오염배출량 저감 노력에 대해 규모수익체감(Decreasing returns to scale, DRS)이 발생하여 $a(\theta) = (1 - \theta)^\epsilon$ 과 같이 나타낼 수 있으며, ϵ 는 1보다 크다. θ 는 경제활동에서 차지하는 오염배출량 저감 노력의 비율을 의미하며, $\theta = 0$ 인 경우 오염배출량 저감을 위한 노력이 없으므로 오염배출량은 경제활동에 의해서만 결정된다. 생산함수 $F(\cdot)$ 는 제도적 장치에 영향을 받으므로 Ω 는 I 의 영향을 받는다.

오염배출량에 대한 위의 가정들을 고려하여 유효노동(BL)당 오염배출량을 시간(t)에 대해 미분하여 정리하면 식 (4)와 같이 1인당 오염배출 증가율을 도출할 수 있다.¹²⁾

$$\frac{\dot{e}}{e} = -g_A + \frac{\dot{y}}{y} \tag{4}$$

식 (4)에 로그를 취하고 이산적(discrete) 시간 N 으로 나누어 준 후 Barro and Sala-i-Martin(1992)이 제시한 로그 선형화(log-linearization)를 이용하면 식 (5)가 도출된다.¹³⁾ λ 는 정상 상태에 수렴하는 속도를 의미하는 것으로, $\lambda = (1 - \alpha)(\delta + n + g_I)$ 이다.

12) 구체적인 식의 도출 과정은 부록 A-3 참조(Brock and Taylor, 2004a).

13) 구체적인 식의 도출 과정은 부록 A-4 참조(Brock and Taylor, 2004a).

$$\frac{1}{N} \log(y_t / y_{t-N}) = g_A + \frac{(1 - \exp[-\lambda N])}{N} \log(B_{t-N}) + \frac{(1 - \exp[-\lambda N])}{N} \log(y^*) - \frac{(1 - \exp[-\lambda N])}{N} \log(y_{t-N}) \quad (5)$$

식 (4)를 이산적 시간으로 표현한 $(1/N) \log(e_{it} / e_{it-N}) = -g_A + (1/N) \log(y_{it} / y_{it-N})$ 에 식 (5)를 대입하고, 분석대상에 해당하는 모든 국가가 동일한 정상상태 y^* 로 배출량이 수렴하는 것을 가정하면, 1인당 오염배출 증가율에 대한 절대적 베타 수렴 추정식이 식 (6)과 같이 도출된다.

$$\frac{1}{N} \log(e_{it} / e_{it-N}) = \beta_0 + \beta_1 \log(e_{it-N}) + \mu_{it} \quad (6)$$

반면, 국가별로 저축률, 인구증가율, 감가상각률이 다르다면 정상상태도 다르게 나타나게 된다. 따라서 식 (6)에 관측 불가능한 국가의 특성을 고려한 $s_i, \theta_i, (\delta + n + g_I)_i$ 와 y^* 를 대입하면 식 (7)과 같이 제도의 질을 고려한 1인당 오염배출 증가율에 대한 조건부 베타 수렴 추정식이 도출된다.

$$\frac{1}{N} \log(e_{it} / e_{it-N}) = \beta_0 + \beta_1 \log(e_{it-N}) + \beta_2 \log(s_i) + \beta_3 \log(1 - \theta_i) + \beta_4 \log[\delta + n + g_I]_i + \mu_{it} \quad (7)$$

본 연구에서는 국가별 소득수준에 따른 탄소배출의 수렴가설을 분석하기 위해 불균형 패널 자료를 이용하며, System GMM을 사용하여 추정한다. System GMM 추정모형을 사용하는 이유는 다음과 같이 두 가지 이유가 있다. 첫 번째, 종속변수의 시차가 설명 변수로 사용되는 경우 오차항과 상관관계를 갖게 되어 일치 추정량이 구해지지 않을 수 있으므로 1차 차분한 값의 과거 값을 추가적인 도구변수로 사용하는 System GMM을 이용하여 추정한다. 두 번째, Brock and Taylor(2010)는 조건부 베타 수렴 추정 시 시계열

이 짧은 패널 자료의 경우 오차항에 설명되지 않는 이질성이 포함되어 편의를 갖는 비일치추정량(biased inconsistent estimator)의 문제를 제기한다. 분석에 사용된 기술수준과 제도의 질에 대한 변수들은 1996년부터 조사된 자료로 시계열이 짧아 결과의 타당성에 문제가 생길 수 있는데, System GMM은 설명변수의 수준시차변수를 도구변수로 이용하기 때문에 짧은 시계열로 구성되고 표본 수가 많은 데이터를 활용하여 추정하기에 적합하다.

식 (6)에서 도출된 1인당 CO₂ 배출량의 절대적 베타수렴의 회귀식은 (8)과 같다.

$$\Delta \ln GCO_{2i,t+T} = \beta_0 + \gamma \Delta \ln GCO_{2i,t-1} + \beta_1 \Delta \ln CO_{2i,0} + \Delta e_{i,t} \quad (8)$$

위의 식에서 종속변수인 $\ln GCO_{2i,t+T}$ 는 i 국가의 1인당 CO₂ 배출량 증가율을 나타내는 것으로서, $((\ln CO_{2i,t+T} - \ln CO_{2i,0})/T)$ 를 의미한다. 즉, i 국가에서 T 기에 발생하는 1인당 CO₂ 배출량 로그값과 0기에 발생하는 CO₂ 배출량 로그 값의 차이를 분석기간 (T)으로 나눈 것이다. $\ln CO_{2i,0}$ 는 i 국가의 초기 1인당 CO₂ 배출량을 의미하며, β_1 의 부호가 음(-)이면 CO₂ 배출량의 절대적 베타 수렴이 나타나는 것을 말한다. $\ln GCO_{2i,t-1}$ 은 1인당 CO₂ 배출량 증가율의 과거 값을 나타내는 시차변수로 효율적인 추정을 위한 도구변수로 사용되었다.

시그마 수렴은 표준편차를 산술평균으로 나눈 변동계수(Coefficient of Variation, CV)를 종속변수로 사용하여 추세분석을 실행하였으며 추세 변수의 계수가 음(-)이고 통계적으로 유의미하면 시그마 수렴이 나타난다고 볼 수 있다.

1인당 CO₂ 배출량의 조건부 베타 수렴은 식(7)을 적용하여 다음과 같이 세 가지 회귀식을 추정한다. 1인당 소득과 1인당 CO₂ 배출 수렴 관계는 식(9)와 같이 추정하며, 제도의 질과 기술수준에 따른 소득과 1인당 CO₂ 배출량의 관계는 식(10)~(11)과 같이 추정한다.

$$\begin{aligned} \Delta \ln GCO_{2i,t+T} = & \beta_0 + \gamma \Delta \ln GCO_{2i,t-1} + \beta_1 \Delta \ln CO_{2i,0} + \beta_2 \Delta \ln Y_{i,t} \\ & + \beta_3 \Delta \ln IND_{i,t} + \Delta e_{i,t} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \Delta \ln GCO_{2i,t+T} = & \beta_0 + \gamma \Delta \ln GCO_{2i,t-1} + \beta_1 \Delta \ln CO_{2i,0} + \beta_2 \Delta \ln Y_{i,t} \\ & + \beta_3 \Delta INST_{i,t} + \beta_4 \Delta (\ln Y_{i,t} \times INST_{i,t}) \\ & + \beta_5 \Delta IND_{i,t} + \Delta e_{i,t} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \Delta \ln GCO_{2i,t+T} = & \beta_0 + \gamma \Delta \ln GCO_{2i,t-1} + \beta_1 \Delta \ln CO_{2i,0} + \beta_2 \Delta \ln Y_{i,t} \\ & + \beta_3 RD_{i,t} + \beta_4 \Delta (\ln Y_{i,t} \times RD_{i,t}) \\ & + \beta_5 \Delta IND_{i,t} + \Delta e_{i,t} \end{aligned} \quad (11)$$

위의 식에서 $\ln Y_{i,t}$ 는 t 기에 i 국가의 1인당 소득을 의미하며, $INST_{i,t}$ 는 t 기에 i 국가의 제도의 질(quality of institution)을 나타내는데, 부패의 통제(control of corruption), 정부효과성(government effectiveness), 규제 질(regulatory quality), 법치(rule of law), 정치적 안정성(political stability), 시민참여와 책임성(voice and accountability)의 수준을 나타내는 지수들을 포함한다. 각 지수는 0~100점의 범위로 나타내며, 지수의 점수가 높을수록 제도의 질이 높은 것으로 간주한다. 본 연구에서는 6가지 지표를 하나의 지수로 산정하여 변수로 활용하기 위해 주성분 분석(Principal Component Analysis, PCA)¹⁴⁾을 통해 하나의 변수를 생성하였으며 이와 관련된 결과는 부록 <A-2>에 제시되어 있다. $RD_{i,t}$ 는 t 기에 i 국가의 GDP 대비 연구개발지출 비중을 의미하며 $(\ln Y_{i,t} \times INST_{i,t})$ 와 $(\ln Y_{i,t} \times RD_{i,t})$ 는 상호작용항(interaction term)으로 제도의 수준 또는 기술의 수준이 소득과 CO₂ 배출량 증가율 관계에 어떠한 영향을 미치는지 알아본다. 한 나라의 제도의 수준은 탄소세나 온실가스 규제 정책 실행에 영향을 미치며, 기술수준은 에너지 효율성 향상과 녹색 기술 개발에 기여하므로 탄소 배출 감축에 영향을 주게 된다. $IND_{i,t}$ 는 GDP 대비 2차 산업의 비중을 의미하며, 1인당 배출량은 에너지 구조와 관련된 국가의 산업구조에 크게 영향을 받으므로 이러한 특성을 통제하는 변수로 사용되었다.

14) 주성분 분석은 서로 연관된 여러 개의 변수의 정보를 조합해서 이 변수들의 정보를 가능한 한 많이 함축하고 있는 새로운 변수를 생성하는 방법이다. 각 주성분의 고유값(eigenvalue)을 사용하여 이들 변수의 움직임이 각 주성분이 어느 정도 나타내는가를 알아볼 수 있으며, 모든 국가에 영향을 미치는 공통요인을 추출한 후 공적분 관계가 존재하는지 검증해야 한다. 본 연구에서는 주성분 분석에서 설명력이 가장 높은 고유값을 제도의 질에 대한 대리변수로 이용하였다.

2. 분석 자료

본 연구는 1980~2013년의 분석 기간을 대상으로 152개 국가의 불균형 패널 자료를 활용하였다. 분석대상에 해당하는 국가의 분류는 World Bank의 소득 분류 기준으로 편성하였으며, 부록 <A-1>에 제시된 바와 같이 고소득 국가 48개국, 중소득 국가 39개국, 저소득 국가 65개국을 대상으로 하였다. World Bank에서는 중소득 국가를 상위 중소득 국가와 하위 중소득 국가로 나누는데, 본 연구에서는 하위 중소득 국가와 저소득 국가를 합쳐 저소득 국가로 구성하였다. 각 변수별 정의와 출처는 <표 1>에 제시하였다. 본 연구의 분석에 사용된 1인당 CO₂ 배출량, 1인당 GDP, 연구개발지출 비중, 2차 산업 부가가치 비중은 World Bank의 World Development Indicator(WDI)에서 제공하는 자료를 사용하였으며, 제도의 질은 앞에서 설명된 바와 같이 총 6개 부문으로 나누어 제도의 질을 평가하는 World Governance Indicators(WGI)의 자료를 활용하였다. 조건부 베타 수렴 분석에서 제도의 질과 기술수준을 포함하여 분석하는 경우 WGI 자료와 GDP 대비 R&D 지출 비중에 대한 자료가 1996년부터 제공되므로 분석 기간을 1996~2013년으로 하였다.

<표 1> 변수에 대한 정의와 자료의 출처

변수	정의	출처
$GCO_{2i,t+T}$	1인당 CO ₂ 배출량 성장률	World Bank (WDI)
$CO_{2i,0}$	초기 1인당 CO ₂ 배출량(단위: metric tons)	
$Y_{i,t}$	1인당 GDP(단위: constant 2010 US\$)	
$RD_{i,t}$	GDP 대비 연구개발지출 비중(단위: % of GDP)	
$IND_{i,t}$	GDP 대비 2차 산업 부가가치 비중(단위: % of GDP)	
$INST_{i,t}$	Control of corruption(부패의 통제) Government effectiveness(정부 효과성) Regulatory quality(규제의 질) Rule of law(법치) Political stability(정치적 안정성) Voice and accountability(시민참여와 책임성)	World Bank (WGI)

IV. 분석결과

1. 소득 그룹별 CO₂ 배출량 추이

1980~2013년까지 소득 그룹별 1인당 CO₂ 배출량 변화 추이를 <표 2>와 <그림 1>에서 살펴보면, 고소득 국가 그룹(HIC)의 1980년 1인당 CO₂ 배출량은 12.29톤에서 2013년 11.23톤으로 연평균 -0.274%의 감소 추세를 보였다. 고소득 국가 내에서 초기 배출량이 높은 국가(H→L)의 연평균 증가율은 -0.641%로 감소하였으며, 초기 배출량이 낮은 국가(L→H)는 0.635%의 증가율을 보였다. 배출량의 감소세를 보이는 고소득 국가 그룹에서는 발전효율 개선, 연료 전환, 탄소세와 탄소배출권 거래제 시행 등을 통해 배출량 감소를 이끈 OECD 내 유럽 국가들¹⁵⁾이 주요한 역할을 한 것으로 생각된다. 다음으로 중소득 국가 그룹(MIC)의 1인당 CO₂ 배출량 연평균 증가율은 3.407%로 나타났으며, 1980년에 2.05톤에서 2013년 6.20톤으로 증가하였다. 중소득 국가 내 초기 배출량이 높은 국가와 낮은 국가는 각각 1.294%, 4.297%의 증가율을 보여 초기 배출량이 높았던 국가가 배출량이 낮았던 국가보다 증가율이 낮은 것으로 나타났다. 마지막으로 저소득 국가 그룹(LIC)은 1980년 0.15톤에서 2013년 0.40톤으로 연평균 3.039%의 증가율을 보였으며, 초기 배출량이 높은 국가의 연평균 증가율은 2.823%, 초기 배출량이 낮은 국가의 연평균 증가율은 2.868%로 나타났다. 1인당 CO₂ 배출량의 연평균 증가율이 가장 높은 그룹은 중소득 국가 내 초기 배출량이 낮은 국가로 이 그룹 내에 있는 국가에는 급격한 경제성장으로 인한 전력 생산의 증가로 이산화탄소 배출의 증가가 두드러지게 나타난 중국¹⁶⁾과 2000년대에 화석연료 소비의 빠른 증가가 이루어진 에콰도르, 콜롬비아, 페루, 브라질 등 일부 중남미 지역¹⁷⁾이 포함되어 있다.

15) 1990~2013년 CO₂ 배출량 감소율: -1.78%(IEA, CO₂ Emissions from Fuel Combustion 2016)

16) 1990~2013년 CO₂ 배출량 증가율: 332.6%(IEA, CO₂ Emissions from Fuel Combustion 2016)

17) 1990~2013년 CO₂ 배출량 증가율: 284.5%(IEA, CO₂ Emissions from Fuel Combustion 2016)

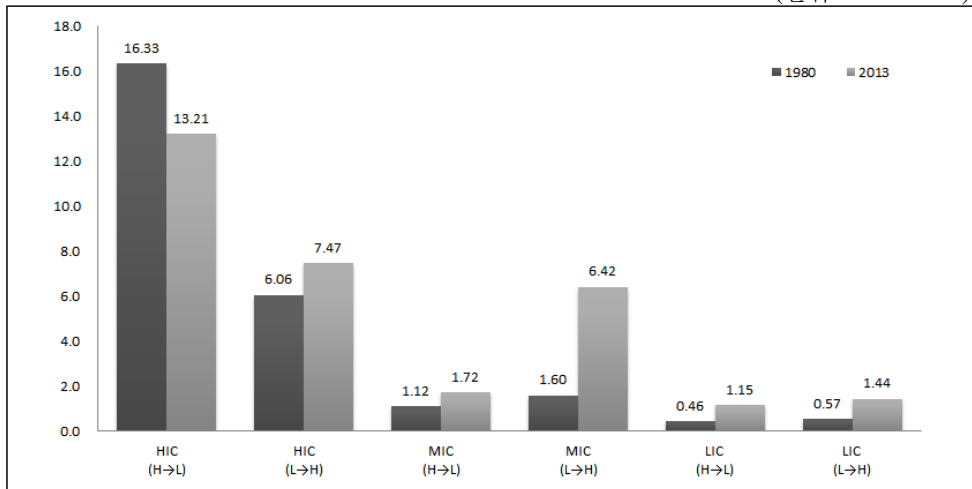
〈표 2〉 소득 그룹별 1인당 CO₂ 배출량 추이

(단위: metric tons)

	(1) HIC			(2) MIC			(3) LIC		
	H→L	L→H	Total	H→L	L→H	Total	H→L	L→H	Total
1980	16.33	6.06	12.29	1.12	1.60	2.05	0.46	0.57	0.15
1985	14.75	5.90	11.29	1.20	1.86	2.31	0.51	0.63	0.15
1990	14.65	6.76	11.65	1.20	2.09	2.50	0.58	0.72	0.15
1995	14.69	7.38	11.96	1.27	2.59	2.97	0.68	0.86	0.17
2000	15.37	7.90	12.63	1.34	2.55	2.99	0.78	0.99	0.21
2005	15.18	8.11	12.63	1.52	4.00	4.24	0.88	1.09	0.29
2010	14.12	7.57	11.80	1.66	5.62	5.56	1.05	1.31	0.37
2013	13.21	7.47	11.23	1.72	6.42	6.20	1.15	1.44	0.40
연평균 증가율	-0.641%	0.635%	-0.274%	1.294%	4.297%	3.407%	2.823%	2.868%	3.039%

〈그림 1〉 소득 그룹별 1인당 CO₂ 배출량 변화

(단위: metric tons)



2. 1인당 CO₂ 배출량의 절대적 베타 수렴

〈표 3〉은 System GMM을 이용하여 소득 그룹별 절대적 베타 수렴 현상을 분석한 결과이며 〈그림 2〉는 소득 그룹별 절대적 베타 수렴의 추이를 그래프로 나타낸 것이다. 각 소득 그룹별로 1980~2013년까지의 전체 기간과 10년 단위 기간으로 나누어 분석하였으며,

연도더미를 포함하였다. 절대적 베타 수렴 현상이 나타난다는 것은 각 기간 동안 각 소득 그룹별로 초기 1인당 CO₂ 배출량이 높았던 국가가 같은 기간 동안 1인당 CO₂ 배출량이 낮았던 국가보다 1인당 CO₂ 배출량의 증가율이 더디거나 혹은 감소하는 것을 의미한다.

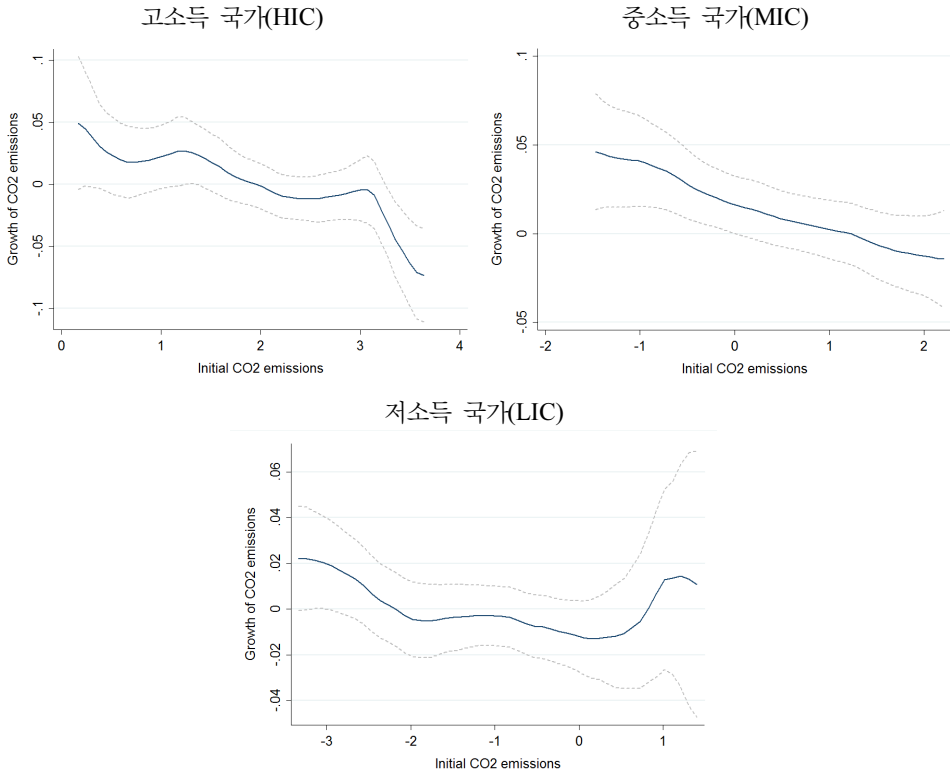
절대적 베타 수렴 결과를 살펴보면, 전체 178개의 국가(ALL)에 대한 기간별 분석은 유의하지 않아 수렴이 나타나지 않았지만, 전체 기간에 대해서는 수렴 현상이 나타났다. 다음으로 국가 소득 그룹별 분석 결과 고소득 국가 그룹은 모든 분석기간에 대해서 수렴이 나타났고, 중소득 국가 그룹은 2000~2013년과 전체 기간에 대해서 수렴이 나타나는 것을 확인했다. 저소득 국가 그룹은 1990~2000년에만 수렴이 나타났고 다른 분석 기간에 대해서는 통계적 유의성이 없어 수렴이 존재하지 않는 것으로 확인되었다. 소득 그룹별 절대적 베타 수렴 추이 그래프를 통해서도 분명하게 그룹별 수렴현상을 관찰 할 수 있다. <그림 2>에서 가로축은 초기 1인당 CO₂ 배출량을 보여주며, 세로축은 1인당 CO₂ 배출량의 성장률을 보여준다. 고소득 국가와 중소득 국가 그룹은 1980~2013년까지 초기 (0)에 1인당 CO₂ 배출량이 수준이 낮았던 국가가 1인당 CO₂ 배출량이 높았던 국가에 비해 배출량 성장률이 더 높은 것을 보여준다. 그러나 저소득 국가의 경우 그 차이가 확연하게 드러나지 않아 절대적 베타수렴의 현상이 없다는 것을 알 수 있다.

<표 3> System GMM을 이용한 기간별 절대적 베타 수렴 모형 추정 결과

	종속변수: 1인당 CO ₂ 배출량 성장률($\ln CO_{2i,t} - \ln CO_{2i,0}$)							
	(1) ALL		(2) HIC		(3) MIC		(4) LIC	
	$\ln CO_{2i,0}$	Constant	$\ln CO_{2i,0}$	Constant	$\ln CO_{2i,0}$	Constant	$\ln CO_{2i,0}$	Constant
1980-1990	-0.007 (-1.28)	-0.0004 (-0.14)	-0.038*** (-2.24)	0.079** (2.21)	-0.003 (-0.36)	0.003 (0.70)	0.003 (0.17)	-0.001 (-0.05)
1990-2000	-0.006 (-1.50)	0.004*** (2.44)	-0.011** (-2.52)	0.026*** (2.73)	-0.006 (-1.46)	0.009*** (3.95)	-0.012* (-1.98)	-0.015 (-1.34)
2000-2013	-0.001 (-0.99)	0.002*** (2.63)	-0.001*** (-2.82)	0.008*** (2.79)	-0.013*** (-3.47)	0.012*** (4.40)	-0.001 (-1.03)	9.e-06 (0.01)
1980-2013	-0.005*** (-3.03)	0.004*** (2.79)	-0.017*** (-3.20)	0.035*** (3.02)	-0.007*** (-4.36)	0.008*** (5.01)	-0.003 (-0.89)	-0.001 (-0.05)
연도더미	Yes		Yes		Yes		Yes	

주: 괄호 안은 t-값을 나타내며, ***, **, *은 각각 1%, 5%, 10% 유의수준 하에서 통계적으로 유의함.

(그림 2) 소득 그룹별 절대적 베타 수렴 추이



소득 그룹별 수렴 속도를 살펴보면, 전체 기간에 대해 고소득 국가 그룹은 -0.017 , 중 소득 국가 그룹은 -0.007 로 고소득 국가가 월등히 빠른 수렴 속도를 가진 것으로 나타났다. CO₂ 배출량 추이에서 살펴봤듯이, 고소득 국가에 속한 유럽의 선진국들은 타 국가에 비해 일찍이 경제성장을 이루었으며 1990년대 이후 CO₂ 배출 감축을 위한 연료 효율 개선 등 물리적 수단과 탄소세 등과 같은 경제적 정책을 수반하였기 때문에 이러한 결과가 나타났다고 볼 수 있다. 중소득 국가 그룹은 2000년대 이후 일부 경제 발전을 위한 화석 연료 사용 급증으로 고소득 국가 그룹보다 수렴 속도가 느리지만, 불가리아, 멕시코 등의 국가에서 신재생에너지 사용 확대를 통한 화석연료 대체 등 CO₂ 감축을 위한 정책에 노력을 쏟고 있다.¹⁸⁾ 그러나 베네수엘라, 아르헨티나 등 일부 중소득 국가의 GDP 성장률의 정체로 인한 에너지 공급 능력의 위축으로 1인당 CO₂ 배출량의 속도가 이전보다

낮은 속도로 증가한 것으로 보인다.¹⁹⁾

3. 1인당 CO₂ 배출량의 시그마 수렴

시그마 수렴은 추세에 대한 분석이므로 자료의 안정성 검정을 위해 패널 단위근 검정을 실시하였으며, 그 결과는 <표 4>에 나타나 있다. 각 소득 그룹별로 CO₂ 배출량 성장률에 대해 모든 횡단면이 동일한 단위근을 갖는다고 가정하는 LLC 검정과 횡단면의 개별적 이질성을 가정하는 IPS 검정을 실시하였다. LLC 검정의 귀무가설은 모든 i 에 대해 $H_0 : \rho_i - 1 = \gamma = 0$ 으로 ‘패널 비정상성이 존재한다.’는 것을 의미하며, 귀무가설을 기각하면 모든 i 에서 정상적 시계열임을 뜻한다. IPS 검정의 귀무가설도 LLC 검정과 동일하나, 대립 가설의 제약을 완화하여 그룹 간에 이질성을 허용한다.²⁰⁾

<표 4> 패널 단위근 검정 결과

		1인당 CO ₂ 배출량 성장률($\ln CO_{2,t} - \ln CO_{2,t-1}$)							
		(1) ALL		(2) HIC		(3) MIC		(4) LIC	
		LLC	IPS	LLC	IPS	LLC	IPS	LLC	IPS
1980 -1990	Level	-0.064	-1.393	-0.496	-3.988***	22.011	1.291	-9.617***	-1.203
	I(1)	-14.950***	-2.774***	-7.709***	-4.065***	-10.552***	-1.509	-7.791***	-2.632***
1990 -2000	Level	-13.341***	-1.804***	-10.159***	-2.683***	-2.489***	-1.339	-11.262***	-1.442
	I(1)	-23.463***	-3.538***	-8.502***	-4.225***	-16.161***	-4.350***	-16.939***	-2.465***
2000 -2013	Level	5.150	-1.048	-2.309*	-1.434	-13.445***	-2.310***	28.920	0.095
	I(1)	-33.694***	-3.907***	-12.362***	-5.018***	-44.808***	-3.984***	5.041	-3.003***
1980 -2013	Level	-5.301***	-2.429***	-2.829***	-4.253***	-4.322***	-1.373	-1.831**	-1.739**
	I(1)	-34.706***	-6.094***	-17.773***	-7.422***	-26.891***	-6.887***	-17.742***	-4.543***

주1: ***, **, *은 각각 1%, 5%, 10% 유의수준 하에서 귀무가설을 기각함.

주2: LLC 단위근 검정과 IPS 단위근 검정의 귀무가설은 종속변수의 1차 시차변수 계수의 추정치가 모든 횡단면에서 0임을 가정함.

18) 2014년 기준 불가리아의 재생에너지 소비 비중이 18%를 기록하여 2020년 재생에너지 소비 비중 목표 16%를 달성하였다(대외경제정책연구원, 2009). 멕시코는 온실가스 감축을 위해, 2007년 온실가스 저감 프로그램 Green plan을 도입하고, 2013년 탄소배출권 거래제 실행하였으며, 온실가스를 2020년까지 배출 전망치 수준에서 25% 감축하는 자발적 감축 목표를 수립하였다(환경부, 2016).

19) 세계에너지시장인사이트 제17-7호(2017. 3. 6) 참조.

20) (LLC 검정) $H_1 : \rho_i - 1 = \gamma < 0, \text{ for all } i$, (IPS 검정) $H_1 : \rho_i - 1 = \gamma_i < 0, \text{ for all } i$

각 기간별 패널 단위근 검정결과를 살펴보면, 수준 변수를 이용한 단위근 검정에서는 귀무가설을 기각하지 못하는 경우가 종종 있으나, 1차 차분한 시계열 변수의 단위근 검정 결과에서는 중소득 국가의 1980~1990년 IPS 검정과 저소득 국가의 2000~2013년 LLC 검정을 제외하고는 1% 유의수준 하에서 패널 단위근이 존재하지 않는 안정적인 시계열인 것으로 나타났다.

소득 그룹별 시그마 수렴을 분석한 결과는 <표 5>와 <그림 3>에 나타나 있다. 시그마 수렴 현상이 나타난다는 것은 시간의 경과에 따라 분산으로 측정되는 국가 간 배출량의 산포도가 축소되는 것으로 즉, 소득 그룹별 1인당 평균 CO₂ 배출량을 향해 움직인다는 것을 의미한다. 만약 분산의 값이 정상상태 수준보다 낮다면, 분산의 값이 커지게 된다. 시그마 수렴에 있어 베타 수렴은 필요조건이기는 하지만 충분조건은 아니다.

시그마 수렴에서는 연도 변수(Year)의 부호와 유의성을 확인하는 것이 중요하다. 먼저, 각 기간별 연도 변수의 유의성을 살펴보면, 대부분의 소득 그룹에서 1%의 유의수준 하에서 유의한 것을 알 수 있다. 그러나 변수의 부호를 살펴보면, 2000~2013년 기간의 모든 소득 그룹, 1980~2013년 기간의 중소득 국가, 그리고 1980~1990년 기간의 저소득 국가에서 양의 부호가 나타나, 시그마 수렴이 나타나지 않는다는 것을 확인했다.

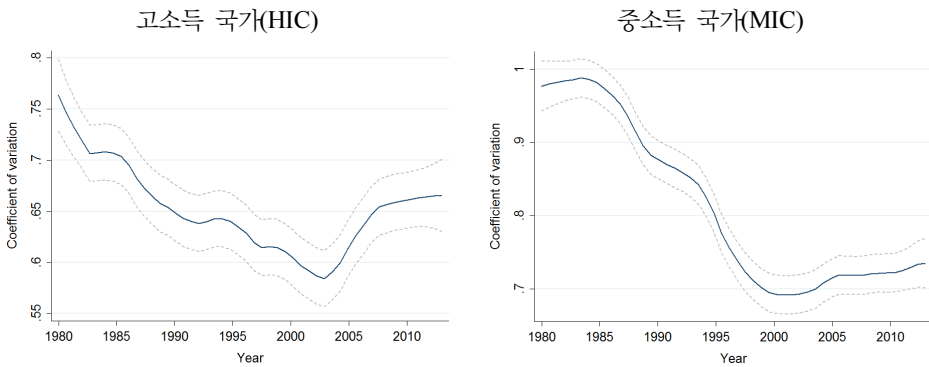
소득 그룹별 각 기간의 절대적 베타 수렴과 시그마 수렴을 살펴본 결과를 정리하면, 고소득 국가는 1980~1990년과 1990~2000년의 기간에 각각 절대적 베타 수렴과 시그마 수렴이 나타나 초기의 1인당 CO₂ 배출량 수준이 높았던 국가의 배출량 증가가 느렸을 뿐 아니라 고소득 국가 그룹 내의 1인당 CO₂ 배출량이 평균값으로 수렴했음을 알 수 있다. 그러나 2000~2013년 기간에 고소득 국가 그룹 내 초기 배출량이 높았던 국가의 배출량 증가율은 감소하였으나, 국가 간 배출량이 평균 수준으로는 수렴하지 않은 것으로 나타나, 이 기간에는 초기 배출량이 낮았던 국가들의 배출량 증가율이 초기 배출량이 높았던 국가보다 훨씬 높게 나타나 시그마 수렴 현상이 나타나지 않았음을 알 수 있다. 중소득 국가는 2000~2013년에만 절대적 베타 수렴이 나타났으나 이 기간에 시그마 수렴은 나타나지 않았다. 저소득 국가의 경우, 1990~2000년 기간에 시그마 수렴이 나타난 것으로 확인되었으나, 전체적으로 배출량 수렴에 대한 유의한 결과를 찾아보기 어려운 것으로 나타났다.

〈표 5〉 추세분석을 통한 시그마 수렴 모형 추정 결과

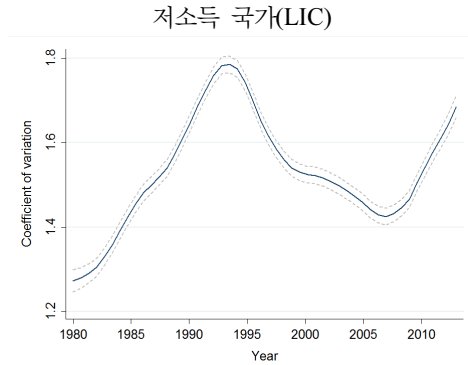
	중속변수: 1인당 CO ₂ 배출량의 변동계수(ΔCV)					
	1980-1990년			1990-2000년		
	σ_{t-1}	Year	Constant	σ_{t-1}	Year	Constant
ALL	-0.220*** (0.013)	-0.0002 (0.000)	0.586 (0.788)	-0.441*** (0.017)	-0.011*** (0.001)	22.050*** (1.294)
HIC	-0.918*** (0.026)	-0.006*** (0.000)	12.788*** (0.902)	-1.240*** (0.049)	-0.004*** (0.000)	9.134*** (0.745)
MIC	-0.129*** (0.027)	-0.008*** (0.000)	16.048*** (0.618)	-0.913*** (0.045)	-0.018*** (0.001)	37.423*** (2.296)
LIC	-0.448*** (0.000)	0.012*** (0.000)	-23.370*** (0.000)	-0.411*** (0.000)	-0.020*** (0.000)	40.424*** (0.000)
	2000-2013년			1980-2013년		
	σ_{t-1}	Year	Constant	σ_{t-1}	Year	Constant
	ALL	-0.132*** (0.021)	0.005*** (0.000)	-10.655*** (0.604)	-0.175*** (0.008)	0.00004 (0.000)
HIC	-0.648*** (0.035)	0.004*** (0.000)	-8.156*** (0.611)	-0.400*** (0.014)	-0.0002** (0.000)	0.567*** (0.158)
MIC	-0.999*** (0.000)	0.004*** (0.000)	-7.326*** (0.000)	-0.194*** (0.013)	-0.003*** (0.000)	5.149*** (0.475)
LIC	0.008 (0.030)	0.012*** (0.001)	-23.449*** (1.221)	-0.268*** (0.019)	0.0007*** (0.000)	-1.179*** (0.444)

주: ()은 표준오차를 나타내며, ***, **, *은 각각 1%, 5%, 10% 유의수준 하에서 통계적으로 유의함.

〈그림 3〉 소득 그룹별 시그마 수렴 추이



〈그림 3〉 소득 그룹별 시그마 수렴 추이(Continued)



4. 1인당 CO₂ 배출량의 조건부 베타 수렴

본 연구의 1인당 CO₂ 배출량의 조건부 베타 수렴은 첫째, 소득수준이 배출량 수렴에 미치는 영향을 분석하며, 둘째, 제도의 질과 기술수준이 소득수준과 배출량 수렴 관계에 미치는 영향에 대해 분석한다. 즉, 조건부 베타 수렴이 존재한다는 것은 초기의 경제구조가 유사한 국가 간에 배출량의 수렴이 이루어지는 것을 말하며, 제도의 질과 기술수준이 유사한 국가 그룹별로 상이한 정상상태가 존재하여 소득 그룹별로 소득이 성장함에 따라 1인당 CO₂ 배출량의 수렴이 서로 다른 수준으로 수렴하는 것을 일컫는다.

<표 6>은 System GMM을 이용하여 1996~2013년의 기간에 대해 식 (9)~(11)에 제시된 식을 분석한 결과이며, 소득 그룹별 1인당 CO₂ 배출량 성장률을 종속변수로 하여 1인당 소득, 제도의 질, GDP 대비 R&D 투자 비중 등의 설명변수에 따라 조건부 베타 수렴이 나타나는지를 보여준다. 소득 그룹별 결과에서 (1)은 식 (9), (2)는 식 (10), (3)은 식 (11)을 추정된 결과이다. 절대적 베타 수렴은 조건부 베타 수렴과의 비교를 위해 1996~2013년까지 추가로 추정하여 결과를 제시하였다.

먼저 고소득 국가에 대한 추정결과를 보면, 결과 (1)에서 1인당 소득과 2차 산업 비중의 증가는 1인당 CO₂ 배출량 성장률을 유의미하게 증가시키는 것으로 나타났으나 경제의 성장으로 배출량 수렴의 계수가 -0.0039에서 -0.0062로 높아져 수렴의 속도가 오히려 가속화됐음을 알 수 있다. 제도의 질을 포함하여 분석한 결과에서는 1인당 소득과 제

〈표 6〉 System GMM을 이용한 절대적·조건부 베타 수렴 결과(1996–2013)

1. 절대적 베타 수렴

	종속변수: 1인당 CO ₂ 배출량 성장률($\ln CO_{2i,t} - \ln CO_{2i,0}$)		
	HIC	MIC	LIC
$\ln CO_{2i,0}$	-0.0039*** (0.001)	-0.0088*** (0.001)	-0.0013 (0.001)
Constant	0.0085*** (0.002)	0.0096*** (0.001)	0.0011 (0.002)
	863	702	1170

2. 조건부 베타 수렴

	종속변수: 1인당 CO ₂ 배출량 성장률($\ln CO_{2i,t} - \ln CO_{2i,0}$)								
	HIC			MIC			LIC		
	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
$\ln CO_{2i,0}$	-0.0062*** (0.001)	-0.0073*** (0.001)	-0.0064*** (0.002)	-0.0074*** (0.001)	-0.0112*** (0.001)	-0.0037*** (0.001)	-0.0006 (0.001)	-0.0015 (0.001)	-0.0003 (0.001)
$\ln Y$	0.0026** (0.001)	0.0050*** (0.002)	0.0013 (0.002)	0.0038** (0.002)	0.0037 (0.002)	0.0161*** (0.005)	-0.0011 (0.001)	-0.0004 (0.002)	0.0188** (0.009)
$INST$		0.0016* (0.001)			-0.0071 (0.007)			-0.0072* (0.004)	
$\ln Y * INST$		-0.0001* (0.001)			0.0009 (0.001)			0.0012** (0.001)	
RD			-0.0015** (0.001)			-0.0060** (0.003)			-0.0095 (0.006)
$\ln Y * RD$			-0.0003** (0.000)			0.0013*** (0.000)			0.0006* (0.000)
IND	0.0001*** (0.000)	0.0001** (0.000)	0.0004*** (0.000)	0.00005 (0.000)	0.0001*** (0.000)	0.0002* (0.000)	-0.0001 (0.000)	0.0001 (0.000)	0.0004* (0.000)
Constant	-0.0180 (0.013)	-0.0343** (0.017)	-0.0062 (0.018)	-0.0246* (0.014)	-0.0241 (0.021)	-0.0021 (0.030)	0.0005 (0.010)	0.0056 (0.016)	-0.0794*** (0.023)
연도더미	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Hansen 검정	0.157	0.120	0.606	0.316	0.215	0.308	0.830	0.178	0.333
국가 수	48	48	42	39	39	27	64	64	38
관측치	810	665	468	692	572	248	1069	907	196

주1: 괄호 안은 표준오차를 나타내며, ***, **, *은 각각 1%, 5%, 10% 유의수준 하에서 통계적으로 유의함.

주2: Hansen 검정은 GMM이 제공하는 도구변수의 과대식별의 적절성을 판단하는 것으로, 귀무가설을 기각할 수 없으면 사용한 도구변수가 통계적으로 유효한 것을 의미함.

도의 질이 유의미한 양(+)의 부호로 추정되었으나, 상호작용항인 ($\ln Y \times INST$)가 음(-)의 부호로 유의하게 추정되었다. 이는 제도의 질이 높아질수록 1인당 소득이 1인당 CO₂ 배출량 증가에 미치는 영향을 약화시켜 배출량 증가율이 둔화되는 것을 의미한다. 또한 (1)의 결과보다 (2)의 결과에서 배출량의 수렴 속도가 -0.0062에서 -0.0073으로 더 높아져 제도의 질은 소득 증가에 따른 CO₂ 배출량 수렴에 긍정적인 역할을 하는 것으로 볼 수 있다. 다음으로, 기술수준을 포함하여 추정한 (3)의 결과를 보면, 1인당 소득은 유의미하지 않지만, 기술수준을 나타내는 GDP 대비 R&D 지출 비중과 상호작용항인 ($\ln Y \times RD$)가 5% 유의수준 하에서 유의하게 나타나 기술수준의 향상은 소득의 증가로 인한 배출량 증가율 감소에 영향을 미치며, 수렴의 속도도 -0.0064로 높아져 (1)의 결과보다 속도가 빠른 것으로 나타났다. 고소득 국가는 제도의 질과 기술수준 모두 1인당 배출량 감소에 중요한 역할을 하며, 배출량 수렴의 속도를 비교하면 제도의 수준이 주요한 역할을 하는 것으로 판단된다.

다음으로 중소득 국가에 대한 추정 결과 (1)에서 1인당 소득의 증가와 2차 산업 비중의 증가로 1인당 CO₂ 배출량이 증가하였으며 소득의 성장으로 배출량의 수렴 속도가 -0.0088에서 -0.0074로 느려진 것으로 나타났다. 이는 고소득 국가의 경제 성장이 성숙기에 도달한 것에 비해 중소득 국가는 탄소를 많이 배출하는 에너지다소비 업종을 기반으로 경제가 성장하고 있는 신흥국들이 포함되어 있고, 초기 배출량 성장률이 높았던 국가들은 수렴의 속도가 다소 둔화된 것으로 해석할 수 있다. 제도의 질을 포함한 분석에서 제도변수는 유의미하지 못한 것으로 나타났으며, 기술수준을 포함한 추정 결과 (3)을 보면 1인당 소득은 유의한 양(+)의 부호를 가지는 반면, GDP 대비 R&D 지출 비중은 유의한 음(-)의 부호로 추정되었다. 그러나 상호작용항이 유의한 양(+)의 부호로 추정되어 경제의 성장으로 1인당 CO₂ 배출량 성장률이 증가세에 있을 뿐 아니라 기술수준의 향상이 오히려 배출량 증가를 가속화 시키는 것으로 나타났다. 다시 말해서, 중소득 국가는 기술수준이 높아질수록 1인당 소득의 증가가 CO₂ 배출량을 더 빠르게 증가시키는 현상을 보인다. 1인당 CO₂ 배출량의 수렴 속도도 (1)의 결과는 -0.0074로 나타났으나 (3)의 결과에서 -0.0037로 나타나 수렴 속도가 더 느려진 것으로 나타났다. 고소득 국가와 달리, 중소득 국가는 환경보호를 위한 기술 투자보다는 경제 성장을 위한 기술 개발과 투자에 더 큰 선호를 가지기 때문에 나타나는 현상으로 볼 수 있다.

마지막으로 저소득 국가에서는 제도변수와 상호작용항이 1인당 배출량 성장률에 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났지만 1인당 배출량 성장률 수렴 계수와 1인당 소득의 계수가 유의하지 않아 정확한 해석이 어렵다. 따라서 결과 (3)의 추정 결과만이 유의미한 것으로 나타났으며, 중소득 국가와 마찬가지로 기술수준의 향상은 1인당 소득의 증가로 인한 배출량의 증가율을 더 높이며 CO₂ 배출량 수렴은 나타나지 않았다.

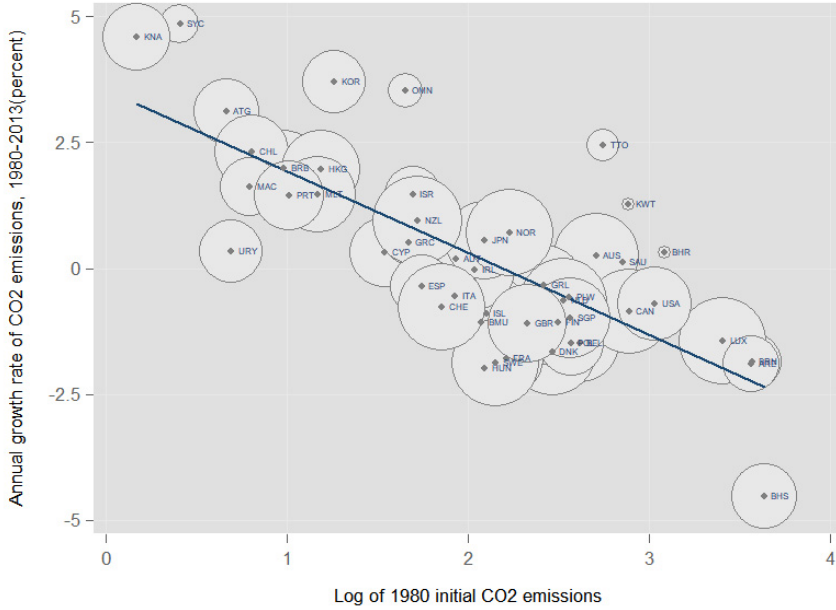
<그림 4>를 통해 베타 조건부 수렴 현상의 추정결과를 더 뚜렷하게 대조하여 살펴볼 수 있다. 위의 추정결과를 통해 소득 그룹별 유의미한 변수에 따른 CO₂ 배출량 성장률과 초기 CO₂ 배출량의 관계를 나타내었다. <그림 4>의 1)은 제도의 질에 따른 고소득 국가 그룹의 CO₂ 배출량 수렴을 보여주며, 원의 크기가 클수록 제도의 질이 높은 것을 의미한다. 초기 배출량이 낮았던 국가들이 CO₂ 배출량의 성장률이 높다는 것을 확인 할 수 있으며 제도의 질이 높은 국가들은 중간 지점에 모여 있는 것을 볼 수 있는데, 다른 국가에 비해 배출량 성장률 증가의 수렴 속도가 더디거나 감소하고 있음을 보여준다. <그림 4>의 2)는 기술수준에 따른 고소득 국가 그룹의 CO₂ 배출량 수렴을 나타내며, 원의 크기가 클수록 기술수준이 높은 것을 의미한다. 세로축의 0을 기준으로 보면 기술수준이 높은 국가일수록 배출량이 감소하고 있음을 알 수 있다. <그림 4>의 3)과 4)는 기술수준에 따른 중소득 국가 그룹과 저소득 국가 그룹의 배출량 수렴 현상을 보여준다. 3)의 그림을 보면 중소득 국가에서도 CO₂ 배출량 수렴 현상이 나타나지만, 상대적으로 기술수준이 높은 국가가 CO₂ 배출량 증가율이 더 높은 것을 확인 할 수 있다. 4)의 그림을 보면 고소득 국가와 중소득 국가에 비해 추세선의 기울기가 평평하고 각 국가의 자료의 위치가 그래프 내에 불규칙하게 흩어져 있어 베타 수렴 현상이 나타난다고 보기 어려우며, 중소득 국가와 마찬가지로 기술수준이 높은 일부 국가가 CO₂ 배출량 증가율이 높은 것으로 나타났다.

이 결과를 통해, 소득 그룹별로 제도의 질과 기술수준에 따라 소득수준과 CO₂ 배출량의 수렴의 관계가 상이하게 나타남을 알 수 있다. 즉, 급격한 경제성장이 이루어지는 저소득 또는 중소득 단계에서는 기술진보가 진행되지만 배출량 성장률이 그 수준을 압도하게 된다. 그러나 소득수준이 균형 성장 경로에 접근함에 따라 고소득 단계에서는 경제성장이 둔화되고 기술진보가 CO₂ 배출량의 저감에 미치는 영향이 압도하게 되어 CO₂ 배출량이 감소하게 된다. 특히, 한 국가의 제도가 오염을 규제하고 환경의 질 향상을 위

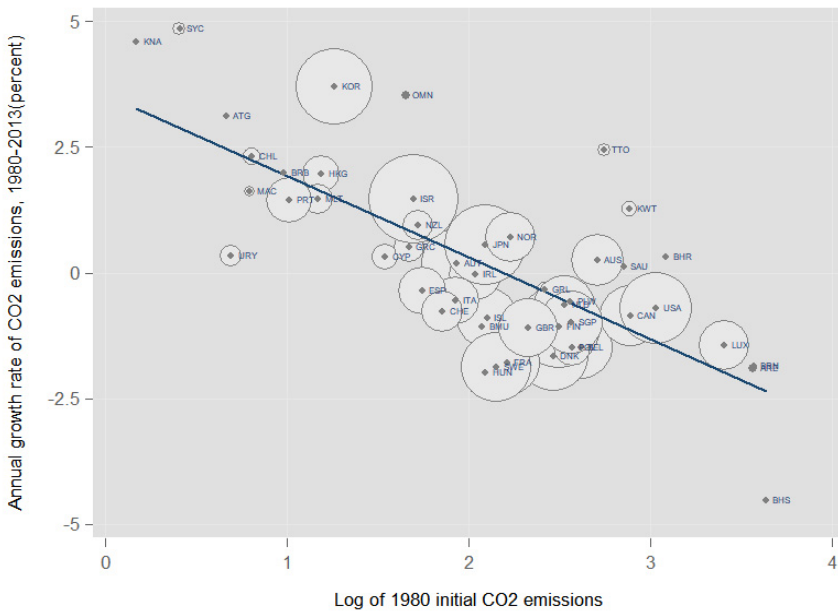
국가별 소득수준에 따른 1인당 CO₂ 배출량 수렴 분석

<그림 4> 소득 그룹별 조건부 베타 수렴

(1) 고소득 국가(제도)

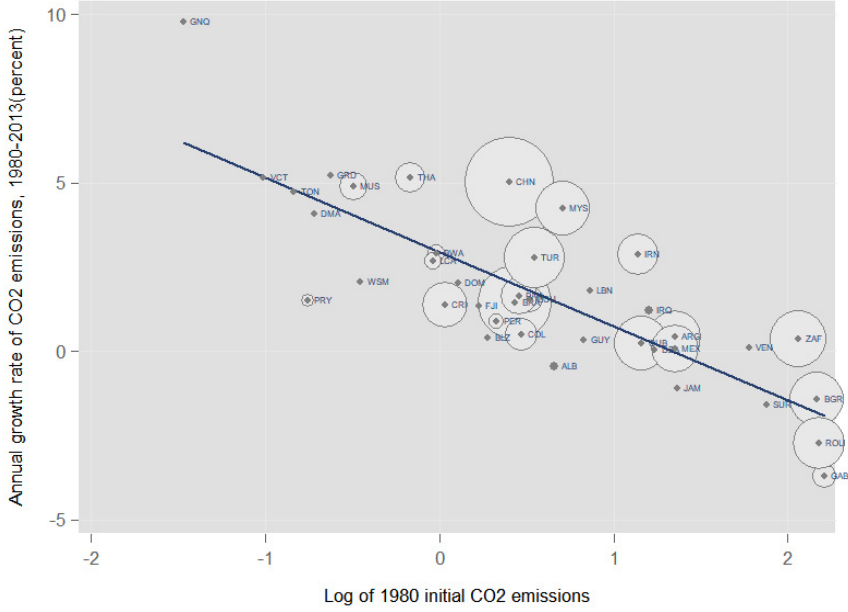


(2) 고소득 국가(R&D 지출)

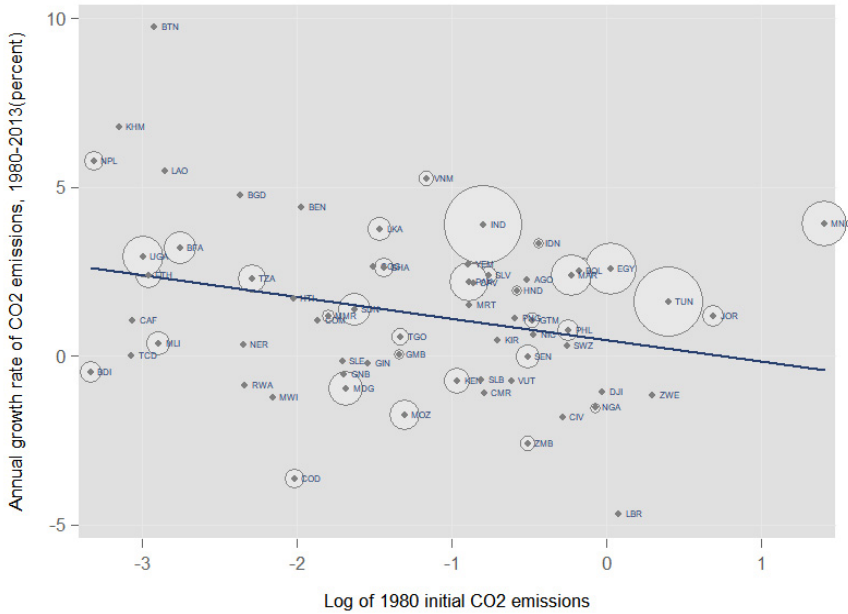


〈그림 4〉 소득 그룹별 조건부 베타 수렴(Continued)

(3) 중소득 국가(R&D 지출)



(4) 저소득 국가(R&D 지출)



한 정책을 시행하는 데에 있어 좋은 제도적 환경을 갖추게 되면 CO₂ 배출량이 감축에 긍정적인 영향을 미칠 것을 기대할 수 있지만, 제도의 질이 열악하면 환경 정책의 비효율적 실행으로 CO₂ 배출량 감축에 효과적이지 못할 것이다. 따라서 고소득 국가는 이미 경제 성장의 성숙기에 접어들면서 저탄소 경제로의 전환이 이루어지고 있으며 제도의 발전과 녹색 기술 등을 통해 CO₂ 감축을 위한 노력이 진행되어 왔음을 알 수 있다. 그러나 중소득 국가와 저소득 국가는 아직 경제발전 단계에 있는 국가들의 비중이 높기 때문에 CO₂ 배출량 수렴 현상이 일부 나타난다 할지라도 기술의 발달은 경제 성장을 위한 부분에 더 많이 투자되고 있음을 시사하고 있다.

V. 결론

본 연구는 178개 국가를 소득별 그룹으로 나누어 1980~2013년 기간 동안의 1인당 CO₂ 배출량 수렴 현상에 대하여 분석하였다. 기존의 연구들은 대부분 국가별 CO₂ 배출량의 절대 수렴 현상과 산업비중 또는 에너지 비중 등 에너지 구조 변화가 CO₂ 배출량 수렴에 미치는 영향을 분석하였으나 본 연구는 내생적으로 결정되는 제도적 장치와 기술 투자 등 정책 요소를 반영하여 분석을 진행하였다.

1980~2013년 고소득 국가의 1인당 CO₂ 배출량은 연평균 -0.274%의 감소 추세를 보였으며, 1980년 12.29톤에서 2013년 11.23톤을 기록하였다. 중소득 국가의 1인당 CO₂ 배출량은 연평균 3.407%의 증가 추세를 보였으며, 1980년 2.05톤에서 2013년 6.20톤을 기록하였다. 저소득 국가는 1980년에 0.15톤, 2013년에 0.40톤으로 1인당 CO₂ 배출량이 연평균 3.039% 증가하였다. 소득 그룹별 각 기간의 절대적 베타 수렴과 시그마 수렴의 분석결과, 고소득 국가는 1980~1990년과 1990~2000년에 두 가지 수렴 현상이 모두 나타났으며, 중소득 국가는 2000~2013년에만 절대적 베타 수렴이 나타났지만, 이 기간을 제외한 다른 분석기간에 시그마 수렴이 나타난 것으로 확인되었다. 저소득 국가는 1990~2000년에 절대적 베타 수렴과 시그마 수렴이 나타났지만, 전체적으로 배출량 수렴 현상의 유의한 결과가 발견되지 않았다.

다음으로 제도의 질과 기술수준이 1인당 소득과 1인당 CO₂ 배출량의 수렴에 어떠한 영향을 미치는지 분석한 조건부 베타 수렴은 소득 그룹별로 상이한 결과가 나타났다. 고

소득 국가는 1인당 소득과 제조업 비중의 증가가 1인당 CO₂ 배출량 성장률을 증가시키지만, 제도의 수준과 기술수준이 높을수록 소득의 증가로 인한 배출량 증가율을 둔화시키고 수렴 속도를 더 빠르게 감소시키는 것으로 나타나 조건부 베타 수렴이 성립하였다. 중소득 국가도 1인당 CO₂ 배출량이 수렴하는 것으로 나타났으나, 고소득 국가와 달리 제도의 질이 유의미한 영향을 주지 못하였다. 주목할 만한 점은 기술수준이 높을수록 소득의 증가로 인한 CO₂ 배출량 수렴의 속도가 느려져 중소득 국가와 저소득 국가에서는 소득과 배출량 수렴의 관계에 있어 기술수준의 향상이 배출량 증가에 유의한 영향을 주는 것으로 나타난다는 것이다. 이상의 결과를 통해 경제성장의 성숙기에 있는 선진국은 제도적 장치와 기술 혁신이 탄소 배출을 저감하는데 긍정적인 역할을 하고 있으나 아직 경제 발전 단계에 있는 개도국은 환경보호를 위한 제도적 개선보다는 경제 성장을 위한 기술 혁신과 투자에 비중이 크다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 개도국이 경제성장으로 인한 배출량 감축을 위해 선진국의 개도국을 위한 기후재원은 단순한 재정적인 지원 뿐만 아니라 온실가스 감축을 위한 녹색 기술 지원이 필요하며, 개도국은 탄소 배출 감축을 위해 저탄소 산업구조로의 전환을 위한 정부의 규제와 관련 법 제정 등 제도적 장치 마련을 병행해야 할 것이다.

본 연구는 국가별 소득수준에 따른 1인당 CO₂ 배출 수렴을 분석하였는데, CO₂ 배출은 기후, 지역 특성요소, 문화 환경 등에도 영향을 크게 받으므로 유럽, 아시아, 아메리카 등 지역별 그룹에 따른 배출량 수렴에 대한 추가적인 분석도 필요할 것으로 생각된다.

[References]

- 조성택·조용성, “이산화탄소 배출량의 수렴성 검증: 다이나믹 패널 분석과 패널 단위근 검정을 이용하여”, 『자원·환경경제연구』, 제18권 제1호, 2009, pp. 53~75.
- 김지옥, “아시아 국가들 환경오염배출량의 확률수렴성과 환경쿠즈네츠곡선가설 검증”, 『자원·환경경제연구』, 제19권 제3호, 2010, pp. 571~598.
- 김지옥, “경제성장과 환경오염 간의 비선형 및 수렴성 검증”, 『한국경제연구』, 제31권 제3호, 2013, pp. 239~266.

- 김재혁·조하현, “1인당 탄소배출 수렴가설 검증: 105개국 동태적 패널임계 분석”, 「국제 통상연구」, 제22권 제1호, 2017, pp. 123~154.
- 대외정책연구원, 『기후변화협상의 국제적 동향과 시사점』, 2009.
- 에너지경제연구원, 『새로운 기후체제에 대한 주요국의 입장』, 2009.
- 에너지경제연구원, 『세계에너지시장인사이트』, 제17-7호, 2017.
- 환경부, 『교토의정서 이후 신 기후체제 파리협정 길라잡이』, 2016.
- Aghion, P., and P. Howitt, *Endogenous Growth Theory*, Cambridge MA, 1998.
- Aldy, J. E., “Per Capita Carbon Dioxide Emissions: Convergence or Divergence?,” *Environmental and Resource Economics*, Vol. 33, No. 4, 2006, pp. 533~555.
- Barro, R. J., and X. Sala-i-Martin, “Convergence Across States and Regions,” *Brookings Paper on Economic Activity*, Vol. 1991, No. 1, 1991, pp. 107~182.
- Barro, R. J., and X. Sala-i-Martin, “Convergence,” *Journal of Political Economy*, Vol. 100, No. 2, 1992, pp. 223~251.
- Barro, R. J., and X. Sala-i-Martin, “The Classical Approach to Convergence Analysis,” *The Economic Journal*, Vol. 106, No. 437, 1996, pp. 1019~1036.
- Baumol, W. J., “Productivity Growth, Convergence, and Welfare: What the Long-Run Data Show,” *American Economic Review*, Vol. 76, No. 5, 1986, pp. 1072~1085.
- Brock, W. A., and M. S. Taylor, “The kindergarten rule of sustainable growth,” *NBER Working Paper*, No. 9597, 2003.
- Brock, W. A., and M. S. Taylor, “The Green Solow model,” *NBER Working Paper*, 2004a.
- Brock, W. A., and M. S. Taylor, “Economic growth and the Environment: A Review of Theory and Empirics,” *NBER Working Paper*, 2004b.
- Brock, W. A., and M. S. Taylor, “The Green Solow Model,” *Journal of Economic Growth*, Vol. 15, No. 2, 2010, pp. 127~153.
- Camarero, M., A. J. Picazo-Tadeo, and C. Tamarit, “Are the Determinants of CO₂ Emissions Converging among OECD Countries?,” *Economics Letters*, Vol. 118, No. 1, 2013a, pp. 159~162.
- IEA, *CO₂ Emissions from Fuel Combustion*, 2016.
- Jobert, T., F. Karanfil, and A. Tykhonenko, “Convergence of per capita carbon dioxide emissions in the EU: Legend or reality?,” *Energy Economics*, Vol. 32, No. 6, 2010, pp.

1364~1373.

- Mckibbin, W. J. and A. Stegman, "Convergence and Per Capita Carbon Emissions," *Brookings Discussion Papers in International Economics*, No. 167, 2005.
- Nguyen Van, P., "Distribution Dynamics of CO₂ Emissions," *Environmental and Resource Economics*, Vol. 32, No. 4, 2005, pp. 495~508.
- Panopoulou, E. and T. Pantelidis, "Club Convergence in Carbon Dioxide Emissions," *Environmental and Resource Economics*, Vol. 44, No. 1, 2009, pp. 47~70.
- Pettersson, F., D. Maddison, S. Acar, and R. Söderholm, "Convergence of Carbon Dioxide Emissions: A Review of the Literature," *International Review of Environmental and Resource Economics*, Vol. 7, No. 2, 2014, pp. 141~178.
- Runar, B., K. Amin, and S. Patrik, "Convergence in Carbon Dioxide Emissions and the Role of Growth and Institutions: A Parametric and Nonparametric analysis," *Environmental and Policy Studies*, Vol. 19, No. 2, 2017, pp. 359~390.
- Sala-i-Martin, X., "The Classical Approach to Convergence Analysis," *The Economic Journal*, Vol. 106, No. 437, 1996, pp. 1019~1036.
- Solow, R. M., "A Contribution to the Theory of Economic Growth," *Quarterly Journal of Economics*, Vol. 70, No. 1, 1956, pp. 65~94.
- Swan, T. W., "Economic Growth and Capital Accumulation," *Economic Record*, Vol. 32, No. 2, 1956, pp. 334~361.
- Stokey, N. L., "Are there Limits to Growth?," *International Economic Review*, Vol. 39, No. 1, 1998, pp. 1-31.
- Strazicich, M. and J. A. List, "Are CO₂ Emissions Levels Converging Among Industrial Countries?," *Environmental and Resource Economics*, Vol. 24, No. 3, 2003, pp. 263~271.
- World Bank, *World Development Indicators*, 2017.
- World Bank, *World Governance Indicators*, 2017.

[부록]

〈A-1〉 소득별 국가 그룹 분류

분류	국가명				
고소득 국가 (48)	Antigua and Barbuda	Denmark	Korea, Rep.	Saudi Arabia	
	Australia	Finland	Kuwait	Seychelles	
	Austria	France	Luxembourg	Singapore	
	Bahamas, The	Greece	Macao	Spain	
	Bahrain	Greenland	Malta	St. Kitts and Nevis	
	Barbados	Hong Kong	Netherlands	Sweden	
	Belgium	Hungary	New Zealand	Switzerland	
	Bermuda	Iceland	Norway	Trinidad and Tobago	
	Brunei Darussalam	Ireland	Oman	United Arab Emirates	
	Canada	Israel	Palau	United Kingdom	
	Chile	Italy	Poland	United State	
	Cyprus	Japan	Portugal	Uruguay	
	중소득 국가 (39)	Albania	Dominican Republic	Lebanon	St. Lucia
		Algeria	Ecuador	Malaysia	St. Vincent and the Grenadines
Argentina		Equatorial Guinea	Mauritius	Suriname	
Belize		Fiji	Mexico	Thailand	
Bulgaria		Gabon	Panama	Tonga	
China		Grenada	Paraguay	Turkey	
Colombia		Guyana	Peru	Venezuela, RB	
Costa Rica		Iran, Islamic Rep.	Romania		
Cuba		Iraq	Samoa		
Dominica		Jamaica	South Africa		
저소득 국가 (64)	Angola	Egypt, Arab Rep.	Madagascar	Sierra Leone	
	Bangladesh	El Salvador	Malawi	Solomon Islands	
	Benin	Ethiopia	Mali	Sri Lanka	
	Bhutan	Gambia, The	Mauritania	Sudan	
	Bolivia	Ghana	Mongolia	Tanzania	
	Burkina Faso	Guatemala	Morocco	Togo	
	Burundi	Guinea	Mozambique	Tunisia	
	Cabo Verde	Guinea-Bissau	Myanmar	Uganda	
	Cambodia	Haiti	Nepal	Vanuatu	
	Cameroon	Honduras	Nicaragua	Vietnam	
	Central African Rep.	India	Niger	Yemen, Rep.	
	Chad	Indonesia	Nigeria	Zambia	
	Comoros	Jordan	Pakistan	Zimbabwe	
	Congo, Dem. Rep.	Kenya	Papua New Guinea		
	Congo, Rep.	Kiribati	Philippines		
	Cote d'Ivoire	Lao PDR	Rwanda		
	Djibouti	Liberia	Senegal		

〈A-2〉 주성분 분석

Component	Eigenvalue	Difference	Proportion	Cumulative
Comp1	5.128	4.737	0.8546	0.8546
Comp2	0.391	0.138	0.0651	0.9197
Comp3	0.253	0.132	0.0421	0.9618
Comp4	0.120	0.639	0.0202	0.9820
Comp5	0.057	0.005	0.0095	0.9915
Comp6	0.051	-	0.0085	1.0000
변수명		Comp1	Explained	
Control of corruption		0.4207	0.907	
Government effectiveness		0.4215	0.911	
Regulatory quality		0.3711	0.706	
Rule of law		0.4099	0.862	
Political stability		0.4307	0.951	
Voice and accountability		0.3927	0.791	

〈A-3〉 식의 도출

Solow 모형에 오염배출과 저감에 대한 가정들을 고려하면, $Y = (1 - \theta)F$ 로 수정되며, 모형의 방정식들을 유효노동(BL)당 단위로 표현하면 아래의 식과 같다.

$$\frac{Y}{B^I L} = y = (1 - \theta)f(k) = (1 - \theta)k^{\alpha I} \tag{12}$$

$$\frac{K}{B^I L} = \dot{k} = (1 - \theta)sk^{\alpha I} - (\delta + n + g_I)k \tag{13}$$

$$\frac{E}{B^I L} = e = f(k)\Omega a(\theta) \tag{14}$$

기술진보를 가정한 Solow 모형에서 1인당 성장률은 $g_y = g_k = g_e = g_I$ 로 나타나며,

오염배출과 제도적 장치를 고려한 본 연구의 모형에서는 균형성장경로(balanced growth path)를 따라 오염배출량 증가율은 식 (15)과 같이 나타난다.

$$g_E = g_I + n - g_A \quad (15)$$

$g_I + n$ 은 제도의 외부효과에 의해 결정되는 배출량에 대한 생산량의 규모효과(scale effect)를 나타내는 성장률이며, g_A 는 오염 배출 저감을 위한 기술진보의 기술효과(technique effect)를 의미한다. 따라서 지속가능한 성장을 위해서는 기술효과가 규모효과보다 커야 하므로 $g_I > 0$ 이고, $g_A > g_I + n$ 이 되므로 $g_E < 0$ 이 된다.

Green Solow 모형은 콥-더글라스(Cobb-Douglas) 함수의 형태로 오염배출 방정식을 $E = B(0)L(0)\Omega(0)a(\theta)\exp[g_E t]k^{\alpha I}$ 로 표현하였으며, 식 (3)과 식 (15)를 사용하여 오염배출 방정식을 시간에 대해 미분하면 아래와 같이 오염배출 증가율과 자본축적 방정식을 구할 수 있다.

$$\frac{\dot{E}}{E} = g_E + \alpha \frac{\dot{k}}{k} \quad (16)$$

$$\frac{\dot{k}}{k} = (1 - \theta)sk^{\alpha I - 1} - (\delta + n + g_I) \quad (17)$$

식 (17)을 통해 정상상태의 자본축적량(k^*)을 구하면 $k^* = \left[\frac{s}{\delta + n + g_I} \right]^{\frac{1}{1 - \alpha I}}$ 가 되며, 제도가 1인당 자본 성장률과 장기 성장률에 영향을 미친다는 것을 보여준다. 식 (16)에 식 (17)을 대입하여 정리하면 식 (18)과 같이 정리된다.

$$\frac{\dot{E}}{E} = \alpha [sk^{\alpha I - 1}(1 - \theta)] - [\alpha(\delta + n + g_I) - g_A] \quad (18)$$

〈A-4〉 식의 도출

식 (13)의 자본축적방정식을 로그 선형화(log linearlization)한 방정식은 아래와 같다.

$$\frac{\dot{k}}{k} = (1 - \theta)sk^{\alpha_I - 1} - (\delta + n + g_I) \quad (19)$$

$$\cong (1 - \theta)sk^{*\alpha_I - 1}[1 + (\alpha - 1)\hat{k}] - (\delta + n + g_I) \quad (20)$$

$$\hat{k} = \log k(t) - \log k^* \quad (21)$$

k^* 와 λ 를 식 (19)에 대입하고 \dot{k} 은 k^* 에서 0이 되는 조건을 사용하면, 간단한 형식의 방정식으로 표현된다.

$$\frac{\dot{k}}{k} = (1 - \theta)(\delta + n + g_I)\hat{k} = -\lambda\hat{k} \quad (22)$$

식 (22)에서 $\hat{k} = \log(k(t)/k^*)$ 이고, 식의 좌변은 $\log k(t)$ 를 시간에 대해 미분한 것이다. $\log k(t)$ 에 대해 미분한 방정식을 $y(t)$ 에 대한 식으로 작성하기 위해 $y = (1 - \theta)k^\alpha$ 를 사용하여 재정리하면 아래의 식과 같다.

$$\frac{d}{dt} \log y(t) = -\lambda \log y(t) + \lambda \log y^* \quad (23)$$

$$\log y(t) = \log y(0)e^{-\lambda t} + \log y^*(1 - e^{-\lambda t}) \quad (24)$$

식 (24)에서 $y(0)$ 은 $t = 0$ 일 때 유효노동 단위당 소득을 말하며, $t = 0$ 은 본 연구에서 초기를 의미하는 즉, $T - N$ 기간을 의미한다. 따라서,

$$\log y(t) - \log y(T-N) = -\log [y(T-N)/y^*](1 - e^{-\lambda N}) \quad (25)$$

유효노동 단위당 소득은 근로자 1단위당 소득 $y(t) = y^c(t)/B(t)$ 와 관련이 있다. 따라서,

$$\log y(T) - \log y(T-N) = N_g - \log [y(T-N)/B(T-N)y^*](1 - e^{-\lambda N}) \quad (26)$$

양변을 N 으로 나누어 해당 기간 동안의 평균 로그 변화를 구하면 식 (27)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{N} \log(y_t / y_{t-N}) &= g_A + \frac{(1 - \exp[-\lambda N])}{N} \log(B_{t-N}) + \frac{(1 - \exp[-\lambda N])}{N} \log(y^*) \\ &\quad - \frac{(1 - \exp[-\lambda N])}{N} \log(y_{t-N}) \end{aligned} \quad (27)$$