

R&D 투자와 환경쿠즈네츠 곡선 가설: CO₂ 사례 분석

강희찬* · 황상연**

요약 : 본 논문은 환경쿠즈네츠곡선가설에 기반을 두고, 경제개발 수준과 기술혁신수준이 다른 전세계 88개 국가에 대한 패널데이터를 이용하여, 기술혁신이 이산화탄소배출량 변화에 미치는 영향을 분석하였다. 기술혁신이 온실가스배출량에 직접적으로 미치는 효과와 소득수준을 변화시켜 온실가스배출량에 미치는 간접적 효과를 종합해본 결과, 비록 미세하지만 기술혁신은 결과적으로 온실가스배출량을 증가시키는 것으로 나타났다. 그러나 패널데이터 모형은 각 '시점 내'에서 변수 간 효과를 분석하는 정태적 모형이라는 한계를 가지고 있다. 이를 개선하기 위해 본 논문에서 채용한 Panel VAR(Panel Vector Auto Regression)모형에서는 기술혁신수준이 시차를 두고 온실가스 배출량에 미치는 영향을 분석할 수 있다. 분석 결과 기술혁신(R&D 투자)과 같은 외생적 충격(Shock)이 일인당 온실가스 배출량 감축에 3년 정도의 시차를 두고 영향을 미치는 것으로 나타났다.

주제어 : 환경쿠즈네츠가설, 기술혁신, 패널데이터 분석, P-VAR

JEL 분류 : H54, Q53, Q58

접수일(2016년 1월 9일), 수정일(2016년 2월 23일), 게재확정일(2016년 3월 25일)

* 인천대학교 경제학과 조교수, 주저자(e-mail: henrykang@inu.ac.kr)

** 인천대학교 경제학과 부교수, 교신저자(e-mail: syhwang@inu.ac.kr)

R&D and Environmental Kuznets Curve Hypothesis: CO₂ Case

Heechan Kang* and Sangyeon Hwang**

ABSTRACT : In this paper, as a determining factor of the Environment Kuznets Curve hypothesis, we analyzed the impact of technological innovation. In this paper, in order to empirically validate the role of technological innovation to an inverted U-shaped Environments Kuznets Curve hypothesis, we utilize the 2SLS considering relationship between R&D and the GDP per capita. Also, using the Panel VAR (Panel Vector Auto Regression) model to analyze with what time lag R&D per capita has impact on the emissions of greenhouse gases per capita. Empirical results show that R&D per capita(proxy of innovation) is a important factor to explain Environmental Kuznets Curve hypothesis, and that the external shock such as R&D per capita reduces greenhouse gas emissions per capita with about 3 time lag.

Keywords : EKC, technology innovation, Panel data analysis, P-VAR

Received: January 9, 2016. Revised: February 23, 2016. Accepted: March 25, 2016.

* Assistant Professor in the Department of Economics of the Incheon National University, Senior Author (e-mail: henrykang@inu.ac.kr)

** Associate Professor in the Department of Economics of the Incheon National University, Corresponding Author(e-mail: syhwang@inu.ac.kr)

I. 서론

환경쿠즈네츠 곡선(EKC, Environmental Kuznets Curve) 가설은 환경오염물질과 일인당 소득간의 역 U 자형의 관계를 나타내는 것이다. 경제 발전 초기 단계에서, 일인당 소득이 낮고 중공업 중심의 산업화 과정을 통해 경제가 성장하면서, 오염물질은 빠르게 증가한다. 그러나 얼마 후, 소득수준이 특정 수준에 도달하게 되면(후기 산업 경제나 서비스 경제), 오염물질 배출량이 감소되는데, 이러한 전환의 배경에는 소득수준이 증가하면서 시민들의 더 좋은 환경에 대한 인식과 요구가 증가하고, 오염물질 감축을 위한 정책과 관련 기술 분야에 혁신이 일어나거나, 산업구조가 탄소 배출을 줄이는 방향을 변화하는 것이 주요 결정요인으로 제시되고 있다. 이러한 역 U자 형의 실증적인 관계는 Grossman & Kruger (1991)가 처음 발견한 것으로, 이들은 멕시코가 NAFTA 가입함으로써 인해 나타나는 오염배출량의 변화를 분석하였다. 이들 연구를 바탕으로 지난 20년 동안 여러 나라를 대상으로 패널데이터분석을 통해 다양한 연구가 진행되었다. 그러나 그동안의 연구들은 환경쿠즈네츠 곡선의 실증적 검증에 대해 아직까지 명확한 결론에 도달하지 못하였고, 환경쿠즈네츠 곡선 가설을 뒷받침 할 수 있는 결정요인에 대해서도 확실한 합의에 도달하지 못하였다.

환경쿠즈네츠 곡선 가설의 소득과 오염물질 간의 역U자의 관계는 크게 두 가지 결정요인으로 설명되고 있다. 그 첫째는 Panayotou (2003)의 주장과 같이, 경제발전 초기 단계에는 에너지 집약적인 산업(특히 제조업) 중심의 경제구조로 인해 오염물질 배출이 증가하는 반면, 어떤 특정 시점 이후에는 경제구조가 에너지를 덜 사용하는 서비스산업이나 경공업 중심 사회로 바뀌면서, 오염물질 배출량이 줄어든다는 논리이다. 두 번째 설명 방식은 Grossman & Kroger (1995)가 주장하는 바와 같이 소득수준이 증가하면, 민간부문과 공공부문의 R&D 지출을 늘릴 수 있게 되고, 이러한 지출로 인해 기존의 공해를 유발하는 기술이 더 깨끗한 기술로 대체되어 오염물질 배출량이 감소할 수 있다고 주장한다. 그러나 R&D 투자의 증가는 생산의 증가로 이어져, 이를 통한 오염물질 배출량의 증가할 수 있는 간접효과의 가능성도 언급하였다.

기술혁신 혹은 기술발전이 환경쿠즈네츠 곡선 가설에 중요한 요인이라는 논문들을 좀 더 살펴보면 다음과 같다. Andreoni & Levinson (2001)은 환경쿠즈네츠 가설의 결정

요인은 정치적 요인(오염 저감정책의 입법과 시행)보다는 감축기술의 도입으로 설명해야 한다고 주장한다. 또한 감축에 따른 수확체증 기술이 중요한 인자라고 주장하고 있다. Chimeli & Bradon (2005)은 이론적 모형에서, 서로 다른 설비의 총요소생산성(Total Factor Productivity)의 차이가 횡단면적인 환경쿠즈네츠를 탄생시킨다고 주장하고 있다. 그들은 총요소생산성이 높을수록 더 나은 환경질을 달성할 수 있다고 주장하고 있다. 기술 혁신적인 활동은 환경쿠즈네츠 곡선에서 환경오염물질의 증가가 감소로 전환되는데 결정적인 역할을 하고, 더 많은 혁신적 기술을 도입하는 국가일수록, 더 낮은 소득 수준에서 환경오염물질의 증가가 감소로 전환될 수 있다고 주장한다. 또한 Smulders et al. (2011)은 내생적 혁신(endogenous innovation)이야말로 환경쿠즈네츠 가설의 이론적 토대가 될 수 있다고 주장하면서, 이러한 내생적 혁신으로 정책적으로 촉진된 기술 변화와 부분 간 변화(inter-sectoral changes)를 유발한다고 제시하였다. 만일 환경쿠즈네츠 곡선이 합당하다면, 국가들의 소득수준이 올라갈수록, 사람들은 기후변화 방지에 보다 많은 관심을 보이게 되고, 정부는 기후변화 대응을 위한 정책을 시행하거나 기술진보를 촉진시켜, 재생에너지 사용 확대를 통해 화석에너지를 덜 사용하게 하거나 생산과정에서 에너지를 절약하거나 이산화탄소를 덜 배출하는 설비를 설치를 권장하게 된다. 이러한 과정에서 감축 비용은 점차 하락하게 된다.

비록 기술진보가 환경쿠즈네츠 곡선 연구의 핵심적 역할을 한다는 이론적 연구들은 제시되고 있으나, 실증연구에서는 대체로 일국(一國)에 대한 연구가 주를 이루고 있으며, 이들 연구들에서 통제변수(Control variables)로 기술수준을 사용하고 있으나 이들 기술수준에 대한 변수로는 대체로 에너지 사용량과 같은 대리변수(proxy)들을 사용하고 있다(Ang, 2007; Iwata et al., 2010; Nasir & Rehman, 2011). 그러나 여러 국가에 대한 패널데이터 분석에서는 기술 혁신과 같은 국가별 특성변수와 일인당 국민소득과의 높은 상관관계를 무시하게 되면 편이가 발생하거나 불일치(inconsistent)한 추정량을 얻을 수 있다.

따라서 본 연구에서는 World Bank의 88개 국가를 대상으로 패널데이터를 구축하고, 일인당 소득과 오염물질 간의 역U자형 관계를 유발하는 결정요인으로 정부 R&D 투자 수준을 기술혁신(기술수준)의 대리변수로 직접적으로 포함시켜 분석하되, 기술혁신이 소득수준을 통해 오염물질에 영향을 미치는 간접적 효과를 포함한 모형을 구축하고자

한다.

한편 패널데이터 분석의 경우 시간이 고려되지만, 기본 모형 자체가 동일 시간 내에 독립변수가 종속변수를 얼마만큼 설명하는지에만 국한된다. 따라서 기술혁신이 오염물질 배출량 변화에 영향을 미친다면, 어떤 시차를 두고 나타나는지에 대한 설명에는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 기술혁신(혹은 R&D 투자)이 어떤 시차를 두고 오염물질(온실가스배출) 배출량 변화에 영향을 미치는지를 분석하기 위해 패널 VAR(panel vector auto regression)모형을 이용한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 모형을 제시하고, 3장에서는 이 논문에서 사용되는 데이터를 설명하고, 4장에서는 추정결과를 논의하고, 5장에서는 시사점과 결론을 제시한다.

II. 모형

오염물질과 일인당 소득수준 그리고 다른 통제변수들 간의 관계는 여러 논문들에서 다음과 같은 식을 통해 추정한다.

$$P_{i,t} = \beta_0 + \beta_1 Y_{i,t} + \beta_2 Y_{i,t}^2 + \beta_3 RnD_{i,t} + \sum_{j=1}^n \beta_j Z_{i,t} + \epsilon_{i,t} \quad (1)$$

여기서, i 와 t 는 각각 해당 국가와 년도를 나타낸다. 여기서 $P_{i,t}$ 는 일인당 이산화탄소 배출량을 나타내고, $Y_{i,t}$ 는 일인당 GDP를 나타낸다. 마지막으로 $Z_{i,t}$ 는 나머지 설명변수들을 나타낸다. 여기서 $RnD_{i,t}$ 는 기술혁신을 나타내는 변수로, 본 논문에서는 국가별 R&D 투자액을 대리변수(proxy)로 사용하고 있다.

그런데 여기서 기술혁신 수준($RnD_{i,t}$)은 직접적으로 일인당 이산화탄소 배출량($P_{i,t}$)에 영향을 미칠 뿐만 아니라 소득수준($Y_{i,t}$) 변화를 통해 간접적으로 이산화탄소 배출량($P_{i,t}$)에 영향을 미친다. 우선 직접적 경로에서는 R&D 투자 확대를 통해 기술이 발달하게 되면 공정 및 원료(연료)의 효율적 사용을 촉진함으로써, 에너지 사용량을 감

소시켜 결과적으로 이산화탄소 배출량을 줄이는데 기여할 수 있다. 특히 재생에너지 기술, 에너지 효율개선 기술, 공정효율 개선 등의 기술혁신 수준 증가는 에너지 사용량을 감소시켜 온실가스 배출량에 바로 영향을 미치게 된다. 반면, 간접적 경로로는 기술혁신 수준이 제고되고 기술이 발달하게 되면 소득수준을 끌어올리는데 기여하게 되는데, 환경쿠르네츠 가설에 따라 특정 소득 수준(threshold)까지는 온실가스배출량이 증가하고, 이후엔 소득 수준과 함께 감소할 수 있다. 따라서 이러한 간접적 경로는 일국의 소득이 어느 수준에 있느냐에 따라, 기술혁신 수준의 증가가 온실가스를 증가시키기도 하고 감소시킬 수도 있다. 결과적으로, 기술혁신 수준의 변화는 직·간접 효과가 종합적으로 일국의 온실가스 배출량에 영향을 미칠 수 있다.

따라서 본 논문에서는 (1) 식에서 기술혁신수준($RnD_{i,t}$)이 이산화탄소 배출량($P_{i,t}$) 미치는 영향을 직접 효과와 간접 효과를 나눠서 파악하고자 한다. 직접 효과는 기술혁신 수준($RnD_{i,t}$)과 이산화탄소 배출량($P_{i,t}$)간의 직접적 경로를 통해 파악할 수 있는 반면, 간접적 영향은 기술혁신수준이 일인당 GDP($Y_{i,t}$)를 변화시켜, 결과적으로 이산화탄소 배출량($P_{i,t}$)에 영향을 미치는 경로로 파악해야 한다. 이러한 기술수준이 소득수준에 영향을 미쳐 결과적으로 이산화탄소배출량에 영향을 미치는 간접효과(indirect effect)를 파악하기 위해 식(2)을 구성하였다. 기존 논문들에서도 이러한 간접효과를 고려한 방식을 채택하고 있다(Leitão, 2010; Islam, 1995; Caselli et al., 1998; Dowrick & Rogers, 2002; Bianchi et al., 2009)

$$Y_{i,t} = \gamma_i + \delta_1 RnD_{i,t} + \delta_2 S_{i,t} + \delta_3 X_{i,t} + \xi_{i,t} \quad (2)$$

식(2)에서 $Y_{i,t}$ (일인당 GDP)는 기술진보의 대리변수인 국가별 R&D투자액($RnD_{i,t}$)과 자본축적의 대리변수인 GDP 중 자본축적 비중($S_{i,t}$)¹⁾과 다른 설명변수($X_{i,t}$)들의 함수로 나타나 있다. 여기서 다른 설명변수($X_{i,t}$)는 인구($Pop_{i,t}$)와 보건 수준을 나타내는 대리 변수인 기대수명($Life_{i,t}$), GDP 중 무역비중($Trade_{i,t}$)을 포함하고 있다. 또한 기술진보(RnD_{it})의 도구변수(IV, Instrument variables)로는 기술진보에 영향을 미칠 수

1) the gross capital formulation(%)

있는 변수인 일인당 특허신청 개수($Patent_{i,t}$)를 사용하였다. 여기서 γ_i 는 관찰되지 않는 국가의 특화된 영향을 나타내고 ξ_{ti} 는 오차항이다. 만일 기술진보(기술혁신)가 일인당 GDP에 긍정적인 영향을 미친다면, $\delta_1 > 0$ 의 결과를 예측해 볼 수 있다. 사실 식(2)과 같은 관계는 여러 요소들로 이뤄진 생산함수로 간주할 수 있다. 즉 물리적 자본, 인적 자본, 노동생산성과 기술 수준이 생산함수이 요소로 사용된 것이다.

다음으로, 두 번째 단계에서는 식(2)에서 얻은 추정치를 통해 $\widehat{Y}_{i,t}$ 를 계산하고, 이를 식(1)에 독립변수로 포함시켜, 식(1)을 추정한다. 이를 통해 기술혁신 수준이 이산화탄소 배출량에 미치는 직접적 영향과 간접적 영향을 동시에 고려할 수 있다.

III. 데이터

본 연구는 전세계 88개국을 대상으로 2006~2012년의 패널데이터 구축하였다. 식(1)의 추정에 있어서, 다양한 설명변수를 이용하였다. 우선 일인당 GDP($Y_{i,t}$) 변수를 포함시키되 2차항($Y_{i,t}^2$)까지 포함시켜 이산화탄소 배출량과 역 U의 관계에 있는지를 확인한다. 만일 1차 항의 추정량이 양(+)이고, 2차항의 추정량이 음(-)이면 일인당 GDP와 오염물질 간에는 역 U자형의 관계가 성립한다고 판단할 수 있다.

기존 연구들²⁾에서 무역규모를 온실가스 배출량 변화에 주요한 요인으로 포함시킨 것을 채용하여, 본 연구에서도 총 수출된 상품 중 제품 비중($X_{i,t}$)³⁾와 총 수입된 상품 중 제품의 비중($M_{i,t}$)⁴⁾을 사용하였다.

또한 경제·산업 구조변화를 판단하기 위해, 부가가치로 평가한 GDP 중 제조업 비중($Manu_{i,t}$)을 포함시켰다. 일반적으로 제조업이 서비스업에 비해 에너지사용량과 온실가스배출량이 높다는 가정 하에, 경제 구조가 변화함에 따른 일인당 온실가스 배출량의 변화를 파악한다. 또한 전체 에너지 생산량에서 재생에너지 비중($Renew_{i,t}$)은 국가의 에너지 Mix의 의지뿐만 아니라 온실가스 배출량 수준에도 영향을 미치는 변수이므로

2) Mycoff and Roop (1994); Panayotou (2000);

3) Manufactures exports (% of merchandise exports)

4) Manufactures imports (% of merchandise imports)

설명변수에 포함시켰다. 온실가스배출량에도 영향을 미치는 다른 주요 설명변수로는 일인당 에너지 사용량($Energy_{i,t}$)을 포함시켰다.

<표 1>은 식 (1)에 포함된 변수에 대해 정리한 것이다.

〈표 1〉 변수에 대한 설명

| 변수 | 단위 | 설명 | 자료 출처 |
|---------------|-----------------------|------------------------|------------|
| $P_{i,t}$ | CO ₂ toneq | 일인당 온실가스 배출량의 로그값 | World bank |
| GDP_{ti} | \$/명 | 일인당 GDP(2005년 기준)의 로그값 | World bank |
| X_{ti} | % | 수출상품 중 제품 비중 | World bank |
| M_{ti} | % | 수입상품 중 제품 비중 | World bank |
| $Manu_{ti}$ | % | GDP중 제조업 부가가치 비중 | World bank |
| $Energy_{ti}$ | kg/명 | 일인당 에너지 사용량의 로그값 | World bank |
| $Renew_{i,t}$ | % | 1차에너지 중 재생에너지 비중 | World bank |

<표 2>는 식 (2)에 포함된 설명변수에 대해 정리한 것이다.

〈표 2〉 변수에 대한 설명

| 변수 | 단위 | 설명 | 자료 출처 |
|---------------|----|----------------------|------------|
| RnD_{ti} | % | GDP 중 R&D 투자 비중의 로그값 | World bank |
| S_{ti} | % | 자본축적 비중 | World bank |
| Pop_{ti} | 명 | 총인구의 로그값 | World bank |
| $Life_{ti}$ | 년 | 기대수명 | World bank |
| $Trade_{ti}$ | % | GDP 중 수출+수입 비중 | World bank |
| $Patent_{ti}$ | 개 | 특허 개수 | World bank |

<표 3>은 변수들에 대한 기초 통계량을 나타내고 있다.

〈표 3〉 기초 통계량

| 변수 | 표본개수 | 평균 | 표준편차 | 최소 | 최대 |
|---------------|-------|----------|----------|---------|-----------|
| $P_{i,t}$ | 1496 | 1.2 | 1.4 | -5.6 | 3.5 |
| GDP_{ti} | 1,496 | 9.4 | 1.1 | 6.4 | 11.5 |
| X_{ti} | 1,436 | 56.5 | 27.5 | 1.47 | 97.4 |
| M_{ti} | 1,434 | 68.9 | 10.6 | 24.4 | 91.7 |
| $Manu_{ti}$ | 1,347 | 16.9 | 6.1 | 1.6 | 35.6 |
| $Energy_{ti}$ | 1,369 | 7.5 | 0.9 | 2.3 | 9.8 |
| $Renew_{i,t}$ | 1,348 | 12.4 | 15.5 | 0 | 99.5 |
| RnD_{ti} | 1,452 | -0.6 | 1.2 | -4.4 | 1.5 |
| S_{ti} | 1,491 | 23.5 | 6.32 | 0.29 | 74.8 |
| Pop_{ti} | 1,496 | 5.76e+07 | 1.82e+07 | 268,916 | 1.35e+09 |
| $Life_{ti}$ | 1,496 | 72.4 | 7.54 | 43.5 | 83.5 |
| $Trade_{ti}$ | 1,491 | 90.2 | 60.3 | 14.9 | 449.9 |
| $Patent_{ti}$ | 1,247 | 12,749 | 52,348 | 1 | 535,313.4 |

IV. 실증분석

1. 패널데이터 분석

우선 식 (2)에 대한 추정 결과가 <표 4>에 정리되어 있다. Hausman Test 결과⁵⁾ 고정효과 모형이 더 적합한 모형으로 판명되었다.

<표 4>에서 확인 할 수 있듯이, 일인당 GDP는 기술혁신(R&D)을 비롯한 자본, 노동력에 상당한 영향을 받지만, 교역비중($Trade_{i,t}$)에는 영향을 받지 않는 것으로 판단된다. 여기서 기술진보의 대리변수로 사용된 $RnD_{i,t}$ 의 추정치는 도구변수($Patent_{i,t}$)를 이용한 2SLS(two-stage Least Squares)를 사용하여 추정하였다. 여기서 2SLS를 사용한 것은 $RnD_{i,t}$ 변수가 오차항과 상관관계가 있다고 판단하였기 때문이며, 도구변수를 사용하여 일치성(consistent)있는 추정치를 얻고자 한다. <표 4>에서 보는 바와 같이 기술진보

5) $\chi^2(4)=35.81$, $Pro>\chi^2=0.0053$

가 일인당 GDP에 미치는 영향은 1%의 유의수준에서 양(+)⁶⁾의 추정치를 갖는다. 즉 R&D 비중이 1% 증가하게 되면, 일인당 GDP는 1.029% 증가하는 것으로 나타난다. 같은 결론으로 $S_{i,t}$ 의 계수도 1%의 유의수준에서 양(+)⁶⁾의 값으로 나타났으며, $Life_{i,t}$ 의 계수들도 1%의 유의수준에서 양(+)⁶⁾의 값으로 나타났다. $Pop_{i,t}$ 변수의 계수는 음(-)의 값으로 나타났다.

〈표 4〉 하위 모형의 추정 결과

| 종속변수 $GDP_{i,t}$ | 고정효과 |
|------------------|----------------------------------|
| $RnD_{i,t}$ | 1.02919 ^{***} (0.000) |
| $S_{i,t}$ | 0.0125733 ^{***} (0.000) |
| $Pop_{i,t}$ | -1.050094 ^{***} (0.000) |
| $Life_{i,t}$ | 0.0493699 ^{***} (0.000) |
| $Trade_{i,t}$ | -0.0005349 (0.333) |
| 상수항 | 23.48169 ^{***} (0.000) |
| R^2 | 0.3787 |

주: ***1%, **5%, *10% 유의수준에서 유의미함.

이 추정을 통해 GDP의 적합값(fitted Value)을 계산함으로써, R&D가 일인당 GDP에 미치는 영향을 제거할 수 있다. 이 추정식을 통해 계산된 GDP의 적합값의 기초통계량을 다음과 같이 정리하였다.

〈표 5〉 GDP의 fitted value

| | 표본개수 | 평균 | 표준편차 | 최소 | 최대 |
|-----------------------|-------|---------|----------|------|-------|
| $\widehat{GDP}_{i,t}$ | 1,447 | 9.48372 | 2.189506 | 3.79 | 15.77 |

〈표 6〉에는 (1) 식을 패널데이터 모형을 통해 얻은 추정 결과를 정리하였다. Hausman Test 결과 고정효과모형이 더 적합한 모형인 것으로 판명되었다.⁶⁾

6) $\chi^2(4)=81.57$, $Pro>\chi^2=0.0042$

〈표 6〉 본 모형의 추정 결과

| 종속변수 $P_{i,t}$ | 추정치 | 표준오차 |
|-------------------------|---------------|-----------|
| $\widehat{GDP}_{i,t}$ | 0.4066871*** | 0.0742595 |
| $\widehat{GDP}_{i,t}^2$ | -0.0116139*** | 0.0028696 |
| $RnD_{i,t}$ | -0.1960954*** | 0.0499205 |
| $X_{i,t}$ | -0.0005287 | 0.000617 |
| M_{ti} | 0.0029819*** | 0.0007071 |
| $Energy_{ti}$ | 0.7779188*** | 0.0365286 |
| $Renew_{i,t}$ | -0.0085496*** | 0.0015815 |
| $Manu_{i,t}$ | 0.0058653*** | 0.0018187 |
| 상수항 | -7.517459*** | 0.5402407 |
| R^2 | 0.7353 | |

주: ***1%, **5%, *10% 유의수준에서 유의미함.

<표 6>에서 보는 바와 같이 일인당 GDP는 온실가스 배출량과 역 U자의 관계를 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 이는 일인당 GDP의 1차항과 2차항 모두에서 추정치는 통계적으로 유의할 뿐만 아니라, 1차항의 추정치는 양(+)의 값을 갖는 반면, 2차항에 대해서는 음(-)의 부호를 나타내고 있다. 즉 온실가스 배출량은 경제발전 초기에는 소득의 증가와 함께 증가하지만, 일정 수준의 일인당 소득 이후에는 소득이 증가하면 감소하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 한편, 기술혁신은 온실가스 배출량을 감소시키는 것으로 나타났다. 따라서 R&D 비중이 1% 증가하게 되면, 온실가스 배출량은 0.196% 감소하는 것으로 나타났다.

그러나 R&D 1% 증가의 순수한 온실가스 배출량 증감효과를 보기 위해서는 앞서 R&D 비중의 증가가 일인당 GDP를 증가시켜 온실가스에 영향을 미치는 간접적인 효과도 함께 파악해야 한다. 식 (1)에서 종속변수($P_{i,t}$)를 $RnD_{i,t}$ 변수로 미분하는데, $GDP_{i,t}$ 와 $RnD_{i,t}$ 의 함수관계를 고려하면, 식 (3)과 같이 도출될 수 있다. 식 (3)의 계산 결과, R&D 비중 1% 증가는 결과적으로 온실가스를 0.109% 증가시키는 것으로 나타났다. 즉, R&D 투자의 증가는 직접적으로 온실가스배출량을 줄일 수 있지만, 다른 한편으로는 R&D 투자 증가가 일인당 GDP를 증가시켜 온실가스 배출량을 늘릴 수 있다. 이 두 효과

를 종합해보면, 결과적으로 온실가스배출량이 증가하는 것으로 나타났다.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial P}{\partial RnD} &= \frac{\partial P}{\partial RnD} + \frac{\partial P}{\partial GDP} \times \frac{\partial GDP}{\partial RnD} & (3) \\
 &= \hat{\beta}_3 + (\hat{\beta}_1 + \hat{\beta}_2 \times \overline{GDP}) \times \hat{\delta}_1 \\
 &= -0.1960954 + (0.4066871 - 0.0116139 * 9.48372) * 1.02919 \\
 &= 0.109114
 \end{aligned}$$

다른 설명변수에 관한 추정결과는 다음과 같다. 우선 정부의 규제와 관련된 변수들에 대해서는 재생에너지 증가($Renew_{i,t}$)는 통계적으로 유의하게 온실가스 배출량 감소에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 재생에너지 비중은 국가의 온실가스 감축과 에너지 해외 의존도 감소를 통한 에너지 안보를 제고하려는 정부의 의지와 깊은 관련이 있다. 따라서 이러한 정부의 정책의지는 온실가스를 감축시킬 수 있다는 것으로 나타난다. 대외 무역역과의 관계에 있어서는, 총 수입되는 상품 중 제조품 비중($M_{i,t}$)의 증가는 온실가스 배출량을 증가시키지만, 수출 상품 중 제조품의 비중은 온실가스 배출량에 통계적으로 유의미한 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 따라서 제조업 생산에서 발생하는 온실가스 배출량 보다는 해외 수입까지 포함한 제조품 소비과정에서 발생하는 온실가스 배출량이 더 큰 것으로 나타났다. 이는 공산품 수입이 많은 국가는 그만큼 온실가스 배출량이 증가한다는 것을 의미한다. 마지막으로 제조업체 비중($Manu_{i,t}$)이 증가하면, 온실가스 배출량은 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 경제구조가 서비스 산업 중심으로 변화할수록 온실가스 배출량을 줄일 수 있다는 결론을 얻는다.

2. Panel VAR 분석

본 장에서는 패널 VAR(Panel VAR) 모형을 이용하여, R&D 투자, 일인당 GDP 그리고 일인당 온실가스 간의 영향 구조를 분석한다. 앞서 살펴본 바와 같이, R&D투자의 증가는 중국에는 일인당 온실가스 배출량을 증가시키는 것으로 나타났다. 그런데 앞서 본 패널데이터 분석은 정태적(Static) 결과로, 변수들 간에 어떤 시차를 두고 나타나는지를

판단할 수는 없다. 즉, 정태적으로는 미세하나마 R&D 투자 증가가 일인당 GDP를 증가시키는 것으로 나타났지만, 변수들 간에 시차를 고려할 경우에는 이러한 결론이 합당한지 결론내릴 수 없다. 따라서 R&D 투자가 일인당 GDP에 대한 영향이 어떤 시차를 두고 나타나는지를 분석하기 위해 ‘패널 VAR(Vector Auto Regression)모형’을 이용하였다. 여기서 패널 VAR 모형은 시계열 VAR모형을 패널데이터로 확장시킨 분석방식이다. 패널 VAR모형은 회귀분석과 시계열분석방법이 결합된 형태로서 서로 인과관계가 있는 변수들의 현재 관측치를 종속변수로 하고 자신과 여타 변수들의 과거 관측치를 설명변수로 설정하여 시계열과정을 추론한다. 이 분석 방식은 모형작성자의 선형적 주관을 가급적 배제하고 일반화된 형태로 모형을 작성하여 분석할 수 있는 장점이 있다. 특히 시계열 VAR 모형의 충격반응함수(Impulse Response Function) 분석을 온전히 활용하여 변수들 간의 상호 영향을 체계적으로 분석할 수 있을 뿐만 아니라, 횡단면 데이터를 활용함으로써 시계열 VAR 모형에서 각 국가별 분석 기간이 짧아 발생할 수 있는 자유도 문제를 해결할 수 있는 장점이 있다. 한편, 본 연구에서는 R&D 변수와 일인당 GDP, 그리고 일인당 온실가스배출량 변수만을 활용하고, 다른 변수(설명변수)에 대한 부분은 분석에서 제외한다.

우선 분석에 앞서, 본 연구에서 활용한 Panel VAR 모형의 한계를 밝히고자 한다. 패널 VAR 모형을 사용하기 위해서는 balanced Panel을 이용해야 하는 제약요인이 있다. 따라서 앞서 연구에서 활용한 88개 국가 중 33개 국가만이 연구 대상 기간 중 R&D 변수, 일인당 GDP 그리고 일인당 온실가스배출량이 모두 존재한다. 특히 국가의 구성도 선진국, 개도국, 최빈국이 균형 있게 분포하고 있지 못하다. 33개 국가 중 20개 국가가 OECD 국가라는 점도 한계라고 할 수 있다.

본 연구에서 사용한 Panel VAR모형은 Holtz-Eakin et al. (1988)과 Love & Zicchino (2006)이 제안한 Panel VAR모형을 이용한다.

$$y_{i,t} = \alpha_0 + \sum_{l=1}^m \alpha_l y_{i,t-l} + \sum_{l=1}^m \delta_l x_{i,t-l} + \Psi_t f_i + u_{i,t} \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall t = 2, \dots, T \quad (4)$$

여기서 $\alpha_0, \alpha_i, \delta_i, \Psi_t$ 는 추정해야하는 계수들이다. 특히 f_i 는 개별국가(i)의 특성을 나타내는 변수이다. $u_{i,t}$ 는 오차항이며, 다음과 같은 직교조건(orthogonality condition)을 충족시켜야 한다.

$$E(y_{i,s}u_{i,t}) = E(x_{i,s}u_{i,t}) = E(f_i u_{i,t}) = 0, \quad \forall s < t \quad (5)$$

그러나 이러한 직교조건을 충족시키기 위해서는 관측되지 않는 국가별 특성인 f_i 를 조정할 필요가 있다. 패널데이터 모형에서 관측되지 않는 국가별 특성을 제거하기 위한 방법인 Fixed effect 추정법을 사용하지만, 이 경우에는 편의가 발생할 수가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 Love & Zicchino (2006)은 헬모트 변환(Helmert transformation) 방식을 제안하였다. 이 방식은 선형평균차분과정(forward mean-differencing procedure)을 사용하는 것으로, 모든 국가 i 에 대해 사용할 수 있는 미래관측치의 평균을 차감하는 방법이다.

$$u_{i,t}^h = (u_{i,t} - \overline{u_{i,t}}) \sqrt{T-t/(T-t+1)} \quad (6)$$

여기서 $\overline{u_{i,t}}$ 는 미래관측치의 평균치를 나타낸다.

Love & Zicchino (2006)는 이러한 과정을 통해 얻은 변수들과 그 시차(lagged) 설명변수들 간에는 직교조건이 성립하게 되며, 이를 통해 연립 GMM(System GMM) 추정법에 서와 같이 시차 설명변수들을 도구변수(IV)로 사용할 수 있다고 밝혔다.

분석에 앞서 Panel VAR에 이용된 변수에 대해 <표 7>에서 정리하였다.

7) 고정효과 추정법은 변수들에 대해 평균차분과정(Mean-differencing procedure)을 사용하는데, 변수들의 평균값에는 $y_{i,t}$ 와 $u_{i,t}$ 가 포함되어 상관관계 문제가 발생할 수 있다.

〈표 7〉 데이터 설명

| 변수 | 변수 설명 |
|----------------|---------------------------|
| $prnd_{i,t}$ | t기에 i국가의 일인당 R&D 지출 |
| $pgdp_{i,t}$ | t기에 i국가의 일인당 GDP |
| $pghg_{i,t}$ | t기에 i국가의 일인당 온실가스배출량 |
| $lprnd_{i,t}$ | $\log(prnd_{i,t})$ |
| $lpgdp_{i,t}$ | $\log(pgdp_{i,t})$ |
| $lpghg_{i,t}$ | $\log(pghg_{i,t})$ |
| $dlprnd_{i,t}$ | $lprnd_{i,t}$ 차분의 헬모트 변환치 |
| $dpgdp_{i,t}$ | $lpgdp_{i,t}$ 차분의 헬모트 변환치 |
| $dpgghg_{i,t}$ | $lpghg_{i,t}$ 차분의 헬모트 변환치 |

Panel VAR 모형 분석에 앞서 Granger Causality 분석을 통해 변수들 간에 상관관계를 살펴보자. <표 8>는 변수들 간의 Granger Causality 결과를 보여준다. 일인당 온실가스 배출량($dpgghg_{i,t}$)과 일인당 R&D 투자($dlprnd_{i,t}$) 간에는 5%의 신뢰구간에서 상관관계가 존재하지 않았다. 이는 R&D 투자의 증가가 온실가스 배출량 변화에 영향을 미치지 못한다고 판단할 수 있다. 또한 일인당 온실가스배출량($dpgghg_{i,t}$)과 일인당 GDP간($dpgdp_{i,t}$)에도 상관관계가 존재하지 않는 것으로 파악된다. 이는 일인당 GDP의 변화가 일인당 온실가스 배출량 변화에 영향을 미치지 못한다고 판단할 수 있는데, 이는 일인당 GDP와 일인당 온실가스배출량 간에 선형 관계가 존재하지 않는다고 판단할 수도 있다. 마지막으로 온실가스 배출량($dpgghg_{i,t}$)과 두 변수(일인당 R&D 투자 및 일인당 GDP) 및 이들의 lag 변수들 ‘전체’에 대해서도 5%의 신뢰구간에 대해 상관관계가 존재하지 않았다. 이는 일인당 온실가스 배출량이 과거 일인당 온실가스 배출량, 일인당 R&D 투자 그리고 일인당 GDP 모두에 전반적으로 영향을 받지 않는다고 해석할 수 있다.

그러나 이처럼 일인당 온실가스 배출량과 다른 변수들 간의 상관관계가 약한 이유가 일인당 R&D와 일인당 GDP간에 존재하는 상호상환관계(bicausality)의 영향일 가능성이 크다. 즉, 일인당 GDP가 증가하면 일인당 R&D는 대체로 증가하지만, 동시에 일인당 R&D가 증가하면 생산함수 모형에 따라 일인당 GDP도 증가하게 된다. 전자의 영향은

일인당 R&D 지출($dlprnd_{i,t}$)이 일인당 GDP($dlpghg_{i,t}$)에 5% 신뢰구간에서 유의미하게 영향을 받는다는 것으로 확인 할 수 있다. 이처럼 Granger Causality 분석은 분석기간 전체에서 변수 간 상관관계를 분석하는 방법으로, 변수 간 존재하는 내생성을 고려하지 못한다는 단점이 있다.

〈표 8〉 Granger Causality 결과

| 종속변수 | 설명변수 | χ^2 | 자유도 | Pro > χ^2 |
|----------------|----------------|----------|-----|----------------|
| $dlprnd_{i,t}$ | $dlpgdp_{i,t}$ | 6.274 | 2 | 0.043* |
| | $dlpghg_{i,t}$ | 21.000 | 2 | 0.000* |
| | 전체 | 31.227 | 4 | 0.000* |
| $dlpgdp_{i,t}$ | $dlprnd_{i,t}$ | 8.261 | 2 | 0.016* |
| | $dlpghg_{i,t}$ | 4.775 | 2 | 0.092 |
| | 전체 | 10.419 | 4 | 0.034* |
| $dlpghg_{i,t}$ | $dlprnd_{i,t}$ | 4.553 | 2 | 0.103 |
| | $dlpgdp_{i,t}$ | 1.334 | 2 | 0.513 |
| | 전체 | 7.971 | 4 | 0.093 |

주: *는 5%신뢰구간에서 상관관계가 있음을 나타냄.

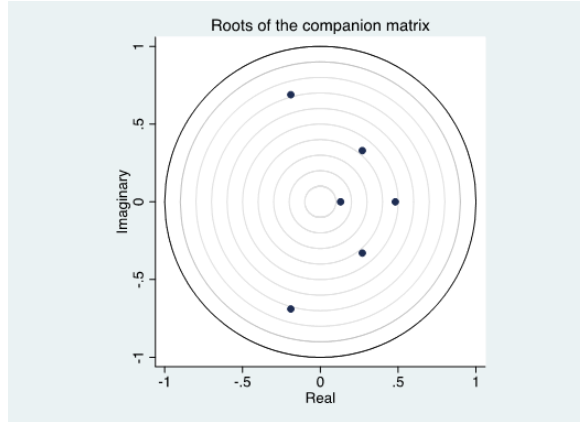
따라서 본 연구에서는 이러한 변수 간 영향 부분을 제거하고, 시간적인 고정 영향(time fixed effect)을 제외하여, 어떤 한 시점에서의 한 변수의 충격(shock)⁸⁾이 같은 시점의 다른 변수에 어떤 시차를 가지로 영향을 미치는지를 분석하기 위해, 동태적 패널 분석법인 Panel VAR을 활용한다.

Panel VAR 모형에 앞서, 슈바르츠 정보기준(SIC)에 따라 최적 시차를 도출하였고 분석 결과 2차가 최적시차로 판명되었다. 또한 패널 단위근의 안정성 측정에서는 패널 단위근이 존재하지 않고, 모든 계수가 (-1,1)사이에 존재하였다. (<그림 1> 참조)

여기에서 변수들의 배열순서는 그랜저 인과관계 검정결과에 따라 외생성(exogeneity)이 큰 순서대로 일인당 R&D 지출($dlprnd_{i,t}$) → 일인당 GDP($dlpgdp_{i,t}$) → 일인당 온실가스배출량($dlpghg_{i,t}$) 순서로 하였다.

8) 여기서 충격(shock)은 각 변수들이 추세(trend)에서 벌어나는 것을 말한다.

〈그림 1〉 PVAR모형의 안정성 검증



일인당 R&D변수($dlprnd_{i,t}$), 일인당 GDP($dlpgdp_{i,t}$), 그리고 일인당 온실가스배출량 간($dlpghg_{i,t}$)에 내생성을 제외한 상호관계를 분석하기 위해, 이들 각각의 t기의 변수를 순서대로 종속변수로 두고, 해당 종속의 시차변수와 다른 변수들을 설명변수로 사용하는 방식이다. 따라서 이들 세 개의 변수를 이용한 Panel VAR 모형은 다음의 세 개의 추정방정식⁹⁾으로 나타난다.

$$dlpgdp_{i,t} = \alpha_i + \sum_{j=1}^5 \alpha_{1i,j} dlpgdp_{i,t-j} + \sum_{j=1}^5 \alpha_{2i,j} dlpghg_{i,t-j} + \sum_{j=1}^5 \alpha_{3i,j} dlprnd_{i,t-j} + \epsilon_{1i,t} \quad (7)$$

$$dlpghg_{i,t} = \beta_i + \sum_{j=1}^5 \beta_{1i,j} dlpghg_{i,t-j} + \sum_{j=1}^5 \beta_{2i,j} dlpgdp_{i,t-j} + \sum_{j=1}^5 \beta_{3i,j} dlprnd_{i,t-j} + \epsilon_{2i,t} \quad (8)$$

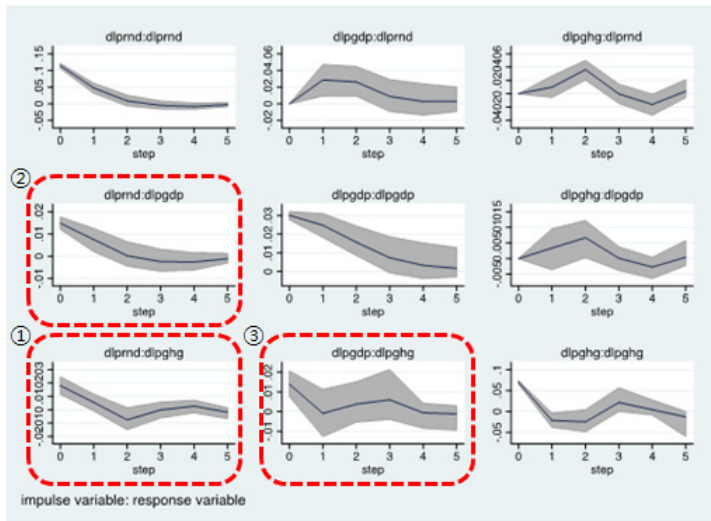
$$dlprnd_{i,t} = \gamma_i + \sum_{j=1}^5 \gamma_{1i,j} dlprnd_{i,t-j} + \sum_{j=1}^5 \gamma_{2i,j} dlpgdp_{i,t-j} + \sum_{j=1}^5 \gamma_{3i,j} dlpghg_{i,t-j} + \epsilon_{3i,t} \quad (9)$$

9) 본 VAR모형의 실제 추정에는 로그차분변수의 평균을 차감한 월만변환을 적용하여 수행된다.

여기서 i =국가, t =시간, j =는 시차를 나타낸다. 식 (6), (7), (8)의 $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ 는 국가별 개별효과(individual effects)를 나타내며, 고정(fixed)되어 있다. 식(6)에서 $\alpha_{1i,j}$ 는 과거 일인당 GDP의 변화가 현재 일인당 GDP에 미치는 영향을, $\alpha_{2i,j}$ 는 과거 일인당 온실가스 배출량의 변화가 현재 일인당 GDP에 미치는 영향을 그리고 $\alpha_{3i,j}$ 는 과거 일인당 R&D의 변화가 현재 일인당 GDP에 미치는 영향을 나타낸다. 다른 식 (7)과 식 (8)의 모수도 동일하게 해석한다.

본 패널VAR 모형은 Abrigo and Love (2015)를 참조하여, STATA를 프로그램으로 이용하였다.

<그림 2> 패널 VAR의 충격반응 함수 결과(직접 영향)



<그림 2>는 패널 VAR의 충격반응함수¹⁰⁾ 결과를 나타내고 있다. 그림에서 빨간색 점선으로 표시된 ①에서 보는 바와 같이, 일인당 R&D($dlprnd_{t,t}$) 충격은 일인당 온실가스 배출량($dlpghg_{i,t}$) 감소에 5% 신뢰구간에서 유의미하게 영향을 미치는 것으로 나타났

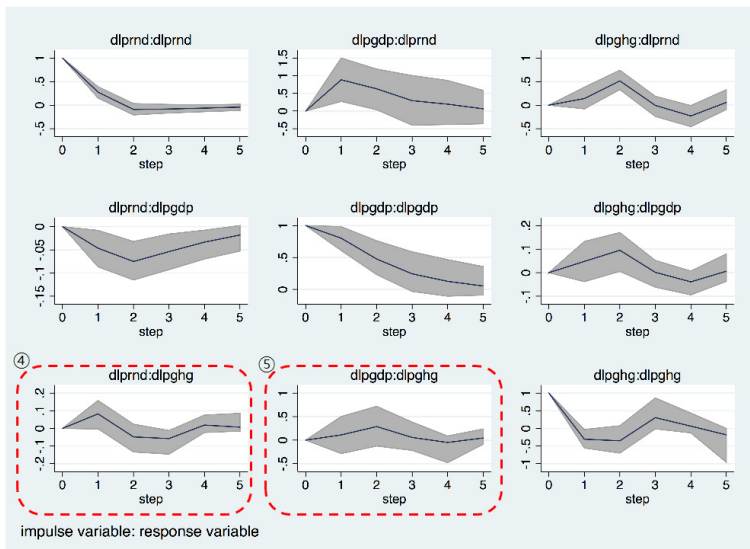
10) 모형 내의 어느 특정 변수에 대하여 일정한 충격을 가한 다음 모형 내의 모든 변수들이 시간의 경과에 따라 반응하는 결과를 나타내는 것

다. 일인당 R&D($dlprnd_{i,t}$) 충격발생 후 초기에는 일인당 온실가스배출량($dlpghg_{i,t}$)이 증가하지만, 2년 이후 감소하여, 약 3년까지는 온실가스 배출량을 감소시키는 것으로 나타났다. 그러나 3년 이후에는 이 충격이 사라지는 것으로 나타났다. 물론 여기서의 충격은 일회 충격에 해당하는 것으로, 한 해에 일 국가에서 발생한 일인당 R&D($dlprnd_{i,t}$) 충격이 일인당 온실가스배출량($dlpghg_{i,t}$)에 미치는 영향을 나타낸다. 한편 <그림 2>의 ②에서는, 일인당 R&D($dlprnd_{i,t}$) 충격이 1기까지 일인당 GDP($dlpgdp_{i,t}$)를 증가시키는 것으로 나타났다. 따라서 이러한 두 개의 효과(간접적 효과와 직접적 효과)가 함께 나올 경우에는 결과적으로 일인당 R&D($dlprnd_{i,t}$)가 일인당 온실가스배출량($dlpghg_{i,t}$)을 증가시키는 것으로 나타날 수 있다.

이처럼 인당 R&D($dlprnd_{i,t}$)가 일인당 온실가스배출량($dlpghg_{i,t}$)에 미치는 종합적인 영향을 검토하기 위해, 간접효과와 직접효과를 모두 포괄하는 새로운 충격반응함수를 정의한다. 이 충격반응함수는 잔차항의 동기간 상관성을 배제하지 않은 충격반응함수이다. 이는 기존 충격반응함수는 일인당 R&D가 동기간에 일인당 GDP를 변화시키는 가능성 또는 일인당 GDP가 일인당 R&D를 동기간에 변화시킬 수 있는 가능성을 감안하여 이들 간의 상호작용을 배제했다면, 새로운 충격반응함수는 일인당 R&D가 일인당 GDP를 동기간에 변화시키는 경로까지 포함하고 있다. 물론 진정한 의미에서 일인당 R&D 충격은 일인당 GDP에 의해서 일인당 R&D 증가하거(일인당 GDP → 일인당 R&D)나 또는 일인당 R&D에 의해서 증가한 일인당 GDP가 다시 일인당 R&D를 증가시키는 등의 경로(일인당 R&D → 일인당 GDP → 일인당 R&D)를 배제하여 정의해야 한다. 그러나 일인당 R&D가 일인당 GDP를 증가시켜, 일인당 온실가스배출량에 영향을 미치는 간접경로를 분석에 포함시키기 위해서는 이들 변수의 상관관계를 배제하기 보다는 이들 변수의 상관관계를 ‘받아들이고’, 이를 ‘전제’한 상태에서 충격반응함수를 살펴보자 한 것이다. 따라서 본 분석과 같이 연간주기 데이터를 이용할 경우 일인당 R&D와 일인당 GDP가 동기간에 상관관계를 가지는 것을 그대로 전제한 상태(즉, 진정한 일인당 R&D만의 고유 충격을 따로 식별하지 않고)에서, 충격반응함수를 살펴보는 것은 일인당 R&D의 일인당 온실가스배출량에 대한 직·간접 영향을 분리하지 않고 포괄적으로 살펴보는 것으로 간주할 수 있다.

<그림 3>에서 보는 바와 같이, 다른 충격반응 함수 결과는 ④를 제외하고는 <그림 2>와 유사한 형태를 보이고 있다. 그러나 <그림 3>의 ④에서 보는 바와 같이, 직접 경로와 간접 경로까지 포함할 경우에는 일인당 R&D가 증가하면, 1기까지는 온실가스배출량이 증가하지만, 3기에서는 온실가스 배출량이 감소하는 것으로 나타났다. 즉 직접효과만을 본 <그림 2>에서는 ①과 ②의 효과가 상충되어 어떤 결과가 나올지 확인할 수 없었지만, 직접효과와 간접효과를 동시에 고려한 새로운 충격반응함수의 결과(④)에서는, 일인당 R&D가 3기부터는 온실가스 배출량을 줄이는 것으로 나타났다. 또한, <그림 2>의 ①에서는 일인당 온실가스 배출량이 2기에 감소세로 돌아서는 것에 반해 <그림 3>의 ④에서 보는 바와 같이 일인당 온실가스 배출량은 3기에 감소되는 것으로 나타났다. 이러한 차이가 발생하는 이유는 <그림 2>에서는 직접효과만을 고려했기 때문에 일인당 R&D 증가가 일인당 온실가스 배출량 감소에 더 빨리 반응한 반면, <그림 3>에서는 일인당 R&D 증가가 일인당 GDP를 증가시키는 효과가 일인당 R&D가 일인당 온실가스 배출량을 줄이는 효과를 반감시켜, 감소세가 더 늦은 3기에 나타나게 하는 것으로 나타났다.

<그림 3> 패널 VAR의 충격반응 함수 결과(직·간접영향)



또한 흥미로운 결과는 <그림 2>의 ③이나 <그림 3>의 ⑤에서 보는 바와 같이 일인당 GDP($dlpgdp_{i,t}$)가 일인당 온실가스배출량($dlpghg_{i,t}$)에 5% 유의수준에서 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 이는 환경쿠즈네츠 가설의 존재를 간접적으로 증명하는 결과로, 어떤 국가(특히 개도국)의 경우 일인당 소득이 온실가스배출량에 양(+의 영향)을 미치는 반면, 다른 국가(특히 선진국)의 경우 음(-)의 영향을 미치지 않기 때문에, 평균적인 영향은 서로 상쇄되어 영향을 미치지 못하는 것으로 나타나고 있다고 볼 수 있다.

V. 시사점 및 한계

본 연구의 결과를 통해서 파악한 바와 같이, 기술혁신을 촉진하기 위한 정부의 R&D 투자는 일인당 GDP에 영향을 미쳐, 간접적으로 온실가스 감축에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 한편, 기술혁신 수준 그 자체는 온실가스 감축에도 영향을 미치는 것으로 나타났다. 종합적으로 정태적 모형에서는 정부의 R&D투자는 미세하지만 일인당 온실가스 배출량을 증가시키는 것으로 나타났다.

그러나 R&D 투자가 온실가스 배출량에 어떤 시차를 통해 영향을 미치는지를 분석하기 위해 사용한 분석 결과, Granger Causality 분석에서는 일인당 R&D와 일인당 온실가스배출량 간에는 상관관계가 없는 것으로 나타나는 반면, R&D가 일인당 GDP에 영향을 받는 부분을 제거하고 분석한 Panel VAR 모형 결과 약 2년 정도의 시차를 두고, R&D 충격이 온실가스배출량 감소에 영향을 미치지 않지만 한 번의 R&D 충격은 약 3년 정도만 일인당 온실가스 배출량에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 한편, R&D투자가 일인당 GDP에 영향을 미쳐 결과적으로 일인당 온실가스배출량에 영향을 미치는 간접경로까지 고려한 모형에서는 일인당 R&D 투자의 증가 충격은 3년의 시차를 두고 온실가스 배출량을 감소시키는 것으로 나타났다. 따라서 결과적으로 정부의 R&D 투자의 증가는 일인당 GDP를 높여 결과적으로 일인당 온실가스 배출량을 증가시키지만(간접적 경로), R&D 투자의 증가가 온실가스 배출량을 감소시키는 효과(직접적 경로)가 더 크기 때문에, 정부의 R&D 투자의 증가는 종합적으로 온실가스 배출량 감소에 효과가 있는 정책이라는 것을 확인할 수 있다.

본 연구의 한계는 다음의 세 가지로 정리해 볼 수 있다. 첫째는 자료 확보의 한계에서

찾을 수 있다. 본 연구의 본래 의도라면, GDP 중 정부 R&D 비중 보다는 GDP 중 재생에너지 분야나 에너지 효율 개선 분야의 정부 R&D 비중을 사용할 경우, 보다 현실 설명력이 높은 연구를 진행했을 것이다. 하지만 재생에너지 분야나 에너지 효율 개선과 같은 분야에 대한 R&D 지출에 대한 데이터의 구축과 접근이 제한적인 상황에서, 간접적으로 전체 정부 R&D 비중을 사용한 것은 이 연구의 근본적인 한계를 보이는 부분이다. 둘째, 앞서 언급한 바와 같이 Panel VAR 분석에서 전체 88개 국가를 대상으로 하지 못하고, 데이터가 충실한 33개국을 대상으로만 분석한 것은 본 연구의 결정적인 한계라 할 수 있다. 추후 각국의 온실가스 감축 기술 관련 R&D 비중 데이터와, 연도별 R&D 데이터가 더 많은 국가들에 대해서 축적될 경우, 보다 현실설명력 있는 분석이 가능하리라 판단된다. 셋째, PVAR 모형 자체의 한계가 있다. 본 연구에서 R&D 투자의 증가 충격이 3년의 시차를 두고 온실가스 배출량을 감소시키는 것으로 나타났다는 것에 대해서는 앞서 기술하였다. 그러나 PVAR모형에서는 왜 3년의 시차를 두고 R&D투자의 증가가 온실가스 배출량 감축으로 이어졌는지에 대한 것은 설명할 수 없다. 이는 R&D 투자와 이를 통한 관련 제품이나 설비의 증가까지의 시차와 관련되어 있을 수도 있고, R&D 투자 생태계의 특수한 상황일 수도 있다. 그러나 본 연구는 원인에 대한 답은 구할 수 없다는 한계가 있다.

[References]

- Abrigo, M. R. and I. Love, “Estimation of Panel Vector Autoregression in Stata: a Package of Programs,” *working paper*, 2015.
- Andreoni, J. and A. Levinson, “The Simple Analytics of the Environmental Kuznets Curve,” *Journal of Public Economics*, Vol. 80, 2001, pp. 269~286.
- Ang, J. B., “CO₂ emissions, energy consumption, and output in France,” *Energy Policy*, 35, 2007, pp. 4772~4778.
- Bianchi, C., F. Calidori, and M. Menegatti, “Pitfalls in Estimating β -convergence by Means of Panel Data: an Empirical Test,” *International Review of Economics*, Vol. 56, 2009, pp. 347~357.

- Boston Consulting Group, "The innovation Imperative in Manufacturing-How the United States can Restore its Edge," 2009.
- Caselli, F., G. Esquivel, F. Lefort, "Reopening the convergence debate: a new look at cross-country growth empirics," *Journal of Economic Growth*, Vol. 1, 1996, pp. 363 ~ 389.
- Chimeli, A. B. and J. B. Braden, "Total Factor Productivity and the Environmental Kuznets Curve," *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 49, 2005, pp. 366 ~ 380.
- Dowrick, S. and M. Rogers, "Classical and technological convergence: beyond the Solow-Swan growth model," *Oxford Economic Papers*, Vol. 54, 2002, pp. 369 ~ 385.
- Gangadharan, L. and Ma. R. Valenzuela, "Interrelationships Between Income, Health and the Environment: Extending the Environmental Kuznets Curve Hypothesis," *Ecological Economics*, Vol. 36, 2001, pp. 513 ~ 531.
- Grossman, G. M. and A. B. Krueger, "Environmental Impacts of the North American Free Trade Agreement," *NBER Working paper*, 1991, p. 3914.
- Grossman, G. M. and A. B. Krueger, "Economic Growth and the Environment," *Quarterly Journal of Economics*, Vol. 110, 1995, pp. 353 ~ 377.
- Holtz-Eakin, D., W. Newey, and H. S. Rosen, "Estimating Vector Autoregressions with Panel Data," *Econometrica*, Vol. 56, No. 6, 1988, pp. 1371 ~ 1395.
- Islam, N., "Growth Empirics: A Panel Data Approach," *The Quarterly Journal of Economics*, Vol. 110, 1995, pp. 1127 ~ 1170.
- Iwata, H., K. Okada, and S. Samreth, "Empirical Study on the Environmental Kuznets Curve for CO₂ in France: The Role of Nuclear Energy," *Energy Policy*, 2010, Vol. 38, pp. 4057 ~ 4063.
- Leitão, A., "Corruption and the Environmental Kuznets Curve: Empirical Evidence for Sulfur," *Ecological Economics*, Vol. 69, 2010, pp. 2191 ~ 2201.
- Love, I. and L. Zicchino, "Financial development and dynamic investment behavior: Evidence from panel VAR," *The Quarterly Review of Economics and Finance*, Vol. 46, 2006, pp. 190 ~ 210.
- Nasir, M., and F. U. Rehman, "Environmental Kuznets Curve for carbon emissions in

- Pakistan: An empirical investigation,” *Energy Policy*, Vol. 39, 2011, pp. 1857~1864.
- Orubu, O. C., and D. G. Omotor, “Environmental Quality and Economic Growth: Searching for Environmental Kuznets Curves for Air and Water Pollutants in Africa,” *Energy Policy*, Vol. 39, 2011, pp. 4178~4188.
- Panayotou, T., “Demystifying the Environmental Kuznets Curve: Turning a Black Box into a Policy Tool,” *Environmental and Development Economics*, Vol. 2, 1997, pp. 469~484.
- Panayotou, T., “Economic Growth and the Environment,” Chapter 2, *Economics Survey of Europe*, No. 2, 2003, pp. 45~67.
- Smulders, S., L. Bretschger, and H. Egli, “Economic Growth and the Diffusion of Clean Technologies: Explaining Environmental Kuznets Curves,” *Environmental and Resource Economics*, Vol. 49, 2011, pp. 79~99.