



Analysis of the relationship among water-efficiency in the non-agricultural sector, economic growth, electricity generation, and CO₂ emission - evidence from Korea -

Jung, Yonghun^a · Lee, Seong-Hoon^{a*}

^aDepartment of Economics, Korea University

Paper number: 18-068

Received: 12 August 2018; Revised: 7 October 2018 / 24 October 2018; Accepted: 24 October 2018

Abstract

We have examined dynamic relationships among water-efficiency, economic growth, electricity generation, and CO₂ emissions in Korea using various time-series analysis methods for 1990-2014. While previous studies have been limited to economic growth, CO₂ emissions, and electricity generation, this study contributed to explain the relationship between existing variables and water-efficiency. We find that the four variables reach a balanced state in the long run through short-term adjustment, CO₂ emissions and economic growth are responsible for water efficiency, and that CO₂ emissions, economic growth and water efficiency are the causes of electricity generation. The long-term impact coefficient estimates on water-efficiency show that the increase in electricity generation and the decrease in CO₂ emissions increase water-efficiency. Although economic growth has increased water-efficiency, moreover, we have identified an inverted U-shaped relationship between economic growth and water-efficiency, which suggests that economic growth above a certain level reduces the rate of increase in water-efficiency.

Keywords: Water-Efficiency, Electricity generation, CO₂ Emissions, Economic growth, VECM

우리나라에서 비농업 부문의 물 효율성, 경제성장, 전력생산 및 CO₂배출 간의 관계 분석

정용훈^a · 이성훈^{a*}

^a고려대학교 공공정책대학 경제통계학부 경제정책학과

요 지

본 연구는 우리나라의 1990-2014년 시계열 자료를 활용하여 물 효율성, 경제성장, 전력생산 및 이산화탄소 배출 간의 장·단기 인과관계를 실증적으로 분석하였다. 기존 연구들이 경제성장, 이산화탄소 배출 및 전력 및 에너지에 국한되어 분석을 한 반면 본 연구는 기존 변수들과 더불어 물 효율성과의 관계를 설명하였다는 기여를 가지고 있다. 실증분석결과를 살펴보면, 네 변수들은 단기조정관계를 통해 장기적으로 균형상태에 도달한다는 것과 변수들 간의 인과관계에서 이산화탄소 배출과 경제성장은 물 효율성의 원인이 되고 이산화탄소 배출과 경제성장 및 물 효율성은 전력생산의 원인이 된다는 사실을 발견하였다. 또한 물 효율성에 대한 장기 영향계수 추정결과를 통해 전력생산의 증가와 경제성장 및 이산화탄소 배출의 감소는 물 효율성을 증가시키며, 일정 수준 이상의 경제성장은 물 효율성의 증가속도를 감소시킨다는 경제성장과 물 효율성의 역U자형 관계를 확인하였다.

핵심용어: 물 효율성, 전력생산, 이산화탄소 배출, 경제성장, 벡터오차수정모형

*Corresponding Author. Tel: +82-44-860-1512
E-mail: leeseonghoon@korea.ac.kr (S.-H. Lee)

1. 서론

전 세계 195개국 대표들은 지난 2015년 12월 12일 UN기후 변화협약(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)에서 2020년 만료 예정인 교토의정서 이후의 기후변화대응을 위한 ‘파리기후협약(Paris Agreement)’을 채택하였다. 파리협정은 온실가스 배출을 줄이고 기후변화에 대한 적응능력을 강화하자는 목표를 가지고 있으며, 감축목표 설정방식이 상향식으로 회원국은 자발적 온실가스 감축목표(Intended Nationally Determined Contribution)를 제출할 것을 의무화하고 2020년 이후 5년마다 감축 목표를 수정하여 제출하되, 이전 목표보다 높은 목표를 제시하고 온실가스 감축노력의 검증은 2023년부터 5년마다 실시하기로 하였다. 또한 2018년 12월에는 파리기후협약의 후속조치로써 유엔기후협약 당사국총회(The 24th Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change, COP 24)에서 「파리협정 세부이행지침(Paris Rulebook)」을 마련할 예정이다.

‘파리기후협약(Paris Agreement)’은 자발적으로 이루어진다는 것을 전제로 하기 때문에 이행을 강제하거나 불이행시 처벌할 수 없다는 한계가 존재한다. 하지만, 지난 약 50 여년간 전 세계 국가들과의 무역 및 교류를 통해 기적이라고 불리어 질 만큼 빠르고 견고한 경제성장을 달성한 우리나라의 입장에서 주요 무역상대국가들 대부분이 동참하는 기후협약을 무시할 수 없다. 또한, 우리가 살고 있는 아름다운 지구의 보호 및 복원에 참여한다는 것은 우리의 당연한 의무이며 절대로 외면할 수 없는 현실인 것이다. 따라서 국제협약에 따른 이산화탄소 배출량 감축의 성공적인 이행은 우리나라의 지속가능한 경제성장을 위해 반드시 필요한 충분조건이다.

최근 우리나라 이산화탄소 배출 현황을 살펴보면, 2015년 파리협정 체결 당시, 우리나라의 이산화탄소 배출량은 약 0.59 기가톤으로 전 세계 배출량의 1.8%, 세계 7번째 수준이며, 파리협정에서 제시한 우리나라의 이산화탄소 감축목표는 특별한 감축노력을 하지 않을 경우 예상되는 미래의 배출량을 의미하는 2030년 배출전망치(Business as Usual, BAU)를 기준으로 37%의 감축목표를 제시하였다. 우리나라의 이산화탄소 배출은 2015년 1인당 GDP (Gross Domestic Products)는 1990년의 3배 수준인 반면 이산화탄소 배출량은 같은 기간 2.5배 증가하여 탄소집약도(CO₂/GDP)가 다소 개선되는 모습이지만, 다른 주요 선진국들과 비교할 때, 아직 주요 선진국의 수준에는 크게 못 미친다. 예를 들어 우리나라의 GDP 1달러당 이산화탄소 배출량이 1990년 0.46 kgCO₂에서 2015년 0.34 kgCO₂로 27.5% 개선된 반면, 독일은 0.39 kgCO₂에서

0.21 kgCO₂로 46.1%, 미국은 0.53 kgCO₂에서 0.30 kgCO₂으로 43.2% 개선되어 탄소집약도 측면에서 주요 선진국들은 우리나라 보다 낮은 수준에 머무르고, 개선속도도 빠른 편이다. 일본은 우리나라에 비해 탄소집약도의 개선속도가 빠르지 않지만, 배출수준이 0.29 kgCO₂에서 0.26 kgCO₂으로 우리나라 보다 매우 낮은 수준의 탄소집약도를 유지하고 있다. 하지만, 중국의 경우, 1990년 탄소집약도가 1.45 kgCO₂에서 2013년 0.64 kgCO₂로 상당히 개선되었으며 잠재적 개선여지가 매우 높다고 평가되고 있으나, 여전히 우리나라에 비해 매우 높은 수준이다.

따라서 현재, 우리나라는 파리기후협약에서 제시한 2030년 배출전망치(Business as Usual, BAU)를 기준으로 37%의 감축목표를 달성하기 위해 이산화탄소 배출량의 절대적인 감축 뿐만 아니라 GDP 당 이산화탄소 배출량으로 측정되는 탄소집약도도 상당히 개선해야 한다는 과제를 가지고 있다. 경제성장을 지속함과 동시에 이산화탄소 배출의 효과적인 감축을 위해 선행되어야 할 가장 중요한 문제는 이산화탄소 배출의 근본적인 원인과 이산화탄소 배출 감축으로 발생할 수 있는 파급효과를 정확히 파악하는 것이다.

현재까지 이산화탄소 배출과 관련된 연구는 크게 두 부분으로 구분될 수 있다. 첫 번째는 이산화탄소 배출량과 가장 관계가 있는 변수로 경제성장을 고려하고 있으며, 두 번째는 이산화탄소 배출과 관련된 주요 변수로 경제성장 뿐만 아니라 에너지 소비량과 에너지 및 전원믹스를 고려하고 있다는 것이다. 이산화탄소 배출과 경제성장을 고려한 연구들은 경제성장과 함께 이산화탄소 배출량이 증가하지만, 경제수준이 일정수준에 도달하면 이산화탄소 배출량의 증가속도가 점차 감소하여 이산화탄소 배출과 경제성장이 역 U자형 관계를 가지고 있다는 환경쿠츠네츠곡선(Environmental Kuznets Curve, EKC) 가설을 검증하는데 초점을 두고 있다. 비록 이산화탄소 배출량과 경제성장 관계가 환경쿠츠네츠곡선 가설이 성립하는지 여부에 대해서는 여전히 논란이 있지만, 대부분 연구들이 도출한 공통된 연구결과는 경제성장과 함께 이산화탄소 배출량이 증가한다는 것이다. 두 번째 연구의 흐름은 이산화탄소 배출량과 관련된 주요 변수로 경제성장 뿐만 아니라, 에너지 소비량이 증가할수록 이산화탄소 배출량이 증가한다는 것과 에너지공급 중 많은 비중을 차지하는 전력발전량과 전력발전을 구성하는 전원믹스의 차이가 이산화탄소 배출량에 영향을 미친다는 주제에 초점을 맞추고 있다.(Jung and Kim, 2012; Kim and Kim, 2015; Kim and Lee, 2018) 따라서, 현재까지 이산화탄소 배출과 관련된 변수로 주로 경제성장과 에너지를 고려하고 있다고 결론지을 수 있다. (Kraft and Kraft, 1978; Yu and Choi, 1985; Glasure and Lee, 1997; Glasure,

2002; Alvarez *et al.*, 2005; Brock and Taylor, 2004, 2005; Soytaş and Sari, 2006; Akinlo, 2008; Marrero, 2010; Ang, 2007, 2008; Baek and Kim, 2013)

경제성장과 에너지가 이산화탄소 배출량과 밀접한 관계가 있다는 점에는 의심의 여지가 없다. 하지만, 인간 존재의 가장 근원적인 요소이며 경제성장과 에너지 사용에 매우 중요한 요인으로 인식하고 있으나, 이산화탄소 배출과의 연관성에 대한 연구에서 간과되고 있는 중요한 요인이 존재한다. 그것은 바로 ‘물’이다.

물과 경제성장이 매우 밀접한 관계를 가지고 있으며 두 변수가 역U자형의 관계를 가지고 있다는 몇몇의 연구가 존재한다. (Lim *et al.*, 2004; Barbier, 2004; Cole, 2004; Katz, 2014) 또한 물과 에너지는 매우 밀접한 연관 또는 상호의존관계로 안정적인 에너지 공급을 위해 물의 안정적이고 지속적인 공급이 필요할 뿐만 아니라, 물의 안정적이고 지속적인 공급을 위해 에너지의 안정적이고 지속적인 공급이 필요하다. 이를 주장하는 물과 에너지의 넥서스(Water-Energy Nexus)에 대한 연구가 다양한 분야에 존재하며 수행되고 있다. (Gleick, 1994; Kim, 2016) 이와 같이 ① 물과 경제성장, ② 물과 에너지 그리고 ③ 이산화탄소 배출과 경제성장 및 에너지의 관계를 설명하고자 하는 연구는 다수 존재하지만, 분명한 관계가 존재할 것으로 예상되는 물과 이산화탄소 배출 및 그 밖의 다양한 거시경제 변수들(경제성장, 에너지 등)과의 관계를 동시에 분석한 연구는 매우 부족하다.

따라서 본 연구에서는 기존에 존재하는 세 분야의 연구를 연결시키는 가교의 역할로서 물과 이산화탄소 배출, 경제성장 및 에너지의 관계를 확인함과 동시에 이산화탄소 배출과 주요 거시경제변수들이 물에 미치는 장기적인 영향에 대해 분석하고자 한다.

2. 분석방법

물과 이산화탄소 배출, 경제성장 및 에너지 변수들의 관계를 분석하고자 하는 본 연구에서 활용한 기본 분석방법은 다음과 같다. 물과 다른 경제변수들과의 관계를 분석하기 위해 본 연구에서는 실질 국내총생산(GDP)을 물 이용량으로 나누어 계산한 물 효율성(GDP/물 이용량, Water Efficiency)을 활용할 것이다. 본 연구에서 활용한 물 이용량은 생활용수와 농업용수의 합으로 농업용수를 제외하였다. 농업용수를 제외하고 물 이용량을 측정하는 이유는 농업용수 이용량이 전체 물 이용량의 약 65% 이상인 반면 실질 국내총생산에서 농업부문이 차

지하는 비중은 약 1% 수준이기 때문에 농업용수를 포함하여 측정된 물 효율성은 본 연구에서 핵심 주제 중의 하나인 실질 국내총생산과 물 효율성의 관계를 왜곡할 수 있기 때문이다.

물 효율성은 한 국가의 경제성장과 에너지 및 이산화탄소 배출량과 상호작용을 하며 서로 영향을 주고 받을 것으로 예상된다. 또한 Katz (2014)는 한 국가의 경제가 성장함에 따라 물 이용량은 증가하지만, 증가속도가 점진적으로 감소하여 경제성장과 물 이용량 사이의 역U자형 관계가 나타난다는 환경쿠즈네츠(EKC) 가설이 성립한다고 주장하고 있다. Katz (2014)의 연구가 옳다면, 물 효율성과 경제성장의 관계는 경제수준 증가에 비해 물 이용량의 증가속도가 느리기 때문에 한 국가의 경제가 일정하고 지속적인 성장을 한다면 경제수준이 낮은 초기의 물 효율성 수준에서 출발하여 경제가 성장함에 따라 물 효율성은 지속적으로 개선될 수 있다는 것을 추론할 수 있다. 하지만, 경제성장과 물 이용량의 관계가 역U자형이더라도, 경제성장과 물 효율성 개선속도와의 관계를 정확히 유추하기는 어렵다. 따라서 본 연구에서는 경제성장과 물 효율성 간의 수준(방향) 및 증가속도의 관계를 분석하고 경제성장 뿐만 아니라 에너지 및 이산화탄소 배출량이 물 효율성에 미치는 영향을 분석하기 위한 기본 모형을 다음 Eq. (1)과 같이 구축하였다.

$$W_t = \alpha_0 + \alpha_1 E_t + \alpha_2 G_t + \alpha_3 C_t^2 + \alpha_4 C_t + u_t \quad (1)$$

여기서 W는 물 효율성을 나타내며, E는 에너지사용량, G는 경제성장, C는 이산화탄소 배출량을 나타낸다. 또한 u는 오차항을 나타낸다.

본 연구의 이산화탄소 배출량과 에너지사용량 통계는 세계은행(World Bank)의 World Development Indicators (WDI) 자료를, 경제성장과 물 효율성 도출을 위한 물 이용량은 한국은행과 한국수자원공사의 자료를 각각 활용했다. 위 Eq. (1)에서 각 독립변수들의 계수값(α)들은 에너지사용량, 경제성장, 경제성장의 제곱, 이산화탄소 배출량이 물 효율성에 미치는 장기 영향력을 의미한다.

이산화탄소 배출량과 경제성장간의 EKC 가설처럼 물 효율성과 경제성장간에도 EKC 가설이 성립한다면 물 효율성과 경제성장 사이에는 양(+)의 관계가 성립할 것이며, 경제성장의 제곱에 대한 계수는 음(-)의 값을 가짐으로써 경제성장에 따라 물 효율성의 개선속도가 감소함을 의미할 것이다. 하지만 물 이용량과 경제성장의 관계가 선형이거나 U자형일 경우에는 경제성장과 물 효율성 수준 및 물 효율성 개선속도와의 관계를 단정 지을 수 없다. 또한, 에너지사용량 증가는 물

이용량을 증가시킴과 동시에 경제성장도 견인하는 역할을 할 수 있기 때문에 물 효율성에 미치는 효과는 명확하지 않으며, 이산화탄소 배출량 증가도 물 이용량과 경제성장을 증가시키는 요인이 될 수 있기 때문에 물 효율성에 미치는 효과는 모호하다. 이를 종합하면 α_1 과 α_2 , α_3 , α_4 의 값은 음(-) 또는 양(+)의 값을 모두 가질 수 있을 것으로 예상된다.

다음은 변수들 간의 동적 그랜저 인과관계(Dynamic Granger Causality)를 살펴볼 것이다. 변수들 간의 동적 인과관계를 살펴보기에 앞서, 우선 시계열의 안정성 여부를 검토하기 위해 Augmented Dickey-Fuller (ADF) 검정과 Philips-Perron (PP) 검정의 두 가지 단위근 검정(Unit root test)을 사용한다. 변수들이 불안정(non-stationary) 시계열인지 여부를 판단하기 위한 단위근 검정의 다음 단계는 변수들 간의 장기적인 관계를 분석하기 위한 공적분(Co-integration) 검정이다. 공적분은 불안정한 두 개 혹은 그 이상의 시계열 자료가 장기에 걸쳐 체계적으로 함께 움직이는 것을 의미하며, 이 경우 변수들 간의 장·단기 인과관계 검정을 위해 벡터오차수정모형(Vector Error-Correction Model)을 활용해야 한다. 본 논문에서는 공적분 검정의 경우 물 효율성, 경제성장, 경제성장의 제곱 및 이산화탄소 배출량에 대해 Johansen의 장기 공적분 검정을 사용한다. Johansen 공적분 방법은 최대우도(Maximum likelihood)를 이용하여 주어진 불안정(Non-stationary) 시계열 자료에 대해 공적분 벡터의 존재를 식별하며, Johansen 공적분 검정은 적절한 시차를 가진 VAR (Vector autoregression) 모형에서 Trace 검정과 Maximum Eigenvalue 검정을 통해 공적분 벡터의 수를 결정한다.

두 개 이상의 시계열 변수가 공적분인 경우 시계열 변수 사이에 인과관계가 있음을 의미하지만 인과관계의 방향을 나타내지는 않는다. 그러므로 다양한 변수들 간의 동적 그랜저 인과관계를 알아보기 위해 벡터오차수정모형(VECM)을 이용한다. 이산화탄소 배출량, 경제성장, 에너지사용량 및 물 효율성 변수들 간의 장·단기 인과관계의 방향을 확인하기 위해 본 논문에서 Pesaran *et al.* (2001)에서처럼 다음과 같은 VECM 모형을 사용한다.

$$\begin{aligned} \Delta W_t &= \delta_1 + \theta_1 ECT_{t-1} + \sum_{j=1}^{p-1} \alpha_{11j} \Delta W_{t-j} + \sum_{j=1}^{p-1} \alpha_{12j} \Delta E_{t-j} + \\ &\quad \sum_{j=1}^{p-1} \alpha_{13j} \Delta G_{t-j} + \sum_{j=1}^{p-1} \alpha_{14j} \Delta [G_{t-j}]^2 + \sum_{j=1}^{p-1} \alpha_{15j} \Delta C_{t-j} + u_{1t} \\ \Delta E_t &= \delta_2 + \theta_2 ECT_{t-1} + \sum_{j=1}^{p-1} \alpha_{21j} \Delta W_{t-j} + \sum_{j=1}^{p-1} \alpha_{22j} \Delta E_{t-j} + \\ &\quad \sum_{j=1}^{p-1} \alpha_{23j} \Delta G_{t-j} + \sum_{j=1}^{p-1} \alpha_{24j} \Delta [G_{t-j}]^2 + \sum_{j=1}^{p-1} \alpha_{25j} \Delta C_{t-j} + u_{2t} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta G_t &= \delta_3 + \theta_3 ECT_{t-1} + \sum_{j=1}^{p-1} \alpha_{31j} \Delta W_{t-j} + \sum_{j=1}^{p-1} \alpha_{32j} \Delta E_{t-j} + \\ &\quad \sum_{j=1}^{p-1} \alpha_{33j} \Delta G_{t-j} + \sum_{j=1}^{p-1} \alpha_{34j} \Delta [G_{t-j}]^2 + \sum_{j=1}^{p-1} \alpha_{35j} \Delta C_{t-j} + u_{3t} \\ \Delta [G_t]^2 &= \delta_4 + \theta_4 ECT_{t-1} + \sum_{j=1}^{p-1} \alpha_{41j} \Delta W_{t-j} + \sum_{j=1}^{p-1} \alpha_{42j} \Delta E_{t-j} + \\ &\quad \sum_{j=1}^{p-1} \alpha_{43j} \Delta G_{t-j} + \sum_{j=1}^{p-1} \alpha_{44j} \Delta [G_{t-j}]^2 + \sum_{j=1}^{p-1} \alpha_{45j} \Delta C_{t-j} + u_{4t} \\ \Delta C_t &= \delta_5 + \theta_5 ECT_{t-1} + \sum_{j=1}^{p-1} \alpha_{51j} \Delta W_{t-j} + \sum_{j=1}^{p-1} \alpha_{52j} \Delta E_{t-j} + \\ &\quad \sum_{j=1}^{p-1} \alpha_{53j} \Delta G_{t-j} + \sum_{j=1}^{p-1} \alpha_{54j} \Delta [G_{t-j}]^2 + \sum_{j=1}^{p-1} \alpha_{55j} \Delta C_{t-j} + u_{5t} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 δ 는 모든 식의 상수항이며, ECT_{t-1} 는 변수들 간의 장기 수렴 여부를 판단할 수 있는 오차수정 항으로 계수 θ 의 유의성 여부에 따라 변수들 간의 단기조정과정을 통한 장기적 균형상태 도달여부의 판단근거를 제시한다.

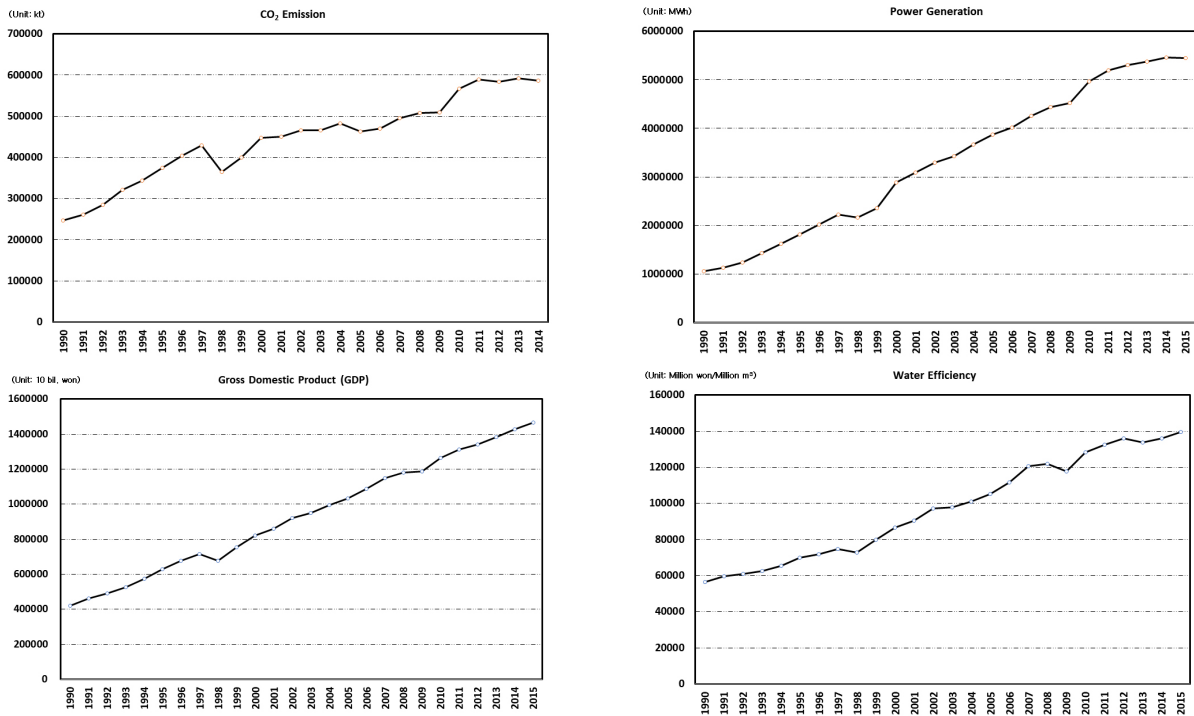
위 모형의 결과에 대한 해석방법을 간단한 예를 가지고 설명하면 다음과 같다. 예를 들어, 이산화탄소 배출량이 물 효율성에 그랜저 인과관계를 야기하는지에 대한 단기 그랜저 인과관계 검정의 귀무가설은 모든 j 에 대한 $H_0: \alpha_{15j} = 0$ 이다. 귀무가설을 기각할 경우 이산화탄소 배출량이 물 효율성에 단기적으로 그랜저 인과관계를 야기한다는 것을 의미한다. 이와 같이 각 식의 독립변수들에 대한 계수 값들의 귀무가설 기각 여부에 따라 각 식의 독립변수가 종속변수에 대해 단기 그랜저 인과관계를 야기하는지를 판단할 수 있다.

3. 실증분석

3.1 자료

물 효율성, 이산화탄소 배출량, 에너지사용량 및 경제성장 간의 관계를 분석하는 본 연구를 수행하기 위해 우리나라의 1990년부터 2014년 기간의 연도별 자료를 사용하였으며, 앞에서 설명한 분석모형에 존재하는 5개 변수들은 다음과 같이 추출되었다.

이산화탄소 배출량은 WDI 자료를 활용하였으며, 경제성장의 대리변수로 기존 연구와 마찬가지로 실질 국내총생산(GDP)을 선정하였고, 우리나라의 2010년 기준 실질 국내총생산(GDP)은 한국은행에서 수집되었다. 에너지사용량의 경우, 총 에너지사용량을 활용할 수도 있지만, 에너지 중에서도 가장 질 높은 에너지이며, 현대 사회에서 이산화탄소 배출과 경제성장에 가장 많은 영향을 미치는 것으로 확인된 전력발전



Sources: World Bank, Bank of Korea, K-water

Fig. 1. Trends in CO₂ Emission, Power Generation, GDP, and Water Efficiency

량을 대리변수로 결정하였다. 전력발전량은 WDI의 총 전력 발전량 중 신재생에너지의 비중을 활용하여 우리나라의 연도별 전력발전량을 계산하였다. 마지막으로 물 이용량은 앞서도 설명하였듯이 한국수자원공사의 자료를 활용하였으며, 농업용수를 제외한 생활용수와 공업용수의 합으로, 본 분석 모형에서 활용하는 물 효율성은 2010년 기준 실질 국내총생산(GDP)을 물 이용량으로 나누어 측정하였다.

위의 Fig. 1은 본 연구에서 활용한 4개 변수들의 연도별 추이를 보여주고 있다. 4개 변수들의 연도별 추이에 대한 유사한 추세는 우선 지속적으로 증가한다는 것과 우리나라와 세계 금융위기 기간인 1998년과 2008년에 일시적으로 감소한다는 것이다. 이와 같은 4개 변수들의 공통된 추이를 통해 기존 연구에서 물 효율성 또는 물이용량의 주요 결정요인으로 다루어진 국내총생산(경제성장)과 전력발전량(에너지) 뿐만 아니라 이산화탄소 배출량도 물 효율성에 영향을 미칠 수 있는 요인이 될 수 있다는 것을 유추할 수 있다.

3.2 단위근과 공적분 검정

Table 1은 본 연구에서 사용된 각 변수에 대한 ADF와 PP의 단위근 검정결과를 보여 주고 있다. 모든 수준 변수들이 단위근을 가지고 있기 때문에 불안정한 시계열(I(1))이라는 것을

Table 1. Unit root test (t-statistics)

	ADF		PP	
	Level	1 st difference	Level	1 st difference
C _t	-1.449	-4.290***	-1.940	-5.546***
W _t	-0.184	-5.168***	-0.045	-5.448***
E _t	-0.547	-4.098***	-0.558	-3.982***
G _t	0.081	-5.246***	1.013	-11.898***
[G _t] ²	2.992	-4.119***	9.124	-4.086***

Note: *, ** and *** denote 10%, 5% and 1% of significance level, respectively.

나타내고 있으며, 이를 차별한 변수들은 안정적인 시계열(I(0))로 변환되는 것을 보여주고 있다

단위근 검정 결과, 모든 수준 변수들이 불안정성 시계열(I(1))이기 때문에 Johansen 공적분 검정을 통해 변수들 간의 장기관계를 살펴볼 수 있으며, 이에 대한 결과가 Table 2에서 공적분 관계가 존재함을 보여주고 있다. 본 결과를 도출하기 위해 활용한 최적 시차의 결정은 Schwartz Information Criteria (SIC) 기준에 따라 1기로 결정되었다.

따라서 단위근과 공적분 관계가 존재하기 때문에 변수들 간의 장·단기 인과 및 영향 관계를 볼 수 있는 벡터오차수정모형(VECM)을 수행할 수 있는 근거를 확인하였다.

Table 2. Johansen Cointegration test results (C_t , E_t , G_t , $[G_t]^2$, W_t)

Null Hypothesis	Eigenvalue	Trace statistics	Maximum eigenvalue statistics
$r=0$	0.922	106.375***	58.537***
$r=1$	0.632	47.836	22.970
$r=2$	0.460	24.869	14.186
$r=3$	0.368	10.683	10.558
$r=4$	0.005	0.125	0.125

Note: Lags used in the Johansen cointegration test is 1 based on the SIC. *, ** and *** denote 10%, 5% and 1% of significance level, respectively.

3.3 장·단기 인과 및 영향관계 분석

Table 3은 벡터오차수정모형(VECM)을 통해 변수들 간의 장·단기 인과관계에 대한 결과를 보여주고 있다. 우선 단기 영향을 살펴보면, 이산화탄소 배출량, 국내총생산(GDP), 및 물 효율성이 전력발전량에 유의적으로 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이산화탄소 배출량과 국내총생산(GDP)이 물 효율성에 유의적으로 영향을 미치는 것으로 나타났다.

장기 인과관계를 살펴보기 위해 오차수정형(ECT)의 계수를 살펴보면, 모든 방정식에서 음의 값을 갖지만 전력발전량과 물 효율성 방정식에서 각각 5%, 1% 유의수준에서 통계적으로 유의한 값을 나타낸다. 이는 물 효율성과 전력발전량에 관련하여 변수들 간 충격 등에 의해 발생하는 불균형관계가 단기조절과정을 통해 장기적으로 균형상태에 놓이게 됨을 의미한다.

이를 종합해보면 이산화탄소 배출량 감축 정책은 경제성장에 단기 뿐만 아니라, 장기에도 영향을 미치지 않고 장·단기적으로 영향의 방향은 알 수 없지만, 전력발전량과 물 효율성에 유의미한 인과관계를 가진다는 것을 보여주고 있다. 비록 이산화탄소 배출에 전력발전량, 국내총소득, 물 효율성이 영향을 주지 않는 것으로 나타나지만, 자료분석 기간 및 고려되는 변수들에 따라 변수들 간의 인과관계에 약간의 차이가 발생할 수 있으며 이산화탄소 배출량이 물 효율성과 밀접한 관계가 있다는 근거를 제시하고 있다. 즉, 이산화탄소 배출을 줄이는 기술개발이 전력발전량과 물 효율성에 단기와 장기 모두

Table 3. Causality results by VECM

	Short-term (F-statistics)				Long-term (t-statistics)
	ΔW	ΔE	$\Delta G \& \Delta G^2$	ΔC	ECT
ΔW		2.19	10.85***	2.84*	-1.65***
ΔE	6.11**		9.83***	5.31**	-54366***
ΔG	1.35	0.73		0.27	-6.21
ΔC	1.13	1.36	1.39		-3.93

Note: *, ** and *** denote 10%, 5% and 1% of significance level, respectively.

Table 4. Long-term coefficients of water efficiency

Variable	Coefficient	t-statistics
Constant	32514	
Electricity(E_t)	0.00002	7.38***
Gross Domestic Product (GDP, G_t)	0.0531	5.75***
[Gross Domestic Product(GDP, G_t)] ²	-0.00000006	-2.65***
CO ₂ Emission(C_t)	-0.0505	-10.00***
$\chi^2_{serial}(1)$	27.48	0.33

Note: $\chi^2_{serial}(1)$ is the Lagrange multiplier test statistics for the first serial correlation. *, ** and *** denote 10%, 5% and 1% of significance level, respectively.

중요한 영향을 미칠 수 있음을 시사한다.

마지막으로 우리나라의 전력발전량, 국내총생산(GDP) 및 이산화탄소 배출량이 물 효율성에 미치는 장기적 영향을 나타내는 물 효율성의 장기 영향계수 추정결과를 살펴보면 Table 4와 같다. 물 효율성의 추정에 사용된 모든 관련 변수들은 1% 유의수준에서 통계적으로 유의하며, 물 효율성과 경제성장 간에 역 U자 가설이 성립하는 것을 확인하였다. 즉, 국내총생산(GDP)과 그 제곱 변수에 대한 추정치가 유의적이며, 각각 양(+)과 음(-)의 부호를 갖는 것은 경제성장과 함께 물 효율성이 지속적으로 증가하지만, 물 효율성의 증가속도는 경제가 성장함에 따라 지속적으로 감소하는 역 U자형 관계가 성립함을 의미한다. 또한 전력발전량이 양(+)의 부호를 가지는 것은 경제성장과 더불어 전력소비가 증가하면 물 효율성이 증가함을 의미한다. 이러한 결과는 전력소비의 증가는 물 이용량을 추가적으로 증가시키지만 전력소비에 따른 경제성장의 폭은 더욱 확대된다는 것을 의미한다. 또한 이산화탄소 배출량의 증가는 물 효율성에 음(-)의 부호를 가지며 이산화탄소 배출량이 감소함에 따라 물 효율성이 증가할 수 있음을 의미한다. 따라서 우리나라의 이산화탄소 배출 감축정책은 물 효율성 증가에도 기여할 수 있음을 시사한다.

4. 결론 및 정책적 시사점

본 연구는 우리나라의 최근 시계열 자료를 활용하여 이산화탄소 배출, 에너지, 경제성장 및 물 효율성 변수들이 매우 밀접한 인과 관계를 가지고 있으며, 에너지사용의 증가가 물 효율성을 증가시키고, 경제성장도 물 효율성을 증가시킨다는 것과 더불어 일정 수준 이상의 경제성장은 물 효율성의 증가속도를 감소시킨다는 역 U자형 가설을 확인하였다.

기존 연구와 차별되는 본 연구의 가장 큰 기여는 기존 연구에서 거의 다루고 있지 않지만, 이산화탄소 배출, 에너지 및 경제 성장과 밀접한 관련이 있는 변수인 ‘물’을 고려하였다는 것이다. 장기 영향 분석결과에 따르면 물 효율성의 증가는 전력발전량의 증가와 경제성장 및 이산화탄소 배출의 감축을 통해서도 이루어질 수 있기 때문에 전력발전량, 경제성장 및 이산화탄소 배출량이 물 효율성의 결정요인이 될 수 있음을 보여 주고 있다.

최근 대두되고 있는 기후변화에 따른 이산화탄소 배출량 감축 정책은 경제성장에 부정적인 영향을 미치지 않고 전력발전량과 물 효율성을 장·단기적으로 향상시킬 수 있음을 보여 주고 있다. 이러한 시계열 분석결과는 이산화탄소 배출 저감을 위한 기술개발 정책이 산업의 전반적인 생산성을 향상시킴으로써 전력발전량과 물 효율성에 장·단기적으로 모두 중요한 영향을 미칠 수 있음을 시사하고 있다.

따라서, 이산화탄소 배출 감축, 지속가능한 경제성장, 그리고 효율적인 에너지 사용이라는 기존의 정책목표와 함께 ‘효율적인 물 정책’이라는 목표를 추가해야만 할 것이며, 위 정책 목표들의 균형있는 달성을 위해 물에 대한 관심과 중요도를 증가시켜야 할 것이다.

감사의 글

본 논문은 2015년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(NRF-2015S1A5A2A03049131)이며, 한국수자원공사와 고려대학교 공공정책대학의 재정지원도 받았습니다.

References

- Akinlo, A. E. (2008). “Energy consumption and economic growth: evidence from 11 African countries.” *Energy Economics*, Vol. 30, No.5, pp. 2391-2400.
- Alvarez, F., Marrero, G. A., and Uch, L. A. (2005). “Air Pollution and the Macroeconomy Across European Countries.” Working Papers-10 (FEDEA).
- Ang, J. (2007). “CO₂ Emissions, Energy Consumption, and Output in France.” *Energy Policy*, Vol. 35, No.10, pp. 4772-4778.
- Ang, J. (2008). “The Long-run Relationship between Economic Development, Pollutant Emissions, and Energy Consumption: Evidence from Malaysia.” *Journal of Policy Modelling*, Vol. 30, No.30, pp. 271-278.
- Baek, J., and Kim, H. S. (2013). “Is Economic Growth good or bad for the environment? Empirical Evidence from Korea.” *Energy Economics*, Vol. 36, No. 2, pp. 744-749.
- Barbier, E. B. (2004). “Water and Economic Growth.” *Economic Record*, Vol. 80, pp. 1-16.
- Brock, W. A., and Taylor, M. S. (2004). “The Green Slow Model.” NBER Working Papers 10557, National Bureau of Economic Research.
- Brock, W. A., and Taylor, M. S. (2005). “Economic Growth and the Environment: A Review of Theory and Empirics.” in : Aghion, P. and S. Durlauf(eds.), edition 1. *Handbook of Economic Growth*, 1, Elsevier, pp. 1749-1821.
- Cole, M. A. (2006). “Economic growth and water use.” *Applied Economics Letters*, Vol. 11, No. 1, pp. 1-4.
- Glasure, Y. U., and Lee, A. R. (1997). “Cointegration, error-correction, and the relationship between GDP and energy: the case of South Korea and Singapore.” *Resource and Energy Economics*, Vol. 20, No. 1, pp. 17-25.
- Glasure, Y. U. (2002). “Energy and National income in Korea: further evidence on the role of omitted variables.” *Energy Economics*, Vol. 24, No. 4, pp. 355-365.
- Gleick, P. H. (1994). “Water and Energy.” *Annual Review of energy and the environment*, Vol. 19, pp. 267-299.
- Jung, Y. H., and Kim, S. Y. (2012). “The relationship among CO₂ emission, Economic growth, and Energy Mix in Korea.” *Environmental and Resource Economic Review*, Vol. 21, No. 2, pp. 271-299.
- Katz, D. (2015). “Water use and economic growth: reconsidering the Environmental Kuznets Curve relationship.” *Journal of Cleaner Production*, Vol. 88, pp. 205-213.
- Kim, H. (2016). “Sustainable Water and Energy Management The Study of Laws and Policies in the U.S. and S. Korea from the Perspective of the Energy-Water Nexus.” *Environmental Law and Policy*, Vol. 16, pp. 101-131.
- Kim, J., and Kim, H. S. (2015). “The Effect of Electricity Generation through Renewable Energy on CO₂ Emissions in Korea.” *Korean Energy Economic Review*, Vol. 14, No. 3, pp. 185-201.
- Kim, S., and Lee, S. H. (2018). “CO₂ Emissions, Energy Consumption, Electricity Consumption and Economic Growth in Korea.” *Applied Economics*, Vol. 19, No. 2, pp. 125-151.
- Kraft, J., and Kraft, A. (1978). “On the relationship between energy and GNP.” *Journal of Energy and Development*, Vol. 3, No. 2, pp. 401-403.
- Lim, H. J., Yoo, S. H., and Kwak, S. J. (2004). “Does Water Consumption Cause Economic Growth, Vice-Versa, or Neither? Evidence from Korea.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 37, No. 10, pp. 869-880.
- Marrero, G. A. (2010). “Greenhouse Gases Emissions, Growth and the Energy Mix in Europe.” *Energy Economics*, Vol. 32, No. 6, pp. 1356-1363.
- Pesaran, M. H., Shin, Y., and Smith, R. J. (2001). “Bounds testing approaches to the analysis of level relationships.” *Journal of Applied Econometrics*, Vol. 16, No. 3, pp. 289-326.
- Soytas, U., and Sari, R. (2006). “Energy consumption and income in G-7 countries.” *Journal of Policy Modeling*, Vol. 28, No. 7, pp. 739-750.
- Yu, E. S. H., and Choi, J. Y. (1985). “The causal relationship between energy and GNP: an international comparison.” *Journal of Energy and Development*, Vol. 10, No. 2, pp. 249-272.