

에너지 집약도, 에너지 가격 그리고 기술 수준 간의 동태적 관계 분석[†]

김기진* · 원두환** · 정수관***

요약 : 지속가능한 발전을 달성하기 위한 방안으로 에너지 집약도 개선이 주목받고 있다. 에너지 가격과 기술 수준은 에너지 집약도에 영향을 미치는 주요한 요인으로 세 변수의 연관성에 관한 실증연구는 해외를 중심으로 진행되어왔다. 그러나 우리나라를 대상으로 한 연구는 드물다. 이에 본 연구에서는 우리나라를 대상으로 에너지 집약도, 에너지 가격, 총요소생산성 간 동태적 관계를 분석하였다. 분석 결과 세 변수는 장기균형관계를 형성하며, 총요소생산성의 증가는 장단기에서 모두 에너지 집약도를 감소시키는 것으로 나타났다. 총요소생산성의 증가가 에너지 집약도 개선에 미치는 효과는 단기보다 장기에 더 큰 것으로 나타났다. 반면 에너지 가격은 에너지 집약도에 유의미한 영향을 미치지 못하였다. Granger 인과성 검정 결과, 에너지 집약도와 총요소생산성은 상호 Granger 인과하지만, 에너지 가격은 약외생적인 것으로 나타났다. 우리나라의 에너지 집약도 개선을 위해서는 전반적인 기술 수준의 개선이 필요하며, 단기적인 처방보다 장기적인 관점에서 정책적 방안을 마련하는 게 바람직하다는 것을 확인할 수 있었다.

주제어 : 에너지 집약도, 장기균형관계, ARDL, 약외생성, Granger 인과성

JEL 분류 : D0, C3, Q4

접수일(2020년 5월 25일), 수정일(2020년 6월 8일), 게재확정일(2020년 6월 12일)

[†] 이 논문 또는 저서는 2017년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2017S1A5B8057488).

* 부산대학교 일반대학원 경제학과, 박사과정, 제1저자(e-mail: dominico0623@gmail.com)

** 부산대학교 경제학부, 교수, 공저자(e-mail: doohwan@pusan.ac.kr)

*** 창원대학교 글로벌비즈니스학부 경제학트랙, 조교수, 교신저자(e-mail: sukwan@changwon.ac.kr)

Analyzing the Relation between Energy Intensity, Energy Price and TFP in Korea[†]

Kijin Kim*, DooHwan Won** and Sukwan Jung***

ABSTRACT : The improvement of energy intensity is drawing attention as a way to achieve sustainable development. Energy price and technology level are the main factors affecting energy intensity, and empirical studies on the relationship between the variables have been conducted mainly in overseas countries. However, analyzing the relation between energy intensity, energy price and technology has not been studied in Korea. Therefore, this study analyzed the dynamic relationship between energy intensity, energy price, and total factor productivity (TFP) in Korea. As a result of the analysis, the three variables form a long-term equilibrium relationship. The increase in TFP reduces energy intensity in both short and long term, and the long-term effect is greater than short-term effect. On the other hand, energy price do not have a significant impact on energy intensity. Granger causality test results show that energy intensity and TFP granger cause each other, but energy price is weak-exogenous.

Keywords : Energy Intensity, Long-run Equilibrium, ARDL, Weak-Exogeneity, Granger Causality

Received: May 25, 2020. Revised: June 8, 2020. Accepted: June 12, 2020.

[†] This work was supported by the Ministry of Education of the Republic of Korea and the National Research Foundation of Korea(NRF-2017S1A5B8057488).

* Ph. D. Candidate, Department of Economics, Pusan National University, First Author(e-mail: dominico0623@gmail.com)

** Professor, Department of Economics, Pusan National University, Coauthors(e-mail: doohwan@pusan.ac.kr)

*** Assistant Professor, Department of Global Business, Changwon National University, Corresponding author(e-mail: sukwan@changwon.ac.kr)

I. 서론

화석연료의 사용은 인류의 경제적 후생을 증진하였으나 에너지 자원의 고갈, 환경오염 등 많은 부작용을 초래하였다(이명현, 2011; 손동희·전용일, 2018). 이를 해결하기 위해 에너지 소비를 줄여야 하지만, 에너지 자원은 경제활동에 필수적이기에 일반적인 에너지 소비량 감소 방안은 경제의 활력을 저해하여 또 다른 부작용을 초래할 수 있다. 이에 에너지 사용에 따른 부작용을 감소시키면서 장기적인 경제성장을 달성하는 지속가능한 성장이 전 세계적인 화두로 떠오르고 있다(이명현, 2011). 지속가능한 성장을 달성하기 위한 방법으로 탄소세 도입, 탄소배출권 시장 개설 등 다양한 정책이 시행되고 있지만, 이들 방안은 에너지 자원의 사용 비용을 높여 일정 부분 경제적 성과를 저해하기도 한다(배정환, 2005; Rajbhandari and Zhang, 2018). 따라서 보다 근본적인 해결책으로 더 적은 양의 에너지 자원을 사용하여 이전과 동일한 수준의 경제적 성과를 달성할 수 있는 에너지 효율성 개선에 대한 관심이 증대되고 있다(Appiah, 2018).

에너지 효율성에 관한 다양한 정의가 존재하지만, 에너지 집약도(energy intensity)가 통상적으로 많이 사용되고 있다. 에너지 집약도는 부가가치의 원단위로 국내총생산(GDP) 1,000달러를 생산하는 데 사용한 에너지의 양을 의미한다. 에너지 집약도는 에너지 효율의 역수로, 에너지 집약도가 높을수록 에너지 효율은 낮은 것으로 판단한다(김지효·심성희, 2016). 우리나라는 에너지 이용 합리화 기본계획 수립, 에너지 효율 등급 표시제 시행 등 에너지 집약도를 감소시키기 위하여 지속적인 노력을 기울여 왔다(김지효·심성희, 2016).

<표 1>에서 나타나듯이 우리나라의 에너지 집약도는 2000년대 이후 꾸준히 감소하고 있다. 그러나 독일, 프랑스 등 주요국과 비교하면 우리나라의 에너지 집약도는 여전히 높은 편이며, 우리나라 경제에 큰 비중을 차지하는 제조업 부문의 에너지 집약도 역시 주요국에 비해 높은 편이다. 2018년 기준 우리나라 최종 에너지 소비의 75%, 전력 발전의 70%를 화석연료에 의존한다는 점을 고려하여 볼 때, 우리나라의 높은 에너지 집약도는 최근 강화되고 있는 탄소 배출에 대한 규제와 맞물려 우리나라 제조업과 경제에 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 따라서 에너지 집약도와 이에 영향을 미칠 수 있는 요인들의 관계를 분석하는 것은 우리나라의 에너지 집약도 개선과 지속가능한 성장을 위한 정책 개발에 중요하다.

〈표 1〉 주요국의 에너지 집약도 변화 추이

	단위	연도	대한민국	미국	독일	영국	프랑스	이탈리아	일본
에너지 집약도 (전체)	MJ/\$2011 PPPGDP	2000	8.07	7.34	4.64	4.82	4.98	3.50	5.31
		2005	7.16	6.60	4.51	4.19	4.93	3.63	5.02
		2010	6.96	6.07	4.12	3.74	4.58	3.43	4.74
		2015	6.55	5.41	3.60	3.02	4.10	3.07	3.74
에너지 집약도 (제조업)	MJ/\$2010 PPPGDP	2000	8.89	9.74	4.45	6.55	6.21	5.43	6.96
		2005	6.65	7.51	4.28	6.6	5.95	5.42	6.14
		2010	5.62	6.28	4.24	5.77	5.21	4.53	5.45
		2015	5.26	5.82	3.62	4.69	4.76	3.72	4.74

주: 1) MJ = MegaJoule

2) 에너지 집약도에 관한 자료는 World Bank와 International Energy Agency의 자료를 사용함.

에너지 집약도에 영향을 미치는 주요한 요인으로 에너지 가격과 기술 수준이 지목되고 있다(Fisher-Vanden et al., 2004; Bessec and Méritet, 2007; Hang and Tu, 2007). 에너지 가격 상승과 기술 발전은 에너지 자원의 수요를 감소시키기 때문에 에너지 집약도를 낮추는 것으로 알려져 있다. 그러나 에너지 자원은 필수재의 성격을 가지기에 수요의 가격 탄력성이 다른 상품에 비하여 낮고, 탄력성이 해당 지역의 여건에 따라 다르게 나타날 수 있다(Bernstein and Griffin, 2006). 따라서 에너지 가격의 변동이 집약도에 미치는 영향은 지역에 따라 다를 수 있다. 시계열 분석을 통하여 세계 에너지 시장에 미치는 영향력이 큰 일부 국가를 제외한 대부분의 국가에서 에너지 가격은 에너지 집약도와 기술 수준에 장기적으로 유의미한 영향을 미치지 않을 수 있다는 주장이 제기되었다(Bessec and Méritet, 2007). 이러한 경우 대부분의 지역에서 에너지 가격은 장기적인 에너지 집약도 개선에 큰 영향을 미치지 못하며, 에너지 집약도의 개선은 기술 진보의 경로를 통해서만 달성될 수 있다. 한편 기술 혁신의 척도로 총요소생산성(TFP, Total Factor Productivity)이 많이 사용되고 있다. TFP는 생산요소와 결합하여 산출량을 결정하며, 다양한 경로를 통하여 에너지 집약도 개선에 직간접적인 영향을 미칠 수 있다(Ladu and Meleddu, 2014 ; Li and Lin, 2018). 이에 최근 에너지 집약도 개선에 있어 TFP의 역할이 주목을 받고 있다.

세 변수의 관계에 관한 연구는 에너지 가격과 기술 수준이 에너지 집약도에 영향을 미치는 단방향적(uni-directional) 인과관계를 전제로 요인 분해 방법(DA: Decomposition Analysis), 자료 포락 분석(DEA: Data Envelopment Analysis), 회귀 분석(regression analysis) 등 다양한 방법론을 활용하여 진행되었다. 최근에는 Bessec and Méritet(2007), Ladu and Meleddu(2014), Osigwe and Arawomo(2015), Haider and Ganaie(2017) 등 연립방정식 모형과 Granger 인과성 검정을 이용하여 변수 간 상호 예측력을 파악하는 연구로 분석의 폭이 확대되었다. 그동안 세 변수의 관계에 관한 해외 연구는 다양한 방식으로 진행되어왔다. 그러나 우리나라를 대상으로 한 연구는 부족한 실정이다. 이에 본 연구는 우리나라를 대상으로 에너지 집약도, 에너지 가격, 기술 수준을 대변하는 TFP 간 동태적 관계를 종합적인 관점에서 분석한다.

먼저 공적분 검정을 통해 변수 간 장기균형관계의 존재 여부를 파악한 이후 에너지 가격과 TFP가 에너지 집약도에 미치는 동태적 영향을 분석한다. 이를 위해 자기회귀 시차 분포(ARDL: Autoregressive Distributed Lag) 모형이 이용되었다. ARDL 모형은 시차 변수를 활용하여 시계열 상관을 감소시켜 내생성 문제를 완화해주는 장점이 있다. 그런 연후에 변수 간 상호 예측력을 살펴보기 위해 벡터오차수정모형(VECM: Vector Error Correction Model)에 기반한 Granger 인과성을 검정을 시행한다. VECM은 장기균형관계에 관한 유의미한 정보를 포함하여 분석하기 때문에 모형설정의 오류를 줄일 수 있다 (Oh and Lee, 2004; Bessec and Méritet, 2007).

본 연구는 세 변수의 연관성에 관한 국내 연구가 부족한 실정에서 우리나라를 대상으로 변수들의 동태적 관계와 상호 예측력을 종합적으로 분석하였다는 데 의의가 있다. 연구의 목차는 다음과 같다. 우선 제 II장에서 세 변수의 관계에 관한 기존 연구를 검토한 뒤, 제 III장에서 이론적 배경과 실증모형을 살펴볼 것이다. 제 IV장에서는 추정 결과를 제시하고, 마지막 제 V장에서 결과를 요약하고 시사점을 제시한다.

II. 선행연구

지속가능한 발전을 달성하기 위한 방안으로 에너지 집약도 개선에 대한 관심이 높아지고 있다. 이에 에너지 집약도와 주요한 영향요인으로 거론되는 에너지 가격, 기술 수

준의 관계를 분석하는 연구가 꾸준히 진행되고 있다. 대다수의 연구는 에너지 집약도를 종속변수로 두고 에너지 가격과 기술 수준이 미치는 영향을 파악하는 단방향 인과관계에 기초하여 분석을 진행하였다(Boyd and Pang, 2000; Metcalf, 2008; Fisher-Vanden et al., 2004; Hang and Tu, 2007).

Boyd and Pang(2000), Metcalf(2008)는 에너지 가격의 상승이 에너지 사용량을 감소시켜 에너지 집약도를 낮춘다는 점을 확인하였다. 마찬가지로 TFP의 증가 역시 에너지 소비량 감소를 통하여 집약도를 낮추기에 에너지 효율 개선에 있어 중요한 변수라는 점을 확인하였다. Fisher-Vanden et al.(2004), Hang and Tu(2007)는 비용극소화(cost minimization)이론을 바탕으로 모형을 설정한 후 중국의 에너지 집약도를 분석하였다. 서로 다른 총계(aggregation) 수준의 자료와 TFP의 대리변수(proxy)를 사용하였음에도 불구하고 두 연구에서 모두 에너지 가격의 상승과 TFP의 증가는 에너지 집약도를 감소시키는 것으로 나타났다.¹⁾ 이처럼 세 변수의 관계를 분석한 대부분의 연구에서 에너지 가격과 TFP는 에너지 집약도에 음(-)의 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

세 변수가 상호 예측에 영향을 미칠 수 있다는 점을 고려하여 VAR(Vector Autoregressive) 혹은 VECM을 통한 Granger 인과성 분석도 이루어졌다. Naser(2014), Osigwe and Arawomo(2015)는 에너지 집약도를 구성하는 에너지 소비량, GDP와 에너지 가격의 관계를 분석하였다. 에너지 가격으로 유가를 사용한 Naser(2014)는 에너지 소비량, GDP와 유가는 상호 Granger 인과한다는 점을 밝혔다. Osigwe and Arawomo(2015)는 나이지리아의 등유 시장, 전력 시장 및 전체 에너지 시장을 분석하였는데 변수 간 상호 인과성은 분석의 대상이 되는 시장에 따라 달라질 수 있다는 점을 확인하였다. 전력 시장에서 에너지 가격은 에너지 소비량, GDP와 장기적으로 양방향의 Granger 인과성을 갖지만, 등유시장과 전체 에너지 시장에서는 변수 간 Granger 인과성을 발견하지 못하였

1) Fisher-Vanden et al.(2004)은 비용극소화이론에 기초한 이론 모형을 설정한 뒤, 1997년에서 1999년 동안의 중국 2,500 기업 패널 자료를 사용하여 분석을 진행하였다. 이후 Hang and Tu(2007)는 1985년에서 2004년 동안의 중국 연간 시계열 자료를 사용하여 Fisher-Vanden et al.(2004)의 연구를 기업 단위에서 국가 단위로 확대하여 분석을 진행하였다. 한편 Fisher-Vanden et al.(2004), Hang and Tu(2007)는 기술 수준을 나타내는 TFP의 대리변수로 각각 연구개발과 외국인 직접투자(FDI : Foreign Direct Investment) 금액 자료를 사용하였다. TFP는 한 국가 경제가 가지는 생산 활동의 효율성 및 생산성, 경제 시스템의 질적 수준을 나타낸다(현대경제연구원, 2013). 따라서 한 국가의 전반적인 기술 수준을 고려할 시에는 연구개발과 FDI 금액보다 경제와 생산요소 전반의 효율성을 반영하는 TFP를 사용하는 것이 더 적절할 수 있다.

다. 한편 Ladu and Meleddu(2014), Haider and Ganaie(2017)는 각각 TFP와 에너지 소비, 에너지 효율성 간 연관성을 분석하였다. 이탈리아를 대상으로 패널 VECM 분석을 시행한 Ladu and Meleddu(2014)의 연구에서 TFP는 에너지 소비와 상호 장기적으로 영향을 미치는 반면 인도의 시계열 자료를 이용한 Haider and Ganaie(2017)의 연구에서는 에너지 효율성에서 TFP로의 단방향적 영향만 존재하는 것으로 나타났다.

다른 연구들이 에너지 가격과 소비량, TFP와 에너지 효율성 등 두 변수 간 관계를 분석한 반면 Bessec and Méritet(2007)은 OECD 주요국의 장기 시계열 자료를 사용하여 석유 집약도, 유가 및 차량 연비 간 관계를 분석하였다. 또한 장기균형행렬에 대한 검정을 통하여 약외생성 검정을 시행하였다. 석유 집약도와 차량 연비는 대부분의 국가에서 상호 영향을 미치지만, 유가는 미국, 영국 등 국제 에너지 시장에 미치는 영향력이 큰 일부 국가를 제외한 대부분의 지역에서 약외생적인 것으로 나타났다.

이처럼 세 변수의 관계에 관한 연구는 다양한 지역을 대상으로 진행되어왔다. 그러나 에너지 집약도 개선의 중요성이 증대되고 있음에도 불구하고, 우리나라를 대상으로 변수들의 관계를 분석한 연구는 드물다. 이에 본 연구는 우리나라를 대상으로 세 변수의 동태적 관계에 대하여 분석하였다. 우선 ARDL 모형을 통하여 변수들의 동태적 인과관계를 분석한다. 이후 VECM을 이용한 Granger 인과성 검정을 통해 변수 간 상호 예측력을 분석할 것이다. 우리나라를 대상으로 세 변수의 관계를 살펴본 연구가 부족하기에, 다양한 관점에서 변수들의 동태적 관계를 분석한 본 연구의 결과는 우리나라 에너지 집약도 개선에 있어 유의미한 정보를 제공할 수 있을 것이라 기대된다.

III. 이론적 배경과 분석방법

1. 이론적 배경

경제 전체의 생산함수는 식 (1)의 Cobb-Douglas 생산함수와 같다.²⁾

2) 이론 모형의 도출 과정은 완전경쟁시장과 규모의 불변 가정하의 비용극소화를 통하여 모형을 설정한 Fisher-Vanden et al.(2004)을 참고하였다.

$$Q = F(X_1, \dots, X_n, A) = A \prod_i X_i^{\alpha_i} \quad (1)$$

여기서, A 는 경제 전반적인 기술 수준을 나타내는 솔로우 잔차(solow's residual) 혹은 TFP이며, X_i 는 산출물 생산에 투입된 생산요소를 나타낸다.³⁾ α_i 는 각 생산요소의 소득 분배율을 나타내며, 규모수익 불변의 가정(CRS : Constant Returns to Scale)에 따라 $\sum \alpha_i = 1$ 이라고 가정한다. 식(1)을 비용극소화 제약하의 최적화 문제로 표현하면 식(2)와 같다.

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum P_{X_i} X_i \\ \text{s.t.} \quad & Q = F(X_1, \dots, X_n, A) \end{aligned} \quad (2)$$

완전경쟁 가정하에서 식(2)는 쌍대성의 원칙(duality principal)에 따라 식(3)과 같은 비용함수로 표현할 수 있다.

$$C(P_{X_1}, \dots, P_{X_i}, A) = A^{-1} \sum P_{X_i} X_i^c \quad (3)$$

여기서, P_{X_i} 는 개별 생산요소의 가격, X_i^c 는 각 생산요소의 조건부 수요를 나타낸다. 식(3)을 자본(K), 노동(L), 중간재(M) 및 에너지(E)에 관한 함수로 나타내면 식(4)와 같다.

$$C(P_K, P_L, P_E, P_M, Q) = A^{-1} P_K^{\alpha_K} P_L^{\alpha_L} P_E^{\alpha_E} P_M^{\alpha_M} Q \quad (4)$$

여기서, Q 는 경제 전체의 산출량이다. Shephard's lemma에 따라 식(4)를 에너지 가격(P_E)에 대하여 편미분하면 식(5)와 같은 에너지 수요 함수를 도출할 수 있다(Fisher-Vanden et al., 2004 ; Hang and Tu, 2007).

3) 솔로우 잔차는 완전경쟁시장과 규모수익 불변의 가정하에서 TFP를 의미한다(Romer, 2006; 장인성, 2015). 본 연구에서는 자료의 제약으로 인하여 OECD에서 제공하는 원형(Primary) TFP를 EU KLEMs 기준 TFP의 대리 변수로 사용하였다.

$$E = \alpha_E A^{-1} P_K^{\alpha_K} P_L^{\alpha_L} P_E^{\alpha_E - 1} P_M^{\alpha_M} Q \quad (5)$$

양변을 Q 로 나누고 $P_Q = P_K^{\alpha_K} P_L^{\alpha_L} P_E^{\alpha_E} P_M^{\alpha_M}$ 이라고 가정하면, 에너지 집약도에 관한 식(6)을 도출할 수 있다.

$$I = \frac{E}{Q} = \frac{\alpha_E P_K^{\alpha_K} P_L^{\alpha_L} P_E^{\alpha_E} P_M^{\alpha_M}}{A P_E} = \frac{\alpha_E}{A P_r} \quad (6)$$

여기서, I 는 $\frac{E}{Q}$ 로써 에너지 집약도를 나타내며, P_r 은 $\frac{P_E}{P_Q}$ 로써 에너지 상대가격을 나타낸다. 에너지 집약도는 전반적인 기술 수준을 나타내는 TFP 및 에너지 상대가격과 역(-)의 관계를 가진다. 일반적으로 에너지 사용의 효율성을 높이는 기술의 발전과 에너지 상대가격의 상승은 에너지 자원에 대한 수요를 감소시켜 에너지 집약도를 감소시킨다.

2. 분석 방법

(1) ARDL 분석

변수들의 장기균형관계를 나타내는 실증모형은 식(6)에 로그를 취하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\ln EI_t = b_0 + b_1 \ln TFP_t + b_2 \ln P_t + \epsilon_t \quad (7)$$

여기서, EI_t 는 에너지 집약도, TFP_t 는 전반적인 기술 수준을 나타내는 총요소생산성, P_t 는 에너지 가격, ϵ_t 는 확률오차를 각각 나타낸다. 기술의 진보와 에너지 가격의 상승이 에너지 집약도의 감소로 이어진다면, b_1, b_2 는 음(-)의 값을 가질 것으로 예상된다.

식(7)의 변수들은 시계열 자료로 불안정한 경우 가성회귀의 문제가 발생할 수 있다. 그러나 불안정한 시계열 간 장기적으로 안정적인 선형관계가 형성되면 변수 간 공적분 관계가 존재한다고 본다. 식(7)의 시계열 변수들이 공적분(Cointegration) 관계를 형성

하면 통상적인 회귀분석은 초일치성을 갖는다. 따라서 회귀분석에 앞서 시계열 간 공적분 검정이 선행될 필요가 있다.

본 연구에서는 공적분 관계를 검정하기 위해 ARDL 한계검정(Autoregressive Distributed Lag Bounds Test)을 시행한다. ARDL 한계검정은 소표본에서 강건하고, 자기 시차변수들을 포함하기에 시계열 상관을 완화하여 내생성을 통제할 수 있는 장점이 있다(Pesaran et al, 2001; 원두환 외, 2018). ARDL 한계검정을 시행하기 위하여 설정된 무제약 오차수정모형(Unrestricted Error Correction Model)은 식 (8)과 같다.⁴⁾

$$\Delta \ln EI_t = b_0 + \sum_{i=1}^p b_{1i} \Delta \ln EI_{t-i} + \sum_{i=0}^{q_1} b_{2i} \Delta \ln TFP_{t-i} + \sum_{i=0}^{q_2} b_{3i} \Delta \ln P_{t-i} + b_4 EI_{t-1} + b_5 \ln TFP_{t-1} + b_6 \ln P_{t-1} + \epsilon_t \quad (8)$$

여기서, Δ 는 차분 연산자이고, p 와 q 는 변수들의 시차 길이를 나타낸다.

ARDL 한계검정을 시행하기 위해 식 (8)의 무제약 오차수정모형에서 장기관계를 나타내는 수준변수들의 계수를 대상으로 ‘변수 간 장기균형관계가 존재하지 않는다’는 귀무가설($H_0 : b_4 = b_5 = b_6 = 0$)을 설정한다. 이후 Wald 검정을 통하여 귀무가설에 대한 가설검정을 시행한다(Pesaran et al, 2001; Nkoro and Uko, 2016). 검정통계량이 상한 임계치보다 커서 귀무가설이 기각되면 변수 간 공적분 관계가 존재한다고 판단한다. 반면 검정통계량이 하한 임계치보다 작으면 귀무가설을 기각할 수 없기 때문에 공적분 관계가 없다고 판단한다. 검정통계량이 상한 임계치와 하한 임계치 사이에 위치할 경우 공적분 관계의 존재 여부에 대해 명확한 결론을 내릴 수 없다(Nkoro and Uko, 2016).

ARDL 한계검정을 통하여 공적분 관계가 확인되면, 식 (9)와 같은 ARDL(p, q_1, q_2) 모형을 통해 변수 간 동태적 관계를 분석할 수 있다.

$$\ln EI_t = b_0 + \sum_{i=1}^p b_{1i} \ln EI_{t-i} + \sum_{i=0}^{q_1} b_{2i} \ln TFP_{t-i} + \sum_{i=0}^{q_2} b_{3i} \ln P_{t-i} + \epsilon_t \quad (9)$$

4) 본 연구는 소표본인 점을 고려하여 설정된 최대시차 내에서 AIC(Akaike's Information Criterion)를 최소화하는 시차를 최적시차로 선택하였다.

여기서, b_{2i} , b_{3i} 는 기술과 에너지 가격이 에너지 집약도에 영향을 미치는 단기효과를 나타낸다. 장기효과는 식 (10)과 같은 장기탄력성을 통해 파악할 수 있다.

$$\frac{\sum_{i=0}^q b_{ji}}{1 - \sum_{i=0}^p b_{1i}}, j = 2, 3 \quad (10)$$

(2) VECM 분석

에너지 집약도, 에너지 가격과 기술 간 Granger 인과성을 분석하는 데 공적분 관계의 유무에 따라 VAR 혹은 VECM이 이용된다.⁵⁾ VAR모형에 기초한 통상적인 Granger 인과성 검정은 시계열의 안정성을 전제로 한다. 안정적인 시계열이라면, 수준변수를 활용하지만, 불안정한 시계열이라면 차분한 변수를 사용한다. 그러나 VAR모형에 기반한 Granger 인과성 검정은 변수 간 공적분 관계가 존재할 때 장기균형관계에 관한 유의미한 정보를 배제하기 때문에 모형설정의 오류를 발생시킬 수 있다. 따라서 변수 간 공적분 관계가 존재할 시, 장기균형관계를 반영한 VECM 모형을 이용하여 Granger 인과성 검정을 시행하는 것이 타당한 방법이라고 볼 수 있다(Mashi and Mashi, 1996, 1997; Oh and Lee, 2004; 송효준·이한식, 2019).

VECM은 다음과 같이 나타낼 수 있다(Johansen 1988).

$$\Delta Y_t = \Pi Y_{t-1} - \sum_{i=1}^{p-1} \Gamma_i \Delta Y_{t-i} + \epsilon_t \quad (11)$$

$$\text{단, } Y_t = \begin{pmatrix} EI_t \\ TFP_t \\ P_t \end{pmatrix}$$

5) 인과관계란 일반적으로 원인과 결과의 관점에서 바라본 변수 간의 관계를 의미한다. 그러나 Granger 인과성 분석에서 의미하는 인과관계란 특정 변수의 과거값이 다른 변수의 현재값 예측에 가지는 유용성, 즉 예측가능성(predictability)을 의미한다(Granger, 1969; 정수관, 2018).

$$\Pi = (\alpha\beta'), \alpha = \begin{pmatrix} \alpha_{EI} \\ \alpha_{TFP} \\ \alpha_P \end{pmatrix}, \beta = (\beta_{EI} \beta_{TFP} \beta_P)$$

$$\Gamma_i = \begin{pmatrix} \Gamma_{EI, EI, i} & \Gamma_{EI, TFP, i} & \Gamma_{EI, P, i} \\ \Gamma_{TFP, EI, i} & \Gamma_{TFP, TFP, i} & \Gamma_{TFP, P, i} \\ \Gamma_{P, EI, i} & \Gamma_{P, TFP, i} & \Gamma_{P, P, i} \end{pmatrix}$$

여기서, Δ 는 차분 연산자이고, Γ_i 는 차분변수의 계수들로 구성된 행렬로써 변수 간 단기 동학을 나타낸다. α 는 조정계수 벡터(adjustment coefficient vector), β' 는 공적분 관계식의 추정계수 벡터(cointegration vector)로써 장기균형행렬(long-run equilibrium matrix)인 Π 를 구성한다. 이때, 조정계수 벡터 α 는 $t-1$ 기 장기균형에 가해진 충격으로 발생한 오차가 균형으로 회복되는 속도를 나타낸다(Engel and Granger, 1987).

식 (11)의 VECM에 근거한 Granger 인과관계는 단기 Granger 인과관계와 장기 Granger 인과관계로 구성된다. 차분된 설명변수의 변동이 종속변수의 변동을 설명한다면 단기 Granger 인과관계가 성립한다. 즉 귀무가설 $\Gamma_{xy, 1} = \Gamma_{xy, 2} = \dots = \Gamma_{xy, p-1} = 0$ 에 대해 귀무가설이 기각되면 특정 설명변수 x 는 종속변수 y 를 단기 Granger 인과한다고 본다. 한편 장기 Granger 인과관계는 공적분 관계식의 계수($H_0 : \beta_y = 0$)와 조정계수($H_0 : \alpha_x = 0$)에 대한 결합 검정을 통해 파악한다. 결합 검정이 귀무가설을 기각하면 특정 설명변수 x 는 종속변수 y 를 장기 Granger 인과한다고 본다. 이때 조정계수에 대한 귀무가설이 기각되지 않는다면 x 는 장기균형관계에 대하여 약외생적(weak exogenous)이라고 한다. 약외생적인 변수는 공적분 관계에 대한 통계적 추론(statistical inference)에 도움이 되지 않으며, 전기에 발생한 충격에 대한 오차수정은 약외생성이 없는 다른 변수를 통하여 이루어진다(윤종인, 2015).

3. 자료

본 연구는 1985년부터 2017년까지의 연간 시계열 자료를 이용하였으며, 모든 변수는 로그를 취하였다. 에너지 집약도는 GDP 단위당 에너지 소비(TOE/천 달러)로 통계청 국가통계포털(KOSIS)에서 획득하였고, 기술 수준은 OECD에서 제공하는 총요소생산성 지수(2010=100)를 사용하였다. 에너지 가격은 한국은행 경제통계시스템(ECOS)에서

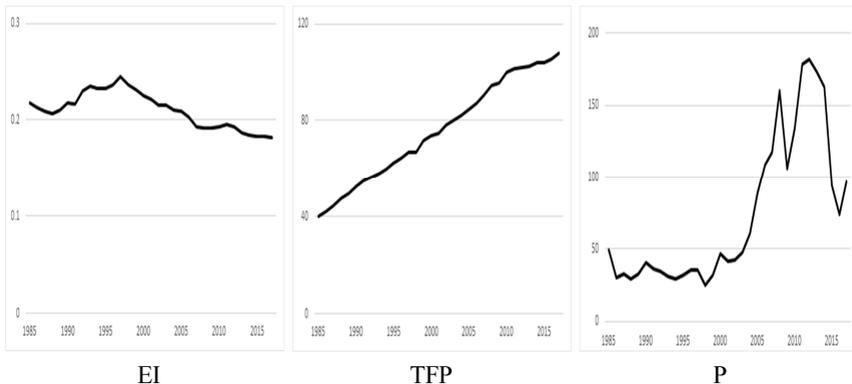
제공하는 원유, 천연가스, 무연탄 및 유연탄 수입 물가지수(2015=100)를 대리변수로 사용하였다.⁶⁾ 원유, 천연가스, 무연탄 및 유연탄 수입 물가지수는 GDP 디플레이터를 통해 2010년 기준가격으로 조정하였다. 분석에 사용된 원자료의 기초통계량은 <표 2>와 같다.

<표 2> 기초통계량

변수명	단위	관측치	평균	표준편차	최솟값	최댓값
<i>EI</i>	GDP 단위당 에너지 소비 (TOE/천 달러)	33	0.2106	0.0184	0.1819	0.2448
<i>TFP</i>	총요소생산성 지수 (2010=100)	33	76.0281	21.4130	40.2861	108.1846
<i>P</i>	원유, 천연가스, 무연탄 및 유연탄 수입 물가지수 (2010=100)	33	73.4470	51.4503	25.0888	181.6247

<그림 1>은 분석의 대상인 에너지 집약도, 에너지 가격 및 TFP 원자료의 연도별 변화 추이를 보여준다. 에너지 집약도는 시간이 흐름에 따라 완만하게 하락하는 반면 TFP는 완만한 상승 추세를 나타내고 있다. 반면 에너지 가격은 세부 구간별로 살펴보았을 때 등

<그림 1> 변수들의 연도별 변화 추이



6) 본 연구에서는 화석연료(원유, 천연가스, 무연탄 및 유연탄) 수입 물가지수를 에너지 가격의 대리변수(proxy variable)로 사용하였다. 전체 에너지 가격을 대표하는 공신력 있는 물가지수가 없는 상황에서, 우리나라는 최종 에너지 소비량의 70% 이상을 해외에서 수입된 화석연료에 의존한다는 점을 고려하였다. 한편 에너지 가격의 상대가격으로 화석연료 수입 물가지수를 생산자물가지수, 소비자물가지수 등으로 나누어 사용하는 방안도 검토하였으나 자료의 변동 폭이 작아 모형에 포함시키지 않았다.

락을 거듭하고 있지만 2000년대를 기점으로 전반적으로 상승하는 추세를 보이며 가격 변동의 폭이 확대되고 있다.

IV. 분석 결과

분석에 앞서 자료의 안정성을 확인하기 위해 ADF(Augmented Dickey Fuller)와 PP(Philips and Perron) 단위근 검정을 시행하였고 결과는 <표 3>과 같다. 시계열이 단위근을 가진다는 귀무가설에 대하여 ADF와 PP 검정을 시행한 결과 TFP와 에너지 가격은 모두 1% 수준에서 유의한 차분 안정적인 I(1) 과정인 것으로 나타났다. 에너지 집약도는 단위근 검정 방법에 따라 통계적 유의수준이 다르게 나타났지만, ADF와 PP 검정 모두에서 차분 안정적인 것으로 나타났다.

<표 3> 단위근 검정 결과

검정방법	EI		TFP		P	
	수준변수	차분변수	수준변수	차분변수	수준변수	차분변수
ADF	-2.3510(2)	-3.3800(1)*	-1.1850(1)	-6.4490(0)***	-1.8590(1)	-5.3030(0)***
PP	-1.3880(2)	-4.0380(1)**	-1.0640(1)	-6.4490(0)***	-2.4640(1)	-5.3030(0)***

주: 1) ()는 AIC 기준으로 선택된 최적시차를 의미함.

2) ***, **은 1%, 5% 수준에서 유의함.

시계열 변수 간 공적분 관계의 존재 여부를 확인하기 위해 ARDL 한계검정과 Johansen(1991, 1995) 공적분 검정을 실행하였다. 그 결과는 <표 4>, <표 5>와 같다. ARDL 한계검정을 위해 Pesaran et al.(2001)이 제시한 임계값과 소표본에서 더 정확한 값을 제시한다고 알려진 Narayan(2005)의 임계값을 모두 사용하였다(Narayan, 2005; Nkoro and Uko, 2016).⁷⁾ ARDL 한계검정 결과, F-통계량(6.09)이 5% 유의수준에서

7) ARDL 모형에 기초한 OLS 추정치들은 단기적으로 일치추정량일 뿐만 아니라 장기적으로 초일치성(super-consistency)을 가지기에 소표본에서 검정력(power)이 우수하다(심성훈, 2006). 본 연구에서는 100개 이상의 대표본에서 사용되는 Pesaran et al.(2001)이 제시한 임계값과 30~80개의 소규모 표본에 적합한 Narayan(2005)의 임계값을 모두 사용하였다.

Pesaran et al.(2001)과 Narayan(2005)이 제시한 상한 임계치(4.85, 4.43)를 초과하여 변수 간 공적분 관계가 존재하지 않는다는 귀무가설은 기각되었다. 따라서 세 변수는 장기 균형관계를 형성한다는 점을 확인하였다.

〈표 4〉 ARDL 한계검정 결과

Critical Value	F-Statistics	ARDL Bounds Test					
		Significance 10%		Significance 5%		Significance 1%	
		Lower, I(0)	Upper, I(1)	Lower, I(0)	Upper, I(1)	Lower, I(0)	Upper, I(1)
Pesaran	6.09	3.17	4.14	3.79	4.85	5.15	6.36
Narayan	6.09	2.91	3.69	3.54	4.43	5.15	6.26

Johansen 공적분 검정은 MLE(Maximum Likelihood Estimator)를 이용하여 Π 의 위수(rank), 즉 공적분 벡터의 수, $\Pi(r)$ 에 관한 가설을 검정하는 것이다. 귀무가설 $H_0 : r \leq r_0$ 과 대립가설 $H_1 : r_0 < r \leq 3$ 에 대한 검정을 통하여 Π 의 위수가 1개 이상 존재할 시 변수 간 장기균형관계가 존재한다고 해석한다(Enders, 2008).⁸⁾⁹⁾ <표 5>는 상수항을 포함한 모형과 추세를 포함한 모형에 대해 Johansen 공적분 검정을 실행한 결과를 나타낸다. 선형독립인 공적분 벡터가 존재하지 않는다는 귀무가설에 대하여 두 모형 모두 트레이스 통계량(34.5283, 49.7468)이 임계값(29.6800, 42.4400)보다 커서 귀무가설을 기각하였다. 그러나 공적분 벡터가 1개 이상 존재한다는 귀무가설에 대하여 트레이스 통계량(8.6582, 18.7603)이 임계값(15.4100, 25.3200)보다 작아 귀무가설을 기각하지 못하였다. 따라서 세 변수 간에는 1개의 공적분 관계가 존재하는 것으로 나타나 앞선 ARDL 한계검정 결과와 부합하였다.¹⁰⁾

8) 여기서 r 은 공적분 벡터의 수이다.

9) 표본 수가 작은 경우, 점근분포(asymptotic distribution)에 기반한 LR(Likelihood Ratio) 검정을 통해 도출되는 Johansen 공적분 검정통계량에 편의가 발생할 수 있다. 이에 Ahn and Reinsel(1988), Johansen(2002)은 자유도의 조정을 통하여 검정통계량의 편의를 교정하는 방법을 제시하였다. 본 연구는 STATA 15를 이용하여 모형을 추정하였다. STATA 15에서는 소표본에서 발생할 수 있는 편의를 교정한 Trace 통계량 값을 제시한다.

10) 공적분 검정의 강건성을 확인하기 위하여 상수항과 선형 추세를 모두 포함하지 않는 모형과 SBIC(Schwarz's Bayesian Information Criterion) 정보기준을 최소화시키는 1시차를 적용한 모형에 대하여 공적분 검정을 추가로 시행하였다. 검정 결과 모든 모형에서 변수 간 하나의 공적분 관계가 존재하였다.

〈표 5〉 Johansen 공적분 검정 결과

Johansen Cointegration Test (p=2) with Constant			
Rank	Eigenvalue	Trace Statistics	5% Critical Value
None	.	34.5283*	29.68
At most 1	0.56592	8.6582	15.41
At most 2	0.1788	2.5517	3.76
At most 3	0.07902		
Johansen Cointegration Test (p=2) with Linear Trend			
Rank	Eigenvalue	Trace Statistics	5% Critical Value
None	.	49.7468*	42.44
At most 1	0.63196	18.7603	25.32
At most 2	0.38521	3.6797	12.25
At most 3	0.11193		

주: 1) p는 AIC 정보기준에 따라 선택된 최적시차를 의미함.

2) **는 5% 수준에서 유의함.

공적분 검정을 통하여 변수 간 장기균형관계가 존재한다는 점을 확인하였으므로, 식 (9)의 ARDL 모형을 추정하였다. 시차가 다른 여러 모형을 추정한 후, AIC 기준으로 ARDL(1,0,0)을 최종모형으로 선택하였다. ARDL(1,0,0) 모형의 추정 결과는 <표 6>과 같다. ARDL(1,0,0) 모형에 대하여 Breusch-Pagan 이분산 검정, Breusch-Godfrey 자기 상관(auto-correlation) 검정을 포함한 진단 검정을 시행하였으나 유의미한 문제는 발견되지 않았다. 에너지 집약도의 시차변수는 1% 수준에서 유의한 양의 부호를 나타내어, 에너지 집약도의 증가가 일정 기간 지속되는 관성효과가 있는 것으로 나타났다. 한편 에너지 가격은 단기적으로 에너지 집약도에 유의한 영향을 미치지 않지만, TFP는 에너지 집약도에 유의한 음(-)의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 장기탄력성 추정 결과, 에너지 가격은 음(-)의 부호를 나타내지만 통계적으로 유의하지 않았다. 반면 TFP의 증가는 1% 유의수준에서 에너지 집약도를 감소시키는 것으로 나타났다. TFP의 장기효과(-0.4384)는 단기효과(-0.1051)보다 훨씬 컸다. ARDL(1,0,0)모형의 추정 결과를 요약하면 기술 수준의 개선은 장·단기 모두에서 에너지 집약도를 감소시키며, 그 효과는 단기보다 장기에 더 크다는 점을 확인할 수 있다.

〈표 6〉 ARDL 모형 추정 결과

	Coefficient	Std. Err	t-Statistics	P-Value
<i>Constant</i>	0.1058	0.1163	0.9100	0.3720
$\ln EI_{t-1}$	0.7603***	0.0797	9.5400	0.0000
$\ln TFP_t$	-0.1051***	0.0328	-3.2100	0.0040
$\ln P_t$	-0.0058	0.0129	-0.4500	0.6560
<i>TFP 장기탄력성</i>	-0.4384***	0.1711	-2.5600	0.0100
<i>P 장기탄력성</i>	-0.0243	0.0501	-0.4800	0.6280
<i>Adjusted R²</i>	0.9608			
<i>Ramsey Reset</i>	0.3940			
<i>Autocorelation</i>	0.6819			
<i>Heteroskedasticity</i>	0.1571			
<i>AIC</i>	-139.334			
<i>BIC</i>	-134.0052			

주: 1) 시차는 AIC 기준으로 선택된 최적시차를 사용함.

2) ***, **, *은 1%, 5%, 10% 수준에서 유의함.

3) Ramsey Reset 검정, Breusch-Godfrey LM 자기상관 검정 및 Breusch-Pagan 이분산 검정의 값은 P-Value이다.

식 (11)의 VECM 모형을 추정한 결과는 <표 7>과 같다. VECM 모형에 대해 LM (Lagrange Multiplier) 자기상관 검정과 Jarque-Bera 정규성(normality) 검정을 실행한 결과 오차항은 정규분포를 따르며 자기상관을 가지지 않는 것으로 나타났다. 오차수정 항은 에너지 집약도와 TFP를 종속변수로 한 방정식에서 각각 10%, 1% 수준에서 통계적으로 유의하였으나 에너지 가격을 종속변수로 둔 식에서는 통계적으로 유의하지 않았다. 따라서 변수들의 장기균형관계는 에너지 집약도와 TFP의 관계를 중심으로 형성되어 있을 것으로 예상된다. 단기계수에 대한 추정 결과를 살펴보면 에너지 집약도와 TFP는 자기 자신의 시차변수로부터 유의한 영향을 받는 것으로 나타났다. 그러나 이를 제외한 대부분의 시차변수들은 통계적으로 유의하지 않아 변수 간 단기적인 영향은 제한적인 것으로 나타났다.

〈표 7〉 VECM 추정 결과

	$\Delta \ln EI_t$	$\Delta \ln TFP_t$	$\Delta \ln P_t$
<i>Constant</i>	-0.0020 (0.0104)	0.0386*** (0.0063)	-0.0186 (0.8730)
$\Delta \ln EI_{t-1}$	0.2781* (0.1680)	-0.2200** (0.1022)	-2.9172 (1.8865)
$\Delta \ln TFP_{t-1}$	-0.1275 (0.3539)	-0.4349** (0.2152)	0.9730 (3.9731)
$\Delta \ln P_{t-1}$	-0.0056 (0.0104)	-0.0035 (0.0112)	0.0587 (0.2065)
ECT_{t-1}	-0.1447* (0.0795)	-0.2343*** (0.0484)	-0.4698 (0.8927)
<i>Autocorelation</i>	0.7816		
<i>Jarque - Bera</i>	0.5209		
<i>AIC</i>	-10.7433		
<i>SBIC</i>	-9.9107		

주: 1) 시차는 SBIC 기준으로 선택된 최적시차를 사용함.

2) ***, **, *은 1%, 5%, 10% 수준에서 유의함.

<표 8>은 VECM을 바탕으로 Granger 인과성 검정을 시행한 결과이다. 단기 인과성 검정 결과 에너지 집약도가 TFP를 단기적으로 Granger 인과하는 단방향 인과성이 확인되었다. 그러나 VECM 모형의 추정 결과와 마찬가지로 변수들은 대부분 단기적으로 상호 유의한 영향을 미치지 못하였다. 추정계수 벡터에 대한 검정 결과, 에너지 집약도는 5%, TFP와 에너지 가격은 10% 유의수준에서 각각 $\beta = 0$ 이라는 귀무가설을 기각하였다. 조정계수 벡터에 대한 검정에서 에너지 집약도와 TFP는 각각 10%, 1% 유의수준에서 $\alpha = 0$ 이라는 귀무가설을 기각시켰으나 에너지 가격은 귀무가설을 기각시키지 못하였다. 추정계수 벡터와 조정계수 벡터에 대한 가설 검정을 통하여 에너지 집약도와 TFP는 서로를 장기 Granger 인과하며, 에너지 가격은 장기균형관계에 대하여 약외생성을 가진다는 점을 확인하였다. 에너지 가격이 약외생성을 가진다는 것은 에너지 가격이 장기균형관계에 대한 통계적 추론에 도움이 되지 않으며, 오차수정과정은 에너지 집약도와 TFP의 변동에 의하여 달성된다는 것을 의미한다. 따라서 변수들의 장기균형관계는 에너지 집약도와 TFP의 관계를 중심으로 형성되어 있다는 점을 확인할 수 있다.

〈표 8〉 Granger 인과성 검정 결과

	Short-run			Long-run					
	$\Delta \ln EI$	$\Delta \ln TFP$	$\Delta \ln P$	α_{EI}	α_{TFP}	α_P	β_{EI}	β_{TFP}	β_P
$\Delta \ln EI$	0.0979	0.7186	0.7589	0.0890	0.0000	0.6150	0.0120	0.0870	0.0800
$\Delta \ln TFP$	0.0314	0.0433	0.7568						
$\Delta \ln P$	0.1220	0.8065	0.7762						

주: Granger 인과성 검정의 값은 P-Value를 의미함.

V. 결론

인류는 화석연료의 사용을 통하여 경제적 후생을 증진해왔으나 이 과정에서 지구온난화를 비롯한 다양한 부작용이 발생하였다. 이에 에너지 자원의 사용에 따른 부작용을 최소화하면서 장기적인 경제성장을 달성하는 지속가능한 성장이 전 세계적인 화두로 떠오르고 있다. 지속가능한 발전을 달성할 수 있는 방안으로 더 적은 양의 에너지 자원을 사용하여 동일한 경제적 성과를 달성할 수 있는 에너지 집약도 개선이 제시되고 있다. 이에 우리나라는 에너지 효율 등급제의 시행 등 정책적 노력을 통하여 꾸준히 에너지 집약도를 감소시켜 왔다. 그러나 우리나라의 에너지 집약도는 주요국에 비하여 여전히 높은 편이다. 한편 에너지 집약도는 에너지 가격과 기술 수준에 영향을 받으며, 세 변수의 관계에 관한 연구는 해외를 중심으로 활발하게 진행되어왔다. 그러나 우리나라를 대상으로 세 변수의 관계를 분석한 연구는 부족한 실정이다. 이에 본 연구에서는 우리나라를 대상으로 에너지 집약도, 에너지 가격과 기술 수준의 대리변수로 사용된 TFP의 동태적 관계를 분석하였다. 먼저 ARDL 모형을 추정하여 에너지 가격과 TFP가 에너지 집약도에 미치는 장·단기 동태적 영향을 살펴보았다. 그런 연후에 VECM에 기반한 Granger 인과검정을 통해 변수 간 상호 예측력을 분석하였다.

분석 결과 첫째, 에너지 집약도, 에너지 가격, TFP는 공적분 관계를 형성하였다. 이는 세 변수 사이에 장기적인 균형관계가 존재한다는 것을 의미한다. 둘째, 에너지 가격은 장·단기에서 모두 에너지 집약도에 유의한 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 이는 에너지 가격의 대리변수로 사용된 화석연료 수입 물가지수가 우리나라의 전체 에너지

가격을 완전하게 대변하지 못하기 때문일 수 있다. 셋째, TFP는 장·단기 모두 에너지 집약도에 유의한 음(-)의 영향을 미치며, 장기효과가 단기효과보다 큰 것으로 나타났다. 이러한 결과는 기술 수준의 발전이 장기적으로 에너지 효율을 개선하는 데 상당한 영향력을 미친다는 것을 의미한다. 넷째, Granger 인과성 검정 결과 에너지 집약도와 TFP는 상호 장기 Granger 인과하는 반면 에너지 가격은 장기균형관계에 대하여 약외생적이었다. 이는 변수들의 장기균형관계가 에너지 집약도와 TFP를 중심으로 형성되어 있으며, 에너지 집약도와 TFP 간 상호 예측력은 단기보다 장기에 더 뛰어나다는 점을 의미한다.

실증분석의 결과를 종합하여 볼 때, 우리나라의 에너지 집약도를 감소시키기 위해서는 전반적인 기술 수준의 개선이 필요하다. 기술 진보는 일반적으로 연구개발 활동을 통하여 이루어지는데 연구개발 활동은 투자의사결정과 성과 획득에 충분한 시간이 요구되고 결과에 대한 불확실성이 크기에 사회적 필요보다 과소 수행될 우려가 있다(조운애, 2004; 황운섭·최영준, 2009). 따라서 기술 수준의 개선이 에너지 집약도에 미치는 효과에 대한 분석과 예측을 바탕으로, 장기적 관점에서 연구개발 활동을 지원하는 것이 중요하다.

한편 우리나라는 고도성장기와 IMF 경제위기를 거치며 산업 및 에너지 소비 구조에 있어 변화를 경험하였을 가능성이 크다. 변수들의 관계는 구조변화 발생 이전과 이후에 다른 모습을 보일 수 있으며 이는 우리나라 에너지 집약도 개선 정책 수립에 보다 풍부한 정보를 제공할 수 있을 것이다. 그러나 본 연구는 표본의 제약으로 구조변화의 가능성을 분석에 반영하지 못하였다. 향후 충분한 표본이 구축된다면 후속 연구를 통하여 구조변화가 변수들의 동태적 관계에 미치는 영향을 분석할 수 있을 것이라 기대한다.

[References]

- 김지효·심성희, 『정책변화 대응을 위한 에너지수요관리 정책의 법제적 기반 및 정책수단 체계화 연구』, 에너지경제연구원, 2016.
- 배정환, “탄소세 부과가 소규모 지역경제에 미치는 영향에 관한 연구: 연산가능 일반균형 모형의 적용”, 『에너지경제연구』, 제4권 제2호, 2005, pp. 11~41.

- 심성훈, “주택자산가치 변동과 부의효과 - ARDL 한계검정법을 이용하여”, 「주택연구」, 제14권 제3호, 2006, pp. 133~158.
- 이명현, “저탄소 녹색성장과 산업의 잠재성과에 관한 실증분석”, 「자원·환경경제연구」, 제20권 제1호, 2011, pp. 99~118.
- 윤종인, “국제비교를 통한 한·미 주식시장 동조화의 평가”, 「금융연구」, 제21권 제1호, 2007, pp. 55~92.
- 원두환·정수관·이연정, “일본의 CO2 배출, 원자력에너지, 신재생에너지관계 분석”, 「에너지경제연구」, 제17권 제2호, 2018, pp. 89~114.
- 장인성, “경쟁형태와 규모보수 가정의 완화를 통한 총요소생산성의 측정”, 「경제학연구」, 제63권 제1호, 2015, pp. 93~127.
- 정수관, “구조변화를 고려한 국제원유시장의 통합 연구”, 「에너지경제연구」, 제17권 제1호, 2018, pp. 153~177.
- 손동희·전용일, “한국 탄소배출권시장 가격결정체계의 학습효과 연구”, 「자원·환경경제연구」, 제27권 제4호, 2018, pp. 667~694.
- 송효준·이한식, “석유제품 가격의 지역 간 연계성 분석”, 「자원·환경경제연구」, 제28권 제1호, 2019, pp. 121~145.
- 조운애, “기업의 연구개발 파급효과 분석: 한국 제조업을 중심으로”, 「응용경제」, 제6권 제1호, 2004, pp. 209~232.
- 황윤섭·최영준, “단계별 R&D가 총요소생산성에 미치는 영향에 관한 분석: 중소기업과 대기업 비교를 중심으로”, 「생산성논집」, 제23권 제4호, 2009, pp. 279~301.
- 현대경제연구원, “총요소생산성(TFP) 영향 요인의 국제 비교”, 「VIP 리포트」, 제13권 제16호, 2013, pp. 1~22.
- Ahn, S. K. and G. C. Reinsel, “Nested Reduced-Rank Autoregressive Models for Multiple Time Series,” *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 403, No. 83, 1988, pp. 849~856.
- Appiah, M. O., “Investigating the Multivariate Granger Causality between Energy Consumption, Economic Growth and CO₂ Emissions in Ghana,” *Energy Policy*, Vol. 112, 2018, pp. 198~208.
- Bernstein, M. A. and J. Griffin, “Regional Differences in the Price-Elasticity of Demand for Energy,” *National Renewable Energy Lab(NREL)*, No. NREL/SR-620-39512, 2006, pp.

1~100.

- Bessec, M. and S. Méritet, “The Causality Link between Energy Prices, Technology and Energy Intensity,” *In The Econometrics of Energy Systems*, London, United Kingdom, Palgrave Macmillan, 2007, pp. 121~145.
- Boyd, G. A. and J. X. Pang, “Estimating the Linkage between Energy Efficiency and Productivity,” *Energy Policy*, Vol. 28. No. 5, 2000, pp. 289~296.
- Enders, W., *Applied Econometric Time Series*, 3rd edition., New York, United States of America, Wiley, 2008.
- Engel, R. F. and C. W. J. Granger, “Cointegration and Error-Correction : Representation, Estimation and Testing,” *Econometrica*, Vol. 55, 1987, pp. 251~276.
- Fisher-Vanden, K., G. H. Jefferson, H. Liu, and Q. Tao, “What is Driving China’s Decline in Energy Intensity?,” *Resource and Energy Economics*, Vol. 26, No. 1, 2004, pp. 77~97.
- Granger, C. W., “Investigating Causal Relations by Econometric Models and Cross-Spectral Methods,” *Econometrica*, Vol. 37, No. 3, 1969, pp. 424~438.
- Haider, S. and A. A. Ganaie, “Does Energy Efficiency Enhance Total Factor Productivity in Case of India?,” *OPEC Energy Review*, Vol. 41, No. 2, 2017, pp. 153~163.
- Hang, L. and M. Tu, “The Impacts of Energy Prices on Energy Intensity: Evidence from China,” *Energy Policy*, Vol. 35, No. 5, 2007, pp. 2978~2988.
- Johansen, S., “Statistical Analysis of Cointegration Vectors,” *Journal of Economic Dynamics and Control*, Vol. 12, No. 2-3, 1988, pp. 231~254.
- _____, “Estimation and Hypothesis Testing of Cointegration Vectors in Gaussian Vector Autoregressive Models,” *Econometrica*, Vol. 59, No. 6, 1991, pp. 1551~1580.
- _____, *Likelihood-Based Inference in Cointegrated Vector Autoregressive Models*, New York, United States of America, Oxford University Press, 1995.
- _____, “A Small Sample Correction for the Test of Cointegrating Rank in the Vector Autoregressive Model,” *Econometrica*, Vol. 70, No. 5, 2002, pp. 1929~1961.
- Ladu, M. G. and M. Meleddu, “Is There Any Relationship between Energy and TFP (Total Factor Productivity)? A Panel Cointegration Approach for Italian Regions,” *Energy*, Vol. 75, 2014, pp. 560~567.
- Li, K. and B. Lin, “How to Promote Energy Efficiency through Technological Progress in

- China?," *Energy*, Vol. 143, 2018, pp. 812~821.
- Masih, A. M. and R. Masih, "Energy Consumption, Real Income and Temporal Causality: Results from a Multi-Country Study based on Cointegration and Error-correction Modelling Techniques," *Energy Economics*, Vol. 18, No. 3, 1996, pp. 165~183.
- _____, "On the Temporal Causal Relationship between Energy Consumption, Real Income, and Prices: Some New Evidence from Asian-Energy Dependent NICs based on a Multivariate Cointegration/Vector Error-Correction Approach," *Journal of Policy Modeling*, Vol. 19, No. 4, 1997, pp. 417~440.
- Metcalf, G. E., "An Empirical Analysis of Energy Intensity and Its Determinants at the State Level," *Energy Journal*, Vol. 29, No. 3, 2008, pp. 1~26.
- Narayan, P. K., "The Saving and Investment Nexus for China: Evidence from Cointegration Tests," *Applied Economics*, Vol. 37, No. 17, 2005, pp. 1979~1990.
- Naser, H., "Oil Market, Nuclear Energy Consumption and Economic Growth: Evidence from Emerging Economies," *International Journal of Energy Economics and Policy*, Vol. 4, No. 2, 2014, pp. 288~296.
- Nkoro, E. and A. K. Uko, "Autoregressive Distributed Lag (ARDL) Cointegration Technique: Application and Interpretation," *Journal of Statistical and Econometric Methods*, Vol. 5, No. 4, 2016, pp. 63~91.
- Oh, W. and K. Lee, "Causal Relationship between Energy Consumption and GDP Revisited : the Case of Korea 1970-1999," *Energy Economics*, Vol. 26, No. 1, 2004, pp. 51~59.
- Osigwe, A. C. and D. F. Arawomo, "Energy Consumption, Energy Prices and Economic Growth: Causal Relationships based on Error Correction Model," *International Journal of Energy Economics and Policy*, Vol. 5, No. 2, 2015, pp. 408~412.
- Pesaran, M. H., Y. Shin, and R. J. Smith, "Bounds Testing Approaches to the Analysis of Level Relationships," *Journal of Applied Econometrics*, Vol. 16, No. 3, 2001, pp. 289~326.
- Rajbhandari, A., and F. Zhang. "Does Energy Efficiency Promote Economic Growth? Evidence from a Multicountry and Multisectoral Panel Dataset," *Energy Economics* Vol. 69, 2018, pp. 128~139.
- Romer, D. *Advanced Macroeconomics*, 3rd edition., New York, United States of America, McGraw-Hill, 2006.