

이산화탄소 배출 효율에 대한 도시화의 영향: ASEAN 8개국을 중심으로*

The Impact of Urbanization on CO₂ Emissions Efficiency:
Evidence from 8 ASEAN Countries

윤정혜 Yun, Junghye**, 강상목 Kang, Sangmok***

Abstract

This study investigates the effects of crucial variables -notably urbanization- on CO₂ emissions efficiency across 8 ASEAN countries through the utilization of the Stochastic Frontier Analysis for 2000-2019. In the first stage of estimation, the capital stock exhibited a negative relationship, while GDP, labor force, and energy showed positive values. In the outcomes of the second stage estimation, it was determined that as urbanization progresses, inefficiencies in CO₂ emissions increase. Moreover, a supplementary variable was introduced to assess the impact of FDI; however, this variable yielded statistically insignificant results owing to varying business conditions across countries. Imports and Official Development Assistance (ODA) yielded positive coefficients, while exports, human capital, and forest area exhibited negative coefficients. This indicates that trade and ODA indeed contribute to the enhancement of urban infrastructure and the fostering of economic growth within the 8 ASEAN countries, coinciding with an elevation in CO₂ emissions. Nevertheless, the intentional accumulation of human capital and the preservation of domestic forest areas, directed toward addressing climate change, play vital roles in effectively mitigating these CO₂ emissions. Given the vulnerability of these nations to the impacts of climate change, international cooperation becomes indispensable to enhance their capacity-building endeavors for responding to climate change and achieving sustainable urban development.

Keywords: ASEAN, Urbanization, CO₂ Emissions, Stochastic Frontier Analysis, FDI

I. 서론

2020년 실시한 '글로벌 위험인식 설문조사 2020'에서 가능성 별 상위 글로벌 위험 순위를 매겼을 때 2019년에서 2021년 연속으로 1위가 극단적인 날씨, 2위 기후 행동 실패, 3위가 인간의 환경 피해일 정도로 환경적

인 위험에 대한 인식이 달라지고 있음을 알 수 있다 (World Economic Forum 2021). 이러한 기후변화를 야기한 원인 중 하나는 인간의 활동으로 인한 온실효과로 볼 수 있다. 통계청(2008)은 지구의 기온 상승을 유발하는 다양한 종류의 온실가스가 온실효과에 영향을 주며, 그중 이산화탄소(CO₂)가 가장 많은 비중을

* 이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

** 부산대학교 경제학과 박사과정 수료(제1저자) | Ph.D. Candidate, Department of Economics, Pusan National University | Primary Author | jhyun925@pusan.ac.kr

*** 부산대학교 경제학과 교수(교신저자) | Prof., Department of Economics, Pusan National University | Corresponding Author | smkang@pusan.ac.kr

차지한다고 하였다. 전 세계적으로 1인당 CO₂ 배출량은 2018년 기준으로 4.4톤이었으며 석탄, 석유, 천연가스 순으로 배출량이 많았다(IEA 2020). 인간의 경제활동으로 인해 CO₂ 배출량이 많이 발생하고 있는데 이는 도시화와 연관된다고 볼 수 있다. 최용욱(2018)은 세계 인구의 약 54%가 도시에 거주하고 있어 2050년까지 도시화가 가속될 것이라 예상되기 때문에 온실가스 배출량의 70%를 차지하고 있는 도시의 역할이 중요하다고 보았다. 또한 아프리카와 아시아 개도국들의 도시화로 인하여 토지, 교통수단, 전기 생산 등 각 분야에서 에너지 사용이 증가하면서 기후에 악영향을 미칠 것으로 보았다.

<표 1>과 같이, 도시화가 진행될수록 CO₂ 배출량에 영향을 미친다는 선행연구들은 이전부터 존재하였다.

국내에서는 주로 Dietz and Rosa(1997)가 제안한 STIRPAT 모형을 이용해 도시화와 CO₂ 배출량 사이의 관계를 분석한 연구들이 대다수였다.¹⁾ 이정희(2010)는 1980년에서 2005년까지 세계개발지표(World Development Indicators: WDI, 2009) 자료의 56개 고소득국가들을 대상으로 도시화율의 증가가 CO₂ 배출량에 미치는 영향을 분석하였다. 그는 도시화율의 증가가 CO₂ 배출량을 감소시키고, 국가의 도시화율에 따라서 CO₂ 배출량에 미치는 영향이 상이하다고 주장한다. 이효진, 강명구(2012)는 총 107개 국가를 대상으로 도시화율과 CO₂ 배출량 간의 관계를 분석하였다. 이들은 도시화와 CO₂ 배출량 간에 비선형적인 관계를 주장하고 도시화가 일정 수준에 도달하면 긍정적인 영향을 줄 수 있다고 보았다. 진태영, 김진수(2017)는 1998년부터 2007년까지 소득별 국가분류를 통하여 거시경제변수들과 CO₂ 배출량의 관계를 분석하였다. 128개국을 대상으로 종속변수로 CO₂ 배출량을 두고 설명

변수로 화석연료 사용비율, 인구, GDP, 에너지원 단위, 도시화율로 두었다. 이들에 의하면 화석연료 비중과 도시화율 변수의 계수들이 소득수준마다 다르게 나타났다. 황민섭, 이응균(2016)은 84개 국가의 2005년부터 2011년까지의 자료를 사용하여 도시화와 1인당 탄소 배출량 간의 관계를 분석하였다. 도시화가 증가할수록 1인당 탄소배출량이 증가하지만 국가별 소득수준에 따라 결과는 다르게 나타났다. 이들은 도시화와 소득수준의 교차항을 변수로 추가하여 소득이 낮은 국가에서는 탄소배출량이 증가하지만 일정 수준의 소득을 넘어서면 탄소배출량이 감소하여 역 U자의 비선형적 관계를 보여주었다.

국외 연구에서는 도시화율과 이산화탄소 배출과 관련해 Sun and Huang(2020), Li, Huang, Kwan and Yang et al.(2018), Zhang, Jin, Li and Wang et al.(2020), Zi, Jie and Hong-Bo(2016)) 등의 연구가 존재한다. 이 연구들은 도시화가 급격히 진행되고 있는 중국의 도시들을 중심으로 분석하였다. 가령, Sun and Huang(2020)은 2000년부터 2016년까지 중국 30개 지방을 중심으로 확률변경분석(Stochastic Frontier Analysis: SFA)을 통해 이산화탄소 배출 효율성에 대한 도시화의 영향을 분석하였다. 즉, 도시화율, 경제발전수준, 산업구조, 에너지소비구조, 외국과의 무역, 정부개입을 설명변수로 두고 도시화율 모형과 도시화율 제곱을 한 모형을 나누어 결정요인을 살펴보았다. 이들은 중국의 이산화탄소 효율성이 꾸준히 증가하고 있으며 도시화 수준과 이산화탄소 배출 효율성 사이에 역 U자 형태의 관계를 이루고 있어 임계점을 넘으면 도시화로 인해 효율성이 악화될 것이라 주장한다. Li, Huang, Kwan and Yang et al.(2018)은 2000년부터 2010년까지 중국 양쯔강 지역을 중심으로 자료포락분석(Data

1) STIRPAT: Stochastic Impacts by Regression on Population Affluence, and Technology.

Envelopment Analysis: DEA)을 하였는데 이산화탄소 배출 효율성과 도시화 사이에는 U자 곡선 관계에 있고 도시화가 CO₂ 배출 효율성을 악화시킨다고 보았다.

또한 Hossain(2011), Wu and Xie (2020), Nihayah, Mafruhah, Hakim and Suryanto(2022) 등과 같이 중국 외 다른 국가들의 도시화를 분석한 연구들도 존재한다. Hossain(2011)은 1971년부터 2007년까지 산업화된 신흥 9개국을 중심으로 에너지사용량, 도시화, 무역개방도, GDP가 CO₂에 미치는 영향을 패널 장단기 Granger 인과 관계 분석을 시행하였다. 그는 장기적으로 봤을 때 도시화와 탄소배출량과의 인과관계가 존재한다고 보기 어렵다고 주장한다. Wu and Xie(2020)는 OECD 국가, 저임금 비OECD 국가, 고임금 비OECD 국가를 중심으로 1990년부터 2017년까지 국가의 경제적 수준 차이

로 인한 소득 불평등과 1인당 CO₂ 배출량 간의 관계를 분석하였다. 그들은 자기회귀시차분포모형(Autoregressive Distributed Lag: ARDL)을 이용해 장단기적 관계를 추정하였는데 도시화율이 1인당 CO₂ 배출량에 영향을 주지는 않았다. Nihayah, Mafruhah, Hakim and Suryanto (2022)는 인도네시아를 대상으로 벡터오차수정모형(Vector Error Correction Model: VECM)을 이용하여 1971년에서 2019년 기간 동안 CO₂ 배출량과, 도시화, 경제 성장, 수출입, 외국인직접투자 간의 관계를 분석하였다. 분석 결과, 장기적으로 CO₂ 배출량은 균형을 이루었고 단기적으로도 독립변수들과 인과관계가 있다고 하였다.

본 연구에서는 Sun and Huang(2020)과 같이 도시화와 이산화탄소 배출 효율성의 관계를 살펴보기 위

표 1_선행연구 요약

저자명 (연도)	연구 대상 (기간)	분석 방법	종속변수	독립변수
이정희 (2010)	56개 고소득국 (1980~2005)	STIRPAT	총 CO ₂ 배출량	총인구, 도시화율, 실질 1인당 GDP, 에너지 1단위 사용당 GDP, 제조업 비중, 서비스업 비중, 국토 면적
이효진, 강명구 (2012)	107개국 (1980~2008)	STIRPAT	총 CO ₂ 배출량	총인구, 도시화율, 1인당 GDP, 에너지효율(에너지 1단위당 GDP), 제조업 부가가치 비중
황민섭, 이응균 (2016)	84개국 (2005~2011)	STIRPAT	1인당 CO ₂ 배출량	도시화율, 1인당 GDP, 도시화율*1인당 GDP, 제조업 비중
진태영, 김진수 (2017)	128개국 (1998~2007)	STIRPAT	총 CO ₂ 배출량	도시화율, 화석연료 사용비율, 국가별 총인구, 1인당 GDP, 에너지원 단위,
Hossain (2011)	산업화된 9개국 (1971~2007)	패널 장단기 Granger 인과관계 분석	1인당 CO ₂ 배출량	도시화율, 1인당 GDP, 무역개방도, 1인당 에너지사용량
Zi, Jie and Hong-Bo (2016)	중국 (1978~2013)	문턱회귀모형	총 CO ₂ 배출량	도시화율, 도시주거소득, 도시인구밀도, 산업
Li, Huang, Kwan and Yang et al. (2018)	중국 양쯔강 지역 (2000~2010)	DEA	GDP, 총 CO ₂ 배출량	노동자수, 자본소득, 산업구조, 인구밀도, GDP
Sun and Huang (2020)	중국 30개 지방 (2000~2016)	SFA	GDP	총 CO ₂ 배출량, 자본소득, 노동자수/도시화율, 경제발전수준, 산업구조, 에너지소비구조, 외국과의 무역, 정부개입
Wu and Xie (2020)	OECD 국가, 저임금 비OECD 국가, 고임금 비OECD 국가 (1990~2017)	ARDL	1인당 CO ₂ 배출량	상위 10% 소득점유율, 탄소집약도, 1인당 국민소득, 인구규모, 도시화율
Zhang, Jin, Li and Wang et al. (2020)	중국 4개 도시 집합체 (2006~2016)	SFA	총 CO ₂ 배출량	GDP, 노동력, 고정자산투자, 에너지소비
Nihayah, Mafruhah, Hakim and Suryanto (2022)	인도네시아 (1971~2019)	VECM	총 CO ₂ 배출량	도시화, 경제성장, 수출입, 외국인직접투자

하여 확률변경분석(SFA) 효율성을 측정한다. Iftikhar, He and Wang(2016), 반치, 민동기(2017), Li, Huang, Kwan and Yang et al.(2018), Wei, Li, Wu and Li(2019), Sun and Huang(2020) 등 다양한 연구들에서 국가의 지속적인 경제활동을 유지하면서 이산화탄소 배출 감축 목표 실현을 위한 방법을 모색하기 위한 것으로 이산화탄소 배출 효율성을 정의하고 있다. 이에 따라, 본 연구에서는 선행연구와 동일하게 이산화탄소의 배출 효율성은 최소배출량을 실제배출량으로 나눈 것으로 정의한다.

본 연구의 목적은 ASEAN 8개국을 중심으로 이산화탄소 배출 효율성을 측정하고 도시화 및 관련 변수들이 탄소 배출의 효율성에 미치는 영향을 분석하는 것이다.²⁾ 방설아(2020)에 의하면 ASEAN 국가들은 2019년을 기준으로 평균 도시화율이 세계평균인 55.7% 보다 낮지만, ASEAN 국가의 연평균 도시인구 증가 비율이 2.2%로 세계평균보다 높다. 또한 The ASEAN Secretariat(2018)에 의하면 1990~2015년 기간 동안 ASEAN 국가들의 도시인구가 연평균 3%씩 증가하였지만, 도시에서의 에너지소비로 인하여 이산화탄소 배출량이 6.1% 증가하고 있다. 이러한 이유로 본 연구에서는 도시인구와 이산화탄소 배출량이 과거에 비해 급격하게 증가하고 있는 ASEAN 국가를 연구 대상으로 선정하였고 도시화와 연관된 변수들이 CO₂ 배출 효율성에 미치는 영향을 살펴보고자 한다.

본 연구와 기존 선행연구와의 차이점은 2가지가 있다. 첫째, ASEAN 8개국을 대상으로 1단계에서 국가별 효율을 측정하고 2단계에서는 효율에 영향을 주는 도시화와 관련 변수들의 관계를 살펴본다. 즉, 효율의 초월대수 SFA 함수 추정과 그 결정요인 분석을 동시에

시행한다.

둘째, 이산화탄소 배출 효율성의 결정요인으로 선행 연구들에서 공통적으로 분석되었던 무역개방도와 에너지사용 비중뿐만 아니라 외국인직접투자(Foreign Direct Investment: FDI) 순수입, 산림면적, 1인당 순 공적개발원조(Official Development Assistance: ODA) 수령액, 인적자본지수를 설명변수로 포함하였다. 특히 ASEAN 국가들은 미국, 일본 등 전 세계적으로 매력적인 투자처로서 FDI 비중이 점차 높아지고 있기에 FDI 변수 존재 여부에 따른 이산화탄소 배출 효율성의 변화도 확인한다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 초월대수함수를 적용한 2단계 SFA의 이론적 모형을 기술할 것이며, 제3장에서는 초월대수함수 추정과 이산화탄소 배출 효율성 추정 결과들을 설명할 것이다. 제4장에서는 정책적 시사점과 함께 결론을 기술할 것이다.

II. 이론 모형

효율성을 분석하는 방법은 크게 DEA와 SFA로 구분된다. 특히 SFA의 장점은 DEA에서 확률오차를 기술 비효율오차에 포함시켜 추정해 정확도가 떨어지는 문제를 해결할 수 있으므로 본 연구에서는 효율을 SFA로 측정한다.

본 연구는 Kumbhakar, Ghosh and McGuckin(1991), Battese and Coelli(1995), Huang and Liu(1994) 등과 같은 방법으로 효율과 그 결정요인을 동시에 추정하는 2단계 접근법을 사용한다. 1단계에서는 확률변경함수의 추정과 기술적 비효율을 측정하며, 확률변경생산함수의 기본 모형은 다음과 같다.

2) ASEAN(Association of South East Asian Nations, 동남아시아국가연합)은 1967년 설립된 동남아시아 지역 공동체이다. 브루나이, 캄보디아, 인도네시아, 라오스, 말레이시아, 미얀마, 필리핀, 싱가포르, 태국, 베트남이 속해 있다. 이들은 정치, 경제, 안보, 문화, 사회 분야에서 협력하고 있으며 1997년 아시아 금융위기를 계기로 한국, 중국, 일본과의 경제 및 정치적 관계를 위한 ASEAN+3 협력체제도 구축하였다.

$$Y_{it} = \exp[f(K_{it}, L_{it}) + v_{it} - u_{it}] \quad (1)$$

식 (1)에서 Y 는 개별 국가 i 의 t 기 동안의 생산량, $f(K_{it}, L_{it})$ 는 생산함수, v_{it} 는 확률오차로서 $iid \sim N(0, \sigma_v^2)$ 으로 분포하고 u_{it} 와 독립적임을 나타낸다. u_{it} 은 기술적 비효율성 관련 변수로서 독립적이고 비음이며 $iid \sim (z_{it}\delta, \sigma^2)$ 의 절단정규분포(Truncated-normal Distribution)를 하는 것으로 가정한다. 또한 기술적 비효율성과 관련된 외생적 변수인 z_{it} 는 설명변수 (1 x m) 벡터이며, 각각의 설명변수의 추정계수는 δ 로서 (m x 1) 벡터이다. 기술적 비효율성 오차항은 생산함수인 $f(K_{it}, L_{it})$ 와 함께 추정계수인 δ 를 추정하며 $u_{it} = z_{it}\delta + w_{it}$ 로 나타낼 수 있다. 여기서 δ 가 0의 값을 취하게 될 경우 z 설명변수들과의 관련성이 없어지고 반정규분포(Half-normal Distribution) 형태가 될 수 있다.³⁾ 다음으로 2단계에서는 예측된 기술적 비효율 효과에 대한 회귀분석을 시행한다. 이를 위해 확률변경함수와 기술적 비효율성을 동시에 추정할 수 있는 최대우도추정(Maximum Likelihood Estimation: MLE) 방법을 사용할 것이다. 우도추정의 경우 분산변수로 나타내며 $\sigma_s^2 \equiv \sigma_v^2 + \sigma^2$, $\gamma \equiv \sigma^2 / \sigma_s^2$ 이다. 식 (2)는 개별 국가 i 의 t 기 동안의 기술적 효율을 보여준다.

$$TE_{it} = \exp[-u_{it}] = \exp[-z_{it}\delta - w_{it}] \quad (2)$$

한편, 본 연구는 투입물 거리함수를 기반으로 초월대수함수(Translog Function) 형태를 사용한 이산화탄소 배출 효율 추정식을 설정하였다.⁴⁾ 1차 동차함수의 특성을 적용한 거리함수 $D_C(Y_i, K_i, L_i, C_i, E_i)$ 는 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$D_C(Y_i, K_i, L_i, C_i, E_i) = C_i \times D_C(Y_i, K_i, L_i, 1, E_i) \quad (3)$$

여기서 i 는 개별국가, Y 는 GDP, K 는 자본스톡, L 은 노동력, C 는 이산화탄소 배출량, E 는 전력사용량을 나타낸다. 식(3)의 양변에 로그를 취하면 식 (4)와 같아진다.

$$\ln D_C(Y_i, K_i, L_i, C_i, E_i) = \ln C_i + \ln D_C(Y_i, K_i, L_i, 1, E_i) \quad (4)$$

식 (4)를 설명변수들을 포함해 상세하게 초월대수함수 형태로 표현하면 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} \ln D_C(Y_i, K_i, L_i, C_i, E_i) &= \beta_0 + \beta_Y \ln Y_i + \beta_K \ln K_i + \beta_L \ln L_i + \beta_C \ln C \\ &+ \beta_E \ln E_i + 0.5\beta_{YY} \ln Y_i^2 + 0.5\beta_{KK} \ln K_i^2 \\ &+ 0.5\beta_{LL} \ln L_i^2 + 0.5\beta_{CC} \ln C^2 + 0.5\beta_{EE} \ln E_i^2 \\ &+ \beta_{YK} \ln Y_i \ln K_i + \beta_{YL} \ln Y_i \ln L + \beta_{YC} \ln Y_i \ln C_i \\ &+ \beta_{YE} \ln Y_i \ln E_i + \beta_{KL} \ln K_i \ln L + \beta_{KC} \ln K_i \ln C_i \\ &+ \beta_{KE} \ln K_i \ln E_i + \beta_{LC} \ln L \ln C_i + \beta_{LE} \ln L \ln E_i \\ &+ \beta_{CE} \ln C \ln E_i + v_i \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 v_i 는 확률오차로서 통계적인 오차를 의미한다. 1차 동차함수의 특성을 적용한 투입물 거리함수 $D_C(Y_i, K_i, L_i, 1, E_i)$ 는 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \ln D_C(Y_i, K_i, L_i, 1, E_i) &= \beta_0 + \beta_Y \ln Y_i + \beta_K \ln K_i + \beta_L \ln L_i + \beta_C \ln 1 \\ &+ \beta_E \ln E_i + 0.5\beta_{YY} \ln Y_i^2 + 0.5\beta_{KK} \ln K_i^2 \\ &+ 0.5\beta_{LL} \ln L_i^2 + 0.5\beta_{CC} \ln 1^2 + 0.5\beta_{EE} \ln E_i^2 \\ &+ \beta_{YK} \ln Y_i \ln K_i + \beta_{YL} \ln Y_i \ln L + \beta_{YC} \ln Y_i \ln 1 \\ &+ \beta_{YE} \ln Y_i \ln E_i + \beta_{KL} \ln K_i \ln L + \beta_{KC} \ln K_i \ln 1 \\ &+ \beta_{KE} \ln K_i \ln E_i + \beta_{LC} \ln L \ln 1 + \beta_{LE} \ln L \ln E_i \\ &+ \beta_{CE} \ln 1 \ln E_i + v_i \end{aligned} \quad (6)$$

3) 기술비효율 오차항이 반정규분포가 되면 2단계 결정요인 추정은 불가능하게 된다.

4) 추정식의 유도과정은 Zhou, Ang and Zhou(2012)를 참고하였다.

식 (4)에 식 (5)와 식 (6)을 대입하면 식 (7)과 같다.

$$\ln C_{it} (\beta_{YC} \ln Y_{it} + \beta_{KC} \ln K_{it} + \beta_{LC} \ln L_{it} + \beta_{EC} \ln E_{it}) = (1 - \beta_C) \ln C_{it} \quad (7)$$

마지막으로 이산화탄소 배출(C)을 종속변수로 취하기 위해 식 (7)을 식 (5)에 넣고 정리한다. 그러면 다음과 같은 식 (8)을 얻을 수 있다.⁵⁾

$$\begin{aligned} -\ln C_{it} = & \beta_0 + \beta_1 \ln Y_{it} + \beta_2 \ln K_{it} + \beta_3 \ln L_{it} \\ & + \beta_4 \ln E_{it} + 0.5 \beta_5 \ln Y_{it}^2 + 0.5 \beta_6 \ln K_{it}^2 \\ & + 0.5 \beta_7 \ln L_{it}^2 + 0.5 \beta_8 \ln E_{it}^2 + \beta_9 \ln Y_{it} \ln K_{it} \\ & + \beta_{10} \ln Y_{it} \ln L_{it} + \beta_{11} \ln Y_{it} \ln E_{it} + \beta_{12} \ln K_{it} \ln L_{it} \\ & + \beta_{13} \ln K_{it} \ln E_{it} + \beta_{14} \ln L_{it} \ln E_{it} + v_{it} - u_{it} \quad (8) \end{aligned}$$

따라서 최종적으로 도출된 식 (8)을 이용해 이산화탄소 배출 효율성을 추정하고자 한다. 즉, 이산화탄소 배출 효율성은 최소배출량/실제배출량으로 정의된다. 여기서 C_{it} 는 개별 국가 i의 t기 동안의 총이산화탄소 배출, Y_{it} 는 개별 국가 i의 t기 동안의 국내총생산(Gross Domestic Product: GDP), K_{it} 는 개별 국가 i의 t기 동안의 자본스톡, L_{it} 은 개별 국가 i의 t기 동안의 노동력, E_{it} 은 개별 국가 i의 t기 동안의 전력사용량을 나타낸다. u_{it} 는 기술적 비효율성 효과를 나타낸다. 기술적 비효율 분포의 평균을 파라미터로 취해 임의의 외생변수들로 인해 영향을 받는 것으로 가정하였다. 1단계 추정을 통해 u_{it} 를 도출한 후 기술적 비효율 결정요소들과의 관계를 설명하기 위한 2단계 추정식은 식 (9)와 같이 제시할 수 있다.⁶⁾

$$u_{it} = \delta_0 + \delta_1 Z_U + \delta_2 Z_{IM} + \delta_3 Z_{EX} + \delta_4 Z_{ODA} + \delta_5 Z_{HC} + \delta_6 Z_{FA} + \delta_7 Z_{FDI} + \epsilon_{it} \quad (9)$$

식 (9)에서 δ 는 각각 설명변수인 Z들의 추정계수이다. 1단계 추정에서 사용된 변수들로는 설명하기 어려운 결정요인 변수들로 구성되어 있다. 이들은 각각 개별 국가 i의 t기 동안의 도시화율, GDP에서의 수입 및 수출 비율, 1인당 순ODA수령액, 인적자본지수(Human Capital Index), 대지면적에서의 산림면적 비율, GDP에서의 FDI 순유입 비율을 나타낸다.

III. 자료 및 실증분석

1. 자료의 구성

본 연구는 2000년부터 2019년까지 패널데이터를 이용해 ASEAN 8개국의 이산화탄소 배출 효율성을 측정하였다. 1단계 추정식에서 사용된 모든 변수들은 국가별 인구수에서 나누었다. 우선 종속변수는 이산화탄소 배출량(C)이고 설명변수는 GDP(Y), 자본스톡(K), 노동력(L), 전력사용량(E)으로 구성되어 있다. 이산화탄소 배출량(C)과 노동력(L)은 WDI, GDP(Y)와 자본스톡(K)은 Penn World Table 10.0, 전력사용량(E)은 IEA(International Energy Agency, 국제에너지기구)의 자료를 사용하였다.⁷⁾

<표 2>는 ASEAN 국가들의 기초 통계량을 보여 준다. 전체적으로 이산화탄소 배출량, GDP, 자본스톡, 노동력은 2019년 인도네시아가 가장 크게 나타났고

5) 식 (5)의 좌변의 거리함수는 식 (8)의 확률변경함수에서는 우변의 비효율오차 u 로 표시된다.

6) 2단계 식에서 도시화 변수를 U , U^2 로 설정하여 추정하였을 때 1단계의 GDP 결과가 일반적인 사실과는 달리 GDP가 증가할수록 이산화탄소 배출량이 감소한다는 결과로 나타나 선행연구들과 같이 비선형적 관계로 추정하지 않았다. ASEAN 국가들이 도시화되면서 도시인구 급증과 에너지 사용 증가로 이산화탄소 배출량이 증가하는 것은 통계적으로도 확인할 수 있는 사실이기 때문에 추정 결과가 옳지 않다고 판단하여 반영하지 않았다.

7) 자본스톡과 GDP는 2017년 불변가격으로 미국 달러를 기준으로 환산되었다. 또한 Penn World Table에서 자본스톡은 감가상각률을 기준으로 산출하고 있다.

표 2_ASEAN 국가별 요약통계

국가명	변수	평균	표준편차	최솟값	최댓값
인도네시아	이산화탄소 배출량 (C)	390.98	89	255	571.1
	GDP (Y)	1,986,966	618,029	1,170,903	3,110,470
	자본스톡 (K)	10,870,646	3,582,832	6,459,948	17,785,758
	노동력 (L)	116,082,964	11,442,656	100,650,985	136,142,053
	전력사용량 (E)	160.34	60.06	82.60	271.00
캄보디아	이산화탄소 배출량 (C)	5.31	3.22	2.00	12.80
	GDP (Y)	40,923	16,650	18,108	72,751
	자본스톡 (K)	107,313	51,529	45,596	210,893
	노동력 (L)	7,739,544	1,061,244	5,697,049	9,220,326
	전력사용량 (E)	3.22	3.03	0.40	10.70
라오스	이산화탄소 배출량 (C)	5.14	6.18	0.90	17.80
	GDP (Y)	31,757	13,385	15,088	56,178
	자본스톡 (K)	88,212	52,300	27,983	190,923
	노동력 (L)	3,135,001	413,053	2,504,990	3,803,401
	전력사용량 (E)	2.61	1.70	0.60	6.20
미얀마	이산화탄소 배출량 (C)	14.04	8.03	7.10	31.10
	GDP (Y)	156,836	73,619	52,467	279,259
	자본스톡 (K)	295,157	262,168	38,661	817,461
	노동력 (L)	23,115,738	882,700	21,514,506	24,454,335
	전력사용량 (E)	7.88	4.72	3.20	16.90
말레이시아	이산화탄소 배출량 (C)	180.34	37.50	115.10	231.10
	GDP (Y)	539,670	153,731	334,534	821,183
	자본스톡 (K)	2,465,404	591,008	1,717,336	3,603,976
	노동력 (L)	12,718,552	2,216,046	9,556,198	16,326,127
	전력사용량 (E)	108.61	34.19	63.70	164.40
필리핀	이산화탄소 배출량 (C)	84.53	23.04	64.40	135.10
	GDP (Y)	568,953	182,408	341,509	929,960
	자본스톡 (K)	1,701,403	466,286	1,161,637	2,744,660
	노동력 (L)	37,588,736	4,960,588	29,775,200	45,091,807
	전력사용량 (E)	61.54	17.11	39.00	96.10
태국	이산화탄소 배출량 (C)	214.26	30.64	153.40	251.60
	GDP (Y)	908,034	194,743	592,014	1,229,521
	자본스톡 (K)	4,873,914	483,587	4,218,172	5,667,203
	노동력 (L)	38,873,584	1,808,143	34,800,733	41,198,445
	전력사용량 (E)	148.60	34.52	91.20	200.10
베트남	이산화탄소 배출량 (C)	122.88	63.29	44.20	283.80
	GDP (Y)	436,744	156,883	221,789	741,654
	자본스톡 (K)	1,037,950	491,139	391,866	2,011,976
	노동력 (L)	48,670,307	5,681,218	39,197,848	55,758,177
	전력사용량 (E)	96.61	61.65	22.90	222.60

주: 개별 변수들의 단위는 이산화탄소 배출량: MTCO₂, GDP: \$, 자본스톡: \$, 노동력: 명, 전력사용량: TWh.

2000년 라오스가 가장 작았다. 또한 전력소비량은 2000년 캄보디아가 가장 작았고 2019년 인도네시아가 가장 높았다. 인도네시아의 인구분포는 생산가능연령(15~64세)이 53.39%(1971년)에서 70.72%(2020년)으로 계속해서 증가하는 추세이다(BPS-Statistics Indonesia 2021). 또한 총인구에서 도시거주 인구가 42%(2000년)에서 55.99%(2019년)으로 크게 상승하였다. 이처럼 풍부한 노동력과 도시 거주를 위한 투자로 인해 2000년에 비하여 2019년에 인도네시아의 GDP, 전력사용량, 이산화탄소 배출량은 약 3배 정도 증가한 것으로 보인다.

나아가, 2단계 접근법에서 사용되는 이산화탄소 배출의 비효율에 대한 결정요인 변수들은 자료가 이용가능한 도시화 수준(U), 수출입비중(GDP 내 수출입이 차지하는 비중(IM, EX)), 1인당 순 ODA 수령액(ODA), 인적자본지수(HC), 산림면적 비중(FA), GDP 내 FDI 순유입 비중(FDI)을 사용하였다.⁸⁾ 인적자본지수는 Penn World Table 10.0 자료를 사용하였다. 그 외 모든 설명변수들은 WDI 자료를 이용하였다.

2. 실증분석 결과

본 연구에서는 ASEAN 8개국의 도시화 진행과 동시에 FDI를 고려했을 때의 이산화탄소 배출 효율성 변화를 보기 위한 3가지 추정식(콥-더글러스, 초월대수 1, 초월대수 2)을 제시한다. 3가지 추정식의 사용 여부를 결정하기 위한 분산(σ^2)와 감마($\gamma = \sigma_u^2 / \sigma^2$)를 확인했을 때 콥-더글러스 모형과 초월대수 2 모형이 1% 수준에서 유의한 결과를 얻었다. 특히 전체 분산에서 기술비효율 오차가 차지하는 비중을 나타내는 감마(γ)가 초

월대수 2에서 99.2%로 나타나 확률변경함수와 최대우도추정(MLE) 사용이 적절함을 보여주고 있다.

본 연구의 추정 결과 제시에 앞서 <표 3>은 초월대수함수 사용의 적절성 검증을 위한 로그우도비검정(Likelihood-Ration Test: LR) 결과를 보여준다.⁹⁾ 첫째로 비효율성이 존재하지 않는다는 귀무가설($H_0 : \gamma = \eta = 0$) 결과를 살펴본다. 초월대수 2 모형의 LR값이 133.61로 귀무가설(H_0)은 $\chi^2(2)=9.21$ 수준에서 기각되었다. 둘째로 확률변경함수가 콥-더글러스 형태라는 귀무가설 결과는 다음과 같다. 콥-더글러스 확률변경함수 로그우도값에 대한 LR 검정값은 99.88로서 임계값 $\chi^2(10)=23.21$ 에서 귀무가설이 기각되었다. 이를 통해 초월대수함수(초월대수 2 모형)가 콥-더글러스 함수보다 적합한 것으로 판정되었다. 따라서 본 연구에서는 초월대수 2 모형을 중심으로 설명한다.

표 3_귀무가설 검정 결과

귀무가설	OLS	MLE	LR	임계값	결과
$H_0 : \gamma = \eta = 0$ (비효율성 없고 비효율성 불변)	44.26	111.07	133.61	9.21	H_0 기각
$H_0 : \beta_5 = \beta_6 = \beta_7 =$ (함수는 콥-더글러스)	25.68	111.07	99.88	23.21	H_0 기각

주: 초월대수 1은 분산과 감마가 유의하지 않아 가설 검정에서 제외하였음.

<표 4>는 도시화와 이산화탄소 배출량의 관계를 분석하기 위한 SFA 추정 결과이다. 먼저 1단계 추정 결과에 대해 살펴본다. 본 연구의 종속변수 부호가 음(-)이기 때문에 결과물에서 나타난 부호와 반대로 해석해야 한다. 노동력(lnL)과 전력사용량(lnE)은 양(+)

8) 도시화 수준 변수는 총인구에서 도시인구 비중을 사용하였다. Sullivan(2018)은 도시지역이 주변 지역보다 상대적으로 높은 밀도를 갖는 곳으로서 도시는 인구밀도를 기반으로 정의하였다.

9) LR 검정의 검정통계량은 $LR = -2\{L(H_0) - L(H_1)\}$ 으로 계산하며, 제약식 수를 자유도로 하는 카이제곱(χ^2)분포를 한다.

표 4_SFA 추정 결과

구분	콕-더글러스		초월대수 1		초월대수 2	
	계수	t-ratio	계수	t-ratio	계수	t-ratio
1단계 추정 결과						
상수항	3.270***	11.093	-19.729***	-20.830	-1.340	-0.250
lnY	1.033***	11.898	-6.384***	-9.538	-1.087	-0.500
lnK	-0.531***	-11.923	2.599**	2.913	2.850***	3.524
lnL	0.565***	7.214	-22.433***	-22.933	-7.209***	-2.611
lnE	-1.302***	-44.572	1.634**	2.309	-2.906***	-2.619
0.5*lnY ²	-	-	-2.388***	-5.319	-1.899***	-3.562
0.5*lnK ²	-	-	-2.774***	-7.969	-2.663***	-14.346
0.5*lnL ²	-	-	-3.600***	-3.561	-18.791***	-10.505
0.5*lnE ²	-	-	-0.567***	-5.203	-0.219*	-1.781
lnYlnK	-	-	2.452***	5.583	2.366***	8.999
lnYlnL	-	-	-4.813***	-8.664	-0.205	-0.310
lnYlnE	-	-	-0.762***	-3.374	-1.051***	-5.621
lnKlnL	-	-	0.979	1.434	1.937***	4.854
lnKlnE	-	-	1.086***	7.472	0.885***	10.760
lnLlnE	-	-	3.218***	8.875	-0.619	-1.263
2단계 추정 결과						
상수항	4.006***	5.337	-	-	2.010***	2.881
U	0.018	1.511	-	-	0.023**	2.116
IM	-0.002	-0.173	-	-	0.076***	4.486
EX	0.003	0.356	-	-	-0.065***	-4.066
ODA	-0.011***	-2.819	-	-	0.035***	5.226
HC	-2.158***	-4.557	-	-	-1.385***	-3.443
FA	0.006	0.955	-	-	-0.061***	-4.609
FDI	0.016	0.888	-	-	0.025	1.158
sigma-squared	0.144***	5.315	0.034***	8.507	0.272***	6.166
gamma	0.997***	275.873	0.000	0.024	0.992***	304.114
mu	-	-	0.000	0.019	-	-
eta	-	-	-0.015	-0.242	-	-
로그우도값	25.68		44.265		111.070	
LR Test	99.88		0.001		133.611	

주 1) 연구의 표본 수는 160개이며, 표에서 ***, **, *는 각각 1%, 5%, 10% 수준에서 유의함을 의미함.

2) 여기서 lnY는 1인당 GDP, lnK는 1인당 자본스톡, lnL은 1인당 노동력, lnE는 1인당 전력사용량, U는 도시화, IM과 EX는 GDP에 대한 수출입 비중, ODA는 1인당 순ODA수령금액, HC는 인적자본지수, FA는 산림면적, FDI는 GDP 대비 외국인직접투자의 순유입비중을 의미함.

의 값을 가지며 유의하였지만, GDP의 경우 제곱항 ($0.5 \cdot \ln Y^2$)에서 양(+)²의 값을 가지며 유의하였다. 자본스톡($\ln K$)의 값은 음(-) 방향으로 유의하게 나타났다. 초월대수 2 모형의 1단계 추정 결과, ASEAN 8개국은 도시화가 진행될수록 도시인구 증가로 노동력이 증가하고 이와 함께 전력사용량과 GDP가 증가하여 이산화탄소 배출을 증가시킨다는 것이다. 특히 전력사용량에 대하여 에너지경제연구원(2015)은 ASEAN 국가들이 가진 저렴하고 풍부한 화석연료 자원들을 전력 생산에 사용하고 있고 이산화탄소 배출량은 계속해서 증가할 것이라 전망하였다. 이처럼 ASEAN 국가들의 경제성장, 도시화 등으로 인해 에너지 사용량은 증가하고 향후 이산화탄소 배출량이 더욱 증가될 것으로 보인다. 하지만 풍부한 노동력을 가짐에도 불구하고 자본스톡과 2단계의 인적자본지수가 음(-)의 값을 가진 것처럼 양질의 교육, 기반시설 미비 등 인적 및 물적 자본 투자 부족으로 인해 이산화탄소 배출이 감소한다는 결과를 얻은 것으로 보인다.

이산화탄소 비효율의 결정요인을 제시한 2단계는 기술적 비효율성 효과를 나타내는 u_{it} 를 종속변수로 하여 분석하였다. 종속변수 부호가 양(+)²이기 때문에 1단계와는 반대로 해석해야 한다. 2단계 결과는 다음과 같다.

첫째, 도시화(U)는 총인구에 대한 도시인구의 비중이다. 1% 수준에서 유의하였으며 양(+)²의 방향을 가졌다. 이는 도시화율이 증가함에 따라 점차 배출 비효율이 증가한다는 것을 의미한다. ASEAN 8개국은 매년 약 0.5%씩 점차적으로 도시화가 진행되고 있으며 도시화율 평균이 41.2%인 2005년을 기점으로 이산화탄소 배출이 점차 증가하기 시작하였다. 본 연구와 유사하게 도시화와 이산화탄소 배출과의 관계를 추정한 Wang, Chen and Kubota(2016), 황민섭, 이웅균(2016)

등의 결과에서도 ASEAN 국가와 같은 저소득 국가에서 도시화로 인해 더 많은 이산화탄소 배출과 에너지 사용을 유발한다고 보았다. 이처럼 ASEAN 국가들은 도시화가 진행되면서 도시로의 인구집중, 수송량 증가, 산업화 진전 등 대기오염 발생요인 증가로 인해 이산화탄소 배출의 비효율을 증가시킨다는 결과를 얻은 것으로 보인다.

둘째, IM과 EX는 GDP에서 수출입이 차지하는 비중에 대한 것이다. 두 변수들은 1% 수준에서 유의하지만 수입(IM)은 양(+)²의 방향, 수출(EX)은 음(-)²의 방향을 가졌다. 즉, 수입의 증가는 이산화탄소 배출 비효율을 증가시키지만 수출은 비효율을 감소시킨다는 의미이다. ASEAN 국가는 안정적인 경제성장률을 기록하면서 신흥시장으로 주목받고 있으며 2000년 이후 상품 교역액도 증가하고 있다. 심해정, 조의운(2019)은 2000년대부터 세계 교역에서 ASEAN이 차지하는 비중이 계속 증가하고 있으며 주변 국가들인 중국, 일본과도 교역량이 증가한다고 주장하였다. 특히 2010~2018년 동안 ASEAN 국가의 수입 증가율(5.2%)이 다른 선진국(미국 3.6%, 전 세계 3.1%, 한국 2.9% 등)에 비해 높았다. 이처럼 수입에 대한 수요가 크게 증가하고 있기 때문에 이산화탄소 배출에 악영향을 미쳤을 것으로 보인다. 즉, 무역의 수입재가 이산화탄소 배출을 많이 유발하는 중간재임을 의미한다.

반면 수출 비중이 이산화탄소 비효율을 감소시키는 원인은 아마도 아시아 국가들의 수출품에서 목재, 고무 등 천연자원이나 1차 농산물이 차지하는 비중이 높아서 지금까지는 이산화탄소 비효율을 낮추는 것으로 판단된다. 그러나 이들 국가가 공업화하면서 수입 대체 공업화나 중간재 생산 등 제조업의 비중이 증가하고 있으므로 향후에는 수출도 탄소 비효율을 악화시킬 수도 있을 것으로 보이므로 이에 대한 대비가 필요할 것이다.

셋째, ODA는 1인당 순ODA수령금액을 말한다.¹⁰⁾ 1% 수준에서 유의하였으며 양(+)의 방향을 가졌다. 이는 수원국인 ASEAN 8개국의 원조 의존도가 높아 질수록 이산화탄소 배출 비효율이 증가한다는 것이다. OECD 통계에 의하면 2019년 기준으로 ODA는 주로 아시아 국가의 사회 분야(교육, 보건 등) 36.6%, 경제 분야(에너지, 통신 등) 16.9%로 지원되고 있다. 이처럼 2000년대 들어 사회 인프라 및 서비스에 초점을 두고 한국을 포함한 공여국들이 ODA를 지원해왔기에 기후 관련 다부문 ODA(8.92%, 2019년 기준)는 취약한 편이었다. 그러므로 분석 기간(2000~2019년) 동안 ODA 지원 가운데 기후변화 등 환경 부문의 비중이 작아서 이산화탄소 배출 효율성을 감소시킨 것으로 보인다. 하지만 ODA 총지출액이 높은 양자 원조에서 기후 관련 ODA 지원(2013년 21.7% → 2020년 33.4%)이 계속해서 증가하고 있어 향후에는 이산화탄소 배출 효율성을 증가시키는 방향으로 변화할 것으로 예상된다.

넷째, HC는 인적자본지수를 의미하며 평균 학교교육 기간을 기반으로 도출되었다.¹¹⁾ 인적자본지수는 음(-)의 값을 가지면서 유의하였다. 즉, 인적자본이 축적될수록 이산화탄소 배출 효율을 상승시킬 수 있다는 것이다. Lutz, Muttarak and Striessnig(2014)는 보편적인 교육이 빈곤 완화와 경제성장뿐 아니라 자연재해에 대한 취약성을 줄이는 데 필수적인 요소이기 때문에 장기적으로 기후변화에 대처하기 위한 최우선순위로 보아야 한다고 하였다. 또한 World Bank Group(2020)은 인적자본이 가정 내에서의 에너지, 수송 등을 사용하는 결정을 내리는 데 핵심적인 역할을 하기

때문에 결과적으로 이들의 결정이 탄소 배출의 감소로 이어질 수 있다고 주장한다. 이처럼 세계은행 등 국제기관들이 ASEAN을 포함한 개발도상국에서 자연재해 취약성을 줄이고 기후변화 대응에 효과적인 방법인 인적자본투자의 중요성을 인식하고 관련된 프로젝트를 진행하고 있으므로 본 연구에서도 효율을 증가시킨다는 결과가 나타난 것으로 보인다.

다섯째, 산림면적(FA)은 각 국가들의 토지면적에서 산림면적 비중을 의미한다. 변수는 1% 수준에서 유의하였으며 음(-)의 값을 가졌다. 이는 산림이 이산화탄소를 흡수하여 실제 배출량이 줄어들게 되면 최소 배출량에 가까워져서 이산화탄소 배출 효율을 증가시킬 수 있다는 것이다. 이산화탄소 배출량을 줄이고자 국제사회에서는 산림을 해결책으로 보고 있다. 산림청(2018)은 산림 관리가 가장 비용효율적인 온실가스 감축 수단으로서 기후변화 적응과 함께 고려해야 한다고 보았다. ASEAN 국가들은 전 세계 산림면적의 20%를 차지한다. ASEAN 국가들은 산림을 통한 기후변화 적응과 완화의 잠재가능성이 큰 지역임과 동시에 재해에 취약한 지역이어서 국제사회와의 협력 사업을 통해 산림보호를 진행하고 있다. 이러한 노력으로 인해 산림이 보전되고 이산화탄소 배출을 흡수하면서 효율성을 높인다는 결과가 나타난 것으로 보인다.

여섯째, FDI 순유입은 GDP 대비 외국인직접투자의 순유입 비중을 의미한다. 추정된 초월대수함수 모형에서 양(+)의 방향으로 이산화탄소 배출 효율을 감소시킨다고 나타났으나 유의하지 않았다. 이병록, 박진(2019)은 ASEAN 5개국(인도네시아, 말레이시아, 필리핀, 태국, 베트남) 경제가 금융위기 이후 높은 성장

10) 본 연구에서 사용된 공적개발원조(ODA) 데이터는 양허성 조건에 따른 차관(순 원금 상환)의 지출과 개발원조위원회(Development Assistance Committee: DAC), 다자 간 기관, DAC 소속이 아닌 국가들에 의한 보조금이 포함되어 있다. ODA는 개발도상국의 경제 및 사회적 개발 증진 등을 목적으로 사용되고 원조 형태의 목적에 의해 사회, 생산, 경제, 다부문(환경보호 등)으로 나눌 수 있다.

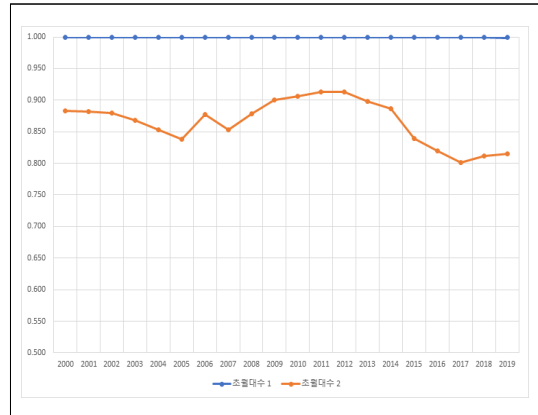
11) 1단계에서 사용된 노동력 변수는 현재 근로자, 실업자, 구직자 등의 숫자가 포함되어 있으며 특정 기간 동안 상품 및 서비스를 공급할 수 있는 15세 이상의 인구 구성을 의미한다. 여기에는 학생 등이 포함되지 않을 때도 있다.

세를 보이는 데 FDI의 역할이 컸다고 보았다. ASEAN Secretariat(2021)에 따르면 ASEAN 지역의 글로벌 FDI 비중이 2015년 5.8%에서 2019년 11.9%로 2배 이상 증가하였으며, 2020년도 코로나19 팬데믹 상황에도 불구하고 13.7% 증가하여 매력적인 투자 지역으로 여겨지고 있다. 특히 ASEAN은 금융과 같은 서비스 부문의 FDI 비중이 50%(1999~2003년)에서 66%(2014~2018년)까지 증가하여 ASEAN 지역 GDP 내에서의 서비스 비중(50%)보다 크게 높아졌다(ASEAN Secretariat 2019). 일반적으로 FDI 유입이 증가하면 경제를 성장시키고 이산화탄소 배출이 증가하는 경향이 있다. 본 연구에서도 FDI 순유입의 비중 증가는 비효율을 증가시키는 방향으로 나타났다. 하지만 본 연구에서는 무역환경, 사회적 인프라 등 비즈니스 여건이 열악한 캄보디아, 라오스, 미얀마 같은 국가들이 포함되므로 FDI 유입이 미미하여 유의하지는 않게 나타난 것으로 보인다.

<그림 1>은 ASEAN 국가의 이산화탄소 배출 효율성을 추정한 결과이다. 본 연구에서는 2000년에서 2019년 동안 도시화가 진행됨에 따라 초월대수 1 모형과 초월대수 2 모형 간 이산화탄소 배출 효율성이 어떻게 변화하는지 비교해 보았다. 하지만 2단계를 고려하지 않은 초월대수 1 모형의 효율성 값이 20년간 모두 비정상적으로 1에 가까웠기 때문에 2단계를 포함한 초월대수 2 모형의 결과를 살펴보았다.

2000년 초반 ASEAN 국가들은 도시화가 크게 진행되지 않아 이산화탄소 배출 효율성이 평균 0.868로 유지되었다. 하지만 2007년 이후 발생한 금융위기로 전 세계적인 경제위기와 성장률이 낮아지면서 이산화탄소 배출량도 감소하여 효율성 값이 높아진 것으로 보인다. 하지만 ASEAN 국가의 계속되는 도시화 진행, 경제회복을 위한 에너지 사용 등으로 다시 효율성이 하락하고 있는 것으로 보인다.

그림 1 ASEAN 국가의 이산화탄소 배출 효율성 평균 비교



IV. 결론

본 연구에서는 2000년부터 2019년까지 ASEAN 8개국의 이산화탄소 배출의 효율성과 도시화를 포함한 그 결정요인을 추정하여 보았다. 초월대수함수를 적용한 확률변경분석 모형을 이용하였고 이산화탄소 배출 효율성 결정요인 변수로 도시화(U), 수입 및 수출 비율(IM, EX), 1인당 순ODA수령액(ODA), 인적자본지수(HC), 산림면적 비율(FA), FDI 순유입(FDI)을 사용하였다.

실증결과에 의하면 1단계 추정식에서는 자본스톡이 음(-)의 관계를 보였고 GDP, 노동력, 에너지는 양(+)의 값을 가졌다. 이산화탄소 배출 비효율의 2단계 결정요인에서는 도시화가 진행될수록 탄소 배출의 비효율은 양(+)의 값을 가졌다. 즉, 도시화 정도가 심해질수록 이산화탄소 배출 비효율을 증가시킨다는 것이다. 그 외에 수입(IM)과 ODA 순유입(ODA)은 양(+)의 영향을 주는 반면 수출(EX), 인적자본(HC), 산림면적(FA)은 음(-)의 영향을 주는 것으로 나타났다. FDI는 양(+)의 관계를 가졌지만 유의하지 않았다. 이는 ASEAN 8개국에서 도시형성과 경제개발을 위한 무역과 ODA의 증가가 이산화탄소 배출을 증가시키지만,

기후변화 대응을 위한 인적자본 축적과 국토 내 산림이 탄소 배출을 감소시키는 방향으로 작용하였다.

본 연구의 실증결과에 기초한 정책적 시사점을 제시하면 다음과 같다. ASEAN Secretariat(2021)은 ASEAN 국가의 인구가 전 세계 인구의 8.6%를 차지하며 도시화율은 2050년 67.8%에 도달할 것으로 예상하였다. 하지만 기후위기로 인한 취약성, 열악한 위생환경, 사회 기반시설 부족 등 지속 가능한 경제성장을 유지하는 데 있어서 다양한 문제들에 직면하고 있다. 방설아, 이상건(2021, 24)에서도 도시계획과 도시 인프라가 충분히 준비되지 않은 상황에서 도시화가 빠르게 진행된다면 환경오염, 도농격차 등 도시민의 삶에 직접적으로 영향을 미치게 된다고 지적하였다. 이를 해결하기 위해서는 ASEAN 국가들은 경제성장과 도시화의 진전으로 이산화탄소 배출량 증가가 예상되므로 환경을 고려한 FDI, 환경과 기후 관련 ODA 지원, 인적자본의 확충을 위한 교육시설 확충, 산림보전의 확산 등이 필요하고 국제사회도 이런 관점에서 지원을 아끼지 말아야 할 것이다. 무엇보다도 ASEAN 국가들이 기후변화 대응 역량을 키워 지속 가능한 도시를 조성할 수 있도록 해야 한다.

본 연구의 한계점은 2020년 코로나19 발생으로 인해 전 세계적으로 이산화탄소 배출량이 급격히 감소하였기에 정확한 추정을 위해 2019년까지의 자료만 반영한 점이다. 향후 연구에서는 코로나19 전과 후의 데이터들을 비교하여 추정해 볼 필요가 있을 것이다.

참고문헌 •••••

1. 방설아. 2020. 아세안 도시화의 도전과제와 대응전략: '아세안 지속가능한 도시화 전략(ASUS)'을 중심으로. 워킹페이퍼 20-24. 세종: 국토연구원.
Bang Seolah. 2020. ASEAN Urbanization challenges and

strategies: Focus on the 'ASEAN Sustainable Urbanization Strategy (ASUS)'. Working Paper 20-24. Sejong: Korea Research Institute for Human Settlement.

2. 방설아, 이상건. 2021. 한-아세안 스마트시티 개발협력 유형 분석과 시사점. 국토연구 110권: 23-41.
Bang Seolah and Lee Sangkeon. 2021. A typology analysis and implications for smart city development cooperation with ASEAN countries. *Korea Spatial Planning Review* 110: 23-41.

3. 반치, 민동기. 2017. 중국의 지역별 탄소배출 효율성 추정 및 영향요인 분석. 자연-환경경제연구 26권, 2호: 205-227.
Pan Chi and Min Dongki. 2017. The analysis of carbon emission efficiency and affecting factors in China. *Environmental and Resource Economics Review* 26, no. 2: 205-207.

4. 산림청. 2018. 제2차 탄소흡수원 증진 종합계획 (2018-2022). 대전: 산림청.
Korea Forest Service. 2018. *The 2nd Carbon Sink Enhancement Comprehensive Plan(2018-2022)*. Daejeon: Korea Forest Service.

5. 심혜정, 조의윤. 2019. 아세안 무역환경 진단과 우리 수출 전략. TRADE FOCUS 23호: 1-43. 서울: 한국무역협회 국제무역연구원.
Shim Hyejeong and Jo Euiyoon. 2019. Diagnosis of the ASEAN trade environment and our export strategy. *TRADE FOCUS*, no.23: 1-43. Seoul: Institute for International Trade, Korea International Trade Association.

6. 에너지경제연구원. 2015. 세계 에너지시장 인사이트 제 15-31호. 울산: 에너지경제연구원.
Korea Energy Economics Institute. 2015. *World Energy Market Insight Weekly 15-31*. Ulsan: Korea Energy Economics Institute.

7. 이정희. 2010. 고소득국가의 도시화와 CO₂ 배출량에 관한 연구. 석사학위논문, 이화여자대학교.
Lee Junghee. *A Panel Analysis of the Relationship between Urbanization rate and CO₂ emissions in High Income Countries*. M.S. dissertation, Ewha Womans University.

8. 이효진, 강명구. 2012. 패널분석을 이용한 도시화와 CO₂ 배출량과의 관계에 관한 연구. 한국지역개발학회지 24권, 5호: 125-144.
Lee Hyojin and Kang Myounggu. 2012. Relationship between urbanization and CO₂ emissions: A cross-country panel data analysis. *Journal of The Korean Regional Development Association* 24, no.5: 125-144.

9. 진태영, 김진수. 2017. 화석연료 사용량을 고려한 탄소배출

- 량과 도시화율의 관계에 관한 연구. *환경정책* 25권, 3호: 47-70.
- Jin Taeyoung and Kim Jinsoo. 2017. The relationship between carbon emissions and urbanization considering fossil fuel usage. *Journal of Environmental Policy and Administration* 25, no.3: 47-70.
10. 통계청. 2008. 한국의 사회동향 2008. 대전: 통계청 통계개발원.
Statistics Korea. 2008. *Korean Social Trends 2008*. Daejeon: Statistics Korea Statistics Research Institute.
11. 이병록, 박진. 2019. 아세안 5국의 외국인직접투자 유입 배경과 전망 및 시사점. 해외경제 포커스 제2019-36호 서울: 한국은행.
Lee Byungrok and Park Jin. 2019. Background, outlook, and implications of the inflow of Foreign Direct Investment in 5 ASEAN countries. *Overseas Economy Focus* no. 2019-36. Seoul: Bank of Korea.
12. 최용욱. 2018. 도시의 탈탄소화. 해외발간보고서 요약분석. 서울: 한국환경산업기술원.
Choi Yongwook. 2018. Decarbonization of cities. *Summary Analysis of Overseas Publication Reports*. Seoul: Korea Environmental Industry & Technology Institute.
13. 황민섭, 이응균. 2016. 도시화가 1인당 탄소 배출에 미치는 영향. *환경영향평가* 25권, 5호: 307-318.
Hwang Minsup and Lee Eungkyoon. 2016. The impact of urbanization on per capita CO₂ emissions. *Journal of Environmental Impact Assessment* 25, no.5: 307-318.
14. Battese, G. and Coelli, T. 1995. A model for technical inefficiency effects in a Stochastic Frontier Production Function for panel data. *Empirical Economics* 20, no.2: 325-332.
15. BPS-Statistics Indonesia. 2021. The Indonesian Population Census 2020 Highlights. *United Nations Expert Group Meeting*, February 9-12. Jakarta: BPS-Statistics Indonesia.
16. Dietz, T. and Rosa, E. 1997. Effects of population and affluence on CO₂ emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 94, no.1: 175-179.
17. Feenstra, R. C., Robert, I. and Marcel, P. T. 2015. The Next Generation of the Penn World Table. *American Economic Review* 105(10): 3150-3182.
18. Hossain, Sharif. 2011. Panel estimation for CO₂ emissions, energy consumption, economic growth, trade openness and urbanization of newly industrialized countries. *Energy Policy* 39, no.11: 6991-6999.
19. Huang, C. and Liu, J. 1994. Estimation of a non-neutral stochastic frontier production function. *Journal of Productivity Analysis* 5, no.2: 171-180.
20. IEA. 2020. *CO₂ Emissions from Fuel Combustion 2020 Edition*. Paris: International Energy Agency.
21. Iftikhar, Y., He, W. and Wang, Z. 2016. Energy and CO₂ emissions efficiency of major economies: A non-parametric analysis. *Journal of Cleaner Production* 139: 779-787.
22. Kumbhakar, S., Ghosh, S. and McGuckin, J. T. 1991. A Generalized Production Frontier approach for estimating determinants of inefficiency in U. S. dairy farms. *Journal of Business & Economic Statistics* 9, no.3: 279-286.
23. Li, J., Huang, X., Kwan, M. P., Yang, H. and Chuai, X. 2018. The effect of urbanization on carbon dioxide emissions efficiency in the Yangtze river Delta, China. *Journal of Cleaner Production* 188: 38-48.
24. Lutz, W., Mutarak, R. and Striessnig, E. 2014. Universal education is key to enhanced climate adaptation. *Science* 346(6213): 1061-1062.
25. Nihayah, D. M., Mafruhah, I., Hakim, L. and Suryanto, S. 2022. CO₂ emissions in Indonesia: The role of urbanization and economic activities towards Net Zero Carbon. *Economics* 10, no.4: 72.
26. Sullivan, Arthur. 2018. *Urban Economics 9th Edition*. New York: McGraw Hill.
27. Sun, W. and Huang, C. 2020. How does urbanization affect carbon emission efficiency evidence from China. *Journal of Cleaner Production* 272: 122828.
28. The ASEAN Secretariat. 2018. *ASEAN Sustainable Urbanisation Strategy*. Jakarta: ASEAN.
29. _____. 2019. *ASEAN Investment Report 2019 - FDI in Services: Focus on Health Care*. Jakarta: ASEAN.
30. _____. 2021. *ASEAN Investment Report 2020-2021: Investing in Industry 4.0*. Jakarta: ASEAN.
31. Wang, Y., Chen, L. and Kubota, J. 2016. The relationship between urbanization, energy use and carbon emissions: evidence from a panel of Association of Southeast Asian Nations (ASEAN) countries. *Journal of Cleaner Production* 112: 1368-1374.

32. Wei, Y., Li, Y., Wu, M. and Li, Y. 2019. The decomposition of total-factor CO₂ emission efficiency of 97 contracting countries in Paris Agreement. *Energy Economics* 78: 365-378.

33. World Bank Group. 2020. The human capital project and climate (English). *Human Capital Project Working Paper*. Washington, D.C.: World Bank Group.

34. World Economic Forum. 2021. *The Global Risks Report 2021 16th Edition*. Geneva: World Economic Forum.

35. Wu, R. and Xie, Z. 2020. Identifying the impacts of income inequality on CO₂ emissions: Empirical evidences from OECD countries and Non-OECD countries. *Journal of Cleaner Production* 277: 123858.

36. Zhang, F., Jin, G., Li, J., Wang, C. and Xu, N. 2020. Study on dynamic total factor carbon emission efficiency in China's urban agglomerations. *Sustainability* 12, no. 7: 2675.

37. Zhou, P., Ang, B. W. and Zhou, D. Q. 2012. Measuring economy-wide energy efficiency performance: A Parametric Frontier Approach. *Applied Energy* 90, no.1: 196-200.

38. Zi, C., Jie, W. and Hong-Bo, C. 2016. CO₂ emissions and urbanization correlation in China based on threshold analysis. *Ecological Indicators* 61: 193-201.

- 논문 접수일: 2023. 4. 18.
- 심사 시작일: 2023. 5. 15.
- 심사 완료일: 2023. 8. 27.

요약

주제어: 아세안, 도시화, 이산화탄소 배출, 확률변경분석, FDI

본 연구의 목적은 2000~2019년 동안 SFA(Stochastic Frontier Analysis) 모형을 이용해 ASEAN 8개국의 도시화 등 주요 관련변수가 이산화탄소 배출 효율성에 미치는 영향을 분석하는 것이다. 1단계 추정식에서는 자본스톡이 음(-)의 관계를 보였으며 GDP, 노동력, 에너지는 양(+)의 값을 가졌다. 이산화탄소 배출 비효율의 2단계 추정 결과, 도시화가 진행될수록 이산화탄소 배출 비효율이 증가하였다. 또한 FDI의 영향을 보기 위해 변수로 포함하였지만 국가별로 사업 여건이 달라 유의하지 않은 결과를 얻은 것으로 보인다.

그 외에 수입(IM)과 ODA(ODA)는 양(+)의 영향을 주는 반면 수출(EX), 인적자본(HC), 산림면적(FA)은 음(-)의 영향을 주는 것으로 나타났다. 이는 ASEAN 8개국에서 도시형성과 경제개발을 위한 무역과 ODA의 증가가 이산화탄소 배출을 증가시키지만, 기후변화 대응을 위한 인적자본 축적과 국토 내 산림이 탄소 배출을 상쇄시키는 역할도 함께 하고 있다는 것이다. 이들 국가가 기후변화에도 취약한 상태에 있으므로 지속 가능한 도시를 만들기 위해서는 기후변화 대응 역량을 키울 수 있도록 국제사회의 협력이 필요하다.

