

기후환경정책에 따른 국가별 생산효율성 분석을 위한 방법론 고찰

Review of Methodologies for National Evaluating Production Efficiency
in the Context of Climate and Environmental Policies

양유경 | 강성원 | 김성진

K O R E A
E N V I R O N M E N T
I N S T I T U T E

■ 저 자 양유경, 강성원, 김성진

■ 연구진

연구책임자 양유경 (한국환경연구원 전문연구원)
참여연구원 강성원 (한국환경연구원 선임연구위원)
김성진 (한국환경연구원 연구위원)

■ 연구자문위원 (가나다 순)

권오상 (서울대학교 농경제사회학부 교수)
박주영 (한국환경연구원 연구위원)
임형우 (한국환경연구원 부연구위원)

© 2024 한국환경연구원

발행인 이 창 훈
발행처 한국환경연구원
(30147) 세종특별자치시 시청대로 370
세종국책연구단지 B동(과학·인프라동)
전화 044-415-7777 팩스 044-415-7799
www.kei.re.kr
발행 2024년 12월 9일
등록 제 2015-000009호 (1998년 1월 30일)
ISBN 979-11-5980-963-7 95530

이 보고서를 인용 및 활용 시 아래와 같이 출처를 표시해 주십시오.
양유경, 강성원, 김성진(2024), 「기후환경정책에 따른 국가별 생산효율성 분석을 위한 방법론 고찰」,
한국환경연구원.

요약

■ 연구의 주요 내용

- 국가 수준에서 생산-환경효율성 분석을 수행하고 국제사회와 비교하여 우리나라가 지속 가능한 발전 경로에 얼마나 부합하는지 평가하고 모니터링할 필요가 있음
 - 현재 정책으로 인한 경제적·환경적 효율성 변화를 통합적으로 검토하는 분석 도구가 부족한 실정이므로 분석 도구 마련이 필요함
- 분석 정책 선별: 탄소가격제
 - 2024년 4월 기준 총 75개 국가 및 관할권에서 탄소세와 배출권거래제를 포함하는 탄소 가격제를 시행 중에 있음¹⁾²⁾
 - 탄소가격제는 경제적 산출물과 관련해서는 1) 부정적 영향을 초래할 것이라는 의견과 2) 긍정적 영향을 초래할 것(포터가설)이라는 상의한 의견이 존재함에 따라 분석을 통해 그 영향을 살펴볼 필요가 있음
- 생산효율성 분석 방법론
 - DEA(Data Envelopment Analysis): Charnes et al.(1978)이 제안한 비모수적인 방법론으로 특정 함수형태를 가정하지 않고 생산효율성을 추정함. 생산경계를 벗어난 모든 편차를 비효율성으로 간주하여 통계적 잡음이 있을 경우 문제가 발생됨
 - SFA(Stochastic Frontier Analysis): 모수적 방법론으로 함수형태와 오차항의 분포를 가정하여 생산경계 및 비효율성을 추정하는 방법론임. 분포가정에 지나치게 의존할 수 있으며, 통계적으로 유의한 추정치 확보에 어려움 존재
 - 다양한 소스의 데이터를 사용하여 국가별 분석을 수행할 계획임에 따라 통계적 잡음처리 에 강점을 지닌 SFA 방법론을 사용하고자 하며 이에 대한 연구 동향을 검토
 - SFA 기법을 적용한 연구 동향

1) Worldbank Carbon Pricing Dashboard, "Download Data", 검색일: 2024.11.22.

2) Worldbank는 탄소크레딧 메커니즘까지 포함하여 탄소가격제로 정의하였으나, 탄소가격제는 탄소가격 수준을 데이터로 관측하기에 어려움이 존재하여 추후 분석의 편이성을 위하여 탄소크레딧 메커니즘을 제외함.

〈표 1〉 SFA 방법론 관련 논의 사항

주제	주요 내용
패널모형	- 시간불변 기술적 비효율성 모형: $y_{it} = m(x_{it}; \beta) - \eta_i + v_{it}$ - 시간변화 기술적 비효율성 모형: $y_{it} = m(\mathbf{x}_{it}; \beta) + v_{it} - u_{it}$ - 이질성과 비효율성 분리모형: $y_{it} = c_i + \mathbf{x}'_{it}\beta + v_{it} - u_{it}$ - 지속적 비효율성과 시간변화 비효율성 분리 모형: $y_{it} = \beta_0 + \mathbf{x}'_{it}\beta + v_{it} - (\eta_i + u_{it})$ - 이질성, 지속적 비효율성 및 시간변화 비효율성 분리모형: $y_{it} = m(x_{it}; \beta) + c_i - \eta_i + v_{it} - u_{it}$
비효율성 결정요인	- 2단계 분석법: 첫 번째 단계에서 JLMs 추정 후, 두 번째 단계에서 비효율성 요인에 대해 회귀분석 수행 - 비효율성 분산값에 결정요인 반영: $\sigma^2_{u,i} = e^{\mathbf{z}'_i \delta}$ - 스케일링 속성: $u_i \sim g(\mathbf{z}_i; \delta)u_i^*$
내생성	- 도구변수 이용: 조정 2SLS, 우도접근법, MOM 접근법 - 기타: 개별 비효율성 추정법, 경제적 접근법
베이저안 추정법	- MCMC 기법: 우도함수나 우도함수의 도함수를 요구하지 않아 계산이 간단함

자료: Kumbhakar et al.(2017)을 참조하여 저자 재구성.

○ 생산-환경효율성 연구 동향

- 생산-환경효율성 연구 동향

〈표 2〉 생산-환경효율성 선행연구 방법론 비교

구분	Jin and Kim(2019)	김길환 외(2019)	Bibi et al.(2020)
함수형태	콕-더글라스	산출물거리함수, 초월로그함수	초월로그함수
설명변수	자본, 노동, 에너지, 소비, 경제복합도지수	자본, 노동, 에너지	농업토지, 농업부문 경제활동인구, 총 고정자산, 비료사용량
종속변수	GDP (에너지효율성 모형), CO ₂ 배출량 (탄소 비효율성 모형)	매출액, 온실가스배출량	농업부문 산출액
모형	패널 TFE 모형	패널 TFE 모형	균형패널데이터 SFM
오차항분포가정 (순수오차항-비효율성항)	정규분포-반정규분포	정규-반정규	정규-반정규
추정방법	MLE	MLE	MLE

자료: Jin and Kim(2019); 김길환 외(2019); Bibi et al.(2020)을 참조하여 저자 재구성.

- 정책변수를 반영한 생산-환경효율성

<표 3> 정책변수를 반영한 생산-환경효율성 선행연구 방법론 비교

구분	Filippini et al. (2014)	Mo and Jeon (2022)	Tateishi et al. (2020)	Honma and Hu (2024)
함수형태	콥-더글러스함수	투입물거리함수, 초월로그함수	초월로그함수	초월로그 함수
설명변수	실질에너지가격, 실질소득, 인구, 평균 주택크기, 난방도일수, 열대기후 더미, 기저에너지 수요 추세	자본, 노동, 에너지소비	1단계: 노동, 자본, 재생에너지, 비재생에너지 2단계: GDP 추정치, 비재생에너지	고용자 수, 고정자본, 국가 더미, 산업 더미, 연도 더미
종속변수	최종에너지소비	매출, 탄소배출	1단계: GDP 2단계: 온실가스 배출량	매출액
모형	패널 BC95모형, BC95M모형, TFE 모형	패널 TRE 모형	잔여접근법 패널 BC 모형	패널 BC 모형
오차항분포가정 (순수오차항-비효율성함)	정규-절단정규	- ¹⁾	정규-절단정규	정규-절단정규
정책변수 반영	2단계 분석법	3단계 분석 (효율성→총요소에너지생산성→패널분석)	2단계 분석법	선형관계 가정
정책변수 내생성 고려	x	x	x	○ (도구변수)
추정방법	MLE	- ¹⁾	- ¹⁾	MLE

주: 1) '-'의 경우 문헌에서 구체적인 정보를 확인하기 어려웠던 경우임.

자료: Filippini et al.(2014); Tateishi et al.(2020); Mo and Jeon(2022); Honma and Hu(2024)를 참조하여 저자 재구성.

○ 분석 모형(안)

- 분석 국가: 177개국, 1990~2019년

- 데이터: GDP, 고정자본형성액, 노동자수(PWT 10.01), 에너지사용량(IEA), 온실가스 배출량(EDGAR), 탄소가격제(Worldbank)

- 분석모형: 베이지안 패널 SFM

•함수형태: 산출물거리함수/초월로그함수

•생산환경효율성: 생산-환경효율성 = $\exp(-u_{i,t})$

•비효율성 결정요인: 스케일링 속성

$$u_{i,t} = \exp(\delta z_{i,t}) u_{i,t}^*$$

• 모형: Greene(2005a; 2005b)가 제안한 패널 TRE, 패널 TFE 적용

모형 1(TRE):

$$\begin{aligned}
 & -\ln(y_{GHG,i,t}) \\
 & = \alpha_0 + \alpha_y \ln \tilde{y}_{i,t} + \sum_n \alpha_n \ln x_{n,i,t} + \frac{1}{2} \sum_n \sum_m \alpha_{nm} \ln x_{n,i,t} \ln x_{m,i,t} \\
 & + \frac{1}{2} \sum_n \alpha_{ny} \ln x_{n,i,t} \ln \tilde{y}_{i,t} + c_i + v_{i,t} - \exp(\delta z_{i,t}) u_{i,t}^* \\
 & \quad n = k, l, TE, RE, \quad m = k, l, TE, RE, \\
 & \quad \sum \alpha_{ny} = 0, \quad \forall n \\
 & \quad c_i \sim N(0, \sigma_c^2), \quad v_{i,t} \sim N(0, \sigma_v^2), \quad u_{i,t}^* \sim N_+(0, \sigma_u^{*2})
 \end{aligned}$$

모형 2(TFE):

$$\begin{aligned}
 & -\ln(y_{GHG,i,t}) \\
 & = \alpha_0 + \alpha_y \ln \tilde{y}_{i,t} + \sum_n \alpha_n \ln x_{n,i,t} + \frac{1}{2} \sum_n \sum_m \alpha_{nm} \ln x_{n,i,t} \ln x_{m,i,t} \\
 & + \frac{1}{2} \sum_n \alpha_{ny} \ln x_{n,i,t} \ln \tilde{y}_{i,t} + c_i \text{ dummy} + v_{i,t} - \exp(\delta z_{i,t}) u_{i,t}^* \\
 & \quad n = k, l, TE, RE, \quad m = k, l, TE, RE, \\
 & \quad \sum \alpha_{ny} = 0, \quad \forall n \\
 & \quad v_{i,t} \sim N(0, \sigma_v^2), \quad u_{i,t}^* \sim N_+(0, \sigma_u^{*2})
 \end{aligned}$$

• 추정: 베이지안, 매개변수의 사전분포는 정규, 반정규로 가정하고 분산 매개변수의 사전 분포는 정규분포로 하여 MCMC 기법으로 추정수행

○ 향후 연구방향

- 데이터를 적용하여 실제 탄소가격제 하의 국가별 생산-환경효율성 추정 수행이 필요함.
- 지속적 비효율성향을 오차 구성항에 포함한 4CSFM으로의 확장을 고려해야함.
- 탄소가격제 이외의 정책변수를 고려한 생산-환경 효율성도 추정되어야 함.

주제어: 생산-환경효율성, 생산경계분석, BSFA, 베이지안 확률경계분석

차례

I. 서론	1
1. 연구의 필요성	1
2. 연구의 목적	2
II. 기후환경정책 현황 및 분석대상 정책 선별	3
1. 기후환경정책 현황	3
2. 분석대상 정책: 탄소가격제	6
III. 생산-환경효율성 연구 동향	8
1. 생산효율성 정의 및 주요 분석방법론(DEA, SFA)	8
2. SFA 기법을 적용한 연구 동향	13
3. 생산-환경효율성 정의 및 연구 동향	26
IV. 분석 모형(안)	37
1. 개요	37
2. 데이터	37
2. 분석 국가 및 연도	39
3. 분석모형: 베이지안 패널 SFM	39
4. 향후 연구방향	44
참고문헌	45

I 서론

1. 연구의 필요성

- 탄소중립과 녹색성장은 우리 사회가 직면한 주요한 과제로, 이들을 통해 지속가능한 사회로의 전환은 필수적이다. 지속가능한 발전 관점에서 경제주체들은 주어진 자원을 최적으로 활용하는 효율적인 의사결정을 내리는 것이 중요함
 - 국가 수준에서 생산-환경효율성 분석을 수행하고, 국제사회와 비교하여 우리나라가 지속가능한 발전 경로에 얼마나 부합하는지 평가하고 모니터링할 필요가 있음
 - 기존의 연구는 주로 '경제 개발'에 초점을 두어 경제적·기술적 효율성 분석에 치우쳐졌으나, 탄소중립과 같은 환경문제에 대한 관심이 높아짐에 따라 최근에는 환경적 요소를 고려한 효율성 분석이 다수 이루어지고 있음
 - 그러나 기존의 환경효율성 분석은 학계에서 논의되고 있는 최신 방법론과 연계가 미흡한 실정임. 이에 최근의 논의들을 검토하고 이를 토대로 정교한 환경효율성 분석 방법론 마련이 요구됨
- 기후 및 환경문제를 해결하기 위한 정책수단들은 기후·환경문제를 개선할 뿐 아니라, 생산자들의 의사결정에도 영향을 주어 궁극적으로 경제 전반에 파급효과를 미침. 따라서 정책의 효율성은 경제적·환경적 측면에서 통합적으로 검토될 필요가 있음
 - 현재 정책으로 인한 경제적·환경적 효율성 변화를 통합적으로 검토하는 분석 도구가 부재한 실정임
 - 이에 기후·환경정책이 생산-환경효율성에 미치는 영향을 구체적으로 추정할 수 있는 분석 도구를 마련하여, 정책 의사결정자가 정책의 경제·환경적 효율성 영향에 대한 데이터를 기반으로 의사결정을 할 수 있도록 지원할 필요가 있음

2. 연구의 목적

- 기후환경정책의 효과성 분석을 위하여 선행연구를 검토하고 기후환경정책에 따른 국가별 생산효율성 분석 방법론을 제시하고자 함
 - 생산효율성에 대한 정의 및 방법론에 대한 최근의 논의를 검토
 - 생산-환경효율성에 대한 선행연구 및 정책변수가 생산-환경비효율성에 미치는 영향을 분석한 선행연구를 검토
 - 최근의 방법론에 대한 논의사항을 반영하고 정책변수가 비효율성에 미치는 영향을 분석할 수 있는 생산-환경효율성 분석모형(안)을 제시

II 기후환경정책 현황 및 분석대상 정책 선별

1. 기후환경정책 현황

- 본 연구에서의 기후환경정책은 ‘온실가스 감축을 위한 정책수단’을 의미함
 - 전 세계적으로 4,300여 개³⁾의 정책수단이 온실가스 감축을 목표로 시행 중에 있음
 - 정책수단은 제도적 규제와 사범규제로 구분될 수 있으며, 제도적 규제는 경제적 유인 유무에 따라 구분될 수 있음⁴⁾
 - 제도적 규제에 포함되는 정책은 배출기준, 오염기준, 기술기준에 따라 규제하는 직접규제가 있으며, 경제적 유인이 있는 제도적 규제로는 부과금 및 보조금제도와 배출권거래 제도로 구분됨⁵⁾
- IMF(2024)는 통상적으로 많이 사용되는 온실가스 감축 정책수단 7개를 <표 2-1>과 같이 소개하였다.
 - 탄소세는 화석연료의 탄소함량 또는 화석연료 연소 시 발생하는 배출량에 요금을 부과하는 제도임
 - 탄소세 부과를 통해 오염원의 배출을 줄일 수 있는 재정적 인센티브를 제공함
 - 정부는 배출의 적정 세율을 설정하며, 적정 세율은 한계저감비용과 한계피해비용이 일치하는 지점에서 설정해야 가장 효율적인 것으로 알려져 있음
 - 탄소함량에 부과하는 형태가 배출량 자체에 부과하는 형태보다 일반적인 것으로 알려짐⁶⁾
 - 2024년 4월 기준, 탄소세를 부과 중인 국가/지역은 39개에 달하며 탄소세의 배출량 커버리지는 최소 1.9%에서 80%까지 다양하게 분포되어 있음⁷⁾

3) Climate Policy Database, “Policies”, 검색일: 2024.11.22.

4) 권오상(2020), p.110.

5) 권오상(2020), p.110.

6) IMF(2024), p.6

7) Worldbank Carbon Pricing Dashboard, “Download Data”, 검색일: 2024.11.22.

〈표 2-1〉 주요 온실가스 감축 정책수단

수단	정의	적용 예시	구분		주무부처
			가격제/ 비가격제	재정적 수단/ 규제 수단	
탄소세	화석연료의 탄소함량 또는 배출량에 따라 부과되는 세금	화석연료 구입 시	가격제	재정적 수단	재무부
배출권 거래제	정부는 기업이 배출량에 대한 배출권을 보유하도록 하며, 시장에서 배출권 가격이 결정	발전 및 산업 대규모 배출자	가격제	규제 수단	환경부
피베이트	배출이 기준을 초과하는 제품 및 행위에 대해서는 요금을 부과하고 기준 이하인 제품 및 행위에 보조금 지급	차량등록세 제도	비가격제	재정적 수단	재무부
기준 규제	기업에 배출 또는 에너지 효율 기준을 지킬 것을 요구. 기준을 초과한 기업은 크레딧 구입 가능	배출량 총량관리, 신차 연비기준, 가전제품 효율기준	비가격제	규제 수단	환경부/ 에너지부
청정기술 보조금	청정기술 또는 연료에 보조금 또는 세제 공제	재생에너지 발전차액지원제도, 재생에너지 생산세 공제, 전기차 세액 공제	비가격제	재정적 수단	환경부/ 재무부
청정기술 의무	청정기술 또는 연료의 최소한의 도입 의무	발전사업자의 RPS 의무, 제조사의 전기차 판매비율 의무	비가격제	규제 수단	환경부/ 에너지부
에너지세	화석연료 및 전기에 부과되던 기존 세금 인상 또는 신규 부과	연료 및 전기 소비세	가격제	재정적 수단	재무부

자료: IMF(2024), p.8.

- 배출권거래제는 규제대상 사업체별 온실가스 배출량의 상한을 설정하고, 사업체는 이행 기간 내 배출량에 상응하는 배출권을 제출해야 함. 사업체들은 다른 사업체와 배출권거래제를 거래할 수 있음
 - 배출권거래제 내에서의 탄소가격은 배출권시장의 수요와 공급에 따라 결정됨
 - 2024년 4월 기준, 배출권거래제를 시행 중인 국가/지역은 36개에 달하며, 배출권거래제의 커버리지는 0~89% 수준임⁸⁾
- 피베이트는 일정한 배출기준을 설정하고 기준 대비 초과하면 세금을 부과, 기준을 초과

8) Worldbank Carbon Pricing Dashboard, "Download Data", 검색일: 2024.11.22.

하지 않으면 환급을 제공하는 정책 수단을 의미함

- 요금(fee)과 환급제도(rebate)를 결합한 단어로 온실가스 배출뿐 아니라 질소산화물, 이산화황 등 다양한 오염물질에 적용되고 있음.
 - 배출세제가 변형된 형태로 규제정책의 수용성이 낮은 경우 좀 더 효과적으로 작동할 수 있도록 설계됨
 - 피베이트의 주요 사례로는 스웨덴의 질소산화물 프로그램과 싱가포르, 캐나다, 캘리포니아 등에서 시행되었던 자동차 피베이트가 있음
- 기준 규제는 배출률 또는 에너지효율 기준을 충족하도록 요구하는 직접규제 형태의 정책수단임
- IMF(2024)는 기준을 초과한 기업은 거래 가능한 크레딧을 구매하여 기준에서 미달한 부분을 보완할 수 있다고 설명하였음
 - 기준 규제 형태의 정책은 680여 개⁹⁾가 시행 중에 있음
 - 기준 규제는 범 부문을 아우르는 정책도 있지만(예: 우리나라 목표관리제), 발전·건물·수송 등 일부 부문에 특정하여 설정되는 정책수단이 다수 존재하였음. 이는 부문별 에너지 사용이나 배출 패턴이 상이하기 때문인 것으로 파악됨
- 청정기술 보조금은 청정기술 또는 재생에너지를 사용하는 기업이나 가정에 보조금 또는 세액공제 혜택을 제공하는 것을 의미함
- 대표적인 보조금 수단으로는 전기차 구매 보조금과 고효율 가전제품 구매비용 지원 사업이 있음
- 청정기술 의무는 청정기술을 도입함에 있어 최소한의 요건을 명시하여 사용하게 하는 직접규제 형태의 정책수단임
- 예를 들어 우리나라는 총면적 1,000m²를 초과하는 공공건물은 최소 20% 이상 재생에너지를 사용할 것을 강제하고 있음
- 에너지세는 화석연료나 전기를 사용하는 과정에서 발생하는 현행의 세금을 강화하거나 신규로 도입하는 것을 의미함
- 수송용 연료 및 난방, 산업, 발전용 연료 소비량에 종량세를 부과하는 형태로 운용되고 있음
- 탄소크레딧 메커니즘은 자발적으로 배출을 감축하여 거래 가능한 크레딧을 생성하고 이를 판매하여 수익을 창출할 수 있는 메커니즘을 의미함
- 탄소크레딧은 온실가스를 포집하여 회피하거나 조립등을 통해 탄소를 제거하여 생성할 수 있음

9) Climate Policy Database, "Policies", 검색일: 2024.11.22.

- 탄소크레딧 메커니즘은 현재 42개국에서 시행 중에 있으며, 스리랑카를 제외하고 선진국들에서 주로 시행되고 있음

2. 분석대상 정책: 탄소가격제

- 본 연구 모형(안)에서 생산-환경효율성에 영향을 미치는 정책수단은 경제활동에의 파급 효과 및 중요성을 고려해 '탄소가격제'로 한정하고자 함.
 - 탄소가격제는 화석연료 소비 및 온실가스 배출 집약적 산업활동으로 인한 비용을 탄소의 사회적 비용과 일치시키는 것을 목표로 하는 정책수단으로 일반적으로 탄소세와 배출권거래제를 포괄함
 - 탄소가격제는 경제의 탈탄소화 달성을 위한 중요한 정책수단 중 하나로 평가됨¹⁰⁾
 - Worldbank는 탄소가격제가 효율적으로 작동한다면 투자·생산·소비 행태 변화 및 기술 발전을 이끌어내는 강력한 경제적 유인을 제공할 수 있을 것이라 주장함¹¹⁾
- 2024년 4월 기준 총 75개 국가 및 관할권에서 탄소가격제를 시행 중에 있음¹²⁾¹³⁾
 - 탄소가격제의 정책 커버리지는 전 세계 온실가스 배출량의 24%에 달하며, 이 중 ETS는 19%, 탄소세는 6% 수준임¹⁴⁾
 - 국가 소득 수준에 따라 구분해서 살펴보면 고소득 국가의 배출량 커버리지는 31%, 중위 소득 국가는 22%, 저소득 국가는 0%인 것으로 나타남¹⁵⁾
- 탄소가격제는 비소망재인 온실가스 배출량을 감축시키는 긍정적 영향을 가져올 것으로 기대되나, 소망재인 산출물에 미치는 영향과 관련해서는 1) 부정적 영향을 초래할 것이라는 의견과 2) 긍정적 영향을 초래할 것이라는 상이한 의견이 존재함
 - 부정적 영향을 초래할 것이라는 주장은 1) 오염규제가 강화됨에 따라 지출비용이 증가하고 해당 규모만큼의 투자 감소, 2) 에너지 혹은 원료의 가격상승으로 인한 생산비용 상승, 3) 정책 및 규제와 관련한 추가적인 업무로 인하여 기업 경제활동 위축이라는 3가지 가설에 기초함(권오상, 2020, p.559)

10) Worldbank Carbon Pricing Dashboard, "What is Carbon Pricing", 검색일: 2024.11.22.

11) Worldbank Carbon Pricing Dashboard, "What is Carbon Pricing", 검색일: 2024.11.22.

12) Worldbank Carbon Pricing Dashboard, "Download Data", 검색일: 2024.11.22.

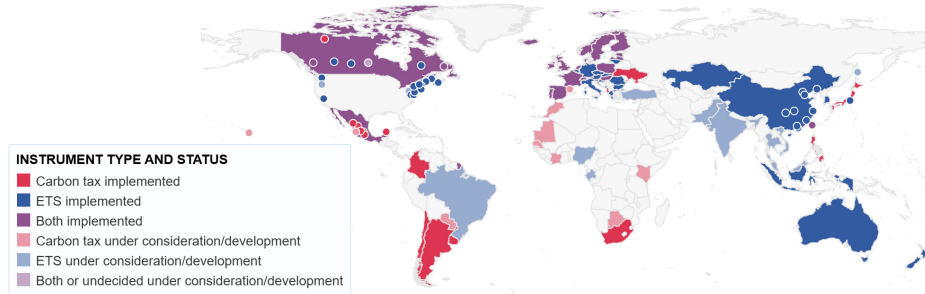
13) Worldbank는 탄소크레딧 메커니즘까지 포함하여 탄소가격제로 정의하였으나, 탄소크레딧 메커니즘은 탄소가격 수준을 데이터로 관측하기에 어려움이 존재하여 추후 분석의 편이성을 위하여 탄소크레딧 메커니즘을 제외함.

14) Worldbank Carbon Pricing Dashboard, "GHG Emissions Coverage", 검색일: 2024.11.22.

15) Worldbank Carbon Pricing Dashboard, "GHG Emissions Coverage", 검색일: 2024.11.22.

Compliance carbon pricing instruments around the world, 2024

Map shows jurisdictions with carbon taxes or emissions trading systems implemented, under development or under consideration, subject to any filters applied in the table below the map. The year can be adjusted using the slider below the map.



자료: Worldbank Carbon Pricing Dashboard, “compliance mechanisms”, 검색일: 2024.11.22

〈그림 2-1〉 2024년 탄소가격제 시행 현황

- 반면 긍정적 영향을 초래할 것이라는 주장은 Porter(1991)이 제기한 ‘포터가설(porter hypothesis)’에 근거함
 - 포터가설은 환경규제가 엄격할수록 기업의 준수 비용이 증가하며 이로 인해 환경친화적 혁신을 위한 인센티브가 유발됨을 의미함(Honma and Hu, 2024)
 - Cohen and Tubb(2018)은 메타분석 결과, 환경규제와 생산성 사이 관계가 긍정적인지 부정적인지 통계적인 결론을 내리기는 어려우나 개별 기업이나 산업단위에서는 규제가 생산성을 저하시키는 것으로, 지역이나 국가 단위에서는 규제가 생산성을 향상시키는 것으로 나타났음을 확인하였음. 이는 포터의 원래 주장은 지역이나 국가단위의 생산성 개선에 대한 내용임에 따라 가설이 지지된다고 결론 내렸음¹⁶⁾
- 생산가능성 관점에서 ‘탄소가격제’는 생산의 투입물적 성격을 지니는 것은 아니나, 앞서 살펴본 가설들에 따라 에너지소비 및 기술조합, 지출비용 등 다양한 경로를 통해 생산에 영향을 주는 것으로 판단됨
 - 이에 ‘탄소가격제’를 국가 생산효율성 분석에서 고려하지 않을 경우 누락변수 편향(omitted variable bias)이 발생할 것으로 우려됨에 따라, 탄소가격제 도입 시 각 국가의 생산-환경효율성 변화를 측정할 필요가 있음

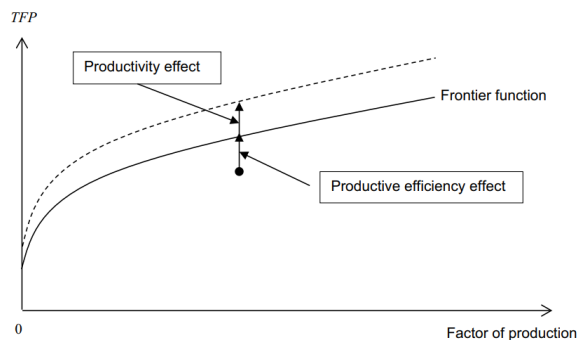
16) 권오상(2020), p.560.

III 생산-환경효율성 연구 동향

1. 생산효율성 정의 및 주요 분석방법론(DEA, SFA)

가. 생산효율성의 정의

- 생산성은 생산요소와 투입물의 물리적 산출 관계를 나타내는 것으로 투입물에 대한 산출물의 비율로 정의됨. 이러한 생산성 분석은 생산자들이 가장 효율적인 방법으로 생산행위를 함을 가정함. 생산효율성은 주어진 자원을 최적으로 활용하지 못하는 상태를 가정하고, 이를 식별하고 개선하기 위한 분석을 수행함(권오상, 2019)
- 생산성의 증가는 과거에는 가능하지 않았던 투입-산출의 집합이 가능해짐을 의미하는 것으로 생산함수의 이동 혹은 생산가능곡선의 확장을 의미함. 생산효율성의 증가는 효율적 생산인 생산가능곡선의 경계와의 거리를 좁혀져 나감을 의미함(Otsuka, 2023)



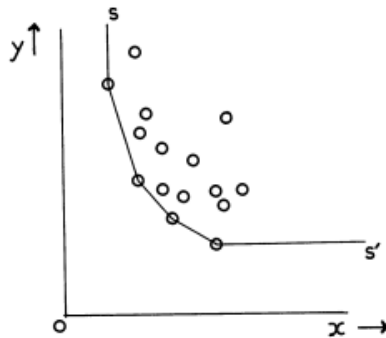
자료: Otsuka(2023), p.27.

〈그림 3-1〉 생산성 변화와 생산효율성 변화의 차이

- 생산효율성과 관련하여 Koopmans(1951), Dbreau(1951)은 기술적 효율성의 이론적 개념을 제안하였고, Farrell(1957)은 이들 연구를 기반으로 기술효율성 방법론을 제시함
- Koopmans(1951)은 'Pareto-Koopman Efficiency'라는 개념을 정의하며 생산효율성에 대한 논의를 시작하였음. 기술적 생산효율성은 실행 가능한 투입-산출 벡터 개념에서 온 것으로 기술적으로 어떠한 산출의 증가(또는 투입의 감소)는 다른 산출의 감소(혹은

투입의 증가) 없이는 불가능하다고 정의하였음(Ruggiero, 2000)

- Debreu(1951)은 경제시스템이 파레토 최적상태가 아님을 뜻하는 ‘dead loss’를 수치적으로 평가함. 경제효율성을 측정하는 자원이용계수 개념을 제시하여 벡터 집합의 특성을 기반으로 평가함
 - Debreu(1951)은 ‘dead loss’의 발생 원인으로는 1) 물리적 자원의 과소 사용, 2) 생산의 비효율성, 3) 불완전한 경제 조직에 따른 것이라 주장함
- Farrell(1957)은 주어진 투입물 집합으로부터 가능한 한 많은 산출을 하는 것을 효율이라 정의하고 효율적 생산함수는 관측된 값 중 가장 높은 효율을 보여주는 결괏값에 기반한 경험적 함수로 정의하였음
 - 관측되는 데이터를 통해 효율적 생산경계를 추정하고 이를 기반으로 비효율적 비점과의 거리를 통해 비효율성을 추정함



자료: Farrell(1957)

〈그림 3-2〉 Farrell(1957)의 효율적 생산함수 예

- Aigner and Chu(1968)은 결정론적 미시 생산함수를 ‘기존 기술지식 상태에서 투입물 조합으로 가능한 최대 산출’을 표현하는 방식으로 정의함. 즉, 평균 개념이 아니라 최대 생산 가능 수준의 생산함수가 도출된다고 해석하여, 산업 생산함수를 주어진 투입물 조합에서 달성할 수 있는 잠재적 경계로 해석하였음
 - Aigner and Chu(1968)은 생산과정에서의 순수 무작위 충격, 기술적 효율성 차이, 경제적 효율성 차이로 인해 산출량이 생산경계 아래에 있는 비효율성이 발생될 수 있다고 해석하였음
- 이러한 논의들을 기반으로 정리된 생산경계 생산기술은 다음 식(3-1)과 같음

$$T = \{(x, y) : x \text{ can produce } y\} \tag{3-1}$$

나. 생산효율성 분석기법: DEA, SFA

○ Charnes et al.(1978)이 제안한 DEA(Data Envelopment Analysis)는 비모수적인 방법론으로 특정 함수형태를 가정하지 않고 생산효율성을 추정함. 기술적으로 가장 효과적인 생산경계뿐 아니라 기술집합 자체를 구축하므로 그 과정에서 어떤 의사결정단위¹⁷⁾가 생산경계에 위치하는 생산자인지, 상대적으로 비효율적으로 생산하는지를 분석함¹⁸⁾

- 목적 분석에 따라 산출물거리함수, 투입물거리함수, 방향거리함수를 이용할 수 있으며, 방향 거리함수를 이용한 DEA의 대표적인 문제는 다음 식(3-2)와 같음¹⁹⁾

$$\begin{aligned} & \max_{(\beta_v, \lambda^1, \dots, \lambda^K)} \beta_v && \text{식(3-2)} \\ \text{s.t. } & y_m^j + \beta_v g_{ym} \leq \sum_{k=1}^K \lambda^k y_m^k, \quad m = 1, \dots, M \\ & \sum_{k=1}^K \lambda^k x_n^k \leq x_n^j - \beta_v g_{yn}, \quad n = 1, \dots, N \\ & \sum_{k=1}^K \lambda^k = 1, \lambda^k \geq 0, k = 1, \dots, K \end{aligned}$$

- DEA 관련 초기 연구로는 Charnes et al.(1978), Färe and Lovell(1978), Banker et al.(1984), Färe et al.(1994) 등이 있음

- Charnes et al.(1978)은 공공프로그램 평가에 활용 가능한 ‘의사결정 효율성’ 측정방법을 제시하였음. 각 DMU(의사결정자)의 효율성을 측정하는 스칼라 척도 제시와 함께 효율성에 대해 공학적 접근과 경제적 접근 간의 연관성을 명확히 제시하였음 효율성에 대해 공학적 접근과 경제적 접근 간의 연관성을 명확히 제시하였음.
- Färe and Lovell(1978)은 실제 산출이 최대 산출에 얼마나 가까운지를 나타내는 것을 생산의 기술적 효율성으로 정의하며 DEA 기법을 이용한 측정방법론의 조건(동차성, 단조성 등)을 제시함
- Banker et al.(1984)는 생산의 상대적 효율성을 평가하기 위하여 DEA 기법을 이용하였음. Shephard 거리함수 개념을 도입하여 다중산출물 상황을 고려해 보다 일반적인 상황으로 효율성 측정방법론을 확장하였음

17) 예: 국가, 산업, 기업

18) 권오상(2019), p.318.

19) 식(3-2)는 Färe et al.(1989)를 기반으로 한 모형으로 권오상(2019)에서 방향거리함수를 이용한 대표적 문제로 제시하였음.

- Färe et al.(1994)는 맘퀴스트 생산성 지수를 계산하기 위하여 생산경계를 추정하고 추정방법론으로 DEA를 적용하였음. 규모 수익 일정, 규모 수익 비증가 허용의 경우 DEA 추정식이 어떻게 달라지는지를 제시하였음
 - DEA 분석은 함수형태의 설정이 필요 없고 손쉽게 효율성지표를 구할 수 있으며 기술집합의 볼록성 등을 항상 충족시킬 수 있다는 점에서 장점이 있음.²⁰⁾ 다만, Schmidt(1985)와 Greene(1993)가 지적 바와 같이 통계적 잡음이 있을 때 본질적인 문제가 발생하는데, 생산경계에서 벗어난 모든 편차가 비효율성에서 기인한 것으로 해석함에 따라 비효율성 추정이 과소 추정될 여지가 있음(Meeusen and Van den Broek, 1977)
 - Schmidt(1985)은 DEA를 이용한 연구 중에는 통계적 잡음을 허용하는 연구사례²¹⁾가 일부 있음을 언급하였고, Greene(1993)은 최근에는 부트스트래핑 방법을 사용하여 이러한 단점을 해결하는 시도(Simar and Wilson, 1998; Puertas and Marti, 2021 등)가 있음을 서술하였음
- Aigner et al.(1977)이 제안한 SFA(Stochastic Frontier Analysis)는 모수적 방법론으로 함수형태와 오차항의 분포를 가정하여 생산경계를 추정하고 비효율성을 추정하는 방법론임
- SFA는 함수형태는 콥-더글라스, 초월로그(translog)와 같은 형태를 가정할 수 있으며 다중산출물을 고려하는 경우에는 거리함수(산출물거리함수, 투입물거리함수, 방향거리함수)를 이용하여 함수형태를 가정할 수 있음. 오차항의 분포가정에서 통계적 잡음은 정규분포를 가정하는 것이 일반적이며, 비효율성의 경우 반정규분포, 절단정규분포, 지수분포, 감마분포 등 다양한 편측분포 형태를 고려함
 - 단, 다중산출물을 고려하는 경우에는 다중산출물의 공간 왜곡이 발생하지 않도록 신축적인 함수를 사용해야 함(Kumbhakar and Lovell, 2000). 추론방법으로는 주로 최우추정법(MLE: Maximum Likelihood Estimation)이 이용되며 가장 흔히 사용되는 모형은 다음 식(3-3)과 같음

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \dots + \beta_N x_{Ni} + v_i - u_i \quad \text{식(3-3)}$$

$$v_i \sim N(0, \sigma_v^2), \quad u_i \sim N^+(0, \sigma_u^2)$$

20) 권오상(2019), p.352.

21) Schmidt(1985)는 이러한 연구사례로 Banker and Maindiratta(1985)를 제시하였음.

- 해당 모형은 콥-더글러스 함수형태를 가정하였고, 통계적 잡음에 해당하는 v_i 는 정규분포, 비효율성에 해당하는 u_i 는 반정규분포를 가정함
- SFA 기법의 대표적인 초기연구로는 Aigner et al.(1977), Meeusen and Van der Broek (1977), Jondrow et al.(1982)가 있음
 - Aginer et al.(1977)은 이전에 수행된 생산경계 생산함수 연구들이 오차항을 고려하지 않음을 지적하며 대칭적인 정규분포와 반정규분포 확률변수의 합을 오차항으로 정의하였음. 해당 연구는 이전 연구들의 문제점으로 1) 이상치로 인한 생산경계 함수 추정의 오류, 2) 최대우도추정법 활용을 위한 정규성 조건 위반 등을 언급하였음. 다만 비효율성에 대한 구체적인 구조적 해석은 부족한 것으로 평가됨
 - Meeusen and Van den Broek(1977)은 순수확률요인과 측정오류로 인한 통계적 교란을 도입하여 비효율성이 과소 추정되는 것을 방지하고자 하였음. 다만 이 역시 비효율성에 대한 구체적인 구조적 해석은 부족한 것으로 평가됨
 - Jondrow et al.(1982)는 관측치로부터 오차항을 분해하는 방법으로 ($v-u$)의 조건부 u 기댓값을 고려하여 추정하는 방법을 제시하였음. v 는 양측분포(정규분포), u 는 0보다 큰 편측분포(반정규분포, 지수분포)를 고려하였음
- 설명변수가 설명하지 못한 부분을 담당하는 확률변수를 모형에 포함하여 분석하고 생산 경계를 확률적 요인을 감안하여 도출하므로 DEA에 비해 현실적인 방법론이라 평가됨²²⁾
- 다만, SFA의 최대우도법을 적용한 효율성 추정은 분포가정에 지나치게 의존할 수 있으며 (Banker et al., 1993), 비효율성에 대한 특정 분포가정으로 인해 현실적이지 않거나 편향된 추정결과가 나올 수 있다는 비판이 있음(Kumbhakar and Lovell, 2000)
 - 이에 패널 SFA 도입을 통해 이질성을 반영하거나, 준모수적 추정법 또는 비모수적 추정법(비모수 커널회귀방법, 로컬우도방법, 로컬최소제곱법 등) 도입에 대한 시도가 있음
- 본 연구는 국가별 데이터를 사용하여 생산-환경효율성 분석 모형(안)을 제시하는 것을 목표로 함. 사용하고자 하는 국가별 데이터는 다양한 데이터 소스로부터 구축된 자료이기 때문에 일관된 프로세스를 통해 구축된 데이터에 비해 데이터 품질이 다소 떨어질 가능성이 높음(Waal et al., 2020). 이에 이상치에 대한 컨트롤이 용이한 SFA 방법론을 채택하는 것이 타당한 것으로 판단됨

22) 권오상(2019), p.335.

2. SFA 기법을 적용한 연구 동향

- 본 절에서는 본 연구에서 제시하는 모형(안)의 추정기법인 SFA 기법을 적용한 최근의 연구 동향을 살펴보고자 함. SFA 기법과 관련하여 최근 연구는 1) 패널모형, 2) 비효율성 결정요인, 3) 내생성, 4) 비효율성 결정요인의 내생성, 5) 대체추론법(베이지안 추론) 등 다양한 관점에서의 논의²³⁾가 이루어지고 있음

가. 패널모형

- 기존 횡단면 데이터보다 패널데이터는 더 많은 정보를 지니고 있음. 이에 패널데이터를 활용할 경우, 횡단면 데이터 활용 시의 강한 분포가정이 다소 완화되고, 기술적 효율성 추정치의 통계적 특성이 개선될 수 있음(Kumbhakar and Lovell, 2000, p.95). Schmidt and Sickles(1984)는 횡단면 SFM의 한계 3가지를 다음과 같이 제시하였고, 이러한 한계는 패널 SFM을 적용함으로써 회피할 수 있음²⁴⁾

- (횡단면 SFM의 한계) 1) 모형의 최대우도추정(MLE) 및 기술적 비효율과 통계적 잡음 분리 과정에서 강한 분포가정 필요, 2) 최대우도추정은 기술적 비효율성의 오차성분이 설명변수와 독립적이어야 함, 3) JLMS 기법²⁵⁾을 통해 생산자별 기술적 효율성 추정이 가능하나 일관된 추정은 아님²⁶⁾
- (패널 SFM이 횡단면 SFM의 한계를 해결하는 이유²⁷⁾) 1) 전통적 패널데이터 추정기법을 적용할 수 있어(생산자 표본 반복 관측 등) 강한 분포가정에 대한 의존이 완화됨, 2) 패널데이터 추정기법은 기술적 비효율성의 오차성분이 설명변수와 독립적이라는 가정을 요구하지 않음, 3) 각 생산자별 기술적 효율성은 각 생산자별 관측 횟수를 무한히 늘리면 일관된 추정치를 얻을 수 있음
- 더불어 패널모형의 경우 개별 생산자의 이질성을 고려할 수 있음. 생산경계에서의 이질

23) 그 외 비모수적 추정법, 사분위추정법, 유한 혼합모형, 제로 비효율성, 메타 생산경계, 총요소 생산성 변화와 그 개별 구성요소, 2단계 생산경계 모형, SFM에서의 표본 선택 문제, 방향거리함수 추정 등이 있음(Kumbhakar et al., 2017).

24) Kumbhakar and Lovell, 2000, p.96 재인용

25) Jondrow et al.(1982)에서 제시한 추정량으로 저자인 Jondrow, Lovell, Materov, Schmidt의 이름을 따서 명명되었음. u_i 의 조건부 기댓값($E(u_i|\epsilon_i)$)을 계산하여 개별 관측값의 효율성을 추정함.

26) 이는 개별생산자 비효율성의 조건부 기댓값 분산이 횡단면 표본의 크기가 증가하더라도 0으로 수렴하지 않기 때문임[Schmidt and Sickles(1984): Kumbhakar and Lovell(2000), p.96에서 재인용].

27) Kumbhakar and Lovell(2000), p.96.

성은 생산자별 고유의 특성으로 인하여 생산경계 자체가 차이가 있을 수 있음을 나타냄. 만약 생산자 간 생산경계의 차이가 있음을 적절히 반영하지 않을 경우, 기술 비효율성의 크기가 과대평가될 뿐 아니라 생산자 간 기술효율성 격차의 분포범위도 과대평가되고, 기술효율성 개선이 생산성 증대에 미치는 영향 또한 과대평가될 수 있음(권오상, 조현경, 2021)

- Pitt and Lee(1981)이 처음으로 횡단면 SFM을 패널데이터로 확장하였으며, Schmidt and Sickles(1984)가 패널데이터 SFM을 본격적으로 알리는 계기가 되었음(Kumbhakar et al., 2017). 가장 일반적인 패널 SFM은 식(3-4)와 같음. $\alpha_i = c_i - \eta_i$ 로 c_i 는 시간불변 DMU 이질성, η_i 는 지속적 비효율성을 의미하며, $\epsilon_{it} = v_{it} - u_{it}$ 는 v_{it} 는 순수오차항, u_{it} 는 시간변화 비효율성을 의미함. 본 연구는 Kumbhakar et al.(2017)과 Kumbhakar and Lai(2022)의 연구를 참고하여 6가지 유형의 패널모형을 살펴보았음

$$y_{it} = m(x_{it}; \beta) + c_i - \eta_i + v_{it} - u_{it} = m(x_{it}; \beta) + \alpha_i + \epsilon_{it} \quad \text{식(3-4)}$$

- 시간불변 기술적 비효율성 모형

$$y_{it} = m(x_{it}; \beta) - \eta_i + v_{it}, \quad i = 1, \dots, n; t = 1, \dots, T \quad \text{식(3-5)}$$

- Schmidt and Sickles(1984)가 분포가정 자유접근법을 이용해 제안한 모형으로 패널 SFM에서 비효율성을 시간 불변으로 보고, 분포에 대한 가정 없이 모형을 추정하였음. 설명변수(X_{it})와 지속적 비효율성(η_i)의 상관관계 허용 유무에 따라 고정효과, 확률효과 프레임워크²⁸⁾를 설정한 후, 패널데이터 회귀기법으로 추정을 수행함²⁹⁾
- (한계) 다만 해당 모형은 개별 생산자의 이질성(c_i)을 고려하지 못하였으며, 생산기술이 시간에 대해 일정하다는 가정 또한 현실과 괴리가 있음

- 시간변화 기술 비효율성 모형: DMU 수준에서 생산성과 효율성 개선 수용

- Cornwell et al.(1990)은 고정효과 프레임워크하에서 시간추세변수(t)를 DMU 이질성 변수에 반영하여 프런티어 DMU가 시간이 지남에 따라 변화할 가능성을 포함하였음. 그러나 분포가정 자유 접근법하에서는 비효율성과 기술변화를 분리할 수 없으며, 분리를

28) 고정효과는 설명변수와 지속적 비효율성의 상관관계를 허용하며, 확률효과는 허용하지 않음.

29) Kumbhakar et al.(2017), pp.50-52, 재인용.

위해서는 추가적인 분포가정을 설정해야 하는 한계가 존재함³⁰⁾

$$y_{it} = c_{it} + \mathbf{x}'_{it}\boldsymbol{\beta} + v_{it} \quad \text{식(3-6)}$$

$$c_{it} = c_{0i} + c_{1i}t + c_{2i}t^2$$

- Lee and Schmidt(1993)은 시간특정효과(time specific effect; l_t) 효율성 함수에 반영한 간결한 시간변화 비효율성 모형을 제안함(식 3-7 참조). 이 모형은 비효율성의 시간적 패턴이 모든 DMU 내에 정확히 동일하다고 가정하였으며, 분포가정은 필요하지 않음. 해당 연구는 분포적 가정하에 확률적 접근법으로 추정하는 방법에 대해서도 제시하였으며, 이는 효율성을 시간에 대한 결정론적 함수와 지속적 비효율성의 곱으로 내는 방법임.³¹⁾ 분포가정이 부과되면 시간 추세를 설명변수의 구성요소로 반영할 수 있음³²⁾
- (한계) 개별 DMU의 시간불변 이질성과 지속적 비효율성에 대해 고려되지 못하였음

$$y_{it} = m(\mathbf{x}_{it}; \boldsymbol{\beta}) + v_{it} - u_{it} = m(\mathbf{x}_{it}; \boldsymbol{\beta}) + \epsilon_{it} \quad \text{식(3-7)}$$

$$u_{it} = u_i l_t \quad \text{or} \quad u_{it} = G(t)u_i$$

- DMU 이질성(c_i)과 비효율성 분리 모형

$$y_{it} = c_i + \mathbf{x}'_{it}\boldsymbol{\beta} + v_{it} - u_{it} \quad \text{식(3-8)}$$

- 시간불변 패널 SFM하에서 시간불변 구성요소를 지속적인 비효율성으로 생각할 것인지 관측되지 않은 시간불변 공변량 효과를 포착하는 개별 이질성으로 생각할 것인지에 대한 연구 질문이 제기됨(Kumbhakar et al., 2017, p.56)
- Greene(2005a)는 시간불변 SFM에서 추가적으로 시간변화 비효율성항을 추가한 모형을 제시함(식 3-8 참조). Greene(2005a)는 고정효과모형(TFE: True Fixed Effect model)과 확률효과모형(TRE: True Random Effect model)을 제시하였음. TFE는 c_i (시간불변 구성요소)를 설명변수와 상관될 수 있는 임의변수로 취급하나 비효율성을 포착하지 않으며, TRE는 설명변수와 상관되지 않는 것으로 처리함. 다만 이 모형을 추정하는 것은 쉽

30) Kumbhakar et al.(2017), pp.52-53, 재인용.

31) 여기서 이야기되는 속성은 '비효율성 결정요인' 부분에서 설명한 스케일링 속성과 관련이 있음.

32) Kumbhakar et al.(2017), pp.53-55, 재인용.

지 않으며 특히 시간불변 구성요소가 고정효과 프레임워크에 내포되면 Neymen and Scott(1948)의 incidental parameter 문제³³⁾에 직면하여 추정치의 일관성이 보장되지 않으며 점근적이지 않을 수 있음³⁴⁾

- Greene(2005b)는 시간변화 비효율성이 i.i.d 반정규분포를 따르며 시간불변 구성요소에 대해 n개의 더미변수를 모형에 포함시킨 후, 변환 없이 MLE를 사용하여 모형을 추정할 것을 제안함. 이 방법론은 T가 10 이상일 때 모형의 매개변수 추정에 유의미한 편향이 나타나지 않는 것으로 파악되었으며, n개 이상의 매개변수 추정 시에는 고급 수치 알고리즘을 사용하여 처리하는 것으로 알려져 있음³⁵⁾
- Chen et al.(2014)는 고정효과 프레임워크를 사용하는 해결책을 제안하였음. Dominguez-Molina et al.(2003)의 결과를 사용하여 내적변환된 모형과 일차차분모형의 우도함수가 닫힌 형식으로 표현함을 보여주었음. 또한 Colombi et al.(2014)는 확률효과 프레임에서도 로그-우도함수를 유도하는 데 사용하였음³⁶⁾
- Wang and Ho(2010)은 내적변환 및 일차차분변환을 수행하면서도 닫힌 형식의 우도함수를 제공하는 SFM을 제안하였음. 시간불변 구성요소가 모형에서 제거되므로 부수적인 매개변수 문제를 회피할 수 있으며 해당 모형은 식(3-9)와 같이 표현됨³⁷⁾

$$y_{it} = c_i + \mathbf{x}'_{it}\boldsymbol{\beta} + \epsilon_{it} \quad \text{식(3-9)}$$

$$\text{where } \epsilon_{it} = v_{it} - u_{it} \text{ with } v_{it} \sim N(0, \sigma_v^2)$$

$$\text{and } u_{it} = g_{it}u_i^* \text{ with } u_i^* \sim N_+(\mu, \sigma_u^2), g_{it} = g(\mathbf{z}'_{it}\boldsymbol{\delta})$$

- (한계) 다만 이러한 연구들은 생산함수의 오차항을 3가지로만 구분하며, 이에 개별 DMU의 시간 불변적 요소를 이질성으로만 간주하며 지속적 비효율성은 고려하지 못하는 한계가 존재함

- 지속적 비효율성(η_i)과 시간변화 비효율성(u_{it}) 분리 모형

$$y_{it} = \beta_0 + \mathbf{x}'_{it}\boldsymbol{\beta} + v_{it} - \epsilon_{it} = \beta_0 + \mathbf{x}'_{it}\boldsymbol{\beta} + v_{it} - (\eta_i + u_{it}) \quad \text{식(3-10)}$$

33) 데이터의 횡단면 단위 수가 증가하고 더불어 추정해야 하는 매개변수 수도 증가할 때 발생함.

34) Kumbhakar et al.(2017), pp.56-57, 재인용.

35) Kumbhakar et al.(2017), p.58, 재인용.

36) Kumbhakar et al.(2017), p.58, 재인용.

37) Kumbhakar et al.(2017), p.58, 재인용.

- 정부규제나 소유권 변경 등이 DMU의 관행에 영향을 주지 않는 한 지속적 비효율성은 변하지 않을 가능성이 높음. 지속적 비효율성과 시간변화 비효율성은 서로 다른 정책적 함의를 지니고 있어 이를 분리하는 문제는 중요함(Kumbhakar et al., 2017, p.59)
- Colombi et al.(2014)는 시간변화 비효율성을 단기 비효율성이라 칭하고 단기적으로 자원을 적절히 배분하지 못함에 따라 발생하는 비효율성이라 정의하였음³⁸⁾
- Kumbhakar et al.(2017)은 고정효과 프레임워크하에서 지속적 비효율성과 시간변화 비효율성을 분리하는 방법을 소개하였음. 3단계로 구분되는 방법은 1단계에서 내적변화를 통해 개체별 불변효과(α_i)를 제거하고 일관된 매개변수(β) 추정치를 확보함(식 3-11 참조). 2단계에서는 $\hat{\beta}$ 를 이용하여 개체별 불변요소(α_i)와 시간변화 오차항(w_i)의 정보를 포함한 가상잔차($r_{it} = y_{it} - \mathbf{x}'_{it}\hat{\beta}$)를 구성해 개별 생산자별 불변효과(α_i)를 추정하고 가상잔차 평균값을 통해 지속적 비효율성(η_i)을 추정함. 3단계에서는 $\hat{\beta}$ 와 $\hat{\eta}_i$ 를 이용하여 잔차($e_{it} = y_{it} - \mathbf{x}'_{it}\hat{\beta} + \hat{\eta}_i$)를 계산함. 해당 단계에서 순수오차항과 시간변화 비효율성을 분해하기 위해서는 추가적인 분포가정을 필요로 함. 처음 두 단계에서는 별도의 분포가정을 이용하지 않으며 마지막 단계에서 분포가정을 이용해 절편(β_0), v_{it} , u_{it} 를 추정함
- (한계) 지속적 비효율성을 고려하였으나 DMU의 이질성을 반영하지 못함. 이 경우 모형 내에서 지속적 비효율성과 이질성이 혼동될 수 있음(Kumbhakar et al., 2017, p.60).

$$y_{it} = \alpha_i + \mathbf{x}'_{it}\beta + \omega_{it} = (\beta_0 - \eta_i - E[u_{it}]) + \mathbf{x}'_{it}\beta + v_{it} - (u_{it} - E[u_{it}]) \quad \text{식(3-11)}$$

- 기업효과, 지속적 비효율성 및 시간변화 비효율성 분리 모형: Kumbhakar et al.(2014), Colombi et al.(2014), Kumbhakar and Lai(2022)는 패널모형에 내재된 4가지 구성요소(기업효과, 지속적 비효율성, 시간변화 비효율성, 순수오차항) 구조를 수용한 4CSFM을 제안하였음. 식의 형태는 앞서 제시한 식(3-4)와 같음
- Greene(2005a, 2005b)는 지속적 비효율성과 DMU 이질성을 분해하지 않았던 기존 3CSFM 모형과 달리 기업의 이질성을 고려하면 지속적 비효율성을 고려하는 4CSFM을 제안하였음³⁹⁾
- Kumbhakar et al.(2014)는 3단계 절차에 따른 4CSFM 추정법을 제시하였음. 1단계에서 표준화물효과모형을 이용하여 $\hat{\beta}$, $\hat{\alpha}_i$, $\hat{\epsilon}_{it}$ 를 추정하고, 2단계에서는 앞서 추정한 $\hat{\epsilon}_{it}$ 를 활용하여 정규-반정규 횡단면 SFM을 이용해 시간변화 비효율성(u_{it})을 추정함. 3단계

38) Kumbhakar et al.(2017), pp.59-60, 재인용.

39) Kumbhakar et al.(2017), p.63, 재인용.

에서는 $\hat{\alpha}_i$ 을 활용하여 정규-반정규 횡단면 SFM을 이용해 지속적 비효율성(η_i)를 추정함⁴⁰⁾

- Colombi et al.(2014)은 단일단계 MLE 추정을 이용하여 4CSFM을 추정하였음. 순수오차항(v_{it})은 정규분포, 시간변화 비효율성(u_{it})은 반정규분포로 가정하고 이들의 구성오차항은 왜곡정규분포(skew normal distribution)라 가정하였음. DMU 이질성(c_i)과 지속적 비효율성(η_i)에도 같은 가정을 하였음. 이는 Kumbhakar et al.(2014)의 절차보다 간단한 것으로 평가되나 설명변수와 비효율성 간의 내생성이 있는 경우 편향이 발생할 수 있음⁴¹⁾
- Lai and Kumbhakar(2018b)은 이분산처리를 하지 않은 Kumbhakar et al.(2014)의 연구를 확장하여 비효율성 분산을 이분산처리하였음. 또한 Filippini and Greene(2016)가 MSL(시뮬레이션 최대우도추정법)을 통해 계산이 간소화될 수 있음을 주장하여, 해당 방법론을 적용해 추정을 수행하였음⁴²⁾
- Lai and Kumbhakar(2018a, 2018b)는 DMU 이질성(c_i)과 지속적 비효율성(η_i)이 설명변수와 내생성을 지닐 수 있는 모형을 설정하였음. 내생성을 해결하는 방법으로는 이윤극대화 가정을 통한 대리변수 접근법과 Lai and Kumbhakar(2018a)가 제안한 2단계 접근법이 있음. Lai and Kumbhakar(2018a)는 1단계에서 내생변수의 매개변수를 추정하고 2단계에서 나머지 내생성이 없는 변수의 매개변수를 추정하는 형태를 제안하였음⁴³⁾
- Lai and Kumbhakar(2021)은 내생성과 이분산성을 해결하기 위한 2단계 접근법을 제시하였음. 1단계에서 차분 또는 내부변환을 통해 시간불변 오차구성요소를 제거하여 도구변수회귀를 통해 시간불변 오차구성요소를 제외한 모형의 매개변수를 추정하였음. 2단계에서는 확률 오차구성요소와 시간불변 오차구성요소의 상관관계를 포착하는 매개변수 ρ 를 도입하여 MLE 추정법을 통해 생산경계를 추정하였음⁴⁴⁾
- (한계) 오차구성의 개수가 늘어남에 따라 모형이 복잡하여 추정의 난이도가 높을 것으로 판단됨.

- 비효율성 결정요인을 포함한 4가지 구성요소 모형

40) Kumbhakar et al., 2017, pp.64-65, 재인용.

41) Kumbhakar et al.(2017), p.65 재인용.

42) Kumbhakar and Lai, 2022, pp.50-52, 재인용.

43) Kumbhakar and Lai(2022), pp.6-9, 재인용.

44) Kumbhakar and Lai(2022), pp.17-20, 재인용.

$$y_{it} = m(x_{it}; \beta) + c_i - \eta_i + v_{it} - u_{it} \tag{3-12}$$

$$\eta_i \sim N_+(0, \sigma_{\eta,i}^2), u_{it} \sim N_+(0, \sigma_{u,it}^2), c_i \sim N_+(0, \sigma_{c,i}^2), v_{it} \sim N(0, \sigma_{v,it}^2)$$

$$\sigma_{\eta,i}^2 = \sigma_{\eta}^2 e^{z_{\eta,i} \delta_{\eta}}, \sigma_{u,it}^2 = \sigma_u^2 e^{z_{u,it} \delta_u}, \sigma_{c,i}^2 = \sigma_c^2 e^{z_{c,i} \delta_c}, \sigma_{v,it}^2 = \sigma_v^2 e^{z_{v,it} \delta_v}$$

- Badunenko and Kumbhakar(2017)은 식(3-12)와 같은 비효율성 결정요인을 포함한 4CSFM을 제시하였음. DMU 이질성 및 순수확률적 요인은 정규분포를 가정하고 비효율성(지속적 비효율성, 시간변화 비효율성)은 반정규분포를 가정하였음. 4가지 구성요소의 분산매개변수($\sigma_{\eta,i}^2, \sigma_{u,it}^2, \sigma_{c,i}^2, \sigma_{v,it}^2$)는 공변량 집합에 의존하며 지수함수형태로 설정됨. Z는 비효율성 결정요인 벡터로 시간불변요소의 벡터($z_{c,i}, z_{\eta,i}$)와 시간변화요소 벡터($z_{u,it}, z_{v,it}$)는 서로 공유 가능함. 해당 연구는 MSL을 통해 추정하였음. 해당 모형에서 추정하는 매개변수는 $\beta, \delta_u, \delta_v, \delta_{\eta}, \delta_c$ 임(45)
- (한계) 비효율성 결정요인이 비효율성 자체에 미치는 한계효과 분석은 불가하며 방향성만 해석할 수 있음

나. 비효율성 결정요인(46)

- 응용 생산성 분석에 SFA의 활용도가 높아짐에 따라 주된 생산 투입물 이외의 변수가 비효율성에 미치는 영향을 분석하는 연구가 수행되고 있음
 - 예: 은행 산업 내 비효율성에 영향을 주는 변수(z)로 자산의 양, 은행의 유형, 소유구조, 기업 지배구조 관행 등을 고려
- 비효율성 결정요인을 반영하는 방안으로 Kumbhakar et al.(2017)은 1) 2단계 분석법, 2) 비효율성 분산값에 결정요인 반영, 3) 스케일링 속성을 소개하였음
 - 2단계 분석법: 부적절한 방법론
 - Pitt and Lee(1981)이 제시한 방법으로 첫 번째 단계에서 JLMS 추정을 수행하고, 두 번째 단계에서 비효율성에 영향을 주는 변수(z)가 비효율성에 미치는 영향을 회귀분석 수행하는 형태임. 많은 연구자들이 해당 방법론을 활용(Ali and Flinn, 1989; Kalirajan, 1990; Bravo-Ureta and Reiger, 1991 등)하였으나, Kumbhakar et al.(2017)은 2단계 추정이 통계적 근거가 없으며 비효율성의 실제 움직임에 대한 정확한 통찰력을 제공하지 못한다고 지적하며 적절하지 못한 방법론이라 평가함

45) Kumbhakar et al.(2017), pp.66-67, 재인용.

46) Kumbhakar et al.(2017), pp.33-44 참조.

- 비효율성 분산값에 결정요인 반영: 적절한 방법론 1

$$\sigma_{u,i}^2 = e^{z_i' \delta} \quad \text{식(3-13)}$$

- 기존 우도함수에서 비효율성 분산값을 식(3-13)과 같이 변경하는 형태로 Kumbhakar et al.(1991), Reifschneider and Stevenson(1991)이 제안하였음⁴⁷⁾. 이분산적 모형으로 MLE로 모든 매개변수를 추정하고 이후 적절한 형태의 비효율성 분산을 이용하여 기술적 비효율성을 계산함.
 - 다만, $E[u_i|z_i]$ 가 z 에 대해 비선형적이므로 기울기 계수는 효과의 방향성에 대해서 논할 수 있으며, 순수오차항을 정규분포로 가정하고 비효율성항은 절단정규분포로 가정한 경우에는 계수의 부호를 직접적으로 해석할 수 없는 경우도 존재함
- 비효율성항의 분포가 절단정규분포일 때의 방안: 적절한 방법론 2

- 절단정규분포를 비효율성항의 분포로 가정한 경우, 비효율성 결정요인 변수(z)가 비효율성에 미치는 영향은 절단 이전의 평균과 표준편차를 통해 모델링할 수 있음. 다만, 어떤 매개변수(평균, 표준편차)를 z 의 함수로 모형화하든 Z 변수가 비효율성에 영향을 미치는 지점을 선택하는 문제는 절단되었으므로 모든 u 의 모멘트(moment)에 영향을 주어 복잡해짐
- Kumbhakar et al.(1991)과 Reifschneider and Stevenson(1991)은 결정요인의 영향을 μ_u 를 통해 모형화하였고, Caudill and Ford(1993)은 σ_u 를 통해 모형화하였고, Wang(2002)는 μ_u , σ_u 를 모두 이용하여 모형화하였음⁴⁸⁾
- 이러한 접근법은 모호성을 최소화하고 z 가 어디에 속하는지 추론 가능하다는 점에서 장점을 지니나 모형의 추정이 더 복잡해지고 Ritter and Simar(1997)이 제기한 바와 같이 식별문제를 초래할 수 있음(Kumbhakar et al., 2017, p.39)

- 스케일링 속성(the scaling property)

$$u_i \sim g(z_i; \delta) u_i^* \quad \text{식(3-14)}$$

- Simar et al.(1994)와 Wang and Schmidt(2002)가 제안한 단순화 방법론으로 비효율

47) Kumbhakar et al.(2017), p.36, 재인용.

48) Kumbhakar et al.(2017), p.39, 재인용.

성이 식(3-14)와 같이 움직인다고 가정하였음⁴⁹⁾. $g(z_i) \geq 0$ 은 외생변수 함수이며, $u_i^* \geq 0$ 은 랜덤 변수임

- 반정규분포, 지수분포와 같은 단일 매개변수분포뿐 아니라 절단정규분포, 감마분포와 같은 더 유연한 분포에도 스케일링 속성을 부여할 수 있음
- (장점) 1) 스케일링 속성하에서 모든 비효율성은 동일한 분포를 유지함. 비효율성의 평균과 표준편차는 Z에 따라 달라지나 분포의 형태는 고정됨. 2) δ 의 해석이 용이함. δ_j 는 j번째 z에 대한 기대 비효율성($E[u_i|z]$)의 준탄력성 또는 탄력성을 나타냄. 3) u^* 를 DMU별 기초 비효율성으로 해석 가능함(Alvarez et al., 2006)⁵⁰⁾
- 스케일링 속성은 비효율성향의 분포 선택 문제와 마찬가지로 스케일링 속성을 지니지 않는 모형과 비교하여 테스트할 수 있음. 예를 들어, 순수오차항 정규분포, 비효율성향 절단정규분포인 SFM을 추정한 후 같은 모형에 스케일링 속성을 부여하여 결과를 비교할 수 있음
- Kumbhakar et al.(2017)은 분포가정을 요구하지 않는 검정방법을 개발하는 것이 스케일링 속성에서의 중요한 연구과제라 언급하였음

다. 내생성⁵¹⁾

○ SFA의 일반적인 가정은 설명변수 x가 오차항(순수 충격 v, 비효율성 u) 모두에 외생적이고 독립적이라는 것임. 이 중 하나를 위반하면 추정치는 편향되고 일관성이 없게 됨

- Kumbhakar et al.(2017)은 내생성이 있을 수 있는 경우의 2가지 예시를 보여줌

- 예 1: 투입물을 선택하기 전에 충격이 관찰되는 경우 생산자는 투입을 조정하여 충격에 대응하고자 함에 따라 설명변수(x)와 순수충격(v) 간의 상관관계가 발생함
- 예 2: 관리자가 자신의 비효율성을 인지하고 이를 토대로 투입물 수준을 조절하는 경우 설명변수(x)와 비효율성(u) 간의 상관관계가 발생함

- 또한 Kumbhakar et al.(2017)은 내생성은 동시성, 변수 누락, 측정 오류에서 비롯된다고 지적함

○ 회귀모형에서는 내생성을 컨트롤하는 방법이 잘 알려져 있으나 SFA와 같은 합성오차 설정에서는 단순히 적용할 수 없으며 구현 시 주의를 기울여야 함(Amsler et al., 2017)⁵²⁾

49) Kumbhakar et al.(2017), p.40, 재인용.

50) Kumbhakar et al.(2017), p.41, 재인용.

51) Kumbhakar et al.(2017), pp.25-33 참조.

52) Kumbhakar et al.(2017), p.26, 재인용.

- Kumbhakar et al.(2017)은 내생성 문제를 해결하기 위한 방법론으로 조정2SLS (Corrected 2 Stage Least Square), 우도접근법, MOM(Method of Moments) 접근법, 개별 비효율성 추정법, 경제적 접근법을 제시하였음. 조정2SLS, 우도접근법, MOM은 도구변수를 이용하여 내생성 문제를 해결한다는 점에서 공통점이 있으며, 개별 비효율성 추정법은 내생성 정보를 포함한 비효율성의 조건부 기댓값 추정, 경제적 접근법은 최소 비용조건을 고려한 방법론임
- (조정2SLS) 첫 번째 단계에서 오차항과 상관관계가 없지만 설명변수와 관련이 있는 도구 변수를 추정하고, 두 번째 단계에서 내생성이 있는 설명변수를 대신하여 도구변수를 포함해 생산경계를 추정하는 방법임
 - (우도접근법) Kutlu(2010), Karakaplan and Kutlu(2013), Tran and Tsionas(2013), Amsler et al.(2017)은 간단한 조건부 논리 설정을 기반으로 한 내생성하의 최대우도추정법을 제시하였음⁵³⁾. Kumbhakar et al.(2017)은 이들 연구 중 Amsler et al.(2017)의 방법론이 가장 간단하고 직관적이라 평가하였는데, 도구변수를 이용하여 내생성을 컨트롤하는 방법론을 제시하였음.
 - (MOM 접근법) Hansen et al.(2010), Amsler et al.(2017)이 제안한 방법론으로 외생성하의 MOM 조건을 설정하고 내생성하에서는 3가지 조건 중 하나의 조건을 조정하여 분석을 수행하는 개념임⁵⁴⁾. 조정은 설명변수 x 를 도구변수 w 로 변경하는 형태로 이루어짐
 - (개별 비효율성 추정법) JLMS 추정량에 기반한 방법론으로 u_i 의 조건부 기댓값이 $E(u_i | \epsilon_i)$ 에서 $E(u_i | \epsilon_i, \eta_i)$ 로 내생성에 대한 정보가 추가적으로 고려되어 개별 비효율성을 추정함. Amsler et al.(2017)은 이 경우 기존 순수오차(v)의 분산보다 내생성하에서의 모형에 포함되는 분산이 더 작아 매개변수 추정은 복잡해질 수 있으나 모형 가정하에서 비효율성 예측 정확도는 향상할 수 있다고 평가하였음. 그러나 이 경우 반드시 축소형 모형이 정확히 지정된 모형이어야 하며, 잔차가 정규분포를 따라야 한다는 실질적 가정이 필요하다고 지적하였음
 - (경제적 접근법) 전통적인 확률적 생산경계모형을 추정하되 비용최소화에서 비롯된 일차 조건을 추가로 고려하는 형태임. 비용최소화 접근법에 따른 문제 해결방식임에 따라 가격정보를 수집할 수 없는 경우에는 활용에 한계가 존재함

53) Kumbhakar et al.(2017), p.27, 재인용.

54) Kumbhakar et al.(2017), p.29, 재인용.

라. 비효율성 결정요인 변수의 내생성 문제⁵⁵⁾

- 생산과정에 영향을 주는 확률적 사건 또는 경영환경에 따라 생산자들은 투입물 사용을 조정하는 경우가 존재함(Latruffe et al., 2016)
 - 예를 들어 정책 도입에 따라 생산자는 정책과 연관되는 투입물 사용을 조정할 수 있으며 이는 비효율성 결정요인이 생산경계모형의 설명변수와 상관성을 지니게 되는 것임
- 이런 경우 전통적인 도구변수 방법론을 적용하여 해결할 수 있으며, Latruffe et al.(2016), Amsler et al.(2017)가 도구변수를 이용한 비효율성 결정요인 내생성 해결방법을 제시하였음
 - 두 연구는 비효율성 결정요인을 모형에 비선형적으로 반영함에 따라 비선형적 방법론을 제시하였음
- Amsler et al.(2017)는 정책 등 경영환경변수(z)를 스케일링 속성을 이용하여 모형 내에 반영하였음
 - 이 연구는 1) 경영환경변수가 순수오차항과 상관관계가 있는 경우, 2) 기준 비효율성과 설명변수 또는 경영환경변수가 상관관계가 있는 경우를 살펴보고 내생성 해결방안을 제시하였음
 - 식(3-15)의 도구변수(w) 모멘트 조건하에서 NL2SLS(비선형 2단계 최소제곱법)을 사용하여 도구변수를 추정하였음

$$E[v_i - (u_i^* - \mu^*) \exp(\mathbf{z}'_i \boldsymbol{\delta}) | \mathbf{w}_i] = 0 \quad \text{식(3-15)}$$

- Latruffe et al.(2016)도 경영환경변수를 스케일링 속성을 이용하여 모형 내에 반영하였고 4단계 추정기를 제안하였음
 - 1단계, 2단계는 각각 OLS와 NLLS를 통해 도구변수 추정을 위해 필요하나 알려지지 않은 매개변수를 추정
 - 3단계에서 NL2SLS를 이용하여 도구변수를 추정
 - 4단계에서 다시 한 번 NL2SLS를 이용하여 효율적 도구변수를 추정
- Kumbhakar et al.(2017)은 Amsler et al.(2017)의 방법론이 보다 일반적이라 평가함

55) Kumbhakar et al.(2017), pp.45-47, 참조.

마. 베이지안 추정법

- 복잡한 SFM을 추정하기 위해서는 기존 MLE으로 계산할 경우 문제가 매우 복잡해짐 (Kumbhakar et al., 2017). 이에 계산을 간소화할 수 있는 추정법에 대한 논의가 이루어짐
 - Greene(2002)는 앞서 패널 SFM에서 언급되었던 MSL과 MCMC 기법을 비교하였음. MCMC 기법은 비교적 큰 표본에서 충분히 반복수행할 경우, MCMC 접근법과 MSL 접근법이 동일한 결과를 제공한다고 설명하였음
 - MCMC 접근법은 수만에서 수십만 번의 함수평가가 요구되나 각 평가에서의 계산량이 적다는 장점이 있음. 우도함수나 우도함수의 도함수를 요구하지 않아 그 계산이 매우 간단함
 - MSL 접근법은 함수평가 횟수는 수백 회 수준으로 적으나 각 함수평가에서 더 많은 계산이 요구됨
 - 본 연구는 오차항을 세 개 이상으로 구성된 패널 SFM 설정을 고려하고 있음에 따라 계산량이 상대적으로 적은 MCMC 기법에 대한 연구 동향에 집중하여 살펴보고자 함
- Van den Broeck et al.(1994)는 확률경계분석에서 베이지안 추론 가능성을 이론적·실증적으로 적용 가능함을 확인하였고, Koop et al.(1995)는 마코프 체인 몬테카를로(MCMC) 방법(Gibbs sampling)을 제안하고 확률경계분석에 도입하였음. Griffin and Steel(2007)은 WinBUGS 패키지를 이용한 SFM 내에서의 베이지안 분석을 위한 MCMC 방법론을 설명하였음. 이러한 연구들을 기반으로 생산효율성 연구에서 베이지안 추정법이 활용되고 있으며, 최근 연구들 중 Wanek et al.(2020), 권오상, 조현경(2020)의 사례를 살펴봄
 - Wanke et al.(2020)
 - (분석목적) 중국 에너지산업에 경영환경이 미치는 영향을 분석하고 기술효율성과 주요 경영환경변수(금융부문 변수, 에너지산업 변수, 거시경제 변수)의 관계를 분석한 연구임
 - (분석방법론) MCMC 방법과 미분 최적화를 결합하여 비효율성항에 대한 다양한 분포가정 및 공분산을 최소화하는 RBSFA(Robust Bayesian Stochastic Frontier Analysis)를 제안함. 사전분포로 γ 는 감마분포, β 는 다변량 정규검열분포, 비효율성항 분포는 Griffin and Steel(2007)의 제안을 참고하여 감마, 지수, 반정규분포로 가정하고, DIC(Deviance Information Criteria)를 최소화하는 비효율성 분포를 최종적으로 결정하는 형태임. 모형은 식(3-16)과 같으며 설명변수(x)는 고정자산, 재고, 건설, 연구개발비용이며, 종속변수(y)는 총수입임. r^{it} 는 사전중앙효율성이며, 에너지효율성은 $\exp(-u_{it})$ 임. 비효율성 결

정요인 변수(z)를 반영한 비효율성 수식은 식(3-17)과 같음

- (분석결과) 2012~2015년 중국 내 128개 에너지기업을 대상으로 분석한 결과, 중국의 에너지산업 효율성은 경영환경에 영향을 받는 것으로 나타났음. 특히 금융부문의 발전은 중국 에너지기업의 효율성 향상에 기여하는 것으로 분석되었음

$$y_{it} = \alpha + \mathbf{x}_{it}\beta + u_{it} \tag{3-16}$$

$$u_{it} \sim \exp(\mathbf{z}_{it}\boldsymbol{\delta}) \tag{3-17}$$

- 권오상, 조현경(2020)

- (분석목적) 한국 농업에 있어서 SFA 방법론을 적용하여 생산자 간 생산경계 이질성을 어떻게 반영하여 생산자별 고유 생산경계와 기술효율성을 동시에 추정할 수 있을지 이론적, 실증적으로 분석을 수행함
- (분석방법론) MCMC 방법론을 이용하여 패널 SFM(TRE)을 추정하였음. 5년이라는 짧은 기간과 많은 DMU 정보를 포함하는 패널데이터를 활용함에 따라 확률효과 프레임워크를 이용하였음. 오차항을 최대 6개까지 고려하고 이질성과 시간 추세 등을 고려하여 모형을 일반화하는 과정을 거쳤음. 식(3-18)은 이질성을 고려하지 않은 가장 기본적인 TRE 모형임. 비효율성항은 반정규, 지수, 절단정규, 감마분포를 고려하였고, 사전분포는 표준편차를 제외한 매개변수는 정규 또는 반정규, 분산의 역수인 정밀도 매개변수는 감마분포로 설정하였음. 함수형태는 콥-더글라스를 가정하였음

$$\ln y_{it} = \alpha_i + \sum_{n=1}^N \beta_n \ln x_{n,it} + \pi t + v_{it} - \exp(-\eta(t-T))u_i \tag{3-18}$$

$$\alpha_i \sim N(\mu_\alpha, \sigma_\alpha^2), v_{it} \sim N(0, \sigma_v^2), u_{it} \sim N^+(0, \sigma_u^2)$$

- (분석결과) 생산자 이질성이 고려되면 기술효율성 크기와 생산자 간 분포범위, 그리고 생산성 변화에 미치는 중요도는 모두 감소됨. 생산자 간 생산경계에 차이가 있음을 반영하지 못하면 기술비효율성의 크기, 생산자 간 기술효율성 격차의 분포범위, 기술효율성 개선이 생산성 증대에 미치는 영향 모두 과대평가됨. 이는 기존의 분석이 이질성에 따른 생산경계의 차이를 모두 기술효율성으로 간주하기 때문임

3. 생산-환경효율성 정의 및 연구 동향

가. 생산-환경효율성 정의

- Färe et al.(1989)는 환경적 영향을 비소망재 산출물로 보고, 소망재 산출물을 같은 비율로 증가시키고 바람직하지 않은 산출물을 감소시키는 능력에 기반한 효율성을 측정방안을 제안하였으며, Färe et al.(1993)은 결정론적 초월로그 산출물거리함수를 설정하고 매개변수를 추정하고 효율성을 측정하였으며 비소망재의 그림자가격을 추정하였음. 이후 다양한 연구들을 통해 방법론이 개선되어 활용되고 있음. 생산-환경효율성의 생산경계는 식(3-19)의 기술집합을 기반으로 추정하게 됨

$$T = \{(x, (y, g)) : x \text{ can produce } y \text{ and } g\} \quad \text{식(3-19)}$$

- 이러한 연구는 자원의 최적 사용을 통해 경제적 산출물을 최대화하면서 동시에 환경에 미치는 부정적 영향을 최소화하는 것을 목표로 분석이 수행됨
- 대표적인 초기 연구로는 Reihard et al.(2000)과 Färe et al.(2005)가 있음
 - Reihard et al.(2000)은 질소, 인산염, 총에너지 사용량 등의 자료를 이용하여 네덜란드 낙농업자들의 환경효율성을 분석하였음
 - 관찰된 투입과 산출 수준을 조건으로 하여 환경에 해로운 영향을 주는 투입물의 최소사용 가능량과 실제 사용량의 비율로 환경효율성을 측정하였음
 - 해당 연구는 DEA와 SFA를 비교 분석하였는데, SFA의 경우 환경오염물질을 3가지 포함시켰을 때는 단조성 위반으로 추정이 불가하였고, DEA는 결정론적 방법론임에 따라 환경오염물질을 모형에 포함하는 것이 적합한지를 확인하기 어렵다고 지적하였음
 - Färe et al.(2005): 미국 209개 발전소의 발전량과 발생하는 오염물질인 이산화황을 고려하여 규제가 시행되기 전, 후의 기술효율성을 추정하였음
 - 2차 방향거리함수를 이용하여 추정을 수행하였음. 방향산출물거리함수를 도입함으로써 비비례적인 산출물 변화를 고려할 수 있으며, 하나의 산출물을 확장하면서 다른 산출물을 축소할 수 있음
 - 오염물질을 한 단위 줄이는 기회비용인 전력가치를 오염물질의 그림자가격으로 추정하고 규제 도입 후 그림자가격이 증가되었는지를 분석하였음

나. 생산-환경효율성 연구 동향

○ 본 절에서는 생산-환경효율성을 이용한 선행연구 사례를 살펴보았음. SFA 기법을 적용한 연구사례 중 DMU를 국가 단위로 하여 분석한 연구사례 2건(Jin and Kim, 2019; Bibi et al., 2021), 기업의 매출액과 온실가스 배출량을 다중산출물로 하여 분석한 연구사례 1건(김길환 외, 2019)을 살펴보았음

○ Jin and Kim(2019)

- (분석목적) 21개 신흥국의 에너지효율성과 탄소비효율성을 추정하여 저탄소에너지 기술 도입비용에 따른 경제적 에너지효율성 변화를 살펴보았음
 - 청정개발메커니즘(CDM: Clean Development Mechanism)과 같은 에너지 기술 개발 체제와 재생에너지에 대한 높은 연구개발비용으로 경제적 에너지효율성은 저해될 가능성이 존재함
 - 경제적 측면에 에너지효율성과 생태적 측면의 탄소비효율성을 추정하여 경제적 에너지효율성이 증가하고 생태적 탄소 비효율성이 감소하는 선도 국가를 식별하고자 함
- (분석방법론) 고정효과프레임 기반의 패널 SFM(TFE)를 이용하여 분석함
 - (함수형태) 콥-더글러스 생산함수
 - (설명변수) 자본, 노동, 에너지소비, 경제복합도지수(ECI⁵⁶)
 - (종속변수) 에너지효율성 모형은 GDP, 탄소비효율성 모형은 이산화탄소 배출량
 - (분석대상) 1995~2016년 기간, 모건스탠리가 선정한 신흥국 24개국 중 21개국⁵⁷⁾
 - (모형) 개별 국가의 특성을 고려하기 위하여 산출물 지향 TFE 모형을 사용하였음. 각 변수들을 자연로그하여 콥-더글러스 생산함수를 선형형태로 표현하였음. 경제적 에너지효율성을 모형 1(식 3-20 참조)의 u_{1it} 를 통해 추정하고, 생태적 탄소비효율성 모형은 모형 2(식 3-21 참조)의 u_{2it} 를 통해 추정함. 모형 2인 탄소비효율성 모형은 경계에서 멀어질수록 효율적이라 해석하였음. 두 모형 모두 순수오차항(v)은 정규분포를 가정하였고, 효율성함은 반정규분포를 가정하였음. 효율성은 식(3-22)을 이용하여 표현함

56) Hidalgo and Hausmann이 제시한 지수로 국가별 수출 품목의 다양성 및 복잡성을 기준으로 순위화한 지수임. 생산지식이 다양하고 복잡하고 전문화된 지식을 보유한 국가일수록 더 높은 순위에 랭킹되는 것으로 알려져 있음 (Harvard university Growth lab 홈페이지, 검색일: 2024.11.20).

57) 24개국 중 데이터 수집에 어려움이 있는 3개국을 제외하고 21개국에 대해 분석 수행함.

$$Y_{it} = \beta_{1i} + \beta_{1E}E_{it} + \beta_{1K}K_{it} + \beta_{1L}L_{it} + \beta_{1ECI}ECI_{it} + v_{1it} - u_{1it} \quad \text{식(3-20)}$$

$$CE_{it} = \beta_{2i} + \beta_{2E}E_{it} + \beta_{2K}K_{it} + \beta_{2L}L_{it} + \beta_{2ECI}ECI_{it} + v_{2it} - u_{2it} \quad \text{식(3-21)}$$

$$\text{효율성} = \frac{\hat{y}_{it}^f}{y_{it}} = \exp(-u_{it}) \quad \text{식(3-22)}$$

- (분석결과) 에너지효율성 모형에서는 자본과 노동은 경제성장에 긍정적 영향을 주는 것으로 나타났으며 에너지소비는 1% 증가 시 경제성장이 3.15% 감소하는 결과가 도출됨. 탄소비효율성 모형에서는 에너지소비가 탄소배출을 가속화하는 것으로 추정되었으나 통계적으로 유의한 결과는 아니었으며, 노동력이 1% 증가할 경우 탄소배출이 감소되고 경제복합성 또한 탄소감축에 기여하는 것으로 분석됨
- (본 연구의 시사점) 에너지효율성 모형과 탄소비효율성 모형을 각각 살펴봄에 따라 선도 국가를 분석함에 있어 각 모형에서 개별 국가들이 생산경계 어느 지점에 위치해 있는지 살펴보고 논하는 수준임

○ 김길환 외(2019)

- (분석목적) 온실가스 감축 정책의 효과성 평가지표 개발 필요성에 대한 문제의식을 바탕으로 온실가스 배출 평가지표로서 온실가스 배출 효율성 개념을 제시함
 - 생산이론에 근거하여 투입물과 산출물을 동시에 고려한 상태에서 각 조직의 현재 온실가스 배출 수준을 최적 배출 수준과 비교 분석함
- (분석방법론) 고정효과프레임 기반의 패널 SFM(TFE)를 이용하여 분석함
 - (함수형태) 산출물거리함수, 초월로그함수
 - (설명변수) 자본, 노동, 에너지
 - (종속변수) 매출액, 온실가스 배출량
 - (분석대상) 2011~2015년 기간, 국내 251개 기업
 - (모형) 업종별 이질성을 고려한 TFE 모형을 구축함(식 3-23 참조). 해당 연구는 온실가스 배출 또는 에너지 사용 특징이 같은 업종은 유사하고 타 업종과는 상이할 가능성이 높다는 점에 근거하여 이질성을 DMU 단위인 기업별 더미변수가 아닌 업종별 더미변수를 반영 하였음. 시간에 대한 변화 수준을 통제하기 위하여 시간변수를 추가로 고려하였음. 순수 오차항(v)은 정규분포를 가정하고, 비효율성항(u)은 반정규분포를 가정하였음. 온실가스 배출 효율성(식 3-24 참조)은 투입물과 소망재 산출물 수준을 유지한 상태에서 온실가스

를 줄일 수 있는 최댓값으로 정의함. MLE 추정법을 적용하여 생산경계를 추정하였음

$$\begin{aligned}
 -\ln(g_{it}) = & \alpha_0 + \alpha_y \ln \tilde{y}_{it} + \alpha_k \ln k_{it} + \alpha_l l_{it} + \alpha_e e_{it} + \frac{1}{2} \alpha_{kl} \ln k_{it} \ln l_{it} & \text{식(3-23)} \\
 & + \frac{1}{2} \alpha_{ke} \ln k_{it} \ln e_{it} + \frac{1}{2} \alpha_{le} \ln l_{it} \ln e_{it} + \alpha_{ky} \ln k_{it} \ln \tilde{y}_{it} + \\
 & + \alpha_{ly} \ln l_{it} \ln \tilde{y}_{it} + \alpha_{ey} \ln e_{it} \ln \tilde{y}_{it} + v_{it} - u_{it}
 \end{aligned}$$

\tilde{y} : y_{it}/g_{it} , y : GDP, g : 온실가스 배출량, k : 자본, l : 노동, e : 에너지,
 v : 순수오차, u : 비효율성

$$\text{온실가스 배출 효율성} = \frac{1}{D((y,g),(k,l,e))} = \exp(-u_{it}) \quad \text{식(3-24)}$$

D(·): 산출물 거리함수

- (분석결과) 목표관리제 시행 첫해인 2012년 온실가스 배출 효율성이 개선되었으나 이후 2013년, 2014년 연속해서 효율성이 악화되었음. 그러나 배출권거래제가 시행된 2015년에 큰 폭으로 온실가스 배출 효율성이 개선되었음
 - 이는 새로운 규제가 도입되었을 때 불확실성이 커져 기업의 배출 효율성 개선으로 이어진 것으로 판단됨
- (본 연구의 시사점) 목표관리제, 배출권거래제의 시행효과를 비효율성 결정요인에 추가하여 분석 수행한 것이 아닌 시점별로 비효율성 변화를 통해 가능한 연구임

○ Bibi et al.(2021)

- (분석목적) 남아시아 농업부문의 기술적 및 환경적 효율성을 비교 분석 수행
 - 남아시아 지역은 농업이 주요한 부문임에 따라 생산과정에서 환경에 미치는 영향을 고려해 농업의 지속가능성을 유지해야 함
- (분석방법론) 균형패널데이터를 활용한 SFA 분석 수행
 - (함수형태) 우도비 검정을 통해 콥-더글라스와 초월로그함수 중 초월로그함수를 선택
 - (설명변수) 농업토지, 농업부문 경제활동인구, 총 고정자본, 비료사용량
 - (종속변수) 농업부문 산출액
 - (분석대상) 2002~2016년 기간, 남아시아 지역 6개국⁵⁸⁾
 - (모형) 균형패널데이터를 이용하여 SFM을 구축하였음. 초월로그함수를 이용한 모형은

58) 방글라데시, 부탄, 인도, 네팔, 파키스탄, 스리랑카.

식(3-25)과 같음. 해당 연구는 기술효율성은 관찰된 산출량과 달성 가능 최대 산출량의 비율로 정의되는 산출물 지향 효율성 방식으로 추정하고(식 3-26 참조), 환경효율성은 최소 실현 가능 투입량과 관찰된 투입량의 비율로 정의되는 투입물 지향 효율성 방식을 사용하였음(식 3-27 참조). 순수오차항은 정규분포, 효율성항은 반정규분포를 가정하였으며, MLE 추정법을 이용하였음

$$\ln Y_{it} = \alpha_0 + \sum_j \alpha_j \ln X_{itj} + \beta_k \ln Z_{it} + \frac{1}{2} \sum_j \sum_l \alpha_{jl} \ln X_{itj} \ln X_{itl} + \frac{1}{2} \beta_{kk} (\ln Z_{it})^2 + \sum_j \sum_k \xi_{jk} \ln X_{itj} \ln Z_{it} + V_{it} - U_i \quad \text{식(3-25)}$$

Y : 산출액, X : 토지, 경제활동인구, 고정자본, Z : 비료,
 V : 순수오차항, U : 기술 비효율성

$$\text{기술효율성} = [\max \{ \theta : \theta T_R \leq F(X_R, Z_R) \}]^{-1} = |0 Y_R| / |0 Y^F| \quad \text{식(3-26)}$$

$$\text{기술효율성}_{it} = \frac{Y_{it}}{f(X_{it}, Z_{it}; \alpha, \beta, \xi) \exp(V_{it})} = \exp(-U_i)$$

$$\text{환경효율성} = [\min \{ \theta : F(X_R, \theta Z_R) \geq Y_r \}] = |0 Z^F| / |0 Z_R| \quad \text{식(3-27)}$$

$$\text{환경효율성}_{it} = (\ln Z_{it}^F) - (\ln Z_{it})^{59)}$$

- (분석결과) 남아시아 국가들의 기술효율성은 평균적으로 92% 수준에 도달하였으며, 주어진 투입물과 가용기술을 활용해 비효율성을 조정하면 농업생산량은 최대 8%까지 증가할 수 있음. 환경비효율성 수준은 평균 77%로 농업생산량을 유지하면서 비료사용량을 줄이면 환경효율성이 23% 추가로 개선될 수 있음
- (본 연구의 시사점) 해당 연구는 비료 사용에 따른 환경오염에 한하여 분석을 수행하였으며, 패널데이터를 활용하였으나 고정효과 혹은 확률효과프레임워크를 고려하지 않아 패널데이터가 제공하는 정보를 충분히 활용하지 못한 것으로 판단됨

59) 앞의 $\ln Z_{it}$ 는 실현 가능 최소 투입물이며 뒤의 $\ln Z_{it}$ 는 관측 투입물을 뜻함.

다. 정책변수를 고려한 생산-환경효율성 연구 동향

○ 본 절에서는 생산-환경효율성 분석을 수행하면서 정책변수가 효율성에 주는 영향을 분석한 연구를 살펴보았음. 검토한 선행연구의 대부분은 2단계 접근법에 기반하였으며, 정책변수와 비효율성의 선형적 관계를 정의하고 있음

○ Filippini et al.(2014)

- (분석목적) 에너지 수요 모델링과 생산경계 분석 접근방식을 결합하여 주거부문 에너지 효율성 수준을 계량경제학적 방법론을 이용해 추정함
 - 특히 에너지효율 제고를 위한 정책수단이 에너지효율성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 정책변수를 확률경계분석 시 고려함
- (분석방법론) BC95⁶⁰⁾, TFE와 같은 패널 SFM을 이용하여 분석 수행
 - (함수형태) 콥-더글라스 에너지 수요함수
 - (설명변수) 실질에너지가격, 실질소득, 인구, 평균 주택크기, 난방도일수, 열대기후 더미,⁶¹⁾ 기저에너지 수요 추세⁶²⁾
 - (종속변수) 최종에너지소비
 - (분석대상) 1996~2009년, 몰타 제외 EU 27개국
 - (모형) 불균형 패널데이터를 이용하여 BC95, BC95M, TFE의 패널 SFM을 구축하였음 (식 3-28 참조). BC95M은 BC95 모형을 개선한 모형으로 Mundlak(1978)이 지적한 TRE나 BC95 모형에서 나타나기 쉬운 관찰되지 않은 이질성 편향을 줄이기 위한 방법론을 적용한 모형임. DMU별 특성효과와 설명변수 사이의 상관관계를 보조방정식을 통해 고려한 모형임. 에너지효율성은 선도 에너지 수요(ED^f)와 관측된 에너지 수요(ED)의 비율로 정의됨(식 3-29 참조). 순수오차항은 정규분포로 가정하고 비효율성항은 절단정규 분포로 가정하였으며, MLE 방법론을 이용하여 생산경계를 추정하였음
 - (정책변수 반영 방안) 해당 연구는 정책변수로 건물 및 난방시스템의 효율기준, 전기기기의 효율기준, 재정 인센티브, 정보 제공수단을 고려하였음. 정책변수와 비효율성의 관계를 Battese and Coelli(1995)가 제시한 2단계 접근법으로 선형관계식을 사용하였음(식 3-30 참조)

60) Battese and Coelli(1995)에서 제안한 패널데이터모형.

61) TFE에서는 기후적 특성이 국가별 특성효과에 반영되어 있음에 따라 해당 변수를 반영하지 않음.

62) t로 근사함.

$$\ln ED_{it} = \alpha_{(i)} + b_{PE} \ln PE_{it} + b_Y \ln Y_{it} + b_{POP} \ln POP_{it} + b_{SIZE} \ln DSIZE_{it} + b_{HDD} \ln HDD_{it} + b_{HOT} \ln HOT_{it} + b_t t + v_{it} - u_{it} \quad \text{식(3-28)}$$

ED: 에너지 수요, *PE*: 실질에너지가격, *Y*: 실직소득, *POP*: 인구, *DSIZE*: 평균 주택크기, *HDD*: 난방도일수, *HOT*: 열대기후 더미, *t*: 시간 추세
v: 순수오차항, *u*: 기술 비효율성

$$\text{주거부문 에너지효율성}_{it} = \frac{ED_{it}^F}{ED_{it}} = \exp(-\hat{u}_{it}) \quad \text{식(3-29)}$$

$$u_{it} = \eta' Z_{it} + e_{it} \quad \text{식(3-30)}$$

- (분석결과) EU의 주거용 에너지 수요는 가격과 소득에 비탄력적인 것으로 분석되었음. 또한 정책수단은 주거부문 에너지 효율 수준에 영향을 미치는 것으로 나타남
 - 정책수단은 주거부문 에너지 효율 수준에 영향을 미치는 것으로 분석되었음. 특히 재정 인센티브는 에너지효율성 개선에 크게 기여하는 것으로 분석되었음. 다만, 정보 제공수단의 경우 유의미한 영향이 없거나 에너지소비를 증가시키는 것으로 나왔는데 리바운드 효과로 분석하였음
- (본 연구의 시사점) Kumbhakar et al.(2017)에서 지적한 바와 같이, 정책변수와 비효율성을 선형적 관계로 분석한 방법론은 통계적 근거가 부족할 수 있음

○ Mo and Jeon(2022)

- (분석목적) 기술혁신, 환경정책, 에너지 가격과 같은 경영환경이 에너지생산성에 미치는 영향을 분석
 - 해당 연구의 연구 질문은 1) 혁신활동은 한국의 기업의 에너지생산성을 증가시키는가, 2) 배출권거래제 도입이 한국기업의 에너지생산성과 긍정적 관계가 있는가, 3) 에너지 가격은 한국 기업의 에너지생산성에 영향을 주는가, 4) 총요소에너지생산성에 영향을 주는 결정요인은 산업별로 상이한가임
- (분석방법론) 패널 SFM과 맘퀴스트 지수 접근법을 이용하여 생산경계분석과 총요소에너지생산성을 분석함
 - (함수형태) Shephard 투입물거리함수, 초월로그함수
 - (설명변수) 자본, 노동, 에너지소비
 - (종속변수) 매출, 탄소배출

- (분석대상) 2011~2019년 기간, 제2기 배출권거래제에 참여한 656개 기업
- (모형) BC95, TRE, TFE 모형을 고려하였고 BIC(Bayesian Information Criterion) 정보를 기준으로 TRE 모형을 선택하고, 선형동차성 조건을 부과하여 투입물 에너지소비에 대해서 정규화⁶³⁾를 진행하였음(식 3-31 참조). 또한 우도비 검정을 통해 에너지소비 비효율성이 존재하는지 확인하였음. 해당 연구는 분포가정과 추정법에 대한 명확한 설명을 제시하고 있지 않음. 효율성 변화는 식(3-32)처럼 추정하였으며, 총요소에너지생산성은 효율성변화와 기술변화⁶⁴⁾의 곱으로 추정하였음

$$\begin{aligned} \ln e_i^t = & \beta_0 + \beta_k \ln k_i^{*t} + \beta_l \ln l_i^{*t} + \beta_y \ln y + \beta_c \ln c_i^t + \beta_t t + \beta_{ky} \ln k_i^{*t} \ln y_i^t & \text{식(3-31)} \\ & + \beta_{kl} \ln k_i^{*t} \ln l_i^{*t} + \beta_{kc} \ln k_i^{*t} \ln c_i^t + \beta_{lc} \ln l_i^{*t} \ln c_i^t + \beta_{ly} \ln l_i^{*t} \ln y_i^t \\ & + 0.5\beta_{kk} (\ln k_i^{*t})^2 + 0.5\beta_{ll} (\ln l_i^{*t})^2 + 0.5\beta_{yy} (\ln y_i^t)^2 + 0.5\beta_{cc} (\ln c_i^t)^2 \\ & + 0.5\beta_{tt} (t)^2 + \beta_{kt} \ln k_i^{*t} t + \beta_{lt} \ln l_i^{*t} t + \beta_{yt} \ln y_i^t t + \beta_{ct} \ln c_i^t t + (\nu_i - \nu_i) \end{aligned}$$

k : 자본, l : 노동, e : 에너지소비, y : 매출액, c : 탄소배출량,
 ν : 순수오차항, ν : 기술비효율성

$$\text{에너지효율성 변화}_{it} = \frac{E[\exp(-\nu^{i,t+1})|\nu^{i,t+1}]}{E[\exp(-\nu^{i,t})|\nu^{i,t}]} \quad \text{식(3-32)}$$

- (정책변수 반영 방안) 정책변수인 배출권거래제를 비롯하여 연구개발과 기업환경(자본집약도, 부채비율, 노동력, 연령, 청정에너지소비구조)이 총에너지생산성에 미치는 영향을 패널분석을 통해 살펴보았음
- (분석결과) 2016년 이후 한국의 에너지생산성은 개선되었으며, 연구개발과 배출권거래제가 에너지생산성 개선에 중요한 역할을 수행한 것으로 분석됨
- 조립 및 첨단기술 등 일부 산업은 기술혁신이 생산성 개선에 유의미한 영향을 주므로 에너지효율성을 효과적으로 개선하기 위해서는 산업별 특성을 반영한 정책 설계가 중요함을 시사함
- (본 연구의 시사점) 해당 연구는 배출권거래제를 비롯한 연구개발, 기업환경이 비효율성에 미치는 영향을 직접적으로 분석한 것은 아니라 기술효율성에 미치는 영향을 분석하는데 한계가 존재함

63) $\ln D^t(k_i^t, l_i^t, e_i^t, y_i^t, c_i^t) = \ln D^t(k_i^t, l_i^t, 1, y_i^t, c_i^t) + \ln e_i^t$ 의 형태로 정규화를 진행함(Mo and Jeon, 2022, p.902).

64) 기술변화에 관한 구체적인 수식은 Mo and Jeon(2022) 참조.

○ Tateishi et al.(2020)

- (분석목적) 거래비용 개념에서 온실가스 감축 효율성과 경제적 효율성에서 다양한 제도적 역할을 평가함
 - 제도는 사회 갈등을 해결하는 데 중요한 역할을 수행하나, 행위자 간 상호의존성 및 협력이나 불일치가 발생할 수 있는 불확실성이 존재하며 이로 인해 거래비용이 발생함
 - 제도의 질이 온실가스 감축과 GDP 경제적 성과 개선에 미치는 역할을 평가하는 것을 목표로 함
 - 생산경계분석을 통해 성과(효율성)를 측정하고, 국가 제도의 질과 교토의정서 목표와 협력 수준이 환경 및 경제 성과에 미치는 영향을 분석함
- (분석방법론) 2단계 잔여접근법에 따른 생산경계분석 수행
 - (함수형태) 초월로그함수
 - (설명변수) 1) 1단계: 노동, 자본, 재생에너지, 비재생에너지, 2) 2단계: GDP 추정치, 비재생에너지
 - (종속변수) 1) 1단계: GDP, 2) 2단계: 온실가스 배출량
 - (분석대상) 1993~2012년 기간, 116개국
 - (모형) 패널모형인 BC 모형에 기반한 2단계 잔여접근법을 적용하여 SFM을 추정하였음(식 3-33 참조). 잔여접근법은 주요기술과 잔여기술로 구분하고 주요기술로는 바람직한 산출물(GDP)을 생산하고, 잔여기술은 주요 산출물 생산과 연관된 오염물질을 배출하는 것으로 구분하는 방법론임. 순수오차항(v, ϵ)은 정규분포를 가정하였고, 비효율성항(u, η)은 절단정규분포를 가정하였음. 더불어 단조성을 부여한 대체모형 테스트도 진행하였음
 - (정책변수 반영 방안) 정책변수인 교토의정서 비준국가 더미를 비롯한 경영환경(농업 비중, 제조업 비중, 인간개발지수, 정치제도 수준, 법적권리 수준)을 변수로 고려하였음. 2단계 접근법을 적용하였으며 결정요인 변수와 비효율성은 (식 3-34 참조)와 같이 선형관계식으로 나타냄
- (분석결과) 국가들은 평균적으로 환경효율성보다 기술효율성을 더욱 중시하였으며, 기술효율성과 환경효율성 사이에 상충효과가 있을 가능성이 있음
 - 환경효율성 값은 기술효율성보다 분산이 컸으며, 분석기간 동안 분석 국가들의 환경효율성은 수렴하지 않은 것으로 나타남
 - 교토의정서가 배출 감축에 긍정적 영향을 주는 것으로 나타났으나 영향의 정도는 개발 수준 및 정치제도 수준보다는 낮은 것으로 나타남
- (본 연구의 시사점) Kumbhakar et al.(2017)에서 지적한 바와 같이, 정책변수와 비효율성을 선형적 관계로 분석한 방법론은 통계적 근거가 부족할 수 있음

$$(1단계) \ln y_i = \alpha_y + \sum_{p=1}^P \beta_{pi} \ln X_{pi} + \sum_{j=1}^J \gamma_{ji} \ln X_{pi} + \frac{1}{2} \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M \beta_{pm} \ln X_{pmi} \quad \text{식(3-33)}$$

$$+ \frac{1}{2} \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N \gamma_{jn} \ln Z_{jni} + \frac{1}{2} \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J \xi_{pj} \ln X_{pi} \ln Z_{ji} + v_i - u_i$$

$$(2단계) \ln s_i = \alpha_s + \delta_i \ln \hat{y} + \sum_{j=1}^J \tau_{ji} \ln Z_{ji} + \frac{1}{2} \delta_{pi} \ln \hat{y}_i^2 + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N \tau_{jn} \ln Z_{jni}$$

$$+ \frac{1}{2} \sum_{j=1}^J \phi_j \ln y_i \ln Z_{ji} + \epsilon_i + \eta_i$$

X_p : 비유해 투입집합(노동, 자본, 재생에너지), Z : 유해투입물(비재생에너지),

y : GDP, s : 온실가스 배출량, \hat{y} : GDP 추정치,

v , ϵ : 순수오차항, u : 기술 비효율성, η : 환경 비효율성

$$\text{기술효율성 결정요인 수식: } u_i = \sum_{k=1}^K \omega_{ki}^u \ln C_{ki} + e_i^u \quad \text{식(3-34)}$$

$$\text{환경효율성 결정요인 수식: } u_i = \sum_{k=1}^K \omega_{ki}^\eta \ln C_{ki} + e_i^\eta$$

○ Honma and Hu(2024)

- (분석목적) 대규모 국제기업 수준의 데이터를 사용하여 포터가설을 검토함
 - 환경정책의 엄밀성이 기업의 비효율성에 미치는 영향을 분석
 - 연구 질문으로 1) 환경정책의 엄밀성이 기업 성과에 어떤 영향을 미치는가, 2) 환경정책의 엄밀성 영향은 선형인가 비선형인가, 3) 정책수단에 따라 환경정책의 엄밀성 영향은 어떻게 다른가, 4) 표본에 포함된 국가들이 권장하는 정책방향은 무엇인가를 제시하였음
- (분석방법론) 패널데이터를 이용한 SFM을 구축하여 분석 수행
 - (함수형태) 초월로그함수
 - (설명변수) 고용자수, 고정자본, 국가 더미, 산업 더미, 연도 더미
 - (종속변수) 매출액
 - (분석대상) 2010~2015년 기간, 33개 선진국 및 개발도상국의 약 21만 6,000개 제조업체
 - (모형) 패널모형인 BC 모형에 기반하여 SFM을 추정하였음(식 3-35 참조). 해당 연구는 비효율성 결정요인 함수를 생산경계 추정식에 한 번에 반영하여 분석을 수행하였음. 순수오차항은 정규분포를 가정하였으며, 비효율성은 절단정규분포를, 비효율성 결정요인의 순수오차항은 정규분포를 가정하였음. MLE 방법론을 이용하여 추정하였음

$$\ln Y_{it} = \beta_{(i)} + \beta_L \ln L_{it} + \beta_K \ln K_{it} + \frac{1}{2} \beta_{LL} \ln L_{it}^2 + \frac{1}{2} \beta_{KK} \ln K_{it}^2 + \gamma_{country} D_{country} + \gamma_{industry} D_{industry} + \gamma_{year} D_{year} + v_{it} - u_{it} \quad \text{식(3-35)}$$

Y : 매출액, L : 고용자 수, K : 고정자본, $D_{country}$: 국가 더미,
 $D_{industry}$: 산업 더미, D_{year} : 연도 더미,
 v : 순수오차항, u : 기술 비효율성

- (정책변수 반영 방안) 환경정책의 엄밀성 지수(EPs)와 그 제공변수로 하여 식(3-36)과 같이 비효율성 결정요인 함수를 설정하였음. 환경정책의 엄밀성은 기업 성과와 잠재적인 내생성 문제가 발생할 수 있다고 판단하여, 1인당 GDP 지수와 EPs 지수를 SUR(Seemingly Unrelated Regression)을 통해 추정하였음

$$u_i = \delta_0 + \delta_1 EPs_{it} + \delta_2 EPs_{it}^2 + \omega_{it} \quad \text{식(3-36)}$$

$$EPs_{ct} = \lambda_0 + \lambda_1 \ln GDPPC_{ct} + \lambda_2 \ln Popden_{ct} + \lambda_3 Polity_{ct} + \xi_{ct}$$

$$\ln GDPPC_{ct} = \theta_0 + \theta_{EPs_{ct}} + \lambda_2 \ln Popden_{ct} + \theta_3 GES_{ct} + \theta_4 TO_{ct} + \eta_{ct}$$

EPs : 환경정책의 엄밀성, $GDPPC$: 1인당 GDP, POP : 인구,
 $Polity$: 민주주의 수준, GES : GDP 대비 정부지출, TO : 무역개방도, ζ , η : 오차항

- (분석결과) 환경정책의 엄밀성은 특정 임계점을 초과할 때 포터가설이 성립함을 확인
 - 환경규제가 특정 수준 이상 강화되면 포터가설이 성립함을 검증하였음
 - 하나의 최선의 수단보다는 적절한 수단의 조합이 보다 적절한 것으로 파악됨
- (본 연구의 시사점) 포터가설을 실증연구를 통해 검증하였으며, 선형관계이기는 하나 내생성을 고려하여 분석을 수행함

IV 분석 모형(안)

1. 개요

- 앞서 살펴본 연구 동향을 바탕으로 본 연구에서는 탄소가격제가 비효율성에 미치는 영향을 파악할 수 있는 국가 생산-환경효율성 분석 프레임워크를 제시하고자 함
 - 본 연구에서 제안하는 모형은 다양한 소스의 국가별 데이터를 사용하여 통계적 잡음 발생이 우려됨에 따라, 통계적 잡음을 비효율성항과 분리하여 분석하는 SFA 방법론을 채택하기로 하였으며, 관련한 연구 동향을 1) 패널데이터 모형, 2) 비효율성 결정요인 고려, 3) 내생성, 4) 베이지안 추정법으로 구분하여 살펴보았음
 - 생산-환경효율성 연구 동향을 살펴본 결과, 1) 환경정책과 같이 생산효율성에 영향을 줄 수 있는 요인을 모형에 반영하여 분석한 연구가 많지 않았으며, 2) 정책변수를 고려한 경우에도 2단계 분석법과 같이 통계적 근거가 부족한 방법론을 적용한 사례가 많은 것으로 파악됨
 - 이에 본 연구는 패널 SFM을 기반으로, 정책변수를 비효율성 결정요인으로 반영하면서 선행연구에서 가장 적합한 방법론으로 제시된 스케일링 속성을 적용하여 기존 연구와의 차별성을 확보하고자 함. 또한 정책변수 반영으로 발생할 수 있는 내생성 문제는 Amsler et al.(2017)이 제시한 도구변수접근법을 활용해 해결하고자 함. 아울러 모형의 복잡성을 고려하여 MCMC 방법론을 적용함으로써 보다 효율적인 생산-환경효율성 분석 프레임워크를 제안하고자 함

2. 데이터

- 본 연구에서 제시하고자 하는 모형(안)은 앞서 살펴본 선행연구와 같이 설명변수에는 전통적인 생산 투입요소를 고려하고 산출물로는 GDP와 온실가스 배출량을 반영
 - 설명변수는 자본, 노동, 에너지 투입을 고려하고자 함. 자본은 고정자본형성액, 노동은

총 노동자 수, 에너지는 전통적 에너지(화석연료 및 원자력)와 재생에너지(태양광, 풍력 등) 투입량을 모형에 투입자료로 활용하고자 함

- 자본, 노동, GDP는 Penn World Table 10.01⁶⁵⁾의 자료를 활용
- 에너지(전통적 에너지, 재생에너지)는 IEA의 World Energy Balance⁶⁶⁾의 자료를 활용
- 온실가스 배출량 자료는 EDGAR v8.0⁶⁷⁾의 자료를 활용

- 비효율성 결정요인으로 본 연구는 탄소가격제를 고려하고자 함. 탄소가격제에 대한 구체적인 정보는 Worldbank의 Carbon Pricing Dashboard를 통해 확보할 계획임
- 비효율성과 관련한 산업구조, 경제복합도지수와 같은 경영환경적 요소를 추가적으로 고려해야 할 가능성이 있음
 - 다만 패널모형을 통해 시간불변적인 DMU의 특성은 식별되는 것으로 가정함에 따라 시간가변적인 경영환경요소들을 추가 검토하는 것으로 함

〈표 4-1〉 데이터 목록(안)

구분	변수	내용	단위	데이터 출처
산출	부가가치	실질 GDP	백만 2017 USD	Penn World Table 10.01
	온실가스	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, PFCs, HFCs, SF ₆ , NF ₃	백만톤 CO ₂ eq	EDGAR v8.0
투입	자본	고정자본 형성액	백만 2017 USD	Penn World Table 10.01
	노동	노동자 수	백만 명	Penn World Table 10.01
	전통적 에너지	석유, 천연가스, 석탄, 기타	백만 TOE	IEA World Energy balance
	재생에너지	신재생에너지	백만 TOE	IEA World Energy balance
비효율성 결정요인	탄소가격제 (ETS, 탄소세)	시행 유형 가격 수준 시행지역(국가/관할권)	-	WorldBank

자료: 저자 작성.

65) University of Groningen, "Penn World Table", 검색일: 2024.11.23.

66) IEA 홈페이지. "World Energy Balance", 검색일: 2024.11.23.

67) EDGAR 홈페이지, "v8.0_GHG 1970-2022(CO₂, CH₄, N₂O, F-gases)", 검색일: 2024.11.26.

2. 분석 국가 및 연도

가. 분석 국가

○ 데이터 가용성을 고려하여 126개국 선정

- 활용 예정인 데이터(PWT 10.01, IEA, EDGAR v8.0)에서 제공하는 국가들을 비교하여 모든 데이터에서 다루고 있는 교집합 국가를 분석범위로 설정

나. 분석 연도

○ 1990~2019년 30년을 분석기간으로 설정함

- 1990년은 교통의정서의 기준 연도임에 따라 IEA, EDGAR와 같은 에너지·온실가스 데이터는 1990년부터 대부분의 국가 데이터가 존재함에 따라 분석 시작 연도를 1990년으로 설정
- 분석 데이터를 검토한 결과, 일부 데이터(PWT)의 가장 최신 연도가 2019년이며 또한 코로나 이전 시점으로 분석에 왜곡도 적을 것으로 판단됨

3. 분석모형: 베이지안 패널 SFM

가. 분석모형

○ 함수형태

- 다중산출물을 고려한 생산경제분석을 수행해야 함에 따라 식(4-1)과 같은 거리함수를 이용한 분석을 수행하고자 함(Kumbhakar and Lovell, 2000; 권오상, 2019).

$$D_o(x_{k,i,t}, x_{l,i,t}, x_{TE,i,t}, x_{RE,i,t}, y_{GDP,i,t}, x_{GHG,i,t}; \theta) = \exp(c_i + v_{i,t} - u_{i,t}) \quad \text{식(4-1)}$$

$$1 = D_o(x_{k,i,t}, x_{l,i,t}, x_{TE,i,t}, x_{RE,i,t}, y_{GDP,i,t}, x_{GHG,i,t}; \theta) \exp(-c_i + u_{i,t} - v_{i,t})$$

$$= \frac{1}{|y_{GHG,i,t}|} D_o(x_{k,i,t}, x_{l,i,t}, x_{TE,i,t}, x_{RE,i,t}, \frac{y_{GDP,i,t}}{|x_{GHG,i,t}|}, 1; \theta) \exp(-c_i + u_{i,t} - v_{i,t})$$

x_k : 자본, x_l : 노동, x_{TE} : 전통에너지, x_{RE} : 재생에너지,
 y_{GDP} : 국가 GDP, y_{GHG} : 국가 온실가스 배출량,
 c : DMU 이질성, v : 순수오차항, u : 시간가변 비효율성

- 본 연구는 효율성을 산출량 관점에서 살펴보는 연구임. 즉, 관찰된 산출량과 달성 가능 최대 산출량의 비율로 정의되는 산출물 지향 효율성 관점에서 생산-환경효율성을 측정하고자 함. 따라서 산출물거리함수를 이용한 생산경계를 추정하고자 함
- 다만 거리함수를 이용하여 분석을 수행할 경우, 콥-더글라스 함수형태의 생산함수를 가정하게 되면 $y_{GDP,i,t}/|y_{GHG,i,t}| = \tilde{y}_{i,t}$ 공간에 왜곡이 발생될 수 있어 신축적인 함수를 사용해야 함(Kumbhakar and Lovell, 2000).
- 이에 추정 안정성 등을 고려하여 초월로그(translog) 함수형태를 가정하였음⁶⁸. 식(4-1)은 식(4-2)의 형태로 나타낼 수 있음
- 단, 거리함수를 모형으로 설정하는 경우 1차 동차성을 만족해야하며, 본 연구는 초월로그 함수형태의 거리함수를 제시하고 있음에 따라 식(4-3)을 충족해야함.

$$-\ln(y_{GHG,i,t}) \quad \text{식(4-2)}$$

$$= \alpha_0 + \alpha_{\tilde{y}} \ln \tilde{y}_{i,t} + \sum_n \alpha_n \ln x_{n,i,t} + \frac{1}{2} \sum_n \sum_m \alpha_{nm} \ln x_{n,i,t} \ln x_{m,i,t} \\ + \frac{1}{2} \sum_n \alpha_{n\tilde{y}} \ln x_{n,i,t} \ln \tilde{y}_{i,t} + c_i + v_{i,t} - u_{i,t} \\ n = k, l, TE, RE, \quad m = k, l, TE, RE$$

$$\sum \alpha_{n\tilde{y}} = 0, \quad \forall n \quad \text{식(4-3)}$$

○ 비효율성 정의

- 본 연구는 식(4-4)의 형태의 비효율성을 추정하고자 함. 해당 비효율성은 주어진 GDP 산출 및 투입물 조건하에서 가장 최적의 온실가스 배출을 하는 DMU를 생산경계로 하여 각 DMU가 경계에서 얼마나 멀리 위치하는지를 분석하는 것임

$$\text{생산-환경효율성} = \exp(-u_{i,t}) \quad \text{식(4-4)}$$

- 생산-환경효율성의 값은 0~1 사이에 위치하며, 1인 경우 가장 효율적인 DMU임

68) 신축적 함수를 사용할 경우 단조성(monotonicity)이 추정결과에서 성립하지 않는 문제가 발생할 수 있음. 이러한 문제를 고려해서 방향거리함수(directional distance function)을 도입하는 경우도 많음.

○ 비효율성 결정요인 함수

- 탄소가격제가 생산-환경효율성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 스케일링 속성의 비효율성 결정요인 함수를 식(4-5)와 같이 설정하였음

$$u_{i,t} = \exp(\delta z_{i,t}) u_{i,t}^* \tag{식(4-5)}$$

- z 는 탄소가격제를 의미하며, δ 는 탄소가격제가 비효율성에 미치는 영향을 나타내는 매개변수임
- 식(4-2)의 $u_{i,t}$ 를 대신하여 식(4-5)를 반영하면 다음 식(4-6)과 같이 변환됨

$$\tag{식(4-6)}$$

$$\begin{aligned} & -\ln(y_{GHG,i,t}) \\ & = \alpha_0 + \alpha_y \ln \tilde{y}_{i,t} + \sum_n \alpha_n \ln x_{n,i,t} + \frac{1}{2} \sum_n \sum_m \alpha_{nm} \ln x_{n,i,t} \ln x_{m,i,t} \\ & \quad + \frac{1}{2} \sum_n \alpha_{ny} \ln x_{n,i,t} \ln \tilde{y}_{i,t} + c_i + v_{i,t} - \exp(\delta z_{i,t}) u_{i,t}^* \\ & \quad n = k, l, TE, RE, \quad m = k, l, TE, RE \end{aligned}$$

- 정책변수를 반영하는 과정에서 설명변수 및 순수오차항과의 내생성 문제가 발생하는 경우, Amsler et al.(2017)이 제안한 도구변수를 이용한 방법론을 통해 해결하고자 함. 식(3-15)의 모멘트 조건을 충족하는 도구변수를 NL2SLS을 통해 추정하는 형태임

○ 패널모형: TRE, TFE

- 패널모형으로 Greene(2005a, 2005b)에서 제시한 TRE와 TFE 모형을 모두 고려함
 - TRE는 DMU 이질성항인 c_i 가 설명변수와 상관관계가 없는 것을 가정하며 확률분포를 지님. 반면 TFE는 c_i 가 설명변수와 상관될 수 있는 임의의 변수(상수)로 취급되거나 비효율성을 포함하지는 않음
 - TFE와 TRE 모형을 다 설정하고 실증분석 단계에서 DIC 값 및 c_i 값의 통계적 유의성을 고려하여 보다 적합한 모형을 선택하는 것으로 함
- TRE 모형은 추정 단계에서 c_i 에 대한 분포가정을 추가하여 추정하며, TFE 모형은 DMU 숫자만큼의 더미변수(*dummy*)를 모형에 포함하여 더미변수의 파라미터(c_i) 추정을 수행함.

- TFE 모형의 경우 T가 10 이상이므로, Greene(2005b)가 제안한 바와 같이 DMU 숫자만큼의 더미변수를 모형에 포함하여 DMU의 이질성(c_i)을 포착하는 것으로 함.
- TRE(모형 1)와 TFE(모형 2) 모두 순수오차항은 정규분포, 비효율성항은 반정규분포를 따르는 것으로 가정하며, TRE 모형의 경우 DMU 이질성항은 정규분포를 따르는 것으로 가정하였음. 모형 1과 모형 2는 식(4-7), 식(4-8)과 같음

모형 1(TRE): 식(4-7)

$$\begin{aligned}
 & -\ln(y_{GHG,i,t}) \\
 & = \alpha_0 + \alpha_{\tilde{y}} \ln \tilde{y}_{i,t} + \sum_n \alpha_n \ln x_{n,i,t} + \frac{1}{2} \sum_n \sum_m \alpha_{nm} \ln x_{n,i,t} \ln x_{m,i,t} \\
 & \quad + \frac{1}{2} \sum_n \alpha_{n\tilde{y}} \ln x_{n,i,t} \ln \tilde{y}_{i,t} + c_i + v_{i,t} - \exp(\delta z_{i,t}) u_{i,t}^* \\
 & \quad \quad \quad n = k, l, TE, RE, \quad m = k, l, TE, RE, \\
 & \quad \quad \quad c_i \sim N(0, \sigma_c^2), \quad v_{i,t} \sim N(0, \sigma_v^2), \quad u_{i,t}^* \sim N_+(0, \sigma_u^{2*})
 \end{aligned}$$

모형 2(TFE): 식(4-8)

$$\begin{aligned}
 & -\ln(y_{GHG,i,t}) \\
 & = \alpha_0 + \alpha_{\tilde{y}} \ln \tilde{y}_{i,t} + \sum_n \alpha_n \ln x_{n,i,t} + \frac{1}{2} \sum_n \sum_m \alpha_{nm} \ln x_{n,i,t} \ln x_{m,i,t} \\
 & \quad + \frac{1}{2} \sum_n \alpha_{n\tilde{y}} \ln x_{n,i,t} \ln \tilde{y}_{i,t} + c_i \text{ dummy} + v_{i,t} - \exp(\delta z_{i,t}) u_{i,t}^* \\
 & \quad \quad \quad n = k, l, TE, RE, \quad m = k, l, TE, RE, \\
 & \quad \quad \quad v_{i,t} \sim N(0, \sigma_v^2), \quad u_{i,t}^* \sim N_+(0, \sigma_u^{2*})
 \end{aligned}$$

○ 베이지안 추정법

- 본 연구는 베이지안 추정법을 이용하여 생산경계를 분석함에 따라 추정해야 하는 매개변수와 분산매개변수 모두 확률변수로 가정함
- 추정해야 하는 매개변수와 분산매개변수는 θ 이고, 투입량과 산출량 자료 등을 모두 포괄하여 k 라 하면, 사전분포 $f(\theta)$ 를 설정한 상황에서 각 추정식에 해당되는 우도함수 $f(k/\theta)$ 를 도출함.⁶⁹⁾ 이 정보들을 바탕으로 다음 식(4-8)을 충족하는 사후분포를 도출함⁷⁰⁾

69) 권오상, 조현경(2020), p.10.

70) 권오상, 조현경(2020), p.10.

$$f(\theta|k) \propto f(k|\theta)f(\theta) \tag{4-9}$$

- 매개변수와 분산매개변수의 사전분포는 선행연구들을 참고하여 다음과 같이 가정함.
 - $\{\alpha_0, \alpha_{\bar{y}}, \alpha_k, \alpha_l, \alpha_{TE}, \alpha_{RE}, \alpha_{kl}, \alpha_{kTE}, \alpha_{kRE}, \alpha_{lTE}, \alpha_{lRE}, \alpha_{TERE}, \alpha_{k\bar{y}}, \alpha_{l\bar{y}}, \alpha_{TE\bar{y}}, \alpha_{RE\bar{y}}, c_i, v_{i,t}, u_{i,t}^*\}$ 는 정규분포 혹은 반정규분포를 따르는 확률분포로 간주하였음.
 - 분산매개변수는 TRE 모형의 경우 c_i 의 분산을 포함하여 $\{\sigma_c, \sigma_v, \sigma_u\}$ 에 대해 정의하여야 하며, TFE는 $\{\sigma_v, \sigma_u\}$ 에 대해서만 정의함. 분산매개변수는 모두 감마분포를 따르는 것으로 가정하였음
- 추정해야 하는 매개변수의 개수가 많아 추정의 효율성을 위하여 Wanke et al.(2020), 권오상, 조현경(2020)이 사용한 MCMC 기법을 이용하여 모형을 추정하는 것으로 함
 - 분석 소프트웨어는 R 소프트웨어 환경에서 Griffin and Steel(2007)이 제안한 winBUGS을 구동하는 'R2WinBUGS'를 이용해 분석하는 것을 제안하나, 모형의 복잡하여 계산시간이 많이 걸릴 수 있어 'R2JAGS' 또는 'Python2JAGS' 이용을 추가 검토하는 것으로 함.

나. 기존 연구와의 차별성

- 기존 생산-환경효율성 분석 연구와의 차별성으로는 1) 비효율성 함수에 정책변수(탄소가격제)를 스케일링 속성을 가정하여 반영함 점, 2) 비효율성 결정요인(탄소가격제)이 내생성이 존재하는 경우 해결방안을 포함한 점, 3) 베이저안 추정법을 이용한 점을 들 수 있음
- Filippini et al.(2014), Tateishi et al.(2020) 등은 비효율성항과 정책변수 등이 선형적 관계를 지니는 것을 가정하였으나, 이 경우 비효율성항의 분포가 이분산성을 지니며, 더불어 분석의 통계적 근거가 부족함. 본 연구는 스케일 속성을 가정하여 동분산성 유지하며, 분석이 지니는 통계적 근거를 보완하고자 하였음
- 비효율성 결정요인이 내생성 문제를 보일 수 있음에 따라 본 연구는 Amsler et al. (2017)이 제안한 도구변수를 이용한 해결방안을 제시함
- 본 모형은 복잡한 비선형 구조를 지녀 우도함수가 매우 복잡한 형태를 띠게 됨. 이에 적절한 사전분포를 부여하고 MCMC 기법을 통해 비효율성을 추정하여 추정의 효율성을 확보하고자 함

4. 향후 연구방향

- 데이터를 적용하여 실제 탄소가격제하의 국가별 생산-환경효율성 추정 수행이 필요함
 - 데이터를 이용해 실증분석하는 과정에서 비효율성 존재에 대한 가설 검정이 사전작업으로 수행되어야 함
 - 확률비 통계(Coelli, 1995) 또는 잔차왜곡도 기반 방법론(Ahmad and Li, 1997)을 적용하여 비효율성 유무를 확인해야 하며, 추정방법론이 베이시안임에 따라 이를 고려한 가설검정이 설계되어야 함.
 - 제안한 모형(안)은 비효율성 항이 반정규분포를 따르는 것으로 가정하였으나, 분석데이터하에서 가장 적합한 오차항분포를 가정해야 함
 - 이 경우 DIC를 통해 효율적인 분포가정을 식별하고 설정할 수 있음
 - 다만 비효율성항이 반정규분포 이외의 분포일 경우에는 TFE를 추정하는 과정은 Greene (2005b)가 제안한 방법이 아닌 Chen et al.(2014) 등이 제안한 내적변환 또는 일차차분 과정의 반영 가능 여부를 검토해야 함
- 지속적 비효율성항을 오차구성항에 포함한 4CSFM으로의 확장을 고려해야 함
 - 지속적 비효율성항을 구분하는 것은 3단계에 걸친 작업을 요함에 따라 본 연구에서 제시하는 분석 모형(안)에는 미포함하였음
 - 그러나 비효율성 개선방안을 도출하기 위해서는 시간가변 비효율성과 지속적 비효율성을 구분할 필요가 있음에 따라 향후 모형을 확장할 필요가 있음
- 탄소가격제 이외의 정책변수를 고려한 생산-환경효율성도 추정되어야 함
 - 탄소가격제 이외의 온실가스 감축 정책이 생산-환경효율성에 미치는 영향 유무 및 방향, 그리고 크기에 대한 분석을 수행할 필요가 있음
 - 이처럼 다양한 정책의 기초자료로 활용될 수 있도록 모형의 활용도를 제고해야 함

참고문헌

[국내문헌]

권오상(2019), 「생산경제학」, 제1판, 서울: 박영사.

권오상(2020), 「환경경제학」, 제4판, 서울: 박영사.

권오상, 조현경(2020), “농가 이질성과 생산기술효율성: 베이지안 확률경계분석”, 「농업경제연구」, 61(4), 한국농업경제학회, pp.1-25.

김길환 외(2019), “확률적 변경모형을 이용한 우리나라 기업의 온실가스배출효율성 추정”, 「Journal of Climate Change Research」, 10(2), 한국기후변화학회, pp.117-128.

[국외문헌]

Ahmad, I. A. and Q. Li(1997), “Testing Symmetry of an Unknown Density Function by Kernel Method”, *Journal of Nonparametric Statistics*, 7, pp.279-293.

Aigner, D. and S. F. Chu(1968), “On Estimating the Industry Production Function”, *The American Economic Review*, 58(4), pp.826-839.

Aigner, D. et al.(1977), “Formulation and Estimation of Stochastic Frontier Production Function Models”, *Journal of Econometrics*, 6(1), pp.15-24.

Ali, M. and J. C. Flinn(1989), “Profit Efficiency among Basmati Rice Producers in Pakistan Punjab”, *American Journal of Agricultural Economics*, 71(2), pp.303-310.

Alvarez, A. et al.(2006), “Interpreting and Testing the Scaling Property in Models Where Inefficiency Depends on Firm Characteristics”, *Journal of Productivity Analysis*, 25(2), pp.201-212.

Amsler, C. et al.(2017), “Endogenous Environmental Variables in Stochastic Frontier Models”, *Journal of Econometrics*, 199(2), pp.131-140.

Badunenko, O. and S. C. Kumbhakar(2017). “Economies of Scale, Technical Change and Persistent and Time-varying Cost Efficiency in Indian Banking: Do Ownership, Regulation and Heterogeneity Matter?”, *European Journal of Operational Research*, 260, pp.789-803.

- Banker, R. D. et al.(1984), "Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis", *Management Science*, 30(4), pp.1078-1092.
- Banker, R. D. and A. Maindiratta(1985), "Nonparametric Analysis of Technical and Allocative Efficiencies in Production", *Unpublished manuscript*.
- Banker, R. D et al.(1993), "Analyzing the Underlying Dimensions of Firm Profitability", *Managerial and Decision Economics*, 14(1), pp.25-36.
- Battese, G. E. and T. J. Coelli(1995), "A Model for Technical Inefficiency Effects in a Stochastic Frontier Production Function for Panel Data", *Empirical Economic*, 20, pp.325-332
- Bibi, Z. et al. (2021), "Technical and Environmental Efficiency of Agriculture Sector in South Asia: a Stochastic Frontier Analysis Approach", *Environment, Development and Sustainability*, 23(6), pp.9260-9279.
- Bravo-Ureta, B. E. and L. Rieger(1991), "Dairy Farm Efficiency Measurement using Stochastic Frontiers and Neoclassical Duality", *American Journal of Agricultural Economics*, 73(2), pp.421-428.
- Caudill, S. B. and J. M. Ford(1993), "Biases in Frontier Estimation Due to Heteroskedasticity", *Economics Letters*, 41(1), pp.17-20.
- Charnes, A. et al.(1978), "Measuring the Efficiency of Decision Making Units", *European Journal of Operational Research*, 2(6): p.16.
- Chen, Y.-Y. et al.(2014), "Consistent Estimation of the Fixed Effects Stochastic Frontier Model", *Journal of Econometrics*, 181(2), pp.65-76.
- Coelli, T. J.(1995), "Estimators and Hypothesis Tests for a Stochastic Frontier Function: A Monte Carlo Analysis", *Journal of Productivity Analysis*, 6(4), pp.247-268.
- Cornwell, C. et al.(1990), "Production Frontiers with Cross-Sectional and Time-Series Variation in Efficiency levels", *Journal of Econometrics*, 46(2), pp.185-200.
- Cohen, M. A. and A. Tubb(2018), "The Impact of Environmental Regulation on Firm and Country Competitiveness: A Meta-analysis of the Porter Hypothesis", *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 5(2), pp.371-399.
- Colombi, R. et al.(2014), "Closed-skew Normality in Stochastic Frontiers with Individual

- Effects and Long/Short-run Efficiency”, *Journal of Productivity Analysis*, 42(2), pp.123-136.
- Debreu, G.(1951), “The Coefficient of Resource Utilization”, *Econometrica*, 19(3), pp.273-292.
- Domnguez-Molina, J. A. et al.(2003), “Skew Normality in Stochastic Frontier Analysis” *Comunicación Técnica*, No I-03-18/06-10-2003 (PE/CIMAT).
- Färe, R. and C. A. K. Lovell(1978), “Measuring the Technical Efficiency of Production”, *Journal of Economic Theory*, 19, pp.150-162.
- Färe, R. et al.(1989), “Multilateral Productivity Comparisons When Some Outputs Are Undesirable: A Nonparametric Approach”, *The Review of Economics and Statistics*, 71(1), pp.90-98
- Färe, R. et al.(1993), “Multiple Outputs and ‘Homotheticity’”, *Southern Economic Journal*, 60(2), pp.287-296.
- Färe, R. et al.(1994), “Productivity Growth, Technical Progress, and Efficiency Change in Industrialized Countries”, *The American Economic Review*, 84(1), pp.66-83.
- Färe, S. G. et al.(2005), “Characteristics of a Polluting Technology: Theory and Practice”, *Journal of Econometrics*, 126, pp.469-492.
- Farrell, M. J.(1957), “The Measurement of Productive Efficiency”, *Journal of the Royal Statistical Society*, 120(3), pp.253-290.
- Filippini, M. et al.(2014), “Impact of Energy Policy Instruments on the Estimated Level of Underlying Energy Efficiency in the EU Residential Sector”, *Energy Policy*, 69, pp.73-81.
- Filippini, M. and W. H. Greene(2016), “Persistent and Transient Productive Inefficiency: A Maximum Simulated Likelihood Approach”, *Journal of Productivity Analysis*, 45, pp.187-196.
- Greene, W. H.(1993), *The Econometric Approach to Efficiency Analysis*, Oxford: Oxford University Press.
- Greene, W. H.(2002), “Alternative Panel Data Estimators for Stochastic Frontier Models”, *Unpublished Manuscript*.

- Greene, W. H.(2005a), "Fixed and Random Effects in Stochastic Frontier Models", *Journal of Productivity Analysis*, 23(1), pp.7-32.
- Greene, W. H.(2005b), "Reconsidering Heterogeneity in Panel Data Estimators of the Stochastic Frontier Model", *Journal of Econometrics*, 126(2), pp.269-303.
- Griffin, J. E. and M. Steel(2007), "Bayesian Stochastic Frontier Analysis using WinBUGS", *Journal of Productivity Analysis*, 27(3), pp.63-176.
- Hansen, C. et al.(2010), "Instrumental Variables Estimation with Flexible Distributions", *Journal of Business and Economic Statistics*, 28, pp.13-25.
- Honma, S. and J.-L. Hu(2024), "How Does Environmental Policy Stringency Affect Inefficiency of Firms? New Evidence from International Firm-Level Data", *Circular Economy and Sustainability*, 4(2), pp.1539-1558.
- IMF(2024), "Policy Options for Climate Change Mitigation: Emission Trading Schemes in Asia-Pacific".
- Jin, T. and J. Kim(2019), "A Comparative Study of Energy and Carbon Efficiency for Emerging Countries using Panel Stochastic Frontier Analysis", *Scientific Report*, 9, pp.1-8.
- Jondrow, J. et al.(1982), "On the Estimation of Technical Inefficiency in the Stochastic Frontier Production Function Model", *Journal of econometrics*, 19(2), pp.233-238.
- Kalirajan, K. P.(1990), "On Measuring Economic Efficiency", *Journal of Applied Econometrics*, 5(1), pp.75-85.
- Karakplan, M. U. and L. Kutlu(2013), "Handling Endogeneity in Stochastic Frontier Analysis". *Unpublished manuscript*.
- Koopmans, T. C.(1951), *An Analysis of Production as an Efficient Combination of Activities. Activity Analysis of Production and Allocation*, London: John Wiley and Sons Inc.
- Koop, G. et al.(1995), "Posterior Analysis of Stochastic Frontier Models using Gibbs Sampling", *Computational Statistics*, 10(10), pp.353-373.
- Kumbhakar, S. C. et al.(1991), "A Generalized Production Frontier Approach for Estimating Determinants of Inefficiency in US Dairy Farms", *Journal of*

Business and Economic Statistics, 9(1), pp.279-286.

Kumbhakar, S. C. and, C. A. K. Lovell(2000), *Stochastic Frontier Analysis*, Cambridge : Cambridge University Press.

Kumbhakar, S. C. et al.(2014), “Technical Efficiency in Competing Panel Data Models: A Study of Norwegian Grain Farming”, *Journal of Productivity Analysis*, 41(2), p.321-337.

Kumbhakar, S. C. et al.(2017), *Stochastic Frontier Analysis: Foundations and Advances*, working paper, University of Miami.

Kumbhakar, S. C and H. -P. Lai(2022), “Recent Advances in the Panel Stochastic Frontier Models: Heterogeneity, Endogeneity and Dependence”, *International Journal of Empirical Economics*, 1(1).

Kutlu, L.(2010), “Battese-Coelli Estimator with Endogenous Regressors”, *Economics Letters*, 109, pp.79-81.

Lai, H. -P. and S. C. Kumbhakar(2018a), “Endogeneity in Panel Data Stochastic Frontier Model with Determinants of Persistent and Transient Inefficiency”, *Economics Letters*, 162, p.5-9.

Lai, H.-P. and S. C. Kumbhakar(2018b). “Panel Data Stochastic Frontier Model with Determinants of Persistent and Transient Inefficiency”, *European Journal of Operational Research*, 271(2), pp.746-755.

Lai, H. -P and S. C. Kumbhakar(2021). “Panel Stochastic Frontier Model with Endogenous Inputs and Correlated Random Components”, *Journal of Business and Economic Statistics*, 41(1), pp.80-96.

Latruffe, L. et al.(2016). “Subsidies and Technical Efficiency in Agriculture: Evidence from European Dairy Farms”, *American Journal of Agricultural Economics*, 99(3), pp.783-799.

Lee, Y. and P. Schmidt(1993), “A Production Frontier Model with Flexible Temporal Variation in Technical Efficiency”, *The Measurement of Productive Efficiency*, Oxford: Oxford University Press

Meeusen, W. and J. van den Broeck(1977), “Efficiency Estimation from Cobb-Douglas

- Production Functions with Composed Error”, *International Economic Review*, 18(2), pp.435-444.
- Mo, J. Y. and W. Jeon(2022), “Determinants of Firm-level Energy Productivity – Evidence from the Korean Emission Trading Scheme”, *Energy and Environment*, 33(5), pp.897-915.
- Mundlak, Y.(1978), “On the Pooling of Time Series and Cross-section Data”, *Econometrica*, 46(1), pp.69-85
- Neyman, J. and E. L. Scott(1948), “Consistent Estimation from Partially Consistent Observations”, *Econometrica*, 16, p.1-32.
- Otsuka, A.(2023), “Impacts of Enhancing Regional Network Economies on Regional Productivity and Productive Efficiency in Japan: Evaluation from Stochastic Frontier Analysis”, *Asia-Pacific Journal of Regional Science*, 8, pp.25-43.
- Pitt, M. M. and L.-F. Lee(1981), “The Measurement and Sources of Technical Inefficiency in the Indonesian Weaving Industry”, *Journal of Development Economics*, 9(1), pp.43-64.
- Poter, M.(1991), “America’s Green Strategy”, *Scientific American*, 264.
- Puertas, R and L. Marti(2021), “International Ranking of Climate Change Action: An Analysis using the Indicators from the Climate Change Performance Index”, *Renewable and Sustainable Energy Review*, 148.
- Reifschneider, D. and R. Stevenson(1991), “Systematic Departures from the Frontier: A Framework for the Analysis of Firm Inefficiency”, *International Economic Review*, 32(1), pp.715-723.
- Reinhard S. et al.(2000), “Environmental Efficiency with Multiple Environmentally Detrimental Variables: Estimated with SFA and DEA”, *European Journal of Operational Research*, 121(2), pp.287-303.
- Ritter, C. and L. Simar(1997), “Pitfalls of Normal-gamma Stochastic Frontier Models”, *Journal of Productivity Analysis*, 8(2), pp.167-182.
- Ruggiero, J.(2000), “Measuring Technical Efficiency”, *European Journal of Operational Research*, 121, pp.138-150.

- Schmidt, P. and R. C. Sickles(1984), "Production Frontier and Panel Data", *Journal of Business and Economic Statistics*, 2(4), pp.367-374.
- Schmidt, P.(1985), "Frontier Production Functions", *Econometric Reviews*, 4(2), pp.289-328.
- Simar, L. et al.(1994), "Stochastic Frontiers Incorporating Exogenous Influences on Efficiency". *Discussion Papers*, No. 9403, Institut de Statistique, Universite de Louvain.
- Simar, L. and P. W. Wilson(1998), "Sensitivity Analysis of Efficiency Scores: How to Bootstrap in Nonparametric Frontier Models", *Management Science*, 44(1), pp.49-61.
- Tateishi, H. R. et al.(2020), "Economic and Environmental Efficiencies of Greenhouse Gases' Emissions under Institutional Influence", *Technological Forecasting and Social Change*, 161.
- Tran, K. C. and E. G. Tsionas(2013), "GMM Estimation of Stochastic Frontier Models with Endogenous Regressors", *Economics Letters*, 118, pp.233-236.
- Van den Broeck et al.(1994), "Stochastic Frontier Models: A Bayesian Perspective", *Journal of Econometrics*, 61, pp.273-303.
- Waal, T. et al.(2020), "Multi-source Statistics: Basic Situations and Methods", *International Statistical Review*, 88(1).
- Wang, H.-J.(2002), "Heteroscedasticity and Non-monotonic Efficiency Effects of a Stochastic Frontier Model", *Journal of Productivity Analysis*, 18(2), pp.241-253.
- Wang, H.-J. and P. Schmidt(2002), "One-step and Two-step Estimation of the Effects of Exogenous Variables on Technical Efficiency Levels", *Journal of Productivity Analysis*, 18, pp.129-144.
- Wang, H.-J. and C.-W. Ho(2010), "Estimating Fixed-effect Panel Stochastic Frontier Models by Model Transformation", *Journal of Econometrics*, 157(2), pp.286-296.
- Wanke, P. et al.(2020), "Environment Drivers and Technical Efficiency in the Chinese Energy Industry: A Robust Bayesian Stochastic Frontier Analysis", *Computers*

and Industrial Engineering, 144.

[온라인 자료]

Climate Policy Database, “Policies”, <https://climatepolicydatabase.org/>, 검색일: 2024.11.22.

EDGAR 홈페이지, “v8.0_GHG 1970-2022(CO₂, CH₄, N₂O, F-gases)”, https://edgar.jrc.ec.europa.eu/dataset_ghg80, 검색일: 2024.11.26.

Harvard university Growth lab 홈페이지, <https://growthlab.hks.harvard.edu/>, 검색일: 2024.11.20.

IEA, “World Energy Balances”, <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-balances>, 검색일: 2024.11.23.

Worldbank Carbon Pricing Dashboard, “Compliance Mechanisms”, <https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/>, 검색일: 2024.11.22.

Worldbank Carbon Pricing Dashboard, “Download Data”, <https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/>, 검색일: 2024.11.22.

Worldbank Carbon Pricing Dashboard, “GHG Emissions Coverage”, <https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/>, 검색일: 2024.11.22.

Worldbank Carbon Pricing Dashboard, “What is Carbon Pricing?”, <https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/>, 검색일: 2024.11.22.

University of Groningen, “Penn World Table”, <https://www.rug.nl/ggdc/productivity/pwt/pwt-releases/pwt100>, 검색일: 2024.11.23.

※ 본 책자는 환경표지 인증을 받은 용지로 인쇄되었습니다.



기후환경정책에 따른 국가별 생산효율성 분석을 위한 방법론 고찰

KEI 한국환경연구원
Korea Environment Institute

(30147) 세종특별자치시 시청대로 370 세종국책연구단지 B동(과학·인프라동)
전화 044-415-7777 팩스 044-415-7799 www.kei.re.kr



9 791159 809637
ISBN 979-11-5980-963-7