

혁신 활동 및 환경 정책이 탄소 생산성에 미치는 영향: 배출권 거래제 참여 기업들을 대상으로

모정윤*[†]

*조선대학교 경제학과 조교수

Impact of Technological Innovation and Environmental Policy on Carbon Productivity: Evidence from Korean Manufacturing Firms Participating in an Emission Trading Scheme

Mo, Jung Youn*[†]

*Assistant Professor, Department of economics, Chosun University, Gwangju, Korea

ABSTRACT

In December 2020, the Korean government announced the “2050 Carbon Neutral Promotion Strategy.” For the paradigm shift to a carbon-neutral society, it is necessary to examine factors affecting carbon productivity considering the two goals of carbon reductions and economic growth. This study investigates the potential factors affecting carbon productivity of firms participating in the Korean Emission Trading Scheme (KETS) and examines the relationship between innovation activity such as R&D investment and environmental policy with carbon productivity. In this study, carbon productivity is defined as the total output divided by total carbon emissions. It also considers innovation effect on environmental performance of firms by industry because each industry has a different production process and carbon reduction ability. The results show that carbon productivity has been influenced by innovation activity such as R&D investment and introduction of first and second phases of KETS. In addition, technological progress and environmental policy effects on environmental performance vary across industries. Thus, in this study, determinants of carbon productivity are analyzed and compared by industry. The results show that innovation activities have a positive relationship with carbon productivity by all industries at the 5% significance level. On the other hand, it is confirmed that the effect of environmental policy varies by industry.

Key words: Carbon Productivity, Emission Trading Scheme, Innovation Activity, Manufacturing Industry, Technical Progress

1. 서론

최근 정부는 효율적이며 실효성 있는 온실가스 감축을 위해 ‘2050 탄소중립 추진전략’ 및 제3차 배출권거래제 기본계획(안)을 확정·발표하였다. 먼저 2020년 12월 발표된 ‘2050 탄소중립 추진전략’은 경제구조를 개편하고 저탄소 산업 육성 생태계를 조성하며 공정 전환을 달성하는 등 탄소중립사회로의 패러다임 변화를 위한 전략들로 구성되어

있다. 동 전략의 기본 목표는 경제 성장과 탄소중립을 동시에 달성할 수 있는 사회적 기반 및 경제시스템의 구축이다. 또한 제3차 배출권거래제 기본계획(안)은 배출권 거래제 1·2차 계획기간의 한계를 보완하고 배출권거래제 시스템의 고도화 달성을 위해 실효적인 온실가스 감축 추진, 할당방식 개선 및 시장기능 확대 등을 중점 전략으로 수립하였다. 동 정책들이 실효성을 거두기 위해서는 산업계의 적극적이며 자발적인 온실가스 감축 유도가 필수적이나

[†]Corresponding author : jymo@chosun.ac.kr (61452, Department of Economics, Chosun University, Gwangju, Republic of Korea. Tel. +82-62-230-6825) ORCID [모정윤 0000-0002-1258-7246](https://orcid.org/0000-0002-1258-7246)

두 정책 모두 산업부문의 적극적인 온실가스 감축 유도 및 기술개발 지원을 위한 구체적인 전략이 미흡한 한계가 존재한다. 탄소 중립과 경제 성장이라는 상충되는 두 가지 목표를 동시에 달성하기 위해서는 전환의 가장 중요한 대상인 산업부문의 부담을 최소화하면서 산업계의 자발적이며 비용효과적인 온실가스감축을 유도해야 한다. 이를 위해서는 세부 산업별로 온실가스 배출을 고려하여 생산이 얼마나 효율적으로 이루어지고 있는지를 추정하고 이를 바탕으로 탄소 생산성 제고에 유의미한 영향을 주는 요인들을 발굴하여 효과적인 중장기 온실가스 감축 전략을 수립해야 한다.

탄소중립사회로의 패러다임 전환을 위해서는 온실가스 감축 및 경제 성장 등 두 가지 목표를 모두 고려한 개념인 탄소 생산성을 살펴보고 산업 및 공정의 특성을 고려한 탄소 생산성 제고 정책을 설계하여 실행하는 전략을 수립하여야 한다. 이를 위해서 동 연구에서는 국내 배출권거래제 2차 계획기간에 참여하고 있는 전체 기업들을 대상으로 기업들의 탄소 생산성에 영향을 주는 다양한 결정 요인들을 살펴보고 특히 기업의 혁신 활동과 배출권거래제 도입 등의 환경 정책이 생산성 제고에 어떤 영향을 미치는지 분석하고자 한다. 혁신 활동 및 환경 정책 도입 등과 탄소 생산성 간의 관계는 산업별로 다르게 나타날 수 있다. 산업의 에너지소비구조 및 생산 공정이 상이하고 현재의 상황에서 도입 및 실행이 가능한 온실가스 감축 능력이 상이하기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 산업별로 탄소 생산성에 영향을 미치는 다양한 결정요인을 비교 분석하여 산업별 중장기 탄소 생산성 제고 정책과 관련된 시사점을 도출하고자 한다. 본 연구는 세 가지 부문에서 기존의 선행 연구와의 차별성이 존재한다. 첫째, 본 연구는 배출권거래제에 참여하는 전체 기업들을 대상으로 탄소 생산성을 추정하여 기업들의 탄소 생산성에 영향을 미치는 요인 중 혁신활동 및 환경정책의 효과를 실증분석하였다. 둘째, 배출권거래제 참여기업들을 세 가지 산업군으로 구분하여 세부 산업별 탄소 생산성에 영향을 미치는 요인 및 그 강도를 비교 분석하였다. 마지막으로 본 연구에서는 실증 분석 결과를 바탕으로 산업별 탄소 생산성 제고를 위한 정책적 시사점을 도출하였다. 본 연구의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 탄소 생산성과 관련된 이론적 배경을 고찰하고 연구가설을 수립하였다. 제3장에서는 국내 배출권거래제 참여 기업들의 통계자료 및 연구 방법론을 소개하였다. 제4장에서는 혁신활동 및 환경정책과 탄소 생산성과의 관계

를 실증 분석하고, 제5장에서는 탄소 생산성 제고를 위한 정책적 방안 및 시사점 등을 도출하였다.

2. 이론적 배경 및 연구가설

탄소 배출 대비 산출이 얼마나 효율적으로 이루어지고 있는가를 의미하는 탄소 생산성을 추정하기 위해 다양한 분석방법 및 지표들이 많은 선행연구들에 의해 개발되어져 왔다. 먼저 Kaya and Yokobori (1997)는 지속 가능한 발전의 성과를 측정하기 위한 지표로서 해당 국가 또는 산업의 총 산출을 총 탄소 배출량으로 나눈 탄소 생산성의 개념을 제시하였다. 동 지표는 지표의 산출과 해석이 용이하며 환경을 고려하여 경제성장의 성과를 측정할 수 있다는 장점이 존재한다.

탄소 배출을 최소화하며 동시에 경제 성장을 지속하려면 에너지효율 향상 및 저탄소 기술 개발을 통해 공정에서 발생하는 온실가스를 감축하거나 새로운 생산 공정의 개발 및 도입을 통해 산출물 증대 및 온실가스 감축을 동시에 달성하여 탄소 생산성을 향상시켜야 한다. 본 연구에서는 기업들의 탄소 생산성에 영향을 미치는 다양한 요인 중 혁신 활동과 환경 정책의 효과를 살펴보고 산업별 동 요인들의 차별적 효과 및 강도를 살펴보고자 한다. 연구개발투자 및 특허출원과 같은 기업의 활발한 혁신 활동은 최종 산출물의 품질 향상, 현재 생산 공정의 에너지효율 향상·저탄소 관련 기술의 개발 및 신공정 도입 등을 유도하여 최종적으로 기업의 탄소 생산성 제고에 유의미한 효과를 가져올 수 있다. 또한 탄소세 및 배출권거래제와 같은 환경 정책은 기업들로 하여금 한계탄소감축비용을 시장 가격에 내재화하여 탄소 감축과 관련되어 있는 기술 투자를 장려할 수 있다.

먼저 기업의 연구개발투자와 특허출원 등의 혁신 활동과 탄소 생산성 간의 관계를 살펴본 선행연구로는 Choi (2011), Mensah et al. (2018), Du and Li (2019), Alam et al. (2019) 및 Fan et al. (2021) 등이 존재한다. 또한 탄소 배출권거래제 등의 환경 정책과 탄소 생산성의 관계를 분석한 연구로는 Jaraité et al. (2012), Zhang et al. (2016) 및 Yu et al. (2017) 등이 존재한다. Choi (2011)은 G20 국가 데이터를 대상으로 해당 국가들의 녹색 생산성을 추정 후 생산성에 영향을 주는 결정요인들을 비교 분석하였다. 그 결과 국가 총생산 및 다양한 생산 요소의 집약도 등이 정부의 환경 정책보다 탄소 생산성에 더 큰 영향을 미친다는

결론을 도출하였다. Mensah et al. (2018)은 28개의 OECD 국가 자료를 바탕으로 혁신 활동과 탄소 배출량과의 관계를 살펴보았다. 분석 결과 혁신 활동은 탄소감축에 중요한 요인이 될 수 있으나 그 효과 및 강도는 나라마다 다르다는 결론을 도출하였다. Du and Li (2019)는 1992년부터 2012년까지의 전 세계 데이터를 사용하여 에너지 기술 특허와 탄소 생산성 사이의 관계를 분석하였다. 그 결과 저탄소 에너지 기술 특허는 소득 수준이 높은 국가의 탄소 생산성에 영향을 미칠 수 있다는 결론을 도출하였다. Alam et al. (2019)는 G-6 나라의 기업 자료를 바탕으로 연구개발투자액과 탄소 생산성과의 관계를 분석하였다. 분석 결과 혁신 활동은 탄소 생산성 제고에 통계적으로 유의미한 영향을 미친다는 결론을 도출하였다. Fan et al. (2021) 등은 1995년부터 2015년까지 중국의 기업 데이터를 기반으로 다양한 기술들이 탄소 생산성에 미치는 효과를 살펴보았다. 그 결과 에너지 효율 향상 기술이 탄소 생산성 제고에 통계적으로 유의미한 효과를 지니고 있다는 점을 밝혀내었다.

또한 Jaraité et al. (2012)은 유럽 연합의 데이터를 기반으로 EU ETS가 발전 산업의 생산성에 미치는 효과를 분석하였다. 그 결과 배출권가격의 상승이 발전 산업의 생산성 및 효율성 제고에 통계적으로 유의미한 효과를 가져올 수 있다는 점을 밝혀내었다. Zhang et al. (2016)은 2006년부터 2014년까지 중국의 산업 데이터를 활용하여 배출권 거래제 도입은 기업의 탄소 생산성 제고에 영향을 미친다는 결론을 도출하였다. Yu et al. (2017)는 국내 배출권거래제 참여기업들을 대상으로 온실가스 감축 정책과 배출량과의 관계를 실증 분석하였다. 그 결과 대부분의 산업부문은 배출권거래제로 인한 정책효과가 있으나 발전 산업은 온실가스 감축의 효과가 없다는 결론을 도출하였다.

기업의 혁신 활동 및 환경 정책 도입 등의 요인들과 탄소 생산성과의 관계를 분석한 선행 연구들을 통해 탄소 생산성 제고에 영향을 주는 요인 및 강도는 국가 및 지역별로 상이할 수 있다는 결론을 도출하였다. 따라서 본 연구에서는 국내 배출권거래제 참여 기업들을 대상으로 탄소 생산성에 영향을 주는 다양한 결정요인들을 발굴하고 요인들의 효과를 실증 분석한 후 아래의 연구 가설들을 검증해 보고자 한다.

- 가설 1: 혁신 활동은 국내 배출권거래제 참여기업들의 탄소 생산성 제고에 긍정적 효과를 미친다.
- 가설 2: 배출권거래제 도입은 참여기업들의 탄소 생산성 향상에 긍정적 효과를 미친다.
- 가설 3: 혁신 활동 및 환경 정책이 탄소생산성 제고에 미치는 효과는 산업마다 다를 것이다.

위의 세 가지 가설을 검증하기 위해 본 연구에서는 패널 분석 방법론을 기반으로 탄소생산성 결정 요인을 분석하였다. 분석에 사용된 자료들은 2011년부터 2019년까지 연도별 배출권거래제 2차 계획기간 전체 참여기업들의 통계 자료로써 횡단면과 시계열 자료의 성격이 혼재되어 있다. 따라서 패널 분석을 적용하여 자기상관 및 오차항의 이질성 문제 등을 해결하며 설명변수의 내생성 문제를 완화하였다. 탄소 생산성에 영향을 주는 다양한 변수들을 혁신활동, 탄소배출권거래제 도입 및 본격시행, 기업특성변수 및 추세 등으로 선정 후 변수 중 각 요인들이 탄소 생산성에 미치는 효과를 모형을 통하여 검증하고자 한다.

3. 연구자료 및 방법

3.1 분석 자료

본 연구의 분석에 사용한 배출권거래제 2차 계획기간 참여기업들의 2011년부터 2019년까지의 연도별 탄소 배출량은 배출권등록부시스템(ETRS) 통계자료 중 인증배출량 자료를 사용하였다. 참여 기업들의 연도별 에너지사용량은 온실가스종합정보센터(GIR)의 자료를 활용하였다. 관련 기업들의 연도별 매출액, 자본, 부채 및 연구개발투자액¹⁾ 등의 재무제표 자료는 KISVALUE 데이터베이스를 기반으로 획득하였다. Table 1에는 사용한 자료 중 배출권거래제 참여 기업들의 연도별 탄소 배출량, 매출액 및 R&D 투자액 자료들의 추세가 정리되어 있다. 배출권거래제 참여 기업들의 탄소 배출량의 추세를 살펴보면 배출량의 경우 2015년 소폭 감소 후 지속적인 증가 추세를 유지, 2019년 이후 큰 폭으로 감소하였다. 매출액은 관측 기간 동안 감소 추세를 보이다 2019년 큰 폭으로 증가하였다. 반면 연도별 R&D 투자액 합계는 2011년 기준 약 13조 원에서 2019년도 27조 원으로 연평균 8.3%의 성장률로 크게 증가하였다.

1) 분석에 사용한 재무자료의 경우 2000년도 기준, GDP 디플레이터를 활용하여 실질액으로 변환하여 사용하였다.

Table 1. The trend of data

	Carbon emissions (unit: Million tons)	Total sales (unit: Billion won)	Total R&D (unit: Billion won)
2011	518	1,080,000	13,200
2012	536	1,140,000	14,600
2013	555	1,150,000	17,800
2014	572	1,120,000	17,700
2015	564	1,020,000	16,700
2015	574	969,000	17,700
2017	592	1,040,000	19,300
2018	620	985,000	21,300
2019	573	1,210,000	27,000

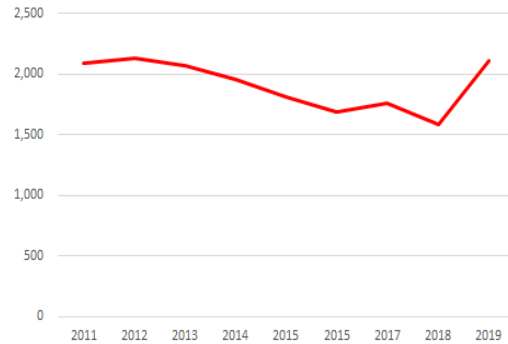


Fig. 1. The trends of the carbon productivity

Table 2. Sample composition

	Number of firms	Total Carbon emissions (unit: Million tons)		Total sales (unit: Billion won)	
Building	40 (6.10%)	36.90	(0.72%)	659,000.00	(6.38%)
Mining	5 (0.76%)	5.45	(0.11%)	1,820.00	(0.02%)
Machine/Equipment	15 (2.29%)	9.14	(0.18%)	104,000.00	(1.01%)
Display	5 (0.76%)	97.53	(1.90%)	411,000.00	(3.98%)
Wood/Timber	7 (1.07%)	3.29	(0.06%)	9,920.00	(0.10%)
Semiconductor	24 (3.66%)	115.00	(2.24%)	1,560,000.00	(15.11%)
Energy/generation	19 (2.90%)	2,200.00	(42.92%)	1,110,000.00	(10.75%)
Nonferrous metals	29 (4.42%)	68.05	(1.33%)	393,000.00	(3.81%)
Production complex	14 (2.13%)	115.00	(2.24%)	24,400.00	(0.24%)
Petrochemicals	103 (15.70%)	453.00	(8.84%)	1,190,000.00	(11.53%)
Textile/apparels	19 (2.90%)	40.91	(0.80%)	129,000.00	(1.25%)
Water	2 (0.30%)	6.59	(0.13%)	599.00	(0.01%)
Cement	30 (4.57%)	347.00	(6.77%)	38,400.00	(0.37%)
Ceramics	10 (1.52%)	14.07	(0.27%)	7,940.00	(0.08%)
Glass	21 (3.20%)	42.45	(0.83%)	72,900.00	(0.71%)
Food/Beverage	28 (4.27%)	25.00	(0.49%)	246,000.00	(2.38%)
Automobile	39 (5.95%)	39.25	(0.77%)	1,140,000.00	(11.04%)
Electronics	28 (4.27%)	29.91	(0.58%)	539,000.00	(5.22%)
Refinery	6 (0.91%)	214.00	(4.18%)	784,000.00	(7.59%)
Pulp/paper	44 (6.71%)	60.42	(1.18%)	83,300.00	(0.81%)
Shipbuilding	12 (1.83%)	20.97	(0.41%)	311,000.00	(3.01%)
Complex energy	21 (3.20%)	93.91	(1.83%)	252,000.00	(2.44%)
Steel/metals	45 (6.86%)	923.00	(18.01%)	610,000.00	(5.91%)
Telecommunications	9 (1.37%)	29.73	(0.58%)	463,000.00	(4.48%)
Waste	74 (11.28%)	121.00	(2.36%)	4,530.00	(0.04%)
Aviation	7 (1.07%)	14.17	(0.28%)	179,000.00	(1.73%)

본 연구에서는 탄소생산성을 배출권거래제 참여 기업들의 매출액을 탄소배출량으로 나눈 값으로 정의한다. 즉, 탄소 배출 대비 기업의 매출액을 평가하여 탄소배출량을 고려한 상태에서 기업의 매출액이 상대적으로 높을 경우 탄

소생산성이 높은 기업으로 평가한다. Fig. 1은 총 매출액을 탄소 배출량을 나누어 도출된 탄소 생산성의 연도별 추세를 요약하고 있다, Fig. 1을 살펴보면 배출권거래제 참여기업들의 탄소 생산성은 2011년 이후 계속 감소하는 추세를

유지하다 2019년도 큰 폭으로 상승하였음을 알 수 있다.

Table 2는 분석 자료의 분포 및 산업별 매출액·탄소배출량의 총량이 요약되어 있다. 가장 많은 기업들이 석유화학산업(15.7%)에 종사하고 있으며 그 다음으로 는 폐기물(11.3%) 및 철강 산업(6.9%)에 많은 기업들이 종사하고 있다. 탄소배출량이 가장 많은 업종은 발전/에너지산업으로 전체 누적 탄소배출량 중 약 42.9%의 탄소 배출을 차지한다. 누적 매출액이 가장 높은 산업은 반도체산업으로 전체 누적 매출액의 약 15.1%를 차지하였다.

분석을 위해 본 연구에서는 모든 자료를 로그 변환하여 사용하였으며 자료들의 기초 통계량 및 상관관계 분석 결과는 Table 3 및 Table 4에 정리되어 있다. Table 4의 결과를 토대로 탄소 생산성은 부채 비율을 제외한 모든 변수와 통계적으로 유의미한 양의 상관관계가 존재하고 있음을 알 수 있다.

3.2 분석 모형

배출권 거래제 전체 참여 기업들을 대상으로 연구개발투자 등의 혁신 활동 및 환경 정책이 기업들의 탄소 생산성에 미치는 효과를 분석하기 위해 동 연구에서는 아래의

식 (1)과 같은 패널 모형을 구성하였다.

$$\begin{aligned} \text{Incp}_{it} = & \alpha + \beta_1(\ln\text{AR\&D})_{it} + \beta_2(\text{phase1})_{it} + \beta_3(\text{phase2})_{it} \\ & + \beta_4 \Sigma(\text{firm controls})_{it} + \beta_5(t)_{it} + \beta_6(\text{industry effects}) \\ & + \varepsilon_{it} \end{aligned} \tag{1}$$

위의 식 (1)에서 Incp_{it} 는 종속변수로써 t 기의 i 기업의 매출액을 탄소배출량을 나눈 탄소 생산성을 의미하고, $\ln\text{AR\&D}_{it}$ 는 t 기의 i 기업의 3년 동안의 누적 연구개발투자액으로써 기업의 혁신 활동을 대리하는 설명변수이다. 일반적으로 기업들의 혁신 활동의 결과는 탄소생산성 제고의 성과로 바로 연결되지는 않는다. 즉, 혁신 활동의 도입 및 실행에 따른 시차가 존재한다. 또한 탄소 생산성 제고를 위해서는 당해의 연구개발투자액의 효과뿐만 아니라 주어진 기간 동안의 누적효과가 필요하기 때문에 본 연구에서는 당해 연도의 연구개발투자액이 아니라 3년 동안의 누적 연구개발투자액을 혁신활동을 대리하는 설명변수로 사용하였다. 또한 phase1 및 phase2는 배출권거래

Table 3. Descriptive statistics

Variables	Mean	Std.dev	Min	Max	Skewness	Kutosis
carbon productivity	14.816	1.674	5.836	20.557	-0.278	3.519
accumulated R&D	21.990	2.853	11.002	31.439	-0.111	3.725
firm's age	2.959	0.952	0.000	4.431	-0.957	3.539
firm size	6.046	1.671	0.000	11.560	0.355	3.267
Energy Consumption Ratio (ECS)	-1.600	1.930	-13.389	8.084	-1.668	9.182
capital	26.119	2.004	16.130	32.812	0.077	3.712
debt ratio	-1.246	0.495	-6.035	-0.073	-2.443	14.961

Table 4. Correlation matrix

	lncp	lnAR&D	lnage	lnsize	lnECS	lncapital	lndebt ratio
lncp	1.000						
lnAR&D	0.309***	1.000					
lnage	0.189***	0.051**	1.000				
lnsize	0.565***	0.615***	0.248***	1.000			
lnECS	0.149***	-0.006	0.043***	-0.013	1.000		
lncapital	0.445***	0.588***	0.214***	0.791***	-0.072***	1.000	
lndebt ratio	-0.001	-0.027	-0.105***	0.057***	-0.034**	-0.142***	1.000

** and *** denotes significant correlation at a 5% and 1% level significance.

제 도입(2015년) 및 본격 시행(2018년) 등의 환경 정책이 기업들의 탄소 생산성에 미치는 영향을 살펴보기 위해 설정한 정책 가변수이다. phase 1은 2015년 이전에는 0, 그 이후는 1을 의미하며 phase 2는 2018년 이전에는 0, 그 이후는 1을 의미한다.

기업연령(lnage), 기업의 규모(lnsize), 에너지소비구조(lnECS), 자본(lncapital) 및 부채비율(lndebt ratio) 등 개별 기업의 특성을 나타내는 다양한 설명변수들을 동 모형에 포함하여 기업 특성을 통제하였다. 여기서 에너지소비구조는 개별기업의 전체 에너지소비량(석탄, 석유, 전기 및 가스의 총 소비량) 대비 상대적으로 탄소 배출이 적은 전기 및 가스 소비량의 비율로 정의된다. 기업들이 석유, 석탄, 가스, 전력 중 보다 탄소 배출이 낮은 에너지원(가스 또는 전력)을 사용하여 산출물을 생산할 경우 같은 양의 산출물을 생산하더라도 에너지소비과정에서의 탄소 배출을 줄일 수 있기 때문에 전체 에너지소비 대비 상대적으로 탄소 배출이 적은 에너지소비의 비율로 정의되는 에너지소비구조는 기업들의 서로 다른 탄소 생산성을 설명할 수 있는 독립변수로 선택되었다. 또한 기업의 규모는 종업원 수가 클수록 규모가 커지는 경향이 존재하므로 개별 기업 종사자수의 로그 변환값으로 정의하였다. 마지막으로 시간 효과를 통제하기 위해 추세(t)를 모형에 반영하였고 산업별 이질성을 통제하기 위해 industry effects 또한 통제변수로 추가하였다.

첫 번째로 Pooled ordinary least squares (OLS) 모형을 기반으로 추정 후, 고정효과모형(fixed effect model)과 확률효과모형(random effect model) 중 보다 분석에 적합한 모형을 선택하기 위해 하우스만 검정(Hausman test)을 실시하고 그 결과를 Table 5에 요약하였다. 그 결과 배출권거래제 참여기업들의 탄소 생산성 패널 분석을 위해서는 고정효과 모형이 확률효과 모형보다 적절하다는 결론을 도출하였다. 따라서 동 연구에서는 분석 대상 기업들의 보이지 않는 특성을 고정변수로 간주하여 분석하는 고정 효과 모형을 기반으로 탄소 생산성과 혁신활동 및 환경 정책 간의 관계를 살펴보고자 한다. 또한 오차항의 자기상관 존재여부를 검정하기 위해 우드리지 검정(Wooldridge test)을 실시한 결과 오차항의 자기상관이 존재하지 않는다는 귀무가설을 채택하여 자기상관을 고려하지 않은 고정효과 모형을 최종 모형으로 선정하였다.

Table 5. Hausman test result

	FE (b)	RE (B)	Difference (b-B)	Sqrt(diag (V _b -V _B)) S.E.
lnAR&D	0.065	0.069	-0.004	0.004
phase1	0.032	0.036	-0.003	.
phase2	0.182	0.179	0.003	.
lnage	0.581	0.377	0.204	0.087
lnage2	-0.181	-0.060	-0.120	0.048
lnsize	0.391	0.558	-0.167	0.028
lnECS	0.009	0.001	0.008	0.001
lncapital	-0.754	-0.706	-0.049	0.030
lndebt ratio	0.002	-0.049	0.051	0.021
t	-0.009	-0.034	0.025	0.009
chi2(10)	102.450			
Prob>chi2	0.000			

b= consistent under Ho and Ha; obtained from Second stage estimation

B= inconsistent under Ha, efficient under Ho; obtained from Frist stage estimation

4. 추정 결과

4.1 모형 추정 결과: 전 산업(All industries)

배출권거래제 2차 계획기간에 참여하는 총 657개의 기업들을 대상으로 탄소 생산성에 영향을 주는 요인들의 효과를 분석한 결과 3년 동안의 누적 연구개발투자액, 배출권거래제 1, 2차 계획기간의 시행, 기업의 연령, 규모 및 에너지소비구조 등이 탄소 생산성에 통계적으로 유의미한 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Table 6를 살펴보면 기업의 혁신활동이 활발할수록 해당 기업의 탄소 생산성 제고에 통계적으로 유의미한 효과가 존재한다고 판단할 수 있다. 환경정책 도입의 성과를 살펴보면, 배출권거래제 1차 및 본격 시행된 2차 계획기간의 도입은 배출권거래제 참여 기업들의 탄소 생산성의 제고에 통계적으로 유의미한 효과를 가져왔다는 결론이 도출되었다. 또한 기업의 연령의 경우 초기에는 탄소 생산성이 증가하다 성숙기에 접어든 이후에는 탄소 생산성이 감소하고 있다. 기업의 규모가 커질수록 탄소 생산성이 통계적으로 유의미하게 증가하였으며 상대적으로 탄소 배출이 적은 에너지원을 많이 소비하는 경우 해당 기업의 탄소 생산성이 증가한다는 결론이 본 연구를 통해 도출되었다.

Table 6. Effects of R&D and KETS on the carbon productivity: all industries

variables	Pooled OLS	Fixed effect (1)	Fixed effect (2)	Fixed effect (3)	Random effect
lnAR&D	0.025* (0.014)			0.065*** (0.012)	-0.005 (0.035)
phase1	-0.007 (0.118)		0.018 (0.025)	0.094*** (0.038)	-1.698 (1.373)
phase2	0.085 (0.191)		0.085** (0.040)	0.224*** (0.062)	-2.144 (2.267)
lnage	0.238 (0.155)	1.107*** (0.084)	1.121*** (0.084)	0.813*** (0.138)	1.040*** (0.330)
lnage2	-0.026 (0.029)	-0.373*** (0.036)	-0.378*** (0.036)	-0.275*** (0.059)	-0.177*** (0.066)
lnsize	0.157*** (0.043)	0.277*** (0.028)	0.277*** (0.028)	0.202*** (0.048)	0.150 (0.109)
lnECS	0.005 (0.015)	0.023*** (0.005)	0.024*** (0.005)	0.019*** (0.007)	0.052 (0.048)
lncapital	0.013** (0.033)	0.100*** (0.020)	0.097*** (0.020)	0.147*** (0.037)	0.166*** (0.083)
lndebt ratio	0.180 (0.080)	0.012 (0.039)	0.013 (0.039)	0.090 (0.068)	0.208 (0.212)
t	0.004 (0.031)	0.051*** (0.007)	0.041*** (0.009)	-0.003 (0.015)	0.390 (0.349)
constant	14.623*** (0.700)	10.750*** (0.576)	10.853*** (0.576)	8.727*** (0.970)	9.137*** (1.990)
Industry effect	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes

*, **, ***Significance at 10%, 5% 1% respectively. The parentheses () denote standard error.

4.2 모형 추정 결과: 산업별(Specific industries)

배출권거래제 참여 기업들의 탄소 생산성에 영향을 주는 변수 및 영향의 강도는 산업마다 다르게 나타날 수 있다. 산

업별로 생산 공정 및 탄소감축기술의 수준 및 적용 가능 정도가 모두 다르기 때문이다. 따라서 3.2장에서는 산업별 탄소 생산성 결정 모형을 구축하여 산업별로 탄소 생산성에 영향을 주는 요인들을 살펴보고자 한다. 먼저 전체 산업을 크게 세 가지 산업군(장치 산업, 첨단기술 산업 및 조립 산업 등)으로 분류하였다. 장치 산업은 대규모 장치 및 설비를 기반으로 생산하는 산업으로 정의되며 석유화학, 정유, 철강, 비철금속, 자동차, 조선, 시멘트 및 제지 산업 등이 장치산업에 포함되었다. 첨단 기술 산업은 기술 집약도가 높으며 첨단 기술을 기반으로 생산하는 산업으로 정의된다. 디스플레이, 반도체 및 전기전자 산업이 첨단 기술 산업에 해당한다. 마지막으로 조립 산업은 다양한 재료 및 부품을 조립하여 완성품을 생산하는 산업으로 정의되며 기계, 섬유, 자동차 및 조선 산업 등이 포함된다. 하우즈만 검정 및 우드리지 검정 결과를 기반으로 각 산업별 최적 모형을 선정하였다. 장치산업의 경우 고정효과 모형을 최적의 모형으로 선택하였고, 첨단산업의 경우 우드리지 검정 결과 오차항의 1계 자기상관이 존재하여 오차항의 1계 자기상관을 고려한 고정효과 모형을 사용하였다. 마지막으로 조립산업의 경우 오차항의 1계 자기상관을 고려한 확률효과 모형을 선택하였다.

세 가지 산업군별 탄소 생산성 결정요인 분석의 결과는 Table 7에 정리되어 있다. 분석 결과 세 산업 모두 누적 연구 개발투자액 등의 기업 혁신활동은 탄소 생산성의 제고에 양의 유의미한 효과를 미치고 있음을 알 수 있다. 반면 배출권 거래제 본격 시행에 따른 탄소 생산성 제고 효과는 장치 산업 및 조립 산업에서만 나타나고 있으며 첨단 기술 산업에서는 환경정책 도입에 따른 탄소 생산성 제고의 효과가 존재하

Table 7. Effects of R&D and KETS on the carbon productivity: specific industries

variables	Process industry (Fixed effect)		High Technology industry (Fixed effect with first order autocorrelation)		Assembling industry (Random effect with first order autocorrelation)	
lnAR&D	0.097***	(0.018)	0.060*	(0.037)	0.068*	(0.037)
phase1	0.069	(0.053)	0.108	(0.080)	0.091	(0.102)
phase2	0.281***	(0.087)	0.047	(0.134)	0.294*	(0.166)
lnage	0.873***	(0.181)	3.642***	(1.073)	1.139***	(0.310)
lnage2	-0.277***	(0.081)	-0.974***	(0.252)	-0.216***	(0.071)
lnsize	0.271***	(0.074)	-0.417**	(0.223)	0.288***	(0.118)
lnECS	0.020*	(0.011)	-0.004	(0.021)	0.016	(0.019)
lncapital	0.063	(0.051)	0.526***	(0.102)	0.070	(0.072)
lndebt ratio	0.166	(0.104)	0.340*	(0.203)	0.100	(0.249)
t	-0.018	(0.021)	0.075	(0.043)	-0.041	(0.030)
constant	9.888***	(1.339)	2.239***	(0.476)	9.566***	(1.576)

*, **, ***Significance at 10%, 5% 1% respectively. The parentheses () denote standard error.

지 않는다는 결론이 도출되었다. 에너지소비구조의 경우 장치산업에서만 해당 산업의 탄소 생산성 제고에 통계적으로 유의미한 효과를 미치고 있다. 첨단 기술 산업 및 조립 산업의 경우 장치 산업에 비해 에너지소비가 상대적으로 낮기 때문에 탄소 배출이 낮은 에너지소비구조의 효과가 탄소 생산성 제고에 통계적으로 유의미하지 않다고 해석된다.

5. 결론 및 시사점

본 연구에서는 배출권거래제 참여기업들의 탄소 생산성을 분석하기 위해 2011년부터 2019년까지 배출권거래제 2차 계획기간의 모든 참여 기업들의 탄소 생산성에 영향을 주는 요인들을 분석하였다. 그 결과 기업들의 혁신 활동, 배출권거래제의 본격 시행, 기업의 연령, 규모 및 에너지소비구조 등이 탄소 생산성에 통계적으로 유의미한 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 세부 산업별 비교 분석 결과를 바탕으로 산업별로 탄소 생산성 제고에 영향을 미치는 요인 및 그 강도는 다르다는 결론이 도출되었다. 철강, 석유화학 및 정유 산업 등의 장치산업 및 조립 산업은 기업의 혁신 활동 및 배출권거래제 2차 계획기간의 도입 등과 같은 환경 정책이 해당 산업의 탄소 생산성 제고에 영향을 주었다. 반면, 첨단기술 산업의 경우 배출권거래제의 도입 및 본격 시행은 탄소 생산성 제고에 통계적으로 유의미한 영향을 미치지 않았다. 첨단기술 산업 및 조립 산업의 경우 에너지소비구조는 산업의 탄소 생산성 제고에 영향을 주지 않는다는 결론을 도출하였다.

동 연구를 통해 배출권거래제 참여 기업들의 탄소생산성 제고를 위해서는 해당 기업들의 혁신 활동을 장려하는 정책이 필요하다는 시사점이 도출되었다. 기업들의 생산 공정 및 에너지소비구조에서의 탄소감축을 유도하기 위한 저탄소감축기술 및 에너지효율향상 기술의 개발 및 도입을 위한 정부의 지원이 필요하다. 또한 배출권 할당 시 참여 기업의 탄소감축능력 및 관련 기술개발 의지를 반영하여 보다 많은 기업들이 자발적으로 저탄소기술관련 투자를 확대하고 생산 공정에 관련 기술을 빠르게 도입하려는 유인을 마련할 필요가 있다. 효율적인 탄소 감축을 위해서는 현재의 에너지다소비 산업구조를 전환하여 생산 공정의 전환 및 에너지소비의 효율성을 증대시키고 산업 구조개편 및 고도화를 위한 구체적인 중장기 산업구조 고도화 전략 수립 또한 필요하다.

또한 산업별 특성을 반영한 차별화된 산업별 온실가스

감축 정책을 수립 지원하여야 한다. 장치 산업의 경우 기후변화 대응 관련 R&D 확대, 신재생에너지 및 저탄소 에너지로의 소비구조 개편을 통해 생산 공정에서의 탄소 감축을 효율적으로 추진하는 전략을 수립해야 한다. 첨단기술 산업의 경우 공정에서 배출되는 탄소 저감을 위해 식각 및 증착공정에서의 저탄소 관련 특허출원 및 연구개발을 지원하는 정책 수립이 효율적이다.

본 연구의 한계는 다음과 같다. 첫째, 본 연구에서는 배출권거래제 2차 계획기간에 참여하고 있는 기업들만을 대상으로 분석을 시행하였다. 만약 추후 국내 전 산업 및 수송 부문 등의 데이터 확보가 가능할 경우 대상을 확대하여 비교분석을 실시하면 보다 많은 정책적 시사점 도출이 가능할 것이다. 둘째, 본 연구에서는 탄소 생산성을 추정 시 기업들의 산출물로써 생산량이 아닌 매출액을 활용하여 탄소 생산성을 추정하였다. 추후 개별기업들의 생산량 자료가 가용할 경우 매출액이 아닌 생산량으로 대체하여 탄소 생산성을 분석하면 보다 정확한 탄소 생산성 분석이 가능할 것이다. 셋째, 본 연구에서는 부분 요소 생산성에 기반한 탄소 생산성을 도출하였다. 매출액 및 탄소 배출량에 영향을 주는 다양한 생산 요소 및 외부적 환경 요인을 고려할 수 있는 총 요소 탄소 생산성을 추정한다면 보다 종합적인 관점에서의 정교한 탄소 생산성의 추정 및 요인 분석이 가능할 것이다.

사사

이 논문은 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음(2020년).

References

- Alam S., Atif M., Chien-Chi C. and Uğur So. 2019. Does Corporate R&D Investment Affect Firm Environmental Performance? Evidence from G-6 Countries. *Energy Economics* 78: 401-411.
- Choi Y. 2011. Comparative Analysis on the Green Productivity and its Determinants among G20 Countries. *Journal of International Area Studies*. 15(3):307-324.
- Du K. and Li J. 2019. Towards a green world: How do

- green technology innovations affect total factor carbon productivity. *Energy Policy*. 131:240-250.
- Fan L., You J., Zhang W. and Zhou P. 2021. How does technological progress promote carbon productivity? Evidence from Chinese manufacturing industries. *Journal of Environmental Management*. 277:111325.
- Jaraité J. and Maria C. 2012. Efficiency, productivity and environmental policy: A case study of power generation in the EU. *Energy Economics*. 34:1557-1568.
- Kaya Y. and Yokobori K. 1997. *Environment, Energy and Economy: Strategies for Sustainability*. United Nations University Press.
- Kortelainen M. 2008. Dynamic environmental performance analysis: A Malmquist index approach. *Ecol. Econ*. 64:701-715.
- Mensah C., Xingle L., Kofi B., Isaac A., Lamini D., and Muhammed S. 2018. The Effect of Innovation on CO2 Emissions of OCED Countries from 1990 to 2014. *Environmental Science and Pollution Research* 25: 29678-29698.
- Mo J. 2020, Technological innovation and its impact on carbon emissions: Evidence from Korea manufacturing firms participating emission trading scheme. *Technology analysis & Strategic management* 33.
- Yu J., Yoo J., Kim J. and Lee C. 2017. The Effectiveness of GHG Abatement Policies in Korea: Examining Changes since the Launch of the ETS. *Korea Environmental Policy And Administration Society*. 25(2):231-247.
- Zhang H. and Xu K. 2016. Impact of Environmental Regulation and Technical Progress on Industrial Carbon Productivity: An Approach Based on Proxy Measure. *Sustainability*. 8: 819.