

온실가스 감축정책 시행 후 제조업의 이산화탄소 배출량 변화 분석*

길 은 선** · 이 슬 기*** · 임 미 라****

논문 초록 우리나라에서 배출되는 온실가스 중 절반가량을 차지하는 제조업 이산화탄소(CO₂) 배출량의 감축은 기후변화 대응 성패를 좌우할 핵심적인 요인이다. 온실가스 감축정책으로 인하여 제조업의 생산과정에서 배출되는 온실가스가 감소하는지를 분석할 때, 에너지 총사용량으로는 충분히 통제되지 않는 내생성이 발생할 수 있다. 고용과 급여총액을 도구변수로 사용하여 산업·지역 연결 패널자료를 분석한 결과, 2015년 이후 산업부문 CO₂ 총배출량, 생산당 CO₂ 배출량, 에너지의 CO₂ 집약도가 모두 유의하게 증가하여 정책 기조와 반대되는 변화를 보였다. 다배출업종 중 1차금속은 생산 대비 온실가스 배출량의 지역별 격차가 높으므로, 동일 업종 내 상대적 다배출 기업의 에너지 사용 저탄소화를 유도하기 위한 정책 설계가 필요하다.

핵심 주제어: 온실가스 감축정책, 제조업 이산화탄소 배출, 내생성

경제학문헌목록 주제분류: Q5, L6, C4

투고 일자: 2021. 5. 14. 심사 및 수정 일자: 2021. 7. 26. 게재 확정 일자: 2021. 9. 15.

* 본 논문은 한국은행의 재정지원을 받아 한국은행 대전충남본부와 공동으로 작성된 「기후변화 대응정책이 충남지역 주력산업의 이산화탄소 배출에 미치는 영향」 연구보고서를 수정·보완한 논문입니다.

** 제1저자, 산업연구원 산업정책연구본부 부연구위원, e-mail: egil@kiet.re.kr

*** 제2저자, 산업연구원 성장동력연구본부 신산업실 부연구위원, e-mail: sulkilee@kiet.re.kr

**** 제3저자, 한국은행 대전충남본부 경제조사팀 조사역, e-mail: mrmr5217@bok.or.kr

I. 서 론

기후변화 대응을 위해서는 대기 중으로 배출되는 온실가스의 총량을 감축하는 전 지구적 공조가 필수적이다. 파리협정 채택으로 시작된 신기후체제하에서, 세계 각국은 기후변화가 인류에 미치는 부정적 영향을 최소화하기 위해 배출권거래제(ETS), 신재생에너지 보급 확대, 탄소국경조정제도(CBAM) 등 다양한 온실가스 감축정책을 도입하고 있다. 파리협정에서는 산업화 이전 수준 대비 지구의 평균 기온 상승을 2°C 이하로 제한하기 위한 국가자발적기여(Nationally Determined Contributions; NDC) 계획을 수립하여 제출하도록 권고하였으며, 우리나라도 2030년 까지의 감축 목표에 대한 상향재수정안을 2021년 내 발표할 예정이다.¹⁾ 2020년 12월 10일, 우리나라는 2050년까지 탄소중립을 달성할 것을 선언하였으며, 2050년까지의 온실가스 감축 계획을 담은 장기 저탄소 발전전략(Low greenhouse gas Emission Development Strategy; LEDS)을 UN기후변화협약사무국에 제출하였다.

2017년 기준 우리나라는 전 세계 11위, OECD 국가 중에서는 5위의 온실가스 다 배출국가에 해당한다. 국가온실가스 인벤토리보고서(National Inventory Report; NIR)의 집계에 따르면 2018년 기준 우리나라의 온실가스 총 배출량은 727.6백만 tCO₂Eq이며, 이 중 이산화탄소(CO₂)가 91.4%를 차지하였다. 온실가스 배출과 관련 있는 생산·소비활동을 확인하기 위해 배출원별 배출량을 살펴보면, 네 가지 부문이 전체 배출량의 80.7%를 차지함을 알 수 있다. 구체적으로, 전기·도시가스 등을 생산하는 에너지산업에서 285.7백만톤(39.3%), 5개 제조업(철강·비철금속·화학·펄프제지·식음료)의 직접 연료 연소로 인한 배출량이 147.0백만톤(20.2%), 수송 분야(항공·수상·육상운송)의 배출량이 98.1백만톤(13.5%), 중전설비·반도체·시멘트 생산과 같은 산업공정 분야의 배출량이 55.9백만톤(7.7%)으로 집계되었다. 이 중 제조업의 온실가스 배출량은 단순히 ‘제조업 연료 연소’와 ‘산업공정’ 배출에만 국한되지 않는다. 예를 들면, ‘에너지산업’에서 생산해

1) 우리나라는 기후변화 관련 최상위 정책인 “기후변화대응 기본계획”을 2016년에 확정하였으며 2019년 10월 “제2차 기후변화대응 기본계획”에서는 저탄소 사회로의 전환, 기후변화대응 기반 강화 등의 핵심 전략을 통해 2030년까지 온실가스 배출량을 536백만톤(2030년 BAU 대비 37% 낮은 수준)으로 감축하겠다는 구체적인 목표를 수립하였다. 그 후 2020년 12월, 2017년 대비 24.4% 감축이라는 갱신된 목표를 제출했다.

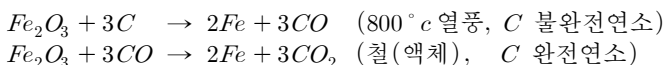
낸 전기·천연가스의 상당량이 중간재로써 산업공정에 사용되므로, 에너지산업 온실가스 배출의 절반 이상 또한 제조업의 간접배출에 해당한다.²⁾ 즉, 온실가스 배출량을 배출원별 대신 최종소비처별로 구분하면, 산업부문(제조업)은 우리나라 전체 온실가스 배출의 50% 이상을 차지하는 단일 부문 최대배출원으로 추산된다.

국가 차원의 온실가스 감축 목표를 달성하기 위해서는 제조업의 대응이 매우 중요하다. 하지만 주력산업에서 철강, 석유화학, 시멘트와 같은 특정 품목의 생산은 화석연료의 연소 및 원자재 내 탄소 산화 반응을 동반하여 온실가스를 불가피하게 배출하는 구조로 되어있다.³⁾ 제조업 생산활동이 온실가스를 배출하는 물리·화학적 구조를 근원적으로 바꿀 혁신적인 신기술이 나오기 전까지는, 온실가스 감축정책은 온실가스 배출량을 줄이면서도 산업경쟁력을 크게 해치지 않도록 두 가지의 목표를 균형감 있게 고려해야 한다. 이러한 온실가스 배출과 제조업 생산의 상충성이 다수의 국가가 적극적인 온실가스 감축의 필요성을 인지하고 있음에도 불구하고 단순히 산업부문 생산을 금지해 온실가스를 배출하지 못하도록 제재하는 방안을 선택하지는 않는 이유이다. 빠른 속도의 경제성장을 이루고자 하는 개발도상국은 적극적인 온실가스 감축정책이 경제에 미치는 부정적 영향을 우려하고 있으며, 선진국도 환경규제가 산업경쟁력의 저하로 이어지지 않도록 예의주시하고 있다.

본 연구는 파리협정이 체결되고 배출권거래제가 도입되는 등 본격적으로 온실가스 감축정책이 시행된 2015년을 기점으로 제조업 생산으로 인한 온실가스 배출량이 어떻게 변화하였는지를 분석하는 것을 목적으로 한다. 구체적으로 내생성을 통제하

2) 에너지산업의 최종소비처별 온실가스 배출량은 NIR에서 제공하고 있지 않다. 다만 참고 기준으로 「에너지통계연보」의 에너지 최종소비처별 소비열량 비중을 보면 에너지산업에서 공급된 도시가스 및 열에너지의 61.4%는 제조업에서 사용되고, 공급된 전력의 53.9%도 제조업에서 소비된다. 가정과 상업을 합쳐도 도시가스 및 열에너지의 17.8%를 소비하는 데 불과하고, 전기의 39.4%를 소비하는 데 그치는 것과 비교하면 제조업에서 소비되는 에너지의 양이 훨씬 많음을 알 수 있다. 에너지와 유사한 이유로 수송의 상당량 또한 제조업 원자재 및 최종재의 운송으로 인한 온실가스 간접배출인 것으로 파악된다.

3) 산화는 분자(혹은 원자나 이온)가 산소를 얻는 것(혹은 수소나 전자를 잃는 것)을 말하며, 환원은 산화의 반대작용으로 반대쪽 분자가 산소를 잃는 것을 뜻한다. 예를 들어 철 제련과정을 도식화하면, 코크스(석탄, C)가 산화(O를 얻음)하고 산화철(철광석, Fe_2O_3)이 환원(O를 잃음)되어 최종적으로 철(Fe)을 생산하고 이산화탄소(CO_2)를 배출하는 화학반응에 해당한다.



는 도구변수추정을 활용해 주력산업의 생산으로 인한 이산화탄소 배출량의 지역·산업별 시계열적 변화를 분석한다. 온실가스 배출량은 생산공정의 물리·화학적 특성상 일부 산업에 강하게 집중되어 있으며, 우리나라는 지역적으로도 산업구성이 크게 차이난다. 즉, 온실가스 정책효과는 다배출지역과 다배출산업의 이질성을 고려하여 분석하여야 하며, 정책방향 또한 현실성 있는 산업 및 지역별 맞춤 정책으로 제시하는 것이 가장 이상적이다.

본 연구는 다음과 같이 구성되었다. 제Ⅱ장에서는 온실가스 감축정책과 관련한 선행연구들을 간략히 소개하고, 본 연구의 분석 방법론적 차별성을 서술한다. 이어 제Ⅲ장에서 우리나라 산업부문 온실가스 배출현황을 개괄적으로 살펴본 뒤, 제Ⅳ장에서 경제모형을 통해 생산과 온실가스 배출 사이에 내생성이 발생하는 구조를 설명하며 이단계최소제곱(2SLS) 도구변수 추정을 사용할 필요가 있음을 밝힌다. 제Ⅴ장은 분석에 사용한 자료 및 주요 변수를 기술하고, 온실가스 감축정책이 주력산업의 이산화탄소 배출에 미친 영향을 실증적으로 분석한 결과를 전국과 다배출지역으로 분리하여 제시한다. 마지막으로 제Ⅵ장에서 주요 결과를 요약하고 정책적 시사점을 논의한다.

Ⅱ. 선행연구

Copeland and Taylor (2004)는 자유무역과 온실가스 배출의 관계 및 환경쿠즈네츠곡선(Environmental Kuznets Curve; EKC)에 대한 종합적인 리뷰 논문이다. 환경쿠즈네츠곡선은 경제성장과 온실가스 배출 사이에 역 U자형 관계가 있다는 가설로, 경제가 발전함에 따라 환경의 질이 점차 나빠지다가 일정 수준 이상부터는 환경이 개선되어 간다는 것을 뜻한다. 이는 다수의 논문을 통해 장기간에 걸친 국가간 비교를 통해서 확인된 정형화된 사실에 해당하지만, 한 국가 내 산업별로 이질적인 생산과 온실가스 배출 사이의 관계를 미시적으로 분석하고 있지는 않아 본 연구의 연구대상과는 차이가 있다.

우리나라를 대상으로 환경정책이 경제에 미치는 영향을 분석한 연구로, 탄소세의 도입이 철강·금속산업에 미칠 영향을 연산일반균형(CGE) 모형으로 분석한 김일중·신동천(1997)과 온실가스 감축 시나리오로 인한 경제 파급효과를 CGE로 분석한 임재규(2009) 등이 있다. 또한 온실가스 배출 관련 연구로는, 한국의 에너지소

비 변동성을 벡터오차수정모형(VECM)으로 분석한 신동현 외(2015), 탄소배출량 결정요인을 VECM을 통해 분석한 신석하(2014), 제조업 온실가스 배출변화를 로그평균 디비지아지수(LMDI) 승법적(multiplicative)·가법적(additive) 방법으로 분해한 김수이·정경화(2011)와 진태영 외(2020) 등이 있다. 추가적으로, 우리나라 철강산업에 한정하여 온실가스 감축잠재량을 분석한 안윤기 외(2010)가 있다.

온실가스 감축정책의 실시로 인한 산업 생산의 영향을 연구한 해외논문의 주요결과는 다음과 같다. Bassi et al. (2009)은 기후변화 대응정책으로 에너지 가격이 오르면 미국의 에너지다소비업종의 경쟁력이 저하된다는 결과를 얻었다. Rivers (2010)는 CGE모형을 이용하여 캐나다 제조업 역시 기후변화 대응정책으로 경쟁력이 약화되었으며 적절한 배출권 판매수익의 활용법을 채택함으로써 이를 완화할 수 있음을 밝혔다. Carbone and Rivers(2017)는 선행연구 분석을 통해 제조업에서 온실가스 배출을 20% 감축하는 정책이 생산량을 5%, 수출을 7% 각각 감소시킨다고 추산하였다. Commins et al. (2011)은 기업 데이터를 이용하여 유럽의 배출권거래제가 기업의 행동 및 성과에 미치는 영향으로, 에너지에 부과한 세금과 배출권거래제는 총요소생산성과 자본수익을 증가시킨 반면 고용을 감소시키는 것으로 분석하였다. Metcalf and Stock (2020)은 탄소세를 시행한 경험이 있는 유럽 국가의 경우, 탄소세가 GDP 성장률 및 고용에 통계적으로 유의미한 영향을 주지 못하였으나 온실가스 배출량은 성공적으로 줄었다는 결과를 제시하였다. Fullerton and Wolfram(2012)은 미국의 청정에너지안보법(American Clean Energy and Security Act of 2009)이 시행되었더라면 상승하였을 전기요금 인상분(약 4%)으로 인해 0.6% 정도의 고용 감소가 예측되는데, 이는 2007년 말 불황으로 인한 고용 감소의 약 1/8 수준이라고 주장하였다.

그런데, 우리나라의 경우에는 이질적인 시점에 지역적으로 상이한 정책들이 산발적으로 실시되는 미국이나 유럽의 사례처럼 지역별 격차를 활용한 이중차분법으로 처리효과(treatment effect)를 추정하기에 적합한 상황이 아니다. 우리나라를 대상으로도 기후변화 대응정책이 경제변수에 미친 영향을 연도변수를 사용하여 평가하려는 시도가 있었으나, 주요 변수의 관측 빈도가 충분히 조밀하지 않은 가운데 연도변수로 정책효과를 추정하면 다른 요인의 효과와 분리 식별하기 어렵다는 문제가 발생한다.

구체적으로, 우리나라에 온실가스 배출권거래제가 도입된 2015년은 화관법(화학

물질관리법) 및 화평법(화학물질의 등록 및 평가법)⁴⁾이 시행된 원년이기도 하며, 유가가 급격히 하락하여 저유가⁵⁾ 기조가 본격화된 시점이기도 하다. 이처럼 다수의 산업환경 변화가 동일한 시점에 복합적으로 발생함에 따라 충분히 통제되지 않은 산업 내 단순 연도효과를 기후변화 대응정책이 주력산업에 미친 영향으로 해석하는 것에는 주의가 필요하다. 그리고 온실가스 배출권거래제가 시행된 시점은 2015년이지만 2017년까지는 단계적 추진 계도기간에 해당하는 등 특정 시점에 법이 제정 혹은 시행되었다고 하여도 현장에서 제대로 수용하는 데 더 많은 시간이 소요되다는 점이 법 시행 연도효과를 정책효과로 곧바로 해석하기 어려운 또 다른 이유를 제공한다. 본 연구는 온실가스 중 가장 큰 비중을 차지하는 이산화탄소 배출량 및 에너지소비량 자료를 직접적으로 사용함으로써 정책 시행 시점 더미변수와 다른 경제변수와의 관계를 간접적으로 추정하는 방법론을 적용한 다수의 국내외 처리효과 연구들과 차별화된다.⁶⁾

한편, 탄소 배출량과 경제변수 사이의 직접적인 관계를 분석한 기존 연구들을 방법론적 차원에서 분류하면 크게 수학적 분해(decomposition), 투입산출(input-output) 모형 기반의 시뮬레이션 및 시계열 계량 방법론 기반의 통계적 추론 연구로 나눌 수 있다. 수학적 분해의 선행연구로는 Kim and Worrell(2002), O'Mahony(2013), Shagidazzaman and Layton(2015)과 같이 Kaya 항등식을 사용해 이산화탄소 배출량을 에너지사용량당 탄소 배출량, 생산당 에너지사용량, 1인당 생산, 인구의 곱 등으로 분해한 후 각 지표의 변화를 통해 생산과 탄소 배출량 사이의 관계

4) 해당 법은 2020년 9월 말까지 처벌을 유예하여 지난 5년간 대기업 위주의 자체 개선 정도에 그쳤다는 평가가 존재한다.

5) 미국 원유의 대표가격인 WTI(West Texas Intermediate) 기준, 2014년 6월 배럴당 \$106.07에서 2015년 1월 \$47.79로 6개월 사이에 54.9%의 큰 폭으로 유가가 하락하였고, 이후 소폭 상승한 시기가 있었으나 코로나19의 확산으로 추가 폭락한 이후 2020년 8월 기준 \$42.89에 머물고 있다.

6) 일반적으로 정책은 세율을 변화시키거나 보조금을 지급하는 등 정책 집행에 강제성이 있다. 따라서 정책에서 명기한 세율, 소득 등의 변화가 실제로 발생하였는지를 확인하는 과정을 생략한 채, 독립변수인 정책시행 연도효과를 관심있는 종속변수에 대해 회귀 추정하여도 큰 무리가 없다. 하지만 온실가스 감축정책은 정책 목표 달성의 강제성이 상당히 떨어지므로, 배출권거래제와 같은 정책 수단이 도입된다고 하더라도 정책 이후 온실가스의 실제 감축이 있었는지를 반드시 별도로 검토를 하여야 한다. 그리고 실제로 감축이 있었던 경우에 한하여, 온실가스의 감축으로 인한 경제적 비용이나 기업성장에 미친 영향을 평가하는 두 단계의 분석을 거쳐야 한다.

를 확인한 논문들을 꼽을 수 있다. 투입산출 모형 기반⁷⁾ 시뮬레이션의 선행연구는 Turner et al. (2007), Wiedmann et al. (2007)에 종합적으로 리뷰되어 있으며, 그 외에도 Dietzenbacher et al. (2012), Gavrilova and Vilu (2012), Bordigoni et al. (2012), Zhang et al. (2014) 등이 있다.

이러한 분석방법은 추정이나 구조모형과 같은 계량경제학적 추론이 아닌, 과거에 관측된 균형값을 근거로 특정 조건이 변화하였을 상황을 가상적으로 계상(accounting)하는 방법론에 해당한다. 기업은 경제주체로서 새로운 제약하에서는 최적화 문제를 다시 풀어 투입 요소 등 선택변수들을 합리적으로 조정한다. 계상을 통한 시뮬레이션 결과는 하나의 조건만을 독립적으로 변화시킬 수 없거나, 수요측 변화와 공급측 변화가 혼재된 균형을 관측치로 가지고 있거나, 한계효과와 평균효과가 다르거나, 비정기적으로 작동하는(occasionally binding) 제약식을 누락하였거나, 투입 혹은 산출물 사이의 대체성에 대한 가정이 틀렸을 경우 정확도가 하락한다. 또한, 추정이 아니므로 표준오차가 제공되지 않으며 가설검정이 불가능하므로 기각가능성(falsifiability)을 확보하지 못하고, 두 가지 이상의 상충하는 시뮬레이션 결과가 있을 경우 어떤 결과를 더 신뢰할 수 있을지 판단할 수 있는 근거가 부족하다는 한계점도 있다. 하지만 관찰 불가능한 상황에 대해 전망을 하거나 현황을 세 부적으로 기술하는 측면에서는 이 방법론이 많이 활용되고 있다.

한편 시계열 계량경제학을 기반으로 한 선행연구로는 앞서 언급한 환경쿠즈네츠 곡선 관련 연구가 많은데, 대표적으로 Ang (2007)이 프랑스의 이산화탄소 배출과 에너지사용량 및 생산의 관계를 VECM기반 공적분 분석을 통해 밝힌 연구가 있다. 이후 Acaravci and Ozturk (2010)가 유럽 국가들을 대상으로, Narayan and Narayan (2010)이 개발도상국을 대상으로 경제성장과 탄소배출량 사이의 공적분 관계를 확인하였다. Bae (2018)의 경우 110개 국을 대상으로 이산화탄소배출량과 소득불평등 사이의 관계를 확인하기도 하였다. 추가적으로, Shbia et al. (2014), Al-Mulani and Ozturk (2016), Gozgor (2017), Shahbaz et al. (2017), Shahbaz et al. (2019), Kim (2019) 등 다수의 연구는 탄소 배출량에 무역 개방과 해외직접투자(Foreign Direct Investment)가 미친 영향을 분석하였다. 이들에 따르면 이산화탄소

7) 기본적인 투입산출 모형 방법론 외에도 SAM(Social Accounting Matrix), CGE 등의 방법론을 혼합하여 사용하기도 하지만 선행연구에서 이를 투입산출기반모형으로 통칭하고 있으므로 동일한 용어를 사용한다.

배출량과 관련성이 높은 변수는 1인당 생산량, 에너지소비량, 무역 개방도 등 세 그룹으로 나뉜다. 이 중 설명력이 가장 높은 것은 에너지소비량 및 생산량이며, 무역의 경우 개발도상국에서 설명력이 높게 나타났다.

이처럼 거시계량 방법론을 기반으로 생산과 탄소 배출량 사이의 관계를 분석한 선행연구들이 다수 존재하지만, 이들은 생산과 에너지사용량, 탄소 배출량 사이의 내생성을 고려하지 않은 추정이라는 점에서 한계가 있다. 내생성을 야기하는 변수의 누락으로 인한 추정편의(omitted variable bias)를 수정하는 방향으로 계량경제학과 응용미시경제학의 방법론이 크게 발달해 왔음을 반영하여, 본 연구에서는 경제변수와 에너지소비량, 탄소 배출량 사이의 내생성을 통제하기 위해 도구변수를 사용한 미시계량적 추정을 실시한다.

Ⅲ. 온실가스 배출현황

1. 온실가스별 배출량

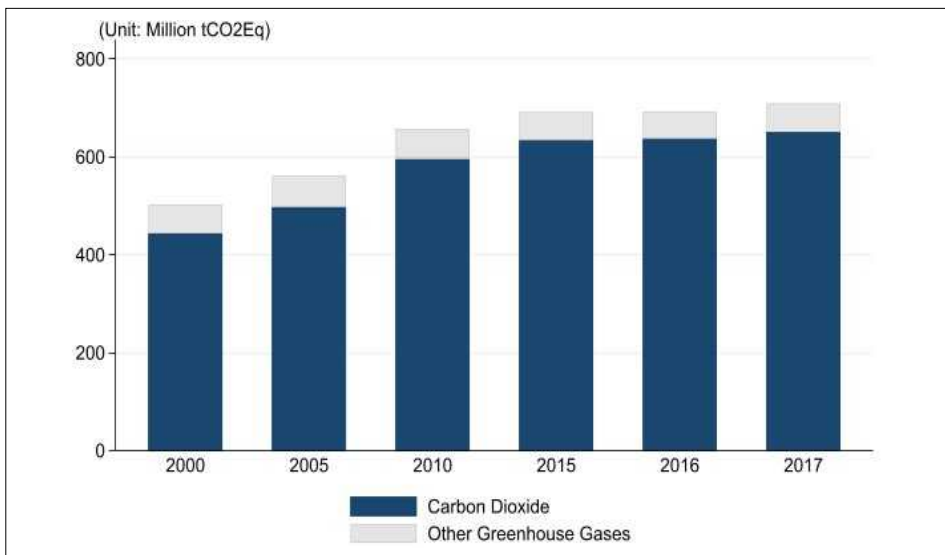
교토의정서의 구분에 따르면 온실가스는 직접적인 온실효과를 갖는 직접온실가스와, 다른 물질과 결합하여 온실효과를 갖는 물질로 전환되는 간접온실가스로 나뉜다. 직접온실가스는 이산화탄소(CO_2), 메탄(CH_4), 아산화질소(N_2O), 수소불화탄소(HFCs), 과불화탄소(PFCs), 육불화황(SF_6) 등의 여섯 가지이며 우리나라의 온실가스 인벤토리보고서(NIR)에서는 이들 6개 직접온실가스만을 대상으로 배출량 및 흡수량을 보고하고 있다.

온실가스별로 지구온난화를 유발하는 정도가 상이하기 때문에 동일한 무게의 가스가 배출되더라도 온실효과는 크게 다를 수 있다. 이에 따라 온실효과라는 일관된 기준으로 온실가스 배출량을 집계하기 위해 가스별 온난화지수(Global Warming Potential; GWP)라는 개념을 사용하는데, 이는 이산화탄소를 1로 두었을 때 각 온실가스의 상대적 온실효과를 나타낸다. 이를테면 IPCC의 2차 평가보고서(IPCC, 1995)를 기준으로 메탄의 GWP는 21이므로 1t의 메탄가스가 배출되는 것은 21t의 이산화탄소가 배출되는 것과 동일한 정도의 온실효과를 갖게 되며, 1t의 메탄은 $21\text{tCO}_2\text{Eq}$ (CO_2 환산톤)으로 표현된다.

CO_2 환산톤으로 우리나라의 온실가스 배출량을 집계한 결과는 <Figure 1>과 같

다. 우리나라가 배출하는 온실가스는 대부분이 CO₂로 구성되어있으며, CO₂가 차지하는 비중은 2000년 88.2%에서 2017년 91.7%로 상승하였다. CH₄와 N₂O를 합하면 전체 온실가스 배출량의 약 6%를 차지하며, 나머지 세 종류의 온실가스(HFCs, PFCs, SF₆)의 비중은 3% 미만이다. 이렇듯 CO₂만으로도 우리나라 온실가스의 대부분을 설명할 수 있으므로 본 연구에서는 관리대상인 직접온실가스 중 CO₂만을 대상으로 분석을 진행한다.

〈Figure 1〉 A Trend in Greenhouse Gas Emissions



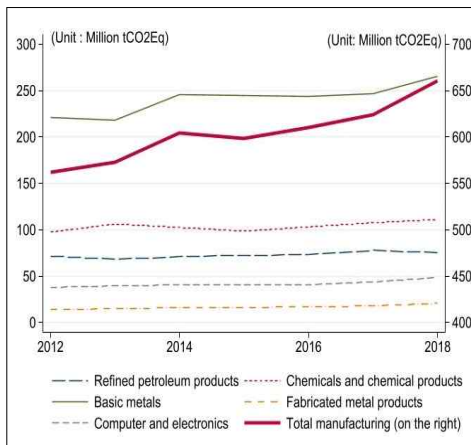
Source: Greenhouse Gas Inventory and Research Center (2019).

2. 업종별 이산화탄소 배출량

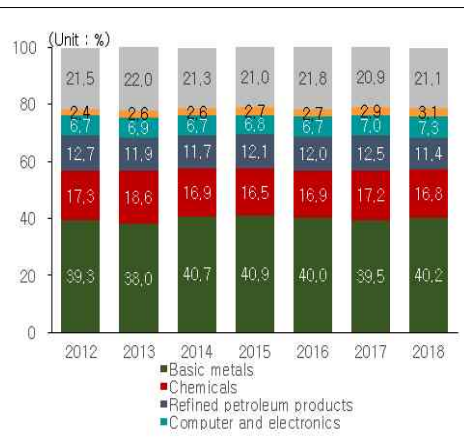
제조업의 온실가스 배출은 크게 직접배출, 간접배출, 공정배출 세 가지 형태로 구분된다. 직접배출이란 공장 등 생산시설에서 에너지를 직접 연소하는 과정에서 발생하는 온실가스이며, 간접배출은 에너지 사용으로 인한 온실가스의 배출이 재화 생산을 위한 시설의 외부에서 발생하는 경우를 말한다. 예를 들면, 생산시설에서 중간재로 사용할 전기를 발전소에서 만드는 과정에서 발생한 온실가스가 제조업의 간접배출에 해당한다. 우리나라 송배전은 중앙집중식으로 관리되고 있으므로 특정 발전소에서 생산한 전기가 특정 소비자에게 곧바로 연결되지 못하며, 이로 인해 전

력에 대해서는 전국적으로 동일한 온실가스 배출계수가 적용된다. 공정배출은 생산 공정 중 화학적 혹은 물리적 반응을 통해 온실가스가 발생하는 것을 일컫는다.

제조업 업종별 직·간접 CO₂ 배출량을 보면 1차금속(철강)은 우리나라 산업부문 배출량의 약 40%를 차지하는 다배출업종이다. 화학과 정유를 합하면 약 25~30%의 비중으로 1차금속의 뒤를 잇는다. 〈Figure 2〉에서 보듯 산업부문 온실가스 배출량의 변동성은 대부분 철강산업에 기인한다. 또한, 〈Figure 3〉처럼 CO₂ 배출량의 산업별 비중은 분석 기간인 2012~18년에 비교적 일정하게 유지되었다. 온실가스 다배출업종인 철강산업은 직접배출의 비중이 높은 대표적인 업종(2017년 기준 약 80%)이며, 석유화학산업은 직접배출과 간접배출이 약 2:1의 비율을 가진다. 반면, 기계 및 수송기기 산업은 간접배출량이 약 70% 수준으로, 전기사용량 비중이 높은 특징이 있다.

〈Figure 2〉 CO₂ Emissions by Industry

Source: National GHG Emission Total Information System.

〈Figure 3〉 CO₂ Emission Shares by Industry

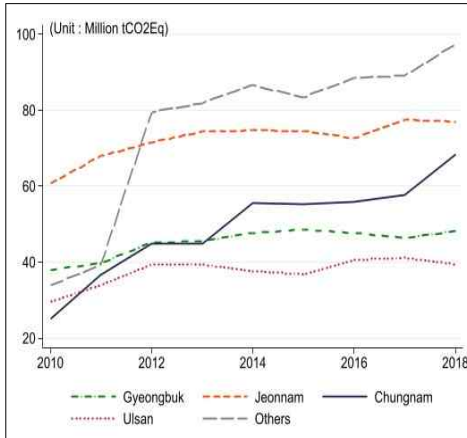
System.

3. 지역별 이산화탄소 배출량

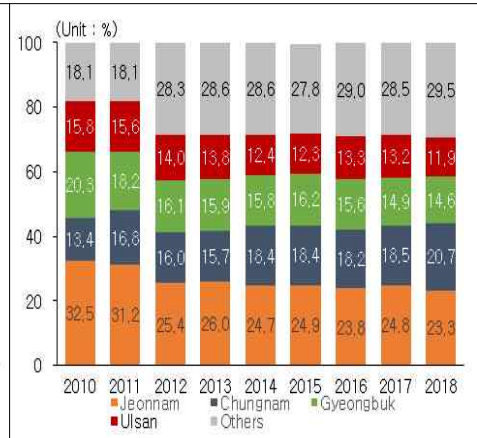
〈Figure 4〉의 지역별 CO₂ 배출량을 보면 전남과 충남이 2018년도 기준으로 각각 1위와 2위를 차지하고 있다. 〈Figure 5〉와 같이 이들 두 지역 간 온실가스 배출 비중의 격차는 2010년 이후 점차 줄어들어 2018년에는 2%p 수준으로 축소되었다.

대표적인 철강 및 화학단지 소재지인 전남, 충남, 경북 및 울산의 경우처럼, 온실가스 다배출 업종이 대규모 산업단지의 형태로 위치한 지역에서 CO₂ 배출량이 많음을 확인하였다.

〈Figure 4〉 CO₂ Emissions by Region



〈Figure 5〉 CO₂ Emission Shares by Region



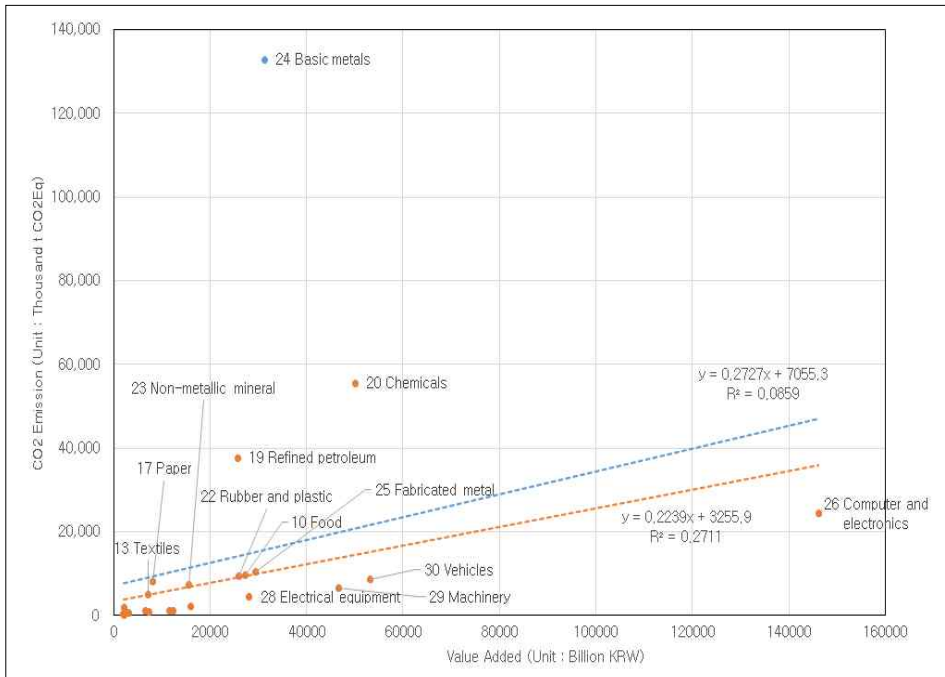
Source: National GHG Emission Total Information System.

4. 배출량과 부가가치의 관계

산업별 생산당 온실가스 배출량의 이질성을 확인하기 위하여 〈Figure 6〉에 전국을 대상으로 이산화탄소 배출량과 부가가치 산포도를 나타내었다. 1차금속은 부가가치 대비 이산화탄소 배출량이 가장 많은 산업이며 그 다음으로 화학제품 제조업과 석유정제업이 온실가스 다배출 업종으로 분류되지만, 전자부품 제조업의 경우 이산화탄소 배출보다는 부가가치가 높은 업종이라는 점에서 산업별 특수성이 매우 중요하게 작용한다. OLS 회귀분석을 실시하면 전국의 경우 부가가치 10억원을 창출하는 데 연관 있는(associated) 이산화탄소 발생량은 272.7tCO₂Eq이다. 지역별 차이를 비교할 경우 주목할 만한 곳은 충남으로, 이 지역은 부가가치 10억원을 창출하는 데 상관관계가 있는 이산화탄소 발생량이 404.5톤으로 전국의 1.48배에 해당한다. 1차금속을 제외한 나머지 제조업만을 대상으로 비교하여도 전국의 경우 부가가치 십억원당 223.9톤이지만 충남지역은 1.81배인 404.3톤으로 추정되어, 충남

지역이 부가가치 대비 온실가스 다배출 지역이라는 점이 반복하여 확인된다.

〈Figure 6〉 CO₂ Emissions and Value-added by Industry

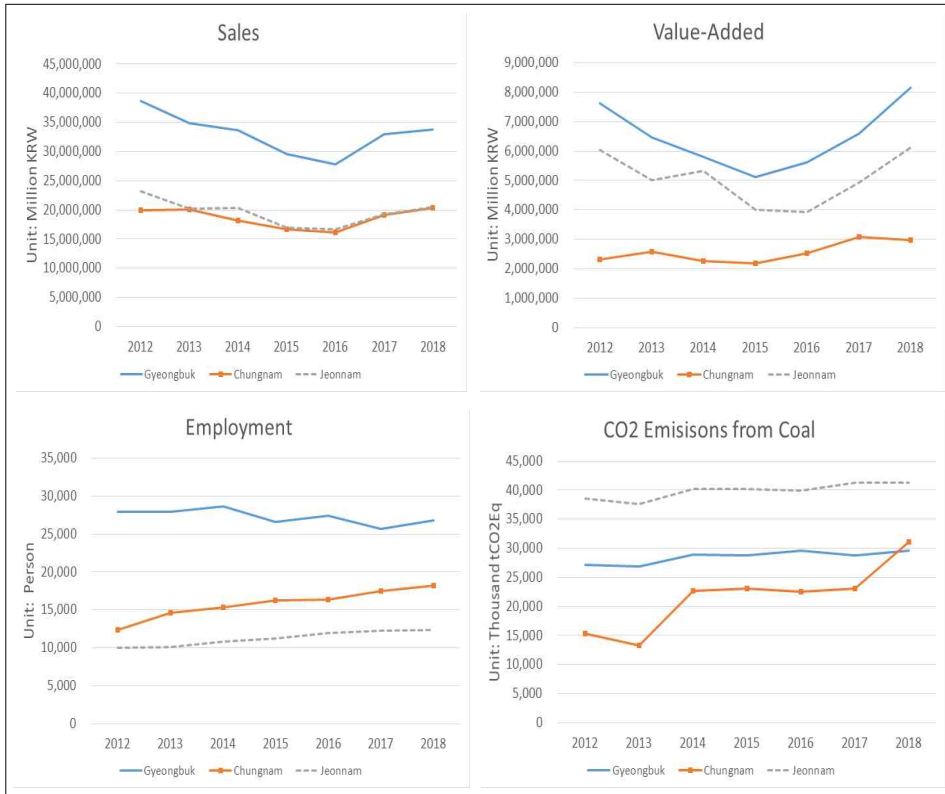


Note: CO₂ emissions and value-added are based on 2018 values. The orange line indicates a fitted line except the basic metals industry, whereas the blue line represents a fitted line for all industries.

Source: Mining and manufacturing survey; and National GHG Emission Total Information System.

〈Figure 7〉을 보면 1차금속 업종만을 놓고 보았을 때도 경북 및 전남 대비 충남 지역의 생산당 이산화탄소 배출량이 높은 편이라는 사실을 확인할 수 있다. 충남의 1차금속은 경북의 1차금속 대비 매출, 부가가치, 고용의 측면에서 규모가 약 절반 정도이지만, 2018년 충남철강의 석탄사용으로 인한 이산화탄소 배출량은 경북철강의 배출량을 초과하였다. 이처럼 CO₂ 배출량은 본원적으로 산업 내 이질성 또한 매우 큰 변수라는 점을 분석 설계 시 고려할 필요가 있다.

〈Figure 7〉 Comparing Basic Metals Industry in Three Carbon-Intensive Regions:
Chungnam, Jeonnam, and Gyeongbuk



Note: Sales, value-added, employment, and coal-based CO₂ emissions from basic metals industry across three carbon-intensive regions are illustrated.

Source: Mining and manufacturing survey; and National GHG Emission Total Information System.

IV. 분석모형 및 내생성 통제

1. 이론적 틀

지구온난화 및 기후변화에 대한 국제적 대응의 필요성이 제기되기 전까지 온실가스 배출은 주력산업 내 기업의 주요 의사결정 대상이 아니었다. 직접적인 인명피해를 주는 유독성 화학물질의 취급이나 방사능, 폐수, 대기오염물질의 배출은 수십 년 전부터 관리가 이루어져 왔지만, 온실가스 배출이 사회적인 문제로 떠오른 것은

비교적 최근이기 때문이다. 하지만 에너지효율 향상은 원가절감을 목표로 하는 산업계의 오래된 화두였으며, 에너지효율을 증대하기 위한 목적의 에너지소비량 및 소비구성의 변화가 간접적으로 온실가스 배출량의 변화 또한 만들어 내었다. 즉, 온실가스 감축정책 이전의 기업들은 경쟁력 확보 및 원가절감을 위해 온실가스 감축과 합치되는 방향의 노력을 비의도적으로 해 온 측면이 있다. 다만 온실가스 감축 정책 시행 이전에는 기업이 이윤극대화를 위한 생산활동의 최적 선택으로서 생산량과 투입요소를 결정하였고, 그 과정에서 내생성 부산물인 온실가스가 대기 중으로 배출되었다고 보는 것이 적절하다.

$$\begin{aligned} \cdot \text{기업의 목적함수: } \max_{\{K, L, E, M, h\}} & pF(K, L, E, M | \Omega_h) - wL - rK \\ & - r_e E - r_m M \end{aligned} \quad (1)$$

$$\cdot \text{최적생산활동: } Y^* = F(K^*, L^*, E^*, M^* | \Omega_{h^*}) \quad (2)$$

$$\cdot \text{부산물: } CO_2 = G(E^* | \Omega_{h^*}) \quad (3)$$

Y 는 생산, K 는 자본, L 은 노동, E 는 에너지, M 은 비에너지 원자재 벡터이며, 각각의 가격이 p, w, r, r_e, r_m 로 표기되었다.⁸⁾ 다수의 거시 선행연구에서 국가별 에너지 총사용량을 사용하는 것처럼 에너지가 스칼라가 아닌 이유는, 에너지의 종류 및 에너지의 사용방식에 따라 온실가스 배출량이 큰 차이를 보이기 때문이다.⁹⁾ Ω_h 는 생산함수에 영향을 주는 비정량적 특성 및 정보의 집합인 σ -필드를, h 는 동일 산업 내 이질적인 생산방식 혹은 생산품목을 뜻한다. 예를 들어 철강산업에서 철광석과 석탄을 혼합하여 고로에서 제철하는지와 철 스크랩(고철)을 사용하여 전기로에서 제강하는지에 따라 사용하는 에너지의 종류, 온실가스 배출량, 원자

8) 기본적인 경제학 모형은 노동과 자본만을 투입 요소로 고려하므로 실증분석에서는 매출에서 원자재비용을 제거한 부가가치를 생산변수로 주로 사용한다. 하지만 본 연구에서는 에너지와 원자재 투입을 목적함수에 명시한 KLEM 모형을 기반으로 하고 있으므로 실증분석에서 생산변수로 매출액을 사용한다.

9) 예를 들어, 나프타를 휘발유처럼 연료로 사용할 경우 IPCC 기준 완전연소에 해당하는 0.783tC/TOE 탄소배출계수를 사용한다. 하지만 나프타를 석유화학 제조업에서 원료로 사용하여 에틸렌, 프로필렌, 부타디엔 등을 생성할 경우에는 제품에 몰입(stored)된 탄소량이 75%에 해당하여 동일한 양의 나프타를 사용하여도 평균연소의 1/4만큼 탄소배출이 이루어지는 것으로 추계한다.

재 및 설비시설의 종류에 있어 큰 차이가 있다. 생산방식(h)은 다른 투입 요소들과 달리 기업이 조정하는 빈도가 낮으며 직접 관찰되기 어려운 잠재변수(latent variable)의 속성을 가지지만, 동일한 산업 및 기업 내에서도 어떠한 기술로 무슨 품목을 생산하는지가 부산물인 온실가스배출량과 에너지 사이의 관계(G 함수)에 큰 차이를 가져다주므로 이를 명시적으로 모형화하였다.

생산방식(h)은 투입요소뿐 아니라 이산화탄소 배출과 높은 연관성을 가지고 있으므로 생산함수와 온실가스배출함수의 조건변수로 작용한다. 생산 단계에서 사용되는 원료 및 연료로서 에너지의 종류와 투입량은 이산화탄소 배출량에 직접적인 영향을 주지만, 노동과 자본, 원자재 투입은 생산방식(h) 및 생산량(Y)을 통해 온실가스 배출에 간접적인 영향만을 준다. 즉, 기계 설비나 노동자, 비에너지 원자재와 같은 투입 요소들은 에너지백터를 통하지 않고서는 독자적으로 온실가스를 발생시키지 않는다.¹⁰⁾ 하지만 생산함수(F)는 에너지사용량, 원자재, 노동, 자본 네 가지 투입 요소와 생산방식 사이에 내생성이 발생하는 원천이며, 온실가스 배출은 생산방식 및 에너지사용량과 관련이 있다. 즉, 기후변화 대응정책 실시된 이후 생산과정에서 파생되는 온실가스 배출량을 정량적으로 추정하려고 할 경우, 최적투입 요소 및 생산, 온실가스 배출량 등이 동시에 결정되지만 생산방식은 관측되지 않는 내생성 문제가 발생한다.

2. 도구변수와 내생성 통제

우리나라의 경우, 국가 전체에서 공급 및 배전을 계획하여 관리하는 전기의 경우 탄소배출계수에 있어 기업·지역·산업별 격차가 없지만,¹¹⁾ 나머지 에너지의 경우 동일한 품목을 동일한 연료 및 원료로 생산하더라도 기업별로 생산설비 및 기술이

10) 예를 들어, 노동자들의 호흡으로 인한 이산화탄소, 점심 식사의 곡물과 육고기를 기르고 유통하는 과정에서 발생한 이산화탄소, 출퇴근 자가용 운전으로 인한 이산화탄소 발생 등은 애초에 산업부문 온실가스 배출로 집계되지 않는다. 한편, 설비의 연료 효율화를 통한 온실가스 저감은 에너지사용량을 변화시켜 이산화탄소 배출량에 영향을 준다. 이산화탄소 포집 기술 도입과 같은 경우는 생산방식(h)의 변화에 해당하며, 에너지사용량, 이산화탄소 발생량, 자본, 생산 모두 내생적으로 변화한다.

11) 전기 사용으로 인한 이산화탄소 간접배출은 전국적으로 하나의 배출계수를 일괄 적용하기 때문에, 본 연구의 분석 대상인 지역별 산업별 온실가스 배출량은 해당 지역에 화력발전소가 있는지에 따라 영향을 받지 않는다.

달라 배출하는 이산화탄소의 양이 다르다. 제조업 생산으로 인한 온실가스 배출량을 분석하기 위해서, 사업체 단위의 생산량과 에너지소비백터, 이산화탄소 배출량을 데이터로 가지고 있는 이상적인 경우를 가정해 보자. 온실가스 감축정책이 본연의 목표를 달성한다면, 기업이 생산당 에너지사용량의 양을 줄이거나 에너지소비구성을 보다 친환경적으로 변화시켜 이산화탄소 발생량을 줄일 것이다. 만약 에너지 자료가 완벽하게 세분화되어 있다면 이산화탄소 배출량 자료를 추가로 확인할 필요 없이, 배출계수를 가중치로 둔 채 생산으로 인한 에너지 사용량 분석을 실시하는 것으로 충분할 것이다. 이때 생산과 온실가스 배출 사이의 OLS 추정치는 투입요소의 변화뿐만 아니라 잠재변수인 생산방식이 변화하여 생산함수 및 온실가스배출함수의 구체적인 사양이 변화한 경우까지도 모두 포함한 분석결과를 제시한다.¹²⁾ 그런데 만약 데이터가 충분히 세밀하지 않다면, 누락변수로 인한 추정편의가 발생하게 되어 OLS 추정치를 그대로 사용하는 것의 단점이 커진다.

본 연구에서 사용하는 자료의 불완전성 문제는 세 가지 정도로 존재한다. 2018년까지의 자료는 기업수준이 아닌 산업수준의 자료로 제공되어, 산업 내 기업 구성의 변화가 고정효과로 충분히 통제되지 않는다. 두 번째로, 에너지의 총사용량을 전기·석유·석탄·천연가스 네 가지로만 구분하여 사용하므로 온실가스 배출계수의 에너지 종류 및 용도별 이질성이 완전히 통제되지 못한다.¹³⁾ 세 번째로, 자본변수가 에너지 및 온실가스 배출과 관련된 생산기술 특화 자본만을 다루고 있지 못한 채 유형자산·무형자산·토지·감가상각비와 같은 전통적인 자본의 세부구성을 따르고 있어 통제변수로서 충분히 기능하지 못하다. 결론적으로, 온실가스 감축정책은 기업 내 저탄소 생산기술의 변화와 에너지 소비구성(energy mix)의 종합적인 변화를 도모하여 본질적으로 내생성을 야기하는 와중에, 생산량, 에너지 총사용량, 이

12) 2SLS 추정을 실시한다면 기존의 생산기술이 변화하지 않는다는 가정에서 탄소감축을 단순히 생산 축소로 대응할 경우 어느 정도의 규모인지를 불편추정치로 확인하는데 더 적합하므로, 완전한 데이터를 가지고 있다고 하더라도 OLS추정치와 2SLS 추정치를 비교하며 요인을 분해할 수도 있다.

13) 선행연구에서 국가별 총생산, 에너지 총사용량, 이산화탄소 총배출량 사이의 관계를 확인하고 있으므로, 본 연구에서도 에너지 총사용량을 사용하였을 경우 발생하는 에너지 구성으로 인한 누락변수 편의문제를 강조하기로 한다. 추후 기업별 실측 온실가스 배출량 자료가 확보될 경우 에너지 용도를 이보다 더 세분화하여 실증분석을 하는 것이 가능할 수 있으나, 현재로서는 용도별 에너지사용량에 탄소배출계수 곱하여 합산하는 방식으로 온실가스 발생량을 추계하고 있으며 제공되는 자료는 원자료를 일정 층위에서 합산한 정보이다.

산화탄소 발생량 데이터의 한계 상 불편추정치를 담보하는 2SLS 추정을 실시하는 것이 보다 더 바람직하다고 판단된다.

이제까지의 내용을 요약하면, 생산방식은 생산량, 투입요소, 이산화탄소 배출과 모두 직접적으로 관련되어 있어 이들 변수간에 높은 내생성이 발생하는 원인이며, 잠재변수이므로 직접 관측되지 않아 자동으로 누락된다. 이산화탄소 발생량은 에너지소비와 생산방식의 함수이며, 생산은 고용, 자본, 원자재, 에너지 및 생산방식의 함수이다. 따라서 에너지 소비자료가 충분히 세밀하지 않다면 생산과 온실가스 배출 사이에 누락변수 편이가 발생한다. 본 연구의 목적은 생산에서 파생되는 이산화탄소 배출량이 얼마인지, 또한 그 양이 온실가스 감축정책 시행 후 유의하게 줄었는지를 정량분석하는데 있다. 따라서, 불편추정량을 도출하기 위하여 직접적으로는 이산화탄소를 배출하지는 않으면서도 생산량과 높은 상관관계를 가지고 있는 노동변수들을 도구변수로 사용한다.¹⁴⁾ 노동자는 생산함수를 통해 생산방식 및 생산량과 높은 상관관계를 가지고 있지만 다른 변수가 변화하지 않는다면 노동자 자체만으로 산업부문 이산화탄소 배출을 늘리지 않는다. 자본의 경우 외생성 조건이 상대적으로 정당화되기 쉽지 않은데, 이는 탄소배출 저감을 위한 구체적인 방안으로서 신규설비의 도입 및 추가장비 설치를 통해 에너지사용량 혹은 생산량 대비 이산화탄소 배출량을 직접적으로 줄일 가능성이 있기 때문이다. 이에 따라 본 연구의 실증분석에서는 생산과 이산화탄소 배출량 사이의 내생성을 통제하기 위해 노동자수(L)와 급여총액(W)을 사용한다.

3. 실증분석 모형

본 연구는 온실가스 감축정책이 실시된 2015년 이후 주력산업의 생산활동으로 인한 온실가스 배출량이 유의하게 줄어드는 정책효과가 있었는지 확인하는 것을 목표

14) 총 769개 산업·지역·연도 관측치를 대상으로, 독립변수와 종속변수 간의 상관계수는 $\rho(CO_2, Y) = 0.4659$, 독립변수와 도구변수 간의 상관계수는 $\rho(CO_2, L) = 0.1505$, $\rho(CO_2, W) = 0.2171$, 종속변수와 도구변수 간의 상관계수는 $\rho(L, Y) = 0.7714$, $\rho(W, Y) = 0.8471$ 로 확인되었다. 이산화탄소 발생량이 중위값 24만CO₂Eq 이상인 다배출 관측치 384개를 대상으로는 상관계수가 $\rho(CO_2, Y) = 0.3671$, $\rho(CO_2, L) = -0.0158$, $\rho(CO_2, W) = 0.0803$, $\rho(L, Y) = 0.6997$, $\rho(W, Y) = 0.8054$ 로 나타났다.

로 한다. 온실가스 배출 변수는 소수의 산업 및 지역이 차지하는 비중이 매우 크기 때문에, 주요 산업 및 지역별 이질성을 통제하기 위해 고정효과(fixed effect) 회귀 추정을 실시한다. 실증분석은 크게 두 가지 부분으로 나누어진다. 먼저, 온실가스 감축정책이 실시된 이후 산업부문 온실가스 배출 총량이 유의하게 줄어들었는지 총괄적 정책효과를 다각도로 확인하는 것이 첫 번째 목표이다. 또한, 온실가스 감축 정책 시행 이후 제조업 생산 대비 온실가스 배출량에 변화가 있는지를 내생성을 통제하여 추정한다.¹⁵⁾ 두 번째 분석을 통해, 현재의 생산방식을 그대로 유지한 채 온실가스 배출 감축을 단순히 생산량의 축소로 대응한다면 경제가 어느 정도로 위축 되는지 추산하는 데 기초가 될 정량적으로 신뢰할 수 있는 불편추정치를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 이산화탄소 배출량 수준 변수를 사용하여 회귀 추정을 실시한다. 이산화탄소 배출 변수는 0에 가까운 매우 작은 값과 소수의 다배출 값이라는 양극단에 최빈값이 있는 쌍봉분포 변수에 해당한다. 따라서 로그변환을 취하면 큰 관측치의 규모를 통제하는 효과보다는 작은 값을 가지는 관측치의 미미한 변화를 확대 왜곡하는 효과가 더 크게 발생한다. 또한, 기후변화 대응이라는 정책목표를 달성하기 위해서는 지구 전체에 발생하는 이산화탄소 총배출량의 감축이 중요하므로, 본 연구의 목적에는 단순합의 변화가 비율변화보다 더 중요하다.¹⁶⁾

아래의 식 (4)처럼, 각 산업(k) 및 지역(j) 별 이산화탄소 배출총량, 석탄 사용으로 인한 이산화탄소 배출량, 석유사용으로 인한 이산화탄소 배출량, 전기 사용으로 인한 이산화탄소 배출량 등이 정책시행 연도를 나타내는 처리효과(T) 전후로 어떻게 변화하였는지를 추정한 β_1 이 정책효과 계수이다. 여기서는 이산화탄소 배

15) 이산화탄소 배출 총량 혹은 생산 단위당 배출량이 유의하게 감축되었다면, 이러한 온실가스 감축과 상충관계에 있는 다른 경제변수들을 분석하는 방향으로 연구를 진행하는 것도 가능할 것이다. 하지만 감축 효과가 실증적으로 존재하지 않음에도 불구하고 온실가스 감축정책이 실시된 지역 및 연도 더미와 다른 경제변수들과의 관계를 분석한다면, 이는 온실가스 감축정책과 우연히 동시에 발생한 다른 생산환경 변화의 효과를 추정하는 가짜결과(spurious results)일 우려가 발생한다.

16) 대다수의 경제학 선행연구에서 로그변환을 사용하는 이유는 동형(homothetic) 모형을 기반으로 하거나, 단봉분포이지만 왜도 및 극단치의 문제가 있는 변수를 정규화할 의도가 있거나, 탄력성 추정의 경우처럼 모수 자체가 비율변화의 비이기 때문임을 상기할 필요가 있다. 본 연구의 설명변수인 이산화탄소 배출량은 두 가지 이유에 해당하지 않으므로, 수준 변수를 사용한 회귀분석을 하는 것이 연구목표에 보다 잘 부합한다.

출량이 정책시행 전후로 어떻게 변화하였는지를 종합적으로 확인하는 것이 목적이므로 OLS 추정결과를 보고한다.

$$CO_{2\ jkt} = \beta_0 + \beta_1 T + \epsilon_{jkt} \quad (4)$$

두 번째 분석은 온실가스 감축정책 시행 이후로 생산당 온실가스 배출량이 감소하였는지를 분석하는 것을 목적으로 하며, 식 (5)의 β_2 가 정책효과를 나타낸다. 여기서는 산업의 생산과 온실가스 배출량 사이의 내생성을 통제하기 위해 도구변수를 사용한 2SLS 추정결과를 보고한다.

$$CO_{2\ jkt} = \beta_0 + \beta_1 Y_{jkt} + \beta_2 Y_{jkt} T + \epsilon_{jkt} \quad (5)$$

4. 분석자료

제조업의 온실가스 배출과 생산과의 관계를 분석하기 위한 목적으로 2012~18년의 산업 및 지역별 연간 연결패널자료를 구축하였으며, 크게 경제변수와 환경 관련 변수 두 그룹으로 나누어진다. 경제변수는 사업체 수, 생산, 부가가치, 고용, 자본 등으로, 10인 이상 고용 사업체 전수 자료인 광업제조업조사를 사용하였다. 광업제조업조사에 포함되지 않는 10인 이하 사업체는 이산화탄소 발생량이 적으며 에너지원 중 전기 사용의 비중이 크므로 지역별·산업별 이질성의 주요 원인이 되지 않는다. 이산화탄소 다배출 업종인 1차금속과 정유 및 화학제품 제조업은 소규모 제조업체의 비중이 낮은 업종에 속하며 에너지사용량과 이산화탄소 배출량 모두 큰 규모의 제조업체에 집중되어 있어, 온실가스 분석의 경우 전수자료가 아니라는 한계점이 연구 결과에 미치는 영향이 일반적인 주제보다 크지 않을 것으로 기대된다.

환경변수로서 국내 온실가스 배출량에 대한 자료 취득처로는 국가온실가스배출량 종합정보 시스템(National greenhouse gas Emission Total Information System; NETIS)과 국가온실가스 인벤토리보고서(NIR)가 있다. NIR은 직접온실가스 6종 모두에 대한 자료를 제공하지만 NETIS 데이터는 직접온실가스 중 일부(HFCs, PFCs, SF₆)에 대해서는 정보를 제공하지 않는다. 에너지의 공급을 고려한다면 발전부문과 비에너지 산업부문의 온실가스 발생량을 분리하여 집계하는 것이 유용하

고, 에너지의 소비를 고려한다면 최종소비처인 산업부문에서 에너지 및 비에너지 온실가스 발생량을 집계하여야 중복계산을 방지할 수 있다. NIR은 전자의 방식¹⁷⁾을, NETIS는 후자의 방식을 따르고 있다.

본 연구에서는 산업·지역별 온실가스 배출량 변수가 필요하므로 NETIS 자료를 사용하였는데, 분석대상 온실가스가 CO₂에 한정되어 NIR 대비 단점이 적용되지 않는다. NIR의 경우, 전기와 열을 생산하는 과정에서 배출된 온실가스를 최종 수요처의 배출량이 아닌 전환부문으로 집계함에 따라 전력 소비로 인한 온실가스 배출량 중 제조업의 기여분을 분리할 수 없다는 단점을 지닌다. 대신 NETIS는 전력 사용을 포함한 모든 형태의 에너지 활용으로 인한 산업부문의 온실가스 배출량을 분석할 수 있는 장점이 있다. 산업부문의 온실가스 배출량을 집계할 때 NETIS에서는 10인 이상 사업체를 전수조사하고, 10인 미만 사업체에 대해서는 표본조사 후 가중치 적용을 하였다.

본 연구에서는 광업제조업조사와 NETIS의 변수를 산업(중분류 25개)·지역(시도 분류 17개)별로 연결한 연간 데이터를 사용하며, NETIS에서 제조업 내 중분류별 자료가 제공된 2012년 이후를 대상으로 한다. 광업제조업조사의 지역·업종·연도별 출하액, 급여액, 유형자산 연말잔액, 종사자 수 등의 경제변수를 분석에서 활용하였으며, NETIS에서는 지역·업종·연도별 에너지소비량과 CO₂배출량과 같은 환경·에너지 변수를 이용하였다. 온실가스 감축정책 기조가 본격적으로 실시된 2015년을 기점으로 <Table 1>에 주요변수의 기초통계량을 제시하였다.

17) NIR에서는 산업부문에서 배출되는 온실가스를 크게 ‘에너지’와 ‘산업공정’의 두 분야로 나누어 집계한다. 이를테면 시멘트 산업에서 킬른을 가열하기 위해 화석연료를 직접연소하는 과정에서 발생한 온실가스는 ‘에너지’ 부문 발생량으로, 석회석의 탈탄산 공정으로부터 발생하는 온실가스는 ‘산업공정’ 부문 발생량으로 집계된다. 이 경우 산업부문 배출량의 90%를 차지하는 직접배출 및 간접배출은 NIR의 ‘에너지’ 부분에서 집계되어 해석에 주의가 필요하다.

(Table 1) Descriptive Statistics of Linked Panel Data

		CO ₂ emissions	Energy consumption	Output (Sales)	Total Payroll	Employment	Tangible Assets (year-end)
2012-2014	Mean	816.1	321.8	4,209.2	294.3	7,952.6	1,427.9
	Std. Dev.	3,608.2	1,626.3	10,660.6	701.8	16,679.6	3,566.0
	Median	71.5	16.3	782.5	72.2	2,297.0	299.7
	Obs.	1,064					
2015-2018	Mean	867.8	341.3	4,111.8	349.4	8,197.6	1,605.1
	Std. Dev.	3,860.0	1,671.5	10,260.4	828.2	16,693.7	4,028.9
	Median	78.5	17.6	856.7	85.7	2,310.0	324.7
	Obs.	1,435					
	Unit	Thousand tCO ₂ Eq	Thousand TOE	Billion KRW	Billion KRW	Person	Billion KRW

Source: Mining and manufacturing survey; and National GHG Emission Total Information System, 2012-2018.

V. 분석결과

1. 이산화탄소 총배출량 감축 효과

우선 온실가스 감축정책 기조가 지역·산업의 이산화탄소 총배출량에 미친 효과를 분석한다. 온실가스 감축정책 시행 원년인 2015년 이후를 처리변수로 사용하는 것을 기본으로 하여 정책효과가 발현되기까지 시간이 걸릴 수 있음을 고려하여 2016년 이후, 2017년 이후, 각 연도효과를 별개로 추정한 결과를 <Table 2>에서 순서대로 확인할 수 있다. 산업부문 이산화탄소의 배출량에 대한 정책효과는 정책 목표와는 반대되게 유의한 양(+)의 값을 가지며 시간이 지날수록 그 증가 폭 또한 더 커지고 있다. 개별 연도효과를 확인한 <Table 2>의 (4) 결과에 따르면, 2015년 소폭 하락하기는 하였으나 전반적으로 이산화탄소 배출량은 꾸준히 증가하는 추세이며, 2018년의 증가 폭이 다른 시점에 비해 더 크다는 점을 확인할 수 있다.

〈Table 2〉 The Effect of Climate Policy(Year Dummies) on CO₂ Emissions(Unit: Thousand tCO₂Eq)

Independent variables	Dependant variable = CO ₂			
	(1)	(2)	(3)	(4)
T15 (year ≥ 2015)	61.624*** (15.955)			
T16 (year ≥ 2016)		67.624*** (15.968)		
T17 (year ≥ 2017)			75.409*** (17.542)	
year 2013				15.296 (29.466)
year 2014				61.229** (29.449)
year 2015				50.917 (29.332)
year 2016				69.605** (29.392)
year 2017				89.087*** (29.525)
year 2018				140.918*** (29.553)
Obs.	2,499	2,499	2,499	2,499
Within R-squared	0.007	0.008	0.009	0.014
Fixed Effects	Industry × region Industry × region Industry × region Industry × region			

Note: 1) Numbers in the parentheses represent robust standard errors. * P<0.10; ** P<0.05; *** P<0.01.

2) The results control for all region FE, industry FE, and industry×region interaction terms. Significance of coefficients is not sensitive to types of fixed effects.

이산화탄소의 총배출량이 증가한 것은 매년 생산이 증가하는 현상을 고려하면 일면 당연한 결과일 수 있다. 따라서 〈Table 3〉에서는 생산당 이산화탄소 배출량과 생산당 에너지소비량에 정책효과가 있는지를 확인하였는데, 둘 다 정책 기조와는 반대로 유의하게 증가한 것을 확인하였다. 이는 생산량의 증가가 있었던 것은 사실이지만, 그 크기에 비해 이산화탄소 총배출량의 증가가 훨씬 더 큰 폭이었다는 점을 드러낸다.

〈Table 3〉 The Effect of Climate Policy on CO₂ Emissions per Output and Energy Consumption per Output

(Unit: tCO₂Eq/Million KRW, TOE/Million KRW)

Independent variables	Dependant variable = CO ₂ / Y			Dependant variable = E / Y		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
T15	0.030*** (0.008)	0.029*** (0.006)		0.008*** (0.002)	0.008*** (0.001)	
T16			0.027*** (0.008)			0.007*** (0.002)
Obs.	2,499	2,499	2,499	2,499	2,499	2,499
R-squared	0.429	0.012	0.428	0.556	0.015	0.555
Fixed Effects	Industry, region, and 9 interaction terms	Industry × region (384 terms)	Industry, region, and 9 interaction terms	Industry, region, and 9 interaction terms	Industry × region (384 terms)	Industry, region, and 9 interaction terms

Note: 1) In columns (1), (3), and (5), region fixed effects, industry fixed effects, and only nine carbon intensive region-industry pairs are controlled: Gyeongbuk-basic metals; Ulsan-refinery; Ulsan-chemicals; Jeonnam-basic metals; Jeonnam-refinery; Jeonnam-chemicals; Chungnam-basic metals; Chungnam-chemicals; and Gyeonggi-electronics.
 2) Others columns use all of interaction terms, and estimation results are robust to fixed effect specification. We report R-squared in the region × industry fixed effects model as within-group value.

온실가스 감축정책 목표와 부합하는 유일한 결과는 에너지사용량당 이산화탄소 배출량이 정책 시행 이전에 비해 유의하게 감축되었다는 점으로, 〈Table 4〉의 (1) ~ (3)의 처리효과가 음(-)의 값으로 유의한 것이 확인된다. 에너지 종류는 크게 석탄, 석유, 전기, 천연가스 및 기타의 네 가지로 구분하였는데, 〈Table 4〉의 (4) ~ (6)에서 확인되는 것처럼 에너지 종류별 사용비중이 통제될 경우 해당 정책효과가 사라진다. 이는 온실가스 감축정책의 시행 이후 생산당 에너지소비량은 늘어났지만 에너지 구성의 저탄소화가 소폭 이루어졌다는 것을 뜻한다. 만약 에너지 종류별 사용비중이 변화하지 않았다면, 에너지사용당 이산화탄소 배출이 저감된 현상이 사라진다고 해석할 수 있다. 에너지 구성의 친환경화를 다각도로 확인하기 위하여 〈Table 5〉에서는 에너지 종류별 소비 비중에 정책효과가 있는지를 확인하였다. 2015년 이후로 유의하게 석탄과 전기의 사용비중은 줄어든 반면, 천연가스 및 기타

에 해당하는 에너지 사용비중이 증가하였다. <Table 6>에서 보듯이, 각 에너지 종류별 사용량당 이산화탄소 발생량은 석유와 천연가스에서 감소하였지만 유의한 정도가 아니며, 석탄과 전기는 에너지열량당 이산화탄소 발생량이 오히려 증가하였다. NETIS 자료에서는 석탄의 종류 및 사용처에 따라 배출계수의 차이가 있어 어떤 방식으로 에너지를 소비하는지에 따라 석탄 에너지열량당 이산화탄소 배출량이 늘어날 수 있으며,¹⁸⁾ 전기 또한 석탄, LNG, 원자력, 수력, 신재생(풍력, 태양력) 등으로 구성되는 전원비중에서 가장 탄소집약적 연료인 석탄화력의 비중이 늘어나면 단위 전기 열량당 이산화탄소 배출이 늘어난다.

<Table 4> The Effect of Climate Policy on CO₂ Emissions per Energy

(Unit: %, tCO₂Eq/TOE)

Independent variables	Dependant variable = CO ₂ / E					
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
T15	-0.0418*** (0.0213)	-0.0374** (0.0152)		0.0437*** (0.0108)	0.0353*** (0.0088)	
T16			-0.0532*** (0.0215)			0.0249** (0.0106)
Coal share E_c/E				0.0129*** (0.0008)	0.0056*** (0.0010)	0.0127*** (0.0008)
Petroleum share E_p/E				-0.0007 (0.0015)	0.0023*** (0.0007)	-0.0008 (0.0015)
Electricity share E_e/E				0.0276*** (0.0005)	0.0278*** (0.0004)	0.0276*** (0.0005)
Obs.	2,474	2,474	2,474	2,474	2,474	2,474
R-squared	0.533	0.003	0.534	0.889	0.682	0.888
Fixed Effects	Industry, region, and 9 interaction terms	Industry × region (376 terms)	Industry, region, and 9 interaction terms	Industry, region, and 9 interaction terms	Industry × region (376 terms)	Industry, region, and 9 interaction terms

18) 2018년 전국 제조업 전체 평균을 기준으로 보면, 석탄류를 고로·전로가스 등에서 사용시 배출계수는 6.7741이지만, 유연탄(연료) 사용시 3.8090으로 배출계수에 있어 큰 차이를 보인다. 유연탄을 연료가 아닌 원료로 사용시 3.8256으로 배출계수가 소폭 상승하며, 석탄의 고로·전로가스 사용시 충남의 배출계수는 6.1879이지만 경북의 배출계수는 7.1270으로 지역별 차이도 존재한다. NETIS에서 집계된 2015년 대비 2018년도 제조업 석탄 사용구성의 가장 큰 변화는 유연탄 사용량의 감소 대신 석탄코크스 사용량의 증가로 요약할 수 있다.

<Table 5> The Effect of Climate Policy on Energy Types

(Unit: %)

Dep. var.	Coal E_c / E		Petroleum E_p / E		Electricity E_e / E		Natural gas E_g / E	
Indep. var.	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
T15	-1.231*** (0.304)	-1.271*** (0.196)	-0.492 (0.387)	-0.455 (0.281)	-2.531*** (0.698)	-2.327*** (0.464)	4.254*** (0.650)	4.053** (0.457)
Obs.	2,474	2,474	2,474	2,474	2,474	2,474	2,474	2,474
R-squared	0.506	0.197	0.605	0.001	0.521	0.012	0.391	0.036
Fixed Effects	Industry, region, and 9 interaction terms	Industry × region (383 terms)	Industry, region, and 9 interaction terms	Industry × region (383 terms)	Industry, region, and 9 interaction terms	Industry × region (383 terms)	Industry, region, and 9 interaction terms	Industry × region (383 terms)

<Table 6> The Effect of Climate Policy on CO₂ Emissions per Energy

(Unit: tCO₂Eq/TOE)

Dep. var.	Coal CO_{2c} / E_c		Petroleum CO_{2p} / E_p		Electricity CO_{2e} / E_e		Natural gas CO_{2g} / E_g	
Indep. var.	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
T15	0.241*** (0.052)	0.171*** (0.042)	-0.150 (0.037)	-0.041 (0.031)	0.068*** (0.009)	0.068*** (0.008)	-0.008 (0.015)	-0.016 (0.011)
Obs.	214	214	1,289	1,289	2,429	2,429	1,779	1,779
R-squared	0.430	0.105	0.337	0.002	0.078	0.030	0.404	0.002
Fixed Effects	Industry, region, and 9 interaction terms	Industry × region (69 terms)	Industry, region, and 9 interaction terms	Industry × region (260 terms)	Industry, region, and 9 interaction terms	Industry × region (376 terms)	Industry, region, and 9 interaction terms	Industry × region (311 terms)

Note: 1) Many observations can be zeros, especially for coal energy consumptions. To avoid distortions that would occur in rounding off, CO₂ emissions less than one thousand ton are excluded.

2) In column (1), the coefficient of T15 indicates that coal-based CO₂ emission per coal consumption after 2015 is higher than one before 2015 by 0.241 tCO₂Eq/TOE when industry, region, and nine interactions are controlled.

이를 종합하면, 제조업에서 온실가스 감축정책 시행 이후 저탄소 방향으로 전환이 된 유일한 항목은 에너지 소비구성이며, 구체적으로 석탄과 전기의 사용비중이 줄고 천연가스 등의 에너지 사용비중이 늘어남으로써 에너지소비량당 이산화탄소 발생량의 감소가 나타났다. 하지만 생산당 에너지사용량이 증가한 효과가 더 큰 규모로 존재하여 생산당 이산화탄소는 오히려 증가하였으며, 온실가스 배출량 또한 증가세를 이어가고 있다.

추가적으로 온실가스 다배출 지역인 충남, 전남, 경북으로 한정하여 주력산업의 이산화탄소 배출량에 미친 온실가스 감축정책의 효과를 추정한다. <Table 7>에서 확인 가능한 것처럼, 온실가스 감축정책 시행 이후 충남지역의 제조업 이산화탄소 총배출량이 증가하였다는 점에서 전국과 변화의 방향이 동일하지만 그 규모 및 증가 속도가 다른 지역에 비해서 매우 큰 것으로 나타났다. 충남의 경우 정책 시행 후 이산화탄소 배출량이 480,059tCO₂Eq 더 증가하여 그 크기가 매우 크면서도

<Table 7> The Effect of Climate Policy on Regional CO₂ Emissions

(Unit: Thousand tCO₂Eq)

Dep. var.	Chungnam CO ₂		Jeonnam CO ₂		Gyeongbuk CO ₂	
Indep. var.	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
T15 (year ≥ 2015)	480.059**		87.327		70.550	
	(213.865)		(79.882)		(44.375)	
year 2013		-6.352		133.450		11.059
		(390.605)		(174.037)		(112.301)
year 2014		461.600		146.474		112.786
		(390.605)		(130.944)		(95.267)
year 2015		445.452		139.200		151.436*
		(390.605)		(102.515)		(89.848)
year 2016		467.865		45.398		112.264
		(390.605)		(129.598)		(97.771)
year 2017		577.728		279.993*		53.309
		(401.610)		(145.191)		(86.920)
year 2018		1,082.895***		255.069*		130.318
		(401.610)		(146.069)		(94.595)
Obs.	158	158	150	150	156	156
R-squared	0.958	0.960	0.998	0.998	0.999	0.999
Fixed Effects	Industry	Industry	Industry	Industry	Industry	Industry

5% 수준에서 유의하다. 이는 온실가스 배출 총량의 비중이 높은 전남의 정책효과 추정치가 87,327톤으로 유의하지 않으며, 경북의 정책효과는 70,550톤으로 유의하지 않은 것과 대조적인 현상으로, 충남지역은 배출 비중이 높을 뿐만 아니라 2015년 이후 배출량이 큰 폭으로 늘어나기도 하였다.

그러나 <Table 8>에서 알 수 있듯이 충남지역의 생산당 이산화탄소 배출량의 증가 및 생산당 에너지사용량의 증가는 다른 지역과 유의하게 다르지는 않은 것으로 나타났다. 이는 충남지역 이산화탄소 총배출량의 대규모 증가는 생산의 증가로 설명 가능한 신뢰구간 범위를 유의하게 벗어나지 않음을 뜻한다. 쉽게 말하면, 충남 지역 내에 대규모의 이산화탄소 배출량 증가가 있었지만, 이는 생산량의 증가로 설명되지 못할 수준 이상인 것은 아니다. 단, 충남지역은 3장 4절에서 확인하였듯 산업을 통제하고 나서도 생산량 대비 이산화탄소 배출량이 타지역에 비해 높은 지역임을 상기할 필요가 있다.

<Table 8> The Effect of Climate Policy on CO₂ Emissions per Output and Energy Consumption per Output for Five Major Carbon-Intensive Regions

(Unit: tCO₂Eq/Million KRW, TOE/Million KRW)

Independent variables	Dependant variable = CO ₂ / Y			Dependant variable = E / Y		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
T15	0.042*** (0.016)	0.041*** (0.013)		0.012*** (0.004)	0.012*** (0.003)	
T15 × Chungnam	-0.008 (0.048)	-0.008 (0.028)		0.004 (0.013)	0.004 (0.007)	
T16			0.029* (0.017)			0.008* (0.004)
T16 × Chungnam			-0.009 (0.050)			0.003 (0.013)
Obs.	769	769	769	769	769	769
R-squared	0.604	0.019	0.602	0.751	0.032	0.749
Fixed Effects	Industry, region, and 9 interaction terms	Industry × region (118 terms)	Industry, region, and 9 interaction terms	Industry, region, and 9 interaction terms	Industry × region (118 terms)	Industry, region, and 9 interaction terms

Note: Five carbon intensive regions are Gyeongbuk, Ulsan, Jeonnam, Chungnam, and Gyeonggi.

전국 단위에서 존재하였던 에너지사용량당 온실가스 발생량이 유의하게 감소하였던 현상을 5개 다배출 지역에서는 유의하게 관찰하지 못한다는 것을 <Table 9>에서 확인할 수 있다. 에너지 사용비중을 통제할 경우 5% 수준에서 유의한 정도로 에너지사용량 대비 온실가스 배출량이 증가하는 것을 볼 때, 5개 다배출 지역에서도 에너지 사용비중 변화가 친환경적인 방향으로 발생한 것은 맞지만 그 규모가 다른 지역에 비해 충분히 크지 않음을 알 수 있다. 여기서는 충남지역이 나머지 다배출 지역과 상이한 방향의 변화를 보이지는 않는다. 즉 에너지 사용비중의 변화는 다배출지역보다 나머지 지역에서 더 정책과 부합하는 방향의 변화를 만들어 냈음을 유추할 수 있다. 이를 종합하면, 충남지역에서 정책 시행 이후 이산화탄소 배출이 큰 폭 증가하였다는 증거는 유의하게 존재하지만, 이산화탄소 추가 배출량이 생산의 증가에서 기인하였다는 귀무가설은 기각되지 않기도 하였다.

<Table 9> The Effect of Climate Policy on CO₂ Emissions per Energy for Five Major Carbon-Intensive Regions

(Unit: %, tCO₂Eq/TOE)

Independent variables	Dependant variable = CO ₂ / E					
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
T15	-0.030 (0.033)	-0.028 (0.023)		0.039*** (0.014)	0.032*** (0.012)	
T15 × Chungnam	-0.009 (0.071)	-0.010 (0.050)		-0.007 (0.033)	-0.004 (0.026)	
T16			-0.050 (0.033)			0.010 (0.014)
T16 × Chungnam			-0.035 (0.070)			0.011 (0.034)
Coal share E_c/E				0.011*** (0.001)	0.0056*** (0.0010)	0.0127*** (0.0008)
Petroleum share E_p/E				0.003** (0.0015)	0.001 (0.001)	0.003** (0.001)
Electricity share E_e/E				0.026*** (0.001)	0.028*** (0.001)	0.026*** (0.001)
Obs.	754	754	754	754	754	754
R-squared	0.809	0.003	0.810	0.964	0.717	0.963
Fixed Effects	Industry, region, and 9 interaction terms	Industry × region (116 terms)	Industry, region, and 9 interaction terms	Industry, region, and 9 interaction terms	Industry × region (116 terms)	Industry, region, and 9 interaction terms

Note: Five carbon intensive regions are Gyeongbuk, Ulsan, Jeonnam, Chungnam, and Gyeonggi.

2. 내생성 통제: 생산 증가로 인한 이산화탄소 배출 감축 효과

이번에는 생산량 증가에 따라 파생적으로 발생하는 이산화탄소 배출량이 온실가스 감축정책 시행 이후 감축되었는지를 분석한다. 생산과 온실가스 사이의 내생성을 통제하기 위해 생산과는 직접적인 관련이 있으나(적합성) 생산함수를 통하지 않고서는 산업부문 온실가스를 독자적으로 배출하지 않는(외부성) 노동자 관련 변수를 도구변수로 사용하여 2SLS 추정을 실시한다. 도구변수를 사용한 추정량과 OLS 추정량이 유의하게 다른지를 내생성 검정을 통해 확인하며, 계수추정에 사용하고 남은 자유도 만큼의 도구변수 정보를 활용하여 과대식별(over-identification) 검정 결과를 제시하였다.¹⁹⁾

〈Table 10〉에서는 생산 증가로 인한 CO₂ 배출량이 정책 시행 이전에는 십억원당 63~90tCO₂Eq으로 추정되었으나, 2015년 이후는 그 이전에 비해 생산 십억원당 11~12tCO₂Eq가 추가적으로 더 발생하는 것으로 추정되었다. 2016년 이후를 정책적 분기점으로 설정한 경우에도 유사한 계수값이 추정되었으며, 생산 십억원당 추가 이산화탄소 배출량은 9~12tCO₂Eq이라는 결과를 얻었다. 해당 결과의 내생성 검정통계량은 귀무가설을 기각할 만한 충분히 큰 값으로 생산변수와 이산화탄소 배출 사이에는 내생성 문제가 있다고 볼 수 있으며, 과대식별 검정통계량은 5% 유의수준에서 기각되지 않아 도구변수가 잔차와의 상관관계가 없다는 귀무가설을 기각할만한 증거를 확인하지 못하였다.

19) 내생성 검정의 경우 OLS 추정량과 2SLS 추정량의 차이가 0이라는 귀무가설하에서 Durbin-Wu-Hausman 검정통계량을 제시한다. 즉 기각할 경우 설명변수가 외생적이지 않다는 실증근거가 확인되는 것이다. 과대식별 검정의 경우 도구변수와 회귀식 오차의 상관관계수가 0이라는 귀무가설하에서 고정효과 패널 추정에서는 Sargan-Hansen 검정통계량을, 더미를 포함한 회귀추정에서는 Sargan-Basmann 검정통계량과 Wooldridge robust score test 결과를 제시하였다. 즉, 기각하지 못할 경우 도구변수가 외생적이라는 가설을 기각할 만한 증거를 확인하지 못하였다는 뜻이다.

〈Table 10〉 2SLS: The Effect of Climate Policy on CO₂ Emissions from Production(Unit: Thousand tCO₂Eq, Billion KRW)

Independent variables		Dependant variable = CO ₂			
		(1)	(2)	(3)	(4)
Y		0.063*** (0.007)	0.076*** (0.021)	0.065*** (0.007)	0.090** (0.040)
Y × T15		0.012** (0.006)	0.011*** (0.003)		
Y × T16				0.012* (0.007)	0.009** (0.004)
Obs.		2,499	2,499	2,499	2,499
R-squared		0.881	0.048	0.881	0.013
Fixed Effects		Industry, region, and 9 interaction terms	Industry × region (384 terms)	Industry, region, and 9 interaction terms	Industry × region (384 terms)
IV		W L WT LT			
	χ^2 (2)	10.914***		9.605***	
Endogeneity	p-value	0.004		0.008	
test	F (2, 2445)	3.926**		3.864***	
	p-value	0.020		0.021	
OverID	χ^2 (2)	2.646	5.847*	1.602	2.635
test	p-value	0.266	0.054	0.449	0.268

Note: Four instrumental variables are used: total payroll (W), employment (L), W × Treatment and L × Treatment. T15 and T16 are used for the treatment.

〈Table 11〉에서는 동일한 회귀식에 에너지 사용비중을 추가로 통제한 추정치를 제시하였다. 정책 시행 이전의 경우 십억원의 생산으로 야기된 이산화탄소 배출량은 57~90tCO₂Eq 이었으나, 정책 시행 이후 9~14tCO₂Eq가 추가적으로 더 배출되고 있음을 확인하였다. 에너지사용량을 통제하지 않았을 때보다 추정치의 범위가 조금 더 넓어지기는 하였으나, 계수의 부호 및 유의성은 변하지 않았다.

고정효과를 모든 지역 및 산업에 대해 부여하지 않은 〈Table 11〉의 (1)과 (3)의 결과는 9개의 다배출 지역 및 업종을 제외한 나머지 업종·지역에 대해서는 교차항을 포함하고 있지 않다. (1), (3)의 결과는 9개 다배출 업종·지역을 제외하고서는

업종과 지역의 평균적인 이질성만을 통제한 추정이지만, (2), (4)의 결과는 모든 교차항을 통제함으로써 업종·지역 내부의 시계열적 변화만을 관심사로 둔 추정이라는 점에서 각각 의미가 있다. 석탄의 에너지 사용비중이 1% 더 높은 업종×지역은 타 업종·지역에 비해 이산화탄소 배출량이 101,877~101,802tCO₂Eq 많으며, 석유 에너지 사용비중이 1% 더 높은 경우 타 관측대상에 비해 이산화탄소 배출량이 6,030~6,106tCO₂Eq 많은 것으로 나타났다. 반면, 전기 사용비중이 1% 더 높은 업종·지역은 이산화탄소 배출량이 더 적지만 그 효과가 유의하지는 않은 것으로 추정되었다. 이러한 결과는 업종·지역 내부의 변화를 살펴보면 석탄과 석유 사용비중의 효과가 유의하지 않은 양수로 변화하는 반면, 전기 사용비중이 1% 높아질 경우 이산화탄소 배출량이 579~641tCO₂Eq 줄어드는 것으로 확인되었다. 이는 이산화탄소 배출량의 경우 산업 및 지역을 각각 통제하더라도 업종·지역의 특수성과 이질성이 매우 크다는 현실을 반영한다.

〈Table 12〉는 에너지소비당 이산화탄소 배출량이 생산을 통제하고 내생성을 고려한 추정을 실시한 경우에도 줄었는지를 확인해 본 것이다. 생산이 많아지면 에너지소비당 이산화탄소 배출은 감소하였는데, 이는 저탄소 에너지 사용의 비중 증가와 관련이 있는 것으로 (3)과 (4)에서 에너지 비중을 통제하면 배출 감소량이 줄어들며 유의하지 않은 수준이 된다. 만약 에너지 사용비중이 변화하지 않는다면, 생산으로 야기되는 에너지소비당 이산화탄소 배출량에는 정책효과가 반대인 양(+)의 값으로 추정되어, 에너지소비당 이산화탄소 배출량을 감축하는 데는 에너지 소비 비중의 변화가 주요하게 작용하였다는 점을 재차 확인하였다.

〈Table 13〉은 주요 지역별로 생산 증가로 인한 이산화탄소 배출량의 정책효과를 살펴본 결과이다. 충남, 경북, 전남 세 곳 모두 2015년 이후 생산 증가로 인한 이산화탄소 배출량이 유의하게 증가하였으며 그 규모가 전국 평균보다 더 크다. 충남 지역의 경우 십억원의 생산에 정책 시행 이전에는 256~469tCO₂Eq 이산화탄소가 배출되었으나, 정책 시행 이후 추가적으로 34~73tCO₂Eq가 더 배출되고 있음을 확인하였다. 경북의 경우 십억원 생산에 따른 이산화탄소 배출량이 정책 시행 이전에는 53~67tCO₂Eq이고 정책 이후 16~25tCO₂Eq가 추가적으로 발생하였으며, 전남의 경우 정책 시행 이전 75~148tCO₂Eq에서 정책 시행 이후 39~78tCO₂Eq이 추가적으로 늘어났다.

〈Table 11〉 2SLS: The Effect of Climate Policy on CO₂ Emissions from
Production Controlling for Energy Shares

(Unit: %, Thousand tCO₂Eq, Billion KRW)

Independent variables		Dependant variable = CO ₂			
		(1)	(2)	(3)	(4)
Y		0.057***	0.075***	0.060***	0.090**
		(0.005)	(0.021)	(0.005)	(0.040)
Y × T15		0.014***	0.011***		
		(0.005)	(0.003)		
Y × T16				0.013**	0.009**
				(0.005)	(0.004)
Coal share E_c/E		101.877***	2.502	101.802***	2.376
		(26.867)	(2.397)	(26.861)	(2.330)
Petroleum share E_p/E		6.106***	0.649	6.030***	0.538
		(2.160)	(0.915)	(2.166)	(0.921)
Electricity share E_e/E		-0.465	-0.641**	-0.441	-0.579*
		(0.724)	(0.312)	(0.725)	(0.302)
Obs.		2,474	2,474	2,474	2,474
R-squared		0.916	0.050	0.916	0.014
Fixed Effects		Industry, region, and 9 interaction terms	Industry × region (383 terms)	Industry, region, and 9 interaction terms	Industry × region (383 terms)
IV			W L WT LT		
Endogeneity test	$\chi^2(2)$	11.248***		9.482***	
	p-value	(0.004)		(0.009)	
	F(2,2417)	3.874**		3.607**	
	p-value	(0.021)		(0.027)	
OverID test	$\chi^2(2)$	1.711	5.846*	0.363	2.601
	p-value	0.425	(0.054)	(0.834)	(0.2724)

〈Table 12〉 2SLS: The Effect of Climate Policy on CO₂ Intensity of Energy due to Production

(Unit: %, Thousand tCO₂Eq, Trillion KRW)

Independent variables		Dependant variable = CO ₂ / E			
		(1)	(2)	(3)	(4)
Y/1000		-0.0093***	-0.0087***	-0.0027***	0.0025
		(0.0019)	(0.0052)	(0.0007)	(0.0018)
Y/1000 × T15		0.0016	0.0013	0.0014***	0.0011**
		(0.0010)	(0.0005)	(0.0003)	(0.0004)
Coal share E_c/E				0.0128***	0.0052***
				(0.0008)	(0.0013)
Petroleum share E_p/E				-0.0008	0.0039***
				(0.0015)	(0.0010)
Electricity share E_e/E				0.0280***	0.0285***
				(0.0004)	(0.0006)
Obs.		2,431	2,431	2,431	2,431
R-squared		0.5527		0.9166	0.769
Fixed Effects		Industry, region, and 9 interaction terms	Industry × region (376 terms)	Industry, region, and 9 interaction terms	Industry × region (376 terms)
IV			W L WT LT		
Endogeneity test	χ^2 (2)	4.274		3.960	
	p-value	(0.118)		(0.138)	
	F (2, 2374)	2.277		2.028	
OverID test	p-value	(0.103)		(0.132)	
	χ^2 (2)	18.463***	1.604	6.899*	10.633***
	p-value	0.000	(0.448)	(0.032)	(0.005)

Note: The unit of output is converted to trillion KRW to report significant digits of estimated coefficients.

〈Table 13〉 2SLS: The Effect of Climate Policy on CO₂ Emissions from
Production for Three Major Carbon-Intensive Regions

(Unit: Thousand tCO₂Eq, Billion KRW)

Dep. var.	Chungnam CO ₂		Gyeongbuk CO ₂		Jeonnam CO ₂	
Indep. var.	(1)	(2)	(3)	(4)	(3)	(4)
Y	0.256	0.469	0.067***	0.053***	0.148*	0.075
	(0.206)	(0.327)	(0.015)	(0.020)	(0.080)	(0.112)
Y × T15	0.073**		0.025***		0.078***	
	(0.006)		(0.009)		(0.024)	
Y × T16		0.034		0.016		0.039**
		(0.023)		(0.010)		(0.017)
Obs.	158	158	156	156	150	150
R-squared	0.955	0.946	0.999	0.999	0.998	0.998
Fixed Effects	Industry	Industry	Industry	Industry	Industry	Industry
IV	W L WT LT					
Endogeneity test	χ^2 (2)	2.508	7.479**	6.755**	3.383	6.476**
	p-value	0.285	0.024	0.034	0.184	0.039
	F (2, 130)	1.272	3.210**	2.655*	3.700**	4.639**
OverID test	p-value	0.284	0.044	0.074	0.027	0.011
	χ^2 (2)	3.890	3.219	1.851	9.298**	1.574
	p-value	0.143	0.200	0.396	0.010	0.455

VI. 결론 및 시사점

본 연구에서는 온실가스 감축정책이 주력산업의 이산화탄소 배출에 미치는 영향을 분석하여 다음과 같은 결과를 도출하였다. 첫째, 온실가스 감축정책이 본격적으로 시행된 2015년 이후로도 이산화탄소 배출량은 증가하는 모습을 보였다. 둘째, 생산당 이산화탄소 배출량 및 에너지소비량 역시 유의하게 증가하였다. 이는 2018년까지의 산업부문 온실가스 배출량의 증가가 단위 생산액에 대한 온실가스 배출량 자체도 증가하였기에 발생한 현상이라는 것을 뜻한다.²⁰⁾ 셋째, 에너지사용량당 이

20) 만약 전국적으로 동일한 제품을 만드는 데에 더 적은 온실가스를 배출하는 구조로 전환하였음에도 불구하고 단순 생산량의 증가로 인해 온실가스 총배출량이 늘어난 것이라는 주장이 있다면 이러한 가설은 실증결과와 배치된다는 것을 밝혔다. NETIS에 따르면, 충남 철강제조업은

산화탄소 배출량은 감소하는 긍정적인 변화도 일부 존재하였는데, 이는 온실가스 저배출 지역을 중심으로 석탄과 전기의 비중을 줄이고 천연가스를 더 사용하는 방향의 에너지 소비구성 변화를 만들어 냈기 때문이다.

추가적으로 다배출지역에 대해 분석한 결과는 다음과 같다. 첫째, 다배출지역에서는 전국과 마찬가지로 온실가스 감축정책 시행 이후 이산화탄소 배출량이 유의하게 증가하였으며, 특히 충남은 그 변화폭이 다른 지역에 비해 매우 큰 것으로 나타났다. 둘째, 생산당 이산화탄소 배출량 및 에너지소비량도 정책 시행 이후 증가하였으나, 이는 다른 지역과 유의하게 다르지는 않은 수준인 것으로 나타났다. 셋째, 에너지원별 소비비중 변화는 전국과 유사하게 석탄과 전기의 비중은 줄어들고 천연가스의 비중이 커지는 친환경적인 방향의 변화를 보였으나, 그 규모가 온실가스 저배출 지역에 비해 작은 수준이었다. 넷째, 충남지역 온실가스 배출 증가는 대체로 철강 산업에서 기인하였으나, 해당 업종에서 증가한 온실가스 배출량이 생산량의 증가로 설명된다는 귀무가설을 기각하지 못하기도 하였다. 즉, 최근 우리나라의 생산 대비 이산화탄소 배출량의 증가는 상대적으로 탄소집약도가 높은 일부기업의 생산확대로 인한 산업구성변화가 주요한 요인이었던 것으로 종합할 수 있다.

한때 충남 철강산업의 전기로 비중이 전남이나 경북 대비 높은 수준이었다는 점에 비추어보면(안세현·이용민, 2012), 본 연구의 분석 결과는 새로운 사실을 밝혀준다. 예전에는 충남지역의 철강산업이 상대적으로 온실가스 배출량이 적은 품목구조였다고 하더라도, 실증분석 결과 최근 충남지역 철강 생산당 온실가스 배출량의 수준 및 그 증가율이 다른 지역의 그것을 크게 앞서고 있음을 확인할 수 있다. 충남지역의 이러한 변화는 철강산업 증설로 인한 고로 제품 생산의 확대와 관련이 있을 것으로 추정된다. 한편 설비 보수 후 고로 온도를 높이는 과정에서 연료사용량이 평소보다 증가할 수 있으며 사용하는 원료·연료의 종류가 바뀌는 일도 있으므로, 최근 생산액 대비 큰 폭으로 증가한 충남 철강의 이산화탄소 배출량은 복합적인 요인이 혼재되어 발생한 결과라는 점에 유의하여야 한다.

2015년에 시행된 온실가스 배출권거래제는 2021년부터 유상할당 비율이 확대되

2017년에 석탄코크스 0.03만TOE와 유연탄(원료) 574만TOE을 소비하였으나 2018년도에는 석탄코크스 289만TOE과 유연탄(원료) 444만TOE로 구성비가 크게 변화하면서 전국의 평균 탄소배출계수의 증가를 주도하였다. 참고로, 2018년 충남지역의 평균적인 석탄코크스 배출계수는 4.4605로 유연탄(원료)의 3.8256보다 높다.

는 제3차 계획기간이 시작된다. NDC와 LEDS의 제출을 통해 국제사회는 저탄소 사회로의 이행에 착수하고 있으며, 이러한 흐름 속에서 각국은 탄소중립, 즉 온실가스의 배출량과 흡수량이 균형을 이루어 순배출량이 0이 되도록 하는 ‘넷제로’를 천명하고 있다. 본 연구의 분석결과에서 확인할 수 있듯이, 지금까지 국내 제조업은 주로 연료 대체를 통한 에너지사용량당 이산화탄소 배출량 감축을 이루었으나, 이는 다배출 기업의 생산 확대에 의한 생산당 온실가스 배출량 증가 효과를 일부 상쇄하는 수준에 그쳤다. 우리나라가 도전적인 온실가스 감축 목표를 달성하기 위해서는 국가 온실가스 배출량의 절반 이상을 차지하는 제조업에서의 감축이 필수적일 것이다. 본 연구의 결과는 온실가스 배출 비중과 시계열적 변화라는 두 가지의 측면에서 제조업의 생산구조를 친환경화하는 실현 가능한 방안 없이 단순히 강도 높은 규제와 처벌을 가하는 방식으로는 국가 수준의 온실가스 감축이 매우 어렵다는 시사점을 제공한다.

철강산업이나 석유화학산업 등 주력산업은 생산과정에서 이산화탄소 배출을 피할 수 없는 물리·화학적 제약이 존재하므로 혁신적인 생산기술의 개발과 동시에 산업구조의 친환경적 전환을 고려해 보아야 한다. 이러한 노력의 예로는 동일 품목을 생산하는 데에 기존보다 소량의 이산화탄소가 발생할 수 있도록 온실가스 원단위 개선 기술의 개발, 생산 과정에서 온실가스 배출량이 적은 품목으로의 품목 구조 전환, 배출된 이산화탄소를 포집하여 저장 및 활용하는 기술의 개발 등을 들 수 있다. 포스트 코로나19 대책의 일환으로 경기 부양 및 일자리 창출을 위한 대규모 정부재정을 그린뉴딜과 관련한 사업에 투자하려 하는 지금이 이러한 고민을 시작할 적기일 수 있다.

본 연구 이전에도 온실가스 감축을 위한 철강산업 내 혁신적인 생산기술의 개발이 필요하다는 인식은 비교적 널리 퍼져 있었으며, 현재 (1) 고정연소 배출량을 감축하기 위한 가스 비회수식 코크스 오븐, 고로 천연가스 주입, 분탄이용 용융환원 기술, (2) 공정배출 감소를 위한 폐가스 재사용 기술, 고로 가스 CO₂ 제거 기술, (3) 수소환원제철 방식 등이 검토되고 있다. 그럼에도 불구하고 해당 기술의 상용화까지 시간이 걸리며 불확실성이 높다는 측면에서 단기적으로는 온실가스 배출량에 대한 정부의 제재가 강화될 경우 외부감축 수단을 활용하거나 생산량을 줄이는 방법 이외에 마땅한 선택지가 없다는 것이 업계의 주된 반응이다.

온실가스 다배출지역 중 특히 충남지역의 철강산업은 타 지역의 동일 업종과 비

교하더라도 생산 대비 이산화탄소 발생량이 많아 조만간 우리나라 기후변화 대응정책의 성공을 가르는 주요 쟁점으로 부각될 것으로 예상된다. 본 연구에서는 동일 업종 내 상대적 고탄소 기업의 에너지 사용량 증가 및 생산 확대가 우리나라 전체의 온실가스 배출량에 미치는 영향이 매우 크다는 점을 실증적으로 보여주었다. 즉, 경제변수의 관점에서는 미미해보이는 생산확대일지라도 온실가스 배출 분포의 극단적인 집중도로 인하여, 탄소집약도가 상대적으로 높은 ‘brown’ 기업의 에너지 사용을 관리하지 않고서는 기후변화에 대응하기 어렵다는 시사점을 얻을 수 있다.

추가적으로, 이미 상용화에 성공한 철강 생산기술을 대상으로도 온실가스 배출량이 왜 이렇게 큰 폭으로 차이가 나는지를 면밀하게 검토할 필요성이 대두된다. 충남 및 전남지역의 1차금속은 생산 또는 부가가치 대비 이산화탄소 배출량이 경북 지역 1차금속의 최대 두 배에 달해 그 격차가 매우 큰 편인데, 이러한 격차는 단순히 고로·전기로의 비중으로는 설명되기 어려운 수준이며 결국 기술격차, 생산품목 구성 및 설비의 노후화와 관련되어 있을 것으로 짐작된다. 철강산업의 온실가스 감축을 위해 단기적으로는 에너지효율개선, 철스크랩 원료 조달 개선, 생산비중 조정 등을 고려하고 장기적으로는 수소환원제철과 같은 신기술의 개발을 통한 획기적인 온실가스 감축방안을 모색하는 것도 물론 중요하다. 하지만 중기적으로 1차금속 단일 업종의 지역별 온실가스 집약도 격차를 줄일 수 있다면, 이를 통해서도 상당한 수준의 국가 온실가스 감축이 가능할 것으로 기대된다.

■ 참 고 문 헌

1. 김수이·정경화, “LMDI 방법론을 이용한 국내 제조업의 온실가스 배출 요인분해분석,” 『자원·환경경제연구』, 제20권 제2호, 2011, pp.229-405.
(Translated in English) Kim, Suyi and Kyung-Hwa Jung, “LMDI Decomposition Analysis for GHG Emissions of Korea’s Manufacturing Industry,” *Environmental and Resource Economics Review*, Vol. 20, No. 2, 2011, pp.229-405.
2. 김일중·신동천, “탄소세가 철강·금속산업에 미치는 효과-CGE모형을 이용한 모의분석,” 『경제학연구』, 제45집 제3호, 1997, pp.255-274.

- (Translated in English) Kim, Il Chung and Dong-Cheon Shin, "The Impact of Carbon-tax on Steel and Metal Industry: Simulation Based on CGE Model," *The Korean Journal of Economic Studies*, Vol. 45, No. 3, 1997, pp. 255-274.
3. 박광수, "환경규제에 따른 산업부문의 에너지원간 대체관계 및 온실가스 배출저감 효과 분석," 에너지경제연구원 기본연구보고서 13, 2005, pp. 1-77.
(Translated in English) Park, Kwang-Soo, "The Impact of Environmental Regulations on Within-energy Substitution and Carbon Abatement in the Industry," *KEEI report* 2005-13, 2005, pp. 1-77.
 4. 신동현 · 조하현 · 김재혁, "한국의 에너지소비 변동성 변화 분석," 『경제학연구』, 제63집 제3호, 2015, pp. 71-119.
(Translated in English) Shin, Donghyun et al., "An Analysis of Korean Energy Consumption Volatility," *The Korean Journal of Economic Studies*, Vol. 63, No. 3, 2015, pp. 71-119.
 5. 신석하, "오차수정모형을 이용한 한국의 탄소배출량 결정요인 분석," 『경제학연구』, 제62집 제3호, 2014, pp. 5-28.
(Translated in English) Shin, Sukha, "An Error-correction Model on the Determinants of CO₂ Emissions of Korea," *The Korean Journal of Economic Studies*, Vol. 62, No. 3, 2014, pp. 5-28.
 6. 안세현 · 이용민, "충남지역 철강산업의 현황과 과제," 한국은행 대전충남본부, 2015, pp. 1-38.
(Translated in English) An, Se-Hyun and Yong-Min Lee, "Iron and Steel Industry in Chungnam Region: The Present and the Future," *Bank of Korea Daejeon Chungnam Branch report*, 2012, pp. 1-38.
 7. 안윤기 · 허재용 · 진윤정, "MARKAL 모형을 통한 철강산업의 온실가스 감축잠재량 분석," 『한국지구시스템공학회지』, 제47권 제3호, 2010, pp. 312-323.
(Translated in English) Ahn, Yoon-Ki et. al., "Carbon Abatement Potential of Iron and Steel Industry: An Analysis using MARKAL Model," *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 47, No. 3, 2010, pp. 312-323.
 8. 에너지경제연구원, "2018 에너지통계연보," 『에너지통계연보』, 제37권, 2018, pp. 1-369.
(Translated in English) Korea Energy Economics Institute, "Annual Energy Statistics Review 2018," Vol. 37, 2018, pp. 1-369.
 9. 임재규, "한국의 온실가스 중기 감축목표가 경제와 환경에 미치는 파급효과와 시사점," 『경제학연구』, 제57집 제4호, 2009, pp. 101-134.
(Translated in English) Lim, Jaekyu, "Economic and Environmental Implications of the Mid-Term Greenhouse Gas Emissions Reduction Target of Korea," *The Korean Journal of Economic Studies*, Vol. 57, No. 4, 2009, pp. 101-134.
 10. 진태영 · 최가영 · 이은미 · 이수경, "이산화탄소 배출량 분해분석: 산업 및 에너지 소비구조를 중심으로," 『환경정책』, 제28권 제2호, 2020, pp. 153-182.
(Translated in English) Jin, Taeyoung, Gayoung Choi, Eunmi Lee, and Sue Kyoung Lee, "A Decomposition Analysis of Domestic Carbon Dioxide Emissions Related to Industry Structure and Energy Mix in Korea," *Journal of Environmental Policy and Administration*, Vol. 28, No. 2, 2020, pp. 153-182.

11. 한국에너지공단, “철강업종 온실가스 배출 및 감축기술 동향,” 2017, pp.6-16.
(Translated in English) Korea Energy Agency, “Carbon Emission and Abatement Technologies in Iron and Steel Industries,” 2017, pp.6-16.
12. Acaravci, A., and I. Ozturk, “On the Relationship between Energy Consumption, CO₂ Emissions and Economic Growth in Europe,” *Energy*, Vol. 35, No. 12, 2010, pp.5412-5420.
13. Al-Mulali, U., and I. Ozturk, “The Investigation of Environmental Kuznets Curve Hypothesis in the Advanced Economies: The Role of Energy Prices,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 54, 2016, pp.1622-1631.
14. Ang, J. B., “CO₂ Emissions, Energy Consumption, and Output in France,” *Energy Policy*, Vol. 35, No. 10, 2007, pp.4772-4778.
15. Bassi, A. M., J. S. Yudken, and M. Ruth, “Climate Policy Impacts on the Competitiveness of Energy-intensive Manufacturing Sectors,” *Energy Policy*, Vol. 37, No. 8, 2009, pp.3052-3060.
16. Bae, J. H., “Impacts of Income Inequality on CO₂ Emission under Different Climate Change Mitigation Policies,” *The Korean Economic Review*, Vol. 34, No. 2, 2018, pp.187-211.
17. Bordigoni, M., A. Hita, and G. Le Blanc, “Role of Embodied Energy in the European Manufacturing Industry: Application to Short-term Impacts of a Carbon Tax,” *Energy Policy*, Vol. 43, 2012, pp.335-350.
18. Carbone, J. C. and N. Rivers, “The Impacts of Unilateral Climate Policy on Competitiveness: Evidence from Computable General Equilibrium Models,” *Review of Environmental Economics and Policy*, Vol. 11, No. 1, 2017, pp.24-42.
19. Commins, N., S. Lyons, M. Schibauer, and R. S. Tol, “Climate Policy & Corporate Behavior,” *The Energy Journal*, Vol. 32, No. 4, 2011.
20. Copeland, B. R., and M. S. Taylor, “Trade, Growth, and the Environment,” *Journal of Economic Literature*, Vol. 42, No. 1, 2004, pp.7-71.
21. Dietzenbacher, E., J. Pei, and C. Yang, “Trade, Production Fragmentation, and China’s Carbon Dioxide Emissions,” *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 64, No. 1, 2012, pp.88-101.
22. Fullerton, D. and C. Wolfram, *The Design and Implementation of US Climate Policy*, University of Chicago Press, 2012.
23. Gavrilova, O., and R. Vilu, R., “Production-based and Consumption-based National Greenhouse Gas Inventories: An Implication for Estonia,” *Ecological Economics*, Vol. 75, 2012, pp.161-173.
24. Gozgor, G., “Does Trade Matter for Carbon Emissions in OECD Countries? Evidence from a New Trade Openness Measure,” *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 24, No. 36, 2017, pp.27813-27821.
25. Kim, Y., and E. Worrell, “International Comparison of CO₂ Emission Trends in the Iron and Steel Industry,” *Energy Policy*, Vol. 30, No. 10, 2002, pp.827-838.
26. Kim, S., “CO₂ Emissions, Foreign Direct Investments, Energy Consumption, and GDP

- in Developing Countries: A More Comprehensive Study using Panel Vector Error Correction Model,” *The Korean Economic Review*, Vol. 35, No. 1, 2019, pp.5-24.
27. Metcalf, G. E. and J. H. Stock, “The Macroeconomic Impact of Europe’s Carbon Taxes,” *NBER Working Paper Series*, No. 27488, National Bureau of Economic Research, 2020.
28. Narayan, P. K., and S. Narayan, “Carbon Dioxide Emissions and Economic Growth: Panel Data Evidence from Developing Countries,” *Energy Policy*, Vol. 38, No. 1, 2010, pp.661-666.
29. O’Mahony, T. (2013). “Decomposition of Ireland’s Carbon Emissions from 1990 to 2010: An Extended Kaya Identity,” *Energy Policy*, Vol. 59, 2013, pp.573-581.
30. Porter, M. E. and C. Van der Linde, “Toward a New Conception of the Environment-competitiveness Relationship,” *Journal of Economic Perspectives*, Vol. 9, No. 4, 1995, pp.97-118.
31. Rivers, N., “Impacts of Climate Policy on the Competitiveness of Canadian Industry: How Big and how to Mitigate?” *Energy Economics*, Vol. 32, No. 5, 2010, pp.1092-1104.
32. Sbia, R., M. Shahbaz, and H. Hamdi, “A Contribution of Foreign Direct Investment, Clean Energy, Trade Openness, Carbon Emissions and Economic Growth to Energy Demand in UAE,” *Economic Modelling*, Vol. 36, 2014, pp.191-197.
33. Shahiduzzaman, M., and A. Layton, “Changes in CO₂ Emissions over Business Cycle Recessions and Expansions in the United States: A Decomposition Analysis,” *Applied Energy*, Vol. 150, 2015, pp.25-35.
34. Shahbaz, M., G. Gozgor, P. K. Adom, and S. Hammoudeh, “The Technical Decomposition of Carbon Emissions and the Concerns about FDI and Trade Openness Effects in the United States,” *International Economics*, Vol. 159, 2019, pp.56-73.
35. Shahbaz, M., S. A. Solarin, S. Hammoudeh, and S. J. H. Shahzad, “Bounds Testing Approach to Analyzing the Environment Kuznets Curve Hypothesis with Structural Breaks: The Role of Biomass Energy Consumption in the United States,” *Energy Economics*, Vol. 68, 2017, pp.548-565.
36. Turner, K., M. Lenzen, T. Wiedmann, and J. Barrett, “Examining the Global Environmental Impact of Regional Consumption Activities—Part 1: A Technical Note on Combining Input-output and Ecological Footprint Analysis,” *Ecological Economics*, Vol. 62, No. 1, 2007, pp.37-44.
37. Wiedmann, T., M. Lenzen, K. Turner, and J. Barrett, “Examining the Global Environmental Impact of Regional Consumption Activities—Part 2: Review of Input-output Models for the Assessment of Environmental Impacts Embodied in Trade,” *Ecological Economics*, Vol. 61, No. 1, 2007, pp.15-26.
38. Zhang, Z., and G. J. Hewings, “The Effects of Direct Trade within China on Regional and National CO₂ Emissions,” *Energy Economics*, Vol. 46, 2014, pp.161-175.

The Impact of Greenhouse Gas Abatement Policy on Manufacturing Industries in South Korea*

Eunsun Gil** · Sul-Ki Lee*** · Mira Rim****

Abstract

CO₂ emissions in Manufacturing industry account for about half of national greenhouse gas emissions in South Korea. To control for endogeneity between output and greenhouse gas emissions, this paper uses employment and total payroll as instrumental variables in an analysis of 2012-2018 linked panel data. Following the implementation of climate policy, CO₂ emissions from production activities in the manufacturing sector increased significantly, running counter to policy objectives. Since the primary metals industry shows a high degree of regional heterogeneity in carbon dioxide emissions relative to its production level, it is necessary to upgrade facilities and adopt technologies for particularly 'brown' firms.

Key Words: CO₂ abatement policy, CO₂ emissions in manufacturing industries, endogeneity

JEL Classification: Q5, L6, C4

Received: May 14, 2021. Revised: July 26, 2021. Accepted: Sept. 15, 2021.

* This paper is a revised and supplemented version of 'The Impact of Climate Policy on CO₂ Emissions in Chungnam Manufacturing Industry' which was financially supported by the Bank of Korea.

** First Author, Associate Research Fellow, Center for Industrial Policy Research, Korea Institute for Industrial Economics & Trade (KIET), 370, Sicheong-daero, Sejong-si 30147, Korea, Phone: +82-44-287-3152, e-mail: egil@kiet.re.kr

*** Second Author, Associate Research Fellow, Center for Growth Engine Industries, ICT & Emerging Industry Division, Korea Institute for Industrial Economics & Trade (KIET), 370, Sicheong-daero, Sejong-si 30147, Korea, Phone: +82-44-287-3955, e-mail: sulkilee@kiet.re.kr

**** Third Author, Junior Economist, Economic Research Team, the Daejeon&Chungnam Branch of the Bank of Korea (BoK), 65, Dunsanbuk-ro, Seo-gu, Daejeon 35232, Korea, Phone: +82-42-601-1229, e-mail: mrmr5217@bok.or.kr