

산업 연관관계를 통한 기후변화 전환리스크의 파급영향*

김 재 윤** · 박 혜 진***

논문초록

기후변화 완화를 위한 저탄소 전환 정책은 기후변화의 물리적 피해를 줄이는 효과와 함께 기존 화석연료 기반의 산업에 상당한 전환리스크(transition risk)를 미칠 것으로 예상된다. 특히, 저탄소 전환 과정에서 발생하는 탄소가격의 상향 조정은 기업의 온실가스 배출 비용을 증가시켜 우리나라와 같이 탄소집약적 제조업 비중이 높은 경제에 상당한 손실을 가져다줄 수 있다. 따라서 탄소가격의 상승이 국내 산업에 미치는 영향을 체계적으로 분석할 필요가 있다. 그러나 기존 연구는 탄소 다배출 산업, 에너지 산업 등 일부 산업에 미치는 영향에 주로 초점을 맞추고 있으며, 전 산업에 대한 파급영향을 분석한 연구는 매우 제한적이다. 이에 본 연구는 우리나라의 산업 간 연관관계를 바탕으로 탄소가격 상승이 국내 전 산업에 미치는 영향을 포괄적으로 분석하였다. 분석 결과, 탄소가격 상승은 온실가스 다배출 산업뿐만 아니라 이와 연관된 저배출 산업에도 상당한 영향을 미칠 수 있는 것으로 나타났다. 이는 탄소집약적 산업에서의 온실가스 배출 비용 증가가 산업 간 연관관계를 통해 다른 산업의 생산물 가격 상승으로 전이될 수 있기 때문이다. 한편, 온실가스 다배출 산업이라도 저탄소 기술 전환 가능성이 높은 경우에는 탄소가격 인상에 따른 충격이 크지 않은 것으로 나타나, 저탄소 기술 개발 투자가 중요함을 시사하고 있다. 본 연구는 산업 간 연관관계를 반영하여 기후변화 전환 리스크가 전 산업에 미치는 영향을 고찰한 국내 최초의 연구로, 국내 기업과 정책 입안자들이 기후변화 리스크 대응 체계를 수립하는 데 근거 자료로 활용될 수 있다는 점에서 학술적, 실무적으로 의의가 있다.

핵심 주제어: 기후변화, 전환리스크(transition risk), 산업연관관계, 탄소가격

경제학문헌목록 주제분류: D57, Q54, Q58

투고 일자: 2024. 2. 13. 심사 및 수정 일자: 2024. 5. 28. 게재 확정 일자: 2024. 7. 26.

* 본 논문은 한국경제학회 2024 경제학 공동학술대회 ‘기후변화의 경제학’ 특별세션에서 발표되었습니다. 본 연구에 유익한 조언을 주신 김민기 박사님(자본시장연구원), 오완근 교수님(한국외대), 익명의 심사위원님들께 감사드립니다. 본 논문의 일부 내용은 박혜진·김민기가 수행한 자본시장연구원 연구보고서 ‘탄소 리스크의 영향과 포트폴리오 탄소중립의 중요성’을 수정 및 보완한 것임을 밝혀둡니다. 이 논문은 한양대학교 교내연구지원 사업(HY-2024-1775)의 지원을 받았습니다.

** 제1저자, 한국은행 지속가능성장실 과장, e-mail: jkim20@bok.or.kr

*** 교신저자, 한양대학교 ERICA 경제학부 조교수, e-mail: hpark83@hanyang.ac.kr

I. 서 론

기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 현재와 같은 추세로 온실가스 배출이 지속되면 2060년 이전에 지구 평균 온도가 산업화 이전 대비 2.0°C 이상 상승하고 기상이변, 대규모 홍수, 가뭄, 산불과 같은 자연재해가 더욱 빈번하게 발생할 것으로 전망하였다(IPCC 2018, 2021). 이러한 지구온난화의 주요 원인은 인간의 온실가스 배출 활동이라는 데 전 세계적인 공감대가 형성되고 있으며, 국제사회는 2015년 파리협정을 체결하고 온실가스 감축을 위한 정책 노력을 강화하고 있다. 이러한 세계적인 흐름에 맞추어 우리나라 정부도 2020년 ‘2050년 탄소중립 달성’ 선언, 2021년 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」(「탄소중립 기본법」) 제정, 2030년 국가 온실가스 감축목표(Nationally Determined Contribution, NDC)를 2018년 대비 40%까지 상향하는 등 온실가스 감축 정책을 적극적으로 추진하고 있다.

온실가스 감축과 같은 저탄소 전환 정책은 기후변화로 인해 야기되는 물리적 피해를 완화하는 긍정적인 효과가 있지만, 정책 시행 과정에서 기업과 산업에 온실가스 배출 비용 증가, 매출 감소, 좌초자산 증가 등의 여러 부정적인 영향을 발생시킬 수 있다. 대표적인 예로, 기업의 탄소 감축을 유도하기 위한 핵심 수단 중 하나로 인식되고 있는 탄소가격 정책(탄소세, 탄소배출권 거래제 등)을 통해 탄소가격이 상향 조정될 경우, 온실가스 다배출 산업 기업의 생산비용 증가와 수익 감소를 초래하여 전환리스크(transition risk)를 유발할 가능성이 있다(김재윤·전은경, 2021).¹⁾

탄소가격 정책은 2023년 현재 우리나라를 포함한 70개 이상의 국가가 탄소세 또는 탄소배출권 거래제의 형태로 도입하여 운영 중이며, 그중 유럽연합의 EU-ETS는 전 세계에서 가장 큰 규모의 배출권 시장으로 잘 알려져 있다(World Bank, 2023).²⁾ 우리나라는 온실가스 감축을 위한 탄소가격 정책의 일환으로 2015년부터

1) 반면에 저탄소 전환 정책은 경제주체들의 저탄소 신기술 개발, 친환경 재생 에너지 전환, 에너지 효율성 향상 등 긍정적인 변화를 촉진할 수도 있다.

2) 탄소 가격 제도는 크게 배출권거래제(Emission Trading System)와 탄소세(Carbon Tax)로 구분된다. 배출권거래제는 국가 온실가스 감축목표에 따라 배출권 총량이 정해지고, 이를 배출업체에 할당하는 제도이다. 업체들은 배출권이 남거나 부족한 경우 서로 거래할 수 있으며, 시장의 수요와 공급에 따라 배출권 가격이 결정된다. 이러한 시장 메커니즘을 통해 기업들은 자신의 배출 효율성과 상황에 근거하여 배출량을 더 감축할지 또는 배출권을 추가로 구매할

배출권거래제(K-ETS)를 시행하여 오고 있다. 제1차 계획기간(2015~2017)에는 배출권의 100%를 무상할당으로 지급하였고, 제2차 계획기간(2018~2020)부터 배출권의 3%에 대해 유상할당이 시행되었다. 현재 진행 중인 제3차 계획기간(2021~2025)에는 유상할당 대상이 36개 업종에서 41개 업종으로 확대되었고, 유상할당 비중 또한 기존의 3%에서 10%로 증가하는 등 규제의 수준도 강화되고 있다.³⁾

그러나 우리나라의 배출권 가격은 2023년 중 1만원/ton 안팎으로 동 기간 EU-ETS 배출권 거래 가격이 약 80유로/ton(약 11만원/ton) 내외에 형성되어 있는 것에 비해 상당히 낮은 수준에 머무르고 있다.⁴⁾ NGFS(Network for Greening the Financial System, 2021)⁵⁾의 시나리오 분석 결과에 의하면 우리나라가 2050년 탄소 중립에 도달하기 위해서는 탄소가격은 2025년 8만원/tCO₂eq 수준에 형성되어 있어야 하고, 이후 점진적으로 상승하여 2050년에는 83만원/tCO₂eq 수준까지 도달해야 한다. 이는 곧 기존의 2050년 탄소중립 달성 계획에 따라 온실가스 감축 정책을 추진한다고 전제하였을 때, 미래의 어느 일정 시점에서 탄소 가격의 상향 조정은 불가피함을 시사한다.

이러한 탄소가격의 상승은 직접적으로 기업의 탄소배출비용 상승을 유발하므로, 탄소집약도가 높은 산업일수록 더 많은 배출비용을 부담하게 되어 수익성이 악화될 것으로 예상할 수 있다. 그러나 이러한 부정적인 영향은 단순히 온실가스 다배출 산업에만 한정되지 않을 수 있다. 만일 기업이 시장에서의 지배력을 이용하여 탄소 가격 상승으로 인한 생산비용 증가를 생산품 가격 인상을 통해 소비자들에게 일정 부분 전가할 수 있다면, 배출 주체인 기업뿐만 아니라 해당 기업의 제품을 소비하

것인지 둘 중 더 경제적인 옵션을 선택하게 된다. 또한 잉여 배출권 매각을 통해 업체들은 추가적인 수입을 창출할 수 있다. 한편, 탄소세는 정부가 탄소 가격을 결정하고 이를 기반으로 탄소배출 비용을 부과하는 방식이다. 탄소세는 배출권거래제에 비해 탄소 가격의 불확실성이 제거된다는 장점이 있지만, 해당 탄소 가격 수준에서 어느 정도의 효과적인 배출량 감축이 일어날지 불확실하다는 점이 단점으로 지적되고 있다.

- 3) 기존의 무상할당 대상이던 자동차, 섬유, 항공기 제조업 등 5개 업종이 유상할당 대상으로 전환되었다.
- 4) 온실가스종합정보센터(2023)의 2022 배출권거래제 운영결과보고서에 따르면 거래량의 80% 이상을 차지하는 KAU의 연도별 평균 거래가격은 2015년 12,044원, 2020년 30,713원, 2021년 22,943원, 2022년 8월까지의 평균 거래가격은 23,594원이었다.
- 5) NGFS는 중앙은행 및 감독기구들의 기후변화 리스크 분석과 선제적 대응을 촉진하기 위해 2017년 12월 결성된 글로벌 협의체로 2023년 6월 기준 현재 한국은행, 유럽중앙은행, 영란은행, 프랑스 중앙은행 등을 포함한 127개 기관이 회원으로 가입되어있다.

는 여타 기업과 소비자도 탄소가격 상승에 따른 비용을 부담할 수 있다(Fabra and Reguant, 2014; Oestreich and Tsiakas, 2015). 즉, 탄소가격의 상승이 일부 산업의 생산비용을 증가시켜 생산품 가격 상승으로 이어지면, 해당 산업의 생산물을 투입 요소로 사용하는 다른 산업의 생산비용 또한 증가하게 되고, 결과적으로 탄소가격 상승은 산업 간 연관관계를 통해 모든 산업에 파급효과를 미칠 수 있다. 즉, 탄소가격 상승에 따라 직접적으로 생산비용이 증가하는 온실가스 다배출 산업뿐만 아니라 이와 연관된 저배출 산업도 탄소가격 상승의 영향을 받을 수 있다.

국내에서는 온실가스 배출량, 자연재해 등의 과거 데이터를 활용하여 기후 관련 리스크가 기업 및 금융시스템에 미치는 영향을 분석한 연구가 소수 존재하지만, 향후 저탄소 전환 시나리오에서 예상되는 탄소가격의 상승이 전 산업에 미치는 영향을 체계적으로 분석한 연구는 거의 없는 실정이다. 일부 예외적인 예로, 김재윤·전은경(2021)은 저탄소 전환 과정에서 발생하는 전환리스크가 금융시스템에 미치는 영향을 추정하였는데, 전환리스크는 고탄소산업 관련 금융자산의 가치하락을 초래하여 이와 관련한 금융자산을 보유한 금융기관에도 상당한 피해를 미칠 수 있음을 보였다. 한편 기후변화의 물리적 리스크에 관한 연구로 황재학(2022)은 기후변화에 따른 강수 피해의 증가가 국내 은행 기업대출에 미치는 영향을 측정하였다. 오희나·홍종호(2022)는 ICT 활용에 따른 디지털 전환은 에너지 소비를 줄이는 긍정적 효과가 있으나 온실가스 배출량 감소 효과는 나타나고 있지 않음을 보이며, 발전 부문의 탈탄소화 없는 디지털 전환은 기후변화를 완화할 수 없다고 전망하였다. 이러한 산업 수준의 분석에서 더 나아가, 정국모·황다슬(2022)은 통합기후모형을 통한 기후변화의 종합적인 경제적 피해 비용, 특히 제주도 지역을 중심으로 탄소의 사회적 비용을 추정하였다. 그리고 가장 최근 연구로 김재윤 외(2023)는 수출입 관계를 고려하여 지구온난화에 따른 해외 농산물가격 상승이 국내 산업의 전반적인 물가 상승으로 연결될 수 있음을 보였다.⁶⁾

본 연구는 국내의 산업 간 연관관계를 바탕으로 대표적인 전환리스크 요인의 하나인 탄소가격 상승 충격이 전 산업으로 파급되는 효과를 추정하였다는 점에서 기존 연구와 차별성이 있다. 산업 간 연관관계를 고려하지 않고 탄소가격 변동의 효

6) 이 외에 김문태 외(2018)는 탄소 배출량과 신용등급 간의 관계를, 최용근(2022)은 기후 리스크가 금융산업에 미치는 영향을, 박도준 외(2023)는 탄소집약도와 신용위험의 관계를 분석하였다.

과를 추정하게 되면 탄소가격 상승의 영향은 주로 온실가스 다배출 산업에 집중되어 나타나고 고탄소 산업과 연관된 여타 산업에서의 영향이 과소 추정될 수 있다. 이에 본 연구는 Adenot et al. (2022)의 산업연관관계를 통한 탄소가격의 파급효과를 반영한 레온티에프 가격 결정 모형과 NGFS(2021)에서 제시한 우리나라의 '2050년 탄소중립' 시나리오의 탄소가격 상승 경로를 참고하여, 탄소가격 상승이 산업 간 연관관계를 통해 국내의 전 산업으로 파급되는 영향을 분석하였다.

분석 결과, 우리나라의 저탄소 전환 과정에서의 탄소가격 상승(즉, 저탄소 전환리스크)은 탄소집약적 산업의 생산비용 상승과 생산품 가격 상승 압력으로 작용함과 동시에 산업 간 연관관계를 통해 여타 산업의 가격 상승과 수요 감소로도 이어질 수 있는 것으로 나타났다. NGFS(2021)가 제시한 우리나라의 '2050년 탄소중립' 시나리오에 따라 탄소가격이 상승한다고 가정하였을 경우 산업별 생산품에 대한 수요 변화를 분석한 결과, 석탄, 원유 및 천연가스 채굴업 -16.5% (2020-50년 누적 기준, 이하 동일), 화학물질 및 화학제품 제조업 -22.1%, 비금속광물제품 제조업 -20.9% 등 화석연료 의존도가 높은 탄소집약적 산업을 중심으로 큰 폭의 수요 감소가 발생하는 것으로 추정되었다. 그뿐만 아니라, 탄소집약도가 상대적으로 낮은 산업도 산업 간 연관관계를 통해 탄소가격 상승에 따른 수요 감소 충격에 상당히 취약할 수 있는 것으로 분석되었다. 특히, 탄소집약적 산업과 연관관계가 상대적으로 높은 업종인 자동차 및 트레일러 제조업 -9.1% (2020-50년 누적 기준, 이하 동일), 육상 운송업 -14.5%, 도소매업 -11.3%, 컴퓨터, 전자 및 광학기기 제조업 -8.1% 등에서 수요 감소폭이 크게 확대되는 것으로 추정되었다. 한편, 탄소집약적 산업 중에서도 향후 저탄소 기술 전환 가능성이 높은 경우에는 탄소가격 상승 충격의 영향이 상당히 완화될 수 있는 것으로 나타났다. 예를 들어, 전기, 가스, 증기 및 공기조절 공급업은 기존의 화석연료 발전이 태양광, 풍력 등 친환경 재생에너지로 전환되면서 상당한 배출량 감축이 가능할 것으로 전망되며, 이에 따라 탄소가격 상승에 따른 수요 변화도 -3.0%로 다른 탄소집약적 산업들에 비해 상대적으로 작게 나타났다.

종합하면, 향후 저탄소 전환 노력이 계속된다고 전제할 때 우리나라의 탄소가격은 현재와 같이 낮은 수준에서 지속되기 어려우며 미래 일정 시점에 상향 조정되어야 한다. 그리고 만일 저탄소 전환 과정에서 탄소가격이 급격하게 인상될 경우, 탄소집약적인 산업과 더불어 연관 산업에까지 탄소가격 상승의 영향(생산비용 및 가격

상승에 따른 생산품에 대한 수요 감소)이 급격히 확대될 수 있다. 이에 따라 국내 기업, 정부 및 학계는 이러한 기후변화 전환리스크의 과급효과를 세밀히 분석하고 이에 대해 선제적으로 대응할 필요가 있다.

본 연구는 다음과 같이 구성된다. 제Ⅱ절에서는 본 연구와 관련된 선행연구들을 정리하고 본 연구의 차별성을 서술하였다. 제Ⅲ절에서는 본 연구에서 사용된 모형을 설명하였다. 제Ⅳ절에서는 데이터와 모형의 주요 변수의 추정 방법을 설명하였다. 제Ⅴ절에서는 탄소가격 상승에 따른 산업별 가격 및 수요 변화를 추정한 결과를 제시하였다. 마지막으로 제Ⅵ절에서는 결론을 서술하였다.

Ⅱ. 선행연구

최근 해외에서는 기후변화가 실물경제와 금융시스템에 부정적 영향을 미칠 수 있는 금융 리스크의 하나로 인식되고 있으며 이와 관련한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 연구는 주로 온실가스 감축, 에너지 전환 등 저탄소 전환 정책의 경제적 영향을 추정하는 데 중점을 두고 있다. Dietz et al. (2016)은 Nordhaus(1993)의 DICE(Dynamic Integrated Climate-Economy model) 모형 성장률 추정치를 바탕으로 온실가스 감축정책이 자산가치에 미치는 영향을 분석하였다. Nordhaus(1993)의 DICE 모형은 기후변화와 경제주체 간의 상호작용을 구현한 기후-경제 통합평가 모형(Integrated Assessment Model, 이하 'IAM')으로 기후변화 피해와 탄소감축 비용을 고려하여 성장 전망치를 제시하고 있다. Dietz et al. (2016)은 다만 글로벌 금융자산 전체를 대상으로 자산가치 영향을 평가하였고, 산업별로 상이한 기후변화 리스크의 영향은 다루지 않았다.

이후 Battiston et al. (2017), Monasterolo et al. (2018), Roncoroni et al. (2021)은 기후변화 리스크의 산업별 영향을 분석하였다. 이 연구들은 GCAM(Global Change Analysis Model), WITCH(World Induced Technical Change Hybrid), REMIND(REGional Model of INvestment and Development) 등 기후-경제 통합평가모형(IAM) 분석결과를 활용하여 에너지, 제조업, 수송 산업의 수익성과 자산가치 변화를 분석하였다.⁷⁾ 이들 연구는 통합평가모형(IAM)에서 추정된 화

7) Battiston et al. (2017)은 EU 지역의 은행과 관련 투자 기업을 대상으로, Monasterolo et al. (2018)은 중국의 은행과 관련 투자 기업을 대상으로, Roncoroni et al. (2021)은 멕시코 은

석연료 및 재생에너지 생산 변동폭과 비례하여 각 산업의 수익성과 자산가치가 변동한다는 가정 하에, 기후정책의 산업별 영향을 평가하였다.⁸⁾ 다만 화석연료 발전업 등 탄소집약적 산업에 집중되는 기후정책의 영향이 산업 간 연관관계를 거쳐 경제 전반으로 파급되는 영향은 해당 연구들에서 다루어지지 않았다. 한편, Stolbova et al. (2018)은 금융 익스포저(대출, 채권, 주식, 예금 등)를 통한 경제주체(금융기관, 비금융회사, 가계) 간 연관 관계에 의해 기후 정책의 충격이 증폭되는 영향을 분석하였다. 이들은 기후정책에 의한 비금융회사의 자산가치 변화로 인해, 동 회사에 대출, 채권, 주식 등의 형태로 투자한 금융기관의 자산가치가 변화하고, 아울러 동 금융기관에 예금한 가계도 영향을 받는 일련의 기후정책 파급효과를 분석하였다. 그러나 본고와 달리 Stolbova et al. (2018)은 다만 산업 내 투입배분구조로 인한 기후변화 리스크의 파급효과는 다루지 않았다.

최근에는 유럽중앙은행, 한국은행 등 다수의 중앙은행이 기후변화 리스크의 영향을 연구하였다. 중앙은행들은 본격적인 분석에 앞서 연구 협의체인 NGFS를 설립하고, 기후리스크 평가에 있어 공통된 전제를 적용하기 위해 NGFS 기후변화 시나리오(NGFS 2021, 2022)를 개발하였다. NGFS의 기후변화 시나리오는 GCAM, REMIND 등 통합평가모형(IAM)을 활용하여 '2050년 탄소중립' 정책 이행 시 예상되는 탄소가격 경로, 에너지 산업 변화 경로 추정치를 포함하고 있다. 유럽중앙은행의 Alogoskoufis et al. (2021), Emambakhsh et al. (2023)은 NGFS 시나리오의 통합평가모형(IAM) 추정치를 기초로 기후변화 리스크가 유럽 내 기업에 미치는 영향을 분석하였다. 특히 Alogoskoufis et al. (2021), Emambakhsh et al. (2023)는 기후변화 리스크의 산업별 영향 및 산업 간 전이효과를 고려하고자 기업별로 Scope 3 배출량⁹⁾(기업의 가치사슬에서 발생하는 배출량)을 측정하고 Scope 3 배출에 의한 간접적 파급효과를 분석하였다. 분석 결과, Alogoskoufis et al. (2021), Emambakhsh et al. (2023) 모두 전기·가스 공급업, 광업, 제조업에서 기후정책

행과 관련 투자 기업을 대상으로 분석하였다.

8) 예를 들어, 기후 정책에 의한 화석연료 감소폭(IAM 추정치) 만큼 화석연료 발전 기업의 수익성이 이에 비례하여 악화된다는 가정을 적용하였다.

9) Scope 3 배출량은 기업이 직접 배출한 배출량이 아닌, 기업이 소속된 가치사슬에서 발생한 온실가스 배출량을 의미한다. 중간재 제조 과정 중에서의 배출량, 최종재 사용 과정에서 유발되는 배출량 등이 Scope 3 배출량이다. Scope 1 배출량은 기업의 직접 배출한 배출량이며, Scope 2 배출량은 기업이 사용한 전기, 열 소비로 인한 배출량이다.

에 의한 수익성이 악화가 두드러지는 점을 발견하였다.

한국의 경우 한국은행의 김재윤·전은경(2021), 김재윤 외(2023)가 NGFS 기후 변화 시나리오를 기초로 각각 국내 전환리스크의 영향, 해외 물리적리스크의 국내 파급영향을 분석하였다. 김재윤·전은경(2021)은 2050 탄소중립 등 기후정책이 국내 각 산업에 직접적으로 미치는 영향을 분석한 반면, 산업간 연관관계에 의한 기후정책의 파급효과는 다루지 않았다. 분석 결과, 김재윤·전은경(2021)은 철강, 화학, 시멘트 등 온실가스 다배출 제조업이 기후정책에 의해 큰 폭의 손실을 입을 수 있다는 점을 발견하였다. 김재윤·전은경(2021)은 기후정책이 발전업에도 부정적 영향을 미치는 점을 발견하였으나, 발전업에서 화석연료 의존도가 낮아지고 재생에너지 보급이 확대될 경우 기후정책에 의한 충격에서 상당폭 회복하는 점을 발견하였다. 한편, 김재윤 외(2023)는 글로벌 농축수산물 공급감소 등 해외에서 발생한 물리적리스크가 산업 간 연관관계를 통해 국내 경제에 파급되는 영향을 분석하였다. 분석 결과, 해외 기후리스크에 의해 글로벌 농축수산물 공급충격이 발생할 경우, 국내 농림수산업, 음식료품 제조업, 음식점 서비스업에서 생산이 위축될 우려가 있다는 점을 발견하였다. 그러나 이러한 선행연구는 주로 기후정책이 온실가스 다배출 산업에 미치는 영향에 초점을 맞추고 있으며 기후정책의 영향이 전 산업으로 미치는 영향을 포괄적으로 분석한 연구는 여전히 제한적이다. 본 연구는 산업 간 연관관계를 통해 기후정책의 파급효과를 분석하였다는 점에서 기존 연구와 차별성이 있다.

III. 모 형

본 연구는 탄소 가격 상승이 국내 각 산업의 생산물가격과 수요에 미치는 효과를 분석하기 위해 Adenot et al. (2022)이 제시한 탄소 가격을 반영한 레온티에프 가격 모형(Leontief price model)을 바탕으로 모형을 설정하였다. 탄소가격의 상승은 산업의 탄소 배출 비용을 증가시키고, 이는 각 산업에 생산품 가격 상승 압력으로 작용한다. 그리고 이러한 한 산업의 생산품 가격 상승은 다시 해당 산업의 생산품을 중간재로 사용하는 다른 산업의 생산비용 상승과 생산품가격 상승으로 전가된다. 즉, 탄소가격 상승의 영향은 개별 산업에 국한되지 않으며 산업 간 연관관계를 통해 전 산업의 전반적인 물가 상승으로 파급될 수 있다. 그리고 이러한 물가 상승은

각 산업의 생산품 수요를 감소시키는 압력으로 작용하고, 결과적으로 기업의 수익성 악화로 이어질 수 있다. 이하에서는 먼저 탄소가격을 고려하지 않은 기본 모형을 살펴보고, 이후 탄소가격을 반영한 확장된 레온티에프 가격 모형과 이러한 가격 상승에 따른 산업별 수요 충격의 추정 방법론에 관해 서술한다.

1. 기본모형

본 연구의 바탕이 되는 Leontief(1936)의 투입-산출모형(Input-Output model)에서 각 산업의 총산출은 다음과 같이 결정된다.

$$X_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}X_j + Y_i \quad \text{where} \quad a_{ij} = \frac{x_{ij}}{X_j} \quad i, j = 1, \dots, n \quad (1)$$

여기서 X_i 는 산업 i 의 총산출, Y_i 는 산업 i 의 생산품에 대한 최종수요, x_{ij} 는 산업 j 에 투입된 산업 i 의 생산품 가치를 의미한다.¹⁰⁾ 그리고 a_{ij} 는 섹터 j 의 생산물 한 단위를 생산하는데 필요한 섹터 i 의 생산물 가치(즉, x_{ij}/X_j)을 나타내는 투입계수(input coefficient)를 나타낸다. 일반적으로 투입계수 a_{ij} 와 최종수요 Y_i 는 외생적으로 주어진다고 가정하며, 이에 따라 식 (1)의 X_i 는 다음과 같은 행렬식으로 표현될 수 있다.

$$X = (I - A)^{-1} Y \quad (2)$$

$$\text{where} \quad X \equiv \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \quad A \equiv \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} \quad Y \equiv \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}$$

여기서 A 는 투입계수행렬, $(I - A)^{-1}$ 는 레온티에프 역행렬을 의미한다. 종합하면, 개별 산업의 최종수요 Y 의 변화는 산업 간 연관관계를 통해 다른 산업의 최종

10) 엄밀하게는 식 (1)은 해외 i 부분으로부터의 수입(m_i)을 포함한 $X_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}X_j + Y_i - m_i$ 으로 표현되어야 한다. 그러나 본 연구에서는 해외부분을 외생 변수로 간주하고 국내 산업 간 연관관계에 초점을 두므로, 서술의 간결성을 위해 해외 수입에 대한 논의는 생략하였다.

수요 및 산출에까지 파급될 수 있다. 본 연구는 선행연구(김재윤 외, 2023)를 따라 한국은행에서 제공하는 2019년 산업연관표를 활용하여 투입계수행렬을 추정하였다.¹¹⁾

구체적으로 본 연구에서는 일반적인 행(가로) 방향의 레온티에프 모형과 달리 다음과 같이 산업연관표의 열(세로) 방향 항등식을 이용하여 탄소가격 상승이 전반적인 국내 물가에 미치는 파급효과를 분석하였다.¹²⁾ 투입산출표의 열을 기준으로, 해당 산업 부문(j)의 산출액(X_j)은 그 산업 부문을 포함한 모든 부문으로부터의 중간 투입비용과 해당 산업 부문의 부가가치의 합과 일치한다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\sum_{i=1}^n (X_{ij}^d + X_{ij}^m) + V_j = X_j \quad (3)$$

여기서 X_j 는 j 부문 총산출, X_{ij}^d 는 국내 i 부문으로부터의 투입, X_{ij}^m 해외 i 부문으로부터의 투입, V_j 는 부가가치를 의미한다. 식 (3)을 총산출 X_j 로 나누면 이는 다음과 같이 j 부문 제품 1단위 생산에 요구되는 국내 및 해외 투입량을 나타내는 투입계수(a_{ij}^d, a_{ij}^m)와 부가가치율(v_j)의 식으로 표현할 수 있다.

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{X_{ij}^d}{X_j} + \frac{X_{ij}^m}{X_j} \right) + \frac{V_j}{X_j} = \sum_{i=1}^n (a_{ij}^d + a_{ij}^m) + v_j = 1 \quad (4)$$

그리고 본 연구에서 사용하는 산업연관표는 금액 단위로 표현되어 있으므로, 식 (4)에 각 부문의 가격을 곱한 다음의 식이 성립한다.

$$\sum_{i=1}^n (a_{ij}^d p_i^d + \widehat{a_{ij}^m} p_i^m) + \widehat{v_j} p_j^v = p_j^d \quad (5)$$

11) 참고로 한국은행에서 제공하는 산업연관표의 가장 최근 시점은 2019년이며, 가구 내 고용 및 미분류 자가소비 생산 활동을 제외한 77개 업종(중분류 기준)에 대해 분석을 수행하였다.

12) 이 부분은 Adenot et al. (2022), 권태현(2020), 이용건 외(2022)를 참고하여 작성되었다.

여기서 추가로 Adenot et al. (2022)의 방법론을 따라 부문 j 의 생산규모에 비례하여 세금(ad valorem tax, τ_j)이 부과된다고 가정하면, 식 (6)이 도출된다.

$$(1 + \tau_j) \left[\sum_{i=1}^n (a_{ij}^d p_i^d + \widehat{a}_{ij}^m p_i^m) + \widehat{v}_j p_j^v \right] = p_j^d \quad (6)$$

즉, 식 (6)에 따르면 각 부문의 생산물 가격은 투입비용과 세율에 따라 결정된다. 또한, 식 (6)은 다음과 같이 행렬식으로도 표현할 수 있다. 여기서 주의할 점은 일반적인 총수요 접근법에서 사용하는 행 방향의 항등식이 아닌 열 방향의 항등식을 사용하면서 투입계수 행렬의 전치행렬(A_τ^{dT})이 사용되었다는 점이다. 여기서 p^d, p^m, p^v 는 각각 국내 가격 벡터, 수입 가격 벡터, 및 부가가치 벡터를, \widehat{A}^m 와 \widehat{A}^v 는 각각 수입 투입계수행렬과 부가가치율 행렬을 나타낸다.

$$A_\tau^{dT} p^d + \widehat{A}^m{}^T p^m + \widehat{A}^v{}^T p^v = p^d \quad (7)$$

$$\text{where } p^d \equiv \begin{pmatrix} p_1^d \\ \vdots \\ p_n^d \end{pmatrix} \quad A_\tau^d \equiv \begin{pmatrix} a_{11}^d + \left(1 - \frac{1}{1 + \tau_1}\right) & \cdots & a_{1n}^d \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1}^d & \cdots & a_{nn}^d + \left(1 - \frac{1}{1 + \tau_n}\right) \end{pmatrix}$$

최종적으로, 식 (6)을 국내 가격 벡터(p^d)에 대해 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.¹³⁾

$$p^d = (I - A_\tau^{dT})^{-1} (\widehat{A}^m{}^T p^m + \widehat{A}^v{}^T p^v) \quad (8)$$

2. 탄소가격을 반영한 산업별 가격 결정 모형

탄소가격 상승의 산업간 파급효과를 분석하기 위해서는 위의 기본 모형에 탄소가

13) 즉, 식 (8)의 역행렬은 산업연관표의 열 방향 항등식을 이용하여 도출한 것으로, 레온티에프 역행렬이 아닌 고쉬 역행렬(Ghosh inverse)로 계산되는 점에 주의할 필요가 있다. 이 점을 지적해준 익명의 심사위원님께 감사드린다.

격 효과를 반영할 필요가 있다. 본 연구에서는 Adenot et al. (2022)의 방법론을 따라 탄소가격이 탄소세(carbon tax)의 형태로 부과된다고 가정한다.^{14) 15)} 각 산업 부문 j 의 산출물에 대해 탄소세(e_j)가 추가적으로 부과된다고 가정하면, 각 부문의 생산물 가격을 나타내는 식 (6)은 다음과 같이 변환된다.¹⁶⁾

$$(1 + e_j)(1 + \tau_j) \left[\sum_{i=1}^n (a_{ij}^d p_i^d + \hat{a}_{ij}^m p_i^m) + \hat{v}_j p_j^d \right] = p_j^d \quad (9)$$

앞서 기본모형과 비교하면, 추가적인 탄소세의 부과(또는 탄소가격 상승)는 투입

-
- 14) 한국은행의 산업연관표에 따르면 부가가치는 피용자보수, 영업이익, 고정자본소모, 생산세 등으로 구성되며, 본 연구의 탄소세는 이 중 생산세 형태로 적용하는 것이 더 적합하다는 견해가 있을 수 있다. 다만, 현재 한국을 포함한 많은 국가에서 탄소세 대신 배출권거래제를 시행하고 있고, 탄소세가 실제로 어떤 형태로 적용되는지는 명확하지 않다. 따라서 이러한 현 상황을 고려하여 일반성을 해치지 않는 범위 내에서, 분석의 단순성을 위해 본 연구는 선행연구인 Adenot et al. (2022)의 방법론을 따라 ad valorem tax를 가정하였다. 탄소세를 ad valorem tax 또는 생산세로 가정하는지는 모형의 해석에 있어 다양한 측면을 부각시킬 수 있지만, 본 연구의 분석 결과의 기본적인 방향성에 있어서 큰 차이를 만들지는 않을 것으로 예상된다. 그러나 탄소세의 도입 형태가 분석 결과에 미치는 영향을 탐구하는 것은 매우 흥미롭고 중요한 연구 주제이며, 이에 대한 심도있는 분석은 향후 후속 연구과제로 남겨둔다. 이 점에 대해 지적해준 익명의 심사위원께 감사드린다.
- 15) 일반적으로 탄소가격은 온실가스 배출량 한 단위(tCO₂eq)에 부과되는 비용을 의미하기 때문에, 이를 생산품에 대해 부과되는 탄소세로 변환하기 위해서는 추가적인 계산이 필요하다. 이에 대해서는 후술하는 장에서 상세히 서술한다.
- 16) 일반적인 산업연관분석에서는 최종수요 또는 부가가치 충격에 따른 경제적 파급효과를 평가하기 위해 해당 부문을 외생화하는 방식을 사용한다. 한편, 본 연구의 대상인 탄소가격(탄소세)은 정부 정책에 의해 결정되는 외생적 요소로, Adenot et al. (2022)을 비롯한 다수의 선행연구들은 탄소가격 변화가 경제에 미치는 영향을 분석할 때 탄소세를 투입계수행렬의 원소를 직접적으로 변화시키는 외생적 요인으로 가정하며, 특정 부문(수요, 부가가치 등)의 외생화 과정을 생략하고 있다. 이런 접근법은 분석을 단순화하고, 연구의 주요 초점인 탄소가격이 국내 산업 부문에 미치는 직접적인 영향을 명확히 조명하는 데 유용하다. 본 연구 역시 이러한 선행연구의 방법론을 따라, 분석의 정확성을 저해하지 않는 범위에서 외생화 과정을 생략하였다. 그럼에도 불구하고, 산업연관표가 내생변수인 중간투입과 외생변수인 부가가치로 구성되어 있다는 점에서, 다수의 선행연구 방법론에 따라 외생화 과정을 생략하는 것은 유발효과를 계산하는 데 오류를 유발할 수 있다. 다만, 외생화 과정을 생략함에 따라 어느 정도 오류가 유발되는지를 다루는 것은 방법론과 관련된 문제로 본 논문의 범위를 넘어서는 것이라 판단된다. 외생화 과정을 반영한 탄소세 변화의 유발효과에 대한 엄밀한 분석은 후속 연구과제로 남겨둔다. 이에 대한 심도 있는 의견을 제시해 주신 익명의 심사자님과 자문위원님께 감사드린다.

비용을 증가시키고, 결과적으로 최종 생산재 가격을 상승시키는 압력으로 작용하게 된다. 또한, 앞서와 마찬가지로 방법으로 식 (9)는 다음과 같이 행렬식으로도 나타낼 수 있다.

$$p^d(e) = (I - A_{\tau,e}^{dT})^{-1} (\widehat{A}^m{}^T p^m + \widehat{A}^v{}^T p^v) \quad (10)$$

$$\text{where } A_{\tau,e}^d \equiv \begin{pmatrix} a_{11}^d + \left(1 - \frac{1}{(1+e_1)(1+\tau_1)}\right) & \cdots & a_{1n}^d \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1}^d & \cdots & a_{nn}^d + \left(1 - \frac{1}{(1+e_n)(1+\tau_n)}\right) \end{pmatrix}$$

여기서 탄소세 인상은 투입계수행렬 ($A_{\tau,e}^T$)의 대각원소값을 증가시킴으로써 전체 물가를 상승시키는 효과가 있음을 알 수 있다. 한편, 식 (10)에서 $\widehat{A}^m{}^T p^m + \widehat{A}^v{}^T p^v$ 는 식 (8)에 따라 $(I - A_{\tau}^{dT})p^d$ 로 대체할 수 있으므로, 탄소세 부과 후 가격 ($p^d(e)$)과 탄소세 부과 전의 가격 (p^d) 간에 다음과 같은 관계가 성립함을 알 수 있다.

$$p^d(e) = (I - A_{\tau,e}^{dT})^{-1} (\widehat{A}^m{}^T p^m + \widehat{A}^v{}^T p^v) = (I - A_{\tau,e}^{dT})^{-1} (I - A_{\tau}^{dT})p^d \quad (11)$$

마지막 단계에서는 위와 같은 방법을 통해 탄소세(혹은 탄소가격) 상승에 따른 산업별 가격 변화를 산출하면, 이를 다시 각 산업의 생산품 수요의 가격 탄력성과 연계하여 국내 각 산업의 생산품 수요 변화를 추정한다. 구체적으로, 본 연구는 분석의 단순화를 위해 동일 산업 내 기업들의 생산품은 동질적이고, 수요함수는 일반적으로 사용되는 로그-선형함수 형태라고 가정한다. 또한, 선행연구를 따라 각 산업의 생산품에 대한 수요는 다른 산업의 생산품의 가격과 독립적(즉, 수요의 교차탄력성은 0)이라고 가정한다. 이러한 가정에 따르면 부문 i 산출물에 대한 수요 변화율 ($\Delta D_i/D_i$)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\Delta D_i}{D_i} = \varepsilon_i \frac{\Delta p_i}{p_i} = \varepsilon_i \frac{p_i(e) - p_i}{p_i} = \varepsilon_i \left(\frac{p_i(e)}{p_i} - 1 \right) \quad (12)$$

여기서, $\Delta D_i = D_i(e) - D_i$ 는 수요량의 변화를, $D_i(e)$ 는 탄소세 부과 후 수요량을, D_i 는 초기 수요량을 나타낸다. $\Delta p_i = p_i(e) - p_i$ 는 가격의 변화를, $p_i(e)$ 는 탄소세 부과 후 가격을, p_i 는 초기 가격을 나타낸다. ε_i 는 산업 i 의 생산품 수요의 가격 탄력성으로 로그-선형수요함수 가정에 의해 상수로 계산된다. 식 (12)의 첫 번째 등식은 탄력성의 정의에 따라 $\varepsilon_i = \frac{\Delta D_i/D_i}{\Delta p_i/p_i}$ 을 $\frac{\Delta D_i}{D_i}$ 에 대해 정리한 것이다. 식 (12)에 따르면, 일반적으로 $\varepsilon_i < 0$ 이므로, 탄소세 부과에 따라 가격이 상승하였을 때(즉, $p_i(e) > p_i$), 수요의 가격탄력성이 탄력적일수록(즉, $|\varepsilon_i|$ 값이 클수록) 수요량이 더 큰 폭으로 감소한다. 추가적으로, Adenot et al. (2022)과 같이 기업의 수익이 매출액과 비례한다고 가정하면, 이러한 탄소가격 상승에 따른 생산품 수요량의 감소는 매출액의 감소로 이어져 기업의 수익 충격(earning shock)을 초래한다고도 해석할 수 있다.

IV. 데이터와 모수 추정

탄소가격 상승 충격이 국내 산업연관구조를 거쳐 전 산업 부문으로 파급되는 효과를 분석하기 위해서는 상술한 모형의 주요 변수인 산업별 탄소세(e_i)와 각 산업의 생산품에 대한 수요의 가격 탄력성(ε_i)을 추정해야 한다.¹⁷⁾ 이하에서는 산업별 탄소세 수준 및 각 산업의 산출물에 대한 최종수요의 탄력성 추정에 활용한 방법론과 데이터를 서술한다.

1. 산업별 탄소세 추정

먼저, 본 연구의 주요 변수인 산업별 탄소세(e_i)의 추정 방법에 대해 서술한다. 업종별 탄소세는 김재윤·전은경(2021), Adenot et al. (2022)을 따라 다음과 같이 업종별 할당량을 초과한 배출량에 대한 배출비용을 총 산출액으로 나눈 값으로 정의하였다. 즉, 업종별 탄소세(e_i)는 총 산출액 대비 탄소가격 정책으로 인한 비용 상승분을 의미한다.

17) 한편, 산업별 생산품에 대한 세율(τ_i)은 분석의 단순화를 위해 선행연구인 Adenot et al. (2022)를 따라 0으로 가정하였다.

$$e_i \equiv P_i \times \frac{Emission_i - Allowance_i}{Production_i} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \text{where } Emission_i &= Emission_{baseline,i} + \Delta Scope 1_i + \Delta Scope 2_i, \\ Allowance_i &= Allowance_{netzero,i} + \Delta Allowance \text{ by } CCS_i, \\ Production_i &= X_i p_i^d \end{aligned}$$

여기서 P_i 는 산업 i 의 배출량 한 단위(톤) 당 부과되는 탄소가격(원/tCO₂eq)으로 NGFS(2021)의 한국 대상 ‘2050년 탄소중립’ 시나리오¹⁸⁾에서 제시한 탄소가격을 적용하였다. $Emission_i$ 은 김재윤·전은경(2021)을 따라 기준시점(2019년)의 배출량($Emission_{baseline,i}$)에서 향후(2025~50년중) 친환경 기술발전((i) 공정개선($\Delta Scope 1_i$), (ii) 재생에너지 보급 확대($\Delta Scope 2_i$))에 따른 감축분을 반영한 배출량 전망치를 적용하였다. $Allowance_i$ 는 김재윤·전은경(2021)을 따라 한국의 2050 탄소중립 달성 경로에 의거하여 설정된 배출한도($Allowance_{netzero,i}$)에서 탄소 포집·저장 기술(CCS; Carbon Capture and Storage) 보급에 따른 탄소 흡수량을 배출한도 증가분($\Delta Allowance \text{ by } CCS_i$)으로 반영하여 추정할 할당량 전망치이다. $Production_i$ 는 산업 i 의 총 산출량을 의미한다.

종합하면, 상기의 업종별 탄소세는 정부의 ‘2050년 탄소중립’ 정책과 저탄소 기술 발전을 고려한 미래 탄소비용 부담을 의미한다. 배출권 가격은 P_i 로 전 산업에 동일하게 적용되나, 업종별 배출량 규모와 기술발전 속도에 따라 실질적인 탄소비용 부담은 산업별로 상이할 수 있다. 일례로, 만일 2050 탄소중립 정책 도입에 따른 배출한도 감소폭($\Delta Allowance$)이 친환경 기술발전에 따른 배출량 감소폭($\Delta Scope 1$, $\Delta Scope 2$)보다 크다면 해당 산업의 탄소비용 부담(e_i)은 양(+)의 값을 가지나, 반대의 경우로 친환경 기술발전이 배출한도 감축속도보다 빠르게 진전될 시에는 탄소감축에 대한 수익이 발생하여 탄소 비용 부담(e_i)이 음(-)의 값을 가질 수 있다.¹⁹⁾

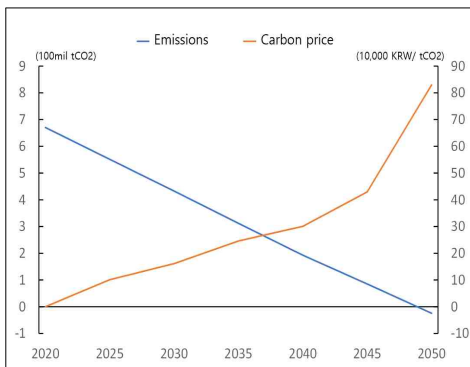
18) NGFS는 기후경제 통합평가모형(Integrated Assessment Model)을 활용하여 각국이 2050년에 탄소중립 목표를 달성한다는 전제하에 탄소 가격, 에너지믹스, 탄소 포집·저장 기술발전 경로 등을 제시하였다. 본 논문에서는 NGFS의 분석 결과 중 GCAM(Global Change Analysis Model) 통합평가모형 분석 결과를 적용하였다.

19) <Figure 2>에서 서술하는 바와 같이 다수의 제조업과 발전업에서는 탄소비용 부담이 양(+)의 값을 가지나 일부 서비스 산업에서는 재생에너지 보급 확대, CCS 기술 상용화 등으로 인해

분석 대상 업종은 한국표준산업분류의 중분류 기준 77개 산업으로 설정하였다. 분석의 기준시점은 투입산출표의 시점과 일치하도록 2019년 12월 말로 설정하였다. 구체적으로 온실가스 배출량 통계와 재무정보 확보가 가능한 861개 개별 기업의 데이터를 기준으로 산업별 탄소세를 추정하였다.²⁰⁾ 이때 기업별 온실가스 배출량은 환경부 산하 국가온실가스종합관리시스템에서, 기업의 재무정보는 KIS-value에서 입수하였다.

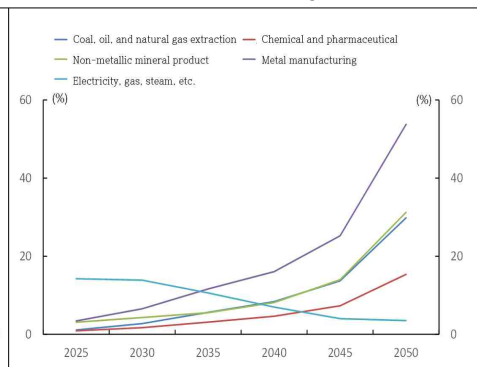
〈Figure 1〉은 탄소세 추정 시 적용한 NGFS(2021)의 한국 대상 ‘2050 탄소중립’ 시나리오이다. 해당 시나리오에서 한국의 이산화탄소 배출량은 2020년 6.7억톤에서 2050년 -0.2억톤으로 점진적으로 감소한다. 이 때, 탄소중립 목표를 달성하기 위해 온실가스 배출가격은 2050년 톤당 83만원까지 상승하는 것으로 나타났다. 〈Figure 2〉는 주요 온실가스 다배출 산업의 탄소세를 보여준다. 탄소세 추정치 기준 상위 5개 산업의 탄소세를 표기하였다. 추정 결과, ‘2050 탄소중립’ 시나리오에서 석탄, 원유 및 천연가스 채굴업, 화학물질 및 화학제품 제조업, 비금속광물제품 제조업, 1차금속 제조업의 탄소세가 2050년까지 크게 확대되는 것으로 나타났다. 특히, 1차금속 제조업(철강 등)의 탄소세가 가장 많이 상승하여 2050년경 탄소비용 부담액이 총 산출액 대비 54%까지 증가하는 것으로 분석되었다. 전기, 가스, 증기

〈Figure 1〉 Pathways of Greenhouse Gas Emissions and Emission Prices in Korea



Source: NGFS(2021)

〈Figure 2〉 Carbon Tax of Major Greenhouse Gas Emitting Industries



Source: Authors' own estimates

탄소비용 부담이 음(-)의 값을 가지는 것으로 나타났다.

20) 온실가스 배출량 정보가 존재하지 않는 산업은 일반적으로 배출권거래제 적용 대상 업종이 아니다. 이에 따라 이들 업종에 대해서는 탄소세가 0인 것으로 가정하였다.

및 공기조절 공급업(발전업 등)은 2025년경 탄소비용 부담액이 총 산출액 대비 14%로 가장 높은 수준이지만, 2025~50년 중 석탄발전 등 기존의 화석연료 발전이 재생에너지로 대체됨에 따라 탄소비용 부담액이 점진적으로 감소하는 것으로 나타났다.

2. 산업별 수요의 가격탄력성

각 산업의 산출물에 대한 수요의 가격 탄력성은 김재윤 외(2023)의 추정치를 적용하였다. 김재윤 외(2023)는 1995년~2022년 기간 동안 가격에 대한 국내 산업의 수요변화를 회귀분석 하여 산업별 수요의 가격탄력성을 추정하였다. 수요의 가격 탄력성 추정에 활용된 회귀분석 식은 다음과 같다.²¹⁾ β 가 주요 관심변수이며, 가격 변화에 따른 수요 변화를 의미한다.

$$\ln(Demand_t^i) = \alpha + \beta \ln(Price_t^i) + \sum_{k=1}^4 \gamma_k \ln(Demand_{t-k}^i) + \ln(GDP_t) + \epsilon_t \quad (i : \text{산업}, t : \text{분기}) \quad (14)$$

수요의 가격 탄력성 추정치는 <Table 1>과 같다.²²⁾ 일반적으로 예상하는 바와 같이, 농림수산물(-0.20), 음식료품(-0.19), 1차금속제품(-0.07), 전력, 가스 및 증기(-0.17) 등 필수재로 인식되는 산업의 수요가 가격 변화에 덜 탄력적인 것으로 나타났으며, 운송장비(-1.50), 전문, 과학 및 기술서비스(-0.55), 교육서비스(-0.54) 등의 서비스 관련 업종의 수요는 상대적으로 더 높은 가격탄력성을 나타내고 있다.

21) 구체적으로는 산업별 부가가치를 수요($Demand_t^i$)의 대용치이자 종속변수로, 산업별 생산자 물가지수를 가격($Price_t^i$)의 대용치이자 주요 설명변수로 설정하여 추정하였다. 통제변수로선 우선 1~4분기 전 시점의 업종별 부가가치($Demand_{t-k}^i$ ($k=1 \sim 4$))를 사용하여 과거 부가가치 추세의 영향을 통제하고자 하였으며, 아울러 국내총생산(GDP_t)을 사용하여 거시경제환경의 영향을 통제하고자 하였다. 표준오차는 잔차의 계열상관 가능성을 고려하여 Newey-West(1987) 추정법을 적용하였다.

22) <Table 1>에 표기되지 않은 여타 산업의 수요 탄력성은 강만옥·강광규·조정환(2011)의 탄력성 추정치를 원용하였다.

〈Table 1〉 Price Elasticity of Demand by Industry

Industry	Price Elasticity ¹⁾²⁾	Industry	Price Elasticity ¹⁾²⁾
■ Agricultural, Forestry, and Fishery Products	-0.20** (0.04)	■ Machinery and Equipment	-0.52** (0.02)
■ Mining Products	-0.55*** (0.00)	■ Transportation Equipment	-1.50*** (0.00)
■ Food and Beverage Products	-0.19*** (0.00)	■ Other Manufactured Products	-0.44*** (0.00)
■ Textile and Leather Products	-0.26** (0.01)	■ Electricity, Gas, and Steam	-0.17*** (0.00)
■ Wood and Paper Products	-0.21** (0.03)	■ Water Supply, Waste Management, and Recycling Services	-0.19*** (0.00)
■ Non-metallic Mineral Products	-0.52* (0.09)	■ Professional, Scientific, and Technical Services	-0.55** (0.00)
■ Primary Metal Products	-0.07** (0.04)	■ Education Services	-0.54* (0.05)
■ Fabricated Metal Products	-0.29* (0.06)	■ Other Services	-0.54* (0.09)

Note: 1) *, **, and *** indicate statistical significance at the 10%, 5%, and 1% levels, respectively.

2) p-values are given in brackets.

Sources: Kim, J., Jeong, S., and Lee, S. (2023).

V. 분석결과

탄소가격 상승은 직접적으로 배출 주체인 기업의 배출비용을 증가시켜 생산비용 증가와 생산품 가격 인상 압력으로 작용하고, 이러한 개별 산업의 가격 상승은 다시 산업 간 연관관계를 통해 전 산업으로 파급될 수 있다. 즉, 저탄소 전환에 따른 탄소가격의 인상은 산업 전반의 물가 상승과 생산물 수요 감소로 연결되어, 결과적으로 모든 산업에 손실을 초래할 수 있다. 이 장에서는 앞서 도출한 모수들의 추정 값을 모형에 대입하여 탄소가격의 상승이 산업 간 연관관계를 통해 전 산업의 생산품 가격 및 수요에 파급되는 영향을 추정하였다. 특히, 산업 간 연관관계의 반영 여부에 따라 추정 결과가 어떻게 변화하는지 살펴보기 위해, 먼저 산업 간 연관관계를 고려하지 않은 경우의 탄소가격 상승의 영향을 추정하고, 다음으로 산업 간

연관관계를 고려한 경우를 분석하여 두 경우의 추정 결과를 비교하였다.

1. 산업 간 연관관계를 고려하지 않은 경우

먼저, 산업 간 연관관계를 고려하지 않은 경우의 탄소가격 상승이 각 산업의 생산품 가격 및 생산품 수요에 미치는 영향을 추정한다. 앞서 서술한 레온티에프 가격 결정 모형의 가정에 따라 탄소 배출비용을 포함한 생산요소 투입비용은 모두 생산품 가격에 반영되므로, 탄소가격의 상승에 따른 생산비용의 증가는 모두 생산품 가격 상승으로 전가된다. 따라서 각 산업(i)의 생산품 가격은 다음과 같이 해당 산업에 부과된 탄소세(e_i)에 비례하여 증가하게 된다.

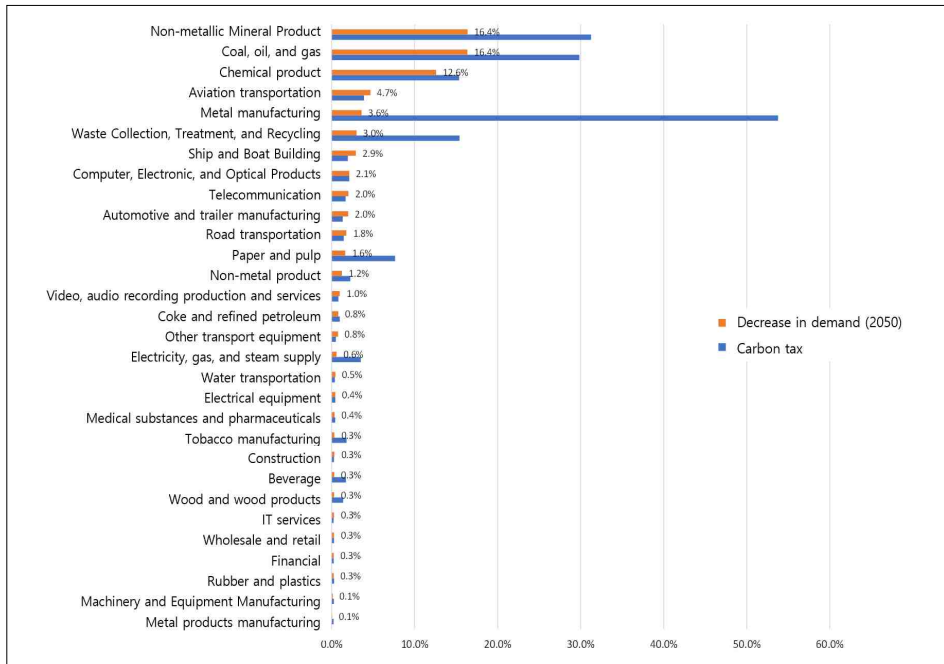
$$P_i(e_i) = (1 + e_i)P_i \quad (15)$$

그리고 앞서 각 산업의 생산품 수요는 탄력성이 일정한 상수인 로그-선형수요함수의 형태를 가진다고 가정하였으므로, 앞서 도출한 산업별 생산품 수요 가격탄력성 추정값(ε_i)을 활용하여 탄소가격 상승에 따른 수요의 변화를 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\Delta D_i \equiv \frac{Demand_i(e_i) - Demand_i}{Demand_i} = \varepsilon_i \left(\frac{p_i(e_i)}{p_i} - 1 \right) \quad \text{where } \varepsilon_i < 0 \quad (16)$$

분석 결과, 탄소가격의 인상은 탄소집약적 산업을 중심으로 상당한 수요 감소를 초래할 수 있는 것으로 나타났다(〈Figure 3〉). ‘2050 탄소중립’ 시나리오 하에서 산업별 수요의 감소폭을 살펴보면, 비금속광물제품 제조업 16.4% (2020-50년 누적 기준, 이하 동일), 석탄, 원유 및 천연가스 채굴업 16.4%, 화학물질 및 화학제품 제조업 12.6%, 항공운송업 4.7%, 1차금속 제조업 3.6%, 폐기물 수집, 운반, 처리 및 원료 재생업 3.0%, 선박 및 보트 건조업 2.9%, 컴퓨터, 전자 및 광학기기 제조업 2.1%, 통신업 2.0%, 자동차 및 트레일러 제조업 2.0% 등의 순으로 상대적으로 탄소집약도가 높은 산업에서의 수요가 기준시점(2019년 말) 대비 큰 폭으로 감소하는 것으로 나타났다.

〈Figure 3〉 Decrease in Demand by Industry: Without Considering Industrial Interrelations



Note: This analysis is based on the '2050 Carbon Neutrality' scenario for Korea provided by NGFS (2021). Carbon tax (orange bar) is based on 2050, and demand reduction rates (blue bar) are based on the accumulated period from 2020 to 2050.

그러나 탄소집약적 산업이라도 기존의 기술을 저탄소, 친환경 기술로 대체가 가능한 경우에는 탄소가격 인상 충격에서 상당폭 회복될 수 있는 것으로 나타났다. 대표적인 예로 전기, 가스, 증기 및 공기조절 공급업은 시나리오상의 에너지 믹스 변화에 따라 기존의 화석연료 발전을 태양광, 풍력 등 재생에너지로 대체하면서 온실가스 배출량을 감소시킬 수 있다. 이러한 저탄소 기술 전환을 통한 배출 감축 효과로 인해 전기, 가스, 증기 및 공기조절 공급업이 2050년에 부담할 것으로 추정되는 탄소세율은 3.5%로 낮아지며, 이에 따라 수요감소율도 0.6%로 다른 탄소집약적 산업들에 비해 상대적으로 낮은 것으로 나타난다.²³⁾ 아울러, 전기, 가스, 증기

23) 참고로 우리나라의 '2050 탄소중립' 시나리오 경로에 따라 탄소가격이 상승할 때 전기, 가스, 증기 및 공기조절 공급업의 생산품 수요의 시계열 변화를 보면, 이러한 저탄소 기술 전환 효과에 따라 수요 감소율이 2030년 2.2%, 2040년 1.1%, 2050년 0.6%로 일정 시점 이후 탄

및 공기조절 공급업의 경우 일반적인 제조업에 비해 상대적으로 수요의 가격탄력성이 낮음에 따라 더 높은 탄소세를 부담하지만, 수요감소율은 상대적으로 더 낮은 결과를 보이고 있다. 종합하면, 탄소집약도, 저탄소, 친환경 기술 전환 가능성, 수요의 가격탄력성 등에 따라 탄소가격 상승 충격의 영향이 산업별로 차별화되어 나타날 수 있다.

2. 산업 간 연관관계를 고려한 경우

저탄소 전환에 따른 탄소가격 상승 충격은 탄소 다배출 산업의 생산비용을 직접적으로 증가시키고 동시에 산업 간 연관관계를 통해 다른 산업에도 직간접적으로 영향을 미칠 수 있다. 이 장에서는 앞서 추정한 모수 값들을 모형에 적용하여 탄소가격 상승 충격이 산업 간 연관관계를 통해 파급되어 국내 모든 산업의 생산물가격과 수요에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 앞서 서술한 바와 같이 탄소가격을 탄소세(총산출액 대비 탄소배출 비용)로 변환하여 레온티에프 가격모형에 적용하여, 탄소가격 상승 후의 가격 $P(e)$ 은 다음과 같이 추정하였다.

$$p(e) = (I - A_{\tau,e}^T)^{-1} (I - A_{\tau}^T) p \quad (17)$$

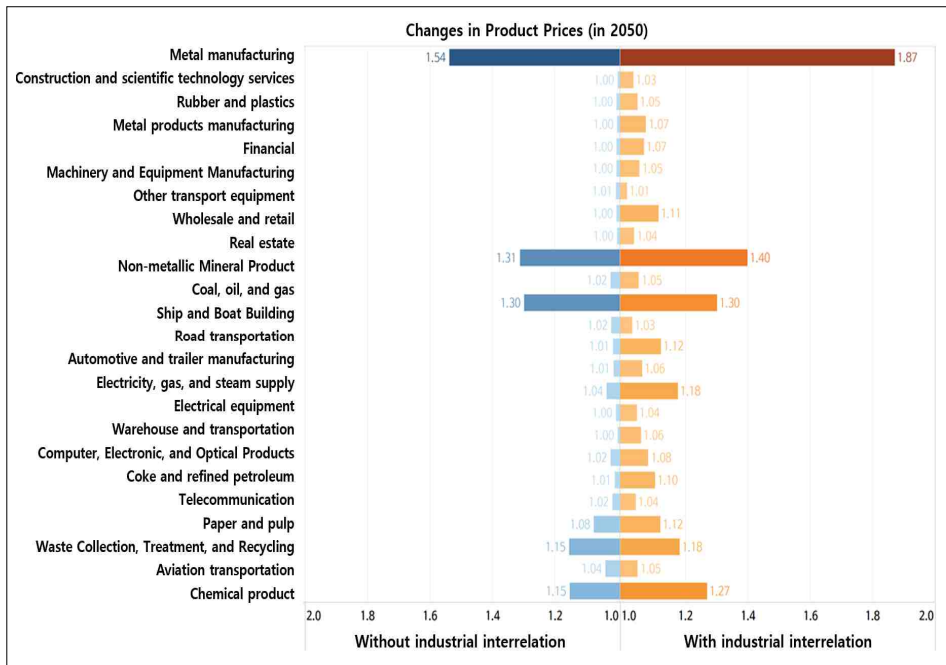
여기서 A_{τ}^T , $A_{\tau,e}^T$ 는 각각 탄소세 도입 전후의 투입계수행렬의 전치행렬을 의미한다. 본 연구에서는 선행연구를 따라 분석의 단순화를 위해 탄소가격 변동 이전의 생산품 가격(P)을 1로 모두 표준화한 후 탄소세 도입(즉, 탄소가격의 상승)에 따른 산업별 생산물가격($P(e)$)의 변동을 추정하였다.

〈Figure 4〉는 NGFS(2021)에서 제시한 우리나라의 ‘2050 탄소중립’ 시나리오에 따라 탄소가격이 2050년까지 약 80만원으로 상승했을 때 국내 산업별 생산품 가격 변화를 추정한 결과이다. 좌측 그래프는 산업연관관계를 고려하지 않은 생산품 가격을 의미하며, 우측 그래프는 산업 간 연관관계를 반영하여 추정한 생산품 가격을 의미한다. 분석 결과, 산업 간 연관관계를 반영할 경우 온실가스 다배출 산업에서

소가격 상승 충격에서 상당 부분 회복하는 것으로 나타났다. 반면에 온실가스 저감기술이 상용화되어 있지 않은 석탄, 원유 및 천연가스 채굴업, 비금속광물제품 제조업, 화학물질 및 화학제품 제조업 등의 경우에는 탄소가격의 인상에 따라 손실폭이 커지는 것으로 분석되었다.

의 탄소세 인상 충격이 전 산업으로 파급되어 산업 전반의 물가 상승으로 이어지는 것으로 나타났다. 생산품 가격 상승은 1차금속 제조업(87%, 2020~50년 누적기준, 이하 동일), 비금속광물제품 제조업(40%), 석탄, 원유, 천연가스 채굴업(30%), 화학물질 및 화학제품 제조업(27%), 전기, 가스, 증기 및 공기조절 공급업(18%) 등 탄소집약적 산업에서 두드러짐과 더불어, 육상 운송업(12%), 도소매업(11%), 컴퓨터, 전자 및 광학기기 제조업(8%), 자동차 및 트레일러 제조업(6%) 등 탄소다배출 산업과 연관관계가 있는 산업에서도 상당한 가격 상승이 발생하였다. 다만, 온실가스 배출량이 적음과 동시에 온실가스 다배출 산업과의 연관관계도 적은 음료 제조 및 식품품 제조업(2~3%), 정보서비스업(1%), 담배제조업(2%), 컴퓨터 프로그래밍, 시스템 통합 및 관리업(1%) 등의 산업은 탄소가격 상승에 따른 영향을 거의 받지 않는 것으로 분석되었다.

〈Figure 4〉 Changes in Product Prices by Industry



Note: 1) The left (right) side shows the changes in product prices (%) for each industry before (after) reflecting inter-industrial linkages, accumulated from 2020 to 2050,
 2) This analysis is based on the '2050 Carbon Neutrality' scenario for Korea provided by NGFS (2021).

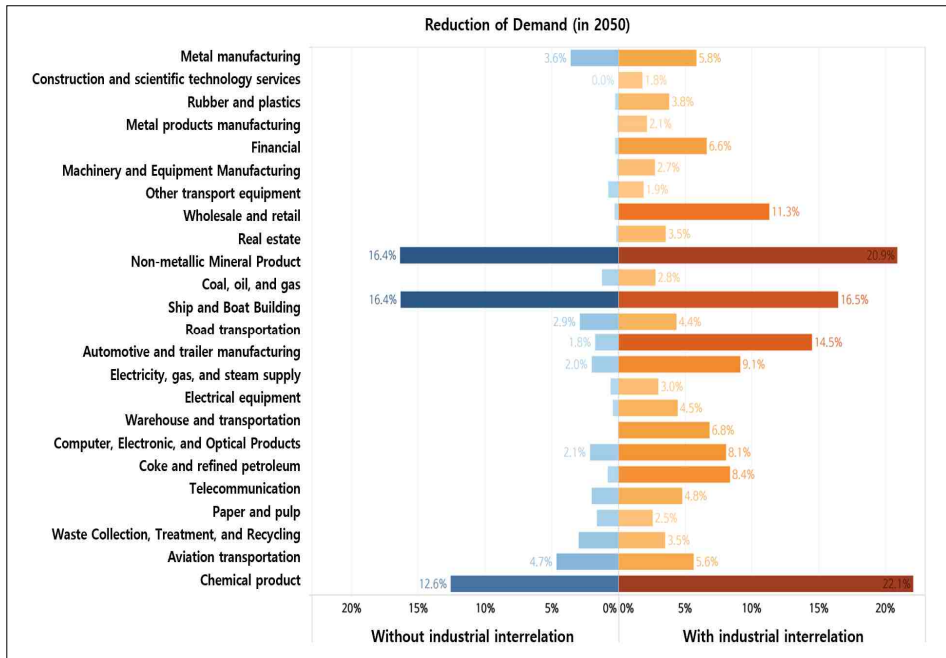
〈Figure 5〉는 탄소세 인상에 따른 2050년경 국내 산업별 수요 변화를 산업 간 연관관계 반영 전(좌측)과 후(우측)로 나누어 비교한 결과이다. 분석 결과, 산업 간 연관관계를 고려할 경우 탄소세 부담이 크지 않은 산업도 온실가스 다배출 산업과 마찬가지로 탄소 가격 상승 충격에 상당히 취약할 수 있는 것으로 나타났다. 특히, 탄소집약도가 상대적으로 낮더라도 탄소집약적 산업들과 연관관계가 깊은 제조업에서 탄소가격 상승에 따른 수요 감소가 두드러지게 관찰되었다. 일례로, 자동차 및 트레일러 제조업은 산업 간 연관관계를 고려하지 않았을 경우 수요가 2% (2020-50년 누적 기준, 이하 동일) 감소하는 것으로 추정되었으나, 산업 간 연관관계를 고려한 경우에는 감소폭이 9.1%로 확대되었다. 마찬가지로 컴퓨터, 전자 및 광학기기 제조업 2.1%→8.1% (산업연관관계 반영 전후, 이하 동일), 육상 운송업 1.8%→14.5%, 도소매업 0.3%→11.3% 등 탄소집약도는 상대적으로 낮지만 온실가스 다배출 산업과의 연관관계가 높은 산업들에서 수요 감소폭이 확대되는 것으로 나타났다. 반면, 의료용 물질 및 의약품 제조업 0.4%→0.7%, 담배제조업 0.3%→0.4%, 음료 제조업 0.3%→0.4%, 식료품 제조업 0.04%→0.6%, 연구개발업 0.01%→0.01% 등 여타 산업과 연관관계가 상대적으로 적은 업종에서는 산업연관효과 반영 전과 후의 추정 결과 차이가 미미하였다.

한편, 온실가스 다배출 산업의 경우 당초 큰 폭의 수요 감소폭을 보이는 가운데, 산업 간 연관관계를 반영한 이후 그 수요 감소폭이 더욱 확대되는 모습이 관찰되었다. 화학물질 및 화학제품 제조업 12.6%→22.1%, 비금속광물제품 제조업 16.4%→20.9%, 석탄, 원유 및 천연가스 채굴업 16.4%→16.5% 등의 순으로 탄소가격 상승에 따른 수요 감소폭이 다른 산업에 비해 상대적으로 크게 나타났다. 이와 대조적으로 재생에너지로의 대체 가능성이 높은 전기, 가스, 증기 및 공기조절 공급업은 수요 감소폭이 3.0%로 산업 간 연관관계를 반영하지 않은 경우의 추정치(0.6%)와 마찬가지로 탄소가격 상승 충격에 상대적으로 덜 민감한 것으로 나타났다.

이상의 결과를 종합하면, 탄소가격 인상 충격은 산업 전반의 가격 상승과 생산품에 대한 수요 감소로 파급되어 국내 산업 전반에 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 탄소집약적 산업은 이러한 탄소가격 상승 충격에 취약할 가능성이 더 높으나, 여타 산업의 경우에도 탄소 다배출 산업과의 연관관계 및 의존도에 따라 그 영향이 상당할 수 있다. 특히, 도소매업, 자동차 및 트레일러 제조업, 컴퓨터, 전자 및 과학기

기 제조업에서 산업연관관계에 따른 부정적 파급효과가 두드러지는 것으로 나타났다.

〈Figure 5〉 Reduction of Demand by Industry



Note: 1) The left (right) side shows the reduction (%) of industrial demand for each industry before (after) reflecting inter-industrial linkages, accumulated from 2020 to 2050, limited to the top 25 industries.

2) This analysis is based on the '2050 Carbon Neutrality' scenario for Korea provided by NGFS (2021).

VI. 결 론

최근 우리나라를 비롯한 전 세계 국가들은 기후 위기 대응의 중요성을 인식하고 온실가스 감축, 재생에너지 보급 확대, 녹색산업 및 녹색기술 투자 활성화 등 저탄소 전환 정책을 적극적으로 추진하고 있다. 이러한 저탄소 정책은 기후변화로 인한 물리적 피해를 예방하는 긍정적인 효과가 있는 반면에 고탄소 산업에는 온실가스 배출 비용 증가, 기존의 탄소 집약적 자산의 가치 하락과 같은 영향을 미치며 전환 리스크(transition risk)를 유발할 수 있다. 따라서 저탄소 경제로의 전환 과정에서

야기되는 부정적 영향을 최소화하기 위해서는 이러한 전환리스크가 산업과 경제에 미치는 영향에 대한 종합적이고 체계적인 분석이 이루어질 필요가 있다. 이와 관련한 국내의 선행연구들은 주로 온실가스 다배출 산업을 대상으로 배출권거래제와 같은 저탄소 전환 정책의 시행이 개별 산업에 미치는 영향을 분석하였으며, 해당 정책이 모든 산업에 파급되어 미치는 영향을 종합적으로 분석한 연구는 여전히 드문 실정이다.

이에 본 연구는 저탄소 전환 정책에서 가장 핵심적인 요소 중 하나로 인식되고 있는 탄소가격의 상승이 개별 산업의 생산비용, 생산품 가격 및 수요에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하고, 여기서 더 나아가 산업 간 연관관계를 통해 그 효과가 전 산업으로 파급될 때 추정 결과가 어떻게 변화하는지 살펴보았다. 이를 위해 본 연구는 최근 중앙은행 및 금융기관에서 활발히 연구 중인 기후변화 리스크에 대한 스트레스 테스트 기법들을 참고하여 우리나라의 상황을 반영한 탄소가격 파급효과 모형을 제시하였다. 특히, 우리나라의 탄소중립 시나리오, 온실가스 배출량 데이터, 산업 간 연관관계 등의 자료를 활용하여 국내 산업계, 학계, 정책당국 등 다양한 이해관계자들에게 좀 더 현실성 있고 유의미한 분석 결과를 제시하고자 하였다.

분석 결과, 먼저 산업 간 연관관계를 고려하지 않은 경우는 선행연구들과 유사하게 탄소가격 상승의 부정적인 영향이 주로 온실가스 다배출 산업에 밀집되어 나타났다. NGFS(2021)의 우리나라 대상 ‘2050 탄소중립’ 시나리오의 2050년 탄소가격 수준(톤당 약 83만원)으로 탄소가격이 상승하였을 때, 석탄, 원유 및 천연가스 채굴업(-16.4%, 2020~50년 누적 기준, 이하 동일), 비금속광물제품 제조업(-16.4%), 화학물질 및 화학제품 제조업(-12.6%), 컴퓨터, 전자 및 광학기기 제조업(-2.1%), 통신업(-2.0%), 자동차 및 트레일러 제조업(-2.0%) 등 온실가스 다배출 산업의 생산품에 대한 수요가 더 많이 감소하는 것으로 나타났다.

그러나 산업 간 연관관계를 고려하면 온실가스 배출량이 많지 않은 산업도 탄소가격 상승 충격에 상당한 영향을 받을 수 있는 것으로 분석되었다. 예를 들어 자동차 및 트레일러 제조업은 산업 간 연관관계를 고려하지 않았을 때는 수요의 변동폭이 -2%이었으나 산업 간 연관관계를 고려한 이후에는 -9%로 감소폭이 확대되었다. 마찬가지로 다른 산업과의 연관관계가 높은 도소매업, 운송업 등도 산업 간 연관관계를 반영하였을 때 수요 감소폭이 확대되는 것으로 나타났다. 이는 저탄소 경제로의 전환 과정에서 발생하는 탄소가격 상승이 탄소집약적 산업의 온실가스 배출

비용을 직접적으로 증가시킴과 동시에 산업 간 연관관계를 통해 전 산업으로 파급되어 전반적인 생산비용 상승을 초래하기 때문이다. 다만, 전기, 가스, 증기 및 공기조절 공급업과 같이 온실가스 다배출 산업이라도 기존의 탄소집약적인 기술(화석연료 발전)을 친환경 기술(재생에너지 발전)로 대체할 수 있는 경우에는 탄소가격 인상 충격에서 상당 부분 회복될 수 있는 것으로 나타났다.

본 연구 결과는 국내 기업들이 저탄소 경제로의 전환 과정에서 발생할 수 있는 위험을 사전에 인지하고, 이에 대한 조기 대응 방안을 마련하는 데 유용한 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한 저탄소 기술의 전환을 통해 전환리스크의 충격을 상당 부분 완화시킬 수 있다는 결과는 온실가스 배출 감축을 위한 기술 개발 투자의 중요성을 환기해 주고 있다. 마지막으로 본 연구는 다양한 방향으로 확장될 수 있다. 예를 들어, 기후변화 전환리스크뿐만 아니라 기후변화의 물리적 리스크의 파급 영향도 함께 고려할 수 있으며, 이 경우 기후변화로 인한 국내 산업의 손실 규모는 더욱 확대될 수 있을 것이다. 또한 국내 저탄소 정책의 영향뿐만 아니라 최근 많이 논의되고 있는 유럽의 탄소국경조정제도(Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM)와 같은 해외 기후변화 대응정책이 국내 경제에 파급되는 영향을 분석하는 것도 의미 있는 후속 연구가 될 수 있을 것이다.

■ 참 고 문 헌

1. 강만옥 · 강광규 · 조정환, “탄소세 도입 및 에너지세제 개편방안 연구,” 녹색성장연구보고서, 2011, pp. 1-181.
(Translated in English) Kang Man-ok, Kwang-gyu Kang, and Jeong-hwan Cho, “Study on the Introduction of Carbon Tax and Energy Tax Reform Measures,” Green Growth Research Report, 2011, pp. 1-181.
2. 권태현, 『산업연관분석』, 도서출판청람, 2020.
(Translated in English) Kwon Tae-hyun, *Input-Output Analysis*, Cheongram Publishing, 2020.
3. 김문태 · 류일한 · 유원희 · 함혜진 · 황윤정, “탄소성적표지가 신용평가에 미치는 영향,” 『세무

- 회계연구』, 제57권, 2018, pp. 1-18.
(Translated in English) Kim, Mun-tae, Il-han Ryu, Won-hee Yoo, Hye-jin Ham, and Yun-jung Hwang, "The Impact of Carbon Footprint Labeling on Credit Ratings," *Tax Accounting Research*, Vol. 57, 2018, pp. 1-18.
4. 김재윤 · 전은경, "기후변화 이행리스크와 금융안정," 한국은행 조사통계월보, 75 (12), 2021, pp. 16-52.
(Translated in English) Kim, Jeayoon, and Eunkyung Jeon, "Climate-related Transition Risks and Financial Stability," Bank of Korea Quarterly Bulletin, December 2021, pp. 14-41.
5. 김재윤 · 정선문 · 이성태, "수출입경로를 통한 해외 기후변화 물리적리스크의 국내 파급영향," BOK 이슈노트, 26, 2023.
(Translated in English) Kim, Jeayoon, Sun-Moon Jung, and Sung-Tae Lee, "Spillover Effects of Foreign Climate-related Physical Risks via Trade Channels: Evidence from Korea," BOK Issue Note, 26, 2023.
6. 박도준 · 박혜진 · 이지윤, "기업의 ESG 활동이 신용위험 및 평가에 미치는 영향," 『재무연구』, 제36권 제1호, 2023, pp. 67-102.
(Translated in English) Park, Dojoon, Hyejin Park, and Jiyeon Lee, "The Effect of ESG Performance on Corporate Credit Risk," *Asian Review of Financial Research*, Vol. 36, No. 1, pp. 67-102.
7. 오희나 · 홍종호, "디지털 전환의 기후효과: 현황과 전망," 『한국경제포럼』, 제14권 제4호, 2022, pp. 1-24.
(Translated in English) Oh, Hyungna, and Jong Ho Hong, "The Impact of Digitalization on GHG Emissions in the Manufacturing Sector," *The Korea Economic Forum*, Vol. 14, No. 4, pp. 1-24.
8. 이용진 · 김종진 · 김상현 · 최재현, "수익곡물의 물가영향 및 공급지장효과 분석," 『농촌경제』, 제45권 제2호, 2022, pp. 1-20.
(Translated in English) Lee, Yong-geon, Jong-jin Kim, Sang-hyun Kim, and Jae-hyun Choi, "Analysis of Price Impact and Supply Disruption Effects of Cash Crops," *Rural Economy*, Vol. 45, No. 2, 2022, pp. 1-20.
9. 정국모 · 황다슬, "통합기후모형을 통한 제주도의 기후변화 피해 비용 추정," 『경제학연구』, 제70집 제2호, 2022, pp. 5-36.
(Translated in English) Jung, Kuk Mo, and Daseul Hwang, "Estimation of Social Cost of Carbon in Jeju Island: An Integrated Assessment Model Approach," *The Korean Journal of Economic Studies*, Vol. 70, No. 2, pp. 5-36.
10. 최용근, "기후변화 리스크가 금융산업에 미치는 영향," 『지급결제학회지』, 제14권 제2호, 2022, pp. 437-480.
(Translated in English) Choi, Yong-geun, "The Impact of Climate Change Risks on the Financial Industry," *Journal of Payment and Settlement*, Vol. 14, No. 2, 2022, pp. 437-480.
11. 한국은행, 『2019년 산업연관표』.
(Translated in English) Bank of Korea, *2019 Input-Output Table*.

12. 환경부 온실가스종합정보센터, 『2019 국가 온실가스 통계』.
(Translated in English) Ministry of Environment Greenhouse Gas Information Center, *2019 National Greenhouse Gas Statistics*.
13. _____, “2022 배출권거래제 운영결과보고서,” 2023.
(Translated in English) Ministry of Environment Greenhouse Gas Information Center, “2022 Emissions Trading System Operation Report,” 2023.
14. 황재학, “국내 은행 기업대출에 대한 물리적 리스크 스트레스 테스트,” 『한국경제연구』, 제40권 제3호, 2022, pp.89-125.
(Translated in English) Hwang, Jae-hak, “Physical Risk Stress Test on Corporate Loans by Domestic Banks,” *Journal of Korean Economic Studies*, Vol. 40, No. 3, 2022, pp. 89-125.
15. Adenot, T., M. Briere, P. Counathe, M. Jouanneau, T. Le Berthe, and T. Le Guenedal, “Cascading Effects of Carbon Price Through the Value Chain: Impact on Firm’s Valuation,” 2022, Available at <https://ssrn.com/abstract=4043923>
16. Alogoskoufis, S., N. Dunz, T. Emambakhsh, T. Hennig, M. Kaijser, C. Kouratzoglou, M. A. Munoz, L. Parisi, and C. Salleo, “ECB’s Economy-wide Climate Stress Test,” European Central Bank Occasional Paper Series, 281, 2021.
17. Battiston, S., A. Mandel, I. Monasterolo, F. Schütze, and G. Visentin, “A Climate Stress-test of the Financial System,” *Nature Climate Change*, Vol. 7, No. 4, 2017, pp. 283-288.
18. Dietz, S., A. Bowen, C. Dixon, and P. Gradwell, “Climate Value at Risk’ of Global Financial Assets,” *Nature Climate Change*, Vol. 6, No. 7, 2016, pp.676-679.
19. Emambakhsh, T., M. Fuchs, S. Kördel, C. Kouratzoglou, C. Lelli, R. Pizzeghello, C. Salleo, and M. Spaggiari, “The Road to Paris: Stress Testing the Transition Towards a Net-zero Economy. The Energy Transition through the Lens of the Second ECB Economy-wide Climate Stress Test,” European Central Bank Occasional Paper Series, 328, 2023.
20. Fabra, N., and M. Reguant, “Pass-Through of Emissions Costs in Electricity Markets,” *The American Economic Review*, Vol. 104, No. 9, 2014, pp.2872-2899.
21. IPCC, Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty, World Meteorological Organization, 32, 2018.
22. _____. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 2021.
23. Leontief, W., “Environmental Repercussions and the Economic Structure: An Input-output Approach,” *The Review of Economics and Statistics*, 1970, pp. 262-271.
24. Monasterolo, I., J. I. Zheng, and S. Battiston, “Climate Transition Risk and Development Finance: A Carbon Risk Assessment of China’s Overseas Energy Portfolios,” *China &*

- World Economy*, Vol. 26, No. 6, 2018, pp.116-142.
25. Newey, W. K., and K. D. West, "A Simple, Positive Semi-definite, Heteroskedasticity and Autocorrelation," *Econometrica*, Vol. 55, No. 3, 1987, pp.703-708.
 26. NGFS, *NGFS Climate Scenarios for Central Banks and Supervisors (Phase II)*, NGFS, 2021.
 27. ———, *NGFS Climate Scenarios for Central Banks and Supervisors (Phase III)*, NGFS, 2022.
 28. Nordhaus, W. D., "Rolling the 'DICE': An Optimal Transition Path for Controlling Greenhouse Gases," *Resource and Energy Economics*, Vol. 15, No. 1, 1993, pp.27-50.
 29. Oestreich, A. M., and I. Tsiakas, "Carbon Emissions and Stock Returns: Evidence from the EU Emissions Trading System," *Journal of Banking & Finance*, Vol. 58, 2015, pp.294-308.
 30. Roncoroni, A., S. Battiston, L. O. Escobar-Farfán, and S. Martinez-Jaramillo, "Climate Risk and Financial Stability in the Network of Banks and Investment Funds," *Journal of Financial Stability*, Vol. 54, 100870, 2021.
 31. Stolbova, V., I. Monasterolo, and S. Battiston, "A Financial Macro-network Approach to Climate Policy Evaluation," *Ecological Economics*, Vol. 149, 2018, pp.239-253.
 32. World Bank, "State and Trends of Carbon Pricing 2023," 2023.

Spillover Effects of Climate Change Transition Risks through Industrial Linkages*

Jeayoon Kim** · Hyejin Park***

Abstract

Low-carbon transition policies pose significant risks to fossil fuel-reliant industries. Increasing carbon prices raise emission costs for companies, leading to economic losses for countries like South Korea, heavily dependent on carbon-intensive manufacturing. This study analyzes the effects of rising carbon prices on all industries, considering inter-industry relationships. Our analysis shows that cost increases in carbon-intensive industries lead to price hikes in connected sectors. However, high-emission industries with low-carbon technology potential are less impacted, emphasizing the importance of green innovation. This study provides valuable policy implications for climate change risk management for South Korean companies and policymakers.

Key Words: climate change, transition risk, inter-industry relationships, carbon pricing
JEL Classification: D57, Q54, Q58

Received: Feb. 13, 2024. Revised: May 28, 2024. Accepted: July 26, 2024.

* This paper was presented at the special session on “The Economics of Climate Change” at 2024 Korea’s Allied Economic Associations Annual Meeting. We would like to express our gratitude to Dr. Minki Kim (Korea Capital Market Institute) and Professor Wankeun Oh (Hankuk University of Foreign Studies) for their valuable advice on this study. The authors acknowledge that some content of this paper has been revised from the research report “The Impact of Carbon Risk and the Importance of Portfolio Carbon Neutrality” written by Hyejin Park and Minki Kim at Korea Capital Market Institute. This work was supported by the research fund of Hanyang University (HY-2024-1775).

** First Author, Economist, Office of Sustainable Growth, Bank of Korea, 39, Namdaemun-ro, Jung-gu, Seoul, 04531, Korea, Phone: +82-2-750-6858, e-mail: jkim20@bok.or.kr

*** Corresponding Author, Assistant Professor, School of Economics, Hanyang University ERICA Campus, 55 Hanyangdeahak-ro, Sangnok-gu, Ansan, Gyeonggi-do, 15588, Korea, Phone: +82-31-400-5601, e-mail: hpark83@hanyang.ac.kr