

편익이전 기법을 통한 탄소의 사회적 비용 추정*

이동규** · 이성규***

요약

기후변화에 대한 대응이 국제사회에서 중요한 이슈로 부각되면서 비용효과적인 탄소저감정책인 탄소가격제도 또한 여러 나라에서 적극적으로 고려되고 있다. 이론적으로 탄소가격이 탄소의 사회적 비용(SCC)과 같은 수준으로 설정된다면 최적의 의사결정을 유도할 수 있는 것으로 기대되기에, 본고는 적정 수준의 가격 설정에 도움이 되도록 최근 미국에서 추정된 SCC 값들에 대하여 가치이전과 메타분석을 통해 국내 SCC로 재추정하였다. 분석결과, 가치이전 추정치는 IWG(2021)의 경우 45,548원/tCO₂, EPA(2023)의 경우 107,172원/tCO₂로 나타났다. 이러한 결과는 31개 선형연구의 560개 SCC 추정치를 표본으로 하는 메타회귀분석의 편익이전 결과와도 일관적이었다. IWG(2021)에 대한 편익이전 결과는 기존 국내 예비타당성조사에서 활용하는 SCC값(44,000원/tCO₂)과 매우 유사하지만, EPA(2023)에 대한 편익이전 결과는 기존보다 두 배 이상 높게 추정되어 향후 해당 수치가 탄소가격으로 활용될 경우 기업들의 탄소저감활동을 강하게 유도하는 효과가 나타날 것으로 판단된다.

주요 단어 : 탄소의 사회적 비용, 편익이전, 가치이전, 메타분석

경제학문헌목록 주제분류 : Q41, Q53

* 이 논문은 한국개발연구원의 2022년 정책연구 보고서 「타당성평가에서의 환경가치 반영에 관한 연구」의 일부를 수정·보완한 것입니다.

** 서울시립대학교 경제학부 부교수(제1저자) (e-mail: dgyi77@uos.ac.kr)

*** 서울대학교 환경대학원 박사과정(교신저자) (e-mail: stonetree16@snu.ac.kr)

I. 서 론

최근 국제사회는 기후변화가 초래할 전 지구적인 부정적 파생효과를 우려하며 탄소배출저감을 통하여 기후변화 수준을 억제하고자 노력하고 있다. 탄소배출을 저감하기 위한 정책수단은 여러 가지가 있겠으나 경제학계를 중심으로 강조하는 정책은 시장에서 탄소의 비용을 반영하는 탄소가격(carbon pricing)제도이다. 대표적인 탄소가격제도로는 탄소세나 탄소배출권거래제 등이 있으며, 최근에는 각종 국책사업들의 예비타당성조사와 같은 사전 비용-편익분석에서도 탄소가격이 일부 활용되고 있다.

이상적으로 탄소가격은 탄소의 사회적 한계비용과 같아야 시장 메커니즘에 입각한 의사결정의 효율성을 극대화할 수 있다. 사회적 한계비용(social marginal cost)은 사적 한계비용(private marginal cost)과 외부비용(external cost)의 합으로 요약된다. 정부의 개입이 없는 시장 메커니즘에서는 생산자들이 발생시키는 탄소에 대한 사적 한계비용은 사실상 발생하지 않는 반면,¹⁾ 배출된 탄소는 기후변화라는 외부비용을 발생시킨다. 따라서 탄소의 사회적 비용은 탄소의 한계피해(marginal damage)와 동일하다.

탄소가격제도는 외부효과로 인한 시장실패를 교정하여 최적 수준의 탄소배출을 유도할 수 있으며, 다른 정책수단들에 비해 비용효과적으로 저감목표를 달성할 수 있다. 탄소가격제도의 핵심은 탄소의 사회적 비용을 적절하게 반영하는 것에 있다. 만약 탄소가격제를 활용하더라도 탄소의 가격이 지나치게 낮거나 높으면 그에 따라 탄소저감량도 최적 저감수준에 비해 과소하거나 과다하게 된다.

본고에서는 탄소가격정책에서의 활용을 위해 탄소의 사회적 비용(Social Cost of

1) 다만, 민간영역에서 탄소배출을 감축하기 위한 자발적인 합의와 같은 움직임이 있는 경우에는 정부가 개입하지 않더라도 시장 메커니즘에 탄소의 비용이 금전적으로 고려될 수 있다.

Carbon; 이하 ‘SCC’)을 추정하고자 한다. 기존에도 몇몇 탄소의 사회적 비용을 추정한 국내 연구들이 있다. 특히, 예비타당성조사에서는 이동규 외(2018)에서 미국 환경청(Environmental Protection Agency; 이하 ‘EPA’)이 발표한 추정치를 가치이전하여 추정한 수치를 활용하고 있으나 최근 급변하는 기후변화에 대한 국제사회의 대응을 감안할 때 5년 이상 지난 추정 수치를 앞으로 계속 참고하기보다는 최근의 해외 추정결과들을 반영한 추정치를 제시하는 것이 관련 정책을 설계하는 데 요긴할 것으로 판단된다. 덧붙여, 본 연구에서는 단순한 해외 유력 추정결과에 대한 가치이전값의 업데이트뿐만 아니라 다양한 해외의 탄소의 사회적 비용 추정값에 대한 메타분석을 함께 실시하여 편익이전 결과가 계량분석방법으로 접근하였을 때도 어느 정도 받아들일 수 있는 결과인지를 재확인하고자 한다. 본고의 구성은 다음과 같다. 다음 장에서는 선행연구들을 소개하며, 제III장에서는 분석방법론을 다룬다. 제IV장에서는 분석결과를 정리하며 마지막 장인 제V장에서 연구결과의 요약과 함께 정책적 의미를 논의하며 마무리한다.

II. 선행연구

SCC를 직접 추정하는 방법론에는 통합평가모형(Integrated Assessment Model; IAM), 설문 등이 있지만, 대부분의 선행연구는 통합평가모형을 사용하여 SCC 추정치를 도출하고 있다. 이에 본 장에서는 본 연구의 메타분석에서 개별 관측치가 되는 통합평가모형을 사용한 선행연구를 중심으로 살펴본다. 특히, 통합평가모형을 사용한 선행연구 중에서도 국내외에서 많이 인용하고 있는 미국 IWG(Interagency Working Group)의 연구와 최근에 IWG의 핵심 구성원인 미국 EPA가 새롭게 발표한 연구결과를 중심으로 살펴본 후 메타분석을 통해 SCC를 추정한 대표적인 선행연구를 정리한다.

1. 통합평가모형을 사용한 탄소의 사회적 비용 추정 연구

통합평가모형은 SCC를 추정하는 가장 대표적인 방법론이다. 통합평가모형은 두 가지 이상의 각기 다른 학문 영역의 지식을 활용하여 하나의 프레임에서 분석하는 것을 의미한다(Nordhaus, 2018). 현재까지 다양한 통합평가모형이 개발되었지만 가장 많이 사용되는 통합평가모형은 DICE, FUND, PAGE 모형이다(Bergh and Botzen, 2014; Wang et al., 2019; EPA, 2023).²⁾³⁾ 국내외의 타당성평가에서 자주 인용하는 IWG(2010), IWG(2021)에서도 위 세 모형의 평균을 사용하여 추정치를 도출하였다.

IWG는 2010년에 첫 번째 추정치를 발표하였고, 2013년, 2016년, 2021년에 추정치를 업데이트하였다. IWG(2010)에서 발표한 2020년의 추정치는 2.5% 할인율을 적용하였을 때 USD 41.7이었고, 이 수치는 IWG(2021)에서 USD 76까지 상승하였으며 여기에는 화폐의 기준 연도가 2007년에서 2020년으로 바뀐에 따른 화폐가치의 변화까지 포함된 것이다. 다만, IWG(2021)에서는 3% 할인율에서의 추정결과가 주로 인용되고 있으며, 해당 값은 USD 51이다.

한편, 미국 EPA는 2023년 11월 새로운 SCC 추정치를 발표하였다(EPA, 2023). EPA(2023)와 IWG의 SCC 추정 연구의 차이점은 EPA(2023)에서는 기존에 만들어진 IAM의 평균을 사용하지 않고 모듈 방식(modular approach)을 사용하였다는 점이다. IWG의 연구에서는 DICE, FUND, PAGE의 평균을 사용했는데 이 방식에서는 기존 모형이 설정하고 있는 가정과 함수가 그대로 사용될 수밖에 없다는 약점이 있었다. 하지만 EPA(2023)에서는 각 단계의 모듈마다 최신의 연구 결과를 반영하여 추정치를 도출함으로써 약점을 보완하였다.

<표 1>은 EPA(2023)의 SCC 추정치와 IWG(2021)의 추정치를 대비하여 보여주고 있다. EPA(2023)에서 추정한 SCC를 살펴보면 IWG의 결과 대비 추정값이 상당

2) Wang et al.(2019)의 연구에서는 36종의 IAM을 분석했다.

3) 각 모형의 전체 명칭은 다음과 같다. DICE: Dynamic Integrated Climate and Economy; FUND: Climate Framework for Uncertainty, Negotiation, and Distribution; PAGE: Policy Analysis of the Greenhouse Gas Effect

히 증가한 것을 확인할 수 있다. 공통 할인율인 2.5% 할인율을 적용한 추정치를 비교해 보면 2020년의 경우 EPA(2023)의 추정치는 IWG(2021) 결과 대비 58%, 2050년의 경우 72% 증가하였다. 이는 기후변화와 관련한 최신 예측치와 연구방법론을 적용하여 계산한 결과 기후변화의 영향이 과거에 예측한 것보다 더 심각할 수 있다는 것을 나타내는 것이라고 볼 수 있다. 비록 EPA(2023)가 미국 IWG의 공식 추정결과가 아니지만, 본고에서는 EPA(2023)의 연구를 포함한 분석 결과를 제시하고자 한다. 이는 EPA가 IWG의 구성원이며 그동안 IWG가 권고하는 추정치와 EPA의 추정치는 일관성을 유지해 왔기에 EPA(2023)의 SCC 추정치가 이후 IWG가 발표할 SCC 추정결과와 동일할 가능성이 높다고 판단하였기 때문이다.

〈표 1〉 EPA(2023)와 IWG(2021)의 SCC 추정결과 비교

(단위: 2020년 기준 USD/tCO₂)

기준연도	할인율 5%	할인율 3%	할인율 2.5%		할인율 2.0%	할인율 1.5%
	IWG('21)	IWG('21)	IWG('21)	EPA('23)	EPA('23)	EPA('23)
2020	14	51	76	120	190	340
2030	19	62	89	140	230	380
2040	25	73	103	170	270	430
2050	32	85	116	200	310	480

자료: IWG(2021), EPA(2023)의 추정 결과를 바탕으로 저자 작성

2. 메타분석을 활용한 탄소의 사회적 비용 추정 연구

메타분석을 활용하여 SCC를 추정한 대표적인 연구로는 Richard Tol의 연구와 Wang et al.(2019)의 연구가 있다. Tol은 2008년과 2023년에 메타분석을 통해 SCC를 각각 추정하였다. Tol(2008)은 47개 연구에서 도출한 211개 추정치를 사용하여 분석을 실시하였고 3%의 순수시간선호율을 적용하여 도출된 2010년의 SCC의 평균값은 24USD/tC(6.82USD/tCO₂)이었다. 이로부터 15년이 지난 2023년 실시한 Tol(2023)에서는 207개 연구에서 도출한 5,905개 추정치를 사용하여 메타분석을

실시했고 이때의 SCC 평균값은 72USD/tC(19.45USD/tCO₂)로 도출되었다. 15년 간의 간격을 두고 실시된 연구에서 도출된 추정치는 3배 가까이 증가하였는데 최근의 추세만을 고려하면 이러한 증가세는 더 두드러진다. 2022년까지 출판된 모든 추정치를 대상으로 분석하지 않고, 2018년부터 2022년 사이에 출판된 연구로 한정하여 도출된 추정치는 146USD/tC(40.45USD/tCO₂)이다. 또 다른 메타분석 연구인 Wang et al.(2019)의 연구에서는 58개 연구에서 도출한 578개 추정치를 사용하여 메타분석을 실시하였고 3% 순수시간선호율을 적용하여 54.70USD/tCO₂의 SCC를 도출하였다.

Ⅲ. 분석 방법

본고는 SCC를 추정하기 위해 편익이전 기법을 활용한다. 편익이전(benefits transfer)은 특정 지역의 비시장재 가치를 직접적으로 해당 지역의 자료로 추정하는 대신 다른 지역에서 추정된 결과를 이용하여 두 지역의 사회·경제적 차이를 적절히 보정하여 추정하는 기법이다(Freeman III et al., 2014). SCC를 추정할 때 편익이전은 유용한 접근법이 될 수 있는데, 이는 탄소에 의한 비용의 대부분이 온실효과에 의한 기후변화에 따른 것이며 이러한 관점에서 탄소는 전 지구적인 비용을 발생시키기 때문이다. 다만, 탄소에 의한 지구온난화라는 것이 전 지구적으로 발생하는 현상임에도 불구하고, 각 지역별로 기후변화에 따른 피해는 다양한 형태와 강도로 나타날 수 있기 때문에 모든 지역에서 탄소에 의한 비용이 동일하다고 보기는 어렵다는 한계는 인식하고 있어야 한다. 편익이전은 이러한 각 지역의 특수성 중 공통적으로 인정될 수 있는 요소들을 반영하여 선행연구에서 추정된 편익(혹은 비용)에 대한 결과를 특정 지역에 대한 것으로 환산하는 기법이다. 특히, 특정 지역에서의 환경 관련 비용이나 편익이 정치적으로 민감하거나 이해관계에서 침예하게 대립하는 경우라면, 새로운 추정을 진행하는 것보다 상당한 공신력을 확보하여 많은 의사결정에서 참고

하고 있는 선행연구를 활용하는 것이 중립적인 접근방법이 될 수 있다. 또한, 환경정책의 편익을 정책별, 지역별로 매번 추정함으로써 지출해야 하는 비용을 줄일 수 있는 장점도 있다(권오상, 2022).

편익이전의 방법은 크게 가치이전, 함수이전, 메타분석 등 세 가지의 접근법으로 구분된다. 가치이전은 기존 연구에서 추정된 가치를 지역적, 시기적 차이 등만을 반영하여 직접 환산하는 기법이다. 함수이전은 기존 연구에서 추정된 지불의사함수나 효용함수의 구조는 그대로 적용된다고 보고 해당 함수에 대입할 변수들의 수치만 새로 추정하려는 대상에 대한 것으로 바꾸어 대입함으로써 편익이나 비용을 도출하는 방법이다. 메타분석은 선행연구의 결과들을 최대한 수집한 뒤 이들을 관측치로 하고 각 연구의 특성을 통제변수로 하는 회귀방정식을 추정하여 이 회귀방정식에 새로 추정하려는 대상의 특성을 입력하여 편익이나 비용을 도출하는 접근법이다. 본고에서는 이러한 편익이전의 기법들 중 가치이전과 메타분석을 활용하여 국내 SCC를 추정한다.

1. 가치이전

가치이전(value transfer)은 선행연구 중 관련 분야에서 공신력을 인정받고 있거나 많이 인용되고 있는 대표적인 연구결과를 새로 추정하려는 대상에 맞게 적절히 환산하여 그 결과를 직접적으로 사용하는 방법이다. 환산과정은 일률적이지 않으며, 편익이나 비용의 내용, 선행연구에서 분석한 방법과 그 대상 등에 따라 적절한 변수를 정하여 반영해야 한다. 예를 들어, 분석하려는 편익이나 비용이 각 지역의 인구나 경제력에 따라 다를 경우, 선행연구의 대상이 된 지역과 새로 추정해야 하는 지역의 지역별 인구 특성(인구밀도, 총 인구, 노인인구 비율 등)과 경제력(1인당 GDP, 가구당 소득 등)을 반영하는 변수를 적절히 선별하여 환산하는 수식에 추가한다.

다른 나라의 연구결과를 이용하여 가치이전을 할 경우 통용되는 수식은 아래와 같이 정리할 수 있다(Robinson, 2008; Ståle, 2007). 수식에는 국가 간의 소득격차와 환율 차이, 구매력 차이가 반영되어 있으며, 선행연구와 가치이전 대상의 기준연도

불일치에 따른 물가수준의 차이도 반영되어 있다. 또한, 국가 간의 소득격차로 인하여 가치가 반영되는 정도의 차이를 소득탄력성을 통해 적용하는데, 소득탄력성의 정의에 따라 수식의 적합성을 맞추면 가치이전에서 소득탄력성은 국가 간 소득비율에 대한 지수로 수식에 들어간다.⁴⁾

$$V_{H,t} = V_{F,t'} \times \left[\frac{(1인당\ GDP_{PPP})_{H,t'}}{(1인당\ GDP_{PPP})_{F,t'}} \right]^\eta \times 환율_{t'} \times \frac{P_{H,t}}{P_{H,t'}} \quad (1)$$

V : 가치이전 대상의 가치

하첨자 H, F, t, t' : 순서대로 가치이전의 대상국가, 선행연구의 대상국가, 선행연구의 기준연도, 가치이전 대상 기준연도를 각각 의미함

1인당 GDP_{PPP} : 구매력평가지수를 반영한 1인당 GDP

η : 가치이전 대상(본 연구의 경우 탄소의 사회적 비용)의 소득탄력성

P : 물가수준을 나타내는 변수

이동규 외(2017)는 온실가스의 외부비용을 추정해 해외 연구결과를 가치이전하는 과정에서 식 (1)을 이용하면서 식 (1)의 물가수준은 소비자물가지수로 반영하고, 소득탄력성은 1의 값을 사용하였다. 이 경우, 온실가스 외부비용 가치이전 공식은 아래 식 (2)와 같이 다시 표현할 수 있다. 탄소의 사회적 비용에서 소득탄력성은 별도의 연구를 통해 도출해야 하는데 이것을 추정해 국내 연구는 사실상 없는 여건이기 때문에 특정 수치를 가정하여 적용한다. OECD(2012)에서는 사망위험감소가치(VSL; Value of a Statistical Life)에 대한 소득탄력성으로 0.7~0.9로 추정하여 0.8을 소득탄력성으로 적용하는 것을 추천한 바 있으며, 대체로 0.5~1.0 사이의 범위에서 추정되었거나 가정하는 경우가 대부분이다.⁵⁾ 이동규 외(2018)의 경우 소득탄력성

4) 구체적인 원리는 Robinson(2008)의 Exhibit B.3을 참고할 수 있다.

5) VSL은 통상적으로 '통계적 생명가치'로 직역되어 사용되고 있으나, 직역이 용어 본연의 의미를 적절히 반영하지 못한다는 지적이 지속되면서 최근 '사망위험감소가치'라는 표현으로 의역되어 사용되기 시작하고 있다.

이 1인 경우와 0.8인 경우를 구분하여 가치이전 값을 제시하였고 그 중 0.8일 때의 결과를 주된 추정치로 사용하였다.

$$SCC_{K,t} = SCC_{F,t'} \times \frac{(1인당\ GDP_{PPP})_{K,t'}}{(1인당\ GDP_{PPP})_{F,t'}} \times 환율_{t'} \times \frac{CPI_{K,t}}{CPI_{K,t'}} \quad (2)$$

$SCC_{K,t}$: t년도 국내 탄소의 사회적 비용

하첨자 K, F, t, t' : 각각 본 연구의 대상국가(한국), 선행연구의 대상국가(미국), 선행연구의 기준연도(2020년), 본 연구에서 사용하는 기준연도(2022년)를 의미함

1인당 GDP_{PPP} : 구매력평가지수를 반영한 1인당 GDP

$CPI_{K,t}$: t년도 국내 소비자물가지수

다만, 본 연구에서 벤치마크(benchmark)하는 연구인 IWG(2021)와 EPA(2023)는 미국 내의 탄소에 의한 피해비용을 고려한 것이 아니라 탄소에 의해 발생하는 전 지구적인 피해를 사용하고 있다. 즉, 탄소의 추가적인 배출에 따라 발생하는 전 세계의 기후적인 피해를 계산한 것으로 어느 나라에서 배출을 하든 상관없이 발생하는 전 지구적인 외부비용의 크기이다. 따라서 IWG(2021) 및 EPA(2023)에서 추정한 탄소의 사회적 비용을 국내 가치로 환산할 때는 국가별 소득격차를 반영할 필요는 없으며, 따라서 소득탄력성도 적용할 필요가 없게 된다.⁶⁾ 그 대신 GDP에 적용했던 국가 간 구매력의 차이는 가치이전 과정에 반영되어야 할 것이기에 일반 환율을 쓰는 대신 구매력평가지수(Purchasing Power Parity; PPP) 환율을 사용하였다. 이 경우, 국내 SCC는 다음과 같이 더 단순하게 표현된다.

$$SCC_{K,t} = SCC_{F,t'} \times 환율_{PPP,t'} \times \frac{CPI_t}{CPI_{t'}} \quad (3)$$

6) 같은 논리로 국가별 인구밀도의 차이도 별도로 수식에 반영하지 않았다.

제II장에서 소개한 것처럼 IWG(2021)와 EPA(2023)는 미국의 대표적인 SCC 추정연구임에도 불구하고 각 연구의 추정결과는 상당한 차이를 보이고 있다. 이에 따라 본고에서는 IWG(2021)와 EPA(2023)의 추정결과에 대하여 각각 가치이전을 하고자 하며, 최종적으로 적용하는 가치이전 공식은 식 (3)이 된다.

2. 메타분석

메타분석(meta-analysis)은 수행된 동일 주제에 대한 다양한 가치추정 연구결과를 수집하여 각 연구에서 사용한 분석자료 및 분석방법 등의 특성을 설명변수로 하여 각 연구에서 도출한 가치와의 함수적 관계를 추정하는 기법이다. 개별 연구결과가 하나의 관측치가 되어 회귀분석을 실시하기 때문에 통계적인 유의성을 확보하기 위해서는 선행연구가 충분히 다수 시행된 주제인 경우에 진행이 가능하다. 회귀분석을 통해 추정된 회귀방정식에 연구자가 알고자 하는 지역과 시기 등의 특성을 보여주는 설명변수값을 대입함으로써 최종적으로 도출하고자 하는 가치(혹은 비용 등)를 추산하게 된다.

본고에서는 메타분석의 진행을 위해 온실가스의 사회적 비용을 추정한 총 31개의 선행연구에서 도출한 추정결과 N(=560)개에 대하여 회귀분석을 실시하였다.⁷⁾ 회귀방정식은 다음 식 (4)와 같이 구성되어 있다. 회귀식에 포함된 설명변수들(즉, X_j 들)의 목록은 <표 2>에 정리하였다.

$$SCC_n = \alpha + \beta_1 X_{1,n} + \dots + \beta_J X_{J,n} + \epsilon_n \quad (4)$$

SCC_n : 온실가스의 사회적 비용에 대한 n 번째 추정치($n = 1, \dots, N$)

$X_{j,n}$: n 번째 추정치와 관련된 j 번째 특성($j = 1, \dots, J$)

ϵ_n : n 번째 연구결과에서 관측되지 않는 오차항

7) 본고에서 사용한 31개의 선행연구 목록은 부록에서 표로 정리하였다.

〈표 2〉 메타분석에 사용한 종속변수 및 설명변수 목록

변수명	변수 설명
SCC(종속변수)	선행연구에서 추정한 탄소의 사회적 비용(SCC) 추정치(USD/tCO ₂)
year_1	선행연구 출판연도(실제 출판연도와 2005년간의 차이값)
year_2	선행연구의 분석 기준연도(실제 기준연도와 1999년간의 차이값)
D_rate	미래가치를 현가로 환산할 때 사용한 사회적 할인율
percentile_5	추정치 분포의 5th 분위값
percentile_95	추정치 분포의 95th 분위값
percentile_99	추정치 분포의 99th 분위값
DICE	연구방법론으로 DICE 모형을 사용한 경우의 더미
PAGE	연구방법론으로 PAGE 모형을 사용한 경우의 더미
FUND	연구방법론으로 FUND 모형을 사용한 경우의 더미
RICE	연구방법론으로 RICE 모형을 사용한 경우의 더미
GIVE	연구방법론으로 GIVE 모형을 사용한 경우의 더미
Ave	연구방법론으로 복수의 모형으로 도출한 추정치의 평균을 사용한 경우의 더미
IAM	연구방법론으로 앞의 대표모형을 제외한 IAM 모형을 사용한 경우의 더미
survey	연구방법론으로 설문조사를 활용한 경우에 대한 더미
Def	탄소비용의 개념으로 한계피해비용을 사용한 경우 1, 정책목표달성 비용을 사용한 경우 0을 부여하는 더미
Uncert	연구에서 불확실성을 반영하여 추정하였는지의 여부를 보여주는 더미
B_trans	직접 추정한 것인지 기존 연구에서 편익이전한 추정치인지를 구분하는 더미
P_review	연구를 출간한 곳이 peer review를 공식적으로 거치는 학술지인지 혹은 개별 연구기관인지 등을 구분하는 더미

자료: 저자 작성

각 설명변수의 의미는 다음과 같다. 먼저 year_1과 year_2는 각각 선행연구가 출판된 연도와 SCC 추정치의 기준연도를 의미한다.⁸⁾ 다만, 연도는 4자리 수(four-digit numbers)이기 때문에 계수의 크기를 맞추기 위해 두 변수 모두 각 변수의 ‘최솟값-1’과의 차이(difference)로 환산하였다. 이에 따라 year_1는 실제 출판연도에서 출판연도 중 최솟값인 2006년보다 1년 작은 2005년을 차감하였고, year_2는

8) 본고의 메타분석에서는 모두 전 지구적인 탄소의 사회적 비용을 추정한 선행연구 결과들을 사용하였다.

기준연도에서 기준연도 중 최솟값인 2000년보다 1년 작은 1999년을 차감하여 생성하였다. 다만, <표 3>과 <표 4>에서는 직관적인 이해를 돕기 위해 환산된 연도 대신 실제 출판연도와 실제 기준연도의 기초통계량을 기입하였다. D_rate 는 사회적 할인율을 의미하며, 불확실성을 반영한 연구에서는 사회적 할인율도 분포로 설명하고 있으나 확실성-등가로 환산된 사회적 할인율이 제시된 경우 그것을 사용하였다. 일부 연구에서는 사회적 할인율 대신 시간선호율의 정보를 제공하고 있는데 약간의 차이에도 불구하고 사회적 할인율이 명시적으로 제시되지 않은 연구에 대해서는 시간선호율 값을 적용하였다. $percentile_5$, $percentile_95$, $percentile_99$ 는 연구에서 도출된 SCC가 분포로 나타날 때 5분위, 95분위, 99분위에 위치한 SCC값을 제시한 경우를 의미하는 더미변수이다. 여기에 해당되지 않는 SCC는 거의 평균값이나 중앙값을 사용하고 있다.

<표 2>의 변수 중 DICE부터 survey까지는 핵심적인 연구방법론을 보여주는 더미변수로, 상술하였던 것처럼 DICE와 PAGE, FUND는 대표적인 통합평가모형이다. RICE(Regional Integrated Climate-Economy)는 DICE에서 파생된 지역통합모형이며, GIVE(Greenhouse Gas Impact Value Estimator)도 RFF(Resources for the Future)와 UC Berkeley 대학에서 공동개발한 통합평가모형이다. Ave 더미변수는 복수의 IAMs를 적용하여 SCC를 도출한 뒤 이것들을 평균하는 방식으로 추정된 경우를 의미하며, IAM 더미변수는 앞에서 언급한 통합평가모형 이외의 통합평가모형을 적용한 연구를 의미한다. survey 더미변수는 설문조사의 결과를 기반으로 SCC를 추정한 연구를 나타낸다.

Def 더미변수는 연구에서 추정한 탄소의 사회적 비용을 한계피해비용 즉, 탄소에 의해 발생한 외부비용으로 정의한 경우로 이론에 부합하는 개념을 사용한 것을 의미한다. 이에 반해 해당 더미변수값이 0이 되는 경우는 SCC로 정책목표를 달성하기 위해 필요한 탄소비용의 개념을 적용한 연구들이 포함된다. 예를 들어, 2°C 이내나 2.5°C 이내의 온도상승 억제를 목표로 할 때 적용될 탄소비용 추정값이 대표적이다. 이러한 추정값은 엄밀히 구분할 때 탄소의 사회적 비용으로 보기 어렵다. Uncert 더미는 SCC를 추정하는 과정에서 불확실성을 반영하였는지의 여부로 결정되는 변수

이다. B_trans는 편익이전을 적용하였는지를 나타내는 더미변수이다. 본고에서는 기본적으로 메타분석에 활용하는 선행연구의 추정치는 자체적인 모형을 구축하여 도출한 결과만을 포함하며 다른 연구의 결과에서 편익이전하여 도출한 SCC는 포함하지 않았다. 그렇지만 자체적인 모형을 구축하여 SCC를 도출하면서도 그 자체 결과에서 추가적으로 편익이전 기법을 활용하는 경우에는 표본에 포함하고 이를 더미변수로 구분하였다. 마지막으로 P_review 더미는 해당 분야 전문가들의 심사(peer review)를 거쳐 출판되는 학술지에 게재된 것인지 혹은 개별 연구기관에서 연구보고서 형태로 출판된 것인지를 구분하는 변수로 1인 경우 외부 심사를 거쳐 출판되는 학술지 게재 연구를 의미한다. 이러한 변수들은 메타분석을 실시한 선행연구들을 참고하여 선택하였다.

각 변수들의 기초통계량은 <표 3>에서 제시하였다. 이후의 메타분석에서는 아직 EPA(2023)의 결과가 IWG의 결과로 공식화하여 발표하지 않았다는 점에서 EPA(2023)의 결과까지 모두 포함한 경우와 EPA(2023)의 결과는 제외한 회귀분석을 구분하여 실행한다. 모든 관측치를 포함한 회귀분석 결과는 EPA(2023)의 결과를 가치이전한 것과 대응시키고, EPA(2023)의 결과를 제외한 회귀분석 결과는 IWG (2021)의 결과를 가치이전한 것과 대응하여 비교한다.

<표 3> 기초통계량

(단위: 2020년 기준 USD/tCO₂, 년, %)

변수명	관측치 수	평균	표준편차	최솟값	최댓값
SCC	560	178.82	350.91	-1.5 ¹⁾	3,410
year_1	560	2014.5	4.15	2006	2022
year_2	560	2025.5	21.72	2000	2200
D_rate	560	2.77	1.40	0.1	7
percentile_5	560	0.03	0.16	0	1
percentile_95	560	0.11	0.32	0	1
percentile_99	560	0.03	0.16	0	1
DICE	560	0.30	0.46	0	1
PAGE	560	0.16	0.36	0	1

변수명	관측치 수	평균	표준편차	최솟값	최댓값
FUND	560	0.06	0.24	0	1
RICE	560	0.08	0.28	0	1
GIVE	560	0.01	0.10	0	1
Ave	560	0.22	0.41	0	1
IAM	560	0.10	0.30	0	1
survey	560	0.02	0.14	0	1
Def	560	0.92	0.27	0	1
Uncert	560	0.97	0.18	0	1
B_trans	560	0.06	0.25	0	1
P_review	560	0.72	0.45	0	1

주: 1) 최소 추정치인 -1.5는 Nordhaus(2014)에서 인용함. Nordhaus(2014)에서 다른 연구의 추정치를 소개하고 있는데 pp. 296, Table 3. Panel A에서 IWG(2010)의 FUND 방법론에 의한 추정치로 -1.5를 제시함.

자료: 저자 작성

IV. 분석 결과

먼저, 제III장의 식 (3)을 적용한 IWG(2021)와 EPA(2023)의 추정치 가치이전 결과는 다음 <표 4>와 같다. 가치이전된 2022년도 기준 국내 탄소의 사회적 비용은 IWG(2021)의 결과를 환산할 경우 이산화탄소톤당 45,548원으로, EPA(2023)의 결과를 환산한 것은 이산화탄소톤당 107,172원으로 각각 추정된다. IWG(2021)는 할인율로 5%, 3%, 2.5%를 적용하였으며, 이 중 3% 할인율 적용값을 주된 결과로 활용하고 있어 본고에서도 3% 할인율 적용값인 51USD/tCO₂를 가치이전하였다. 반면, EPA(2023)의 추정치는 2020년 기준 달러가치에 2.5% 할인율을 적용한 결과이다. EPA(2023)는 할인율로 2.5%, 2.0%, 1.5%를 적용하였으며 이 중 특정한 값을 기본값으로 명시하고 있지 않아, 본고에서는 IWG(2021)의 결과값과 가장 가까운 할인율인 2.5% 할인율 적용결과를 선택적으로 사용하였다.

〈표 4〉 탄소의 사회적 비용 원단위 추정결과(가치이전)

	선행연구 추정치 (A)	2020년 PPP 환율 (B)	'20년 대비 '22년 CPI (C)	'22년 국내 SCC (D=A*B*C)
IWG(2021) 할인율 3% 결과	51USD/tCO ₂	829.36원/USD	1.077	45,548 원/tCO ₂
EPA(2023) 할인율 2.5% 결과	120USD/tCO ₂			107,172 원/tCO ₂

자료: IWG(2021), EPA(2023), OECD Data(OECD, 2024, doi: 10.1787/1290ee5a-en) 및 KOSIS에서 제공하는 PPP 환율과 소비자물가지수 값을 이용하여 저자 작성

다음으로, 메타분석의 회귀방정식 추정결과를 정리하면 <표 5>와 <표 6>으로 요약된다. <표 5>은 EPA(2023)의 추정치들을 관측치에 포함하지 않고 회귀분석을 진행한 결과이다. 통계적으로 유의한 변수들을 중심으로 그 부호를 해석해 보면 메타분석의 결과가 일반 경제적 직관에서 벗어나지 않음을 확인할 수 있다. year_1과 year_2가 양수로 나온 것은 최근에 출간한 연구일수록, 그리고 더 먼 미래에 대한 SCC일수록 SCC가 증가함을 의미한다. 이는 과거보다 최근 온실효과에 의한 기후변화의 심각성이 더 부각되고 있음을 상기할 때 최근 연구에서 기후변화의 우려가 더 많음을 반영하는 것이라 할 수 있다. 또한, 온실가스에 의한 기후변화의 피해는 누적적으로 나타나고 서서히 증가하지만 점차 가속화되는 특성을 보인다는 점에서 과거 혹은 가까운 미래보다 먼 미래에 그 피해가 커질 것임은 어렵지 않게 짐작할 수 있다. 반면, 할인율은 사람들이 미래보다는 현재를 선호한다는 점에서 미래의 피해를 현재가치로 환산할 때 그 크기를 축소시키는 역할을 하기 때문에 계수의 부호가 음수인 것이 매우 직관적이다.

percentile_5, percentile_95, percentile_99는 각각 분위수를 의미하므로, percentile_5는 추정값 중 하위 5%에 해당되는 수치를 percentile_95와 percentile_99는 각각 상위 5%와 1%값을 나타낸다. 따라서 분위수가 클수록 추정치는 큰 숫자가 되며, 이는 계수값에 그대로 반영되어 있다. 또한, 기준(baseline)이 평균 혹은 중앙값이기 때문에 5분위수의 계수가 음수로 나오게 되며, 95분위와 99분위수의 계수는 양수로 나타난다. 방법론 중에서는 DICE, FUND, IAM 더미가 0과 유의미하게 다른 것으로 추

정되었다. 마지막으로 편익이전을 적용한 추정치는 직접 SCC를 추정할 경우에 비해 그 크기가 상대적으로 더 작게 추산된 것으로 나타난 점도 눈여겨볼 만하다.

〈표 5〉 메타회귀분석 결과(EPA, 2023 미포함)

변수명	계수 추정치	강건한 표준오차	t값	P > t 확률
year_1	7.33***	2.85	2.57	0.01
year_2	2.29***	0.35	6.52	0
D_rate	-55.54***	9.96	-5.58	0
percentile_5	-142.98***	18.01	-7.94	0
percentile_95	223.34***	35.62	6.27	0
percentile_99	1,412.59***	265.59	5.32	0
DICE	84.57***	28.01	3.02	0.003
PAGE	-19.85	30.20	-0.66	0.51
FUND	-93.44***	24.88	-3.76	0
RICE	28.80	35.68	0.81	0.42
GIVE	-73.97	51.37	-1.44	0.15
Ave	-44.43	43.32	-1.03	0.31
IAM	-156.25***	33.50	-4.66	0
survey	21.00	36.65	0.57	0.57
Def	-10.64	35.81	-0.30	0.77
Uncert	6.89	21.06	0.33	0.74
B_trans	-45.97**	20.77	-2.21	0.03
P_review	53.33	40.08	1.33	0.18
Constant	114.79**	57.78	1.99	0.05
표본 크기		539	F(18,520)	31.09
R-squared		0.56	Prob. > F	0

주: 표준오차는 강건한 표준오차이며, 추정치의 유의수준이 10% 이하일 경우 *, 5% 이하일 경우 **, 1% 이하일 경우 ***을 부여함

자료: 저자 작성

한편, <표 6>은 EPA(2023)의 추정결과를 관측치에 포함하여 메타분석을 다시 실행한 결과이다. 앞서 설명한 것과 같이 EPA(2023)는 상대적으로 기존의 추정결과에

비해 사회적 비용이 높게 추정되어 계수에 미치는 영향이 있기는 하지만 전체적인 계수의 부호는 EPA(2023)의 결과를 포함하기 전과 차이가 없다.

〈표 6〉 메타회귀분석 결과(EPA, 2023 포함)

변수명	계수 추정치	강건한 표준오차	t값	P > t 확률
year_1	9.73***	2.33	4.18	0
year_2	2.55***	0.35	7.26	0
D_rate	-61.91***	8.98	-6.90	0
percentile_5	-142.75***	18.42	-7.75	0
percentile_95	214.07***	35.34	6.06	0
percentile_99	1,412.82***	265.44	5.32	0
DICE	75.32***	27.46	2.74	0.006
PAGE	-28.86	28.71	-1.01	0.32
FUND	-98.27***	25.24	-3.89	0
RICE	31.05	36.85	0.84	0.40
GIVE	-101.10**	44.75	-2.26	0.02
Ave	-25.79	43.79	-0.59	0.56
IAM	-182.37***	28.35	-6.43	0
survey	2.98	33.45	0.09	0.93
Def	-14.52	35.48	-0.41	0.68
Uncert	1.81	20.94	0.09	0.93
B_trans	-44.86**	21.75	-2.06	0.04
P_review	58.86	40.69	1.45	0.15
Constant	116.57**	59.29	1.97	0.05
표본 크기		560	F(18,520)	36.77
R-squared		0.56	Prob. > F	0

주: 표준오차는 강건한 표준오차이며, 추정치의 유의수준이 10% 이하일 경우 *, 5% 이하일 경우 **, 1% 이하일 경우 ***을 부여함

자료: 저자 작성

메타분석의 마지막 단계로 회귀분석에서 추정된 계수를 활용하여 국내 온실가스의 사회적 비용을 추산하면 다음과 같다. 본고에서는 IWG(2021)를 기본적인 편익

이전 대상으로 선정하고 있으나, 최근 발표한 EPA(2023)가 IWG(2021)를 대체할 가능성이 높다는 점에서 EPA(2023)을 고려한 편익이전도 함께 진행한다. 이에 따라 두 경우 각각을 메타분석 결과에 대입하였다. 각각의 대입결과를 보여주기 위해 앞서 선형회귀식을 식(5)와 식(6)의 두 가지로 구분하여 적용하였음을 설명하고자 한다.

본고의 메타분석에서는 편익이전 변수가 여타 선행연구의 결과를 편익이전한 경우가 아닌 자체분석결과를 편익이전한 경우만을 관측치로 하여 추정을 진행하였다. 반면, 지금 본고에서 진행하는 편익이전은 다른 연구에서 도출한 결과를 편익이전하는 것이므로 메타회귀식이 이것을 반영하기에는 한계가 있다. 그럼에도 메타분석 결과를 이용하여 편익이전하는 것에 가까운 방정식 후보로 두 가지를 고려하였다. 식(5)는 본고의 편익이전에 적용되는 변수 중 계수가 유의미한 값이었던 것만 회귀식에 포함한 것이다. 회귀분석에서 계수가 통계적으로 유의미하게 나온 변수 중 본고의 편익이전에 적용할 수 있는 것은 출판연도(year_1), 기준연도(year_2), 할인율, 편익이전 터미 및 상수항이다. 출판연도는 본 연구가 출판되는 2024년을 적용하고 기준연도는 본 연구에서 편익이전의 기준연도인 2022년을 적용하였다. 할인율은 IWG(2021)의 내용을 적용하여 편익이전을 할 경우에는 3%로 입력하고, EPA(2023)를 반영하는 편익이전의 경우에는 2.5%로 대입하였다.

$$\begin{aligned} \widehat{SCC} & \\ &= \hat{\alpha} + \hat{\beta}_{year_1} \times year_1 + \hat{\beta}_{year_2} \times year_2 + \hat{\beta}_{D_{rate}} \times D_{rate} + \hat{\beta}_{B_{trans}} \times B_{trans} \end{aligned} \quad (5)$$

식(6)은 회귀분석의 변수 중 본고의 편익이전에 적용되는 변수면 그 계수의 통계적 유의성을 막론하고 모두 포함하여 만든 회귀식이다. 식(5) 대비 추가되는 변수는 Ave 터미 및 SCC 정의 터미, 불확실성 터미이다. 본고 편익이전의 대상연구인 IWG(2021)와 EPA(2023) 모두 복수의 IAMs를 사용한 결과를 평균하여 추정치를 제시하고 있어 연구방법론은 Ave 터미에 해당되고, 탄소의 외부비용으로 SCC를 구하며, 불확실성을 반영하고 있으므로 불확실성 터미(Uncert)도 추가한다.

$$\begin{aligned} \widehat{SCC} &= \hat{\alpha} + \hat{\beta}_{year_1} \times year_1 + \hat{\beta}_{year_2} \times year_2 + \hat{\beta}_{D_{rate}} \times D_{rate} + \hat{\beta}_{Ave} \times Ave \\ &+ \hat{\beta}_{Def} \times Def + \hat{\beta}_{Uncert} \times Uncert + \hat{\beta}_{B_{trans}} \times B_{trans} \end{aligned} \quad (6)$$

편익이전에 활용할 메타분석 결과로 IWG(2021)에 대응하는 추정치를 도출할 때는 EPA(2023) 추정치를 관측치에서 제외한 회귀분석의 결과를 사용하였고, EPA(2023)에 대응하는 추정치를 구할 때는 EPA(2023) 추정치를 관측치에 포함한 회귀분석의 결과를 따랐다. 따라서 <표 7>에서 EPA(2023)를 제외할 때에는 <표 5>의 계수 추정결과에 대한 선형결합(linear combination)을, EPA(2023)를 포함할 경우에는 <표 6>의 계수 추정결과에 대한 선형결합을 사용하였다.

<표 7> 메타분석 결과를 대입할 경우, 온실가스 사회적 비용 원단위 추정결과

(단위: 2022년 기준 원/tCO₂)

		메타회귀분석 결과로 선형결합 추정결과		가치이전에 의한 SCC 추정치
		SCC 추정치	표준오차	
EPA(2023) 미포함 (할인율 3% 적용)	식 (5)	76,281	61,198	45,548
	식 (6)	37,239	32,052	
EPA(2023) 포함 (할인율 2.5% 적용)	식 (5)	130,013	59,969	107,172
	식 (6)	98,811	27,650	

주: 메타회귀분석 결과는 USD를 기준으로 도출되어 이를 가치이전의 기준연도인 2022년 PPP 환율로 환산한 값을 기입함.

자료: 저자 작성

<표 5>와 <표 6>의 결과를 통해 도출한 SCC 추정치는 미국 달러화 기준이다. 따라서 <표 4>에서 도출한 SCC 값과 비교하기 위해 2022년 기준 PPP 환율로 환산하였다. 식 (5)는 편익이전의 대상이 되는 추정치를 도출할 때 통계적으로 유의한 계수를 가진 변수만 고려하기에 과소고려의 우려가 있고, 반대로 식 (6)은 모든 관련 변수를 포함함에 따른 과대고려의 우려가 있다.

V. 결 론

에비타당성조사 중 도로·철도부문 사업과 같은 대기오염물질에 대한 사회적 비용을 반영하는 사례에서 기존에 사용하던 SCC 추정치는 IWG(2013)의 연구결과를 환산한 이산화탄소톤당 44,000원이었다(한국개발연구원, 2017). 본고에서는 IWG(2021)와 EPA(2023)의 추정치를 가치이전함으로써 국제적으로 통용되는 SCC 추정치를 국내 원단위로 환산하였다. 비슷한 시기에 미국 정부에서 발표한 연구결과였음에도 불구하고 두 연구에서 추정된 SCC는 추정치가 상당히 다르기에 가장 최근 추정결과인 EPA(2023)의 연구결과를 적용하는 경우와 직전 연구결과인 IWG(2021)의 추정치를 적용하는 경우에 대하여 각각 가치이전하였다. 그리고 이 결과를 계량적인 접근법인 메타분석을 이용하여 편익이전할 경우와 비교함으로써 가치이전 결과가 얼마나 안정적인 결과인지 개략적으로 살펴보았다.

분석결과, IWG(2021)를 가치이전한 결과는 국내 SCC 추정값으로 기존에 통용되는 원단위 추정치와 매우 유사한 이산화탄소톤당 45,548원이 도출되었다. 이는 사실상 기존 원단위에서 시간이 지남에 따른 환율이나 물가 정도의 차이를 제외하면 거의 변화가 없는 결과이다. 반면, EPA(2023)의 추정결과를 가치이전할 경우, 국내 SCC 추정값은 이산화탄소톤당 107,172원으로 기존 원단위보다 2배 이상 증가한 것으로 나타났다.

각각의 가치이전 결과는 메타분석을 통하여 도출한 결과와도 일관적이다. 메타분석은 31개 선행연구의 560개 추정결과를 표본으로 하는 회귀분석으로 진행되었으며, 선행연구의 연구방법론을 어느 정도로 반영하느냐에 따라 차이가 있지만, EPA(2023)의 결과를 제외한 표본에 대한 회귀식에서는 37,239~67,663원/tCO₂로, EPA(2023)의 결과를 포함한 표본에 대한 회귀식에서는 98,807~118,241원/tCO₂로 각각 도출되어 가치이전을 사용한 결과 값이 메타분석을 사용한 추정값의 범위 내에 있는

것을 알 수 있다.

한편, IWG(2021)와 EPA(2023)의 결과가 크게 차이 나면서 어떤 결과를 적용하느냐에 따라 정책적 의사결정에는 큰 차이가 발생할 수 있게 되었다. IWG(2021)의 결과를 활용할 경우, SCC를 보수적으로 반영함으로써 기존 정책 의사결정과 매우 유사한 수준에서 정책적 판단을 내리게 될 것이다. 그렇지만 EPA(2023)의 결과를 적용할 경우, 탄소가격이 시장에 매우 높은 수준으로 반영됨에 따라 기업들의 탄소 저감활동을 강하게 압박하는 효과가 나타날 것이다. 다만, EPA(2023)의 결과를 국제사회에서 얼마나 받아들이고 적용할지는 좀 더 지켜볼 필요가 있기 때문에 당분간은 IWG(2021)에 대한 가치이전 결과가 활용성이 더 클 것으로 판단된다.

접수일(2024년 3월 4일), 수정일(2024년 3월 19일), 게재확정일(2024년 3월 19일)

◎ 참고 문헌 ◎

- 권오상(2022). 환경경제학 제4판. 서울 : 박영사.
- 이동규·정준환·조철근·임재규·김주영·한진석·이창훈(2017). 수송용 에너지 상대가격 합리적 조정방안 연구. 세종: 기획재정부·국토교통부·산업통상자원부·환경부·한국조세재정연구원.
- 이동규·박명덕·조성진·정연제·전호철·이창훈(2018). 발전용 에너지 제세부담금 체계 합리적 조정방안 연구. 세종: 기획재정부·산업통상자원부·환경부·한국조세재정연구원.
- 한국개발연구원(2017). 교통부문사업 편익산정 방법론 연구. 세종: 한국개발연구원.
- Bergh, J. and Botzen, W.(2014). “A lower bound to the social cost of CO2 emissions.” *Nature Climate Change* 4 : 253-258.
- EPA(2023). “EPA Report on the Social Cost of Greenhouse Gases: Estimates Incorporating Recent Scientific Advances.” Washington D.C.: United States Environmental Protection Agency.
- Freeman III, A. M., Herriges, J. A. and Kling, C. L.(2014). “The Measurement of Environmental and Resource Values - Theory and Methods.” 3rd Edition. Washington D.C.: Resource For the Futhre Press.
- IWG(2010). Technical Support Document: - Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis - Under Executive Order 12866 -. United States : Interagency Working Group on Social Cost of Greenhouse Gases.
- IWG(2013). Technical Support Document: - Technical Update of the Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis - Under Executive Order 12866 -. United States : Interagency Working Group on Social Cost of Greenhouse Gases.
- IWG(2021). Technical Support Document: Social Cost of Carbon, Methane, and Nitrous Oxide Interim Estimates under Executive Order 13990. United States : Interagency Working Group on Social Cost of Greenhouse Gases.

- Nordhaus, W.(2014). “Estimates of the Social Cost of Carbon: Concepts and Results from the DICE-2013R Model and Alternative Approaches.” *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists* 1 : 273-312.
- Nordhaus, W.(2018). “Evolution of Assessments of the Economics of Global Warming: Changes in the DICE model.” *Climatic Change* 148 : 623-640.
- OECD(2012). “Mortality Risk Valuation in Environment, Health and Transport Policies.” Paris: Organization for Economic Cooperation and Development Publishing.
- OECD(2024). Purchasing power parities (PPP) (indicator). doi: 10.1787/1290ee5a-en.
- Robinson, L. A.(2008). Valuing Mortality Risk Reductions in Homeland Security Regulatory Analyses. Washington D.C. : United States Customs and Border Protection Department of Homeland Security.
- Ståle, N.(2007). Practical tools for value transfer in Denmark guidelines and an example. Copenhagen: Danish Environmental Protection Agency.
- Tol, R.(2008). “The Social Cost of Carbon: Trends, Outliers and Catastrophes.” *Economics* 2 : 1-23.
- Tol, R.(2023). “Social cost of carbon estimates have increased over time.” *Nature climate change* 13 : 532-536
- Wang, P., Deng, X., Zhou, H. and Yu, S.(2019). “Estimates of the social cost of carbon: A review based on meta-analysis.” *Journal of Cleaner Production* 209 : 1494-1507.

◎ 부 록 ◎

〈부표 1〉 메타분석 대상 선행연구 목록

순번	저자	연구명	저널	출판 연도
1	Zhen et al.	A simple estimate for the social cost of carbon	Energy Procedia	2018
2	Nordhaus	Estimates of the Social Cost of Carbon_ Concepts and Results from the DICE-2013R Model and Alternative Approaches	JAERE	2014
3	Anthoff & Emmerling	Inequality and the social cost of carbon	JAERE	2019
4	IWG	Technical Support Document: Social Cost of Carbon, Methane, and Nitrous Oxide Interim Estimates under Executive Order 13990		2021
5	Nordhaus	Revisiting the social cost of carbon	PNAS	2017
6	Brookings	The social cost of carbon	Brookings papers on economic activity	2021
7	Kikstra et al.	The social cost of carbon dioxide under climate-economy feedbacks and temperature variability	Environmental Research Letters	2021
8	Pindyck	The social cost of carbon revisited	Journal of Environmental Economics and Management	2019
9	Rickeetal.	Country-levelsocialcostofcarbon	nature climate change	2018
10	Tol	A social cost of carbon for (almost) every country	Energy Economics	2019
11	Yang et al.	Social cost of carbon under shared socioeconomic pathways	Global Environmental Change	2018

순번	저자	연구명	저널	출판 연도
12	Taconet et al.	Social Cost of Carbon Under Stochastic Tipping Points	Environmental and Resource Economics	2021
13	Olvera & Moore	Use and non-use value of nature and the social cost of carbon	Nature	2021
14	Lemoine	The climate risk premium_ how uncertainty affects the social cost of carbon,	JAERE	2021
15	Hambel et al.	The social cost of carbon in a non-cooperative world	Journal of International Economics	2021
16	Hope	Critical issues for the calculation of the social cost of CO2: why the estimates from PAGE09 are higher than those from PAGE2002	Climate Change	2013
17	Ackerman & Stanton	Climate Risks and Carbon Prices: Revising the Social Cost of Carbon	Economics	2012
18	Greenstone et al.	Estimating the Social Cost of Carbon for Use in U.S. Federal Rulemakings: A Summary and Interpretation	NBER Working Paper	2011
19	Nordhaus	Estimates of the Social Cost of Carbon: Background and Results from the RICE-2011 Model	NBER Working Paper	2011
20	Anthoff & Tol	The uncertainty about the social cost of carbon: A decomposition analysis using fund	Climate Change	2013
21	Weitzman	Tail-Hedge Discounting and the Social Cost of Carbon	Journal of Economic Literature	2013
22	Ploeg	Abrupt positive feedback and the social cost of carbon	European Economic Review	2014
23	Pycroft et al.	A tale of tails: Uncertainty and the social cost of carbon dioxide	Economics	2011
24	Newbold et al.	A rapid assessment model for understanding the social cost of carbon	Climate Change Economics	2013
25	Anthoff et al.	Regional and sectoral estimates of the social cost of carbon: An application of FUND	Economics	2011

순번	저자	연구명	저널	출판 연도
26	IWG	Technical Support Document: Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis Under Executive Order 12866		2010
27	Watkiss & Downing	The social cost of carbon: Valuation estimates and their use in UK policy	The Integrated Assessment Journal	2008
28	Anthoff et al.	Risk aversion, time preference, and the social cost of carbon	Environ. Res. Lett.	2009
29	Guo et al.	Discounting and the social cost of carbon: a closer look at uncertainty	Environmental science & policy	2006
30	RFF	Comprehensive Evidence Implies a Higher Social Cost of CO2	Nature	2022
31	EPA	Report on the Social Cost of Greenhouse Gases		2023

자료: 저자 작성

ABSTRACT

Estimating the Social Cost of Carbon through Benefit Transfer Techniques*

Donggyu Yi** and Sungkyu Lee***

Amid the increasing emphasis on addressing climate change as a critical issue in the international community, cost-effective carbon reduction policies such as carbon pricing mechanisms are actively being considered in many countries. In theory, carbon pricing is expected to induce optimal decision-making by applying a price level equivalent to the social cost of carbon (SCC). This study re-estimates domestic SCC values through value transfer and meta-analysis based on recent estimates of SCC values in the United States. The analysis shows that the value transfer estimates are 45,548 KRW/tCO₂ for IWG (2021) and 107,172 KRW/tCO₂ for EPA (2023). These results are consistent with the benefit transfer results of meta-regression analysis using 560 SCC estimates from 31 previous studies. The benefit transfer results for IWG (2021) are very similar to the SCC value (44,000 KRW/tCO₂) commonly used in existing domestic preliminary feasibility studies. However, the benefit transfer results for EPA (2023) are estimated to be more than double the previous estimate, suggesting that if this figure is used as the carbon price in the future, it will exert strong pressure on companies' carbon reduction activities.

Key Words : social cost of carbon, benefit transfer, value transfer, meta-analysis

* This paper is a revised and supplemented version of the KDI policy research paper in 2022, titled "A Study on Incorporating Environmental Values in Feasibility Assessment."

** Associate Professor, School of Economics, University of Seoul, dgyi77@uos.ac.kr

*** Ph.d Candidate, Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University, stonetree16@snu.ac.kr