

에너지산업 분야 탄소배출권의 적정 발행가격 분석

임성수*

건국대학교 경제통상학과 부교수

Optimal Issuance Price of Carbon Credits in the Energy Industry

Sungsoo Lim*

Associate professor, Department of Economics and Trade, Konkuk University

요약 본 연구에서는 에너지산업 부문의 CER 발행가격의 적정 수준은 어느 수준인지를 배출권가격의 불확실성을 고려한 실물옵션 기법을 통하여 추정하였다. 분석결과 UNFCCC에서 2012년 12월부터 2021년 말까지 등록된 에너지산업 부문 CDM 사업의 손익분기점은 개별사업별로 CO2톤당 0.64-36.69유로로 나타났다. NPVw/o CER+ NPVCER \geq 0일 때 손익분기점에 도달하는 배출권가격은 평균 12.10유로이며, NPVw/o CER+ NPVCER \geq 옵션가치일 때 손익분기점에 도달하는 배출권가격은 평균 12.63유로로 추정되었다. 한편, 사업의 불확실성을 경감하기 위해 실물옵션을 적용한 옵션가치는 톤당 1-5 유로 수준에서는 약 19%, 톤당 5-10유로 수준에서는 약 11%, 톤당 10-15유로 수준에서는 약 5%만큼의 불확실성 경감으로 인한 배출권가격의 상승효과가 있는 것으로 분석되었다. 투자자, 사업시행자, 잠재적 의무감축기업으로 대표되는 온실가스 감축 사업 주체들이 본 연구 결과를 참고할 경우 그간 에너지부문에 시행됐던 온실가스 감축 사업의 개별사업별 발행가격을 확인할 수 있어 사업투자 의사결정에 유용할 수 있다.

키워드 : 에너지 산업, CER 발행가격, 실물옵션, CDM 사업, 배출권가격

Abstract In this study, the optimal level of CER issuance price in the energy industry was estimated using a real options considering the uncertainty of emission price. As a result of the analysis, the break-even point for CDM projects in the energy industry registered by UNFCCC from December 2012 to the end of 2021 was 0.64-36.69 euros per ton of CO2 for each individual project. More closely, the emission permit price that reaches the break-even point when NPVw/o CER+ NPVCER \geq 0 is estimated to be 12.10 euros on average, and the emission permit price that reaches the break-even point when NPVw/o CER + NPVCER \geq option value is estimated to be 12.63 euros on average. Meanwhile, the option value using real options to reduce business uncertainty is about 19% at the 1-5 euro per ton level, about 11% at the 5-10 euro per ton level, and about 5% at the 10-15 euro per ton level. It was analyzed that there was an effect of increasing emissions prices due to uncertainty reduction. The results of this study may be useful to greenhouse gas reduction project entities, including investors, project operators, and companies with potential mandatory reductions.

Key Words : Energy industry, CER issuance price, Real option, CDM project, Emission permit price

*Corresponding Author : Sungsoo Lim(sslim07@kku.ac.kr)

Received April 1, 2024

Accepted June 20, 2024

Revised May 2, 2024

Published June 28, 2024

1. 서론

지구온난화의 가속화로 인해 긴급한 기후위기 비상조치의 필요성에 대한 국제사회의 인식이 확산되고 있다. 세계경제포럼(World Economic Forum)은 「2020 세계 위험보고서」를 통해 인류에게 가장 큰 영향을 미치는 위협요인으로 '기후행동 실패'를 선정하였으며[1], UN 사무총장은 지구의 날 50주년 기념 메시지에서 COVID-19 위기보다 더 심각한 환경 비상상태(deeper emergency)를 경고하며 지구보호를 위한 결정적 행동을 촉구하였다. 국제사회에서 2015년 12월 합의된 파리기후변화협약(Paris Agreement)¹⁾의 발효로 모든 협약 당사국은 자발적 온실가스 감축 목표를 설정하고 이행 중이며, 2020년 마이크로소프트와 네슬레 등의 글로벌 기업들이 탄소중립 대응책을 내놓은데 이어서, 2021년 하반기에는 한국을 포함한 주요 선진국들이 2050년(중국은 2060년)을 기점으로 탄소중립을 달성하겠다는 국가계획을 발표한 바 있다.

본 연구는 한국도 파리기후변화협약에 의해 온실가스 감축 의무를 부여받을 시대적 소명 하에서, 필연적으로 온실가스를 줄여야 할 기업과 투자자들에게 해당 시장의 정보를 제공하는 것에 그 목적을 두고 있다. 2050년까지 탄소중립을 선언한 국가가 늘어나면서 파리협정의 시장 메커니즘을 활용하는 국가가 증가할 것으로 전망된다. 파리협정의 협력적 메커니즘은 교토의정서(Kyoto Protocol) 체제하의 청정개발체제(Clean Development Mechanism, 이하 CDM)와 유사한 구조를 지니며, 협력적 메커니즘은 정부 간 협력을 통한 사업이지만 투자 사업을 추진한다는 측면에서 시장메커니즘의 기능이 작동될 것이다. 한국은 2030년 온실가스 감축목표를 달성하기 위해 국내 부문별 감축으로 약 2억 7,650만 톤을 감축하고, 국내감축으로 달성하지 못한 약 4.5%(3,830만 톤)에 대해서 국외감축 및 산림 흡수원을 활용해야 하는데, 이 과정에서 부문별, 나아가 온실가스 감축 기술별 발행가격을 추정하는 것이 중요하다. 투자자, 사업자, 잠재적 의무감축기업으로 대표되는 온실가스 감축 사업주체들은 탈황시설, 열병합발전시설, 가축분뇨처리시설, 재생에너지발전시설 등과 같은 환경시설투자에 얼마를 투자해서 사업을 진행시키고,

최종산출물인 탄소배출권(CER)을 시장에 판매할 경우 어느 정도의 판매수익을 기대할 수 있는지에 대한 정보를 습득하는 것이 무엇보다 중요하다. 현재 CER(Certified Emission Reduction)유통가격은 시장의 거래가격을 통해 정보를 획득할 수 있으나, 발행가격은 CDM 사업계획서의 금융지표를 통해 직접 추정하는 방법밖에 없다.²⁾

탄소배출권 가격 분석에 대한 연구는 온실가스 감축 기업과 투자자들에게 중요한 의사결정 정보를 제공하나, 이와 관련된 연구는 아직 부족한 실정이다. 김수이·박호정(2008)[2]는 EU의 탄소배출권 시장의 가격자료를 활용하여 주요 시장간 배출권가격의 발견과정과 시장간 인과성을 벡타오차수정(ECM)과 그래프 이론을 접목하여 실증 분석하였다. 그 결과 가격발견과정에서 정보의 흡수 및 채널로 Nord Pool 선도시장의 역할이 주목되었으며, Pownertex와 EEX 등 주요 전력거래소의 영향도 크게 작용하는 것으로 나타났다. 임성수·양승룡(2010)[3]은 CER의 발행가격과 투자분기점 수준의 결과를 발표한 바 있다. 그러나 당시의 결과는 CDM 사업이 2000년 4월부터 2006년 6월 사이에 시행된 과거의 자료를 이용하여 분석한 것이었다. CDM 사업 방법론(methodologies) 역시 40여 건에 불과한 시기였다. 따라서 당시 연구 결과의 CER 발행가격으로 탄소시장이 초기 학습효과를 거쳐 성숙기에 접어든 현재 상황을 설명하기에는 무리가 따른다.

한편, 노상환(2011)[4]는 탄소배출권 시장에 유입되는 각종 정보에 대해 거래소별 상품별 가격변동성을 분석하였다. 그 결과 탄소배출권 가격이 과거 수익률에 의존할 경우 특성이 다른 탄소배출권 시장에서 거래되는 배출권의 변동성과 동일 거래소의 배출권 선물과 현물간 변동성은 다르게 반응하나, 상품의 종류가 상이하더라도 동일시장에서 거래되는 선물의 경우 변동성은 동일한 것으로 계측되었다. 박순철·조용성(2013)[5]는 EU-ETS 2기(2008-2012년) 전 기간을 대상으로 할당배출권(EUA)과 상쇄배출권(sCER)간의 가격 영향 요인 분석 및 두 유닛 간의 스프레드(spread) 결정 요인을 AR-GARCH 모형을 이용해 분석하였다. 분석 결과 EUA와 sCER은 석탄가격(-), 금융위기(-)와 같은 에너지와 경제변수, 제도 운영변수에 대해서는 공통적인 방향으로 영향을 받았다. 그러나 전력이

1) 파리기후변화협약에서는 산업화 이전 수준과 비교하여 지구평균 온도를 섭씨 2℃보다 훨씬 낮게 유지하고, 나아가 1.5℃로 제한하도록 온실가스 배출을 감축하도록 강제한다.

2) CER 유통가격(CER^{2nd})은 시장에서의 거래가격이며, 발행가격(CER^{1st})은 비용원가에 기업가치가 포함된 개념이다. 채권(주식) 발행가격, 아파트의 분양가격과 동일한 개념이다. 양 가격의 차이는 기업의 유통마진을 나타낸다.

격, CER 사용 제한과 같은 정책변수, EUA와 ERU간의 가격 차 등에 대해서는 서로 다른 방향으로 영향을 받는 것으로 나타났다. 비교적 최근의 연구라 할 수 있는 노동운 외(2021)[6] 논문에서는 개도국 소수력발전 CDM 사업의 온실가스 감축비용을 UNFCCC 사업계획서(PDD) 자료를 이용하여 칠레, 페루, 베트남, 스리랑카를 대상으로 추정한 바 있다.

본 연구에서는 EU-ETS 2기가 종료된 시점인 2012년 12월부터 현재까지 UNFCCC에 등록된 에너지산업 부문의 CDM PDD 1,350건을 검토한 후 투자분석에 활용할 수 있는 주요 표본을 추출하여 데이터베이스화하였다. 그리고 실물옵션(Real option) 기법을 통한 적정 발행가격 수준의 추정을 통해 국내 온실가스 감축 기업들이 어느 정도의 사업비용으로 신재생에너지로의 에너지 전환이 가능한지를 분석한 최초의 연구로 다른 선행연구들과는 차별점이 있다. 연구의 구성은 다음과 같다. 서론에 이어 2장에서는 연구방법론과 자료설명을 하고, 3장에서 실물 옵션을 통한 탄소배출권의 적정 발행가격 수준을 실증 분석한다. 마지막으로 4장에서는 요약 및 결론을 제시한다.

2. 이론적 배경

개도국 시행자가 주관할 수 있는 온실가스 감축 사업인 CDM 사업은 탈황시설, 열병합발전시설, 가축분뇨처리시설 등과 같은 환경시설 투자와 결부되어 판단된다. 환경시설 투자는 상당한 규모의 고정자본(initial cost)이 소요되기 때문에 기업의 입장에서는 배출권을 구매할지 아니면 시설 투자를 할지에 대한 신중한 의사결정이 필요하다.³⁾ 투자 타당성 분석에 가장 보편화된 방법으로는 순현재가치(NPV, Net Present Value) 기법이 있는데, 이는 투자 편익의 현재가치와 투자 비용의 현재가치가 일정하면 즉 $NPV \geq 0$ 이면 투자의 경제적 가치가 있는 것으로 본다. 불확실성 존재 시 NPV기법은 위험프리미엄이 포함된 할인율을 이용함으로써 투자를 평가하며, 투자의 비가역성은 잔존가치를 0으로 처리함으로써 고려할 수 있다. 또한 Dixit & Pindyck(1994)[7]이 보여주는 바와 같이 NPV기법을 적절히 동적 구조로 전환하면 실물옵션과 유사한 결론을 얻을 수 있다. 그러나 NPV기법은 사업의 불확실성이 시간에 걸쳐 동적인 성격을 지닐 때 이에 대응

하기 위한 경영자의 신속적인 결정구조를 반영하지 못한다는 단점이 있으며, 미래에 대한 예측치가 할인율에 크게 의존한다는 한계 역시 지니고 있다[8]. 실물옵션 기법은 이와 같은 기존의 NPV기법의 한계를 극복한 것으로 평가받는다. 실물옵션은 투자를 할 것인지 말 것인지에 대한 의사결정 자체가 경영자에게 옵션으로서의 가치를 지닌다고 본다. 즉 투자결정권 가치(the value of investment right)를 투자의 옵션가치로 해석한다. 일단 투자가 이행되면 이에 해당하는 투자의 결정권이 더 이상 존재하지 않기 때문에, NPV가 0이라고 해서 당장 투자하기보다는 사업의 수익이 충분히 커질 때까지(NPV가 충분히 큰 양(+))의 값을 갖기 전까지 투자를 하지 않고 기다리는 것이 바람직하다는 것이다.⁴⁾ 한편, 비가역적 사업투자의 사결정 모형에서는 투자의 비가역성 문제와 경제 상황의 지속적인 불확실성 문제에 대해 강조한다. 아울러 투자 주체들이 다양하고 질적으로 풍부한 정보를 취득할 수 있도록 기다림의 옵션가치(waiting value)를 고려한다. Murat Isik(2004)[9]의 연구에서는 비가역적인 투자 사업의 의사결정에 있어 불확실성, 비가역성, 위험회피성향 모두 최적 시점을 결정하는데 중요한 역할을 한다는 점을 제시하고 있다.

본 연구에서는 실물옵션 관점에서 볼 때 블랙-숄츠(Black-Scholes) 옵션 모형을 응용하여 투자의 최적시점을 도출하도록 한다. 여기서 투자의 최적시점은 투자를 촉발하는 배출권가격 수준으로 정의된다. 배출권가격의 상승은 배출권 구매비용을 증가시키는데, 이때 배출권가격이 어느 임계수준을 상회하면 기업은 배출권에 대한 의존도를 줄이기 위해 환경오염시설에 투자하는 것이 바람직하다. 반면, 가격이 이 임계수준까지 충분히 상승하기 전에는 비가역적인 투자 옵션을 행사하지 않는 것이 최적이다. 따라서 이 임계수준을 배출권가격의 투자분기점으로 정의하여 구하도록 한다. 본 고에서는 CDM 사업의 내재가치인 순현재가치(NPV value)와 투자를 지연할 경우를 가정한 시간가치인 실물옵션 가치(Real option value)를 추정한다. 그런 다음 양 가치를 합산하여 개별 CDM 사업의 가치를 추정하고 적정 투자분기점(break-even point)을 도출한다. 투자의 비가역성 문제는 투자 시점 이전에 이미 배출권의 예상저감물량과 CER 발행기간

3) 형성중인 시장에서는 구 시설들을 구매하려는 사람들이 거의 없기 때문에 자본비용은 상당부분이 매몰된다.

4) 본 고에서는 CDM 사업 투자의 주된 편익 요소인 CER가격이 충분히 상승할 때까지를 의미한다.

(crediting period)이 정해지는 CDM 사업의 특성으로 자연스럽게 해결할 수 있다. 따라서 분석 모형에서는 배출권가격의 불확실성만을 고려하게 된다.

3. 분석자료 및 변수

Black-Scholes(1976)[10]이 제시한 유럽형 현물옵션의 콜(call) 옵션 프리미엄을 구하는 공식은 실물옵션 중에서 사업투자 결정을 지연하는 옵션으로 해석이 가능하다⁵⁾. 본 연구에서는 실물옵션 중의 하나인 지연옵션 개념을 CDM 사업시행자가 배출권가격의 불확실성을 경감할 목적으로 투자 시점을 1년 연기할 경우의 기다림의 가치(waiting value)와 동일하게 간주한다. 실물옵션의 가치 역시 B-S의 방법론과 마찬가지로 미래현금흐름의 현재가치, 고정비용의 현재가치, 만기까지의 기간, 미래현금흐름의 불확실성, 무위험이자율 및 옵션 보유에 따른 기회비용 등의 변수에 의해 변화한다[3]. 즉, 기업이 계획하고 있는 특정 사업에 대한 투자를 옵션의 기초자산에 대한 권리행사로 여겨 해당투자 안에 지출되는 금액을 옵션의 행사가격으로 설정하며, 투자 안으로부터 얻을 수 있는 현금흐름은 기초자산의 가치로 평가하여 적용한다. 김태선(2009)[11]은 기업이 해당투자 안에 대한 권리를 잃지 않으면서 투자할 수 있는 기간을 옵션의 행사기간으로 보며, 투자 안의 현금흐름의 미래가치에 대한 불확실성을 옵션에서 기초자산의 변동성의 개념으로 이해하고 있다. 식 (1)은 Black-Scholes 콜 옵션가치를 구하는 공식이자 본 연구의 지연옵션 가치를 구하는 계산식이기도 하다. 여기서 S는 시점 t에서 지수화되어 있는 기초자산(underlying asset)의 가치이고, X는 무형자산을 개발하는데 소요되는 비용이다. r은 무위험이자율(risk free discount rate)을 나타내는데, 본 고에서는 CDM 사업투자 시점의 리보(LIBOR) 3개월 금리를 사용한다. σ 은 투자의 주기에 걸쳐서 나타나는 현금흐름의 변동성⁶⁾, T는 옵션의 경제적 주기를 나타낸다. 한편, $e(\cdot)$ 는 연속복리 계산을 위한 지수함수를 나타내고, $\ln(\cdot)$ 은 자연로그 함수를 나타낸다. $\Phi(d_1)$, $\Phi(d_2)$ 은 각각 d_1 과 d_2 에서 구한 표준 정규 누적 확률밀도함수 값을 의미한다.

$$Option\ to\ defer = S \cdot \Phi(d_1) - X e^{-rT} \Phi(d_2)$$

$$d_1 = \frac{\ln\left(\frac{S_0}{X}\right) + T\left(r_f + \frac{1}{2}\sigma^2\right)}{\sigma\sqrt{T}}, \quad d_2 = d_1 - \sigma\sqrt{T} \tag{1}$$

CDM 사업의 가치를 추정하는데 있어 본 연구에서 고려하는 경우는 두 가지이다. 첫째, CDM 사업의 순현재가치가 CER 수익이 없는 경우와 CER 수익을 포함한 경우를 합산하여 0보다 클 때 CDM 사업의 가능성(사업투자의 경제적 가치)이 있는 것으로 가정한다. 두 번째는 옵션 가치를 고려한 경제성 기준으로 CER 수익을 고려하지 않을 경우($NPV_{w/o\ CER}$)와 CER 수익을 고려하였을 경우(NPV_{CER})를 합산한 순현재가치가 사업의 투자시점을 1년 지연할 경우의 옵션가치보다 커지는 CER 가격 수준이다. 이는 배출권가격의 불확실성을 고려한 최적 투자시점이 된다.

Table 1. Comparison of variables between B-S call options and real options

B-S call option	Real option
S : underlying asset	CER expected price
E : exercise price	issuance price
r : risk-free interest rate	risk-free interest rate
σ : variation of underlying asset price	variation of emission price
T : duration until maturity	1 year(defer)

B-S 콜 옵션 추정에 필요한 변수와 실물옵션 변수는 Table 1로 대응 가능하다. 즉, 금융옵션에서의 기초자산의 가격과 행사가격(exercise price)을 본 연구의 실물옵션 분석에서는 CER 기대가격과 발행가격으로 대응할 수 있는 것이다. 본 장에서 분석해야 할 CDM 사업가치 중 $NPV_{w/o\ CER}$ 값은 CDM 사업계획서(PDD) 상에 기재된 것을 이용한다. 일부 사업계획서 중에는 NPV를 제시하지 않고 IRR(내부수익률)을 제시한 것이 있다. 이 경우에는 IRR을 구하는데 사용했던 금융지표(financial indicators) 값이 사업계획서에 명기되어 있어 이를 통해 $NPV_{w/o\ CER}$ 값을 계산하였다. $NPV_{w/o\ CER}$ 값을 구하는 공식은 식 (2)와 같다.

$$NPV_{w/OCER} = \sum_{t=1}^n \frac{R_t - C_t}{(1+r)^t} = 0 \tag{2}$$

5) Mun(2002)[12]도 일부 조정된 Black-Scholes 옵션 모형을 지연 옵션(option to defer) 모형으로 대응할 수 있음을 규명한 바 있다.

6) 본 고에서는 CDM 사업 투자시점별로 탄소배출권 가격의 연간변동성을 계속하여 변수로 사용하였다.

여기서 C는 CDM 사업비용(project cost)으로 식 2의 P_{CER} (기대가격)과는 구분된다, 본 연구에서 직접 추정해야 할 NPV_{CER} 값을 구하는 공식은 식 (3)이다. 본 연구에서는 두 경우의 CER 임계 수준을 추정한다. 우선 CDM 사업이 CER 판매 이후에 경제성을 확보하게 되는 투자분기점의 \hat{P}_{CER} 값을 추정한다. 이어 배출권가격의 불확실성으로 옵션의 행사(투자시점)를 1년 기다릴 경우의 \hat{P}_{CER} 임계치를 찾는다.

$$NPV_{CER} = \sum_{t=1}^n \frac{Q_t - \hat{P}_{CER}}{e^{rt}} \quad (3)$$

CDM 사업의 가치를 추정하기 위해서는 NPV의 계산과는 별도로 실물옵션 가치를 추정해야 한다. 실물옵션 가치는 B-S 콜 옵션 모형을 통해 계산되는데, 이를 위해 배출권가격의 변동성을 계측하는 것이 필수적이다. CDM 사업은 사업시작년도(투자결정시점)에 따라 배출권가격의 불확실성(σ)이 다르다. 할당배출권인 EUA를 거래하는 ECX(유럽기후거래소)가 2005년 4월부터 운영되고 있어 배출권가격 변동성은 ECX 가격자료를 통해 추정하였다.

Table 2. Estimation of variation in emission prices

	2012	2013	2014	2015	2016
variation (%)	4.89	4.44	4.90	4.17	5.48
calculation	annual variation(σ)= s.d $\times \sqrt{52}$				

note : Price data is based on ECX CFI futures contracts and EUA closing prices.

본 고의 가격변동성 추정은 상대가격의 변동율을 주간 표준편차로 산출하고, 여기에 1년 동안의 거래일수인 52주를 대입해 산출하였다. 금융시장에서는 일반적으로 선물거래 대상 품목으로 성공하기 위해서는 연간 변동성이 $\pm 20\%$ 이상이 되어야 한다. 옵션가치 추정을 위한 유효 표본이 존재하는 2012-2016년 기간의 배출권가격 변동성을 추정된 결과가 Table 2이다. 동 기간이 의무감축기간이 아닌 관계로 상대적 수준으로는 거래참여자를 배출권 거래시장에 충분히 유인할 정도의 가격변동 위험이 상존하지 않았던 점을 알 수 있다.

CER 적정 발행가격 분석을 위한 표본은 2012년 12월부터 2021년 말까지 CER이 발행된 적이 있는 CDM 사업에 대해 사업계획서(PDD) 상에서 추출한 126개이다 (Table 3). 애초에는 제1차 의무감축기간이 끝난 2013년

Table 3. Basic data for CER issuance price analysis

(Unit: tCO_{2e}, €, years)

No.	Registration date	Total reduction	Issuance price	Crediting period	Expected price	Libor (%)	Discount rate (%)	NPV	
								w/o CER	with CER
1	2012.12.03	565,474	16.58	7(renew)	11.00	0.3105	7.05	-3,717,092	5,660,297
2	2012.12.03	275,835	8.77	7(renew)	12.00	0.3105	12.00	-1,362,908	1,673,240
3	2012.12.03	555,373	15.83	7(renew)	10.50	0.3105	7.05	-2,598,636	6,192,615
4	2012.12.03	603,092	16.58	7(renew)	11.00	0.3105	7.05	-3,335,794	6,665,424
5	2012.12.04	1,053,570	17.26	7(renew)	10.00	0.3105	8.00	-13,814,346	4,373,093
6	2012.12.04	907,040	4.98	10	10.20	0.3105	12.00	-3,039,782	1,480,112
7	2012.12.04	709,548	14.73	7(renew)	10.50	0.3105	8.00	-3,660,497	6,789,174
8	2012.12.04	548,660	16.58	7(renew)	11.00	0.3105	7.05	-4,970,022	4,128,537
9	2012.12.05	606,277	13.62	7(renew)	10.50	0.3105	8.00	-6,474,431	1,782,495
10	2012.12.05	728,861	14.74	7(renew)	10.50	0.3105	8.00	-5,614,527	5,129,113
11	2012.12.05	668,003	9.13	7(renew)	12.00	0.3105	8.00	-433,816	5,667,505
12	2012.12.05	873,012	8.17	7(renew)	8.00	0.3105	10.00	-6,137,593	993,909
...									
115	2014.12.04	210,850	5.97	10	13.00	0.2349	9.50	-901,011	356,898
116	2014.12.31	177,345	20.42	7(renew)	16.53	0.2552	10.00	-1,949,971	1,671,747
117	2015.04.17	238,203	6.22	7(renew)	10.82	0.2751	8.92	-1,350,779	131,354
118	2015.04.21	769,405	20.62	7(renew)	10.50	0.2760	8.00	-8,062,701	7,801,924
119	2015.06.10	736,754	3.12	10	10.62	0.2855	12.50	-1,052,271	1,244,403
120	2015.07.28	135,401	8.14	7(renew)	10.00	0.2941	13.00	-663,042	438,643
121	2015.08.15	145,684	12.48	7(renew)	12.00	0.3093	10.50	-1,594,429	224,000
122	2016.05.11	245,133	9.04	7(renew)	8.85	0.6281	10.00	-1,018,324	1,196,761
123	2016.06.23	508,739	5.73	7(renew)	8.85	0.6401	18.00	-2,890,985	26,531
124	2016.07.22	257,873	17.79	7(renew)	16.50	0.7145	10.00	-515,847	4,071,719
125	2016.07.29	508,739	5.89	7(renew)	9.09	0.7565	18.00	-2,852,930	144,154
126	2016.10.28	16,421	5.84	10	12.00	0.8873	12.00	-92,531	3,424

1월부터 등록된 사업을 표본 대상으로 추출할 계획이었으나, 표본을 획득하는 과정에서 유효 표본 수가 적어 표본 수를 확대하는 차원에서 2012년 12월을 표본추출 기간에 포함하여 진행하였다. 표본 자료에서 개별 CDM 사업은 2012년 12월 3일부터 2016년 10월 28일까지 착수된 것을 볼 수 있다. CDM 사업시행자는 CER 발행기간을 두 가지 방안에서 선택할 수 있다. 첫 번째는 최초 7년부터 3년까지 연장할 수 있는 방안이며(이 경우 최대기간은 7년×3회=21년), 다른 방안은 연장 기간 없이 10년으로 선택하는 것이다. 할인율은 개별 CDM 사업이 사업계획서(PDD)를 작성할 때 자체적으로 NPV(또는 IRR)를 계산한 후에 적용된 위험조정된 실질할인율(risk adjusted real discount rate)이다(Table 3).

에너지산업 부문 CDM 사업의 표본 변수에 대한 기초 통계량 결과는 Table 4와 같다. CDM 사업의 평균 총 저감량은 996,478 이산화탄소 등가톤(tCO₂e)으로 최대는 20,260,270톤, 최소는 16,421톤이다. 평균 발행가격은 톤당 11.14유로이며, 표본 중 최대값은 27.54유로 그리고 최소값은 0.60유로로 나타났다. CER 발행기간은 평균 7.98년으로 10년 단일사업보다는 7년씩 3번 연장되는 사업이 다수인 것을 볼 수 있다. 사업계획서에 기재된 CER 기대가격은 톤당 평균 11.34유로이며, 최대값은 24.4유로 그리고 최소값은 4.56유로로 나타났다. 리보금리의 평균은 0.3%를 기록했고, 할인율은 평균적으로 9.52%를 기록한 것으로 나타났다.

Table 4. Basic statistics of the sample

(Unit: tCO₂e, €/tCO₂e, years)

Variable	Average	Std.	Min	Max
Total reduction	996,478	2,661,030	16,421	20,260,270
Issuance price	11.14	5.43	0.60	27.54
Crediting period	7.98	1.41	7	10
Expected price	11.34	2.83	4.56	24.40
Labor (%)	0.30	0.09	0.22	0.89
Discount rate (%)	9.52	2.63	5.94	18.00

4. 실증분석 결과

본 연구에서는 에너지산업 부문 CER 발행가격의 적정 수준을 분석하기 위해 배출권가격의 불확실성을 고려하

였다. 그리고, CDM 사업 착수의 의사결정을 내리게 되는 사업시행자와 투자자의 입장에서 CDM 사업이 가능한 손익분기점 수준과, CDM 사업 투자를 1년 지연시켰을 때의 경제적 손익분기점 수준의 CER 가격을 도출하였다. 여기서 $NPV_{w/o CER} + NPV_{CER} \geq 0$ 일 때의 손익분기점은 사업 착수 시점에서 판단할 수 있는 CER 가격의 적정 수준이 된다. 즉, 이는 CER 발행가격의 적정 수준을 뜻한다. 옵션가치를 포함할 경우의 손익분기점($NPV_{w/o CER} + NPV_{CER} \geq option\ value$)은 사업시행자 또는 투자자가 배출권가격의 불확실성을 경감시킬 목적으로 CDM 사업 투자 시점을 1년 지연했을 경우의 CER 발행가격 수준이다. 경제성을 고려한 CER의 적정 가격을 추정하기 위해서는 사업계획서(PDD)에 NPV, IRR, 할인율, 배출권 기대가격 등의 금융지표가 기재되어 있어야 추정이 가능하다. 본 연구에서 CER 발행가격 수준의 추정에 이용된 표본 수는 126건이며, Table 5는 CER 발행가격 수준의 분석 결과를 나타낸다.

먼저 CDM 사업의 순현재가치(NPV)는 경제적 추가성 요건에 따라 CER 판매수입을 고려하지 않을 경우의 $NPV_{w/o CER}$ 값은 음수(-)값을 가지게 되며, 이는 CDM 사업이 CER 판매수입을 고려치 않을 경우에는 사업성이 없음을 의미한다. 그러나 CER 판매수입을 고려할 경우의 NPV_{CER} 값은 양수(+) 값을 갖게 되며, 이를 합산한 NPV 값이 0보다 클 경우의 CER 가격 수준을 첫 번째 손익분기점, 즉 $NPV_{w/o CER} + NPV_{CER} \geq 0$ 일 경우의 $PCER^{break-even}$ 수준이라 할 수 있다. Table 5를 보면, 첫 번째 손익분기점 수준이 개별사업별로 CO₂톤당 0.22유로(사업번호 7521)에서 35.07유로(사업번호 7672) 사이에 위치함을 확인할 수 있다.

다음으로 두 번째 손익분기점 수준을 도출하기 위해서는 사업시행자가 CDM 사업을 배출권가격의 불확실성으로 인해 1년 지연할 권리를 행사하게 되는 옵션가치를 구해야 한다. 옵션가치는 B-S 콜 옵션 가치를 구하는 공식에 다 연간 저감량을 곱한 식으로 계산되었으며, 옵션가치는 사업별로 ϵ 에서 최대 27,360,482유로 사이의 값을 나타내고 있다(Table 5). 다음으로 CER 판매수입을 고려할 경우인 NPV_{CER} 값을 추정하게 되면 두 번째 손익분기점, 즉 $NPV_{w/o CER} + NPV_{CER} \geq option\ value$ 일 때의 $PCER^{break-even}$ 수준을 구할 수 있게 된다. 이 가격수준을 배출권가격의 불확실성을 고려한 CER 적정 가격 수준이라 정의할 수 있으며, 본 연구에서 추정한 결과에 따르면, 에너지산업 부

7) CDM 사업의 등록 일자를 보면, 2012년 12월의 1개월 간 등록된 사업 수가 785건으로 이는 2013년부터 2021년까지 등록된 사업 수 565건에 비해 압도적이다.

Table 5. CER optimal price level analysis results

(Unit : €)

No. (Project No.)	Registration date	Net Present Value		Option value	Break-even point ¹⁾	Break-even point ²⁾
		w/o CER	CER			
1(8412)	2012.12.03	-3,717,092	5,660,297	€(0) ³⁾	8.73	8.73
2(8317)	2012.12.03	-1,362,908	1,673,240	128,345	10.76	11.28
3(8385)	2012.12.03	-2,598,636	6,192,615	€	6.21	6.21
4(8411)	2012.12.03	-3,335,794	6,665,424	€	7.34	7.34
5(8507)	2012.12.04	-13,814,346	4,373,093	€	18.71	18.71
6(8472)	2012.12.04	-3,039,782	1,480,112	474,872	13.72	14.80
7(8476)	2012.12.04	-3,660,497	6,789,174	€	7.36	7.36
8(8422)	2012.12.04	-4,970,022	4,128,537	€	12.02	12.02
9(8481)	2012.12.05	-6,474,431	1,782,495	0.00066	16.46	16.46
10(8490)	2012.12.05	-5,614,527	5,129,113	€	10.98	10.98
11(8479)	2012.12.05	-433,816	5,667,505	276,582	1.80	2.19
12(8441)	2012.12.05	-6,137,593	993,909	11,923	13.78	13.79
13(8502)	2012.12.05	-19,833,210	1,163,464	1.28	22.50	22.50
14(8552)	2012.12.05	-3,050,731	3,730,173	0.00046	8.55	8.55
15(8544)	2012.12.06	-4,151,658	7,539,161	€	12.29	12.29
16(8510)	2012.12.06	-7,887,547	4,205,809	10.88	17.61	17.61
17(8435)	2012.12.06	-3,414,398	4,951,814	€	8.58	8.58
18(8542)	2012.12.06	-3,559,734	6,441,129	€	7.01	7.01
19(8465)	2012.12.07	-6,194,280	2,947,268	€	12.88	12.88
20(8125)	2012.12.07	-5,395,710	2,669,765	€	12.72	12.72
21(8585)	2012.12.10	-5,819,551	2,549,601	0.00057	13.91	13.91
22(8610)	2012.12.10	-4,935,152	4,240,862	0.00062	11.30	11.30
23(8555)	2012.12.10	-13,007,792	20,098,200	38.46	8.26	8.26
24(8616)	2012.12.10	-3,878,224	2,225,702	15,978	14.19	14.22
25(7891)	2012.12.11	-25,491,661	18,438,012	43,331	10.43	10.43
26(8628)	2012.12.11	-459,675	1,127,426	€	6.09	6.09
27(8620)	2012.12.13	-10,085,255	454,390	0.00074	28.71	28.71
28(7301)	2012.12.13	-1,562,730	10,135,591	€	2.81	2.81
29(7340)	2012.12.13	-1,850,476	494,098	344,241	23.32	25.48
30(8634)	2012.12.13	-9,989,147	19,503,337	5.62	6.78	6.78
31(8635)	2012.12.14	-878,248	7,588,542	€	1.98	1.98
32(8676)	2012.12.17	-6,810,838	6,903,813	€	12.42	12.42
33(9017)	2012.12.18	-6,784,976	5,458,082	1,062,807	18.36	19.79
34(8460)	2012.12.19	-953,605	3,158,274	0.00028	3.72	3.72
35(8656)	2012.12.20	-14,034,641	22,622,691	0.1528	8.05	8.05
36(8068)	2012.12.21	-684,714	3,725,165	€	3.88	3.88
37(8601)	2012.12.24	-2,419,878	3,818,485	€	7.76	7.76
38(8826)	2012.12.24	-3,314,435	7,992,670	€	6.16	6.16
39(9014)	2012.12.24	-640,387	1,900,288	0.00042	5.05	5.05
40(9408)	2012.12.29	-99,525	51,562	18,030	10.93	11.32
41(9405)	2012.12.29	-303,899	135,644	101,517	22.64	26.29
42(7521)	2012.12.29	-106,925	7,812,105	424,513	0.22	0.65
43(9420)	2012.12.30	-218,487	57,697	36,101	15.72	16.03
44(9410)	2012.12.30	-562,882	50,228	20,371	22.91	23.34
45(8048)	2012.12.31	-13,970,306	42,226,892	9,051,225	5.74	7.59
46(9333)	2012.12.31	-571,768	5,202,097	304,629	2.26	3.10
47(9478)	2012.12.31	-2,394,229	1,897,071	343,200	27.20	29.15
48(8800)	2012.12.31	-6,794,060	3,686,870	€	14.01	14.01
49(8798)	2012.12.31	-12,227,042	2,035,456	76,994	14.75	14.88
50(9365)	2012.12.31	-6,918,728	6,014,523	8,902	15.08	15.10
51(8378)	2012.12.31	-148,621	336,037	62,343	9.86	10.27
52(8423)	2012.12.31	-11,670,961	5,197,120	€	21.53	21.53
53(9469)	2012.12.31	-24,366	59,072	27,439	3.48	4.35
54(9278)	2012.12.31	-4,163,909	2,349,504	0.00044	13.43	13.43
55(9319)	2012.12.31	-7,297,873	400,170	0.00052	19.91	19.91
56(6783)	2012.12.31	-4,175,536	27,206,400	€	1.87	1.87

57(9467)	2012.12.31	-1,201,897	332,881	84,099	12.54	12.97
58(9222)	2012.12.31	-2,903,777	6,352,196	£	6.59	6.59
59(9418)	2012.12.31	-805,483	3,124,524	576,897	7.89	8.27
60(7954)	2012.12.31	-1,235,092	58,943	62,665	21.12	21.72
61(3638)	2012.12.31	-133,045	116,494	20,047	4.84	5.25
62(9201)	2012.12.31	-4,762,359	145,686	499,254	16.50	17.37
63(9264)	2012.12.31	-3,784,474	210,113	10,553	15.16	15.18
64(9258)	2012.12.31	-1,779,255	980,541	7,291	10.32	10.34
65(9464)	2012.12.31	-345,453	1,270,933	343,983	4.19	5.82
66(3108)	2013.01.06	-823,095	1,606,911	397,387	5.37	6.67
67(7759)	2013.01.15	-4,720,729	4,152,428	£	9.64	9.64
68(9349)	2013.01.16	-2,311,486	2,318,843	144,706	7.99	8.24
69(8922)	2013.01.17	-2,256,964	2,804,522	27,981	12.58	12.65
70(9425)	2013.01.25	-359,336	846,304	167,538	7.16	8.83
71(6055)	2013.01.29	-16,974,738	13,420,247	27,360,482	20.74	20.84
72(9419)	2013.01.31	-112,726	117,416	43,020	12.76	15.10
73(8062)	2013.01.31	-374,306	17,048,593	294.75	29.79	29.79
74(9565)	2013.02.01	-431,744	516,878	130,453	12.00	12.02
75(7031)	2013.02.05	-675,295	181,549	89,400	30.32	34.78
76(8329)	2013.03.29	-184,726	7,091,268	£	0.64	0.64
77(8319)	2013.04.01	-416,637	4,926,425	£	1.28	1.28
78(8867)	2013.04.10	-1,488,907	1,600,447	0.0613	16.84	16.84
79(9614)	2013.04.22	-1,377,117	1,009,715	197,609	9.69	10.41
80(9667)	2013.06.27	-1,309,895	3,944,625	80.61	4.99	4.99
81(9674)	2013.07.03	-413,990	180,103	11,779	19.53	19.80
82(9309)	2013.07.26	-139,948,145	61,131,209	16,649	13.92	13.92
83(9689)	2013.07.31	-1,334,242	311,403	197,109	5.01	5.75
84(9378)	2013.08.08	-1,773,020	1,082,143	217,070	9.94	10.55
85(9720)	2013.08.19	-337,155	136,997	62,808	21.50	23.35
86(8237)	2013.09.06	-4,031,370	8,417,150	£	6.81	6.81
87(9359)	2013.09.12	-607,301	1,628,072	295,444	5.54	6.83
88(7672)	2013.09.23	-1,925,098	2,651,799	267,500	35.07	36.69
89(9487)	2013.09.23	-229,316	551,061	248,667	8.40	12.71
90(9601)	2013.09.24	-361,260	132,037	55,893	17.81	19.25
91(9757)	2013.10.07	-50,515	127,959	6,329	7.42	7.88
92(9736)	2013.10.11	-6,549,813	3,172,965	£	24.40	24.40
93(7567)	2013.10.25	-1,312,703	876,988	524.06	15.59	15.59
94(9590)	2013.11.15	-4,584,665	4,417,907	£	10.70	10.70
95(9781)	2013.11.21	-2,983,906	7,229,100	0.00064	6.98	6.98
96(9658)	2013.12.04	-322,362	35,620	13,259	17.82	18.18
97(9832)	2014.01.06	-263,185	165,866	£	18.31	18.31
98(9857)	2014.01.21	-3,479,135	6,195,308	£	8.64	8.64
99(9824)	2014.01.28	-77,457	119,720	234,689	13.36	15.38
100(9878)	2014.01.29	-366,701	549,024	87,551	10.95	12.27
101(9877)	2014.02.18	-480,361	9,378,000	£	1.03	1.03
102(9876)	2014.02.18	-5,728,964	20,471,607	£	1.19	1.19
103(9770)	2014.02.28	-3,311,854	1,149,274	289,925	12.63	13.22
104(9897)	2014.03.17	-2,101,418	6,090,125	£	4.11	4.11
105(9891)	2014.03.11	-7,917,614	1,130,506	67.80	17.51	17.51
106(9918)	2014.03.20	-54,769	140,172	27,334	7.39	9.19
107(4120)	2014.03.22	-3,982,852	11,157,659	£	5.69	5.69
108(9896)	2014.03.28	-931,671	473,315	36,915	17.36	17.71
109(9950)	2014.05.07	-203,289	19,052	1,186	1.94	1.99
110(9973)	2014.07.10	-720,523	2,158,031	394,593	6.16	8.04
111(9968)	2014.08.26	-5,100,456	6,026,011	£	9.63	9.63
112(10052)	2014.10.17	-18,031	42,009	143,208	32.63	36.27
113(6164)	2014.11.06	-528,383	531,322	33.88	11.97	11.97
114(10068)	2014.11.20	-6,142,102	6,846,376	0.0149	11.63	11.63
115(10073)	2014.12.04	-901,011	356,898	148,523	18.46	20.10
116(10088)	2014.12.31	-1,949,971	1,671,747	0.0496	17.80	17.80

117(10139)	2015.04.17	-1,350,779	131,354	157,115	19.73	20.87
118(10043)	2015.04.21	-8,062,701	7,801,924	ε	10.68	10.68
119(10102)	2015.06.10	-1,052,271	1,244,403	553,218	9.95	12.56
120(9843)	2015.07.28	-663,042	438,643	36,440	11.91	12.22
121(10183)	2015.08.15	-1,594,429	224,000	501.57	21.10	21.10
122(10239)	2016.05.11	-1,018,324	1,196,761	4,742	8.14	8.16
123(10207)	2016.06.23	-2,890,985	26,531	229,412	17.54	18.24
124(10312)	2016.07.22	-515,847	4,071,719	1,768	3.72	3.72
125(10206)	2016.07.29	-2,852,930	144,154	235,793	17.31	19.83
126(10333)	2016.10.28	-92,531	3,424	10,199	23.50	24.88

note: 1) $NPV_{w/o CER} + NPV_{CER} \geq 0$, $PCER(\text{break-even point})$, 2) $NPV_{w/o CER} + NPV_{CER} \geq \text{option value}$, $PCER(\text{break-even point})$

3) ε is a Very small amount of real number close to 0

문 CDM 사업별로 CO₂톤당 0.64유로(사업번호 8329)에서 36.69유로(사업번호 7672) 내에 위치하고 있다.

한편, 사업의 불확실성을 경감하기 위해 실물옵션 개념을 적용한 옵션가치를 보면 CER 발행가격 수준이 톤당 1-5유로 수준에서는 평균적으로 약 19%[최소 2.0%(사업번호 9420)~최대 51.3%(사업번호 9487)]만큼의 불확실성 경감으로 인한 배출권가격의 상승효과가 있는 것으로 분석되었다. CER 발행가격 수준이 톤당 5-10유로 수준에서는 약 11%[최소 2.0%(사업번호 9658)~최대 37.2%(사업번호 9333)]만큼의 배출권가격 상승효과가 있는 것으로 나타났다. CER 발행가격 수준이 톤당 10-15유로 수준에서는 약 5%[최소 2.0%(사업번호 9896)~최대 7.8%(사업번호 9017)]만큼의 배출권가격 상승효과가 있는 것으로 나타났다(Table 5). 본 연구의 표본 기간인 2012년 12월부터 2016년 10월까지의 실물옵션 변수인 무위험이자율과 배출권가격의 변동성이 상대적으로 낮았던 기간이다. 따라서 2018년 이후 배출권가격이 크게 상승했던 기간을 표본에 포함시킬 경우, 사업 불확실성 경감으로 인한 배출권가격의 상승효과는 확대될 것이다. 이렇듯, 온실가스 감축 사업의 시행사 및 투자자에게는 배출권가격의 불확실성으로 인한 기업수익의 편차가 큰 관계로 온실가스 감축 사업의 착수 시점을 결정하는 부분이 사업의 의사결정에 있어 중요하게 고려되어야 한다.

5. 결론

탄소중립이라는 지구의 역사적 도전에 직면한 잠재적 온실가스 감축 기업들은 자체 사업장의 한계저감비용과 배출권가격을 비교하여 온실가스 감축 사업의 투자를 결정할 의사결정을 내려야 한다. 본 연구는 한국도 파리기후변화 협약으로 온실가스 감축 의무를 부여받게 될 시대적 상황에서 필연적으로 온실가스를 감축해야 할 사업 주

체들에게 해당 시장의 정보를 제공하는 것에 그 목적이 있다. 2050년까지 탄소중립을 선언하는 국가가 늘어나면서 시간이 갈수록 파리협정의 시장메커니즘의 중요성이 높아질 것이다. 파리협정의 지속가능메커니즘은 교토의 정서 체제의 CDM 사업방식과 유사한 구조를 지닐 것이며, 협력적 메커니즘은 정부 간 협력을 통한 사업이지만 투자 사업을 추진한다는 측면에서 시장메커니즘 기능은 여전히 유효하다.

투자자, 사업시행사, 잠재적 의무감축기업으로 대표되는 온실가스 감축 사업 주체들은 탈황시설, 열병합발전시설, 태양광 패널과 풍력발전 터빈 등과 같은 환경시설 도입에 얼마를 투자해서 사업을 진행할 수 있는지에 대한 정보를 취득하는 것이 필요하다. 즉, 온실가스 감축 실적을 확보하기 위한 발행가격을 추정하는 것이 중요하다.

CER의 유통가격은 시장의 거래가격을 통해 분석 가능하나, 발행가격은 CDM 사업계획서의 금융지표를 통해 직접 추정하는 방법밖에 없다. 따라서 CDM 사업을 이행하고 감축실적인 CER을 발행받기 전까지는 발행가격의 적정 수준이 어느 정도인지를 파악하는 것이 의사결정의 중대한 요건이 된다. 본 연구에서는 제1차 의무감축기간이 종료되는 시점인 2012년 12월부터 2021년 말까지 UNFCCC에 등록된 에너지산업 부문의 CDM 사업계획서 1,350여 건을 검토한 후 투자분석에 활용할 수 있는 유효 표본을 추출하였다. 그리고 에너지산업 부문의 CER(탄소배출권) 발행가격의 적정 수준은 어느 수준인지를 배출권가격의 불확실성을 고려한 실물옵션 기법을 통하여 추정하였다. 구체적인 분석 결과는 다음과 같다.

본 논문에서 적정 가격 수준의 측정이 가능한 유효표본 수는 126건이며, 분석 결과, UNFCCC에서 2012년 12월부터 2021년 말까지 등록한 에너지산업 부문 CDM 사업의 손익분기점은 개별사업별로 CO₂톤당 0.64-36.69 유로로 나타났다. 조금 더 상세히 보면, $NPV_{w/o CER} +$

NPV_{CER} ≥ 0일 때 손익분기점에 도달하는 배출권가격은 평균 12.10유로이며, 이때 최저치는 0.22유로, 최고치는 35.07유로였다. NPV_{w/o CER} + NPV_{CER} ≥ 옵션가치일 때 손익분기점에 도달하는 배출권가격은 평균 12.63유로이며, 이때 최저치는 0.64유로 그리고 최고치는 36.69유로로 분석되었다. 한편, 사업의 불확실성을 경감하기 위해 선물옵션을 적용한 옵션가치는 톤당 1-5유로 수준에서는 약 19%, 톤당 5-10유로 수준에서는 약 11%, 톤당 10-15유로 수준에서는 약 5%만큼의 불확실성 경감으로 인한 배출권가격의 상승효과가 있는 것으로 분석되었다. 온실가스 감축 사업 주체들이 본 연구의 분석 결과인 Table 5를 참고한다면 그간 에너지산업 부문에서 시행됐던 온실가스 감축 사업의 개별사업별 발행가격을 확인할 수 있어 사업투자 의사결정에 유용할 것이다. 한편, 2021년 8월에 EUA 배출권가격이 톤당 60유로를 돌파한 이후 2023년 7월까지 90유로 수준으로 지속 상승한 바 있고, 최근인 2024년 3월 25일에도 63달러를 상회하는 가격 추세를 보였다. 이런 현상을 보면, 그간 수행된 해외 재생 에너지 온실가스 감축 사업의 경제성은 충분히 존재한다고 판단된다. 더군다나 국제사회가 탄소중립을 돌이킬 수 없는 역사적인 과제로 추진하고 있는 현실에서 향후 수요 증대로 인한 배출권가격의 상승은 불가피한 바, 온실가스 감축 시설을 설치하고 에너지 전환을 선점하고 있는 기업들의 경제적 이득은 확대될 것이다. 마지막으로, 파리기후변화협정 하의 온실가스 제2차 의무감축 시대와 더불어 오는 2030년까지 2018년 온실가스 배출량 대비 40%의 의무감축을 준비해야 하는 국내 온실가스 관리업체에게도 본 연구의 결과가 유용할 것으로 기대한다.

REFERENCES

- [1] World Economic Forum. (2020, January). *The Global Risks Report 2020*. (pp. 10-11). Geneva: World Economic Forum.
- [2] S.Y. Kim & H.J. Park. (2008). Price discovery process and causality analysis of EU carbon credits. *Journal of Economic Studies*, 26(1), 1-20. UCI : I410-ECN-0102-2009-320-008888485
- [3] S.S. Lim, & S.R. Yang. (2010). Analysis of Optimal Issuance Price regard to Economic Feasibility. *Environmental and Resource Economics Review*, 19(4), 829-852. UCI : G704-000752.2010.19.4.005
- [4] S.W. Lho. (2011). A Test on Price Volatility of CO₂ Emission Trading Permits focusing on ECX and CCX. *Journal of Environmental Policy and Administration*, 10(2), 45-60. DOI : 10.17330/joep.10.2.201106.45
- [5] S.C. Park & Y.S. Cho. (2013). Analysis on Price Driver of Spread and Different Patterns of EUA and sCER. *Environmental and Resource Economics Review*, 22(4), 759-784. UCI : G704-000752.2013.22.4.005
- [6] D.W. Noh, I.S. Son, J.M. Lim & S.I. Kim. (2021). Comparison of Greenhouse Gas (GHG) Emission Abatement Cost of Clean Development Mechanism (CDM) Activities in Four Countries Chile, Peru, Vietnam, and Malaysia. *Journal of Climate Change Research*. 12(5), 613-643. DOI : 10.15531/KSCCR.2021.12.5.613
- [7] A.K. Dixit & R.S. Pindyck. (1994). *Investment under Uncertainty*. New Jersey: Princeton University Press.
- [8] L. Trigeorgis. (1996). *Real Options : Managerial Flexibility and Strategy in Resource Allocation*. Massachusetts: The MIT Press.
- [9] M. Isik. (2004). Incorporating Risk Preferences into Real Options Models. Paper Presented at the American Agricultural Economics Association Annual Meeting. Denver, Colorado.
- [10] F. Black.(1976). The Pricing of Commodity Contracts. *Journal of Financial Economics*. 3, 167-179. DOI : 10.1016/0304-405X(76)90024-6
- [11] T.S. Kim. (2009). *Secrets of the carbon market*. The Gyeongmun Press.
- [12] J. Mun. (2002). *Real Options Analysis : Tools and Techniques for Valuing Strategic Investments and Decisions*. New Jersey: John Wiley & Sons.

임 성 수(Sungsoo Lim)

[정회원]



- 1999년 8월 : 건국대학교 농업경제학과(경제학사)
- 2008년 2월 : 고려대학교 농업경제학과(경제학박사)
- 2008년 9월~2011년 2월 : 한국연구재단 학술연구교수

- 2011년 3월~현재 : 건국대학교 경제통상학과 부교수
- 관심분야 : 탄소배출권시장, 국제금융
- E-Mail : sslim07@kku.ac.kr