

배출권 가격 불확실성을 고려한 고효율 쿽스토브 보급사업 실물옵션 연구

이재형*

요약 : 배출권거래제 2차 계획기간(2018~2020년)부터 ‘국내기업 등이 외국에서 직접 시행한 CDM 사업’의 감축실적을 할당대상업체가 사용할 수 있게 되었다. 이에 시장의 이해관계자들은 한계비용이 낮으면서 많은 양의 배출권을 확보할 수 있는 ‘고효율 쿽스토브 보급사업’과 같은 해외 CDM 사업을 적극 추진하고 있다. 본 논문은 실물옵션 방법론을 활용하여 ‘고효율 쿽스토브 보급사업’ 대한 외부사업자의 투자의사결정 모형을 개발하였다. 그리고 배출권 가격 불확실성하에서 ‘고효율 쿽스토브 보급사업’의 최적투자분기점(p^*) 도출 및 민감도 분석을 시행하였다. 그 결과 기준시나리오(PoA-S)에서의 최적투자분기점은 29,054원/톤으로 현재 배출권 현물 가격(p_{spot}^*)보다 낮아 고효율 쿽스토브 보급사업은 경제성이 있는 것으로 나타났다. 그러나 할당대상업체는 CDM 사업 추진 시 경제성뿐 아니라, 본 논문에서 분석한 투자유치국의 비재생 바이오매스 비율, 쿽스토브 교체 비율, 지분율, 사업기간 및 해외 외부사업 배출권의 사용 한도와 같은 위험요소도 고려하여 의사결정을 해야 한다. 그리고 외부사업자는 외부사업자의 고유 파라미터로 사업단계별 최적투자분기점을 도출하여 경제성 점검에 활용할 수 있을 것이다.

주제어 : 배출권거래제, 배출권 가격 불확실성, 외부사업, 쿽스토브, 실물옵션

JEL 분류 : C6, D8, Q3

접수일(2020년 1월 6일), 수정일(2020년 2월 6일), 게재확정일(2020년 3월 16일)

* SK텔레콤, SV Innovation 센터, 매니저, 교신처자(e-mail: for385@hanmail.net)

Real Option Study on Cookstove Offset Project under Emission Allowance Price Uncertainty

Jaehyung Lee*

ABSTRACT : From the Phase II (2018–2020) of K-ETS, the offset credit from 'CDM projects that domestic companies and others have carried out in foreign countries' can be used in the K-ETS. As a result, stakeholders in the K-ETS market are actively developing overseas CDM projects, such as the 'high-efficiency cook stove project'. which can secure a large amount of credits while marginal cost is relatively low. This paper develops the investment decision-making model of offset project for the 'high-efficiency cook stove project' using the real option approach. Under the uncertainty of the emission allowance price, the optimal investment threshold (p^*) is derived and sensitivity analysis is conducted. As a result, in the standard scenario (PoA-S), the optimal investment threshold is 29,054won/ton, which is lower than the stock price (p_{spot}^*). However, allocation entities are not only economics in the CDM project, but also CDM risk factors such as non-renewable biomass ratio, cook stove replacement ratio, equity ratio with host country, investment period and submission limitation of emission allowance. In addition, offset project developers will be able to derive the optimal investment threshold for each business stage and use it for economic feasibility checks.

Keywords : Emission trading scheme, Emission allowance price, Offset, Cook stove, Real option

Received: January 6, 2020. Revised: February 6, 2020. Accepted: March 16, 2020.

* Manager, SK Telecom, Corresponding author(e-mail: for385@hanmail.net)

1. 서론

2020년은 2015년 1월 12일 총량제한 온실가스 배출권거래제(K-ETS, Korea Emission Trading Scheme, 이하 “배출권거래제”)가 시작된 지 6년째이자, 2차 계획기간(2018~2020년)의 마지막 이행연도이고, 3차 계획기간(2021~2025년)의 할당이 이루어지는 해이다. 2차 계획기간의 배출허용총량은 1차 계획기간(2015~2017년) 대비 5.2%(8,717만 톤) 증가하였고, 사전할당량은 1차 계획기간 대비 1.8%(2,825만 톤) 초과할당되었다(환경부 보도자료, 2018a)¹⁾. 1차 계획기간과 2차 계획기간은 할당대상업체 수, 사전할당 대상 시설의 범위, 이월제한 조치 등이 상이하여 할당효과에 대한 단순비교는 어려우나, 배출허용총량이 2차 계획기간에 1차 계획기간 보다 늘어났음에도 불구하고 시장지표인 배출권 가격이 급등한 것은 명백한 사실이다.

2015년 1월 12일 첫 상장된 KAU(Korea Allowance Unit)의 첫 상장일 증가는 8,640 원/톤(KAU15)으로 1차 계획기간 마지막 거래일(2017년 12월 28일)까지 연평균 32% 상승(CAGR)한 반면 2차 계획기간 첫 거래일(2018년 1월 2일) 증가는 25,000원/톤(KAU18)으로 2019년 12월 30일까지 연평균 38% 상승(CAGR)하였다²⁾.

이렇게 배출권 가격이 급등한 이유는 여러 원인이 있을 수 있으나, 시장의 이해관계자들은 배출권 가격 급등에 따라 비용효과적으로 배출권을 확보하기 위해 외부사업³⁾을 적극 추진하고 있다. 2015년 상쇄제도 시행 이후 최근 들어 국내 외부사업 등록건수가 급증하고 있으며, 등록된 사업 중 대다수 사업이 시장의 이해관계자들이 자발적으로 추진하는 사업이다(이충국, 2019). 또한 시장의 주요 이해관계자인 할당대상업체, 컨설팅회사 및 금융기관 등은 국내 외부사업뿐 아니라 해외 외부사업을 발굴하고 있다. 해외 외부사업은 UNFCCC 체제하에 관리되는 해외 청정개발체제(Clean Development Mechanism,

1) 환경부 보도자료(2018.07.12.), “온실가스 배출권 할당 총량안 3년간 17억 7,713만 톤.”

2) KAU는 2015년 1월 12일 첫 상장일 증가는 8,640원/톤(KAU15)이고, 마지막 거래일 증가는 2015년 말 12,000원/톤(KAU15), 2016년 말 19,300원/톤(KAU16), 2017년 말 20,000원/톤(KAU16), 2018년 말 25,000톤(KAU17), 2019년 말 38,100원/톤(KAU19)을 기록하였다.

3) “외부사업”이란 할당대상업체의 조직경계 외부에서 이루어지는 온실가스 감축사업에 대한 투자를 통해 배출권을 확보할 수 있는 사업을 의미한다. 외부사업은 크게 UNFCCC 규정에 따라 해외 및 국내에서 진행되었거나 진행 중인 ‘해외 및 국내 CDM 사업’이 있고, ‘외부사업 타당성 평가 및 감축량 인증에 관한 지침’에 따른 ‘국내 외부사업’이 있다.

이하 ‘CDM’) 사업을 의미하며, 국내 외부사업에 비해 투자유치국(Host Party)의 국가리스크, 정책리스크, 시장(가격)리스크 및 환(換) 리스크 등의 위험요소들이 존재(오원석·안건형, 2009)하고, 해외 CDM 사업을 통해 발급된 CER(Certificated Emission Reduction)을 국내에 사용하기 위해 전환 절차(산업통상자원부, 2018)를 거쳐야 함에도 불구하고, 상대적으로 배출권 사업개발 비용이 저렴하면서 많은 양의 배출권을 확보할 수 있는 수단이다.

해외 CDM 사업 중 현재 국내 이해관계자들이 투자하고 있는 사업의 하나가 ‘고효율 쿡스토브(Cook Stove)’ 보급 사업이다. 여기서 고효율 쿡스토브란 나무땃감, 숯을 주 연료로 한 취사도구로 금속, 시멘트, 진흙 등으로 제작⁴⁾하고, ‘고효율 쿡스토브 보급사업’이란 이러한 고효율 쿡스토브를 개도국 가구에 보급함으로써 바이오매스 및 화석연료 등의 절감을 통해 온실가스를 감축하는 사업을 의미한다. UNFCCC CDM 체계가 시작된 이후 2009년 나이지리아(Nigeria) 사업(Efficient Fuel Wood Stoves for Nigeria)⁵⁾을 시작으로 개도국을 대상으로 한 쿡스토브 보급사업은 지속적으로 확대되고 있다. 쿡스토브와 관련된 선행연구는 주로 고효율 쿡스토브의 목재사용 감소(Minang, 2007; Miah et al., 2009), 온실가스 감축(Panwar et al., 2009; Johnson et al., 2010; Mobarak et al., 2012; Dresen et al., 2014), 공기질 및 건강 개선(Panwar et al., 2009; Mobarak et al., 2012; Aung et al., 2016) 효과에 초점을 맞추어 진행하였다. 그러나 아직까지 쿡스토브의 온실가스 감축효과와 실물업선 방법론을 연계하여 분석한 선행연구는 없다.

실물업선 방법론으로 온실가스 감축사업을 분석한 연구는 조직경계⁶⁾에 따라 할당업체 내부 온실가스 감축(이하 ‘내부감축’) 및 외부 온실가스 감축(이하 ‘외부사업’)으로 나눌 수 있다. 우선 내부감축과 관련된 선행연구에서는 불확실한 대상을 배출권 가격(박호정, 2005; 박호정, 2015) 및 감축비용(Zhao, 2003; Park, 2012)으로 설정하였다.

외부사업을 실물업선 방법론으로 분석한 연구는 대부분 산림부문에 초점을 맞추어 연구되었다. 산림부문 외부감축사업의 대표적인 연구는 장희선·박호정(2009), Park

4) 전자신문(2019.11.14.), “SK텔레콤, 11개 관계사와 미얀마에 쿡스토브 432만대 보급.”

5) UNFCCC CDM (<https://cdm.unfccc.int/ProgrammeOfActivities/registered.html>)

6) 「온실가스 배출권거래제의 배출량 보고 및 인증에 관한 지침」 제1장 제1조 제37항 “조직경계”란 업체의 지배적인 영향력 아래에서 발생하는 활동에 의한 인위적인 온실가스 배출량의 산정 및 보고의 기준이 되는 조직의 범위를 말한다.

and Jang(2010), 홍원경·박호정(2011) 및 Yoo et al.(2018)이 있다. 동 연구에서도 내부 감축과 마찬가지로 불확실한 대상을 배출권 가격(장희선·박호정, 2009; Park and Jang, 2010; 홍원경·박호정, 2011) 및 목재판매수익(Yoo et al., 2018)으로 설정하여 분석하였다. 산림부문 외의 대상으로 한 연구는 박호정(2012) 및 박호정·김윤경(2017)이 있는데, 두 연구 모두 불확실한 대상을 배출권 가격으로 설정하여 분석하였다.

본 논문은 외부감축사업을 개발하는 외부사업 사업자(이하 ‘외부사업자’)의 ‘고효율 쿼츠토브 보급사업’에 대한 투자의사결정 모형을 실물옵션 방법론을 이용하여 개발하였다. 선행연구와 동일하게 불확실한 대상을 외부감축사업에 따라 발행되는 배출권 가격으로 설정하였고, 분석 대상으로는 선행연구에서 다루지 않았으나 국내 외부사업자가 활발히 투자하고 있는 해외 CDM ‘고효율 쿼츠토브 보급사업’을 설정하였다.

이하 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 실물옵션 방법론을 활용한 모형을 제시하였으며, III장에서는 UNFCCC CDM에 등록된 사업자별 사업계획서(PDD, Project Design Document)에 제시한 파라미터를 바탕으로 실증분석을 하였다. 마지막으로 IV장에서는 실증분석결과와 연계한 정책적 시사점 및 본 논문의 한계점을 제시하였다.

II. 모형

UNFCCC CDM에서는 CDM 사업 유형에 따른 감축량을 산정하기 위한 방법론을 제시하고 있다. 방법론은 사업 규모에 따라 대규모(large scale) 사업, 소규모(small scale) 사업⁸⁾, 대규모 조림/재조림(large scale A/R) 사업, 소규모 조림/재조림(small scale A/R) 및 탄소 포집 및 저장(CCS, Carbon Capture and Storage) 사업이 있으며, 이러한 사업 유형에 따른 CDM 사업 방법론을 개발하여 제시하고 있다.

또한 개별 사업의 감축량 규모는 작으면서 다수의 유사한 형태의 CDM 사업을 하나

7) 「외부사업 타당성 평가 및 감축량 인증에 관한 지침」 제2조 제2항.

“외부사업 사업자”란 외부사업의 발굴·시행 및 운영에 책임이 있는 사업주체를 말하며, 「기후변화에 관한 국제연합기본협약에 대한 교토의정서」 제12조에 따른 청정개발체제 사업을 통하여 확보한 온실가스 인증실적에 대한 소유권을 가진 자를 포함한다.

8) UNFCCC CDM 사업에서 규정하고 있는 대규모사업은 배출 감축량 60,000tCO₂/년 초과되는 사업을 의미하고, 소규모사업은 60,000tCO₂/년 이하인 사업을 의미한다. 소규모 사업중에서 20,000tCO₂/년 이하인 사업은 ‘극소 규모’ 사업이라 명명한다.

의 프로젝트처럼 묶어서 등록할 수 있는 사업이 있는 데 이를 프로그램사업(PoA, Programme of Activities)이라 지칭한다. 이는 PoA 사업에 개별사업(CPA, Component Project Activities) 여러 개를 묶을 수 있는 제도로서 개별 규모는 작지만 다수의 유사한 형태의 사업을 개별적으로 등록하는 행정 시간 및 비용을 감축하여 CDM 사업을 활성화 시키려는 제도이다.

이 중 고효율 쿡스토브 보급사업은 개별 온실가스 감축량 규모는 작지만, 동일한 쿡스토브를 특정 지역에 다량을 보급하기에 하나의 PoA 아래 여러 개의 CPA를 묶는 방식으로 사업을 추진한다. 사업 등록을 위한 방법론으로는 일반적으로 소규모 사업 방법론인 ‘(AMS-II.G) 비-재생 바이오매스의 열기에서 에너지 효율 조치(Energy efficiency measures in thermal applications of non-renewable biomass)’ 방법론을 사용하여 온실가스 감축량을 산정한다(UNFCCC, 2019).

UNFCCC(2019) 방법론에 따른 고효율 쿡스토브 보급시 쿡스토브 1개의 온실가스 감축량은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다⁹⁾.

$$q(t) = B_{savings}(t) \times \mu \times f_{NRB} \times NCV_{biomass} \times EF_{P,J,ff} \times LAF \quad (1)$$

$B_{savings}(t)$: Biomass 감축량 (톤/년/개)

μ : 쿡스토브 교체 비율

f_{NRB} : 비재생 바이오매스 (non-renewable biomass) 비율

$NCV_{biomass}$: 순발열량 (TJ/톤biomass)

$EF_{P,J,ff}$: 배출계수 (톤/TJ)

LAF : 누출계수

위 식 (1)에서 $B_{savings}(t)$ 는 끓는 점 실험(WBT, Water Boiling Test)을 통해 다음 식 (2)와 같이 구할 수 있다(UNFCCC, 2019).

9) 방법론에 따르면 온실가스 관련 단위를 ‘tCO₂e(이산화탄소상당량톤)’로 나타내나 이하에서는 ‘톤’으로 표현하였다.

$$B_{savings} = B_{t=1, new} \times \left(\frac{\eta_{new}}{\eta_{old}} - 1 \right) = B_{old} \times \left(1 - \frac{\eta_{old}}{\eta_{new}} \right) \quad (2)$$

$B_{savings}(t)$: 쿼스토브 사용에 따른 Biomass 감축량 (톤biomass/년/개)

$B_{y=1, new}$: 쿼스토브 Biomass 사용량 (톤biomass/년/개)

η_{new} : 신규 쿼스토브 효율

η_{old} : 기존 쿼스토브 효율

외부사업자가 CDM 사업을 추진하는 이유는 사업자가 할당대상업체인 경우에는 온실가스 감축목표 달성에 사용하려는 목적이고, 사업자가 비할당대상업체인 경우에는 CER을 발급받아 국내 배출권시장에 판매하려는 목적이다. 그렇기에 선행연구(Park and Jang, 2010; 장희선·박호정, 2009; 홍원경·박호정, 2011; 박호정, 2012; 박호정, 2015)와 달리 ‘배출권 가격’을 CER 가격이 아닌 국내 배출권 시장의 외부사업감축량(KOC, Korean Offset Credit)으로 설정하였다. 그리고 선행연구와 동일하게 KOC 배출권 가격은 아래 식 (3)과 같이 기하 브라운 운동(GBM, Geometric Brownian Motion) 확률과정을 따름을 가정하였다.

$$dp(t) = \alpha p(t)dt + \sigma p(t)dz(t) \quad (3)$$

위 식에서 α 는 p 의 증가율(Drift Rate)이고, σ 는 변동성(Volatility)을 뜻하며, $dz(t)$ 는 위너과정(Wiener's process)의 증분을 의미한다.

외부사업자가 시간 t 에서 확보하는 배출권 총량(δNq)은 시간 t 에서 투자유치국(Host Party)에 공급한 쿼스토브 개수(N), 쿼스토브 1개당 감축하는 온실가스 감축량(q), 투자유치국에 제공하는 배출권을 제외한 지분율(δ)로 구성되며, 사업자의 총편익은 사업자가 확보하는 배출권 총량에 배출권 가격을 곱하여 도출한다. 다음으로 비용은 쿼스토브 생산비(c_1), 운송비(c_2) 및 운영비(c_3)로 구성되며, CDM 사업 관리를 위한 간접비(k)가 발생한다. 일반적으로 온실가스 감축과 관련한 선행연구에서는 비용함수를 감축율에 따른 이차함수(quadratic cost function)로 가정하였다(Zhao, 2003; 박호정, 2005; Park,

2012). 이는 감축율이 커질수록 감축비용은 지수적으로 증가되는 현실을 반영한 것이다. 반면 쿽스토브 보급사업은 개당 감축량은 동일하고, 전체 공급량(N)만 증가하는 관계로 본 논문에서는 비용함수를 일차선형함수로 가정하였다.

결론적으로 외부사업자의 이윤함수는 다음 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\pi(p) = p(t)\delta Nq - N((1 + \phi)c_1 + c_2 + c_3) - k \quad (4)$$

δ : 지분율

N : 쿽스토브 보급개수

c_1 : 생산단가(원/개)

ϕ : 파손율

c_2 : 운송비(원/개)

c_3 : 운영비(원/개)

k : 간접비(인건비, 모니터링, 밸리데이션 비용 등) (원)

이를 종합한 외부사업자의 가치함수는 다음과 같다.

$$V(p) = E \int_0^\tau [p(t)\delta Nq - N((1 + \phi)c_1 + c_2 + c_3) - k] e^{-\rho t} dt \quad (5)$$

$$\text{s.t. } dp(t) = \alpha p(t)dt + \sigma p(t)dz(t)$$

위 식 (5)에서 E 는 기대연산자이며, ρ 는 할인율을 나타낸다. 또한 τ 는 쿽스토브 사업의 만기(Duration of PoA)로서 CDM 사업의 경우 사업등록 및 배출권 발행의 만기가 정해져 있기에 τ 는 유한한 값을 갖는다.

이를 풀어서 정리하면 다음과 같다.¹⁰⁾

$$V(p) = \frac{\delta p N q}{\rho - \alpha} T_1 - \frac{N((1 + \phi)c_1 + c_2 + c_3) + k}{\rho} T_2 \quad (6)$$

10) 이후의 자세한 풀이 방법에 대해서는 박호정(2018)을 참고하기 바란다.

여기서 $T_1 = 1 - e^{-(\rho - \alpha)\tau}$ 및 $T_2 = 1 - e^{-\rho\tau}$ 로 정의된다. 만약 $\tau \rightarrow \infty$ 가 될 경우 $T_1 = T_2 = 1$ 로 수렴하게 되고, 이는 사업 기간이 무한대인 경우의 기대 순현재가치를 의미한다.

다음으로 옵션 가치를 구해야 한다. 콕스토브 보급사업 투자 이전의 옵션가치를 $F(p)$ 라 할 때, $F(p)$ 는 이토 보조정리(Ito's lemma)와 해밀톤-자코비-벨만(Hamiltonian-Jacobi-Bellman, HJB) 방정식을 바탕으로 식 (7)과 같이 정리할 수 있다.

$$\rho F(p) = \alpha p F_p + \frac{1}{2} \sigma^2 p^2 F_{pp} \quad (7)$$

일반적으로 옵션가치는 Dixit and Pindyck(1994)에서 잘 알려진 바와 같이 식 (8)의 형태를 갖는다. 단, 여기에서 $A > 0$ 및 $\beta > 0$ 조건을 만족하는 것으로 알려져 있다.

$$F(p) = Ap^\beta \quad (8)$$

식 (8)을 식 (9)에 넣어 정리하면 다음의 식 (9)과 같이 정리할 수 있다. 여기서 β 는 HJB 방정식으로부터 도출한 특성방정식(Characteristic Equation)의 해로, 특성방정식은 다음과 같다.

$$\alpha\beta + \frac{1}{2}\sigma^2\beta(\beta - 1) - \rho = 0 \quad (9)$$

그리고 이를 정리한 특성방정식의 해는 다음과 같다.

$$\beta = \frac{1}{2} - \frac{\alpha}{\sigma^2} + \sqrt{\left(\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{\sigma^2}\right)^2 + \frac{2\rho}{\sigma^2}} > 1 \quad (10)$$

다음 단계로는 최적투자임계점(p^*)을 구해야 하는 데 이는 등가조건(value matching condition)과 한계조건(smooth pasting condition)을 바탕으로 도출할 수 있다.

등가조건은 $F(p) = V(p) - I$ 인 조건을 의미하며 이는 다음 식 (11)과 같다. 다음 식에

서 I 는 외부사업자의 비가역적 초기 투자비를 의미한다.

$$Ap^\beta = \frac{\delta p Nq}{\rho - \alpha} T_1 - \frac{N((1 + \phi)c_1 + c_2 + c_3) + k}{\rho} T_2 - I \quad (11)$$

한계조건은 $F_p(p) = V_p(p)$ 이며, 이는 식(11)을 상태변수인 p 로 미분한 조건을 의미한다.

$$\beta Ap^{\beta-1} = \frac{\delta Nq}{\rho - \alpha} T_1 \quad (12)$$

식(11) 및 식(12)를 연립하여 정리하면 다음과 같은 최적투자분기점(p^*)을 구할 수 있다. 아래 식(13)에서 $T_1 = 1 - e^{-(\rho - \alpha)\tau}$ 및 $T_2 = 1 - e^{-\rho\tau}$ 를 의미한다.

$$p^* = \left(\frac{N((1 + \phi)c_1 + c_2 + c_3) + k}{\rho} T_2 + I \right) \left(\frac{\beta}{\beta - 1} \right) \left(\frac{\rho - \alpha}{\delta Nq T_1} \right) \quad (13)$$

식(13)의 우변의 $\beta/(\beta - 1)$ 는 투자를 지연시키는 역할을 하며, 이를 옵션승수(option multiplier) 혹은 히스터리시스(hysteresis)로 정의한다. 불확실성이 존재하는 세계에서 도출된 p^* 에 옵션승수가 존재하게 되면, 외부사업자의 투자시점은 임계점은 뒤로 늦춰진다.

다음으로 다른 미지수인 A 값을 구해야 한다. A 값은 최적투자분기점인 식(13)을 식(11)에 대입한 후 항들을 A 에 대해 정리함으로써 얻을 수 있다.

$$A = \left(\frac{1}{p^*} \right)^\beta \left(\frac{\delta p^* Nq}{\rho - \alpha} T_1 - \frac{N((1 + \phi)c_1 + c_2 + c_3) + k}{\rho} T_2 - I \right) \quad (14)$$

불확실성이 없는 상황에서의 최적투자분기점은 식(6)을 바탕으로 구할 수 있다. 즉, $V(p_{npv}) - I = 0$ 을 바탕으로 ‘불확실성을 고려하지 않을 때의 최적투자분기점(p_{npv}^*)’의 값은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$p_{npv}^* = \left(\frac{N((1+\phi)c_1 + c_2 + c_3) + k}{\rho} T_2 + I \right) \left(\frac{\rho - \alpha}{\delta N q T_1} \right) \quad (15)$$

결론적으로 ‘불확실성하에서의 최적투자분기점(p^*)’인 식 (13)은 ‘불확실성을 고려하지 않을 때의 최적투자분기점(p_{npv}^*)’인 식 (15)에 옵션승수($\frac{\beta}{\beta-1}$)를 곱하여 구함을 알 수 있다.

$$p^* = \frac{\beta}{\beta-1} \times p_{npv}^* \quad (16)$$

III. 실증분석

본 절에서는 앞장에서 도출한 배출권 가격 불확실성하에서의 콥스토프 사업 투자의 사결정모형을 실증분석 하였다. 그러기에 앞서 실증분석을 위한 파라미터 값을 도출하였다.

우선 GBM 확률과정을 따르는 배출권 가격 $p(t)$ 의 증가율인 α 와 변동성인 σ 를 배출권 가격 데이터로부터 추정하도록 한다. $y(t) = \log(p(t)) - \log(p(t-1))$ 로 정의하고 시차(time interval)를 Δ 라고 설정할 때, $p(t)$ 가 GBM 확률과정을 따르므로 $y(t)$ 는 정규분포를 따르게 된다. 정규분포를 따르는 $y(t)$ 의 평균과 분산이 $E(y(t)) = (\mu - \sigma^2/2)\Delta$ 와 $Var(y(t)) = \sigma^2\Delta$ 이므로, $y(t)$ 의 표본평균 \bar{y} 와 표준편차 s_y 에서 $\alpha = \bar{y}/\Delta + s_y^2/2\Delta$ 와 $\sigma = s_y/\sqrt{\Delta}$ 를 구할 수 있다. 연도별 자료를 이용해 연도별 α 와 σ 를 추정하고자 할 경우 $\Delta = 1$ 이고, 월별자료를 이용할 경우 $\Delta = 1/12$ 가 된다(박호정, 2005). 본 논문에서는 박호정·김윤경(2017)과 달리 시장의 현실을 반영하기 위해 $\Delta = 1/244$ 로 적용하였는데, 이는 2015~2019년 동안 배출권 거래시장 거래일¹¹⁾의 평균이다.

이를 바탕으로 도출한 배출권 가격 증가율(α) 및 변동성(σ) 값은 <표 1>과 같으며, 이

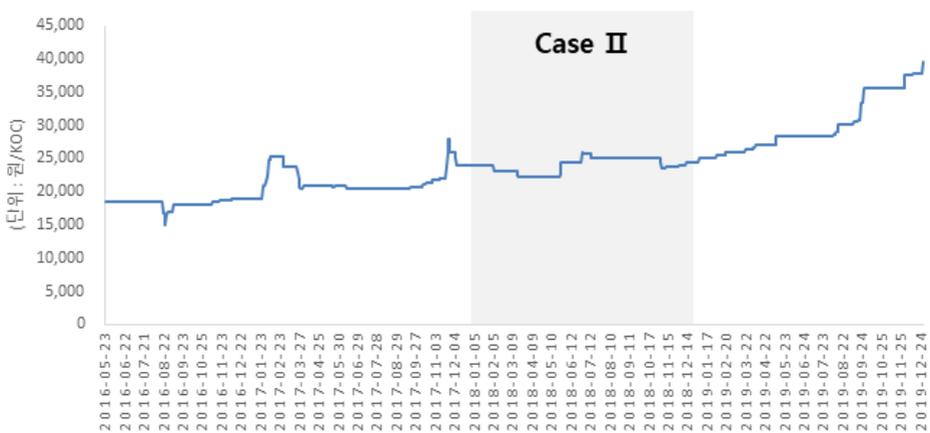
11) 국내 배출권 거래시장의 경우 2015년 1월 12일 개장한 이래 2015년은 242일, 2016년은 246일, 2017년은 243일, 2018년은 244일, 2019년은 246일을 거래하였다. 그리고 박호정·김윤경(2017)은 $\Delta = 1/250$ 로 적용하였다.

중 분 논문에서는 ‘Case II’ 파라미터인 $\alpha = 0.0287$ 및 $\sigma = 0.1272$ 를 적용하였다. 일반적으로 실물옵션 문헌에서 최적투자분기점(p^*) 도출 및 민감도 분석을 위한 전제 조건으로 $\alpha < \rho$ 을 가정한다(Dixit and Pindyck, 1994; 정진영·남영식·전대욱, 2019). 이는 $\alpha < \rho$ 일 경우 할인율이 증가율보다 클 때 투자 지연 시 불확실성이 해소되는 가치가 존재하며, $\alpha \geq \rho$ 일 경우에는 투자수익률이 할인율보다 크기에 투자 지연 시 발생하는 불확실성을 고려하지 않게 된다. 그렇기에 본 논문에서는 ‘Case II’의 파라미터로 최적투자분기점(p^*) 도출 및 민감도 분석을 시행하였다. 그리고 할인율은 선행연구인 박호정(2015) 및 박호정·김윤경(2017)에서 적용한 $\rho = 0.05$ 을 동일하게 적용하였다.

〈표 1〉 배출권 가격 파라미터

파라미터	Case I	Case II	Case III
대상	KOC 현물		
적용년도	2018~2019	2018	2019
기간	2018.01~2019.12	2018.01~2018.12	2019.01~2019.12
증가율 (α)	0.2575	0.0287	0.4843
변동성 (σ)	0.1358	0.1272	0.1426
할인율 (ρ)	0.0500		

〈그림 1〉 KOC 배출권 가격 추이 (2016년 05월~2019년 12월)



다음으로 외부사업자의 감축량 파라미터이다. 감축량 파라미터란 식 (1) 및 식 (2)에 쓰인 파라미터로 외부사업 사업자가 국가승인 및 UNFCCC에 사업등록을 위해 제출한 사업계획서(PDD)에 제시한 값이다. 외부사업자는 UNFCCC 등록 시 PDD를 작성하고, 동 PDD에 감축량 관련 파라미터를 제시한다. 그리고 사업이행 및 모니터링 기간에 모니터링 보고서 작성 시 ‘실제’ 모니터링한 파라미터를 제시한다. 그렇기에 PDD상의 파라미터와 모니터링 보고서상의 파라미터 값은 상이할 수 있는데, 본 논문에서는 외부사업자가 쿡스토브 보급 투자사업 의사결정 단계에서 활용하기 위해 PDD의 파라미터를 감축량 파라미터로 적용하였다.

아래 <표 2>에서 제시한 바와 같이 $B_{savings}$ 및 q 관련 파라미터는 사업자마다 상이하다. 이는 보급하는 쿡스토브의 효율 및 투자유치국(Host Party)의 특성에 따라 파라미터가 달라짐을 의미한다. 특히 $NCV_{biomass}$, $EF_{PJ,ff}$ 및 LAF 는 쿡스토브 감축량 산정 방법론 버전에 따라 상이한 값을 갖는 것을 볼 수 있다.

그렇기에 본 논문에서는 외부사업별 최적투자분기점(p^*)을 도출하기 위해서 각 사업별 PDD에서 제시한 파라미터를 사용하였다. 그리고 민감도 분석을 위해 기준시나리오(PoA-S)를 설정하였으며, 그 값으로 $B_{savings}$ 관련 파라미터(B_{old} , η_{new} , η_{old}), μ 및

<표 2> 국내 외부사업 사업자의 사업별 감축량¹⁾ 파라미터

구분	파라미터	PoA					단위	비고
		PoA-1	PoA-2	PoA-3	PoA-4	PoA-S		
방법론 버전		Ver.7	Ver.7	Ver.8	Ver.9	Ver.9	-	-
$B_{savings}$	B_{old}	4.180	4.210	2.300	4.390	3.770	톤biomass/년	평균
	η_{old}	0.100	0.180	0.110	0.200	0.148	-	평균
	η_{new}	0.286	0.300	0.340	0.315	0.311	-	평균
q	μ	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	-	평균
	f_{NRB}	0.300	0.990	0.843	0.966	0.775	-	평균
	$NCV_{biomass}$	0.015			0.0156	0.0156	TJ/톤biomass	최근값
	$EF_{PJ,ff}$	81.6			63.7	63.7	톤/TJ	최근값
	LAF	0.95				0.95	-	최근값

주: 감축량 관련 파라미터는 UNFCCC CDM 홈페이지에 등록된 PDD을 자료를 활용함.

f_{NRB} 는 ‘PoA-1’ 사업부터 ‘PoA-4’ 사업의 평균값을 사용하였으며, $NCV_{biomass}$, $EF_{PJ,ff}$ 및 LAF 는 방법론의 최근 버전에서 제시한 값을 사용하였다(UNFCCC, 2019).

다음으로 식 (4)와 관련한 편익 및 비용 관련 파라미터를 도출하였다. 해당 파라미터는 PDD에 없어 외부사업자로부터 확보해야 하나 외부사업자의 대외비 자료이기에 공개가 어렵다. 그렇기에 온실가스 감축량(q)에 영향을 미치는 변수인 생산단가(c_1)를 제외하고는 외부사업자별 파라미터의 평균값을 ‘기준시나리오(PoA-S)’로 값으로 설정하였다. 생산단가만을 다르게 설정한 이유는 일반적으로 쿡스토브 생산단가가 높을수록 고효율 쿡스토브 이기에 이에 따른 바이오매스 감축량($B_{savings}$) 및 온실가스 감축량(q)이 달라지기 때문이다.

외부사업자의 편익 관련 파라미터는 다음과 같이 설정하였다. 쿡스토브 공급량(N)은 18만 개를 적용하였다. 일반적으로 고효율 쿡스토브 보급사업의 1 CPA는 쿡스토브 18,000개를 기준으로 하고 있으며, 본 논문에서는 10 CPA를 보급한다는 전제하에 $N=180,000$ 개를 적용하였다. 그리고 지분율(δ)은 0.9를 적용하였다. 고효율 쿡스토브 보급사업을 UNFCCC에 등록 후 배출권이 발급될 경우 일반적으로 투자유치국(Host Party)에 일부를 공여한다. 하지만 동 값은 외부사업자와 투자유치국 정부와의 협상을 통해 결정되는 사안이며, PDD에 공개되지 않고 외부사업자로부터 확보해야 하는 대외비 자료이다. 일반적으로 외부사업자는 투자사업 검토 시 CER을 투자유치국에 10% 준다고 전제하여 분석하는 데 본 논문에서도 $\delta=0.9$ 를 적용하여 분석하였다.

외부사업자의 비용 관련 변수는 다음과 같이 설정하였다. 우선 생산단가(c_1)는 전술한 바와 같이 쿡스토브 효율에 직접적으로 영향을 주는 변수로 사업별로 상이한 값을 적용하였으며, PoA-S의 $c_1 = 12,650$ 을 가정하였다. 다음으로 생산한 쿡스토브는 사용자에게 운송하는 운송비(c_2)가 발생하며, 운송과정에서 파손, 훼손 및 분실 등이 발생하기에 외부사업자는 파손율(ϕ)을 고려하여 쿡스토브를 생산해야 한다. 그리고 운영비(c_3)는 쿡스토브 사업 추진 시 해당 국가 정부 및 지자체의 협조, 쿡스토브 보급 및 사용자 교육 등의 프로그램 운영비용이 발생한다. 이는 사업의 규모에 따라 달라질 수 있기에 고정비인 간접비(k)가 아닌, 변동비인 c_3 로 별도로 분리하였다. 그리고 쿡스토브 보급사업 시 매년 현지사무소 임대비용 및 인건비, 매년 발행하는 CER에 대한 인증, 검증 및 모니

터링 비용 등이 발생하였으며, 이를 간접비(k)로 정의하였다. 결론적으로 외부사업자의 비용과 관련된 파라미터 값으로 $c_1 = 12,650$ 원/개, $c_2 = 1,500$ 원/개, $c_3 = 2,000$ 원/개, $k = 3$ 억 원/년 및 $\phi = 0.01$ 을 가정하여 적용하였다. 마지막으로 외부사업자의 비가역적 초기투자비(I)는 4억 원, 사업기간(τ)은 28년을 가정하여 적용하였다. 사업기간을 28년으로 규정한 이유는 일반적으로 CDM에서 PoA의 최대 유효기간을 28년으로 규정하고 있기 때문이다(한국에너지공단, 2018).

배출권 가격 증가율 및 변동성에 따른 최적투자분기점은 <표 3>와 같다. <표 3>에 따르면, $\alpha = 0.0287$ 및 $\sigma = 0.1272$ 일 때 ‘기준시나리오(PoA-S)’의 최적투자분기점(p^*)은 29,054원/톤으로 나왔다. 이는 배출권 가격 불확실성하에서 배출권 가격이 29,054원/톤 이상이어야 경제성이 있다는 것을 의미한다. 2019년 마지막 거래일(12월 30일)의 KOC 증가가 39,500원/톤 및 KAU19 증가가 38,100원/톤임을 감안하였을 때 ‘고효율 콕스토브 보급사업’은 배출권 가격의 불확실성을 고려하더라도 즉각 투자해야 하는 사업임을 알 수 있었다. 불확실성을 고려하지 않을 때의 최적투자분기점(p_{npv}^*)은 p^* 와 비교해서 낮음을 알 수 있는데, 이는 p^* 는 p_{npv}^* 와 투자지연을 일으키는 옵션승수(option multiplier)의 곱이기 때문이다. 그리고 외부사업자의 사업 종류 및 불확실성 고려 여부에 상관없이 p^* 및 p_{npv}^* 는 현재의 배출권 가격(KOC 및 KAU19)보다 낮아 경제성이 있음으로 해석할 수 있다.

변동성이 $\sigma \in [0.08, 0.18]$ 일 경우 σ 변동에 따른 외부사업자의 사업별 p^* 의 변화를

<표 3> 국내 외부사업자의 사업별 투자임계값

구분	파라미터	PoA-1	PoA-2	PoA-3	PoA-4	PoA-S	단위
감축량	$B_{savings}$	2.719	1.684	1.556	1.603	1.976	톤biomass/년
	q	2.791	1.939	1.525	1.462	1.446	톤/개
임계값	p_{npv}^*	5,145	7,408	9,417	9,826	9,934	원/톤
	p^*	15,048	21,666	27,539	28,737	29,054	원/톤
	β	1.5196					-
	옵션승수	2.9246					-

주: 증가율(α)=0.0287, 변동성(σ)=0.1272, 할인율(ρ)=0.05.

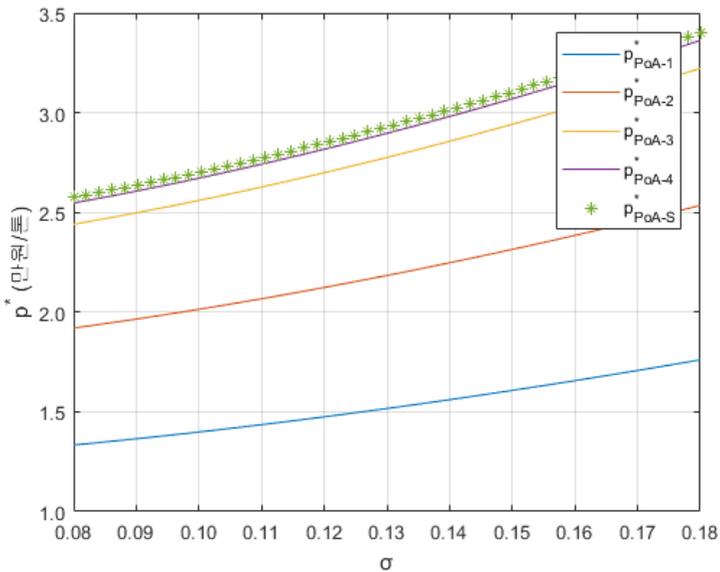
살펴보았다. <그림 2>과 같이 배출권 가격의 변동성이 커짐에 따라 사업별 p^* 는 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 $\sigma = 0.18$ 인 경우에도 p^* 는 2019년 12월말 배출권 현물 가격(p_{spot} , KOC 39,500원/톤 및 KAU19 38,100원/톤)보다 낮은 것을 알 수 있다. 특히나 PoA-1 및 PoA-2의 p^* 및 p_{npv}^* 가 낮게 도출되었는데, 이는 PoA-1의 $B_{savings}$ 및 q 가 높게 도출되었으며 PoA-2의 q 가 높게 도출되었기 때문이다(<표 2>).

그리고 <그림 2>에는 표시되어 있지 않지만, 기준시나리오(PoA-S)에서 최적투자분기점(p_{PoA-S}^*)이 배출권 현물가격과 동일해지려면 $\sigma = 0.23$ 이상으로 상승해야만 한다.

다음으로 <표 2>에서 정의한 파라미터를 바탕으로 민감도 분석을 시행하였다.

우선 고효율 콕스토브 보급사업의 중요한 파라미터인 f_{NRB} 의 변화에 따른 배출권 가격 임계값(p^*)의 민감도 분석을 시행하였다. 여기에서 f_{NRB} 는 ‘비재생 바이오매스(non-renewable biomass) 비율’로 콕스토브 보급사업 투자유치국(Host Party)에 따라 상이한 값을 가지고 있다(UNFCCC, 2019). 식(1)과 같이 f_{NRB} 값이 클수록 동일조건에서 확보할 수 있는 배출권의 규모가 커진다.

<그림 2> 변동성(σ)에 따른 외부사업자의 사업별 p^*

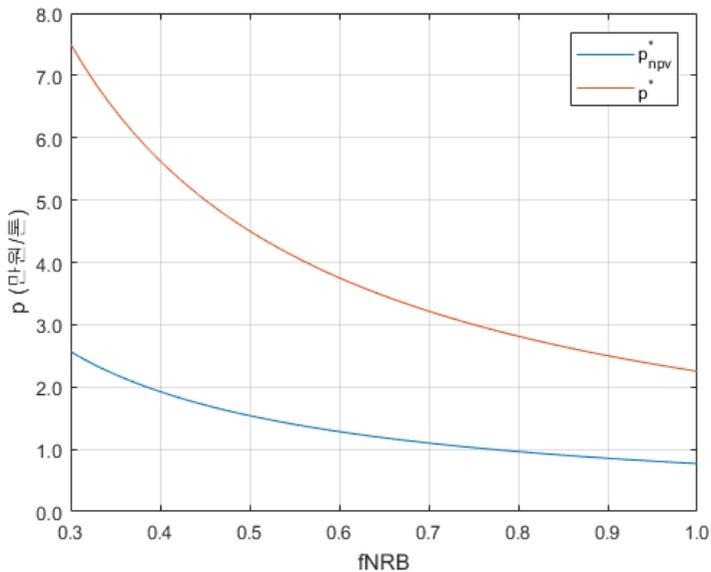


<표 2>에 제시된 4개의 PoA에서 보듯이 f_{NRB} 는 투자유치국에 따라 최소 0.300에서 0.966까지 3.22배의 차이를 보인다. 이는 다른 모든 변수들이 고정일 경우 외부사업자가 확보할 수 있는 배출권의 양이 최대 3.22배까지 달라질 수 있다는 것이고, 이에 따라 외부사업자 관점에서는 f_{NRB} 는 사업개발 시 중요하게 고려하는 요소일 수 밖에 없다.

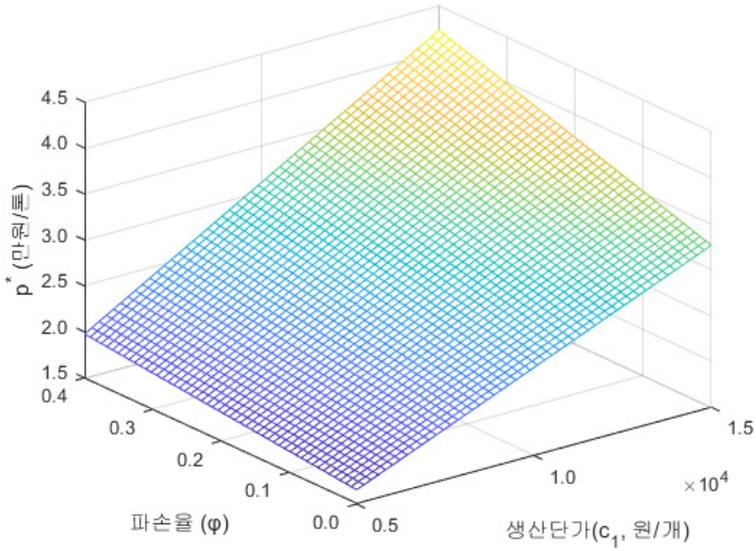
민감도 분석을 위한 f_{NRB} 값은 <표 2>의 최솟값인 0.3부터, 이론적 최댓값인 1까지의 범위($f_{NRB} \in [0.3, 1.0]$)를 설정하였다. 그 결과 f_{NRB} 증가에 따라 p^* 및 p_{npv}^* 는 낮아져 경제성을 쉽게 확보하는 것으로 나타났다. 그리고 불확실성하에서의 p^* 는 불확실성이 없는 상태에서의 p_{npv}^* 보다 높은 것으로 나타났으며, $f_{NRB} = 0.55$ 일 경우 p^* 는 배출권 현물가격(p_{spot})에 가까워져 경제성이 사라짐을 알 수 있다. 반면 불확실성을 고려하지 않는다면 $f_{NRB} \in [0.3, 1.0]$ 의 전 구간에서 $p_{npv}^* < p_{spot}$ 이 성립하여 경제성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다.

두 번째로 콕스토브 생산비용과 관련된 파라미터인 ‘파손율(ϕ)’ 및 ‘생산단가(c_1)’에 대한 p^* 의 민감도 분석을 시행하였다. <그림 4>와 같이 p^* 는 생산단가(c_1)의 변화에는

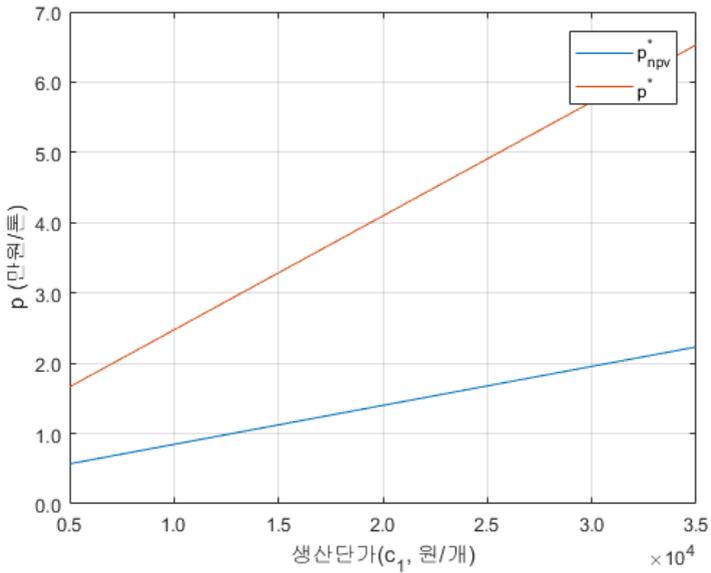
<그림 3> $f_{NRB}(f_{NRB} \in [0.3, 1.0])$ 변화에 따른 p^* 및 p_{npv}^*



〈그림 4〉 p 의 생산단가(c_1) 및 파손율(ϕ) 민감도 분석



〈그림 5〉 생산단가($c_1 \in [0.5 \times 10^4, 3.5 \times 10^4]$) 변화에 따른 p^* 및 p_{npv}^*



민감하게 반응하고 있으나, 파손율(ϕ)에는 상대적으로 덜 민감하게 반응하는 것을 알 수 있다. 그렇기에 외부사업자는 고효율 쿡스토브 보급사업 경제성을 쉽게 확보하기 위해서는 생산단가가 낮은 쿡스토브를 우선적으로 선정해야 할 것이다.

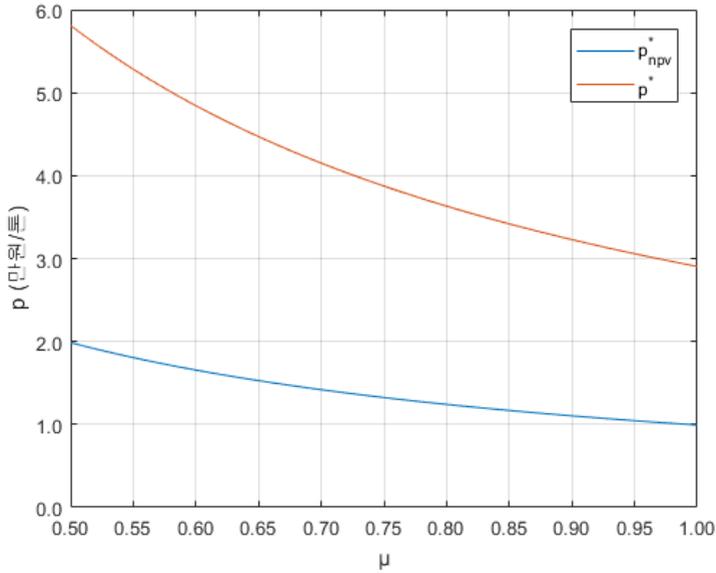
또한 <그림 5>와 같이 $c_1 \in [0.5 \times 10^4, 3.5 \times 10^4]$ 의 범위에서 c_1 증가에 따라 p^* 및 p_{npv}^* 는 높아지는 것으로 나타났다. 그리고 불확실성하에서의 p^* 는 불확실성이 없는 상태에서의 p_{npv}^* 보다 높은 것으로 나타났으며, c_1 이 18,000원/개 이상일 경우 p_{npv}^* 는 배출권 현물가격(p_{spot}^*)에 가까워져 경제성이 사라짐을 알 수 있다. 반면 불확실성을 고려하지 않는다면 $c_1 \in [0.5 \times 10^4, 3.5 \times 10^4]$ 의 전 구간에서 $p_{npv}^* < p_{spot}^*$ 이 성립하여 경제성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다.

세 번째로 ‘쿡스토브 교체 비율(μ)’에 대한 p^* 의 민감도 분석을 시행하였다. 일반적으로 고효율 쿡스토브 보급사업 대상 가구(household)는 기존 쿡스토브를 1개씩 운영 중이다. 그렇기에 고효율 쿡스토브 보급사업을 통해 대상 가구의 기존 쿡스토브를 제거하고, 이를 고효율 쿡스토브를 1:1로 대체하기에 $\mu = 1$ 의 값을 가진다. 그래서 일반적으로 고효율 쿡스토브 보급사업 PPD 작성시 $\mu = 1$ 을 가정한다.

하지만 고효율 쿡스토브 보급을 기(既) 시행한 가구에 대해 현장실사 및 모니터링 기간 방문할 경우에는 $\mu \neq 1$ 의 값을 갖지 않는다. 이는 ① 신규 쿡스토브의 분실 및 훼손 ② 신규 쿡스토브 판매 통한 현금화 ③ 기존 쿡스토브를 제거하지 않은 후 신규 쿡스토브 병행 사용 등에 따라 $\mu < 1$ 의 값을 갖는다.

<그림 6>과 같이 $\mu \in [0.5, 1.0]$ 의 범위에서 μ 값이 높아질수록 p^* 및 p_{npv}^* 는 낮아지는 것으로 나타났다. 그리고 불확실성하에서의 최적투자분기점(p^*)는 불확실성을 고려하지 않을 때의 최적투자분기점(p_{npv}^*)보다 높은 것으로 나타났다. 본 논문에서는 <표 2>와 같이 $\mu = 1.0$ 로 적용하였는데, 고효율 쿡스토브 보급사업은 $\mu = 1.0$ 일 때 배출권 가격 불확실성하에서도 충분히 경제성이 있는 것으로 나타났다. 그리고 $\mu = 0.7$ 인 경우에도 p^* 및 p_{npv}^* 모두 경제성이 있는 것으로 나타났다.

〈그림 6〉 쿽스토브 교체 비율($\mu \in [0.5, 1.0]$) 변화에 따른 p^* 및 p_{npv}^*

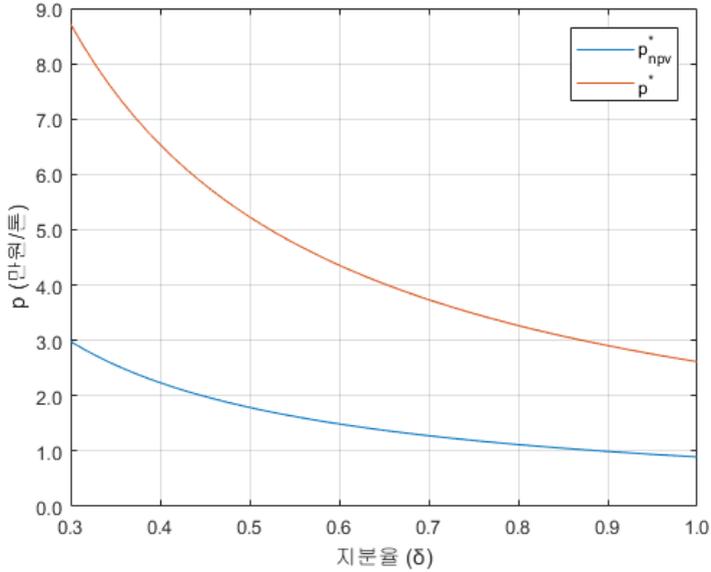


μ 와 생산단가(c_1)와 연계하여 살펴보면, c_1 높을수록 경제성이 떨어지는 것으로 나타났다. 반면 μ 가 낮아지면 경제성이 사라지는 데, 전술한 바와 같이 $\mu < 1$ 을 갖는 사유 중 하나가 바로 ‘신규 쿽스토브의 현금화’이다. 이는 c_1 이 높으면 신규 쿽스토브의 효율 (η_{new})이 높아져 배출권 확보에 유리할 수 있으나, 그만큼 개도국 주민들이 고효율 쿽스토브를 판매하여 현금화할 개연성이 존재하고 이에 따라 μ 도 낮아질 수 있다. 그렇기에 외부사업자 관점에서는 c_1 , η_{new} 및 μ 를 종합적으로 고려한 사업계획을 세워야 할 것이다.

네 번째로 지분율(δ)에 대한 p^* 의 민감도 분석을 시행하였다. 지분율이란 전술한 바와 같이 CDM 사업 추진을 통해 CER이 발급될 경우 일반적으로 투자유치국(Host Party)에 공여하는 물량을 차감하는 값이다.

지분율은 파리협정(Paris Agreement) 제6조의 시장메커니즘을 통한 감축결과의 이전 (ITMOs, Internationally Transferred Mitigation Outcomes)과 관련이 있다. CDM 사업은 투자자 혹은 외부사업자가 속해 있는 국가의 온실가스가 직접적으로 감축되는 아닌 투자유치국에 투자를 통해 투자유치국의 온실가스 감축실적을 CER의 형태로 이전하는 것이다.

<그림 7> 지분율($\delta \in [0.3, 1.0]$) 변화에 따른 p^* 및 p_{npv}^*



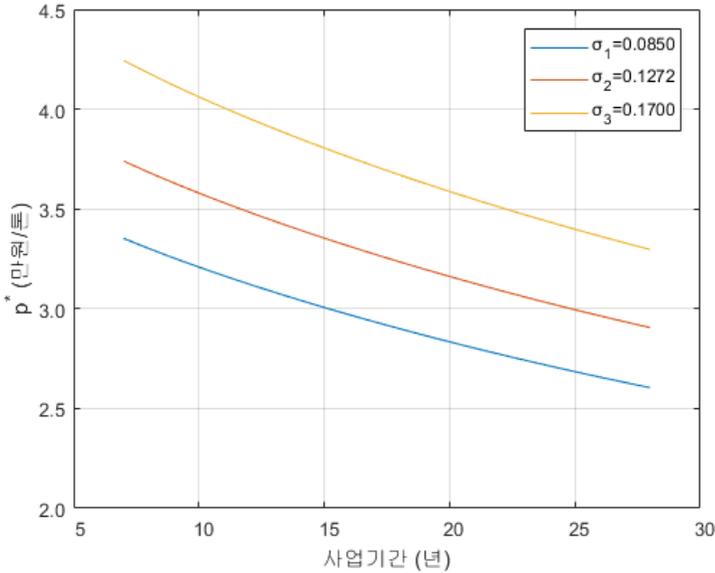
파리협정 제6조는 ‘국제탄소시장’ 규칙을 다루고 있으며, 투자유치국 및 투자자 혹은 외부사업자가 속해 있는 국가의 온실가스 감축실적의 이중계산(Double Counting) 문제, 투자 활성화를 통한 투자유치국의 온실가스 감축과 지속가능한 발전 촉진 등의 이슈를 다루고 있다(정서용, 2018). 하지만 UNFCCC COP25에서도 파리협정 제6조의 세부 내용에 대한 결정은 이루어지지 못했다¹²⁾.

투자유치국은 CDM을 통한 온실가스 감축실적이 과도하게 이전될 경우 투자유치국의 감축목표 달성을 위한 추가적 노력을 할 수 밖에 없으며, 그렇기에 CER의 거래금액의 일부를 개발도상국의 지원에 사용하는 방안을 제시하거나 지분율 조정을 통해 투자유치국의 감축실적으로 인정받으려 할 것이다. 그렇기에 지분율은 외부사업자가 CDM 사업추진시 고려해야 할 중요한 사안이다.

<그림 7>과 같이 $\delta \in [0.3, 1.0]$ 의 범위에서 δ 값이 높아질수록 p^* 및 p_{npv}^* 는 낮아지는 것으로 나타났다. 그리고 μ 의 결과와 마찬가지로 p^* 는 p_{npv}^* 보다 높은 것으로 나타났다. 본 논문에서는 $\delta = 0.9$ 로 적용하였는데, 고효율 쿡스토브 보급사업은 $\delta = 0.9$ 일 때 배출

12) 브릿지경제(2019.12.15.), “COP25, 탄소시장 지침 채택 불발.”

〈그림 8〉 p 의 사업기간(τ) 민감도 분석



권 가격의 불확실성하에서도 충분히 경제성이 있는 것으로 나타났으며, $\delta = 0.65$ 이하에서는 경제성이 사라짐을 알 수 있다.

마지막으로 고효율 쿡스토브 보급사업의 사업기간(τ)의 변화에 따른 최적투자분기점(p^*)의 민감도 분석을 시행하였다. 일반적으로 PoA의 유효기간은 28년이며, 28년 기간 동안 CPA를 지속적으로 등록할 수 있다. 그리고 등록된 CPA는 7년 단위로 2회 갱신할 수 있다(한국에너지공단, 2018). 하지만 전술한 파리협정 제6조 4항에서는 현행 CDM 체제의 지속가능메커니즘(Sustainable Development Mechanism, 이하 ‘SDM’) 체제로의 전환 여부 및 SDM에서 인정하는 CDM 사업 유형에 대한 결정은 아직 이루어지고 있지 않다. 그렇기에 외부사업자는 외부사업 투자 시 SDM 전환 가능한 사업 유형 및 투자유치국 경제발전 정도에 따라 사업기간도 고려해야 한다.

고효율 쿡스토브 보급사업의 경우 개발도상국의 주민의 삶의 질 향상을 위한 CDM 사업이기에 SDM으로의 전환이 될 개연성은 충분히 존재하나, 외부사업자 입장에서는 사업기간도 중요한 고려요소이다. 본 논문의 분석 대상인 고효율 쿡스토브 보급사업의 경우 사업기간(τ)을 7년 단위(7년, 14년, 21년 및 28년)로 설정할 수 있는데, p^* 의 τ 에 대한

민감도 분석을 위해 τ 를 연속된 값($\tau \in [7, 28]$)으로 가정하여 분석하였다.

그 결과 τ 값이 낮아질수록 p^* 는 높아지는 것으로 나타났으며, 그중에서 배출권 가격의 변동성(σ)이 클수록 p^* 가 높아져 배출권 가격의 불확실한 상황에서 투자를 지연시키는 것을 알 수 있다. 그리고 $p^* < p_{spot}$ 을 만족시키는 τ 을 변동성 크기에 따라 살펴보면, $\sigma_1 = 0.0850$ 일 경우는 $\tau \in [7, 28]$ 구간에서 $p^* < p_{spot}$ 로 나타났으며, $\sigma_2 = 0.1272$ 일 경우는 $\tau = 7$ 년 이상, 마지막으로 $\sigma_3 = 0.1700$ 일 경우는 $\tau = 13$ 년 이상이어야 경제성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다(<그림 8>).

IV. 결론 및 제언

2020년은 배출권거래제가 시작된 지 6년째이자, 2차 계획기간(2018~2020년)의 마지막 이행연도이자, 3차 계획기간(2021~2025년)의 할당이 이루어지는 해이다. 특히나 정부의 ‘온실가스 감축목표 달성을 위한 배출허용총량 설정 강화’(관계부처합동, 2019) 방침에 따라 3차 계획기간 할당대상업체에 공급되는 배출허용총량은 감소할 것이라 판단된다. 이에 시장의 이해관계자들은 배출권 가격의 지속 상승 및 가격 상승폭 확대에 따라 감축목표 달성과 배출권 확보를 위해 상대적으로 배출권 사업 개발 비용이 저렴하면서 많은 양의 배출권을 확보할 수 있는 ‘고효율 쿼스토프 보급사업’과 같은 외부사업을 적극 추진하고 있다.

본 논문은 외부감축사업에 투자하는 외부사업자의 ‘고효율 쿼스토프 보급사업’에 대한 투자의사결정 모형을 실물옵션 방법론을 이용하여 개발하였다. 선행연구와 동일하게 불확실한 대상을 외부감축사업으로 발행되는 배출권 가격(KOC)으로 설정하였다. 그리고 본 모형은 ‘고효율 쿼스토프 보급사업’의 사업 구조 및 특성을 감안하여 모형을 설계하였으며, 주요 파라미터를 활용하여 최적투자분기점을 도출 및 민감도 분석을 시행하였다.

실증분석 결과 배출권 가격(p)의 증가율(α)이 0.0287 및 변동성(σ)이 0.1272일 때, ‘기준시나리오(PoA-S)’의 최적투자분기점(p^*)은 29,054원/톤으로 나왔다. 이는 배출권 가격 불확실성하에서 배출권 가격이 29,054원/톤 이상이어야 투자 경제성이 있다는 것

을 의미한다. 2019년 마지막 거래일(12월 30일) 배출권 증가(KOC는 39,500원/톤, KAU19는 38,100원/톤)를 감안하였을 때 ‘고효율 쿡스토브 보급사업’은 배출권 가격의 불확실성을 고려하더라도 즉각 투자해야 하는 사업임을 알 수 있었다.

민감도 분석결과 p^* 는 $f_{NRB} \in [0.3, 1.0]$ 의 범위에서 f_{NRB} 값이 낮아질수록 p^* 및 p_{npv}^* 는 높아지는 것으로 나타났으며, $f_{NRB} = 0.55$ 일 경우 p^* 는 배출권 현물가격(p_{spot}^*)에 가까워져 경제성이 사라짐을 알 수 있다. 쿡스토브의 ‘파손율(ϕ)’ 및 ‘생산단가(c_1)’에 대한 p^* 의 민감도 분석결과 p^* 는 생산단가(c_1)의 변화에는 민감하게 반응하고 있으나, 파손율(ϕ)에는 상대적으로 덜 민감하게 반응하는 것을 알 수 있다. 그렇기에 외부사업자는 고효율 쿡스토브 보급사업의 경제성을 확보하기 위해서는 생산단가가 낮은 쿡스토브를 우선적으로 선정해야 할 것이다. 쿡스토브 교체 비율(μ) 및 지분율(δ)에 대한 민감도 분석 결과 μ 및 δ 값이 높아질수록 p^* 및 p_{npv}^* 는 낮아지는 것으로 나타났으며, 기준시나리오($\mu = 1, \delta = 0.9$)에서 배출권 가격의 불확실성에서도 고효율 쿡스토브 보급사업은 경제성이 있는 것으로 나타났다.

본 논문에서 분석한 바와 같이 고효율 쿡스토브 보급사업의 최적투자분기점(p^*)은 배출권 시장의 현물가격보다 저렴한 것으로 나타났으며, 고효율 쿡스토브 보급사업은 경제성이 쉽게 확보되는 사업임을 보였다. 하지만 해외 CDM 사업 추진 시 다음과 같은 사항을 고려하여 의사결정을 해야 한다.

첫째, 리스크 관리다. CDM 사업은 투자유치국의 국가리스크, 정책리스크, 시장(가격)리스크 및 환리스크 등 많은 리스크가 존재한다(오원석·안건형, 2009). 그중에서도 본 논문에서 살펴본 투자유치국별 f_{NRB} , 주민들의 생활습관에 따른 쿡스토브 교체 비율(μ), 투자유치국과의 지분율(δ) 협상, 파리협정과 연계한 사업기간(τ) 설정과 같은 리스크도 고려해야 한다. 그렇기에 사업에 대한 사전고려 시(pre-consideration) 단계부터 해외 CDM 사업에 대한 리스크를 고려한 의사결정이 필요하다. 만약 직접적으로 사업에 대한 발굴 및 추진에 대한 역량이 부족하다면, 컨설팅회사 및 금융기관 등 외부사업 개발자가 추진 중인 사업에 투자하여 리스크를 간접적으로 회피할 수 있을 것이다.

둘째, UNFCCC CDM 제도 변화이다. 현 시점의 CDM 체제는 SDM 체제로의 전환을 앞두고 있다. 그렇기에 CDM으로 추진되는 사업이 SDM 체제에서의 인정 여부는 아직

결정되지 않았다. ‘고효율 쿡스토브 보급사업’의 경우 개발도상국 주민의 삶의 질 향상에 기여하기에 SDM 체제에 머무를 수 있으나, 아직까지 SDM 체제의 구체적 규정이 설정되지 않았기에 사업기간(τ) 설정과 관련하여 UNFCCC 협상결과 등 국제 정책 동향을 예의주시할 필요가 있다.

셋째, 배출권 관리역량이다. 앞서 <표 3>에서는 PoA-S의 p^* 및 p_{npv}^* 는 현재의 배출권 가격(KOC 및 KAU19)보다 낮고, 온실가스 감축량(q)은 1.446톤/개임을 제시하였다. 이는 고효율 쿡스토브 보급사업은 경제성이 있는 사업이고, 투자규모가 10 CPA ($N=180,000$)일 경우 배출권(CER)은 23.4만 톤/년¹³⁾ 정도 발행된다. 하지만 국내 배출권거래제 제도상¹⁴⁾ 해외 CDM 외부사업으로 발급된 배출권은 할당대상업체가 제출해야 하는 배출권의 최대 5%만을 사용할 수 있다. 그렇기에 할당대상업체가 대규모 CER을 발급받았다 하더라도, 발급된 배출권 중 일부(5%)만 당해 이행연도에 직접적으로 활용할 수 있으며, 잔량은 다음 이행연도에 사용하거나 다른 할당대상업체의 KAU와 전환 후 사용해야 한다. 그렇기에 대량으로 발행된 CER 및 전환한 KOC에 대한 관리, KAU로의 배출권 스왑(swap) 등 배출권 관리역량의 마련도 필요하다.

넷째, 국내 정책 변화이다. ‘2030 온실가스 감축 로드맵’에서는 ‘국외감축’을 대한민국의 온실가스 감축수단으로 포함하고 있다(환경부 보도자료, 2018b)¹⁵⁾. 즉, ‘국외감축량을 최소화’하나 국내 감축수단으로 줄이기 어려운 경우 ‘국외감축 등’을 활용하여 감축목표를 달성하고자 한다. 아직 ‘국외감축 등’에 대한 규정은 없으나, 국외감축을 통한 ‘2030 온실가스 감축 로드맵’ 달성을 위해서는 정부의 재원뿐 아니라 민간의 투자도 필요할 수 밖에 없다. 그렇기에 민간의 투자를 활성화하기 위해서는 해외 외부사업 배출권의 사용한도(5%)에 대한 완화가 필수불가결하므로 투자규모(CPA)를 감안하여 지속적으로 정부정책을 모니터링하고, 한도완화와 관련된 의견개진도 필요할 것이다.

본 논문에서는 UNFCCC CDM에 제출된 대한민국 외부사업자의 PDD 파라미터 및

13) 23.4만 톤 = $q \times N \times \delta = 1.446\text{톤/개} \times 180,000\text{개} \times 0.9$.

14) 『온실가스 배출권의 할당 및 거래에 관한 법률 시행령』 제38조(상쇄) ④… 상쇄배출권의 제출한도는… 해당 할당대상업체가 환경부장관에게 제출하여야 하는 배출권의 100분의 10 이내의 범위에서 할당계획으로 정한다. 이 경우 외국에서 시행된 외부사업에서 발생한 온실가스 감축량을 전환한 상쇄배출권은 상쇄배출권 제출한도의 100분의 50을 넘을 수 없다.

15) 환경부 보도자료(2018.07.24.), “2030 온실가스 감축 로드맵 수정안 및 2018~2020년 배출권 할당계획 확정.”

이해관계자들을 통해 확보한 외부사업자 고유의 파라미터를 바탕으로 모형을 실증분석하였다. 하지만 CDM에 제출된 외부사업자의 PDD 파라미터와 사업 등록 후 모니터링 및 검증 후의 파라미터는 다를 수 밖에 없기에, 외부사업자는 모니터링 이후 관측된 파라미터 값을 바탕으로 사업에 대한 점검도 필요할 것이다. 또한 비용 관련 파라미터는 생산단가(c_1)를 제외하고는 외부사업자의 대외비 자료이기에 기준시나리오(PoA-S)를 설정하여 최적투자분기점(p^*) 및 p_{npv}^* 를 도출하였다. 이 결과는 외부사업자가 자신의 파라미터를 식 (13) 및 식 (15)에 대입한 결과와 다를 수 밖에 없다. 만약 외부사업자는 사업단계별로 자신의 고유 파라미터를 식 (13) 및 식 (15)에 대입한다면, 사업단계별 경제성 평가를 통해 투자 의사결정에 활용할 수 있을 판단된다.

[References]

- 관계부처합동, 제2차 기후변화대응 기본계획, 2019.
- 박호정, “배출권 가격 불확실성을 고려한 기업의 환경투자 실물옵션 연구”, 『경제학연구』, 제53권 제4호, 2005, pp. 173~199.
- 박호정, “분리불가 이윤함수를 가진 발전사의 온실가스 감축투자 옵션 연구: 몬테카를로 최소자승법”, 『자원·환경경제연구』, 제24권 제4호, 2015, pp. 607~627.
- 박호정, “실물옵션 모형을 이용한 RPS 와 배출권거래제 연계의 신재생에너지 투자효과”, 『자원·환경경제연구』, 제21권 제2호, 2012, pp. 301~319.
- 박호정, 『실물옵션과 투자분석』, 2018.
- 박호정·김윤경, “정부 승인 차액계약 제도의 발전소 투자 옵션에 대한 영향 연구”, 『여성경제연구』, 제14권 제2호, 2017, pp. 97~113.
- 산업통상자원부, (산업통상자원부) 외부사업 타당성 평가 및 감축량 인중에 관한 지침, 2018.
- 오원석·안건형, “청정개발체제(CDM) 리스크에 따른 탄소배출권 구매계약(ERPA)의 법적 쟁점에 관한 연구”, 『무역학회지』, 제34권 제4호, 2009, pp. 99~105.
- 이충국, “국내 배출권거래제 상쇄제도가 갖는 의미”, 『배출권거래제&탄소시장 정보지』, 제2019-6호, 2019, pp. 9~10.
- 장희선·박호정, “CER 가격 불확실성하의 산림의 최적관리 모형”, 『에너지기후변화학회지』,

- 제4권 제2호, 2009, pp. 99~105.
- 정서용, “파리 기후변화협정 상 국제시장메커니즘에 대한 검토”, 『서울국제법연구』, 제25권 제2호, 2018, pp. 121~140.
- 정진영·남영식·전대욱, “실물옵션을 활용한 전시관 건립사업의 경제성 분석 연구”, 『문화경제연구』, 제22권 제2호, 2019, pp. 3~27.
- 한국에너지공단, CDM 사업 지침서, 2018.
- 환경부 보도자료, 배출권거래제 1기, 배출권 부족 없이 안정적으로 운영, 2018a.
- 환경부 보도자료, 2030 온실가스 감축 로드맵 수정안 및 2018~2020년 배출권 할당계획 확정, 2018b.
- 홍원경·박호정, “CER 가격 불확실성을 고려한 A/R CDM 사업의 실물옵션 분석: 포스코 A/R CDM 사업 분석”, 『자원·환경경제연구』, 제20권 제3호, 2011, pp. 459~487.
- Aung, T. W., G. Jain, K. Sethuraman, J. Baumgartner, C. Reynolds, A. P. Grieshop, J. D. Marshall, and M. Brauer, “Health and Climate-relevant Pollutant Concentrations from a Carbon-finance Approved Cookstove Intervention in Rural India,” *Environmental Science & Technology*, Vol. 50, No. 13, 2016, pp. 7228~7238.
- Dixit, A. K. and R. S. Pindyck, Investment under Uncertainty, Princeton University Press, 1994.
- Dresen, E., B. D. DeVries, M. Herold, L. Verchot, and R. Müller, “Fuelwood Savings and Carbon Emission Reductions by the Use of Improved Cooking Stoves in an Afromontane Forest, Ethiopia,” *Land*, Vol. 3, No. 3, 2014, pp. 1137~1157.
- Johnson, M., R. Edwards, and O. Masera, “Improved Stove Programs Need Robust Methods to Estimate Carbon Offsets,” *Climatic Change*, Vol. 102, No. 3-4, 2010, pp. 641~649.
- Miah, M. D., H. A. Rashid, and M. Y. Shin, “Wood Fuel Use in the Traditional Cooking Stoves in the Rural Floodplain Areas of Bangladesh: A Socio-environmental Perspective,” *Biomass and Bioenergy*, Vol. 33, No. 1, 2009, pp. 70~78.
- Minang, P. A., M. K. McCall, and H. Th. A. Bressers, “Community Capacity for Implementing Clean Development Mechanism Projects within Community Forests in Cameroon,” *Environmental management*, Vol. 39, No. 5, 2007, pp. 615~630.
- Mobarak, A. M., P. Dwivedi, R. Bailis, L. Hildemann, and G. Miller, “Low Demand for Nontraditional Cookstove Technologies,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 109, No. 27, 2012, pp. 10815~10820.

- Panwar, N. L., A. K. Kurchania, and N. S. Rathore, "Mitigation of Greenhouse Gases by Adoption of Improved Biomass Cookstoves," *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, Vol. 14, No. 6, 2009, pp. 569~578.
- Park, H. J., "Real Option Analysis for Effects of Emission Permit Banking on Investment under Abatement Cost Uncertainty," *Economic Modelling*, Vol. 29, No. 4, 2012, pp. 1314~1321.
- Park, H. J. and H. S. Jang, "Valuing Clean Development with Emission Credit Price Uncertainty: A Real Option Analysis for A/R CDM Project in Indonesia," *Proceedings of Real Options 14th Annual International Conference*, 2010.
- UNFCCC, Small-scale Methodology : Energy Efficiency Measures in Thermal Applications of Non-renewable Biomass - Version 10.0, UNFCCC, 2019.
- Yoo, S. R., Y. S. Cho, and H. J. Park, "An Optimal Management Strategy of Carbon Forestry with a Stochastic Price," *Sustainability*, Vol. 10, No. 3290, 2018, pp. 1~13.
- Zhao, J. "Irreversible Abatement Investment under Cost Uncertainties: Tradable Emission Permits and Emissions Charges," *Journal of Public Economics*, Vol. 87, No. 12, 2003, pp. 2765~2789.