

투입 및 산출 요소 확률과정을 고려한 연료전지 발전시설 최적 투자관리 연구*

남 영 식** · 강 희 찬***

논 문 초 록 지구온난화로 인한 기후변화 문제의 해결을 위해 국제 사회의 온실가스 감축노력이 지속되고 있는 가운데 국내에서도 대규모 발전사업자를 대상으로 신재생에너지 의무할당제를 실시하여, 발전 부문의 주요 신재생에너지 기술의 보급 및 확산을 위한 노력이 진행되고 있다. 이처럼 신재생에너지 발전사업에 대한 투자가 요구되는 상황 속에서, 본 연구에서는 최근 분산형 전원으로 널리 활용되고 있는 연료전지 발전시설에 대한 투자 경제성을 분석하였다. 이를 위해 실물옵션을 활용한 분석을 진행하였으며, 분석 시 전력판매가격 및 액화천연가스가격의 확률과정을 고려하였다. 본 분석에서는 포스코에너지의 연료전지 발전시설 자료를 활용한 실증분석을 진행하였고, 할인율 및 신재생에너지공급인증서 가중치에 대한 민감도 분석을 통해 액화천연가스가격에 대한 전력판매가격의 비율 관점에서 최적 투자 임계값을 제시하였다. 분석결과, 현재 연료전지 발전사업 환경에 내포된 불확실성을 고려할 경우, 제한적인 조건 하에서 해당 사업에 대한 투자 경제성 확보가 가능한 것으로 나타났다.

핵심 주제어: 연료전지 발전시설, 신·재생에너지 의무할당제, 실물옵션, 경제성
경제학문헌목록 주제분류: N7, Q1, Q3

투고 일자: 2017. 4. 14. 심사 및 수정 일자: 2017. 5. 22. 게재 확정 일자: 2017. 6. 19.

* 본 논문은 2015년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임을 밝힌다 (NRF-2015015420). 본 논문에 대해 세심한 코멘트를 주신 익명의 심사위원 두분께 감사의 말씀을 전한다. 또한, 본 논문의 분석모형에 대한 아낌없는 조언을 주신 고려대학교 박호정 교수께도 감사의 말씀을 전한다.

** 제1저자, 고려대학교 식품자원경제학과 박사과정, KU·KIST 그린스쿨 대학원, e-mail: toju111@korea.ac.kr

*** 교신저자, 인천대학교 경제학과 교수, e-mail: henrykang@inu.ac.kr

I. 서론

최근 빈번하게 발생하고 있는 기후변화 현상은 식량위기, 질병확산 등의 재난을 초래하며 글로벌 사회가 관리해야 할 위험요소로 간주되고 있다. 지구온난화는 기후변화 현상의 주요인으로 여겨지고 있으며, 산업혁명 이후 무분별하게 배출되어 온 온실가스가 지구온난화의 원인으로 지목되고 있다. 이와 같은 상황 속에서, 각 국가들은 지구온난화 방지를 위해 CO_2 로 대표되는 온실가스를 감축하기 위한 자구적인 노력을 지속적으로 기울이고 있다.

한국의 경우, 온실가스 배출이 가장 많은 발전부문의 온실가스 감축을 위해 “신재생에너지 의무할당제(Renewable Portfolio Standard, RPS)”를 시행하고 있다. 이는 일정 수준 이상의 전력을 생산하는 발전사업자들이 2012년부터 의무적으로 전체 발전량의 일부를 신재생에너지를 활용하여 생산하도록 하는 제도이다. RPS는 신재생에너지 발전의 의무화를 통해서 온실가스 감축뿐만 아니라, 발전부문의 신재생에너지 확대를 위한 목적을 가지고 있다. RPS 대상이 되는 발전사업자들은 신재생에너지를 통해 생산된 발전량에 대해서 “신재생에너지 공급인증서(Renewable Energy Certificate, REC)”를 발행할 수 있으며, REC는 관련 시장 내에서 형성된 가격을 기반으로 거래가 가능한 구조를 가지고 있다. 신재생에너지를 활용한 발전의 경우 온실가스 감축에는 유용한 반면, 전통적인 화석연료를 활용한 발전보다 발전단가가 높기 때문에 경제성 확보가 힘들다는 단점이 있는데, 이러한 단점을 REC의 판매를 통해 일부 보완하고 있는 상황이다.

신재생에너지를 이용한 발전은 태양광발전, 풍력발전, 연료전지발전 등과 같이 다양한 형태로 이루어지고 있다. 태양광발전이나 풍력발전의 경우 발전원료인 태양에너지와 풍력에너지가 자연으로부터 무상으로 제공된다는 장점이 있는 반면, 발전시설이 위치할 입지적인 조건 및 발전에 있어서 가장 중요한 지속성 유지 문제가 단점으로 지적되고 있다. 반면 연료전지발전의 경우 연료로 액화천연가스(Liquefied Natural Gas, LNG)가 활용되기 때문에 연료비가 존재하는 단점이 있지만, LNG를 연료로 하는 기존 화력발전보다 CO_2 배출이 적으며 전력과 열을 동시에 생산하는 열병합 발전의 특성을 가지므로 발전효율성이 높은 장점을 가진다. 또한, 발전시설의 입지조건 확보가 비교적 용이하여 분산형 전원시스템에 적합한 조건을 갖추고 있어, 신재생에너지의 현실적인 대안으로서 논의되고 있다. 그러므로 본 연구에서

는 연료전지 발전시설에 대한 투자 경제성 분석을 통해, 발전사업자 입장에서의 최적 투자시기에 대해 살펴보고자 한다.

신재생에너지 발전에 대한 투자 경제성은 다수의 기존 문헌들을 통해 분석되어 왔으나, 본 연구에서는 실물옵션을 적용하여 국내 연료전지 발전시설의 투자 경제성을 분석하고자 하므로, 최근 국내 발전용 연료전지에 관한 연구 및 신재생에너지 관련 사업 투자 경제성에 관한 실물옵션 연구에 국한하여 기존 문헌을 검토하고자 한다.

먼저 국내 발전용 연료전지에 대한 연구로는 김승구 외(2007), 노철우·김민수(2008), 정회인 외(2009), 그리고 삼정 KPMG(2013)의 연구가 있다. 김승구 외(2007)에서는 발전용 연료전지의 시장현황 및 상업화 전략에 대해서 소개하고 있으며, 노철우·김민수(2008)와 정회인 외(2009)에서는 발전용 연료전지 시설에 대한 투자 경제성을 투자회수기간법 및 순현재가치법(Net Present Valuation, NPV)을 활용하여 분석하였다. 삼정 KPMG(2013)의 경우 연료전지 보급 활성화 방안을 제시하기 위해, 분석대상을 건물용과 발전용으로 구분하여 연료전지 도입에 따른 경제성을 NPV로 분석하였다.

다음으로 신재생에너지 사업에 대한 투자 경제성을 실물옵션 관점에서 접근한 연구는 크게 국내사업 분석과 해외사업 분석으로 구분할 수 있는데, 먼저 국내사업 관련 연구로는 Lee et al. (2011), Jang et al. (2012), 그리고 김경택 외(2012)의 연구가 있다. 이 연구들은 한국의 신재생에너지 투자환경에 내재된 불확실성을 고려하여, 해당 사업에 대한 가치평가를 실물옵션으로 분석하였다.

해외사업에 대한 관련 연구로는 Lee and Shih(2010), Reuter et al. (2012), Liu(2014) 그리고 Abadie and Chamorro(2014)가 있다. Lee and Shih(2010)는 대만의 풍력발전사업을, Reuter et al. (2012)는 노르웨이의 풍력발전사업을, Liu(2014)는 중국의 탄소포집저장(Carbon Capture Storage, CCS) 투자사업을, 그리고 Abadie and Chamorro(2014)는 영국의 풍력발전사업을 대상으로 실물옵션을 적용하여 각 사업들의 투자 경제성을 평가하였다. 이 연구들은 분석대상 및 분석모형의 세부적 구성에는 차이가 있으나, 주어진 정책 하에서의 신재생에너지 투자사업에 대한 경제성 분석을 이산적 확률과정을 고려한 실물옵션으로 진행하였다는 측면에서 공통점을 가진다.

앞서 언급된 내용과 유사한 주제를 다루고 있지만, 연속적 확률과정을 고려한 실

물옵선으로 신재생에너지 관련 투자사업을 분석한 연구로는 박호정·장철호(2007), 박호정(2012), Boomsma et al. (2012), Maxwell and Davison(2014), 그리고 Walsh et al. (2014)의 연구가 있다. 박호정·장철호(2007)의 경우, 전력가격의 확률과정을 고려하여 국내 소형 열병합발전소에 대한 투자 경제성을 평가하였다. 박호정(2012)는 배출권거래제(Emission Trading Scheme, ETS)와 RPS가 기업의 환경투자 관련 의사결정에 미치는 영향을 분석하였다. Boomsma et al. (2012)는 발전차액지원제도(Feed In Tariff, FIT)와 RPS 하에서의 노르웨이의 풍력발전사업 투자에 대한 적정성을 검토하였으며, Maxwell and Davison(2014)은 정부정책 지원 여부에 따른 바이오에탄올 사업 투자의 경제성을 분석하였다. Walsh et al. (2014)는 탄소비용이 확정적인 경우와 확률적 과정을 따르는 경우를 구분하여, CCS사업의 투자 경제성을 비교분석 하였다.

발전용 연료전지 및 신재생에너지 관련 사업의 투자 경제성 분석에 관한 기존 문헌들을 살펴본 결과, 국내 및 해외의 다양한 신재생에너지 투자사업들에 대한 경제성 분석이 진행되었지만, 발전용 연료전지 투자에 대한 경제성 분석은 상대적으로 부족함을 확인할 수 있었다. 노철우·김민수(2008), 정희인 외(2009), 그리고 삼정 KPMG(2013)의 경우, 국내 발전용 연료전지 투자사업에 대한 경제성 분석을 진행하였지만, 모두 확정적 투자 환경 내에서의 NPV 분석에 국한하여 진행된 한계점이 존재한다. 발전용 연료전지 투자사업은 타 신재생에너지 투자사업과 마찬가지로 투자 및 수익창출 환경 내에 존재하는 확률적 요소들에 따라 해당 투자의 경제성이 달라질 수 있으므로, 본 연구에서는 해당 요소들의 반영을 통해 기존 연구의 한계를 보완할 수 있도록 실물옵선 모형을 구축하여 국내 발전용 연료전지 투자사업의 경제성을 분석하였다. 특히 본 연구에서는 투자 이후의 수입을 결정하는 전력판매 가격¹⁾과 비용을 결정하는 LNG가격의 확률과정을 해당 요소들의 비율 형태로 고려하여, 투자 환경 내에 존재하는 불확실성을 반영한 분석이 가능하도록 하였다. 박호정(2012)에서도 확률과정을 따르는 복수의 요소들을 비율 형태로 고려한 분석이 이루어졌으나, 본 연구는 연료전지 발전사업의 투자 경제성 분석을 다루고 있다는 점과 실증분석이 수행되었다는 측면에서 박호정(2012)과는 차별성을 가진다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 다음 장에서 분석모형에 대해 제시한 뒤 분석자

1) 본 연구에서 전력판매가격은 신재생에너지 중, 연료전지 발전에 대한 정산단가를 의미하는 자료로 포스코에너지에서 확보한 월별 정산단가(원/kWh) 자료를 기본으로 활용하였다.

료에 대해 설명하고, 도출된 분석결과를 바탕으로 결론 및 시사점을 제시하고자 한다.

II. 분석모형

1. 실물옵션 모형²⁾

본 연구에서는 실물옵션을 활용하여 연료전지 발전시설 투자사업에 대한 최적 투자시기를 분석하고자 한다. 투자사업에 대한 경제성 분석은 다양한 방법으로 진행될 수 있으며, 일반적으로 가장 널리 활용되는 방법으로는 NPV가 있다. NPV는 투자사업으로 인해 발생 가능한 할인된 현금흐름(Discounted Cash Flow, DCF)을 계산하여 해당 사업의 경제성을 평가하는 방법이다. NPV를 통한 경제성 분석은 분석의 단순성 및 명료성 측면에서 장점을 가지지만, 반대로 투자환경 내에 존재하는 불확실성을 반영할 수 없다는 단점이 존재한다. 실물옵션은 이와 같은 NPV의 단점을 보완할 수 있는 가치평가 방법으로, 비가역적인 투자와 이에 따른 현금흐름의 불확실성이 존재하는 경우에 적용할 수 있다. 이 방법은 NPV에 비해 상대적으로 계산과정이 복잡하지만, 투자환경에 내재된 불확실성을 반영하여 최적 투자의사결정을 가능하게 하는 장점을 가진다. 또한 실물옵션은 옵션가치로 표현되는 투자에 대한 기다림의 가치를 반영하므로, 투자 의사결정에 있어 NPV에 비해 상대적으로 보수적인 결론을 도출하는 경향을 가진다.

본 연구에서는 투자 이후의 현금흐름에 내재된 불확실성을 반영하기 위해, 발전사업자 입장에서의 수입과 비용을 결정하는 전력판매가격과 LNG가격의 연속적 확률과정을 고려하여 최적 투자시기를 분석하였다. 일반적으로 연속적 확률과정이 반영된 실물옵션 분석은 분석해(analytical solution)의 도출을 고려하여 단일 요소에 대한 확률과정만을 반영하는 경우가 많다. 복수 요소에 대한 확률과정의 반영은 구축된 목적식의 현실 적합성을 향상시킬 수 있으나, 수치해석을 통해 도출되는 최적해가 초기 경로값에 민감하게 반응하는 한계가 존재하기 때문이다.

본 연구에서는 복수요소에 대한 확률과정을 고려하는 동시에 분석해의 도출이 가

2) 실물옵션 모형에서 기술된 내용은 박호정(2017)을 참고하여 정리하였다.

능하도록 하기 위해 각 요소의 비율에 대한 확률과정을 고려하여 분석을 진행하였다.³⁾

2. 복수 요소 확률과정을 고려한 실물옵션 모형

본 연구에서는 전력판매가격과 LNG가격이 기하학적 브라운 운동(geometric Brownian motion, gBm)의 확률과정을 따를 때, 발전사업자의 수익을 극대화 할 수 있는 목적식을 구축하였으며, 이는 아래의 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\max E \left[\int_0^T [(p_e(t)Q_e + p_r Q_e + p_h Q_h) - (p_g(t)Q_g + C)] e^{-rt} dt \right]. \quad (1)$$

식 (1)의 목적식은 연료전지 발전시설의 유한한 가동기간 T 를 고려하여 구축되었으며, E 는 확률과정에 대한 기대연산자(expectation)이다. 식 (1)의 목적식은 가동기간 동안의 총수익(총수입-총비용)을 나타낸다. 목적식을 구성하는 요소들 중 발전사업자의 수입 관련 요소들을 살펴보면, $p_e(t)$ 는 전력판매가격, p_r 은 REC 가격, p_h 는 열판매가격을, Q_e 는 연료전지 발전시설에서 생산하는 연간 발전량, Q_h 는 연료전지 발전시설에서 전기를 생산하는 과정에서 얻을 수 있는 연간 열 생산량을 의미한다. 발전시설 운영과정에서 발생하는 비용 관련 요소들을 살펴보면, $p_g(t)$ 는 연료로 사용되는 LNG가격을, C 는 운영과정에서의 연료비를 제외한 모든 제반 비용을 의미하며, 식 (1)의 마지막에 나와 있는 r 은 할인율로 포스코에너지의 가중평균자본비용(Weighted Average Cost of Capital, WACC)을 참고하여 4.34%로 설정하였다.⁴⁾ 이때, $p_e(t)$ 와 $p_g(t)$ 의 경우 gBm의 확률과정을 따르는데, 이는 아

3) 앞서 설명한 바와 같이 복수의 확률과정을 실물옵션 모형에 반영할 경우 목적식의 현실 적합성은 향상될 수 있으나, 모형의 복잡성이 증가하여 수치해석으로 해를 도출해야 하므로, 복수 요소들의 확률과정을 반영하면서도 분석해 도출이 가능하도록 하기 위해, 이들 요소들의 비율에 대한 확률과정을 고려하여 분석을 진행하였다.

4) 본 연구에서는 실증분석을 위해 포스코에너지의 자료를 활용하므로, 할인율로 포스코에너지의 2016년 가중평균자본비용(Weighted Average Cost of Capital, WACC)에 해당되는 4.34%를 제시하였으며, 본 연구에서는 이를 기준 할인율로 선정하였다. 포스코에너지의 WACC자료는 NICE평가정보의 데이터베이스인 KISVALUE (www.kisvalue.com)에서 확보

래와 같이 표현할 수 있으며, $p_e(t)$ 와 $p_g(t)$ 는 각각 gBm의 확률과정을 따르지만 동시에 상관계수 ρ 에 의해 연관성을 가진다.⁵⁾

$$dp_e(t) = \mu_e p_e(t)dt + \sigma_e p_e(t)dz_e(t). \quad (2)$$

$$dp_g(t) = \mu_g p_g(t)dt + \sigma_g p_g(t)dz_g(t). \quad (3)$$

$$E[dz_e(t)dz_g(t)] = \rho dt. \quad (4)$$

식 (2)와 (3)에서의 μ_e , μ_g , 그리고 σ_e , σ_g 는 $p_e(t)$ 및 $p_g(t)$ 의 기대증가율 및 순간변동률을 의미하며, $z_e(t)$ 와 $z_g(t)$ 는 각각의 위너과정 (Wiener process) 을 의미한다.⁶⁾

식 (1)부터 식 (4)까지는 $p_e(t)$ 와 $p_g(t)$ 를 시간 t 의 함수로 표기하였으나, 각 변수의 최적 해 도출에 있어서의 시간 독립적인(time autonomous) 특성 및 표기의 단순화를 고려하여, 이후 진행되는 표기에서는 변수 내의 시간 표기 t 를 생략하도록 한다. 또한, 이후에 전개되는 목적식 변환 과정 및 분석결과 해석의 용이성을 위해, 식 (1)에서 제시된 모든 에너지 가격 및 수량 변수의 단위는 석유환산톤(tonne of oil equivalent, toe) 단위가 적용된 “원/toe”와 “toe”로 변환하였다. 이와 같은 사항들을 고려할 경우, 식 (1)은 다음의 식 (5)와 같은 형태로 변형될 수 있다.

$$\max E \left[\int_0^T [(\tilde{p}_e Q_e) - (\tilde{p}_g Q_g)] e^{-rt} dt \right]. \quad (5)$$

$$\tilde{p}_e = (p_e + p_r + hp_h). \quad (6)$$

$$\tilde{p}_g = (p_g + p_c). \quad (7)$$

식 (5)는 발전사업자 입장에서의 편익 및 비용을 각각 단일항으로 구성하기 위해 식 (1)을 변형시킨 것이며, \tilde{p}_e 와 \tilde{p}_g 역시, gBm의 확률과정을 따른다.⁷⁾ 이때, 식

하였다.

- 5) $p_e(t)$ 와 $p_g(t)$ 외의 다른 변수들도 시간 t 의 함수로 표시될 수 있지만 본 연구에서는 나머지 사항들을 확정적 평균값으로 적용하였기 때문에 시간 t 의 함수로 표시하지 않았다.
- 6) 위너과정은 연속적 확률과정이며, 위너증분에 대한 평균 및 분산은 $E(dz(t)) = 0$, $Var(dz(t)) = dt$ 이다.

(6)의 h 는 연간 열생산량(toe)을 연간 발전량(toe)의 공통항으로 변환하는 과정에서 도출되는 변환비율이며, 식 (7)의 p_c 는 연료전지 발전시설 운영 시 발생하는 모든 운영비용 중 연료비를 제외한 비용을 의미하는 C (원)를 가스사용량(Nm^3)으로 나눈 단위 비용으로 해석될 수 있다. 이때, C 는 주기적으로 시행되는 스택교체 비용까지 포함하고 있으며, 연간 평균값을 적용하였다.

다음으로 모형의 단순화를 통한 분석해 도출을 위해 식 (5)를 식 (8)과 같이 변환시켜 나타낼 수 있다.⁸⁾

$$\max E \left[\int_0^T [(\tilde{p}_f Q_e) - Q_g] e^{-rt} dt \right]. \quad (8)$$

$$\tilde{p}_f = \frac{\tilde{p}_e}{\tilde{p}_g}. \quad (9)$$

식 (8)은 \tilde{p}_f 의 확률과정을 따르며, \tilde{p}_f 는 \tilde{p}_g 에 대한 \tilde{p}_e 의 비율로 구성되어 있으므로, \tilde{p}_f 의 확률과정은 \tilde{p}_e 및 \tilde{p}_g 의 각 확률과정에 영향을 받음을 알 수 있다. 이를 고려하여 \tilde{p}_f 의 확률과정은 다음의 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} d\tilde{p}_f &= \left(\frac{1}{\tilde{p}_g} \right) d\tilde{p}_e - \left(\frac{\tilde{p}_e}{\tilde{p}_g^2} \right) d\tilde{p}_g - \left(\frac{1}{\tilde{p}_g} \right) d\tilde{p}_e d\tilde{p}_g + \left(\frac{\tilde{p}_e}{\tilde{p}_g^3} \right) (d\tilde{p}_g)^2 \\ &= \left(\frac{\tilde{p}_e}{\tilde{p}_g} \right) \left[(\tilde{\mu}_e - \tilde{\mu}_g - \rho \tilde{\sigma}_e \tilde{\sigma}_g + \tilde{\sigma}_g^2) dt + \tilde{\sigma}_e d\tilde{z}_e - \tilde{\sigma}_g d\tilde{z}_g \right] \\ &= \alpha \tilde{p}_f dt + \tilde{\sigma}_e \tilde{p}_f d\tilde{z}_e - \tilde{\sigma}_g \tilde{p}_f d\tilde{z}_g. \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)에서 최종 정리된 식의 첫 번째 항에 기술된 α 는 \tilde{p}_f 의 기대증가율에 해

7) \tilde{p}_e 와 \tilde{p}_g 에서 p_e 와 p_g 가 gBm의 확률과정을 따르고 나머지 항들은 확정적 값을 가지므로, \tilde{p}_e 와 \tilde{p}_g 역시 gBm의 확률과정을 따른다. 이후 관련 파라미터 기호는 식 (2) 및 (3)에서 제시된 기호 위에 상첨자 “~”를 추가하여 표기하도록 한다.

8) 발전연료 단위 비용과 발전량 단위 판매가격 사이에 연관성이 존재하므로, 식 (8)로의 변형이 가능하다.

당되며, 식 (10)의 전개 과정을 통해 α 는 $\tilde{\mu}_e - \tilde{\mu}_g - \rho\tilde{\sigma}_e\tilde{\sigma}_g + \tilde{\sigma}_g^2$ 임을 확인할 수 있다.

연료전지 발전시설에 대한 투자 이전의 옵션가치를 $F(\tilde{p}_f)$ 라 할 때, $F(\tilde{p}_f)$ 는 이토정리(Ito's lemma)에 의해 다음의 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} dF &= F_{\tilde{p}_f} d\tilde{p}_f + \frac{1}{2} F_{\tilde{p}_f \tilde{p}_f} (d\tilde{p}_f)^2 \\ &= F_{\tilde{p}_f} \tilde{p}_f (\alpha dt + \tilde{\sigma}_e d\tilde{z}_e - \tilde{\sigma}_g d\tilde{z}_g) + \frac{1}{2} F_{\tilde{p}_f \tilde{p}_f} (\tilde{p}_f)^2 (\tilde{\sigma}_e^2 - 2\rho\tilde{\sigma}_e\tilde{\sigma}_g + \tilde{\sigma}_g^2) dt. \end{aligned} \quad (11)$$

식 (11)의 식 전개를 위해서 $dt^2 \rightarrow 0$, $dt d\tilde{z}_i \rightarrow 0$, 그리고 $d\tilde{z}_i^2 \rightarrow dt$ 의 성질이 적용되었다. 식 (11)을 해밀토니안 자코비 벨만 방정식(Hamiltonian Jacobi Bellman equation, HJB)에 적용할 경우, 다음의 식 (12)와 같이 정리하여 나타낼 수 있다.⁹⁾

$$\alpha(\tilde{p}_f) F_{\tilde{p}_f} + \frac{1}{2} (\tilde{p}_f)^2 F_{\tilde{p}_f \tilde{p}_f} (\tilde{\sigma}_e^2 - 2\rho\tilde{\sigma}_e\tilde{\sigma}_g + \tilde{\sigma}_g^2) - rF = 0. \quad (12)$$

옵션가치 $F(\tilde{p}_f)$ 는 $A(\tilde{p}_f)^\beta$ 로 나타낼 수 있으며 $A(\tilde{p}_f)^\beta$ 를 식 (12)에 대입하여 정리하면, $\frac{M}{2}\beta^2 - \left(\frac{M}{2} - \alpha\right)\beta - r = 0$ 의 식을 도출할 수 있다. 이때, $M = \tilde{\sigma}_e^2 - 2\rho\tilde{\sigma}_e\tilde{\sigma}_g + \tilde{\sigma}_g^2$ 을 의미하며, 식의 간소화를 위해 활용되었다. 옵션가치의 승수에 해당하는 β 는 특성근(characteristic root)라 불리는데, 앞서 기술된 β 에 관한 2차 방정식을 통해 다음의 식 (13)과 같은 양의 β 값이 도출된다.¹⁰⁾

$$\beta = \left(\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{M}\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{M}\right)^2 + \frac{2r}{M}}. \quad (13)$$

9) 세부 과정은 Dixit and Pyndick(1994)를 참고할 수 있다.

10) $F(\tilde{p}_f)$ 가 $\lim_{\tilde{p}_f \rightarrow 0} F(\tilde{p}_f) = 0$ 을 만족하기 위해서는 $\beta < 0$ 인 경우의 A 는 0이 되므로 양의 특성근만 고려한다.

다음으로 연료전지 발전시설에 대한 투자 이후의 사업가치를 $V(\tilde{p}_f)$ 라 할 경우, 이는 다음의 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} V(\tilde{p}_f) &= E\left[\int_0^T (\tilde{p}_f Q_e) e^{-rt} dt\right] - \int_0^T Q_g e^{-rt} dt \\ &= \int_0^T (\tilde{p}_f Q_e) e^{\alpha t} e^{-rt} dt - \int_0^T Q_g e^{-rt} dt \\ &= \frac{\tilde{p}_f Q_e}{r - \alpha} [1 - e^{(\alpha - r)T}] - \frac{Q_g}{r} [1 - e^{(\alpha - r)T}]. \end{aligned} \quad (14)^{11)}$$

연료전지 발전시설 투자 이후의 사업가치와 투자 이전의 옵션가치의 비교를 통해서 확률과정을 따르는 \tilde{p}_f 의 최적 해를 도출할 수 있는데, 이때의 최적 해는 투자의 사업가치와 옵션가치 및 이들의 한계값이 일치하는 조건에서 도출되는 최적 투자 임계값을 의미한다. 이 값은 비용편의 일치조건(value matching condition)과 한계비용 한계편의 일치조건(smooth pasting condition)을 통해서 도출되며, 이는 식 (15) 및 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{비용편의 일치조건 : } F(\tilde{p}_f) = V(\tilde{p}_f) - I. \quad (15)$$

$$\text{한계비용 한계편의 일치조건 : } F(\tilde{p}_f)_{\tilde{p}_f} = V(\tilde{p}_f)_{\tilde{p}_f}. \quad (16)$$

식 (15)에서 I 는 연료전지 발전시설의 건설에 소요되는 비용의 변환값에 해당된다. 본 연구에서는 연료전지 발전시설 건설 이후, 발생 가능한 가치를 식 (8)과 같이 변형된 형태로 나타내고 있기 때문에, 관련 설비 건설을 위해 소요되는 총 금액 역시 같은 맥락에서 변형된 값을 적용하였다.¹²⁾

식 (15)와 (16)을 통해, \tilde{p}_f 의 최적 투자 임계값은 식 (17)과 같이 도출된다.

11) 식 (14)에서 확률과정의 기댓값이 적용된 이후의 \tilde{p}_f 는 투자 시행 이후의 \tilde{p}_f 초기값을 의미한다.

12) 식 (15)에서 제시된 I 에는 투자 시행에 소요되는 총 비용에 \tilde{p}_g 의 초기값을 나눈 변환값이 적용되었다.

$$\tilde{p}_f^* = \left(\frac{\beta}{\beta-1} \right) \left(\frac{r-\alpha}{Q_e(1-e^{(\alpha-r)T})} \right) \left[I + \frac{Q_g}{r}(1-e^{(-r)T}) \right]. \quad (17)$$

식 (17)에서 도출된 \tilde{p}_f 의 최적 투자 임계값은 연료전지 발전시설에 대한 투자에 있어서 \tilde{p}_f 의 확률과정으로부터 유발되는 투자에 대한 불확실성을 고려하였을 때, 투자 경제성 확보가 가능한 기준 시점으로 해석될 수 있다.

Ⅲ. 분석자료

1. 자료 특성

본 연구에서는 발전용 연료전지 시설에 대한 투자 경제성을 평가하기 위해 포스코에너지의 발전용 연료전지 시설에 대한 자료를 활용하였다. 포스코에너지는 국내 발전용 연료전지 시장에서 최대 점유율을 차지하고 있는 발전용 연료전지 분야의 대표 기업으로 포스코에너지의 발전용 연료전지 투자자료의 활용은 국내 연료전지 발전시설 투자 경제성 분석에 있어서 대표성을 가진다 할 수 있다. 해당 연료전지 발전시설의 특성은 아래 <Table 1>과 같다.

<Table 1> Features of fuel cell power generator

	Feature
Capacity	2,500 (kW)
Operation rate	92 (%)
Stack replacement period	5 (years)
Durability life	20 (years)

Source: Internal data of POSCO ENERGY.

본 연구에서는 분석을 위해 포스코에너지 발전시설의 연간 발전량, 연간 LNG 소비량, 연료비를 제외한 발전시설 연간 운영비용에 대한 값을 운영기간 동안의 연간 평균값으로 적용하였다. 발전량은 19,141 (MWh), LNG소비량은 4,083,938 (Nm^3), 그리고 연료비 제외 운영비용은 790(백만원)의 값을 적용하였다.

또한 포스코에너지의 연료전지 발전시설 관련 자료와 더불어, 전력판매가격,

LNG가격, REC가격 등도 활용하였다. 특히, 발전사업자 관점에서의 수입과 비용을 결정하는 전력판매가격 p_e 와 LNG가격 p_g 가 gBm의 확률과정을 따르는 것으로 가정하였는데, 이는 각 시계열 자료들이 비정상성을 가짐을 의미한다.

그러므로 해당 자료들의 비정상성을 검정하기 위해, 2011년 1월부터 2016년 12월까지의 각 월별 자료에 대한 ADF (Augmented Dickey Fuller) 단위근 검정을 실시하였다.¹³⁾ 그 결과 전력판매가격 및 LNG가격 모두 10% 유의수준에서 단위근을 가진다는 귀무가설을 기각하지 못하는 것으로 나타났으며, 이를 통해 전력판매가격 p_e 및 LNG가격 p_g 가 gBm의 확률과정을 따름을 확인할 수 있다.¹⁴⁾ 본 연구에서는 분석모형에서 설명한 바와 같이 p_e 및 p_g 를 기반으로 하는 \tilde{p}_e 및 \tilde{p}_g 의 확률과정에 영향을 받은 \tilde{p}_f 가 gBm의 확률과정을 따를 때, \tilde{p}_f 의 최적 투자 임계값을 도출하였다. p_e 및 p_g 의 ADF 단위근 검정 결과는 다음의 <Table 2>와 같다.

<Table 2> Unit root test on electricity and LNG price

	T-statistics		P-value
	ADF		
Electricity price		-2.033407	0.5729
Critical value	1%	-4.094550	
	5%	-3.475305	
	10%	-3.165046	
LNG price	ADF	-2.324165	0.4154
Critical value	1%	-4.096614	
	5%	-3.476275	
	10%	-3.165610	

분석에 활용된 주요 가격변수로는 전력판매가격, LNG가격, 그리고 REC가격이 있으며, 이 변수들은 모두 포스코에너지로부터 확보한 자료를 활용하였다. 이때 전

13) 본 연구에서 적용한 전력판매가격의 경우, 2011년 1월부터 2015년 12월까지는 포스코에너지에서 확보한 자료를 활용하였으며, 2016년 1월부터 12월까지의 자료는 “전력통계시스템 (Electric Power Statistics Information System)”에 제시된 연간 평균 계통한계가격 자료에 2015년 RPS 이행비용 정산금(16.0원/kWh)을 더하여 구성하였다. 포스코에너지에서 확보한 전력판매가격 자료가 RPS 이행 이후 시기에는 계통한계가격에 RPS 이행비용 정산금이 더해진 값으로 구성되어 있으므로, 일관성을 유지하면서 최근 시기까지의 반영을 위해 이와 같이 해당 자료를 구성하였다.

14) ADF 단위근 검정은 E-views 8.0으로 진행하였으며, <Table 2>는 상수항과 트렌드항을 모두 포함한 경우의 단위근 검정 결과이다.

력판매가격은 발전용 연료전지를 통해 생산된 전력의 판매가격을, REC가격은 전력거래소에서 제공하는 값을, LNG가격은 서울도시가스의 열병합 1 기준¹⁵⁾의 가격을 의미한다. 이 외에 열판매가격 역시 포스코에너지에서 적용하는 40,000(원/Gcal)의 값을 반영하였다.

2. 주요 자료 기초 통계량

전력판매가격, LNG가격, 그리고 REC가격의 기초 통계량은 다음 <Table 3>과 같이 나타낼 수 있다. 해당 값들은 2011년 1월부터 2016년 12월까지의 월단위 자료에서 확보된 값이며, 전력판매가격은 “원/kWh”, LNG가격은 “원/ Nm^3 ”, 그리고 REC가격은 “원/REC”로 제시하였다. 분석모형에서 설명한 바와 같이, 본 연구에서는 목적식 변환 및 분석결과 해석의 용이성을 위해 모든 가격 및 에너지 단위를 “toe” 단위로 변환시켜 적용하였으나, 기초 통계량에 대한 정보전달 용이성을 위해 일반적으로 활용되는 단위로 나타내었다.¹⁶⁾

<Table 3> Descriptive statistics(01/2011 - 12/2016)

	Electricity price (Won/kWh)	LNG price (Won/ Nm^3)	REC price ¹⁷⁾ (Won/REC)
Average	133.79	776.98	108,665.99
Median	137.81	811.44	95,898.81
Standard deviation	29.09	129.41	43,743.27
Skewness	-0.11	-0.72	1.20
Kurtosis	-0.82	-0.44	1.48

Source: Internal data of POSCO ENERGY.

15) 서울도시가스 열병합 1 기준 가격은 <http://www.seoulgas.co.kr/> 에서 확인할 수 있다.

16) 이때, 단위 변환은 한국가스공사에서 제시하고 있는 단위 변환 기준을 적용하였다. 에너지 및 가격단위의 toe 변환을 위해, $1toe=10^7kcal$ 로 국제에너지기구(International Energy Association, IEA)에서 제시된 값을 기준으로 하였으며, kWh는 발전기준($0.211*10^{-3}toe$), Nm^3 는 천연가스 기준($1.0251*10^{-3}toe$), 열생산량은 toe 정의를 기준으로 단위 변환을 실시하여, 통일된 toe 단위로 분석을 진행하였다.

17) REC가격은 “REC환산량=발전량(kWh)*가중치/1000”의 REC 환산식을 바탕으로 “원/REC”에서 “원/kWh”로 변환 후, “원/toe”로 변환 가능하다. 또한 REC가격 자료는 2012년부터 구축되었기 때문에, REC가격의 기초 통계량은 2012년부터 2016년까지의 자료에서 도출되었다.

주요 가격 변수에 대한 기초 통계량 중 우선 평균 및 표준편차를 먼저 살펴보면, 전력판매가격의 경우 133.79(원/kWh) 및 29.09(원/kWh), LNG가격의 경우 776.98(원/ Nm^3) 및 129.41(원/ Nm^3), 그리고 REC가격의 경우 108,665.99(원/REC) 및 43,743.27(원/REC)인 것으로 나타났다. 왜도 및 첨도의 경우 전력판매 가격 및 LNG가격은 음의 값을 가지는 것으로, REC가격은 양의 값을 가지는 것으로 나타나, 주요 가격 변수들의 편향성 정도 및 형태에 차이가 있음을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 분석의 다양성을 위해, LNG가격으로 기존에 적용한 서울도시가스 열병합 1 기준 외에, 한국가스공사의 발전용 천연가스 요금¹⁸⁾을 LNG가격으로 적용한 추가 분석 역시 진행하였다. 일반적으로 연료전지 발전시설 운영 시 발전원가에서 연료비가 차지하는 비중이 70% 이상의 높은 값을 가지는 것으로 알려져 있어, 기존에 적용되는 연료비보다 낮은 수준의 연료비를 적용한 경우의 최적 투자시기에 대한 차이를 확인하기 위해 추가적인 분석을 진행하였다.¹⁹⁾ 추가 적용한 LNG가격 역시 비정상성 검정을 위해 ADF 단위근 검정을 실시한 결과 t 통계 값이 -2.44 (10% 통계적 유의 수준 기준 값: -3.17)로 나타나, 비정상성을 가짐을 확인할 수 있었다. 또한, 추가 적용 LNG가격의 평균값은 704.25(원/ Nm^3)로 나타나, 기존에 적용한 LNG가격의 평균값인 776.98(원/ Nm^3)보다 낮음을 확인할 수 있다.

IV. 분석결과

본 연구에서는 실물옵션을 활용하여 연료전지 발전시설 투자 시의 최적 투자시기를 분석하였다. 이를 위해 포스코에너지의 연료전지 발전시설 관련 자료를 활용하

18) 한국가스공사의 발전용 천연가스 요금은 <http://www.kogas.or.kr>에서 확인할 수 있다.

19) 본 연구에서 적용된 LNG가격의 차별화는 변동성이 아닌 수준 값 차이로 야기된 차별화로 할 수 있다. 수준 값 차이에 기인한 차별화 가격을 적용한 것도 의미가 있으나, 확률과정을 고려한 실물옵션 분석에서는 기존 LNG가격과 변동성 차이를 가지는 가격을 반영하는 경우 역시 적절한 비교 대상이 될 수 있다. 예를 들어 현재 국내 천연가스 수입계약의 주된 방식인 원유 연결 가격결정 방식을 따르는 경우와, 헨리 허브(Henry Hub)와 같은 독립적인 천연가스 시장가격에 연결한 가격결정 방식을 따르는 경우를 비교하는 것이 여기에 해당된다. 이와 같이 변동성 차별화를 따르는 가격 적용에 대한 비교 분석은 후속 연구에서 고려하고자 한다.

였고, 본 연구의 분석에 활용된 모든 에너지 가격 및 에너지는 앞서 설명한 바와 같이 “toe” 기준으로 환산하여, “원/toe” 및 “toe”로 나타내었다. 이와 더불어, 기존에 적용한 값보다 낮은 수준의 LNG가격을 적용한 경우의 최적 투자시기 역시 분석하기 위해 추가적인 LNG가격을 적용한 분석도 진행하였으며,²⁰⁾ 분석결과는 기준 LNG가격 적용 결과를 먼저 제시한 뒤, 추가 LNG가격 적용 결과를 제시하고자 한다.

1. 기준 LNG가격(서울도시가스) 적용 시 분석결과

먼저 기준 LNG가격을 적용한 분석결과 도출과정을 살펴보면 다음과 같다. 결과 도출에 필요한 Q_e , Q_h , Q_g , 그리고 C 는 포스코에너지의 2,500kW 규모 연료전지 발전설비 자료를 참고하여 운영기간 내에서의 연간 평균값을 적용하였다. p_e , p_g , 그리고 p_r 은 최근 연도 값을 반영하기 위해, 2016년의 월간 평균값들을 적용하였고, p_h 의 경우, 포스코에너지에서 통상적으로 판매하는 열 판매가격으로 적용하였다.

본 분석에서 확률과정 파라미터로 제시된 $\tilde{\mu}_e$, $\tilde{\mu}_g$, $\tilde{\sigma}_e$, 그리고 $\tilde{\sigma}_g$ 는 2011년 1월부터 2016년 12월까지의 월단위 자료에 해당되는 \tilde{p}_e 및 \tilde{p}_g 에서 도출하였다. 해당 파라미터들을 도출하기 위해서 Tsay (2001)에서 제시된 방식을 적용하였다. Tsay (2001)에 따르면, $y_{x,t} = \ln(\tilde{p}_{x,t}/\tilde{p}_{x,t-1})$ 일 때 $E_{y_{x,t}}$ 를 $y_{x,t}$ 의 평균이라고 하고, $S_{y_{x,t}}$ 를 $y_{x,t}$ 의 표준편차로 간주할 경우, $\tilde{\mu}_x$ 및 $\tilde{\sigma}_x$ 는 다음의 식 (18) 및 식 (19)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\tilde{\mu}_x = E_{y_{x,t}} + S_{y_{x,t}}^2/2. \quad (18)$$

$$\tilde{\sigma}_x = S_{y_{x,t}}. \quad (19)$$

이때, 하첨자 x 는 전력판매가격 및 LNG가격을 의미하는 e 및 g 로 표시될 수 있다. ρ 는 \tilde{p}_e 와 \tilde{p}_g 의 상관성의 정도를 의미하는 상관계수이다. 본 연구에서 최종적

20) 추가적인 LNG가격에 대한 구체적인 내용은 “III. 분석자료”에 기술하였다.

인 투자 임계값으로 도출되는 \tilde{p}_f 의 기대증가율 및 순간변동률은 식 (12)에 의해서 α 와 \sqrt{M} 으로 나타낼 수 있음을 확인할 수 있다. 할인율이 4.34%일 경우, \tilde{p}_f 의 기대증가율 및 순간변동률은 0.0158 및 0.0932인 것으로 나타났고, 이 값들은 \tilde{p}_f 의 최적 투자 임계값 도출 시 적용되었다. 본 분석에 활용된 주요 변수 및 파라미터에 관한 설명 및 수치는 <Table 4>에 정리하여 제시하였다.

지금부터 분석결과 내용의 기술 시에는 앞서 분석모형에서 최적 해로 표기한 내용들을 투자 임계값으로 표기하고자 한다. 이는 분석모형에서 도출된 최적 해가 바로 최적 투자시기를 의미하는 투자 임계값으로 활용될 수 있기 때문이다.

분석결과 연료전지 발전시설의 투자에 대한 경제성을 확보할 수 있는 \tilde{p}_f 의 투자 임계값은 2.30으로 도출되었다. 이는 \tilde{p}_g (비용 관련 통합가격)에 대한 \tilde{p}_e (수입 관련 통합가격)의 비율이 2.30 이상이 될 때, 연료전지 발전시설 투자에 대한 경제성이 확보된다는 의미로 해석될 수 있다. 도출된 \tilde{p}_f 의 투자 임계값과 비교 분석하기 위해, 확보된 분석자료를 활용하여 2016년을 기준으로 하는 최근 시기의 실제 \tilde{p}_g 에 대한 \tilde{p}_e 의 비율을 계산한 결과, 2.48의 값을 가지는 것으로 나타났다.²¹⁾ 이 결과를 통해, 현실화된 \tilde{p}_g 에 대한 \tilde{p}_e 의 비율이 도출된 투자 임계값보다 큰 값을 가짐을 확인할 수 있다. 이는 전력판매가격과 LNG가격의 불확실성을 고려하여 연료전지 발전시설 투자사업에 대한 경제성을 판단하였을 때, 현재 상황에서 경제성 확보가 가능함을 의미한다.

앞서 제시된 분석결과를 할인율을 포스코에너지의 2016년 WACC에 해당되는 4.34%로 적용하고, REC 환산 시 가중치를 현재 발전용 연료전지에서 적용하고 있는 2.0으로 활용한 경우에 도출된 값이다. 본 연구에서는 현재 연료전지 발전시설 운영환경을 고려한 투자 경제성뿐만 아니라, 향후 관련 정책이 변화하였을 때의 투자 경제성에 대해서도 살펴보고자 한다. 연료전지 발전시설에 관한 지원정책 중 대표적인 것이 REC 환산 시 적용되는 가중치이므로, 기존 분석결과에 더하여 가중치 변화에 따른 연료전지 발전시설에 대한 투자 경제성을 분석하는 것은 의미있는 작업이라 할 수 있다. REC 환산 관련 가중치 외에도 할인율 역시 발전시설 투자 경제

21) 기술된 최근 시기의 실제 값은 각 대상의 2016년 월별 평균값을 의미하며, 이후에 기술되는 최근 시기 값 역시 동일하게 해석한다.

〈Table 4〉 Summary of primary variables and parameters²²⁾

	Explanation
p_e	Average electricity price in 2016 (92.75 Won/kWh), “Won/kWh”→“Won/toe”
p_g	Average LNG price in 2016: 557.15 Won/ Nm^3 in scenario 1 and 459.30 Won/ Nm^3 in scenario 2, “Won/ Nm^3 ”→“Won/toe”
p_r	Average REC price in 2016 (134,990 Won/REC), “Won/REC”→“Won/toe”
p_h	Heat price of POSCO ENERGY (40,000 Won/Gcal), “Won/Gcal”→“Won/toe”
p_c	C : Total yearly average cost except for the fuel cost of POSCO ENERGY $p_c = C$ /the average amount of LNG (Nm^3) → $p_c = 193.441$ Won/ Nm^3 “Won/ Nm^3 ”→“Won/toe”
\tilde{p}_e	$\tilde{p}_e = p_e + p_r + hp_h$ → Average in 2016: $\tilde{p}_e = 1.815 \times 10^6$ Won/toe
\tilde{p}_g	$\tilde{p}_g = p_g + p_c$ → Average in 2016 (Scenario 1) : 0.732×10^6 Won/toe → Average in 2016 (Scenario 2) : 0.637×10^6 Won/toe
\tilde{p}_f	$\tilde{p}_f = \tilde{p}_e / \tilde{p}_g$
$\tilde{\mu}_x$	$\tilde{\mu}_e = 0.0026$, $\tilde{\mu}_g$ (Scenario 1) = -0.0158, $\tilde{\mu}_g$ (Scenario 2) = -0.0128, → Period: 01/2011 - 12/2016
$\tilde{\sigma}_x$	$\tilde{\sigma}_e = 0.1674$, $\tilde{\sigma}_g$ (Scenario 1) = 0.1184, $\tilde{\sigma}_g$ (Scenario 2) = 0.1605, → Period: 01/2011 - 12/2016
ρ	Correlation between \tilde{p}_e and \tilde{p}_g (Scenario 1) : 0.8413 Correlation between \tilde{p}_e and \tilde{p}_g (Scenario 2) : 0.8709
α, \sqrt{M}	Scenario 1: $\alpha=0.0158$, $\sqrt{M}=0.0932$ (Discount rate: 4.34%, Weight of REC: 2.0) Scenario 2: $\alpha=0.0178$, $\sqrt{M}=0.0836$ (Discount rate: 4.34%, Weight of REC: 2.0)
Q_x	Yearly average quantity on x (for durability life) → Subscript, x means e , g and h → $Q_e = 19,141$ (MWh), $Q_g = 4,083,938$ (Nm^3), $Q_h = 9,694$ (Gcal) → Each measured value is transformed into “toe”

22) 앞서 설명한 대로 각 변수에 대한 단위는 실제 분석 시에는 “toe”로 통일하여 변환하였으나, 이해의 용이성을 위해 일반적으로 많이 사용하는 단위로 기입하였다. 단 \tilde{p}_e 및 \tilde{p}_g 는 변환된 값이므로 “toe”로 표현하였다. “toe” 변환 기준은 각주 16)을 참고하였다. 또한, 〈Table 4〉에는 기준 LNG가격 및 추가 LNG가격 적용 시의 값들을 같이 기술하였다.

성에 영향을 미칠 수 있는 요소이므로, 할인율의 변화 역시 고려하여 추가 분석을 진행하고자 한다.

REC 가중치와 할인율의 변화에 따른 투자 경제성 분석을 위해 민감도 분석을 적용하였으며, 기존 결과와 비교가 가능하도록 \tilde{p}_f 의 투자 임계값을 도출하는 방식으로 진행하였다. 민감도 분석을 위한 할인율의 범위는 기준 할인율로 적용한 4.34%를 기준으로 $\pm 2\%$ 범위 내의 변화를 고려하여, 2.34%에서 6.34%까지로 설정하였다.

REC 가중치의 민감도 분석 범위는 현재 연료전지 발전시설에 적용되고 있는 2.0을 기준으로 ± 0.2 범위 내의 변화를 고려하여, 1.8에서 2.2까지로 설정하였다.

\tilde{p}_f 의 투자 임계값 도출에 있어서 REC 가중치 및 할인율에 따른 민감도 분석결과는 아래의 〈Table 5〉와 같이 나타낼 수 있다.

〈Table 5〉 Threshold value of \tilde{p}_f according to r (discount rate) and w (weight of REC)
(Scenario 1)

	w=1.8	w=1.9	w=2.0	w=2.1	w=2.2
r=0.0234	4.5629	4.4709	4.4042	4.3586	4.3306
r=0.0334	2.8251	2.7788	2.7411	2.7108	2.6867
r=0.0434	2.3643	2.3304	2.3018	2.2776	2.2575
r=0.0534	2.1654	2.1373	2.1132	2.0924	2.0746
r=0.0634	2.0651	2.0404	2.0190	2.0003	1.9842

〈Table 5〉의 분석결과 중 할인율의 변화에 따른 투자 임계값의 변화를 살펴보면, 할인율이 커질수록 투자 경제성 확보가 가능한 \tilde{p}_f 의 투자 임계값이 감소하는 모습을 확인할 수 있다. 식 (17)에서 제시된 바와 같이 할인율은 \tilde{p}_f 의 투자 임계값 결정에 양의 영향 또는 음의 영향을 동시에 미치고 있지만, 최종적으로는 음의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이에 대한 원인을 확인하기 위해 \tilde{p}_f 의 투자 임계값을 의미하는 식 (17)을 조금 더 자세히 살펴보고자 한다. 이 임계값은 $\left(\frac{\beta}{\beta-1}\right)$ 와 나머지 항의 곱으로 이루어져 있는데, 이때 $\left(\frac{\beta}{\beta-1}\right)$ 는 투자 환경에 내포된 불확실성에 의해 야기되는 투자 지연효과(hysteresis effect)를 의미한다. 할인율이 증가할

경우 $\left(\frac{\beta}{\beta-1}\right)$ 는 감소하는 반면 투자 임계값을 구성하는 나머지 항의 값은 증가하는 모습을 보이는데, 이때 $\left(\frac{\beta}{\beta-1}\right)$ 의 감소효과가 나머지 항의 증가효과보다 더 크게 나타나므로 최종적으로는 \tilde{p}_f 의 투자 임계값이 감소함을 확인할 수 있다. 이 결과는 할인율이 증가할수록, 연료전지 발전시설 투자사업에 대한 경제성 확보가 가능한 최적 투자시기가 앞당겨지는 것으로 해석될 수 있다.

다음으로 <Table 5>에서 REC 가중치 변화에 따른 투자 임계값의 변화를 살펴보면, REC 가중치가 증가할수록 \tilde{p}_f 의 투자 임계값이 감소하는 모습을 확인할 수 있다. 앞서 기술된 내용에 의하면 REC 가중치가 증가하는 경우 발전량에 상응하는 REC 단위 가격을 의미하는 p_r 의 증가로 \tilde{p}_e 가 증가하여, \tilde{p}_e 및 \tilde{p}_f 와 관련된 파라미터 값 역시 변화됨을 알 수 있다.²³⁾ 이는 다시 말해, REC 가중치 변화가 \sqrt{M} 과 α 를 변화시켜, \tilde{p}_f 의 투자 임계값의 구성요소인 $\left(\frac{\beta}{\beta-1}\right)$ 와 \tilde{p}_f 임계값 중 $\left(\frac{\beta}{\beta-1}\right)$ 를 제외한 나머지 항들의 값 역시 변화시킴을 의미한다.²⁴⁾ REC 가중치가 1.8에서 2.2까지 증가할 경우를 살펴보면, $\left(\frac{\beta}{\beta-1}\right)$ 는 지속적으로 감소하는 모습을 보인다.

반면, 투자 임계값 중 $\left(\frac{\beta}{\beta-1}\right)$ 를 제외한 나머지 항들의 값은 REC가 1.8에서 1.9로 변화할 때에는 증가하지만, 1.9에서 2.2까지 변화하는 경우에는 감소하는 모습을 보인다. 투자 임계값에서 $\left(\frac{\beta}{\beta-1}\right)$ 를 제외한 나머지 항들이 REC 가중치 변화에 따라 비선형적인 변화를 보이는 것은 REC 가중치 변화에 따라서 α 가 비선형적으로 변화하기 때문이다. 이때 REC 가중치 변화에 따른 α 의 비선형적 변화는 REC 가중치가 증가할수록 통합 전력판매가격의 기대증가율 $\tilde{\mu}_e$ 의 감소 규모보다 순간변동률 $\tilde{\sigma}_e$ 감소 규모가 더 커짐으로 인해 발생됨을 α 의 식 구성을 통해 확인할 수 있다. 이는 다시 말해 연료전지 발전사업의 투자 환경에 내포된 확률적 요소들의 복합적 작용으로 인해, 할인율 및 REC 가중치와 같은 주요 파라미터의 변화가 해당 사업의 투자 임계값 결정에 비선형적인 영향을 미칠 수 있음을 의미한다.

23) REC 가중치가 변화할 경우, \tilde{p}_e 및 \tilde{p}_f 와 관련된 파라미터 값이 변화될 수 있음은 $\tilde{\mu}_x$, $\tilde{\sigma}_x$, α , \sqrt{M} 에 대한 본문의 설명과 식 (13)을 통해 확인할 수 있다.

24) 식 (17)을 통해 확인할 수 있다.

지금까지 설명한 바와 같이 REC 가중치의 변화는 세부적으로는 투자 임계값 구성요소들의 비선형적인 변화를 야기시키지만, 최종적으로는 $\left(\frac{\beta}{\beta-1}\right)$ 의 감소효과가 나머지 항들의 증가효과보다 더 크게 나타나, REC 가중치 증가에 따라 \tilde{p}_f 의 투자 임계값이 감소함을 확인할 수 있다. 이 결과는 앞서 제시된 할인율의 경우와 마찬가지로, REC 가중치가 증가할수록 발전시설 투자사업의 최적 투자시기가 앞당겨지는 것으로 해석될 수 있다.

이와 더불어 <Table 5>에서 제시된 결과와 민감도 분석 범위 내에서의 최근 시점의 실제 \tilde{p}_f 값을 비교하여, 투자에 대한 경제성을 판단할 수 있는데, 이에 대한 분석결과는 <Table 6>과 같이 나타낼 수 있다. <Table 6>에서 “+”는 \tilde{p}_f 의 실제 값이 \tilde{p}_f 의 투자 임계값보다 큰 경우를 의미하고, “-”는 반대의 경우를 의미한다. 이때 주의할 점은 REC 가중치가 변화함에 따라 최근 시점의 실제 \tilde{p}_f 값 역시 달라진다는 것이다. 이는 \tilde{p}_f 의 구성요소인 \tilde{p}_e 가 REC 가중치 값에 영향을 받음으로 인해 발생하는 현상이며, 할인율에는 무관하게 움직인다. 이에 대한 값은 <Table 7>과 같이 나타낼 수 있다.

<Table 6> The result of analysis on economic feasibility(compared to \tilde{p}_f , Scenario 1)

	w=1.8	w=1.9	w=2.0	w=2.1	w=2.2
r=0.0234	-	-	-	-	-
r=0.0334	-	-	-	-	-
r=0.0434	-	+	+	+	+
r=0.0534	+	+	+	+	+
r=0.0634	+	+	+	+	+

<Table 7> Realized value of \tilde{p}_f considering weight of REC (Scenario 1)

	w=1.8	w=1.9	w=2.0	w=2.1	w=2.2
Realized value of \tilde{p}_f (in 2016)	2.3042	2.3916	2.4789	2.563	2.6537

<Table 6>의 결과를 통해서 주어진 할인율 및 REC 가중치에 따라서 투자 경제성

이 달라질 수 있음을 확인할 수 있다. 결과를 살펴보면, 할인율이 2.34% 및 3.34%일 경우에는 REC 가중치가 1.8에서 2.2로 변화하는 범위에서는 연료전지 발전사업에 대한 투자 경제성이 확보되지 못하지만, 할인율이 4.34%에서 6.34%로 변화하는 범위에서는 대부분 해당 사업에 대한 투자 경제성이 확보되는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 할인율의 변화가 REC 가중치보다 연료전지 발전사업의 투자 임계값 결정에 더 큰 영향을 미칠 수 있음을 의미하며, 이는 <Table 5>의 결과를 통해서도 확인할 수 있다. 투자 임계값에 대한 할인율의 영향력을 투자 임계값 구성 식 관점에서 살펴보면, 할인율은 자연지수의 승수로 적용되어 작은 변화에도 투자 임계값에 REC 가중치보다 더 큰 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

본 연구의 분석결과를 통해 확인할 수 있는 또 다른 사실은 투자 환경에 내포된 불확실성을 반영한 경우와 반영하지 않은 경우의 투자 경제성 확보 여부가 다르게 나타날 수 있다는 점이다. 본 연구에서 투자 내의 불확실성과 관련된 확률과정을 고려한 실물옵션 분석에서는 <Table 6>에서 확인할 수 있는 바와 같이 일부 민감도 분석 상황 하에서만 투자 경제성이 확보되는 것으로 나타났지만, 투자에 대한 기다림의 가치를 고려하지 않는 상황에서의 투자 임계값에 대한 민감도 분석결과는 주어진 모든 상황에서 투자 경제성 확보가 가능함을 나타내고 있다. 이때, 투자 내에 존재하는 불확실성으로 인한 기다림의 가치를 고려하지 않는 경우의 \tilde{p}_f 투자 임계값은 $\tilde{p}_{f, NPV}$ 로 구분할 수 있으며, $\tilde{p}_{f, NPV}$ 는 식 (15)에서 옵션가치를 고려하지 않았을 때 도출된 \tilde{p}_f 식을 의미한다. 이는 투자 경제성 평가 시 투자 환경 내에 존재하는 불확실성의 반영 여부에 따라, 해당 투자의 경제성 확보 여부 판단이 다르게 도출될 수 있음을 의미하며, 결과는 <Table 8>에 정리하여 나타내었다.

<Table 8> Threshold value of $\tilde{p}_{f, NPV}$ according to r (discount rate) and w (weight of REC)
(Scenario 1)

	w=1.8	w=1.9	w=2.0	w=2.1	w=2.2
r=0.0234	1.1477	1.1479	1.1478	1.1474	1.1468
r=0.0334	1.1781	1.1783	1.1781	1.1778	1.1771
r=0.0434	1.2099	1.2101	1.2100	1.2096	1.2090
r=0.0534	1.2433	1.2435	1.2434	1.2430	1.2424
r=0.0634	1.2780	1.2782	1.2781	1.2777	1.2771

〈Table 8〉에 제시된 $\tilde{p}_{f, NPV}$ 는 할인율 변화에 따라 선형적으로 변화하지만, REC 가중치 변화에 대해서는 비선형적으로 변화함을 확인할 수 있다. 이는 앞서 〈Table 5〉의 설명 시 기술한, REC 가중치 변화가 투자 임계값의 구성요소에 비선형적인 영향을 미친다는 관점에서 해석될 수 있다.

2. 추가 LNG가격(한국가스공사) 적용 시 분석결과

지금까지는 기준 LNG가격 하에서의 분석결과를 제시하였고, 다음으로 추가 LNG가격 하에서의 분석결과를 제시하고자 한다. 추가 분석에 대한 결과정리 표 및 설명은 앞서 제시된 표와 상응되거나 이미 설명한 부분과 중복되는 부분이 존재하기 때문에, 기존에 제시된 결과들과 비교하여 기술하고자 한다.

추가 LNG가격 하에서의 분석결과 도출 시 다른 조건들은 모두 기준 LNG가격 하에서의 조건들과 동일함을 가정한다. 다르게 적용되는 부분은 생산비용 중 연료비에 해당되는 LNG가격 부분이며, 이에 따라 \tilde{p}_g 및 \tilde{p}_f 와 관련된 파라미터 값의 변화를 반영하였다. 이 경우, REC 가중치 및 할인율에 따른 \tilde{p}_f 의 투자 임계값은 〈Table 9〉와 같이 나타낼 수 있다.

〈Table 9〉 Threshold value of \tilde{p}_f according to r (discount rate) and w (weight of REC)
(Scenario 2)

	w=1.8	w=1.9	w=2.0	w=2.1	w=2.2
r=0.0234	5.4085	5.5332	5.6926	5.8869	6.1171
r=0.0334	2.9761	2.9823	2.9962	3.0167	3.0431
r=0.0434	2.4321	2.4272	2.4269	2.4306	2.4377
r=0.0534	2.2107	2.2030	2.1987	2.1975	2.1988
r=0.0634	2.1038	2.0950	2.0892	2.0859	2.0848

〈Table 9〉의 분석결과 중 할인율의 변화에 따른 투자 임계값의 변화를 살펴보면, 앞서 제시된 〈Table 5〉의 결과와 동일하게 할인율이 커질수록 투자 경제성 확보가 가능한 \tilde{p}_f 의 투자 임계값이 감소하는 모습을 확인할 수 있다. 감소 이유 역시 〈Table 5〉의 경우와 동일하게, 할인율이 증가함에 따른 $\left(\frac{\beta}{\beta-1}\right)$ 의 감소 규모가 투

자 임계값을 구성하는 나머지 항의 증가 규모보다 크기 때문인 것으로 확인되었다.

다음으로 <Table 9>에서 제시된 REC 가중치 변화에 따른 투자 임계값 변화를 살펴본 결과, 이 경우 역시 REC 가중치의 변화가 투자 임계값의 각 구성요소에 비선형적인 영향을 미침을 확인하였으며, 특히 주어진 일부 할인율에 따라서 β 값에 비선형적 영향을 미치는 것으로 나타났다. 앞서 분석된 <Table 5>에서는 본 연구의 모든 할인율 분석 범위 내에서 REC 가중치 변화가 투자 임계값 변화에 미치는 영향의 방향성이 최종적으로 음의 방향성을 가지는 것으로 나타났으나, <Table 9>에서는 주어진 할인율에 따라 REC 가중치 변화가 투자 임계값 변화에 미치는 영향의 방향성이 동일하게 양의 방향성을 가지거나, 음 또는 양의 방향성이 개별적으로 나타나는 모습을 보였다. 이때 REC 가중치 변화에 따른 투자 임계값 변화의 방향성이 개별적이라는 것은 REC 가중치 변화에 따라 투자 임계값이 감소에서 증가로 변화하는 지점이 각각 다르게 나타나는 현상을 의미하며, 분석결과의 합리성 및 일관성에는 문제가 없음에 주의할 필요가 있다.

REC 가중치 변화가 투자 임계값에 미치는 비선형적인 영향은 <Table 5>에서와 같이 투자 임계값의 구성요소인 $\left(\frac{\beta}{\beta-1}\right)$ 와 그 외 항들의 값 변화에 따라 결정된다. <Table 9>의 결과는 REC 가중치 변화에 따른 $\tilde{\mu}_e$ 및 $\tilde{\sigma}_e$ 의 변화가 α , M , 그리고 β 값에 영향을 미쳐 나타난 결과이며, 그 영향의 정도가 주어진 상황에 따라서 다르게 나타나므로 투자 임계값에 비선형적 영향을 미치게 된다. 이를 투자자 관점에서 살펴보면 다음과 같이 해석될 수 있다. REC 가중치가 증가할 경우 해당 사업의 수익증가 유인이 발생하여 최적 투자시기가 앞당겨질 수 있으나, 가중치 변화의 복합적 영향으로 인한 투자 임계값 \tilde{p}_f 의 기대증가율 및 순간변동율 변화가 투자자의 최종적인 최적 투자시기에 영향을 미친다. 이때 민감도 분석 시 주어진 조건에 따라 최적 투자시기에 미치는 영향이 각각 다르게 나타나므로 비선형적인 결과가 도출되며, 해당 사업의 수입 및 비용이 시간의 흐름에 따라 영향을 받기 때문에 주어진 할인율 역시 최적 투자시기 결정에 영향을 미칠 수 있다.

투자 임계값 분석에 이어, <Table 9>의 결과와 변화된 LNG가격 적용 시 최근 시점의 실제 \tilde{p}_f 값을 비교한 투자 경제성 역시 검토하였다. 이에 대한 비교 검토를 위해 앞서와 같이 REC 가중치 변화에 따른 최근 시점의 실제 \tilde{p}_f 값 변화를 <Table 11>에 제시하였다. <Table 11>에서 제시된 값을 <Table 9>에서 도출된 투자 임계

값과 비교한 결과, 투자 경제성 확보 여부는 <Table 6>에서 제시된 결과와 유사함을 확인할 수 있으며, 이는 <Table 10>에 제시하였다. <Table 10>은 전체적으로 <Table 6>과 유사한 결과를 나타내고 있지만, 할인율이 4.34%이고 REC 가중치가 1.8인 경우 및 할인율이 3.34%이고 REC 가중치가 2.2인 경우에 해당 사업에 대한 투자 경제성이 추가적으로 확보되는 것으로 나타났다. 이 결과는 다시 말해, 일부 경우이기는 하지만 추가 분석이 진행된 조건 하에서 기준 분석의 경우보다 연료 전지 발전사업에 대한 투자 경제성 확보가 용이할 수 있음을 의미한다.

<Table 10> The result of analysis on economic feasibility(compared to \tilde{p}_f , Scenario 2)

	w=1.8	w=1.9	w=2.0	w=2.1	w=2.2
r=0.0234	-	-	-	-	-
r=0.0334	-	-	-	-	+
r=0.0434	+	+	+	+	+
r=0.0534	+	+	+	+	+
r=0.0634	+	+	+	+	+

<Table 11> Realized value of \tilde{p}_f considering weight of REC (Scenario 2)

	w=1.8	w=1.9	w=2.0	w=2.1	w=2.2
Realized value of \tilde{p}_f (in 2016)	2.6495	2.7501	2.8505	2.9510	3.0515

마지막으로 투자 환경 내에 존재하는 불확실성을 고려하지 않은 경우의 투자 임계값에 해당되는 \tilde{p}_{fNPV} 에 대해 분석한 결과, 앞서 제시된 <Table 7> 및 <Table 8>의 비교를 통해 도출된 결과와 동일하게 모든 민감도 분석 범위 내에서 투자 경제성이 확보되는 것으로 나타났다. 할인율 및 REC 가중치에 따른 \tilde{p}_{fNPV} 는 <Table 12>에 제시하였다.

<Table 11> 및 <Table 12>의 비교를 통한 투자 경제성 분석 결과는 앞서 제시된 <Table 7> 및 <Table 8>의 비교를 통해 제시된 분석결과와 동일하지만, REC 가중치 변화에 따른 \tilde{p}_{fNPV} 값의 변화 방향에는 약간 차이가 존재한다. <Table 8>에서는 REC 가중치가 1.8에서 1.9로 변화할 때에는 투자 임계값이 증가하였다가 1.9

이후부터 감소하는 모습을 보이지만, 〈Table 12〉에서는 REC 가중치가 1.8에서 2.2로 변화는 모든 범위에서 투자 임계값이 감소하는 모습을 보이는 것이 그 차이로 할 수 있다. 이와 같은 결과는 앞서 설명한 바와 같이 REC 가중치 변화가 주어진 조건 하에서 투자 임계값의 각 구성 요소에 서로 다른 비선형적인 영향을 미치기 때문에 도출되는 것으로 이해할 수 있다.

〈Table 12〉 Threshold value of \tilde{p}_{fNPV} according to r (discount rate) and w (weight of REC)
(Scenario 2)

	w=1.8	w=1.9	w=2.0	w=2.1	w=2.2
r=0.0234	1.1687	1.1663	1.1637	1.1610	1.1581
r=0.0334	1.2030	1.2006	1.1980	1.1953	1.1925
r=0.0434	1.2390	1.2366	1.2341	1.2314	1.2286
r=0.0534	1.2768	1.2744	1.2719	1.2692	1.2664
r=0.0634	1.3163	1.3139	1.3113	1.3087	1.3059

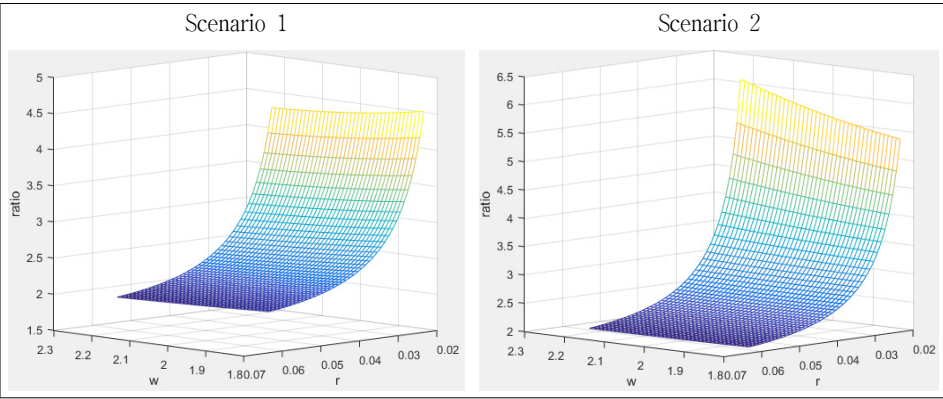
분석결과를 종합해보면, 그 차이가 크지 않기는 하지만 기준 LNG가격을 적용한 경우보다 상대적으로 낮은 수준의 LNG가격을 적용한 경우에 연료전지 발전사업에 대한 투자 경제성 확보 가능성이 높음을 확인할 수 있다.

본 연구에서 제시된 분석결과는 연료전지 발전사업 투자 시 전력판매가격과 LNG 가격의 불확실성을 동시에 고려할 경우, 일부 할인율 조건 하에서 현재 적용되고 있는 REC 가중치보다 낮은 REC 가중치에서도 투자 경제성이 확보될 수 있음을 나타내고 있다. 민감도 분석에서의 REC 가중치 변화 범위가 크지 않지만, 본 연구의 분석결과는 향후 신재생에너지 발전원에 대한 REC 가중치 재산정이 이루어질 경우 참고 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

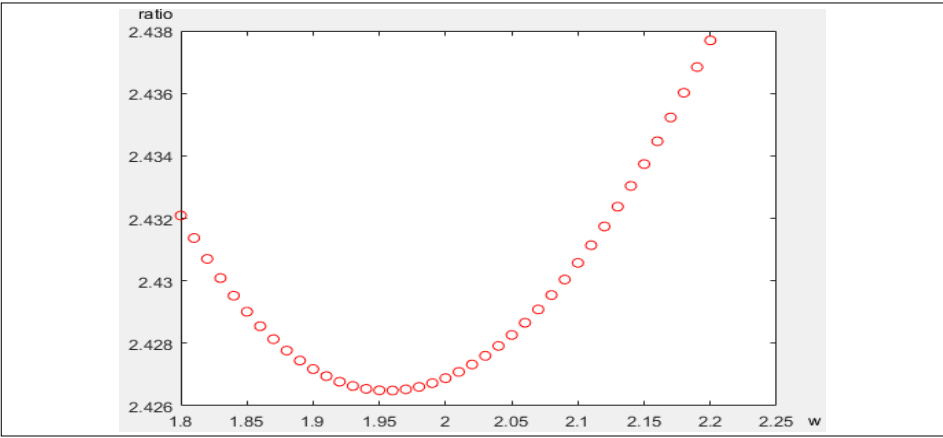
또한, 현재 LNG가격보다 낮은 LNG가격을 적용한 추가 분석결과 역시 사용연료 가격인하와 관련된 의미있는 시사점을 제시할 수 있을 것으로 여겨진다. 연료전지 발전시설이 도입된 이후, 연료전지 사업자들 사이에서는 연료전지 발전시설 사용연료에 대한 전용 요금제 마련과 같은 사용연료 가격 인하에 대한 요구가 지속적으로 이루어지고 있다. 인하된 가격의 사용연료 적용 시 기존 가격의 사용연료를 활용하는 경우보다 연료전지 발전사업에 대한 투자 경제성 확보가 용이한 것으로 나타난 본 연구의 추가 분석결과를 바탕으로, 향후 연료전지 발전사업에 대한 인센티브 제

공을 위한 정책마련 시 발전용 연료전지 사용연료의 가격 인하 등을 고려할 수 있을 것이다.

〈Figure 1〉 The graph on threshold value according to discount rate and weight of REC



〈Figure 2〉 Non-linearity of the threshold value according to the weight of REC
($r=0.0434$, Scenario 2)



〈Figure 1〉은 할인율 및 REC 가중치의 단위 변화량이 〈Table 5〉 및 〈Table 9〉에서 제시된 것보다 더욱 세밀하게 변화할 때 \tilde{p}_f 의 투자 임계값 변화를 MATLAB을 활용하여 3차원 그래프로 나타낸 것이며, 앞서 제시된 분석결과의 설명과 같이 기준 및 추가 분석에 있어서 REC 가중치가 투자 임계값에 미치는 영향이 다르게 나타남을 시각적으로 확인할 수 있다. 하지만 〈Figure 1〉에서는 추가 LNG 가격 적

용 시 나타난 투자 임계값에 대한 REC 가중치의 비선형적 영향의 시각적 확인이 용이하지 않으므로, 이에 대한 확인을 위해 할인율이 4.34%일 때의 REC 가중치에 따른 투자 임계값 변화의 2차원 그래프를 <Figure 2>에 제시하였다.

V. 결론 및 시사점

1. 결 론

본 연구에서는 전력판매가격과 LNG가격의 연속적 확률과정을 고려한 실물옵션 모형에 포스코에너지의 연료전지 발전시설 자료를 적용하여, 연료전지 발전시설의 최적 투자시기에 대한 실증분석을 진행하였다. 최적 투자시기는 LNG가격에 대한 전력판매가격의 비율로 구성된 \tilde{p}_f 의 투자 임계값으로 도출하였다. 이와 더불어 발전원가에서 가장 높은 비중을 차지하는 LNG가격에 차별화를 두어, 현재 적용되고 있는 LNG가격보다 낮은 수준의 가격 적용 시 투자 임계값에 대해서도 함께 살펴보았다.

LNG가격을 차별화하여 적용한 모든 민감도 분석에서 할인율은 \tilde{p}_f 의 투자 임계값에 음의 영향을 주는 것으로 나타났다. 이 결과는 주어진 민감도 분석 범위 내에서 할인율이 증가할수록 연료전지 발전사업에 대한 투자 경제성 확보 시기가 앞당겨질 수 있음을 의미한다. 하지만 REC 가중치의 경우 \tilde{p}_f 의 투자 임계값의 각 구성 요소에 서로 다른 비선형적인 영향을 미치므로, 주어진 할인율 조건에 따라서 투자 임계값에 미치는 영향의 정도 및 방향성이 달라질 수 있는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 연료전지 발전사업에 대한 최적 투자 임계값이 투자 환경 내에 내포된 확률요소들의 복합적 작용에 의해서 결정되기 때문에 나타나는 현상으로 해석될 수 있다.

2. 시사점

본 연구의 분석결과는 세 가지 시사점을 제시한다. 첫 번째 시사점은 연료전지 발전시설에 대한 REC 가중치 조정 가능성이다. 본 연구의 분석결과를 통해, 제한

된 할인율 조건 하에서 현재 REC 가중치뿐만 아니라 현재보다 낮은 REC 가중치에서도 투자 경제성이 확보됨을 확인할 수 있다. 이는 제한된 조건 하에서 REC 가중치의 하향 조정이 가능할 수 있음을 의미한다. 하지만 첫 번째 시사점과 관련된 분석결과는 제한적으로 활용될 필요가 있다. 왜냐하면, 신재생에너지 발전원에 대한 REC 가중치 조정은 해당 사업과 관련된 종합적인 요소들을 고려하여 신중하게 결정되어야 하기 때문이다. 온실가스 감축 등을 위해 신재생에너지 발전원의 적극적인 도입이 요구되는 상황에서 현실적인 신재생에너지 발전원 중 하나로 간주되는 연료전지 발전시설의 REC 가중치가 하향 조정될 경우, 해당 사업에 진입하고자 하는 잠재적 진입자들을 가로막을 수 있음에 주의해야 한다.

두 번째 시사점은 발전용 연료전지 사용연료의 가격인하 가능성이다. 본 연구의 추가적인 분석결과는 현재 활용되고 있는 사용연료 가격보다 인하된 가격을 적용할 경우 사업 내에 존재하는 확률적 요소들을 고려하더라도, 기존 사용연료 가격 적용 시보다 연료전지 발전사업에 대한 투자 경제성 확보가 용이할 수 있음을 제시하고 있다. 차별화된 사용연료 가격 적용이 해당 사업의 투자 경제성 확보 여부에 큰 차이를 가져오는 것은 아니지만 발전사업자에게 투자 경제성 확보 관점에서 긍정적인 효과를 제공할 수 있으므로, 연료전지 발전시설의 도입 장려를 위한 정책 마련 시 발전용 연료전지 사용연료의 가격인하를 고려할 수 있을 것이다. 이와 관련해서는 사용연료 가격인하와 더불어, 가격의 변동성 변화가 투자 경제성에 미치는 영향 역시 고려할 필요가 있다. 평균적인 수준 값 차이를 의미하는 가격인하가 투자 경제성에 영향을 미치기도 하지만, 해당 가격의 확률과정에 기인한 변동성 변화 역시 투자 경제성에 영향을 미칠 수 있기 때문이다. 본 연구에서는 가격인하에 초점을 둔 차별화된 사용연료 가격 적용이 투자 경제성에 미치는 영향을 살펴보았지만, 후속 연구에서는 변동성 관점에서 차별화된 가격 적용이 투자 경제성에 미치는 영향을 분석하여 다양한 관점에서의 비교 분석이 이루어질 필요가 있다.

마지막으로 세 번째는 최적 투자관리 분석 시 불확실성 반영의 중요성이다. 본 연구의 분석결과를 통해서 연료전지 발전사업 투자의 경우에도 사업운영과 관련된 전력판매가격 및 LNG가격의 불확실성을 반영한 경우와 그렇지 않은 경우에 있어 투자 경제성 확보 여부가 달라짐을 확인하였다. 사업 운영 환경 내에 내포된 불확실성을 반영하지 않을 경우에는 연료전지 발전사업자들은 모든 민감도 분석 범위 내에서 투자 경제성을 확보하고 있는 것으로 나타났지만, 복수 요소의 불확실성을

반영한 경우에는 제한적인 조건 하에서 투자 경제성이 확보되는 것으로 나타났다. 이 결과는 특정 사업에 대한 최적 투자관리 분석 시, 해당 사업 내에 존재하는 불확실성의 반영 여부에 따라 투자 경제성에 대한 상반된 결과가 도출될 수 있음을 제시하고 있다. 그러므로 향후 투자 규모가 크고 사업 환경 내에 예상되는 불확실성이 클수록, 투자 경제성 분석 시 내포된 불확실성을 적절히 고려해야 할 것이다.

본 연구의 분석결과는 일부 시사점 제시에 있어 제한적인 해석이 요구되는 한계가 존재하지만, 그럼에도 불구하고 주요 신재생에너지 발전원 중의 하나로 간주되는 연료전지 발전사업의 활성화 방향성을 제시하고 있다는 측면에서, 발전사업자 및 정책 입안자들에게 의미 있는 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

■ 참 고 문 헌

1. 김경택 · 이덕주 · 박성준, “실물옵션을 이용한 신재생에너지 R&D의 경제적 가치 및 최적 적용 시점 평가,” 『대한산업공학회지』, 제38집 제2호, 2012, pp.144-156.
(Translated in English) Kim, Kyung-Taek, Deok Joo Lee and Sung-Joon Park, “Evaluation of the Economic Values and Optimal Deployment Timing of R&D Investment in New and Renewable Energy Using Real Option Approach,” *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, Vol. 38, No. 3, 2012, pp.144-156.
2. 김승구 · 최영재 · 박태준 · 국승택 · 전재호 · 진중환, “발전용 연료전지의 시장 현황 및 상업화 전략,” 『RIST 연구논문』, 제21집 제4호, 2007, pp.319-328.
(Translated in English) Kim, Seung Gu, Young Tae Choi, Tae Jun Park, Seung Taek Guk, Jae Ho Jeon and Jung Hwan Jeon, “Current Market Status and Commercialization Strategy of Fuel Cell Systems for Stationary Power Generation,” *RIST Review*, Vol. 21, No. 4, 2007, pp.319-328.
3. 노철우 · 김민수, “주택면적의 변화에 따른 가정용 초소형 연료전지 코제너레이션 시스템의 경제성 분석에 관한 연구,” 『신재생에너지』, 제4집, 제2호, 2008, pp.45-51.
(Translated in English) Roh, Chul Woo and Min Su Kim, “A Study on the Economic Evaluation with Super-Micro Fuel Cell Home Cogeneration System by Varying the Floor Area of House,” *Renewable Energy*, Vol. 4, No. 2, pp.45-51.
4. 박호정 · 장철호, “실물옵션을 이용한 소형열병합 발전의 경제성 평가: 전력가격 변동성을 고려하여,” 『자원 · 환경경제연구』, 제16집, 제4호, 2007, pp.763-779.

- (Translated in English) Park, Hojeong and Chulho Jang, "Real Option Analysis for Medium-scale CHP Plant Investment with Volatile Electricity Prices," *Environmental and Resource Economics Review*, Vol. 16, No. 4, 2007, pp.763-779.
5. 박호정, "실물옵션 모형을 이용한 RPS와 배출권거래제 연계의 신재생에너지 투자효과," 『자원·환경경제연구』, 제21집, 제2호, 2012, pp.301-319.
(Translated in English) Park, Hojeong, "Real Option Analysis for the Effect of Connection between RPS and ETS on Renewable Energy Investment," *Environmental and Resource Economics Review*, Vol. 21, No. 2, 2012, pp.301-319.
 6. ———, 『실물옵션과 경제성 평가』, 제1판, 옵션리얼, 2017.
(Translated in English) Park, Hojeong, *Real Options and Benefit Cost Analysis*, 1th ed., Option Real, 2017.
 7. 삼정 KPMG, 『연료전지 보급현황 및 보급 활성화 방안 연구』, 한국에너지공단, 2013.
(Translated in English) SAMJUNG KPMG, *Study on the Introduction and Expansion of Fuel Cell*, Korea Energy Agency, 2013.
 8. 이창호·조기선·조인승·임도상·양성철·김창수, "신·재생에너지 발전차액지원제도 개선 및 RPS제도와 연계방안," 산업통상자원부, 2006.
(Translated in English) Lee, Chang Ho, Ki Sun Cho, In Seung Cho, Do Sang Lim, Sung Chul Yang and Chang Su Kim, "Study on the Improvement of FIT and the Connection Way between FIT and RPS," Ministry of Trade, Industry and Energy, 2006.
 9. 정희인·정현석·조성우·편하형·한종훈, "주요변수 변동을 고려한 부생수소 활용 연료전지 발전소 경제성 분석," 한국가스학회 학술대회, 2009.
(Translated in English) Jeong, Hoi-in, Hyeounseok Jeong, Sungwoo Cho, Hahyung Peon and Chonghun Han, "Economic Analysis of Fuel Cell Systems using By-product H^2 Considering Parameter Variation," The Korean Institute of Gas, 2009.
 10. 포스코에너지 내부자료.
(Translated in English) Internal data of POSCO ENERGY.
 11. Abadie, L. M. and J. M. Chamorro, "Valuation of Wind Energy Projects: A Real Options Approach," *Energies*, Vol. 7, No. 5, 2014, pp.3218-3255.
 12. Boomsma, T. K., N. Meade and S. Fleten, "Renewable Energy Investments under Different Support Schemes: A Real Options Approach," *European Journal of Operational Research*, Vol. 220, No. 1, 2012, pp.225-237.
 13. Dixit, A. and R. S. Pindyck, *Investment under Uncertainty*, 1th ed., Princeton University Press, 1994.
 14. Lee, D., K. Kim and S. Park, "Economic Evaluation of Renewable Energy R&D in Korea using Real Option," World Congress on Engineering and Computer Science. 2011.
 15. Lee, S., and L. Shih, "Renewable Energy Policy Evaluation Using Real Option Model-The Case of Taiwan," *Energy Economics*, Vol. 32, No. 1, 2010, pp.67-78.
 16. Liu, J., "CCS Investment Decision Based on Real Options," *International Journal of Nonlinear Science*, Vol. 17, No. 2, 2014, pp.182-187.
 17. Maxwell, C., and M. Davison, "Using Real Option Analysis to Quantify Ethanol Policy

- Impact on the Firm's Entry into and Optimal Operation of Corn Ethanol Facilities," *Energy Economics*, Vol. 42, 2014, pp.140-151.
18. Reutera, W. H., S. Fussa, J. Szolgayovaa, and M. Obersteiner, "Investment in Wind Power and Pumped Storage in a Real Options Model," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, No. 4, 2012, pp.2242-2248.
 19. Tsay, R. S., Analysis of Financial Time Series, 1th ed., Wiley, 2001.
 20. Jang, Y., D. Lee and H. Oh, "Evaluation of New and Renewable Energy Technologies in Korea Using Real Options," *International Journal of Energy Research*, Vol. 37, No. 13, 2013, pp. 1645-1656.

Study on the Optimal Investment Management of Fuel Cell Power Generator Considering Stochastic Process of Input and Output*

Youngsik Nam** · Heechan Kang***

Abstract

To deal with the climate change caused by global warming, the efforts to reduce greenhouse gases have been continued in the world. In Korea, Renewable Portfolio Standard has been implemented in the way for the large-scale power plants to expand the use of renewable energy. This study analyzes an economic feasibility of an investment on a fuel cell power plant which is widely used as a distributed resource. Specifically, this study constructs a real option model, where a stochastic process of electricity price and liquefied natural gas price are explicitly considered. For the empirical analysis, we collect the data on POSCO ENERGY, which is a representative fuel cell power company in Korea. The paper also provides a sensitivity analysis on the discount rate and the weight of Renewable Energy Certificate. The result shows that, when the uncertainty associated with the operation of fuel cell power plant is considered, the investment on power generator has an economic feasibility under the conditional circumstance.

Key Words: fuel cell power plant, real option, economic feasibility

JEL Classification: N7, Q1, Q3

Received: April 14, 2017. Revised: May 22, 2017. Accepted: June 19, 2017.

* This work was supported by the Ministry of Education of the Republic of Korea and the National Research Foundation of Korea (NRF-2015015420). We sincerely appreciate useful comments of two anonymous reviewers on this study, and also appreciate essential advice of Prof. Park on the analysis model of this study.

** First Author, Ph.D. student, Department of Food and Resource Economics, KU · KIST Green-School Graduate Program, Korea University, 145, Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02841, Korea, Phone: +82-2-3290-3481, e-mail: toju111@korea.ac.kr

*** Corresponding Author, Professor, Department of Economics, Incheon National University, 119, Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon 22012, Korea, Phone: +82-32-835-8547, e-mail: henrykang@inu.ac.kr