

석탄가스화 복합발전소 건설의 에너지안보 확보편익 추정

임슬예* · 최효연** · 유승훈*[†]

*서울과학기술대학교 에너지환경대학원 에너지정책학과, **고려대학교 경제학과
(2015년 3월 17일 접수, 2015년 8월 20일 수정, 2015년 8월 24일 채택)

Measurement of the Benefits from Safeguarding Energy Security through Building the Integrated Gasification Combined Cycle Power Plant

Seul-Ye Lim*, Hyo-Yeon Choi**, and Seung-Hoon Yoo*[†]

*Department of Energy Policy, Graduate School of Energy & Environment, Seoul National University of Science & Technology

**Department of Economics, Korea University

(Received 17 March 2015, Revised 20 August 2015, Accepted 24 August 2015)

요 약

석탄가스화 복합발전소는 기존 석탄화력 발전소에 비해 온실가스 및 대기오염물질을 적게 배출할 뿐만 아니라 국제적으로 쉽게 확보할 수 있는 저렴한 저품위 석탄을 사용할 수 있어서 연료를 안정적으로 공급받을 수 있다. 이에 본 논문에서는 석탄가스화 복합발전 건설의 에너지안보 확보편익을 추정하고자 한다. 이를 위해 무작위로 추출된 전국 600가구를 대상으로 설문조사를 수행한 후 얻은 자료에 조건부 가치추정법을 적용하여 분석한 결과를 제시한다. 통계적 효율성의 확보를 위해 이중경계 모형을 적용하며 영(0)의 응답자료를 적절하게 다루기 위해 스파이크 모형을 적용한다. 분석결과 석탄가스화 복합발전소로부터 생산되는 전력 1kWh에 대해 응답자들은 평균적으로 6.05원의 추가적인 지불의사액을 가졌다. 즉 석탄가스화 복합발전소로부터 생산되는 전력에 대한 에너지안보 확보편익은 6.05원/kWh이다. 올해 완공되는 태안 석탄가스화 복합발전소의 예상 연간 발전량은 2.27TWh이므로 에너지안보 확보편익은 연간 13,740백만원으로 추정된다.

주요어 : 석탄가스화 복합발전, 에너지안보 확보편익, 조건부 가치추정법, 지불의사액, 이중경계 모형

Abstract - Integrated gasification combined cycle (IGCC) power plants not only emit less greenhouse gases and air pollutants than conventional coal-fired power plants, but also use low-price, low-quality, and internationally easily procurable coal. Thus we can benefit from safeguarding energy security through building the IGCC power plant. This paper attempts to value the benefits of energy security enhanced by IGCC power plant. To this end, we report here the results from a contingent valuation survey of randomly selected 600 households. A combination of a double-bounded model and a spike model is applied for the purpose of increasing statistical efficiency and dealing with zero(0) willingness to pay data, respectively. The results show that the respondents are additionally willing to pay 6.05 won for 1kWh of electricity generated from IGCC power plant. In other words, the benefits from safeguarding energy security through building the IGCC power plant are 6.05 won per kWh. Given that the expected amount of generation from the Taean IGCC power plant that is scheduled to be built in late 2015 is 2.27 TWh per year, the benefits are estimated to be 13.74 billion won per year.

Key words : integrated gasification combined cycle, benefits from safeguarding energy security, contingent valuation, willingness to pay, double-bounded model

[†]To whom corresponding should be addressed.
Graduate School of Energy & Environment, Seoul National
University of Science & Technology
Tel : 02-970-6802 E-mail : shyoo@seoultech.ac.kr

1. 서론

우리나라는 온실가스 감축을 위한 자발적 기여방안(Intended Nationally Determined Contribution, INDC)으로 국가 온실가스 감축목표를 2030년까지 BAU 대비 37%로 달성할 것을 선언하였다. 이중 25.7%는 기존의 시나리오대로 감축하고, 11.3%는 국제 탄소시장 메커니즘을 활용한다. 제21차 유엔기후변화협약 당사국총회 이후 감축목표가 공식화되면 구체적으로 감축목표 달성을 위한 노력이 요구될 것이다.

발전부문은 국가 전체 온실가스 배출량의 25%를 차지하며, 온실가스의 원인물질인 이산화탄소(CO₂) 배출량이 상당하다. 석탄화력발전소가 배출하는 CO₂ 배출량은 타 발전원을 이용한 발전소보다 상대적으로 많다. 석탄화력발전의 온실가스 다배출 문제를 완화하고 기후변화에 대응하기 위해 청정석탄 이용기술인 석탄가스화 복합발전(Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC)이 도입되었다.

IGCC 발전소는 석탄을 고온 및 고압으로 기체 상태의 가스로 만들어 전기를 생산하는 친환경 기술로 대기오염물질 배출량도 기존 석탄화력발전소 대비 훨씬 저감된다. IGCC 발전소는 이산화탄소 포집 및 저장(Carbon Capture & Storage, CCS)과의 연계가 용이하다. CCS 기술이란 CO₂가 대기 중에 배출되기 전에 발생원에서 포집한 다음, 수송 과정을 거쳐 육상 또는 해양에 저장하는 기술로 크게 포집, 수송, 저장 3단계로 나누어져 있다. CCS 기술은 CO₂를 제거하는 것이 아니라 일시적으로 격리시킨다는 점에서 한계가 존재하지만, 급격하게 증가하는 에너지 수요에 대응하는 가장 현실적인 방안이라 할 수 있다. 기존 석탄발전소가 화학적 반응에 의한 연소 후 포집방식(post-combustion)을 채택하는데 반해 IGCC 발전소는 물리적 반응에 의한 연소 전 포집방식(pre-combustion) 적용하므로 상대적으로 CO₂ 포집에 유리하다.

전기를 안정적으로 생산하여 각 가구 및 기업에 공급하는 것은 에너지안보(energy security) 차원에서 국가의 중요한 과제로, 합리적인 가격으로 중단없이 공급하는 전략이 필요하다. 발전에는 석탄, 석유, 천연가스 등이 쓰이지만 우리나라는 연료의 대부분을 수입에 의존하고 있어 안정적인 에너지원 확보가 이루어져야 한다. 에너지의 국제가격 변동은 심하고 온실가스 감축이행의 의무화됨에 따라 석탄화력발전소의 부담은 커지고 있다. IGCC 발전소는 기존 화력발전소와 달리 세계적으로

널리 분포하여 매장량이 풍부한 석탄을 안정적으로 이용하면서도 낮은 품질의 저렴한 저열량탄 및 저회용점탄도 사용할 수 있어 연료원 확보가 안정적이다. 정부에서는 에너지안보 전략으로 태양광발전, 풍력발전, 조력발전 등과 함께 신재생에너지 중 하나로 주목받고 있는 IGCC 발전소를 건설중에 있다.

IGCC 발전소 건설로 우리나라의 에너지안보는 강화되므로 편익이 발생하지만 이에 대한 정량적인 연구는 부족한 상태이다. 이에 본 논문에서는 IGCC 발전소 건설의 에너지안보 확보편익을 분석하고자 한다. 본 논문의 이후 구성은 다음과 같다. 제2절에서는 IGCC 발전소의 개요를 제시한다. 제3절에서는 IGCC 발전소 건설의 에너지안보 확보편익추정을 위한 연구방법론을 추정한다. 제4절에서는 IGCC 발전소 건설의 에너지안보 확보편익 추정결과를 제시한다. 마지막 절은 결론으로 할애한다.

2. IGCC 발전소의 개요

IGCC 기술은 석탄을 연료로 고온·고압의 가스화기에서 가스화시켜 일산화탄소와 수소가 주성분인 합성가스를 만들어 정제공정을 거친 후 가스터빈 및 증기터빈을 구동하는 복합사이클 발전기술이다. 연료로는 석탄뿐만 아니라 중질잔사유, 바이오매스 등을 사용할 수 있다. 일반적으로 가스터빈이 총 출력의 60%, 증기터빈이 40%의 전력을 생산하며 IGCC 발전소는 발전효율이 40% 이상으로 일반 석탄화력의 발전효율인 37~40%보다 높다. 300MW급 IGCC 발전소 건설에 관한 계획은 이미 제3차 신재생에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획('08. 12) 및 제4차 전력수급기본계획에 포함되어 2015년 말 준공을 앞두고 있다.

300MW급 IGCC 발전소는 현 태안화력발전소 부지 내에 건설중이며 10만 가구(약 30만명)가 1년 동안 사용할 전기가 생산된다. 건설중인 발전소는 세계 최초의 IGCC 실증 플랜트로 IGCC 기술이 상용화되면 기술수요도 급증할 것으로 예상된다.

우리나라는 1차 에너지의 96% 이상을 수입하고 있으며, 특히 석유 및 천연가스의 비중이 매우 높아 안정적이고 경제적인 에너지 확보가 절실하다. 특히 석유 및 천연가스의 불안정한 가격은 장기적으로 국가 에너지정책에 있어서 안정성을 떨어뜨리는 큰 위험요소이다. 이에 비해 우리나라 발전용 연료의 30% 이상을 담당하고 있는 석탄은 타 화석연료에 비해 공급이 안

정적이고 매장량이 풍부하다. 지역적으로 편재되지 않고 가격변동이 크지 않아 안정적 에너지 확보에 유리하다.

석탄은 연소시 유황분과 질소분이 연소하여 황산화물(SOx)과 질소산화물(NOx)이 배출되며 온실가스의 원인물질로 주목받고 있는 이산화탄소의 배출이 타 발전원보다 상대적으로 많다. IGCC 발전소의 경우 일반 석탄화력발전소에 비해 효율이 향상됐을 뿐만 아니라 탈황설비 방식 변경으로 인하여 이산화탄소 발생이 저감된다. 또한 기존 화력발전소에 비해 SOx, NOx, 먼지 등의 대기오염 물질을 적게 배출한다. 또한 IGCC 발전은 기존 석탄화력발전소 대비 높은 효율로 연료 사용량이 절감되어 연료구입에 소요되는 비용 역시 절감된다.

이처럼 IGCC 발전소는 동일하게 석탄을 연료로 사용하는 일반 석탄화력발전소와 비교하여 효율이 높고 친환경적이므로 차세대 석탄발전방식으로 부각되고 있으며, 현재 세계적으로 IGCC 기술은 상용화 진입단계로 향후 기술수요가 급속히 증가할 것으로 예상된다. 이러한 효과를 정량적으로 계산하고 화폐단위로 계량화하는 것은 비교적 쉬운 일이지만, 에너지안보의 확보로 발생하는 편익의 경우 시장에서 거래되지 않는 비시장재화적 특징을 가지므로 정량화가 쉽지 않다. 이러한 비시장재화의 경제적 가치 평가를 위해서

는 경제학적 기법을 적용한 분석이 수행되어야 한다.

3. 연구방법론

3-1. 에너지안보에 관한 선행연구사례

전 세계적으로 에너지의 안정적 공급에 관한 다수의 연구가 진행되었으며, Table 1에 주요 결과가 요약되어 있다. Damigos et al. (2009)은 전력생산에 있어서 천연가스 안정적 확보에 대한 지불의사액을 조건부 가치측정법(CVM, contingent valuation method)으로 추정하였다. Bang (2010)은 에너지 안보와 기후 변화의 관점에서 본 미국의 에너지 정책 변화를 분석하였고, Markandya and Pemberton (2010)은 에너지안보에 관해 기대효용분석을 실시하였다. Umbach (2010)는 세계 에너지 안보에 관한 분석을 통해 EU에 대한 시사점을 제시하였으며, Hipple et al. (2011)는 아시아에 도입되는 에너지 안보 프로젝트를 소개하였다. Greene (2010)은 미국이 석유 자립도를 달성할 수 있을 것인지를 분석하여 에너지안보에 대해 논의하였고, Lefèvre (2010)는 화석연료의 자원 집중이 에너지 안보에 미치는 영향을 추정하였다. Jang et al. (2014)는 천연가스 공급의 안정성을 보장하기 위해 국민들이 얼마나 더 추가적인 비용을 부담할 수 있는지를 CVM으로 추정하였다. Kim and Kim (2015)은 CVM 기법을 적용하여

Table 1. Summary of previous studies dealing with energy security

Sources	Contents
Damigos et al. (2009)	Willingness to pay a premium on their electricity bills in order to internalize the external costs of electricity production, in terms of energy security, which are caused from imported fuels
Lefèvre (2010)	Analysis on the energy security implications of fossil fuel resource concentration
Bang (2010)	How the political institutions of the US structured interaction and affected policy outcome, and ultimately the change of changing the energy policy status quo
Markandya and Pemberton (2010)	Analysis on energy security in an expected utility framework
Umbach (2010)	Analysis on the future international energy security and implications for Europe and EU-27
Hippel et al. (2011)	Introduction to the Asian Energy Security
Greene (2010)	Analysis on specific policies to achieve oil independence in United States
Jang et al. (2014)	Measurement of public's willingness to pay for improving the reliability of the natural gas supply in Korea
Kim and Kim (2015)	Korean public's perceptions on supply security of fossil fuels: A contingent valuation analysis

우리나라 국민들이 화석연료의 공급안정성에 대해 갖고 있는 인식 및 각 화석연료에 대한 WTP의 차이를 비교하였다.

앞서 진행된 다수의 연구사례를 통해 에너지안보에 대한 해외사례 및 에너지원별로 안정적 공급에 관해 살펴보았다. 본 논문에서는 IGCC 발전을 통해 우리나라 국민들이 안정적으로 전력을 공급받아 발생하는 에너지안보 확보편익에 관해 정량적으로 분석한다. 에너지안보 확보편익을 추정하기 위해서는 평가대상 재화의 특성과 선행연구의 방법론을 반영하여 CVM을 적용하여 에너지안보 확보편익을 구하고자한다 (Damigos et al. 2009; Jang et al. 2014; Kim and Kim 2015).

3-2. 확률효용모형의 개요

WTP 응답을 다룰 수 있는 Hanemann(1984)이 제안한 효용격차모형(utility difference model)이 가장 널리 활용되고 있다. 이 모형의 운용은 다음의 절차를 따른다. 우선 제시된 금액에 대해 지불의사가 있는 지 여부를 묻는 질문에 대한 응답을 모형화한다. 즉, “예” 또는 “아니오”의 이산응답을 모형화한 후 최우추정법을 통해 관련된 모수를 추정한다. 다음 단계로 분포의 성격과 평균값의 정의를 이용하여 WTP의 평균값을 계산한다.

응답자가 자신의 효용함수를 정확하게 알고, 주어진 화폐소득(m)과 개인의 특성벡터(S)에 근거하여 비시장재화의 상태(j)에 대해 느끼는 효용은 다음과 같은 간접효용함수 u 로 표현될 수 있다.

$$u = u(j, m; S), \quad j = 0, 1 \quad (1)$$

여기서, $j = 0$ 은 비시장재화를 이용할 수 없는 또는 비시장재화가 보존되지 않는 상태를 의미하며 $j = 1$ 은 비시장재화를 이용할 수 있는 또는 비시장재화가 보존되는 상태를 의미한다. 그런데 연구자에게는 응답자가 측정대상 비시장재화의 상태 변화를 선택 또는 거부하는 데 있어 관측이 불가능한 부분이 존재한다. 따라서 간접효용함수는 다음과 같이 관측 가능한 확정적인 부분 $v(j, m; S)$ 과 관측 불가능한 확률적 부분 ϵ_j 로 구성된다.

$$u(j, m; S) = v(j, m; S) + \epsilon_j \quad (2)$$

간접효용함수에 영향을 미치는 확률적 성분인 ϵ_j 는 j

에 상관없이 독립적이면서 동일한 분포를 갖는(independently and identically distributed) 확률변수로 평균은 0이다. 각 개인이 효용을 최대화한다고 가정하자. 그렇다면 각 개인은 다음의 조건을 만족할 때, “당신은 비시장재화의 이용을 위해 A 를 지불할 의사가 있습니까?”란 질문에 대해 “예”라고 대답하면서 A 를 기꺼이 지불함으로써 효용을 최대화한다.

$$v(1, m - A; S) + \epsilon_1 \geq v(0, m; S) + \epsilon_0 \quad (3)$$

또는

$$v(1, m - A; S) - v(0, m; S) \geq \epsilon_0 - \epsilon_1 \quad (3')$$

이제 효용의 격차와 오차항의 격차를 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \Delta v(A) &\equiv v(1, m - A; S) - v(0, m; S) \\ \eta &\equiv \epsilon_0 - \epsilon_1 \end{aligned} \quad (4)$$

그렇다면 “예”라고 응답할 확률은 다음과 같이 표현된다.

$$\Pr\{\text{응답이 “예”}\} = \Pr\{\Delta v(A) \geq \eta\} \equiv F_\eta[\Delta v(A)] \quad (5)$$

여기서 $F_\eta(\cdot)$ 는 η 의 누적분포함수(cdf, cumulative distribution function)이다. “예”란 응답은 $\Delta v \geq 0$ 일 때 관측되며, “아니오”란 응답은 $\Delta v < 0$ 일 때 관측된다. 지금부터 C 로 표기할 WTP는 확률변수로서 이의 cdf는 $G_C(A)$ 로 정의된다. 한편 식 (5)는 다음과 같이 다르게 표현될 수 있다.

$$\Pr\{\text{응답이 “예”}\} = \Pr\{C \geq A\} \equiv 1 - G_C(A) \quad (6)$$

따라서 식 (5)와 식 (6)을 비교하면 다음의 관계식을 구할 수 있다.

$$1 - G_C(A) \equiv F_\eta[\Delta v(A)] \quad (7)$$

이 결과는 이산반응모형 (5)를 적합시키는 것이 곧 WTP의 분포함수인 $G_C(\cdot)$ 의 모수를 추정하는 것으로 해석될 수 있다는 점을 시사한다. 이 때 C 는 $j=0$ 상

태에서 $j=1$ 의 상태로 변화하기 위한 WTP이다. C_j 가 음의 값도 가질 수 있을 때의 평균(C^+)은 다음과 같이 계산된다.

$$C^+ = E(C) = \int_0^{\infty} [1 - G_C(A)] dA - \int_{-\infty}^0 G_C(A) dA \quad (8)$$

3-3. 이중경계 스파이크 모형

이중경계 양분선택모형은 Hanemann et al.(1991)에 근거한다. i 번째 응답자는 첫 번째 제시금액(A_i)을 지불할 지 여부에 대해 “예” 혹은 “아니오”로 응답한다. “예”라고 응답한 응답자에게 제시되는 두 번째 금액과 “아니오”라고 응답한 응답자에게 제시되는 두 번째 금액은 각각 A_i^H 및 A_i^L 로 표시한다. 아울러 WTP 질문에 대한 응답을 간단하게 나타내기 위해 다음과 같이 몇 가지 변수를 더 정의한다.

$$\begin{cases} I_i^{YY} = \mathbf{1}(i\text{번째 응답자의 응답이 “예-예”}) \\ I_i^{YN} = \mathbf{1}(i\text{번째 응답자의 응답이 “예-아니오”}) \\ I_i^{NY} = \mathbf{1}(i\text{번째 응답자의 응답이 “아니오-예”}) \\ I_i^{NN} = \mathbf{1}(i\text{번째 응답자의 응답이 “아니오-아니오”}) \end{cases} \quad (9)$$

$\mathbf{1}(\cdot)$ 은 인디케이터함수로서 괄호 안의 조건이 만족되면 1의 값을 취하고 만족되지 않으면 0의 값을 갖는다. 예를 들어, I_i^{YY} 는 i 번째 응답자의 응답이 “예-예”이면 1이고, 아니면 0의 값을 취한다. 이제 효용극대화를 추구하는 응답자 N 명의 표본을 가정할 경우 i 번째 응답자의 응답결과를 구분하여 다음과 같이 로그-우도함수를 구성할 수 있다.

$$\ln L = \sum_{i=1}^N \left\{ I_i^{YY} \ln [1 - G_C(A_i^H)] + I_i^{YN} \ln [G_C(A_i^H) - G_C(A_i)] \right. \\ \left. + I_i^{NY} \ln [G_C(A_i) - G_C(A_i^L)] + I_i^{NN} \ln G_C(A_i^L) \right\} \quad (10)$$

이제 0(영)의 WTP를 명시적으로 다룰 수 있는 스파이크 모형에 대해 정형화한다. 식 (9)의 마지막 부분에 있는 “아니오-아니오”의 응답은 0의 WTP와 두 번째 제시금액(A_i^L)보다 작은 양의 WTP로 구분되므로, I_i^{NN} 은 다시 I_i^{N0Y} 와 I_i^{N0N} 로 세분화된다.

$$\begin{cases} I_i^{N0Y} = \mathbf{1}(i\text{번째 응답자의 응답이 “아니오-아니오-예”}) \\ I_i^{N0N} = \mathbf{1}(i\text{번째 응답자의 응답이 “아니오-아니오-아니오”}) \end{cases} \quad (11)$$

WTP의 누적분포함수를 $G_C(\cdot; \theta)$ 라 하고 이를 로지스틱(logistic) 함수로 가정하여 스파이크 모형을 구성하면 평균값 WTP를 추정할 수 있다. 스파이크 모형에 있어서, $\theta = (a, b)$ 일 때 WTP의 누적분포함수는 식 (12)와 같이 정의되며,

$$G_C(A; \theta) = \begin{cases} [1 + \exp(a - bA)]^{-1} & \text{if } A > 0 \\ [1 + \exp(a)]^{-1} & \text{if } A = 0 \\ 0 & \text{if } A < 0 \end{cases} \quad (12)$$

이중경계 양분선택 스파이크 모형에 대한 로그-우도함수는 식 (13)과 같다.

$$\ln L = \sum_{i=1}^N \left\{ I_i^{YY} \ln [1 - G_C(A_i^H)] + I_i^{YN} \ln [G_C(A_i^H) - G_C(A_i)] \right. \\ \left. + I_i^{NY} \ln [G_C(A_i) - G_C(A_i^L)] \right. \\ \left. + (I_i^{N0Y} + I_i^{N0N}) \ln [G_C(A_i^L) - G_C(0)] + I_i^{NN} \ln [G_C(0)] \right\} \quad (13)$$

이 때 스파이크는 $1/[1 + \exp(a)]$ 로 정의되며 표본에서 0의 WTP를 갖는 응답자의 비중을 의미한다. 한편 식 (8) 및 식 (12)로부터 평균값 WTP는 다음과 같이 추정된다.

$$\overline{WTP} = (1/b) \ln [1 + \exp(a)] \quad (14)$$

4. 편의 추정

4-1. CVM의 적용

앞서 언급하였듯이 지불의사 유도방법으로는 미리 설정된 금액에 대해 지불의사가 있는지를 질문하여 응답자가 ‘예/아니오’로 대답하는 방식으로 이루어지는 양분선택형 질문을 택하였다. 질문시 응답자는 제한된 소득하에서 IGCC 발전을 위해 비용부담이 필요하며, 소득은 이 외에도 여러 용도로 지출되어야 한다는 사실과 정부가 관심을 기울여야 할 대상은 IGCC 발전 외에도 많다는 사실을 고려하여 응답할 수 있도록 하였다.

제시금액은 최종적으로 얻고자 하는 WTP의 평균값에 민감한 영향을 미칠 수 있으므로 세심한 주의를

기율이 산정되어야 한다. 설문조사에서는 50원부터 600원까지 범위의 총 8개의 첫 번째 제시금액을 거의 비슷한 수의 응답자들에게 배분하였다. 이중경계 양분선택형 질문을 할 때 두 번째 제시금액을 어떻게 설정해야 할지가 중요하다. 사전적으로 최적 제시금액을 결정하는 것은 거의 불가능하므로 각종 모의실험으로부터 얻은 결과이자 국제적으로도 널리 통용되는 관례를 적용하였다. 이로써 첫 번째 제시금액에 대하여 ‘예’라고 응답한 사람들에 대해서는 2배의 금액을, ‘아니오’라고 응답한 사람들에 대해서는 1/2배의 금액을 제시하는 이중경계 양분선택형 질문법으로 조사를 실시하였다.

4-2. CVM 모형 추정결과

IGCC 발전으로 인한 에너지안보에 대한 우리나라 가구 평균 WTP를 추정하기 위한 설문조사는 무작위로 추출된 전국 600가구를 대상으로 실시되었다. Table 2 는 이중경계 스파이크 모형의 추정결과를 담고 있는데,

추정계수는 모두 유의수준 1%에서 통계적으로 유의하다. Wald 통계량의 p -값이 1%보다 작으므로 추정방정식에 있는 모든 추정계수들의 값이 0이라는 귀무가설이 유의수준 1%에서 기각된다. 한편 스파이크는 유의수준 1%에서 통계적으로 유의하며 0.7436로 추정되었다. 실제로 절반 이상의 응답자들이 0의 WTP로 응답하였으므로, 이를 반영할 수 있는 모형인 스파이크 모형의 적용이 적절하다.

이중경계 스파이크 모형의 추정결과와 식 (14)를 이용하여 구한 평균 WTP의 추정값은 Table 3에 요약되어 있다. 분석결과 전체 가구당 추가적인 평균 WTP는 6.05원/kWh 이었고, t -값은 4.81로 유의수준 1%에서 통계적으로 유의하다.

추가적인 평균 WTP 추정에 수반된 불확실성을 반영한 신뢰구간의 계산을 위해 Krinsky and Robb(1986)이 제안한 모수적 부트스트랩(parametric bootstrap) 기법인 몬테칼로 시뮬레이션 기법을 적용하였다. 무작위 반복표본추출의 회수는 5,000번으로 하였으며, 90%

Table 2. Estimation results of the spike model without covariates

Variables	Coefficient estimates
Constant	-1.0650 (-11.36)*
Bid amount ^a	-0.4902 (-5.11)*
Spike	0.7436 (41.61)*
Number of observations	600
Log-likelihood	-354.95
Wald statistic ^b (p -value)	1,731.52 (0.000)

Notes: ^aThe unit is Korean won. ^bThe null hypothesis is that all the parameters are jointly zero and the corresponding p -value is reported in the parentheses beside the statistic. * indicates the statistical significance at the 1% level. The numbers in parentheses beside the coefficient estimates are t -values.

Table 3. Estimation results of the additional mean willingness to pay (WTP)

(unit: won/kWh)

Variables	Estimates
Mean additional WTP	6.05
t -value	4.81*
90% confidence interval ^a	4.43 to 9.08
95% confidence interval ^a	4.21 to 10.14

Notes: ^aThe confidence intervals are calculated by the use of the Monte Carlo simulation technique suggested by Krinsky and Robb(1986) with 5,000 replications. * indicates the statistical significance at the 1% level.

Table 4. Economic benefits from safeguarding energy security using integrated gasification combined cycle power plant

Mean additional willingness to pay (end of 2009)	Yearly electric power generated	Total yearly benefits
6.05 won per kWh	2.27TWh	13.74 billion won

신뢰구간 및 95% 신뢰구간을 Table 3에 제시하였다. 몬테칼로 시뮬레이션 기법의 적용 절차는 다음과 같다. 우선 (a, b)의 추정치와 이에 대한 분산-공분산 행렬을 이용하여 (a, b)의 다변량 정규분포로부터 (a, b)의 값을 발생시켜 평균 WTP를 계산하며 이 과정을 5,000번 반복한다. 이렇게 발생된 5,000개의 평균 WTP 값을 크기순으로 나열한 다음 양끝에서 각각 5%를 버리면 90% 신뢰구간을 얻을 수 있으며, 양끝에서 각각 2.5%를 버리면 95% 신뢰구간을 얻을 수 있다.

Table 3에 있듯이 추가적인 평균 WTP로 평가된 IGCC 발전소 건설의 에너지안보 확보편익은 1kWh 당 6.05원/kWh으로 나타났다. 95% 신뢰구간은 4.21원/kWh~10.14원/kWh으로 편익추정에 있어 보수적인 관점에서 접근할 수 있다.

4-3. 편익추정 결과 및 확장

1kWh 당 에너지안보 확보편익값에 IGCC 발전소의 예상 연간 발전량을 곱하면, 연도별 에너지안보 확보 편익을 구할 수 있다. 예상 연간 발전량은 송전단 설비용량에 IGCC 발전소 가동시간을 곱하여 산정한다.

$$\text{연간발전량 (GWh)} = \text{송전단설비 (MW)} \times 8,760(\text{Hour}) \times \text{이용률} \quad (15)$$

IGCC 발전소 설비용량은 380MW이지만 송전단 기준으로 305MW이며, 이용률을 85%로 가정하면 IGCC 발전소의 예상되는 연간 전력생산량은 2.27TWh이다. 이를 반영하며 Table 4와 같이 IGCC 발전소 건설로 인한 에너지안보 확보편익을 계산하면 연간 137.4억 원에 달한다.

5. 결론

IGCC 발전은 석탄을 고온 및 고압으로 기체 상태의 가스로 만들어 전기를 생산하는 친환경 기술이다. IGCC 발전소는 기존 화력발전소와 달리 낮은 품질의 저렴한 석탄도 사용할 수 있으므로 에너지수입 비용

을 줄일 수 있다. 특히 석탄은 세계적으로 널리 분포하며 매장량이 풍부하여 발전원료 확보가 용이해 발전소가 전기를 안정적으로 공급하는 데 기여한다. 기존 석탄화력발전소 대비 온실가스도 적게 배출할 뿐만 아니라 CCS와의 연계도 용이하기 때문에 현실적인 기후변화 대응방안으로 꼽히고 있다.

이러한 배경하에서 본 논문은 IGCC 발전소 건설의 에너지안보 확보편익을 CVM을 적용하여 구하고자 하였다. 지불의사 유도방법으로 이중경계모형을 적용하여 통계적 효율성을 높였다. 무작위로 추출된 전국 600가구를 대상으로 설문조사를 수행하였고, 0의 WTP를 명시적으로 다룰 수 있는 스파이크 모형을 결합하여 추정하였다. 추정결과, IGCC 발전으로 발생하는 에너지안보 확보에 대한 전국 가구의 추가적인 평균 WTP는 1kWh 당 6.05원이고, 연간 발생하는 총편익은 137.4억 원에 달한다.

본 논문의 구도는 다음과 같이 개선할 부분이 있다. 모수적 추정모형을 적용하였으나 좀 더 강건한(robust) 준모수적 추정모형을 적용할 필요가 있다. NOAA 가이드라인에 따르면 CVM 적용시 1,000가구를 조사하도록 되어 있다. 그러나 예산의 제약으로 가이드라인 준수의 한계가 있었기에 추후 응답자를 확대하여 조사할 필요가 있다. 또한 본 논문에서는 IGCC 발전소 건설로 인한 에너지안보 확보편익을 추정하였는데, 다른 발전원을 활용한 발전소에서 발생하는 편익을 추정한다면 서로 간의 비교가 가능하다.

발전소 건설을 위해서는 상당한 공적 재원이 투입되므로 IGCC 발전소의 건설로 인해 얻을 수 있는 편익에 대한 선행적인 분석이 필수적으로 요구된다. 본 논문의 결과는 IGCC 발전소 건설의 에너지안보 확보편익과 관련된 정량적 정보로 활용될 수 있을 것이다.

사 사

“이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.”

References

1. Arrow, K. Rolow, R. Portney, P. R., Leamer, E. E., Radner, R., Schuman, H. Report of the NOAA panel on contingent valuation. Federal Register, 1993, 58, 4601-4614.
2. Bang, G. Energy security and climate change concerns: Triggers for energy policy change in the United States? Energy Policy, 2010, 38, 1645-1653.
3. Damigos, D., Tourkolias, C., Diakoulaki, D. Households' willingness to pay for safeguarding security of natural gas supply in electricity generation. Energy Policy, 2009, 37, 2008-2017.
4. Greene, D. L. Measuring energy security: Can the United States achieve oil independence? Energy Policy, 2010, 38, 1614-1621.
5. Hanemann, M. W., Loomis, J. B., Kanninen, B. J., Statistical efficiency of double-bounded dichotomous choice contingent valuation. American Journal of Agricultural Economics, 1991, 73, 1255-1263.
6. Hanemann, W. M. Welfare evaluations in contingent valuation experiments with discrete responses. American Journal of Agricultural Economics, 1984, 66, 332-341.
7. Hipple, D. V., Savage, T., Hayes, P. Introduction to the Asian Energy Security project: Project organization and methodologies. Energy Policy, 2011, 39, 6712-6718.
8. Jang, J.-Y., Lee, J.-S., Yoo, S.-H. The public's willingness to pay for securing a reliable natural gas supply in Korea. Energy Policy, 2014, 69, 3-13.
9. Kim, J.-S., Kim, J.-H. Korean public's perceptions on supply security of fossil fuels: A contingent valuation analysis. Applied Energy, 2015, 137, 301-309.
10. Korea Development Institute. A feasibility study on the construction of the Korea model 300MW IGCC demonstration, 2010.
11. Krinsky, I., Robb, A. On approximating the statistical properties of elasticities. Review of Economics and Statistics, 1986, 68, 715-719.
12. Kriström, B. Spike models in contingent valuation, American Journal of Agricultural Economics, 1997, 79, 1013-1023.
13. Lefèvre, N. Measuring the energy security implications of fossil fuel resource concentration. Energy Policy, 2010, 38, 1635-1644.
14. Markandya, A., Pemberton, M. Energy security, energy modelling and uncertainty. Energy Policy, 2010, 38, 1609-1613.
15. Ministry of Trade, Industry & Energy. The 3rd basic plan for technology development, application, and deployment of new & renewable energy. 2008.
16. Ministry of Trade, Industry & Energy. The 4th basic plan of electricity demand and supply. 2014.
17. Mitchell, R. C., Carson, R. T. Using Surveys to Value Public Goods : The Contingent Valuation Method, Washington, D.C. : Resources for the Future. 1989.
18. Park, T. J., Loomis, B., Creel, M. Confidence intervals for evaluating benefits estimates from dichotomous choice contingent valuation studies, Land Economics, 1991, 67, 64-73.
19. Umbach, F. Global energy security and the implications for the EU. Energy Policy, 2010, 38, 1229-1240.
20. Yoo, S.-H., Kwak, S.-J. Using a spike model to deal with zero response data from double bounded dichotomous choice contingent valuation surveys. Applied Economics Letters, 2002, 9, 929-932.
21. Yoo, S.-H., Kwak, S.-J., Kim, T.-Y. Modeling willingness to pay responses from dichotomous choice contingent valuation surveys with zero observations. Applied Economics, 2001, 33, 523-529.