혼합 MDCEV 모형을 이용한 발전사업자의 최적 재생에너지 포트폴리오 구성에 관한 연구*

조만석** · 허성운*** · 이용길****

요 약

신재생에너지는 기후 변화에 대응하는 대체 에너지원으로서 뿐만 아니라 에너지 안보를 확충하고 친환경 산업을 선도하는 성장 동력으로서 그 중요성이 부각되고 있다. 특히 다양한 신재생 에너지원이 존재하고, 각각의 기술적, 경제적 특성이 다르다는 사실을 고려할 때, 저탄소 녹색성장 정책에 따라 적정 신재생에너지 원별 포트폴리오를 마련하고 이에 따른 대응전략을 마련하는 연구가 필요하다. 본 연구는 향후 어떤 재생에너지원을 개발하여 각각으로부터 얼마나 많은 양의 발전을 하는 것이 각 발전사업자에게 유리한지 다중 이산-연속 모형 중 하나인 MDCEV(Multiple Discrete-Continuous Extreme Value) 모형을 사용하여 정량적으로 분석하였다. 분석 결과 풍력발전이 현재로서는 최적의 재생에너지원인 것으로 나타났으나, 의무할당제도의 시행이 태양광발전의 긍정적인 영향을 미치는 것으로 분석되어 향후 태양광발전 확대가 유리해 질 수 있음을 확인하였다. 또한 본 연구에서는 재생에너지 기술개발로 인한 발전단가 하락 및 설치비용 하락 등 외부적 환경이 변화하였을 때를 대비한 재생에너지 포트폴리오 구성에 대해서도 고려하였으며, 태양광발전의 발전단가가 풍력보다 1.5배 정도로 높아도 기술투자만 풍력발전보다 20% 이상 이루어진다면 우리나라 발전사업자들에게 태양광발전이 풍력발전보다 유리해질 수 있음을 분석하였다. 본 연구는 발전 부문 재생에너지 포트폴리오 구성에 대해 정량적인 분석을 수행하고 발전사업자들에게 특화된 결과를 제시한 선제적인 연구로서 향후 발전사업자들이 재생에너지 포트폴리오를 구성할 때 정량적 근거로서 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

주요 단어 : 다중 이산-연속 모형, 재생에너지 포트폴리오, 발전사업자, 다양성
탐색 주체, 혼합 MDCEV 모형, 베이지안 추정 방법
경제학문헌목록 주제분류 : Q28, Q48, Q55

-
- * 본 논문은 한국연구재단의 SSK(NRF-2015-S1A3A-2046742)와 중견연구자지원사업(2016R1A2B1014142)의 지원을 받았습니다.
** 위스콘신대학교 경영학부 마케팅학과 방문연구원, 제 1저자 (e-mail: mjo7@wisc.edu)
*** 캘리포니아대학교 버클리 캠퍼스 박사후연구원, 공동저자 (e-mail: sunghuh@berkeley.edu)
**** 인하대학교 에너지자원공학과 부교수, 교신저자 (e-mail: leedomingo@inha.ac.kr)

I. 서 론

기후 변화 대응을 위한 탄소 배출 감축 노력은 전 세계적으로 지속되고 있다. 1973년의 1차 석유파동, 1997년 교토의정서 채택, 2015년 파리 협약 등의 과정을 거치며 신재생에너지는 기후 변화에 대응하는 대체 에너지원으로서 뿐만 아니라 에너지 안보를 확충하고 친환경 산업을 선도하는 성장 동력으로서 그 중요성이 부각되고 있다. 이와 같은 배경 하에 각국은 신재생에너지에 대한 꾸준한 연구 개발과 보급 정책을 추진 중이다. 신재생에너지는 발전, 열, 수송 등 다양한 에너지 부문에 사용될 수 있는데, 지금까지는 상대적으로 가시적인 성과를 달성하기 쉬운 발전 부문이 가장 큰 주목을 받아왔다. 신재생에너지 지원을 이용한 발전은 발전 및 송전 과정에서 기존의 석탄, 석유, 천연가스, 원자력 발전과는 다른 특성을 지니고 있는데, 자연환경에 따른 입지 제약이 있으며, 전력계통 연계가 어렵고, 입출력이 불안정한 것 등을 꼽을 수 있다.

신재생에너지의 중요성이 점차 커짐에 따라, 다양한 관점에서 신재생에너지에 초점을 둔 연구들 또한 국내외에서 활발하게 발표되고 있다. 이들 중 특히 경제학적인 이슈를 분석한 연구들이 본 연구와 관련이 있는데, 기존 연구들은

신재생에너지 수요 예측 (구훈영 외, 2013; Huh and Lee, 2014), 신재생에너지에 대한 소비자 지불의사 분석 (이창훈 외, 2009; Lee and Heo, 2016), 신재생에너지의 경제적 가치 및 기술가치 평가 (Ben Amor et al., 2012; 전찬웅 외, 2014), 신재생에너지 확대 또는 신재생 정책 시행의 파급효과 추정 (김현제 외, 2010, 문영석 외, 2011; 김재화 외, 2015) 등 다양한 주제를 다루고 있다.

발전 부문 내의 신재생에너지 전략에서 가장 핵심적인 부분 중 하나는 신재생에너지 포트폴리오 구성 전략이다. 다양한 신재생 에너지원이 존재하고, 각각의 기술적, 경제적 특성이 다르다는 사실을 고려할 때, 여러 제약 조건 하에서 적정 신재생에너지 원별 포트폴리오를 마련하고 이에 따른 대응전략을 마련하는 연구가 반드시 필요하다.

따라서 발전사업자들이 향후 어떤 신재생에너지원을 개발하여 각각으로부터 얼마나 많은 양의 발전을 할 것인지를 정량적으로 분석하는 것이 필요하다. 또한 향후 신재생에너지 관련 정책 변화, 신재생에너지 기술개발로 인한 발전단가 하락 및 설치비용 하락 등 외부적 환경이 변화하였을 때를 대비한 신재생에너지 포트폴리오 구성을 고려할 필요도 있다.

본 연구에서는 이러한 연구목적을 달성하기 위해 다중 이산-연속 모형 중 하나인 MDCEV (Multiple Discrete-Continuous Extreme Value) 모형을 사용할 것이다. 이 모형을 사용하여, 발전사업자들의 특성과 규모에 맞는 적정 재생에너지원별 사용량을 정량적으로 도출하고, 이를 바탕으로 발전사업자들의 재생에너지원 구성 전략을 살펴볼 것이다. 따라서 본 연구는 MDCEV 모형의 적용을 통해 발전 부문 내 재생에너지를 정량적으로 분석함으로써, 발전사업자의 최적 재생 포트폴리오 구성을 도출하고 이를 근거로 정책적, 전략적 함의를 제안하고자 한다.

II장에서는 MDCEV 모형의 상세한 내용을 설명하고, 관련 문헌 연구를 소개할 것이다. 그리고 분석에 사용된 데이터를 설명하고, MDCEV 모형을 통해 분석된 결과를 서술하여 최종적으로 우리나라 발전사업자들의 최적 재생에너지 포트폴리오 전략을 제안한다.

II. MDCEV 모형

본 연구에서는 각 국가에 속한 여러 발전회사의 재생에너지에 대한 다중 선택과 재생에너지 발전량을 고려한다. 기존 이산선택모형은 주로 단일 선택, 즉, 상호배타적인 대안들 가운데 단 하나의 대안만을 선택하는 상황을 가정하였으므로 본 연구의 목적과는 합치되지 않는다. 본 연구에서 대안이 되는 재생에너지원 선택에서 각 발전사는 동시에 여러 가지 대안을 선택할 수 있고, 또한 대안 선택 이외에 대안의 사용량도 결정해야 한다. 이러한 이유로, 본 연구에서는 재생에너지원에 대한 각 발전사의 선택기제를 분석하기 위해 MDCEV (Bhat, 2005)를 이용한다. MDCEV 모형은 본 연구 대상에 걸맞게 이산선택뿐만 아니라 연속적인 사용량까지 분석 가능한 모형이고, 확률 효용 모형 및 이산선택모형의 연장선상에 있다.

1. 확률효용이론 및 이산선택모형

이산선택모형은 미시경제학의 확률효용이론 (Random Utility Model)에 기초하고 있다. 확률효용이론은 선택 주체의 효용을 연구자가 관측 가능한 확정적인 부분 (Deterministic Part)과 연구자가 관측할 수 없는 임의적인 부분 (Unobserved Random Part)로 나눈다.

$$U_{njt} = V_{njt} + \epsilon_{njt} \quad (1)$$

식 (1)에서 n 은 선택 주체를, j 는 대안을, t 는 선택 상황을 의미한다. 즉, U_{njt} 는 t 시점에서 대안 j 를 선택한 소비자 n 의 효용을 의미한다. V_{njt} 는 확

혼합 MDCEV 모형을 이용한 발전사업자의 최적 재생에너지 포트폴리오 구성에 관한 연구

정적인 부분, ϵ_{njt} 는 임의적인 부분을 의미한다.

확률효용이론에서 확정적인 부분은 다음 식 (2)와 같이 선택 주체들의 특성과 대안의 속성 부분의 함수로 생각할 수 있다.

$$U_{njt} = V_{njt} + \epsilon_{njt} = V(x_{njt}, s_{nt}) + \epsilon_{njt} \quad (2)$$

이 때, x_{njt} 는 j 대안에 대한 속성을 의미하고, s_{nt} 는 소비자 n 의 특성을 의미한다. 확률효용이론에서는 모형의 단순화를 위해, 이러한 확정적인 부분이 선형함수로 이루어진다고 가정하는 것이 일반적이다. 이를 나타낸 것이 식 (3)이다.

$$U_{njt} = V(x_{njt}, s_{nt}) + \epsilon_{njt} = \beta'_{njt} x_{njt} + \alpha'_{njt} s_{nt} + \epsilon_{njt} \quad (3)$$

β_{njt} 는 선택주체의 한계효용으로서, 대안의 특성 효용에 대한 계수를 의미하고, α_{njt} 는 소비자의 특성에 대한 계수를 의미한다.

이러한 확률효용이론을 기반으로 소비자 n 이 대안 i 를 선택할 확률은 다음 식 (4)과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{\ni} &= \Pr(U_{\ni} > U_{nj} \quad \forall j \neq i) = \Pr(V_{\ni} + \epsilon_{\ni} > V_{nj} + \epsilon_{nj} \quad \forall j \neq i) \\ &= \Pr(\epsilon_{nj} - \epsilon_{\ni} < V_{\ni} - V_{\ni} j \neq i) \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)의 선택확률은 임의적인 부분인 ϵ_n 의 누적밀도함수 (Cumulative Density Function, CDF)와 동일한 구조를 가지고 있으며, 따라서 ϵ_n 의 확률 밀도함수 (Probability Density Function, PDF)인 $f(\epsilon_n)$ 의 적분과정을 통해 직접적인 값을 산출해 낼 수 있다. 이산선택모형은 이 $f(\epsilon_n)$ 을 어떻게 정의하느냐에 따라 각기 다른 형태를 가지게 된다.

이산선택모형의 가장 초기적인 모형은 McFadden (1974)이 제시한 다항로짓모형 (Multinomial Logit Model)이다. 다항로짓모형은 여러 가지 대안 중 가장 높은 효용을 주는 대안 한 가지를 선택하는 상황을 가정하고 있다. 이 모형이 로짓 (Logit) 모형으로 분류되는 이유는, 임의적인 부분인 ϵ 의 확률밀도함수가 독립적이고, 동일한 형태의 제 1형 극한분포 (Independent, Identical Type 1 Extreme Value Distribution)을 따르기 때문이다. 제 1형 극한분포를 갖는 확률변수간의 차는 로지스틱 분포 (Logistic Distribution)를 따르며, 이를 이용해 누적밀도함수를 도출해내므로 로짓으로 불린다.

다항로짓모형은 간단한 수식으로 인해 추정이 쉽다는 장점이 존재하지만 선택대안 간의 독립성(Independence from Irrelevant Alternatives, IIA)이 가정되기 때문에, 대체 및 보완관계에 놓여있는 현실을 반영하지 못하는 한계점이 있다. 한 가지 대안의 선택 확률은 다른 대안의 추가 및 제거에 의해 변화되어야 한다. 다항로짓모형에서는 또한, 각 선택 주체별로 계수가 모두 똑같다고 가정하기 때문에 선택주체의 선호 상 이질성을 가정하지 않는 단점이 있다(Train, 2009). 이렇듯 다항로짓모형은 간단하고 쉽게 사용할 수 있다는 장점이 존재하지만 현실을 반영하는데 제약조건이 많아 본 연구에서는 분석 모형으로 사용하기에 어려움이 있다.

위의 다항로짓모형은 여러 가지 대안 중 하나의 대안만을 선택하는 상황을 가정했으나, 본 연구의 대상은 동시에 여러 가지 대안을 선택할 수 있다. 이러한 상황을 분석하기 위해 개발된 것이 다변량 프로빗 모형 (Multivariate Probit Model, MVP)이다. 다변량 프로빗 모형에서 선택 주체는 대안들 중 선택 주체에게 주는 효용이 양의 값을 가지면 모두 선택한다고 가정한다.

다변량프로빗 모형에서는 로짓모형과 달리 IIA 제약이 완화된다. 프로빗모형에서는 임의적인 부분인 ϵ 이 평균이 0인 정규분포를 따르게 되며, 다변량프로빗모형에서는 ϵ 이 모든 차원의 평균이 0이고 공분산 행렬 Σ 를 갖는 다변량정규분포를 따르는 것으로 가정한다. 공분산 행렬의 존재로 인해, 교란항

사이의 상관관계를 살펴볼 수 있게 되며, 이로써 대안 간 대체 및 보완 관계를 표현할 수 있게 된다. (Baltas, 2004)

2. MDCEV 모형

MDCEV 모형 역시 확률효용이론을 기반으로 한다. 위 II장 1절에서 설명하였듯, 확률효용이론에서는 선택 주체가 대안을 선택하면서 발생하는 효용을 확정적인 부분(Deterministic part)과 임의적인 부분(Random part)으로 나누어 설명한다. 확률효용이론은 미시경제학이론 중 하나로서, 모든 선택주체가 자신의 효용을 극대화하기 위한 행동을 한다는 효용극대화 가정을 받아들인다. MDCEV 모형에서 선택주체들은 효용을 극대화하는 대안들을 선택하고 그 선택에 대한 사용량을 결정하게 된다.

Kim et al(2002)는 가산적 변형 효용 구조 (Translated Additive Utility Structure)를 바탕으로 한 소비자 수용 모형을 제시한 바 있다. Kim et al(2002)의 모형을 바탕으로 Bhat(2005)는 임의적 부분인 ϵ 이 독립적이고 동일한 제 1유형 극한분포를 가진다고 가정하여 선택확률과 예상 사용량을 직접 계산할 수 있게 모형을 수립하였다.

MDCEV 모형에서 K 개의 대안 가운데 선택 주체가 선택한 각 대안 j 에 대한 소비량을 m 이라고 하면 소비자의 효용은 다음과 같다.

$$U = \sum_{j=1}^K \phi(x_j)(m_j + \gamma)^{\alpha_j} \quad (5)$$

식 (5)에서 $\phi(x_j)$ 는 대안 j 가 기본적으로 제공하는 효용 (Baseline Utility)이며, x_j 는 대안의 관찰 가능한 속성 (Observed Characteristic)을 의미한다. γ 는 수식 상 이 효용극대화 방정식에서 경계해 (Corner Solution)가 가능한지, 아니면 내부해 (Interior Solution)만이 가능한지 결정하는 상수이다. α_j 는

포화 매개변수(Satiation parameter)로서, 대안에 대한 소비량이 늘어날수록 그 대안에 대한 단위 소비량 당 느끼는 효용이 감소한다는 한계효용체감법칙(Law of diminishing marginal utility)의 효과를 반영할 수 있다. 식 (5)가 유효하기 위해서는 $\phi(x_j)$ 가 양수여야 하고, α_j 는 0 초과 1 미만의 값을 가져야하기 때문에 이 제약조건을 자동적으로 반영하기 위하여 $\alpha_j = 1/(1 + \exp(-\delta_j))$ 로 변환할 수 있고, 이 때 δ_j 는 포화정도에 영향을 미치는 선택 주체별 특성을 나타내기 위해 $\delta_j = \theta'_j s_j$ 로 쓸 수 있다. 이 때, s_j 는 j 번째 대안에 대한 선택 주체별 특성을 나타내는 벡터가 된다.

어떤 선택주체가 특정 대안 j 에 대해 높은 $\phi(x_j)$ 와 높은 α_j 를 가진 경우, 그 선택주체는 한 가지 대안만 많이 사용하게 되며 이를 동질성탐색 주체(Homogeneity-seeking Individual)라 한다. 반대로, 어떤 선택주체가 전 대안에 걸쳐 고른 $\phi(x_j)$ 와 낮은 α_j 를 가진 경우, 이 선택주체는 거의 모든 대안을 고르게 사용하게 되며 이를 다양성탐색 주체(Variety-seeking Individual)이라 한다. 이처럼 효용 형태를 통해 선택주체의 행동 메커니즘을 특성화할 수 있다.

기본효용(Baseline Utility)의 함수는 MDCEV에서 다음 식 (6)과 같이 가정된다.

$$\phi(x_j, \epsilon_j) = \phi(x_j) \cdot e^{\epsilon_j} = e^{\beta'x_j + \epsilon_j} \quad (6)$$

식 (6)을 이용하면, 식 (5)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$U = \sum_{j=1}^K e^{\beta'x_j + \epsilon_j} (m_j + \gamma_j)^{\alpha_j} \quad (7)$$

각 선택주체들은 가능한 전체 사용량인 $M = \sum_{j=1}^K m_j$ 내에서 대안 별 사용량을 적절히 분배하여 효용함수를 극대화한다. 이 때, 임의적인 부분인 ϵ_j 가

혼합 MDCEV 모형을 이용한 발전사업자의 최적 재생에너지 포트폴리오 구성에 관한 연구

유형 1 극한분포를 가진다고 가정하면, 소비자가 K 개의 대안 중 I 개를 선택할 확률은 다음과 같다(Bhat, 2005).

$$P(m_2, m_3, \dots, m_I, 0, 0, \dots, 0) = \left(\prod_{i=1}^M c_i \right) \left(\prod_{i=1}^M \frac{1}{c_i} \right) \left(\frac{\prod_{i=1}^M e^{V_i}}{\left(\sum_{j=1}^K e^{V_j} \right)^M} \right) (M-1)! \quad (8)$$

식 (8)에서 $c_i = \left(\frac{1 - \alpha_i}{m_i^* + \gamma} \right)$ 로 정의되며, 확정적인 효용 부분인 V_j 는 포화 계수를 포함하여 $V_j = \beta' x_j + \ln \alpha_j + (\alpha_j - 1) \ln(m_i^* + \gamma)$ 형태로 나타난다. 이 식에서도 살펴볼 수 있듯이, $M=1$, $\alpha_j = 1$, $m_i = 0$ for $i \neq j$ 라고 가정하면, 하나의 대안만 선택하는 상황이 되며, 이는 곧 일반적인 다항 로짓모형(Multinomial logit model)의 선택확률과 같음을 알 수 있다. 이를 통해, MDCEV 모형은 로짓모형에 연속변수를 반영한 로짓의 확장 모형임을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 재생에너지에 대한 선택여부 및 사용량을 분석하기 위해 MDCEV모형이 발전된 형태인 혼합 MDCEV모형(Mixed MDCEV model)을 이용한다. 혼합 MDCEV 모형 역시 MDCEV 모형을 개발한 Bhat (2005) 연구에 동시에 소개되고 있는 것으로서, MDCEV 모형을 임의계수모형(Random coefficient model)화한 것이다. 혼합 MDCEV모형은 한계효용에 관한 계수들(β)이 분포를 가지고 있다고 가정하여 선택주체 별 다양성(Heterogeneity)을 확인할 수 있다는 장점이 존재한다(Ahn et al, 2008). 한계효용계수에 분포가 있다는 말은 곧 한계효용의 분산값 역시 추정된다는 의미로서, 만약 통계적으로 유의하고 값이 상대적으로 큰 분산값이 추정되었다면 해당속성에 관해서는 응답자들의 선호가 큰 범위에서 다양하게 존재한다고 볼 수 있다. 신재생에너지의 경우, 자연환경에 대한 의존도가 커 각 지역별로 기본 선호가 다를 수 있고 발전환경에 따라 중요하게 생각하는 기술적, 환경적 속성이 다를 수

있기 때문에 본 연구에서는 각 속성에 대해 각 발전사업자가 갖는 한계효용이 충분히 다르다는 사실을 가정할 수 있는 혼합 MDCEV 모형을 사용하였다.

식 (5)를 보면, 포화 매개변수인 α 와 상수 γ 가 지수 관계로 묶여 있는 것을 확인할 수 있다. 두 계수가 이와같이 독립적이지 않기 때문에 통계적 추정을 위해서는 한 쪽 계수를 고정시키는 수밖에 없다 (Bhat, 2005). 신재생에너지의 경우, 어떤 특정 에너지를 전혀 사용하지 않는 경계해 (Corner solution)이 충분히 가능하기 때문에, 본 연구에서는 이하 모든 추정에서 γ 를 경계해를 허용하는 값인 1로 고정하여 사용하였으며 대신 풍부한 의미를 줄 수 있는 α 를 통계적으로 추정하였다.

3. 베이저안 추정 방법 (Bayesian Estimation)

혼합 MDCEV 모형은 여러 가지 요소를 분석할 수 있게 하는 장점이 있으나, 추정과정 상 계산이 복잡하여 고전적인 최우추정법을 사용하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 베이저안 추정방법을 이용하여 이러한 한계를 극복한다. 베이저안 추정방법은 고전적 추정방법에 비해 많은 장점이 존재한다. 우선 베이저안 추정방법은 고전적 추정방식의 약점인 초기값의 위치에 따라 최대 우도가 잘못 산정되는 문제를 피할 수 있다(Train, 2009). 베이저안 추정 결과는 뿐만 아니라, 고전적인 관점에서의 추정결과로도 변환이 가능하여 쉽게 의미를 비교할 수 있다. 또한, 베이저안 추정방법이 복잡한 계산이 수반되는 추정에 이용할 경우, 고전적인 추정방법보다 제약조건을 적게 사용하면서도 효율적으로 일관된 결과를 얻을 수 있다.

베이저안 추정방법은 아래 식 (9)에 기재된 베이즈 정리를 이용하는 데에서 그 명칭이 유래한다.

혼합 MDCEV 모형을 이용한 발전사업자의 최적 재생에너지 포트폴리오 구성에 관한 연구

$$p(\text{parameter}|\text{data}) = \frac{p(\text{data}|\text{parameter})p(\text{parameter})}{p(\text{data})} \quad (9)$$

추정 대상인 주어진 자료의 조건 하에서 매개변수의 확률 분포는 식 (9)와 같이 베이즈 정리에 의해 알려진 항의 연산으로 조합이 가능하다. 이 때, 자료의 분포는 상수이므로 이를 아래 식 (10)과 같이 축약할 수 있다.

$$p(\text{parameter}|\text{data}) \propto p(\text{data}|\text{parameter})p(\text{parameter}) \quad (10)$$

여기에서 $p(\text{parameter})$ 는 매개변수에 대한 사전분포 (Prior distribution) 라고 하며, $p(\text{parameter}|\text{data})$ 는 추정해야 할 대상으로서, 매개변수의 사후 분포 (Posterior distribution)라고 한다. $p(\text{data}|\text{parameter})$ 는 정의에 따라 매개변수의 우도함수를 나타내고 이는 모형을 통해 직접 도출해 낼 수 있기 때문에, 사후분포를 구하기 위해서는 사전분포의 형태만이 필요하다. 사전분포는 매개변수 고유의 분포 형태를 의미하고, 이는 곧 매개변수에 대한 제약 조건을 정의하는 역할을 하게 된다. 연구자는 추정의 목적과 수식적 당위성에 근거하여 사전분포를 임의로 설정하게 된다. 이렇게 가정 된 사전분포와 우도 함수의 곱을 통하여 매개변수의 사후분포를 구할 수 있다. (Koop, 2003)

추정계수의 사후분포를 계산하여 수식에서 직접 도출하는 것은 매우 복잡할 뿐만 아니라 때로는 적분이 불가능하기 때문에 여기서는 깃스샘플링(Gibbs sampling)을 추출기법으로 한 몬테카를로 시뮬레이션을 사용한다(Allenby and Rossi, 1998; Hurber and Train, 2001; Train 2009). 마르코프 연쇄 몬테 카를로 (Markov Chain Monte Carlo, MCMC) 시뮬레이션 기법은 매 시행마다 추출된 사후분포의 값으로 마르코프 연쇄를 만들고, 이 연쇄를 잇는 조건부 확률 분포에서의 연속 샘플 추출을 통하여 한계 분포(Marginal distribution)로 수렴되는 매개변수의 사후분포를 도출한다. 사후분포의 평균값이 곧 매개변수의 추정치가 된다. 이 때 깃스샘플링은 여러 계수가 있는 경우

다른 계수를 고정시킨 상태에서 계수를 하나씩 번갈아가며 추출하는 기법을 의미한다. 예를 들어, 본 연구의 경우 최종적으로 혼합 MDCEV를 사용하였을 때의 우도함수는 다음 식 (11)과 같이 나타난다.

$$L(\beta, \alpha, \sigma, \eta) = \sum_{q=1}^Q \log \left[\int_{\eta} \int_{\mu} \left(\prod_{i=1}^M c_i \right) \left(\prod_{i=1}^M \frac{1}{c_i} \right) \left(\frac{\prod_{i=1}^M e^{V_i + \eta_i + \sigma_i}}{\left(\sum_{j=1}^K e^{V_j + \eta_j + \sigma_j} \right)^M} \right)^{M-1} dF(\eta) dF(\sigma) \right] \quad (11)$$

위의 우도함수에서 β 는 각 속성에 대한 한계효용, α 는 포화 매개변수, σ 와 η 는 각각의 분산을 의미한다. 깁스 샘플링을 활용하면, 먼저 각 계수의 기본값을 대입하여 위의 우도함수를 계산한 다음, η 의 값을 바꾸어 α 값을 새로이 추출하고, 바뀐 α, η 의 값에 따라 다시 최대우도함수를 계산한다. 같은 방식을 차례로 β, θ 에 적용하는 식으로 번갈아가면서 우도함수를 최대화시키는 계수 값을 찾는다. 혼합 MDCEV 모형의 경우 위의 수식에서도 확인할 수 있듯이 등장계수가 많고 수식이 복잡하여 계산이 많이 필요하므로 Bhat (2005)에서는 일반적인 임의추출보다는 Halton 수열 등을 활용한 준-의사임의추출 방법을 사용하기를 권장하고 있다. 본 연구에서도 그러한 방식을 그대로 차용하여 우도함수를 최대화 시키는 각 계수의 사후 분포를 도출하였으며, 사후 분포의 평균값과 분산값을 활용하여 통계적 유의성을 검증하였다.

Ⅲ. 신재생에너지 포트폴리오 분석을 위한 기존 문헌 연구

본 연구에서는 MDCEV 모형을 이용하여 발전사업자들에 최적화 된 재생 에너지 포트폴리오를 구성하는 것을 목표로 한다. 이 절에서는 기존에 행해졌던 신재생에너지 수요에 관한 연구를 먼저 살펴보고, MDCEV가 활용되었던 다른 분야의 연구를 살펴보아 본 연구의 학문적 기반을 마련하고자 한다.

1. 신재생 에너지 수요 및 포트폴리오 분석에 관한 연구

신재생에너지 선택 상황을 분석하기 위해서는 먼저 신재생에너지 이용에 영향을 미치는 요인에 대한 정보가 수집되어야 한다. 신재생에너지 이용에 영향을 미치는 요인에 대한 선행연구는 여러 가지가 있다. Zarnikau(2003)는 신재생에너지에 대한 소비자의 수요를 조사하기 위해 2800명에 대한 설문조사를 수행하고, 토빗 모형을 통해 이들의 지불의사액을 알아보았다. Wisner(2003)는 지불방법에 따른 신재생에너지 프리미엄 지불의사를 조건부 가치추정(Contingent Valuation Method)을 사용하여 추정하였고, 로짓 모형을 이용하여 소비자의 행태에 대해 분석하였다. 이러한 연구들은 비록 소비자에 한정되어 있으나 신재생에너지에 대한 지불의사액 도출을 했다는 점에서 본 연구에 함의를 제공한다.

우리나라의 연구로는 크게 두 가지 선행연구를 들 수 있다. 먼저, 전영서(2007)는 수요공급모형을 통해 대체에너지원에 대한 추정을 수행한 결과, 대체에너지 수요가 소득과 보조금에 대해서 양의 상관관계를, 대체에너지의 상대가격에 대해서 음의 상관관계를 갖는 것으로 밝혔다. 특히 정부의 보조금 지원정책이 실제 대체에너지 수요촉진에 큰 기여를 하는 것으로 나타나 보조

금이 매우 유효한 정책도구로 평가 받을 수 있다고 하였다. 이근대 외(2007)는 조사업체인 엠브레인을 통해 구조화된 웹 설문을 이용한 온라인 설문을 실시하여, 전력소비자들의 녹색전력에 대한 잠재수요를 추정하였다. 분석 결과, 평균 환경활동 수준과 신재생에너지에 대한 지식수준이 신재생에너지의 가격정책 및 수요에 긍정적인 역할을 할 것이라 밝혀내었다. 이러한 우리나라의 소비자 수요 연구들은 신재생에너지의 향후 잠재시장 규모를 대략적으로나마 추산하게 해줌으로써 분석을 위한 시나리오 수립에 함의를 제공한다.

위와 같이, 지금까지의 선행연구에서는 환경 또는 개개인의 특성이 신재생에너지 구매에 어떤 영향을 끼치는지에 대한 소비자 수요 연구가 주를 이루고 있음을 확인할 수 있다. 반면 개별 발전회사를 선택 주체로 놓고 각 기업들의 신재생에너지 발전에 어떤 설명 변수들이 어떤 영향을 끼쳤는지에 대한 총체적인 연구는 상대적으로 찾아보기 어렵다.

신재생에너지발전의 최적 포트폴리오 구성에 대해서도 선행 연구들이 수행되어 왔다. Doherty et al. (2005)은 아일랜드의 신재생에너지 발전에 대해 설비규모, 수명연한, 발전단가, CO₂ 배출량 등을 활용하여 선형계획법을 통해 비용이 최소화 되는 최적 신재생에너지 포트폴리오를 도출한 연구다. 이 연구에서는 특히 탄소세 증가와 연료 가격 상승 시나리오에 따른 최적 신재생에너지 발전비중을 도출하여, 본 연구와 유사한 목적을 지녔다고 볼 수 있다. Awerbuch (2006)은 Mean-variance portfolio 이론을 통한 신재생에너지 포트폴리오 구성을 제안한 연구로서, 특히 시장가격에 매우 민감한 화력발전 연료들과 달리 안정적인 발전단가를 형성하는 신재생에너지의 역할에 주목하였다. Daim et al. (2010)은 미국 오리건 주의 최적 신재생에너지 포트폴리오를 Fuzzy goal programming이라는 기법을 활용하여 도출한 연구로, 오리건 주에서 시행되고 있는 의무할당제도 기준에 맞추었을 때 설비건설비용, 발전비용, 토지사용, 환경에의 영향, 대중 수용성, 가격 안정성 등을 각각 최소화할 수 있는 최적의 신재생에너지 포트폴리오는 어떻게 되는지 분석한 연구이다.

이와 같이 신재생에너지 포트폴리오에 대한 선행연구들은 본 연구와 유사

혼합 MDCEV 모형을 이용한 발전사업자의 최적 재생에너지 포트폴리오 구성에 관한 연구

하게 신재생에너지 발전의 여러 속성이나 정책적 환경을 고려하여 최적 포트폴리오를 도출하는 연구를 수행하였다. 단, 현재까지 발전사 단위의 자료를 바탕으로 MDCEV와 같은 계량경제학적 방법론을 사용하여 신재생에너지 최적 포트폴리오를 분석한 연구는 찾아보기 어려우며, 그 점에서 본 연구의 차별성이 있다고 하겠다.

2. MDCEV 모형을 활용한 기존 연구

이산-연속 선택모형은 교통, 에너지 등 많은 분야에서 사용되고 있다. Kim et al. (2002)에서는 가산적 효용 모형(Translated additive utility structure)에 기반한 이산-연속 선택모형을 제시하였다. 이 모형에서 직접 효용함수는 비선형적(Non-linear)이고 가산적(Additive)이라고 가정하였다. 이 연구는 이러한 새로운 방법론을 바탕으로 가정에서 요거트를 선택하는 상황에 대해 실증분석을 진행하였다. 제시된 모형은 대안의 여러 가지 선택이 가능하고 한계효용 체감 이론(Law of diminishing marginal utility)을 반영 했다는 점에서 중요한 시사점을 갖는다. 하지만 추정식이 닫혀있는 형태(Closed form)가 아니기 때문에 직접적으로 추정치를 도출할 수 없고, 추정과정이 매우 복잡하여 실용적으로 활용하기 힘들다는 한계점이 존재하였다.

Bhat(2005)는 Kim et al. (2002)의 연구를 바탕으로 이산-연속 선택모형인 Multiple Discrete Continuous Extreme Value (MDCEV)모형을 제시하였고 이로써, 단일 대안 선택만 가능한 기존의 다항로짓모형의 한계점을 극복하였다. Bhat (2005)는 2000 San Francisco Bay Area Travel Survey(BATS) 자료를 바탕으로 MDCEV모형을 사용하여 사람들이 주말에 어떤 활동을 선택하고, 각 활동에 어느 정도 시간을 투자하는지에 대해 실증분석을 수행하였다. 이 연구는 Kim et al.(2002)의 모형의 한계점인 복잡한 추정 과정을 보완하고, 수식적인 완결성을 더한 새로운 MDCEV라는 모형을 제시했다는 것에

큰 의의가 있다.

Bhat and Sen (2006)은 가정의 특성과 위치, 자동차의 속성에 따라 가정에서 어느 종류의 자동차를 소유하고 얼마만큼 사용하는지 분석하였다. 분석 결과 많은 자녀가 있으면 스포츠 유틸리티 밴(SUV)을 선호하고 가정에 남자가 많을수록 픽업트럭을 선호한다는 것을 보였다. 또한 자동차 유지비용이 자동차 소유와 사용량에 대해 부정적인 영향을 미치는 것을 보여주어 속성의 한계효용 역시 분석하였다.

Bhat(2008)는 기존 연구에 더하여, 대안들 사이의 가격 차이를 반영할 수 있는 모형을 도입하였다. 이를 통해, MDCEV모형에서 오차공분산구조 (Error Covariance Structure)의 조건을 완화하였다.

에너지 분야에 관련한 연구로는 먼저 Ahn et al. (2008)이 있다. Ahn et al. (2008)은 컨조인트 설문과 MDCEV모형을 이용하여 대체에너지 자동차의 속성에 대한 선호분석을 진행하였다. 분석 결과, 소비자는 휘발유를 가장 선호하였고 CNG, 디젤, LPG, 하이브리드 순서로 선호도가 정해졌다. 포화 계수의 추정결과에서는 하이브리드가 가장 높아, 하이브리드 자동차가 아직 낮은 선택 확률을 가지고 있지만 높은 잠재력이 있음을 확인하였다. 현시선호 (Revealed Preference) 분석에서 사용된 MDCEV모형이 진술선호 (Stated Preference) 분석에서도 활용될 수 있었고, 또한 베이지안 방법론이 복잡한 MDCEV모형의 추정에 사용될 수 있었다는 것을 보여주었다는 시사점을 제공한다. 하지만 조사 당시 가정의 사용량을 바탕으로 추정하였기 때문에 연료 가격의 변화 또는 새로운 대안에 대해 분석을 진행 할 수 없었고, 표본에 이미 차를 가지고 있는 사람이 포함되어 있어 잠재적인 고객의 선호도를 알기 힘들었다는 것은 한계점으로 지적되었다.

또 다른 에너지 분야 관련 연구로, Jeong et al. (2011)은 MDCEV모형을 이용하여 가정에서 난방기기 및 에너지원 사용행태와 난방기기간 또는 에너지원간의 상관관계에 대해 연구를 진행하였다. 연구 결과, 가정에서 가스보일러가 난방 기기 중 가장 큰 효율을 주고 포화가 가장 적게 일어난다는 것을 밝

혼합 MDCEV 모형을 이용한 발전사업자의 최적 재생에너지 포트폴리오 구성에 관한 연구

했다. 또한 소득과 에너지원 사용행태에서는 가스가 전기에 비해 강한 선호를 보였으나, 포화 매개변수는 전기에 비해 약함을 보여주었다.

이와 같이, MDCEV 모형은 여러 분야의 연구에서 사용되었지만 아직까지 MDCEV 모형을 사용한 신재생에너지 도입행태에 대한 연구는 이루어지지 않았다. MDCEV모형은 대안 도입의 유무와 함께 사용량을 함께 반영하기 때문에 기존의 고전적인 이산선택모형에 비해 현실을 더 직접적으로 반영할 수 있다는 장점이 있고, 포트폴리오 구성을 위한 가장 적합한 계량적 방법론 중 하나이다.

IV. MDCEV를 이용한 재생에너지원 채택 요인 분석

이 절에서는 위에서 설명한 MDCEV 모형을 활용하여 우리나라 발전사업자들을 포함한 전 세계의 발전사들을 대상으로 분석한 결과를 서술한다. 재생에너지원에서는 수력이 제외되었으며, 4개의 에너지원에 분석의 초점을 맞추었다. 4개의 에너지원은 세계적으로 풍력이 월등한 위치에 있는 것으로 나타나, 이로 인하여 추정 상의 편이가 발생할 수 있는 것은 본 연구의 한계이다. 분석에 활용된 자료를 기술하며 이 자료를 활용하여 추정된 계수 값을 보이고, 이 결과를 해석한다. 이는 다음 장에서 우리나라 발전사업자들의 최적 재생에너지 포트폴리오를 도출하는 데에 활용된다.

1. MDCEV 분석에 사용된 자료

MDCEV 분석 수행을 위해서는 방대한 발전회사의 현시선호자료가 필요하다. 본 연구에서는 이 목적에 가장 적합한 데이터로서, 'UDI Directory of Electric Power Producers & Distributors (약칭 UDI EPPD)'자료와 'UDI

World Electric Power Plants Database (UDI WEPP)'의 2012년 출시 자료를 확보하였다. 이 중 실제로 분석에 사용된 것은 WEPP 자료로서 EPPD 자료를 활용하지 못한 것은 EPPD가 상세한 자료를 가지고 있긴 하나 대상이 북미에 한정되어 있고, 의미 있는 결과를 얻기 위해서는 우리나라 발전사들을 분석에 포함시켜야하기 때문이다. 우리나라만의 자료를 이용할 수 없는 것은 현재 우리나라에서 중간 규모 이상 발전사는 13개로 자료의 개수가 작아 분석이 불가능하므로 전 세계 자료를 활용하여야만 선택 및 사용량에 대한 충분한 현시선휘자료를 확보할 수 있기 때문이다.

분석에 사용된 변수는 다음 <표 1>에 정리하였다. 먼저 분석 대상이 되는 재생에너지로는 대표적인 4가지 재생에너지원으로 선정하였는데 이는 곧 태양광, 바이오매스, 지열에너지, 풍력에너지 이다. 수력 에너지를 제외한 것은 우리나라 수력 발전은 한국수력원자력이 독점적으로 관리하고 있고 있기 때문이다.

<표 1> MDCEV 분석을 위한 변수의 정의

변 수		설 명	자료 출처
사용량	설비용량 ¹⁾	각 발전사의 에너지원별 발전 설비 용량	WEPP (2012)
재생에너지원 별 속성	발전단가	지역별 개별 에너지원 발전 비용	IEA (2010)
	기술별 투자액	2011 신규 재정투자액, 자산금융투자, 신생 기업에 대한 벤처 캐피탈, 정부 및 기업 연구개발 투자액 추산 값	UNEP (McCrone et al., 2012)
국가별 속성	인구밀집도	단위 면적당 인구 수	World Bank Open Data ²⁾
발전사업형태	자가발전자 민간사업자 공공사업자	개인 소비 목적의 전력 생산자 전력 거래를 주목적으로 하는 민간업자 공공전력 생산이 주목적인 공공사업자	WEPP (2012)
신재생 에너지 촉진 정책	의무할당제도 발전차액지원 제도	신재생에너지 의무발전량을 강제 (RPS) 신재생에너지의 발전 비용의 일부를 지원 (FIT)	Klein, Held (2007) 한국에너지공단 ³⁾

1) WEPP가 발전기 단위의 자료를 구축하고 있는 것은 큰 장점인데, 용량 데이터만을 제공하고 있다. 따라서 본 고에서는 발전량 대신 불가피하게 설비용량을 이용하여 추정하

혼합 MDCEV 모형을 이용한 발전사업자의 최적 재생에너지 포트폴리오 구성에 관한 연구

분석대상이 되는 기업은 WEPP에서 자료를 제공하는 모든 발전 사업자 중 분석 대상 4개 재생에너지 중 하나라도 발전설비를 보유하고 있는 7,894개 발전사를 대상으로 하였다. 우리나라 발전사들의 자료 역시 자료의 일관성을 유지하기 위해 따로 구하지 않고, 상기 된 자료 출처에 기재된 자료를 그대로 이용하였다.

2. 계수의 추정 결과

본 연구는 MDCEV 분석을 위해 Ahn et al. (2008)이 사용한 추정 방식을 본 연구에 목적에 맞게 변형하여 사용하였으며, 이를 통해 MDCEV의 기본 효용 계수와 포화 매개변수를 추정하였다. 추정은 Gauss 6.0 프로그램을 이용하여 Bayesian 추정방식을 사용하였으며, 초기값 효과를 제거하기 위해 깃스 샘플링을 활용하여 얻은 20,000번의 결과 중 초기 10,000개를 제외한 뒤 10,000 개 값 중 각 10번째 값들을 추출하여 계수의 평균 및 분산을 얻었다. 각 에너지원의 발전단가와 기술별 투자액은 에너지원 별 자료가 있으므로 그대로 반영하였으나, 그 외 인구밀집도, 발전사업자 형태, 신재생에너지 촉진 정책 여부 등은 개별 신재생 에너지원에 대한 선호도를 분석하기 위해 교차항 (Interaction Term)으로 투입하였다.

MDCEV 모형의 추정을 통해 얻은 기본 효용 (Baseline Utility)의 계수 분석 결과는 다음 표와 같다.

였다. 설비용량을 이용하여 신재생 포트폴리오 추정 사례로는 Daim et al. (2010), Doherty et al. (2005) 등을 참조.

2) World Bank Open Data, <http://data.worldbank.org/> 를 참조

3) 한국에너지공단 신·재생에너지센터 사업소개 <http://www.knrec.or.kr/knrec/12/KNRECI21700.asp> 를 참조

<표 2> 기본 효용 계수 분석 결과

변수	평균	분산
태양광	2.1384**	0.0314**
바이오매스	0.1993**	0.0263**
풍력	-0.3598**	0.0174**
발전단가	-0.1295**	0.0003**
기술별 투자액	0.9993**	0.4229**
국가별 속성 변수		
인구밀집도*태양광	-0.1695**	0.0653**
인구밀집도*풍력	0.8605**	0.0369**
발전사업 형태		
자가발전자*태양광	2.4286**	0.0143**
자가발전자*풍력	-2.4774**	0.0112**
민간사업자*태양광	-0.0824	0.0125**
민간사업자*풍력	-0.2108**	0.0105**
공공사업자*태양광	-0.1139	0.0236**
공공사업자*풍력	1.8871**	0.0154**
재생 에너지 정책 변수		
발전차액지원제도*태양광	1.3265**	0.0216**
의무할당제도*태양광	0.5375**	0.0138**
발전차액지원제도*풍력	1.7238**	0.0192**
의무할당제도*풍력	-1.0184**	0.0138**

*: 5% 수준으로 유의

**: 1% 수준으로 유의

4개 재생에너지 대안 중 지열 발전을 기본 대안 (Base)으로 설정한 [표 2]의 분석결과에서, 전 세계 발전사는 평균적으로 태양광 에너지를 가장 선호하며 그 다음으로 바이오매스를 근소하게 선호하나, 풍력 발전을 선호하지는 않는 것으로 조사되었다. 태양광에 대한 기대가 예전과 같이 못한 상황에서, 태양광의 기초 선호도가 상대적으로 높게 나온 것은 최근 급격하게 증대되고 있는 소형 발전의 영향이라고 해석할 수 있다. 다른 에너지원에 비해 태양광이 소형 발전에 유리하고, 분석 대상이 되는 기업 중 약 3,000개 기업이

1MW 이하의 재생에너지 설비를 운영하고 있는 발전사이므로 이러한 결과가 나올 수 있는 근거를 제공한다.

각 발전사는 각 재생에너지원의 발전단가가 낮을수록, 기술투자액이 높을수록 해당 재생에너지를 선호하는 것으로 분석되었다. 이는 자연스러운 결과로서, 재생에너지의 경쟁력이 낮은 발전단가와 높은 에너지 효율 달성에서 기인함을 실증적으로 보인 것이다. 풍력의 경우 <표 3>과 같이 실제 분석 대상이 된 발전사들의 발전용량 비중은 81%에 육박함에도 위에서 가장 기초 선호가 낮은 이유는 기술투자액 계수 추정 결과와 연계하여 해석될 수 있다.

<표 3> 분석대상 발전사의 에너지 발전 설비 용량

	태양광	바이오매스	지열	풍력
발전용량 (MW)	58,193	11,787	24,197	391,537
비중	12.01%	2.44%	4.89%	80.66%

풍력발전은 가장 현실적으로 활용 가능한 신재생에너지원으로 각광받고 있으며, 각 발전사의 기술투자액은 태양광의 3.7배에 이르는 것으로 나타난다. 따라서 풍력발전의 경우 압도적으로 높은 기술투자액에 비례하여 평균적으로 가장 높은 발전용량을 갖추고 있는 것으로 보인다. 발전단가 역시 풍력은 태양광의 30% 수준으로서 풍력발전이 높은 발전비중을 가질 수 있는 이유를 설명해 준다. 그러나 풍력 발전의 기초 선호 계수가 낮게 나온 것은 결국 풍력발전이 현재 과대평가되어 있다는 것을 시사하며, 태양광이 현재의 높은 발전단가와 낮은 기술투자액으로 인해 과소평가되어 있음을 시사한다.

특히 기술 투자액은 그 분산이 유의하면서 매우 큰 것으로 나타났는데 이는 각 발전사별로 재생에너지 발전 설비를 구축하는 데 있어 기술투자액의 영향이 매우 다양할 수 있음을 말한다. 즉, 특정 발전사의 경우 높은 기술투자가 이루어진 재생에너지원 발전설비를 집중적으로 갖추는 한 편 기술투자와 큰 관계없이 재생에너지원 발전설비를 갖추는 발전사가 있다는 것이다. 이

러한 분산 계수의 분석 결과 역시 기술투자가 일반적으로 높은 풍력에너지를 선호하는 회사와 낮은 기술투자에도 불구하고 기타 에너지를 선호하는 회사 간의 차이를 보여주고 있다고 해석할 수 있다. 반면, 발전단가의 경우 유의한 분산 계수를 가지고 있으나 그 값이 매우 작은 것을 고려할 때 모든 발전사가 재생에너지 발전설비 채택에 있어 발전단가에 관한 매우 일관된 선호를 가지고 있음을 알 수 있다. 발전단가 계수의 절대치 역시 기술투자액보다 크므로 결과를 종합해볼 때, 발전단가가 기술투자보다 재생에너지원 선택에 더 결정적인 변수임을 확인할 수 있다.

국가 특성 변수로 선정한 인구밀집도 변수를 살펴보면, 인구밀집도가 높은 국가의 발전사는 풍력 발전을 선호하는 반면 태양광은 기피하는 것으로 나타났다. 보통 인구밀집도가 높은 지역에서는 소음 등의 이유로 인해 풍력 발전을 기피하는 것을 감안할 때, 이러한 결과가 의아하게 받아들여질 수 있으나 본 연구에서의 인구밀집도는 국가 특성 변수라는 점을 감안하여야 한다. 인구밀집도가 높은 국가일수록 전력수급 관리에 더욱 민감하기 때문에 더 효율적인 에너지원을 선호하게 되는데, 이는 곧 풍력이 태양광에 비해 더 안정적인 에너지원으로 인식되고 있음을 보여주는 것으로 해석할 수 있다. 다만, 국가 특성 변수로서의 인구밀집도는 그 한계가 분명하고 에너지원 선호와의 직접적인 연관성이 크지 않으므로 이를 통한 결과 해석에는 한계가 있다.

발전사업 형태에 따른 분석에서 먼저 자가발전 사업자는 태양광을 선호하는 것으로 나타났다. 태양광의 경우 소규모 발전이 가능하므로 자가발전 사업자가 발전설비를 갖추기에 매우 유리하므로 이는 자연스러운 결과로 볼 수 있다. 한편 공공 발전 사업자는 풍력을 선호하는 것으로 나타났는데 이는 태양광의 발전단가가 아직 높아 경제성이 약하고, 규모가 큰 공공 사업자의 경우 풍력 단지 등을 조성하는 데 현실적인 어려움이 훨씬 덜하기 때문인 것으로 해석할 수 있다. 민간발전 사업자의 경우에는 어떤 에너지원이든 간에 재생에너지 발전규모 확충에 소극적인 것으로 나타났다. 이는 아직 수익성이 좋지 않은 재생에너지 발전설비를 민간 발전 사업자가 기피하는 것으로 해석할

수 있다.

마지막으로 신재생에너지 정책 변수 분석 결과를 살펴보면, 발전차액지원제도가 태양광과 풍력에너지 발전설비 확충에 모두 긍정적인 영향을 미친 반면, 의무할당제도는 두 에너지원에 서로 다른 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 이는 발전차액지원제도의 경우 에너지원의 종류에 따라 고정 가격을 조정하여 에너지원 간 형평성을 조정하지만, 의무할당제도의 경우 에너지원에 관계없이 총 신재생에너지원 발전량을 고정하였기 때문에 발전설비를 시기적절하게 확충하기 용이한 에너지원과 그렇지 않은 에너지원 간에 차이가 나타날 수 있다. 분석 결과 의무할당제도 시행은 태양광 발전설비 확충에는 긍정적인 영향을 미치고 있으나 풍력에너지에는 부정적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 태양광의 경우 빠른 시간 내에 설비를 구축하는 것이 용이하나 풍력발전의 경우 부지 선정과 설비 구축 등에 있어 태양광보다 설치가 어렵기 때문인 것으로 해석된다. 특히 우리나라의 의무할당제도에서도 태양광 산업 육성 측면에서 태양광 별도 의무량을 할당한 만큼, 태양광이 의무할당제도로부터 여러 가지 긍정적인 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

MDCEV 모형은 기본 효용뿐만 아니라 포화 매개변수 분석 결과를 함께 제시하는 특징이 있다. 본 연구에서 도출한 포화 매개변수의 값은 다음 <표 4>와 같다.

<표 4> 포화 매개변수 분석 결과

	평균	분산
태양광	0.6154**	0.0017**
바이오매스	0.7089**	0.0008**
지열	0.3956	0.0012**
풍력	0.2956**	0.0009**

*: 5% 수준으로 유의

** : 1% 수준으로 유의

각 에너지원별 포화매개변수 결과를 살펴보면 매우 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 풍력에너지의 경우 가장 낮은 포화계수를 가지는 것으로 나타나, 풍력발전 설비를 대규모로 갖추고 있는 발전사라고 해서 풍력발전을 더 갖추려고 하지는 않는 것으로 분석되었다. 이는 풍력발전이 신재생에너지원 발전설비 중에서 기초가 되는 에너지원이 되기 때문인 것으로 해석 된다. 반면, 바이오매스나 태양광은 특성화가 가능한 재생에너지원으로 나타났는데 이는 곧 태양광 설비규모가 큰 회사는 추가 재생에너지 발전 설비로 태양광을 더 선호할 것임을 의미한다. 태양광이 이러한 규모의 경제를 가지는 이유로는 여러 가지가 있을 수 있으나, 태양광의 경우 설비규모를 확장하기가 어렵지 않고, 설비가 주로 제조업 기반 폐널에 의존적이기 때문에 자연스럽게 규모의 경제를 가지고 있는 것으로 해석할 수 있다. 반면 풍력발전의 경우 일정 규모 이상이 되면 풍력 단지를 확장하기가 쉽지 않아 새로운 부지를 모색해야 하며, 풍력 발전설비가 건물과 유사하여 더 큰 규모의 설비를 만들고 여러 설비를 만드는 것이 반드시 규모 경제적이 아니다.

이러한 분석결과는 우리나라 발전사업자들의 경우 향후 우리나라 신재생에너지 의무할당비율 확대에 맞추어 발전규모를 확대하기 위해서는 현재 주력하고 있는 풍력보다는 태양광과 바이오매스에 투자하여 향후 그 규모를 확대할 필요가 있음을 시사한다. 우리나라 발전사업자들의 공공 발전사업자라는 특성이 풍력발전에 집중하기에 용이한 조건을 제공하고 있으나, 상기하였듯 풍력발전에 대한 선호가 현재 과대평가되어 있을 가능성이 있으므로 포트폴리오를 확대하는 것이 권고되며 특히 현재 과소평가 된 태양광에 대한 투자를 추천하는 바이다.

3. MDCEV를 이용한 최적 재생에너지 포트폴리오 분석

MDCEV 모형을 통해 각 계수를 추정하고 나면, 각 대안 별 최적 사용량을 계산할 수 있다. Bhat (2005)에 따르면, 다음 식 (12)에 대한 최적화문제 해를

혼합 MDCEV 모형을 이용한 발전사업자의 최적 재생에너지 포트폴리오 구성에 관한 연구

구하는 것으로 각 대안에 따른 최적 사용량을 도출해 낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Max } \bar{U}_q &= \sum_j \left\{ \exp(\bar{\beta}x_{qj} + \bar{\sigma}_{qj}) \times (m_{qj} + \gamma)^{\bar{\alpha}_{qj}} \right\} & (12) \\ \text{subject to } \sum_j m_{qj} &= M_q, m_{qj} \geq 0 \end{aligned}$$

본 연구에서는 Gauss 프로그램을 활용하여 위 방정식의 해를 도출하였으며 해를 도출하기 위해 각 추정계수에는 사후분포로부터 임의추출된 값을 대입하였다.

우리나라의 경우 의무할당제도를 2012년부터 시행하였는데, 자료가 2011년의 자료로 구성되어 있으므로 자료에는 발전차액지원제도만을 시행하는 것으로 되어 있다. 따라서 최적 사용량 분석 시에는 우리나라가 의무할당제도를 시행한다는 가정 하에 분석을 하였다. 분석 결과 전 세계 발전사 최적 에너지원별 발전 비중과 우리나라 발전사업자들의 최적 에너지원별 발전 비중은 다음 <표 5>와 같이 분석 되었다.

<표 5> 최적 에너지원 별 사용량 비중 분석 결과

	태양광	바이오매스	지열	풍력
전 세계 발전사 평균 실제 비중	12.01%	2.44%	4.89%	80.66%
전 세계 발전사 평균 최적 비중	13.36%	2.06%	2.38%	82.19%
우리나라 발전사업자들의 WEPP 자료상 발전 비중	-	-	-	100%
우리나라 발전사업자들의 최적발전 비중	-	-	-	100%

위와 같이 MDCEV 분석 결과를 통해 얻은 전 세계 평균 각 에너지원별 최적 비중은 풍력과 태양광을 소폭 상승 시키고 바이오매스와 지열을 축소시키는 것으로 나타났다. 이는 현재 상대적으로 낮은 발전단가와 높은 기술투자가 이루어진 풍력발전에 더 많은 발전설비를 투자하는 것이 합리적인 것으로 분석되고, 또한 기초 선호도가 높은 태양광 역시 과소평가되어 있어 더 많은 발전 비중을 두는 것이 최적인 것으로 분석되었기 때문이다. 하지만 4개 재생에너지 중 태양광과 풍력에너지를 중점으로 변수를 선정하였기 때문에 상대적으로 변수가 덜 반영된 바이오매스와 지열의 발전 비중이 낮게 나온 것으로도 볼 수 있다.

우리나라 발전사업자들의 경우 2012년 말 현재 실제 신재생에너지 발전 비중은 풍력 44%, 태양광 30%로 이루어져 있고 소수력 25%에 연료전지 발전 설비까지 갖추고 있으나, WEPP 자료에서는 영흥 풍력발전 22MW만이 자료로서 제공되고 있다. 우리나라 발전사업자들의 태양광 발전 설비가 5MW 이하 발전 설비로 이루어져 있어 누락된 것인지는 알 수 없으나, 자료의 일관성을 유지하기 위해 분석에서는 WEPP 자료 그대로 영흥 풍력만이 반영된 자료를 이용하였다.

분석 결과 우리나라 발전사업자들은 풍력발전 100%를 그대로 유지하는 것이 최적인 것으로 나타났다. 주의할 것은 이것이 원 자료가 100%로 주어졌기 때문에 나타난 결과가 아니라는 점이다. MDCEV 모형에서 계수가 아닌 최적의 에너지원별 사용량을 도출할 때 에너지원 별 사용량 자료는 반영되지 않기 때문이다. MDCEV 분석에서 최적 사용량을 도출할 때는 각 발전사의 총 발전량 수치만이 이용되며, 따라서 최적 에너지원별 비중은 초기 자료와 관계없이 도출된다. 그러므로 우리나라 발전사업자들의 총 신재생에너지 발전량을 2012년 말 현재 실제 수치인 49.8MW로 바꾸어 계산하여도 결과는 똑같이 도출된다.

발전사업자들 뿐만 아니라 우리나라 발전사들이 대체로 풍력발전 100%로 결과가 도출되는 것으로 미루어보아, 우리나라의 공공사업자 위주의 발전 사

업자 구성 등이 풍력발전에 유리한 것으로 분석되었다고 볼 수 있다. 또한, 2012년 이전의 발전단가 자료를 사용해서, 태양광과 풍력의 발전단가 차이가 크고, 정부의 보조금 정책에 의해서도 최적의 포트폴리오가 변화할 수 있을 것이다.

현재로서는 풍력에너지에 집중하는 것이 최적의 전략으로 보이지만, 향후 발전단가와 기술투자액 변화에 따라 최적 포트폴리오가 달라질 수 있다. 우리나라 발전사업자들의 최적 포트폴리오 구성이 풍력 100%로 도출되었으므로, 어떤 가정 하에서 풍력 에너지의 비중이 낮아지는 게 최적의 해가 되는지를 찾았다. 풍력의 발전단가를 높이고 기술투자규모를 낮추는 것은 무리한 가정이 되므로, 이 분석을 수행할 때는 가장 대표적인 대안인 태양광의 발전단가를 낮추고 기술투자규모를 높이는 가정을 하였다. 즉, 계수의 추정치는 동일하다는 가정 하에서, 외부 투입 변수인 에너지원 별 발전단가와 기술투자규모의 값을 변화시켜 위 식 (12)의 최적해를 다시 구하는 방식으로 시뮬레이션을 한 것이며, 우리나라 발전사업자들의 최적 포트폴리오가 풍력 100%가 아닌 태양광발전 비중이 발생하는 시점을 분석한 것이 바로 아래 <표 6>에 나타난 결과다.

<표 6> 우리나라 발전사업자들의 최적 포트폴리오가 변화하는 시점

발전단가만 하락 시	태양광이 현재의 10% 수준이 되어도 태양광 발전을 하지 않음
기술투자만 확대 시	태양광에 대해 현재의 약 7.05배의 기술투자가 이루어지면 태양광 발전 시작
발전단가 50% 가정 시	태양광에 대해 현재의 약 4.16배의 기술투자가 이루어지면 태양광 발전 시작
발전단가 10% 가정 시	태양광에 대해 현재의 약 1.5배의 기술투자가 이루어지면 태양광 발전 시작

<표 6>의 결과는 우리나라 발전사업자들에게 풍력이 확실히 유리한 재생에너지원임을 다시 한 번 보여주고 있다. 태양광의 발전단가가 현재의 10%

수준으로 급격하게 떨어져도 우리나라 발전사업자들의 최적 포트폴리오는 풍력 100%로 나타나 발전단가의 하락만으로는 태양광 설비를 증축할 이유가 없는 것으로 나타났다. 기술투자액의 경우에도 타 에너지원에 대한 투자를 고정한 상태에서 태양광에 대한 투자를 7배 가까이 증대시켜야 태양광 발전을 시작하는 것이 최적인 것으로 나타나, 태양광이 최적의 대안이 되기 위해서는 태양광에 대한 기술투자가 크게 확대될 필요가 있음을 보여주었다. 타 에너지원의 발전단가가 고정된 상태에서 태양광의 발전단가가 50%가 된 상황을 가정하였을 때는 태양광의 기술투자 역시 4.2배 가량 증대 되어야 태양광 발전을 시작하는 것이 최적인 것으로 분석되었다. 현재의 태양광 대비 풍력발전에 대한 기술투자가 전 세계 평균 약 3.6배인 반면 발전단가는 태양광이 풍력발전의 3.3배인 것으로 미루어볼 때, 무리한 가정이 아닌 것으로 판단된다. 마지막으로, 태양광의 발전단가가 10%가 되는 시점에는 태양광에 대한 기술투자가 현재가 1.5배가 되어야 태양광을 시작하는 것이 최적인 것으로 분석 되었다.

V. 결론 및 토의

본 연구는 MDCEV 모형을 활용하여 전 세계 발전사업자를 대상으로 최적의 재생에너지 포트폴리오를 분석하고, 우리나라 발전사업자들만의 최적 재생에너지 포트폴리오를 도출하였다. 계수의 추정 결과, 인구밀집도가 높은 국가일수록 풍력발전을 선호하였으며 공공 발전사업자일수록 풍력발전을 선호하는 것으로 나타났다. 다만, 풍력발전의 기초 선호가 낮은 것으로 나타나 풍력 발전에 대해 전반적으로 과대평가가 있을 수 있음을 암시하였다.

우리나라 발전사업자들의 경우, 최적 재생에너지 포트폴리오는 풍력발전만 하는 것으로 분석되었는데 이는 우리나라의 공공사업자 위주의 발전에 따른 결과로 해석될 수 있다. 우리나라 발전사업자들의 최적 재생에너지 포트폴리

오에서 태양광 발전이 비중을 가지기 위해서는 현재의 7배 이상의 기술투자가 이루어져야 하는 것으로 분석되었는데, 이는 현재 풍력발전 기술투자의 약 2배를 의미한다. 태양광 발전단가가 50%가 되고, 기술투자가 약 4배가 될 경우, 태양광 발전을 시작하는 것이 최적으로 나타났다. 이는 풍력발전에 비해 여전히 발전단가가 150% 정도로 높은 상태를 의미한다. 그러나 기술투자가 풍력발전보다 20% 정도 더 높아질 때, 태양광 발전을 하는 것이 효과적일 수 있음을 나타낸다.

본 연구의 결과는 향후 발전 부문 내에서 우리나라 발전사업자들이 재생에너지 포트폴리오를 구성할 때 정량적 근거로 활용할 수 있을 것이다. 다만, 다음과 같은 것들이 분석의 한계로 남는다. 첫째, 의무할당제도에 의한 발전할당량을 정확히 반영할 수 없었다는 것이다. II장 2절에서 설명하였듯이 MDCEV 모형에서 최적 포트폴리오를 도출할 때는 총 발전량만이 기준이 되며, 의무할당제도로 인해 총 신재생에너지 발전량이 증가해야 하더라도 각 에너지원별 비중에는 큰 변화가 없게 된다. 둘째, 정확한 자료의 부재이다. WEPP만큼 전 세계 발전사의 설비용량 자료를 방대하게 제시하는 자료가 없지만, 우리나라의 경우만 하더라도 영흥 풍력만 반영되었을 정도로 세부적인 자료의 정확성은 확보되지 않은 것으로 볼 수 있으며, 본 연구에서 사용된 재생에너지 자료가 과소표본일 가능성이 크다. 향후 전 세계적으로 신재생에너지 발전이 확대되면 신재생에너지 발전 자료 역시 더 정확하게 수집될 것으로 기대된다. 분석대상이 되는 재생에너지원이 한정된 것 역시 한계로 남는다. 특히 우리나라에서 최근 주요 사업 중 하나로 투자하고 있는 연료전지 발전과 같은 것이 반영되었다면 더 넓은 함의를 제공하였을 것으로 생각된다.

셋째, 재생에너지가 보유한 고유한 특성이 일부 반영되지 못했다는 점이다. 서론에 기술된 바와 같이 재생에너지는 화석연료, 원자력 등의 기존 에너지원과는 달리 자연환경의 제약을 받고, 전력계통 연계의 어려움으로 인해 상대적으로 자가용 발전 및 분산전원이 선호될 수 있는 등의 중요한 특성을 지닌다. 그러나 본 연구는 우리나라 발전사업자 재생에너지 부문 운영 측면에서 전략

적 함의를 제시하려는 목적을 달성하기 위해 분석 범위를 대규모 중앙집중형 전원으로 운영되는 재생에너지 부문으로 한정했고, 이에 재생에너지의 분산형, 자가용 특성을 고려하지 못하였다. 마지막으로, 본 연구에서는 국가 간 특성을 인구밀집도 하나로만 제한적으로 반영하고 있는데, 재생에너지는 자연환경에 크게 의존하기 때문에 국가별로 지리적인 이점에 따라 신재생에너지원이 서로 다른 포트폴리오를 구성할 수 밖에 없다는 점, 국가별로 발전 시장의 성격이 달라 발전사들이 취할 수 있는 전략이나 국가 전력 설비 정책이 다를 수 있다는 점 등이 반영되지 못한 한계가 있다. 따라서 본 연구 결과를 바탕으로 실제 에너지정책을 입안하거나 사업전략을 수립할 경우, 위와 같은 분석의 한계점들을 반드시 고려해야 할 것이다.

이러한 한계들이 있음에도, 본 연구는 발전 부문 재생에너지 포트폴리오 구성에 대해 정량적인 분석을 수행한 선제적인 연구로서의 의의를 가지며 특히 발전사업자들에 특화된 결과를 제시하였다는 점에서 그 의미가 크다. 방법론적인 측면에서는 MDCEV 모형이 재생에너지 부문 내 이슈를 분석하기에 유용한 모형이며, 향후 여타 에너지 관련 연구에도 활용될 수 있는 잠재력이 충분함을 입증하였다. 또한 본 연구는 특히 풍력발전이 현재로서는 최적 재생에너지원임을 보였으며, 태양광 발전설비 확충을 위한 최소 조건을 정량적 수치로 제시하였다. 이러한 정량적 수치는 발전사업자들의 재생에너지 설비 투자에 객관적인 방향을 제시하는 역할을 수행할 수 있을 것이다.

접수일(2016년 7월 20일), 수정일(2016년 8월 28일), 게재확정일(2016년 9월 13일)

◎ 참 고 문 헌 ◎

- 구훈영, 민대기, 2013, “텔파이 활용 신재생 에너지 수요예측과 장기전원 구성의 경제성 평가”, 대한산업공학회지 제39권 제3호, pp. 183-191.
- 김재화, 김현석, 2015, “신재생에너지 발전이 우리나라 CO2 배출에 미치는 영향분석”, 에너지경제연구 제14권 제3호, pp. 185-201.
- 김현제, 조경엽, 2010, “신재생에너지 의무할당제의 국내산업에 대한 파급효과”, 자원환경경제연구 제19권 제4호, pp. 805-828.
- 문영석, 노동석, 조상민, 2011, “에너지믹스 변화의 비용 추정: 신재생확대 시나리오”, 에너지경제연구 제10권 제2호, pp. 169-186.
- 이근대, 부경진, 이창훈, 2005, “신재생 에너지 전력시장 활성화”, 에너지경제연구원.
- 이창훈, 황석준, 2009, “신재생에너지 전력에 대한 소비자 지불의사”, 자원환경경제연구 제18권 제2호, pp. 173-190.
- 전영서, 2009, “대체에너지 기술개발 및 보급정책의 유효성검증에 관한 연구”, 經濟研究 제 28권 제2호, pp. 1-15.
- 전찬웅, 신준석, 2014, “시스템다이나믹스와 복합 리얼옵션 기반 신재생에너지 기술가치평가”, 대한산업공학회지 제40권 제2호, pp. 195-204.
- Ahn, J., G. Jeong, and Y. Kim, 2008, “A forecast of household ownership and use of alternative fuel vehicles: A multiple discrete-continuous choice approach”, *Energy Economics* 30(5), pp. 2091-2104.
- Allenby, G. M. and P. E. Rossi, 1998, “Marketing models of consumer heterogeneity”, *Journal of Econometrics* 89(1-2), pp. 57-78.
- Awerbuch, S., 2006, “Portfolio-based electricity generation planning: policy implications for renewables and energy security”. *Mitigation and adaptation strategies for Global*

- Change, 11(3), 693-710.
- Baltas, G., 2004, "A Model For Multiple Brand Choice", *European Journal of Operational Research* 154 (1), pp. 144-149.
- Ben Amor, M., P. O. Pineau, C. Gaudreault, and R. Samson, "Assessing the economic value of renewable distributed generation in the Northeastern American market", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, pp. 5687-5695.
- Bhat, C. R., 2005, "A Multiple discrete-continuous extreme value model: formulation and application to discretionary time-use decisions", *Transportation Research Part B: Methodological*, pp. 679-707.
- Bhat, C. R., 2008, "The multiple discrete-continuous extreme value (MDCEV) model: Role of utility function parameters, identification considerations, and model extensions", *Transportation Research Part B: Methodological*, pp. 274-303.
- Bhat, C. R. and S. Sen, 2006, "Household vehicle type holdings and usage: an application of the multiple discrete-continuous extreme value (MDCEV) model", *Transportation Research Part B: Methodological*, pp. 35-53.
- Daim, T. U., Kayakutlu, G., and Cowan, K., 2010, "Developing Oregon's renewable energy portfolio using fuzzy goal programming model". *Computers & Industrial Engineering*, 59(4), 786-793.
- Doherty, R., Outhred, H., and O'Malley, M. O., 2005, Generation portfolio analysis for a carbon constrained and uncertain future. In 2005 International Conference on Future Power Systems.
- Huber, J. and K. Train, 2001, "On the Similarity of Classical and Bayesian Estimates of Individual Mean Partworths", *Marketing Letters* 12(3), pp. 259-269.
- Huh, S. Y. and C. Y. Lee, 2014, "Diffusion of renewable energy technologies in South Korea on incorporating their competitive interrelationships", *Energy Policy* 69, pp. 248-257.
- International Energy Agency, 2010, "Projected Costs of Generating Electricity (2010 Edition)", International Energy Agency

혼합 MDCEV 모형을 이용한 발전사업자의 최적 재생에너지 포트폴리오 구성에 관한 연구

- Kim, J., G. M. Allenby, and P. E. Rossi, 2002, "Modeling Consumer Demand for Variety", *Marketing Science* 21(3), pp. 229-250.
- Lee, C. Y. and H. Heo, 2016, "Estimating willingness to pay for renewable energy in South Korea using the contingent valuation method", *Energy Policy* 94, pp. 150-156.
- Koop, G., 2003, "Bayesian Econometrics", John Wiley & Sons.
- McCrone, A., Usher, E., Sonntag-O'Brien, V., Moslener, U., and Grüning, C., 2012, "Global trends in renewable energy investment 2012". Frankfurt School UNEP Collaborating Centre for Climate and Sustainable Energy Finance
- McFadden, D., 1974, "The Measurement of urban travel demand", *Journal of Public Economics*, pp. 303-328.
- Platts, 2012, "UDI World Electric Power Plants Database", S&P Global Platts
- Platts, 2012, "UDI Directory of Electric Power Producers & Distributors", S&P Global Platts
- Train, K., 2009, "Discrete Choice methods with simulation", Cambridge University Press.
- Zarnikau, J., 2003, "Consumer demand for 'green power' and energy efficiency", *Energy Policy* 31(15), pp. 1661-1672.

ABSTRACT

Optimal Construction of Renewable Energy
Portfolio in use of MDCEV Model

Manseok Jo* Sung-Yoon Huh** and Yong-Gil Lee***

New and renewable energy is getting more and more important because of not only its role to prevent climate change, but also its significance for energy security and green industry. There are various sources for new and renewable energy with different technological and economic features. In consideration of these different features, it is necessary to construct desirable and optimal portfolio of diverse renewable energy sources. The authors explore the quantitative solution of renewable energy portfolio in use of MDCEV (Multiple Discrete-Continuous Extreme Value) model. The result shows that wind power is optimal source for Korean power producers, but the presence of Renewable Portfolio Standard works to advantage of solar power over other sources. Furthermore, it is found that solar power can become the first choice of Korean power producers if the unit production cost of solar power decreased to 1.5 times that of wind power and the technology investment of solar power increased to 1.2 times that of wind power. This study has its significance as a pioneering work of quantitative approach for optimal new and renewable portfolio, and is expected to be utilized by electric power producers.

Key Words : MECEV (Multiple Discrete-Continuous Extreme Value), Renewable Energy Portfolio, Generation Company, Homogeneity-seeking Individual, Variety-seeking Individual, Mixed MDCEV model, Bayesian Estimation

* Visiting Scholar, Marketing Department, School of Business, University of Wisconsin-Madison (e-mail: mjo7@wisc.edu)

** Postdoc Scholar, University of California Berkeley (e-mail: sunghuh@berkeley.edu)

*** Associate Professor, Department of Energy Resource Engineering, Inha University, Corresponding Author (e-mail: leedomingo@inha.ac.kr)