

한국형 기후변화대응 분석모형의 경제적 가치

Economic Valuation of the Korean Climate Change Mitigation and Adaptation Model

최 이 중 · 이 미 숙^{1),*}

한국과학기술기획평가원, ¹⁾한국환경정책·평가연구원

(2014년 3월 31일 접수, 2014년 5월 2일 수정, 2014년 5월 15일 채택)

le-jung Choi and Misuk Lee^{1),*}

Korea Institute of S&T Evaluation and Planning, ¹⁾Korea Environment Institute

(Received 31 March 2014, revised 2 May 2014, accepted 15 May 2014)

Abstract

The objective of this research is to quantitatively value the economic value of analysis model related to climate change mitigation and adaptation. Due to the fact that the subject of this research, which is the Korean climate change mitigation and adaptation model, has not been actualized, a conjoint analysis applying stated preference data has utilized. As results, among the many attributes considered in this research, the value of the attribute related to reflecting Korea's current situation is analyzed to be largest in both greenhouse gas (GHG) mitigation model and climate change adaptation model. Additionally, if all the considered functional aspects are assumed to be feasible, the economic value of the Korean GHG mitigation model is assumed to be 60.3 billion Korean won (KRW) and the Korean climate change adaptation model is assumed to be 51 billion KRW.

Key words : GHG mitigation model, Climate change adaptation model, Conjoint analysis, Mixed logit model

1. 서 론

대기 중 온실가스의 농도가 증가함에 따라 기후변화의 영향이 두드러지게 나타나고 있다. 무분별한 개발과 산림의 파괴로 온실가스 흡수원은 줄어드는 반면, 인구 증가에 따른 농지 확대와 질소비료의 사용, 화석연료를 통한 에너지 공급은 지속되기 때문이다.

2003년 유럽의 폭염 사태와 2005년 미국의 허리케인 카트리나 사태는 이상기후 현상의 심각한 위험을 직접적으로 보여주는 사례이며, 최근 이러한 재해의 피해규모와 발생빈도는 모두 증가하는 추세이다. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 제4차 보고서에 따르면 지난 100년간 전 지구의 평균 기온은 0.74°C (1906년~2005년 기준) 증가했으며 (IPCC, 2007), 우리나라 6대 도시의 평균 기온은 1.7°C (1912년~2008년 기준) 상승하여 훨씬 높은 상승률을 나타내고 있다 (Korea Meteorological Administration, 2009). 또한 2000년에서 2100년까지 시나리오 별로 최대

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)2-6922-7862, Email : leems@kei.re.kr

4°C까지 기온이 증가하여 생태계, 수자원, 식량, 해안 등에 미치는 부정적 영향이 심화될 것으로 전망된다.

이에 따라 세계 각국은 기후변화 협약을 통해 온실가스 감축을 위한 노력을 지속하는 한편, 다양한 시나리오에 따른 부문별 영향평가 및 대책을 수립하여 기후변화에 적응하기 위한 정책을 적극적으로 추진하고 있다. 우선 국제사회에서는 ‘기후변화에 관한 기본협약(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)’을 통해 기후변화 문제를 최우선 의제로 정하고, 지구온난화 문제를 해결하기 위해 선진국을 중심으로 글로벌 차원의 대응을 추진해 왔다. 이후 1997년 교토의정서, 2009년 코펜하겐 회의, 2010년 칸쿤 합의, 그리고 2011년 더반 회의를 통해 2020년까지 모든 당사국이 참여하는 법적 구속력 있는 감축체제를 구축하기로 합의하였다. 유럽연합 27개국은 EU-ETS (European Union Emission Trading Scheme) Phase 3 (2013~2020)을 통하여 1990년 대비 2020년까지 온실가스 배출량을 20% 감축하고자 노력하고 있다. 미국은 교토의정서를 탈퇴하여 감축 규제를 거부하는 대신 2020년까지 2005년 대비 총 온실가스 배출량을 17% 감축하겠다는 자율적 감축 목표를 수립하였다(Kang, 2009). 일본 역시 지구온난화대책본부를 중심으로 온실가스 감축 계획을 수립하였으며, 2050년까지 1990년 대비 60~80% 감축을 목표로 기술개발과 세제 개편 등의 정책을 추진 중이다(Yoon, 2010).

우리나라의 경우 현재 교토의정서에 따른 온실가스 감축 의무국은 아니지만, 경제 성장과 온실가스 배출량 증가 추세에 따라 감축 의무대상국으로 분류될 확률이 높아지고 있다. 2010년 우리나라 온실가스 배출량은 669백만tCO₂eq로 1990년의 296.4백만tCO₂eq에 비해 2배 이상 증가한 것으로 나타났다. 이에 우리나라는 저탄소 녹색성장 기본법(‘10.1)과 시행령(‘10.4)을 제정하고 온실가스종합정보센터(‘10.6) 및 국가기후변화응답센터(‘09.7)를 설립하여 온실가스·에너지 목표관리제, 온실가스 배출권거래제 등 기후변화 대응 기반 마련에 힘쓰고 있다.

Stern(2007)에 따르면 전 세계가 온실가스 감축을 위해 아무 대책도 실행하지 않을 경우 기후변화에 따른 경제적 손실은 매년 세계 GDP의 5~20%에 달할 전망이다. 하지만 이를 사전에 방지하기 위한 정책 수행에는 약 1%의 비용 밖에 소요되지 않아, 피해 예방

을 통해 상당 규모의 경제적 편익이 발생할 수 있다. 이와 유사하게 Korea Environment Institute(2011)의 분석 결과에 따르면 전 세계가 기후변화에 대응하기 위한 대책을 실행하지 않을 경우 기후변화에 따른 우리나라의 2100년 누적 피해비용은 약 2,800조 원에 이른다. 그러나 적응 정책을 실행할 경우 2100년 피해비용은 약 800조 원 감소될 수 있으며, 이 때 정책 비용은 약 304조 원이 소요될 것으로 나타났다. 또한 온실가스종합정보센터의 분석자료에 따르면 온실가스 감축 분야에서 최적감축방안을 고려하여 온실가스 감축목표를 할당할 경우 2013년부터 2020년까지 약 36조 원의 감축 비용을 절감할 수 있다(Korea Environment Institute, 2012). 뿐만 아니라 Song *et al.*(2011)은 온실가스 감축과 대기환경 정책의 통합 관리에 따라 대기질 개선(Bollen *et al.*, 2009; Alcamo *et al.*, 2002)과 사망자 저감(West *et al.*, 2006; Bussolo and O'Connor, 2001), 농림업 생산성 향상(Reilly *et al.*, 2007)의 측면에서 경제적 편익이 발생할 것으로 제시하였다.

이처럼 기후변화 대응정책을 시행함에 따른 경제적 편익은 주로 온실가스 감축 분석모형이나 기후변화 적응 분석모형을 활용하여 산정된다. 따라서 세계 각국은 보다 정교하고 현실에 적합한 이론적 모형을 구축하기 위해 지속적으로 연구개발 활동에 투자하고 있다. 하지만 대부분의 연구자나 정책결정자들은 다양한 분석모형을 적용하여 도출된 경제적 편익이 얼마인지에 주로 초점을 맞추는 반면, 이러한 분석모형 자체가 가지는 경제적 가치가 얼마인지에 대해서는 제대로 분석한 연구가 없는 실정이다. 특히 분석모형을 개발하기 위해 투자되는 연구개발비가 효율적으로 평가되기 위해서는 연구개발의 결과로 얻어지는 이러한 분석모형의 경제적 가치가 정량적으로 측정될 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 기후변화대응 관련 분석모형이 가지는 경제적 가치를 정량적으로 측정하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 2장에서는 기후변화대응 관련 분석모형의 동향과 기후변화 대응정책의 경제성 분석 관련 기존문헌을 검토한다. 3장에서는 본 연구의 분석 방법론을 소개하고 4장에서는 분석결과를 제시한다. 마지막으로 5장에서는 결론과 함께 정책적 시사점을 제안한다.

2. 기후변화대응 관련 기술개발 동향

2.1 연구개발

기후변화대응을 위한 노력은 기후변화 현상으로 발생하는 영향 및 피해를 감소시키기 위한 적응(Adaptation) 분야와 사전적 예방을 위한 완화(Mitigation) 분야로 크게 나누어지며, 특히 사전예방 및 사후처리를 통한 완화 분야에서는 온실가스 감축을 위한 노력이 큰 비중을 차지한다. 미국, 일본 등 주요 선진국에서는 각 분야별로 필요한 기술을 개발하기 위해 기후변화대응 관련 연구개발(R&D) 프로그램을 적극적으로 추진하고 있다. 미국의 경우 기후변화 관련 R&D 예산은 2008년 기준 73.7억 달러로 총 R&D 예산(1,430억 달러)의 5%를 차지하며 (Chang and Lee, 2009), 이 중 대표적 정책 프로그램인 CCSP (Climate Change Science Program)의 예산은 18.4억 달러로 기후변화 R&D 예산의 25%에 해당한다.

EU는 기후변화대응 연구개발 프로그램인 FP (Framework Program)를 추진 중이며, 제7차 FP7의 예산은 505억 유로로 FP6에 비해 급격히 증액되었다 (European Commission, 2012). 영국은 기후변화법 (Climate Change Bill)을 제정하여 기후변화 영향, 위험평가 및 적응 프로그램을 수립하였으며, 일본은 FRCGC (Frontier Research Center for Global Change)를 중심으로 기후변화 및 영향평가 연구를 수행 중에 있다. 이 외에도 네덜란드의 CcSP (Climate Change Spatial Planning) 프로그램, 호주의 국가 기후변화 적응 프로그램 (National Climate Change Adaptation Programme), 캐나다의 기후변화 영향 및 적응 프로그램 (Climate Change Impacts and Adaptation Programme) 등이 추진되고 있다.

우리나라의 기후변화대응 관련 R&D 예산규모는 범위 및 산정방식에 따라 차이가 존재하므로 확정적 수치를 제시하기에는 한계가 있다. 2008년에 발표된 범부처 '기후변화 대응 국가연구개발 중장기 마스터플랜'에 따르면 화석연료 대체, 에너지 효율화, 온실가스 처리, 기후변화 관측 및 예측, 그리고 영향평가 및 적응 전반을 모두 포함한 정부 R&D 예산이 2008년 기준 6,910억 원인 것으로 집계되었다. 반면 Kim

and Lee (2010)는 동일 자료 중 기후변화 관측 및 예측, 기후변화 영향평가 및 적응 분야만을 기후변화대응 R&D 범위로 한정하여 미국, 일본의 투자현황과 비교한 바 있다. 우리나라는 주로 개별 부처별로 기후변화대응 관련 R&D 사업을 추진해 왔으며,¹⁾ 최근 범정부적 통합 프로그램의 필요성이 대두됨에 따라 기후변화대응 환경기술개발사업을 추진 중에 있다.

이러한 연구개발의 성과 중에서 온실가스 감축 분석모형이나 기후변화 적응 분석모형은 기후변화대응 관련 연구나 정책 수립에 널리 활용될 수 있다. 우선 국가 온실가스 감축 목표를 설정하고 정책의 효과를 분석하기 위해서는 전 세계적으로 LEAP (Long-range Energy Alternative Planning), MESSAGE (Model for Energy Supply Strategy Alternatives and General Environmental Effect), AIM (Asia-Pacific Integrated Model) 등 다양한 감축모형이 활용되고 있다. LEAP 모형은 1980년대 미국에서 개발하여 SEI (Stockholm Environment Institute)에서 보급한 에너지 수급분석 및 중장기 전망 모형으로, 국가적 또는 지역적 차원의 감축 잠재량 분석에 활용된다. 에너지 시나리오 (Energy Scenarios), 통합 (Aggregation), 환경DB (Environmental Data Base)와 같은 3개의 주요 프로그램 그룹으로 구성되어 있으며, 현재 전 세계 160여 국가에서 5,000명 이상의 연구자가 사용하고 있다. MESSAGE는 1980년대 오스트리아 IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis)에서 개발하여 국제원자력기구 (IAEA)와 공동으로 보급한 상향식 최적화 모형으로, 신재생에너지 도입, 혁신기술 개발, 지속가능한 에너지 계획 수립 등을 위한 분석에 활용된다. 1990년대 일본 환경성의 지원으로 일본 국립환경연구소 (NIES)에서 개발한 AIM은 아시아 지역의 특성을 고려한 상향식 비용 최소화 모형으로 온실가스 배출, 기온 상승, 영향 평가 등의 세부 모듈로 구성되어 있다. 이외에도 미국 EIA (Energy Information Administration)에서 운영하는 NEMS (National Energy Modeling System), EU의 주도로 개발된 EFOM (Energy Flow Optimization Model) 등이 활용되고 있다.

최근에 중요성이 부각되고 있는 기후변화 적응 분야에서는 기후와 미래환경의 변화에 따른 사회경제

¹⁾ 기존에 추진되어온 기후변화대응 관련 국가R&D사업으로는 기후변화대응 기초·원천기술개발사업, 기후변화대응 해양기술개발사업, 기후변화감시예측 및 국가정책 지원강화사업, 기상지진기술개발사업, 국가장기생태연구 등이 있다.

적 취약성을 분석하기 위해 다양한 국가 보고서가 발간되고 있으며, IPCC(2007)의 4차 보고서 이후 구축된 통합모형을 이용하여 감축 시나리오와 연계한 사회·경제 시나리오 개발 연구가 활발하게 추진되고 있다. 사회, 경제, 정책과 기후, 인간 및 자연 시스템의 영향을 통합적으로 평가하는 분석모형으로는 일본 AIM/impact, 미국 GCAM(Global Change Assessment Model), 네덜란드 IMAGE(Integrated Model to Assess the Global Environment) 등이 있다.

우리나라의 경우 주로 상향식 모형과 하향식 모형을 병행하여 온실가스 감축목표를 설정하고 있다. 그러나 기존 해외 모형만으로는 국내 경제성장과 기술 확산 등의 내용을 적절히 반영하는데 한계가 있어, 한국 실정에 맞는 온실가스 감축 분석모형 개발의 필요성이 제기되고 있다.²⁾ 기후변화 적응 분야에 있어서도 다양한 미래 전망과 사회·경제적 시나리오 연구가 추진되고 있으나, 기후변화에 따른 영향 평가는 일부 분야에서 산발적으로 이루어지는 실정이라 통합적인 영향평가 모형의 개발이 요구되고 있다.

2.2 경제성 분석

본 연구에서 목적으로 하는 기후변화대응 분석모형의 경제적 가치 측정을 위해서는 기후변화대응 관련 R&D 프로그램의 경제성 분석 방법론을 참고할 수 있다. National Audit Office(2007)의 경우 영국 환경감사위원회(Environmental Audit Committee)의 요청으로 2004년 9월부터 2006년 3월까지 영국의 기후변화 정책 프로그램을 검토하였으며, 각 정책별로 탄소저감 1톤당 비용 또는 편익을 측정하여 비교하였다. 탄소배출이 건강, 환경, 경제에 미치는 피해를 정량화한 사회적 비용은 탄소 1톤당 평균 70파운드 정도(35~140파운드의 범위)로 도출되며, 에너지 효율성 향상 프로그램(Energy Efficiency Commitment), 난방전선 프로그램(Warm Front Programme), 시장변화 프로그램(Market Transformation Programme)과 소비자 정보 프로그램(Consumer Information Programme) 등은 매우 비용 효과적인 것으로 평가되었다. Jansen and Bakker(2006)는 온실가스 감축 프로그램의 경제

성 분석을 위해 대부분 톤당 비용 효율성을 중요시 여겨왔으나, 여기에는 정량화 되지 못한 다양한 요소가 간과되어 있음을 지적하였다. 특히 할인율과 외부성에 대한 고려가 온실가스 감축 비용에 미치는 영향을 집중적으로 검토하였으며, 주요 온실가스 감축 기술에 대한 실증 분석 결과를 통해 감축 비용이 크게 달라짐을 확인하였다.

온실가스 감축 정책의 경제성 분석을 다루고 있는 국내 연구의 경우에도 주로 온실가스 감축 시나리오별 감축 비용 산정이나 사회경제적 파급효과의 산출, 특정 온실가스 감축 정책 도입에 따른 파급효과 산정을 위한 모델링 분석 등에 집중되어 있다. Kim and Chang(2008), Korea Environment Institute(2001), Korea Environment Institute and Korea Energy Economics Institute(2000) 등에서는 연산가능 일반균형(Computable General Equilibrium: CGE) 모형을 이용하여 탄소세, 배출권거래제 등 온실가스 저감 시나리오별 파급효과를 산정한다. 또한 Korea Environment Institute(2011)와 Korea Environment Institute(2009)에서는 CGE 모형을 이용하여 기후변화의 경제적 파급효과를 분석하고, 통합모형의 일종인 PAGE2002(Policy Analysis for the Greenhouse Effect) 모델을 이용하여 기후변화의 피해 및 감축비용을 분석하고 있다.

결국 기후변화대응 관련 프로그램이나 정책의 경제적 가치를 측정하기 위해서는 국내·외 연구 모두 톤당 온실가스 감축 비용을 분석하는 경우가 많으며, 이를 위해서 다양한 온실가스 감축 분석모형이나 통합모형이 활용되고 있다. 실제로 기후변화대응 관련 프로그램의 목적이 온실가스 감축에 있기 때문에, 온실가스 감축 비용이나 이를 통해 발생하는 편익을 측정하는 것이 적절하다. 하지만 이러한 연구에서 활용되고 있는 분석모형의 경우에는 모형 자체가 온실가스 감축이나 기후변화 적응에 활용되는 것이 아니기 때문에, 메타평가적 관점에서 분석모형의 경제적 가치를 측정할 연구가 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 기후변화대응 관련 분석모형과 같은 비시장재의 경제적 가치를 추정하기 위해 진술선호접근법(Stated Preference Method)을 활용하고자 한다.

²⁾ 예를 들어 Park *et al.*(2012)에서는 영국의 2050년 배출량 경로 계산기를 기반으로 한국의 현실 상황 및 기술 데이터를 반영하여 수정한 저탄소 경로 모형을 제시한 바 있다.

3. 분석방법

진술선호접근법은 비시장재를 거래할 수 있는 가상의 시장을 설정하고 비시장재에 대한 소비자의 지불의사를 표현하도록 하는 기법이며, 대표적으로 조건부가치측정법 (Contingent Valuation Method: CVM) 과 컨조인트 분석법 (Conjoint Analysis Method: CAM) 이 있다. 조건부가치측정법은 대상 재화에 대한 지불의사를 응답자에게 직접 질문하는 기법으로, 가치측정의 대상이 단일속성으로 이루어진 경우에 활용하는 것이 적절하다 (Kwak *et al.*, 2005). 반면 컨조인트 분석법은 응답자에게 하나 이상의 속성 (attribute) 들로 구성된 대안을 제시하여 응답자의 선호정보를 도출하고, 이로부터 응답자의 효용함수 (utility function) 를 추정하여 재화의 속성에 대한 화폐적 가치를 추정할 수 있다. 조건부가치측정법을 활용할 경우 연구 대상인 기후변화 대응 관련 분석모형 전체의 가치를 측정하는 것은 가능하지만, 분석모형의 개별 속성에 대한 경제적 가치나 상대적 중요도 등의 정보를 도출하기에는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 기후변화대응 관련 분석모형의 여러 속성을 고려하기 위해 컨조인트 분석법을 적용하고자 한다.

확률효용이론 (Random Utility Theory)에 따르면 대안 j 에 대한 응답자 n 의 총효용 U_{nj} 는 결정적 효용 (deterministic utility, V_{nj})과 확률적 효용 (stochastic utility, ε_{nj})의 합으로 표현된다. 여기서 오차항 ε_{nj} 의 확률분포 $f(\varepsilon_{nj})$ 을 이용하면 응답자 n 이 가장 높은 효용을 가지는 대안 j 를 선택할 확률은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 P_{nj} &= \Pr(U_{nj} > U_{\exists}, \forall i \neq j) \\
 &= \Pr(\varepsilon_{\exists} - \varepsilon_{nj} < V_{nj} - V_{\exists}, \forall i \neq j) \\
 &= \int I(\varepsilon_{\exists} - \varepsilon_{nj} < V_{nj} - V_{\exists}, \forall i \neq j) f(\varepsilon_n) d\varepsilon_n. \quad (1)
 \end{aligned}$$

위의 식에서 $I(\cdot)$ 는 지표함수 (indicator function)이

며, 오차항의 확률 분포에 따라 다양한 형태의 선택 모형이 적용될 수 있다. 우선 오차항에 대해 독립이며 동일한 (independently and identically distributed, i.i.d.) type I extreme value 분포 (또는 Gumbel 분포)를 가정하는 경우 응답자 n 이 대안 j 를 선택할 확률은 식 (2)와 같이 표현되며, 이를 다항로짓모형 (Multinomial Logit Model)이라 정의한다 (McFadden, 1974).

$$P_{nj} = \frac{\exp(V_{nj})}{\sum_{j=1}^J \exp(V_{nj})}, \quad j=1, \dots, J. \quad (2)$$

다항로짓모형이 응답자 간의 동질성을 가정하는 것에 비해, 혼합로짓모형 (Mixed Logit Model)은 각각의 응답자가 서로 다른 선호를 보이는 이질성 (heterogeneity)을 반영한다. 여기서 대안의 속성 x_j 에 대한 한계 효용 β_n 은 평균이 b 이고 공분산이 Σ 인 다변량 정규 분포 (Multivariate Normal Distribution)를 따르며 오차항의 분포는 다항로짓모형과 동일한 것으로 가정한다. 이 경우 혼합로짓모형 하에서 응답자 n 이 대안 j 를 선택함으로써 얻게 되는 효용은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$U_{nj} = V_{nj} + \varepsilon_{nj} = \beta_n x_j + \varepsilon_{nj}, \quad \beta_n \sim N(b, \Sigma). \quad (3)$$

이와 같은 효용함수에 기초하여 응답자 n 이 대안 j 를 선택할 확률을 나타내는 우도함수 (Likelihood Function)는 식 (4)와 같이 표현된다.³⁾

$$P_{nj} = \int \left\{ \frac{e^{V_{nj}(\beta)}}{\sum_{j=1}^J e^{V_{nj}(\beta)}} \right\} f(\beta) d\beta. \quad (4)$$

다항로짓모형의 경우 전통적인 최대우도추정법 (Maximum Likelihood Estimation: MLE)을 사용하여 추정하게 되지만, 혼합로짓모형의 경우에는 복잡한 우도함수를 계산하기 위해 베이저안 추정법 (Bayesian Estimation)을 이용할 수 있다 (Revelt and Train, 1998).⁴⁾

한편 한계지불의사액 (Marginal Willingness To Pay,

³⁾ 혼합로짓모형은 한계효용에 대한 분포를 속성에 따라 다르게 설정할 수 있다는 장점이 있다 (Train, 2003). 응답자들의 이질성을 반영하기 위해서 각각의 한계효용에 대한 분포를 정규분포로 가정하는 것이 일반적이나, 모든 응답자들이 일정한 방향(음 또는 양)의 선호를 보이는 속성에 대해서는 특정한 분포를 가정할 수 있다 (Train and Sonnier, 2005). 다만 본 연구에서는 정규분포를 가정하여 추정한 모형에서 통계적 유의도가 가장 높은 것으로 나타났기 때문에 모든 속성에 대하여 정규분포를 가정하였다.

⁴⁾ 베이저안 추정법은 전통적인 MLE에 비해서 몇 가지 장점을 가진다. 우선 다변량 확률분포함수의 적분을 계산하는 복잡한 과정을 피할 수 있으며, 추정 결과는 다항로짓모형에서와 동일한 형태로 편리하게 해석될 수 있다. 또 MLE에서는 초기값에 따라 우도함수의 최대값을 극대값 (Local Maximum)으로 잘못 계산할 가능성이 존재하나, 베이저안 추정법은 이러한 문제를 보다 수월하게 해결할 수 있다.

MWTP)은 특정 속성의 수준이 한 단위 변화했을 때, 기존의 속성 수준을 유지하기 위해 응답자가 지불하고자 하는 가치를 의미한다. 상기 추정결과로부터 도출된 가격 속성 x_p 의 한계효용을 β_p , 가격을 제외한 속성 x_k 의 한계효용을 β_k 라 할 때, 속성 k 에 대한 MWTP는 식(5)와 같이 계산된다.

$$MWTP_k = -\frac{\partial U/\partial x_k}{\partial U/\partial x_p} = -\frac{\beta_k}{\beta_p} \tag{5}$$

또한 식(6)과 같이 응답자 n 의 각 속성 k 에 대한 상대적 중요도(Relative Importance, RI)를 계산할 수 있다. 여기서 부분가치(part-worth)란 속성 k 의 최대값과 최소값의 차이에 한계효용 β_k 을 곱한 값이 된다.

$$RI_k = \frac{part-worth_k}{\sum_{k=1}^K part-worth_k} \tag{6}$$

4. 실증 분석

4.1 분석 자료

본 연구에서는 ‘한국형’ 기후변화대응 분석모형의 경제적 가치를 분석하기 위해 온실가스 감축 분석모형과 기후변화 적응 분석모형이라는 두 가지 분석대상을 설정하였다. 컨조인트 분석을 적용하기 위해서는 각 모형의 속성과 속성 수준을 설정하여야 한다. 온실가스 감축 분석모형에 대해서는 앞서 검토한 기존 해외 모형의 특성을 참고하여 한국자료 적용 용이성, 한국현실 반영 분석체계, 비산업부문 포함, 경제적/정책적 분석가능 여부, 그리고 개발비용의 5가지 속성을 설정하였다. 기후변화 적응 분석 모형 역시 기존 해외 모형들을 기반으로 한국자료 적용 용이성, 분석 구조(상향식/하향식), 정책적 요인 반영체계, 분석범위의 지역성, 그리고 개발비용의 5가지 속성을 설정하였다. 이러한 주요 속성들은 한국 현실을

Table 1. Attributes and levels of climate change mitigation/adaptation model.

Model	Attributes	Description	Attribute level
GHG mitigation model	Avaliability of Korean data	<ul style="list-style-type: none"> ■ GHG emission DB establishment and emission/absorption factor development with domestic data ■ Input structure for easy application of domestic data 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Applied: 1 ■ Unapplied: 0
	Analysis system to apply Korea's current situation	<ul style="list-style-type: none"> ■ Whether the algorithm and variables in the model can apply Korea's current situation 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Applied: 1 ■ Unapplied: 0
	Including non-industrial sector	<ul style="list-style-type: none"> ■ Whether the non-industrial sector is included as the analysis scope 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Included: 1 ■ Excluded: 0
	Economic/politic analysis	<ul style="list-style-type: none"> ■ Additional economic/politic analysis provided in the model 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Included: 1 ■ Excluded: 0
	Cost of development	<ul style="list-style-type: none"> ■ Cost of development for GHG mitigation model (unit: billion KRW) 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 30 ■ 50 ■ 70
Climate change adaptation model	Avaliability of Korean data	<ul style="list-style-type: none"> ■ Input structure to apply domestic climate change adaptation related technology DB and impact valuation results 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Included: 1 ■ Excluded: 0
	Type of analysis system	<ul style="list-style-type: none"> ■ Type of analysis system 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Bottom-up: 1 ■ Top-down: 0
	Analysis system to apply politic factor	<ul style="list-style-type: none"> ■ Whether the politic factor is assumed to be endogenous or exogenous 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Endogenous: 1 ■ Exogenous: 0
	Regional range of analysis	<ul style="list-style-type: none"> ■ Regional range of analysis 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Asia-Pacific: 1 ■ Korea: 0
	Cost of development	<ul style="list-style-type: none"> ■ Cost of development for climate change adaptation model (unit: billion KRW) 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 30 ■ 50 ■ 70

Table 2. Demographics of respondents.

Characteristics	Samples	Ratio (%)	
		Male	Female
Total	262	90.1	9.9
Gender	Male	236	0.0
	Female	26	100.0
Age	30s	44	22.7
	40s	103	9.7
	50s	98	6.1
	Above 60	17	0.0
Field of expertise	Air quality management	159	6.9
	Environmental forecasting	102	14.7
	Climatology	1	0.0
Education level	Master degree	9	11.1
	Ph.D. degree	253	9.9
Affiliation	University	115	8.7
	Governmental institute and research institute	102	13.7
	Private sector	40	5.0
	etc.	5	0.0

반영한 한국형 분석모형에서 고려해야 하는 속성들이며, 해당 분야별 전문가 검토 및 문헌 검토(Manne *et al.*, 1995; Morita *et al.*, 1994)를 통해 선정하였다. 표 1은 각각의 분석모형에 대한 속성과 수준을 나타낸다.

그러나 한국형 기후변화대응 분석모형들은 아직 개발되지 않았기 때문에 실제로 어떻게 선택·활용될 수 있는지에 대한 현시선호(Revealed Preference) 자료의 이용이 어렵다. 이와 같은 경우 진술선호(Stated Preference) 자료를 활용하기 위해 설문조사를 수행할 수 있다. 본 연구에서는 2012년 5월에 262명의 기후변화 관련 전문가를 대상⁵⁾으로 설문조사를 수행하였으며, 응답자의 인구통계학적 특성은 표 2와 같다. 총 262명의 응답자 중 온실가스 감축 분석모형과 기후변화 적응 분석모형에 대해 응답한 전문가는 각각 235명, 222명으로 나타났다.

응답자들의 특성을 살펴보면 약 90%의 응답자가 남성이며, 응답자 대다수는 40대 또는 50대임을 알 수 있다. 또한 대학 또는 정부기관/출연연구원 소속

Table 3. Example of choice set in conjoint survey.

No. of alternative	1	2	3	4
Availability of Korean data	X	X	O	O
Analysis system to apply Korea's current situation	O	O	O	O
Including non-industrial sector	O	O	O	X
Economic/politic analysis	X	O	O	O
Cost of development	30	50	70	30
Choice	()	()	()	()

의 박사학위자가 설문에 집중적으로 참여하였음을 확인할 수 있다. 응답자의 전공은 대기질관리와 환경에측에 집중되어 있었다. 설문조사는 전문기관을 통해 수행하였으며, 이메일 설문을 기초로 하되 필요할 경우 전화 설문 방식을 병행하였다. 컨조인트 설문에 앞서 각각의 분석모형에 대한 일반적인 정보(해외 분석모형의 특징 등)를 서면으로 제공하였다.

컨조인트 설문을 위한 보기카드는 직교성 테스트를 통해 도출하였다. 응답자들은 각 분석 모형별로 4개의 시나리오에 응답하게 되며, 각 시나리오는 4개의 선택대안으로 구성되어 있다. 즉, 응답자들은 각 시나리오 내의 4개 선택대안 중에서 가장 선호하는 번호의 대안을 선택하게 된다. 결과적으로 본 연구에서는 온실가스 감축 분석모형에 대해 940개(235명*4개 시나리오) 자료, 기후변화 적응 분석모형에 대해 888개(222명*4개 시나리오) 자료를 이용하여 분석을 수행하였다. 표 3은 컨조인트 설문에 활용된 보기카드의 사례를 나타낸다.

4.2 추정 결과

본 연구에서는 혼합로짓모형을 통해 온실가스 감축 분석모형과 기후변화 적응 분석모형에 대한 소비자의 효용함수를 추정하였다. 혼합로짓모형을 추정하기 위한 프로그램으로는 Gauss 6.0을 사용하였으며, 베이지안 추정을 위해서는 M-H(Metropolis-Hastings) 알고리즘을 이용하였다.

먼저 온실가스 감축 분석모형에 대한 추정 결과, 속성별 한계효용의 평균 b 와 분산 σ^2 는 대부분 통계

⁵⁾선택모형을 위한 설문조사는 일반 소비자를 대상으로 하는 경우가 많지만, 기후변화대응 분석모형의 잠재적 수요자는 실질적으로 제한적이기 때문에 보다 정확한 경제적 가치 측정을 위해 설문대상을 기후변화 관련 전문가로 제한하였다. 유사한 사례로 Lüthi and Prüssler(2011)는 풍력발전 개발 시 고려해야 할 정책요소를 비교·분석하기 위해 관련 전문가만을 대상으로 설문을 진행하고 로짓모형을 적용하여 실증분석을 수행한 바 있다.

Table 4. Estimation results for GHG mitigation model.

Attributes	Mean (<i>b</i>)	Variance (Σ)	MWTP (unit: billion KRW)	RI
Avaliability of Korean data	3.421**	5.938**	19.959	19.9%
Analysis system to apply Korea's current situation	3.542**	1.566**	20.665	20.6%
Including non-industrial sector	1.967**	3.799**	11.476	11.4%
Economic/politic analysis	1.414**	2.763**	8.250	8.2%
Cost of development	-1.714**	1.774	-	39.9%

** , * : Statistically significant at the 1% and 5% level, respectively.

Table 5. Estimation results of climate change adaptation model.

Attributes	Mean (<i>b</i>)	Variance (Σ)	MWTP (unit: billion KRW)	RI
Avaliability of Korean data	4.808**	7.140**	21.954	28.0%
Type of analysis system	2.776**	1.925**	12.676	16.1%
Analysis system to apply politic factor	1.954**	1.502*	8.922	11.4%
Regional range of analysis	1.641**	3.222**	7.493	9.5%
Cost of development	-2.190**	4.351**	-	50.9%

** , * : Statistically significant at the 1% and 5% level, respectively.

적으로 유의⁶⁾하였다(표 4). 이는 개별 소비자의 이질성을 반영한 혼합로지모형의 적용이 적절하다는 것을 의미한다. 하지만 개발비용에 대한 분산은 유의하지 않아, 개발비용에 대한 응답자 선호의 이질성이 존재하지 않는 것으로 해석할 수 있다. 본 연구에서 고려한 속성 중에서 한국자료 적용 용이성에 대한 분산이 상당히 큰 것으로 나타났는데, 이는 한국자료 적용 용이성에 대한 전문가들의 인식이 다르다는 것을 의미한다. 반면 한국현실 반영 분석체계는 다른 속성에 비해 작은 분산을 보여, 관련 분야 전문가들 사이에서 한국현실을 반영한 분석체계 마련의 필요성에 대해 대체로 공감대가 형성되어 있다고 볼 수 있다.

온실가스 감축 분석모형의 속성별 한계지불의사액을 계산한 결과, 한국현실 반영 분석체계와 한국자료 적용 용이성에 대한 MWTP가 206.65억 원과 199.59억 원으로 가장 높으며 경제적/정책적 분석 속성에 비해 2배 이상의 효용을 갖는 것으로 나타났다. 즉, 온실가스 감축 분석모형이 두 가지의 ‘한국형’ 속성을 보유하게 될 경우 응답자들은 약 406억 원의 추가적인 지불의사가 있다고 볼 수 있다. 온실가스 감

축 분석모형 속성별 상대적 중요도 계산 결과, 개발비용이 응답자의 선호에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 개발비용을 제외한 속성들 중에서는 한국현실 반영 분석체계와 한국자료 적용 용이성이 상대적으로 높은 중요도를 가진다.⁷⁾ 상기 추정결과를 통해 한국자료의 적용이 가능하고 한국현실을 반영할 수 있는 분석체계를 갖추며, 비산업부문에 대한 분석과 경제적/정책적 분석이 가능한 ‘한국형 온실가스 감축 분석모형’의 경제적 가치는 총 603억 원으로 산정되었다.

다음으로 기후변화 대응 분석모형에 대한 추정 결과, 온실가스 감축 분석모형과 유사하게 추정치의 평균 *b*와 분산 Σ 가 모두 통계적으로 유의하게 나타났다(표 5). 기후변화 적응 분석모형의 추정결과에 따르면 상향식 및 하향식 분석구조와 정책적 요인 반영체계에 대한 분산이 상대적으로 작게 나타났는데, 이는 해당 속성에 대한 응답자의 공감대가 형성되어 있는 것으로 볼 수 있다. 온실가스 감축 분석모형과 마찬가지로 기후변화 대응 분석모형의 추정결과에서도 한국자료 적용 용이성에 대한 분산은 상당히 큰 값을 가진다는 것은 소비자 선호의 이질성을 고려한

⁶⁾혼합로지모형의 경우 베이지안 추정을 이용하기 때문에, 개별 추정계수의 유의성은 전통적인 t-검정을 통해 별도로 확인하였다.

⁷⁾컨조인트 설문조사 단계에서 개발비용을 제외한 모든 속성의 수준이 0 또는 1로 설정되었기 때문에, 속성별 상대적 중요도 역시 한계지불의사액에 정비례하게 된다.

혼합로짓모형의 적용이 적절했음을 의미한다. 하지만 이처럼 한국자료 적용 용이성에 대해 전문가들의 인식이 큰 편차를 나타내는 이유를 파악하기 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

기후변화 적응 분석모형의 속성별 한계지불의사액을 계산한 결과, 한국자료 적용 용이성에 대한 MWTP가 219.54억 원으로 가장 높으며, 분석구조, 정책적 요인 반영체계, 그리고 분석범위의 지역성이 각각 126.76억 원, 89.22억 원, 그리고 74.93억 원의 MWTP를 갖는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 온실가스 감축 분석모형의 추정결과와 유사하게 기후변화 적응 분석모형에 대해서도 ‘한국형’ 모형이 갖는 가치가 상당히 높다는 것을 의미한다. 기후변화 적응 분석모형을 활용하는 전문가들은 하향식에 비해 상향식 모형을 선호하며, 분석범위 역시 한국에 국한되기 보다는 아시아-태평양 지역으로 확대된 모형을 선호한다. 한편 기후변화 적응 분석모형 속성별 상대적 중요도 계산 결과, 개발비용이 응답자의 선호에 50% 이상의 큰 영향을 미치며 그 중요성이 온실가스 감축 분석모형에 비해 상대적으로 더 크다는 것을 확인할 수 있다. 개발비용을 제외한 속성들 중에서는 한국자료 적용 용이성이 상대적으로 높은 중요도를 가진다. 상기 추정결과를 통해 한국자료의 적용이 가능하고 아시아-태평양 범위의 상향식 분석구조를 가지며 정책적 요인을 내생적으로 반영하는 ‘한국형 기후변화 적응 분석모형’의 경제적 가치는 총 510억 원으로 산정되었다.

5. 결 론

본 연구는 기후변화대응 관련 연구에 다양하게 활용되는 온실가스 감축 분석모형과 기후변화 적응 분석모형의 경제적 가치를 직접적으로 측정하였다. 이를 위해 기후변화 관련 전문가를 대상으로 컨조인트 설문조사를 수행하였으며, 혼합로짓모형을 추정하여 분석모형의 속성별 한계지불의사액과 상대적 중요도를 도출하였다. 분석 결과에 따르면 기후변화 관련 전문가들은 온실가스 감축 분석모형과 기후변화 적응 분석모형에 대해 동일하게 ‘한국형’ 속성의 가치를 높게 평가하였다. 즉 기존의 분석모형에서 한국자료의 적용이 용이한 체계를 갖추거나 한국의 현실을

반영할 수 있는 체계가 마련될 경우 최소 200억 원 이상의 추가적인 가치를 부여하고 있다. 또한 상기 분석모형에 대해서 한국형 속성과 추가적인 분석 기능이 갖춰질 경우, 한국형 온실가스 감축 분석모형과 한국형 기후변화 적응 분석모형의 경제적 가치는 각각 603억 원 및 510억 원으로 산정되었다.

실제로 이러한 분석모형을 통해 기후변화대응 관련 기술이나 정책의 경제적 효과를 분석할 수 있지만, 분석모형 자체가 갖는 경제적 가치를 평가한 연구는 없는 상황이다. 따라서 본 연구의 분석 결과는 온실가스 감축 분석모형과 기후변화 적응 분석모형이 갖는 경제적 가치에 대한 직접적인 정보를 제공하며, 나아가 한국형 분석모형의 연구개발을 추진하는 경우 연구개발의 편익에 대한 정보는 제공할 수 있다. 또한 각각의 분석모형이 갖는 다양한 속성에 대해 잠재적 수요자들이 부여하는 한계지불의사액 및 상대적 중요도를 비교하여, 개발해야 하는 속성 및 수준에 대한 우선순위 설정 과정에 활용할 수 있을 것이다. 본 연구에서 이용한 방법론 역시 분석범위가 넓기 때문에 향후 유사한 분석모형의 가치를 추정하는 과정에 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문의 일부는 환경부의 지원으로 한국환경정책·평가연구원이 수행한 “기후변화대응 R&D 추진을 위한 경제성 분석” 연구(과제코드 2012-025)에 의해 작성되었습니다.

References

- Alcamo, J., P. Mayerhofer, R. Guardans, T. van Harmelen, J. van Minnen, J. Onigkeit, M. Posch, and B. de Vries (2002) An integrated assessment of regional air pollution and climate change in Europe: findings of the AIR-CLIM project, *Environmental Science & Policy*, 5, 257-272.
- Bollen, J., B. Guay, S. Jamet, and J.C. Morlot (2009) Co-benefit of Climate Change Mitigation Policies: Literature Review and New Results, *Economics Department Working Papers No.693*, OECD, 46pp.

- Bussolo, M. and D. O'Connor (2001) Clearing the Air in India: the Economics of Climate Policy with Ancillary Benefits, OECD Development Centre Working Paper No.182, OECD, 61pp.
- Chang, K.B. and S.Y. Lee (2009) Environmental Strategies for Developing Low-Carbon Resource-Saving Society, Korea Environment Institute, Korea, 302pp.
- European Commission (2012) EU Research for the Environment 2007-2013, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Union, 57pp.
- IPCC (2007) Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976pp.
- Jansen, J.C. and S.J.A. Bakker (2006) Social Cost-benefit Analysis of Climate Change Mitigation Options in a European Context, ECN-E-06-059, Energy Research Centre of the Netherlands, 90pp.
- Kang, S.J. (2009) Policy and its Implication to mitigate Climate Change in US, Gyeonggi Research Institute, 31pp.
- Kim, J.K. and S.H. Lee (2010) Climate Change Projection and Adaptation Technologies for Achieving Secure Society and Green Growth, Research Brief 2010-08, Korea Institute of S&T Evaluation and Planning, Korea, 26pp.
- Kim, Y.G. and K.B. Chang (2008), Economic Impacts of International Greenhouse Gas Emissions Trading, Korea Environment Institute, Korea, 87pp.
- Korea Environment Institute (2001) Environmental Benefit Analysis of Greenhouse Gases Mitigation Measures: Focusing on Ancillary Environmental Benefits, Ministry of Environment, Korea, 225pp.
- Korea Environment Institute (2009) Economic Analysis of Climate Change in Korea (I), Ministry of Environment, Korea, 379pp.
- Korea Environment Institute (2011) Economic Analysis of Climate Change in Korea (II), Ministry of Environment, Korea, 725pp.
- Korea Environment Institute (2012) Economic Analysis for Promoting R&D on Climate Change, Ministry of Environment, Korea, 146pp.
- Korea Environment Institute and Korea Energy Economics Institute (2000) Cost-Benefit Analysis of Greenhouse Gases Mitigation Scenarios, Ministry of Environment, Korea, 503pp.
- Korea Meteorological Administration (2009) Report of Global Atmosphere Watch 2008, 178pp.
- Kwak, S.J., S.H. Yoo, J.Y. Heo, and J.S. Lee (2005) The non-market value of science museum, Journal of Technology Innovation, 13, 1-17. (in Korean with English abstract)
- Lüthi, S. and T. Prüssler (2011) Analyzing policy support instruments and regulatory risk factors for wind energy deployment: a developers' perspective, Energy Policy, 39, 4876-4892.
- Manne, A., R. Mendelsohn, and R. Richels (1995) MERGE - A model for evaluating regional and global effects of GHG reduction policies, Energy Policy, 23(1), 17-34.
- McFadden, D. (1974) Conditional logit analysis of qualitative choice behavior, in Frontiers in Econometrics. Edited by P. Zarembka, Academic Press, New York, 105-142.
- Morita, T., M. Kainuma, H. Harasawa, K. Kai, L. Dong-Kun, and Y. Matsuoka (1994) Asian-Pacific integrated model for evaluating policy options to reduce greenhouse gas emissions and global warming impacts. AIM Interim Paper, National Institute for Environmental Studies, 18pp.
- National Audit Office (2007) Cost-effectiveness Analysis in the 2006 Climate Change Programme Review, London, 34pp.
- Park, N.B., J.H. Yoo, M.H. Jo, S.G. Yun, and E.C. Jeon (2012) Comparative analysis of scenarios for reducing GHG emissions in Korea by 2050 using the low carbon path calculator, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 28, 556-570. (in Korean with English abstract)
- Reilly, J., S. Paltsev, B. Felzer, X. Wang, D. Kicklighter, J. Melillo, R. Prinn, M. Sarofim, A. Sokolov, and C. Wang (2007) Global Economic Effect of Changes in Crops, Pasture, and Forests due to Changing Climate, Carbon Dioxide, and Ozone, MIT joint Program on the Science and Policy of Global Change, U.S.A., 22pp.
- Revelt, D. and K. Train (1998) Mixed logit with repeated choices: households' choices of appliance efficiency level, The Review of Economics and Statistics, 80, 647-657.
- Song, C.K., S. Lee, and J. Yoon (2011) A review of the integrated strategy for climate change and air pollution management, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 27, 805-818. (in Korean with English abstract)
- Stern, N. (2007) The Economics of Climate Change: The Stern Review, Cambridge: Cambridge University Press,

- 692pp.
- Train, K. (2003) *Discrete Choice Method with Simulation*, Cambridge: Cambridge University Press, 334pp.
- Train, K. and G. Sonnier (2005) Mixed logit with bounded distribution of partworths, in *Applications of Simulation Methods in Environmental and Resource Economics*. Edited by R. Scarpa and A. Alberini, Springer, Dordrecht, 117-134.
- West, J.J., A.M. Fiore, L.W. Horowitz, and D.L. Mauzerall (2006) Global health benefits of mitigating ozone pollution with methane emission controls, *Proceedings of National Academy of Science*, 103, 3988-3993.
- Yoon, J.B. (2010) *Guideline Development to Establishing Science and Technology Policy for Low Carbon Green City*, The Korean Academy of Science and Technology, 109pp.