

제품의 온실가스 배출저감에 대한 성과지표 개발 - 컨조인트 분석(conjoint analysis)을 이용한 지구온난화 영향의 사회적 비용 추정 -

정인태[†] · 이건모 · 송중성*

아주대학교 환경공학과 · *삼성전자 LCD 총괄

(2008년 7월 25일 접수, 2008년 12월 19일 채택)

Development of the Performance Indicator for the Mitigation of Greenhouse Gas Emissions from Products

- Estimation of Social Cost for Global Warming Impact using the Conjoint Analysis -

In-Tae Jeong[†] · Kun-Mo Lee · Jong-Sung Song*

School of Environmental Engineering, Ajou University · *Samsung Electronics LCD Business

ABSTRACT : Proposing a method for the estimation of the social cost for global warming impact (external cost) is the aim of this paper. Both the endpoint approach and conjoint analysis were applied to estimating the social cost for global warming. The endpoint approach was used to assess the damage on the safeguard subjects by global warming due to the emission of greenhouse gases into the atmosphere. The conjoint analysis was used to estimate the economic values for safeguard subjects which measure the social preferences and willingness to pay (WTP) on safeguard subjects. The economic values of human health and social asset were estimated at 62,261,700 Won/DALY (yr) and 10,000 Won/10,000 Won, respectively. Moreover, cost factors of GHGs were calculated by multiplying the damage factor which is quantified the unit damage on safeguard subject and the economic value. In the case of CO₂, the cost factor was calculated at 13.52 Won/kg (13,520 Won/ton). External cost of products or services can be calculated by multiplying the GHG inventory result of products or services by the cost factor of each GHG inventory.

Key Words : Greenhouse Gases, Global Warming, Social Cost (External Cost), Safeguard Subject, Endpoint Approach, Willingness to Pay (WTP), Conjoint Analysis, Cost Factor

요약 : 지구온난화 영향의 사회적 비용(외부비용) 추산 방법을 제안하는 것이 이 연구의 목적이다. 지구온난화 영향의 피해를 받는 대상을 정의하기 위하여 엔드포인트 접근방법(endpoint approach)을, 피해를 받는 대상에 대한 경제적 가치를 산출하기 위하여 컨조인트 분석(conjoint analysis)을 각각 적용하였다. 보호대상에 대한 사회적 선호도와 지불의사금액(Willingness to Pay; WTP)을 측정하여 보호대상에 대한 경제적 가치를 추정한 결과 인간 건강은 62,261,700원/DALY(년)(장애보정생존연수), 사회 자산은 10,000원/10,000원이었다. 또한 각 보호대상에 대한 단위 피해를 정량화 한 피해계수(damage factor)와 인간 건강과 사회 자산에 대한 경제적 가치를 곱하여 GHG의 비용계수(cost factor)를 산출하였다. 온실가스 중 CO₂의 경우 비용계수는 13.52원/kg(13,520원/ton)으로 산출되었다. 제품 및 서비스로 인해 배출된 GHG 목록 결과값과 각 온실가스의 비용계수를 곱하여 지구온난화의 외부비용을 산출하였다.

주제어 : 온실가스, 지구온난화, 사회적 비용(외부비용), 보호대상, 엔드포인트 접근방법, 지불의사비용(WTP), 컨조인트 분석, 비용계수

1. 서론

최근 지구온난화(global warming)는 전세계적으로 주요한 환경문제로 부각되고 있으며, 포스트 교토 체제를 앞두고 우리나라 역시 2013년부터는 온실가스(Greenhouse gases; 이하 GHGs) 감축 의무국가로 편입될 가능성이 농후하다. 이러한 이유로 지구온난화 이슈는 산업계 입장에서 도 기업의 생존과 관련된 주요한 사회경제적 이슈로 부각되고 있

다. 특히, 제조기업 입장에서 제품 생산 활동으로 인한 GHGs 배출은 필연적이다. 제품 제조뿐만 아니라 운송, 사용 및 폐기에 이르는 제품의 전과정(life cycle)에 걸쳐 직·간접적으로 온실가스가 배출된다.

한편 이러한 시대적 흐름 속에서 GHGs 배출량 정보 공개에 대한 요구가 증가하고 있다. 기존 GHGs 정보는 일반적으로 kg CO₂ equiv. 값으로 제공된다. 이러한 정보는 실질적으로 지구온난화에 대한 지식을 갖고 있는 사람은 쉽게 이해할 수 있지만, 그렇지 못한 사람들은 이해하기 힘들다. 그러므로 누구나 GHGs 배출량 정보를 쉽게 이해할 수 있는 정보 형태로 가공하여 정보 공유를 할 필요성이 있다.

[†] Corresponding author

E-mail: intae.jeong@gmail.com

Tel: 031-219-2409

Fax: 031-215-5145

또한 GHGs 배출로 인한 지구온난화 영향의 피해는 환경에 위해를 가하고 우리 삶의 질을 악화시킨다. 이러한 환경적 피해는 외부효과(external effect)로서 한 경제 주체의 활동이 다른 경제 주체에게 시장을 매개로 하지 않고 불리하게 작용하는 것을 말하며, 이로 인해 질병 또는 사회적 자산의 손실 등이 발생한다. 이러한 환경적 피해를 금액으로 환산한 것을 사회적 비용(social cost)이라고 정의할 수 있다. 그리고 비용 즉 화폐적 가치로 표시된 정보는 누구나 쉽게 이해할 수 있는 장점이 있다.

그러므로 이 연구에서는 지구온난화 영향의 피해를 받는 보호대상(safeguard subjects)을 정의하고, 이에 대한 경제적 가치를 추정하여 GHGs에 대한 사회적 비용(외부비용)을 산출하는 것이 이 연구의 목적이다.

2. 지구온난화 피해의 가치 추정을 위한 접근방법

이 연구에서는 지구온난화 피해에 대한 가치 추정을 하기 위해 크게 두 가지 방법으로 접근하였다. 첫째, 엔드포인트 접근방법을 통해 GHGs로 인하여 발생된 지구온난화 영향의 피해를 받는 보호대상을 정의한다. 둘째, 컨조인트 분석을 이용하여 정의된 보호대상에 관한 경제적 가치를 평가한다.

2.1. 엔드포인트 접근방법(피해함수접근법)

제품(서비스 포함)의 전과정에 걸쳐 발생하는 환경부하(e.g. CO₂, NO_x, PM2.5 등)로부터 환경에 미치는 잠재적인 영향(예: 지구온난화, 부영양화, 인간 건강 등)을 평가하는 방법에는 크게 미드포인트 접근방법(midpoint approach)과 엔드포인트 접근방법(endpoint approach)의 두 가지 접근방법이 있다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 미드포인트 접근방법은 특정 영향범주에 속하는 환경부하 물질 목록(in-

ventory)에 각 물질의 특성화값을 곱하여 해당 영향범주의 중요도를 산출한다. 이후 이들 영향범주 간의 중요도를 고려하여 단일 지수로 표현하는 방법이다. 반면 엔드포인트 방법은 환경부하 물질 목록으로 인해 발생한 환경문제를 통해 어느 정도 피해를 받을 것이며, 평가 결과(열사병 환자가 얼마나 증가했는가, 백내장이 몇 건 증가했는가 등)에 기초하여 환경영향을 엔드포인트 수준까지 통합하는 접근방법이다.

미드포인트 접근방법에 비해 엔드포인트 접근방법의 장점은 다음과 같다.¹⁾

- 1) 엔드포인트(보호대상)까지 환경영향을 집약함으로써 3개 또는 4개로 가중치 항목의 수를 줄일 수 있다. 이를 통해 설문 응답자의 혼란을 줄일 수 있다.
- 2) 가중치 부여의 전 단계에 있는 피해평가는 과학적 지식을 기초로 평가를 하기 때문에 응답자의 주관적 가치 판단을 배제할 수 있으며(특성화, 피해평가), 사회과학적 분석방법을 통해 평가(피해평가에서 가중치부여)를 함으로써 미드포인트 접근방법에 비해 평가 단계의 명확한 구별이 가능하다.
- 3) 응답자가 이해할 수 있는 정보를 제공할 수 있다. 미드포인트 접근방법은 특성화 결과(예: 지구온난화-CO₂ equiv. 값)를 제시한다. 그러나 엔드포인트 방법은 피해평가 결과(예: 인간 건강의 경우 손실수명(연수))를 나타내기 때문에 응답자가 중요도 부여 시 혼란을 줄일 수 있다. 그 결과 중요도 계수의 통계적 유의성을 향상시킬 수 있다.
- 4) 엔드포인트 접근방법은 어떤 엔드포인트를 평가에 포함시킬 것인지, 어떤 모델 및 파라미터로부터 결과를 얻었는지가 명확하기 때문에 투명성을 높일 수 있다. 엔드포인트 접근방법들 간의 평가 결과가 다를 경우, 차이가 나는 원인을 찾아서 분석이 가능하다. 예를 들어, 지구온난화에 의한 말라리아의 평가 모델이 다를 수 있으며, 이 때 지구

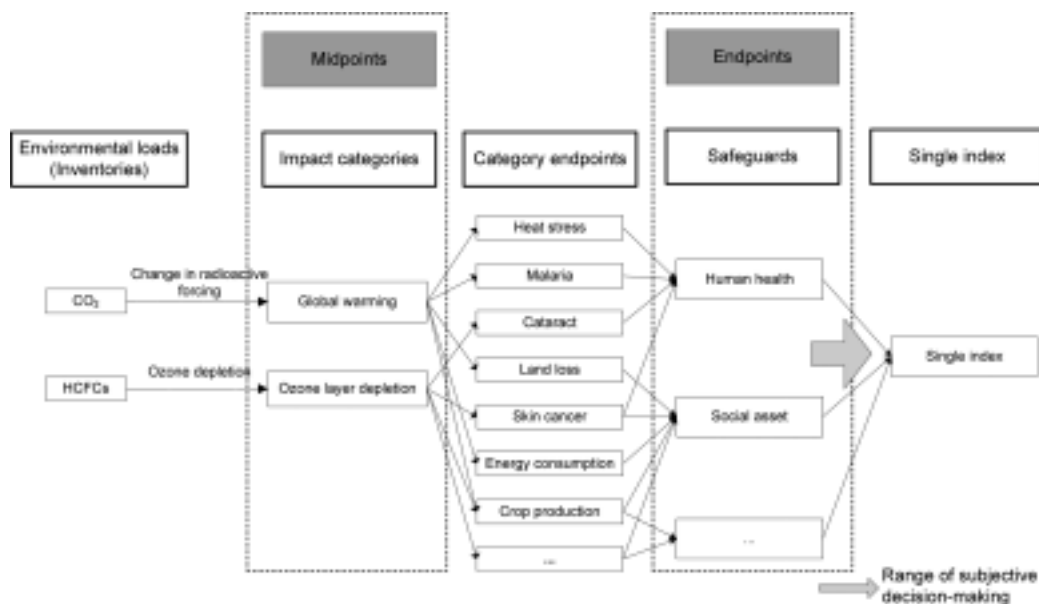


Fig. 1. Diagram of endpoint approach¹⁾ (modified by the author).

온난화로 인한 편익을 고려한 것인지 아닌지 등의 차이에 대한 해석이 가능하다.

5) 피해평가를 통해 다양한 범위의 피해 측면을 하나의 보호대상으로 집약할 수 있고, 손실수명과 같은 지표를 사용하여 이런 측면을 통합하고 비교 가능하게 된다. 만약 피해측면이 다른 영향범주에 있더라도 비교가 가능하다. 예를 들어, 지구온난화에 의한 열 스트레스에 의한 영향과 오존층 고갈로 인한 피부암의 영향을 비교할 수 있다.

한편 엔드포인트 접근방법은 미드포인트 접근방법에 비해 불확실성이 큰 것으로 알려져 있다. 이는 엔드포인트에 대한 피해를 모델링하는 과정에서 발생하는 불확실성을 의미하는데, 지구온난화 영향에 대한 많은 과학적 연구가 진행되고 있기 때문에 향후 모델로 인한 불확실성을 줄일 수 있을 것으로 판단한다.

따라서 위에 기술한 엔드포인트 접근방법의 장점을 토대로 제품으로 인해 배출되는 GHGs로 인한 지구온난화 영향의 사회적 비용, 즉 외부비용을 산정하기 위해서 엔드포인트 접근방법에 근거하여 식 (1)을 제안하였다.

$$EC = \sum_{safeguard} \sum_x (inv(x) \times DF^{Safeguard}(x) \times ES(safeguard)) = \sum_x (inv(x) \times CF^{Safeguard}(x)) = \sum_x (inv(x) \times CF^{Total}(x)) \quad (1)$$

여기에서,

- EC: 지구온난화의 외부비용(사회적 비용)
- Inv (X): GHG 중 X 물질의 목록 결과값(Kg)
- DF^{Safeguard} (x): 지구온난화에 의해 보호대상(safeguard subject)에 영향을 미치는 GHG 중 X 물질의 피해계수(피해단위량/Kg-GHG) (예: DALY/Kg-CO₂, 원/Kg-CO₂)
- ES (safeguard): 보호대상의 단위 피해에 대한 경제적 가치(원/피해단위량)
- CF^{Safeguard} (X): GHG 중 X 물질의 보호대상에 대한 비용계수(원/kg)
- CF^{Total} (X): GHG 중 X 물질의 총 비용계수(원/kg)

식 (1)에서 보는 바와 같이 보호대상의 단위 피해별 경제적 가치를 피해계수와 곱하여 보호 대상별 GHG의 비용계수를 산출한다. 이를 제품으로 인해 배출된 GHG 목록결과값과 곱하여 지구온난화 외부비용을 산출한다.

2.2. 환경영향의 사회적 비용 산출 방법

환경영향의 사회적 비용을 산출하기 위한 방법은 크게 물리적 연계모형(physical linkage model)과 행태적 연계모형(behavioral linkage model)이 있다.

2.2.1. 물리적 연계모형

물리적 연계모형은 환경제와 소비자 후생 간에 과학적 또는 생태적인 관계를 가정하여 환경제의 가치를 추정하는 방법으로서, 환경오염이 인간 건강이나 농작물, 건축물

등에 끼치는 피해를 분석해서 간접적으로 편익을 추정하는 방법이다. 이 모형에는 피해함수접근법(damage function approach), 유지비용접근법(maintenance cost approach), 대체비용접근법(replacement cost approach) 등이 있다.²⁾

피해함수접근법은 환경피해 또는 편익의 추정에 있어서 직접적으로 발생한 환경의 금전적 가치를 추정하는 대신 환경피해가 인간의 건강이나, 농작물, 건축물 등에 끼치는 피해를 추정한다. 이를 토대로 제품이나 시장활동에서 기인된 환경적 가치를 추출하는 방법으로서 환경영향을 정량화하는 접근방법인 엔드포인트 접근방법과 동일하다. 피해함수는 오염의 수준과 물리적 피해를 연결시키는 함수로서 투입-반응함수(Dose-Response Relationship)라고 불린다.²⁾

2.2.2. 행태적 연계모형

행태적 연계모형은 환경제를 소비하는 소비자의 효용극대화 모형에 기초하여 환경질의 변화가 소비자의 소비행태에 미치는 영향의 정도를 추정함으로써 환경가치를 측정하는 방법이다.³⁾ 행태적 연계모형은 환경가치를 응답자로부터 직접 도출하는 직접분석법(direct method)과 환경제와 보완 혹은 대체관계에 있는 시장제에 포함되어 있는 환경가치를 간접적으로 추정하는 간접분석법(indirect method) 또는 대체시장접근법(surrogate market approach)의 두 가지로 구분된다.

직접분석법은 환경질의 변화에 따른 소비자의 경제적 편익을 설문에 의한 응답자의 가치평가에 근거하여 추정하는 방법으로 조건부가치측정법(contingent valuation method; CVM)과 컨조인트 분석법이 대표적이다. 직접분석법은 시장이 존재하지 않는 환경제의 비사용가치를 추정하는 데 주로 사용된다. 간접분석법 또는 대체시장접근법은 환경제와의 보완제 또는 대체제에 대한 후생효과를 간접적으로 추정하는 방법으로 여행비용접근법(travel cost approach), 속성가격접근법(hedonic price approach), 회피행위접근법(avoiding behavior approach) 등이 있다. 이러한 간접분석법은 명시적으로 시장이 존재하지 않는 환경제의 사용가치를 암묵가격(implicit price)에 의해 추정하는 방법이다.

국내 행태적 연계모형을 이용한 대기오염에 의한 피해에 대한 가치를 임영식,⁴⁾ 조준모,⁵⁾ 광승준,⁶⁾ 임종수⁷⁾와 엄영숙⁸⁾에 의해 연구된 바 있으며, 이들 연구는 O₃, NO_x (NO₂), CO, TSP, SO₂의 대기오염물질로 인한 인간 건강과 생태계 피해에 대한 사회적 비용을 산정하였다. 그러나 현재까지 온실가스로 인한 인간 건강 및 생태계 피해에 대한 사회적 비용을 산정한 국내 사례는 없는 실정이다.

2.2.3. 지구온난화의 사회적 비용 산출 방법

컨조인트 분석은 상충관계에 놓여 있는 응답자의 선호체계 분석에 중점을 두는 지불의사금액(Willingness to Pay; 이하 WTP)을 유도하는 방법으로서 가치평가 대상의 다양한 속성과 응답자의 WTP 사이의 상충관계를 종합적으로 고려할 수 있다. 컨조인트 분석은 주로 시장재화의 속성

별 가치를 측정하기 위해 널리 적용되어 왔으며, 비시장재화의 가치 측정 분야는 Adamowicz et al.⁹⁾에 의해 기법이 적용된 이후 그 적용사례가 꾸준히 증가하고 있다. 그리고 대부분의 연구자들은 컨조인트 분석결과에 대해 긍정적인 평가를 내리고 있다.

한편 비시장재의 경제적 편익 측정방법으로 가장 널리 사용되고 있는 조건부 가치 측정방법은 일반적으로 대상 재화의 속성들의 1회적인 변화에 해당하는 WTP만 추정 가능하다. 이에 비해 컨조인트 분석은 다양한 속성 수준의 조합으로 구성된 다수의 대안에 대한 소비자의 상대적 선호를 표시하게 함으로써 소비자의 총체적인 선호구조를 추출해내어 다양한 속성의 변화에 대한 WTP를 추정해 낼 수 있는 장점을 가지고 있다.¹⁰⁾ 지구온난화에 의한 피해는 인간 및 생태계에 다양하게 영향을 미치기 때문에 각 속성의 1회적인 변화에 대한 가치를 측정하기 보다는 컨조인트 분석을 이용하여 각 속성 수준별 가치 및 속성들로 구성된 지구온난화로 인한 피해의 가치를 추정해 볼 필요가 있다.

그러므로 지구온난화 영향에 대한 사회적 비용 산출은 기본적인 분석틀로서 피해함수접근법을 택하였다. 피해함수를 이용하여 온실가스로 인한 인간 및 생태계에 미치는 피해를 정량화하였다. 이렇게 정량화된 피해에 대한 사회적 비용을 직접 산출하기 어렵다. 그러므로 행태적 연계 모형 중 하나인 컨조인트 분석을 이용하여 사회적 비용을 WTP의 형태로 추정하는 방법을 이용하였다. 컨조인트 분석은 지불의사 유도 방법에 따라 크게 조건부 선택법(contingent choice method), 조건부 순위결정법(contingent ranking method), 조건부 등급결정(contingent rating method)의 세 가지 방법이 있다. 이 논문에서는 설문 응답자의 부담으로 인한 오류의 가능성을 최소화하기 위해 조건부 선택법을 이용하였다.

3. 컨조인트 분석에 의한 지구온난화 피해 가치 추정

Fig. 1에서 나타난 엔드포인트 접근방법에서와 같이 지구온난화로 인해 보호대상(엔드포인트)이 받은 피해량을 산정하여 그 피해량 간의 비교를 통해 단일 지표로 통합한다. 단일 지표로 통합하기 위해 환경영향을 경제적 가치로 추정하고 환경영향의 정도를 금액으로 나타낸다. 이 때 컨조인트 분석을 통하여 보호대상에 대한 사회적 선호도를 측정하여 보호대상에 대한 경제적 가치를 추정하였다. 이 연구에서 사용된 컨조인트 분석 절차를 Fig. 2에 나타내었다.

3.1. 가치측정대상 선정 및 시나리오 작성

조건부 선택법에서는 사전조사를 통해 응답자가 판단할 수 있는 근거 자료, 즉 지구온난화 영향에 대한 현재 상태와 개선 대안에 대한 프로파일을 준비한다. 프로파일은 4개의 보호대상(인간 건강, 사회 자산, 생태계 건강, 생태계 자산)과 WTP의 5가지 속성으로 구성하였다.

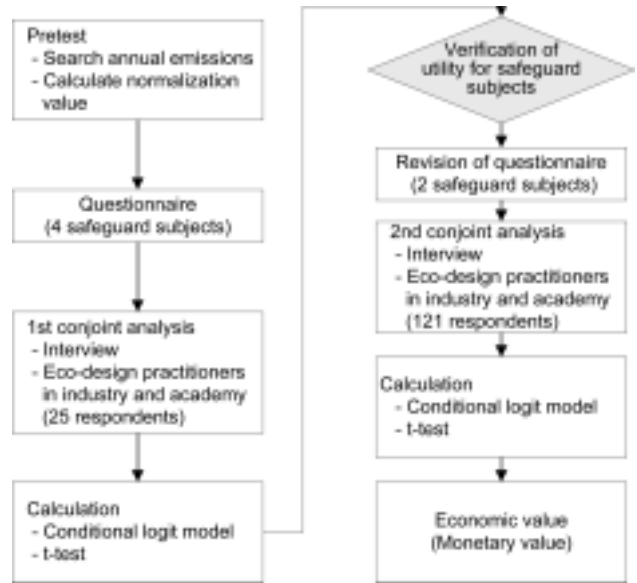


Fig. 2. Process flow chart for the conjoint analysis using the contingent choice method.

지구온난화의 영향을 그대로 방치해 두었을 경우 초래될 수 있는 속성별 최대 악화수준을 설정하고 이를 회복시키기 위해 필요한 속성별 WTP를 도출한다. 이 경우, 지구온난화의 WTP 속성이 0원일 경우, 지구온난화를 위한 아무런 노력을 기울이지 않음을 의미한다. 0원의 WTP 수준과 각 속성의 최대 악화수준으로 구성된 대안을 모든 질문의 기준대안으로 제시하고 나머지 두 대안은 가상의 지구온난화에 대한 영향을 나타내는 대안을 포함시킴으로써 총 3개의 대안 중 응답자가 선호하는 것을 택하도록 설정하였다.

3.2. 속성 및 지불수단

컨조인트 분석은 환경자산의 속성 수준별 한계지불의사금액(Marginal Willingness To Pay; 이하 MWTP)을 유도해 내는 방법론으로서, 지구온난화 영향에 대한 속성변수와 각 변수의 수준을 결정하는 것이 필요하다. 여기에서는 속성변수는 인간 건강, 사회 자산, 생태계 건강 및 생태계 자산으로 선정하였다. 속성변수의 평가단위는 순서대로 장애보정생존연수(Disability Adjusted Life Year; DALY(일)), 자산 피해액(원), 멸종 종(종의 수) 및 식물 생산량(톤)이다. 여기에서 장애보정생존연수는 질병이나 사고로 인해 조기 사망이나 장애가 생길 경우 이로 인한 건강손실을 연수로 계산한 값이다. 각 속성변수에는 최대 악화 수준(level 1)에서부터 피해가 전혀 없는 이상적인 수준(level 4)까지 4개의 속성수준을 결정하였다. WTP의 수준은 산업계 및 학계의 제품환경실무자 20명을 대상으로 사전조사를 실시하여 도출된 결과를 토대로 50,000원, 30,000원, 10,000원, 0원의 4개 수준으로 정하였다. 각 속성변수의 수준을 결정하기 위하여 각 속성변수에 대한 현재 수준을 다음과 같이 파악하였다. 그리고 지구온난화 영향의 속성변수와 속성수준을 Table 5에 나타내었다.

3.2.1. 인간 건강

지구온난화로 인한 인간 건강에 대한 피해를 산정하기 위해 2004년 국내 온실가스 배출량 통계(Table 1 참조)와 엔드포인트 접근 방법 중의 하나인 Life cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling(이하 LIME) 방법¹¹⁾의 피해계수(damage factor)를 사용하였다.

Table 1. Statistics of greenhouse gas emissions in Korea in 2004¹¹⁾

GHGs	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	HFCs	PFCs	SF ₆	Total
Emissions (Mt CO ₂)	517.9	25.7	20.9	7.1	3.1	15.9	590.6
Ratio(%)	87.7	4.3	3.5	1.2	0.5	2.7	100

Table 1에서 보는 바와 같이 국내 온실가스 총 배출량은 5.906E+11 kg CO₂ equiv.이다. 국내 총 온실가스 배출량에 의한 인간 건강에 대한 피해량은 Table 2와 같이 계산하였다. 이 때 피해계수는 지구온난화 영향으로 인해 엔드포인트(인간 건강)가 받는 피해(예: 열 스트레스로 인한 사망, 말라리아로 인한 사망 등)를 GHG별 단위 피해량 당 DALY로 환산한 값이다.

Table 2. Calculation of current level of damage for human health

Total GHG emissions (A)	Damage factor (B)	Population (C)	Damage per person to human health (= A×B×365/C)
kg CO ₂	DALY (yr)/kg CO ₂	Persons	DALY (day)
5.906E+11	1.23E-07	48,039,415	0.55

Table 2에서 인구는 2004년도 국내 추계 인구수 4천 8백만 명을 사용하였으며(통계청 인구통계 기준), 이를 통해 현 수준에서 연간 1인당 0.55일(0.0015년)의 수명손실이 발생하는 것으로 산출되었다.

3.2.2. 사회 자산

온실가스로 인한 사회 자산에 대한 피해 역시 인간 건강에서의 온실가스 배출량과 LIME의 피해계수를 사용하였으며, 동일한 인구통계를 사용하였다. 피해계수는 지구온난화 영향으로 인해 엔드포인트(사회 자산)가 받는 피해(예: 해수면 상승으로 인한 침수 피해, 농작물 생산량 감소 등)를 GHG별 단위 피해량 당 금액(원(Won))으로 환산한 값이다.

Table 3. Calculation of current level of damage for social asset

Total GHG emissions (A)	Damage factor (B)	Damage (C) (=A×B)	Population (D)	Damage per person to social asset (= C×10.5*/D)
kg CO ₂	Yen/kg CO ₂	Yen	Persons	Won/person · yr
5.906E+11	0.5483	3.238E+11	48,039,415	70,770

*Basic exchange rate of year 2004 (source: Korea Exchange Bank website (www.keb.co.kr))

Table 3에 나타난 바와 같이 현 수준에서 온실가스로 인한 국내 사회 자산의 피해액 수준은 연간 1인당 약 70,000원으로 산정하였다.

3.2.3. 생태계 건강

국제적인 생물종 멸종화율인 0.5%/년을 적용하여 우리나라 생물종수를 10만 정도로 추정하여 계산한 결과를 Table 4에 나타내었다.

Table 4. Estimated domestic species and extinct species

Estimated domestic species	The rate of extinction	Extinct species/year	Extinct species/month	Extinct species/day
100,000	0.5%/year	500	42	1.4

Table 4에 나타난 바와 같이 매년 우리나라에서 500종의 생물이 멸종되고 있다는 결과가 보고된 바 있다.¹²⁾ 이 결과에 따르면 월간 42종, 일간 1.4종이 우리나라에서 사라지고 있는 것이다.

IPCC 4차 보고서에서는 기온이 2~3℃ 상승(2050년대) 시 20~30%의 생물종이 멸종위기에 처할 것이라고 예측하고 있다. 이를 국내 멸종위기에 처한 동식물 221종¹³⁾에 멸종화율(0.5%/년) 및 온난화로 인한 멸종 비율(약 25%)을 적용할 경우, 연간 0.28종의 생물종이 멸종될 위험에 처해 있다고 산정할 수 있다.

3.2.4. 생태계 자산

생태계 자산의 평가단위는 순 1차 생산량(Net Primary Production; NPP)으로서, 이는 광합성 시 식물이 흡수하는 이산화탄소와 호흡 시 잃게 되는 이산화탄소의 양을 제외하고 식물 내에 저장된 양을 의미한다. 일본의 한 연구¹⁴⁾에 의하면 온실가스의 배출로 인해 발생한 식물생산의 손실량에 대해 평가를 하였으며, 그 결과 지구온난화에 의해 21,000,000톤의 피해가 발생한 것으로 집계되었다.

상기 21,000,000톤은 1년간 일본 전체 NPP의 약 0.007%에 해당한다. 일본과 유사하거나 동일한 피해가 발생할 것이라는 가정 하에서 우리나라(남한)와 일본의 국토 면적 비율(3.43배)¹⁵⁾을 적용하여 현 수준에서의 생태계 자산 피해수준을 연간 약 6,120,000톤으로 산정하였다.

지구온난화 영향에 대한 상기 4개의 보호대상(속성변수)과 속성수준 개선 시 WTP(속성변수)에 관한 속성수준을 Table 5에 나타내었다.

3.3. 선택대안집합의 설계

여러 속성변수 및 수준들로 구성된 지구온난화 영향에 대한 대안들이 응답자의 선택확률에 영향을 주도록 선택대안집합(choice sets)의 설계가 필요하다. 이 연구에서는 여러 대안 중 응답자들이 한 개의 대안을 선택하는 행위로부터 개별 속성변수들의 수준변화에 따른 가격효과를 분리해내기 위해 개별 속성들간의 직교성(orthogonality)을 보장해주는 주 효과 직교설계(orthogonal main effects de-

Table 5. Attributes of global warming impact and levels of each attribute

Attribute	Unit	Levels of attribute	
Human health	Loss of life (DALY)	Level 1*	Hold the present situation 0.55 day/year (27.5 days/50 years)*
		Level 2	25% reduction 0.41 day/year (20.5 days/50 years)
		Level 3	50% reduction 0.28 day/year (14days/50 years)
		Level 4	0 (No loss of life)
Social asset	Cost of damage (Won/year)	Level 1*	Hold the present situation 70,000 Won/year (350 Mwon/50years)*
		Level 2	25% reduction 52,500 Won/year (262.5 Mwon/50years)
		Level 3	50% reduction 35,000 Won/year (175 Mwon/50years)
		Level 4	0 (No damage)
Ecosystem health	The number of extinction (species/year)	Level 1*	Hold the present situation 0.28 species/year (14species/50years)*
		Level 2	25% reduction 0.21 species/year (10.5species/50years)
		Level 3	50% reduction 0.14 species/year (7species/50years)
		Level 4	0 (No extinction)
Ecosystem asset	Production of plant (ton/year)	Level 1*	Hold the present situation 6.12 Mton/year (306 Mton/50years)*
		Level 2	25% reduction 4.59 Mton/year (229.5 Mton/50years)
		Level 3	50% reduction 3.06 Mton/year (153 Mton/50years)
		Level 4	0 (No reduction of plant production)
Willingness to Pay (WTP) for improvement	Additional WTP (Won) per year	Level 1*	0 (No payment)*
		Level 2	10,000 Won/year
		Level 3	30,000 Won/year
		Level 4	50,000 Won/year

Note: 'asterisk(*)' means the worst situation and it was used as a base option in the questionnaire.

sign) 방법을 이용하였다. 이 연구에서는 5개의 속성변수와 개별 속성변수에 대해 각각 4개의 수준들이 존재한다. 컨조인트 분석 질문에서 응답자들은 일반적으로 여러 개의 대안에 직면하게 된다. 이 연구에서는 기준상태(0원의 지불의사금액과 각 속성별 최대악화수준)을 나타내는 대안 한 개와 가상의 지구온난화 영향에 대한 2개의 대안 등 총 3개의 대안이 존재한다. 응답자는 주어진 대안들에서의 속성들과 금액 속성 사이의 상관관계를 고려하여 3개의 대안들 중 1개의 대안을 선택하도록 하였다.

Table 5에 수록된 5개의 속성변수가 가진 4개의 속성수준을 조합하여 만들 수 있는 대안은 총 45×45개이다. 그러나 응답자에게 모든 대안에 대해 질문하는 것은 비현실적이므로 모형의 추정이 가능하도록 하는 최소 선택대안 집합을 전체 대안 집합으로부터 도출하였다. 이를 위해 사회과학분야에서 데이터의 통계적 분석을 위한 컴퓨터 프로그램인 Statistical Package for the Social Sciences (SPSS)

12.0 프로그램¹⁶⁾을 사용하여 주 효과 직교설계를 수행하였다. 주 효과 직교설계로부터 62개의 선택대안집합들이 도출되었고, 한 개의 설문서에 4개의 질문이 포함되도록 설문서를 생성하였다. 실제 설문에 사용된 질문 중의 하나를 예시하면 Fig. 3과 같다.

3.4. 설문조사

설문조사는 1차 컨조인트 분석은 산업계 제품환경실무자 및 환경공학과 대학원생 25명(샘플 수: 100개)을 대상으로 수행하였으며, 2차 컨조인트 분석은 산업계 제품환경실무자 및 환경공학과 학부 및 대학원생 121명(샘플 수: 484개)을 대상으로 수행하였다. 응답자들은 컨조인트 분석에 대해 친숙하지 못하기 때문에 분석 질문에 묘사되는 다양한 속성과 금액(WTP) 속성 간의 상충관계를 정확하게 이해시키는 데 한계가 존재하기 때문에 설문서에 대한 응답률을 높이고 응답자들에게 상세한 질문 및 응답을 위한

다음의 서로 다른 3개의 대안들 중 귀하가 가장 선호하는 것을 선택하여 번호에 체크하여 주십시오			
보호대상	대안 1	대안 2	대안 3 (기준상태)
인간 건강 (손실수명)	현상유지 (0.55일 감소/년) (50년간 27.5일)	50% 감소 (0.28일 감소/년) (50년간 14일)	현상유지 (0.55일 감소/년) (50년간 27.5일)
사회 자산 (피해액)	없음(0)	25% 감소 (52,500원 감소/년) (50년간 262.5만원)	현상유지 (70,000원 감소/년) (50년간 350만원)
생태계 건강 (멸종 종의 수)	25%감소 (0.21종/년 멸종) (50년간 10.5종 멸종)	50%감소 (0.14종/년 멸종) (50년간 7종 멸종)	현상유지 (0.28종/년 멸종) (50년간 14종)
생태계 자산 (식물생산량)	25% 감소 (4.59백만톤 감소/년) (50년간 229.5백만톤 감소)	50% 감소 (3.06백만톤 감소/년) (50년간 153백만톤 감소)	현상유지 (6.12백만톤 감소/년) (50년간 306백만톤 감소)
추가적인 연간 지불액 (1세대, 1년)	30,000원	10,000원	0원
대안 1~3 중 가장 선호하는 1개를 선택해 주십시오	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Fig. 3. Sample question of questionnaire used for conjoint analysis.

최선의 기회를 제공하기 위해 일대일 개인면접방식을 채택하였다.

3.5. 추정모형

각 응답자들의 속성별 지불의사금액을 추정하기 위해 조건부 선택법은 확률효용모형(random utility model)을 이용하여 정형화될 수 있다. 이 논문에서는 McFadden¹⁷⁾에 의해 개발된 조건부로짓모형(conditional logit model)을 사용하였으며, 이를 식 (2)에 나타내었다. 조건부로짓모형은 개별 속성들이 어떻게 응답자의 선택확률에 영향을 주는지를 모형화하는데 있어 통계적인 체계를 제공한다. 응답자 i 가 선택대안집합 C_i 중 하나의 선택대안 j 로부터 얻는 간접효용함수(U)는 다음과 같이 표현될 수 있다.¹⁷⁾

$$U_{ij} = V_{ij} + \varepsilon_{ij} = \beta x_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

여기에서, V_{ij} 는 관측 가능한 정형화된(deterministic) 부분
 ε_{ij} 는 관측 불가능한 확률적(stochastic) 부분(오차 항)
 x_{ij} 는 선택대안 j 의 속성수준
 β 는 추정계수

응답자 i 가 선택대안집합 C_i 내의 모든 선택대안들에 대해 $U_{ij} > U_{ik}$ ($k \in C_i, k \neq j$)을 만족한다면, 선택대안 j 를 선택할 것이다.

컨조인트 분석법 질문으로부터 얻어진 각 응답자의 응답은 응답자의 효용극대화(utility maximization)를 위한 선택결과로서 해석될 수 있다. 속성별 세대 당 연간 MWTP를 산출하기 위해 다음과 같은 지불의사 모형을 설정하였으며, 이를 식 (3)에 나타내었다.¹⁸⁾

$$V(x, T) = \sum_k \beta_k x_k + \beta_T T \quad (3)$$

여기에서, V : 관측 가능한 정형화된(deterministic) 부분
 x : 속성변수
 T : 부담액
 β : 추정계수

상기 식 (3)을 전미분하면 식 (4)와 같다.

$$\sum_k \frac{\partial V}{\partial x_k} dx_k + \frac{\partial V}{\partial T} dT = dV \quad (4)$$

여기에서, 효용수준을 기초수준에 고정 시킬 경우($dV=0$) 속성 x_1 이외의 속성도 기초수준에 고정($dx_k = 0, k \neq 1$) 한 것으로 가정한다. 그 때 속성 x_1 이 한 단위 증가할 때 그에 대한 MWTP는 식 (5)와 같이 계산한다.

$$MWTP_{x_1} = \frac{dT}{dx_1} = - \frac{\partial V}{\partial x_1} / \frac{\partial V}{\partial T} = - \frac{\beta_1}{\beta_T} \quad (5)$$

4. 분석결과

4.1. 1차 컨조인트 분석 결과

1차 컨조인트 분석은 4개의 보호대상에 대한 분석을 수행하였으며, 그 결과를 Table 6에 나타내었다. 식 (2)의 조건부로짓모형으로부터 도출된 추정계수를 통하여 보호대상에 대해 지불의사금액이 증가함으로써 얻는 응답자의 효용을 평가하여 효용이 없거나 감소하는 보호대상을 제외하고 2차 컨조인트 분석을 수행하였다.

추정계수의 부호가 음(-)인 것은 각 속성 수준이 증가할수록 응답자의 효용을 감소시킨다는 것을 의미한다. 즉 인간 건강 및 사회 자산의 경우 효용이 증가하는 반면, 생태계 건강 및 생태계 자산은 효용이 감소함을 알 수 있다.

Table 6. The result of estimated coefficients for four attributes

Attribute	Estimated coefficient (β)	Standard error	T value	P value
Human health	1.226 (0.597 ~ 1.855) [†]	0.629	1.949	0.054 ^{***}
Social asset	0.144 (0.090 ~ 0.198) [†]	0.054	2.651	0.009 [*]
Ecosystem health	-0.479 (-1.665 ~ 0.707) [†]	1.186	-0.404	0.687
Ecosystem asset	-0.044 (-0.061 ~ -0.027) [†]	0.017	-2.554	0.012 ^{**}
Willingness to Pay (WTP)	-0.089 (-0.155 ~ -0.023) [†]	0.066	-1.344	0.182

[†] : the range of estimated coefficient (β - standard error ~ β + standard error)

^{*} P<0.01 : statistically significant at the 1% level ^{**} P<0.05: statistically significant at the 5% level

^{***} P<0.1: statistically significant at the 10% level

Table 7. Respondents' information of second conjoint analysis

	Gender		Age			Residence				
	Male	Female	20s	30s	40s	Seoul	Gyeong-gi province	Chung-cheong province	Gyeong-sang province	Jeolla province
Persons	84	37	89	28	4	25	86	6	3	1
Ratio (%)	69.4	30.6	73.6	23.1	3.3	20.7	71.1	5.0	2.5	0.8

Table 8. The result of estimated coefficients for two attributes

Attribute	Estimated coefficient (β)	Standard error	T value	P value
Human health	1.269 (β_1) (0.717 ~ 1.821) [†]	0.552	4.956	0.000088 [*]
Social asset	0.074 (β_2) (0.033 ~ 0.115) [†]	0.041	3.684	0.000001 [*]
Willingness to Pay (WTP)	-0.108 (β_T) (-0.163 ~ -0.053) [†]	0.055	-3.955	0.000255 [*]

[†] : the range of estimated coefficient (β - standard error ~ β + standard error)

^{*} P<0.01 : statistically significant at the 1% level ^{**} P<0.05: statistically significant at the 5% level

^{***} P<0.1: statistically significant at the 10% level

또한 WTP 수준의 증가가 응답자의 효용을 감소시킨다는 것을 의미한다. 상기 표에서 보는 바와 같이 생태계 건강 및 생태계 자산에 대해서는 지구온난화 영향의 개선에 따른 효용이 없으므로, 두 속성변수를 제외한 인간 건강 및 사회 자산의 두 속성변수에 대해서만 2차 컨조인트 분석을 수행하였다.

Table 6에서 표준오차(Standard Error; SE)는 추정량의 정도를 나타내는 척도로서 표준편차를 표본크기의 양의 제곱근으로 나눈 것($SE = s(\text{표준편차}/n)$)이며, 평균의 정확성을 의미한다. 그리고 T-검증(test)은 두 집단 간에 평균의 차이가 있는가를 검증하는 방법이다. 두 집단간 표본평균의 차이가 귀무가설(영가설; H_0)하에 있을 확률 즉, 표본오차로 인해 차이가 발생할 확률(유의확률: P-값)이 귀무가설을 기각하기로 설정한 유의수준(통상적으로 5%)과 같거나 적다면 귀무가설을 기각하고 대립가설을 채택한다.

4.2. 2차 컨조인트 분석 결과

2차 컨조인트 분석의 설문 응답자에 대한 성별, 연령 및 지역 정보를 Table 7에 나타내었다. 남성 응답자가 약 70%를 차지하며, 20대 응답자가 약 74%를 차지하고 있었다. 그리고 약 92%인 111명의 응답자가 수도권(서울/경기도)에 거주하고 있었다.

2차 컨조인트 분석은 2개의 속성변수 - 인간 건강과 사회 자산 - 에 대하여 1차 컨조인트 분석 대상자를 대상으로 설문조사를 수행하였으며, 이를 통해 인간 건강과 사회 자산에 대한 추정계수를 도출하여 Table 8에 나타내었다. 또한 식 (5)를 이용하여 MWTP를 추정하여 Table 9에 나타내었다.

인간 건강과 사회 자산에 대해서는 계수의 부호가 모두 양(+)으로 나왔으며, 이는 개별 속성들의 수준이 증가할수록 응답자의 효용이 증가한다는 것을 의미한다. 반면에 지불의사금액에 대한 계수가 음(-)의 부호라는 것은 지불의사금액 수준의 증가가 응답자의 효용을 감소시킨다는 것을 의미한다.

Table 9. The result of MWTP of each attribute for the impact of global warming

Attribute	MWTP (Won) / household (= $-\beta_1/\beta_1$)	MWTP (Won) / household (= $-\beta_1/\beta_2$)
Human health	11,713 Won/DALY (day)	170,580 Won/DALY (day)
Social asset	6,866 Won/Won	10,000 Won/ 10,000 Won

한편 지구온난화 영향에 대한 각 속성에 대해 악화상태에서 최대한 개선시키기 위해 각 속성별 MWTP는 인간 건강은 11,713원, 사회 자산은 6,866원으로 계산되었다. 그러나 사회 자산의 경우 실제 피해를 금액으로 산정할 수 있으므로, 사회 자산에 대한 MWTP를 10,000원으로 설정하였다. 사회 자산을 기준으로 MWTP를 재계산하였을 경우, 속성별 MWTP는 인간 건강 170,580원, 사회 자산 10,000원으로 계산되었다. 추정 결과에서 보는 바와 같이 지구온난화 영향에 대해 사회 자산보다 인간 건강에 더 높은 효용가치를 두고 있다고 해석할 수 있다.

Table 10에 컨조인트 분석을 통해 각 보호대상에 대한 경제적 가치(사회적 비용)를 추정하여 나타내었으며, 인간 건강에 대한 경제적 가치는 MWTP 값인 170,580원/DALY (일)에 365일을 곱하여 DALY(년)에 대한 값으로 환산하였다.

Table 10. Estimated economic value of each safeguard subject from conjoint analysis

Safeguard subject	Estimated economic value	
Human health	62,261,700	Won / DALY (yr)
Social asset	10,000	Won / 10,000 won

Table 11. The part of cost factor for GHGs

GHGs (X)	Molecular formula	Cost factor (CF ^{Total}) (Won/kg X)
Carbon dioxide	CO ₂	1.35E+01
Methane	CH ₄	3.57E+02
Nitrous Oxide	N ₂ O	4.60E+03
CFCs		
CFC-11	CFCl ₃	7.15E+04
CFC-12	CF ₂ Cl ₂	1.65E+05
CFC-13	CClF ₃	2.17E+05
CFC-113	C ₂ F ₃ Cl ₃	9.32E+04
CFC-114	C ₂ F ₄ Cl ₂	1.52E+05
CFC-115	C ₂ F ₅ Cl	1.12E+05
HCFCs, etc		
HCFC-21	CHCl ₂ F	3.26E+03
HCFC-22	CF ₂ HCl	2.64E+04
HCFC-141b	C ₂ FH ₃ Cl	1.09E+04
HCFC-142b	C ₂ F ₂ H ₂ Cl	3.73E+04
HCFC-123	C ₂ F ₃ HCl ₂	1.86E+03
HCFC-124	C ₂ F ₄ HCl	9.63E+03
HCFC-225ca	C ₃ F ₅ HCl ₂	2.80E+03
HCFC-225cb	C ₃ F ₅ HCl ₂	9.63E+03

상기 결과는 기업의 제품환경 담당 실무자 및 환경공학 전공 학부생 및 대학원생을 대상으로 설문한 결과로서 대한민국을 대표하는 결과로 간주하기에는 한계점이 존재한다. 그러나 환경에 관심이 있는 특화된 집단으로서의 환경전문가 집단에 대한 결과로서 의미 있는 값이라 판단한다.

식 (1)에 의거하여 Table 10의 인간 건강과 사회 자산에 대한 경제적 가치와 피해계수를 이용하여 GHGs 중 CO₂에 대한 비용계수(CF^{Total} = CF^{Human health} + CF^{Social asset})를 산출한 결과 13.52원/kg(13,520원/ton) 값이 산출되었다. 다른 GHGs에 대한 비용계수를 계산하여 그 중 일부를 Table 11에 나타내었다.

5. 결론

지구온난화 영향의 피해를 받는 대상을 정의하여 이에 대한 경제적 가치를 추정하여 GHGs에 대한 사회적 비용(외부비용)을 산출하였다. 이를 위해 지구온난화 영향의 피해를 받는 대상을 정의하기 위하여 엔드포인트 접근방법을, 피해를 받는 대상에 대한 경제적 가치를 산출하기 위하여 컨조인트 분석을 각각 적용하였다. 컨조인트 분석을 통하여 인간 건강 및 사회 자산에 대한 경제적 가치는 각각 62,261,700원/DALY(년), 10,000원/10,000원으로 추정되었으며, 이 결과와 피해계수를 이용하여 비용계수를 산출하였다. 그 결과 CO₂의 경우 13.52원/kg(13,520원/ton)의 값이 산출되었다.

각 GHG에 대한 비용계수는 지구온난화 영향에 대한 사회적 비용(외부비용)을 의미하는 것으로서 GHG에 의한 지구온난화 피해를 화폐 가치로 전환할 수 있다. 그러므로 제품 혹은 서비스의 제조 및 사용, 운송, 폐기 등의 활동으로 인해 발생하는 GHGs를 화폐 가치로 전환함으로써 누구나 쉽게 지구온난화 영향을 이해할 수 있는 효과적인 정보 전달 수단이 될 수 있다.

참고문헌

1. Itsubo N., Inaba A., 라이프사이클 환경影響評價手法, 産業環境管理協會(JEMAI) (2005).
2. 김재홍, 환경자원의 경제적 가치와 환경오염의 사회적 비용, 집문당, 경기도(2006).
3. 김승우, 김홍균, 유상희, 이호생, 임종수, 정태용, 한택환, 홍종호, 환경경제학-이론과 실제-, 박영사, 서울(2003).
4. 임영식, 전영섭, “헤도닉가격기법을 이용한 대기질 개선시의 편익 추정,” 자원경제학회지, 3, 81~105(1993).
5. 조준모, “대기오염의 사회적 비용,” 21세기 대기정책 수립을 위한 대토론회 요약집, 한국대기보전학회(1996).
6. 광승준, 조준모, “자동차의 이산화질소 배출로 인한 대기오염의 사회적 비용 분석,” 교통정책연구, 3(3), 51~72(1996).
7. 임종수, 대기오염의 사회적 비용, 한국환경정책·평가연구원(1996).
8. 엄영숙, “환경영향평가제도와 환경영향의 가치평가,” 환

- 경경제연구, **8**(1), 1999.
9. Adamowicz, W., Louviere, J., and Williams, M., "Combining Revealed and Stated Preference Methods for Valuing Environmental Amenities", *J. Environ. Economics Manage.*, **26**, 271~292(1994).
 10. 곽승준, 유승훈, 장정인, "컨조인트 분석을 이용한 한강 하구의 가치추정," *경제학연구*, **54**(4), 141~160(2006).
 11. 산업자원부, '온실가스 배출증가율, 1999년 이후 감소 추세 이어가 - 2004년 배출량은 1990년 대비 연평균 4.7%, 2003년 대비 1.4% 증가 -', *보도자료*, 2006.10.23.
 12. 조승현, 박용하, 김승우, 최용재, *생물다양성 보전을 위한 유인제도 활성화 방안*(KEI/1999 기본과제 연구보고서), 한국환경정책·평가연구원(1999).
 13. 환경종합정보서비스(<http://etips.me.go.kr>), 2008년 3월 접속.
 14. 株式会社日経リサーチ, *経済評価によるインパクト評価手法の開発調査報告書*(2002).
 15. 세계도시정보(<http://ubin.krihs.re.kr>), 2008년 4월 접속.
 16. SPSS (version 12.0) [Computer software], SPSS Korea (Datasolution) (2004).
 17. McFadden, D., Conditional Logit Analysis of Qualitative Choice behavior, In P. Zarembka, ed., *Frontiers in Econometrics*, New York: Academic Press(1974).
 18. Kuriyama K.(栗山浩一), EXCEL ができるコンジョイント(version 1.1), *環境経済学ワーキングペーパー#0302*, 早稲田大学政治経済学部(2003).