

지구온난화에 의한 가정용 전력에너지의 소비평가

임한철^{1,*} · 변영화¹ · 권원태¹ · 전종갑²

¹국립기상연구소 기후연구팀

²서울대학교 지구환경과학부

(2007년 12월 24일 접수; 2008년 3월 8일 승인)

An Assessment of the Residential Electric Energy Consumption Induced by Global Warming

Han-Cheol Lim^{1,*}, Young-Hwa Byun¹, Won-Tae Kwon¹ and Jong-Ghap Jhun²

¹Climate Research Lab. /National Institute of Meteorological Research /KMA

²School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

(Manuscript received 24 December 2007; in final form 8 March 2008)

Abstract

This study provides an impact assessment of climate change on energy consumption, based on ‘active-deal scenario’. This approach assumes that the amount of electric energy consumption depends on human spontaneous acts against local temperature change. In this study, a statistical model for estimation of the Residential Electric Energy Consumption (REEC) has been developed by using monthly mean temperature and monthly amount of electric energy consumption in the 6 major cities over the 1999-2005 period. The statistical model is utilized to estimate the past and future REEC, and to assess the economic benefits and damage in energy consumption sector. For an estimation of the future REEC, climate change scenario, which is generated by National Institute of Meteorological Research, is utilized in this study. According to the model, it is estimated that over the standard period (1999~2005), there might be economic benefits of about 31 billion Won/year in Seoul due to increasing temperature than in the 1980s. The REEC is also predicted to be gradually reduced across the Korean peninsula since the 2020s. These results suggest that Korea will gain economic benefits in the REEC sector during the 21st century as temperature increases under global warming scenarios.

Key words: active-deal scenario, residential electric energy consumption, REEC, impact assessment

1. 서론

근세기 기후변화에 대한 다양한 원인들이 제시되며 (Hurrell, 1996; Shindell *et al.*, 1999; Severinghaus and Brook, 1999; Jones *et al.*, 2001; Hendy *et al.*, 2002) 그 논란이 이어지고 있지만, 최근 발표된 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 제 4차

평가보고서는 20세기 들어 급격하게 진행되고 있는 지구온난화가 인간활동에 의한 인위적 온실가스증가 때문이라는 많은 증거를 제시하고 있다 (IPCC, 2007). 인류활동에 의한 인위적인 이산화탄소의 방출이 지구온난화의 원인으로 지목되었음에도 불구하고 (Manabe *et al.*, 1990; Tett *et al.*, 1999; Crowley, 2000), 전 지구 규모로 발생하는 해양과 대기의 온난화 징후들의 상호 과정에 대한 이해는 여전히 부족하다. Levitus *et al.* (2000)은 해양의 연직 열용량 관측을 통해 해양의 수온 또한 지속적으로 증가해오고 있음을 제시하였으며, Barnett *et al.* (2005)은 이와 같은 해양수온의 증가원인이 이산화탄소 때문에 더워진 대기의 열이 오랫동안 해양으로 흡수되었기 때문이라고 주장하였지만, 비중에 큰 해양과 대기사이 물리적 상호과정은 설명하지

*Corresponding Author: Han-Cheol Lim, Climate Research Team, National Institute of Meteorological Research, 460-18 Sindabang -2dong, Dongjak-gum Seoul 156-720, Korea.
Phone : +82-2-6712-0312, Fax : +82-2-846-2853
E-mail: hclim99@metri.re.kr

못하고 있다.

이처럼 지구온난화의 영향으로 생태계뿐만 아니라 인간과 자연의 모든 영역에 이상 징후들이 나타나고 있다. 예를 들면, 그린랜드 빙하의 용해나 베링해의 수온상승 및 산성화로 인한 해양 생물종의 변화 그리고 시베리아 지역의 영구동토가 사라지기 시작했다는 보고들이 바로 대기-해양이 결합된 전 지구시스템의 기온상승이 가속화되고 있다는 증거들이다 (Paterson and Reeh, 2001; Ridley, *et al.*, 2005; Pearce, 2005; Grebmeier, 2006).

최근 지난 한 세기간의 급격한 지구온난화로 유발되는 이상기후징후에 대한 위급성을 깨닫고 수자원, 농업, 생명다양성, 연안, 에너지소비 등 다양한 영역에서 그 취약성과 영향평가 연구가 진행되고 있다 (IPCC, 2001a, 2001b; UKCIP, 2000, 2001; Parson *et al.*, 2003). 특히, 기후변화에 기인한 환경, 에너지 문제는 국제적으로 미래 국가생존과 직결된 문제로 받아들여지고 있으며 이해관계에 따라 국제분쟁의 씨앗이 되기도 하는 등, 정치·경제적 여파는 다른 어떤 분야만큼이나 크다고 할 수 있다.

기후변화와 에너지 소비의 상관성에 대한 연구로 일찍이 Quayle and Diaz (1980)는 난방용 화석에너지 및 전력에너지 소비와 높은 상관관계가 있음을 보이고 난방도일(heating degree day)을 제시하였다. 또한 Downing *et al.* (1995, 1996)은 기온과 냉·난방 에너지 소비사이에 선형적인 관계가 있음을 보였다. 이를 기반으로 Tol (2002)은 냉·난방모델을 각각 개발하였는데 그의 연구결과에 따르면, 미래 2200년까지 에너지 효율의 향상이 있더라도 난방비의 증가와 난방비의 감소로 국내총생산 (Gross Domestic Product, GDP)의 1%를 넘지 않는 범위의 순이익이 발생할 것으로 내다보았다. 하지만 Tol (2002)의 연구에서 제시된 냉·난방 에너지 추정모델은 최적 추적치를 결정하는데 있어 많은 불확실성이 포함하고 있는 것으로 알려져 있다. 2003년 OECD 보고서에서는 기온이 상승하면 난방과 관련된 에너지소비가 증가되고, 하강하면 난방에 필요한 에너지 소비가 증가되어, 겨울에서 여름이 됨에 따라 에너지소비 곡선은 U 또는 V 형 패턴을 가진다고 진술하고 있다 (Joel and Sam, 2003). 그러나 이런 특징은 열대나 고위도지방을 포함한 전 지구평균기온이나 모든 국가별 에너지소비에 대해서 일반화되지 못함을 지적하였다. 국지적인 기온-에너지 소비 상관성 연구의 일환으로 Lins *et al.* (2002)은 조

건부요구분석 (Conditional Demand Analysis)에 기초하여 브라질의 남부지방과 북부지방의 가정용 전자 전기 제품군의 종류와 보급에 따른 전력에너지 소비를 비교 조사하였다. 결과에 따르면 남부지방 전력소비의 차이는 가전제품의 종류와 개수보다는 오히려 국지적 기온 차이에서 크게 기인할 수 있음을 언급하였다.

이와 같은 기존의 연구결과를 바탕으로 본 연구에서는 에너지 분야에 있어서 우리나라 미래 기후변화의 영향에 대한 경제적 손익평가를 시도하였다. 먼저, 우리나라 주요도시 인구당 연간 가정용 전력 소비량 (Residential Electric Energy Consumption, 이후 REEC로 지칭함)과 연간 기온변동사이 통계적 관련성을 보였다. 국립기상연구소에서 산출한 한반도 기후변화 시나리오를 사용하여 (Boo *et al.*, 2004) 미래 기온변화에 따른 인구당 연간 REEC를 추정하고, 향후 전력에너지 소비와 관련한 경제적 영향을 논의하였다. 본 연구에 앞서 먼저, 기후변화 영향평가에 관한 보다 합리적인 새로운 접근법을 소개하고, 타 분야에서의 영향평가 연구에 대한 적용 가능성을 논의하였다.

2. 기후 영향평가의 사실적 접근: ‘적극 대응 시나리오 (active-deal scenario)’

기후변화에 기인한 지구 환경변화에 가장 취약한 부분 중 하나로 알려진 농업에서는 기후 영향평가의 일환으로 농업생산성의 변화를 추정하기 위한 노력이 있어왔다 (Sonka *et al.*, 1989; Mendelsohn *et al.*, 1994; Darwin, 1999; Thomson *et al.*, 2005; Deschenes and Greenstone, 2006; Mendelsohn and Reinsborough, 2007 etc.). 농업분야에서 기후영향평가의 가장 대표적인 접근법은 소위 “production function approach”이다. 이 접근법은 기온과 강수량만이 농업생산성을 결정하는 직접적인 요인으로 고려하여, 기온과 강수량의 변동에 따른 농업생산량의 변화를 추정하는 방법이다. 그러나 곡물생산량과 기후변화사이 관련성을 보여주는 관측된 증거를 정량적으로 보여주기 어려웠다. 그 이유는 농업생산의 주체인 농부가 기후변화에 적극 대처하여 최대 곡물생산량을 유지시키기 위한 노력을 아끼지 않기 때문이다. 그래서 농업분야 기후영향평가에 있어서 “게으른 농부시나리오 (dumb-farmer scenario)”라는 가정이 필수적이다. 이 가정은 곡물생산성에 직접적인 영향을 줄 수 있는 기온, 강수, 서리, 산성비 등의 피해에 대해, 농부가 할 수

Table 1. Description of the assessment on agriculture and energy(REEC) induced by impacts of climate change based on the ‘active-deal scenario’.

Field	Agriculture	Energy (REEC)
Climate change	Temperature, Precipitation, Insolation, Acid rain, etc.	Temperature
Subject	Farmer	Electric energy consumer
Act	Irrigation, Luminescence and heating, Soil fertilization, Crop species change, Soil usage change	Cooling and heating, Buying and frequent usage of electric appliances
Effect	Maximum agricultural profits	Constant interior temperature, Life convenience
Assessment	Additional agricultural costs	Increase of REEC

있는 어떠한 대처 (관개, 발광, 발열, 토질개선, 재배작물 변경, 토지 사용용도 변경)도 하지 않아, 기후변화가 농업생산량에 직접적이면서 고스란히 영향을 미친다는 가정이다. 하지만 곡물생산량을 일정하게 유지 또는 최대화 하고자 노력하는 농업의 주체, 농부를 배재함으로써 현실적이지 못한 가정되었으며 기후영향 평가에 있어 자료의 불확실성을 더욱 키웠다.

그러므로 농업분야 기후영향평가에서 기후변화에 대한 적극적인 농부들의 대응 노력으로 추가되는 경농비용이 농업생산량 변화와 함께 고려되어야 한다. 이 연구에서는 기후영향평가의 한 방법으로 ‘적극 대응 시나리오 (active-deal scenario)’를 제시하게 되었는데, 이는 기후변화에 대한 인간의 적극적 대응으로 기후변화의 피해가 줄어들지만, 추가적인 비용 증대가 나타남에 착안하여 기후변화에 따른 영향평가에 추가되는 비용을 포함시킴으로써 기후영향평가에서 일반적으로 발생할 수 있는 자료의 불확실성을 줄이고자 하였다. 이 ‘적극 대응 시나리오 (active-deal scenario)’ 개념을 에너지 부분 기후영향평가에 도입하여 기후 변화의 영향으로 발생하는 에너지 소비 증감을 보이고 이에 대한 경제적 손익을 분석하고자 한다.

본 연구에서 평가하게 될 가정용전력에너지 소비는 기온변화뿐만 아니라, 냉·난방 시간과 공간, 가구 인구수, 가계수입, 가전기구보급율 등에 의존적이기에 이를 산정하기에 상당한 난점들이 있다. 하지만, 인구당 가정용 전력소비 자료를 사용함으로써 가계 구성원수에 무관하게 접근할 수 있고, ‘적극 대응 시나리오 (active-deal scenario)’ 가정을 함으로써 가정용 전력에너지 소비를 오직 기온변화의 함수로 나타내고자 했

다. 이 접근법은 각 개인이 전력소비자가 되어 기온변화에 민감하고 적극적으로 대응함으로써, 실내온도 유지와 생활편의 영위를 목적으로 가전기기를 구입하고 빈번히 사용하여 가정용 전력에너지소비가 증대됨을 의미한다. 다시 말해서, ‘적극 대응 시나리오 (active-deal scenario)’는 아무리 가계수입이 높거나 평균 냉·난방 공간이 넓거나 또는 난방시간이 길다 해도 거주자가 추위와 더위를 느끼지 않는 다거나, 춥거나 덥더라도 적극적으로 대응하지 않으면 전력소비는 늘지 않으므로 가정용전력에너지 소비량의 변화를 결정하는 요소는 당연히 기온 변화가 된다. 농업과 가정용 전력에너지 부분에서 기후영향평가의 한 방법으로 이 연구에서 새롭게 제시된 ‘적극 대응 시나리오 (active-deal scenario)’의 개념을 Table 1에 정리하였다.

3. 기온과 REEC의 상관성과 REEC 추정 다중선형 모형

3.1 사용자료

기온변화에 따른 REEC를 추정하기 위하여 과거 7년간의 주요 도시별 전력 소비량과 기온과의 상관관계를 조사하였다. 전력 에너지 소비량은 통계청 통계정보시스템 (<http://www.kosis.kr/>)에서 제공하는 1999년부터 2005년까지의 서울, 부산, 대구, 대전, 인천, 광주 6개 도시에 대한 월평균 자료를 사용하였고, 기온 변동과의 상관관계를 분석하기 위하여 기상청에서 제공하는 월평균 기온 자료를 사용하였다. 본 연구에서 1999년~2005년은 기온-REEC 상관관계 추정 모형을

위한 기준 기간 (reference period)으로서, 동기간 동안의 평균치는 REEC와 기온에 대한 현재 값 (present value)으로 정의되어 미래 기온변화에 따른 REEC 추정치와의 비교에 사용되었다.

한편, 미래기온변화에 따른 가정용전력에너지 소비를 추정하기 위하여 국립기상연구소에서 산출한 한반도 기후변화 전망 자료를 사용하였다 (Boo *et al.*, 2004). 한반도 미래 기후전망 자료는 IPCC의 SRES (Special Report on Emission Scenario) A2에 근거한 것으로서, A2 시나리오는 대기 중 이산화탄소 농도가 급격하게 증가하여 2100년에는 820ppm에 이를 것으로 예상하는 사회경제 친화적 시나리오이다. 이 시나리오에 의하면 한반도를 포함한 동아시아 지역의 미래 기후전망은 2100년까지 기온이 6°C 증가하고 전 지구적으로 4.6°C 정도 증가되는 것으로 나타난다 (권원태, 2005; Boo *et al.*, 2004).

3.2 추정모형

기온변화에 따른 REEC의 상관성을 분석하기 위하여 우선, 과거 기준 기간 (1999년~2005년) 동안 평균된 월평균기온과 인구당 월별 REEC를 Fig. 1에 비교하였다. 여기서 사용된 인구당 월별 REEC는 각 도시의 2000년 인구조사를 기준으로 한 도시인구 1인당 월별 평균 전력소비량 (kWh)을 말한다. Fig. 1에서 주요 6개 도시의 평균 REEC는 겨울철 (12월, 1월, 2월)과 늦은 여름 (8월, 9월)에 최대치를 보이며, 기준 연구와 같이 연중 기온이 가장 높거나 낮은 계절에서 최대 소

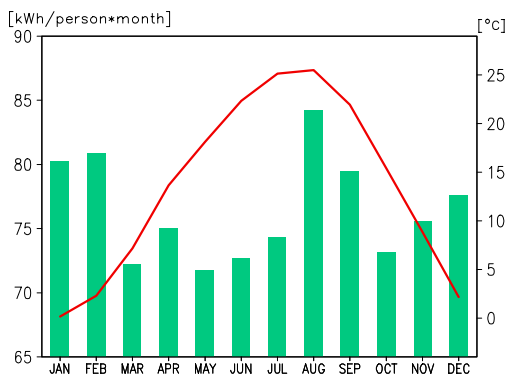


Fig. 1. Monthly mean REEC (kWh/person · month, bars) and monthly mean temperature (°C, line) averaged over the six major cities (Seoul, Busan, Deagu, Deajeon, Incheon, Gwangju) for standard period (1999~2005).

비가 발생하는 경향을 나타낸다 (Tol, 2002; Joel and Sam, 2003). 여름철 최대 에너지 소비 곡선이 8월과 9월에 주로 나타나는 이유는 평균적으로 6월 말부터 7월 중순까지의 장마기간이 끝난 후, 본격적인 더위가 8월과 9월에 나타나기 때문이다 (Matsumoto, 1992; Ha *et al.*, 2005).

기온 변화에 따른 REEC의 변화를 좀 더 뚜렷이 살펴보기 위하여 개별 도시 별 인구당 REEC와 각 도시의 연교차 (월평균 최고기온과 월평균 최저기온의 차이) 사이의 분산도를 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 REEC와 연교차의 상관 계수는 95%의 유의수준 하에서 +0.86의 비교적 높은 상관관계를 보여준다. 즉, 기온의 연교차가 큰 지역일수록 인구당 REEC는 증가하는 경향을 보인다. 이는 각 도시의 발달 정도에 따른 오차를 감안하더라도, REEC가 각 도시의 지리적 분포나 기후적 요건과 비교적 선형적인 관계를 갖는다는 것을 암시하는 것이다. 따라서, 본 연구에서는 기온 변화에 따른 REEC 추정을 위하여 다음과 같은 선형적 관계를 가정하였다.

$$REEC = k_1 T_{max} + k_2 T_{min} + C \quad (1)$$

k_1 , k_2 , C 는 기준 기간 동안의 우리나라 6개 주요 도시의 연최대 월평균기온 (T_{max})과 연최저 월평균기온 (T_{min}), 인구당 REEC에 의해 결정된 상수이다. 본 연구에서는 식 (1)에 의해 주어진 REEC 추정모형의 평가를 위해 기준기간 동안의 MSSS (Mean Square Skill

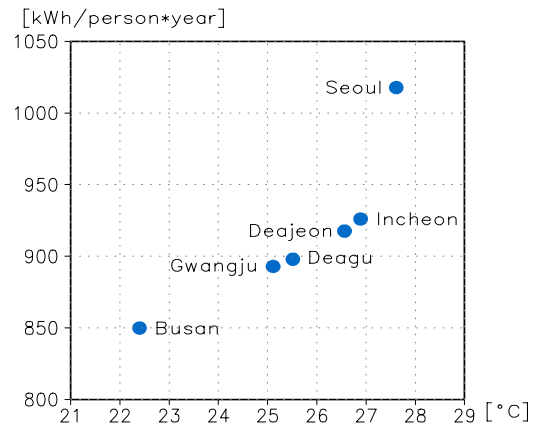


Fig. 2. Scatter diagram between REEC (kWh/person · year) and annual mean temperature range (°C) in the six major cities.

Score)를 산출하였다. 이 때, 모형으로 추정된 REEC와 실제 REEC와의 MSSS는 0.65로서 식 (1)에 의한 REEC 추정 모형의 예측성은 비교적 우수한 편이라고 볼 수 있다. WMO의 표준 검증법 중 하나인 MSSS는 $1 - \frac{MSE}{MSE_r}$ 로 정의되며 경우의 수가 무한할 때, MSSS가 1이면 완벽한 예측(perfect forecast)으로 관측과 일치함을 의미하고 여기서 MSE 와 MSE_r 는 각각 예보와 관측의 Mean Square Error이다.

4. 기온변화에 따른 가정용 전력소비의 경제적 손익과 미래 추정

이 장에서는 식 (1)에서 주어진 인구당 REEC 추정 모형을 사용하여 현재, 기준 기간 동안의 경제적 손익과 함께, 미래 기온 변화에 따른 경제적 손익을 평가하였다. 우리나라 주요 도시별 REEC 변화의 경제적 손익 전환은 우리나라 평균 전력생산단가를 곱함으로써 식 (2)와 같이 간단히 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{전력소비량 변화로 인한 경제적 손익} = \\ & \text{인구당 전력소비 변동량 (kWh)} \times \text{1 kWh 전력} \\ & \text{생산단가} \times \text{각 도시인구수} \end{aligned} \quad (2)$$

기준 기간 동안의 REEC 변화에 따른 경제적 손익을 평가하기 위하여 1980년대의 기온 자료를 사용하여 식 (1)로부터 REEC를 추정한 후, 기준 기간의 REEC와 비교하여 경제적 손익을 평가 한 결과를 Table 2에 보였다.

Table 2에 따르면, 최근(기준기간)에 1980년대보다 최고기온은 내려가고 최저기온이 크게 상승한 대전의 경우, 기준기간동안 인구당 44 kWh의 전력 소비가 절약되면서, 대전시의 연간 경제적 이익은 54억원에

이르렀다고 볼 수 있다. 또한 서울의 경우에는 최고 기온과 최저기온이 모두 1980년대에 비해 상승 경향을 보였으나 최저기온이 상대적으로 더욱 많이 상승하면서 인구당 35kWh의 전력 소비가 감소하였으며, 결과적으로 경제적 이익은 연간 313억원에 이르는 것으로 나타났다.

미래 기후변화에 따른 REEC의 변화는 어떻게 나타날 것인가? 본 연구에서는 국립기상연구소에서 산출한 IPCC SRES A2 시나리오에 따른 한반도 기후변화 전망 자료를 사용하여 미래 REEC 변화를 추정하였다. 우선 A2 시나리오에 따른 한반도의 미래 평균 기온의 변화를 살펴보기 위하여, 2011부터 2040년까지 각 10년에 대한 2000년대(2001년~2010년) 연평균 최고기온과 최저기온의 차이를 Fig. 3에 보였다. 그 결과, 연평균 최고기온의 경우 2010년대는 2000년대에 비하여 한반도 북부를 제외한 대부분의 지방에서 기온이 감소하는 것을 볼 수 있으며, 2020년대 이후부터는 2000년대와 비교해서 우리나라 전역에서 최고기온의 상승이 뚜렷해지는 것으로 나타내고 있다(Fig. 3a). Fig. 3b의 최저기온의 경우는 2000년대보다 2010년대에 한반도 남동부지방은 더욱 더워지고 북서부지방은 더욱 추워지는 것으로 나타났다. 그러나 2020년대 이후부터는 동부지방을 중심으로 겨울철 최저기온이 우리나라 전역에서 상승하는 것으로 나타났다. 또한 최고기온의 상승폭보다 최저기온의 상승폭이 더욱 큰 특징이 나타났다. 이 결과는 미래 우리나라 기온은 여름철에 더워지는 정도보다 겨울철 따뜻해지는 정도가 더 크다는 것을 의미한다.

한반도 미래 기후전망 자료를 REEC 추정모형에 적용하여 미래 REEC를 추정할 수 있다. Fig. 4는 2001년부터 2040년 사이 10년 단위 평균기온 정보를 추정 모형에 넣어 10년 단위의 인구당 REEC 추정치를 구

Table 2. Estimation of economic benefit and damage in the Korean six major cities according to variations of maximum and minimum temperatures. Each value in the table means difference between the value for standard period and the value in 1980s.

City	Maximum temperature change (°C)	Minimum temperature change (°C)	The change of residential electric energy consumption (kWh/person · year)	Economic benefit and damage per year (a hundred million won)
Seoul	+0.41	+1.66	-35.11	+ 313
Busan	-0.24	+0.95	-28.94	+ 95
Deagu	+0.16	+1.35	-31.65	+ 71
Incheon	+0.53	+1.75	-35.15	+ 78
Gwangju	-0.21	+0.99	-29.30	+ 36
Daejeon	-0.02	+1.70	-44.04	+ 54

하고, 각 년대별 추정치에 2000년대 REEC를 빼서 2000년대에 대한 상대적인 REEC 증감을 보여주고 있다. 2010년대는 2000년대와 비교하여 최고기온은 상승하고 최저기온은 하강하는 우리나라 북부지방을 중심으로 인구당 가정용 전력에너지 소비는 많이 증가하는 것으로 나타났으며, 반면, 남동부지방에는 전력소비감소로 경제적 순이익이 있을 것으로 나타났다. 2020년대와 2030년대는 2000년대에 비교해서 비록 여름에 더욱 더워지기는 했으나 (Fig. 3 참조), 겨울에 기온상승 효과로 REEC의 감소가 더 커서 총체적으로 경제적 이익이 있는 것으로 나왔다.

미래 한반도 기후전망 자료에서도 지구온난화의 영향은 여름보다는 겨울에 훨씬 기온상승이 높은 것으로 나타났다. 특히, 2020년대 이후부터는 겨울철 최저기

온 상승률이 여름철 최고기온 상승률 보다 훨씬 높음을 Fig. 3으로부터 알 수 있다. 미래 기후변화에 인간이 적극적으로 대응한다면, 따뜻해진 겨울철에 난방과 생활편의를 위한 가전기기 사용이 줄어들고, 여름철 늘어나는 REEC보다 더 많은 양이 감소한다. 결국, 전체적인 연간 REEC는 감소하여 미래 기온변화에 따른 REEC는 경제적으로 순이익이 되는 것으로 평가되어진다.

앞에서 살펴본 바와 같이, 최고 및 최저기온의 국지적 편차가 큰 경향이 있으나 우리나라 전체에 대한 미래 가정용전력소비량을 언급할 필요가 있다. 그래서 2000년대부터 2030년대까지 10년 단위로 추정된 인구당 연간 REEC 변화량을 한반도 전 영역에서 평균치를 구하였다 (Fig. 5). 2010년대 이후부터 막대위의 값

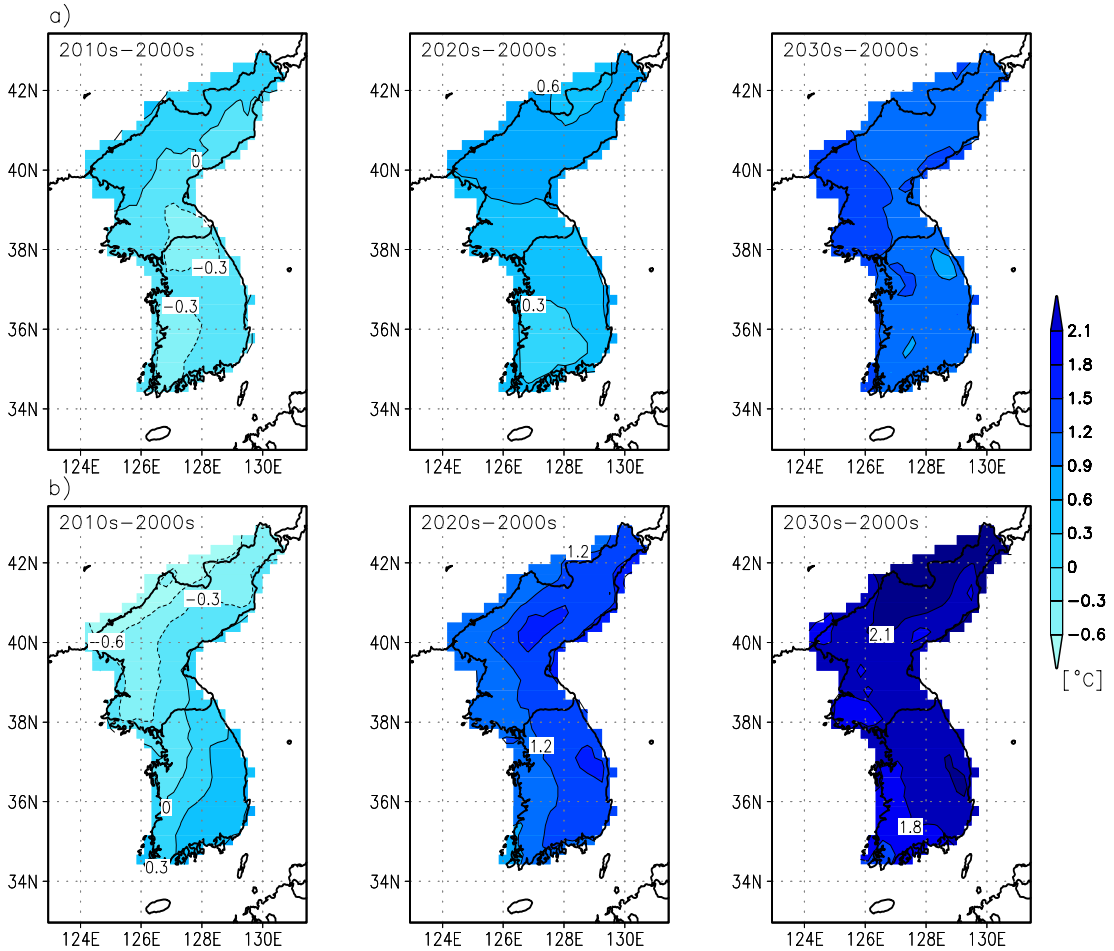


Fig. 3. Change in (a) annual maximum temperature(°C) for each 10-year mean and (b) annual minimum temperature (°C) From left panels to right panels, each panel indicates temperature difference between 2010s (2011~2020), 2020s (2021~2030), 2030s (2031~2040) and 2000s (1999~2005).

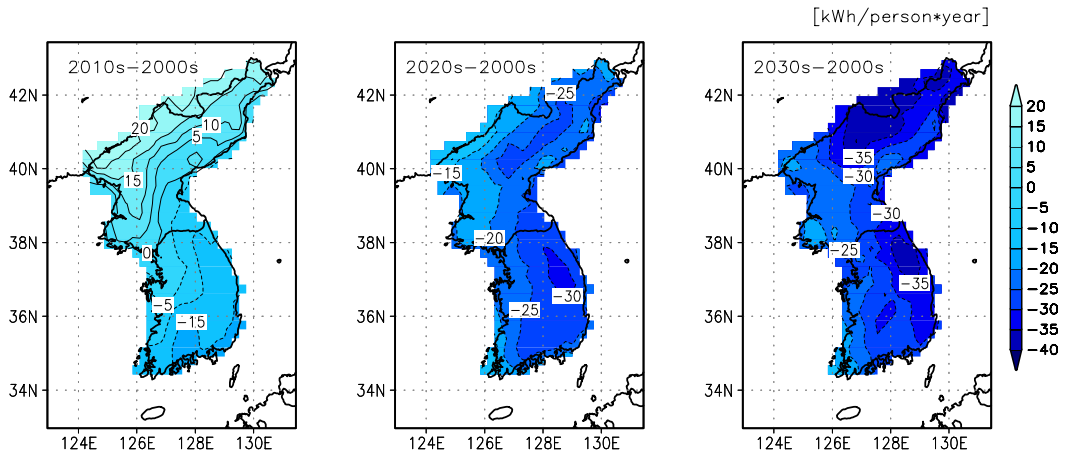


Fig. 4. Changes in consumption amount of estimated REEC (kWh/person · year) in 2010s, 2020s and 2030s, compared to that in 2000s.

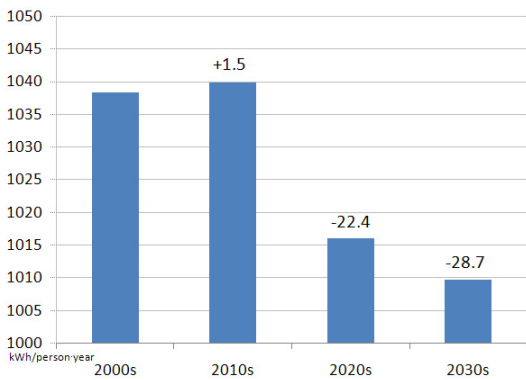


Fig. 5. Estimated consumption amount of REEC (kWh/person · year) over the whole Korean peninsula for each 10-year. Values with bars denotes the difference between each 10-year mean estimate and the value of 2000s.

은 2000년대 평균 REEC 1038 (kWh/person · year)에 대한 REEC의 변동량이다. 2010년대 우리나라 평균 REEC가 2000년 대비 증가하는 경향 (인구당 연간 +1.5kWh)을 보이고 있는 이유는, 한반도 중·북부지방의 겨울철 최저 기온이 2000년대보다 훨씬 낮아져 (Fig. 3) 연간 순 REEC는 증가하는 경향으로 나타난다. 그러나 2020년대 이후부터는 한반도 전 지역에서 겨울철 최저기온 상승이 여름보다 뚜렷해지고, 따뜻해진 기후에 적극 대응함으로써 REEC가 감소한다. 지구온난화 시나리오에 따라 대기 중 이산화탄소량에 비례하여 2030년대까지 기온이 전반적으로 상승하며 연간 REEC가 감소하는 등 우리나라 REEC 측면에서 지구온난화가 경제적 이익임에도 불구하고, 2010년대 처

럼 국지적 기온변화의 차이에 따라 REEC가 증가하기도 한다. 2030년대 전력소비감소 (-28.7 kWh/person · year)를 화폐 경제적 가치로 환산한다면 (생산단가 90원/1 kWh, 북한포함 한반도 총인구수 7000만 명으로 가정할 때) 지구온난화로 인한 한반도 경제적 순이익은 약 연간 약 1800억원에 이를 것으로 추정된다.

5. 요약 및 토론

이 연구에서는 기후변화 영향 평가에 있어서 기후 자료에 대한 불확실성을 해결하기 위하여 ‘적극 대응 시나리오 (active-deal scenario)’ 접근을 제시하고 이 개념을 농업과 에너지부분에 예를 들어 설명하였다. 그리고 이 가정을 REEC에 적용하여 실제 관측 자료에서 기온변화와 우리나라 REEC의 통계적 상관성을 보였으며, 이를 근거로 기온변화에 따른 REEC 추정모형을 만들어 기후변화에 따른 과거, 현재 그리고 미래의 REEC를 추정하고 경제적 손익을 평가하였다. 그 결과, 우리나라 주요 6개 도시 (서울, 부산, 대구, 인천, 대전, 광주) 전체에서 1980년대 REEC보다 기준기간 (1999년~2005년)의 REEC가 감소되었음을 알 수 있었다. 그리고 두 비교기간 사이 전력 1kWh당 생산단가를 고려하여 도시별 절감되는 REEC를 경제적으로 환산하였는데, 연간 313억원에 이르는 REEC 절감효과가 수도 서울에서 발생한 것으로 조사되었다. 또한, 한반도 미래 기후전망 자료를 이용하여 지구온난화에 의한 우리나라 전 지역의 미래 REEC 추정하여 경제적

손익을 평가하였는데, 총체적으로 경제적 손익이 있음을 알게 되었다. 이는 따뜻한 겨울에서 오는 경제적 이익이 더워진 여름철 순간 전력증가량에서 오는 손해보다 더 커서, 지구온난화가 REEC에 관련되어 경제적 이익이 됨을 의미한다. 이 연구에서 기후변화에 따른 우리나라 REEC의 미래 경제적 손익 평가결과는 앞에서 언급한 지구온난화가 세계 냉난방 석유, 석탄 등의 에너지소비를 감소시킨다는 Tol (2002)의 연구결과와도 비교적 일치한다.

이 연구의 결과는 기후변화에 따른 미래 REEC 추정을 가능케 하여, 장기적인 미래 전력수급 계획에 이용될 수 있으며, REEC의 기후영향평가 결과들은 에너지 절약형 신도시 계획에 기후임지정보를 제공할 수 있을 것으로 사료된다. 또한, 본 연구의 근간이 되는 기후영향평가의 새로운 접근법인 '적극 대응 시나리오(active-deal scenario)'는 다른 분야 기후영향평가에 확장하여 자료의 불확실성을 제거할 수 있는 한 방법으로 응용될 수도 있다.

우리나라 주요 도시에서 관측된 REEC가 국지적 기온변화와 통계적 관련성을 보임으로부터 본 연구에서 제시된 '적극 대응 시나리오(active-deal scenario)'가 기후영향평가에서 보다 사실적이고 합리적인 접근이라 할 수 있다. 하지만, 미래에 보다 신뢰도 높은 REEC 추정을 위해서는 더 긴 REEC의 관측기록과, 보다 정확한 온난화 시나리오에 따른 한반도 기후정보 자료가 필요하다. 또한, 우리나라 6개 주요도시의 REEC 자료를 기반으로 추정모형의 계수를 결정하였기 때문에 세계 모든 나라에 적용하기엔 다소 무리가 있다.

감사의 글

본 연구는 기상청 국립기상연구소 주요사업 "기후변화협약대응 지역기후시나리오 활용기술 개발" 과제의 지원으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 권원태, 2005: 기후변화의 과학적 현황과 전망, *한국기상학회지*, 41, 325-336.
- Barnett, T. P., D. W. Pierce, K. M. AchutaRao, P. J. Gleckler, B. D. Santer, J. M. Gregory, and W. M. Washington, 2005: Penetration of human-induced warming into the world's oceans. *Science*, **309**, 270-274.
- Boo, K.-O., W.-T. Kwon, J.-H. Oh, and H.-J. Baek, 2004: Response of global warming on regional climate change over Korea: An experiment with the MM5 model, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 31, No. 21, L21206 10.1029/2004GL02117 1.
- Crowley, T. J., 2000: Causes of climate change over the past 1000 years. *Science*, **289**, 270-277.
- Deschenes, O. and M. Greenstone, 2006: The economic impacts of climate change: evidence from agricultural profits and random fluctuations of weather, MIT Joint program on the science and Policy of global change.
- Darwin, R., 1999: A FARMER's View of the Ricardian Approach to Measuring Agricultural Effects of Climatic Change. *Clim. Change*, **41**, 371-411.
- Downing, T. E., R. A. Greener, and N. Eyre, 1995: The Economic Impacts of Climate Change: Assessment of Fossil Fuel Cycles for Extreme Project. Oxford and Lonsdale, Environmental Change Unit and Eyre Energy Environment.
- _____, T. E., N. Eyre, R. Greener, and D. Blackwell, 1996: Projected Costs of Climate Change over Two Reference Scenarios and Fossil Fuel Cycles. Oxford, UK: Environmental Change Unit.
- Grebmeier, J. M., L. W. Cooper, J. E. Overland, S. E. Moore, E. V. Farley, J. H. Helle, E. C. Carmack, F. A. McLaughlin, Karen E. Frey, and S. Lyn McNutt, 2006: A major ecosystem shift in the northern Bering Sea, *Science*, **311**, 1461-1464.
- Ha, K.-J., K.-S. Yun, J.-G. Jhun, and C.-K. Park, 2005: Definition of onset/retreat and intensity of Changma during the boreal summer monsoon season. *J. Korean Meteor. Soc.*, **41**, 927-942.
- Hendy, E., M. K. Gagan, C. A. Alibert, M. T. McCulloch, J. M. Lough, P. J. Isdale, 2002: Abrupt decrease in tropical Pacific sea surface salinity at end of little ice age. *Science*, **295**, 1511-1514.
- Hurrell, J. W. and K. E. Trenberth, 1996: Satellite versus surface estimates of air temperature since 1979. *J. Climate*, **9**, 2222-2232.
- IPCC, 2001a: *Climate change 2001: The scientific basics. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Houghton, J. T., Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C. A. Jhson(Eds.)] Cambridge University Press, Cambridge, 881 pp.
- _____, 2001b: *Climate change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [McCarthy J. J., O. F. Canziani, N. A. Leary, D. J. Dokken, and K. S. White (Eds.)]

- Cambridge University Press, Cambridge, 1032 pp.
- _____, 2007: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- Joel, S. and H. Sam, 2003: Estimating global impacts from climate change. OECD workshop on the benefits of climate policy: Improving information for policy makers. OECD, Paris, France.
- Jones, P.D., T. J. Osborn, K. R. Briffa, C. K. Folland, E. B. Horton, L. V. Alexander, D. E. Parker, and N. A. Rayner, 2001: Adjusting for sampling density in grid box land ocean surface temperature time series. *J. Geophys. Res.*, **106**, 3371-3380.
- Levitus, S., J. I. Antonov, T. P. Boyer, C. Stephens, 2000: Warming of the world ocean. *Science*, **287**, 2225-2229.
- Lins, M. P. E., and A. C. M. D. Silva, and L. P. Rosa, 2002: Regional variations in energy consumption of appliances: Conditional demand analysis applied to Brazilian households. *Ann. Oper. Res.*, **117**, 235-246.
- Manabe, S., K. Bryan, and M. J. Spelman, 1990: Transient response of a global ocean-atmosphere model to a doubling of atmospheric carbon dioxide. *J. Phys. Oceanogr.*, **20**, 722-749.
- Matsumoto, J., 1992: The seasonal changes in Asian and Australian monsoon regions. *J. Meteor. Soc. Japan*, **70**, 257-273.
- Mendelsohn, R., W. D. Nordhaus, and D. Shaw, 1994: The impact of global warming on agriculture: A ricardian approach. *American Economic Review*, **84**: 753-771.
- _____, R., and M. Reinsborough, 2007: A Ricardian analysis of US and Canadian farmland. *Clim. Change*, **81**, 9-17.
- Parson, E., A. R. W. Corell, E. J. Barron, V. Burkett, A. Janetos, L. Joyce, T. Karl, M. C. Maccracken, J. Melillo, M. G. Morgan, D. S. Schimel, and T. Wilbanks, 2003: Understanding climatic impacts, vulnerabilities, and adaptation in the united states: Building a capacity for assessment. *Clim. Change*, **57**, 9-42.
- Paterson W. S. B., and N. Reeh, 2001: Thinning of the ice sheet in northwest Greenland over the past forty years. *Nature*, **414**, 60-62.
- Pearce, F., 2005: Climate warning as Siberia melt, *New Scientist magazine*, **8**, 12.
- Quayle, R. G., and H. F. Diaz, 1980: Heating degree day data applied to residential heating energy consumption. *J. Appl. Meteor.*, **19**, 241-246.
- Ridley, J. K., P. Huybrechts, J. M. Gregory, and J. A. Lowe, 2005: Elimination of the Greenland ice sheet in a high CO₂ climate. *J. of Climate*, **17**, 3409-3427.
- Severinghaus, J., and E. J. Brook, 1999: Abrupt climate change at the end of the last glacial period inferred from trapped air in polar ice. *Science*, **286**, 930-934.
- Shindell, D. D. Rind, N. Balachandran, J. Lean, and P. Lonergan, 1999: Solar cycle variability, ozone, and climate. *Science*, **284**, 305-308.
- Sonka, S. T., S. A. Changnon, and S. Hofing, 1989: Assessing climate information use in agribusiness. Part 2: Decision experiments to estimate economic value, *J. Climate*, **1**, 766-774.
- Tett, S. F. B., P. A. Stott, M. R. Allen, W. J. Ingram, and J. F. B. Mitchell, 1999: Causes of Earth's near-surface temperature change in the twentieth century, *Nature*, **399**, 569-572.
- Tol, R. S. J., 2002: Estimate of the damage costs of climate change, Part II: Dynamic estimates. *Environmental and Resource Economics*, **21**, 135-160.
- Thomson, A. M., N. J. Rosenberg, R. C. Izaurralde, and R. A. Brown, 2005: Climate change impacts for the conterminous USA: An integrated assessment, *Climate change*, **69**, 27-41.
- UKCIP, 2000: *Climate Change: Assessing the impacts-identifying responses. The first three years of the UK Climate Impacts Programme*. UKCIP and DETR, Oxford.
- _____, 2001: *Socio-economic scenarios for climate change impact assessment: a guide to their use in the UK Climate Impacts Programme*. UKCIP, Oxford.