

미래 기후변화에 따른 가정 및 상업 부문 에너지수요 변화 추정

정지훈^{1)*} · 김주홍²⁾ · 김백민²⁾ · 김재진³⁾ · 유진호⁴⁾ · 오종열⁵⁾

¹⁾전남대학교 지구환경과학부, ²⁾극지연구소, ³⁾부경대학교 환경대기과학과,
⁴⁾APEC 기후센터, ⁵⁾서원대학교 경제학과

(접수일: 2014년 9월 13일, 게재확정일: 2014년 10월 24일)

Estimation of Energy Use in Residential and Commercial Sectors Attributable to Future Climate Change

Jee-Hoon Jeong^{1)*}, Joo-Hong Kim²⁾, Baek-Min Kim²⁾, Jae-Jin Kim³⁾,
Jin-Ho Yoo⁴⁾, and Jong-Ryul Oh⁵⁾

¹⁾Department of Oceanography, Chonnam National University, Gwangju, Korea

²⁾KOPRI, Incheon, Korea

³⁾Dept. of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong Nat'l University, Busan, Korea

⁴⁾Asian Pacific Climate Center, Busan, Korea

⁵⁾Department of Economics, Seowon University, Cheongju, Korea

(Manuscript received 13 September 2014; accepted 24 October 2014)

Abstract In this study it is attempted to estimate the possible change in energy use for residential and commercial sector in Korea under a future climate change scenario. Based on the national energy use and observed temperature data during the period 1991~2010, the optimal base temperature for determining heating and cooling degree days (HDD and CDD) is calculated. Then, net changes in fossil fuel and electricity uses that are statistically linked with a temperature variation are quantified through regression analyses of HDD and CDD against the energy use. Finally, the future projection of energy use is estimated by applying the regression model and future temperature projections by the CMIP5 results under the RCP8.5 scenario. The results indicate that, overall, the net annual energy use will decrease mostly due to a large decrease in the fossil fuel use for heating. However, a clear seasonal contrast in energy use is anticipated in the electricity use; there will be an increase in a warm-season demand for cooling but a decrease in a cold-season demand for heating.

Key words: Energy use, temperature, fossil fuel, electricity, climate change

1. 서 론

기온, 습도, 바람, 운량, 강수 등 생활에 밀접하게 관련되어 있는 여러 기상변수의 변동은 냉난방, 조명, 운송 등 우리 사회 및 경제활동에 큰 영향을 끼치며,

결과적으로 에너지 사용량의 변화를 초래한다. 냉난방용 화석연료 및 전기 에너지의 사용은 특히 기온의 변동과 높은 상관관계를 보이는데, 여름철 온도 상승에 따른 냉방에너지 소비 증가, 겨울철 기온 하강에 따른 난방에너지 소비 증가가 뚜렷이 나타난다. 이로 인해 전체 에너지 소비 곡선은 기온에 대해 V자 혹은 U자 형태의 변동을 나타낸다고 알려져 있다(Asit K 1984).

산업혁명 이후 지속적으로 증가된 온실가스 강제력으로 인해 지난 백여 년간 전지구 평균 기온은 꾸준

*Corresponding Author: Jee-Hoon Jeong, Department of Oceanography, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea.
Phone : +82-62-530-3466, Fax :+82-62-530-3469
E-mail : jjeehoon@jnu.ac.kr

히 상승하였으며, 많은 기후모델들은 이러한 추세가 미래에도 지속될 것으로 예상된다(Solomon et al., 2007; IPCC 2013). 지난 세기부터 20세기 초반까지 한반도 및 동아시아에는 전구평균보다 높은 기온상승이 나타났으며, 기후모델을 통한 미래 예측에서도 전구평균보다 높은 기온상승이 예측되고 있다(Kwon, 2005). 따라서 이러한 장기 기후변화는 국내 에너지 소비에도 직접적인 영향을 미칠 것을 예상할 수 있다. 특히 여름철 냉방용 에너지 소비의 증가, 겨울철 난방용 에너지 소비의 감소는 온난화에 따라 가장 쉽게 예상할 수 있는 변화이다. 그러나 기후변화에 따른 에너지 소비의 변동은 이를 정량적으로 추정할 수 있어야 에너지 생산, 발전, 신재생 에너지 개발, 이들을 위한 인프라 구축 등의 사회경제적 장기계획 수립에 활용될 수 있다.

미국 및 유럽의 선진국들은 기후변화 적응(adaptation)의 매우 중요한 분야의 하나로 에너지 부문을 주목하고 있으며, 기후변화에 의한 변화를 예측하고 이에 대비하기 위한 연구들을 활발히 진행하고 있다. 실레로 Linder (1990)는 2010년부터 2055년까지 전 미국에서 기후변화에 의한 여름철 냉방수요의 증가로 14~23%의 전력용량의 증가가 필요함을 예상하였고, Rosenthal et al. (1995)은 미래 1도 기온 증가에 의해 여름철 전력수요는 감소하나, 겨울철 난방수요가 더 크게 감소하여 연간 총 에너지 소비가 0.7% 감소할 것으로 전망하였다. 유럽의 경우 Ulrich and Turton (2009)는 기온상승으로 2050년까지 전력수요가 5% 상승할 것을 전망하였고, Cartalis et al. (2001)은 그리스에서 미래 기온 1도 증가에 의해 10% 난방 에너지 소비 감소, 28% 냉방에너지 증가를 예상하였다. 이 밖에도 지역적 규모의 연구로서 Ruth and Lin (2006)과 Amato et al. (2005)은 미국의 메릴랜드와 메사추세츠 주의 가정 및 상업 부문 에너지 소비량과 지역 기온의 변동간의 통계적 관련성, 그리고 기후모델의 미래기온 예측 시나리오를 바탕으로 미래 에너지 소비량의 변화를 추정하였고, 이를 통해 미래 기후변동을 고려한 에너지 수요 예측이 주정부의 정책 및 투자 결정에 매우 중요함을 제시하였다.

국내에서도 이러한 미래기후변화에 따른 에너지 소비 변화를 추정하고 이에 대응하려는 논의가 시작되고 있다. Ahn and Oh (2010)는 해외사례를 통해 기후변화에 의한 우리나라 에너지부문의 잠재적 변화를 정성적으로 제시하고 후속연구의 필요성을 제시하였다. 에너지 소비와 기후변동 간의 관계는 매우 지역적 특성이 강하기 때문에 우리나라 에너지 수요의 정량적 예측을 위해서는 국내 기후자료와 에너지 소비 자료를 모두 이용한 분석이 필요하나 이러한 연구는 아직 많지 않다. Lim et al. (2008)이 수행한 연구가

거의 유일한 연구로서 1999년부터 2005년까지 6개 대도시에서의 가정용 전력 사용량과 기온간의 선형 회귀분석으로부터 미래 기후변화 시나리오에 따른 미래 에너지 소비 변화를 추정하고 이에 따른 경제적 손익을 추정하였다.

이 연구에서는 장기간에 걸친 에너지 소비 통계, 기후자료 그리고 기후모델의 미래 기후예측을 이용하여 미래 기온변화가 국내 가정 및 상업 부문의 에너지 소비에 미치는 순효과(net effect)를 추정하였다. 먼저 우리나라의 지역적 특수성을 고려하여 에너지 소비 변동과 냉난방도일(cooling/heating degree days: CDD/HDD)의 관계를 객관적으로 추정하고, 이를 통해 에너지 소비-냉난방도일간의 통계적 관련성을 파악하였다. 여기에 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 5차 기후변화 평가 보고서(Fifth Assessment Report: AR5)에 사용된 27개 기후모델의 미래예측 시나리오로부터 한반도 기온의 미래 예측 값을 산출하여 산출된 에너지 소비-냉난방도일모델에 적용하여 기후변화에 따른 미래 에너지 소비변동을 정량적으로 추정하였다.

2. 본 론

2.1 자료

이 연구에서는 에너지 경제 연구원에서 제공하는 에너지 수급 통계 자료를 사용하였다. 이 자료는 1991년부터 2010년까지의 지난 20년간 국내의 산업, 가정 및 상업, 수송 부문별 석유, 가스, 석탄, 전력 등의 월별 에너지 사용량을 포함한다¹⁾. 에너지 사용량 변화에서 기후변화 외적인 요인(e.g., 인구 증가, 산업 발달) 중 인구 증가의 효과를 감안하기 위해 1인당 에너지 소비를 사용하였는데, 이에 필요한 인구자료는 통계청에서 제공하는 주민등록에 의한 집계²⁾로부터 산출하였다. 집계된 인구를 매해 12월 값으로 가정하고 매월 인구를 선형내삽하는 방법으로 추정하였다.

우리나라 기온 자료는 기상청에서 제공하는 한반도 60개 관측소에서 기록된 월별 평균 기온값을 사용하였다. 공간적 대표성과 자료의 가용성을 고려하여 60개 관측소를 선정하였으며, 여기에는 한반도 내 인구 대부분이 거주하는 대도시 및 중소도시들이 모두 포함된다. 기후모델 예측 결과와의 비교를 고려하여 평균에 인구별 가중치를 주지는 않았다.

미래 한반도 기온 변화는 IPCC AR5에 참여한 (Coupled Model Intercomparison Project phase 5

1) 국가에너지통계종합정보시스템, <http://www.kesis.net/flexapp/KesisFlexApp.jsp>.

2) 행정안전부 02-2100-3990, 연말기준, 외국인 제외.

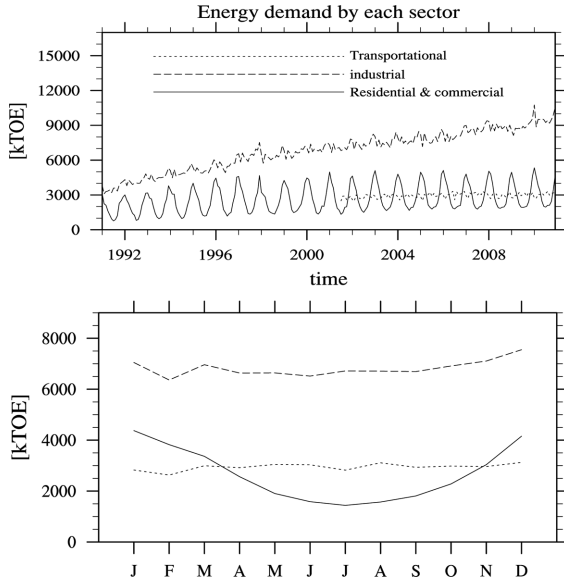


Fig. 1. Time-series of energy uses by three sectors (e.g., transportational, industrial, and residential and commercial sectors) in Korea for the period 1991~2010 (top) and their respective mean seasonal cycles (bottom).

(CMIP5) (Taylor et al., 2008) 27개 전구 기후모델³⁾로부터 산출된 지면 근처 기온 예측 값으로부터 추정하였다. 1991년부터 2005년까지는 관측된 복사강제력 자료를 사용한 historical run을, 2006년 이후 2050년까지는 현재 추세로 온실가스가 배출되는 경우를 가정했을 때의 미래 복사강제력 시나리오인 RCP8.5를 사용한 모델 시뮬레이션 결과의 앙상블 평균 값을 사용하였다. 한반도의 크기가 대부분의 모델의 격자 크기보다 작거나 비슷한 것을 고려하여, 한반도 지역 평균 온도는 위·경도 1도 해상도로 수평내삽한 후 한반도 지역에 상당하는 동경 126-130도, 북위 34.5-37.5도 범위에서의 격자 평균 값을 이용하였다.

2.2 기온 변동이 가정 및 상업용 에너지 소비량 변동에 미치는 영향 추정

Figure 1a는 분석기간 동안 산업, 가정 및 상업, 수

3) 27개 모델의 약자는 다음과 같으며, <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>에서 자료 및 사용된 기후모델의 추가적 정보를 얻을 수 있음; ACCESS1-3, BNU-ESM, CCSM4, CMCC-CM, CNRM-CM5EC-EARTH, FIO-ESM, GFDL-CM3, GFDL-ESM2G, GFDL-ESM2M, GISS-E2-R, HadGEM2-AO, HadGEM2-CC, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, IPSL-CM5A-MR, IPSL-CM5B-LR, MIROC-ESM-CHEM, MIROC-ESM, MIROC5, MPI-ESM-LR, MRI-CGCM3, NorESM1-ME, NorESM1-M, bcc-csm1-1-m, bcc-csm1-1, inmcm4.

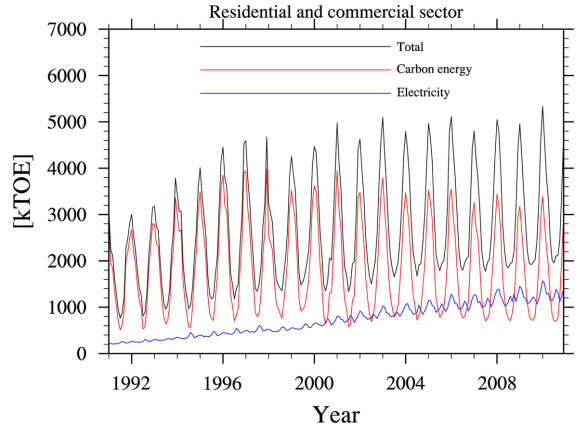


Fig. 2. Time-series of total energy use (black), carbon fuel (red), and electricity (blue) use in residential and commercial sectors.

송부분의 에너지 소비량 변화 추이를 나타낸다. 전체적으로 산업부분의 뚜렷한 증가가 두드러지며(총기간 동안 선형경향: 23.67 kTOE/year), 가정 및 상업부분은 이에 비해 약하지만 점진적인 증가세를 보인다(선형경향: 5.03 kTOE/year). 수송부문에서는 2002년부터 최근까지 뚜렷한 장기경향성은 나타나지 않는다. 에너지 소비량 변동에서 나타나는 가장 뚜렷한 특징의 하나는, 가정 및 상업부문 에너지 소비에 나타나는 겨울-최고 여름-최저로 나타나는 뚜렷한 계절 주기(seasonal cycle)이다. 1991~2010년 기간의 월별 평균 에너지 소비를 살펴보면(Fig. 1b) 이러한 특징이 더욱 잘 드러나는데, 가정 및 상업용 에너지 소비는 연중 최고 사용량과 최저 사용량이 두 배 이상의 차이를 보이는 반면, 다른 두 부문의 계절적 변동은 매우 미미하다. 이러한 강한 계절성은 에너지 소비의 기온 변동에 대한 민감도가 크다는 것을 의미하는 것으로, 결국 기온 변동에 따른 국내 에너지 소비의 변화는 주로 가정 및 상업부문 에너지 소비변화에 기인한다고 볼 수 있다. 따라서 이 연구에서는 분석의 초점을 가정 및 상업용 에너지 소비에 한정하였다.

Figure 2에서 가정 및 상업용 에너지 소비량의 추이를 화석연료(석탄, 석유, 천연가스)와 전력으로 나누어 살펴보았다. 분석기간 동안 석탄 및 석유의 소비는 지속적으로 감소하였으며 이에 반해 천연가스의 소비는 증가하였는데(그림 생략), 이는 에너지 소비 패턴 변화에 의한 것으로 추측된다. 전체 화석연료의 소비량은 1990년대에 증가세, 2000년대에 약한 감소세를 보여 총 기간 동안 약한 감소세를 보인다(선형경향: -0.22 kTOE/year). 화석연료 소비는 겨울에 최대 여름에 최저를 보이는 뚜렷한 계절 주기를 나타내

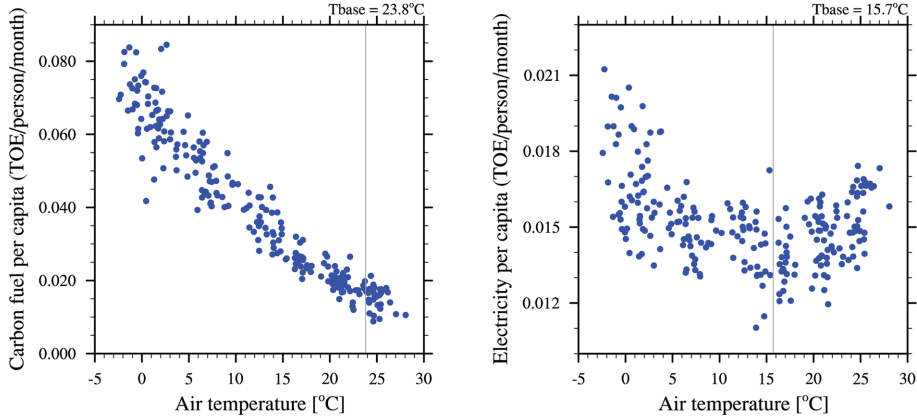


Fig. 3. Scatter diagram of monthly air temperature in Korea vs. energy use per capita by (left) carbon fuel and (right) electricity in Korea. Vertical gray lines indicate the base temperatures yielded by Eq. (1) that are used for the calculation of HDD and CDD.

며, 전체 가정 및 상업부문 에너지 소비량의 계절성, 특히 겨울철 난방에너지 소비에 최대값 변동을 대부분 설명한다. 전력 사용량을 살펴보면 지난 20년간 꾸준한 증가추세가 두드러지며(총기간 동안 선형 경향: 4.87 kTOE/year), 연간 계절성도 증가하는 추세를 나타낸다. 1990년대 후반 이후 화석연료 사용량이 약한 감소세를 보이거나, 전력사용의 증가로 인해 총 에너지 소비는 약한 증가세를 나타낸다. 2000년대에 접어들면서 전력 소비의 계절적 변동이 더욱 뚜렷해져 화석연료 소비와 비슷하게 겨울철에 연중 최대값을 나타내며, 여름철 냉방 에너지 수요에 의한 2차 최대값도 보다 뚜렷이 나타난다.

기온과 에너지 소비의 관계를 알아보기 위해 Fig. 3에 한반도 월평균 기온과 1인당 월별 에너지 소비량 간의 산포도를 나타내었다. 분석 기간 동안 1인당 에너지 소비량에는 선형경향(linear trend)이 나타나는데, 이는 대부분 산업의 발달이나 에너지 소비 패턴의 변화 같은 기상학적 이외의 요인에 기인한다고 볼 수 있다. 따라서 기온의 변동과 관련된 에너지 소비량의 변화를 좀 더 명확하게 표현하기 위해 에너지 소비량과 기온 자료 모두에서 분석 기간 동안의 선형경향을 제거하였다. 화석연료와 전력 사용 모두 기온과의 뚜렷한 연관성이 나타나며 각기 고유한 냉난방 의존성을 나타낸다. 대부분 난방의 목적으로 사용되는 화석연료의 사용량은 기온과 뚜렷한 음의 상관성을 보인다. 최저 사용량은 최고 사용량의 약 1/8 수준으로 나타나 매우 강한 계절 주기를 확인할 수 있다. 반면, 전력 사용은 가정 및 상업 부문에서 냉방 및 난방에 모두 이용되기 때문에 잘 알려진 V자 형태의 변동 패턴이 나타난다.

이러한 기온-에너지 소비 분포로부터, 에너지 소비

의 기온 변동에 대한 민감도를 추정하였다. 기온변동에 의한 에너지 소비 필요량은 난방도일(Heating Degree Days; HDD) 및 냉방도일(Cooling Degree Days; CDD)의 개념을 사용하여 보다 효과적으로 정량화할 수 있다(Quayle and Diaz 1980). HDD와 CDD는 냉난방이 필요한 기준기온(T_{base})로부터의 절대 기온편차($T - T_{base}$)로 계산되며 HDD나 CDD가 높을수록 각각 난방 및 냉방의 필요성이 높아짐을 의미한다. 여기서 기준기온은 일반적으로 HDD와 CDD 모두 18°C를 사용하며, 기상청이나 통계청에서 제공하는 자료도 이를 기반으로 계산된다. 하지만 이 기준기온은 건물의 단열, 거주형태, 지역적 기후특징 등에 따라 필요적으로 다를 수밖에 없다. 이 연구에서는 Belzer et al. (1996)이 제시한 방법과 유사하게 Fig. 4에 나타난 월별 기온과 에너지 사용 분포 관계로부터 가장 효과적인 기준기온을 산출하였다. 먼저 아래 Eq. (1)과 같은 1차원 V모형을 가정하고, 기온 자료가 제시하는 범위 내에서 0.1도 간격으로 기준기온을 설정하고 회귀분석을 반복적으로 실행하여 모형이 에너지 사용량을 최대로 설명하는(즉, 회귀모형의 explained variace가 가장 큰) 기온을 HDD 및 CDD 계산의 기준기온으로 결정하였다. 이때, Fig. 3에 보이는 바와 같이 화석연료와 전력 사용의 소비 형태가 다른 것을 고려하여 기준기온을 별도로 계산하였다.

$$E = a|T - T_{base}| + b, \quad (1)$$

여기서, E 는 에너지수요, T 는 기온, T_{base} 는 기준기온, a 와 b 는 회귀상수를 의미한다.

계산 결과 화석연료는 23.8°C, 전력은 15.7°C가 HDD와 CDD 결정의 최적 기준기온으로 추정되었다. 추정된 기준기온들과 Fig. 4에 나타난 한반도 기온의 평

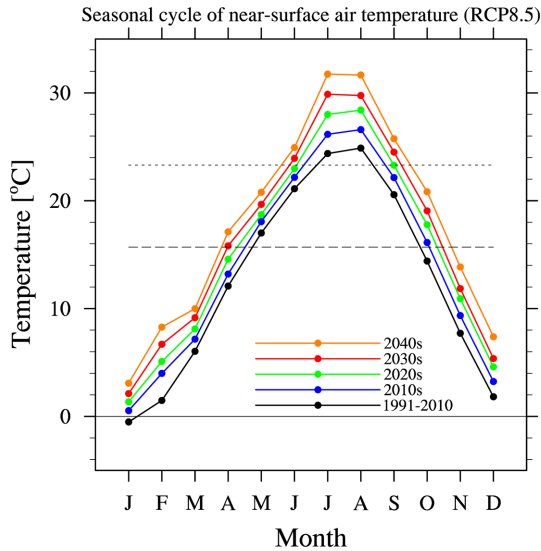


Fig. 4. Mean seasonal cycles of 2-meter air temperature in Korea for the present climate (1991~2010) and future climates (from 2010s to 2040s) from the 27 climate models that participated in the CMIP5 under the RCP8.5 scenario. The dotted and dashed lines indicate the base temperature for the calculation of HDD and CDD.

균적 계절변동을 비교해보면 화석연료를 사용하는 난방에너지 수요는 7, 8월을 제외한 모든 월에서, 전력을 사용하는 난방에너지 수요는 9월부터 이듬해 4월까지 발생하는 것으로 나타난다. 화석연료의 기준기온은 보편적으로 사용되는 값인 18°C보다 상당히 높은데, 이는 평균기온은 낮지 않으나 봄, 가을에 일교차가 매우 큰 한반도의 기후특성 때문으로 생각된다. 한편, 냉방에너지 수요의 대부분은 5~9월 사이에 발생하는 것으로 나타난다.

결정된 기준기온을 바탕으로 각 에너지원 별 월별 HDD와 CDD를 계산하였고 아래 Eq. (2)와 같이 에너지 소비량과의 회귀분석을 통해 에너지 수요-HDD, 에너지수요-CDD 변동 관계를 정량적으로 추정하는 회귀모델을 구성하였다.

$$\ln E = a(\text{HDD or CDD}) + b, \quad (2)$$

여기서, E 는 에너지 소비량, a 와 b 는 회귀상수를 나타낸다.

(2)에서 종속변수인 에너지 소비량은 자연로그를 취해 계산하였으므로 회귀상수 a 는 HDD나 CDD의 1°C 변화당 에너지 소비량 변화율을 나타내며, 회귀상수 b 는 기온변동과 관계없는 에너지 수요로 볼 수 있다. 회귀분석의 결과는 Table 2에 정리하였다. HDD 1°C 증가에 일인당 화석연료 에너지 소비는 약 5.96% 증

Table 1. Statistics of seasonal means of 2-meter air temperature in Korea for the period 1991~2010.

	Average [°C]	1 σ [°C]	Linear trend [°C/decade]
Winter	0.88	0.80	0.29
Spring	11.71	0.68	0.28
Summer	23.45	0.77	0.32
Autumn	14.22	0.69	0.55*

*Trend significant at 95% confidence level.

Table 2. Log-linear regression results.

Independent variable	Dependent variables**	
	Log carbon fuels per capita	Log electricity per capita
HDD (23.8°C)	0.0596197	-
HDD (18°C)	0.0556981	0.0123504
HDD (15.7°C)	-	0.0127685
CDD (18°C)	-	0.0164635
CDD (15.7°C)	-	0.0165095
Constant***	2.85629	2.59484

*All regression values are significant at 99.9% confidence level; **unit is [10^{-3} *TOE/person/month]; ***Y-intercept value of regression of HDD (23.8°C) and CDD (15.7°C), representing temperature insensitive energy demands.

가(T_{base} 23.8°C 기준), 전력 소비는 약 1.28% (T_{base} 15.7°C 기준) 증가하는 것으로 추정되었으며, CDD 1°C 증가에 1인당 전력 소비는 약 1.65%가 증가하는 것으로 추정되었다.

2.3 미래 기후변화 시나리오에 따른 에너지수요 변화 추정

앞 절 회귀모델에서 추정된 HDD, CDD와 에너지 사용량 간의 통계적 관계를 이용하여, 기후모델이 예측한 미래 기후변화 시나리오에 따른 에너지 수요 변화를 추정하였다. 전술한 바와 같이 한반도 지역의 미래 기온 변화는 IPCC 5차 평가 보고서에 사용된 전구기후모델 예측 자료로부터 산출하였다. 먼저 총 27개 기후예측모델로부터 얻어진 1991~2050년 기간의 한반도 지역 기온변화 모의 값들을 앙상블 평균하여 한반도 기온 변화 시나리오 값을 산출하였다. 지난 수십 년 동안 기후예측모델의 성능은 비약적으로 발전했지만 아직도 모든 모델은 실제 기후시스템을 모의하는 데 큰 고정오차(bias)를 보인다. 따라서 관측된 한반도 기온과 기후모델이 모의하는 한반도 기온은 그 평균 값 및 변동성에서 차이를 보인다. 따라서 이러한 미래 기온 예측 값을 앞 절에서 얻어진 관측 자료를 기반으로 추정한 냉난방 기준기온, 그리고 기온

과 에너지수요 간의 통계적 관계에 직접적으로 적용하기 위해서는 추가적인 보정이 필요하다.

이를 위해 간단한 형태의 통계적 보정 방법을 사용하여 1991~2010년 기간 동안 모델이 모의하는 기온 값이 같은 기간 동안 관측 자료에서 나타나는 평균과 변동성을 같도록 조정하였다. 먼저 1991~2010년 사이의 자료로부터 관측과 모델의 장기 월 평균 값(\bar{T}), 월별 평균변동성(σ)을 각각 계산하고, 이로부터 1991~2050년 기간 동안의 모델 모의 값에서 1991~2010년 기간 장기 평균으로부터의 편차(T)를 계산하였고, 이를 다시 모델의 월별 평균변동성으로 나누어 정규화하였으며, 정규화된 값에 관측 자료의 월별 평균변동성을 곱한 값에 최종적으로 1991~2010년 기간 관측 자료의 장기 평균 값을 더한다. 이 방법을 통해 조정된 기후 모델 값($T_{Y,M}^{adj}$)은 관측 자료에서 얻은 현재(1991~2010년) 기후의 월별 평균 값과 월별 평균변동성을 고려한 미래 기후의 예측 값으로 간주할 수 있다. 이 관계는 다음 Eq. (3)으로 정리할 수 있다.

$$T_{Y,M}^{adj} = T_M^{obs} + T_{Y,M}^{model} \frac{\sigma_M(T_{Y,M}^{obs})}{\sigma_M(T_{Y,M}^{model})} \quad (3)$$

여기서, Y 와 M 은 각각 해당 연도와 월을, \bar{T} 는 장기(1991~2010년) 평균온도를, σ 는 장기평균으로부터의 편차를, σ 는 표준편차를 나타낸다.

Figure 4에는 조정된 기후모델 예측 값으로 ($T_{Y,M}^{adj}$) 나타낸 한반도 기온의 평균 계절 주기의 미래변화를 관측값과 함께 나타내었다. 한반도 지역은 모든 계절에 걸쳐 뚜렷한 기온 상승이 예측되었고, 특히 여름철 및 가을철의 상승이 두드러졌다. 따라서 겨울철 난방 수요의 감소 및 여름철 냉방 수요의 증가를 쉽게 예상할 수 있다. 그림에 표시된 냉난방 기준기온이 미래에도 현재와 같이 유지될 것이라 가정하면, 현재 5월부터 9월까지 나타나는 냉방용 전기에너지 수요는 2040년대가 되면 4월부터 10월까지 수요가 발생할 것으로 예상할 수 있으며, 난방의 경우 현재 7, 8월을 제외한 모든 계절에서 수요가 있지만 2040년대에는 6월부터 9월까지의 난방 에너지 수요가 사라질 것으로 예상할 수 있다.

조정된 한반도 미래기후 예측 값을 이용하여 HDD와 CDD를 계산하고, 이를 앞 절에서 계산된 회귀모델에 적용하여 기후모델이 예측하는 기온변화에 따른 미래 에너지수요 변화를 추정하였다(Fig. 5). 먼저 냉난방 모두에 사용되는 전력 사용의 변화를 살펴보면, 냉방용 전력의 증가와 난방용 전력의 감소가 뚜렷하게 나타난다. 현재는 난방용 전력 수요가 냉방용 전력 수요보다 높지만, 약 2020년대 중반 이후에는 기후변화에 의해 여름철 냉방용 전력수요가 겨울철 난

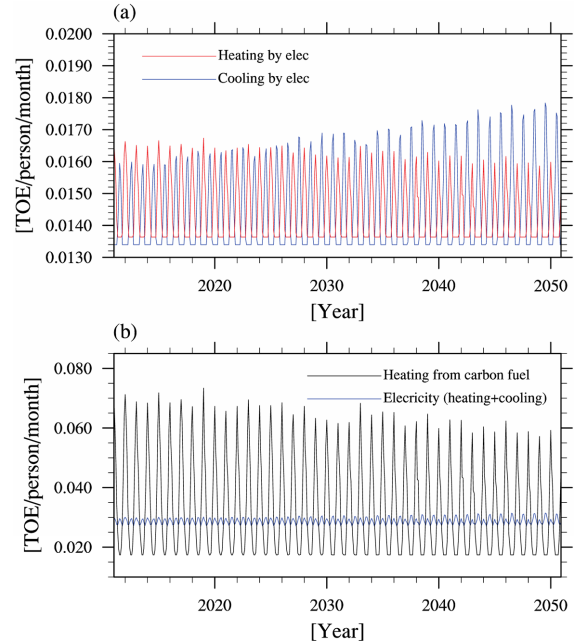


Fig. 5. Time-series of estimated future energy use per capita in residential and commercial sectors attributable to climate change.

방용 전력수요를 추월할 것으로 예상되며, 그 증가폭이 난방용 전력수요 감소 경향보다 크기 때문에 연간 전기에너지 사용량은 전체적으로 약간 증가할 것으로 예상된다. 그러나 전력 에너지 소비량은 화석연료 사용량에 비해서는 상대적으로 매우 작은 편이므로(Fig. 5b), 연간 1인당 전체 에너지 사용량은 난방용 화석연료 에너지 사용의 감소에 의해 2050년까지 점진적으로 감소할 것으로 나타난다.

기후변화에 따른 에너지 소비 변화의 계절성을 보다 자세하게 나타내기 위해, 미래 에너지 소비 추정 값을 현재(1991~2010년) 대비 월별 증감값으로 Fig. 6에 나타내었다. 앞에서 예측한 바와 같이 여름철 기온상승 경향에 의한 여름철 전력 소비 증가가 뚜렷하며, 특히 7월부터 10월까지의 여름과 가을철의 전력 수요 상승이 가장 크게 나타날 것으로 예측된다. 화석연료 사용에 의한 에너지 소비는 7, 8월을 제외한 모든 시기에 감소할 것으로 예상된다. 겨울철(12~2월)에 상당한 감소를 보이지만 봄과 가을철에도 겨울철 못지않은 감소세가 나타난다.

3. 요약 및 토의

이 연구에서는 미래 기후변화에 의한 가정 및 상업 부문 에너지 소비 변화를 예측하였다. 지난 20년(1991~

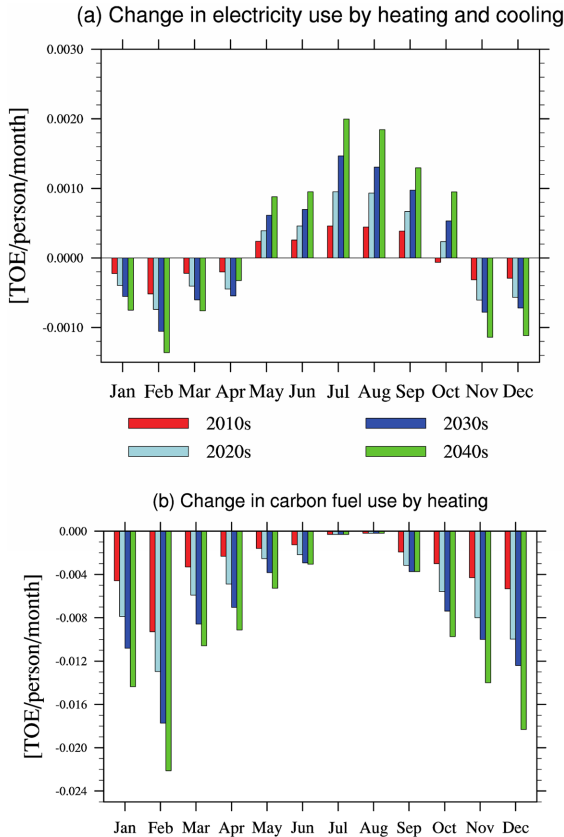


Fig. 6. Estimated future change in monthly energy use per capita in residential and commercial sectors by (a) electricity for heating and cooling and (b) carbon fuel for heating attributable to climate change.

2010년) 동안의 우리나라 월별 가정 및 상업 부문 에너지수요와 남한 평균 기온간의 관계로부터 HDD 및 CDD 계산의 기준이 되는 최적 기준기온을 추정하였으며, 이를 통해 HDD 및 CDD를 새로 계산하였다. HDD 및 CDD와 에너지 소비량 간의 회귀분석을 통해 기온 변동에 따른 에너지 소비량 변동을 정량적으로 추정하는 회귀모형을 구성하였다. 이 회귀모형을 CMIP5 기후모형들이 생산한 한반도 미래 기온 변화 시나리오에 적용하여, 미래 기후 변화에 따른 가정 및 상업 부문의 에너지 사용량의 변화를 추정하였다. 전반적인 온난화에 따라, 겨울철 난방을 위한 탄소연료 소비의 감소가 나타나고, 이에 따라 연간 1인당 총 에너지 소비는 지속적으로 감소하는 것으로 예상되었다. 특히 전력 소비의 경우 여름철 냉방 전력 소비 증가 추세와 겨울철 난방 전력 소비 감소 추세의 계절적 대비가 뚜렷하여, 2020년대 중반 무렵부터는 여름철 냉방에 의한 전력소비가 겨울철 난방에 의한 소비를

넘어설 것으로 추정되었다.

이러한 결과들을 해석하고 실제에 적용하는 데에는 연구의 한계에 대한 주의와 추가적인 연구가 필요하다. 무엇보다 가장 먼저 고려되어야 할 사항으로, 이 연구에서 제시된 에너지 사용량의 변화는 사회경제적 변화가 전혀 고려되지 않고 단지 기온 예측과 관련된 변화만을 추정했다는 점이다. HDD 및 CDD와 에너지 소비의 회귀관계를 통한 미래 에너지 수요 예측은 기본적으로 현재의 에너지 소비 패턴이 미래에도 유지된다는 가정하에 이루어졌으나, 에너지 소비 패턴은 가격요인, 전반적 생활 패턴의 변화, 정부 정책 등에 의해 꾸준히 변화할 것이다. 예를 들어 과거 20년간의 자료에서 나타나는 전력사용의 증가와 화석연료 소비의 감소 추세는 유가의 상승, 탄소에너지 사용 저감 정책, 대체 에너지 사용 증가 등을 고려하면 앞으로 상당기간 동안 지속될 것으로 예상할 수 있다. 미래 에너지 소비 예측결과에서 가정 상업용 총 에너지 소비량은 화석연료 사용량 감소추세에 의해 감소할 것으로 예상하였는데, 이처럼 기후외적인 요인에 의해 화석 연료의 절대적 사용량이 계속 감소한다면, 기후변동에 의한 변동성은 지속적으로 줄어들 것이다. 둘째, 이 연구에서는 월평균 기온 변동이 월간 에너지 소비에 미치는 영향을 추정하였으나, 실제 에너지 소비는 여름철 열파(heat wave)의 발생이나 겨울철 한파발생과 같은 수시간에서 수일 이내의 시간 규모로 발생하는 극한기상 현상에 훨씬 더 큰 폭으로 반응하는 것을 우리는 경험적으로 잘 알고 있다. 2011년 9월에 있었던 대정전 사태나 2009, 2010년 혹한에 의한 폭발적인 에너지 소비 증가는 이에 좋은 예라 할 수 있다. 최근 한반도에는 일년의 극한기상 현상의 발생이 빈발하고 있고, 기후변화에 따라 이러한 극한기상 현상도 뚜렷이 변화한다고 알려지고 있어(Solomon et al., 2007), 이와 관련된 에너지 소비 변화에 대한 연구는 평균 기후 변화에 의한 에너지 소비 변화만큼이나 매우 중요하다. 차후 에너지 소비와 일별(daily) 통계자료, 그리고 극한기상 현상을 모의할 수 있는 고해상도의 기후모델 예측자료를 통해 이러한 부분을 연구할 예정이다. 마지막으로, 이 연구에 사용된 기후모델 예측의 한계와 불확실성(uncertainty)을 고려해야 한다. 지난 수십 년간 인간의 기후시스템에 대한 이해와 컴퓨터 과학의 발달로 인해 기후예측모델들의 성능이 비약적으로 향상되었으나, 아직도 기후모형의 모수화의 한계, 예측에 사용된 관측 자료 및 기후변화 강제력에 존재하는 오차, 기후시스템이 가진 비선형성 등에 의해 기후모형의 예측에는 아직도 커다란 불확실성이 존재한다. 이는 미래 에너지 소비 예측에도 고스란히 투영되므로, 에너지 소비예측 결과 해석에 있어서도 이러한 기후예측의 오차를 고려하여야 한다.

감사의 글

이 연구는 2013년도 전남대학교 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Ahn, Y. H., and I. Oh, 2010: Exploratory study on climate change adaptation strategies in the Korean Energy Sector. *Korean Energ. Economic Rev.*, **9**, 153-185.
- Amato, A. D., M. Ruth, P. Kirshen, and J. Horwitz, 2005: Regional energy demand responses to climate change: Methodology and application to the commonwealth of massachusetts. *Climatic Change*, **71**, 175-201.
- Asit, K. B., 1984: Climate and energy systems, a review of their interactions: by Jill Jäger John Wiley, Chichester, UK, 1983, 231 pp. *Energ. Policy*, **12**, 370-371.
- Belzer, D. B., M. J. Scott, and R. D. Sands, 1996: Climate change impacts on U.S. commercial building energy consumption: An analysis using sample survey data. *Energ. Source*, **18**, 177-201.
- Cartalis, C., A. Synodinou, M. Proedrou, A. Tsangrassoulis, and M. Santamouris, 2001: Modifications in energy demand in urban areas as a result of climate changes: an assessment for the southeast Mediterranean region. *Energ. Convers. Manage.*, **42**, 1647-1656.
- IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 1535 pp.
- Kwon, W. T., 2005: Current status and perspectives of climate change sciences. *J. Korean Meteor. Soc.*, **41**, 325-336.
- Lim, H. C., Y. H. Byun, W. T. Kwon, and J. G. Jhun, 2008: An assessment of the residential electric energy consumption induced by global warming. *Atmosphere*, **18**, 33-41.
- Linder, K. P., 1990: National impacts of climate change on electric utilities. *The Potential Effects of Global Warming on the United States*, J. B. Smith, and D. A. Tirpak, Eds., Environmental Protection Agency.
- Meehl, G. A., and Coauthors, 2007: The WCRP CMIP3 multimodel dataset - A new era in climate change research. *B Am. Meteorol. Soc.*, **88**, 1383-1394.
- Quayle, R. G., and H. F. Diaz, 1980: Heating degree day data applied to residential heating energy consumption. *J. Appl. Meteorol.*, **19**, 241-246.
- Rosenthal, D. H., H. K. Gruenspecht, and E. A. Moranm, 1995: Effects of global warming on energy use for space heating and cooling in the United States. *The Energy Journal*, **16**, 77-96.
- Ruth, M., and A.-C. Lin, 2006: Regional energy demand and adaptations to climate change: Methodology and application to the state of Maryland, USA. *Energ. Policy*, **34**, 2820-2833.
- Solomon, S., Intergovernmental Panel on Climate Change., and Intergovernmental Panel on Climate Change. Working Group I., 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*. Cambridge University Press, viii, 996 pp.
- Taylor, K. E., R. J. Stouffer, and G. E. Meehl, 2008: *A summary of the CMIP5 experiment design*.
- Ulrich, R., and H. Turton, 2009: Climate change adaptation scenario for the European electricity sector. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **6**, 522004.