

사회경제 변화를 고려한 서비스 수요 및 기후변화 유발물질 배출량 예측: 가정·상업부문, 교통부문, 산업부문을 중심으로

박진한* · 이동근**† · 이미진*** · 박 찬**** · 정태웅***** · 김상균***** · 홍성철***** · 백소진***** · 이장훈*****

*서울대학교 협동과정 조경학, **서울대학교 조경지역시스템공학부, ***서울대학교 대학원, ****국토연구원,
*****연세대학교 국제대학원, *****국립환경과학원, *****호서대학교 벤처대학원 융합공학과

Estimating Climate Pollutants Emissions and Service Demands considering Socio-economic Change: Residential · Commercial Sector, Transportation Sector, Industrial Sector

Park, Jin-Han*, Lee, Dong-Kun**†, Lee, Mi-Jin***, Park, Chan****, Jung, Tae-Yong****,
Kim, Sang-Kyun*****, Hong, Sung-Chul*****, Baek, So-Jin***** and Lee, Jang-Hoon*****

*Interdisciplinary Program in Landscape Architecture, Seoul National University, Korea,

**Dept. of Landscape Architecture and Rural Systems Engineering, Seoul National University, Korea,

***Graduate School, Seoul National University, Korea,

****Land Management and Urban Research Division, Korea Research Institute for Human Settlements, Korea,

*****Graduate School of International Studies, Yonsei University, Korea,

*****Global Environment Research Division, Climate and Air Quality Research Department,
National Institute of Environmental Research

*****Dept. of Convergence Engineering Graduate School of Venture, Hoseo University, Korea

ABSTRACT

Vulnerability due to climate change depends on the concentration of carbon dioxide emissions over several upcoming decades. The objective of this study is to estimate the concentration of greenhouse gases and air pollutants in 2100, while also accounting for expected socio-economic changes in Korea. First, we intend to prepare scenarios for possible socioeconomic changes in Korea: business as usual (BAU), high growth and low growth. Secondly, we aim to predict services demands in residential · commercial sector, transportation sector, industrial sector for each scenarios. Finally, the emissions of LLGHG and SLCP will be estimated on the basis of the predicted service demands. The study results project that in Korea, LLGHG emissions will be approximately 660 Mt CO₂ eq. and SLCP emissions will be approximately 3.81 Mt, -including black carbon (BC) by 2100. The transportation and industrial sectors are the major source for LLGHG emissions, and the residential and commercial sector serve as the SLCP source. Later, additional studies on the cost and benefit of mitigation should be carried out by comparing the reduced use of materials that cause climate change as a result of reduction policies and the socioeconomic cost.

Key words: Long-Lived Greenhouse Gas(LLGHG), Short-Lived Climate Pollutant(SLCP), CO₂ Emissions, Air Pollutants, Climate Change, Mitigation, Adaptation.

1. 서 론

우리나라를 비롯한 세계 각국은 2015년 12월, 프랑스 파리에서 열리는 UNFCCC COP21에서 2020년 이후 신기후체제

마련을 위한 논의를 본격적으로 진행할 예정이다. 이에 앞서 우리나라는 2015년 6월, 온실가스 감축목표를 확정하고, INDC (Intended Nationally Determined Contribution)를 UN에 제출하였다. 미국, EU 등의 선진국은 이미 2015년 3월에 제출하였

† Corresponding author : cupidjh@gmail.com

Received September 8, 2015 / Revised November 18, 2015(1st), November 30, 2015(2nd) / Accepted December 24, 2015

으며, 중국과 일본 등도 곧 제출할 것으로 예상된다(UNFCCC). 국제사회는 전 세계 탄소배출량 7위인 한국에게 기대를 하고 있으며, 이에 따라 정부는 녹색성장, GCF유치 등의 전례에 따라 BAU 대비 37%의 감축안을 제안하였다(Ministry of Environment, 2015). 하지만 이는 2030년까지의 감축 목표이다. 온실가스 배출물질에 대한 감축목표는 장기적으로 접근해야 하지만, 국제사회에서는 정치적, 경제적인 이유로 2030년까지의 목표에 대해서만 논의하고 있는 것이다.

IPCC 제5차 보고서에서는 기후변화에 따른 각종 영향의 주원인이 인위적인 온실가스 배출과정이라고 말하고 있으며, 가까운 미래의 완화 행동 선택에 따라 21세기 전반에 걸쳐 나타날 기후변화 위험이 달라질 것이라고 말하고 있다. 즉, 기후변화로 인한 위험은 이산화탄소의 누적배출량에 달려 있으며, 이산화탄소 누적배출량은 다시 향후 가까운 몇 십 년 동안 배출량에 달려 있다는 것이다(IPCC, 2014).

이러한 기후변화를 유발하는 온실가스 배출은 인간의 활동 과정에서 발생하는 것으로(Riahi *et al.*, 2000; Dalton *et al.*, 2008), 이를 예측하고 이에 대한 저감방안을 세우기 위해서는 사회경제 활동에 대한 예측이 중요하다. 실제 온실가스 배출에 미치는 변수로는 인구, 경제, 토지이용, 건물, 교통, 환경 등의 부문이 언급되고 있으며(Promjiraprawat *et al.*, 2014; Selvakumaran *et al.*, 2014), 재정자립도, 고령인구비율, 총인구, 공동주택 비율 등이 지표 역시 온실가스 배출에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 산업의 비율 역시 상관관계를 가지고 있는 것으로 나타나고 있다(Yoo and Hwang, 2015).

한편, IPCC 제5차 보고서에서는 단기 체류 기후변화 유발물질(Short-Lived Climate Pollutant, 이하 SLCP)에 대한 내용이 언급되기 시작하였다. 기후에 영향을 주는 오염물질 중에 대기 중에 짧게 머무르는 물질을 SLCP라고 정의하고 있으며, BC(Black Carbon), CH₄, O₃, HFCs 등이 있다. 이러한 물질은 짧은 시간대기에 머물면서 지구온난화에 영향을 주고, 이러한 오염물질들이 인간의 건강 등과 같이 지역사회에 영향을 주기 때문에 최근 연구자들의 관심을 받고 있다(IPCC, 2014). 특히 정책과 기술에 의해 황산화물의 배출량은 감소하지만, 교통 부문의 이용이 증가하면서 질소산화물의 배출은 증가할 것으로 예측하고 있다(Fenger, 1999). 따라서 향후 저감정책을 세우기 위해서는 장기 체류 기후변화 유발물질(Long-Lived Greenhouse Gas, 이하 LLGHG)과 같은 기존의 온실가스 뿐만 아니라, SLCP에 대해서도 미래 배출량을 추정할 수 있어야 효과적인 저감정책을 세울 수 있을 것이다.

하지만 현재 우리나라에서는 온실가스 정보센터에서 기존 온실가스에 대한 정보를 수집 및 가공하고 있으며 대기오염

물질의 일종인 SLCP는 국립환경과학원에서 각각의 대기오염 물질에 대한 배출량을 모니터링 및 추정하고 있는 실정이다. 따라서 온실가스와 대기오염 물질에 대한 배출량에 대한 연구가 동시에 진행되어야 할 필요성이 제기되고 있다(Jung and Kwon, 2014).

본 연구의 목적은 한국의 사회경제 변화를 고려한 2100년의 장·단기 체류 기후변화 유발물질의 배출량을 추정하는 것이다. 이를 위해서는 첫째, 한국의 사회경제 변화에 대한 시나리오를 BAU 시나리오, 저성장 시나리오, 고성장 시나리오의 경우로 가정하여 작성하고, 둘째, 각각의 시나리오에 따른 각 부문별 서비스 수요를 예측하고자 한다. 마지막으로 예측된 서비스 수요를 바탕으로 배출량을 추정한다.

2. 연구 범위

본 연구에서는 2010년을 기준년도로 설정하고, 목표연도는 2025~2045년을 단기미래로, 2080~2100년을 장기미래로 설정하였다. 또한 본 연구에서 분석한 장·단기 체류 기후변화 유발물질은 CO₂, CH₄, N₂O, SO₂, NO_x, PM₁₀, CO, TSP, VOC, NH₃, BC 등 LLGHG 3종, SLCP 8종이다.

또한 본 연구에서 서비스 수요 예측 및 배출량을 추측한 부문은 가정·상업 부문, 교통 부문, 산업 부문을 중심으로 하였으며, 특히 산업부문에서는 철강산업, 시멘트산업, 기타 산업으로 구분하였다.

3. 연구 방법

3.1 사회경제시나리오 설정

사회경제시나리오의 설정을 위해서 국내·외 기관에서 추정하고 있는 자료를 검토하였다. 통계청을 비롯하여 UN DESA, OECD, IIASA(The International Institute for Applied Systems Analysis) 등의 기관에서 추정하고 있는 인구 자료 및 GDP 자료를 모두 검토하였다.

통계청에서 제공하고 있는 인구 시나리오의 경우, 2060년까지의 추계만 제공하고 있다. 이는 본 연구에서 목표연도로 설정한 2100년과는 시간적 범위가 맞지 않으므로 타 기관의 인구 추계 시나리오 선택의 기준자료로 활용하였다.

특히 IIASA에서는 인구 자료, GDP 자료, 에너지 수요 자료, 에너지 가격 자료, 발전소 기술 투자 비용 등을 이용하여 미래의 사회·경제 시나리오 및 배출량 예측하고 있으며, 이들 자료가 향후 온실가스 및 기후오염 물질 발생과 관련하여 밀접

한 관련이 있는 것으로 밝히고 있다. 따라서 본 연구에서는 IIASA의 미래 사회·경제 시나리오 5개 중에서 통계청의 인구 추계 시나리오를 바탕으로 이와 인구 추계가 유사한 시나리오 3개를 선택하여 각각 BAU 시나리오, 저성장 시나리오, 고성장 시나리오로 설정하였다.

3.2 서비스 수요 예측 방법

3.2.1 가정·상업 부문

가정 부문의 서비스는 난방, 냉방, 조명, 조리, 주요 전자기기, 기타 전자기기로 구분되며, 상업 부문의 서비스는 난방, 온수, 냉방, 조명, 조리, 기타 전자기기로 구분된다. 가정 부문에서 온수는 대부분 보일러 기반으로 난방과 함께 사용되고 있으므로 난방 부문에 포함하여 산정하였다.

서비스 유형별 서비스 수요 예측은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Service\ Demand_{RSD,COM} = \Sigma(SA_{i,t} \times ST_{i,t} \times SI_{i,t}) \quad \text{식 (1)}$$

$SA_{i,t}$: 서비스를 필요로 하는 공간이나 면적

$ST_{i,t}$: 서비스를 필요로 하는 시간

$SI_{i,t}$: 서비스를 필요로 하는 강도

가정 부문의 배출량 산정에 있어서 가전기기의 보급현황 또한 중요한 고려사항으로 이를 위해서 한국전력거래소에서 발간한 가전기기 보급률 및 가정용전력 소비행태 조사 보고서(2006, 2009, 2011)를 참고하였다.

3.2.2 교통 부문

교통 부문은 여객 수송량과 화물 수송량을 나누어 추정하였으며, 수송량을 추정하기 위하여 고려한 운송수단은 승용차, 버스, 철도, 국내 항공, 국제 항공 등이다. 여객 수송량을 추정한 방법은 연령별 인구나 연령별 목적지에 따른 이동거리, 교통수단별 분담률의 곱으로 추정하였다[식 (2)]. 문헌 리뷰를 통하여 5~19세의 등교거리는 평균 약 4.9 km, 20~69세의 출근거리는 평균 약 12.7 km, 전 연령에서의 쇼핑을 위한 이동 거리는 평균 약 5.5 km, 여가 및 친교를 위한 이동은 평균 약 7.9 km 정도 이동하는 것으로 설정하였으며, 교통수단별 분담률은 대중교통에서 기차와 버스만 고려하였다.

$$Service\ Demand_{TRTP} = \Sigma(P_a \times D_{p,s} \times S_d) \quad \text{식 (2)}$$

P_a : 연령별 인구수

$D_{p,s}$: 연령별 목적별 이동거리

S_d : 교통시설 분담률

화물 수송량의 경우, 여객과는 다르게 산업의 영향을 많이 받는다(McKinnon AC and Woodburn A, 1996; Choi CH, 2002). 따라서 대표적 국가 경제지표인 GDP를 활용하였으며, 특히 GDP의 변화율을 이용하여 화물 수송량을 추정하였다 GDP 전망자료를 활용하여 화물 수송량을 추정하기 위하여 기준년도의 화물 서비스 수요에 GDP 변화율을 곱하여 미래의 서비스 수요를 예측하였다.

$$Service\ Demand_{TRTF} = \Sigma(R_{GDP} \times SD_{2010}) \quad \text{식 (3)}$$

R_{GDP} : GDP 변화율

SD_{2010} : 2010년 서비스 수요

3.2.3 산업 부문

본 연구에서의 산업 부문은 철강산업, 시멘트산업, 기타 산업으로 구분할 수 있다. 철강 및 시멘트의 서비스 수요는 국내·외 생산량 및 수출입물량, 연관된 산업의 소비량 등과 관련이 있다. 하지만 본 연구에서는 1인당 소비량과 인구를 곱하는 방식으로 총수요량을 도출하였다(America's Cement Manufacturers, 2015).

$$Service\ Demand_{STL, CMT} = \Sigma(CPC_{STL, CMT} \times P_i) \quad \text{식 (4)}$$

$CPC_{STL, CMT}$: 1인당 소비량

P_i : 인구

1인당 소비량 추정은 일인당 GDP를 이용하여 도출하였으며, 일본에서의 이용량을 참고하였다. 또한 1인당 사용량은 한계가 있기 때문에 철강은 1.4 ton/year, 시멘트는 1.2 ton/year로 수렴하도록 하여 1인당 사용량을 도출하였다.

그 외 기타 산업에서의 서비스 수요는 일본의 기타산업 연간 증가율을 차용하여 한국의 기타산업 증가율에 적용하였다. 다만 같은 시점으로 적용하지 않고 일본의 1990~2010년의 증가율을 한국의 2010~2030년의 증가율로 적용하는 것과 같이 약 20년 정도의 시차를 두어 적용하였다. 또한 산업 구조의 변화 역시 일본의 산업 구조 변화 유형을 시차를 두고 차용하여 사용하였다.

3.3 배출계수

배출계수는 대기 중으로 방출된 오염물질의 양을 표시하는 대표 값이다. 일반적으로 단위, 무게, 부피, 거리 또는 오염 물질을 배출하는 활동 시간으로 나누어서 오염 물질의 무게로 표현된다. 이러한 요인은 공기오염의 다양한 원인으로부터 배출량을 산정할 수 있다.

본 연구에서는 NIER(2013)에서 나온 배출계수를 이용하였으며, 특히 전력 배출계수는 국가 대기오염물질 배출량 산정 방법(NIER, 2013)의 연료별 배출계수부분과 제6차 전력수급 기본계획(Ministry of Trade, Industry and Energy, 2013)의 연료원별 발전설비 규모, 실제가동률 및 전원구성비 전망 등의 내용을 활용하여 전기부분의 새로운 배출계수를 도출하였으며, 이를 각각의 부문에 반영하였다.

3.4 기후변화 유발물질 배출량 예측방법

앞서 구축한 장치들의 DB와 도출된 부문별 서비스 수요를 이용하여 장·단기 체류 기후변화 유발물질의 배출량을 예측하였다. 배출량 예측에는 일본 국립환경연구소에서 개발되었고, 현재 전 세계적으로 인정받고 있는 AIM/Enduse 모델을 사용하였다. AIM/Enduse 모델은 국가의 에너지-경제-환경 시스템 내에서 세부 기술 선택 모듈을 가지고 있는 상향식(bottom-up) 모델이다. 본 모델의 기본적인 구조는 모델 내에서 서비스 수요, 에너지 및 소재 공급의 가용성 및 기타 시스템의 제약 등과 같은 조건 하에서 시스템 비용이 최소화되는 기술을 선택하여 배출량을 추정한다. 또한 동시에 계산을 수행할 수 있는 재귀 동적 모델로서 정책 대응을 포함한 다양한 시나리오 분석이 가능하다. 본 모델에서 선택할 수 있는 정책은 국가보고서 혹은 국가출연 연구기관 등의 보고서 등을 참

고하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 사회경제 변화 전망

본 연구에서 사용한 인구 시나리오는 BAU 시나리오, 저성장 시나리오와 고성장 시나리오 등 세 가지이다. 2010년 인구는 약 4,800만 명이며, 2010년 대비 2100년 인구는 최소 12%에서 최대 62%까지 감소하는 것으로 나타난다.

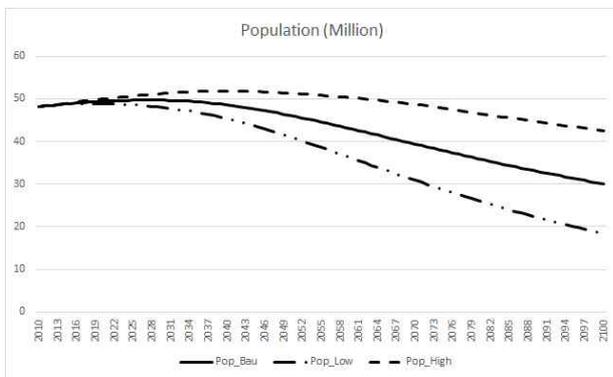
BAU 시나리오를 살펴보면 2030년까지 증가하는 추세를 보이다 점차적으로 감소하는 경향을 보인다. 저성장 시나리오에서도 마찬가지로 2030년 정도까지 증가하는 추세를 보이다 급격하게 감소하는 경향을 보인다. 고성장 시나리오에서는 2040년까지 증가하는 추세를 보이다가 그 이후로 감소하는 경향을 보이는데, BAU 시나리오에 비해서는 감소폭이 작은 것을 알 수 있다.

한국의 GDP(GDP | PPP)는 2010년 약 13,200억 USD이며, 2100년 GDP는 최소 19,320억 USD에서 최대 87,410억 USD으로 나타난다. BAU 시나리오와 고성장 시나리오에서는 증가하는 경향을 보이는데 BAU 시나리오에서는 점차적으로 증가하는 경향을 보이나, 고성장 시나리오에서는 급격하게 증가하는 경향을 보인다. 반면에 저성장 시나리오에서는 2050년까지는 증가하나, 그 이후로는 점차적으로 감소하는 경향을 보이고 있다.

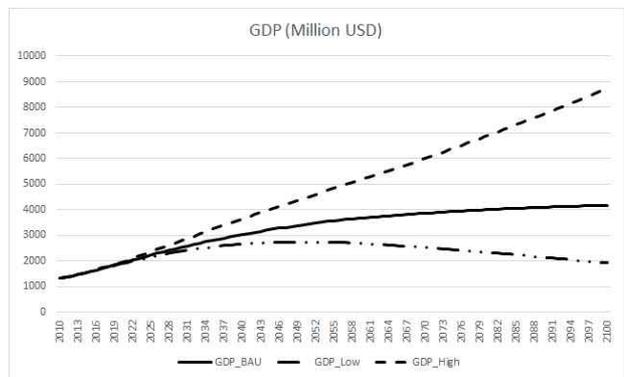
4.2 부문별 서비스 수요 변화 전망

4.2.1 가정 · 상업 부문

가정 부문의 2030년 서비스 수요는 2010년 대비 증가하는



(a) Population scenarios



(b) GDP scenarios

Fig. 1. Outlook of population and GDP.

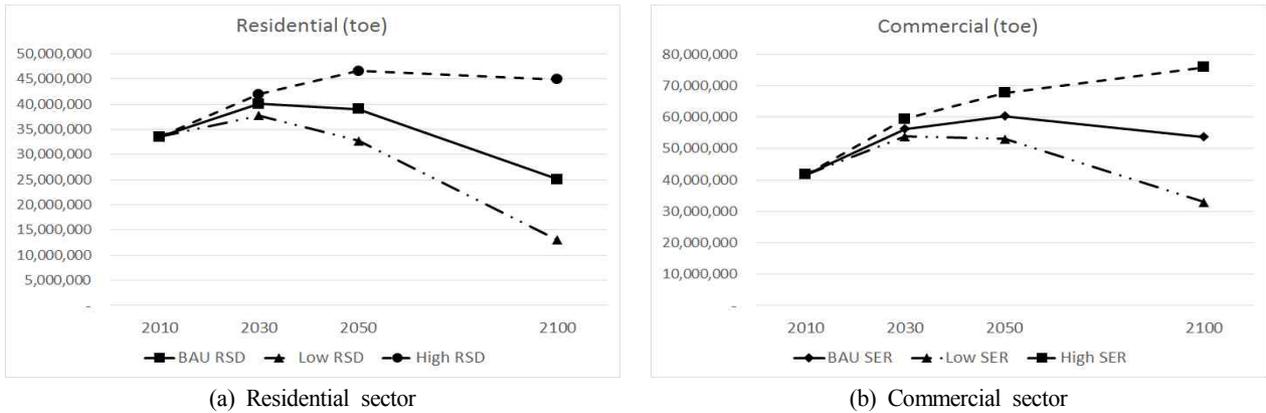


Fig. 2. Change in service demand in the residential and commercial sectors.

모습을 보이며, 2050년에는 시나리오 별로 다르다. BAU 시나리오는 2030년과 유사한 수요를 보이며, 저성장 시나리오에서는 2030년 이후 감소하는 추세를 보인다. 고성장 시나리오에는 2010년에서 2030년에 증가한 것과 유사하게 증가하는 것으로 나타난다. 2100년의 서비스 수요는 2050년 대비 모두 감소하는 것으로 나타났으며, 특히 BAU 시나리오와 저성장 시나리오의 경우, 2010년 서비스 수요보다 더 줄어드는 것으로 나타났다. 이는 인구 변화와 유사한 변화 추세를 보인다.

상업 부문의 서비스 수요 변화는 가정부문과 유사한 흐름을 보인다. 2010년 대비 2030년의 서비스 수요는 모든 시나리오에서 증가하는 것을 알 수 있다. 2050년의 서비스 수요는 시나리오별로 다르다. BAU 시나리오와 고성장 시나리오는 2030년 대비 증가하는 것으로 나타나지만, 저성장 시나리오는 2030년 대비 감소하는 것으로 나타난다. 2100년의 서비스 수요는 고성장 시나리오의 경우만 증가하고 있으며, BAU 시나리오와 저성장 시나리오는 2050년에 비하여 감소하는 모습을 보인다. 고성장 시나리오는 2010년부터 2030년, 2050년, 2100

년 모두 서비스 수요가 증가하는 것을 알 수 있으며, BAU 시나리오는 2010년, 2030년, 2050년까지 서비스 수요가 증가하다가 2100년에는 오히려 감소한다는 것을 알 수 있다. 저성장 시나리오는 2030년의 서비스 수요는 증가하지만, 2050년과 2100년의 서비스 수요는 2030년 대비 감소하는 것으로 나타났다.

4.2.2 교통 부문

교통 부문의 서비스 수요는 여객수송과 화물수송 등으로 나눌 수 있다. 여객수송은 인구변화를 기반으로 서비스 수요를 예측하였으며, 화물수송은 GDP 변화를 기반으로 서비스 수요를 예측하였다.

먼저 여객수송은 세 가지 시나리오 모두 2010년 대비 2030년, 2050년, 2100년 서비스 수요가 감소하는 것으로 나타났다. 이는 인구의 변화 추이와 비슷함을 알 수 있다.

화물수송은 세 가지 시나리오 모두 2010년 대비 2030년, 2050년, 2100년 서비스 수요가 증가하는 것으로 나타났다. 고성장 시나리오와 BAU 시나리오는 2010년부터 2030년, 2050

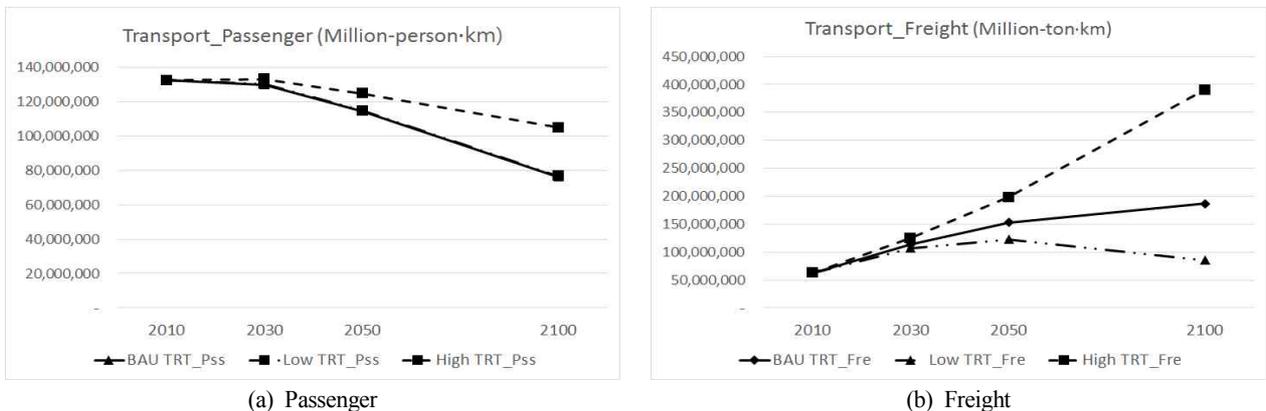


Fig. 3. Change in service demand in the transport sectors.

년 2100년 서비스 수요가 모두 증가하고 있으며, 저성장 시나리오는 2050년의 서비스 수요 증가 이후 2100년의 서비스는 감소하는 것으로 나타났다.

4.2.3 산업 부문

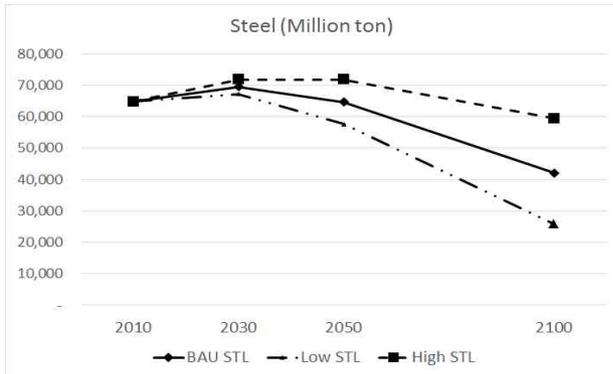
산업 부문 중 철강산업의 서비스 수요 예측은 인구변화를 기반으로 예측하였다. 따라서 인구 변화와 그 흐름이 유사함을 알 수 있다. 세 가지 시나리오에서 2030년의 서비스 수요는 2010년에 비하여 소폭 상승하는 것으로 나타났다. 하지만 2050년의 서비스 수요는 BAU 시나리오와 저성장 시나리오에서는 감소하는 것으로 나타났으며, 고성장 시나리오에서는 거의 유사함을 알 수 있다. 2100년의 서비스 수요는 2050년에 비하여 모두 감소하고 있음을 알 수 있다. 2010년 대비 2100년의 서비스 수요는 고성장 시나리오에서는 증가 후 감소로 유사함을 알 수 있지만, BAU 시나리오와 저성장 시나리오에서는 감소할 것으로 나타났다.

산업 부문 중 시멘트산업의 서비스 수요 변화 역시 철강산업의 변화 패턴과 유사하다. 철강산업과 마찬가지로 인구변화

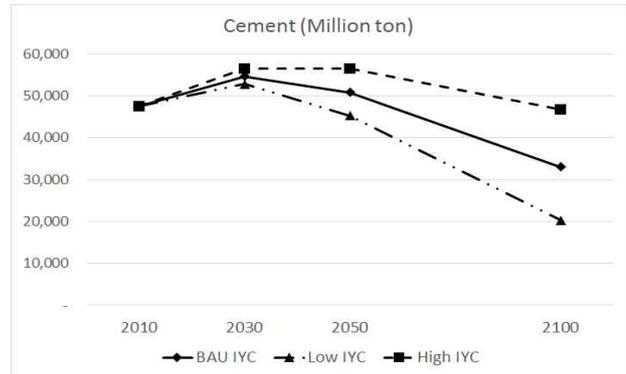
를 기반으로 시멘트산업의 서비스 수요를 추정하였기 때문이다. 세 가지 시나리오 모두 2030년까지는 증가하다가 2050년, 2100년의 서비스 수요는 감소하는 것을 알 수 있다. 2010년 대비 2050년의 서비스 수요는 BAU 시나리오와 고성장 시나리오에서는 증가하였지만, 저성장 시나리오에서는 감소하는 것으로 나타났다. 또한 2010년 대비 2100년의 서비스 수요는 고성장 시나리오에서는 증가 후 감소 패턴으로 유사하게 나타났지만, BAU 시나리오와 저성장 시나리오에서는 모두 감소하는 것으로 나타났다.

산업 부문 중 철강산업과 시멘트산업을 제외한 기타 산업의 서비스 수요 변화는 GDP변화와 유사한 패턴임을 알 수 있다. GDP변화는 세 가지 시나리오 모두 2010년 대비 2100년 GDP가 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 저성장 시나리오의 경우, 서비스 수요가 2010년 대비 감소하는 것으로 나타났다. 이는 GDP 뿐만 아니라, 산업 구조의 변화 등도 서비스 수요에 영향을 미치기 때문이다.

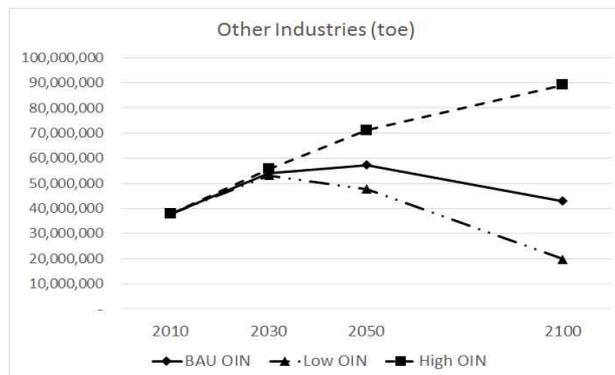
4.3 부문별 기후변화 유발물질 배출량 전망



(a) Steel industry sector



(b) Cement industry sector



(c) Other industry sectors

Fig. 4. Change in service demand in the industrial sectors.

4.3.1 가정·상업 부문

가정 부문의 LLGHG 배출량은 2010년 69 Mt CO₂ eq.로 CO₂가 대부분이고, SLCP 배출량은 SO₂ 0.12 Mt, NO_x 0.34 Mt, BC 0.01 Mt, PM₁₀ 0.02 Mt, CO 0.14 Mt, TSP 0.03 Mt, VOC 0.16 Mt, NH₃ 0.05 Mt의 배출량을 나타냈다.

2010년 대비 2100년 LLGHG 배출량은 29%(20 Mt)까지 감소하거나 108%(74 Mt) 수준으로 증가하였고, SLCP는 고성장 시나리오에서 2배(1.78 Mt) 가까이 증가하였다. 가정 부문의 LLGHG 배출량은 CO₂가 대부분이며, BAU 시나리오와 저성장 시나리오에서는 점차적으로 감소하는 경향을 볼 수 있고, 고성장 시나리오에서는 점차적으로 증가하는 경향을 볼 수 있다.

SLCP 배출량을 살펴보면, NO_x가 가장 많은 것을 알 수 있으며, 전체적인 추세는 LLGHG 배출량과 같이 BAU, 저성장 시나리오에서는 감소, 고성장 시나리오에서는 증가하는 경향을 볼 수 있다.

상업 부문의 LLGHG 배출량은 72 Mt CO₂ eq.로 CO₂가 대부분이고, SLCP의 배출량은 SO₂ 0.21 Mt, NO_x 0.60 Mt, BC 0.00 Mt, PM₁₀ 0.04 Mt, CO 0.24 Mt, TSP 0.06 Mt, VOC 0.27 Mt, NH₃ 0.09 Mt 배출하는 것으로 나타났다.

2010년 대비 2100년 LLGHG 배출량은 57%(41 Mt)까지 감소하거나 123%(89 Mt) 수준으로 증가하였고, SLCP 배출량은 고성장 시나리오에서 142%(2.14 Mt) 가까이 증가하는 것을 볼 수 있었다.

특히, 상업 부문 배출량의 총량은 변화하지만, 배출물질 내의 비율의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 상업 부문의 LLGHG 배출량은 가정 부문과 마찬가지로 대부분이 CO₂임을 알 수 있으며, BAU 시나리오와 저성장 시나리오에서도 점차적으로 감소하는 경향을 보이는 것이 유사하다. 그러나 가정 부문과의 차이점은 고성장 시나리오에서 증가하는 가정 부문과는 달리 상업 부문에서는 고성장 시나리오에서는 점차 증가하다가 감소하는 경향을 보였다.

한국의 상업 부문의 SLCP는 가정 부문과 마찬가지로 NO_x가 대부분을 차지하고 있으며, 그 경향 또한 가정 부문과 비슷한 경향을 보이고 있다.

4.3.2 교통 부문

교통 부문은 배출물질의 증가폭이 가장 큰 부문이다. 교통 부문의 LLGHG 배출량은 2010년 104 Mt CO₂ eq.로 CO₂가 대부분이고, SLCP 배출량은 SO₂ 102.12 Mt, NO_x 0.14 Mt, BC 1.44 Mt, PM₁₀ 0.04 Mt, CO 0.24 Mt, TSP 0.06 Mt, VOC

0.27 Mt, NH₃ 0.09 Mt 배출하는 것으로 나타났다.

2010년 대비 2100년 LLGHG 배출량은 85%(88 Mt)까지 감소하거나 170%(176 Mt), 349%(362 Mt) 수준까지 증가하였고, SLCP 배출량은 고성장 시나리오에서 322%(0.74 Mt) 가까이 증가하였다.

교통 부문 LLGHG 배출량을 살펴보면 CO₂가 대부분을 차지하는 것을 알 수 있으며, 전반적으로 2045년까지는 증가하는 경향을 보이나, 그 이후로 저성장 시나리오에서는 감소하는 경향을 보이고, BAU 시나리오와 고성장 시나리오에서는 증가하는 경향을 보임을 알 수 있다. 다만 그 차이가 BAU 시나리오에서는 거의 미미하게 증가하는 것을 볼 수 있으나, 고성장 시나리오에서는 매우 급격히 증가하는 것을 알 수 있다.

SLCP 배출량을 살펴보면 앞선 부분들과 마찬가지로 NO_x가 가장 많은 부분을 차지하고 있는 것을 알 수 있다. 전반적인 경향은 LLGHG 배출량과 비슷하게 BAU, 고성장 시나리오에서는 증가하는 경향을, 저성장 시나리오에서는 감소하는 경향을 볼 수 있다. 또한 눈에 띄는 점은 2100년으로 갈수록 BC의 배출이 상당히 증가하는 모습을 보이는 것이다.

4.3.3 산업 부문

산업 부문 중 철강산업의 LLGHG 배출량은 2010년 92 Mt CO₂ eq.로 CO₂가 대부분이고, SLCP 배출량은 SO₂ 0.01 Mt, NO_x 0.17 Mt, BC 0.37 Mt, PM₁₀ 0.07 Mt, CO 0.02 Mt, TSP 0.01 Mt, VOC 0.08 Mt, NH₃ 0.03 Mt 배출하는 것으로 나타났다. 2010년 대비 2100년 LLGHG 배출량은 37%(34 Mt)에서 84%(77 Mt) 수준까지 감소하였고, SLCP 배출량 역시 모든 시나리오에서 34~79%(0.08~0.19 Mt) 정도로 감소하는 경향을 보였다. 이는 인구 변화와 관계가 있는 것으로 판단된다.

철강산업의 LLGHG 배출 또한 대부분이 CO₂임을 알 수 있다. 그러나 다른 부분들과의 차이점은 모든 시나리오에서 2030년까지 증가하는 경향을 보이다가 그 이후로 감소하는 경향을 보인다는 것이다. 다만 고성장 시나리오에서는 약간 감소하고, 저성장 시나리오에서는 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있다.

철강산업의 SLCP의 배출은 다른 부분들과는 달리 VOC가 가장 많은 부분을 차지하고 있으며, 그 다음으로 CO가 많은 부분을 차지하고 있다. 전체적인 경향은 LLGHG 배출량과 같이 감소하는 추세를 보이고 있다. 또한 갈수록 CO는 줄어드는 경향을 보이지만 VOC는 미래에도 여전히 많은 부분을 차지하고 있는 것을 알 수 있다.

다음으로 시멘트산업의 LLGHG 배출량은 2010년 36 Mt

Table 1. Total emissions of long-lived greenhouse gas and short-lived climate pollutant

(Unit: LLGHG=Mt CO₂ eq./SLCP=Mt)

Year		2010	2025	2030	2035	2040	2045	2080	2085	2090	2095	2100	
R S D	BAU	LLGHG	68.9	63.2	62.8	62.1	61.6	61.3	48.5	46.0	43.6	41.4	39.2
		SLCP	0.9	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2	1.1	1.1	1.0	1.0	0.9
	Low growth	LLGHG	68.9	60.8	59.2	56.9	54.7	52.6	30.6	27.4	24.5	21.9	19.6
		SLCP	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.7	0.6	0.6	0.5	0.5
	High growth	LLGHG	68.9	65.1	66.5	68.1	70.0	72.1	76.9	76.2	75.5	74.9	74.3
		SLCP	0.9	1.1	1.2	1.2	1.3	1.5	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
C O M	BAU	LLGHG	72.2	81.4	81.5	79.6	78.6	78.2	79.5	76.2	73.2	70.3	66.6
		SLCP	1.5	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.9	1.8	1.7	1.7	1.6
	Low growth	LLGHG	72.2	79.2	78.0	76.9	75.3	74.1	57.3	53.0	48.3	43.5	41.0
		SLCP	1.5	1.7	1.6	1.6	1.6	1.6	1.3	1.3	1.1	1.0	1.0
	High growth	LLGHG	72.2	84.4	87.3	88.6	90.2	90.6	97.5	95.0	92.9	90.9	89.1
		SLCP	1.5	1.8	1.8	1.9	1.9	2.0	2.3	2.2	2.2	2.2	2.1
T R T	BAU	LLGHG	103.7	112.3	116.9	124.2	132.1	140.6	168.9	170.6	172.4	174.2	176.1
		SLCP	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4
	Low growth	LLGHG	103.7	108.4	111.2	114.1	117.2	120.4	104.2	99.8	95.6	91.6	87.7
		SLCP	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	High growth	LLGHG	103.7	119.7	127.9	141.1	156.0	172.8	285.1	302.5	321.0	340.7	361.7
		SLCP	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7
S T L	BAU	LLGHG	92.0	98.7	98.6	96.2	93.9	90.3	66.3	63.2	60.2	57.4	54.7
		SLCP	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
	Low growth	LLGHG	92.0	96.7	95.3	91.5	87.8	82.5	48.4	44.2	40.4	36.9	33.7
		SLCP	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	High growth	LLGHG	92.0	100.9	101.9	100.9	100.0	98.2	85.8	83.6	81.4	79.3	77.3
		SLCP	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
C M T	BAU	LLGHG	35.8	40.6	40.7	40.5	40.1	39.1	29.7	28.4	27.2	26.0	24.9
		SLCP	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Low growth	LLGHG	35.8	39.7	39.4	38.5	37.5	35.7	21.7	19.9	18.2	16.7	15.3
		SLCP	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	High growth	LLGHG	35.8	41.5	42.1	42.5	42.8	42.6	38.5	37.6	36.8	35.9	35.1
		SLCP	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
O I N	BAU	LLGHG	287.1	377.5	407.7	402.8	395.1	376.1	337.6	329.8	322.2	314.9	307.8
		SLCP	0.9	1.1	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0

Table 1. Continued

Year		2010	2025	2030	2035	2040	2045	2080	2085	2090	2095	2100	
O I N	Low growth	LLGHG	287.1	372.4	396.5	381.1	363.3	325.7	200.3	184.2	169.4	155.9	143.4
		SLCP	0.9	1.1	1.1	1.1	1.1	0.9	0.7	0.6	0.6	0.5	0.5
	High growth	LLGHG	287.1	386.6	428.3	438.3	445.9	450.4	575.9	588.8	602.1	618.2	634.9
		SLCP	0.9	1.2	1.3	1.3	1.4	1.3	1.9	1.9	2.0	2.1	2.1

* RSD: residential sector, COM: commercial sector, TRT: transport sector, STL: steel industry sector, CMT: cement industry sector, OIN: other industry sector.

CO₂ eq.로 CO₂가 대부분이고, SLCP 배출량은 SO₂ 0.00 Mt, NO_x 0.04 Mt, BC 0.09 Mt, PM₁₀ 0.01 Mt, CO 0.00 Mt, TSP 0.00 Mt, VOC 0.01 Mt, NH₃ 0.00 Mt 배출하는 것으로 나타났다. 2010년 대비 2100년 LLGHG 배출량은 43%(15 Mt)에서 98%(35 Mt) 수준까지 감소하고, SLCP 배출 역시 모든 시나리오에서 37~84%(0.01~0.03 Mt) 정도로 감소하는 경향을 보였다. 이러한 결과도 역시 인구 변화와 관계가 있으며, 2030년 이후 인구 감소로 인하여 배출량 또한 감소하는 것으로 판단된다.

시멘트산업의 LLGHG 배출량을 살펴보면 다른 부문들과 마찬가지로 CO₂가 대부분을 차지하는 것을 알 수 있다. 각 시나리오별로 살펴보면 BAU 시나리오와 저성장 시나리오는 2030년까지 증가하다가 차츰 감소하는 경향을 볼 수 있으며, 고성장 시나리오에서는 2045년까지 증가하는 경향을 보이다 점차적으로 감소하는 모습을 볼 수 있다. 감소하는 시기가 다를 뿐 세 시나리오에서 모두 배출량은 증가하다 결국은 감소하는 모습을 볼 수 있다. SLCP는 SO₂가 대부분을 차지하고 있으며, 다음으로 NO_x, CO, VOC가 비슷하게 차지하고 있다. 다만 미래로 갈수록 NO_x, CO, VOC에 비해 SO₂는 상당히 줄어드는 경향을 보이고 있다. 전반적인 경향은 세 시나리오 모두 2100년으로 갈수록 감소하는 경향을 보이고 있다.

마지막으로 기타 산업의 LLGHG 배출량은 2010년 287 Mt CO₂ eq.로 CO₂가 대부분이고, SLCP 배출량은 SO₂ 0.00 Mt, NO_x 0.07 Mt, BC 0.17 Mt, PM₁₀ 0.30 Mt, CO 0.07 Mt, TSP 0.05 Mt, VOC 0.34 Mt, NH₃ 0.12 Mt 배출하는 것으로 나타났다. 2010년 대비 2100년 LLGHG 배출량은 50%(143 Mt) 수준으로 감소하거나 221%(638 Mt) 수준까지 증가하였고, SLCP 배출량은 고성장 시나리오에서 229%(2.12 Mt) 가까이 증가하였다. 이러한 결과는 GDP 변화와 관계가 있는 것으로 사료된다.

기타 산업의 LLGHG 배출량을 구체적으로 살펴보면 CO₂가 대부분을 차지하고 있으며, BAU 시나리오와 저성장 시나리

오에서는 2030년까지 증가하다가 감소하는 경향을 보인다. 반면 고성장 시나리오에서는 계속해서 증가하는 경향을 보이며, 2100년에는 2010년의 2배 이상의 온실가스 배출이 예상된다.

SLCP 배출량은 VOC와 CO가 대부분을 차지하고 있으며, 이는 미래에도 같은 모습을 보인다. 전반적으로 살펴보면 BAU, 저성장 시나리오에서는 감소하는 경향을 보이며, 고성장 시나리오에서는 증가하는 경향을 보이고 있다.

4.4 한국의 기후변화 유발물질 배출량 전망

배출량 예측 결과 장기 체류 기후변화 유발물질은 CO₂, CH₄, N₂O, 등 3종, 단기 체류 기후변화 유발물질은 SO₂, NO_x, PM₁₀, CO, TSP, VOC, NH₃, BC 등 8종이 발생하였다.

2010년 LLGHG 배출량은 약 660 Mt CO₂ eq.로 가정·상업 부문 21%, 교통 부문16%, 산업 부문 63%의 배출기여도를 나타내고, 단기미래인 2045년에는 가정·상업 부문은 세 시나리오 모두 18%, 교통 부문은 17~19%, 산업 부문은 세 시나리오 모두 64%이며, 장기미래인 2100년에는 각 13~18%, 26~28%, 56~59%로 변화하였다. 이는 현재 수준의 배출량이 단기미래까지는 거의 변화가 없음을 의미한다. SLCP 배출량은 약 3.81 Mt(BC 포함) 정도를 배출하는 것으로 나타났으며, 가정·상업 부문 63%, 교통 부문 6%, 산업 부문 31%의 배출기여도를 나타내고 있으며, 2045년에는 각각 64~66%, 6~7%, 28~30%, 2100년에는 각각 56~66%, 8~11%, 26~33%로 변화하였다. SLCP의 배출량 역시 마찬가지로 단기미래의 배출기여도는 현재와 큰 차이가 없으며, 시나리오 별 차이도 크지 않다.

LLGHG 물질 배출량을 살펴보면 BAU 시나리오에서는 2030년까지 증가 추세를 보이다가 2100년까지 점차적으로 감소하는 것을 볼 수 있다. 저성장 시나리오에서도 마찬가지로 감소하는 경향을 보이나, BAU 시나리오에 비해 더욱 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 반면, 고성장 시나리오에서는 기준년도 대비 2배 이상 증가하는 것을 알 수 있었다.

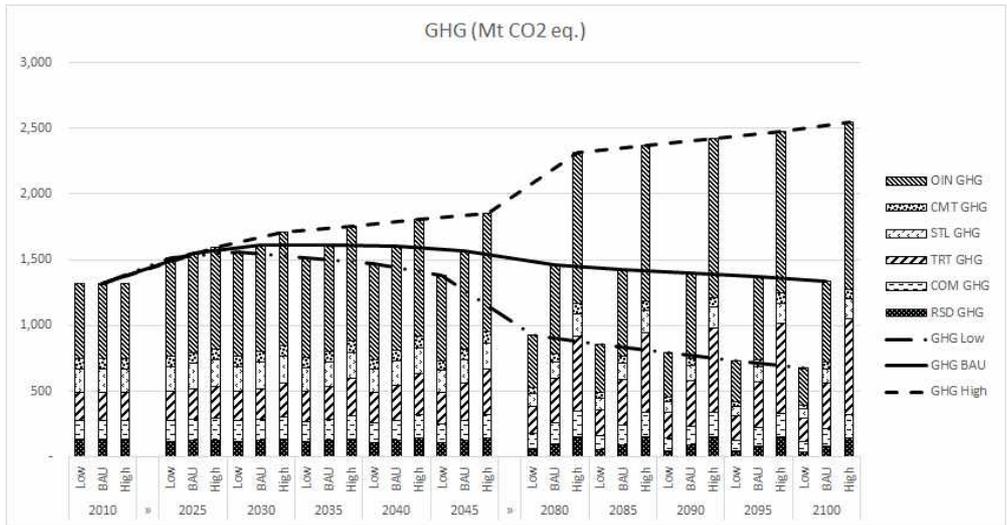


Fig. 5. Emissions of long-lived greenhouse gas (LLGHGs).

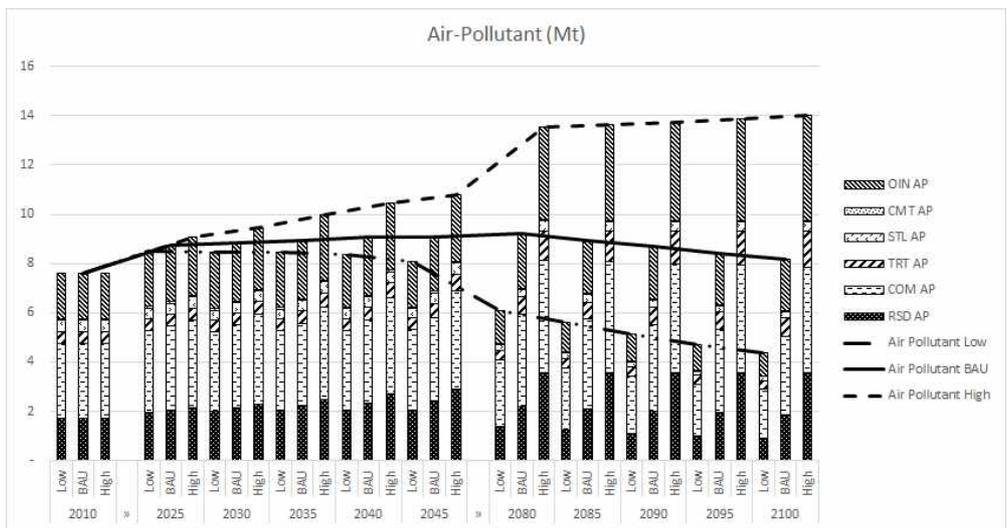


Fig. 6. Emissions of short-lived climate pollutants (SLCPs).

부문별로 살펴보면 가정·상업 부문은 BAU, 저성장 시나리오에서 기준년도 대비 감소하는 경향을 보였으며, 철강산업 역시 감소하는 경향을 보였다. 반면에 기타 산업의 배출량 증가가 매우 큰 부분을 차지하고 있으며, 교통 부문 또한 증가하는 경향을 보였다.

다음으로 SLCP 배출량의 각 시나리오 별 경향은 LLGHG 배출 경향과 비슷하게 나타난다. BAU 시나리오와 저성장 시나리오에서는 점차적으로 감소하는 경향을 보이고, 고성장 시나리오에서는 증가하는 경향을 보인다.

그러나 세부적으로 살펴보면 LLGHG와 SLCP 배출의 주요 원인이 다름을 알 수 있는데, LLGHG 배출에서는 비교적

교통, 산업 부문이 대부분을 차지했다면 SLCP의 배출은 주로 가정, 상업 부문에서 발생하는 것을 알 수 있다.

한국의 2100년 LLGHG 배출량은 2010년 대비 가정·상업 부문과 산업 부문의 비율은 감소하지만 교통 부문의 비율은 증가하는 경향을 보인다. 기본적으로는 2030년대부터 감소하는 한국의 인구전망에 따라 경제활동과 가정 부문의 활동 감소에 기인하는 장기추세라 할 수 있다. 배출량은 가정·상업 부문은 2010년 배출량 대비 저성장 시나리오에서는 43%, BAU 시나리오에서는 75% 수준으로 줄어들지만, 고성장 시나리오에서는 116%로 늘어난다. 교통 부문의 경우, 저성장 시나리오에서는 86% 정도의 배출량을 나타내지만, BAU 시나리오와

고성장 시나리오에서는 각각 170%, 349%까지 배출량이 증가한다. 이는 교통부문에서 인구감소에도 불구하고 산업구조의 고도화 및 기술의 발전에 따라 인구의 이동에 필요한 교통수요는 줄어든 반면에, 화물의 이동에 대한 교통수요는 늘어나는 추세이고, 현재 내연기관 중심의 교통수단이 계속된다는 가정 하에서 나타난 결과라 하겠다. 산업 부문은 저성장 시나리오와 BAU 시나리오에서는 46%, 93% 수준으로 감소하지만, 고성장 시나리오에서는 180% 정도로 늘어날 것으로 예측된다. 이는 한국 경제가 기본적으로 향후에는 에너지원단위가 높은 제조업의 비중 점점 감소하지만, 상대적으로 에너지원단위가 낮은 서비스업을 비롯한 3차 산업의 비중 증가를 반영한 결과라 할 수 있다. 다만 고성장 시나리오에서는 인구 감소에도 불구하고, 전체적인 경제활동의 증가로 GDP 증가로 인한 산업 부문의 배출량으로 이어지는 추세를 반영한 것이라 할 수 있다.

2010년을 기준으로 환경부에서 발표한 온실가스 배출량은 657.1 Mt CO₂ eq.로 나타났으며, 본 연구 결과는 약 660 Mt CO₂ eq.로 나타났다. 또한 대기오염물질의 배출량은 과학원 자료에 의하면 약 3.68 Mt정도의 배출이 일어나고 있으며, 연구 결과는 약 3.81 Mt(BC 포함)으로 나타났다. 기존 발표된 연구 결과와 비교하면 본 연구의 주요 목적 중 하나인 배출량 인벤토리 작성 결과가 신뢰성을 확보할 수 있는 것으로 판단할 수 있다.

또한 환경부가 발표한 INDC에 따르면 2030년 온실가스 배출량은 850.6 Mt CO₂ eq.로 나타났다. 본 연구에서는 시나리오에 따라 약 802~811 Mt CO₂ eq.로 추정할 수 있으며, 이는 INDC에서 발표한 배출량과 약 5% 정도의 차이를 가지는 것으로 나타났다. 특히 INDC의 1안은 산업, 발전, 수송, 건물 등 각 부문별로 현재 시행중이거나, 계획 중인 감축정책을 강화하고, 비용효과적인 저감기술을 반영한 안으로 본 연구의 BAU 시나리오 설정과 매우 유사한 것으로 사료된다. 하지만 목표로 하고 있는 배출량은 약 726 Mt CO₂ eq.로, 이는 본 연구보다 약 10% 더 감축하는 것으로 나타났다. 이는 본 연구에서 고려하고 있는 정책보다 훨씬 강화된 정책을 도입한 것으로 추정된다. 또한 인구 변화보다는 GDP 변화에 더욱 초점을 맞추어 본 연구의 결과와 차이가 나는 것으로 추정할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 한국의 사회경제 변화를 전망하고, 그에 따른 장·단기 체류 기후변화 유발물질의 배출량을 산정하였다. 구체적으로는 2010년을 기준년도로 설정하였고, 과거 20년

자료를 인벤토리로 활용하여 2100년까지의 배출량을 추정하였다. 또한 미래 예측을 위해서 사회경제의 변화 전망과 감축정책의 계획/이행 등의 자료를 활용하였다.

본 연구의 의의는 한국의 미래 사회경제 변화를 고려하여 장·단기 체류 기후변화 유발물질의 배출량을 산정하는데 있다. 또한 최신 데이터를 사용하였으며, 장기 체류 기후변화 유발물질인 온실가스 배출량뿐만 아니라, 단기 체류 기후변화 유발물질인 대기오염물질의 배출량까지 추정하였다는 점에서 그 의의가 크다고 할 수 있다. 또한 본 연구의 결과는 현재 국립환경과학원에서 개발하여 운영 중인 기후-대기 통합모형의 정교화 과정에 필요한 기본 자료로 이용할 수 있을 것이다.

본 연구의 또 다른 의의는 그동안 이원화되어 관리되어 왔던 배출물질의 배출량을 동시에 추정하였고, 또한 에너지 수요량을 기반으로 미래 배출량까지 추정하는 것이다. 현재 온실가스와 대기오염물질은 각기 다른 기관에서 관리를 하고 있지만, 기후변화 유발물질 모두 에너지 사용에 기반을 두는 배출물질이라면 동시에 관리가 될 필요가 있을 것이다. 하지만 국가 데이터의 한계로 인하여 가정 부문의 서비스 수요 예측 시 온수를 난방에 포함시켜 서비스를 통합하여 산정한 점과 교통 부문에서 선박을 고려하지 못한 점, 교통 부문의 운송수단 분류 시 대중교통에서 지하철과 택시 등을 고려하지 못한 점은 본 연구의 한계점으로 볼 수 있을 것이다. 또한 에너지 수요량을 기반으로 배출량을 추정하는 방법의 한계점으로는 비에너지에 의한 배출량을 제대로 추정하지 못했다는 점이다. 이러한 사항은 향후 연구에서 보완되어야 할 것이다.

마지막으로 SLCP의 경우, 우리나라에서 발생하는 배출량보다 중국에서 발생하는 배출량의 영향을 더욱 받을 것이다(Lin *et al.*, 2014). 특히 한국을 비롯하여, 중국과 일본을 포함하는 아시아 지역은 전 지구적 CO₂ 배출에서 중요한 지역으로 인식되고 있다(Calvin *et al.*, 2012; Selvakkumaran and Limmeechokchai, 2015). 따라서 향후 한국을 비롯하여 중국, 일본과 함께 이러한 연구를 수행한다면 대기오염 물질의 확산 방지 대책뿐만 아니라, CO₂ 감축 대책 수립에도 용이할 것이다.

아울러 정책 수립의 우선순위를 정하기 위해서는 비용 관련된 연구가 추가적으로 진행되어야 할 것이다. 감축정책의 경우 큰 투자를 필요로 하는 경우가 많다(Neil *et al.*, 2005). 이 경우, 정책 결정에 있어서는 비용·편익분석이 더욱 중요해질 것이다(Kok *et al.*, 2011). 사회 경제적 비용 및 회피비용 분석 등을 통하여 기후변화 정책의 잠재적 편익을 추정하는 연구를 수행하여야 할 것이다.

사 사

이 논문은 환경부 “미래 동아시아의 사회경제 변화를 고려한 장단기 체류 기후변화 유발물질 배출 특성규명” 과제 및 “2015년도 BK21 플러스 사업(서울대학교 협동과정조경학 그린인프라 창조 인재 양성팀)”의 지원을 받아 수행된 연구임.

REFERENCES

- America's Cement Manufacturers. 2015. World Cement Consumption Forecast Report.
- Calvin K, Clarke L, Krey V, Blanford G, Jiang K, Kainuma M, Kriegler E, Luderer G, Shukla PR. 2012. The role of Asia in mitigating climate change: Results from the Asia modeling exercise. *Energy Economics* 34, Supplement 3(0):S251-S260.
- Choi CH. 2002. Development of commodity generation models using GDP. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 22(3D):351-362. (In Korean)
- Dalton M, O'Neill B, Prskawetz A, Jiang L, Pitkin J. 2008. Population aging and future carbon emissions in the United States. *Energy Economics* 30(2):642-675.
- Fenger J. 1999. Urban air quality. *Atmospheric Environment* 33(29):4877-4900.
- IPCC. 2014. Fifth assessment report.
- Jung JH, Kwon OY. 2014. An estimation of direct and indirect GHG-AP integrated emissions from energy sector in Seoul. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* 30(2):150-160. (In Korean)
- Kok R, Annema JA, Bert W. 2011. Cost-effectiveness of greenhouse gas mitigation in transport: A review of methodological approaches and their impact. *Energy Policy* 39(12):7776-7793.
- Korea Power Exchange. 2006. Survey on electricity consumption characteristics of home appliance. (In Korean)
- Korea Power Exchange. 2009. Survey on electricity consumption characteristics of home appliance in 2009. (In Korean)
- Korea Power Exchange. 2011. Survey on electricity consumption characteristics of home appliance in 2011. (In Korean)
- Lin J, Pan D, Davis Steven J, Zhang Q, He K, Wang C, Streets David G, Wuebbles Donald J, Guan D. 2014. China's international trade and air pollution in the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111(5):1736-1741.
- McKinnon AC, Woodburn A. 1996. Logistical restructuring and road freight traffic growth: An empirical assessment. *Transportation* 23(2):141-161.
- Ministry of Environment. 2015. Post-2020 greenhouse gas emissions reduction target.
- Ministry of Trade, Industry and Energy. 2013. The 6th basic plan for electricity supply and demand (2013-2027). (In Korean)
- National Institute of Environmental Research (NIER). 2013. The national handbook of air pollutant emissions calculation methods (III). (In Korean)
- National Institute of Environmental Research. 2013. Handbook of the estimation of national air pollutants emission of Korea(III). (In Korean)
- Neil Adger W, Arnell Nigel W, Tompkins Emma L. 2005. Successful adaptation to climate change across scales. *Global Environmental Change* 15(2):77-86.
- Promjiraprawat K, Winyuchakrit P, Limmeechokchai B, Masui T, Hanaoka T, Matsuoka Y. 2014. CO₂ mitigation potential and marginal abatement costs in Thai residential and building sectors. *Energy and Buildings* 80:631-639.
- Riahi K, Roehrl RA. 2000. Greenhouse gas emissions in a dynamics-as-usual scenario of economic and energy development. *Technological Forecasting and Social Change* 63(2-3):175-205.
- Selvakkumaran S, Limmeechokchai B. 2015. Low carbon society scenario analysis of transport sector of an emerging economy-The AIM/Enduse modelling approach. *Energy Policy* 81:199-214.
- Selvakkumaran S, Limmeechokchai B, Masui T, Hanaoka T, Matsuoka Y. 2014. An explorative analysis of CO₂ emissions in Thai industry sector under low carbon scenario towards 2050. *Energy Procedia* 52(0):260-270.
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) INDC (Intended Nationally Determined Contributions) homepage (http://unfccc.int/focus/indc_portal/items/8766.php).
- Yoo SP, Hwang JW. 2015. Effects of urban characteristics on CO₂ emission by region. *Journal of the Korea Planners Association* 50(2):197-210. (In Korean)