

논문

GAINS-Korea를 활용한 온실가스 및 대기오염물질 동시 저감을 위한 정책 효과 분석 연구

A Study on Analysis of Integrated Policies for Simultaneous Reduction of GHG and Air Pollutants Using GAINS-Korea

성미애, 진형아*, 임재현, 여소영, 안영환¹⁾

국립환경과학원 기후대기연구부 지구환경연구과

¹⁾숙명여자대학교 기초교양대학

접수일 2019년 7월 1일
수정일 2019년 8월 6일
채택일 2019년 8월 22일

Received 1 July 2019
Revised 6 August 2019
Accepted 22 August 2019

*Corresponding author

Tel : +82-(0)32-560-7302

E-mail : hajin608@korea.kr

Miae Seong, Hyungah Jin*, Jaehyun Lim, Soyoung Yeo, Young-Hwan Ahn¹⁾

Global Environment Research Division, Climate and Air Quality Research Department,

National Institute of Environmental Research, Incheon, Republic of Korea

¹⁾Sookmyung College of General Education, Sookmyung Women's University, Seoul, Republic of Korea

Abstract In keeping with the announcement and implementation of national policies on the reduction of greenhouse gases (GHGs) and particular matter (PM), policy considerations are required for simultaneous reduction of GHGs and air pollutants. In the present study, integrated management of climate change and air quality policy scenarios SRI (Scenario of Reduction Indicator) and SMR (Scenario of Maximum Reduction) were constructed based on national plans, and policy effects were analyzed for targeted regions of Seoul, Gyeonggi (Gyeonggi Province), and Chungnam (South Chungcheong Province). The results showed reductions in CO₂ emissions by 13~22% relative to BAU scenario for 2030 SMR, while synergistic reductions in CO, NO_x, PM_{2.5}, and SO₂ by 11~15%, 11~19%, 6~8%, and 4~17%, respectively, were also observed. Majority of the industrial sectors currently use crude oil and bituminous coal. However, under the policy on "alternatives for raw materials and fuels with low emissions of GHGs", they are switching to renewable energy sources such as liquid nitrogen gas (LNG) and biofuels. As a consequence, the emissions of GHGs and air pollutants from these industries show a contradictory trend; the former decrease, while the latter record an increase. In particular, Chungnam, which consumes high quantities of soft coal, should carefully review this policy prior to implementing it. In addition, the considerable reduction in primary PM_{2.5} was observed owing to the replacement of older vehicles with newer ones in the transportation sector. Therefore, it can be stated that the policies applicable to Seoul, Gyeonggi, that experience high level of pollutants from the transportation sector, should be strengthened.

Key words: Greenhouse gas, Air pollutant, Integrated policy, Co-benefits, GAINS-Korea

1. 서론

기후변화의 주요 요인으로 화석연료 사용 증가 등에 의한 온실가스가 언급되는 가운데 (IPCC, 2014), 대기오염은 장기적으로 대기과 기후 간 상호작용에 문제를 일으켜 기온상승과 강수량 증가 등 기후변화

에 영향을 줄 수 있는 것으로 알려져 있다 (Christensen *et al.*, 2007). 전 지구적 규모의 기후변화와 지역적 규모의 대기오염 문제는 별개로 연구되고 다루어지고 있지만 실제로 화석연료 연소 과정에서 동시에 배출되는 온실가스와 대기오염물질은 서로 밀접한 관련이 있다. 기후변화 완화 정책 시행으로 온실

가스가 감소되면 대기오염물질이 감소되고 이는 잠재적으로 건강에 긍정적인 영향을 줄 수 있는 것이다 (Dulal *et al.*, 2013; Bollen *et al.*, 2009).

‘교토의정서’ 만료를 앞두고 ‘파리협정’이 새로이 채택되면서 국제적으로 기후변화 대응을 위한 온실가스 감축 노력이 더 강화되고 있다. 우리나라는 감축의무가 없었던 2009년에 이미 2020년 BAU 대비 30%로 감축목표를 설정했으며 최근 신기후체제에 발맞추어 감축목표를 2030년 BAU 대비 37%로 강화하는 등의 계획을 수립하였다 (Prime Minister’s Secretariat, 2016). 또한 감축목표의 실효성을 높이기 위해 추가적으로 2018년 7월 ‘2030년 국가 온실가스 감축목표 달성을 위한 기본 로드맵 수정안’을 마련하여 노력 중에 있다.

온실가스 배출을 통제하면 동시에 대기오염물질이 감소하며 (Jiang *et al.*, 2013; He *et al.*, 2010), 사회·경제적으로 에너지와 비용 측면에서 긍정적인 영향을 주는 등 부가편익(co-benefits)을 기대할 수 있다 (Dulal and Akbar, 2013; MOEJ, 2008; IPCC, 2007). 국내외 문헌 분석을 통해 기후·대기 통합 관리 정책은 온실가스와 대기오염물질 저감 정책의 개별 수행 시 편익을 초과하여 그 효과와 효율이 높은 것이 입증되었고, 통합관리전략 수립 및 이행을 위해서는 편익을 분석할 수 있는 모형을 활용한 정량화가 필요한 것으로 확인되었다 (Song *et al.*, 2011).

GAINS (Greenhouse Gas - Air pollution Interaction and Synergies)는 기후·대기 통합평가 모델로서 유럽 및 아시아 내 많은 연구에 이용되고 있다 (Ciucci *et al.*, 2016; Dholakia *et al.*, 2013; Kanada *et al.*, 2013; Liu *et al.* 2013; Rafaj *et al.*, 2012; Amann *et al.*, 2011; Amann *et al.*, 2008b). 중국은 GAINS-China를 이용하여 양쯔강 지역 산업부문 정책의 실효성을 검토하고 대기오염 제어와 온실가스 저감은 동시에 이루어져야 더 효율적이고 경제적이며 정책결정 과정에서 부가편익 효과를 고려하는 것이 매우 중요함을 언급하였다 (Zheng *et al.*, 2016). 또한 남아프리카에서는 GAINS를 이용한 기후변화 완화, 대기오염관리 정책

검토를 통해 상승(synergies) 효과와 온실가스 감축 정책이 SO₂, NO_x, PM_{2.5} 감소에 영향을 나타냄을 확인하였다 (Henneman *et al.*, 2016; McCollum *et al.*, 2013; Rao *et al.*, 2013; Bollen *et al.*, 2010). 한편으로 온실가스 감축 및 대기오염저감 대책 시행에 따른 높은 에너지세로 가계 부담이 증가하고 빈곤가정에서의 값싼 연료 사용으로 인한 지역적 대기오염이 더 심해질 수 있는 상반(trade-offs) 효과도 동시에 확인하였다 (Klausbruckner *et al.*, 2016).

최근 온실가스 및 미세먼지 정책 등이 발표·시행되고 있는 상황에서 온실가스와 대기오염물질을 동시에 저감하기 위한 정책적 고려가 필요할 것으로 판단된다. 이에 따라 온실가스 및 대기오염물질 통합관리의 중요성을 인식하여 국립환경과학원은 매년 기후·대기 통합배출량을 산정하고 있으며, 이를 기반으로 기후·대기 통합평가 모델인 GAINS-Korea를 건국대학교, IIASA와 함께 개발하여 운영 중에 있다. 본 연구에서는 GAINS-Korea를 활용하여 온실가스 및 대기오염 정책 시행 시 예상되는 상승(synergies), 상반(trade-offs) 효과를 분석하고 그 결과에 대한 시사점을 논의하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 GAINS-Korea

GAINS-Korea는 IIASA (International Institute for Applied System Analysis)가 개발한 GAINS (Greenhouse gas-Air pollution Interactions and Synergies)를 근간으로 하는 한국형 온실가스 및 대기오염물질 배출량 기반의 통합평가 모델이다 (Ahn *et al.*, 2019; NIER, 2015; NIER, 2014). GAINS는 온실가스(CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFCs, SF₆)와 대기오염물질(SO₂, NO_x, PM, NH₃, VOC) 간의 상호작용과 이러한 상호작용이 보건, 식생, 기후변화에 미치는 영향을 정량화한 모델이다. GAINS-Korea는 국가 단위뿐만 아니라 지역 단위 정책 기획 단계에서도 활용할 수 있도록

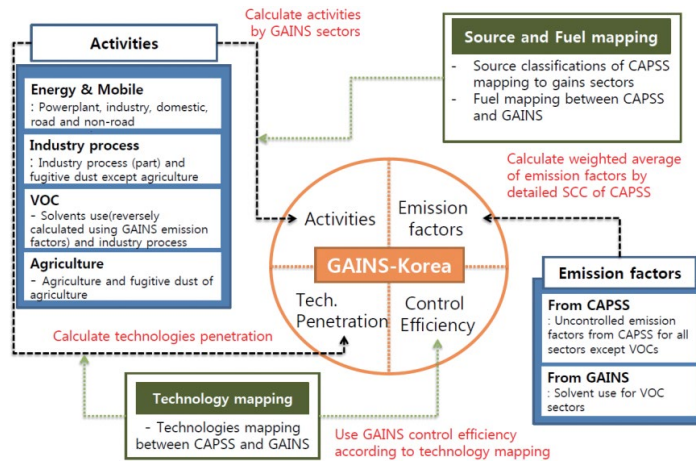


Fig. 1. Flowchart of GAINS-Korea to build base year emissions (NIER, 2014).

17개 지자체로 구분되어 있으며 2010년을 기준연도, 2030년을 목표연도로 구성하였다.

GAINS-Korea 배출량 산정방법은 기본적으로 GAINS 방법론과 일치한다(Amann *et al.*, 2011). 배출량($E_{i,p}$)은 eq. 1과 같이 지역별(i) 단위 활동도(A_k), 배출계수($ef_{i,k,m,p}$), 배출 제어 기술 효율($x_{i,k,m,p}$) 및 적용 대책(m)들을 활용하여 각 물질별(p) 현재와 미래 배출량($E_{i,p}$)을 산정한다.

$$E_{i,p} = \sum_k \sum_m A_{i,k} ef_{i,k,m,p} x_{i,k,m,p} \quad (\text{eq. 1})$$

이러한 배출량 산정은 가장 보편적인 방법이며 GAINS 활동도 자료들에는 추가적으로 에너지 사용량, 암모니아 배출원, VOC 배출원 자료와 거시경제 파라미터 등이 있다. 또한 배출기술 효율 관련 ‘Control Strategies’와 배출계수 등을 포함하고 있는 ‘Regional parameters’ 등의 자료들을 토대로 배출량 산정이 이루어진다.

GAINS-Korea 내 온실가스 및 대기오염물질 배출량은 SEMS (Stack Emission Management System), 국내 150개 유관기관의 300여 개 활동도, 각 배출원별 배출계수 및 방지효율 등을 활용하여 기준연도 배출량을 산정한 CAPSS (Clean Air Policy Support System)와 GHG-CAPSS (GreenHouse Gas-Clean Air

Policy Support System) 자료를 이용하였다(NIER, 2013; NIER, 2011). 2030년 목표연도 배출량(BAU)은 국가 단위의 에너지 수요 전방 자료를 지자체 수준으로 분할한 것을 활용하여 산정하였으며, 2010년 기술수준이 2030년까지 지속적으로 유지된다는 가정 하에 8차 전력수급계획을 토대로 각종 정부 통계 및 미래 전망 사회경제지표들을 적용하였다(표 1, 그림 1).

2.2 정책 시나리오 구성

정책은 ‘온실가스 감축 로드맵 수정안’과 ‘미세먼지 관리 종합대책’을 토대로 마련한 기후·대기 통합 정책을 발전(난방포함), 산업, 가정상업, 수송 부문으로 구분하여 시나리오화하였다. ‘온실가스 감축 로드맵 수정안’은 2030년 단일 감축목표만 담고 있어 활용에 제약이 많았던 기존 로드맵에 비해 에너지 전환, 산업, 건물, 수송 등 배출원별 감축량 및 이행계획을 구체적으로 제시하고 있다. 에너지 수요관리 강화, 에너지 효율화 추진, 저탄소 산업 육성 등으로 온실가스 감축목표 중 국내 감축량을 25.7%에서 32.5%로 이전 로드맵보다 상향 조정하였다(MOE, 2018). ‘미세먼지 관리 종합대책’은 저감 목표를 국내 배출량 기준 30%로 설정하여 미세먼지를 지역 통합적인 관점에서 관리하기 위한 계획을 제시하고 있다. 기존 수도권 및

Table 1. Configuration outlook data of BAU scenario.

Sector	Forecast data of national level	Forecast data of local government level	
Power & Heat	8 th power supply plan	To shut down existing power plants to construct new power plants on power supply plan	
Industry	2 nd energy master plan	Energy consumption per GRDP	
Residential/Commercial		Energy consumption per capita	
Transportation		Road Rail, Aviation, Sea	Energy consumption per car Energy consumption per capita

Table 2. Reduction indicators by policies applied to reduction scenarios.

Sector	No.	Policies	Applied reduction indicators by 2030	
			SRI	SMR
Power & Heat	1	Strengthening environment-friendly power	Renewable energy generation 20%	
Industry	2	Supplying FEMS and improving energy efficiency	Introduction rate 50%	Introduction rate 80%
	3	Alternatives for raw materials and fuels with low emissions of GHGs	Heavy oil · bituminous coal → LNG · biomass fuel replacement, 5%	Heavy oil · bituminous coal → LNG · biomass fuel replacement, 10%
Residential/Commercial	4	Introducing passive and zero energy technology to new bld.	Mandating zero energy bld. in public, 8.5%	Mandating zero energy bld. in public, 18.5%
	5	Introducing BEMS	Introduction rate 50%	Introduction rate 70%
	6	Replacing with LED light	Supply rate 100% in private and public sector	Supply rate 100% in private and public sector
Transportation	7	Expansion supplying environment-friendly vehicles	Replace existing old gasoline cars with eco-friendly one, 50%	Replace existing old gasoline cars with eco-friendly one, 60%
	8	Expansion low pollution for old diesel vehicles	Replace existing old diesel cars with eco-friendly one, 15~19%	Replace existing old diesel cars with eco-friendly one, 25~29%
	9	Expansion supplying LPG vehicles	Replace existing old LPG cars with eco-friendly one, 15%	Replace existing old LPG cars with eco-friendly one, 25%
	10	Expansion supplying CNG bus	Replace existing old diesel bus with eco-friendly one, 8~33%	Replace existing old diesel bus with eco-friendly one, 18~43%

대도시 중심 관리를 벗어나 전국으로 관리 범위를 확대하고 나아가 국제협력을 통해 실질적인 저감을 꾀하여 인체 위해성을 최우선적으로 고려하는 계획을 포함하고 있다(MOE, 2017).

시나리오는 Scenario of Reduction Indicator (이하 SRI)와 Scenario of Maximum Reduction (이하 SMR)으로 작성하였다(표 2). SRI는 기존 국가계획에 제시

되어 있는 부문별 감축지표를 반영하였고 SMR은 국내 온실가스 감축목표 달성 가능성을 높이기 위해 SRI보다 감축지표를 높이되 실현가능한 범위 내로 설정하였다. 부문별 감축지표는 공표된 자료들을 이용하여 GAINS-Korea에 적용 가능한 정책들을 선별하여 최대한 활용하였다. 예를 들어 산업부문 'FEMS 보급 및 에너지효율 향상'의 감축지표는 '18년 기준 시

Table 3. Sectoral CO₂ decrease results for Seoul, Gyeonggi and Chungnam reduction scenarios.
(unit: BAU-Mt, SRI:SMR -%)

Sector	Scenario	Seoul	Gyeonggi	Chungnam
Power & Heat	BAU	10	87	173
	SRI, SMR	20	20	20
Industry	BAU	1	8	39
	SRI	0	1	6
	SMR	5	23	33
Residential/ Commercial	BAU	11	11	2
	SRI	10	10	14
	SMR	26	22	25
Transportation	BAU	10	27	6
	SRI	3	14	4
	SMR	3	16	5
Total	BAU	33	135	221
	SRI	7	17	17
	SMR	13	19	22

홍시 FEMS (Factory Energy Management System) 보급률 30% (Siheung-si, 2018) 및 국가차원에서 에너지 효율 강화 계획(MOTIE, 2019)을 참고하여 SRI 목표연도 감축지표를 50%로 설정하였고 SMR 감축지표는 국가 목표 달성을 위한 이상값으로서 80%로 설정하였다. ‘온실가스 저배출 연료 및 원료 대체’의 감축지표는 온실가스 감축 로드맵 수정안의 감축량 값을 환산하여 적용하였다. 발전부문 정책의 감축지표는 기존 국가계획의 신재생에너지 발전량을 적용하였고, 가정상업부문 감축지표는 기존 건물 관련 계획들의 도입률 및 보급률을 적용하거나 지자체별 30년 이상 노후 주거 건축물 평균비율(MOLIT, 2016)을 활용하였다. 수송부문은 타 부문보다 최신 기술 보급률이 빠른 것을 감안하여 각 지자체별 2010년 기준 연료별 차량의 보급률을 활용한 값을 감축지표로 적용하였다. 구성된 시나리오의 분석 대상지역은 기후·대기 통합 정책 적용 시의 효과 분석을 위한 사례연구 차원에서 2013년 기준 GHG-CAPSS의 지역별 배출특성을 고려하여 가정상업 부문이 주 배출원인 서울(Seoul), 수송부문이 주 배출원인 경기(Gyeonggi), 발전부문이 주 배출원인 충남(Chungnam)을 선정하였다(NIER, 2017).

3. 연구 결과

3.1 온실가스 정책 적용에 따른 시나리오별 분석 결과

GAINS 모델의 특수성인 온실가스 감축에 따른 부가적인 대기오염물질 저감 정도를 분석하기 위하여 에너지 전환 관련 대책인 표 2의 1~7을 온실가스 정책으로 구분하여 적용하였다. 온실가스 정책 적용에 따른 2030년 CO₂ 배출량은 BAU 대비 SRI 기준 7~17%, SMR 기준 13~22% 감소하였으며 지역별로는 각각 서울 7~13%, 경기 17~19%, 충남은 17~22% 감소하였다. SMR 기준으로 서울은 가정상업 및 발전부문 감축률이 26%, 20%로 높았고 경기는 산업, 가정상업 및 발전부문 감축률이 각각 23%, 22%, 20%로 높았으며 충남은 산업, 가정상업 및 발전부문 감축률이 33%, 25%, 20%로 높았다(표 3). 이는 지역별로 주요 배출원 및 에너지별 사용 비중이 상이함에 따른 결과이다. 가정상업부문은 LED 조명 보급률이 100%에 달하는 만큼 감축률이 가장 높게 분석되었다. 산업부문은 FEMS 및 에너지효율 향상으로 인한 CO₂ 감축률이 온실가스 저배출 연료 및 원료 대체보다 더 높았으며, 발전부문은 국가계획에 따른 신재생에너지 발전 계획만큼 감축되는 것으로 분석되었다. 수송부문은 친환경차 보급으로 인한 감축률이 높았으며 서울, 충남에 비해 경기의 감축률이 높았다. 지역별 CO₂ 최대 감축률은 서울, 경기, 충남 각각 13%, 19%, 22%로 국가 온실가스 감축목표에 조금 못 미치는 실정이나 정량화 가능한 일부 정책들만을 조합한 시나리오 결과인 것을 참고할 때 국가 감축목표(32.5%) 달성 가능성을 어느 정도 확인할 수 있었다. 다만 추가적인 감축목표 달성을 위해서는 시나리오에 활용되지 않은 정성적 정책들의 정량적 구체화가 요구되며 향후 좀 더 강도 높은 정책 시행이 요구된다.

온실가스 정책 적용 시 CO₂ 감축과 동시에 2030년 BAU 대비 SRI 기준으로 CO 9~11%, NO_x 7~12%, PM_{2.5} 1~2%, SO₂ 5~11%가 감소하였고, SMR 기준으로 CO 10~14%, NO_x 9~14%, PM_{2.5} 1~3%, SO₂

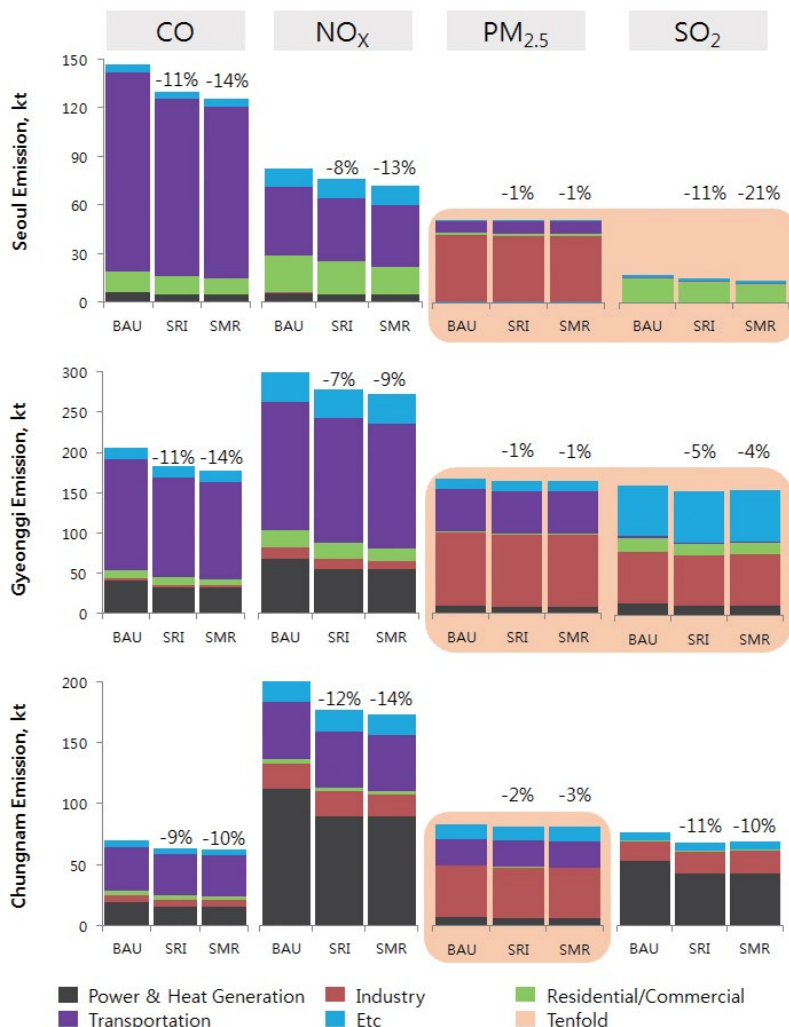


Fig. 2. Results of CO, NO_x, PM_{2.5} and SO₂ reduction due to the implementation of the greenhouse gas reduction policies.

4~21%가 감소하였다. 서울은 CO 11~14%, NO_x 8~13%, PM_{2.5} 1%, SO₂ 11~21% 감소하였다. 경기도는 CO 11~14%, NO_x 7~9%, PM_{2.5} 1%, SO₂ 4~5% 감소하였으며 충남은 CO 9~10%, NO_x 12~14%, PM_{2.5} 2~3%, SO₂ 10~11% 감소하였다(그림 2). 온실가스 정책 적용으로 인해 CO₂ 감축에 따른 CO, NO_x, SO₂의 동시 저감 효과는 두드러졌으나 PM_{2.5} 저감 효과는 미미했다. 이는 수송부문 배출비중이 높은 서울, 경기에서 더 뚜렷하였다. SO₂의 경우 경기도와 충남에 한해 감축지표가 큰 SMR에서 저감률이 더 낮았다.

이는 제조공정·자가발전의 연료인 중유·유연탄을 LNG와 바이오연료로 대체하는 산업부문 ‘온실가스 저배출 연료 및 원료 대체’ 정책의 상반(trade-offs) 효과 때문인 것으로 분석되었으며 구체적인 설명은 기후·대기 통합 정책 적용 결과에 기술하였다.

3.2 기후·대기 통합 정책 적용에 따른 시나리오별 분석 결과

본 연구에서 구성한 기후·대기 통합 정책 적용 시 결과는 2030년 BAU 대비 SRI 기준 CO₂ 7~17%, CO

Table 4. Sectoral and material increase and decrease results for Seoul, Gyeonggi and Chungnam reduction scenarios.(unit: BAU-CO₂ Mt, CO·NO_x·PM_{2.5}·SO₂ kt, SRI·SMR-%)

		Seoul					Gyeonggi					Chungnam				
		CO ₂	CO	NO _x	PM _{2.5}	SO ₂	CO ₂	CO	NO _x	PM _{2.5}	SO ₂	CO ₂	CO	NO _x	PM _{2.5}	SO ₂
Power & Heat	BAU	10	6	6	0.1	0.04	87	41	68	1.0	1.5	173	19	111	0.7	53
	SRI, SMR		20			19		20			19		20			19
Industry	BAU	1	0.1	0.3	4.3	0.01	8	3	13	9.0	6.5	39	6	21	4.1	16
	SRI	0	+1	1	0	0	1	+1	1	0	4	6	+11	1	0	+11
	SMR	5	22	23	0	33	23	27	+3	0	0	33	+8	16	1	+19
Residential/Commercial	BAU	11	13	23	0.1	1.5	11	10	22	0.2	1.7	2	4	4	0.1	1
	SRI	10	12	10	10	13	10	12	11	10	12	14	16	14	16	15
	SMR	26	25	26	26	24	22	22	23	22	22	25	25	25	25	24
Transportation	BAU	10	123	42	0.8	0.1	27	138	158	5.2	0.2	6	36	47	2.2	0.04
	SRI	3	12	15	0	0	14	11	6	0	0	4	7	5	13	0
	SMR	3	14	20	33	0	16	13	9	20	0	5	9	7	15	0
Total	BAU	33	147	82	5.4	1.8	135	206	298	17	16	221	70	200	8.3	76
	SRI	7	12	12	1	10	17	12	9	1	5	17	9	12	5	11
	SMR	13	15	19	6	17	19	14	11	8	4	22	11	15	6	10

9~12%, NO_x 9~12%, PM_{2.5} 1~5%, SO₂ 5~11% 감소하였고, SMR 기준 CO₂ 13~22%, CO 11~15%, NO_x 11~19%, PM_{2.5} 6~8%, SO₂ 4~17% 감소하였다(표 4).

서울의 배출량은 2030년 BAU 대비 각각 CO₂ 7~13%, CO 12~15%, NO_x 12~19%, PM_{2.5} 1~6%, SO₂ 10~17% 감소하였다. 온실가스 정책만을 적용했을 때에 비해 수송부문 감축효과가 더해져 대기오염물질 총 감축률은 더 높게 분석되었다.

경기는 각각 CO₂ 17~19%, CO 12~14%, NO_x 9~11%, PM_{2.5} 1~8% 감소하였는데 서울과 마찬가지로 수송부문의 감축효과 추가로 대기오염물질 총 감축률이 더 높게 분석되었다. SO₂는 온실가스 정책 적용 결과에서 언급되었던 바와 같이 산업부문 ‘온실가스 저배출 연료 및 원료로의 대체’ 정책의 상반(trade-offs) 효과로 SMR에서 배출량이 오히려 증가한다. 이 정책은 CO 배출에도 동일한 영향을 미치나 ‘FEMS 보급 및 에너지효율 향상’ 저감률이 ‘온실가스 저배출 연료 및 원료로의 대체’ 저감률보다 높아 SMR 총 감축률은 감소하는 것으로 분석되었다.

충남의 배출량은 CO₂ 17~22%, CO 9~11%, NO_x 12~15%, PM_{2.5} 5~6%가 감소하였으며 서울, 경기와 마찬가지로 수송부문의 감축효과가 더해짐에 따라

대기오염물질 총 감축률이 더 높아졌다. 충남도 경기와 같이 ‘온실가스 저배출 연료 및 원료로의 대체’ 정책의 상반(trade-offs) 효과로 SMR 기준 CO₂ 감소(33%)에는 효과적이었으나 대기오염물질, 특히 SO₂와 CO는 19%, 8% 증가하였다. 발전부문에서는 SRF(Solid Refuse Fuel) 관리를 강화함으로써 이러한 현상을 완화하려는 노력을 미세먼지 저감 차원에서 이미 시행 중이나 ‘신재생에너지 공급의무화’에 따라 SRF, 펠릿 등의 사용이 급증하고 있어 정책 도입 시 고려가 필요할 것으로 판단된다. SO₂ 배출 증가 현상은 유연탄 사용량이 더 많은 충남에서 두드러졌으며 CO 총 감축률 결과 분석은 경기 지역과 동일하다.

PM_{2.5} 저감률은 SMR 기준 수송부문에서 서울 33%, 경기 20%, 충남 15%로 다른 오염물질보다 상대적으로 높게 나타났다. 온실가스 정책 적용 시 1차 PM_{2.5} 저감 효과는 미미했으나 수송부문 정책이 추가된 기후·대기 통합 정책 적용 시 저감 효과는 두드러졌다. 기존 노후 차량을 신차로 대체함에 따른 감축효과가 큰 결과를 바탕으로 최근 논란이 되고 있는 미세먼지 관리를 위해서는 관련 정책 강화가 필요함을 알 수 있다. 효과적인 PM_{2.5} 저감을 위해서는 수송부문 신차 도입이 필연적이나 이에 따르는 초기비용

부담도 고려해야 한다. Kang and Lee (2019)에 따르면 서울시내 택시 기준 LPG 및 전기 차량의 초기 구매 비용 비교 결과, 전기차 도입을 위해서는 2018년부터 2026년까지 매년 LPG 차량 기준의 2배에 가까운 초기비용이 필요한 것으로 예측되었다. 다만 운영비용 측면에서는 전기차의 연료비가 LPG 차량의 12%에 불과하고 앞으로의 전기차 배터리 비용 부담이 낮아질 것으로 유추해 볼 때 PM 관리를 위한 초기 신차 도입비용의 부담은 운영비 및 오염물질 관리비용 저감 등으로 상쇄할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 GAINS-Korea를 이용하여 온실가스 및 대기오염 정책을 활용한 기후·대기 통합 정책 시행 시 발생하는 상승(synergies), 상반(trade-offs) 효과를 분석하고 그 시사점을 논의하였다.

1. 산업부문 ‘온실가스 저배출 연료 및 원료 대체’ 정책은 온실가스 배출을 줄이기 위해 기존의 유연탄을 신재생에너지·바이오연료로 대체하는 것으로 국내에서는 주로 바이오연료로 폐기물, SRF, 펠릿을 사용하고 있다. 이는 온실가스 감축에는 효과적이거나 대기오염물질의 증가를 초래할 수 있다. 발전과 산업부분의 온실가스 및 대기오염물질 배출 비중이 높은 충남은 국가 에너지 전환 정책으로 온실가스 감축 목표 달성 가능성이 높으나 유연탄을 폐기물, SRF, 펠릿으로 대체함에 따라 대기오염물질 배출은 증가할 수 있으므로 해당 정책 도입 시 신중히 검토할 필요가 있다.

2. 수송부문 노후 차량을 신차로 대체함에 따른 1차 PM_{2.5} 감소 효과가 크다는 것을 감안하면 수송 배출원 비중이 높은 서울, 경기 지역은 친환경차 위주의 신차 보급 정책을 지금보다 더욱 강화하고 나아가 차량등급제를 통한 노후 차량 진입금지를 확대할 필요가 있다.

3. 정책 시나리오 작성에 따른 서울, 경기, 충남의

온실가스 감축률이 각각 13%, 19%, 22%로 분석되었다. 현재 서울은 2005년 대비 2030년 40% 감축이 목표이나 2014년 온실가스 배출량은 2005년 대비 4.7% 감축에 불과하다. 기후변화 완화계획이 4개 부분(에너지 절약, 효율화, 생산, 자원순환)으로 구성되어 있으나 에너지 절약 부분의 2030년 18.3% 절감 목표만 수립했을 뿐 그 외 목표치는 미설정 상태이다. 또한 경기는 수송부문의 온실가스 감축률이 높은 반면에 대기오염물질 배출 비중이 높아 두 지역 모두 현재 국가 정책보다 더 적극적이며 엄격한 계획이 수립, 이행되어야 한다.

공표된 자료들을 이용하여 GAINS-Korea에 적용 가능한 정책들을 선별하고, 활용함으로써 온실가스와 대기오염물질의 동시 저감 가능성을 확인할 수 있다. 지자체별 특성을 모두 고려할 수는 없었으나 국가 감축지표와 일부 지자체 감축지표를 활용하여 실현 가능한 시나리오를 작성하였다. 본 연구결과를 근거자료로 활용하여 향후 지자체 특성에 맞는 감축 가이드를 설정할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원(NIER-2018-01-01-019)의 지원을 받아 수행하였습니다.

References

- Ahn, Y.-H., Woo, J.-H., Wagner, F., Yoo, S.J. (2019) Downscaled energy demand projection at the local level using the Iterative Proportional Fitting procedure, *Applied Energy*, 238, 384-400, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.051>.
- Amann, M., Bertok, I., Broken, J., Chambers, A., Cofala, J., Denstener, F., Heyes, C., Hoglund, L., Klimont, Z., Purohit, P., Rafaj, P., Schöpp, W., Teixeira, E., Toth, G., Wagner, F., Winiwarter, W. (2008a) A tool to combat air pollu-

- tion and climate change simultaneously, GAINS Asia Methodology, IIASA.
- Amann, M., Bertok, I., Borken-Kleefeld, J., Cofala, J., Heyes, C., Höglund-Isaksson, L., Klimont, Z., Nguyen, B., Posch, M., Rafaj, P., Sandler, R., Schöpp, W., Wagner, F., Winiwarter, W. (2011) Cost-effective control of air quality and greenhouse gases in Europe: Modeling and policy applications, *Environmental Modeling & Software*, 26, 1489-1501, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.07.012>.
- Amann, M., Kejun, J., Jiming, H., Wang, S., Wei, W., Jia, X., Chuying, Z., Bertok, I., Borken, J., Cofala, J., Heyes, C., Hoglund, L., Klimont, Z., Purohit, P., Rafaj, P., Schöpp, W., Toth, G., Wagner, F., Winiwarter, W. (2008b) GAINS-Asia: Scenarios for Cost-effective Control of Air Pollution and Greenhouse Gases in China.
- Bollen, J., Guay, B., Jamet, S., Corfee-Morlot, J. (2009) "Co-benefits of Climate Change Mitigation Policies: Literature Review and New Results", OECD Economics Department Working Papers, No. 693, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/224388684356>.
- Bollen, J., Hers, S., van der Zwaan, B. (2010) An integrated assessment of climate change, air pollution, and energy security policy, *Energy Policy*, 38, 4021-4030, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.03.026>.
- Christensen, J.H., Hewitson, B., Busuioc, A., Chen, A., Gao, X., Held, I., Jones, R., Kolli, R.K., Kwon, W.-T., Laprise, R., Magaña Rueda, V., Mearns, L., Menéndez, C.G., Räisänen, J., Rinke, A., Sarr, A., Whetton, P. (2007) Regional Climate Projections, In: *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.
- Ciucci, A., Wagner, F., Sander, R., Ciancarella, L., Zanini, G., Schöpp, W. (2016) Cost-effective reductions of PM_{2.5} concentrations and exposure in Italy, *Atmospheric Environment*, 140, 84-93, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.05.049>.
- Dholakia, H.H., Purohit, P., Rao, S., Garg, A. (2013) Impact of current policies on future air quality and health outcomes in Delhi, India, *Atmospheric Environment*, 75, 241-248, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.04.052>.
- Dulal, H.B., Akbar, S. (2013) Greenhouse gas emission reduction options for cities: finding the 'coincidence of agendas' between local priorities and climate change mitigation objectives, *Habitat International*, 38, 100-105, <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2012.05.001>.
- He, K., Lei, Y., Pan, X., Zhang, Y., Zhang, Q., Chen, D. (2010) Co-benefits from energy policies in China, *Energy*, 35, 4265-4272, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.07.021>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014) *Climate Change 2014: IPCC Fifth Assessment Synthesis Report*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007) *Fourth Assessment Report: Climate Change 2007: Working Group III: Mitigation of Climate Change*. http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg3/en/ch7s7-10.html (accessed 16.03.12.).
- Jiang, P., Chen, Y., Geng, Y., Dong, W., Xue, B., Xu, B., Li, W. (2013) Analysis of the co-benefits of climate change mitigation and air pollution reduction in China, *Journal of Cleaner Production*, 58, 130-137, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.042>.
- Kanada, M., Dong, L., Fujita, T., Miniru, F., Inoue, T., Hirano, Y., Togawa, T., Geng, Y. (2013) Regional disparity and cost-effective SO₂ pollution control in China: a case study in 5 mega-cities, *Energy Policy*, 61, 1322-1331, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.105>.
- Kang, S.-C., Lee, H. (2019) Economic appraisal of implementing electric vehicle taxis in Seoul, *Research in Transportation Economics*, <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2018.11.007>.
- Klausbrückner, C., Annegarn, H., Henneman, L., Rafaj, P. (2016) A policy review of synergies and trade-offs in South African climate change mitigation and air pollution control strategies, *Environmental Science & Policy*, 57, 70-78, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.12.001>.
- Liu, F. (2013) Integrating mitigation of air pollutants and greenhouse gases in Chinese cities: development of GAINS-city model for Beijing, *Journal of Cleaner Production*, 58, 25-33, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.03.024>.
- McCollum, D., Krey, V., Riahi, K., Kolp, P., Grubler, A., Makowski, M., Nakicenovic, N. (2013). Climate policies can help resolve energy security and air pollution challenges, *Climatic Change*, 119, 479-494, <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0710-y>.
- Ministry of Environment (MOE) (2017) *Comprehensive measure for Particulate Matter management*.
- Ministry of Environment (MOE) (2018) *The amendment plan of 2030 greenhouse gas reduction roadmap and confir-*

- mation of emission quota allocation, press release.
- Ministry of Environmental of Japan (MOEJ) (2008) Mitigation-, Climate Change. Co-benefits Approach to Climate Change and CDM in Developing Countries. <http://www.kyomecha.org/e/pdf/co-benefits4.pdf> (accessed 12.03.12.).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2016) Statistics of 2015 building status, press release.
- Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) (2019) Third Korea energy master plan.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2011) Handbook of estimation methods for GHG-CAPSS emissions.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2013) Handbook of estimation methods for national air pollutant emissions (III), NIER-GP2013-097.
- National Institute of Environmental Research (2014) Development of the air pollution interactions and synergies model for Korea (GAINS-Korea) I, NIER-SP2014-073.
- National Institute of Environmental Research (2015) Development of the air pollution interactions and synergies model for Korea (GAINS-Korea) II, NIER-SP2015-129.
- National Institute of Environmental Research (2017) A study on integrated policies for simultaneous reduction of climate change and air pollutants (I), NIER-RP2017-217.
- Prime Minister's Secretariat (2016.12.6.) Suggestion of mid- to long- term strategies and policy direction for effective climate change response at the national level following Paris Agreement, press release.
- Rafaj, P., Schöpp, W., Russ, P., Heyes, C., Amann, M. (2013) Co-benefits of Post-2012 global climate mitigation policies, Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 18(6), 801-824, <https://doi.org/10.1007/s11027-012-9390-6>.
- Rao, S., Pachauri, S., Dentener, F., Kinney, P., Klimont, Z., Riahi, K., Schoepp, W. (2013). Better air for better health: forging synergies in policies for energy access, climate change and air pollution. Global Environmental Change, 23, 1122-1130, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2013.05.003>.
- Siheung-si (2018.8) Technology innovation briefing for smart city national strategy project business creation, ppt.
- Song, C.-K., Lee, S.J., Yoon, J.-S. (2011) A review of the integrated strategy for climate change and air pollution management, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 27(6), 805-818, <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2011.27.6.805>.
- Zheng, J., Jiang, P., Qiao, W., Zhu, Y., Kennedy, E. (2016) Analysis of air pollution reduction and climate change mitigation in the industry sector of Yangtze River Delta in China, Journal of Cleaner Production, 114, 314-322, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.011>.

Authors Information

성미애(국립환경과학원 기후대기연구부 지구환경연구과 전문위원)
 진형아(국립환경과학원 기후대기연구부 지구환경연구과 환경연구관)
 임재현(국립환경과학원 기후대기연구부 지구환경연구과 과장)
 여소영(국립환경과학원 기후대기연구부 지구환경연구과 환경
 연구사)
 안영환(숙명여자대학교 기초교양대학 부교수)