DOUBLE STANDARD
이중기준

더블 스탠다드, 살인적 이중기준

한국이 투자한
해외 석탄화력발전소들이
주민 생명에 미칠 건강영향 분석

GREENPEACE

© Ulet Ifansasti / Greenpeace


© Ulet Ifansasti / Greenpeace

목차

저자:
Aidan Farrow (대기오염과학자, 그린피스 과학연구소),
Andreas Anhäuser (대기오염 분석가, 그린피스 북유럽지부),
Lauri Myllyvirta (선임 대기오염 분석가, 그린피스 북유럽지부),
손민우 (대기오염 캠페이너, 그린피스 동아시아지부)

기여:
Kate Ford
장마리 (기후에너지 캠페이너, 서울사무소),
한신혜 (기후에너지 캠페이너, 서울사무소)

도움 주신 분:
Han Chen (NRDC, 미국 천연자원보호협회)

전문가 감수:
Christopher A. James
(前 미국환경보호청 감독관 및 주정부 대기질 관리자)

편집:
Karli Thomas

번역 감수 및 윤문:
허광준

디자인:
디자인티엠(DESIGNTM)

출판:
그린피스 동아시아 서울사무소

요약

한국은 한국무역보험공사(K-SURE), 한국수출입은행(KEXIM), 한국산업은행(KDB) 등 공적 금융기관(PFA)을 통해 해외 석탄화력발전소 사업에 투자하고 있으며, 그 규모는 G20 국가 중 3위에 달한다. 석탄은 기후변화를 이끄는 가장 심각한 주범으로, 전 세계 이산화탄소 배출량의 절반 가량을 차지하고 있다.[1,2] 또한 석탄발전에서 배출되는 다량의 대기오염물질은 심각한 질병을 초래하고 악화시켜 수많은 사람을 조기 사망에 이르게 한다.[3,4]

한국이 투자하는 해외 석탄화력발전소 대다수에는 대기오염물질 배출기준이 국내보다 훨씬 느슨하게 적용되고 있다. 우리는 이를 이중기준(double standard)이라고 한다. 인도네시아를 비롯한 동남아 국가들의 환경 관리가 취약한 점도 있지만, 문제는 한국의 공적 금융기관들이 이로 인해 발생하는 대기오염 등의 문제를 알면서도 투자를 결정한다는 점이다. 결론적으로 한국 정부는 국내에서 운영된다면 불법으로 간주될 해외 석탄화력발전소에 공적 금융을 투자하고 있는 것이다. 이는 환경적으로도, 또 윤리적으로도 옳지 않다.

본 보고서는 한국 공적 금융기관이 2013년 1월부터 2019년 8월까지 투자한 10개의 해외 석탄화력발전소가 소재국과 주변 국가 주민의 건강에 미치는 영향을 분석하였다. 문제의 석탄화력발전소는 방글라데시, 인도네시아, 베트남 등에 산재해 있다. 분석 결과, 이들 발전소로 인해 연간 최소 1,600명에서 최대 5,000명의 조기 사망자가 발생할 것으로 추산되었다. 이들 발전소의 운영 수명이 대개 30년인 점을 감안하면, 누적 조기 사망자 수는 적게는 47,000명, 많게는 151,000명에 달한다.

대기환경보전법(2019년)[5]에 규정된 한국의 국내 발전소 배출기준은 전 세계에서 가장 엄격한 편에 속한다. 대기오염에 대한 국민의 우려가 크고 대기질을 개선하라는 강력한 요구가 있었기 때문이다. 반면 한국이 투자한 해외 석탄화력발전소에는 이러한 기준이 적용되지 않는다. 해외 발전소들은 국내에 건설된 석탄화력발전소보다 질소산화물(NO_x)은 최대 18.6배, 이산화황(SO_2)은 최대 11.5배, 먼지는 최대 33배를 더 배출한다.

본 연구는 해외 석탄화력발전소들의 대기오염물질 배출량을 모델링을 통해 분석하고 그에 따른 조기 사망자 수를 추산했다. 또 이 해외 발전소들에 한국 내 신규 발전소와 동일한 대기오염물질 배출기준을 적용할 경우 얼마나 많은 사람이 조기 사망의 위험에서 벗어날지도 분석했다.

이에 따라 아래 2개의 시나리오를 설정하여 각각의 경우 발전소들이 초래하는 조기 사망 위험을 비교했다:

- **1번 시나리오**
  현지의 배출설계 및 설비 가동데이터 (실제 혹은 예상)를 적용할 때 예상되는 석탄화력발전소 대기오염물질 배출량
- **2번 시나리오**
  2015년 1월 이후에 건설된 한국 석탄화력발전소의 배출기준을 적용할 때 예상되는 대기오염물질 배출량

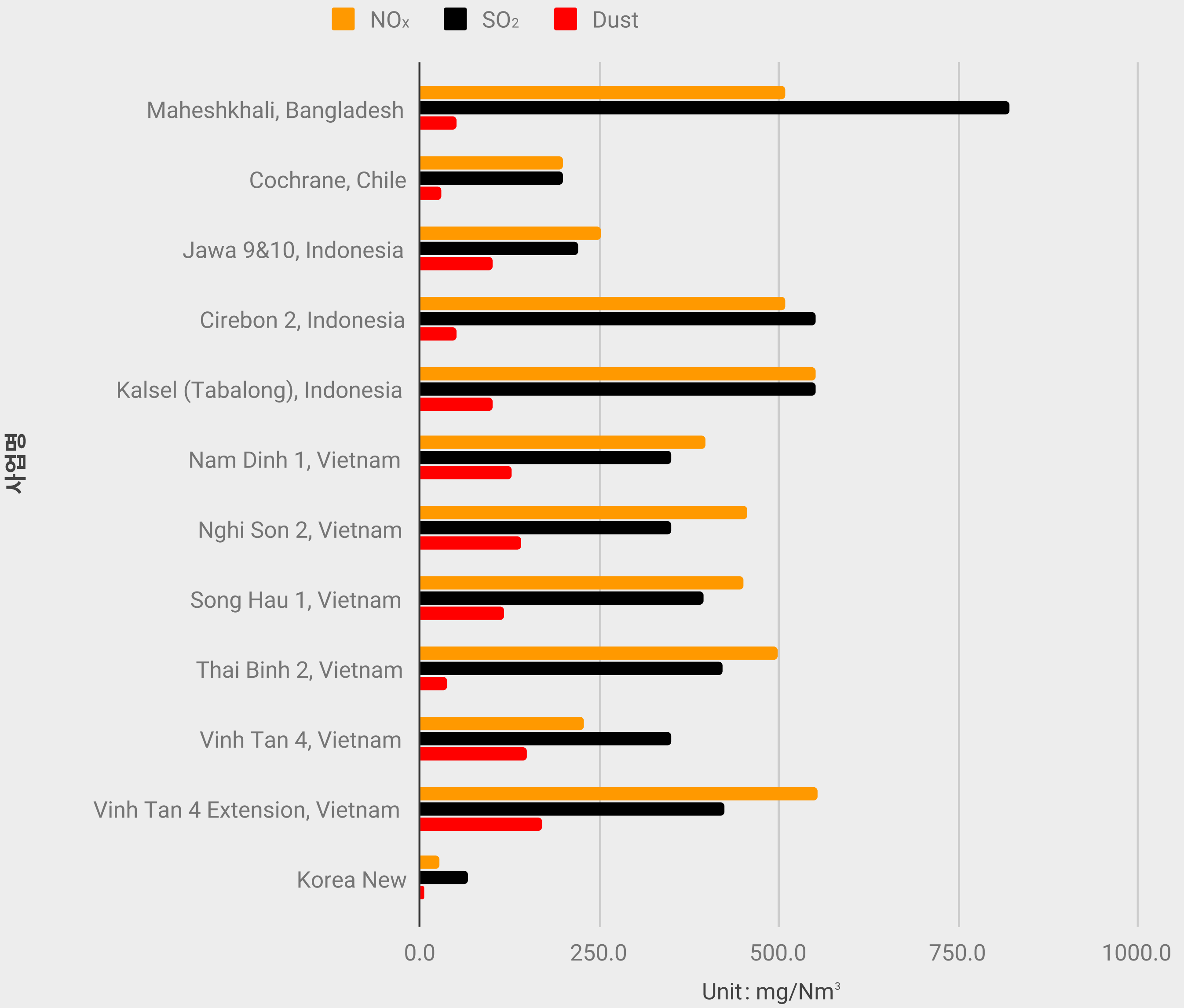


그림: NO_x, SO_2, 먼지 배출기준: 한국 공적금융기관이 투자하는 해외 석탄화력발전소[6] 대기오염물질 배출설계와 한국 석탄화력발전소 배출기준 (맨아래)[7]

연구팀이 2번 시나리오에 해당하는 모델링을 적용하여 본 결과는 매우 시사적이었다. 한국이 투자한 해외 석탄화력발전소에 국내 신규 발전소의 대기오염 배출기준을 적용할 경우 매년 최소 1,400명, 최대 4,500명이 조기 사망의 위험에서 벗어날 수 있을 것으로 추산되었다. 발전소가 30년간 가동된다면 최소 42,000명, 최대 136,000명에 달하는 사람들이 조기 사망 위험에서 벗어나는 셈이다. 이 모델링은 지난 7년간 한국이 투자한 발전소 중 일부인 10개 발전소를 대상으로 하여 추산된 것이다.

인도네시아, 방글라데시, 베트남과 같은 국가들은 한국이 투자한 석탄화력발전소가 초래한 대기오염 이외에도 이미 다양한 오염원에 의해 극심한 피해를 받고 있다. 한국의 해외 석탄발전 투자는 이 국가들이 대기질을 개선하고 공중보건 기준을 달성하는 것을 더욱 어렵게 만들 뿐이다.

조기 사망의 대부분은 발전소가 위치한 국가 내에서 발생할 것으로 전망됐지만, 대기오염의 피해는 국경을 넘어 확산될 것으로 나타났다. 예상 조기 사망자 중 13%는 해당 발전소 사업과 무관한 7개 주변 국가에서 발생할 것으로 예측됐다.

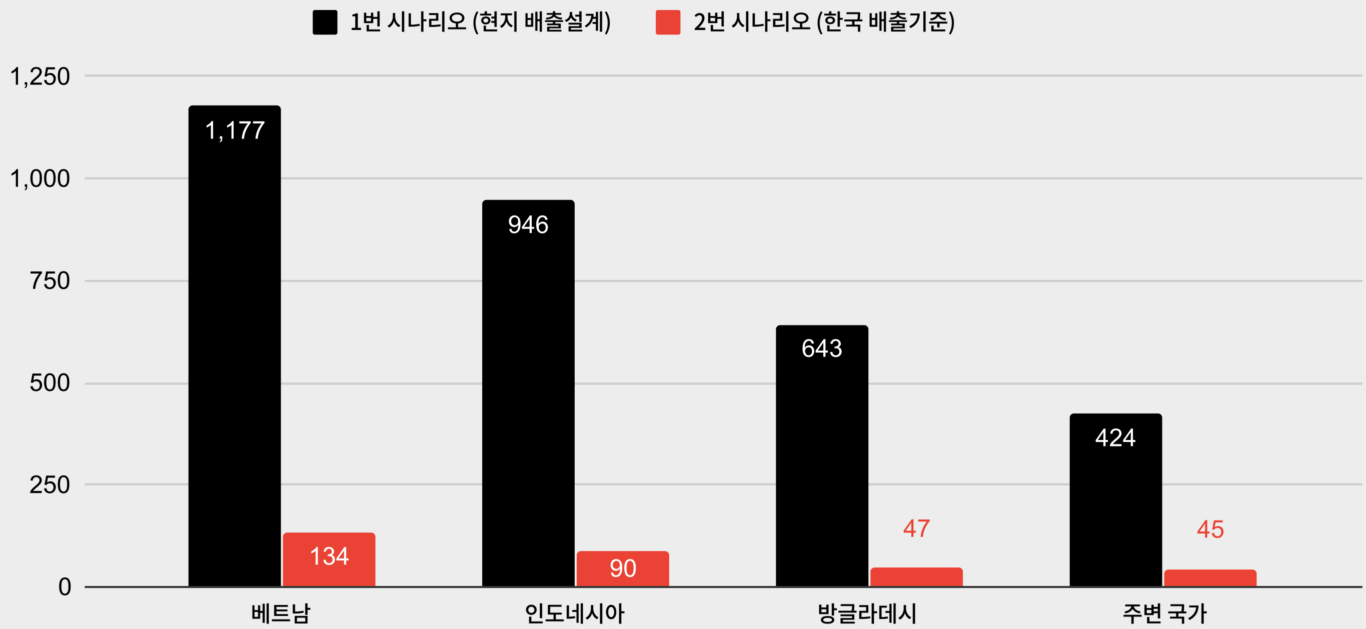


그림: 1번 시나리오(검은색, 한국 공적금융기관이 투자한 해외 석탄화력발전소의 현재 배출설계)와 2번 시나리오(빨간색, 한국 배출기준) 하에서 예상되는 석탄화력발전소 소재국 및 주변 국가의 연간 조기 사망자 수

재앙 수준의 기후변화를 피하고 대기오염물질로 인한 조기 사망 등의 건강 피해를 예방할 수 있도록, 모든 국가는 석탄화력발전에서 재생가능에너지로 신속하게 전환해야 한다. 재생가능에너지는 석탄화력발전보다 이미 경제성이 높고 경쟁력 있는 차세대 에너지로 공인받고 있다[8]. 재생가능에너지는 대기오염과 기후변화 피해를 완화하는 해결책이다. 국제 사회는 재생가능에너지 촉진을 포함한 국제적 차원의 협력을 통해 탄소 중립 경제로 나아가야 하며, 한국은 이러한 변화를 이끄는 선도적 역할을 맡아야 한다.

한국 정부는 2030년까지 재생가능에너지 비율을 20%로 높이는 에너지전환 계획, 원전의 단계적 폐지, 그리고 신규 석탄화력발전소 허가 중단을 약속했다. 또한 석탄화력발전소의 대기오염물질 배출 규제를 매년 강화하고 있다. 한국 공적 금융기관들의 지속적인 해외 석탄투자는 이와 같은 국내의 노력과 지극히 대비되는 행동이다. 해외에서 석탄발전 투자를 지속하는 한국은 이미 '기후 악당'으로 간주되고 있다. **기후위기에 대응하는 국제사회 일원으로서 책임과 의무를 다하기 위해 한국은 하루 빨리 해외 석탄투자를 중단하고 재생가능에너지 투자를 확대해야 한다.**

그림: 한국 공적 금융기관의 투자를 받는 해외 석탄화력발전소 사업의 위치 (2013년 1월부터 2019년 8월 기준)

기후위기에 대응하는 국제사회 일원으로서 책임과 의무를 다하기 위해 한국은 하루 빨리 해외 석탄투자를 중단하고 재생가능에너지 투자를 확대해야 한다.

© Kemal Jufri / Greenpeace

1. 서론

대기오염은 세계적으로 연간 7백만 명이 넘는 조기 사망을 초래하고, 만성질환을 일으키는 것으로 알려져 있다.[9] 세계은행(World Bank)에 따르면, 대기오염으로 인한 조기 사망자 발생이 세계 경제에 미치는 노동 수익 손실(lost labor income) 규모는 2013년 약 2,250억 달러(약 260조 원)에 이른다.[10]

대기오염은 다양한 배출원에서 비롯되지만, 가장 주된 원인은 석탄화력발전소다.[11] 동남아시아 지역 내 다수 국가에서 석탄화력발전소로 인한 대기오염은 극심한 수준이다. 2030년이 되면 이 지역에서 대기오염으로 인한 연간 조기 사망자수가 7만 명에 이를 것이라는 예측도 있다.[12] 석탄화력발전소에서 배출되는 이산화황(SO_2), 질소산화물(NO_x), 미세먼지(PM)와 같은 대기오염물질에 전 세계 수백만의 사람들이 무방비로 노출되고 있다. 그럼에도 발전소에 투자하는 금융기관들은 대기오염이 공중보건에 미치는 악영향을 알면서도 개의치 않는다.

세계 석탄 수요는 2013년에서 2016년 사이 감소하다가 2018년에 0.7% 증가했다. 이는 아시아 지역의 높은 수요에 기인한 것이다.[13] 국제에너지기구(IEA)에 따르면 동남아시아는 중국과 인도에 이어 석탄 수요가 증가한 주요 지역 중 하나이다. IEA는 2018년에 동남아시아 지역 중 인도네시아와 베트남의 석탄 소비량이 급증한 점도 밝혔다. 두 국가 모두 석탄 의존도가 높은 전력생산구조로, 발전량이 빠르게 늘어나면서 석탄 소비도 가속화하고 있다.[14]

석탄 발전량이 증가할수록 대기질은 악화된다. 방글라데시, 베트남, 인도네시아의 대기질은 이미 전 세계에서 가장 유해한 수준이다. 이런 상황에서 해당 국가에 새로 석탄화력발전소를 건설하면 대기오염으로 인한 공중보건, 환경 등 각종 사회적 비용을 더욱 늘리는 결과밖에 되지 않는다.[15] 석탄화력발전소가 배출하는 온실가스는 지구온난화 피해를 가속화하며, 한국을 포함해 어느 나라도 이로부터 결코 자유롭지 않다. 다수 국가가 석탄발전의 단계적 퇴출을 통해 지구 기온 상승을 1.5℃에서 2℃로 제한하기 위한 파리협정[16]을 체결한 것은 그 때문이다.

기후변화로 인한 최악의 결과를 피하기 위해 경제협력개발기구(OECD)의 회원국은 2030년까지, 나머지 국가들은 2050년까지 단계적으로 석탄을 퇴출시켜야 한다.[17] 이에 따라 다수의 회원국이 탈석탄을 위해 전향적인 결정을 내리고 있다. 반면, 여전히 신규 석탄발전에 재정을 지원하는 국가들도 있다.

중국, 한국, 일본의 공적 금융기관(Public Finance Agency, PFA)은 세계 해외 석탄화력발전소 자금 제공의 대부분을 담당하고 있다.[18] 2013~2018년 기간에 세 국가의 해외 석탄발전 투자 규모는 530억 달러에 달한다. 이는 같은 기간에 G20 국가 전체가 해외 석탄에 투자한 규모의 88%에 육박한다.[19, 20, 21] 본 연구는 세계 해외 석탄 투자에서 3위를 차지하는 한국이 전 세계 수백만 명 이상을 대기오염으로 인한 조기 사망 위험으로 내몰고 기후변화를 가속하는 현실에 대한 분석이다.

본 연구는 세계 해외 석탄 투자에서 3위를 차지하는 한국이 전 세계 수백만 명 이상을 대기오염으로 인한 조기 사망 위험으로 내몰고 기후변화를 가속하는 현실에 대한 분석이다.

한국의 공적 금융기관이 투자하는 석탄화력발전소 사업

한국은 전 세계에서 공적 투자의 형태로 해외 석탄 사업을 지원하는 규모가 가장 큰 국가 중 하나이다.

2013년 1월부터 2019년 8월 사이 한국의 공적 금융기관은 설비용량 7GW의 해외 석탄화력발전소에 약 57억 달러(약 6조 7,000억 원)를 투자하였다.[22] 또한 현재 4.5GW 용량의 신규 석탄화력발전소를 대상으로 투자 가능성을 검토하고 있다. 해당 기간에 이루어진 한국 공적 금융기관의 투자는 동남아시아 및 남아시아, 남아메리카 지역을 대상으로 한 것이었으며, 국가별로는 베트남(72%), 인도네시아(22%), 칠레(6%) 등의 순서다(그림1).

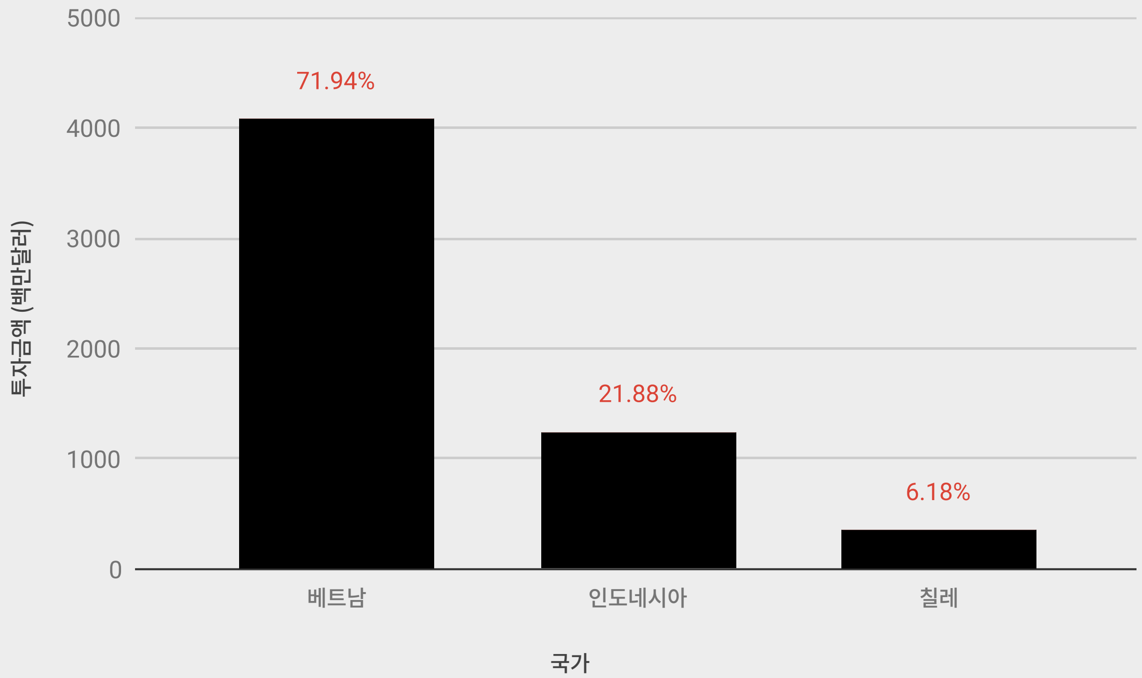


그림 1. 한국 공적 금융기관의 국가별 해외 석탄화력발전소 투자금액 (2013년 1월 ~ 2019년 8월)[23, 24]

투자에 나선 금융 기관은 한국무역보험공사(K-SURE), 한국수출입은행(KEXIM), 한국산업은행(KDB)이다. 이들 중에서 해외 석탄 사업에 가장 많은 금융을 제공해 온 기관은 수출입은행이며, 무역보험공사와 산업은행이 그 뒤를 잇는다(그림 2). 한국 공적 금융기관이 투자하는 11개 석탄화력발전소 사업(기존 혹은 예정)의 목록은 표1에 제시되어 있다.

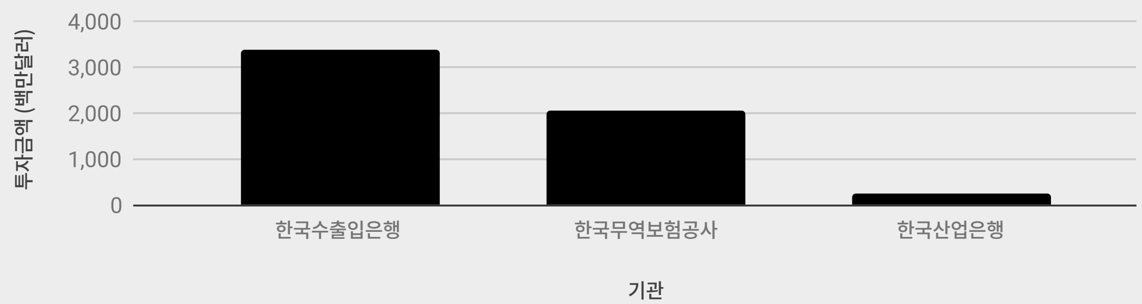


그림 2. 한국 공적 금융기관의 기관별 해외 석탄화력발전소 투자금액 (2013년 1월 ~ 2019년 8월)

표 1.
해외 석탄화력발전소 사업에 대한 한국 공적 금융기관의 투자 목록 (2013년 1월 ~ 2019년 8월)

기관	소재국	사업명	용량 (MW)[25]	규모 (USD)	금융 종결 연도
수출입은행	방글라데시	Maheshkhali Coal Plant KEPCO	1,320	향후 결정 예정	미래
무역보험공사	칠레	Cochrane Coal-Fired Power Project	472	250,000,000	2013
수출입은행				100,000,000	2013
수출입은행	인도네시아	Jawa Power Plant units 9&10[26]	2,000	향후 결정 예정	미래
무역보험공사				향후 결정 예정	미래
수출입은행	인도네시아	Cirebon Coal Plant Phase 2	1,000	522,000,000	2017
무역보험공사	인도네시아	Kalsel (Tabalong) Coal-Fired Power Plant	200	485,000,000	2016
산업은행				232,000,000	2017
수출입은행	베트남	Nam Dinh I Coal Plant	1,200	향후 결정 예정	미래
수출입은행	베트남	Nghi Son 2 Coal Plant	1,200	936,000,000	2018
무역보험공사	베트남	Song Hau 1 Power Plant	1,200	507,000,000	2016
수출입은행				480,000,000	2016
수출입은행	베트남	Thai Binh 2 Coal Power Plant	1,200	600,000,000	2013
무역보험공사	베트남	Vinh Tan 4 Coal-Fired Thermal Power Plant	1,200	455,000,000	2014
수출입은행				455,000,000	2014
무역보험공사	베트남	Vinh Tan 4 Coal-Fired Power Plant Expansion	600	341,000,000	2017
수출입은행				300,000,000	2017
합계			**11,592**	**5,663,000,000**	

해당 목록은 NRDC의 통합 석탄 금융 데이터베이스(consolidated coal finance database) 및 수출입은행, 무역보험공사, 산업은행의 석탄 투자 목록에 기반해 작성하였다(강조된 부분은 향후 진행될 사업을 나타낸다).


KOMATSU
PC
200

2. 한국의 모순적인 석탄 정책

2017년 한국 정부는 제8차 전력수급기본계획(제8차 전기본)을 통해, 국내에서 신규 석탄화력발전소 사업을 더 이상 허가하지 않을 것이며 석탄 발전을 단계적으로 감축하겠다고 공약하였다.[27] 또한 대기오염 완화를 위해 2019년 5월 대기환경보전법을 개정하여, 화력발전소 및 산업 부문을 포함한 모든 시설을 대상으로 대기오염물질 배출기준을 강화하였다.[28] 최근 한국 정부는 고농도 오염 계절인 12월~3월 사이에 최소 9기에서 최대 27기의 석탄화력발전소를 일시적으로 가동 중단하는 동시에 다른 석탄화력발전소의 가동을 제한하는 정책도 검토하고 있다.[29]

한국의 지방정부 또한 석탄의 단계적 퇴출을 위한 조치를 점진적으로 추진하고 있다. 한국 석탄화력발전소의 절반가량이 위치한 충남도는 동북아 지역 최초로 탈석탄 동맹(PPCA)에 가입하여 2050년까지 탈석탄을 달성하는 목표를 세웠다. 또 충남도는 석탄화력발전소의 조기 폐쇄를 중앙정부에 요청하고 있다.[30]

한국은 파리협정의 국가별감축기여분(NDC)[31] 목표에 따라 2030년까지 온실가스 배출량을 배출전망치(BAU) 대비 37% 감축할 것을 공약한 바 있다.[32] 뿐만 아니라 한국은 2018년 10월에 제48차 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC) 총회를 개최하여 지구온난화 1.5°C 특별보고서[33]가 채택되도록 지원하기도 했다. 문재인 대통령은 IPCC 총회 축사에서 지구 평균 온도 상승을 1.5°C 이내로 제한하기 위해 한국이 기후행동을 적극 펼칠 것이라고 약속하였다.[34]

또 문재인 대통령은 최근 유엔 기후행동 정상회의에서 "녹색성장과 글로벌 목표 2030을 위한 연대(P4G)" 정상회의를 2020년 한국에서 개최할 것이라며, 기후변화에 대응하기 위한 국가적 노력을 가속화하겠다고 선언하였다. 또한 대기오염으로 인해 전 세계에서 해마다 7백만 명 이상이 조기 사망한다고 언급하면서 문제 해결을 위한 국제 협력을 촉구하고, "세계 푸른 하늘의 날" 지정을 제안하기도 하였다.[35]

"대기질 개선을 위해서는 공동연구와 기술적 지원을 포함한 초국경적인 국제협력과 공동대응이 반드시 필요합니다. 한국은 반기문 前 유엔 사무총장을 위원장으로 하는 '국가기후 환경회의'를 설립하여 국내적인 노력과 함께 국제사회와의 협력을 강화하고 있습니다. 대기질 개선을 위한 국제사회의 협력은 저탄소 시대를 촉진하는 길이기도 합니다. 회원국들의 적극적인 참여와 지지를 당부 드립니다."

- 문재인 대통령
(2019년 9월 23일 유엔 기후행동 정상회의)

최근 한국 정부는 신남방정책을 통해 동남아시아국가연합(ASEAN) 국가들의 인프라 및 경제 개발 지원을 약속하며 긴밀한 협력을 구축하는 데 상당한 노력을 기울이고 있다. 기후변화 대응과 완화를 위한 청정에너지 및 기술 지원은 아세안 국가들이 한국의 도움을 받을 것으로 기대하고 있는 분야 중 하나이다.[36] 2019년 11월 25일 부산에서 열릴 2019 한·아세안 특별정상회의에서 "동행, 평화와 번영(Partnership for Peace, Prosperity for People)"에 대해 논의하는 것도 마찬가지 맥락이다.

위와 같은 한국 정부의 공약과 발표들에 비추어 볼 때, 한국이 대기오염과 이산화탄소 배출의 주범인[37, 38] 해외 석탄화력발전소 사업에 지속적으로 투자하는 모습은 모순적이고 위선적이라고 할 수밖에 없다.

3. 살인적 이중기준: 대기오염 투자

현재 한국이 국내에서 석탄발전을 점진적으로 퇴출시키고 있음을 고려할 때, 한국의 공적 금융기관이 해외 석탄 사업에 투자하고 있다는 사실은 매우 모순적이다. 이는 석탄발전으로 인한 대기오염물질 배출을 전방위적으로 줄이고자 하는 한국의 태도와 극명하게 대비된다. 한국은 국내 전력생산에서 석탄발전 비율을 감소시키겠다는 목표를 세웠을 뿐만 아니라, 신규 석탄화력발전소에 대해 비교적 엄격한 배출기준을 적용함으로써 국내 대기오염 문제를 줄이기 위해 노력하고 있다. 그러나 한국의 공적 금융기관이 투자한 해외 석탄화력발전소들은 한국의 대기오염물질 배출기준보다 몇 배로 느슨한 배출설계를 적용받고 있다.

한국의 해외 석탄화력발전소에 대한 공적 투자는 대부분 OECD 공적지원수출신용협약의 "석탄화력발전사업의 공적자금 지원에 대한 경제협력개발기구 규약(CFSU)"을 따르고 있다. 이에 따르면 자금 지원은 초초임계(ultra-supercritical, USC) 기술을 적용하는 사업에만 가능하다. 최빈국에서 진행되는 소규모 사업의 경우, 초임계(supercritical, SC) 기술은 500MW 이하, 아임계(subcritical, SUBC) 기술은 300MW 미만 규모에 대해서만 지원이 가능하도록 규정하고 있다.[39]

하지만 초초임계 기술을 적용한 고효율 석탄화력발전소라 하더라도 여전히 대기오염의 주 원인이 되며, 초초임계 기술을 통해 높인 효율성이 공중보건을 위협하지 않는 수준이 되기에는 턱없이 부족하다.[40] 이에 대해서는 보고서 제4장에서 더 자세히 서술한다.

석탄화력발전소 배출설계에 대한 치명적 이중기준

석탄화력발전소에서는 다음 물질을 포함하여 다수의 위험한 오염물이 배출된다 :

- **이산화질소 (NO_2):** 모든 연소 과정에서 생성되는 가스. 일산화질소(NO)에서 변환되거나 NO로 변환된다. 건강에 미치는 전체 질소산화물(NO_x)군, 즉 NO와 NO_2의 영향을 평가하기 위해 주로 대기 중 NO_2의 양을 대용물로 사용한다.

- **이산화황 (SO_2):** 석탄화력발전소 내의 석탄 연소나 일부 광물의 가공 등, 황을 함유한 물질을 사용하는 산업 공정에서 생성되는 가스. 대기 중 이산화황의 99%는 인위적인 활동으로부터 나온다. SO_2는 다른 물질과 반응하여 황산(H_2SO_4), 아황산(H_2SO_3) 및 황산염 입자와 같은 유해 화합물을 형성하며 산성비 및 미세먼지 오염의 원인이 된다.

- **초미세먼지 ($PM_{2.5}$):** 직경(aerodynamic diameter)이 2.5μm 미만인 고체 입자이다.[41] 초미세먼지는 폐에서 혈류로 흘러들어올 정도로 작아 전체 심혈관계에 영향을 주고 건강에 다양한 악영향을 초래한다. 작은 크기 덕분에 오랜 시간 대기중에 떠다니면서 수천 킬로미터를 이동할 수 있다. 화석연료를 태우면 비산재 및 기타 불연소 입자와 함께 $PM_{2.5}$가 직접 배출되며, 대기중에서 $PM_{2.5}$를 생성하는 가스 형태의 대기오염물질(특히 SO_2와 NO_x)도 배출함으로써 초미세먼지를 2차 생성하기도 한다.

한국은 G20와 OECD 내 정치 및 경제 부문의 선두 국가로서, 이와 같이 비윤리적인 해외 석탄화력발전소 투자를 당장 중단해야 한다.

한국의 국내 석탄화력발전소에는 엄격한 배출기준이 적용된다. 2015년 1월 이후로 한국에 건설된 100MW 규모 이상 석탄화력발전소의 배출기준은 NO_x는 28mg/Nm³, SO_2는 65mg/Nm³, 먼지는 5mg/Nm³이다.[42] 최근에 건설된 석탄화력발전소에 대하여는 더욱 강력한 배출설계를 적용하고 있다. 새로 건설 중인 강릉에코파워 석탄화력발전소의 경우 1,000MW 규모 1기당 NO_x, SO_2, 먼지 배출설계가 각각 19, 39, 3mg/Nm³이다.[43]

반면에, 한국 공적 금융기관이 투자한 일부 해외 석탄화력발전소 사업들은 국내보다 훨씬 느슨한 대기오염물질 배출설계를 적용받고 있다. 본 보고서는 이렇게 느슨한 기준으로 운영되는 석탄화력발전소들이 환경과 인체에 미치는 영향을 분석한 결과를 제시한다.

그림3-5 및 표2는 해외 석탄화력발전소의 배출설계와 한국 국내 발전소의 배출기준 간 차이를 보여주고 있다. 예를 들어, 수출입은행이 현재 투자를 고려 중인 방글라데시의 Maheshkhali 석탄화력발전소 사업에서 NO_x, SO_2, 먼지의 배출설계는 각각 510, 820, 50mg/Nm³로, 한국 기준에 비해 약 17배나 많은 대기오염물질 배출을 허용하고 있다. 수출입은행이 2018년에 투자하기로 한 베트남의 Nghi Son-2 석탄화력발전소의 경우 NO_x, SO_2, 먼지의 배출설계는 각각 455, 350, 140mg/Nm³로 한국의 국내 기준보다 NO_x는 15배, SO_2는 4배, 먼지는 27배나 많은 수준이다. 본 연구의 평가 대상이 된 발전소 중에서 한국 기준과 격차가 가장 크게 나타난 경우는 다음과 같다. 베트남 Vinh Tan 4의 질소산화물(NO_x)은 한국의 19배 이상, 방글라데시 Maheshkhali의 이산화황(SO_2)은 12배 이상, 역시 베트남 Vinh Tan 4의 먼지는 33배 이상에 이르는 배출설계가 적용되었다.

석탄화력발전소가 배출한 미세먼지와 오염물질은 수백 킬로미터에 걸친 광범위한 지역에 영향을 미친다. 발전소 방향으로부터 바람이 불어오는 지역의 인구가 직접적으로 위험에 처하게 될 뿐 아니라, 넓은 지역에서 공공의 건강을 지키고 대기질 기준을 유지하기 어려워진다. 일부 지역에서는 $PM_{2.5}$ 농도가 1µg/m³만 높아지더라도 다른 배출원의 오염물질과 결합하여 대기질 기준을 쉽게 넘어서게 될 수 있다. 석탄발전소의 영향을 받은 지역은 대기오염을 완화하기 위해 많은 비용이 드는 대책을 시행해야 할 수도 있다.

대기오염에 노출되면 아동은 기도 감염 가능성이 늘어나고 성인은 뇌졸중, 폐암, 심장 및 호흡기 질환의 위험이 증가한다.[44] 대기오염에 노출된 인구 중 일부는 조기 사망의 피해를 입을 것으로 예상된다. 또한 석탄화력발전소가 배출한 오염물질은 산성비의 형태로 대지로 되돌아옴으로써 비소, 니켈, 크롬, 납, 수은 등 독성이 있는 중금속을 퍼뜨리고 산림, 작물, 토양, 수로를 파괴하며 야생 동식물에 해를 입힌다.

이러한 피해는 일차적으로 각 석탄화력발전소의 소재국에 책임이 있다. 이들은 자체 배출기준을 강화해 대기오염을 규제하여야 한다. 그러나 한국과 같은 외국 투자국 역시 배출기준이 느슨한 국가의 석탄화력발전소에 투자한 것에 동등한 책임이 있다. 한국은 대기오염물질 배출량을 줄일 수 있는 기술을 가지고 있다. 그럼에도 공적금융이 나서서 낮은 배출기준을 가진 해외에 투자함으로써 해당국의 대기오염에 기여한 결과가 되었다.

한국이 국내외에서 적용하는 서로 다른 배출기준과 그로 인해 나타나는 대기오염의 수준 및 영향 차이는 비윤리적이고 살인적인 이중기준의 민낯을 그대로 보여준다. 한국은 G20와 OECD 내 정치 및 경제 부문의 선두 국가로서, 이와 같이 비윤리적인 해외 석탄화력발전소 투자를 당장 중단해야 한다.

한국은 공적 금융기관을 통해 해외 석탄화력발전소에 투자함으로써, 결과적으로 오염을 수출하고 질병, 조기 사망, 환경 파괴, 기후변화를 부추기고 있는 것이다.

한국의 이중기준은 해당국 주민의 건강과 환경에 악영향을 미칠 뿐만 아니라 한국의 평판을 손상시킨다. 한국은 공적 금융기관을 통해 해외 석탄화력발전소에 투자함으로써, 결과적으로 오염을 수출하고 질병, 조기 사망, 환경 파괴, 기후변화를 부추기고 있는 것이다.

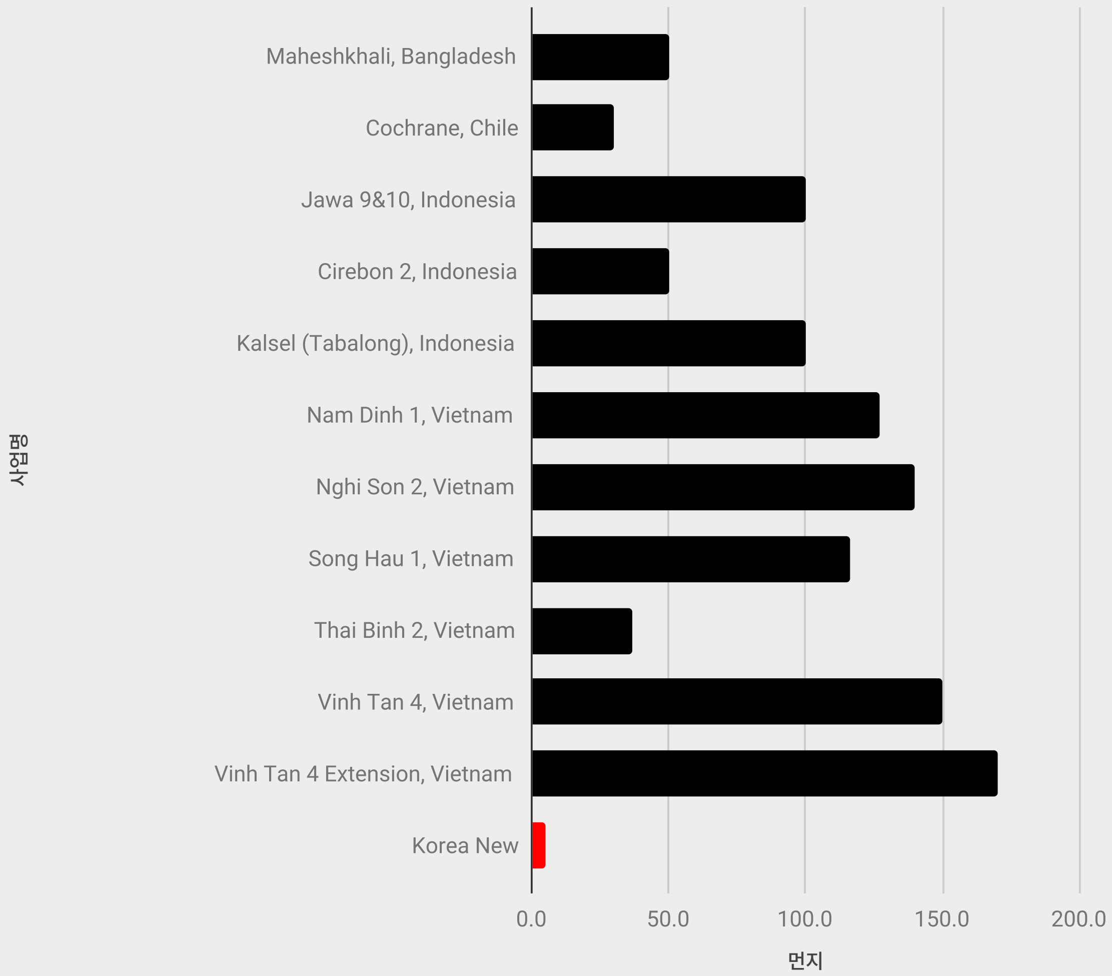


그림 3.
먼지 배출설계: 신규 석탄화력발전소에 대한 한국 배출 기준[45]과 한국이 투자하는 해외 석탄화력발전소의 배출설계 (mg/Nm³)

그림 4.
질소산화물(NO_x) 배출설계: 신규 석탄화력발전소에 대한 한국의 배출기준[46]과 한국이 투자하는 해외 석탄화력발전소의 배출설계 (mg/Nm^3)

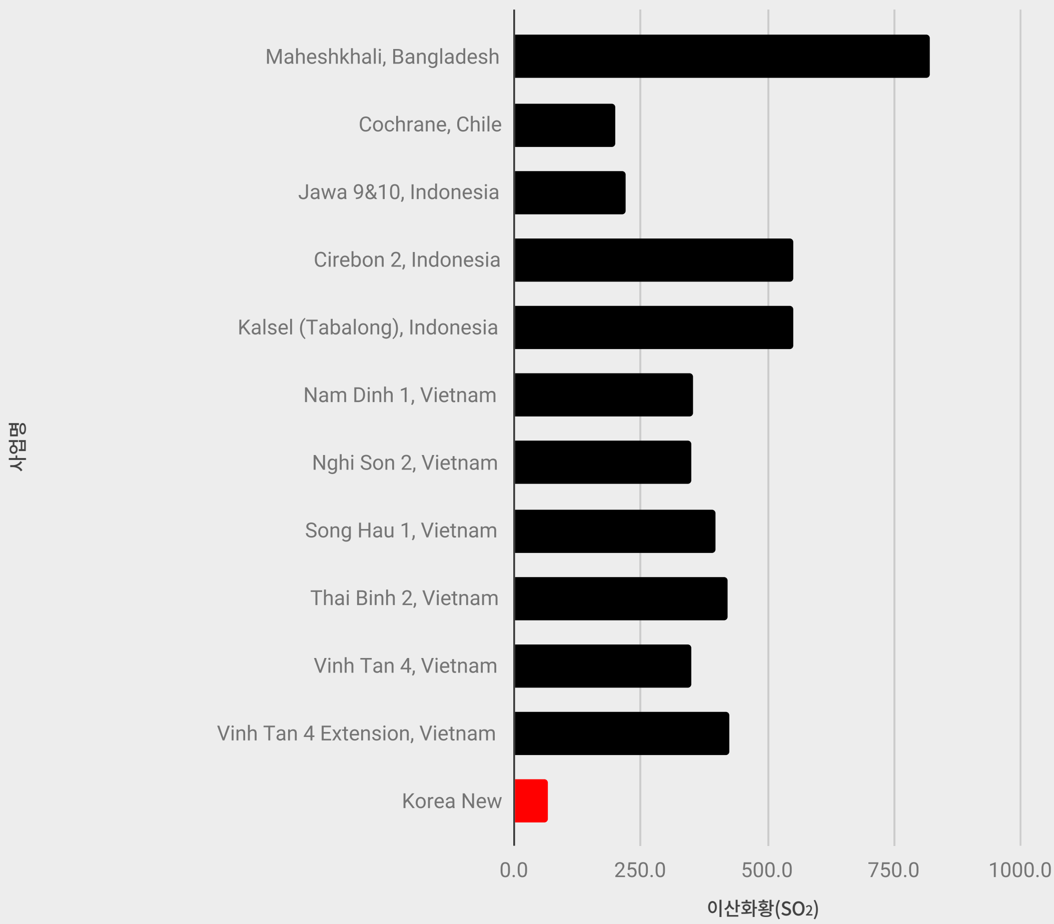


그림 5.
SO_2(이산화황) 배출설계: 신규 석탄화력발전소에 대한 한국의 배출기준[47]과 한국이 투자하는 해외 석탄화력발전소의 배출설계 (mg/Nm^3)

© Ulet Ifansasti / Greenpeace

표 2.
한국과 해외 석탄화력발전소의 배출설계

국가	사업명	배출설계(mg/Nm³)			보일러 효율
		NO_x	SO_2	Dust	
한국	신규 석탄화력발전소 대상 배출기준	28	65	5	USC
방글라데시	Maheshkhali Coal Plant	510	820	50	USC
칠레	Cochrane Coal-Fired Power Project	200	200	30	SUBC
인도네시아	Jawa Power Plant units 9&10	251	221	100	USC
인도네시아	Cirebon Unit 2	509	550**	50	USC
인도네시아	Kalsel (Tabalong) power station	550	550*	100*	SUBC
베트남	Nam Dinh-1	399	351	127	SC
베트남	Nghi Son-2	455	350	140	SC
베트남	Song Hau-1	450	396	116	SC
베트남	Thai Binh-2	500	422	37	SC
베트남	Vinh Tan-4 extension	553	425	170	USC
베트남	Vinh Tan-4	228	350	150	SC

- 모든 데이터는 관련 사업의 환경영향평가(EIA) 및 글로벌 석탄발전소 트랙커(Global Coal Plant Tracker)[48]에서 발췌하거나 한국의 공적 금융기관이 제출한 자료에서 얻은 것이다.
- USC (초초임계) / SC (초임계) / SUBC (아임계)

* Kalsel(Tabalong) 석탄화력발전소의 배출설계 정보는 입수할 수 없었다. 이 발전소에 대한 위의 수치는 인도네시아에서 새롭게 제정한(2019년 4월 23일) 석탄화력발전소 배출기준을 기반으로 한 것이다. 해당 기준은 가동 중 발전소나 규제 제정 전에 건설된 발전소에 대해 NO_x 및 SO_2는 각각 550 mg/Nm³, 먼지는 100 mg/Nm³의 배출설계를 규정하고 있다.

** 사업 환경영향평가에 따르면 Cirebon 2 석탄화력발전소의 SO_2 배출량은 인도네시아에서 새롭게 제정된 배출기준을 초과한다. 여기서는 해당 석탄화력발전소가 새로운 배출기준을 따를 것으로 가정하였다.

이중기준에 따른 대기오염물질 배출량 및 건강영향 모델링

본 보고서에서는 가동 중이거나 기획 단계인 석탄화력발전소들이 배출하는 대기오염물질의 확산에 관한 모델을 구축하여, 한국의 이중적인 배출기준이 대기질과 인체 건강에 미치는 영향을 정량화해 평가했다. 모델링에 사용한 대기오염물질 배출량 데이터는 각 사업의 환경영향평가(EIA) 및 공적 금융기관이 제출한 자료에서 가져왔다. 환경영향평가 자료를 입수할 수 없는 경우, 대중에 공개된 자료에 기반하여 추정하였다. 여기에는 각 국가의 국내 배출기준과 글로벌 에너지 모니터(Global Energy Monitor)의 글로벌 석탄발전소 트랙커 데이터베이스[49]가 포함된다. 모델링에 대한 상세한 기술적 설명은 부록에서 제시한다.

이러한 데이터와 모델 시뮬레이션을 통해 1년 동안의 근지표 오염물질 농도를 예측하였다. 시뮬레이션 대상은 한국 공적 금융기관의 투자를 받는 석탄화력발전소로서 인구 밀집 지역 근처에 위치한 방글라데시, 인도네시아, 베트남의 10개 발전소이다(그림6).[50] 한국의 이중적 기준으로 인한 영향을 산출하기 위해 10개 발전소에 대해 아래 2가지 시나리오를 적용하여 모델링을 실시했다.

- **1번 시나리오**
  현지의 배출설계 및 설비 가동데이터(실제 혹은 예상)를 적용할 때 예상되는 석탄화력발전소 대기오염물질 배출량
- **2번 시나리오**
  2015년 1월 이후에 건설된 한국 석탄화력발전소(≥ 100 MW)의 배출기준을 적용할 때 예상되는 대기오염물질 배출량

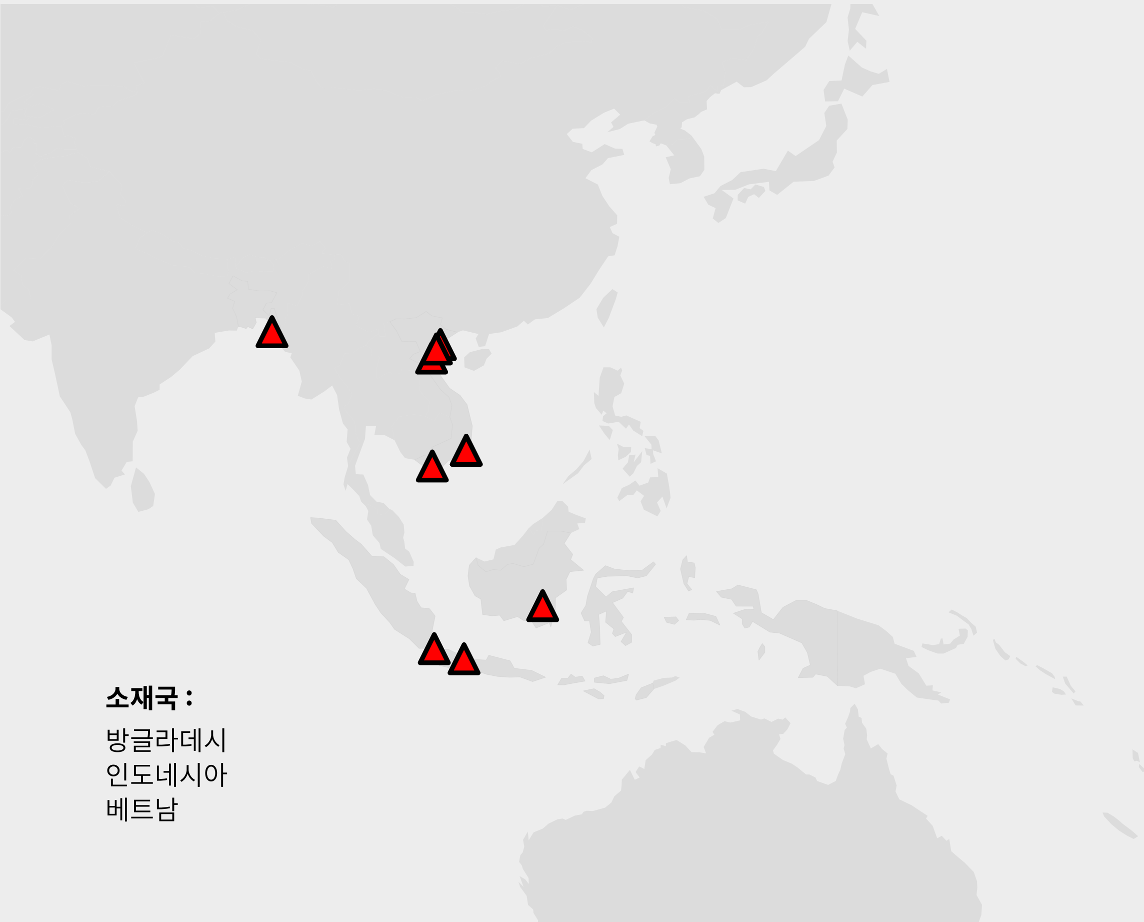


그림 6.
2013년 1월에서 2019년 8월 사이 한국의 공적 금융기관이 투자한 해외 석탄화력발전소의 위치(투자 계획한 발전소 포함)

1) 대기오염 농도

세계보건기구(WHO)는 다양한 평균 시간대별로 대기오염물질 농도를 설정하는 대기질 가이드라인 (Air Quality Guidelines)을 발표하고 업데이트하고 있다(표3). 대기질 가이드라인은 이를 초과할 경우 대기오염 정도가 안전하지 못한 수준으로 간주되는 상한선을 제시하고 있다.[51] 그러나 이 선을 넘지 않았다고 해서 대기오염 농도가 해롭지 않다는 의미는 아니다:

"연구에서는 부정적 영향이 발생하지 않는 임계값을 식별하지 않았으므로, [이들] 가이드라인 값은 [...]을 따른다고 해도 인체 건강을 완전히 보호할 수 있는 것은 아니라는 점에 주목해야 한다."[52]

표 3.
평균 시간대별 최대 오염물질 농도에 대한 WHO 대기질 가이드라인 (Air Quality Guidelines)

오염물질	NO_2 (μg/m³)		SO_2 (μg/m³)		$PM_{2.5}$ (μg/m³)	
평균 시간대	연간	1시간	24시간	10분	연간	24시간
대기질 가이드라인 (μg/m³)	40	200	20	500	10	25

그림7-9는 모델링한 일부 석탄화력발전소의 오염물질 예측 농도를 보여준다. 석탄화력발전소에서 나온 대기오염물질은 수천 킬로미터에 걸쳐 확산되어 인구 밀집 지역에까지 영향을 미친다. 세 소재국의 주요 대도시 지역은 모델링한 발전소들 중 최소 한 곳 이상으로부터 대기오염 영향을 받는 것으로 드러났다:[53]

- **방글라데시:** 치타공(인구 약 300만 명) - Maheshkhali 발전소의 영향을 받음(그림7 윗줄)
- **인도네시아:** 자카르타(3,400만 명), 반둥(600만 명) - Cirebon 2호기와 Jawa 9•10호기의 영향을 받음(그림8 윗줄과 가운데줄)
- **베트남:**
  - 호치민(1,100만 명) - Song Hau 1호기의 영향을 받음(그림9 윗줄)
  - 하노이(800만 명), 하이퐁(120만 명) - Thai Binh 2호기의 영향을 받음(그림9 아랫줄)

특정한 기상 조건 경우에는 오염물질 농도가 연평균을 크게 웃도는 상태에 도달한다. 예컨대 방글라데시 치타공에서 Maheshkhali 발전소가 배출하는 $PM_{2.5}$의 24시간 최대 평균 농도를 모델링한 결과, 그 값은 연평균 모델링값보다 약 50배 높았다(그림7 중간줄과 윗줄).

1번 시나리오대로 현지의 배출설계에 따라 석탄화력발전소를 가동하는 경우, 세 소재국의 발전소 10기 중 8기가 WHO 대기질 가이드라인을 넘을 것으로 예상되며(표4) 오염물질 농도는 가이드라인을 최대 22배 초과하는 수준까지 도달할 것이다(Maheshkhali 발전소의 SO_2 24시간 최대 평균 농도, 그림7 아랫줄). 그 결과 주민 수백만 명이 유해한 대기오염에 노출될 것으로 전망된다. 구체적으로는 기준을 초과하는 SO_2에 200만 명, NO_2에 70만 명, $PM_{2.5}$에 10만 명의 인구가 노출되고 영향을 받게 된다(그림10 및 표5).

2번 시나리오대로 한국 국내 배출기준을 적용할 경우 오염물질 농도는 모든 석탄화력발전소에서 크게 감소한다(그림7-9의 오른쪽 열 및 표4). 그 감소폭은 다음과 같다:

- NO_2는 9~28배 감소
- SO_2는 3~13배 감소
- $PM_{2.5}$는 4~14배 감소

방글라데시

1번 시나리오 **2번 시나리오**

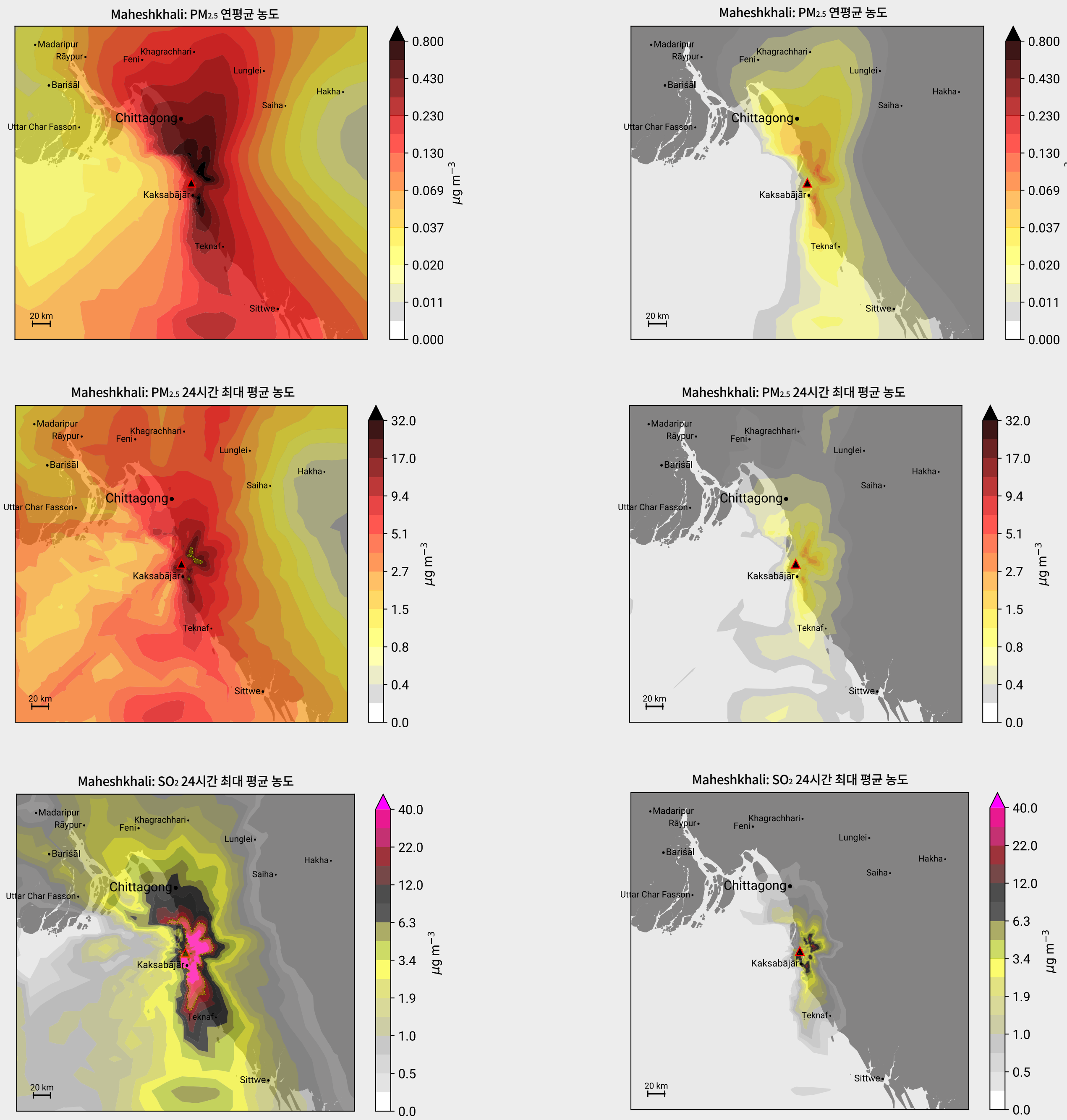


그림 7. 오염물질 농도 모델링 결과: 방글라데시 Maheshkhali 석탄화력발전소(삼각형)
(참고: 색상 기준표는 로그 눈금이며 줄마다 다르다.)

오염물질 농도가 감소함에 따라, WHO 대기질 가이드라인을 초과하는 오염 수준에 노출되는 총 인구수는 약 2백만명에서 4천명으로 무려 99.8% 줄어든다(표5).

인도네시아

1번 시나리오 **2번 시나리오**

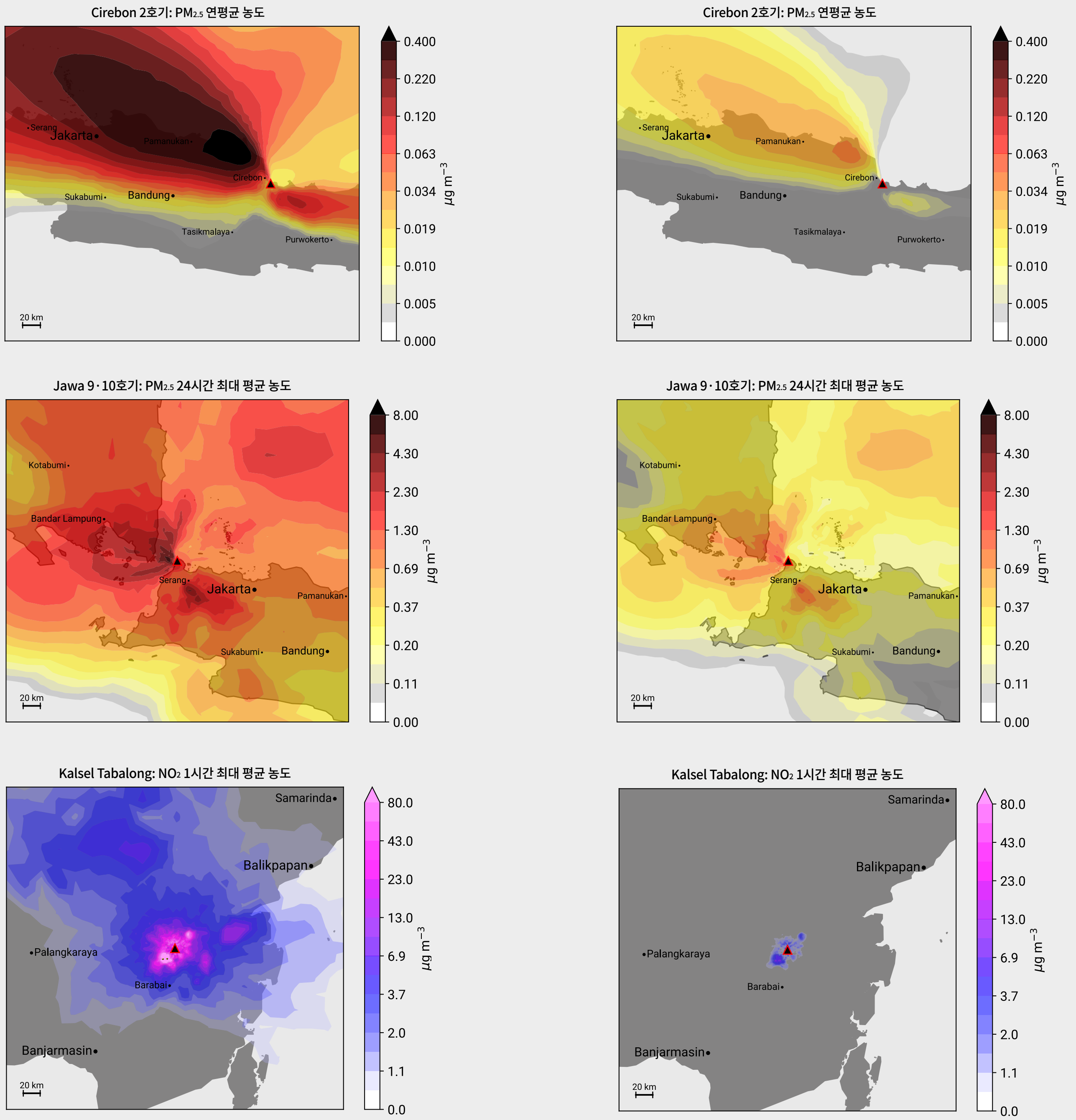


그림 8. 오염물질 농도 모델링 결과: 인도네시아 Cirebon 2호기 (윗줄), Jawa 9•10호기 (가운데줄), Kalsel Tabalong (아랫줄) 석탄화력발전소(삼각형)

(참고: 색상 기준표는 로그 눈금이며 줄마다 다르다.)

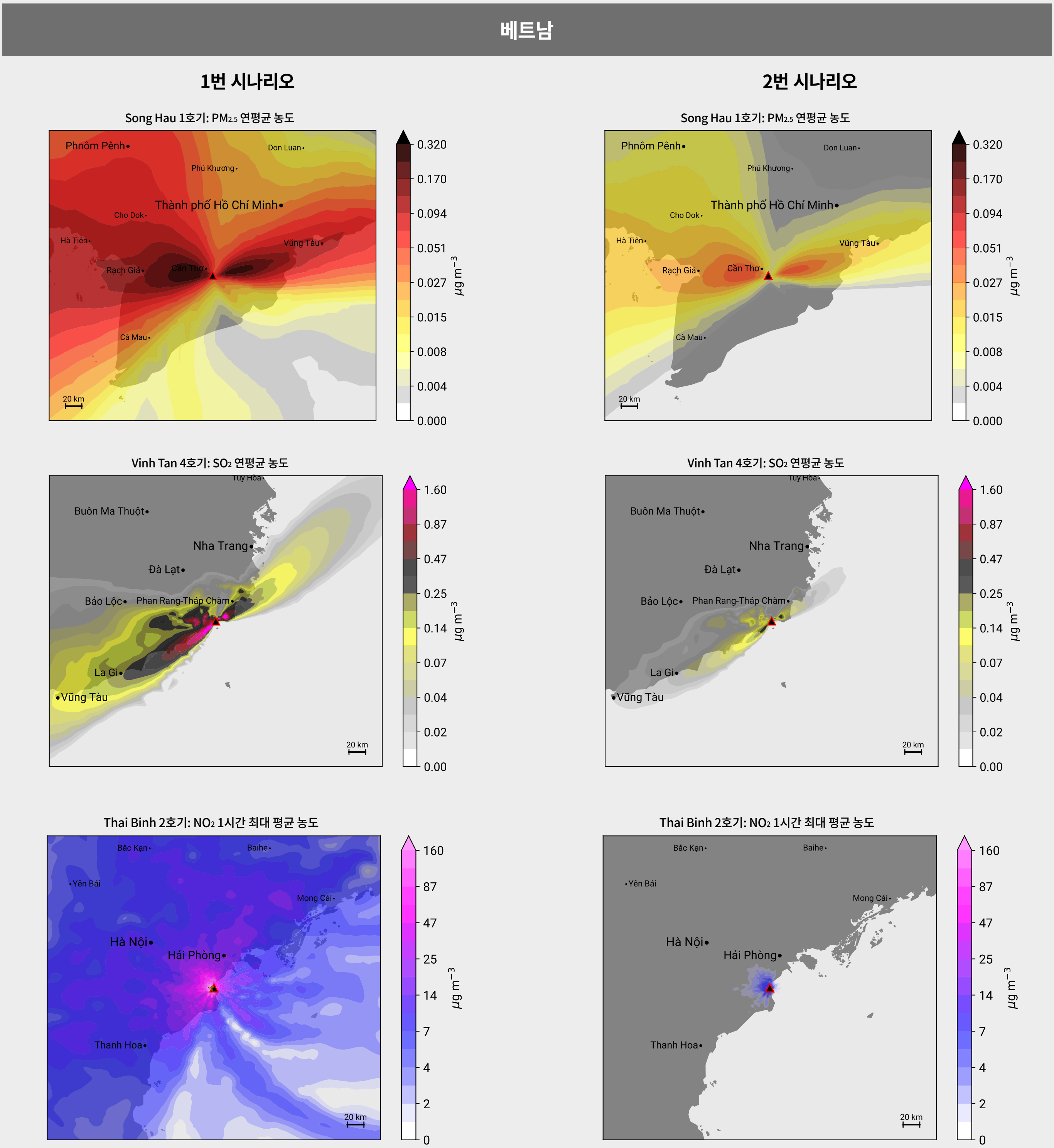


그림 9. 오염물질 농도 모델링 결과: 베트남 Song Hau 1호기 (윗줄), Vinh Tan 4호기 (가운데줄), Thai Binh 2호기 (아랫줄) 석탄화력발전소(삼각형)

(참고: 색상 기준표는 로그 눈금이며 줄마다 다르다.)

표 4.
세계보건기구(WHO) 대기질 가이드라인과 비교한 평균 시간대별 오염물질 최대 예상 농도

오염물질	NO_2 (μg/m³)		SO_2 (μg/m³)				$PM_{2.5}$ (μg/m³)	
평균 시간대	1시간		24시간		10분		24시간	
시나리오	시나리오 1	시나리오 2	시나리오 1	시나리오 2	시나리오 1	시나리오 2	시나리오 1	시나리오 2
WHO 가이드라인	200	200	20	20	500	500	25	25
Maheshkhali (BGD)	**1491**	82	**461.8**	**36.8**	**3848**	307	**35.5**	2.9
Jawa 9&10 (IDN)	241*	27	27.9*	8.2	328	97	8.0	1.9
Cirebon-2 (IDN)	220*	11	**25.4**	2.0	421	33	9.7	0.8
Kalsel Tabalong (IDN)	250*	9	**26.3**	2.3	313	27	4.1	0.3
Nam Dinh (VNM)	138	10	15.4	2.9	201	38	7.8	1.4
Nghi Son2 (VNM)	**400**	25	**32.4**	6.2	**698**	133	12.0	1.9
Song Hau-1 (VNM)	**245**	15	**31.0**	5.1	504*	83	8.0	1.2
Thai Binh-2 (VNM)	**407**	22	**34.7**	6.5	**569**	106	11.4	1.9
Vinh Tan-4 (VNM)	**364**	35	**83.1**	12.2	**726**	107	15.8	1.9
Vinh Tan-4 Exp. (VNM)	**311**	16	**37.2**	5.7	263	40	6.6	0.8

빨간 강조체는 해당 수치가 WHO 대기질 가이드라인을 초과함을 나타낸다. 해당 지역 중에서 바다나 비거주지역에서 최대 오염치가 나온 경우는 *로 표시하였다.

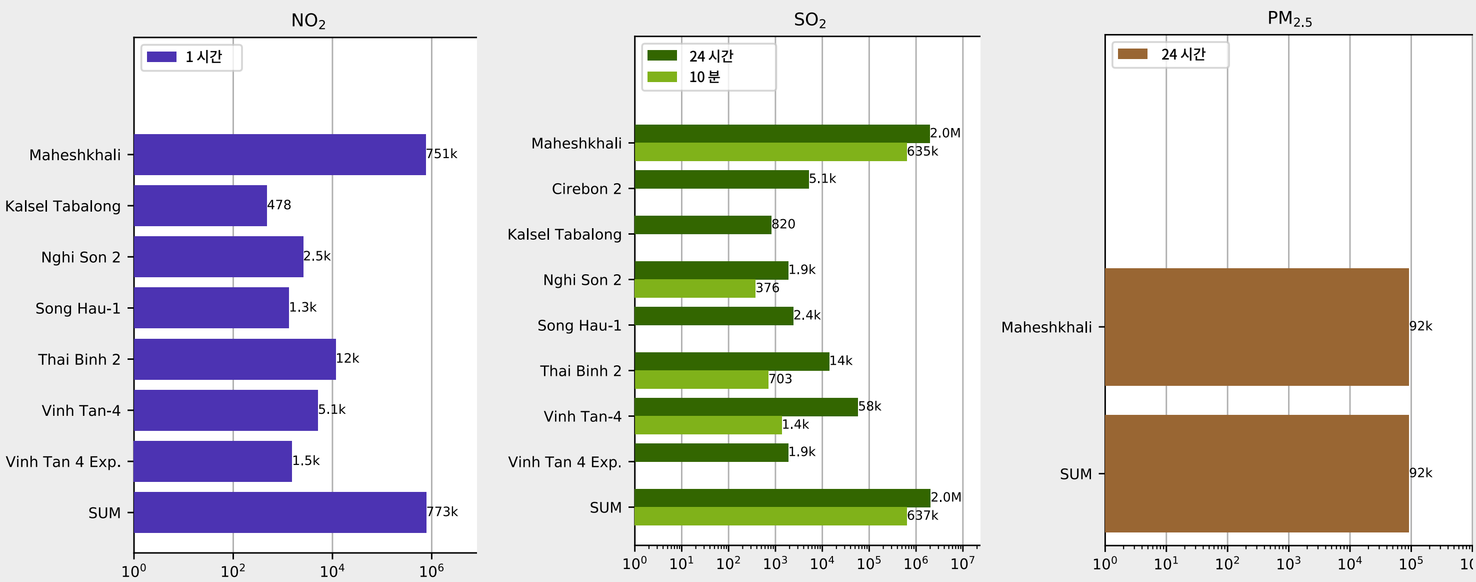


그림 10. 1번 시나리오 모델링 결과: WHO 대기질 가이드라인을 초과하는 수준의 대기오염에 노출된 예상 인구수

2번 시나리오(그림으로 제시하지 않음)에서 WHO 가이드라인을 초과한 유일한 경우는 Maheshkhali 석탄화력발전소의 SO_2 24시간 최대 평균 농도였으며, 4천 명의 인구가 영향을 받는 것으로 드러났다.[54]

표 5.
세계보건기구(WHO) 대기질 가이드라인을 초과하는 평균 시간대별 오염물질 농도에 노출된 총 예상 인구수[55]

오염물질	NO_2		SO_2		$PM_{2.5}$	
평균 시간대	연간	1시간	24시간	10분	연간	24시간
대기질 가이드 (μg/m^3)	40	200	20	500	10	25
1번 시나리오: 가이드라인 초과 수준에 노출되는 인구		773,000	1,960,000	637,000		92,000
2번 시나리오: 가이드라인 초과 수준에 노출되는 인구			4,000			

2) 인체 건강에 미치는 영향

대기오염에 노출될 경우 어린이, 노인, 호흡기 질환자 등 취약 집단을 중심으로 호흡기 질환 등 갖가지 질병에 걸릴 위험이 크게 증가한다. 오염물질 농도가 WHO 대기질 가이드라인보다 낮은 경우에도 여전히 유해할 수 있다. 본 보고서에서는 널리 통용되는 건강영향 평가 방법[56, 57, 58] (부록 참조)을 적용하여, 두 시나리오 하에서 한국 공적 금융기관이 투자한 석탄화력발전소가 얼마나 많은 대기오염물질을 배출하는지, 또 그로 인해 조기 사망자 수가 얼마나 많이 발생하는지를 모델링으로 분석했다.

그 결과는 표6-8과 그림11에 제시되어 있다. **1번 시나리오 (현지 배출설계)의 경우, 석탄화력발전소 10기에서 배출되는 대기오염물질로 연간 최소 1,600명에서 최대 5,000명의 조기 사망자가 발생할 것으로 예상되며, 발전소들을 평균 수명인 30년간 운영한다면 총 조기 사망자 수는 최소 47,000명에서 최대 151,000명에 이를 것으로 나타났다.**[59]

표8은 연간 조기 사망자 수치를 사인별로 보여준다. 사망자의 3분의 2는 초미세먼지 오염으로 인한 질환, 그중에서도 특히 국소 빈혈성 심장질환과 뇌졸중으로 사망할 것으로 추정된다.

연구 결과에 따르면, 가장 많은 조기 사망자를 발생시키는 석탄화력발전소는 방글라데시의 Maheshkhali 발전소와 인도네시아의 Cirebon 2호기 발전소였다. 두 발전소는 각각 매년 400명에서 1,200명의 조기 사망자를 유발할 것으로 예상된다(표6 및 그림11 상단). 두 발전소가 뿜어내는 오염물질은 주변 대도시 지역(치타공과 자카르타)으로 확산된다(각각 그림7 왼쪽열 상단과 그림8 왼쪽열 상단).

국가별로 보면, 한국 공적 금융기관의 석탄발전소 투자로 가장 큰 영향을 받을 것으로 예측되는 나라는 베트남이다. 6기의 석탄화력발전소가 한국 기관의 투자를 받는 베트남의 조기 사망자는 전체 조기 사망자 중 38%를 차지할 것으로 추산된다. 인도네시아(29%)와 방글라데시(20%)가 그 뒤를 이었다(표7 및 그림11 하단).

나머지 13%(연간 조기 사망 206~664명)는 주변 국가들, 즉 중국(81~246명, 전체 중 5.0%), 인도(45~132명, 2.7%), 캄보디아(31~115명, 2.2%), 미얀마(31~104명, 2.0%), 태국(15~54명, 1.0%), 라오스(2~9명, 0.2%), 그리고 말레이시아(2~6명, 0.1%)에서 발생할 것으로 예상된다. 이들 국가는 한국으로부터 투자받는 석탄화력발전소가 없음에도, 이웃 국가의 발전소에서 나오는 대기오염물질로 인해 영향을 받는 것이다. 석탄화력발전소의 30년 수명 동안에 이와 같은 주변 국가에서 발생할 것으로 예상되는 조기 사망자 수는 최소

표 6.
1번 시나리오와 2번 시나리오 하에서 모델링 대상 석탄화력발전소의 대기오염물질로 인해 예상되는 연간 조기 사망자 수

	1번 시나리오 (실제 배출설계)			2번 시나리오 (한국 배출기준)			차이		
석탄화력발전소	중간 추정치	최소 추정치	최대 추정치	중간 추정치	최소 추정치	최대 추정치	중간 추정치	최소 추정치	최대 추정치
Maheshkhali (BGD)	798	393	1,253	58	30	90	740	364	1,163
Jawa 9&10 (IDN)	157	80	244	33	18	49	124	62	195
Cirebon-2 (IDN)	776	408	1,176	56	30	84	720	377	1,092
Kalsel Tabalong (IDN)	13	7	19	1	1	1	12	6	18
Nam Dinh (VNM)	198	94	321	24	12	38	174	82	284
Nghi Son2 (VNM)	261	121	427	30	15	46	231	106	381
Song Hau-1 (VNM)	224	104	361	27	13	41	197	91	320
Thai Binh-2 (VNM)	282	130	464	30	15	47	252	115	418
Vinh Tan-4 (VNM)	315	157	489	39	19	59	277	137	430
Vinh Tan-4 Exp. (VNM)	166	79	266	18	9	27	149	70	239
총계(연간)	**3,190**	**1,572**	**5,021**	**315**	**161**	**483**	**2,875**	**1,410**	**4,538**
총계(30년)	**95,700**	**47,148**	**150,615**	**9,456**	**4,836**	**14,481**	**86,244**	**42,312**	**136,140**

6,200명에서 최대 20,000명이다. 나라별로는 중국 2,400~7,400명, 인도 1,400~4,000명, 캄보디아 920~3,400명, 미얀마 930~3,100명, 태국 440~1,600명, 라오스 63~258명, 말레이시아 54~171명 등의 피해가 벌어질 것으로 추정됐다.

한국의 배출기준이 적용될 경우(2번 시나리오), 해당 발전소 10기로 인한 연간 조기 사망자 수는 최소 161명에서 최대 483명으로 90% 이상의 인구가 조기 사망 위험에서 벗어날 수 있다. 다시 말해 매년 1,400명에서 4,500명, 발전소의 평균 가동기간인 30년 동안 총 42,000명에서 136,000명의 운명이 달라질 수 있다는 것이다(표6).

1번 시나리오(현지 배출설계)의 경우, 석탄화력발전소 10기에서 배출되는 대기오염물질로 연간 최소 1,600명에서 최대 5,000명의 조기 사망자가 발생할 것으로 예상되며, 발전소들을 평균 수명인 30년간 운영한다면 총 조기 사망자 수는 최소 47,000명에서 최대 151,000명에 이를 것으로 나타났다.

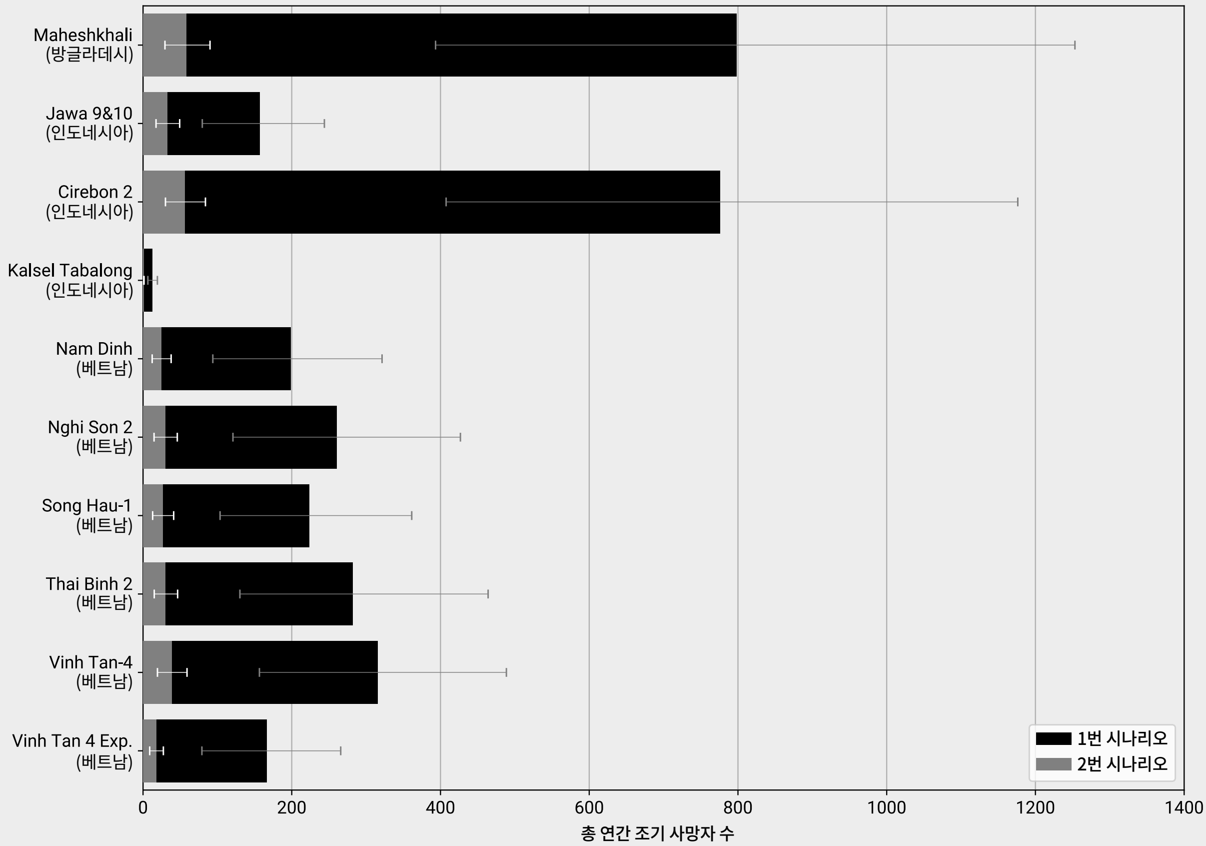
Photo (left): ⓒ Kemal Jufri / Greenpeace

표 7.
1번 시나리오와 2번 시나리오 하에서 모델링 대상 석탄화력발전소의 대기오염물질로 인해 예상되는 국가별 연간 조기 사망자 수[60]

	1번 시나리오 (실제 배출설계)			2번 시나리오 (한국 배출기준)			차이		
국가	중간 추정치	최소 추정치	최대 추정치	중간 추정치	최소 추정치	최대 추정치	중간 추정치	최소 추정치	최대 추정치
방글라데시	643	315	1,015	47	23	72	597	291	943
캄보디아	71	31	115	9	4	14	62	27	101
중국	157	81	246	19	10	28	138	70	218
인도	87	45	132	7	4	10	81	42	123
인도네시아	946	493	1,440	90	48	135	856	445	1,305
라오스	5	2	9	0	0	1	5	2	8
말레이시아	4	2	6	1	0	1	3	2	5
미얀마	67	31	104	5	2	8	62	29	95
태국	33	15	54	4	2	7	29	13	47
베트남	1,177	553	1,900	134	67	208	1,042	486	1,692
총계	**3,189**	**1,566**	**5,020**	**315**	**161**	**483**	**2,874**	**1,406**	**4,537**

표 8. 1번 시나리오와 2번 시나리오 하에서 모델링 대상 석탄화력발전소의 대기오염물질로 인해 예상되는 사망 원인별 연간 조기 사망자 수
각 국가의 사망 원인별 조기 사망자 수는 부록의 표 A.2.에 나와있다. COPD: *만성 폐쇄성 폐질환*, LRI: *하기도 감염*, IHD: *국소 빈혈성 심장질환*

		1번 시나리오 (실제 배출설계)			2번 시나리오 (한국 배출기준)			차이		
오염물질	원인	중간 추정치	최소 추정치	최대 추정치	중간 추정치	최소 추정치	최대 추정치	중간 추정치	최소 추정치	최대 추정치
$PM_{2.5}$	COPD	197	115	278	22	13	31	175	102	247
	폐암	149	59	238	19	8	30	130	52	208
	LRI	122	0	249	14	0	28	108	0	220
	당뇨	111	14	209	13	2	24	99	12	185
	IHD	982	624	1,340	111	71	151	871	553	1,189
	뇌졸중	641	387	894	75	45	105	566	342	790
	합계	**2,202**	**1,199**	**3,209**	**253**	**138**	**369**	**1,948**	**1,062**	**2,840**
NO_2	**전체 사인**	**988**	**372**	**1,812**	**62**	**23**	**114**	**926**	**349**	**1,698**
총계		**3,190**	**1,571**	**5,021**	**315**	**161**	**483**	**2,875**	**1,410**	**4,538**



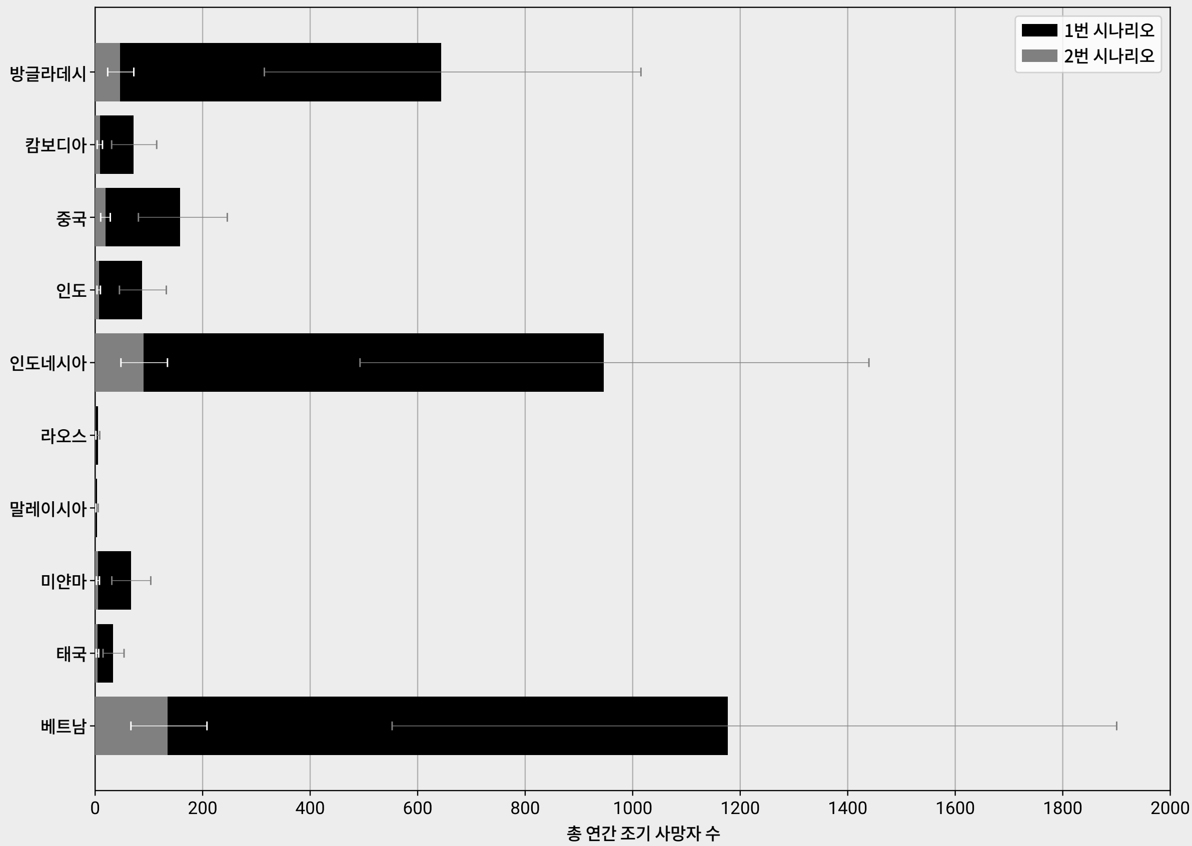


그림 11. 총 연간 조기 사망자 수 모델링 결과: 발전소별 (상단) 및 국가별 (하단)

수염(whisker lines)은 95% 신뢰구간을 표시한다.[61] (표6 및 표7의 데이터)

요약: 한국의 이중기준으로 인한 예상 조기사망자 수

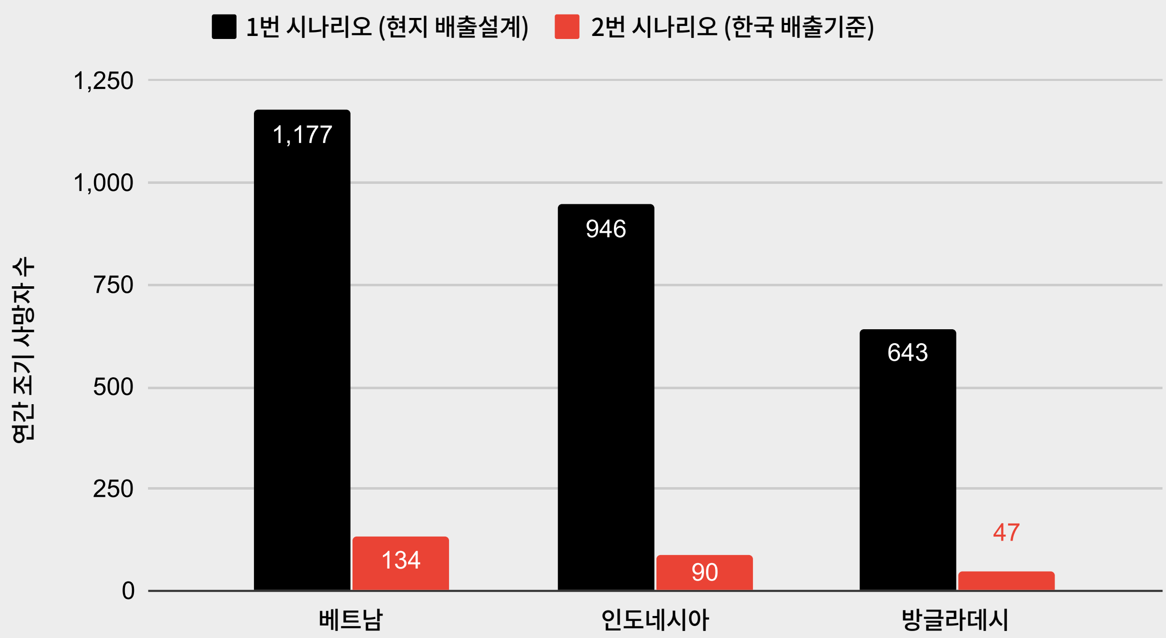


그림 12. 연간 조기 사망자 수 모델링 결과: 1번 시나리오(검은색)와 2번 시나리오(빨간색) 하에서 한국 공적 금융기관이 투자한 석탄화력발전소로 인한 소재국 내 조기 사망 (불확실성은 약 50% 수준, 정확한 수치는 표7 참고)

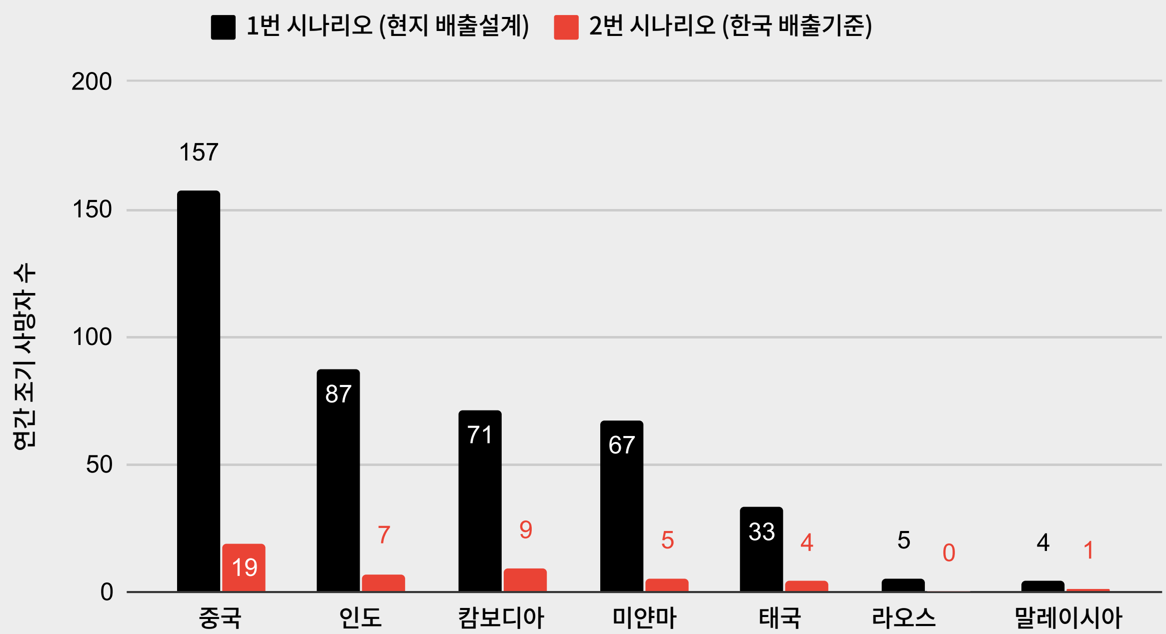


그림 13. 연간 조기 사망자 수 모델링 결과: 1번 시나리오(검은색)와 2번 시나리오(빨간색) 하에서 한국 공적 금융기관이 투자한 석탄화력발전소로 인한 제3국(주변 국가) 내 조기 사망 (불확실성은 약 50% 수준, 정확한 수치는 표7 참고)

그린피스 동아시아 서울사무소는 한국의 공적 금융기관 투자를 받는 해외 석탄화력발전소가 소재국의 대기질 및 인체 건강에 미치는 영향을 모델링하였다. 현재 적용중인 현지의 배출설계(1번 시나리오)대로 10개 발전소를 가동하는 경우 연간 3,200명(최소 1,600명에서 최대 5,000명)[62]의 조기 사망자를 유발할 것이며(그림12), 석탄화력발전소의 평균 수명인 30년 동안 가동할 경우 조기 사망자 수는 96,000명(최소 47,000명에서 최대 151,000명)으로 늘어날 것으로 예상된다. 이 수치는 미래의 인구 성장을 고려하지 않은 결과이므로, 미래에 인구가 증가할 경우 조기 사망자의 수도 더욱 증가할 것이다.

또한 본 모델은 해당 석탄화력발전소 외에 다른 오염원에서 발생한 오염물질은 고려하지 않았다.[63] 다른 오염원의 오염물질이 발전소로부터 발생한 오염을 더욱 악화시킬 것이므로, 유해한 오염 수준에 노출되는 실제 인구수와 그로 인한 조기 사망자 수는 더욱 늘어날 가능성이 있다.

가장 많은 조기 사망자가 발생할 것으로 추정되는 국가는 베트남이며, 인도네시아와 방글라데시가 그 다음 순이다. 주변 국가(중국, 인도, 캄보디아, 미얀마, 태국, 라오스, 말레이시아) 또한 국경을 넘어 퍼지는 대기오염의 영향으로 매년 총 424명(최소 206명에서 최대 664명)의 조기 사망자가 발생할 것으로 나타났다(그림13).

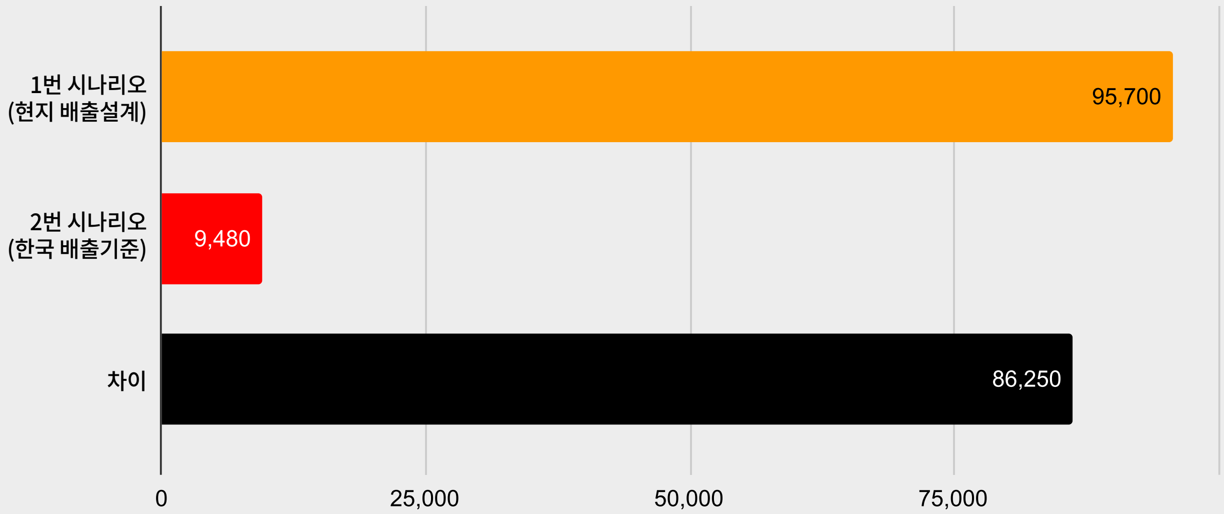


그림 14. 총 조기 사망자 수 모델링 결과: 1번 시나리오(현지 배출설계)와 2번 시나리오(한국 배출기준) 하에서 한국 공적 금융기관이 투자한 석탄화력발전소로 인한 조기 사망자 수 및 두 시나리오 간 차이
(한국 배출설계를 적용할 경우 조기 사망 위험에서 벗어나는 사람의 수. 불확실성은 약 50% 수준)

이들 석탄화력발전소는 한국에서 요구되는 것보다 훨씬 느슨한 수준의 대기오염물질 배출설계 하에 가동되고 있다. 배출설계의 이중적 기준을 없애고 한국의 배출기준 내에서 모든 발전소를 가동한다면, 앞서 추산한 조기 사망자의 90%가 위험에서 벗어날 수 있다. 석탄화력발전소의 평균 수명인 30년 동안 총 86,000명(최소 42,000명에서 최대 136,000명)이 조기 사망의 위험에서 벗어나는 것이다(그림14).

© Jurnasyanto Sukarno / Greenpeace

4. “최신기술”이 적용된 석탄화력발전소 역시 치명적이다

석탄업계와 일부 발전회사들은 고효율 보일러와 같은 선진 기술이 오염 수준을 현저히 줄일 수 있다고 주장하고 있다. 한국 정부와 석탄업계는 초초임계(USC) 기술이 환경성과 효율 측면에서 최신기술을 적용한 것이라 주장하면서 이의 개발과 채택을 추진하고 있다.[64]

이른바 “친환경 석탄” 기술이라 홍보되는 이 같은 초초임계 기술은 의사 결정자들이나 공적 금융기관을 오도하는 결과를 낳는다. 이 기술을 적용한 석탄화력발전소를 선택하면 대기오염물질과 이산화탄소 배출을 크게 줄일 수 있다고 오해하게 만드는 것이다. 한국에서 규모가 큰 금융기관에 속하는 수출입은행, 무역보험공사, 산업은행은 초초임계라는 최신기술에 대한 근거없는 믿음을 갖고 있다.

그러나 초초임계 기술을 적용한 석탄화력발전소가 과거의 기술을 적용한 것보다 효율이 높을지라도, 석탄화력발전소는 여전히 심각한 오염물질 배출원이다. 이는 아무리 엄격한 배출설계를 적용한다 하더라도 변하지 않는 사실이다.

아임계(SUBC) 보일러를 적용한 석탄화력발전소와 비교하면, 초초임계 보일러를 장착한 발전소의 대기오염물질 배출량은 단지 10~15% 줄어들 뿐이다(그림15). 반면 풍력, 태양광 패널, 태양열 발전, 지열, 수력 및 기타 재생가능에너지 기술은 가동 중에 어떠한 대기오염물질도 배출하지 않는다. 석탄 연소가 발생시키는 대기오염으로 수십만 명이 사망하는 일을 막는 유일한 방법은 더러운 석탄화력발전소를 퇴출하고 현대의 청정 재생가능에너지원으로 나아가는 것이다.

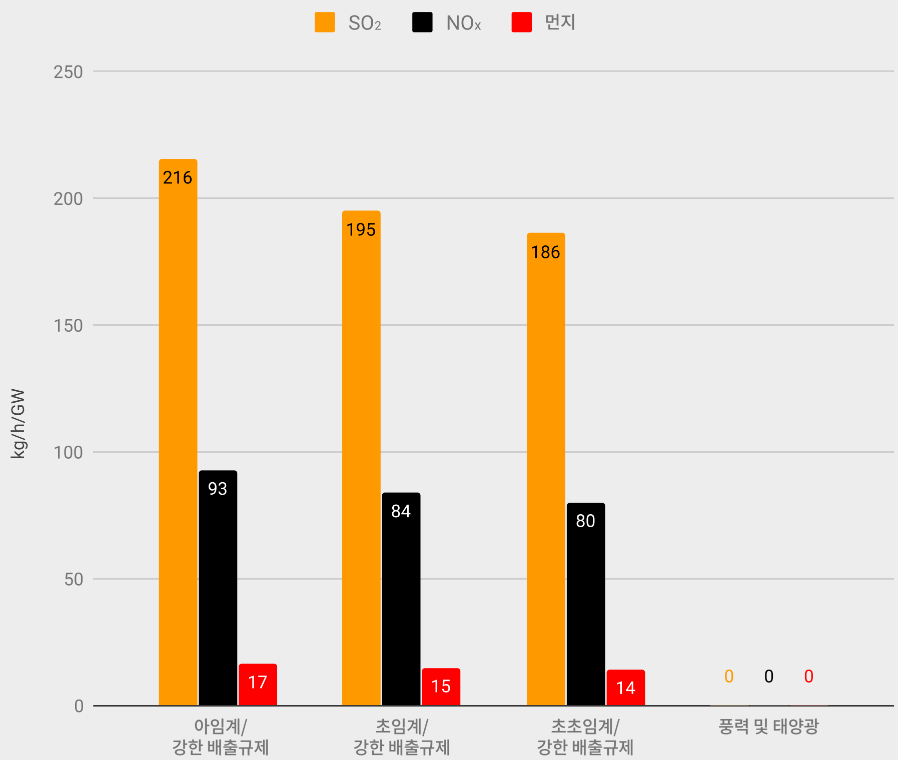


그림 15.
전기 에너지 생산량 당 대기오염물질(SO_2, NO_x, 먼지) 배출량: 석탄화력발전소 (아임계, 초임계, 초초임계)[65] 대비 재생가능에너지 발전소 (단위: kg/h/GW)

5. 한국은 석탄 대신 재생가능에너지 지원해 조기 사망 위험에서 사람들 구해야

본 보고서는 한국의 수출입은행, 무역보험공사, 산업은행이 국내 석탄화력발전소보다 느슨한 수준의 배출설계가 적용된 해외 발전소에 투자하는 사업의 결과 모델링을 통해 한국 공적 금융기관이 가진 비윤리적이고 치명적인 이중기준을 폭로하고 있다. 이는 피할 수 있는 질병과 조기 사망을 묵인하는 석탄화력발전소 산업계와 한국의 공적 금융기관이 공범임을 보여주는 것이기도 하다.

국내에서 요구되는 환경 기준을 지키지 않는 해외 사업 개발은 정당화될 수 없다. 한국 국민과 마찬가지로 해외 시민들의 생명과 안전도 중요하다. 그들도 미세먼지 건강 피해와 조기 사망 위험에서 벗어나야할 권리가 있다. 한국의 투자는 이들의 당연한 권리와 인권을 침해하는 것이다. **한국 정부는 해외 석탄화력발전소 투자를 당장 중단하여 비윤리적인 이중기준 문제를 해결해야 한다.** 동시에 석탄화력발전소 사업을 유치한 소재국의 정부는 기존 발전소의 배출기준을 강화하여 안전하고 건강한 환경을 누릴 자국민의 권리를 보호해야 한다.

이번 연구 결과는 전력 생산을 위한 석탄 연소가 인체 건강에 미치는 막대한 영향을 극적으로 드러냈을 뿐만 아니라, 석탄화력발전소의 배출기준을 엄격히 규제하더라도 여전히 광범위한 중증 질환과 조기 사망 사태를 피할 수 없다는 점을 보여준다. 석탄화력발전소를 안전하거나 청정하게 운영할 수 있는 방법은 없다.

석탄화력발전소의 문제는 대기오염만이 아니다. 석탄발전소가 배출하는 온실가스는 해양 산성화, 지구 온난화뿐만 아니라 해수면 상승, 생물다양성의 막대한 손실, 기상이변 심화 등과 같은 2차 영향을 일으켜, 전지구적 차원에서 인간 및 환경에 장기적 위해를 가한다. 하지만 본 보고서에서는 이와 같이 온실가스로 초래되는 또 다른 문제점에 대해서는 다루지 않았다.

한국의 금융기관인 수출입은행, 무역보험공사, 산업은행과 소재국은 모든 석탄화력발전소 사업을 즉시 중단하고 재생가능에너지로 투자를 전환해야 한다. 국제 사회는 함께 협력해 탄소 중립 경제로 나아가야 하며, 한국은 이러한 변화를 이끄는 선도적 역할을 맡아야 한다.

본 보고서의 분석 대상인 석탄화력발전소들을 운영하는 소재국은 한국과 국제 사회의 지원을 받아 석탄에서 재생가능에너지로 에너지 구조를 전환하는 일에 착수해야 한다.

인간과 환경을 보호하고 지구의 미래를 수호하기 위해 이와 같은 정책 변화와 투자 전환은 더욱 빨라져야 한다. 재생가능에너지는 새로 석탄화력발전소를 짓는 것보다 경제성이 높고 더 경쟁력 있는 차세대 에너지로 이미 공인받고 있다.[66] 대기오염과 기후변화 피해를 동시에 완화하는 해결책이기도 하다.

한국의 공적 금융기관이 치명적이고 이중적인 해외 석탄화력발전소 투자를 중단하는 순간, 수십만의 생명이 조기 사망 위험에서 벗어나게 된다. 나아가 전기 생산을 위해 석탄을 태워온 세대가 모든 석탄화력발전소를 퇴출한다면 앞으로 올 수많은 세대가 구원을 받을 수 있다는 점을 잊지 말아야 한다.

한국 정부는 해외 석탄화력발전소 투자를 당장 중단하여 비윤리적인 이중기준 문제를 해결해야 한다.
한국의 금융기관인 수출입은행, 무역보험공사, 산업은행과 소재국은 모든 석탄화력발전소 사업을 즉시 중단하고 재생가능에너지로 투자를 전환해야 한다.

지도 관련 고지사항

그린피스는 지구 환경을 보호하고 평화를 증진하기 위해 캠페인을 펼치며, 시민들의 태도와 행동에 변화를 유도하는 전 지구적 환경단체입니다. 그린피스는 정치적인 독립성을 유지하며, 국제 영토 분쟁지역에 관해 특정 의견을 피력하지 않습니다. 그린피스의 공식 웹사이트와 출판물에 표기되는 지도는 해당 지역 및 국가의 규제에 따른 것으로, 분쟁지역에 대한 그린피스의 입장을 대변하는 것은 아닙니다.

투자 관련 고지사항

그린피스 동아시아 서울사무소는 투자자문사가 아니며 특정한 기업이나 투자 펀드 혹은 기구에 대한 투자의 적정성에 관해 어떠한 진술도 제공하지 않습니다. 본 투자자 브리핑 자료에 명시된 내용에 의존하여 그러한 투자 펀드나 법인에 투자하는 결정을 내리는 일은 없어야 합니다. 그린피스 동아시아 서울사무소가 신뢰할 수 있는 것으로 판단되는 정보를 입수한 것은 사실이지만, 그린피스 동아시아 서울사무소는 본 문서에 포함된 정보와 연관하여 수익의 상실, 징벌적 손해배상, 결과적 손해배상 등 성격을 불문하고 어떠한 청구나 손실에 대해서도 책임을 지지 않습니다. 본 보고서에 표명된 견해는 각주에 명시된 문서에 기초를 두고 있습니다.

교차 검토자 소개

© Regulatory Assistance Project

크리스토퍼 A. 제임스(Christopher A. James)

전(前) 미국 환경보호청(EPA) 규제관 및 주 정부 대기질 감독관

크리스토퍼 A. 제임스는 온실가스와 독성물질을 감축해 기존 · 신규 대기질 기준을 충족하고 수질을 개선하며 소비자를 보호하는 방법에 대해 규제 기관과 여러 단체에 자문을 제공하고 있다. 그는 대기질, 에너지 효율, 수요 대응뿐만 아니라 대기질과 에너지 계획 과정에서 에너지와 환경의 연계 등 광범위한 분야에서 활동하고 있다.

최근에는 유럽 동부와 동남아시아 지역의 환경 운동가 및 보건 전문가와 함께 협업하여 발전소 대상 배출기준 개선 프로젝트를 진행하고 있다. 또한 2008년부터 중국 정부의 대기질 담당 공무원들과 함께 대기질 개선을 위한 계획 개발 및 이행, 중국 대기법 강화, 통합환경허가(environmental permitting) 시스템 개발 등을 추진하고 있다.

환경 모니터링 네트워크, 배출 인벤토리와 관리 대책 개발에서부터 대책 이행 및 강화에 이르기까지 대기질과 관련된 거의 모든 주제를 아우르며 대기질 분야에서 35년의 경험을 쌓아 왔다. 특히 다중 오염원(multi-pollutant) 대기질 계획 및 에너지 효율의 정성화를 신뢰도 높은 자료이자 대기질 관리 대책으로서 중요하게 다루고 있다.

과거 코네티컷 환경보호국의 대기 계획 감독관이자 및 기후변화 및 에너지 프로그램 관리자로서, 코네티컷 주가 지역 온실가스 이니셔티브에 참여하도록 도왔다. 또한 코네티컷 에너지 절약 관리 위원회(Connecticut Energy Conservation Management Board)의 환경보호국 대표였으며 설비 에너지 효율 프로그램에 대하여 감독 및 자문 제공 역할을 하였다.

미국 환경보호청의 시애틀 지역 사무소에서는 대기질 규제 강화에 대한 노력을 인정받아 두 번의 “금메달”을 수여받았다. 또한 시냅스 에너지 이코노믹스사(Synapse Energy Economics) 및 설비•바이오매스 에너지 산업의 컨설턴트들을 대상으로 한 민간 부문에서도 업무 경험이 있다.

우스터 폴리텍 대학교에서 기계 공학 학사 학위를, 브라운 대학교에서 환경학 석사 학위를 취득하였다.

기술 용어 및 약어 용어집

PFA	공적 금융기관
공적 금융기관	정부 소유의 금융기관. 본 보고서에서는 크게 다음과 같은 한국 정부 기관을 언급한다. - 공적 수출신용기관: **한국수출입은행(KEXIM)**, - **한국무역보험공사(K-SURE)** - 국영 정책개발은행: **한국산업은행(KDB)**
WHO	세계보건기구
대기질 가이드라인	WHO가 제시한 오염물질 농도에 대한 가이드라인. 가이드라인 수치를 초과하는 오염물질 농도는 인체 건강에 해로운 것으로 간주된다. 가이드라인 농도 이하의 수준에 대해서는 인체 건강에 대한 위험 여부 및 그 수준이 명확하지 않다.
CFPP	석탄화력발전소
초과	대기오염물질의 농도가 WHO의 대기질 가이드라인상 적정 농도를 초과하는 기간
신뢰 구간	본 연구의 건강 평가 모델에서는 인구수, 배경 사망률 등의 실증적 데이터를 사용한다. 이들 변수의 참값(true values)은 절대적인 정확성을 가진다고 단정할 수 없다. 이는, 그 어떠한 모델링 연구도 절대적인 정확도로 결과를 제시할 수 없음을 의미한다. 대신 본 보고서에서는 참값을 포함할 가능성이 큰 범위(구간)를 제공하였다. 본 연구에서는 95% 신뢰 구간을 사용한다. 이는 실제의 값이 95%의 확률로 신뢰 구간 내에 있으며 5% 확률로 해당 구간 밖에 있다는 것을 의미한다(값이 더 크거나 작음). 참값일 가능성이 가장 높은 값을 중앙 추정치라고 부르며, 이는 신뢰 구간 내에 존재한다. 신뢰 구간의 경계를 최소 추정치 및 최대 추정치라 한다. **동의어:** 95%-신뢰 구간(본 연구 대상), "x와 y 사이"
중앙 추정치	신뢰 구간 참고
최소 추정치	신뢰 구간 참고
최대 추정치	신뢰 구간 참고
배출 농도	발전소의 연도가스(flue gas) 내 일부 오염물질의 실제 농도 (예: 425 mg/Nm^3 혹은 200 ppm). 배출 농도는 발전소의 배출설계를 초과하거나(관련법 위반) 또는 그 미만(법 준수)일 수 있다. 오염물질 농도와는 달리 발전소 외부의 지상이 아닌 연도가스 내부에서 측정한다. **관련 용어(동의어 아님):** 배출률(emission rate) **다음의 용어와 혼동하지 않는다:** 오염물질 농도
배출률	특정 발전소가 단위 시간당 배출하는 오염물질의 양 (예: 100kg/시간). 경우에 따라 배출 농도 대신 석탄화력발전소 오염 정도의 척도로서 사용한다. **관련 용어(동의어 아님):** 배출 농도
배출설계	특정 발전소에 대한 최대 허용 배출 농도 (일부 경우 배출률). 국가 기준, 환경 허가 조건(국가 기준을 기반으로 할 수 있으나 느슨하거나 엄격할 수 있음) 또는 기타 법적 규정에 따라 정해질 수 있다. **관련 용어(동의어 아님):** 배출기준
배출기준	국가적으로 (혹은 초국가적으로) 규제하는 배출 농도의 최대 한도 (일부 경우 배출률). 국가 기준과 차이가 있을 수 있는 특정 발전소의 배출설계와는 다를 수 있다. **관련 용어(동의어 아님):** 배출설계
대기오염물질	고체 입자, 액체 방울 또는 기체의 형태로 대기중에 있는 의도치 않은 물질. 대기오염물질을 흡입할 경우 인체 건강에 위험하거나 유해할 수 있으며 환경에 피해를 줄 수 있다. 대표적 사례로는 $PM_{2.5}$, NO_x군 및 SO_2가 있다. **동의어(본 용어집에서):** 오염물질
오염물질 농도	모든 위치에서 (발전소에서 가까이 혹은 멀리) 측정한 일부 오염물질의 실제 농도. 현지 인구가 노출되는 농도이며, 이는 공중보건에 대한 영향이 해당 값에 의해 결정됨을 의미한다. 오염물질 농도는 대기질 가이드라인을 초과(위반)하거나 그 미만(준수)일 수 있다. **다음의 용어와 혼동하지 않는다:** 배출 농도
24시간 최대 농도	측정 혹은 모델링을 통해 구한 최고 오염물질 농도. 24시간 기간에 대하여 평균값을 구한다. 규제 혹은 가이드라인이 아닌, 실제로 발생하거나 발생하리라 모델링한 오염물질에 대한 농도이다. 다른 기간에 대해서도 적용 가능하다 (1시간, 10분). **다음의 용어와 혼동하지 않는다:** 대기질 가이드라인, 배출설계

연도가스	연돌을 통해 발전소가 배출하는 가스
아임계 (subcritical)	일반적인 석탄화력발전소는 물리적으로 아임계라 불리는 보일러 조건에서 가동한다. 발전기는 물을 사용하여 터빈을 구동하는데, 물을 끓여 터빈을 구동하는 증기를 발생시킨다. 터빈의 물의 상태는 초임계 온도 및 압력까지는 상승하지 않는다. 아임계 석탄화력발전소의 열효율은 35% 이하이다. **유의 사항:** 본 설명의 맥락상, "임계(critical)"라는 용어는 "위기(crisis)" 혹은 "제어 불가 지점(out-of-control point)"과 같은 일상용어를 의미하지 않는다. **관련 용어(동의어는 아님):** 초임계, 초초임계
초임계 (supercritical)	초임계 조건에서 가동할 경우, 보일러의 물의 온도 및 압력은 외래 물리 상태(exotic physical state)가 될 정도로 높다. 이 상태에서는 기체와 액체의 구분이 불가능하다. 초임계 석탄화력발전소는 22-25MPa의 압력과 540-580°C의 온도에서 가동함으로써 아임계보다 높은 열효율을 달성한다. 초임계 석탄화력발전소의 열효율은 35-40%이다. **관련 용어(동의어는 아님):** 아임계, 초초임계
초초임계 (ultra-supercritical)	초초임계 석탄화력발전소는 초임계 발전소보다도 더 높은 온도에서 가동한다. 22-25MPa의 압력과 580-620°C의 온도에서 가동함으로써 초임계보다 높은 열효율을 달성한다. 초초임계 석탄화력발전소의 열효율은 45-52%이다. **관련 용어(동의어는 아님):** 아임계, 초임계
MPa	메가파스칼 (압력의 단위). 대기의 압력은 0.1MPa이다.
NO	**일산화질소.** 모든 연소 과정에서 생성되는 미량 가스. NO_2에서 변환되거나 NO_2로 변환된다. **동의어:** 산화질소
NO_2	**이산화질소.** 모든 연소 과정에서 생성되는 가스. 일산화질소(NO)에서 변환되거나 NO로 변환된다. 전체 질소산화물(NO_x)군의 건강영향을 평가하기 위해 주로 대기 중 NO_2의 양을 대용물로 사용한다
NO_x	**질소산화물.** 인체 건강에 해로운 미량 가스군인 NO 및 NO_2의 총칭
SO_2	**이산화황.** 석탄화력발전소 내의 석탄 연소나 일부 광물의 가공 등 황을 함유한 물질의 산업 공정에 의해 생성되는 가스. 대기 중 이산화황의 99%는 인위적인 활동으로부터 나온다. SO_2는 다른 물질과 반응하여 황산(H_2SO_4), 아황산(H_2SO_3) 및 황산염 입자와 같은 유해 화합물을 형성하며 산성비 및 미세먼지($PM_{2.5}$) 오염의 원인이 된다.
dust	**고체 대기중 입자.** 석탄화력발전소에서 배출되는 연도가스에서 대개 비산재를 뜻한다. $PM_{2.5}$는 먼지의 아강(亞綱)이다.
$PM_{2.5}$	**미세먼지.** 직경(aerodynamic diameter)이 2.5μm미만인 고체 입자로, 즉 초 미세 먼지 입자이다.[67] 초미세먼지는 폐에서 혈류로 흘러들어올 정도로 작아 전체 심혈관계에 영향을 주고 다양한 건강영향을 초래한다. 작은 크기 덕분에 오랜 시간 대기중에 떠다니면서 수천 킬로미터를 이동할 수 있다. 화석연료 연소는 비산재 및 기타 불연소 입자와 더불어 $PM_{2.5}$를 직접 배출하며, 대기중에서 $PM_{2.5}$를 생성하는 대기오염물질(특히 SO_2와 NO_x) 또한 배출하여 2차 생성 초미세먼지($PM_{2.5}$)의 원인이기도 하다. $PM_{2.5}$는 인체 건강에 해로운 영향을 미치며 따라서 대기오염물질에 속한다.
mg	**밀리그램.** 1그램의 1,000분의 1 (작은 개미의 질량 정도이다)
mg/Nm^3	**정규화된 입방 미터 당 밀리그램.** 1입방 미터의 기체에서 물질의 질량을 밀리그램 단위로 표시한 것. 온도와 압력의 변화에 따라 기체는 크게 팽창하거나 수축한다. 발전소의 연도가스 온도는 지구 표면의 정상 주위 온도보다 훨씬 높다. 연도가스 내부의 오염물질 농도를 비교하기 위해 지구 표면의 정상 온도와 압력에 대한 농도로 단위를 변환한다.
ppm	**피피엠.** 농도를 기술한다: 특정 물질이 1백만이라 할 때 그 중의 수. 질량이나 부피를 나타낼 수 있다.
μg	**마이크로그램.** 백만분의 1 그램(개미의 더듬이 질량 정도이다)
μm	**마이크로미터.** 천만분의 1 밀리미터

부록. 건강영향 모델링 방법

방법 개요

대기 확산 모델링시스템과 인구 데이터를 결합한 접근법을 적용하여 석탄화력발전소에서 배출된 대기오염물질로 인한 영향을 도출한다. 대기 확산 모델링 시스템은 대기오염물질 농도를 추정하는 방식을 의미하며, 인구 데이터를 건강에 미치는 효과를 추정하기 위해 이용하였다.

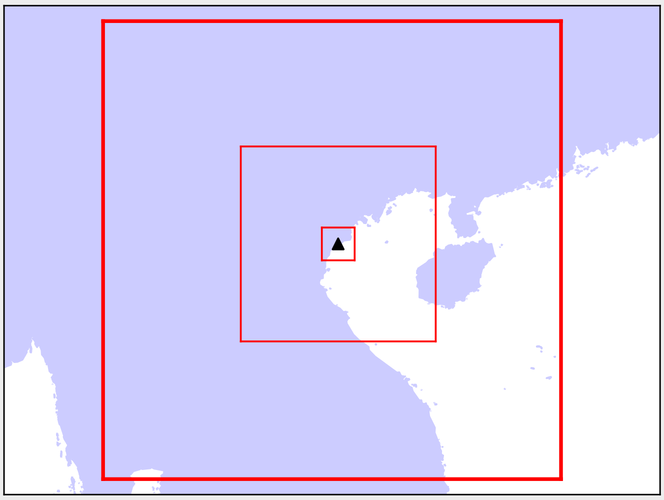


그림 A.1.

각 발전소에 대하여 배출원(검은색 삼각형 - 그림 A.1은 베트남 북부 지역의 남딘(Nam Dinh))을 중심으로 3개 격자(적색 박스)의 범위에서 수치예보 모델을 적용한다.

1. 대기 확산 모델링 시스템

대기확산모델은 크게 두 가지 요소로 구성된다. 석탄화력발전소 주변 지역의 기상 조건을 시뮬레이션할 목적으로 기상 모듈이 적용된다. 석탄화력발전소에서 배출된 대기오염물질이 주변 환경으로 전파되는 양상을 시뮬레이션하기 위해 해당 모듈에 화학수송 모델(chemistry-transport model)을 결합한다.

a) 기상 모델.

석탄화력발전소 주변의 기상은 The Air Pollution Model (TAPM) 버전3을 적용하여 모델링을 실시한다.[68] TAPM에는 대기오염물질 확산 모델링 기능도 포함되어 있지만 본 시뮬레이션에서는 TAPM의 기상 요소만을 이용한다. 개별 석탄화력발전소를 중심으로 3개 둥지격자에 대해 모델을 적용한다. 여러 석탄화력발전소가 가까이 위치한 경우 그 집단을 중심으로 한다. 모델 격자는 37x37 격자 세포로 구성되며 공간 해상도는 각각 40 km, 10 km, 2.5 km로 중심에 가까워질수록 세밀해진다(그림 A.1). 경계 조건은 호주 기상청의 GASP 모델로부터 도출했다.[69] 모든 TAPM 시뮬레이션에서 2017년의 마지막 9일에 대해 스핀업 기간을 적용한다. 그 이후로 2018년 전체에 대해 TAPM을 적용하여 화학수송 모델 시뮬레이션에 이용할 데이터를 확보한다.

b) 대기 화학수송 모델.

CALPUFF 모델 버전7을 적용하여 확산과 화학적 변성 그리고 석탄화력발전소에서 배출되는 NO_x, SO_2, 1차 $PM_{2.5}$의 침적에 대한 모델링을 실시한다.[70] 본 시뮬레이션에서는 석탄화력발전소로 인한 영향에만 초점을 맞추고 있으므로 다른 배출원은 모델에서 배제시켰다. 다만 O_3, NH_3, H_2O_2 배경농도는 화학 모듈에 이용하기 위해 포함시켰다.[71] 이를 토대로 두 배출 시나리오(1번 시나리오(실제 배출설계)와 2번 시나리오(한국 배출기준))에 대해 모델링을 실시했다. 모델을 통해 모델 격자 전역의 격자 수용점에 대한 근지표 오염물질 농도 시계열이 산출된다.

c) 배출 데이터 소스.

대기오염물질 배출률(emission rate, ER)과 연도가스 (flue gas) 배출 특성은 각 사업 관계자가 공개한 데이터에 최대한 근거를 두고 있다. 해당 사업의 환경영향평가(EIA), 환경허가, 타당성 조사 보고서 및 기타 자료에서는 이하의 데이터를 수집하였다. 모델링에 사용되는 오염물질 배출률 및 연도가스 방출 특성은 가능한 각 석탄화력발전소 사업의 제안자가 공개한 데이터를 근거로 한다. 다음의 데이터는 공개된 환경영향평가, 환경 허가, 타당성 조사(feasibility study) 및 기타 각 석탄화력발전소 관련 문서에서 수집하였다.

- 연간 배출량 (AEV)
- 전면 가동 시 배출률 (ER)
- 연도가스의 오염물질 농도 (CFG)
- 연도가스 체적 유량 (FGV)
- 석탄화력발전소의 순 연효율 (EFF), 발전용량 (CAP), 증기조건(아임계/초임계/초초임계)
- 예상 설비부하율 (PLF)
- 석탄 유형
- 연돌(stack) 높이 및 내부 직경
- 연도가스 방출 온도 및 속도
- 연돌 위치

최대 단기 대기질 영향과 연간 대기오염물질 노출 및 건강영향을 평가하기 위해서는 AEV와 ER에 관한 데이터가 요구된다. AEV나 ER 중 하나를 입수할 수 없는 경우, 해당 매개변수를 아래 공식으로부터 산출했다.

$$ER = AEV / PLF$$

예상되는 최대 단기 공기 질 영향과 관련된 보수적인 가정을 적용하여 발전소가 가동되는 동안 CFG가 일정하게 유지되는 것으로 가정했다. ER과 AEV를 입수할 수 없는 경우 아래 공식으로부터 ER을 산출했다.

$$ER = FGV * CFG$$

FGV를 입수할 수 없는 경우 아래 공식으로부터 FGV를 추정했다.

$$FGV = CAP / EFF * SFGV$$

위 공식에서 SFGV는 석탄화력발전소에서 사용하는 석탄 유형에 대해 추정되는 단위 열입력(Nm^3/GJ) 당 특정 연도가스 부피를 의미한다. 특정 사업의 CFG를 알 수 없는 경우에는 해당 국가의 대기오염물질 배출기준에 근거해 추정하였다.

석탄의 진발열량, 수분, 회분 함량에 근거하여 SFGV 값을 추정할 목적으로 유럽 기준 EN 12952-15의 85페이지에 수록된 실험식 A.5N을 적용했다. 석탄 특성은 가능한 경우 사업 문서에서 구하였고, 그렇지 않은 경우에는 USGS 세계 석탄 품질 인벤토리에서 가장 유사한 종류의 표본으로부터 도출하였다.[72] 불특정한 해상 수송을 통해 아역청탄을 수입하는 사업의 경우 칼리만탄산 석탄의 평균값을 적용하였다. 불특정한 해상 수송을 통해 역청탄을 수입하는 사업에 대해서는 호주산 석탄의 평균값을, 인도네시아 내에서 불특정 국내 해상 수송을 통해 자국 석탄을 사용하는 사업에 대해서는 수마트라산 석탄의 평균값을 적용하였다.

모든 사업의 AEV와 ER을 구한 후에 전면 가동 배출률을 기준으로 1년 전체를 대상으로 대기 모델을 적용했으며 그에 따른 지표면 대기오염물질 농도 필드를 이용해 최대 단기 대기질 영향을 분석했다. 건강영향 평가를 위해 평균 농도를 예상 설비부하율(PLF)을 통해 축소함으로써 석탄화력발전소의 연간 배출량을 1년 전체로 분산시켰다.

석탄 유형 및 발전소 위치에 대한 데이터가 공개되지 않은 경우, 글로벌 석탄발전소 트랙커(Global Coal Plant Tracker)를 참고하였다.[73] 연돌 높이 및 내부 직경, 연도가스 방출 온도 및 속도, 순 연효율 및 예상 설비부하율의 경우에는, 유사한 사업들의 중앙값을 이용하여 누락 데이터를 보충하였다. 열효율에 대한 특정 정보가 제공되지 않았으나 해당 발전소의 증기 조건을 아는 경우에는 아임계, 초임계 및 초초임계 발전소에 대하여 각각 38%, 41%, 44%의 순 열효율을 가정하였다.

2. 건강영향 평가

대기오염 모델(1단계) 결과를 이용하여 세계보건기구(WHO) 대기오염 가이드라인을 초과하는 농도에 노출된 주민의 수를 추산하고 그러한 대기오염이 현지 주민의 건강에 미치는 영향을 산정했다.

a) 가이드라인 초과 농도에 대한 노출.

1km 해상도의 인구 데이터를 이용하여 WHO 가이드라인을 초과하는 지역에 거주하는 주민의 수를 분석했다. WHO 가이드라인에는 연간 평균 농도에 관한 지침과 단기간 동안의 평균 농도에 관한 지침이 존재한다. 연간 평균 농도에 관한 지침의 경우 분석 기간인 1년 전체에 대한 시간 평균을 적용했다. 단기간 농도의 경우 각각의 개별 화학 모델 수용점에 대해 적절한 시간 이동 평균의 최대값을 계산했다.

b) 건강영향.

다양한 조기 사망 원인과 대기오염물질 농도 상승 간의 연관관계에 따른 상대 위험의 실험값을 적용하여 과도한 대기오염으로 인한 사망자 수를 분석했다. 상대 위험 r은 특정한 대기오염에 과도하게 노출된 사람이 조기에 사망할 가능성이 노출이 배제된 경우와 비교하여 얼마나 높은지를 표시한다.

$$m_x / m_0 = r \quad (1)$$

m_x는 대기오염이 증가한 Δx조건 하에서의 사망률(거주자 수 대비 사망자 수)을 의미하며 m_0은 과도한 대기오염이 없었을 경우의 사망률을 의미한다. 최신 역학 모델하에서 r은 $m_x << 1$인 경우 x에 기하급수적으로 의존한다.[74, 75]

$$r = \exp(c\,\Delta x) \quad (2)$$

위 공식에서 c는 상수로서 농도 반응 계수라 한다. (1) 등식과 (2) 등식을 결합하면 아래의 공식을 얻을 수 있다.

$$m_x = m_0 \exp(c\,\Delta x)$$

사망자 수는 인구 P에 사망률을 곱해서 나온 결과이므로 대기오염물질 농도가 상승한 조건에서 사망하는 주민의 수는 아래와 같다.

$$d_x = P\, m_0 \exp(c\,\Delta x)$$

과도한 대기오염으로 인한 사망자 수는 아래와 같다.

$$\Delta d = d_x - d_0 = P\, m_0\, [\exp(c\,\Delta x) - 1]$$

학술 문헌에서 r값은 다수의 사인들로 세분화되거나 특정한 사인의 합계를 의미할 수 있다.

건강영향 평가에 적용된 데이터 소스

- **인구.** 사회경제데이터응용센터 (Socioeconomic Data and Applications Center, SEDAC)에서 발표한 2010년 1km 해상도 글로벌 인구 데이터를 적용했다.[76]
- **국가 경계선**은 GADM 프로젝트의 버전 3.6 (2018년 5월)에서 획정(劃定)한 내용을 따랐다.[77]
- **농도 반응 계수(CRF).** 표 A.1에 열거된 CRF를 적용했다.CRF는 NO_2의 경우 WHO (2013)[78], $PM_{2.5}$-*당뇨병*의 경우 Pope et al. (2015)[79], $PM_{2.5}$-*하기도 감염*의 경우 Mehta et al. (2011)[80], 나머지 $PM_{2.5}$의 경우 Krewski et al. (2009)[81]에 기술된 상대 위험을 근거로 산정했다. 모든 국가와 모든 연령대에는 동일한 값을 적용했다.[82]
    - 이중 집계 효과의 배제: NO_2로 인한 사망자의 최대 33%는 $PM_{2.5}$ 노출로 인한 사망과 중복될 가능성이 있다.[83] 다수의 사인들로 인한 사망자 수를 합산할 때 이중 집계의 가능성을 반영하기 위해 CRF를 적용한 후에 NO_2로 인한 원 사망자 수를 조정했다.
        - 하계를 33% 낮췄다.
        - 중점 산정치를 16.5% 낮췄다.
        - 상계는 변함 없이 유지했다(저자들은 중복 하한을 적용하지 않았다).

    본 보고서에 수록된 모든 NO_2 사망자 수는 이미 이러한 방식으로 조정했다.

- **배경 사망률**은 IHME의 2017년 전세계 질병 부담 연구(Global Burden of Disease Study 2017)에서 원용했다.[84] 해당 데이터 세트는 각 사인별 국가 평균값을 제시하고 있다. 본 보고서에서 사용한 국가별 및 사인별 수치들은 표 A.2에 열거되어 있다.

표A.3은 CRF와 배경 사망률에 사용된 사인 명칭을 비교하여 제시하고 있다.

표 A.1.
10 μg/m³ 표준 증가에 따른 상대 위험으로부터 도출한 NO_2와 $PM_{2.5}$의 농도 반응 계수. CRF는 (2) 등식을 적용하여 상대 위험으로부터 도출했다. 괄호는 95% 신뢰구간을 표시한다. NO_2의 경우 구체적인 사인에 관한 데이터가 존재하지 않는다(따라서 NO_2에 대해서는 전체 사인으로 인한 집합적인 건강영향만을 분석했다).

	NO_2		$PM_{2.5}$[85]	
	10 μg m^{-3} 증가 시 상대 위험	CRF (10^{-3} $μg^{-1}$ m^3)	10 μg m^{-3} 증가 시 상대 위험	CRF (10^{-3} $μg^{-1}$ m^3)
전체 사인[86, 87]	1.055 (1.031-1.080)	5.354 (3.053-7.696)	-	-
하기도 감염	-	-	1.128 (1.077-1.182)	11.33 (2.96-26.24)
폐암	-	-	1.142 (1.057-1.234)	13.28 (5.54-21.03)
만성 폐쇄성 폐질환	-	-	1.128 (1.077-1.182)	11.33 (2.96-26.24)
당뇨병	-	-	1.128 (1.077-1.182)	11.33 (2.96-26.24)
뇌졸중	-	-	1.128 (1.077-1.182)	11.33 (2.96-26.24)
국소 빈혈성 심장질환	-	-	1.287 (1.177-1.407)	25.23 (16.30-34.15)

표 A.2.

본 보고서에 적용된 국가별 배경 사망률은 IHME 2017년 전세계 질병 부담 데이터세트에서 원용했다. 100만 명당 연간 사망자 수는 95% 신뢰구간이 적용됐다. 표A.3에 사인이 정리되어 있다.

	전체	LRI	LC	COPD	당뇨병	뇌졸중
방글라데시	5652 (5198-6138)	245 (209-294)	161 (139-186)	412 (366-468)	159 (134-187)	1030 (933-1138)
캄보디아	6318 (5823-6893)	612 (541-694)	139 (117-165)	189 (159-220)	93 (76-109)	866 (784-969)
중국	7400 (7187-7619)	127 (119-155)	490 (468-510)	684 (655-757)	78 (74-83)	1494 (1446-1547)
인도	7178 (7049-7311)	368 (333-389)	61 (57-65)	694 (574-779)	135 (121-147)	526 (496-551)
인도네시아	6363 (6090-6661)	170 (154-181)	144 (124-168)	259 (221-291)	236 (209-265)	1195 (1125-1271)
라오스	6536 (5934-7222)	539 (437-664)	124 (100-150)	236 (190-287)	108 (88-132)	849 (736-969)
말레이시아	5389 (5041-5772)	773 (513-884)	154 (133-176)	157 (136-203)	48 (43-54)	579 (526-638)
미얀마	7765 (7060-8435)	428 (372-482)	155 (136-174)	736 (508-872)	314 (262-373)	673 (600-737)
태국	6616 (6086-7129)	512 (329-595)	276 (246-311)	225 (198-276)	166 (146-194)	610 (551-685)
베트남	6306 (5801-6932)	189 (164-234)	370 (317-432)	294 (249-338)	177 (152-205)	1161 (1060-1293)

표 A.3.

CRF 출처와 배경 사망률 데이터에 사용된 사인 명칭 비교(사인 명칭이 정확하게 일치하지 않는 경우 강조 표시)

CRF	배경 사망률
전체 사인(전체)	전체 사인
하기도 감염(LRI)	하기도 감염
폐암(LC)	기관 · 기관지 · 폐암
만성 폐쇄성 폐질환(COPD)	만성 폐쇄성 폐질환
당뇨병	제2형 당뇨병
뇌졸중	뇌졸중
국소 빈혈성 심장질환(IHD)	국소 빈혈성 심장질환

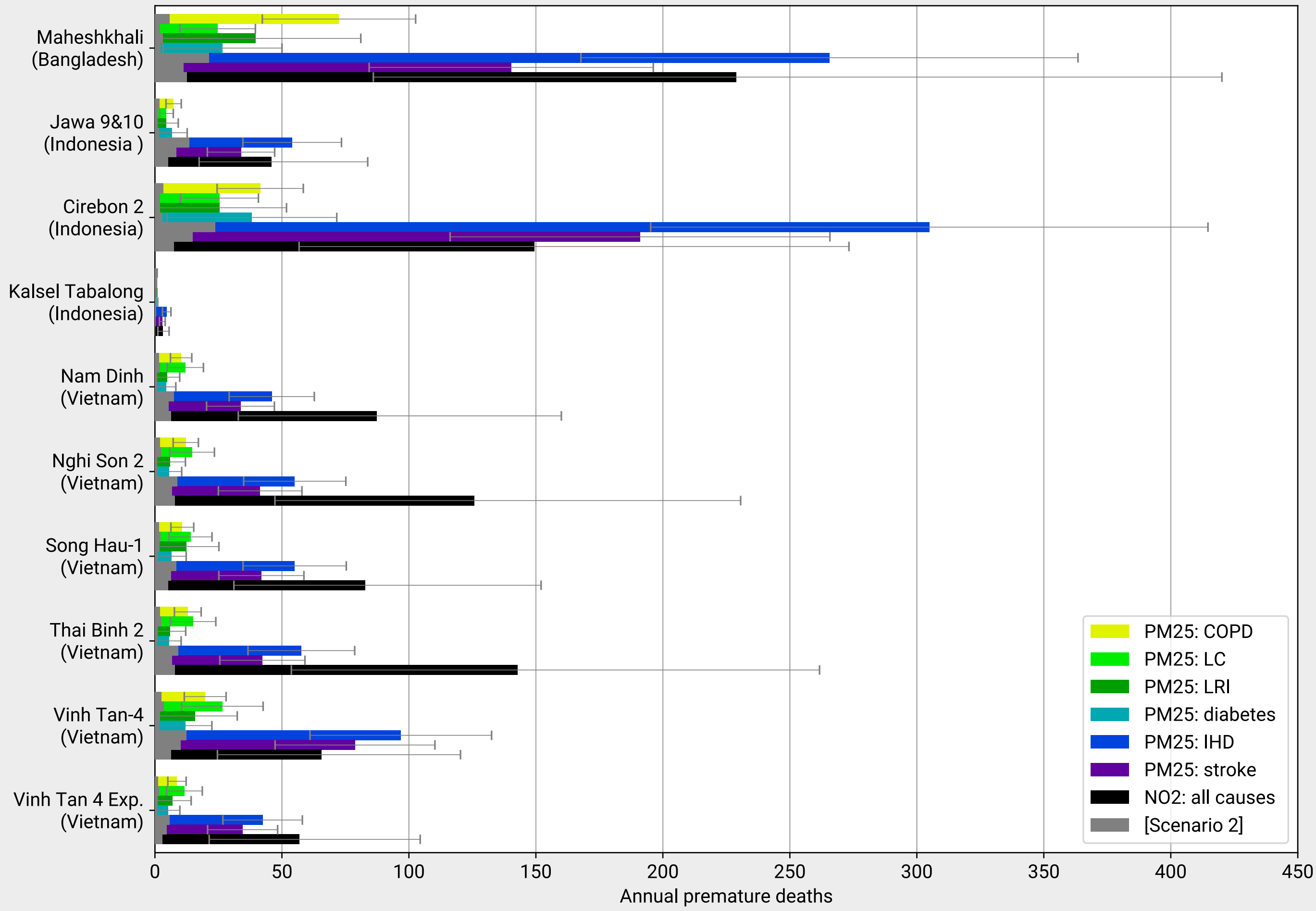


그림 A.2.

시나리오 1(색깔 막대 및 검은색 막대) 및 시나리오 2(회색 막대)에 따른 각 석탄화력발전소의 사인별 조기 사망자 수 모델링 결과. 수염(whisker lines)은 시나리오 1에 대한 95% 신뢰구간을 표시한다.

참고자료

1. End Coal (2019) 기후변화(Climate change) https://endcoal.org/climate-change/ (2019년 6월 17일 열람)

2. International Energy Agency (2018) 연료 연소로 인한 CO_2 배출량 2018 (CO_2 Emissions from Fuel Combustion 2018) https://webstore.iea.org/co2-emissions-from-fuel-combustion-2018 (2019년 7월 15일 열람)

3. Krewski, D. et al. (2009) 미세먼지 오염과 사망률의 연관관계에 관한 미국 암학회 연구에 대한 장기 후속 연구 및 공간 분석 (Extended follow-up and spatial analysis of the American Cancer Society study linking particulate air pollution and mortality). HEI Research Report 140. Health Effects Institute, Boston, MA. http://dx.doi.org/10.1021/acs.est.6b03731

4. Anenberg, S.C., Horowitz, L.W., Tong, D.Q. and West, J.J. (2010) 지상 오존과 초미세먼지가 조기 사망률에 미치는 전 지구적 부담에 관한 대기 모델링 추정 (An estimate of the global burden of anthropogenic ozone and fine particulate matter on premature human mortality using atmospheric modeling). Environmental Health Perspectives 2010;118(9):1189–1195. doi:10.1289/ehp.0901220

5. 환경부, 대기환경보전법 Ministry of Environment of Korea (2019년). http://www.law.go.kr/LSW//lsInfoP.do?lsiSeq=209973&efYd=20190716#AJAX (2019년 9월 18일 열람)

6. 자와(Jawa) 9 · 10 석탄화력발전소는 수랄라야(Suralaya) 9 · 10 석탄화력발전소로도 알려져 있다.

7. 한국 석탄화력발전소의 경우 2015년 1월 이후 신설된 발전소를 대상으로 하였다.

8. Bloomberg New Energy Finance (2019), New energy outlook 2019 https://about.bnef.com/new-energy-outlook/#toc-download (2019년 10월 29일 열람)

9. World Health Organization (2018) 전 세계 10명 중 9명이 대기오염에 노출, 많은 국가가 행동 나서 (9 out of 10 people worldwide breathe polluted air, but more countries are taking action). News release, Geneva, 2018년 5월 2일 www.who.int/news-room/detail/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action

10. The World Bank (2016) 대기오염으로 인한 노동 수익 손실 2,250억 달러 (Air pollution deaths cost global economy US$225 billion). Press release, Washington, DC, 2016년 9월 8일 www.worldbank.org/en/news/press-release/2016/09/08/air-pollution-deaths-cost-global-economy-225-billion

11. Crippa, M., et al. (2018) EDGAR 버전 4. 3.2에 따른 1970-2012년 대기오염물질 격자 배출 (Gridded emissions of air pollutants for the period 1970–2012 within EDGAR v4. 3.2). Earth System Science Data. 10(4):1987-2013 https://doi.org/10.5194/essd-10-1987-2018

12. Koplitz, S.N. et al. (2017) 동남아시아 지역의 석탄화력발전소 배출량 증가에 따른 질환 부담(Burden of Disease from Rising Coal-Fired Power Plant Emissions in Southeast Asia). Environ. Sci. Technol. 51(3): 1467-1476 DOI: 10.1021/acs.est.6b03731

13. International Energy Agency (2019) Global energy & CO_2 status report https://www.iea.org/geco/coal/ (2019년 7월 15일 열람)

14. International Energy Agency (2019) Global energy & CO_2 status report https://www.iea.org/geco/coal/ (2019년 7월 15일 열람)

15. Greenpeace International (2019) 최신 대기오염 데이터로 세계 도시 순위 매겨 (Latest air pollution data ranks world's cities worst to best). Press release, Jakarta, 2019년 3월 5일 www.greenpeace.org/international/press-release/21193/latest-air-pollution-data-ranks-worlds-cities-worst-to-best/

16. United Nations / Framework Convention on Climate Change (2015) Adoption of the Paris Agreement, 21st Conference of the Parties, Paris: United Nations.

17. Climate Analytics (2019) Coal Phase Out. Briefing climateanalytics.org/briefings/coal-phase-out (accessed 15 July 2019)

18. Climate Transparency (2019) 탈석탄 이행 – G20 국가 비교 (Managing the coal phase-out – a comparison of actions in G20 countries). www.climate-transparency.org/wp-content/uploads/2019/05/Managing-the-phase-out-of-coal-DIGITAL.pdf

19. NRDC (2018) 석탄 및 재생에너지 통합 데이터베이스 (Consolidated coal and renewable energy database 2018)

20. JBIC, NEXI, JICA의 석탄투자 목록 (JACSES 제공)

21. 수출입은행, 무역보험공사, 산업은행에서 제공한 석탄화력발전소 투자 목록

22. 직접적인 사업 투자나 재투자, 혹은 명확히 석탄 사업에 쓰인 중개 융자에 한함

23. NRDC (2018) 석탄 및 재생에너지 통합 데이터베이스 (Consolidated coal and renewable energy database 2018)

24. 수출입은행, 무역보험공사, 산업은행에서 제공한 석탄화력발전소 투자 목록

25. 메가와트

26. 자와(Jawa) 9・10 석탄화력발전소는 수랄라야(Suralaya) 9・10 석탄화력발전소로도 알려져 있다.

27. 산업통상자원부 (2017) 제8차 전력수급기본계획 발표, 2017년 12월 14일자 발표. http://english.motie.go.kr/en/pc/pressreleases/bbs/bbsView.do?bbs_cd_n=2&bbs_seq_n=605 (2019년 9월 30일 열람)

28. 환경부 (2019) 2020년 시행 대기오염물질 배출허용기준 확정 공포, 2019년 5월 2일자 발표. http://me.go.kr/home/web/board/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=&searchValue=&menuId=286&orgCd=&boardId=979615&boardMasterId=1&boardCategoryId=39&decorator= (2019년 9월 30일 열람)

29. 연합뉴스TV (2019) 미세먼지 대책…"석탄발전소 최대 27기 중단". 2019년 9월 30일. https://www.yonhapnewstv.co.kr/news/MYH20190930006900038?did=1825m (2019년 9월 30일 열람)

30. 세계로컬타임즈 (2019), 충남도 "미세먼지 주범 노후 석탄火電 조기 폐쇄하라". 2019년 4월 3일. http://www.segyelocalnews.com/news/newsview.php?ncode=1065625174653719 (2019년 9월 27일자 열람)

31. 유엔기후변화협약(UNFCCC) (2015) 제21차 당사국총회에서 파리협약 채택 (Adoption of the Paris Agreement, 21st Conference of the Parties), Paris: United Nations.

32. UNFCCC, NDC Registry. https://www4.unfccc.int/sites/NDCStaging/pages/Party.aspx?party=KOR (2019년 9월 27일 열람)

33. Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC) (2018) 지구온난화 1.5°C 특별보고서 (Special Report on Global Warming of 1.5 °C). Vol 67 (2) - 2018. https://www.ipcc.ch/sr15/

34. 기상청 (2018) 「지구온난화 1.5°C」 특별보고서 승인 위한 포문 열었다!. 2018년 10월 1일. http://www.kma.go.kr/notify/press/kma_list.jsp?bid=press&mode=view&num=1193608 (2019년 9월 27일 열람)

35. 코리아헤럴드 (2019) 문재인 대통령 한국 기후행동 강조… 대기오염 해결 위한 국제협력 촉구해 (Moon highlights Korea's environment actions, calls for cooperation on air pollution). 2019년 9월 24일. http://www.koreaherald.com/view.php?ud=20190924000012 (2019년 9월 30일 열람)

36. 청와대 (2019) 아세안 10개국 순방 관련 주형철 경제보좌관 종합 브리핑. 2019년 9월 5일. https://www1.president.go.kr/articles/7110 (2019년 9월 30일 열람)

37. 엔드콜(End Coal, 2019) 기후변화 (Climate Change) https://endcoal.org/climate-change/ (2019년 6월 17일 열람)

38. International Energy Agency (2018) 연료 연소로 인한 CO_2 배출량 2018 (CO_2 Emissions from Fuel Combustion) https://webstore.iea.org/co2-emissions-from-fuel-combustion-2018 (2019년 7월 15일 열람)

39. OECD. 공적지원수출신용협약 (Arrangement and Sector Understandings: Arrangement on Officially Supported Export Credits) www.oecd.org/trade/topics/export-credits/arrangement-and-sector-understandings/ (2019년 7월 15일 열람)

40. Myllyvirta, L. (2017) 초초임계 석탄화력발전소가 실제로 대기오염을 얼마나 줄일 수 있는가? (How much do ultra-supercritical coal plants really reduce air pollution?) Renew Economy, 2017년 6월 22일. reneweconomy.com.au/how-much-do-ultra-supercritical-coal-plants-really-reduce-air-pollution-70678/

41. 이는 미국 환경보호청(EPA)의 정의에 따른 것이다. https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics (2019년 7월 11일 열람)

42. 25°C 및 1기압 표준 조건에서 ppm을 mg/Nm^{3}으로 환산하였다.

43. 25°C 및 1기압 표준 조건에서 ppm을 mg/Nm³으로 환산하였다.

44. 세계보건기구(WHO) (2018) 대기질 데이터베이스 (Ambient air quality database), 2018년 업데이트. www.who.int/airpollution/data/cities/en/

45. 5mg/Nm³

46. 28mg/Nm³

47. 65mg/Nm³

48. Global Energy Monitor (2019) 글로벌 석탄발전소 트랙커 endcoal.org/global-coal-plant-tracker (2019년 6월 11일 열람)

49. Global Energy Monitor (2019) 글로벌 석탄발전소 트랙커 endcoal.org/global-coal-plant-tracker (2019년 6월 11일 열람)

50. Cochrane 발전소는 사막 지역에 위치하여 인체 건강에 직접적인 영향을 크게 미치지 않을 것으로 예상된다. 그러나 모든 석탄화력발전소와 마찬가지로 온실가스를 배출해 심각한 간접적 피해와 손상을 유발한다 (본 보고서에서는 직접적인 주제가 아니므로 다루지 않았다).

51. 세계보건기구 (WHO) (2005) 대기질 가이드라인 글로벌 업데이트 2005. 미세먼지, 오존, 이산화질소, 이산화황 (Air Quality Guidelines Global Update 2005. Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide). www.who.int/airpollution/publications/aqg2005/en (2019년 7월 14일 열람)

52. ibid., p. 7

53. 데모그라피아(Demographia)의 전세계 도시 지역 인구 수, 15번째 연례 보고서, 2019년 4월.

54. 서로 다른 가이드라인에는 동일 인구가 이중 집계될 수 있다.

55. 세로열 간에 동일 인구가 이중 집계될 수 있다.

56. Anenberg, S.C., Horowitz, L.W., Tong, D.Q. and West, J.J. (2010) 지상 오존과 초미세먼지가 조기 사망률에 미치는 전 지구적 부담에 관한 대기 모델링 추정(An estimate of the global burden of anthropogenic ozone and fine particulate matter on premature human mortality using atmospheric modeling). Environmental health perspectives. 2010년 9월 1일. DOI:10.1289/ehp.0901220

57. Koplitz, S.N. et al. (2017) 동남아시아 지역의 석탄화력발전소 배출량 증가에 따른 질환 부담(Burden of Disease from Rising Coal-Fired Power Plant Emissions in Southeast Asia). Environ. Sci. Technol. 51(3): 1467-1476 DOI: 10.1021/acs.est.6b03731

58. Krewski, D. et al. (2009) 미세먼지 오염과 사망률의 연관관계에 관한 미국 암학회 연구에 대한 장기 후속 연구 및 공간 분석(Extended Follow-Up and Spatial Analysis of the American Cancer Society Study Linking Particulate Air Pollution and Mortality). HEI Research Report 140. Health Effects Institute, Boston, MA. DOI: 10.1021/acs.est.6b03731

59. 본 추정에서는 미래의 인구 증가는 고려하지 않았으며 인구가 증가할 경우 조기 사망자 수가 더욱 증가할 수 있다.

60. 표6 및 표8과 관련하여 총계의 차이는 여기서 목록으로 제시하지 않는 국가에서 발생하는 소수의 사망자(대개 아주 적음) 및 반올림 오차에서 기인한 것이다.

61. 두 시나리오 간 오차는 독립적이지 않다: 1번 시나리오에 대한 하한값이 참이거나 거짓인 경우, 2번 시나리오에 대한 하한값도 참이거나 거짓이다.

62. 95% 신뢰구간

63. 대기오염이 서로 영향을 미칠 수 있을 정도로 가까이 위치한 석탄화력발전소의 경우, 상호 기여도를 반영하지 않았다(인도네시아와 베트남).

64. Greenpeace East Asia (2017) '친환경' 석탄, 그 새까만 거짓말 석탄발전회사의 그린워싱과 규제 필요성. https://www.greenpeace.org/archive-korea/multimedia/publications/2017/ClimateEnergy/Clean-Coal-is-Lie-20170927/#

65. Myllyvirta, Lauri (2017), 초초임계 석탄화력발전소가 실제로 대기오염을 얼마나 줄일 수 있는가? https://energypost.eu/how-much-do-ultra-supercritical-coal-plants-really-reduce-air-pollution/ (2019년 10월 25일 열람)

66. Bloomberg New Energy Finance (2019), New energy outlook 2019 https://about.bnef.com/new-energy-outlook/#toc-download (2019년 10월 29일 열람)

67. 미국 환경청의 정의, https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics (2019년 7월 11일 열람)

68. Hurley, P.J. Edwards, M., Physick, W.L. and Luhar, A.K. (2005) TAPM V3 – 모델 설명 및 검증(TAPM V3 – Model Description and Verification). search.informit.com.au/documentSummary;dn=377523612276411;res=IELNZC

69. Hart, T. (1998). 글로벌 분석 및 예측(GASP) 시스템 업그레이드(Upgrade of the global analysis and prediction (GASP) system), Bureau of Meteorology Operations Bulletin No. 45.

70. Scire, J.S., Strimaitis, D.G. and Yamartino, R.J. (2000). CALPUFF 확산 모델에 대한 사용자 가이드(A user's guide for the CALPUFF dispersion model)(버전 5). www.src.com/calpuff/download/CALPUFF_UsersGuide.pdf

71. CALPUFF 내에서 ISORROPIA/RIVAD 화학 모듈을 적용하여 황과 질소 종의 화학적 변성에 대한 모델링을 실시했다. 화학 반응 세트에는 Geos-Chem 글로벌 벤치마크 시뮬레이션을 통해 입수한 배경 오염물질 농도 기준(O_3, NH_3, H_2O_2 농도)이 필요하다. wiki.seas.harvard.edu/geos-chem/index.php/GEOS-Chem_v8-01-04#1-year_benchmarks

72. US Geological Survey (2011) 세계 석탄 품질 인벤토리(World Coal Quality Inventory) v1.1. www.usgs.gov/centers/eersc/science/world-coal-quality-inventory (2019년 6월 11일 열람)

73. Global Energy Monitor (2019) 글로벌 석탄발전소 트랙커(Global coal plant tracker) endcoal.org/global-coal-plant-tracker (2019년 6월 11일 열람)

74. Krewski, D. et al. (2009) 미세먼지 오염과 사망률의 연관관계에 관한 미국 암학회 연구에 대한 장기 후속 연구 및 공간 분석(Extended Follow-Up and Spatial Analysis of the American Cancer Society Study Linking Particulate Air Pollution and Mortality). HEI Research Report 140. Health Effects Institute, Boston, MA. http://dx.doi.org/10.1021/acs.est.6b03731

75. Anenberg, S.C., Horowitz, L.W., Tong, D.Q. and West, J.J. (2010) 상 오존과 초미세먼지가 조기 사망률에 미치는 전 지구적 부담에 관한 대기 모델링 추정(An estimate of the global burden of anthropogenic ozone and fine particulate matter on premature human mortality using atmospheric modeling). Environmental Health Perspectives Environmental Health Perspectives 2010;118(9):1189–1195. doi:10.1289/ehp.0901220

76. 컬럼비아 대학교 국제지구과학정보네트워크센터(CIESIN) (2018) 세계 격자 인구(버전4)(GPWv4): 2015년 개정 UN WPP 국가별 합계(11판)에 맞춰 조정한 인구 밀도(Gridded Population of the World, Version 4 (GPWv4): Population Density Adjusted to Match 2015 Revision UN WPP Country Totals, Revision 11). Palisades, NY: NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC) https://doi.org/10.7927/H4F47M65 (2019년 5월 15일 열람)

77. GADM 지도 및 데이터 https://gadm.org/

78. 세계보건기구(2013) 유럽-HRAPIE 프로젝트의 공기 오염으로 인한 건강 위험(Health risks of air pollution in Europe-HRAPIE project) www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0006/238956/Health_risks_air_pollution_HRAPIE_project.pdf

79. Pope, C.A. III et al. (2015) 미세먼지 오염, 심장대사 질환, 심혈관 사망률 간의 관계(Relationships Between Fine Particulate Air Pollution, Cardiometabolic Disorders, and Cardiovascular Mortality), Circulation Research. 2015; 116:08–115. http://dx.doi.org/10.1161/circresaha.116.305060

80. Mehta et al. (2011) 대기 미세먼지 오염과 급성 하기도 감염: 체계적 문헌고찰 및 세계 질병 부담 추정에 대한 함의(Ambient particulate air pollution and acute lower respiratory infections: a systematic review and implications for estimating the global burden of disease). Air Qual Atmos Health. DOI 10.1007/s11869-011-0146-3

81. Table 11 in: Krewski, D. et al. (2009) 미세먼지 오염과 사망률의 연관관계에 관한 미국 암학회 연구에 대한 장기 후속 연구 및 공간 분석(Extended Follow-Up and Spatial Analysis of the American Cancer Society Study Linking Particulate Air Pollution and Mortality). HEI Research Report 140. Health Effects Institute, Boston, MA. http://dx.doi.org/10.1021/acs.est.6b03731

82. Krewski et al.이 발견한 CRF는 30세 이상 인구에 적용된다. 본 보고서에서는 동일한 CRF가 30세 미만 인구에도 적용되는 것으로 가정했다.

83. 세계보건기구(2013), 위의 내용 참조.

84. GBD 2017 Mortality Collaborators (2018) 세계 지역 국가 연령-성별 특이 사망률 및 기대수명(1950~2017): 2017년 질병 부담 연구에 관한 체계적 분석(Global, regional, and national age-sex-specific mortality and life expectancy, 1950–2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017). The Lancet. 8 Nov 2018;392:1684-735. doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31891-9

85. 2019년 8월 20일에 발간한 동일한 주제에 관한 일본의 이전 보고서(Double standard: How Japan's financing of highly polluting overseas coal plants endangers public health, Greenpeace Southeast Asia)의 경우 국소 빈혈성 심장질환과 만성 폐쇄성 폐질환 수치가 틀리게 기재되어 있었다. 하지만 건강영향 평가를 위한 실제 계산에서는 정확한 수치를 사용했다.

86. 이 항목의 경우 최대 33%가 $PM_{2.5}$ 노출로 인한 사망자와 중복된다.

87. 동일한 주제에 관한 이전 보고서(Double standard: How Japan's financing of highly polluting overseas coal plants endangers public health, Greenpeace Southeast Asia)의 경우 상대 위험 하계에 1.031이 아닌 1.021을 적용하는 오류가 발생했다. 이로 인해 사망자 수 하계가 다소 과소평가되었다.

출판:
그린피스 동아시아 서울사무소

2019년 11월

Photo: © Ulet Ifansasti / Greenpeace