

2019년 11월

인도네시아 자와 9·10호기에 대한 건강영향 연구



© Ulet Kansastri / Greenpeace

GREENPEACE

목차

요약	05
석탄화력발전소 대기오염물질 배출기준	06
이중기준-더블 스탠다드로 인한 배출 및 건강영향 모델링	07
연간 150명 이상 조기 사망자	
대기오염물질 농도	
인체 건강에 미치는 영향	
부록. 건강영향 평가 모델링 방법	13

저자

Andreas Anhäuser (대기오염 분석가, 그린피스 노르딕)
손민우 (대기오염 캠페이너, 그린피스 동아시아)
Aidan Farrow (대기오염과학자, 그린피스 과학연구소)
Lauri Myllyvirta (선임 대기오염 분석가, 그린피스 노르딕)

모델링

Lauri Myllyvirta (선임 대기오염 분석가, 그린피스 노르딕)
Andreas Anhäuser (대기오염 분석가, 그린피스 노르딕)
Aidan Farrow (대기오염 과학자, 그린피스 과학연구소)

사진

Ulet Ifansasti / Greenpeace

발간

그린피스 서울사무소



요약

이 보고서는 인도네시아 반텐 지역에 있는 자와 석탄화력발전소¹의 9호기와 10호기(이하 자와 9·10호기)를 짓고 운영할 경우 배출되는 대기오염물질이 인체 건강에 미치는 영향을 분석한 결과를 담고 있다. 자와 9·10호기는 계약 체결 전부터 부지 공사를 시작했고 2024년 가동할 계획이다. 공적 금융기관인 한국수출입은행(KEXIM), 한국무역보험공사(K-SURE)가 미화 16.7억 달러(한화 약 2조 원)를 투자할 예정으로 알려져 있고, 한국산업은행(KDB) 역시 두 기관의 금융지원이 전제될 경우 참여하겠다는 투자의향을 밝혔다.²

건강영향 분석은 해당 발전소로부터 나오는 질소산화물(NO_x), 이산화황(SO₂), 초미세먼지(PM_{2.5})의 배출 수준을 대기/화학 모델링 시스템으로 분석하여 두 가지 시나리오로 나누어 진행했다. 또 대기오염물질로 인한 조기 사망자 수를 각 시나리오별로 예측하였다. 첫 번째 시나리오에서는 현재 인도네시아에서 적용하는 자와 9·10호기의 대기오염물질 배출기준을 그대로 적용했다. 두 번째 시나리오에서는 한국 신규 석탄화력발전소의 대기오염물질 배출기준을 적용하였다.

각 시나리오상 지역 인구의 공중 보건에 미치는 영향을 정량화하기 위해 널리 사용되는 모델링을 적용했다. 그 결과, 두 발전설비가 배출하는 대기오염물질 탓에 매년 최소 80명, 최대 244명의 인도네시아인이 조기 사망하는 것으로 추산됐다. 자와 9·10호기를 통상 수명인 30년 가동할 경우 최소 2,400명에서 최대 7,300명에 달하는 규모다. 한국의 대기오염물질 배출기준을 적용하면 조기 사망자의 79%를 줄일 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 한국 배출기준도, 30년 가동될 경우 총 최소 500명에서 최대 1,500명의 조기 사망자를 발생시키는 것으로 나타나 여전히 건강피해가 발생했다.

수출입은행, 무역보험공사 그리고 산업은행과 같은 한국의 공적 금융기관들은 운영 기간에 조기 사망자 수천명을 유발할 것으로 예상하는 자와 9·10호기에 대한 투자 의향을 철회해야 한다. 특히, 기후위기 대응을 위해 가입국 모두가 2030년까지 석탄발전소 가동을 중단해야 한다는 경제협력개발기구(OECD)의 권고를 고려할 때, 2024년부터 가동할 발전소에 신규 투자하는 것은 국제사회 일원으로서 책임감을 전혀 고려하지 않은 결정이다. 석탄발전소의 경제성 하락이 인도네시아에 미칠 경제적 피해까지 고려하면 더욱 그렇다.

한국 정부는 대기오염물질로 인한 건강 피해를 고려하여 국내서 신규 석탄화력발전소 건설을 중단하고, 노후 발전소의 조기 폐쇄를 결정하였으나 한편 해외 신규 석탄화력 투자는 지속하고 있다. 이는 지구온난화를 막기 위해 탈화석연료 정책 실현을 가속하는 전 지구적 노력과 파리협약 이행에도 어긋나는 조치이며, 인도네시아와 같은 동남아시아 국가들의 지속가능한 발전을 해치는 이중적인 정책이다. 한국은 해외 석탄발전 투자를 조속히 중단하고 재생가능에너지로 투자를 늘려 국제사회 일원으로서 책임과 의무를 다해야 할 것이다.



석탄화력발전소 대기오염물질 배출기준

대기환경보전법³에 규정된 한국의 국내 석탄화력발전소 (CFPP) 배출기준은 전 세계에서 가장 엄격한 편에 속한다. 대기오염에 대한 국민적 우려로 인해 공기 질 개선에 대한 강력한 요구가 있었기 때문이다. 하지만 석탄화력발전소의 대기오염물질 배출로 인한 대기오염과 공공보건 피해는 여전히 남아 있다. 더욱이 정부와 지자체의 요구로 현재 건설 중이거나 가동 중인 신설 석탄화력발전소는 배출설계를 더 엄격하게 적용하는 경우가 많다.

일례로, 관련 환경영향평가(EIA) 보고서에 따르면 2015년 이후로 한국에 건설된 100 MW⁴ 규모 이상 석탄화력발전소의 평균 배출기준은 질소산화물(NO_x)은 28 mg/Nm³, 이산화황(SO₂)은 65 mg/Nm³, 먼지는 5 mg/Nm³이다. 반면 새로 건설 중인 강릉에코파워 석탄화력발전소의 경우 더 엄격한 기준을 적용하여 1,000MW 규모의 1기당 NO_x, SO₂, 먼지 배출설계⁵가 각각 19, 39, 3 mg/Nm³이다(표1 및 그림1 참조.^{6,7})

	배출기준(mg/Nm ³)		
	NO _x	SO ₂	먼지
2015년 1월 이후로 한국에 신설된 석탄화력발전소(≥ 100 MW)의 배출기준	28	65	5
강릉에코파워 석탄화력발전소 배출설계 (한국)	19	39	3
자와 9·10호기의 배출설계 (인도네시아)	251	221	100

표1 한국 및 인도네시아 석탄화력발전소 배출 한도⁸

반면에, 한국의 공적 금융기관들이 투자한 일부 해외 석탄화력발전소 프로젝트들은 국내보다 훨씬 느슨한 대기오염물질 배출 규정을 적용하고 있다(표1 및 그림1). 본 보고서는 현재 한국의 금융지원 계약 체결 이후 2024년부터 가동할 예정인 인도네시아 자와 석탄화력발전소 9·10호기에 대한 환경영향 분석 결과를 제시하고 있다.¹¹ 수출입은행(KEXIM), 무역보험공사(K-SURE)가 미화 16.7억 달러(한

화 약 2조 원) 를 투자할 예정으로 알려져 있고, 산업은행(KDB) 역시 두 기관의 금융지원이 전제될 경우 참여하겠다는 투자意向을 밝혔다.¹²

자와 9·10호기의 NO_x, SO₂, 먼지 배출 한도는 각각 251, 221, 100 mg/Nm³로 한국 석탄화력발전소에 비해 19배 이상 느슨한 기준을 적용하고 있다(그림1).

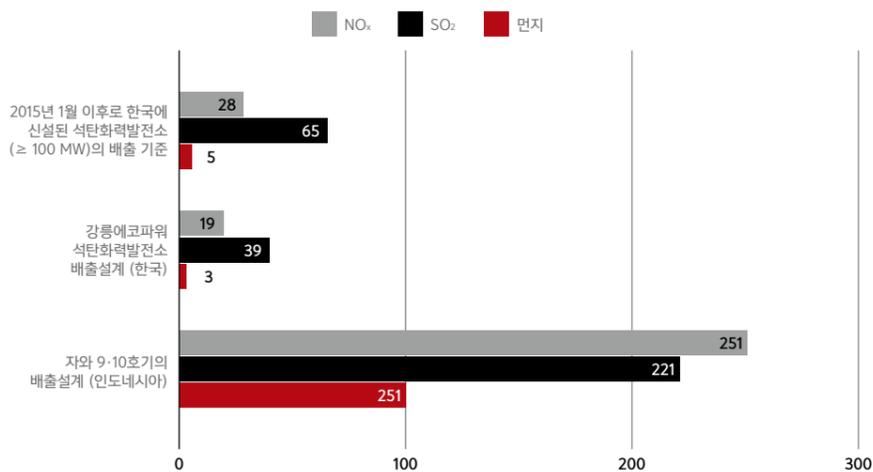


그림1 NO_x, SO₂, 먼지 배출 한도: 2015년 1월 이후의 한국 배출기준과 인도네시아 자와 9·10호기 대기오염 배출설계(mg/Nm³)^{9,10}

이중기준으로 인한 배출 및 건강영향 모델링

본 보고서에서는 자와 9·10호기에서 배출되는 대기오염물질의 확산에 관한 모델을 구축하여 한국이 투자할 석탄발전소의 이중적인 배출기준이 공기 질에 미치는 영향과 그로 인해 인도네시아 주민에게 미치는 건강영향을 정량화해 분석했다.

자와 9·10호기의 현재 대기오염물질 배출기준으로 인한 영향과 한국 국내 배출기준을 적용할 경우 잠재적으로 예상되는 저감 효과를 정량화하기 위해 아래 2가지 시나리오를 적용하여 모델링을 실시했다.

- 1번 시나리오: 인도네시아 자와 9·10호기에 적용된 배출설계
 - 2번 시나리오: 2015년 1월 이후에 건설된 석탄화력발전소(≥100 MW)에 대한 한국 국내 배출기준
- 각각의 모델 시뮬레이션을 통해 1년 동안 특정한 배출 조건에서 자와 9·10호기에서 발생하는 대기오염물질의 농도를 예측했다. 배출에 관한 입력 데이터는 자와 9·10호기의 환경영향평가(EIA)에서 발췌했다.¹³ 부록에 본 모델에 관한 상세한 기술적 설명이 수록되어 있다.

30년 가동 시 조기 사망자 최대 7,300명 이상 발생

자와 9·10호기의 대기오염물질 배출설계 기준으로 분석한 결과, 인도네시아에서 연간 최소 80명, 최대 244명의 조기 사망자가 추가로 발생할 것으로 추정된다(표2, 그림2). 석탄화력발전설비 평균 수명 30년을 적용하면 최소 2,400명에서 최대 7,300명의 조기 사망자가 예상된다. 이 수치는 장래의 인구 증가를 고려하지 않은 결과이다. 미래에 인구가 증가할 경우 대기오염물질에 노출되는 주민의 수가 늘어나므로 사망자가 확대될 것이다. 본 보고서에 제시된 숫자는 보수적인 추정치다.

한국의 배출허용기준을 적용하여 자와 9·10호기를 운영할 경우, 조기 사망자를 연간 최소 62명에서 최대 195명 줄일 수 있으며, 30년 가동 시 최소 1,866명에서 최대 5,800명이 조기 사망 위험에서 벗어날 수 있을 것으로 예상된다(그림3)

	1번 시나리오 (자와 9·10호기 대기오염물질 배출설계)			2번 시나리오 (한국 석탄화력발전소 대기오염물질 배출기준)			차이		
	중간 추정치	최소 추정치	최대 추정치	중간 추정치	최소 추정치	최대 추정치	중간 추정치	최소 추정치	최대 추정치
연간	157	80	244	33	18	49	124	62	195
30년간	4,707	2,391	7,317	984	525	1,479	3,723	1,866	5,838

표2 1번 시나리오와 2번 시나리오 하에서 자와 9·10호기의 과도한 대기오염물질로 인한 연간 조기 사망자 수 모델링 결과 (최소 및 최대는 95% 신뢰구간을 표시한다)

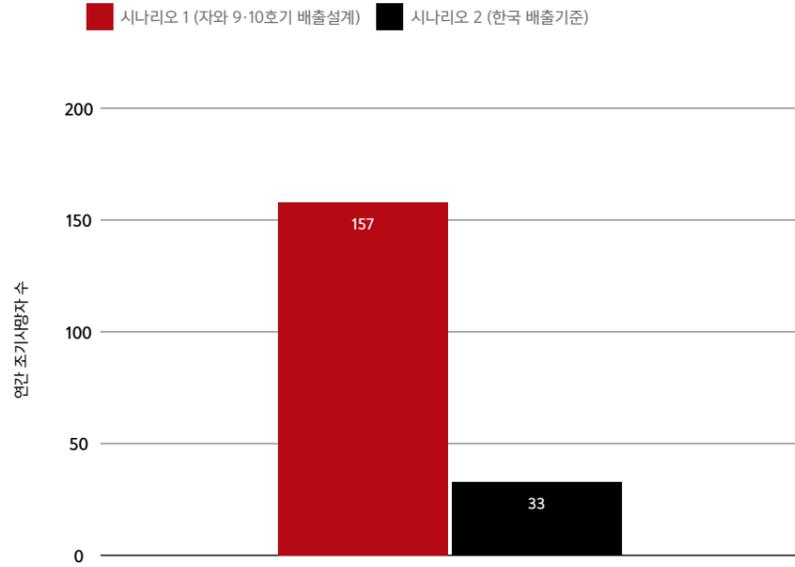


그림2

1번 시나리오와 2번 시나리오 하에서 자와 9·10호기 배출로 인한 연간 조기 사망자 수 모델링 결과. 그래프에 표시된 수치는 중간 추정치임. 불확실성은 약 50% 수준임(정확한 수치는 표2 참조).

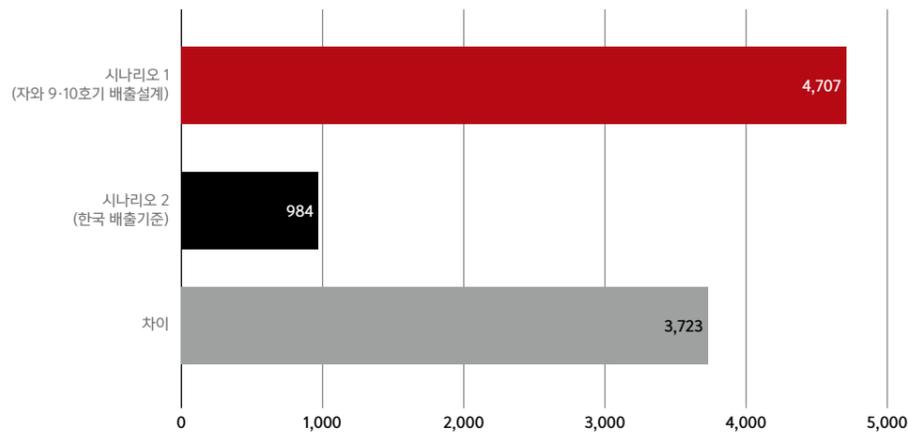


그림3

1번 시나리오(자와 9·10호기 배출설계)와 2번 시나리오(한국 배출기준) 하에서 30년 수명주기 동안 자와 9·10호기 배출로 인한 총 조기 사망자 수에 대한 중간 추정치. 두 추정치 간의 차이는 한국 배출기준을 적용할 경우 예방할 수 있는 조기 사망자 수를 나타낸다(정확한 수치는 표2 참조).

대기오염물질 농도

그림 4~6은 두 시나리오 적용 시 자와 9·10호기가 배출할 것으로 예상하는 이산화질소(NO₂), 이산화황(SO₂), 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도를 제시하고 있다. 해당 석탄화력발전소에서 발생한 대기오염은 반덴, 람퐁, 서부 자바 지방을 넘어 수십에서 수백 km 밖으로까지 퍼져 자카르타, 반다르람퐁, 반둥 등 수백만의 인구가 밀집한 대도시 지역에 영향을 미친다. 기상 조건이 나쁘거나 배출 상황이 최악의 수준에 이른 경우에는 단기간에 평균 대기오염물질 농도를 크게 웃도는 상태에 도달한다(그림 4~6의 윗줄과 아랫줄 비교, 색상 기준표 참조). 반다르람퐁의 경우 자와 9·10호기로 인한 PM_{2.5}의 24시간 최대 평균 농도는 연평균 농도의 약 20배에 달한다(그림6, 아랫줄과 윗줄).

한국 배출기준을 적용할 경우(2번 시나리오) 대기오염물질 농도가 아래와 같이 큰 폭으로 감소하는 것을 그림4~6과 표3에서 확인할 수 있다. 그 감소폭은 NO₂의 경우 9배, SO₂의 경우 3배, PM_{2.5}의 경우 6배에 달한다.

	NO ₂ (µg/m ³)			SO ₂ (µg/m ³)			PM _{2.5} (µg/m ³)		
	연간	24시간	1시간	연간	24시간	1시간	연간	24시간	1시간
1번 시나리오 (자와 9·10호기 대기오염물질 배출설계)	0.8	16.3	241	1.3	27.9	328	0.4	8.0	73.7
2번 시나리오 (한국 석탄화력발전소 대기오염물질 배출기준)	0.1	1.8	27	0.4	8.2	97	0.1	1.9	13.0

표3 자와 9·10호기 주변 지역의 평균 시간대별 최대 예측 농도

본 모델은 자와 9·10호기에서 배출되는 대기오염물질만을 대상으로 하였다. 다른 오염원에서 발생한 배경 오염물질은 고려하지 않았으며, 다른 발전설비(1호기~8호기)로부터 배출되는 대기오염물질도 포함하지 않았다. 본 보고서는 자와 9·10호기 이외의 다른 대기오염물질 배출 영향을 제외한 결과 수치를 다루고 있다.

자와 9·10호기가 배출할 대기오염물질은 수백 km에 걸친 광범위한 지역의 미세먼지와 기체 상태의 대기오염물질 농도를 높인다. 다수의 지역에서 자와 9·10호기로 인한 오염 부담(pollution burden) 증가 폭은 낮은 수준인 것으로 추정됐다. 하지만 주변 지역의 대기오염 농도에 미치는 영향이 없는 것은 아니다. 자와 9·10호기에서 배출된 대기오염물질은 다른 오염원에서 발생한 오염을 가중한다. 자와 9·10호기에서 배출된 대기오염물질로 인한 영향이 기존 오염과 결합할 경우 주변 자카르타, 반다르람퐁, 반둥 등 수백만 인구가 밀집한 대도시의 오염도를 가중시킬 가능성이 커진다.

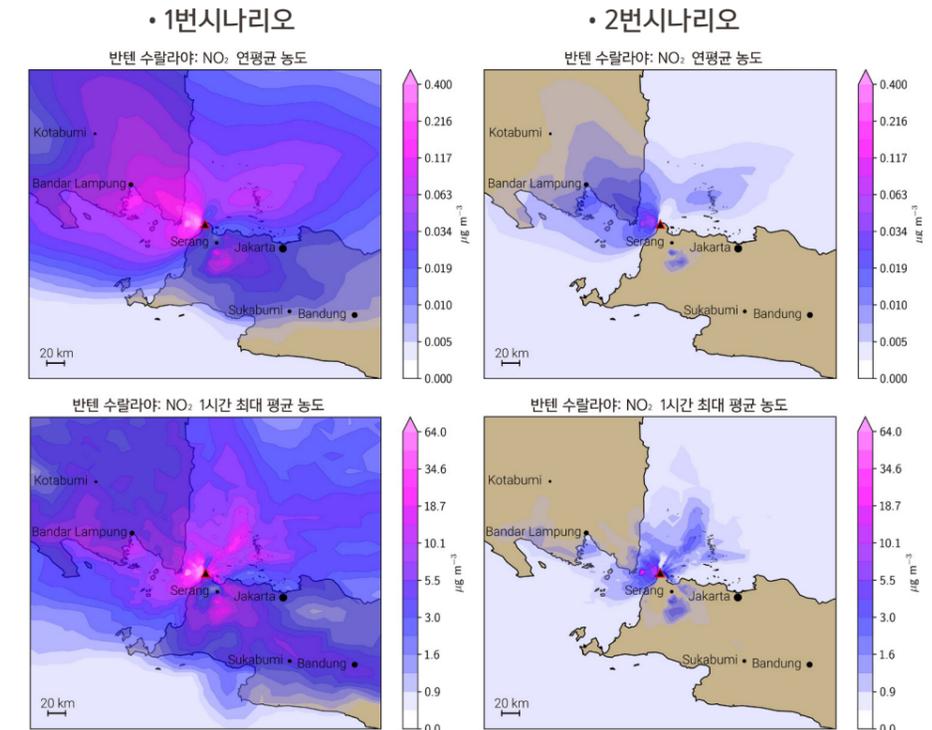


그림4

자와 9·10호기(삼각형)에서 배출된 대기오염물질로 인한 미래의 NO₂ 농도 증가에 관한 모델링 결과 (참고: 색상 기준표는 로그 함수가 적용됐으며 열 사이에 차이가 있다.)

그림5
자와 9·10호기(삼각형)에서 배출된 대기오염물질로 인한 미래의 SO₂ 농도 증가에 관한 모델링 결과 (참고: 색상 기준표는 로그 함수가 적용됐으며 열 사이에 차이가 있다.)

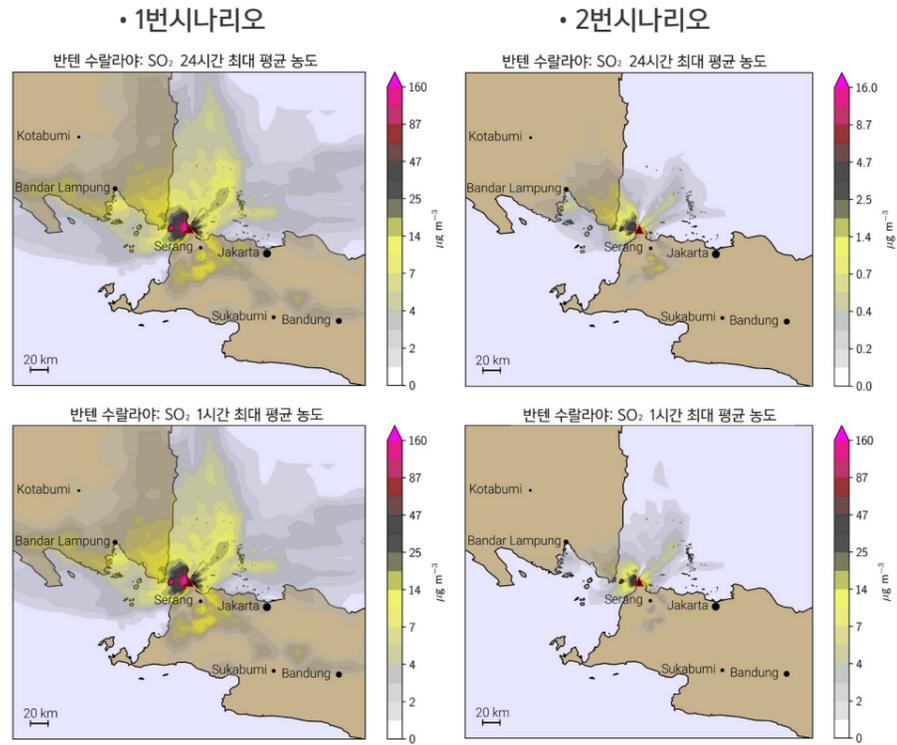
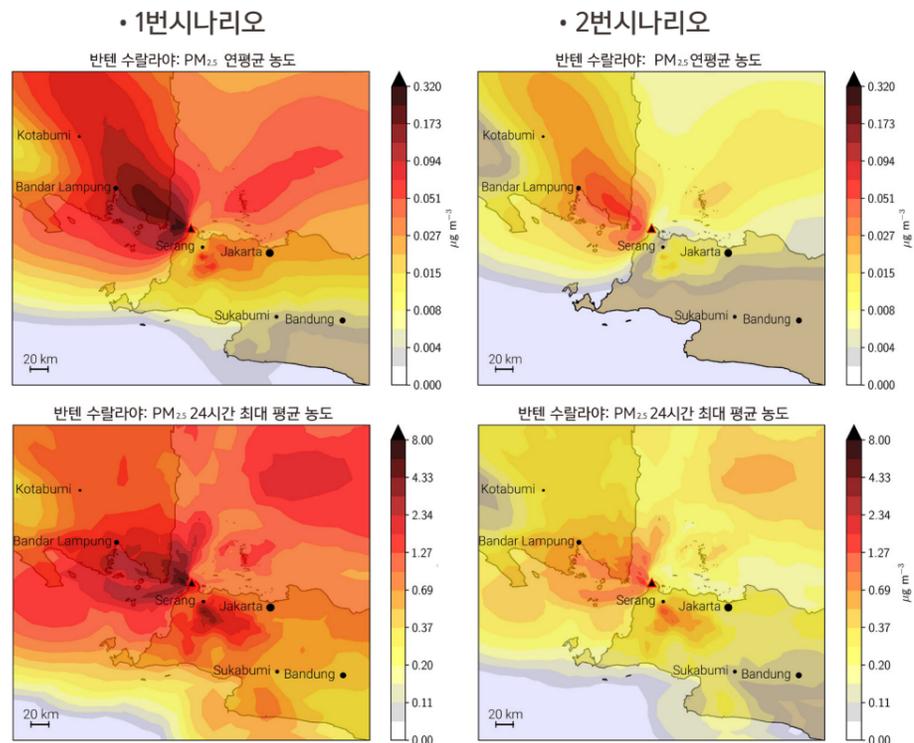


그림6
자와 9·10호기(삼각형)에서 배출된 대기오염물질로 인한 미래의 PM_{2.5} 농도 증가에 관한 모델링 결과 (참고: 색상 기준표는 로그 함수가 적용됐으며 열 사이에 차이가 있다.)



인체 건강에 미치는 영향

대기오염물질에 노출될 경우 어린이, 노인, 호흡기 질환자 등 취약 집단을 중심으로 호흡기·심혈관계 질환, 암 등 갖가지 질병을 유발할 위험이 크게 증가한다. 본 보고서에서는 널리 통용되는 건강영향 평가 방법^{14 15 16} (부록 참조)을 적용하여 두 시나리오 하에서 자와 9·10호기에서 배출된 대기오염물질로 인한 연간 조기 사망자 수에 대한 모델링을 실시했다.

표4에 그 결과가 제시되어 있다. 1번 시나리오의 경우 자와 9·10호기에서 배출된 대기오염물질은 연간 최소 80명에서 최대 244명의 조기 사망자를 유발할 것으로 예상되며, 발전소의 평균 수명인 30년간 운영 시 최소 2,400명에서 최대 7,300명의 조기 사망자가 발생할 것으로 추산된다.¹⁷ 사망자의 3분의 2 이상은 PM_{2.5} 오염으로 인한 질환, 그 중에서도 특히 국소 빈혈성 심장질환으로 사망할 것으로 추정된다. 이는 전체 사망자의 34%에 달한다.

한국 국내 배출기준을 적용할 경우 연간 조기 사망자 수는 79% 감소한 최소 17명에서 최대 49명으로 줄어든다. 다시 말해 해마다 최소 62명에서 최대 195명, 석탄화력발전소 평균 수명주기 30년 동안에는 최소 1,900명에서 최대 5,800명의 조기 사망 위험을 예방할 수 있을 것으로 예측된다(표4).

		1번 시나리오 (자와 9·10호기 대기오염물질 배출설계)			2번 시나리오 (한국 석탄화력발전소 대기오염물질 배출기준)			차이		
대기오염물질	사인	중간 추정치	최소 추정치	최대 추정치	중간 추정치	최소 추정치	최대 추정치	중간 추정치	최소 추정치	최대 추정치
PM _{2.5}	COPD	7	4	10	2	1	3	6	3	8
	폐암	5	2	7	1	0	2	3	1	5
	LRI	5	0	9	1	0	2	3	0	7
	당뇨병	7	1	13	2	0	3	5	1	10
	IHD	54	35	74	14	9	18	41	26	55
	뇌졸중	34	21	47	8	5	12	26	16	35
	합계	111	62	160	28	15	40	84	47	120
NO ₂	전체사인	46	17	84	5	2	9	41	16	74
합계(연간)		157	80	244	33	17	49	124	62	195
합계(30년)		4,710	2,388	7,320	981	522	1,479	3,726	1,866	5,838

표4 사인별 연간 조기 사망자 모델링 결과

한국의 공적 금융기관들은 운영 기간 조기 사망자 수천명을 발생시킬 것으로 추산되는 자와 9·10호기에 대한 투자 의향을 철회해야 한다. 특히, 기후위기 대응을 위해 가입국 모두가 2030년까지 석탄발전소 가동을 중단해야 한다는 OECD의 권고를 고려할 때, 2024년부터 가동이 예정된 발전소에 신규 투자하는 것은 국제사회 일원으로서 무책임한 행태다. 석탄발전소의 경제성이 떨어지고 있어 인도네시아가 입을 경제적 피해를 감안하면 더욱 그렇다.

현 정부는 대기오염물질로 인한 건강 피해를 감안하여 국내 신규 석탄화력발전소 건설을 중단하고, 노후 발전소의 조기 폐쇄를 결정하였으나 한편 해외 신규 석탄화력 투자는 지속하고 있다. 이는 지구온난화를 막기 위해 탈화석연료 정책 실현을 가속하는 전 지구적 노력과 파리협약 이행에도 어긋나는 조치이며, 인도네시아와 같은 동남아시아 국가들의 지속가능한 발전을 해치는 이중적인 정책이다. 한국은 해외 석탄발전 투자를 조속히 중단하고 재생가능에너지로의 신규 투자를 확장해 국제사회 일원으로서 책임과 의무를 다해야 할 것이다.

부록. 건강영향 평가 모델링 방법

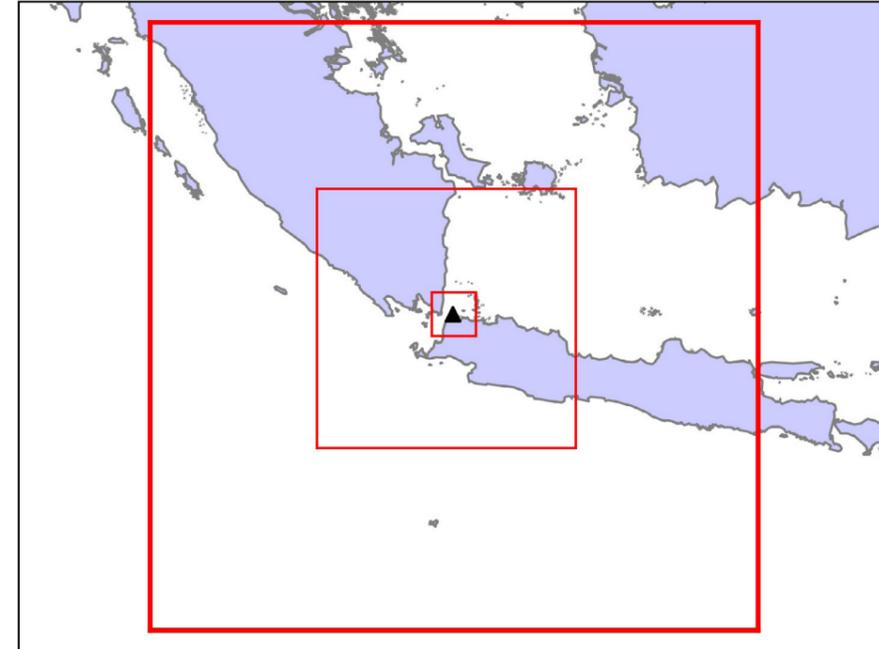


그림 A.1
소스(흑색 삼각형)를 중심으로 3개 격자(적색 박스)의 범위에서 수치예보 모델을 적용한다.

방법 개요

대기확산모델링시스템과 인구 데이터를 결합한 접근법을 적용하여 석탄화력발전소에서 배출된 대기오염물질로 인한 영향을 도출한다. 대기확산모델링시스템은 대기오염물질 농도를 추정하는 방식을 의미하며, 인구 데이터를 건강에 미치는 효과를 추정하기 위해 이용하였다.

1. 대기 확산 모델링 시스템

대기확산모델은 크게 2가지 요소로 구성된다. 석탄화력발전소 주변 지역의 기상 조건을 시뮬레이션할 목적으로 기상 모듈이 적용된다. 석탄화력발전소에서 배출된 대기오염물질이 주변 환경으로 전파되는 양상을 연구하기 위해 해당 모듈에 화학수송 모델을 결합한다.

a) 기상 모델. 석탄화력발전소 주변의 기상은 The Air Pollution Model (TAPM) 버전3을 적용하여 모델링을 실시한다.¹⁸ TAPM에는 대기오염물질 확산 모델링 기능도 포함되어 있지만 본 시뮬레이션에서는 TAPM의 기상 요소만을 이용한다. 석탄화력발전소를 중심으로 3개 등지격자에 대해 모델을 적용한다. 모델 격자는 37x37 격자셀로 구성되며 공간 해상도는 각각 40 km, 10 km, 2.5 km로 중심에 가까워질수록 세밀해진다(그림 A.1). 경계 조건은 호주 기상청의 GASP 모델로부터 도출했다.¹⁹ 모든 TAPM 시뮬레이션에서 2017년의 마지막 9일에 대해 스펀업 기간을 적용한다. 그 이후로 2018년 전체에 대해 TAPM을 적용하여 분석에 이용할 데이터를 확보한다.

b) **대기 화학수송 모델.** CALPUFF 모델 버전7을 적용하여 확산과 화학적 변성 그리고 석탄화력발전소에서 배출되는 NO_x, SO₂, 1차 PM_{2.5}의 침적에 대한 모델링을 실시한다.²⁰ 본 시뮬레이션에서는 석탄화력발전소로 인한 영향에만 초점을 맞추고 있으므로 다른 배출원은 모델에서 배제시켰다. 다만 O₃, NH₃, H₂O₂ 배경농도는 화학 모듈에 이용하기 위해 포함시켰다.²¹ 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.** 모델링에 사용한 대기오염물질 배출률(emission rate, ER)과 연도가스(flue gas) 배출 특성은 프로젝트 관계자가 공개한 데이터에 최대한 근거를 두고 있다. 해당 프로젝트의 환경영향평가(EIA) 보고서에서는 이하의 데이터를 수집하였다.

- 연도가스의 오염물질 농도(CFG)
- 발전소 발전용량(CAP)
- 증기조건(아임계/초임계/초초임계)
- 석탄 유형
- 연도가스 방출 온도 및 속도
- 연돌(Stack) 위치

본건 석탄화력발전소의 순 열효율(EFF)은 초초임계 화력발전소의 일반적인 수치인 44%로 가정한다. 연돌 높이와 내부 연돌 직경은 자와 9·10호기 프로젝트의 EIA 문서에서 발췌했다.²²

최대 단기 공기 질 영향과 연간 대기오염물질 노출 및 건강영향을 평가하기 위해서는 연간 배출량(AEV)과 전면 가동 시 배출률(ER)에 관한 데이터가 요구된다. AEV는 아래 공식으로부터 산출했다.

$$ER = AEV / PLF$$

위 공식에서 PLF는 예상 설비부하율을 의미하며, 예상되는 최대 단기 공기 질 영향과 관련된 보수적인 가정을 적용하여 발전소가 가동되는 동안 CFG가 일정하게 유지되는 것으로 가정했다. ER과 AEV를 입수할 수 없는 상황이므로 아래 공식으로부터 ER을 산출했다.

$$ER = FGV * CFG$$

위 공식에서 FGV는 연도가스 체적 유량을 의미한다. FGV를 입수할 수 없는 상황이므로 아래 공식으로부터 FGV를 추정했다.

$$FGV = CAP / EFF * SFGV$$

위 공식에서 SFGV는 석탄화력발전소에서 사용하는 석탄 유형에 대해 추정되는 단위 열 입력(Nm³/GJ) 당 특정 연도가스 부피를 의미한다.

석탄의 진발열량, 수분, 회분 함량에 근거하여 SFGV 값을 추정할 목적으로 유럽 기준 EN 12952-15의 85페이지에 수록된 실험식 A.5N을 적용했다. 석탄 특성은 자바에 신설되는 석탄화력발전소에 흔히 사용되는 수마트라산 석탄의 평균값(USGS 세계 석탄 품질 인벤토리²³)에서 도출했다.

AEV와 ER을 구한 후에 전면 가동 배출률을 기준으로 1년 전체를 대상으로 대기 모델을 적용했으며 그에 따른 지표면 대기오염물질 농도 필드를 이용해 최대 단기 공기 질 영향을 분석했다. 건강영향 평가를 위해 평균 농도를 PLF를 통해 축소함으로써 석탄화력발전소의 연간 배출량을 1년 전체로 분산시켰다.

2. 건강영향 평가

대기오염 모델(1단계) 결과를 이용하여 세계보건기구(WHO) 대기오염 가이드라인을 초과하는 농도에 노출된 주민의 수를 분석하고 그러한 대기오염으로 인한 영향이 현지 주민의 건강에 미치는 영향을 추정했다.

a) **가이드라인 한도 초과 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 Δx 조건 하에서의 사망률(거주자 수 대비 사망자 수)을 의미하며 m₀은 과도한 대기오염이 없었을 경우의 사망률을 의미한다. 최신 역학 모델하에서 r은 m_x << 1인 경우 x에 기하급수적으로 의존한다.^{24,25}

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

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 r 값은 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.²⁶
- **국가 경계선**은 GADM 프로젝트 버전3.6 (2018년 5월)에서 확정(劃定)한 내용을 따랐다.²⁷
- **농도 반응 계수(CRF).** 표A.1에 열거된 CRF를 적용했다. CRF는 NO₂의 경우 WHO (2013)²⁸, PM_{2.5}-당뇨병의 경우 Pope et al. (2015)²⁹, PM_{2.5}-하기도 감염의 경우 Mehta et al. (2011)³⁰, 나머지 PM_{2.5}의 경우 Krewski et al. (2009)³¹에 기술된 상대 위험을 근거로 산정했다. 모든 연령대에는 동일한 값을 적용했다.³²
 - 이중 집계 효과의 배제: NO₂로 인한 사망자의 최대 33%는 PM_{2.5}노출로 인한 사망과 중복될 가능성이 있다.³³ 다수의 사인들로 인한 사망자 수를 합산할 때 이중 집계의 가능성을 반영하기 위해 CRF를 적용한 후에 NO₂로 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 NO₂ 사망자 수는 이미 이러한 방식으로 수정했다.
- **배경 사망률**은 IHME 2017년 질병 부담 연구에서 원용했다.³⁴ 해당 데이터세트는 사인별 국가 평균값을 제시하고 있다. 본 보고서에 사용된 수치들은 표A.2에 열거되어 있다.

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

	NO ₂		PM _{2.5} ³⁵	
	10 µg m ⁻³ 증가에 따른 상대 위험	CRF (10 ⁻³ µg ⁻¹ m ³)	10 µg m ⁻³ 증가에 따른 상대 위험	CRF (10 ⁻³ µg ⁻¹ m ³)
전체 사인 ^{36,37}	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)

표A.1 10 µg/m³ 표준 증가에 따른 상대 위험으로부터 도출한 NO₂와 PM_{2.5}의 농도 반응 계수. CRF는 (2) 등식을 적용하여 상대 위험으로부터 도출했다. 괄호는 95% 신뢰구간을 표시한다. NO₂의 경우 구체적인 사인에 관한 데이터가 존재하지 않는다(따라서 NO₂에 대해서는 전체 사인으로 인한 집합적인 건강영향만을 분석했다)

	전체	LRI	LC	COPD	당뇨병	뇌졸중
인도네시아	5652 (5198-6138)	245 (209-294)	161 (139-186)	412 (366-468)	159 (134-187)	1030 (933-1138)

표A.2 본 보고서에 적용된 배경 사망률은 IHME 2017년 질병 부담 데이터세트에서 원용했다. 100만 명당 연간 사망자 수는 95% 신뢰 구간이 적용됐다. 표A.3에 사인이 정리되어 있다

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	제 2형 당뇨병
뇌졸중	뇌졸중
국소 빈혈성 심장질환(IHD)	국소 빈혈성 심장질환

표A.3 CRF 출처와 배경 사망률 데이터에 사용된 사인 명칭 비교(사인 명칭이 정확하게 일치하지 않는 경우 강조 표시)

각주

1. 자와 석탄화력발전소 9·10호기의 공식 명칭은 수랄라야 석탄화력발전소 9·10호기이다.
2. Mongabay (2018) 환경운동가들, 인도네시아 석탄화력발전소에 대한 한국 정부의 자금 지원 중단 촉구(Activists urge end to South Korean funding of Indonesia coal plants). 2018년 11월 16일자 기사.(<https://news.mongabay.com/2018/11/activists-urge-end-to-south-korean-funding-of-indonesia-coal-plants/>)
3. 환경부, 대기환경보전법(2019년). <http://www.law.go.kr/LSW//lsInfoP.do?lsiSeq=209973&efYd=20190716#AJAX> (접속일: 2019-09-30)
4. 메가와트
5. 25°C 및 1기압 표준 조건에서 ppm을 mg/Nm³으로 환산.
6. 환경영향평가정보지원시스템 <https://www.eiass.go.kr/> (접속일: 2019년 9월 30일)
7. 25°C 및 1기압 표준 조건에서 ppm을 mg/Nm³으로 환산.
8. 수랄라야 석탄화력발전소 9&10호기 환경영향평가. 한국 국내 신설 석탄화력발전소의 배출기준은 대기환경보전법 (<http://www.law.go.kr/LSW//lsInfoP.do?lsiSeq=209973&efYd=20190716#AJAX>)에서 발췌했으며 강릉에코파워 석탄화력발전소의 배출기준은 환경영향평가 문서(<https://www.eiass.go.kr/>)에서 발췌했음
9. 수랄라야 석탄화력발전소 9&10호기 환경영향평가. 한국 국내 신설 석탄화력발전소의 배출기준은 대기환경보전법(<http://www.law.go.kr/LSW//lsInfoP.do?lsiSeq=209973&efYd=20190716#AJAX>)에서 발췌했으며 강릉에코파워 석탄화력발전소의 배출기준은 환경영향평가 문서(<https://www.eiass.go.kr/>)에서 발췌했음.
10. 25°C 및 1기압 표준 조건에서 ppm을 mg/Nm³으로 환산.
11. Sourcewatch, 반덴 수랄라야 발전소(https://www.sourcewatch.org/index.php/Banten_Suralaya_power_station) (접속일: 2019년 10월 4일)
12. Mongabay (2018) 환경운동가들, 인도네시아 석탄화력발전소에 대한 한국 정부의 자금 지원 중단 촉구(Activists urge end to South Korean funding of Indonesia coal plants). 2018년 11월 16일자 기사.(<https://news.mongabay.com/2018/11/activists-urge-end-to-south-korean-funding-of-indonesia-coal-plants/>)
13. PT. Indonesia Power (PTL), Analisis Dampak Lingkungan Hidup (Andal) Rencana Pembangunan PLTU Suralaya Unit 9-10 (2 X 1.000 MW) Beserta Fasilitas Penunjangnya (2017).
14. 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
15. 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
16. 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
17. 본 추정에서는 장래의 인구 증가는 고려하지 않았으며 인구가 증가할 경우 관련 수치가 더욱 증가할 수 있다.
18. 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=IELN2C
19. 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.
20. 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
21. CALPUFF 내에서 ISORROPIA/RIVAD 화학 모듈을 적용하여 황과 질소 중의 화학적 변성에 대한 모델링을 실시했다. 화학 반응 세트에는 Geos-Chem 글로벌 벤치마크 시뮬레이션을 통해 입수한 배경 오염물질 농도 기준(O₃, NH₃, H₂O₂ 농도)이 요구된다. wiki.seas.harvard.edu/geos-chem/index.php/GEOS-Chem_v8-01-04#1-year_benchmarks
22. PT. Indonesia Power (PTL), Analisis Dampak Lingkungan Hidup (Andal) Rencana Pembangunan PLTU Suralaya TPP Unit 9-10 (2 X 1.000 MW) Beserta Fasilitas Penunjangnya (2017).
23. US Geological Survey (2011) 세계 석탄 품질 인벤토리(World Coal Quality Inventory) v1.1. www.usgs.gov/centers/eers/science/world-coal-quality-inventory (접속일: 2019년 6월 11일)
24. 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>
25. 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
26. 컬럼비아 대학교 국제지구과학정보네트워크센터(CIESIN) (2018) 세계 격자 인구(버전4)(GPWv4): 2015년 개정 UN WPP 국가별 합계(11판)에 맞춰 조정된 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> (접속일: 2019년 5월 15일)
27. GADM 지도 및 데이터(<https://gadm.org/>)
28. 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
29. Pope, C.A. III et al. (2015) 초미세먼지 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>
30. 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. <https://doi.org/10.1007/s11869-011-0146-3>
31. 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>
32. Krewski et al.이 발견한 CRF는 30세 이상 인구에 적용된다. 본 보고서에서는 동일한 CRF가 30세 미만 인구에도 적용되는 것으로 가정했다.
33. 세계보건기구(2013), 위의 내용 참조.
34. 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. [dx.doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)31891-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31891-9)
35. 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.
36. 이 항목의 경우 최대 33%가 PM_{2.5}, 노출로 인한 사망자와 중복된다.
37. 동일한 주제에 관한 이전 보고서의 경우 상대 위험 하계에 1.031이 아닌 1.021을 적용하는 오류가 발생했다. 이로 인해 사망자 수 하계가 다소 과소평가되는 결과가 초래됐다.



지도에 관한 법적 고지

그린피스는 지구 환경을 보호하고 평화를 증진하기 위해 캠페인을 펼치며, 시민들의 태도와 행동에 변화를 유도하는 전 지구적 환경단체입니다. 그린 피스는 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.

투자에 관한 법적 고지

그린피스 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 서울사무소가 신뢰할 수 있는 것으로 판단되는 정보를 입수한 것은 사실이지만, 그린피스 서울사무소는 본 문서에 포함된 정보와 관련하여 수익의 상실, 징벌적 손해 배상, 결과적 손해배상 등 성격을 불문하고 어떠한 청구나 손실에 대해서도 책임을 지지 않습니다. 본 보고서에 표명된 견해는 각주에 명시된 문서에 기초를 두고 있습니다.