CLIMATE ANALYTICS

파리협정에 부합하는 대한민국 탈석탄 정책의 건강 편익 평가

2021년 5월

저자

Gaurav Ganti
Andreas Anhaüser*
Lauri Myllyvirta**
Deborah Ramalope
Bill Hare
Anne Zimmer
Charlotte Plinke
Carley Reynolds
Matthew Gidden

본 연구를 진행함에 있어 기후솔루션(Solutions for Our Climate) 팀의 검토와 자문에 깊이 감사 드립니다.

본 보고서 본문 및 부록들의 디지털 사본은 다음의 웹사이트에서 확인하실 수 있습니다:
www.climateanalytics.org/publications

인용 및 감사인사
본 출판물은 교육 또는 비영리 목적을 위해서는 Climate Analytics의 별도 허가 없이도 전체나 일부를 어떤 형태로든 다시 제작될 수 있습니다. 다만, 적절한 출처 표시 그리고/또는 인용을 조건으로 합니다.

본 출판물은 Climate Analytics의 서면상의 사전 승인 없이는 어떠한 상업적 목적으로도 재판매 되거나 사용될 수 없습니다. 저희가 의도하지 않은 실수나 누락에 대해서는 유감의 말씀을 전합니다.

본 보고서를 인용할 때에는 다음의 양식을 따르시면 됩니다:
Climate Analytics (2021). 파리협정에 부합하는 대한민국 탈석탄 정책의 건강편익 평가

* 제휴기관: Greenpeace
** 제휴기관: Center for Research on Energy and Clean Air

기후변화의 위험을 예방하기 위한 과학기반 정책을 지원함으로써 지속 가능한 발전 현실화하기 위해 활동합니다.
www.climateanalytics.org

in collaboration with:

주요 결과

- 파리협정 목표 이행을 위해 한국정부는 2030 년까지 석탄발전을 완전히 퇴출해야 한다. 한편, 국내 제 9 차 전력수급기본계획에서 제시하는 발전기 별 가동 일정에 따르면 2034 년에도 29GW 용량의 석탄화력발전소들이 가동 중이며, 파리협정에 부합하기 위해 요구되는 시점보다 거의 25 년가량 늦은 2054 년이 되어야 석탄발전이 완전히 퇴출된다.

- 본 연구에서는 파리협정에 부합하는 이산화탄소 배출 감축 경로에 상응하는 발전기 별 폐쇄 일정 두 개를 제시한다. 두 일정 중 어느 것을 따르더라도 매년 약 4.2GW에 해당하는 석탄발전용량이 감축되어야 한다. 현재 건설중인 발전기들도 최대 4 년까지 밖에 가동하지 못한다.

- 석탄화력발전소는 국내 대기오염의 주요 원인 중 하나로, 심혈관 질환, 만성 및 급성 호흡기 질환 등의 위험을 높여 조기 사망에 영향을 줄 뿐만 아니라, 조산, 우울증과 같은 건강 문제를 일으키는 것으로 알려져 있다.

- 본 연구에서 제시한 두 개의 (파리협정과 부합하는) 탈석탄 일정을 따를 경우, 2054 년에 석탄발전을 완전히 퇴출하는 전력수급기본계획 대비 향후 5 년 내 한국의 석탄화력발전소의 운영으로 인한 대기오염과 관련된 조기 사망자 수를 절반으로 줄일 수 있고, 발전소 가동이 종료될 때까지 18,000 명 이상(국내에서만 12,000 명 이상)의 목숨을 살릴 수 있다.

가속화된 탈석탄 정책을 시행할 경우 막을 수 있는 건강 위험 (경제성 시나리오)									
결과	합계			국내			국외		
	95% 신뢰 구간			95% 신뢰 구간			95% 신뢰 구간		
	최적 추정치	최저 추정치	최고 추정치	최적 추정치	최저 추정치	최고 추정치	최적 추정치	최저 추정치	최고 추정치
조기사망(명)	18,482	12,034	25,589	12,619	8,168	17,363	5,863	3,866	8,226
잠재수명 손실연수(년)	339,294	219,361	474,593	228,161	147,813	314,663	111,133	71,548	159,930
조산(건)	1,734	839	1,842	830	402	882	904	437	960
신규천식(건)	3,261	706	7,373	2,552	552	5,787	709	154	1,586

표: 현행 정책 대비 파리협정에 부합하는 탈석탄 시나리오를 따를 경우 막을 수 있는 위험(일부)

- 아울러 현행 정책계획보다 빠른 탈석탄 일정을 따를 경우, 1,700 건 이상의 조산(국내에서만 800 건), 3,000 건의 신규 천식 케이스(국내에서 2,500 건), 총 460 만 일 이상의 결근(국내에서 280 만일)을 줄일 수 있을 것으로 예측된다(상기 표 참조).

도입

한국은 전력 생산을 위해 대기오염 및 각종 질병의 원인으로 지목되는 석탄에 상당 부분 의존하고 있다(석탄은 2020 년 총 설비용량의 29%가량을 차지 하였음). 실제로 한국은 세계보건기구(WHO)가 권장하는 대기오염 수준의 한도를 크게 웃도는 나라들 사이에서도 꾸준히 높은 순위를 차지하고 있다 [1].

이러한 이유에서 한국 정부는 대기오염을 비상 저감 조치가 필요한 '사회적 재난'으로 선포하였다[2]. 그럼에도 불구하고 한국 정부는 총 용량이 7.3GW에 육박하는 신규 석탄화력발전소의 건설을 계속 추진한다는 계획이다 [3].

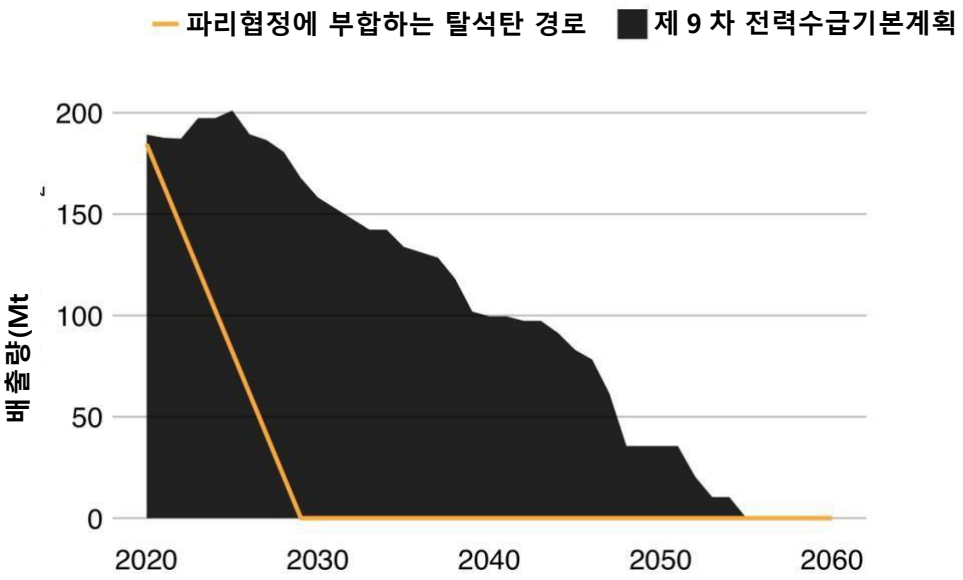


*그림 1 석탄발전으로 인한 잠재적인 이산화탄소 배출량의 비교. * 아래 각주 1 의 설명 참조*

석탄발전 용량의 지속적인 증가는 파리협정 온도 목표 달성을 위해 필요한 2029 년 탈석탄 계획(**그림 1**)과 극명한 대조를 이룬다[4].[1] 2020 년 12 월에 발표된 제 9 차 전력수급기본계획(**상자 1**)상 폐쇄 일정에 따르면 2030 년에도 석탄발전용량이 30GW 을 상회할 것으로 보인다.

한국정부가 그러한 현재의 폐쇄 일정을 고수한다면 온실가스 감축목표를 달성하기 어려울 뿐만 아니라(석탄화력발전으로 인한 온실가스 배출량이 2025 년경 정점에 달하게 됨) 온 국민을 대기오염으로 인한 즉각적인 위험에 노출시키게 된다.

[1] Climate Analytics는 IEA의 Energy Technology Perspectives "Beyond 2°C Scenario"의 하향식 모델을 기반으로 2019 년까지의 역대 배출량을 고려하여 파리협정에 부합하는 석탄발전 부문 배출량 감축 계획을 모델링하였다. Climate Analytics는 상기 모델의 특성이 파리협정 장기 온도 목표(Long-Term Temperature Goal)와 부합하도록 별도의평가를 실시하였다. 파리협정에서 전 세계는 지구 온난화를 "2°C 보다 훨씬 아래로" 억제하고, 1.5°C 이하로 제한하기위한 노력을 추구하기로 합의하였다.

본 보고서에서는 2029년까지 석탄발전을 완전히 퇴출하는 두 가지 일정을 제시하면서, 탈석탄을 보다 가속화할 경우 방지할 수 있는 건강피해를 강조하고자 한다.

상자1 제 9 차 전력수급기본계획

제 9 차 전력수급기본계획

전력수급기본계획은 산업통상자원부가 전기사업법 제25조 및 동법 시행령 제 15 조에 따라 2 년마다 작성하는 행정계획으로, 국내 전력의 장기(15 년) 수급계획을 제시한다.

제9차 계획(2020 년 12 월)은 석탄 및 원자력 용량을 줄임과 동시에 증가하는 전력 수요를 충족시키기 위해 가스 및 재생에너지 발전용량을 확대하는 것을 목표로 한다. 제9차 계획의 특징은 다음과 같다:

- 향후 5 년 내 석탄발전 7.2 GW 가 계통에 추가됨;
- 석탄발전 용량은 2024 년에 40.6GW 로 정점을 기록한 뒤 2034 년에는 29GW까지 감축됨;
- 2034 년까지 석탄발전 24 기(12.7GW)를 가스 발전으로 전환할 계획;
- 2034 년까지 가스발전용량을 58GW, 재생에너지 용량을 78GW(태양광 59%, 풍력 32%)로 확대.

발전기 별 폐쇄 일정

우리는 **그림 1**에서 제시한 감축 경로를 바탕으로 자체적으로 개발한 발전기 별 폐쇄 '우선순위'에 기반해서, 두가지의 탈석탄 일정을 제시하고자 한다 [5]. 이러한 '우선 순위'는 다음의 두 가지 관점을 기반으로 한다:

- **환경성 관점**: 해당 관점에서는 탄소배출 집약도가 가장 높은 발전기들이 폐쇄 일정에 있어 우선순위를 차지하게 된다. 다시 말해, 각 발전기의 폐쇄 시점은 일차적으로 발전량 단위당 배출되는 이산화탄소량에 의해, 그리고 이차적으로(탄소배출 집약도가 동일한 발전기들 사이의 우위를 가리기 위해) 장기한계비용에 의해 결정된다.
- **경제성 관점**: 해당 접근의 주된 목표는 발전량 단위당 발전비용[2]이 가장 높은 발전기를 우선적으로 폐쇄함으로써 가동 중지로 인한 국가 전체적인 차원의 비용을 줄이는 것이다. 해당 접근에는 카본 트래커 이니셔티브(Carbon Tracker Initiative)의 발전비용 추정치를 사용하였다 [6].

이를 바탕으로 한 폐쇄일정은 단계적으로 계산된다. 석탄화력발전소들의 온실가스 배출량 합계가 파리협정의 장기적인 목표에 부합하는 수준을 초과하는 연도에는 배출량이 상기 수준 또는 그 이하가

[2] 한국 전력 시장은 정부규제에 의해 결정되는 부분이 많다는 특성을 고려하여 카본 트래커 이니셔티브 보고서의 권고에 따라 장기한계비용(LRMC)을 선택하였다.

될 때까지 발전기들을 폐쇄하게 된다.[3] 이러한 두 가지 관점의 계산 방법에 대한 자세한 내용은 **부록 I**에 제시되어 있다.

두 가지 관점 중 어느 것을 따르더라도 석탄발전용량의 연평균 감소량은 약 4.2GW이고, 마지막 발전기는 2029 년에 폐쇄된다. 총 67 기 중 50 기(즉, 전체 발전기의 75%)에 대해서는 두 가지 관점의 폐쇄시기 간의 차이는 2 년 미만에 불과하다. 이는 곧 각 발전기의 정확한 폐쇄 연도에 있어는 어떤 관점을 따르는 지가 어느 정도 중요성을 갖지만, 그보다는 모든 발전기를 폐쇄하는 데 주어진 기간이 짧다는 부분이 가장 유의할 점이라는 것을 의미한다. 각 발전기 별 폐쇄시기 정보와 시사점에 대한 설명은 **부록 II**에 제시되어 있다.

석탄에 대한 지속적인 의존이 대기오염 및 건강에 미치는 영향

석탄 연소는 비단 이산화탄소 배출 뿐만 아니라 환경 및 공중 보건에 직접적인 영향을 주는 대기오염 물질을 많은 양 배출한다는 문제점이 있다. 이산화탄소와 대기오염 모두 화석연료 연소에 의해 발생하기 때문에, 탄소배출 감축 정책을 통해 대기오염도 방지할 수 있다[7]~[11].

초미세먼지($PM_{2.5}$)는 심혈관 질환, 만성 및 급성 호흡기 질환, 폐암, 조산 등 심각한 질환의 위험을 높이는 것으로 알려져 있다[12]~[15]. 아울러 이산화황(SO_2)은 산성비의 원인이 되고[16] 수은과 같은 중금속은 뇌를 포함한 신경계를 손상시킬 수 있으며[17], 질소산화물(NO_x)은 호흡기에 영향을 미침과 동시에 추가적인 미세먼지 및 유해 오존(O_3) 형성에 기여한다[18].

한국 정부는 대기오염을 '사회적 재난'으로 칭한 바 있으나, 그에 따른 충분한 정책 수단이 동반되지는 않았다[2]. 특히 최근 서울 지역 초미세먼지($PM_{2.5}$) 농도는 세계보건기구(WHO) 권고 기준치보다 2 배 이상 높았다[19]. 비록 석탄발전으로 인한 미세먼지 발생량이 2018 년에 비해 상당히 감소하였다고 하지만[4], 60 개의 석탄화력발전소는 2020 년 12 월 기준 3,527 톤의 초미세먼지($PM_{2.5}$) 관련 대기오염물질을 배출하였다 [20]. 환경부에 따르면, 노후 석탄화력발전소를 조기폐쇄하고 대기오염이 심한 계절에는 석탄화력발전소 가동을 중단하며 온실가스 배출 기준을 강화함으로써 대기오염물질 배출 저감 효과가 나타났다[20]. 이는 곧 빠른 탈석탄이 대기오염 물질을 줄이는 효과적인 방법이 될 수 있음을 보여준다.

가속화된 탈석탄 일정으로 인한 대기질 및 건강 편익

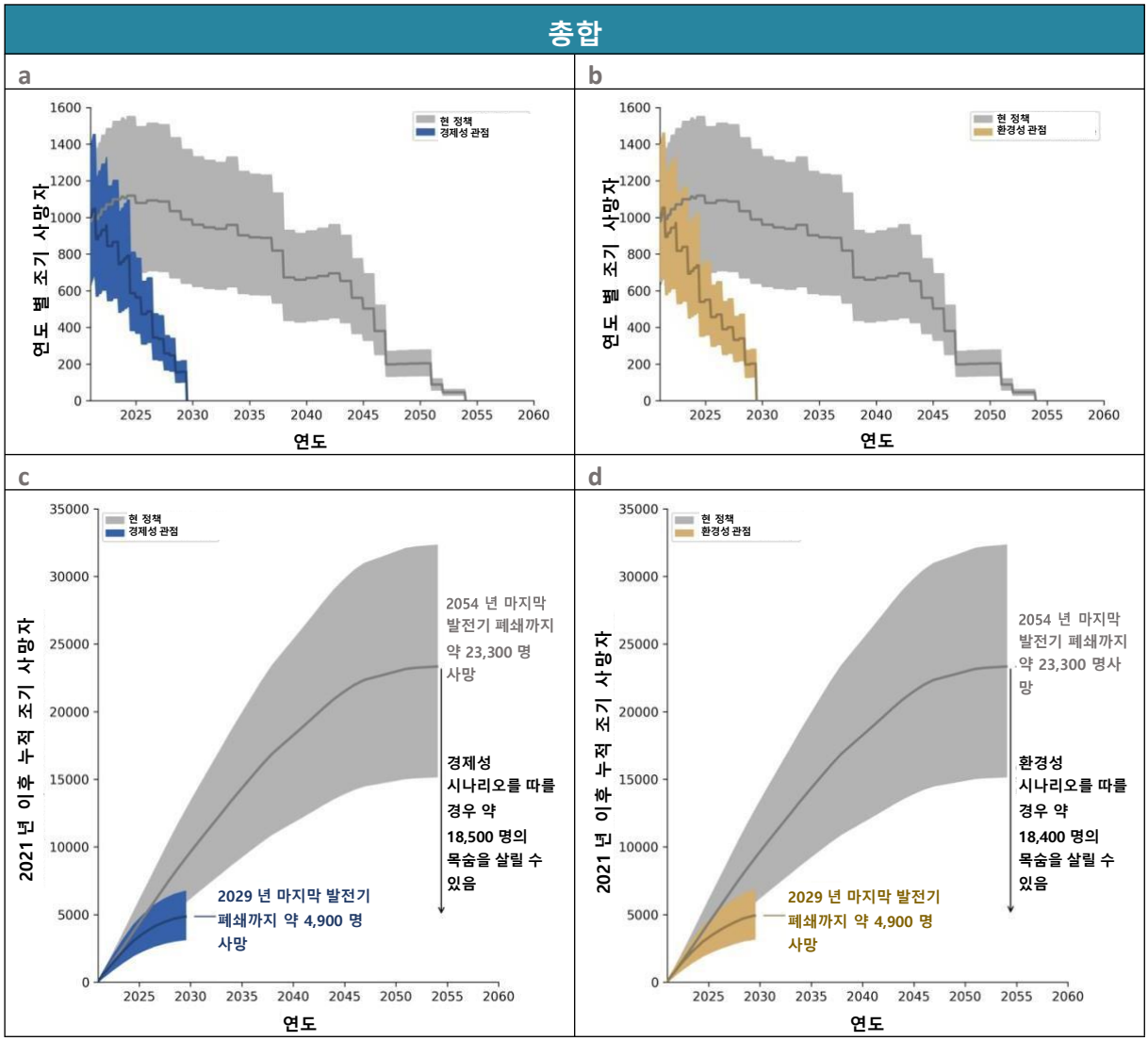
석탄화력발전소로 인한 대기오염에 노출된 인구는 파리협정에 부합하는 폐쇄 일정의 가속화를 통해 상당한 편익을 얻을 수 있을 것으로 보인다. 이를 정량적으로 측정하기 위해 우리는 화학 모듈이 포함된

[3] 이러한 시나리오는 각 발전소의 계통 안정성에 대한 기여, 기대 수익률 등과 같은 요소들을 고려하지 않았다. 이들은 각각의 전략이 어떻게 다른 지(또는 이 보고서에서 강조하는 바와 같이 어떻게 유사한 결론에 이르는 지)에 대한 이해를 돕기 위한 목적으로 고안된 시나리오이다.

[4] 환경부는 2018 년 12 월의 배출량인 8,781 톤에 비하여 2020 년 12 월에는 약 60%가량 배출량이 감소한 것으로 보고했다 [20]. 석탄화력발전소에 의한 대기오염을 관리하기 위해 보다 최근에 채택된 조치들(가령 2019 년 11 월부터 시행된 미세먼지 관리 종합계획(Comprehensive Plan of Fine Dust Management [25])의 실제 효과는 코로나 19의 영향으로부터 경제가 회복될 때까지 지켜봐야 할 것으로 보인다.

날씨 수치모델을 사용한 모델링을 통해 발전소에서 배출되는 오염 물질의 분포를 연구했다. 방법론에 대한 간략한 개요를 **상자 2**에, 보다 상세한 내용은 **부록 III** 에 기술했다.

파리협정에 부합하는 두 일정 모두 제9차 전력수급기본계획 대비 국내 석탄화력발전소에 의한 대기오염으로 인한 조기 사망자 수를 79% 가까이 큰 폭으로 줄여줄 것으로 판단된다(전체적인 영향은 **그림 2a 및 2b**, 국내 영향은 **그림 2e 및 2f** 를 참조). 두 일정 간의 차이는 미미한 반면, 현행 정책 시나리오와 가속화된 탈석탄 일정 간에는 잠재적 감축효과가 누적되어서 차이가 크다. 후자를 따를 경우, 향후 5 년 동안 연간 조기 사망자 수는 약 절반으로 줄어든다. 이러한 차이가 누적되어서, 파리협정에 부합하는 탈석탄 일정에 따르면 2054 년까지 조기사망이 약 23,000 명(그 중 한국에서만 약 15,900 명)이상 발생하는 제9차 전력수급기본계획에 따른 석탄설비 폐쇄 계획에 비해 약 18,000 명(한국에서만 약 12,500 명)의 조기사망을 막을 수 있다[6](**그림 2c, 2d 및 표 1-3** 참조).



[5] 최적 추정치. 95% 신뢰도 범위는 표 1~3 에 제시되어 있음.

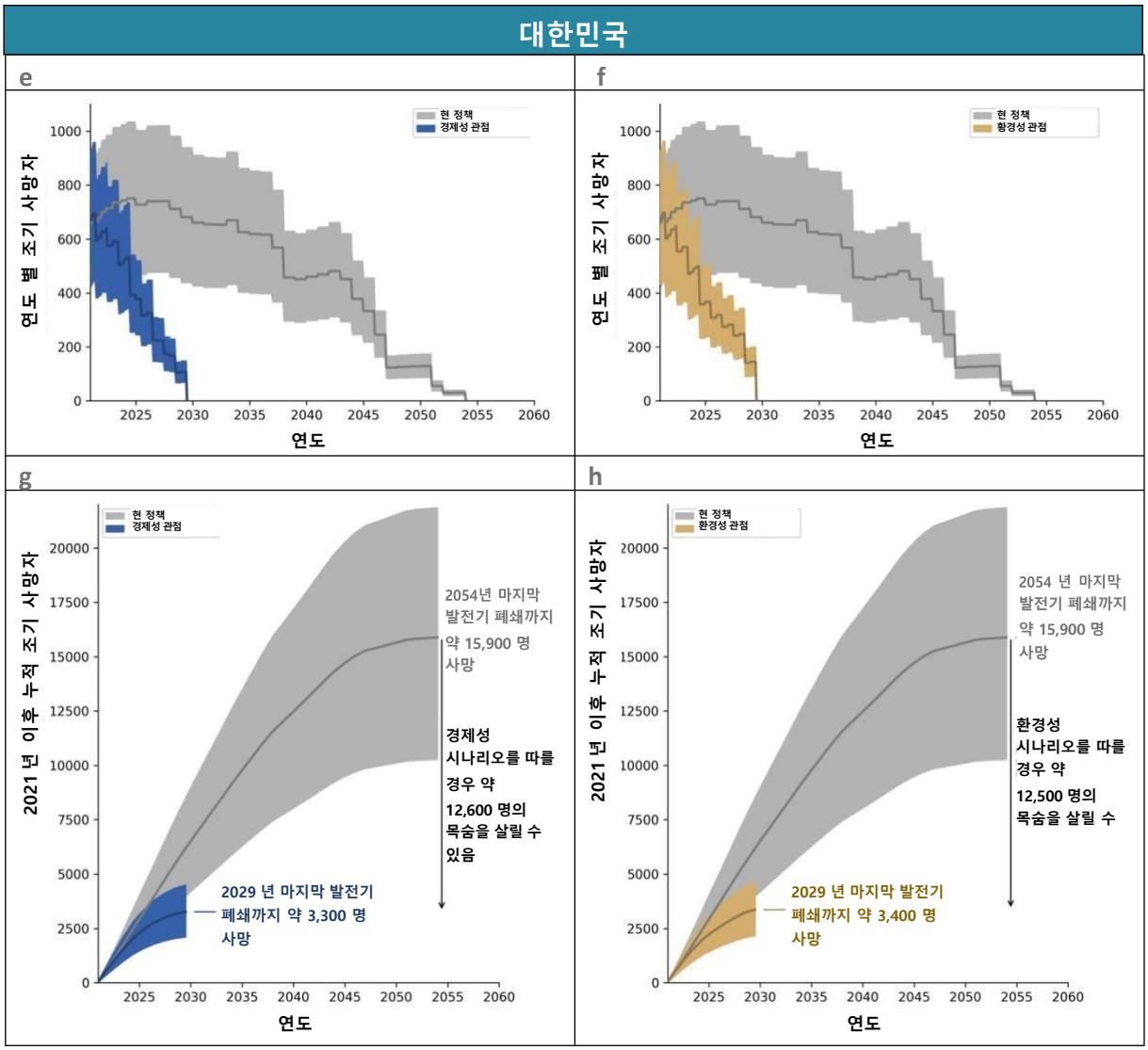


그림 2: 대한민국 석탄발전으로 인한 대기오염 관련 연간 총 조기 사망자 수 추정치(국내 및 국외 총합은 그림 a 및 그림 b, 국내 한정은 그림 e 및 그림 f) 및 탈석탄 소요기간 동안 누적 조기 사망자 수(국내 및 국외 총합은 그림 c 및 그림 d, 국내 한정은 그림 g 및 그림 h) – 정부에서 추진 중인 제 9 차 전력수급기본계획과 파리협정에 부합하는 가속화된 탈석탄시나리오 간의 비교(왼쪽– 경제성 관점, 오른쪽– 환경성 관점). 음영 영역은 95%의 신뢰도 구간을 나타냄[6].

대기오염의 지역적 영향에서도 상당한 차이가 발견된다. 우리는 각 지역별 1 인당 영향[7](그림 3 과 같이 주민 백만 명 당 대기오염으로 인한 사망자 수)을 보여주기 위해 현재 운영 중이거나 계획 중인 모든

[6] 석탄화력발전소에 의한 조기 사망률(패널 a, b, e, f)은 두 가지 상반된 효과의 경쟁으로 인하여 시간이 지남에 따라 변화한다. 1) 발전기(때로는 동시에 여러 개의 발전기)가 폐쇄될 때 급감 현상이 나타남. 초기에는 일부 신규 발전기가 가동을시작해서 급증 현상이 나타남. 2) 이러한 급감은 인구 변화에 따른 사망률의 지속적인 증가와 맞물려 나타남. 즉, 고령화가 심화됨에 따라 더 많은인구가 대기오염 관련 질병으로 인한 사망에 더 취약해짐(부록 II 의 A2 참조). 그림2에 제시된 숫자들은 반올림한 결과를 반영한 것이다. 정확한 숫자는 부록IV의 표I, II, III에 제시하였다.

[7] 실제로는, 몇몇 발전소는 현재 공사가 진행 중인 일부 발전소가 가동을 시작하기도 전에 폐쇄될 계획이다. 따라서 모든 발전소들이 동시에 가동 중인 상태는 어느 시점에도 없다. 그러나 해당 지도는 석탄발전의 영향을 상대적으로 가장 많은 받는 지역들이 있음을 분명히 보여준다(즉, 인구 밀도상의 차이를 보여줌).

석탄화력발전소의 온실가스 배출량을 지리적으로 중첩하여 분석한 가설적 사례를 구축했다. 석탄발전과 관련된 대기오염으로 인한 사망자 수는 발전소 주변(북동부, 서부, 남부 3 개 지역에 밀집)에서 특히 높게 나타난다. 가장 영향을 많이 받는 10 개 지역(모든 발전기가 동시에 가동 중이라고 가정했을 때 인구당 사망자 수 기준)은 광양, 보령, 순천, 동해, 홍성, 하동, 구례, 곡성, 사천, 삼척이다. 절대적인 수치면에서는 인구 밀도가 가장 높은 곳에서 가장 많은 조기 사망 사례가 발생하는데, 이는 인구 밀도가 높을수록 해당 지역의 석탄화력발전소에 의한 대기오염으로 인한 영향을 받는 인구가 많아지기 때문이다(그림에는 표시되어 있지 않음).

그림 3: *국내 가동 중이거나 건설중인 모든 석탄화력발전소의 대기오염물질 배출량 총량을 기준으로 모델링한 결과 인구당 사망자 수의 지역별 분포도 (최적 추정치). 참고로 상기 모델은 어떤 지역이 가장 영향을 많이 받는지를 보여주기 위해 모든 발전소가 동시에 가동된다고 가정한 가상의 사례를 기준으로 한다(실제로는 새로 지어진 발전소가 가동할 때쯤 몇몇 발전소들은 이미 폐쇄됐을 것임).*

조기 사망은 개개인의 수명을 평균적으로 단축시키는데, 국내 석탄발전소들이 현행 정책상의 가동수명이 다할 때까지 배출하는 대기 오염은 거의 43 만 년에 해당하는 잠재적 수명을 단축시키는 결과를 가져올 수 있다(**부록 IV** 의 **표 I**). 이 중 국내 인구의 수명단축이 28 만 년 이상이고, 나머지 14 만 년 이상은 해외 인구의 수명단축이다. 이에 반해 파리협정에 부합하는 탈석탄 시나리오들 에서는 잠재적인 수명 단축이 약 9 만 년으로 대폭 감소하여 현행 정책 대비 총 33 만 년 이상의 잠재적 수명을 살릴 수 있다(**표 1**, **표 2** 및 **부록 IV** 의 **표 I, II, III**).

표 1: 현행 정책 대비, 환경성 시나리오를 따를 경우 방지할 수 있는 2021 년~2054 년 사이 국내 석탄화력발전소로 인한 건강에 미치는 누적 영향(총합, 국내, 국외)

환경성 관점									
결과	총합			국내			국외		
	95% 신뢰 구간			95% 신뢰 구간			95% 신뢰 구간		
	최적 추정치	최소 추정치	최고 추정치	최적 추정치	최소 추정치	최고 추정치	최적 추정치	최소 추정치	최고 추정치
조기사망(명)	18,410	11,993	25,480	12,527	8,113	17,232	5,883	3,880	8,248
잠재수명 손실연수(년)	337,632	218,417	472,071	226,502	146,807	312,305	111,130	71,610	159,766
조산(건)	1,728	836	1,835	827	400	879	901	436	956
천식(신건)	3,239	701	7,323	2,528	547	5,732	711	154	1,591
천식(응급실 방문건수)	7,307	4,544	10,047	4,122	2,581	5,650	3,185	1,963	4,397
결근(인일 기준)	4,647,484	3,953,635	5,336,693	2,809,835	2,390,349	3,226,511	1,837,649	1,563,286	2,110,182

표 2: 현행 정책 대비, 경제성 시나리오를 따를 경우 방지할 수 있는 2021 년~2054 년 사이 국내 석탄화력발전소로 인한 건강에 미치는 누적 영향(총합, 국내, 국외)

경제성 관점									
결과	총합			국내			국외		
	95% 신뢰 구간			95% 신뢰 구간			95% 신뢰 구간		
	최적 추정치	최소 추정치	최고 추정치	최적 추정치	최소 추정치	최고 추정치	최적 추정치	최소 추정치	최고 추정치
조기사망(명)	18,482	12,034	25,589	12,619	8,168	17,363	5,863	3,866	8,226
잠재수명 손실연수(년)	339,294	219,361	474,593	228,161	147,813	314,663	111,133	71,548	159,930
조산(건)	1,734	839	1,842	830	402	882	904	437	960
천식(신건)	3,261	706	7,373	2,552	552	5,787	709	154	1,586
천식(응급실 방문건수)	7,326	4,555	10,072	4,136	2,589	5,669	3,190	1,966	4,403
결근(인일 기준)	4,652,626	3,958,009	5,342,597	2,819,235	2,398,346	3,237,305	1,833,391	1,559,663	2,105,292

대기오염은 사망 외에도 건강에 다양한 문제를 야기한다. 현행 정책을 지속할 경우, 국내 석탄발전에 의한 대기오염으로 2021 년과 2054 년 사이에만 2,300 건(이 중 국내에서만 1,100 건) 이상의 조산이 보고될 것으로 예측되는데, 탈석탄 시나리오 두 가지 중 하나를 따를 경우 이 중 3/4 가량이 방지될 것으로추정된다(**부록 IV** 의 **표 1**). 또한, 두 탈석탄 시나리오 중 어느 것을 따르더라도 향후 신규 천식 발생 건수는 3,000 건 이상, 기존 천식의 악화로 인한 응급실 방문 건수는 7,000 건 이상 줄일 수 있다(**표 1** 및**표 2**). 대기오염이 건강에 미치는 영향은 피해자에게 개인적인 손해를 끼칠 뿐만 아니라 의료서비스의 이용을 수반한다는 점, 그리고 근로 생산성을 저하시킨다는 점(현행 정책을 지속할 경우 총 630 만 결근일이 발생)에서 사회적으로도 경제적 손실을 초래한다(**부록 IV** 의 **표 1**). 결근일 수는 탈석탄 시나리오두 가지 중 어느 것을 따르더라도 약 73% 감소하여 총 170 만 일에 그칠 것으로 예측된다.

상자2: *대기오염 영향 계산 방법론*

방법론

발전기 별 폐쇄 일정은 한국의 가속화된 탈석탄으로 인한 대기질 편익을 추정하기 위한 입력 자료이다. 다양한 건강 관련 결과에 대한 농도반응함수를 사용하여 발전소가 계속 가동될 경우 건강에 미치는 영향을 계산하였다. 이는 각 발전기가 대기오염물질의 농도에 미치는 영향을 포착하고, 이러한 자료는 다시금 대한민국은 물론 주변국[9] 내 대기오염에 노출된 인구에 미치는 영향(각국의 인구 증감 추이와 연령 구조의 변화 고려)을 산출하는 데 활용된다. 이를 제9차 전기본전망에 따른 건강에 미치는 영향과 비교하였다. 이와 관련된 보다 자세한 사항은 **부록 III** 에 제시되어 있다.

결론

이러한 연구 결과에 비추어 보건대, 가속화된 탈석탄은 한국 정부가 파리협정을 통해 국제적으로 합의된 목표를 준수하는 차원 뿐만 아니라 2054 년에 석탄발전을 완전히 퇴출하는 현행 정책 대비 약 18,000 명(국내에서만 12,000 명 이상)의 생명을 구할 수 있다는 점에서 의의가 있다.

탈석탄을 가속화할 경우, 불과 5 년 안에 국내 석탄화력발전소에 의한 대기오염으로 인한 연간 조기 사망자의 수를 절반으로 줄일 수 있다. 탄소 집약도를 바탕으로 발전소들의 폐쇄 순서를 정하는 안이 한계비용을 바탕으로 한 안보다 조금 더 많은 수의 생명을 구할 수 있지만, 석탄을 빠르게 퇴출하기만 하면 어느 기준으로 폐쇄 순서를 정하는 지는 상대적으로 덜 중요하다.

최근 발표된 문헌도 우리의 연구 결과를 뒷받침한다. Maamoun 외(2020)은 연식, 탄소집약도, 대기오염 정도 등을 기준으로 세계 2,000 여 곳의 석탄화력발전소에 대한 순위를 매겼는데, 조기 폐쇄되어야 할 발전소들이 중국, 인도, 한국에 있는 것으로 나타났다[22]. 이는 한국이 보다 가속화된 탈석탄을 추진해야 한다는 우리의 결과를 뒷받침한다.

[8] 중국, 일본, 북한

또한 Kim et al.(2020)은 한국이 야심찬 온실가스 감축목표 달성을 위해 시행하는 대기오염 조치들이 건강에 주는 편익을 계량화 한 결과, 경제적 측면에서 이러한 건강 편익이 기후변화 완화에 수반되는 총 비용보다 훨씬 크다고 추산한 바 있다 [23]. 해당 연구에 따르면 의료 비용 지출 감소로 인한 절감액이 미화 약 1 억 4 천만 달러, 노동시간 손실 방지를 통한 절감액이 약 3 억 8 천만 달러이며, 통계적 생명가치(value of statistical life) 면에서 조기 사망을 방지하는 것만으로도 미화 약 230 억 달러 상당의 경제적 편익을 발생시킨다. 석탄화력발전에 초점을 맞춘 최근 연구는 제9차 전기본상 건강에 미치는 영향으로 인한 누적 비용이 약 210 억 달러에 달할 수 있다는 것을 발견하였다 [26].

본 보고서는 석탄화력발전소의 대기오염물질 배출과 그로 인한 건강영향만을 고려한다는 점에유의할 필요가 있다. 이 점에서, 이 연구가 제시한 빠른 탈석탄으로 인한 건강상의 편익은 다음의 두가지측면에서 보수적으로 추산된 것이다:

- 첫째, 석탄 채굴, 운반, 저장 및 석탄재 처리 등 석탄의 공급망을 따라 진행되는 공정 역시 상당 수준의 대기오염으로 건강에 큰 영향을 미치지만 본 연구의 추정치에 포함되어 있지 않다.

- 나아가, 제9차 전기본은 석탄화력발전소 24 기를 천연가스발전소로 전환할 계획이다. 최근 연구에 따르면 석탄발전에서 가스발전으로의 전환은 파리협정 온도목표와 부합하지 않을 가능성이 높으며[27], 재생에너지로 바로 전환하는 것이 더 나은 경로일 수 있다. 본 보고서에서 고려되지는 않았으나 가스발전 역시 대기오염에 영향을 준다.

- 따라서 현행정책 시나리오(business-as-usual)에 따른 총 대기오염물질 배출량과 이산화탄소 배출량은 실제로는 더 높을 것으로 예상되며, 이는 곧 (석탄화력발전소를 가스발전소로 전환하지 않는) 빠른 탈석탄에 따른 건강 편익과 환경 편익이 더 크다는 것을 의미한다.

References

[1] MOTIE, "보도/해명 | 산업통상자원부 홈페이지," 2020. [Online]. Available: http://www.motie.go.kr/motie/ne/presse/press2/bbs/bbsView.do?bbs_cd_n=81&bbs_seq_n=163670. [Accessed: 07-Mar-2021].

[2] The Guardian, "'Social disaster': South Korea brings in emergency laws to tackle dust pollution," 13-Mar-2019.

[3] C. Shearer *et al.*, "Boom and Bust 2020: TRACKING THE GLOBAL COAL PLANT PIPELINE," 2020.

[4] Climate Analytics, "South Korea must exit coal by 2029 to be in line with the Paris Agreement," *Climate Analytics*, 20-Feb-2020. [Online]. Available: https://climateanalytics.org/latest/south-korea-must-exit-coal-by-2029-to-be-in-line-with-the-paris-agreement/. [Accessed: 04-Aug-2020].

[5] Climate Analytics, "A Stress Test for Coal in Europe under the Paris Agreement," 2017.

[6] M. Gray and D. D'Souza, "BROWN IS THE NEW GREEN: Will South Korea's commitment to coal power undermine its low carbon strategy?," *Carbon Tracker Initiative Analysis Report*, 2019. [Online]. Available: https://carbontracker.org/reports/south-korea-coal-power/. [Accessed: 07-Mar-2021].

[7] C. Oberschelp, S. Pfister, C. E. Raptis, and S. Hellweg, "Global emission hotspots of coal power generation," *Nat. Sustain.*, vol. 2, no. 2, pp. 113–121, Feb. 2019, doi: 10.1038/s41893-019-0221-6.

[8] E. Amster, "Public health impact of coal-fired power plants: a critical systematic review of the epidemiological literature," *Int. J. Environ. Health Res.*, pp. 1–23, Oct. 2019, doi: 10.1080/09603123.2019.1674256.

[9] K. Mahavong, P. Pataranawat, and S. Chinwetkitvanich, "MERCURY CONTAMINATION IN ENVIRONMENT SURROUNDING COAL-FIRED POWER PLANT," doi: 10.21660/2017.33.2581.

[10] N. L. Mills *et al.*, "Adverse cardiovascular effects of air pollution," *Nature Clinical Practice Cardiovascular Medicine*, vol. 6, no. 1. Nature Publishing Group, pp. 36–44, 25-Nov-2009, doi: 10.1038/ncpcardio1399.

[11] S. Zhou *et al.*, "Impact of a Coal-Fired Power Plant Shutdown Campaign on Heavy Metal Emissions in China," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 53, no. 23, pp. 14063–14069, Dec. 2019, doi: 10.1021/acs.est.9b04683.

[12] A. Vodonos, Y. A. Awad, and J. Schwartz, "The concentration-response between long-term PM 2.5 exposure and mortality; A meta-regression approach," *Environ. Res.*, vol. 166, pp. 677–689, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.envres.2018.06.021.

[13] I. Braithwaite, S. Zhang, J. B. Kirkbride, D. P. J. Osborn, and J. F. Hayes, "Air pollution (Particulate matter) exposure and associations with depression, anxiety, bipolar, psychosis and suicide risk: A systematic review and meta-analysis," *Environmental Health Perspectives*, vol. 127, no. 12. Public Health Services, US Dept of Health and Human Services, 18-Dec-2019, doi: 10.1289/EHP4595.

[14] P. Klepac, I. Locatelli, S. Korošec, N. Künzli, and A. Kukec, "Ambient air pollution and pregnancy outcomes: A comprehensive review and identification of environmental public health challenges," *Environmental Research*, vol. 167. Academic Press Inc., pp. 144–159, 01-Nov-2018, doi: 10.1016/j.envres.2018.07.008.

[15] F. Liu *et al.*, "Associations between long-term exposure to ambient air pollution and risk of type 2 diabetes mellitus: A systematic review and meta-analysis," *Environmental Pollution*, vol. 252, no. Pt B. Elsevier Ltd, pp. 1235–1245, 01-Sep-2019, doi: 10.1016/j.envpol.2019.06.033.

[16] S. Kumar, "Acid Rain-The Major Cause of Pollution: Its Causes, Effects," 2017.

[17] S. Zhou *et al.*, "Impact of a Coal-Fired Power Plant Shutdown Campaign on Heavy Metal Emissions in China," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 53, no. 23, pp. 14063–14069, Dec. 2019, doi: 10.1021/acs.est.9b04683.

[18] United States Environmental Protection Agency, "Basic Information about NO2 | Nitrogen Dioxide (NO2) Pollution | US EPA." [Online]. Available: https://www.epa.gov/no2-pollution/basic-information-about-no2#Effects. [Accessed: 15-Mar-2021].

[19] D. Trnka, "POLICIES, REGULATORY FRAMEWORK AND ENFORCEMENT FOR AIR QUALITY MANAGEMENT: THE CASE OF KOREA-ENVIRONMENT WORKING PAPER No. 158."

[20] Ministry of Environment (MOTIE), "Joint update of the environmental authorities of Korea and China on their fine dust response.," *Press Release*, 2021. [Online]. Available: http://eng.me.go.kr/eng/web/board/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=&searchValue=&menuId=461&orgCd=&boardId=1432680&boardMasterId=522&boardCategoryId=&decorator=. [Accessed: 26-Feb-2021].

[21] Solutions for Our Climate, "기후솔루션," 2020. [Online]. Available: http://www.forourclimate.org/sub/data/view.html?idx=12&curpage=2. [Accessed: 15-Mar-2021].

[22] N. Maamoun, R. Kennedy, X. Jin, and J. Urpelainen, "Identifying coal-fired power plants for early retirement," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 126, 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.109833.

[23] S. E. Kim *et al.*, "Air quality co-benefits from climate mitigation for human health in South Korea," *Environ. Int.*, vol. 136, no. June 2019, p. 105507, 2020, doi: 10.1016/j.envint.2020.105507.

[24] IPCC, "Stationary Combustion," in *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, H. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, and K. Tanabe, Eds. 2006.

[25] Ministry of Environment (MOTIE), "Air pollution." [Online]. Available: http://eng.me.go.kr/eng/web/index.do?menuId=464. [Accessed: 09-Mar-2021].

[26] CREA. (2021). The Health and Economic Cost of Coal Dependence in South Korea's Power Mix. [27].

Ganti, G., Brecha, R., Strefler, J., Uekcerdt, F., Luderer, G., & Gidden, M. (2021). Coal-to-Gas Bridge Incompatible with Paris Agreement Goals. doi: https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-289099/v1

부록 I – 발전기 별 폐쇄 일정 및 배출량 계산에 대한 방법론

본 연구에서는 발전기 별 폐지 일정과 관련하여 다음과 같이 두 가지의 접근법을 고려한다:

- '환경성' 관점: 해당 관점은 탄소배출 감축을 위한 환경적 적합성에 의거한 접근 방식을 취해서 가장 비효율적인 발전기의 폐쇄를 우선시하며, 각 발전기가 창출할 수 있는 수익의 최대화를 고려한다. 해당 관점에서는 발전기들의 순서가 일차적으로 탄소집약도(발전량 단위당 이산화탄소 배출량)에 따라 정렬된다. 또한, 석탄발전 퇴출로 인한 전반적인 경제적 손실을 줄이기 위해, 그리고 많은 발전기들의 탄소집약도 특성이 유사하다는 점을 감안하여, 각 탄소집약도의 범위에서 장기한계비용이 낮은 발전기에 우선순위를 부여하는 2 차 분류를 시행했다. 본 연구의 시나리오들은 설비이용률을 70%로 일정하게 가정하였다(배출량 계산에 대한 세부 사항은 아래 참조).
- '경제성' 관점: 해당 관점은 경제적 가치가 더 높은 발전기를 가능한 오랫동안 유지함으로써 발전기 폐쇄로 인해 투자자와 발전사에게 발생하는 국가 전체(지역 불문) 차원의 비용 감축을 목표로 한다. 환경성 관점과 유사하게, 해당 관점 역시 두 단계 분류를 시행한다. 우선 장기한계비용에 따라 발전기들을 분류한 뒤, 순서가 겹치는 경우에는 발전 과정에서의 배출집약도를 기준으로 분류한다.

발전기 폐쇄는 단계적으로 수행된다. 석탄화력발전소들의 배출량 합계가 목표 배출 경로를 초과하는 연도에는 배출량이 상기수준 또는 그 이하가 될 때까지 발전기들을 폐쇄한다. 발전기들은 위에서 설명한 대로 분류되며, 그림 13에서 보는 바와 같이 우선순위가 가장 높은 발전기들이 해당 연도에 폐쇄된다.

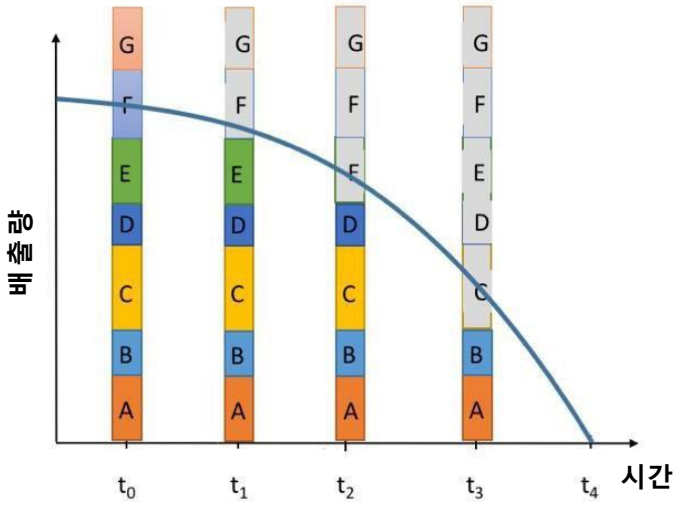


그림 13 – 방법론의 개략적인 도식. A~G 로 표시된 각 상자는 발전기의 배출량을 나타낸다. 파란색 선은 파리협정의 장기 온도목표(Long-Term Temperature Goal)에 부합하는 최적 비용의 석탄 배출 경로를 나타내며, t0~t4 는 시간적인 단계(연도)를 나타낸다. 만약 t1 단계에서 폐쇄를 시작한다고 가정하면, 회색 영역이 보여주는 바와 같이 G 와 F 발전기가 폐쇄되어야 한다. t2 단계에서는 최소 비용 전략에 따라 발전기 E 가 폐쇄되어야 하며, t3 단계에서는 A 와 B 만 가동된다. t4 단계에서는 배출량이 '0'에 도달해야 하므로 남아있는 모든 발전소들이 폐쇄되어야 한다.

한국에서 현재 가동 또는 건설 중인 석탄화력발전소에서 발생하는 배출량을 추정하기 위해, 우리는 알려진 모든 석탄화력발전소에 대한 위치, 상태, 투자자, 용량, 연소 기술 및 연료, 가동 연도 및 폐쇄 예정 연도 등의 정보를 제공하는 Global Coal Plant Tracker(GCPT) 데이터베이스를 사용하였다. 해당 데이터를 한국전력의 데이터와 통합한 뒤 모든 발전기에 70%의 설비이용률을 할당하였다. 본 보고서에서 사용된 데이터는 발전소의 위치 국가, 용량, 상태 및 연소 기술과 같은 각 발전소 별 상세 정보로 구성되어 있으며, 다음 공식을 사용하여 해당 발전소들의 이산화탄소 배출량을 추정할 수 있다.

연간 배출량:

$$Emi_{it} = Cap_i * \frac{1}{eff_i} * lf_{it} * ef_i * \boldsymbol{\phi}$$

$\boldsymbol{Emi_it}$는 발전기(i)의 특정 연도 배출량을 Mt CO_2의 단위로 나타낸 것이다.

$\boldsymbol{Cap_i}$는 발전기(i)의 용량을 MWel의 단위로 나타낸 것으로, MWel 은 발전기의 전기 출력을 뜻한다. 석탄화력발전소 연료에 포함된 에너지의 약 2/3(실제 값은 연료 기술에 따라 달라짐) 정도가 전기로 변환되면서 상실되고, 변환 중 방출되는 열 에너지는 일반적으로 더 이상 사용되지 않고 냉각탑이나 강물을 통해 제거된다.

$\boldsymbol{eff_i}$는 발전기의 전환 효율, 즉 연료(석탄)에 포함된 에너지 중 얼마가 전기로 전환되는지를 나타낸다. 일반적으로 현대적인 발전소(한국내 석탄화력발전소의 대부분을 차지)의 경우 전환 효율이 더 높은 편이다.

$\boldsymbol{lf_{it}}$는 특정 연도에 발전소의 부하율을 나타낸다. 부하율은 이론상 최대 출력에 대한 실제 출력의 비율이며, 보통 1 년 기간에 대해 계산된다. 이론상 최대 출력치는 발전소가 공표된 최대 용량에서 365 일 24 시간 동안 가동된다고 가정함으로써 계산할 수 있다. 예를 들어, 100MW 용량을 가진 발전기의 최대 출력치는 다음과 같다:

$$100\ \mathrm{MW_{el}} * \mathrm{l0}\frac{\mathrm{hours}}{\mathrm{day}} * \mathrm{ayr}\frac{\mathrm{days}}{\mathrm{year}} = 876{,}000\ \mathrm{MWh}$$

.

1 년간 실제 출력치는 최대 출력치보다 낮을 수밖에 없는데, 수요의 변동 등으로 인하여 항상 최대출력으로 가동되지 않고, 유지보수를 위해서는 가동이 완전히 중단되어야 하기 때문이다. 한국내 석탄화력발전소의 향후 이용률에 대한 불확실성이 있기 때문에 계산에 있어 기본값으로 70%를 설정하였다. 이것이 환경성 관점에서 사용되는 지표인 발전 과정에서의 배출집약도에영향을 주는 것은 아니라는 점에 유의할 필요가 있다.

$\boldsymbol{ef}_i$ 는 배출 계수를 나타내며, 특정 석탄 연소에 따라 얼마나 많은 양의 이산화탄소가 배출되는지에 관한 정보를 뜻한다. 단위는 kg CO_2/TJ이다. 석탄은 등급이 높을 수록 탄소를 더 많이 함유하고, 연소 과정에서 탄소가 이산화탄소로 변환된다. 우리는 (IPCC, 2006)의 배출 계수를 사용하였는데, 해당 자료는 석탄의 종류별 배출 계수에 관한 정보만 있기 때문에 두 가지 등급의 석탄(가령 유연탄과 아역청탄)을 사용하는 발전소들에 대해서는 각 등급의 석탄이 50:50 비율로 사용된다고 가정하였다.

$\boldsymbol{\phi}$는 결과를 올바른 단위(Mt CO2/yr)로 나타내기 위한 변환 계수이다.

부록 II – 발전기 별 폐쇄 일정

발전기	현행 정책 폐쇄년도	환경성 시나리오 폐쇄년도	경제성 시나리오 폐쇄년도	배출 집약도 (g CO2 / kWh)	장기한계비용 (Unit)
보령 #1	2020	2020	2020	1045.552	50.66
보령#2	2020	2020	2020	1045.552	50.54
동해#1	2028	2020	2020	1256.639	55.36
동해#2	2029	2021	2020	1166.901	54.32
호남#1	2021	2021	2021	1175.02	49.16
호남#2	2021	2021	2021	1175.02	49.16
삼천포#1	2021	2021	2021	1012.987	54.15
삼천포#2	2021	2021	2021	1012.987	53.9
태안#2	2025	2022	2021	939.6995	52.92
삼천포#4	2024	2021	2021	972.3855	52.3
삼천포#3	2024	2021	2021	972.3855	51.4
당진#3	2030	2023	2021	861.3834	51.1
여수#1	2046	2022	2021	881.4979	50.76
태안#4	2029	2022	2021	939.6995	50.45
당진#4	2030	2023	2021	861.3834	49.97
강릉안인#1	2052	2026	2022	795.0736	51.63
강릉안인#2	2052	2026	2022	795.0736	51.63
태안 #3	2028	2022	2022	939.6995	49.6
당진#1	2029	2024	2022	861.3834	49.53
고성하이#1	2051	2026	2022	795.0736	49.43
고성하이#2	2051	2026	2022	795.0736	49.43
삼척그린파워#2	2047	2027	2022	795.0736	49.35
여수#2	2041	2021	2023	1094.004	49.27
태안#1	2025	2022	2023	939.6995	49.15
보령#3	2043	2021	2023	969.909	49.01
당진#9	2045	2028	2023	770.3096	48.92

영흥#1	2034	2024	2023	861.3834	48.65
당진 #2	2029	2024	2023	861.3834	48.59
당진#8	2037	2024	2024	847.3219	48.51
당진#7	2037	2025	2024	847.3219	48.48
영흥#2	2034	2024	2024	861.3834	48.25
당진#10	2046	2029	2024	770.3096	48.19
태안 #10	2047	2029	2024	770.3096	48.14
북평 #2	2047	2023	2024	867.3625	48.1
북평 #1	2047	2023	2024	867.3625	48.06
보령 #4	2043	2021	2024	969.909	47.93
태안 #7	2037	2025	2024	847.3219	47.82
보령 #5	2025	2021	2025	969.909	47.53
보령 #6	2025	2022	2025	969.909	46.82
당진 #6	2036	2023	2025	874.5617	47.73
태안 #5	2032	2024	2025	861.3834	47.73
하동 #1	2026	2022	2025	939.6995	47.72
하동 #2	2027	2022	2025	939.6995	47.72
당진 #5	2035	2023	2025	874.5617	47.72
하동 #3	2028	2022	2026	939.6995	47.66
영흥 #5	2044	2028	2026	783.0674	47.64
영흥 #6	2044	2028	2026	783.0674	47.62
하동 #4	2028	2024	2026	861.3834	47.6
하동 #5	2031	2024	2026	861.3834	47.53
하동 #6	2031	2024	2026	861.3834	47.47
삼천포 #5	2027	2022	2027	969.909	44.34
신서천	2051	2027	2027	795.0736	47.51
보령 #8	2038	2023	2027	874.5617	47.49
삼척그린파워 #1	2046	2027	2027	795.0736	47.41
신보령 #2	2047	2027	2027	795.0736	47.25
삼천포 #6	2028	2022	2028	969.909	43.62

삼척블루파워 #1	2054	2025	2028	808.2415	47.18
삼척블루파워 #2	2054	2025	2028	808.2415	47.18
영흥 #4	2038	2029	2028	770.3096	47.15
신보령 #1	2047	2028	2028	795.0736	47.08
태안 #8	2037	2025	2029	847.3219	46.97
태안 #9	2046	2029	2029	770.3096	46.85
태안 #6	2032	2024	2029	861.3834	46.79
보령 #7	2038	2023	2029	874.5617	46.55
영흥 #3	2038	2029	2029	770.3096	46.54
하동 #7	2038	2025	2029	847.3219	45.88
하동 #8	2039	2029	2029	770.3096	45.83

평균적으로, 경제성 시나리오가 현행 정책 대비 11.5년 빠른 탈석탄 일정을 제시하는 반면, 환경성 시나리오는 11.9년을 앞당긴다. 이 둘 사이에 의미 있는 차이는 없다. 주요 분석 내용은 다음과 같다:

a. 경제성 시나리오보다 환경성 시나리오에서 더 빨리 폐쇄되는 발전기들:

   i. 삼천포 6 과 보령 7 은 6 년 빨리 폐쇄.

   ii. 삼천포 과 태안 6 은 5 년 빨리 폐쇄.

   iii. 하동 3과 하동 7, 보령 5와 보령 8, 태안 8 은 4 년 빨리 폐쇄.

   iv. 하동 1과 하동 2, 삼척블루파워 1 과 삼척블루파워 2, 보령 4와 보령 6 은 3 년 빨리 폐쇄.

   v. 초초임계압 설비인 삼척블루파워 1,2호기 외에 나머지 모든 발전기들은 초임계압 발전시설이다.

b. 환경성 시나리오보다 경제성 시나리오에서 더 빨리 폐쇄되는 발전기들:

   i. 태안 10, 삼척그린 2, 당진 9과 당진 10 은 5 년 빨리 폐쇄.

   ii. 고성하이 1 과 고성하이 2, 강릉안인 1과 강릉안인 2 는 4 년 빨리 폐쇄.

   iii. 이 발전기들은 초임계압 시설들이다. 강릉안인 1,2 호기는 현재 건설 중이고, 나머지 다른 발전기들은 가동 중이거나 공사가 거의 완료되었다.

c. 경제성 시나리오에서 현재 건설중인 신규 발전기들(고성하이 1 및 2, 강릉안인 1 및 2, 삼척블루파워 1 및 2, 그리고 신서천)은 완공되자마자 거의 바로 폐쇄되어야 한다 (환경성 시나리오에서는 4 년 가량 가동할 수 있다). 이는 이 발전기들이 완공되더라도 좌초자산화 될 위험이 크다는 사실을 보여준다.

   i. 북평 1와 북평 2, 당진 9 와 당진 10, 태안 10, 신보령 1과 신보령 2, 삼척그린 1 과 삼척그린 2 와 같이 2016- 2017 년에 완공된 초초임계압 발전기들 중 동해안 가까이 있는(삼척그린 2, 북평 1과 북평 2 등) 발전기들은 상대적으로 더 빨리 폐쇄되어야 한다.

   ii. 가동중인 초임계압/초초임계압 발전기들 중 여수 1과 여수 2, 보령 3과 보령 4, 영흥 5와영흥 6, 태안 7, 당진 7과 당진 8 은 현행 정책 대비 더 빨리 폐쇄되어야 한다. 최근의 설비 투자 등은 이 발전기들이 우선적으로 폐쇄되도록 하는데 영향을 미치는 요인이 될수 있다.

d. 환경성 시나리오에서는 폐쇄 순서가 완공 순서와 거의 일치한다. 이는 가속화된 탈석탄이 나아갈 수 있는 방향을 제시한다. 동해 1과 동해 2 와 같이 다양한 정책적 이유로 가동 유지되고 있는 노후 발전기들의 순서가 앞당겨 질 수 있다. 그 후 삼천포 3과 삼천포 4, 보령 3,4,5,6, 태안 1,2,3,4, 하동 1,2,3과 같이 조기폐쇄가 예정된 발전기들 인근에 위치한 발전기들 또한 빠르게 폐쇄될 수 있다.

   i. 우리의 계산에 따르면, 신규 발전기들 중 북평 1과 북평 2은 오염물질 배출이 확연하게많은데, 이에 대한 원인규명을 위한 조사가 있어야 한다.

부록 III – 대기오염 및 건강영향 분석에 대한 방법론

A.1 대기 확산 모델링 시스템

대기확산모델은 크게 두 가지 요소로 구성된다. 석탄화력발전소 주변 지역의 기상 조건을 시뮬레이션하기 위한 기상 모듈(A-1)과, 석탄화력발전소에서 배출된 대기오염물질이 주변 환경으로 확산되는 양상을 시뮬레이션하기 위해 화학수송 모델(A-2)을 결합한다.

A.1.1 기상 모듈

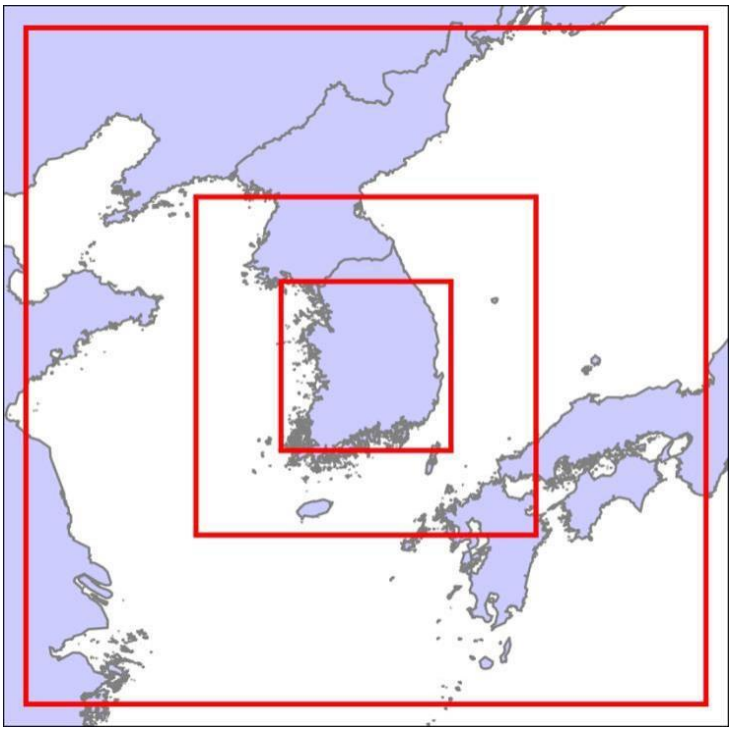


그림 A.1: 한국 주변지역에 대해 3 개 격자(붉은색 박스)의 범위에서 수치 날씨모델이 적용되었다

- **모델.** 석탄화력발전소 주변의 기상은 The Air Pollution Model (TAPM) 버전 3을 적용하여 모델링을 실시했다. TAPM 에는 대기오염물질 확산 모델링 기능도 포함되어 있지만 본 시뮬레이션에서는 TAPM 의 기상 요소만을 이용한다.
- **도메인.** 기상 모듈은 한반도를 중심으로 3 개 둥지격자에 대해 모델을 적용한다. 모델 격자는 75x75 격자 셀로 구성되며 공간 해상도는 각각 20km, 10km, 5km 로 중심에 가까워질수록 세밀해진다(그림 A.1).
- **경계조건.** 경계 조건은 호주 기상청의 GASP 모델로부터 도출했다.
- **스핀업과 분석기간.** 이 연구에서는 1 년의 기간을 모델로 잡고, 기상모듈을 가동하였다. 다년간의 건강 영향을 분석한 결과 최근의 대표 년도를 선택하는 것이 가장 적절하다고 판단했다. 2005 년부터 2018 년 사이에 일어났던 지표면 기상현상에 대한 대략적인 통계적 분석을 바탕으로, 우리는 2016 년의 기상현상을 대표모델로 선택하였다. 매 시뮬레이션 마다, 2015 년의 마지막 7 일부터 2016 년 한 해의 기간동안 모델링이 실행된다. 첫번째 7 일은 모델링의 스핀업을 위해서 사용되며, 2016 년의 데이터만이 분석을 위해 사용된다.

- **대표 모델 연도 선택.** 가능한 장기간에 걸쳐 대표성을 띈 연도를 선택하기 위해 2005 년부터 2018 년까지 기상 표면 관측에 대한 대략적인 통계 분석을 수행했다. NOAA의 ISD 데이터를 통해 표준 공항 기상 관측에서 풍속, 풍향, 온도, 습도, 강우, 운저 높이 및 구름량을 분석하여 지난 10 년간 값이 평균에 가깝고 극한 값이 없는 1 년의 기간을 스크리닝했다. 이러한 기준을 바탕으로 2016 년을 대표 모델 연도로 선정했다.

A.1.2 대기 화학수송 모델

- **모델.** 대기확산, 화학적 변성, 석탄화력발전소의 대기오염물질 침적에 대한 모델링은 CALPUFF 모델 버전 7이 사용되었다.
- **수용점 배열.** 대기 화학수송 모듈은 각 발전소를 중심으로 불규칙하게 배열된 11,224 개 수용점에 가동된다. 수용점의 공간해상도는 발전소의 바로 주변 700m에서 기상모듈 도메인의 가장 바깥쪽 영역 20km 까지다.
- **외부 대기오염 배출원.** 모델링에서는 석탄화력발전소에서 배출된 대기오염물질 피해에 집중하고 있기 때문에, 석탄발전소 이외의 다른 배출원의 대기오염물질은 모델링에 포함하지 않았다. 발전소에서 배출된 대기오염물질의 화학적 변형에 따른 영향은 Koplitz 등 (2017)의 월별 배경 화학 종 (NH_3, O_3, H_2O_2) 농도를 CALPUFF에 입력함으로써 간접적으로 고려되었다.
- **대기오염물질.** 석탄화력발전소에서 배출된 수은(원소, 2 가 및 입자결합), 일산화질소(NO), 이산화질소(NO_2), 이산화황 (SO_2)과 직접배출 초미세먼지($PM_{2.5}$) 만을 모델링 하였다.
- **배경농도.** 화학모듈을 사용하여 O_3, NH_3, H_2O_2 의 배경농도만을 모델링에 사용하였다.
- **결과.** 모델을 통해 모델격자 전역의 격자 수용점에 대한 지표 부근 대기오염물질 농도 시계열이 산출되었다.
- **운전시간의 계산.** 모델은 1 년의 기간동안, 최대가동의 배출율로 운영된다. 결과인 지표면 대기오염물질 농도 필드는 단기간 최대 대기질영향을 평가하기 위해 사용된다. 건강영향을 분석하기 해서는, 평균농도가 석탄화력발전소의 부하율에 따라 축소되어 연간 배출량에 따라 1 년의 기간동안 균등하게 분산된다.

석탄화력발전소의 재원 및 배출량 자료의 출처

모델링에 사용된 대기오염물질의 배출율과 배연가스 배출 특성은 최대한 발전소 사업자가 직접공개한 자료 혹은 정부를 통해 공개된 자료를 사용하였다. 또한 다른 형태로 공개된 정보 또한 분석을 위해 사용되었다. 모델링을 위한 90% 이상의 자료는 환경영향평가 정보공개시스템과, 국회를 통해 발전소 사업자가 제출한 자료들을 출처로 한다. 아래와 같은 매개변수들이 사용되었다.

- 발전사업자와 정부의 통계로부터 보고된 연간 배출량자료
- 배출설계 기준값, 배출허용 기준값, 평균 연돌 배출농도
- 실제 또는 예측되는 대기오염물질(PM2.5, NO2, SO2) 배출량
- 발전소 호기별 가동기간, 설비용량, 보일러 효율
- 연간 가동시간
- 석탄 열량
- 배연가스 부피 (FGV)
- 배연가스 속도 및 온도

- 굴뚝 높이
- 굴뚝 내부직경

석탄발전소의 위치는 구글맵을 통한 시각적 조사와, 발전사업자가 작성한 환경영향평가 문서에서 추출하였다. 연돌 재원에 대한 자료가 부재할 경우, 고해상도 위성 이미지를 기반으로 연돌의 내경을 측정하였다. 연돌 높이와 배연가스 온도에 대한 자료가 부재할 경우, 같은 재원의 석탄발전소 자료로부터 중간값을 추출하여 사용하였다. 배연가스 배출속도가 주어지지 않은 경우에는 연돌직경과 배연 가스유량을 통해 계산되었다. 연간 배연가스 부피가 주어지지 않은 경우, 아래 식에 의해 계산되었다.

SFGV * CAP / EFF * CF * FGC,

SFGV 는 특정 배연가스 부피(N ㎥/GJ)이며 배연 가스유량, 용량 및 열효율이 알려진 플랜트의 중앙값으로 추정된다; CAP 는 전기용량, EFF 는 열 효율, CF 는 연간 평균 용량 계수, FGC 는 배연 가스의 오염 물질 농도이다 (SO2 및 NOx 의 경우 ppm, 먼지의 경우 mg/N ㎥).

수은 배출량이 발전사에 의해 보고되어 있지 않은 관계로, AMAP/UNEP의 Global Mercury Assessment31 를 통해 석탄 연소 톤당 평균 수은 배출량을 계산했다.

표 A1의 석탄발전소 재원과 배출자료는 석탄화력발전소의 대기질 영향을 분석하기 위한 CALMET-CALPUFF 모델링 시스템에 사용된 기본 입력자료이다.

표 A1. 모델링된 발전소의 연돌, 배연가스 특성 및 기준 배출량 (미터 단위). 연돌 및 배연가스 매개 변수는 발전사에 의해 보고되었다. 배출량 자료는 (a) 발전사가 보고했거나 (b) 위에서 설명한대로 예상 용량과 열 효율 및 용량 계수에 대한 가정으로부터 계산되었다.

발전소	호기	연돌				배연가스		배출량			자료 출처
		위도	경도	높이	직경	온도	속도	SO_2	NO_x	PM	
		(deg)	(deg)	(m)	(m)	(°C)	(m/s)	(t/a)	(t/a)	(t/a)	
여수	1	34.8404	127.6917	150	4.8	91	27.2	128	392	14	a
여수	2	34.8404	127.6917	150	4.8	91	21.6	76	427	11	a
영흥	1	37.2429	126.4463	200	6.6	90	18.1	1239	937	60	a
영흥	2	37.2429	126.4463	200	6.6	90	18.1	1363	975	52	a
영흥	3	37.2429	126.4463	198	6.3	90	20.4	888	536	16	a
영흥	4	37.2429	126.4463	198	6.3	90	20.4	819	513	25	a
영흥	5	37.2429	126.4463	200	6.9	95.3	17.4	497	450	22	a
영흥	6	37.2429	126.4463	200	6.9	95.3	17.4	507	463	20	a
태안	1	36.0004	126.2451	150	8.83	79.83	8.9	320	560	53	a
태안	2	36.0002	126.2443	150	8.83	77.87	8.9	272	341	31	a
태안	3	35.9999	126.2435	150	8.83	78.41	8.9	322	835	94	a
태안	4	35.9997	126.2427	150	8.83	77.69	8.9	691	710	99	a
태안	5	35.9991	126.2413	150	5.4	78.49	23.4	993	886	78	a
태안	6	35.9991	126.2411	150	5.4	82.22	23.4	1353	1037	93	a

태안	7	35.9986	126.2396	150	5.4	95.87	27.7	451	567	20	a
태안	8	35.9986	126.2395	150	5.4	96.41	27.7	598	700	24	a
태안	9	35.9972	126.2373	150	7.3	91	32.9	706	795	77	a
태안	10	35.9973	126.2375	150	7.3	91	32.9	1011	816	53	a
신보령	1	36.3840	126.4850	150	7.5	90	16.8	1150	507	29	a
신보령	2	36.3840	126.4850	150	7.5	90	16.8	1005	763	45	a
삼천포	1	34.9117	128.1092	200	5.3	119	37.5	687	1122	39	a
삼천포	2	34.9117	128.1092	200	5.3	109	37.5	557	1178	57	a
삼천포	3	34.9117	128.1092	200	5.3	95	37.5	1230	2035	75	a
삼천포	4	34.9117	128.1092	200	5.3	100	37.5	1044	1302	71	a
삼천포	5	34.9117	128.1092	200	5.3	139	24.2	645	521	118	b
삼천포	6	34.9117	128.1092	200	5.3	148	23.8	726	586	133	b
삼척그린파워	1	37.1860	129.3400	90	8.8	90	15.1	595	1445	105	a
삼척그린파워	2	37.1840	129.3400	90	8.8	90	15.1	330	1008	60	a
호남	1	34.5114	127.4404	150	7	90	6.6	681	862	17	a
호남	2	34.5114	127.4406	150	7	90	6.6	1379	1558	32	a
하동	1	34.9500	127.8200	150	9.3	83	7.4	1113	1094	50	a
하동	2	34.9500	127.8200	150	9.3	83	6.6	1174	706	47	a
하동	3	34.9510	127.8200	150	9.3	83	6.6	1128	707	49	a
하동	4	34.9520	127.8190	150	9.3	83	6.5	970	855	30	a
하동	5	34.9520	127.8190	150	9.3	83	6.7	898	721	40	a
하동	6	34.9530	127.8190	150	9.3	83	6.8	819	1129	40	a
하동	7	34.9540	127.8180	150	5.4	82	18.6	720	808	37	a
하동	8	34.9540	127.8180	150	5.4	82	19.1	886	855	49	a
동해	1	37.2907	129.0847	150	4	154	16.2	770	262	7	a
동해	2	37.2909	129.0845	150	4	154	16.2	857	341	10	a
당진	1	37.0315	126.3051	151	6.5	85	15.4	691	602	52	a
당진	2	37.0315	126.3048	151	6.5	85	15.4	662	706	53	a
당진	3	37.0316	126.3045	151	6.5	85	15.4	562	592	44	a

호남	1	34.5114	127.4404	150	7	90	6.6	681	862	17	a
호남	2	34.5114	127.4406	150	7	90	6.6	1379	1558	32	a
하동	1	34.9500	127.8200	150	9.3	83	7.4	1113	1094	50	a
하동	2	34.9500	127.8200	150	9.3	83	6.6	1174	706	47	a
하동	3	34.9510	127.8200	150	9.3	83	6.6	1128	707	49	a
하동	4	34.9520	127.8190	150	9.3	83	6.5	970	855	30	a
하동	5	34.9520	127.8190	150	9.3	83	6.7	898	721	40	a
하동	6	34.9530	127.8190	150	9.3	83	6.8	819	1129	40	a
하동	7	34.9540	127.8180	150	5.4	82	18.6	720	808	37	a
하동	8	34.9540	127.8180	150	5.4	82	19.1	886	855	49	a
동해	1	37.2907	129.0847	150	4	154	16.2	770	262	7	a
동해	2	37.2909	129.0845	150	4	154	16.2	857	341	10	a
당진	1	37.0315	126.3051	151	6.5	85	15.4	691	602	52	a
당진	2	37.0315	126.3048	151	6.5	85	15.4	662	706	53	a
당진	3	37.0316	126.3045	151	6.5	85	15.4	562	592	44	a
당진	4	37.0317	126.3042	151	6.5	85	15.4	664	544	42	a
당진	5	37.0318	126.3037	150	5.4	90	22.2	540	687	53	a
당진	6	37.0319	126.3034	150	5.4	90	22.2	627	667	54	a
당진	7	37.0320	126.3031	150	5.4	90	22.2	393	464	42	a
당진	8	37.0320	126.3028	150	5.4	90	22.2	397	431	47	a
당진	9	37.0323	126.3023	200	7.4	91	25.7	796	829	22	a
당진	10	37.0324	126.3018	200	7.4	91	25.7	1079	1058	27	a
북평	1	37.4770	129.1459	150	5.3	90	24.5	1212	1910	84	a
북평	2	37.4770	129.1459	150	5.3	90	24.5	1212	1910	84	a
보령	1	36.4020	126.4880	150	8.864	85	7.2	570	959	53	a
보령	2	36.4020	126.4890	150	8.864	85	7.2	470	1320	40	a
보령	3	36.4020	126.4900	150	8.788	90	8.8	516	416	94	b
보령	4	36.4020	126.4910	150	8.762	90	7.3	804	464	26	a

보령	5	36.4020	126.4920	150	8.788	90	7.3	1013	667	49	a
보령	6	36.4020	126.4930	150	8.788	90	7.3	1146	689	34	a
보령	7	36.4020	126.4940	150	5.4	90	17.2	235	312	43	a
보령	8	36.4020	126.4940	150	5.4	90	17.2	229	604	32	a
신서천	1	35.2394	126.5016	150	7.4	90	21.0	1364	1159	238	b
고성하이	1	34.9020	128.1230	190	7.5	90	22.5	1500	1275	261	b
고성하이	2	34.9020	128.1230	190	7.5	90	22.5	1500	1275	261	b
강릉안인	1	37.7340	128.9780	102	7.6	101	21.9	1389	1121	254	b
강릉안인	2	37.7340	128.9780	102	7.6	101	21.9	1389	1121	254	b
삼척블루파워	1	37.4070	129.1770	250	7.4	90	22.3	1415	1203	247	b
삼척블루파워	2	37.4070	129.1770	250	7.4	90	22.3	1415	1203	247	b

A.2 건강영향 분석

대기확산모델링 시스템을 통해 도출된 석탄화력발전소 대기오염물질의 영향으로 인한 지표 부근 대기오염물질 농도결과는 주변지역 인구에 대한 대기오염 노출과 공공보건에 대한 피해를 분석하는데 사용된다.

A.2.1 건강영향 결과

대기오염으로 인한 건강피해를 받는 사람들의 수는 대기오염 농도의 증가에 따른 부정적인 건강 결과(천식, 저체중 출산, 사망)와 연관된 관련 위험의 경험적 값을 적용하여 분석되었다. 상대위험 r 은 특정한 대기오염에 과도하게 노출된 사람이 조기사망할 가능성이 노출이 배제된 경우와 비교하여 얼마나 높은지를 표시한다.

$$m_x / m_0 = r, \qquad (1)$$

mx 는 대기오염이 증가한 Δx 조건 하에서의 발병률을 의미하며 m0 은 과도한 대기오염이 없었을 경우의 발병률을 의미한다. 발병률은 관련 인구그룹의 대비 개인의 경험적인 사례를 기반으로 한 건강결과다(천식어린이, 신생아, 총인구). 최신 역학모델 하에서 r 은 mx<<1 인 경우 x 에 기하급수적으로 의존한다.

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

위 공식에서 c 는 상수로서 농도 반응 계수라 한다. ①등식과 ②등식을 결합하면 아래의 공식을 얻을 수 있다.

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

사례의 수는 인구 P 에 발병률을 곱해서 나온 결과이므로 대기오염물질 농도가 상승한 조건에서 발생하는 사례의 수는 아래와 같다.

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

과도한 대기오염으로 인한 건강피해 사례의 수는 아래와 같다.

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

공간적인 모델 영역에 Δd 를 통합하면 모델 영역 내의 과도한 대기오염으로 인한 총 사례 수가도출된다.

건강모델링 분석을 위한 자료 출처

- **인구.** 전체 인구 및 연령분포 자료는 2019 년 세계질병부담연구(IHME Global Burden of Disease Study 2020)를 기반으로 한다.
- **배경 발병률-사망율.**
  - 배경 사망율과 수명 손실년수는 2019 년 세계질병부담연구(IHME Global Burden of Disease Study 2020)를 기반으로 한다.
  - 배경 발병률은 Myllyvirta(2020)의 보고서에서 활용된 자료의 출처와 같다.
  - 건강영향은 UNPD 세계 인구 전망 2019 의 자료 및 예측을 기반으로 연령대별 인구 및 원인별 사망률의 변화에 따라 조정되었다 (중간값 활용).
- **배경 대기오염도.** 배경 초미세먼지($PM_{2.5}$) 자료의 출처는 Donkelaar 등(2016)의 보고서, 이산화질소(NO_2) 농도는 Larkin 등(2017)의 보고서를기반으로 한다.
- **행정구역별 영역 경계**는 GADM project의 버전 3.6 (2018 년 5 월)에서 규정된 경계를 기반으로 사용한다. 지도에 표시된 경계는 데이터 출처에서 제시된 경계를 반영하는 것일뿐 영토 분쟁이 있을 수 있는 영역에 대해서 어떠한 입장도 표명하는 것이 아니다.
- **농도반응계수 (CRFs).** 농도반응계수는 Myllyvirta(2020)의 보고서에서 활용된 자료의 출처와 같다. 단지 이산화질소 관련 질병의 농도반응계수는 Faustini 등(2014)의 보고서, 이산화황 관련질병의 농도반응계수는 Krewski 등(2009)의 보고서를 기반으로 한다 (표A2 참고).

표 A2. 농도반응계수 (CRFs)

연령대	영향	대기오염물질	농도반응계수	농도 변화	역치	출처	발병률-사망률 자료
1-18	천식: 신규 환자 발생	NO_2	1.26 (1.10 - 1.37)	10 ppb	2 ppb	Achakulwisut et al. 2019	Achakulwisut et al. 2019
0-17	천식: 응급실 방문	$PM_{2.5}$	1.025 (1.013–1.037)	10 μg/m³	6 μg/m³	Zheng et al. 2015	Anenberg et al. 2018
18-99	천식: 응급실 방문	$PM_{2.5}$	1.023 (1.015–1.031)	10 μg/m³	6 μg/m³	Zheng et al. 2015	Anenberg et al. 2018
신생아	조산	$PM_{2.5}$	1.15 (1.07, 1.16)	10 μg/m³	8.8 μg/m³	Trasande et al. 2016	Chawanpaiboonet al. 2019
25-99	사망: 비 전염성 질병 및 하기도 감염	$PM_{2.5}$	non-linear		2.4 μg/m³	Burnett et al. 2018	IHME 2020

0-4	사망: 하기도 감염	$PM_{2.5}$	non-linear		5.8 μg/m³	IHME 2020	IHME 2020
25-99	사망: 하기도 감염	$PM_{2.5}$	non-linear		5.8 μg/m³	IHME 2020	IHME 2020
25-99	조기사망	NO_2	1.04 (1.02–1.06)	10 μg/m³	4.5 μg/m³	Faustini et al. 2014	IHME 2020
25-99	조기사망	SO_2	1.02 (1.014–1.026)	5 ppb	0.02 ppb	Krewski et al. 2009	IHME 2020

부록 IV – 세 가지 시나리오에서 건강에 미치는 영향

각 시나리오별로 예측되는 건강에 미치는 영향에 대한 세부 사항은 아래와 같다.

표 I: 현행 정책 (제9차 전기본) 하에서 2021-2054 사이 대한민국 석탄화력발전소로 인한 누적 건강 영향 (합계, 국내, 국외).

현행 정책									
결과	합계			국내			국외		
	95%-신뢰구간			95%-신뢰구간			95%-신뢰구간		
	최적 추정치	최소 추정치	최고 추정치	최적 추정치	최소 추정치	최고 추정치	최적 추정치	최소 추정치	최고 추정치
조기사망	23,332	15,188	32,309	15,880	10,273	21,857	7,452	4,915	10,452
잠재수명 손실연수	428,223	276,760	599,087	287,127	185,890	396,110	141,096	90,870	202,977
조산	2,348	1,136	2,493	1,128	546	1,198	1,220	590	1,295
천식: 신규건수	4,382	948	9,909	3,451	746	7,825	931	202	2,084
천식: 응급실 방문	9,793	6,083	13,471	5,572	3,484	7,642	4,221	2,599	5,829
결근 (인일 기준)	6,376,941	5,424,894	7,322,620	3,905,690	3,322,604	4,484,870	2,471,251	2,102,290	2,837,750

표 II: 환경성 시나리오 하에서 2021-2054 사이 대한민국 석탄화력발전소로 인한 누적 건강 영향 (합계, 국내, 국외).

환경성 시나리오									
결과	합계			국내			국외		
	95%-신뢰구간			95%-신뢰구간			95%-신뢰구간		
	최적 추정치	최소 추정치	최고 추정치	최적 추정치	최소 추정치	최고 추정치	최적 추정치	최소 추정치	최고 추정치
조기사망	4,922	3,195	6,829	3,353	2,160	4,625	1,569	1,035	2,204
잠재수명 손실연수	90,591	58,343	127,016	60,625	39,083	83,805	29,966	19,260	43,211
조산	620	300	658	301	146	319	319	154	339
천식: 신규 건수	1,143	247	2,586	923	199	2,093	220	48	493
천식: 응급실 방문	2,486	1,539	3,424	1,450	903	1,992	1,036	636	1,432
결근 (인일 기준)	1,729,457	1,471,259	1,985,927	1,095,855	932,255	1,258,359	633,602	539,004	727,568

표 III: 경제성 시나리오 하에서 2021-2054 사이 대한민국 석탄화력발전소로 인한 누적 건강 영향 (합계, 국내, 국외).

경제성 시나리오									
결과	합계			국내			국외		
	95%-신뢰구간			95%-신뢰구간			95%-신뢰구간		
	최적 추정치	최소 추정치	최고 추정치	최적 추정치	최소 추정치	최고 추정치	최적 추정치	최소 추정치	최고 추정치
조기사망	4,850	3,154	6,720	3,261	2,105	4,494	1,589	1,049	2,226
잠재수명 손실연수	88,929	57,399	124,494	58,966	38,077	81,447	29,963	19,322	43,047
조산	614	297	651	298	144	316	316	153	335
천식: 신규 발생건수	1,121	242	2,536	899	194	2,038	222	48	498
천식: 응급실 방문	2,467	1,528	3,399	1,436	895	1,973	1,031	633	1,426
결근 (인일 기준)	1,724,315	1,466,885	1,980,023	1,086,455	924,258	1,247,565	637,860	542,627	732,458