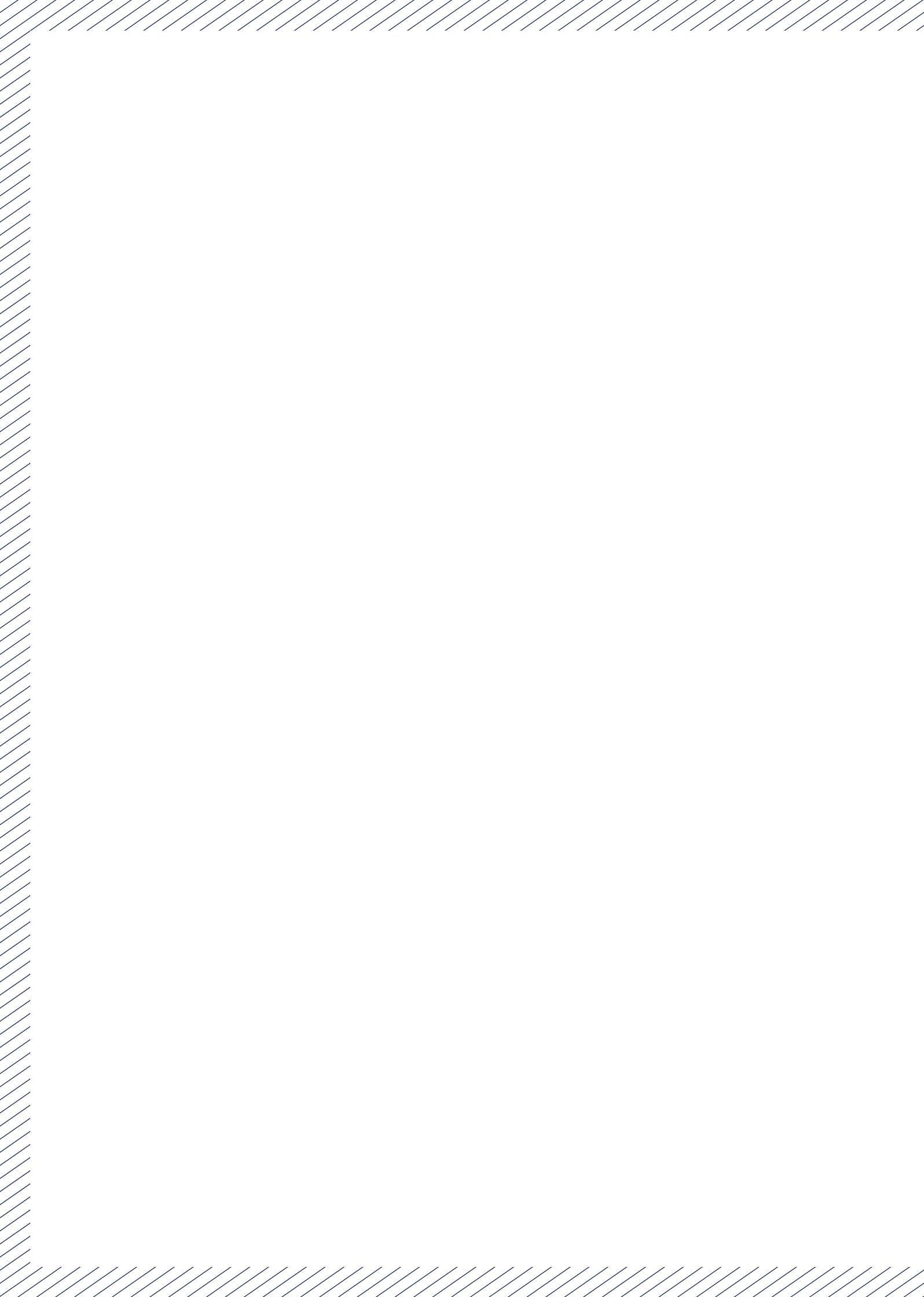


가스발전의 실체 : 가스발전의 대기오염 영향 및 건강피해



가스발전의 실체 :

가스발전의 대기오염 영향 및 건강피해



목차

요약	2
I. 서론	4
II. 우리나라 가스발전소 현황	5
1. 가스발전의 현황 및 전망	5
2. 가스발전으로 인한 대기오염	7
III. 분석 방법	9
IV. 분석 결과	11
1. 대기오염 예측 결과	11
2. 건강영향 예측 결과	13
V. 결론 및 제언	18
1. 신규 발전소 건설 계획의 철회	18
2. 가스발전소 대기오염물질 배출 규제 강화	19
3. 가스발전에 대한 금융지원 중단	19
부록	22

요약

우리나라에는 가스복합화력발전소 7기(33.8GW)와 열병합발전소 28기(7.4GW)를 포함한 총 99기(41.3GW)의 천연가스화력발전소(이하 가스발전소)가 운영 중이다.¹ 가스발전소는 전력 수요가 밀집해 있는 경기도(43%), 인천광역시(21%)를 비롯한 수도권과 충청남도(9%), 울산광역시(6%), 전라남도(6%)에 주로 위치해 있다. 현재 5기(2.6GW)의 가스발전소가 경기도(여주, 김포, 안양), 경상남도(양산), 충청남도(예산) 지역에 건설되고 있으며, 35기(18.7GW)의 가스발전소가 경상남도(통영), 울산광역시, 경상북도(구미), 충청북도(청주, 음성), 서울특별시(강서구), 세종특별자치시, 전라남도(여수), 경기도(부천) 지역 등에 건설될 예정이다.²

그동안 천연가스는 화석연료임에도 불구하고, 온실가스 및 대기오염물질 배출이 적은 청정연료로 인식되어 왔다. 한국에서는 특히 2020년 12월 확정된 제9차 전력수급기본계획에서 노후 석탄발전소 24기(12.7GW)를 가스발전소로 전환하겠다는 계획에 따라 앞으로 2034년까지 가스발전의 설비용량이 59.1GW로 증가할 것으로 예상되는 등 에너지전환에 있어 가스발전의 역할이 강조되기도 한다. 이는 2050년 넷제로(net-zero)³ 목표를 달성하기 위해서는 2035년까지 전력부문의 탈탄소화를 이루어야 한다는 세계에너지기구(IEA)의 제언⁴과 상반될 뿐만 아니라, 이로 인해 보다 심각한 대기오염 피해가 예상된다는 점에서 우려스럽다.

사단법인 기후솔루션(이하 '기후솔루션')은 현 정책 하에서 가스발전소로 인한 대기오염과 건강피해를 분석하고, 2035년 가스발전소 조기폐쇄의 건강 편익에 대해 알아보고자 본 보고서를 작성했다. 본 분석은 제9차 전력수급기본계획을 바탕으로 기존 및 신규(건설 중, 건설 예정) 발전소가 배출하는 대기오염물질 확산에 관한 모델을 구축하고, 이로 인한 건강 영향을 정량화 하였다. 건강 영향의 예측을 위해서 제9차 전력수급기본계획과 수명관리 지침에 따른 설계수명 30년을 반영한 '현정책' 시나리오와 2035년까지 가스발전소를 모두 폐쇄하는 '넷제로' 시나리오 등 두가지 시나리오를 설정하였다.

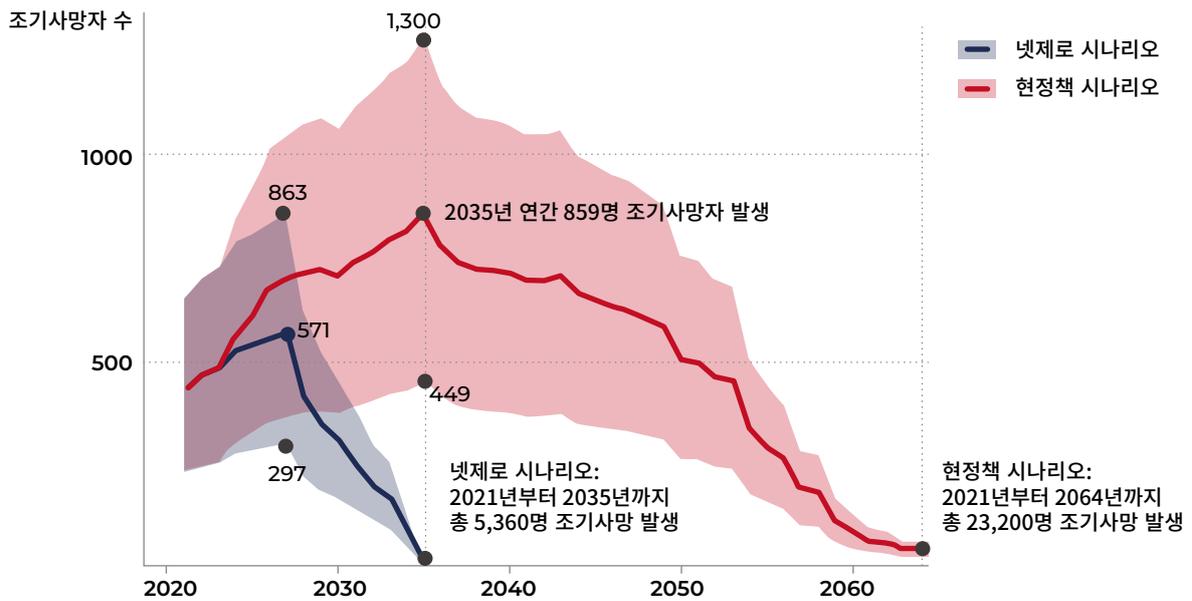
분석 결과, 현정책 시나리오에서는 가스발전소로 인해 최대 연간 859명, 2064년까지 총 23,200명이 조기사망할 것으로 추정되었다. 반면, 2035년까지 가스발전소가 모두 폐쇄될 경우 조기사망자 수는 누적 5,360명으로 현저하게 줄어드는 것으로 파악되었다. 가스발전소의 대기오염물질 배출로 인한 조기사망 피해는 특히 발전소가 밀집해 있고 인구밀도가 높은 경기도와 서울특별시에서 가장 심각할 것으로 나타났다. 조기사망 피해의 주요 원인은 이산화질소(NO₂)에 의한 것으로 분석되었다.

1. 산업통상자원부, (2020). "제9차 전력수급기본계획(2020-2034) 공고". 35면.

2. 전력거래소, (2021). "2021년도 2분기 발전소 건설사업 추진현황".

3. 대기 중으로 배출하는 온실가스 양과 흡수되는 양이 동일하여 실제적으로 배출되는 온실가스가 '0'인 상태

4. IEA, (2021). "Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector".



조기 사망자수	중간	최소	최대
현정책 시나리오	23,200	12,100	35,000
넷제로 시나리오	5,360	2,800	8,070

그림 1. 시나리오별 가스발전소로 인한 조기사망 피해

기후솔루션은 이러한 가스발전소로 인한 건강 피해를 최소화하기 위해 다음 세 가지 사항을 제안하고자 한다. 첫째, 정부는 건설 예정인 신규 가스발전소의 건설 계획을 모두 철회해야 한다. 9차 전력수급기본계획에 반영되어 있는 건설 예정인 가스발전소는 석탄발전소에서 전환하는 복합화력발전소 24기(12.7 GW), 신규 복합화력발전소 3기(3.3 GW), 열병합발전소 8기(3.9 GW)로 총 35기(21.3 GW)에 달한다. 이 발전소들의 건설 계획을 철회하고 2035년까지 운영 중인 가스발전소를 모두 폐쇄한다면 17,840명의 조기사망을 예방할 수 있다.

둘째, 정부는 가스발전의 대기오염물질 배출량을 엄격히 관리, 검토하고 배출 규제를 강화해야 한다. 가스발전소는 특히 인구 밀도가 높은 지역에 위치해 있어 그로 인한 건강피해가 심각한 것으로 드러났다. 이러한 건강피해를 줄이기 위해서라도 가스발전시설에 대한 대기오염물질의 배출 규제를 강화할 필요가 있다. 특히 조기사망 피해의 대부분을 일으키는 원인물질인 이산화질소(NO₂)에 대한 배출허용기준을 강화하고, 정격 운전 시간 외에 배출되는 대기오염물질에 대한 관리를 위한 규제를 철저히 시행해야 한다.

셋째, 정부는 심각한 건강 피해를 유발하는 가스발전에 대한 금융제공을 촉진하는 정책을 철회해야 한다. 특히, 현재 고려하고 있는 것처럼 가스 발전을 ‘한국형 녹색분류체계상 “녹색경제활동”에 포함시켜서는 안 된다. 이는 가스 발전을 확대할 뿐 아니라 가스발전사업에 대한 금융지원을 정당화하는 것이다. 정부는 녹색분류체계의 본래 취지인 기후변화 대응과 오염 방지 등 주요 환경 목표 달성에 기여하는 것에 충실해야 한다.

I. 서론

지구평균기온 상승을 막기 위해 석탄 퇴출과 에너지 전환 가속화에 전세계가 나서는 가운데 징검다리(bridge) 연료로 천연가스(natural gas, 이하 가스)의 역할에 대한 논쟁이 다시 가열되고 있다. 가스발전은 여전히 기존의 연소기술에 기반하고 있지만 현저히 적은 온실가스와 대기오염물질을 배출한다고 알려져 있기 때문이다. 따라서, 세계적으로 가스발전소 설비 용량이 증가하고 있는데, 2020년 한해동안 40GW의 설비가 늘어났다.⁵

그러나, 가스발전은 연소과정 이외에도 가스가 채굴되어 가스발전소까지 오는 과정에서 추가적으로 상당한 온실가스를 배출할 뿐만 아니라, 가스발전 역시 화석연료 연소 기술에 기반하고 있기 때문에 질소산화물, 미세먼지 등 대기오염물질을 배출하며, 여전히 건강영향을 발생시킬 수밖에 없다. 특히 대부분의 가스발전소는 인구밀도가 높은 지역에 위치하고 있다는 지리적 특징은 물론이고 침투부하 발전기로 기능하고 있다는 점 때문에 자주 발전소를 켜고 끄는 과정에서 불완전연소가 더 빈번하므로 건강 피해가 상당할 것으로 예상된다. 하지만 가스발전이 배출하는 대기오염물질로 인한 건강피해에 대해서는 국내외를 막론하고 본격적인 연구가 이루어지고 있지 못한 상황이다.

대기오염은 현대사회에서 인간의 건강을 위협하는 주요 원인으로, 허혈성 심질환, 뇌졸중, 만성 폐쇄성 폐질환, 천식과 암 발생 위험을 증가시킨다. 세계보건기구(WHO)는 이러한 위협요인에 대한 관리를 강화해야 한다는 취지에서 2021년 대기질 가이드라인(Air Quality Guideline)⁶을 16년만에 대폭 강화한 바 있다.⁷

본 연구는 CALPUFF 대기확산모델을 바탕으로 ①가스발전소의 조기 폐쇄가 이루어질 경우 기대할 수 있는 건강편익에 대해 분석하고, ②이를 바탕으로 가스발전소의 대기오염 피해를 최소화하기 위한 정책대안으로써 신규 가스발전소 건설 계획의 타당성에 대해 검토하였다. 본 보고서에서 분석하는 가스발전소의 대기오염 건강피해로 인한 조기사망은 분석대상에서 배출되는 대기오염물질의 영향이 없다면 발생하지 않을 것으로 예상되는 질병으로 인한 사망을 의미한다.

5. IEA, (2020). "2020 Global overview: Capacity, supply and emissions"

6. 대기질 가이드라인은 초미세먼지, 미세먼지, 오존, 이산화질소, 이산화황, 일산화탄소에 대해 인체에 무해한 권고 수준을 제시한다.

7. WHO, (2021). "New WHO Global Air Quality Guidelines aim to save millions of lives from air pollution".

II. 우리나라 가스발전소 현황

1. 가스발전의 현황 및 전망

현재 우리나라에는 총 99기(41.3GW)의 천연가스화력발전소(이하 가스발전소)가 운영 중이며, 이는 가스복합화력발전소⁸ 71기(33.8GW)와 열병합발전소⁹ 28기(7.4GW)로 구분된다.¹⁰ 제9차 전력수급기본계획에 따르면, 가스발전 설비용량은 점진적으로 증가하여 2034년 기준 59.1GW에 달할 전망이다. 특히, 2034년까지 폐쇄되는 석탄발전소 30기 중 24기(12.7GW)는 가스발전소로 전환될 예정이다.¹¹

	발전소(기)	설비용량(GW)
2020년	99	41.3
2034년	118	59.1

표 1. 제9차 전력수급기본계획에 따른 가스발전소 증설 계획

가스발전소는 전력 수요가 밀집되어 있는 경기도(43%), 인천광역시(21%)를 비롯한 수도권과 충청남도(9%), 울산광역시(6%), 전라남도(6%)에 주로 위치해 있다. 현재 5기(2.6GW)의 가스발전소가 경기도(여주, 김포, 안양), 경상남도(양산), 충청남도(예산) 지역에 건설되고 있으며, 36기(18.7GW)의 가스발전소가 경상남도(통영), 울산광역시, 경상북도(구미), 충청북도(청주, 음성), 서울특별시(강서구), 세종특별자치시, 전라남도(여수), 경기도(부천) 지역 등에 건설될 예정이다.¹² 충청북도 청주시¹³, 충청북도 음성군¹⁴ 지역에서는 주민 반대로 인해 발전소의 착공이 지연되고 있으며 대구 지역에서는 발전소 건설 계획이 무산되면서 부지 선정에 어려움을 겪고 있다.¹⁶

8. 복합화력발전은 에너지 효율을 높이기 위해 가스터빈과 증기터빈을 결합하여 전력을 생산하는 발전 방식이다(한국중부발전 홈페이지. “복합화력발전의 원리”).
9. 열병합발전은 전력을 생산한 후 생산되는 배열을 회수하여 냉방, 난방 등에 활용할 수 있는 열에너지를 생산하는 발전 방식이다 (KONETIC. “열 병합 발전 기술”).
10. 전력통계정보시스템. “발전기별 발전설비”
11. 산업통상자원부, (2020). “제9차 전력수급기본계획(2020-2034) 공고”
12. 전력거래소, (2021). “2021년도 2분기 발전소 건설사업 추진현황”.
13. 이재은, (2021.03.22). “정부가 원전 대신 선택한 LNG, 인근 주민 반대로 발전소 건설 난항”. 비즈조선.
14. 윤대원, (2021.10.05). “갈 길 먼 음성 LNG 발전…주민수용성 확보가 관건”. 전기신문.
15. 오경욱, (2021.03.25). “대구국가산단 LNG발전소 건립 사실상 무산…대구시 “주민 뜻 수용” 발표”. 한국경제.
16. 이필녀, (2021.04.01). “전국서 LNG발전소 건설 표류…대구 LNG발전소 무산”. 에너지신문.

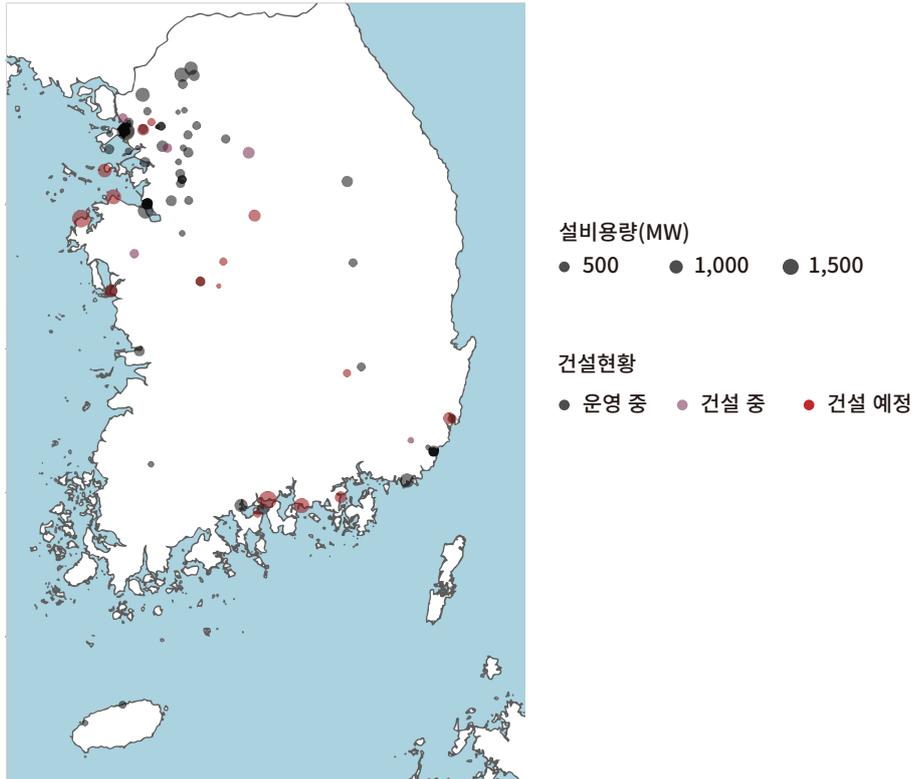


그림 2. 가스발전소 현황 지도¹⁷

지역	발전소(기)	설비용량(MW)
전체	99기	40,993 ¹⁸
경기도	35기	17,520.5
인천광역시	25기	8,576.8
충청남도	9기	3,713.5
울산광역시	5기	2,514.7
전라남도	4기	2,378.9
부산광역시	5기	1,845.8
경상북도	2기	1,209.6
서울특별시	5기	799.6
전라북도	1기	718.4
세종특별자치시	1기	530.4
강원도	1기	431.2
대구광역시	1기	370.7
제주특별자치도	3기	219.4
광주광역시	1기	115.2
대전광역시	1기	48.3

표 2. 광역시도별 운영 중인 가스발전소 설비용량¹⁹

17. 건설 예정인 발전소는 2021년 10월 기준 건설 부지로 고려 중인 위치에 표시하였다. 최종 건설 부지는 앞으로의 논의결과에 따라 달라질 수 있다.
18. 제9차 전력수급기본계획에 언급된 가스 설비 용량 41,300 MW와 차이가 나는 이유는 2020년 운영되지 않은 남제주북함(146MW)과 신정 열병합(6MW)을 제외하였을 뿐만 아니라 실제 설비용량이 공고된 용량과 차이가 일부 있었기 때문이다. 설비용량은 전력거래소와 발전자회사가 대한민국 국회에 제출한 자료를 활용하였다.
19. 제9차 전력수급기본계획과 전력통계정보시스템(EPSS)를 토대로 2019년(본 보고서 분석 기준연도)에 가동된 가스발전소만을 수록하였다.

한국전력통계에 의하면, 2020년 기준 전체 발전량에서 가스발전이 차지하는 비중은 26.4%로 석탄(35.6%)과 원자력(29.0%) 다음으로 큰 것으로 나타나고 있다.²⁰ 지난 10월 발표된 2030년 국가온실가스 감축목표와 2050 탄소중립 시나리오에 따르면 2030년 가스발전량 비중은 19.5%에 달할 것이며,²¹ 우리나라가 약속한 탄소중립 목표가 달성되어야 하는 2050년에도 우리나라는 여전히 가스발전에 일정 부분 의존하게 될 것으로 보인다. 탄소중립위원회가 발표한 2개의 시나리오 안 중 하나의 안에는 61.0TWh(5%)의 전력이 가스로 생산될 예정이며, 이를 통해 배출되는 온실가스는 20.7백만톤으로 예상된다.²²

2. 가스발전으로 인한 대기오염

가스발전은 화석연료의 연소를 통해 얻은 에너지로 전기를 생산하기 때문에 연소 과정에서 이산화탄소는 물론이고 질소산화물과 같은 대기오염물질을 배출할 수밖에 없다. 우선 온실가스 측면을 살펴보면, 가스발전은 석탄발전의 60%에 달하는 이산화탄소를 배출한다. 에너지경제연구원에 따르면, 발전원별 이산화탄소 배출량은 석탄이 888톤/GWh, 석유가 733톤/GWh, 가스 499톤/GWh이다.²³

대기오염물질 배출 측면에서 가스발전은 기존의 화석연료 발전보다 상대적으로 깨끗하다고 인식되고 있으나 여전히 대규모로 오염물질을 배출하는 배출원이다. 산업통상자원부가 발표한 자료에 따르면 가스발전으로 인한 대기오염물질 배출량은 0.171kg/MWh로 석탄발전(0.561kg/MWh)의 1/3에 달한다.²⁴

가스발전소는 가동을 시작하거나 중단할 때에는 불완전연소로 인해 정상적으로 가동될 때보다 많은 대기오염물질이 생성되며, 배출가스 온도가 상대적으로 낮아 탈질 설비의 효율이 떨어지므로 대기중으로 배출되는 대기오염물질량이 많아진다. 이 과정에서 배출허용기준이 존재하지 않는 대기오염물질인 일산화탄소도 다량 배출된다.²⁵ 그러나 가스발전소는 재가동 횟수가 많은 발전원임에도 불구하고, 가동을 시작하거나 중단하는 시간동안 (최대 5시간) 배출되는 대기오염물질은 규제에서 제외된다. 우리나라 가스발전소의 호기당 평균 가동 횟수는 2019년과 2020년 각각 148회, 166회에 달했다. 이는 평균 이틀에 한번 발전소가 재가동된다는 의미이다.²⁶

20. 한국전력통계, (2021.05.28). “21년도판 한국전력통계(제90호)”.

21. 탄소중립위원회, (2021). “2030 국가온실가스감축목표(NDC) 상향(안)”.

22. 탄소중립위원회, (2021). “2050 탄소중립 시나리오(전체본)”.

23. 에너지경제연구원, (2017). “세계 석탄규제 현황과 영향 전망”.

24. 산업통상자원부, (2019.03.05). “(해명자료) LNG 발전의 대기오염물질 배출은 석탄발전의 1/3 수준”

25. 이지훈 (2019.04.07). “[단독] ‘친환경’ LNG발전소의 배신…알고보니 유해물질 대량배출’. 환경증권.

26. 본 내용은 산업통상자원부와 전력거래소가 국회에 제출한 자료이다.

가스발전소가 배출하는 대표적인 대기오염 물질인 질소산화물(NOx)은 그 자체로 천식과 만성기관지염과 같은 호흡기 질환을 유발한다. 또한, 초미세먼지(PM_{2.5})를 형성하는 주요 전구물질이기 때문에 초미세먼지로 인한 건강 영향에도 일정부분 기여한다. 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})는 입자 크기가 매우 작기 때문에 인체에서 가스교환이 일어나는 폐의 끝부분인 폐포까지 침투할 수 있으며, 일부는 혈관을 통과할 수도 있다. 일정 농도 이상 먼지와 같은 입자상 물질에 노출될 경우 불규칙한 심장박동, 심근경색, 호흡곤란, 천식 등이 발생할 수 있으며 심각할 경우 심장 및 폐질환으로 조기사망에 이를 수도 있다.²⁷

환경부는 대기오염으로 인한 국민 건강이나 환경에 관한 위해를 예방하기 위해서 대기환경보전법 시행규칙 제15조 [별표 8]을 통해 대기오염물질 배출시설을 규제하고 있다. 가스발전소의 대기오염물질(질소산화물, 황산화물, 먼지, 수은) 배출허용기준은 배출시설 설치연도에 따라 다음 표와 같이 다르게 규제하고 있다. 이외에도 신규 시설이 환경영향평가 대상 사업일 때 환경부 장관에 제시하는 별도의 협의기준을 따르는 경우(환경영향평가법 제2조의5), 지방자치단체별로 일부 지역의 경우 조례를 통하여 시설별로 별도의 배출허용기준이 제시된 경우, 운영중인 시설은 통합 허가 과정을 통하여 필요시 대기환경보전법 상의 배출허용기준 보다 강화된 기준이 적용되는 경우가 있을 수 있다.

배출허용기준	설치연도	2001.6.30 이전	2014.12.31 이전	2019.12.31 이전	2020.1.1 이후
황산화물 SO _x (ppm)		20(15)	20(15)	15(15)	10(15)
질소산화물 NO _x (ppm)		40(15)	25(15)	20(15)	10(15)
먼지 TSP (ppm)		10(15)			
수은 Hg (mg/Sm ³)		0.1			

표 3. 가스발전소의 대기오염물질 배출허용기준²⁸

먼지는 총 입자상 물질(TSP, Total Suspended Particle)로 미세먼지 중 입자 크기가 10 μ m 이하인 입자를 가리키며 보통 입자 크기가 10 μ m와 2.5 μ m 이하인 입자를 각각 PM₁₀과 PM_{2.5}라고 한다.

27. EPA (2002). "Overview of the Human Health and Environmental Effects of Power Generation: Focus on Sulfur Dioxide (SO₂), Nitrogen Oxides (NO_x) and Mercury (Hg)."

28. 대기환경보전법 시행규칙 제15조 [별표 8]

III. 분석 방법

본 보고서는 우리나라 가스발전소에서 배출되는 대기오염물질이 대기질과 인체 건강에 미치는 영향을 정량화해 평가했다. 먼저 운영 중, 건설 중, 건설 예정인 가스발전소의 대기오염물질 배출로 인한 지표 부근 대기오염 농도 영향을 대기 확산 모델링 시스템을 사용하여 도출했다. 이 결과를 바탕으로 인구 데이터와 널리 통용되는 건강영향 평가 방법^{29, 30, 31}을 적용하여 대기오염물질에 노출된 인구의 건강피해를 추정했다.

가스발전소의 건강 피해 추정에 있어서는 기존 발전소의 퇴출 시점과 신규 발전소의 건설 여부에 따른 대기오염 물질 배출과 그에 따른 건강영향의 차이를 알아보기 위해 두 가지 시나리오를 정하여 비교 분석했다. 첫 번째 시나리오(**현정책 시나리오**)는 현 정책에 따라 2034년까지 발전설비를 59.1GW로 확대하고, 이후에는 30년 설계수명³²을 다한 가스발전소들은 순차적으로 퇴출되는 것으로 가정했다. 현정책 시나리오에서 마지막 가스발전소는 2064년에 폐쇄된다. 두 번째 시나리오(**넷제로 시나리오**)는 2050 넷제로 달성을 위해서는 2035년 기준 전력부문의 순배출량이 0이 되어야 한다는 세계에너지기구(IEA) 권고에 따라 가스발전소가 2035년까지 모두 퇴출된다고 가정했다. 이러한 가정에 따르면 아직 공사가 시작되지 않은 신규 발전소들의 건설계획을 모두 철회하고, 2021년 10월 기준 이미 운영 중이거나 착공을 시작한 발전소는 연식에 따라 노후 발전기부터 차례로 2035년까지 모두 폐쇄되어야 한다. 시나리오별 가정에 따른 가스발전소 설비용량의 변화는 그림3과 같다.

29. Anenberg, S.C., Horowitz, L.W., Tong, D.Q. and West, J.J. (2010) An estimate of the global burden of anthropogenic ozone and fine particulate matter on premature human mortality using atmospheric modeling. *Environmental health perspectives*. 1 September 2010. DOI:10.1289/ehp.0901220

30. Koplitz, S.N. et al. (2017) 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

31. Krewski, D. et al. (2009) Extended Follow-Up and Spatial Analysis of the American Cancer Society Study Linking Particulate Air

32. KOSPO, "발전설비 수명관리 지침" (2021년 1월 4차 개정).

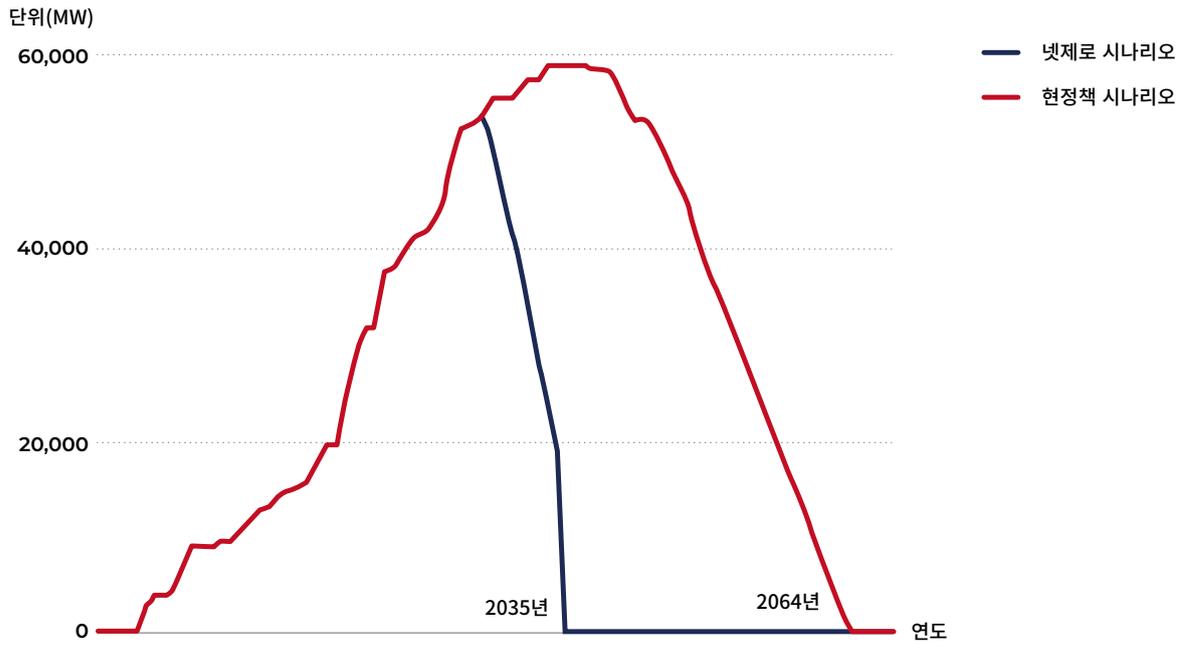


그림 3. 시나리오별 가스발전소 설비 용량 추이

발전소별 대기오염물질 배출량, 발전량, 발전시설의 일반현황과 관련한 데이터는 정부기관이나 발전회사들이 대한민국 국회에 제공한 자료를 사용하였다. 보다 상세한 분석의 방법론과 활용된 자료의 출처는 부록에 기술되어 있다.

IV. 분석 결과

1. 대기오염 예측 결과

현정책 시나리오에서 모든 가스발전소들이 동시에 가동된다고 가정할 때 배출되는 대기오염물질은 연평균 농도를 기준으로 지표 부근의 대기질에 연평균 최대 0.47ppb의 이산화질소(NO₂)와 최대 0.08ug/m³의 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도를 가중시킨다. 그에 따라 이산화질소(NO₂)의 1시간 평균 농도는 최대 47.55 ppb, 24시간 평균 대기질의 초미세먼지 농도는 최대 0.73ug/m³까지 증가할 것으로 분석된다.

아직 착공하지 않은 신규 발전소들이 건설되면 연평균 이산화질소(NO₂) 농도가 최대 0.06ppb, 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도가 최대 0.01ug/m³ 까지 가중될 것으로 나타났다. 또한 1시간 평균농도 기준으로 이산화질소(NO₂)는 최대 0.002ppb, 24시간 평균 농도 기준으로 초미세먼지 농도는 최대 0.06ug/m³ 까지 증가할 것으로 분석되었다. (부록 3 참고)

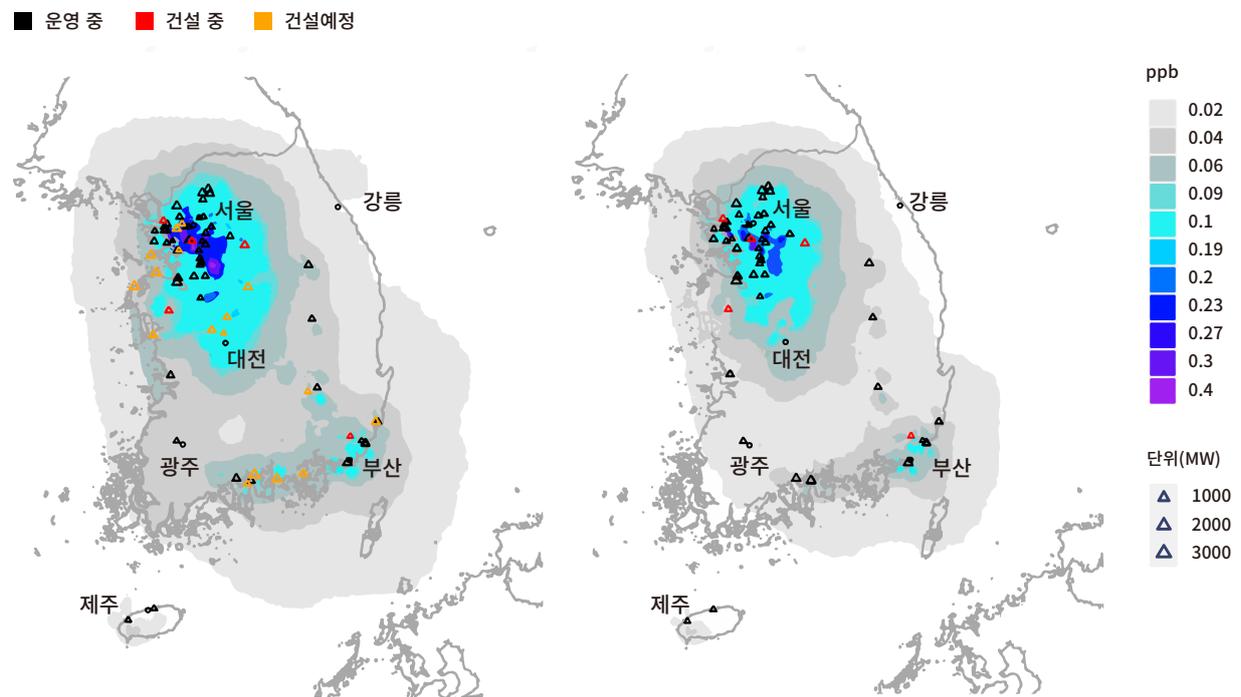


그림 4. 현정책 시나리오와 넷제로 시나리오에서 가스발전소로 인한 연평균 NO₂ 농도 변화

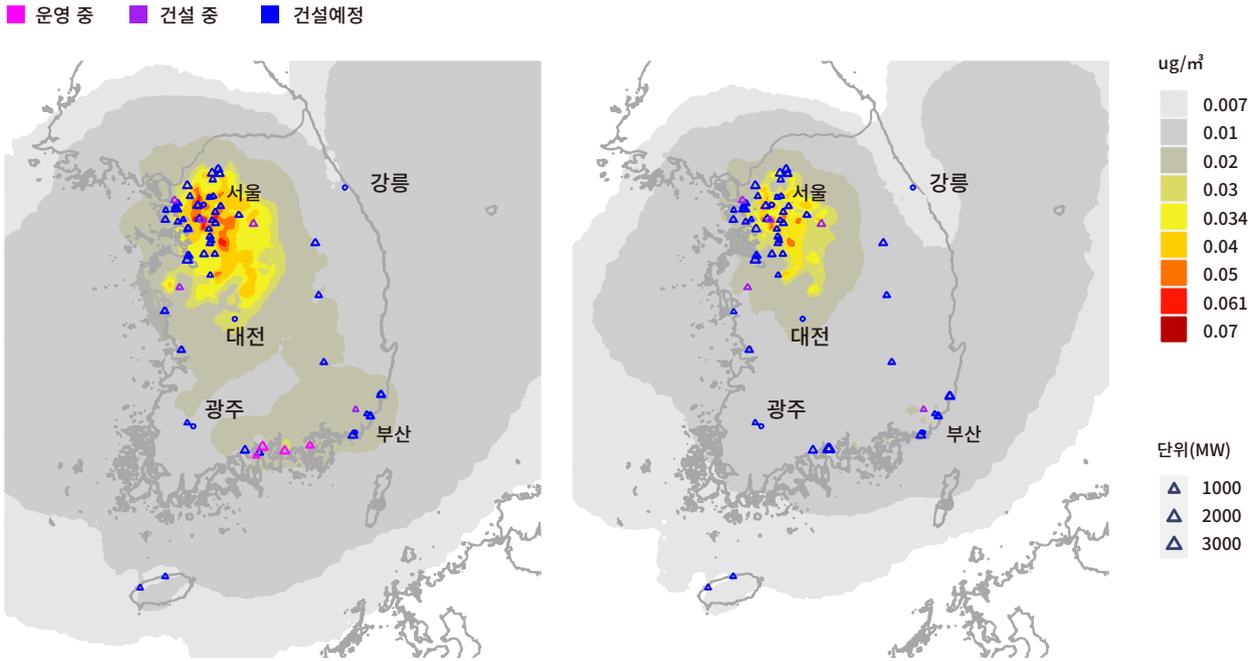


그림 5. 현정책 시나리오와 넷제로 시나리오에서 가스발전소로 인한 연평균 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도 변화

현정책 시나리오에서 가스발전소가 모두 가동된다고 가정할 때 광역시도별 연평균 이산화질소(NO₂) 및 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도 변화는 그림6에서 확인할 수 있다. 가스발전소가 많이 위치해 있는 경기도와 인천광역시에서 대기오염 물질 농도 변화가 가장 크게 나타났다. 서울특별시의 경우 가스발전소가 규모상으로 많지는 않지만 경기도와 인천광역시에 위치한 가스발전소의 영향으로 인해 대기오염물질 농도 영향이 3번째로 높은 곳으로 분석되었다.

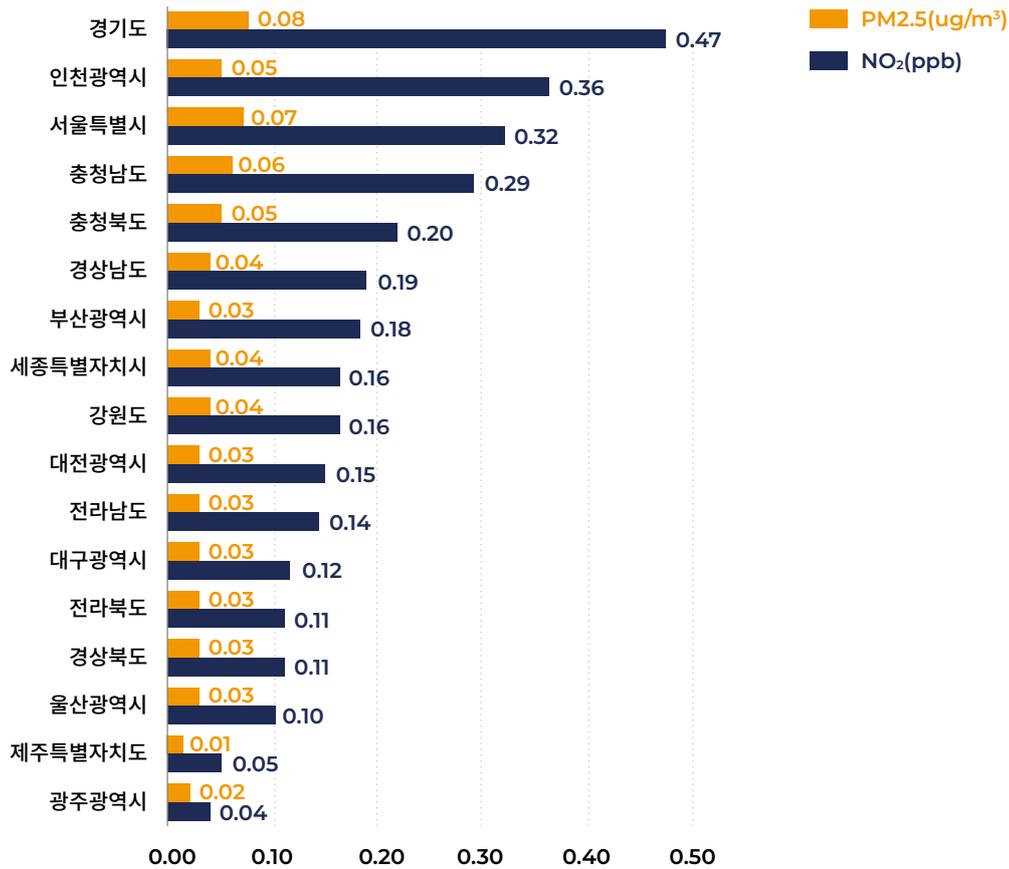


그림 6. 현정책 시나리오에서 가스발전소로 인한 광역시도별 연평균 이산화질소(NO₂), 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도 변화

2. 건강영향 예측 결과

A. 연간 건강영향

현 정책 기조에서 가스발전소가 배출하는 대기오염물질로 인한 연간 조기사망자 수는 건설 예정인 가스발전소가 전부 완공되는 2035년에 859명(최소 449명, 최대 1,300명)에 달할 것으로 분석되었다. 이후 연간 조기사망자는 가스발전소가 모두 퇴출될 것으로 예상되는 2064년까지 매년 감소할 것으로 추정된다.

현정책 시나리오 (2035년)		
중간	최소	최대
859	449	1,300

표 4. 현정책 시나리오에서 가스발전소로 인한 최대 연간(2035년) 조기사망자 수

가스발전소로 인한 건강영향은 국내에만 국한되는 것이 아니다. 연간 조기사망자 수의 약 87%는 국내에서 발생 하지만 나머지(약 13%)는 북한, 일본, 중국 등 국외 지역에서 발생하는 것으로 추정됐다.

국가	현정책 시나리오 (2035년)		
	중간	최소	최대
대한민국	761	395	1,150
북한	37	19	60
일본	34	19	48
중국	27	16	41

표 5. 현정책 시나리오에서 가스발전소로 인한 국가별 최대 연간 조기사망자 수

대기오염물질 중 이산화질소(NO₂)가 조기사망에 미치는 영향이 가장 큰 것을 확인할 수 있다.

물질	질병	현정책 시나리오 (2035년)		
		중간	최소	최대
총 조기사망자 수		859	449	1,300
NO ₂ 로 인한 총 조기사망자 수		739	359	1,140
PM _{2.5} 로 인한 총 조기사망자 수		120	90	153
PM _{2.5}	만성 폐쇄성 폐질환	10	4	19
PM _{2.5}	당뇨	1	0	3
PM _{2.5}	허혈성 심질환	22	16	28
PM _{2.5}	하부호흡기감염증	27	8	50
PM _{2.5}	폐암	18	9	30
PM _{2.5}	뇌졸중	23	9	42

표 6. 현정책 시나리오에서 가스발전소로 인한 주요 질환별 최대 연간 조기사망자 수³³

위 표는 주요 질환에 대한 조기사망자 수만 나타낸 것으로 주요 질환으로 인한 조기사망자 수 합이 총 조기사망자 수와 일치하지 않는다.

조기사망 이외에도 천식, 조산 등의 발병률이 증가할 것이며, 당뇨, 뇌졸중, 호흡기 질환으로 인한 건강수명³⁴이 단축될 것으로 추정된다.

33. 위 표는 주요 질환에 대한 조기사망자 수만 나타낸 것이기 때문에, 주요 질환으로 인한 조기사망자 수 합이 총 조기사망자 수와 일치하지 않는다.

34. 여기서 건강수명이란 질병이나 장애를 가지고 사는 기간을 제외한 기간으로, 신체적 정신적으로 특별한 이상 없이 생활하는 기간을 의미한다. (국가지표체계, (2021). “건강수명”)

물질	질병	현정책 시나리오 (2035년)		
		중간	최소	최대
PM _{2.5}	천식으로 인한 응급실 내원 (성인)	30	20	40
PM _{2.5}	천식으로 인한 응급실 내원 (아이)	9	5	13
NO ₂	신규 천식 환자 (아이)	302	66	184
PM _{2.5}	조산	17	8	18
PM _{2.5}	결근(일)	60,600	51,500	69,500
PM _{2.5}	호흡기질환으로 인한 건강수명 상실(년)	84	30	157
PM _{2.5}	당뇨로 인한 건강수명 상실(년)	33	8	89
PM _{2.5}	뇌졸중으로 인한 건강수명 상실(년)	118	39	238

표 7. 현정책 시나리오에서 가스발전소로 인한 최대 연간 건강피해

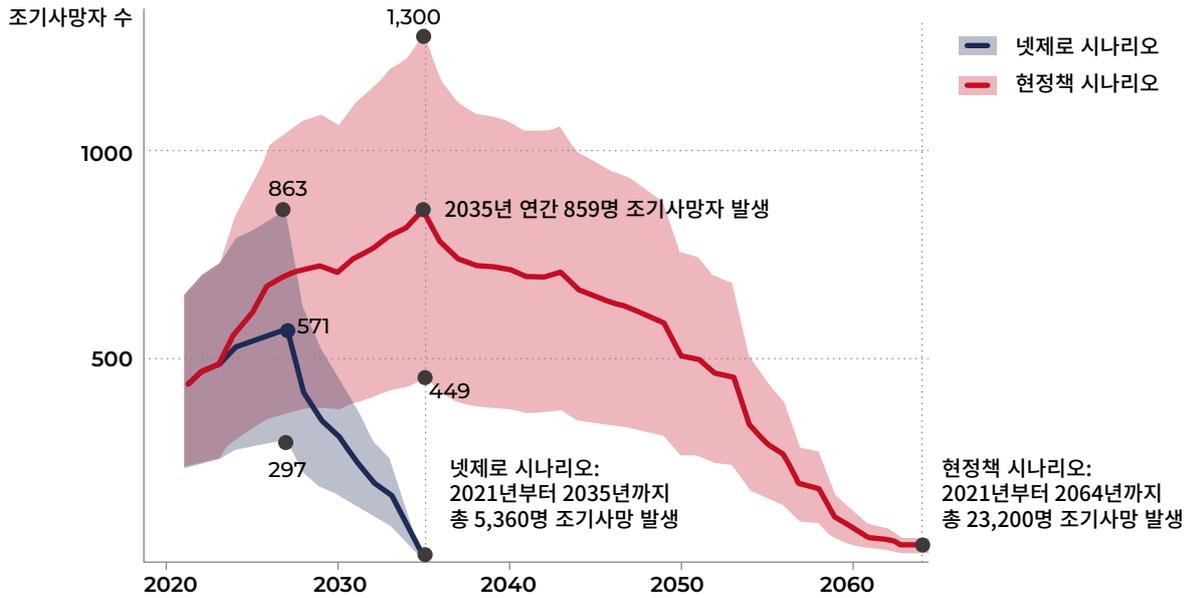
광역시도별 조기사망자 분석결과에 따르면, 가스발전소의 대기오염으로 인한 연간 조기사망자는 경기도와 서울특별시에서 가장 많이 발생할 것으로 나타났다. 건설 중인 발전소와 건설 예정인 발전소가 모두 완공될 경우 연간 조기사망자는 경기도(164명), 서울특별시(101명), 인천광역시(30명), 부산광역시(18명), 경상남도(14명) 순으로 높게 나타났다. 건설 현황에 따른 광역시도별 연간 조기사망자 수는 부록 4를 참고하면 된다.

광역행정구역	현정책 시나리오 (2035년)		
	중간	최소	최대
대한민국	761	395	1,150
경기도	306	158	462
서울특별시	192	99	291
인천광역시	52	26	78
부산광역시	35	18	53
경상남도	29	15	43
충청남도	25	13	38
충청북도	24	12	36
대전광역시	19	10	29
경상북도	18	10	27
대구광역시	16	8	24
전라북도	11	6	17
전라남도	10	5	15
강원도	9	5	13
울산광역시	6	3	10
광주광역시	6	3	8
제주특별자치도	2	1	2
세종특별자치시	1	1	2

표 8. 현정책 시나리오에서 가스발전으로 인한 광역시도별 최대 연간 조기사망자 수

B. 누적 건강영향

가스발전소의 운영이 끝나는 시점까지의 가스발전으로 인한 누적 건강영향은 앞서 제시한 바와 같이 두가지 시나리오(현정책 시나리오, 넷제로 시나리오)에 대해 분석하였다. 제9차 전력수급기본계획과 발전설비 수명 30년을 가정한 현정책 시나리오에서는 가스발전으로 인한 누적 조기사망자 수가 23,200명(최소 12,100명, 최대 35,000명)에 달할 것으로 분석되었다. 반면, 2035년까지 가스발전소를 모두 퇴출하는 넷제로 시나리오에서는 누적 조기사망자 수가 5,360명(최소 2,800명, 최대 8,070명)로 분석되었다. 이는 2035년까지 우리나라 가스발전소를 모두 퇴출한다면 17,840명(최소 4,030명, 최대 32,200명)의 조기사망자를 살릴 수 있다는 것을 의미한다.



조기 사망자수	중간	최소	최대
현정책 시나리오	23,200	12,100	35,000
넷제로 시나리오	5,360	2,800	8,070

그림 7. 시나리오별 가스발전소로 인한 조기사망 피해

다음 표는 국가별 누적 조기사망자 수를 살펴본 것이다. 우리나라의 가스발전소로 인한 영향은 북한(1,000명, 중간값), 일본(830명, 중간값), 중국(701명, 중간값) 순으로 컸으며, 2035년 가스발전소를 전부 퇴출할 경우 각 국가의 피해는 모두 약 75% 정도 감소할 것으로 추정되었다.

국가	현정책 시나리오			넷제로 시나리오		
	중간	최소	최대	중간	최소	최대
대한민국	20,700	10,700	31,100	4,730	2,450	7,130
북한	1,000	513	1,620	267	136	435
일본	830	479	1,180	212	122	302
중국	701	403	1,070	150	86	228

표 9. 시나리오별 가스발전소로 인한 국가별 누적 조기사망자 수

물질	질병	현정책 시나리오			넷제로 시나리오		
		중간	최소	최대	중간	최소	최대
총 조기사망자 수		23,200	12,100	35,000	5,360	2,800	8,070
NO ₂ 로 인한 총 조기사망자 수		20,000	9,690	30,900	4,620	2,240	7,150
PM _{2.5} 로 인한 총 조기사망자 수		3,240	2,430	4,140	736	553	941
PM _{2.5}	만성 폐쇄성 폐질환	275	99	523	63	23	120
PM _{2.5}	당뇨	33	10	75	7	2	17
PM _{2.5}	허혈성 심질환	583	425	759	133	97	173
PM _{2.5}	하부호흡기감염증	730	212	1,350	167	49	309
PM _{2.5}	폐암	479	231	800	108	52	180
PM _{2.5}	뇌졸중	614	237	1,140	140	54	261

표 10. 시나리오별 가스발전소로 인한 주요 질환별 누적 조기사망자 수

위 표는 주요 질환에 대한 조기사망자 수만 나타낸 것으로 주요 질환으로 인한 조기사망자 수 합이 총 조기사망자 수와 일치하지 않는다.

지역별 누적 조기사망자 수도 연간 조기사망자 수와 비슷한 양상으로 나타났다. 가스발전소가 상대적으로 많이 존재하면서 인구밀집도가 높은 경기도(8,350명), 서울특별시(5,390명), 인천광역시(1,320명), 경상남도(738명), 부산광역시(729명) 순으로 그 피해가 클 것으로 추정된다. 반면, 넷제로 시나리오에서는 현정책 시나리오에 비하여 조기사망자 수가 지역에 따라 71.5%(부산광역시) ~85.3%(대구광역시)까지 감소하는 것으로 나타났다.

광역행정구역	현정책 시나리오			넷제로 시나리오		
	중간	최소	최대	중간	최소	최대
대한민국	20,700	10,700	31,100	4,730	2,450	7,130
경기도	8,350	4,320	12,600	2,050	1,060	3,100
서울특별시	5,390	2,780	8,140	1,510	593	1,730
인천광역시	1,320	682	2,000	369	188	559
경상남도	738	390	1,110	144	76	216
부산광역시	729	380	1,100	208	107	315
충청남도	699	365	1,050	151	79	227
충청북도	680	354	1,020	140	73	210
대전광역시	539	280	811	102	53	154
경상북도	519	278	775	97	52	145
대구광역시	477	249	718	70	37	105
전라북도	303	161	453	61	32	91
전라남도	274	147	409	42	23	62
강원도	248	132	371	67	36	101
울산광역시	162	87	242	35	19	52
광주광역시	154	83	228	26	14	38
제주특별자치도	33	19	48	10	5	14
세종특별자치시	33	17	50	7	4	11

표 11. 시나리오별 가스발전소로 인한 광역시도별 누적 조기사망자 수

V. 결론 및 제언

분석 결과를 종합하면 운영중인 가스발전소에서 배출된 대기오염물질에 의해 2021년 현재 연간 431명의 조기사망 피해가 발생하고 있으며, 신규 천식 환자를 비롯한 호흡기 질환자가 상당수 발생하고 있는 것으로 추정된다. 제9차 전력수급기본계획에 따라 앞으로 2034년까지 가스발전소가 확대된다면 이러한 피해는 2035년 기준 연간 859명까지 증가할 것으로 예상된다.

특히, 가스발전소의 대기오염물질 단위배출량은 석탄발전소보다 적지만, 현 정책이 그대로 추진된다면 가스발전소로 인한 누적 건강피해는 석탄발전소를 초과할 것으로 나타났다. 가스발전소는 석탄발전소보다 인구 밀도가 높은 지역에 위치해 있으며, 현 정책 기조에서 가스발전소(~2064년)는 석탄발전소(~2054년)보다 10년가량 더 가동되기 때문이다. 이전 연구에 따르면 석탄발전소의 경우 연간 995명, 2054년까지 15,000명의 조기사망자가 나올 것으로 분석되었는데,³⁵ 가스발전소 역시 연간 최대 859명, 2064년까지 23,200명의 조기사망자가 발생할 것으로 추정되었다. 가스발전소의 누적 조기사망자 수가 석탄발전소의 누적 조기사망자 수를 넘어서는 것을 알 수 있다.

이와 같은 건강 피해에서 벗어나기 위해서는 적어도 신규 가스발전소 건설 계획은 모두 철회되어야 한다. 신규 가스발전소 건설 계획을 철회하고 2035년까지 가스발전소를 모두 폐쇄한다면 17,840명의 사망 피해를 예방할 수 있다. 본 보고서는 이와 같은 조기폐쇄 정책의 건강 편익에 대한 분석결과를 토대로 다음과 같은 가스발전 규제 정책을 정부에 권고하고자 한다.

1. 신규 가스발전소 건설 계획의 철회

가스발전소가 현 정책대로 유지된다면 가스 설비용량은 2035년까지 꾸준히 증가하며, 마지막 가스발전소는 2064년에 폐쇄될 것으로 예상된다. 이로 인한 누적 조기사망자는 총 23,200명(최소 12,100명, 최대 35,000명), 가스 설비용량이 가장 많은 2035년도의 연간 조기사망자 수는 859명(최소 449명, 최대 1,300명)에 달할 것으로 분석되었다. 지역별 편차가 존재하지만 앞으로 건설 예정인 발전소로 인한 조기사망자는 2035년 기준 전체 조기사망자의 약 30%로 예상된다 (부록4 참고).

따라서, 건강 피해를 줄이기 위해서는 아직 착공되지 않은 신규 가스발전소 건설 계획을 철회해야 한다. 9차 전력수급기본계획에 반영되어 있는 건설 예정인 가스발전소는 석탄발전소에서 전환하는 발전소 24기(12.7 GW), 신규 복합화력발전소 3기(3.3 GW), 열병합발전소 8기(2.7 GW)로 총 35기(18.7 GW)에 달한다. 이 발전소의 건설 계획을 철회하고 2035년까지 운영 중인 가스발전소를 모두 폐쇄한다면 17,840명(약 75%)의 조기사망을 예방할 수 있다.

35. 사단법인 기후솔루션 (2020). "석탄화력 조기폐쇄의 건강편익 분석 보고서"

특히 이미 운영 중인 가스발전으로 인해 연간 125명(최소 64명, 최대 189명)의 조기사망 피해가 예상되는 경기도 지역에는 4기(2.0GW)의 신규 가스발전소가 추가로 증설 및 건설될 예정이다. 이 지역에서 신규 가스발전소 건설 계획이 철회되고 2035년까지 운영 중인 가스발전소가 모두 폐쇄된다면 누적 6,300명(최소 1,220명, 최대 11,540명)의 조기사망 피해를 막을 수 있을 것이다.

2. 가스발전소 대기오염물질 배출 규제 강화

가스발전소는 특히 인구 밀도가 높은 지역에 위치해 있어 그로 인한 건강피해가 심각한 것으로 드러났다. 이러한 건강피해를 줄이기 위해서라도 가스발전시설에 대한 대기오염물질 관리를 강화할 필요가 있다. 특히 조기사망 피해의 70%가 이산화질소(NO₂)에 의해 발생할 것으로 분석되는 만큼, 질소산화물의 배출허용기준 상향 조정, 가동/재가동과 가동중단 과정의 초과배출 현황 확인 등 추가적인 조치를 검토해야 한다.

가스발전소의 경우 가동 시작과 중단 시간동안 SCR과 같은 오염저감장치가 작동하지 않을 뿐만 아니라, 배출허용 기준보다 많은 오염물질이 대기 중으로 그대로 배출된다. 가스발전소는 전력수요가 높은 시간대에서만 가동되는 경우가 많아 가동 횟수가 연간 평균 약 160번으로 그러한 과정에서 대기오염물질 배출이 증가하기 때문에 더욱 문제된다. 대기환경보전법 시행규칙 제15조 [별표 8]에 따르면, 가스복합화력발전소는 가동개시 및 재가동 시 5시간 그리고 가동중지 직후 2시간 동안은 배출허용기준을 초과한 대기오염물질 배출이 허용된다. 그럼에도 본 보고서를 작성하는 과정에서 확인한 바에 따르면, 이러한 규제 완화로 인한 초과 배출 현황에 대해서는 적절한 현황 조사조차 이루어지지 않은 것으로 보인다. 초과배출 현황에 대한 조사를 바탕으로 환경영향과 건강영향을 적극적으로 검토하고 최소화하기 위한 조치들이 필요하다.³⁶

3. 가스발전에 대한 금융지원 중단

현재 정부는 가스발전을 확대할 계획을 세우고 있을 뿐 아니라 정책적으로 가스발전사업에 대한 제도적인 지원도 계획하고 있다. 한국 정부는 지난 2020년 7월 코로나 경기부양책으로 “한국판 뉴딜”을 발표하고 이를 실행하기 위한 방안으로 “한국판 뉴딜 펀드”를 조성하여 금융 지원을 하고 있다.³⁷ 한국 정부가 수립한 “뉴딜투자 공동기준”은 뉴딜금융 지원 대상 품목으로 디지털뉴딜 115개 품목, 그린뉴딜 85개 품목을 지정하고 있으며, 그린뉴딜 품목 가운데 에너지 부분 친환경발전 항목으로 “가스터빈 발전플랜트(C11005)”가 포함되어 있다.³⁸ 그러나 국내에서 가스발전의 연료로 사용되는 액화천연가스(LNG)의 경우 생산·가공·수송 과정에서 다량의 온실가스가 배출

36. 일례로 캘리포니아에서는 가동, 재가동, 가동중지 상황이 발생할 경우, 질소산화물의 초과배출량을 측정하고, 지역사회와 환경관리청에 알릴 의무에 대한 입법이 추진되기도 하였다 (SB-64 Fossil-fuel generation units). EU에서는 대형연소시설의 경우 일산화탄소와 암모니아에 대해 연속측정을 통해 관리하도록 하고 있어 부하변동에 따라 발생하는 영향을 모니터링하고 대응할 수 있도록 하고 있다 (김유미 외, (2020). LNG 열병합발전시설의 대기오염물질 관리 개선방안 연구).

37. 대한민국 정책브리핑, (2021). “한국판 뉴딜”.

38. 혁신성장 정책금융협의회 사무국, (2021. 2). “뉴딜투자 공동기준 실무 매뉴얼”

되기 때문에 전과정 배출을 고려할 경우 온실가스 배출이 석탄발전 배출량의 70-80%에 달하는 것으로 지적되며,³⁹ 본 보고서에서 지적한 바와 같이 대기오염으로 인한 심각한 건강 피해를 유발하므로 “친환경발전”으로 인정하는 것은 합리적이지 않다.

나아가 녹색채권 등 녹색금융의 대상이 되는 사업의 기술적 표준을 정하는 ‘한국형 녹색분류체계’ 수립을 추진 중인 환경부는 2021년 10월 가스발전을 녹색분류체계상 “녹색경제활동”에 포함시키는 안을 발표하고 의견수렴 절차를 진행 중이다.⁴⁰ 녹색분류체계에 가스발전이 포함될 경우 기후변화 대응과 오염 방지를 포함한 주요 환경 목표 달성에 기여하는 사업에 대해서만 녹색금융을 제공하고자 하는 녹색분류체계 취지가 심각하게 훼손될 우려가 있다.

39. 사단법인 기후솔루션, (2021. 8). “국내 공적금융기관의 해외 화석연료 투자 현황과 문제점”

40. 정중훈, (2021.10.26). “LNG 발전 포함된 녹색분류체계 공개 … 환경단체 “제도 취지 훼손””, 중앙일보

부록

부록1. 건강영향 평가: 방법론

본 연구는 대기오염물질 배출로 인한 건강영향을 연구하는 가장 일반적인 분석법인 '영향경로(impact pathway)' 분석법을 따르고 있다. 이 분석법은 가스발전소에서 배출된 대기오염물질의 확산으로 인한 지표 부근 대기의 오염물질 농도 변화, 각 지점에서의 인구 노출도, 각종 건강 위험 증가율을 파악하여 대기오염에 노출된 인구의 건강피해를 분석하였다.

1. 배출량

첫째, 가스발전소에서 나오는 대기오염물질로 인한 건강영향 연구는 발전소의 위치, 발전량, 대기오염물질 배출량 등에 관한 상세한 정보를 필요로 한다.

운영 중인 발전소의 경우 2019년 연간 NO_x 배출량 데이터를 사용하였다. 신규 발전소 그리고 측정된 배출량 데이터가 없는 발전소의 경우 아래 산식을 적용하여 연간 NO_x 배출량(E)를 계산했다.

$$E = \text{SFGV} * \text{CAP} / \text{EFF} * \text{CF} * \text{FGC},$$

위 산식에서 SFGV는 Graham et al (2012)에 기초한 배출가스(flue gas) 체적(Nm³/GJ, thermal input), CAP는 설비용량, EFF는 열효율, CF는 연평균 설비 이용률, FGC는 연도가스 중 오염물질 농도를 의미한다.

FGC를 산정하기 위해, 모든 발전소가 배출허용기준(신규 발전소의 경우 10ppm)을 준수하는 것으로 가정했다. 배출량 변동 폭을 감안할 때, 발전소가 배출허용기준을 준수하기 위해서는 오염물질 평균 농도가 배출허용기준보다 훨씬 낮아야 한다. 본 연구에서는 기존 발전소의 배출허용기준 대비 실제 평균 배출농도 차이를 계산하여 신규 발전소의 배출농도 산정에 이용했다. 다시 말해서, 신규 발전소가 정상적으로 운전하는 동안 배출허용기준보다 적은 양을 배출하는 것으로 가정한다.

발전소가 가동을 시작하거나 중단하는 등 정상 출력에서 가동되지 않을 때는 SCR(선택적 환원 촉매) 장치⁴¹가 제대로 작동하지 않아 대기오염물질 배출량이 허용기준을 초과할 수 있지만 이는 규제 대상이 아니다. 이때의 배출량은 발전량에 비례하고, SCR 장치가 85% 효율로 작동하는 것으로 가정하였다. 실제 발전소 열효율은 더 낮다는 점에서 앞의 가정은 보수적이다. 정격 운전이 아닌 경우에 적용된 가정은 표12에 명시되어 있다. 기후솔루션에서 취합한 데이터에 근거하여 SCR을 보유하지 않은 발전소의 경우에는 SCR을 보유한 발전소의 배출량 기준을 토대로 상향조정하거나 SCR이 없는 발전기가 배출하는 NO_x 농도의 하한값(15ppm)을 적용했다.

41. SCR는 Selective Catalytic Reduction의 약자로 200 ~400°C에서 선택적으로 질소산화물(NO_x)만을 무해한 질소(N₂)와 물(H₂O)로 전환하는 기술이다.

광역행정구역	현정책 시나리오	SCR이 작동되지 않는 가동 시간
Cold startup	발전량이 0인 상태가 48시간 이상 지속된 이후에 발전기가 가동을 시작하는 경우	180분
Warm startup	발전량이 0인 상태가 8시간 이상 지속된 이후에 발전기가 가동을 시작하는 경우	120분
Hot startup	발전량이 0인 상태가 8시간 미만으로 지속된 이후에 발전기가 가동을 시작하는 경우	60분
가동 중단	발전기가 발전을 중단한 경우	60분
부분 부하 운전	발전기가 정격용량의 50% 미만으로 전력을 생산하는 경우	—

표 12. 정격 운전이 아닌 경우의 SCR 가동에 관한 가정(Bivens 2002 기준).

가스 연소로부터 발생하는 이산화황(SO₂) 및 초미세먼지(PM_{2.5}) 배출량은 배출허용기준을 크게 밑돈다. 이 오염 물질의 경우에는 REAS (Regional Emission inventory in Asia) 배출량 인벤토리를 기준으로 국내 가스발전소의 연료투입량 당 평균 배출계수를 적용했다(Kurokawa et al 2013; 표13 참조).

변수	값	단위
CO ₂ 배출량	33.6	Mt
CO ₂ 배출계수	56.1	tCO ₂ /TJ
연료 투입량	598	10 ³ TJ
PM _{2.5} 배출량	31.7	t
SO ₂ 배출량	69.0	t
PM _{2.5} 배출량	53.1	10 ⁻⁶ kg/GJ
SO ₂ 배출량	115	10 ⁻⁶ kg/GJ

표 13. 가스발전소의 대기오염물질 배출계수

연간 배출량 변동 상황을 반영하기 위해, 2020년의 모든 배출원에 대해 시간당 배출량 데이터세트(dataset)를 개발했다. 2020년에 운전 중인 대부분의 발전소에 대해 발전기 혹은 발전소 수준에서 시간당 발전량을 확보했다. 연료 투입량은 전력 산출량에 비례하고, 대기오염물질 방지시설에 의해 처리되지 않은 대기오염 물질량은 연료 투입량에 비례하는 것으로 가정했다.

부분 부하 운전시 배출되는 물질을 포함한 연간 대기오염배출량이 정부기관이나 발전자회사로부터 입수한 연간 총배출량 자료와 일치할 수 있도록 시간당 배출량 자료를 토대로 연평균 배출량을 조정하였다. 연간 총배출량 자료가 없는 건설 중이거나 건설 예정인 발전소의 경우 정격 운전 시간을 제외하고는 배출가스의 대기오염물질 농도가 질소화합물(NO_x) 배출허용기준인 10ppm을 준수하는 것으로 가정했다.

본 연구에 적용된 CALPUFF 대기확산 모델에는 발전소 굴뚝에서 발생하는 배출가스 확산에 관한 세부적인 모델이 포함되어 있다. 여기에는 모든 발전소의 굴뚝 높이, 내부 직경, 배출가스 온도, 배출가스 확산 속도에 관한 정보가 사용된다. 이 모델링은 정부기관이나 발전사업자들이 국회를 통해 제출한 자료를 바탕으로 분석되었다.

건설 중이거나 건설 예정인 발전소를 포함하여 자료가 누락된 발전소의 대기오염 영향을 분석하기 위해서는, 입수한 가스발전소의 자료를 참고했다. 발전소를 소형과 대형(발전량 300MWe 미만 및 이상) 그리고 복합화력발전소와 열병합발전소(CHP)로 구분했다. 이러한 4개 범주에 대해 설비 이용률, 열효율, 굴뚝 높이, 내부 직경, 배출가스 온도, 배출가스 확산 속도, 시간당 평균 발전량을 계산하여 자료가 누락된 발전소에 적용했다. 신규 복합화력발전소의 경우 Ibrahim&Mohammed (2015)에 근거하여 열효율을 58%로 가정하였는데, 이는 현재 우리나라에서 운영 중인 최신 가스발전소의 열효율을 상회하는 수준이다. 운영 중인 가스발전소의 열효율은 입수한 발전량과 연료사용량 자료를 토대로 계산했다.

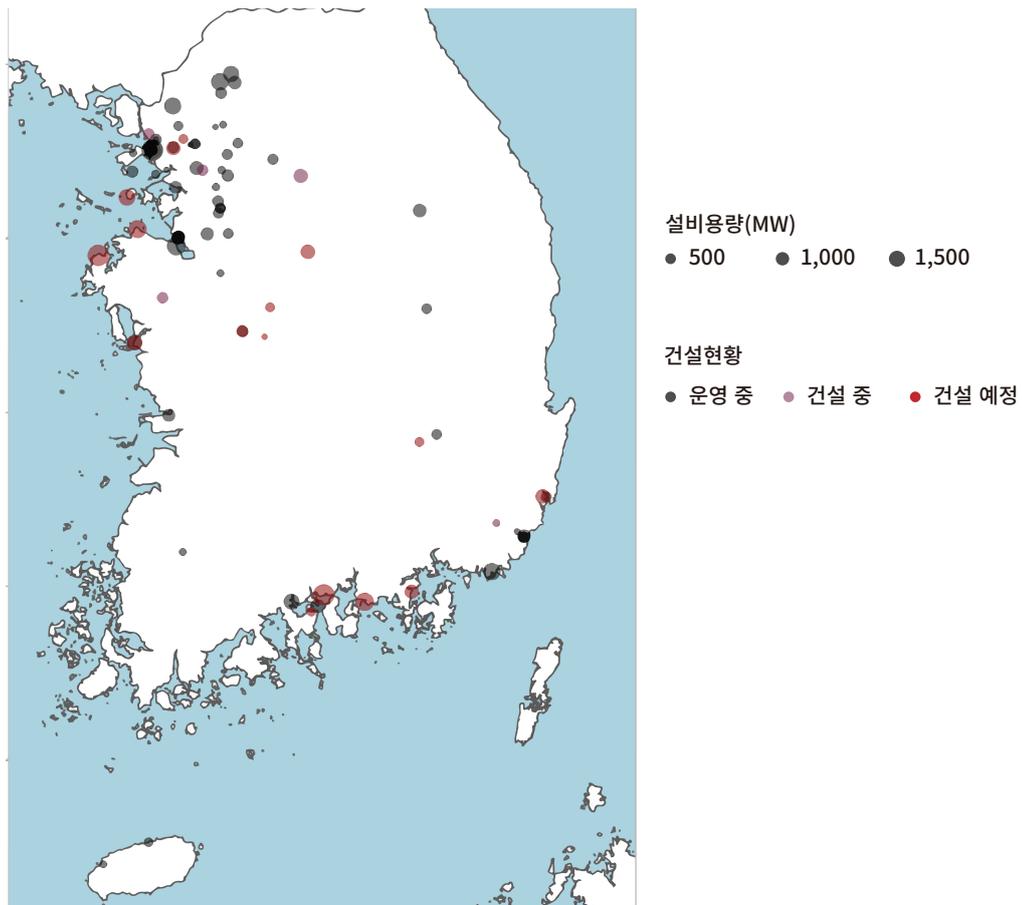


그림 8. 가스발전소 현황 지도

가스발전소 및 발전기 발전량

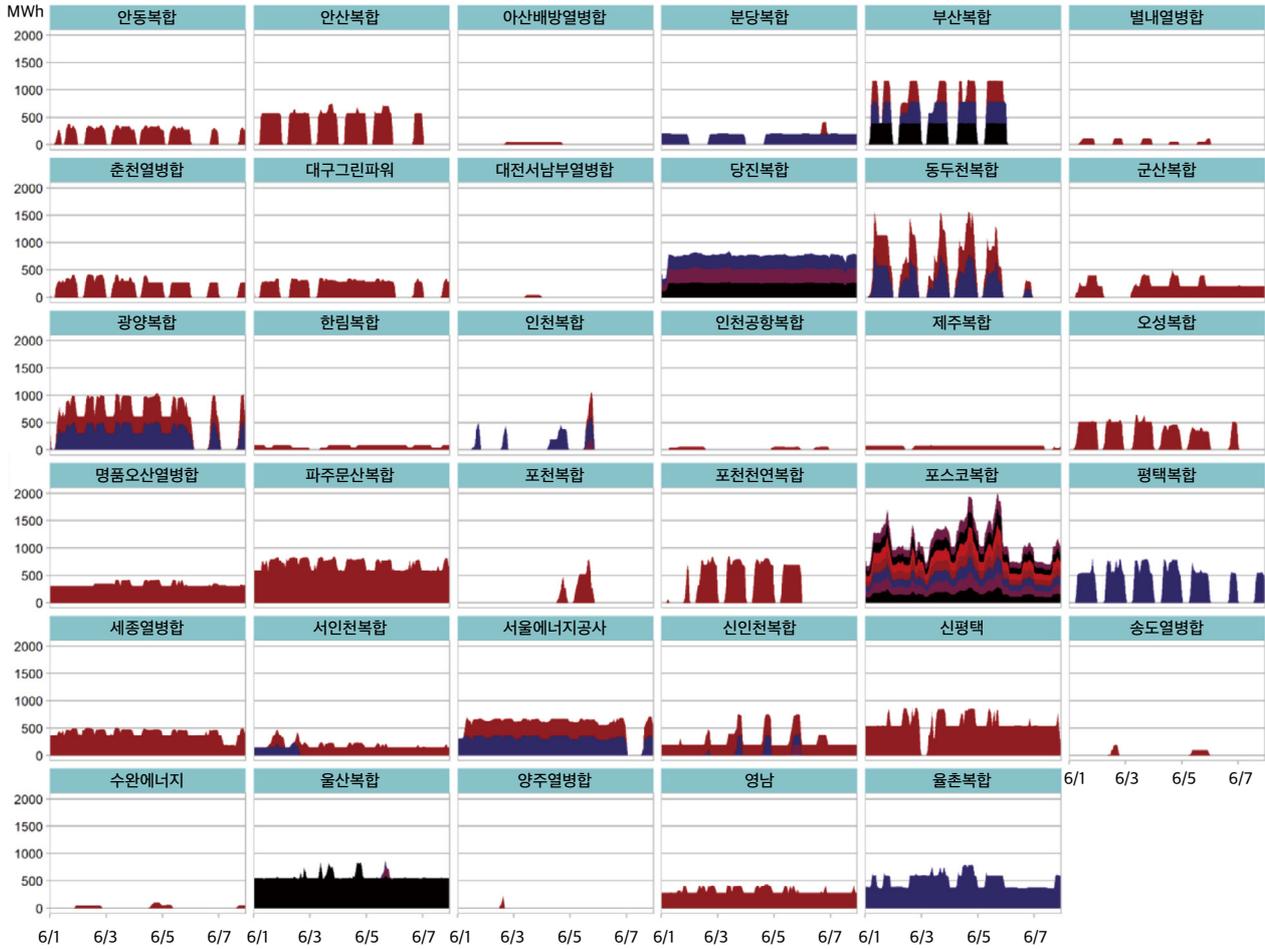


그림 9. 배출량 추이를 계산하는데 적용된 시간당 발전량 자료 예시.
같은 발전소 내에 여러 개의 발전기가 존재하는 경우 각기 다른 색깔로 표시된다.⁴²

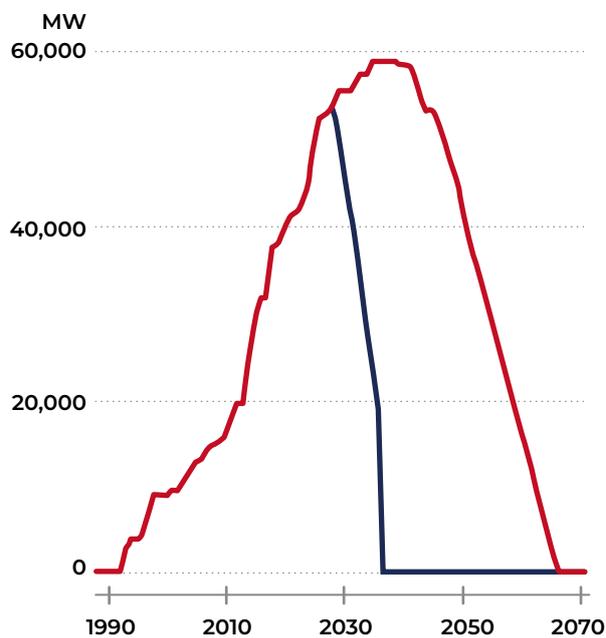
2. 시나리오

본 연구에서는 기존 발전소의 이용률과 배출량이 2019년 수준을 유지한다고 가정하고 신규 발전소의 이용률은 운영 중인 기존 발전소의 2019년 자료를 토대로 향후 배출량을 예측했다. 2020년이 아닌 2019년을 기준연도로 설정했는데, 이는 2020년에 코로나19 영향으로 인해 가스발전량 데이터의 대표성이 낮다고 생각되었기 때문이다. 현정책 시나리오에서는 제9차 전력수급기본계획을 근거로 하여 가스발전소 용량을 2030년 기준 55GW, 2034년 기준 59GW로 가정하였다. 건설 중이거나 건설 예정인 발전소가 모두 준공된다고 가정하였다. 2034년에 가스발전소 설비용량이 최대가 되고, 이후 매년 2~3GW씩 노후화된 발전소부터 순차적으로 퇴출되는 것으로 가정하였다. 2034년 기준 운전 기간이 30년을 초과하는 경우를 제외하고 모든 발전소가 30년간 운영되는 것으로 가정했다. 마지막 발전소는 2064년에 폐쇄된다.

42. 본 자료는 대한민국 국회에서 입수한 자료를 근거로 재구성한 것이며, 발전량 자료는 무작위로 뒤섞인 상태로 제공되었다. 기후솔루션은 설비용량, 발전기 수 등 일반에 공개된 설비 정보를 근거로 발전소를 발전량 자료와 대응시켰다.

넷제로 시나리오는 전력 부문이 2035년까지 탈탄소화를 달성하는 IEA 1.5도 시나리오를 반영하여 2035년까지 가스발전소가 모두 퇴출된다고 가정한 시나리오이다. 그에 따라 아직 착공되지 않은 발전소의 건설 계획은 모두 철회되고, 이미 착공된 발전소는 계획대로 준공된다고 가정했다. 발전소 폐쇄 연도의 경우 2002년 이전에 운영을 시작한 발전기는 2027년에 폐쇄되고, 2020년 이후에 운영을 시작한 발전소는 노후된 발전소부터 순차적으로 2035년까지 퇴출하는 것으로 가정했다. 이 시나리오는 이미 30년 이상을 운영한 노후발전소에 대해서도 대체 발전량을 확보할 수 있는 기간으로 5년을 부여하여 2027년부터 폐쇄된다고 했으며, 모든 가스발전소가 8년에 걸쳐 선형적으로 퇴출되는 것으로 제시한다 (그림 10)

가스발전소 설비 용량



NO_x 배출량 추이

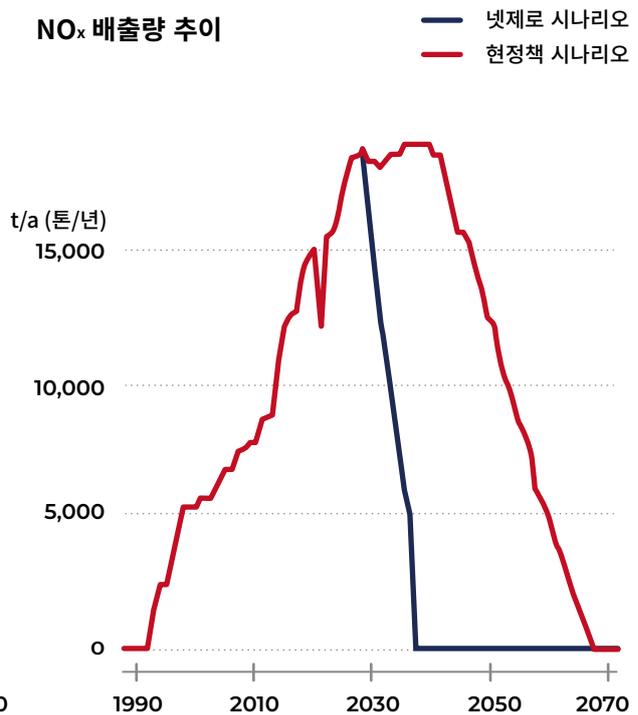


그림 10. 시나리오별 가스발전소 설비 용량과 NO_x 배출량 추이

3. 대기질 모델링

본 연구에서는 대기 모델링을 수행하여 우리나라 가스발전소가 배출하는 대기오염물질로 인한 대기질변화와 이로 인한 건강영향을 추정했다.

CALPUFF 최신 버전을 이용하여 배출 확산 모델링을 수행했다.⁴³ CALPUFF는 점오염원이 대기질에 미치는 장거리 영향 분석에 적합하여 세계적으로 가장 빈번히 활용되고 있는 표준 모델이다. 이 모델은 미국 EPA와 기타 규제 당국으로부터 공식적인 검증을 받아왔다. 이 모델은 오픈소스로 공개되어 있다.

43. Exponent, "CALPUFF Modeling System"

CALPUFF는 발전소에서 배출되는 NO_x 및 SO₂로부터 생성되는 질소산화물과 황산화물을 파악하고, 이들의 장거리 이동경로도 모델링할 수 있다. 이 메커니즘은 PM_{2.5}에 노출되는 인구 수를 증가시키는데 이는 건강영향 90% 이상의 원인이 된다 (Zhou et al 2006 참조). 이를 배제할 경우 PM_{2.5} 건강영향의 대부분이 누락되는 결과를 초래할 수 있다. 또한, CALPUFF는 고도의 해상도와 효율적인 계산을 통해 지표부근에서 발생하는 오염을 모델링할 수 있다.

호주 연방과학산업연구원(CSIRO)이 개발한 TAPM (The Air Pollution Model) 모델링 시스템을 이용하여 시뮬레이션용 3차원 기상 데이터를 생성했다. TAPM은 호주기상청 GASP 모델의 전 세계 날씨 데이터와 고해상도 지형 데이터를 입력 데이터로 사용한다.

모델링 영역은 한국을 중심으로 1500×1500km 면적을 포함하며 최외곽 격자의 수평 해상도는 20km, 수직격자는 35층으로 구성됐다. 본 연구에서는 배출원 근방의 세밀도를 높이기 위해 10km와 5km 해상도로 2개의 동심 동지격자를 적용했다(그림 11). 모든 격자는 75×75 수평 격자 셀로 구성됐다.



그림 11. 모델링 영역

우선 TAPM를 통해 얻어진 결과물과 기상자료를 CALPUFF 모델에서 처리가능한 CALMET 형태로 변환하였다. CALMET은 CALPUFF 입력을 위한 시간대별 미기상학적 변수(시간대별 3차원 온도 분포, 시간대별 격자 안정도, 표면 마찰 속도, 혼합 고도, 모난-오브코프 길이, 대류 속도 스케일, 공기 밀도, 태양 단파 복사, 표면 상대습도 및 온도, 강수 코드, 강수량)를 생성한다.

지형고도와 토지 이용 데이터는 TAPM 시스템과 CSIRO에서 제공하는 글로벌 데이터셋을 사용했다.

CALPUFF 확산 모델링의 경우 모델링 대상 배출원 근방의 최소 격자에 1000×1000m 해상도로 동심 등지 격자를 정의했다. 모델 시작 효과가 기상 분석에 영향을 미치게 하지 않기 위해 연구 대상 기간의 첫 3일은 스펀업 기간을 적용했다.

CALPUFF의 RIVAD 화학 모듈에 대기 화학 변수(오존, 암모니아, H₂O₂ 농도)를 적용하여 황 및 질소 화합물의 화학적 변화를 모델링했다. 모델링 영역 내의 공식 관측소에서 입수한 시간대별 오존 데이터를 모델에 적용했다(표 3 참조). 대기질 관측 대상에 포함되지 않는 기타 화학물질이나 입수하지 못한 오존 데이터의 경우 동남아시아 지역의 등지 격자를 이용한 지오스-캠(Geos-Chem) 대기 모델과 기준 시뮬레이션을 토대로 월평균 농도를 추정했다(Kopplitz et al 2017). CALPUFF 결과는 POSTUTIL 유틸리티를 이용하여 재가공됨으로써 질소화합물이 재분류(NO, NO₂, NO₃, HNO₃) 되었다.

각 발전소가 서로 다른 시점에 운영을 시작하고 폐쇄되는 점을 감안하여, 본 연구의 대상이 되는 모든 발전소를 개별적으로 시뮬레이션을 실시했다.

4. 건강영향평가

CREA는 전 지역에 적용할 수 있는 건강영향평가 체계를 개발했으며, 중첩되지 않는 건강영향 평가를 도출함으로써 정확도를 높인다. 이 체계는 글로벌 데이터셋을 기반으로 국가별로 발병률 데이터를 도출하고 의료보건 및 노동생산성과 관련된 건강 결과를 도출할 수 있다(표14 참조).

대기오염에 따른 건강 영향을 정량화하기 위해서는 기존에 널리 적용되고 있는 공신력 있는 농도-반응 관계식을 선정했다. 이 관계식은 지역과 대기오염물질 노출 수준에 관계없이 보편적으로 활용이 가능할 정도로 충분히 검증된 것이다.

건강영향을 계산하는 방식은 표준적인 역학 등식을 따른다.

$$\Delta cases = POP \times \sum_{age} \left[Frac_{age} \times Incidence_{age} \times \left(1 - \frac{RR(c_{base} + \Delta c_{gas, age})}{RR(c_{base, age})} \right) \right],$$

위 등식에서 POP는 격자 내 총인구, age는 분석 대상 연령집단(연령 의존적 농도-반응 함수인 경우 5세 단위 하위집단, 그 외의 경우 함수가 적용되는 전체 연령대), Frac_{age}는 분석 대상 연령집단에 속하는 인구에서 차지하는 비율, Incidence는 분석 대상 건강상태의 기준 발병률, c는 오염물질 농도, c_{base}는 기준 농도(현재 배경 농도), Δc_{gas}는 가스발전소로부터 기인한 농도를 의미하며 기준 발전소의 영향은 음수(기준 농도에서 차감한다), 신규 발전소의 영향은 양수(기준 농도에 가산한다)로 표시된다. RR(c, age)은 깨끗한 대기질과 비교하여 특정 농도에서 특정 연령집단의 분석 대상 건강 영향이 차지하는 위험도를 도출하는 함수에 해당한다. 위 등식의 해는 기존 발전소의 경우 음수로서 가스발전에서 배출된 대기오염을 제거했을 때 방지할 수 있는 발병 건수를 표시하며, 신규 발전소의 경우 양수로서 대기오염 증가로 인한 추가 발병 건수를 표시한다.

연령과 무관한 로그선형 농도-반응 함수의 경우 RR 함수는 아래와 같다.

$$RR(c) = RR_0^{\frac{c-c_0}{\Delta c_0}} \quad (c > c_0 \text{인 경우}), 1 \text{ (그 외의 경우)},$$

위 함수에서 RR0은 역학 연구에서 관찰되는 위험도, Δc_0 은 RR0이 참조하는 농도 변화, c_0 은 무해하다고 가정한 임계값(일반적으로, 연구 데이터에서 발견되는 최저 농도)를 의미한다.

총인구 및 인구 연령 구조에 관한 데이터는 2019년도 세계질병부담(GBD) 연구 결과를 참조했다(IHME 2020). 각국의 예상 인구 공간분포는 GPW (Gridded Population of the World) v4를 근거로 삼았다(CIESIN 2018).

PM_{2.5}로 인한 성인 사망률 및 수명 단축 기간은 Burnett et al (2018)이 개발하고 Lelieveld et al (2019)이 적용한 위험 함수를 이용하여 추정했다. 사망률의 경우 세계질병부담(GBD) 모델 대신에 GEMM (Burnett et al 2018) 위험 모델을 선택했다.

GBD 모델이 보다 널리 이용되는 것은 사실이지만 저농도와 고농도 범위에서 건강 위험을 지나치게 보수적으로 가정하는 경향이 있다. 극단적인 예로서 GBD 모델은 대기오염물질 농도가 저농도와 고농도에서 소량으로 감소한 경우에는 이 영향을 무시한다. 게다가 GBD 모델의 사망률의 경우 실외 대기오염, 실내 공기오염, 흡연 영향이 모두 포함되어 있어 에너지 부문에 국한된 분석을 하기에는 어려움이 있다.

GEMM는 동아시아 지역에 대한 연구를 포함하여 최신 데이터에 근거를 두고 있으며 본 연구의 대상인 실외 대기오염에 초점을 맞추고 있다.

GEMM 모델에 따른 PM_{2.5} 사망률 결과에는 비전염성 질병 및 하기도 감염을 포함한 “모든 원인”으로 인한 사망이 포함되며, 가장 주된 사망 원인에 대한 결과를 원인 별로 나타낸다. 모든 원인 별 사망자 수를 합산하면 전체 사망자 수 결과값을 초과하는데 이는 다른 비전염성 질병이 원인 별 결과에 포함되어 있기 때문이다. 이처럼 분석은 다른 비전염성 원인까지 집계함으로써 더 높은 신뢰도를 제공한다.

장기적인 이산화질소(NO₂) 노출에 따른 사망률은 다중 오염물질 위험 모델을 통해 PM_{2.5}와 NO₂의 복합적인 영향에 주력한 Faustini et al (2014) 메타 분석의 결과를 적용하여 정량화했다. 농도-반응 관계(오즈비 1.04)는 WHO HRAPIE 프로젝트의 권고사항과도 부합한다(WHO 2013). WHO는 오즈비 1.057을 권고했지만 이산화질소(NO₂) 노출로 인한 사망률의 최대 3분의 1이 초미세먼지 PM_{2.5}로 인한 사망률과 중첩될 가능성이 있다고 시사했다. Faustini et al은 분석에 포함된 최저 농도를 언급하지 않았으므로 무해하다고 가정한 임계값 Stieb et al (2021)을 참조했다.

초미세먼지(PM_{2.5})에 의한 하기도질환으로 인한 소아(5세 미만) 사망률은 GBD 하기도질환 위험 함수를 이용하여 분석했다(IHME 2020).

모든 사망률 자료의 경우 원인 별 데이터는 2019년 GBD 프로젝트 자료를 참조했다(IHME 2020). 다른 건강영향 결과의 경우 표14에 명시된 국가별 발병률 데이터를 이용했다.

건강영향 모델링은 연구 대상 기간 동안의 오염물질 노출로 인한 효과를 예측한다. 일부 건강영향은 천식 악화나 근로손실일수처럼 증상이 즉각적인 반면에 그 외의 만성적인 증상은 잠복기가 수년에 이를 수도 있다.

천식으로 인한 응급실 내원 횟수와 결근에 관한 농도-반응 관계는 오염물질 농도와 건강영향 결과의 일간 변동을 분석한 연구들을 참조하였다. 이러한 관계를 연평균 농도 변동에 적용했다.

초미세먼지(PM_{2.5})와 이산화질소(NO₂) 연평균 기준 농도는 각각 van Donkelaar et al (2016)과 Larkin et al (2017)을 참조했다. 비선형 농도-반응 관계와 농도 기준선을 적용하기 위해서는 가스발전소의 영향 뿐만 아니라 이러한 기준 배경 농도가 요구된다. Larkin et al 데이터세트의 해상도는 100m이며 van Donkelaar et al 데이터세트의 해상도는 0.01도이다. 두 데이터세트 모두 건강영향평가에 적용되는 1km 해상도로 집산하고 내삽했다.

모든 분석은 1x1km 해상도의 공간격자에서 R 데이터 분석 소프트웨어를 통해 실시됐으며 각 단위격자에 대해 건강영향을 산정했다. 모든 데이터세트를 필요에 따라 이 해상도로 집산하거나 내삽했다.

연령 집단	영향	오염물질	농도-반응 함수	농도 변동	임계값 (No-risk threshold)	참고문헌	발병률 데이터
1-18	신규 천식 환자	NO ₂	1.26 (1.10 - 1.37)	10 ppb	2 ppb	Khreis et al 2017	Achakulwisut et al 2019
0-17	천식으로 인한 응급실 내원	PM _{2.5}	1.025 (1.013, 1.037)	10 ug/m ³	6 ug/m ³	Zheng 2015	Achakulwisut et al 2018
18-99	천식으로 인한 응급실 내원	PM _{2.5}	1.023 (1.015, 1.031)	10 ug/m ³	6 ug/m ³	Zheng 2015	Anenberg et al 2018
신생아	조산	PM _{2.5}	1.15 (1.07, 1.16)	10 ug/m ³	8.8 ug/m ³	Sapkota et al 2012	Chawanpaiboon et al 2019
20-65	결근	PM _{2.5}	1.046 (1.039-1.053)	10 ug/m ³	N/A	WHO 2013	EEA 2014
0-4	하부호흡기감염증으로 인한 사망	PM _{2.5}	IHME 2020		5.8 ug/m ³	IHME 2020	IHME 2020
25-99	비감염성 질환 (원인별 세분화) 및 하기도 감염으로 인한 사망	PM _{2.5}	Burnett et al 2018		2.4 ug/m ³	Burnett et al 2018	IHME 2020
25-99	당뇨병, 뇌졸중, 만성 호흡기 질환으로 인한 장애	PM _{2.5}	IHME 2020		2.4 ug/m ³	Burnett et al 2018	IHME 2020
25-99	조기 사망	NO ₂	1.04 (1.02-1.06)	10 ug/m ³	4.5 ug/m ³	Faustini et al 2014; NRT from Stieb et al 2021	IHME 2020

표 14. 건강영향 추정에 이용된 입력 변수 및 데이터.

'농도-반응 함수' 항목의 수치는 '농도 변동' 항목에 명시된 농도 증가분에 상응하는 질병 증가율을 의미한다. 참고문헌은 선형 관계에 있지 않은 '농도 반응 함수'를 도출하는데 사용되었다. 임계값이란 선행 연구에서 이보다 노출 수준이 낮은 집단에 대한 분석을 진행하지 않아서 그 이하로는 건강영향이 정량화되지 않는 농도를 의미한다.

5. 건강영향 추정

대기질이 개선되지 않는 한 대기오염으로 인한 건강영향은 인구 증가와 노령화, 대기오염에 의한 만성 질환의 확산을 부추기는 역학 변천(epidemiological transition)으로 인해 시간이 경과함에 따라 대부분 그 영향이 증가할 것이다.

이러한 영향을 파악할 목적으로 본 연구에서는 유엔개발계획(UNPD) 세계인구전망에 포함된 국가별 총인구 예측과 연령별 인구 분포 그리고 사망률 데이터를 참조했다. 사인 별 연령집단 사망률 분포는 일정하게 유지되는 것으로 가정했다.

본 연구에서는 운영을 시작하는 신규 발전소와 폐쇄되는 발전소 일정을 고려하여 개별 발전소의 영향을 반영함으로써 각 단위격자별로 가스발전으로 인한 대기 오염물질 농도를 시간의 경과에 따라 예측했다.

부록 2. 세계보건기구 대기질 가이드라인

대기오염에 일정 시간 이상 노출될 경우 어린이, 노인, 호흡기질환자 등 취약 집단을 중심으로 호흡기 질환 등 갖가지 질병에 걸릴 위험이 크게 증가한다. 오염물질 농도가 세계보건기구 대기질 가이드라인(Air Quality Guidelines, AQGs)보다 낮은 경우에도 여전히 유해할 수 있다.⁴⁴

오염물질	영향	2005년 기준	2021년 기준
PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	연간	10	5
	24시간	25	15
PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	연간	20	15
	24시간	50	45
오존, O ₃ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	성수기	-	60
	8시간	100	100
이산화질소, NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	연간	40	10
	24시간	-	25
이산화황, SO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24시간	20	40
일산화탄소, CO($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24시간	-	4

표 15. 세계보건기구 대기질 가이드라인 (출처: WHO)⁴⁵

44. Knibbs LD, et al. The Australian Child Health and Air Pollution Study (ACHAPS): A national population-based cross-sectional study of long-term exposure to outdoor air pollution, asthma, and lung function. *Environ Int.* Nov 2018; 120:394-403. doi: 10.1016/j.envint.2018.08.025.

45. WHO (2021). "What are the WHO Air quality guidelines?"

부록 3. 현정책 시나리오와 넷제로 시나리오에서의 대기오염물질 농도변화

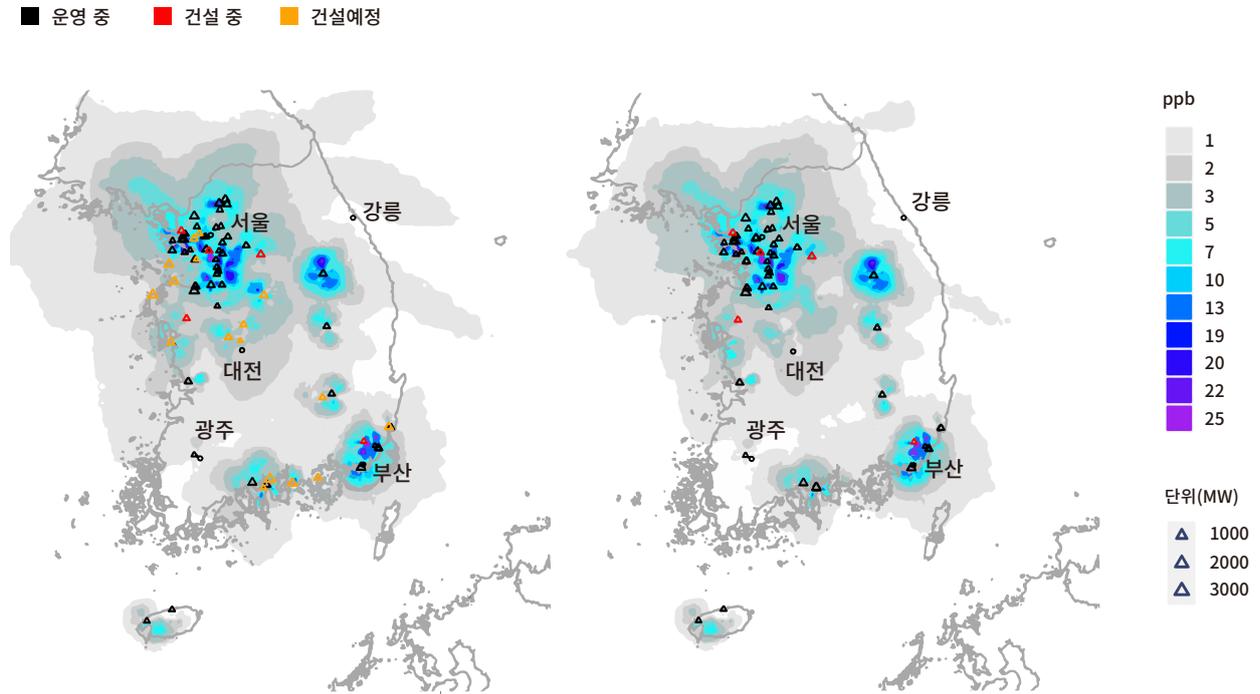


그림 12. 현정책 시나리오와 넷제로 시나리오에서 가스발전소로 인한 시간당 최대 이산화질소(NO₂) 농도 비교

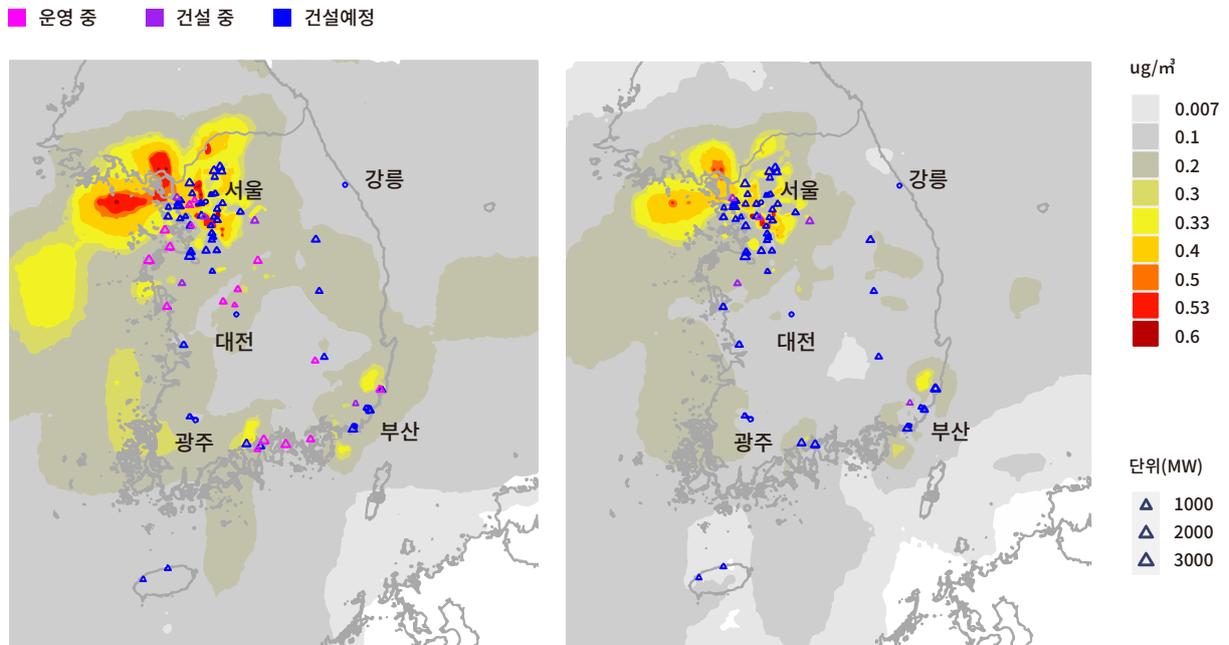


그림 13. 현정책 시나리오와 넷제로 시나리오에서 가스발전소로 인한 24시간 최대 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도 비교

부록 4. 2035년 건설현황에 따른 광역시도별 최대 연간 조기사망자 수

광역행정구역	현정책 시나리오 (2035년)			기존 발전소			건설 중			건설 예정인 발전소		
	중간	최소	최대	중간	최소	최대	중간	최소	최대	중간	최소	최대
경기도	306	158	462	185	96	279	30	16	46	91	47	137
서울특별시	192	99	291	104	54	156	18	9	27	71	36	107
인천광역시	52	26	78	35	18	53	5	2	7	12	6	18
경상남도	29	15	43	16	9	24	2	1	3	11	6	16
충청북도	24	12	36	12	7	19	2	1	3	9	5	14
충청남도	25	13	38	14	8	22	2	1	3	9	5	13
대구광역시	16	8	24	7	4	10	1	0	1	9	4	13
대전광역시	19	10	29	10	5	15	1	1	2	8	4	12
경상북도	18	10	27	9	5	14	1	1	2	8	4	12
부산광역시	35	18	53	27	14	41	1	1	2	7	4	10
전라북도	11	6	17	6	3	9	1	0	1	4	2	6
전라남도	10	5	15	5	3	7	0	0	0	5	3	7
강원도	9	5	13	6	3	8	1	1	2	2	1	3
울산광역시	6	3	10	4	2	6	0	0	1	2	1	3
광주광역시	6	3	8	3	2	4	0	0	0	2	1	4
제주특별자치도	2	1	2	1	1	2	0	0	0	0	0	0
세종특별자치시	1	1	2	1	0	1	0	0	0	0	0	1

표 16. 현정책 시나리오에서 가스발전소로 인한 광역시도별 최대 연간 조기사망자 수



가스발전의 실체:

가스발전의 대기오염 영향 및 건강피해

발간일

2021년 11월

저자

이석영 | 사단법인 기후솔루션 연구원 | seukyoung.lee@forourclimate.org

조규리 | 사단법인 기후솔루션 연구원 | gyuri.cho@forourclimate.org

한가희 | 사단법인 기후솔루션 연구원 | gahee.han@forourclimate.org

모델링

Lauri Myllyvirta | Centre for Research on Energy and Clean Air | 선임 대기오염 분석가

디자인

네모연구소

문의

solutions@forourclimate.org

SFO°C

Solutions for Our Climate

사단법인 기후솔루션(Solutions for Our Climate, SFOC)은
보다 효과적인 기후변화 및 대기오염 대응 정책 마련을 위해
2016년 한국에서 설립된 비영리법인입니다.
에너지기후변화 정책에 전문성을 가지고 있는
법률, 경제, 금융, 환경 전문가 등으로 구성되어 있고,
국내외 비영리단체들과의 긴밀한 협력 하에 활동하고 있습니다.

