

천연가스 열병합발전의 2차 생성 PM_{2.5} 저감효과 추정

How Much Can the Natural Gas-based Combined Heat and Power Reduce Secondary PM_{2.5} Formation?

임슬예* · 김주희** · 유승훈***

Seul-Ye Lim · Ju-Hee Kim · Seung-Hoon Yoo

요약: 최근 미세먼지는 한국에서 가장 중요한 환경문제로 부각되고 있다. 미세먼지 중에서 직경이 2.5 μm 미만인 PM_{2.5}는 인체 유해성이 크기에 이를 줄이는 데 정책의 초점이 맞춰지고 있다. 특히 발전 및 난방부문에서는 1차 배출 PM_{2.5}보다 2차 생성 PM_{2.5}가 더 많은 것으로 알려져 있다. 이에 본 논문에서는 천연가스 열병합발전소(800 MW급)가 2차 생성 PM_{2.5}를 얼마나 저감할 수 있는지를 따져 보고자 한다. 열을 생산하는 대체설비를 주택용 개별 보일러로, 전기를 생산하는 대체설비를 한국전력공사의 화력발전원 믹스로 설정하였다. 해당 열병합발전소는 2018년 한 해 동안 2차 생성 PM_{2.5}를 565톤만큼 저감시킨 것으로 분석되었다. 이것은 천연가스 열병합발전소가 개별 보일러와 달리 배출저감시설을 갖추고 있을 뿐만 아니라 열과 전기를 동시에 생산하여 효율적이기에 에너지 사용량을 획기적으로 절감시켜 대기오염물질의 배출 자체를 줄일 수 있기 때문이다. 이러한 2차 생성 PM_{2.5} 저감효과를 화폐단위로 평가하면 연간 37,498백만원이다. 이러한 분석결과는 천연가스 열병합 발전을 확대하고자 하는 에너지전환 정책에 부합하며 PM_{2.5} 배출을 절감하는 한 가지 수단으로서 천연가스 열병합발전이 유용할 수 있음을 시사한다.

핵심주제어: 미세먼지, PM_{2.5}, 2차 생성 PM_{2.5}, 열병합발전, 천연가스

Abstract: Particulate matter has recently emerged as the most important environmental issue in Korea. In this regard, government policy has focused on reducing the emissions of PM_{2.5}, i.e., particulate matter less than 2.5 μm in diameter, owing to the significant hazard it poses to human health. In particular, secondary PM_{2.5} formations are considered more harmful than primary PM_{2.5} emissions in the power generation and heating sectors. Therefore, this study seeks to examine the extent to which a natural-gas-based (NG-based) combined heat and power (CHP) or co-generation plant, which produces heat and electricity simultaneously, can reduce secondary PM_{2.5} formation. We focused on an alternative facility that produces heat in individual boilers for housing and an alternative facility of the Korea Electric Power Corporation that produces electricity as a fossil fuel-based power mix. The results show that the NG-based CHP plant reduced secondary PM_{2.5} formation by 565 tons in 2018. This is because the NG-based CHP plant was equipped with emission-reduction facilities, unlike individual boilers, and its high energy efficiency led to reduced emissions of air pollutants. As of 2018, secondary PM_{2.5} formation amounts to 34,901 million won per year. These results are in line with the government's policy of expanding NG-based CHP plants and imply that they can be useful as a means of reducing PM_{2.5}.

Key Words: Particulate Matter, PM_{2.5}, Secondary PM_{2.5} Formation, Combined Heat and Power, Natural Gas

* 주저자, 한국지역난방공사 미래개발원 선임연구원

** 공동저자, 서울과학기술대학교 에너지환경대학원 에너지정책학과 박사과정

*** 교신저자, 서울과학기술대학교 에너지환경대학원 에너지정책학과 교수

I. 서론

미세먼지는 직경이 10 μm 보다 작은 먼지를 의미하는데, 통상 직경이 2.5 μm 에서 10 μm 사이인 PM_{10} 과 직경이 2.5 μm 보다 작은 $\text{PM}_{2.5}$ 로 구분된다. 미세먼지의 건강 유해성은 여러 연구에서 다뤄진 바 있는데(김수인·원두환, 2018; Li et al., 2018; 이수지·김호 2019; Altieri and Keen, 2019), 특히 PM_{10} 보다 $\text{PM}_{2.5}$ 가 더 큰 유해성을 가지는 것으로 알려져 있다(이수지·김호, 2019). 따라서 미세먼지 대책의 핵심도 PM_{10} 보다는 $\text{PM}_{2.5}$ 에 맞춰져 있다. 예를 들어, 정부는 2017년 미세먼지 관리 종합대책을 수립하였고, 2018년 비상·상시 미세먼지 관리 강화대책을 마련하였으며, 2019년에는 미세먼지 특별법이 제정되어 종합적인 미세먼지 저감조치의 강화 속에 대통령 직속 '미세먼지 문제 해결을 위한 국가기후환경회의'가 출범했는데 $\text{PM}_{2.5}$ 의 저감에 집중하고 있다.

그런데 대기 중에 존재하는 전체 $\text{PM}_{2.5}$ 의 70% 이상이 1차 배출이 아닌 2차 생성에서 기인하는 것으로 알려져 있다(국가기후환경회의, 2019). 2차 생성 $\text{PM}_{2.5}$ 는 가스 상태로 배출된 대기오염물질이 공기 중에서 광화학 반응을 일으켜 변한 것으로 1차 배출 $\text{PM}_{2.5}$ 에 비해 질산염, 황산염, 암모늄 등 인체에 해로운 물질을 더 많이 포함하고 있다. 당초 가스상 물질인 황산화물(SO_x), 질소산화물(NO_x)이 대기 중 수증기, 암모늄 이온 등과 결합하여 $\text{PM}_{2.5}$ 를 생성하기 때문이다. 따라서 2차 생성 $\text{PM}_{2.5}$ 를 줄이는 것이 미세먼지 저감 정책에 있어서 핵심이 되어야 한다. 반면에 2차 생성 미세먼지 배출량 및 저감량에 대한 검증과 평가는 최근에서야 본격적으로 이뤄지고 있기에(김민경 등, 2015; 환경부, 2016, 2018, 2019; 여민주·김용표, 2019), 2차 생성 $\text{PM}_{2.5}$ 관련 연구가 확대될 필요가 있다.

특히 발전소 및 냉난방 부문은 1차 미세먼지 배출량보다 2차 생성 미세먼지의 발생량이 더 많으며(구윤모 등, 2018), 전체 미세먼지 발생량 중 약 20%를 차지하면서(환경부, 2019), $\text{PM}_{2.5}$ 농도에 적지 않은 영향을 미치고 있기에(이동규·성재훈, 2018), 2차 생성 미세먼지 저감 정책의 주된 대

상이 되고 있다.¹⁾ 다른 발전소와 달리 도심지에 입지할 수 있는 천연가스 열병합발전은 발전 및 냉난방 부문에서 2차 생성 미세먼지를 줄일 수 있는 현실적인 유력한 수단이 될 수 있다.

열병합발전은 열과 전기를 함께 생산함으로써 열과 전기를 각각 생산할 때에 비해 연료 사용량이 줄어드는 효율 개선 때문에 오염물질의 배출도 줄일 수 있어서 대기오염 개선에 기여할 수 있기 때문이다(김용하 등, 2007; 전의찬·김정욱, 1990; Agrell and Bogetoft, 2005; Beith, 2011; Afifi et al., 2012; US DOE and EPA, 2012; Bianchi et al., 2014; UNEP, 2015). 아울러 난방 및 급탕에 사용되는 개별 보일러에는 오염저감장치가 장착되어 있지 않는 반면에, 열병합발전소에는 질소산화물을 걸러내는 탈질설비와 같은 대규모 오염저감장치가 설치되어 있기 때문에 대기 중으로 배출되는 오염물질이 획기적으로 줄어든다.

지금까지 천연가스 열병합발전이 갖는 여러 가지 공익적 기능에 대해서는 활발하게 논의되어 왔다. 예를 들어, 미국 환경청²⁾에서는 열병합발전의 공익적 편익을 체계적으로 제시하고 있다. 국내에서는 민서현 등(2015), Kim et al.(2018a), Kim et al.(2018b)이 각각 천연가스 열병합발전의 온배수 저감편익, 대기오염 개선편익, 미세먼지 저감편익을 추정한 바 있다. 한국지역난방공사(2019)는 열병합발전의 미세먼지 저감효과에 대해 체계적인 분석결과를 제시한 바 있다. 하지만 열병합발전이 2차 생성 PM_{2.5}에 미치는 영향 내지는 역할에 대해 연구한 사례는 찾기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 발전 및 냉난방 부문에서 미세먼지를 저감할 수 있는 여러 수단 중에서 천연가스 열병합발전에 주목하면서 2차 생성 PM_{2.5}의 저감효과를 화폐단위로 산정하고자 한다. 저자들이 알고 있는 범위 내에서, 이러한 시도는 국내에서는 처음으로 시도되는 것이며 관련된 해외

1) 발전 부분의 미세먼지 배출 저감을 위한 주요 과정은 노후 석탄화력발전 가동 중지 및 조기폐지, 환경설비 투자 확대, 재생에너지 확대이다. 특히 정부는 '재생에너지 3020 이행계획'과 '신재생에너지 기술개발 및 이용·보급 실행계획'에서 재생에너지인 태양광, 풍력, 수소 등의 확대를 계획하고 있다.

2) www.epa.gov/chp/chp-benefits.

사례도 찾지 못했다.

본 연구의 목적을 달성하기 위해서는 전기와 열을 생산하는 대체설비를 잘 설정하는 것이 중요하다. 뒤에서 자세하게 설명하겠지만, 본 논문에서는 천연가스 열병합발전 대신에 전기를 생산하는 대체설비로 한국전력공사(발전자회사 포함)의 화력발전원 믹스를 설정하였다. 만약 천연가스 열병합발전이 가동되지 않는다면 현실적으로 한국전력공사의 화력발전소가 그 역할을 대신할 수밖에 없기 때문이다. 천연가스 열병합발전에서 생산되는 열은 가정에서의 난방 및 급탕으로 사용되고 있는데 이를 대체하는 설비는 도시가스 개별보일러이므로 천연가스 열병합발전의 열 생산 대체설비는 개별보일러로 설정하였다.

본 논문의 이후 내용은 다음과 같이 구성된다. 제2절에서는 본 논문에서 채택한 방법론에 대해 자세하게 설명한다. 대체설비에 근거하여 열과 전기를 따로 생산할 때의 2차 생성 $PM_{2.5}$ 의 양과 열병합발전으로 열과 전기를 함께 생산할 때의 2차 생성 $PM_{2.5}$ 의 양을 서로 비교함으로써 열병합발전의 2차 생성 $PM_{2.5}$ 의 저감효과를 산정하는 방법을 제시할 것이다. 제3절에서는 주요 분석결과를 제시한 후 이에 대해 논의한다. 2차 생성 $PM_{2.5}$ 의 정량적 저감효과를 살펴볼 뿐만 아니라 이 효과를 화폐적 가치로 산정한다. 연구결과에 대한 요약 및 결론은 마지막 절에 담길 것이다.

II. 연구방법론

1. 분석대상의 선정

천연가스, 석탄, 폐기물의 3가지가 국내 열병합발전의 주된 연료로 사용되고 있다. 우드칩 등의 바이오매스는 비용 문제로 사용하지 않고 있으며 미이용 산림 바이오매스는 아직까지 사업화가 추진되지 못하고 있다. 이 중에서 폐기물 열병합발전의 경우 일부 소용량으로 가동되고 있지만 주민 수용성 문제로 충남 내포신도시 폐기물 열병합발전과 같이 사업 초

기 단계에서 좌초되거나 나주혁신도시 폐기물 열병합발전과 같이 완공 후 가동을 못 하고 있다. 석탄 열병합발전은 산업단지를 중심으로 하여 가동되고 있지만 온실가스 및 미세먼지 저감을 위해 신규 사업은 없기에 분석 대상으로 삼을 필요가 없다. 반면에 천연가스 열병합발전은 서울 시내에도 입지하고 있으며 대부분의 신도시에서 이미 가동되고 있고 다양한 신규 사업이 추진되고 있다.

따라서 본 연구에서는 천연가스 열병합 발전을 분석 대상으로 삼고자 한다. 그렇다면 다음 단계로 향후 지을 것으로 하느냐 아니면 현재 가동중인 것으로 하느냐의 문제가 있다. 운영 실적이 있어야 2차 생성 PM_{2.5} 저감효과를 파악할 수 있으므로 현재 가동중인 천연가스 열병합발전소를 대상으로 할 필요가 있다. 더군다나 신규 천연가스 열병합발전소를 대상으로 하게 되면, 원래 대기오염물질 배출이 없었는데 발전소가 들어와 작더라도 대기오염물질을 배출하므로 2차 생성 PM_{2.5} 저감효과는 없으며 더 나아가 부정적인 효과가 발생하는 셈이 된다.

본 연구의 분석 대상으로 기존에 가동되고 있는 천연가스 열병합발전소를 하되, 만약에 이것이 없었다면 어떤 시설로 대체되었을 것인지를 추정하는 대체시설 접근법을 활용할 필요가 있다. 본 연구에서는 국내에 입지한 다양한 천연가스 열병합발전소 중에서 수도권에 입지한 특정 천연가스 열병합발전소를 대상으로 한다. 그 이유는 2가지로 요약된다. 첫째, 발전소 운영실적에 대한 정보를 구할 수 있는 열병합발전소를 대상으로 하였다. 국내 천연가스 열병합발전산업을 살펴보면 한국지역난방공사라는 공기업이 대략 절반의 시장 점유율을 차지하고 나머지 절반은 다수의 민간기업이 경쟁을 벌이고 있다. 민간기업의 경우 기업간 경쟁 때문에 전기 판매량, 열 판매량, 오염물질 배출량과 같은 발전소 운영실적이 기업 영업 비밀에 속하기에 관련 정보를 구하기가 어려운 반면에 공기업의 경우 정보공개 청구를 통해 발전소 운영실적에 대한 자료를 구할 수 있다. 따라서 한국지역난방공사가 운영하는 천연가스 열병합발전소를 대상으로 한다.

둘째, 여러 발전소 중에서 비교적 최근에 지어진 대규모 발전소를 대상

으로 하였다. 한국지역난방공사가 운영하는 천연가스 열병합발전소는 오래된 시설부터 최근에 지은 시설까지 다양한 편이다. 본 연구의 분석결과는 앞으로의 방향에 대한 시사점을 제공할 수 있어야 유용할 것인데 오래된 발전소와 유사한 발전소가 앞으로 설치되지는 않을 것이기 때문에 오래된 발전소는 고려하지 않는다. 현재 건설을 계획 중인 대부분의 천연가스 열병합발전소는 최신 설비를 사용하면서 용량이 제법 큰 편이므로 이와 여러 여건이 유사한 천연가스 열병합발전소를 대상으로 분석하는 것이 보다 나을 것이다.

2. 대체설비의 선정

천연가스 열병합발전의 2차 생성 $PM_{2.5}$ 저감효과를 산정하기 위해서는 불필요한 논란이 없는 방법론의 선정이 이뤄져야 한다. 이때 제일 중요한 것은 전기와 열을 생산하는 대체시설을 무엇으로 선정하느냐이다. 이와 관련하여 미국 환경청에서는 천연가스 열병합발전의 에너지 절감량 및 온실가스 배출 저감량을 산정할 수 있는 방법론을 개발하여 제시하였다(US EPA, 2015). 이 방법론은 기본적으로 Maldague(1984)에 근거하고 있는데, UNEP(2015) 및 Noussan et al.(2018)의 연구에서 적용된 바 있다. 본 논문에서는 미국 환경청이 제시한 방법론을 활용하되 국내 여건에 맞게 필요한 부분을 수정하고자 한다.

우선적으로 해야 할 작업은 전기와 열을 생산하는 대체설비를 정하는 것이다. 먼저 전기 생산의 대체설비를 정해야 하는데 이와 관련해서는 국내에서 발전량 비중이 가장 높은 발전원을 이용하는 방법, 한계발전기를 이용하는 방법, 발전원 믹스 실적치를 이용하는 방법, 한국전력공사의 화력발전원 믹스 실적치를 이용하는 방법의 4가지 대안이 있다. 각 방법의 장단점을 따져 보면서 적절한 방법을 선택하고자 한다.

첫째, 직관적으로 생각할 수 있는 방안은 발전량 비중이 가장 높은 발전원으로 전기를 생산하는 것인데 우리나라의 경우 발전량 비중이 40%에 달하는 석탄발전이 될 것이다. 가동중인 천연가스 열병합발전소가 사라진

다면 결국 발전량 비중이 제일 높은 발전원이 이를 대체할 것이라는 논리다. 한국개발연구원(2009, 2010)이 수행한 새만금 풍력사업 클러스터 조성사업 및 한국형 300MW IGCC 실증플랜트 기술개발사업의 예비타당성 조사에서 대기오염 저감효과를 산정하는 데 있어서 대체설비를 석탄 발전소로 상정한 바 있다. 하지만 이러한 접근 방식은 대체설비를 석탄발전으로 고정시켜 놓음으로써 실제로 발생하는 대기오염 저감효과를 과대평가할 수 있는 여지를 안고 있다.

둘째, 석탄발전으로 고정하는 것보다는 한계발전기 기준으로 효과를 산정하는 것이 더 나올 수 있다. 한계발전기란 계통한계가격(system marginal price)을 결정하는 발전기를 말한다. 전력수급 상황에 따라 그때그때 달라지는 한계발전기를 기준으로 삼는 것은 합리적일 수 있지만, 대체설비의 발전원이 상황에 따라 달라지므로 분석이 너무 복잡해지는 단점이 발생한다.

셋째, 우리나라의 현재 발전원 믹스를 고려하는 방법이 있다. 즉 천연가스 열병합발전으로 생산한 것과 동일한 양의 전기를 생산하는 데 있어서 석탄, 원자력, 천연가스, 석유, 신재생에너지 등의 발전원 구성비를 종합적으로 고려하여 대기오염물질 배출량을 산정하는 것이다. 우리나라 전체의 발전원 믹스를 고려한다는 점은 합리적이지만 실제로 이로부터 연료사용량 및 대기오염물질 배출량을 산정하는 것에는 어려움이 있다. 공기업 발전기의 경우 관련 자료를 어느 정도 구할 수 있는 반면에, 민간기업 발전기의 경우 관련 자료를 구하는 것이 만만치가 않다. 따라서 우리나라 전체의 발전원 믹스를 고려하기에는 어려움이 있다.

또한 원자력 발전은 한번 가동되면 멈추기 어려우며 한 번 멈추면 바로 가동하기 어려운 대표적인 경직성 전원으로 우리나라의 원자력발전소는 부하 추종이 불가능하기에, 원자력 발전과 천연가스 열병합발전이 대체관계에 있다고 보기는 어렵다. 태양광 및 풍력 발전과 같은 재생에너지는 간헐적이기에 천연가스 열병합발전이 가동되기 어려운 상황에서 전기를 생산하는 것으로 보기에 어려움이 있다.

신에너지인 연료전지는 당분간 보급 확대에 한계가 있어서 천연가스 열병합발전을 대체하기에는 어려움이 있다. 산업통상자원부(2019)에서 제시된 발전용 연료전지 보급목표는 2040년 기준 8 GW인데 현재 국내 발전용량은 110 GW에 달하며 앞으로 늘어날 것을 감안하면 발전용 연료전지의 역할은 제한적일 가능성이 크다. 수소발전은 기술개발의 한계 때문에 상용화까지는 제법 많은 시간이 걸릴 것으로 예상된다. 석탄을 연료로 하는 다른 신에너지인 IGCC 발전은 근본적으로 석탄발전소와 다를 바가 없다. 따라서 신재생에너지도 대체 발전기로 보기에는 어려움이 있다.

넷째, 마지막 대안으로 석탄, 천연가스, 중유를 연료로 하는 화력발전믹스를 한국전력공사 기준으로 반영하는 방식을 생각할 수 있다. 만약 천연가스 열병합발전소가 가동되지 못한다면 한국전력공사의 화력발전소가 가동률을 조정하는 형태로 대응할 것이기 때문이다. 아울러 한국전력공사의 발전 실적 및 대기오염물질 배출량 정보는 공개되어 있기에 이를 활용하기에도 편리하다. 이것은 미국 환경청(US EPA, 2015)이 활용한 방법과도 동일하다. 따라서 본 연구에서는 앞의 3가지 방법이 가진 한계 때문에 4번째 방법을 적용하고자 한다.

다음으로 열 생산의 대체설비를 결정해야 한다. 전술하였듯이, 우리나라는 천연가스 열병합발전소에서 생산된 열을 지역난방이라 불리는 개별수용가의 난방 및 급탕에서 사용하고 있다. 지역난방을 이용하지 않는다면 택할 수 있는 방식은 도시가스 개별난방이나 중앙난방이다. 물론 나무보일러, 연탄, 태양열, 전기난방 등을 활용할 수 있지만 보편적인 유형은 아니다. 석유제품을 주로 사용하는 중앙난방의 경우 신규 공급은 없으며 과도한 난방 및 급탕 비용 발생으로 2000년대 이후 지역난방이나 도시가스 개별난방으로 전환 중이다. 따라서 지역난방에 대한 대체 방식은 논란의 여지없이 도시가스 개별난방이라 할 수 있으며, 발전소 기준으로 본다면 도시가스 개별난방 보일러가 될 것이므로, 본 연구에서는 열 생산의 대체설비로 도시가스 개별난방 보일러를 이용한다.

한편 열 생산에 대한 대체설비로서 수소연료전지를 고려할 수도 있을

것이다. 하지만 이와 관련해서는 두 가지 난점이 있기에 천연가스 열병합발전의 열 생산에 대한 대체설비로 연료전지를 고려하지 않는다. 첫째, 수소연료전지에서 열이 생산되기는 하지만 열은 부수적으로 소량만 생산되므로 열병합발전처럼 난방 및 급탕의 열원으로 활용하기에는 제한적이라 열병합발전을 대체하는 것은 거의 불가능하다. 즉 열병합발전에서 생산되는 열을 공급시 연료전지로부터 발생하는 열을 일부 섞는 정도만 가능하다. 둘째, 연료전지에는 수소가 필요한데 이 수소를 생산하기 위해서는 천연가스를 개질해야 하며 이 과정에서 온실가스 등이 발생한다. 따라서 원하는 열량을 공급하기 위해서는 천연가스를 직접 활용하는 열병합발전이 보다 효율적이고 온실가스를 적게 배출한다. 반면에 천연가스를 개질하여 만든 수소를 활용하는 연료전지는 비효율적이고 더 많은 온실가스를 배출한다. 따라서 천연가스 열병합발전의 대체시설로 연료전지를 활용하기에는 어느 정도 제약이 있다. 연료전지에서 발생하는 열은 버리기 아까우므로 지역난방으로 회수하여 부분적으로 활용될 뿐이다.

3. 에너지 사용 절감량의 산정

2018년 한 해 동안 평가대상 천연가스 열병합발전에서 생산된 전기와 열을 생산하기 위해 사용된 천연가스의 양(A)은 한국가스공사로부터의 천연가스 구매실적 자료로부터 수집이 가능하며 이를 TOE 단위로 환산할 수 있다. 이 열병합발전소에서 생산한 것과 동일한 양의 전기를 생산하기 위해 사용된 연료(석탄, 천연가스, 증유)의 양(B)을 집계한 후 열량 환산계수를 적용하면 TOE 단위로 환산이 가능하다. 마찬가지로 동일한 양의 열을 개별난방 도시가스 보일러로 생산하기 위해 필요한 천연가스의 양(C)을 산정한 후 TOE 단위로 환산할 수 있다. 따라서 (B+C)에서 A를 차감하면 천연가스 열병합발전으로 인한 에너지 사용 절감량을 산정할 수 있다.

4. 대기오염물질 배출량의 산정

2차 생성 $PM_{2.5}$ 는 황산화물(SO_x) 및 질소산화물(NO_x)로부터 발생된다. 따라서 2차 생성 $PM_{2.5}$ 저감량을 산정하기 위해서는 우선 황산화물(SO_x) 및 질소산화물(NO_x)의 저감량을 산정할 필요가 있다. 기준이 되는 천연가스 열병합발전의 경우, 질소산화물(NO_x) 배출량은 대기오염물질 배출사업장에 부착하여 배출 현황을 24시간 실시간으로 관리하는 굴뚝 원격감시체계인 TMS(Tele-Monitoring System)를 통해 파악될 수 있다. 하지만 천연가스의 연소를 통해서 황산화물(SO_x)이 거의 배출되지 않기 때문에 황산화물(SO_x)은 TMS의 관리 대상이 아니다. 따라서 황산화물(SO_x) 배출량은 실적 자료가 아닌 국립환경과학원(2015)의 대기오염물질 배출계수를 활용하여 산정된다.

전기 생산 대체시설로부터의 대기오염물질 배출량을 산정하기 위해서는 국립환경과학원(2015)의 배출계수를 활용할 수 있다. 하지만 이 자료는 기본적으로 오염저감시설 전단 기준이므로 실제 배출량을 제대로 반영하지 못한다. 왜냐하면 대부분의 발전소는 탈질시설 및 탈황시설과 같은 오염저감시설을 갖추고 있기 때문이다. 발전소별로 오염저감시설의 효율이 다르므로 국립환경과학원(2015)에서는 오염저감시설 후단 기준의 배출계수는 제공하고 있지 않다. 따라서 한국전력공사(2019b)의 지속가능경영보고서를 활용하여 한국전력공사의 화력발전 믹스 실적치를 추정한다. 즉 한국수력원자력을 제외한 발전자회사 포함 한국전력공사의 황산화물(SO_x) 및 질소산화물(NO_x) 배출량(g)을 한국수력원자력을 제외한 발전자회사 포함 한국전력공사의 발전량(MWh)으로 나눠 배출계수(g/MWh)를 산정한 후 천연가스 열병합발전으로 생산한 전기의 양(MWh)에 곱하여 대기오염물질 배출량을 산정한다. 산정된 황산화물(SO_x) 및 질소산화물(NO_x)의 배출계수는 <표 1>에 제시되어 있다.

〈표 1〉 발전 부문 황산화물(SO_x) 및 질소산화물(NO_x)의 배출계수

항목	황산화물(SO _x)	질소산화물(NO _x)
한국전력공사 전체 발전량 기준 ^{주1)}	138(g/MWh)	177(g/MWh)
한국수력원자력 제외 한국전력공사 발전량 기준 ^{주2)}	209.6(g/MWh)	268.8(g/MWh)

주1) 자료원 : 한국전력공사(2019b)

주2) 발전공기업별 발전량 자료를 가지고 저자들이 산정

열 생산 대체시설로부터의 대기오염물질 배출량을 산정하기 위해서는 개별 보일러의 실적치를 이용하면 좋은데 이와 관련된 자료를 구할 수 없었다. 일반 보일러 대 콘덴싱 보일러에 따라 실적이 크게 다르며, 발전소의 경우 지속적인 보수 및 정비를 통해 오염저감시설이 제 성능을 유지하지만, 개별 가정에 있는 보일러의 경우 통상 보수 및 정비를 하지 않으므로 노후 보일러이나 신규 보일러이나에 따라 대기오염물질 배출량에서 큰 차이가 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 대안으로서의 〈표 2〉와 제시된 바와 같이 ‘대기환경보전법 시행규칙 [별표 10]’에 제시된 LNG(난방) 부문의 황산화물(SO_x) 및 질소산화물(NO_x) 배출계수를 활용한다. 개별 보일러의 경우 오염저감시설을 갖추고 있지 않으므로 〈표 2〉를 그대로 활용해도 무리가 없다.

〈표 2〉 난방 부문 황산화물(SO_x) 및 질소산화물(NO_x)의 배출계수

구분	단위	황산화물(SO _x)	질소산화물(NO _x)	먼지(Dust)
LNG(난방)	kg/천Nm ³	0.01	3.70	0.03
LNG(발전)	kg/천Nm ³	0.01	6.04	0.03

자료) 대기환경보전법 시행규칙 [별표 10] ‘배출시설의 시간당 대기오염물질 발생량 산정방법’

천연가스 열병합발전에서 생산한 전기 및 열과 동일한 양의 전기 및 열을 대체시설로 생산할 때의 연료 투입량 및 대기오염물질 배출량을 비교하는 과정을 지금까지 설명하였는데 이를 도식화하여 요약하면 〈그림 1〉과 같다. 자료가 신뢰할만하고 가용한 경우에는 실적치에 근거하고 이것이 여의치 않는 경우에는 공개된 자료 및 법령 등을 활용하여 필요한 정보를 추정하였다.

〈그림 1〉 천연가스 열병합발전과 대체설비의 비교 방법

천연가스 열병합발전		대체설비
열 생산설비	열+전기 동시 생산	개별 보일러
전기 생산설비		+ 한전 화석연료 발전원 믹스
투입 연료량	실적	열 : 추정, 전기 : 실적
대기오염물질 배출량	SOx : 추정, NOx : 실적	열 : 추정, 전기 : 실적

5. 2차 생성 PM_{2.5}의 산정

황산화물(SO_x) 및 질소산화물(NO_x)로부터 발생하는 2차 생성 PM_{2.5}의 양을 산정하는 것은 대단히 어려운 작업으로 이에 대한 국내 선행연구 사례를 찾을 수가 없었다. 오랜 기간 동안 충분히 축적된 자료와 복잡한 모델링을 통해서만 황산화물(SO_x) 및 질소산화물(NO_x)의 발생량으로부터 2차 생성 PM_{2.5}의 양을 산정하는 데 활용할 수 있는 전환계수를 추정할 수 있는 것으로 알려져 있다. 해외 사례에 대해서는 미국을 대상으로 한 Guerra et al.(2014)의 연구를 찾을 수 있었는데, 전환계수는 연구자에 따라 그리고 지역에 따라 다르다는 것이 중요한 결론이었다. 이 논문에서 전환계수를 몇 개 소개하고 있었지만 기상 및 기후 여건이 국내와 상이하기에 이를 그대로 적용하기에는 무리가 있다.

현재 환경부가 공식적으로 발표하고 있는 국가공식 통계로서의 2차 미세먼지 생성 추정량은 모두 임의의 전환계수를 이용해 산정된 것이다. 전환계수를 엄밀하게 구하는 것은 본 연구의 주된 목적도 아니며 환경정책 분야가 아닌 대기과학 분야에서 수행해야 할 과제이기도 하다. 따라서 본 연구에서는 환경부(2018)가 공식적으로 사용하고 있으면서 국가기후환경회의(2019)에서도 활용하고 있는 전환계수를 적용하고자 한다. 즉 황산화

물(SO_x) 및 질소산화물(NO_x)의 발생량에 <표 3>에 제시된 전환계수를 곱하면 2차 생성 PM_{2.5}의 발생량을 산정할 수 있다.

<표 3> 황산화물(SO_x) 및 질소산화물(NO_x)의 2차 생성 PM_{2.5} 전환계수

구분	황산화물(SO _x) ⇨ PM _{2.5}	질소산화물(NO _x) ⇨ PM _{2.5}
전환계수	0.345	0.079

자료) 국가기후환경회의(2019)

III. 분석결과

1. 분석대상 천연가스 열병합발전의 개요

본 연구에서 분석대상으로 삼은 것은 수도권에 입지한 800 MW급 천연가스 열병합발전소로 시간당 524 Gcal의 열과 757 MW 용량의 전기를 공급할 수 있다.³⁾ 이 발전소는 2017년말 준공되어 2018년부터 본격 가동되었다. 열 공급 권역 내에 공동주택 입주가 꾸준히 늘어나고 있어서 2018년에 비해 이후에는 운영실적이 보다 개선되어 환경 관련 실적도 더 개선될 여지가 있다. 2018년 한 해 실적을 살펴보면 약 46,000세대에 2,254,306 Gcal의 열을 공급했다. 전기는 약 5.5TWh를 생산했는데 이는 우리나라 전체 발전량에 1.0%를 차지하는 수준이다. 이 열병합발전소는 대표적인 분산형 전원으로서 수요지인 수도권에 전기를 안정적으로 공급하고 있다. 천연가스 사용량은 985,965천Nm³로 집계되었다.

2. 분석과정에 대한 추가적 검토

이 열병합발전소에서 생산된 열 만큼을 개별보일러로 생산할 때 필요한 연료 사용량을 산정하기 위해서는 추가적으로 검토할 사항이 2가지 있다.

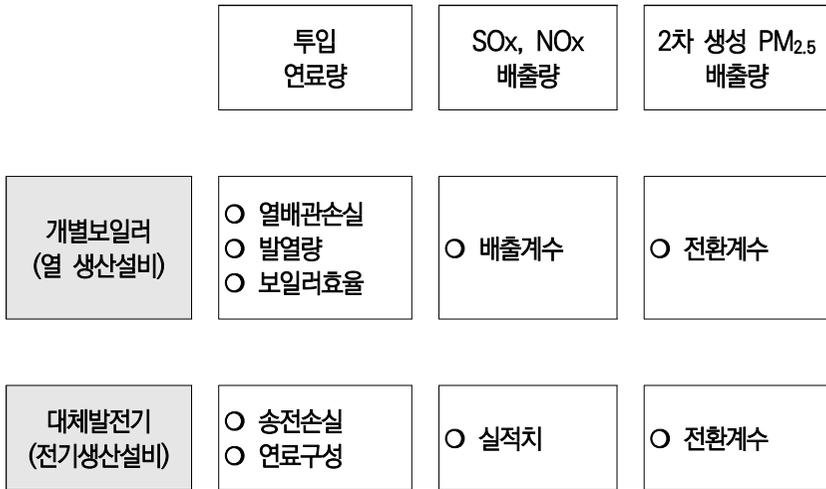
3) 이 발전소는 경제급전 원칙에 따라 전력시장에서 경쟁을 하고 있으며 세부 운영자료는 기업영업비밀의 영역에 속하는 것이라, 편의상 발전소의 실명은 언급하지 않는다.

첫째, 열수송 손실률을 감안해야 한다. 개별보일러는 덕내에 있어서 열 손실이 거의 발생하지 않지만 열병합발전소에서 생산된 열을 개별 수용가에서 소비하기 위해 수송할 때 열 손실이 발생하기 때문이다. 즉 개별 수용가에서 100만㎤의 열이 필요할 때 열병합발전소에서는 100 이상의 열을 생산해야 하기에, 열수송 손실률을 고려해야 한다. 이와 관련하여 본 연구에서는 신경아 등(2017)에 제시된 열수송 손실률 10%를 반영한다.

둘째, 개별 보일러의 효율을 감안하여 연료 사용량을 산정해야 한다. 즉 연료의 사용으로 생산된 열이 100% 활용되지는 못하고 일부는 대기 중으로 배출될 수 있다. 최근에는 기술 발전으로 개별보일러의 설계효율이 높은 반면에 오래된 보일러는 설계효율이 낮은 편이다. 게다가 설계효율이 높은 보일러라 하더라도 시간의 경과에 따라 효율은 떨어질 수 있다. 따라서 특정 효율을 일괄적으로 적용하기에는 어려운 면이 있다. 본 연구에서는 개별보일러의 효율과 관련하여 신경아 등(2017)의 연구에 제시된 87.2%를 적용한다. 이는 개별보일러를 이용시 원하는 열량을 얻기 위해 효율 손실분에 해당하는 12.8%만큼의 연료를 더 투입해야 함을 의미한다.

이 열병합발전소에서 생산된 전기만큼을 대체설비로 생산할 때 필요한 연료 사용량을 산정하기 위해서도 추가적으로 따져봐야 할 사항이 있다. 천연가스 열병합발전은 분산형 전원으로 송전선로가 필요없으므로 송전 손실이 발생하지 않지만, 대체발전기로서의 한국전력공사 발전기를 이용하게 되면 송전손실이 발생하기에 송전 손실률을 감안해야 한다. 이와 관련하여 한국전력공사(2019a)가 제공하고 있는 송전 손실률 1.59%를 적용한다. 즉 이것은 특정 전력 소비량을 만족시키기 위해서 한국전력공사는 1.59% 만큼 전기를 더 많이 생산해야 함을 시사한다. 이상의 검토사항을 반영하여 대체설비의 대기오염물질 배출량을 산정하는 과정은 〈그림 2〉에 요약되어 있다.

〈그림 2〉 대체설비의 대기오염물질 배출량 산정시 주요 고려사항



3. 분석결과

앞서 설명한 방법론 및 과정을 거쳐 열병합발전소, 개별보일러, 대체발전기의 에너지 사용량 및 열병합발전소의 에너지 절감량을 산정한 결과는 〈표 4〉에 제시되어 있다. 에너지 절감량은 510,242천TOE에 달한다. 이러한 에너지 절감량으로 인해 발생하는 산화물(SO_x) 및 질소산화물(NO_x)의 절감량은 〈표 5〉와 같이 산정된다. 황산화물(SO_x) 및 질소산화물(NO_x)의 절감량은 각각 1,170,757 kg 및 2,041,530 kg으로 합하면 3,212,287 kg에 달한다. 절감율을 각각 99.2% 및 87.0%에 달하며 둘을 합하면 절감율이 91.0%에 이른다.

〈표 4〉 열병합발전소, 개별보일러, 대체발전기의 에너지 사용량

구분	분석대상 천연가스 열병합발전소(A)	대체설비			에너지 절감량 (D-A)
		대체발전기 (전기, B)	개별보일러 (열, C)	합계(D=B+C)	
에너지 사용량 (천Nm ³)	980,965	-	225,932	-	-
에너지 사용량 (천TOE) ^{주)}	1,009,413	1,286,986	232,669	1,519,655	510,242

주) 에너지법 시행규칙 별표에 제시된 환산계수(1.029TOE=LNG(천Nm³))를 활용하여 산정하였다

〈표 5〉 열병합발전소, 개별보일러, 대체발전기의 대기오염물질 배출량

구분	분석대상 천연가스 열병합발전소(A)	대체설비			대기오염물질 배출 저감량(D-A)
		대체발전기 (전기, B)	개별보일러 (열, C)	합계 (D=B+C)	
황산화물(SO _x) (kg)	9,810	1,178,308	2,259	1,180,567	1,170,757 (99.2%)
질소산화물(NO _x) (kg)	306,392	1,511,308	836,614	2,347,922	2,041,530 (87.0%)
합계(kg)	316,202	2,689,615	838,874	3,528,489	3,212,287 (91.0%)

주) 괄호 안에 제시된 값은 절감률을 의미한다

이제 황산화물(SO_x) 및 질소산화물(NO_x)의 저감으로부터 발생하는 2차 생성 PM_{2.5}의 저감량을 구하고자 한다. 그 결과는 〈표 6〉에 제시되어 있다. 황산화물(SO_x) 기인 발생량 및 질소산화물(NO_x) 기인 발생량은 각각 403,911 kg 및 161,228 kg으로 총 저감량은 565,139 kg이다. 천연가스 열병합발전으로 인해 황산화물(SO_x) 및 질소산화물(NO_x) 기인 2차 생성 PM_{2.5}의 발생량이 95.3%나 저감된다는 것은 흥미로운 부분이다.

〈표 6〉 열병합발전소, 개별보일러, 대체발전기의 2차 생성 PM_{2.5}의 발생량

구분	분석대상 천연가스 열병합발전소(A)	대체설비			2차 생성 PM _{2.5} 저감량 (D-A)
		대체발전기 (전기, B)	개별보일러 (열, C)	합계 (D=B+C)	
황산화물(SO _x) 기인 발생량(kg)	3,384	406,516	779	407,296	403,911 (99.2%)
질소산화물(NO _x) 기인 발생량(kg)	24,205	119,393	66,040	185,433	161,228 (87.0%)
합계(kg)	27,589	525,909	66,819	592,729	565,139 (95.3%)

주) 괄호 안에 제시된 값은 저감률을 의미한다

마지막으로 2차 생성 PM_{2.5}의 저감량이 제공하는 사회적 편익을 화폐단위로 산정하고자 한다. 본 연구의 목적은 PM_{2.5}의 환경비용을 추정하는 것이 아니라 객관적이고 과학적인 자료에 근거하여 천연가스 열병합발전의 2차 생성 PM_{2.5}의 저감량을 산정하는 것이다. 따라서 PM_{2.5}의 환경비용 추

정을 무리하게 시도하기보다는 학계에서 인정받고 있는 선행연구사례를 잘 활용하여 천연가스 열병합발전의 2차 생성 PM_{2.5} 저감편익을 산정하는 것이 더 나을 것이다. 이와 관련하여 선행연구 사례를 살펴볼 필요가 있다.

구윤모 등(2018)은 발전 및 산업부문의 미세먼지 저감대책의 비용효과 분석 연구를 수행했는데, 미세먼지 배출량 단위별 환경비용을 구하지는 않았다. Kim et al.(2018c)은 도시지역의 PM_{2.5} 저감정책에 대한 공익적 가치를 추정하였다. Lvovsky et al.(2000)은 1993년 기준 세계 6개 도시 대상 PM₁₀으로 인한 피해비용을 추정했는데 건강 관련 비용은 1,923백만 달러, 건강외 비용은 414백만달러로 평가하였다. 하지만 이 두 연구 모두 마찬가지로 배출량당 환경비용을 추정하지는 않았다. 기타 해외를 대상으로 PM_{2.5} 한 단위 배출의 환경비용을 추정한 연구사례들은 여기저기 소개되어 있다(한국환경정책·평가연구원, 2013; 강유진 등, 2018; 한국조세재정연구원, 2018). 하지만 우리나라를 대상으로 한 연구사례들은 아니며 해외에 대한 연구결과를 환율 정도로 보정한 내용을 담고 있어서 활용에 있어서 제한적이다.

한편 Parry et al.(2014)는 많은 국가에 대해 미세먼지를 포함한 대기오염물질의 환경비용을 직접 평가하여 그 결과를 제시하였다. 여기에는 우리나라를 대상으로 한 PM_{2.5} 한 단위 배출의 환경비용 추정결과도 담겨 있다. 특히 교통수단과 같이 도로면 기준에서 발생하는 PM_{2.5}의 환경비용과 높은 굴뚝을 가진 발전소 기준에서 발생하는 PM_{2.5}의 환경비용을 구분하여 추정한 결과를 제시함으로써 분석결과의 엄밀성을 확보하고자 하였다. 아울러 해당 국가의 인구밀도, 기상 및 기후 여건도 고려하여 국가별로 차별화된 PM_{2.5}의 환경비용 정보를 제공하고 있다.

따라서 한국개발연구원(2019)에서는 정부 재정사업 및 공공부문 사업의 타당성 조사를 수행하는 데 있어서 PM_{2.5}의 환경비용 값으로 활용할 수 있도록 Parry et al.(2014)의 연구결과를 적절하게 조정한 값 66,352(원/kg)을 제시하면서 다소 보수적인 접근을 위해 별도의 물가 보정없이 이 값을 사

용할 것을 지침으로 밝힌 바 있다. 이에 본 연구에서는 이 값을 그대로 활용하고자 한다. 평가대상 천연가스 열병합발전의 2차 생성 PM_{2.5} 저감편익은 2018년 한 해 기준으로 37,498천원(=565,139 kg×66,352(원/kg))으로 분석된다.

4. 분석결과에 대한 논의

천연가스 열병합발전은 서로 대체관계에 있으면서 국내에서 최대 비중을 차지하고 있는 유연탄 화력발전에 비해 대략 1/30 수준의 1차 PM_{2.5}를 배출하고 있는 것으로 알려져 있다. 특히 서울시에 따르면 서울에서 가장 많은 미세먼지를 내뿜는 건 경유차나 산업체가 아니라 가정용 보일러로 조사되었다. 15년 된 노후 보일러에서 배출하는 질소산화물(NOx)이 문제인데 서울 시내 가정용 보일러 360여만 대 중 36%에 해당하는 130만대 가량이 10년이 넘는 노후 보일러이다. 이들 노후 보일러를 천연가스 열병합발전에서 생산되는 지역난방 열로 교체하면 서울시의 미세먼지 문제는 크게 개선될 수 있는 것이다. 이에 서울시는 마곡지구에 대용량 천연가스 열병합발전소의 건설을 추진하고 있다.

한편 에너지전환의 모범국가라 할 수 있는 독일 및 덴마크는 재생에너지의 확대와 더불어 열병합발전도 함께 늘리고 있다. 그 외 유럽 대부분의 국가, 미국, 가까운 일본 및 중국도 천연가스 열병합발전 확대를 천명하고는 실제로 천연가스 열병합 발전을 확대하고 있다. 물론 우리나라도 예외는 아니다. 그 이유는 몇 가지 점에서 열병합발전이 완전한 에너지전환 사회로 가기 위한 중간단계에서 확대되어야 할 가교 에너지(bridge energy)로서의 역할을 수행할 수 있기 때문이다.

첫째, 재생에너지가 급격하게 늘어나면 비용 문제는 차치하더라도 간헐성으로 인해 전력계통 안정성을 위협하는데 이때 계통 안정성을 확보해 줄 수 있는 유력한 수단이 열병합발전이다. 열병합발전은 기상 여건으로 태양광이나 풍력발전의 출력이 저하시 즉각 기동이 가능하기 때문이다. 둘째, 천연가스 열병합발전은 석탄화력발전에 비해 온실가스 저감효과가

탁월하기에 석탄화력발전을 대체할 수 있는 유력한 발전원이다. US EPA(2015) 및 한국지역난방공사(2019)에 따르면 천연가스 열병합발전의 온실가스 저감효과는 50%에 달한다. 셋째, 열병합발전은 송전선로가 필요 없는 대표적인 분산형 발전원이기에 수요지에 멀리 떨어진 곳에 대규모로 개발되고 있는 해상풍력 단지, 폐염전 부지의 태양광발전 단지의 문제점을 보완해 줄 수 있다.

한국에너지공단(2019)에 따르면, 2018년을 기준으로 할 때 우리나라의 천연가스 열병합발전은 전체 발전량의 5.4% 및 전체 주택 지역난방 수요의 9.6%를 담당하고 있다. PM_{2.5}의 저감을 위해 열과 전기를 생산하는 데 있어서 천연가스 열병합발전의 비중을 높이는 방안을 고려할 수 있다. 만약 천연가스 열병합발전이 2차 생성 PM_{2.5}을 줄일 수 있다면 천연가스 열병합발전을 늘리는 것이 바람직할 것이기 때문이다.

앞에서의 분석결과로부터 얻은 중요한 발견은 천연가스 열병합발전의 2차 생성 PM_{2.5} 저감효과 및 저감편익이 결코 작지 않다는 점이다. 이것은 천연가스 열병합발전을 확대하고자 하는 정책이 합리적일 수 있음을 시사한다. 특히 산업통상자원부(2019)는 제3차 에너지기본계획에서 2017년 12%에 불과한 분산에너지의 발전량 비중을 2040년까지 30%로 늘리겠다고 천명했는데 여기서 천연가스 열병합발전이 핵심적인 역할을 수행할 수밖에 없음을 감안할 때 본 연구의 발견은 정부의 이러한 정책을 뒷받침해 주는 의의를 가진다. 특히 인체 유해성이 큰 2차 생성 PM_{2.5}에 대한 정책적 관심이 최근에 시작된 점을 감안할 때 관련 연구사례가 부족한 현재의 상황에서 본 연구는 파일럿 연구로서의 의의도 가진다.

IV. 결론 및 시사점

본 연구의 주된 목적은 천연가스 열병합발전의 2차 생성 PM_{2.5} 저감효과를 추정한 후 그 편익을 화폐적 단위로 산정하는 것이다. 이를 위해

2017년말에 완공되어 가동 중인 수도권 소재 열병합발전소의 2018년 실적을 사용하였다. 저감효과를 추정하는 데 있어서 최대한 공개된 실적자료를 이용하고자 했으며, 객관적이고 과학적인 근거를 확보한 자료만 사용하고자 하였다. PM_{2.5}의 환경비용도 무리하게 추정하거나 근거가 약한 값을 사용하기보다는 비교적 최근에 국제통화기금에서 우리나라를 대상으로 연구한 결과를 사용하였다. 즉 본 연구에서는 무리하게 새로운 값을 창조하기보다는 객관성, 과학성, 학술적 완성도를 확보한 자료들을 종합하여 시사점을 도출함으로써 연구 목적을 달성하고자 하였다. 이런 점에서 본 논문은 정책적인 의의뿐만 아니라 연구적인 의의도 가진다고 판단된다.

본 논문은 천연가스 열병합발전을 확대하고자 하는 정부의 정책이 2차 생성 PM_{2.5}의 저감이란 관점에서 바람직함을 확인하였다. 물론 2차 생성 PM_{2.5}의 저감이 천연가스 열병합발전 확대의 가장 중요한 동인은 아니지만 다양한 정책적 목표를 달성하기 위한 천연가스 열병합발전의 확대가 PM_{2.5}의 저감이란 관점에서 의의가 있음을 확인한 것은 본 연구의 중요한 정책적 성과라 할 수 있다. 더 나아가 천연가스 열병합발전의 사회적 편익을 규명한다는 점에서 2차 생성 PM_{2.5} 저감의 경제적 편익도 추정하였다. 이 정보는 향후 천연가스 열병합발전 건설사업의 타당성 분석에서 편익에 대한 정량적 정보로 활용됨으로써 사업 추진 여부에 대한 의사결정을 지원할 수 있을 것이다.

본 논문은 연구적인 측면에서도 의의를 가진다. 첫째, 천연가스 열병합발전의 2차 생성 PM_{2.5} 저감효과를 산정하기 위한 분석틀을 정립하였다. 전기와 열을 생산하는 대체설비를 우리나라의 여건에 맞게 설정하면서 분석과정에서 요구되는 정보의 객관적인 선정 방식 및 자료원을 정리하였다. 특히 열배관 손실, 보일러 효율, 송전손실 등도 엄격하게 반영함으로써 분석결과의 엄밀성을 기하고자 하였다. 따라서 본 연구에서 제시한 분석틀은 다른 열병합발전을 사례로 하는 후속연구에서 유용하게 활용될 수 있을 것이다. 둘째, 2차 생성 PM_{2.5} 저감효과를 물리적으로 산정하는 데서

한 단계 더 나아가 화폐단위로 저감편익을 산정하였는데, 마찬가지로 이 산정과정은 후속연구에서 활용될 수 있다.

본 연구의 후속작업으로서 몇 가지 고민은 다음과 같다. 첫째, 본 연구에서는 국내에서 가장 큰 최신 천연가스 열병합발전소 1기를 대상으로 실증분석을 했는데, 이 구도를 우리나라 전체 열병합발전소로 확대할 필요가 있다. 그렇다면 우리나라 전체에 대해 천연가스 열병합발전의 역할을 규명할 수 있을 것이다. 이렇게 하기 위해서는 천연가스 열병합발전을 운영하고 있는 수십 개의 민간기업에 대해서도 객관성을 확보한 자료를 수집할 수 있어야 한다. 둘째, 본 연구에서는 천연가스 열병합발전의 대체설비로 한국전력공사 화력발전 믹스와 개별 보일러를 이용했는데 향후 재생에너지의 보급 확대에 따라 에너지전환 정책의 성과를 고려하여 다양한 대체설비를 대안으로 삼아 추가적인 분석을 수행할 수 있을 것이다. 예를 들어, 태양광 및 풍력을 활용한 전기와 열의 생산, 미이용 산림자원 등 바이오매스를 활용한 전기와 열의 생산, 수소연료전지를 활용한 전기와 열의 생산과 비교한다면, 천연가스 열병합발전의 환경적 효과가 발전원 믹스 변동에 따라 어떻게 변화하는지를 파악할 수 있어서 새로운 시사점을 얻을 수 있다. 셋째, 국내를 대상으로 한 분석결과와 해외의 천연가스 열병합발전소에 대한 분석결과를 비교함으로써 우리의 경쟁력을 분석하고 약점 및 강점을 도출할 수 있을 것이다. 다양한 후속 연구가 수행되길 기대한다.

■참고문헌■

- 강유진·김유미·문난경, 2018, “환경영향평가를 통한 화력발전소의 환경개선 효과와 사회적 편익,” 『환경영향평가』, 27(3), pp.322-333.
- 구윤모·신정우·이미숙, 2018, “발전 및 산업부문 미세먼지 저감대책의 비용효과분석 연구,” 『산업경제연구』, 31(1), pp.347-367, DOI: 10.22558/jieb.2018.02.31.1.347.
- 국가기후환경회의, 2019, 『국가기후환경회의 국민정책제안: 국민이 만든 미세먼지 대책』, 서울: 국가기후환경회의.

- 국립환경과학원, 2015, 『대기오염물질 배출계수 : 2012년 대기오염물질 배출량 기준』, 인천: 국립환경과학원.
- 김민경·차영욱·이소림·유은철, 2015, “부산지역 미세먼지 중 2차 생성 기여도 평가 연구,” 『보건환경연구원보』, 24(1), pp.146~160.
- 김수인·원두환, 2018, “대기질 개선으로 인한 조기 사망률 감소의 편익 추정,” 『환경정책』, 26(4), pp.45-69, DOI: 10.15301/jepa.2018.26.4.45.
- 김용하·문정호·연준희·정현성·우성민·김미예, 2007, “전력수급기본계획에 열병합발전 설비 반영시의 효과분석에 관한 연구,” 『에너지공학』, 16(1), pp.22-31.
- 대기환경보전법 시행규칙, 2020.1.1, 환경부령 제817호.
- 민서현·최효연·유승훈, 2015, “집단에너지 열병합발전의 온배수 저감편익 추정 - 석탄 화력발전과의 비교를 중심으로,” 『에너지공학』, 24(4), pp.223-231.
- 산업통상자원부, 2019, 『제3차 에너지기본계획(2019-2040)』, 세종: 산업통상자원부.
- 신경아·동종인·강재성·임용훈·김다혜, 2017, “열병합 발전을 이용한 집단에너지사업의 온실가스 감축효과,” 『Journal of Climate Change Research』, 8(3), pp.213-220, DOI: 10.15531/KSCCR.2017.8.3.213.
- 여민주·김용표, 2019, “우리나라 미세먼지 농도 추이와 고농도 발생 현황,” 『한국대기환경학회지』, 35(2), pp.249-264.
- 이동규·성재훈, 2018, “노후 석탄화력발전소 가동중단에 따른 발전소 주변지역의 초미세먼지 농도 감소효과 분석,” 『자원·환경경제연구』, 27(2), pp.315-337, DOI: 10.15266/KEREA.2018.27.2.315.
- 이수지·김호, 2019, “미세먼지가 건강에 미치는 영향,” 『국토』, 6, pp.42-48.
- 전의찬·김정욱, 1990, “대기오염 방지대책으로서 지역난방의 효과분석에 관한 연구,” 『한국대기환경학회지』, 6(1), pp.51-56.
- 한국개발연구원, 2009, 『2009년도 예비타당성조사 보고서: 새만금 풍력사업 클러스터 조성사업』, 서울: 한국개발연구원.
- _____, 2010, 『2010년도 예비타당성조사 보고서: 한국형 300MW급 IGCC 실증플랜트 기술개발사업』, 서울: 한국개발연구원.
- _____, 2019, 『2019년 제2차 공기업·준정부기관 사업 예비타당성조사 착수 회의자료』, 서울: 한국개발연구원.
- 한국에너지공단, 2019, 『2019 집단에너지사업편람(2018년 실적)』, 울산: 한국에너지공단 분산에너지실.
- 한국전력공사, 2019a, 『2018년 한국전력통계』, 나주: 한국전력공사 경영혁신처.
- _____, 2019b, 『2019년 지속가능경영보고서』, 나주: 한국전력공사 기획처 전략기획부.
- 한국조세재정연구원, 2018, 『발전용 에너지 제세부담금 체계 합리적 조정방안 연구』, (최종보고서), 세종: 기획재정부.

- 한국지역난방공사, 2019, 『신기후체제 대응 및 신재생에너지 확대보급에 따른 열병합 발전의 역할강화 및 제도개선(안) 도출 연구』, 분당: 한국지역난방공사.
- 한국환경정책·평가연구원, 2013, 『동북아 대기오염 전망을 고려한 국내 석탄화력발전 증설의 대기질 영향분석』, (정책보고서; 2013-14), 서울: 한국환경정책·평가연구원.
- 환경부, 2016, 『바로 알면 보인다. 미세먼지, 도대체 뭘까?』, 세종: 환경부 대변인실.
- _____, 2018.11.15., “올해 3~6월 노후 석탄발전소 가동중단, 충남 초미세먼지 저감효과 컸다,” 보도자료.
- _____, 2019, 『미세먼지 팩트 체크 미세먼지! 무엇이든 물어보세요』, 세종: 환경부.
- Afifi, S. N., M. G. Hassan, and A. F. Zobaa, 2012, “How market regulatory framework and policy affected the CHP development in meeting 2010 targets in the UK,” *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 7(4), pp.331-338, DOI: 10.1080/15567240903502552.
- Agrell, P. J. and P. Bogetoft, 2005, “Economic and environmental efficiency of district heating plants,” *Energy Policy*, 33(10), pp.1351-1362, DOI: 10.1016/j.enpol.2003.12.011.
- Altieri, K. E. and S. L. Keen, 2019, “Public health benefits of reducing exposure to ambient fine particulate matter in South Africa,” *Science of The Total Environment*, 684(20), pp.610-620, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.355.
- Beith, R., 2011, *Small and micro combined heat and power (CHP) systems: Advanced design, performance, materials and application*, Cambridge: Woodhead Publishing Ltd.
- Bianchi, M., L. Branshini, A. D. Pascale, and A. Peretto, 2014, “Application of environmental performance of CHP systems with local and global approaches,” *Applied Energy*, 130, pp.774-782, DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.04.017.
- Guerra, S. A., S. R. Olsen, and J. J. Anderson, 2014, “Evaluation of the SO₂ and NO_x offset ratio method to account for secondary PM_{2.5} formation,” *Journal of the Air & Waste Management Association*, 64(3), pp.265-271, DOI: 10.1080/10962247.2013.852636.
- Kim, H. J., J. H. Kim, and S. H. Yoo, 2018a, “Do people place more value on natural gas than coal for power generation to abate particulate matters emissions? Evidence from South Korea,” *Sustainability*, 10, 1740, DOI: 10.3390/su10061740.
- Kim, J. H., H. J. Kim, and S. H. Yoo, 2018b, “The public value of reducing the PM_{2.5} concentration in South Korean urban area,” *Sustainability*, 10, 1144, DOI:

10.3390/su10041144.

- Kim, G. E., H. J. Lee, and S. H. Yoo, 2018c, "Willingness to pay for substituting coal with natural gas-based combined heat and power in South Korea: A view from air pollutants emissions mitigation," *Sustainability*, 10, 1554, DOI: 10.3390/su10051554.
- Li, T., R. Hu, C. Zi, Q. Li, S. Huang, and Z. Zhu et al., 2018, "Fine particulate matter (PM_{2.5}): The culprit for chronic lung diseases in China," *Medicine*, 4(3), pp.176-186, DOI: 10.1016/j.cdtm.2018.07.002.
- Lvovsky, K., G. Hughes, D. Maddison, B. Ostro, and D. Pearce, 2000, *Environmental costs of fossil fuels - A rapid assessment method with application to six cities*, Washington DC. USA: The World Bank.
- Maldague, P. E., 1984, "Combined heat and power (CHP) vs separate heat and power (SHP) generation for primary energy conservation," *Heat Recovery Systems*, 4(5), pp.337-340, DOI: 10.1016/0198-7593(84)90048-1.
- Noussan, M., M. Jarre, R. Roberto, and D. Russolillo, 2018, "Combined vs separate heat and power production - Primary energy comparison in high renewable share contexts," *Applied Energy*, 213, pp.1-10, DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.01.026.
- Parry, I, D. Heine, E. Lis, and S. Li, 2014, *Getting energy prices right : From principle to practice*, Washington DC. USA: International Monetary Fund.
- United Nations Environment Programme (UNEP), 2015, "District energy in cities: Unlocking the potential of energy efficiency and renewable energy," <http://europa.eu/capacity4dev>, [2019.9.26]
- United States Department of Energy and Environmental Protection Agency (US DOE and EPA), 2012, "Combined heat and power: A clean energy solution," <http://www.doe.gov>, [2019.9.26]
- United States Environmental Protection Agency (US EPA), 2015, "Fuel and carbon dioxide emissions savings calculation methodology for combined heat and power systems," <http://www.epa.gov>, [2019.9.26]

임슬예: 한국지역난방공사 미래개발원 선임연구원으로 재직 중이며 주요관심분야는 에너지환경경제 및 정책, 비시장재화의 가치평가 등이다(sylim@kdhc.co.kr).

김주희: 서울과학기술대학교 에너지환경대학원 에너지정책학과 박사과정 재학 중이며, 주요 관심 분야는 에너지환경경제 및 정책 등이다(jhkim0508@seoultech.ac.kr).

유승훈: 서울대학교 기술경영경제정책 대학원과정에서 경제학 박사학위를 취득하고 현재 서울과학기술대학교 에너지환경대학원 에너지정책학과 교수로 재직 중이다. 주요 관심 분야는 에너지환경경제 및 정책, 수자원관리, 해양 정책, 기술경제학 등이다(shyoo@seoultech.ac.kr).

투 고 일: 2020년 01월 30일
심 사 일: 2020년 02월 15일
게재확정일: 2020년 03월 16일