

미세먼지 계절관리제로 인한 발전사별 전력생산량 변화 분석[†]

김부권* · 원두환**

요약 : 미세먼지 계절관리제는 미세먼지 고농도 시기인 겨울철에 수송, 발전, 산업, 생활 부문에서 강화된 저감 조치를 시행하는 정책을 말한다. 미세먼지 계절관리제는 규제정책으로 사회적 비용을 발생시키고, 다양한 경제주체에게 전가가 된다. 비용부담에 있어서 형평성은 중요한 문제이다. 따라서 본 연구에서는 발전 부문의 비용이 균등하게 배분되는지 확인하기 위해 각 발전사의 석탄발전 저감량을 이용해 발전사별 비용을 분석하였다. 특히, 정책의 시간가변효과를 파악할 수 있는 합성대조법을 적용해 미세먼지 계절관리제가 발전사의 석탄발전량에 미치는 효과를 분석하였다. COVID-19 사태로 인해 일부 전력 수요가 감소한 효과를 감안하더라도 미세먼지 계절관리제가 석탄발전소의 연료 사용량, 발전량을 감소시켜 발전 부문의 비용 증가가 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 이러한 비용은 발전사별로 균등하게 배분되지 않고, 특정 발전사에 가중되는 것을 확인할 수 있었다. 미세먼지 계절관리로 인해 발생하는 사회적 비용이 이해관계자들에게 형평성 있게 부담되도록 개선할 필요가 있다.

주제어 : 미세먼지 계절관리제, 합성대조법, 발전사 기회비용

JEL 분류 : L1, D4, Q3

접수일(2021년 8월 12일), 수정일(2021년 9월 3일), 게재확정일(2021년 9월 6일)

[†] 이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

* 부산대학교 경제학과, 박사과정, 제1저자(e-mail: kimbk8824@pusan.ac.kr)

** 부산대학교 경제학과, 교수, 교신저자(e-mail: doohwan@pusan.ac.kr)

Analysis of Changes in Power Generation of Each Power Generation Company by the Fine-Dust Seasonal Management System[†]

Bu-Kwon Kim* and Doo Hwan Won**

ABSTRACT : The fine-dust season management system refers to the policy of implementing enhanced reduction measures in transportation, power, business and living sectors in winter, when fine dust levels are high. The fine dust season management system is a regulatory policy that causes social costs and transfers to various economic players. Equity is an important issue for the cost burden. Therefore, in this study, the cost of each power generator was analyzed using the coal power generation reduction amount of each power generator to verify that the cost of the power sector is evenly distributed. In particular, the effect of the fine dust season management system on coal power generation of power generators was analyzed by applying a synthetic control method that can identify the time-variable effect of the policy. It was confirmed that the fine dust season management system reduced volume of fuel and power generation in coal power plants, resulting in an increase in the cost of the power generation sector, even considering the effect of some power demand due to the COVID-19 crisis. However, it could be seen that these costs were not distributed equally among the generators, and that they were more costly to the specific generators. Social costs incurred by fine dust season management need to be improved so that stakeholders are equally burdened.

Keywords : The fine-dust season management system, Synthetic control method, Opportunity cost for power generators

Received: August 12, 2021, Revised: September 3, 2021, Accepted: September 6, 2021.

[†] This work was supported by a 2-Year Research Grant of Pusan National University.

* Ph.D. Candidate, Department of Economics, Pusan National University, First author(e-mail: kimbk8824@pusan.ac.kr)

** Professor, Department of Economics, Pusan National University, Corresponding author(e-mail: doohwan@pusan.ac.kr)

1. 서론

기후변화와 미세먼지 문제 등 국제사회는 다양한 환경문제에 직면해 있다. 환경문제는 개별 국가를 넘어 범지구적인 문제이므로 전 세계가 함께 공동체 의식을 갖고 해결해야 한다(Nordhaus, 2019). 이에 세계 각국은 기후위기 대응을 위해 국제협력¹⁾을 강화하고 있다. 한국도 국제사회의 일원으로서 환경문제에 대한 중장기 대책을 마련하고, 기후위기 대응능력과 국제공조를 강화하고 있으며, 정부는 이러한 기후환경정책의 일환으로 미세먼지 계절관리제를 시행하고 있다. 미세먼지 계절관리제는 미세먼지 고농도 시기인 12월부터 3월까지 수송, 발전, 산업, 생활부분에서 발생하는 미세먼지를 저감하기 위한 고강도 정책을 말한다(국가환경회의, 2020). 미세먼지 계절관리제가 도입된 계기는 2019년 3월에 발생한 재난수준의 고농도 미세먼지 발생 때문이었는데, 정부는 범국가적 미세먼지 대응과 기후변화 및 국제협약 이행을 위해 「국가기후환경회의」 출범과 함께 미세먼지 계절관리제를 2019년 12월부터 시행하였다.

미세먼지는 배출원에서 직접 배출되는 1차 생성과 화학반응을 통해 생성되는 2차 생성의 특성을 가지고 있다. 따라서 미세먼지 분석을 진행하는 경우 다양한 요인을 복합적으로 고려해야 한다(남기표 외, 2018). 한국은 외부적 요인으로 계절풍에 의해 중국 발 미세먼지가 유입되고 내부적 요인으로 수송, 발전, 산업, 생활 각 부문에서 미세먼지가 복합적으로 발생하고 있다. 그러나 외부적 요인은 불가항력적인 기상영향으로 인해 통제하기 어렵기 때문에 정부는 내부적 요인에서 발생하는 미세먼지 저감을 목표로 하고 있다. 다양한 내부적 미세먼지 배출원 중에서 발전 부문의 관리는 필수적이다. 국내 전력의 40.4%가 석탄발전으로 생산되고 있고, 석탄발전 과정에서 많은 미세먼지가 발생하기 때문에, 발전 부문에 대한 미세먼지 계절관리 대책은 석탄발전의 가동을 낮추고 보다 친환경적인 대체연료를 이용하여 발전을 하는 것에 중점을 두고 있다. 그러나 발전 부문에 대한 정책 적용은 전력믹스, 국내 전력 수요, 그리고 각 발전사의 손익구조 등에도 영향을 미칠 수 있기 때문에 미세먼지 계절관리제가 발전 부문에 미치는 효과에 대해서

1) 에너지의 친환경적 생산과 소비, 기후변화 대응, 지구촌 협력강화 등 17개의 Sustainable Development Goals(SDGs)을 세계 공동의 목표로 설정하고 있으며(Assembly, 2015), 지구의 평균 온도 상승 폭을 2100년까지 산업화 시기 이전에 비해 2℃ 이내로 유지하기 위해 온실가스를 감축하는 국제파리협정에 합의하는 등 기후 대응에 대한 국제협력이 강화되고 있다.

다양한 분석이 필요하다(박순애·신현재, 2017).

본 연구에서는 미세먼지 계절관리제로 인해 각 발전사들의 발전원별 전력생산 변화에 대해서 검토하고, 석탄을 이용한 전력생산량 변화를 분석하고자 한다. 미세먼지 계절관리제의 목표는 국내 석탄발전으로부터 발생하는 미세먼지의 피해를 최소화하는데 있다. 그러나 우리나라의 석탄 화력발전소는 해안선을 따라 전국적으로 분포하고 있고, 겨울철에는 북서풍이 주류를 이루고 있어서(Mori et al., 2003), 남해나 동해에 위치하는 석탄발전소에 대한 규제는 큰 효과를 못 볼 가능성이 있다. 따라서 석탄발전소에 대한 일률적인 규제 적용은 사회적인 비효율을 발생시킬 가능성이 있다. 또한 미세먼지 계절관리제의 적용으로 인하여 발생하는 각 발전사의 부담의 격차가 존재한다면, 형평성에 대한 논란이 있을 수 있고, 특정 발전사의 재무적 부담으로 이어질 수 있기 때문에 이에 대한 검토가 필요하다. 본 연구에서는 미세먼지 계절관리제로 인하여 각 발전사들이 저감한 석탄발전량을 살펴봄으로서 미세먼지 계절관리제의 형평성과 유연한 적용에 대해서 논의하고자 한다.

다양한 요인들이 각 발전사의 석탄발전량에 영향을 미칠 수 있기 때문에 미세먼지 계절관리제가 발전사별 석탄발전량에 미치는 영향을 정확히 추정하기 어렵다. 먼저, 석탄발전량의 감소는 미세먼지 계절관리제 효과 이외에도 COVID-19로 인한 전력수요 감소, 전력믹스 변화 등 다양한 요인에 영향을 받고 있다. 또한, 석탄발전량의 변화는 무작위적 요소가 아닌 경제적 상황 및 에너지 가격 변화에 따라 결정된다. 이러한 경우 미세먼지 계절관리제에 따라 석탄발전량의 변화를 정확히 파악하기 어렵다. 이에 본 연구는 이러한 문제를 해결하기 위해 합성대조법(synthetic control method)을 이용하였다. 일반적으로 정책에 대한 효과를 분석하는 경우 이중차분법(difference-in difference)을 이용한다(Doudchenko and Imbens, 2016). 그런데 이중차분법은 처치군의 구성이 무작위적 요소만 존재해야 추정이 유효하다. 반면, 합성대조법은 무작위 조건을 완화할 수 있으며, 제한된 자료를 이용해도 편의 없이 추정할 수 있으며, 모든 통제군의 자료를 이용해 계산된 가중평균으로 가상의 대조군을 설정하기 때문에 개별 특성으로 인한 내생성 문제를 완화할 수 있다(Abadie et al., 2010). 따라서 본 연구에서는 이러한 점을 고려해 미세먼지 계절관리제가 발전사의 석탄발전량에 미치는 효과를 합성대조법을 이용해 추정하고자 한다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 미세먼지와 관련된 선행연구를 살펴보고, III 장에서는 미세먼지 계절관리제로 인한 발전 부문의 현황을 살펴본다. IV 장에서는 미세먼지 계절관리제의 발전사별 석탄발전량 효과를 살펴보기 위한 자료 및 모형의 설정을 살펴보고, V 장에서는 미세먼지 계절관리제로 인한 발전사의 석탄발전량 추정결과를 제시한다. VI 장에서는 추정된 결과를 바탕으로 시사점을 도출한다.

II. 선행연구

미세먼지와 관련된 정책평가 중 대기질 개선효과에 대한 정량적 연구는 많지만, 미세먼지 정책이 발전사에 미치는 영향에 대한 분석은 많지 않다. Jung et al.(2019)은 공간계량분석(spatial analysis)을 이용해 한국의 도시구조와 환경오염원 사이의 관계를 분석하였다. 분석결과 공원과 도로를 제외한 인구, 상업지구, 산업지구, GRDP는 지역의 환경오염에 부정적인 영향을 미치는 주요 오염원임을 확인하였다. 박호정·홍종호(2014)는 실물옵션 모형을 이용해 노후화된 수도권 경유차량에 대한 저감 사업의 경제성 분석을 하였는데, 분석결과 저감 사업으로 인해 대기의 질이 충분히 개선되어 경제성이 확보되는 것으로 나타났으며, 차량 종류에 따라 저감장치를 구분하여 장착할 경우 정책의 효과가 더 큰 것으로 보고하였다. 이동규·성재훈(2018)은 이중차분법(DID)을 적용해 30년 이상의 노후 석탄발전소 가동중단에 따른 발전소 주변지역의 초미세먼지 농도 감소효과를 분석하였다. 분석결과 노후 석탄발전소의 가동은 초미세먼지 발생에 직접적인 영향을 미치고 이에 따라 노후 석탄발전소의 가동으로 인한 사회적 비용이 증가한다는 것을 발견하여, 노후 석탄발전소 가동 중단으로 인한 사회 후생 증가가 매우 클 것으로 예측하였다. He and Jiang(2021)은 2007년부터 2017년까지 기간을 설정하고 이중차분모형을 이용해 차량 구매제한 정책이 중국의 주요 6개 도시의 미세먼지 농도에 미치는 영향을 분석했다. 차량구매제한 정책이 적용되는 지역은 규제를 받지 않는 지역에 비해서 미세먼지 농도가 현저히 낮아졌으며, 정책 시행 3년 이후가 가장 효과가 크다는 것을 보고하였다. Chiesa et al.(2014)은 이탈리아 밀라노지역에 수송, 생활 부문 15개 오염저감 정책을 다양한 시나리오 및 평가기준으로 지표를 지수화하여 각 정책의 비용-편익 분석을 실시하였는데, 분석결과 천연가스 전환 정책을 제외하고 모든 정책이 미세먼지는 최

대 26%, 질소는 최대 15%까지 감소효과가 있다는 것을 발견했다. 그러나 오염 저감 정책으로 인해 대체 연료비용상승과 인프라 구축을 위한 직접 비용이 함께 증가한다는 것을 주장하였으며, 오염 저감 정책을 고려할 때 에너지 전환정책은 주의해서 도입해야 함을 보여주었다.

이처럼 기존 연구들은 주로 미세먼지 배출원 및 미세먼지 정책에 대한 대기질 개선효과 분석에 치중되어 있으며 미세먼지 정책으로 인한 발전사 영향에 대한 분석은 부족했다. 발전 부문의 정책 규제는 전력믹스, 국내 전력 수요, 산업 부문, 전기요금 상승과 같이 국민경제와 각 발전사의 손익구조를 결정하는 등 국내 경제활동에 주요한 영향을 미치기 때문에 미세먼지 계절관리제에 따른 발전사별 석탄발전량의 변화를 파악하는 것은 중요하다.

본 연구는 미세먼지 계절관리제로 인한 발전사별 석탄발전량 변화를 분석하기 위한 방법으로 합성대조법(synthetic control)을 적용했다는 점에서 의의가 있다. 기존 연구에서는 주로 정책의 효과를 분석하는 방법으로 이중차분법(difference in difference)를 이용하였다. 그런데 이중차분법은 표본의 무작위성 조건, 정책의 시간가변효과 포착할 수 없는 한계를 갖고 있다. Abadie et al.(2010)은 이중차분법의 한계를 완화해 줄 수 있는 합성대조법을 개발하였다. 합성대조법은 통제군의 특성과 가중평균을 고려해 가상의 자료를 생성하고 이를 처치군과 비교하는 방법이며, 정책의 시간가변효과를 파악할 수 있는 장점이 있다. 이러한 특징으로 인해 최근 다양한 분야에서 많이 이용하고 있다 (Gharehgozli, 2017; McClelland and Gault, 2017; Kerif et al., 2016; Peri and Yassenov, 2015). 그러나 아직 미세먼지와 관련된 정책의 효과를 분석한 연구는 전무하다. 본 연구에서는 사례 연구(case study) 방법인 합성대조법(synthetic control method)을 적용해 미세먼지 계절관리제가 석탄발전량에 미치는 시간가변 정책효과를 추정한다.

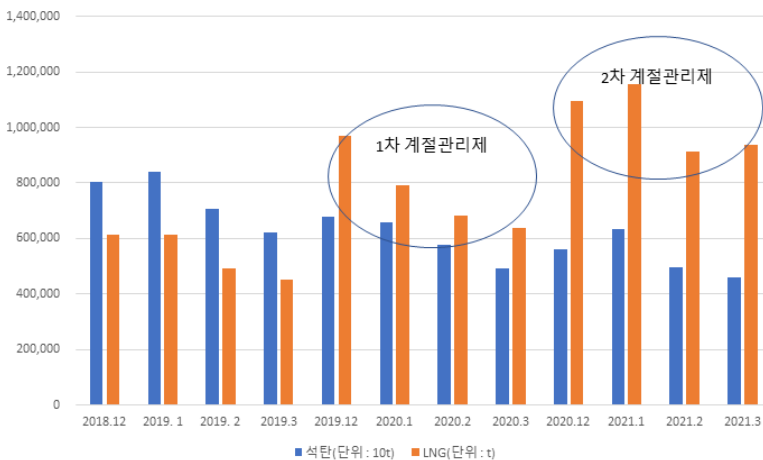
III. 미세먼지 계절관리제 시행 이후 에너지 연료 사용량 및 발전량 현황

미세먼지 계절관리제로 인해 발전 부문에 적용되는 사항은 전력수급 안정성을 전제로 석탄발전 가동 중지 및 상한 제약을 최대로 실시하고 있으며, 1차 미세먼지 관리제(2019년 12월부터 2020년 3월까지)와 2차 미세먼지 계절관리제(2020년 12월부터 2021

년3월까지) 하에서 각각 8~15기, 9~16기의 석탄발전소를 가동중단하였다. 또한, 노후 석탄 화력 발전소를 조기 폐쇄하고, 석탄발전소를 LNG 발전소로 전환하는 등 친환경 발전소의 확대를 지향하고 있다(국가환경회의, 2020). 이러한 미세먼지 계절관리제 시행에 따라 정책 시행 이전과 이후의 석탄 및 LNG 발전소의 연료사용량과 석탄 및 LNG 연료원별 발전량이 어떻게 달라졌는지 검토한다. 에너지 연료사용량 및 발전량 변화를 분석하기 위해 계절관리제 시행 직전인 2018년 겨울철(12월~3월)과 시행 이후 2019년 겨울철(12월~3월), 2020년 겨울철(12월~3월)의 전년 동월 대비 자료를 비교 분석하였다.

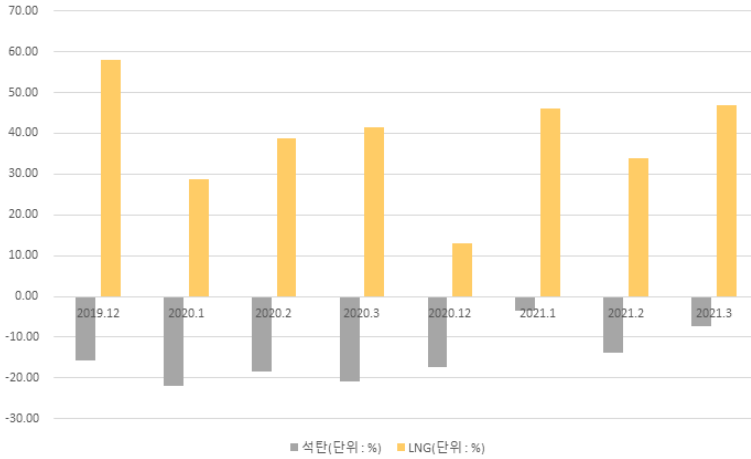
<그림 1>과 <그림 2>는 각각 2018년부터 매년 겨울철(12월~3월) 석탄, LNG 발전 연료 사용량과 발전 연료의 전년 동월 대비 증감률을 나타낸다. 1차 계절관리제 기간(2019년 12월부터 2020년 3월까지)을 살펴보면, 계절관리제 시행 이전기간에 비해 석탄 사용량은 감소하였지만, LNG사용량은 급증한 것을 알 수 있다. 석탄 사용량의 감소는 1차 계절관리제 기간이 COVID-19 확산시기와 동일하기 때문에, 석탄 사용량 감소가 COVID-19의 영향으로 인한 경제활동 저하가 전력수요 감소로 이어진 것인지, 아니면 미세먼지 계절관리제의 정책효과로 인한 결과인지 정확히 알 수 없다. 그러나 1차 계절관리제와 2차 계절관리제의 LNG 사용량이 증가했다는 사실로 추론해 볼 때, 미세먼지 계절관리제가 석탄 사용량을 저감시켰다는 것을 유추해 볼 수 있다.

<그림 1> 연료원별 전년 동월 대비 발전 연료 사용량



자료: 한국전력통계 전력통계속보

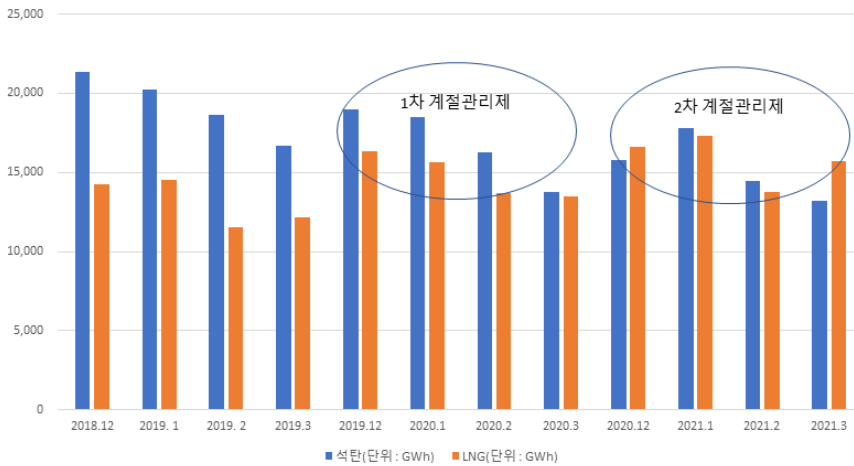
<그림 2> 연료원별 전년 동월 대비 발전 연료 사용량 증감률



자료: 한국전력통계 전력통계속보

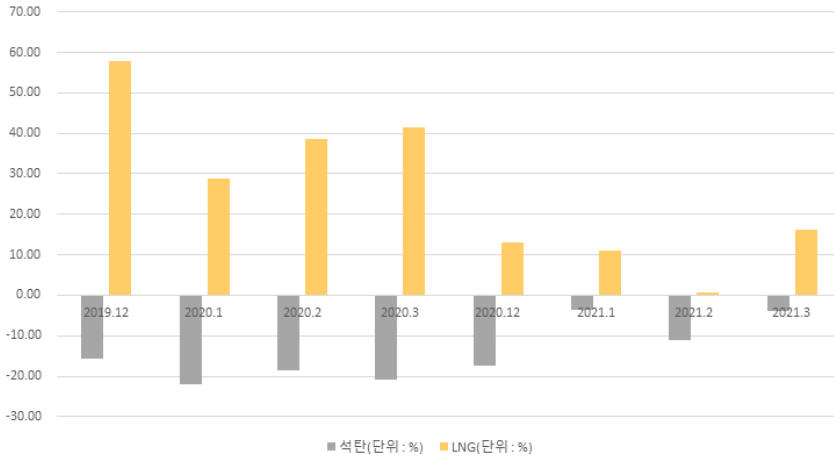
<그림 3>과 <그림 4> 각각은 석탄과 LNG 발전량의 추이와 전년 동월 대비 증감률을 보여준다. 발전연료 사용량 변화와 유사하게 계절관리제 시행으로 인해 석탄발전량은 감소하고 LNG 발전량은 증가했을 것으로 유추할 수 있다.

<그림 3> 에너지원별 전년 동월 대비 발전량



자료: 한국전력통계 전력통계속보

<그림 4> 에너지원별 발전량 전년 동월 대비 증감률



자료: 한국전력통계 전력통계속보

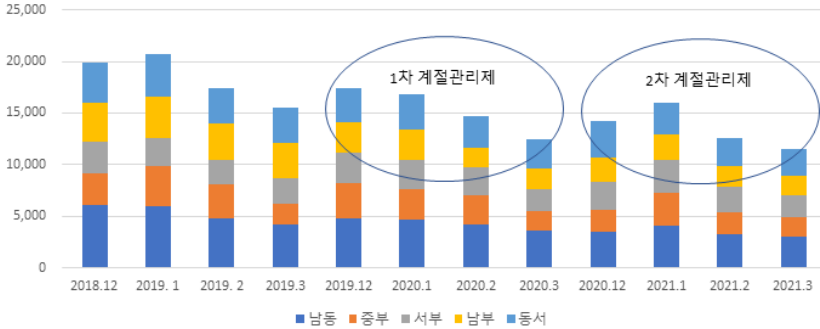
석탄, LNG 자료를 이용해 석탄발전소와 LNG 발전소의 미세먼지 정책효과는 석탄발전소의 연료 사용량, 발전량 감소, LNG 발전소의 연료 사용량, 발전량 증가하는 것으로 나타난다. 그런데 미세먼지 계절관리제의 정책 내용을 살펴보면, 석탄발전소의 노후화 정도, 지역 미세먼지의 기여도에 따라 석탄발전소의 가동중지를 결정하게 된다. 한국의 석탄발전소는 남동, 중부, 서부, 남부, 동서발전사가 석탄발전소를 운영하고 있으며, 미세먼지 계절관리제 시행으로 인해 각 발전사별로 발전량의 증감 정도가 달라질 수 있다. 따라서 각 발전사별로 정책의 효과를 구분해서 살펴볼 필요가 있다.

<그림 5>와 <그림 6>을 통해 1차 계절 관리제 기간 동안 서부발전을 제외하고 모든 발전회사는 석탄발전량이 급격하게 감소했다는 것을 알 수 있다. 특히, 발전회사 중 남부발전이 가장 크게 감소한 것을 확인할 수 있는데, 이는 미세먼지 계절관리제가 각 발전회사에 미치는 영향이 다를 수 있음을 알 수 있다. 1차 계절관리제 기간 대비 2차 계절관리제 기간의 석탄발전량도 각 발전사에서 모두 감소하고 있으나, 1차 계절관리제에 비해 감소폭은 적게 나타나는 것을 알 수 있다.

또한, 각 발전사별 석탄발전량은 특정 시기를 제외하고 전반적으로 감소하는 추세를 보이는 것을 확인할 수 있는데, 이는 COVID-19로 인한 전력수요 감소 효과와 더불어 미세먼지 계절관리제의 정책효과로 인해 발전사별 석탄발전소의 발전량 감소 추세가 가

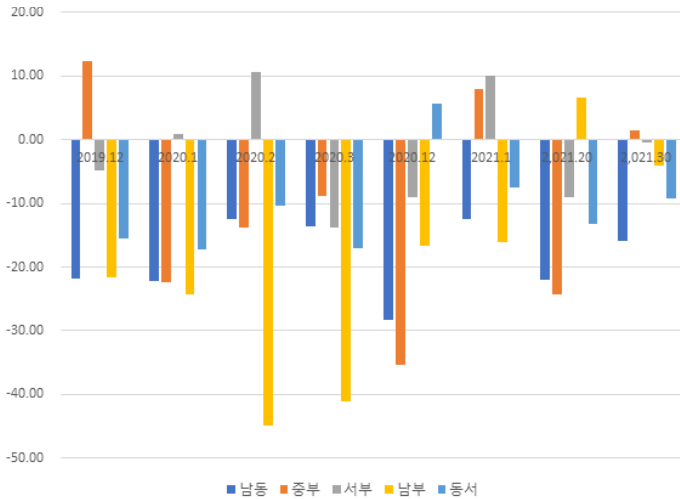
속화 될 가능성이 있다.

〈그림 5〉 발전사별 전년 동월 대비 석탄발전량



자료: 한국전력통계 전력통계속보

〈그림 6〉 발전사별 석탄발전량 증감률

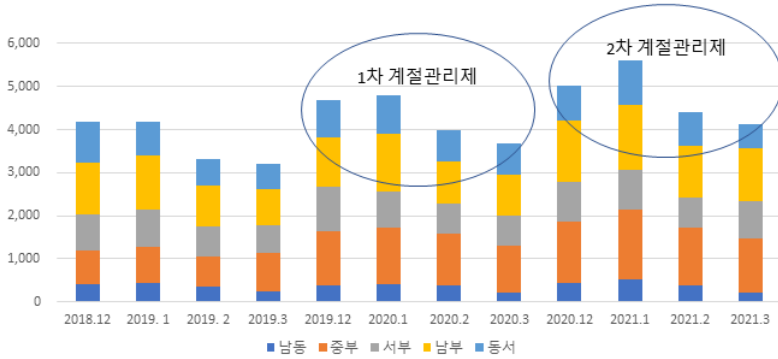


자료: 한국전력통계 전력통계속보

감소한 석탄발전량이 전력수요의 절대적인 감소로 인한 것인지 살펴보기 위해 LNG 발전량의 변화를 각 발전사별로 살펴볼 필요가 있다. <그림 7>과 <그림 8>은 발전사별 전년 동월 대비 LNG 발전량과 증감률을 나타낸다. 시기별로 1차 계절관리제와 2차 계

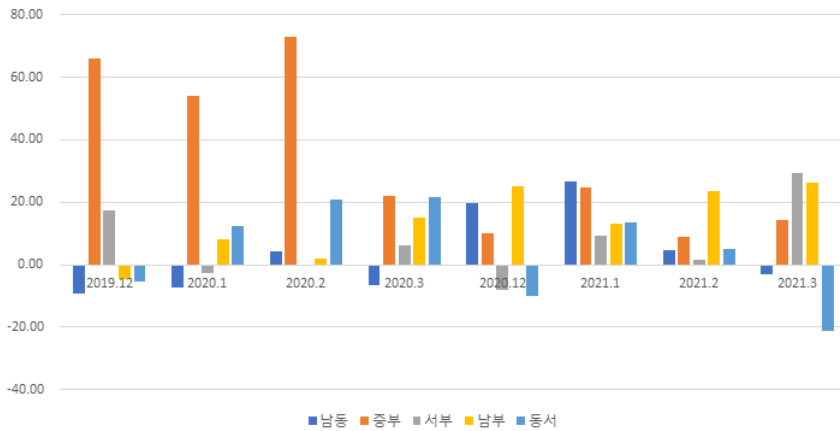
절관리제로 나누어서 살펴보면, 1차 계절관리제 정책하에서 중부발전의 LNG 발전량의 증가율이 가장 크게 나타나고, 나머지 발전사들도 LNG 발전량이 증가하는 것으로 나타나지만, 증가율은 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 2차 계절관리제 정책하에서도 모든 발전사에서 전년 대비 LNG 발전량이 증가하는 것으로 나타났다.

〈그림 7〉 발전사별 LNG 발전량



자료: 한국전력통계 전력통계속보

〈그림 8〉 발전사별 LNG 발전량 증감률



자료: 한국전력통계 전력통계속보

결과를 종합해보면, COVID-19 사태로 인해 전력 수요가 일부 감소한 효과를 감안하

더라도 미세먼지 계절관리제는 석탄발전소의 연료 사용량, 발전량이 지속적으로 감소시키는 효과가 있는 것을 알 수 있다. 발전사별로 살펴보아도 미세먼지 계절관리제로 인한 석탄발전량의 지속적인 감소가 나타나고 있는 것을 확인할 수 있으나, 석탄발전의 감소량과 LNG발전의 증가량은 발전사별로 차이가 나고 있어서, 미세먼지 관리제로 인한 각 발전사의 손익에 차이가 발생할 수 있음을 알 수 있다.

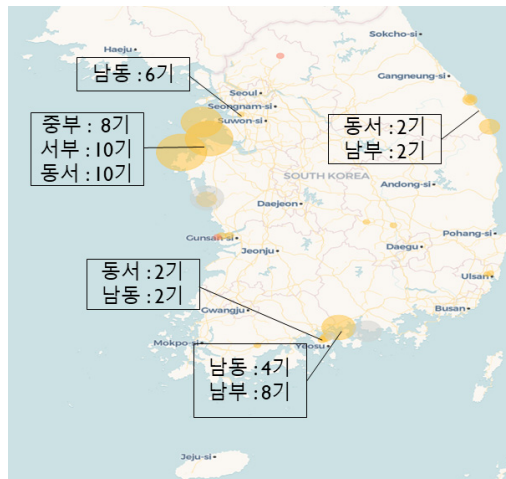
IV. 미세먼지 계절관리제의 발전사별 발전량 효과

1. 모형의 설정 및 분석방법

1) 미세먼지 계절관리제의 발전사별 발전량 효과 모형의 설정

<그림 9>는 발전사별 석탄발전소 현황을 나타낸다. 남동발전이 운영하는 석탄발전소는 전남, 경남, 인천에 위치하고 있고, 중부발전이 운영하는 석탄발전소는 충남, 서부발전의 석탄발전소는 충남, 남부발전의 석탄발전소는 강원도, 경남에, 동서발전의 석탄발전소는 강원, 전남, 충남에 위치해 있다. 일반적으로 미세먼지는 편서풍의 영향력이 큰 봄, 가을, 겨울철 중국으로부터 유입되어 우리나라에 영향을 미치게 된다(Jia and Ku,

〈그림 9〉 석탄발전소 현황



2019). 편서풍의 영향으로 미세먼지는 서부지역에서 동부지역으로 이동하게 되고, 이에 따라 서부지역의 석탄발전소에서 발생한 미세먼지로 인해 미세먼지의 농도가 악화될 수 있다. 석탄발전소는 국내 미세먼지의 주요 발생원이지만 남부지역 혹은 동부지역에 위치한 석탄발전소는 서부지역에 위치한 발전소에 비해 국내 미세먼지 농도에 기여하는 부분이 적을 수 있다. 그런데 미세먼지 계절관리제는 모든 석탄발전소에 일괄적으로 적용하고 있기 때문에, 남부지역과 동부지역에 위치한 석탄발전소에 대한 정책 효과는 예상보다 적을 수 있다.

각 발전소의 석탄발전량 저감으로 인한 미세먼지 발생량 감소의 효과를 차치하더라도, 계절관리제로 인한 각 발전사가 부담이 균등해야 할 것이다. 그런데 앞서 그림들을 통해서 각 발전사의 석탄발전 감소분에 격차가 있음이 확인되어, 계절관리제의 비용이 각 발전사에 공평하게 배분되는지 분석할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 미세먼지 계절관리제 시행으로 인한 발전사의 비용을 석탄발전 감소분으로 추정하여 비교해보고자 한다. 석탄 발전소의 분포를 고려하여 남부발전을 처치군(treatment group)으로 설정하고, 남동, 중부, 서부, 동서 발전을 통제군으로 설정해 합성대조방법의 반사실적추론(counterfactual inference)을 통해 미세먼지 계절관리제에 따른 발전사별 발전량의 변화를 파악하고자 한다.

2) 합성대조법

미세먼지 계절관리제가 시행된 시기는 COVID-19사태가 발생한 시기와 동일하다. COVID-19는 국내 소비 수요 감소 및 경기 위축 효과를 유발하였고, 이에 따라 전력 소비 수요 감소에 나타나게 된다. 즉, 이 시기에 발전량 또는 연료 사용량의 감소는 순수하게 미세먼지 계절관리제 효과로 보기 어려운 부분이 존재한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 사례 연구(case study) 방법인 합성대조법(synthetic control method)을 적용해 미세먼지 계절관리제로 인한 발전 부문에 미치는 순 효과를 추정하고자 한다.

합성대조방법(synthetic control method)은 Abadie and Gardeazabla(2003)에 의해 개발된 방법으로 Abadie et al.(2010)에 의해 더욱 정교하게 발전되었다. 합성대조방법은 사례분석(case study)을 위해 처치(treatment)가 있었던 집단에 대해서 처치가 없었을 경우의 반사실적추론(counterfactual inference)이 가능한 것을 말한다. 즉, 처치군(treat-

ment group)과 합성대조군(synthetic control)을 비교하는 이중차분법(difference-in-difference)을 통해 정책의 효과를 추정하는 것을 말한다.

예를 들어, 총 $N+1$ 개의 분석단위 중 첫 번째 집단에 정책이 적용되었다고 가정하고, 나머지 단위들(N)은 대조후보군(donor pool 또는 control group)이라 한다. 다음으로 Y_{it}^P 는 정책이 적용되지 않은 집단 $i(i = 2, \dots, N+1)$, 시점 $t(t = 1, \dots, T+1)$ 의 결과변수이다. 정책 적용 시점은 T_0 라 하면 정책이 적용되는 첫 번째 집단에 T_0 개의 정책 적용 이전기간(pre-treatment periods)의 자료가 존재한다. 마찬가지로 Y_{it}^I 는 첫 번째 집단에 정책이 적용된 기간 $t = T_0 + 1, \dots, T$ 의 결과변수이다. 주어진 기간(t)와 모든 집단(i)에 대해서 $Y_{it}^P = Y_{it}^I$ 라고 가정한다. 즉, 정책 적용 이전기간($t = 1, \dots, T+1$)에 대해 적용된 정책은 아무런 영향을 미치지 못한다는 것을 가정한다. 따라서 정책의 효과는 정책이 적용된 경우의 결과변수와 정책이 적용되지 않은 결과변수의 차이인 $\alpha_{1t} = Y_{it}^I - Y_{it}^P$ 로 나타낼 수 있으며, 이를 추정하는 방법을 합성대조법이라 한다. 이를 정책이 적용된 기간 이후($t > T_0$)의 정책효과는 다음의 식 (1)으로 나타낼 수 있다.

$$\alpha_{1t} = Y_{it}^I - Y_{it}^P = Y_{1t} - Y_{it}^P \quad (1)$$

그런데 정책이 적용된 이후의 효과(Y_{it}^I)는 관찰 가능하지만, 정책이 적용된 시점 이후에 정책이 적용되지 않는 효과(Y_{it}^P)는 관찰이 불가능하기 때문에 정책 효과를 추정하기 위해서는 반사실적인 추론이 필요하다. 이러한 반사실적 추론을 위해 다음과 같은 요소 모형(factor model)을 가정할 수 있다.

$$Y_{it}^P = \theta_t Z_i + \lambda_t \mu_i + \delta_t + \epsilon_{it} \quad (2)$$

여기서 Z_i 는 관찰가능한 변수(observable variable)의 벡터를 의미하고, θ_t 는 모수의 벡터, λ_t 는 관찰 불가능한 공통요인(unobservable common factor) 벡터, μ_i 는 인자적재값(factor loading)의 벡터, ϵ_{it} 는 평균이 0인 관찰 불가능한 일시적인 충격(transitory shocks) 벡터이다. 반사실적추론을 위한 합성대조법의 추정식은 다음의 식으로 나타낼

수 있는 이중차분모형과 비교할 수 있다.

$$Y_{it}^P = \theta_t Z_i + \mu_i + \delta_t + \epsilon_{it} \quad (3)$$

이중차분모형은 관찰불가능한 교란요인을 나타내는 인자적재값(μ_{it})에 대해 고정되어 있기 때문에 시간에 따라 변화하는 영향을 식별할 수 없지만, 합성대조법은 관찰불가능한 인자적재값의 공통요인(λ_t)에 의해 시간에 따라 변화하는 영향을 식별할 수 있다. 따라서 합성대조법은 관찰불가능한 요소가 있는 상황에서도 정책의 효과를 식별할 수 있기 때문에 누락변수 편의(omitted bias)로 인한 내생성 문제를 해결할 수 있다는 장점이 있다. 특히, 관측 불가능한 가상의 합성대조군을 생성하기 위해 관측가능한 변수를 이용해 가중치를 부여하게 되는데, 가중치를 이용하는 경우 처치군과 대조군의 결과변수의 평균적 차이가 0에 가까워 지기 때문에, 합성대조방법은 편이 없는 정책효과를 추정할 수 있다는 장점이 있다(Abadie et al., 2010). 즉, 합성대조법은 관찰가능한 자료를 이용하여 관찰불가능한 가상의 자료를 예측하여 가상의 자료를 생성하게 되고, 시간 변화에 따른 정책의 효과를 파악할 수 있다.

분석을 위한 자료는 전력통계속보²⁾의 발전사별 석탄발전량을 이용하였고, 분석기간은 2015년~2021년 겨울철(12월~3월) 월별 자료를 선정하였다.

V. 추정결과

1. 합성대조법을 이용한 사회적 비용 추정결과

일반적으로 합성대조법 추정을 위한 기준은 예측력 측정 기준인 RMSPE를 이용해 그 값이 가장 시기를 기준으로 설정한다. 본 연구에서는 각 월(12월~3월)을 기준으로 합성대조법을 추정한 결과 12월~3월 중 3월이 RMSPE가 가장 작은 것으로 나타나 3월을 기준으로 추정하였다. 합성대조법은 처치군인 남부발전의 가상의 석탄발전량을 생성하여 실제 남부발전의 석탄발전량과의 차이만큼을 정책효과라 할 수 있는데, 가상의 발전량

2) 한국전력통계(<https://home.kepco.co.kr>)

을 생성하기 위해 통계군의 발전사별 석탄발전량의 행태를 통해 가중치를 부여하게 된다. <표 1>은 예측변수(predictor variable)의 가중치를 나타낸다. 미세먼지 계절관리제가 없었을 경우의 남부발전사의 석탄발전량을 추정하기 위해 서부발전사와 동서발전사의 발전량에 가중치를 각각 0.386, 0.614만큼 부여하게 된다.³⁾

<표 1> 예측변수 가중치

발전사	가중치
남동발전사	0
중부발전사	0
서부발전사	0.386
동서발전사	0.614

<표 2>는 3월을 기준으로 계산한 발전량 예측 평균값과 실제값을 나타낸다. 여기서 예측값은 미세먼지 계절관리제가 시행되지 않았을 시기(2015년 3월부터 2018년 3월까지)의 남부발전소의 가상의 석탄발전량이라 할 수 있다. 각 값을 살펴보면, 2017년 3월을 제외하고 실제값과 예측값이 유사하기 때문에 관측불가능한 예측값이 실제 발전량의 행태를 잘 반영해 주는 것을 알 수 있다.

<표 2> 3월을 기준으로 계산한 석탄발전량 예측 평균값

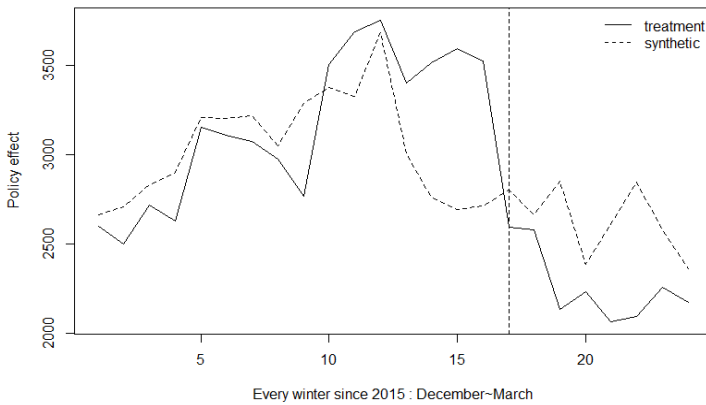
기간	실제값	예측 평균값
2015.03 석탄발전량	2628	2962.662
2016.03 석탄발전량	2978	3361.222
2017.03 석탄발전량	1754	3557.922
2018.03 석탄발전량	3525	3154.984

<그림 10>과 <그림 11>은 합성대조법을 이용한 미세먼지 계절관리제의 정책효과를 나타낸다. <그림 10>을 살펴보면, 정책의 시점을 17기(2019년 12월: 수직선)를 기준으로 남부발전소의 가상의 석탄발전량(점선)과 남부발전소의 실제 석탄발전량(실선)을

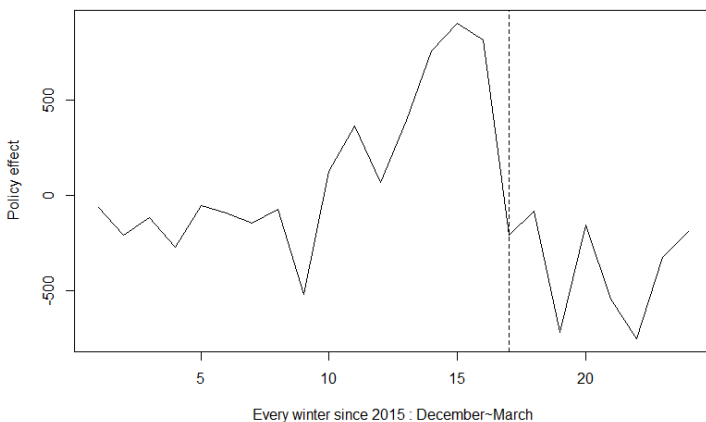
3) 남동발전과 중부발전의 가중치가 0이라는 의미는 석탄발전량에 있어서 남부발전과 서로 연관성이 없다는 것을 말한다.

나타낸다. 13기~15기를 제외하고 미세먼지 계절관리제 시행 전의 석탄발전량의 실제 값(실선)과 가상의 석탄발전량값(점선)이 차이가 적게 나타나 가상의 발전량 값(점선)이 실제값(실선)을 잘 반영하는 것을 알 수 있다. 또한 미세먼지 계절관리제하에서 가상의 값은 남부발전이 다른 발전소와 동일한 수준으로 석탄발전을 했을 때를 의미하므로, 정책 시점 17기 이후로 남부발전의 석탄발전 저감량의 상대적인 변화를 객관적으로 비교할 수 있다. <그림 10>을 살펴보면 미세먼지 계절관리제 시행으로 인해 남부발전사의 석탄발전량이 타 발전소 석탄발전 감소량에 비해 상대적으로 큰 것을 알 수 있다.

<그림 10> 합성대조법 추정결과



<그림 11> 미세먼지 계절관리제의 정책효과

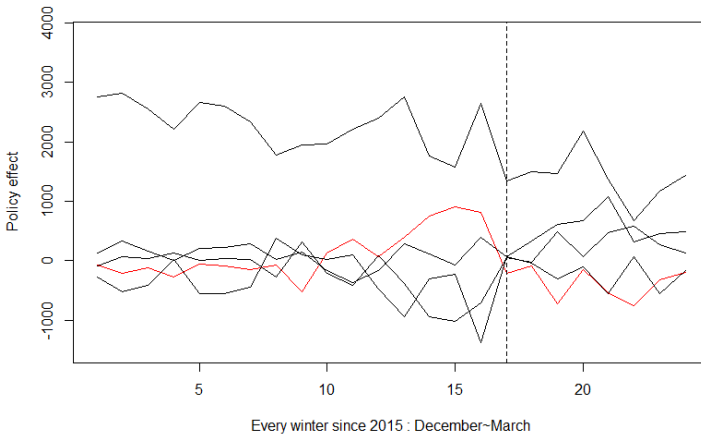


<그림 11>은 미세먼지 계절관리제의 유무에 따라 남부발전소 석탄발전량의 실제 발전량과 가상의 발전량의 차이를 의미하는 정책효과를 나타낸다. 미세먼지 계절관리제 시행시점인 17기 이전에는 실제값과 가상의 값의 차이가 0에 가깝지만, 미세먼지 계절관리제 시행 이후, 남부발전의 석탄발전 저감량이 타 발전에 비해 크다는 것을 확인할 수 있다.

합성대조방법은 정책의 시간가변 효과 및 종합적 분석이 가능한 장점이 있지만, 소표본 문제, 계열 상관(serial correlation)으로 인해 편의(bias)가 발생할 수 있다(Abadie et al., 2010). 따라서 일종의 모의실험을 통해 실제 처치군과 대조군 간의 차이가 상대적으로 얼마나 큰지를 살펴보는 치환 검정을 시행해야 한다. 즉, 남부발전 이외에 각 발전(남동, 중부, 서부, 동서)을 처치군으로 설정하여 합성대조방법을 이용해 추정된 후 각 발전(남부, 남동, 중부, 서부, 동서)의 석탄발전량 실제값과 가상의 값의 차이를 살펴보는 검증방법을 말한다.

<그림 12>는 남부발전(붉은선), 타 발전사(검은선)의 정책효과를 나타내는 결과이다. 정책시점(17기) 이전에는 남동발전사를 제외⁴⁾하고 모든 발전사가 정책 시점 이전에는 정책효과가 0에 가까운 움직임을 동일하게 보이다가 정책 시점 이후에 각 발전사별로 석탄발전량의 변화가 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다.

<그림 12> 타 발전사의 정책효과와 비교(Placebo effects)



4) 이러한 결과가 나타나는 이유는 남동발전사는 발전설비가 발전사 중 가장 크고, 발전량이 가장 많다. 따라서 타 발전사의 발전량을 이용해 추정된 가상의 값이 남동발전소의 실제값에 비해 작게 추정되고, 정책효과가 양인 것처럼 나타난다.

추정 결과를 종합해보면, 남부발전의 석탄발전량 저감 효과가 타 발전사에 비해 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 각 발전사의 석탄발전설비용량을 고려할 때, 남부발전의 설비용량이 가장 작다.⁵⁾ 남부발전의 석탄설비용량이 가장 작음에도 불구하고, 미세먼지 계절관리제로 인한 석탄발전 저감량이 가장 크게 나타난다. 이러한 상황은 미세먼지 계절관리제의 각 발전사의 비용부담이 동일하게 배분되지 않는 문제가 있을 수 있다. 게다가 남부발전의 석탄발전소 위치는 미세먼지의 피해가 상대적으로 적을 가능성이 높은 동해와 남해에 있기 때문에 비용부담의 형평성 문제를 가중시킬 수 있다. 이러한 문제가 지속적으로 발생한다면 특정 발전사의 부채압력이 높아지고 전력시장 전체의 부채부담이 증가할 가능성이 높다. 따라서 계절관리제의 정책적용의 유연성을 높여 발전사의 실정에 맞는 단계적 정책이 시행되어야 할 필요가 있다.

VI. 결론

미세먼지 계절관리제는 겨울철 수송, 산업, 발전, 생활 부문에서 발생하는 미세먼지 발생원을 관리하여 국민건강을 증진시키기 위한 정책이다. 이러한 규제 정책의 적용은 비용부담을 발생시킬 것이며, 비용은 각 경제주체에게 공정하게 배분되어 사회적 부담을 최소화되도록 해야 한다. 따라서 본 연구는 계절관리제 적용으로 인해 발전 부문에서 발생하는 비용부담이 발전사별로 균등하게 배분되는지에 대해 분석하였다. 발전사별 비용부담의 균등성을 확인하기 위해 합성대조법을 적용해 미세먼지 계절관리제가 발전사의 석탄발전량에 미치는 효과를 분석하였다. 본 분석결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 석탄발전소 출력제한 및 가동제한에 따른 발전원별 연료사용량, 발전량을 살펴보고, 연료원별로 각 발전사의 발전량을 비교하였다. COVID-19 사태로 인해 일부 전력 수요가 감소한 효과를 감안하더라도 석탄발전소의 연료 사용량, 발전량이 미세먼지 계절관리제로 인해 감소하는 효과가 나타난다는 것을 확인할 수 있었다.

둘째, 합성대조방법을 이용해 발전사별 석탄발전량 감소분을 추정·비교해보았다. 추정결과 미세먼지 계절관리제로 인한 남부발전사의 석탄발전량의 감소효과가 가장 크게

5) 2021년 3월의 전력통계속보를 살펴보면, 각 발전사별 석탄발전설비용량은 남동발전이 7,868GW, 중부발전은 6.106GW, 서부발전은 7.5GW, 남부발전은 6.04GW, 동서발전은 8.14GW이다.

나타나는 것을 알 수 있었다. 특히, 발전사 중 남부발전의 석탄설비용량이 가장 작음에도 불구하고, 미세먼지 계절관리제로 인한 석탄발전 저감량이 가장 크게 나타난다. 이는 미세먼지 계절관리제의 각 발전사의 비용부담이 다르게 배분되고 있다는 것을 확인할 수 있다.

게다가 남부발전의 석탄발전소 위치는 미세먼지의 피해가 상대적으로 적을 가능성이 있는 동해와 남해에 위치하기 때문에 비용부담의 형평성 문제를 가중시킬 수 있다. 지역적 특성을 고려하지 않고 계절관리제 정책을 일괄적으로 적용하는 것은 발전사의 비용부담의 격차를 더 크게 만들 수도 있다. 따라서 계절관리제의 정책적용의 유연성을 높여 발전사의 실정에 맞는 단계적 정책을 고려할 필요가 있다.

미세먼지 계절관리제의 목적과 의의는 환경문제 대처, 기후협약의 이행의 기초단계라는 점에서 의의가 있다. 그러나 현재 미세먼지 계절관리제의 정책은 지역적 특성, 이해관계자에 대한 객관적 지표가 부족하다. 이러한 규제정책은 사회적 비용을 발생시키고, 그것을 부담하는 주체의 형평성을 고려해야 한다. 본 연구에서도 나타났듯이, 발전 부문에 있어서 발전사의 비용부담이 균등하지 않다는 것을 확인하였다. 발전 부문 이외에도 미세먼지 계절관리제를 적용받는 수송, 산업, 생활 부문에서도 이러한 문제가 발생할 가능성이 있기 때문에 규제정책의 비용부담 문제를 고려해 객관적인 정책으로 개선해야 할 필요가 있다.

[References]

- 국가기후환경회의, “국가기후환경회의 중장기 국민정책제안”, 2020. 11.
- 남기표·이대균, 이재범, 최기철, 장임석, 최광호, “효율적인 대기정책 마련을 위한 대기질 모델 활용방안 고찰: 노후 석탄화력발전소 가동중지에 따른 충남지역 PM2.5 저감효과 분석을 중심으로”, 「한국대기환경학회지」, 제34권 제5호, 2018, pp. 687~696.
- 박순애·신현재, “한국의 초미세먼지(PM 2.5)의 영향요인 분석: 풍향을 고려한 계절성 원인을 중심으로”, 「환경정책」, 제25권 제1호, 2017, pp. 227~248.
- 박호정·홍중호, “수도권 운행차 대기오염 저감사업의 효과: 실물업선분석”, 「자원·환경경제

- 연구], 제23권 제3호, 2014, pp. 435~451.
- 이동규·성재훈, “노후 석탄화력발전소 가동중단에 따른 발전소 주변지역의 초미세먼지 농도 감소효과 분석”, 「자원·환경경제연구」, 제27권 제2호, 2018, pp. 315~337.
- Abadie, A., A. Diamond, and J. Hainmueller, “Synthetic control methods for comparative case studies: Estimating the effect of California’s tobacco control program,” *Journal of the American statistical Association*, Vol. 105, 2010, pp. 493~505.
- Abadie, A., and J. Gardeazabal, “The economic costs of conflict: A case study of the Basque Country,” *American economic review*, Vol. 93, 2003, pp. 113~132.
- Chiesa, M., M. G. Perroneb, N. Cusumanoc, L. Ferrerob, G. Sangiorgib, E. Bolzacchinib, A. Lorenzonic, and A. Ballarin Denti, “An environmental, economical and socio-political analysis of a variety of urban air-pollution reduction policies for primary PM10 and NOx: The case study of the Province of Milan (Northern Italy),” *Environmental science & policy*, Vol. 44, 2014, pp. 39~50.
- Doudchenko, N., and G. W. Imbens, *Balancing, regression, difference-in-differences and synthetic control methods: A synthesis*, National Bureau of Economic Research, 2016.
- Gharehgozli, O, “An estimation of the economic cost of recent sanctions on Iran using the synthetic control method,” *Economics Letters*, Vol. 157, 2017, pp. 141~144.
- He, X., and S. Jiang, “Effects of vehicle purchase restrictions on urban air quality: Empirical study on cities in China,” *Energy Policy*, Vol. 148, 2021.
- Jia, R., and H. Ku, “Is China's pollution the culprit for the choking of South Korea? Evidence from the Asian dust,” *The Economic Journal*, Vol. 129, 2019, pp. 3154~3188.
- Jung, M. C., J. Park, and S. Kim, “Spatial relationships between urban structures and air pollution in Korea,” *Sustainability*, Vol. 11, 2019, pp. 476.
- Kreif, N., R. Grieve, D. Hangartner, A. J. Turner, S. Nikolova, and M. Sutton, “Examination of the synthetic control method for evaluating health policies with multiple treated units,” *Health economics*, Vol. 25, 2016, pp. 1514~1528.
- McClelland, R., and S. Gault, *The synthetic control method as a tool to understand state policy*, Washington, DC: The Urban Institute, 2017.
- Mori, I, M. Nishikawa, T. Tanimura, and H. Quan, “Change in size distribution and chemical composition of kosa (Asian dust) aerosol during long-range transport,” *Atmospheric*

Environment, Vol. 37, 2003, pp. 4253~4263.

Nordhaus, W., “Climate change: The ultimate challenge for economics,” *American Economic Review*, Vol. 109, 2015, pp. 1991~2014.

Peri, G., and V. Yasenov, *The labor market effects of a refugee wave: Applying the synthetic control method to the Mariel boatlift*, National Bureau of Economic Research, 2015.