

## 노후 석탄화력발전소 가동중단에 따른 발전소 주변지역의 초미세먼지 농도 감소효과 분석

이동규\* · 성재훈\*\*

**요약** : 정부는 준공된 지 30년 이상 경과한 8기의 노후 석탄화력발전소를 2017년 6월 한 달간 가동중단하였다. 이번 정부의 조치는 일종의 정책실험으로 자연실험에 가까운 특성을 가지고 있다. 본고는 이러한 정책실험의 특성을 이용하여 가동중단 조치에 따른 초미세먼지 농도변화의 인과적 효과를 분석하였다. 이를 위해 본 연구에서는 정책대상 발전기 중 2기가 위치한 영동 화력발전소 인근 지점을 실험군으로, 그곳에서 약 40km 거리를 가진 삼척 지점을 대조군으로 하여 이중차분법을 시행하였다. 해당 대조군은 발전소 지역과 지리적, 지형적 특성은 유사하나 해당 발전소에서 배출된 초미세먼지로부터의 직접적인 영향은 크지 않다는 특징을 가지고 있다. 분석 결과, 이번 가동중단 조치로 영동석탄화력발전소 주변지역은 3.7~4.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 초미세먼지 농도 감소효과가 발생한 것으로 분석되었다.

**주제어** : 초미세먼지 농도, 정책실험, 석탄화력발전소, 역내 효과

**JEL 분류** : Q48, Q53, Q58

접수일(2018년 2월 8일), 수정일(2018년 4월 4일), 게재확정일(2018년 4월 11일)

\* 한국조세재정연구원 부연구위원, 제1저자(e-mail: dgyi@kipf.re.kr)

\*\* 한국농촌경제연구원 부연구위원, 교신저자(e-mail: jsung@krei.re.kr)

# The Local Effects of Coal-fired Power Plant Shutdown on PM<sub>2.5</sub> Concentration: Evidence from a Policy Experiment in Korea

Donggyu Yi\* and Jae-hoon Sung\*\*

**ABSTRACT** : Korean government temporarily shut down the coal-fired power plants built before 30 years and more from 6/1/2017 to 6/31/2017. This treatment provides a credible natural experiment regarding the regional PM<sub>2.5</sub> concentration and coal-fired generators. Based on this feature of the treatment, this study analyzed the causality between the old coal-fired power plants and regional PM<sub>2.5</sub> concentration. To be specific, we categorized two pollution monitoring stations nearby coal-fired power plants in Yeongdong into a treatment station and a control station based on the distance from the power plants. The control station is similar to the treatment station geographically and topographically, but its PM<sub>2.5</sub> concentration would not be directly affected by coal-fired power plants in Yeongdong. A difference-in-difference method was applied to identify the effects of the old coal-fire power plants on regional PM<sub>2.5</sub> concentration. The results show that the temporary shutdown would decrease PM<sub>2.5</sub> concentration nearby coal-fired power plants in Yeongdong by 3.7~4.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

**Keywords** : PM<sub>2.5</sub>, Policy experiment, Coal-fired power plant, Local effect

---

Received: February 8, 2018. Revised: April 4, 2018. Accepted: April 11, 2018

\* Associate Fellow, Korea Institute of Public Finance, First author(e-mail: dgvi@kipf.re.kr)

\*\* Associate Fellow, Korea Rural Economic Institute, Corresponding author(e-mail: jsung@krei.re.kr)

## I. 서론

석탄화력발전은 초미세먼지를 직접 발생시킬 뿐만 아니라 초미세먼지의 전구물질(precursor)인 질소산화물과 황산화물 등을 다량 발생시킨다(Wang et al., 2011; Clay et al., 2015; Greenpeace, 2015).<sup>1)</sup> 따라서 초미세먼지가 심각한 국가에서는 저감 장치 설치 의무화 등과 같은 규제를 도입·강화하고 발전 부문에 있어 대체에너지 비중을 증가시키고 있는 추세이다(Chanhong et al., 2006; Arora et al., 2016; 한택환 외, 2017).

우리나라에서도 석탄화력발전은 자동차 배기가스, 산업생산 등과 더불어 초미세먼지의 주요 오염원으로 꼽힌다(박순애·신현재, 2017). 문재인 정부는 미세먼지 문제에 대응하기 위해 대선 당시 에너지 생산에서 석탄발전의 비중을 줄이는 공약들(석탄 화력 발전소 신규 건설 전면 중단, 가동 30년 지난 노후 석탄 발전기 10기 조기 폐쇄, 봄철 일부 석탄화력발전기 일시적 가동 중단)을 발표하였다. 또한, 당선 직후인 2017년 5월 15일 문재인 대통령은 ‘3호 업무지시’을 통해 준공된 지 30년 이상 지난 8기의 노후 석탄화력 발전소를 일시적으로 가동중단시켰으며, 올해부터는 상대적으로 전력수요가 적은 3~6월 사이 4개월 동안 석탄화력발전소의 교차 가동중단을 지시하였다.

환경부는 보도자료를 통해 2017년 6월 노후 석탄화력발전소 가동중단 조치 이후 충남지역의 대기 중 평균 미세먼지 농도가 2015년 6월과 2016년 6월 평균치에 비해 15.4%( $4\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 감소하였다고 밝혔다. 또한 BMF (Brute Force Method) 기법의 대기질 모형 분석 결과, 2017년 6월 1일부터 6월 30일까지의 한시적 노후 석탄화력발전소 가동 중단 조치는 충남지역의 미세먼지를 1.1% 감소시켰다고 발표하였다. 하지만 환경부의 발표는 대기질 관련 자료와 대기 모형을 이용한 결과이며, 노후 석탄화력발전소 가동 중단 조치가 대기 중 미세먼지 농도, 특히 초미세먼지에 미치는 영향을 규명하기 위한 경험적 연구는 현재 매우 부족한 실정이다.

1)  $\text{PM}_{10}$ 이 아닌  $\text{PM}_{2.5}$ 를 분석한 이유는 다음과 같다. 우선,  $\text{PM}_{2.5}$ 는 WHO에서 지정한 1급 발암 물질로서,  $\text{PM}_{10}$ 보다 인체에 미치는 영향이 더 큰 오염물질이다(Greenpeace, 2015). 둘째,  $\text{PM}_{10}$ 의 최근 연평균 오염도는 크게 변동이 없는 반면, 최근  $\text{PM}_{2.5}$ 의 공기 중 농도가 기준치를 초과하는 일수가 빈번히 일어나고 있다(환경부, 2017b). 셋째, 화력발전소는  $\text{PM}_{2.5}$ 의 주요 발생원으로 많은 국가에서  $\text{PM}_{2.5}$ 의 대기 중 농도를 개선하기 위해 화력발전소 관련 정책을 이용하고 있다. 마지막으로 환경부가 발표한 미세먼지 종합관리대책 역시  $\text{PM}_{2.5}$ 의 대기 중 농도 기준을 선진국 수준으로 낮추고, 이를 체계적으로 관리하기 위해 노후화력발전소 일시 가동 중단 등 다양한 정책을 추진하고 있다(환경부, 2017b).

본고는 2017년 6월에 실시한 노후 석탄화력발전소 가동중단 조치를 이용하여 노후 석탄화력발전소가 인근지역의 대기 중 초미세먼지 농도에 미치는 영향을 사회과학의 계량분석방법으로 규명하고 이를 바탕으로 한 정책적 함의를 찾고자 한다. 특히, 대통령의 ‘3호 업무지시’에 따른 한시적 노후 석탄화력발전소 중단은 일종의 자연실험(natural experiment)과 같은 특성을 가지고 있어, 노후 석탄화력발전소가 대기 중 미세먼지 농도에 미치는 영향에 대한 경험적 분석할 수 있는 좋은 기회를 제공한다.

노후 석탄화력발전소와 초미세먼지와의 관계를 규명하기 위해 본고에서는 가동이 중단된 노후 석탄화력발전소 주변의 대기질 관측소를 거리 기준으로 실험군과 대조군으로 나누었다. 그리고 선정된 실험군과 대조군의 대기 중 초미세먼지 농도 변화와 노후 석탄화력발전소 가동 중단 간의 인과관계를 이중차분법(Difference-in-difference; 이하 ‘DID’)을 통해 분석하였다.

본고의 구성은 다음과 같다. 제II장에서는 미세먼지 감축 정책을 분석한 선행연구를 바탕으로 본 연구의 차별성을 설명하였다. 제III장에서는 분석방법과 분석자료에 대하여 소개한다. 제IV장에서는 이중차분법 분석결과를 보이고, 이를 정부에서 공개한 대기 모형 분석결과와 비교한다. 마지막으로, 제V장에서는 제IV장의 결과가 정책적으로 가지는 함의에 대해 간략히 정리하고 본 연구가 가지는 한계에 대하여 언급하면서 논의를 마무리한다.

## II. 선행연구

대기질 개선 정책의 많은 경우가 자연실험과 같은 특징을 가지고 있으며, 이러한 정책적 특성을 바탕으로 해외에서는 대기질 개선 정책효과에 대한 다양한 연구가 진행되었다(Auffhammer et al., 2009; Auffhammer and Kellogg, 2011; Chen et al., 2013; Evans, 2015; He et al., 2016; Fu and Gu, 2017; Gehrsitz, 2017; Zhong et al., 2017). Chen et al. (2013)은 중국 정부가 베이징 올림픽을 위해 시행한 대기질 개선 정책들(예를 들어, 차량2부제, 일시적인 오염원 가동 중단, 오염원의 영구적 가동 중단 혹은 이전 등)의 효과를 실증적으로 규명하였다. 또한 He et al. (2016)과 Zhong et al. (2017)의 연구결과, 베이징 올림픽 기간 동안의 중국 정부의 대기질 개선 정책이 영아 사망률과 구급전화

(ambulance call) 빈도를 낮추는 효과가 있는 것으로 나타났다.

Fu and Gu (2017)는 도로통행료의 대기질 개선 효과를 분석하였으며, Gehrsitz (2017)는 독일의 일정 지역에서 배출 기준에 미흡한 차량의 운행을 금지시키는 정책(low emission zone)이 초미세먼지 농도에 미치는 영향을 분석하였다. 분석 결과, 도로 통행료와 독일의 차량 통행 제한 조치 모두 정책 시행지역의 대기 중 초미세먼지 농도를 낮추는 것으로 나타났다. 마지막으로 Evans (2015)는 미국의 공기질 관리법을 위반한 기업의 목록(watch list) 작성과 공개 여부가 기업들의 공기질 관리법 준수 여부에 미치는 영향을 분석하였다. 앞서 언급한 해외 연구들의 경우, 정책 전후를 자연실험으로 간주하고 본 연구에서 사용한 이중차분법을 이용하여 정책 효과를 규명하였다. 하지만 대부분이 자동차 배기가스와 연관된 정책이 미세먼지와 관련 화합물에 미치는 영향을 분석한 반면, 석탄발전과 초미세먼지에 대한 연구는 매우 제한적으로 이루어졌다.

초미세먼지를 포함한 미세먼지 관련 정책에 대한 국내 연구는 상대적으로 부족하다. 박호정·홍종호(2014)는 수도권 운행 경유차에 공해저감 장치를 설치하는 사업의 환경적 영향을 평가하였다. 배정환·김유선(2016)은 경유가격 상승 정책이 경유소비와 미세먼지를 포함한 대기오염에 미치는 영향을 분석하였다. 박순애·신현재(2017)는 초미세먼지 농도에 미치는 요인을 산동성의 초미세먼지 농도와 풍향, 경유 소비량, 석탄화력발전소 발전 거래량, 시멘트제조업 생산지수로 구분하고, 이들과 초미세먼지와의 인과관계를 분석하였다. 분석결과, 중국으로부터의 유입과 시멘트제조업의 생산지수는 초미세먼지 농도에 통계적으로 유의한 영향을 미쳤으나, 석탄화력발전소의 발전 거래량의 영향은 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다. 그렇지만 박순애·신현재(2017)는 대기 중 초미세먼지에 영향을 주는 강수량 등의 기상 변수를 통제하지 않았으며, 석탄화력발전소에서 배출되는 화합물에 따른 2차 미세먼지 증가를 고려하지 않은 한계점이 있다. 또한, 석탄화력발전소 발전 거래량을 대리변수로 사용하였다는 점에서 현재 추진 중인 석탄발전 관련 정책에 대한 정책적 함의를 찾기에는 한계가 있다.

본고는 자연실험의 특성을 내포하고 있는 한시적 노후 석탄화력발전소 가동중단을 분석함으로써, 노후 석탄화력발전소의 운영이 발전소 주변지역의 초미세먼지 농도에 미치는 영향에 대한 보다 정확한 경험적 자료를 제공하고자 한다. 본 연구는 기존 연구에서 다루지 않은 노후 석탄화력발전소와 초미세먼지와의 인과관계를 규명했다는 점과

화력발전 관련 단기 초미세먼지 감축 효과를 연구했다는 점에서 기존 연구과의 차별된다. 마지막으로 본 연구의 결과는 정부가 추진 중인 석탄발전 관련 정책 결정에 필요한 실질적인 경험 자료로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

### III. 분석방법

#### 1. 정책실험

이번 노후 석탄화력발전소 가동중단 조치는 계량분석을 하는 입장에서 볼 때 일종의 자연실험(natural experiment)에 가까운 조치라 할 수 있다. 해당 발전소 주변 지역을 포함하여 국민들은 가동중단 조치에 따라 특별히 행동의 변화를 가져가기 어려웠다. 대통령 업무지시가 발표된 것이 2017년 5월 15일로 시행 보름 전에 공개되었고, 시행기간도 한 달에 불과하며, 가동중단 조치로 전기요금의 변화도 없었다. 즉, 가동중지 조치 기간 동안 노후발전소 주변지역이든 다른 지역이든 거주민들이 생활행태를 바꿀 유인은 거의 없었다. 이 단기간의 조치가 적용되는 발전소 지역은 국민들에게는 임의로 선택된 것과 거의 유사한 효과라 볼 수 있다. 각 집단의 모든 특성이 무작위로 선택되어 처치가 이루어지는 경우, 실험군과 대조군 사이의 평균적인 결과 차이(즉, 단일 차분(one difference))를 계산함으로써 정책의 인과효과를 추정할 수 있다(강창희 외, 2013, p.95). 각 집단의 표본이 무작위로 선택되어 정책을 제외한 다른 조건들은 동일하게 유지될 경우, 정책효과를 제외한 각 집단의 특성이 평균적으로 동일하여 두 집단의 성과 차이는 오로지 정책에 의한 것으로 이해할 수 있다.

그렇지만 발전소 가동중단 조치는 완전한 무작위 선택이라고 말할 수 없다. 왜냐하면 실험군이 될 8개의 노후 석탄화력발전소 지역과 대조군이 될 비교대상 지역의 지리적 여건이 체계적으로 다를 수 있기 때문이다. 따라서 정책효과와는 무관한 지역적·지리적 특성만 통제할 수 있다면 정책효과는 실험군과 대조군의 평균적인 성과 차이로 추정할 수 있다. 이러한 이유에서 본 연구에서는 정책효과를 추정하는 방법으로 이중차분법을 활용하였다. 이중차분법은 실험군과 대조군의 두 집단이 정책시행 전과 후 두 시점 사이에 거의 동일한 추세를 갖는다는 전제 아래 실험군에서의 정책효과를 추정할 수 있다.

본 연구에서 활용한 이중차분법에 대한 회귀방정식은 기본적으로 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$PM_{jty} = \alpha + \beta D_{ty} + \gamma R_j + \delta D_{ty} \cdot R_j + \tau T_t + \theta Y_y + \epsilon_{jty} \quad (1)$$

변수와 하첨자에 대한 설명은 다음과 같다.

$PM$ : 해당 지역의 일평균 초미세먼지( $PM_{2.5}$ ) 농도

$D$ : 정책 시행 더미(시행 이전이거나 종료 이후면 0, 시행기간 동안이면 1)

$R$ : 지역 더미(가동중단이 적용되는 발전소 주변지역이면 1, 대조군 지역이면 0)

$T$ : 시간(단위는 일수(day)), 마찬가지로 하첨자  $t$ 도 시간을 의미함

$Y$ : 연도 더미(2017년이면 1, 2016년이면 0), 마찬가지로 하첨자  $y$ 도 연도를 의미함

$\alpha$ : 상수항

$j$ : 지역이 실험군(발전소 주변지역)인지 대조군인지를 알려주는 하첨자

(실험군이면 1, 대조군이면 0, 즉,  $R_0 = 0, R_1 = 1$ )

식 (1)의 회귀방정식을 추정하면 교차항( $D_t \cdot R_j$ ) 계수의 추정값( $\hat{\delta}$ )이 바로 이중차분법에서 추정하는 정책의 순수효과가 된다. 각 시점별 지역별 일평균 미세먼지 농도의 기댓값을 다음과 같이 정의해 보자.

$$E_{11} \equiv E(PM|R=1, D=1) = \alpha + \beta + \gamma + \delta + \tau \overline{T}_{t|D=1} + \theta \quad (2)$$

$$E_{01} \equiv E(PM|R=0, D=1) = \alpha + \beta + \tau \overline{T}_{t|D=1} + \theta$$

$$E_{10} \equiv E(PM|R=1, D=0) = \alpha + \gamma + \tau \overline{T}_{t|D=0}$$

$$E_{00} \equiv E(PM|R=0, D=0) = \alpha + \tau \overline{T}_{t|D=0}$$

이렇게 정의된 기댓값을 이용하면 정책의 순수효과는 식 (3)과 같이 정리된다.

$$\delta = (E_{11} - E_{01}) - (E_{10} - E_{00}) \quad (3)$$

기본 회귀식으로 식 (1)을 사용하였으나, 정책대상지역과 비교대상지역의 기후특성을 반영하는 통제변수를 추가한 식 (4)에 대해서도 분석하였다. 정책효과가 진정 외생적이라면 식(1)에서 추정된  $\hat{\delta}$ 이나 식(4)에서 추정된  $\hat{\delta}$ 의 차이가 크게 민감하지 않게 나와야 할 것이다. 다만, 식(4)를 이용할 경우 표준오차의 크기를 줄일 수 있어 보다 유의미한 결과를 도출하기 용이하다는 점에서 두 회귀식을 모두 활용하였다. 본고에서는 OLS (Ordinary Least Squares)로 DID 계수를 추정하고 유의수준의 추정에는 강건한 표준오차(robust standard error)를 이용하여 계산하였다.

$$PM_{jty} = \alpha + \beta D_{ty} + \gamma R_j + \delta D_{ty} \cdot R_j + \tau T_t + \theta Y_y + \mu X_{jty} + \epsilon_{jty} \quad (4)$$

$X$ : 해당 지역의 기후특성변수로 본 연구에서는 강수량, 일평균풍속, 일최대풍속, 일최저기온, 일최고기온을 사용함

## 2. 분석자료

분석대상 자료는 대기 중 미세먼지 농도이며, 이를 지역별·기간별로 구분하여 사용하였다. 해당 자료는 환경관리공단의 에어코리아에서 수집하였다.<sup>2)</sup> 노후 석탄화력발전소의 기준은 준공된 지 30년이 넘는 발전소를 뜻한다. 우리나라에 30년 이상 된 노후 석탄화력발전소는 총 10기가 있으며, 이번 조치로 인해 호남 1·2호기를 제외한 8기가 한시적으로 가동을 중단하였다. 가동중단 된 노후 석탄화력발전소는 총 8기로 이 중 4기는 충남지역(서천 1·2호, 보령 1·2호)에, 2기는 경남지역(삼천포 1·2호)에, 나머지 2기는 강원지역(영동 1·2호)에 분포하고 있다.

2) 웹 주소는 <http://www.airkorea.or.kr/>이며, 강릉의 초미세먼지는 ‘강릉시 옥천동 327-2 옥천동 주민센터’의 수치를, 삼척의 초미세먼지는 ‘삼척시 남양동 339-1 남양동 주민센터 3층 옥상’의 수치를 사용하였다. 마지막으로 백령도의 초미세먼지는 ‘인천 옹진군 백령면 연화리 산241-2’의 일평균 대기 중 초미세먼지 농도 값을 사용하였다.



〈표 1〉 30년 이상 된 노후 석탄화력발전소 현황

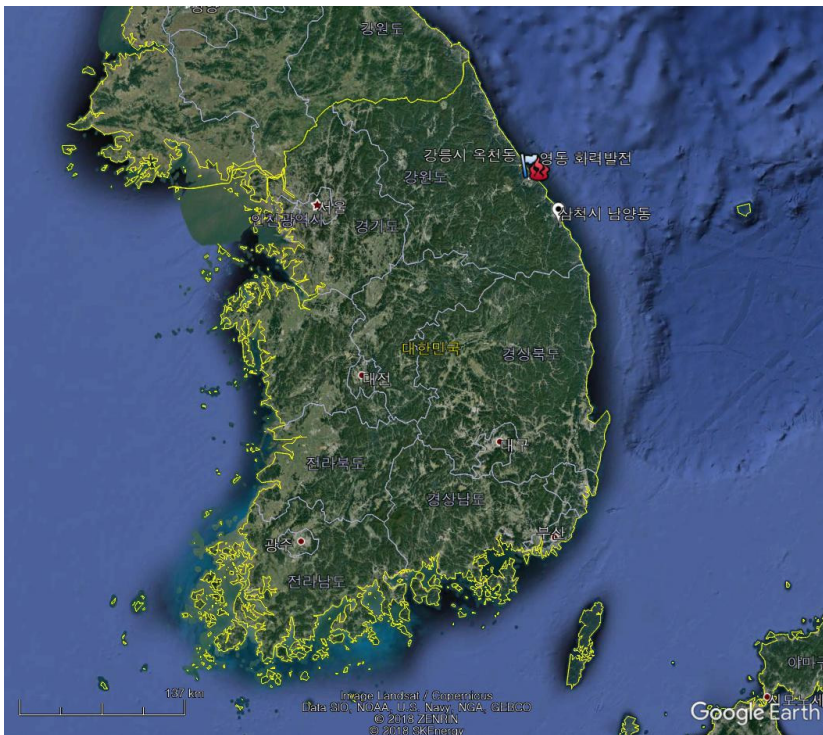
발전기명	소재지	준공연도	설비용량 (kW)	발전량 (2015년 기준, GWh)
호남1/호남2	전남 여수	1973년	각 25만	1,870/1,902
영동1/영동2	강원 강릉	1973, 1979년	12.5만/20만	969/1,409
서천1/서천2	충남 서천	1983년	각 20만	1,256/1,271
삼천포1/삼천포2	경남 고성	1983, 1984년	각 56만	3,963/4,467
보령1/보령2	충남 보령	1983, 1984년	각 50만	3,813/3,759

주: 호남1·2발전기는 이번 일시 가동중단 대상에서 제외.

자료: 중앙일보 블로그([http://blog.joins.com/media/folderlistslide.asp?uid=stoncold&folder=2&list\\_id=15061553](http://blog.joins.com/media/folderlistslide.asp?uid=stoncold&folder=2&list_id=15061553)). 원자료: 산업통상자원부.

연합뉴스(<http://www.yonhapnews.co.kr/bulletin/2017/05/15/0200000000AKR20170515107900001.HTML?input=1195m>), 원자료: 환경부·한국남동발전.

〈그림 1〉 분석대상지역들의 지리적 위치

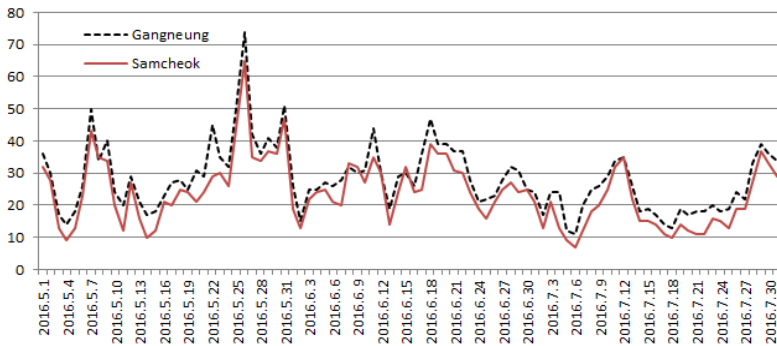


자료: Google Earth에서 저자 가공.

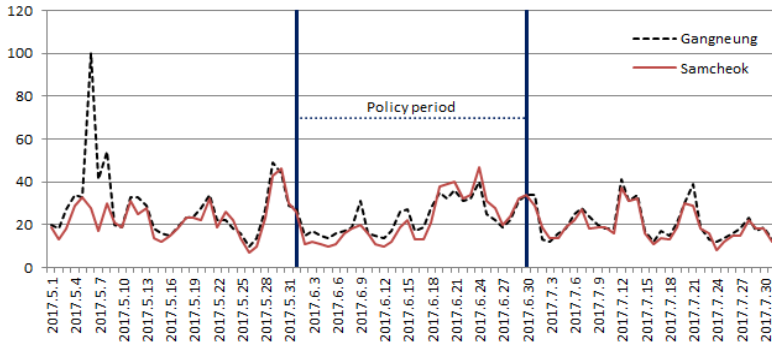
본고에서는 각 지역별로 일간 미세먼지의 농도가 제공되는 지점(station) 중 가동중 단 조치대상 발전소에서 가장 가까이 위치하는 지점을 실험군으로 삼았다. 그리고 발전소로부터 반경 20km보다는 멀리 위치하고 있으나 지리적·지형적 특성은 유사하게 간주될 만큼 가까운 지역의 지점을 대조군으로 설정하였다.<sup>3)</sup> 이러한 조건을 가장 잘 만

〈그림 2〉 강릉시 옥천동과 삼척시 남양동의 초미세먼지 농도 흐름

(a) 2016년 5~7월 (단위:  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )



(b) 2017년 5~7월 (단위:  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )



자료: Air Korea의 농도자료로 저자 가공.

3) 석탄 화력발전에서 발생한 대기오염 물질에 영향을 받는 지역적 범위(exposure radius 혹은 treatment radius)는 기상 조건, 발전소의 특징, 그리고 오염 물질에 따라 달라진다(Clay et al., 2015). 또한 화력 발전 관련 경험적 연구 역시 다양한 지역적 범위를 연구에 적용해 왔다. 구체적으로 Gupta and Spears(2017)는 지구(district)를 기준으로 화력발전이 인근지역 주민의 건강에 미치는 영향을 분석하였다. Clay et al. (2015)은 화력발전소에서 반경 30mile (약 48km)을 대조군과 실험군으로 나누는 기준으로 설정하였다. 하지만 Clay et al. (2015)의 기준은 화력발전소 관련 배출 규제가 없었던 시기의 자료를 바탕으로 하였으며, 일리노이 주의 가장 큰 화력발전소 9개를 기준으로 하였다. 본 연구에서는 실험군과 대조군의 지리적 그리고 지역적 유사성을 유지하기 위해 앞서 언급한 논문에서 사용한 기준 중 가장 작은 크기의 지역적 범위를 이용하였다.

족하는 지역은 강원지역이었다(<그림 1> 참고). 영동 화력발전소에서 가까운 강릉시 옥천동 지점은 발전소와의 직선거리가 약 7km로 실험군이 되기에 적합한 위치로 판단되었다. 삼척시 남양동 지점은 영동 화력발전소와의 직선거리가 약 40km로 적절한 거리를 가지면서도 실험군과 비교적 유사한 지리적·지형적 여건을 가지고 있어 대조군으로 설정하였다.

본고에서 분석대상으로 삼고 있는 두 지역으로 이중차분법을 수행하기 위해서는 두 지역이 공통추세가정(parallel trend assumption)을 만족시켜야 한다. 이를 확인하기 위해 정책과 상관없는 2016년 5월부터 7월까지 석 달 동안의 두 지역 초미세먼지 농도의 흐름을 살펴보면 <그림 2>의 패널(a)와 같다. 두 지역의 초미세먼지 농도는 매우 유사한 흐름을 가지고 있으면서도 강릉의 초미세먼지 농도가 거의 모든 날에 삼척보다 소폭 높음을 알 수 있다. 정책이 시행된 2017년에도 5월 초에 강릉에서의 농도가 치솟은 이상치(outlier)가 있기는 하나 공통추세는 대체로 유지되고 있는 모습을 볼 수 있다. 2016년과 차이가 있다면 정책기간인 2017년 6월 한 달 중 6월 19일부터 30일까지는 두 지역 초미세먼지 농도 역전현상이 나타나고 있다는 점이다. 그리고 정책이 끝난 6월 말 이후에는 다시 두 지역 초미세먼지 농도 역전현상이 사라짐을 볼 수 있다. 이로 보건데, 노후 석탄화력발전소의 가동중단에 따른 정책효과가 어느 정도 있을 가능성을 예상해 볼 수 있으며, 다만 그 통계적 유의성은 회귀분석을 바탕으로 논할 수 있겠다.

분석기간은 가동중단 조치가 시행된 2017년 6월 및 그 직전인 5월을 대상으로 삼았다. 여기에 공통추세를 보이고 있는 전년동기인 2016년 5, 6월도 함께 분석기간에 포함하여 분석의 오차를 줄였다. 한편, 이번 조치는 한 달간의 단기적인 정책이어서 정책 시행 전과 시행기간을 비교할 수도 있지만 마찬가지로 정책 시행기간과 정책 시행 후를 비교하는 것도 고려할 수 있다. 따라서 본고에서는 2017년 6, 7월 및 2016년 6, 7월을 분석기간으로 하여서도 분석을 병행하였다. 또한, 미세먼지의 경우 1차 생성(직접 발생)뿐 아니라 2차 생성의 영향도 큰 것으로 알려져 있다. 그리고 전에 생성된 미세먼지가 대기 중에 정체되어 계속 영향을 줄 가능성도 배제할 수 없다. 이러한 점을 감안하여 시행 전과 시행기간을 비교할 때는 시행 시작 후 5일을, 시행기간과 시행 후를 비교할 때는 시행 시작 후 5일과 시행 종료 후 5일을 표본에서 제외하였을 경우에 대해서도 함께 분석하였다.

각 지역의 분석자료에 대한 기초통계량은 <표 2>에 정리되어 있다. 2016년 5~7월과

2017년 5~7월의 초미세먼지의 농도를 비교하면 강릉시 옥천동과 삼척시 남양동 모두 2016년보다 2017년에 평균적으로 낮아졌음을 알 수 있다. 각 지역의 기상변수로는 강수량, 일평균풍속, 일최고풍속, 일최저기온, 일최고기온을 사용하였다.<sup>4)</sup> 이외에도 고려해 볼 수 있는 기상변수로는 습도, 풍향, 일평균기온 등이 있다. 그러나 습도는 강릉시 옥천동 지점에서 수치가 제공되지 않으며, 풍향도 적절한 가용변수가 없다는 한계가 있다. 현재 기상자료개방포털에서 제공하는 풍향 관련 일단위(daily) 변수는 ‘최대 풍속 풍향’ 이다. 이는 최대 풍속을 기록한 시점에서의 풍향정보로 본고의 분석에 적용하기는 부적절한 측면이 있다. 일평균기온에 대한 자료는 공개되어 있으나 변수 간 상관관계를 볼 때 일평균기온은 일최저기온 및 일최고기온과 상관성이 매우 높아 본 연구의 통제변수에서는 배제하였다(<표 3> 참고).

지리적·지형적 여건이 유사한 인근 지역을 대조군으로 삼아 이중차분법을 활용하는 것은 해외요인을 포함한 다양한 요인이 혼재된 초미세먼지 농도에서 정책의 순효과를 식별할 수 있다는 장점이 있음은 이미 상술한 바와 같다. 하지만 우리나라 초미세먼지 농도는 해외요인, 그 중에서도 특히 중국에 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 이에 따라 본고에서는 중국요인을 대표하는 변수로 백령도 초미세먼지 농도를 식(4)에 포함하여 본 연구 결과의 강건성을 점검하였다.

백령도의 초미세먼지 농도를 중국에서 불어오는 초미세먼지의 영향을 나타내는 대체변수(proxy)로 사용한 것은 백령도가 가지는 두 가지 특징 때문이다. 첫째는 백령도의 지리적 위치이다. 백령도는 중국의 황사나 초미세먼지가 우리나라 방향으로 이동하는 경로에 위치한 우리나라 영토 중 가장 중국에 가까운 지역이다. 둘째는 백령도가 국가배경농도 지역이라는 점이다. 배경농도는 인위적인 오염원으로부터 발생하는 오염물질에 직접적으로 영향을 받지 않는 장소의 농도를 말한다. 이 두 가지 특징을 고려한다면 백령도의 초미세먼지 농도는 국내요소에 의한 효과가 아닌 중국발 미세먼지 효과를 보여주는 대체변수로 적절할 것으로 판단된다(이동규, 2016).

4) 해당 기상변수들은 기상청 기상자료개방포털(<https://data.kma.go.kr>)에서 자료조회를 통해 수집하였다. 강릉은 종관기상관측자료의 105지점을, 삼척은 방재기상관측자료의 876지점을 사용하였다.

〈표 2〉 분석대상지역별 주요 변수 기초통계량

(단위:  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , mm, m/s,  $^{\circ}\text{C}$ )

지역	변수	기간	평균	표준편차	최대값	최솟값
강릉	PM <sub>2.5</sub>	2016년 5~7월	28.18	10.26	74	11
		2017년 5~7월	24.41	12.02	100	10
	강수량	2016년 5~7월	5.42	17.56	96	0
		2017년 5~7월	3.16	10.98	95.5	0
	일평균풍속	2016년 5~7월	1.93	0.79	5.3	0.8
		2017년 5~7월	2.21	0.99	5.3	0.7
	일최고풍속	2016년 5~7월	4.44	1.51	9.9	2.5
		2017년 5~7월	4.82	1.77	11	2
	일최저기온	2016년 5~7월	17.92	4.02	27.8	8.6
		2017년 5~7월	18.81	4.85	28.5	8.7
	일최고기온	2016년 5~7월	26.12	3.76	35.1	17.5
		2017년 5~7월	27.06	4.49	37.1	17.2
삼척	PM <sub>2.5</sub>	2016년 5~7월	23.76	10.05	65	7
		2017년 5~7월	21.55	9.00	47	7
	강수량	2016년 5~7월	4.07	16.07	130	0
		2017년 5~7월	2.19	5.80	33	0
	일평균풍속	2016년 5~7월	1.63	0.60	4.6	0.6
		2017년 5~7월	1.64	0.55	3.3	0.6
	일최고풍속	2016년 5~7월	7.92	2.91	24.6	4.4
		2017년 5~7월	8.35	3.02	23.1	3.9
	일최저기온	2016년 5~7월	17.00	3.78	25.2	8
		2017년 5~7월	17.69	4.73	26.6	7.7
	일최고기온	2016년 5~7월	24.96	3.51	34.4	16
		2017년 5~7월	25.88	4.25	35.3	17.2
백령도	PM <sub>2.5</sub>	2016년 5~7월	20.30	12.75	69	3
		2017년 5~7월	20.83	11.69	69	3

〈표 3〉 기상변수 간 상관관계(표본 크기: 243개)

	강수량	일평균풍속	일최고풍속	일평균기온	일최저기온	일최고기온
강수량	1					
일평균풍속	-0.0707	1				
일최고풍속	-0.0129	0.4117	1			
일평균기온	-0.2229	0.1311	-0.1644	1		
일최저기온	-0.0776	-0.011	-0.2477	0.8601	1	
일최고기온	-0.251	0.2274	-0.0494	0.9306	0.6873	1

## IV. 분석결과

본 장에서는 이중차분법 분석결과를 소개하고 기존에 정부에서 공개한 정책효과와의 비교를 통해 분석결과의 함의와 한계에 대하여 설명하고자 한다.

### 1. 이중차분법 분석결과

강원지역권의 이중차분법 분석결과는 <표 4>와 <표 5>에 정리되어 있다. 각 표에서 모형 1은 지역별 기상특성을 나타내는 변수를 포함하지 않은 식 (1)을 회귀식으로 사용하는 경우이고, 모형 2는 기상변수들을 통제변수로 추가한 식 (4)를 회귀식으로 사용한 경우이다. 모형 3은 중국발 요인을 명시적으로 한 번 더 통제하기 위해 중국발 요인의 대체변수로 백령도의 초미세먼지 농도를 식 (4)에 추가한 회귀식을 사용한 경우이다. 모형 1, 2, 3에 대하여 모형 1', 2', 3'는 정책시행 시작 직후와 종료 직후 5일 간을 표본에서 제외하고 분석한 경우이다. 앞 장에서 설명한 바와 같이, 정책을 시작한 직후에는 정책시작 직전까지 배출된 초미세먼지가 대기에 계류되어 있을 가능성도 있고, 정책 직전 배출된 질소산화물 등과 같은 전구물질들에 의해 2차 생성된 초미세먼지가 발생할 수도 있다. 따라서 정책시행 초기 며칠은 분석에서 아예 제외하는 것이 순수한 정책효과를 도출하기 적절할 수 있다. 마찬가지로 논리로, 정책종료 직후 며칠은 정책종료 직전의 대기여건이 유지될 가능성이 있다는 점에서 정책시행 후를 비교할 경우, 정책종료 직후 며칠을 표본에서 제외하는 것이 효과비교에 더 적절하게 될 것이다.<sup>5)</sup>

기본 식을 활용한 모형 1의 경우, 노후 석탄화력발전소가 동중단 조치 이전 대비 가동중단으로 인해 평균적으로  $3.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도가 감소하는 것으로 추정되었으나 통계적으로는 유의하지 않은 것으로 나타났다(5월 vs. 6월 비교). 대신 통제변수까지 모두 포함하여 추정한 결과(<표 4>의 모형 2와 3), 이전 대비 가동중단으로 인해 평균적으로  $3.7\sim 3.8\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도가 감소하는 것으로 추정되었고, 모두 10% 이하의 유의수준에서

5) 정책시행 직후 및 정책종료 직후 며칠을 표본에서 제외하는 것이 적절한지에 대해서는 논의의 여지가 있다. 따라서 5일 단위로 표본에서 제외하는 일수를 늘려가면서 분석을 반복하였으며, 표본에서 제외되는 일수가 늘어날수록 정책효과(DID 계수)의 유의성이 더 높아져 본고에서는 5일을 제외한 모형의 결과만을 소개하였다.

통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 게다가 정책 이외의 효과가 결합될 수 있을만한 기간을 제외한 모형(<표 4>의 모형 2', 3')에서는 농도 감소 효과도  $4.4\sim 4.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 더 커졌고, 그 통계적 유의성도 더 높아졌다. 한 달이라는 비교적 단시간의 정책시행임에도 불구하고 대기상의 농도 변화가 통계적으로 유의할 만한 수준으로 나타났다는 점은 눈여겨 볼 결과라 할 수 있다. 또한, 지역별 특성변수로 기상의 차이를 통제한 모형 2나 지역별 기상 특성 차이와 중국발 요인까지 함께 통제한 모형 3에서도 정책효과를 나타내는 DID 계수 추정값이 기본 모형과 거의 유사한 수준에서 산출되었다는 점에서 가동중단 정책이 이중차분법 분석을 하기에 적절한 외생성을 가지고 있다는 해석도 가능하다.

한편, 발전소 가동중단 조치기간과 재가동 이후 기간을 비교한 분석(6월 vs. 7월 비교)에서도 평균적으로  $2.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 감소가 계산되었으나 통계적으로 유의미한 숫자는 아닌 것으로 나타났다(<표 5>의 모형 2, 3). 기간을 절단한 모형(<표 5>의 모형 2', 3')에서는 어느 정도의 통계적 유의성이 나타나기는 하였으나 5, 6월 비교모형에 비해 그 결과가 명백하지 않아 보인다. 기본 식과 통제변수를 포함한 식의 추정계수값의 차이도 모형마다  $0.8\sim 1.0$ 가량으로 5, 6월 비교모형의 추정계수값의 차이 수준인  $0.1\sim 0.3$ 보다 더 크다. 외생성 측면에서도 상대적으로 5, 6월 비교모형이 더 적절한 비교분석임을 알 수 있다. 가동중단 조치가 외생적이라고 가정한다면 지역별 특성변수의 추가여부가 DID 계수 추정값을 크게 변동시키지 않기 때문이다. 만약 지역별 특성변수에 의해 교차항의 계수 추정값이 급격히 바뀐다면 가동중단 조치가 내생성이 있다고 의심할 수 있으며, 이 경우 이중차분법 추정값은 인과효과라고 해석하기 곤란하다(강창희 외, 2013, p.102).

참고로, 연도더미나 정책더미, 지역더미의 부호는 일반상식에 부합하는 결과라 할 수 있다. 우선, 연도더미의 계수는 초미세먼지의 평균 농도가 해마다 추세적으로 낮아지고 있다는 점에서 음수로 나오는 것이 예상과 부합하는 결과이다. 정책더미와 관련해서는 일반적으로 봄에서 여름으로 갈수록 초미세먼지의 농도는 낮아지는 경향을 보인다. 특히, 5, 6월은 상대적으로 농도 차이가 크지 않지만, 7월에는 장마가 시작되면서 강수량이 많아져 강수에 의해 대기 중의 초미세먼지 농도가 상당히 저감된다. 정책더미는 실질적으로 월 단위 평균 농도변화를 의미하므로 5월과 비교하면 정책 시행기간(6월)에 농도가 더 낮게 나오거나 통계적으로 유의미하지 않은 값이 나오는 것이 자연스럽다. 반면, 7월과 비교하면 정책 시행기간에 농도가 더 높게 나오는 것은 쉽게 예측할 수 있는 결과가

〈표 4〉 이종차분법 회귀분석결과(5월 vs. 6월 비교 시)

	모형 1	모형 2	모형 3	모형 1'	모형 2'	모형 3'
시 간	0.098** (0.045)	-0.309*** (0.068)	-0.268*** (0.066)	0.080* (0.046)	-0.308*** (0.069)	-0.267*** (0.067)
연도 더미	-1.471 (2.055)	-4.528** (1.935)	-3.970** (1.861)	-1.743 (2.062)	-4.550** (1.934)	-3.969** (1.861)
정책 더미	-3.963 (2.694)	3.171 (2.448)	2.634 (2.528)	-1.937 (2.932)	3.901 (2.577)	3.079 (2.739)
지역 더미	4.891*** (1.690)	1.464 (2.057)	2.287 (1.917)	4.891*** (1.688)	1.309 (2.111)	2.102 (1.960)
<b>교차항</b>	<b>-3.591</b> <b>(2.845)</b>	<b>-3.704*</b> <b>(2.073)</b>	<b>-3.801*</b> <b>(2.253)</b>	<b>-4.091</b> <b>(3.042)</b>	<b>-4.440**</b> <b>(2.221)</b>	<b>-4.526*</b> <b>(2.490)</b>
강수량		0.035 (0.105)	0.093 (0.103)		-0.069 (0.115)	-0.016 (0.105)
일평균풍속		-1.877 (1.607)	-2.367* (1.406)		-1.700 (1.647)	-2.201 (1.444)
일최고풍속		-0.446 (0.315)	-0.395 (0.277)		-0.489 (0.331)	-0.441 (0.291)
일최저기온		1.933*** (0.340)	1.751*** (0.311)		1.945*** (0.345)	1.778*** (0.314)
일최고기온		0.445* (0.247)	0.249 (0.261)		0.371 (0.258)	0.181 (0.270)
백령도 PM <sub>2.5</sub>			0.212*** (0.058)			0.209*** (0.058)
상수항	23.249*** (1.915)	2.739 (3.604)	4.397 (3.319)	23.811*** (1.948)	4.499 (3.784)	5.782* (3.492)
표본 크기	244	243	243	234	233	233
F-value	7.42	12.7	15.13	5.34	10.74	12.83
Prob > F	0	0	0	0.0001	0	0
R-squared	0.095	0.349	0.394	0.074	0.325	0.371

주: 추정계수값에 있는 별표는 유의수준을 나타내며, \*는 10%, \*\*는 5%, \*\*\*는 1%의 유의수준에서 통계적으로 유의미한 값을 의미함. 추정계수값 아래의 괄호는 강건한 표준오차를 의미함. 백령도의 대기 중 PM<sub>2.5</sub>농도는 중국에서 유입된 초미세먼지의 영향을 통제하기 위해 이용하였음.



〈표 5〉 이중차분법 회귀분석결과(6월 vs. 7월 비교 시)

	모형 1	모형 2	모형 3	모형 1'	모형 2'	모형 3'
시 간	-0.059 (0.037)	-0.366*** (0.038)	-0.352*** (0.039)	-0.091** (0.039)	-0.380*** (0.040)	-0.365*** (0.041)
연도 더미	-3.027** (1.373)	-7.703*** (1.222)	-7.510*** (1.208)	-2.058 (1.496)	-6.790*** (1.340)	-6.684*** (1.325)
정책 더미	2.030 (2.603)	9.433*** (2.097)	8.985*** (2.178)	2.568 (2.783)	9.158*** (2.190)	8.719*** (2.276)
지역 더미	3.217*** (1.153)	-0.053 (1.593)	0.391 (1.609)	3.425*** (1.179)	-0.484 (1.732)	-0.098 (1.749)
<b>교차항</b>	<b>-1.917</b> <b>(2.759)</b>	<b>-2.726</b> <b>(1.811)</b>	<b>-2.742</b> <b>(1.872)</b>	<b>-2.625</b> <b>(2.988)</b>	<b>-3.604*</b> <b>(1.939)</b>	<b>-3.625*</b> <b>(2.022)</b>
강수량		-0.073*** (0.019)	-0.073*** (0.019)		-0.063*** (0.020)	-0.064*** (0.021)
일평균풍속		-2.739** (1.134)	-3.102*** (1.116)		-2.883** (1.217)	-3.292*** (1.170)
일최고풍속		-0.615 (0.376)	-0.553 (0.380)		-0.779* (0.423)	-0.735* (0.426)
일최저기온		2.091*** (0.276)	2.033*** (0.281)		2.069*** (0.288)	2.020*** (0.292)
일최고기온		0.439*** (0.159)	0.388** (0.158)		0.430*** (0.162)	0.385** (0.160)
백령도 PM <sub>2.5</sub>			0.085* (0.044)			0.085* (0.044)
상수항	26.108*** (2.361)	2.842 (4.061)	2.923 (4.027)	27.998*** (2.476)	5.643 (4.334)	5.554 (4.296)
표본 크기	244	243	243	224	223	223
F-value	4.75	22.67	21.51	5.15	21.48	20.17
Prob > F	0.0004	0	0	0.0002	0	0
R-squared	0.073	0.500	0.509	0.089	0.496	0.506

주: 추정계수값에 있는 별표는 유의수준을 나타내며, \*는 10%, \*\*는 5%, \*\*\*는 1%의 유의수준에서 통계적으로 유의미한 값을 의미함. 추정계수값 아래의 괄호는 강건한 표준오차를 의미함. 백령도의 대기 중 PM<sub>2.5</sub>농도는 중국에서 유입된 초미세먼지의 영향을 통제하기 위해 이용하였음.

다. 정책더미와 함께 시간변수의 계수도 같은 맥락에서 음수가 될 것으로 예상할 수 있다. 지역더미의 경우, 발전소 인근지역이 발전소에서 떨어진 지역보다 초미세먼지의 농도가 높을 것이므로 지역더미의 계수가 양수로 나오는 것 또한 일반상식에 부합한다고 할 수 있다.

마지막으로, 모형 3에서 중국발 요인이 강원지역의 초미세먼지 농도와 유의미하게 강한 양의 상관관계가 있다는 결과 역시 우리나라가 중국의 초미세먼지에 크게 영향 받고 있다고 알려진 내용과 일관적인 결과이다. 중국발 요인이 포함될 때 정책더미나 연도더미, 상수항 등의 계수 추정값은 변동하지만 정책효과를 나타내는 DID 계수에는 거의 영향을 주지 않는다는 것은 본고 결과의 강건성(robustness)을 지지해 준다. 연도더미나 정책더미 등은 중국발 요인이 시기적으로 다르게 영향을 준다는 점에서 중국발 요인과 상관성이 있을 가능성이 높으며 그러한 이유에서 모형 2와 3에서 각 계수 추정값이 차이가 나는 것은 자연스러운 결과로 보인다. 그러나 DID 계수는 이중차분법 자체가 해외요인에 대해 충분히 통제하고 있어 중국발 요인이 변수로 추가되어도 그 계수 추정값에 거의 변화가 없는 것으로 나타났다.

## 2. 환경부 발표결과와의 비교

본 절에서는 정부에서 발표한 가동중단 조치 효과와 지금까지 본고에서 논의한 이중차분법을 이용한 분석결과와 비교하고자 한다. 정부에서 발표한 가동중단 조치 효과 중 농도 변화에 대한 것은 충남지역을 대상으로 분석한 결과를 발표하였다. 이에 반해, 본고의 이중차분법 분석은 실험군의 위치적 한계로 인해 충남지역 대신 강원지역에 대하여 진행하였다. 따라서 본고의 결과와 정부에서 발표한 결과를 서로 보완적으로 함께 고려하는 것이 정책효과를 이해하는 데에 도움이 될 것으로 판단된다.

정부에서 발표한 충남지역의 미세먼지 농도비교는 반경 70km 내의 측정망, 측정차량, 간이측정기를 활용하여 40개 지점에서 진행되었다. 그 결과 미세먼지의 농도가 2015년 6월, 2016년 6월의 평균인  $26\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 비해 2017년 6월에는  $4\mu\text{g}/\text{m}^3$  감소된 것으로 조사되었다. 이러한 감소량은 금년 6월이 최근 6월 평균과 대비하여 다른 모든 조건들에 의한 결과이다. 보도자료에서도 이를 고려하여, 올해 6월이 강수일수와 평균풍속

등은 예년과 유사하였으나 풍향과 외부오염물질 유입 조건 등은 예년보다 더 여건이 좋았음을 함께 설명하였다. 6) 충남지역에서 가동중단 조치에 따른 미세먼지 농도의 저감 효과는 BFM기법의 대기질 모형을 이용하였다. <표 6>을 볼 때, 대기질 모형은 충남지역 전반에 대한 평균 감소효과와 가동중단 조치에 가장 영향을 많이 받은 지점의 평균 감소효과 및 하루(또는 한 시간단위) 최대 감소효과를 함께 추정하고 있다.

이에 반해, 이중차분법 분석에서 추정하는 감소효과는 평균 농도상의 변화이다. 또한, 감소효과를 분석하는 지역도 발전소 주변지역이다. 즉, 발전소에서 나오는 매연에 직접적으로 영향을 받을 정도의 거리 내에 있는 지역과 그 밖에 위치한 지역 간의 월 평균 농도 차이 중 가동중단에 따른 효과를 추출하는 것이다. 따라서 정부에서 발표한 대기질 모형에서 다른 분석대상지역은 이중차분법이 대상으로 하는 분석지역과 다르며, 분석대상인 농도의 개념도 이중차분법 분석이 평균 농도만을 다룬 데에 반해 대기질 모형은 평균 농도뿐 아니라 일(또는 시간당) 최대 농도에 대해서도 분석하고 있어 보다 광범위하다고 하겠다. 그럼에도 불구하고, 대기질 모형에서 추정한 일 최대 감소값( $3.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ )이 본고의 이중차분법에 의한 감소 추정값( $3.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ )과 크게 다르지 않다는 것은 흥미로운 점이다.

<표 6> 가동중지에 따른 모델링 결과('17.6)

(단위:  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

구분		중단 전	중단 후	감소량
충남	월 평균	26.3	26.0	0.3 (1.1%)
최대 영향 지점	월 평균	24.5	23.7	0.8 (3.3%)
	일 최대	39.6	36.2	3.4 (8.6%)
	시간 최대	67.5	58.0	9.5 (14.1%)

자료: 환경부(2017a) p.3의 표.

6) 이 문단에서 다루는 환경부 보도자료 내용은 환경부(2017a) pp.2~3을 부분적으로 직접 인용하거나 정리하여 기술하였다.

## V. 결론

본고에서는 노후 석탄화력발전소의 가동이 대기의 초미세먼지 농도에 미치는 영향을 추정하고자 하였다. 이를 위해, 2017년 6월 한 달 동안 시행된 노후 석탄화력발전소 가동중단 조치라는 정책실험에 대하여 이중차분법이라는 미시계량분석기법을 활용하여 가동중단 전후의 대기 중 초미세먼지 농도를 비교하였다. 분석결과, 정책시행 전인 5월과 비교할 때 약  $3.7\sim 4.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 감소효과 있었던 것으로 추정되었다. 이러한 감소분은 강릉시 옥천동의 2017년 5월 평균 초미세먼지 농도인  $28.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 약 13~15% 수준이다. 정책시행 후인 7월과도 비교하였는데, 이 경우 약  $2.7\sim 3.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 평균적인 감소가 계산되었으나 통계적으로 유의성도 약하였으며 인과관계로 인식하기에도 상대적으로 부족한 결과로 보인다.

분석결과를 바탕으로 할 때, 노후 석탄화력발전소가 대기 중의 초미세먼지 농도에 기여하는 바는 무시하기 어려운 수준일 수 있다. 특히, <표 1>에서 보듯, 지난 가동중단 조치의 대상이 된 강릉지역 노후 석탄화력발전소의 발전량은 다른 지역의 노후 석탄화력발전소의 발전량에 비해 상대적으로 작은 수준이다. 즉, 더 많이 발전해 오던 타 지역의 노후 석탄화력발전소는 본고에서 추정한 기여수준보다 더 높은 정도로 대기 중의 초미세먼지 농도에 영향을 줄 수 있다. 발전소가동중단 조치는 발전소 주변지역에 대한 초미세먼지의 농도를 줄이기 위한 유효한 수단이 될 수 있음을 암시한다. 이러한 점에서 노후 석탄화력발전소 대체방안을 도모하는 것은 정책적으로 충분한 가치를 가지는 노력으로 평가받을 수 있다.

다만, 본고의 결과를 해석하는 데에는 몇 가지 주의할 점이 있다. 먼저, 본고의 분석에서는 발전소 주변지역과 지리적으로 30~40km 떨어진 지역과 비교하여 초미세먼지 농도 저감효과를 추정하였다. 즉, 이러한 농도 저감효과는 발전소에서 가까운 지역에서 기대할 수 있는 수치이다. 발전소 주변 지역에서 노후 석탄화력발전소의 가동중단으로  $3.7\sim 4.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도가 저감되었더라도 발전소에서 먼 곳에서는 이러한 수준의 저감효과를 기대하기는 어렵다. 다음으로, 가동중단 정책의 초미세먼지 농도 감소율이 13~15% 수준이라는 것은 그 기준이 5월의 초미세먼지 농도이다. 따라서 초미세먼지의 농도가 높은 2~4월 사이를 기준으로 한다면 그 감소율은 더 낮을 수밖에 없다. 마지막으

로, 가동중단 조치가 완전한 자연실험은 아닌 까닭에 분석상 한계도 존재한다.

마지막으로 본문에서 설명하지 않은 분석상의 한계 몇 가지를 밝히고자 한다. 실험군과 대조군 주변의 발전소에서 정책 전후 기간 동안 실제 가동을 얼마나 했는지 발전소 가동률에 대한 통제를 분석에서는 포함하지 않고 있다. 가동률이 지역별·기간별로 다르다면 본고의 결과는 과대 또는 과소평가될 수 있다. 그러나 월단위 발전소별 가동률 자료는 저자들이 확인한 바로는 공개된 자료가 아니어서 본고에서는 다루지 못하였다. 또한, 노후 석탄화력발전소 가동중단 기간이 상대적으로 짧은 것도 이중차분법 분석으로 미세먼지 농도의 미세한 변화를 유의미하게 구별하기에는 한계가 있다. 따라서 본고에서 통제하지 못한 변수들에 대한 분석이 추가되고 정책과 관련된 변수들을 보다 정책기간이 길어져 표본수가 늘어난다면 보다 정교한 추정이 가능할 것으로 생각된다. 문재인 대통령은 2018년부터 매년 3월에서 6월까지 봄철 4개월 동안 30년 미만의 석탄화력발전소에 대해서도 교대로 가동을 중단하기로 하였다. 이러한 발표가 그대로 실현된다면 상대적으로 충분한 기간에 대하여 다양한 조건의 석탄화력발전소에 대한 가동중단 효과를 파악할 수 있을 것으로 기대한다.

## [References]

- 강창희·이정민·이석배·김세움, 『관광정책 및 관광사업 프로그램 평가방법 개발』, 문화체육관광부, 2013.7.
- 박순애·신현재, “한국의 초미세먼지의 영향요인 분석 : 풍향을 고려한 계절성 원인을 중심으로,” 『환경정책』, 제25권 제1호, 2017, pp. 227~248.
- 박호정·홍종호, “수도권 운행차 대기오염 저감사업의 효과: 실물옵션분석,” 『자원·환경경제연구』, 제23호 제3권, 2014, pp. 435~451.
- 배정환·김유선, “우리나라 대기오염배출 원인과 저감 정책 효과 분석,” 『자원·환경경제연구』, 제25권 제4호, 2016, pp. 545~564.
- 연합뉴스, “文대통령, 노후 화력발전소 6월 한달간 가동중단 지시”, 2017.5.15. (<http://www.yonhapnews.co.kr/bulletin/2017/05/15/0200000000AKR20170515107900001.HTML?input=1195m>)

- 이동규, “최근 미세먼지 이슈에 대한 소고,” 「재정포럼」, 2016년 9월호 Vol. 243, 2016, pp. 6~27.
- 한택환·임동순·박시용·김진태, “미국 전원 내 석탄화력발전 비중에 대한 환경규제 영향평가: 정성적 평가와 계량분석의 결합,” 「환경정책」, 제25호 제2권, 2017, pp. 199~230.
- 환경부, “올해 6월 한 달간 노후 석탄발전소 가동중단, 미세먼지 저감효과로 나타나”, 환경부 보도자료, 2017.7.24.(2017a).
- 환경부, “미세먼지 관리 종합대책”, 환경부 정책자료, 2017.9.26.(2017b).
- Arora, V, Y. Cai, and A. Jones, “The national and international impacts of coal-to-gas switching in the Chinese power sector”, *Energy Economics*, Vol. 60, 2016, pp. 416~426.
- Auffhammer, M, A. M. Bento, and S. E. Lowe, “Measuring the effects of the Clean Air Act Amendments on ambient PM<sub>10</sub> concentrations: The critical importance of a spatially disaggregated analysis”, *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 58, No. 1, 2009, pp. 15~26.
- Auffhammer, M. and R. Kellogg, “Clearing the Air? The Effects of Gasoline Content Regulation on Air Quality”, *American Economic Review*, Vol. 101, No. 6, 2011, pp. 2687~2722.
- Changhong, C, W. Bingyan, F. Qingyan, C. Green, and D. G. Streets, “Reductions in emissions of local air pollutants and co-benefits of Chinese energy policy: a Shanghai case study”, *Energy policy*, Vol. 34, No. 6, 2006, pp. 754~762.
- Chen, Y, G. Z. Jin, N. Kimar, and G. Shi, “The promise of Beijing: Evaluating the impact of the 2008 Olympic Games on air quality”, *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 66, 2013, pp. 424~443.
- Clay, K., J. Lewis, and E. Severnini, “Canary in a Coal Mine: Impact of Mid-20th Century Air Pollution Induced by Coal-Fired Power Generation on Infant Mortality and Property Values”, NBER Working Paper 22155, 2015.
- Evans, F. M., “The Clean Air Act Watch List: An Enforcement and Compliance Natural Experiment”, *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 2015, Vol. 3, No. 3, pp. 627~665.
- Fu, S., and Y. Gu, “Highway toll and air pollution: Evidence from Chinese cities”, *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 83, 2017, pp. 32~49.
- Gehrsitz, M., “The effect of low emission zones on air pollution and infant health”, *Journal*

- of Environmental Economics and Management*, Vol. 83, 2017, pp. 121~144.
- Greenpeace, 「Human Cost of Coal Power: How coal-fired power plants threaten the health of Indonesians」, 2015.
- Gupta, A., and D. Spears, “Health externalities of India’s expansion of coal plants: Evidence from a national panel of 40,000 households”, *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 86, 2017, pp. 262~276.
- He, G., M. Fan, and M. Zhou, “The effect of air pollution on mortality: Evidence from the 2008 Beijing Olympic Games”, *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 79, 2016, pp. 18~39.
- Wang, S., J. Xing, S. Chantani, J. Hao, Z. Kilmont, J. Cofala, and M. Amann, “Verification of anthropogenic emissions of China by satellite and ground observations”, *Atmospheric Environment*, Vol. 45, No. 35, 2011, pp. 6347~6358.
- Zhong, N., J. Cao, and Y. Wang, “Traffic Congestion, Ambient Air Pollution and Health-Evidence from Driving Restrictions in Beijing”, *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 2017, Vol. 4, No. 3, pp. 821~856.