

항공관측 결과를 활용한 당진시 대형사업장에서의 황산화물 배출량 평가

김 용 표^{1)*} · 김 세 응²⁾ · 김 종 호³⁾ · 이 태 형⁴⁾

¹⁾이화여자대학교 화학신소재공학과 겸 시스템헬스 융합전공(BK21+ 프로그램)

²⁾캘리포니아대학 어바인 지구시스템과학과

³⁾한서대학교 인프라시스템학과(환경전공)

⁴⁾한국외국어대학교 환경학과

(2020년 12월 17일 투고, 2020년 12월 21일 수정, 2020년 12월 21일 게재확정)

Estimation of SO₂ emissions in large point sources at Dangjin City using airborne measurements

Yong Pyo Kim^{1)*} · Saewung Kim²⁾ · Jongho Kim³⁾ · Taehyoung Lee⁴⁾

¹⁾*Department of Chemical Engineering and Materials Science, System Health & Engineering Major in Graduate School (BK21 Plus Program)*

²⁾*Department of Earth System Science, School of Physical Sciences, University of California, Irvine*

³⁾*Department of Infrsystem, Hanseo University*

⁴⁾*Department of Environmental Science, Hankuk University of Foreign Studies*

(Received 17 Dec 2020; Revised 21 Dec 2020; Accepted 21 Dec 2020)

Abstract

Based on the airborne measurement results over a coal fired power plant and steel work in Dangjin city, SO₂ emission amounts of each site are estimated (top-down emission). Airborne measurements were carried out on May-June and October-November 2019. The estimated SO₂ emission in 2019 for the power plant was 1502.1 kg/hr and that for the steel work was 2850.5 kg/hr, higher as much as a factor of 2.5 and 2.0, respectively, than the emission amounts provided by both facilities (bottom-up emission). The outcomes strongly illustrates that well designed airborne observations can serve a quantitative diagnostic tool for bottom-up emission estimates. Further research direction to improve the reliability of the top-down emission estimates is suggested.

Keywords: SO_x emissions, large point sources, airborne measurement, Dangjin city

*Corresponding Author
Tel : +82-2-3277-2832
E-mail : yong@ewha.ac.kr

1. 서론

충청남도는 석탄화력발전소, 제철소, 석유화학단지 등의 대형 사업장이 소재한 곳으로 대기오염물질 배출이 많은 곳이다. 충청남도의 대기오염에 관한 연구는 수도권과 비교해 그다지 많지 않았으나, 최근 대형 점오염원 영향에 관한 관심이 증가하면서 연구 결과도 여럿 나오고 있다.

오세원(Oh, 2007)은 Dust Monitor (Grimm, Model 1.107)를 사용하여 충남 16개 시/군을 권역별로 구분하여 총 7개의 측정 지점을 선정하고 2005년 5월부터 2006년 1월 측정을 수행하였다. 일평균 PM10 측정치는 국내의 대기환경기준을 모두 만족시키고 있었으나, 미세영역 먼지인 PM2.5의 경우, 천안, 당진, 보령, 연기에서 미국 일평균 PM2.5 농도 기준인 $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 일수가 관측되어, 미세영역 먼지 오염도가 PM10에 비해 심각함을 나타냈다. PM10 중 미세영역 먼지(PM1)가 차지하는 비율은 연기, 천안, 홍성이 약 64%로, 논산, 보령, 당진, 태안이 약 58~60%로, 천안, 연기, 홍성의 3개 지역이 다른 지역보다 미세영역 먼지의 비율이 높은 것으로 나타났다.

김중범 등(Kim et al., 2020)에 의하면 충남의 대기오염물질 배출량은 1999년부터 꾸준히 증가하다가 2004년을 기점으로 감소세로 돌아선 후 다시 2008년 이후 증가하는 추세이다. 특히, 2015년 이후 급격히 증가하는데, 이것은 기존에 산정하지 않았던 비산먼지와 생물성 연소가 추가되었기 때문이다. 충청남도의 대기오염물질 배출량은 경기도에 이어 2위를 차지하고, 전체적인 분율 측면에서 경기도는 증가하는 반면에, 충청남도는 조금씩 감소하고 있다.

김은혜 등(Kim et al., 2019)은 국내에서 배출량이 높은 충남 지역의 오염원별 배출량이 인구 밀집 지역인 수도권 PM2.5 농도에 미치는 영향을 대기질 모사를 통해 추정하였다. 2015년 수도권의 연평균 PM2.5 모사농도 $26.42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (관측농도 $26.70 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 중 충남 7개 배출 부문에 의한 추정 기여도는 $1.74 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 이는 전체 수도권 PM2.5 모사 농도의 6.6%에 해당한다. 계절별로 보면, 1월 $0.96 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (2.9%), 4월 $2.21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (7.8%), 7월 $2.43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (17.1%), 10월 $1.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (4.6%)로, 여

름철인 7월에 높은 기여율을 보였다. PM2.5 추정 기여도를 충남의 배출 부문별로 살펴보면 충남 자체 지역에 대해 제조업 연소($1.81 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 6.8%), 에너지산업 연소($0.72 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2.7%), 생산공정($0.71 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2.7%)의 순서로 높게 기여하며, 수도권에 대하여는 제조업 연소($0.93 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 3.5%), 생산공정($0.36 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 1.4%), 에너지산업 연소($0.23 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.9%) 순서로 높게 모사되었다. 충남과 수도권 모두에서 제조업 연소 부문의 추정 기여도가 에너지산업 연소나 생산공정에 비해 2배 이상 높게 나타나, 제조업 연소 부문에 대한 관리가 중요할 것으로 판단된다. 김순태 등(Kim et al., 2017)은 충남지역 대형 점오염원의 배출량이 배출지역 및 풍하지역 PM2.5 농도에 미치는 영향 분석을 위해 3차원 광화학 모델을 이용한 대기질 모사를 수행하였다. 특히, 입력자료 변화에 따른 영향을 살펴보기 위해 배출목록으로는 2010 CAPSS와 2013 CAPSS를 이용하였으며, 모사기간에 설정에 따른 기상변화를 고려하기 위해 2010년과 2014년에 대상으로 세 가지 사례에 대한 모사를 수행하였다. 세 가지 모사 사례에 대해 충남지역 대형 점오염원 배출량의 PM2.5 연평균 기여농도는 수도권 평균 $0.62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ - $1.64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 범위에서 나타났으며, 크게는 3배 정도 차이를 보였다. 충남지역에 대하여는 $1.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$ - $1.86 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 범위를 보였으며, 이러한 PM2.5 기여농도는 2016년 6.3대척에서 발표한 서울시 PM2.5 농도 저감목표($23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 저감)를 고려하면 저감농도($3 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 대비 30~50%를 차지할 수 있으며, 목표농도 대비 ~10%에 가까운 수치로 중요한 기여도로 판단된다.

충청남도에서도 당진시는 10기의 석탄화력발전 시설이 있는 화력발전소와 제철소가 있어, 이에 대한 주민의 민원이 상당하다. 2016년도 충청남도 시군별 대기오염물질의 총배출량을 검토하면 당진이 32.8%로 가장 큰 분율을 차지하고, 서산 13.9%, 보령 9.8%, 천안 9.2%, 태안 7.8%, 아산 5.8% 순이다. 상위 6개 도시를 살펴보면, 당진(1위), 보령(3위), 태안(5위)에 발전소가 있고, 서산(2위)에는 석유화학단지가 있으며, 천안(4위)과 아산(6위)은 도시 지역이다. 2019년 미세먼지 농도도 측정소별로는 PM10 기준 성산면 측정소(당진)가 $61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높았다(Kim et al., 2020).

손세창 등(Son et al., 2020)은 충남 지역에 위치한 11곳 대기오염측정소에서 2019년 5월 7일~6월 7일에 1시간 단위로 측정된 대기환경기준물질(PM10, PM2.5, NO₂, O₃ 및 SO₂)의 평균 농도를 검토하고, CMAQ 모델을 사용하여 초미세먼지 특성을 연구하였다. 측정 결과 PM10의 평균 농도는 태안화력발전소 인근의 측정소에서 가장 낮았으며(38±22 μg/m³), 현대제철 당진제철소가 위치한 측정소에서 가장 높았다(75±42 (9~284) μg/m³). 당진제철소의 풍하 방향에 위치한 측정소들이 그 지점 다음으로 높은 PM10 평균 농도를 보였으며, 각각 64±31 (12~246), 64±35 (1~189) μg/m³으로 나타났다. 당진제철소에 위치한 측정소에서 조사된 높은 PM10의 평균 농도는 아마도 당진제철소의 생산공정인 고로, 제강, 소성, 소결 등에서 발생한 낙광탄이 바람에 의하여 비산되어 주변 지역에 영향을 준 것으로 판단하였다. PM2.5의 평균 농도가 가장 높은 지점은 당진제철소의 풍하 방향에 위치한 아산시 둔포면의 측정소로 41±25 (2-130) μg/m³이었다. 둔포면 측정소 다음으로 당진제철소와 그 풍하 방향에 위치한 측정소들로 높았으며 각각 39±23 (3-125), 35±24 (1-119), 29±20 (1-115) μg/m³로 나타났다. CMAQ 모사 결과에 의하면, PM2.5의 고농도 사례에서는 PM2.5의 농도에 미치는 국지적 및 국외 영향의 기여도는 각각 67.6±14.5%, 39.4±14.5%로 국지적 영향의 기여도가 높았다. 반면에 사례 II와 III의 경우에는 국외 영향의 기여도가 더 높았으며, 평균적으로 74.3±15.7%와 58.7±20.1%를 차지하였다. 그러나 충남 전 지역에서 국외 영향의 기여도가 높은 사례 II 기간에도 현대제철 당진제철소가 위치한 송산면 측정소와 당진제철소의 풍하 방향에 위치한 아산시 인주면 측정소에서는 국지적 영향의 기여도가 40.0±19.3%에 이르렀다.

이복진과 박승식(Lee and Park, 2019)은 충남의 대형 점오염원(석탄화력발전소, 제철소 및 석유화학산업시설)으로부터 배출되는 대기오염물질이 주변 지역의 대기질에 미치는 영향을 파악하고, 향후 항공관측 시 비행경로와 관측시간을 사전에 조사하고자 10곳의 대기오염측정소에서 2018년 5~6월에 생산한 대기환경기준물질의 농도 자료를 분석하였다. 충남지역에서 5~6월에 조사한 PM10,

PM2.5, CO, O₃ 및 SO₂의 월평균 및 시간 최고농도는 현대제철 당진제철소가 위치한 대기오염측정소에서 가장 높았다. 특히 PM10, PM2.5 및 SO₂의 농도 증가는 매우 두드러졌다. 석유화학 산업단지가 위치한 대기오염측정소에서 O₃의 월평균 및 시간 최고농도는 충남지역에서 거의 최고 수준에 도달하였으며 SO₂의 월평균 및 시간 최고농도 역시 당진제철소 다음으로 높았다. 그러나 대기환경 기준물질의 농도 추이에서 특이한 점은 당진제철소와 석유화학 산업단지 주변의 결과와 비교해 태안화력발전소와 보령화력발전소 주변의 대기오염측정소에서 얻은 PM10, PM2.5 및 SO₂의 농도는 비교적 낮았다. 이것은 아마도 측정 기간 중 두 석탄화력발전소에서 배출되는 연기의 이동 방향과 대기오염측정소의 위치가 일치하지 않은 점과 배출 오염원과 측정 지점 사이의 짧은 거리 때문에 나타난 결과로 보인다. 이를 명확하게 밝히기 위해서는 당진시의 대기오염물질 배출의 큰 부분을 차지하는 화력발전소와 제철소의 대기오염도와 배출량을 정확하게 파악하는 것이 필요하다.

배출량은 대기관리 정책 수립에 필수적이며, 대기질 모사 결과에 대한 정확도를 결정하는 주요한 인자이다. 따라서 효과적인 대기관리를 위해서는 배출량 신뢰도에 대한 검토가 필수적이다. 특히 대형사업장의 대기오염물질 배출은 주변 지역뿐만 아니라 국내 다른 지역에도 영향을 줄 가능성이 있으므로, 정확한 배출량 자료 확보가 필수적이다.

신뢰할 수 있는 대기오염물질 배출량 자료는 대기환경 정책의 효과 평가와 수립의 필수적인 자료이다. 그러나 상향식으로 산정되는 배출량 목록의 특성상 배출량 조사 연도와 실제 사용 연도 간의 이격이 발생하므로, 실시간으로 변화하는 배출원을 반영하기 어렵다. 따라서 이용 가능한 농도 관측자료를 바탕으로 배출량의 불확실성을 간접적으로 추정하고, 모델이 관측농도를 잘 재현할 수 있도록 배출량을 보정하는 것이 필요하다. 또한, 보정한 배출량 자료를 이용하여 대기질 농도 모사를 수행하여 국내외 기여도를 재산정하는 것이 필요하다.

범부처 미세먼지 프로젝트 사업단에서는 2019년 봄과 가을에 충청남도에서 항공관측을 통해 대형 점오염원의 대기오염물질 농도를 측정하고, 이를 바탕으로 배출량을 추산하고 있다. 본 연구에서는

당진시 상공에서 항공관측한 SO₂ 자료를 바탕으로 배출량을 추산하여 사업장에서 자체 평가한 배출량과 비교하여 앞으로의 연구 방향에 대해 논의하였다.

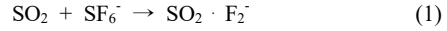
2. 연구방법

2.1 측정

항공관측은 2019.05.01.-2019.06.08.과 2019.09.23.-2019.11.09. 사이 총 145시간 수행하였다. 항공관측의 주요 목적은 상공으로 배출되는 대형 점오염원(화력발전소나 산업공단) 중심으로 미세입자를 생성하는 가스상 전구물질과 1·2차 미세먼지 발생 및 생성 과정을 관측하는 것으로 충청남도의 석탄화력발전소(태안, 보령, 당진), 산업단지(대산석유화학단지, 현대제철 및 철강단지)이다.

SO₂ 관측은 한서대학교 중형항공기 B1900D상에 SF₆⁻ 이온을 이용하는 화학이온화법 질량분석기(SO₂ CIMS)를 탑재하여 수행하였다. 이와 함께 비행기에 장착된 기상관측장비를 이용하여 3차원 바람장과 온도, 습도, 그리고 고도에 대한 관측도 지

속적으로 수행하였다. SO₂ CIMS는 SF₆⁻ 이온을 이용하여 SO₂를 다음과 같이 이온화시킨다.



이렇게 이온화된 SO₂를 정량하는 방식이다. 감도를 비행 중 정량하기 위하여 비행 중 지속적으로 표준기체를 주입하였으며 각각의 주요 점오염원 사이를 이동할 때는 배경신호 관측을 위해 활성탄 스크러버(charcoal scrubber)를 이용하였다. 기기의 관측 흐름도를 그림 1에 보였다. SO₂ CIMS는 여러 연구에서 활용돼, 그 신뢰도가 검증된 장치이다(Kim et al., 2007).

2.2 배출량 산정

측정 결과로부터 배출량을 산정하기 위해 여러 하향식(top-down) 배출량 산정 방법을 검토하였다. Gaussian Plume (이하 플룸) 모델은 이미 1930년대부터 분석적인 수학적 해가 존재하는 모델로 바람의 방향 및 풍속 수직 온도 분포를 분석한 대기 안정도 자료를 이용하여 관측 농도로부터 배출량을 계산할 수 있다. 즉 이렇게 분석된 배출량은 하향식 배출량으로 이해 할 수 있다. 그러나 이러한

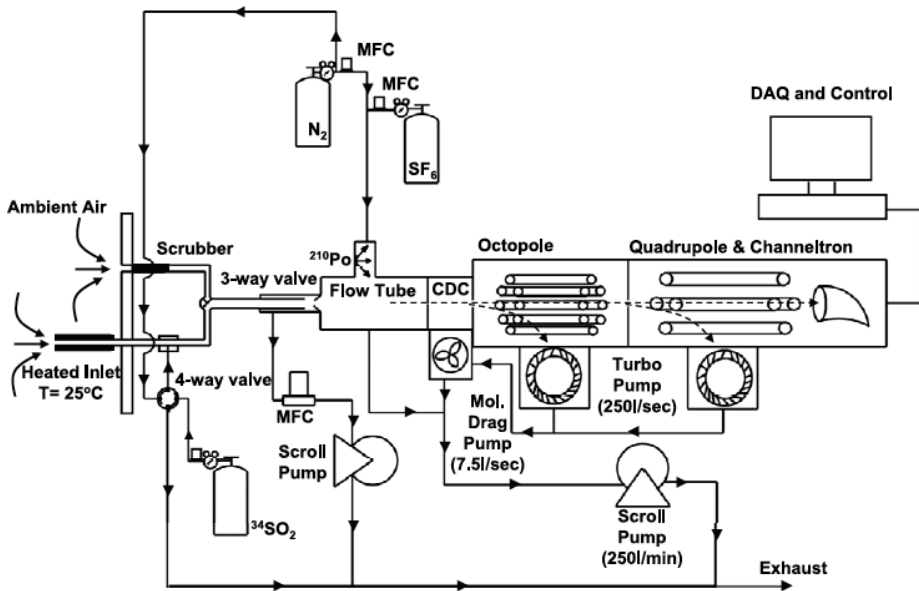


Figure 1. Schematic diagram of the SO₂ CIMS used for the airborne measurement from Kim et al. (2007).

분석적인 계산은 몇 가지 명확한 한계가 존재한다. 첫째 석탄화력발전소나 제철소의 연소는 하나의 연소로 이상이 이용되고 따라서 하나 이상 많게는 10개 이상의 다른 위치에 있는 굴뚝과 비산배출(fugitive emission)을 통해 배출가스가 나온다는 점이다. 이렇게 배출원이 나누어져 있으면 한 굴뚝에서 배출되는 것에 비해 오염물질의 플룸은 더 공간적으로 넓게 퍼질 수밖에 없다. 이런 한계로 인하여 플룸 모델을 이용하여 계산한 배출량이 실제보다 적게 나오는 일관적인 방향성을 가질 가능성이 크다. 따라서 플룸 모델에서 계산된 배출량은 실험적으로 산정할 수 있는 값의 최저치로 이해할 수 있다.

Gaussian-Plume 모델에서 포함할 수 없는 퍼져서 진행되는 배출량을 모두 고려하기 위해, 이 연구에서는 Top-down Emission Rate Retrieval Algorithm (TERRA, 이하 플럭스) 모델을 적용하였다. 이 모델은 2015년 Environmental Canada의 연구자에 의해서 개발된 모델이다(Gordon et al., 2015). 이 모델은 점오염원 및 한정된 지역 - 즉 공업단지와의 같은 시설에서의 모든 플럭스 요소들을 실험적으로 추산하기 위한 모델이다. 플럭스 요소는 크게

수평(advective flux), 수직(vertical flux), 그리고 난류(turbulent flux) 플럭스로 나눌 수 있다. 점오염원 및 지역 오염원의 경우 근거리에서의 측정시 플럭스 대부분은 수평 플럭스가 대부분을 차지한다.

이 부분에 대한 계산은 그림 2에 보인 것처럼 바람의 방향과 농도를 작은 격자로 나누어 이를 적분해 계산하게 된다.

계산을 위한 프로그램은 캐나다 York University의 Mark Gordon 교수와 Environmental Canada의 Andrea Darlington 박사를 통해 받았다. 프로그램 운용을 난류 플럭스(turbulence flux)가 수평 플럭스보다 상대적으로 중요하지 않다는 가정을 사용하였고, 다양한 방식으로 2D 내삽을 할 수 있는 radial distribution function 방식을 적용하여 python에서 평면 내삽을 연산하였다.

3. 결과 및 고찰

표 1과 2에 당진시 화력발전소와 제철소의 2019년 봄, 가을의 대기오염물질 농도 측정 결과를 각각 제시하였다. 표에서 \angle 는 그 사업장의 풍하 지

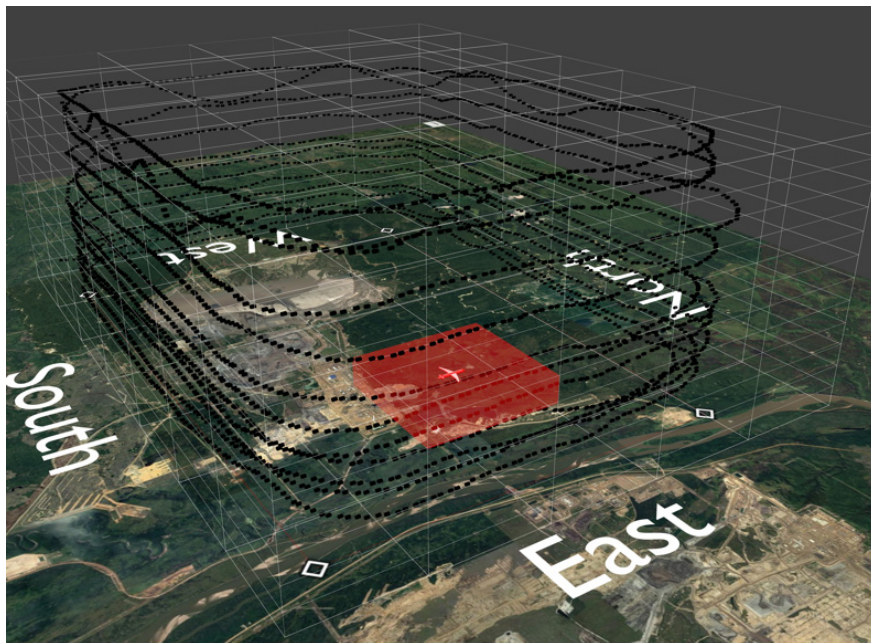


Figure 2. Schematic diagram of estimating advective flux from Gordon et al. (2015).

역 농도와 풍상 지역 농도의 차이를 표시한다. 예를 들어서 SO₂ 농도는 그 관측 기간의 아황산가스 평균 농도고, ΔSO₂는 그 사업장의 아황산가스 풍하 지역 농도와 풍상 지역 농도의 차이, 즉 그 사업장에서 배출한 농도로 생각할 수 있다. 항공관측에서 풍상과 풍하 지역이 계속 변화하지만, 반복 측정을 한 결과의 평균이므로, 재현성은 상당히 있다고 판단할 수 있다. 일반적으로 화력발전소보다는 제철소 상공에서의 황산화물이나 질소산화물, 미세먼지 등의 대기오염물질 농도가 높은 것으로 나타났다.

플룸 모델과 플럭스 모델 결과를 비교한 결과를 표 3에 보였다. 플룸 모델이 배출량 하한치로 생각하였으나, 계산 결과는 플룸 모델 계산값이 플럭스 모델 계산값보다 높은 것을 알 수 있다. 따라서 관

측 결과로부터 배출량을 산정하는 데에는 상당한 오차가 존재할 수 있다. 이는 플룸 모델에 들어가는 여러 가정들 - 굴뚝의 갯수 및 대기 안정도 등에서 기인한다. 앞으로의 배출량 계산은 논리적으로 보다 정확한 플럭스 모델을 사용하였다.

표 4에 항공관측으로부터 산출한 SO₂ 배출량을 관측일별로 나타내고, 이를 각 사업장에서 발표한 배출량 자료와 비교하였다. 사업장의 2019년 SOx 배출량 자료는 당진시의 대기오염물질 배출량 감축 검증위원회에 각 사업장에서 제출한 것이다 (Dangjin city, 2020; MOE, 2020b). 이에 의하면 당진시에 소재한 석탄화력발전소의 2019년 1-10호기의 황산화물(SOx) 배출량은 4,315톤으로 보고되었다. 이를 1년 300일 운전기준으로 환산하면 599.3 kg/hr이다. 또한, 제철소의 2019년 SOx 배출량은

Table 1. Concentrations of air pollutants measured over large point sources on spring 2019.

	Power Plant	Steel Work
SO ₂ (ppb)	67	95
ΔSO ₂ (ppb)	65	93
HNO ₃ (ppb)	31	35
ΔHNO ₃ (ppb)	29	33
NH ₃ (ppbv)	9.60	10.68
ΔNH ₃ (ppbv)	0.46	-0.92
O ₃ (ppbv)	93.66	92.81
ΔO ₃ (ppbv)	-13.89	-13.97
PM1 mass concentration (μg/m ³)	15.09	17.49
ΔPM1 mass concentration (μg/m ³)	8.63	14.64
rBC (ng/m ³)	401.05	350.21
ΔrBC (ng/m ³)	162.29	267.76
Org (μg/m ³)	5.47	5.69
ΔOrg (μg/m ³)	1.76	1.81
SO ₄ ²⁻ (μg/m ³)	4.49	5.03
ΔSO ₄ ²⁻ (μg/m ³)	1.04	7.44
NO ₃ ⁻ (μg/m ³)	2.99	4.01
ΔNO ₃ ⁻ (μg/m ³)	4.13	2.74
NH ₄ ⁺ (μg/m ³)	2.17	2.77
ΔNH ₄ ⁺ (μg/m ³)	1.69	2.65

Table 2. Concentrations of air pollutants measured over large point sources on fall 2019.

	Power Plant	Steel Work
SO ₂ (ppb)	54	80
ΔSO ₂ (ppb)	51	76
HNO ₃ (ppb)	28	34
ΔHNO ₃ (ppb)	27	32
NH ₃ (ppbv)	15.13	14.96
ΔNH ₃ (ppbv)	3.32	-0.26
O ₃ (ppbv)	68.79	66.05
ΔO ₃ (ppbv)	-23.34	-5.32
PM1 mass concentration (μg/m ³)	17.82	20.04
ΔPM1 mass concentration (μg/m ³)	13.48	8.28
rBC (ng/m ³)	797.88	528.12
ΔrBC (ng/m ³)	419	360.16
Org (μg/m ³)	7.03	7.78
ΔOrg (μg/m ³)	6.83	2.56
SO ₄ ²⁻ (μg/m ³)	4.31	4.56
ΔSO ₄ ²⁻ (μg/m ³)	1.28	3.13
NO ₃ ⁻ (μg/m ³)	4.10	4.53
ΔNO ₃ ⁻ (μg/m ³)	3.84	1.35
NH ₄ ⁺ (μg/m ³)	2.36	2.74
ΔNH ₄ ⁺ (μg/m ³)	1.54	1.23

Table 3. Comparison of the SO₂ emission estimates between the plume model and flux model (kg/hr).

Measurement on 29 May	Plume model	Flux model
Power plant	3,483	2,421
Steel work	2,417	2,153

10,311톤이었고, 이를 역시 1년 300일 운전기준으로 환산하면 1,432.1 kg/hr이다. 실제 운전일자는 300일이 아닐 수 있으나, 300일보다 클 것으로 보여, 이 연구에서 계산한 값은 상한값일 가능성이 크다. 또 하나 고려할 것은 관측은 SO₂를 측정하여 SO₂ 배출량을 산정한 것이고, 사업장에서 보고한 배출량은 SOx 기준인 점이다. 일반적으로 SOx 대부분이 SO₂ 형태로 배출되지만, 일부는 황산 등의 형태로 배출된다. 따라서 항공관측으로부터 산출한 배출량은 사업장에서 보고한 배출량의 하한치로 생각할 수 있다.

2019년 봄 관측에서는 5월에 2회만 배출량 산출을 위한 자료를 얻었고, 가을 관측에서는 사업장별로 4, 7회 배출량 산출을 위한 관측자료를 얻었다. 두 사업장 모두 5월에 10월보다 많은 배출량이 산출되었으며, 이는 사업장의 운전 조건에 따른 변화인 것으로 보인다. 뒤에 적었지만, 제철소의 경우

2019년 6월에 1, 2 소결로의 대기오염 제어시설이 완공되어 가을에 SOx 배출농도가 줄어든 것으로 나타났다.

이 결과를 그림으로 보이면 그림 3, 4와 같다. 화력발전소의 경우 거의 대부분의 관측일에서 자체 산출한 배출량에 비해 높은 배출량을 보이는 것으로 확인되었다. 제철소의 경우 자체 산출한 배출량에 비해 매번 큰 값을 보이는 것으로 확인되었다. 이는 화력발전소, 제철소에는 연료 혹은 원료 운반 부두가 있으며, 이곳의 선박에서 배출되는 배출량을 산정하지 못하고 있다. 또한, 제철·제강 공정은 매우 복잡한 공정인데, 이에 반해 대기오염 물질 산정은 4가지 공정만으로 산정하고 있어 정확한 산정을 못하고 있다. 아울러 대기환경보전법에는 배출시설 허가 시 배출허용기준 이하로 배출되는 시설에 대하여 대기오염방지시설 설치와 자가측정을 면제하는 규정이 있는데(MOE, 2020a),

Table 4. Estimated SO₂ emissions in the large point sources (kg/hr).

Date	Power Plant	Steel Work
May 16 Morning	1639.9	4239.1
May 29 Morning	2420.8	2153.3
Oct 18 Morning	279.83	2123.2
Oct 21 Morning	1652.1	3341.7
Oct 21 Afternoon	981.05	3154.6
Oct 22 Morning	1368.6	-
Oct 23rd Morning	2675	-
Oct 28th Afternoon	-	2091
Oct 29 Morning	1059	-
Oct 30 Afternoon	1442.7	-
Mean emission in May	2030.4	3196.2
Mean emission in October	1351.2	2677.6
Mean emission in 2019	1502.1	2850.5
Reported emission amount*	599.3	1432.1

* Assume the facility was in operation for 300 days in 2019 based on the data from Dangjin city (2020).

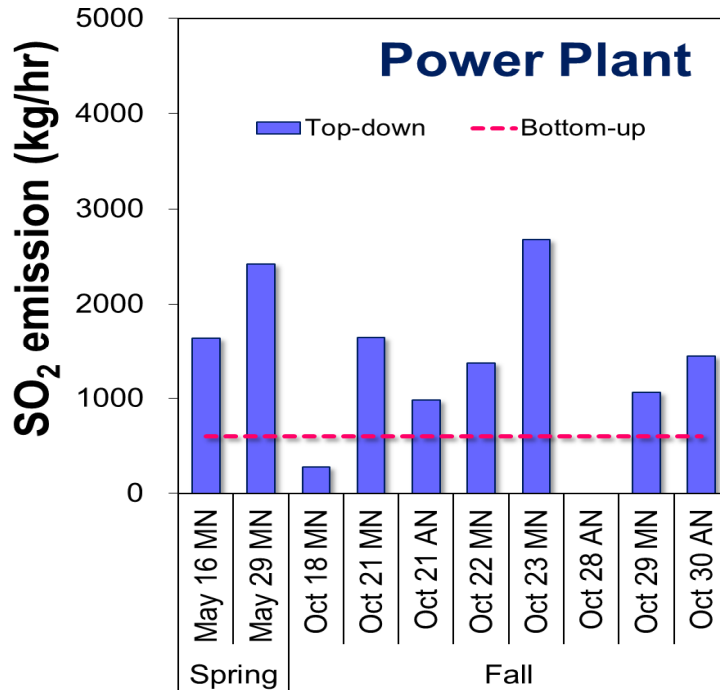


Figure 3. Comparison of the estimated emission amounts based on the airborne measurements (top-down) and the reported emission amount (bottom-up) in 2019 from the power plant (dashed line).

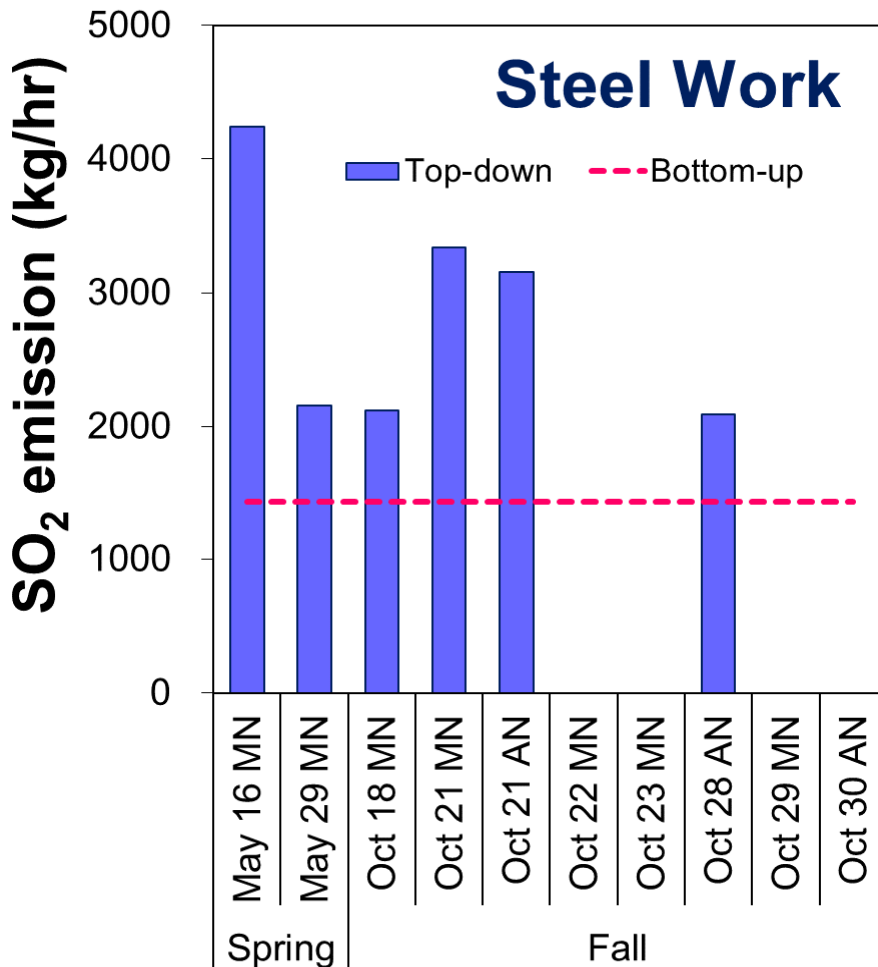


Figure 4. Comparison of the estimated emission amounts based on the airborne measurements (top-down) and the reported emission amount (bottom-up) in 2019 from the steel work (dashed line).

제철소는 공정특성상 많은 배출구가 있으며, 여기에는 대기오염방지시설 설치와 자가측정을 면제받은 배출구도 많은 것으로 알려져 있어 대기오염물질 배출량산정에 누락된 것으로 판단된다(BAI, 2020).

석탄화력발전소의 경우 2016년 6월 발표된 정부합동 미세먼지 관리 특별대책에서 석탄화력발전소 증설을 원칙적으로 제한하고, 노후 석탄화력발전소 10기를 폐지하고, 기존 석탄화력발전소를 단계별로 감축하는 등의 원칙을 정하였다. 그 이후 2016년 12월 산업부와 발전사 사이에 석탄발전 미세먼지

배출 저감 이행협약을 체결하여 2030년까지 2015년 대비 대기오염물질 배출량을 전국 50%, 충남 57% 감축하기로 하였다. 또한, 충청남도는 2017년 6월 충청남도 대기배출허용기준을 강화한 조례를 공포하여 2026년까지 영흥화력 3~6호기 수준으로 배출기준을 강화하기로 하였다(SO_x 25 ppm, NO_x 15 ppm, 먼지 5 mg/Sm³).

당진시의 석탄화력발전소는 2017년 7월 당진시와 대기오염물질 자발적 감축협약을 체결하여 2020년까지 당진지역 대기오염물질 배출량을 20% 감축하기로 하였다. 이에 따라 탈황설비 및 전기집

진기 성능 보장, 탈질설비 촉매 증설 및 저녹스버너 설치 등의 대기오염물질 배출저감시설에 2019년까지 1,480억원을 투자하여 대기오염물질 배출을 2015년 대비 60% 감축하고, 2026년까지는 1.4조원을 투자하여 대기오염물질 배출을 70% 감축하기로 목표를 정하였다. 이런 노력으로 석탄화력발전소의 대기오염물질 배출농도가 2015년 SOx 24 ppm, NOx 73 ppm, 먼지 5 mg/Sm³에서 2019년 SOx 14 ppm, NOx 20 ppm, 먼지 4 mg/Sm³으로 저감되었고, 전체 대기오염물질 배출량을 2015년 대비 60%를 감축하여 SOx 4,315 톤, NOx 4,385 톤, 먼지 436 톤을 배출하였다. 앞으로도 지속적인 배출저감시설 보안을 통해 2026년까지는 SOx 9 ppm, NOx 7 ppm, 먼지 2 mg/Sm³ 수준으로 배출농도를 저감할 계획이다(Dangjin city, 2020).

제철소도 2017년 7월 당진시와 대기오염물질 자발적 감축협약을 체결하여 2020년까지 당진지역 대기오염물질 배출량을 20% 감축하기로 하였다. 이에 따라 소결로에 대기오염물질 저감시설을 설치하는 등의 노력으로 2016년 SOx 12,695 톤, NOx 10,271 톤, 먼지 510 톤 대비 2019년 SOx 10,311 톤(19%), NOx 7,040 톤(32%), 먼지 481 톤(6%)을 배출하였다. 이에 따라 협약 목표인 2016년 배출량 대비 2020년 배출량 40% 저감목표를 초과 달성하여 배출량을 51% 저감할 수 있을 것으로 보인다.

구체적으로 소결로에 배가스청정시설을 교체하는 작업을 1, 2 소결로는 2019년 6월 완료하였고, 3 소결로는 2020년 6월 완료되어 추가적인 배출량 저감이 달성되었을 것이다. 이에 따라 1 소결로는 SOx와 NOx 농도가 개선전 평균 157, 159 ppm에서 개선후인 2019년 6월 이후에는 각각 32, 33 ppm으로 줄어들었고, 2 소결로는 SOx와 NOx 농도가 개선전 평균 171, 169 ppm에서 개선후인 2019년 7월 이후에는 각각 32, 29 ppm으로 줄어들었다.

그러나 이러한 당진시와 사업자의 노력에도 불구하고 항공 관측으로 산출한 배출량 값이 사업자가 제시한 값보다 큰 것은 중요한 문제이며, 이를 해결하기 위한 노력이 필요하다.

4. 요약

충청남도 대형사업장에서의 대기오염물질 배출이 미세먼지 농도에 미치는 영향에 대한 논란이 많다. 2019년 봄과 가을에 항공관측을 수행하여 충청남도 대형사업장 상공에서 대기오염물질 농도를 측정하였고, 이를 바탕으로 황산화물(SO₂) 배출량을 산정하였다(하향식 배출량). 이를 사업장에서 제시한 배출량 자료(상향식 배출량)와 비교한 결과, 항공관측에 바탕을 둔 배출량이 더 많았다. 항공관측에 바탕을 둔 배출량은 석탄화력발전소는 1502.1 kg/hr, 제철소는 2805.5 kg/hr였다. 이는 사업장에서 밝힌 2019년 연평균 배출량보다 각각 2.5배와 2.0배 큰 값이다.

이와 같은 차이가 나는 원인을 규명하기 위해서는 관측에 바탕을 둔 하향식 배출량과 활동도에 바탕을 둔 기존의 상향식 배출량을 산정함에 있어서 보다 면밀한 검토와 개선이 필요하다. 하향식 배출량의 개선을 위해서는 관측 불확도를 줄이는 것이 중요하다. 불확도를 높이는 요소의 하나는 지상에서 항공기가 운행될 수 있는 최저 고도까지 관측을 하지 않은 것이다. 이러한 불확도를 줄이는 방법은 지상에서 관측을 수행하며, 더 나아가서는 지상과 항공기 관측 최저 고도 사이에서 드론 등의 방법을 통해 관측을 수행하는 것이다. 바람장 역시 관측 및 외삽과 내삽을 이용하여 평면 분포를 구하면 평면에 대한 적분을 이용하여 평면 전체의 플럭스를 구할 수 있어 불확도를 줄일 수 있는 것이다.

상향식 배출량의 정확도 개선을 위해서는 측정이 이루어지고 있는 굴뚝의 배출량 자료 정확도 개선과 함께, 관측이 이루어지고 있지 않은 배출구의 현황 파악이 필요하다.

사사

이 논문은 2020년도 정부(과학기술정보통신부, 환경부, 보건복지부)의 재원으로 한국연구재단-미세먼지 국가전략프로젝트사업의 지원과(2017M3D8A1092015), 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-기후변화대응기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(2019M1A2A2103953).

참고문헌

- BAI, The Board of Audit and Inspection of Korea (2020). Audit Report of PM management status.
- Dangjin City (2020). Report to the Oversight Committee on the air pollutants emission reduction in Dangjin City.
- Gordon, M., Li, S. M., Staebler, R., Darlington, A., Hayden, K., O'Brien, J., and Wolde, M. (2015). Determining air pollutant emission rates based on mass balance using airborne measurement data over the Alberta oil sands operations, *Atmospheric Measurement Techniques*, 8, 3745-3765.
- Kim, E.H., Kim, H.C., Kim, B.U., and Kim, S.T. (2019). PM_{2.5} Simulations for the Seoul Metropolitan Area: (VI) Estimating Influence of Sectoral Emissions From Chungcheongnam-do, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(2), 226-248.
- Kim, J.B., Yoon, S.H., Lee, S.S., Kim, K.H., Noh, S.J., and Bae, G.N. (2020). Spatial and Temporal Distributions of PM₁₀ and PM_{2.5} Concentrations in Chung Cheongnam-do, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(4), 464-481.
- Kim, S., Huey, L. G., Stickel, R. E., Tanner, D. J., Crawford, J. H., Olson, J. R., Chen, G., Brune, W. H., Ren, X., Leshner, R., Wooldridge, P. J., Bertram, T. H., Perring, A., Cohen, R. C., Lefter, B. L., Shetter, R. E., Avery, M., Diskin, G., and Sokolik, I. (2007). Measurement of HO(2)NO(2) in the free troposphere during the intercontinental chemical transport experiment - North America 2004, *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 112, D12S01.
- Kim, S.T., Kim, O., Kim, B.Uk., and Kim, H.C. (2017). Impact of Emissions from Major Point Sources in Chungcheongnam-do on Surface Fine Particulate Matter Concentration in the Surrounding Area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(2), 159-173.
- Lee, B.J. and Park, S.S. (2019). Temporal and Spatial Variabilities of Concentrations of Criteria Air Pollutants during Early Summer in 2018 in South Chung Cheong Province, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(2), 265-281.
- MOE, Ministry of Environment (2020a). Enforcement Rule of the Environmental Conservation Act.
- MOE, Ministry of Environment (2020b). Air pollutant emissions by facility. <https://www.stacknsky.or.kr/stacknsky/contentsDa.jsp>, accessed on 2020.12.16.
- Oh, S. (2007). Concentrations of Atmospheric Fine Particles Measured during 2005 in Chungnam, Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 23(1), 132-140.
- Son, S.C., Park, S.S., Bae, M., and Kim, S.T. (2020). A Study on Characteristics of High PM_{2.5} Pollution Observed around Large-scale Stationary Sources in Chungcheongnam-do Province, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(5), 669-687.

