

기술자료

CleanSYS 실시간 배출량을 이용한 발전부문 시간 분배계수 작성 Developing Temporal Allocation Profiles for Electric Generating Utilities based on the CleanSYS Real-time Emissions

배민아, 유 철¹⁾, 김형천¹⁾, 김순태²⁾*

아주대학교 환경공학과, ¹⁾국가미세먼지정보센터 배출량조사팀,

²⁾아주대학교 환경안전공학과

접수일 2021년 3월 4일
수정일 2021년 3월 26일
채택일 2021년 4월 7일

Received 4 March 2021
Revised 26 March 2021
Accepted 7 April 2021

*Corresponding author
Tel : +82-(0)31-219-2511
E-mail : soontaekim@ajou.ac.kr

Minah Bae, Chul Yoo¹⁾, Hyungcheon Kim¹⁾, Soontae Kim²⁾*

Department of Environmental Engineering, Ajou University, Suwon, Republic of Korea

¹⁾Emission Inventory Management Team, National Air Emission Inventory and Research Center, Cheongju, Republic of Korea

²⁾Department of Environmental & Safety Engineering, Ajou University, Suwon, Republic of Korea

Abstract The bottom-up national emission inventory (EI) in South Korea named the Clean Air Policy Support System (CAPSS) provides annual and monthly emission rates. The EI should be treated for spatial and temporal allocations, and chemical speciation to prepare the hourly resolved emissions prior to air quality assessments. The real-time emission rates for the major point sources in South Korea are continuously monitored by the CleanSYS. We utilized the CleanSYS 1-h emission data for 68 stacks in the electric generating utilities (EGU) to compare the total emissions against those in the CAPSS during 2017 and to develop the temporal allocation profiles for SO_x, NO_x, PM₁₀, and PM_{2.5} based on the real-time stack emissions. The total SO_x and NO_x emissions from the 68 stacks reported in the CAPSS were 4% and 3% respectively lower than the real-time emissions. The differences were mostly due to the underestimation of the emissions from the anthracite-burning facilities. When the annual emissions of 68 stacks were resolved to the monthly, daily, and hourly emissions with the temporal profiles developed in this study, the monthly SO_x and NO_x emission decreased by 11~21% in winter and increased by 11~26% in summer. The nighttime emission rates increased by up to 48% and the daytime emission rates decreased by up to 16%. The hourly emissions in the CleanSYS can be directly used for the real-time measurement period. However, the temporal allocation profiles developed in this study can be applied to generate typical time-varying emissions for the stacks of which real-time emissions are unavailable or to predict the concentrations of air pollutants in a future year based on the emission growth and control scenarios.

Key words: CleanSYS, Real-time emissions, Temporal profile, Electric generating utilities, Typical emissions

1. 서 론

초미세먼지 (Particulate Matter with a diameter of 2.5 μm or less; PM_{2.5})는 호흡기 및 심혈관계 질병을 유발하는 등 건강에 악영향을 미친다 (Pascal *et al.*, 2013; Pope and Dockery, 2006). 정부에서는 PM_{2.5} 농도 관리를 위해 다양한 정책을 펼치고 있으며, 그 중 미세먼지 관리 종합대책 및 1차 계절관리제 등을 통

해 석탄 화력발전의 배출 관리를 수행하였다 (KMOE, 2021; Bae *et al.*, 2020a; Kim *et al.*, 2018; KMOE, 2017). 석탄을 포함한 화력발전의 경우, 대기오염물질의 배출규모가 다른 배출원에 비해 상대적으로 크며, 배출이 한 곳에서 집중적으로 이루어지는 등 중요한 배출관리 대상이 되고 있다. 또한 전력의 수요 공급면에서 국내 화력발전은 주로 남한의 서쪽지역에 위치하며, 이는 북서풍의 영향을 받아 인구가 많

은 수도권 지역에 미치는 영향이 큰 것으로 알려져 있다 (Bae *et al.*, 2020a; Ju *et al.*, 2019; Kim *et al.*, 2016).

국내의 경우 점오염원에 대한 배출관리 및 영향분석 시 국가배출목록인 CAPSS (Clean Air Policy Support System)를 주로 이용한다. CAPSS 자료는 연간 또는 월간 배출자료를 제공하므로, 이를 대기질 모사 등에 활용하기 위해서는 매시간 형태의 배출량으로 시간 분배하는 과정이 필요하다. 광화학 모델에 이용되는 배출량 입력자료는 Sparse Matrix Operator Kernel Emission (SMOKE; Benjey *et al.*, 2001) 등을 통해 연간 배출량에서 시간 배출량으로 전환된다. 이러한 과정을 시간할당이라 하며, 이때 시간 분배계수가 이용된다 (Adelman and Baek, 2012; Kim *et al.*, 2008). 현재 국내에서는 연구자들의 재량에 따라 다양한 시간 분배계수가 이용되고 있다. 그 중 하나로 국내에서는 동종 배출원의 경우 미국과 활동도가 동일하다는 가정 하에 미환경청에서 제공하는 시간 분배계수가 많이 이용되고 있다. 단, 국내 배출원의 활동도가 미국과 다른 경우 배출량 시간 분배가 실제와 다르게 이루어질 수 있다 (Moon, 2015). 또한, 점오염원은 업종에 따라 시설 가동률이 수시로 조정되거나 잦은 유지 보수 등으로 다른 배출원 대비 비교적 시간에 따른 배출 변화가 큰 특징이 있다. 따라서 배출목록에서 제공하는 연간 또는 월간 배출정보는 배출규모와 시간별 활동도 등에서 실제 배출량과 차이를 보일 수 있다. 미환경청은 이러한 점을 감안하여 State Implementation Plans (SIP) 평가 시 대형 점오염원에 대해 실시간 배출자료의 이용을 권장한다 (U.S. EPA, 2017). 국내에서 CAPSS 자료 생성 시 화력발전소를 비롯한 점오염원 배출량에 대해 굴뚝원격감시체계 (CleanSYS)의 실시간 측정자료 및 대기배출원 관리 시스템 (Stack Emission Management System, SEMS) 등의 자료는 연 배출량을 추정하기 위한 기초자료로 이용되고 있으나 (NIER, 2019), 직접적으로 모사에 활용되지 못하고 있다. 굴뚝 배출량이 실제 배출 조건과 차이를 보이는 경우 주변지역에 대한 영향 평가

시에 오차 원인으로 작용할 수 있으므로 (Bae *et al.*, 2020b; Kim *et al.*, 2020; Ju *et al.*, 2019; Van der Gon *et al.* 2011) 정확한 배출원-수용지 관계 파악을 위해서는 이러한 배출 불확도를 최소화하는 것이 바람직하다.

본 연구에서는 화력발전 부문의 굴뚝 68기를 대상으로 NO_x와 SO_x 등에 대한 CleanSYS 실시간 배출자료를 분석하여 1) CAPSS 배출목록상의 연간 배출량과의 차이 유무를 확인하고, 2) 국내 발전부문에 대한 시간 분배계수를 마련하였다. 또한, 3) 도출된 시간 분배계수의 활용 방안에 대해 논의하였다.

2. 연구 방법

2.1 실시간 배출자료

대형 굴뚝을 대상으로 하는 CleanSYS는 먼지 (Total Suspended Particulate; TSP), CO, NO_x, SO_x, NH₃ 등의 오염물질과 배출량, 그리고 배출농도, 온도, 유량 등을 측정한다 (KMOE, 2012). CleanSYS의 실시간 측정자료는 배출허용기준 준수 여부 및 방지 시설 적정 가동 여부 확인뿐만 아니라 CAPSS 배출량 산정의 기초자료로 이용된다. 본 연구에서는 연간 배출량 및 시간 분배계수를 마련하기 위하여 2017년에 대한 30분 간격의 CleanSYS 실시간 배출 측정자료 (이하 '실측자료')를 이용하였다. 분석대상은 화력 발전부문을 중심으로 실측자료가 확보된 14곳 배출업소의 68기의 굴뚝을 대상으로 하였다 (표 1). 본 연구에서는 CleanSYS의 측정물질 중 국가 대기오염물질 배출량 산정 물질인 SO_x, NO_x, TSP를 대상으로 검토하였다. TSP 배출량은 개별 굴뚝의 배출원 분류 (Source Classification Code; SCC)와 연료 정보를 바탕으로 대기오염물질 배출계수 (NIER, 2015)의 TSP : PM₁₀ : PM_{2.5} 비율을 적용하여 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 배출량을 추정하는데 이용하였다 (표 1). 68기 굴뚝 중, 유연탄을 사용하는 굴뚝이 41기로 가장 많으며, 무연탄 3기, B-C유 4기, LNG 19기로 구분된다. 전체 발전 부

Table 1. Information on fuel types and PM and TSP emissions for the seventy electric generating utility (EGU) stacks targeted in this study.

Stack number	Plant name	SCC_CD	Fuel	PM ₁₀ /TSP	PM _{2.5} /TSP
1	A	01010100	Anthracite	0.58	0.3
2~3	B	01010100	Anthracite	0.58	0.3
4~7	C	01010100	B-C oil	0.8	0.52
8~13	D	01010100	Bituminous	0.98	0.79
14~21	E	01010100	Bituminous	0.98	0.79
22~31	F	01010100	Bituminous	0.98	0.79
32~41	G	01010100	Bituminous	0.98	0.79
42~43	H	01010100	Bituminous	0.98	0.79
44~47	I	01010100	Bituminous	0.98	0.79
48~49	J	01010100	Bituminous	0.98	0.79
50~52	K	01010400	LNG	1	1
53	L	01050100	LNG	1	1
54~60	G	01050400	LNG	1	1
61~68	H	01050100	LNG	1	1

문의 굴뚝 중 전체 CAPSS 자료와 실측자료의 연간 배출량을 비교하기 위하여 30분 간격의 실측자료 2017년에 대해 합산하여 준비하였다.

2.2 CAPSS 배출목록

CAPSS 배출목록에서는 에너지산업연소, 비산업연소, 제조업 연소 등 13개의 대부분류로 배출량을 구분하며, 점/선/면 오염원을 포함하고 있다. CAPSS 점오염원은 굴뚝별 SCC와 굴뚝 제원을 제외한 정보를 제공하지 않으므로 분석대상 굴뚝을 구별하기에 제한적이다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 CAPSS의 점오염원별로 ‘TMS 사업장 관리번호’와 ‘TMS 굴뚝 번호’를 별도로 수집하였으며, 이를 CleanSYS 배출 정보에 포함된 TMS 정보와 대조하여 두 자료의 굴뚝 및 배출자료를 연계하여 이용하였다.

2.3 배출량 시간 분배계수 작성

Community Multi-scale Air Quality (CMAQ) 또는 Comprehensive Air Quality Model with Extensions (CAMx)와 같은 광화학 대기질 모델은 1시간 간격의 배출량 입력자료를 필요로 한다. CAPSS 국가배출목록에서는 오염원별, 지역별 배출량을 연간 또는 월별

로 제공하므로, SMOKE 등 배출모델에서는 다음과 같은 순차적인 시간 분배(또는 할당) 과정을 거치게 된다(Adelman and Baek, 2012; Kim *et al.*, 2008). 1) 우선, 연간(annual) 배출량은 오염원의 월별 활동도를 기반으로 12개월로 분배된다. 단, 배출목록의 월별(monthly) 배출량을 이용하는 경우, 이 과정은 생략될 수 있다. 2) 할당된 월별 배출량은 오염원의 요일별 활동도에 따라 요일별(weekday or weekend) 배출량으로 분배된다. 3) 산정된 일별 배출량은 평일과 주말 등의 일간 배출량 변화에 따라 시간별(hourly) 배출량으로 재분배된다. 이때 각 단계에서 월/요일/시간별 시간 분배계수가 필요하다. 국내 오염원의 SCC를 1,000개라 가정하면, 모든 개별 오염원에 대해 월/요일/시간별 분배계수가 마련되어야 하나, 현재는 주로 미환경청의 시간 분배계수를 활용하고 있다. 이에 본 연구에서는 CleanSYS 실측자료를 바탕으로 다음과 같은 방법에 따라 국내 화력발전 배출량에 대한 시간 분배계수를 작성하였다.

2.3.1 월별 분배계수

개별 굴뚝에 대한 월별 배출량은 30분 간격의 실측자료를 해당 월에 합산하여 산정하였으며, 이를 식(1)과 같이 이용하여 월별 시간계수를 마련하였다.

$$P_{i,m} = E_{i,m} \times \frac{1000}{\sum_{m=1}^{12} E_{i,m}} \quad (1)$$

여기에서 $P_{i,m}$ 는 i 번 굴뚝의 m 번째 월($m=1\sim 12$ 월)에 대한 분배계수를, $E_{i,m}$ 는 i 번 굴뚝의 m 월 동안의 배출량을 의미한다. $\sum_{m=1}^{12} E_{i,m}$ 는 12개월에 대한 배출량의 합이므로 i 번 굴뚝의 연간 배출량과 같다. 식(1)에서 분자의 1000은 전체 월별 배출량의 합을 1000으로 정규화하기 위해 이용되었다. 단, 월간 배출량이 0 ton인 굴뚝은 해당 월 동안 가동되지 않은 것으로 보이나, 이러한 미가동 기간은 연도별로 차이를 보일 수 있다. 따라서 해당 자료를 그대로 이용하여 월별 분배계수를 작성하는 것은 실제와 차이를 유발할 수 있다고 판단하였다. 이러한 영향을 최소화하

기 위하여 배출이 보고되지 않은 월에 대한 굴뚝별 배출량은 연간 배출량으로 추정된 월별 평균값으로 대체하였다. 이에 대한 내용은 3.3.1에서 더욱 자세히 논의하였다.

2.3.2 요일별 분배계수

굴뚝별 30분 간격의 실측자료를 날짜별로 합산하여 1년 365일에 대한 배출량으로 준비한 후, 이를 각 요일별로 평균하였다. 요일별 평균 배출량은 식 (2)를 통해 분배계수로 도출되었다.

$$P_{i,w} = E_{i,w} \times \frac{1000}{\sum_{w=1}^7 E_{i,w}} \quad (2)$$

위 식에서 $P_{i,w}$ 는 i 번 굴뚝의 w 번째 요일 ($w=1$ (월요일)~ 7 (일요일))의 분배계수이며, $E_{i,w}$ 는 i 번 굴뚝의 w 번째 요일의 1년 평균 배출량이다.

2.3.3 시간별 분배계수

배출량의 일간 분배를 위한 시간별 분배계수 작성을 위해 우선 30분 간격의 실측자료를 8,760개의 시간 배출량으로 준비하고, 이를 식 (3)과 같이 하루 24시간(00~23시)에 대한 일간 배출량으로 도출하였다.

$$E_{i,h} = \frac{\sum_{d=1}^{365} E_{i,d,h}}{365} \quad (h = 00, 01, \dots, 23) \quad (3)$$

여기에서, $E_{i,d,h}$ 은 d 번째 일($d=1\sim 365$) 중 h 시(h 시 00~59분) 동안의 배출량을 의미한다. $E_{i,h}$ 는 i 번 굴뚝의 시간대별 배출량을 1년 평균한 값이며, 이를 식 (4)에 대입하여 시간별 분배계수를 작성할 수 있다.

$$P_{i,h} = E_{i,h} \times \frac{1000}{\sum_{h=00}^{23} E_{i,h}} \quad (4)$$

식 (4)의 $P_{i,h}$ 는 i 번 굴뚝의 h 시간($h=00\sim 23$ 시)에 대한 배출량 분배계수를 의미한다.

3. 결 과

3.1 화력발전 실측자료와 CAPSS 배출량 비교

대상 68기 굴뚝에 대한 실측자료 및 CAPSS의 대기 오염물질 배출량 총합을 표 2에 제시하였다. 68기에 해당하는 CAPSS의 SO_x , NO_x , PM_{10} , $PM_{2.5}$ 배출량은 차례로 31,932, 38,010, 1,904, 1,539 ton/yr이다. CAPSS의 전체 점오염원 개수가 9,500여 개임을 고려할 때, 본 연구에서 고려한 68기는 굴뚝 수로는 0.7%에 해당하나 배출량은 전체 점 오염원 배출량의 1~10%를 차지한다. 본 연구에서 검토된 굴뚝의 배출량은 전체 에너지산업연소의 배출량 대비 29~42% 수준이다. B-C유의 경우 모든 굴뚝 개수 대비 30% 수준이며, LNG 굴뚝은 15%가량만이 검토 대상이다. 본 연구에서 검토된 굴뚝의 표본은 작지만, 공공발전에서 LNG를 연료로 하는 화력발전의 경우 유사한 패턴으로 운영되고 있다. 표본이 적은 굴뚝의 경우 향후 자료 확보를 통해 대표성 검토가 이루어져야 한다.

실측자료를 기반으로, SO_x 배출량은 유연탄을 연료로 하는 굴뚝(이하 '유연탄 굴뚝')에서 68기 총 배출량의 92%, 무연탄 굴뚝이 7%, B-C유 굴뚝이 1% 배

Table 2. Comparisons of SO_x , NO_x , PM_{10} , and $PM_{2.5}$ emissions released from the seventy EGU stacks in the CAPSS and the CleanSYS. (unit: ton/yr)

Emission sources		SO_x	NO_x	PM_{10}	$PM_{2.5}$
CAPSS	Total	315,530	1,189,800	218,476	91,731
	Point	203,256	295,585	12,623	9,513
	Point - Combustion in energy industries	77,574	114,192	3,829	3,162
	68 stacks	31,932	38,010	1,904	1,539
CleanSYS	68 stacks	33,308	39,122	1,871	1,501

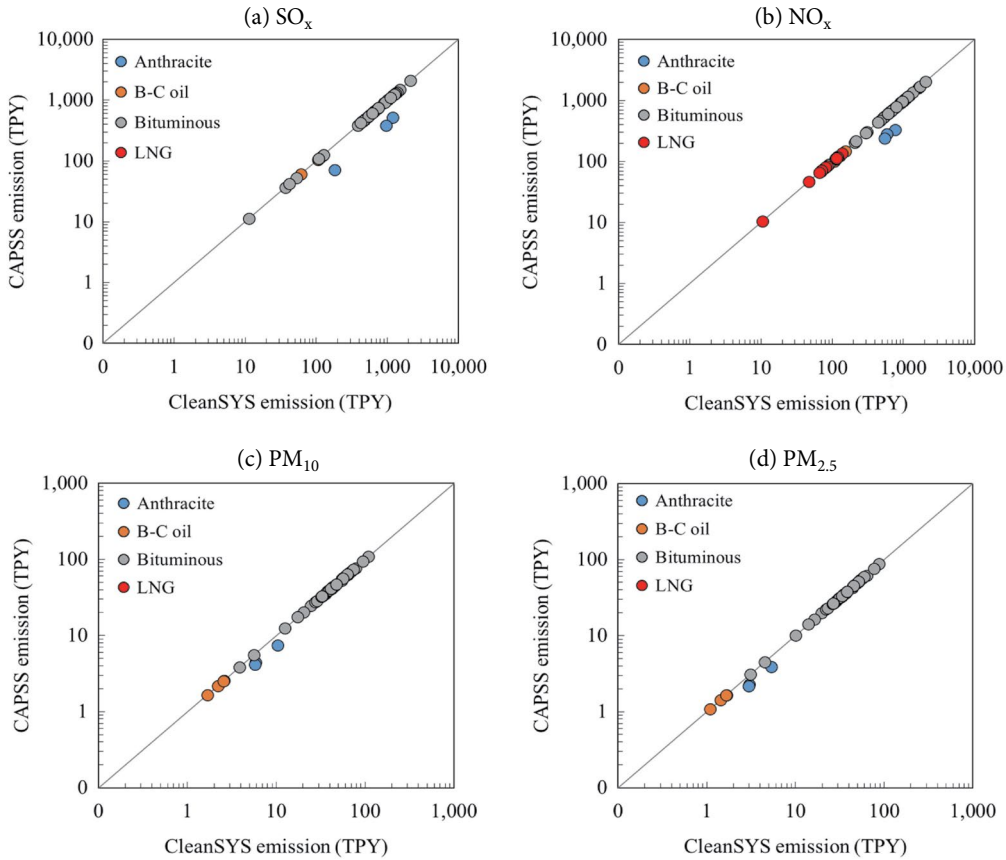


Fig. 1. Comparisons of (a) SO_x , (b) NO_x , (c) PM_{10} , and (d) $\text{PM}_{2.5}$ emissions for the electric generating utility (EGU) stacks between the CleanSYS measurements and the CAPSS 2017 emissions inventory.

출하였다. NO_x 배출량은 유연탄 굴뚝 (90%), 무연탄 굴뚝 (5%), LNG 굴뚝 (4%), B-C유 굴뚝 (1%) 순으로 배출하였다. 한편 PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 의 경우 유연탄 굴뚝에서 98%, 99%를 배출하며, 나머지 1%는 무연탄 굴뚝에서 배출하였다. 동일 발전량당 오염물질은 석탄과 같은 고체 연료의 이용하는 시설에서 기체나 액체 연료를 이용하는 굴뚝에 비해 다량 배출된다 (Park *et al.*, 2018). 또한, 남한의 석탄 화력발전소는 모두 500 MW 이상으로 대형 발전소에 해당하기 때문에 (KPX, 2020), 유무연탄 굴뚝의 배출량이 높다.

실측자료와 CAPSS에서 68기 굴뚝의 총 배출량을 비교해보면 (표 2), SO_x 와 NO_x 에 대해 CAPSS 배출량은 실측자료 대비 각각 4%, 3% 낮게, PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 는

각각 2%, 3% 높게 산정되었다. 이를 개별 굴뚝별로 살펴보면, 배출물질에 관계없이 CAPSS 배출량이 0~13 ton/yr가량 (0~2%) 크나, 실측자료와 CAPSS의 연간 배출량이 1:1선에 인접해 있으며, 대체로 유사하다 (그림 1). 다만, 3기의 무연탄 굴뚝은 CAPSS 배출량이 실측자료에 비하여 SO_x 배출량 109~666 ton/yr (56~61%), NO_x 배출량 305~433 ton/yr (52~56%) 낮게 산정되었다.

3.2 굴뚝별 배출량 비교

실측자료를 기반으로 살펴본 화력발전 68기의 일별 SO_x , NO_x 총 배출량은 60~150 ton/day 범위이며, PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 총 배출량은 SO_x 와 NO_x 배출량의 5%

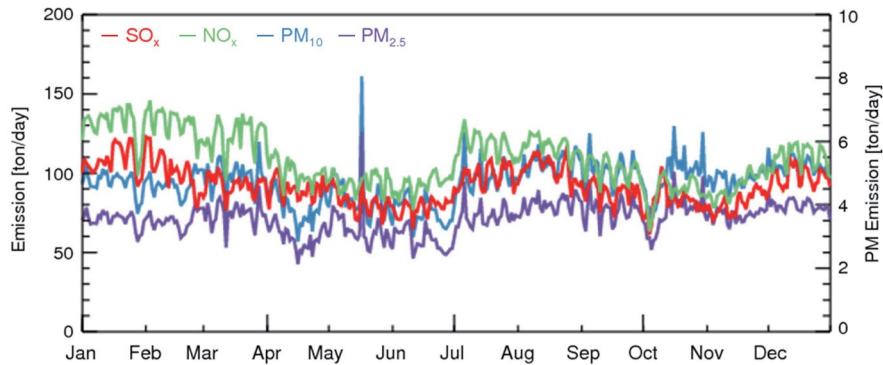


Fig. 2. Daily total SO_x , NO_x , PM_{10} , and $\text{PM}_{2.5}$ emissions from the 68 EGU stacks in 2017.

수준이다(그림 2). 일별 총 배출량은 겨울철과 여름철에 다소 증가하는 특성을 보였는데, 이는 해당 계절에 증가하는 에너지 소비와 관련이 있다(KEI, 2017). PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 배출량은 5월 중순경 2배 이상 높아지는데, 특정 굴뚝의 비정상적 운전에 의한 것으로 추정된다. 일별 총 배출량의 변동은 모든 오염물질에 대해 유사하다.

분석 대상 68기 굴뚝에 대한 실측자료의 연간 배출량 규모는 SO_x 11~2,127 ton/yr (평균값: 680 ton/yr, 중간값: 570 ton/yr), NO_x 10~2,059 (평균값: 575 ton/yr, 중간값: 549 ton/yr)로, 굴뚝별 오염물질 배출 수준이 다양하다. 그림 3에서 SO_x 배출량이 높은 굴뚝들(20~30번)은 NO_x , PM_{10} 및 $\text{PM}_{2.5}$ 배출량 또한 다른 굴뚝들에 비해 높다. 또한, 배출규모가 큰 굴뚝은 월 배출량의 편차도 크다. 이에 반해, 배출규모를 정규화(=[월별 배출량-월 배출량 평균]/월 배출량 평균)하여 표준편차를 살펴보면, 연간 배출규모가 작은 굴뚝에서 오히려 정규화된 표준편차는 크게 분석되었다(그림 4). 따라서, 절대편차는 배출규모가 큰 굴뚝에서 중요하지만, 상대편차는 배출규모가 작은 굴뚝에서 높기 때문에 배출량 변동은 모든 굴뚝에 대해 살펴볼 필요가 있다. 본 연구에서는 모든 굴뚝에 대한 시간 변동을 고려할 수 있도록 굴뚝별 시간 배출량을 정규화하여 검토하였다.

3.3 화력발전의 월/요일/시간별 배출 변화

3.3.1 굴뚝별 배출량의 월별 변화

실측자료의 월별 변동성을 분석하기 위해 개별 굴뚝의 월별 배출량을 정규화하여(월별 변동성=[월별 배출량-월별 배출량 평균]/월별 배출량 평균) 그림 5에 제시하였다. 분석 대상인 발전시설에서 68기 개별 굴뚝의 월별 변동성은 이용되는 연료에 따라 유사였으며, SO_x , NO_x , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ 등 대상 대기오염물질별 차이는 크지 않았다. 예를 들어, 유연탄 굴뚝의 배출량은 1, 8, 12월 동안 연평균 대비 10%가량 증가한다. 무연탄 굴뚝도 마찬가지로 1~3월과 7~8월 동안 평균 대비 10% 내외로 증가된 배출을 보였으며, 그 외 다른 월에 대해서는 평균보다 낮은 배출량을 보였다. LNG 굴뚝에서는 4월과 12월 동안 평균 대비 4배 이상 높은 배출량을 보였다. 한편, B-C유 굴뚝의 경우 1~2월, 6~8월, 11~12월에 대해서만 배출량이 보고되었으며, 나머지 기간 동안에는 배출량이 없는 것으로 나타났다. 그 외에도 몇몇의 굴뚝에서 월별 배출량이 없거나 누락된 자료가 확인되었다. 이러한 자료는 전체 월 배출자료의 16%가량으로, 해당 월의 시간자료를 살펴보면 대부분 가동중지 기간인 것으로 파악된다. 이처럼 특정 월에 실제 배출이 이뤄지지 않음에 따라 일부 굴뚝에서는 특정 월의 자료가 이어지지 않거나, 평균 대비 변화가 급격한 증감을 보였다(그림 5).

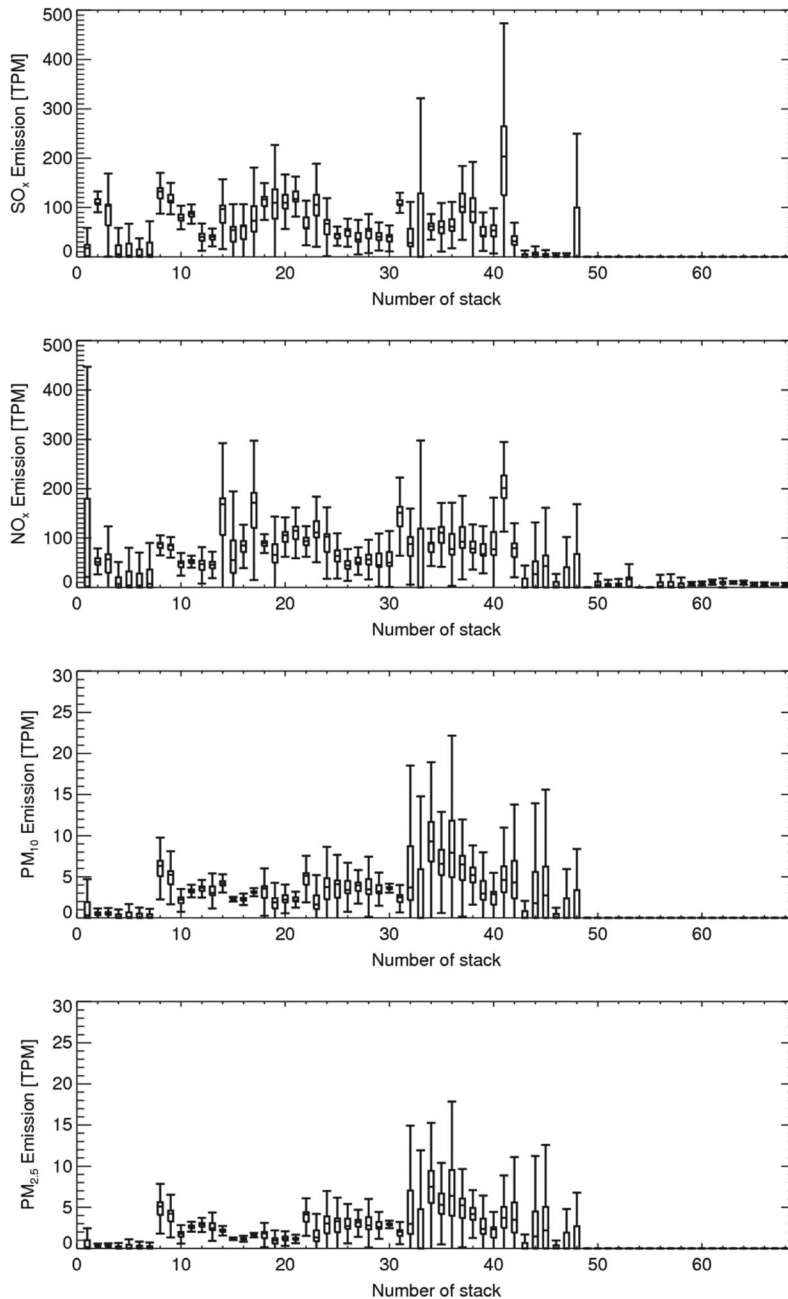


Fig. 3. Variations of monthly SO_x, NO_x, PM₁₀, and PM_{2.5} emissions for each EGU stacks in the CleansYS data for 2017.

3.3.2 굴뚝별 배출량의 요일별 변화

국내 발전 굴뚝에서 배출되는 대기오염물질의 요일별 배출 변동을 살펴보기 위하여 월별 변동성과 동

일한 방법을 적용하였다. 그림 6에서 요일별 변동성 ($= \frac{\text{요일별 배출량} - \text{요일별 배출량 평균}}{\text{요일별 배출량 평균}}$)은 두 가지 유형으로 뚜렷하게 구분된다.

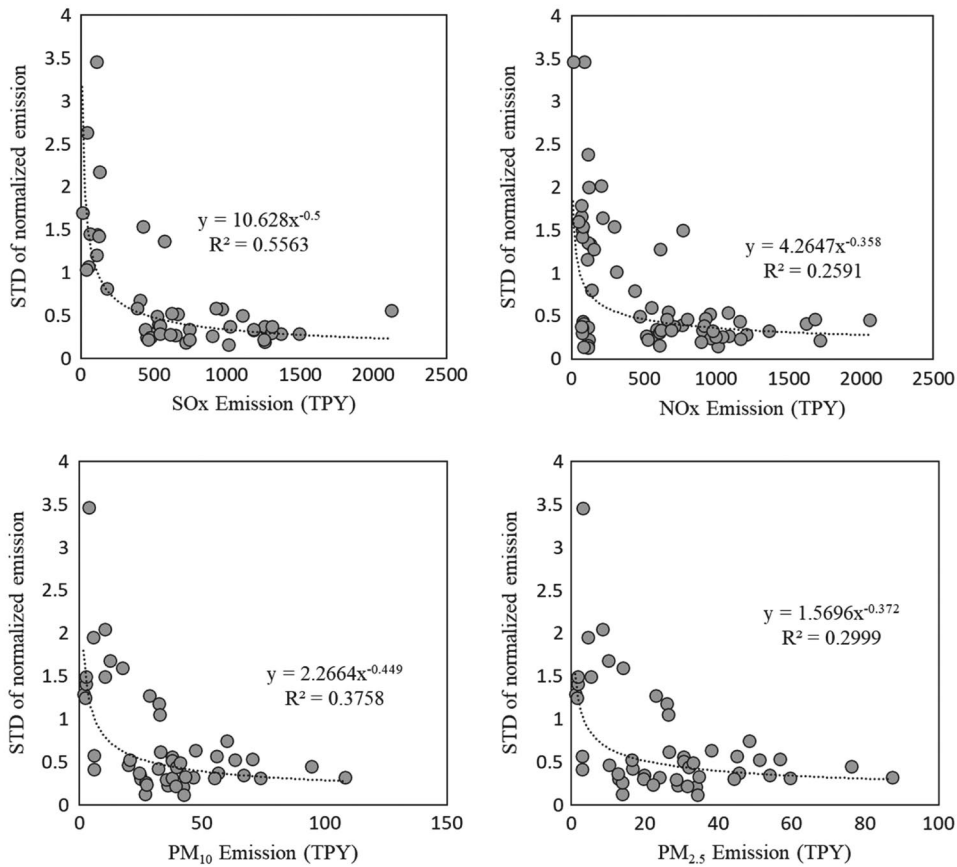


Fig. 4. Relationship between annual total SO_x, NO_x, PM₁₀, and PM_{2.5} emissions and standard deviations (STD) of their normalized monthly emissions (= [each month emissions - average of monthly emissions] / average of monthly emissions).

첫 번째 유형은 요일간 배출변동이 $\pm 5\%$ 내외로 작아 일주일 요일별 배출량이 대체로 일정하다. 이는 유연탄 및 무연탄 굴뚝에서 나타났다. 두 번째 유형은 요일별 배출량이 평일에 높고 주말에 낮아지며, 이는 B-C유 및 LNG 굴뚝에서 분석되었다. B-C 굴뚝의 경우 평일 대비 주말의 배출이 100%가량 낮아지며, LNG 굴뚝의 경우 평일과 주말의 배출량 차이가 큰 경우(-100%)와 작은 경우(-20%)가 모두 존재하였다. 월별 배출량과 마찬가지로 요일별 변동성에서 대기오염물질별 차이는 크지 않았다.

3.3.3 굴뚝별 배출량의 시간별 변화

그림 7은 발전시설 배출량의 하루 중 시간별 변동

성 (= [시간별 배출량 - 시간별 배출량 평균] / 시간별 배출량 평균)을 보인 것이다. 해당 배출원에 대한 시간별 변동성은 두 가지 주요한 유형으로 나눌 수 있다. 첫 번째 유형은 요일별 변동성과 마찬가지로 유연탄, 무연탄 굴뚝에 해당하며, 시간별 배출량의 차이가 2~3% 이내로 24시간 동안 대체로 일정하게 유지된다. 일부 유연탄 굴뚝 등에서 보이는 시간별 배출량의 증감은 발전시설의 가동률 조정에 의한 것으로 추정되며, 이는 68기 전체 배출량의 0.4%를 차지하는 작은 규모에 해당된다. 두 번째 유형은 뚜렷한 시간별 배출량 변화가 나타나는 것으로 B-C유와 LNG 굴뚝을 대상으로 분석되었다. 이러한 굴뚝의 경우 시간별 배출량이 주로 7~18시 사이 낮 시간 동안에 높아

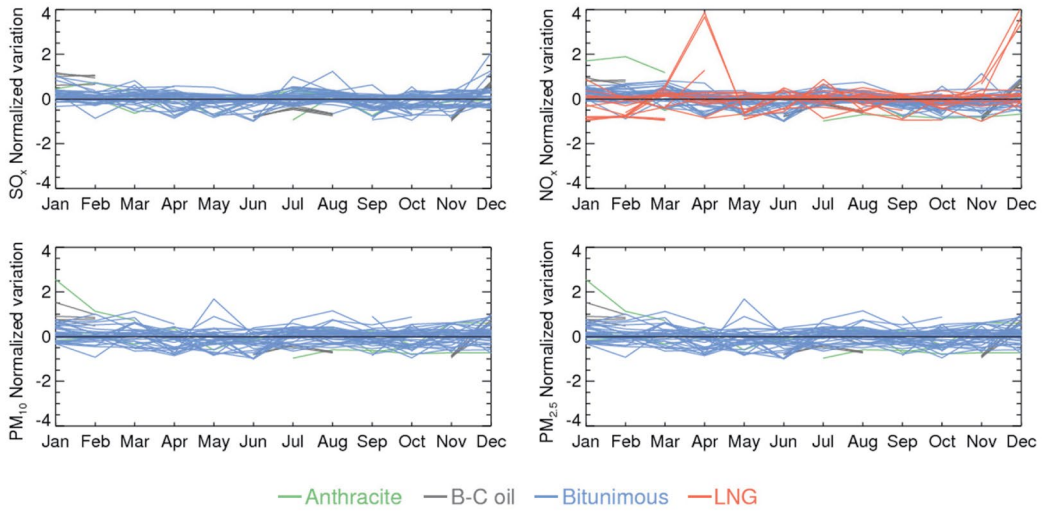


Fig. 5. Monthly variations of normalized SO_x , NO_x , PM_{10} , and $\text{PM}_{2.5}$ emissions for the EGU from the CleanSYS data. Line colors indicate the fuel types in the EGU facilities.

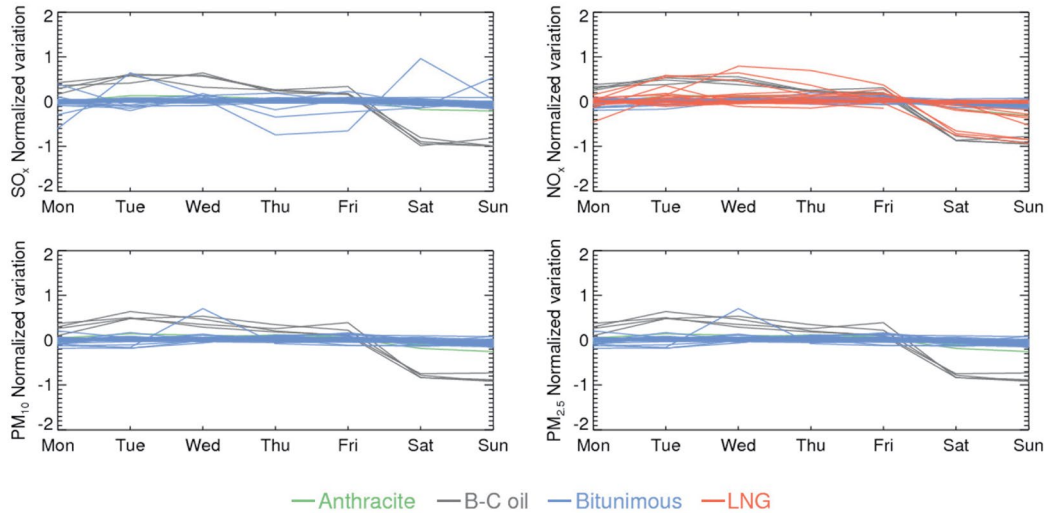


Fig. 6. Weekday and weekend variations of normalized SO_x , NO_x , PM_{10} , and $\text{PM}_{2.5}$ emissions for the EGU stacks in the CleanSYS data. Line colors indicate the fuel types in the EGU facilities.

지고, 그 외 야간 동안에는 낮아지는 일간 변화를 보였다. 이는 B-C유 및 LNG 굴뚝의 경우 대개 에너지 수요가 높은 낮 시간 동안에만 가동되기 때문으로 판단된다(Lee, 2012).

실측자료의 월/요일/시간별 배출 변동을 요약하면

다음과 같다. 1) 월별 배출량은 굴뚝에 따라 평균 대비 $-100\sim 100\%$ 사이의 변동을 보이거나, 경우에 따라 비연속적으로 나타났다. 2) 요일별 배출량은 7일간 일정하거나 평일에 높고 주말에 낮은 두 가지로 구분되었다. 3) 시간별 배출량은 주간에 높고 야간에 낮은

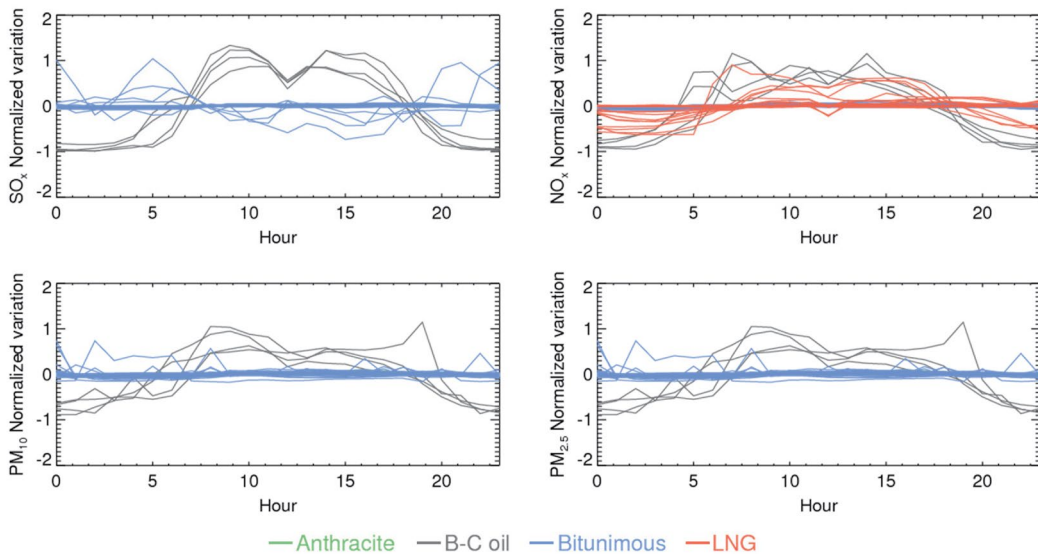


Fig. 7. Diurnal variations of normalized SO_x , NO_x , PM_{10} , and $\text{PM}_{2.5}$ emissions for the EGU stacks from the CleanSYS data. Line colors indicate the fuel types in the EGU facilities.

배출유형과 24시간 일정하게 배출되는 유형으로 구분되었다. 전체 68기 중에 44기 굴뚝 배출량(총 배출량의 97% 이상)은 요일별, 시간별 변화가 없는 패턴을 보였다. 이와 같이 일정하게 배출되는 굴뚝은 대부분 대형 발전 설비에서 나타나며, 시설의 발전량 등 가동율이 결정되고 나면 계획이 변경되기까지 일정 기간 동안 배출량이 유지되기 때문으로 판단된다.

3.4 발전시설에 대한 연료별 시간 분배계수

3.3절에서 논의된 발전시설의 배출량에 대한 시간 변동성은 동일한 연료를 사용하는 굴뚝에 대해 유사하게 나타났다. 이러한 점을 고려하여 시간 분배계수는 발전시설의 연료별로 평균하여 제시하였다. 2.3절에서 보인 바와 같이 월별 배출량이 보고되지 않은 굴뚝에 대해서는 유효한 월별 배출량의 평균값으로 대체하였다.

월별 분배계수는 그림 4에서 보인 바와 같이 연료별 굴뚝에 대해 다양하게 나타났다(그림 8). 유연탄 굴뚝은 에너지 소비가 증가하는 겨울철과 여름철 분배계수가 평균 대비 10%가량 높게 산정되었다. 무연

탄 굴뚝은 1~2월 계수가 평균 대비 50% 이상 높으며, 9~10월에는 40%가량 낮게 나타났다. 한편, B-C유 굴뚝의 경우 겨울철(1, 2, 12월) 분배계수가 평균 대비 1.7배 이상 높으며, 여름철(7~8월)에는 절반 수준이다. LNG 굴뚝은 4월과 12월의 분배계수가 평균 대비 30% 이상 높다. 다만, 이는 검토된 LNG 굴뚝 가운데 월별 배출량이 보고되지 않거나 특정 월 배출량이 크게 증가한 결과이다. 월별 분배계수는 SO_x , NO_x , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ 에 대해 유사하므로, 이를 평균하여 연료별로 표 S1에 제시하였다.

요일별 분배계수는 B-C유와 LNG를 제외한 무연탄, 유연탄 굴뚝에 대해 일별 차이가 5% 내외로 비교적 일정하다(그림 8). 한편, B-C유 굴뚝의 요일별 분배계수는 월요일~수요일 동안 높고, 목요일과 금요일에 다소 낮아지며, 주말에는 평일 대비 10% 수준이다. LNG 굴뚝의 경우, 주말 계수가 평일 계수 대비 30%가량 낮다. 요일별 분배계수 역시 월별 분배계수와 마찬가지로 물질별로 유사하다(표 S2).

B-C유 굴뚝에 대해 대부분의 배출이 낮에 이루어지므로, 시간별 분배계수는 주간에 높고 야간에는 배

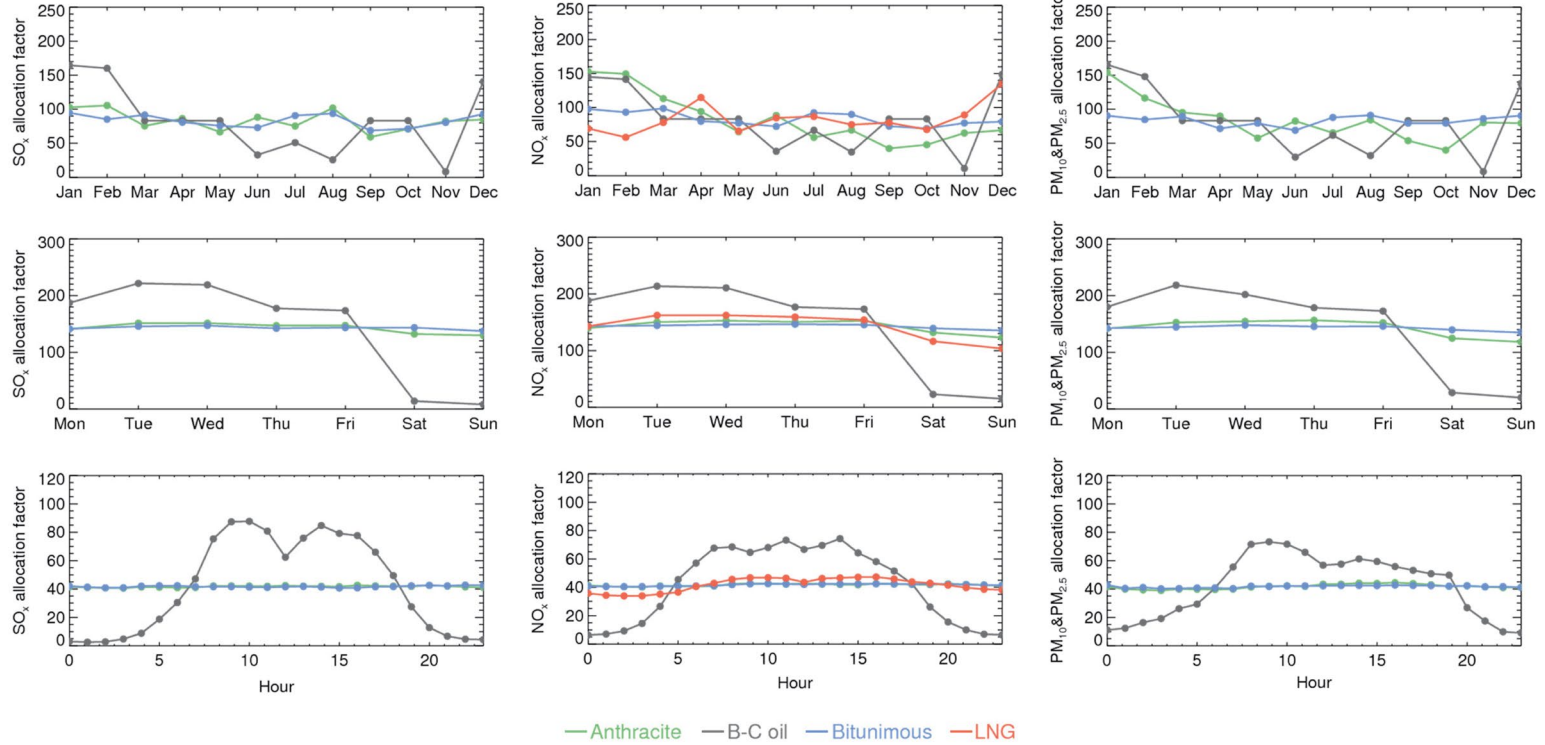


Fig. 8. Monthly (top), daily (middle), and hourly (bottom) temporal allocation factors developed in this study by fuels for SO_x, NO_x, PM₁₀ and PM_{2.5}.

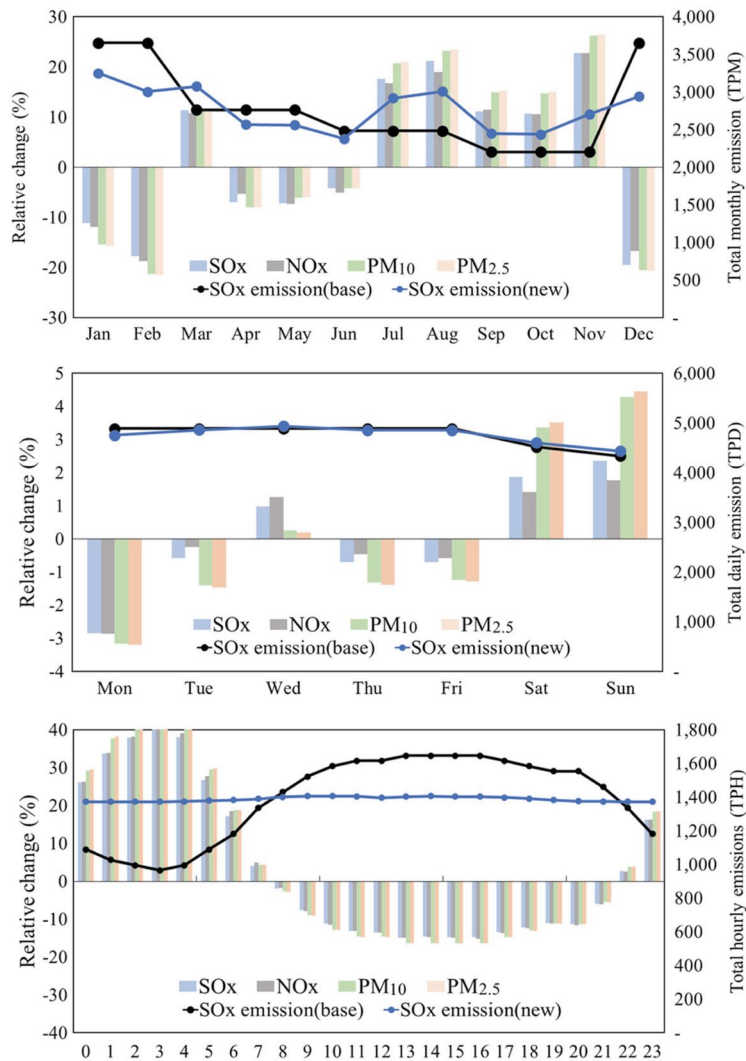


Fig. 9. Emission rates and relative changes in monthly, daily, and hourly emissions processed with the exiting (base) and developed (new) temporal allocation factors. Black and blue Lines indicate SO_x emissions temporally processed by base and new temporal profiles, respectively.

출이 거의 없다. LNG 굴뚝은 야간의 저점이 주간 고점의 30% 수준으로 주야간 차이가 있다. 그 외 굴뚝에 대해서는 시간 변화 없이 일정한 시간별 분배계수가 산정되었다(표 S3).

다만, 본 연구에서 검토된 무연탄과 B-C유 굴뚝의 경우 검토된 굴뚝 수가 적어 자료사용이 제한적이었다. 향후 많은 굴뚝을 대상으로 CleanSYS 자료를 확보하거나, 분석 기간 확대 등을 통해 이용 가능한 자

료가 증가한다면 보다 일반적인 시간 분배계수 도출이 가능할 것으로 사료된다.

3.5 기존 시간 분배계수와와의 비교

본 절에서는 기존 시간 분배계수를 적용하여 시간 할당된 68기의 총 배출량(이하 'E_{OLD}')과 본 연구에서 산정된 시간 분배계수를 적용한 배출량(이하 'E_{NEW}')의 차이를 비교하였다. 시간 분배계수 변화에

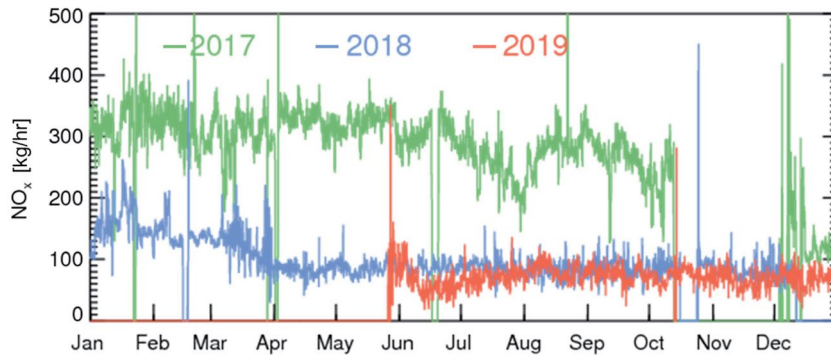


Fig. 10. Temporal variations of 1-h NO_x emissions from the selected stack from 2017 to 2019. The stack was selected since it showed the highest emission rates among 68 stacks.

따라 각 시간의 배출량은 달라지나, 연간 배출 총량은 보존된다. 그림 9의 월/요일/시간별 E_{OLD} 와 E_{NEW} 는 물질별 변화가 유사하여 SO_x 만을 대표로 제시하였으며, E_{OLD} 대비 E_{NEW} 의 변화율은 모든 분석 물질에 대해 나타내었다. SO_x 의 월별 E_{OLD} 는 겨울철에 높고 여름철에 낮았으나, E_{NEW} 는 기존 대비 여름철에 증가하였다. 이를 정량적으로 살펴보면, 12~2월 동안 E_{NEW} 가 E_{OLD} 대비 11~21%가량 감소하였으며, 반대로 7~11월에는 E_{NEW} 가 E_{OLD} 대비 11~26%가량 증가하였다. 이는 유연탄에 대한 여름철 시간 분배계수가 기존에 비해 높아졌기 때문이다. 이와 같은 겨울철 배출량 감소를 감안하였을 때, 겨울철 계절관리제를 통한 화력발전 부문의 배출제어는 예상된 결과에 비하여 농도개선 폭이 작아질 수 있다. 다만, 저감 대책이 적용되는 굴뚝의 배출량 변화는 평균적인 배출량 변화와는 차이를 보일 수 있으므로, 실제 대책효과 분석에는 실배출량을 적용이 바람직하다.

한편, 요일별 배출량의 경우 E_{OLD} 와 E_{NEW} 가 0~4% 차이를 보여 유사하였다. 시간별 SO_x 의 E_{OLD} 는 낮 동안 높고 야간에 낮아졌으나, E_{NEW} 는 24시간 일정하게 유지되었다. 이는 배출의 대부분을 차지하는 유연탄 및 무연탄 굴뚝이 24시간 일정한 시간별 분배계수를 따르기 때문이다. 기존 분배계수는 무연탄에 대해 주간 대비 야간 계수가 낮게 적용되었으나, 본 연구에서 도출된 시간 분배계수가 적용됨에 따라 0~7시,

22~23시 동안에는 배출량이 E_{OLD} 대비 증가하며, 3시에는 증가폭이 48%로 가장 컸다. 반대로 8~21시 동안에는 각 시간의 E_{NEW} 가 E_{OLD} 대비 11~16% 감소하였다.

이와 같은 새로운 시간 분배계수의 적용은 여름철 대기오염물질 농도 증가에 영향을 줄 수 있다. 또한, E_{NEW} 의 시간별 배출 변화에 따라 낮 동안 오염물질 농도가 감소할 수 있으나, 혼합고가 낮은 야간 동안에는 지표부근으로의 대기질 영향이 더욱 누적될 가능성이 있다. 이와 같은 대기 중 오염물질 농도에 대한 영향은 추가 연구를 통한 검토가 필요하다.

3.6 실측자료 활용 방안 검토

3.3.1에서 검토된 바에 의하면, 68기 굴뚝의 2017년 월별 배출량 중 16%는 배출이 없거나, 이용 가능한 배출 정보가 부재하였다. 이러한 배출량 자료의 연간 일관성을 살펴보기 위해, 그림 10에 분석 대상 굴뚝 중 배출규모가 가장 큰 굴뚝을 대상으로 2017~2019년 기간에 대한 1시간 NO_x 배출량의 연간 변화를 보였다. 해당 굴뚝의 배출량은 2017년 1~6월 동안 300 kg/hr 이상이었으나, 여름철 동안 점차 낮아진 후 10월 중순부터 11월까지 배출량이 0 kg/h으로 보고되었다. 2018년과 2019년에는 2017년 동기간 대비 배출량이 1/3 수준으로 감소하였으며, 2018년 12월~2019년 5월 말 기간에는 배출량이 다시 0 kg/hr으로 보고되

었다. 이처럼 3년간 발전시설의 가동이 중지된 기간과 배출규모는 해마다 큰 차이를 보였다. 이와 같이 굴뚝의 월별 가동여부 및 가동률 변화를 시간 분배계수에 반영하기는 어려우므로, 본 연구에서 제시한 시간 분배계수의 활용 방안을 다음과 같이 제안한다.

첫째, 발전과 같이 대형 점 오염원에서 CleanSYS 등 1시간 간격의 배출자료를 사용할 수 있다면, 해당 자료를 직접 배출량 분석이나 대기화학 모형 등에 이용한다. 다만, 연간 배출량으로 작성되는 CAPSS 배출 목록과의 자료 연계방안 및 직접적인 CleanSYS 자료 이용을 위한 전처리 방법이 마련되어야 한다. 또한 실시간 배출자료 입력 시 CAPSS 점오염원과의 중복 입력을 방지하기 위해 실시간 배출자료 제공 여부에 따라 CAPSS 점오염원 자료를 분리하는 방안이 모색될 필요가 있다.

둘째, 미래연도에 대한 모사(예를 들어, 대기질 예보, 정책모델링 등) 혹은 자료 수집의 제한으로 실시간 배출자료를 이용할 수 없는 경우, 본 연구에서 산정된 시간 분배계수를 활용할 수 있다. 다만, CAPSS는 점오염원에 대해 월간 배출량을 제공하므로, 연간 배출량을 시간 분배과정을 거쳐 이용하기보다는 월간 배출자료를 직접 이용하는 것이 시간분배 과정에서의 불확도를 줄일 수 있는 방법이 될 수 있다. 또한, 발전부문 이외에도 실측자료가 활용 가능한 배출부문의 경우, 본 연구에서 제시한 방법을 통해 시간 분배계수를 작성할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 발전부문 굴뚝 68기에 대해 CleanSYS 실시간 배출자료를 이용하여 CAPSS 2017 배출 목록의 배출량과 비교하고, 월/일/시간별 시간 분배계수를 작성하였다. CleanSYS를 통해 보고된 분석 대상 굴뚝의 2017년 1년간 실측 배출량은 SO_x 와 NO_x 각각 33,308, 39,122 ton이었다. 한편 동일 굴뚝에 대해 CAPSS 2017에서 보고된 SO_x 와 NO_x 총 배출량은

31,932, 38,010 ton/yr으로, 실측자료 대비 각각 4%, 3% 낮게 산정되었다. 이러한 배출량 차이는 주로 무연탄 관련 굴뚝에서 기인하였다.

계절별 배출량 변화를 보여주는 월별 분배계수는 연료 구분에 따라 차이를 보이나, 대체로 에너지 소비가 높은 겨울철과 여름철에 높게 산정되었다. 요일에 따른 배출량 변화를 보여주는 요일별 분배계수는 B-C유와 LNG 굴뚝에 대해서는 평일에 높고 주말에는 대체로 배출되지 않으며, 24시간 동안의 시간 변화에서는 야간에 낮고 주간에 높았다. 그 외 무연탄, 유연탄 등의 굴뚝은 요일 변동이 $\pm 5\%$ 로 대체로 일정하며, 시간별 분배계수도 일정하게 산정되었다.

68기 굴뚝에 대해 기존에 이용되어온 미환경청의 시간 분배계수는 실측된 배출자료로부터 산정된 시간 분배계수와 차이가 있다. 본 연구에서 제시한 시간 분배계수를 적용한 SO_x 및 NO_x 월 배출량은 기존 계수로 분배된 배출량 대비 겨울철 11~21% 감소하였으며, 여름철과 가을철에는 11~26% 증가하였다. 요일별 배출량은 분배계수에 따른 차이가 4% 미만으로 변화가 작다. 한편, 새로운 시간 분배계수가 적용된 시간 배출량의 경우 야간(23~6시) 동안 배출량이 기존 계수를 적용한 배출량에 비해 10~48% 증가하고, 주간(10~21시) 동안에는 최대 10~16% 감소하였다.

본 연구에서 검토된 CleanSYS 자료에서 1시간 배출량은 다양한 시간 변동성을 보이나, 시간 분배계수를 적용한 할당은 일반적인 변화를 대표하므로 실제와 차이를 보인다. 모든 굴뚝의 배출의 시간 변화를 개별적으로 고려하며, 실제와 가까운 1시간 배출자료를 준비하기 위해서는 실측 배출자료를 직접적으로 활용하는 방안이 모색되어야 한다. 다만, 실측자료 측정 여부, 또는 미래 연도에 대한 배출 시나리오 검토 등을 위해서는 CAPSS의 연 또는 월 배출자료를 시간 분배 과정을 거쳐 대기질 개선 효과 분석 등에 이용하는 방안이 필요하며, 이때 본 연구에서 작성한 시간 분배계수가 활용될 수 있다. 향후 충분한 자료 확보로 실측자료가 가용한 다른 대형 점오염원에 대해

서도 부문별로 동일한 분석을 통해 배출계수를 산출하고자 하며, 실시간 배출량 활용 및 시간 분배계수 개선을 종합하여 대기질 모사를 수행하고 농도 변화를 분석하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 국가미세먼지정보센터의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Adelman, A., Baek, B.H. (2012) Methods for estimating meteorology-based emissions temporal profiles for livestock and residential wood combustion sources. Institute for the Environment. University of North Carolina at Chapel Hill.
- Bae, C., Kim, H.C., Kim, B.-U., Kim, Y., Woo, J.-H., Kim, S. (2020a) Updating Chinese SO₂ emissions with surface observations for regional air-quality modeling over East Asia, *Atmospheric Environment*, 228, 117416, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117416>
- Bae, M., Yoo, C., Kim, S. (2020b) Estimating the Shutdown Effect of the Old Coal-fired Power Plants on PM_{2.5} and its Composition, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36, 48-63, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.1.048>
- Benjey, W., Houyoux, M., Susick, J. (2001) Implementation of the SMOKE emission data processor and SMOKE tool input data processor in models-3. US EPA.
- Ju, H., Yoo, C., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2019) Impact of Stack Parameters on Modeled PM_{2.5} Conversion Rates: A Case Study of Chungnam during the KORUS-AQ 2016, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35, 593-608, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.5.593>
- Kim, B.-U., Kim, O., Kim, H.C., Kim, S. (2016) Influence of fossil-fuel power plant emissions on the surface fine particulate matter in the Seoul Capital Area, South Korea, *Journal of the Air & Waste Management Association* 66, 863-873, <https://doi.org/10.1080/10962247.2016.1175392>
- Kim, E., Bae, C., Yoo, C., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2018) Evaluation of the Effectiveness of Emission Control Measures to Improve PM_{2.5} Concentration in South Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34, 469-485, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.3.469>
- Kim, O., Bae, M., Kim, S. (2020) Evaluation on Provincial NO_x and SO₂ Emissions in CAPSS 2016 Based on Photochemical Model Simulation, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* 36, 64-83, <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.1.064>
- Kim, S., Moon, N., Byun, D. (2008) Korea Emissions Inventory Processing Using the US EPA's SMOKE System, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 2, 34-46, <https://doi.org/10.5572/ajae.2008.2.1.034>
- Korea Environment Institute (KEI) (2017) Analysis of environmental and health impacts by fuel substitution scenario for coal-fired power plants, (in Korean with English abstract).
- Korea Ministry of Environment (KMOE) (2012) CleanSYS Services Manual.
- Korea Ministry of Environment (KMOE) (2017) the Particulate Matter Comprehensive Plan http://me.go.kr/home/web/policy_data/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=title&searchValue=%EB%AF%B8%EC%84%B8%EB%A8%BC%EC%A7%80&menuId=10259&orgCd=&condition.deleteYn=N&seq=7053 (accessed 11.17.20).
- Korea Ministry of Environment (KMOE) (2021) <https://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?boardMasterId=1&boardId=1189340&menuId=286> (accessed 2.8.21).
- Korea Power Exchange (KPX) (2020) Electricity Market Trends & Analysis 2019 Annual Report.
- Lee, S.-U. (2012) A Swap Optimization for Dynamic Economic Dispatch Problem with Non-smooth Function, *Journal of the Korea Society of Computer and Information*, 17, 189-196, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.9708/JKSCI/2012.17.11.189>
- Moon, Y.S. (2015) Estimation of Chemical Speciation and Temporal Allocation Factor of VOC and PM_{2.5} for the Weather-Air Quality Modeling in the Seoul Metropolitan Area, *Journal of the Korean Earth Science Society*, 36, 36-50, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5467/JKES.2015.36.1.36>
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2015) Air

- Pollutants Emission Factor.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2019) 2016 NATIONAL AIR POLLUTANTS EMISSION.
- Park, H.-S., Lee, D.-A., Yang, J.-G., Jang, S.-G., Kim, H.-B., Kim, D.-S. (2018) Emission Characteristics of PM₁₀ and PM_{2.5} in Thermal Power Plants Using Different Fuel Types, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34, 534-541, (in Korean with English abstract)
- Pascal, M., Corso, M., Chanel, O., Declercq, C., Badaloni, C., Cesaroni, G., Henschel, S., Meister, K., Haluza, D., Martin-Olmedo, P., Medina, S. (2013) Assessing the public health impacts of urban air pollution in 25 European cities: Results of the Aphekom project, *Science of the Total Environment*, 449, 390-400. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.01.077>
- Pope, C.A., Dockery, D.W. (2006) Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56, 709-742. <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485>
- U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA) (2017) Emissions Inventory Guidance for Implementation of Ozone and Particulate Matter National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) and Regional Haze Regulations.
- Van der Gon, H.D., Hendriks, C., Kuenen, J., Segers, A., Visschedijk, A. (2011) TNO Report.

Authors Information

- 배민아 (아주대학교 환경공학과 박사과정)
유 철 (국가미세먼지정보센터 배출량조사팀 팀장)
김형천 (국가미세먼지정보센터 배출량조사팀 환경연구사)
김순태 (아주대학교 환경안전공학과 교수)

Table S1. Monthly allocation factors developed in this study by fuels from 1-hr emission measurement data.

Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Anthracite	141	122	95	90	62	86	66	84	52	49	77	78
B-C oil	160	149	83	83	83	32	60	31	83	83	9	141
Bituminous	93	87	92	76	78	71	90	92	75	75	83	88
Kerosene	69	56	78	115	65	85	87	75	78	68	89	135

Table S2. Weekday and weekend allocation factors developed in this study by fuels.

Day	Sun	Mon	Tue	Wed	Thu	Fri	Sat
Anthracite	141	152	153	153	151	128	122
B-C oil	184	218	208	178	173	24	16
Bituminous	142	145	147	145	145	140	136
LNG	143	162	162	159	154	116	104

Table S3. Hourly allocation factors developed in this study by fuels.

Hour	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Uniform	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
B-C oil (SO _x)	3	3	3	5	9	19	30	47	75	87	88	81	62	76	85	79	78	66	49	27	13	7	5	4
B-C oil (NO _x)	6	7	9	15	27	45	57	68	68	65	68	73	67	70	74	64	58	52	42	26	16	10	7	6
B-C oil (PM ₁₀ & PM _{2.5})	11	12	16	19	26	29	41	55	71	73	72	66	57	58	61	59	56	53	51	50	27	17	10	9
LNG (NO _x)	36	34	34	34	35	36	41	43	46	47	47	46	44	46	47	47	47	46	44	43	41	40	39	38