

Research Paper

김포시 난립 개별입지 공장 군집화 조정에 따른 SO₂ 오염도 변화

김 희 석

서울대학교 환경계획연구소

Changes in SO₂ Pollution by Clustering of Individual Location Factories Scattered throughout Gimpo City

Hee-Seok Kim

Environmental Planning Institute, Seoul National University

요약: 주거지 내 위치하거나 매우 인접한 곳에 무분별하게 난립된 개별입지 공장들은 궁극적으로는 준 산업단지 또는 새로운 계획입지로의 조정이 필요하다. 본 연구에서는 김포시 환경을 예로 김포시 전역에 난립된 개별입지 공장들을 새로운 지역으로 군집시킴에 따른 대기 SO₂ 오염도의 변화를 AERMOD 모형을 이용하여 평가하였다. 평가결과 개별입지 공장들의 공간 재배치를 통해 김포시 자체 배출원에 의한 오염도를 개선할 수 있는 가능성을 확인하였다. 재배치와 더불어 배출 굴뚝의 높이 조정과 같은 배출규제가 병행되는 경우 김포시 자체 배출원에 의한 오염도를 김포시 전체적으로 볼 때 약 70% 감소 가능하며 행정구역별로 최대 약 87% 감소 가능성을 정량적으로 확인하였다. 단, 군집지역으로 선정된 해당 행정구역은 김포시 전체 오염도의 변화 폭과 비교했을 때 상대적으로 큰 오염도 증가가 나타날 수 있다.

주요어: AERMOD, 개별입지 공장, 군집화, 이산화황, 인구가중평균오염도

Abstract: Many factories indiscriminately located in the vicinity of residential areas need to be adjusted to quasi-industrial parks or new planning management area. In the present work, the changes of atmospheric SO₂ concentration according to clustering of individual location factories throughout Gimpo city into a new area were evaluated using a commercial dispersion model, AERMOD. As a result of the evaluation, it was suggested the possibility of improving the pollution through the relocation of individual factories. The combination of relocation and discharge regulation on the stack height may reduce the overall pollution from Gimpo approximately up to 70%, and some areas achieve maximum 87% decrease. However, the area selected as a cluster zone may show a relatively large increase compared to the change in the total pollution level of Gimpo.

Keywords: AERMOD, Individual location factory, Clustering, SO₂, Population-weighted concentration

I. 서론

한국은 1960년대 울산공업단지 조성을 기점으로 전역에 크고 작은 산업시설의 증가와 이를 기반으로 한 산업화를 통해 경제발전을 이루어 왔다(MKE 2011). 그러나 산업화에 의한 경제발전은 부가적으로 다양한 환경문제를 유발한다. 특히 산업시설에서 배출되는 유해화학물질들은 환경은 물론 인체 건강에도 직접적으로 나쁜 영향을 미친다. 산업시설에 의한 대표적인 대기오염물질인 이산화황(SO₂)은 국립환경과학원 국가 대기오염물질 배출량 서비스(NAPES 2015)에 따르면 전체 배출량의 약 80%가 산업시설에서 배출되고 있다. SO₂는 자극적인 냄새가 나는 무색 기체의 유해물질로 인체의 점막을 침해하는 독성이 있으며 질소산화물과 함께 산성비를 야기한다(AIHA 1989). 또한 SO₂는 최근 크게 이슈가 되고 있는 미세먼지의 주요 생성 물질로서 초미세먼지(PM_{2.5}) 총 질량의 약 20~35%를 차지하는 것으로 연구된 바 있다(Pathak et al. 2009; Zhang et al. 2015). 국내에서는 1978년부터 대기 환경 관리대상 오염물질 중 하나로 SO₂를 관리하고 있다(MOE 2015).

SO₂의 주 배출원인 산업시설은 국내에서는 계획입지 시설(산업단지)과 산업단지 외 농경지나 주거지에 개별적으로 설립된 개별입지 시설(개별입지 공장)로 구분된다. 국가 및 지방 자치 단체의 종합적인 계획하에 설립되는 산업단지와 달리 개별입지 공장들은 개별 기업의 자유의지 하에 임의로 개발되기 때문에 무분별하게 난립되어 난개발을 유발하고 자연환경을 훼손하고 있는 실정이다(Yang & Lee 2016; Hwang et al. 2018). 또한 개별입지 공장들은 대체로 규모가 영세하고 환경 처리시설을 제대로 구비하지 않고 있기 때문에 각종 환경문제를 유발하기 쉽다(Ban & Baek 2010; Ban et al. 2015). 무엇보다 개별입지 공장들은 주거지 내 위치하거나 매우 인접하고 있어 이 시설들에 의한 환경 문제에 시민들은 직접 노출되고 있다(Jang et al. 2017).

개별입지 공장들을 준산업단지로 지정하거나 궁극적으로는 계획입지로 조정함으로써 산업단지에 비해

취약한 기반 시설을 보완하고 지방 자치 단체의 효과적인 규모의 경제를 통해 효율적으로 관리할 수 있는 방안들이 연구된 바 있다(KRIHS 2007; Ban & Baek 2010). 그러나 준산업단지 또는 계획입지로의 조정에 따른 개별입지 공장들의 새로운 군집화가 오염도에 미치는 영향은 논의되지 않았다. 아울러 분산되어 있는 개별 배출원을 임의의 지역으로 군집시킴에 따라 해당 지역의 SO₂ 오염도가 어떻게 달라지는지 정량적으로 평가한 연구는 찾아보기 힘들다. SO₂의 환경 중 배출량 측면에서 개별입지 공장 하나의 배출량은 산업단지 배출량과 비교해 볼 때 매우 작을 수 있지만 분산되어 있는 개별입지 공장들의 배출량 합은 상당할 것이다. 국내 개별입지 용지 면적은 2009년부터 2018년 기간 평균적으로 국내 산업시설의 약 50%를 차지하고 있기 때문에 개별입지 공장에 의한 배출량이 전체 산업시설에 의한 배출량 중 상당 비중을 차지하고 있을 것이라 추정할 수 있다(Factoryon, <https://www.femis.go.kr/>). 특히 대표적인 개별입지 공장의 난립 지역으로 알려진 김포시의 경우 개별입지 시설의 비율이 전체 산업시설의 96%를 차지하고 있다(Gimpo 2014).

면·점 오염원에 의한 대기 오염을 평가할 수 있는 대기확산모형은 매우 다양하나 미국환경보호청은 미국기상학회와 공동 개발한 대기확산모형 AERMOD를 오염원으로부터 50 km 이내의 근거리 평가 시 규제 모형으로 권고하고 있다(Cimorelli et al. 1996; 2003; 2005; Sax & Lsakov 2003; Venkatram et al. 2004; EPA 2004a). 국내의 경우 2000년 초반까지는 주로 ISC3 모형이 주로 활용되었으나 ISC3와 AERMOD 비교 결과 국내 환경에서 AERMOD가 더 적합한 것으로 평가된 바 있다(KEI 2005). 특히 다수의 연구들에서 AERMOD가 SO₂ 평가에 활용되고 있다(Perry et al. 2005; Park 2007; Bin et al. 2009; 2010; Carbonell et al. 2010; Gibson et al. 2013). 아울러 미국환경보호청 주도하에 최근까지도 AERMOD 성능 개선 및 평가에 대한 업데이트가 이루어지고 있다(EPA 2015; 2016).

따라서 본 연구에서는 김포시를 대상으로 난립되어 있는 개별입지 시설들을 특정 지역으로 이전하여

군집시킴에 따른 대기 SO₂ 오염도 변화를 대기확산 모형 AERMOD를 이용하여 정량적으로 평가하였다.

II. 연구방법

1. 연구범위

본 연구 평가의 시간적 범위는 평가에 필요한 기상값, SO₂ 배출량 및 측정값, 개별입지와 산업 시설 현황 정보 등 이러한 정보를 모두 확인 가능하면서 그 중 가장 최신인 2013년으로 한정하였다. 공간적 범위는 김포시이다. 김포시는 대한민국 중부 서북쪽 한강 하류에 입지하고 있어 침전물의 퇴적에 의한 넓은 평야지의 특성을 보인다(Gimpo 2015). 김포시를 중심으로 북쪽으로는 북한 개성, 동쪽으로는 파주시 및 고양시, 남동쪽으로는 서울특별시 강서구, 남쪽으로는 인천광역시 서구 및 계양구, 그리고 서쪽으로는 인천광역시 강화군과 각각 마주보고 있다. 김포시는 서해에서 가까워 해양성 기후의 영향을 받고 있으며 2001~2010년 연평균 기온, 강수량, 풍속은 각각 12.1℃, 1264 mm, 2.3 m/s이며, 6~9월에 전체 강수량의 약 62%가 집중된다(KMA 2016). 전체적인 지형적 모향은 남동 방향으로 손잡이가 있는 돌도끼 형태라 할 수 있다. 김포시의 행정구역은 2013년 12월말 기준 3읍(통진읍, 고촌읍, 양촌읍), 3면(대곶면,

월곶면, 하성면), 6동(김포 1동, 김포 2동, 사우동, 풍무동, 장기동, 구래동)으로 총 면적은 276.62 km²이다(Figure 1). 김포시 내 산업시설의 수는 2013년 기준 총 6924개이며 이중 개별입지 시설과 계획입지 시설의 비율은 각각 96%, 4%이다(Gimpo 2014). 개별입지 시설들은 김포시 내 행정구역 전역에 난립되어 분포하고 있으며 산업단지는 양촌읍(학운·양촌 산업단지), 월곶면(상마 산업단지), 대곶면(울생 산업단지)에 위치한다. 대기질 모니터링 지점은 3개소로 통진읍, 고촌읍, 사우동에서 각각 운용되고 있다.

2. AERMOD

AERMOD 시스템은 주 프로그램(AERMOD)과 두 가지 전처리 프로세스로 AERMET과 AERMAP을 가지고 있다(EPA 2004a). AERMET는 기상 전처리 시스템으로 상층 기상데이터와 지상 기상데이터를 입력 자료로 받아서 AERMOD의 기상 입력 자료를 생성하며(EPA 2004b), AERMAP은 지형에 대한 전처리 프로그램으로 수치표고모형(DEM) 자료를 받아서 각 수용기(receptor) 위치 및 높이에 데이터를 생성한다(EPA 2004c). 상층 기상데이터는 라디오존데를 통한 12시간 간격의 고도에 따른 상층대기의 기압, 고도, 기온, 이슬점 온도, 풍향, 풍속 등의 데이터이다. 본 연구에서는 평가 공간인 김포시와 인접한 백령도

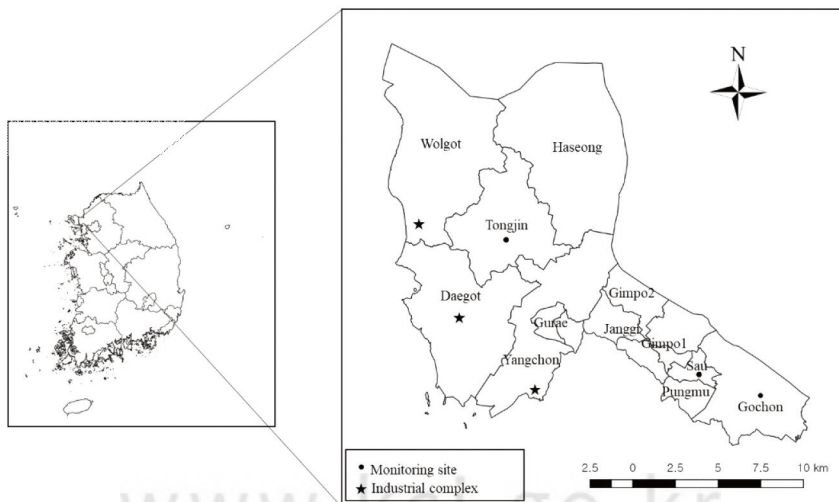


Figure 1. Map of Gimpo city.

측정소(37.9661N, 124.6305E, 해발고도 144.86m)의 자료를 활용하였다. 지상관측 데이터는 기압, 기온, 풍향, 풍속, 상대습도, 강수량, 강수유무, 운고, 전운량 등의 1시간 간격의 데이터이다. 김포시와 인접한 지상 관측소는 강화, 백령도, 인천, 인천공항 측정소가 있는데 본 연구에서는 평가를 위한 데이터 결손이 상대적으로 적은 인천공항(37.469N, 126.451E, 해발고도 7.0m) 데이터를 사용하였다. 본 연구 대상 영역의 수치표고 데이터는 국토지리정보원(NGII, www.ngii.go.kr/)에서 제공하는 격자 간격 90 m의 DEM 데이터를 사용하였다. 수용기는 DEM 자료를 통해 높이를 반영하였으며 김포시를 포함하도록 1 km의 간격으로 설정하였다. 김포시 행정구역내에는 총 279개의 수용기가 위치한다.

3. SO₂ 배출량

SO_x는 황분이 산화하면서 생성하는 SO₂, SO₃로 구성되는데 이중 SO₂의 비율이 약 98% 정도 되는 것으로 알려져 있다(NRC 1975). 따라서 본 연구에서는 SO₂의 배출량과 SO_x의 배출량은 동일한 것으로 설정하였다. 현재 제공되는 배출량 정보의 최소 공간해상도는 시·군·구이고 배출원은 비산업과 산업(산업단지, 개별입지 공장)에 의한 것으로 구분할 수 있다. 김포시 행정구역별 배출량은 Table 1에 나타난 것처럼

비산업시설, 개별입지 공장, 산업단지 배출량으로 구분하여 나타내었다. 비산업시설에 의한 배출량과 산업시설에 의한 배출량은 각각 거주 인구와 종사자의 수로 가중하여 산정하였다. 비산업시설과 개별입지 공장은 각 행정구역 전체 면오염원(Area poly)으로, 산업단지별 배출량은 해당 산업단지의 지점 및 면적을 고려한 면오염원(Area circle)으로 설정하였다. 면오염원의 배출높이는 김포시 현지 배출 시설물들의 높이와 유럽 대기 배출 인벤토리에서 제시하고 있는 면오염원 대표 높이 0, 5, 10 m (Trozzi et al, 2003; Trozzi 2005)를 고려하여 비산업시설, 개별입지 공장, 산업단지 각각 1.5 m, 5 m, 15 m로 반영하였다. 김포시와 인접하고 있는 서울시 양천구(4,980 kg/year)·강서구(1,536,415 kg/year), 부천시(173,990 kg/year), 고양시 일산동구·서구(70,982 kg/year), 시흥시(2,837,175 kg/year), 파주시(353,584 kg/year), 인천시 중구(4,675,238 kg/year)·서구(4,117,884 kg/year)·동구(1,360,679 kg/year)·부평구(543,050 kg/year)·계양구(162,219 kg/year), 강화군(8,828 kg/year), 북한 개성시(3,000,000 kg/year)의 배출량(NAPES 2013; NIER 2013)은 해당 지역 전역 면오염원(Area poly)으로 5 m 높이에서 배출되는 것으로 가정하였다. 웅진에 위치한 열병합 발전소(5,525,498 kg/year) 배출(NAPES 2013)은

Table 1. SO₂ emissions in Gimpo city for 2013 (NAPES 2013)

Local	Area (km ²)	Emission (kg/year)		
		Non-industrial	Individual factories	Industrial complex
Tongjin	29.50	1,209	16,058	-
Gochon	25.03	1,028	2,194	-
Yangchon	33.65	1,127	10,784	7,140
Daegot	42.78	563	25,811	252
Wolgot	51.95	280	6,424	568
Haseong	54.84	404	9,155	-
Gimpo1	11.65	2,146	1,265	-
Gimpo2	10.00	1,740	717	-
Sau	3.32	892	626	-
Pungmu	4.40	1,598	3,167	-
Janggi	4.43	1,370	68	-
Gurae	5.07	836	3	-

점오염원(point)으로 200 m 높이에서 배출되는 것으로 설정하였다(KOSEP; NAPES 2013).

4. 모형 예측력 평가

AERMOD와 같은 대기질 모형의 예측력 평가는 평가 영역 내 개별 수용기에서의 예측 농도와 관측 농도의 비교를 통해 이루어지며 대표적인 통계적 지표로서 모형의 체계적 편향(즉, 과대예측 또는 과소예측 경향)을 측정하는 FB (Fractional bias) (식 1), 편향 및 산포 정도를 측정하는 NMSE (Normalized mean square error) (식 2), 그리고 모형값과 관측값의 차이가 2배 이내인 데이터의 비율을 나타내는 FAC2 (Fraction of data that satisfy less than 2 times) (식 3) 등이 사용된다(Chang & Hanna 2004; Barton et al. 2012). 모형의 예측값들이 관측값들과 완벽히 일치하는 경우 FB, NMSE, FAC2는 각각 0, 0, 1 이다. 음의 FB 값은 모형의 과평가를 양의 FB 값은 모형의 저평가를 의미한다. 오염도의 단위는 µg/m³으로 통일하였다(즉, 1 ppb = 2.62 µg/m³).

$$FB = \frac{(\bar{C}_o - \bar{C}_p)}{0.5(\bar{C}_o + \bar{C}_p)} \quad (1)$$

$$NMSE = \frac{\overline{(C_o - C_p)^2}}{\bar{C}_o \bar{C}_p} \quad (2)$$

$$0.5 \leq \frac{C_p}{C_o} \leq 2.0 \quad (3)$$

여기서

C_p , C_o , 그리고 (\bar{C}) 는 각각 모형 예측농도, 관측농도, 그리고 평균농도를 의미한다.

5. 개별입지 공장의 군집화 시나리오 및 평가

김포시 내 전역에 분산되어 있는 개별입지 공장들을 새로운 지역으로 이전하여 군집시킴에 따라 대기 SO₂ 오염도가 어떻게 달라지는지 시나리오를 통해 평가하였다(Table 2). S1 시나리오는 김포시 내의 배출원만 있다고 가정하고 현재 산업시설의 변경 없이 평가하는 시나리오이다. S2 시나리오는 상대적으로 인구밀도가 낮고 여유 부지가 있는 지역(대곶면, 통진읍, 하성면, 양촌읍) 중 한 지역에 개별입지 공장들의 배출량을 모두 할당하는 시나리오이다. S3 시나리오는 두 개의 지역에 개별입지 공장들의 배출량을 나누어 할당하는 시나리오로 사전 평가를 통해 대곶-통진, 통진-하성, 대곶-양촌 세 개의 조합을 선정하였다. S4 시나리오는 기존 산업단지 공간 내 개별입지 공장들을 수용할 수 있다는 가정하에 개별입지 공장들의 배출량을 기존 산업단지 공간에 할당한 시나리오(S4-1)와 배출 시설의 개선 효과를 함께 평가하기 위해 배출 시설의 높이를 15 m (S4-2), 50 m (S4-3)로 조정된 추가 시나리오로 구성하였다. S2~S4 시나리오 각각 오염도를 평가하고 시나리오별 S1 시나리오 대비 오염도의 변화를 확인하였다. 김포시 전체 및 행정구역별 평균 오염도는 해당 구역 내 수용기에서의 오염도로부터 구한다(식 4). 아울러 시나리오별 대기 SO₂ 오염도와 도시 노출인구에 따

Table 2. The scenarios for clustering of individual location factories scattered throughout Gimpo city

Scenarios	Conditions
S1	The basic scenario that reflects the emission of Gimpo city only.
S2	From S1, the entire individual facility of Gimpo city was coordinated into one district with low population density and large area. - Daegot (S2-1), Tongjin (S2-2), Haseong (S2-3), Yangchon (S2-4)
S3	From S1, the entire individual facility of Gimpo city was coordinated into two districts with low population density and large area. - Daegot and Tongjin (S3-1), Tongjin and Haseong (S3-2), Daegot and Yangchon (S3-3)
S4	From S1, the entire individual facility of Gimpo city was coordinated into the industrial complexes and adjusted the height of the release emission. - 5 m (S4-1), 15 m (S4-2), 50 m (S4-3)

른 건강 영향의 차이를 파악하기 위해 유럽과 세계보건기구에서 지표로 활용되고 있는 인구가중평균오염도를 계산하였다(De Leeuw & Fiala 2009; WHO 2016). 김포시 전체 인구가중평균오염도(EC)는 행정구역 평균 오염도에 행정구역별 인수로 가중하여 산정하였다(식 5).

$$\bar{C} = (\sum C_j) / N_T \tag{4}$$

여기서

C_j 와 N_T 는 각각 수용기 j 지점에서의 농도와 김포시 내 전체 수용기 개수를 의미한다.

$$EC = \sum (p_i \bar{C}_i) \tag{5}$$

여기서

p_i 는 김포시 전체 인구수 대비 i 행정구역의 인구수 비율을 \bar{C}_i 는 김포시 i 행정구역의 평균 농도를 의미한다.

III. 결과 및 고찰

1. AERMOD 모형 예측력 검증

대기질 측정소가 있는 통진읍, 사우동, 고촌읍 3

지역 각각의 관측값과 모형 예측값 그리고 모형 예측력의 통계적 지표를 Table 3에 나타내었다. 관측값과 모형 예측값의 비교는 공간적·시간적으로 동시에 일치하도록 매칭하는 가장 엄격한 조건으로 평가하였다. 지역별 연평균에 대한 FB, NMSE, FAC2는 산정하지 않았는데 이는 지역별 관측소가 1개로 연평균 관측값과 예측값 매칭 데이터 수가 충분하지 않기 때문이다. 고촌, 사우, 통진 3 지역의 관측값 및 모형 예측값 모두 환경기준치(연간기준 52.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.02 ppm), 24시간 기준 131 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.05 ppm), 1시간 기준 393 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.15 ppm))(MOE 2015)를 초과하지 않고 있다. 3 지역 전체 연평균, 월평균, 일평균, 1시간 평균의 FB는 각각 0.70, 0.68, 0.69, 0.70으로 이는 모형이 약 2배 저평가하고 있음을 나타낸다. 3 지역 전체 연평균, 월평균, 일평균, 1시간 평균 NMSE는 각각 0.56, 0.70, 1.78, 9.83으로 평가 시간의 단위가 작을수록 더 커짐을 알 수 있다. NMSE가 1보다 훨씬 커짐에 따라 분포가 로그 정규분포에 가까워지는데 이는 평가 시간 단위가 작을수록 데이터에서 상대적으로 낮은 값들이 많고 큰 값들은 적음을 의미한다(Chang & Hanna 2004). FAC2는 고촌

Table 3. The model performance for annual, monthly, daily and hourly average value at each monitoring site within domain

Site	Time	Predicted value ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Observed value ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	FB	NMSE	FAC2
Gochon	Annual	8.2	13.4	-	-	-
	Monthly	12.9*	19.9*	0.46	0.32	0.83
	Daily	50.2*	34.6*	0.46	1.35	0.29
	1 h	176*	52.4*	0.48	8.64	0.14
Sau	Annual	6.6	14.1	-	-	-
	Monthly	11.6*	22.1*	0.72	0.82	0.25
	Daily	43.5*	36.5*	0.71	1.80	0.25
	1 h	141.3*	49.8*	0.72	10.03	0.10
Tongjin	Annual	3.7	10.8	-	-	-
	Monthly	5.4*	17.1*	0.97	1.39	0.17
	Daily	33.9*	27.1*	0.96	2.60	0.19
	1 h	80.3*	39.3*	0.97	10.93	0.08
All	Annual	5.9	12.7	0.70	0.56	0.33
	Monthly	12.7*	21.7*	0.69	0.70	0.42
	Daily	45.7*	34.2*	0.68	1.78	0.22
	1 h	129.3*	47.2*	0.70	9.83	0.09

*The value of 99th percentile

을 월평균에 대한 값(0.83)을 제외하고는 0.2 정도로 대체로 낮게 평가되었다. 이는 본 연구에서 관측값과 모형값의 비교 매칭을 시간과 공간적으로 동시에 일치하도록 엄격하게 적용했기 때문이다. FB, NMSE, FAC2의 결과를 전체적으로 평가해 볼 때 모든 지역에서 모형이 저평가 하고 있지만 평가 시간 단위 측면에서 1시간과 일평균에 비해 월평균과 연평균에 대한 모형 예측이 더 나은 것으로 보인다. 모형값과 관측값의 평균 적인 차이는 약 2배로 이는 모형의 예측력이 양호한 것으로 볼 수 있다(Chang & Hanna 2004).

일평균, 월평균 관측값과 예측값을 Quantile-Quantile 그래프(Venkatram 1999)를 이용하여 나타내었다(Figure 2). 오염도 순위에 따른 모형값과 관측값 쌍의 차이는 전체적으로 3배 범위 이내에 있다. 주목할 점은 일평균 값들의 추세가 약 24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 기준으로 낮은 오염도에서는 모형이 저평가, 높은 오염도에서는 모형이 과평가 하는 것이다(Figure 2(a)). 이러한 패턴은 Venkatram et al. (2001; 2004)과 EPA (2003) 연구에서도 나타난다. 월평균 값들의 경우는 전체적으로 모형이 저평가하고 있다(Figure 2(b)). 일평균 결과는 전체 예측값 중 약 94.3% 정도가 관측값에 비해 저평가하고 있다. 모형 예측과 관측값의 차이는 일반적으로 모형이 실제 환경을 완벽

하게 묘사할 수 없는 불확실성에 기인한다. 특히 AERMOD 입력 기상값은 특정 기상 관측소에서의 1시간 단위 측정값이기 때문에 평가 세부 지역별로 수 초·분 단위의 기상 조건 및 변화에 따라 모형이 과평가 할 수도 저평가 할 수도 있다. 다만 본 연구와 같이 전반적으로 모형이 저평가 하는 주된 이유는 관측 농도는 과거 오랜 기간 실제 배출원 및 배출량을 모두 반영하고 있는 데 반해 모형에서는 i) 평가 범위 내 배출량이 저평가 되었거나, ii) 평가 범위 밖 배출원에 의한 장거리 이동 영향 미고려, 그리고 iii) 평가 기간 이전의 잔여 농도 미고려 등 이러한 요소들의 복합적 영향 때문으로 추정할 수 있다. 또한 AERMOD는 풍하방향으로 배출원과 수용체 직선상의 배출원 근접 지점에서는 모형 예측값이 과평가, 이 선상을 벗어나는 각도가 클수록 모형 예측이 저평가 하는 것으로 보고된 바 있는데(Venkatram et al. 2004), 이러한 특성으로 인해 상위 오염도에서는 모형 예측의 과평가 결과들이 그 외 대부분은 저평가 결과들이 나타나는 것으로 추정된다. 전체적으로 결과들은 AERMOD의 모형 예측이 월평균 및 연평균과 같이 좀 더 장기간 평균에 있어서 관측값에 비해 저평가할 수 있음을 의미한다(Perry et al. 2005). 반면, 1시간 평균, 일평균 값들의 경우 상위 오염도에서 AERMOD 과평가 특성은 보수적인 관점에서

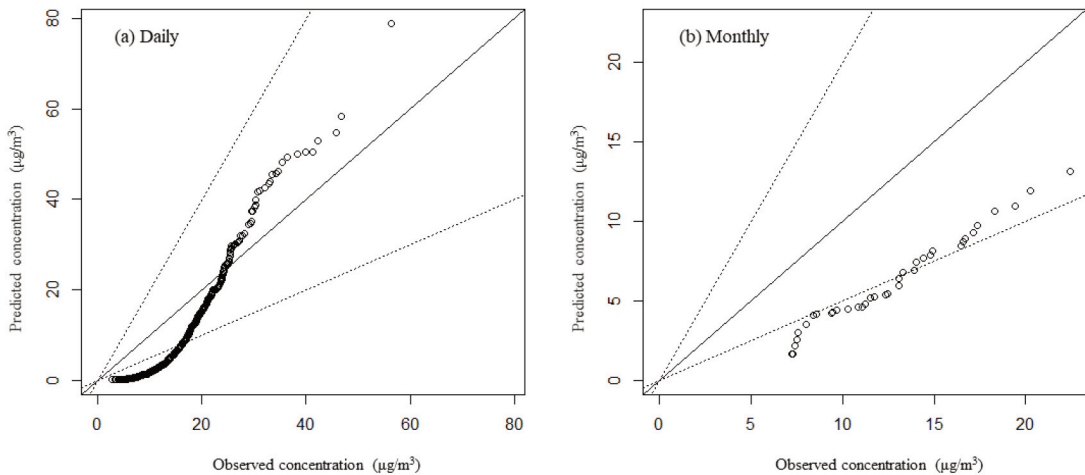


Figure 2. The quantile-quantile plot of the model-predicted concentrations versus the observed concentrations for 3 sites (Gochon, Sau, and Tongjin) for (a) daily, (b) monthly averages, paired by rank. Dotted lines indicate a factor of two over or under prediction.

평가할 수 있다는 장점으로 받아들여지고 있다 (Rzeszutek et al, 2017).

고촌읍, 사우동, 통진읍 및 나머지 지역을 모두 포함한 김포시 전체 예측값은 연평균은 $4.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 일평균 99th 퍼센타일은 $45.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 1시간 평균 99th 퍼센타일은 $100.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준으로 모두 환경기준치를 초과하지 않았다. 행정구역별로는 양촌읍을 포함한 아래 지역이 위쪽 지역보다는 오염도의 수준이 높았다. 평균값이 가장 높은 지역은 연평균값으로는 고촌읍, 일평균으로는 양촌읍, 1시간 평균으로는 고촌읍 지역이었으며 각각 8.2 , 56 , $176 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났다.

2. 시나리오에 따른 대기 SO₂ 연평균 오염도 변화

김포시와 인접하고 있는 지역들의 배출량을 고려하지 않았을 때 즉 김포시 내 자체 배출원에 의한 배출량만 모형에 반영하는 S1 시나리오에서는 김포시 전체 연평균 오염도는 $0.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 인접 지역들의 배출원을 함께 고려했을 때에 비해 약 5.3% 정도로 평가되었다. 이러한 결과는 김포시 전체 오염도는 상대적으로 김포시 내 배출원보다는 김포시 외부 배출원에 의한 영향을 더 크게 받고 있음을 시사한다. 이는 김포시 전체 SO₂ 배출량은 약 97,000 kg인데 비해 김포시 인접 지역들의 배출량 합은 약 24,370,000 kg으로 0.4%에 지나지 않기 때문이다. 따라서 효과적인 김포시 대기질 개선을 위해서는 김

포시 자체 배출원 관리에 의한 오염 감소뿐만 아니라 인접 지방 자치 단체와의 협조가 절대적으로 필요한 것으로 판단된다. 김포시 내 행정지역별로 외부 배출원의 영향 정도가 차이가 있는데 가장 크게 받는 곳은 고촌읍, 상대적으로 적게 받는 지역은 통진읍으로 나타났다.

시나리오별 S1 시나리오 대비 오염도의 변화를 Table 4에 나타내었다. 대곶면 선정(S2-1), 통진읍 선정(S2-2), 하성면 선정(S2-3), 양촌읍 선정(S2-4) 시나리오의 결과는 S1 시나리오의 결과와 비교해서 각각 -6.4%, 12.8%, 6.7%, 8.7% 변화하였다. 두 개의 지역에 개별입지 공장들의 배출량을 나누어 할당하는 시나리오(S3)의 경우 대곶면과 통진읍(S3-1), 통진읍과 하성면(S3-2), 대곶면과 양촌읍(S3-3) 시나리오의 오염도는 S1 시나리오와 비교해서 각각 1.5%, 8.9%, 0.1% 변화하였다. 개별입지 공장들 군집지역으로 대곶면을 선정한 결과를 제외하고는 연평균 오염도는 최소 0.1%에서 최대 12.8% 증가하였다. 또한 S2 시나리오와 S3 시나리오의 결과 공통적으로 대곶면이 군집지역으로 포함되는 것이 오염도를 감소시키거나 상대적으로 증가 폭을 낮추는데 도움이 되는 것으로 나타났다. 이는 대곶면의 지리적 위치(Figure 1)와 북서 방향인 주풍향(Figure 3)의 복합적 요인으로 인해 인접 행정구역에 영향을 상대적으로 적게 주고, 적게 받기 때문으로 판단된다. 기존 산업단지 내에 개별입지 공장들의 배출량을 할

Table 4. Change rate (%)* of annual average concentration of SO₂ compared with S1 scenario

	Total	Tongjin	Gochon	Yangchon	Daegot	Wolgot	Haseong	Gimpo1	Gimpo2	Sau	Pungmu	Zanggi	Gurae
S2-1	-6.44	-61.24	-50.46	-28.29	114.86	-53.52	-71.18	-33.95	-28.14	-39.81	-55.74	-23.06	-6.52
S2-2	12.80	220.73	-44.81	-33.92	-46.94	35.49	-17.03	-28.25	-19.26	-36.69	-54.73	-15.39	-22.94
S2-3	6.65	-40.91	-47.09	-46.79	-78.10	-18.30	377.61	-30.19	-23.57	-38.35	-55.95	-22.15	-40.68
S2-4	8.65	-54.49	-38.14	227.83	-34.27	-61.09	-43.87	-17.01	47.93	-31.41	-51.54	32.53	122.74
S3-1	1.53	54.00	-48.13	-30.53	49.05	-17.10	-49.03	-31.61	-24.48	-38.52	-55.32	-19.91	-13.15
S3-2	8.87	50.70	-46.28	-42.26	-67.18	0.58	239.86	-29.50	-22.04	-37.76	-55.52	-19.77	-34.46
S3-3	0.11	-58.31	-45.06	84.22	49.07	-56.89	-59.20	-26.51	5.27	-36.13	-53.90	1.35	50.23
S4-1	-6.33	-76.54	-45.72	185.82	-20.93	-50.02	-77.65	-27.23	-14.28	-36.94	-53.89	-7.39	26.01
S4-2	-32.29	-77.55	-45.97	63.30	-35.51	-58.97	-78.12	-27.94	-15.83	-37.47	-54.15	-8.69	17.52
S4-3	-68.71	-86.35	-55.68	-45.31	-79.14	-79.30	-84.87	-37.25	-34.66	-42.61	-57.83	-29.14	-27.90

*(Si scenario - S1 scenario)/(S1 scenario) × 100%

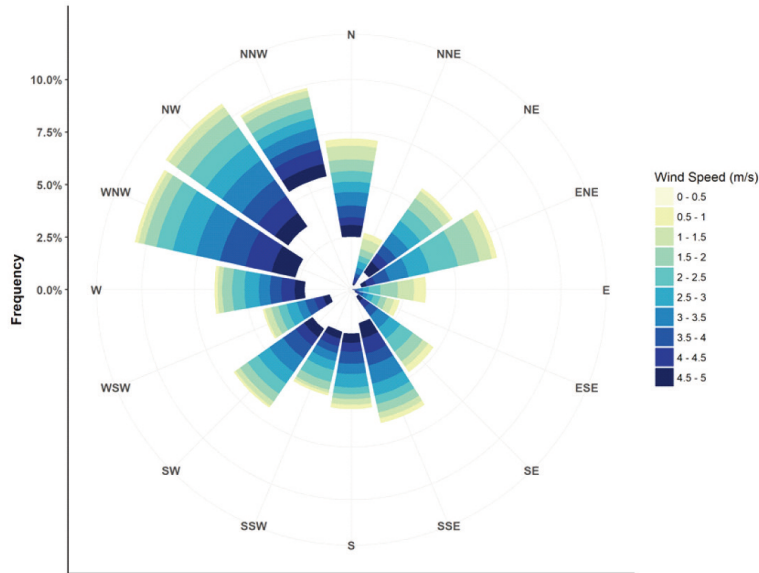


Figure 3. Wind rose of Gimpo area in 2013 (KMA, <http://www.kma.go.kr/>).

당한 시나리오(S4-1)의 경우 S1 시나리오에 비해 SO₂의 대기 오염도가 6.3% 감소하였다. 이는 산업단지들이 서쪽에 위치하고 있어 S2-1 시나리오와 비슷한 결과를 나타내는 것으로 보인다. 이러한 결과들을 종합해보면 김포시 전역에 분산되어 있는 개별입지 공장들을 재배치하여 군집하는 경우 지리적·기상 환경을 잘 고려하여 군집지역을 선정한다면 대기질 개선에 효과가 있을 것으로 기대할 수 있다. 반면 단순히 특정 지역으로 개별입지 공장들을 군집시키는 것만으로는 대기질 개선에 있어서 효과가 없거나 오히려 악화될 수도 있다. 추가로 개별입지 공장들을 산업단지로 편입하면서 환경배출 시설 개선에 의한 효과를 확인하기 위해 배출 높이를 각각 15 m (S4-2), 50 m (S4-3)로 조정하여 평가하였다. S4-2 시나리오, S4-3 시나리오의 SO₂ 대기 오염도는 S1 시나리오에 비해 각각 32.3%, 68.7% 감소하였다. 이는 배출원의 적절한 공간 재배치와 배출시설의 개선(굴뚝 높이의 증가)이 동시에 이루어질 경우 대기질 개

선에 크게 도움이 될 수 있음을 시사한다. 행정구역 개별적으로 평가해 볼 때는 S4-3 시나리오에서 통진읍의 대기 오염도는 86.4%로 가장 큰 감소를 보였지만, S2-1 시나리오에서 대곶면, S2-2 시나리오에서 통진읍, S2-3 시나리오에서 하성면, S2-4 시나리오에서 양촌읍의 SO₂의 대기 오염도는 각각 114.9%, 220.7%, 377.6%, 그리고 227.8% 증가됨으로써 해당 시나리오의 김포시 전체 오염도의 증·감폭과 비교했을 때 상대적으로 더 크게 증가하였다.

3. 인구 노출 평가

김포시 전체 오염도에 대해 수용체 노출 정도를 함께 평가하기 위해 행정구역별 인구를 고려한 인구가중평균오염도를 지표로 S1 시나리오 대비 각 시나리오별로 얼마나 변화했는지를 평가하였다(Table 5). 김포시 내 행정구역별로 시나리오별 인구가중평균오염도의 변화율은 다양하게 나타나며, S2-4 시나리오를 제외하고는 최소 약 3% 최대 약 53% 감소하는

Table 5. The change rate (%)* of population weighted annual concentration of SO₂ compared with S1 scenario for Gimpo area

	S2-1	S2-2	S2-3	S2-4	S3-1	S3-2	S3-3	S4-1	S4-2	S4-3
Gimpo	-30.67	-3.37	-35.02	10.41	-19.47	-23.92	-12.66	-13.86	-27.72	-53.32

* $(S_i \text{ scenario} - S1 \text{ scenario}) / (S1 \text{ scenario}) \times 100\%$

것으로 평가되었다. 앞서 오염도만을 평가한 것에 비해 전체적으로 인구가중평균오염도 변화율의 감소 정도가 더 컸다. 이는 인구가 밀집되어 있는 지역에 대한 개별입지 공장 배출원을 인구가 상대적으로 덜 밀집되어 있는 지역으로 재배치하는 것이 오염도 관리에 효과적임을 시사한다. 상대적으로 인구가 많은 행정구역의 오염도가 증가하는 경우에는 김포시 전체 평균 오염도는 감소하였더라도 인구가중평균오염도는 증가할 수 있는데 본 연구에서는 그러한 경우는 확인되지 않았다(Figure 4).

오염도 수준이 S1 시나리오 대비 낮은 수준이라 하더라도 동일 시나리오 상에서는 인구가중평균오염도가 평균오염도보다 큰 경우(S1, S2-2, S2-4, S3-3, S4-2, S4-3 시나리오 결과)는 인구가 더 많은 행정구역이 평균오염도보다 더 높은 오염도를 나타내기 때문에 상대적으로 더 높은 수준의 오염도에 많은 사람들이 노출된다고 볼 수 있다(De Leeuw & Fiala 2009; Rohde & Muller 2015). 이러한 점들은 정책 결정자의 입장에서 인지하고 정책 판단에 고려해야 한다. 본 연구에서는 S2-1, S4-1, S4-2, S4-3 시나리오의 결과만 S1 시나리오 대비 평균 오염도 및 인구가중평균오염도가 동시에 감소하였다. 이러한

결과는 주풍향을 고려해 볼 때 대곶면과 기존 산업단지의 지리적 위치가 인접 행정구역에 미치는 영향이 적은 곳에 위치하고 있고 해당 행정구역 모두 상대적으로 인구밀도가 낮기 때문으로 추정된다. 반면, S2-4 시나리오의 경우 풍하방향으로 인구밀도가 높은 행정구역들이 위치하고 있기 때문에 본 연구 범위에서 인구가중평균오염도가 가장 높게 나타났다.

VI. 결론

김포시 대기 오염도는 김포시 자체 배출보다는 주변 배출에 의한 영향이 더 큰 것으로 평가되었다. 따라서 김포시의 대기 오염도 개선을 위해서는 주변 지방자치단체와의 협의 활동이 매우 중요한 것으로 볼 수 있다. 아울러 본 연구에서는 김포시 자구적 활동으로써 김포시 전역에 난립하고 있는 개별입지 공장들의 공간 재배치를 통해 김포시 자체 배출원에 의한 오염도를 개선할 수 있는 가능성을 확인하였다. 또한 배출 굴뚝의 높이 조정과 같은 배출규제가 병행되는 경우 김포시 자체 배출원에 의한 오염도를 김포시 전체적으로 볼 때 크기는 약 70% 감소 가능하며 행정구역별로는 최대 약 87% 감소 가능성을 정량적으로

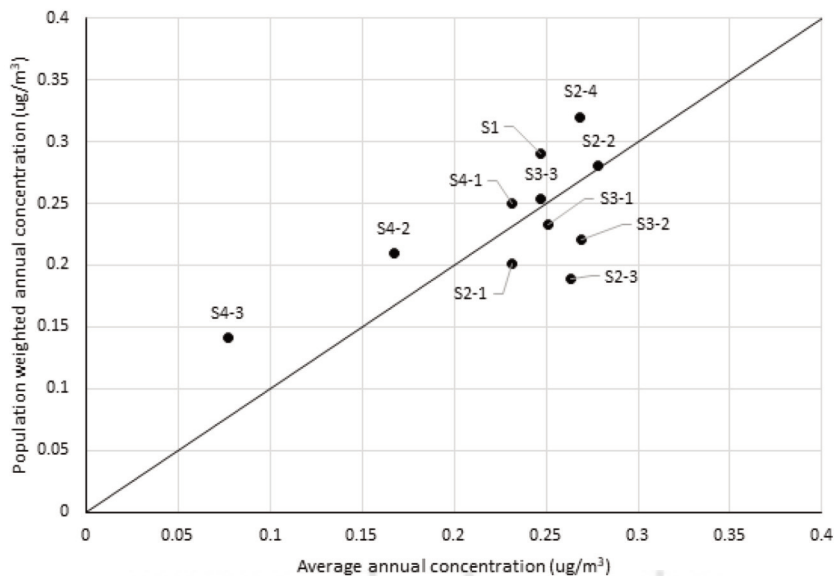


Figure 4. The population weighted annual concentrations versus the average annual concentrations for Gimpo by scenarios.

확인하였다. 단, 각 시나리오에 따라 개별입지 공장들의 배출량 모두를 할당 받은 해당 행정구역은 김포시 전체 오염도의 증·감 폭과 비교했을 때 상대적으로 큰 오염도 증가가 나타날 수 있음을 주의해야 한다. 본 연구의 한계점은 크게 2가지로 첫째 본 연구에서는 배출원의 공간 재배치에 따른 현실적인 문제점들은 고려하지 않았다. 둘째 김포시 내 행정구역에 대한 오염도 변화만을 살펴보았다. 따라서 차후 보다 심화된 연구를 하게 된다면 배출원의 공간 재배치에 대한 현실적인 고려 사항들과 함께 김포시의 배출원 공간 재배치에 따른 오염도 개선활동이 김포시 주변 지방자치 단체에 미치는 영향이 긍정적인지 부정적인지도 복합적으로 살펴보아야 할 것이다.

사 사

본 연구는 서울대학교와 환경부/한국환경산업기술원의 지원으로 수행되었습니다(과제번호 940-20160002, 2017001970002).

References

- AIHA. 1989. Odor threshold for chemicals with established occupational health standards, Akron, OH: American Industrial Hygiene Association.
- Ban YU, Baek JI. 2010. Strategies to build the quasi-industrial park of agglomeration zone composed of independently located companies for sustainable development, *The Geographical Journal of Korea*. 44(1): 63-75. [Korean Literature]
- Ban YU, Son CH, Baek JI, Han KM. 2015. Analyzing the distributional characteristics of independently-located factories in non-urbanized area, *Residential Environment Institute of Korea*. 13(1): 55-64. [Korean Literature]
- Barton CA, Zarzecki CJ, Russell MH. 2012. A site-specific screening comparison of modeled and monitored air dispersion and deposition for perfluorooctanoate. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 60: 402-411.
- Bin Zou, Wilson JG, Zhan FB, Zeng Y. 2009. Spatially differentiated and source-specific population exposure to ambient urban air pollution. *Atmospheric Environment*. 43: 3981-3988. doi:10.1016/j.atmosenv.2009.05.022
- Bin Zou, Zhan FB, Wilson JG, Zeng Y. 2010. Performance of AERMOD at different time scales. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 18: 612-623. doi:10.1016/j.simpat.2010.01.005
- Carbonell LMT, Gacita MS, de Jesus Rivero Oliva J, Garea LC, Rivero ND, Ruiz EM. 2010. Methodological guide for implementation of the AERMOD system with incomplete local data. *Atmospheric Pollution Research*. 1: 102-111. doi:10.5094/APR.2010.013
- Chang JC, Hanna SR. 2004. Air quality model performance evaluation. *Meteorol Atmos Phys*. 87: 1-30. doi:10.1007/s00703-003-0070-7
- Cimorelli AJ, Perry SG, Lee RF, Paine RJ, Venkatram A, Weil JC, Wilson RB. 1996. Current progress in the AERMIC model development program. Preprints. In: 89th Annual Meeting Air and Waste Management Association. Air and Waste Management Association, Pittsburgh, PA, pp. 1-27.
- Cimorelli AJ, Venkatram A, Weil JC, Paine RJ, Wilson RB, Lee RF, Peters WD. 2003. AERMOD description of model formulation, U.S. EPA Rep. 454/R-03-002d, 85 pp.
- Cimorelli AJ, Perry SG, Venkatram A, Weil JC, Paine RJ, Wilson RB, Lee RF, Peters WD,

- Brode RW. 2005. AERMOD: a dispersion model for industrial source applications, Part I: general model formulation and boundary layer characterization. *Journal of Applied Meteorology*. 44: 682-693.
- De Leeuw F, Fiala J. 2009. Indicators on urban air quality, a review of current methodologies. ETC/ACC Technical Paper 2009/8.
- EPA. 2003. AERMOD: Latest Features and Evaluation Results. Environmental Protection Agency, United States.
- EPA. 2004a. AERMOD: Description of model formulation. Environmental Protection Agency, United States.
- EPA. 2004b. User's guide for the AERMOD meteorological preprocessor (AERMET). Environmental Protection Agency, United States.
- EPA. 2004c. User's guide for the AERMOD terrain preprocessor (AERMAP). Environmental Protection Agency, United States.
- EPA. 2015. Addendum - User's Guide for the AMS/EPA Regulatory Model - AERMOD. Environmental Protection Agency, United States.
- EPA. 2016. AERMOD model formulation and evaluation. Environmental Protection Agency, United States.
- Factoryon [Internet]. Available from: <https://www.femis.go.kr/>
- Gibson MD, Kundu S, Satish M. 2013. Dispersion model evaluation of PM_{2.5}, NO_x and SO₂ from point and major line sources in Nova Scotia, Canada using AERMOD Gaussian plume air dispersion model. *Atmospheric Pollution Research*. 4: 157-167. doi:10.5094/APR.2013.016
- Gimpo. 2014. The 54th basic statistics of Gimpo, 2014. [Korean Literature]
- Gimpo. 2015. Changing the basic plan of Gimpo city in 2020. [Korean Literature]
- Hwang SG, Lee S, Park JI. 2018. Spatial-temporal pattern analysis of unplanned factory locations in the Seoul metropolitan area using FEMIS data, *Korean Regional Science Association*. 34(2): 21-34. [Korean Literature]
- Jang S, Han M, Jeong D, Cho BH. 2017. Public perception and environmental behavior towards independently-located factories pollution and adverse health effects in Gimpo, J. *Korean. Alcohol. Sci*. 18: 81-96. [Korean Literature]
- KEI. 2005. The application of air quality models on environment impact assessment. Korea Environment Institute. [Korean Literature]
- KMA. 2016. Detailed analysis report on climate change in Gimpo city, Gyeonggi-do. Korea Meteorological Administration. [Korean Literature]
- KMA. Korea Meteorological Administration [Internet]. Available from: <http://www.kma.go.kr/>
- KOSEP. Korea South-East Power Co., Ltd [Internet]. Available from: <https://www.koenergy.kr/>
- KRIHS. 2007. Study on designation criteria and methods for semi-industrial complex, Korea Research Institute for Human Settlements, Report. 1-214
- MKE. 2011. Industrial park development strategy and management practices, Ministry of Knowledge Economy, Korea. [Korean Literature]
- MOE. 2015. Environment white paper, Ministry of Environment, Korea. [Korean Literature]
- NAPES. 2013. National Air Pollutants Emission Service, Korea [Internet]. Available from:

- <http://airemiss.nier.go.kr/>
- NAPES. 2015. National Air Pollutants Emission Service, Korea [Internet]. Available from: <http://airemiss.nier.go.kr/>
- NGII. National Geographic Information Institute, Korea [Internet]. Available from: <https://www.ngii.go.kr/>
- NIER. 2013. Development of the Asia emission inventory in support of integrated modeling of climate and air quality(III). National Institute of Environmental Research, Korea.
- NRC. 1975. Air Quality and stationary source emission control. Washington, DC: The National Academies Press. National Research Council. <https://doi.org/10.17226/10840>
- Park J-H. 2007. Prediction of air quality in Incheon using AERMOD modeling, J. of Korean Society of Environmental Technology. 8(3): 222-232.
- Pathak RK, Wu WS, Wang T. 2009. Summertime PM 2.5 ionic species in four major cities of China: nitrate formation in an ammonia-deficient atmosphere. Atmospheric Chemistry and Physics. 9(5): 1711-1722.
- Perry SG, Cimorelli AJ, Paine RJ, Brode RW, Weil JC, Venkatram A, Wilson RB, Lee RF, Peters WD. 2005. AERMOD: A dispersion model for industrial source applications. part II: model performance against 17 field study databases. Journal of Applied Meteorology. 44: 694-708. doi: 10.1175/JAM2228.1
- Rohde RA, Muller RA. 2015. Air pollution in China: mapping of concentrations and sources. PLoS ONE 10, e0135749-14. doi:10.1371/journal.pone.0135749
- Rzesutek M, Szulecka A, Oleniacz R, Bogacki M. 2017. Assessment of the AERMOD dispersion model over complex terrain with different types of meteorological data: tracy power plant experiment. E3S Web Conf. 22. 00149-9. doi:10.1051/e3sconf/20172200149
- Sax T, Isakov V. 2003. A case study for assessing uncertainty in local-scale regulatory air quality modeling applications, Atmospheric Environment. 37: 3481-3489.
- Trozzi C. 2005. Local, regional and national aspects of emissions inventories. WIT Transactions on Ecology and the Environment. 82: 617-629. doi:10.2495/AIR050621
- Trozzi C, Piscitello E, Lena F. 2003. Modeling area, line and point sources for ISC model: methodology, computer interface and case studies, Proc. of U.S. Environmental Protection Agency Conference “Emissions inventories - Applying New Technologies”, San Diego, California, USA.
- Venkatram A. 1999. Applying a framework for evaluating the performance of air quality models. In: proceedings of the sixth international conference on harmonisation within atmospheric dispersion modeling for regulatory applications, Rouen, France, 11-14 October, 1999.
- Venkatram A, Brode R, Cimorelli A, Lee R, Paine R, Perry S, Peters W, Weil J, Wilson R. 2001. A complex terrain dispersion model for regulatory applications. Atmospheric Environment. 35: 4211-4221. doi:10.1016/S1352-2310(01)00186-8
- Venkatram A, Isakov V, Yuan J, Pankratz D. 2004. Modeling dispersion at distances of meters from urban sources. Atmospheric Environment. 38: 4633-4641.
- WHO. 2016. Ambient air pollution: a global assessment of exposure and burden of

disease. World Health Organization
Yang W, Lee H. 2016. Analysis of the inflow of independently-located manufacturing factories in non-urbanized area of the capital region, Journal of the Economic Geographical society of Korea. 2: 209-224.

[Korean Literature]

Zhang QQ, Wang Y, Ma Q, Yao Y, Xie Y, He K. 2015. Regional differences in Chinese SO₂ emission control efficiency and policy implications. Atmos. Chem. Phys. 15: 6521-6533. doi:10.5194/acp-15-6521-2015