

울산지역 대기 중 아황산가스의 시공간적 오염특성(2005-2009)

이윤세^{1,2} · 최성득^{1,2†} · 권혜옥¹ · 김철수² · 손희식² · 예진²

¹울산과학기술대학교 도시환경공학부, ²울산과학기술대학교 환경분석센터

Temporal and Spatial Distribution of Sulfur Dioxide in Ulsan, Korea

Yun-Se Lee^{1,2}, Sung-Deuk Choi^{1,2†}, Hye-Ok Kwon¹, Chul-Su Kim², Hee-Sik Son², and Jin Ye²

¹School of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), Ulsan 689-798, Korea

²UNIST Environmental Analysis Center (UEAC), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), Ulsan 689-798, Korea

Received August 10, 2011/Accepted December 30, 2011

We investigated the temporal and spatial distribution of SO₂ measured at 14 air pollution monitoring sites in Ulsan, Korea. The levels of SO₂ in Ulsan have continuously decreased since the 1990s, and a recent (2005-2009) annual average concentration of 8 ppb is lower than the national guideline of 20 ppb. However, Ulsan has higher levels of SO₂ than any other mega-city in Korea. The average level of SO₂ at industrial sites (13.7 ppb) is 2.4 times higher than those at residential and commercial sites. According to the measurement data, meteorological condition, and former air dispersion modeling results, it was confirmed that SO₂ emitted from the industrial complex was transported to the residential area by sea-land breeze and southeastern seasonal winds. For the improved air quality in Ulsan, the current environmental policy permitting the use of high-sulfur oil (<4%) should be carefully evaluated. The emission of greenhouse gases and hazardous air pollutants (HAPs) as well as SO₂ from plants using the high-sulfur oil should be monitored. Furthermore, separated environmental policies for the industrial and residential areas are required for more effective pollution management.

Key words: Sulfur dioxide, SO₂, Ulsan, Air pollution

1. 서 론

아황산가스(SO₂)는 무색의 자극성이 있는 수용성 기체로서 대표적인 대기오염물질이다. SO₂는 화산활동과 산불 등 자연활동에 의해서도 배출되지만, 대부분 인위적 배출원(연소, 금속 용융 및 제련, 황산제조, 석유정제 등)에서 발생한다. 국내에서는 주로 산업, 난방, 수송, 발전시설의 연료 연소과정에서 배출되는 것으로 알려졌다.¹⁾ SO₂는 인체 점막을 자극하고 호흡기 질환을 유발하며, 대기 중 수증기와 반응하여 산성비의 원인이 된다. 역사적으로 유명한 대기오염 사건인 뮤즈계곡 사건(1930), 도노라 사건(1948), 런던 스모그(1952) 등은 SO₂가 주요 원인이었다.

울산광역시에는 SO₂로 인한 환경오염과 주민건강 피해 사례가 보고된 대표적 도시로서, 1962년 특정공업지구로 지정되어 대규모 국가산업단지(울산·미포, 온산)가 조성되었다. 2009년 12월 31일 현재 울산시 대기배출업소는 906개이며, 국가산업단지 내에 429개가 있다.²⁾ 특히, 국가산업단지 내 점오염원인 1-3종 사업장이 주요 배출원인 것으로 보고되었다.³⁻⁴⁾ 국가산업단지 인근에는 주거지역이 위치하므로 공단에서 배출된 오염물질이 주거지역으로 확산될 가능성이 크며,⁵⁾ 실제로 온산국가산업단지 인근 주거지역에서 온산병으로 일컬어지는 환경문제가 발생하여 1985년부터 7,467세대가 집단적으로 이주하였다.⁶⁾ 환경청에서는 1986년 환경청고시(제86-3호)로 울산·미포 및 온산국가산업단지를 대

[†]To whom correspondence should be addressed.

Tel: 82-52-217-2811, Fax: 82-52-2809, E-mail: sdchoi@unist.ac.kr

기특별대책지역으로 지정하였다. 이후 대기오염을 개선하기 위해 다양한 정책(저황유와 청정연료 사용, 사업장의 엄격한 배출허용기준 적용, 자율환경관리협약을 통한 오염물질 감축, 지속적인 방지시설의 개선·투자 유도 등)을 추진한 결과,⁷⁾ 1990년대 초반부터 SO₂ 농도가 꾸준히 감소하였다.

그동안 국내에서 수행된 SO₂ 모니터링과 모델링 연구 대부분은 1990-2000년대 중반까지의 연구로서 수도권이나 부산 등 일부 지역에 집중되었으며,⁸⁾ 울산에서도 SO₂에 대한 연구가 꾸준히 진행되었다. 1990년대 중후반에는 대기확산모델 ISC3를 이용하여 공단지역 굴뚝에서 배출된 SO₂가 울산시로 확산되는 경향을 파악하였으며,⁹⁻¹⁰⁾ 2002년에는 대기질 수치모델을 이용하여 해륙풍에 의한 대기오염물질 분포경향을 예측하였다.⁴⁾ 최근에는 울산지역 일 최고 농도를 예측할 수 있는 신경망모델을 개발하여 수치모델을 보완할 수 있는 연구도 수행되었다.¹¹⁾ 이와 같은 모델연구 이외에도 실측자료에 근거한 연구들도 수행되었다. 2003년 실측자료로 오염장미(Pollution rose)를 작성하고 다중회귀분석을 통해 배출원을 추정하고 계절별 농도변화를 해석하였다.⁵⁾ 또한 2001-2004년도 환경기준 초과사례의 원인을 파악하고, 연료사용량과 굴뚝 TMS 자료를 이용하여 황산화물 저감방안을 제시한 연구도 수행되었다.⁸⁾ 이 외에도 울산시와 환경부 차원의 연구도 수행되었다. 울산시는 울산지역환경기술개발센터를 통해 대기질 개선목표를 제시하고 지역배출허용기준을 설정하는 연구를 수행하였으며,¹²⁾ 기상조건에 따른 대기오염 실태조사도 수행하였다.¹³⁾ 환경부는 울산지역 대기질 현황자료와 대기확산모델을 이용하여 배출허용기준 강화에 따른 농도저감효과를 평가하였다.¹⁴⁾ 그러나 울산지역 기상조건에 따른 SO₂의 시공간적 장기변화에 대한 연구는 여전히 부족한 실정이며, 2005년 이후 최근 오염현황을 보고한 예를 찾기 어렵다.

울산시의 노력에도 불구하고 최근 수년 동안 SO₂ 연평균 농도는 감소하지 않고, 여전히 국내 대도시 중에서 최고 수준으로 유지되고 있다. 더구나 지속적인 도시개발과 산업단지 확장을 계획하고 있으므로 대기오염 배출원은 더욱 증가할 것으로 예상된다. 이러한 이유로 울산시에서는 2011년 1월에 대기질 개선 중장기 종합대책을 마련하여 다양한 실무추진계획들을 수립하였다.¹⁵⁾ 그런데 이 대책에는 지역배출허용기준 강화와 고황유 허용방안이 포함되어 있어 최근 많은 논란이 되고 있다. 고황유를 허용하면 다양한 대기오염물질의 배

출량이 증가한다는 우려가 있는 반면, 상당수 전문가들은 연료종류에 따른 배출량 시나리오와 실측자료에 근거하여 대기질이 개선될 수 있다는 입장을 취하고 있다.¹⁶⁾ 따라서 본 연구에서는 2000년대 중반 이후의 SO₂ 자료를 수집하여 농도수준, 공간적 분포, 월별·시간별 농도경향 등을 파악함으로써, 울산시의 최근 오염현황에 대해 종합적으로 이해하고 고황유 허용에 따른 후속연구 필요성에 대해 논의하고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 기상자료

본 연구에서는 기상월보에 수록된 일평균 풍향(16방위)과 풍속자료를 사용하였다.¹⁷⁾ 관측지점은 지상기상관측 152지점(울산기상대)인 울산광역시 중구 북정동(35°33N, 129°19E)이며, 노장의 해발높이는 34.6 m, 풍속계의 지상높이는 12.0 m이다. 기상월보에 수록된 일평균 풍향자료를 이용하여 2005-2009년도 계절별(봄: 3-5월, 여름: 6-8월, 가을: 9-11월, 겨울: 12-2월) 바람장미와 연간 바람장미를 작성하였다.

울산지역의 다소 복잡한 산악/해안지형으로 인해 내륙과 해안지점에서 기상조건이 다를 가능성이 있다. 따라서 울산기상대 자료가 울산 전역의 기상을 대표할 수 있는지 확인하기 위해, 다섯 지점의 무인자동관측망 자료(2000-2009)를 추가로 입수하여 계절별 주풍향을 파악하였다. 내륙지점에서는 계절풍 영향이 강하고, 해안지점에서는 해안지형과 해륙풍 영향도 많이 받는 것으로 나타났다. 그러나 울산 전역에서 계절풍 영향이 우세하고 주거지점과 공단지점의 주풍향이 상당히 유사하므로, 오염물질의 주거지역으로의 이동측면에서는 울산기상대 자료를 울산지역 대표 기상자료로 사용해도 큰 무리가 없을 것으로 판단하였다.

2.2. 대기오염자료

울산광역시 보건환경연구원은 14개소(농소동(A), 효문동(B), 성남동(C), 무거동(D), 삼산동(E), 신정동(F), 신정동(도로변)(G), 야음동(H), 여천동(I), 대송동(J), 부곡동(K), 상남리(L), 덕신리(M), 화산리(N))로 구성된 대기오염자동측정망을 운영하고 있으며, 기준성 대기오염물질(SO₂, CO, O₃, NO₂, PM₁₀)의 시간평균 농도를 제공하고 있다.¹⁸⁾ 대기측정소의 구체적인 위치정보는 Table 1에 나타내었으며, 농도자료와 함께 지도상에 표시하였다(Fig. 4). 본 연구에서는 5년 동안(2005년 1월

Table 1. Information for the air pollution monitoring sites in Ulsan, Korea¹⁹⁾

Site	Name	Land use	Longitude	Latitude	Address
A	Nongso	Commercial	129°21'17.46"E	35°37'30.96"N	Hogyedong 726, Bukgu
B	Hyomun	Industrial	129°22'16.02"E	35°33'34.08"N	Hyomundong 616-8, Bukgu
C	Seongnam	Commercial	129°19'11.82"E	35°33'14.64"N	Seongnamdong 219-10, Junggu
D	Mugeo	Commercial	129°15'38.82"E	35°33'03.06"N	Mugeodong 1555-2, Namgu
E	Samsan	Residential	129°19'54.48"E	35°32'39.72"N	Samsandong 1513-13, Namgu
F	Sinjeong I	Residential	129°18'29.00"E	35°32'05.00"N	Sinjeongdong 1210-9, Namgu
G	Sinjeong II	Roadside	129°18'26.79"E	35°31'55.93"N	Sinjeongdong 1670-2, Namgu
H	Yaeum	Residential	129°19'33.00"E	35°31'34.00"N	Yaeumdong 789-12, Namgu
I	Yeochoen	Industrial	129°21'33.30"E	35°30'58.92"N	Yeochoendong 250, Namgu
J	Daesong	Residential	129°24'52.38"E	35°30'10.20"N	Daesongdong 148-2, Donggu
K	Bugok	Industrial	129°20'20.28"E	35°29'50.16"N	Bugokdong 125-2, Namgu
L	Sangnam	Residential	129°18'19.08"E	35°29'32.82"N	Sangnamri 595-7, Cheongnyangmyeon, Uljugun
M	Deoksin	Residential	129°18'52.26"E	35°26'05.22"N	Deoksinri 36-4, Onsan-eup, Uljugun
N	Hwasan	Industrial	129°20'15.48"E	35°26'17.16"N	Hwasanri 22, Onsan-eup, Uljugun

-2009년 12월)의 측정소별 SO₂ 농도자료를 입수하여 월별·시간별 평균농도를 계산하였다. 신정동(도로변)(G) 측정소의 2005년 12월 10일 이전 자료와 상남리(L) 측정소의 2005년 11월 25일 이전 자료는 누락되어 본 연구에서 제외하였으며, 효문동(B) 측정소는 2005년 11월 25일부터 설치되어 가동되었으므로 그 이후 자료를 사용하였다. 또한 통신선로 교체로 인한 자료전송 중단, 노후장비 교체, 정도관리, 장비수리 등으로 인해 수 시간에서 3일 정도 누락된 자료를 제외하였으며, 측정소당 1년에 8,000개 이상의 측정값을 사

용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 기상자료

2005-2009년도 연간 바람장미에 의하면, 가을·겨울철에는 북동풍과 북서풍, 봄·여름철에는 남동풍이 우세한 것으로 나타났다(Fig. 1). 이러한 계절풍 변화는 매년 유사하며 국가산업단지는 동해안에 위치하고 있으므로, 공단에서 배출된 대기오염물질이 주로 봄과 여

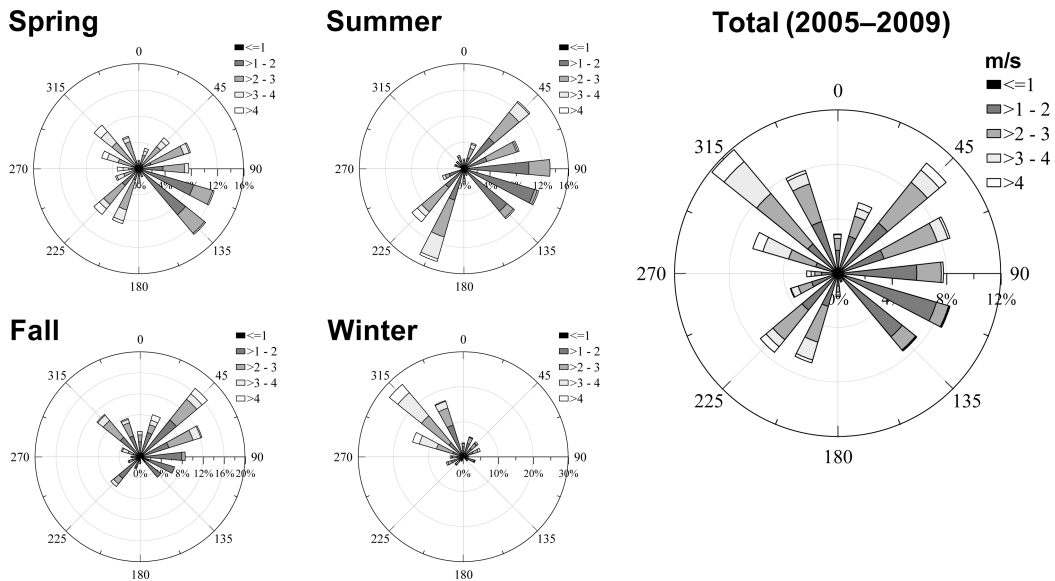


Fig. 1. Seasonal and annual wind patterns in Ulsan (2005-2009).

름철에 내륙 서편에 위치한 주거지역으로 유입될 것으로 예상된다. 또한 국지순환성 해륙풍에 의해 공단지역에서 배출된 오염물질이 일시적으로 주거지역으로 확산될 것으로 판단되며, 실제로 울산지역에서 해풍이 우세한 낮에 SO₂ 농도가 환경기준을 초과하는 경우가 많은 것이 보고되었다.⁸⁾

3.2. SO₂ 농도 수준

울산의 SO₂ 연평균 농도는 1990년대 중반 이후에 급격히 감소하여 1997년 이후로 연간기준을 만족하고 있다(환경기준: 연간 20 ppb, 24시간 50 ppb, 1시간 150 ppb 이하).²⁾ 2000년대 초반부터는 0.3% 이하 저황유 사용(2001년 8월 1일 시행)과 청정연료 사용 및 환경개선 투자유도를 통해 SO₂ 농도가 지속적으로 감소하였다.²⁾ 최근 5년(2005-2009) 평균농도는 8 ppb로서 연간기준의 40% 수준으로 유지되고 있으나 더는 감소추세가 보이지 않는다(Fig. 2).

국내 주요 대도시(서울, 부산, 대구, 인천, 광주, 대전, 울산)의 2009년 SO₂ 평균농도는 5.6 ppb(표준편차 1.6 ppb)이며,¹⁹⁾ 일반 대도시의 경우에는 전반적으로 고른 분포를 보이고 있다(Fig. 3). 그러나 대규모 국가산업단지를 보유한 울산의 평균농도는 8 ppb로서 가장 높은 수준을 나타내며 그 뒤를 인천이 따르고 있다. 이러한 농도수준과 경향은 2005년부터 매년 일정하므로, 국내 대도시 SO₂ 농도는 안정기에 접어들었다고 판단된다. 또한, 전국 71개 시·도에서 측정된 결과에 의하면, 2002년 이후로 전국 연평균 농도는 6 ppb로 거의 변화가 없다.¹⁹⁾ 즉, 정부의 연료규제 제도(저황유와 LNG를 포함한 청정연료 공급확대, 배출규제 강화 등)가 2000년대 초반까지는 효과적이었지만, 이후 급증하는 차량대수와 연료사용량으로 인해 SO₂ 배출저감이 한계에 도달한 것으로 판단된다.¹⁹⁾ 한편, 국가배경농도 측정소(강화도 석모리, 웅진군 덕적도, 태안군 파도리,

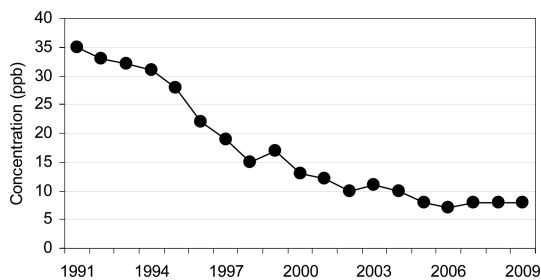


Fig. 2. Long-term trend of annual average levels of SO₂ in Ulsan.

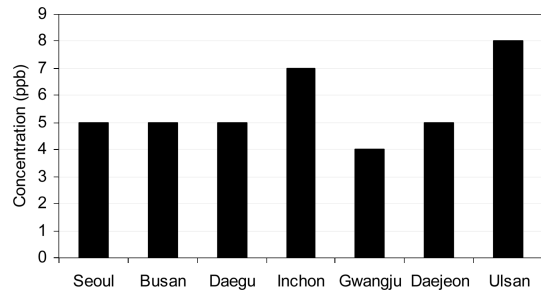


Fig. 3. Average levels of SO₂ in major Korean cities in 2009.

거제도 저구리, 울릉도 태하리, 제주도 고산리)의 2009년 SO₂ 평균농도는 2.8 ppb로서 대도시 평균농도의 절반 수준이었다.¹⁹⁾

3.3. 공간적 분포

SO₂의 주요 오염원과 주변영향을 파악하기 위하여 14개 지점별 평균 농도를 계산하였으며(Table 2), 연도별 농도가 비교적 일정하므로(상대표준편차: 4.1-27.4%), 5년 평균 분포도를 작성하였다(Fig. 4). 온산국가산업단지에 위치한 화산리(N)가 가장 높은 농도(17.3 ppb)를 보였다. 온산국가산업단지는 SO₂를 비롯한 대부분의 기준성 대기오염물질이 고농도로 분포하는 지역이다.⁵⁾ 화산리와 인접한 원산리에서는 SO₂ 농도가 증가함과 동시에 CO와 PM₁₀ 농도도 증가했으므로 고농도 SO₂를 유발하는 오염원이 온산국가산업단지 내 연소배출시설이라는 보고가 있다.⁸⁾ 2007년 환경부 대기정책지원시스템(CAPSS) 자료에 의하면, 울산에서는 에너지·제조업 분야의 연소(39.6%)와 생산공정(44.4%)이 황산화물의 주요 배출원인 것으로 나타났다.¹⁵⁾ 한편, 울산·미포국가산업단지에 위치한 여천동(12.3 ppb)과 부곡동(11.7 ppb)에서도 고농도 SO₂가 측정되었다. 그러나 단지 내 효문지구에 위치하고 있는 효문동 측정소는 일반 주거지역이나 상업지역과 비슷한 농도(5.5 ppb)를 나타냈으며, 이는 자동차 부품 등을 생산하는 효문단지의 특성 때문으로 해석된다. 한편, 주거지역으로 분류된 대송동에서 비교적 고농도(7.4 ppb) SO₂가 측정되었다. 대송동은 울산시 동구에 위치한 주거지역이지만 공단으로 둘러싸여 있기 때문인 것으로 해석된다. 효문동을 제외한 공단지역 SO₂ 평균농도(13.7 ppb)는 주거 및 상업지역 평균농도(5.7 ppb)와 비교할 때 통계적으로 유의한 차이($p < 0.05$)를 나타냈다. 울산시 주거 및 상업지역의 농도수준을 전국 대도시 농도와 비교하면 인천 다음으로 높은 수준이었다. 즉, 공단지역 자료를

Table 2. Annual average concentrations (ppb) of SO₂ at each monitoring site in Ulsan

Site	Name	Land use	2005	2006	2007	2008	2009	Mean	RSD (%)
A	Nongso	Commercial	5.0	4.2	4.2	5.8	7.0	5.2	22.9
B	Hyomun	Industrial	3.6	5.9	5.7	6.2	6.0	5.5	19.5
C	Seongnam	Commercial	4.5	5.2	5.5	5.9	4.7	5.2	11.4
D	Mugeo	Commercial	4.4	5.1	5.7	5.7	5.7	5.3	11.2
E	Samsan	Residential	6.0	5.8	6.2	5.6	6.7	6.0	6.9
F	Sinjeong I	Residential	5.8	5.5	6.0	6.8	5.2	5.9	10.7
G	Sinjeong II	Roadside	4.2	6.3	8.0	6.3	4.3	5.8	27.4
H	Yaeum	Residential	5.9	5.8	5.3	7.0	7.0	6.2	12.5
I	Yeochoen	Industrial	12.9	11.5	12.1	13.4	11.4	12.3	7.1
J	Daesong	Residential	6.6	6.2	8.0	9.2	7.0	7.4	16.0
K	Bugok	Industrial	11.9	12.2	12.0	12.5	9.8	11.7	9.1
L	Sangnam	Residential	7.3	4.0	4.7	5.7	5.5	5.4	23.3
M	Deoksin	Residential	5.7	5.6	8.8	6.6	7.6	6.9	19.6
N	Hwasan	Industrial	16.7	17.6	17.5	18.2	16.4	17.3	4.1

RSD: Relative Standard Deviation

제외하더라도 울산지역 SO₂ 농도는 전국 대도시 중에서 최고수준이다.

지난 5년간(2005-2009) 울산에서 SO₂ 기준(1시간 기준: 150 ppb)을 초과한 횟수는 226회이다. 전체 14개 측정소 중에서 8개 측정소에서 환경기준을 초과했으며, 비철금속 사업장이 많은 화산리(N)에서 전체의 82%인 185회를 초과하였다. 이 중에서 121회는 남동풍이 우세한 4-6월에 초과하였으므로, 계절풍이 화산리 SO₂ 농도에 절대적인 영향을 미친다고 할 수 있다. 화산리 측정소 서편 2.3 km에 위치한 덕신리(M) 측정소에서는 25회의 초과횟수를 기록하였다. 기준초과는 5-7월에 집중되었으며, 남동풍에 의해 온산단지에서 배출

된 SO₂가 덕신리로 이동한 것으로 판단된다. 이전 연구에서도 주거지역인 덕신리 지점에서 기준초과농도가 발생하는 것은 남동풍의 해풍이 불 때 온산국가산업단지에서 발생한 오염물질이 바람에 의해 직접 이동한 것으로 해석하였다.⁸⁾ 또한 연도별 환경기준 초과횟수는 연료사용량의 영향을 받는 것이 보고되었다. 울산에서는 2003-2004년도에 고황유 사용량이 줄었지만 전체 중유 사용량은 증가하여 SO₂ 배출량이 증가했고, 화산리 지점에서 기준초과 횟수가 갑자기 증가한 사례가 있다.⁸⁾

3.4. 월별 · 일별 농도추세

SO₂는 주로 화석연료 연소에 의해 배출되는 물질이므로 난방연료 사용량이 많은 겨울철에 농도가 높은 1차 오염물질의 계절변화가 예상된다. 국내 대도시와 배경농도 지역에서 이러한 계절변화가 관찰된다.¹⁹⁾ 그러나 울산에서는 이와는 다른 계절변화가 나타났다(Fig. 5). 공업지역인 효문동(B), 여천동(I), 부곡동(K), 화산리(N)에서는 늦봄-여름철(5-7월)에 SO₂ 농도가 높으며(평균 17 ppb), 가을-겨울철(10-2월)에는 약 절반(평균 9 ppb) 수준이었다. 일반 대도시에서는 계절별로 난방연료 사용량 변화가 크지만, 울산에서는 공단지역에서 다량의 산업용 연료를 연중 일정하게 사용하고 있다. 그러므로 울산지역에서의 SO₂ 계절변화는 난방연료 사용량 변화보다는 공단배출과 계절풍 영향을 주로 받는 것으로 판단된다. 바람장미(Fig. 1)와 공단의 위치(Fig. 4)를 고려할 때, 가을 · 겨울철에는 북서풍 영향으로 공

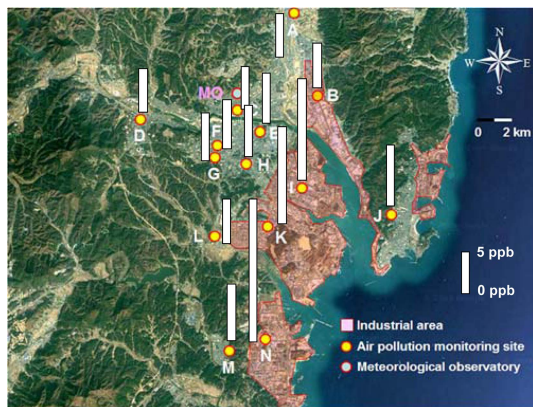


Fig. 4. Spatial distribution of five-year (2005-2009) average concentrations of SO₂ in Ulsan. Industrial areas are shaded in red. The location of a meteorological observatory (MO) is also shown.

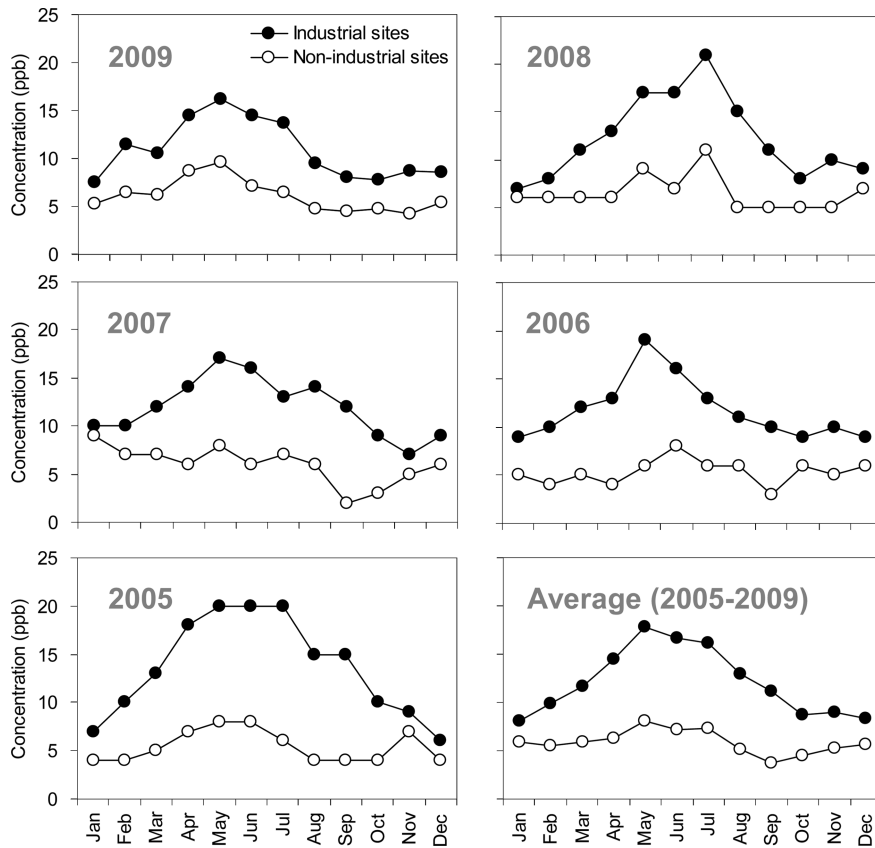


Fig. 5. Monthly variations of average concentrations of SO_2 in Ulsan.

단지에서 배출되는 오염물질들이 동해로 이동하여 내륙에서 SO_2 농도가 감소하고, 봄·여름철에는 남동풍으로 인해 SO_2 가 내륙으로 유입되어 농도가 증가하는 것으로 해석된다. 대기확산 모델링 연구에 의하면, 봄·여름철에는 SO_2 가 울산 전 지역으로 확산되며, 가을·겨울철에는 울산 외곽 해안으로 분산된다.⁹⁾ 비공단지역에서도 강도에는 차이가 있지만 공단지역에서와 비슷한 계절변화(하고동저)가 나타난 것으로 볼 때, 공단에서 배출된 SO_2 가 주변지역으로 유입되는 것을 알 수 있다.

일반적으로 해안지역에서는 계절풍과 함께 해륙풍이 오염물질 확산에 매우 중요한 역할을 한다. 울산에서는 산곡풍에 이어 해륙풍이 발달하며, 해안지형에 의한 바람이 해륙풍과 합성되어 강한 흐름장을 보인다.⁴⁾ 본 연구에서는 해륙풍 영향을 파악하기 위해 시간대별 SO_2 평균농도를 파악하였다(Fig. 6). 오전 9시부터 오후 9시 까지의 농도(14 ppb)가 이외 시간의 농도(10 ppb)보다 확연하게 높았으며, 공단지역의 시간별 농도변화가 비

공단지역보다 상대적으로 크게 나타났다. 이 결과는 바닷가에 가까이 위치한 공단에서 배출된 SO_2 가 주간에 우세한 해풍에 의해 공단지역 측정소와 비공단지역으로 이동하는 것을 의미한다. 울산에서는 해풍 전선이 벽 역할을 하여 오염물질이 빨리 확산되지 않고 축적되어 내륙으로 이동한다고 보고되었다.⁸⁾ 반면, 야간에는 육풍에 의해 SO_2 가 동해로 이동하면서 내륙에서는 농도가 낮아지는 것으로 보인다. 본 연구에서는 장기간 시간평균농도를 이용하여 해륙풍 효과를 확인하였으며, 개별 고농도 사례를 조사할 경우에는 고농도 발생과정을 보다 명확히 이해할 수 있을 것이다. 이미 울산지역에서 해풍에 의한 국지수송과 풍속약화에 따른 풍하측 농도축적에 의한 개별 고농도 사례들이 보고되었다.¹³⁾

3.5. 후속연구 필요성

앞에서 언급한 바와 같이 이미 울산시는 대기질 개선 중장기 종합대책을 통해 다양한 대기오염 저감대책을 수립하여 추진 중이다.¹⁵⁾ 특히 2011년도 울산지역

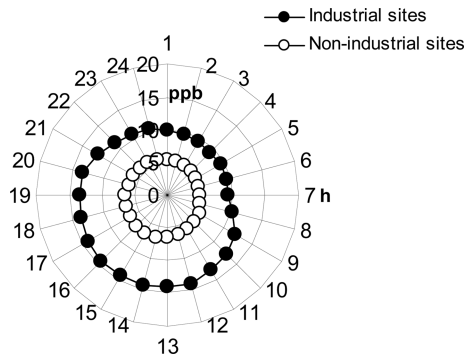


Fig. 6. Hourly variations of five-year (2005-2009) average concentrations of SO₂ in Ulsan.

환경기술개발센터 연구과제로 지역 대기 배출원 특성 조사 및 인벤토리 구축 연구가 수행되었다. 울산시의 종합대책이 차질 없이 수행되면 지역 대기질이 지속적으로 개선될 것으로 보인다. 다만, 실효성 있는 대기오염 관리대책을 수립하고 개선하기 위해서는 일반 도시 지역(주거 및 상업)과 공업지역을 분리해서 농도수준을 파악하고 지역별 관리대책을 수립할 필요가 있다.²⁰⁾ 예를 들어, 개별 관측소에서 측정되는 SO₂에 대한 오염원 기여도를 정량적으로 평가하고, 이를 반영하여 각 지역별, 공단지구별, 사업장별로 구체적인 관리대책이 수립되어야 할 것이다.

한편, 울산시 대기질 관리의 당면한 과제는 고탄유 허용이 대기질 개선에 미치는 영향을 평가하는 것이다. 울산시는 2009년 한국환경정책·평가연구원에서 수행한 용역과제 결과(방지시설이 갖춰진 사업장에 고탄유를 허용할 경우, SO₂ 총 배출량은 오히려 감소할 것으로 예상)에 근거하여,²¹⁾ 고탄유를 허용하고 지역배출 허용기준을 강화하는 정책을 추진하고 있다. 또한 연료 종류에 따른 오염물질 배출량 시나리오 연구에 의하면, 지금까지 울산에서 SO₂ 농도가 지속적으로 감소한 이유는 황을 많이 함유한 연료의 사용량을 줄였기 때문이지, 방지시설이 면제된 0.3% 이하의 저황유 사용이 확대되었기 때문은 아닌 것으로 판단된다.¹⁶⁾ 이러한 선행 연구들을 바탕으로, 고탄유를 사용하는 사업장 굴뚝과 주변지역의 환경대기 중 SO₂ 농도를 상시 모니터링하여 연료정책을 평가하고 보완할 필요가 있다. 또한 고탄유를 사용하는 사업장에서 배출되는 온실기체와 유해대기오염물질(HAPs) 등에 대해서도 면밀한 조사가 필요하다.

4. 결 론

울산의 SO₂ 농도는 1990년대 이후 꾸준히 감소되어 최근 5년(2005-2009) 평균농도는 기준치의 40% 수준으로 유지되고 있으나 더는 감소추세를 보이지 않는다. 현재 울산시 SO₂ 농도수준은 전국 대도시 중 최고 수준이며, 공업지역 농도를 제외하더라도 인천에 이어서 두 번째로 높은 수준이다. 측정결과, 기상자료, 기준 대기모델링 결과를 종합적으로 고려하면, 국가산업단지가 SO₂의 주요 배출원이며 계절풍과 해풍에 의해 공단에서 배출된 SO₂가 주변 주거지역으로 확산되는 현상을 확인할 수 있었다. 현재 울산시에서는 SO₂ 배출량을 저감하기 위해 지역배출허용기준을 강화하고 고탄유를 허용하는 정책을 추진하고 있다. 향후, 이러한 정책의 실효성을 확인하기 위해 일반 도시지역(주거 및 상업)과 공업지역을 분리해서 세부 관리대책을 수립할 필요가 있다. 또한 고탄유 사용 사업장에서 배출되는 SO₂ 이외의 일반대기오염물질, 온실기체, 유해대기오염물질(HAPs)을 주기적으로 측정·분석하여 대기질 개선효과를 검증해야 한다.

감사의 글

본 연구는 2009-2010년 울산과학기술대학교(UNIST) 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 조병환, 1999. *대기환경관리*, 향문사.
2. 울산광역시, 2010. *환경백서 울산의 환경*.
3. 서정호, 김일배, 이학성, *대한환경공학회 춘계학술연구 발표회*, 2001, 205-206.
4. 이화운, 원경미, 정우식, 오은주, 김민선, 도우근, *한국환경과학회지*, 2002, 11, 933-943.
5. 최봉욱, 정종현, 최원준, 손병현, 오광중, *한국환경보건의학회지*, 2006, 32, 324-335.
6. 국립환경과학원, 2009. *환경성질환의 이해와 국내 동향*.
7. 울산광역시, 2010. *시정백서*.
8. 문윤섭, *한국환경과학회지*, 2008, 17, 423-437.
9. 송덕만, 최정정, *대한환경공학회지*, 1996, 18, 1217-1226.
10. 이병규, 서중근, *한국대기환경학회 춘계학술대회논문집*, 1999, 254-256.
11. 이소영, 김유근, 오인보, 김정규, *한국환경과학회지*, 2009, 18, 129-139.

12. 울산지역환경기술개발센터, **2005**. 지역대기환경용량평가 및 배출허용기준의 효율적인 적용방안.
13. 울산지역환경기술개발센터, **2003**. 울산의 대기오염 기상조건과 기상여건에 따른 대기오염실태 조사.
14. 환경부, **2004**. 울산 여수산단 특별대책지역 대기오염 (SO_2) 개선방안 마련을 위한 연구.
15. 울산광역시, **2011**. 대기질 개선 중장기 종합대책.
16. B.-K. Lee, H.-S. Park, **2009**. Environmental and economic issues from changing a major fuel type as energy resources in an industrial city, Korea. *Global Warming: Engineering Solutions*. Springer, 211-222.
17. 기상청, **2005-2010**. 기상월보.
18. 울산광역시보건환경연구원, **2011**. 대기정보시스템(<http://airulsan.go.kr/>).
19. 환경부, **2010**. 대기환경연보 2009.
20. 변승혁, 이병규, 한국대기환경학회 춘계학술대회논문집, **2008**, 345-346.
21. 한국환경정책·평가연구원, **2010**. 대기오염도 개선을 위한 종합분석 평가 및 효율적인 연료정책 적용방안 연구.