

온산공업단지 주변의 박무와 해풍발생이 대기오염물질의 이동 및 농도분포에 미치는 영향

이형돈, 이규홍[†], 김인득[‡], 강지순[§], 오광중*

부산대학교 사회환경시스템공학과
609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30
[†]울산광역시청 환경관리과
680-701 울산광역시 남구 신정동 중앙로 201
[‡]부산광역시 연제구청 환경위생과
611-703 부산광역시 연제구 연제로 2
[§]한국환경공단 영남지역본부 검사분석팀
616-101 부산광역시 북구 만덕대로 155번길 81

(2012년 10월 30일 접수; 2013년 2월 18일 수정본 접수; 2013년 2월 20일 채택)

The Influences of Concentration Distribution and Movement of Air Pollutants by Sea Breeze and Mist around Onsan Industrial Complex

Hyung-Don Lee, Gou-Hong Lee[†], In-Deuk Kim[‡], Ji-Soon Kang[§], and Kwang-Joong Oh*

Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University
San 30 Jangjeon-dong, Geumjeong-gu, Busan 609-735, Korea
[†]Environmental Management Division, Ulsan Metropolitan City
201 Jungangno Sinjeong-dong, Nam-gu, Ulsan 680-701, Korea
[‡]Environment & Sanitation Division, Busan Metropolitan City Yeonje-gu
2 Yeonjero, Yeonje-gu, Busan 611-703, Korea
[§]Test & Analysis Team, Korea Environment Corporation HQ of Yeongnam Region
81 Mandeok-daero 155beon-gil, Buk-gu, Busan 616-101, Korea

(Received for review October 30, 2012; Revision received February 18, 2013; Accepted February 20, 2013)

요 약

온산공업단지는 인근에 울산석유화학단지가 위치해 있고 동쪽에는 바다가 위치하고 있는 공업지역이다. 이러한 이유로 온산공업단지에서 배출되는 대기오염물질은 특히, 해풍과 같은 기상인자에 영향을 받기 쉽다. 본 연구에서는 기상자료를 분석하여 해풍과 박무발생 빈도를 평가하였으며, 온산공업단지 인근의 기상현상에 의해 영향을 받는 대기오염물질의 농도를 평가하기 위해 상층바람조건과 온위를 분석하였다. 분석결과, 박무와 해풍이 발생될 때, 미세먼지(PM₁₀)는 각각 57.2%, 71.8%, 이산화황(SO₂)은 46.6%, 57.7%로 고농도 현상이 나타났다. 이런 결과를 통해 박무와 해풍과 같은 기상현상이 대기오염물질의 고농도에 영향을 주는 것을 확인하였다. 온위와 상층바람조건을 활용한 상층기상을 분석한 결과, 해풍에 의한 울산석유화학단지에서 배출된 대기오염물질의 이류가 온산공업단지 인근의 고농도 현상에 영향을 주는 것을 확인하였다. 특히, 안정한 대기조건에서 해풍이 발생했을 때, 온산공업단지의 평균농도에 비해 1.5배 이상 고농도 현상이 나타났다.

주제어 : 미세먼지, 이산화황, 해풍, 박무, 온위

Abstract : Onsan Industrial Complex located in a nearby the Ulsan Petrochemical Complex and in the east of the coast. For this reason, air pollution substances emitted by Onsan Industrial Complex especially tend to have an effect on meteorological factors such as sea breeze. In this study, we assessed the frequency of sea breeze and mist using the meteorological data, and analyzed potential temperature and upper wind condition for assessment of atmospheric pollution concentration influenced by meteorological

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: kjoh@pusan.ac.kr

doi:10.7464/ksct.2013.19.2.095

phenomena in a nearby the Onsan industrial complex. From an analysis results, when mist and sea breeze happened, each higher concentration phenomenon of PM_{10} and SO_2 appeared each 57.2%, 71.8% and 46.6%, 57.7% respectively. Hence, we confirmed that meteorological phenomena such as mist and sea breeze had an effect on high concentration of air pollution substances in the research area. Analytical result of meteorological data in upper layer using potential temperature and wind condition, we confirmed that advection of air pollution substances emitted in Ulsan Petrochemical Complex by sea breeze have an effect on high concentration in Onsan Industrial Complex and nearby the residential area. In particular, concentration in Onsan Industrial Complex were higher than the average concentration by a factor of more than over 1.5 times when sea breeze by stable condition in atmospheric layer appeared.

Keywords : Particulate matter (PM_{10}), Sulphur dioxide (SO_2), Sea breeze, Mist, Potential temperature

1. 서론

울산시 울주군에 위치한 온산공업단지는 대규모 공업단지로서 북쪽에 석유화학단지에서 배출되는 대기오염물질이 국지기상의 변화에 따라 수송되어 대기오염농도를 가중시킬 수 있고 인근 주거지역인 덕신리 지역은 지속적인 공단의 확장에 따라 환경오염에 노출되고 있는 실정이다. 특히, 연안에 위치한 공단지역에서 배출된 오염물질은 야간의 육풍에 의해서 해상으로 수송된 후, 주간 해풍에 의해 육상으로 이류하는 경향이 있다[1]. 이런 경우 중관풍이 약하면 오염된 대기가 해안선 부근에 정체하게 되면서 연안역에서의 대기오염농도가 침적됨에 따라 내륙보다 높은 상태를 유지하는 경향을 보이게 된다. 이런 형태의 대기오염농도 분포는 배출원에 의한 직접적인 영향을 제외하면 기상학적인 요인에 의해 많은 영향을 받는다[2,3]. 따라서 기상학적 요인 중 기온, 바람, 하층 대기의 안정도 등이 대기오염 현상을 이해하는데 필수요소이며, 대기오염 현상의 정확한 파악을 위해서는 바람, 기온, 혼합고, 안정도 등의 종합적인 분석과 지역특성이 강한 해풍의 발생도 중요하다[4-8]. 기상현상 중, 일반적으로 2차 오염물질에 의해 발생하는 박무현상은 공단지역 인근과 도시의 시정을 악화시키고 기온과 습도 등의 기상인자에 의해 입자상물질로의 입자전환(gas-to-particle conversion) 및 입자응집(particle coagulation) 매커니즘에 영향을 주어 입자상 물질의 농도 증가에도 기여하기 때문에[9], 대기오염물질의 농도 분포와 연관된 매우 중요한 기상현상이라고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 온산공단에서 배출되는 PM_{10} 과 SO_2 의 농도를 분석하고, 2005~2007년까지 3년간 인근에서 불어오는 해풍과 박무일수를 산정하여 대기오염물질농도와와의 연관성을 분석하였다. 또한 기상조건에 따른 온산공단 북쪽의 석유화학공단에서 배출된 대기오염물질의 이류로 인해 온산공단 지역의 대기오염물질 농도가 시간별로 변화되는 추이를 평가하였다. 마지막으로 상층기상의 온위분포와 바람장 분석을 통해 해풍발생에 따른 대기오염농도 변화를 종합적으로 분석하여 온산공단 인근지역의 대기오염물질의 농도 분포와 기상현상이 온산공단과 주거지역에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 연구자료 및 방법

2.1. 위치 및 지형

국토지리정보원에서 제공하는 연구대상지역의 위성사진을 Figure 1에 나타내었다. 울산 남쪽 40 km 지점의 울주군 온산



Figure 1. Geographical location of the research area in Ulsan city (A : Onsan Industrial Complex, B : Duksin, C : Ulsan Petrochemical Complex).

읍에 위치하고 있는 온산공업단지(A)는 동쪽으로 주거지역인 덕신리 지역(B), 북쪽으로는 남구 부곡동의 울산석유화학단지(C)가 위치해 있다. 울산석유화학단지에는 국내 굴지의 석유회사들이 상주해 있고 인근의 각 지점은 현재 울산시 보건환경연구원에서 대기오염물질의 농도를 시간대별로 측정하고 있다. 이렇게 시간별로 측정된 지점별 농도자료를 사용하여 온산공단지역 인근의 대기오염물질 농도변화 분석에 활용하였다.

2.2. 울산과 온산공단의 대기오염도

Figure 2는 울산과 온산지역의 10년(2001~2010)간 PM_{10} 과 SO_2 의 연평균농도를 나타낸 것이다[10]. 울산지역의 PM_{10} 연평균농도는 국내 대기환경기준에 비교적 만족하였으나 온산공단의 PM_{10} 연평균농도는 울산지역보다 높게 나타났다. 온산공단의 농도는 2001년 $81 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 높은 농도를 나타낸 이후 2010년까지 지속적으로 감소 추세를 보이고 있으나 대기환경기준 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하였으며, 울산지역에 비해 높은 농도 분포를 나타내었다. SO_2 의 경우 온산공단지역이 울산지역의 연평균농도를 크게 상회하였다. 전반적으로 울산지역 내 SO_2 농도는 꾸준히 감소하는 추세를 보이고 있으나 온산공단은 감소의 폭이 적고 또한 기준치 0.02 ppm에 근접하고 있어 온산공단지역의 SO_2 농도가 주변 대기환경에 미치는 영향이 클 것으로 예측된다.

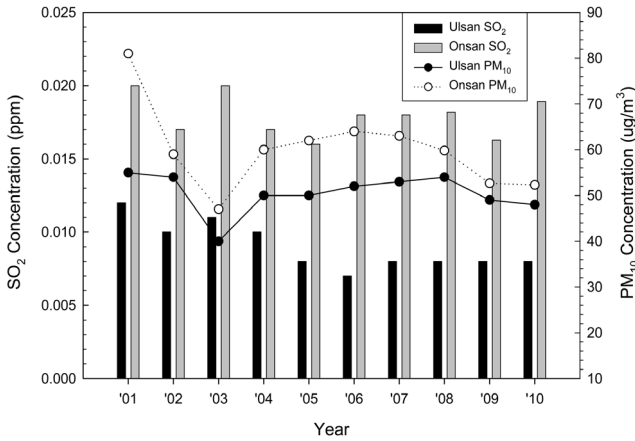


Figure 2. The concentration of SO₂ and PM₁₀ of year with respect to the each area.

2.3. 박무와 해풍발생일 및 고농도 기준

박무는 시정거리가 1 km 이하에서 안개와 비슷한 기상현상으로 무수히 많은 미세한 물방울이나 습한 흡습성 알갱이가 대기 중에 떠있어 먼 곳의 물체가 흐리게 보이는 현상으로 시정거리 1~5 km인 상태이다[11,15]. 특히, 이러한 박무는 앞서 언급한 바와 같이 입자상 물질의 농도 증가에도 기여하기 때문에 정확한 분석이 필요하며 본 연구에서는 기상청의 매시간 기상관측데이터를 활용하여 박무발생일을 분석하였다. 선정 기준으로 강수일(3 mm 이상)을 제외, 황사일과 박무현상이 지속되다 소멸되고 연무로 바뀌는 날을 제외한 순수 박무일만을 선정하였다.

세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO)에서는 해풍발생일의 선정 기준으로 일조율 70% 이상, 바람의 일 변화가 가변풍속 1.5 m/s 이상을 유지하고 육지와 해수가 위치한 방향으로 풍향의 변화가 있는 날을 권고하고 있다. 이에 본 연구에서는 WMO기준을 참고하고 본 연구지역 특성을 고려하기 위해 공단 지점 자동기상관측장비(automatic weather system, AWS)에서 산출된 바람장 자료를 이용하여 해풍발생일을 선정하였으며, 발생조건을 다음과 같이 설정하였다. 먼저 강수와 강설이 내린 날을 제외하고, 일조율 70% 이상, 전운량 8/10 이하인 맑은 날을 선택하였다. 시간은 1300~1700 KST, 평균풍속은 2.5 m/s, 풍향은 동풍 계열의 바람을 해풍발생일로 판단하여 분석하였다[12-14]. 대기오염물질의 고농도 기준은 Figure 2에 나타낸 바와 같이 울산과 온산의 PM₁₀은 연평균 약 50 ± 10 µg/m³, SO₂는 0.009 ± 0.006 ppm 수준이나 봄철 황사로 인해 PM₁₀의 농도가 500 µg/m³ 이상 되는 날을 제외하면 연평균농도가 감소할 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 연간 대기기준치를 각각 10 µg/m³, 0.01 ppm을 초과한 농도인 60 µg/m³, 0.03 ppm 이상의 농도를 보인 날을 고농도일로 분류하여 분석하였다.

2.4. 상층기상 분석방법

본 연구에서 사용한 자료는 부산대학교 대기과학과에서 울산 울주군 인근에서 연직 라디오존데(radiosonde) 기구를 사용

하여 관측한 상층기상 관측데이터를 활용하였다. 관측 자료에 나타난 기압(hectopascal, hPa), 기온(°C), 풍향(deg), 풍속(m/s), 상대습도(%), 지오펀텔 고도(geopotential height) 등의 자료를 토대로 온위를 계산하여 대기혼합고를 분석하였다. 온위(θ)는 식 (1)과 같이 구할 수 있으며, 공기를 단열적으로 압력이 1,000 mb가 될 때까지 압축하였을 때의 온도를 말한다. 특히, 대기오염물질의 확산과 관련하여 온위를 이용할 수 있으며, 온위를 이용한 혼합층의 높이를 산출해 대기오염물질의 확산과 정체 등을 예측할 수 있다. 식 (1)에서 T는 기온, P는 고도에 따른 기압이며, R은 기체상수, C_p는 공기의 정압비열이다.

$$\theta = T \left(\frac{1000}{P} \right)^{\frac{R}{C_p}} \tag{1}$$

3. 결과 및 고찰

3.1. 박무발생일과 고농도 분포

3.1.1. 박무발생일과 바람장 분포

박무발생일 선정 기준에 따라 총 박무발생일을 산정한 결과를 Table 1에 나타내었으며, 총 284회로 나타났다. 계절별로는 봄 65회, 여름 132회, 가을 49회, 겨울 38회로 여름철에 가장 많이 발생하였다. 이는 상대습도가 높은 여름철에 황산 등의 흡습성 대기오염물질이 대기 중에 떠돌면서 박무발생을 가중시킨 것으로 사료된다. 월별 발생률은 7월이 전체의 18%인 54회로 가장 많이 발생하였고, 6월 47회, 8월 31회, 5월 29회 순으로 나타났다. 박무발생일의 풍향과 풍속을 분석한 결과, 박무 발생 시 평균풍속은 2.0 m/s, 박무현상이 없을 때 2.3 m/s로 나타났다. 이는 박무가 약한 풍속에서 대기 중의 황산화물의 이류 및 확산현상의 감소에 따라 입자의 이동 및 수송의 정도가 줄어 대기 중의 분진을 흡수하거나 산란시키는 현상이 더 가중될 수 있기 때문으로 판단된다. 풍향의 경우 북서 계절풍이 탁월한 겨울철을 제외한 봄, 여름, 가을철에서의 풍향이 NE, NNE, ENE, ESE 등으로 나타나 해풍의 풍계와 일치하였다. 즉, 온산공단에서 배출된 대기오염물질이 습한 공기를 포함한 해풍을 타고 내륙으로 수송되어 대기질과 산란 및 흡수 작용에 의해 박무가 발생된 것으로 판단된다.

3.1.2. 박무발생 시 고농도 사례

Table 1에 박무발생 시 고농도 발생일의 빈도를 나타낸 결과, PM₁₀은 3년간 57%로 나타났으며, 월별로 살펴보면 4월 83%, 6월 70%, 7월 67% 순으로 높은 발생 빈도를 보였다. 4월을 제외하고 상대습도가 높고 강수량이 많은 여름철에 높은 빈도를 나타내었으며, 가장 낮은 연관성을 보인 계절은 겨울철로 50% 내외의 빈도를 보였다. 이는 겨울철의 상대습도가 가장 낮아 건조하고 종관풍인 북서풍의 영향에 의해 배출된 대기오염물질이 확산되기 때문이다. SO₂는 PM₁₀에 비해 고농도 발생빈도가 낮은 것으로 확인되었으며, 3년간의 전체평균 발생빈도는 47%로 나타났으며, 월별 분석결과, 7월 59%, 5월과 6월 55%, 8월 52% 순으로 나타났다. PM₁₀과 마찬가지로

Table 1. Occurrence frequency of PM₁₀ and SO₂ episode day during the mist day

Classification		Month												Total
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
2005_Mist day		1	1	9	7	7	17	20	7	9	2	5	0	85
2006_Mist day		3	2	7	2	11	20	14	15	4	11	3	7	99
2007_Mist day		10	9	8	3	11	10	20	9	3	5	7	5	100
2005_PM ₁₀	≥ 60 µg/m ³	1	1	6	6	5	15	15	4	3	0	3	0	59
2006_PM ₁₀		0	1	5	2	5	11	8	8	2	4	2	3	51
2007_PM ₁₀		5	5	6	2	6	7	13	4	2	2	4	3	59
2005_SO ₂	≥ 0.03 ppm	0	0	3	2	3	7	12	3	2	0	2	-	34
2006_SO ₂		1	1	4	1	7	14	8	9	2	6	2	3	58
2007_SO ₂		4	4	5	1	6	5	12	4	2	2	4	2	51
Frequency		Month												Avg.
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
2005_PM ₁₀	%	100	100	67	86	71	88	75	57	33	0	60	-	67
2006_PM ₁₀		0	50	71	100	45	55	57	53	50	36	67	43	52
2007_PM ₁₀		50	56	75	67	55	60	55	44	67	40	43	60	56
Total_PM ₁₀		43	58	71	83	55	70	67	52	44	33	60	50	57
2005_SO ₂		0	0	33	29	43	41	60	43	22	0	40	-	39
2006_SO ₂		33	50	57	50	64	70	57	60	50	55	67	43	55
2007_SO ₂		40	44	63	33	55	50	60	44	67	40	57	40	49
Total_SO ₂		36	42	50	33	55	55	59	52	38	44	53	42	47

Table 2. Occurrence frequency of PM₁₀ and SO₂ episode day during the sea breeze day

Classification		Month												Total
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
2005_Sea breeze day		5	3	6	8	13	7	5	10	4	5	7	2	75
2006_Sea breeze day		2	7	12	11	10	7	3	4	9	3	6	4	78
2007_Sea breeze day		5	6	9	13	8	7	9	5	9	7	5	4	87
2005_PM ₁₀	≥ 60 µg/m ³	2	2	4	6	9	4	3	6	2	5	5	2	50
2006_PM ₁₀		2	4	8	7	7	6	3	4	7	2	3	3	56
2007_PM ₁₀		4	5	4	6	4	5	7	5	8	7	4	3	62
2005_SO ₂	≥ 0.03 ppm	2	2	2	4	5	4	2	5	3	3	5	2	39
2006_SO ₂		1	3	7	6	6	4	2	3	5	2	2	3	44
2007_SO ₂		5	6	9	13	8	7	9	5	9	7	5	4	87
Frequency		Month												Avg.
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
2005_PM ₁₀	%	40	67	67	75	69	57	60	60	50	100	71	100	68
2006_PM ₁₀		100	57	67	64	70	86	100	100	78	67	50	75	76
2007_PM ₁₀		80	83	44	46	50	71	78	100	89	100	80	75	75
Total_PM ₁₀		67	69	59	59	65	71	76	79	77	93	67	80	72
2005_SO ₂		40	67	33	50	38	57	40	50	75	60	71	100	57
2006_SO ₂		50	43	58	55	60	57	67	75	56	67	33	75	58
2007_SO ₂		60	67	56	46	50	43	67	80	56	71	60	75	61
Total_SO ₂		50	56	52	50	48	52	59	63	59	67	56	80	58

상대습도가 높아진 여름철에 비교적 높은 발생빈도를 나타내었으며, 연도별로 살펴보면 2006, 2007년에 각각 55%, 49%로 2005년의 39%에 비해 농도가 높게 나타났다. 이는 박무생성

에 영향을 미치는 PM₁₀과 SO₂의 배출량이 2005년에 비해 증가했기 때문인 것으로 판단된다. 결론적으로 PM₁₀과 SO₂가 57%, 47%의 확률로 고농도 현상이 발생한 것으로 나타나 박무현상

이 대기오염물질의 고농도 일수에 영향을 줄 수 있는 기상인 자임이 나타났다.

3.2. 해풍발생일과 고농도 분포

3년간의 해풍의 빈도수를 분석한 결과, 2005년에 75회, 2006년에 78회, 2007년에 87회 발생한 것으로 나타났으며, 3년간 총 발생일수는 240회, 연평균 79회로 분석되었다. 4월의 빈도가 14%로 가장 높았으며, 5월 13%, 3월 11%, 1월과 12월이 각각 4%로 겨울철의 해풍발생 빈도가 가장 낮은 것으로 나타났다. 대기오염물질의 고농도 일수와 해풍발생일과의 연관성

분석을 위해 고농도 발생일 중 황사가 유입된 날은 최대 농도가 PM₁₀의 경우 250~980 µg/m³까지 치솟아 분석에서 제외하였으며, 해풍발생시간 1300~1700 KST와 덕신리 지역까지 해풍이 유입될 유예시간 2시간을 추가시켜 최종적으로 1300~1900 KST까지 고농도 발생일을 분석하여 Table 2에 나타내었다.

PM₁₀은 평균 72%의 빈도를 보였으며, 10월 93%, 8월 79%, 9월 77%의 순으로 나타났다. 전체적으로 6~10월 사이 비교적 따뜻한 여름철과 가을철에 높은 발생확률이 나타난 특징을 보였다. 해풍의 발생 사례가 적은 겨울철은 비교적 해풍과 고농도

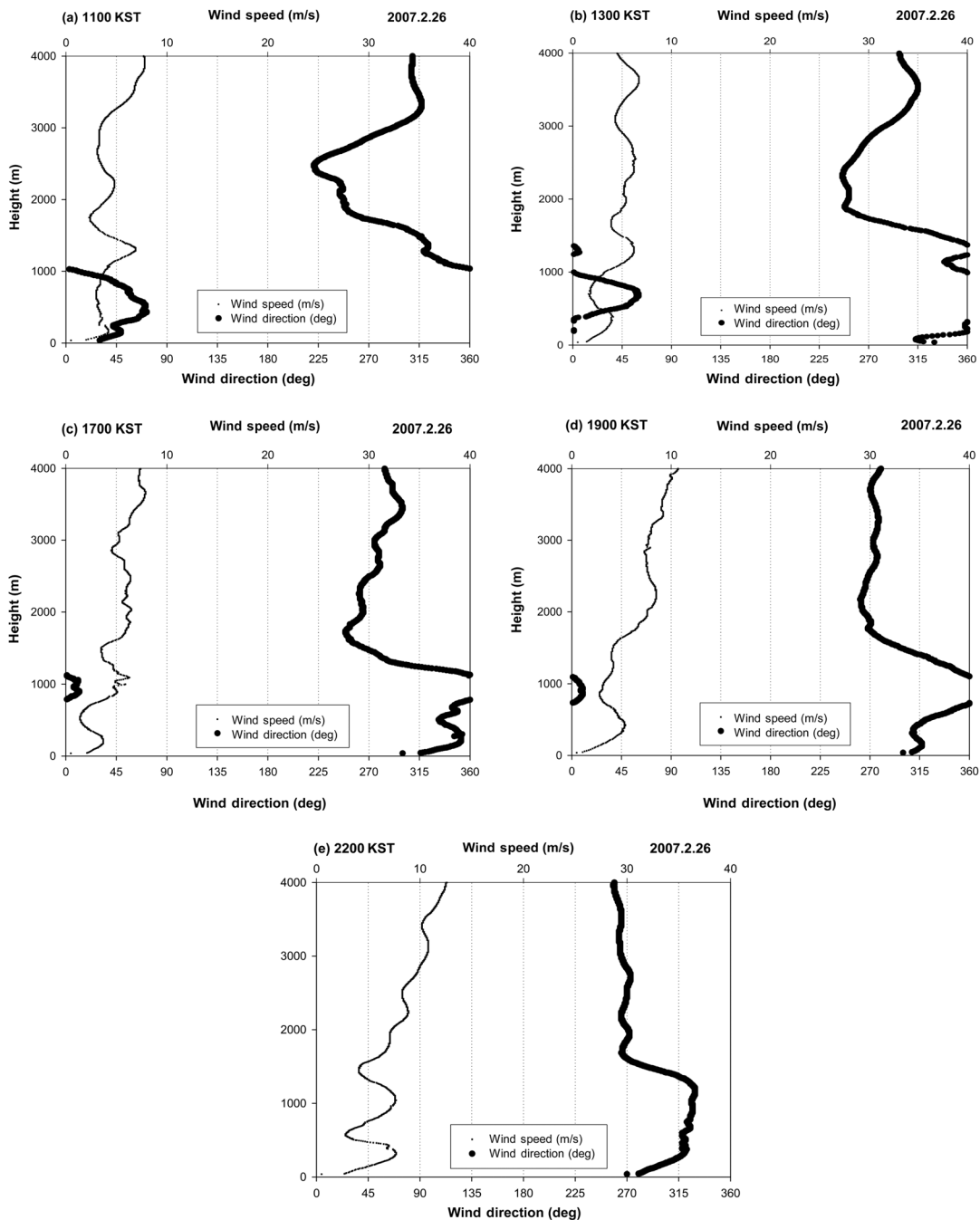


Figure 3. Vertical profiles of wind vector and wind speed at each observation time (2007.2.26).

일의 발생이 일치하는 경향을 보였지만 사례가 적어 신뢰도는 상대적으로 낮을 것으로 판단된다. 봄철에 60% 내외로 가장 낮은 발생확률이 나타났으며, 이는 황사로 인해 고농도 일로 나타난 일수와 황사 소멸 후의 며칠간을 발생일수에서 제외한 결과 다른 계절에 비해 빈도가 낮게 나타났기 때문이다. SO₂는 3년간 평균 58%로 PM₁₀에 비해 빈도가 낮았으며, 해풍 발생 빈도가 적은 12월을 제외하면 10월 67%, 8월 63%, 9월, 7월 59% 순으로 여름과 가을철에 높은 것으로 나타났다. 전체적으로 PM₁₀, SO₂가 각각 72%, 58%로 비교적 높은 연관성을 보였으며 해풍 발생이 대기오염물질의 이류 현상에 영향을 주

는 것으로 판단되며, 입자상 물질인 PM₁₀이 가스상 물질인 SO₂에 비해 해풍유입에 따른 영향이 상대적으로 크다는 특징이 나타났다.

3.3. 상층기상조건에 따른 대기오염 현상

3.3.1. 바람장 및 온도변화 분석

Figure 3에 2월 26일의 상층기상 바람장 분포를 나타낸 결과, 1100 KST에 5 m/s 내외의 북동풍계열인 약한 상층 지균풍이 부는 것으로 나타났으며, 시간이 지남에 따라 북서풍으로 풍향이 고도에 따라 역전된 것으로 나타났다. 이후 1300

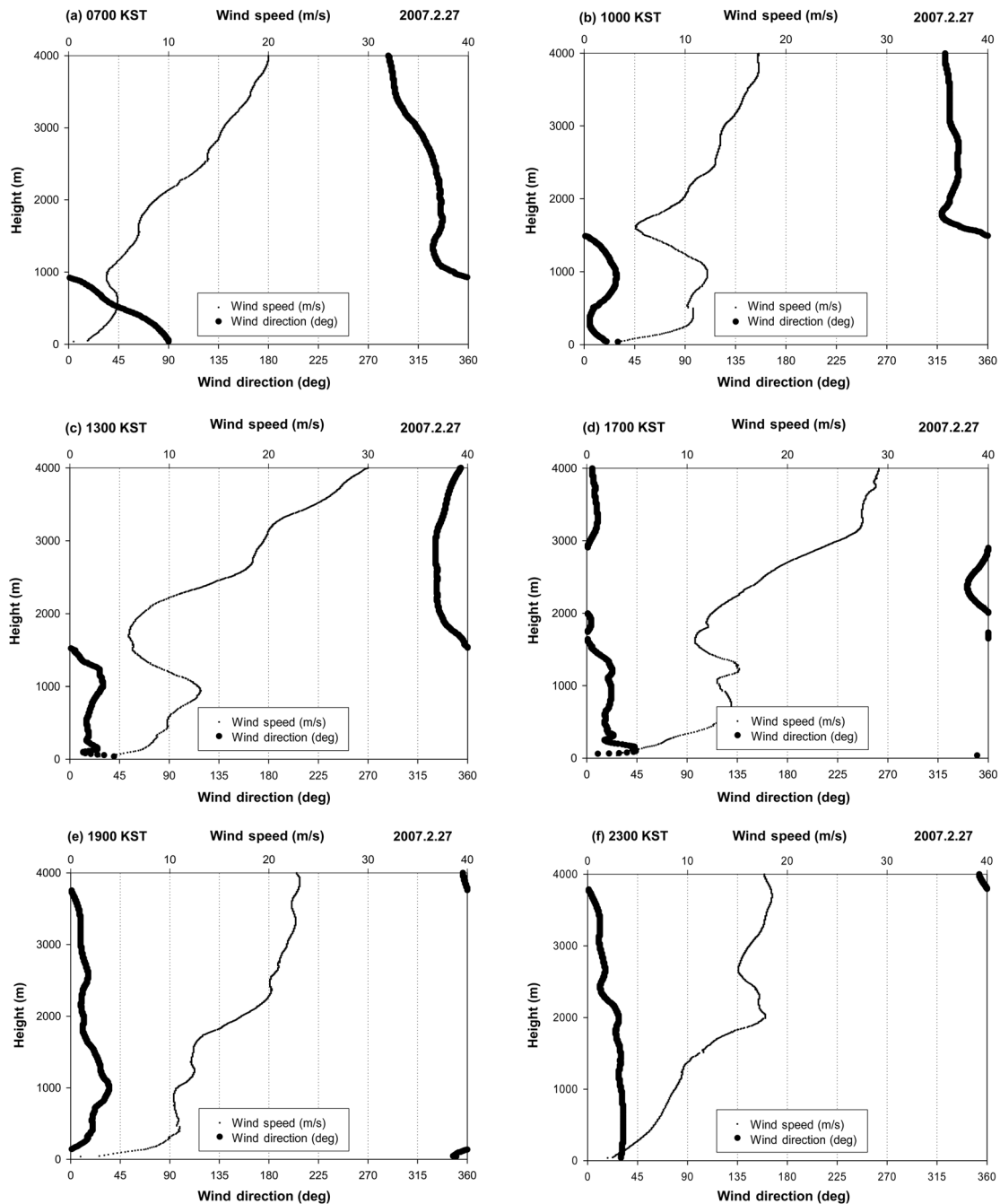


Figure 4. Vertical profiles of wind vector and wind speed at each observation time (2007.2.27).

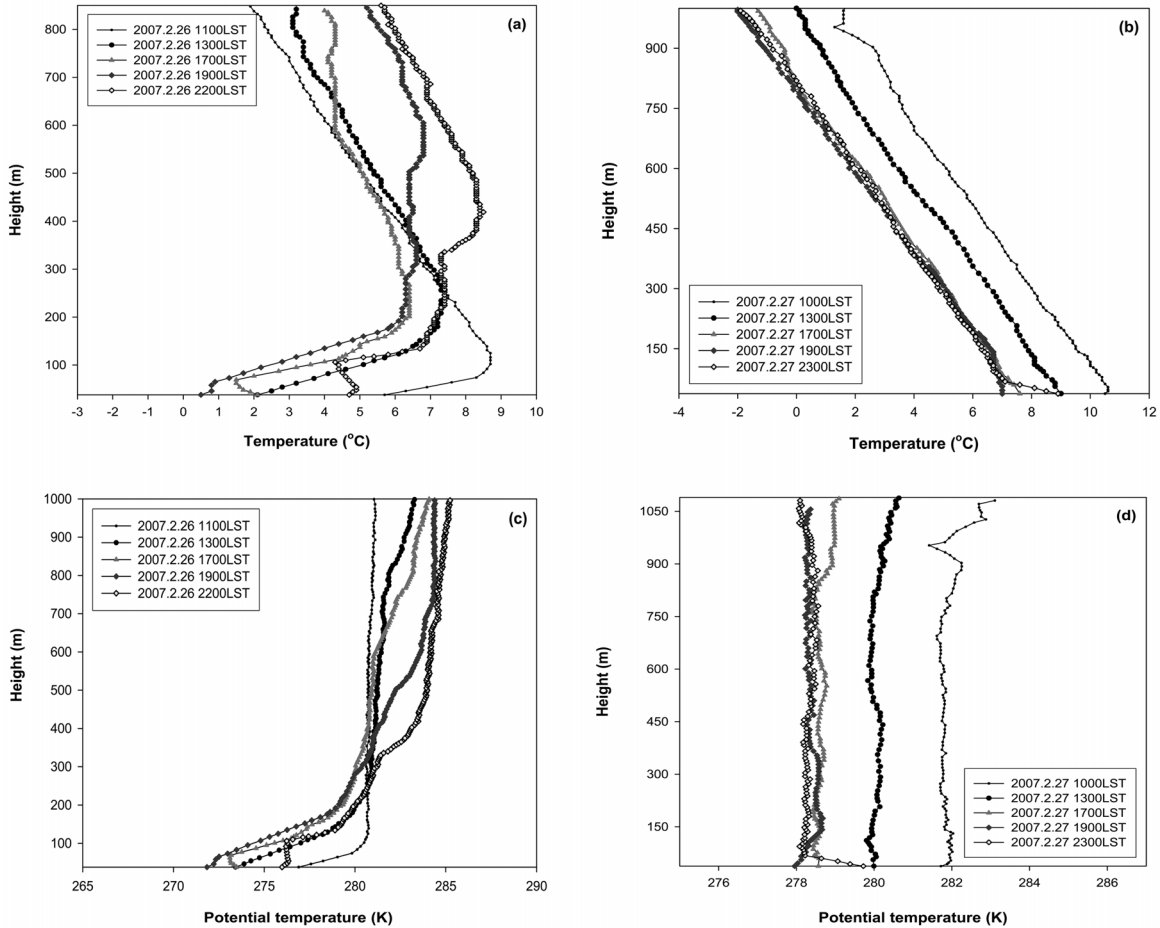


Figure 5. Height of observation time with respect to the (a, b) upper air temperature and (c, d) potential temperature.

KST부터 북동풍이 북서풍으로 바뀌면서 강하게 불다가 1900 KST 경부터 서풍과 북서풍이 가장 우세한 바람장으로 바뀌며 육풍이 부는 경향을 보였다. 또한 27일 바람장을 Figure 4에 나타낸 결과, 0700~1700 KST까지 지표부근에서 온산공단의 동쪽과 북동쪽 방향의 인근 해안에서 불어오는 북풍과 북동풍계열의 바람(0~45°)이 가장 우세한 것으로 나타났으며, 1900 KST에서 북서풍이 조금씩 발달하며 육풍이 일부 관측되었으나, 전체적으로 북동풍계열의 바람이 가장 우세할 것으로 판단되어 26일에 비해 바람장이 비교적 안정하게 유지되는 것으로 관측되었다.

상층대기관측결과를 이용하여 고도에 따른 온도분포를 Figure 5(a), (b)에 나타내었다. 먼저 2월 26일 1100~1900 KST까지 약 50~200 m의 역전층이 발달하였으며, 1700 KST에 50~200 m까지 비교적 강한 역전층, 200~300 m까지 중립에 가까운 역전층이 생성되는 것으로 나타났다. 특히, 26일은 오전과 오후에 발달한 북동풍계열의 한랭한 해풍으로 인해 상대적인 지상기온의 분포가 지속적으로 낮아진 것으로 분석된다. 또한 이러한 해풍유입에 의해 1700 KST 경, 태양복사에너지에 의한 열적인 난류와 기타 기계적 난류 등으로 50 m까지는 불안정층이 생긴 것으로 판단된다. 2월 27일에는 고도 1000 m까지 역전층이 거의 발달하지 않고 온도분포가 비교적 일정한 경향을 보

였으며, 이는 지표 부근에서 부는 바람이 26일에 비해 비교적 안정하여 일정하게 불어오는 해풍의 영향으로 온도분포의 변동이 크지 않았기 때문으로 판단된다.

식 (1)을 이용하여 온위 분포를 계산하여 Figure 5(c), (d)에 나타내었다. 2월 26일 1100 KST 경 약 100 m까지 안정층이 형성되었으며, 이후 1700 KST 경 하층대기에서 온위가 점차 감소하여 불안정층을 유지함에 따라 대류운동이 활발할 것으로 판단되나 대체적으로 하층에서 온위가 고도에 따라 증가하여 대기가 안정한 조건을 유지할 것으로 사료된다. 또한 2월 27일은 온위가 하층 대기에서(1 km 이하) 중립형태의 안정한 상태를 지속적으로 나타내고 있으며, 상층(1 km 이상)에서도 온위의 분포가 지속적으로 고도에 따라 증가하고 있어 대기가 매우 안정한 상태를 유지함에 따라 대기오염물질의 정체현상이 가중될 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 이러한 대기조건에서 26일 고농도 현상이 발생될 경우, 오염물질이 이류와 확산되지 못하고 축적되어 다음날까지 고농도의 대기상태가 유지될 것으로 판단된다.

3.2.2. 대상지역의 고농도 현상

앞서 분석한 바람장 분포와 온도 및 온위분포 결과를 바탕으로 26일과 27일에 온산공단과 석유화학공단, 그리고 인근

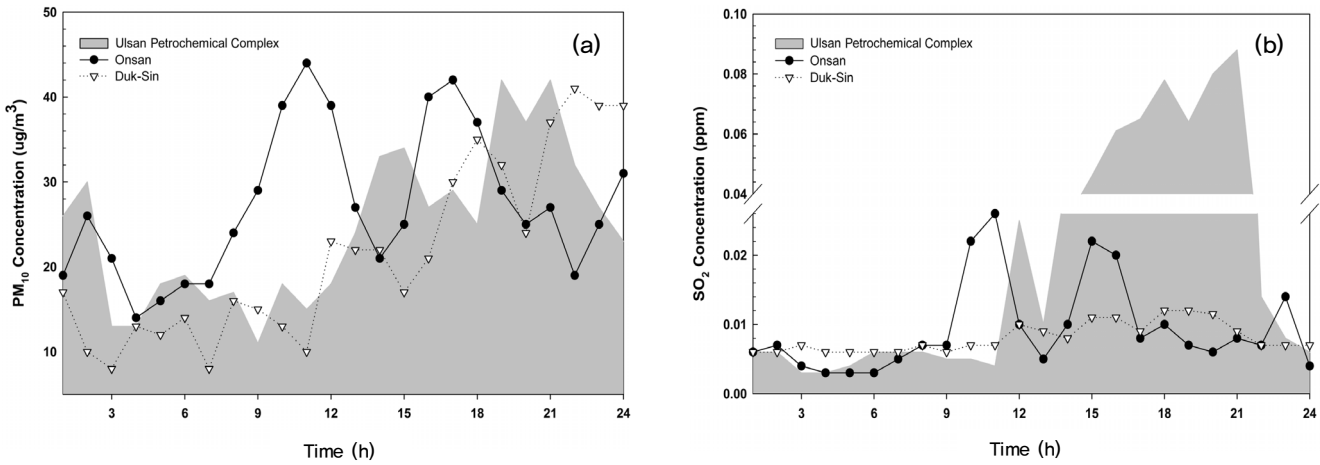


Figure 6. The concentration of (a) PM₁₀ and (b) SO₂ of measured time with respect to the observing area (2007.2. 26).

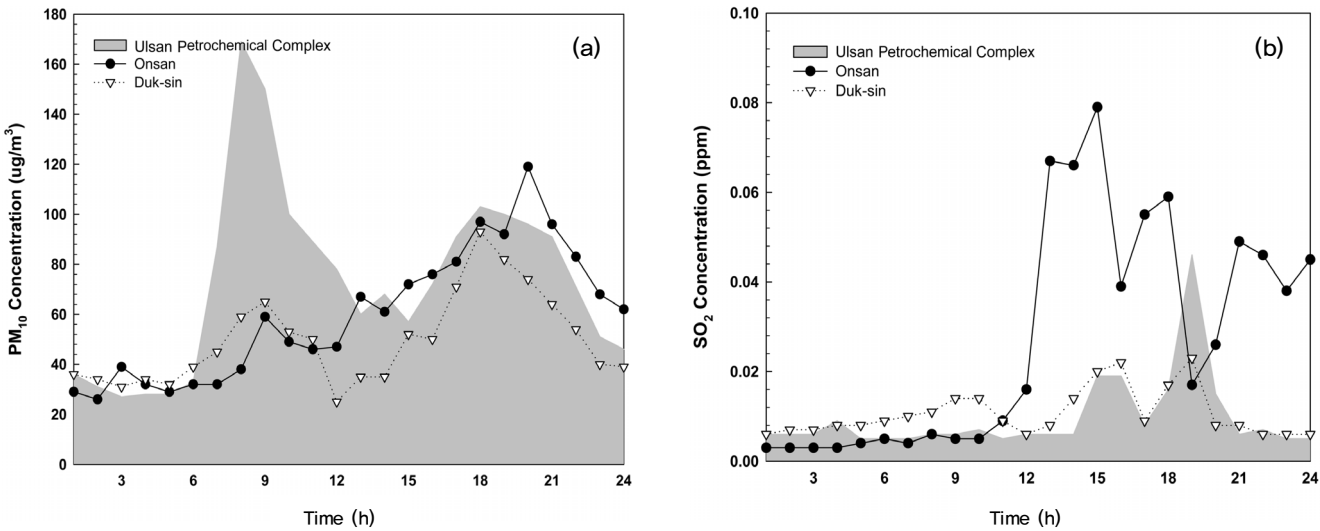


Figure 7. The concentration of (a) PM₁₀ and (b) SO₂ of measured time with respect to the observing area (2007. 2. 27).

주거지역인 덕신리 지역에서 측정된 대기오염물질의 농도변화를 분석하여 Figure 6, 7에 나타내었다. 2월 26일의 대기오염농도 분석결과, 오전시간 북동풍계열인 해풍에 의해 석유화학공단에서 배출된 PM₁₀과 SO₂가 남서쪽에 위치한 온산공단에 영향을 주어 PM₁₀은 약 20 ug/m³에서 45 ug/m³까지 2배 이상 급격하게 농도가 상승되었으며, SO₂의 경우도 0900 KST 0.008 ppm에서 1100 KST까지 0.033 ppm으로 대기환경기준 0.020 ppm을 초과하며, 최대 4배 이상 농도가 상승한 것으로 나타났다. 이후 1200 KST 경부터 1500 KST까지 오염물질의 농도가 낮아진 것은 1300 KST 경부터 바람장이 북서풍으로 역전되면서 온산공단지역의 대기오염물질이 이류됨에 따라 농도가 낮아졌기 때문으로 판단된다. 1500 KST 이후 북쪽에 위치한 석유화학공단에서 측정된 PM₁₀과 SO₂의 농도가 지속적으로 상승하면서 북풍계열의 바람에 의해 인근 온산공단과 덕신리 지역의 농도 상승에 영향을 주면서 농도가 1800 KST까지 높은 농도를 유지하는 것으로 나타났다.

또한 온산공단지역은 야간시간 공장가동이 중지됨에 따라 점차 농도가 낮아지는 경향을 나타낸 것과 달리 주거지역인 덕신리 지역은 온산공단에 비해 농도분포가 비교적 일정하게 증가하는 경향을 나타내었다. 온산공단의 경우 26일 야간시간 북서풍으로 인해 인근에 위치한 해안으로 일정농도의 대기오염물질이 확산되며 농도가 감소하는 경향을 보였다. 반면 덕신리 지역은 야간 지표면 냉각에 의해 형성되는 접지역전층 및 낮은 혼합고로 인해 생기는 대기안정도의 변화로 오염물질의 확산 및 이류현상이 감소하여 지속적으로 농도가 상승한 것으로 판단된다. 이러한 현상과 더불어 산곡풍에 의해서 주간 풍상층에 퍼져있던 대기오염물질이 풍하측인 덕신리 지역으로 이류된 것에 기인하는 결과로 판단된다.

2월 27일의 PM₁₀과 SO₂의 시간별 농도분포변화를 Figure 7에 나타내었다. PM₁₀의 경우, 주간에서 야간까지 계속해서 농도가 증가하는 추세를 보였으며, 이러한 농도변화추세가 1800~2000 KST까지 지속적으로 유지되는 것으로 나타났다. 이는

0700~1700 KST 경 동풍계열의 해풍발달로 인해 전날 정체되어 있던 PM₁₀과 27일 0600~1200 KST 경 석유화학공단의 고농도(최대 160 µg/m³) 현상이 남쪽 덕신리 지역과 온산공단지역에 영향을 미쳤기 때문인 것으로 판단된다. 또한 상층 대기상태가 안정한 상태를 유지하여 대기오염물질의 이류 및 확산이 최소화되어 대기오염도가 지속적으로 상승했기 때문이다. 특히, 온산공단지역은 0900 KST에 65 µg/m³의 농도수치를 시작으로 1200 KST에 67 µg/m³, 1500 KST에 71 µg/m³, 1800 KST에 97 µg/m³, 2000 KST 경에 119 µg/m³까지 이 지역 평균농도의 1.52배에 이르는 고농도의 분포가 나타났다. 또한 덕신리 지역도 낮시간대 해풍의 영향으로 인해 석유화학공단지역과 온산공업단지로부터 PM₁₀이 확산되어 기준치를 초과하는 고농도 현상이 나타났다.

SO₂의 경우, 1000 KST부터 야간까지 지속적으로 대기환경기준(0.020 ppm)을 초과하는 고농도 현상이 유지되는 것으로 나타났다. 특히, 26일 1500~2100 KST 경 석유화학공단지역에서 최대 0.080 ppm의 초고농도 현상이 관측되었으며, 이러한 SO₂가 26일 야간시간 육풍에 의해 해양으로 이류되었다가 27일 해풍에 의해 재순환(recirculation)되어 오염물질이 유입된 것으로 판단된다. 이러한 유입으로 인해 1200~1800 KST까지 온산공단지역은 최대 0.079 ppm까지 오염도가 상승하였으며, 평균치의 최대 4배 이상을 초과하는 고농도 현상이 나타났다. 또한 덕신리 지역은 2월 평균농도 0.007 ppm의 약 23배의 고농도 현상이 나타났으며, 온산공단지역에 비해 농도가 상승되는 시점이 2시간정도 차이를 보이고 상승폭이 완만하게 유지되는 특징을 보였다. 이는 석유화학공단에서 배출된 SO₂가 해풍에 의해 이동되는 시간차이 때문인 것으로 판단된다.

따라서 2월 27일에 나타난 고농도 현상은 26일 야간시간에 발생하는 육풍에 의해 배출된 오염물질이 바다로 유입된 후, 27일에 북동풍계열의 해풍 발생으로 인해 석유화학단지에서 배출된 오염물질과 온산공단 대기오염물질이 혼합되어, 고농도 현상이 나타난 것으로 판단된다. 이렇게 유입된 대기오염물질은 상층대기의 역전현상과 온위의 연직분포에 의해 안정화된 대기상태로 인해 오염물질이 정체되어 월평균농도를 약 1.54배 초과하는 고농도 현상이 가중된 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 울산에 위치한 온산공단 인근의 박무와 해풍 발생일을 분석하고 상층기상의 바람장, 온도, 온위분포 분석을 통해 대기오염물질의 고농도 발생일과의 연관성을 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 박무발생 시 PM₁₀, SO₂의 고농도 발생빈도는 57%, 47%로 나타났으며, 월별분석결과, 상대습도와 기온이 높은 여름철에 높은 연관성이 나타났다. 또한 해풍발생에 따른 빈도를 분석한 결과, PM₁₀ 72%, SO₂ 58%의 발생확률을 보여 해풍과 박무 발생이 온산공단의 대기오염물질 농도와 비교적 높은 상관도가 나타났다. 이를 통해 해풍의 발생이 대기오염물질의 이류에

영향을 줌으로서 인근 지역의 대기오염물질의 고농도 현상에 기여함을 확인하였다.

2) 상층기상관측을 통해 관측된 온위를 분석한 결과, 하층 대기에서 온위가 고도에 따라 증가하는 안정한 대기상태를 지속적으로 유지할 것으로 나타났다. 이러한 기상조건을 통해 온산공단과 석유화학공단에서 발생하는 대기오염물질이 해풍과 육풍의 영향으로 주변지역에 영향을 주어 오염물질의 정체현상이 가중될 수 있을 것으로 판단되었다.

3) 대기오염물질별 농도변화를 비교 분석한 결과, 26일 석유화학공단에서 배출된 고농도의 PM₁₀과 SO₂가 해풍으로 인해 온산공단과 인근 덕신리 지역의 농도상승에 영향을 주며, 27일에는 해풍의 영향을 받는 시각에 대기오염물질의 농도가 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 또한 온위분포를 통해 확인된 해풍과 역전현상으로 안정한 대기상태로 인해 온산공단과 덕신리 지역의 대기오염농도가 평균농도의 1.5배 이상 증가하는 고농도 현상이 나타나, 이를 통해 해풍이 대기오염물질의 고농도 현상에 영향을 주는 것으로 판단되었다. 따라서 해안에 위치한 공단은 해풍과 같은 국지적인 기상현상이 발생할 경우 고농도의 대기오염현상이 유발될 수 있으며, 해풍발생 빈도가 높은 시기에는 적합한 대기질 관리정책이 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

감사

이 논문은 두뇌한국(BK)21사업 및 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Robinsohn, J., Mahrer, Y., and Wakshal, E., "The Effect of Mesoscale Circulation on the Dispersion of Pollutants (SO₂) in the Eastern Mediterranean, Southern Coastal Plain of Israel," *Atmos. Environ.*, **26**(3), 271-277 (1992).
2. Lee, H. W., Park, J. H., Jung, W. S., and Leem, H. H., "Sea Breeze Criterion and the Climatological Characteristics of the Short-time Sea Breeze in Gangneung Coastal Area," *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **23**(5), 436-441 (2002).
3. Shin, C. G., Han, J. S., and Kim, Y. S., "A Study on the Relationship of Air Pollution and Meteorological Factors," *Korean J. Sanitation*, **7**(2), 141-152 (1992).
4. Lee, S. Y., "Development of Air Pollution Potential Prediction System in Ulsan Metropolitan Area," Master Dissertation, Pusan National University, Busan, 2006.
5. McKendry, I. G., "Ground-level Ozone in Montreal, Canada," *Atmos. Environ.*, **27**(1), 93-103 (1993).
6. Srinivas, C. V., Venkatesan, R., and Bagavath, S. A., "Sensitivity of Mesoscale Simulations of Land-sea Breeze to Boundary Layer Turbulence Parameterization," *Atmos. Environ.*, **41**(12), 2534-2548 (2007).
7. Liu, C. M., Liu, S. C., and Shen, S. H., "A Study of Taipei Ozone Problem," *Atmos. Environ.*, **24**(6), 1461-1472 (1990).

8. Massons, J., Camps, J., and Soler, M. R., "Modeling of Pollutant Dispersion in Sea Breeze Conditions using a Lagrangian Model," *Theor. Appl. Climatol.*, **56**(3-4), 255-266 (1997).
9. Park, G. H., Lee, B. G., Jung, S. G., and Ham, Y. S., "Comparison of Characteristics of Heavy Metals in the Ambient TSP on Mist and Clear Days," *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment Proceeding*, (2008).
10. National Institute of Environmental Research, "Air Quality in Korea(2010)," Annual Report, 2011.
11. Cho, J. H., "A Study on the Relationship between Fog and Air Pollution in the Seoul Area (2000~2004)," Master Dissertation, Hanyang University, Seoul, 2007.
12. Lee, H. W., Won, G. M., Jung, W. S., Oh, E. J., Kim, M. S., and Dou, W. G., "A Numerical Simulation of Air Pollutant Concentration Considering Land and Sea Breeze in Ulsan Area," *Korean Environ. Sci.*, **11**(7), 933-943 (2002).
13. Jeon, B. I., Kim, Y. G., and Lee, H. W., "The Influences of Sea Breeze on Air Pollution Concentration in Pusan, Korea," *Korean Environ. Sci.*, **3**(4), 357-365 (1994).
14. Abbs, D. J., "Sea-breeze Interactions along a Concave Coastline in Southern Australia: Observations and Numerical Modeling Study," *Mon. Wea. Rev.*, **114**(5), 831-848 (1985).
15. World Meteorological Organization (WMO), "Commission for Instruments and Methods of Observation," Expert Team on Surface Technology and Measurement Techniques Second Session, 2008.