

## 양산시 산업단지에서 측정한 악취물질의 농도 분포 특성 및 대기확산 모델링

송상근<sup>\*,\*\*\*</sup> · 손장호<sup>\*\*</sup> · 김유근<sup>\*\*\*</sup> · 박흥재<sup>\*\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>부산대학교 연안환경시스템사업단, <sup>\*\*</sup>동의대학교 환경공학과,  
<sup>\*\*\*</sup>부산대학교 지구환경시스템학부, <sup>\*\*\*\*</sup>인제대학교 환경공학과

(2009년 4월 15일 접수; 2009년 6월 18일 수정; 2009년 7월 22일 채택)

## Characteristics of Malodor Pollutants and Their Dispersion Measured in Several Industrial Source Regions in Yangsan

Sang-Keun Song<sup>\*,\*\*\*</sup>, Zang-Ho Shon<sup>\*\*</sup>, Yoo-Keun Kim<sup>\*\*\*</sup> and Heung-Jai Park<sup>\*\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Coastal Environmental System School, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

<sup>\*\*</sup>Department of Environmental Engineering, Dong-Eui University, Busan 614-714, Korea

<sup>\*\*\*</sup>Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

<sup>\*\*\*\*</sup>School of Environmental Science & Engineering, Inje University, Gimhae 621-749, Korea

(Manuscript received 15 April, 2009; revised 18 June, 2009; accepted 22 July, 2009)

### Abstract

In this study, the environmental behavior of malodor pollutants (MPs: H<sub>2</sub>S, CH<sub>3</sub>SH, DMS, and DMDS) was investigated around areas influenced by strong anthropogenic processes based on observations and modeling study (a CALPUFF dispersion model). The MP emission concentrations were measured from 8 industrial source regions (tire plants (S1-S3), waste water disposal plant (S4), and oil refinery (S5) in an urban center area and paper mill/incineration plant (S6) and livestock feedlots (S7-S8) in Ungsang area) in Yangsan city during a fall period in 2008 (21 October 2008). Overall, the most MPs emitted from the urban center area were found to affect the malodor pollution in their downwind areas during early morning (06:00 LST) and nighttime (18:00 and 21:00 LST), compared with those in the Ungsang area. For malodor intensity, the most MPs in the urban center area (especially S1 and S2) were found to be a significant contributor, whereas CH<sub>3</sub>SH and H<sub>2</sub>S in the Ungsang area (especially S6) were the dominant contributor. The model study showed agreement in the spatial distributions of simulated MPs with those of the observations. The largest impact of MPs in the urban center area on the malodor pollution in its residential areas occurred at S1, S2, and S3 sites during nighttime, while that of MPs in the Ungsang area occurred at S6 and S8 sites. This may be caused mainly by the high MP emissions and in part by wind conditions (prevailing northeasterly winds with low wind speeds of 2-3 m/s).

**Key Words :** Malodor pollutant, H<sub>2</sub>S, CH<sub>3</sub>SH, CALPUFF, High emission, Wind condition

### 1. 서 론

일반적으로 악취물질은 산업 활동이 활발한 대도시의 공단 및 매립 지역을 통해서 대기 중으로 많이

배출되고 있으며, 또한 축산농가 및 축산폐기물 처리시설 등과 같은 시골의 특정 배출원을 통해서도 배출되기도 한다. 이러한 다양한 환경(공단, 매립, 폐기물처리, 축산농업, 주거 환경 등)에서의 주요 악취물질로는 황화수소( $H_2S$ ), 암모니아( $NH_3$ ), 그리고 메틸머캅탄( $CH_3SH$ ) 등이 있다<sup>1~4</sup>). 그 중에서도 주요 악취물질인  $H_2S$  배출량은 도시의 오염지역이 자연환경 지역(예, 습지지역에서  $0.12 \text{ g/m}^2/\text{y}$  배출량)과 비교하여 약 10배 정도 높게 나타났으며<sup>5</sup>), 우리나라 연안 매립지에서는 무려  $1.8 \text{ g/m}^2/\text{y}$  정도 추정되었다<sup>6</sup>). 이것은 공단 및 매립 환경에서 발생하는 가스 생성물 중 가장 큰 비중을 차지한다<sup>6~8</sup>). 또한 우리나라 안산시 반월 시화공단에서의 악취강도 분석결과,  $H_2S$ 와  $CH_3SH$ 가 다른 황 악취물질과 비교하여 훨씬 높은 취기강도를 나타낸 물질로 밝혀진 바 있다<sup>9</sup>).

대부분의 악취오염은 다양한 배출원에서의 악취 유발물질에 의한 영향뿐 아니라 지역 내 국지적인 기상조건(기온, 풍향, 풍속, 습도 등)에 따라 크게 영향을 받는다<sup>10,11</sup>). 예를 들어, 도시에서의 악취도는 기온에 따라 변화하면서 서로 비례관계를 나타내고 약한 풍속에서 보다 쉽게 악취가 감지되며, 주간에 주풍의 풍하측을 중심으로 악취강도가 높게 나타났다<sup>10</sup>). 또한 공업도시인 울산지역에서의 악취와 기상특성과의 비교에서 대체로 악취발생은 높은 기온과 습도 조건일 때 빈번하게 나타났으며, 봄철 이동성 고기압의 영향으로 인한 맑은 날과 여름철 저기압의 영향으로 인한 흐린 날에도 약한 풍속 조건과 함께 악취오염이 발생한다고 하였다<sup>11</sup>).

최근 들어, 악취물질은 산업이 발달하고 공장이 들어설수록 점차 그 피해는 늘어가고 있으며, 특히 사업장이 밀집되어 있는 공단지역에서 발생하는 악취물질이 주변지역으로의 확산으로 인해 주민들로부터 민원이 끊이지 않고 있다<sup>12,13</sup>). 많은 관련 연구자들은 이러한 악취물질의 피해를 줄이기 위하여 다양한 측정 분석을 통한 악취 원인물질에 대한 규명과 악취물질의 배출 특성을 평가하는 등의 연구를 수행하여 왔다<sup>6,9,14~16</sup>). 또한 배출된 악취물질이 주변 지역에 미치는 영향을 정량적으로 해석하기 위한 모델링 기법에 대한 연구도 일부 수행되었다<sup>4,17,18</sup>). 예를 들어, 축산농가와 비료공장의 분뇨처리시설에서 발생하는 악취가 주변지역으로 미치는 영향을 Puff 모델로 분석한 결과 대기가 안정한 저녁 또는 새벽

에 높은 악취도를 보였으며, 대부분의 악취배출원 인접지역에서는 약 2도 정도의 악취도가, 8 km 이내 범위에서는 1도 정도의 악취도가 추정되었다<sup>4</sup>). 또한 안산시 반월 산단지역을 중심으로 악취물질의 확산모델링(CALPUFF 모델)을 수행한 결과 모델값이 측정된 악취도와 서로 잘 일치하는 것을 확인하였다<sup>17</sup>).

현재까지 악취 배출원을 중심으로 다양한 측정 및 분석 연구와 함께 일부 모델링 연구가 수행되었음에도 불구하고, 여전히 도시오염 환경에서 악취 원인물질의 정량분석 및 주변지역으로의 영향평가에 대한 심도 깊은 연구는 미비한 실정이다. 또한 이제까지 대부분의 조사연구는 악취 민원 제기지역의 부지경계선을 중심으로 주로 이루어졌을 뿐 사업장 내부시설에서 발생하는 악취물질에 대한 연구 사례는 그다지 많지 않다. 본 연구에서는 양산시의 악취 민원이 심한 오염지역의 여러 사업소(8개 사업소) 내 배출시설에서 주요 황 악취물질의 측정을 실시하였으며, 이를 통해 각 배출지점별 악취물질의 강도와 배출량을 산정하였다. 또한 산정된 배출 정보를 대기확산모델의 입력 자료로 이용하여 각 물질별 시·공간적 농도 분포 특성 및 인근 주거지역으로의 미치는 영향에 대해 살펴보았다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 대상지역, 자료, 샘플링 및 분석 방법

본 연구의 대상지역인 양산은 1996년 시로 승격된 이후, 기존의 산업단지(전체 토지이용도의 30% 이상)와 함께 신도시 조성 계획 하에 주거지역(약 50%)이 발달하였다. 도시 전체가 이러한 산업단지(어곡, 산막, 양산, 북정, 웅상, 웅비 산단)와 주거지역, 공공건물과 높은 산 등으로 둘러싸여 있는 준폐쇄형의 계곡지역이며, 도시의 공단지역은 대부분 화학약품제조, 가죽제조, 가공금속, 폐기물처리 등 악취를 발생시키는 업종들이 밀집되어 있다. 또한 양산도심 부근의 여러 산단은 북동쪽에서 남서쪽으로 큰 도로를 따라 위치하고 있으며, 산단으로부터 약 3~4 km 남쪽으로 떨어진 곳에 도심의 주거지역이 위치한다. 반면 웅상 지역 부근의 여러 산단은 크고 작은 산의 골을 따라 위치하고 있으며 산단 바로 인근(1~2 km 이내)에 주거지역이 분포하고 있

다(Fig. 1). 따라서 두 지역으로 나누어진 여러 산단 주변에서는 다양한 오염원과 지형적 특징으로 인한 악취물질의 고농도현상이 예상된다.

본 연구에서는 2008년 여름철 동안 두 지역(양산 도심 및 웅상 지역)의 여러 산단 내 사업장의 공정 조사를 통해 악취 민원이 빈발하고 악취물질 발생이 많을 것으로 예상되는 8개 배출사업소 지점(S1~S5: 양산도심 지역, S6~S8: 웅상 지역)을 선정하여, 2008년 가을철 사례일(2008년 10월 21일)에 야외측정을 실시하였으며 측정된 악취물질의 시·공간적 농도 분포를 분석하였다. 또한 악취 측정 사례일의 기상상태를 살펴보기 위하여 주요 기상요소인 기온, 풍향, 풍속, 강수량의 시계열 변화를 분석하였다. 분석에 이용된 기상요소의 관측지점은 현재 기상청 산하에서 지속적으로 운영 중에 있는 양산도심 지역의 중앙동(M1)과 웅상 지역의 서창동 지점(M2)이다(Fig. 1). 이 두 지점은 야외측정 장소인 배출사업소로부터 큰 장애물 없이 중앙대로를 따라 각각 남쪽 방향으로 약 3 km(양산도심 지역의 산단으로부터)와 1 km 이내(웅상 지역의 산단으로부터)에 인접한 지점으로서 실제 측정 장소의 기상상태를 해석하는데 큰 무리는 없을 것으로 판단된다. 또한 이 두 지점은 배출사업소로부터 풍하측에 위치하고 있으므로 모델링을 통한 악취물질의 인근지역으로의 확산 및 영향을 분석하기에 매우 적절한 지점이라고 판단된다.

선정된 측정지점인 8개 배출사업소(S1~S8)는 S1~S3: 어곡 산단 주변의 타이어 공장, S4: 폐수처리장(어곡 산단으로부터 남쪽으로 약 3 km 정도 떨어진 지점), S5: 정유공장(산막 산단 주변), S6: 제지공장 및 소각장(웅상 산단 주변), S7~S8: 축산농장(웅상 산단으로부터 북쪽으로 약 1 km 떨어진 지점)이

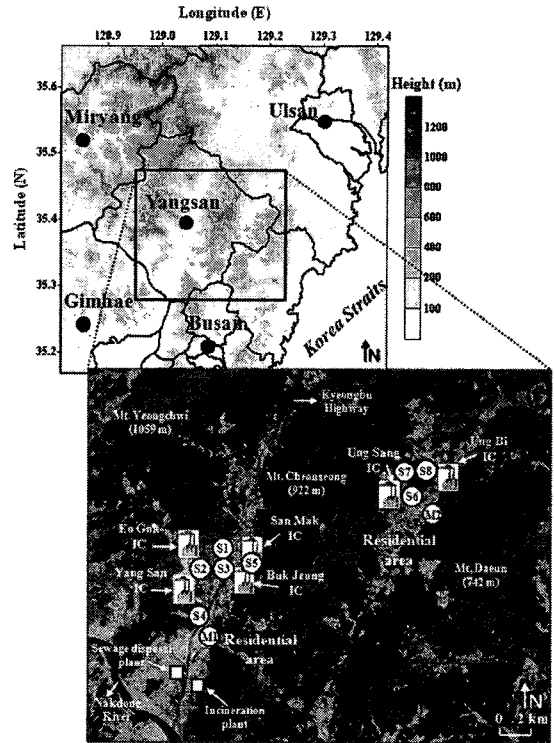


Fig. 1. Study domain including 8 sampling sites (S1-S8) for four malodor pollutants (MPs) in Yangsan city. Individual sampling locations of the study area are assigned as: (1) S1-S3 = tire plants; (2) S4 = waste water disposal plant; (3) S5 = oil refinery; (4) S6 = paper mill and incineration plant; (5) S7-S8 = livestock feedlots. M1-M2 indicate meteorological monitoring sites (M1: Jung Ang, M2: Seo Chang).

다. 연구기간 동안 측정된 악취물질의 종류 및 측정지점의 위치에 대한 자세한 정보는 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다. 8개 사업소에서 측정된 주요 악취물질은 H<sub>2</sub>S, CH<sub>3</sub>SH, DMS(dimethyl sulfide, 황화메

Table 1. A full list of four malodor pollutants (MPs) investigated during the field campaign held in several industrial complexes of Yangsan city

Malodor pollutant	Analytical method
Name	Molecular formula
Hydrogen sulfide	H <sub>2</sub> S
Methyl mercaptan	CH <sub>3</sub> SH
Dimethyl sulfide (DMS)	CH <sub>3</sub> SCH <sub>3</sub>
Dimethyl disulfide (DMDS)	CH <sub>3</sub> SSCH <sub>3</sub>
	PAB+GC/FPD*

\*PAB-sampling by polyester aluminum bag, GC-gas chromatography, FPD-flame photometric detector.

틸), 그리고 DMDS(dimethyl disulfide, 이황화메틸)이며, S1~S5 지점은 주로 오후시간대(13:10~16:20 LST)에 S6~S8 지점은 오전시간대(09:00~11:10 LST)에 각각 하루 1회 측정되었다.

대상지역 사업소에서의 악취 오염물질 샘플링(시료 채취) 및 분석 방법에 대한 세부 내용은 다음과 같이 요약된다. 샘플링 방법의 순서는 먼저 폴리에스테르 알루미늄 주머니(PAB: polyester aluminum bag)를 흡인상자에 넣어 불소수지제 콕크에 접속한다. 불소수지제 콕크 및 흡인 콕크가 열려있는 것을 확인한 후 흡인 콕크에 접속한 흡인 펌프를 작동시켜 흡인상자를 감압하여 PAB에 시료공기를 샘플링한다. 유량은 흡인 콕크 및 흡인 펌프로 조절하고 5분 이내 일정 유량으로 채취한다. 먼지가 많은 공기시료는 시료채취관 초기 유입부에 필터를 설치하여 시료채취시 먼지가 제거되게 한다. 시료공기 샘플링장치를 이용하여 PAB에 시료를 1회 이상 채우고 배기한 후 5 L 이상을 샘플링한다. 채취한 시료는 차광용기와 차광막(예, 아이스박스나 검은 봉지 등)을 사용하여 운반 및 보관한다. 이때 채취한 시료의 손실을 최소화하기 위하여 최대한 신속(24시간 이내)하게 실험실로 운반한다<sup>9,18</sup>. 위와 같은 방법으로 채취된 시료공기는 GC/MS(Gas Chromatography/Mass Spectrometer) 시스템과 GC/FPD(Flame Photometric Detector)에 의해서 개별적으로 악취물질의 농도를 산출한다. 악취물질의 샘플링 및 분석조건에 대한 보다 상세한 설명은 Table 2에 나타내었다.

## 2.2. 배출량 산정 및 모델 구성

일반적으로 악취성 기체는 다른 가스상 오염물질과 달리 광화학 반응이 잘 일어나지 않는 물질이므로 대부분의 악취모델링으로 물질의 수송 및 확산 모

가 우수한 CALPUFF 모델을 주로 이용한다<sup>4,17,19</sup>. 따라서 본 연구에서는 대상지역 8개 사업소에서 측정된 악취물질이 주변지역으로 미치는 영향을 평가하기 위하여 대기확산모델(CALPUFF 모델)을 이용한 수치모의를 수행하였다. 또한 대기확산 모델에 필요한 초기 기상 입력자료는 3차원 기상장 모델인 MM5의 계산된 결과값을 이용하였다.

본 연구에 이용된 CALPUFF 모델은 EPA(Environmental Protection Agency)와 관련 연구자들의 평가를 통해 유용가능성을 인정받은 대기질 모델로서<sup>20</sup>, 복잡 지형 알고리즘(complex terrain algorithms), 건물 후면 침강(building downwash), 플룸 혼중(plume fumigation) 등의 여러 효과는 물론 화학적 제거(chemical removal)와 습·건식 침적(wet and dry deposition)의 효과도 고려할 수 있는 특징이 있다. CALPUFF 모델 수행은 CALMET과 CALPUFF, CALPOST의 크게 세 부분으로 구성되어 있다<sup>21</sup>. CALMET은 3차원 온도 및 바람장과 2차원의 혼합층(mixing layer), 지표면 특성(surface characteristics), 확산 특성(dispersion properties) 등을 모의하는 기상장 모델이며, CALMET의 초기 기상 입력자료는 MM5의 수치모의 결과를 이용한다. MM5의 전체 계산영역은 23개의 연직층과 81 km 수평 해상도로 38×40의 격자크기를 구성한다(중심 위경도: 37.3°, 126.3°). 또한 전체 영역을 5개의 세부 영역으로 단방향 등지격자(one-way nesting)를 사용하였으며, 가장 작은 영역은 1 km 수평 해상도로 88×88의 격자크기로 구성하였다. 모델링 수행시 계산 안정화를 위해 48시간의 초기화 시간을 고려하였다. 수치모의에 이용된 중규모 기상장 모델의 초기 및 경계 입력 자료로는 기상청에서 제공하는 30 km 해상도의 RDAPS(Regional Data Assimilation and Prediction

Table 2. Analytical conditions for determination of target MPs during the study period

Parameters	Analytical conditions
Sampler	PAB
Instrument (detector)	GC-17A (FPD), Shimadzu, Japan
Column	CP-Sil 5 CB (50 m × 0.53 mm × 5 μm)
Detector temp.	250°C
Cold trap	Low = -180°C, high = 80°C (holding time = 3 min)
Oven temp. program	Initially 40°C for 4 min 1 <sup>st</sup> heat up rate of 7°C min <sup>-1</sup> to 80°C (holding time = 5 min) 2 <sup>nd</sup> heat up rate of 20°C min <sup>-1</sup> to 190°C (holding time = 5min)

System)를 이용하였으며, 주변지역에서 관측된 기상 특성을 반영하기 위해 자료동화 방법(25개 지점의 기상관측자료)을 적용하였다. 한편, 지표면 자료는 기존의 모델에서 일반적으로 제공되던 USGS(US Geological Survey)의 도시 영역 자료가 본 연구의 대상지역인 양산시의 도시 상태를 잘 반영하지 못하므로 여기서는 환경부에서 제공한 토지피복도 자료를 고려하여 대상지역의 도시 영역의 입력 자료를 개선시켜 이용하였다<sup>22)</sup>.

CALPUFF 모델 시스템에 적용하기 위한 악취물질의 배출량 산정 방법은 다음과 같이 요약된다. 먼저 대상지역 내의 8개 배출사업소(S1~S8)를 8개의 점오염원으로 지정하고 이를 모델 내의 8개 격자(1 km × 1 km 격자간격)에 맞추어 결합하였다. 그리고 각 사업소에서 측정된 배출농도와 배출유량(= 배출속도 × 배출구 면적) 등을 이용하여 대상 악취물질의 배출량을 산정하고 이를 모델의 입력 자료로 이용하였다. 각 사업소별 측정된 배출농도와 격자별로 산출된 배출량에 대한 자세한 정보는 Tables 3과 4에 나타내었다. 전반적으로 대부분의 악취물질이 타이어 공장(특히, S1 지점)에서 가장 높은 배출농도가 측정되었으며, 그 중에서 H<sub>2</sub>S는 모든 지점에서 고농도(1300 ppb 이상)를 나타내었다. 각 물질별 최고농도를 보면, H<sub>2</sub>S는 S5(제지공장 및 소각장)에서 약 1500 ppb, CH<sub>3</sub>SH는 S2(타이어 공장)에서 약 650 ppb, 그리고 DMS와 DMDS는 둘 다 S1(타이어 공장)에서 각각 약 560 ppb와 450 ppb를 나타냈다(Table 3). 또한 DMDS를 비롯하여 일부는 검출이 되지 않은 지점도 포함하고 있었다. 이렇게 검출되지 않은

지점의 악취물질 농도는 각 물질별 검출 한계의 1/2 값을 적용하여 배출량 산정 및 모델링 수행에 적용하였다<sup>8,23)</sup>. 4종의 악취물질별 검출 한계는 H<sub>2</sub>S가 0.2 ppb, CH<sub>3</sub>SH가 0.3 ppb, DMS가 0.6 ppb, 그리고 DMDS가 1 ppb이다. 한편, 각 물질별 최고 배출량은 H<sub>2</sub>S가 28.5 g/sec (중간값은 7.0 g/sec)로 계산되었으며, CH<sub>3</sub>SH는 15.5(0.6), DMS는 22.3(0.6), DMDS는 27.4(0.01)로 산출되었다(Table 4). 모델링 수행에 있어 대기확산과 수송과정을 보다 정확하게 모의하기 위하여 각 물질별 산출된 배출량에 하루 24시간 동안 매시간별로 할당계수(범위가 0.012~0.061)를 적용하였다. 배출량에 대한 시간 할당계수의 정보는 미국 환경부(EPA: Environmental Protection Agency)에서 제공하는 참고자료를 이용하였다<sup>24)</sup>. 그러나 한정된 지점(8개 지점)으로부터 산정된 악취 배출량 정보와 여러 화학작용을 제외한 모델 결과를 통해 전 대상영역의 시·공간적 농도 분포를 모두 해석하기에는 한계점이 있으므로, 본 연구에서는 대상 악취 배출원으로부터 주변지역으로의 단순 확산을 통한 오염물질의 영향을 분석하는데 초점을 맞추었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 측정 사례일 기상 특성

일반적으로 악취오염은 대상지역 내 배출원(공단, 매립, 소각시설 등)으로부터의 영향이 가장 크며, 또한 그 지역 고유의 국지기상 조건에 따라서 직·간접적으로 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서는 악취 측정 사례일의 기상상태를 면밀히 살펴보

**Table 3.** Temporal and spatial information on the sample acquisition of four MPs during the study period (in ppb)

Site no.	Time (LST)	Malodor pollutant			
		H <sub>2</sub> S (60) <sup>a</sup>	CH <sub>3</sub> SH (4)	DMS (50)	DMDS (30)
S1	15:00-15:40	1309	503	559	453
S2	14:30-15:00	1401	649	317	N.D.
S3	13:50-14:20	1423	N.D. <sup>b</sup>	505	N.D.
S4	15:50-16:20	1375	N.D.	N.D.	N.D.
S5	13:10-13:30	1504	410	N.D.	N.D.
S6	09:00-09:40	1384	424	N.D.	N.D.
S7	10:40-11:10	1868	N.D.	431	N.D.
S8	10:00-10:30	1388	N.D.	394	N.D.

<sup>a</sup>An allowable exhaust standard (ppb) for each of the four MPs; <sup>b</sup>N.D.: Not detected. For the model study, one half of detection limit (DL) values were used. The DL values for all MPs were found to be 0.2 (H<sub>2</sub>S), 0.3 (CH<sub>3</sub>SH), 0.6 (DMS), and 1 ppb (DMDS).

**Table 4.** Basic information on the emissions of four MPs at 8 CALPUFF grid locations in the study domain

Grid no.	X UTM (km)	Y UTM (km)	Stack height (m)	Stack diameter (m)	Exit temp. (K)	Exit velocity (m/s)	Emission rates (g/sec) <sup>*</sup>			
							H <sub>2</sub> S	CH <sub>3</sub> SH	DMS	DMDS
1	505.0	3917.2	12.3	0.8	307.6	19.7	2.852E+01	1.554E+01	2.230E+01	2.740E+01
2	504.0	3916.2	17.0	1.9	311.0	3.9	1.205E+01	7.881E+00	4.972E+00	1.189E-02
3	505.0	3916.2	13.8	1.4	408.0	19.0	2.620E+01	3.899E-03	1.696E+01	2.545E-02
4	504.0	3914.2	15.0	15.0	420.0	7.9	3.406E+00	5.245E-04	1.355E-03	3.424E-03
5	506.0	3917.2	78.5	2.4	453.7	6.7	1.058E+01	4.072E+00	3.849E-03	9.726E-03
6	516.0	3921.2	11.5	1.6	403.0	18.0	2.555E+00	1.105E+00	1.010E-03	2.552E-03
7	516.0	3922.2	10.0	15.0	297.3	3.9	1.523E+00	1.726E-04	6.407E-01	1.127E-03
8	517.0	3922.2	10.0	15.0	297.3	3.9	1.131E+00	1.726E-04	5.857E-01	1.127E-03

<sup>\*</sup>The daily mean emission rate for each of the four MPs was determined with emission concentrations and exit velocity in the emission sources.

기 위해 양산도심 지역에 포함되는 중앙동 지점과 응상 지역의 서창동 지점에서 사례 당일 및 사례일 전·후(2008년 10월 20~22일)의 주요 기상요소인 기온, 풍향, 풍속, 강수량의 시계열 분포를 분석하였다(Fig. 2).

전반적으로 두 지점 모두 악취 측정 사례일의 새벽과 야간에 다소 높은 기온과 약한 풍속 등 악취발생에 유리한 기상조건을 나타내고 있다. 기상요소별로 보면, 사례 당일의 기온변화는 사례 전날과 유사한 패턴을 나타내지만 야간의 기온분포는 전날보다 상당히 높은 수치(18~20°C)를 나타내었다(특히 중앙동 지점). 사례일의 풍속과 풍향 변화를 살펴보면, 사례일 전·후와 비교하여 두 지점 모두 풍향은 비슷한 패턴을 보이지만 풍속은 다소 큰 차이를 보였다. 예를 들어, 사례 당일 두 지점 모두 새벽과 야간에 약한 풍속(중앙동은 약 2~3 m/s, 서창동은 약 1~2 m/s 정도)의 북동풍 계열의 바람이 탁월하였다. 이러한 북동풍 계열의 바람으로 인해 악취 측정 장소(공단 밀집지역)의 남쪽 방향에 위치한 주거지역에서 느끼는 악취오염의 피해는 상당할 것으로 예상된다. 이것은 선행연구<sup>10,11)</sup>에서 나타난 높은 기온과 약한 풍속의 조건에서 악취 발생빈도 및 악취민원이 활발하다는 연구결과와 매우 유사한 경향을 보였다. 한편 사례 당일과 전날에는 강수량이 기록되지 않았으며 다음 날인 22일의 오전과 오후에 한 두 차례 소량(1 mm 이하)의 강우가 관측되었다.

### 3.2. 악취물질의 강도 분석

본 연구에서는 양산도심 및 응상 지역에 포함된 각 배출사업소에서 측정된 악취물질의 강도를 평가

하기 위해 Nagata<sup>25)</sup>에 의해서 소개된 수치 방정식을 적용하였다. 즉, 4종의 악취물질 농도와 악취강도사이의 대수관계는 다음과 같이 요약된다.

$$\text{H}_2\text{S}: Y = -2.850 \log X + 4.14$$

$$\text{CH}_3\text{SH}: Y = -3.750 \log X + 5.99$$

$$\text{DMS}: Y = -2.352 \log X + 4.06$$

$$\text{DMDS}: Y = -2.955 \log X + 4.51$$

여기서, Y는 악취강도를 나타내고 X는 악취물질의 측정 농도(ppm)를 나타낸다. 이는 악취물질의 농도가 감소하여도 악취강도는 농도의 대수에 비례하기 때문에 농도감소에 상응하는 양만큼의 세기로 감소하지는 않는다. 또한 동일한 농도감소에서도 물질별로 체감되는 악취강도는 다를 수 있음을 의미한다. 즉, 위의 방정식을 통해 측정된 각 악취물질의 농도는 해당되는 악취강도(1~5 사이의 강도 지수)로 전환된다. 악취강도, 해당 악취물질의 농도, 그리고 악취강도에 해당하는 냄새 세기 등에 대한 상세한 설명은 선행연구에 잘 나타나 있다<sup>9,26)</sup>.

Fig. 3에서 볼 수 있듯이, 전반적으로 모든 배출사업소(S1~S8)에서 H<sub>2</sub>S의 악취강도가 주로 높은 편이었지만(강도 지수 4), 최고 악취강도는 CH<sub>3</sub>SH(강도 지수 5)에서 나타났다. 또한 양산도심 지역에서는 타이어 공장(S1, S2 지점)에서 모든 악취물질에 대해 높은 악취강도를 나타내며(강도 지수 3.5~5), 응상 지역에서는 제지공장 및 소각장(S6)에서 H<sub>2</sub>S와 CH<sub>3</sub>SH가 가장 높은 악취강도를 보였다(강도 지수 4~5). 개별 악취물질에 대해 살펴보면, CH<sub>3</sub>SH 악취강도는 양산도심 지역의 타이어 공장(S1, S2)

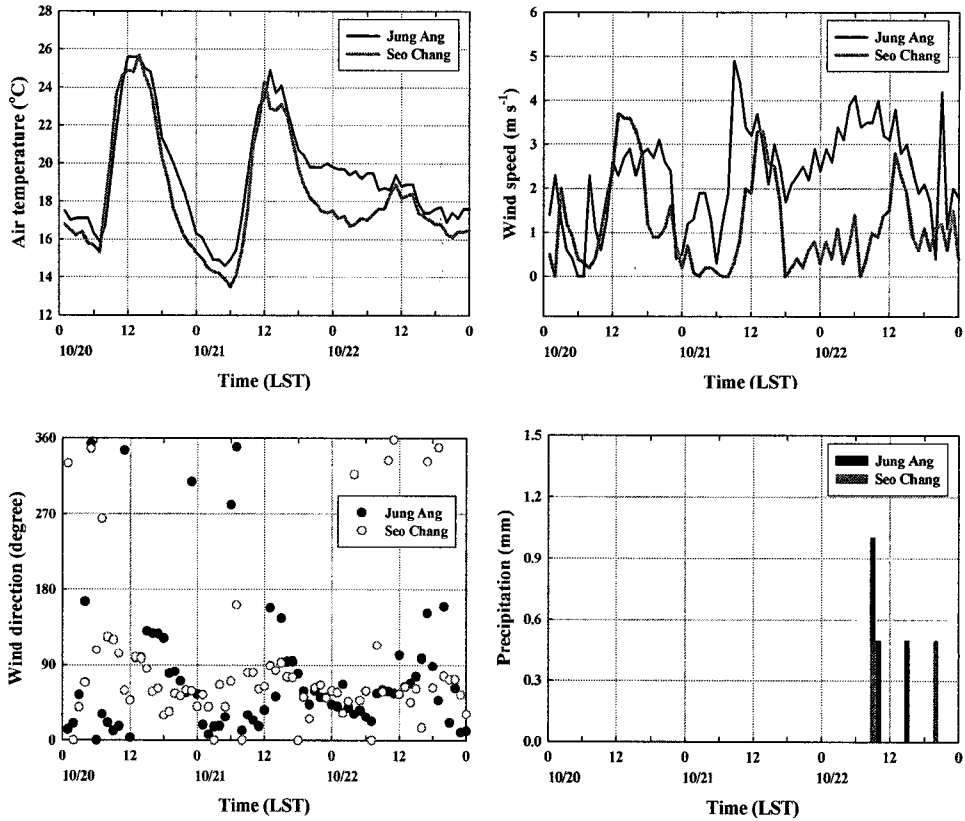


Fig. 2. Time series plot of air temperature (°C), wind speed (m/s) and direction (degree), and precipitation (mm) at two weather stations (Jung Ang and Seo Chang stations) close to the 8 sampling sites during the period of 20-22 October 2008.

및 정유공장(S5) 지점과 웅상 지역의 제지공장 및 소각장(S6) 지점에서 가장 높게 나타났다. DMS 악취강도는 양산도심 지역의 타이어 공장(S1, S2, S3)에서 가장 높게 나타났고, 웅상 지역의 축산농장(S7, S8) 지점에서 높은 강도를 보였다(강도 지수 3.5). 한편, DMDS는 타이어 공장(S1)에서 높은 악취강도(강도 지수 4)를 나타낸 반면, 다른 모든 지점에서는 매우 낮은 편이었다(강도 지수 1).

### 3.3. 악취물질의 시·공간적 농도 분포 분석

본 연구에서는 악취물질의 시·공간적인 농도 분포 특성을 분석하기 위해 측정 사례일(2008년 10월 21일)을 중심으로 악취물질 중 H<sub>2</sub>S의 수평 농도와 바람벡터 분포를 살펴보았다(Fig. 4와 Table 5). 4종의 악취물질 중 가장 고농도를 나타낸 물질이 H<sub>2</sub>S이므로 이에 대한 모델링 결과를 중점적으로 분석

하였다. 다른 3종의 악취물질(CH<sub>3</sub>SH, DMS, DMDS)의 공간 분포는 H<sub>2</sub>S의 경우와 동일한 바람조건 대기확산 패턴이므로 따로 그림으로 제시하지 않았지만, 모델을 통한 악취물질의 최고농도에 대한 분석은 양산도심 및 웅상 지역으로 구분하여 Table 5에 나타내었다. 또한 악취오염이 심한 시간대와 약한 시간대의 공간적 농도 분포를 살펴보기 위해 이른 아침(0600 LST), 정오(1200 LST), 그리고 야간(1800와 2100 LST) 시간대로 구분하여 나타내었다. Fig. 4에서 알 수 있듯이, 전반적으로 각 사업소에서 배출된 악취물질의 공간적인 분포 패턴은 이 지역에서 탁월하게 부는 바람의 특징(주로 북동풍 계열의 바람이 지배적임)에 따라 크게 좌우됨을 확인 할 수 있다. 또한 하루 중 주간보다는 이른 아침과 야간 시간에 그리고 웅상 지역보다는 양산도심 지역에서

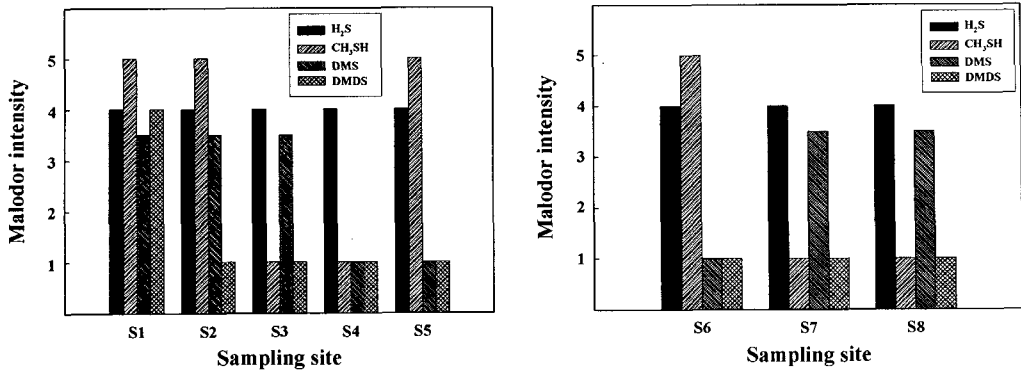


Fig. 3. Relative contribution of each MP to malodor intensity is compared for 8 sampling sites during the study period.

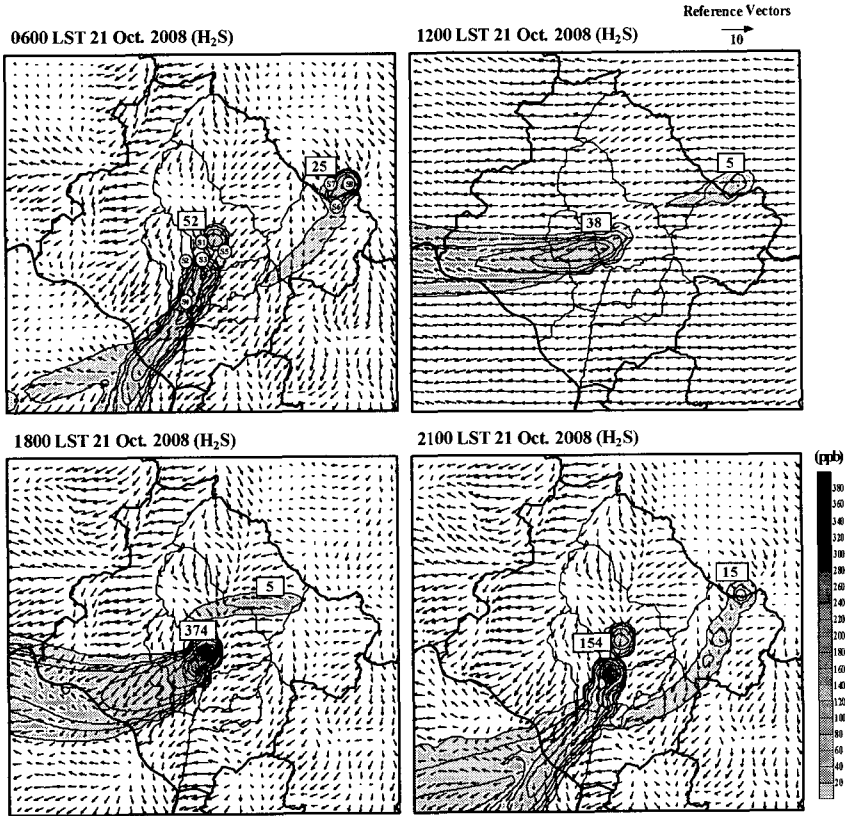


Fig. 4. Horizontal distributions of the simulated wind vectors (m/s) and H<sub>2</sub>S concentrations (ppb) at 06:00, 12:00, 18:00, and 21:00 LST during the study period. The values within rectangle indicate the simulated H<sub>2</sub>S concentrations.

대부분 높은 악취농도가 모사되었다.

시간별 농도 분석 결과, 0600 LST에는 양산도심 및 웅상 지역 모두 북동풍의 풍계가 탁월하여 대부분의 악취오염(최고 55 ppb의 H<sub>2</sub>S 농도)은 배출사업

소를 중심으로 남쪽 방향에 위치한 주거 및 교외 지역으로 확산되어 이 지역의 악취오염에 다소 영향을 준 것으로 사료된다. 1200 LST에는 일사에 의한 혼합층 고도의 상승과 함께 대류활동이 활발하여



**Table 5.** Maximum concentrations of simulated MPs in the urban center and Ungsang areas during the study period (in ppb)

Malodor pollutant	Urban center area				Ungsang area			
	06:00	12:00	18:00	21:00	06:00	12:00	18:00	21:00
H <sub>2</sub> S	52	38	374	154	25	5	5	15
CH <sub>3</sub> SH	18	12	144	58	6	1	3	3
DMS	22	13	160	65	5	< 1	< 1	< 1
DMDS	15	9	129	52	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1

이른 아침과 야간보다는 대기 중 혼합 및 희석효과가 보다 뚜렷하게 나타나므로 상대적으로 악취물질의 농도는 감소하게 된다(최고 40 ppb의 H<sub>2</sub>S 농도). 일몰 이후인 1800과 2100 LST에는 낮 동안에 발달 및 성장되었던 혼합층의 고도가 다시 낮아지게 되고, 이러한 혼합층의 감소로 인해 대기 중 혼합 및 희석효과는 감소하며 또한 안정한 대기를 이루게 되어 확산효과의 모습도 뚜렷하지 않게 된다. 따라서 낮 동안의 모사된 농도와 비교하여 상대적으로 높은 악취오염이 나타났으며(특히, 1800 LST에 최고 375 ppb 정도의 H<sub>2</sub>S 농도), 오전 시간대인 0600 LST와 마찬가지로 탁월한 북동풍 계열의 바람으로 인해 주요 공단지역의 남쪽으로 위치하고 있는 주거지역에 보다 심한 악취오염뿐만 아니라 이 지역의 대기질에도 매우 큰 영향이 나타남을 시사한다. 다른 악취물질의 시·공간적 농도 분포를 보면 H<sub>2</sub>S와 매우 유사한 공간 분포를 나타내고 있으며(그림 제외), H<sub>2</sub>S와 마찬가지로 웅상 지역보다는 양산도심 지역에서 야간 시간대(1800과 2100 LST)를 중심으로 가장 높은 악취오염을 나타냈다. 한편, 웅상 지역의 악취오염은 매우 낮은 편이고 H<sub>2</sub>S를 제외하고는 대부분 6 ppb(CH<sub>3</sub>SH) 이하의 낮은 농도를 나타냈다(Table 5).

한편, 양산도심 및 웅상 지역에 위치한 각 배출사업소(S1~S8)로부터 인근의 주거지역(중앙동과 서창)에 미치는 악취오염의 영향을 살펴보기 위하여 각 사업소와 중앙 및 서창동 지점에 해당되는 악취물질 농도의 시계열 변화를 분석하였다(Fig. 5). 앞에서 언급했듯이, 중앙동 지점은 양산도심 지역으로부터 풍하측에 위치한 주거밀집지역을 나타내며(남쪽으로 약 3 km 정도 떨어진 지점), 서창은 웅상 지역으로부터 인근의 풍하측에 위치한 주거밀집지역을 나타낸다(남쪽으로 약 1 km 이내). 전반적으로

양산도심 지역에 대해서는 타이어 공장(S1, S2, S3)에서 배출된 악취물질이 인근 주거지역(중앙동)으로의 가장 큰 영향(약 30~40%)을 나타냈으며, 이때 악취물질의 농도는 최고 90 ppb까지 나타났다. 반면, 웅상 지역에 대해서는 두 곳의 사업소(S6, S8)에서 배출된 악취물질이 인근 주거지역(서창동)으로의 가장 큰 영향(약 50% 정도)을 나타냈으며, 대부분 20 ppb 이하의 낮은 농도 분포를 보여 실제 이 지역에서의 악취오염 영향은 양산도심 지역과 비교하여 상대적으로 매우 작은 편이었다(Fig. 5). 아울러 대상지역은 대부분 약한 풍속(약 2~3 m/s 정도)의 북동풍 계열 바람이 탁월하므로(Fig. 4) 양산도심 지역의 사업소로부터 배출된 악취물질은 인근 풍하측의 중앙동 지점에 미치는 영향이 직접적으로 매우 큰 반면, 산 오른쪽 너머 웅상 지역의 서창에 미치는 영향은 거의 나타나지 않았다. 그러나 웅상 지역의 사업소로부터 배출된 악취물질은 인근 풍하측인 서창에 미치는 직접적인 큰 영향과 함께 산 왼쪽 너머 양산도심 지역의 중앙동에 미치는 간접적인 영향이 매우 작게 나타났음을 확인 할 수 있었다. 한편, 양산도심 지역의 폐수처리장(S4)에서의 악취오염 영향은 뚜렷이 나타나지 않았다. 본 연구결과에 나타난 악취물질의 시·공간적인 특성은 주로 악취 배출원으로부터의 높은 배출량과 함께 일부 국지적 바람조건 등에 의한 복합적인 원인의 결과로 해석할 수 있으며, 주로 타이어 공장과 제지 공장 및 소각장이 대상지역의 가장 뚜렷한 악취 배출원임을 확인 할 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 대상지역 내 악취 민원이 빈발한 8개 배출사업소(양산도심 지역: S1~S5, 웅상 지역:

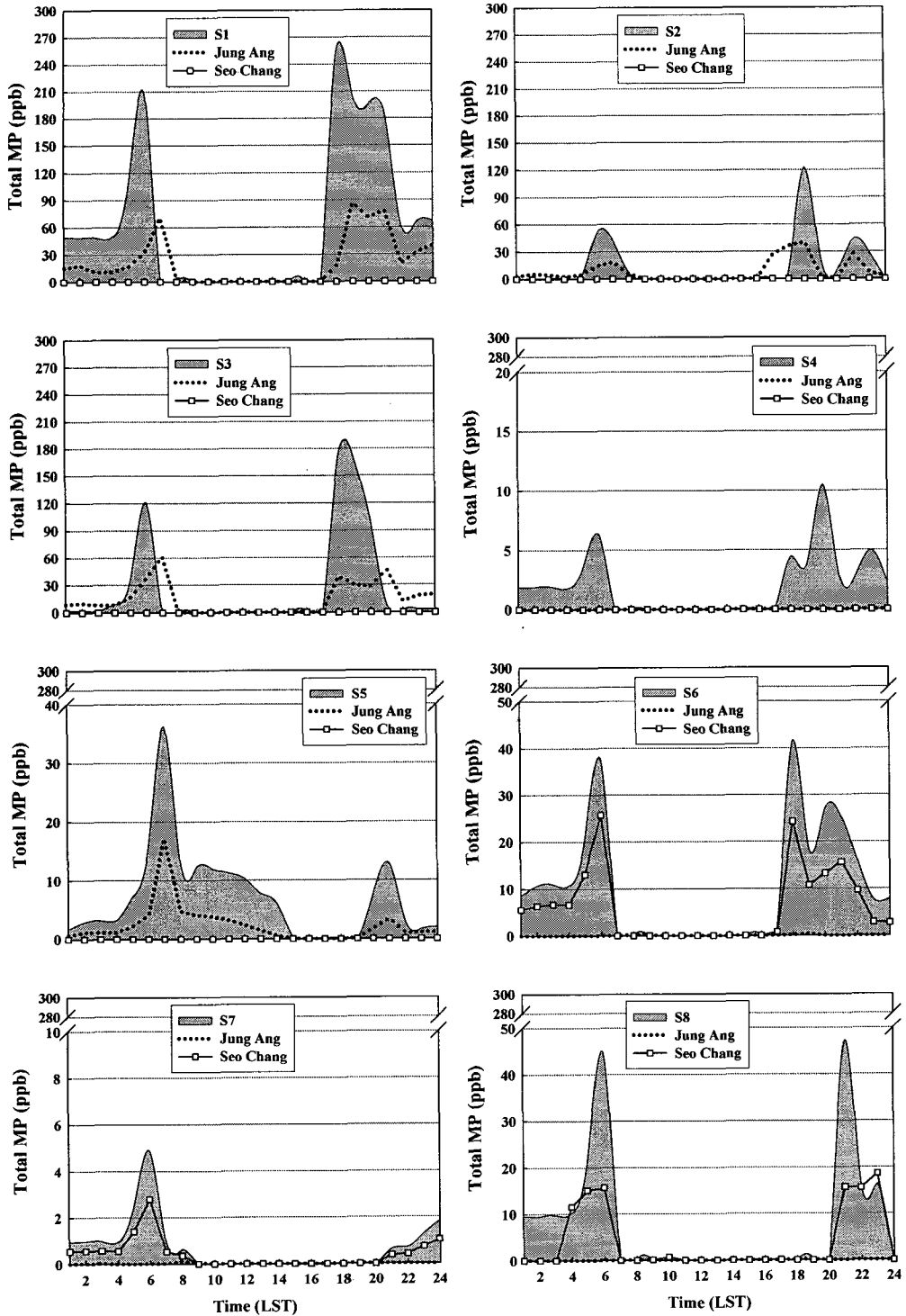


Fig. 5. Diurnal variation of hourly concentrations (ppb) of total MPs (including H<sub>2</sub>S, CH<sub>3</sub>SH, DMS, and DMDS) at each of 8 sampling sites versus the residential areas (Jung Ang and Seo Chang) during the study period.

S6~S8)를 중심으로 주요 악취물질( $H_2S$ ,  $CH_3SH$ , DMS, DMDS)의 야외 측정(2008년 10월 21일)을 실시하여 각 사업소별 배출농도의 특성을 분석하였다. 또한 측정기간 동안 대기확산모델링을 수행하여 각 악취물질별 농도 분포 및 인근 주거지역으로의 미치는 영향에 대해 살펴보았다.

연구기간인 10월 21일 사례는 새벽과 야간에 다소 높은 기온과 약한 풍속 등 전반적으로 악취 발생에 유리한 기상조건이 나타났다. 특히, 이 날의 주풍인 북동풍 계열의 바람은 악취 측정 장소인 8개 사업소에서 배출된 악취물질이 풍하측인 남쪽 주거지역에 상당히 큰 악취오염의 영향을 야기시켰다. 또한 각 사업소별 악취강도의 분석 결과, 양산도심 지역에서는 타이어 공장(S1, S2 지점)에서 대부분 악취물질의 높은 악취강도를 나타내며(강도 지수 3.5~5), 웅상 지역에서는 제지공장 및 소각장(S6)에서  $CH_3SH$ 와  $H_2S$ 가 가장 높은 악취강도를 보였다(강도 지수 4~5).

한편, 대상지역 내 악취오염의 분포는 대기확산 모델을 통한 각 악취물질별 시·공간적인 농도 분포와 유사함을 확인 할 수 있었다. 전반적으로 각 사업소에서 배출된 악취물질의 공간적인 분포 패턴은 이 지역에서 탁월하게 부는 주풍(주로 북동풍 계열의 바람이 지배적임)에 따라 크게 좌우됨을 알 수 있었고, 하루 중 주간보다는 이른 아침과 야간 시간에 그리고 웅상 지역보다는 양산도심 지역에서 대부분 높은 악취농도가 모사되었다. 또한 양산도심 및 웅상 지역에 위치한 각 배출사업소(S1~S8)로부터 인근의 주거지역(중앙동과 서창)에 미치는 악취오염의 영향을 분석한 결과, 양산도심 지역에서는 타이어 공장(S1, S2, S3)에서 배출된 악취물질이 인근 주거지역(중앙동)에 가장 큰 영향을 주었으며(약 30~40%), 모사된 악취물질의 농도는 최고 90 ppb까지 나타났다. 반면, 웅상 지역은 두 곳의 사업소(S6, S8)에서 배출된 악취물질이 인근 주거지역(서창동)에 가장 큰 영향을 끼쳤으며(약 50% 정도), 대부분 낮은 농도(< 20 ppb)를 나타내어 실제 이 지역에서의 악취오염 영향은 상대적으로 매우 작은 편이었다. 이것은 주로 악취 배출원으로부터의 높은 배출량 조건(타이어 공장과 제지 공장 및 소각장)과 함께 일부 인근의 국지적 바람조건 등에 의한 복합

적인 원인으로 해석할 수 있다. 그러나 본 연구는 특정 사례일 동안에 수행된 악취측정, 기상조건 분석 및 모델링 결과임을 감안할 때 대상지역 전역의 악취 배출원 및 악취오염 현황을 설명하기에는 여전히 부족한 관측자료 등으로 인해 여러 가지 문제점이 남아 있으며, 특히 도시규모 내 악취오염의 정확한 평가를 위해서는 향후 다양한 관측자료 및 배출정보 확보를 바탕으로 한 다양한 모델링 연구가 반드시 필요하다고 사료된다.

## 참고 문헌

- 1) Ito A., I. Takahashi, Y. Nagata, K. Chiba and H. Haraguchi, 2001, Spatial and temporal characteristics of urban atmospheric methane in Nagoya City, Japan: An assessment of the contribution from regional landfills, *Atmospheric Environment*, 35, 3137-3144.
- 2) Shon Z. H., K. H. Kim, E. C. Jeon, M. Y. Kim, Y. K. Kim and S. K. Song, 2005, Photochemistry of reduced sulfur compounds in a landfill environment, *Atmospheric Environment*, 39, 4803-4814.
- 3) Dincer F. and A. Muezzinoglu, 2006, Chemical characterization of odors due to some industrial and urban facilities in Izmir, Turkey, *Atmospheric Environment*, 40, 4210-4219.
- 4) 구윤서, 김성태, 최종혁, 오영숙, 설미진, 전승세, 안대희, 2006, 축산분뇨처리시설 발생 악취의 확산 모델링, *한국냄새환경학회지*, 5(1), 10-18.
- 5) Watts S. F., 2000, The mass budgets of carbonyl sulfide, dimethyl sulfide, carbon disulfide and hydrogen sulfide - phytoplankton production in the surface ocean, *Atmospheric Environment*, 34, 761-799.
- 6) Kim K. H., 2006, Emissions of reduced sulfur compounds (RSC) as a landfill gas (LFG): A comparative study of young and old landfill facilities, *Atmospheric Environment*, 40, 6567-6578.
- 7) Kim K. H., Y. J. Choi, E. C. Jeon and Y. Sunwoo, 2005, Characterization of malodorous sulfur compounds in landfill gas, *Atmospheric Environment*, 39, 1103-1112.
- 8) Song S. K., Z. H. Shon, K. H. Kim, S. C. Kim, Y. K. Kim and J. K. Kim, 2007, Monitoring of atmospheric reduced sulfur compounds and their oxidation in two coastal landfill areas, *Atmospheric Environment*, 41, 974-988.
- 9) Kim K. H., E. C. Jeon, Y. J. Choi and Y. S. Koo, 2006, The emission characteristics and the related malodor intensities of gaseous reduced sulfur compounds (RSC) in a large industrial complex, *Atmospheric*

- Environment, 40, 4478-4490.
- 10) 김형욱, 1997, 지형과 기상을 고려한 악취도의 공간분포해석, 석사학위논문, 환경대학원, 서울대학교, 서울, 80pp.
  - 11) 김유근, 2003, 울산의 대기오염 기상조건과 기상여건에 따른 대기오염실태조사, 2003년도 울산지역 환경기술개발센터 환경기술연구개발사업 최종보고서, 244pp.
  - 12) 송동웅, 송창근, 2004, 3차원 오일러리안 확산모델을 이용한 악취물질의 확산 연구, Journal of Environmental Science, 10(1), 1-10.
  - 13) Kim K. H., E. C. Jeon, Y. S. Koo, M. S. Im and Y. H. Youn, 2007, An on-line analysis of reduced sulfur gases in the ambient air surrounding a large industrial complex, Atmospheric Environment, 41, 3829-3840.
  - 14) Loizidou M. and E. G. Kapetanos, 1992, Study on the gaseous emissions from a landfill, Science of the Total Environment, 127, 201-210.
  - 15) Muezzinoglu A., 2003, A study of volatile organic sulfur emissions causing urban odors, Chemosphere, 51, 245-252.
  - 16) Lee S., Q. Xu, M. Booth, T. G. Townsend, P. Chadik and G. Bitton, 2006, Reduced sulfur compounds in gas from construction and demolition debris landfills, Waste Management, 26, 526-533.
  - 17) 구윤서, 윤희영, 김성태, 전의찬, 김기현, 2007, 반월공단지역을 대상으로 한 악취모델링, 한국냄새환경학회지, 6(1), 20-27.
  - 18) 국립환경과학원, 2005, NIER Compendium of Methods for the Determination of Offensive Odor, 2005.
  - 19) 이입학, 구윤서, 전의찬, 2001, CALPUFF 모델의 특징 및 국내 적용성 검토, 한국대기환경학회 2001 추계학술대회 논문집, 89-90.
  - 20) Environmental Protection Agency(U.S. EPA), 1998, Interagency Workgroup on Air Quality Modeling (IWAQM) Phase 2 Summary Report and Recommendations for Modeling Long-range Transport Impacts.
  - 21) Scire J. S., D. G. Strimaitis and R. J. Yamartino, 2000, A User's guide for the CALPUFF dispersion model (Version 5.0), Earth Tech, Inc., Concord, MA.
  - 22) <http://egis.me.go.kr/egis/>.
  - 23) Song S. K., Z. H. Shon, K. H. Kim, Y. K. Kim and R. Pal, 2008, Dispersion and photochemical oxidation of reduced sulfur compounds in and around a large industrial complex in Korea, Atmospheric Environment, 42, 4269-4279.
  - 24) <http://www.epa.gov/ttn/chief/emch/temporal/>.
  - 25) Nagata Y., 2003, Odor intensity and odor threshold value, Journal of Japan Air Cleaning Association, 41, 17-25.
  - 26) 악취법령연구회, 2002, 핸드북 악취방지법, 일본, 489-491pp.