

악취배출시설 업종별 악취물질 분포 연구

유진*, 정유진, 홍다은, 배유진, 조성근, 우정석, 이재인, 윤다영, 이범열, 정일진, 박완순, 권문주
인천광역시보건환경연구원 생활환경과

A study on the distribution of odorous substances by industry in odor emission facilities

Jin Yoo*, Yu-Jin Jung, Da-Eun Hong, Yu-Jin Bae, Sung-Geun Cho, Jeong-Seok Woo,
Jae-In Lee, Da-young Youn, Bum-Yeol Lee, Il-Jin Jeong, Wan-Soon Kwack, Mun-Ju Kwon
Indoor Environment Division, Incheon Research Institute of Public Health and Environment

국문 요약

본 연구는 전처리과정 없이 실시간 연속 측정이 가능한 선택적다중이온질량분석기(SIFT-MS, Selected Ion Flow Tube-Mass Spectrometry)를 이용하여 인천광역시 내에서 민원을 주로 유발하는 악취배출시설 6종(하수처리, 폐수처리, 목재제조, 금속제품제조, 도장처리, 합성고무·플라스틱 제품제조)의 배출구에서 복합악취, 지정악취 및 악취 유발물질 91종을 분석하였다. 하수처리시설의 복합악취 희석배수 범위는 100~1,392 배였고, 폐수처리시설은 100~3,000 배, 목재제조시설은 100~6,694 배, 금속제품제조시설은 100~13,924 배, 도장처리시설은 100~1,000 배, 합성고무 및 플라스틱 제품제조시설은 100~1,442 배였다. 업종간의 통계적인 차이가 있는 악취 유발물질은 12종으로 나타났으며, 7종이 도장처리시설에서 배출되었고, 목재시설 4종, 금속제품제조시설 1종으로 나타났다. 도장처리시설에서 배출된 주요악취물질은 메틸아이소뷰틸케톤, 2-메톡시-2-메틸뷰테인, C3-알킬벤젠, 다이에틸벤젠, 에틸벤젠, 헵테인, 헥세인으로 벤젠류가 주를 이루고 있다. 목재시설에서 배출된 주요 악취물질은 1,4-벤조퀴논, 사이클로펜테인, 다이메틸아민, 염화수소로 다양한 물질이 배출되었다. 금속제품제조시설에서는 아크릴로나이트릴이 배출되었다. 악취배출시설의 지정악취물질 악취기여도평가를 한 결과, 하수처리시설과 금속제품제조시설은 아세트알데하이드, 폐수처리시설은 트라이메틸아민, 목재제조시설, 도장처리시설, 합성고무 및 플라스틱 제품제조시설은 발레르산이 악취 기여도가 가장 컸다. 업종별 악취배출시설의 전수조사가 이뤄지지 않아 모든 시설에 대해서 본 연구 결과를 적용하는데 한계를 가지고 있지만, 본 연구는 향후 악취 저감 기초자료와 악취민원발생 시 신속한 배출원 추적수단으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심단어 : 선택적다중이온질량분석기, 악취배출시설, 지정악취, 복합악취, 악취유발물질

I. 서론

악취란 황화수소, 메르캅탄류, 아민류, 그 밖에 자극성이 있는 물질이 사람의 후각을 자극하여 불쾌감과 혐오감을 주는 냄새를 말한다(악취방지법, 2021). 악취는 기체 상태의 물질이 단일 또는 다양한 성분으로 혼합된 상태로 대기중에 존재하면서 심리적, 정신적 피해와 건강상의 피해까지 줄 수 있는 감각오염 중 하나이다. 악취는 발생물질의 종류와 배출원이 다양하고, 여러 물질이 복합적으로 작용하기도 한다. 또한, 생활환경과 사람의 심리상태에 따라서 오염도에 대한 인식이 달라지는 특성이 있어 다른 대기오염물질과는 달리 발생원을 효과적으로 관리하고 저감 대책을 수립하는 데에 어려움이 있다(환경부, 2012).

최근 삶의 질 향상과 쾌적한 공기질에서 생활하고자 하는 욕구가 높아짐에 따라 산업단지 뿐만 아니라 주거지 주변의 다양한 시설로 인한 악취 민원이 급증하고 있다. 특히, 국내의 경우에는 협소한 국토면적과 산업화에 따른 도시형태 변화로 산업단지 및 환경기초시설과 같은 다양한 악취배출원이 주거지역과 인접한 경우가 많아 악취 문제는 끊임없이 발생하고 있다. 2005년 악취방지법의 시행 이후, 2019년까지 악취민원은 지속적으로 증가했다. 2020년 이후부터 악취민원은 감소추세에 있지만 2021년 전국 악취 민원건수는 39,397건으로 상당한 수치이다(환경부&한국환경공단, 2022).

인천광역시의 2021년 악취민원 발생건수는 2,172건으로 전국 지방자치단체 중 경기도, 충청남도, 경상남도, 전라북도 다음으로 민원이 많이 접수되었다(환경부&한국환경공단, 2022). 인천광역시의 악취민원 발생원을 분석해본 결과 사업장 발생이 47.8 %(1,039건)으로 가장 큰 부분을 차지했고, 생활악취, 원인불명 순으로 나타났다(인천광역시, 2021). 화학물질 배출·이동량 정보(<https://icis.me.go.kr/prtr>)에 의하면, 인천에 위치한 배출업체의 2020년 연간 유해화학물질 대기 배출량은 1,277 tonne/yr로서 전국 지방자치단체 17개 중에서 10위를 차지했으며, 단위면적당 배출량은 1.2 tonne/km²로서 6위를 차지하였다. 군·구별 배출 물질수는 198개로서 다양한 유해화학물질을 배출하고 있다(환경부 화학물질안전원, 2022). 대기 중으로 다양한 종류의 화학물질이 다량 배출되면, 개별물질에 의한 악취뿐만 아니라 복합악취를 유발할 가능성이 매우 크다(최성득, 2022). 그러므로 악취방지법에 지정된 복합악취와 22종의 지정악취물질만 분석해서 대책을 마련하는 것은 실효성 있는 악취 방지 대책이 될 수 없다. 현재 악취방지법은 지역적인 배출특성이 충분히 고려되지 않았고, 악취 원인물질과 배출원 파악에는 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 전처리과정 없이 실시간 연속 측정이 가능한 선택적다중이온질량분석기(SIFT-MS, Selected Ion Flow Tube-Mass Spectrometry)를 이용하여 인천광역시 내에서 민원을 주로 유발하는 악취배출시설 6종(하수처리, 폐수처리, 목재제조, 금속제품제조, 도장처리, 합성고무·플라스틱 제품제조)의 배출구에서 복합악취, 지정악취 및 악취 유발물질 91종을 분석하였다. 분석 결과를 토대로 악취배출시설 업종별 악취물질 종류 및 농도 등 악취배출현황을 파악하여 업종별 주요악취물질을 진단·평가하고, 악취확산모델링을 통한 악취추적시스템 구축을 위한 기초자료를 확보하고자 한다.

II. 이론적 고찰

2.1 악취물질의 특성

2.1.1 악취의 정의 및 특성

악취는 황화수소, 암모니아 및 기타 자극성이 있는 기체상의 물질이 인간의 후각을 자극하여 불쾌감과 혐오감을 주는 냄새로 인간의 감각기관을 자극하기 때문에 소음과 더불어 감각 공해로 알려져 있다. 일반적으로 악취는 여러가지 성분이 혼합된 상태로 존재하면서 인간의 후각을 자극하여 정신적, 생리학적 스트레스를 유발시켜 메스꺼움, 두통, 식욕감퇴, 호흡곤란 및 알레르기 현상 등 인체의 자각반응을 나타낸다.

일정한 냄새를 악취로 인식하는 데에는 지역특성, 생활수준 등 사회·문화적인 특성과 성별, 연령, 건강 상태, 음식물에 대한 기호 등 개인적인 특성이 중요하게 작용한다(환경부, 2012). 예민한 사람과 둔감한 사람이 악취를 느끼는 정도를 구별하는 한 예로서 최소감지농도(Threshold)의 경우 냄새물질에 따라 10배 이상의 차이가 날 수 있다. 일반적으로 냄새에 대한 감각이 남자보다는 여자가 민감하고, 연령이 높아질수록 취기감지 능력이 낮아지는 생리학적 특성을 갖고 있다. 악취는 물질별로 각각 특유의 냄새 특성을 가지고 있으며 휘발성, 용해도, 기온 등의 물리적 인자가 서로 상관관계를 가지며 악취발생에 관여하는 것으로 알려져 있다(정민영, 2015).

2.1.2 악취물질의 주요 발생원

악취유발물질의 발생원은 크게 자연적 발생원과 인위적 발생원으로 구분할수 있다. 자연적 발생원은 미생물 또는 박테리아의 대사활동에 의한 분해과정으로 외부의 개입 없이 일상적인 동·식물의 분해과정에서 발생하는 악취유발물질을 의미하며, 넓은 지역에서 낮은 농도로 발생하므로 악취를 느끼지 못하는 경우가 대부분이다.

인위적 발생원은 인간의 활동범위 내에서 행해지는 발생원으로 가정에서부터 대규모 산업시설에 이르기 까지 그 규모와 원인물질의 종류가 매우 다양하다는 것이 특징이다. 인위적인 요인이 개입되어 있는 상태에서 발생하는 악취유발물질은 지속적으로 고농도의 취기가 발생하기 때문에 많은 문제를 야기 시키게 된다. 대규모 악취 발생업체로는 화학약품 제조공장, 석유 제품가공공장, 사료공장, 비료공장, 축사시설, 하수처리시설 등을 예로 들 수있다. 이에 따라 우리나라는 악취방지법을 제정하여 악취배출시설에 대한 규제기준과 내용을 따로 명시하여 악취에 대한 피해를 줄일수 있도록 관리하고 있다.

2.1.3 악취물질의 성분별 특성

악취물질의 종류는 매우 다양하며 황화합물, 질소화합물, 방향족 탄화수소류, 알데하이드류, 케톤류, 지방산류 등이 있으며, 물질의 종류에 따라 악취가 다르게 나타난다(김영훈, 2011; 인천지역환경기술개발센터, 2011).

가. 황화합물

악취물질 중 황화합물에는 황화수소, 메르캅탄류 등이 존재한다. 아주 낮은 농도에도 악취를 느낄 수 있으며, 자극성이 심하고 하수, 분뇨, 축산폐수 처리장 등 거의 모든 악취발생시설에서 발생하는 물질이다. 메르캅탄류는 산성계열로서 물에 녹는 수용성이며, 황화메틸 및 이황화메틸은 중성계열로 물에 녹지 않는 난용성물질이다.

나. 질소화합물

질소화합물 중 대표적인 악취원인물질로 암모니아와 저분자물질의 아민류로서 메틸아민, 디메틸아민 등이 있다. 이러한 아민류의 악취원인물질은 암모니아와 유사한 냄새를 가진다. 저농도에서도 감지가 가능하고 강한 자극성이 있는 물질로서 주요 발생원에는 축산사업장, 계분건조공장, 분뇨 및 하수처리장, 비료제조공장, 쓰레기 처리장 등이 있다. 암모니아와 같이 염기성을 띠는 수용성 물질로서, 에테르, 알콜, 벤젠 등과 같은 극성이 낮은 용매에 녹는다.

다. 방향족 탄화수소류

방향족 탄화수소류는 벤젠과 화학적 성질이 비슷하고, 6각 또는 고리모양의 분자구조를 가진다. 주요 악취유발물질로서 스타이렌이 있으며, 황화합물 또는 질소화합물보다는 악취가 적은 편이나 저농도에서 강한 자극성을 가지고 있으며, 장기 노출될 경우 인체에 유해하다. 석유화학공장, FRP(Fiber Reinforces Plastics)제조공장, 합판 또는 접착제 제조공장 등에서 발생한다.

라. 알데하이드류, 케톤류

알데하이드와 케톤은 카르보닐기를 가진 극성화합물로 저급 알데하이드와 케톤은 용매와 수소결합을 하면서 물에 일부 용해되지만, 탄소수가 5개 이상일경우 물에 녹지 않는다. 석유화학공장, 비료제조공장, 담배제조공장, 생선처리공장 등에서 발생하며, 인체에 유해하다.

마. 지방산류

지방산은 짝수 탄소로만 이루어진 탄소사슬을 가진 기름이나 지방으로 이루어져 있으며, 주로 12개, 14개 및 18개의 탄소사슬을 갖는다. 기름은 주로 불포화 지방산을 함유하고 있는 반면 지방은 포화 지방산을 함유하는 경향이 크다. 축산식료품 제조공장, 화장터, 유지공장, 전분 제조공장, 분뇨 및 폐기물 처리장등에서 지방산 악취가 발생된다.

바. 지방족 알코올류

R-OH 구조를 갖고 있는 유기화합물을 알코올이라 하고, 메틸알코올, 에틸알코올, 아이소부틸알코올 등이 있다. 모든 알코올류는 물에 잘 용해되고, 환각, 마취 기능이 있으며 특히 메틸알코올은 음용시 인체에 치명상을 주는물질이다. 알코올 제조공장, 석유화학공장 등에서 발생한다.

사. 페놀류

페놀은 낙동강에서 식수오염을 일으킨 오염 물질로 널리 알려져 있으며, 순수한 상태에서는 무색의 결정성 고체이지만 공기의 산화를 받으면 연분홍이나 갈색을 띤다. 페놀은 물에 용해되며, 산성을 나타내는 극성 액체이고 염소이온 등과 반응하면 악취가 상승한다. 크레졸은 악취가 심하며 소독제로 사용한다. 페놀류는 화학공장, 크레졸 제조공장, 전자기관 제조공장등에서 악취물질로 배출된다.

2.2. 악취의 단위(환경부, 2012)

악취를 나타내는 단위에는 최소감지농도(Threshold), 농도(Concentration), 희석배수(Dilution Factor), 악취세기(Odor Intensity Index) 등이 있으며, 각 단위별 특성은 다음과 같다.

2.2.1. 최소감지농도(Threshold)

악취는 개별 물질마다 사람이 느낄 수 있는 최소농도나 냄새의 질이 다르다. 어떤 물질이 사람에게 냄새로 느껴지기 시작되는 최소의 농도를 최소감지농도(최소감지값 또는 역치, Threshold)이라 한다. 최소감지농도가 작을수록 낮은 농도에서 냄새를 유발하므로 강한 냄새를 내는 물질이라 할 수 있다. 최소감지농도는 사람마다 조금씩 차이를 나타내고 민족이나 연령에 따라서도 차이가 있으며, 예민한 사람과 둔감한 사람의 최소감지농도는 냄새물질에 따라 10배 이상의 차이가 날 수도 있다(정민영, 2015). 최소감지농도는 지역별, 성별, 생활습관 등에 따라 사람마다 차이를 보이며, 인종이 다른 국가간에도 차이가 나타난다.

악취물질마다 최소감지농도를 가지고 있으며, 악취물질의 최소감지농도를 측정하는 방법은 농도를 정량적으로 평가하는 기기분석방법과 후각을 이용한 측정방법 등이 있다(강인선, 2008; 박상진 등, 2010). 최소감지농도에 대한 연구는 국내에서도 꾸준히 연구되고 있고 있다. 연구자들마다 물질별 최소감지농도가 상이하므로, 본 연구에서는 환경부에서 발표한 264종의 악취물질의 최소감지농도(환경부, 2012)를 기준으로 하였다. 지정악취물질 22종에 대한 최소감지농도는 Table 1과 같다.

같은 물질임에도 연구자에 따라 다른 연구결과를 나타내지만 일반적인 특징은 다음과 같다. 최소감지농도는 탄소와 수소만으로 된 화합물보다 산소, 황, 질소 등의 물질이 포함되어 있는 화합물이 대체로 작은 값을 가진다. 또, 단일성분의 냄새물질은 일정한 최소감지농도를 갖지만, 두 가지 이상의 물질이 혼합되어 있을 때에는 상승 또는 상쇄작용에 의해 각 성분의 최소감지농도보다 더 높아지거나 혹은 낮아지는 경우도 있다.

Table 1. Threshold for each Specified Offensive Odor Substances

| No. | Classification | Threshold (ppm) | No. | Classification | Threshold (ppm) |
|-----|------------------------------------|------------------|-----|----------------------------------|------------------------|
| 1 | Acetaldehyde | 0.002 | 12 | Methyl mercaptane | 0.0001 |
| 2 | Ammonia | 0.1 | 13 | Propionaldehyde | 0.002 |
| 3 | i-Butanol | 0.01 | 14 | Propionic acid | 0.002 |
| 4 | i-Butyl acetate | 0.008 | 15 | Stylene | 0.03 |
| 5 | i-Butyraldehyde n-Butyraldehyde | 0.0009 0.0003 | 16 | Toluene | 0.9 |
| 6 | n-Butyric acid | 0.00007 | 17 | Trimethylamine | 0.0001 |
| 7 | Dimethyl disulfide | 0.0003 | 18 | i-Valeraldehyde | 0.0002 |
| 8 | Dimethyl sulfide | 0.0001 | 19 | n-Valeraldehyde | 0.0007 |
| 9 | Hydrogen sulfide | 0.0005 | 20 | i-Valeric acid | 0.00005 |
| 10 | Methyl ethyl ketone | 0.44 | 21 | n-Valeric acid | 0.0001 |
| 11 | Methyl isobutyl ketone | 0.2 | 22 | m-Xylene o-Xylene p-Xylene | 0.041 0.38 0.058 |

2.2.2. 농도(Concentration)

농도는 일정량의 부피 중에 존재하는 성분의 비율인 조성을 표시하는 양이다. 여러 가지 단위를 사용하며 주요 단위로는 질량백분율(wt%), 체적백분율(V%), 몰수의 비(몰분율) 등이 이용된다. 기체상태 악취물질의 화학적 분석에 의해 측정된 농도 단위로는 단위부피당 부피(Vol/Vol)를 사용하는 경우가 많아 악취성분의 농도를 ppm(parts per million, ml/m^3), ppb(10^{-3}ppm), ppt(10^{-6}ppm)로 표현하는 것이 일반적이다. 이와 더불어, 단위부피당 질량(Wt/Vol)으로 표시하는 mg/m^3 , $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 등의 단위를 사용하는 경우도 있다.

2.2.3. 희석배수(Dilution Factor, Dilution threshold)

희석배수는 당초 미국에서 액체상태의 시료의 악취세기를 나타내기 위해 정의하였던 것으로, 시료수에 무취의 물을 가하여 희석시료에서 최저한도의 냄새를 명확하게 알 수 있을 때의 최대 희석배수를 말하며, 후각한계 희석배수라고도 불린다. 희석배수는 공기시료에 대해서도 동일하게 적용시킬 수 있는데, 악취배출시설 배출구 및 부지경계선 등에서 채취한 시료공기를 무취공기로 희석하면서 최소감지농도 수준(냄새가 인지되지 않는 순간의 희석치)으로 희석했을 때의 배율로 구할 수 있다. 현행 악취공정시험기준에서는 5인 이상의 판정인이 악취를 감지한 희석배수 중 최대, 최소 희석배율을 제외한 희석배수의 기하평균값을 희석배수로 하고 있다.

2.2.4. 기타 악취단위

대기중의 냄새의 정도를 수치화하여 표현하는 방법으로 악취공정시험기준의 공기희석관능법에 의한 희석배수, 일본의 6단계 냄새표시법, 미국의 TIA(Total Intensity of Aroma) 등이 있다. 직접관능법에 의한 악취세기는 최소감지값 수준의 냄새를 1도, 악취로 인식되지않을 보통의 수준을 2도(규제기준)로 하며, 기타악취로 느낄 수 있는 세기를 3~5도로 규정하고 있다. 일본의 6단계 냄새 표시법은 직접관능법의 악취세기와 유사하며, 미국의 TIA는 무취, 약간 냄새, 확실한 냄새, 강한 냄새의 4단계 척도를 이용하고 있다. 그러나 우리나라는 직접 관능법에 의한 악취세기를 악취공정시험방법에서 삭제하고 공기희석관능법에 의한 희석배수를 사용하고 있다.

발생원에서 배출되는 악취의 총량을 표현하는 방법으로 후각한계수준의 냄새 1 ft^3 을 1 Odor Unit로 정의하고, 냄새시료 1 ft^3 을 후각한계까지 희석시켰을 때의 총용량(ft^3)을 Odor Concentration이라 하고, 여기에 단위시간당의 배출가스량을 곱해서 배출원의 부하(OER : Odor Emission Rate)로서 표현하기도 한다. 이 값의 장점으로서는 각 배출원의 영향범위나 영향 정도의 추정할 수 있고, 배출원별 악취오염에 따른 영향도의 상대적인 비교가 용이하다. 최근에는 각 배출원의 OER값을 합계하여 Total Odor Emission Rate(TOER)에 의해 전체 악취의 발생정도를 나타내기도 한다.

2.3. 국내 악취 관리법

현재 국내에서는 「악취방지법」에 따라 악취를 관리하고 있으며, 「환경 분야 시험·검사 등에 관한 법률」 제6조에 따라 「악취공정시험기준」을 적용하여 복합악취 및 지정악취물질 22 항목을 관리하고 있다. 복합악취는 채취한 악취 시료를 실험실에서 무취 공기로 희석하여 냄새가 전혀 나지 않을 때까지 희석하였을 때의 희석배수를 측정하는 공기희석관능법으로 분석하며, 지정악취물질은 기기분석법으로 진행하며 그 방법은 Table 2와 같다.

이와 같이 현재 악취 관리법은 시료 채취 후 실험실에서 분석을 진행해야 하며, 순간 발생했다 사라지는 특성을 가진 악취 원인을 분석하는 데에 한계가 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 많은 연구진들은 다양한 방법을 연구하고 있다(한진석&김선태, 2015; 국립환경과학원, 2016; 국립환경과학원, 2021).

Table 2. Analysis method of odor compounds

| Compound | Ingredients | Analysis method |
|-------------------------------|---|--|
| Complex odor | Complex odor | Air dilution olfactory method |
| Ammonia | Ammonia | Ultraviolet/visible spectrometry |
| Trimethylamine | Trimethylamine | Headspace-Gas chromatography (Nitrogen-phosphorus detector) |
| Sulfur compounds | Hydrogen sulfide, Methyl Mercaptan, Dimethyl disulfide, Dimethyl sulfide | Thermal desorption- Gas chromatography (Flame photometry detector) |
| Fatty acids | Propionic acid, Butyric acid, n-valeric acid, i-valeric acid | Headspace-Gas chromatography (Flame ionization detector) |
| Aldehydes | Acetaldehyde, Propionaldehyde, Butyraldehyde, i-valeraldehyde, n-valeraldehyde | High performance liquid chromatography |
| Volatile Organic Compounds | Styrene, Toluene, Xylene, Methyl ethyl ketone, Isobutyl methyl ketone, Butyl acetate, Isobutyl alcohol | Thermal desorption- Gas chromatography (mass spectrometer) |

2.4. 인천광역시 악취오염 현황

2.4.1. 인천광역시 산업단지 위치 및 악취오염 특성

인천광역시는 대륙성 기후에 속하면서 해안에 위치하여 다른 내륙지방보다는 해양성 기후의 특성도 일부 가지고 있어서 기온의 연교차가 적은 편이고, 강수량은 연 1,134.4 mm로 비슷한 위도지역에 비해 적은 편이다. 연평균 풍속은 2.9 m/s이며, 주 풍향은 북북서풍이다. 풍속이 가장 강한 달은 2~4월이며, 가장 약한 달은 9월이다. 봄·가을철에는 이동성고기압의 영향으로 맑고 건조한 날이 많으며, 여름철에는 북태평양 고기압의 영향으로 무더운 날씨를 나타낸다. 6월 하순에서 7월 중순까지는 장마전선의 영향을 받고 8~9월은 태풍의 영향을 받고 있다. 겨울철에는 찬 대륙성 고기압의 영향으로 추운 날씨를 보이고 있다. (인천광역시, 2022).

인천광역시의 산업단지 위치와 주풍향은 Figure 1과 같다. 인천시는 도로·항만 등 유리한 입지 여건 때문에 산업체의 집적화 현상이 두드러졌다. 인천시에는 총 16개의 산업단지가 있으며, 국가산업단지 2개, 일반산업단지 12개, 도시첨단산업단지 2개가 있다(한국산업단지공단, 2022). 산업단지가 많은만큼 산업단지와 거주지가 근접하여 있어 산업단지에서 배출된 악취물질로 인한 민원이 꾸준히 제기되고 있다.

인천광역시 2021년 악취민원 발생건수는 2,172건으로 전국 지방자치단체 중 경기도, 충청남도, 경상남도, 전라북도 다음으로 민원이 많이 접수되었다(환경부&한국환경공단, 2022). 인천광역시의 악취민원 발생원을 분석해본 결과 사업장 발생이 47.8 %(1,039건)으로 가장 큰 부분을 차지했고, 생활악취, 원인불명 순으로 나타났다(인천광역시, 2021). 군·구별로 분석해본 결과, 악취민원은 산업단지가 가장 많이 위치한 서구(606건)에서 제일 많았고, 미추홀구(526건), 부평구(327건), 남동구(202건) 등 순으로 나타났다. 계절별로는 여름(821건), 가을(759건), 봄(406건), 겨울(186건)으로 하절기에 가장 많이 발생했다. 악취는 공업지역과 주거지가 혼합된 지리적 조건과 기상에 따라 확산, 이동하는 특성을 가지며, 지리·기후와 밀접한 관계가 있다.

2.4.2. 인천광역시 악취의 주요 원인과 특성

2020년말 기준 인천광역시의 악취배출업소 2,709개소 중 악취를 다량 배출하는 악취중점관리 대상업소는 44개소이며, 악취배출업소 이외에 생활악취 시설로는 분뇨·오수·축산폐수 처리시설, 폐기물 처리시설, 농수산물도매시장, 하수처리장 등 환경기초시설 등이 있다(인천광역시, 2022).

2017년 1월부터 2019년 12월까지의 악취 민원을 냄새 종류별, 각 구별로 분석한 결과는 다음과 같다(인천광역시, 2021). 중구의 경우는 신흥동, 북성동, 향동 순으로 민원이 접수되었으며, 신흥동은 약품냄새, 북성동은 사료냄새, 향동은 쓰레기 냄새가 주로 나는 것으로 분석되었다. 동구의 경우는 만석동, 송림동 일대에 민원이 많이 집중되며 타는 냄새와 하수구 냄새가 주로 나타났다. 미추홀구의 경우는 도화동 일대에서 민원이 집중되었으며, 주물 냄새와 타는 냄새가 주로 나타났다. 연수구의 경우는 송도동 일대에 민원이 집중되었으며, 주로 가스 및 타는 냄새가 났다. 남동구의 경우는 고잔동, 논현동 일대에 민원 신고가 집중되었으며, 인근 사업장 악취, 공장악취 등의 포괄적인 냄새로 나타났다. 부평구의 경우는 민원이 특정 법접동에 집중되지 않고 골고루 접수되었지만 다른 구에 비해 접수된 민원이 적었다. 계양구의 경우는 효성동, 계산동, 작전동 주변에서 악취민원 신고가 집중되었으며, 음식물 냄새와 타는 냄새가 주를 이루는 것으로 분석되었다. 서구의 경우는 다른 구에 비해 악취 민원 접수건수가 월등히 많았고, 청라동 일대가 가장 민원 접수건수가 많았다. 청라동 일대는 가스 냄새, 주물 냄새, 약품 냄새 순으로 냄새가 난다고 했으며, 오류동은 고무 냄새, 하수구 냄새, 가스 냄새, 사료 냄새가 난다고 하였다.

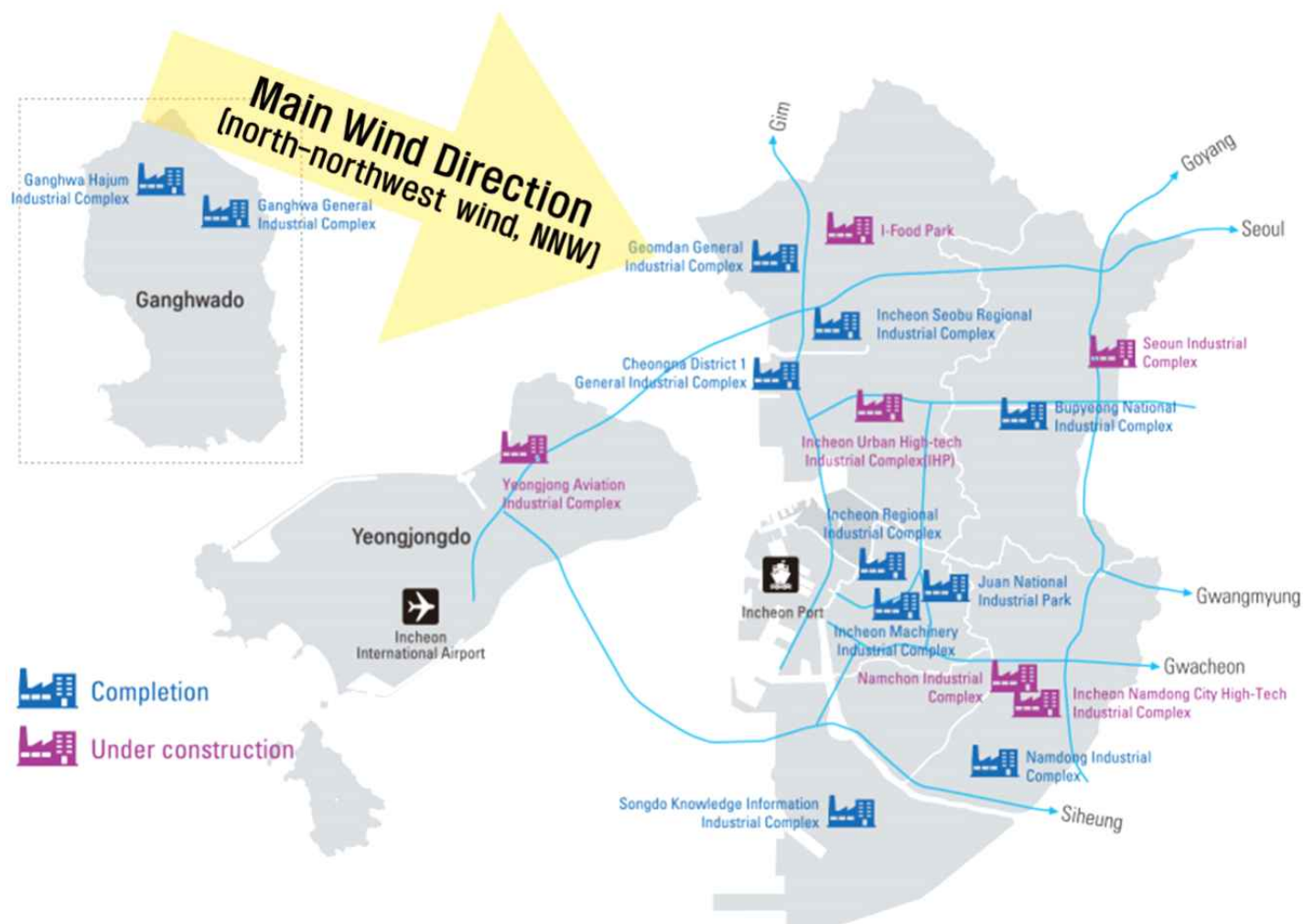


Figure 1. Distribution of Industrial Complexes and Main Wind Direction in Incheon Metropolitan City

2.5. 선택적 다중이온 질량분석기(SIFT-MS)

선택적 다중이온 질량분석기(SIFT-MS, Selected Ion Flow Tube - Mass Spectrometry)는 질량 분석법 중 하나로써 화학적 이온화(chemical ionization, CI)방법을 통해 정량화를 하는 분석 장비이다(손현동 등, 2018; 박정은, 2021). 화학적 이온화 방법은 기존의 전자 충격 이온화 방법과 컬럼을 이용한 물리적 분리 방법인 크로마토기법과는 다르게 연성 이온화(soft ionization)과정을 통해 분석 물질을 이온화 한다.

SIFT-MS의 분석과정은 Figure 2와 같다. 대기 중의 질소, 산소와 공급된 수분에 마이크로파 플라즈마(microwave plasma)를 방사시키면, 8개의 반응물 이온인 양이온(H_3O^+ , NO^+ , O_2^+) 3개와 음이온(OH^- , O_2^- , NO_2^- , O^- , NO_3^-) 5개가 생성된다. 생성된 각각의 반응물 이온은 첫 번째 사중극자 매스 필터(Quadrupole mass filter)를 통해 필터링 되어 순차적으로 flow tube에 주입된다. Flow tube에 들어온 반응물 이온이 운반 gas와 충돌해 안정화되면 유입된 시료가 질량 대 전하 비율(mass to charge, m/z)에 따라 생성이온(product ions)을 형성한다. 생성이온의 생성메커니즘은 반응물이온에 따라 다양한데, H_3O^+ 는 전하이동(proton transfer, PT)을, NO^+ 는 전자이동(electron transfer, ET)과 결합(association), O_2^+ 는 전자이동(electron transfer, ET)과 해리(dissociation)를 한다. 생성된 이온과 반응하지 않은 반응물이온들은 두 번째 사중극자(Quadrupole mass filter)를 통해 필터링 된다.

SIFT-MS에서 분석대상 화합물의 절대 정량은 GC/MS에서 사용되는 상대 정량법과 달리 표준 물질 없이 가능하다. 필터링 된 이온들은 Syft사에서 제공한 화합물 정보가 있는 compound library의 충돌상수, 반응속도상수, 반응비율 등에 따라 선택적으로 반응하고 생성 이온의 양을 결정되고 입자 증폭기(particle multiplier)를 통해 정량화 한다. 즉, 생성 이온 양과 반응 이온 양, 화합물의 고유 반응 속도 상수를 통해 실시간으로 화합물의 농도가 계산된다(식 1).

$$[A] = y \frac{P^+}{R^+k} \quad (\text{식 1})$$

여기서, [A]:농도(ppb), y:기기보정계수(ICF), P^+ :생성이온, R^+ :반응이온, k:반응속도상수

SIFT-MS는 화학적 분리를 통해 대기 중에 있는 물질을 직접 주입하여 실시간으로 정량, 정성 분석할 수 있는 질량 분석기로, 별도의 전처리 및 시료 농축과정 없이 ppt 수준의 농도까지 분석이 가능하다. 의학, 식품분야 등 다양한 분야에서 적용되고 있으며, 환경분야에서도 작업환경 유해물질, 공장내 유해물질, 건축물 및 자동차 실내공기, 자동차 배기가스 분석에 활용되고 있다. 그러나 아직까지 산업단지 및 주변지역의 대기 중 악취물질 측정에 대한 연구는 많이 부족한 수준이다.

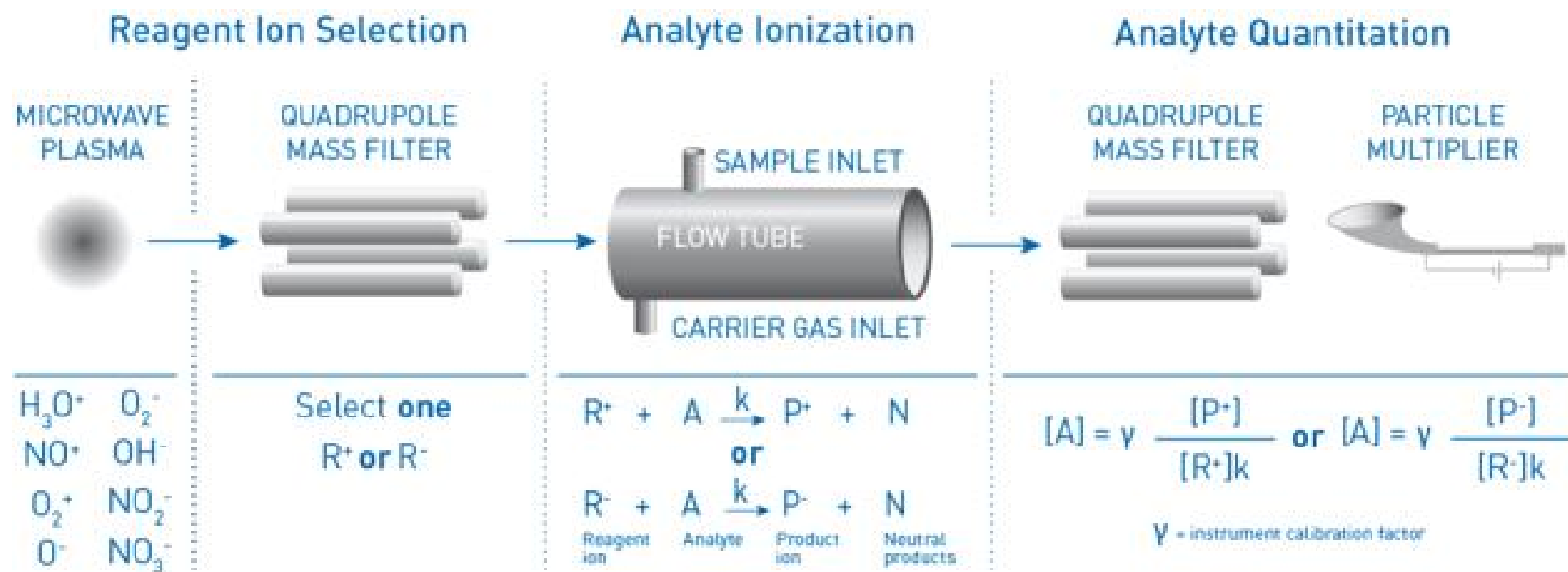


Figure 2. Principle of Selected Ion Flow Tube-Mass Spectrometry Analysis

III. 조사대상 및 방법

3.1. 조사 대상

본 연구에서는 인천광역시에 위치하며, 민원을 주로 유발하는 악취배출시설 중 하수처리, 폐수처리, 목재제조, 금속제품제조, 도장처리, 합성고무·플라스틱 제품제조 등 6개 업종을 조사 대상으로 선정하였다. 본 연구는 6개 업종 106개소 악취배출시설의 배출구에서 악취시료를 채취했다. 하수처리시설 14개소, 폐수처리시설 16개소, 목재제조시설 11개소, 금속제품제조시설 27개소, 도장처리시설 22개소, 합성고무·플라스틱 제품제조시설 16개소를 조사 대상으로 하였다.

3.2. 조사 방법

3.2.1. 시료채취 방법

악취배출시설 배출구의 악취시료는 간접흡인상자를 이용하여 수동 채취하였고, 이는 악취공정시험기준의 ES 09130.a 시료채취와 보관 및 ES 09301.c 공기희석관능법(악취공정시험기준, 2022)에 준하여 실시하였다. 시료채취 전 시료주머니를 무취공기로 1회 이상 치환한 후 시료주머니의 무취상태를 확인했고, 채취관 및 펌프도 사용하기 전에 무취공기로 10분 이상 치환한 후 사용했다. 배출구에서의 시료채취지점 선정 시, 사업장에서 5 m 이상의 일정한 배출구로 배출되는 경우에는 악취도가 가장 높을 것으로 판단되는 측정공 또는 최종 배출구에서 채취했다. 펌프와 채취관을 시료를 채취하기 전에 시료가스를 이용하여 3분 동안 치환 후 사용했으며, 시료주머니는 시료로 1회 치환한 후 시료를 채취했다. 흡입 유량 5 L/min로 2분동안 시료를 채취해 10 L의 시료를 채취했다. 채취된 냄새시료는 상온 (15 °C ~ 25 °C)을 유지하며, 차광용기가 아닐 경우 검은 비닐봉지를 이용하여 차광하여 운반했고, 보관 및 시험도 동일한 상태로 유지했다.

3.2.2. 복합악취(공기희석관능법)

악취시료의 복합악취 분석은 악취공정시험기준의 ES 09301.c 공기희석관능법에 준하여 실시하였다. 시료채취 후 48시간 이내에 시험했고, 공기희석관능시험 전 공기희석배수를 평가하는 패넬 선정시험을 통해 악취판정요원을 선정하였다. 악취판정요원 선정시험은 4단계로 나눠서 진행했는데, 첫 번째로 노르말부탄올로 제조한 악취강도 1 도의 인식시험액을 예비 판정요원 모두에게 냄새를 맡게 하여 이 냄새를 인식할 수 있는지 확인하였고 이 때, 인식을 못하는 판정요원은 제외했다. 두 번째, 시험을 통과한 판정요원을 대상으로 악취강도 1 도 ~ 5 도의 순으로 냄새를 맡게 하여 악취강도를 인식하도록 했다. 세 번째는 냄새질 인식시험으로 무취, 식초 냄새, 달콤한 냄새, 장미향 냄새, 생선썩는 냄새의 5가지의 냄새의 종류와 악취도를 평가했다. 위의 3 단계를 모두 통과하면 악취판정요원으로 선정하였고, 마지막 4단계로 무취공기의 질을 평가하도록 하여 매일 무취공기제조장치를 점검하였다.

공기희석관능법은 수동식 공기희석방법을 사용했으며, 내용적이 3 L인 냄새주머니에 주사기를 사용하여 희석배수에 맞춰 시료를 주입하였다. 희석배수는 배출구의 경우 300 배부터 시험을 시작했다. 악취판정요원에게 평가대상 시료 냄새를 인지시키고 5분간 휴식한 후, 판정요원에게 최

초희석배수로 희석시킨 시료희석주머니 1개와 무취주머니 2개를 1조로 하여 나누어 주고 냄새를 맡도록 했다. 1차 시험완료 후 최초시료희석배수 1 조를 다시 제조하여 판정요원에게 관능시험을 했다. 1단계(1차, 2차 포함) 시험완료 후 정답률이 0.6 미만이면 판정시험을 끝내고, 0.6 이상이면 정답을 맞힌 판정요원이 1인 이하가 될 때까지 희석단계를 증가시켜 시험한다. 희석배수는 전체 판정요원의 시료희석배수 중 최대값과 최소값을 제외한 나머지 3개 값을 기하평균한다.

3.2.3. 악취유발물질 분석(SIFT-MS)

배출구에서 채취한 악취시료 전처리과정 없이 실시간 연속 측정이 가능한 선택적다중이온질량분석기(SIFT-MS, Selected Ion Flow Tube-Mass Spectrometry)를 이용하여 분석하였으며, 113종의 악취유발물질은 Table 3와 같다. SIFT-MS(Voice200 ultra, Syft Technologies, New Zealand)는 실시간 악취분석차량에 탑재하여 이동분석도 가능하도록 개조하였다(Figure 3). SIFT-MS를 이용한 분석 방법은 공정시험기준에 명기된 방법이 아니기 때문에 배출허용기준을 적용하기 어려우며 본 장비로부터 나온 결과 간의 비교 및 분석이 필요하다. 또한 이성질체 물질은 분리가 어려운 물질들은 이성질체들의 합으로 도출되었다.

3.2.3.1. 악취 시료 분석

악취 시료는 필터를 사용하여 입자상 물질을 제거한 후 25 mL/min의 유속으로 SIFT-MS 시료 주입구에 주입하여 분석하였다. 시료는 고순도 질소가스(99.9999 %)를 carrier gas로 이용하며 flow tube에서 8개 이온과 반응 후 검출기로 들어가게 된다. 분석에 사용된 SIFT-MS의 운전조건은 Table 4.와 같다.

3.2.3.2. SIFT-MS 정확성 및 신뢰성 평가

악취물질의 정량분석을 위해 분석 전 SIFT-MS의 Validation을 실시하여 펌프의 온도 및 압력, carrier gas, 진공상태 등을 점검하였고, 7종의 VOCs(elthylene, isobutane, benzene, toluene, tetrafluoro benzene, hexafluoro benzene, octafluoro toluene)가 들어있는 Tuning standard를 이용하여 장비의 교정을 실시하여 성능을 항상 일정하게 유지하였다.

시료 분석과 동일한 분석조건에서 SIFT-MS에 고순도 질소가스를 시료 주입구에 직접 주입하여 바탕농도 변화를 조사하였고, 안정화 된 후의 평균값을 총 7회 측정하였다. 고순도 질소가스를 사용하여 얻어진 측정값의 표준편차에 3배 곱한 값으로 SIFT-MS의 기기검출한계(IDL, instrument detection limit)를 계산하였다. 기기검출한계는 악취공정시험기준 ES 09001.a_정도 관리정도보증에 준하여 실시하였다. 본 연구에서는 바탕농도를 측정한 후 시료농도에서 바탕농도를 보정한 후 최종농도를 산출하였다.

SIFT-MS에서는 검량선을 이용하는 상대정량법이 아닌 이온화된 물질의 분자수를 개별 측정하고 SIFT-MS 제조사에서 제공하는 반응속도 상수(k-factor)를 이용하여 직접 반응물의 농도를 산출하는 절대정량법을 이용한다. 반응속도 상수는 생성이온과 반응이온이 단위시간 내에 반응하는 속도이며, 이 값에 의해 반응물의 정량 결과가 달라질 수 있다(정지선, 2017). 따라서 본 연구에서는 지정악취 22종의 표준가스를 이용하여 실제 측정농도와 표준물질의 농도를 비교하고, 반응속도 상수를 보정하였다.

Table 3. List of analytes in this study

| No. | Classification* | Substance name | Substance name (Korean) | No. | Classification* | Substance name | Substance name (Korean) |
|-----|-----------------|---|--------------------------------|-----|-----------------|----------------------|-------------------------|
| 1 | OMS | 1.1.1-trichloroethane | 1,1,1-트라이클로로에테인 | 58 | OMS | Dibromine | 다이브로민 |
| 2 | OMS | 1.1.2-trichloroethane | 1,1,2-트라이클로로에테인 | 59 | OMS | dibutyl phthalate | 다이부틸프탈레이트 |
| 3 | OMS | 1.1-dichloroethene +1.2-dichloroethene | 1,1-다이클로로에테인 + 1,2-다이클로로에테인 | 60 | OMS | diethyl amine | 다이에틸아민 |
| 4 | OMS | 1.2.4-trichlorobenzene | 1,2,4-트라이클로로벤젠 | 61 | OMS | diethylbenzene | 다이에틸벤젠 |
| 5 | OMS | 1.2-dibromoethane | 1,2-다이브로모에테인 | 62 | OMS | dimethyl sulfate | 다이에틸 설페이트 |
| 6 | OMS | 1.2-dichloroethane +vinyl chloride | 1,2-다이클로로에테인 +염화 바이닐 | 63 | SOOS | dimethyl sulfide | 다이에틸설파이드 |
| 7 | OMS | 1.2-dichloropropane | 1,2-다이클로로프로페인 | 64 | OMS | dimethylamine | 다이에틸아민 |
| 8 | OMS | 1.2-epoxybutane | 1,2-에폭시부테인 | 65 | OMS | dodecane | 도데케인 |
| 9 | OMS | 1.3-butadiene | 1,3-부타디엔 | 66 | OMS | epichlorohydrin | 에피클로로히드린 |
| 10 | OMS | 1.3-butadiyne | 1,3-부타디인 | 67 | OMS | ethane+ethylene | 에테인+에틸렌 |
| 11 | OMS | 1.4-benzoquinone | 1,4-벤조퀴논 | 68 | OMS | ethanol | 에탄올 |
| 12 | OMS | 1.4-dichlorobenzene | 1,4-다이클로로벤젠 | 69 | OMS | ethyl benzene | 에틸벤젠 |
| 13 | OMS | 1.4-dioxane | 1,4-다이옥세인 | 70 | OMS | ethyl chloride | 염화에틸 |
| 14 | OMS | 1.5-pentanedial | 1,5-펜탄다이알 | 71 | OMS | ethyl mercaptan | 에틸메르캡탄 |
| 15 | OMS | 1-butene | 1-부텐 | 72 | OMS | ethyl methyl sulfide | 에틸메틸설파이드 |
| 16 | OMS | 1-chlorotoluene | 1-클로로톨루엔 | 73 | OMS | ethylene oxide | 에틸렌옥사이드 |
| 17 | OMS | 1-pentene | 1-펜텐 | 74 | OMS | formaldehyde | 포름알데하이드 |
| 18 | OMS | 2.2-dimethylbutane | 2,2-다이에틸뷰테인 | 75 | OMS | furfural | 푸르푸랄 |
| 19 | OMS | 2-acetyl furan | 2-아세틸푸란 | 76 | OMS | furfuryl alcohol | 푸르푸릴 알코올 |
| 20 | OMS | 2-butenal | 2-부테날 | 77 | OMS | heptane | 헵테인 |
| 21 | OMS | 2-butene | 2-부텐 | 78 | OMS | hexamethyldisiloxane | 헥사 메틸 다이실록세인 |
| 22 | OMS | 2-ethoxyethanol | 2-에톡시에탄올 | 79 | OMS | hexane | 헥세인 |
| 23 | OMS | 2-ethoxyethyl acetate | 2-에톡시에틸아세테이트 | 80 | OMS | hydrogen bromide | 브로민화 수소 |
| 24 | OMS | 2-methoxy-2-methyl butane | 2-메톡시-2-메틸뷰테인 | 81 | OMS | hydrogen chloride | 염화수소 |
| 25 | OMS | 2-methyl-2-propanethiol | 2-메틸-2-프로판 티올 | 82 | OMS | hydrogen cyanide | 사이안화 수소 |
| 26 | OMS | 2-methylpentane +3-methylpentane | 2-메틸펜테인 +3-메틸펜테인 | 83 | SOOS | hydrogen sulfide | 황화수소 |
| 27 | OMS | 2-methylundecanal | 2-메틸언데칸알 | 84 | OMS | Isobutane +butane | 아이소뷰테인 +뷰테인 |
| 28 | OMS | 2-propanol | 2-프로판올 | 85 | SOOS | isobutyl alcohol | i-뷰틸알코올 |

| No. | Classification* | Substance name | Substance name (Korean) | No. | Classification* | Substance name | Substance name (Korean) |
|-----|-----------------|--|--|-----|-----------------|-------------------------------|--------------------------------|
| 29 | OMS | 3-methylbutanoic acid | 3-메틸뷰티르산+펜타노익산 →발레르산(=n+i-발레르산) + 메틸뷰티르산 | 86 | OMS | isopentane | 아이소펜테인 |
| 30 | SOOS | pentanoic acid | | 87 | OMS | isoprene | 아이소프렌 |
| 31 | SOOS | acetaldehyde | 아세트알데하이드 | 88 | OMS | methanol | 메탄올 |
| 32 | OMS | acetic acid | 아세트산, 초산 | 89 | OMS | methyl bromide | 브롬화메틸 |
| 33 | OMS | acetone | 아세톤 | 90 | OMS | methyl chloride | 염화메틸 |
| 34 | OMS | acetylene | 아세틸렌 | 91 | OMS | methyl cyclohexane | 메틸사이클로헥산 |
| 35 | OMS | acrolein | 아크롤레인 | 92 | SOOS | methyl isobutyl ketone | 메틸아이소뷰틸케톤 |
| 36 | OMS | acrylamide | 아크릴아미드 | 93 | SOOS | methyl mercaptan | 메틸메르캅탄 |
| 37 | OMS | acrylonitrile | 아크릴로나이트릴 | 94 | OMS | methyl tert-butyl ether | 메틸삼차부틸에테르 |
| 38 | OMS | allyl chloride | 알릴클로라이드 | 95 | OMS | methylcyclopentane | 메틸사이클로펜테인 |
| 39 | SOOS | ammonia | 암모니아 | 96 | OMS | N,N-dimethylformamide | N,N-다이메틸포름아마이드 |
| 40 | OMS | aniline | 아닐린 | 97 | OMS | naphthalene | 나프탈렌 |
| 41 | OMS | benzaldehyde | 벤즈알데하이드 | 98 | OMS | nonane | 노네인 |
| 42 | OMS | benzene | 벤젠 | 99 | OMS | Octane+isooctane | 옥테인+아이소옥테인 |
| 43 | OMS | benzothiazole | 벤조티아졸 | 100 | SOOS | n-pentanal | 펜탈알→발레르알데하이드 (i+n-발레르알데하이드) |
| 44 | SOOS | butanal | 뷰틸알데하이드 | 101 | SOOS | i-pentanal | |
| 45 | SOOS | butanoic acid +ethyl acetate | 뷰티르산 + 에틸아세테이트 | 102 | SOOS | phenol +dimethyl disulfide | 다이메틸다이설파이드 + 페놀 |
| 46 | SOOS | butanone | 메틸에틸케톤(=부탄온) | 103 | SOOS | propanal | 프로피온알데하이드 |
| 47 | SOOS | butyl acetate | 뷰틸아세테이트 | 104 | SOOS | propanoic acid | 프로피온산 |
| 48 | OMS | C3-alkylbenzene | C3-알킬벤젠 | 105 | OMS | propylene oxide | 산화 프로필렌 |
| 49 | OMS | carbon disulfide | 이황화 탄소 | 106 | SOOS | styrene | 스타이렌 |
| 50 | OMS | carbon tetrachloride | 사염화 탄소 | 107 | OMS | tertiary butyl acetate | 3차부틸초산에스테르 |
| 51 | OMS | chlorobenzene | 클로로벤젠 | 108 | OMS | tetrahydrofuran | 테트라하이드로퓨란 |
| 52 | OMS | Chloroform +dichloromethane +tetrachloroethane | 클로로포름 + 다이클로로메테인 + 테트라클로로에테인 | 109 | OMS | tetrahydrothiophene | 테트라하이드로티오펜 |
| 53 | OMS | cresol | 크레졸 | 110 | SOOS | toluene | 톨루엔 |
| 54 | OMS | cyclohexanamine | 싸이클로헥실아민 | 111 | SOOS | trimethylamine | 트라이메틸아민 |
| 55 | OMS | cyclohexane | 사이클로헥세인 | 112 | OMS | vinyl acetate | 아세트산비닐 |
| 56 | OMS | cyclopentane | 사이클로펜테인 | 113 | SOOS | xylene | 자일렌 |
| 57 | OMS | decane | 데케인 | | | | |

* OMS : Other malodorous substances, SOOS : Specified Offensive Odor Substances

(a)



(b)

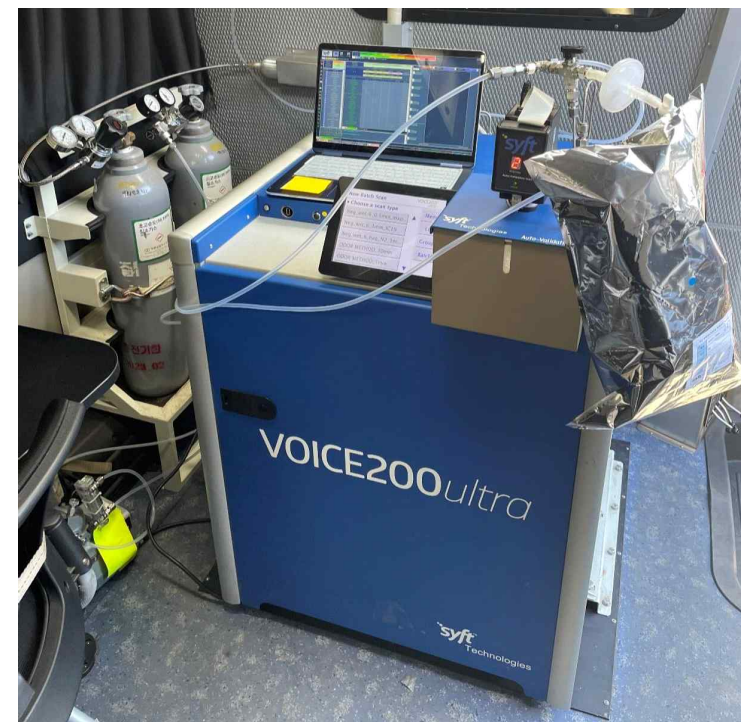


Figure 3. Real-time Odor Analysis Vehicle for the Monitoring of Odor used in this study : (a) Outside View, (b) Selected Ion Flow Tube-Mass Spectrometry

Table 4. Operating conditions of Selected Ion Flow Tube-Mass Spectrometry for analysis.

| Parameter | Value |
|--------------------------|----------------------------|
| Sample plate temperature | 110 °C |
| Inlet pipe temperature | 110 °C |
| Upstream pressure | 1.60 E ⁻⁰⁴ Torr |
| Flow tube pressure | 140 mTorr |
| Flow tube temperature | 120 °C |
| Downstream pressure | 1.00 E ⁻⁰⁶ Torr |
| Source pressure | 420.9 mTorr |

3.3. 악취 기여도 평가

악취는 여러 물질들이 복합적으로 작용하여 발생하는 것으로, 하나의 물질 농도만으로는 악취가 어느정도인지 알 수 없다. 더욱이 각 물질별로 최소감지농도가 다르기 때문에 개별적으로 측정된 물질의 농도만으로는 악취의 영향정도를 파악하거나, 물질별 비교 자체에 어려움이 있다. 따라서 발생한 악취에 대한 악취물질별 기여도를 평가하여, 악취발생지점에서의 주요 원인물질을 파악하는 것은 중요한 의미를 가진다. 악취활성값의 산정은 악취물질들이 저마다 최소감지농도를 갖는다는 것에 기초를 둔다(정지선, 2017). 이 방법은 Guadagni 등(Guadagni 등, 1963)에 의해 처음 제안되었다. 악취활성값은 측정된 개별 악취물질의 농도를 각각의 악취물질이 가지는 최소감지농도로 나눈 값으로 정의되어지며, 이를 이용하여 악취발생지점에서 주된 악취원인물질을 확인할 수 있는 악취기여도평가를 하였다. 본 연구에서는 악취활성값 산정을 위한 최소감지농도는 환경부에서 발표된 자료를 이용하였다(환경부, 2012).

악취활성값(Odor Activity Value, OAV)은 개별 악취물질의 농도를 각각의 악취물질이 가지는 최소감지농도로 나눈 값으로 정의(식-2)하고, 총악취활성값(Sum of Odor Activity Value, SOAV)은 개별 악취물질의 악취활성값의 합으로 정의(식-3)한다.

$$\text{악취활성값}(OAV) = \frac{\text{악취물질농도}(ppb)}{\text{악취물질의 최소감지농도}(ppb)} \quad (\text{식-2})$$

$$\text{총악취활성값}(SOAV) = \sum \text{개별 악취물질의 악취활성값}(OAV) \quad (\text{식-3})$$

악취기여도(Odor Contribution, OC) 평가는 총 악취활성값에 대한 개별물질의 악취활성값의 비율로 평가했다(식-4).

$$\text{악취기여도}(OC) = \frac{\text{악취활성값}(OAV)}{\text{총악취활성값}(SOAV)} \times 100 \quad (\text{식-4})$$

3.4. 악취확산모델링 평가

악취배출사업장에서 배출되는 악취물질이 주변지역으로 미치는 영향을 예측하기 위해서 주로 대기확산모델을 활용하고 있다(김영진 등, 2020). 우리나라에서는 대기확산현상을 예측하기 위하여 EPA의 추천모델 중에서 AERMOD와 CALPUFF를 주로 사용하고 있다.

본 연구에서는 CALPUFF를 이용하여 악취영향예측 결과를 분석하였고, 점오염원에서 오염물질 배출 후 이동경로를 파악이 가능한 모델링 소프트웨어 EPS-15(E2M3사)를 이용하였다.

3.5. 통계분석

악취유발물질 분석결과의 통계처리는 오픈소스소프트웨어인 R studio를 활용하여 분석하였다. 업종별 오염물질 농도의 차이 검증은 분산분석을 실시하였고, 차이가 있는 경우 Tukey's HSD test를 통해서 다중비교(multiple comparison)를 하여 집단간의 평균을 비교했다.

IV. 결과 및 고찰

4.1. 업종별 악취물질 데이터베이스

복합악취, 지정악취 22종 및 기타 악취물질 91종 등 총 114종의 악취물질을 6개 업종별(하수처리, 폐수처리, 목재제조, 금속제품제조, 도장처리, 합성고무·플라스틱 제품제조) 평균값으로 데이터베이스를 구축하였다. 배출구에서 채취한 시료 중 악취기여도평가를 위해 일부 고농도 시료를 선택하여 106건의 악취시료를 대상으로 했다.

4.1.1. 복합악취 분석 결과

2022년 인천광역시 보건환경연구원에서 분석한 악취배출시설 복합악취는 총 945건으로(Table 5), 배출구 시료가 893건(94.5 %)으로 대부분을 차지했고, 나머지 52건은 부지경계선 시료였다. 보건환경연구원에서는 복합악취 분석 결과를 토대로 배출허용기준 준수여부를 판정 한 후, 검사결과를 의뢰기관 통보한다. 기관별 의뢰건수는 서구 550건, 남동구 119건으로 전체 검사의 70.8 %를 차지하고, 부적합 건수는 서구가 52건으로 가장 많지만, 전체 부적합률과 비교하면 다소 높은 9.5 %를 보였다. 엄격한 배출허용기준 적용 검사건수는 775건으로 전체검사의 82.0 % 차지하고 있으며, 전체 부적합 80건 중 관리지역 62건, 비관리지역 18건으로 부적합률은 각각 8.0 %, 10.6 % 수준 이다.

본 연구에는 조사 대상 업종을 6개로 정해서 진행했으므로 악취시료 945건 중 조건에 맞는 106건만 선택해서 악취물질 조사를 진행했고, 하수처리시설 14개소, 폐수처리시설 16개소, 목재제조시설 11개소, 금속제품제조시설 27개소, 도장처리시설 22개소, 합성고무·플라스틱 제품제조시설 16개소가 대상이 되었다.

하수처리시설의 복합악취 회석배수 범위는 100~1,392 배였고, 폐수처리시설은 100~3,000 배, 목재제조시설은 100~6,694 배, 금속제품제조시설은 100~13,924 배, 도장처리시설은 100~1,000 배였으며, 합성고무 및 플라스틱 제품제조시설은 100~1,442 배였다(Table 6). 업종별 복합악취 평균값은 통계적 유의성이 없었다. 이는 악취배출시설에 따라 악취 발생 특성이 매우 다양하다는 전준민 등 (2010)의 연구결과와 유사하다. 또한 악취배출시설의 관리는 복합악취뿐만아니라 개별 악취오염물질을 관리하는 것이 중요하고, 업종에 따라 복합악취의 발생량이 정해지는 것이 아닌 사업장의 관리가 중요함을 시사한다.

Table 5. Current Status of Complex Odor Analysis for Malodor-emitting Facilities in Incheon Metropolitan City in 2022

| Classification | Number of examination cases | Nonconformity | Nonconformity rate (%) |
|---------------------------|-----------------------------|---------------|------------------------|
| Incheon Metropolitan City | 73 | 5 | 6.8 |
| Ganghwa-gun | 33 | 8 | 24.2 |
| Ongjin-gun | 2 | - | - |
| Jung-gu | 19 | 4 | 21.1 |
| Dong-gu | 38 | 1 | 2.6 |
| Michuhol-gu | 36 | 1 | 2.8 |
| Yeonsu-gu | 17 | 3 | 17.6 |
| Namdong-gu | 119 | 5 | 4.2 |
| Bupyeong-gu | 58 | 1 | 1.7 |
| Gyeyang-gu | - | - | - |
| Seo-gu | 550 | 52 | 9.5 |
| Sum | 945 | 80 | 8.5 |

Table 6. Analysis Results of Complex Odor by Industry

| Industrial Category | Number of Samples | Air Dilution Olfactory Method (Dilution Factor) | |
|--|-------------------|---|-----------------|
| | | Range | Mean ± S.D. |
| Sewage Treatment Plant (STP) | 14 | 100~1,392 | 514 ± 509.8 |
| Wastewater Treatment Plant (WTP) | 16 | 100~3,000 | 399 ± 729.3 |
| Wood Products Manufacturing Facility (WPMF) | 11 | 100~6,694 | 1,049 ± 2,182.7 |
| Metal Product Manufacturing Facility (MPMF) | 27 | 100~13,924 | 1,771 ± 3,547.3 |
| Paint Processing Facility (PPF) | 22 | 100~1,000 | 261 ± 279.3 |
| Synthetic Rubber and Plastic Product Manufacturing Facility (SRPPMF) | 16 | 100~1,442 | 329 ± 420.9 |
| SUM | 106 | 100~13,924 | - |

4.1.2. SIFT-MS를 이용한 악취 유발물질 분석 결과

22종의 지정악취물질과 91종의 악취유발물질 등 113종을 SIFT-MS로 분석한 결과, 업종간의 통계적인 차이가 있는 악취 유발물질은 12종이었다(Table 7).

지정악취물질 중에서는 메틸아이소부틸케톤만 업종간의 차이가 있었다. 도장처리시설이 합성고무·플라스틱 제품제조시설을 제외하고, 다른 4개시설(하수처리, 폐수처리, 목재제조, 금속제품제조)에 비해 평균배출농도가 통계적으로 유의하게 높았으며, 도장처리시설 > 합성고무·플라스틱 제품제조시설 > 목재제조시설 > 폐수처리시설 > 금속제품제조시설 > 하수처리시설 순으로 배출되었다(Figure 4-a). 메틸아이소부틸케톤(Methyl isobutyl ketone, $\text{CH}_3\text{COCH}_2\text{CH}(\text{CH}_3)_2$)은 지정악취물질 중 하나이며, 배출허용기준이 공업지역 3 ppm 이하, 기타지역 및 엄격한 배출허용기준은 1 ppm 이하이다. 달콤한 냄새, 약간의 케톤의 장뇌 냄새, 민트 같은 냄새를 가지고 있고, 최소감지농도는 0.3~0.7 ppm이다(한국산업안전보건공단, 2018). 비닐, 에폭시, 자연의 수지, 아크릴 수지, 나이트로셀룰로오스를 위한 용매로 인쇄업계에 염색을 위한 용매로 주로 사용된다. 주로 발생하는 업종은 카렌다(인쇄시설), 가죽제품 제조, 가공업이 있다고 알려져있다(환경부, 1999).

지정악취물질이 아닌 악취유발물질 중 업종간의 차이가 있는 물질은 11가지로, 1,4-벤조퀴논, 2-메톡시-2-메틸뷰테인, 아크릴로나이트릴, C3-알킬벤젠, 사이클로펜테인, 다이에틸벤젠, 다이메틸아민, 에틸벤젠, 헵테인, 헥세인, 염화수소로 분석되었다.

1,4-벤조퀴논은 목재제조시설이 하수처리시설, 폐수처리시설, 금속제품제조시설에 비해 평균배출농도가 통계적으로 유의하게 높았으며, 목재제조시설 > 합성고무·플라스틱 제품제조시설 > 도장처리시설 > 금속제품제조시설 > 폐수처리시설 > 하수처리시설 순으로 배출되었다(Figure 4-b). 1,4-벤조퀴논(1,4-Benzoquinone, para-quinone)은 케톤류이며 방향족화합물 중 하나이고, 화학식은 $\text{C}_6\text{H}_4\text{O}_2$ 이다. 1,2-벤조퀴논과는 이성질체이다. 냄새는 순수 상태에서 염소, 표백제와 같은 매운 냄새와 폼알데하이드 같은 자극적인 냄새가 난다. 최소감지농도는 0.4×10^{-3} ppm로 알려져 있다. 흡입, 삼키거나, 피부를 통해 흡수시 치명적일 수 있고, 만성노출 시 각막 구조의 손상을 일으킨다. 접착제, 접착방지제, 표백제, 방염제 촉매등 공정조절제, 안료, 도료, 하이드로퀴논의 제조, 인화약품 등으로 사용된다(환경부 화학물질안전원, 2022).

2-메톡시-2-메틸뷰테인의 평균배출농도는 도장처리시설이 하수처리시설에 비해 통계적으로 유의하게 높았으며, 도장처리시설 > 목재제조시설 > 합성고무·플라스틱 제품제조시설 > 금속제품제조시설 > 폐수처리시설 > 하수처리시설 순으로 농도가 높았다(Figure 4-c). 2-메톡시-2-메틸뷰테인(2-methoxy-2-methyl)은 tert-Amyl methyl ether(TAME)로 알려져있고, 분자식은 $\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}$, $\text{C}_2\text{H}_5\text{C}(\text{CH}_3)_2\text{OCH}_3$ 이다. 사용용도는 옥탄가 향상제로서 가솔린에 사용하고, 일산화탄소와 불연성의 탄화수소의 대기가스 배출량을 감소하기 위해 산소와 함께 연료로 사용되기도 한다(환경부 화학물질안전원, 2022).

아크릴로나이트릴은 금속제품제조시설이 목재제조시설, 폐수처리시설에 비해 평균배출농도가 통계적으로 유의하게 높았으며, 금속제품제조시설 > 목재제조시설 > 합성고무·플라스틱 제품제

조시설 > 도장처리시설 > 폐수처리시설 > 하수처리시설 순으로 배출되었다(Figure 4-d). 아크릴로나이트릴(Acrylonitrile)은 나이트릴 화합물, 탄화수소, 불포화 방향족 화합물이며, 분자식은 C_3H_3N 이다. 매우 연한 복숭아 냄새가 나고 거의 무취이다. 사람에 따라 달콤한 냄새, 양파, 마늘, 톱 쏘는 듯한 냄새 등 불쾌하고 짜증나는 냄새로 느끼기도 한다. 최소감지농도는 21.4 ppm이다. 플라스틱, 코팅제와 접착제 산업에서 쓰이고, 산화방지제, 제약, 염료, 표면활성제 등 합성할 때도 쓰이며, 살충제 훈증제로써 쓰이기도 한다(환경부 화학물질안전원, 2022).

C3-알킬벤젠은 도장처리시설이 폐수처리시설, 금속제품제조시설, 하수처리시설에 비해 평균배출농도가 통계적으로 유의하게 높았으며, 도장처리시설 > 합성고무·플라스틱 제품제조시설 > 폐수처리시설 > 목재제조시설 > 금속제품제조시설 > 하수처리시설 순으로 배출되었다(Figure 4-e).

사이클로펜테인(Cyclopentane)은 목재제조시설이 금속제품제조시설, 하수처리시설에 비해 평균배출농도가 통계적으로 유의하게 높았으며, 목재제조시설 > 도장처리시설 > 합성고무·플라스틱 제품제조시설 > 폐수처리시설 > 금속제품제조시설 > 하수처리시설 순으로 배출되었다(Figure 4-f). 사이클로펜테인(Cyclopentane)은 지방족 포화 탄화수소류로, 분자식은 C_5H_{10} 이다. 냄새는 순한, 에테르 비슷한 달콤한 냄새가 난다. 증기를 흡입 시 어지러움, 구역질 유발하고, 고농도의 증기는 심각한 폐의 자극과 즉각적인 폐부종, 무의식과 허탈을 유발할 수 있다. 합성을 위한 시작물질 용매와 셀룰로오스 에테르의 용매, 모터 연료, 및 살충제, 진통제, 진정제, 수면제, 항암제와 같은 의약품 등 많은 제품들을 생성하기 위해 사용된다(환경부 화학물질안전원, 2022).

다이에틸벤젠은 도장처리시설이 폐수처리시설, 금속제품제조시설, 하수처리시설에 비해 평균배출농도가 통계적으로 유의하게 높았으며, 도장처리시설 > 합성고무·플라스틱 제품제조시설 > 목재제조시설 > 폐수처리시설 > 금속제품제조시설 > 하수처리시설 순으로 배출되었다(Figure 4-g). 다이에틸벤젠(Diethylbenzene)은 방향족 탄화수소류며, 분자식은 $C_{10}H_{14}$ 이다. 방향성 냄새가 난다. 용매로 주로 쓰인다(환경부 화학물질안전원, 2022).

다이에틸아민은 목재제조시설이 하수처리시설에 비해 평균배출농도가 통계적으로 유의하게 높았으며, 목재제조시설 > 금속제품제조시설 > 도장처리시설 > 합성고무·플라스틱 제품제조시설 > 폐수처리시설 > 하수처리시설 순으로 배출되었다(Figure 4-h). 다이에틸아민(Dimethylamine)은 아민류로, 분자식이 C_2H_7N 이다. 암모니아와 물고기 같은 비린 냄새가 나며, 최소감지농도는 $0.76 \times 10^{-3} \sim 1.6$ ppm이다. 사용용도는 경화 고무의 가속장치, 태닝, 비누와 세제의 제조업. 목화다래바구미(Boll weevil) 유인제와 구제약, 산화방지제 등으로 쓰인다(환경부 화학물질안전원, 2022).

에틸벤젠은 도장처리시설이 목재제조시설을 제외하고, 다른 4개시설(하수처리시설, 폐수처리시설, 금속제품제조시설, 합성고무·플라스틱 제품제조시설)에 비해 평균배출농도가 통계적으로 유의하게 높았으며, 도장처리시설 > 목재제조시설 > 합성고무·플라스틱 제품제조시설 > 폐수처리시설 > 금속제품제조시설 > 하수처리시설 순으로 배출되었다(Figure 4-i).

에틸벤젠 (Ethylbenzene)은 방향족 탄화수소류로, 분자식이 C_8H_{10} 이다. 자극적인 달콤하고 가솔린 비슷한 냄새가 나며, 최소감지농도는 0.4~140 ppm이다. 셀룰로스(cellulose), 아세트산 (acetate), 스타이렌(styrene)과 합성고무의 제조에서 쓰이며, 용제나 희석액; 자동차 및 항공 가솔린의 성분, 산화방지제로 쓰인다(환경부 화학물질안전원, 2022).

헵테인은 도장처리시설이 하수처리시설, 금속제품제조시설에 비해 평균배출농도가 통계적으로 유의하게 높았으며, 도장처리시설 > 폐수처리시설 > 합성고무·플라스틱 제품제조시설 > 목재제조시설 > 하수처리시설 > 금속제품제조시설 순으로 배출되었다(Figure 4-j). 헵테인(Heptane)은 지방족 포화 탄화수소류로, 분자식이 C_7H_{16} 이다. 가솔린 비슷한 냄새가 나며, 최소감지농도 48.78~312.20 ppm 이다. 사용용도는 락커류 및 에나멜류의 용매로서, 유기 합성물에 사용된다.

헥세인은 도장처리시설이 금속제품제조시설, 폐수처리시설, 하수처리시설에 비해 평균배출농도가 통계적으로 유의하게 높았으며, 도장처리시설 > 합성고무·플라스틱 제품제조시설 > 목재제조시설 > 금속제품제조시설 > 폐수처리시설 > 하수처리시설 순으로 배출되었다(Figure 4-k). 헥세인(Hexane)은 지방족 포화 탄화수소류로, C_6H_{14} 이다. 가솔린 비슷한 냄새와 특이한 파라핀 냄새가 나며, 최소감지농도가 1.82 ppm이다. 많은 지방족 화합물 용매의 부수적인 구성 요소, 페인트와 에나멜 희석제, 또한 잉크 희석액과 클리닝 용매로 쓰인다.

염화수소는 목재제조시설이 모든업종에 비해 평균배출농도가 통계적으로 유의하게 높았으며, 목재제조시설 > 합성고무·플라스틱 제품제조시설 > 도장처리시설 > 금속제품제조시설 > 폐수처리시설 > 하수처리시설 순으로 배출되었다(Figure 4-l). 염화수소(염산, Hydrogen chloride)는 무기 비산화 산류로, 분자식은 HCl이다. 부식성 기체, 압축가스, 염산 수용액로 존재하고, 특 쓰는 자극적, 숨막히는 냄새가 난다. 최소감지농도는 0.26~0.77 ppm이다. HCl는 다양한 산업 공정에서 많이 사용되는데, 순수 HCl 가스의 일반적인 용도는 태양 전지, 전자제품 응용 분야의 고순도 실리콘 생산, 유기 화학 및 다양한 금속가공 공정에도 사용된다.

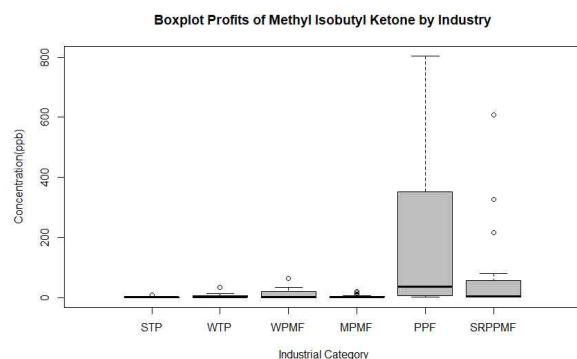
업종간의 통계적인 차이가 있는 악취 유발물질은 12종 중 7종이 도장처리시설에서 배출되었고, 목재시설 4종, 금속제품제조시설 1종으로 나타났다. 도장처리시설에서 배출된 주요악취물질은 메틸아이소부틸케톤, 2-메톡시-2-메틸뷰테인, C3-알킬벤젠, 다이에틸벤젠, 에틸벤젠, 헵테인, 헥세인이었고, 작용기별로 구분하면 벤젠류와 지방족탄화수소류, 케톤류 순으로 주를 이루고 있다. 목재시설에서 배출된 주요 악취물질은 1,4-벤조퀴논, 사이클로펜테인, 다이메틸아민, 염화수소로 다양한 물질이 배출되었다. 금속제품제조시설에서는 아크릴로나이트릴이 배출되었다. 본 연구 결과를 통해 악취배출시설의 악취원인 물질 조사 시, 22종의 지정악취물질뿐만 아니라 본 연구에서 다뤄진 11종의 기타악취물질도 포함하여 관리하는 것이 필요하다는 것을 시사하고 있으며, 도장처리시설과 목재제조시설에 대해서는 주기적인 지도점검이 필요할 것으로 보인다.

Table 7. Analysis Results of major odorous substances by Industry (Unit : ppb, Mean \pm Standard deviation)

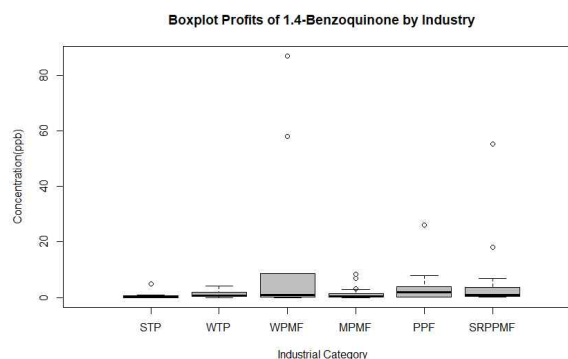
| Industrial category (CAS number) | Methyl isobutyl ketone 108-10-1 | 1,4-Benzo quinone 106-51-4 | 2-Methoxy -2-methyl butane 994-05-8 | Acrylonitrile 107-13-1 | C3-Alkyl benzene - | Cyclo pentane 287-92-3 | Diethyl benzene 25340-17-4 | Dimethyl amine 124-40-3 | Ethyl benzene 100-41-4 | Heptane 142-82-5 | Hexane 110-54-3 | Hydrogen Chloride 7647-01-0 |
|---|--|----------------------------------|--|---------------------------|--------------------------|------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| Sewage Treatment Plant | 1.39 * \pm 2.05 | 0.64 * \pm 1.3 | 8.35 * \pm 6.1 | 3.24 \pm 3.8 | 2.04 * \pm 3.1 | 18.31 * \pm 21.9 | 0.58 * \pm 1.4 | 41.37 * \pm 37.0 | 12.86 * \pm 17.7 | 19.45 * \pm 56.5 | 101.98 * \pm 137.0 | 0.23 * \pm 0.5 |
| Waste Water Treatment Plant | 5.80 * \pm 8.18 | 1.15 * \pm 1.2 | 28.58 \pm 45.2 | 5.17 * \pm 7.2 | 27.56 * \pm 63.3 | 80.38 \pm 150.2 | 2.27 * \pm 2.1 | 57.54 \pm 42.8 | 55.51 * \pm 86.5 | 94.18 \pm 319.6 | 148.30 * \pm 247.9 | 2.11 * \pm 2.9 |
| Wood Products Manufacturing Facility | 12.63 * \pm 20.94 | 15.92 * \pm 30.7 | 51.07 \pm 71.9 | 38.11 * \pm 88.7 | 21.89 \pm 22.1 | 234.89 * \pm 356.8 | 7.46 \pm 11.7 | 154.25 * \pm 194.6 | 141.02 \pm 194.1 | 29.06 \pm 35.5 | 356.99 \pm 777.2 | 32.07 * \pm 41.3 |
| Metal Product Manufacturing Facility | 3.63 * \pm 5.40 | 1.40 * \pm 2.2 | 29.47 \pm 62.7 | 75.46 * \pm 158.1 | 15.01 * \pm 17.2 | 45.72 * \pm 73.6 | 2.24 * \pm 3.2 | 101.50 \pm 90.9 | 47.47 * \pm 107.7 | 18.08 * \pm 27.4 | 242.11 * \pm 406.4 | 3.60 * \pm 13.4 |
| Paint Processing Facility | 217.88 * \pm 301.26 | 3.55 \pm 5.9 | 78.38 * \pm 101.2 | 21.28 \pm 31.8 | 382.28 * \pm 747.3 | 139.76 \pm 169.0 | 30.16 * \pm 48.6 | 65.80 \pm 54.6 | 574.19 * \pm 851.3 | 424.50 * \pm 761.2 | 1135.90 * \pm 1709.3 | 3.67 * \pm 7.9 |
| Synthetic Rubber and Plastic Product Manufacturing Facilities | 80.56 \pm 168.69 | 5.92 \pm 13.9 | 30.52 \pm 39.7 | 29.48 \pm 65.1 | 87.63 \pm 207.4 | 122.37 \pm 185.9 | 10.00 \pm 27.9 | 62.83 \pm 67.2 | 124.55 * \pm 281.0 | 60.93 \pm 142.0 | 468.05 \pm 687.8 | 5.36 * \pm 12.5 |

* Asterisks in the each column indicate significant statistical differences($p < 0.05$, Tukey's test)

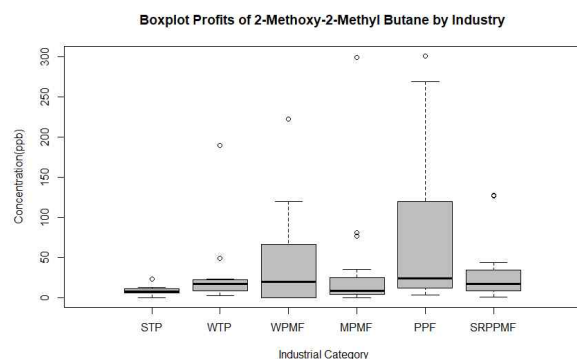
(a) Methyl Isobutyl Ketone



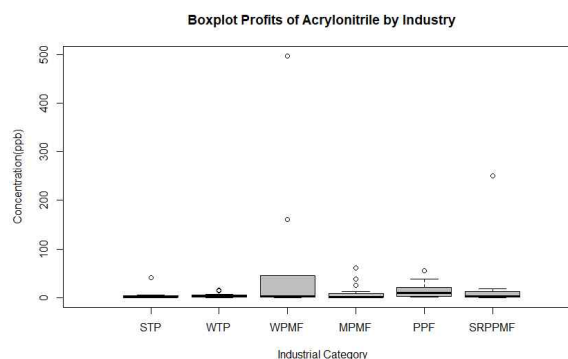
(b) 1,4-Benzoquinone



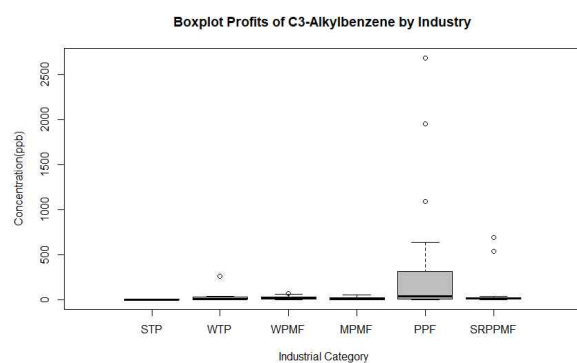
(c) 2-Methoxy-2-Methyl Butane



(d) Acrylonitrile



(e) C3-alkylbenzene



(f) Cyclopentane

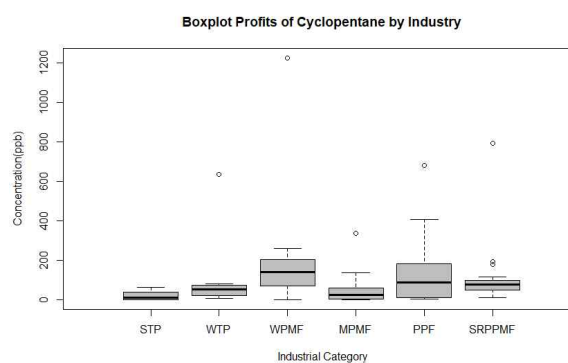
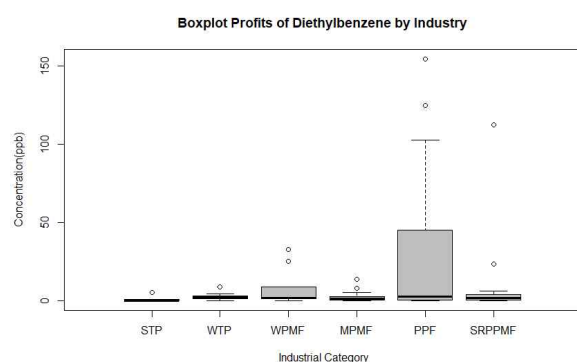
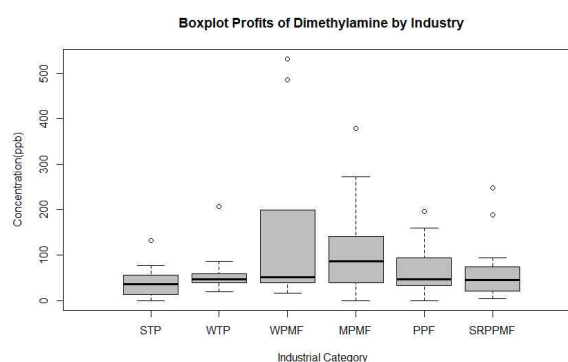


Figure 4. Boxplot of the odour concentrations by Industry (a) Methyl isobutyl ketone, (b) 1,4-benzoquinone, (c) 2-methoxy-2-methyl butane, (d) Acrylonitrile, (e) C3-alkylbenzene, (f) Cyclopentane. The abbreviation for Malodor-emitting Facilities is “STP” to “Sewage Treatment Plant”, “WTP” to “Wastewater Treatment Plant”, “WPMF” to “Wood Products Manufacturing Facility”, “MPMF” to “Metal Product Manufacturing Facility”, “PPF” to “Paint Processing Facility”, and “SRPPMF” to “Synthetic Rubber and Plastic Product Manufacturing Facility”.

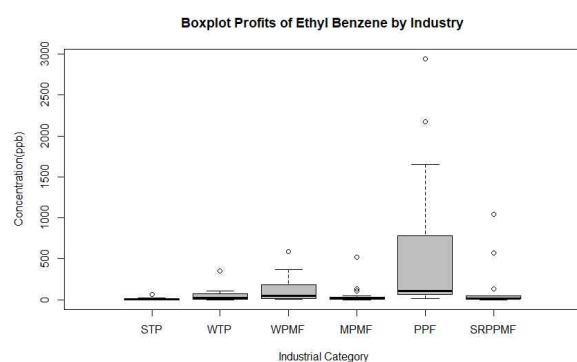
(g) Diethylbenzene



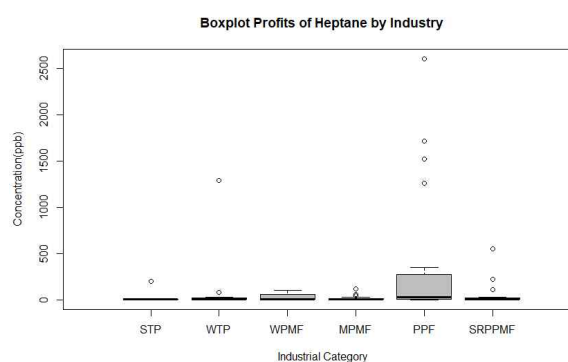
(h) Dimethylamine



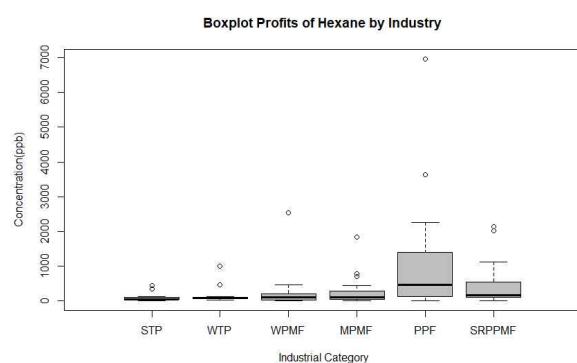
(i) Ethyl benzene



(j) Heptane



(k) Hexane



(l) Hydrogen chloride

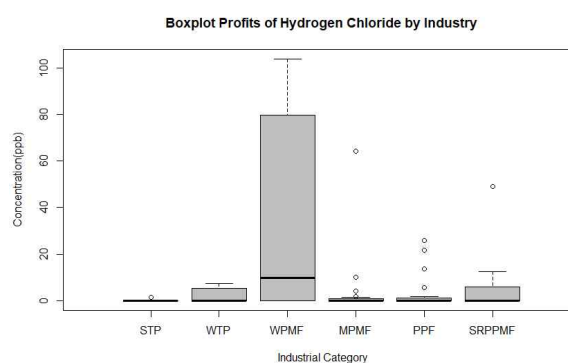


Figure 4. Boxplot of the odour concentrations by Industry (g) Diethylbenzene, (h) Dimethylamine, (i) Ethyl benzene, (j) Heptane, (k) Hexane, (l) Hydrogen chloride. The abbreviation for Malodor-emitting Facilities is “STP” to “Sewage Treatment Plant”, “WTP” to “Wastewater Treatment Plant”, “WPMF” to “Wood Products Manufacturing Facility”, “MPMF” to “Metal Product Manufacturing Facility”, “PPF” to “Paint Processing Facility”, and “SRPPMF” to “Synthetic Rubber and Plastic Product Manufacturing Facility”.

4.2. 악취기여도 (Odor Contribution, OC)

4.2.1. 지정악취물질 악취기여도 평가

지정악취 22종에 악취기여도 평가 결과, 6개 업종 모두 뷰티르산의 기여도가 90 % 이상으로 가장 컸는데 이는 뷰티르산과 동시에 분석되는 에틸아세테이트로 인한 것으로 판단된다.

뷰티르산을 제외한 21종에 대한 악취기여도 평가는 다음과 같았다(Figure 5).

하수처리시설의 경우는 아세트알데하이드(23.6 %) > 메틸메르캅탄(21.8 %) > 다이메틸설파이드(21.4 %) > 황화수소(14.6 %) > 발레르산(6.4 %) 순으로 악취기여도가 평가되었다. 일반적으로 황화합물은 하수처리장, 분뇨처리장, 쓰레기 매립장 등 환경기초시설과 하수관거 등에서 배출되는 것으로 알려져 있는데, 본 연구결과에서도 황화합물(메틸메르캅탄, 다이메틸설파이드, 황화수소)이 전체의 57.8 %를 차지하며 가장 큰 기여도를 보였다. 또, 아세트알데하이드가 개별 물질 중에서는 가장 큰 기여도를 보였는데, 비슷한 결과가 김승혜&박찬진(2021)에 의해 보고되었다. 수처리장의 수처리공정과 슬러지 처리공정에서 공통적으로 아세트알데하이드가 검출되었고(이찬형 등, 2017), 사료제조시설과 음식물류 폐기물 처리시설의 경우 아세트알데하이드를 포함한 5종의 알데하이드가 검출되었다(유승성 등, 2012; 임지영 등, 2018). 이는 주로 미생물의 활동에 의해 발생되었는데 특히 고농도의 아세트알데하이드가 발생하는 이유는 음식물류 폐기물이 발효과정을 거쳐 알코올을 생성하고 알코올탈수효소에 의해 아세트알데하이드로 산화되었기 때문이다. 2010년~2020년의 10년간 국내외 악취물질중 알데하이드류 제어 연구 동향을 검토한 결과, 최근에 가장 많이 연구된 방법은 흡착(27 %) 및 플라즈마-촉매(17 %), 광촉매(39 %)로 조사되었다(김승혜&박찬진, 2021).

폐수처리시설의 경우는 트라이메틸아민 (47.4 %) > 다이메틸설파이드(25.0 %) > 황화수소(7.3 %) > 발레르산(6.7 %) > 아세트알데하이드(5.2 %) 순으로 악취기여도가 평가되었다. 목재제조시설의 경우는 발레르산(21.7 %) > 아세트알데하이드(20.8 %) > 다이메틸설파이드(20.6 %) > 트라이메틸아민(17.4 %) > 발레르알데하이드(4.4 %) 순으로 악취기여도가 평가되었다.

금속제품제조시설의 경우는 아세트알데하이드(38.0 %) > 발레르산(18.8 %) > 다이메틸설파이드(12.1 %) > 트라이메틸아민(10.1 %) > 뷰틸알데하이드(5.7 %) 순으로 악취기여도가 평가되었다. 금속제품제조시설의 특성상 주조공정과 최종 공정에서 악취가 다량 발생하게 된다. 주조 공정의 경우 주형의 원료가 되는 주물사와 점결력의 향상을 위해 투입한 폐놀수지, 퓨란수지 및 에스테르 등이 주형을 제조하는 과정에서 고온과 결합하게 되면서 알데하이드류, 아민류 및 벤젠 등의 악취물질의 발생 원인이 된다. 본 연구에서도 알데하이드류(43.7 %)가 주 악취물질이었다. 또한 제품을 최종 생산하는 과정에서도 원료를 연마, 가공하는 과정에서 악취가 발생하게 된다. 기계제조업에서 발생하는 악취물질 중 벤젠과 톨루엔 등의 물질은 잠재적인 발암 물질이며, 폐놀의 경우에도 인체에 유해한 영향을 끼치는 것으로 알려져 있다(Gioda A 등, 2005; 백승륜, 2011).

도장처리시설의 경우는 발레르산(49.1 %) > 트라이메틸아민(24.4 %) > 프로피온산(11.0 %) > 다이메틸설파이드(7.2 %) > 아세트알데하이드(3.0 %) 순으로 악취기여도가 평가되었다. 합성고무 및 플라스틱 제품제조시설의 경우는 발레르산(65.1 %) > 다이메틸설파이드(12.4 %) > 트라이메틸아민(5.5 %) > 아세트알데하이드(5.4 %) > 프로피온산(3.2 %) 순으로 악취기여도가 평가되었다.

4.2.2. 기타 악취유발물질 악취기여도 평가

기타악취물질 중 최소감지농도가 문헌에 존재하는 49종을 작용기에 따라 11가지로 나뉘고, 그 그룹에 대한 악취기여도를 평가하였다. 모든 업종에서 황화합물의 기여도가 가장 컸으며, 평균 98.4 % 기여도를 가졌으며, 황화합물 중에서는 에틸메르캅탄의 기여도가 가장 높았다. 하수처리시설은 황화합물 > 알데하이드류 > 페놀류 > 산류 > 방향족 순으로 악취기여율이 컸다. 폐수처리시설은 황화합물 > 페놀류 > 방향족 > 알데하이드류 > 산류 순이었다. 목재제조시설은 황화합물 > 페놀류 > 알데하이드류 > 방향족 > 산류 순이었다. 금속제품제조시설은 황화합물 > 페놀류 > 알데하이드류 > 방향족 > 산류 순이었다. 도장처리시설은 황화합물 > 페놀류 > 방향족 > 알데하이드류 > 산류 순이었다. 합성고무 및 플라스틱 제품제조시설은 황화합물 > 페놀류 > 방향족 > 산류 > 알데하이드류 순으로 나타났다.

4.3. 악취확산모델링

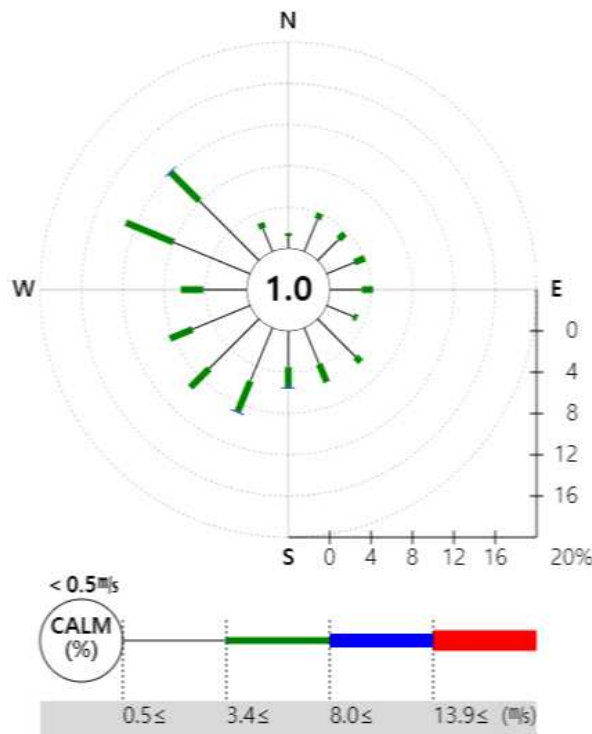
4.3.1. 연구대상지역 기상자료 분석

2022년 기청상의 종관기상관측소 인천기상대(11)의 기상자료를 분석한 결과(Figure 5) 주풍향은 서북서(WNW)풍으로 나타났으며, 평균풍속 2.9 m/s, 최대풍속 10.5 m/s로 나타났다. 계절별로는 봄 남남서, 여름 남서, 가을 서북서, 겨울 북서풍이 주풍향이였다. 인천기상대의 기상자료를 활용하여 연구대상지역의 악취확산모델링을 수행했다.

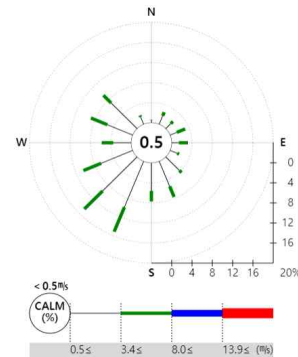
4.3.2. 악취확산 모델링 결과

본 연구에 적용된 CALPUFF 모델은 우리나라와 같이 삼면이 바다로 되어 있고 도시나 공단 등이 해안지역에 위치한 경우 해륙풍 순환의 영향을 받는 풍하측 농도를 예측하는데 적합한 모델이다. 본 연구에서는 서구에 위치한 산업단지 내에서 발생하는 복합악취를 대상으로 확산모델링을 이용하여 주변지역에 미치는 영향을 분석하였다. 모델링 결과, 모델링 대상지역의 모델링 기간 중 1시간 평균 복합악취 최대값은 0.0043 OU로 예측되었다(Figure 6). 이는 인천시의 서구뿐만 아니라 김포시 일부와 부평구까지 영향을 미치는 것으로 나타났고(Figure 6-a), 2022년 1월부터 12월까지의 영향범위는 동쪽으로 더 확장되는 것으로 나타났다(Figure 6-b).

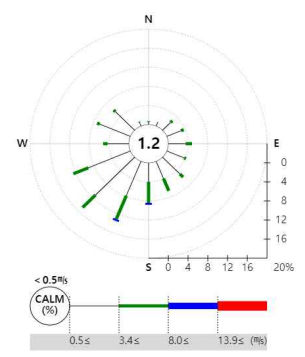
(a) Wind rose plots in 2022



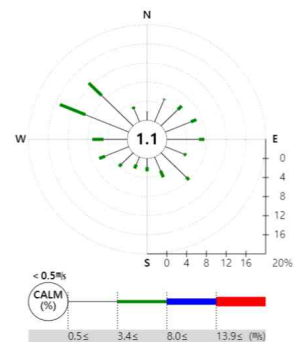
(b) Wind rose in the spring of 2022



(c) Wind rose in the summer of 2022



(d) Wind rose in the autumn of 2022



(e) Wind rose in the winter of 2022

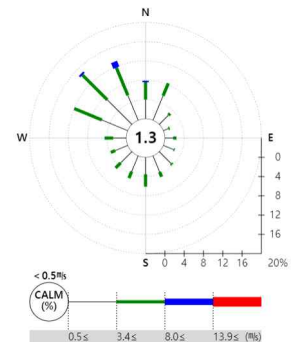
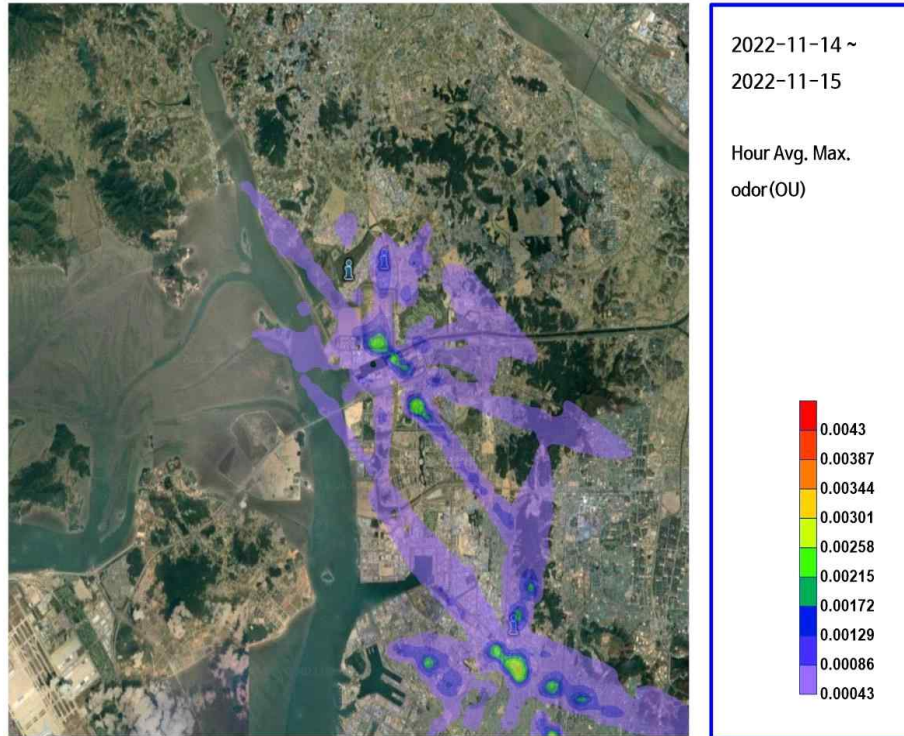


Figure 5. Annual and Seasonal wind rose plots for Incheon Metropolitan City during the sampling period

(a) Distributions of the simulated complex odor emission at the time of sample collection



(b) Distributions of the simulated complex odor emission during 2022

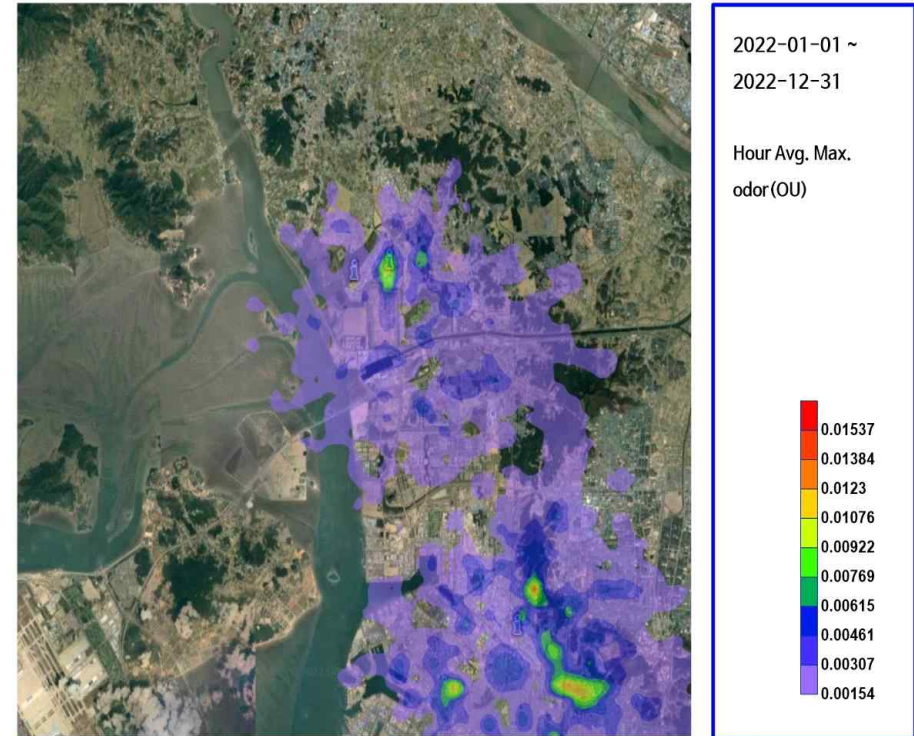


Figure 6. Distributions of the simulated complex odor emission in Seo-gu, Incheon Metropolitan City.
The values within rectangle indicate the simulated complex odor maximum emission per hour.

V. 결론

본 연구에서는 전처리과정 없이 실시간 연속 측정이 가능한 선택적다중이온질량분석기(SIFT-MS, Selected Ion Flow Tube-Mass Spectrometry)를 이용하여 인천광역시 내에서 민원을 주로 유발하는 악취배출시설 6종(하수처리, 폐수처리, 목재제조, 금속제품제조, 도장처리, 합성고무·플라스틱 제품제조)의 배출구에서 복합악취, 지정악취 및 악취 유발물질 91종을 분석한 결과는 다음과 같다.

1. 하수처리시설의 복합악취 회석배수 범위는 100~1,392 배였고, 폐수처리시설은 100~3,000 배, 목재제조시설은 100~6,694 배, 금속제품제조시설은 100~13,924 배, 도장처리시설은 100~1,000 배였으며, 합성고무 및 플라스틱 제품제조시설은 100~1,442 배였다. 업종별 복합악취 평균값은 통계적 유의성이 없었다.

2. 업종간의 통계적인 차이가 있는 악취 유발물질은 12종으로 나타났으며, 7종이 도장처리시설에서 배출되었고, 목재시설 4종, 금속제품제조시설 1종으로 나타났다. 도장처리시설에서 배출된 주요악취물질은 메틸아이소부틸케톤, 2-메톡시-2-메틸뷰테인, C3-알킬벤젠, 디에틸벤젠, 에틸벤젠, 헵테인, 헥세인이었고, 벤젠류가 주를 이루고 있다. 목재시설에서 배출된 주요 악취물질은 1,4-벤조퀴논, 사이클로펜테인, 다이메틸아민, 염화수소로 다양한 물질이 배출되었다. 금속제품제조시설에서는 아크릴로나이트릴이 배출되었다.

3. 악취배출시설의 지정악취물질 악취기여도평가를 한 결과, 하수처리시설과 금속제품제조시설은 아세트알데하이드가 악취 기여도가 가장 컸고 폐수처리시설은 트라이메틸아민, 목재제조시설과 도장처리시설, 합성고무 및 플라스틱 제품제조시설은 발레르산이 악취 기여도가 컸다.

4. 악취확산모델링(CALPUFF 모델) 결과 서구에 위치한 산업단지에서 발생한 악취물질이 서구뿐만 아니라 김포시 일부와 부평구까지 영향을 미치는 것으로 나타났다.

5. 업종별 악취배출시설의 전수조사가 이뤄지지 않아 모든 시설에 대해서 본 연구 결과를 적용하는데 한계를 가지고 있지만, 본 연구는 향후 악취 저감 기초자료와 악취민원발생 시 신속한 배출원 추적수단으로 활용 될 수 있을 것으로 기대된다.

VI. 참고문헌

1. Gioda A., Sales J. A., Cavalcanti P. M. S., Maia M F., Neto F. R. A., 2005. Exposure to high levels of benzene and risk of cancer. *Fresenius environmental bulletin* 14(4), 259-262.
2. Guadagni, D. G., Buttery, R. G., Okano, S., Burr, H. K., 1963. Additive effect of subthreshold concentrations of some organic compounds associated with food aromas. *Nature* 200, 1288-1289.
3. 강인선, 2008. 우리나라 지정악취물질의 최소감지농도와 희석배수 등 악취지표간 상관성에 대한 실험적 연구. 석사학위논문, 우송대학교.
4. 국립환경과학원, 2016. 악취관리 개선방안 적용을 위한 연구.
5. 국립환경과학원, 2021. 환경분야 센서형 간이측정기 신뢰성 평가기법 연구(III) : 소음진동 및 악취분야.
6. 김승혜, 박찬진, 2021. 국내 지정악취물질 중 알데히드류의 최근 제어 연구 동향에 대한 연구. *실내환경 및 냄새 학회지* 20(4), 275-287.
7. 김영진, 한진석, 김성태, 장현섭, 2020. 현장후각측정방법의 국내 적용 연구. *한국도시환경학회지* 20(1), 49-59.
8. 김영훈, 2011. 악취 표준가스에 대한 악취센서와 공기희석관능법의 상관성 평가 및 검증 실험. 석사학위논문, 대전대학교.
9. 박상진, 김선태, 이민도, 한직선, 2010. 지정악취물질의 최소감지농도 측정에 관한 연구. *실내환경 및 냄새 학회지* 9(4), 192-195.
10. 박정은, 2021. 선택적 다중이온 질량분석기(SIFT-MS)를 응용한 해양 기원의 휘발성 유기 황 화합물의 분석법. 석사학위논문, 고려대학교.
11. 백승륜, 2011. 공장 악취에 대한 악취센서와 공기희석관능법의 업종별 상관성 분석. 석사학위논문, 인하대학교.
12. 손현동, 안준진, 하성용, 김기범, 임운혁, 2018. 선택적다중이온질량분석기를 이용한 대기 중 휘발성유기화합물 실시간 동시분석법 개발 및 적용. *한국대기환경학회지* 34(3), 393-405.
13. 악취공정시험기준 (행정규칙 국립환경과학원고시 제2022-78호, 2022. 11. 29.).
14. 악취방지법 (법률 제17845호, 2021. 1. 5.) 제2조 제1호.
15. 유승성, 김영두, 이준연, 차영섭, 김은숙, 전재식, 선우영, 엄석원, 채영주, 2012. 음식물류폐기물 처리시설에서의 악취발생 특성 및 관리방안. *환경영향평가* 21(3), 353-365.
16. 이찬형, 전현숙, 권병윤, 김은덕, 장윤재, 이명숙, 금종록, 송희봉, 2017. 대구시 산업단지 염색폐수처리장의 악취발생 특성. *한국환경보건학회지* 43(4), 314-323.
17. 인천광역시, 2021. 2022년 악취관리 종합시책.
18. 인천광역시, 2021. 서북부권역 등 악취 실태조사 및 중·단기 악취 시책 수립 용역 보고서.
19. 인천광역시, 2022. 2022년 인천광역시 환경백서.
20. 인천지역환경기술개발센터, 2011. 인천남동공단 내 주요 업종별 악취배출 특성 규명 및 관리방안.
21. 임지영, 전용빈, 송승준, 조영근, 김진한, 2018. 사료제조 공장의 발생악취 특성 및 약액세정

- 타를 이용한 악취저감효율 평가. 실내환경 및 냄새 학회지 17(4), 389-395.
22. 전준민, 서윤섭, 정만호, 이학성, 이민도, 한진석, 강병욱, 2010.). 환경기초시설의 악취물질 배출특성-5개 시설(하·폐수, 축산·분뇨 및 음식물) 처리장 중심으로. 한국냄새환경학회지 9(2), 80-89.
 23. 정민영, 2015. 악취관리지역의 흡착에 의한 산업시설 악취관리 특성. 석사학위논문, 인천대학교.
 24. 정지선, 2017. 악취의 배출원별 특성과 사회적 수용성에 관한 연구. 박사학위논문, 한국교통대학교.
 25. 최성득, 2022. 울산광역시 악취발생 현황과 통합관리체계 구축 제안. 환경분석과 독성보건 25(1), 43-49.
 26. 한국산업단지공단, 2022. 전국산업단지현황통계.
 27. 한국산업안전보건공단, 2018. 메틸 이소부틸케톤에 대한 작업환경측정, 분석 기술지침.
 28. 한진석, 김선태, 2015. 악취강도와 지방산 화합물 및 i-부틸알코올 농도와의 상관관계와 배출 허용기준의 적정성 연구. 실내환경 및 냄새 학회지 14(4), 315-322.
 29. 환경부 화학물질안전원, 2022. 2020년도 화학물질 배출량 조사결과.
 30. 환경부, 1999. 악취배출시설 관리업무 편람.
 31. 환경부, 2012. 악취관리 편람.
 32. 환경부, 한국환경공단, 2022. 2022 악취관리 연찬회 자료집.