드론을 활용한 산업단지 주변 대기오염물질 분포 특성에 관한 연구

최성우, 이상헌, 박정민, 최성화, 차영욱, 이서이

대기환경연구부 환경보건팀

A Study on the Characteristics of Air Pollutants Distribution around Industrial Complexes using Drone

Choi Seong-woo, Lee Sang-hun, Park Jeong-min, Choi Seong-hwa, Cha Young-wook and Lee Seo-i

Environmental Health Team

Abstract

The Air pollution monitoring by altitude of industrial complexes in Busan was investigated by using drone. The fine dust was measured using drone, gas was collected and analyzed by SIFT-MS. The results were as follows.

1. As a result of analyzing 84 types of SIFT-MS, industrial complexes were about 2 times as high as green areas and 1.4 times higher than commercial areas.
2. Aromatic, epoxide and ketone groups were relatively high in Noksan national industrial area. Alkane, alcohol and inorganic groups were relatively high in Shinpyeong-Jangrim general industrial complex.
3. In case of the aromatic compounds, the SOA(Secondary Organic Aerosol) and the OFP(Ozone Formation Potential) are high. Therefore, continued emission management is required to reduce ozone and fine particle precursor.
4. The air pollution measurement using drone on the ground was abouet ± 5% more error than direct measurement methods.
5. As the altitude increased, the concentration of air pollutants has decreased and the concentration was increased in the temperature inversion.
6. The gaseous pollutants were affected by the downflow of drone propellers, and the altitude of 10m was the optimal point. Particulate pollutants were more affected by drone than gaseous pollutants and the altitude of 30m was the optimal point.
7. In this study, the optimal altitude was confirmed when checking air pollutants in industrial complexes using drone. In the future, more studies on various pollutants will be needed.

Key words *: Drone, OFP, PM-2.5, SIFT-MS, VOCs*

1. 서 론

산업단지에서 배출되는 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds ; VOCs)은 미세먼지 및 오존생성의 전구물질로, 배출원 관련 연구가 활발히 진행되고 있으나, 대기오염 농도측정은 사업장 부지경계의 지상에서 이루어지며, 고도별 오염분포에 대한 연구는 상대적으로 미미한 상태이다. 일반적으로 고도별 대기오염 측정에는 유인비행기 및 라디오존데를 이용하는데,[1)~4)] 비용과 조작의 문제점으로 연구수행에 어려움이 있으며, 특히, VOCs의 경우 사업장 배출구 굴뚝 높이 및 온도, 기압 등에 따라 확산, 분포 및 최대 착지농도거리가 변화할 수 있어, 고도별 환경오염 정보가 필요한 실정이다. 최근 드론을 활용하여 대기 중 유해물질 농도측정하는 다양한 측정기법이 연구되고 있어,[5),6)] 공간이동을 통해 직접 접근이 어려운 지점의 환경오염 정보를 쉽게 구할 수 있다. VOCs는 사업장 배출, 차량 증가 등 다양한 원인으로 증가추세에 있으며, 대부분의 VOCs는 악취 원인물질로 산업시설과 인접한 주거지역의 대기질에 악영향을 미칠 수 있어 연구 및 관리가 중요하다.[7)]

미세먼지 또한 사회적인 문제로 크게 대두되고 있으며, 국내에선 이를 관리하기 위해 대기오염측정망을 설치하여 관측하고 있으나, 대부분 지상 20m 이내에 설치된 무인관측소로 특정 고도의 미세먼지 정보만 포집되고 있다. 환경부에 따른면 고도차에 의한 미세먼지 분포도의 차이는 미미하다고 발표하였으나,[8)] 해당 통계는 짧은 기간 동안의 한시적 측정결과로 다른 시점의 측정결과와 의미적 차이가 발생함을 확인 할 수 있다.[9)] 이런 문제점을 해결하고자 국내 연구소 등에 의해 드론을 이용한 미세먼지 포집연구가 진행되고 있으나, 드론을 통한 대기오염조사 시 드론 프로펠라에 의한 대기흐름으로 비행전과 비교시 측정센서 수치가 약 0.2~0.5% 더 적게 측정되는 연구결과가 있어,[10)] 드론을 통한 데이터 수집 중 프로펠러 바람에 의한 영향 및 측정오차를 줄이는 다양한 연구가 진행되고 있다.[11)~13)] 드론은 연속비행 시간이 짧고, 기상조건에 영향을 받는다는 단점이 있지만, 상대적으로 비용이 저렴하고 짧은 시간 간격으로 원하는 지점과 고도에서 반복적인 측정이 가능하다는 장점이 있어, 고도별 대기오염물질 분포를 측정하는데 적합하다.[11)]

부산의 산업단지는 1984년 신평·장림일반산업단지를 최초로 조성한 이래 2021년 현재 국가산업단지 1개소, 일반산업단지 30개소, 도시첨단산업단지 4개소, 농공단지 1개소로 총 4,394만㎡의 지정면적을 가지고 있으며, 강서구와 기장군, 사하구, 해운대구, 금정구에 분포되어 있다.[14)] 특히 녹산국가산업단지는 약 700만㎡의 대규모 면적으로 석유화학, 조립금속, 섬유, 의복제조업 등이 가동중이며, 신평·장림일반산업단지는 약 282만㎡으로 도금, 피혁, 염색, 기계부품, 일반제조업 등이 입주하여 각종 화합물질이 다양하게 배출되어 주위 환경에 영향을 미치고 있는 실정이다.[14)] 산업단지의 경우 미세먼지와 유해 화학물질 배출로 인해 인근 주민 건강에 악영향이 우려되고 있으므로, 부산과 같이 대규모 산업단지가 있는 지역의 경우 산업단지주변 고도별 대기오염도를 조사하여 주요 오염원을 파악하고 환경감시기능에 대한 조사가 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 드론을 이용하여 미세먼지 측정과 시료포집 후 선택적다중이온질량분석기(Selected Ion Flow Tube Mass Spectrometry ; SIFT-MS) 분석으로 부산의 대표적 산업단지인 녹산국가산업단지와 신평·장림일반산업단지에 대한 고도별 대기오염농도 모니터링 및 주변환경에 미치는 영향을 연구하였다.

2. 연구 방법

2.1 연구기간 및 대상시설

이번 연구사업은 2021년 1월부터 12월까지 진행되었고, Fig. 1과 같이 부산지역 대표적 산업단지인 녹산국가산업단지와 신평·장림일반산업단지를 중심으로 미세먼지 측정이 가능한 Air Scan(Sensoronic)과 가스샘플링백을 드론에 장착하여 지상에서 10m 간격으로 100m까지 측정하였다. 포집된 시료는 SIFT-MS (VOCIE 200 ultra, Syft Technologies)가 장착된 실시간 대기이동측정시스템을 이용하여 휘발성유기화합물질을 분석하였으며, 용도별 대기오염도를 비교하기 위하여, 일반상업지역에 위치한 국제여객터미널과 자연녹지지역에 위치한 S-대학교에서 동일한 방법으로 조사하였다. 2021년 3월부터 항공안전법 개정(조종자 증명 의무화)으로 드론비행이 어려워 1~2월간 측정한 자료를 기준으로 연구를 진행하였고 측정지점별 기상관측 자료는 Table 1에 나타내었다.

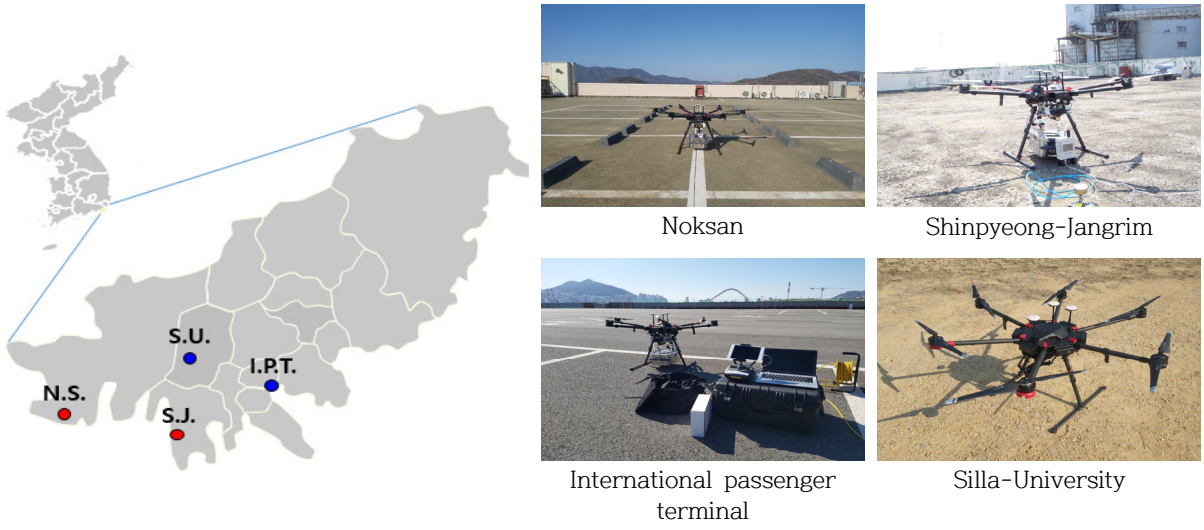


Fig. 1. Location of drone monitoring sites at Busan.

Table 1. Weather mean conditions during air monitoring date.

Site	Date	Temperature(℃)	Humidity(%)	Wind speed(m/s)	Wind direction
I.C.(N.S.)	2021. 1. 27.	10.5	32.4	1.2	NE
I.C.(S.J.)	2021. 2. 22.	15.2	65.7	1.2	SSW
C.A.(I.P.T.)	2021. 2. 19.	12.6	26.8	0.9	SW
G.A.(S.U.)	2021. 1. 20.	4.7	35.2	0.9	W

2.1.1 녹산국가산업단지

부산광역시 강서구와 경상남도 진해시 용원동 일대에 있는 총면적 697만 2000㎡의 국가산업단지로, 부산광역시의 부족한 공업용지 확보와 부산광역시 소재 공장들의 이전과 재배치를 통한 도시 환경개선을 위하여 조성되었다. 1990년 7월 23일에 착공하여 2008년 8월 29일에 준공되었으며, 석유, 화학, 섬유, 의복, 조립금속, 기계 업종 등이 입주해 있으며, 기계 부문이 약 45.1%로 주종을 이루고 있다.[15)]

2.1.2 신평·장림일반산업단지

신평·장림일반산업단지는 부산시내에 위치한 용도지역 부적격 공장들을 이전·집단화시켜 1980년 9월에 산업단지로 지정하고 1981년 5월에 착공하여 1990년 6월에 준공하였다. 공단 면적은 282만㎡으로 657개 업체가 입주하고 있으며, 도금, 피혁, 염색, 기계부품, 일반제조업 등이 주종을 이루고 있다.[16)]

2.2 조사방법

2.2.1 시료채취

Fig. 2와 같이 시료채취에 사용된 드론은 헥사콥터형 무인멀티콥터(Matrice 600 Pro, DJI)로 길이 1668㎜, 폭 1518㎜, 높이 727㎜, 최대이륙중량 15.5kg, 비행시간 최대 15분이다. 드론비행시 동일조건을 고려하여 매번 조사시 오후 2시경에 지상에서 이륙하여 10m 간격으로 1분간 정지 후 고도 100m 까지 미세먼지와 기상요소를 측정하였으며, 시료포집은 지상, 10m, 20m, 40m, 60m, 80m, 100m에서 30초 정지후 1L 테들러백에 포집하였다. 포집된 시료는 즉시 SIFT-MS가 장착된 실시간 대기이동측정시스템에서 휘발성유기화합물 등 84종의 농도를 측정하였고, 시료채취용 테들러백은 고순도 질소를 넣은 공시료 분석을 통해 측정값을 보정하였다.

공기질측정기는 미세먼지 간이측정기 1등급 제품으로 기상, PM-10, PM-2.5, CO_2, HCHO 측정이 가능한 Air scan(Sensoronic) 모델을 드론에 부착하여 측정

Fig. 2. Drone equipped with an air quality monitoring system.

하였고, 가스샘플링백은 1L 테들러백 4개가 장착된 시료포집장치를 제작하여 드론비행 중 일정 높이에서 포집하여 분석하였다.

2.2.2 조사항목 및 분석

본 연구에서 사용한 SIFT-MS는 1976년에 처음 제안된 이후 다양한 VOCs에 대해 반응속도 상수를 확보하여 정량분석이 가능한 장비로 GC에서 주로 사용되는 컬럼을 이용한 물리적 분리 대신 낮은 에너지 준위를 가지는 ion source를 이용하는 화학적 분리방식으로, 반응가스(reaction gas) 없이 대기 중 산소와 질소, 수분을 microwave에서 생성된 수많은 반응성 이온(reagent ion) 중 H_3O^+, NO^+, O_2^+을 선택적으로 flow tube에 흘려주어 reagent ion과 가스상 시료와 만나 화학적 특성에 따라 다양한 화학적 이온반응을 이용하여 product ion을 생성한다. 생성된 product ion은 4중 질량필터(quadrupole mass filter)에서 선택적으로 분석하고자 하는 물질을 여과하여 검출기로 흘려주어 분석물의 절대농도를 정량화하여 계산된다. SIFT-MS 분석법은 수분의 영향을 받지 않으며, 별도의 시료 농축 없이 pptv level까지 분석이 가능한 장점으로 작업환경 유해물질 분석, 부지경계선 악취물질분석, 건축물 및 자동차 실내공기 분석 등 다양한 분야에 적용되고 있다.[17)~19)]

분석 대상 휘발성유기화합물은 US EPA TO-15 method상의 독성물질 64종과 악취물질 20종을 드론을 이용한 가스샘플링백으로 포집 후 SIFT-MS를 통해 분석하였고, 분석한 86종은 대기환경보전법에서 정한 대기오염물질 64종 중 27종이 포함되어 있으며, 유해성대기감시물질 43종 중 21종, 휘발성유기화합물 지정고시에서 정한 37종 중 21종, 악취방지법에서 정한 지정악취물질 22종 중 20종, 화학물질관리법에서 지정한 사고대비물질 97종 중 27종이 포함되어 있다. 미세먼지(PM-10, PM-2.5) 농도는 Air scan으로 기상자료와 함께 6초 간격으로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 산업단지별 대기오염물질 평균농도

녹산국가산업단지와 신평·장림일반산업단지 주변 대기오염물질 농도를 연구하고자 SIFT-MS를 탑재한 이동식 차량으로 드론측정일과 동일기간동안 실시간 직접 측정하였고, 용도별 대기오염도를 비교하기 위하여 상업지역(국제여객터미널)과 자연녹지지역(신라대학교) 대기농도도 동일한 방법으로 측정한 평균농도를 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Concentration of VOCs and odorous compounds in industrial complexes.

Group	Compounds (ppb)	Industrial complex		Commercial area	Green area
		Noksan	Shinpyeong-Jangrim	International passenger terminal	Silla-University
alkane	methyl chloride	0.698	0.621	0.732	0.436
	methyl bromide	1.154	0.92	0.619	0.49

continued table 2

Group	Compounds (ppb)	Industrial complex		Commercial area	Green area
		Noksan	Shinpyeong-Jangrim	International passenger terminal	Silla-University
alkane	ethyl chloride+phosgene	1.204	3.235	1.659	0.446
	methyl iodide	2.445	3.229	2.267	1.082
	1.1-dichloroethane	0.549	1.648	0.536	0.107
	chloroform+methylen chloride+1.1.2.2-tetrachloroethane	3.381	1.45	2.505	0.953
	hexane	6.74	**17.312**	6.264	1.73
	1.1.1-trichloroethane	0.269	0.235	0.201	0.099
	carbon tetrachloride	0.026	0.174	0.006	0.011
	1.2-dichloroethane+vinyl chloride	0.244	0.597	0.27	0.136
	isooctane	0.836	0.568	0.775	0.178
	1.2-dibromoethane	0.024	0.03	0.011	0.008
	2-nitropropane	0.107	0.067	0.08	0.007
	1.2-dibromo-3-chloropropane	0	0	0	0
alkene	1.3-butadiene	0.033	0.04	0.048	0.04
	1.1-dichloroethene	0.773	0.576	0.561	0.288
	allyl chloride	0.57	0.397	0.44	0.177
	(Z)-1.3-dichloropropene	0.126	0.31	0.145	0.052
	trichloroethylene	0.037	0.022	0.02	0.004
	tetrachloroethylene	0	0	0	0
aldehyde	formaldehyde	**11.923**	**11.059**	10.68	5.798
	acetaldehyde	3.779	2.977	3.036	3.143
	propionaldehyde+propylene oxidel	1.356	1.992	1.233	0.647
	acrolein	2.372	3.021	1.016	0.84
	butanal	0.902	0.709	0.652	0.446
	pentanal	0.566	0.395	0.478	0.252
aromatic	benzene	0.046	0.059	0.066	0.026
	toluene	**14.418**	0.697	3.459	0.723
	xylenes + ethylbenzene	2.106	0.779	1.05	0.399
	styrene	0.312	0.033	0.051	0.025
	isopropyl benzene	0.279	0.089	0.156	0.044
	styrene oxide	0.083	0.092	0.039	0.012
halogenated	1.2-dichloropropane	0.245	0.452	0.185	0.099
	1.1.2-trichloroethane	0.786	0.601	0.584	0.328
	chlorobenzene	0.095	0.052	0.077	0.02
	bromoform	0	0	0	0
	1-chlorotoluene	0.201	0.12	0.077	0.014
	1.4-dichlorobenzene	0	0.002	0	0
	hexachlorobutadiene	0	0	0	0
	1.2.4-trichlorobenzene	0	0	0	0
amine	2-methylaziridine	0.103	0.16	0.097	0.054
	triethylamine	0.092	0.073	0.053	0.019
	methylhydrazine	3.043	2.135	2.409	2.243
	dimethylnitrosoamine	0.17	0.187	0.076	0.085
	aniline	0.924	0.032	0.139	0.013
	acrylamide	0.134	0.085	0.076	0.04
	N.N-dimethylaniline	0.008	0.003	0.006	0
	trimethylamine	0.323	0.363	0.231	0.14
amide	N.N-dimethylformamide	**1.915**	0.692	0.646	0.336
	urethane	0.096	0.08	0.07	0.002

continued table 2

Group	Compounds (ppb)	Industrial complex		Commercial area	Green area
		Noksan	Shinpyeong-Jangrim	International passenger terminal	Silla-University
ester	vinyl acetate	0.866	0.697	0.641	0.623
	methyl methacrylate	0.222	0.132	0.148	0.106
	beta-propiolactone	1.373	0.393	1.504	0.795
	dimethyl sulfate	0.052	0.079	0.044	0.023
	butyl acetate	0.623	0.475	0.428	0.293
ether	methyl tert-butyl ether	1.243	2.112	0.979	0.497
	1.4-dioxane	1.067	0.612	0.539	0.147
	2-chloroethyl ether	0.09	0.105	0.09	0.031
alcohol	methanol	6.807	**14.641**	5.852	5.353
	o-cresol	0.023	0.011	0.016	0.005
	catechol	0.023	0.021	0.021	0.012
	phenol+dimethyl disulfide	0.098	0.068	0.032	0.016
	isobutyl alcohol	2.114	1.689	0.896	0.641
carboxylic acid	dimethylcarbamoyl chloride	0.173	0.078	0.087	0.031
	chloroacetic acid	0.045	0.03	0.041	0.003
	3-methylbutanoic acid	0.437	0.305	0.315	0.125
	butanoic acid	1.128	0.528	0.92	0.384
	propanoic acid	1.835	0.938	1.49	0.704
epoxide	ethylene oxide	2.819	2.456	1.561	1.06
	1.2-epoxybutane	1.478	1.048	1.009	0.69
	epichlorohydrin	**5.171**	1.22	2.702	0.234
ketone	methyl ethyl ketone+acrylic acid	**4.334**	0.578	2.494	1.099
	methyl isobutyl ketone	0.606	0.282	0.414	0.192
	acetophenone	0.032	0.03	0.031	0.012
	isophorone	0.006	0.009	0.005	0.002
nitrile	acrylonitrile	0.096	0.066	0.091	0.12
	acetonitrile	0.365	0.233	0.25	0.236
inorganic	carbonyl sulfide	2.563	1.899	2.137	1.522
	ammonia	12.486	**20.489**	12.572	10.334
	hydrogen sulfide	0.999	1.869	0.914	0.388
isocyanate	methyl isocyanate	0.278	0.268	0.15	0.115
nitrogen hecterocycle	N-nitrosomorpholine	0.218	0.201	0.155	0.106
thioether	dimethyl sulfide	0.089	0.417	0.077	0.052
thiol	methyl mercaptan	0.411	0.186	0.296	0.316

SIFT-MS를 이용한 84항목 분석 결과 산업단지는 자연녹지지역보다 약 2배, 상업지역보다 약 1.4배 정도 높게 나타났다. 녹산국가산업단지는 신평·장림일반산업단지 보다 많은 항목이 상대적으로 높은 농도값을 나타내었다. 특히, 녹산국가산업단지는 톨루엔, 자일렌+에틸벤젠, 스타이렌 등 방향족화합물과 메틸에틸케톤(MEK)의 농도가 높게 나타났으며, 신평·장림일반산업단지는 헥세인, 메탄올, 암모니아 등의 농도가 상대적으로 높게 나타났다. 이는 산업단지 업종구성에 따른 배출물질 특성의 차이로 보이며, 헥세인, 폼알데하이드, 메탄올은 산업단지 배출오염물질 중 공통적으로 높게 나타나, 중요관리 대상물질로 VOCs 중 우선적으로 고려해야 할 것으로 보여진다. 또한, 2개 산단과 상업지역에서 지정악취물질인 황화수소가 한국인의 악취최소감지 농도인 0.58ppb보다 높게 나타나 발생원 관리도 필요할 것이다.[7] 반응성이 작고 무색무취인 알칸계열 중 헥세인은 이송·운반·분배·계량공정, 화학반응공정, 대기오염방지시설 등과 같은 산단의 공통적 기반의 영향으로 판단되며, 알데하이드 계열의 폼알데하이드는 폐기물 소각, 일반용 도료 및 관련제품 제조업, 제철·제강, 시멘트 제조 등 다양한 배출원의 영향으로 높게 나타났다.

Fig. 3에는 산업단지내 공기중 대기오염 화학물질군 비율을 나타내었다. 배경지역과 비교하면 녹산국가산업단지의 경우 방향족(14.9%), 에피옥사이드(8.2%), 케톤계열(4.3%)의 화학물질이 상대적으로 높게 조사되었고, 신평·장림일반산업단지는 알칸(26.7%), 알코올(14.6%), 무기염류(21.6%)의 비율이 상대적으로 높게 나타났다.

2021년 부산녹색환경지원센터 "부산지역 미세먼지 전구물질의 측정자료 해석 및 평기기법 연구" 보고서에서 2차 유기에어로졸(Secondary Organic Aerosol ; SOA)은 일반적으로 7개 이상의 탄소를 함유한 유기화합물로 구성되며, VOCs의 SOA 생산에 기여하는 비율이 톨루엔(37.1%), 아이소프로필벤젠(29.6%), 에틸벤젠(16.9%), 자일렌(7.5%), 벤젠(5.3%), 스티렌(3.7%)로 조사되어,[20] 상대적으로 방향족화합물의 비율이 높은 녹산국가산업단지의 경우 지속적인 배출원 관리가 필요할 것으로 판단된다.

3.2 고도별 가스상 대기오염물질 분포

산업단지의 고도별 대기오염물질 분포를 조사하기 위하여 드론에 장착된 가스샘플링 장치로 지상, 10m, 20m, 40m, 60m, 80m, 100m에서 가스를 포집 후 지

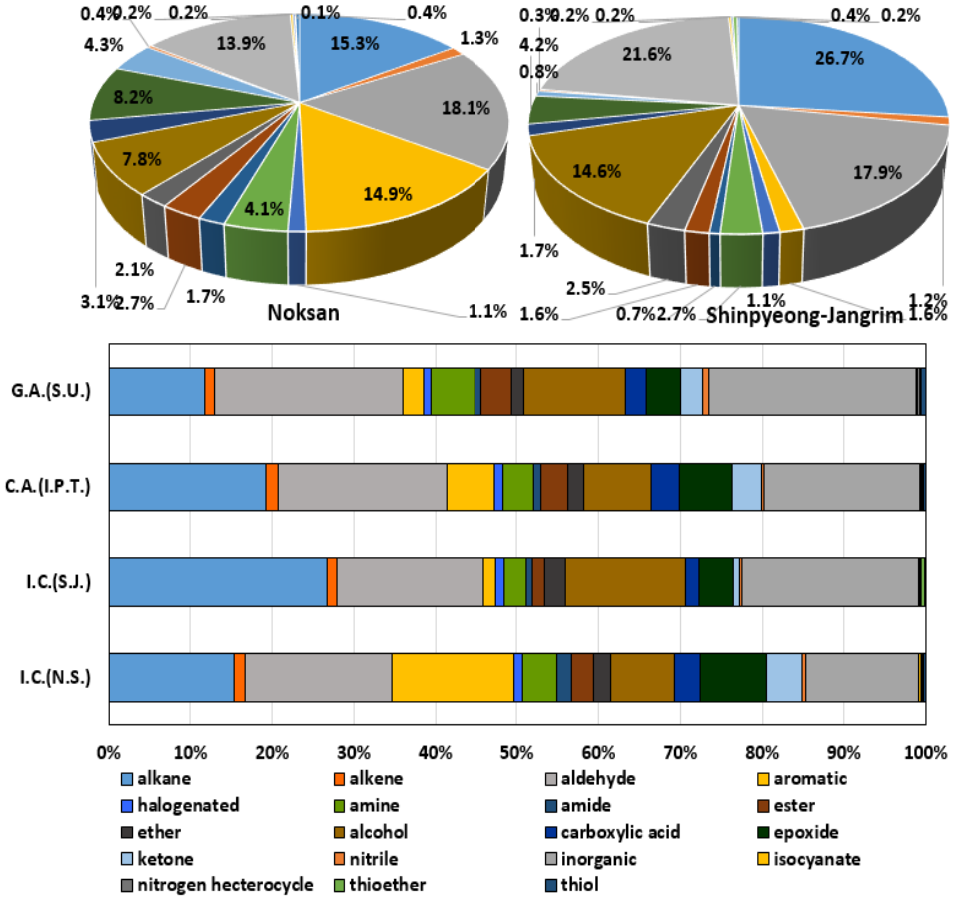


Fig. 3. The ratio of air pollutant chemical group in industrial complexes.

Table 3. Total concentration of VOCs and odorous compounds.

Measurement position		84 species total concentration(ppb)	
		direct SIFT-MS	use Drone
Industrial complex	Noksan	115.67	104.26
	Shinpyeong-Jangrim	112.54	107.18
Commercial area	International passenger terminal	82.68	87.44
Green area	Silla-University	48.26	51.61

상에서 실시간 대기이동측정시스템에 장착된 SIFT-MS로 휘발성유기화합물 등 84종을 분석하였다. Table 3에는 지상에서 드론을 이용한 대기오염물질 총농도와 Table 2의 실시간 대기이동측정시스템으로 직접 측정한 값을 비교하였다.

Neumann 등의 연구에서[10] 드론을 통한 대기오염 조사시 프로펠라에 의한 대기흐름으로 측정센서 수치가 약 0.2~0.5% 정도 적게 측정된다고 하였으나, 본 연구에서 산업단지의 경우 측정값이 약 5~10% 낮았으며, 상업지역과 자연녹지지역은 오히려 약 5% 정도 높게 측정되었다. 이는 측정당일 기상조건과 풍속에 의한 차이가 있었으며, 드론 비행시 30초~1분 정도 정지 비행은 주변 대기흐름의 변화를 충분히 반영하지 못한 결과로 판단된다. 드론은 아랫방향으로 기류를 생성시

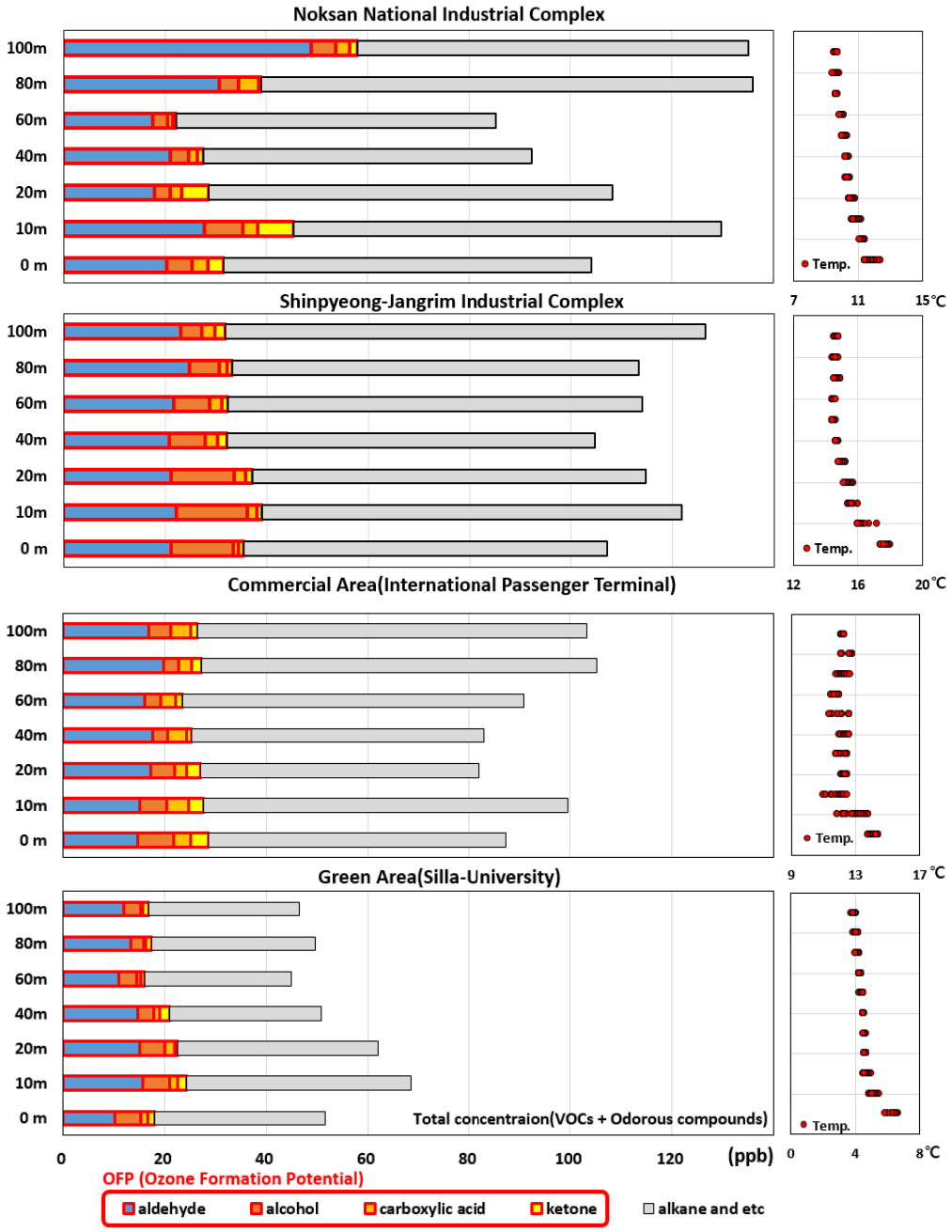


Fig. 4. Vertical distribution of temperature, total VOCs and odorous compounds.

킴으로써 자체중량 이상의 양력을 획득한다. 따라서 드론 아래쪽은 강한 난류가 형성되어 공기의 혼합이 활발히 진행된다.[6] 최근 환경부 “환경측정용 드론 운영 가이드라인(2021.9.)”에 의하면 초기 비행시 3분 이상 정지비행 후 측정을 실시하도록 되어 있어, 드론 프로펠라에 의한 영향을 어느 정도 줄 일 수 있을 것으로 판단된다.

드론에 부착한 공기질측정기(Air Scan)와 가스샘플링백을 이용하여 고도별로 측정한 온도 및 84종 대기오염물질 총농도 변화량을 Fig. 4에 나타내었다. 테들러백을 이용한 SIFT-MS 분석시 테들러백에 의한 오차를 줄이고자 고순도 질소로 5회 세척 후 사용하였으며, 공시료 분석을 통해 측정값을 보정하였으나, ppt 수준의 미량물질은 오히려 공시료가 높게 나타나는 경우가 있어 84종 개별물질보다 총물질로 고도별 비교를 진행하였다.

Fig. 4에 나타난 고도별 대기오염물질 84종 총농도 분포를 보면, 산업단지 및 비교지점 모두 지상 10m 지점의 총농도가 비교적 높게 나타났다. 지상 0m의 경우 드론 프로펠라에서 발생하는 하강기류의 영향을 받아 공기의 혼합이 활발하여 상대적으로 낮은 농도가 나타났고, 지상 10m의 경우는 프로펠라 하강기류의 영향이 줄어들고, 산업단지 배출원 높이에 대부분 위치하여 확산전에 포집할 수 있으므로, 고도 10m 지점에서 샘플링하는 것이 그 지역의 대기오염 발생원의 대표값으로 간주할 수 있을 것으로 판단된다.

녹산국가산업단지와 신평·장림일반산업단지의 고도별 온도변화를 보면, 고도상승에 따라 온도가 하강하는 불안정상태로 대기확산이 잘 이루어지고 있어, 배출원 높이에서 발생된 오염물질들이 수직으로 확산이 이루어지고 있으나, 측정일에 80m 와 100m 일부 고도에서 온도가 상승하는 기온역전 구간이 나타나, 안정상태의 대기정체로 인해, 오히려 대기오염물질의 총농도가 상승한 것으로 조사되었다. 상업지역 역시 80m 이상 구간에서 온도가 상승하는 일부 구간이 나타나, 80m 부근의 대기오염물질 총농도가 가장 높게 조사되었다. 반면, 자연녹지지역의 기온분포는 드론조사 고도까지 온도가 하강하는 불안정상태가 나타나, 100m 높이에서도 고농도가 나타나지 않았다.

따라서, 기체상 오염물질은 드론의 영향을 적게 받는 지상 10m 지점이 상대적 고농도로 측정되고, 고도가 상승함에 따라 농도는 낮아지며, 기온역전층이 생성되는 고도에서 다시 높아지는 결과를 알 수 있다. 드론 배터리의 제약을 받지 않는다면 장시간 비행으로 더 높은 위치의 오염도 측정이 가능할 것이며, 시료 포집시 충분한 호버링(정지비행) 수행 후 샘플링을 진행한다면 좀 더 안정적인 대기오염물질 분석이 가능할 것이다.

VOCs는 물질별로 광화학 반응성이 다르며 오염원이 다양하기 때문에 VOCs 화학종별로 오존생성기여도를 산출하고, 기여도가 높은 화학종을 중심으로 저감정책을 실시하면 효율적인 오존오염 대응정책수립이 가능하다.[21] 오존생성기여도(Ozone Formation Potential : OFP)는 1994년 carter가 상자모델을 이용하여 VOCs 화학종별로 1시간 동안 생성할 수 있는 최대 오존량을 MIR(Maximum Incremental Reactivity) 지수로 산출하여 처음 도입하였으며, 오존 및 오존 전구물질의 중장거리 이동이 중요한 유럽에서는 Derwent and Jenkin이 4~6일간 VOCs 화학종별로 생성하는 오존을 산출하여, ethylene의 오존생성량을 기준으로 다른 물질의 오존생성기여도를 표준화하여 POCP(Photochemical Ozone Creation Potential) 지수를 개발하였다.[22),23)] 최근 “SIFT-MS를 이용한 부산시 대기중 휘발성유기화합물의 오존생성기여도 산정”연구에서 장거리 이동이 아닌 지역내 오염원에 대한 평가를 위해 MIR 지수를 이용한 OFP를 연구한 결과 부산도심의 경우 알데하이드, 케톤, 카복실산, 알코올 순으로 오존생성기여도가 높은 것으로 나타났다.[24] 따라서, 본 연구에서는 오존생성기여도가 높은 화학물질군의 농도를 Fig. 4에 표시하였다. 녹산국가산업단지를 제외하고는 대부분 고도 10m 지점이 오존생성기여도가 높은 물질의 농도가 높았으며, 기온역전 구간에서도 고도상승에 따른 오존 광화학 생성반응으로 농도가 상승하지는 않았다. 녹산국가산업단지의 경우 80~100m 상공에서 pentanal의 농도가 상승하여 알데하이드 고농도 구간이 나타났다. 이 결과값은 외부유입에 의한 영향인지, 테들러백 불순물에 의한 측정값인지는 추가연구가 필요할 것으로 판단된다.

앞선 OFP 연구에서 도심지역 방향족계열의 오존생성기여도는 알코올 다음으로 5번째 높은 값으로 나타났으나,[24] 녹산국가산업단지 경우, 방향족 화합물의 농도가 타산업단지보다 상대적으로 높아 오존생성기여율은 더욱 높게 평가될 것으로 예상된다. Table-4와 Fig. 5에 본 연구에서 분석한 SIFT-MS 84종 중 POCP값이 있는 물질을 대상으로 오존생성기여도를 나타내었다.

Table 4. Summarized of each VOCs to concentraion and calculation of POCP-weighted.

Group	Compounds	M.W.	POCP[25]	Noksan		Shinpyeong-Jangrim	
				Con.(ppb)	POCP-weighted*)	Con.(ppb)	POCP-weighted*)
alkane	methyl chloride	50.49	1	0.698	1.573	0.621	1.400
	hexane	86.17	36	6.740	933.406	**17.312**	**2397.496**
aldehyde	formaldehyde	30.03	67	11.923	1070.946	11.059	993.340
	acetaldehyde	44.05	116	3.779	862.051	2.977	679.102
	propionaldehyde	58.08	74	1.356	260.178	1.992	382.208
	butanal	72.12	63	0.902	182.959	0.709	143.812
	pentanal	86.13	59	0.566	128.403	0.395	89.610
aromatic	benzene	78.11	3	0.046	0.481	0.059	0.617
	toluene	92.14	36	**14.418**	**2135.048**	0.697	103.213
	xylenes + ethylbenzene	106.17	91	2.106	908.351	0.779	335.995
	styrene	104.15	33	0.312	47.872	0.033	5.063
ester	butyl acetate	116.16	22	0.623	71.075	0.475	54.191
ether	methyl tert-butyl ether	88.15	16	1.243	78.265	2.112	132.981
alcohol	methanol	32.04	11	6.807	107.101	14.641	230.360
carboxylic acid	propanoic acid	74.08	13	1.835	78.892	0.938	40.327
epoxide	ethylene oxide	44.05	1	2.819	5.544	2.456	4.830
ketone	methyl ethyl ketone	72.11	35	4.334	488.320	0.578	65.124
	methyl isobutyl ketone	100.16	65	0.606	176.130	0.282	81.961

*) POCP-weighted = con.(ppb) × (M.W./22.4㎥) × POCP value

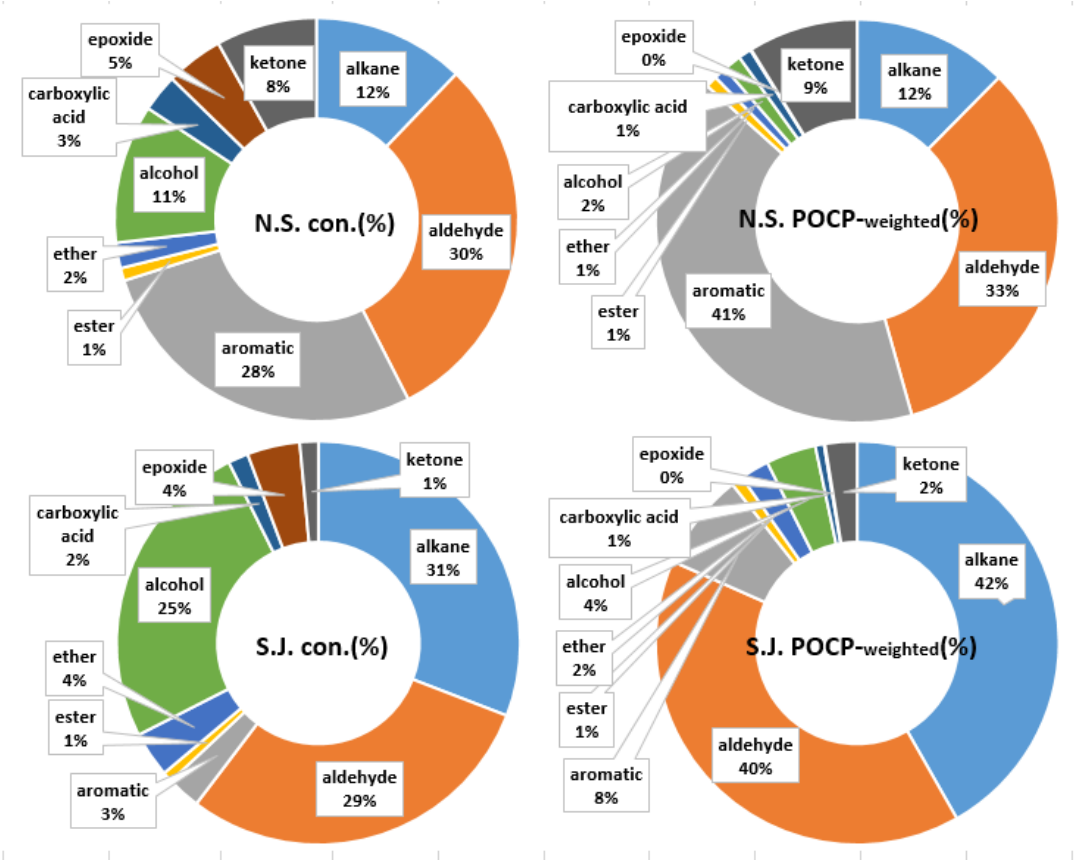
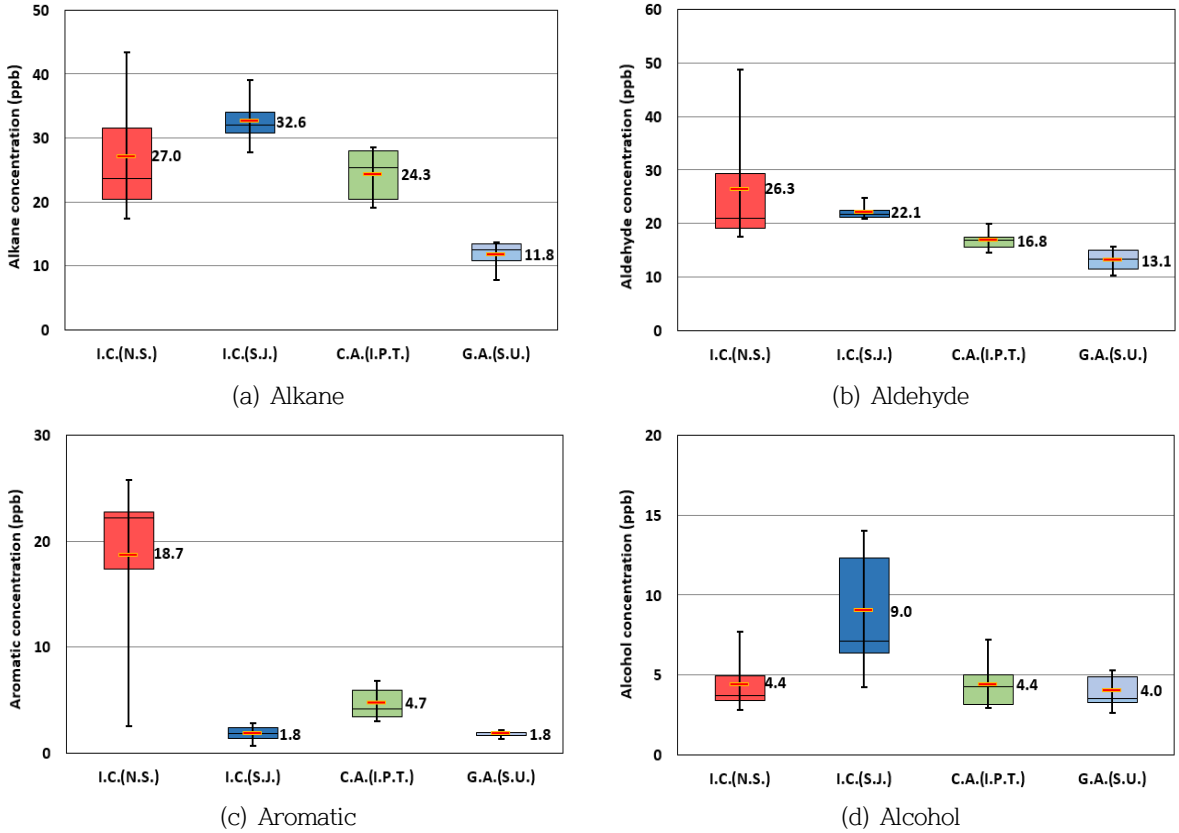


Fig. 5. Target VOCs distribution by their POCPs.

Hwang 등의 연구에서, 화학물질별 오존생성기여도는 알데하이드, 케톤, 카복실산 등의 화합물이 도심 60% 이상, 항만 70% 이상으로 나타났고, 뒤를 이어 알코올, 방향족, 알칸 화합물순이었다.[24] 하지만, 본 연구에서는 산업단지 배출물질 특성상 녹산국가산업단지는 톨루엔의 영향으로 방향족화합물의 오존생성기여율이 가장 높게 나타났으며, 폼알데하이드, 헥세인에 의해 알데히이드, 알칸 순으로 높게 나타났다. 신평장림일반산업단지의 경우 헥세인의 영향으로 알칸 화합물의 오존생성기여율이 가장 높게 나타났으며, 알데하이드, 방향족, 알코올 순으로 나타났다. 따라서, 산업단지별 오존생성기여율이 높은 물질의 배출을 저감한다면 효율적으로 오존생성을 억제할 수 있을 것으로 판단된다.

녹산국가산업단지와 신평·장림일반산업단지에서 높은 농도로 조사되었던, 알칸, 알데하이드, 방향족, 알코올류의 고도별 평균농도값을 Fig. 6에 나타내었다. (a) 알칸계열의 경우, 신평·장림일반산업단지에서 높게 나타났으며, 특히 헥세인의 농도가 가장 높게 측정되었다. 헥세인은 지상 0m에서는 17.571 ppb, 10m 19.280 ppb, 20m 15.745 ppb, 40m 12.710 ppb, 60m 12,127 ppb, 80m 17.474 ppb, 100m 18.341 ppb로 지상 10m 구간이 고농도로 나타났고, 고도 상승시 낮아지다가, 80m와 100m에서 다시 상승하는 결과가 나타났다. 녹산국가산업단지의 고도별 헥세인 농도도 유사한 형태로 나타났으나, 10m 지점보다 100m 지점이 가장 높게 관측되었다. 이는 기온역전에 따른 대기정체로 인한 결과로 판단된다.

(b) 알데하이드계열은 폼알데하이드와 아세트알데하이드의 농도가 상대적으로 높았으며, (c) 방향족계열은 녹산국가산업단지에서 톨루엔의 농도가 100m 지점을 제외하고는 13.599~23.329 ppb 범위에서 측정되었다. (d) 알코올류는 신평·장림일반산업단지에서 메탄올이 높게 나타났으며, 지상 0m 11.414 ppb, 10m 12.386 ppb, 20m 10.315 ppb, 40m 6.021 ppb, 60m 5.443 ppb, 80 m 4.597 ppb, 100m 3.713 ppb로 고도 상승시에도 계속 낮아지는 결과가 나타났다. 2021년 11월에 발표된 Kim 등의 연구에서,[26] 오



(a) Alkane (b) Aldehyde

(c) Aromatic (d) Alcohol

Fig. 6. Boxplot of alkane, aldehyde, aromatic and alcohol concentration.

존은 고도 상승시 증가하고, 메탄올을 포함한 VOCs 물질은 고도 상승시 낮아지는 결과가 발표되어, 이와 유사한 결과로 보여지며, 앞으로도 다양한 VOCs 물질에 대한 구체적인 연구가 계속 진행되어야 할 것이다.

3.2 고도별 입자상 대기오염물질 분포

산업단지의 고도별 입자상 대기오염물질 분포를 조사하기 위하여 드론에 미세먼지 측정이 가능한 광산란 방식의 공기질측정기(Air Scan)를 부착하여 지상에서 10m 간격으로 1분간 정지비행 후 고도 100m 까지 상승하여 PM-2.5와 PM-10의 질량농도를 측정하였다. 테들러백을 이용한 가스포집장치 실험과 동시에 실시하여 기상은 동일한 조건을 나타내었다. 녹산국가산업단지와 신평·장림일반산업단지 고도별 미세먼지 분포 현황을 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 6에 나타난 것처럼 가스상 대기오염물질 분포와는 다르게 지상 30m와 40m 부근에서 미세먼지 고농도가 나타났다. 고도가 상승함에 따라 미세먼지 농도는 낮아졌으며, 지상에서 30m까지는 드론 아랫방향의 난류의 영향을 받는 것으로 나타났다. 기온역전이 일어나는 80m 이상 고도에서 PM-2.5는 감소추세가 줄어들었으나, PM-10은 고도상승시 계속 감소하였다.

Lee 등의 미세먼지 측정을 위한 GIS 맵핑 기반 드론 연구에서 지상에서 50m 까지 드론비행으로 1,300여 개의 데이터를 분석한 결과 0~10m 까지는 프로펠러 회전의 영향을 받고, 30m의 미세먼지 오염도가 가장

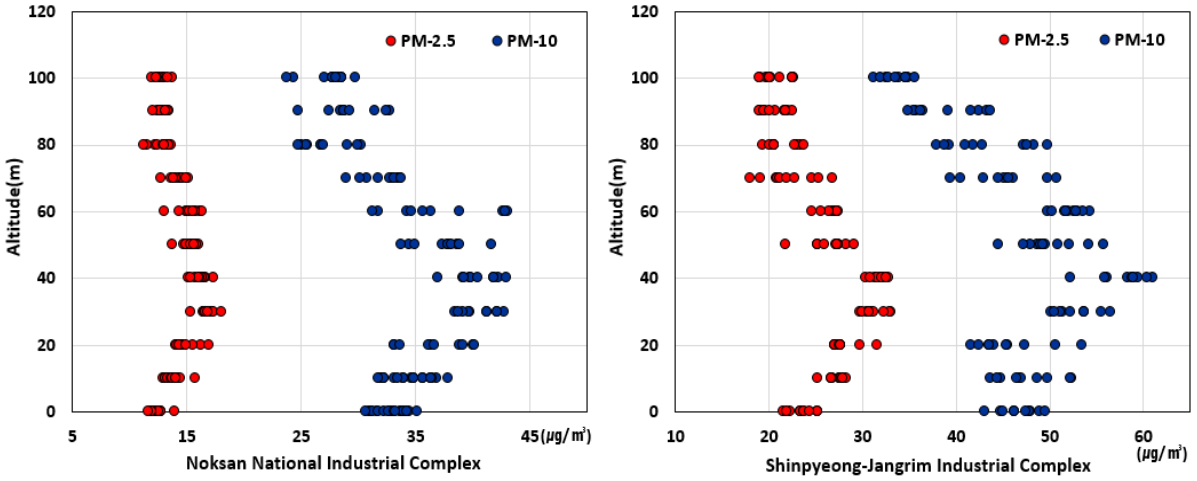


Fig. 7. Vertical distribution of PM-2.5 and PM-10 concentration.

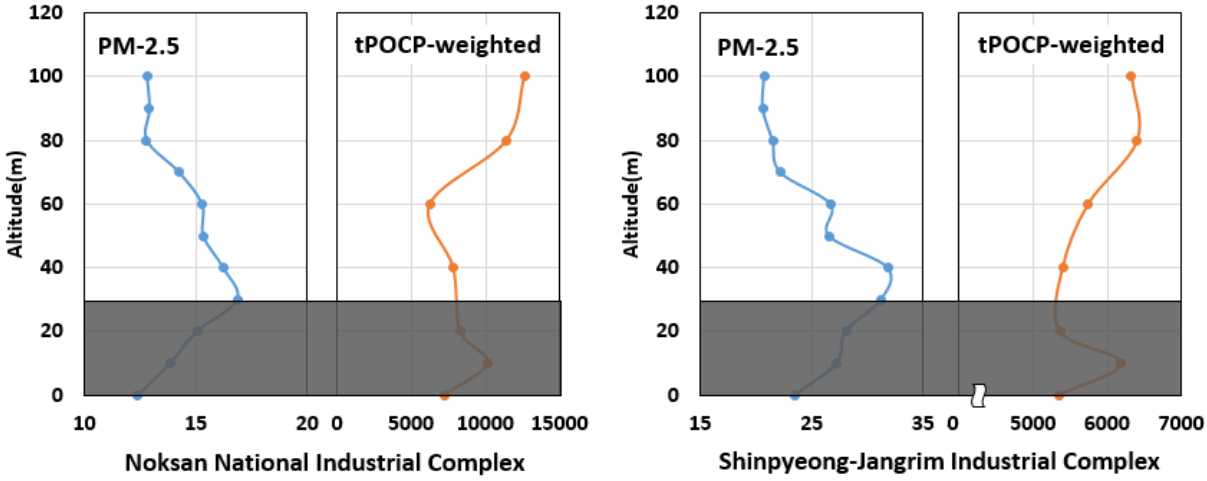


Fig. 8. Vertical distribution of PM-2.5 and calculation of total POCP-weighted.

유용한 결과값을 보인다고 하였다.[27] 또한, 한국환경정책평가연구원의 "드론을 이용한 대기환경조사기법 분석과 적용을 위한 기초연구"보고서에서도 드론을 이용한 미세먼지 측정시 30m 부근에서 고농도로 나타나며, 고도상승시 측정값이 낮아지는 결과를 보여주고 있다.[28] 본 연구에서도 유사한 결과가 나타났으며, PM-2.5는 30m 상공에서 최대, PM-10은 40m 상공에서 최대값이 나타나, 입자가 커질수록 드론의 영향을 많이 받는 것으로 조사되었다. 또한, 입자가 작을수록 기온역전에 따른 기상조건에 영향을 받는 것을 알 수 있다. 일반적으로 입자상 오염물질 측정이 가스상 오염물질 측정보다 드론의 영향을 더 많이 받는다는 연구결과에 따라,[6),12),28)] 향 후 산업단지 대기오염도 연구시 가스상 대기오염물질 포집은 지상 10m, 입자상 대기오염물질 포집은 30m가 적당할 것으로 판단된다.

녹산국가산업단지의 경우, 방향족계열 화합물로 인해, 미세먼지를 생성하는 SOA값이 높게 나타났고.[20] 오존생성기여율도 가장 높은 값으로 조사되었다. 따라서, 산업단지 VOCs 화함물의 오존생성기여율과 미세먼지(PM-2.5)와의 관계를 비교하고자 Fig. 8에 고도별 분포도를 나타내었다.

Fig. 8은 드론을 이용하여 Air Scan으로 측정한 PM-2.5 고도별 평균값과 VOCs에 물질별 POCP값을 곱한 오존생성기여도 총합을 고도별로 표시하였다. 입자상 대기오염물질의 드론 프로펠라 영향 고도인 30m 이하의 값을 제외하면 PM-2.5는 고도상승시 농도가 낮아지며, 오존생생성기여도는 높아지는 경향이 나타났다. 본 연구에 사용된 드론에는 오존 측정이 어려워 고도별 오존농도를 측정하지 못했지만, 일반적으로 오존의 농도는 고도상승시 높아지는 연구결과를고찰하여 보면[26] 본 연구의 오존생성기여도 상승에 따른 상관성을 알 수 있다.

초미세먼지의 구성성분 중 SOA가 40% 이상을 차지하며, 고농도 사례에는 80%에 이르기도 한다.[29] 또한 VOCs는 대류권 내 오존과 더불어 SOA의 전구물질로 알려져 있다.[30] 따라서, 오존과 초미세먼지와의 상관관계도 있을 것으로 판단되지만, 본 연구에서는 오존생성기여도 상승, 오존농도 상승이 직접적인 초미세먼지 상승으로 나타나지는 않았다. 항공안전법 개정에 따른 드론비행 제한으로 드론측정일수가 짧아 좀 더 많은 데이터 연구가 어려웠으며, 초미세먼지의 경우 풍속, 풍향, 기상조건 등에 더 많은 영향을 받아 미세먼지 전구물질에 의한 동일 구간내 농도증가 결과는 나타나지 않았다. 높은 고도내 VOCs에서 전환된 SOA는 풍향을 타고 인근지역으로 이동하여 주변지역의 초미세먼지 농도증가에 기여할 것으로 예상된다. 향 후 고도차이를 더 크게 하고, 측정횟수와 최대높이를 증가시켜 좀 더 뚜렷한 변화 경향을 조사할 필요가 있을 것이다.

이번 연구를 통해 산업단지 대기오염물질 고도별 분포를 알 수 있었으며, 드론을 활용한 대기오염물질 점검시 샘플링을 위한 최적 고도조건을 확인하였고, 향 후 더 다양한 오염물질 분포에 대한 연구를 통해 화학사고 등 유해대기오염물질 발생시 고도별 확산에 대한 기초자료가 될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

부산지역 대표적 산업단지에 대한 고도별 대기오염농도 모니터링을 위해 드론을 이용하여 미세먼지 측정과 가스포집 후 선택적다중이온질량분석기로 분석한 결과, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 휘발성유기화합물 등 84종 분석결과 산업단지는 자연녹지지역보다 약 2배, 상업지역보다 약 1.4배 정도 높게 나타났다.
2. 녹산국가산업단지는 방향족, 에피옥사이드, 케톤계열의 화학물질이 상대적으로 높게 나타났고, 신평·장림일반산업단지는 알칸, 알코올, 무기염류의 화학물질이 상대적으로 높게 나타났다.
3. 방향족 화합물의 경우, 미세먼지를 생성하는 SOA값과 오존생성기여도가 높아 오존과 미세먼지 전구물질 감소를 위해 지소적인 배출원 관리가 필요할 것이다.
4. 지상에서 드론을 통한 대기오염조사시 직접측정 방법보다 약± 5% 정도 오차가 발생하였다.
5. 고도 상승에 따라 대기오염물질의 농도는 낮아졌으며, 기온역전 구간에서 농도상승이 나타났다.
6. 가스상 대기오염물질 조사시 드론 프로펠라에서 발생하는 하강기류의 영향을 받으며, 고도 10m 지점이 최적지점으로 조사되었고, 입자상 대기오염물질은 가스상 대기오염물질보다 드론의 영향을 더 많이 받으며, 고도 30m 지점이 최적지점으로 조사되었다.
7. 이번 조사를 바탕으로 드론을 이용한 산업단지 대기오염물질 점검시 최적 고도조건을 확인할 수 있었으며, 향 후 더 다양한 오염물질 분포에 대한 연

구가 필요할 것이다.

참고문헌

1. J. T. Jayne, D. C. Leard, X. Zhang, P. Davidovits, K. A. Smith, C. E. Kolb, & D. R. Worsnop, Development of an aerosol mass spectrometer for size and composition analysis of submicron particles, Aerosol Science & Technology, 33(1-2), 49-70(2000).
2. M. Yu. Arshinov, B. D. Belan, Vertical distribution of nanoparticles in the continental troposphere, Atmospheric and Oceanic Optics, 17(20), 489-499(2004).
3. H. R. Eun, W. K. Kim, H. K. Lee, D. H. Yoo, S. J. Yook, & K. H. Ahn, Vertical distributed aerosol sampling and analysis using tethered balloon sampler system in Ansan, Particle and Aerosol Research, 7(4), 139-149(2011).
4. X. Querol, A. Alastuey, G. Ganggoiti, N. Perez, H. K. Lee, H. R. Eun, & K. H. Ahn, Phenomenology of summer ozone episodes over the Madrid Metropolitan Area, central Spain, Atmospheric Chemistry and Physics, 18(9), 6511-6533(2018).
5. S. M. Ryu, J. H. Kim, J. H. Kim, J. W. Yoo, B. J. Gong, J. M. Park, A study on air pollution piont source tracking method in the industrial complex area using drone and real-time analyzer, Journal of the Korean Society of Urban Environment, 19(4), 259-266(2019).
6. J. H. Lee, Black carbon measurement using a drone, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 34(3), 486-492(2018).
7. H. J. Shin, H. C. Kong, J. S. Kim, D. H. Kim, SS. J. Park, Study on the efficient investigation method for sources of odor-inducing substances and volatile organic compounds using drone and real-time air quality monitoring equipments, J. Odor Indoor Environ. 19(1), 20-28(2020).
8. Ministry of Environment, Fine dust fact check : fine dust! Ask me anything, Republic of Korea, 11(2019).
9. Hight of fine dust observatory, https://www.chosun.com/site/data/html_dir/2018/03/28/201803 2800241.html
10. P. P. Neumann, S. Asadi, V. Hernandez Bennetts, A. J. Lilienthal, M. Barthilmai, Monitoring of CCS areas using micro unmanned aerial vehicles(MUAVs), J. Energy Procedia, 37, 4937-4964(2013).
11. H. S. OH, S. H. Lee, D. W. Choi, K. H. Kwak, Comparison of the vertical PM2.5 distributions according to atmospheric stability using a drone during open burning events, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 36(1), 108-118(2020).
12. H. S. Kim, Y. H. Park, W. Y. Kim, H. R. Eun, K. H. Ahn, Vertical aerosol distribution and flux measurement in the planetary boundary layer using drone, Particle and Aerosol Research, 14(2), 35-40(2018).
13. J. H. Yoon, Y. J. Li, M. S. Lee, M. H. Jo, Deep learning drone flying height prediction for efficient fine dust concentration measurement, The 13th International Conference on Ubiquitous Infomation Management and Communication, Thailand, 1112-1119(2019).
14. Korea Industrial Complex Corporation, National industrial complex status statistics table, http://www.kicox.or.kr, September(2021).
15. DAUM encyclopedia, https://100.daum.net/encyclopedia/view/b04n0271a (2021).
16. DAUM encyclopedia,, https://100.daum.net/encyclopedia/view/b13s3114a (2021).
17. D. Smith, P. Spanel, Selected ion flow tube mass spectrometry(SIFT-MS) for on-line trace gas analysis, Mass Spectrometry Reviews, 24(5), 661-700(2005).
18. P. Pakanat, S. Barringer, The effect of food additives in fruit drinks on the nosespace using selected ion flow tube mass

spectrometry (SIFT-MS), Journal of Food and Agriculture, 1(1), 1-10(2016).
19. P. Spanel, D. Smith, Progress in SIFT-MS: breath analysis and other applications, Mass Spectrometry Reviews, 30(2), 236-267(2011).
20. J. H. Son, Analysis and evalustion methods of precursors of PM in Busan, Busan Green Environment Center, 58(2021).
21. W. P. L. Carter, Development ozone reactivity scales for volatile organic compounds, Air and Waste, 44(7), 881-899(1994).
22. R. G. Derwent, M. E. Jenkin, Hydrocarbons and the long-range transport of ozone and PAN across Europe, Atmospheric Environment, 25(8), 1661-1678(1991)>
23. R. G. Derwent, Photochemical ozone creation potentials for a large number of reactive hydrocarbons under European conditions, Atmospheric Environment, 30, 181-199(1996).
24. K. C. Hwang, J. G. An, S. H. Lee, W. S. Choi, and U. H. Yim, A study on the ozone formation potential of volatile organic compounds in Busan using SIFT-MS, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 36(5), 645-668(2020).
25. H. R. Cheng, H. Guo, S. M. Saunders, S. H. M. Lam, F. Jiang, X. M. Wang, I. J. Simpson, Assessing photochemical ozone formation in the Pearl River Delta with a photochemical trajectory model, Atmospheric Environment, 44, 4199-4208(2010).
26. H. S. Kim, I. S. Kim, E. H. Oh, J. R. Lee, J. H. Jeong, Ozone distribution characteristics in the atmosphere using drones, 2021 Korea Society Environmental Engineers Conference, 195(2021).
27. J. H. Lee, J. G. Han, Y. H. Kim, Preliminary study on GIS mapping-based fine dust measurement in complex construction site, Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society, 22(2), 319-325(2021).
28. J. H. Yoon, S. W. Son, H. J. Jeon, J. J. Yoo, D. W. Kim, Analysis research trends and application of air quality investigation technique using drone, Korea Environment Institute, 29-37(2018).
29. C. Cho, G. Park, B, Kim, An effectiveness of simultaneous measurement of PM_{10}, $PM_{2.5}$, and $PM_{1.0}$ concentrations in Asian dust and haze monitoring, Journal of Environmental Science International, 22(6), 651-666(2013).
30. Y. Liu, L. Li, J. An, L. Huang, R. Yan, C. Huang, H. Wang, Q. Wang, M. Wang, W. Zhang, Estimation of biogenic VOC emissions and its impact on ozone formation over the Yangtze river delta region, China, Atmospheric Environment, 186, 113-128(2018).