

페인트제조시설의 VOC/HAPs 배출특성 및 저감방안 연구

송복주[†] · 이승민 · 조갑제 · 조정구
산업환경과

Study on the VOC/HAPs Emission Characteristics & Control Technologies for Paint Products

Bok-Joo Song[†], Seung-Min Lee, Gab-Je Cho and Jeong-Gu Cho
Industrial Environment Division

Abstracts

The VOC/HAPs, which is produced by manufacturing process in paint manufacturing facility, is serving as cause material of odor and photochemical oxidation such as ozone, toxicity and carcinogenicity. It is urgent to study on its emission characteristic and control technologies.

In this study, we select four paint factory and apprehend these operating situation. And we estimated the activated carbon replacement possibility of Kapok fiber, which is a natural material, with control technologies of VOC/HAPs.

As a result of research these facilities, it is researched that above 50% of atmospheric emission is volatilized naturally. And that result presented design arguments such as flow of suction facilities, facilities specifications, activated carbon filling volume, and replace cycle of activated carbon as control technologies. Also, that result presented emission process improvement such as adoption of central-controlled ventilation device, installation of inlet flange, and Potable cleaning process.

The oncentration profile of VOC/HAPs, which is volatile naturally outside the factories, is surveyed above 70% at Toluene, Ethylbenzene, and Xylene. And a result of estimate the odor contribution level about the component whose Odor Threshold is known, it is estimated that major cause material of A, B, C factories is Toluene and that of D factory is m/p-Xylene.

The rate of pollutant adsorption of Kapok fiber, which is natural material, is indicated about 91.9%, 66.7%. That result validated the possibility as replacement of activated carbon.

Key words : Paint Product, distribution, contribution, adsorption, Kapok fiber.

서 론

다양한 배출시설을 통해 배출되는 많은 종류의 휘발성 유해대기오염물질(VOC/HAPs)은 미량으로도 건강과 환경에 악영향을 초래할 수 있고 개별 물질별로 독성, 발암성, 확산에 의한 지속성 등의 특성과 대기 중에 오랜 기간 체류하면서 오존 또는 광화학 산화물 등 2차 오염물질을

생성하고 악취의 원인물질로도 작용하고 있어 그 중요성이 점차 증대되어가고 있다.

유해대기오염물질(Hazardous Air Pollutions)은 세계 여러 국가가 자국의 현실을 반영하여 200여종 내외의 오염물질을 지정하여 관리하고 있으며, OECD에서는 실용적인 이유로 다음과 같이 5개의 분류로 그룹화하고 있다.¹⁾

[†] Corresponding author, E-mail : bjsong2@korea.kr

Tel : +82-51-757-6936, Fax : +82-51-753-1424

Table 1. Grouping of HAPs, OECD

Group	Example of HAPs
Metals and metalloids	Cadmium, Mercury, Arsenic
Respirable mineral fibers	Asbestos, Glass microfibers
Inorganic gases	Fluorides, Chlorine, Cyanides, Phosgen
Nonhalogenated organic compounds	Aldehydes, Benzene, PAHs
Halogenated organic compounds	Vinyl chloride, Chlorobenzenes, Dioxins

미국의 경우, 188종의 오염물질을 유해대기오염물질(HAPs)로 규정하여 관리하고 있으며, PAHs, PCBs, 다이옥신 등 반휘발성유기화합물(SVOCs), 휘발성유기화합물(VOCs), 중금속 등으로 구성되고 VOCs가 82종, SVOCs가 63종으로 VOCs가 145종으로 대부분을 차지하고 있다.²⁾ 국내의 대기환경보전법에서는 유해대기오염물질과는 유사한 개념으로 사람의 건강, 재산이나 동식물의 생육에 직접 또는 간접적으로 위해를 줄 우려가 있는 35종을 특정대기오염물질로 지정하여 관리하고 있고, 별도로 VOCs 관리를 위하여 석유화학제품, 유기용제 등 37종의 휘발성유기화합물을 고시하여 관리하고 있다. 특정대기오염물질로 지정된 35종 중 중금속류, 다이옥신류 등은 배출허용기준 등 오염원 기준이 설정되어 개별 오염물질 관리가 꾸준히 되어 왔으나, VOCs는 일부 물질을 제외한 대부분이 배출허용기준이 설정되어 있지 않고 시설 관리 기준으로 규정하고 있어 개별 오염물질 관리가 미흡한 실정이다. 특히 다량의 VOC/HAPs가 발생하는 페인트제조시설의 경우, 제품의 종류, 색상, 용제 등 다양한 제품 생산에 따른 생산시설의 증설을 반영한 배출시설 및 방지시설의 변경 설계 등 기술적인 추가 행위의 수반이 요구되어지나, 최초 설계된 환경시설을 그대로 이용함으로써 흡입구 면적, 흡입유량 및 포착속도의 부족, 방지시설의 용량 및 처리방식 적용 미숙 등으로 상당한 양의 VOC/HAPs가 최종 배출구 및 작업공정에서 자연 휘발되어 작업장 및 주변지역에 악취 민원은 물론 주요 대기오염 배출원으로 인식되고 있는 현실이다.

과거, 부산지역의 페인트제조시설은 공업지역에 위치하여 민원발생 빈도가 낮았으나 주변 지역의 도시 개발 영향으로 공장지역과 주거지역이 혼재된 환경 취약지역으로 변질되었으며, 이로 인하여 생산 공정 중에서 발생하는 다량의 VOC/HAPs에 의해 빈번하게 악취 민원이 발생하고 있어 이에 대한 대책 수립이 시급한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 부산지역의 대표적인 페인트제조시설 4개소를 선정하여 배출시설의 설치환경 및 운영 현황을 파악함은 물론 배출시설 및 방지시설에서 발생하는

VOC/HAPs의 배출 특성을 파악하여 배출원에서의 제어 방안을 제시하고 적절한 방지시설의 선정과 최적 운영조건을 제시하여 악취 민원의 근원적인 해결과 함께 하절기 오존생성의 원인을 차단하는 동시에 향후 규제 강화가 예상되는 법 규제에 대비하여 기초 자료를 확보하고자 하였다. 또한 생산현장에서 일반적인 악취 흡착물질로 인식되고 있는 Activated carbon과 *Kapok Fiber*의 오염물질 제거율을 비교하여 흡착능력을 평가하고 활성탄 대체품으로서 *Kapok Fiber*의 가능성을 비교 평가하고자 하였다.

재료 및 방법

페인트제조시설의 오염물질 배출 현황 조사

현재 페인트제조시설에서 생산되고 있는 페인트의 종류는 건축용, 제품 마감용(예 자동차, 기계류, 금속, 가구 등), 특수 목적의 도료(예 industrial new construction and maintenance paint, traffic marking paints, marine paints) 등이며 건축용 도료의 약 80%는 수성이나 제품 마감용과 특수 목적용 도료는 대부분이 유성 페인트이다. 페인트제조시설에서 발생하는 대기 오염물질의 대부분은 유성 페인트에서 사용되는 용제의 증발로부터 발생되는 VOCs이며 공정운전, Solvent Reclamation, 원료저장탱크, 장치누출 등으로 인해 발생하는 것으로 파악되고 있다.³⁾ 그 중 Solvent Reclamation, 원료 저장탱크, 장치 누출 등은 생산 관리와 원료의 회수를 위한 장치 개발 등 지속적인 보완 이루어져 왔으나, 공정 운전의 경우 다품종 소량 생산의 특성에 기인한 구조적인 어려움으로 대부분 과거 재래식 공정을 채택하고 있어 VOCs 배출의 주요원인으로 파악되고 있다. 따라서 본 연구에서는 페인트제조시설의 생산 공정의 특징을 분석하고 주요 생산품, 배출 공정, 송풍기 용량 및 방지시설의 설치 현황 등 현황 조사를 통하여 환경시설의 적정 관리 방안을 제시하고자 하였다.

Table 2. U.S. EPA 188 HAPs²⁾

Acetaldehyde	Diazomethane	Hexane*	1,2-Propylenimine
Acetamide	Dibenzofuran	Hydrazine	Quinoline
Acetonitrile	1,2-Dibromo-3-chloropropane	Hydrochloric acid	Quinone (p-Benzoquinone)
Acetophenone	Dibutyl phthalate	Hydrogen fluoride	Styrene*
2-Acetylaminofluorene	1,4-Dichlorobenzene	Hydroquinone	Styrene oxide
Acrolein	3,3' -Dichlorobenzidine	Isophorone	2,3,7,8-Tetrachlorodibenzo-p-dioxin
Acrylamide	Dichloroethyl ether	Maleic anhydride	1,1,2,2-Tetrachloroethane
Acrylic acid	1,3-Dichloropropene	Methanol	Tetrachloroethylene
Acrylonitrile	Dichlorvos	Methoxychlor	Titanium tetrachloride
Allyl chloride	Diethanolamine	Methyl bromide(Bromomethane)	Toluene*
4-Aminobiphenyl	Diethyl sulfate	Methyl chloride(Chloromethane)	Toluene-2,4-diamine
Aniline	3,3' -Dimethoxybenzidine	Methyl chloroform	2,4-Toluene diisocyanate
o-Anisidine	4-Dimethylaminoazobenzene	Methyl ethyl ketone (2-Butanone)*	o-Toluidine
Asbestos	N,N-Dimethylaniline	Methylhydrazine	Toxaphene
Benzene*	3,3' -Dimethylbenzidine	Methyl iodide (Iodomethane)	1,2,4-Trichlorobenzene
Benzidine	Dimethylcarbamoyl chloride	Methyl isobutyl ketone (Hexone)*	1,1,2-Trichloroethane
Benzotrithloride	N,N-Dimethylformamide	Methyl isocyanate	Trichloroethylene
Benzyl chloride	1,1-Dimethylhydrazine	Methyl methacrylate	2,4,5-Trichlorophenol
Biphenyl	Dimethyl phthalate	Methyl tert-butyl ether	2,4,6-Trichlorophenol
Bis(2-ethylhexyl)phthalate(DEHP)	Dimethyl sulfate	4,4' -Methylenebis(2-chloroaniline)	Triethylamine
Bis(chloromethyl) ether	4,6-Dinitro-o-cresol	Methylene chloride	Trifluralin
Bromoform	2,4-Dinitrophenol	4,4'-Methylenediphenyl diisocyanate	2,2,4-Trimethylpentane
1,3-Butadiene	2,4-Dinitrotoluene	4,4' -Methylenedianiline	Vinyl acetate
Calcium cyanamide	1,4-Dioxane	Naphthalene	Vinyl bromide
Captan	1,2-Diphenylhydrazine	Nitrobenzene	Vinyl chloride
Carbaryl	Epichlorohydrin	4-Nitrobiphenyl	Vinylidene chloride
Carbon disulfide	1,2-Epoxybutane	4-Nitrophenol	Xylenes (mixed isomers)
Carbon tetrachloride	Ethyl acrylate	2-Nitropropane	o-Xylene*
Carbonyl sulfide	Ethylbenzene*	N-Nitroso-N-methylurea	m-Xylene*
Catechol	Ethyl carbamate (Urethane)	N-Nitrosodimethylamine	p-Xylene*
Chloramben	Ethyl chloride (Chloroethane)	N-Nitrosomorpholine	Antimony Compounds
Chlordane	Ethylene dibromide	Parathion	Arsenic Compounds
Chlorine	Ethylene dichloride	Pentachloronitrobenzene	Beryllium Compounds
Chloroacetic acid	Ethylene glycol	Pentachlorophenol	Cadmium Compounds
2-Chloroacetophenone	Ethyleneimine (Aziridine)	Phenol	Chromium Compounds
Chlorobenzene	Ethylene oxide	p-Phenylenediamine	Cobalt Compounds
Chlorobenzilate	Ethylene thiourea	Phosgene	Coke Oven Emissions
Chloroform	Ethylidene dichloride	Phosphine	Cyanide Compounds1
Chloromethyl methyl ether	Formaldehyde	Phosphorus	Glycol ethers2
Chloroprene	Heptachlor	Phthalic anhydride	Lead Compounds
Cresol(mixed isomers)	Hexachlorobenzene	Polychlorinated biphenyls	Manganese Compounds
o-Cresol	Hexachlorobutadiene	1,3-Propane sultone	Mercury Compounds
m-Cresol	1,2,3,4,5,6-Hexachlorocyclohexan	beta-Propiolactone	Fine mineral fibers3
p-Cresol	e	Propionaldehyde	Nickel Compounds
Cumene	Hexachlorocyclopentadiene	Propoxur (Baygon)	Polycyclic Organic Matter4
2,4-D	Hexachloroethane	Propylene dichloride	Radionuclides (including radon)5
DDE	Hexamethylene diisocyanate	Propylene oxide	Selenium Compounds
	Hexamethylphosphoramide		

* : target compound

Table 3. Summary of instrument and analytic conditions(VOCs)

Instrument	analytical condition
Thermal Desorber (SPIS-TD 3000, Heungkook)	<ul style="list-style-type: none"> · Adsorption : -20℃, 50 mL/min · Desorption : 310℃, 21 mL/min, 5min · Conditioning : 300℃, 50 mL/min, 5min
Gas Chromatography (DS 6200, Heungkook)	<ul style="list-style-type: none"> · Detector : FID, 200℃, 50 mL/min · Column : PLOT 50m × 0.32mm × 5μm BP-1 50m × 0.32mm × 1μm · Carrier gas(He) 3 mL/min · Oven Temp. : 45℃(15min)→4℃/min→160℃ →10℃/min→200℃(3.25min)

VOC 농도 분포 조사

하절기 오존생성의 전구물질(Ozone Precursors)로 알려진 VOCs는 다양한 배출원에서 다양한 형태로 대기 중에 배출되고 있으며 SO₂, PM-10 등 기준성 오염물질에 비해 연구 빈도가 미약하였으나, 최근에는 공업지역 및 도로의 사용이 많은 조선소 밀집지역 등에서 VOCs 농도 조사 등 오염원 현황 조사 및 배출계수 개발 등 다양한 시도가 진행되고 있다.^{4), 5), 6)} 페인트제조시설에서 사용되는 원료는 크게 4가지로 구분하는데 표면의 특성을 좌우하고 여러 조성물을 결합하는 역할을 하는 Binders, 제품의 점도조절 및 Binders를 용해하는 역할을 하는 Solvents, 표면물질의 색깔과 질감을 결정하는 Pigments, UV 차단, 방부제, 살균제, 살충제 등의 Accompanying substances로 구성된다. 제품의 용도에 따라 다양한 원료가 사용되고 있었으며 대기오염을 유발하는 VOCs는 대부분 혼합과정에서 Solvent 휘발에 의한 것으로 파악되었다.

본 연구에서는 생산 시설 내부에서 악취 강도가 높을

것으로 예상되는 지점 및 외부 통로지점을 선정하여 각각의 공기를 10L-테들러 백을 사용하여 채취하였으며, VOC/HAPs 성분 분석은 벤젠, 톨루엔 등 56종 VOCs를 광화학오염물질측정망 즉, PAMS(Photochemical Assesment Monitoring Station) 측정방법을 준용하여 분석하였고 분석기기의 종류 및 조건은 Table 3.이며 PAMS 혼합 표준물질 100ppb_v의 Chromatogram은 Fig. 1.과 같다.

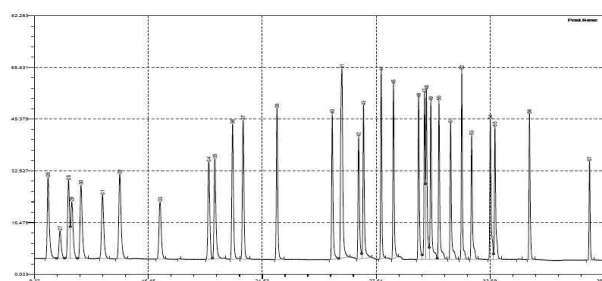


Fig. 1. Chromatogram of PAMS standard mixture gas(Peak No. 26~57).

Table 4. Summary of instrument and analytic conditions(Odors)

Instrument	analytical condition
Thermal Desorption System (TDS-G, Gerstel)	<ul style="list-style-type: none"> · 1st ramp. : 60℃/min, final Temp. 180℃(3min) · 2nd ramp. : 0℃/min · CIS Initial Temp. : -30℃ · 1st ramp. : 10℃/s, final Temp 260℃(10min) · 2nd ramp. : 0℃/s
Gas Chromatography (6890N, Agilent)	<ul style="list-style-type: none"> · Inject : Split 20:1 · Column : VOC 60m × 0.32mm × 1.8μm · Carrier gas(He) 1.0 mL/min · Oven Temp. : 40℃(5min)→10℃/min→180℃
Mass Selective Detector (5973i MSD, Agilent)	<ul style="list-style-type: none"> · SIM mode · MSD source Temp. : 230℃

악취성분 악취기여도 조사

페인트제조시설의 악취 발생은 대부분 혼합, 분산 및 조색공정의 교반에 의해서 발생되는데 공정 중에 발생한 악취물질은 활성탄 흡착시설을 거쳐 외기로 배출되도록 설계 운영 중이나, 적정하지 못한 흡입유량과 적절하지 못한 후드설치로 인하여 많은 악취물질들은 작업장에서의 휘발되어 내부공기를 오염시킴과 동시에 오염된 내부공기가 외부로 희석·확산되면서 악취 민원을 유발하는 것으로 파악되었다.

따라서 악취물질의 고농도가 예상되는 혼합기의 상부공기를 흡입상자를 이용하여 10L-테들러 백에 채취하여 방지시설 전단의 농도로 가정하였고 방지시설을 거친 배출구의 측정공에서 동일한 방법으로 채취하여 Table 4.의 조건에서 분석하였다.

악취방지법에서 지정악취물질로 규정된 8종(MEK., i-buthylalcohol, MIBK., Toluene, Styrene, m/p-Xylene, o-Xylene 및 n-bythylacetate의 표준물질 Chromatogram은 Fig. 2에 나타내었다.

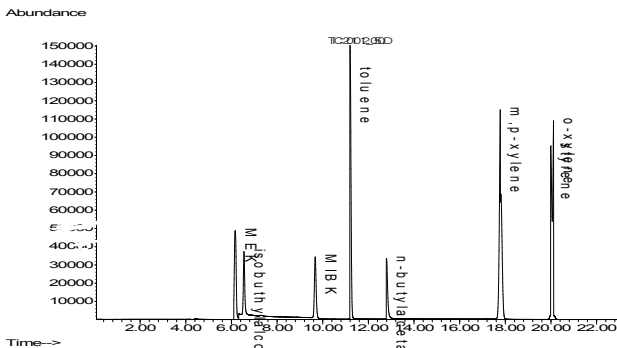


Fig. 2. Chromatogram of Odors standard mixture gas.

Activated carbon 및 Kapok fiber의 흡착능 조사

현재 악취 방지시설로 주로 이용되고 있는 활성탄 흡착시설은 운전이 간단하고 효율이 우수하며, 설치비가 적어 대다수의 배출시설에서 채용되고 있으나 흡착제의 파과점 (break point) 도달시기가 짧은 특성으로 잦은 활성탄의 교체가 요구되므로 비용 부담의 경제적인 어려움으로 교체를 지연하거나 누락하여 악취 민원을 유발하는 경우가 많은 것으로 파악되었다.

따라서 본 연구에서는 페인트제조시설의 발생하는 VOC/HAPs의 원인물질로 지목되는 기체상 톨루엔에 대한 흡착실험을 케이폭 섬유에 적용하여 활성탄 대체물질

로서의 가능성을 평가하고자 하였다.

흡착실험을 위한 기체상 톨루엔의 제조는 일정량의 질소가스를 충전한 10L-테들러 백에 액상 톨루엔을 일정량 주입한 후 수욕 중에서 1차 휘발시킨 후 120℃로 고정된 건조기에서 약 5분간 방치하여 완전히 증발시킨 다음 테들러 백을 실온까지 냉각한 후 질소가스를 충전하여 Inlet 가스로 사용하였다.

흡착능력 평가 실험장치는 Fig. 3.의 장치로 구성하였으며 흡착탑은 가스 흡수 임핀저를 활용하여 제작하였고 감압펌프를 이용하여 일정한 속도로 가스를 흐르게 한 후, 충전층의 높이, 흡착층의 단면적 등을 감안하여 공탑 속도(SV, Space Velocity), 머무름시간(Retention Time)을 산출하였으며, 감압펌프의 Outlet Port에 별도의 동일 용량의 테들러 백 부착하여 유입 전·후의 톨루엔 농도를 비교하여 흡착 능력을 평가 하였다.



Fig. 3. Adsorption apparatus of Kapok fibers & Activated carbon.

결과 및 고찰

페인트제조시설의 VOC/HAPs 제어방안 제시

조사대상 페인트제조시설의 주요생산품은 A사의 경우 자동차용 도료, B사 건축용 유성 도료, C사 건축용 수성 도료, D사는 선박용 도료를 주로 생산하고 있었으며 VOC/휘발성 HAPs 발생 현황을 파악하기 위해서는 제품의 생산 공정, 주요 발생원, 방지시설 설치 및 현장 조사가 필수적이다.

대부분의 제조시설에서는 소비자들의 요구에 따라 특화된 제품의 대량생산 공정과 다수의 고객 요구에 따른 소량생산 공정이 혼재되어 운전하고 있었으며, 생산제품은 알키드, 아크릴, 에폭시, 에나멜 등을 Binder로 한 다양

Table 5. Current status on paint products of this study

factory	A Use of product	Odor Source	Solvent	Activated carbon replacement period	establishment
A	general Industry	mixing, dispersion	Xylene>Toluene>MIBK	2 times / year	1978
B	construct	mixing, coloring	Xylene>Toluene>HCs	2 times / year	1972
C	construct	mixing, coloring	Xylene>Toluene>Alcohols	2 times / year	1985
D	marine	mixing, dispersion	Xylene>Ethylbenzene>HCs	2 times / year	2009

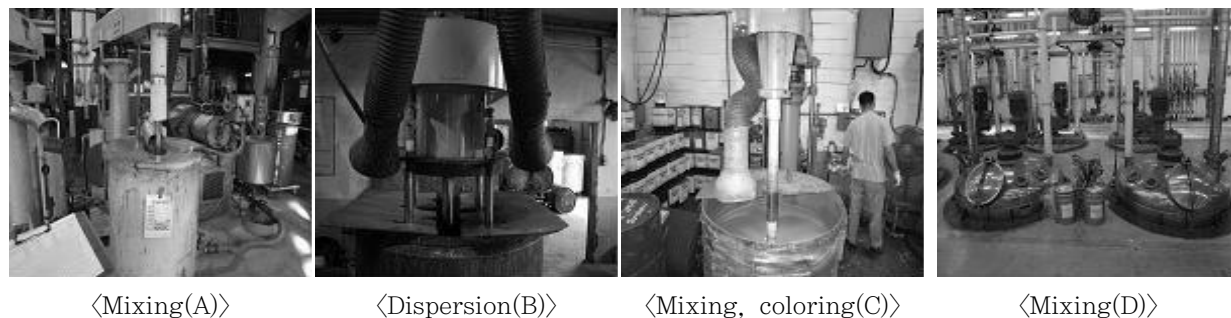


Fig. 4. Production process of paint.

한 색깔의 페인트를 생산하고 있었으며, 조사시설의 기본 현황은 Table 5.와 같다.

수지제조공정의 반응시설, 베이스 재료를 생산하는 분쇄공정 등은 밀폐 공정으로 운전되어 대기오염물질의 발생에 따른 처리가 양호한 것으로 조사되었고 대량 생산 공정에서는 고정된 혼합용기와 교반기를 사용함으로써 비교적 밀폐가 양호하여 발생하는 VOCs의 대부분이 방지시설인 활성탄 흡착시설에서 제거된 후 대기로 방출되고 있었으나, 소량 생산 공정에서는 이동식 혼합용기, 이동식 환기장치 등 작업자의 경험과 작업의 용이도에 따른 비정형적 작업방법의 선택으로 환기량의 변동부하가 일정하지 못하여 발생하는 포착속도 저하에 따른 휘발, 교반되는 혼합용기의 개방부로부터의 휘발, 적치된 원료용기에서 발생하는 휘발, 혼합용기의 세정 작업 시 사용되는 용제로부터의 휘발 등으로 공장내부가 오염되고 오염된 내부공기가 자연 환기에 의하여 외부공기로 노출되는 것으로 조사되었다.

포착속도(Capture Velocity)의 유지

공장내부의 오염은 작업자의 건강을 심각하게 위해하고 오염된 내부공기는 외부공기오염의 주요원인이 되므로 최선의 방안은 오염된 공기를 방지시설로 유도하여 처리하는 것이 가장 중요하며 주요 운영 변수는 배출시설에서의 포착속도(Capture Velocity)를 적절히 유지하는 것이다.

일반적으로 조용한 대기 중에 낮은 속도로 유해물질이 비산하는 경우 개구면에서의 포착속도(Capture Velocity)를 0.5~1.0 m/s 정도로 설계하도록 권고하고 있으며, 배출시설의 대부분은 기밀상태(enclosed)를 유지하면서 개구면에서의 포착속도를 0.7m/s 정도 유지하도록 설계되어 있다.

기류의 속도분포는 사용되고 있는 개구면에서 20cm 이격거리에서 설계속도 대비 10% 정도 분포하는 것으로 알려져 그 이상의 거리는 외부로 비산한다고 가정할 수 있으므로 비산되는 휘발성 VOC/HAPs 비율은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \text{외부 비산 비율} &= [(\pi * d_1^2/4 - \pi * d_2^2/4)/\pi * d_1^2/4] \times 100 \\
 &= (d_1^2 - d_2^2) * 100/d_1^2 = 64\%
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

* 산정예 : 지름 1m의 혼합기에 20cm의 흡입구가 있을 경우, $d_1=1$, $d_2=0.6$

상기 계산에서 알 수 있는 바와 같이 공기 중으로 비산되는 휘발성 물질은 후드장치의 적절한 배치와 더불어 배기구 포착속도의 조정을 통하여 제어가 가능하며, 일부 배출시설에서 채택하고 있는 Fig. 5.와 같은 중앙제어 전자식 환기장치를 부착하여 방지시설로 오염물질 유입하고 방지시설의 부하량을 일정하게 유지시킴으로써 오염물질 제거효율 향상에 기여할 것으로 판단된다.

다른 방안으로는 각 흡입구에 프렌지를 설치하여 개구면 면적 증가 및 외기의 흐름에 대한 영향을 최소화하고, 개구면적 증가에 따른 포착속도를 유지하기 위하여 흡입 펌프 용량을 증설하여 휘발성 물질의 외부 비산을 최소화하는 방안을 검토할 수 있으리라 판단된다.

방지시설에서의 활성탄 교체 주기 산출

VOC·악취물질의 제어법은 직접연소법, 축열연소법, 흡수법, 생물탈취법, 활성탄흡착법 등 여러 방법이 있다. 현대식 공정에서는 주로 축열연소법(R.T.O.:Regenerative Thermal Oxidizer)을 채용하고 있으며 R.T.O.는 VOC·악취물질을 연소 분해하는 시스템으로써 분해 공정에서 발생하는 열은 생산시설에 재활용하도록 설계되어 오염물질처리와 열 공급을 동시에 달성하도록 구성된다.

열효율을 높이기 위해 저온 조건에서 운전하는 경우 R.C.O.(Regenerative Catalytic Oxidizer)라 명명하는

데 이러한 방지시설은 높은 효율의 오염물질 제거 효율에도 불구하고 설치 경비가 수억에서 수십억원이 소요되어 생산시설에서의 채용은 용이하지 못한 실정이다.

조사대상 제조시설은 기존 활성탄 흡착법을 방지시설로 채택하고 있었으며 활성탄 흡착시설은 오염물질 흡착능력이 매우 우수하고 설치비용 소모가 적은 특징으로 일반적으로 채용되는 방식이나, 오염물질 흡착 용량이 경과된 후에는 흡착능이 소멸되므로 일정 주기로 교체해서 사용해야만 한다.

그러므로 본 연구에서는 기존 방지시설을 재설계하고 활성탄 교체주기를 산출하여 환경시설의 적정운영을 유도하고자 하고자, 대표시설 1개소를 추출하여 대기오염방지시설 설계업무 편람을 기초로 설계요인을 산출하였다.⁷⁾

A사의 경우 혼합시설, 분산시설, 포장시설에서 대부분의 VOC/HAPs가 발생되고 있으며 혼합시설 63대, 분산시설 8대, 포장시설 10대의 배출시설을 운영하고 있었다.

이들 배출시설의 흡입 가스량을 산출하고 이에 따른 방지시설의 설계 요소 및 활성탄 교체주기를 산출하면,

① 흡입 유량 산출

- 혼합시설 63대, 밀폐형후드(Enclosed Hood), 개구부 직경 0.4m, 포착속도 0.7m로 설정,

$$Q_I = A * v * N \tag{2}$$

A : 개구부 면적($\pi * d_1^2 / 4 = \pi * 0.4^2 / 4 = 0.1256m^2$)

v : 포착속도(0.7m/sec, 회전체 분진발생원 포착속도 적용)

N : 개구부 수량(총 63대 * 최대 가동율 0.6 = 37.8대 \approx 40대)

$$= 0.1256m^2 * 0.7 \text{ m/sec} * 60\text{sec/min} * 40\text{대}$$

$$= 211.0 \text{ m}^3/\text{min}$$

- 분산시설 8대, 밀폐형후드(Enclosed Hood), 개구부 직경 0.4m, 포착속도 0.7m로 설정,



<Auto damper control>



<damper control panel>



<CPU of damper>

Fig. 5. Automatic ventilation control system.

$$Q_2 = A * v * N \tag{3}$$

$$= 0.1256\text{m}^2 * 0.7 \text{ m/sec} * 60\text{sec/min} * 8\text{대}$$

$$= 42.2 \text{ m}^3/\text{min}$$

· 포장시설 5대, 캐노피후드(Canopy Hood), 개구부 직경 0.585m, 포착속도 1.0m로 설정,

$$Q_3 = 1.4 * P * D * v * N \tag{4}$$

A : 개구부 둘레(0.585 * 3.14 = 1.8369m)
 D : 이격거리(180mm = 0.18)
 v : 포착속도(1.0m/sec, 조용한 대기 중 용기 충전작업 적용)
 N : 개구부 수량(총 10대 * 최대 가동율 0.5 = 5대)

$$= 1.4 * 1.8369\text{m} * 1.0 \text{ m/sec} * 60\text{sec/min} * 5\text{대}$$

$$= 138.9 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \tag{5}$$

$$= 392.1\text{m}^3/\text{min}$$

∴ 총 흡입유량(여유율 15%를 적용) : 392.1 * 1.15 = 450m³/min(설계점)

② 방지시설 설계

· 방지시설 설계 기준 : 공탑속도(S.V.) 0.5m/sec 이하, 접촉시간(R.T.) 1sec 이상

· 흡입유량(Q) : 450m³/min일 경우,

$$\cdot \text{요구 단면적}(A) = Q / S.V. \tag{6}$$

$$= 450\text{m}^3/\text{min} / (0.5\text{m/sec} * 60\text{sec/min})$$

$$= 15\text{m}^2 \text{ 《 } 17.16\text{m}^2(\text{흡착단면 } 3900\text{L} * 2200\text{W} * 2\text{단})$$

$$\cdot \text{흡착층 높이}(H) = Q \cdot R.T. / A \tag{7}$$

$$= 450\text{m}^3/\text{min} * 1\text{sec} * 1\text{min}/60\text{sec} / 17.16\text{m}^2$$

$$= 0.4371\text{m} \text{ 《 } 500\text{mm}(\text{흡착층높이})$$

∴ 방지시설 설계 : 3900L * 2200W * 500H * 2단

③ 흡착제 충전량 산정

· 흡착제의 종류 : Activated Carbon

· 형 식 : 조립 활성탄

· 규 격 : Ø4 * 6 mm

$$\cdot \text{흡착제 충전량}(kg) = V * \rho \quad (\rho : \text{흡착제 비중 } 500\text{kg/m}^3) \tag{8}$$

$$= 3.9\text{m} * 2.2\text{m} * 0.5\text{m} * 2\text{단} * 500\text{kg/m}^3$$

∴ 흡착제 충전량 : 4290 kg

④ 흡착제 교환 주기(T) 산정

· 설계기준 : 피흡착제는 메탄, 입구농도 920.1ppm, 흡착효율 80% 기준

	Compound	Concentration(ppb)							
		Indoor(A)	Outdoor(A)	Indoor(B)	Outdoor(B)	Indoor(C)	Outdoor(C)	Indoor(D)	Outdoor(D)
12	Isopentane	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
13	n-Pentane	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
14	trans-2-Pentene	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
15	1-Pentene	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
16	cis-2-Pentene	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
17	2,2-Dimethylbutane	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
18	2,3-Dimethylbutane	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
19	2-Methylpentane	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
20	3-Methylpentane	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
21	n-Hexane	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
22	Isoprene	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
23	1-Hexene	N.D.	N.D.	146.4	41.3	662.8	16.2	19.8	N.D.
24	Methylcyclopentane	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
25	2,4-Dimethylpentane	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
26	Benzene	N.D.	N.D.	85.9	N.D.	10.5	N.D.	28.4	N.D.
27	Cyclohexane	N.D.	N.D.	25.7	N.D.	18.9	N.D.	N.D.	N.D.
28	2-Methylhexane	N.D.	N.D.	30.0	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
29	2,3-Dimethylpentane	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	8.5	N.D.	N.D.	N.D.
30	3-Methylhexane	N.D.	N.D.	23.7	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
31	2,2,4-Trimethylpentane	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	26.6	N.D.	N.D.	N.D.
32	n-Haptane	N.D.	N.D.	69.1	N.D.	20.4	N.D.	N.D.	N.D.
33	Methylcyclohexane	969.8	451.1	1947.9	120.4	1404.3	48.1	107.9	19.7
34	2,3,4-Trimethylpentane	N.D.	1.3	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
35	Toluene	4932.9	2049.9	2026.2	274.6	8029.1	332.6	44.7	10.7
36	2-Methylheptane	N.D.	N.D.	17.3	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
37	3-Methylheptane	N.D.	N.D.	13.7	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
38	n-Octane	518.6	98.8	56.6	6.1	148.2	12.4	20.9	N.D.
39	Ethylbenzene	385.2	1320.0	5164.7	617.4	1292.3	102.5	658.1	34.8
40	m/p-Xylene	1015.4	374.6	927.3	121.2	2117.9	156.2	646.9	25.2
41	Styrene	N.D.	15.9	65.1	4.5	107.0	7.7	N.D.	N.D.
42	o-Xylene	594.5	166.3	346.1	50.2	1250.4	99.6	480.9	16.7
43	n-Nonane	18.1	3.6	169.0	13.4	179.6	8.8	7.7	N.D.
44	Isopropylbenzene	N.D.	2.5	16.6	N.D.	11.5	N.D.	15.3	N.D.
45	n-Propylbenzene	68.1	3.6	31.0	N.D.	33.0	N.D.	5.9	N.D.
46	m-Ethyltoluene	N.D.	N.D.	47.1	N.D.	80.6	5.7	46.0	N.D.
47	p-Ethyltoluene	33.5	6.7	N.D.	N.D.	14.3	N.D.	N.D.	N.D.
48	1,3,5-Trimethylbenzene	N.D.	4.9	20.5	N.D.	38.3	N.D.	8.5	N.D.
49	o-Ethyltoluene	93.3	3.2	16.8	N.D.	15.5	N.D.	7.2	N.D.
50	1,2,4-Trimethylbenzene	111.5	15.6	38.7	4.1	109.5	9.7	68.2	2.6
51	n-Decane	45.2	2.3	70.2	6.8	62.9	3.7	5.3	N.D.
52	1,2,3-Trimethylbenzene	34.6	4.8	23.1	N.D.	23.3	N.D.	7.2	N.D.
53	m-Diethylbenzene	N.D.	N.D.	19.9	N.D.	8.3	N.D.	6.1	N.D.
54	p-Diethylbenzene	N.D.	20.5	17.0	N.D.	23.1	N.D.	7.3	N.D.
55	n-Undecane	29.7	1.9	25.0	3.7	23.9	2.8	4.2	N.D.
56	n-Dodecane	98.4	N.D.	22.9	3.8	11.0	5.3	6.8	N.D.

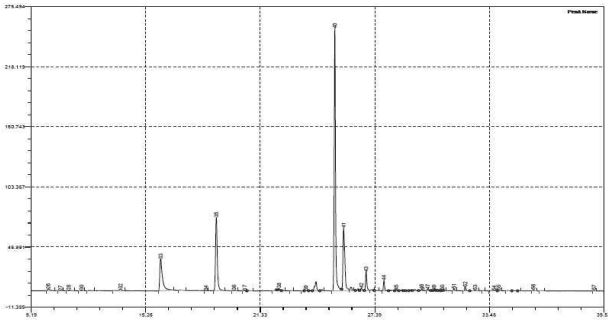


Fig. 7. Chromatogram of sampling gas(B factory indoor).

Fig. 7.은 B사 페인트제조시설 공장 내부공기의 크로마토그램이며, 생산시설의 규모, 제품의 종류, 제품 생산량 등에 따라 다소 차이가 있으나 VOC/HAPs의 발생은 혼합공정에서 교반에 의한 액체용제의 휘발이 최대 발생원으로 조사되었다.

혼합공정은 전술한 바와 같이 최초에는 밀폐식 공정으로 설계하였으나 작업자의 편의 및 다품종 소량 생산의 특징으로 개방식 공정으로 변형 운용되고 있으며, 일부 특정제품을 주로 생산하는 D사를 제외한 시설에서는 상

대적으로 높은 VOC 성분 검출이 예상되었고 실제 분석결과가 이를 반영하고 있다.

공장 내부공기 분석결과, VOC/HAPs의 검출은 A사의 경우 15종의 VOC가 검출되었으며, B사는 28종, C사는 27종, D사는 21종의 VOC가 검출되었고 이중 HAPs 물질은 A사가 4종, B사는 6종, C사 6종, D사는 5종의 HAPs가 검출되었다.

A사 공장내부에서의 농도 분포는 Toluene 4932.9ppb, m/p-Xylene 1015.4ppb, o-Xylene 594.5ppb, Ethylbenzene 385.2ppb의 순으로 나타났으며, B사는 Ethylbenzene > Toluene > m/p-Xylene의 순으로 C사는 Toluene > m/p-Xylene > Ethylbenzene, D사는 Ethylbenzene > m/p-Xylene > o-Xylene순으로 나타났다.

Table 5. 생산시설 현황조사에서 나타난 바와 같이 용제 사용량과 오염물질 배출량과의 농도비는 유사한 경향을 나타낼 것으로 예상되었으나, 조사된 공장내부의 VOC/HAPs 농도분포는 다른 결과를 나타내고 있어 각각의 성분 특성을 검토한 결과, 25℃ 1기압에서의 증기압이 Toluene 30mmHg, Ethylbenzene 10mmHg, m-Xylene

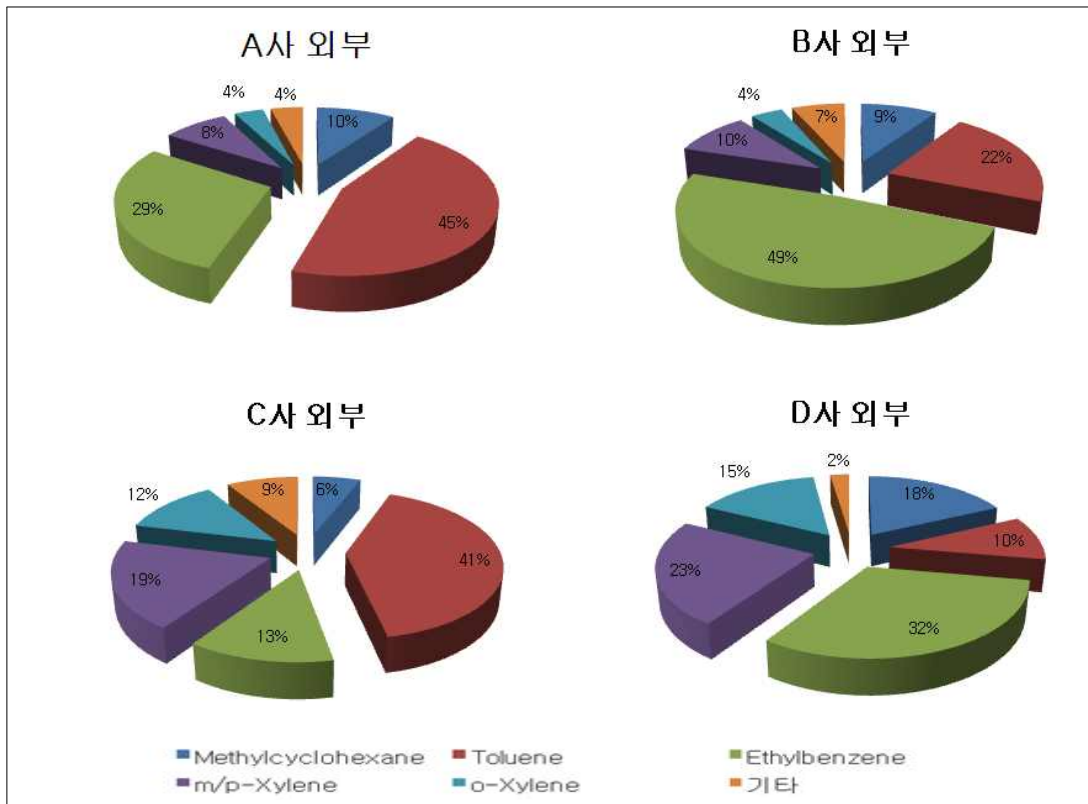


Fig. 8. concentration distribution at outdoor.

Table 7. Relation of odor intensity & concentration

(unit : ppm)⁹⁾

Compound	relative equation	barely feeling conc.	easily feeling conc.	strong feeling conc.
Methylethylketone	Y=1.85logX+0.149	2.9	35	410
Methylisobuthylketone	Y=1.65logX+2.27	0.17	2.8	45
i-buthylalcohol	Y=0.79logX+2.53	0.012	4.0	1400
n-buthylacetate	Y=1.14logX+2.34	0.066	3.8	220
Toluene	Y=1.40logX+1.05	0.92	25	660
Stylene	Y=1.42logX+3.10	0.033	0.84	22
m-Xylene	Y=1.46logX+2.37	0.12	2.7	63
o-Xylene	Y=1.66logX+2.24	0.18	2.9	46

8mmHg, o-Xylene 7mmHg로 나타나 Toluene의 증기압이 Xylene에 비해 높은 특성이 반영된 것으로 판단된다.⁸⁾

오염된 공장내부의 공기가 다른 요인이 배제된 상태에서 공장외부로 확산된다고 가정한다면 농도 분포 경향은 동일하다고 가정할 수 있었으나 A사의 Ethylbenzene은 공장내부보다 높은 농도를 나타내고 있고 일부 물질의 경우 농도분포 비율이 다르게 나타난 것은 동일사의 타 공장에서의 오염이 확산되어 나타난 결과로 판단된다.

Toluene 등 VOC/HAPs의 내부공기 대비 외부공기의 농도비는 약 5%~50%의 범위로 공장 내의 오염물질이 외부로 2배~20배 정도로 희석되면서 배출되는 것으로 조사되었으며, 4개 사업장의 외부공기는 내부공기의 평균 17.6%로 정도로 산출되었다.

Fig. 8.에 나타난 바와 같이 VOC/HAPs의 주요 배출물질 비율은 A사의 경우 Toluene 45%, Ethylbenzene 29%, Xylene 12%, Methylcyclohexane 10%의 순으로

나타났고, B사의 경우 Ethylbenzene 49%, Toluene 22%, Xylene 14%, Methylcyclohexane 9%였으며, C사는 Toluene 41%, Xylene 31%, Ethylbenzene 13%, Methylcyclohexane 6%로 나타났으며, D사의 경우 Xylene 38%, Ethylbenzene 32%, Methylcyclohexane 18%, Toluene 10%로 나타났다.

A, B사는 Toluene과 Ethylbenzene, C사는 Toluene, Xylene, D사는 Xylene, Ethylbenzene 등이 70% 이상의 농도 분포비를 나타내고 있어 각 생산설비에서는 환경시설의 운영 및 유지관리에 있어서 상기 대표성 물질을 특성을 고려하여 설계 및 운영조건에 반영함으로써 오염물질 제어의 효율성을 제고 할 수 있으리라 판단된다.

악취물질원인물질의 악취 기여도

악취의 자극량과 감각 세기와의 관계는 다음 식으로 표현되며 이식을 Weber-Fechner의 법칙이라 한다.

$$I = K \cdot \log C, \text{ 여기서 } (I : \text{감각세기}, K : \text{계수}, C : \text{자극량}) \tag{10}$$

악취를 유발하는 물질은 약 40만종이상으로 알려져 있으며 악취오염은 수많은 물질이 독립적으로 또는 부가적으로 상호작용하는 다성분계 오염으로 정의할 수 있으며 이러한 다성분계 냄새의 세기는 단순한 성분의 합으로 생각하기에는 어려움이 있다.

상기 관계식을 근거로 일본 환경위생센터에서 발표한 냄새세기와 물질농도와의 관계를 아래에 제시하였다.

악취오염이 단순한 농도의 합으로 표현될 수는 없지만

수많은 물질의 상호 관계를 명확히 구분하기가 어려우므로 최소 후각 감지농도(odor threshold,역치)¹⁰⁾가 알려진 성분의 예상 악취농도(Expected Odor Concentration)를 산정하였으며, 측정항목이 모든 악취를 설명한다는 가정 하에서 각 악취성분별 기여도(Contribution)를 계산하여 악취 원인물질을 규명하고자 하였다.¹¹⁾

예상악취농도 및 악취기여도의 산정식은 수식(11)과 (12)에 나타내었다.

$$O_{pf} = C_m / C_T \tag{11}$$

O_{pf} : 측정된 악취성분의 예상악취 농도

C_m : 측정된 악취성분의 농도

C_T : 측정된 악취성분의 최소 감지농도

$$A_o = O_{pf} / \sum O_{pf} \times 100 \tag{12}$$

A_o : 악취기여도(%)

O_{pf} : 측정된 악취성분의 예상 악취농도

$\sum O_{pf}$: 측정된 모든 악취성분의 예상 악취농도 합

본 연구에서는 악취 원인물질을 도출하고자 각 배출공정과 방지시설의 후단에서 10L-테들러 백을 사용하여 시료를 채취하였으며 우리나라 악취방지법에서 규정하고 있는 8종의 악취물질을 악취오염공정시험방법에 따라 전술한 조건에 따라 GC/MS를 이용하여 분석하였으며, B사의 배출원에서의 크로마토그램을 Fig. 9.에 나타내었다.

사 64.2%, D사 96.7%로 나타났고 8종 악취물질 평균 제거율은 66.2%로 조사되었으며, 대부분의 악취물질이 배출구를 통해 대기로 확산된다고 가정하여 평균 악취기여도를 평가한 결과, 페인트제조시설 평균 악취기여도는 Toluene 61.7%, m/p-Xylene 21.7%, i-buthylalcohol 9.3 %로 나타났다.

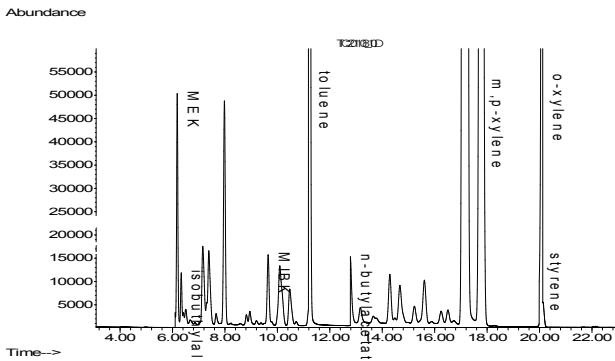


Fig. 9. Chromatogram of B factory.

방지시설의 악취물질 제거효율을 평가하고자 배출원(혼합공정) 및 방지시설 후단에서 시료를 채취하여 전후 농도를 비교한 결과, A사의 경우 29.1%, B사 74.7%, C

A사의 악취기여도

악취는 개인의 민감도에 따라 순간적인 노출에 의해서도 감각의 세기가 달라지므로 각 생산시설에서는 주변 지역의 여건에 따라 노출한계 등 환경관리의 수준이 달라야 할 것으로 사료된다. 자동차용 유성도료가 주요 생산품인 A사의 배출원(혼합공정)에서는 Toluene(67.4ppm) > Methylisobuthylketone(18.1ppm) > n-buthylacetate (15.9ppm)의 분포를 보이고 있으며, 최소 후각감지농도를 고려한 기여도는 Toluene(84.7%) > m/p-Xylene (8.84%) > i-buthylalcohol(3.1%)의 순으로 다른 경향을 보이고 있다.

또한 활성탄 흡착시설을 거친 방지시설 후단에서의 농도 분포는 n-buthylacetate(36.7ppm) > Toluene(16.3ppm) > m/p-Xylene(13.2ppm)의 순으로 나타났으며, 악취기

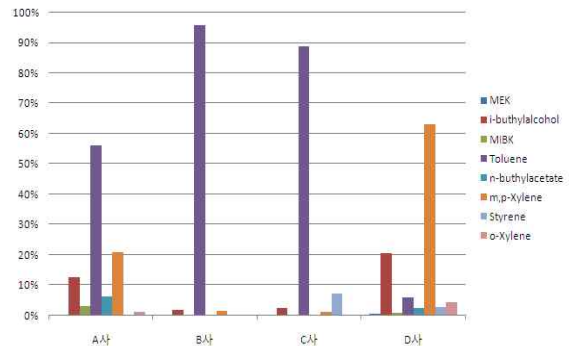
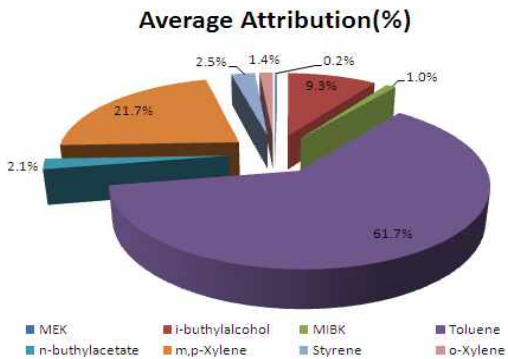


Fig. 10. Average & Each odor attribution of treated gas.

Table 8. Components and concentration of sample gas (A).

Compound	Concentration(ppm)		Threshold (ppm)		Expected Odor Conc.		Attribution (%)	
	source	treated gas	source	treated gas	source	treated gas	source	treated gas
Methylethylketone	1.81	1.93	0.44	0.44	4.11	4.38	0.08%	0.24%
i-buthylalcohol	2.59	3.82	0.017	0.017	152.61	224.52	3.07%	12.43%
Methylisobuthylketone	18.11	11.97	0.22	0.22	82.30	54.40	1.65%	3.01%
Toluene	67.43	16.25	0.016	0.016	4214.23	1015.35	84.67%	56.19%
n-buthylacetate	15.91	36.72	0.33	0.33	48.20	111.26	0.97%	6.16%
m/p-Xylene	15.40	13.18	0.035	0.035	440.10	376.45	8.84%	20.83%
Stylene	0.67	0.00	0.041	0.041	16.23	0.00	0.33%	0.00%
o-Xylene	7.46	7.82	0.38	0.38	19.62	20.59	0.39%	1.14%

여도 분포는 Toluene(56.2%) > m/p-Xylene(20.8%) > i-buthylalcohol(12.4%)로 나타났다.

A사의 경우 배출원과 방지시설 후단에서 동일하게 Toluene, m/p-Xylene, i-buthylalcohol의 기여도가 90% 전후로 나타나 이들 개별 물질에 대한 특성을 파악하여 관리방안을 수립·시행한다면 악취 민원 저감에 더욱 효율적으로 대처 가능할 것으로 사료된다.

B사의 악취기여도

건축용 유성도료가 주요 생산품인 B사의 경우 배출원에서의 악취물질의 농도분포는 Toluene(391.4ppm) > m/p-Xylene(303.1ppm) > o-Xylene(137.7ppm)의 순으로 나타났으며 농도분포에 대응하는 악취기여도는 Toluene(70.0%) > m/p-Xylene(24.8%) > i-buthylalcohol(3.3%)의 순으로 나타나 A사와 유사한 경향을 나타내고 있었다.

활성탄을 거친 방지시설 후단에서의 농도분포는 Toluene(205.0ppm) > m/p-Xylene(7.42ppm) > Methylisobuthylketone(6.1ppm)의 순으로 나타났으며, 악취기여도 분포는 Toluene(95.9%) > i-buthylalcohol(1.9%) > m/p-Xylene(1.6%)의 순으로 나타나 Toluene이 주원인 물질로 판단된다.

C사의 악취기여도

건축용 수성도료가 주요생산품인 앞선 2개 생산시설에 비해 다른 경향을 보일 것으로 예상되었으며 C사의 경우 배출원 악취물질 농도분포는 Toluene(18.2ppm) > m/p-Xylene(6.5ppm) > i-buthylalcohol(4.3ppm)의 순이었고 악취기여도는 Toluene(70.8%) > i-buthylalcohol(15.7%) > m/p-Xylene(11.6%)의 순으로 나타나 A, B사와는 다른 경향을 나타내고 있었다.

활성탄 흡착시설을 거친 방지시설 후단에서의 농도분포는

Table 9. Components and concentration of sample gas (B).

Compound	Concentration(ppm)		Threshold (ppm)		Expected Odor Conc.		Attribution (%)	
	source	treated gas	source	treated gas	source	treated gas	source	treated gas
Methylethylketone	29.86	4.28	0.44	0.44	67.85	9.72	0.19%	0.07%
i-buthylalcohol	19.72	4.20	0.017	0.017	1160.18	246.90	3.32%	1.85%
Methylisobuthylketone	21.92	6.07	0.22	0.22	99.65	27.60	0.29%	0.21%
Toluene	391.39	205.00	0.016	0.016	24461.89	12812.48	70.00%	95.87%
n-buthylacetate	16.84	1.21	0.33	0.33	51.04	3.66	0.15%	0.03%
m/p-Xylene	303.07	7.42	0.035	0.035	8659.18	211.90	24.78%	1.59%
Stylene	3.40	1.75	0.041	0.041	82.83	42.74	0.24%	0.32%
o-Xylene	137.71	3.48	0.38	0.38	362.39	9.15	1.04%	0.07%

Table 10. Components and concentration of sample gas (C).

Compound	Concentration(ppm)		Threshold (ppm)		Expected Odor Conc.		Attribution (%)	
	source	treated gas	source	treated gas	source	treated gas	source	treated gas
Methylethylketone	1.43	0.19	0.44	0.44	3.26	0.44	0.20%	0.06%
i-buthylalcohol	4.29	0.32	0.017	0.017	252.09	18.54	15.71%	2.53%
Methylisobuthylketone	3.03	0.14	0.22	0.22	13.77	0.62	0.86%	0.08%
Toluene	18.18	10.43	0.016	0.016	1136.33	651.96	70.80%	88.92%
n-buthylacetate	1.03	0.08	0.33	0.33	3.13	0.23	0.19%	0.03%
m/p-Xylene	6.49	0.32	0.035	0.035	185.51	9.10	11.56%	1.24%
Stylene	0.00	2.12	0.041	0.041	0.00	51.70	0.00%	7.05%
o-Xylene	4.14	0.23	0.38	0.38	10.90	0.60	0.68%	0.08%

Toluene(10.4ppm) > Stylene(2.1ppm) > m/p-Xylene (0.32ppm)의 순이었으며 악취기여도 분포는 Toluene(88.9%) > Stylene(7.1%) > i-buthylalcohol(2.5%)의 순으로 나타났다.

C사의 경우 배출원에서는 Stylene이 검출되지 않았으나 방지시설 후단에서 검출된 것은 생산제품의 종류가 다른 타 공정에서의 오염물질 배출에 따른 결과로 판단되며, 다종의 생산공정이 합류되는 방지시설의 후단에서의 악취기여도가 높은 Toluene, Stylene, i-buthylalcohol의 특성을 고려하여 저감방안을 수립한다면 더욱 효과적인 악취 저감대책이 가능할 것으로 판단된다.

D사의 악취기여도

선박용 유성도료를 주요 생산제품으로 하는 D사는 Mixed Xylene을 주 용제로 사용하고 있었다. D사 배출원(혼합공정) 악취물질 농도분포는 n-buthylacetate (22.6ppm) > m/p-Xylene(15.3ppm) > o-Xylene(12.0ppm)의 순이었으며 악취기여도는 m/p-Xylene(51.7%) >

i-buthylalcohol(29.3%) > n-buthylacetate(8.1%)의 순이었으며, 흡착시설을 거친 방지시설 후단에서의 농도분포는 m/p-Xylene(0.78ppm) > o-Xylene(0.58ppm) > n-buthylacetate(0.27ppm)의 순으로 나타났으며 악취기여도는 m/p-Xylene(63.2%) > i-buthylalcohol (20.5%) > Toluene(5.8%)의 순으로 나타났다.

D사의 경우 배출원과 방지시설 후단 모두에서 m/p-Xylene이 가장 높게 나타났으며 개별 배출원이 합류된 결과를 나타내는 방지시설후단의 악취기여도는 m/p-Xylene, i-buthylalcohol, Toluene의 비율이 90% 정도로 나타나 이들 물질들에 대한 제어를 검토하여야 할 것으로 판단된다.

활성탄 및 케이폭 섬유의 흡착능

일반적으로 활성탄 흡착시설은 시설의 설치 및 유지관리가 간단하고 처리효율이 높아 대부분의 유기용제 사용 시설에서 악취의 제거시설로 널리 이용되고 있으나, 활성탄의 흡착능이 급속하게 소실되는 파과점(break point)

Table 11. Components and concentration of sample gas (D).

Compound	Concentration(ppm)		Threshold (ppm)		Expected Odor Conc.		Attribution (%)	
	source	treated gas	source	treated gas	source	treated gas	source	treated gas
Methylethylketone	2.01	0.07	0.44	0.44	4.57	0.16	0.54%	0.44%
i-buthylalcohol	4.21	0.12	0.017	0.017	247.70	7.27	29.30%	20.53%
Methylisobuthylketone	2.69	0.07	0.22	0.22	12.23	0.31	1.45%	0.88%
Toluene	0.49	0.03	0.016	0.016	30.56	2.04	3.62%	5.75%
n-buthylacetate	22.60	0.27	0.33	0.33	68.49	0.81	8.10%	2.29%
m/p-Xylene	15.31	0.78	0.035	0.035	437.38	22.39	51.74%	63.22%
Stylene	0.53	0.04	0.041	0.041	12.92	0.91	1.53%	2.57%
o-Xylene	11.99	0.58	0.38	0.38	31.56	1.53	3.73%	4.32%

도달시기가 짧아 흡착제 교체에 따른 관리비용의 과다로 많은 어려움이 있는 현실이다.

이에 본 연구에서는 가격이 저렴한 천연섬유로서의 *Kapok fiber*의 약취 흡착능 시험을 통하여 활성탄 대체 품으로서의 가능성을 평가하고자 하였다. *Kapok fiber*는 자바, 수마트라 등 동남아시아 열대지역에 서식하는 *Kapok* 나무의 열매에서 채취한 섬유질로서 베개나 옷의 보온재료 및 구멍조끼에 사용되고 있으며 섬유의 형상은 내부가 텅 빈 중공구조를 가지고 있으며 당과 리그닌이 주요성분으로 리그닌의 대부분이 syringaldehyde로 구성되어 있고 당 잔기에 acetyl group이 약 13%정도 함유되어 친유성의 화학적 특성을 가지고 있다.

최근 친환경적인 소재의 개발과 더불어 수중의 중금속 흡착을 위한 *Kapok fiber*의 개질에 대한 연구가 시도된 바 있으나,^{12), 13)} 가스 상에서의 흡착능력 평가는 시도된 바가 없으며, 본 연구에서는 천연소재로서의 *Kapok fiber* 흡착능을 기존 활성탄과 비교 평가하여 페인트제조 시설에서 흡착제 대체 가능성을 평가하였다.

사용된 *Kapok fiber*는 위상차 현미경을 이용하여 Fig. 11.와 같이 형상을 확인하였고 확인된 형상은 선행 연구 자료와 유사한 형상으로 확인되었다. 일반적으로 활성탄 흡착층의 설계기준은 Space Velocity는 50cm/sec이하, Retention Time 1sec이상으로 설계 시공되며 본 연구에서는 흡입 진공펌프의 성능을 고려하여 운전조건을 결정하였으며 조사 결과 VOC/HAPs 및 약취 기여도가 높은 톨루엔을 기준물질로 시험한 약취 흡착능 실험결과를 Table 12.와 같다.

시중 활성탄 100g이 충전된 흡착층에서의 흡착효율은

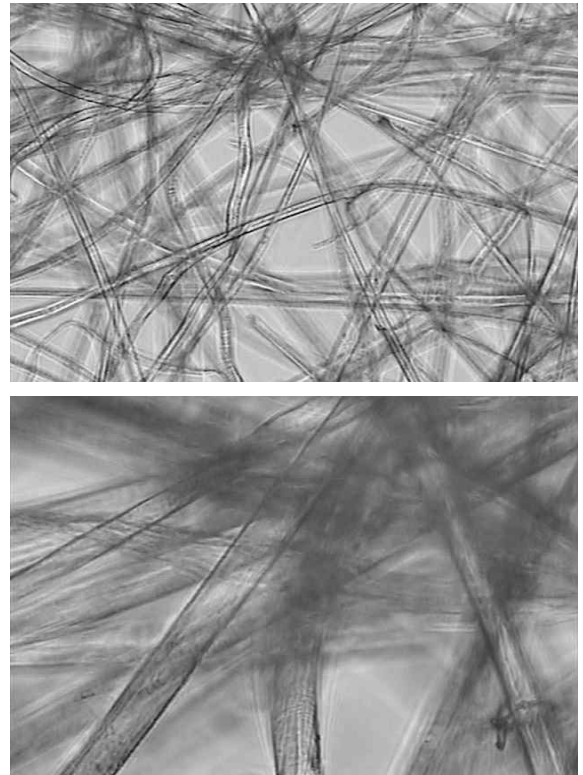


Fig. 11. Photographies of Kapok fibers(×100, ×400).

공탐속도 및 머무름 시간의 차이에도 불구하고 대부분 99%이상의 우수한 효율을 나타내어 초기 흡착효율이 매우 우수함을 입증하였다.

*Kapok fiber*는 겉보기비중이 활성탄에 비하여 훨씬 낮은 특성으로 인하여 30g을 흡착층에 충전하여 흡착능 시험을 실시하였으며, 공탐속도 0.27cm/sec, 머무름 시간

Table 12. Results of adsorption ability

adsorbent	Flow (L/min)	S.V. (cm/sec)	R.T. (sec)	Inlet (ppm)	Outlet (ppm)	Efficiency (%)
A.C._A(palm)	1.67	3.40	2.06	2579.48	7.72	99.7
	5.56	11.30	0.62	94.76	0.766	99.2
A.C._B(palm)	1.00	2.03	9.85	3.4	0.097	97.1
	5.56	11.30	1.77	47.99	0.493	99.0
A.C._C(coal)	1.67	3.40	5.88	17.07	0.091	99.5
	4.76	9.68	2.07	17.07	0.035	99.8
A.C._D(coal)	1.67	3.40	3.68	19.35	0.172	99.1
	4.55	9.25	1.35	4.62	0.028	99.4
<i>Kapok fiber</i>	0.33	0.27	181.48	10.11	0.818	91.9
	4.35	3.55	13.80	15.72	5.23	66.7

181.48sec에서는 91.9%의 비교적 우수한 흡착효율을 나타내었고, 공탑속도 3.55cm/sec, 머무름시간 13.8sec에서는 66.7%의 흡착효율을 나타내었다.

단순한 상기 실험의 결과로 도출된 활성탄의 대체품으로서 *Kapok fiber*의 흡착능은 기존 활성탄에 비하여 열등한 결과를 나타내고 있으나, 가스상에서의 VOC 흡착능을 평가한 최초의 시도로 만족스런 결과를 도출하였다는 데 의미를 두고자 한다.

또한 활성탄은 기존 야자껍질이나 석탄계원료를 탄화시키기 위하여 연료를 사용에 의한 온실가스 발생이 필연적이거나, *Kapok fiber*는 자연에서 바로 채취가 가능하여 식물에 의한 온실가스 감축효과와 더불어 제조 가공 중에 온실가스 발생이 없는 친환경소재로 평가되므로 추가적인 연구를 통하여 압력손실, 파과점, 재활용 방법 등 상용화와 관련된 factors를 표준화하고 구체적인 방법으로 성능을 비교 평가한 후 실제 현장적용을 통하여 흡착 능력을 검증함으로써 전처리 또는 대체 흡착제로서의 활용 방안을 마련할 수 있으리라 사료된다.

결 론

부산지역 페인트제조시설에서 발생하는 VOC/휘발성 HAPs의 분포특성을 조사하여 원인물질을 파악하고 악취 기여도 평가를 통한 주요 악취 원인물질을 추출하여 오염 저감방안을 제시하고자 본 연구를 수행한 결과, 다음과 같은 유용한 결론을 도출할 수 있었다.

1. 조사 대상시설 4개소의 운전현황을 조사한 결과, 대부분의 배출시설에서 약 60%이상 대기로 자연 휘발됨을 알 수 있었으며, 이의 적절한 제어방법으로서 포착속도를 유지를 위한 중앙제어식 환기장치의 채용, 흡입구 프랜지 설치 및 흡입 펌프의 증설 등의 방안을 제시하였다.
2. 또한 방지시설로 활용되는 흡착시설의 흡입유량, 시설규격, 활성탄 충전량, 활성탄 교체주기 등의 설계인자를 산출하여 제시하였으며, 혼합기를 응용한 세정공정의 자동화 및 Portable 세정공정 등 오염물질 배출저감 방안을 제시하였다.
3. 공장 내·외부의 VOC/HAPs의 농도분포를 조사한 결과, 내부의 농도분포는 생산제품의 종류에 따라 상이한 결과를 나타내고 있었으며 외부공기는 A, B사의 경우 Toluene과 Ethylbenzene, C사는 Toluene, Xylene, D사는 Xylene, Ethylbenzene 등이 70% 이상의 농도 분포를 나타내었다.
4. 악취 원인물질을 도출하고자 배출원과 방지시설을 거친 처리가스를 채취하여 악취기여도를 평가하였고 활성탄 흡착시설의 평균 제거효율은 66.2%로 평가되었으며 처리된 가스의 악취기여도는 Toluene이 A사는 56.2%, B사는 95.9%, C사는 88.9%로 나타나 주요 원인물질로 판명되었으며, D사는 m/p-Xylene이 63.2%로 주요 악취 원인물질로 평가되었다.
5. 활성탄과 천연소재인 *Kapok fiber*의 Toluene 흡착능을 평가한 결과, 활성탄의 제거율은 대부분 99%이상 우수한 것으로 나타났으나 *Kapok fiber*는 91.9%, 66.7%의 제거효율을 나타내어 *Kapok fiber*의 흡착능력은 상대적으로 미흡하나 저렴한 소재의 가격, 친환경성 등을 감안한다면 기초 흡착제로서의 가능성은 충분한 것으로 평가되며 흡착제의 상용화에 필요한 추가 연구가 필요할 것으로 사료된다.

References

1. OECD: Hazardous Air Pollutants, The London Workshop(1995, 8.).
2. U.S. EPA : Handbook for Air Toxics Emission Inventory Development, Vol 1.(1998).
3. 환경부 : 유해대기오염물질(HAPs) 배출원 조사기술 개발, 최종보고서(2005. 7).
4. 정수연 등 : 국내 유통 페인트 제품 등 주요 VOC 성분의 함량분포 특성 연구, 한국환경분석학회Vol. 10, No. 3, pp.154~168(2007).
5. 안상영 등 : 대구성서산업단지 발생원 부지경계 대기 중 휘발성유기화합물질의 농도 수준, 한국환경과학회지, Vol. 14, No. 1, pp.53~60(2005).
6. 정재우 등 : 중소규모 조선소 인근지역 VOC 및 알데히드류 농도 특성, 대한환경공학회 2007 추계학술연구발표회 논문집, pp.1225~1227(2007).
7. 대구지방환경관리청 : 대기오염방지시설 설계업무 편람(1999).
8. Harold J. Refson : Odor and VOC Control Handbook, 2. pp.13~24(1998).
9. 일본환경위생센터 연구소 보, 17, pp.77~89(1990)
10. 환경부 : 악취물질 발생원 관리방안 개선을 위한 조사연구(2001).

11. 유미선 등 : 흡착열탈착 장치와 GC/MS를 이용한 휘발성 유기화합물의 분석과 악취원인 성분의 예측, *Analytical Science & Technology*, Vol 15, No 1, pp.80~86(2002).
12. 조인희 등 : 방사선 중합법에 의한 Kapok 이온교환 섬유의 합성, *Polymer*, Vol. 31, No. 6, pp.512~517 (2007).
13. Byung yeoup Chung et al. : Adsorption of Heavy Metal Ions onto Chemically Oxidized *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn. (Kapok) Fibers, *J. Appl. Biol. Chem.* 51(1), pp.28~35(2008).