

UV/O₃ 고도산화방법을 이용한 악취제거 연구

대기화학팀

이준연 · 최유리 · 조현석 · 차영섭 · 유승성 · 이종현 · 신덕영 · 천정완 · 전재식

Removal of Odorous Compounds Using UV/O₃ Process

Atmospheric Chemistry Team

**Jun-yeon Lee, Yu-ri Choi, Hyun-seok Cho, Yeong-seop Cha,
Seung-seong Yoo, Jong-hyun Lee, Deok-young Shin,
Chung-wan Chun and Jae-sik Jeon**

Abstract

This study was conducted to examine the application of an UV/O₃ advanced oxidation method installed in a wastewater treatment plant and its ability to reduce odor. We analyzed the occurrence of complex odors and 17 offensive odorants, using a GC/FID, GC/PFPD, UV spectrophotometer and air dilution olfactory method. The results of this study showed that the dilution values of the complex odor ranged from 300 to 1,442 and that hydrogen sulfide and methyl mercaptan were the most abundant compounds in the samples. After treatment using the UV/O₃ process, we could find that the mean removal efficiencies of the complex odors, hydrogen sulfide, methyl mercaptan and toluene were 78%, 86%, 73% and 84%, respectively. Sulfur compounds and VOCs were removed with greater efficiency than the other odorants. Odor mainly decreased by the photolysis and photo-oxidation and VOCs were primarily reduced by activated carbon filtering. The UV intensity influenced the removal efficiencies of odor, especially VOCs.

Key words : odor, UV/O₃, hydrogen sulfide, methyl mercaptan

서론

경제성장과 함께 삶의 질 문제가 대두되면서 주변에 많은 환경기초시설들이 생겨났으나 대중들에

게는 단지 혐오시설로 인식 되고 있다. 이러한 시설들은 도시화의 가속으로 주거지역과 점점 가까워지고 있으며, 그에 비례해 민원도 점차 증가하고 있다. 그 중에서도 악취 민원이 급속히 증가하

여 2009년 조사결과 2006년도에 비해 3배나 증가한 것으로 나타났다(1).

악취는 그 자체가 심리적·정신적 피해와 건강상의 피해를 주는 감각오염으로 발생물질의 종류가 다양하고 감지 농도도 낮으며 원인 물질들이 상호 복합적으로 작용하는 특징이 있다. 또한, 산업체 연돌이나 악취배출시설을 통해서만 발생하는 것이 아니라 개방된 장치나 야적장, 상가시설과 하수도 등 점오염원이나 면오염원에서도 연속적으로 발생되기 때문에 그 원인과 배출특성을 정확하게 파악하기가 어렵다. 따라서 다른 대기오염물질처럼 발생원을 효과적으로 관리하고 저감대책을 수립하기에 어려움이 있다(2~3).

이러한 문제를 해결하기 위해서는 악취발생에 대한 특성을 다각적으로 이해하고 그에 맞는 저감대책과 제어방법을 선택하는 것이 필요한데, 현재까지 국내의 도시 악취오염물질 관련 연구는 물재생센터나 음식물 처리시설 등과 같은 대규모 시설에서 발생하는 악취특성에 대한 연구들이 많았고, 사용되는 악취 제어기술로는 생물학적 처리(서울시내 4개 물재생시설의 경우 biofilter와 토양탈취, 포기조 미생물 탈취법 등이 주로 사용)가 주로 많았다. 최근에는 저렴한 유지비용, 높은 화학적 안정성 등의 장점을 가진 고도산화처리방법도 꾸준히 연구 개발되고 있는데 그 중에서도 UV/O₃를 이용한 고도산화방법은 광분해(photolysis)와 광산화(photo-oxidation)를 통해 오염물질을 제거함으로써 악취제거 뿐 아니라 공기정화나 살균까지 넓은 용도로 사용되고 있다(4~8).

본 연구에서는 대표적 도심악취 배출시설인 물

재생센터에서 UV/O₃ 고도산화방법의 악취저감 및 적용 가능성에 대한 진단을 시도하였다. 물재생센터 내부 분뇨투입시설에 UV/O₃ 악취처리시설을 설치하고 시설 전·후 시료를 채취, 복합악취 및 17종 지정악취물질을 분석하였으며, 결과를 통해 UV/O₃ 고도산화방법의 악취저감 효과를 평가하였다.

연구방법

1. 실험대상

이번 연구는 서울시 난지물재생센터 내부의 분뇨 투입시설에서 수행하였다. 이 건물은 각 가정에서 정화조 오수를 수거해 와 투입하는 시설로 강변북로 변에 위치해 이 도로를 이용하는 시민들에겐 불쾌감을 주는 주 대상 시설이었다.

시료채취는 2010년 9월, 11월, 12월 기간 중 총 3차례에 걸쳐 하였으며, 이 건물 내부에서 분뇨투입 중 발생한 악취 공기를 옥상에 위치한 팬으로 흡입하여 실험 대상으로 하였다.

2. 실험장치

본 연구에서 사용된 실험장치는 전처리필터, UV/O₃ 발생부, 산화반응부, 활성탄 필터로 구성되어 있으며 그림 1로 나타내었다. 실험에 사용한 UV/O₃ 발생장치는 180~230 nm의 자외선을 발생시키는 150 W UV램프 20개(THY-EQ 20000, 크린하이테크)를 사용하였으며 여기서 발생하는 광에너지는 472~647 KJ/mol이다. 산화반응부는

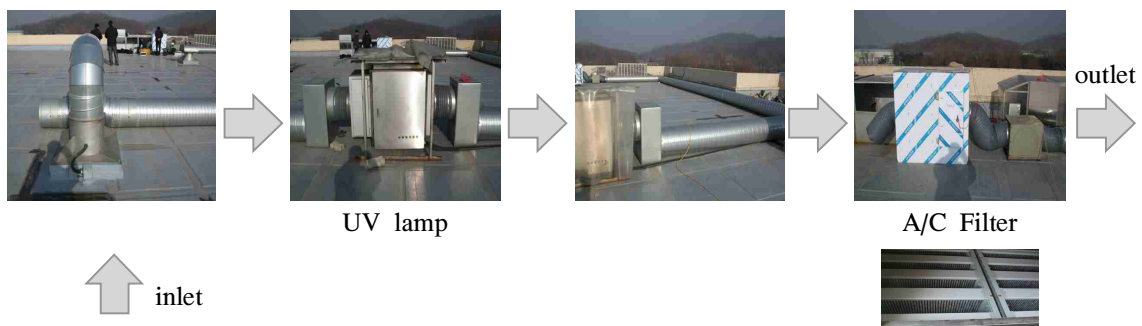


Fig. 1. Schematic diagram of the UV/O₃ process.

직경 30 cm의 관 25 m로 구성되어 있고 유입되는 유량은 실측결과 2,200 m³/hr였다. 또한, 활성탄 필터는 산화반응 후의 잔류 오존 제거와 추가적인 악취저감을 위해 최종 배출구 앞에 설치하였다.

3. 분석방법

UV/O₃ 고도산화방법의 악취저감 및 적용 가능성 평가를 위해 실험장치의 유입구, 산화반응부 끝단, 최종 배출구 3곳에서 시료를 채취하여 복합

악취와 지정악취 17가지 악취 성분을 분석하였다. 이들 성분들의 분석에 활용한 분석기법의 일반적인 내용은 표 1에 제시하였다.

복합악취 및 황화합물의 시료 채취는 시료 채취 전 고순도 질소(99.999%)로 3회 이상 세척한 테들러백을 이용 5 L/min로 시료를 간접 흡입하였다. 복합 악취 분석은 3점식 공기회석관능법으로 하였다. 황화합물은 공기분배기와 열탈착 장치(AS/TD UNITY, Markes, UK)를 이용, 내부

Table 1. Summary of instrumental set-up and analytical conditions(3)(16)

Odor compounds	Instrument	Analytical conditions
TMA	GC/FID (GC2010, SHIMADZU)	Column Elite5Amine(30 m, 0.53 mm, 3 μm) Oven 40°C (4 min)→15°C/min→150°C Detector 260°C Air : 400 mL/min H ₂ : 40 mL/min
	HS Sampler (TurboMatrix40, PERKIN ELMER)	Transfer line 130°C Oven 50°C Carrier flow 10.0 psi
Styrene Toluene Xylene Butyl acetate Metylethyl ketone Methyl isobutyl ketone	GC/FID (GC2010, SHIMADZU) ATD (STD1000, DANI)	Column DB-1(60 m, 0.25 μm, 0.32 mm) Oven 40°C (4 min)→7°C/min→75°C→1°C/min→ 80°C→6°C/min→110°C→10°C/min→230°C Detector 250°C Air : 400 mL/min H ₂ : 40 mL/min Low Temp -10°C High Temp 300°C Tube 280°C Valve 250°C
Hydrogen sulfide Methyl mercaptan Dimethyl sulfide Dimethyl disulfide	GC/PFPD (GC-3800, VARIAN) ATD (UNITY, MARKES)	Column CP-Sil 5CB(30 m, 0.32 mm, 3 μm) Oven 40°C (6 min)→8°C/min→150°C Detector 200°C H ₂ : 14 mL/min Air : 17/10 mL/min Trap U-T8CUS cold trap Trap low -15°C Trap high 250°C Trap hold 5min
Acetaldehyde Propionaldehyde Butyraldehyde n-Valeraldehyde i-Valeraldehyde	HPLC (2695, WATRES)	Detector UV/Vis 360 nm Column Symmetry Shield TM RP 18 5 μm Column Temp 40°C Mobile Phases(Acetonitrile/H ₂ O: 60/40) Flow rate 1.5 mL/min Analysis time 15 min
Ammonia	UV-Spectrophotometer (UV-1650PC, SIMADZU)	Absorbance 640 nm

cold trap에서 시료를 -15℃로 일정 시간 농축 하였다 그리고 이를 다시 수초 내에 250℃로 고온 탈착하여 GC/PFPD(GC-3800 Varian)로 주입시켜 분석하였다. 표준시료($\mu\text{mol/mol}$ 농도)는 인증 표준 가스(Rigas, Korea, 메틸머캅탄 10.0, 황화 수소 10.0, 다이메틸설파이드 10.2, 다이메틸다이설파이드 10.0)와 테들러백(Tedlar bag : 10 L, SKC, USA)을 사용하여 고순도 질소와 혼합 희석하여 사용하였다. 암모니아의 경우 0.5% 봉산용액을 임핀지에 각각 20 mL씩 채워 직렬로 연결한 후 10 L/min으로 5분간 50 L를 채취하여 흡광광도계(SIMADZU UV-1650 PC, 640 nm)를 이용 인도페놀법을 적용하여 분석하였다. 표준시료는 황산암모늄을 이용 공정시험방법에 준하여 준비하였다. 알데하이드류는 오존 스크리버를 연결한 DNPH 카트리지(LpDNPH S10, SUPELCO)를 사용 1.5 L/min으로 5분간 채취하여 acetonitrile 5 mL로 용출시킨 후 HPLC(WATERS2695, Waters)로 10 μL 를 주입하여 분석하였다. 표준시료는 알데하이드 표준용액(All aldehydes = 0.1 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$, acetonitrile solution, Wako)을 단계별로 희석하여 사용하였다.

스티렌, 톨루엔, 자일렌, 메틸에틸케톤, 메틸아이스부티르케톤, 뷰티르아세테이트의 경우 고체흡착관(Tenax TA, Supelco)에 0.2 L/min로 5분간 통과시켜 채취하였다. 그리고 흡착관을 열탈착장치(STD1000, Dani)로 전처리하고 GC/FID(GC2010, SHIMADZU)로 분석하였다. 표준시료($\mu\text{mol/mol}$ 농도)는 인증표준가스(Rigas, Korea)로 스티렌 5.2, 톨루엔 5.1, o,m,p-자일렌 4.9, 메틸 에틸 케톤 10, 메틸 아이소 뷰티르 케톤 9.8, 뷰티르 아세테이트 9.8로 준비하였다. 이들 표준 가스는 희석 시스템(APK 610, KnR)을 사용하여 고체흡착관에 고순도 질소로 희석하여 사용하였다. 또한 트리메틸아민도 산성여과지를 여과지 홀더에 장착하여 10 L/min으로 5분간 50 L 채취한 다음 헤드스페이스(Turbomatrix 40, PERKIN ELMER)로 전처리하고 GC/FID(GC2010, SHIMADZU)로 분석하였다. 표준시료는 1 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ TMA 표준용액(Wako)을 사용 희석하여 악취공정시험법에 준하여 준비하였다. 각 물질마다 직선성(R^2 값

0.970 이상)은 양호한 결과를 보였다. 분석 재현성과 검출한계는 표 2에 제시하는 바와 같다. 또한 잔류 오존의 농도를 측정하기 위해 오존측정기(EC9810 O₃, ECOTECH)를 이용 산화반응부와 최종 배출구에서 오존농도를 측정하였다.

결과 및 고찰

1. 실험대상 악취의 발생 경향과 특성

악취는 인간이 후각으로 느끼고 감지하는 최소 감지농도가 물질별로 서로 달라, 각각의 농도 측정만으로는 악취의 높고 낮음을 판단하기에 어려움이 있다. 따라서 각 악취물질 감지 한계농도를 활용하여 악취 유발물질의 농도와 악취강도를 연계시킨다(9~10). 본 연구에서도 각 개별 악취 별 측정 농도와 악취농도지수(Odor Quotient : 기기분석의 측정 농도를 그 물질의 최소감지농도로 나눈 값)를 함께 활용하였다. 이를 토대로 각 악취물질별 악취 기여도 % (측정한 악취의 악취농도지수 \times 100/측정한 모든 악취농도지수의 합)를 산출하였다.

실험대상인 분뇨 투입동은 시설 개선 공사 중인 관계로 샘플링 기간 중 분뇨 투입지점이 변경되고 건물 내 출입문의 개폐상태가 측정일마다 달라지는 등 시설 상황 변화가 심했다. 따라서 분뇨 투입동에서 배출되어 저감시설로 유입되는 실험 대상 악취의 강도도 측정일에 따라 변동폭이 컸으며, 복합악취의 경우 희석배수가 최저 300배에서 최고 1,442 배까지 나타났다. 표 3에 분뇨투입동에서 저감시설로 유입된 실험 대상 악취를 분석 종합하여 나타내었다.

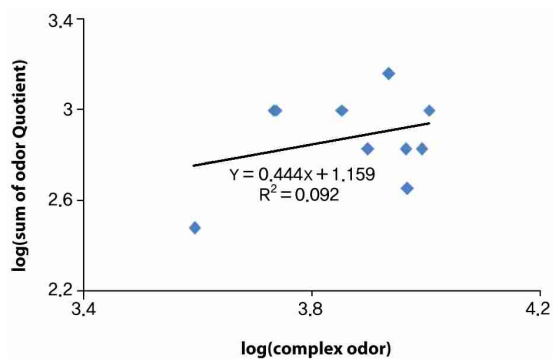
또한, 17종 지정악취물질을 대상으로 악취의 주요 원인물질을 살펴본 결과 황계열 화합물들이 주요 오염물질임을 확인할 수 있었다. 기여도는 hydrogen sulfide가 87.4%, methyl mercaptan이 9.9%로 대부분을 차지하였다. 나머지 물질들은 거의 검출되지 않거나 기여도가 극히 미미했다.

그림 2는 실험대상 악취 샘플링 개수 10개에 대하여 복합악취와 17개 지정악취물질의 악취농도지수 합을 구한 후 양자간의 상관성을 조사한 것인데 R^2 이 0.092로 나타났다. 이는 사람이 코로 인

Table 2. Precision and Detection Limits of 17 odorants by instrumental analysis

Odor Compounds	Detection Limit		Precision(%RSD)
Ammonia	0.001 ppm	0.4 ng	1.0
Hydrogen sulfide	0.08 ppb	1.2 ng	1.1
Methyl mercaptan	0.15 ppb	3.0 ng	2.3
Dimethyl sulfide	0.12 ppb	3.2 ng	0.4
Dimethyl disulfide	0.11 ppb	3.9 ng	1.3
Styrene	0.34 ppb	224 ng	5.1
Toluene	1.01 ppb	3.1 ng	7.8
m,p-Xylene	0.13 ppb	0.4 ng	8.7
o-Xylene	0.27 ppb	0.8 ng	8.6
Metyethyl ketone	0.57 ppb	1.8 ng	6.9
Methyl isobutyl ketone	0.31 ppb	1.0 ng	6.3
Butyl acetate	0.22 ppb	0.7 ng	7.2
Trimethylamine	0.01 ppb	1.5 ng	6.8
Acetaldehyde	0.30 ppb	5.7 ng	0.1
Propionaldehyde	0.25 ppb	6.3 ng	0.3
Butyraldehyde	0.17 ppb	5.4 ng	0.1
n-Valeraldehyde	0.16 ppb	17.9 ng	0.2
i-Valeraldehyde	0.36 ppb	5.8 ng	0.2

지하는 복합악취와 17개 지정악취 간에 상관성이 낮다는 것을 의미하고 아울러 실험대상 악취의 원인물질들 17가지 지정악취물질로 설명하기에는 무리가 따른다는 것을 의미한다(15).

**Fig. 2.** Relationship between complex odor and sum of odor quotient(n=10).

따라서 정확한 악취 원인물질 파악을 위해서는 이번 조사에 포함된 17종의 지정악취물질 뿐 만 아니라 나올 것으로 예상되는 다른 악취물질들(인돌, 스카톨, 휘발성 유기산 등)에 대한 고려가 있어야 하며, 그에 따른 추가적인 검사와 분석도 이루어져야 할 것으로 생각된다.

2. UV/O₃ 고도산화방법에 의한 악취저감 효과 분석

분뇨투입동 옥상에 UV조사 장치와 활성탄 필터 등 악취 저감시설을 설치하였는데 UV 조사 장치는 샘플링 1시간 이상 전 부터 가동시켜 안정화시켰으며 활성탄 필터는 필터 교환 1주일 이내의 상태에서 샘플링하였다. 악취저감 장치의 종합적인 악취저감 효과 평가를 위해 악취저감장치 유입구와 최종배출구에서 시료채취를 하였으며 UV 조사

Table 3. Overall summary of emission concentrations of odorous pollutants in septic tank treatment facility

Odor Compounds	Unit	Avg (n=10)	Min	Max	Odor Threshold(11)	Odor Quotient	Contribution (%)
Complex odor	D/T ^a	820	300	1442	-	-	-
Ammonia	ppm	0.6	0.1	1.7	0.1	6.0	0.1
Hydrogen sulfide	ppb	3,375.8	1,880.1	4,436.3	0.5	6751.6	87.4
Methyl mercaptan	ppb	76.6	13.5	107.5	0.1	765.6	9.9
Dimethyl sulfide	ppb	10.0	2.2	26.3	0.1	100.2	1.3
Dimethyl disulfide	ppb	2.5	0.3	8.4	0.3	8.4	0.1
Styrene	ppb	4.3	4.3	14.4	30	0.1	0.0
Toluene	ppb	2,014.2	1,099.6	4,773.2	900	2.2	0.0
m,p-Xylene	ppb	44.4	32.7	57.9	41	0.5	0.0
o-Xylene	ppb	65.5	49.5	76.4	380	0.2	0.0
Metylethyl ketone	ppb	17.4	7.3	29.0	440	0.0	0.0
Methyl isobutyl ketone	ppb	5.5	1.4	12.4	200	0.0	0.0
Butyl acetate	ppb	4.6	1.7	11.3	8	0.6	0.0
Trimethylamine	ppb	0.01	0.01	0.01	0.1	0.1	0.0
Acetaldehyde	ppb	7.0	1.9	9.9	2	3.5	0.1
Propionaldehyde	ppb	1.8	1.4	2.6	2	0.9	0.0
Butyraldehyde	ppb	1.4	0.6	2.0	0.3	2.34	0.0
n-Valeraldehyde	ppb	< 0.16	< 0.16	< 0.16	0.7	0.0	0.0
i-Valeraldehyde	ppb	6.4	0.4	13.7	0.2	31.8	0.4

^a D/T = Dilution-to-threshold ratio.

만으로 인한 악취 저감(광분해, 광산화의 효과)을 확인하기 위해 반응부의 가장 끝단인 활성탄 필터 앞에서도 시료채취를 하였다.

복합악취와 17종 지정악취물질 중 기여도가 높은 물질 중심으로 시료 분석결과를 그림 3에 나타냈다.

분석결과 사람의 코가 판단기준이 되는 복합악취는 평균 78% 제거되어 상당한 효과가 있는 것으로 나타났고 최종배출구의 회석배수도 최고 448 배로 배출구 허용기준을 만족시키고 있었다. 다만 잔류 오존의 영향으로 최종배출구 주변으로 약간의 비릿한 냄새가 감지되었으나, 이 또한 최종배출구에서 오존농도를 측정해 본 결과, 평균 0.019

ppm으로 오존의 최소감지농도 0.003 ppm보다는 높으나 일반 대기 중의 평균 오존농도 수준을 약간 상회하는 수준이었다.

실험 대상 악취의 주 원인물질이었던 황 계열 악취물질들도 hydrogen sulfide가 평균 83% 제거되고, methyl mercaptan이 평균 95% 제거되는 등 대체적으로 좋은 제거 효율을 보였으며 VOCs의 대표적인 성분인 toluene과 xylene도 평균 84% 이상의 제거효율을 보였다. 이는 Yungshuen Shen, Xia Lan-Ynag, Fischer 등의 연구에서 UV 조사를 통해 VOCs와 hydrogen sulfide 등을 처리했을 때 좋은 효율을 얻었다는 연구 결과와도 유사하다(12~14). 그러나, butyl

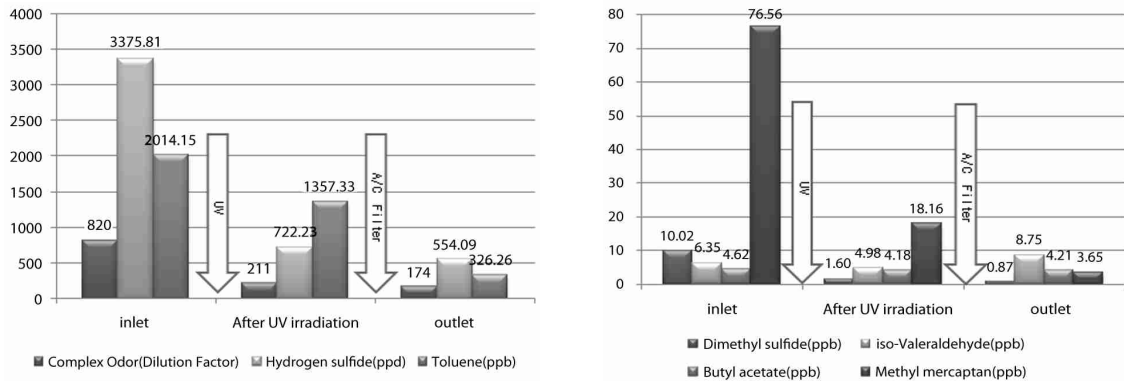


Fig. 3. Removal efficiency results of major odorants by UV/O₃ process.

acetate 등 그 외 악취물질은 유입 공기 중의 농도가 매우 낮아 악취 저감효과를 파악할 수 없거나 악취 저감 효과가 없었으며, 오히려 acetaldehyde 등 일부 물질에서는 미세하나마 농도가 증가하는 경향도 관찰되었다.

활성탄 필터 앞에서 측정한 분석결과를 보면 hydrogen sulfide가 평균 79%, methyl mercaptan이 평균 76% 제거되어 UV조사를 통한 광산화와 광분해가 전체 악취 처리의 주요 메카니즘임을 알 수 있었다. 그러나, VOCs류의 경우는 톨루엔의 처리효율이 32%로(최종 배출구의 톨루엔 처리효율 84%) 활성탄 필터에 의한 처리가 악취저감에 큰 역할을 한 것으로 나타났다.

3. UV 조사량에 따른 악취저감 효과 분석

광원의 세기에 따른 악취저감 효과를 파악하기 위하여 광원의 세기를 600 W에서 3,000 W까지 조절하며 실험하였다. 그림 4에 광원의 세기에 따른 분석결과를 나타내었다.

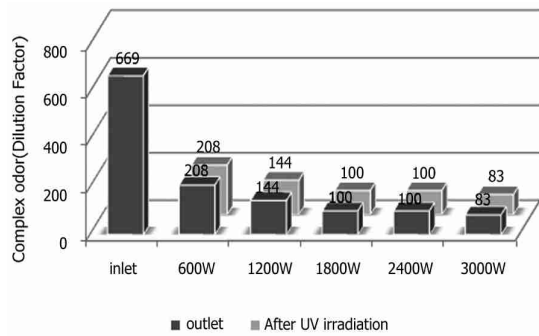
예상했던 대로 광원의 세기가 클수록 처리효율(활성탄 필터 앞에서의 분석결과)이 좋았는데, 특히 VOCs가 그 영향이 매우 컸으며 톨루엔의 경우 600 W에서 13%의 처리효율을 보이던 것이 3,000 W에서는 63%까지 증가하였다. 실험 대상 악취의 주 원인 물질인 hydrogen sulfide는 광원 세기가 커짐에 따라 꾸준히 처리효율이 증가하다가 2,400 W부터는 비슷한 처리효율을 보였고, methyl mercaptan은 600 W에서는 처리효율 5%로 거의

처리되지 않다가 1,200 W부터 급격하게 처리효율이 높아지는 결과를 보였다. 이처럼 악취물질의 종류나 농도에 따라 필요한 광원의 세기도 조금씩 달라짐을 알 수 있는데 최적의 광원 세기를 알기 위해서는 대상 악취의 주 원인물질을 정확히 파악하고 배출 농도도 충분히 사전조사되어야 할 것으로 생각되었다.

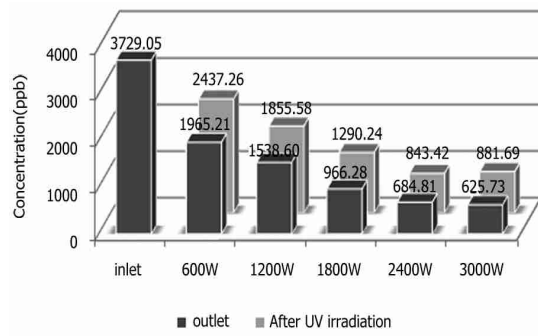
결론

UV/O₃ 고도산화방법의 적용 가능성 및 악취저감 효과 평가를 위해, 물재생센터 내부 분뇨투입 시설에 UV/O₃ 고도산화 악취처리시설을 설치하고 전 후 시료를 채취, 복합악취 및 17종 지정악취물질을 분석하였다.

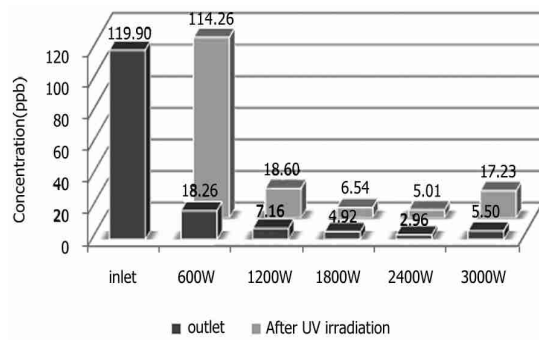
실험대상 악취는 복합악취가 300~1,442배였고 조사대상 개별악취 17종 중 주 원인물질은 hydrogen sulfide와 methyl mercaptan이었다. UV/O₃ 고도산화방법을 적용한 결과 복합악취가 평균 78% 제거되었으며 hydrogen sulfide와 methyl mercaptan, toluene이 각각 76%, 73%, 84% 제거되는 등 황계열 화합물과 VOCs에서 좋은 제거효율을 보였다. 그러나, 그 외 악취 물질들에서는 악취 저감 효과를 확인할 수 없거나 효과가 없었다. 악취 저감은 주로 UV조사에 따른 광분해와 광산화로 이루어졌으나 VOCs에서는 활성탄 필터에 의해서도 많이 저감되었다. 광원은 세기가 커짐에 따라 악취 제거효율이 좋아졌고 특히 VOCs



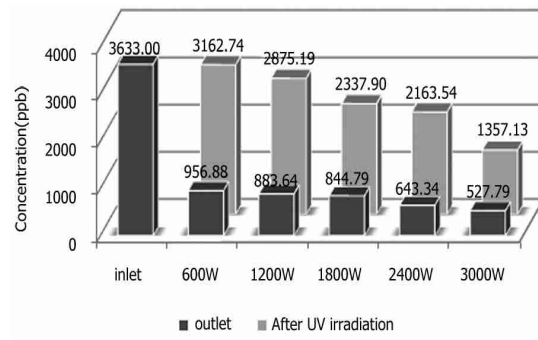
(A) Complex odor



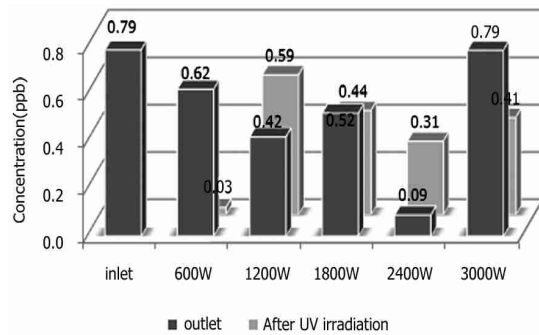
(B) Hydrogen sulfide



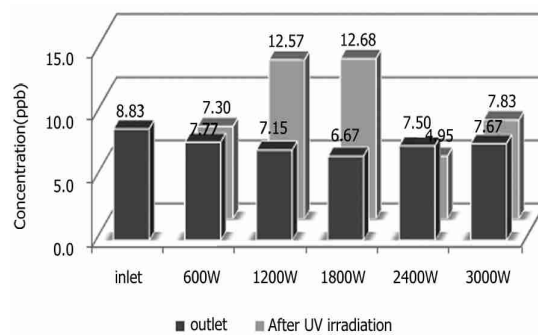
(C) Methyl mercaptan



(D) Toluene



(E) i-Valeraldehyde



(F) Butyl acetate

Fig. 4. The UV light intensity effect on the decomposition of major odorants by UV/O₃ process.

가 광원의 세기에 영향을 많이 받았다.

본 연구는 3개월 간 총 3차에 걸쳐 10여회 의 시료 채취로 악취저감 효과를 파악하고자 하였으나 시료수가 적고, 기 설치된 악취저감시설을 대상으로 연구가 진행되어 정확한 악취 원인물질이나 배출농도에 따른 악취 저감 효과를 파악하기 힘들었다. 또한, 다른 변수들(광원발생방법, 반응

체류시간, 활성탄 필터의 영향과 교체 주기에 대한 고려 등)에 따른 결과도 파악할 수 없어 정확한 해석을 내리기엔 부족함이 많았다. 앞으로 보다 많은 시료수를 바탕으로 한 배출농도별, 악취 물질별 후속 연구와 여러 가지 변수를 적용시켜볼 수 있는 실험실 단계의 연구도 병행되어야 할 것으로 판단한다.

참고문헌

1. 서울시 도시안전본부 : 하수악취 발생실태 조사 자문회의 자료. p1~2, 2011.
2. 전의찬, 사재환, 김선태, 홍지형, 김기현 : 생활악취 배출원의 악취배출 특성 연구, 하수처리장을 중심으로. 한국대기환경학회지, 22: 337~351, 2006.
3. 최유리, 이준연, 유승성, 차영섭, 유동구, 천정완, 신덕영, 김교봉 : 빌딩 오수정화조 악취 오염물질 배출 특성 연구. 서울시보건환경연구원보, 45:115~123, 2009.
4. Choi YR, Oh SR, Lee JS, Ko HW, Kwon SM, Lee SC, Eo SM, Kim JH and Kim MY : A study on the movement of odor emitted from the S wastewater treatment plant. 한국환경보건학회 국제학술대회, 2008.
5. 정규철 : 광촉매 반응기에서 UV오존램프를 이용한 악취 및 VOC 제거 시스템에 관한 연구. 경기대학교 석사학위논문, p1~43, 2003.
6. 안춘화 : 악취물질 제거를 위한 고도산화와 생분해 결합공정의 적용. 세종대학교 석사학위논문, p1~29, 2007.
7. 김선화, 장미옥, 정영립, 김협, 김만구 : 음식물 퇴비화 시설에서 발생하는 냄새유발물질 분석과 기여도 평가. 한국냄새환경학회지, 6(3):194~201, 2007.
8. Schlegelmilch M, Streese J and Stegmann R : Odor management and treatment technologies : An overview. Waste Management, 25:928~929, 2005.
9. 정의석 : 직·간접 관능법을 응용한 악취평가 방법 및 해석에 관한 연구. 박사학위논문, 대전대학교 환경공학과, 2004.
10. 김성림, 김주인, 김영태 : 음식물 쓰레기 처리 설비로부터 발생되는 악취저감방안 연구, 부산시보건환경연구원보. p41~59, 2004.
11. 환경부 : 악취관리편람. p2~22, 2007.
12. Xia LY, Gu DH, Tan J, Dong WB and Hou HQ : Photolysis of low concentration H_2S under UV/VUV irradiation emitted from microwave discharge electrodeless lamps. Chemosphere, 71:1744~1780, 2008.
13. Yung-shuen Shuen, Young Ku : Treatment of Gas-phase Volatile Organic Compounds by the UV/ O_3 Process. Chemosphere, 38(8):1585~1866, 1999.
14. Fischer, K : Non-biological processes for odour elimination, Hamburger Berichte Vol.17. Verlag Abfall Aktuell, Stuttgart, p193~204, 2001.
15. 김선태, 박민수, 전의찬, 김덕현, 홍지형 : 악취농도지수와 악취농도단위와의 상관성 분석. 한국대기환경학회 2004 추계학술대회 논문집, p270~271, 2004.
16. 국립환경과학원 : 악취공정시험방법. 2007.