

ORIGINAL ARTICLE

복합악취 농도와 황화수소 농도를 이용한 국내 하수처리시설의 악취발생 특성에 대한 연구

고병철 · 이종국 · 이윤수 · 이민규¹⁾ · 감상규^{2)*}

한국환경공단 악취관리센터, ¹⁾부경대학교 화학공학과, ²⁾제주대학교 환경공학과

A Study on Odor Emission Characteristics of Domestic Sewage Treatment Facilities Using Composite Odor Concentration and Hydrogen Sulfide Concentration

Byung-Churl Ko, Jong-Kuk Lee, Yoon-Su Lee, Min-Gyu Lee¹⁾, Sang-Kyu Kam^{2)*}

Odor Management Center, Korea Environment Corporation, Daejeon 302-120, Korea

¹⁾Department of Chemical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

²⁾Department of Environmental Engineering, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea

Abstract

Odor from sewage treatment plants have the potential to cause significant annoyance and to impact the amenity. In this study, odor emission characteristics at unit process of 48 sewage treatment facilities in 39 plants were evaluated using composite odor concentration and hydrogen sulfide (H₂S) concentration. The values of composite odor concentration (geometry mean) and H₂S concentration (median) for sludge treatment processes are higher than those for the other treatment processes. The composite odor concentration and H₂S concentration are distributed over a wide area in each process. Composite odor concentration (dilution ratio) was found to have the significant correlation with H₂S concentration ($p=0.000<0.05$). The H₂S concentration accounted for 67.1% of composite odor concentration.

Key Words : Odor emission characteristics, Domestic sewage treatment facilities, Composite odor, H₂S

1. 서론

악취란 황화수소, 메르캅탄류, 아민류, 그 밖에 자극성이 있는 기체상태의 물질이 사람의 후각을 자극하여 불쾌감과 혐오감을 주는 냄새(Ministry of Environment, 2012a)로서, 일반적으로 여러 가지 성분이 혼합된 상태로 존재하면서 사람의 후각을 자극하여 심리적·정신적 피해를 야기하는 감각공해의 하

나이다(Choi와 Ahn, 2005). 악취는 원인 물질이 매우 다양하고 복합적이고 매우 낮은 농도에서도 불쾌감, 두통 등의 피해를 유발하며 순간적·국지적으로 발생하고 소멸하는 특성을 나타내며(Ministry of Environment, 2011, 2012b), 주로 발생원과 인접한 지역에서 민원 등 관련 영향이 나타나고 있다.

최근 들어 국민의 삶의 질 향상에 따른 쾌적한 환경 질의 요구가 증대됨과 맞물려 악취관련 민원이 2001

received 21 August, 2012; revised 15 September, 2012;

accepted 8 October, 2012

*Corresponding author : Sang-Kyu Kam, Department of Environmental Engineering, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea

Phone: +82-64-754-3444

E-mail: sakyukam@jejunu.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

년 2,760건에서 2010년 7,247건으로 급증하고 있으며, 지자체에서 운영중인 공공환경시설에 대한 악취 민원도 2010년 176건으로 전년도 149건 대비 15% 증가(Ministry of Environment, 2012b)하고 있는 추세이다. 특히, 악취 민원을 제기하여도 통계화 되지 않는 민원 건수를 포함하여 앞으로도 공공환경시설에 대한 악취관련 민원이 계속적으로 증가할 것으로 전망된다. 더욱이 공공환경시설에서 발생하는 민원은 악취 피해로 인한 실질적인 민원 외에도 혐오시설이라는 인식에서 기인한 악성 민원이 많이 발생할 수 있다.

정부에서는 2005년 2월부터 악취방지법을 시행한 이후에도 환경기초시설에 대한 악취 관련 민원이 지속적으로 증가함에 따라 악취로 인한 주민의 건강상 위해를 예방하고 생활환경을 보전하기 위하여 지방자치단체장이 설치·운영하는 공공하수처리시설 등 공공환경시설을 대상으로 기술진단을 받도록 2011년 2월 악취방지법을 개정하는 등 적극적으로 대처하고 있다. 2010년 말 현재 전국에 가동 중인 공공하수처리시설은 500 m³/일 이상 470개소, 500 m³/일 미만 2,594개소가 운영 중이며(Ministry of Environment, 2011) 도시 지역의 확대에 따라 주요 하수처리장의 경우 인근에 대규모 주거지역 및 상업지역이 조성되어 있는 경우가 많아 악취 민원의 대상이 되고 있다.

하수처리시설에서 발생하는 악취 특성에 대한 연구는 많은 연구자(Gostelow 등, 2001, 2004; Holder 등, 1985; Islam 등, 1998)에 의해 수행되고 있으며, 국내에서도 Park(2003)은 표준활성슬러지법에 의해 운전되고 있는 2개의 하수처리장에서 침사지 및 농축조 등 6개 지점에 대한 악취 농도를 조사하였으며, Park 등(2005)은 하수처리 공법이 다른 3개의 하수처리장에서 발생하는 악취물질의 특성에 대하여 평가하였다. 또한 Paeng 등(2005)은 단일 하수처리장에서 발생하는 악취 현황을 6단계 악취강도 및 냄새감지한계 희석배수 등을 이용하여 평가하였으며, Chung 등(2004)은 단일 하수처리장에서 발생하는 악취 발생 현황과 발생능에 대하여, Jung 등(2006)은 단일 하수처리장의 유량조정조, 농축조, 슬러지 콘테이너에서 발생하는 악취 및 휘발성 유기화합물의 배출특성을 연구하였다. 그러나, 하수처리시설의 개별 시설을 대상으로 한 사례 연구가 대부분으로 그 연구 결과가 제한적이

며 국내 하수처리시설의 악취발생 특성을 전체적으로 평가하기에는 한계가 있는 것이 사실이다.

본 연구에서는 국내에서 운영중인 48개 하수처리시설을 대상으로 복합악취 농도와 하수처리시설의 주요 악취 원인물질인 황화수소의 농도를 분석하여 각 공정별 악취 배출특성을 파악하고, 복합악취 농도에 영향을 미치는 황화수소 농도의 기여 정도를 분석함으로써, 하수처리시설에 대한 효과적이고 종합적인 악취관리방안을 수립하기 위한 기초자료를 제공하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 조사대상 시설

지방자치단체에서 설치·운영하는 국내 39개 공공하수처리장의 48개 하수처리시설을 대상으로 2010년 2월부터 2011년 11월까지 악취발생 특성을 조사하였다. 지역별로는 강원 2개, 경기 24개, 경남 4개, 경북 4개, 부산 7개, 인천 3개 및 충남 4개 시설이며, 지자체에서 직접 운영하는 경우가 15개, 공공기관 위탁 운영이 18개, 민간 위탁 운영이 15개 시설이 해당되었다. 시설용량은 5 × 10⁴ m³/일 미만이 26개, 5 × 10⁴ m³/일 이상 1 × 10⁵ m³/일 미만이 9개, 1 × 10⁵ m³/일 이상이 13개 시설이며, 처리공법은 표준활성슬러지법 6개, SBR 6개, MLE 6개, CNR 5개, DNR 5개, BNR 4개, A2O 3개 시설이 해당되었으며 이외에도 B3, 장기포기, 산화구법 등 매우 다양한 처리공법이 있었다.

2.2. 시료채취 및 분석 방법

조사대상 하수처리시설에 대하여 각 공정 중 악취가 가장 많이 발생하는 것으로 판단되는 지점에서 악취공정시험방법(National Institute of Environmental Research, 2007)에 따라 시료를 채취하였으며, 생물반응조와 같이 수표면이 있는 시설의 경우에는 열린 챔버 방법을 이용하여 시료를 채취하였다. 열린 챔버 방법은 악취물질을 포함한 다양한 물질의 배출량 산정에 이용되는 방법(Bart, 1992; Hong 등, 2002; Kienbusch, 1986)으로써, 본 연구에서는 질소가스(N₂)를 일정한 유량(5 L/min)으로 챔버 내로 흐르게 한 후 챔버 내에서 발생하는 악취물질을 3 L/min의 유량으로 시료를 채취하였다.

복합악취용 시료는 펌프 내장형의 진공흡인상자(ENS Eng., Korea)를 이용하여 polyester aluminum bag(10 L, Top Trading, Korea)에 간접흡인 하였다. 복합악취 측정에 사용한 polyester aluminum bag은 현장 시료로 1회 이상 채우고 배기한 후 시료를 채취 하였으며, 시료채취가 완료된 polyester aluminum bag은 상온(15~25℃)을 유지하고 직사광선을 피하여 보관 및 운반하였으며, 시료채취 후 24시간 이내에 악취공정시험방법의 공기희석관능법에 따라 평가하였다. 공기희석배율은 무취공기 제조장치와 활성탄이 채워진 6방 분배기를 통해 제조된 무취공기를 무취 봉지에 담고 시료를 주입하여 단계별로 희석해가면서 판정 패널 선정시험에 합격한 5인의 패널들이 직접 평가하였다. 전체 판정요원의 시료희석 배수 중 최대값과 최소값을 제외한 나머지를 기하 평균하여 판정요원 전체의 희석배수로 산정하였다.

황화수소는 복합악취와 동일한 방법으로 시료를 채취하고, 24시간 이내에 분석을 하였다. 먼저, 채취한 시료를 thermal desorber(Unity/Air Server, Markes, U.S.A)를 이용하여 농축하였으며, 농축된 시료는 황화합물에 선택성이 좋은 불꽃광도검출기(PFPD)가 설치된 GC(7890A, Agilent, USA)를 사용하여 분석하였으며, 분석조건은 Table 1과 같다.

Table 1. Analytical conditions of GC-PFPD for H₂S analysis

Parameters	Conditions
Thermal desorber	Unity/Air Server, Markes, U.S.A
GC	7890A, Agilent, U.S.A
Detector	PFPD
Column	Supelco SPB-1 (30 m × 0.32 mm × 4 μm)
Column temperature	70℃(3 min) → 10℃/min → 150℃(1 min)
Injector temperature	80℃
Detector temperature	250℃
Carrier gas	He(99.999%), 10 psi/min

3. 결과 및 고찰

3.1. 복합악취 농도를 이용한 공정별 악취발생 특성

하수처리시설은 일반적으로 전처리시설, 수처리시설, 슬러지 처리시설 및 혐잡물 등을 처리하기 위한 기타 시설로 구분될 수 있으며, 각 시설에 따라 악취 발생 특성이 매우 다르게 나타난다(Chung 등, 2004; Jung 등, 2006; Paeng 등, 2005; Park, 2003; Park 등, 2005). 본 연구에서는 공기희석관능법을 이용하여 하수처리시설 유입수를 포함한 각 단위 공정에 대한 복합악취 농도(OU/m³) 분석 결과를 Table 2와 Fig. 1~Fig. 4에 나타내었다. 상자그림(box plot)은 요약 통계량을 표시한 것으로서 분포의 대칭성, 자료의 중심 위치, 산포의 정도 및 이상치(outlier) 유무 등을 알아 보는데 유용하다. 상자의 양끝은 25백분위수(제1사분위수) 및 75백분위수(제3사분위수)를, 상자 내부의 직선은 중앙값(제2사분위수)을 표시한다. 상자 외부의 최대값은 제3사분위수에 사분위수범위(IQR, Inter Quartile Range)의 1.5배를 더한 값보다 같거나 작은 값 중 가장 큰 자료를, 상자 외부의 최소값은 제1사분위수에서 사분위수범위의 1.5배를 뺀 값보다 같거나 큰 값 중 가장 작은 자료를 나타낸다. 최대값과 최소값의 범위를 벗어나는 자료 중 제3사분위수에 사분위수범위의 3배를 더한 값 이내를 잠재적 이상값(mild outlier, “o”)으로 표시하고 이 범위를 초과하는 경우 극단적인 이상값(extreme outlier, “*”)으로 표현하였다.

조사대상 시설에 대한 각 공정별 복합악취 농도의 기하평균값을 살펴보면 중력 농축조가 5,291OU/m³로 가장 높았고, 슬러지 저류조, 최초침전지, 슬러지 탈수기실 순으로 각각 2,866 OU/m³, 2,355 OU/m³, 1,829 OU/m³로 나타나 슬러지 처리시설이 다른 공정에 비해 높은 농도의 악취가 발생하는 것으로 조사되었다. 이러한 결과는 슬러지 처리시설에서 발생하는 악취물질이 대기중으로 확산될 경우 악취 민원 등을 야기할 수 있는 가능성이 크다는 것을 의미하며, 하수처리시설의 주요 악취 발생원으로 작용될 수 있다는 사실을 보여준다고 할 수 있다.

하수 유입부의 복합악취 농도는 977 OU/m³로 슬러지 처리시설과 최초침전지를 제외한 다른 공정보다

Table 2. Statistical summary of dilution ratio (OU/m³) for unit processes of sewage treatment facilities by air dilution olfactory method

Item	n	Dilution ratio(OU/m ³)					
		Geo. Mean	Min.	1st Quartile	2nd Quartile	3rd Quartile	Max.
Influent Water	40	977	100	300	1,000	3,000	100,000
Screening	26	633	100	111	448	3,000	10,000
Grit Chamber	8	223	100	100	122	231	6,694
1st Settling Pond	24	2,355	100	1,000	3,000	7,434	100,000
Bio-Reactor	40	427	100	100	237	1,111	30,000
Sludge Holding Tank	55	2,866	100	300	1,442	55,879	100,000
Gravity Thickener	25	5,291	100	1,442	6,694	30,000	100,000
Dewatering Building	8	1,829	100	361	3,682	12,700	30,000
Dewatered Sludge Cake Bin	31	783	100	133	669	3,000	100,000
Grit Bin	23	333	100	100	175	835	4,481
Adulteration Bin	35	330	100	100	208	1,000	6,694

매우 높은 농도를 보이고 있으며, 침사지의 경우에는 223 OU/m³로 조사대상 공정 중 농도가 가장 낮은 것으로 나타났다.

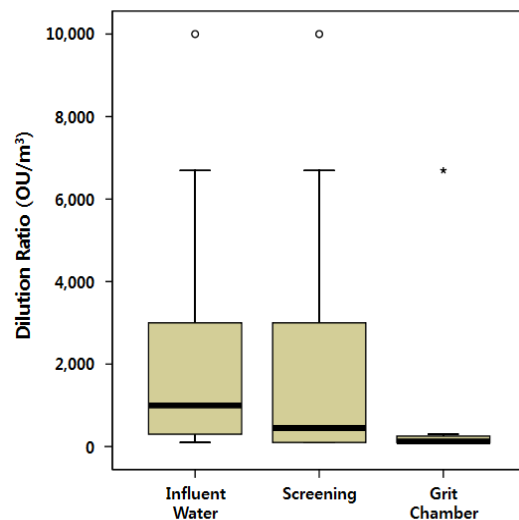
하수처리시설의 공정별(전처리 공정, 수처리 공정, 슬러지 처리 공정 및 기타 저장시설)로 구분하여 악취 발생 특성을 살펴보면 다음과 같다.

전처리 공정으로 구분될 수 있는 하수 유입부, 스크린과 침사지에서 발생하는 복합악취 농도(Table 2 및 Fig. 1)의 기하평균값은 하수 유입부가 977 OU/m³로 나타나 스크린 633 OU/m³, 침사지 223 OU/m³에 비해 높은 값을 보였으며, 자료의 중앙값을 나타내는 제2사분위수 또한 유입부가 1,000 OU/m³로 가장 높은 값을 보였다.

농도의 분포는 하수에 포함된 험잡물을 제거하기 위한 스크린의 경우 448 OU/m³ 이하에 자료의 50%가 포함되어 있으나, 제3사분위수는 유입부의 값과 동일하며 사분위수 범위가 111 OU/m³~3,000 OU/m³로 전처리 공정 중 자료의 분포 범위가 가장 넓은 것으로 나타났다. 그러나 침사지의 경우 사분위수 범위가 100~231 OU/m³로 나타나 하수처리시설별 악취발생 농도의 차이가 상대적으로 크지 않음을 알 수 있었다.

자료의 이상값을 확인한 결과 유입부의 경우 잠재적인 이상값이 10,000 OU/m³ 1개가 나타났다. 극단

적인 이상값은 66,943 OU/m³와 100,000 OU/m³가 나타났다. 그래프를 시각적으로 명확하게 표현하기 위하여 y-축의 범위를 조절함에 따라 Fig. 1에는 나타나지 않았다. 이 극단적인 이상값은 Korea Environment Corporation(2011)의 사례에서 나타난 복합악취 측정 농도 최고값인 66,943배 보다 조금 높은 것으로 나타났다. 하수관로를 통하여 하수처리시설로 유입되는

**Fig. 1.** Box plots of dilution ratio results for pretreatment process (influent water, screening and grit chamber).

하수에서 발생하는 악취는 하수의 체류시간, 깊이에 따른 환경변화, 수온, 용존산소 및 pH의 영향을 받기 때문(USEPA, 1985)에 다양한 농도 분포를 보이는 것으로 사료된다. 스크린의 경우에도 잠재적인 이상값 10,000 OU/m³이 나타났으나, Korea Environment Corporation(2011)의 사례에서 나타난 복합악취 측정 농도 최고값인 6,694배를 고려하면 본 조사에서 나타난 농도가 충분히 검출될 수 있을 것으로 판단된다. 침사지의 경우에도 극단적인 이상값으로 6,694 OU/m³가 나타났으나, 이는 해당 공정이 폭기 침사지로서 다량의 공기가 침사지에 공급됨에 따라 수체의 격렬한 난류 형성으로 인하여 악취발생 농도가 높은 것으로 사료된다.

수처리 공정(최초침전지, 생물반응조)에서 발생하는 복합악취(Table 2 및 Fig. 2)의 기하평균은 생물반응조에서 427 OU/m³로 나타나 최초침전지 2,355 OU/m³에 비해 매우 낮은 값을 보였으며, 자료의 중앙값을 나타내는 제2사분위수 또한 생물반응조가 237 OU/m³로 최초침전지의 3,000 OU/m³에 비해 상대적으로 낮은 값을 보였다.

최초침전지의 경우 비교적 넓은 농도 분포를 보이고 있으나 자료의 50%가 3,000 OU/m³ 이하에 포함되어 있으며, 생물반응조의 경우에도 기하평균 보다 작은 237 OU/m³에 자료의 50%가 포함되어 있는 것으로 나타났다.

최초침전지의 경우 잠재적인 이상값이 20,800 OU/m³ 1개가 나타났다. 극단적인 이상값은 44,814 OU/m³와 100,000 OU/m³가 나타났으나, 그래프를 시각적으로 명확하게 표현하기 위하여 y-축의 범위를 조절함에 따라 Fig. 2에는 나타나지 않았다. 하수처리 시설로 유입된 후 하수가 일정시간 체류되는 최초침전지는 하수의 성상뿐만 아니라 최초침전지 하부 슬러지의 혐기화 정도에 따라 매우 넓은 범위의 악취발생 특성을 보이는 것으로 사료된다. 또한 최초침전지의 복합악취 농도가 수처리 공정 중 가장 큰 것으로 조사되어 하수처리시설의 운영시 우선적으로 적절한 대책을 수립하여야 하는 것으로 판단되었다.

생물반응조의 경우 극단적인 이상값이 30,000 OU/m³와 10,000 OU/m³가 각각 2개 시설에서 나타났으나 생물반응조의 처리공법에 따른 차이는 아닌 것

으로 판단되었으며, 생물반응조의 운전상태에 따라 악취발생 정도가 다르게 나타나는 것으로 사료된다.

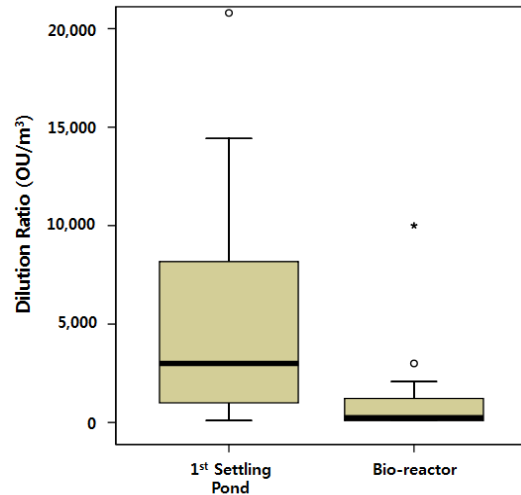


Fig. 2. Box plots of dilution ratio results for water treatment process (1st settling pond and bio-reactor).

슬러지 처리공정으로 구분될 수 있는 슬러지 저류조, 중력 농축조 및 탈수기실에서 발생하는 복합악취(Table 2 및 Fig. 3)는 앞에서 설명한 바와 같이 다른 공정에 비해 매우 높은 농도를 보이고 있는 것으로 나타났다.

슬러지 저류조의 농도 분포는 1,442 OU/m³ 이하에 자료의 50%가 포함되어 있으나, 제3사분위수가 55,879 OU/m³, 최대값이 100,000 OU/m³로 전체적으로는 농도 분포가 매우 넓은 것으로 나타났으며, 이는 슬러지의 퇴적 방지와 인 재용출 방지 등을 위한 교반 또는 포기 조건 및 악취방지시설 가동에 따른 환기 정도에 따라 악취발생 농도에 차이(Korea Environment Corporation, 2011)가 있는 것으로 사료된다.

슬러지 농축조의 경우 슬러지 저류조에 비해 사분위수 범위가 작으며 전체적인 농도분포 범위 또한 작게 나타났으나, 제2사분위수는 6,694 OU/m³로 4배 이상 높고, 기하평균 값은 5,291 OU/m³로 1.8배 이상 높아 슬러지 처리 공정 중에서도 복합악취 농도가 가장 높은 것으로 나타났다. 탈수기실 복합악취 농도의 사분위수 범위는 361~12,700 OU/m³로 나타났으며, 최대값 또한 30,000 OU/m³로 다른 슬러지 처리 공정

에 비해 낮은 것으로 나타났다. 탈수기실에서의 악취는 탈수기 및 탈수케의 이송 컨베이어에서 주로 발생되고 있으며, 탈수슬러지의 성상, 이송 컨베이어의 밀폐 및 악취포집설비의 효율에 따라 악취발생 농도에 차이가 있는 것으로 사료된다.

자료의 이상값을 확인한 결과 슬러지 농축조의 경우 잠재적인 이상값 100,000 OU/m³가 4개 나타났으나, Korea Environment Corporation(2011)의 사례에서 나타난 복합악취 측정농도 최고값인 300,000배를 고려하면 본 조사에서 나타난 농도를 이상값으로 처리하기는 어려울 것으로 판단된다.

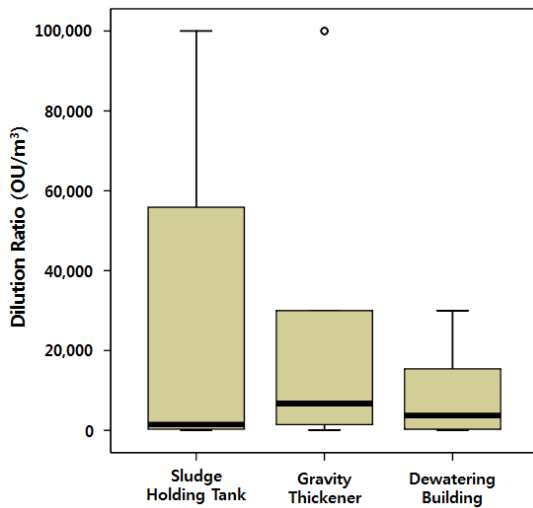


Fig. 3. Box plots of dilution ratio results for sludge treatment process (sludge holding tank, gravity thickener and dewatering building).

기타 저장시설(탈수케의, 침사물 및 혐잡물 저장조)에서의 악취 발생 정도는 각각의 성상뿐만 아니라 저장기간에 따라 차이를 보이는 것으로 사료되며, 복합악취의 기하평균은 탈수케의 저장조에서 783 OU/m³로 나타나 저장시설 중 가장 높은 값을 보였으며, 침사물 저장조와 혐잡물 저장조의 기하평균은 각각 333 OU/m³, 330 OU/m³으로 유사한 값을 보였다(Table 2 및 Fig. 4).

탈수케의 저장조 복합악취 농도의 사분위수 범위는 133~3,000 OU/m³로 다른 저장조에 비해 넓은 것으로 나타났으며, 침사물 저장조와 혐잡물 저장조의

사분위수 범위는 각각 100~835 OU/m³, 100~1,000 OU/m³로 비슷한 분포를 보이고 있는 것으로 나타났다.

탈수케의 저장조의 경우 극단적인 이상값이 100,000 OU/m³와 14,422 OU/m³가 각각 1개가 나타났으며, 침사물 저장조는 4,481 OU/m³ 2개, 혐잡물 저장조는 6,694 OU/m³ 1개가 나타났으며, 일부 값의 경우 시각적으로 명확하게 표현하기 위하여 y-축의 범위를 조절함에 따라 Fig. 4에는 나타내지 않았다.

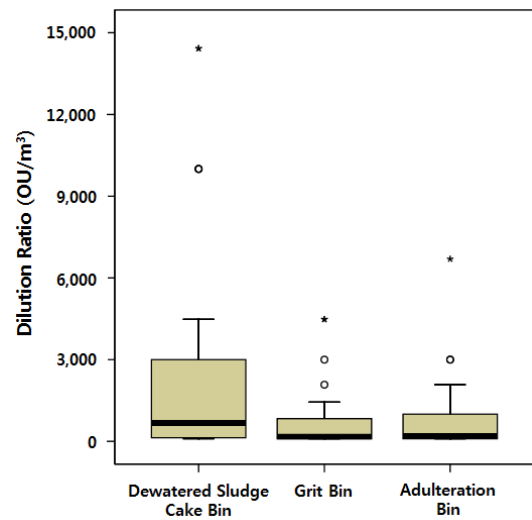


Fig. 4. Box plots of dilution ratio results for dewatered sludge cake bin, grit bin and adulteration bin.

3.2. 황화수소 농도의 공정별 발생 특성

황화수소(H₂S)는 부패된 계란 냄새가 나는 무색의 악취물질로서 약 0.5 ppbv 정도의 낮은 농도에서도 그 냄새를 느낄 수 있을 정도로 자극적인 물질로 심미적인 거부감을 줄 뿐 아니라 하수처리계통에서 부식물질을 유발하는 물질로(Smet 등, 1998), 하수처리시설 등의 환경기초시설 뿐만 아니라 제지공장, 석유 정제 공장 및 천연가스 처리공장 등의 산업현장 저변에서 발생하는 주요 악취 원인물질로 알려져 있다(Yang과 Allen, 1994). 하수처리시설의 각 공정별로 측정된 황화수소 농도에 대한 분석 결과는 Table 3과 Fig. 5에 나타내었으며 시각적으로 명확하게 표현하기 위하여 Fig. 5의 y-축의 범위를 조절하였다.

최초침전지와 탈수기실의 최소 농도는 0.010 ppm으로 나타났으나 대부분의 공정에서 0.000 ppm으로 조사되었다. 최대값은 슬러지 저류조가 1,775.13 ppm으로 가장 높았으며 중력 농축조 400.870 ppm, 탈수 케익 저장조 361.780 ppm, 유입수 136.270 ppm 및 최초침전지 126.350 ppm 순으로 나타났다.

자료의 중앙값을 나타내는 제2사분위수를 비교한 결과 중력 농축조와 최초침전지의 경우 각각 6.230 ppm, 3.470 ppm으로 다른 공정에 비해 높은 값을 보였으며, 탈수기실 0.630 ppm, 하수 유입부 0.410 ppm, 슬러지 저류조 0.395 ppm, 스크린 0.175 ppm 순으로 나타났다. 침사지를 포함한 다른 공정에서는 황화수소 농도가 0.1 ppm 이하로 상대적으로 낮게 나타났다.

슬러지 저류조에서 발생하는 황화수소 농도에 대한 제2사분위수는 0.395 ppm으로 중력 농축조 6.230 ppm에 비해 매우 낮은 값을 보이고 있으나 사분위수 범위는 0.018~44.990 ppm으로 하수처리 공정 중 가장 넓은 범위를 보이고 있으며, 이는 복합악취 농도 분포에 대한 분석 결과와 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

또한 중력 농축조와 최초침전지의 경우에도 각각 0.320~16.580 ppm, 1.360~7.638 ppm으로 다른 공정에 비해 비교적 넓은 범위의 농도분포를 보이고 있음을 알 수 있다. 침사지, 생물반응조, 탈수슬러지 저장조, 침사물 저장조 및 협잡물 저장조의 경우 제3사분위수가 1 ppm 미만으로 나타나 비교적 좁은 범위에 황화수소 농도가 분포하고 있는 것으로 나타났다.

자료의 이상값을 확인한 결과 공기희석관능법을 통한 복합악취 농도 분석에서 이상값을 보인 대부분의 하수처리시설의 경우 황화수소 농도 분석에서도 이상값을 나타냈으나, 일부 시설의 경우에는 황화수소 농도 분석에서는 이상값을 나타내지 않았다. 또한 복합악취 농도 분석에서 이상값을 보이지 않은 하수처리시설의 경우에도 황화수소 농도 분석에서는 이상값으로 나타났다. 이는 황화수소를 포함한 다양한 악취물질이 복합악취 농도에 영향을 미치고 있기 때문이며 아울러 황화수소의 농도가 복합악취 농도에 미치는 영향 정도가 단순 선형적인 관계가 아니기 때문인 것으로 사료된다.

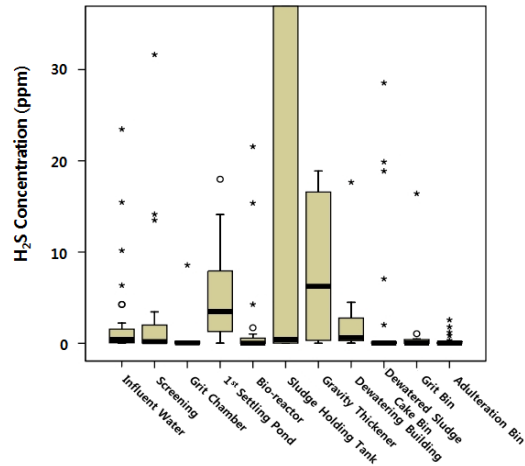


Fig. 5. Box plots of H₂S concentration for unit processes of sewage treatment facilities.

Table 3. Statistical summary of H₂S Concentration (ppm) for unit processes of sewage treatment facilities

Item	n	H ₂ S Concentration(ppm)					
		Geo. Mean	Min.	1st Quartile	2nd Quartile	3rd Quartile	Max.
Influent Water	39	-	0.000	0.060	0.410	1.550	136.270
Screening	20	-	0.000	0.028	0.175	1.500	31.640
Grit Chamber	8	-	0.000	0.008	0.050	0.193	8.570
1st Settling Pond	18	2.765	0.010	1.360	3.470	7.638	126.350
Bio-Reactor	29	-	0.000	0.000	0.000	0.560	48.630
Sludge Holding Tank	52	-	0.000	0.018	0.395	44.990	1,775.13
Gravity Thickener	23	-	0.000	0.320	6.230	16.580	400.870
Dewatering Building	7	0.508	0.010	0.295	0.630	2.765	17.650
Dewatered Sludge Cake Bin	27	-	0.000	0.000	0.010	0.160	361.780
Grit Bin	13	-	0.000	0.000	0.020	0.410	16.410
Adulteration Bin	27	-	0.000	0.000	0.020	0.070	2.560

3.3. 복합악취와 황화수소 농도와의 관계

황화수소의 농도가 복합악취 희석배수에 미치는 영향을 알아보기 위하여 조사대상 시설의 악취 방지 시설 입구에서 시료를 채취하고 황화수소와 복합악취 농도를 측정하였다.

황화수소 농도와 복합악취 희석배수에 대한 회귀 분석을 실시한 결과(Table 4 및 Fig. 6) 황화수소 농도(ppm)의 상용대수 값은 복합악취 농도(OU/m³)의 상용대수 값에 유의한 영향을 주는 것으로 나타났다(p=0.000<0.05).

$$\begin{aligned} \text{Log(Dilution Ratio, OU/m}^3) \\ = 0.5522\text{Log(H}_2\text{S, ppm)} + 3.1606 \end{aligned}$$

황화수소 농도의 상용대수 값이 높아질수록 복합악취 농도의 상용대수 값은 높아지는 것으로 나타났으며, 황화수소의 농도가 복합악취 농도를 설명할 수 있는 설명력의 정도는 약 67.1%로 나타났다.

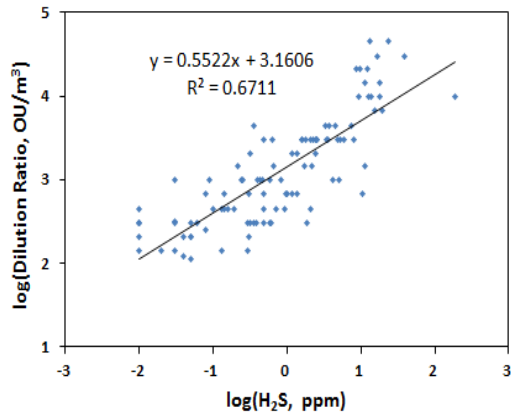


Fig. 6. Scatter diagram and regression curve of H₂S concentration and dilution ratio.

복합악취 희석배수의 대수값에 대한 잔차의 등분산성을 확인하기 위하여 잔차 산점도(Fig. 7)를 확인한 결과 평균 0을 중심으로 어떠한 규칙이나 경향이 없이 무작위로 분포되어 있어 앞에서 제시한 직선의 선형회귀식은 주어진 데이터에 대하여 변수간의 관계를 적절히 설명하고 있음을 알 수 있었다.

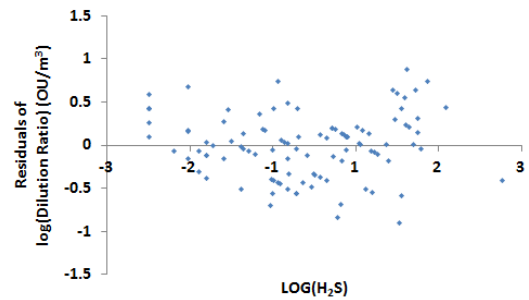


Fig. 7. Residual plots on the log(Dilution ratio) and the log(H₂S).

4. 결론

국내에서 운영중인 48개 하수처리시설을 대상으로 복합악취 농도와 하수처리시설의 주요 악취 원인물질인 황화수소의 농도를 분석하여 각 공정별 악취 배출 특성을 파악하고, 황화수소의 농도가 복합악취 농도에 미치는 영향을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 각 공정별 복합악취 농도의 기하평균값은 중력 농축조가 5,291 OU/m³로 가장 높았고, 침사지의 경우에는 223 OU/m³로 가장 낮은 것으로 나타났으며 슬러지 처리시설이 하수처리시설의 주요 악취 발생원으로 작용될 수 있음을 알 수 있었다.

Table 4. Statistical summary of regression curve of H₂S concentration and dilution ratio

Item	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t-value	p-value	95% confidence interval of B	
	B	SE ¹⁾	β			Lower limit	Upper limit
Constant	3.161	0.037	-	85.642	0.000	3.087	3.234
log(H ₂ S)	0.552	0.038	0.819	14.428	0.000	0.476	0.628

R² = 0.671, F-value = 208.160, p-value = 0.000, n = 104

¹⁾SE : Standard error

2) 복합악취 농도에 대한 사분위수 범위는 슬러지 저류조가 300~55,879 OU/m³로 하수처리시설별 농도 차이가 매우 크게 나타났고, 침사지의 경우에는 100~231 OU/m³로 하수처리시설별 농도 차이가 크지 않음을 알 수 있으나, 전체적으로 하수처리시설의 각 공정별 복합악취 농도의 분포 특성이 다양하게 나타남을 알 수 있었다.

3) 황화수소 농도에 대한 중앙값을 비교한 결과 증력 농축조와 최초침전지의 경우 각각 6.230 ppm, 3.470 ppm으로 다른 공정에 비해 높은 값을 보였으며, 탈수기실과 슬러지 저류조도 각각 0.630 ppm, 0.395 ppm으로 나타나 슬러지 처리시설과 최초침전지가 다른 공정에 비해 배출 농도가 높은 것을 알 수 있었으며, 복합악취의 배출농도 경향과 유사하게 나타났다.

4) 황화수소 농도에 대한 사분위수 범위는 복합악취 농도의 경우와 동일하게 슬러지 저류조가 0.018~44.990 ppm으로 하수처리 공정 중 가장 넓은 범위를 보이고 있으며, 침사지, 생물반응조, 탈수슬러지 저장조, 침사물 저장조 및 협잡물 저장조의 경우 제3사분위수가 1 ppm 미만으로 나타나 비교적 좁은 범위에 황화수소 농도가 분포하고 있는 것으로 나타났다.

5) 각 공정별 복합악취 및 황화수소 농도에 대한 이상값을 분석한 결과 동일 하수처리시설의 경우에도 이상값의 포함 여부가 다르게 나타나는 경우가 발생하였으며, 이는 황화수소를 포함한 다양한 악취물질이 복합악취 농도에 영향을 미치고 있으며 황화수소의 농도가 복합악취 농도에 미치는 영향 정도가 단순 선형적인 관계가 아니기 때문인 것으로 사료된다.

6) 황화수소 농도의 상용대수 값은 복합악취 농도의 상용대수 값에 유의한 영향을 주는 것으로 나타났으며 ($p=0.000<0.05$), 황화수소의 농도가 복합악취 농도를 설명할 수 있는 설명력의 정도는 약 67.1%로 나타났다.

참 고 문 헌

Bart, E., 1992, Practical guidance for flux chamber measurements of fugitive volatile organic emission rates, *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 42, 1583-1591.
 Choi, S. W., Ahn, S. Y., 2005, Introduction to odor pollution, DongHwa Technol. Publishing Co., 1-23.
 Chung, G. H., Kim, S. T., Park, M. S., Chung, J. H., 2004, A Survey on the odor emission characteristics

in a sewage treatment plant, *Korean J. Odor Research & Eng.*, 3(4), 225-233.
 Gostelow, P., Parsons, S. A., Lovell, M., 2004, Integrated odour modelling for sewage treatment works, *Water Sci. Technol.*, 50(4), 169-176.
 Gostelow, P., Parsons, S. A., Stuetz, R. M., 2001, Odour measurements for sewage treatment works, *Wat. Res.*, 35(3), 579-597.
 Holder, G. A., Vaughan, G., Drew, W., 1985, Kinetic studies of the microbiological conversion of sulfate to hydrogen sulfide and their relevance to sulfide generation within sewers, *Water Sci. Technol.*, 17, 183-196.
 Hong, Z., Steve, E. L., Mark, O. B., Alan, F. V., Mae, S. G., 2002, Dynamic flux chamber measurement of gaseous mercury emission fluxes over soils: part 1-simulation of gaseous mercury emissions from soils using a two-resistance exchange interface model, *Atmospheric Environment*, 36(5), 835-846.
 Islam, A. K. M., Hanaki, K., Matsuo, T., 1998, Fate of dissolved odorous compounds in sewage treatment plants. *Water Sci. Technol.*, 38, 337-344.
 Jung, B. J., Jang, Y. K., Lee, E. Y., Lee, H. Y., Hwang, H. W., Kim, K., 2006, Characteristics of odor and VOCs emitted in sewage water treatment plant, *Korean J. Odor Research & Eng.*, 5(4), 245-251.
 Kienbusch, M., 1986, Measurement of gaseous emission rates from land surfaces using an emission isolation flux chamber, *User's Guide: EPA-600/8-86/008*.
 Korea Environment Corporation, 2011, Casebook of odor technology diagnosis, 11-23.
 Ministry of Environment, 2011, White paper on environment, 190-461.
 Ministry of Environment, 2012a, Offensive odor control law.
 Ministry of Environment, 2012b, Comprehensive plan for odor prevention, 3-44.
 National Institute of Environmental Research, 2007, Standard method of odor compounds.
 Paeng, J. I., Cho, S. J., Kim, H. M., 2005, Evaluation of odor character at wastewater treatment plant by olfactory method, *J. Korea Soc. Environ. Admini.*, 11(2), 73-79.
 Park, S. J., 2003, A Study on odor concentration of malodorous gases emitted from sewage treatment plants using air dilution sensory test, *Korean J. Odor Research & Eng.*, 2(1), 32-37.
 Park, G. H., Oh, G. Y., Lee, J. H., Jung, K. H., Jung, S. Y., 2005, Comparison of odor characteristics

- emitted from the 3 type of sewage treatment plant, Korean J. Odor Research & Eng., 4(4), 196-206.
- Smet, E., Lens, P., Langenhove, H., 1998, Treatment of waste gases contaminated with odorous sulfur compounds, Critical Rev. Environ. Sci. Technol., 28, 89-117.
- USEPA, 1985, Design manual: Odor and corrosion control in sanitary sewage systems and treatment plants, EPA-625/1-85/018.
- Yang, Y., Allen, E. R., 1994, Biofiltration control of hydrogen sulfide 1. Design and operation parameter, J. Air & Waste Manage. Assoc., 44, 863-868.