



Los Angeles와 San Francisco의 악취 저감 시스템을 통해 본 우리나라 하수도의 악취 저감 방안

The measures to reduce sewer odor in South Korea through sewer odor reduction system in Los Angeles and San Francisco

지현욱·유성수*

Hyonwook Ji·Sungsoo Yoo*

한국건설기술연구원, 국토보전연구본부, 경기도 고양시 고양대로 283, 10223

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Department of Land, Water and Environment Research, Gyeonggi-Do, Goyang, Ilsanseo-Gu, Goyangdae-Ro, 283, 10223

ABSTRACT

Urban sanitary sewer systems can aid in preventing inundation, and can improve civil health by effectively disposing stormwater and wastewater. However, since sewage odor can cause adverse effects, numerous technical and administrative studies have been conducted for reducing such odor. European countries and the United States of America (USA) built modern sewer systems in the late 19th century, and have since been endeavoring to eliminate sewage odors. Several cities of the USA, such as Los Angeles (LA) that has a separate sewer system and San Francisco (SF) that has a combined sewer system, have produced and distributed odor control master plan manuals. Features common in the odor reduction plans of both these cities are that the odor reduction programs are operated in all the respective local regions and are supported by administrative systems. The primary aspectual difference between the two said programs is that the city of LA employs a sewage air purification system, whereas the city of SF controls the emission of major odor causing compounds. Compared to the existing sewer odor reduction systems of these two cities, South Korea is still in the initial phase of development. Through technical studies and policy implementations for sewer odor reduction, a foundation can be laid for improving the civil health quality.

Key words: Sanitary sewer, Odor, Combined sewer, Separate sewer, Hydrogen sulfide

주제어: 하수도, 악취, 합류식 하수도, 분류식 하수도, 황화수소

1. 서론

하수도 시스템은 우수를 배제하여 침수를 예방하고, 오수를 배제하여 시민의 보건을 향상시키는 중요한 사회기반시설이다. 오수는 특성상 악취를 동반하

며, 악취는 농도에 따라 생활이 불가능할 정도로 삶의 질을 하락시키곤 한다. 하수의 악취를 유발하는 물질은 매우 다양하지만 환경부령에서 규정한 지정악취물질은 22가지이며, 그 중 무색에 강한 썩은 달걀 냄새를 가진 황화수소(H₂S, hydrogen sulfide, CAS No. 7783-06-4)의 악취 기여도가 28.5%로 가장 높기 때문에 하수도 악취 대표물질이라 할 수 있다 (Cho, 2013;

Received 3 August 2018, revised 2 October 2018, accepted 5 October 2018.

*Corresponding author: Sungsoo Yoo (E-mail: yoosungsoo@kict.re.kr)

pp. 371-379

pp. 381-388

pp. 389-398

pp. 399-409

pp. 411-419

pp. 421-434

pp. 435-443

pp. 445-451

pp. 453-460

pp. 461-470

Song et al., 2013).

현대식 하수도 시스템이 정립된 이후로 지속적으로 악취 저감을 위한 다양한 기술이 개발되어 왔다. 통풍(Bowker et al., 1989), 황산화세균(Pokorna and Zabranska, 2015), 황성탄(Huang et al., 1979), 철염(Ge et al., 2012) 등이 많이 이용된다. 오늘날까지도 하수도 악취를 저감하기 위한 노력이 지속되고 있고, 전통적으로 hotspot 위주의 악취 저감 기술이 개발되었다면, 최근에는 하수도 네트워크에서 전반적으로 악취를 관리할 수 있는 기술의 개발로 발전하고 있다(Jiang et al., 2015).

우리나라도 경제가 발전함에 따라 삶의 질의 중요성이 높아져 왔지만, 최근까지 하수도 악취 저감에 대한 대책이 부족했다. 악취방지법과 하수도법은 생활악취 및 개인하수처리시설에서의 악취에 대한 규제가 없고, 악취배출시설에 대해서만 규정하였으며, 주민 피해에 대한 제재 수단이 없다(Cho and Song, 2011b). 하수도 악취 민원은 맨홀, 우수받이, 오수받이에 대해서 가장 많이 발생하여 우수받이 덮개 및 준설 등의 처방을 해왔지만, 그 원인은 정화조, 오수처리시설, 배수조에 있어 단기 처방에 불과하다. 하수도 악취 관련 기술들은 하수도 처리시설 중심으로 개발 및 적용해 왔지만, 악취 저감 시설을 운영하고 있는 곳에서도 악취가 지속적으로 발생하고 있다(Cho and Song, 2011a).

하지만 2011년부터 악취저감 로드맵 작성이 시작되면서 악취 저감을 위한 움직임이 시작되었고, 지자체(서울, 광주, 대구) 및 국가(환경부) 사업이 발주되기 시작하였다. 광진구의 악취저감사업은 정화조, 하수 유량, 관경, 관 연장, 수심, 경사 등 종합적인 하수관로 정보를 이용하여 수중 및 대기 중의 악취농도를 예측하였으며, 이를 악취지도로 나타내었다(Gwangjin-gu, 2014).

환경부는 광진구의 악취저감사업을 토대로 2015년 하수도 악취관리 가이드북(Ministry of Environment, 2015)을 공개하였다. 가이드북은 악취저감기술을 발생원, 발산원, 배출원으로 분류하여 각각에 대한 악취저감대책을 제시하였고, 악취조사와 악취지도 작성을 통한 대책수립방안을 구성하는 내용을 담고 있다.

2016년 9월 하수도법 시행령이 개정되어 200인조 이상 펌핑형 부패식 정화조는 공기공급장치 등 악취저감장치를 의무적으로 설치하여야 한다. 이에 따라 서울시는 악취정감장치 의무설치 대상 6,320개 중에 2017년 12월까지 43%를 설치하였고, 2018년 9월까지

설치 100%를 목표로 하고 있다.

하수도 악취 저감 사업은 대체적으로 서울시에서 이루어지고 있고, 서울시가 주도적으로 시행하고 있으며, 그 외 지역은 소외되어 있다. 하수도 악취 저감 대책들이 대부분 계획 단계이고, 그마저도 악취를 발생시킬 수 있는 원인 중 일부만 다루고 있다.

이에 비해 현대식 하수도 시스템을 먼저 도입한 국가에서는 하수도 악취 저감 전략을 가지고 있다. 1970년대부터 악취방지법을 실시한 일본은 빌딩배수조의 수중 황화수소농도 2 mg/L, 기상중 황화수소농도 10 ppm 제한 규정을 포함한 하수도 악취 저감 규정을 가지고 있으며, 유럽은 펌프장 및 대형관거 위주의 전략을 가지고 있다. 미국 역시 하수도 악취 저감 전략을 가지고 있으며, Los Angeles(LA)와 San Francisco(SF)가 odor master plan을 수립하여 공개하였다. LA와 SF의 하수도 악취 전략의 장점은 오랜 기간의 연구와 다양한 측면에서의 전방위적인 전략이다. 도시 전역에 설치되어 있는 하수도로부터 올라오는 악취는 관리하기가 쉽지 않다. 따라서 악취가 생성되고 발생할 수 있는 모든 것에 대하여 LA와 SF처럼 악취 저감을 시도해야 한다.

LA의 odor master plan은 2017년 버전이 인용되었지만, SF의 odor master plan은 2009년 버전이 인용되었다. 비록 SF의 master plan이 오래되었지만, 악취저감 전략은 큰 틀에서 변화가 없으며, 우리나라의 현실에 비추어 본다면 배울 점이 많기 때문에 현 시점에서도 소개하기에 부족함이 없다. 본 연구는 미국의 두 도시에서의 odor master plan의 내용을 살펴보고, 이를 바탕으로 우리나라의 하수도 악취 저감을 위해 나아가야 할 방안을 모색하였다.

2. Los Angeles 하수도 악취 저감 프로그램

LA는 1800년대 후반부터 하수 운송 시스템을 갖추었고, 1920년대 처리시설을 갖추기 시작하였다. 오늘날 LA는 분류식 하수도 시스템을 갖추고 있으며, 직경 152.4 mm (6 inch)~3,810 mm (150 inch) 크기의 하수관과 공공하수도 연장 10,783 km (6,700 miles)를 이용하여 1,424 km² (550 mile²)의 지역에 서비스를 제공하고 있다(WESD, 2011).

Los Angeles Sanitation (LASAN)은 하수도 악취 저



감을 위하여 행정적인 면이나 기술적인 면에서 종합적인 노력을 하고 있다. LASAN은 24시간 전화와 인터넷으로 악취 민원을 받고, 그것이 하수도 악취 민원이라면 반드시 조사 및 완화 조치를 취한다. 또한 정기적인 하수도 유지/보수를 통하여 악취 민원을 사전에 차단하려는 노력을 한다. 강력한 수압, 회전 칼날, 버킷(bucket) 등을 이용해서 최소 5년에 1번 이상 하수도를 청소하는 계획을 가지고 있다.

하수도 악취 저감을 위한 구조적 특징으로는 p-trap과 air jumper를 들 수 있다. 주로 작은 관이 큰 관에 꽂힐 때, 압력이 높은 큰 관으로부터 가스가 역류하는 것을 방지하기 위하여 작은관 쪽에 p-trap을 만든다. 이 트랩은 공공 도로쪽에서 개방할 수 있는 청소구와 가정쪽에서 개방할 수 있는 청소구를 가지고 있고, 이를 이용하여 분기별로 청소를 시행한다. 1940년대에 사이펀이 항상 물로 차 있어서 가스가 역류하여 악취를 상부로 발산한다는 것을 알게 되었고, 이후 'air jumper' 라는 관을 만들어 가스가 사이펀을 돌아서 하류로 이동할 수 있도록 하였으며, 분기별로 청소를 시행한다. 이 외에 하수도 유지관리를 위한 각종 구멍 및 틈새를 실링(sealing)한다.

하수도 악취 저감을 위해 화학약품을 이용하기도 한다. sodium hydroxide를 이용하는 caustic shock 방법은 hollywood street에서 시행하고 있으며, 긴 접촉시간을 갖는 곳에 적절한 방법으로, 모든 황화물을 효율적으로 제거한다. 황화물의 효율적 제거를 위해서는 pH 12.5 이상, 접촉시간 30분 이상이 필요하다.

H₂S 가스는 pH가 높아지면 자연적으로 용해된다. 따라서 magnesium hydroxide를 투여하여 pH를 7.5~8.6 사이로 만들어서 H₂S를 90% 이상 감소시킨다. 위험한 물질이 아니기 때문에 LA의 65%가 이 방법을 사용한다.

LA는 하수도의 공기를 직접적으로 처리하는 방법을 사용하기도 한다. LA에는 10개의 지점에 악취제거율 99%에 달하는 활성탄이 탑재된 carbon scrubbers를 설치하여 악취를 제거한다(Fig. 1, (a)). 차집관이 교차되어 악취를 가진 공기가 모이는 4개의 지점에 air treatment facilities (ATF)를 설치하여 대량으로 악취를 정화한다(Fig. 1, (b)). ATF는 미생물막 필터와 카본필터의 2 단계 처리 시스템으로, 하수도로부터 공기를 직접 빨아들여 악취를 정화 후 대기중으로 발산한다. 이 외에도 air curtain을 설치하여 차집관에서 공기가 빠져나가지 못하도록 한다.



(a)



(b)

Fig. 1. Carbon scrubber (a) and Air Treatment Facility (b) in LA (WESD, 2011).

모니터링도 악취 저감을 위한 중요한 전략이다. 토구, 차집관, 압력이 높은 지역, 난류 생성 지역, 경사 급완화 지역, 지체시간이 긴 지역(평탄지역) 등에서 황화물, pH, 온도를 이용하여 상시 모니터링을 실시한다. 2016년부터는 하수도 악취 민원이 자주 발생하는 지역 5 곳을 area of concern (AOC)로 지정하여 집중 관리하며, 잠재성이 높은 곳 2 곳을 area of study (AOS)로 지정하여 역시 특별 관리하고 있다 (WESD and WCSO, 2017).

3. San Francisco 악취 저감 프로그램

San Francisco (2009)는 합류식 하수도를 사용하고 있으며, 1,449 km (900 miles) 간선과 3,219 km (2,000 miles)의 지선으로 구성된다. 하수도 악취의 주요 물질인

pp. 371-379

pp. 381-388

pp. 389-398

pp. 399-409

pp. 411-419

pp. 421-434

pp. 435-443

pp. 445-451

pp. 453-460

pp. 461-470

황화수소를 저감하기 위하여 유지관리 강화, 유속 개선, 공기 흐름 조절, 화학물질 사용 등 다양한 방법을 사용하고 있다. 유지관리 강화 방안으로는 24시간 민원 접수를 하며, 정기적으로 하수도 청소와 보수, 개선을 한다. 또한, 하수의 흐름을 방해하여 악취를 유발시키는 주요 물질인 fat, oil, grease (Husain et al., 2014)의 배출을 조절하는 FOG control program을 운영한다. FOG program은 유분 수집 장치 설치와 배출량에 대한 행정적 규제를 포함한다 (SFWater, 2018).

악취의 주된 원인은 느린 유속으로 인한 하수관거 내부의 혐기화인데, 이를 개선하기 위한 방안으로는 구배 확보와, 하수관 모양의 변형을 제시하였다.

공기의 흐름을 조절하여 악취를 저감하는 방법은 다음과 같다. Side sewer trap은 공공하수도로 연결되는 연결관 중간에 공기유입구와 함께 설치된 U자형관을 말한다. 이것은 1900년 초에 생겨나서 지금까지 사용하고 있으며, 약 200,000개가 설치되었다. 맨홀에서는 악취가 올라오는 것을 막기 위해 구멍을 작게 하거나 악취 흡착제를 설치하기도 한다. Vent stack은 가로등 모양의 철 기둥 끝에 통풍구가 설치된 형태이다. 통풍구를 지나가는 바람에 의한 압력 저하가 하수관 내부의 공기를 밖으로 일부 발산시켜 하수관 내부의 압력 상승을 방지한다.

하수관로의 악취 저감을 위해 주로 사용하는 화학물질은 sodium hypochlorite, ferrous/ferric chloride, hydrogen peroxide이다. SF는 이 화학물질의 반응시간, 잔류성, 부식성의 차이에 따라 적용지역을 선정한다. Sodium hypochlorite은 황화합물을 즉각적으로 산화시키고 10~15분의 잔류시간을 가지며, north shore pump station, richmond street, lake street, westside pump station에 적용되었다. ferrous/ferric ion은 황화물을 황화철로 응결시켜 침전시키고, 반응시간이 길지만 잔류시간이 없고 부식성이 있으며, north shore pump station과 griffith pump station에 사용된다. Hydrogen peroxide는 DO를 잔류시켜 혐기상태를 최소화함으로써 악취를 저감하는데 25~30분의 잔류시간을 가지며, 4th street, brannan street, channel pump station에 사용된다. 화학약품은 하수처리장에서 사용되기도 하지만(Batt et al., 2007), 하수관로의 악취 저감을 위해서 하수관거나 pump station에 직접 투입되기도 한다 (Jameel, 1989; Zhang et al., 2008).

Table 1의 2005년 화학물질 사용비율에서 알 수 있듯이

Table 1. The usage and expense of chemicals to reduce sanitary sewer odor in San Francisco in 2015

Contents	Sodium Hypochlorite	Ferrous/ferric Chloride	Hydrogen Peroxide
Usage	3,958,660 Lbs	1,474,779 Lbs	95,048 Gal
Expense	334,109 \$	108,388 \$	275,349 \$

역사적으로 악취 저감을 위해 sodium hypochlorite가 주로 이용되어 왔다. 하지만 2003년 embarcadero 하수도에 iron salt와 peroxide의 조합에 의한 악취 저감 효과 검증 이후 hydrogen peroxide 사용량이 증가하고 있고, sodium hypochlorite의 의존도는 줄어들고 있다.

이 외에도 potassium permanganate, nitrates, high purity oxygen addition, and air injection이 산화반응으로 황을 변화시켜 악취를 저감한다. 이런 다양한 노력에 의하여 하수도 악취 민원이 2001년에 약 360건에서 2006년에는 약 130건으로 줄었다.

4. 악취 저감 프로그램 비교

LA와 SF 두 도시는 악취 문제에 행정적, 기술적 방법을 사용하여 적극적으로 대처하고 있다. 행정적 방법은 상시 악취 민원을 신고 받고 조치를 취하는 악취전담반과 유지관리, 모니터링이 있다. 기술적인 방법은 악취가 하수도 밖으로 빠져나가지 않게 하수도의 역학적 구조개선과 화학약품 살포에 의한 악취물질 혹은 유발물질 제거가 있다. 위 사항들은 두 도시가 공통적으로 적극적으로 사용하고 있는 방법이다.

두 도시의 차이점은 다음과 같다. LA는 하수도의 공기를 직접 포집하여 처리해서 내보내는 carbon adsorption과 ATF를 운영하고 있다. LA가 하수도 공기를 직접 포집할 수 있는 이유는 분류식 오수관은 공기가 밖으로 나가지 않게 폐쇄되어 있기 때문이다. 하수관이 외부로부터 격리되어 있기 때문에 한 장소에서 공기를 일괄적으로 흡입하여 처리하는 것이 가능하다. 행정상 차이점은 LA가 AOC와 AOS를 지정하여 악취를 집중적으로 관리하는 구역을 지정한다는 것이다.

SF는 fat, oil, grease control program에 의하여 배출을 억제하거나, vent stacks를 이용해 관내 압력 상승을 방지한다. 합류식 하수관은 맨홀이나 우수받이를 통해 하수관과 외부가 연결되기 때문에 LA와 같은 공기 처리시설을 설치할 수 없다. 위 사항을 Table 2에 정리하였다.



Table 2. The comparison of odor reduction strategies in sanitary sewer of LA and SF

Contents	Los Angeles	San Francisco
Similarity	Odor Complaint Response and Investigation Routine Sewer Maintenance Chemical Control Technologies Sewer Construction and Repair General Monitoring	
Dissimilarity	Carbon Adsorption Air Treatment Facilities (ATF) AOC & AOS Monitoring	FOG Control Program Vent Stack

5. 악취 저감 방안

LA와 SF의 악취 관리 방안에서의 시사점은 오랜 시간동안 고민해 왔으며, 다양한 관점에서의 접근법을 사용한다는 것이다. 악취 트랩, 공기 정화, 악취 원인물질 배출 제어, 하수관 내 압력제어, 화학약품 사용, 제도 개선, 유지관리 강화 등 악취 발생의 가능성이 있는 모든 곳에 대책을 시행하고 있다. 우리나라도 악취 저감을 위해서는 하수도 시스템 전반에 걸친 종합적 대책이 요구된다. 그리고 효율적인 대처를 위해서는 악취의 원인을 파악해야 한다.

Cho (2013)에 의하면 하수도로부터 발생되는 황화수소의 80% 이상이 정화조로부터 유래하기 때문에, 하수도 악취 저감을 위한 최우선 과제는 정화조에서의 악취 저감 대책 수립이다. 정화조에서의 황화수소 발

생을 저감하기 위해서 정화조 내 체류시간을 단축하거나, sulfur-oxidizing bacteria 탈취필터(Doungprasopsuk and Suwanvitaya, 2017)를 사용할 수 있다.

미국 및 유럽을 포함하는 대부분의 국가는 도시에서는 정화조를 사용하지 않고, 공공하수도로 접근이 힘든 외지에서만 정화조를 사용한다는 것에 착안하여, 우리나라도 정화조를 폐쇄하고 분뇨를 공공하수도에 직투입하는 방안이 거론되고 있다. 분류식 하수도는 이미 분뇨를 직투입하는 방안으로 전환하고 있는 반면, 합류식 하수도는 서울시 군자배수분구에 test-bed를 마련하여 서울시와 MOU를 맺고 연구를 진행하고 있다.

정화조의 악취 저감 대책과 함께 하수관거의 원활한 하수 이송을 위한 설계기준의 변경은 필수적이다. 하수관거는 겉에서 보이지 않기 때문에 설계 및 시공이 잘못된 곳이 많다 (Bae, 2008). 또한 우리나라 하수관거는 대부분 콘크리트관으로 건설되어있는데, Fig. 2과 같이 부식 및 파손되면 거칠기 계수가 증가하여 운송 기능이 떨어지게 된다 (De Belie et al., 2004). SF와 LA 모두 악취의 주된 원인을 관거 내 하수의 느린 유속으로 인한 혐기화로 꼽고 있는데, 이를 방지하기 위해서는 하수관거의 운송기능을 살릴 수 있는 설계기술과 장기간 운송능력을 유지할 수 있는 재료 및 유지관리 기술과 계획이 필요하다. 이 외에도 환경부의 하수도 악취관리 가이드북(Ministry of Environment, 2015)이 제시하는 발생원, 발산원, 배출원을 관리할 수 있는 기술들의 적용 및 보편화가 필요하다.



Fig. 2. Condition of sanitary sewer in a part of Seoul in January 2018.

Table 4. Methods for odor reduction

Classification	Details	
Blocking	Blocking pathway by coverage, sealing, trap, and air curtain.	
	Prevention of anaerobic digestion	
Deodorization	Washing	Water
		Acid or alkaline solutions
	Combustion	Direct combustion
		Catalyzed combustion
	Oxidation	Ozone
		Chlorine
		Microorganism
	Adsorption	Ion exchange resin
Activated carbon		
Masking	Spraying aroma	

Table 3은 하수도의 악취 저감을 위한 탈취방식을 보여준다. Blocking은 악취가 들어오는 입구를 막거나 (San Francisco, 2009; WESD, 2011; WESD and WCS, 2017), 혐기화를 막아 발생을 방지하는 방법이다. Deodorization은 악취 물질을 직접적으로 없애는 기술 (Beardsley et al., 1958; Nielsen et al., 2003)로, 효과가 좋으나 건설 및 유지관리에 비용이 많이 든다. Masking은 강한 방향(芳香)을 가진 물질로 악취를 덮는 방법으로, 악취가 약할 때 효율적이다.

위와 같은 것들이 현장에 적용되기 위해서는 기술의 연구개발과 함께 하수도법에서 악취 관련 기준을 신설하고, 하수도시설기준이 하수도 악취 저감이 고려된 설계기준을 포함해야 한다. 더 나아가 LA나 SF에서 적용하고 있는 기술들을 시도해 볼 수 있는 유연한 사회적 환경이 조성되면 하수도 악취 저감 기술의 발전과 시장 형성에 도움이 될 것이다.

6. 결론

현대식 하수도 도입 역사가 오래된 미국의 두 도시의 사례로부터 말하고자 하는 것은, 하수도 악취 저감은 하수 배제 만큼이나 중요해서 행정적, 기술적 방법을 총 동원해야 한다는 것이다. 그 증거는 미국이 1800년대 하수도 건설 이후부터 하수도 악취를 저감하기 위하여 끊임없이 노력해왔고, 그 결과 하수도의

구조적 개선과 함께 악취 발생원 및 악취 물질 제거 기술 도입, 24시 악취 민원창구 개설, 유지관리 시스템 도입 등 행정적, 기술적 방법을 동원하여 하수도의 모든 부분에서 악취 저감을 위한 종합적인 노력을 하고 있다는 점에서 찾을 수 있다.

우리나라는 하수도로 인한 큰 재난이 없었으며, 지하에 묻혀있어 보이지 않으며, 기반시설의 온전함 보다는 보이는 시설에 집중을 하는 편이고, 삶의 질이 중요한 화두로 자리 잡은 시간이 오래되지 않았기 때문에 하수도 악취를 포함한 하수도 기술 전반에 대한 관심이 높지 않다. 하수도 악취 문제는 저감이라는 표현에서 볼 수 있듯이 완전 차단할 수 없는 어려운 문제이고, 악취 저감을 위한 행정적, 기술적 장치들이 사회 제도와 하수도 시설 전반에 복잡하게 퍼져있는 미국의 두 도시의 시스템을 단기간에 국내에 적용할 수 없다. 앞으로 삶의 질의 향상을 위하여 하수도 악취의 중요성을 우리 사회 전체가 인식을 해야 다양한 제도 및 기술들을 도입할 수 있고, 그 후 꾸준한 노력이 있어야 하수도 악취 저감의 효과가 드러날 것이다. 이를 위해서는 하수도에 관련된 기술자, 과학자, 공무원들의 많은 노력이 다방면에서 발휘되어야 한다.

사 사

본 연구는 환경부 환경정책기반공공기술개발사업으로 한국환경산업기술원(과제번호 :2017-0007-00001)의 지원을 받았습니다.

References

Bae, C. (2008). <http://www.waterjournal.co.kr/news/articleView.html?idxno=5554> (August 7, 2018).

Batt, A.L., Kim, S. and Aga, D.S. (2007). Comparison of the occurrence of antibiotics in four full-scale wastewater treatment plants with varying designs and operations, *Chemosphere*, 68(3), 428-435.

Beardsley, C.W., Krottinger, N.J. and Rigdon, J.H. (1958). Removal of sewer odors by scrubbing with alkaline solutions, *Sew. Ind. Wastes*, 30(2), 220-225.

Bowker, R.P., Smith, J.M. and Webster, N.A. (1989). *Odor and corrosion control in sanitary sewerage systems and treatment plants*. Park Ridge, New Jersey: Noyes Data Corporation, 110.



- Cho, J. (2013). Evaluation of odor source and control in sewage system, Doctoral thesis, University of Seoul.
- Cho, J. and Song, H. (2011a). "A study of controls and complaints by odor in domestic sewer system", *Proceedings of 2011 joint autumn conference*, Water Wastewater & Korean Soc. Water Environ., Deajeon, South Korea.
- Cho, J. and Song, H. (2011b). "A study of rules for odor in domestic sewer system", *Proceedings of 2011 joint autumn conference*, Water Wastewater & Korean Soc. Water Environ., Deajeon, South Korea.
- De Belie, N., Monteny, J., Beeldens, A., Vincke, E., Van Gemert, D. and Verstraete, W. (2004). Experimental research and prediction of the effect of chemical and biogenic sulfuric acid on different types of commercially produced concrete sewer pipes, *Cement and Concrete Res.*, 34(12), 2223-2236.
- Doungprasopsuk, W. and Suwanvitaya, P. (2017). Effect of oxygen on sulfur products from H₂S removal by Thiobacillus in a biotrickling filter column, *Eng. Appl. Sci. Res.*, 44(4), 214-221.
- Ge, H., Zhang, L., Batstone, D. J., Keller, J. and Yuan, Z. (2012). Impact of iron salt dosage to sewers on downstream anaerobic sludge digesters: sulfide control and methane production, *J. Environ. Eng.*, 139(4), 594-601.
- Gwangjin-gu (2014). Odor reduction plan service around sewage pipe and large septic tank, Final report.
- Huang, J.Y., Wilson, G.E. and Schroepfer, T.W. (1979). Evaluation of activated carbon adsorption for sewer odor control, *J. Water Pollut. Control. Fed.*, 1054-1062.
- Husain, I.A., Alkhatib, M.A.F., Jammi, M.S., Mirghani, M.E., Zainudin, Z.B. and Hoda, A. (2014). Problems, control, and treatment of fat, oil, and grease (FOG): a review, *J. Oleo Sci.*, 63(8), 747-752.
- Jameel, P. (1989). The use of ferrous chloride to control dissolved sulfides in interceptor sewers, *J. Water Pollut. Control. Fed.*, 230-236.
- Jiang, G., Sun, J., Sharma, K.R. and Yuan, Z. (2015). Corrosion and odor management in sewer systems, *Curr. Opin. Biotechnol.*, 33, 192-197.
- Ministry of Environment (2015). Guidebook of odor control in sanitary sewer.
- Nielsen, A.H., Vollertsen, J. and Hvitved-Jacobsen, T. (2003). Determination of kinetics and stoichiometry of chemical sulfide oxidation in wastewater of sewer networks, *Environ. Sci. Technol.*, 37(17), 3853-3858.
- Pokorna, D. and Zabranska, J. (2015). Sulfur-oxidizing bacteria in environmental technology, *Biotechnol. Adv.*, 33(6), 1246-1259.
- San Francisco (2009). City and County of San Francisco 2030 Sewer System Master Plan.
- SFWater (2018). <https://sfwater.org/index.aspx?page=480> (Aug. 22, 2018).
- Song, H., Cho, J., Kim, T., Kwon, S. and Yu, H. (2013). A study on the Effect of SOB(Sulfur-Oxidizing Bacteria) Media on the Removal of Hydrogen Sulfide in Water of Septic Tank, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 27(1), 59-67.
- WESD (Wastewater Engineering Services Division) (2011). Sewer Odor Control Master Plan.
- WESD and WCSD (Wastewater Engineering Services Division & Wastewater Collection Systems Division) (2017). Collection System Odor Control Master Plan 2017.
- Zhang, L., De Schryver, P., De Gussemme, B., De Muyneck, W., Boon, N. and Verstraete, W. (2008). Chemical and biological technologies for hydrogen sulfide emission control in sewer systems: a review, *Water Res.*, 42(1-2), 1-12.

pp. 371-379

pp. 381-388

pp. 389-398

pp. 399-409

pp. 411-419

pp. 421-434

pp. 435-443

pp. 445-451

pp. 453-460

pp. 461-470