

시판용 미생물탈취제를 이용한 하수 악취 내 황화수소 저감에 관한 실험적 연구

박상진 · 권수열*†

우송대학교 철도건설시스템학부/악취VOC연구센터, *한국방송통신대학교 보건환경학과

Experimental Study on Hydrogen Sulfide Abatement in Sewage Odor Using Microbial Deodorants on the Market

Sang Jin Park and Soo Youl Kwon*†

Department of Railroad Civil System Engineering/Odor&VOC Research Center, Woosong University

*Department of Environmental Health, Korea National Open University

ABSTRACT

Objectives: This study was conducted to estimate a technology to reduce hydrogen sulfide (H₂S) in sewage odor using microbial deodorant.

Methods: After injecting five commercially available microbial deodorants into fresh sewage, the concentration of hydrogen sulfide over time was measured using the headspace method. H₂S concentration in odor samples was measured using gas chromatograph/FPD. Calculated odor concentration and calculated odor intensity by H₂S concentration remaining after treatment with microbial deodorant were evaluated theoretically.

Results: The rate of H₂S abatement by microbial deodorant differed depending on the experimental conditions and the type of deodorant, but it was found to range from 63 to 82%. Especially, two deodorants showed high H₂S reduction rates of over 80% on average. However, based on the best deodorant, the theoretically calculated odor concentration by H₂S after microbial deodorant treatment was 4,400 OU_k, and the theoretical odor intensity was also rated at 4 degrees or higher.

Conclusions: In conclusion, microbial deodorant is considered to have a relatively high effect on reducing H₂S in sewage odor. However, even after treatment with microbial deodorant, calculated odor concentration and calculated odor intensity were relatively high. This is thought to be caused by other odorous substances besides H₂S.

Key words: Sewage odor, microbial deodorant, H₂S abatement, calculated odor concentration, calculated odor intensity

I. 서 론

하수는 수돗물과 함께 인간이 살아가는 과정에서 필연적으로 발생하게 된다. 그러나 하수를 운반하는 하수관거 그리고 하수를 처리하는 하수처리장 즉, 하수도 시설은 인간의 생활에 있어 필수적인 시설임에

도 불구하고, 하수도 시설에서 발생하는 악취는 이미 오래 전부터 사회적인 민원이 되어 오고 있다. 이 가운데 하수처리장에서 발생하는 악취문제는 악취발생시설의 복개, 각종 탈취장치의 설치 등에 의해 어느 정도 해결되고 있으나, 주거지역에 포설되어 있는 하수관거 악취에 의한 민원발생은 여전히

†Corresponding author: Department of Environmental Health, Korea National Open University, 86 Daehak-ro, Jongro-gu, Seoul 03087, Korea, Tel: +82-2-3668-4705, Fax: +82-2-741-4701, E-mail: sykwon@knou.ac.kr

Received: 24 February 2020, Revised: 16 March 2020, Accepted: 16 March 2020

사회적인 문제로 남아있는 실정이다. 하수관거 악취의 해결이 어려운 이유는 하수관거에 악취발생원과 악취배출원이 다양하게 존재하기 때문이다. 주요 악취발생원은 하수관거로 배출되는 건물 내 정화조나 배수조 유출수, 하수관거 내부에서 유하되고 있는 혐기성 상태의 생하수와 낮은 유속으로 인해 관거 내부에 침적되어 있는 유기고형물 그리고 부적절하게 시공된 하수도 시설 등이 있다. 주요 악취배출원은 맨홀, 우수받이 및 오수받이 그리고 토구 등이 있다. 하수관거 악취문제를 해결하기 위한 노력으로 서울 시정개발연구원에서는 도로변 빗물받이 악취해소방안¹⁾과 정화조에서 배출되는 하수관 악취저감방안이 연구되었다.²⁾ Nam et al.(2012)은 산화전리시스템을 이용한 정화조 악취제거 사례를 보고하고 있으며³⁾, Kang et al.(2020)은 황산화박테리아를 고정시킨 미디어층을 이용하여 정화조 내 황화수소(Hydrogen sulfide, H₂S)를 제거하는 연구를 보고하고 있다.⁴⁾

정화조 외에 토구 발생악취 문제를 해결하기 위해 대전시에서는 대전시 관내 3대 하천의 토구에서 발생하는 악취조사와 함께 대책수립을 위한 연구를 진행하였으며⁵⁾, Park(2018)은 4차 산업기술을 악취분야에 활용한 사례로서 악취센서와 무선통신기법을 이용하여 실시간으로 악취를 모니터링하는 기술을 소개하고 있다⁶⁾

그러나 이제까지 하수관거 악취에 대한 연구는 대부분 정화조나 토구 등에 집중되어 있으며, 실제로 제기되고 있는 하수관거 악취민원의 원인이 되고 있는 하수본관에 대한 연구사례나 기술은 그다지 많지 않다.

세정탑, 흡착탑, 바이오필터 등의 탈취기술이 하수도 시설 악취제거에도 많이 적용되고 있으나, 이러한 기술은 복개공간 내 악취가스를 포집하여 분해 처리하는 기술이므로, 하수도 시설 가운데 중계펌프장이나 하수처리장에도 많이 설치되어 있다.^{7,8)}

그러나 하수관거는 유하구간이 길고 하류부에 갈수록 신선한 하수가 계속 유입되어 전체 하수관거 연장에 걸쳐 악취가 발생되고 있으므로, 이러한 탈취기술을 적용하기가 불가능하다. 따라서 다양한 악취발생원과 악취배출원이 연결되어 있는 하수관거 본관의 악취문제를 해결하기 위해서는 하수와 함께 혼재되어 유하하면서 하수 내 악취물질을 저감시키는 방법의 개발이 필요하다.

하수관거 악취저감을 위해 사용되어 온 기술은 하

수관거 내부에 공기 또는 순산소를 주입하는 방법, 악취가 많이 발생하는 지점에 산화제를 투입하는 방법 등이 보고되고 있다. Garcia et al.(2017)은 압송 하수관거에 공기를 주입하여 황화합물을 저감하는 연구사례를 보고하고 있으며⁹⁾, Choi et al.(2010)은 총 황환원분석기를 이용하여 5개 탈취제의 하수관거 악취제거에 대한 유효성을 평가한 사례를 보고하고 있다.¹⁰⁾

한편 악취제거를 위해 특정미생물 및 혼합균주를 이용하여 악취성분을 분해 제거하는 방법은 이미 오래 전부터 연구되어 왔다. Park et al.(1993)은 *Thiobacillus thioparus* DW44 분리균주를 이용하여 하수처리장이나 분뇨처리장에서 발생하는 유황계 악취물질을 분해 제거한 사례를 보고하고 있으며,¹¹⁾ Weon et al.(1995)은 *Thiobacillus neapolitanus* R-10 균주를 분리하여 유황계 악취물질의 생물학적 탈취에 관한 연구를 보고하였다.¹²⁾ Kim et al.(2013)은 젖산 분해균주인 KJ-108을 이용하여 혐기성 환경하에서의 악취분해기능을 조사한 사례를 보고하고 있으며¹³⁾, Kim et al.(2011)은 토양으로부터 *Rhodanobacter* sp. 균주를 분리하여 건식소화가스 중의 악취를 제거하는 연구를 보고하였다.¹⁴⁾

그러나 기존의 많은 연구사례는 대부분 특정미생물을 분리하여 실험을 진행한 실험실 규모의 연구로서 실제 현장에 적용하여 실용화를 시키기에는 아직 많은 한계를 안고 있다. 따라서 본 연구에서는 사회적인 민원으로 대두되고 있는 하수관거 악취문제를 해결하기 위해서 연구단계에 있는 특정취미생물 보다는 현장에 적용되고 있고 실용화가 가능한 시판되는 미생물탈취제를 이용하여 하수관거 악취저감 연구를 진행하였다.

한편 하수관거에서는 다수의 무기화합물과 유기화합물에 의해 악취가 유발되고 있는데, 국내 하수도에서 악취의 원인이 되고 있는 무기악취물질과 휘발성 유기화합물 악취물질의 특성을 조사한 두 편의 연구결과에 의하면, 하수관거 악취의 주요 원인물질은 황화수소(H₂S)인 것으로 보고되고 있다.^{16,17)}

이러한 배경 하에, 본 연구에서는 국내에서 시판되는 미생물탈취제를 생하수에 주입하여 혼합한 상태에서 시간 경과에 따라 하수관거 악취 내 H₂S의 농도를 측정 조사함으로써, 하수관거 악취 내 H₂S 저감기술로서 현재 시판되고 있는 국내 미생물탈취

제의 적용 가능성을 조사할 목적으로 본 연구를 수행하였다.

II. 재료 및 방법

1. 약취시료 측정

약취시료는 gas-tight syringe를 이용하여 반응조 내부 상부공간에서 head space법을 이용하여 운전시간 경과에 따라 직접 채취하였으며, 채취된 약취가스 시료내 H₂S 농도는 염광광도검출기가 부착된 가스스크로마토그래프(GC17A/FPD, Shimadzu co. Japan)를 이용하여 직접주입법으로 분석하였다. Table 1은 본 연구에 사용된 가스스크로마토그래프의 사진과 분석조건을 나타낸 것이다.

2. 실험에 사용된 하수시료 및 미생물탈취제

실험에 사용된 하수는 30분 이내 거리에 위치한 TJ하수종말처리장 최초 침전지에 유입되고 있는 생하수를 실험실로 직접 운반하여 사용하였다. 실험실로 운반된 하수시료는 약 1일 정도 보관되었으며, 실험 당일 침전물의 영향을 최소화한 균질한 시료를 확보하기 위해 충분히 혼합한 후 사용하였다.

미생물탈취제는 실제 현장에서 직접 활용할 수 있는 기술을 개발할 목적으로, 조달청에 등록되어 시판되고 있는 미생물탈취제 가운데 현장 보급실적이 많은 제품 5종을 구입하여 사용하였다. 본 연구에서 사용된 미생물탈취제의 미생물 활성화 및 사용방법

등 상세 규격 및 제품사양은 나라장터-종합쇼핑몰에 상세히 제공되고 있으므로 본 고에서는 생략하기로 한다. 또한 본 연구에서 제시된 결과가 각 회사의 영업에 영향을 미칠 것을 고려하여 본 연구에 사용된 미생물탈취제명은 모두 영문 익명으로 표기하였다.

Fig. 1은 본 연구에 사용된 미생물탈취제의 사진을 제시한 것이다.

3. 실험방법 및 실험조건

모든 실험은 상온에서 진행되었으며, 밀폐된 반응장치에 생하수 2L와 실험조건에 맞게 미생물탈취제를 준비한 후, head space법을 이용하여 운전시간 경과에 따른 수면 상부의 H₂S 농도 변화를 측정하였다.

당초 실험은 5개 미생물탈취제 시료 사이에 blank 시료 2개를 제작하여 동일한 초기 농도 조건으로 실험을 진행하려 하였으나, 동일한 초기 하수 농도의 blank 시료를 제작하는 것이 어려웠기 때문에, 실험은 크게 blank 시료농도 측정실험과 탈취제 검증 비교실험으로 구분하여 진행하였다.

3.1. blank 시료 실험

각 미생물탈취제 실험에 사용되는 blank 시료의 동질성 여부를 확인하기 위해 3회에 걸쳐 blank 시료의 초기 약취농도를 측정하였다. 실험#1은 미교반, 실험#2는 교반 상태에서 각각 2개의 blank 시료를 측정하였으며, 실험#3은 교반 상태에서 6개의 blank 시료를 제작한 후 초기 약취농도를 측정하였다.

Table 1. Photograph and analysis condition of GC17A/FPD used in this study

Model	GC-17A (Shimadzu, Japan)
Detector	Flame Photometric Detector
Oven Temp.	80°C
Injection Temp.	150°C
Detector Temp.	150°C
Column	Packed Column (0.32 mm (I.D.)×3 m)
Column Material	β,β'-oxidropionitriebo 60-80 mesh chromosorb w
Carrier Gas Flow Rate	50 mL/min
H ₂ Gas Pressure	60 kpa
Carrier Gas	N ₂
Standard Gas	H ₂ S 47.8 ppm., CH ₃ SH 45.7 ppm., (CH ₃) ₂ S 44.4 ppm., (CH ₃) ₂ S 47.6 ppm., (Kotte & Zeller Co., USA)





Fig. 1. Photograph of microbial deodorants used in this study

3.2. 탈취제별 H₂S 저감효과 비교 실험

Blank 시료 실험 결과를 토대로 실험#4에서 실험 #8까지 5차례에 걸쳐 미생물탈취제에 의한 악취가스 내 H₂S 저감 효과 비교실험을 수행하였다.

미생물탈취제 주입량은 미생물 원액을 기준으로 하수량 대비 1/1000, 1/2000, 1/3000에 해당하는 양을 액상으로 직접 하수에 주입하여 실험을 진행하였다.

실험의 진행은 유입하수 농도 변화에 따른 악취저감 효과를 파악하기 위해 하수에서 발생하는 초기악취의 농도를 다양하게 시료를 준비하여 실험을 진행하였으며, 수리학적 상태에 따른 악취저감 효과를 파악하기 위해 하수와 미생물을 교반하는 경우와 교반

하지 않은 경우의 두 가지 조건으로 실험을 진행하였다.

악취초기농도는 no mixing 실험(실험#4)의 경우 실험개시 단계부터 수면악취 발산이 정상상태(Steady state)이므로 실험개시 시점의 농도를 초기농도로 설정하였으며, mixing 실험(실험#5~실험#8)의 경우는 하수에서 악취가 발생되어 수면 상부 악취농도가 점차 증가하며 Steady state 상태까지 도달하는데 시간이 소요되므로 실험개시 30분 후 농도를 초기농도로 설정하였다.

Fig. 2는 본 실험에 사용된 장치사진을 나타낸 것이며, Table 2는 탈취제별 H₂S 저감효과 비교 실험 조건을 나타낸 것이다.

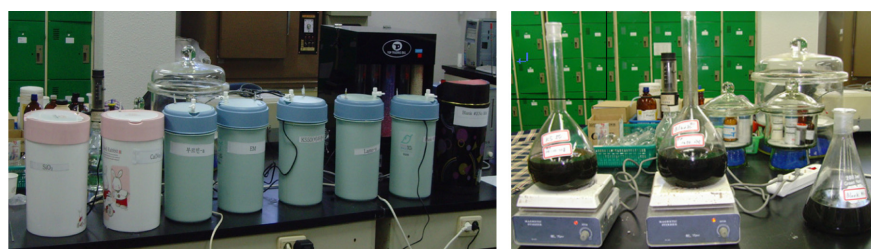


Fig. 2. Photograph of experimental apparatus used in this study

Table 2. Experimental condition of H₂S abatement test using 5 microbial deodorants

Test	Hydraulic condition	Injection rate of deodorants vs raw sewage	Flow rate of raw sewage (L)	Flow rate of microbial deodorants (mL)
#4	no mixing	1/1000	15	15
#5	mixing	1/1000	2	2
#6	mixing	1/2000	2	1
#7	mixing	1/3000	2	0.67
#8	mixing	1/2000	2	1

4. 미생물탈취제별 H₂S 저감율 산정방법

미생물탈취제별 H₂S 저감율은 식 (1)에 의해 계산하였다.

$$A.E. = (C_i - C_e) / C_i * 100 \quad (1)$$

여기서,

A.E.: 저감율(Abatement Efficiency), %

C_i: 미생물탈취제가 주입된 실험장치의 초기농도, ppm

C_e: 실험 종료시점의 처리 후 농도, ppm

5. 처리 후 H₂S에 의한 악취농도 및 악취강도 검토

5.1. 미생물탈취제 처리 후 H₂S에 의한 악취농도 검토

일반적으로 악취농도는 특정농도의 악취화합물에 대해 냄새가 인간의 후각에 감지되지 않을 때까지 주입되는 희석공기량의 배수에 의해 계산된다. 우리나라 악취공정시험법에서는 공기희석관능법을 이용하여 복합악취를 측정하여 희석배수로 악취농도를 표현하지만, 본 연구에서는 지정악취물질인 H₂S에 대해 기기분석을 수행하였으므로, 미생물탈취제에 의해 저감된 후 하수악취 내에 남아 있는 H₂S 농도를 이용하여 이론적으로 악취농도를 평가하였다. 식 (2)는 기기분석 결과치를 이용하여 이론적인 악취농도를 계산하는 방법을 나타낸 것이다.

$$COC = C_e / C_{TLV} \quad (2)$$

여기서,

COC: 이론적으로 평가한 환산악취농도(Calculated Odor Concentration), OU_k

C_e: 실험 종료시점의 처리 후 농도, ppm

C_{TLV}: 악취물질의 최소감지농도(Threshold Limit Value), ppm

5.2. 미생물탈취제 처리 후 H₂S에 의한 악취강도 검토

미생물탈취제에 의해 저감된 후 하수악취 내 H₂S는 어느 정도의 냄새 세기를 함유하고 있는가를 조사하기 위해 악취강도를 검토하였다. 일반적으로 악취강도의 측정 후각이 정상적으로 판정된 5인이 현장에서 판정하는 직접관능법을 사용하나, 이론적으로 악취물질농도와 악취강도간의 상관관계식을 이용하여 환산악취강도를 추정하기도 한다. 본 연구에서 이론적인 환산악취강도는 아래의 공식을 이용하여 산정하였다. 식 (3)은 한국인의 후각, 식 (4)는 일

본인의 후각을 이용하여 도출한 연구결과이다^{18,19)}

$$Y = 0.874 \log(X) + 4.0598 \quad (3)$$

$$Y = 0.950 \log(X) + 4.14 \quad (4)$$

여기서,

Y: 이론적으로 계산된 환산악취강도(Calculated Odor Intensity, COI), 도

X: H₂S 농도, ppm_v

III. 결 과

1. Blank 시료별 H₂S 초기농도 실험결과

미생물탈취제별 제거율 평가는 실험개시 시점의 blank 농도를 초기농도로 하고 탈취제 주입 후 2시간 경과한 시점의 농도를 처리 후 농도로 하여 악취제거율을 산정할 계획이었다. 그러나 5개 반응장치의 악취시료를 측정하는 데는 30분 이상의 시간이 소요되므로, blank 시료를 1개만 운용하는 경우 최초로 측정되는 탈취제는 마지막으로 측정되는 탈취제 보다 반응시간이 짧아 제거율 산정 시 실험오차가 발생할 수 있으므로, 2개의 blank 시료를 준비하여 실험#1과 실험#2를 진행하였다.

Table 3은 blank test 실험결과를 나타낸 것이다. 실험#1과 실험#2에서는 동일한 시료임에도 불구하고 blank 시료간의 악취농도 편차가 거의 2배에 가까운 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이는 인공시료와는 달리 현장에서 채취한 하수는 부유물질 및 침강성 고형물에 의해 균질한 시료의 제조가 어렵기 때문인 것으로 생각된다. 실험#3에서는 동일한 하수를 이용하여 최대한 균질하게 5개의 blank 시료를 준비한 후, 미생물탈취제를 주입하지 않은 상태에서 초기 악취농도를 측정된 결과 초기 악취농도는 H₂S 120 ppm에서 180 ppm까지 50% 이상의 편차를 나타내었다.

이러한 실험결과를 토대로, 당초 연구여건상 측정 회수를 최소화하여 실험개시 단계에서는 blank 시료의 악취농도만 측정하여 제거율 산정에 기준이 되는 초기농도를 확보하고, 미생물탈취제가 주입된 하수 시료는 운전개시 후 30분 후부터 측정하려 하였으나, 미생물탈취제가 주입된 하수시료의 초기농도가 모두 상이하여 제거율 산정에 객관성이 부족하기 때문에 blank 시료의 악취농도를 기준으로 제거율을

Table 3. Experimental results of H₂S initial concentration at 3 blank samples test (unit: ppm)

Test	blank#1	blank#2	blank#3	blank#4	blank#5	blank#6
#1	16.5	35				
#2	60	38				
#3	120	180	150	150	130	180

Table 4. H₂S concentration variation of blank and microbial deodorants over the retention time in the previous study²⁴⁾

Time (min)	H ₂ S Concentration (ppb)				
	blank	Microbial deodorants			
		KS5	EM	BRMA	LAMA
0	1,858	1,858	1,858	1,858	1,858
69	1,852	1,800	2,000	980	1,846
140	1,850	1,200	1,900	2,060	932
190	1,848	1,200	9,800	3,860	930
241	1,846	1,200	16,900	3,830	928
295	1,844	1,200	28,600	3,786	926

산정하려던 당초 방법은 적용하기 어려운 것으로 판단되었다. 따라서 미생물탈취제별 정확한 제거율을 파악하기 위해서는 실험 개시 단계에서부터 2개의 blank 시료가 아니라 미생물탈취제가 주입된 5개 실험장치 모두 30분 후가 아닌 실험개시 직후부터 각 미생물탈취제별로 독립적인 초기농도를 측정하여 가장 객관적인 방법으로 각각의 미생물탈취제별 제거율을 산정하였다.

한편 본 연구는 현장에서 활용할 만한 미생물탈취제를 선별할 목적으로 비교실험을 주로 진행하였기 때문에, 시간경과에 따른 blank 시료의 H₂S 농도 변화는 기존의 사례를 참고하였다. Table 4는 본 연구와 유사하게 미생물탈취제의 H₂S 저감에 대한 이전의 연구사례를 제시한 것이다. 이 실험의 시료 역시 하수이며, 1개의 blank 시료와 4종류의 탈취제에 대해 시간경과에 따른 H₂S 농도 저감효과를 조사하였다. Table 4에서와 같이 시간경과에 따른 blank 시료의 H₂S 농도 변화는 거의 보이지 않은 것으로 보고하고 있다²⁴⁾.

2. 미생물탈취제에 의한 악취제거 실험결과

미생물탈취제 악취제거실험은 Table 2에 나타난 바와 같이 하수도 시설 내 수리학적 특성을 고려하여 no mixing 상태 1회(실험#4), mixing 상태 4회(실험#5, 실험#6, 실험#7, 실험#8)로 구분하여 총 5차에

걸쳐 실험을 진행하였다

Table 5는 실험#4부터 실험#8까지 각 실험조건에 따라 미생물탈취제별로 운전 초기부터 운전시간경과에 따른 수면 상부의 H₂S 농도 측정 결과를 나타낸 것이며, Fig. 3부터 Fig. 7까지는 Table 5의 내용을 이해하기 쉽게 그림으로 도식화한 것이다.

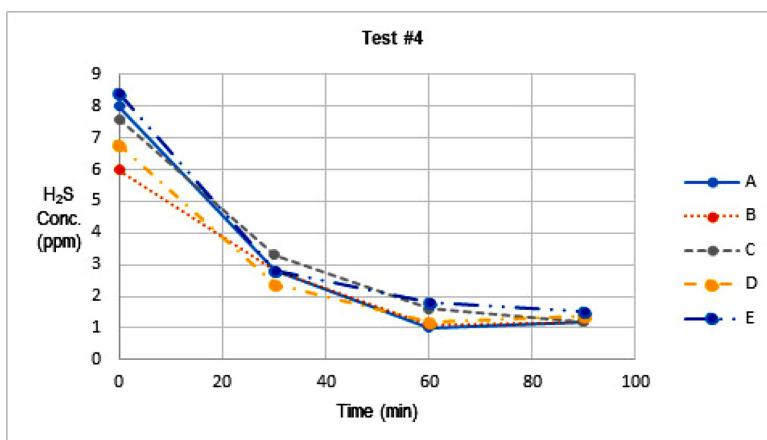
Table 5에서와 같이 초기 H₂S 농도가 2~8.4 ppm으로 비교적 낮았던 경우 처리 후 농도는 1 ppm 정도까지 처리가 되었으나, 하수에서 발생한 H₂S의 초기 악취농도가 32~58 ppm으로 높았을 때에는 처리 후 농도가 2 ppm에서 10 ppm까지 탈취제에 따라 5배의 차이를 보이는 것으로 나타났다.

미생물탈취제의 시간 경과에 따른 악취 저감효과는 초기 악취농도가 타 실험에 비해 높았던 실험#7의 경우 90분이 경과할 때 까지도 일정한 속도로 제거가 이루어는 경향을 보였으나(Fig. 6), 실험#7 이외의 실험에서는 대부분의 미생물탈취제가 주입 후 약 60분까지는 악취농도가 큰 폭으로 감소되다가 60분이 경과한 후에는 악취제거가 비교적 완만하게 이루어지는 것으로 나타났다.

생하수와 미생물탈취제의 교반 여부에 따른 저감효과, 생하수량 대비 미생물탈취제 희석비율에 따른 저감효과, 하수 수면상부 H₂S 초기농도에 대한 미생물탈취제의 저감효과 등에 대해서는 IV. 고찰 부분에서 검토하기로 한다.

Table 5. Time-course H₂S reduction of 5 microbial deodorants according to the experimental condition (unit: ppm)

Test	Hydraulic condition	Injection rate of deodorants vs raw sewage	Operating time (min)	Microbial deodorant				
				A	B	C	D	E
#4	no mixing	1/1000	0	8	6	7.6	6.8	8.4
			30	2.8	2.8	3.3	2.4	2.8
			60	1	1.1	1.6	1.2	1.8
			90	1.2	1.2	1.2	1.4	1.5
#5	mixing	1/1000	0	6.2	6.2	6	6.5	5.1
			30	12.5	12.5	16	21	9
			60	3	3.5	6.5	15	5
			90	2.5	2.5	9	17.5	7
#6	mixing	1/2000	0	32	38	32	32	38
			30	38	35	38	47	48
			60	5	7	18	28	11
			90	3.4	3.1	8	13	5
#7	mixing	1/3000	0	57	58	42	40	41
			30	48	50	41	46	60
			60	16	16	16	26	43
			90	4.4	3.4	4	6	20
#8	mixing	1/2000	0	2	1.5	1.2	2.05	1.65
			30	2	3	2.5	1.95	3.1
			60	1.25	1.65	1.65	1.2	1.8
			90	1.1	1.25	1.25	1.2	1.3
			120	1.1	1.2	1.2	1.2	1.3

**Fig. 3.** Time-course H₂S reduction of 5 microbial deodorants in Test #4

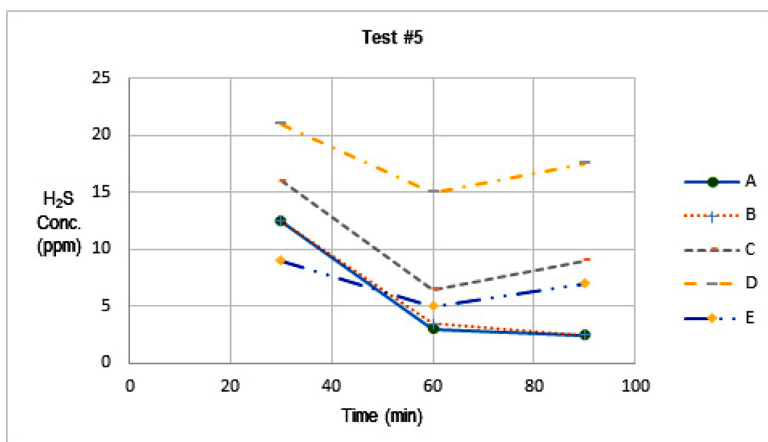


Fig. 4. Time-course H₂S reduction of 5 microbial deodorants in Test #5

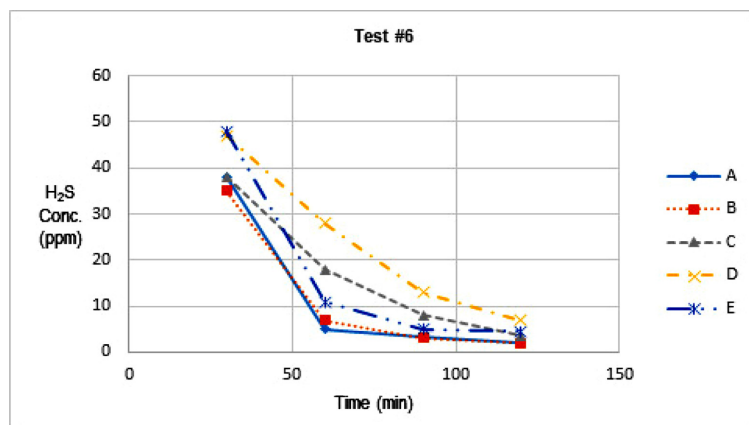


Fig. 5. Time-course H₂S reduction of 5 microbial deodorants in Test #6

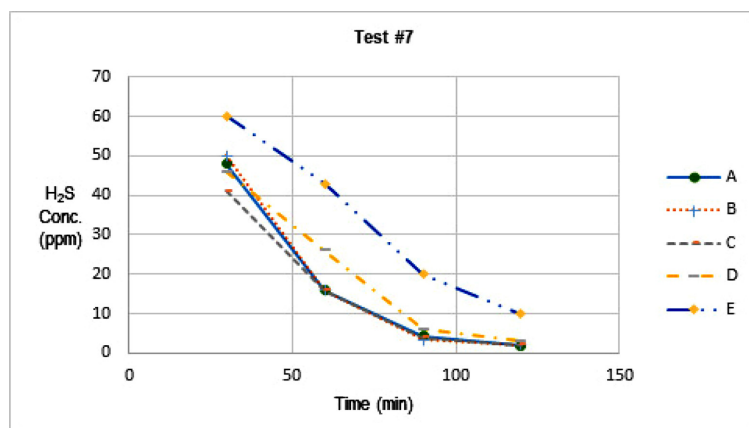


Fig. 6. Time-course H₂S reduction of 5 microbial deodorants in Test #7

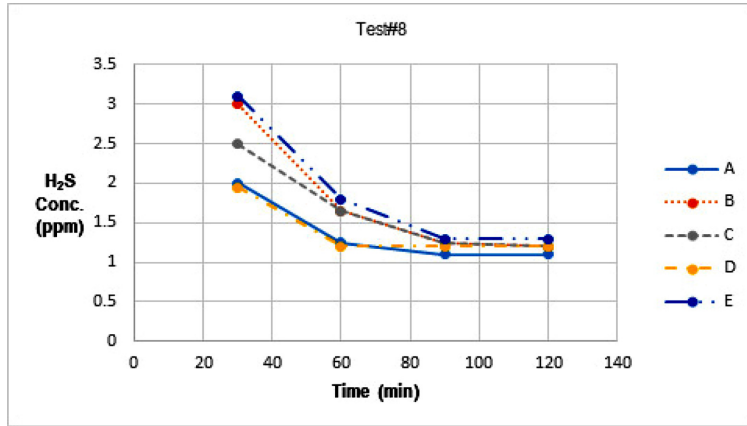


Fig. 7. Time-course H₂S reduction of 5 microbial deodorants in Test #8

IV. 고 찰

1. 실험조건에 의한 미생물탈취제별 H₂S 저감율 비교

Table 6은 실험#4에서 실험#8까지의 실험결과를 토대로 미생물탈취제별 H₂S 저감율을 정리하여 제시한 것이며, Fig. 8은 Table 4의 내용을 알기 쉽게 실험조건별로 구분하여 미생물탈취제의 H₂S 저감율을 막대그래프로 비교하여 나타낸 것이다.

Table 6에서와 같이 미생물탈취제의 H₂S 저감율은 실험조건에 따라 그리고 미생물탈취제의 종류에 따라 17%에서 96%까지 큰 차이를 나타내었다. Fig. 8에서 볼 수 있는 바와 같이 대부분의 실험에서 미생물탈취제별로 약간의 차이는 있으나 대부분 유사한 제거율을 보인 반면, 실험#5의 경우는 탈취제에 따라 제거율이 큰 폭의 차이가 있는 것으로 나타났다.

미생물탈취제별로 비교해 보면 5종의 미생물탈취제 가운데 미생물탈취제 A와 미생물탈취제 B는 대부분의 실험에서 80% 이상의 안정된 H₂S 저감율을 나타냈으며, 미생물탈취제 D와 미생물탈취제 E는 실험조건에 따라 H₂S 저감율이 다소 낮은 것으로 나타났다. 실험조건별로 미생물탈취제의 H₂S 저감정도를 살펴보면 다음과 같다.

1.1. H₂S 초기농도의 변화에 대한 미생물탈취제의 저감효과

실험#8의 경우 H₂S 초기농도를 2 ppm에서 3 ppm

정도의 저농도 조건으로 실험을 진행하였다. 5개 미생물탈취제 모두 처리 후 농도는 대부분 1.3 ppm 이하까지 저감되었으나, H₂S 저감율은 모두 60% 이하로 낮게 나타났다. 그러나 동일한 희석조건으로 진행한 실험#6을 포함하여 H₂S 초기농도를 중농도와 고농도로 진행한 실험에서는 탈취제의 종류에 따라 차이가 있으나 80% 이상의 비교적 높은 제거율을 나타내었다. 이러한 결과를 볼 때 미생물탈취제는 유입하수 내 H₂S 발생물질이 많을수록 저감효과가 더 높은 것으로 생각된다.

1.2. 생하수와 미생물탈취제의 교반 여부에 따른 저감효과

실험#4와 실험#5는 H₂S 초기농도를 8 ppm에서 20 ppm 정도, 미생물탈취제 주입량은 동일한 조건 하에 생하수와 미생물탈취제의 교반여부에 따른 저감효과를 비교한 것이다. Table 6에서와 같이 교반하지 않은 상태의 실험#4에서는 모든 미생물탈취제가 80% 이상의 높은 저감율을 보였다. 그러나, 생하수와 미생물탈취제를 교반하며 실험했던 실험#5의 경우 미생물탈취제 A와 B는 여전히 80%의 저감율을 보인 반면, 미생물탈취제 C, D, E는 H₂S 저감율이 44% 이하로 낮게 나타났다. 이러한 결과를 볼 때 임의의 미생물탈취제를 선정하여 하수악취를 저감하고자 할 때에는 교반여부 등의 운영조건을 검토할 필요가 있을 것으로 생각된다.

Table 6. Comparison of H₂S abatement efficiency of 5 microbial deodorants according to the experimental condition (unit: ppm, %)

Test		Microbial deodorant				
		A	B	C	D	E
#4	Ci (ppm)	8	6	7.6	6.8	8.4
	Ce (ppm)	1.2	1.2	1.2	1.4	1.5
	A.E. (%)	85	80	84	79	82
#5	Ci (ppm)	12.5	12.5	16	21	9
	Ce (ppm)	2.5	2.5	9	17.5	7
	A.E. (%)	80	80	44	17	22
#6	Ci (ppm)	38	35	38	47	48
	Ce (ppm)	2	2	2.6	7	4.5
	A.E. (%)	95	94	91	85	91
#7	Ci (ppm)	48	50	41	46	60
	Ce (ppm)	2	2.2	2.2	3	10
	A.E. (%)	96	96	95	93	83
#8	Ci (ppm)	2	3	2.5	1.95	3.1
	Ce (ppm)	1.1	1.2	1.2	1.2	1.3
	A.E. (%)	45	60	52	38	58
A.E. in average (%)		80	82	73	63	67

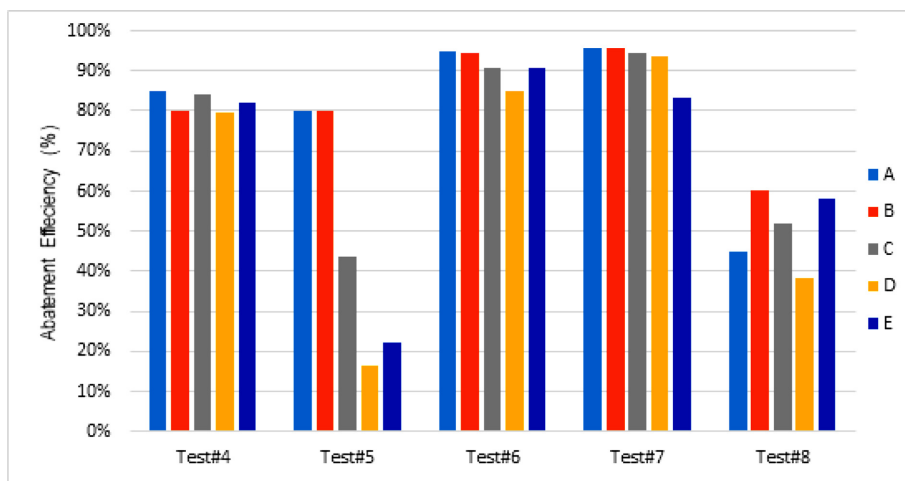


Fig. 8. Comparison of H₂S abatement efficiency of 5 microbial deodorants according to experimental conditions

1.3. 생하수량 대비 미생물탈취제 희석비율에 따른 저감효과

실험#5, 실험#6, 실험#7은 H₂S 초기농도를 45 ppm에서 60 ppm (실험#5는 10 ppm에서 20 ppm), 생하수와 미생물탈취제의 교반여부 등 비교적 유사한 실험조건 하에서 생하수량과 미생물탈취제 주입량의

혼합조건을 다르게 한 실험조건하에서의 H₂S 저감효과를 비교한 것이다. Table 6에서와 같이 실험결과로는 실험#6과 실험#7 모두 대부분의 미생물탈취제가 90% 이상의 매우 높은 저감율을 보였다. 다만 H₂S 초기농도가 다소 낮았던 실험#5는 A, B 탈취제의 경우 80%, 나머지 탈취제는 44% 이하의 낮은

저감율을 나타내었다. 이러한 실험결과를 볼 때 실험에 사용된 미생물탈취제는 하수량 대비 미생물탈취제 원액의 1/3000 정도의 희석비율에서도 H₂S 저감효과가 있는 것으로 나타났다.

2. 미생물탈취제처리 후 H₂S에 의한 악취농도 검토

Table 7은 II.5.1절에 기술한 방법대로 미생물탈취제 처리 후의 H₂S 농도를 이용하여 환산악취농도를 이론적으로 계산한 결과를 나타낸 것이다. 실험조건과 미생물탈취제에 따라 저감 효과가 상이하기 때문에 전체의 실험결과를 평균적인 수치로 표현하는 것이 다소 무리가 있으나, 저감 효과가 가장 높았던 미생물탈취제 A의 경우에도 처리 후의 H₂S에 의한 환산악취농도는 4,400 OU_k으로 매우 높게 나타났다.

Table 8은 국내 악취방지법의 복합악취와 지정악취물질에 대한 배출허용기준치를 나타낸 것이다. 현행 악취방지법에서는 악취농도에 대해 공기희석관능법에 의한 복합악취의 희석배수를 기준으로 배출구의 경우 배출허용기준치를 1,000 이하로 규제하고 있음을 감안하면, 본 실험에서 얻어진 처리 후 H₂S에 의한 환산악취농도는 매우 높은 것으로 생각된다. 다만 이론적인 환산악취농도가 공기희석관능법에 의한 실측악취농도보다는 크게 산출된다는 점, 그리고 실제 현장에서는 하수에서 발산되는 악취가 대기 중으로 이동 확산되면서 희석된다는 것을 감안한

다면 처리 후의 환산악취농도가 높게 산출되기는 하나 미생물탈취제에 의한 H₂S 저감은 어느 정도의 악취저감 효과를 기대할 수 있을 것으로 생각된다.

3. 미생물탈취제 처리 후 H₂S에 의한 환산악취강도 검토

Table 9는 II.5.2절에 기술한 방법대로 미생물탈취제 처리 후의 H₂S 농도를 이용하여 이론적으로 평가한 환산악취강도 결과를 나타낸 것이며, Table 10은 인간이 느끼는 정도에 따라 냄새의 세기를 악취강도 0도부터 5도까지 6단계로 구분하여 표현하는 직접관능법을 나타낸 것이다.

Table 9에서와 같이 미생물탈취제 처리 후의 H₂S에 의한 환산악취강도는 실험조건이나 탈취제 종류에 관계없이 한국과 일본의 두가지 방법 모두 4도 이상인 것으로 나타났다. 현행 국내 악취방지법에서는 악취강도에 의한 배출허용기준은 적용하고 있지 않기 때문에 악취규제기준치와의 직접적인 비교는 어려우나, Table 10의 직접관능법에 비교해 볼 때 미생물탈취제 처리 후에도 남아있는 H₂S에 의한 악취강도는 매우 높은 것으로 생각된다.

다만 환산악취농도와 마찬가지로 실제 현장에서 인지되는 악취강도와 이론적으로 계산되는 환산악취강도와는 많은 차이가 있으며, 악취강도는 개인의 후각능력에 따라 측정 폭이 크기 때문에 이론적인 환

Table 7. Calculated odor concentration using H₂S concentration after treating by microbial deodorants

Threshold limit value of H ₂ S (ppm)		0.0004 ⁽²¹⁻²³⁾				
Test		Microbial deodorant				
		A	B	C	D	E
#4	Ce (ppm)	1.2	1.2	1.2	1.4	1.5
	COC (OU _k)	3,000	3,000	3,000	3,500	3,750
#5	Ce (ppm)	2.5	2.5	9	17.5	7
	COC (OU _k)	6,250	6,250	22,500	43,750	17,500
#6	Ce (ppm)	2	2	2.6	7	4.5
	COC (OU _k)	5,000	5,000	6,500	17,500	11,250
#7	Ce (ppm)	2	2.2	2.2	3	10
	COC (OU _k)	5,000	5,500	5,500	7,500	25,000
#8	Ce (ppm)	1.1	1.2	1.2	1.2	1.3
	COC (OU _k)	2,750	3,000	3,000	3,000	3,250
Average	Ce (ppm)	1.8	1.8	3.2	6.0	4.9
	COC (OU _k)	4,400	4,550	8,100	15,050	12,150

Table 8. Permitted odor criteria of air quality in Korean Odor Prevention Law

Complex odor	Permitted criteria (odor unit, diluted ratio)		Strictly permitted criteria (odor unit, diluted ratio)	
	Industrial area	Other area	Industrial area	Other area
Stack	below 1000	below 500	500~1000	300~500
Boundary area	below 20	below 15	15~20	10~15

Legally designated malodorous compounds	Permitted criteria (ppm)		Strictly permitted criteria (ppm)	Adopted period
	Industrial area	Other area	Industrial area	
Ammonia	below 2	below 1	1~2	
Methyl-mercaptan	below 0.004	below 0.002	0.002~0.004	
Hydrogen Sulfide	below 0.06	below 0.02	0.02~0.06	
Dimethyl Sulfide	below 0.05	below 0.01	0.01~0.05	
Dimethyl Disulfide	below 0.03	below 0.009	0.009~0.03	
Trimethyl Amine	below 0.02	below 0.005	0.005~0.02	from Feb. 2005
Acetaldehyde	below 0.1	below 0.05	0.05~0.1	
Styrene	below 0.8	below 0.4	0.4~0.8	
Propionic Aldehyde	below 0.1	below 0.05	0.05~0.1	
Butyl Aldehyde	below 0.1	below 0.029	0.029~0.1	
n-Valeric Aldehyde	below 0.02	below 0.009	0.009~0.02	
i-Valeric Aldehyde	below 0.006	below 0.003	0.003~0.006	
Toluene	below 30	below 10	10~30	
Xylene	below 2	below 1	1~2	
Methyl-Ethyl Ketone	below 35	below 13	13~35	from Jan. 2008
Methyl Iso Butyl Ketone	below 3	below 1	1~3	
Butyl Acetate	below 4	below 1	1~4	
Propionic Acids	below 0.07	below 0.03	0.03~0.07	
n-Butyl Acids	below 0.002	below 0.001	0.001~0.002	
n-Valeric Acids	below 0.002	below 0.0009	0.0009~0.002	from Jan. 2010
i-Valeric Acids	below 0.004	below 0.001	0.001~0.004	
i-Butyl Alcohol	below 4.0	below 0.9	0.9~4.0	

산악취강도 값만으로 미생물탈취제에 의한 악취저감 효과를 평가하기에는 다소 무리가 있다.

V. 결 론

다양한 악취발생원 및 악취배출원을 갖고 있어 해결하기 어려운 하수관거 악취의 주요 원인물질인 H₂S를 저감하기 위한 기술을 개발할 목적으로, 시판되고 있는 미생물탈취제 5종을 생하수에 주입하여 수리학적 조건 및 농도조건에 따라 하수 악취 내

H₂S 저감실험을 수행한 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 미생물탈취제에 의한 하수 악취 내 H₂S 저감율은 실험조건이나 탈취제의 종류에 따라 상이하나 63~96%의 범위인 것으로 나타났으며, 5개 제품 중 두 개 제품은 다양한 실험조건 하에서도 하수 악취에서 발생하는 H₂S의 80% 이상을 제거하는 것으로 나타났다.

(2) 미생물탈취제 처리 후 잔존하는 H₂S에 의한 악취농도는 이론적으로 계산한 결과 가장 우수한 A 제품을 기준으로 4,400 OU_k인 것으로 나타났으며,

Table 9. Calculated odor intensity using H₂S concentration after treating by microbial deodorants

Test	Microbial deodorants					
	A	B	C	D	E	
#4	Ce (ppm)	1.2	1.2	1.2	1.4	1.5
	Korea, COI (degrees)	4.1	4.1	4.1	4.2	4.2
	Japan, COI (degrees)	4.2	4.2	4.2	4.3	4.3
#5	Ce (ppm)	2.5	2.5	9	17.5	7
	Korea, COI (degrees)	4.4	4.4	4.9	5.1	4.8
	Japan, COI (degrees)	4.5	4.5	5.0	5.3	4.9
#6	Ce (ppm)	2	2	2.6	7	4.5
	Korea, COI (degrees)	4.3	4.3	4.4	4.8	4.6
	Japan, COI (degrees)	4.4	4.4	4.5	4.9	4.8
#7	Ce (ppm)	2	2.2	2.2	3	10
	Korea, COI (degrees)	4.3	4.4	4.4	4.5	4.9
	Japan, COI (degrees)	4.4	4.5	4.5	4.6	5.1
#8	Ce (ppm)	1.1	1.2	1.2	1.2	1.3
	Korea, COI (degrees)	4.1	4.1	4.1	4.1	4.2
	Japan, COI (degrees)	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2
Average	Ce (ppm)	1.8	1.8	3.2	6.0	4.9
	Korea, COI (degrees)	4.3	4.3	4.4	4.5	4.5
	Japan, COI (degrees)	4.4	4.4	4.5	4.7	4.7

Table 10. Classification of odor intensity by on-site olfactory test

Degrees	Intensity	Properties
0	None	People cannot feel an odorous smell with normal sense of smell
1	Threshold	People smell something but cannot recognize the type of smell
2	Moderate	People smell something and can recognize the type of smell
3	Strong	People easily smell something strongly like a cresol smell in hospitals
4	Very Strong	People strongly smell something like a conventional rest room
5	Over Strong	People strongly smell something and gag or hold their breath

이론적으로 계산한 악취강도는 4도 이상으로 평가되었다.

(3) 본 연구에서 얻어진 H₂S 저감율, 이론악취농도와 이론악취강도 실험결과 토대로 볼 때, 미생물탈취제를 하수에 투입하는 경우 주요 악취원인물질인 H₂S의 저감효과는 비교적 높은 것으로 생각되나 하수 악취의 저감효과는 다소 한계가 있는 것으로 보여진다.

감사의 글

이 논문은 2018년 한국방송통신대학교 학술연구비 지원을 받아 수행되었습니다.

References

1. Seoul Development Institute. A Solution of Foul Odor of Roadside Gutters in Seoul. Seoul: Seoul Development Institute Press; 2007; p.129-156.
2. Seoul Development Institute. A study on the Reduction Solution for Sewer Foul Odor Discharged from a Septic Tank. Seoul: Seoul Development Institute Press; 2009; p.95-128.
3. Nam YK, Kim JS, Song JH. The Effect of Electrode Materials on Odor Removal in an Electrolytic System; Proceeding of the 48th of KOSAE Korean Society for Atmos. Environ. 2012; 24.
4. Kang HI, Namgung HJ, Cho JI, Yoo SS, Lee BJ, Ji

- HK. Removal of Hydrogen Sulfide in Septic Tanks for Treating Black Water via an Immobilized Media of Sulfur-Oxidizing Bacteria. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2020; 17: 684-695.
5. Park SJ, et. al. Survey on the Status of Odor Generation in Main Sewer and Establish the Countermeasure to Improve the Living Environmental Condition in Daejeon City. Daejeon: Woosong Univ. Press; 2018.
 6. Park SJ. Remote monitoring and real-time abatement of odor emitted from sewer using odor sensors, wireless communication technique and microbial deodorant. *Global NEST Journal*. 2018; 20(3): 646-653.
 7. Jeon EC, Son HK, Sa JH. Emission Characteristics and Factors of Selected Odorous Compounds at a Wastewater Treatment Plant. *Sensors*. 2009; 9: 311-326.
 8. E. Alinezhad, M. Haghhighib, F. Rahmanic, H. Kes-hizadeha, M. Abdia, K. Naddaf. Technical and economic investigation of chemical scrubber and bio-filtration in removal of H₂S and NH₃ from wastewater treatment plant. *J. of Environ. Management*. 2019; 241: 32-43.
 9. García JT, Antonio VR, Castillo LG, Carrillo JM. Evaluation of Sulfide Control by Air-Injection in Sewer Force Mains Field and Laboratory Study. *Sustainability*. 2017; 9: 402-421.
 10. Choi II, Lee HJ, Shin JD, Kim HY. Evaluation of the Effectiveness of Five Odor Reducing Agents for Sewer System Odors Using an On-Line Total Reduced Sulfur Analyzer. *Sensors(Base)*. 2012; 12(12): 16892-16906.
 11. Park SJ, Hirai H, Shoda M. Treatment of exhaust gases from a night soil treatment plant by a combined deodorization system of activated carbon fabric reactor with peat biofilter inoculated with *Thiobacillus thio-parus* DW44. *J. of Ferment. Bio-eng*. 1993; 76(5): 423-426.
 12. Weon YD, Park SB, Lee WK, Ryu BH, Song SK. Continuous Dedorizaion of Malodorous Sulfur Compounds Using Immobilized *Thiobacillus neapolitanus* R-10. *J. of Korean Environ. Sci. Society*. 1995; 4(3): 295-301.
 13. Kim JD, et. al. Isolation and Identification of a Lactic Acid Bacterial Strain KJ-108 and Its Capability for Deodorizing Malodorous Gases Under Anaerobic Culture Conditions. *J. Microbiol. Biotechnol*. 2013; 13(2): 207-216.
 14. Kim SK, Kang CM, Chung SY, Oh JS, Kim SD, Yoon HS, Lee JW. Study on Desulfurizing Microbe Selection and Its Deodorizing Effect in Dry Anaerobic Digestion. *J. of Korean Society of Environ. Technology*. 2011; 12(2): 118-124.
 15. Oh KH, Chpi IH, Cho YC. Isolation and Characterization of Ammonia -removing Bacteria from a Food-wastewater Treatment Facility. *J. of Korean Society of Environ. Engineers*. 2008; 30(6): 653-658.
 16. Park SJ, Kwon SY. Odor Characteristics of Malodorous Sulfur-containing Gas Emitted from a Sewer and Its Outlet. *J Environ. Health Sci*. 2014; 40(6): 477-483.
 17. Park SJ, Kwon SY. Odor Characteristics and Concentration of Malodorous Volatile Organic Compounds Emitted from a Sewer and Its Outlet. *J Environ. Health Sci*. 2017; 43(6): 457-466.
 18. Han, JS, Park, SJ. A Study of the Correlation between the Concentration and Dilution Factor of Sulfur Compounds, NH₃, and TMA. *Korean J. Odor Research and Engr*. 2012; 11: 87-93.
 19. Japan Association on Odor Environment. Chapter 3 Correlation equation between odor intensity and odor compounds concentration - Handbook of Odor Prevention Law, 6th ed.; Tokyo; Gyosei digital Press; 2012. p. 380-333.
 20. Wu, C., Liu, J., Zhao, P., Piringer, M., Schaub-berger, G. Conversion of the chemical concentration of odorous mixtures into odour concentration and odour intensity: A comparison of methods. *Atmos. Environ*. 2016; 12(7): 283-292.
 21. Han, J.S.; Lim, Y.J.; Park, S.J. A Study on the Calculation Methods of Odor Threshold Values of the Specified Offensive Odor Substances. *J. Odor Research and Engr*. 2012; 11: 24-33.
 22. Nagata, N. Measurement of Odor Threshold by Triangle Odor Bag Method. Available: https://www.env.go.jp/en/air/odor/measure/02_3_2.pdf [accessed on 10 January 2019].
 23. Leonardos, G, Kendall, D, Barnard, N. Odor Threshold Determinations of 53 Odorant Chemicals. *J. Air Pollut. Control Assoc*. 1969; 19: 91-95.
 24. Busan Metropolitan City/Saha-Gu. Status of Odor and Environmental Conditions in Sin-pyoung & Jang-rim Industrial Complex. Daejeon; Woosong University Press; 2008; p.510-513.

<저자정보>

박상진(교수), 권수열(교수)