

부산지역 환경기초시설에서 발생하는 폐기물의 물리, 화학적 특성 규명 및 황화수소 발생량 예측에 관한 연구

Physicochemical Characteristics and Estimation of H₂S Emission Rate from Municipal Solid Waste at the Environmental Facilities in Busan City

이 태 윤[†] · 김 도 용¹⁾ · 김 재 진²⁾ · 이 준 기³⁾

Lee, Taeyoon · Kim, Doyong · Kim, Jaejin · Lee, Junki

ABSTRACT : There have been increasing interests in the odor generation problems as concerns about the quality of life has been increased recently. Especially, approximately 67% of the odor complaints from environmental facilities are those from sewage treatment facilities and food waste treatment facilities. Moreover, sewage ocean dumping will be prohibited from 2012 by the international and domestic ocean laws, and thus, demand for alternative management plans is increasing. Therefore, it was first selected 5 sewage treatment facilities and 5 food waste treatment facilities where the amounts of waste are relatively immense in Busan, and collect their sludge samples. Then it was investigated the samples' physical and chemical characteristics through proximate analysis, elemental analysis, XRF analysis, and calorific value analysis. Finally, estimate the H₂S emission rates were estimated in order to apply the results as the basic data for providing the fundamental solution for the odor complaints. As a result, the concentration of H₂S in sewage sludge and in food waste treatment facility were 57.3 mg/kg and 19.7 mg/kg in average, respectively. Finally, the units of H₂S in wastes stored in total 10 waste treatment facilities was estimated 16,017,910.0 mg/d.

Keywords : Odor, H₂S, Waste

요 지 : 최근 우리나라의 국민들의 삶의 질이 향상됨에 따라 악취발생문제가 중요한 사회이슈가 되고 있다. 특히 환경기초시설에서 발생하는 악취물질로 인한 민원 중 약 67%가 하수처리장과 음식물쓰레기 처리시설에 의한 것으로 나타났으며, 해양오염방지법 시행규칙개정으로 2012년부터는 하수오니 등의 해양투기가 전면 금지될 예정에 있어 이들 시설의 처리량 증가에 따른 관리대책 마련이 시급한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 부산시 전역의 하수처리장과 음식물쓰레기처리시설중 상대적으로 폐기물발생량이 많은 5개 하수처리장과 5개 음식물쓰레기처리시설을 선정하여 슬러지 시료를 채집하고 이들 시료에 대한 공업분석, 원소분석, XRF 분석, 발열량분석 등을 통해 시료의 물리, 화학적 특성을 알아내었다. 또한 최종적으로 시료 내 황화수소 발생가능도 측정을 통해 황화수소발생원단위를 산정, 악취민원의 근본적 대책마련을 위한 기초 자료로써 활용 하고자 하였다. 분석결과, 하수슬러지의 황화수소농도는 평균 57.3mg/kg, 음식물쓰레기처리시설의 것은 19.7mg/kg이었다. 최종적으로 총 10개 시설 폐기물의 황화수소 발생원 단위 산정결과 16,017,910.0mg/d로 예측 되었다.

주요어 : 악취, H₂S, 폐기물

1. 서 론

최근 우리나라에서는 국민들의 삶의 질 향상과 더불어 악취관련 민원이 해마다 급격히 증가하고 있다. 환경부 조사결과에 따르면 '06년도 우리나라 악취 민원접수는 총 4,797건으로 '01년 2,760건에 비해 2배 정도 증가 하였으며, 특히 부산지역은 인천, 경기지역과 함께 총 악취 민원 접수 건수의 55.2%를 차지할 만큼 악취 민원이 많이 발생하는 지역이며 실제 조사결과에서도 '06년 509건으로 '02년 134건에 비해 약 3.7배 증가 한 것으로 나타나 악취문

제의 해결이 시급한 것으로 드러났다(환경부, 2007a).

이 중 환경기초시설에서 발생한 악취 민원의 약 67%는 하수처리장과 음식물쓰레기처리시설에 의한 것으로 나타났으며 더 심각한 문제는 정부가 해양오염방지법 시행규칙 개정을 통해 2012년부터 하수오니 등의 해양투기를 전면 금지할 계획에 있어 이들 폐기물의 육상처리를 위한 공공처리시설의 추가 확충이 불가피한 상황이라 악취관리 대책마련이 시급한 실정이다(환경부, 2007a; 해양수산부, 2006).

본 연구에서는 부산시에 위치한 하수처리장과 음식물쓰

† 정희원, 부경대학교 환경해양대학 환경공학과 조교수(E-mail : badger74w@pknu.ac.kr)

1) 비회원, 기상지진기술개발사업단 팀장

2) 비회원, 부경대학교 환경해양대학 대기환경과학과 조교수

3) 비회원, 부경대학교 환경공학과 대학원

레기 처리시설 중 상대적으로 폐기물발생량이 많은 5개 하수처리장과 5개 음식물쓰레기처리시설을 선정하여 슬러지 및 음식물쓰레기시료를 채집하고 이들 시료에 대한 공업분석, 원소분석, 회재조성분석, 발열량분석 등을 통해 재활용을 위한 기본적 자료인 시료의 기본 물리, 화학적 특성을 알아내고, 최종적으로 시료 내 황화수소 발생가능농도 측정을 통해 이들 시설의 주요 악취원인물질인 황화수소의 발생 원단위를 산정하여 악취저감의 근본적 대책 마련과 재활용을 위한 기초 자료로써 활용하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 이론적 배경

경제발전과 인구증가로 인한 하수처리시설의 증설로 인해 하, 폐수의 슬러지량이 증가하게 되었고 음식물쓰레기 또한 직매립 금지로 인해 그 처리량이 해마다 증가추세에 있다. 2005년 말 현재 우리나라에 설치된 공공하수처리시설은 모두 294개소로, 시설용량은 22,568천톤에 달하며, 하수도 보급율이 낮은 남강댐, 대청댐 등 7개의 댐 상류지역에는 2004년부터 2010년까지 13,125억원을 투자하여 공공하수처리시설 532개소 확충사업을 추진하고 있으며, 부족한 하수관거 정비사업을 체계적으로 추진하기 위해 팔당 상류지역에 대해 2001년~2010년까지 1조1,780억원을 투자하여 1,609km의 하수관거를 신설, 정비 중에 있다(환경부, 2007b). 그 결과 1997년 전국 평균 하수도 보급율이 60.9%였던 것이 2006년 현재 85.6%으로 증가 하였다(환경부, 2007c).

또한 환경부의 '06년 하수 슬러지 처리현황을 보면 현재 발생된 이들 하수슬러지중 71%인 총5,306톤이 해양투기에 의존하고 있지만 앞으로 정부가 해양오염방지법 개정을 통해 2012년부터 하수오니의 해양투기를 전면 금지시킬 계획에 있어 이들 폐기물에 대한 처리대책 마련이 시급한 실정이다(해양경찰청, 2005).

이에 일찍이 급증하는 하수슬러지와 음식물쓰레기를 폐기물 이라기보다는 자원이라는 인식으로 재활용에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔으며, 이들 재활용기술들은 크게 퇴비화를 통한 비료화방법, 소각처리를 통한 건설자재 또는 에너지 회수방법 등으로 나눌 수 있다(김경숙 등, 1999).

하지만 각 하수처리장과 음식물쓰레기 처리시설의 유입원, 처리방식의 차이로 인해 슬러지의 물리화학적 특성에도 다소 차이가 발생하므로 경량골재 제조, 비료화, 응집제 제조, 소각 등과 같은 다양한 처리방법의 연구를 위해서는 이들 개별시설에서 발생하는 슬러지의 정확한 성분

분석이 필요한 실정이며, 개발된 재활용기술들을 실제로 처리시설에서 적용하고 가동하기 위해서는 악취로 인한 악취 민원을 근본적으로 해결해야 하고 강화된 악취방지법에 명시된 악취물질별 허용기준을 만족할 수 있는 요건을 갖추어야 한다.

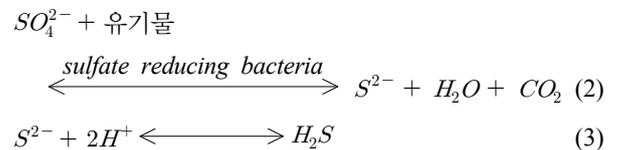
2.1 하수처리장에서의 악취배출 특성

하수처리장에서 발생하는 악취물질에는 황화합물, 질소화합물, 알데히드류, 유기산, 케톤류, 기타 방향족 화합물 등이 있다. 악취는 악취성분의 단순 농도가 높은 물질보다는 악취기여율이 높은 악취물질을 중심으로 제어가 계획되어야 한다(정재은 등, 2003).

악취유발물질의 농도를 악취정도와 연계시키기 위해서 일반적으로 악취감지한계농도(Odor Threshold)라는 개념이 활용되는데 이는 어떠한 물질이 사람이 후각을 이용하여 감지할 수 없는 농도로 정의 된다. 전라북도 보건환경연구원에서 실시한 '환경기초시설 악취저감 방안 연구'에서는 기기분석에 의해 측정된 개별 악취농도를 악취물질의 최소감지농도로 나누어 악취농도지수(Odor Quotient, OQ)로 나타내었는데 그 결과에 따르면 하수처리장에서 주로 발생하는 악취원인물질의 61.2%~89.2%가 황화수소로 밝혀졌다(전라북도, 2007).

$$\text{악취농도지수(OQ)} = \frac{\text{조사악취물질의 농도(ppb)}}{\text{물질의 최소감지농도(ppb)}} \quad (1)$$

하수처리장의 황화수소는 주로 황산염 환원반응에 의해 발생하는데 그 과정은 아래와 같이 황산염과 유기물질이 혐기성 박테리아에 의해 물, 탄소, 황 이온으로 바뀌고, S²⁻은 혐기성 상태에서 다시 수소이온과 반응해 황화수소를 발생시킨다.



2.2 음식물쓰레기처리시설에서의 악취배출 특성

음식물쓰레기의 경우 정부의 음식물쓰레기 자원화 정책과 폐기물관리법시행규칙에 의해 직매립 금지 조치가 취해진 2005년 이후 음식물 쓰레기 재활용율이 급증했으며, 환경부 음식물류 폐기물 처리시설 현황(2007) 자료를 보면 음식물쓰레기 자원화시설도 공공, 민간시설을 합하여 2007

년 12월 기준 총 255개소가 가동 중이고 현재 10곳이 추가 설치 중에 있는 등 계속 증가하는 추세이다.

우리나라의 음식물쓰레기는 곡물과 야채가 많고, 마늘이 든 요리가 많은 등의 이유로 수분함량과 황계 악취성분의 농도가 높은 것이 특징이다(환경부, 2001). 음식물쓰레기 악취 또한 암모니아, 트라이메틸아민, 아세트산, 에탄올, 다이메틸설파이드, 다이메틸다이설파이드등 미생물에 의한 악취성분이 복합적으로 작용하며, 전라북도 보건환경연구원에서 하수처리장과 같은 방법으로 조사한 악취농도 지수(Odor Quotient, OQ)결과에 의하면 황화수소의 악취 기여도가 투입시설에서 46.1%, 이송시설에서 36.1%, 건조시설에서 23.7%로써 역시 가장 중요한 악취원인물질이라고 할 수 있다(전라북도, 2007).

3. 시료 채취 및 실험방법

3.1 시료채취

본 연구에서는 부산지역에 위치한 9개 하수처리장 사업소 및 8개 음식물쓰레기처리시설중 상대적으로 처리량이 많은 하수처리장 5곳과 음식물쓰레기처리시설 5곳을 선정하였으며 2008년 6월 3일~26일 약 한 달에 걸쳐 시료를 채집하여 가능한 채집 즉시 분석을 실시하였으며 시료의 변질을 막기 위해 냉장보관 하였다. 하수처리장의 경우는 탈수슬러지케익을, 음식물쓰레기처리시설은 음식물처리공정에서 발생하는 중간부산물을 분석대상으로 하였고, 시료채취 대상시설의 위치 및 처리공정은 표 1과 같다.

표 1. 시료채취 대상시설 위치 및 공정

업종	시설명	사업소 위치	처리방법
하수처리장	남부사업소	남구 용호동	표준활성슬러지법(수처리) 중온혐기성소화법(슬러지처리)
	수영사업소	동래구 안락동	표준활성슬러지법(수처리) 중온혐기성소화법(슬러지처리)
	중앙사업소	서구 압남동	BIOFOR®(고정상생물막)공법
	장림사업소	사하구 신평2동	표준활성슬러지법(수처리) 중온혐기성소화법(슬러지처리)
	녹산사업소	강서구 송정동	활성슬러지변법(MLE)+화학적처리
음식물쓰레기 재활용시설	수영하수병합처리시설	동래구 안락동	하수병합
	사하음식물쓰레기 재활용센터	사하구 다대동	건식사료화
	반여농산물도매시장	해운대구 반여동	파쇄, 탈수
	생곡 음식물쓰레기 자원화시설	강서구 생곡동	혐기성소화
	(주)삼득산업	강서구 송정동	습식사료화

(출처: 2008 한국지반환경공학회 학술발표회 논문집, P.415~419 일부요약 및 추가)

3.2 시료분석

채취한 총 10개의 폐기물 중 하수슬러지시료에 대해 공업분석, 원소분석, 회재조성분석, 발열량분석, 황화수소 함량분석을 실시함으로써 물리, 화학적 특성을 알아낼 수 있었다.

원소분석은 시료를 섭씨 1,150°C 정도의 고온에서 연소하여 각종원소를 함유한 가스로 분해하고 이들 가스의 열전도도를 측정하여 원소의 종류와 함량을 알아내는 장비인 Macro and Micro Elemental Analyzer(원소분석기)를 이용하여 분석하였다. 이 기기에서 분석할 수 있는 원소들은 탄소, 수소, 산소, 질소, 황 등이며 분석결과는 주로 화합물의 분자식을 결정하는데 기초자료가 된다. 발열량 분석은 PARR INSTRUMENT COMPANY의 Oxygen Bomb Calorimeter를 사용 하였으며 수분량과 원소분석치를 고려하여 다음과 같은 식으로 환산하여 저위발열량을 구할 수 있다(조백근, 2005).

$$\text{생쓰레기 고위발열량}[cal/g] = \text{실측치} \times \frac{100 - \text{수분}[\%]}{100} \quad (4)$$

$$\text{생쓰레기 고위발열량}[cal/g] =$$

$$\text{생쓰레기 고위발열량} - 600(9H + W) \quad (5)$$

회재조성성분분석은 SHIMADZU(Japan)사의 XRF-1700을 사용하여 분석하였다. XRF 분석은 X-선에 의해 여기된 각각의 원소들에서 발생하는 2차 X-선을 분광시켜 검출되는 X-선의 파장과 강도에 따라 원소의 정성 및 정량분석이 가능한 것이 특징이고 금속, 전기, 화학, 암석, 토양, 시멘트, 환경, 식품, 제지 등 여러 분야에 폭넓게 적용이 가

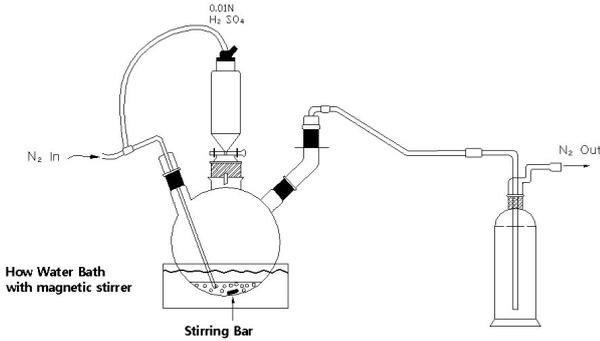


그림 1. 고형 폐기물 중의 황화물 포집을 위한 증류장치의 모습

능하다.

또한 부산시 하수처리장과 음식물쓰레기처리시설의 폐기물에서 발생하는 총 황화수소 발생 원단위 산정을 위해 우선 각 시설별 시료를 15g씩 채취하여 고형 폐기물의 총 황화물 농도 측정 방법인 증류법에 의한 요오드 환원 적정법(Method No. 9030A, EPA SW-846)을 적용하여 분석을 실시하였으며 실험장치는 그림 1과 같다.

이 방법은 샘플을 70°C로 가열한 후 폐기물내의 황화물에 황산을 추가함으로써 산성의 조건에서 황화물을 증류, 분리시킨 후 N₂가스의 흐름을 타고 흡수병으로 이동, 아연 황화물로 침전 시킨 후 과량의 요오드로 인해 황으로 산화시킨 후 티오황산나트륨 표준용액으로 무색이 될 때까지 적정하는 방법으로 계산방법은 식 (6)와 같다.

$$\text{mg/L sulfide} = \frac{[(A \times B) - (C \times D)] \times 16,000}{V} \quad (6)$$

위의 식에서 A = 첨가된 요오드의 양(mL), B = 요오드 용액의 노르말농도, C = 티오황산나트륨의 적정량(mL), D = 티오황산나트륨의 노르말농도, 16,000 = 1000 × 16(16은 황화물 당량이며 1000은 factor임), V = 적정된 샘플의 양(mL)의 값이다(Maria, 1997).

측정된 총 황화물의 농도 중 이온화분을 계산을 통해 다시 황화수소 비율을 예측하였다. 이온화분 계산을 통해 최종적으로 황화수소의 비율을 구하는 식은 식 (7)과 같고 식을 그래프로 나타내면 그림 2와 같은 형태를 보인다(Vernon et al., 1980).

$$\begin{aligned} \text{Percentage of Dissolved Sulfide Present as H}_2\text{S}(\%) \\ = \frac{[H^+]}{[H^+] + K'} \times 100 \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)에서 K'는 전기전도도와 온도를 측정해 이온세기의 영향과 온도의 영향을 고려해 산의 평형상수 K_a값을 좀 더 정확히 보정해 준 값이다.

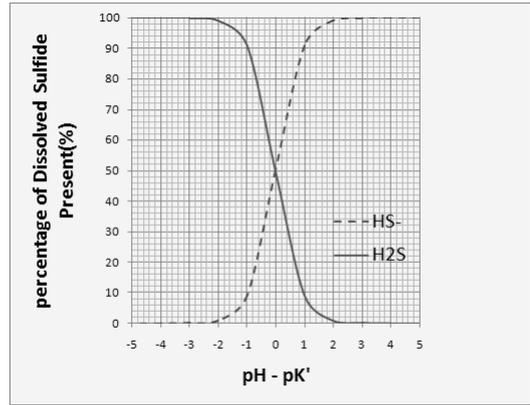


그림 2. 용존성 황화물 내의 H₂S-HS⁻ 비율 그래프

이때 EUTECH INSTRUMENTS사의 PC510 Bench pH/conductivity meter를 사용하여 pH와 전기전도도를 측정하였고 최종적으로 황화수소 발생원단위 산정을 위한 시료의 비중을 측정하기 위해 SHINKO DENSHI 사의 DME-220HE Tuning Fork Density meter가 사용되었다.

4. 결과 및 고찰

4.1 하수슬러지에 대한 공업분석, 발열량분석, 원소분석, 회재조성분석

황화수소 발생량 측정에 앞서 하수슬러지에 대한 공업분석, 발열량분석, 원소분석, 회재조성분석을 실시하였다. 이는 슬러지의 함수율 및 유기물함량, 그리고 발열량, 구성원소성분비 등은 소각, 퇴비화, 연료화와 같은 방법으로 재활용 할 경우 또는 처리방법 결정시 중요한 변수로 작용할 수 있으며, 악취발생특성에도 영향을 줄 수 있기 때문이다. 실제로 서울지역환경기술개발센터에서 실시한 ‘하수슬러지 자가착화를 위한 반응성 여재 개발’ 연구에 따르면 ‘슬러지 함수율이 55%이하 일 때는 유동층 소각로를 이용할 때 자연연소하며 함수율 60%에서는 연소공기를 300°C로 예열해야 하며 함수율이 70%의 경우에는 슬러지 100 kg 고형물질 당 약 8kg의 보조연료가 요구된다.’라고 보고되고 있으며(서울지역환경기술개발센터, 2006), 박재현 등의 ‘하수슬러지의 유동층 소각 특성’ 연구결과에 따르면 함수율이 그보다 낮은 40% 이하일 때 보조연료 없이 쉽게 소각이 가능한 것으로 나타나 있다(박재현 등, 2001).

슬러지 분석 결과를 표 2에 종합적으로 정리하여 나타내었다. 하수슬러지에 대한 공업분석을 실시한 결과 평균 함수율이 74.5%로 상당히 높은 값을 보였으며, 평균 휘발분 함량 17.7%, 회분의 함량이 7.2%로 나타났다. 74.5%에 달하는 높은 함수율로 인해 만일 하수슬러지를 열분해처

표 2. 하수슬러지 탈수케익에 대한 공업분석, 발열량분석, 원소분석, 회재조성분석결과

시료		수영	남부	중앙	장림	녹산	평균
공업 분석 [%]	수분	73.4	74.8	71.2	74.1	78.8	74.5
	휘발분	19.1	18.7	19.0	16.7	15.1	17.7
	고정탄소	0.4	0.6	0.7	0.8	1.0	0.7
	회분	7.1	5.9	9.2	8.5	5.2	7.2
고위발열량 HHV[cal/g]		2,966	3,132	2,765	2,848	3,942	3,131
저위발열량 LHV[cal/g]		94.8	75.9	121.4	55.4	49.7	79.4
원소 분석 [wt.%]	C	28.4	29.9	30.7	27.1	37.2	30.7
	H	4.7	4.9	5.1	4.4	5.8	5.0
	N	4.8	5.2	4.2	4.3	5.7	4.9
	S	2.4	1.5	1.8	2.7	2.5	2.2
	O (by difference)	33.2	35.2	26.4	26.6	24.3	29.1
회재 조성 분석 [wt.%]	SO ₃	5.89	13.12	17.14	12.26	16.96	13.07
	Al ₂ O ₃	13.84	12.64	18.29	7.64	17.75	14.03
	SiO ₂	34.04	31.21	16.00	16.90	17.71	23.17
	Fe ₂ O ₃	9.77	8.72	7.50	24.07	7.12	11.44
	P ₂ O ₅	15.94	15.02	17.29	16.92	16.71	16.38
	CaO	10.62	8.05	10.76	8.37	8.67	9.29
	NiO	N.D.	N.D.	1.53	0.16	2.02	0.74
	MnO	0.68	0.14	1.37	0.19	2.07	0.89
	Na ₂ O	1.25	1.48	1.60	N.D.	1.61	1.19
	Cl	0.81	1.47	1.69	0.42	1.77	1.23
	MgO	2.82	4.13	1.99	1.82	1.95	2.54
	CuO	0.29	0.30	0.83	0.63	1.17	0.64
	ZnO	0.50	0.57	0.99	5.58	1.02	1.73
	BaO	N.D.	N.D.	0.55	N.D.	0.51	0.21
	TiO ₂	1.19	1.15	0.82	1.08	0.74	0.99
	K ₂ O	2.27	1.93	1.09	0.82	1.16	1.45
	Cr ₂ O ₃	N.D.	N.D.	0.30	2.84	0.60	0.75
	SrO	0.05	0.06	0.25	0.09	0.41	0.17
	Br	0.02	N.D.	0.02	N.D.	N.D.	0.01
	ZrO ₂	0.01	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.00
Co ₂ O ₃	N.D.	N.D.	N.D.	0.04	0.05	0.02	
PbO	N.D.	N.D.	N.D.	0.17	N.D.	0.03	

(출처: 2008 한국지반환경공학회 학술발표회 논문집, P.415~419 일부요약 및 추가)

리와 같은 방법으로 처리시 경제성을 가지기 위해서는 하수처리장에 추가적인 건조설비를 갖추어야 할 것으로 보이며 소각 또는 고체연료화의 방법을 적용하기 위해서도 수분을 효율적으로 제거해야 할 것으로 보인다. 원소분석 결과 탄소의 평균함량이 30.7%로 가장 높았고 황 성분 또한 약 2.2%정도 존재하는 것으로 나타났다. 발열량은 폐기물의 열적처리시설 운전시 기초적인 자료이며, 소각처리시에도 보조연료의 필요유무, 열회수시설의 용량, 소각시설 운전조건 등을 결정하는데 가장 중요한 요소이다. 5개 사업소의 탈수슬러지케익에 대한 고위발열량(HHV) 분석

결과 평균 3,131cal/g이었지만 슬러지의 수분함량이 상당히 높기 때문에 수분증발열을 뺀 실제로 효용 되는 연료의 발열량인 저위발열량(LHV)을 산정한 결과 평균 79.4cal/g으로 상당히 낮음을 알 수 있었고 이에 따라 소각 등의 처리 시에는 건조와 같은 전처리 또는 보조연료가 필요할 것으로 보인다. 또한 회재조성분석 결과 실리카(SiO₂)성분이 23.2%로 가장 높았으며 Cr, Pb, Cu, Fe, Zn과 같은 중금속 물질이 일부 포함 되어 있음을 알 수 있었고 특히 장림 하수처리장의 경우 거의 모든 중금속 항목에서 매우 높은 값을 나타내어 해양투기나 비료로써 사용될 경우 중금

속의 토양 용출이 우려된다.

4.2 황화수소 발생량 측정

위와 같은 방법으로 시료 내 총 황화물 농도를 측정결과 아래의 표 3과 같이 남부사업소가 320mg/kg으로 가장 높았으며 대체로 음식물처리시설의 폐기물 평균농도 37 mg/kg보다 하수슬러지의 평균 황화물농도가 184mg/kg로 약 5배정도 높게 나타났다.

또한 실험결과로 얻은 총 황화물농도를 이온화분율 계산법을 통해 다시 황화수소의 농도로 계산하였다. 이온화분율은 질량균형식과 평형식을 연립해 계산하며, 이렇게 구한 이온화 분율은 분석농도와 관계없이, 특정 pH에서의 비율값에 분석농도를 곱하면 바로 당해 pH에서의 각 화학종의 농도가 된다.

이렇게 구한 황화수소의 농도를 구한 결과, 하수슬러지 내의 황화물 중 H₂S의 비율은 평균 32.5%, 황화수소평균 농도는 57.3mg/kg으로 나타난 반면 음식물쓰레기처리시설의 경우 H₂S 비율이 평균 81.6%, 황화수소평균 농도는 19.7mg/kg으로 나타나 황화물농도에서는 약5배 차이가 났던 것이 음식물쓰레기처리시설의 샘플의 H₂S비율이 대체로 높았기 때문에 황화수소농도에서는 약3배로 그 격차가 줄어든 것을 확인 할 수 있었다. 그리고 황화수소의 농도가 가장 높은 시료는 녹산하수처리장의 슬러지였다.

4.3 황화수소 발생원단위 예측

위에서 확인한 각 시료의 황화수소 농도와 비중측정을 통한 슬러지밀도, 그리고 부산환경공단 홈페이지에 공개된 2007년 일평균 슬러지 발생량 자료와 환경부의 2007년 음식물류폐기물 처리시설 현황 자료를 토대로 황화수소 발

생가능량 원단위를 산정하였다. 원단위 산정을 위한 식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} & \text{슬러지 일 발생량(m}^3\text{/d)} \times \text{슬러지밀도(kg/m}^3\text{)} \\ & \times \text{시료내 총 황화수소 농도(mg/kg)} \end{aligned} \quad (8)$$

최종적으로 구한 부산시 총 10개 환경기초시설 폐기물에서의 황화수소 발생 예측량은 표 4와 같다. 부산지역에 위치한 총10개소의 하수처리장과 음식물폐기물처리시설의 폐기물에서 발생하는 황화수소의 일평균 가능발생량은 16,017,910.0mg/d로 예측되었다. 하지만 이들 폐기물의 pH가 좀 더 낮아질 경우, 황화수소의 발생량은 급격히 증가하므로 폐기물의 pH가 5일 때와 pH가 3일 때를 가정해 예측해 본 결과, pH5일 때에는 슬러지 내의 황화물 중 약 99%정도가 황화수소로 존재하게 되며 일평균 가능발생량은 약5.4배 증가한 87,033,740.7mg/d로 예측되었으며, pH3일 때에는 그보다 많은 99.99%가 황화수소로 발생되어 총 87,918,899.3mg/d이 발생할 것으로 예측되었다.

5. 결 론

본 연구는 부산시 하수처리장과 음식물쓰레기처리시설에서 배출되는 폐기물의 물리, 화학적 특성을 파악하고 폐기물에서 발생하는 악취물질 중 가장 중요한 물질인 황화수소에 대한 발생가능 원단위를 산정해 악취저감의 근본적인 대책수립을 위한 기초자료로서 활용 가능 하도록 하기위해 조사, 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 부산시 5개 하수처리장 탈수슬러지에 대한 공업분석 결과 평균 함수량이 74.5%로 상당히 높은 값을 나타

표 3. 시료 내 황화물 농도 측정결과 및 H₂S 예측 농도

시설명	샘플 pH	Conductivity at, 25°C (µmhos/cm)	H ₂ S 비율(%)	시료내 황화물 농도(mg/kg)	시료내 H ₂ S 농도(mg/kg)
수영사업소	7.84	215	12.63	77	9.77
남부사업소	7.98	275	9.48	320	30.34
중앙사업소	6.47	580	76.40	107	81.50
장림사업소	8.19	448	5.94	149	8.87
녹산사업소	6.85	328	57.99	269	156.18
수영하수병합처리시설	3.84	805	99.93	19	18.66
사하음식물쓰레기 재활용센터	4.74	4980	99.36	29	29.15
반여농산물도매시장	4.30	931	99.79	27	26.61
생곡음식물쓰레기자원시설	7.96	2970	8.90	92	8.19
(주)삼득산업	4.22	1822	99.82	16	15.97
평균	6.24	1255.75	57.02	111	38.52

(출처:2008대한환경공학회 추계학술연구발표회 논문요약집, P.143 요약 및 추가)

표 4. 황화수소 예상 발생 원단위

시 설 명	슬러지 발생량 (m ³ /d)	슬러지 발생량 (ton/d)	슬러지 밀도 (kg/m ³)	시료내 총 황화수소 농도 (mg/kg)	일평균 총 황화수소 예측 발생량(mg/d)	슬러지의 pH가 5일때 총황화수소 예측발생량 (mg/d)	슬러지의 pH가 3일때 총황화수소 예측발생량 (mg/d)
수영사업소	153	-	1050	9.77	1,569,550.5	12,247,956.0	12,370,050.0
남부사업소	87	-	1054	30.34	2,782,117.3	29,052,677.3	29,340,609.1
중앙사업소	14	-	1061	81.50	1,210,601.0	1,572,890.1	1,589,229.5
장림사업소	170	-	1080	8.87	1,628,532.0	27,081,000.0	27,354,564.0
녹산사업소	16	-	1036	156.18	2,588,839.7	4,413,857.3	4,458,446.7
하수처리장평균	88	-	1056	57.33	1,955,928.1	14,873,676.1	15,022,579.86
수영하수 병합시설	-	80	-	18.66	1,492,524.6	1,504,000.0	1,520,000.0
사하 음식물쓰레기 재활용센터	-	43	-	29.15	1,253,520.4	1,232,380.0	1,247,000.0
반여농산물 도매시장	-	13	-	26.61	345,988.8	347,230.0	351,000.0
생곡 음식물 쓰레기 자원화시설	-	78	-	8.19	638,807.5	7,096,440.0	7,176,000.0
(주)삼득산업	-	157	-	15.97	2,507,428.2	2,485,310.0	2,512,000.0
음식물쓰레기 처리시설평균	-	74.2	-	19.72	1,247,653.9	2,533,072.0	2,561,200.0
총계	440	214			16,017,910.0	87,033,740.7	87,918,899.3

(출처: 2008대한환경공학회 추계학술연구발표회 논문요약집, P.143 일부 발췌 및 추가)

내었고, 휘발분 17.7%, 고정탄소0.7%, 회분이 7.2% 으로 나타났다.

- (2) 부산시 5개 하수처리장 탈수슬러지에 대한 원소분석결과 탄소의 평균함량이 30.7%로 가장 높았고 황성분은 약 2.2%정도 함유하고 있었다. 총 발열량(고위발열량, HHV) 분석결과 평균발열량이 3,131cal/g이었지만 슬러지의 수분함량이 74.5%로 상당히 높기 때문에 수분 증발열을 뺀 실제로 효용되는 연료의 발열량인 저위발열량(LHV)은 평균 79.4cal/g로 상당히 낮았고 이에 따라 소각 등의 처리 시에는 건조와 같은 전처리가 추가로 필요할 것으로 예상된다.
- (3) 부산시 5개 하수처리장 탈수슬러지에 대한 회재조성 성분(XRF) 분석결과 실리카(SiO₂)성분이 23.17%로 가장 높았으며 Cr, Pb, Cu, Fe, Zn과 같은 중금속 물질이 일부 포함되었음을 알 수 있었으며 특히 장림 하수처리장의 슬러지에 중금속 성분이 다량 함유되어 있음을 알 수 있었다.
- (4) 부산시 10개 환경기초시설에 대한 황화물 농도 측정결과 5개 하수처리장의 탈수슬러지케익 중 남부사업소가 320mg/kg으로 가장 높았으며 대체로 음식물처리시설의 폐기물 평균농도 37mg/kg보다 하수슬러지의 평균 황화물농도가 184mg/kg로 약 5배 정도 높게 나타났다.
- (5) 이온화 분율을 이용해 황화물중의 황화수소 비율을 측정해 황화수소의 농도를 계산한 결과 하수슬러지 내

의 황화물 중 H₂S의 비율은 평균 32.5%, 황화수소평균 농도는 57.3mg/kg이며, 음식물 쓰레기 처리시설의 경우 H₂S 비율이 평균 81.6%, 황화수소평균농도는 19.7 mg/kg이었다.

- (6) 부산시 총 10개 환경기초시설 폐기물에서의 황화수소 발생원단위 산정 결과 16,017,910.0mg/d로 예측되었고 폐기물의 pH가 5 또는 3으로 낮아질 경우 이보다 약5.4배 많은 87,033,740.7mg/d 와 87,918,899.3mg/d로 예측되었다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2008-3206)의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 김경숙, 박용남, 정재춘 (1999), 하수슬러지의 자원화 기술평가 및 정책방안, *유기성자원학회지*, Vol. 7, No. 1, pp. 79~91.
2. 대한환경공학회 (2008), 추계 학술연구발표회 논문요약집, pp. 143.
3. 박재현, 류승민, 이승용, 한근희, 장동순, 진경태 (2001), 하수슬러지의 유동층 소각 특성, *공업화학* 전망, Vol. 4, No. 4, pp. 44~52.
4. 서울지역환경기술개발센터 (2006), *하수슬러지 건조도에 따른*

- 자가착화 특성연구, 서울지역환경 기술개발센터, pp. 15~20.
5. 이태운, 이준기, 김재진 (2008), 하수슬러지의 효율적인 처리를 위한 물리화학적 특성 분석, *학술발표회 논문집*, 한국지반환경공학회, pp. 415~419.
 6. 전라북도 보건환경연구원 (2007), *환경기초시설 악취 저감 방안 연구*, 전라북도 보건환경연구원, pp. 12~13, 149~151, 165~174.
 7. 정재은, 송복주, 정승렬 (2003), 음식물쓰레기 처리설비에서 발생하는 악취성분 분석 및 적정 처리방안 연구(II), *부산광역시 보건환경연구원보*, Vol. 13, No. 2, pp. 17~47.
 8. 조백근 (2005), *경남지역 음식물쓰레기 발생 특성에 관한 연구*, 석사학위논문, 진주산업대학교, pp. 27~29.
 9. 해양경찰청 (2005), *'05년 폐기물 해양투기 현황 및 '06년 폐기물 해양투기 억제대책*, 해양경찰청, pp. 1~10.
 10. 해양수산부 (2006), *친환경적 투기해역관리를 위한 범정부적 육상폐기물 해양투기 종합대책*, 해양수산부, pp. 1~12.
 11. 환경부 (2001), *악취물질 발생원 관리방안 개선을 위한 조사 연구*, 환경부, pp. 317~336.
 12. 환경부 (2007a), *'06년 악취 민원 실태분석 및 '07년 악취 관리방향*, 환경부, pp. 1~6.
 13. 환경부 (2007b), *2007 환경백서*, 환경부, pp. 611~620.
 14. 환경부 (2007c), *2007 환경통계연감*, 환경부, pp. 492.
 15. Maria Csuros (1997), *Environmental Sampling and Analysis: Lab Manual*, Lewis Publishing Company, pp. 295~311.
 16. Vernon L. Snoeyink, David Jenkins (1980), *Water Chemistry*, John Wiley & Sons, pp. 134~135.

(접수일: 2008. 9. 9 심사일: 2008. 10. 8 심사완료일: 2009. 1. 5)