

하수슬러지 중 중금속 및 PAHs의 함량 분석

박정민 · 김민정[†] · 김진필 · 이상보 · 권오상 · 이상학¹

국립환경과학원 배출시설연구과, ¹경북대학교 화학과

Concentration of Heavy Metals and PAHs in Sewage Sludge

Jung-Min Park, Min-Jung Kim[†], Jin-Pil Kim, Sang-Bo Lee,
Oh-Sang Kwon, and Sang-Hak Lee¹

Emission Sources Research Division, National Institute of Environmental Research

¹*Department of Chemistry, Kyungbuk National University*

Although the production of sewage sludge increases every year, its proper treatment has only been recently raised as a new issue. This is because current landfill and ocean dumping arrangements are expected to suffer from proper management in the future. The Korean Ministry of the Environment (KMOE) plans to diversify its processing facilities and expand its processing systems by 2011, with the purpose of processing all produced sludge on land. This study reviews the characteristics of PAHs and heavy metals in sewage sludge. The contents of heavy metals in sludge across five facilities decreased on the order of: copper > zinc > chrome > nickel > cadmium > mercury. In terms of heavy metal content in sewage sludge, the sludge in facilities other than D with industrial water waste, was examined in order to satisfy the ocean contamination standard and fertilizer specifications. The results of the inspections of 16 PAHs showed that the total PAHs content in sewage sludge averaged 6.10 mg/kg, with a high content in the sludge in city areas relative to industrial wastewater. This can be explained by the treatment of PAHs in wastewater treatment facilities, while it is not the case for household wastewater, rainwater, and road runoff water.

Key words : sewage sludge, heavy metals, PAHs

1. 서 론

2004년 말 기준 우리나라 총 인구 중 공공하수종말 처리시설(마을하수도 포함) 및 폐수종말처리시설을 통해 처리되는 하수처리구역 내 하수처리인구 비율로 산정한 하수도 보급률은 81.4%이다. 전국에 가동 중인 하수종말처리시설은 268개소, 시설용량은 21,534,745톤/일, 마을하수도는 1,153개소, 시설용량은 83,034톤/일이다. 이러한 하수종말처리장의 증설과 확충은 결과적으로 최종 산물인 하수슬러지의 증가를 초래한다. 2004년 전국 268개 하수종말처리시설에서 발생한 하수슬러지는 2,426,070톤/년으로 이는 2001년(1,903,840톤/년)에 비해 27% 증가한 양이다. 향후로도 처리용량 증가와

함께 발생량도 계속 증가하리라 예상되어진다(환경부 2004 하수도 통계). 전 세계적으로도 하수 처리시설의 증가로 슬러지량이 증가하고 있는 실정이다. EU국가에서 매년 약 8백만톤의 슬러지가 발생하고 있으며, 미국의 경우도 연간 약 620만톤의 건조슬러지가 발생한다(Marmo, 2005).

이러한 슬러지의 기본적인 처리방법은 매립, 소각, 해양배출, 재활용 등이 있다(Villar *et al.*, 2006). 우리나라의 경우, 한국하수처리통계에 의하면 2004년 기준 268개 하수종말처리시설에서 발생한 하수슬러지를 재활용 239,085톤(9.8%), 육상매립 34,295톤(1.4%), 소각 283,356톤(11.7%), 해양배출 1,869,334톤(77.1%)의 방법으로 처리하였다. 그러나 2012년부터 하수슬러지의

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: m3j2kk@me.go.kr

해양투기가 전면적으로 금지됨에 따라 육상처리로의 전환이 필요하나, 하수슬러지의 육상처리와 관련하여 법적, 기술적 문제가 존재한다. 유럽연합에서는 1999년 1월부터 이들 폐기물에 대한 해양투기를 금지하고 있다. 미국과 유럽의 경우 하수슬러지의 재활용을 통한 자원화 사업이 꾸준히 진행되어 왔으나 우리나라는 관련 제도 및 기술적 문제 등의 제반여건에 따라 그간 하수슬러지의 재활용이 부진하였다. 외국에서 많이 적용하고 있는 하수슬러지의 비료 또는 퇴비화는 국내 비료관리법령으로 도시지역 하수슬러지의 퇴비화를 원칙적으로 금지하고 있어 재활용에 큰 걸림돌로 작용하고 있다. 이러한 하수슬러지 처리의 문제를 해결하기 위하여 환경부에서는 “유기성오니종합처리대책(2006.5)”을 세우고 2011년까지 발생하는 모든 슬러지를 육상에서 처리하는 것을 목표로 처리시설의 다변화와 처리시스템의 확충 등을 통하여 재활용 처리를 대폭 확대할 계획이다. 이 계획에 의하면, 하수슬러지 소각처리율을 2011년에는 발생량의 30%로 전망하고 있다.

하수슬러지에 대한 연구는 영국을 중심으로 한 유럽에서 많은 연구를 하였다. 특히 현재 하수슬러지를 퇴비로 활용하고 있는 영국에서는 하수슬러지 중 PAHs의 잔류량, 생화학적 분해작용, 토양을 통한 식물체로의 이동 등에 관한 매우 광범위한 연구가 수행되었다 (Villar *et al.*, 2006). 유럽대부분의 국가에서는 슬러지 재이용률이 해마다 증가되는 것으로 나타났다 (Oleszczuk *et al.*, 2006). 그런데 하수슬러지에는 여러 가지 중금속과 유기오염물질이 포함되어 있고 이것은 인간에 해로운 독성, 발암성, 돌연변이 등 독특한 특성으로 나타낼 가능성이 있다(Masclat *et al.*, 1986).

따라서 본 연구에서는 국내 5개 하수처리장에서 발생하는 슬러지 중에 포함되어 있는 중금속류와 다환방향족탄화수소류(PAHs, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons)의 함량에 대해 비교·검토하였다. 이 결과는 하수슬러지의 퇴비화 또는 매립을 위한 유용한 자료가 되리라 판단된다.

2. 실험방법

2.1. 시료채취장소 및 시료채취

하수슬러지는 5개의 하수처리장으로부터 채취하였으며 각 하수처리장의 시설용량 등 특징은 Table 1에 나타내었다. A와 B시설은 대도시 지역의 생활하수가 유입되어 처리되며 C는 농촌지역과 중소도시 지역의 생활하수와 일부 분뇨가 유입되어 처리된다. D시설에서는 생활계 하수가 11.0만톤/일, 산업폐수가 16.2만톤/일 유입되어 처리되고. E시설은 농촌지역과 소도시의 생활하수가 처리된다.

시료는 각 하수처리장에서 채취하여 비닐팩으로 봉한 후 4°C의 냉장고에 보관하면서 분석시료로 사용하였다.

2.2. 삼성분 분석

하수슬러지의 삼성분(수분, 가연분, 불연분)을 측정하기 위해 각 시설의 반입슬러지 저장조의 슬러지를 채취하였다. 공기와 접촉되지 않도록 밀봉하여 냉암소에 보관하면서 수분의 휘발을 최소화하기 위해 48시간 이내에 측정을 하였다. 삼성분의 측정은 먼저 도가니를 105±5°C에서 건조시켜 항량이 되도록 한 다음 무게를 측정하였다. 그 다음 일정량의 하수슬러지를 취하여 다시 무게를 측정하고 시료가 담긴 도가니를 건조기에서 건조(105°C, 4시간)하였다. 4시간 경과 후 황산테시케이터에서 항량으로 방냉하여 무게를 측정한다. 무게 측정 후 전기로에서 600±25°C에서 25% 질산암모늄을 넣어 시료를 적셔 3시간 강열하고 황산테시케이터에서 방냉한 다음 각각의 감량을 측정하여 시료의 조성을 수분, 회분, 가연분 등 삼성분의 백분율로 산정하였다(손지환, 2006).

2.3. 중금속 분석

하수슬러지 중 중금속 함량실험은 Cr, Cd, Ni, Cu,

Table 1. Characterization of wastewater treatment plants

Wastewater treatment plant	Capacity (×10 ⁴ m ³ /day)	Secondary treatment	Inlet flow (×10 ⁴ m ³ /day)	Amount of sludge (ton/day)	Population range (×10 ⁴)
A	100	Activated sludge	169.0	613	>100
B	200	Activated sludge	86.6	285	>100
C	28	Activated sludge	24	125	50 - 100
D	38.5	Activated sludge	27.2	259.5	50 - 100
E	11.4	Activated sludge	11.4	33	< 50

Pb, Zn, Hg, As 등 8개 항목에 대해서 실시하였다. 하수슬러지를 5 g 취하여 킬달플라스크에 넣고 여기에 질산 15 mL와 염산(1+1) 70 mL, 유리구 4~5개를 넣은 다음 서서히 가열하여 액량이 약 5~10 mL가 될 때까지 증발 농축하였다. 이를 방냉한 후 질산 5 mL와 과염소산 10 mL를 넣고 가열을 계속하여, 과염소산이 분해되어 백연이 발생하기 시작하면 가열을 중지하였다. 이 때 유기물의 분해가 완전히 끝나지 않아 액이 맑지 않을 때에는 다시 질산 5 mL를 넣고 가열을 반복하였다. 그 다음 분해가 끝나면 방냉하고 물 50 mL를 넣어 서서히 끓이면서 질소산화물 및 유리염소를 완전히 제거하였다. 여과 후 여지(Whatman 40)를 물로 2~3회 씻어준 다음 여액과 씻은 액을 합하여 정확히 100 mL로 맞추어 주었다. 이 액에 대해 Hg은 수은분석기(Mercury instruments, AULA-254, 수은분석기)로 Ni 등 7개 중금속류는 AA(Varian, Spectra AA, 원자흡수분광계)로 분석하였다. 중금속 정량을 위해 폐기물공정시험법의 각 항목별, 정량범위의 하한을 최저 농도로 해서 검량선을 작성하였다. 검량선의 R²은 0.997 이상이었다. 수은의 경우는 0.1, 0.5, 1, 5, 10 µg/L의 표준용액으로 검량선을 작성하였으며 R²은 0.999이었다.

2.4. PAHs 분석

PAHs의 분석은 US EPA의 SW-864분석법에 준하여 분석하였다. 건조된 하수슬러지 5 g을 취하여Dichloro-

Table 2. GC-MSD conditions to analyze PAHs

Parameter	Condition
GC Model	HP 6890
Column	DB-5MS (60 m×0.32 mm×0.25 µm)
Inj. Temp	280°C
Inj. Mode	splitless/split(closed 3min)
Oven Temp.	50°C to 100°C at 20 °C/min, then 310°C (4 min) at 3 °C/min
MS model	HP 5973
Ionization Mode	EI
Ionization Energy	70 eV
MS Source Temp.	230°C
Ion Mode	SIM

methane:Hexane 1:1을 사용하여 16시간 Soxhlet 추출하여 사용하였다. 시료의 정제를 위해 185°C에서 16시간 이상 가열하여 활성화시킨 실리카겔 4g을 Pentane을 용매로 하여 슬러리 상태로 충전하였다. 추출시료를 5 mL로 농축 mass up하여 컬럼에 로딩하고 Pentane과 Dichloromethane (v:v=6:4) 혼합용매를 이용하여 최종 용출하였다. 이렇게 정제한 시료를 다시 회전 감압 농축기와 질소 농축기를 사용하여 최종 시료의 부피를 1 mL가 되도록 농축하고 Internal Standards (Naphthalene-d₈, Phenanthrene-d₁₀, Chrysene-d₁₂, Perylene-d₁₂)의 총량이 0.5 µg이 되도록 첨가하였다. 전처리가 완료된 시료의 분석은 미국 환경보호청(US EPA)의 우선감시물질목록에 포함된 16가지 PAHs

Table 3. Selected ion group of SIM for PAHs analysis and MDL

Group	Start time	Compounds	MDL (µg/L)	Selected Ions, m/z
1	11 min	Naphthalene	0.32	76 83 89 128 152 154 166
		Acenaphthylene	0.31	
		Acenaphthene	0.03	
		Fluorene	0.08	
2	30 min	Phenanthrene	0.08	89 176 178
		Anthracene	0.11	
3	40 min	Fluoranthene	0.17	101 113 114 200 202 226 228
		Pyrene	0.03	
		Benz[a]anthracene	0.24	
		Chrysene	0.61	
4	60 min	Benzo[b]fluoranthene	0.37	126 138 250 252 276 278
		Benzo[k]fluoranthene	0.08	
		Benzo[a]pyrene	0.72	
		Indeno[1,2,3-cd]pyrene	0.28	
		Dibenz[a,h]anthracene	0.24	
		Benzo[ghi]perylene	0.95	

(naphthalene, acenaphthylene, acenaphthene, fluorene, phenanthrene, anthracene, fluoroanthene, pyrene, benzo(a)anthracene, chrysene, benzo(b)fluoroanthene, benzo(k)fluoroanthene, benzo(a)pyrene, indeno(1,2,3-cd)pyrene, dibenzo(a,h)anthracene, benzo(g,h,i)perylene)를 대상으로 Table 2의 조건으로 GC/MSD를 이용하여 분석하였다(Helaleh *et al.*, 2005). GC/MSD 분석시에 Group을 4개로 나누어 SIM mode로 분석을 하였다. 분석방법의 검출한계, 표준편차, 회수율을 검토하기 위해 2 µg/L 표준용액을 8개 준비하여 전처리 후 측정하였다. MDL은 측정값의 표준편차에 3.14를 곱하여 산출하였다(Table 3). 측정결과, 내부표준법을 이용한 기지농도에 대한 회수율은 87.5~110%로 양호하였으며 표준편차는 Benzo[ghi]perylene, Chrysene이 각각 14.3%, 11.9%로 다소 높게 나타났으나 다른 14개 항목은 10% 이내의 양호한 값을 보였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 하수슬러지의 물리·화학적 특성

하수슬러지를 소각, 퇴비화에 의하여 처리할 경우 함수율 및 유기물 함량이 중요한 변수로 작용한다. 소각에서는 발열량에 영향을 미치며 퇴비화에서는 미생물이 이용 가능한 영양원에 영향을 준다. 발생하는 하수슬러지의 함수율은 탈수기의 효율에 의하여 결정되며, 최근에 몇몇 하수처리장의 경우 가압탈수기가 고압탈수기로 전환되면서 탈수효율이 증가하고 있는 실정이다(환경관리공단, 2005).

침전지로부터 배출된 슬러지가 소화·농축과정을 거쳐 탈수기(belt press)에 의해 탈수된 후 배출되어진 하수슬러지의 수분함량은 73.5~84.1% 범위였다. 공단 폐수가 함유된 D시설의 슬러지가 수분함량이 가장 낮은 것으로 조사되었다. 유기물함량은 평균 13.2%로 나타났고 D시설의 유기물함량이 21.5%로 가장 높은 것으로 조사되었다.

가연성 성분인 유기물질 함량이 높을수록 탈수효율이 낮아 슬러지의 함수율이 높음을 알 수 있었다. 대체로 하수슬러지의 경우 유기물질 성분이 다량 포함되어 수분함량이 높은 편이지만 성상이 균일한 미세입자로 되어 있다. 따라서 유동상 소각처리방법과 같이 고온의 공기와 잘 접촉시킬 경우 미세한 입자로 건조되어 부유되므로 완전 소각될 수 있는 성상을 나타내고 있다. 하수슬러지의 함수율과 유기물함량은 계절과 배출원(대

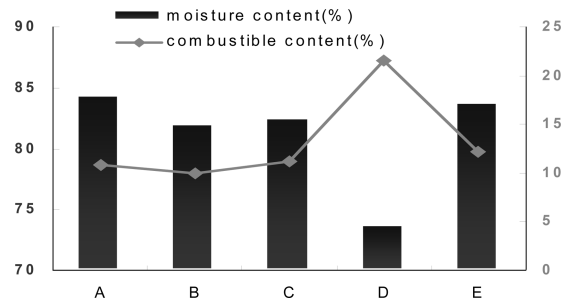


Fig. 1. Correlation between moisture content and combustible content

도시, 중·소도시, 농촌, 산업단지 등)에 따라 다소 차이가 있다. 그러나 전체적으로 함수율 평균 67.2~85.8%, 유기물함량 평균 4.3~12%로 5개 시설의 하수슬러지가 비슷한 값을 나타내었다.

3.2. 중금속 결과

슬러지에 포함된 중금속 성분은 배출원 종류에 따라 차이가 있고 유해 중금속이 다량 포함되어 있을 경우 매립, 퇴비화, 농지 직접살포로 처리할 경우 토양에 잔류하여 토양, 지하수 및 지표수를 오염시킨다(Babel *et al.*, 2005). 또한 슬러지 소각 시 저비점 중금속은 기화되어 대기로 배출되어 대기오염을 유발하게 된다(Lee WMG *et al.*, 1993) 따라서 고비점 중금속은 소각 잔재물로 그대로 배출되므로 매립시킬 경우 침출수로 용출된다. 5개 시설의 슬러지에 대하여 Hg 등 8개 중금속에 대하여 조사한 결과와 중금속류의 해양오염물질 배출기준을 Table 4에 나타내었다. 2004년 말 기준 우리나라에서 발생하는 하수슬러지의 77.1%(1,869,334톤/년)가 해양으로 투기되고 있다. 런던협약의 '96개정 의정서 제 2조 해양투기 되는 물질에 의해 발생하는 오염을 방지하고 감소시키기 위해 우리나라에서도 해양배출 규제항목을 두고 있다. 그러나 제 1기준 초과 슬러지는 '08년 8월, 제 2기준 초과는 '10년 말 이후로는 투기가 금지된다. 해양오염물질 배출기준에 의해 오염물질의 농도를 분석할 시에 기존에는 폐기물관리법에 준하여 용출실험을 이용하였다. 그러나 용출실험방법이 실제 유해물질의 농도를 파악하는 수단으로서 미비하다는 점에서 함량실험(mg/kg, d.w)으로 전환시켰다. 해양배출기준 항목(PCB-28 등 28종) 중 중금속 항목은 수은 등 8개 항목(니켈은 기준이 없으며, 크롬이 총크롬과 6가크롬으로 나누어져 있음)이다. E시설은 하수처리장에서 발생하는 슬러지 전량이 소각장으로 보내어

Table 4. Heavy metals content (dry weight) in sewage sludge unit : mg/kg, d.w

	Cr	Cd	Ni	Cu	Pb	Zn	Hg	As
First Standard	1,850	20	-	2,000	1,100	9,000	5	145
Second Standard	370	4	-	400	220	1,800	1	29
A	35.5	3.33	20.4	200	391	358	4.13	ND
B	1075	1.73	50.8	240	62.51	1,796	2.41	ND
C	6.96	1.00	4.29	547	13.51	585	0.20	ND
D	3225	5.81	88.6	7,250	30.5	4,099	2.31	ND
E	9.61	2.07	9.81	61.7	31.6	565	0.06	ND
Max.	3225	5.81	88.6	7,250	391	4,099	4.13	-
Min.	6.96	1.00	4.29	61.7	13.5	358	0.06	-
Avg.	96.3	2.79	34.8	1,660	106	1,481	1.82	-

지고, 이를 제외한 4개 시설은 하수처리장에서 발생하는 슬러지 전체 중 일부가 소각장으로 보내지며 나머지는 해양투기하고 있는 실정이다. 슬러지 건중량 1kg 당 크롬은 평균 96.3mg으로 공단폐수가 유입되는 D시설의 슬러지가 322mg으로 가장 많은 것으로 조사되었다. 중소규모의 도시하수와 농촌지역의 하수가 유입되는 C와 E시설의 슬러지에서는 10mg 미만으로 다른 슬러지에 비해 낮게 조사되었다. 전체 소각시설의 크롬 함유량은 해양배출기준 제 2기준을 만족하였다. 카드뮴의 경우는 제 2기준이 4mg/kg인데 D시설의 슬러지가 5.81mg/kg으로 기준을 상회하는 것으로 조사되었으며, 나머지 4개 시설의 슬러지는 제 2기준을 만족하는 수준으로 나타났다. 니켈은 해양배출기준에는 없으나 4.28~88.6mg/kg의 범위를 나타내었다. D시설의 구리와 아연 함유량은 각각 7,250와 4,099mg/kg로 가장 낮은 함유량을 나타낸 다른 시설의 슬러지에 비해 12배 정도 많은 것으로 조사되었다. 구리의 경우 제2기준보다 3.5배 높은 함유량을 보였다. 중금속 항목별 평균 함유량은 구리>아연>납>크롬>니켈>카드뮴>수은 순이었으며, 비소는 5개 시설 모두에서 검출되지 않았다.

최근에 관심이 높아지는 슬러지 처리방법으로써 토양개량제, 퇴비화의 자원화가 있고 모든 국가에서 슬러지의 자원화 및 효율적인 이용을 확대하고 있는 것에 반해, 우리나라는 상당히 소극적으로 대처하고 있다. 농지에 대한 하수슬러지 등의 이용에 대해서는 농림부의 부산물비료 공정규격에 의해 규제되어진다. 부산물비료에서 슬러지는 퇴비기준을 적용하며, 이것은 최종적으로 생산된 퇴비에 대한 기준이다. 외국에서는 건조기준을 사용하고 있으나 우리나라에서는 습윤기준을 사용하고 있다. 5개 시설의 하수슬러지의 수분량을 고려하여 수분을 포함한 하수슬러지 1kg 중의 중금속 함유량과 부산물비료의 규격을 Table 5에 나타내었다. 공단폐수 슬러지를 포함하는 C와 D시설의 Cu가 부산물비료 기준을 초과하고 나머지 중금속류는 대부분 규격을 만족하지만 폐기물이라는 이유로 읍면단위에서 발생하는 슬러지가 조건부로 퇴비화되는 것을 제외하고는 실용화되고 있지 않은 실정이다.

3.3. 하수슬러지 중 PAHs 함량

일반적으로 도시 하수에 포함된 PAHs 중 80% 이상

Table 5. Heavy metals content(wet weight) in sewage sludge unit : mg/kg, w.w

	Cr	Cd	Ni	Cu	Pb	Zn	Hg	As
Standard	300	5	50	300	150	900	2	50
A	10.29	0.97	5.92	58.11	113.30	103.92	0.65	ND
B	19.51	0.32	9.25	43.75	11.39	327.19	0.44	ND
C	4.62	0.66	2.84	363.18	8.96	388.47	0.13	ND
D	57.11	1.03	15.70	1,285.33	5.40	726.75	0.41	ND
E	5.44	1.17	5.55	34.88	17.87	319.73	0.04	ND
Max.	57.11	1.17	15.70	1,285.33	113.30	726.75	0.65	-
Min.	4.62	0.32	2.84	34.88	5.40	103.92	0.04	-
Avg.	19.39	0.83	7.85	357.05	31.38	373.21	0.33	-

은 유기물질의 불완전 연소에 의해 발생한다. 또한, 유기물의 불완전 연소는 산불이나 화산활동 등에 의한 유기물 분해로 발생하거나 디젤이나 가솔린 등의 석유화학제품의 연소과정, 알루미늄이나 carbon black 생산 그리고 원유의 정제과정 등에서도 생긴다. 따라서 PAHs는 산업폐기물 뿐 아니라 가정 하수, 빗물, 공기 중의 물질, 도로의 유출수 등에 포함되어 있다(원양수 등, 1997).

하수슬러지 중 총 PAHs 함량은 평균 6.10 mg/kg이었으며, 광역시 규모인 A시설은 5.76 mg/kg, B소각은 8.37 mg/kg이었으며, 소도시 규모인 C시설의 슬러지는 1.84 mg/kg이었으나 비슷한 규모의 E시설은 12.3 mg/kg으로 조사 대상 하수처리장 슬러지 중 가장 높은 PAHs 함유량을 나타내었다. 산업폐수가 유입되어 처리된 D시설의 중금속 함유량이 다른 슬러지에 비해 높았던 것과 달리 총 PAHs 함유량은 광역시규모의 슬러지에 비해 소도시인 D시설의 슬러지에서 낮은 함유량을 나타냈다. PAHs가 주로 화석연료의 사용량과 밀접하게 관련되어 있고 화석연료의 사용량은 도시규모와 비례한다(남재작 등, 2002)고 하였는데 E시설의 총 PAHs 함량이 다른 시설에 비해 높은 것에 대해서는 연구가 필요하다고 판단된다.

Naphthalene은 지역에 상관없이 비슷한 함유량을 나타내었고 독성에 있어서 중요한 의미를 갖는 5~6 ring

의 PAHs 분포에 있어서는 소도시인 C시설의 슬러지에 비해 광역시 규모의 A, B시설의 슬러지가 4~5배 정도 높은 함유량을 보였다. Table 7에 나타난 외국의 하수 슬러지 중 16 PAHs 평균 함량과 비교해 보면 소도시인 C시설의 슬러지는 스페인과 비슷하였고 광역시 규모인 A, B시설의 슬러지는 독일의 평균 16 PAHs 함량과 비슷한 수준임을 알 수 있었다.

해양오염물질 배출기준에는 naphthalene 등 8개의 PAHs(naphthalene:제2기준-0.8, 제1기준-4 mg/kg, phenanthrene:제2기준-0.8, 제1기준-5 mg/kg, anthracene:제2기준-0.8, 제1기준-4 mg/kg,, benzo(a)pyrene:제2기준-0.9, 제1기준-4.5 mg/kg, benzo(a)fluoranthene:제2기준-0.8, 제1기준-4 mg/kg, benzo(a)anthracene:제2기준-1, 제1기준-5 mg/kg, fluoranthene:제2기준-2.5, 제1기준-10 kg/kg)에 대한 기준이 설정되어

Table 7. Comparison of Σ 16 PAHs concentration in measured in this study with those in other countries (이강영 등, 2005)

Countries	Average (mg/kg)	Range (mg/kg)
Korea (this study)	6.1	1.8~12.2
Canada	11.8	2.2~79
Germany	7.1	2~15
Switzerland	-	1.7~2.2
Spain	3.0	1.1~5.5

Table 6. PAHs composition in sewage sludge

		unit : mg/kg, d.w				
		A	B	C	D	E
2 ring	Naphthalene	0.12	0.21	0.17	0.11	0.24
	Acenaphthylene	nd	nd	nd	nd	nd
3 ring	Acenaphthene	0.01	0.01	0.01	0.03	0.09
	Fluorene	0.11	0.031	0.09	0.05	0.85
	Phenanthrene	1.11	0.91	0.53	0.13	0.08
	Anthracene	0.05	0.04	0.03	nd	0.98
4 ring	Fluoranthene	0.43	0.60	0.10	0.03	0.04
	Pyrene	0.81	1.46	0.21	0.27	nd
	Benzo(a)anthracene	0.51	0.93	0.06	0.08	0.01
	Chrysene	0.34	1.22	0.04	0.05	1.86
5 ring	Benzo(b)fluoranthene	0.51	0.32	0.06	0.65	2.32
	Benzo(k)fluoranthene	0.36	0.79	0.05	0.33	3.92
	Benzo(a)pyrene	0.86	0.11	0.07	nd	0.08
	Dibenz(a,h)anthracene	0.34	0.24	0.36	nd	0.17
6 ring	Indeno(1,2,3-cd)pyrene	0.02	0.11	nd	0.39	0.90
	Benzo(g,h,i)perylene	0.16	1.31	0.06	0.18	0.73
Σ 16 PAHs		5.76	8.37	1.84	2.30	12.3

nd: not detectable

있다. 그러나 부산물 비료규격에는 PAHs에 대한 기준이 설정되어 있지 않다. 조사대상 하수슬러지 중 제1기준을 초과하는 것은 없었으며 phenanthrene의 경우 A, B시설의 하수슬러지가 각각 1.11, 0.91 mg/kg으로 제2기준을 약간 상회하는 것으로 조사되었다.

4. 결 론

5개 하수처리장 슬러지에 함유되어 있는 중금속류와 다환방향족탄화수소의 함량을 조사하였다. 중금속류함유량을 조사한 결과 산업폐수가 함유된 D시설의 슬러지를 제외한 나머지 시설의 슬러지는 해양오염기준과 비료규격을 만족하는 것으로 조사되었다. 중금속 항목별 평균 함유량은 구리>아연>납>크롬>니켈>카드뮴>수은 순이었으며, 비소는 5개 시설 모두에서 검출되지 않았다.

하수슬러지 중 총 PAHs 함유량은 평균 6.10 mg/kg이었으며, 광역시 규모인 A시설은 5.76 mg/kg, B시설은 8.37 mg/kg이었고, 소도시 규모인 C시설의 슬러지는 1.84 mg/kg이었으나 비슷한 규모의 E시설은 12.3 mg/kg으로 조사 대상 슬러지 중 가장 높은 PAHs 함유량을 나타내었다. 산업폐수가 유입되어 처리된 D시설의 중금속 함유량이 다른 슬러지에 비해 높았던 것과 달리 총 PAHs 함유량은 도시지역의 슬러지에서 높은 함유량을 나타내었다. 또한 2012년부터 하수슬러지의 해양투기가 전면적으로 금지됨에 따라 하수슬러지의 육상처리와 관련하여 녹생토, 지렁이 사육, 경량골재 등에 하수슬러지를 이용하기 위해서는 기술적 문제뿐만 아니라 계속적으로 하수슬러지 중 유해물질에 대한 모니터링이 이루어져야 한다고 판단된다.

참고문헌

1. 이강영, 정창수, 김영일, 이현경, 홍기훈, 우리나라 하수 및 폐수처리 슬러지의 다환방향족탄화수소의 함량, *한*

2. 원양수, 이철희, 최성필, 하수슬러지 성분 및 소각 특성에 관한 연구, *한국폐기물학회지*, **1997**, 14, 43-53.
3. 남재작, 소규호, 박우균, 조남준, 이상학, 가스 크로마토그래피-이온트랩질량분석법을 이용한 하수슬러지 중 다환방향족탄화수소(PAHs) 함량 분석, *한국환경과학회지*, **2002**, 11, 367-373.
4. 환경관리공단, 하수슬러지 처리 및 자원화 방안, **2005**.
5. 환경부, 하수도통계, **2004**.
6. 손지환, 생활폐기물 열분해 용융공정에서 다이옥신 등 대기유해물질 거동, 한국의국어대학교 석사학위논문, **2006**, 41-42.
7. Oleszczuk P, Persistence of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sewage sludge-amended soil *Chemosphere* **2006**, 65, 1616-1626.
8. Masclat P, Mouvier G, Nikolaou K. Relative decay index and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Atmos Environ*, **1986**, 20, 439-46.
9. Babel S., del Mundo Dacera D., Heavy metal removal from contaminated sludge for land application: A review, *Waste Management*, **2005**, 26, 988-1004.
10. Villar P. et al., Temporal evolution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sludge from wastewater treatment plants: Comparison between PAHs and heavy metals *Chemosphere*, **2006**, 64, 535-541.
11. Marmo, L., Towards a revision of the sewage sludge directive 86/ 278/EEC. In: *Proceedings of the Conference on Researching the Sludge Directive*, October 30.31, Brussels, accessed June, **2005**.
12. Lee WMG, Yen SY, Chen JC. The relation between polycyclic aromatic hydrocarbons and organic carbon in fly ash from municipal incinerator. *J Environ Sci Health Part A. Environ Sci Eng Toxic Hazard Substance Control*, **1993**, 28, 1495-1506.
13. Helaleh M.I.H. et al., Validation of various extraction techniques for the quantitative analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in sewage sludges using gas chromatography-ion trap mass spectrometry *J. Chromatogr. A*, **2005**, 1083, 153-160.