

국내 하수오니에 대한 퇴비원료로의 활용성 검토

권순익* · 임동규 · 이상범 · 김계훈¹⁾ · 고문환

농업과학기술원, ¹⁾서울시립대학교

(2003년 3월 27일 접수, 2003년 5월 20일 수리)

Investigation of Sewage Sludge as Raw Compost Material in Korea

Soon-Ik Kwon*, Dong-Kyu Lim, Sang-Beom Lee, ¹⁾Kye-Hoon Kim, and Mun-Hwan Koh (National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon 441-707, ¹⁾The University of Seoul, Seoul 130-743, Korea)

ABSTRACT : The objective of this experiment was to investigate the possibility on agricultural use of municipal sewage sludge with respect to heavy metal contents in Korea. Metal contents (mg/kg) in 88 sludge samples were ranged from 0 to 54.3 for As, 1.7 to 197.3 for Cd, 7.3 to 2,854 for Cr, 87.4 to 5,730 for Cu, 129.3 to 10,289 for Mn, 20.1 to 2,057 for Ni, 7.6 to 197.5 for Pb, and 523.5 to 6,349 for Zn. Heavy metal contents of sludges were compared with the regulation on raw material for compost. All sludges produced from sewage treatment plants in metropolis (over a million in population) and large cities (500,000~1,000,000) were not compatible with the regulation. In addition, 95% of sludge from small and mid-size cities (100,000~500,000) and 93% from rural area (below 100,000) were not suitable. On the basis of Cd, Cu, Ni, and Zn contents, 41, 53, 47, and 89% of sludge samples were not compatible with the regulation on raw material for compost, respectively.

Key words: sewage sludge, heavy metal, nutrients, raw compost material.

서 론

산업의 발달과 도시화로 각종 폐기물 발생량의 증가와 더불어 하수처리량이 늘어나면서 하수종말처리장에서 남은 잔재물인 하수오니도 해마다 증가하여 2001년도에는 1,902천톤이 발생하였다¹⁾. 하수오니의 최종 처리는 재활용, 육상매립, 소각 및 해양투기 등이 있는데, 2001년을 기준으로 전체 처리량 1,897천톤 중에서 해양투기가 1,391천톤(73.3%)으로 가장 많았고, 다음이 육상매립 12.1%, 소각 7.3%, 재활용 6.2%, 기타 1.1% 순이었고, 미처분량(이월량)은 5천톤이었다. 우리나라의 하수오니는 하수도법과 폐기물관리법에 의해 관리되며 하수종말처리장에서 최종 배출되는 물질은 방류수와 오니로, 전자는 하수도법으로, 후자는 폐기물관리법으로 관리하고 있다. 하수오니의 처분과 관련해서는 육상매립과 소각은 폐기물관리법으로, 해양투기는 해양오염방지법으로 관리하고 있다. 하수오니의 매립은 매립지 부족과 침출수 및 악취 발생 등 2차 오염 문제가 있어, 수분 함량이 75% 이상인 오니에 대해서는

2001년부터 직매립이 금지되었고, 그에 따른 준비기간 등을 감안하여 2003년 7월로 시행이 유예된 상태이다. 이러한 원인으로 전체 하수오니의 육상매립비율은 2000년 25.2%에서 2001년 12.1%로 크게 감소하였다¹⁾. 하수오니의 소각처리 방법은 대도시권이나 중급속의 농도가 높은 지역에서 주로 검토되고 있는데, 최종 폐기물의 발생량을 줄일 수 있다는 장점이 있으나, 설비 및 운전비용이 높고 불완전연소로 인한 대기오염을 유발할 우려가 높은 것으로 알려져 있다. 하수오니의 해양투기는 1995년에 143천톤, 2001년에 1,391천톤으로 6년 동안 약 10배정도 증가하였다. 우리나라는 폐기물의 해양배출과 관련한 국제협약인 런던협약 96의정서²⁾에 따라 국내 관련제도의 합리적 개선계획을 추진하고 있다. 이에 따라 우리 정부는 의정서의 폐기물평가체제를 수용하기 위해 해양배출의 원칙, 하수오니의 이화학성, 생물적 특성 규명, 투기장 선정, 잠정 영향 평가, 감시 및 허가 등에 관한 내용을 검토하고 있으며, 96의정서가 발효되면 해양배출량의 감소가 불가피할 것으로 예상되고 있다.

우리나라의 비료관리법의 퇴비원료기준에 퇴비원료는 그 물질의 발생원에 따라 퇴비원료로 사용가능한 물질, 사전분석 검토 후 사용가능한 물질 및 사용불가능한 물질의 3가지로

*연락처:

Tel: +82-31-290-0208 Fax: +82-31-290-0277

E-mail: sikwon@rda.go.kr

구분되어 있다³⁾. 농립부산물이나 인축의 분뇨, 음식물쓰레기 및 식료품 등 제조업에서 발생하는 동식물성 잔재물 등에 대해서는 퇴비 원료로 사용이 가능하도록 지정하여 재활용을 적극 권장하고 있다. 그러나 식료품, 음료수, 담배 및 종이제조업에서 발생하는 폐수처리오니 및 읍면단위 농어촌지역 생활하수오니 등에 대해서는 비료가치가 인정되고 인축 및 농작물에 유해한 물질(중금속 및 유해화합물)이 포함되지 않음이 입증될 경우 분석결과와 사전 검토 후 퇴비원료로 사용이 가능하도록 지정되어 있다. 또한 도시 및 공단지역 폐수처리 오니나 조립, 금속, 화학, 석유, 광물, 전기, 세탁, 가죽제조 등에서 발생하는 부산물 및 폐수처리오니에 대해서는 퇴비로 농경지에 사용할 경우 인축 및 농작물에 유해할 수 있으므로 퇴비원료로 사용할 수 없도록 규정하고 있다. 도시지역에서 발생하는 하수오니는 발생원이 다양하고 많은 종류의 유해화합물을 함유하고 있으므로 이들에 대한 안전성이 입증되지 않는 한 농경지에 투입하기는 어려운 실정이다.

하수오니의 재활용에 관해서는 환경부의 유기성오니의 재활용에 관한 고시에 따라 부속도 등으로 재활용할 수 있으며, 비료관리법에서는 읍면단위 생활하수오니에 한해 사전 검토 후 퇴비원료로 사용하도록 법제화되어 있다. 이에 대해 환경관계 전문가들은 폐기물의 종류에 따라 퇴비원료로 사용가능한 원료, 사전 검토 후 사용가능한 원료 및 사용 불가능한 원료로 구분되어 있는 것을 원료에 따른 구분을 없애고 성분분석을 통해서 재활용 여부를 결정하도록 요구하고 있다.

유럽 등을 비롯한 선진국에서는 자원의 유한성을 이유로 하수오니에 대하여 농업적 재활용 등 다양한 형태의 자원화를 적극적으로 추진하고 있다^{4,5)}. 오니를 퇴비로 재활용하는 것은 자원재순환 측면에서 바람직하다고 볼 수 있으나, 선진국의 사례처럼 인체나 환경에 유해한 영향을 주지 않는 범위에서 엄격하게 관리할 필요가 있다.

하수오니의 농경지에 대한 재활용 기준들은 네덜란드 등 유럽 몇몇 나라의 기준과 미국의 기준이 현저하게 다르다. 네덜란드와 같이 국토가 협소하고 유기물의 과부하가 우려되는 나라에서는 퇴비를 장기간 사용하여도 토양내에 유해물질의 집적이 일어나지 않도록 농도 및 사용량을 엄격하게 관리하고 있다. 이에 반해 미국과 같이 국토가 넓은 나라에서는 유럽에서 시행하고 있는 Net Balance와 달리 인간 및 환경에 유해한 영향을 미치지 않는 농도(No Observed Adverse Effect Level: NOAEL)를 기준으로 위해성평가(Risk Assessment)를 실시하여 유해물질의 농도 및 사용량을 설정하고 있다^{6,8)}.

자원의 재순환은 재활용에 따른 경제적인 이윤도 중요하지만 무엇보다도 인간의 건강과 환경에 유해하지 않아야 한다. 왜냐하면 폐기물에 의해 오염된 토양 및 환경을 복원하는 비용이 재활용에 따른 경제적 이익보다 훨씬 더 크기 때문이다. 또한 하수오니는 유기물 함량이 높고 각종 유기화합물 및 중금속 등 유해한 물질이 다량 함유되어 있으며, 실제로 하수오니의 장기연용 토양에서 작물 피해 및 유해물질의 식물체 내 축적 등의 문제가 발생하였다⁹⁾. 따라서 본 연구에서는 국

내에서 발생하는 하수오니의 이화학적 성분과 중금속 함량을 분석한 후 채취지역 및 퇴비원료 기준별로 비교하여 농업적 활용 가능성 및 문제점을 검토하였다.

재료 및 방법

우리나라에서 2001년에 가동된 전국 150개소의 하수처리장 중 82개소에서 88점의 하수오니를 채취하여 이화학적 및 중금속 함량을 분석하였다. 시료는 Fig. 1과 같이 하수처리장이 위치한 지역의 인구와 발생량을 고려하여 광역시로부터 12점, 대도시 9점, 중소도시 38점 및 농촌지역으로부터 29점을 채취하였다. 2001년 5~6월에 채취한 시료의 일부는 수분함량 및 유기물 측정에 사용하였고, 나머지는 건조시켜 마쇄한 후 플라스틱 용기에 넣어 냉장보관하면서 분석에 이용하였다.

유기물, 질소, 인산 및 칼리 등 비료성분과 As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb 및 Zn 등 중금속 성분은 비료의 품질검사방법 및 시료채취기준¹⁰⁾에 따라 분석하였다.

하수오니의 성상은 지역별, 처리방법별, 시기별 차이가 있을 수 있으나, 도시화 정도와 하수오니의 유해물질 함량과의 관계를 알아보기 위해 하수처리장이 위치한 지역의 인구를

Table 1. Classification of sewage sludge samples used in this study

Classification	Metropolis	Large cities	Small and mid-size cities	Rural area
Population	> 1,000,000	500,000~1,000,000	100,000~500,000	< 100,000
No. of samples	12	9	38	29

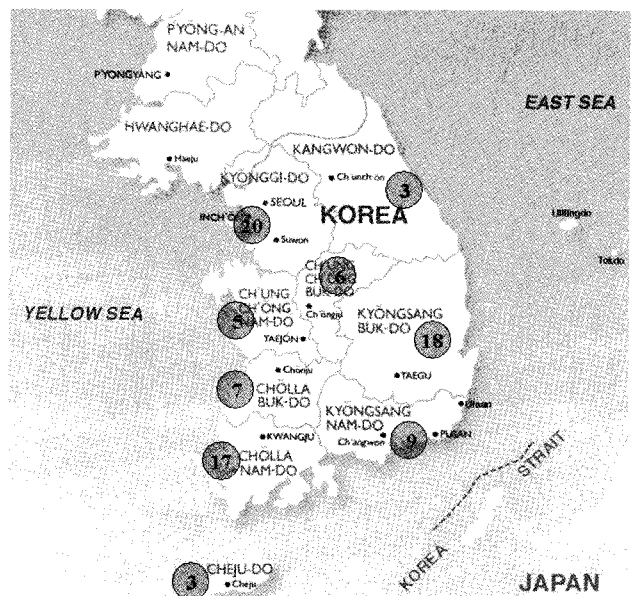


Fig. 1. Sampling area and number of sewage sludge samples used in this study.

기준으로 Table 1과 같이 인구 100만명 이상의 광역시, 50만~100만명의 대도시, 10만~50만명의 중소도시 및 10만명 이하의 소도시를 포함한 농촌지역으로 구분하여 현재의 퇴비 원료기준 및 외국의 기준과 비교하였다. 또한, 하수처리방법에 따른 비교를 위하여 현재 많이 쓰이는 방법인 표준활성슬러지법, 산화구법 및 회전원판법으로 구분하여 검토하였다.

결과 및 고찰

하수오니의 이화학적성

하수오니는 하·폐수를 처리하고 남은 최종 산물로 처리 과정에서 미생물에 의한 소화과정을 거치므로 다량의 유기물을 함유하고 있다. 토양에서의 유기물은 식물이 필요로 하는 양분의 공급, 토양 이화학적성의 개선, 토양중의 생물상과 그 활성의 유지 및 증진시키는 역할 등을 한다. 하수오니의 농경지 사용효과는 토양내 입단형성, 보비력 및 보수력의 증가 등 토양 물리성 개선에 효과가 있다고 보고되고 있다¹¹⁻¹⁶⁾. 하수오니의 이화학적성과 채취 지역별 농도 분포를 Table 2에 나타내었다. 하수오니의 유기물 함량은 건물기준으로 53.8~86.4%(평균 69.6%)였다. 비료공정규격의 퇴비원료 기준³⁾에는 유기물 함량이 60%이상으로 규정되어 있어 조사된 하수오니의 90%는 그 기준을 만족하였다. 인구 분포로 구분한 채취 지역별로 보면 광역시 및 대도시의 하수오니보다 중소도시 및 농촌지역에서 높은 유기물 함량을 보였다.

하수오니에는 다량의 질소와 인산 성분을 함유하고 있으며 작물재배에서 화학비료의 일정량을 대체할 수 있다고 보고 되어있다¹⁷⁻²²⁾. Smith²³⁾는 영국의 하수오니에는 건물기준으로 질소 3.8% 및 인(P) 2.2%를 함유하고 있으며, 매년 질소 20,000톤과 인산 11,000톤에 해당되는 양이 하수오니의 농경지 이용을 통하여 토양에 투입되는 것으로 추정하였고, 유럽 전체로 볼 때는 질소 91,000톤 및 인산 53,000톤에 해당하는 양이라고 하였다. 조사한 하수오니의 질소 평균함량은 5.0%로서 계분(5.1%)과 비슷하고 돈분(3.7%)이나 우분(2.1%)보다는 높았다²⁴⁾. 그러나 함량 분포에 있어서는 0.8~8.8%의 범위로 시료간의 함량 차이가 매우 크게 나타났는데, 이는 지역 및

처리방법에 의한 영향을 크게 받는 것으로 생각된다.

작물의 인산성분 필요량은 질소요구량의 10~25%에 불과 하지만²⁵⁾ 하수오니 중의 인산 함량은 질소의 절반 수준 이상을 함유하고 있다. 따라서 하수오니를 질소기준으로 농경지에 사용할 경우에는 인산은 작물의 필요량 이상이 공급되어 토양에 집적되게 된다. 조사한 하수오니의 인산 평균함량은 3.3%로서 돈분(6.0%)과 계분(4.8%)보다는 낮았지만 우분(2.8%)보다는 높았다²⁴⁾. 그러나 함량 분포에 있어서는 0.6~7.7%의 범위로 질소 성분처럼 시료간의 차이가 컸으며, 폐수나 하수오니에서 인산 함량이 높은 주 원인은 합성세제로 알려져 있다²⁶⁾. 유럽연합(EU)에서 지표수로 유입되는 인의 공급원은 50%가 농업활동, 41%는 각종 폐수(분뇨잔사로부터 24%, 합성세제 10%, 산업활동으로부터 7%), 그리고 9%는 자연 공급이라고 보고되어 있다²⁷⁾. 또한 처리공법의 발달로 폐수 및 하수처리 과정에서 인의 제거율이 높아져 방류수의 인 성분은 낮아지고, 상대적으로 오니중의 인산 성분은 높아질 수도 있다^{27,28)}. 채취 지역별 인산 함량은 도시지역이 농촌지역보다 높게 나타났는데, 이는 합성세제 등의 사용량 차이에 기인된 것으로 생각된다.

하수오니중의 칼리 성분은 상대적으로 낮아 대부분의 작물에서 필요로 하는 성분량에는 미치지 못하였다¹⁹⁾. 조사한 시료의 칼리 평균함량은 0.3%로서 가축분보다는 함량이 낮았고, 분뇨잔사와는 유사하였다. 함량 범위에 있어서도 0.1~0.8%로 하수오니의 농업적 활용시에는 칼리성분의 보충이 필요한 것으로 판단되었다.

하수오니의 성분중 특히 Fe과 Al은 다른 금속 성분들에 비해 함량이 높은데, 이는 폐수처리 공정에서 투입되는 응집제의 영향으로 생각된다.

하수오니의 중금속 함량

본 조사에서 분석한 하수오니의 중금속 함량은 Table 4와 같다. 비소는 비료공정규격의 퇴비원료기준에 건물기준으로 50 mg/kg 이하로 설정되어 있으며, 채취된 하수오니의 As 함량은 평균 4.6 mg/kg으로 낮은 편이었다. 함량 범위도 검출한계 이하에서 최고값이 54.3 mg/kg 이었고, 중앙값이 2.9

Table 2. Chemical composition of the sludge samples used in this study

(unit: g/kg DW)

Chemical composition	Mean	Standard deviation	Min.	Percentile					Max.
				10%	25%	Median	75%	90%	
OM	696	66	538	599	657	708	743	767	864
T-N	49.5	12.4	8.1	36.4	43.9	50.0	55.9	63.3	87.6
P ₂ O ₅	32.9	10.2	6.2	22.7	26.6	32.2	37.6	45.2	77.0
K ₂ O	3.1	1.3	0.7	1.6	2.3	2.8	3.7	4.5	7.6
CaO	11.3	5.4	4.3	7.6	8.8	10.8	12.6	14.3	53.6
MgO	4.5	1.3	2.4	3.2	3.7	4.3	5.1	5.8	10.5
Na ₂ O	0.9	1.2	0.04	0.2	0.3	0.5	1.1	1.9	6.5
Al	38.7	18.0	9.8	24.2	31.5	35.7	43.8	51.6	156.8
Fe	21.1	9.8	5.4	9.4	13.6	20.7	27.2	33.6	52.6

OM: organic matter, T-N: total nitrogen, Number of samples = 88.

Table 3. Chemical composition of the sewage sludges classified by population of the representing location of sewage treatment plant (unit: g/kg, DW)

Chemical composition		Metropolis	Large cities	Small and mid-size cities	Rural area	LSD 0.05
OM	Mean	673	675	709	696	46.9
	Standard deviation	75	69	67	59	
	Min.	552	582	538	579	
	Median	685	659	712	709	
	Max.	766	785	864	774	
T-N	Mean	49.1	61.5	50.0	45.3	8.36
	Standard deviation	12.7	14.4	9.0	13.7	
	Min.	28.3	43.9	35.0	8.1	
	Median	48.7	57.7	49.2	49.9	
	Max.	69.7	87.6	74.5	63.4	
P ₂ O ₅	Mean	40.8	36.3	34.3	26.8	6.55
	Standard deviation	13.5	8.1	8.0	9.0	
	Min.	29.2	25.1	21.3	6.2	
	Median	34.8	36.0	34.2	26.5	
	Max.	77.0	49.9	58.4	57.0	
K ₂ O	Mean	3.0	2.0	3.0	3.4	0.87
	Standard deviation	1.1	0.5	1.1	1.5	
	Min.	2.0	1.4	1.2	0.7	
	Median	2.8	1.8	2.8	3.1	
	Max.	5.9	2.7	6.3	7.6	
CaO	Mean	12.2	10.5	11.2	11.4	3.88
	Standard deviation	2.4	3.6	3.1	8.4	
	Min.	8.2	4.3	6.2	6.4	
	Median	12.1	10.1	11.0	9.6	
	Max.	15.9	14.5	22.8	53.6	
MgO	Mean	5.1	4.2	4.5	4.4	0.93
	Standard deviation	0.8	1.3	1.5	1.1	
	Min.	4.0	2.5	2.4	2.7	
	Median	4.9	3.9	4.4	4.1	
	Max.	6.8	6.3	10.5	8.1	
Na ₂ O	Mean	1.4	1.2	0.8	0.8	0.84
	Standard deviation	1.2	2.0	1.0	1.1	
	Min.	0.2	0.1	0.1	0.04	
	Median	1.1	0.4	0.5	0.4	
	Max.	4.7	6.5	5.9	4.8	
Al	Mean	39.0	30.8	37.9	42.1	12.8
	Standard deviation	11.0	8.0	9.4	28.1	
	Min.	22.4	13.8	9.8	11.1	
	Median	37.3	32.5	38.1	34.8	
	Max.	57.9	41.7	57.9	156.8	
Fe	Mean	29.9	18.1	19.9	20.1	6.63
	Standard deviation	12.4	9.2	7.9	9.7	
	Min.	9.5	5.4	5.7	6.3	
	Median	31.3	16.7	20.4	18.5	
	Max.	52.6	35.4	37.7	51.9	

mg/kg으로 나타나 하수오니에서의 As 성분은 퇴비화 및 토양에 영향이 적을 것으로 생각되었다.

비료공정규격중 Cd의 퇴비원료기준은 5 mg/kg 이하로 설정되어 있으며, Cd은 인체에 독성이 강하고 토양으로부터 비교적 쉽게 작물로 이행되는 성분으로 알려져 있으므로 엄격

히 관리되고 있다. 하수오니의 Cd 함량은 평균 9.0 mg/kg으로 퇴비원료기준을 초과하였고, 범위는 1.7~197.3 mg/kg으로 시료간에 큰 편차를 보였다. 또한 중앙값의 경우에도 4.7 mg/kg으로 퇴비원료의 허용기준에 근접해 있어 하수오니의 퇴비원료 사용시 Cd이 중요한 제한인자의 하나로 작용할 것

으로 생각된다. 하수오니에 함유된 Cr의 평균 함량은 249 mg/kg으로 퇴비원료의 허용기준인 300 mg/kg 보다는 낮았으나 7.3~2,854 mg/kg의 큰 편차를 보여 시료에 따라서는 퇴비원료로 활용시에는 주의할 필요성이 있을 것으로 생각되었다.

하수오니에 포함된 Cu의 평균함량은 812 mg/kg으로 퇴비원료의 허용기준인 500 mg/kg 보다 높게 나타나 퇴비원료로 활용시 제한인자로 작용할 가능성이 큰 성분으로 생각되었다. 이들의 분포 범위는 87.4~5,730 mg/kg으로 시료 간에 큰 편차를 보였으며, 중앙값(543 mg/kg)도 퇴비원료기준을 초과하고 있으므로 발생원을 줄이는 노력이 필요할 것으로 생각된다.

하수오니에 함유된 Mn의 평균함량은 1,516 mg/kg이고, 범위는 129~10,300 mg/kg에 있어 다른 성분들과 마찬가지로 시료간의 편차가 큰 것으로 나타났다. 하수오니에 포함된 Ni의 평균함량은 200 mg/kg으로서, 퇴비원료의 허용기준인 50 mg/kg을 크게 초과하였고, 그 범위도 20~2,027 mg/kg으로 최고치의 경우 허용기준의 40배를 초과하는 등 시료에 따라 커다란 편차를 보이고 있었다.

하수오니에 포함된 Pb의 평균함량은 46 mg/kg, 중앙값은 40 mg/kg으로 퇴비원료로 활용시 Pb 함량은 큰 문제는 없을 것으로 생각되었다. 하수오니에 포함된 Zn의 평균함량은 2,000 mg/kg을 상회하여 퇴비원료의 허용기준인 900 mg/kg을 크게 초과하였고, 최저치가 523.5 mg/kg으로 나타나 퇴비원료로 활용시 가장 큰 제한인자로 작용할 것으로 생각되었다.

채취지역별 하수오니의 중금속 함량

하수처리장이 위치한 지역의 인구를 기준으로 광역시(인구 100만명 이상), 대도시(50만~100만명), 중소도시(10만~50만명) 및 농촌지역(인구 10만명 이하의 소도시 포함)으로 구분하여 하수오니의 중금속 함량을 비교하였다(Table 5, Fig. 2).

비소 함량은 인구가 적은 지역일수록 함량이 높게 나타났으나 전체적으로 평균함량은 퇴비원료기준인 50 mg/kg에 훨씬 못 미치는 것으로 나타나 퇴비화에 있어 제한요인으로 작용할 것으로는 보이지 않았다. 채취지역별 Cd의 평균함량은 인구가 많을수록 높은 경향이었으나 편차가 크고 중앙값에서는 차이가 없어 도시와 농촌간의 차이보다는 특정한 지역 또는 처리장의 영향을 많이 받는 것으로 생각된다. Cr 함량은

도시규모가 클수록 높게 나타났고, 특히 광역시에서는 다른 지역에 비해 현저히 높은 함량이 검출되었다.

구리 함량은 도시규모가 클수록 높았으며, 모든 권역별 평균값이 퇴비원료기준을 상회하고 있었다. Critchley and Agg²⁹⁾는 하수처리 시스템으로 유입되는 Cu의 62%가 생활하수에서, 도로에서의 유실이 5% 였고, 산업으로부터는 3%에 불과하다고 하였다. Coppoolse³⁰⁾는 하수오니에 Cu가 유입되는 주원인은 상하수도 구리배관의 부식이며, 이로부터 방출되는 Cu가 전체의 80% 이상을 차지한다고 하였다.

니켈 함량도 도시규모가 클수록 높았으며 광역시의 경우는 중앙값이 다른 권역보다 10배 이상 높게 나타났고, 모든 권역의 평균값은 퇴비원료기준을 상회하였다.

아연 함량은 Cr, Cu 및 Ni과 마찬가지로 인구가 많을수록 함량이 높게 나타났다. Page³¹⁾는 영국, 미국, 캐나다 및 스웨덴의 주거지역에 위치한 약 300여개 하수처리장의 하수오니를 수집하여 중금속 함량을 조사한 결과, 건물기준으로 Cu는 500 mg/kg, Zn은 1000 mg/kg을 초과하였는데, 이러한 결과를 배관설비에서 유래된 것으로 보고하였다.

채취지역별 하수오니의 품질평가

채취지역별 하수오니의 성분 함량을 퇴비원료기준과 비교한 결과는 Table 6과 같다. 유기물의 경우 전체 시료의 10%가 기준에 미달된 것으로 조사되었는데, 이는 1차 처리나 단순침전에 의해 무기물의 비중이 컸기 때문으로 생각된다.

중금속 성분 중에서 Zn은 광역시와 대도시는 100%, 중소도시 90%, 농촌지역의 경우에도 79%가 퇴비원료기준에 부적합한 것으로 나타나 퇴비화에 가장 큰 제한요인이 될 것으로 생각된다. Cu, Ni 및 Cd의 경우에도 퇴비원료기준에 부적합한 비율이 전체 시료에 대해 각각 53, 47, 41%로 조사되어 퇴비화에 제한요인으로 작용할 것으로 판단되었다. 반면에 모든 지역에서 As와 Pb은 퇴비원료기준에 90% 이상이 적합한 것으로 나타났다.

퇴비원료기준과 비교하여 As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb 및 Zn 중에서 어느 한 성분이라도 함량이 초과하는 비율은 광역시 및 대도시는 100%, 중소도시 95%, 농촌지역 93%로 나타났다. 따라서 조사된 시료중 중소도시 지역의 하수오니는 5%, 농촌

Table 4. Profile of heavy metal distribution in the overall experimental sewage sludges (unit: mg/kg DW)

Heavy metal	Mean	Standard deviation	Min.	Percentile					Max.
				10%	25%	Median	75%	90%	
As	4.6	7.1	<0.01	<0.01	1.0	2.9	4.9	9.2	54.3
Cd	9.0	23.8	1.7	2.9	3.7	4.7	5.9	7.9	197.3
Cr	249.2	507.5	7.3	41.8	49.7	63.5	117.1	765.9	2854.1
Cu	811.9	850.4	87.4	297.4	386.2	543.2	856.9	1679.3	5730.1
Mn	1516.1	1580.4	129.3	292.7	488.3	933.8	1878.6	3676.7	10288.8
Ni	199.6	366.8	20.1	28.2	35.2	45.6	115.8	637.5	2056.7
Pb	45.8	28.6	7.6	22.7	29.2	40.2	50.4	75.2	197.5
Zn	2005.5	1246.3	523.5	886.3	1156.8	1522.9	2605.9	3535.7	6349.4

Number of samples = 88.

지역 하수오니의 경우에도 7% 정도만이 퇴비원료로 사용이 가능한 수준이었다.

국내외 하수오니의 중금속 함량 비교

본 조사에서 검출된 중금속 함량을 국내에서 기존에 발표된 성적 및 유럽 국가들의 함량과 비교한 결과는 Table 7과 같다. Park 등³²⁾에 의해 조사된 1995년 당시의 하수오니의 중금속 함량과 비교해 보면 Cd과 Cu는 큰 변화가 없었으나 Cr

과 Pb의 함량은 현저히 낮아졌고 Ni과 Zn의 함량도 낮아진 것을 확인할 수 있었다. 유럽의 경우에도 연차별로 중금속 함량이 낮아지는 경향이였다. 이와 같이 중금속의 함량이 낮아지는 것은 생활쓰레기의 분리수거와 위생처리, 배관 및 하수관거의 개선, 하수처리 시스템이 발달하기 때문인데, 이러한 추세로 볼 때 하수오니중의 중금속 함량은 계속적으로 낮아질 것으로 생각되었다. 실제로 Rowlands³³⁾는 영국 Nottingham의 하수처리장에서 발생된 하수오니의 Cd 함량이 1962

Table 5. Heavy metal composition of the sewage sludges classified by populations of the representing location of sewage sludge treatment plant (unit: mg/kg, DW)

Heavy metal		Metropolis	Large cities	Small and mid-size cities	Rural area	LSD 0.05
As	Mean	2.9	3.2	4.6	5.8	5.11
	Standard deviation	2.0	5.7	5.6	10.2	
	Min.	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	
	Median	3.1	0.3	2.8	3.1	
	Max.	6.0	16.8	25.8	54.3	
Cd	Mean	19.3	26.5	4.9	4.8	16.3
	Standard deviation	31.7	64.2	1.4	1.5	
	Min.	1.7	1.9	2.7	2.8	
	Median	4.7	5.0	4.7	4.6	
	Max.	112.0	197.3	9.9	9.0	
Cr	Mean	925.2	208.1	174.6	80.1	308.8
	Standard deviation	925.0	362.8	364.9	130.7	
	Min.	59.4	40.1	23.7	7.3	
	Median	818.2	58.4	66.5	55.7	
	Max.	2854.1	1151.2	2115.1	747.0	
Cu	Mean	1439.0	831.4	628.7	786.4	584.7
	Standard deviation	1168.8	785.3	382.6	1061.0	
	Min.	353.0	299.4	186.5	87.4	
	Median	994.2	547.0	537.1	468.3	
	Max.	3890.4	2844.3	1815.4	5730.1	
Mn	Mean	2502.8	922.4	1467.3	1355.9	1101
	Standard deviation	2796.9	1122.1	1247.5	1307.9	
	Min.	364.8	292.7	129.3	231.0	
	Median	1613.1	490.4	1004.5	779.1	
	Max.	10288.8	3848.6	4283.6	4941.9	
Ni	Mean	675.6	156.5	119.3	121.2	226.6
	Standard deviation	684.6	221.5	189.7	243.8	
	Min.	31.8	22.3	22.8	20.1	
	Median	453.9	42.4	42.9	40.5	
	Max.	2056.7	667.4	935.7	1107.4	
Pb	Mean	67.0	34.1	47.5	38.3	19.4
	Standard deviation	47.5	15.1	27.9	16.0	
	Min.	19.0	12.0	16.2	7.6	
	Median	50.1	34.9	40.6	34.8	
	Max.	197.5	66.9	151.6	78.2	
Zn	Mean	3532.2	2096.0	1890.9	1495.9	771.5
	Standard deviation	1604.1	718.3	1132.8	827.0	
	Min.	1208.5	1316.3	627.9	523.3	
	Median	3445.6	1983.9	1603.2	1327.5	
	Max.	6349.4	3353.1	5816.8	3521.2	

년에 비해 30년이 지난 1992년에는 98% 감소하였다고 보고하였다. 국내 하수오니의 중금속 평균 함량을 유럽연합 권장기준⁴⁾과 비교해 보면 대부분 허용기준 이내에 포함됨을 볼 수 있다. 그러나 대부분의 유럽 국가들에서 발생된 하수오니의 중금속 평균함량³⁴⁾과 비교하면 현저히 높은 수준이었고, 이러한 결과는 유럽의 국가들이 유럽연합 권장기준 외에 나라마다 독자적인 기준을 설정하여 엄격하게 관리하고 있기 때문으로 생각되었다.

하수오니의 농경지 사용에서 중금속 함량은 퇴비의 품질을 결정하는 중요한 요인이 되며, 유해물질의 함량이 허용기준보다 낮게 나타나도 과다사용으로 인한 토양오염을 예방하기 위해 여러 국가에서는 사용량 및 사용횟수를 제한하고 있다³⁵⁾.

Table 6. The impropriety ratio of the sludge samples used in this study

Element	Permitted value ^{a)} (mg/kg DW)	Impropriety ratio (%)			
		Metropolis	Large cities	Small and mid-size cities	Rural area
OM	60 % ^{b)}	17	22	5	10
As	50	0	0	0	3
Cd	5	50	44	40	38
Cr	300	58	11	11	3
Cu	500	75	67	53	41
Ni	50	92	44	39	38
Pb	150	8	0	3	0
Zn	900	100	100	90	79
Overall		100	100	95	93

^{a)}The regulations on the raw materials for composting.

^{b)}Organic matter of 60% is a minimum value.

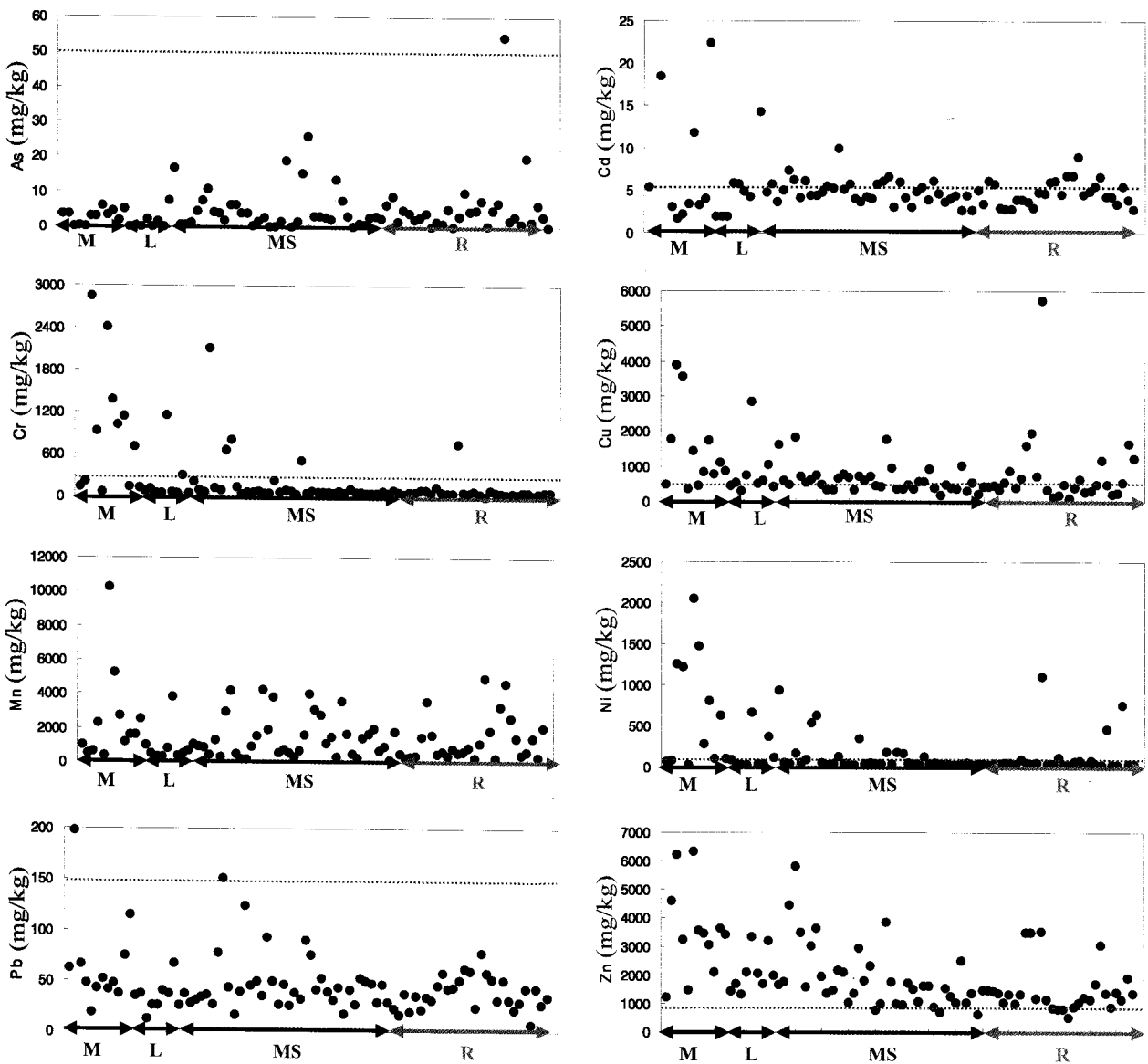


Fig. 2. Heavy metal concentration in sewage sludges sampled from all over the country. All data is mg/kg with dry weight basis. Dotted lines indicate limiting criteria of heavy metal in raw compost materials. M, Metropolis (over a million in population); L, Large cities (populations 500,000~1,000,000); MS, Small and mid-size cities (populations 100,000~500,000); R, Rural area including smaller cities with population less than 100,000.

Table 7. Comparisons of heavy metal concentrations in sludges from several countries

(unit: mg/kg, DW)

Element	Limiting criteria		Korea		Germany			Denmark		
	Korea	86/278/EEC	1995 ^{a)}	2001	1995	1996	1997	1995	1996	1997
Cd	5	20-40	8.3	9.0	1.5	1.5	1.4	1.5	1.5	1.3
Cr	300	-	659	249	52	52	46	34	40	25
Cu	500	1000-1750	791	812	277	273	274	298	304	250
Ni	50	300-400	298	200	23	23	25.7	26	24	18
Pb	150	750-1200	200	46	67	63	72	72	57	50
Zn	900	2500-4000	2617	2006	831	809	878	878	776	678

Element	Finland			Netherlands			Sweden			UK		IRL	L
	1995	1996	1997	1995	1996	1997	1995	1996	1997	1995	1996	1997	1997
Cd	1.3	0.7	1.0	0.6	0.8	0.4	1.6	1.4	1.3	3.8	3.3	2.8	3.8
Cr	82	91	84	17	18	16	38	39	35	162	157	165	51
Cu	283	291	290	44	39	39	517	526	393	555	568	641	206
Ni	41	48	34	10	9	9	20	19	18	60	57	54	24
Pb	47	43	39	12	11	13	52	44	38	222	221	150	128
Zn	575	636	606	136	149	143	638	603	543	764	792	562	1628

^{a)}Park et al.(1998)

86/278/EEC, CEC(Council of the European Communities) 1986; UK, United Kingdom; IRL, Ireland; L, Luxembourg;

Source of European countries: European Commission(2000).

하수처리 방법별 이화학적 및 중금속 함량

하수처리 방법에 따른 하수오니의 이화학적 및 중금속 함량을 Fig. 3에서 보면 유기물 함량에 있어서는 처리방법간에 큰 차이를 보이지 않았다. 질소 함량은 표준활성>산화구법>회전원판법, 인산 함량은 산화구법=표준활성>회전원판법, 칼리 함량은 산화구법>회전원판법>표준활성의 순으로 나타났다.

처리방법에 따른 As 함량의 평균값에는 큰 차이가 없으나 표준활성 처리에서 시료간에 편차가 크고 퇴비원료기준에도 부적합한 시료가 있어 퇴비원료로 이용하기 위해서는 처리공정 방법에 대한 검토가 필요할 것으로 생각된다.

처리방법별 Cd 함량은 세 처리방법 모두의 평균값이 퇴비원료 규제기준에 근접하거나 초과하여 퇴비원료로 검토시 Cd 이 제한인자가 될 가능성이 있을 것으로 생각되었다. 또한 산화구법과 회전원판법과 비교하여 표준활성법의 퇴비원료 규제기준에 대한 초과비율은 낮으나 최대값이 112 mg/kg에 달하는 시료도 있어서 주의가 필요할 것으로 판단되었다.

처리방법별 Cr 함량은 산화구법과 회전원판법에 비하여 표준활성슬러지법이 현저히 높아서 하수처리시 Cr 화합물의 첨가 여부나 하수 유입시 Cr의 함량을 검토할 필요가 있을 것으로 생각되었다. 하수처리 방법별 Cu 함량은 회전원판법은 퇴비원료 규제기준을 초과하는 시료가 적었으나 산화구법과 표준활성법에서는 절반 이상의 시료가 기준에 부적합한 것으로 나타나 하수오니를 퇴비원료로 이용할 때 제한인자가 될 것으로 생각되었다.

처리방법별 Fe과 Mn의 함량은 차이가 크지 않은 것으로 조사되었다. 처리방법별 Ni 함량에 있어서는 표준활성>산화구법>회전원판의 순이었으나 모든 처리에서 퇴비원료기준에 부적합한 비율이 40% 이상으로 나타나 퇴비원료로의 검토시 Ni도 중요한 제한인자로 작용할 것으로 생각되었다.

처리방법에 따른 Pb의 함량은 큰 차이가 없었으며, Zn 함량은 표준활성>산화구법>회전원판법의 순이었고, 처리방법에 상관없이 퇴비원료 규제기준에 부적합한 비율이 높게 나타나 하수오니의 퇴비원료 검토시 Zn이 가장 큰 제한인자가 될 것으로 생각되었다.

하수처리 방법에 따른 최종 슬러지의 중금속 함량 차이는 처리 공정에 투입되는 첨가제 종류 및 투입량과 하수처리를 위한 유입수(원수)의 중금속 함량에 크게 좌우될 것으로 생각된다. 현재 하수종말처리에 관한 기준항목으로는 방류수 중 BOD, COD, SS, T-N 및 T-P만이 설정되어 있어서 유입수 및 방류수의 수질분석은 다섯 가지 항목만 조사되고 있는 실정이다³⁶⁾.

본 연구에서 나타난 결과를 종합하여 볼 때 우리나라에서 발생하는 대부분의 하수오니가 현재 기준에서 퇴비원료로 부적합한 것으로 나타났고, 채취지역별로도 중소도시 및 농촌지역에서도 90% 이상이 퇴비원료로 사용할 수 없는 것으로 나타났다. 따라서 하수오니가 퇴비의 원료로서 적합성이 확인되기 위해서는 유해성분인 중금속 함량에 대한 하수처리 과정 중의 제거 노력이 필요할 것으로 판단되었다.

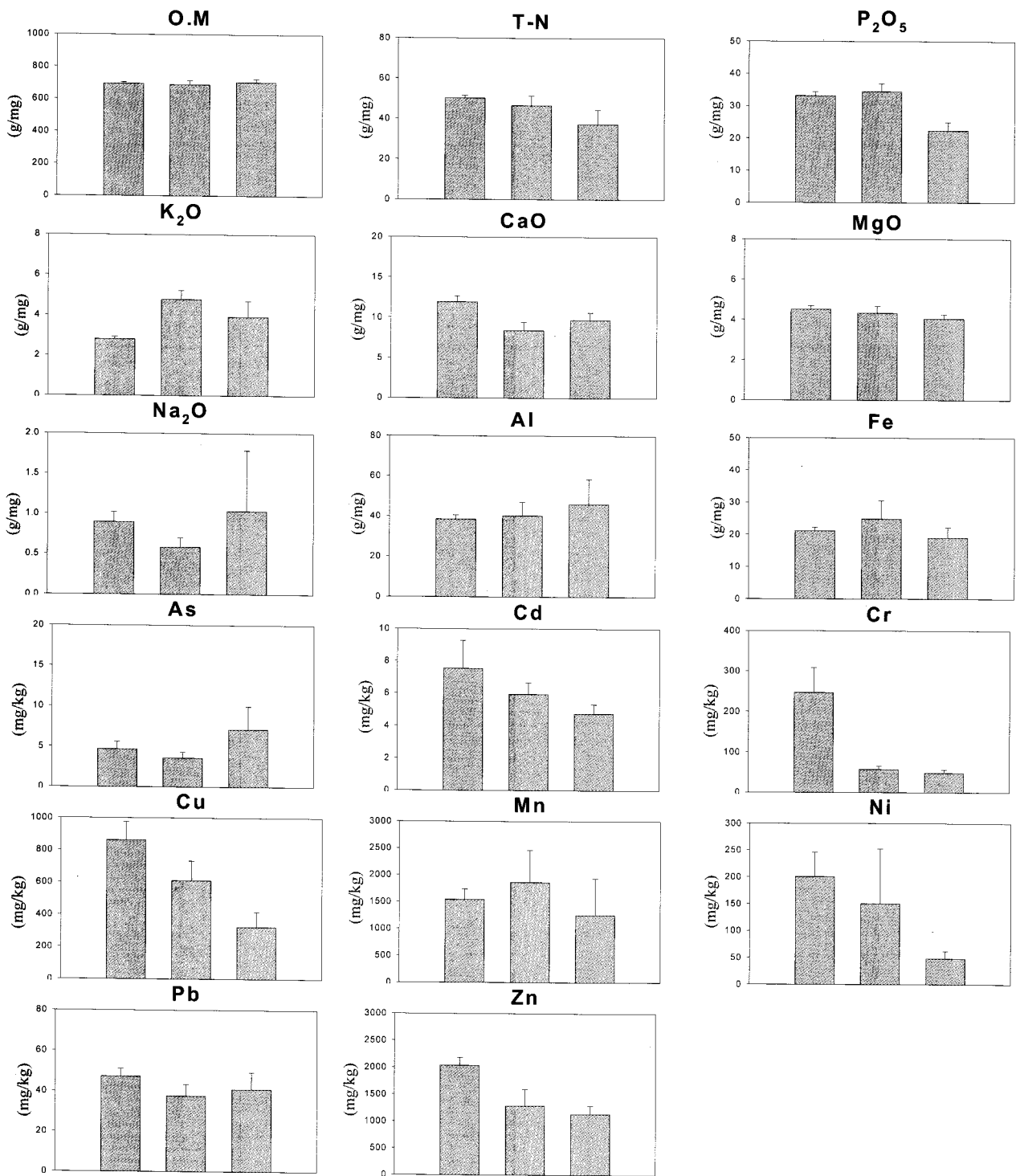


Fig. 3. Mean concentrations \pm standard errors for the several components in sludge produced from different types of wastewater treatment system. Left bar, Activated sludge process system (67 samples); Middle bar, Oxidation ditch system (7 samples); Right bar, Rotating biological contactor(RBC) system (6 samples).

요약

국내에서 발생하는 하수오니에 대한 퇴비원료로의 활용성을 검토하기 위하여 전국 150개소의 하수처리장 중에서 82개

소로부터 88점의 하수오니를 채취하여 중금속 함량을 분석하였다. 하수오니의 구분은 하수처리장이 위치한 지역의 인구를 기준으로 광역시(100만명 이상), 대도시(50만~100만명), 중소도시(10만~50만명) 및 농촌지역(인구 10만명 이하 소도시 포함)

으로 구분하여 몇 가지 중금속을 분석하고 현재의 퇴비원료 기준과 비교 검토하였다. 성분별 전국적인 분포는 As 0.0~54.3 mg/kg, Cd 1.7~197.3 mg/kg, Cr 7.3~2,854 mg/kg, Cu 87.4~5,730 mg/kg, Mn 129.3~10,289 mg/kg, Ni 20.1~2,057 mg/kg, Pb 7.6~197.5 mg/kg, Zn 523.5~6,349 mg/kg 의 범위에 있었다. 퇴비원료기준과 비교하였을 때 As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb 및 Zn 중 어느 한 성분이라도 함량이 초과하는 비율은 광역시 및 대도시는 100%, 중소도시 95%, 농촌지역 93%로 나타났다. 중금속 성분별로는 전체시료 중 As는 1%, Cd 41%, Cr 15%, Cu 53%, Ni 47%, Pb 2% 및 Zn은 89%가 기준치를 초과하였다.

참 고 문 헌

1. Ministry of Environment (2002) 2001 *Statistics of sewerage*, Republic of Korea, p.194-205.
2. London Convention (1996) Convention on the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and Other Matters.
3. Ministry of Agriculture and Forestry (2002) Notification for raw compost materials, *Enforcement Regulations of the Fertilizer Control Act*. Republic of Korea.
4. CEC; Council of the European Communities (1986) Council Directive of 12 June 1986 on the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture (86/278/EEC), *Official Journal of the European Communities* No. L 181/6-12.
5. USEPA; US Environmental Protection Agency (1993) Part 503-Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge, *Federal Register* 58, 9387-9404.
6. McGrath, S. P., Chang, A. C., Page, A. L. and Witter, E. (1994) Land application of sewage sludge: scientific perspectives of heavy metal loading limits in Europe and the United States, *Environ. Rev.* 2, 108-118.
7. USEPA; US Environmental Protection Agency (1992a) *Technical Support Document for Land Application of Sewage Sludge*, Volume I. Eastern Research Group, Lexington.
8. USEPA; US Environmental Protection Agency (1992b) *Technical Support Document for Land Application of Sewage Sludge*, Volume II. Eastern Research Group, Lexington.
9. Kwon, S. I., Lim, D. K., and So, K. H. (2001) Soil contamination by successive land application of organic wastes, *Agro-Environment Research* 2000, NIAST, RDA, p.63-81.
10. Ministry of Agriculture and Forestry (2001) Standards on the sampling and analysis for fertilizer, *Enforcement Regulations of the Fertilizer Control Act*, Republic of Korea.
11. Chaney, R. L. and Giodano, P. M. (1977) Microelements as related to plant deficiencies and toxicities, In Elliot, L. F. and Stevenson, F. J. (ed.) *Soils for Management and Utilization of Organic Wastes and Wastewaters*, Soil Sci. Soc. Am. Madison. WI. p.234-279.
12. Tester, C. F., Sikora, L. J., Taylor, J. M. and Parr, J. F. (1982) Nitrogen utilization by tall fescue from sewage sludge compost amended soils, *Agron. J.* 74, 1013-1017.
13. Epstein, E., Taylor, J. M. and Chaney, R. L. (1976) Effects of sewage sludge and sludge compost applied to soils on some physical and chemical properties, *J. Environ. Qual.* 5, 422-426.
14. Tisdall, J. M. and Odes, J. M. (1982) Organic matter and waster stable aggregates in soils, *J. Soil Sci.* 33, 141-163.
15. Lynch, J. M. and Bragg, E. (1985) Microorganisms and soil aggregates stability, *Adv. Soil Sci.* 2, 133-171.
16. Boyle, M., Frankenberger, Jr. W. T. and Stolzy, L. H. (1989) Influence of organic matter on soil aggregates and water infiltration, *J. Prod. Agric.* 2(4), 290-299.
17. Hall, J. E. (1984) Predicting the nitrogen value of sewage sludges, In: L'Hermite, P. and Ott, H. (eds), *Processing and Use of Sewage Sludge*, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, p.268-278.
18. Hall, J. E. (1985) The cumulative and residual effects of sewage sludge nitrogen on crop growth, In: Williams, J. H., Guidi, G. and L'Hermite, P. (eds) *Long-term Effects of Sewage Sludge and Farm Slurry Applications*, Elsevier Applied Science Publishers Ltd, Barking, p.73-83.
19. Hall, J. E. and Williams, J. H. (1984) The use of sewage sludge on arable and grassland, In: Berglund, S., Davis, R. D. and L'Hermite, P. (eds), *Utilization of Sewage Sludge on Land: Rates of Application and Long-term Effects of Metals*. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, p.22-35.
20. Coker, E. G. and Carlton-Smith, C. H. (1986) Phosphorus in sewage sludges as a fertilizer, *Waste Management Research* 4, 303-319.
21. Coker, E. G., Hall, J. E., Carlton-Smith, C. H. and Davis, R. D. (1987a) Field investigations into the manurial value of lagoon-matured digested sewage sludge, *J. Agric. Sci., Cambridge* 109, 467-478.
22. Coker, E. G., Hall, J. E., Carlton-Smith, C. H. and Davis, R. D. (1987b) Field investigations into the manurial value of liquid undigested sewage sludge when applied to grassland, *J. Agric. Sci., Cambridge* 109, 479-494.
23. Smith, S. R. (1996) *Agricultural Recycling of Sewage Sludge*

- and the Environment*, CAB International, Wallingford, UK.
24. Kwon, S. I., and Jung, K. Y. (1994) Chemical properties of the organic wastes in Korea, ASTI Annual Report, p.74-100.
 25. Cooke, G. W. (1982) *Fertilizing for Maximum Yield*, Third edition, Canada Publishing Limited, St Albans.
 26. Wilson, B. and Jones, B. (1994) *The Phosphate Report: A Life Cycle Study to Evaluate the Environmental Impact of Phosphates and Zeolite A-PCA as Alternative Builders in UK Laundry Detergent Formulations*, Landbank Environmental Research and Consulting, London.
 27. Morse, G. K., Lester, J. N. and Perry, R. (1993) *The Economic and Environmental Impact of Phosphorus Removal from Wastewater in the European Community*, Selper Publications, Chiswick.
 28. Furrer, O. J. and Bolliger, R. (1981) Phosphorus content of sludge from Swiss sewage treatment plants, In: Hucker, T. W. G. and Catroux, G. (eds), *Phosphorus in Sewage Sludge and Animal Waste Slurries*, D. Reidel Publishing, Dordrecht, p.91-97.
 29. Critchley, R. F. and Agg, A. R. (1986) Sources and Pathways of Trace Metals in the United Kingdom, WRc Report No. ER 822-M. WRc Medmenham, Marlow.
 30. Coppoolse, J. (1992) Pollution by heavy metals from diffuse sources in the Netherlands. RIZA Document, The Netherlands Workshop in Diffuse Sources of Pollution by Heavy Metals, European Institution for Water, May 1992.
 31. Page, A. L. (1974) Fate and effects of trace elements in sewage sludge when applied to agricultural lands, A literature review, US EPA Report No. EPA-670/2-74-005, National Technical Information Service, Springfield, Virginia.
 32. Park, M. H., Lee, S. H., Yoo, S. H. and Kim, K. H. (1998) Chemical compositions of sewage sludges and nitrogen mineralization in sewage sludge applied soil, *J. Korean Soc. Soil Sci. Fert.* 31(2), 189-196.
 33. Rowlands, C. L. (1992) Sewage sludge in agriculture: A UK perspective, Water Environment Federation 65th Annual Conference and Exposition. New Orleans, 20-24 September, p.305-315.
 34. European Commission (2000) Report from the Commission to the Council and the European Parliament on the implementation of community waste legislation for the period of 1995-1997; COM(1999)752 final.
 35. European Commission (2001) Disposal and Recycling Routes for Sewage Sludge, Part 2- Regulatory report, European Commission DG Environment, p.20.
 36. Ministry of Environment (2001) *Sewerage Act*, Republic of Korea.