

슬러지 액비의 비효효과 및 안전성 평가

이영옥[†] · 황진규* · 황응주**

대구대학교 생명과학과 · *대구대학교 원예학과 · **대구대학교 환경공학과

(2008년 1월 31일 접수, 2008년 2월 21일 채택)

Assessment of Aerobic Stabilized Waste Sludge as Liquid Fertilizer and Its Safety

Young-Ok Lee[†] · Jin-Gyu Hwang* · Eung-Ju Hwang**

Department of Life Sciences, Daegu University · *Department of Horticulture, Daegu University

**Department of Environmental Engineering, Daegu University

ABSTRACT : This study was carried out to assess aerobic stabilized waste sludge as liquid fertilizer for the growth of cucumber, cabbage and chrysanthemum. Sludge was pretreated with NaOH(40 meq/L) at 40°C for 330 min. The number of fecal coliforms in batch test sludge fertilizer was more efficiently reduced than those in continuous one, maybe due to longer SRT. All produced fertilizer belonged to class B according to US EPA requirement at least. Among 6 heavy metals regulated in Korea, As, Cd and Hg were not detectable in plant amended with fertilizer whereas the concentration of Cr, Cu and Pb in plant was less than 10 mg/kg dw. However, Zn and Ni, which were restricted in other country, but not in Korea, were detected in most amount of 118 mg/kg and 15.7 mg/kg, respectively. Furthermore, based on dry weight of plant, digested sludge(5.4 mg, dw) functioned as better fertilizer rather than activated sludge (4.3 mg, dw), much more fertile when those sludge was pretreated(1.24 mg, dw) compared to untreated one(1.12 mg, dw). But its fertility was 60~80% of commercial fertilizer and accumulation of Zn, Ti and Cr in plant was founded. Therefore, it could be concluded that sludge-fertilizer can be used for flower unlimitedly, but for edible plant limitedly as additive fertilizer.

Key Words : Sludge-fertilizer, Hygienic Safety, Heavy Metals, Agricultural Use

요약 : 하수슬러지를 알칼리(40 meq/L NaOH, 330 min. at 40°C)로 가용화시킨 후 호기적으로 안정화시켜 생산한 액상의 비료(액비)로 오이, 배추, 국화 등의 농작물을 재배하여 비료로서의 활용가능성 및 그 안전성을 평가하였다. 위생적인 안전성을 확보하기 위해 검출한 분원성대장균은 연속공정보다 회분식 공정에서 더 높은 제거 효율을 보였는데 이는 아마도 긴 슬러지 체류시간(SRT) 때문이며 생산된 액비 모두 미국 EPA 기준의 B등급 이상이였다. 또한 우리나라에서 규제하는 비소, 카드뮴, 크롬, 수은, 구리, 납 등 6개의 중금속 중 크롬, 구리, 납은 대략 식물 건중량당 10 mg/kg 이하로 검출되었으나 비소, 카드뮴, 수은은 거의 검출되지 않았다. 그러나 규제 외 항목 중 선진외국에서 규제하는 아연과 니켈은 각각 최고 118 mg/kg과 15.7 mg/kg로 검출되었다. 아울러 생물량기준으로 볼 때, 활성슬러지액비(4.3 mg, dw)보다 소화슬러지액비(5.4 mg, dw)가 더 양호한 비효효과를 나타냈고 전처리한 액비(1.24 mg, dw)가 비전처리 액비(1.12 mg, dw)보다 더 좋았으나 액비 성분이 실제로 농가에서 사용하는 배양액 성분의 대략 60~80%를 차지했고 아연, 티타늄, 크롬 등의 중금속이 농축되었으므로 화훼 재배에는 무리가 없을 것이나 식용작물 재배 시에는 전적으로 액비에 의존하기 보다는 추가적인 비료로 사용하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

주제어 : 슬러지액비, 위생적인 안전성, 중금속, 농작물, 비효효과

1. 서론

우리나라에서 연간 발생하는 하수슬러지량은 약 250만 톤(6645 톤/일)으로 이는 고형폐기물의 6.5%를 차지하는 많은 양이며¹⁾ 이를 처리하는데 소요되는 비용은 하수처리장 총 운전비용의 절반 이상을 차지할 만큼 그 비중이 크다. 또한 하수슬러지는 수분을 다량 함유하고 유기물 함량이 높아서 적절히 관리하지 않으면 부패되어 악취를 발생시키고 침출수를 누출하는 등 환경오염과 민원상의 문제들을 초래하기도 한다.²⁾ 현재 잉여 슬러지의 대부분(78%)

을 처리비용이 저렴하다는 이유로 해양투기하고 있으며 그 외의 처리 방법인 재활용(15%), 매립(1.7%), 소각(7.3%)되는 비율은 극히 저조한 실정이다. 그러나 런던 협약과 교토의정서가 발효됨에 따라 2011년 말부터는 해양투기가 전면 금지될 전망이다. 이에 정부에서는 재활용비율을 현재의 15%에서 2011년에는 57%로 상향조정하려고 한다.²⁾ 실제로 유기물 함량이 높아 차세대에너지자원의 하나로 간주되는 하수슬러지(biosolid)를 처리하여 퇴비, 토지개량제, 매립지 복토제 등으로 재활용하려는 연구들이 국내외에서 활발히 진행 중이다.^{3~6)}

그러나 대부분의 연구들이 슬러지 처리에 국한되어 있으며 처리산물의 재활용에 관한 연구는 거의 수행되지 않아 슬러지 재활용 시에 초래될 수 있는 문제점은 해결되지 않

[†] Corresponding author

E-mail: ecolomi@daegu.ac.kr

Tel: 053-850-6456

Fax: 053-850-6459

고 있다.⁷⁾ 즉 유기성 폐자원인 슬러지를 이용하여 토양생태계를 복원하거나 유기질 비료로 사용하려면 슬러지에 함유된 중금속과 병원균 등 유해물질의 존재유무를 확인하여 환경보건적인 안전성이 확보되어야 한다. 이를 위해 우리나라도 슬러지를 토지개량제 또는 매립시설 및 도로포장 복토용으로 재활용할 경우의 배출 기준을 두 개의 등급(가, 나)으로 나누어 중금속, 유기물, C/N비, 염도 등의 배출농도와 연간 사용량 상한치를 규제하고 있으나⁸⁾ 아직 그 규제 설정이 미흡한 실정이다. 실례로 미국 환경보호청(EPA)에서는 아직 우리나라에서는 규제가 없는 위생적인 안전성을 확보하기 위해 토양 매립시의 분변오염의 지표세균인 분원성 대장균군(fecal coliforms, FC)과 병원균인 살모넬라, 바이러스, 기생충, Helminth 포낭 등의 개체수를 검출하여 규제하고 있다.⁹⁾

따라서 본 연구에서는 폐하수슬러지를 호기 조건에서 안정화시켜 액상의 비료(액비)를 생산하는데 그치는 것이 아니라 그 액비를 이용해 현장에서 오이, 배추, 국화 등의 농작물을 경작하여 비료로서의 활용가능성을 평가하고 아울러 액비를 시비할 경우, 액비의 유해성여부를 평가하고자 분변오염의 지표세균인 분원성 대장균군과 액비에 함유된 중금속이 식물이 성장하는 동안 축적되는지의 여부를 조사하고자 하였다.

2. 실험재료 및 방법

본 실험에 사용한 회분식 공정의 시료는 경북 K하수처리장의 폐소화슬러지를 수거하여 5 L 용량의 반응조에서 압축공기를 산기식으로 주입하면서 교반장치로 혼합해 생산한 액비이다(Fig. 1). 연속공정의 경우에도 동일처리장에서 수거해 NaOH로 가용화(40 meq/L NaOH, 330 min. at 40°C)시킨 소화슬러지(PDS, Pretreated Digested Sludge)와 활성슬러지(PAS, Pretreated Activated Sludge)를 연속적으로 유입(HRT 2.7일)시키면서 호기적으로 안정화(aerobic

digestion)시켜 반응조의 운전조건이 정상상태에 이르렀을 때, 반응조 유출수를 액비로 간주하였으며 그 조성은 Table 1과 같다. 이 액비를 사용해 농작물 재배 시의 비효효과, 위생적인 안전성, 유해물질인 중금속의 농축여부 등을 평가하고자 오이, 배추, 국화 등을 온실에서 재배하였다. 아울러 대조구에는 해당 작물을 재배하는데 상용되는 배양액이나 수돗물을 주입해 동일 식물을 재배한 후 그 결과를 비교 분석하였다.

2.1. 슬러지 액비의 위생적인 안전성 점검

회분식과 연속공정 액비 생산과정에서 액비의 원료가 되는 폐소화슬러지와 폐활성슬러지에 함유된 분원성 대장균군(fecal coliforms, FC)의 제거효율을 점검하였다. 병원균 존재가능성을 지시하는 분원성 대장균군수는 하수처리장의 폐슬러지 원액과 액비 생성 반응조의 유출수를 2주간 7회에 걸쳐(EPA 기준) 채수해 적당 농도로 희석한 후 막여과법으로 검출하였다. 이때 사용한 배지는 m-FC agar이며 44.5°C에서 24시간 배양한 후 진한 청색을 띠는 군체(colony)를 분원성 대장균군으로 간주해 계수하였다.¹⁰⁾

2.2. 슬러지 액비로 재배한 농작물의 중금속 농도 및 농축여부

2.2.1. 회분식 소화슬러지 액비로 재배한 오이의 중금속 농도 및 축적여부

슬러지 액비를 사용해 농작물을 경작할 경우, 유해 중금속의 축적여부를 점검하기 위해 원폐소화슬러지(A; raw digested sludge)와 전처리한 슬러지, 즉 알칼리(40 meq/L NaOH, 330 min. at 40°C)로 가용화시킨 것(B)과 초음파(40 kHz, 360 min)처리한 슬러지(C)를 호기성 반응기에서 28일간 회분식으로 분해/안정화시켜 생산한 액비, 총 3종류의 슬러지액비를 추비로 주입하여 58일간 오이를 재배하였다(Table 1 참조). 실험에 사용된 오이 모종은 비료가 포함되지 않은 코코피트로 충전한 사각 플라스틱화분(0.09 m², 20

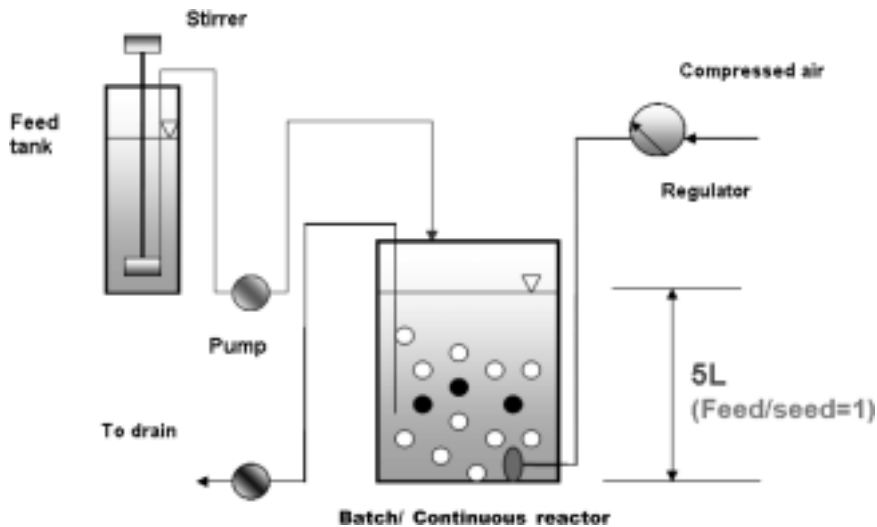


Fig. 1. Schematic diagram of aerobic stabilizing reactor system.

L)에 심겨졌다. 대조구에는 오이전용 배양액(culture medium, Table 2)만을 주입하였고 실험구에는 배양액에 추가로 3종류의 액비(A, B, C)를 주 3회 50 mL씩 8주간 각각 총 1.2 L를 관주하였다. 주입한 액비에 함유된 중금속이 오이에 얼마나 흡수되는지를 알아보기 위해 식재한지 58일째 되는 날에 오이를 수거해 잎, 줄기, 뿌리 및 열매 등 부위별 중금속 농도를 측정하였다. 또한 오이 생육기간에 따른 중금속의 농축여부를 확인하기 위해 슬러지-액비를 주입하기 시작한 날(0 day), 33일째 되는 날(33 day)과 58일째 되는 날(58 day)에 수거한 오이의 각 부위에서 측정된 중금속 농도평균값으로 시간경과에 따른 중금속 축적여부를 확인하였다. 액비와 식물에 함유된 중금속은 각 항목 당 3개의 건중량 시료에서 각각 1 g을 취해 H₂O₂-H₂SO₄ 분해법으로 전처리한 후 ICP법으로 분석한 결과를 kg으로 환산하여 평균값을 취했다.^{11,12)}

2.2.2. 연속공정 활성/소화슬러지 액비로 재배한 배추의 중금속 농도

NaOH로 가용화시킨 소화슬러지(PDS)와 활성슬러지(PAS)를 반응조에 연속적으로 유입(HRT 2.7일)시키면서 호기적으로 안정화시켜 생산한 액비를 이용해 배추를 4주간 포트 재배하였다. 배추모종을 비료가 포함 되지 않은 코코피트를 충전한 화분(0.025 m²)에 심었으며 주 3회 50 mL씩 4주간 총 0.6 L의 액비를 주입하였고 그리고 대조구에는 동

Table 2. Comparison of culture medium for cucumber and liquid fertilizer produced in batch test

composition	culture medium after Yamazaki (mg/L)	Fertilizer(mg/L)		
		Raw Digested Sludge	Pretreated Digested Sludge	
			NaOH	Ultrasonicated
NO ₃ -N	192	172.0	146.3	149.7
PO ₄ -P	30.9	37.82	37.22	30.29
Total-K	234.6	139.76	138.02	139.67
Total-Ca	140	339.66	340.45	342.32
Total-Mg	48.6	70.67	72.11	71.23
Total-Na	0.01	250.66	251.12	249.98
Zn	0.05(ZnSO ₄)	15.15	15.30	21.14
Fe	3(as Fe-EDTA)	-	-	-
Cu	0.02(CuSO ₄)	6.33	3.78	3.86

Table 1. Properties of fertilizer produced in batch/continuous aerobic reactor

	treatment	TKN (mg/L)	Nitrate (mg/L)	Soluble P (mg/L)	TCOD (mg/L)	SCOD (mg/L)
Batch aerobic digester (HRT; 28 day)	A: Raw digested sludge	336.0	172.0	37.82	4399.9	101.6
	B: Digested sludge treated with NaOH	560.0	146.3	37.22	4562.8	250.1
	C; Ultrasonicated digested sludge	280.0	149.7	30.29	4155.4	104.9
Continuous aerobic digester (HRT; 2.7 day)	Pretreated digested sludge(PDS, with NaOH)	642.9	22.4	3.14	2367.6	651.2
	Pretreated activated sludge(PAS, with NaOH)	303.5	18.3	3.17	8703.9	465.4
Continuous aerobic digester (HRT; 5 day)	Pretreated digested sludge(PDS, with NaOH)	-	-	-	2180.2	358.3
	Pretreated activated sludge(PAS, with NaOH)	-	-	-	7668.5	347.3

일한 양의 수돗물을 주입해 재배한 후 식물체에 함유된 중금속량을 상기방법으로 분석하였다.

2.3. 슬러지 액비의 시비효과

유기물 함량이 높은 폐슬러지의 비효효과를 점검하기 위해 본 연구에서 생산한 액비와 시판되는 해당식물의 배양액 및 수돗물로 배추, 국화를 재배해 그들의 생육상태를 비교분석하였다.

2.3.1. 슬러지 종류(활성/소화슬러지)에 따른 차이

NaOH로 가용화시킨 소화슬러지(PDS)와 활성슬러지(PAS)를 연속공정(HRT 2.7일)으로 호기 처리해 생산한 액비의 비효효과를 분석하였다. 이를 위해 배추모종을 비료가 포함 되지 않은 코코피트를 충전한 화분(0.025 m²)에 심어 주 3회 50 mL씩 4주간 총 0.6 L의 액비를, 그리고 대조구에는 동일한 양의 수돗물을 주입하였다. 4주 후, 잎의 길이와 수 및 면적, 그리고 잎, 뿌리로 분리해 생중량을 측정 한 뒤 80°C에서 48시간 건조시켜 각각의 건중량을 측정해 그 생육상태를 비교분석하였다.

2.3.2. 소화슬러지의 전처리 유무에 따른 비효효과

Table 1에 열거한 원소화슬러지 액비와 NaOH로 가용화시킨 소화슬러지(PDS) 액비를 2배 희석한 후, 코코피트를 충전한 화분(0.025 m²)에 심은 국화모종을 주 1회 100 mL씩 5주간 총 0.5 L를 주입해 재배하였다. 아울러 대조구에는 동일한 양의 수돗물을 주입하였다. 5주 후, 국화의 길이와 엽수 및 엽면적, 그리고 잎, 줄기, 뿌리로 분리하여 각각의 건중량을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 슬러지 액비의 위생적인 안전성

액비를 농경지에 살포했을 때의 공중 위생적인 안전성을 점검하기 위해 회분식과 연속공정으로 각각 2.7일(SRT 2.7)과 5일(SRT 5) 동안 호기적으로 안정화시킨 액비에서 미국 EPA 기준에 준해 2 주간 7회에 걸쳐 검출한 분원성 대장균군(FC; fecal coliforms)수의 평균치를 슬러지 건중량으로 환산하였다(Table 3). 그 결과, 연속공정보다 회분식

공정에서 더 많은 분원성대장균수가 제거되었다. 회분식 공정에서 SRT가 2.7일 경우, 액비로 사용되는 유출수의 분원성 대장균수는 원폐슬러지($1,320 \times 10^3$ CFU/g, dw)의 98%가 제거된 2,736 CFU/g, dw 수치를 보인 반면 SRT를 5일로 조정된 경우에 검출된 분원성 대장균수의 평균치는 530 CFU/g, dw로 원폐슬러지 대비 약 log 3의 제거 효율(99.9%)을 보였고 EPA 기준 A등급에 속했다. 반면에 연속공정 액비에서는 회분식 액비보다 약 10배 이상 많은 균수가 검출되었다. 이와 같이 처리공정 및 SRT에 따라 차이를 보이는 이유는 대장균이 온혈동물의 대장이라는 원래의 서식지보다 ‘반응조’라는 환경에서 다른 세균들과의 경쟁 등으로 인해 대장균의 생존여건이 불리하였기 때문으로 사료된다.^{9,13)} 본 연구에서 생산한 액비 중, 회분식으로 SRT를 5일로 조정해 생산한 액비만이 미국 EPA 기준의 A등급에 속하였고 그 외의 슬러지액비는 모두 A등급에 약간 못 미쳐 B등급에 속하였다. 따라서 폐슬러지를 액비로 만들어 농작물 재배에 재활용하려면 위생적인 안전성이 확보되어야 하므로 사전에 대장균 등을 포함한 병원균 제거방안이 마련되어야 할 것이다. 이를 위해 가열처리가 효과적인 것으로 보고되었는데 55℃에서 슬러지를 혐기적으로 안정화시키면 살모넬라, 대장균 등을 기준 이하로 제거할 수 있다고 하였다.^{14,15)} 또한 슬러지에 2,450-MHz의 마이크로파를 조사해 슬러지 온도가 65℃에 도달하면 A등급 슬러지를 얻을 수 있다고 하였고¹⁴⁾ 축분도 고온에서 호기적 처리를 하면 살모넬라와 포도상구균이 검출되지 않지만 열처리를 하지 않은 축분을 토양에 투입한 경우에는 살모넬라와 포도상구균이 증가했다고 하였다.¹⁶⁾ 결론적으로 우리나라는 아직 슬러지의 위생적인 규제가 없으나 슬러지 액비의 위생적인 안전성을 확보하려면 사전의 가열처리 등의 공정이 추가되어야 할 것으로 사료된다. 또한 슬러지의 재활용률을 향상조절하려는 정부정책이 실현되면 오염원을 원천 봉쇄하는 차원에서 하수처리장에 개선된 슬러지 소독처리 방법을 도입하는 것도 고려해 볼 만하다. 왜냐하면 현재 우리나라의 하수처리장에서 주로 사용하는 염소 및 UV 살균 소독처리법으로는 병원성 미생물의 존재가능성을 지시해주는 분원성 대장균군은 효율적으로 제거되지만 실제 병원성 미생물인 지아디아(*Giardia*), 크립토스포리디움(*Cryptosporidium*) 등 감염될 경우에 설사병 등의 발병이 우려되는 장기생 원생동물 포낭은 제거되지 않는다고 보고되었기 때문이다.¹⁷⁾

Table 3. Comparison of fecal coliforms(FC) in liquid fertilizer produced by digested sludge(DS) depending on HRT in batch/continuous process reactor

Raw digested sludge (CFU/g, dw)	Fertilizer produced by digested sludge(CFU/g, dw)				Requirement(EPA, 2000, MPN/g, dw)	
	Batch R.		Continuous R.		Class A	Class B
	SRT 2.7 d	SRT 5 d	SRT 2.7 d	SRT 5 d		
FC No.*	1,320,000	2,736	530	66,906	6,729	<1,000 <2×10 ⁶

* Mean No. of fecal coliforms(FC) in 7 samples according to EPA

3.2. 슬러지 액비로 재배한 농작물의 중금속 농도 및 농축여부

Table 4에서 보는 것처럼 활성슬러지보다 소화슬러지에 함유된 중금속의 농도가 더 높았는데 이는 소화슬러지 감량에 따른 농축효과에 기인하는 것으로 판단되며 이를 이용해 생산한 액비의 중금속 농도는 원폐슬러지보다 훨씬 낮았다.

3.2.1. 회분식 소화슬러지 액비로 재배한 오이의 중금속 농도 및 축적여부

회분식으로 처리한 소화슬러지 액비(Table 1; A, B, C)를 추가적인 비료(추비)로 주 3회 50 mL씩 8주간, 총 1.2 L를 오이 모종에 관주해 재배할 경우, 액비에 함유된 중금속이 오이의 각 부위에 얼마나 함유되는지를 시판되는 배양액을 주입해 재배한 오이와 비교하였다(Fig. 2). 그 결과, 우선 우리나라에서 규제하는 비소, 카드뮴, 크롬, 구리, 납, 수은 등 6개의 중금속 항목 중, 비소, 카드뮴, 수은이 검출되지 않았고 구리, 크롬, 납 등이 식물 부위에 관계없이 대략 10 mg/kg 이하 수준에서 검출되었는데 그 검출농도는 규제농도의 10% 이하였다(Table 4). 우리나라 식품에 함유된 중금속의 양에 관한 규제는 아직 없으나 대체적으로 80년대에 비해 90년대에 식품에 함유된 중금속 양이 감소하는 추세이며 우리나라 성인 1인이 1주간 식품을 통해 섭취하는 납은 독성학적으로 설정된 ‘주간섭취 잠정 허용량(provisional tolerable weekly intake, PTWI)’의 50~80%에 해당한다고 한다.¹⁸⁾ 반면에 우리나라에서는 규제하지 않지만 선진외국에서는 규제하는 니켈(Ni)과 아연(Zn)도 최고 15.7 mg/kg과 118 mg/kg로 검출되었다. 특히, 고농도로 존재할 경우 농작물에 유해성을 나타내는 중금속으로 알려진 아연은 거의 모든 시료에서 상당량이 검출되었으나 배양액을 이용해 재배한 오이의 중금속농도와 별 차이가 없었으므로 유해 수준은 아닌 것으로 판단된다. 또한 생활하수에 미량 함유된 티타늄(Ti)은¹⁹⁾ 50~200 mg/kg에서 식물에게 유해하다고 보고되었고²⁰⁾ 우리나라 비료품질 기준에 보면, 해당 비료성분 1%에 대해 니켈 0.024%, 크롬 0.24%, 티타늄 0.12% 이하로, 즉 티타늄함량을 크롬의 1/2로 규제하고 있다.¹¹⁾ 그런데 오이에서 크롬은 10 mg/kg 이하로 검출된 반면 티타늄은 크롬의 3배 이상인 최고 30 mg/kg로 검출되었다. 그러나 배양액만으로 재배한 오이에서도 슬러지 액비로 키운 오이와 유사한 농도의 티타늄이 검출된 것으로 보아 오이에서 검출된 티타늄 농도(최고 30 mg/kg)가 식물생장에 유해하지 않을 가능성도 있으나 비료품질기준에서 크롬보다 더 강하게 티타늄을 규제하는 것을 고려할 때 티타늄의 유해성에 대한 추가 연구가 필요한 것으로 판단된다. 반면 슬러지에서 보통 800 mg/kg 이상의 고농도로 검출되는 아연은 10~20 mg/kg 이하의 농도에서는 식물에게 결핍현상을 나타내지만 100~400 mg/kg에서는 독성이 있다고 한다.^{19,20)} 또한 티타늄과 아연은 크롬과 함께 식물의 생장기간 동안 농축효과를 나타내므로 주의가 요망된다(Fig. 3).

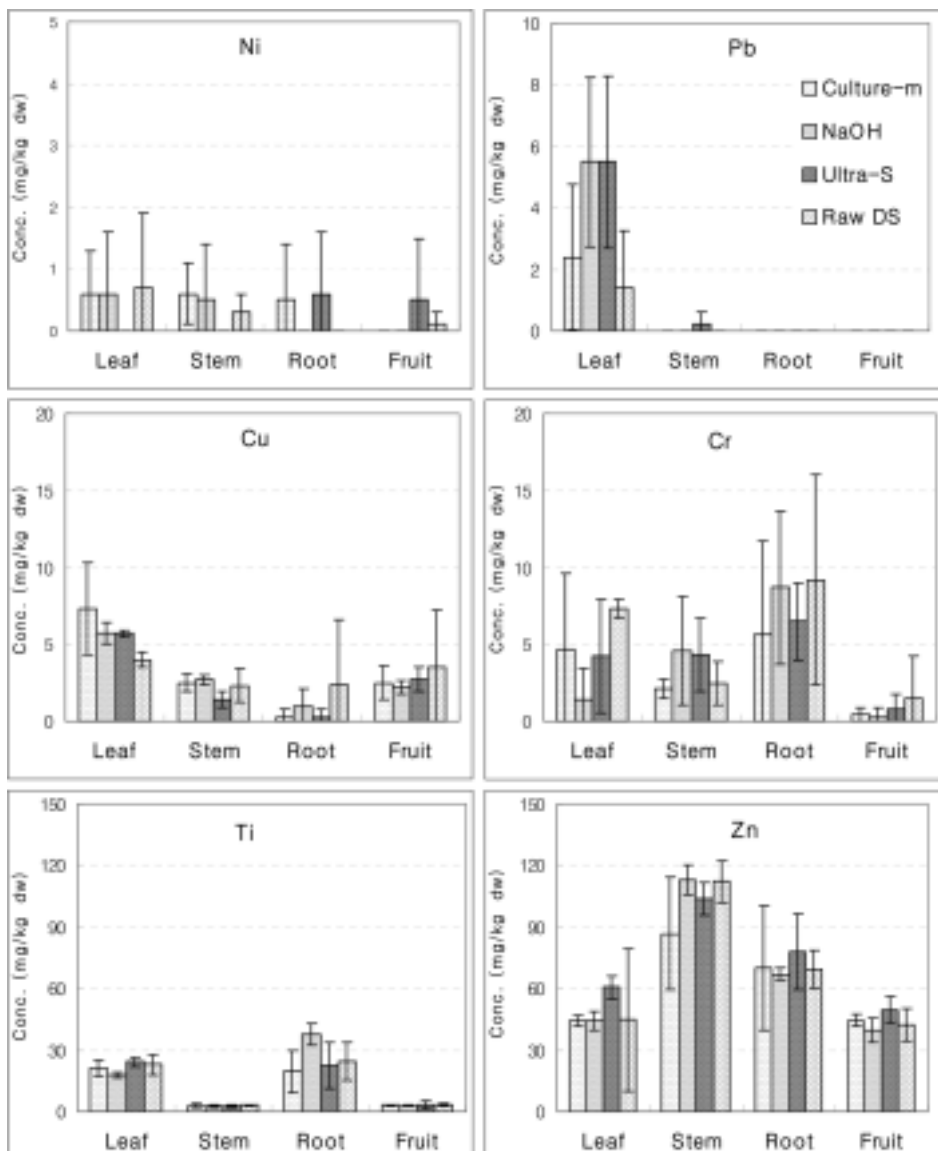


Fig. 2. Heavy metal concentrations in each part(leaf, stem, root, fruit) of cucumber grown in the culture medium amended pot and sludge-fertilizer amended pot on day 58. Error bars indicate standard error of the mean(n = 3).

Table 4. Concentration of heavy metals in raw sludges, liquid fertilizer and their regulation guideline according to MOE 2003 (unit; mg/kg, dw)

Item	Raw activated sludge	Raw digested sludge	Liquid fertilizer (SRT; 2.7 days)		Requirement (MOE, No. 2003-214)	
			PDS	PAS	Class A	Class B
As	0.10	0.12	0.002	0.002	<50	<50
Cd	0.76	0.76	0.043	0.036	<5	<8
Cu	1.13	8.13	0.11	0.01	<500	<750
Cr	0.00	0.00	0.06	0.008	<300	<370
Hg	0.04	0.04	0.00	0.00	<2	<3
Pb	10.40	10.65	0.57	0.41	<150	<225
Se	0.001	0.001	0.0057	0.0052	according to EPA:	
Zn	11.48	30.16	0.0556	0.0559	Se; 100	
Ni	11.91	17.04	0.262	0.283	Zn; 2800	
Annual usage amount; < 13 tons/3,300 m ²					Ni; 420	

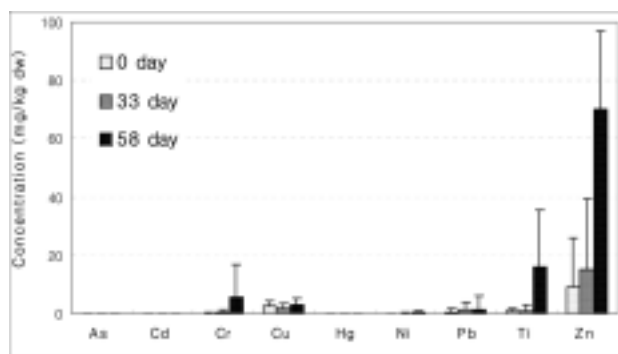


Fig. 3. Accumulation of heavy metals in cucumber fruit without aerobic stabilized sludge fertilizer use(0 day) and with those fertilizer on day 33 and 58. Error bars indicate standard error of the mean(n = 36).

요컨대 권순식 등은³⁾ 슬러지를 유기질 비료로 활용할 경

우, 아연이 고농도로 존재하면 식물생장에 유해하므로 규제할 필요가 있다고 언급하였고 미국 EPA와 EU에서도 슬러지에서 아연의 농도를 각각 2,800 mg/kg과 2,500~4,000 mg/kg으로 규제하고 있으므로^{9,21)} 우리나라도 슬러지에 고농도로 함유된 아연을 추가로 규제해야 할 것이다. 본 연구에서 생산한 액비를 주입해 재배한 오이의 중금속 농도는 원소화슬러지와 전처리 유무 및 방법에 따른 차이는 없었으나 오이의 식용부위인 열매의 중금속 농도가 다른 부위에 비해 낮았는데 이는 아마도 중금속에 노출된 시간이 짧기 때문이었던 것으로 사료된다.²²⁾

3.2.2. 연속공정 활성/소화슬러지 액비로 재배한 배추의 중금속 농도

폐소화슬러지(PDS)와 폐활성슬러지(PAS)를 이용해 연속공정으로 생산한 액비로 4주간 배추를 재배하였을 경우, 수돗물만 재배한 배추보다 더 높은 중금속 농도가 검출되었으며, 또한 폐활성슬러지보다 폐소화슬러지에서 약간 높은 농도로 검출되었는데(Table 5) 이는 소화슬러지의 농축 효과 때문으로 생각된다. 검출된 중금속 농도는 아연 > 티타늄 > 구리 순서로 높았다. 또한 부위별로 보면, 아연과 구리를 제외하고는 대체적으로 식용부위인 잎보다 뿌리에서 더 높은 농도로 검출되었다. 폐활성슬러지와 폐소화슬러지로 만든 액비에 함유된 구리농도는 각각 0.11 mg/kg과 0.01 mg/kg에 지나지 않았으나(Table 4) 동일 실험의 대조구, 즉 수돗물만을 주입해 키운 배추뿌리에서 3.68 mg/kg 검출된 반면, 0.6 L의 액비를 살포한 배추 잎에서 각각 6.23 mg/kg과 6.88 mg/kg으로 농도가 증가한 것을 보면(Table 5)

Table 5. Comparison of heavy metals concentration in cabbage grown on liquid fertilizer amended pot to those in water amended pot(The number in parenthesis indicates the standard error of the mean. unit; mg/kg, dw)

Item	Water		PDS		PAS	
	Leaf	Root	Leaf	Root	Leaf	Root
As	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Cd	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Cr	ND	0.55 (±0.95)	0.25 (±0.42)	3.74 (±4.56)	0.88 (±1.51)	1.83 (±2.40)
Cu	0.74 (±0.7)	3.68 (±5.17)	6.23 (±3.74)	0.48 (±0.83)	6.88 (±8.51)	3.20 (±5.54)
Hg	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Ni	ND	ND	ND	0.79 (±1.37)	ND	5.22 (±9.04)
Pb	ND	ND	ND	2.63 (±4.56)	ND	ND
Ti	4.38 (±0.7)	25.99 (±8.64)	15.77 (±4.87)	18.52 (±5.28)	41.61 (±41.62)	23.61 (±3.99)
Zn	28.39 (±7.4)	20.83 (±3.33)	60.79 (±8.22)	13.07 (±8.66)	36.38 (±5.03)	28.03 (±17.99)

ND : Not Detected

농축효과도 있는 것으로 사료된다. 식물이 흡수하는 각 중금속의 양은 토양 입자, pH 등의 이화화적인 환경의 영향을 받으며 또한 식물체의 종류 및 부위별 차이가 크다고 한다.^{23,24)}

결론적으로 슬러지 액비를 사용해 오이와 배추를 재배한 결과, 현재 우리나라에서 규제하는 비소, 카드뮴, 크롬, 수은, 구리, 납 등 6개의 중금속 중 크롬, 구리, 납은 대략 10 mg/kg 이하로 검출되었으나 비소, 카드뮴, 수은은 거의 검출되지 않았다. 그러나 규제 외 항목 중, 선진외국에서 규제하는 아연과 니켈은 상당량 검출되었으므로 아연과 니켈 등도 규제할 필요가 있을 것으로 사료된다. 또한 슬러지 재활용비용을 현재의 15%에서 2011년에 57%로 상향조정하려면 기설정된 각 중금속의 용도별 배출허용농도와 동일한 토양(지역)에서의 특정 중금속의 최고 오염부하 및 슬러지의 부하량 등 면밀한 사전 기초조사를 토대로 보다 타당한 규제기준을 마련해야 할 것이다.

3.3. 슬러지 액비의 시비효과

3.3.1. 슬러지 종류(활성/소화슬러지)에 따른 차이

NaOH로 가용화시킨 소화슬러지(PDS)와 활성슬러지(PAS)를 연속공정(HRT 2.7일)으로 호기 처리해 생산한 액비성분을 비교해 보면(Table 1) 소화슬러지가 활성슬러지보다 약간 높은 질산성 질소(NO₃-N) 농도를 나타냈으나 용존 인산염(PO₄-P)의 농도는 유사하였다. 소화슬러지가 활성슬러지보다 비효효과가 더 크다는 것은 이들을 이용해 재배한 배추의 생육상태에서도 확인할 수 있었다. 소화슬러지 액비로 시비한 경우, 잎의 길이(PDS; 152 cm, PAS; 139 cm), 잎의 수(PDS; 15.7개, PAS; 12.3개)와 엽면적(PDS; 420.7 cm², PAS; 345.6 cm²), 그리고 식용하는 부위(shoot)의 생물량, 습윤량(PDS; 21.2 mg, PAS; 18.2 mg)과 건중량(PDS; 3.2 mg, PAS; 2.6 mg)이 활성슬러지 액비로 재배한 경우보다 더 컸다(Table 6).

3.3.2. 소화슬러지의 전처리 유무에 따른 비효효과

원폐슬러지를 전처리하지 않고 생산한 액비에 식물이 바로 이용할 수 있는 질산성 질소 성분이 NaOH나 초음파 처리한 경우보다 높았으나(Table 2) 이와 같은 차이는 슬러지에 함유된 분해가 용이한 유기물질이 호기성 미생물에 의해 분해되는 과정에서 질산성 질소의 일부가 소모되기 때문이다. 이러한 슬러지의 안정화과정은 슬러지 재활용

Table 6. Effect of fertilizers produced by activated sludge (PAS) and digested sludge(PDS) on growth of cabbage

Treatment	Leaf length (mm)	No. of leaves (ea)	Leaf area (cm ²)	Fresh weight (mg)			Dry weight (mg)		
				Shoot	Root	Total	Shoot	Root	Total
Water	138.3	11.7	291.8	14.6	13.8	28.4	2.1	1.2	3.3
PDS	152.0	15.7	420.7	21.2	24.5	45.7	3.2	2.2	5.4
PAS	139.0	12.3	345.6	18.2	18.9	37.1	2.6	1.7	4.3

PDS : Pretreated digested sludge, PAS: Pretreated activated sludge

Table 7. Effect of sludge-liquid fertilizer depending on the presence of the pretreatment of digested sludge on growth of chrysanthemum(NS; not significant between the values)

Treatment	Plant height (cm)	Stem diameter (mm)	No. of leaves (ea)	Leaf area (cm ²)	Dry weight(mg)			
					Leaf	Stem	Root	Total
Water	9.59	2.36	14.67	85.07	0.38	0.17	0.46	1.01
Raw digested sludge	9.18	2.59	13.87	109.20	0.55	0.17	0.40	1.12
Pretreated digested sludge	9.60	2.71	15.20	102.93	0.49	0.16	0.59	1.24
* P<0.05	NS	*	*	*	*	NS	*	*

시에 악취 발생 등을 방지하기 위해 불가피하게 요구되는 사안이다. 그 외의 성분은 전처리유무에 따른 차이가 거의 없었으며 또한 전처리 방법에 따른 차이도 미미하였다. 원소화슬러지(RDS) 액비와 NaOH로 가용화시킨 소화슬러지(PDS) 액비(총 0.5 L)를 2배 희석해 5주간 재배한 국화의 생육상태를 비교한 결과(Table 7). 액비로 키운 국화가 수돗물만 주입해 키운 국화보다 줄기의 직경, 엽면적, 건중량 기준으로 볼 때 더 양호한 생육상태를 나타냈으나 전처리 유무에 따른 차이는 크지 않았다. 일례로 전처리하지 않은 원소화슬러지로 키운 국화의 엽면적(109.2 cm²)이 전처리한 소화 슬러지로 키운 국화 엽면적(102.93

cm²)보다 약간 넓었으나 그 차이가 크지 않았지만 수돗물만 주입해 키운 배추(85.07 cm²)보다는 뚜렷한 차이를 보였다. 또한 전처리한 소화 슬러지로 재배한 국화화분에서 가장 먼저 꽃망울이 생성되었다(Fig. 4). 즉, 슬러지를 전처리한 경우에 비효효과가 더 좋았다.

결론적으로 슬러지의 종류 및 전처리유무에 따른 액비의 비효효과는 활성슬러지보다 소화슬러지가 더 양호했고 전처리하지 않은 경우보다 전처리한 경우에 더 좋았다. 그러나 실제로 농가에서 수경재배 시 사용하는 배양액과 회분식으로 생산한 액비의 성분을 비교하면(Table 2), 액비의 질산성 질소는 배양액의 약 80%, 용존 인산염 농도는 거의 유사하였고 칼륨 성분은 약 60%를 차지하였다. 반면에 액비에 함유된 칼슘성분은 배양액의 약 2.5배에 달했는데 식물생장에 칼슘이 부족할 경우 과일 생성 및 상태에 문제가 있다고 보고되었다.²⁵⁾

따라서 액비를 사용해 농작물을 재배할 경우, 전적으로 액비에 의존하기 보다는 추가적인 비료로 사용하는 것이 타당할 것으로 사료된다. 또한 액비를 사용해 오이, 배추 등의 식용작물을 재배한 결과, 액비의 비효효과는 검증되었으나 우리가 아직 규제하지 않으나 EU에서 규제하고 있는 환경호르몬 등의 유해물질을 감안한다면²⁰⁾ 식용작물보다 국화 등 화훼 재배에 슬러지 액비를 사용하는 것이 더 타당할 것이다. 즉, 대규모의 화훼경작단지과 하수처리장이 서로 근접해 있을 경우, 함유율이 높은 폐슬러지를 현장에서 바로 안정화시켜 경작지에 살포해 준다면 매우 바람직한 슬러지 처리 및 재활용 방법이 될 것이다.

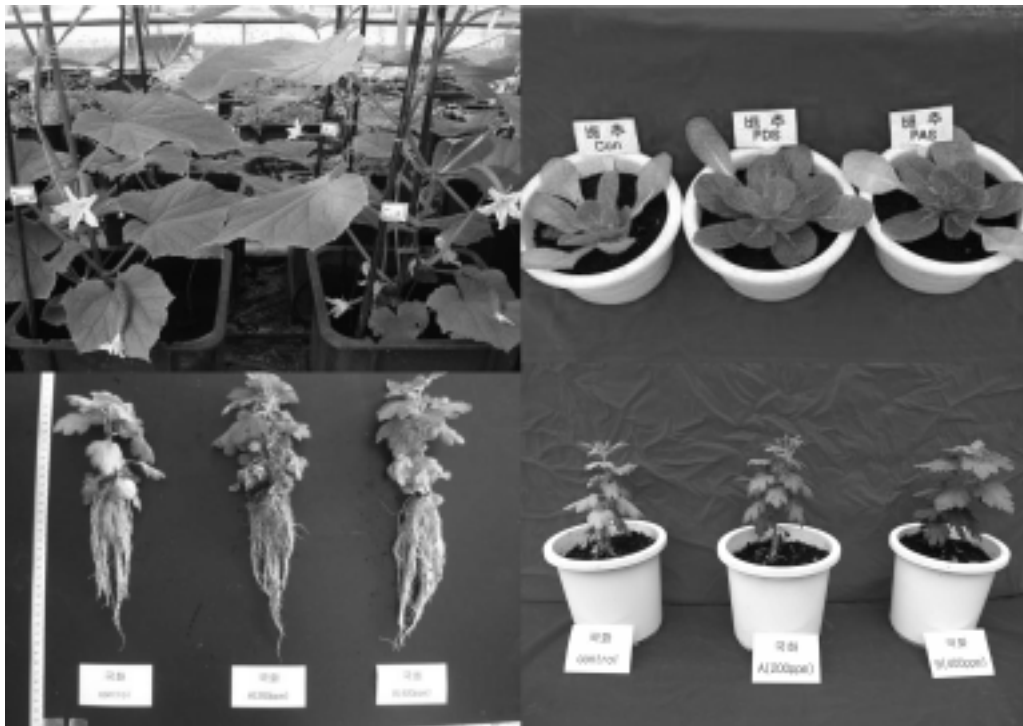


Fig. 4. The growth pattern of cucumber(above left), cabbage (above right) and chrysanthemum(bottom). The chrysanthemum growth with just water was compared with those growth in pretreated digested sludge-fertilizer amended pot(middle) and in raw digested sludge-fertilizer amended pot(right).

4. 결론

하수슬러지를 알칼리(40 meq/L NaOH, 330 min. at 40°C)로 가용화시킨 후 호기적으로 안정화시켜 생산한 액상의 비료(액비)로 오이, 배추, 국화 등의 농작물을 경작하여 비료로서의 활용가능성을 평가하였다. 아울러 액비를 시비할 경우, 액비의 유해성여부를 평가하고자 분변오염의 지표 세균인 분원성 대장균군과 액비에 함유된 중금속이 식물에 생육하는 동안 축적되는지의 여부를 조사하였다.

1) 위생적인 안전성을 확보하기 위해 검출하는 분원성대장균(FC; fecal coliforms)은 연속공정보다 회분식 공정에서 더 높은 제거 효율을 보였고 슬러지체류시간(SRT)이 5일인 경우에 SRT 2.7일인 경우보다 더 높은 제거효율을 보였다. 본 연구에서 생산한 액비 중 회분식으로 SRT를 5일로 조정해 생산한 액비만이 미국 EPA 기준의 A등급에 속하였고 그 외의 슬러지액비는 약간 A등급에 못 미치는 수치를 나타내 B등급에 속하였다.

2) 슬러지 액비를 사용해 오이와 배추를 재배한 결과, 현재 우리나라에서 규제하는 비소, 카드뮴, 크롬, 수은, 구리, 납 등 6개의 중금속 중 크롬, 구리, 납은 대략 식물 건중량 당 10 mg/kg 이하로 검출되었으나 비소, 카드뮴, 수은은 거의 검출되지 않았다. 그러나 규제 외 항목 중 선진의 국에서 규제하는 아연과 니켈, 그리고 규제하지 않지만 상당량 존재하는 티타늄은 각각 최고 118 mg/kg, 15.7 mg/kg, 108 mg/kg 농도로 검출되었다.

3) 재배한 농작물의 건중량 기준으로 볼 때, 액비의 비효효과는 활성슬러지(4.3 mg, dw)보다 소화슬러지(5.4 mg, dw)가 더 양호하였고 전처리하지 않은 경우(1.12 mg, dw)보다 전처리한 경우(1.24 mg, dw)에 더 좋은 것으로 나타났다. 그러나 액비 성분이 실제로 농가에서 사용하는 배양액 성분의 대략 60~80%를 차지하므로 액비를 사용해 농작물 재배 시, 전적으로 액비에 의존하기 보다는 추가적인 비료로 사용하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 한국 과학재단 목적기초연구(과제번호: R01-2004-000-10737-0)지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 환경부, “하수종말처리장 운영결과 분석보고,” (2005).
2. 환경부, “런던협약 '96의정서 발효에 따른 하수슬러지처리 종합대책,” (2007).
3. 권순익, 임동규, 성기석, 이신찬, 이정택, “유기성폐기물 퇴비의 농업활용에의 문제점 및 개선방안,” 유기물 자원화, **15**(3), 31~49(2007).
4. Abdel-Shafy, H. I., Hegemann, W., Genschow, E., “Fate

of heavy metals in the leather tanning industrial wastewater using an anaerobic process,” *Environ. Manag. Health*, **6**(2), 28~33(1995).

5. Zbytniewski, R., Buszewski, B., “Characterization of organic matter(NOM) derived from sewage sludge compost. Part 2: multivariate techniques in the study of compost maturation,” *Bioresour. Technol.*, **96**, 479~484(2005).
6. Gove, L., Cooke, C. M., Nicholson, F. A., Beck, A. J., “Movement of water and heavy metals(Zn, Cu, Pb and Ni) through sand and sandy loam amended with biosolids under steady-state hydrological conditions,” *Bioresour. Technol.*, **78**(2), 171~179(2001).
7. 이기완, 이남경, 노현철, “유기성 폐기물의 퇴비화 과정 중 물질변화,” 대한환경공학회 춘계학술발표회, pp. 1364~1366(2005).
8. 환경부, “유기성 오니 등 토지개량제 및 매립시설 복토용 도로의 재활용 방법,” 환경부 고시, 제2003-214호(2003).
9. US EPA, Part 503 Standards(2000).
10. 환경부, 수질오염공정시험방법, 환경부고시, 제2004-188호(2004).
11. 농업과학기술원, “비료품질 검사방법 및 시료 채취기준,” 농진청 고시, 제996-6호(1996).
12. 농업과학기술원, 토양 및 식물체 분석법(2000).
13. 이영옥, 조주래, 김상현, 김선덕, “위해성 미생물 동태 및 상수원수 관리에 관한 연구,” 낙동강환경기초조사사업 보고서(2007).
14. Hong, S. M., Park, J. K., Teeradej, N., Lee, Y. O., Cho, Y. K., Park, C. K., “Pretreatment of Sludge with Microwaves for Pathogen Destruction and Improved Anaerobic Digestion Performance,” *Water Environ. Res.*, **78**, 76~83(2006).
15. Watanabe, H., Kitamura, T., “Inactivation of pathogenic bacteria under mesophilic and thermophilic conditions,” *Water Environ. Res.*, **36**, 25~32(1997).
16. Han, I., Lee, Y. S., Park, J., “Evaluation of Microbial Risk in Soil Amended with Organic Fertilizers from Stabilized Swine Manure Waste,” *Environ. Eng. Res.*, **12**, 129~135(2007).
17. Korich, D. G., Mead, J. R., Madore, M. S., Sinclair, N. A., Sterling, C. R., “Effects of ozone, chlorine dioxide, chlorine, and monochloroamine on *Cryptosporidium parvum* oocyst viability,” *Appl. Environ. Microbiol.*, **56**(5), 1423~1428(1990).
18. 이서래, 이미경, “국내식품의 중금속 오염과 위해성 분석,” 식품위생학회지, **16**(4), 324~332(2001).
19. Oliveira, A. S., Bocio, A., Trevilato, T. M., Takayanagi, A. M., Domingo, J. L., Segura-Muñoz, S. I., “Heavy metals in untreated/treated urban effluent and sludge from a biological wastewater treatment plant,” *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, **14**(7), 483~489(2007).

20. Kabata-Pendias, A., "Trace elements in soils and plants," CRC press 3 ed.(1984).
21. European Commission, DG Environment, Regulatory Report, Disposal and recycling routes for sewage sludge, October(2001).
22. Miller, R. W., Al-Khazraji, M. L., Sisson, D. R., Gardiner, D. T., "Alfalfa growth and adsorption of cadmium and zinc from soils amended with sewage sludge," *Agric. Ecosys. Environ.*, **53**, 179~184(1995).
23. 최문경, 장매희, "아연폐광지역의 식물복원을 위한 쑥과 해바라기의 생리, 생화학적 반응과 중금속 축적," 원예과학기술지, **21**(4), 451~456(2003).
24. Deng, H., Ye, Z. H., Wong, M. H., "Accumulation of lead, zinc, copper and cadmium by 12 wetland plant species thriving in metal-contaminated sites in China," *Environ. Pollut.*, **132**, 29~40(2004).
25. 김광용, 서태철, 김영철, "고온기 펄라이트 재배 시 양액의 K/Ca 당량비율이 토마토의 생육, 수량 및 배꼽썩음과 발생에 미치는 영향," 한국원예학회지, **40**(6), 652~656(1999).