

## 석회안정화 방법을 이용한 돈사분뇨공공처리시설에서 발생하는 탈수슬러지의 퇴비화

황인수 · 민경석<sup>\*†</sup>

상주시축산폐수처리사업소

<sup>\*</sup>경북대학교 환경공학과

## Composting using the Lime Stabilization of Dewatering Sludge from Centralized Swine Wastewater Treatment Facility

In-Su Hwang · Kyung-Sok Min<sup>\*†</sup>

Office of Livestock Wastewater Treatment Plant, Sanju city

<sup>\*</sup>Department of Environmental Engineering, Kyungpook National University

(Received 10 May 2006, Accepted 13 June 2006)

### Abstract

Dewatering sludge using inorganic chemicals with polymer has been evaded for reuse on account of the risks of high heavy metals contained and soil acidification. Composting feasibility of coagulation & dewatering sludges produced from livestock waste treatment plant was investigated. The results of analysis prove that dewatering sludge is valuable matter with suitable elements for composting if high quality ferric chloride ( $FeCl_3$ ) is used for coagulation & dewatering process. In pot-cultivation of harvestes, using effects of dewatering sludge improved with lime treatment was very effective. The results of pot-cultivation proved that harms of crops according to different acid tolerances were not detected. But it was not applied to crops with weak acid tolerance or greenhouse for free from gas damage. Also, Further studies and monitorings are necessary to use sludges because results of pot-cultivation were generated differently by characteristics of soil, nutrient demand of plants, mature degree of sludge, consecutive cultivation and etc.

**keywords** : Composting, Dewatering sludge, Ferric chloride, Lime treatment, Pot-cultivation

### 1. 서론

현재 국내의 슬러지 처분방식은 매립년한의 단축과 해양 투기에 의한 해양오염을 발생시키는 원인이 되고 있다. 해양오염방지를 위한 런던협약에 의하여, 장기적으로 불 때 슬러지는 해양투기가 금지되고 해양환경오염 부담금부과가 현실화될 전망이다. 슬러지의 농지주입은 화학비료의 농경지주입에 따른 지하수 오염보다 피해가 적으며, 인산과 기타 중요한 영양소를 공급한다. 또한 일반비료에 부족한 미량원소들이 상당량 슬러지에 포함되어 있고, 토양표면의 배수성 향상 및 토양의 화학적 성상 변화로 농업적 이용을 위한 개량의 목적으로 이용될 수 있다(Metcalf et al., 1991). 외국에서는 최근에도 유기성 폐기물을 토양에 사용하기 위한 중금속과 산성화에 대한 여러 연구가 활발하게 진행되고 있다(Cao et al., 2003; Düring et al., 2003). 그러나 국내에서는 재이용에 대한 관심이 비교적 적었을 뿐만 아니라, 하수슬러지(이, 1999)와는 달리 축산분뇨처리장에서 발생하는 탈수슬러지에 대한 연구는 매우 드문 상태이다.

축산분뇨처리장에서 발생하는 탈수슬러지는 화학적 응집 공정에서 대부분 염화제이철( $FeCl_3$ )을 사용함에 따라 슬러지 사용에 따른 중금속 오염과 토양산성화의 가능성 등으로 인하여 사용을 기피하는 경우가 많았고, 작물에 미치는 영향에 대한 실증자료 또한 빈약하였다. 이로 인하여 대부분 슬러지를 높은 비용을 지불하면서 위탁처리함으로써 축산폐수처리비용과 더불어 많은 경제적 부담을 주고 있다(아주대학교 환경·도시공학부, 2001). 2003년 축산폐수처리 통계(환경부, 2004)에 의하면, 2003년도 우리나라의 축산분뇨공공처리장에서 발생한 슬러지는 57,270톤이며, 퇴비 등 재활용으로 40,603톤이 처분되었다. 결국 탈수슬러지는 유기질 비료공장의 혼합퇴비화의 원료로 사용되거나 농가에서 간단한 석회처리와 부숙 후 농지에 사용된 것으로 판단된다. 정부의 가축분뇨 관리·이용대책(농림부 등, 2004)에서도 축산분뇨공공처리장에서 발생하는 슬러지의 재이용에 관한 방안을 강구하고 있다.

슬러지의 처분방법으로서 퇴비화는 안정화를 위한 공정 중의 하나이다. 슬러지의 안정화는 병원균의 감소, 악취의 제거, 부패성의 억제 및 제거를 목적으로 혐기성 소화, 호기성 소화, 습식산화, 열처리, 석회안정화 및 염소산화 등

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.

ksmin@knu.ac.kr

으로 슬러지를 처리하여 2차 오염 및 위해를 방지하는 것이다. 유 등(1994)은 슬러지에 주입된 생석회와 중금속 함량에 대한 연구를 수행하였으며, 최근 가축분 및 하수슬러지와 같은 유기폐기물의 부산물 퇴비화와 작물 및 토양에 대한 영향에 대한 연구가 국내에서도 활발하게 진행되고 있다(전 등, 2003; 송 등, 2003; 황 등, 2004, 2005; 박 등, 2005). 석회를 이용한 안정화 공법은 미국에서 많이 사용하는 방법으로서, 이 방법은 병원균을 사멸시키며 수분함량이 감소하고 냄새가 적어 많이 사용하고 있다(US. EPA, 1993). 본 연구자들은 슬러리형 돈사분뇨와 유기성 폐기물의 혼합퇴비화에 대한 연구(민 등, 2002)와 재활용을 위한 돈사분뇨와 공정슬러지의 특성에 대한 연구(황 등, 2006)를 지속적으로 수행해 왔다. 실제로 슬러지는 대규모 유기질 비료생산업체에서 제품생산에 사용하는 경우는 드물고, 농가에서 직접 사용하거나 소규모 유기질 비료생산업체에서 부산물퇴비 원료로 사용하고 있다. 또한 기술적으로 퇴비를 만들기보다는 대부분 경제적이고도 간편하게 석회처리만을 거치거나 혼합퇴비화하여 사용하고 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 현실에 맞추어, S시 축산분뇨공공처리시설에서 발생하는 슬러지의 성분분석과 함께 석회처리 후 작물에 직접 사용하여 그 결과를 분석하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

실험에 사용한 시료는 S시 축산분뇨공공처리시설의 돈사분뇨처리공정에서 발생하는 탈수슬러지를 사용하였다. 재활용 연구를 위하여 탈수슬러지의 성상은 물론, 슬러지 성상에 직접 영향을 끼치는 염화제이철의 성상도 함께 조사하였다. 또한 발생한 슬러지를 석회로 처리하여 퇴비화 한 후, 산성내성에 따른 표본 작물들을 재배·평가하였다.

### 2.1. 염화제이철 및 슬러지의 성상분석

염화제이철의 성상은 현재 S시 축산분뇨공공처리시설에서 사용하고 있는 제품을 2개월 간격으로 총 3회 측정하여 산출평균하였다.  $FeCl_2$ 와  $FeCl_3$  등을 포함한 모든 항목은 KS M 1118에 준하여 분석하였다. pH는 슬러지와 물을 1:5(Jackson, 1958)로 혼합하여 측정하였고, 수분은 증량법을 사용하였다. 유기물(VS), 총탄소(T-C)는 회화법(dry-ashing)을 사용하여 측정하였고, 총질소는 Kjeldahl법을 사용하였다. 기타 항목은 토양오염공정시험법(동화기술, 2003)과 폐기물공정시험법(동화기술, 2003)을 준용하였으며, 비료성분은 비료공정시험법(농업과학기술원, 1999)을 사용하였다.

일반세균은 희석평판법을 사용하였고, 단계별로 희석한 시료 petri dish당 colony의 수가 30~200개 정도 나타난 것을 선택하여 계수한 후 평균치를 구하였다. 대장균수는 최확수(MPN)로 산출하였으며, 기생충검사는 Antiforming 용액과  $Na_2Cr_2O_7$  용액으로 처리한 후 원심분리하여 현미경으로 계수하였다.

### 2.2. 작물재배실험 및 방법

슬러지는 석회를 혼합하지 않은 순수 슬러지와 석회를 혼합한 슬러지로 구별하여 퇴비화 시켰다. 석회를 혼합한 슬러지는 개량을 위하여 알칼리도 60%인 소석회를 슬러지에 골고루 뿌린 후 삼을 이용하여 인력으로 혼합하였으며, 목표 pH에 도달할 때까지 작업을 반복하였다. 슬러지와 물의 비율이 1:5일 때 pH가 일반적인 채소작물의 적정 생육 조건인 pH 6.0~6.5(Winston, 1968)를 유지하도록 하였다. 석회혼합슬러지는 비닐로 덮은 후 노천에서 약 3개월간 숙성시켰다. 발효는 S시 C동에서 실제로 작물을 재배하고 있는 밭에서 직접 채취하여 사용하였다. 재배작물은 계절적으로 적합한 작물 중 산성에 대한 저항력(조 등, 1981)에 따라 구분하여 선택하였으며, 작물에 미치는 영향은 석회처리 유무와 석회처리한 슬러지의 사용량에 따라 구분하여 평가하였다. 또한 사용에 따라 작물의 모종과 파종에 미치는 영향이 상이할 수 있으므로 모종과 파종을 분리하여 실시하였다.

재배실험은 5~7월에 걸쳐서 산성저항력이 강한 작물, 다소 강한 작물, 약한 작물, 가장 약한 작물로서 각각 옥수수, 토마토, 가지, 상추 등 4종을 모종하여 실시하였다. 재배상은 규격  $0.32 m^w \times 0.48 m^l \times 0.2 m^h$ 인 물빠짐이 좋은 플라스틱상자를 선택하여 사용하였다. 슬러지를 시용한 모포상은 지표에서 20 cm 깊이로 슬러지를 충분히 섞은 후 1개의 모포상당 4개의 모종을 일정한 간격으로 심었다. 모포상은 토양  $1 m^2$ 당 (20 cm 깊이) 각각 대조구, 석회로 개량한 슬러지 1 kg 첨가, 개량하지 않은 슬러지 1 kg 첨가, 석회로 개량한 슬러지 2 kg 첨가, 개량하지 않은 슬러지 2 kg 첨가 등으로 구분하여 시용하였다. 모포상은 땅을 파서 분하도록 하여 지표와의 수분과 온도를 유지하였고, 주기적으로 물을 주었다. 생육상태 관찰은 하나의 모포상 당 4개 모종 중 생육이 가장 좋은 2개의 수치를 산출평균하였고, 1주일을 주기로 하여 9주간 실시하였다. 각 작물의 시용에 대한 효과는 일반적인 비료효과 분석에 많이 이용되는 잎, 줄기 길까지의 생장을 기준으로 평가하였다(한국자원재생공사, 1997; 조, 1998). 실험 초기에는 시용효과만을 관찰하기 위하여 실제 작물의 재배에서 사용하는 적정한 간격이나 포기수를 고려하지 않은 단순재배법을 이용하였다.

파종 재배실험은 평균온도 30°C, 습도 70%인 S시 농업기술센터 온실에서 4주간 실시하였다. 산성저항력에 기준하여 강한 작물과 다소 강한 작물 각 1종, 약한 작물 2종을 선택하였다. 선택된 작물은 각각 무, 배추, 상추, 시금치 등 잎이 대체로 큰 작물로서, 시용효과를 실험하기에 적합한 작물(한국자원재생공사, 1997; 조, 1998) 4종을 파종하였다. 작물이 일정한 크기로 생장한 후에는 최대한 비슷한 생육 조건을 조성하기 위하여 작물별 포기수와 간격을 조절하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 염화제이철 및 탈수슬러지의 성상

Table 1은 S시 축산분뇨공공처리시설에서 사용하고 있는

염화제이철의 성분을 2개월 단위로 3회 측정 한 값이다. S 시에서는 처리공정과 지정폐기물기준을 감안하여 구입제품의 성상기준을 설정하고 있으며, 철저한 기준을 정한 자체 구입시방서에 의해 염화제이철을 구입·관리하고 있다. 이 기준은 탈수시 슬러지에 잔류 가능한 항목농도를 계산한 후 지정폐기물항목에 해당하는 중금속 함량이 기준의 10% 이하가 되도록 여유율을 둔 것으로서 지정폐기물기준의 약 45배 이하의 농도로 규정되었다. 즉, 응집시 염화제이철의 표준주입농도가 약 2,000~4,000 mg/L(폐수의 0.2~0.4%)이므로, 이에 근거하여 슬러지에 잔류가능한 중금속량을 계산하고 지정폐기물기준농도의 10분의 1이하가 되게하는 염화제이철의 중금속함량을 역산하여 구한 값이다.

Table 2는 탈수슬러지를 폐기물공정시험법으로 측정 한 결과이다.

응집공정에 염화제이철을 사용하는 S시의 경우 탈수슬러지를 분석한 결과, 폐기물관리법에 의한 지정폐기물항목기준의 전항목에 있어서 안전하였다. Cd, Pb 및 Cu의 경우는 미량만이 관찰되었으며, 나머지 항목은 검출되지 않았다. 전처리 슬러지의 성상은 돈사폐수에 직접 영향을 받으며, 중금속은 생장촉진과 질병예방을 위한 구리, 아연 및 항생제 등이 함유된 배합사료에 기인한다. 반면에 탈수슬러지는 응집제인 염화제이철의 성상에 직접 영향을 받는다. 슬러지는 철, 망간, 구리, 아연, 크롬, 카드뮴, 납 등의 중금속함량이 높을 경우, 토양오염과 작물에 악영향을 끼치는 물론 작물내 축적으로 인한 인체의 피해와 농약살포시 독성의 상승작용을 유발할 가능성이 있다. 탈수슬러지의 중금속 문제는 화학적 응집·탈수공정에서 중금속 함량이 높은 저질의 염화제이철을 사용할 경우 발생한다(환경관리연구소, 1998). 일단 중금속이 함유된 슬러지는 중금속의 제거가 사실상 불가능할 뿐만 아니라, 지정폐기물 기준을 초과할 경

우 유기질비료 원료로 사용할 수 없도록 규정하고 있다. 따라서 중금속이 다량 함유된 저질품 사용을 엄격히 피하고, 타 시군의 슬러지 성상을 분석한 자료를 바탕으로 하여 중금속 오염우려가 없는 우수한 품질의 제품을 선택적으로 사용하여야 할 것으로 사료된다.

Table 3은 최근 4년간 화학적 탈수를 통하여 발생한 슬러지를 비료공정시험법에 의해 측정 한 결과로서, 우리나라의 비료관리법상 비료공정규격 중 부산물 퇴비의 기준(농업진흥청, 2005) 및 유기성 슬러지 등을 토지개량제 및 매립시설 복토용 도로의 재활용 방법에 관한 고시(환경부, 2000)를 비교하여 정리하였다. 표에서 보는 바와같이, 탈수슬러지는 함수율을 제외하고는 지정폐기물 기준, 부산물 비료 중 퇴비의 규격기준 및 부식토의 기준을 모두 만족하였다. 부산물 퇴비의 함수율 기준이 50% 미만으로 규정된 데 반하여, 탈수슬러지는 약 83%의 함수율을 보였다. 따라서 높은 함수율에 따른 악취문제가 발생할 수 있는데, 앞선 민 등(2002)의 연구에서는 돈사폐수를 석회로 처리하여 퇴비화하였을 때, 초기 다량으로 탈기된 암모니아 농도는 건조가 진행됨에 따라 점점 감소하였다. 석회를 처리한 약 4일 뒤에는 거의 석회처리 전의 상태로 감소하였고, 처리 후 약 16일 이후에는 농도가 미미하였다. 또한 황화수소는 석회처리 초기 2~4시간 내에서는 급격한 증가를 보였으나, 시간이 경과함에 따라 점차 감소하여 8일 후에는 미량만이 검출되었다. 따라서 슬러지가 중성이상을 유지할 수 있는 충분한 석회처리를 통하여 60일 이상의 부숙 및 건조가 진행되면 악취는 크게 감소되는 것으로 판단된다.

Table 4는 탈수슬러지의 성상과 주요 국가들의 재활용기준을 비교한 것이다. 국가에 따라 기준항목의 차이는 있지만, 중금속함량이 매우 낮은 우수한 품질의 염화제이철을 사용하여 응집·탈수한 슬러지는 우리나라 뿐만 아니라 선

Table 1. Content of heavy metals in FeCl<sub>3</sub>

Item	FeCl <sub>2</sub>	FeCl <sub>3</sub>	Free acid (as HCl)	Cd	CN	Pb	Cr	As	Hg	Cu	Ni
Criteria of special regulation	-	-	-	0.3	1	3	1.5	1.5	0.005	3	-
Criteria of delivered good	0.3	41	0.5	13	44	134	67	67	0.2	134	80*
This study	0.1~0.2	41.9~43	0.1~0.2	0.0~0.5	ND	2.0~6.3	0~2.0	ND	ND	33~69	0.04~65

Note) 1. Unit : mg/kg except FeCl<sub>2</sub>, FeCl<sub>3</sub>, Free acid and N-Hex are %  
 2. ND : Not detected  
 3. \* : Standard for by-product compost

Table 2. Content of heavy metals and hazard matters in dewatering sludge

Item	Cd	CN	Pb	Cr	As	Hg	Cu	TCE	TECE	Org-P	N-Hex
Criteria of special regulation	0.3	1	3	1.5	1.5	0.005	3	0.3	0.1	1	5
This study	0.00~0.05	ND	0.01~0.02	ND	ND	ND	0.03~0.06	ND	ND	ND	ND

Note) 1. Unit : mg/kg except FeCl<sub>2</sub>, FeCl<sub>3</sub>, Free acid and N-Hex are %  
 2. ND : Not detected  
 3. \* : Standard for by-product compost

**Table 3.** Trace elements of dewatering sludge

Item	Criteria for by-product manure in Korea	Criteria for mature soil usage in Korea		Dewatering sludge in this study
		Degree A	Degree B	
Ni	50	-	-	0.1 ~ 2.64(1.12)
Zn	900	-	-	0.33 ~ 2.86(0.90)
Organic matter	25 or higher	min.25	min.25	34.9 ~ 51.1(41.7)
C/N	50 or lower	Max.50	Max.50	8.76 ~ 11.42(8.98)
NaCl	1.0 or lower	Max.1	Max.1	0.12 ~ 0.34(0.30)
H <sub>2</sub> O	50 or lower	-	-	80.2 ~ 86.7(83.35)
pH	-	-	-	4.9 ~ 5.2 (5.12)
T-C	-	-	-	19.32 ~ 24.34(22.23)
T-N	-	-	-	1.96 ~ 2.45(2.19)
P	-	-	-	5.9 ~ 6.5(6.1)
K	-	-	-	0.63 ~ 0.72(0.67)

Note) 1. Unit : mg/kg (N-Hex, Organic matter, NaCl, H<sub>2</sub>O: %; C/N, no demension)  
 2. ( ): average; ND: not detected

**Table 4.** Regulation standards of heavy metals for use of biosolids

Items	USA <sup>1</sup>				EU <sup>2</sup>	Australia <sup>3</sup>		Criteria for by-product manure	Korea		Dewatering sludge in this study
	Ceiling conc. (mg/kg)	Cumulative pollutant loading rate (kg/ha)	*High quality pollutant conc. (mg/kg)	Annual pollutant loading rate (kg/ha/yr)	Criteria of heavy metals & advices of organic compounds (mg/kg)	Maximum limit for receiving soil contaminat & maximum limit			Degree A (mg/kg)	Degree B (mg/kg)	
						Grade C1 (mg/kg)	Grade C2 (mg/kg)				
As	75	41	41	2.0	-	20	60	50	50	50	ND
Cd	85	39	39	1.9	20 ~ 40	1	20	5	5	8	0.0007
Cr	3,000	3,000	1,200	150	-	100 ~ 400	500 ~ 3,000	300	300	370	ND
Cu	4,000	1,500	1,500	75	1,000 ~ 1,750	100	2,500	300	500	750	0.092
Pb	840	300	300	15	750 ~ 1,200	150 ~ 300	420	150	150	225	0.02
Hg	57	17	17	0.85	16 ~ 25	1	15	2	2	3	0.0001
Mo	75	18	18	0.90	-	-	-	-	-	-	-
Ni	420	420	420	21	300 ~ 400	60	270	50	-	-	1.12
Se	100	0	36	5.0	-	3	50	-	-	-	-
Zn	7,500	2,800	2,800	140	2,500 ~ 4,000	200	2,500	900	-	-	0.90

Note) 1. U.S.EPA (1993)  
 2. European Commission DG Environment (2001)  
 3. Australia Department of Agriculture, Fisheries and Forestry (2002)  
 4. \*: monthly averages; -: not applicable

진 외국의 재활용기준에도 모두 만족하였다. 그러나 기준에 규정하고 있지 않은 pH, Cl, Fe 등도 재활용의 고려대상이다. 염화제이철을 사용하여 탈수한 슬러지는 산성을 띠게 되는데, 토양의 pH는 양분흡수에 대하여 매우 큰 영향을 끼친다. 토양산성화에 의한 작물의 장애에는 직접적인 것과 간접적인 것이 있으나, 대체로 수소이온에 의한 유해작용, 알루미늄의 유해작용, 작물양분의 결핍, 토양생물의 활성감퇴와 그 밖의 유해이온의 증가 등이 있다(조 등, 1981). 음식물 퇴비를 시용 후 상추와 열무를 재배한 연구결과(한국자원재생공사, 1997)에 의하면, 토양의 pH는 15일째 일시적으로 감소하였다가 이후 다시 증가하는 경향을 보였다. 이와 같이 일시적으로 pH가 감소한 것은 토양에 시용된 퇴비가 완전히 부숙되었을지라도, 토양환경의 변화로 인하여 미생물 등에 의해 다시 분해되면서 생성되는 유기산이나 지방산 및 부식산 등 약산 물질 때문이라고 보고하였다. 따라서 슬러지를 퇴비화할 때는 완전 부숙은 물론, 충분한

석회처리로 pH의 저하를 막는 것이 필요할 것으로 판단된다.

**3.2. 돈사폐수 및 슬러지의 미생물적 특성**

Table 5는 탈수슬러지의 일반세균, 대장균 및 기생충 수를 분석하여 각국의 기준과 비교한 결과이다.

미생물적 기준은 위해성이 아닌 병원균의 존재가능성과 잠재적인 노출가능성을 줄일 목적으로 기준을 설정하였는데, 미국 EPA(2000)에서는 기준을 Class A와 Class B로 구분한다. Class A가 병원균을 검출한계 이하로 줄이는데 목적이 있는 반면에, Class B는 특정조건에서 공공과 환경에 위해를 줄이는 데 취지가 있다.

호주의 경우 미생물학적 기준은 EPA의 기준을 참조하여 만들어졌다. 슬러지는 유해물질농도인 C1과 C2, 미생물농도인 P1~P4, 최대토양허용농도인 C1에 따라 분류되며, 주거지, 농경지, 오락시설 조경, 비오락시설 조경, 산림지, 매

**Table 5.** Maximum allowable concentrations of pathogen concentrations in biosolids

Classification	Microbiological criteria	Approved process
US.EPA <sup>1</sup>	Class A <1000 most probable numbers (MPN)/gram of dry-solids Or Salmonella <3 MPN/4 grams of dry-solids	Microbiological criteria and one of the following process options ; · Temperature and time process / Alkaline treatment · Prior test for enteric virus/Viable helminth · Post test for enteric virus/Viable helminth ova · Processes to further reduce pathogens (PFRP) : Heat drying, composting, heat treatment, thermophilic aerobic digestion, beta ray irradiation, gamma ray irradiation, pasteurization. · PFRP equivalent process
	Class B Fecal coliforms <2 million MPN/gram of dry-solids (averaging seven samples over a two-week period)	Microbiological criteria or one of the following process options; · Processes to significantly reduce pathogens (PSRP) : Aerobic digestion, anaerobic process, air drying, composting, lime stabilization · PSRP equivalent process
EU <sup>2</sup>	France 1. Salmonella : 8 MPN/10 g DM 2. Enterovirus : 3 MPCN/10 g of DM 3. Helminths eggs : 3/10 g of DM	-
	Italy Salmonella : 1000 MPN/g DM	-
	Luxem-bourg 1. Enterobacteria : 100/g 2. No egg of worm likely to be contagious	-
	Poland 1. Not to use in agriculture if it contains salmonella 2. Parasites : 10/kg of DM	-
Australia <sup>3</sup>	P1 1. <1 Salmonella per 50 gram of final product 2. <100 MPN Thermotolerant coli-forms per gram of product	· Composting · pH and heating / Heating and drying · Long - term storage
	P2 1. <10 Salmonella per 50 gram of final product 2. <1000 MPN Thermotolerant coliforms per gram of final product	· Composting · Heating and drying · Aerobic thermophilic digestion
	P3 <2,000,000 MPN Thermotolerant coliforms per gram (dry-weight)	· Anaerobic digestion / Aerobic digestion · Composting
	P4 Not applicable	Any stabilization process not meeting the above microbiological criteria and other conditions
Dewatering sludge in this study	1. Total bacteria : 9.31E+02-2.32E+03 2. Coliform bacteria : 8.26E+02-1.11E+3MPN/g dry-solid 3. Helminths eggs : ND	· Alkaline treatment · Composting

Note) 1. U.S.EPA (2000)  
 2. European Commission DG Environment (2001)  
 3. Australia Department of Agriculture, Fisheries and Forestry (2002)

립지, 소각 등의 7가지 방법으로 재이용되거나 처분되어진다. C1과 P1을 만족하는 슬러지는 제한없이 부지에 사용되어질 수 있다. 유럽에서 미생물에 대한 규제기준은 EC지침에 별도로 규정되어 있지는 않지만, 일부국가에는 별도의 기준을 정하고 있으며 살모넬라, 장내바이러스 및 기생충에 대하여 규정하고 있다.

슬러지 분석결과 전처리슬러지에서는 많은 수의 일반세균과 함께 대장균과 기생충이 존재하고 있었다. 그러나 화학적 응집·탈수를 거치면서 일반세균과 대장균은 대부분이 사멸 또는 제거되었으며, 기생충은 완전히 사멸한 것으로 나타났다. 이는 응집·탈수공정에서 사용하는 염화제이철의 강한 산화력에 기인한 것으로 사료된다. 우리나라에서는 부산물퇴비 중 분뇨잔사를 제외하고는 미생물적 기준이 마련되어 있지 않다. 그러나 유기성 폐기물에 함유되

어 있는 기생충란이나 병원성 세균 등은 석회처리 등을 통한 퇴비화 과정을 거치는 동안 발생하는 최대 64°C의 열과 알칼리에 의해 살충 및 살균되어 위생적으로 안정화되므로(민 등, 2002) 미생물적인 문제는 없을 것으로 보인다.

**3.3. 석회처리에 의한 슬러지의 변화**

Table 6은 슬러지의 석회처리 전후의 성상변화를 나타낸 것이다. 소석회로 처리한 후 3개월 부숙시킨 석회혼합슬러지의 경우 수분이 50%이하로 감소하였으며, pH는 6 이상을 유지하였다. 수분감소에 따라 니켈과 아연 및 염분의 함량은 증가하였으나 유기물함량은 약 30%까지 감소하였다. 또한 석회처리한 슬러지혼합물의 각 항목은 부산물퇴비의 기준에 모두 만족하였다.

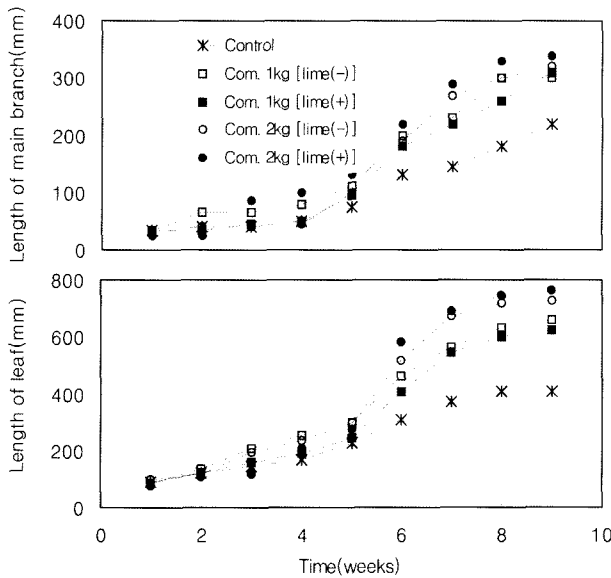
**Table 6.** Effect of lime treatment

Item	Criteria for by-product manure in Korea	Before lime treatment	3 months after lime treatment
Ni	50	1.5	2.7
Zn	900	0.82	1.28
Organic matter	25 or higher	40.3	30.4
C/N	50 or lower	9.2	5.8
NaCl	1.0 or lower	0.20	0.38
H <sub>2</sub> O	50 or lower	81.4	45.8
pH	-	5.1	6.2

Note) 1. Unit: mg/kg (Organic matter, NaCl, H<sub>2</sub>O: %; C/N, no demension)  
 2. -: not regulated

**3.4. 모종에 의한 작물의 생육현황**

Fig. 1은 산성저항력이 강한 작물인 옥수수의 생육현황이다.

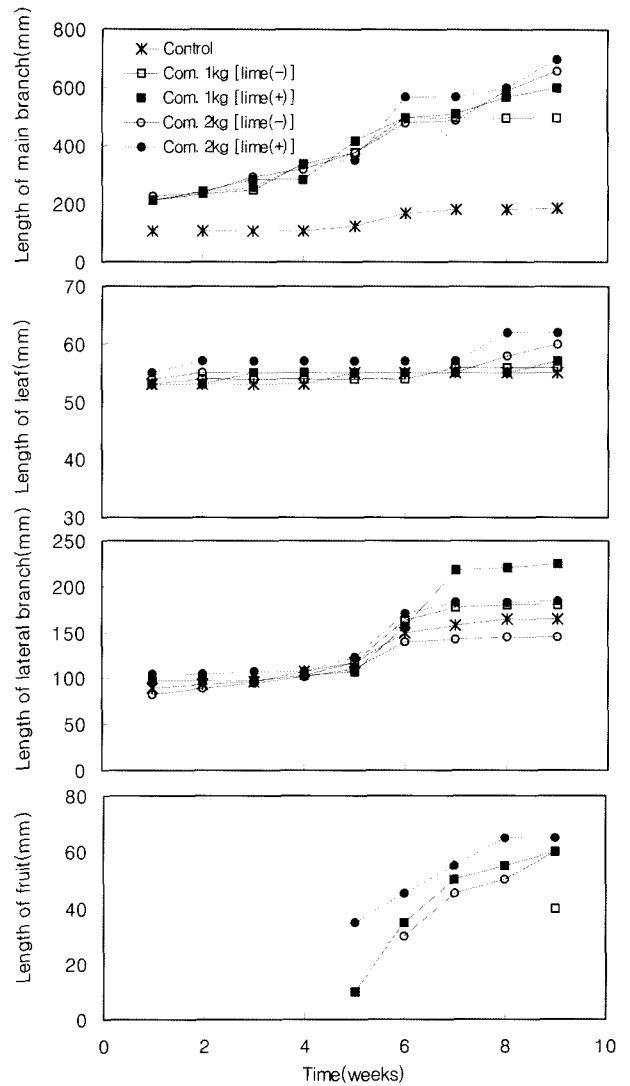


**Fig. 1.** Growth of zea.

모종한 옥수수에 있어서 줄기의 생장은 뚜렷한 슬러지 사용효과를 보였으며, 석회처리 유무와는 크게 상관관계가 없었다. 또한 사용량이 1 kg/m<sup>2</sup>보다는 2 kg/m<sup>2</sup>으로 증가함에 따라 생장율이 높은 것으로 나타났으며 석회첨가 유무에 따른 생장율의 차이는 1 kg/m<sup>2</sup> 사용했을 때보다 2 kg/m<sup>2</sup> 사용했을 때가 조금 더 뚜렷하였다. 옥수수잎 또한 뚜렷한 사용효과가 보였으며 기간별 생장율은 5주를 지나면서 크게 차이를 보였는데, 사용량이 많을수록 생장율이 높았다. 그러나 사용 1 kg/m<sup>2</sup>에서 석회를 첨가하지 않은 것이 석회를 첨가한 것보다 잎의 생장율이 다소 높게 나타나고 있는데, 이는 석회에 의한 것이라기보다는 다른 영향인자에 의한 것으로 보인다.

Fig. 2는 산성저항력이 다소 강한 작물인 토마토의 생육 특성을 나타낸 것이다.

토마토 곁가지의 생장은 석회를 첨가한 사용 1 kg/m<sup>2</sup>에서 가장 높게 나타났으며, 석회를 첨가하지 않은 사용 2 kg/m<sup>2</sup>에서는 오히려 사용하지 않은 것보다 생장율이 낮았다. 석회를 첨가하지 않은 사용 1 kg/m<sup>2</sup>은 석회를 첨가한



**Fig. 2.** Growth of lycopersion.

사용 2 kg/m<sup>2</sup>과 유사한 생장을 보였으며, 대조구와는 뚜렷한 차이를 보이지 않았다. 곁가지에서의 이러한 결과는 열매를 맺기 위하여 영양분이 사용된 연유로 보인다. 토마토 열매는 석회를 처리한 것이 석회를 처리하지 않은 것에 비하여 일찍 열매를 맺었으며(5주차), 석회를 처리하지 않은 사용 2 kg/m<sup>2</sup>과 사용 1 kg/m<sup>2</sup>은 각각 6주차와 9주차에 열매가 관찰되었고 사용하지 않은 대조구는 9주차까지 열매를 맺지 않았다.

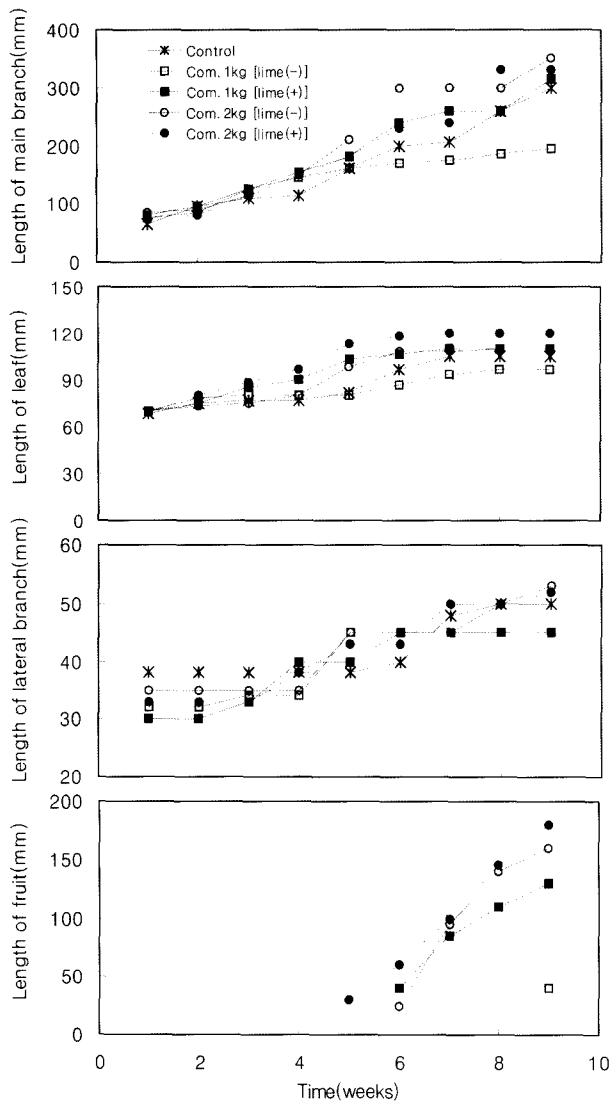


Fig. 3. Growth of solanum.

Fig. 3은 산성저항력이 약한 가지의 생육특성을 나타낸 것이다.

모종한 가지줄기의 생장율은 시용 2 kg/m<sup>2</sup>일 경우 석회를 처리하지 않은 것이 석회를 처리한 것보다 오히려 더 높은 성장을 보였으며, 대체적으로 불규칙한 양상을 보였다. 시용 1 kg/m<sup>2</sup>일 경우에는 석회를 첨가한 것이 더 높은 생장율을 보였을 뿐만아니라 석회를 첨가하지 않았을 경우에는 대조구보다도 생장율이 낮았다. 가지잎의 생장율은 시용 2 kg/m<sup>2</sup>일 경우가 시용 1 kg/m<sup>2</sup>일 경우보다 높게 나타났으며, 석회를 첨가할수록 높은 성장을 보였다. 석회처리를 하지 않은 시용 2 kg/m<sup>2</sup>은 대조구보다 도리어 잎의 생장율이 낮았다. 곁가지의 생장율은 시용량과 석회첨가유무에 상관없이 대조구와 특이한 차이를 보이지 않았다. 가지 열매는 동일 시용량일 경우 석회를 첨가한 경우에 빨리 맺었으며, 시용 2 kg/m<sup>2</sup>에서 시용 1 kg/m<sup>2</sup>보다 일찍 열매를 맺기 시작하였다.

Fig. 4와 같이 산성저항력이 가장 약한 모종상추잎의 생장율은 석회유무와 관계없이 시용에 따른 효과가 나타나지 않았다. 이러한 결과는 상추가 산성에 대한 저항력이 낮고,

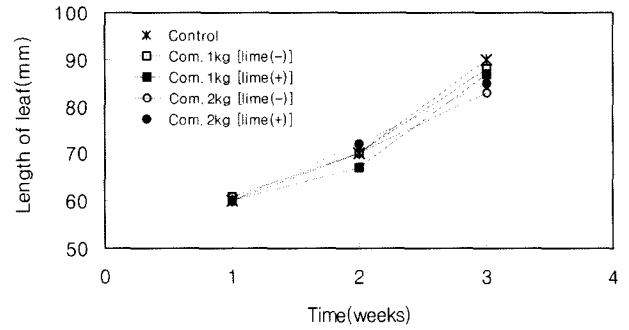


Fig. 4. Growth of lactuca.

토양에서의 슬러지 분해과정에서 생성된 약산의 영향으로 인하여 시용효과가 상쇄된 것으로 추측된다.

### 3.5. 파종에 의한 작물의 생육현황

Fig. 5와 같이 산성저항력이 강한 작물인 파종 무에 있어서 잎의 기간별 생장율은 큰 차이를 보이지 않다가 3주차부터 시용에 대한 생장율이 높게 나타났다. 산성저항력이 다소 강한 작물인 파종 배추잎의 기간생장율은 3주차에서부터 다소 높은 생장율을 보였다. 반면에 산성저항력이 약

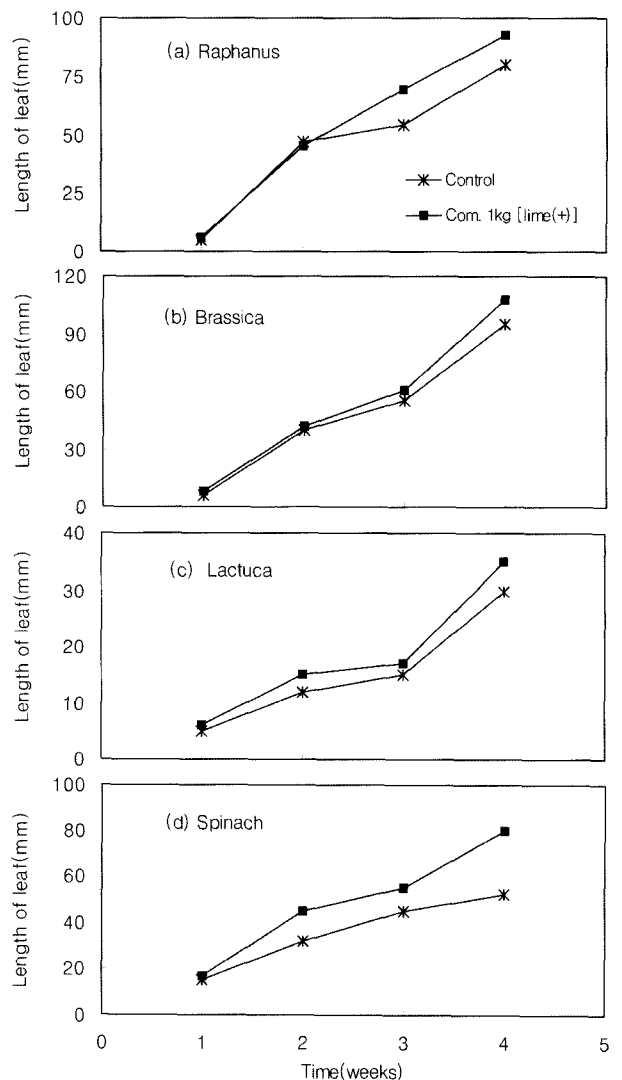


Fig. 5. Growth of vegetables as sowing.

한 작물인 파종 상추잎의 기간별 생장율은 1주차에서부터 시용에 따른 생장율의 차이를 조금씩 보였다. 파종 시금치의 기간별 잎생장율은 시용한 경우 2, 4주차에서 생장율이 매우 높은 양상을 보였다. 시금치잎은 슬러지를 시용한 경우 2주차부터 대조구에 비하여 높은 생장율을 보였다. 이러한 결과는 시금치가 산성에 대한 내성이 약하지만 석회 첨가효과가 있었고, 시비에 대한 흡수성이 매우 강한 특성을 가지고 있기 때문인 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

돈사분뇨를 처리하는 축산분뇨공공처리시설 발생하는 탈수슬러지의 특성을 분석하고 석회를 처리하여 안정화시킨 퇴비를 이용하여 작물재배를 수행한 결과는 다음과 같다.

- 1) 탈수슬러지의 중금속함유는 응집탈수에 사용되는 염화제이철에 기인하며, 염화제이철의 중금속 함량이 지정폐기물 기준을 약 45배 이상 초과하지 않는 우수한 품질의 제품을 선택·사용할 경우, 지정폐기물 기준 및 부산물 비료 중 퇴비의 중금속기준 모두를 만족할 수 있을 것으로 사료된다.
- 2) 탈수슬러지는 부산물 비료 중 퇴비의 규격기준 중에서 함수율을 제외하고는 유기물, 유기물질/질소비, 염분 등의 기준에 모두 적합하였으며, 미생물학적으로도 안전하였다.
- 3) 석회로 개량된 탈수슬러지를 이용한 작물재배 실험에서는 작물과 시용량에 따라 다소 차이가 있었으나, 석회로 개량하지 않은 슬러지에 비하여 우수한 시용효과가 나타났다. 산성에 대한 저항성이 약한 작물에서도 피해는 관찰되지 않았는데, 이는 화학적 응집·탈수 전에 이미 충분한 생물학적 처리공정을 거쳤고, 석회개량 후 3개월 이상 충분히 부숙시켰기 때문으로 사료된다. 그러나 pot 재배실험 결과는 재배토양의 특성, 작물의 다비성 정도, 슬러지의 부숙기간, 토양투수성, 작물의 연작여부 등에 따라 상이하게 나타날 수 있으므로 지속적인 연구를 통한 모니터링이 필요한 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

농림부, 환경부, 가축분뇨 관리·이용대책 (2004).  
 농업과학기술원, 고시 제1999-1호 (1999. 9. 17).  
 농업진흥청, 농업진흥청고시 제2005-1호, 비료공정규격 (2005. 3. 19).  
 동화기술, 공정시험방법, 8판 (2003).  
 민경석, 정용준, 권덕희, 석회처리한 슬러리형 돈사폐수와 유기성폐기물의 혼합 퇴비화, *한국폐기물학회지*, **19**(4), pp. 436-443 (2002).  
 박철수, 주진호, 이원정, 윤경열, 양재의, 옥용식, 부산물 퇴비를 시용한 토양에서 표면유거와 용탈에 의한 질소와 인의 유실, *한국토양비료학회지*, **38**(6), pp. 307-312 (2005).  
 송석현, 나은수, 강호, 돈분 퇴비화에 미치는 응집제의 영향, *한국폐기물학회 춘계학술연구회발표논문집*, pp. 161-

165 (2003).  
 아주대학교 환경·도시공학부, 축산폐수 처리시설 설치·운영 개선방안 수립을 위한 연구보고서, pp. 49-53 (2001).  
 유광태, 최의소, 생석회를 이용한 하수슬러지의 화학적 안정화, *대한토목학회 학술발표논문집*, **III** (1994).  
 이성호, 하수슬러지 재활용 및 자원화 방안, *환경과학논집*, **4**(1), pp. 1-19 (1999).  
 전원태, 박창영, 조영손, 박기도, 윤을수, 강위금, 박성태, 조진룡, 화학비료 및 퇴비 장기사용에 따른 비 뿌리 분포 특성, *한국작물학회*, **48**(6), pp. 484-489 (2003).  
 조성진, 박천서, 임대익, *신교 토양학*, 향문사, pp. 198-206 (1981).  
 조재경, 제5회 환경기술세미나, 환경기술사회, pp. 147-173 (1998).  
 한국자원재생공사, 퇴비제품의 안정성 및 효용성 평가, pp. 1-53 (1997).  
 환경관리연구소, *첨단 환경기술*, **6**(11), p. 129 (1998).  
 환경부, 유기성 슬러지 등을 토양개량제 및 매립시설 복도 용도로의 재활용 방법에 관한 고시 제2000-78호 (2000. 7. 7).  
 환경부, 2003 축산폐수처리통계 (2004).  
 황기성, 윤봉식, 가축분 퇴비의 시용량에 따른 제주 밭토양의 부식의 형태별 함량변화, *한국환경농학회지*, **24**(4), pp. 364-369 (2005).  
 황선진, 장현섭, 윤상현, 김해민, 최윤근, 하수슬러지 퇴비화에서 송풍량이 N<sub>2</sub>O 발생에 미치는 영향에 관한 연구, *한국폐기물학회 추계학술연구회발표논문집*, pp. 297-300 (2004).  
 황인수, 민경석, 재활용을 위한 양돈폐수와 공정슬러지의 특성연구, *한국물환경학회지*, **22**(2), pp. 308-313 (2006).  
 Australia Department of Agriculture, Fisheries and Forestry, *Draft Guidelines for Sewage Systems, Biosolids, Management, Natural Resource Management Ministerial Council* (2002).  
 Cao, X., Ma, L. Q. and Shiralipour, A., Effects of Compost and Phosphate Amendments on Arsenic Mobility in Soils and Arsenic Uptake by the Hyperaccumulator, *Environmental Pollution*, **126**, pp. 157-167 (2003).  
 Düring, R. A., Hoß, T. and Gäth, S., Sorption and Bioavailability of Heavy Metals in Long-term Differently Tilled Soils Amended with Organic Wastes, *The Science of the Total Environment*, **313**, pp. 227-234 (2003).  
 European Commission DG Environment, *Regulatory Report, Disposal and Recycling Routes for Sewage Sludge* (2001).  
 Jackson, M. L., *Soil Chemistry Analysis*, Prentice-Hall, Inc., Englewood cliffs, N. J. (1958).  
 Metcalf and Eddy, *Wastewater Engineering : Treatment, Disposal and Reuse*, 3th Edition, McGraw-Hill, Inc. (1991).  
 U. S. EPA, *Federal Register, Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge Rule*, **58**(32), pp. 9347-9420 (1993).  
 U. S. EPA, *Guide to Field Storage of Biosolids*, EPA/832-B-00-007, U.S. Environmental Protection Agency, July (2000).  
 Winston, A. W., *The Whys and Hows of Liming*, University of Vermont Brieflet 997 (1968).