한국토양비료학회지 제 39권 6호
Korean J. Soil Sci. Fert. Vol. 39, No. 6, 339-344 (2006)

연구보문

퇴비원료기준 확대설정을 위한 유기성자원의 미량원소 및 PAHs 분포 연구

임동규*・이승환・권순익・성기석・이정택・송범헌[1]

농업과학기술원, [1]충북대학교

Study of Trace Element and PAHs Distribution for Extensive Regulation Establishment in Raw Material of Compost on Organic Resource

Dong-Kyu Lim*, Seung-Hwan Lee, Soon Ik Kwon, Ki-Seog Seong, Jeong-Taek Lee and Beom-Heon Song[1]

National Institute of Agricultural Science and Technology, Suwon 441-707, Korea
[1]Chungbuk National University, Cheongju, 361-763, Korea

A lot of organic wastes have been produced from diverse industries, they must be tested by the regulation of fertilizer control act if reuse the organic wastes for agricultural utilization. The regulation has had only two criteria; the content of organic matter and 8 heavy metals. This study was conducted to evaluation trace element (boron, cobalt, molybdenum, and selenium) and distribution of organic compounds with different classification for complement the regulation in 16 organic waste materials(62 samples) collected from different regions and industries. Contents of boron(leather industry sludge, 154.2 mg kg^{-1}; food company sludge, 57.1 mg kg^{-1}), cobalt(industrial area sewage sludge, 95.2 mg kg^{-1}; metropolitan sewage sludge, 22.9 mg kg^{-1}), molybdenum(metropolitan sewage sludge, 40.1 mg kg^{-1}; food company sludge, 16.8 mg kg^{-1}), selenium (fiber industry sludge, 28.1 mg kg^{-1}; leather industry sludge, 16.9 mg kg^{-1}; food company sludge, 15.9 mg kg^{-1}) were highest compare to the other organic wastes. Total PAHs contents were the highest in paper-mill manufacture(3,462 ug kg^{-1}), and among the 16 PAHs, naphthalene, phenanthrene, pyrene, fluoroanthene, Anthracene and acenaphthene were detected more clearly than others in all kinds of organic resources.

Key words : Organic resource, Boron, Cobalt, Molybdenum, Selemium, PAHs

서 언

우리나라 산업의 발달과 도시화로 폐기물의 총 발생량이 2004년에는 1.1 억 톤에 달하였다. 종류별로는 생활폐기물이 1995년 대비 1,825 만 톤으로 6.2%, 사업장 배출 폐기물은 3,833 만 톤으로 9.6% 증가하였는데 그 중 유기성오니는 667만 톤으로 사업장 배출 폐기물의 17.4%를 차지하고 있다 (ME, 2005).

다양한 산업 활동을 통해 발생되는 폐기물의 처리 방안으로는 소각, 매립, 해양투기 및 재활용 하는 방법이 있다. 소각은 비용과 대기오염 및 NIMBY (Not in my back yard)현상 등으로 인한 민원 발생이 쉬워서 처리가 어렵고, 매립은 환경부의 폐기물 관리법에 따라 시설용량 10,000 ㎥/일 이상의 하수 및 폐수 종말처리시설에서 발생하는 오니를 2003년 7월부터, 음식물류 폐기물 등의 유기성오니는 2005년 1월부터 직매립을 금지하고 있기 때문에 어렵다. 해양투기의 경우는 영양염류와 유기물에 의한 해양환경의 오염우려로 런던협약(London convention, 1996)에 따라 유기성 폐기물의 규제를 강화하였고, 2012년부터 완전히 금지하도록 입법추진 중에 있기 때문에 어렵다(ME, 2005). 따라서 배출되는 폐기물을 처리하기 위해 농업분야의 재활용 압력이 증가하고 있다. 따라서 다양하게 배출되는 유기성자원 중에서 유기물 함량과 무기영양성분이 높고 중금속과 유해화합물 등의 함량이 낮은 폐기물을 엄격히 선별하여 농업적으로 재활용해야 한다.

현재 비료관리법에서는 유기성오니를 부산물비료(퇴

접 수 : 2006. 10. 10 수 리 : 2006. 11. 10
*연락저자 : Phone: +82312900226,
E-mail: dklim@rda.go.kr

비)로 농업에 활용하고자 할 때에는 " 퇴비의 원료로 사용 가능한 물질", " 사전 분석 검토 후 사용 가능한 물질"과 " 사용 불가능한 물질"의 3가지로 유기성자원의 종류를 규제하고 있으며, " 사전 분석 검토 후 사용 가능한 물질"은 유기물 함량과 8종의 중금속 함량 기준만 통과하면 사용이 가능토록 되어 있다. 그러나 유기성 폐자원은 종류가 다양하고 그에 따른 특성을 파악하기 곤란하며, 중금속을 비롯한 유해 유기화합물 및 미지의 유해성분을 다량으로 함유할 가능성뿐만 아니라, 농업적 사용경험도 축적되어 있지 않기 때문에 현재의 비료관리법 만으로는 토양과 작물에 미치는 유해성 유무를 판별하기에는 부족하다.

따라서 본 시험에서는 해마다 증가하고 있는 유기성자원을 농업적으로 재활용하기 위하여 전국의 유기성자원을 대상으로 현재 비료관리법에서 제시하고 있는 유기물 함량과 중금속 8종 이외에 붕소(B), 코발트(Co), 몰리브덴(Mo) 및 셀레늄(Se)과 유해 유기화합물 중 PAHs함량을 분석하여 우리나라 유기성자원의 함유수준을 알아보고 외국의 문헌과 비교 검토하여 활용기준 보완을 위한 기초자료로 이용하고자 실시하였다.

재료 및 방법

시험재료 전국 시 · 도 · 공단지역 및 산업체를 각각 무작위로 선발하여 2004년과 2005년 2년간 직접 방문하여, 유기성오니 약 1 kg을 채취하였다. 유기성 폐자원의 수집은 Table 1과 같이 비료공정규격의 부산물비료 퇴비의 비고란에 규정된 퇴비의 원료로 사용 가능한 물질과 사용 불가능한 물질의 분류(RDA, 2004)에 따라 " 사용 가능한 원료로 지정된 원료"는 가축분뇨(돈분뇨) 9점(신고대상 4점, 허가대상 5점), 음식물류 폐기물 8점(단독주택, 공동주택, 감량화 사업장 규모 이하, 감량화 사업장 규모 이상 각 2점)이었고, " 사전 분석검토 후 사용 가능한 원료"는 농어촌 하수오니 6점, 식품오니 2점, 제약오니 3점, 제지오니 2점, 화장품 오니 2점이었으며, " 사용 불가능한 원료"는 하수오니 21점(중소도시 7점, 대도시 8점, 공단지역 6점), 피혁오니 4점, 섬유오니 5점으로 총 16종 62점이었다. 이 시료는 음지에서 풍건한 다음 파쇄하여 2 mm 체를 통과시킨 후 분석 전까지 PE 봉지에 밀봉하여 실온에 보관하였고, 분석은 3회 반복 실시하였다.

분석방법 유기성 오니의 미량원소 및 중금속 분석방법은 시료 0.5 g에 질산 10 mL넣고 microwave를 이용하여 분해한 뒤 유도결합플라스마 발광광도계(ICP- AES, Integra XMP, GBS, Australia)로 붕소, 코발트, 몰리브덴, 셀레늄을 측정하였다.

PAHs는 토양시료 5 g을 dichloromethane 200 mL를 soxhlet 장치에 장착한 후 16시간 동안 추출하였으며(USEPA, 1994), 추출액은 EPA 3630C(USEPA, 1996a)에 준하여 silica gel column으로 정제하였다. 분석은 EPA 8270C(USEPA, 1996b)에 따라 fused silica capillary column(DB-5ms, 30 m×0.25 mm, ID×0.25 ㎛, J&W Sci. Inc., USA)이 장착된 GC-ITMS(PolarisQ, Thermo Finnigan, USA)를 사용하여 분석하였다.

결과 및 고찰

시험재료에 함유되어 있는 붕소, 코발트, 몰리브덴 및 셀레늄의 함량은 Table 2와 같다. 붕소의 경우 피혁오니가 154.2 mg kg^{-1}, 식품오니가 57.1 mg kg^{-1}로 가장 높았고 다른 오니의 경우 2.6 20.9 mg kg^{-1}으로 낮았다. 붕소는 토양 중에 과량이 존재할 시에는 식물체 초기 생육을 억제하여 왜소(dwarf) 해지고 엽변이 갈색으로 위조되는 등의 식물독성을 일으키는 것으로 알려져 있다(Aitken and Bell, 1985; Plank and Martens, 1974). 붕소의 독성은 두과작물이 예민하여 토양을 열수침출 했을 때 붕소함량이 7 ppm 이상이면 독성이 시작되고 대체로 20 ppm 이상에서 작물의 해가 발생된다고 하였다(Hollis et al., 1988). 그러나

Table 1. The numbers and resources of organic wastes used in the experiment.

Organic wastes	Pig Manure		Food Waste Sludge				Sewage Sludge			
	Above of report standards	Above of permission standards	Detached house	Apart -ment house	Below of standards at reducing facility	Above of standards at reducing facility	Rural	Urban	Metro-politan	Industrial area
No. of samples	5	4	2	2	2	2	6	7	8	6

Food Com-pany	Pharma-ceutical company	Paper-mill manufacture	Cosmetic company	Leather Industr	Fiber Industry	Tota
2	3	2	2	4	5	62

Park and Park(1966)은 우리나라 전작지대 유효 붕소 함량의 평균은 0.15 mg kg-$^{-1}$으로 극히 낮고 밭 토양의 95%가 0.3 mg kg^{-1} 이하로 붕소 결핍이 우려된다고 하였다. Dowdy et al.(1976)은 미국에서 발생되는 하수오니의 총 붕소함량은 장소와 계절에 따라 다르지만 4 757 mg kg^{-1}의 범위 안에 들어온다 하였고, 이미 중국과 남아프리카에서는 150 mg kg^{-1}과 80 mg kg^{-1}을 규제항목으로 정해놓고 있다(Battle, 1999). 코발트는 공단지역 하수오니에서 95.2 mg kg^{-1}, 대도시 하수오니에서 22.9 mg kg^{-1}, 몰리브덴은 식품오니에서 16.8 mg kg^{-1}, 대도시 하수오니에서 40.1 mg kg^{-1}에서 가장 높았다 코발트와 몰리브덴은 다른 어떤 원소보다도 식물체에 극소량만을 필요로 하기 때문에 토양에 충분한 양이 있어서 거의 결핍이 일어나지 않는다고 알려져 있어 코발트는 남아프리카와 스위스에서 100 mg kg^{-1}, 60 mg kg^{-1}, 몰리브덴은 슬로바키아, 남아프리카, 스위스 및 미국(EPA)에서 각각 25 mg kg^{-1}, 25 mg kg^{-1}, 20 mg kg^{-1}, 75 mg kg^{-1}을 규제항목으로 정해놓고 있다(Battle, 1999). 셀레늄은 섬유오니에서 28.1 mg kg^{-1}, 피혁오니에서 16.9 mg kg^{-1} 그리고 식품오니에서 15.9 mg kg^{-1}으로 가장 높았으며 기타 다른 유기성 자원에서는 10 mg kg^{-1}을 넘지 않는 낮은 수준이었다.

셀레늄은 1817년 스웨덴에서 처음으로 발견되었고 사람과 동물에게는 매우 낮은 농도로 요구되는 필수 미량원소로서 보통 식물, 가축, 어류 등을 통해 섭취한다고 알려져 있으며, 이미 미국과 유럽에서는 심장, 간 등의 기능강화와 암 등에 예방효과가 있다고 인정되어(Axley et al., 1991) 일일 권장섭취량이 100 200 ug으로 알려져 있다(Gunnar et al., 1985). 일반적으로 토양 내 셀레늄 함량은 0.1 2 mg kg^{-1}이며, 프랑스, 남아프리카 및 미국(EPA)에서는 10 mg kg^{-1}, 15 mg kg^{-1}, 100 mg kg^{-1}을 규제항목으로 정해놓고 있다. 이처럼 외국의 규제사례 중 가장 강한 기준(붕소: 80 mg kg^{-1}, 코발트: 60 mg kg^{-1}, 몰리브덴: 20 mg kg^{-1}, 셀레늄: 10 mg kg^{-1})과 우리나라 유기성자원의 붕소, 코발트, 몰리브덴, 및 셀레늄 함량을 비교해 보았을 때, 붕소에서는 피혁오니가, 코발트에서는 공단지역 하수오니가, 몰리브덴에서는 대도시 하수오니가, 셀레늄에서는 식품오니, 피혁오니 및 섬유오니가 각각 기준치를 초과하였다.

따라서 현재 유기물함량과 중금속 8성분의 기준 이외에 이들 미량원소를 추가로 보완한다면 우선 외국의 규제사례 중 가장 완만한 기준인 붕소: 150 mg kg^{-1}, 코발트: 100 mg kg^{-1}, 몰리브덴: 75 mg kg^{-1}, 셀레늄: 100 mg kg^{-1}으로 활용기준을 설정하는 것이 좋을 것으로 생각되며, 앞으로도 많은 연구를 통해 우리나라의 실정에 맞게 확대, 보완할 필요가 있다고 판단된다.

시험재료에 함유되어있는 유해 유기화합물인 총 PAHs를 분석한 결과는 Table 3과 같다. 총 PAHs 함량은 제지오니에서 3462 ug kg^{-1}으로 가장 높았고, 허

Table. 2. Concentrations of B, Co, Mo, and Se in 16 organic resources collected from different regions and industries.

Organic wastes†	B	Co	Mo	Se
	mg kg^{-1}, dry basis			
PM1	13.5±3.85	1.8±0.34	2.1±0.40	1.0±0.05
PM2	9.1±1.09	3.4±2.27	1.2±0.43	0.9±0.23
FW1	9.1±1.31	0.0±0.03	0.3±0.06	0.3±0.00
FW2	8.6±0.44	0.1±0.01	0.3±0.02	0.8±0.30
FW3	6.4±0.77	0.0±0.01	0.9±0.08	0.4±0.14
FW4	4.9±0.38	1.5±0.95	8.0±4.07	2.5±0.55
SS1	11.9±1.03	5.1±1.36	3.9±0.31	3.1±0.90
SS2	7.1±0.79	5.4±0.67	5.1±1.03	3.1±1.02
SS3	16.9±2.11	22.9±12.20	40.1±25.75	5.8±2.60
SS4	20.9±5.67	95.2±98.41	9.8±4.10	4.8±1.93
Fo	57.1±38.46	5.6±3.36	16.8±9.31	15.9±10.53
Ph	16.3±5.39	0.9±0.36	2.1±0.43	0.7±0.43
Pa	10.9±1.97	5.4±2.98	1.5±0.37	4.3±2.86
Cm	2.6±0.27	2.6±1.41	3.3±0.29	2.5±0.96
Le	154.2±148.13	7.4±1.80	3.2±1.11	16.9±8.53
Fi	4.7±1.03	9.4±2.69	1.4±0.38	28.1±10.63

†PM1: Pig manure (above of report standards) PM2: Pig manure (above of permission standards) FW1: Food waste sludge (detached house) FW2: Food waste sludge (apartment house) FW3: Food waste sludge (below of standards at reducing facility) FW4: Food waste sludge (above of standards at reducing facility) SS1: Sewage sludge (rural) SS2: Sewage sludge (urban) SS3: Sewage sludge (Metropolitan) SS4: Sewage sludge (industrial area) Fo: Food company, Ph: Pharmaceutical company, Pa: Paper-mill manufacture, Cm: Cosmetic company, Le: Leather Industry, Fi: Fiber industry.

Table 3. Concentrations of total PAHs in 16 organic waste materials collected from different regions and industries (Refer to the table 2 for the abbreviations).

Organic wastes	Total PAHs
	mg kg^{-1}, dry basis
PM1	391 ± 367.8
PM2	837 ± 29.7
FW1	1642 ± 104.0
FW2	592 ± 585.9
FW3	1290 ± 515.3
FW4	1673 ± 43.6
SS1	1507 ± 891.4
SS2	2179 ± 65.7
SS3	1531 ± 157.9
SS4	1134 ± 474.3
Fo	739 ± 418.3
Ph	823 ± 132.5
Pa	3462 ± 113.5
Co	585 ± 125.6
Le	2406 ± 846.3
Fi	1152 ± 492.6

가대상 가축분뇨가 391 ug kg^{-1}으로 가장 낮았으며, 피혁오니, 중소도시 하수오니, 감량화사업장 이상 음식물류 폐기물, 단독주택 음식물류 폐기물, 대도시 하수오니 순이었으며, 나머지 유기성자원에서는 약 1500 ug kg^{-1} 이하로 낮았다. Smith (2000)는 하수오니의 PAHs 함량이 1 10 mg kg^{-1} 정도라고 하였고, 우리나라 하수슬러지의 총 PAHs 함량의 범위는 142 20,102 ug kg^{-1}으로 평균 3,289 ug kg^{-1}이라고 하여 (Nam et. al., 2002) 본 시험재료를 분석한 결과(391.0 3462 ug kg^{-1})와 유사하였다.

Fig. 1은 시험재료에 함유되어 있는 16가지 PAHs 화합물의 분포를 "사용가능한 원료", "사전분석 검토 후 사용가능한 원료" 및 "사용 불가능한 원료"로 나누어 종류별 평균을 표시한 것이다. "사용가능한 원료"의 PAHs 함량이 naphthalene, pyrene, phenanthrene, 및 benzo(b)fluoroanthene에서 각각 140.2, 111.8, 110.8, 110.8 ug kg^{-1} 순이었고, "사전분석 검토 후 사용가능

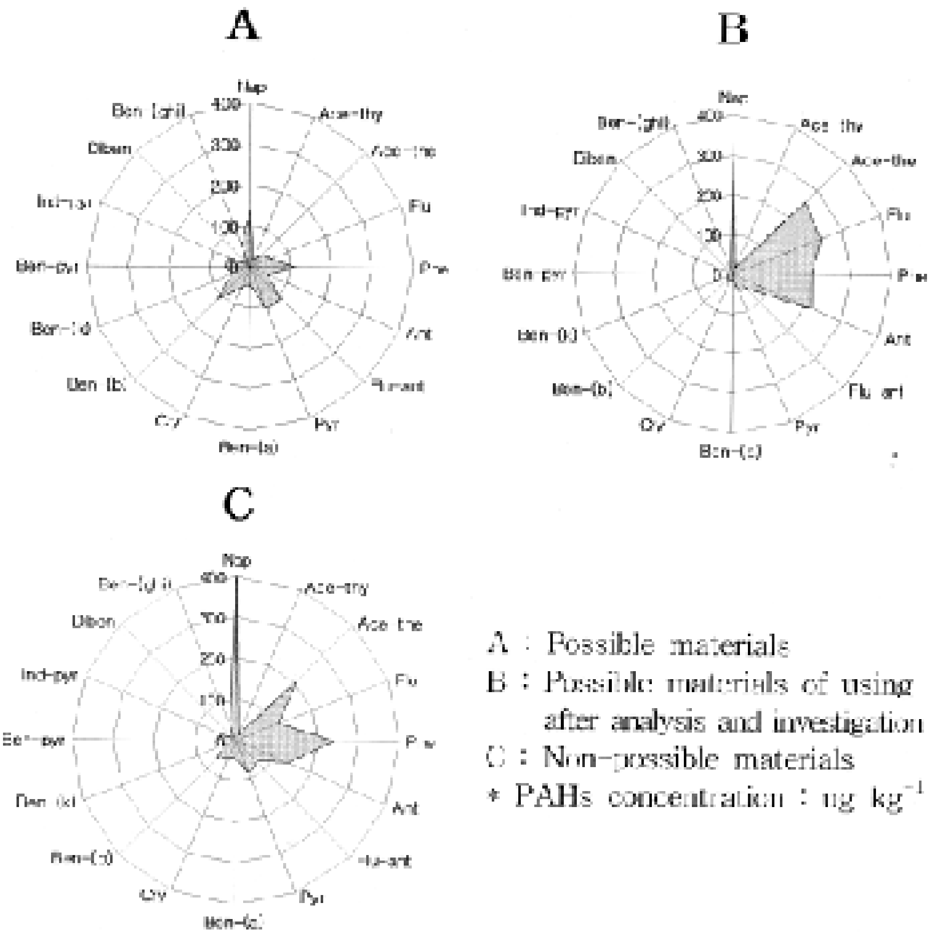

Fig. 1. The concentration of 16 PAHs in organic wastes with different classification.
Nap: Naphthalene, Ace-thy: Acenaphthylene, Ace-the: Acenaphthene, Flu: Fluorene, Phe: Phenanthrene, Ant: Anthracene, Flu-ant: Fluoroanthene, Pyr: Pyrene, Ben-(a): Benzo(a)anthracene, Cry: Crysene, Ben-(b): Benzo(b)fluoroanthene, Ben-(k): Benzo(k)fluoroanthene, Ben-pyr: Benzo(a)pyrene, Ind-pyr: Indeno(123-cd)pyrene, Diben: Dibenzo(ah)anthracene, Ben-(ghi): Benzo(ghi)perylene

한 원료"의 PAHs 함량이 naphthalene, acenaphthene, fluorene, anthracene 및 phenanthrene이 각각 329.5, 256.3, 239.5, 218.9 및 200.1 ug kg^{-1} 이었으며, “사용 불가능한 원료"의 PAHs 함량은 naphthalene, phenanthrene, acenaphthene 및 anthracene은 각각 468.1, 240.8, 212.2 및 140.9 ug kg^{-1} 이었다. PAHs 함량기준이 있는 세계 여느 나라에서도 단일 화합물 별로 규제하고 있지는 않으나(Ellen et al., 1999; Battelle, 1999) 본 연구에서는 모든 종류의 유기성 자원에서 naphthalene이 화합물 중 함량이 가장 높은 것으로 나타났다.

생활하수 슬러지 84점의 PAHs 분석을 한 Nam et al. (2002)은 16종의 PAH 중 가장 많은 양을 차지하고 있는 성분은 fluorene, fluoroanthene 및 pyrene이었다고 하여 본 시험재료의 PAHs 함량분포와 약간 상이하였다. 이는 제조 방법과 원료 및 생산품의 종류 등에 따라 분포가 달라진 것으로 생각되었다. 유럽의 경우 덴마크에서는 PAHs 중 acenaphthene, phenanthrene, fluorene, fluoranthene, pyrene, benzo(b+j+k)-fluoranthene, benzo(a)pyrene, benzo (ghi)perylene, indeo(1,2,3-cd)pyrene에 대하여 2000년 6월30일까지는 6 mg kg^{-1}이하가 되도록 규제하였으나 7월1일부터는 3 mg kg^{-1}으로 강화하였다. 프랑스는 fluoranthene은 5 mg kg^{-1}, benzo(b)fluoranthene 2.5 mg kg^{-1}, benzo(a)pyrene 2 mg kg^{-1} 이하로 각각 규제하고 있으며, 스웨덴은 Swedish EPA에서 지정한 6가지 화합물의 합이 3 mg kg^{-1} 이하가 되도록 규제하고 있다(CEC, 2000). 본 시험결과에서 검출이 많이 된 성분과 외국의 규제성분과는 차이가 있기에, 각 성분에 따른 유해성 유무 및 함량의 기준에 대한 연구가 필요하다고 생각된다.

적 요

유기성 폐자원을 퇴비원료로서 재활용하는데 대한 규정에는 현재 유기물과 8종의 중금속 함량에 대한 기준만 있기 때문에 미량원소(붕소, 코발트, 몰리브덴 및 셀레늄) 및 유해 유기화합물(PAHs) 함량을 기준 항목으로 추가하기 위하여 전국 62개소에서 채취한 16종에 대한 성분분석을 실시한 결과는 다음과 같다.

붕소의 경우 피혁오니가 154.2 mg kg^{-1}, 식품오니가 57.1 mg kg^{-1}로 가장 높았고, 코발트는 공단지역 하수오니에서 95.2 mg kg^{-1}, 대도시 하수오니에서 22.9 mg kg^{-1}, 몰리브덴은 식품오니에서 16.8 mg kg^{-1}, 대도시 하수오니에서 40.1 mg kg^{-1}, 셀레늄은 섬유오니에서 28.1 mg kg^{-1}, 피혁오니에서 16.9 mg kg^{-1} 그리고 식품오니에서 15.9 mg kg^{-1}으로 가장 높았다. 유해 유기화합물 중 총 PAHs는 제지오니에서 3,462 ug kg^{-1}로 가장 높았고, PAHs의 성분별 비교해 보면, naphthalene, phenanthrene, pyrene, fluoroanthene, anthracene 및 acenaphthene의 함량이 다른 화합물보다 현저히 높은 것으로 나타났다.

따라서 현재 우리나라에서 유기성자원의 퇴비원료로 활용에 대한 기준은 유기물함량과 중금속(8성분: Zn, Cu, Cr, Pb, Ni, Cd, As, Hg)으로 규제하고 있으나, 미량원소(B, Co, Mo, Se), 유해 유기화합물(PAHs)에 대한 보완연구를 통해 퇴비원료기준에 규제기준을 추가하여 선별체계를 확립한다면, 유기성 폐기물도 자원으로써 농업적인 재활용이 가능하다고 생각된다.

인 용 문 헌

Aitken, R.L., and L.C. Bell. 1985. Plant uptake and phytotoxicity of boron in Australi an fly ashes. Plant and Soil 84:245-256.

Axley, M.J., A. Beuck, and T.C. Stadtman. 1991. Catalytic properties of an Escherichia coli formate dehydrogenase mutant in which sulfar replaces selenium. Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 88:8450-8454.

Battelle. 1999. Background report on fertilizer use, contaminants and regulations. National Program Chemicals Division Office of Pollution and Toxics. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C. 20460.

CEC. 2000. Working document on sludge, Third draft, Brussels 27 April 2000, DG. Environment.

Dowdy, R.H., R.E. Larson, E. Epstein. 1976. Sewage sludge and effluent use in agriculture. In: Land application of waste materials. Soil Conservation Society of America. 138-153.

Ellen, Z.B., H.M. McBride, and D.R. Bouldin. 1999. The case for caution. Recommendation for land application of sewage sludges and an appraisal of the US EPA's Part 503 sludge rules. Cornell Waste Management Institute.

Gunnar, G.N., C.G. Umesh, L. Michel, and W. Tuomas. 1985. Selenium in soil and plant and its importance in livestock and human nutrition. Adv. Agron. 37:397-460.

Hollis, J., F.R. Karen, and M. Gal. 1988. Boron release and sorption by fly ash as affected by pH and particle size. J. Environ. Qual. 17:181-184.

London convention. 1996. Convention on the prevention of marine pollution by dumping of wastes and other matters.

Ministry of Environment. 2005. Home page ()

Nam, J.J., K.H. So, W.K. Park, N.J. Jo, and S.H. Lee. 2002. Quantitative analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs) in sewage sludge by gas chromatography- ion trap mass spectrometry. J. of the Environmental Sciences. 110:367-373.

Park, C.S., and N.J. Park. 1966. Studies on the available boron content in the soils of upland crops area in Korea. Annual research report. RDA. 9:163-174.

Plank, C.O., and D.C. Martens. 1974. Boron availability as influenced by application of fly ash soil. Soi. Sci. Soc. Amer. Proc.

38:974-977.

Rural Development Administration. 2004. Possible materials and non possible materials of using as raw materials of compost (Asterisk table 1).

Smith. S.R. 2000. Are controls on organic contaminants necessary to protect the environment when sewage sludge is used in agriculture? Prog. Environ. Sci. 2:129-146.

US EPA. 1994. Test methods for evaluating solid waste, physical/chemical methods. SW-846, Revision 2, Office of Solid Waste and Emergency Response, Wahington, DC, USA.

US EPA. 1996a. Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods, SW-846, Method 3630C: Silica gel cleanup.

US EPA. 1996b. Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods, SW-846, Method 8270C: Semivolatile Organic Compounds by Gas Chromatography/Mass Spectrometry(GC/MS), Washington, DC, USA.