

Research Paper

농축산저수지 오염퇴적토의 토양정화기술에 대한 적용성 연구

정재윤 · 장윤영

광운대학교 환경공학과

A Study on the Applicability of Soil Remediation Technology for Contaminated Sediment in Agro-livestock Reservoir

Jaeyun Jung · Yoonyoung Chang

Department of Environmental Engineering, Kwangwoon University

요약: 하천, 호소 및 해양항만의 퇴적물은 수계로 배출된 오염물질의 종착점이며 동시에 지속적으로 오염물질을 수계로 배출하는 오염원(source)으로 작용한다. 지금까지 오염퇴적물은 육상매립 또는 해양투기 해왔던 것이 현실이었다. 하지만 육상매립은 고 비용, 해양투기는 런던협약으로 인해 전면 금지되었다. 따라서 본 연구에서는 대상부지인 왕궁축산단지의 오염퇴적토를 대상으로 토양정화방법을 적용하여 연구하였다. 토양정화방법은 해외 적용사례와 국내 처리 가능한 적용기술을 선별하여 전처리, 퇴비화, 토양세척, 동전기, 열탈착을 적용하였다. 오염특성과약을 위한 대상 부지 조사결과 수질은 용존산소(Dissolved Oxygen, DO), 부유물질(Suspended Solid, SS), 화학적산소요구량(Chemical Oxygen Demand, COD), 총질소(Total Nitrogen, TN), 총인(Total Phosphorus, TP) 이 방류수 수질기준을 초과하였고 특히 SS, COD, TN, TP는 기준을 수십 배에서 수백 배 초과하였다. 토양은 돼지사료의 성장을 촉진하는 구리, 아연의 농도가 높게 나타났으며, 카드뮴이 토양환경보전법 기준치 1지역을 상회하였다. 전처리기술은 하이드로사이클론을 활용하여 입도분리를 실시하였으며, 미세토양이 80% 이상 분리되어 선별효율이 높게 나타났다. 퇴비화는 유기물 및 석유계 총 탄화수소(Total Petroleum Hydrocarbon, TPH) 오염토양을 대상으로 실시하였으며, TPH는 우려기준 이내로 처리되었고, 유기물의 경우 대장균이 높게 분석되어 70℃에서 퇴비화 최적조건을 적용하여 비료규격을 만족하였으나 비료규격에 비하여는 유기물함량이 낮게 분석되었다. 토양세척은 연속추출시험결과 Cd는 미세토에서 5단계인 잔류성(Residual)물질이 확연하게 존재하였고 Cu 및 Zn은 오염분리가 쉬운 이온교환성(1단계), 탄산염(2단계), 철/망간산화물(3단계)의 함량이 대부분을 차지했다. 산용출과 다단계세척을 단계별로 적용결과 염산, 1.0M, 1:3, 200rpm, 60min이 최적 세척인자로 분석되었으며 다단계세척시험결과 오염 퇴적토는 대부분 1단에서 토양환경보전법 우려기준을 만족하는 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구의 적용성 시험결과 중금속오염이 높은 오염토는 전처리 후 토양세척을 적용하여 처리토를 골재로 활용하고, 유기물 및 유류 오염토는 퇴비화를 적용하여 오염물질과 대장균을 사멸한 후 부숙토로 사용하는 것이 효율적임을 확인할 수 있었다.

주요어: 농축산저수지, 오염퇴적토, 토양정화기술

Abstract: Sediments from rivers, lakes and marine ports serve as end points for pollutants discharged into the water, and at the same time serve as sources of pollutants that are continuously released into the water. Until now, the contaminated sediments have been landfilled or dumped at sea. Landfilling, however, was expensive and dumping at sea was completely banned due to the London Convention. Therefore, this study applied contaminated sedimentation soil of 'Royal Palace Livestock Complex' as soil purification method. Soil remediation methods were applied to pre-treatment, composting, soil washing, electrokinetics, and thermal desorption by selecting overseas application cases and domestically applicable application technologies. As a result of surveying the site for pollutant characteristics, Dissolved Oxygen (DO), Suspended Solid (SS), Chemical Oxygen Demand (COD), Total Nitrogen (TN), and Total Phosphorus (TP) exceeded the discharged water quality standard, and especially SS, COD, TN, and TP exceeded the standard several tens to several hundred times. Soil showed high concentrations of copper and zinc, which promote the growth of pig feed, and cadmium exceeded 1 standard of Soil Environment Conservation Act. In the pre-treatment technology, hydrocyclone was used for particle size separation, and the fine soil was separated by more than 80%. Composting was performed on organic and Total Petroleum Hydrocarbon (TPH) contaminated soils. TPH was treated within the standard of concern, and E. coli was analyzed to be high in organic matter, and the fertilizer specification was satisfied by applying the optimum composting conditions at 70°C, but the organic matter content was lower than the fertilizer specification. As a result of continuous washing test, Cd has 5 levels of residual material in fine soil. Cu and Zn were mostly composed of ion exchange properties (stage 1), carbonates (stage 2), and iron / manganese oxides (stage 3), which facilitate easy separation of contamination. As a result of applying acid dissolution and multi-stage washing step by step, hydrochloric acid, 1.0M, 1:3, 200rpm, 60min was analyzed as the optimal washing factor. Most of the contaminated sediments were found to satisfy the Soil Environmental Conservation Act's standards. Therefore, as a result of the applicability test of this study, soil with high heavy metal contamination was used as aggregate by applying soil cleaning after pre-treatment. It was possible to verify that it was efficient to use organic and oil-contaminated soil as compost Maturity after exterminating contaminants and E. coli by applying composting.

Keywords: Agricultural Reservoir, contaminated sediment, Soil remediation Technology

I. 서론

퇴적물은 육지로부터 유입되어 호소, 하천, 해양 등의 수체에 쌓이는 모래, 점토, 유기물질, 광물질을 통칭한다. 퇴적물이 수서 생물 혹은 국민건강에 악영향을 미칠 수 있는 농도 이상의 중금속, 다환방향족 탄화수소(PAHs), 유기염소계 농약, 폴리클로리네이티드비페닐(PCBs) 등의 유해화학물질을 포함하는 경우 오염퇴적물이라 일컫는다(EPA 1993). 일반적으로 유기물 및 인 등의 영양염류를 많이 포함하여 부영양화를 발생시켜 수질악화의 원인이 된다.

하천, 호소 및 해양항만의 퇴적물은 수계로 배출된 오염물질의 종착점이면서 동시에 지속적으로 오염물질을 수계로 배출하는 오염원(source)으로 작용한다. 오랜 시간 동안 퇴적된 토사는 홍수 시 하천의 통수능력을 저해하거나 호소의 저수량을 낮추는 등 물 관리에 부정적인 영향을 줄 수 있다. 지표면에서 탈착되어 수체로 유입된 입자성 물질(토사)은 영양염류, 중금속, 유기물질 등과 흡착되어 하천과 호소로 유입되어 흘러가거나 정체되면서 결합하여 침전물을 형성하고 중력에 의해 수체 바닥에 퇴적된다. 퇴적물에 존재하는 오염물질은 수소이온농도(pH), 용존산소

(DO), 산화환원전위(ORP), 유기탄소함량(TOC) 등의 조건에 따라 퇴적물 내 간극수(pore water)로 용출된 후에 저서생물체로 유입되거나 다시 퇴적물과 결합하는 과정을 반복하게 된다. 퇴적물 간 결합된 오염물질은 저서생물의 활동에 의한 생물교란이나 홍수, 준설과 같은 교란에 의해 재부유하여 수질과 수생태계에 영향을 줄 수 있다(Kim & Kim 2009).

퇴적물의 준설사업은 하천의 통수 능력이나 저수지의 저수량의 변화뿐만 아니라 물 환경에도 큰 영향을 미친다. 그러나 국내에서는 오염 퇴적물의 판단·관리하고 준설된 오염물질을 처리하고, 재활용 할 수 있는 제도적 및 기술적 기반이 미비한 실정이다(Kim et al. 2010). 또한 지금까지 오염퇴적물 및 유기오염퇴적물은 준설하여 육상처리시설로 이송하여 육상매립처리하거나 해양투기 해왔던 것이 현실이었다. 하지만 육상매립장은 매립장 건설비용 과다 및 국토이용활용에 부정적이며 해양투기는 런던협약으로 인해 전면 금지되었다.

국내 퇴적토 관리는 ‘수질 및 수생태계 보전에 관한 법률’, ‘해양환경관리법’, ‘하천법’, ‘폐기물관리법’, ‘토양환경보전법’ 등에서 오니, 퇴적물, 침전물, 수저 퇴적물, 골재, 토양 등으로 다양하게 언급되고 있으나 아직 직접적인 관리의 대상으로는 취급되지 않았으며, 단지 수질개선을 위한 오염원관리 차원에서 유기물 또는 영양염류로 오염된 퇴적물을 제거하는 것과 환경기초조사의 일환으로 퇴적물 오염도 조사를 실시한 것이 지금까지 수행된 퇴적물 관리의 전부라

할 수 있다.

퇴적토는 각각의 토지이용도에 맞게 재이용되어야 하며, 그에 맞는 오염 처리기술이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 오염퇴적토의 토양환경보전법에 의한 정화방안을 제시하고자 한다.

1. 연구대상부지 선정

국내에서는 오염퇴적토를 정화기술로 이용한 사례가 없고 지금까지 오염퇴적물 및 유기오염퇴적물은 준설하여 육상처리시설로 이송, 육상매립처리하거나 해양투기 해왔다. 하지만 육상매립장은 매립장 건설비용이 과다한 문제가 있고 국토이용활용에 부정적이며, 해양투기는 런던협약으로 인해 전면 금지되었다.

미국에서는 EPA GLNPO(Great Lakes Nation Program Office)에서 오염퇴적층 평가 및 복원 프로그램 등을 통해 90년대 초반부터 연구개발을 진행 중에 있으며, 퇴적물 중 함유된 PCBs(Poly Chlorinated Biphenyls), PAH(Polyaromatic Hydrocarbon) 등에 대하여 추출, 습식산화 등의 Table 1의 기술을 적용하고 있다(USEPA 2005).

오염퇴적층에 대한 연구는 우선 오염퇴적층에 대한 기초조사(퇴적층 높이, 오염분포, 오염물질 분석 등)를 실시한 후 오염물질에 따라 복원기술을 적용하고 있으며 퇴적층에 포함되어 있는 오염물질은 중금속, PAH, 유분, 유기물, 질소, 인 등 매우 다양한 기 때문에 여러 처리공정을 적절히 조합하여야 한다.

Table 1. A Study on the Restoration of Contaminated dredge sediment (USEPA 2005)

Technologies	Operational Characteristics
Bioremediation	1. Environmental-friendly 2. Site-specific information required
Chemical Treatment	1. Quick response 2. Concern for secondary contamination
Washing / Extraction	1. Contaminants essentially removed 2. Sludge and wastewater treatment required
Solidification/Stabilization or Immobilization	1. Reduced risk by applying stabilizing agent 2. Applicable to fine sediment
Thermal Treatment	1. Complete removal 2. High energy & cost
Particle Size Separation	Limited application upon contamination characteristics

복원기술은 기존의 폐수 및 액상 폐기물의 처리방법을 고효율 기술로 개량하여 적용하고 있으며, 퇴적층의 혼합액으로부터 각각의 오염물질을 추출분리하는 공정, 화학약품과 에너지를 이용하여 화학적으로 분해하는 공정, 혼합액에 존재하는 미생물의 활성을 높이는 방법 등 개발이 활발하게 진행되고 있다. 따라서 본 연구에서는 해외에서 적용되었던 기술 중 국내 토양환경보전법의 토양정화방법을 오염퇴적토정화에 적용성 실험을 하고자 한다. 이에 본 연구의 대상부지로 전라북도 익산시 왕궁면에 위치하는 농축산 저수지인 왕궁축산단지의 주교제를 선정하였다 (Figure 1).

왕궁축산단지는 1949년 전남 고흥군 국립 나환자 익산병원으로 정착한 뒤 1968년 병원이 폐쇄되면서 익산농장을 기점으로 현재의 농장형태를 갖추게 되었다. 왕궁농원은 익산, 금오, 신촌농장 등 3개의 마을로 구성된 특수지역으로 1999년 당시 1,65km²(약 50만평)의 면적에 886세대가 거주하고 있었다. 전체 세대 중 47%에 해당하는 416호의 양돈농가로서 총 약 95,570두를 사육하였다.

당초 왕궁농원 대부분의 정착민이 1970년대부터

할당받은 100여평에 생계를 위해 소규모 양돈을 시작하였다가 최근 전업화, 대형화 되었다. 양돈이 수질 오염에 영향을 미치는 이유는 돼지사료에 돼지의 성장을 촉진시키는 Cu(구리)와 성장, 번식을 촉진시키는 Zn(아연)이 포함되어있기 때문이다. 돼지가 사료를 섭취하고 배설물로 다시 배출할 때 이 배설물에 오염물질인 Cu와 Zn이 포함되어있다. 양돈농가는 돈슬러리를 세척하여 돈사 밖으로 배출하는 기본적으로 수세식 돈사가 주를 이루고 있는데 전체 시설물의 70% 이상이 무허가로서 무분별하게 난립해 있다. 세척수에 함유되어 저수지로 흘러들어가 중금속오염물질은 퇴적되어 토양오염에도 영향을 미치게 된다. 더욱 문제를 어렵게 하는 것은 개별농가 부지 내 주거공간과 축사가 함께 위치하여 특히 여름철 각종 해충등과 악취로 주거 환경이 매우 열악한 상태이며, 왕궁농원 전체를 보더라도 제한된 공간에서 다수의 돼지를 사육하여 수세 돈슬러리가 용호제, 학평제를 거쳐 유하되어 주교제로 유입된 후 이는 다시 익산천으로 방류되어 만경강 수계의 주요 비점오염원으로 작용하며, 새만금 수질의 가장 큰 악영향으로 평가되고 있는 실정이다.

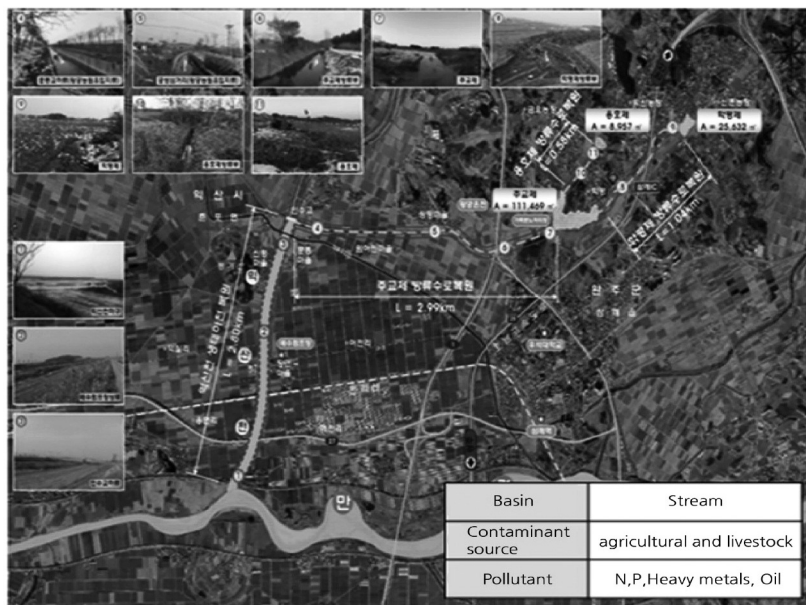


Figure 1. Present and Peripheral Condition of Site.

2. 오염 퇴적토 현황 및 정화기술 선별

오염퇴적토는 생활환경 유역에 따라 특성이 다르다. 생활환경 유역은 공업, 도심지, 농업, 축산, 광산으로 구분할 수 있으며, 각각의 고려해야 할 항목이 상이하다. 우선 생활환경 유역은 퇴적물에 영향을 미치는 인자는 인구가 있을 것이다. 농업 및 축산 유역은 BOD(Biochemical Oxygen Demand), N, P 등의 유기성 오염부하량이 상대적으로 높아 퇴적물 역시 유기오염에 대한 우선 처리가 필요할 것이며, 공업지역의 경우 점오염원인 동시에 비점오염원으로서 우수에 유출된 중금속 및 유해화학물질 등이 하천 하류 또는 항만해역에 퇴적된다.

이러한 오염퇴적토의 오염특성과 국내 적용되고

있는 토양정화기술을 비교분석하여 오염물질별 처리 가능한 정화기술을 Table 3에 기술하였다.

생물학적 처리기술에서는 유기물, N, P를 저비용으로 처리할 수 있으며, 물리화학적 기술은 광범위한 오염물질을 처리할 수 있다. 열적처리는 중금속을 제외한 유기오염물질을 처리할 수 있으나 고비용이 소요되어 본 연구에서는 적용이 어렵다.

중금속오염은 국내 대다수의 오염부지가 토양세척을 이용하여 처리 중이다. 퇴적토는 골재성분과 미립자(실트 및 점토) 세분으로 이루어져 있는데, 이 중 미립자는 큰 비표면적으로 인해 오염물질의 농도가 높으며 일반적 세척공정에서 효율적으로 처리되지 않음이 보고되었다(Wenning 2001). 따라서 전처리기술

Table 2. Emissions contaminants by living environment basin

Sort	Fresh water				Seawater
	Industrial complex	City	Agricultural and dairy	Mining industry	On the coast
Organic matter, N, P		○	○		○
Heavy matter	○			○	
POPs (Persistent Organic Pollutants)	○		○		

Table 3. Remediation technology for each contaminant

Remediation method		Organic, N, P	Heavy metal	POPs
Biological	Composting	◎	×	×
	Landfarming	○	×	×
	Bio-file	○	×	×
	Phyto remediation	△	△	×
Physical chemistry	Chemical oxidation	◎	△	△
	Solvent extraction	○	○	○
	Soil washing	○	◎	○
	Current electricity	×	○	△
Thermal	thermal desorption	◎	×	○
	Subcritical	○	△	◎

◎ : 효율 높음 ○ : 효율 보통 △ : 효율 낮음 × : 적용 불가

Table 4. Technology Selection of contaminated dredge sediment

Sort	Processing Techniques		Assessment
Pre-treatment	Particle size separation	Hydrocyclone	Particle Separation Efficiency
Processing Techniques of dredge sediment	Biological	Composting	Microbial strain Organic, TPH
	Physical chemistry	Soil Washing	Extraction step by step Residence time, high cost, etc.

로 퇴적토사 중 골재성분을 분리하여 토양세척으로 이용, 건설용 자재 및 복토재로 재이용하고, 불용토로 폐기물 처리되던 모래에 대하여는 재활용 할 수 있다면 경제적, 환경적인 효과가 매우 클 것으로 기대된다. 유기물과 유류오염은 고비용의 열적처리보다는 생물학적처리 중 유류와 유기물인 대장균류를 동시에 처리할 수 있는 퇴비화를 적용하여 실험을 실시하였다.

본 연구에서는 Table 4에 기술한 것과 같이 오염물질별 처리 가능한 기술을 반영하여 하이드로사이클론을 이용한 전처리 입도분리, 생물학적 정화의 퇴비화 및 물리·화학적 처리기술인 토양세척을 실험 계획하였다.

II. 연구방법

1. 연구대상부지 조사

1) 수질조사

연구대상부지의 주요 유입수는 주교제, 용호제, 학평제가 있으며, 인근 축사에서 배출되는 오·폐수가 주 성분이다. 현장측정은 pH(Potential Hydrogen), DO (Dissolved Oxygen), EC(Electrical Conductivity), 수온으로 하였고, 유기오염물 분석은 수질오염공정시험방법에 준하여 분석을 실시하였다. 분석 장비 및 시험방법에 대한 내용은 Table 5에 정리하였다.

Table 5. Water quality analysis method and measuring equipment

Item	Unit	Method of analysis	Measuring Instrument
pH	-	Electrode Method	TOADIK (HM-21P)
DO	mg/L	Electrode Method	TOADIK (DO-21P)
EC	μS/cm	Electrode Method	WTW (inolab level 1)
SS	mg/L	Gravimetric Method	-
COD	mg/L	Potassium permanganate Method	-
TN	mg/L	UV / Visible Spectroscopy (Oxidation)	Humas (HS-3300)
TP	mg/L	UV / Visible Spectroscopy	Humas (HS-3300)

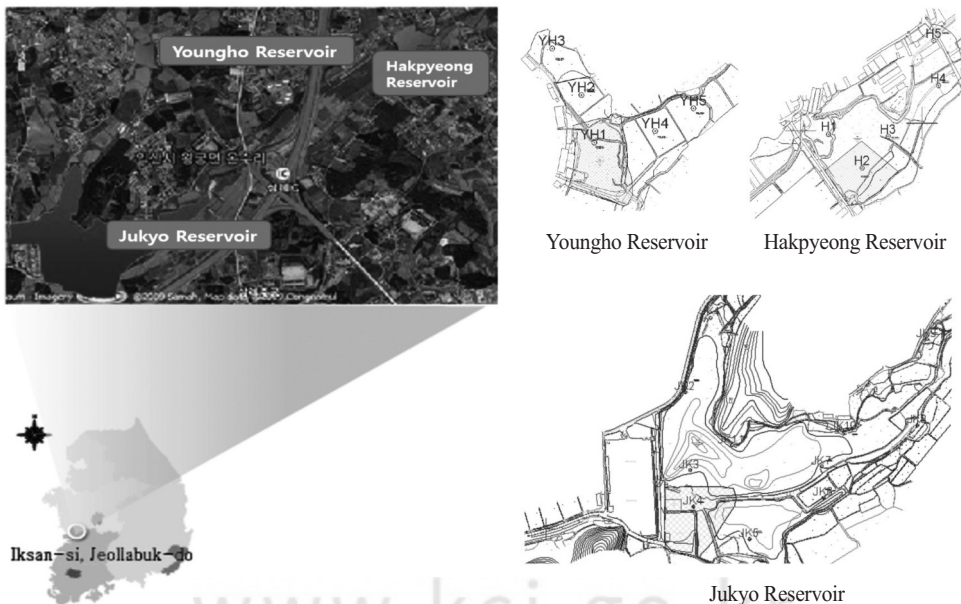


Figure 2. Sampling position.

2) 토양조사

토양정밀조사의 항목·방법 및 절차는 4대강 사업의 준설토(사토) 성토지역에 대한 토양오염 정밀조사 및 정화지침(2010.6월 제정·2010.12월 개정, 4대강 살리기 추진본부)에 의한 토양정밀조사지침(환경부 고시 제2010-104호)에 준하여 수행하였으며 분석은 토양오염공정시험기준에 의하여 실시하였다. 토양시료채취 위치는 Figure 2와 같다.

2. 실험방법

1) 전처리기술

입경별로 중금속 농도의 차이가 크지 않으나 향후 퇴적토를 골재나 부속토로 재활용하기 위해서는 재활용이 불가한 미세토를 선 처리하여야 하므로 전처리 공정으로 입도분리가 필요하다. 입도분리 효율을 평가를 위해 기 검증된 LAKOS사의 해외 장비를 통한 파일럿 규모의 사이클론 선별기를 제작하여, 현장 내 설치, 연구를 수행하였다. LAKOS사는 미국의 하이드로사이클론 전문 제조사이며 제조사에서 제시한 입

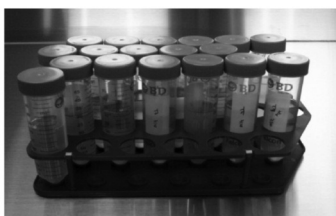
도분리효율이 높은 2단 구조로 제작하였다. 선별효율은 2mm 미만, 0.075mm 이상(#200) 기준의 입경분리효율을 평가를 수행하였다.

2) 퇴비화

연구 대상지역은 다년간 유입된 축산폐수로 인한 퇴적토 내 다량의 유기물이 함유되어 있으므로 처리 토양의 경제적 활용 가능여부 확인을 위한 퇴비화 처리 실험을 실시하여 온도에 따른 병원성 미생물의 잔여여부 및 퇴비화 경제적 가치가 존재하는지 확인하였다. 퇴비화 실험에 앞서 토착미생물균주개발을 위해 주교제의 유기물로 오염된 오염토로부터 미생물을 분리, 동정하여 R2A와 TSA 배지에서 25℃ 인큐베이터에 수일간 배양하여 미생물을 순수 분리하였다. 16S rDNA유전자 분석에 의한 세균의 동정은 Sequence를 ribosomal RNA의 이차구조를 참고하여 alignment하고 %Similarity 값을 구한다(Jukes, T. H. & Cantor, C. R 1969). 주교제의 분리된 미생물 18종에 의한 분해 효율을 평가를 위해 Petri dish와 Aluminum box를 이용하였다. 실험조건은 Table 6에 나타내었다.

Table 6. Conditions of decomposition efficiency evaluation experiment

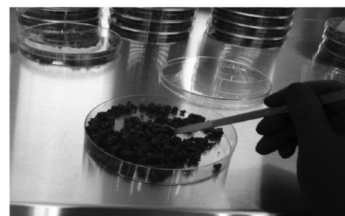
	Petri dish	Aluminum box
Sample	Iksan Jukyo Reservoir sediment	R1, R4, R15, R17 of <i>Pseudomonas frederiksbergensis</i> Strain and R3, F8 of <i>Arthrobacter siccitolerans</i> Strain
Water content	10%	10%
Nutritional salts	No additional supply	No additional supply
Temperature	25°C	25°C
Soil quantity	50 g	500 g
Microbial infusion volume	6 ml (1.1×10^6 CFU/g)	(9.0×10^7 CFU/g)
Analysis days	11 days	14 days
Analysis method	the Ultrasonic Wave Method	the Ultrasonic Wave Method



Microorganism cultivation



Measure soil



Moisture, Strain, and Soil

Figure 3. Microbial Efficiency Evaluation Experiment in Petri Dish.

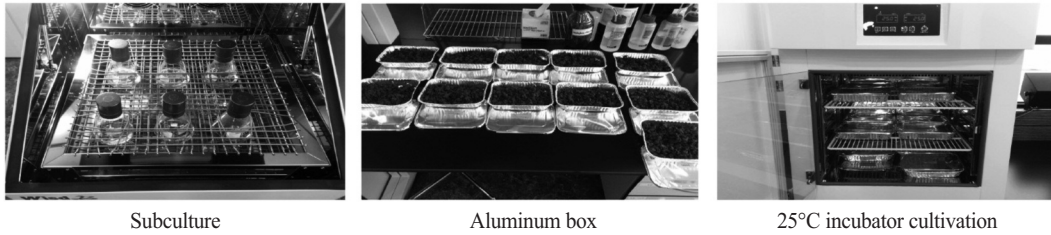


Figure 4. Microbial efficiency evaluation experiment in aluminum box.

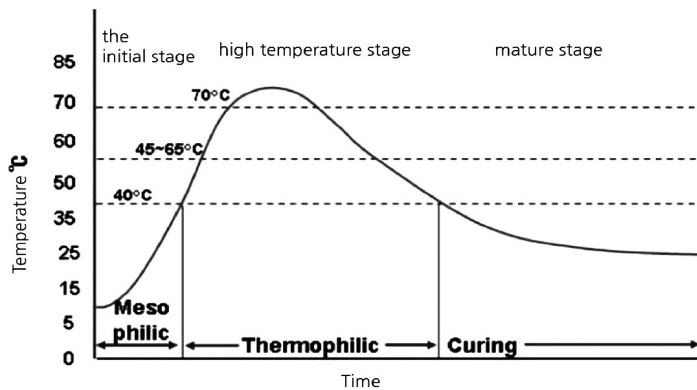


Figure 5. Temperature Variation by Decomposition Phase.

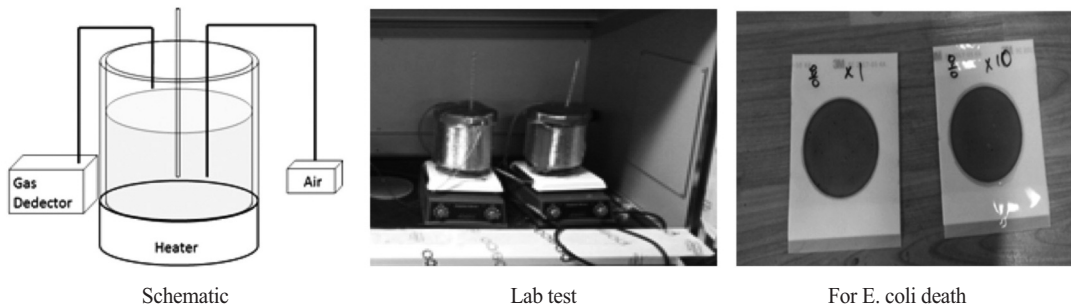


Figure 6. Composting Experiment.

Table 7. Compost Optimization

Check list	Optimum	Principle
Appropriate Size of Particles	0.65~2.54 cm	
C/N ratio	20~30 (C/P : 100~150)	Microbial Nutrients
Proportion of oxygen in the air	12~13%	Anaerobic fermentation begins when lowered below 5%
Water content	50~60%	Difficulty in the availability of microbial effects if less than 40%
pH	5.5~8.5	Create NH ₃ at pH 8 and above
Natural ventilation	공극 30% 정도	Volume 540 kg/m ³
Deposition height	60~200 cm	Poor ventilation over 200 cm
Stirring	1~2 times/day	At least once/week

퇴비화는 호기성 미생물에 의해 진행되는 부숙과정으로 중온성(Methophilic)균과 고온성(Thermophilic)균이 관여하며, 미생물에 의한 퇴비 부숙과정은 Figure 5와 같이 3단계로 구분된다(친환경 농업을 위한 퇴비 제조기술8. 경상북도 농업기술원). 퇴비화 최적조건은 Table 7과 같다(Ministry of Environment, 2007).

2L 비커에 퇴적토 1 kg과 톱밥을 넣고, 공기를 주입하기 위한 관과 온도를 관찰하기 위한 온도계를 삽입하였으며, 발생하는 가스의 배출을 위하여 비커 상부에 배출관을 설치한 후 퇴비화 최적조건을 만족시키기 위해 공기공급량을 120ml/min, 수분함량, 60%, C/N비를 20으로 고정하고 온도와 운영일수에 따른 퇴비화 실험을 실시하였다. 함수율을 유지시키기 위해, 1일 1회 함수율을 측정하고, 설정한 조건에 맞게 수분을 보충하면서 실험을 진행하였다.

3) 토양세척

토양 중 중금속은 다양한 형태로 존재하며, 중금속의 거동특성은 물리·화학적 조건변화에 따라 수계로의 용출가능성을 지니게 된다. 따라서 토양입자의 물리·화학적 특성을 파악하는 것은 향후 중금속 처리에 있어 정화방법 설정을 용이하게 할 수 있다. 이에, 본 연구에서는 입도선별을 통한 입도별 중금속 오염특성을 파악하였다. 또한, XRD, XRF 그리고 연속추출분석을 통하여 토양 내 각 금속원소의 함량비 및 존재형태를 파악하였다.

(1) 입경별 중금속농도

입도선별은 습식방법으로 수행하였다. 총 6개의 거름체가 이용되었으며, 체의 크기는 20~400 메쉬의

크기(#20, 40, 60, 100, 200, 400)를 갖는다. 각 체를 쌓아올린 다음, 적당량의 토양을 증류수로 흘려보내는 방법으로 입경분리를 실시하였다. 각 크기별로 분리된 시료에 대해서는 약 70℃의 건조기에서 건조하였고, 각 입경별로는 토양오염공정시험기준에 의해 Cu, Zn 그리고 Cd를 정량하였다.

(2) X-선 회절분석(XRD)과 X-선 형광분석(XRF) 및 연속추출분석

① XRD(X Ray Diffraction),

XRF(X Ray Fluorescence Spectrometry)

대상지역에서 채집된 토양시료 내 광물학적 특성을 파악하기 위하여, X-선 회절분석(XRD)과 X-선 형광분석(XRF)을 실시하였다. X-선 회절분석은 X선을 토양입자에 부딪히게 하면 그 중 일부는 회절을 일으키고 그 회절각과 강도는 물질 구조상 고유한 것으로서 이 회절 X선을 이용하여 시료에 함유된 결정성 물질의 종류와 양에 관계되는 정보를 알 수 있다. 한편, X선 형광분석은 X선을 쬐어 전자를 여기시켜 전자에 의해 방출되는 빛(fluorescence)을 측정하는 방법으로 토양시료 내 구성광물의 구성성분 및 그 함량을 파악하기 위한 목적으로 수행되었다.

② 연속추출분석

연속추출분석 방법은 (Kim et al, 2009)의 방법을 준용하였으며, 이는 (Tessier et al, 1979)과 (Wenzle et al, 2001)의 방법을 수정/보완한 방법이다. 이 방법은 총 5가지의 형태로 중금속의 형태를 구분하는 방법으로 60 mesh 이하의 토양을 테플론 재질의 반응용기에 첨가하고 각 반응단계별로 추출용매를 첨가하여 연속적으로 용출시켰다. 이때, 토양과 반응용액의 비는 1:20의 비율로 유지하였다. 또한, 각 단계별

Table 8. Continuous Extraction Analysis Method to Determine Heavy Metal Presence Form (Kim et al. 2009)

Targets	Extractant	Conditions
Exchangeable	2M MgCl ₂ (pH=7.0)	1 h shaking, 20°C
Bound to carbonate	1M NaOAc/HOAc (pH=5.0)	5 h shaking, 20°C
Bound to amorphous hydrous oxide	0.2M NH ₄ -oxalate buffer (pH=3.25)	4 h shaking, 20°C in the dark
Bound to crystalline hydrous oxide	0.2M NH ₄ -oxalate buffer + 0.1 M ascorbic acid (pH=3.25)	0.5 h in a water-bath at 96±3°C
Residual	10N HNO ₃	Autoclave (105 min, 110°C)

Table 9. Soil Washing Experimental Conditions

Stage	Subject experiment	Experimental conditions
Stage 1	Wash solution selection	Sulfuric acid, phosphoric acid, hydrochloric acid
Stage 2	Wash solution concentration	0.1M, 0.5M, 1M, 1.5M, 2M
Stage 3	Soil-to-Wash Ratio	Solid : Liquid = 1:3, 1:5, 1:10
Stage 4	Washing strength	200, 300 rpm
Stage 5	Washing time	30, 60, 90 min
Stage 6	Multi-stage continuous experiment	Perform continuous experiment using optimum condition (1 ~ 5 stages)

로 회수된 용액에 대해서는 무게를 측정함으로써 이 전단계에서의 잔량에 의한 영향도 보정하여 실험을 수행하였다.

(3) 산용출세척 및 다단계세척

최적의 세척조건 선정을 위하여 Table 9와 같이 6단계에 걸쳐 실험을 수행하였다. 세척조건 산정을 위한 실험은 모두 2 mm 이하로 체거름 된 토양 입자만이 이용되었다. 실험은 단계별로 진행되었고, 각 단계가 종료된 이후 선정된 조건을 다음 단계에 적용하는 방법으로 실험을 진행하였다. 예를 들어, 1단계 실험에서 확인된 최적의 세척액이 선정된 이후, 2단계 실험에서는 1단계에서 얻어진 세척액만을 고려하여 실험을 진행하였다. 실험을 통하여 확인된 최적조건에 대해서는 추가적으로 다단계연속실험을 진행하였다. 다단계세척공정은 최대 5회까지 반복하여 실험이 이루어졌으며, 각 단계별로 확인된 중금속 세척효율을 비교/분석하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 연구대상부지 조사결과

1) 수질 조사결과

본 연구를 위해 소류지 3곳의 시료를 채취하여 실험하였으며 결과는 Table 10와 같이 조사되었다. 문헌조사 결과는 익산왕궁지역 가축분뇨관리 및 수질개선방안(Ministry of Environment 2010)을 인용하였다.

수소이온농도(pH)는 7.34 ~ 8.15의 범위로 수질 기준을 만족하였고, 문헌조사값과 비슷한 값으로 분석되었다. 주교제로 유입되는 유입수의 용존산소(DO)를 분석한 결과 농도는 0.76~1.24 mg/L로, 이는 수질환경 기준인 2 mg/L에 미치지 못한다. 각각의 측정치 분석 결과 모든 지점에서 혐기성 상태의 유입수가 지속적으로 유입되고 있는 것을 알 수 있었으며, 혐기성 상태의 외부 유입수의 영향으로 퇴적물로부터 영양염류 등의 용출가능성이 높아져 부영양화를 가속시키는 원인으로 작용하고 있는 것으로 분석

Table 10. Analysis of Water Quality Results

Item \ Sort	Hakpyeong Reservoir			Youngho Reservoir			Jukyo Reservoir			effluent standard
	1st	2nd	Literature research	1st	2nd	Literature research	1st	2nd	Literature research	
pH	7.59	7.96	7.36	7.15	7.34	7.33	8.04	8.15	7.32	6.5~8.5
DO (mg/L)	1.14	1.24	-	0.59	0.87	-	0.77	0.76	-	Above 2
EC (µs/cm)	506	569	-	1,359	1,439	-	775	807	-	-
SS (mg/L)	2,414	2,650	2,841	4,250	4,700	2,706	3,080	3,350	4,870	Below 30
COD (mg/L)	590	1,450	3,745	1,300	1,950	5,045	720	1,050	1,933	Below 40
TN (mg/L)	490	1,204	1,322	580	918	1,394	497	1,239	1,115	Below 60
TP (mg/L)	92	152	239	92	152	152	46	54	275	Below 8

되었다.

전기전도도(EC)는 대체로 외부 유기오염물질의 수 중 분해 시 용출되는 용존이온 혹은 중금속 등의 무기 성 오염원의 유입에 의해 측정값이 높아진다고 알려져 있다. 학평제의 전기전도도는 569 $\mu\text{s}/\text{cm}$, 용호제 1,439 $\mu\text{s}/\text{cm}$, 주교제 807 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 으로 측정되었고, 지점별 변화가 상당히 큰 것으로 분석되었다. 전기전도도의 측정값을 통해 용호제의 오염정도가 가장 클 것으로 보인다.

부유물질(SS)은 지천수의 수질지표로서 유거수의 오염정도를 나타내며, 부유물질은 용액에 현탁 형태의 작은 고체입자들을 의미하며 입자가 작을수록 단위면적당 표면적이 높고, 그만큼 오염도 심화되는데 부유물질의 문제점은 오염원으로 작용할 뿐만 아니라 병원체가 그 표면에 붙어서 이동하기 때문에 병원성 물질의 이동에 관여하는데 있다. W-1~3 지점의 부유물질 분석결과는 2,414~4,700 mg/L의 범위로 나타났다. 이는 수질기준을 100배정도 초과하는 결과이다. 일반적인 돈분뇨의 부유물질이 10,000~40,000 mg/L인데 비하여 주교제 부유물질 농도는 낮은 것으로 분석되었는데, 이는 상류의 돈사에서 세척수를 다량 사용하여 희석되었기 때문인 것으로 사료된다.

화학적 산소요구량(COD_m)은 수중의 유기물을 화학적으로 산화할 때 소비되는 산소량을 mg/L로 표시하는 것을 말하고, 측정 목적은 수중의 유기물 양을 파악하는데 있다. 본 연구의 수질지점 W-1~3의 화학적산소요구량 분석결과는 학평제의 경우 590~1,450 mg/L, 용호제 1,300~1,950 mg/L, 주교제

720~1,050 mg/L의 범위로 분석되어 SS, EC의 분석결과와 마찬가지로 용호제>주교제>학평제 순으로 나타났다. 일반적인 돈 분뇨의 화학적산소요구량은 50,000 mg/L 이상으로 알려져 있으며, 이는 부유물질과 마찬가지로 수세에 의해 상당히 희석되어 배출되고 있는 것으로 사료된다.

주교제의 W-1~3지점의 총 질소(TN) 분석결과는 용호제 580~918 mg/L, 학평제 490~1,204 mg/L, 주교제 497~1,239 mg/L의 범위로 측정되어 심각한 수준의 오염정도를 보여주고 있다. 특히, 질소는 환경에 미치는 영향이 매우 크고 부영양화를 초래하여 녹조나 적조 같은 심각한 수질문제를 야기시키며, 지하수의 주요 오염원임을 감안할 때 매우 심각한 상황임을 알 수 있었다.

수질지점 W-1~3지점의 총인(TP) 분석결과는 용호제 92~152 mg/L, 학평제 50~114 mg/L, 주교제 46~54 mg/L의 범위로 분석되어 수질환경기준과 대비하여 수십에서 수백배 초과하고 있어 매우 심각한 상황인 것으로 판단된다.

2) 토양조사결과

학평제(HP), 용호제(YH) 각각 5개소, 주교제(JK) 11개소에서 표층과 중간층, 심층 등의 깊이별로 시료를 채취하여 분석하였다. 표층은 surface, 중간층은 -1, 심층은 -2로 구분하여 Table 11에 나타내었다.

(1) 구리(Cu)

Cu(구리) 항목의 분석 결과 주교제 10~316 mg/kg, 용호제 11~584 mg/kg, 학평제 12~204 mg/kg로,

Table 11. Analysis of soil Quality Results

Sort	TPH (mg/kg)	As (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Cr ⁶⁺ (mg/kg)
HP1-surface	200.924	24.267	146.445	429.382	7.628	60.688	17.362	9.006
HP1-1	233.109	20.964	160.116	456.853	7.781	59.528	15.607	6.082
HP1-2	583.753	35.667	85.338	164.634	7.012	66.278	16.967	5.638
HP2-surface	324.650	34.910	120.462	403.852	9.037	89.938	22.840	11.036
HP2-1	3,574.110	37.003	204.005	398.424	8.248	74.085	17.819	10.784
HP2-2	1,247.930	28.939	71.742	153.024	6.879	63.627	17.641	2.604
HP3-surface	223.988	23.720	111.012	217.678	7.708	69.453	34.667	6.410
HP3-1	341.153	32.897	110.949	216.466	7.478	70.860	35.468	2.070
HP3-2	127.992	27.035	166.612	371.544	7.582	74.891	25.743	1.801

Table 11. Continued

Sort	TPH (mg/kg)	As (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Cr ⁶⁺ (mg/kg)
HP4-surface	55.328	25.583	84.200	168.015	8.335	60.719	5.559	1.128
HP4-1	55.419	29.306	24.213	108.574	8.737	61.186	5.153	0.522
HP4-2	76.638	27.035	17.176	68.661	7.771	54.845	12.193	0.493
HP5-surface	65.706	22.360	27.564	137.034	7.059	58.934	2.726	0.620
HP5-1	55.109	36.572	48.185	154.328	7.561	82.697	5.211	0.518
HP5-2	72.049	22.303	18.859	66.137	7.152	51.121	8.170	0.607
YH1-surface	175.270	22.329	454.820	600.427	6.806	54.056	16.521	11.166
YH1-1	175.975	25.780	584.344	683.393	8.056	57.035	16.572	14.287
YH1-2	81.151	18.701	31.271	86.474	7.541	43.769	13.588	0.928
YH2-1	75.161	20.615	17.706	50.827	6.762	50.089	14.921	0.423
YH2-2	76.153	12.279	15.525	39.234	5.456	40.765	9.084	1.832
YH3-surface	97.159	18.547	40.319	100.401	6.364	56.876	3.164	2.330
YH3-1	81.246	15.342	20.270	60.530	6.208	38.345	3.640	1.562
YH3-2	67.623	21.418	13.031	46.065	8.284	52.484	2.461	0.661
YH4-1	103.763	9.822	25.109	61.301	7.286	51.879	2.647	1.653
YH4-2	121.600	12.418	16.139	52.160	7.410	42.520	2.835	1.467
YH5-surface	84.755	19.179	22.384	66.571	6.935	44.326	11.117	1.648
YH5-1	71.214	21.325	15.958	56.079	8.091	55.010	0.743	0.899
YH5-2	82.598	10.723	14.627	52.159	5.654	40.840	0.533	0.908
JK1-surface	654.784	ND	ND	ND	ND	ND	ND	4.115
JK1-1	223.859	29.773	316.414	270.282	7.660	49.364	6.183	6.870
JK1-2	114.255	24.456	60.297	90.464	6.175	45.403	4.825	4.607
JK2-1	96.359	16.937	17.080	87.336	4.930	45.457	2.247	7.070
JK2-2	129.334	21.968	50.927	95.300	5.662	42.176	4.841	4.096
JK3-surface	259.458	25.470	126.050	233.474	6.138	70.561	5.951	3.706
JK3-1	282.146	18.991	104.219	183.991	5.907	60.023	3.365	3.018
JK3-2	364.482	25.456	76.164	122.143	5.738	42.843	3.162	1.556
JK4-1	360.634	13.768	32.541	152.201	4.843	48.777	1.961	2.953
JK4-2	1,242.870	20.901	40.437	140.441	5.440	52.240	3.673	0.608
JK5-surface	59.857	17.761	28.365	55.331	5.358	41.339	4.332	1.483
JK5-1	62.943	27.287	16.543	40.636	5.827	41.824	10.673	1.269
JK5-2	53.006	16.420	18.620	44.128	4.162	44.677	15.218	0.664
JK6-1	89.264	14.439	26.128	56.389	5.792	41.640	5.023	1.427
JK6-2	67.326	13.214	13.633	28.866	4.757	36.390	4.189	0.475
JK7-surface	129.991	17.527	47.862	141.189	5.033	58.642	13.533	1.076
JK7-1	132.356	18.800	41.926	129.850	4.808	50.851	2.187	0.644
JK7-2	324.558	12.010	210.112	370.467	4.931	58.285	19.574	3.786
JK8-1	150.232	12.034	84.172	116.625	5.139	43.235	ND	1.501
JK8-2	117.588	5.469	36.379	100.893	6.365	35.347	0.059	0.880
JK9-surface	90.286	9.254	16.195	67.565	5.847	40.429	ND	2.107
JK9-1	83.922	9.041	33.410	83.806	6.031	38.821	ND	2.360
JK9-2	108.635	13.938	16.034	75.085	5.701	30.063	ND	1.977
JK10-1	550.169	6.665	190.358	567.575	5.192	34.355	ND	10.182
JK10-2	356.111	8.590	100.000	246.588	5.960	39.004	ND	3.894
JK11-1	99.383	2.430	10.902	40.953	2.006	24.194	ND	2.017
JK11-2	85.980	18.537	10.371	55.780	7.790	39.419	ND	2.209

주교제와 학평제는 “토양오염우려기준 1지역”을 상회하는 것으로 조사되었으며 용호제는 우려기준 2지역을 초과하는 것으로 조사되었다. 퇴적토의 구리 함량은 기본적으로 양돈 사료에 돼지성장을 촉진하기 위하여 첨가하는 구리 때문으로 토양의 구리 함량이 높은 편이고, 구리는 1가, 2가 양이온 Cu^{2+} , Cu^+ 형태로 흡수되며, 구리는 식물의 철 이용을 저해하여 철 부족현상을 유발하므로 토양의 이용 시에 이에 대한 고려가 필요하다.

(2) 아연(Zn)

양돈사료 중 Zn(아연)은 50~100 mg/kg을 함유시켜 성장, 번식을 촉진시키는 필수미량원소이다. 아연은 2가 양이온 Zn^{2+} 로 흡수되며, pH가 낮은 경우 흡수율이 높고, 다른 2가 양이온 Ca, Cu, Fe 등과는 길항관계에 있으므로 공존하면 서로 흡수가 억제된다. 토양의 인산함량이 높으면 인산아연($ZnHPO_4$)을 형성하여 Zn의 유효도가 낮아진다. 본 연구에서 퇴적토를 채취하여 분석한 결과 주교제 28~567 mg/kg, 용호제 36~683 mg/kg, 학평제 39~456 mg/kg으로 주교제와 학평제는 “토양오염우려기준 1지역”을 상회하였으며, 용호제는 “토양오염우려기준 2지역”을 초과하는 것으로 조사되었다.

(3) 카드뮴(Cd)

분석결과 주교제 2~8 mg/kg, 용호제 6~8 mg/kg, 학평제 7~9 mg/kg로 조사되었다. 토양오염 우려기

준에 비교해봤을 때, 주교제, 용호제, 학평제 모두 토양오염우려기준 1지역을 상회하는 지점이 대부분이었으며, 전체적으로 1지역 기준인 4mg/kg을 초과하였다.

(4) TPH

분석결과 TPH(Total Petroleum Hydrocarbon:석유계 총 탄화수소)는 주교제에서 53,109~1,242,871 mg/kg, 용호제 67,623~175,975 mg/kg, 학평제 55,109~3,574,106 mg/kg으로 주교제는 “토양오염우려기준 1지역”을 상회하며 용호제는 2지역을, 학평제는 3지역을 초과하는 것으로 조사되었다. 주변 농가에서 사용하는 난방용 시설이나 작업용 장비에서 유출된 기름성분이 처리되지 않은 채 소류지에 유입되어 퇴적하여 발생한 문제로 판단된다.

해외에서는 이미 퇴적물에 대한 효율적인 관리를 위하여 퇴적물권고기준(SQGs; Sediment Quality Guidelines)을 설정하여 중금속오염에 대한 관리를 하고 있다. 미국해양대기청(NOAA)은 퇴적물 내 중금속함량이 저서생물에 악영향을 미치는 농도를 기준으로 최소영향농도와 중간영향농도로 구분하고 있다. 이때, 최소 영향농도의 경우에는 저서생물의 약 10%에 악영향을 미치는 농도로서, 퇴적물의 중금속 오염의 지표로 사용할 수 있을 것이다. Table 12은 각 국가별 퇴적물 관리법에 의한 퇴적물 내 중금속 기준을 제시한 것이다.

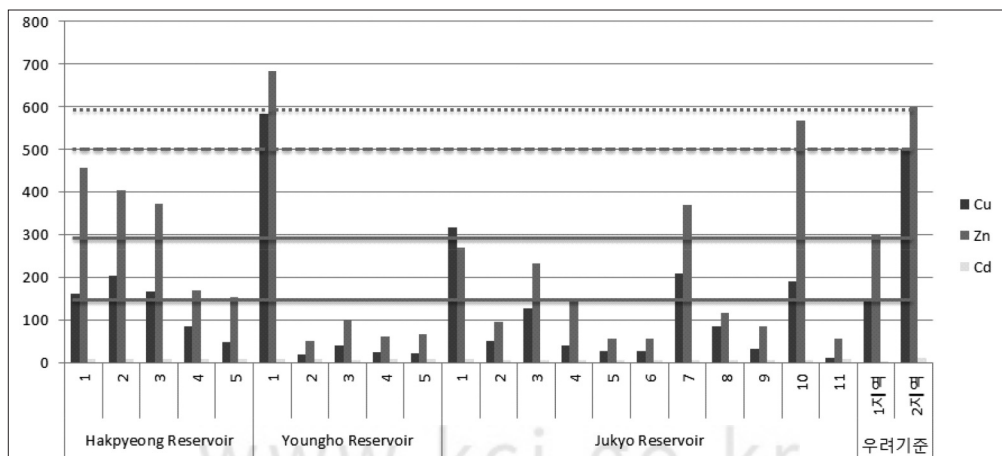


Figure 7. Result of soil survey.

Table 12. Heavy Metal Standards in Sediments According to the Sediment Management Act by Country (unit : mg/kg)

Metal	USA(NOAA)		Canada	Netherlands	Norway
	ERL ¹⁾	ERM ²⁾	NEC ³⁾	ISQGs ⁴⁾	Class ⁵⁾
As	8.2	70	7.24	29	< 20
Cd	1.2	9.6	0.7	0.8	0.25
Cr	81	370	52.3	100	70
Cu	34	270	18.7	36	35
Pb	46.7	218	30.2	85	30
Hg	0.15	0.71	0.13	0.3	0.15
Ni	20.9	51.6	-	35	30
Zn	150	410	124	140	150

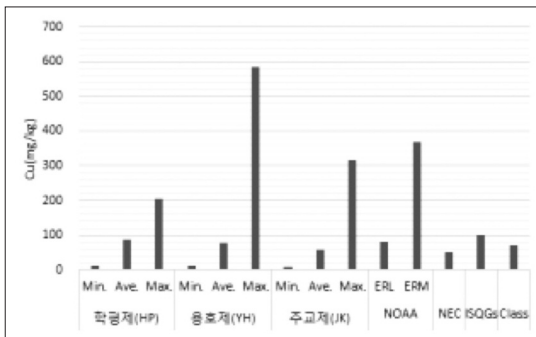
¹⁾ERL : Effect Range Low (10% adverse effect on benthic organisms)

²⁾ERM : Effect Range Medium (50% adverse effect on benthic organisms)

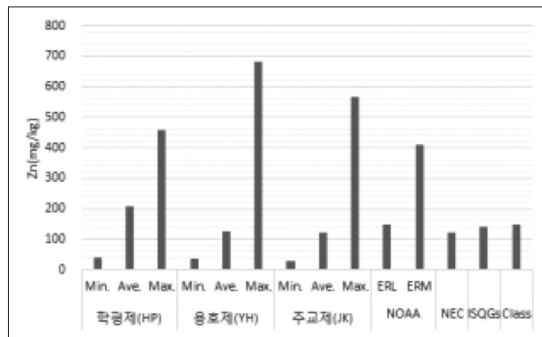
³⁾NEC : No Effect Concentration

⁴⁾ISQGs : Interim Sediment Quality Guidelines

⁵⁾Class : Good condition



Copper concentration comparison



Zinc concentration comparison

Figure 8. Comparison of Heavy Metal Concentrations in Sediments by Overseas Sediment Management Act.

조사지역에서 측정된 중금속 함량을 해외국가에서 제시되고 있는 퇴적물권고기준과 비교하여 볼 때, Cu 항목의 경우 용호제와 학평제에서 가장 높은 수치의 NOAA의 ERM(중간영향농도)을 넘어서는 것으로 조사되었다. 또한 Zn 항목은 주교제의 경우 NOAA의 ERL(최소영향농도)과 캐나다, 네덜란드, 노르웨이 등의 기준을 넘었으며, 용호제와 학평제는 NOAA의 ERM을 초과하는 것으로 조사되어 매우 우려되는 지역으로 판단되어 3개 소류지의 퇴적토 관리가 필요하다고 사료된다.

2. 실험결과

1) 전처리기술

실험 시 선별효율은 2mm 미만, #200 기준의 입경

분리효율을 평가를 수행하였다. 실험장비의 최적효율을 위하여 사이클론의 압력을 3bar 이상으로 유지하였으며, 공급토양은 2mm체를 통하여 사전에 체거름을 수행하였다. 선별 전 토양과 선별 후 토양을 입도분석하여 효율을 확인하였으며, 대상토양은 주교제 토양으로 하였다. 실험결과 0.075mm 미만의 미세토양이 80% 이상 선별되어 분리 효율이 높음을 확인할 수 있었다.

2) 퇴비화

연구대상 지역은 다년간 유입된 축산폐수로 인해 다량의 유기물이 함유되어 있고, TPH로 오염이 되어 있는 지역이다. 처리토양의 경제적 활용가능 여부를 파악하기 위해 유류오염을 저감하고 병원성 미생물을

Table 13. Pre-treatment Technology Results

Before selection								
	↑4.75mm	4.75~2mm	2~0.85mm	0.85~0.425mm	0.425~0.25mm	0.25~0.15mm	0.15~0.075mm	↓0.075
mass percentage (%)	30.65	16.58	9.74	6.39	2.66	1.58	3.75	28.65
Arfter selection								
	↑4.75m	4.75~2mm	2~0.85mm	0.85~0.425mm	0.425~0.25mm	0.25~0.15mm	0.15~0.075mm	↓0.075
mass percentage (%)	38.31	19.50	12.02	8.75	3.85	2.35	5.36	9.86



Site view



Sampling after particle size separation

Figure 9. Pre-treatment technology site view.

제거할 수 있는 실험을 단계별로 실시하였다.

(1) 균주개발 및 효율평가

① 토착미생물균주

먹는물 수질 공정 시험법에 등록된 배지로 물, 생수 등에 세균 검출에 사용되는 R2A(Reasoner's 2A agar) 배지에서 17개, 식품, 수질, 병원성 가검물에서 광범위한 미생물 배양을 목적으로 그람음성, 양성,

진균 등 다양한 미생물을 배양하는 TSA(Tryptic soy agar) 배지에서 8개를 각각 순수분리하여 16S ribosomal DNA의 부분 염기서열 분석으로 최종 동정을 시도한 결과 총 18개의 다른 종을 동정할 수 있었다.

② Petri dish 미생물 효율평가결과

11일 후 각 균주에 따른 토양 중 TPH 잔류농도 및

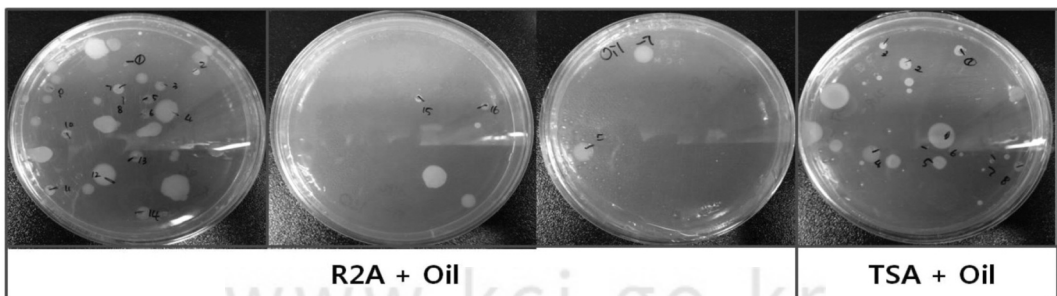


Figure 10. Identification of microbial strain.

Table 14. *16S rRNA gene Analysis of Results

No.		Strain	Accession No	%Similarity	nt differences/compared
R1	=R2	<i>Pseudomonas frederiksbergensis</i>	AJ249382	99.48	5/969
R3	=R6	<i>Arthrobacter siccitolerans</i>	GU815139	99.18	8/977
R4	=R7	<i>Pseudomonas frederiksbergensis</i>	AJ249382	99.69	3/977
R5		<i>Pseudomonas extremorientalis</i>	AF405328	100.00	0/835
R8		<i>Arthrobacter siccitolerans</i>	GU815139	98.77	12/977
R9		<i>Pseudomonas extremorientalis</i>	AF405328	100.00	0/939
R13		<i>Pseudomonas jessenii</i>	AF068259	99.37	6/945
R14	=T6	<i>Pseudomonas baetica</i>	FM201274	99.26	7/950
R15	=R10=R11=R12	<i>Pseudomonas frederiksbergensis</i>	AJ249382	100.00	0/960
R16		<i>Arthrobacter scleromae</i>	AF330692	99.03	9/932
R17		<i>Pseudomonas frederiksbergensis</i>	AJ249382	99.47	5/946
T1		<i>Pseudomonas rhodesiae</i>	AF064459	100.00	0/927
T2		<i>Arthrobacter scleromae</i>	AF330692	99.88	1/832
T3		<i>Arthrobacter oryzae</i>	AB279889	99.89	1/920
T4		<i>Pseudomonas arsenicoxydans</i>	FN645213	99.48	5/959
T5		<i>Pseudomonas simiae</i>	AJ936933	100.00	0/879
T7		<i>Rugamonas rubra</i>	HM038005	97.75	21/934
T8		<i>Arthrobacter oryzae</i>	AB279889	99.66	3/891

Table 15. TPH residual concentration and treatment efficiency in soil after 11 days

Sample name	Strain	Initial concentration (mg/kg)	Concentration after treatment (mg/kg)	Processing efficiency (%)
Control	-	3,801.8	2,381.0	37.4
R1	<i>Pseudomonas frederiksbergensis</i>		507.9	86.6
R3	<i>Arthrobacter siccitolerans</i>		655.9	82.7
R4	<i>Pseudomonas frederiksbergensis</i>		798.2	79.0
R5	<i>Pseudomonas extremorientalis</i>		1,063.6	72.0
R8	<i>Arthrobacter siccitolerans</i>		785.3	79.3
R9	<i>Pseudomonas extremorientalis</i>		951.6	75.0
R13	<i>Pseudomonas jessenii</i>		1,426.1	62.5
R14	<i>Pseudomonas baetica</i>		1,678.2	55.9
R15	<i>Pseudomonas frederiksbergensis</i>		1,247.4	67.2
R16	<i>Arthrobacter scleromae</i>		1,737.5	54.3
R17	<i>Pseudomonas frederiksbergensis</i>		1,199.8	68.4
T1	<i>Pseudomonas rhodesiae</i>		1,799.8	52.7
T2	<i>Arthrobacter scleromae</i>		1,701.8	55.2
T3	<i>Arthrobacter oryzae</i>		1,590.6	58.2
T4	<i>Pseudomonas arsenicoxydans</i>		1,393.6	63.3
T5	<i>Pseudomonas simiae</i>		1,434.1	62.3
T6	<i>Pseudomonas baetica</i>		1,560.5	59.0
T7	<i>Rugamonas rubra</i>	1,363.5	64.1	
T8	<i>Arthrobacter oryzae</i>	1,313.6	65.4	

처리효율은 Table 15와 같다. 오염토의 초기농도는 3,801 mg/kg 이었으며, 균주를 주입하지 않은 control 시료는 2,381 mg/kg로서 처리효율은 37% 였다. 접종한 균주 중 가장 높은 처리효율을 나타낸 것은 R1과 R3로서 오염토 대비 각각 86%, 82%의 처리효율을 나타냈다. 따라서 가장 높은 처리효율을 나타낸 R1과 R3 및 이와 동일한 종인 *Pseudomonas frederiksbergensis*로 R14, R15, R17과 *Arthrobacter siccitolerans*, R8 균주를 추가로 선정하여 총 6종의 균주에 대한 처리효율을 Aluminum box에서 평가하였다.

② Aluminum box 실험결과

Aluminum box 실험은 25°C incubator에서 배양하여 15일째 효율을 분석하였다. 분석결과는 Table 16에 나타났다. 분석결과 초기 오염토의 TPH 농도는 2352 mg/kg이며, 균주를 접종하지 않은 control은 1581 mg/kg로서 처리효율 32%를 나타냈다. Petri

dish에서의 실험과는 달리 가장 뛰어난 분해효율을 나타낸 균주는 R4와 R8이었으며, 각각 79%, 87%의 처리효율을 나타냈다.

(2) 퇴비화 실험

본 연구에서는 퇴적토의 퇴비화 가능성에 대해 알아보기 위하여 연구를 진행하였다. 시료의 채취지역은 각 저수지마다 1개 지점씩을 정하였으며, 채취방법은 일반적인 토양시료의 채취와 동일한 방식으로 진행하였다.

분석결과는 Table 17과 같이 나타났다. 주교제, 용호제, 학평제 모두 유기물함량이 비료 규격에 비해 전체적으로 유기물 함량이 매우 낮은 상태로 조사되어, 원활한 퇴비화 실험을 위하여 보조제로 톱밥을 사용하였다. 그 외 중금속은 비료규격을 초과하지 않았으며 대장균이 검출되었다. 특히 주교제의 대장균이 높게 분석되었다.

실험은 주교제 시료로 실시하였으며 2 mm 채로

Table 16. TPH residual concentration and treatment efficiency in soil after 15 days

Sample name	Initial concentration (mg/kg)	Concentration after treatment (mg/kg)	Processing efficiency (%)
R1 15day	2,352	540.4	77.0
R4 15day		492.1	79.1
R15 15day		876.3	62.7
R17 15day		972.5	58.7
R3 15day		584.4	75.2
R8 15day		299.2	87.3
Control		1,581.2	32.8

Table 17. Initial Sample Analysis Results

Division	The Agrarian Development Office Notificaton No. 2013-13	Jukyo Reservoir		Youngho Reservoir		Hakpyeong Reservoir	
		1st	2nd	1st	2nd	1st	2nd
Water content (%)	Below 55%	43.82	39.05	35.21	35.85	29.32	22.75
Organic matter content (%)	Above 50%	7.79	7.90	7.95	7.62	7.29	7.43
Organic matter/N (%)	Below 45%	20.48	19.98	20.19	22.77	22.94	23.66
Arsenic (mg/kg)	Below 45	4.30	5.20	4.60	4.50	5.80	5.60
Copper (mg/kg)	Below 360	193.60	211.90	228.30	191.00	176.10	187.40
Zinc (mg/kg)	Below 900	600.20	612.50	712.50	705.30	584.20	596.30
Chrome (mg/kg)	Below 200	37.01	36.70	37.78	37.74	36.49	37.58
Cadmium (mg/kg)	Below 5	0.54	0.51	0.52	0.52	0.51	0.53
Colon bacillus (NTU/100ml)	NA	1070	1040	40	50	110	100

Table 18. Composting Experiment Conditions

Division	Air content (ml/min)	Water-content (%)	Temperature (°C)	C/N ratio	Operating days (day)	Note
1	120	60	상온	20↑	28	No temperature control
2	120	60	50	20↑	28	
3	120	60	50	20↑	28	
4	120	60	70	20↑	7	
5	120	60	70	20↑	7	

Table 19. Composting Experiment Result

Division		Organic content (%)	Organic to Nitrogen Ratio (%)	Compost Maturity	Colon bacillus (NTU/100ml)
Official standard of fertilizer		Above 50%	Below 45%	Above 4	NA
Condition 1	A weeks	11.65	20.37	5	950
	2 weeks	11.19	20.09	6	1050
	3 weeks	10.90	19.75	6	950
	4 weeks	10.72	20.07	7	1100
	5 weeks	10.22	19.77	7	1150
Condition 2	A week	11.77	22.94	5	1050
	2 weeks	11.36	22.77	7	950
	3 weeks	11.09	22.22	8	700
	4 weeks	11.05	22.69	8	700
	5 weeks	10.78	22.99	8	400
Condition 3	A week	12.02	23.94	5	900
	2 weeks	11.95	24.19	8	900
	3 weeks	11.62	23.81	8	700
	4 weeks	11.41	24.28	8	450
	5 weeks	10.98	23.66	8	450
Condition 4	A week	11.55	21.04	5	950
	2 weeks	11.07	20.24	8	0
Condition 5	A week	12.22	20.92	5	950
	2 weeks	11.81	20.26	8	0

※ compost Maturity Estimation

1: Immature 2: Early stage 3: Middle age 4~6: the later 7~8: Completion

If it is 4 or more in the judgment table, it is judged to be completion (fertilizer quality inspection method and sampling standard).

거른 다음 사용하였고, 실험 조건은 호기성 상태를 유지하기 위해 공기 주입을 120 ml/min 주입하였으며, C/N비는 20 이상 함수율은 60 %로 유지한 채로 온 도조건을 바꾸어서 실험을 진행하였다.

실험결과 유기물 함량의 변화와 유기물대 질소비는 차이가 크지 않았으며, 부숙도의 경우 50℃정도의 조건이면 부숙도가 높아짐을 확인할 수 있었다.

대장균은 보통 사람이나 동물 등의 온혈동물의 장

기에 서식하는 미생물인데, 이들이 검출되었다 함은 전염성 병원균을 지닌 동물들의 배설물이 대장균과 같이 배출될 수 있음을 나타낸다. 특히, 콜레라, 이질, 장티푸스, 간염 등의 전염병을 일으키는 병원균 등이 장내에서 대장균과 더불어 배출되어, 전염병의 감염 가능성을 예상할 수 있는 잠재적 오염현상(potential contamination)이라고 볼 수 있다. 대장균은 그람 음성의 무아포성 간균으로써 35℃에서 48시간 이내

에 Lactose를 발효시키는 막대기형상의 호기성 및 혐기성 세균들이다. 이 중에서 Escherichia Coli(E. Coli)는 분변성 대장균(fecal coli)으로서 분변으로 배출되는 대장균군의 약 90%를 차지하여 주관심의 대상이 되기 때문에 퇴적토의 재활용을 위해 퇴비화 실험 후 대장균을 측정하였다.

본 연구에서 실험 조건 2, 3과 4, 5의 차이는 퇴비화의 최적조건이라는 50~60℃에서의 실험 상태와 대장균이 사멸하는 조건인 70℃에서의 실험을 통해 퇴비화의 적정성과 안정성에 대해 분석하였다.

온도를 조절하지 않았던 실험 조건 1에서는 대장균의 감소가 거의 없었지만, 실험 조건 2, 3과 실험 조건 4, 5에서는 눈의 띄는 감소를 보여주었다. 실험 조건 2와 3에서는 퇴비화 기간이 증가할수록 대장균 개체수가 감소하였으며, 실험 조건 4와 5에서는 7일 안에 모든 대장균이 사멸하였다. 이는 기존의 연구들(Hessetal, 2004, Lungetal, 2001, Jung, 2014)에서와 같이 50℃ 이상의 조건에서는 대장균이 사멸하게 되며, 70℃ 이상에서는 더 빠른 속도로 사멸하게 됨을 보여주고 있다.

퇴비화에 필요한 유기물함량은 모든 실험에서 부족하게 분석되었다. 퇴적토는 대부분 가축분뇨에 의해 만들어진 것인데, 가축분뇨에는 유기물질이 미생물들이 이용하기 힘든 고분자 형태로 이루어져 있어, 일반적인 퇴비화 방법으로는 가축분뇨에 의해 생성된 퇴적토의 퇴비화가 어렵기 때문에 추가적인 연구가 필요할 것으로 파악된다.

유기물량을 보았을 때, 가축분뇨 퇴적토는 퇴비화 적용에는 부족한 것으로 판단된다. 원인으로는 오랜

시간 혐기상태로 방치되어 있어 퇴비화에 필요한 호기성 미생물의 수가 충분치 못하고, 퇴적토에 존재하는 질소 등의 유기물질이 고분자 형태로 많은 양이 존재하여 퇴비화에 실제적인 영향을 미치지 못하는 것으로 사료된다.

그러나 전체적인 질소의 양이 충분하며, 중금속의 오염이 없는 퇴적토는 매립하거나 골재로 사용하는 것은 비효율적이며, 요즘의 자원 재순환에도 맞지 않는다. 비록 비료에는 부적당하지만, 퇴비화과정을 거친다면 토지 개량을 목적으로 하거나 도로변의 녹화 사업용으로 사용하기에 충분할 것으로 사료된다.

따라서 필요시 별도의 유기물함량이 높은 물질과 혼합하여 사용하되 대장균의 균에 의한 오염을 제거 후 부식토로써 토양개량제로 사용하는 것이 바람직할 것으로 분석되었다.

3) 토양세척

(1) 입경별 중금속농도

습식방법에 의한 입도분석과 각 입경별 Cu, Zn, Cd 분석결과를 Table 20와 Figure 11에 제시하였다. 중금속(Cu, Zn, Cd)의 함량은 입경에 따라 정도의 차이를 보이며, 입도가 세립할수록 증가되는 양상이 나타난다. Cu의 함량은 309~388 mg/kg의 범위이며, Zn은 783~990 mg/kg의 범위를 보인다. 이 두 항목 모두 입경에 따라 뚜렷한 경향성을 보이지는 않았지만, 전체적으로 400 mesh 이하의 입경에서 가장 높은 함량을 보였다. 한편, Cd의 경우에는 입경이 작은 구간에서 뚜렷하게 증가되는 Cd 함량을 보였다.

Table 20. Analysis of weight ratio and pollution degree by particle size by wet sieve analysis

Sieve size (mesh)	Particle size classification (mm)	Weight ratio (wt. %)	Cu (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cd (mg/kg)
			500	600	4
>20	841	25.7	383.5	957.3	3.2
20-40	841-420	29.0	383.9	907.8	3.1
40-60	420-250	20.1	369.9	881.2	2.9
60-100	250-149	8.4	327.1	783.7	3.4
100-200	149-74	8.8	309.3	797.3	3.7
200-400	74-37	5.2	355.0	937.5	4.4
<400	37	2.8	388.8	990.8	4.6

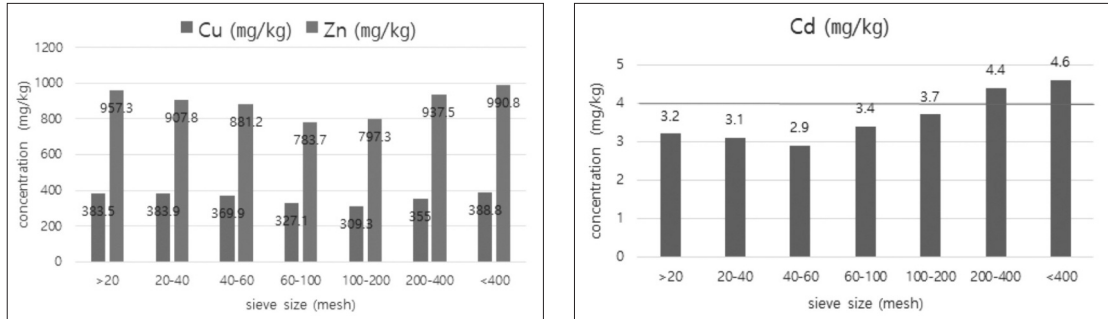


Figure 11. Contents of Cu, Zn (left) and Cd (right) for each particle diameter.

일반적인 산업단지 중금속 오염부지의 경우 미세 토에 오염이 집중되어 있는 반면 농축산 퇴적토에는 그 경향이 뚜렷하지 않았다 다만 세립질 입자(<400 mesh)에서는 그 함량이 다소 증가되는 경향성을 보였다. Zn은 모든 입경에서 토양오염우려기준 2지역을 초과하였고, 400메쉬 이하의 입경에서는 가장 높은 농도(990.8 mg/kg)로 Zn에 대한 오염도가 높게 나타났다.

(2) XRD 및 연속추출분석

Figure 12는 연구대상지역 시료에 대한 XRD 분석결과이다. XRD 분석결과 토양 구성광물은 석영(Quartz; Q)과 방해석(Calcite; C)이 주를 이루고 있다. 보다 세부적으로는 일부 조장석(Albite; A)이 관찰되었으며, 이들 역시 규산염광물로서 우리나라 일반 토양에서 전형적으로 관찰되는 토양 특성을 보인다고 할 수 있다. 농어촌지역의 퇴적토의 특이한 경향은 나타나지 않았다.

Cu, Zn, Cd에 대한 연속추출분석 결과를 Figure 13에 제시하였다.

존재형태별 분석결과, Cu, Zn, Cd 항목 모두 비정질의 함량이 타 형태와 비교하여 상대적으로 높은 비율을 차지하는 것으로 나타났다. 이들 형태는 pH 및 산화환경의 변화에 따라 쉽게 용출이 가능한 형태이다. 즉, 본 연구지역과 같이 소류지의 형태를 보이는 경우 퇴적환경의 변화 및 수중 내 용존산소 및 pH 변화에 따라 이들 독성원소들이 수층으로 재 용출될 가능성이 있다. Cd는 미세토에서 5단계인 잔류성(Residual) 물질이 확연하게 존재하였고 Cu 및 Zn은 오염분리가 쉬운 이온교환성(1단계), 탄산염(2단계), 철/망간산화물(3단계)의 함량이 대부분을 차지했다.

(3) 산용출 및 다단계척

Figure 14는 토양세척을 위해 수행된 결과를 도시한 것이다. 먼저, 세척액 선정을 위해 황산(H₂SO₄), 염산(HCl), 인산(H₃PO₄)을 적용한 결과, 염산을 세척

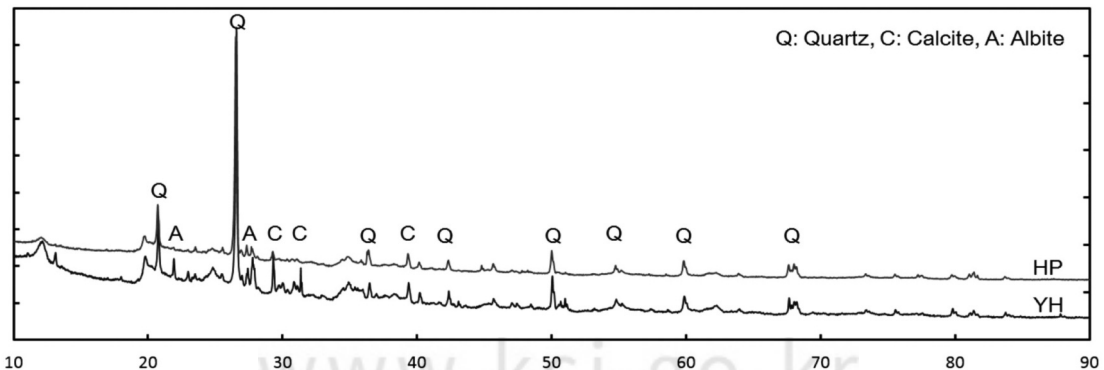


Figure 12. XRD Analysis Result.

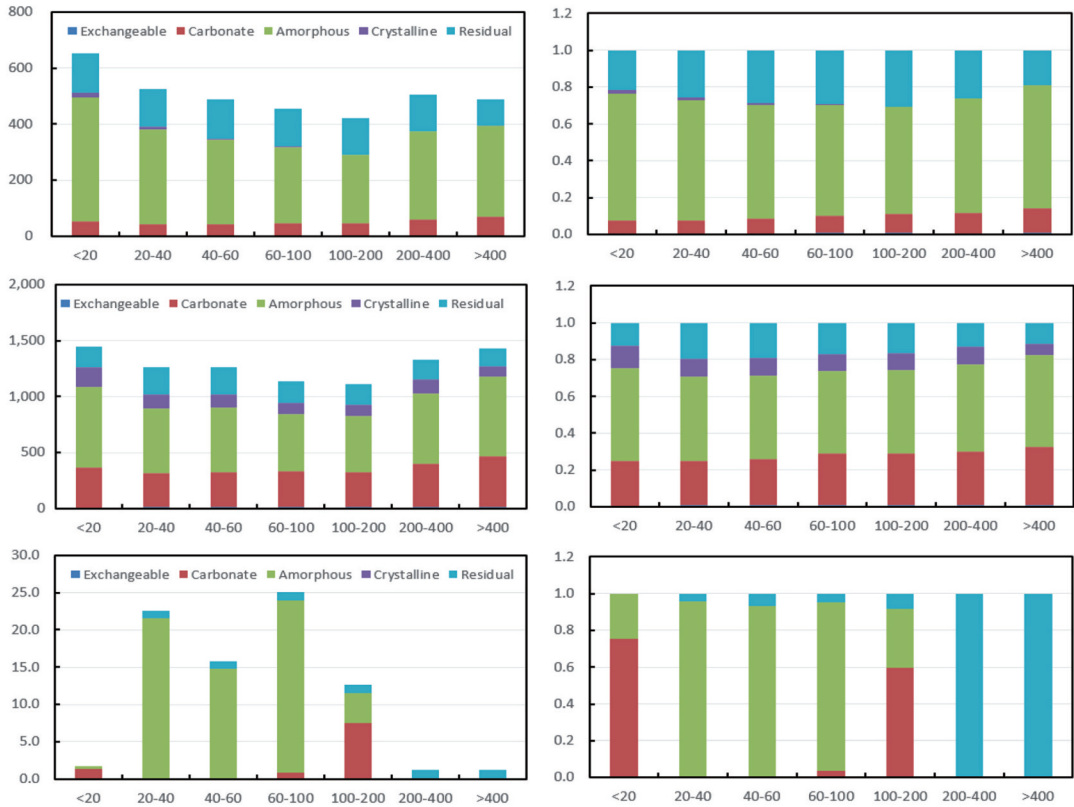


Figure 13. Grain Contents (Left) and Presence Morphology (Right) for Cu (Top), Zn (Medium) and Cd (Bottom).

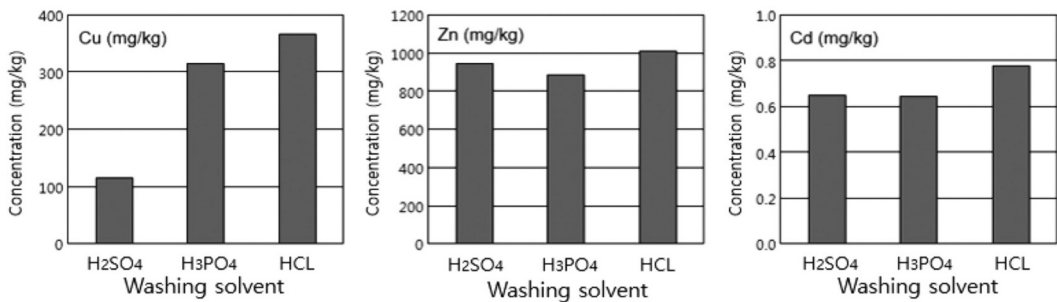


Figure 14. Extraction amount of heavy metals (Cu, Zn, Cd) to sulfuric acid, phosphoric acid and hydrochloric acid as washing solvent.

용매로 사용한 실험에서 중금속의 추출효율이 가장 높게 나타났다. 다음으로는 인산, 황산의 순이었으며 대상이 되는 중금속 항목에 따라서는 이들 두 용매의 추출효율이 큰 차이를 보이지는 않았다. 전체적으로 인산과 염산의 경우에는 Cu와 Cd에 대한 추출효율이 매우 유사하게 나타났다. 하지만, 황산은 이들 두 산과 비교하여 현저히 낮은 용출 효율을 보였다. 염산

은 Zn에 대해 매우 높은 추출효과를 나타내었다. 이러한 결과로 볼 때, 세척용매로는 염산이 매우 적절해 보인다. 따라서 연구대상지역 오염토를 정화하기 위해서는 세척액으로써 염산을 선정하였고, 세척액의 농도, 고액비, 강도 그리고 세척시간에 대한 실험을 연속적으로 수행하였다.

염산의 농도변화(0.1M, 0.5M, 1.0M, 1.5M, 2.0M)

에 따른 실험결과, 염산의 농도가 증가됨에 따라 각 중금속 용출량은 뚜렷하게 증가하였다. 농도별로 용출량을 비교하여 보면, 0.1 M의 조건을 제외하고는 다른 조건들에서 큰 차이를 보이지는 않았다. 다만 Cd은 0.5 M의 조건에서 효율이 높게 나타났다. 하지만 3가지 오염물질을 같이 처리하기에는 용출 효율성과 경제성 고려 시 1.0 M의 조건이 적절할 것으로 판단된다.

오염토양과 세척액의 고액비를 조절(1:3, 1:5, 1:10)한 실험결과에는 Cu, Zn, Cd 모두 큰 차이를 보이지 않아 경제성을 고려할 때 고액비(1:3)의 조건이 적절할 것으로 판단된다.

반응속도의 경우 Cu와 Cd는 200 rpm의 조건에서 효율이 가장 높았고 Zn의 경우 300rpm에서 효율이 높았으나 3가지 오염물질을 함께 처리하는데 있어 경제성을 고려하였을 때 200rpm 조건이 적절할 것으

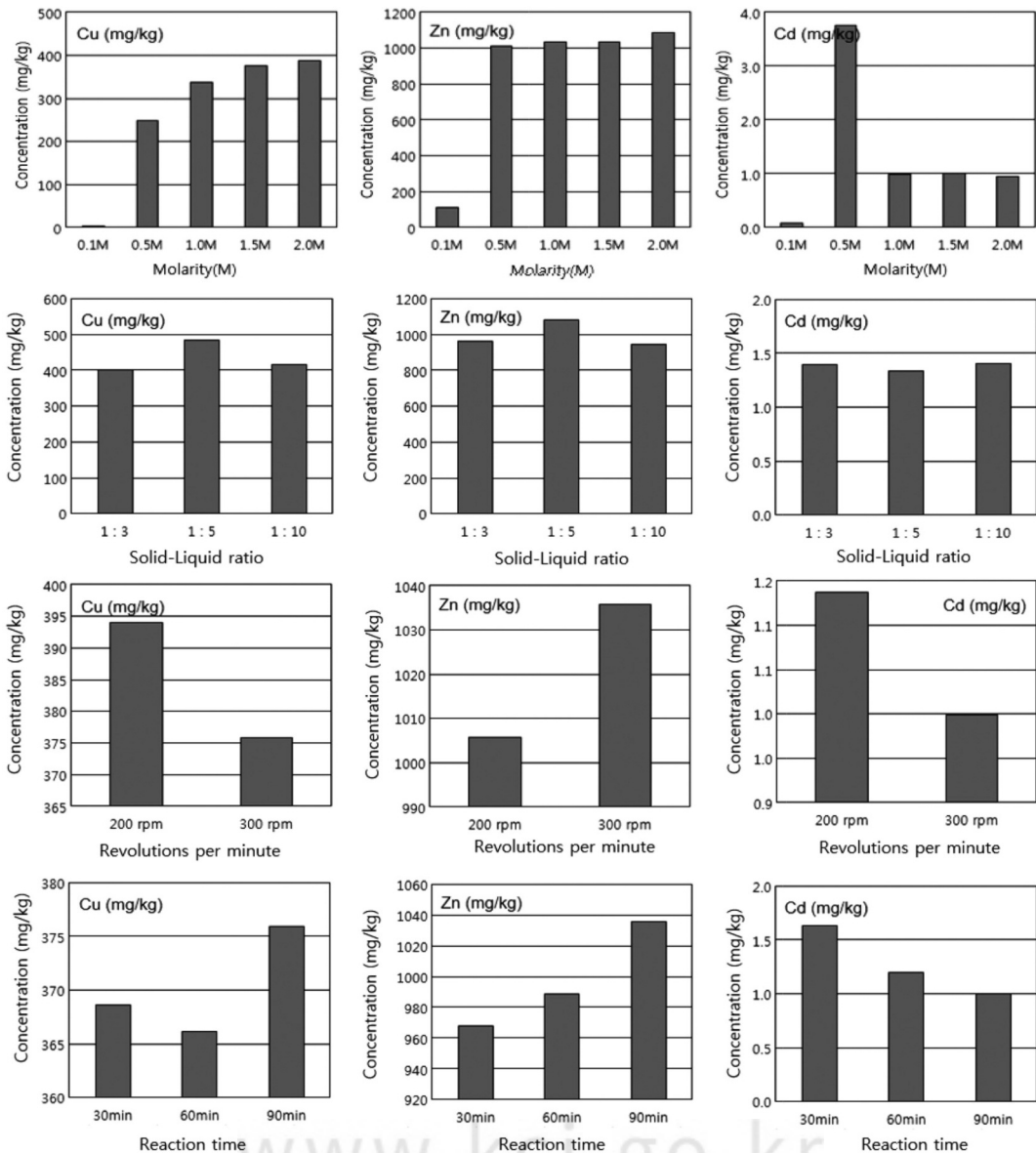


Figure 15. Extraction Efficiency According to the Experimental Conditions (Cu, Zn, Cd).

Table 21. Result of Selection of Optimum Condition for Soil washing

Stage	Experiment	licited optimal condition
1 Stage	Selection of cleaning fluid	hydrochloric acid (HCl)
2 Stage	Cleaning fluid concentration	1.0 M
3 Stage	Ratio of soil cleaning solution	1:3
4 Stage	Cleaning strength	200 rpm
5 Stage	Cleaning time	60 min

로 판단된다.

반응시간 실험결과, Cu는 90분 적용시 효율이 가장 좋았으나 각 반응시간에 따른 용출농도가 미세한 차이를 보였다. Zn의 경우 반응시간이 증가함에 따라 효율이 점점 증가하는 추세를 보인 것과 반대로 Cd의 경우 용출농도가 반응시간이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 따라서 3가지 중금속 오염물질을 처리하는데 있어 효율성, 경제성 등을 고려할 때 60분의 반응시간 적용이 적절할 것으로 판단된다.

각 조건에 따른 실험결과, Table 21에서 제시한 것처럼 염산, 1.0M, 1:3, 200rpm, 60min이 최적 세척 인자로 분석되었다.

(4) 다단 연속세척실험

토양세척을 이용한 오염토양정화에 있어 세척횟수가 증가할수록 세척효율이 증가된다. 하지만, 세척횟수 증가로 경제성 측면에서는 효율이 떨어진다고 볼 수 있다. 따라서 오염토양의 정화를 위해 세척공정을 적절하게 활용하는 것이 무엇보다도 중요하다고 할 수 있다. 따라서 Table 21의 조건으로 총 5회에 걸쳐 반복세척 실험을 수행하였다. 연속세척 실험을 수행한 결과, 세척의 횟수가 증가될수록 토양 내 Cu, Zn, Cd의 함량이 급격히 감소되는 양상을 보였다(Figure

16). 이러한 양상은 대상 중금속 모두에서 유사하며, 1단계 세척에서 대부분의 중금속이 용출되는 것으로 보인다. 각 단계가 진행될수록 오염토양으로부터 용출되는 중금속의 함량은 급격히 감소하며 항목에 따라 정도의 차이를 보이긴 하나, 3회 이후부터는 안정한 패턴을 보인다. Cu의 경우, 단계별로 추출된 양은 1회에서 433.9 mg/kg의 함량을 보였고, 2단에서는 초기 추출된 양의 약 25%만이 추출된 107.8 mg/kg으로 나타났다.

한, 3단, 4단, 5단에서는 각각 29.7 mg/kg, 11.9 mg/kg, 6.45 mg/kg으로 초기(1단) 추출된 양의 10% 이내만이 추출되는 것으로 나타났다. 이러한 양상은 Zn와 Cd에서도 유사하게 나타난다. 본 실험결과 오염 퇴적토는 1단에서 대부분 토양환경보전법 우려기준을 만족하는 것으로 분석되었다. 단 일부 고농도의 경우에는 3단 이후 뚜렷한 차이가 나타나지 않았으므로 3단으로 구성하여 적용하는 것이 효율적으로 판단된다.

4) 연구를 통한 오염퇴적토 정화방법 제시

따라서 본 연구에서는 Figure 17처럼 중금속 오염토는 전처리 후 토양세척을 적용하여 처리토를 골재로 활용하고, 유기물 및 유류 오염토는 퇴비화를 적

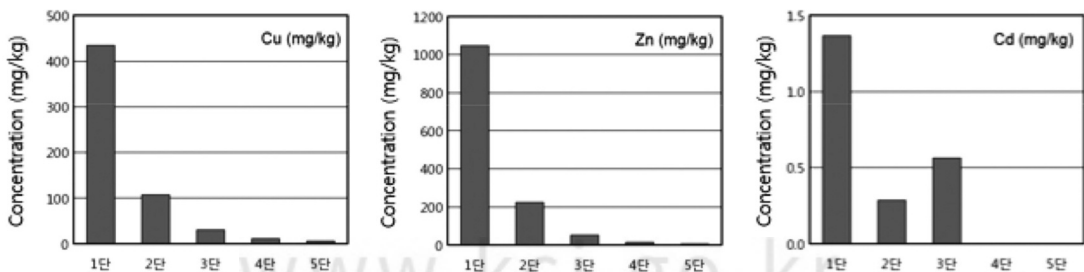


Figure 16. Extraction Efficiency of Heavy Metals (Cu, Zn, Cd) According to Washing Frequency.

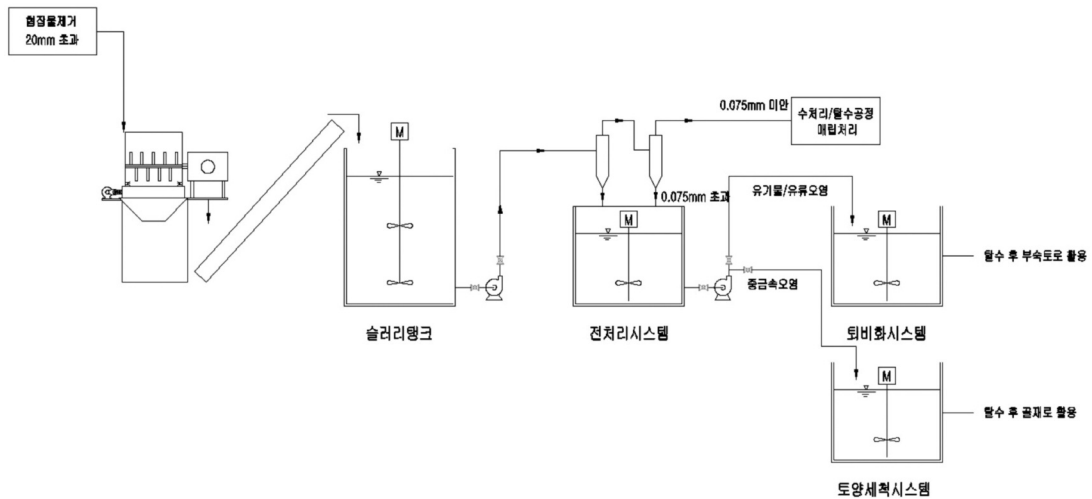


Figure 17. Method for remediation of contamination Sediments.

용하여 오염물질과 대장균을 사멸한 후 부숙토로 사용하는 것이 효율적으로 판단된다.

IV. 결론

본 연구에서는 수계로 배출된 오염물질의 종착지인 오염퇴적토를 토양환경보전법에 의한 정화방안을 제시하고자 하였다.

1. 대상부지 및 오염물질 특성결과

- 수질조사결과 DO, SS, COD, TN, TP가 방류수 수질기준을 초과하였고 특히 SS, COD, TN, TP는 기준을 수십배에서 수백배 초과하였다.
- 토양조사결과 사료의 성장을 촉진하는 구리, 아연의 농도가 높게 나타났으며, 카드뮴이 1지역을 상회하였다. 또한 일부 지역에서 유류오염이 검출되었다. 이 결과는 해외의 퇴적물관리법과 비교하여도 준설을 해야하는 수치로 분석되었다.

2. 토양환경보전법 상 정화기술 적용결과

- 전처리기술은 하이드로사이클론을 활용하여 입도분리를 실시하였으며, 미세토양이 80%이상 분리되어 선별효율이 높게 나타났다.
- 퇴비화는 유기물 및 TPH 오염토양을 대상으로

실시하였으며, 오염토 내 균주를 동정하여 상온에서 실험결과 TPH는 우려기준 이내로 처리되었고, 유기물의 경우 대장균이 높게 분석되어 비료규격을 초과하였다. 따라서 50℃, 70℃에서 퇴비화 최적조건을 적용하여 유기물함량, 유기물대질소비, 부숙도, 대장균을 분석결과 대장균은 사멸되었고 유기물대질소비, 부숙도는 비료규격을 만족하였으나 유기물함량이 낮게 분석되었다. 이 결과는 가축분뇨 퇴적토는 퇴비화를 하기에는 부족한 것을 보여준다. 하지만 전체적인 질소의 양이 충분하여 토지 개량을 목적으로 하거나 도로변의 녹화 사업용으로 사용하기에 충분할 것으로 분석되었다.

- 일반적인 산업단지의 중금속 오염지역의 미세토에 오염이 집중된 양상과 달리 토양세척은 입경별 중금속농도 분석결과 뚜렷한 증가가 나타나지 않았다. XRD분석 결과도 정의할 수 있는 특이한 경향이 나타나지는 않았다. 하지만 연속추출시험결과 Cd는 미세토에서 5단계인 잔류성(Residual)물질이 확연하게 존재하였고 Cu 및 Zn은 오염분리가 쉬운 이온교환성(1단계), 탄산염(2단계), 철/망간산화물(3단계)의 함량이 대부분을 차지했다. 이 결과는 토양세척 효율이 높게 분석됨을 나타내었다. 산용출과 다단계척을 단

계별로 적용결과 염산, 1.0M, 1:3, 200rpm, 60 min이 최적 세척인자로 분석되었으며 오염 퇴적토는 1단에서 대부분 토양환경보전법 우려기준을 만족하는 것으로 분석되었다.

따라서 본 연구결과 중금속오염이 높은 오염토는 전처리 후 토양세척을 적용하여 처리토를 골재로 활용하고, 유기물 및 유류 오염토는 퇴비화를 적용하여 오염물질과 대장균을 사멸한 후 부숙토로 사용하는 것이 효율적임을 확인할 수 있었다.

사사

본 연구는 “지중환경오염위해관리기술개발사업(과제번호 2018002480001)”의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- Jukes TH, Cantor CR. 1969. Evolution of protein molecules. In *Mammalian protein metabolism*, 21-132. Edited by H. N. Munro. New York: Academic Press.
- Kim IJ, Hwang SI. 2009. Pollution Status of Domestic River Sediments: Literature Review and Management Direction. *environmental forum Third volume No. 3rd*. Korea Environment institute. [Korean Literature]
- Kim IJ, Hwang SI, Kim HJ. 2010. River and lake sediment management and dredged material utilization plan. Korea Environment institute. [Korean Literature]
- Kim K, Park SM, Kim J, Kim SH, Kim Y, Moon JT, Hwang GS, Cha WS. 2009. Arsenic concentration in porewater of an alkaline coal ash disposal site: Roles of siderite precipitation/dissolution and soil cover. *Chemosphere* 77, 222-227. [Korean Literature]
- Tessier A, Campbell PGC, Bisson M. 1979. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry* 51, 844-851.
- Ministry of Environment. 2007. Guidelines for the method of remediation of contaminated soil. [Korean Literature]
- Ministry of Environment. 2010. A Study on the Management and Improvement of Animal Drainage in Iksan Palace Area. [Korean Literature]
- U.S. Environmental Protection Agency. 1993. Questions and Answers About Contaminated Sediments, EPA 823-F-93-009. Office of Water, Washington, D.C.
- U.S. Environmental Protection Agency. 2005. Contaminated Sediment Remediation Guidance for Hazardous Waste, EPA 540-R-05-012. Office of Solid Waste and Emergency Response
- Wenning RJ, Stern EA, Jones KW, Douglas WS. 2001. The WDRA program and emerging decontamination technologies for contaminated sediments, *Contaminated Soil Sediment and Water*.
- Wenzel WW, Kirchbaumer N, Prohaska T, Stingeder G, Lombi E, Adriano DC. 2001. Arsenic fractionation in soils using an improved sequential extraction procedure. *Analytical Chimica Acta* 436, 309-323.