Journal of Korean Society on Water Quality, Vol. 25, No. 3, pp.404-410 (2009)

토지이용별 하수관거 퇴적토의 특성과 재활용

원철희 · 이병원[*] · 최중대[**] · 임재명[*,†]

강원대학교 환경연구소
[*]강원대학교 환경공학과
[**]강원대학교 지역기반공학과

Characteristics and Recycling of Sewer Sediments from Land Use

Chul-hee Won · Byung-won Lee[*] · Joong-dae Choi[**] · Jay-myoung Rim[*,†]

Institute of Environmental Research, Kangwon National University
[*]Department of Environmental Engineering, Kangwon National University
[**]Department of Agricultural Engineering, Kangwon National University
(Received 5 March 2009, Revised 30 March 2009, Accepted 6 April 2009)

Abstract

In this study, research for physical and chemical characteristics were conducted through analysis of sediments, grading and heavy metals (e.g., Mn, Cu, Cd, Zn and Pb) in sewers which are classified by drainage types. After that, cement solidification and yellow soil calcinations made heavy metals stabilized and then, ways of recycling it were examined. The grain size distribution of all sediments was relative graded. When evaluating heavy metal pollution through index of geoaccumulation (Igeo), Cu showed moderately pollution or strong pollution in forest and street site and Zn was assessed by moderately pollution in military, residential, and street site. Analysis of Pearson Correlation coefficient of heavy metal indicated that all items in street site have tight relationship respectively. Especially, Cd-Zn, Cu-Pb, Cu-Mn, and Pb-Mn have relationship at 99% confidence intervals in statistical analysis. Recycling it with cement solidification was satisfied with compressive strength standard under 55% deposit contents and Zn, Pb, Mn were stabilized effectively. If time and temperature plasticity and compressive strength would be standard, it is revealed that yellow soil calcinations is valuable aggregate when it has 50-60 Wt% contents. When considering economic feasibility and stabilization of heavy metals, cement solidification would be more appropriate than yellow soil calcinations as solution to recycling.

keywords : Cement solidification, Igeo, Recycling, Sediments, Yellow soil calcination

1. 서 론

토지의 이용에 따라 강우시 유출되는 오염물질의 종류와 양은 매우 다른 특성을 보이며(김이형과 강주현, 2004), 동일한 지역의 노면퇴적물과 이들이 관거로 유입되어 퇴적된 퇴적물내의 중금속 성분은 일치하는 것으로 보고되고 있다(이의상, 2004). 따라서 하수관거내 퇴적물의 입도분포와 유·무기성 오염물질의 농도는 배수구역의 토지이용에 크게 의존할 수밖에 없다.

하수관거내 퇴적물 중 무기성 물질, 특히 중금속은 자연적으로 존재하는 것(Background level), 광산 폐석이나 중금속 함유 광물의 침출수와 산업체의 원자재 등에서 유출된 것, 도시생활쓰레기 및 고형폐기물에서 침출된 것, 그리고 사람이나 가축의 분뇨에서 유출된 것으로 구분할 수 있으며, 이들은 독성을 지니고 있기 때문에 중요한 의미를 가진다. 즉 중금속이 함유된 하수관거 퇴적물은 강우시 유속의 증가에 의해 하류로 유하하여 combined sewer overflows(CSOs) 또는 stormwater sewer discharges(SSDs)와 같이 미처리된 상태로 하천으로 흘러갈 수 있다. 하천으로 유입된 중금속은 저서생물과 수생생물에 흡수되고, 먹이 사슬을 따라 농축의 정도가 증가하며 결국에는 생태계 및 인간에 치명적인 위협이 될 수 있다.

한편 우리나라는 년 1회 이상 준설을 실시하고 있다. 그러나 준설된 퇴적토는 또 다른 환경문제를 유발할 수 있는 오염물질(유기물, 중금속)을 포함하기 때문에 최종 처분시에는 매립과 해양투기 같은 직접적인 방법보다는 안정화 방법을 이용한 재활용이 대안적인 의미를 가질 수 있다. 퇴적토의 재활용은 하수도의 효율적 관리를 위하여 필요하며, 수계오염의 저감과 도시환경보전에 간접적으로 기여할 수 있을 것이다.

따라서 본 연구에서는 토지이용별 퇴적토의 입도분포와 입도에 따른 중금속 농도 분포를 분석하였다. 또한 주변 토양을 바탕으로 토지이용별 퇴적토의 상대적 오염도와 중금속 항목별 상관관계를 분석하였다. 마지막으로 퇴적토의 재활용 측면에서의 기초조사를 수행하였다.

† To whom correspondence should be addressed.
jmrims@kangwon.ac.kr

2. 연구방법

2.1. 조사지역

토지의 이용현황에 따른 배수구역별 퇴적토의 특성을 비교・검토하기 위하여, 농공단지(Agriculture and Industrial Site), 교량(Bridge Site), 임야(Forest Site) 공업지역(Industrial Site), 군사지역(Military Site), 주거지역(Residential Site), 도로(Street Site)로 구분하여 총 7개 지점을 선정하였다. 각 지점의 현황은 Fig. 1과 같으며, 지점별 특성은 Table 1에 제시하였다. 농공단지 지역은 소규모로서 정유저유소, 부직포공장, 정밀전기 레미콘회사 등이 모여 있으며, 배수면적은 6.720 ha이고 분류식하수관거 중 우수관거로 평상시에도 적은 유량이 흐르는 것으로 조사되었다. 교량지역은 도심지 하천을 가로지르는 다리로서, 교량하부 배수구에서 퇴적토를 채취하였으며 배수면적은 0.013 ha이다. 임야지역은 대학교내 침엽수림 인근 인도에 위치한 측구로서 배수면적은 0.015 ha이다. 공업지역은 배수구역내 소규모의 식품공장, 통신전자공장, 정밀, 섬유, 직물, 차정비공장 등이 위치하고 있으며, 배수면적은 1.410 ha로 배제방식은 합류식이다. 군사지역은 과거 군부대가 위치하고 있던 지역으로 이외에 주유소, 제재소, 카센터, 식품회사가 있으며 배수면적 9.820 ha로 조사지점 중 가장 크다. 주거지역은 주로 2~3층 규모의 단독주택 밀집지점이며 배수면적은 0.100 ha이다. 도로 지역은 하천변 도로에 위치하고 있는 측구로서 배수면적은 0.002 ha로 가장 작다.

Fig. 1. Investigation point and drainage area of dredged soil classified by drainage type.

Table 1. Site characteristics of dredged soil classified by drainage type

Site	Area (ha)	Sewer type	Outlet size (m) Diameter×Unit	Drainage type
A	6.720	Separate (Stormwater)	HP 800	Agriculture and Industrial
B	0.013	Bridge waterway	-	Bridge
F	0.015	Sidewalk gutter	-	Forest
I	1.410	Combine	PE 800	Industrial
M	9.820	Combine	HP 700×2	Military
R	0.100	Separate (Stormwater)	HP 300	Residential
S	0.002	Street gutter	-	Street

HP: Hard chlorinate vinyl pipe, PE: Poly ethylene

2.2. 시료채취 및 분석방법

각 지점별 퇴적토는 1년간 총 5회를 채취하였으며, 조사시마다 약 2 kg씩 채취하였다.

채취된 시료는 입도분석과 중금속에 대하여 분석을 수행하였다. 중금속은 원시료와 입경별로 구분하여 분석하였다. 입경에 따른 중금속의 분석은 표준체 60 mesh, 20 mesh, 10 mesh, 4 mesh로 체가름을 하여 4 그룹으로 분리한 후 수행하였다. 시료내 중금속을 분석하기 위하여 Zn, Cd, Cu는 0.1N HCl 침출법, Pb는 과염소산분해법, 그리고 Mn은 중성 1N-아세트산암모늄액 침출법으로 전처리를 하였으며(동화기술편집부, 2001; 배재근과 오종민, 2002), 분석은 Flame atomic absorption spectrometry(AAs)방법으로 원자흡광광도기(analytic jena AG novAA400FL, Germany)를 이용하였다.

2.3. 입도분석

입도 분석을 위하여 채취한 시료는 105°C의 고온에서 48시간 건조 하였으며, 표준체(325, 200, 100, 80, 60, 18, 9 mesh)와 Sieve shaker(CISA, Spain)로 입도를 분석하였다.

입도분포를 통하여 산정되는 균등계수($C_u=D_{60}/D_{10}$)와 곡률계수[$C_e=(D_{30})^2/(D_{60}\times D_{10})$]는 입도가 얼마나 균등하게 이루어 졌는지를 알아볼 수 있는 척도이다(한국수자원공사, 2004). 균등계수는 누적중량퍼센트 그래프의 기울기로서 $C_u \fallingdotseq 1$일 때에는 D_{60}과 D_{10}과의 범위가 좁아 그래프가 거의 직선의 형태를 나타내며, 곡률계수는 입도 분포가 계단식인 경우에 이것을 정량적으로 나타낸다(국가표준종합정보센터, 2006). 계산된 균등계수와 곡률계수로부터 $C_u \geq 10$, $1<C_e \leq C_u^{0.5}$의 조건을 만족할 때에는 '입도가 좋다'를 의미하며, $C_u<10$일 때는 '균등입도, 입도가 나쁘다'라고 말한다. 또한 $C_u>10$, $C_e<1$ 또는 $C_e>C_u^{0.5}$의 조건에서는 '계단입도, 입도가 나쁘다'라고 말하며, 나쁜 경우의 입경은 어느 한쪽으로 치우치거나 넓은 범위의 입경이 있을 때이다.

2.4. 공시체 제작 및 강도 측정

재활용을 위한 공시체의 제작과 강도 측정은 선행된 연구(이병원 등, 2007)와 동일한 방법으로 수행하였으며, 이후 퇴적물의 함량비에 따라 강도 및 용출량을 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 지질 특성

조사지역이 위치한 도시는 국가하천과 작은 하천 등이 산재한 지역으로서 토양은 비옥하며, 지반은 화강암이 넓게 분포하고 있다. 조사지점 중 농공단지, 주거지역, 도로지역, 교량지역은 작은 하천에 인접하여 있으며, 군사지역은 국가

하천에 인접해 있다. 임야지역과 공업지역은 하천과 비교적 떨어진 거리에 위치하고 있다(Fig. 1).

Fig. 2에는 토지이용에 따른 배수구역별 퇴적토를 분석하기에 앞서 조사지점 주변의 3 지점(Fig. 1 참조)을 선정하여 토양을 채취 · 혼합한 후, 입도에 따른 중금속의 농도를 입도분석 전의 원시료와 환경부(2003)의 자료와 비교하여 나타내었다. 원시료의 경우 Cu는 1.24 mg/kg, Zn은 3.86 mg/kg, Pb는 4.86 mg/kg 그리고 Cd는 0.105 mg/kg로서, 환경부(2003)에서 제시하고 있는 논의 평균 중금속 함유량 Cu 4.00 mg/kg, Zn 4.15 mg/kg, Pb 5.38 mg/kg, Cd 0.135 mg/kg보다는 낮게 조사되었다. 입경별로 중금속의 농도를 살펴보면, Mn은 16.49~43.83 mg/kg의 범위를 보였으며 Cu는 0.55~3.29 mg/kg, Zn은 2.47~6.71 mg/kg, Pb는 0.59~9.31 mg/kg, 그리고 Cd는 0.087~0.163 mg/kg의 범위로서, 모든 시료에서 중금속의 농도는 입도가 커질수록 낮아지는 경향을 보였다. 이는 크기가 작은 입자의 상대적으로 큰 표면적과 높은 양이온 교환능력에 기인한다(Bodo, 1989; Sansalone and Bushberger, 1997; Wiber and Hunter, 1979).

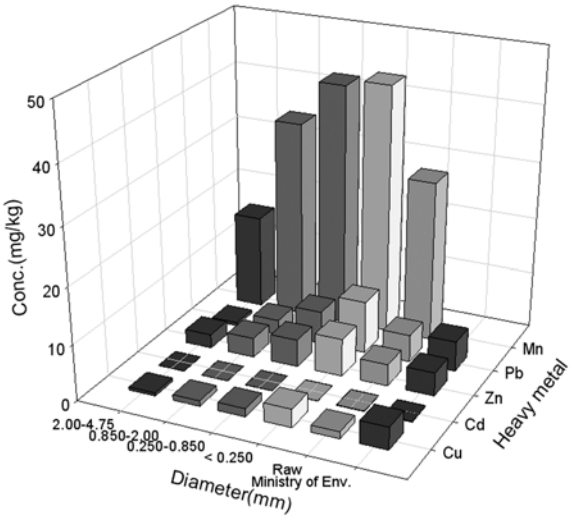


Fig. 2. Heavy metals concentration in soil of investigation area.

3.2. 입도 분석

Fig. 3은 배수구역별 퇴적토의 입도를 나타낸 것으로 임야지역, 군사지역, 도로지역은 0.550 mm보다 작은 입자가 70% 이상을 차지하였으며, 전 지역 모두 0.215~0.550 mm 사이의 입자가 많은 양을 차지하였다. 누적통과백분중량 그래프가 직선에 가깝게 나타나는 농공단지, 공업지역 그리고 주거지역에서 비교적 균질한 준설토의 분포곡선을 나타내고 있다. 또한 교량지역, 임야지역 그리고 도로지역에서는 0.200 mm 이하의 미세퇴적토의 분포가 크게 나타났는데, 세 곳 모두 측구 또는 배수구로서 유속이 매우 작기 때문인 것으로 판단된다.

Table 2에는 지점별 균등계수와 곡률계수를 계산하여 제시하였으며, 선행된 연구(이병원 등, 2007)와 동일한 방법으로 분석하였다. '입도가 좋다'에 속하는지 확인하기 위하

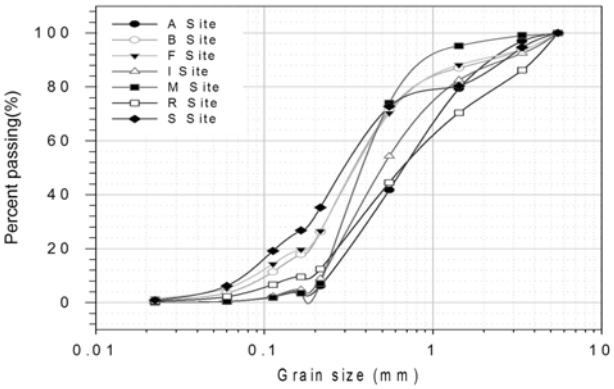


Fig. 3. Grain size of dredged soil classified by drainage type.

Table 2. Gradation characteristics of the dredged soil in sewers

Site	D_{10} mm	D_{30} mm	D_{60} mm	C_u	C_e
Agriculture and industry	0.26	0.41	0.84	3.23	0.77
Bridge	0.11	0.23	0.41	3.73	1.17
Forest	0.09	0.23	0.42	4.67	1.40
Industry	0.23	0.32	0.65	2.83	0.68
Military	0.26	0.29	0.43	1.65	0.75
Residence	0.16	0.36	0.95	5.94	0.85
Street	0.08	0.19	0.38	4.75	1.19

여 C_u를 기준으로 살펴본 결과는 모두 C_u가 10 이하였으나 $1<C_e<C_u^{0.5}$를 기준으로 살펴보았을 때는 교량지역, 임야지역 그리고 도로지역 퇴적토의 입도가 좋은 것으로 나타났다. '균등입도 입도가 나쁘다.'에 속하는지 분석한 결과는 모든 지점에서 $C_u<10$에 만족하였다. '계단입도, 입도가 나쁘다'에 속하는지 분석한 결과는 $C_e<1$ 기준에는 교량지역, 임야지역 그리고 도로지역을 제외하고는 만족하였으나, $C_e>C_u^{0.5}$의 기준에는 만족시키지 못하였다.

3.3. 중금속 농도와 오염도평가

Table 3에는 토지이용별 퇴적토 내의 중금속 농도와 이를 바탕으로 계산된 중금속의 오염도(Igeo)(Http://minmag.geoscienceworld.org/cgi/content/full/72/1/445)를 제시하였다. Cu의 농도는 13.28~2.39 mg/kg의 농도 범위를 가지고 있으며, 임야지역과 도로지역에서 각각 13.07 mg/kg과 13.28 mg/kg의 농도로 토양농도와 비교 시에 각각 10.6배와 10.8배로 나타났다. 임야지역은 미세한 부식질에 의한 흡착으로 인한 것으로 판단되며, 도로지역은 차량이동이 많은 지역으로서 자동차 브레이크 패드가 마모되면서 높은 농도가 발생하는 것으로 사료된다(이평구 등, 2001).

Pb의 농도는 23.68~2.43 mg/kg의 농도 범위를 가지고 있으며, 임야지역과 도로지역에서는 23.68 mg/kg과 15.90 mg/kg으로 다른 지점에 비해 월등히 높게 측정되었으며 토양농도와 비교 시 4.9배와 3.3배로 나타났다. Pb는 고농도의 유기물인 휴믹이나 펄빅산과 착화합물을 형성할 수 있는데(정승우 등, 2003), 부식질의 농도가 높은 숲의 특성을

Table 3. Heavy metals concentrations and indices geoaccumulationin for heavy metals in dredged soil

Item / Site	Heavy metal concentration (mg/kg)					Indices geoaccumulation				
	Cu	Cd	Zn	Pb	Mn	Cu	Cd	Zn	Pb	Mn
Soil (background)	1.24	0.11	3.86	4.86	28.27	-	-	-	-	-
A	2.39	0.15	15.07	2.43	38.38	0.36	0	1.38	0	0
B	9.30	0.12	17.01	8.03	36.02	2.32	0	1.55	0.14	0
F	13.07	0.22	19.68	23.68	47.07	2.81	0.48	1.76	1.70	0.15
I	5.14	0.21	24.19	11.46	40.01	1.47	0.40	2.06	0.65	0
M	4.69	0.23	23.32	8.52	17.26	1.33	0.55	2.01	0.23	0
R	7.73	0.21	21.88	7.24	28.30	2.06	0.43	1.92	0	0
S	13.28	0.26	26.46	15.90	45.19	2.84	0.71	2.19	1.13	0.09

Igeo value; >5 : Very strongly polluted, 4-5 : Strongly/very strongly polluted, 3-4 : Strongly polluted, 2-3 : Moderately/strongly polluted, 1-2 : Moderately polluted, 0-1 : Practically unpolluted/moderately polluted, 0 : Practically unpolluted

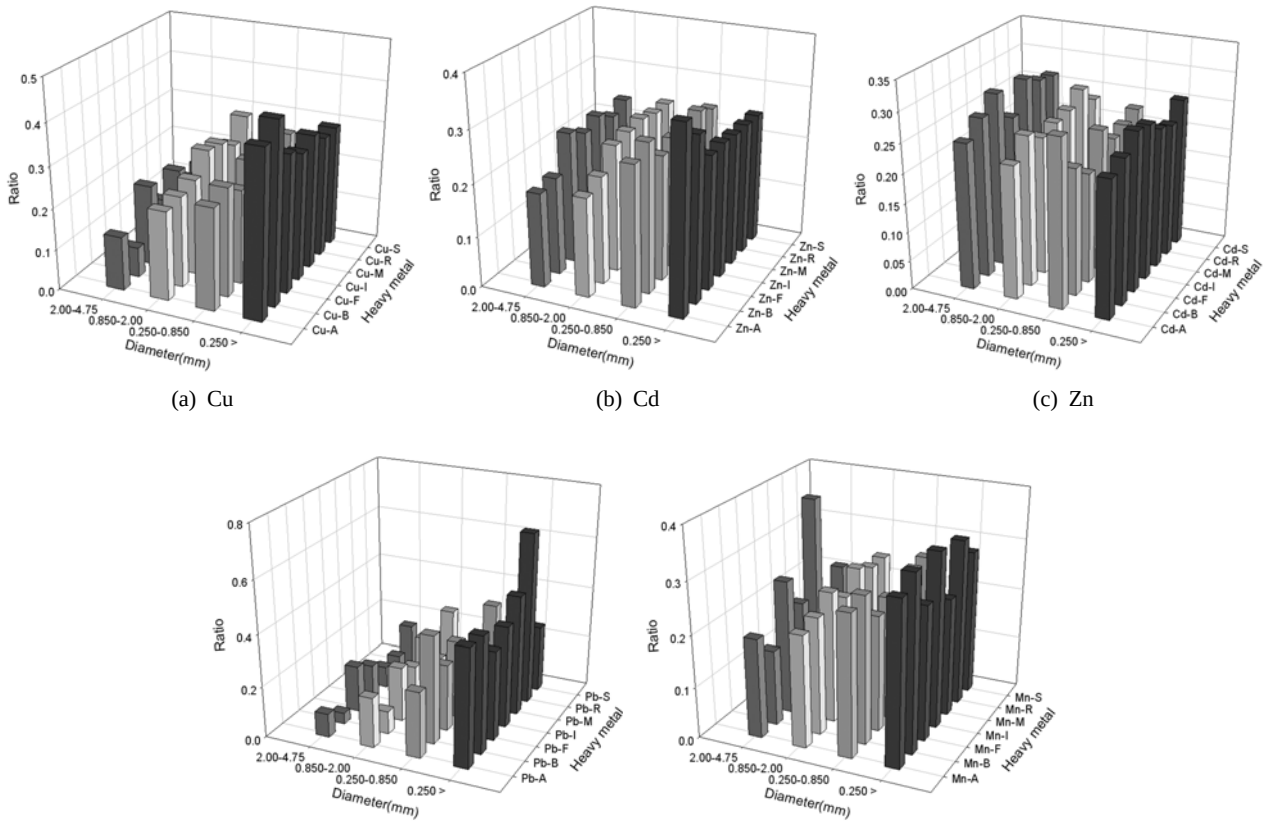
고려할 때, 임야지역의 높은 Pb의 설명이 가능하다. 또한 Pb는 차량의 antinock agent로 사용되는 alkyl lead compounds에 다량 함유되므로 도로지역을 지나는 차량에 의해 발생되는 것으로 추정된다(정명채, 2004).

Zn의 농도는 26.46~15.07 mg/kg의 범위로서 토양농도와 비교 시에는 6.9배에서 3.9배의 범위로 나타났다. Mn의 농도는 47.07~17.26 mg/kg의 범위로 측정되었으며, 토양농도와 비교 시에는 1.7배에서 0.6배의 범위로 나타나 토양과 거의 비슷함을 알 수 있다.

Cd의 농도는 0.26~0.12 mg/kg의 범위로서 토양농도와 비교 시에는 2.4배에서 1.1배의 범위로 나타났다.

위의 결과로부터 퇴적토는 그 오염도가 토양의 우려기준(환경부, 2008)을 초과할 수준은 아니다. 따라서 Igeo를 이용 수치화하여 평가한 결과, 계산된 Cu는 임야지역과 도로지역에서 중간 또는 강한 오염을 보이고 있으며, Zn이 공업지역, 군사지역, 주거지역, 그리고 도로지역에서 중간정도의 오염을 보이고 있다. Mn은 임야지역과 도로지역을 제외한 지역의 퇴적토에서는 오염도가 나타나지 않았다.

Fig. 4에는 퇴적토내의 입자별 중금속 분포를 나타내었다. 입자별 중금속의 분포는 대부분의 조사지역에서 입도가 작을 때 중금속의 농도가 높았으며, 입도가 클 때 농도가 낮음을 알 수 있었다. 특히 Cu, Pb는 그 경향이 뚜렷이 나



(a) Cu (b) Cd (c) Zn

(d) Pb (e) Mn

Fig. 4. Heavy metals distribution chart classified by grain size and drainage type.

타났다. 그러나 Cd와 Zn은 입도의 크기에 따른 분포가 비슷하게 나타났다.

3.4. 중금속들 간의 상관관계

중금속간의 상관관계는 pearson correlation coefficient를 이용하였으며, Table 4에 토지이용별로 제시하였다. 농공단지에서는 Mn-Zn이 99% 신뢰구간에서 유의하였으며, 교량지역의 Zn와 Mn은 다른 항목들과 95% 신뢰구간에서 높은 상관관계를 보였으며, Cd-Pb는 상관관계가 없는 것으로 분석되었다. 임야에서 Mn은 다른 항목들과 상관관계가 없었으며, Cd-Zn은 99% 신뢰구간에서 0.81의 높은 상관관계를 보였다. 공업지역에서는 Cu-Cd, 높은 상관성을 보였으며, Pb-Cd와 Pb-Zn, Zn-Mn은 상관관계가 없었다. 군사지역과 주거지역에서는 Cd-Zn이 99% 신뢰구간에서 높은 상관관계로 분석되었다. 도로지역에서는 모든 항목에서 상관관계가 있었으며, 특히 Cd-Zn, Cu-Pb, Cu-Mn, Pb-Mn은 99% 신뢰구간에서 높은 상관관계가 있는 것으로 분석되었다. 퇴적토 내의 중금속은 인간 활동에 의해 유입되는 것이 대부분으로, 원소들 간의 상관성을 살펴봄으로써 원소들의 배출원에 대한 정보를 알아 낼 수 있으며, 상관성이 높은 원소들은 배출원이 유사한 것으로 간주 할 수 있다. 예를 들면 농공단지 지역을 제외한 전 지역에서 Zn-Cd는 높은 상관성을 보였는데, 이는 자동차 타이어의 경화작용에 사용되는 산화아연과 산화아연의 불순물로서 Cd가 포함되어지며(Lee and Touray, 1998), 아연 도금한 구조물의 부식에 의해 Zn이 함께 방출되어 높게 나타난 것으로 판단된다(염승준 등, 2005). 또한 Cu, Zn, Cd의 세 항목은 모든 지역에서 양의 상관관계를 보였는데, 이는 자동차 윤활유가 고온에서 산화될 때, 발생하는 화합물이 차량의 금속을 부식시킬 경우 함께 배출된다고 보고되고 있다(Drew, 1975).

3.5. 퇴적토의 재활용

퇴적토의 골재로서의 재활용은 적정 강도 달성과 중금속의 안정화 정도에 달려있다. Table 5에는 시멘트 고형화와 황토 소성 방법의 퇴적토 함유비(Wt%)에 따른 공시체의 압축강도가 제시되어 있다.

시멘트 고형화의 경우 퇴적물의 혼합율이 증가함에 따라 압축강도는 340.5 kg_f/cm^2에서 132.7 kg_f/cm^2으로 단계적으로 감소하였으며, 60 Wt% 이하로 혼합해야지만 압축강도 기준인 260~280 kg_f/cm^2을 만족시켜, 골재로서의 가치가 있었다. 황토소성 공시체의 압축강도는 220.1~288.3 kg_f/cm^2의 범위로서 압축강도기준 210 kg_f/cm^2을 만족시켰다. 또한 퇴적물 혼합율 50 Wt%까지는 압축강도가 점차 증가하였고 60 Wt%의 압축강도는 50 Wt%와 유사한 286.9 kg_f/cm^2의 값을 보였다. 그러나 70 Wt% 이상으로 혼합한 공시체의 압축강도는 오히려 감소하였다. 따라서 소성시간과 소성온도, 그리고 압축강도를 기준할 때 혼합율 50~60 Wt%가 골재로서의 가치가 있는 것으로 분석되었다. 이는 관거의 종류와 지점은 상이하지만 이병원 등(2007)의 연구와 일치하는 결과이다.

Fig. 5에는 재활용 방안으로 검토된 시멘트 고형화와 황토 소성 공시체의 중금속 용출실험 결과를 나타내었다.

Table 4. Pearson correlation coefficient

Site / HM	Agriculture and industrial					Bridge					Forest				
HM	Cu	Cd	Zn	Pb	Mn	Cu	Cd	Zn	Pb	Mn	Cu	Cd	Zn	Pb	Mn
Cu	1	0.50*	0.22	0.26	-0.09	1	0.62	0.92**	0.71*	0.97**	1	0.54	0.30	0.34	-0.45
Cd		1	-0.09	-0.59*	-0.26		1	0.80*	-0.06	0.71*		1	0.81**	0.19	-0.51
Zn			1	0.42	0.83**			1	0.63*	0.93**			1	0.09	-0.40
Pb				1	0.26				1	0.73*				1	-0.04
Mn					1					1					1

Site / HM	Industrial					Military					Residential				
HM	Cu	Cd	Zn	Pb	Mn	Cu	Cd	Zn	Pb	Mn	Cu	Cd	Zn	Pb	Mn
Cu	1	0.83**	0.46	0.32	0.64*	1	0.23	-0.10	0.47	0.18	1	0.16	0.50*	0.40	0.24
Cd		1	0.57	-0.47	0.51		1	0.78**	-0.24	0.54*		1	0.71**	0.44	0.30
Zn			1	-0.39	0.07			1	-0.15	0.15			1	0.53	0.27
Pb				1	0.64				1	-0.57*				1	0.35
Mn					1					1					1

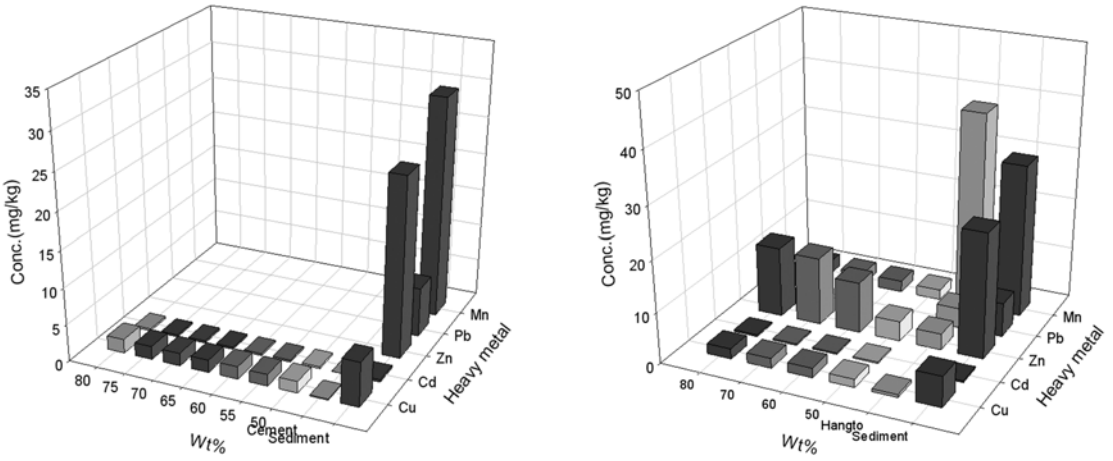
Site / HM	Street				
HM	Cu	Cd	Zn	Pb	Mn
Cu	1	0.53*	0.34	0.74**	0.76**
Cd		1	0.84**	0.32	0.52*
Zn			1	0.24	0.38
Pb				1	0.64**
Mn					1

*: $p<0.05$; **: $p<0.01$; HM : Heavy metal

Table 5. Compressive strength classified by dredged soil percentage

Item \ SSP	Cement solidification							Yellow soil calcination								
	50	55	60	65	70	75	80	0	10	20	30	40	50	60	70	80
CS	340.5	329.4	299.5	255.7	205.8	156.4	132.7	220.1	245.3	248.5	252.4	262.8	288.3	286.9	244.8	228.7
CSS	260~280							210								

CS : Compressive strength (kg_f/cm^2); SSP : sedimentation soil percentage (Wt%); CSS : compressive strength standard (kg_f/cm^2)



(a) Cement solidification (b) Yellow soil calcination

Fig. 5. Heavy metals concentration after cement solidification and yellow soil calcination.

시멘트 고형화의 경우 Cd는 안정화가 안 되었으며, Cu는 50% 정도의 안정화율을 보였다. 그러나 Zn, Pb, Mn은 검출 한계 농도 이하로 측정되어 안정화가 효율적으로 수행된 것으로 나타났다. 황토 소성의 경우 Cd는 안정화가 거의 안 되었으며, Cu와 Zn은 50% 이상이 안정화되었다. Mn은 모든 혼합율 범위에서 90% 이상의 안정화율을 보였으며, Pb는 검출 한계 농도 이하로 측정되어 안정화가 효과적으로 수행되었음을 알 수 있었다. 안정화율은 시멘트 고형화보다 낮았다. 그러나 현장에서는 다른 결과를 보일 수 있기 때문에 재활용품에 대한 자연 조건에서의 추가적인 연구도 필요할 것으로 판단된다.

종합적으로 하수관거 퇴적토의 골재로의 재활용은 시멘트 고형화와 황토 소성 두 가지 방법이 모두 가능한 것으로 판단된다. 그러나 중금속의 안정화정도와 소요되는 비용을 고려할 때, 시멘트 고형화가 보다 적절한 방법으로 판단되며(이병원 등, 2007), 재활용시에는 용출되는 중금속의 영향을 고려하여 그 사용범위를 정해야 할 것으로 사료된다. 또한 본 연구에서는 수행하지 않았지만, 수질오염지표(BOD, COD, SS, TN, TP)에 대한 분석과 시멘트 고형화의 경우 혼합율 50 Wt% 이하에 대한 추가적인 연구를 통하여 재활용 방안에 대한 보다 세밀한 자료를 확보하는 과정이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

토지이용에 따른 관거 내 퇴적토의 물리·화학적 특성을 조사한 후, 시멘트 고형화와 황토 소성화 방법으로 퇴적토의 재활용 방안을 검토하였다.

관거내 퇴적토의 입도를 균등계수와 곡률계수로 평가한 결과 모든 퇴적토에서 '균등입도, 입도가 나쁘다'를 만족하였다. 중금속의 농도는 오염우려지역 이하의 농도였으나, 농집지수를 통한 분석결과 주변의 토양보다는 많이 오염되어 있었다. 입도별 중금속의 농도는 작은 입도에서 높게 나타나 재활용시에는 이를 고려한 입도의 선택이 필요할 것으로 판단된다. 또한 중금속간 상관관계를 분석한 결과 상관성이 높게 나타난 항목은 발생원의 유사성이 있었다. 하수관거 퇴적토의 골재로서의 재활용은 시멘트 고형화와 황토 소성 두 가지의 방법이 모두 가능하나, 재활용 후 용출가능한 중금속의 영향이 고려된 특정 조건에 한해서이다. 중금속의 안정화 정도와 고형화 및 소성에 소요되는 에너지를 고려할 때, 시멘트 고형화가 적절한 방법으로 판단된다.

사 사

본 연구의 일부는 강원대학교 박사후연구원 지원사업과 환경부 Eco-Star project(과제번호 07-II-6)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 깊이 감사드립니다.

참고문헌

국가표준종합정보센터(2006). *흙의 입도 분석 실험*, www.standard.go.kr/code02/user/0B/03/SerKS_View.asp.

김이형, 강주현(2004). 고속도로 강우 유출수내 오염물질의 EMC 및 부하량 원단위 산정. *한국물경학회지*, **20**(6), pp. 631-640.

동화기술편집부(2001). *토양오염공정시험방법*, 동화기술.

배재근, 오종민(2002). *환경인을 위한 토양오염 측정분석*, 신광문화사.

염승준, 이평균, 연규훈, 강민주(2005). 부산시 회동저수지 집수분지내 주용도로변 퇴적물의 중금속 오염평가. *자원환경지질*, **38**(3), 247-260.

이병원, 원철희, 임재명(2007). 하수준설토의 물리 · 화학적 특성 및 재활용 방안. 한국폐기물학회지, **24**(7), pp. 604-612.

이의상(2004). 고속도로변 퇴적물의 중금속 오염에 관한 연구. *서울도시연구*, **5**(4), pp. 61-72.

이평구, 박성원, 염승준(2001). 공주 금흥매립지의 중간복토재 및 차수재(논)의 중금속 오염과 존재형태 연구. *자원환경지질*, **34**, pp. 283-299.

정명채(2004). *토양오염 및 처리공학*, 세명대학교.

정승우, 이상훈, 박응렬, 이강근, 이춘식(2003). *토양오염물질의 물리적 · 화학적 특성과 이동성에 대한 환경영향평가 방안*. 한국환경정책평가연구원.

한국수자원공사(2004). *천안시 지하수 기초조사*.

환경부(2003). *2002년도 토양 측정망 및 실태조사 결과*.

환경부(2008). *토양환경보전법 시행규칙*.

Bodo, B. A. (1989). Heavy metals in water and suspended particulates and urban basin impacting lake ontario. *Science of the Total Environment*, **87-88**, pp. 329-344.

Drew, H. M. (1975). *Metal-based lubricant compositions*, Noyes Data Corporation, N. J. Http://minmag.geoscienceworld.org/cgi/content/full/72/1/445.

Lee, P. K. and Touray, J. C. (1998). Characteristics of polluted artificial soil localized on a motorway border and effects of acidification on the leaching behavior of heavy metals (Pb, Zn, Cd). *Water Research*, **32**, pp. 3425-3435.

Sansalone, J. J. and Bushberger, S. G. (1997). Characterization of solid and metal element distributions in urban highway stormwater. *Water Science and Technology*, **36**(8-9), pp. 155-160.

Wiber, W. G. and Hunter, J. V. (1979). Distributions of metals in street sweepings. stormwater solids and urban aquatic sediments. *Journal Water Pollution Control Federation*, **51**, pp. 2810-2822.