

## 폐기물혼입굴착물의 선별특성과 재활용성 평가

이수영<sup>a</sup>, 김규연<sup>bt</sup>, 전태완<sup>c</sup>, 신선경<sup>d</sup>

### Separation Characteristic and Recycling of Excavated Materials Containing Waste

Suyoung Lee<sup>a</sup>, Kyuyeon Kim<sup>bt</sup>, Taewan Jeon<sup>c</sup>, Sunkyoung Shin<sup>d</sup>

(Received: Mar. 5, 2019 / Revised: May 28, 2019 / Accepted: Jun. 3, 2019)

**ABSTRACT:** The study is carried out to survey the proper management and to propose an eco - friendly separation system through efficient screening and resource recovery of excavated materials containing waste from various excavating fields such as reconstruction of landfill sites for reuse, reclamation of unsanitary landfill and residential land development of waste dumping sites. The current status and screening process and analytical characteristics of the excavated materials containing waste were reviewed. Through the analysis of the samples such as separated combustibles, recyclable soils and residues collected from the on-site visits we were able to understand the characteristics of separated materials and excavated materials containing waste such as calorific value, elementary composition, TOC, foreign material content and LOI. It has been found that elimination of the moisture of excavations, removal of attached soil from the surfaces of the excavated combustibles and the quantitative supply method of the input devices are the main operating factors as essential factors for the optimal separation of excavated materials containing waste. For efficient management and recycling of excavated materials containing, it is necessary to set criteria of ash content in separated combustibles and criteria organic matter content in separated soils.

**Keywords:** Excavated materials containing waste, combustibles, screened soil, recycling

**초 록:** 과거 산업화와 경제발달 과정에서 증가하였던 폐기물이 일부 단순 투기되거나 비위생 매립시설에 최종 처분된 사례가 있다. 매립지 사용종료 및 신규 매립지 확보를 위해 사용이 종료된 비위생매립지 정비 사업들의 시행과 폐기물의 자원화 정책이 강화되면서 매립억제 및 기매립 자원의 재활용을 위한 매립폐기물의 순환이용과 순환형매립지 조성사업이 확대되고 있다. 폐기물혼입굴착물은 순환형매립지의 조성, 매립지 정비사업 및 각종 건설공사 등 다양한 굴착 현장에서 발생되며 자원의 유효이용과 폐기물의 적정처리를 통한 관리가 필요하다. 본 연구에서는 택지개발, 순환형매립지 정비, 비위생매립지 정비 등 굴착·선별 공사가 진행 중인 사업장 3개소를 대상으로 폐기물혼입굴착물의 선별을 통한 선별가연물, 선별토사의 물리화학적 조성 및 특성분석을 통해 선별회수자원 및 잔재물의 특성을 검토하였다. 그 결과, 굴착·선별된 가연물의 부착토사 및 불연성분으로 인해 소각처리 시 운영효율 저하 혹은 고형연료 제조 시 제품의 품질기준을 충족하지 못할 수 있으므로 선별가연물의 불연물

<sup>a</sup> 국립환경과학원 환경자원연구부 전문위원(Researcher, National Institute of Environmental Research, NIER)

<sup>b</sup> 국립환경과학원 환경자원연구부 연구관(Senior researcher, National Institute of Environmental Research, NIER)

<sup>c</sup> 국립환경과학원 환경자원연구부 과장(Director, National Institute of Environmental Research, NIER)

<sup>d</sup> 국립환경과학원 환경자원연구부 부장(Director general, National Institute of Environmental Research, NIER)

† Corresponding author(e-mail: [qykim@korea.kr](mailto:qykim@korea.kr))

함량을 관리할 필요가 있다. 선별토사의 경우, 매립된 폐기물의 유기성분이 토사 중에 잔존할 수 있으므로 굴착·선별된 토사류의 적정 재활용을 위해서는 선별토사의 유기물질을 관리하여야 할 것으로 판단되었다.

**주제어:** 폐기물혼입굴착물, 선별가연물, 선별토사, 재활용

## 1. 서론

과거 산업화와 경제발달 과정에서 증가하였던 폐기물이 효율적인 재활용이나 적정 관리되지 못한 채 일부 단순 투기되거나 사후관리가 계획되지 못한 비위생 매립시설에 최종 처분되곤 하였다. 그 후 ‘폐기물관리법’ 제정 및 폐기물의 중간처리 기술 등의 발달과 함께 위생적으로 매립처분되기 시작하였고 매립지 사용종료 및 신규 매립지 확보를 위해 사용이 종료된 비위생매립지의 정비 사업들의 시행되었다. ‘자원순환기본법’ 제정과 폐기물의 자원화 정책이 강화되면서 매립억제 및 기매립 자원의 재활용을 위한 매립폐기물의 순환이용과 순환형매립지 조성사업이 확대되고 있다<sup>1)</sup>. 순환형매립지정비사업은 기존 매립지 부지의 재이용을 통하여 토지 이용성 확보 및 균형적인 지역개발계획을 확립할 수 있다. 또한 굴착·선별된 가연성 폐기물의 에너지화를 통하여 화석연료의 대체 및 온실가스 감축 효과를 나타낼 수 있고 선별된 토사는 성토재, 복토재로 재활용하여 매립자원의 순환이용을 도모할 수 있다<sup>2)</sup>.

폐기물혼입굴착물은 순환형매립지의 조성, 매립지 정비사업 및 각종 건설공사 등 다양한 굴착 현장에서 발생되며 자원의 유효이용과 폐기물의 효율적인 측면에서 적정관리가 필요하다. 굴착폐기물을 선별하는 경우 플라스틱, 종이, 목재 등의 선별가연물, 자갈, 금속, 유리자기 등의 불연물, 기타 잔재물과, 선별토사로 크게 분리·선별되며, 회수물질 중 약 50~85 %는 매립지 덮개로 쓰인 토양과 분해된 유기

폐기물이 차지하는 것으로 나타났다<sup>3,4)</sup>. 선별가연물은 소각처분, 고형연료 등으로 재활용되거나 에너지회수업체에게 공급된다. 선별토사는 순환골재, 매립지내 복토재 등으로 재활용될 수 있다.

사용종료 매립지 토지이용 현황에 의하면<sup>5)</sup> 국내에서 사용 종료된 매립지 1,170개소 중 430개소(37 %)가 토지이용 없이 나대지로 되어 있고 354개소(30 %)가 농경지, 115개소(10 %)가 건물 등으로 이용되었다. 국내 약 1,500개소의 생활폐기물 매립지를 대상으로 초기에 안정화한 후 매립지로 순환이용하거나 택지 및 산업용지로 개발하는 ‘매립지 순환이용 및 개발사업’이 추진되어 Table 1과 같이 2020년까지 국내 생활폐기물 매립지 중 사용종료매립지, 사용 중인 매립지를 포함한 123개소를 대상으로 매립지 순환이용 사업 및 매립지 개발 사업이 계획되어 추진되고 있다<sup>6)</sup>.

본 연구에서는 순환형매립지 조성, 비위생 매립지 정비사업 및 택지개발 등 굴착이 진행되는 다양한 현장에서 발생하는 폐기물혼입굴착물을 대상으로 현장에서 채취한 선별가연물, 선별토사의 특성 분석을 통해 선별회수자원 및 잔재물의 특성을 검토하여 폐기물혼입굴착물의 회수이용 및 잔재물의 자원 활용성에 대하여 검토하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 조사 대상 폐기물혼입굴착물

폐기물혼입굴착물의 시료를 채취하기 위하여 2018

Table 1. Landfill Recycling Project and Landfill Development Project(2009)

Item	Closed landfill site(No. of sites)	In-use landfill(No. of sites)	Total(No. of sites)
Unsanitary landfill	27	1	28
Sanitary landfill	39	56	95
Total	66	57	123

년 현재 국내에서 굴착·선별 공사가 진행 중인 사업장 3개소를 선정하였다. 택지개발로 인한 매립구역 정비가 진행되고 있는 I시는 과거 폐기물의 비위생매립이 이루어진 지역으로 매립 이력에 대한 뚜렷한 기존 자료가 존재하지 않았으며 비위생매립지 굴착·선별 및 안정화를 통한 택지개발사업이 이루어지고 있었다. 순환형매립지 정비사업이 진행되고 있는 K시는 기존 매립지의 수명을 연장하고 순환이용을 통한 경제성 확보, 매립 폐기물의 재활용, 주변 환경오염 방지 등 순환형 매립지 정비가 진행되고 있는 매립지로서 2013~2017년까지 굴착·선별된 폐기물 68,105 톤은 소각장으로 반입되었고 폐토사 86,084 톤은 외부로 반출되어 위탁처분 되고 있다. 비위생매립지정비사업이 진행되고 있는 C시는 총 매립지면적 62,296 m<sup>2</sup>, 잔여 매립가능량은 503,637 m<sup>3</sup>인 지역으로 2018년 현재 굴착·선별을 통한 과거 비위생매립지에 대한 정비사업이 진행되고 있으며 폐기물혼입굴착물에 대한 분리 선별이 이루어지고 있다. 분리 선별된 선별가연물은 압축, 포장을 통해 별도로 적치하여 추후 소각시설에서 처분을 계획하고 있으며 해당부지는 공원 등 지역주민을 위한 공적공간조성을 계획하고 있다.

본 연구에서는 폐기물혼입굴착물의 선별공정에 따라 분리되어진 선별가연물과 선별토사에 대하여 I시 10건, K시 6건, C시 4건 등 총 20건의 시료를 각각 채취하였고 각 시료채취 지역의 매립면적, 매립량은 Table 2와 같다.

## 2.2. 분석방법

폐기물혼입굴착물 중 선별공정에 따라 분리된 선별가연물과 선별토사를 대상으로 굴착·선별된 선별가연물의 구성 및 분포를 확인하기 위하여 선별

가연물은 건조하여 수분을 제거한 뒤 수선별하여 Fig. 1과 같이 가연물, 불연물, 부착토사로 세분류하였다. 세분류한 가연물을 분쇄하여 특성분석을 진행하였으며 가연물, 불연물, 부착토사는 중량비(wt, %)로 나타내었다. 세분류한 가연물과 선별토사의 물리·화학적 조성 및 특성분석을 위하여 삼성분, 강열감량, 원소분석(C, H, N, S), 발열량을 분석하였으며 선별토사의 경우 pH, 총유기탄소(TOC), 중금속함량, 이물질함량 등의 분석을 추가적으로 실시하였다. 수분함량 및 고형물함량은 폐기물공정시험기준에 따라 105~110 °C에서 건조한 뒤 무게차로 측정하였다. 강열감량은 시료를 600±25 °C의 전기로 안에서 3시간 강열한 뒤 남아있는 시료의 무게를 측정하여 가연분 및 회분을 분석하였다. 원소분석은 조사대상 시료를 105 °C에서 건조시켜 수분을 제거하고 0.5 mm 이하의 미세분말 상태로 분쇄한 후 원소분석기(628 series, Leco)를 이용하여 분석하였다. TOC는 원소분석기(multi EA 4000, analytikjena)를 이용하여 분석하였고 TC와 TIC를 각각 측정하고 TC와 TIC 값의 차로 산정하였다. 순환골재 품질기준의 이물질함량은 한국산업표준(KS F 2576)에 따라 측정하였다. 시료의 이물질을 육안으로 분리 선별하여 선별된 이물질을 실온의 물에 침적시키고 다시 자연탈수 시킨 후 메스실린더에 적정량의 물을 담아 탈수시킨 이물질의 투입 전과 투입 후의 늘어난 부피를 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 선별가연물의 분포

굴착된 선별가연물을 수선별하여 세분류한 결과

Table 2. Status of Excavated Materials Containing Waste

Samples	Landfill Area (m <sup>2</sup> )	Height (m)	Landfill (m <sup>3</sup> )	
I city	I-1	27,181	1.4	121,700
	I-2	21,106	4.4	110,565
	I-3	40,683	6.0	285,000
K city	243,862	-	1,175,620	
C city	62,296	-	754,442	

선별가연물 중 가연물은 대부분 비닐, 플라스틱류로 구성되어 있었으며 20~70 %의 범위로 나타났다. 불연물은 4~38 %의 범위로 나타났으며 유리조각, 자갈류와 함께 가연물에 부착된 토사는 9~66 %의 범위로 분리되었다. 부착토사의 경우, 비닐류에 붙은 토사를 직접 털어내도 완전히 제거되지 않기 때문에 비닐류를 물에 침전시켜 토사를 씻어내고 수분을 제거하여 토사량을 확인하였다. 채취한 선별가연물의 종류와 성상에 따라 부착토사의 중량의 차이가

있음을 확인하였고 장기간 매립되어 굴착된 비닐류는 삭거나 가루로 발생되었으며 수선별을 통해 부착토사량을 확인하였기 때문에 다소의 오차가 존재한다. Fig. 2에 선별가연물을 세분류하여 가연물, 불연물, 부착토사의 분포도를 나타내었다.

### 3.2. 선별가연물 특성분석

선별된 가연물에 대한 수분함량 및 강열감량을 분석하였다. 수분함량은 14.1~49.5 %, 평균 32.5 %로 나



Fig. 1. Separation of excavated screened combustibles.

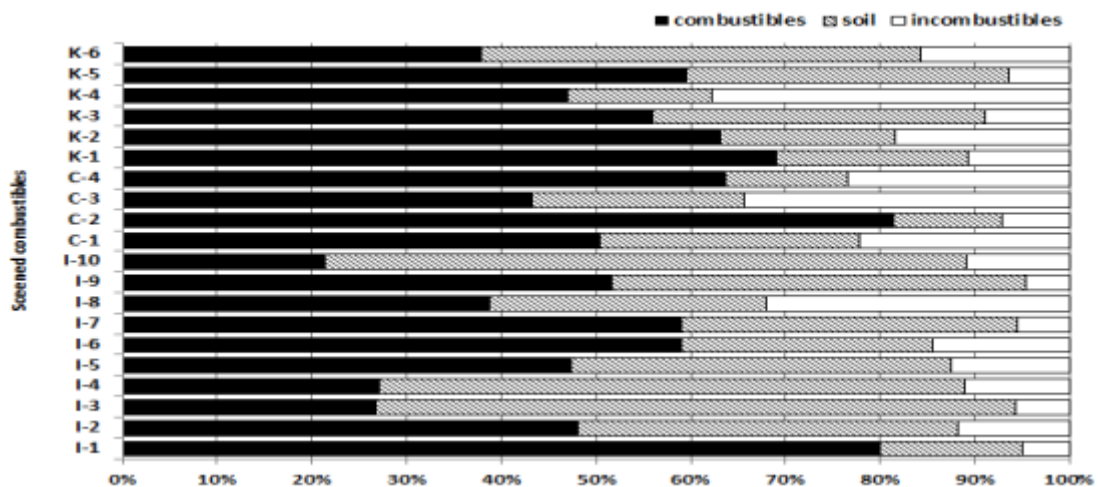


Fig. 2. Distribution chart of excavated screened combustibles.

타났으며 강열감량은 57.6~88.8 %, 평균 80.7 %이었다. 선별가연물의 회분함량은 분석결과 11.2~ 42.4 %의 범위로 나타났다. 선별된 가연물은 「폐기물관리법」과 지자체의 조례에서 정하는 바에 따라 소각, 매립, 재활용이 가능하고, 고품연료제품으로 제조하는 경우 「자원의 절약과 재활용촉진에 관한 법률」의 고품연료제품의 품질기준(제20조의2 관련)에 따라 함유수율(성형 10 % 이하, 비성형 25 % 이하), 저위발열량(3,500 kcal/kg 이상), 회분함량(20 % 이하)의 조건을 충족해야 한다. 시료 채취한 가연물을 고품연료제품으로 제조할 경우 회분함량 20 % 이하의 품질기준 조건을 분석시료의 약 65 %가 충족하는 것으로 나타났다.

원소분석 결과 C는 67.6 %, H 9.6 %, N은 0.7 %, S는 0.2 %로 나타났다. 대부분의 가연물 시료는 70 % 정도가 탄소로 이루어져 있음을 알 수 있었다.

발열량 분석결과, 굴착·선별된 가연물은 6,244~9,516 kcal/kg의 범위로 나타났으며 평균 약 8,200 kcal/kg 이었다. 굴착·선별된 가연물의 열량과 일반 폐비닐류의 열량을 비교하기 위하여 소각장에 반입된 폐비닐류를 추가적으로 시료 채취하여 발열량을 측정하였다. 일반 폐비닐류는 5,684~9,285 kcal/kg의 범위로 나타났으며 평균 약 8,300 kcal/kg의 열량을 나타냈다. 굴착·선별된 가연물과 비교하였을 때 폐비닐류는 비슷한 열량을 가지고 있었으며 고품연료제품 품질기준 저위발열량 3,500 kcal/kg 이상에 만족하는 것으로 분석되었다. Table 3에 선별가연물의 물리화학적 특성을 나타내었다.

### 3.3. 선별토사의 특성분석

폐기물혼입굴착물에서 굴착·선별된 선별토사는 건조하여 수분을 제거한 뒤 특성분석을 진행하였다. 수분함량은 11.3~26.8 %, 평균 20.2 %이었으며 강열감량은 5.3~11.7 %, 평균 8.6 %이었다. 일반토양의 유기물함량에 대한 범위는 1~7 %, 마사토에 대한 유기물함량은 2~8 % 등으로 알려져 있다<sup>7,8)</sup>. 굴착·선별된 선별토사의 유기물함량은 매립된 폐기물의 특성 및 매립 경과년수, 폐기물 굴착지점에 따라 상이하게 나타나는 것으로 판단된다.

선별토사의 원소분석 결과 C는 5.1 %, H 2.0 %, N은 0.6 %, S는 0.3 %로 나타났다. 선별토사의 대부분은 불연성분이며 산소 및 기타 미량원소를 소량 포함하고 있는 것으로 나타났다. Table 3에 선별토사의 물리화학적 특성을 나타내었다.

TOC 분석결과 7건의 선별토사는 TOC 기준치 5 % 이하로 나타났으며 13건의 선별토사는 TOC가 5.2~9.5 %의 범위로 나타나고 있다. 이는 선별토사중에 폐기물의 분해산물이 미세하게 분해되어 미량 잔존하고 있기 때문인 것으로 판단된다. 유럽연합(EU)은 매립지침(Landfill Directive)에서 매립지 반입기준(WAC, Waste acceptance criteria)으로 용출기준과 더불어 고품 기준의 경우 TOC 5 %를 규정하고 있다<sup>9,10)</sup>. 선별토사의 용존유기탄소(DOC) 분석결과 6~242 mg/kg 의 범위로 나타났으며 선별토사 20건 모두 EU의 비-유해성(non-hazardous) 폐기물 매립지 반입기준인 800 mg/kg 이하인 것으로 나타났다<sup>9)</sup>.

Fig. 3에 선별토사의 TOC, DOC결과를 나타냈다. 이물질함유량은 순환골재 중 이물질의 함유량을

Table 3. Physicochemical Characteristics of Excavated Screened Combustibles and Soil

Analyzed Item	Combustibles avg.(min~max)	Soil avg.(min~max)
Moisture (%)	32.5 (14.1~49.5)	20.2 (11.3~26.8)
Loss on ignition (%)	50.7 (57.6~88.8)	8.6 (5.3~11.7)
Element contents (%)	C	67.6 (50.2~75.7 )
	H	9.6 (7.3~11.2)
	N	0.7 (0.2~3.2)
	S	0.2 (0.1~0.4)
Calorific value (kcal/kg)	8,200 (6,244~9,516)	-

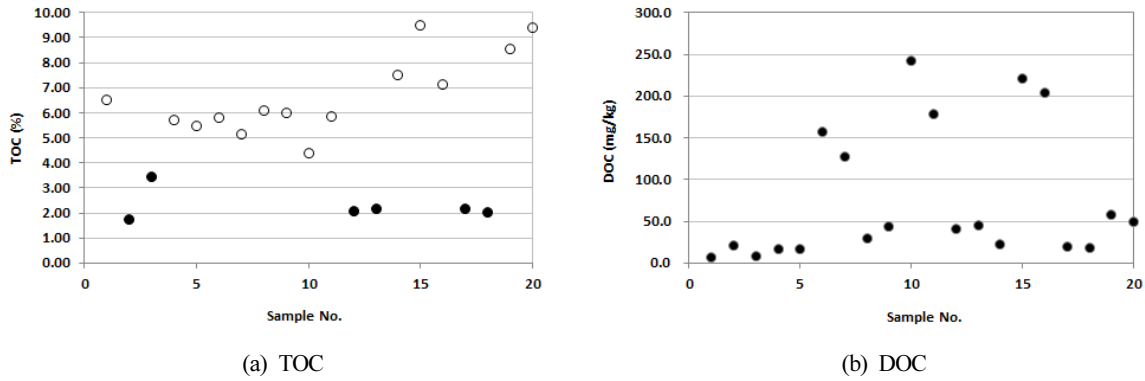


Fig. 3. TOC and DOC of excavated screened soil.

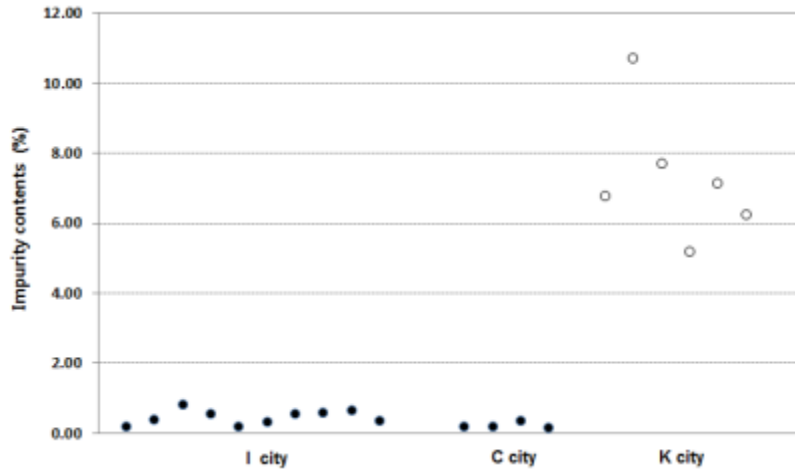


Fig. 4. Foreign materials of excavated screened soil.

측정하는 시험방법으로 한국산업표준 KS F 2576에 따라 분석하였다. 이물질은 유기이물질(목재류, 천류, 비닐 및 장판류, 플라스틱류, 섬유류, 종이류 등)과 무기이물질(적벽돌, 철물류, 유리, 자기류 등)로 구분되며 성토용 순환골재의 품질기준에 유기이물질함유량은 1.0 % 이하의 기준치를 규정하고 있다. I시 10건, C시 4건, K시 6건 총 20건 선별토사의 유기이물질함유량 분석결과 I시, C시의 선별토사는 기준치 1.0 % 이하로 나타났다. K시 선별토사의 유기이물질함유량은 5.2~10.7 %의 범위로 순환골재 품질기준 기준치 이상으로 나타났으며 외부에 위탁처분하고 있다.

폐기물혼입골재의 선별토사는 「건설폐기물의 재활용촉진에 관한 법률」 제2조 관련 건설폐기물의 종류에서 건설 폐토석에 해당되어 순환골재 품질기

준에 따라 주로 성토 및 복토재의 기준 적용이 가능하다. 폐기물혼입골재의 선별토사는 순환골재 품질기준(국토교통부공고 제2017-1711호)의 용도별 품질기준 중 성토용, 복토용, 매립시설의 복토용의 품질기준과 「토양환경보전법」 시행규칙에서 규정하는 토양오염우려기준을 충족하여야 한다. 선별토사의 중금속함량 분석결과 As는 불검출되었고 Cd 0.4~4.0 mg/kg, Pb 26.0~655.2 mg/kg, Zn 265.3~1332.1 mg/kg, Cu 71.9~778.7 mg/kg, Ni 23.0~120.1 mg/kg, Hg 0.06~0.47 mg/kg 의 범위로 분석되었다. 토양오염우려기준에 따른 기준치는 As(50 mg/kg), Cd(10 mg/kg), Ni(200 mg/kg), Hg(10 mg/kg) Pb(400 mg/kg), Zn(600 mg/kg), Cu(500 mg/kg) 이며 As, Cd, Ni, Hg 은 토양오염우려기준 중 2지역의 함량 기준치 이하 및 불검출되었고 Pb, Zn, Cu의 경우 일부시료에서 기준치

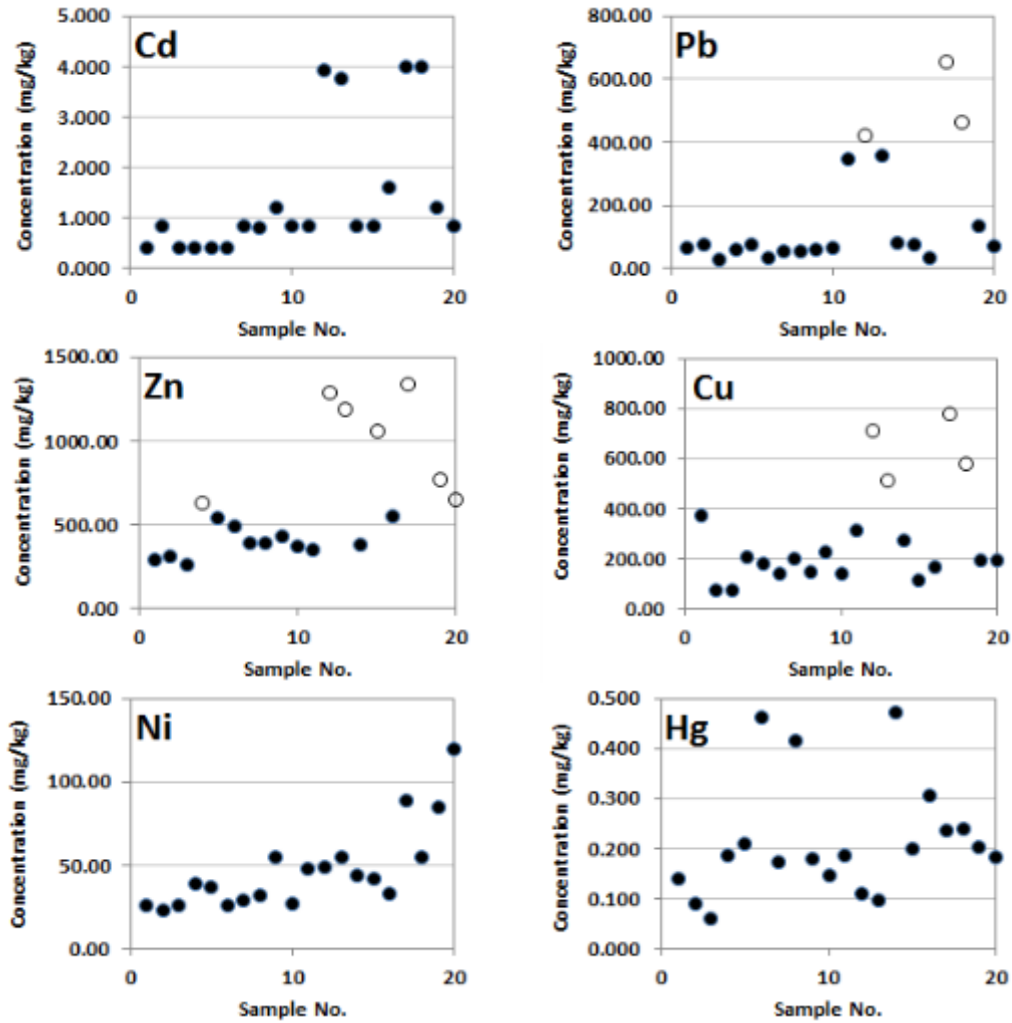


Fig. 5. Heavy metals of excavated screened soil.

를 초과하는 것으로 분석되었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 순환형 매립지 조성, 비위생 매립지 정비사업 및 택지개발 등 굴착이 진행되는 다양한 현장에서 발생하는 폐기물혼입굴착물의 적정 관리와 효율적 선별·자원회수 가능성을 알아보고자 하였다. 폐기물혼입굴착물의 선별특성을 조사하고 현장 방문에서 채취한 시료의 분석을 통하여 굴착폐기물의 물리화학적 조성 등 선별회수자원 및 잔재물의 특성 조사를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 굴착된 선별가연물을 수선별하여 세분류한 결과, 가연물은 20~70 %의 범위로 대부분 비닐, 플라스틱류로 구성되어 있었으며, 불연물은 4~38 %의 범위로 유리조각, 자갈류와 함께 가연물에 부착된 토사는 9~66 %의 범위로 나타났다. 부착토사의 경우, 비닐류에 붙은 토사를 직접 털어내도 완전히 제거되지 않았으며 채취한 선별가연물의 종류와 성상에 따라 부착토사의 중량의 차이가 있음을 확인하였고 장기간 매립되어 굴착된 비닐류는 삭거나 가루로 발생되었다.
2. 한국산업표준 KS F 2576에 따라 성토용 순환골재품질기준 1.0 % 이하의 이물질함유량 기준치를 규정하고 있으며, 일부 선별토사의 유기

- 이물질함유량은 순환골재품질기준 보다 높게 나타났다. 또한 선별토사의 TOC는 1.7~9.5 %의 범위로 나타났으며 이는 선별토사중에 폐기물의 분해산물이 미세하게 분해되어 잔존하고 있기 때문인 것으로 판단된다.
3. 굴착·선별된 일부 가연물은 부착 등으로 다량 포함되어 있는 토사 등의 불연성분으로 인해 소각처리 시 운영효율 저하를 야기하거나 혹은 고형연료 제조 시 제품의 품질기준을 충족하지 못할 것으로 판단되었다.
  4. 선별토사의 경우 매립된 폐기물의 유기성분이 토사 중에 잔존할 수 있으므로 굴착·선별된 토사류의 적정 재활용을 위해서는 매립된 생활 폐기물 등의 생물학적으로 분해 가능한 유기물이 토사 중에 잔존할 수 있으므로 순환골재품질기준의 이물질함량과 더불어 유기물함량도 평가할 필요가 있을 것으로 판단되었다.

## 사 사

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2018-01-01-043).

## References

1. [한국환경자원공사, 순환형매립지 정비사업 로드맵 구성연구], Korea Environment & Resources Corporation, A study on the roadmap for the recycled landfill improvement project, (2009).
2. Yi. S. R., Cho. J. H., Im. H. S., Lee. W. J., park. H. J., “Analysis of landfill resource recovery potentials and strategies for managing future landfills”, Korea Environment Institute. (2017).
3. Jain. P., Kim. H., Townsend. T., “Characterization of Heavy Metals in Soil Reclaimed from a Municipal Solid Waste Landfill”, Waste Management, 25, pp. 25~35. (2005).
4. Florida Department of Environmental Protection, USA, “Landfill Reclamation Demonstration Project”. (2009).
5. [환경부, 전국 사용종료매립지 기초조사 결과 및 관리대책], Ministry of Environment, The results of a basic study on the nationwide closed waste landfill sites, and its management measures. (2002).
6. Lee. B. C., Lee. M. H., Park. S. C., Jeong. S. K., Han. Y. S., Yeon. I. J., “Analysis by environmental factor of similar closed non-sanitary landfills”, Korean Geo-Environmental Society, 10(6), pp. 27~33. (2009).
7. [환경관리공단, 오염토양 복원기술], Environmental Management Corporation, Remediation technologies for the contaminated soil, pp. 6~10. (2001).
8. [일본토양물리연구회 번역판, 흙의 물리학], Japan soil physics research society, Soil Physics (translated edition), pp. 330~332. (1993).
9. Confederation of European Waste-to-Energy Plants (CEWEP), “Landfill taxes and bans” (2012).
10. Defra, “Landfill bans and restrictions in the EU and US: a review”, WR1202. (2009).