

경기도 지역 쓰레기 매립지 복토층 토양의 이화학성

이상모^{1*} · 김기대² · 이은주³ · 김판기¹ · 이군택¹

¹서울대학교 농업과학공동기기센터, ²국립환경연구원 생물다양성 센터, ³서울대학교 생명과학부

Physical and Chemical Properties of Cover Soils of Waste Landfills in Kyonggi-Do Area

Sang-Mo Lee^{1*} · Gi-Dae Kim² · Eun-Ju Lee³ · Pan-Gi Kim · Gun-Taek Lee

¹National Instrumentation Center for Environmental Management, Seoul National University,

²Biodiversity Center, National Institute of Environmental Research,

³School of Biological Sciences, Seoul National University

ABSTRACT

The physical and chemical properties of cover soils of 10 waste landfill sites in Kyonggi-Do area, where social circumstances at present forces to consider the reuse of landfill, were investigated to provide the informations of soil environment which are necessary to establish the appropriate ecological restoration plan of waste landfills. The pH and electrical conductivity of soils were higher in landfills sites than in reference sites(area around landfill sites), indicating the salt accumulation in surface soil. However, total-N and organic matter contents were lower in landfills sites than in reference sites. In landfill sites, the total-N and plant available-P contents were less than 0.15% and 20mg/kg, respectively. Exchangeable cations(K, Ca, Mg and Na) and heavy metal(Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb and Zn) contents varied between the landfill sites, but were higher in landfills sites than in reference sites. The major exchangeable cation of soil was Ca. Heavy metal contents were much lower than the critical concentration which phytotoxicity is considered to be possible and the standard for agricultural land of Korean Soil Environmental Preservation Act. Therefore, the proper soil management plan to increase the soil

* Corresponding author : smlee@nicem.snu.ac.kr

원고접수일 : 2001.11.14 게재승인일 : 2002. 2.28

fertility is recommended for the ecological restoration of landfill using natural or artificial vegetation.

Key Words : waste landfill, cover soil, soil property, ecological restoration, soil management

요약문

본 연구는 쓰레기 매립지의 생태학적 복원에 필요한 토양환경자료를 제공하고자 경기도 지역의 10개 쓰레기 매립지의 복토층 토양과 주변토양의 이화학성을 조사하였다. 매립지 토양은 염류집적에 의하여 주변토양 보다 pH와 전기전도도는 높았으나, 유기물 및 전질소 함량은 낮았다. 매립지 토양은 식물체 필수성분 중 특히 질소와 인산의 함량은 낮은 것으로 나타났다. 토양의 교환성 양이온 함량은 매립지간 차이가 커 있으나 매립지 토양이 주변토양에 비하여 높은 경향이었다. 토양 중 중금속 함량은 매립지 인천 원창동 매립지를 제외한 모든 매립지에서 대조구보다 높게 나타났으나 모든 매립지에서 식물에게 독성을 일으킬 수 있는 임계농도보다 낮았으며, 또한 토양환경보전법의 농경지에 대한 우려기준에 비하여 매우 낮은 값을 나타내었다. 따라서 매립지 토양은 질소와 인산의 함량이 낮으므로 자연 또는 인공적인 식생을 이용한 매립지의 생태학적 복원시 질소와 인산의 시용과 같은 토양관리 대책이 필요하다고 판단되었다.

주제어 : 쓰레기 매립지, 복토, 토양 이화학성, 생태학적 복원, 토양관리

1. 서 론

쓰레기 매립은 폐기물을 처리하는데 있어서 가장 널리 사용되는 처리방법이고^{1,2}, 폐기물 처리비용을 가장 절감할 수 있는 방법이다³. 우리나라의 쓰레기 매립지 현황은 1999년 말 사용중인 매립시설은 전국 294개소로서 총 매립면적은 16,631,000m², 매립 용량은 232,607,400m³이며, 매년 2,370,000m³ 정도의 국토가 매립지로 사용되어지고 있다⁴. 우리나라 쓰레기 매립지의 특징은 1980년대 이전에는 대부분의 경우, 오염방지시설이 부재한 비위생 매립지로서 침출수가 주변으로 누출 또는 확산되어 지하수를 오염시키고 있는 실정이라는 것이다⁵. 쓰레기 매립지는 쓰레기 운반비용 때문에 도심지 근처에 위치하여 매립지 가스, 침출수 및 악취 등과 같은 각종 오염물질에 의한 환경오염, 불미스러운 경관 및 매립지 관리에 들어가는 비용 때문에 대중의 관심이 증가되고 있으며, 최근에는 도시공간의 밀집화에 따라 매립지를 공원, 골프장 또는 식물원 등과 같은 유효공간으로 활용하려는 요구가 증

대되고 있다⁶.

쓰레기 매립지는 대기와 수질 오염, 매립지 안정화 사업과 관리 등에 의하여 자체 교란과 인위적인 교란이 교차되는 인공적이고 역동적인 생태계이다⁷. 쓰레기 매립지는 쓰레기 위에 복토를 하고 다시 그 위에 쓰레기를 덮고 복토를 하는 다층 구조로 이루어져 있다. 마지막 복토가 이루어진 층을 복토층이라고 하는데 복토층의 깊이와 복토에 사용한 토양의 물리화학적 특성에 따라 침입하여 정착하는 식물상이 결정되고 이 식물상에 따라 동물상이 구성된다⁸. 매립지의 생태학적 특이 사항은 우선 매립지 토양의 척박함이다. 복토층 토양의 조성은 어느 토양으로 복토를 하였는지에 따라 토양의 물리화학적인 상태 등이 차이가 나게 된다. 매립지 토양의 이화학적 성질들은 식생에 다양하게 영향을 끼칠 수 있다. 배수가 잘 되는 토양으로 복토한 매립지는 식물에게 건조 스트레스를 야기 시키고, 양분이 부족한 토양은 나쁜 생육 상태를 야기 시킨다. 또한 매립지의 압축된 토양으로 인해 식물의 뿌리 발달 시 과도한 에너지가 요구되어진다⁹. 쓰레기

매립지에서 식물 식재 후 생육 불량을 일으키는 요인으로는 배수불량, 매립토양불량, 최소 성토 높이 부족, 토양 유기물 부족, 토양 건조, 배식 밀도 불량 등이 있다¹⁰. 따라서 본 연구에서는 매립지의 식생구조 평가 및 생태학적 복원 수행에 필요한 토양환경자료를 얻고자 경기도 지역의 10개 쓰레기 매립지 토양의 이화학성을 조사하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구장소 선택과 현황

2.1.1 연구장소 선택

쓰레기 매립지 연구 장소는 서울특별시, 인천광역

시, 경기도 내 쓰레기 매립지 중 사용이 종료된 매립지에서 선택하였다. 문현상에 나타난 서울 주변 경기도 일대 127개(서울 1개소, 인천 23개소, 경기도 103개소)의 쓰레기 매립지 중에서 우선 자연 식생이 침입하고 있는 곳을 대상으로 하였다¹¹. 토지용도가 바뀌어 건물을 지은 곳과 농경지로 사용하고 있는 곳, 인간의 간섭이 심한 곳을 제외하고 매립이 완료된 후 경과 시간이 각각 다른 장소를 선택하였다. 최종적으로 선택된 10개 매립지와 각 매립지의 주변지역(대조구)은 Table 1과 같다.

2.1.2 지리·지형적 특성

모든 장소는 행정구역상 경기도 내에 속해 있으며, 북위 37° 58'에서 37° 00' 까지, 동경 126° 38'에서 127° 29' 내에 위치한다(Fig. 1). 이 중 인천시와 평택시에 분포하는 4개의 매립지는 서해안에 가까이 인접하고 있어 바다의 영향으로 인하여 바람과 염의 작용을 받을 것으로 생각된다. 연구지역인 쓰레기 매립지들은 주변 생태계에 따라 4가지로 구분되었다. 즉 해안간척지, 야산지역, 습지지역, 도시교란지역으로 나눌 수

Table 1. List of study sites. The number in parentheses represents azimuth of study sites and distance of reference sites from landfill sites

No	Waste landfill sites	Reference sites
1	BunSuh-Ri, PaJu (37° 46' N:126° 51' E)	near forest (20m)
2	DuGi-Ri, PaJu (37° 58' N:126° 55' E)	near forest (80m)
3	HaSanUn-Dong, SungNam (37° 23' N:127° 05' E)	near forest (11m)
4	KoMae-Ri, YongIn (37° 13' N:127° 07' E)	near forest (10m)
5	KyoungSeo-Dong, InCheon (37° 34' N:126° 39' E)	near forest (200m)
6	MoJeon-Ri, IChon (37° 18' N:127° 29' E)	near forest (80m)
7	SangPae-Dong, DongDuCheon (37° 54' N:127° 01' E)	near forest (150m)
8	ShinDae-Dong, PyongTaek (37° 00' N:127° 03' E)	near slope (20m)
9	#196, Wonchang-Dong, InCheon (37° 31' N:126° 40' E)	near forest (200m)
10	#420, Wonchang-Dong, InCheon (37° 31' N:126° 38' E)	near forest (400m)

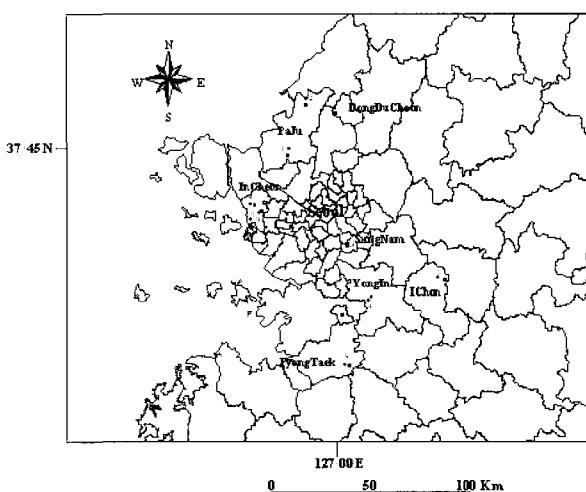


Fig. 1. Map of study sites. Closed circles(●) represent waste landfills and closed squares(■) represent reference sites. The number in map corresponds to that study sites. in Table 1.

Table 2. Characteristics of study sites

Waste landfill sites	Landfill period	Size (km ²)	Landfill height (m)	Landfill amount ($\times 10^3$ ton)	Landfill type	Landuse status	Surrounding ecosystem
BunSuh-Ri, PaJu	'80. 1. ~ '93. 12.	9	4	28	compacted	idle land	forest
DuGi-Ri, PaJu	'80. 1. ~ '93. 12.	10	3	28	compacted	idle land	river and field
HaSanUn-Dong, SungNam	'89. 12. ~ '93. 3.	65	47	1291	sanitary	forest	forest
KoMae-Ri, YongIn	'90. 10. ~ '93. 3.	11	9	39	sanitary	idle land	forest and lake
KyoungSeo-Dong, InCheon	'90. 2. ~ '92. 12.	220	27	3861	sanitary	idle land	reclaimed land
MoJeon-Ri, IChon	'92. 8. ~ '94. 12.	15	8.5	124	sanitary	forest	forest
SangPae-Dong, DongDuCheon	'95. 12. ~ '99. 8.	6.1	-	77.8	compacted	idle land	forest
ShinDae-Dong, PyongTaek	'86. 3. ~ '90. 4.	21	5.5	116	compacted	idle land	river and field
#196, Wonchang-Dong, InCheon	'86. 11. ~ '88. 4.	201	4	2619	compacted	turf field	reclaimed land
#420, Wonchang-Dong, InCheon	'89. 4. ~ '89. 5.	169	4	184	compacted	turf field	reclaimed land

있었다. 해안간척지에 속하는 지역은 인천시에 있는 경서동, 원창동 196번지, 원창동 420번지 매립지이고, 야산지역은 동두천시 상폐동, 이천시 모전리, 성남시 하산운동, 파주시 분수리가 해당되었다. 습지지역에는 평택시 신대동과 파주시 두지리 매립지가 포함되며, 도심지 근처에서 인위적인 훼손이 심하다고 판단되는 도시교란지역으로서 강과 호수로 둘러싸인 지역은 용인시 고매리이었다. 쓰레기매립지는 또한, 매립된 지형의 형태에 따라 돔형, 평지형, 사면형으로 나눌 수 있었다. 돔형은 평지나 지하로 토양을 파고 쓰레기를 돔형태로 만든 것이다. 돔형에 속하는 것은 인천 경서동 매립지와 파주 분수리이었다. 평지형은 지하로 토양을 파서 쓰레기를 메우고 평지로 복토한 지역으로서 인천시 원창동 196번지, 420번지, 파주시 두지리 지역이 해당되었다. 사면형은 산지로 둘러싸인 지역이나 제방 한쪽 편에 쓰레기로 사면을 만든 형태로서 동두천시 상폐동, 이천시 모전리, 평택시 신대동이 속하였다.

2.1.3 쓰레기 매립 관련 특징

연구 장소의 특징은 Table 2와 같다. 매립년도 별로는 매립한지 2년도 되지 않은 동두천시 상폐동 매립지에서부터 12년이 경과된 인천시 원창동 196번지까지 다양하였다. 매립한지 6년이 지난 장소가 4곳이었

다. 매립지의 크기는 6~220km²까지 있어 면적의 차이가 크게 나타났다. 매립한 높이인 매립고는 3~47m로 분포하였다. 쓰레기의 매립량은 28~3861kton에 이르기까지 장소별 차이가 많았다. 토지의 매립 후 용도는 10개의 매립지 중 6곳이 공한지였다. 인천시 원창동 매립지는 잔디밭을 넓게 조성하여 다른 매립지와는 식생의 양상이 달랐다. 매립지 가스관과 침출수를 처리하는 침출수 차수막, 침출수관을 조성하고 침출수를 모아서 화학적인 처리를 하는 침출수 집수관 등의 시설을 갖춘 위생매립지는 10곳 중 4개 장소에 해당되었다. 토양의 이화학성을 조사하기 위하여 토양을 채취한 대조구 지역은 습지 바깥쪽의 사면인 평택지역을 제외하면 모두 인근 야산지역이었다. 평택 대조구 지역은 갈대와 참억새가 우점하는 지역이었다. 야산 대조구 지역의 경우, 교목층 우점종은 아까시나무 이었고, 리기다소나무, 소나무, 신갈나무, 상수리나무, 떡갈나무 등이 우점하였다. 이 종들의 피도는 모두 50% 이상이었다.

2.2 토양 시료 채취 및 분석

2000년 9~10월에 10개 매립지와 주변 지역(대조구)에서 매립지에서는 10개 지점, 대조구에서는 3개 지점을 선정하여 복토층 토양 깊이 0~10cm에서 토양

을 채취하였다. 채취한 토양을 상온에서 풍건한 후, 2mm체를 통과시킨 시료를 분석용 시료로 사용하였다. 토양 pH와 전기전도도(Electrical Conductivity, EC)는 1:5(토양:증류수) 침출액을 얻은 후 pH meter와 전기전도도계(Philips PW9509)로 측정하였다. 토성은 pipette법, 토양 가비중은 core법을 이용하여 측정하였으며¹², 토양 유기물 함량은 Wakley-Black법, 전질소 함량은 semi micro Kjeldahl digestion-steam distillation법으로 정량하였다¹³. 토양 유효인산 함량은 Bray No. 1 법으로 측정하였다¹⁴. 토양의 양이온 교환 용량(Cation Exchange Capacity, CEC)과 교환성 양이온(K, Na, Mg, Ca)은 1N CH₃COONH₄ 용액(pH 7.0) 침출법으로 정량하였으며, 토양 중 중금속(Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn) 함량은 0.1N HCl 용액 침출법을 이용하여 정량하였다¹⁵.

모든 분석자료는 통계처리 프로그램인 SAS ver 6.12를 사용하여 분석하였으며¹⁶, 그룹 간 평균을 다중 비교하기 위하여 비모수 검정으로 정규분포의 가정이 필요하지 않는 Wilcoxon Rank Sum Test 및 GT2 method를 수행하였다¹⁶.

3. 결과 및 고찰

3.1 토양의 토성, 가비중, pH, 전기전도도, 유기물 함량 및 양이온 치환용량

쓰레기 매립지와 대조구(주변지역) 토양의 토성(texture), 가비중(bulk density), pH, 전기전도도(electrical conductivity, EC), 유기물 함량 및 양이온 치환 용량(cation exchange capacity, CEC)을 Table 3에 나타내었다. 토양의 토성은 모래함량이 높은 사양토(sandy loam) 또는 양질 사토(loamy sand)로서 배수성은 양호하나 토양 중의 식물체 필수성분 함량은 낮을 것으로 판단되었다. 토양의 가비중은 파주 분수리의 0.90g/cm³에서부터 성남 하산운동의 1.48g/cm³까지의 범위로서 매립지간에 차이가 있었다. 매립지 장소별로 GT2 method를 사용하여 평균을 다중비교 분석한 결과, 성남 하산운동, 이천 모전리, 평

택 신대동 매립지가 다른 매립지 보다 가비중 값이 커다($P<0.05$). 가비중이 1.8g/cm³일 경우 나무의 생장은 방해를 받는 것으로 알려져 있어¹⁷ 목본류의 뿌리 생장이 억제되지는 않을 것으로 생각된다.

토양 pH는 매립지 5.67~7.98, 대조구 4.00~5.50의 범위였으며, 토양의 전기전도도는 매립지 65.3~435.9μS/cm, 대조구 46.3~98.4μS/cm의 범위로서 모든 매립지 토양이 대조구 토양에 비하여 pH와 전기전도도가 높았다. 전기전도도가 가장 높은 인천 경서동 쓰레기 매립지에서는 갯드랑새, 나도바랭이 등 염생식물이 관찰되었다. 매립지에서는 매립지가스에 의하여 지온과 기온을 상승시키기 때문에 많은 증발산이 일어나 토양의 염도가 증가한다고 알려져 있다¹⁸. 토양 유기물 함량은 매립지 0.45~4.38%, 대조구 1.90~8.20%의 범위로서 인천 원창동 매립지를 제외한 나머지 모든 매립지 토양이 대조구 토양보다 낮았다. 인천 원창동 매립지는 인공적인 잔디밭으로 이루어져 있기 때문에 잔디와 비료가 크게 영향을 미쳤을 것으로 판단되었다. 토양의 양이온 치환 용량은 매립지 10.3~19.6cmol/kg, 대조구 11.5~22.9cmol/kg의 범위로서 대조구 토양이 매립지 토양에 비하여 높은 경향이었는데 이는 토양의 유기물 함량과 관련이 있다고 생각된다.

3.2 토양의 전질소, 유효인산 및 교환성 양이온 함량

Table 4는 식물생장에 대한 필수성분인 질소, 인산 및 교환성 양이온(K, Ca, Mg 및 Na) 함량을 나타낸 것이다. 전질소 함량은 매립지 0.054~0.143%, 대조구 0.100~0.289%의 범위를 나타내었다. Wilcoxon 2 sample test를 한 결과, 평택 신대동, 인천 원창동 매립지를 제외하면 쓰레기 매립지가 대조구보다 낮았다($P<0.05$). 쓰레기 매립지는 2차 천이의 초기 단계이기 때문에 천이가 진행된 아산지역보다 질소의 축적이 작다고 할 수 있다. 질소의 공급원으로서는 식물잔해, 대기중의 질소 침착 및 토양 내 질소 고정박테리아에 의한 산물 등을 들 수 있다¹⁹. 그러나, 쓰레기 매립지에서는 침출수에 의하여 NH₄⁺의 형태로 질소를 공급받을 수 있다²⁰. 신대동은 주변이 습지지역이고 매립지

Table 3. Texture, bulk density, pH, electrical conductivity, organic matter content and cation exchange capacity of soils in landfill(L) and reference(R) sites

Waste landfill sites	Texture	Bulk density (g/cm ³)	pH	Electrical conductivity (μS/cm)	Organic matter (%)	CEC (cmol/kg)
BunSuh-Ri, PaJu (L)	sandy loam	0.90±0.06*	7.91±0.04	147.3±20.3	0.45±0.08	15.8±1.5
BunSuh-Ri, PaJu (R)	sandy loam	-	4.37±0.13	46.3±3.4	4.90±0.55	18.4±3.8
DuGi-Ri, PaJu (L)	loamy sand	0.95±0.01	6.38±0.43	106.0±5.2	1.03±0.21	19.6±3.5
DuGi-Ri, PaJu (R)	loamy sand	-	4.17±0.03	73.0±7.7	6.92±0.92	22.9±3.0
HaSanUn-Dong, SungNam (L)	loamy sand	1.48±0.01	6.14±0.66	89.0±7.5	3.25±0.30	15.5±0.7
HaSanUn-Dong, SungNam (R)	loamy sand	-	4.43±0.15	55.0±5.2	6.93±0.71	18.7±2.4
KoMae-Ri, YongIn (L)	sandy loam	1.29±0.01	7.01±0.42	90.5±25.9	0.75±0.27	11.7±1.8
KoMae-Ri, YongIn (R)	sandy loam	-	4.76±0.69	67.0±8.2	3.12±0.31	14.0±2.3
KyoungSeo-Dong, InCheon (L)	sandy loam	1.21±0.01	7.83±0.14	435.9±34.7	0.58±0.09	13.2±1.7
KyoungSeo-Dong, InCheon (R)	sandy loam	-	4.00±0.01	98.4±5.3	8.20±0.97	15.5±2.9
MoJeon-Ri, IChon (L)	loamy sand	1.30±0.02	5.67±0.75	65.3±7.4	0.75±0.27	11.0±1.9
MoJeon-Ri, IChon (R)	loamy sand	-	4.30±0.20	53.7±0.30	3.12±0.31	13.0±1.6
SangPae-Dong, DongDuCheon (L)	sandy loam	1.04±0.09	7.98±0.07	167.5±15.1	2.49±0.22	13.4±1.5
SangPae-Dong, DongDuCheon (R)	sandy loam	-	4.00±0.10	83.8±10.4	4.54±0.15	14.7±1.2
ShinDae-Dong, PyongTaek (L)	loamy sand	1.37±0.03	7.94±0.11	160.6±28.0	1.76±0.33	10.3±2.0
ShinDae-Dong, PyongTaek (R)	loamy sand	-	5.50±0.70	53.8±6.4	1.97±0.14	11.5±2.8
#196, Wonchang-Dong, InCheon (L)	sandy loam	1.05±0.04	6.41±0.25	173.3±24.5	4.38±0.47	13.0±2.1
#420, Wonchang-Dong, InCheon (L)	sandy loam	0.84±0.01	6.50±0.15	135.5±13.2	3.95±0.25	12.5±1.6
Wonchang-Dong, InCheon (R)	sandy loam	-	4.67±0.09	47.0±8.1	1.90±0.34	16.8±1.8

*Values are mean ± standard error.

내 습지 지역이 존재하기 때문에 질소가 습지에서 유입되었을 가능성이 있으며, 원창동 196번지는 잔디를 재배하는 밭이어서 잔디의 잔해가 공급되었을 가능성이 있어서 질소함량이 대조구에 비하여 높게 나온 것으로 추측된다. 토양 중 유효인산 함량은 매립지 2.8~19.6mg/kg, 대조구 2.7~26.4mg/kg의 범위로서 일반적인 토양의 유효인산 함량인 20mg/kg에 비

하여 낮거나 비슷한 수준을 나타내었다.

토양 중 교환성 K, Na, Ca 및 Mg 함량은 표준오차가 크게 나왔는데 이것은 매립지 복토 과정에서 많은 다른 층의 토양들이 혼합되었기 때문에 나타나는 현상이다²⁰⁾. 토양 중 교환성 K와 Mg 함량은 매립지에서 각각 90~230와 53~194mg/kg, 대조구에서 32~322와 10~196mg/kg의 범위로서 평택 신대동을

Table 4. Total-N, available-P and exchangeable cations content of soils in landfill(L) and reference(R) sites

Waste landfill sites	Total-N (%)	Available-P (mg/kg)	Exchangeable cations			
			K	Ca	Mg	Na
			(mg/kg)			
BunSuh-Ri, PaJu (L)	0.059±0.014*	8.0±2.1	111.0±23.7	1955±231.8	59.7±9.7	6.3±0.5
BunSuh-Ri, PaJu (R)	0.175±0.015	3.0±0.5	60.0±14.9	124.7±38.0	26.9±5.4	4.1±0.5
DuGi-Ri, PaJu (L)	0.077±0.009	14.2±3.2	184.4±20.6	1153±281.7	109.9±10.0	12.4±3.1
DuGi-Ri, PaJu (R)	0.280±0.038	7.0±2.4	89.2±11.5	98.3±24.3	26.1±4.0	13.6±4.6
HaSanUn-Dong, SungNam (L)	0.118±0.019	7.9±1.1	123.0±10.0	1537±117.2	123.9±8.4	6.1±0.5
HaSanUn-Dong, SungNam (R)	0.289±0.017	18.2±0.7	51.3±4.7	139.6±32.4	15.3±1.0	2.6±0.5
KoMae-Ri, YongIn (L)	0.055±0.012	2.8±0.8	90.2±17.6	1094±136.6	166.2±22.2	16.0±3.6
KoMae-Ri, YongIn (R)	0.140±0.015	2.7±0.1	32.3±2.9	53.0±2.0	10.2±1.3	4.2±1.4
KyoungSeo-Dong, InCheon (L)	0.143±0.015	7.6±0.6	138.9±12.3	1712±112.3	194.3±13.8	33.4±4.8
KyoungSeo-Dong, InCheon (R)	0.274±0.038	6.5±1.1	56.6±5.4	104.0±13.6	22.4±2.3	6.4±1.3
MoJeon-Ri, IChon (L)	0.054±0.009	8.1±1.7	152.6±25.1	380.7±64.7	85.6±7.4	10.0±3.8
MoJeon-Ri, IChon (R)	0.132±0.017	26.4±6.7	57.5±8.5	95.2±15.7	12.6±3.0	3.9±1.3
SangPae-Dong, DongDuCheon (L)	0.117±0.023	19.6±3.2	177.2±26.9	2351±561.0	52.5±5.6	15.1±3.8
SangPae-Dong, DongDuCheon (R)	0.187±0.013	5.5±2.0	76.1±11.4	97.4±33.0	10.8±0.7	17.3±4.1
ShinDae-Dong, PyongTaek (L)	0.116±0.010	12.6±1.9	230.9±39.5	2326±298.3	168.6±16.4	24.1±5.5
ShinDae-Dong, PyongTaek (R)	0.100±0.017	18.8±1.9	322.0±10.5	696.4±121.1	196.6±29.2	5.2±2.8
#196, Wonchang-Dong, InCheon (L)	0.126±0.013	14.0±2.3	122.4±8.6	1052±206.2	147.5±9.3	29.9±4.5
#420, Wonchang-Dong, InCheon (L)	0.093±0.006	7.1±0.8	125.0±7.2	1545±156.0	179.9±9.4	42.0±4.3
Wonchang-Dong, InCheon (R)	0.105±0.019	18.5±2.7	89.1±6.6	846.9±159.2	85.1±13.2	10.3±3.9

*Values are mean ± standard error.

제외한 모든 매립지에서 대조구에 비하여 높았다 ($P<0.05$). 교환성 Na 함량은 매립지 6~42mg/kg, 대조구 2~10mg/kg의 범위로서 파주 두지리와 동두천 상파동을 제외한 모든 매립지에서 대조구보다 높았으며 ($P<0.05$), 특히 가장 함량이 높은 동두천 상파동 매립지의 경우 24.1배, 다른 매립지에서는 대조구보다 1.2~20.6배 높았다. 매립지에서 교환성 Ca의 함량이 다른 교환성 양이온 함량보다 매우 높았는데 Ca은 중금속의 독성을 완화하는 것으로 알려져 있다².

의 범위로서 다른 교환성 양이온에 비하여 매우 높았다. 모든 매립지 지역이 대조구보다 높았으며 ($P<0.05$), 특히 가장 함량이 높은 동두천 상파동 매립지의 경우 24.1배, 다른 매립지에서는 대조구보다 1.2~20.6배 높았다. 매립지에서 교환성 Ca의 함량이 다른 교환성 양이온 함량보다 매우 높았는데 Ca은 중금속의 독성을 완화하는 것으로 알려져 있다².

Table 5. Heavy metal contents of soils in landfill(L) and reference(R) sites

Waste landfill sites	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
	(mg/kg)							
BunSuh-Ri, PaJu (L)	2.22±0.53*	0.12±0.02	6.32±1.75	60.3±14.3	152.5±19.8	0.17±0.05	53.4±5.9	57.1±11.2
BunSuh-Ri, PaJu (R)	0.10±0.01	0.10±0.03	2.01±0.22	57.4±12.2	29.3±6.5	0.22±0.06	8.3±1.1	3.5±0.5
DuGi-Ri, PaJu (L)	0.06±0.01	0.07±0.01	3.92±0.83	95.8±15.3	59.9±7.5	0.30±0.07	3.3±0.6	3.4±0.6
DuGi-Ri, PaJu (R)	0.08±0.01	0.05±0.01	1.20±0.06	33.6±1.8	17.3±4.7	0.26±0.05	4.3±1.0	2.0±0.4
HaSanUn-Dong, SungNam (L)	0.07±0.01	0.16±0.02	3.10±0.43	170.9±16.9	97.7±6.3	1.06±0.14	2.5±0.2	3.7±0.4
HaSanUn-Dong, SungNam (R)	0.05±0.03	0.02±0.01	1.41±0.03	35.9±3.6	12.1±2.3	0.13±0.05	1.4±1.1	3.0±0.6
KoMae-Ri, YongIn (L)	0.03±0.01	0.03±0.01	27.8±4.86	37.5±13.2	44.8±9.9	0.19±0.04	3.3±1.1	3.8±1.4
KoMae-Ri, YongIn (R)	0.07±0.01	0.02±0.01	0.96±0.01	58.1±8.3	14.1±1.4	0.02±0.01	1.8±0.6	1.4±0.1
KyoungSeo-Dong, InCheon (L)	0.18±0.01	0.23±0.03	5.99±0.59	126.7±14.5	178.3±17.5	0.75±0.10	7.4±0.9	149.6±19.3
KyoungSeo-Dong, InCheon (R)	0.09±0.01	0.02±0.01	5.69±0.22	58.3±1.8	55.2±6.1	0.43±0.09	5.6±2.8	8.1±1.3
MoJeon-Ri, IChon (L)	0.01±0.01	0.03±0.01	3.57±1.33	27.7±9.2	34.2±2.5	0.10±0.03	9.3±4.8	23.3±7.4
MoJeon-Ri, IChon (R)	0.06±0.01	0.02±0.01	0.48±0.03	30.8±0.9	17.3±3.0	0.02±0.01	8.2±1.7	1.3±0.2
SangPae-Dong, DongDuCheon (L)	0.16±0.04	0.54±0.23	6.62±2.72	115.6±35.0	57.0±9.0	0.45±0.09	7.4±2.2	25.3±11.2
SangPae-Dong, DongDuCheon (R)	0.07±0.01	0.02±0.01	0.83±0.06	58.8±12.4	9.5±3.0	0.03±0.02	7.6±0.8	1.6±0.2
ShinDae-Dong, PyongTaek (L)	0.11±0.02	0.14±0.03	3.06±0.88	97.9±19.6	82.6±9.7	0.59±0.08	4.9±2.3	58.4±10.9
ShinDae-Dong, PyongTaek (R)	0.03±0.02	0.05±0.01	1.52±0.24	55.1±2.7	25.9±2.5	0.55±0.16	0.8±0.3	4.0±0.4
#196, Wonchang-Dong, InCheon (L)	0.11±0.02	0.05±0.01	2.98±0.35	84.1±8.7	114.9±5.2	0.38±0.06	2.4±0.3	9.6±2.1
#420, Wonchang-Dong, InCheon (L)	0.07±0.01	0.06±0.01	2.60±0.33	87.6±6.3	100.9±3.4	0.34±0.03	2.9±0.4	6.8±1.7
Wonchang-Dong, InCheon (R)	0.13±0.01	0.02±0.01	2.88±0.33	66.9±21.3	40.3±4.4	0.15±0.05	0.7±0.4	11.1±1.7
Critical concentration in soil**	> 3	> 75	> 60	-	> 1500	> 100	> 100	> 70

*Values are mean±standard error.

**The critical concentration in soil is the value above which toxicity is considered to be possible(Kabata-Pendias and Pendias, 1992).

3.3 토양의 중금속 함량

토양 중 Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb 및 Zn 함량에 대한 분석결과는 Table 5와 같다. 중금속 함량은 매립지 지역별로 차이가 있었으나 인천 원창동 매립지를 제외한 모든 매립지에서 대조구보다 높게 나타났다. 토양 중금속의 경우, 매립지간의 차이는 토양 생성 모암의 기원에 의하여 결정될 수 있어 지역 간

차이가 나타나게 된다²⁰. 매립지의 경우 복토한 토양의 기원에 따라 지역 간 편차가 예상되며 매립쓰레기에서 나오는 추출물이나 침출수에 의하여 오염이 일어날 수 있다고 예상된다.

모든 매립지에서 Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb 및 Zn 함량은 보통 일반 토양에서의 범위였으며²¹, 식물에게 독성을 일으킬 수 있는 임계농도²² 보다 매우

낮았으며, 토양환경보전법 상의 분석항목인 Cd, Cu 및 Pb의 함량도 토양환경보전법의 농경지에 대한 우려기준에 비하여 매우 낮은 값을 나타내었다. 서울 난지도 매립지 토양의 중금속 함량과²⁵⁾ 비교하면, Cd 함량은 이천 모전리 매립지를 제외하고 모든 매립지에서 난지도 보다 높게 나타났다. Cu 함량은 용인시 고매리의 경우 난지도보다 3.44배 많았으나, 다른 매립지는 난지도 보다 낮았다. Pb 함량은 파주 분수리, 인천 경서동, 이천 모전리, 동두천 상폐동의 함량이 난지도 보다 높았다. Zn 함량은 파주 분수리, 인천 경서동, 이천 모전리, 동두천 상폐동, 평택 신대동, 인천 원창동 196번지 매립지가 난지도 보다 높았다. Fe와 Zn의 함량은 연구대상 매립지에서 대조구보다 대부분 높게 나타났다. 매립지에서 토양 내에 매립지 가스를 포함하게 되면 가스를 포함하지 않은 지역보다 Fe와 Zn의 함량이 증가하는데 이는 매립지 가스에 의한 산소의 대체와 산소를 사용하는 미생물의 활동에 의하여 토양 내에 환원 상태가 일어나게 되면 Fe와 Zn을 포함한 미량원소들의 함량이 증가하기 때문이다²⁶⁾.

4. 결 론

쓰레기 매립지는 도심지 근처에 존재하는 인위적인 혐오지로서 인식되어 왔으나, 최근에는 매립지를 재활용하려는 관심이 증가하고 있다. 쓰레기 매립지 복토를 하는데 쓰이는 토양은 주변 도심지 건설현장에서 기초공사시 파낸 토양, 주변 야산 토양, 하천 토양 등이 사용된다. 따라서 매립지 복토층 토양의 이화학성은 복토재로 사용된 토양의 기원에 따라 많이 차이가 나게 된다. 또한 매립과정과 매립 후에 심각한 환경변화를 동반하면서 토양 오염을 야기시킬 수 있으며, 토양 중 양분은 식물 생육 요구량 보다 낮은 함량을 가질 수 있다. 따라서 쓰레기를 매립할 때는 앞으로의 재활용 목표를 설정하여 이에 따라 토양을 선택하여 복토하여야 한다. 즉, 매립지의 식생은 주변 식생에 의하여 크게 영향을 받으므로 매립지를 특이한 몇몇 식생으로 복원하기 위해서는 매립하는 토양을 선택하여 복토하는 것이 필요한 것으로 판단되었고, 대부분

매립지 복토층의 토양은 식물의 생육에 필요한 질소 및 인산의 함량이 부족한 척박한 토양이므로 매립지에서 자연 또는 인공 식생을 이용한 생태학적 복원을 수행할 시 질소 및 인산의 사용과 같은 토양관리 측면을 고려하여야 한다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 특정기초연구사업(과제번호 R01-2000-00069)의 재정적 지원으로 수행되었기에 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Ahel, M., Mikac, N., Cosovic, B., Prohic, E., and Soukup, V. "The Impact of Contamination from a Municipal Solid Waste Landfill(Zagreb, Croatia) on Underlying Soil" . *Wat. Sci. Tech.*, **37**(8), pp203~210(1998).
2. Manna, L., Zanetti, M.C., and Genon, G. "Modeling Biogas Production at Landfill Site." . *Resources, Conservation and Recycling*, **26**(1), pp1~14(1999).
3. Simmons, E. "Means to restore" . *Landscape Design*, **219**(1), pp15~7(1993).
4. 전국 매립시설 현황, 환경부(2001).
5. 이광열, 반응셀기법을 이용한 비위생매립지 오염 확산 방지 대책, 한국건설기술연구원(2000).
6. 이승래, 구자공, 오세봉, 민달기, 윤석표, 김준석, 김윤태, 홍은수, 도시폐기물 매립지반의 침하특성에 관한 연구, 한국건설기술연구원(1992).
7. Wilson, E.O., Biodiversity, National Academy Press, Washington, D.C.(1988).
8. Chan, Y.S.G., Chu, L.M., and Wong, M.H. "Influence of Landfill Factors on Plants and Soil Fauna-An Ecological Perspective" . *Environmental Pollution*, **97**(1-2), pp39~44(1997).
9. Maurice, C., Landfill Gas Emission and Landfill Vegetation, Licentiate Thesis, Lulea University of

- Technology(1998).
10. 생육환경특성을 고려한 아파트 단지 내 조경수목 선정 및 식재방안연구, 대한주택공사 주택연구소 (1995).
 11. 사용종료 매립지 실태조사결과 및 지하수 오염방지대책, 환경부(1997).
 12. Klute, A., Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical and Mineralogical Methods, 2nd Edition, ASA&SSSA Inc., Madison, WI(1986).
 13. Page, A.L., Methods of Soil Analysis, Part 2, Chemical and Microbiological Properties, 2nd Edition, ASA&SSSA Inc., Madison, WI(1982).
 14. 토양화학분석법, 농촌진흥청 농업기술연구소 (1988).
 15. SAS/STAT guide for personal guide(version 6 edition), SAS Institute Inc. Cary, NC(1985).
 16. Sokal, R.R., and Rohlf, F.J., Biometry: The Principles and Practice of Statistics in Biological Research, 3rd Edition, Freeman company, USA(1995).
 17. Gilman, E.F., Leone, I.A., and Flower, F.B. "Effect of Soil Compaction and Oxygen Content on Vertical and Horizontal Root Distribution". *J. Environ. Hort.*, 5(1), pp33~36(1987).
 18. Hernandez, A.J., Adarve, M.J., Gil, A., and Pastor, J. "Soil Salination from Landfill Leachates: Effects on the Macronutrient Content and Plant Growth of Four Grassland Species". *Chemosphere*, 38(7), pp1693~1711(1999).
 19. Stiling, P., Ecology: Theories and Application, 3rd Edition. Prentice Hall, NJ(1999).
 20. Wong, M.H., and Yu, C.T. "Monitoring of Gin Drinkers' Bay Landfill, Hong Kong: II . Gas Contents, Soil Properties, and Vegetation Performance on the Side Slope". *Environmental Management*, 13(6), pp753~762(1989).
 21. Sabre, M., Holl, K.D., Lyons, R.E., and Cairns, J.Jr. "Potential Use of Wildflower Species for Landfill Restoration in Southwestern Virginia". *Hort. Technology*, 7(4), pp383~387(1997).
 22. Proctor, J., and Woodwell, S.R.J. "The Ecology of Serpentine Soils". *Adv. Ecol. Res.*, 9, pp255~384(1975).
 23. Alloway, B.J., Heavy Metals in Soils, Blackie Academic & Professional, London(1995).
 24. Kabata-Pendias, A., and Pendias, H. Trace Elements in Soils and Plants, CRC Press, Boca Raton, FL(1992).
 25. 구영본, 이성규, 김판기, 변광옥, 우수영 "난지도 폐기물 매립지의 포플러 생장 및 오염물질 흡수 가능성". *포플러*, 14(1), pp23~32(1997).
 26. Flower, F.B., Gilman, E.F. and Leone, I.A. "Landfill Gas, What It Does to Trees and How Its Injurious Effects May Be Prevented". *J. Arboriculture*, 7(2), pp43~52(1981).