

수도권 주변 점토광물의 점토차수벽 물질로의 유용성 평가

오석영* · 전효택*

Evaluation of the Engineering Property of Clay Minerals Nearby Seoul Area as Clay Liner Material

Seok-Young Oh* and Hyo-Taek Chon*

ABSTRACT : This research was carried out to evaluate the possible usage of natural clay materials collected from the Kimpo landfill site and nearby clay mines as a clay liner material. In order to evaluate the possible usage as a clay liner material, specific gravity, pH, loss-on-ignition (L.O.I.), organic carbon content and mineralogical composition of clay materials were measured. The Atterberg limit test and the size analysis were performed for the engineering classification and the prediction of hydraulic conductivity of clay materials. Cation exchange capacity (CEC) and batch tests were also carried out for the assessment of attenuation capacity. Clay specimens of KPNCL, KP-1, KP-2 and SH were recommended as suitable clay liner materials from the viewpoint of their basic quality and attenuation capacity.

서 론

폐기물 매립지는 폐기물을 저장 처리하고 폐기물에 의하여 환경오염이 일어나지 않도록 설계되어야 하며 폐기물 매립지에서 발생하는 침출수가 대수층으로 유입되는 것을 막음으로서 지하수계의 오염을 방지하여야 한다. 또한 폐기물 매립지의 안정화를 이루기 위한 위생매립지 건설을 위해서는 매립지 상부와 하부의 차수벽 (liner)과 침출수차집시설 (leachate collection system)의 설계와 시공이 필수적이다. 차수벽과 차집시설의 설계에서는 매립지내에서의 침출수의 생성을 억제하여 침출수에 의하여 형성되는 국부적인 수두를 억제할 수 있는 효율성, 매립지 공사와 매립 진행중에 발생하는 물리적 파손에 대한 저항성, 매립지의 안정화가 충분히 될 까지의 낮은 수리전도도의 지속성과 화학적 저항성, 차수벽 물질의 선경과 유용성 등이 평가되어야 한다.

일반적으로 사용되고 있는 차수벽 시스템은 자연점토방벽 (natural clayey deposits), 다짐점토차수벽 (compacted clay liner), 단일합성차수벽, 다짐점토차수벽과 합성차

수벽을 동시에 이용하는 복합차수벽 등이며 최근에는 수두 조절층 (Hydraulic control layer)도 복합차수벽에 이용되고 있다. 차수벽은 매립되는 폐기물과 입지조건에 따라 다르게 채택될 수 있으며 특히 다짐점토차수벽의 경우 다짐 정도와 함수비에 따라 수리전도도가 달라지므로 최적의 함수비를 설정하고 적절한 다짐시공이 필수적이며, 점토 차수벽의 균열과 파손으로 말미암은 수리전도도의 국부적인 손상이 중요한 문제점으로 제시되고 있다 (Keller *et al.*, 1986).

점토차수벽의 매질로서의 유용성 평가에는 수리전도도를 비롯한 물리적 특성 평가뿐만 아니라 오염물질의 지연 (attenuation) 능력에 대한 평가가 종합적으로 이루어져야 한다 (Czurda, 1993; 오석영, 전효택, 1996). 왜냐하면 점토차수벽은 매립지에서 생성되는 오염물질과의 반응을 통하여 오염물질을 지연시키는 주요한 매체이며 매립지로부터의 오염물질의 거동을 예측하기 위해서는 차수벽의 지연능력을 평가하는 것이 필수적이기 때문이다. 지질 매체와의 반응을 통한 오염물질의 지연은 열역학적 환경에 의한 침전을 제외하면 지질매체에 대한 흡착이 대부분이므로, 지연능력의 평가로 회분식 실험 (batch test), 주상 실험 (column test)를 통한 흡착능력, 입도분석, 광물 조성, 양이온 교환 용량 (CEC), 유기물질 함량에 대한 연구 등이 선행되어야 한다.

* 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 (School of Civil, Urban, and Geosystem Engineering, College of Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea), E-mail: chon@plaza.snu.ac.kr

점토를 차수벽으로 사용하기 위한 기준은 여러 연구자들에 의하여 연구되었는데 Daniel (1993)이 제시한 ① 수리전도도: 10^{-7} cm/s 이하, ② 소성지수: 7~10% 이상, ③ 입도분석시 실트 (silt) 크기 이하의 양: 20~30% 이상, ④ 입도분석시 자갈 (gravel)의 양: 30% 이하, ⑤ 최대입자 크기: 25~50 mm 등의 기준과, Rowe 등 (1995)이 제시한 ① 수리전도도 10^{-7} cm/s 이하, ② 입도분석시 점토 (<2 μ m)의 양: 15~20% 이상, ③ 소성지수 7% 이상, ④ 활성도 (activity) 0.3 이상, ⑤ CEC 10 meq/100 g 이상 등의 기준이 대표적이다. 또한 독일에서는 수리전도도 10^{-6} (cm/s) 이하, 점토광물의 함량 10% 이상 등을 차수벽으로의 기준으로 설정하였으며 (Czurda, 1993) 영국 NRA (National Rivers Authority)에서는 액성한계 90% 이하, 소성지수 65% 이하, 점토함량 10% 이상 등이 제시되었으며 (Clark, Davies, 1996), Murray 등 (1992)은 소성지수가 12% 이상이어야 된다고 제시하였다.

이 연구에서는 현재 사용되고 있는 자연점토차수벽과 수도권 주변의 점토광물들의 기본 물성과 지질학적, 공학적 특성을 파악하고 차수벽으로의 유용성을 평가하여 수도권 주변 매립지 부지 선정에 도움을 주고자 한다.

연구대상지역

점토의 차수벽 물질로서의 유용성 평가를 위하여 현재 차수벽 물질로 사용되고 있는 김포 매립지의 해상점토를 채취하였다. 1992년 10월 말로 난지도 매립지의 매립이 완료된 후 수도권의 폐기물 매립이 실시되고 있는 김포 매립지는 해상점토를 자연점토차수벽으로 사용하는 매립지이다. 수도권에서 발생하는 폐기물 매립지에 사용될 점토차수벽의 경제성을 고려하여 인구밀도가 높고 폐기물의 발생량이 많은 수도권 인근지역인 경기도 김포지역과 여주, 용인지역, 시흥지역의 저품위 점토를 연구대상으로 설정하였다. 김포지역 점토는 진원광산과 대성광산에서, 여주, 용인지역은 여주광산과 대덕광산에서 시흥지역은 (구)경인광산에서 점토시료를 각각 채취하였다.

진원광산은 경기도 김포군 월곶면에 위치하고 있으며 광산은 중생대 통진통의 퇴적암류인 장석질사암과 이질반토질세일을 대상으로 하는 고령토광산이다. 주구성광물은 석영, 장석이며 유색광물의 함량은 적은 편으로 장석은 견운모화 내지 일부 고령토화되어 나타난다. 광산은 노천 채굴을 실시하고 있으며 월 200~300 M/T를 채광하여 내화 모르타르용으로 판매하고 있다.

대성광산은 경기도 김포군 월곶면에 위치하고 있으며 광산은 중생대 통진통의 퇴적암류를 관입, 분포하는 암편

이 풍화작용 또는 일부 열수변질작용을 받아 형성된 고령토 광산으로 장석질 사암의 견운모화와 고령토화 작용 또한 관찰된다. 또한 광구 일부지역에서 반토질세일 및 반토질세일이 변질을 받아 생성된 납석광상이 존재하고 있으며 약간의 탄질물을 함유하고 있어 암색을 띠고 있고 저품위이다. 이 광산 역시 월 250 M/T를 노천채굴을 통해 채광하여 내화 모르타르용으로 판매하고 있다 (대한광업진흥공사, 1988).

여주광산은 경기도 여주군 능서면에 위치하고 있으며 광산은 규장암이 풍화되어 생성된 고령토 광산으로 유백색 내지 담갈색을 띠는 극세립질로 풍화도가 높아 분상 또는 미분상을 이루고 있다. 주구성광물은 석영과 견운모 그리고 점토광물이며, 도자기 원료로 사용되어 왔으며 현재 휴광중이다 (대한광업진흥공사, 1987).

대덕광산은 경기도 용인군 와서면에 위치하고 있으며 중생대 화강암에 관입한 산성암맥이 열수 변질 및 풍화를 받아 생성된 고령토 광산이다. 대부분 담홍 내지 유백색을 띠고 있으며 장석은 대부분 고령토화되어 있다. 도자기 원료로 채굴되어 왔으며 현재도 소규모로 채광중이다. 주구성 광물은 석영이며 그 밖에 점토광물이 나머지를 차지하고 있다.

경인광산은 경기도 시흥군 군자면에 위치하고 있으며 광산은 안구상편마암내에 관입된 규장암이 풍화되어 형성된 고령토 광산으로 백색 내지 담회색을 띠나 불순물이 포함된 곳은 담홍색을 띠고 있고 비교적 철분이 많고 백색도가 낮다. 현재 폐광되었으며 각종 토목공사용 토취장으로 현재 이용중이다 (대한광업진흥공사, 1981).

시료채취 및 처리

채취된 6개 시료들 (김포매립지 점토차수벽 시료: KP-NCL, KP-1: 진원광산, KP-2: 대성광산, SH: (구)경인광산, YI: 대덕광산, YJ: 여주광산)은 Daniel (1993)이 제시한 자연점토차수벽 물질로의 기본 조건을 알아보기 위하여 입도 분석과 Atterberg 한계시험을 실시하여 수리전도도를 예측하고 공학적인 분류를 실시하였으며 지연능력 평가를 위한 기초자료로서 pH, 작열감량, 유기탄소의 함량, 양이온 교환 용량을 측정하고 회분식 실험을 통하여 지연능력을 평가하였다. 6개 시료 중 YI 시료는 흡착능력을 비교하기 위한 비교대상 시료로 선정하였으며 실제의 유용성 평가는 5개 시료에 대하여 행하였다. 채취한 시료는 상온에서 완전 건조시킨 후 입도분석과 비중측정을 실시하였으며 -10 mesh로 체질하여 pH, 작열감량 (L.O.I.), 양이온교환 용량, 회분식 실험, 다짐시험 (compaction test)을 실시하

였고, -40 mesh로 체질하여 유기탄소 함량측정, Atterberg 한계시험을 실시하였으며, -200 mesh로 체질하여 X-선 회절분석을 실시하였다.

기본 물성

Mirage사의 SD-120으로 측정된 6개 점토시료의 비중은 Table 1과 같다. YJ시료가 가장 높은 2.34의 값으로 측정되었고 KPNCL이 2.03로서 가장 낮은 값을 보이는데 장연수 등 (1993)이 제시한 2.64~2.68의 값과는 차이가 있었다. pH는 Rump와 Krist (1988)가 제안한 방법에 의하여 측정하였으며 사용된 증류수의 pH는 5.35였다. KP-1, KP-2, SH는 pH 5 전후의 산성, KPNCL, YI, YJ는 7 이상의 중성 및 약알칼리성의 특징을 보임으로써 KPNCL, YI, YJ가 중금속 등의 오염물질의 흡착에 유리한 시료임을 알 수 있다.

점토시료중의 유기물질 함량이 증가할수록 토양의 중금속 원소들이나 유기화합물에 대한 흡착능력이 커지므로 (Khan *et al.*, 1979; Thornton., 1983) 흡착능력의 평가와 해석을 위해서는 유기물질의 함량이 필수적이다. 점토 내의 작열감량은 유기물의 함량을 직접적으로 나타내는 것은 아니지만 비례관계에 있으므로 유기물질 함량의 간접적인 지표가 될 수 있다. Ball (1964)이 제안한 방법에 의하여 작열감량을 측정된 결과 SH와 KPNCL은 각각 2.39 (%), 1.79 (%)의 작열감량을 보였고 나머지 4개 시료는 1% 전후의 값을 보였으며 6개 시료 모두 유기물질 함량이 많지 않았다 (Table 1).

점토시료 중의 유기탄소 함량은 Walkley-Black method (Carter., 1993)에 의하여 측정하였다. 측정결과 작열감량과 마찬가지로 SH와 KPNCL이 상대적으로 높은 0.24 (%), 0.32 (%)의 유기탄소의 함량을 나타내었다 (Table 1). YI, YJ는 0.1 (%)가 넘지 못하여 비극성 유기화합물의 분배계수 (partition coefficient)를 결정하는 경험식 (Sch-

warzenbach, Westall, 1981; Karickhoff, 1984)을 이용하는데는 부적합하였다 (McCarty *et al.*, 1981). 또한 Ball (1964)이 제안한 유기탄소 함량과 작열감량과의 관계식인 $C_{org} (%) = 0.458 \times L.O.I. (%) - 0.4$ 는 유기물이 풍부한 토양의 자료에 기초한 것이었으므로 본 연구에서는 적절치 못한 것으로 나타났다.

X선 회절분석과 양이온교환용량

MAC Science Inc.의 MXP 18A RINT-2500 model을 사용하여 6개 점토 시료의 X선 회절분석 결과를 Fig. 1에 도시하였다. 각 시료별로 확인된 광물로는, KP-1은 석영, 백운모, 카오리나이트, 견운모, KP-2는 석영, 백운모, 납석, 카오리나이트, 견운모, SH는 석영, 장석, 카오리나이트, 녹니석, 견운모, 몬모릴로나이트, KPNCL은 석영, 장석, 녹니석, 견운모, YI는 석영, 몬모릴로나이트, 카오리나이트, YJ는 석영, 장석, 견운모, 일라이트, 카오리나이트 등이다. YI와 SH에서는 흡착능력이 좋은 2:1 점토 광물인 몬모릴로나이트가, YJ에서는 일라이트가 발견되었는데 이는 점토의 양이온교환용량 실험결과와 잘 일치한다.

양이온교환용량의 측정은 Hesse (1971)가 제안한 방법을 사용하였다. 측정결과 X선 회절분석에서 2:1 점토 광물이 발견된 시료인 YI와 SH가 각각 47.8 (meq/100 g), 29.0 (meq/100 g)으로 상대적으로 높은 값을 나타내었고 나머지 4개 시료도 20 (meq/100 g) 이상의 양이온교환용량을 나타내었다 (Table 1). SH의 경우 유기물질의 함량이 6개 시료중 가장 높아 양이온교환용량이 상대적으로 높은 것으로 해석되며, YI의 경우는 pH가 중성이고 2:1 점토광물이 상대적으로 많은 것에서 기인한다.

지질학적, 공학적 분류

점토 시료의 지질학적 공학적 분류를 위하여 KS F 2303의 방법을 따라 액성한계시험 (Liquid limit test)을, KS F2304의 방법을 따라 소성한계시험 (Plastic limit test)을 각각 실시하여 소성지수 (Plasticity Index)를 구하였다. 시험 결과 SH가 가장 높은 24.4 (%)의 값을 나타내었고 YJ를 제외한 시료들은 Daniel (1993)이 제시한 7~10 (%)를 넘고 있었다 (Table 2). YJ의 경우 5.7 (%)로서 차수벽 물질로의 조건을 만족하지 못하였으며 KPNCL의 경우에는 장연수 등 (1993)이 제시한 액성한계 (33.4~41.5%), 소성지수 (11.2~19.0%)와 일치하였다.

입도분석은 10% H₂O₂와 0.1N HCl을 차례로 넣고 유기물과 탄산염을 제거한 후 습식체질 (wet sieving)에 의하

Table 1. The physical and chemical properties of soil samples

	KPNCL	KP-1	KP-2	SH	YI	YJ
S.G.	2.03	2.25	2.24	2.12	2.06	2.34
pH	7.06	5.49	4.79	4.81	7.78	7.20
L.O.I. (%)	1.79	1.21	1.29	2.39	1.23	0.70
O.C. content (%)	0.32	0.21	0.17	0.24	0.04	0.02
C.E.C. (meq/100 g)	23.7	21.5	24.2	29.0	47.8	25.0

KPNCL; clay liner at the Kimpo landfill site, KP-1; Jinweon mine, KP-2; Daeseong mine, SH; Gyeongin mine, YI; Daedeog mine, YJ; Yeosu mine.

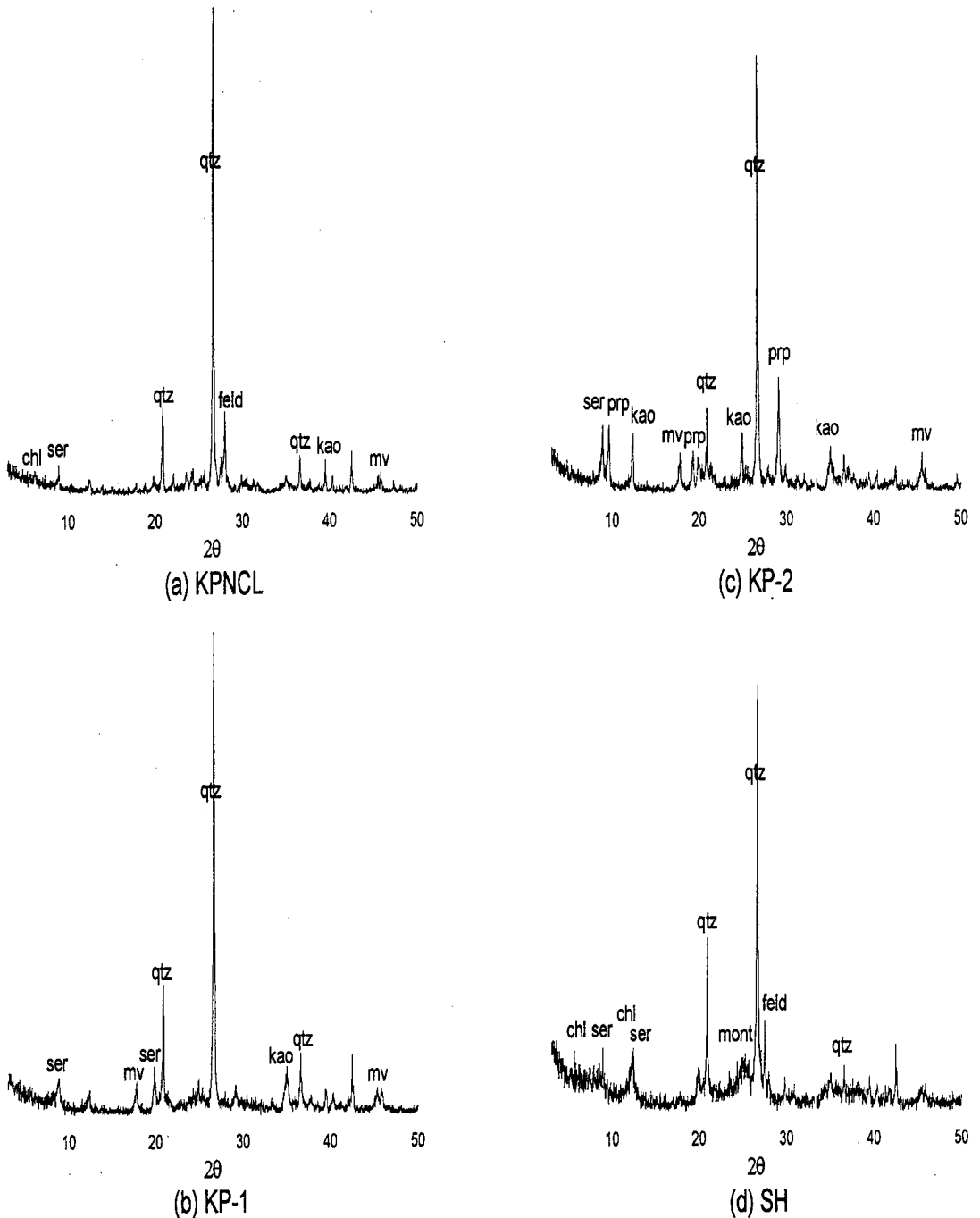


Fig. 1. X-ray powder diffraction patterns of soil samples: (a) KPNCL (clay liner at the Kimpo landfill site), (b) KP-1 (Jinweon mine), (c) KP-2 (Daeseong mine), (d) SH (Gyeongjin mine), (e) YI (Daedeog mine), (f) YJ (Yeosu mine) (qtz; quartz, feld; feldspar, mv; muscovite, kao; kaolinite, chl; chlorite, prp; pyrophyllite, ser; sericite, ill; illite, mont; montmorillonite).

여 조립질 (62.5 μm 이상)과 세립질 (62.5 μm 이하)로 분리하여 조립질은 건조 후 진탕기 (Rotap sieve shaker)로 15분간 체질하여 입도별 무게를 구하고, 세립질은 침

전시킨 후 마그네틱 자동교반기 (stirrer)를 이용하여 대표성을 띌 수 있도록 교란시켜 약 1.5 g을 취하여 확산제 (0.1% Calgon 용액 20 ml)를 넣고 초음파 진동기로 균일

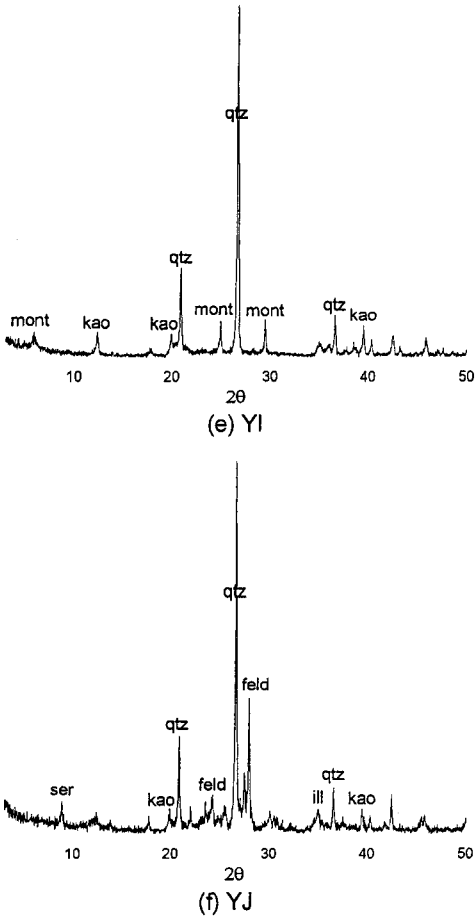


Fig. 1. Continued.

하게 분산시킨 후 자동입도분석기인 Micromeritics사의 Sedigraph 5000D로 분석하였다. 분석결과 SH (64.75%)와 KPNC (93.16%)이 silt와 clay 크기의 입자가 많은 부분을 차지하고 있었고 YI를 제외한 5개 시료 모두 Daniel (1993)이 제시한 차수벽 기준인 silt와 clay 20~30 (%) 이상, gravel 30 (%) 이하를 만족하고 있었다 (Table 2, Fig. 2). 또한 균등계수 (C_u , uniformity coefficient: D_{60}/D_{10})를 구하여 본 결과 YI를 제외한 5개 시료가 C_u 가 10 이상의 값을 보임으로써 입도분포가 좋은 것으로 나타났다 (Table 2). YI의 입도분포가 좋지 못한 이유는 흡착능력의 평가를 위한 비교대상 시료로서 광물을 분쇄하여 만든 시료이기 때문이다. SH와 KPNC는 입자크기가 상대적으로 작기 문에 중금속 등의 오염물질의 흡착능력이 좋을 것으로 예상된다.

입도분석 결과를 이용하여 Hazen (1911)과 Harleman 등 (1963)이 제시한 다음 방법들에 의하여 수리전도

Table 2. The results of size analysis and Atterberg limit test.

	KPNC	KP-1	KP-2	SH	YI	YJ
Sand (%)	6.84	64.53	66.55	35.24	85.06	46.63
Silt (%)	73.13	17.64	19.63	43.02	10.39	42.23
Clay (%)	20.03	17.83	13.82	21.73	4.55	11.14
$U_c (D_{60}/D_{10})$	46.1	442.9	96.6	17.9	5.2	26.9
L.L. (%)	38.9	27.5	25.3	49.4	40.9	34.1
P.L. (%)	24.4	15.4	14.0	25.0	18.3	28.4
P.I. (%)	14.5	12.1	11.3	24.4	22.6	5.7

도를 예측하였다.

$$K_H = C(D_{10})^2 \quad (1)$$

K_H : hydraulic conductivity estimated by Hazen method (cm/sec)

C : constant (very fine sand, poorly sorted: 40~80)

D_{10} : effective grain size (cm)

$$k = (6.54 \times 10^{-4})(D_{10})^2 \quad (2)$$

k: permeability estimated by Harleman *et al.* (cm²)

D_{10} : effective grain size (cm)

Hazen method에 의한 수리전도도의 예측은 모래질이 우세한 토양에서 유효한데 (Fetter, 1994), 입도분석결과 KPNC를 제외한 5개 시료가 모래질이 우세하여 타당성이 있는 것으로 판단되며, Hazen이 제시한 방법에 의하여 계산된 수리전도도는 Harleman 등이 제시한 방법에 의해 계산된 값과 일치한다. KPNC, YJ의 경우 Daniel (1993)의 기준을 만족하고 있었고 나머지 4개 시료도 기준에 거의 근접하고 있으며 Czurda (1993)가 제시한 수리전도도의 기준은 모두 만족하였다. KPNC의 경우 장연수 등 (1993)에 의해 계산된 값 10^{-6} (cm/sec)과는 약간의 차이가 있으나 압밀시험결과에서 계산된 값 (10^{-7} ~ 10^{-9} cm/sec)과는 일치하였다.

입도분석과 Atterberg 한계 시험 결과로 Shepard (1954)의 방법에 따른 지질학적 분류 (Fig. 3)와 USC (Unified Soil Classification)와 AASHTO의 분류방법을 따른 공학적 분류를 실시하였다 (Table 3). Shepard의 방법에 의한 지질학적 분류 결과 KPNC는 clayey silt였으며 KP-1은 clayey sand, KP-2와 YJ는 silty sand, SH는 sand-silt-clay, YI는 sand 등으로 구분되었다. USC에 의해 분류한 결과, 흡착능력의 평가를 위한 비교대상 시료인 YI를 제외하고 SC, CL로 분류된 KPNC, KP-1, KP-2, SH는 다짐 특성이 좋고 팽창력이 높지 않아 차수벽 물질로의 유용성이 있으나, YJ의 경우 ML,

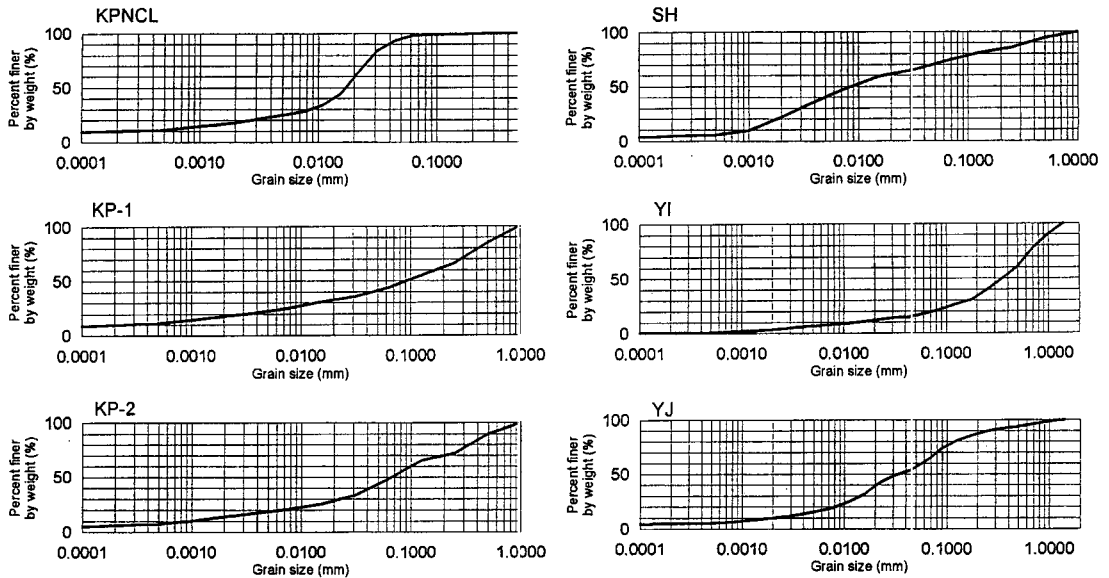


Fig. 2. Grain size distribution curves of soil samples: (a) KP-NCL (clay liner at the Kimpo landfill site), (b) KP-1 (Jinweon mine), (c) KP-2 (Daeseong mine), (d) SH (Gyeongin mine), (e) YI (Daedeog mine), (f) YJ (Yeoju mine).

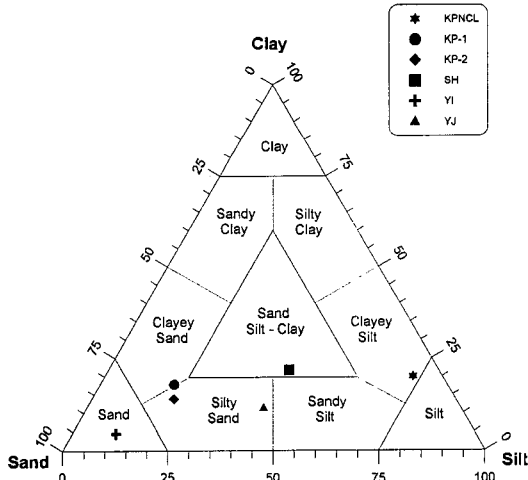


Fig. 3. Textural classification triangle of soil samples (After Shepard, 1954): (a) KP-NCL (clay liner at the Kimpo landfill site), (b) KP-1 (Jinweon mine), (c) KP-2 (Daeseong mine), (d) SH (Gyeongin mine), (e) YI (Daedeog mine), (f) YJ (Yeoju mine) (sand: >0.063 mm, silt: 0.002-0.063 mm, clay: <0.002 mm).

AASHTO의 분류에서는 A-4로 분류되어 치수벽 물질로는 부적합하였다.

지연 능력 평가

각 점토시료들의 지연능력의 평가는 회분식 실험으로

Table 3. Engineering classifications and hydraulic conductivity calculated by size analysis.

	KP-NCL	KP-1	KP-2	SH	YI	YJ
UCS	CL	SC	SC	CL	SC	ML
AASHTO	A-6	A-2-6	A-2-6	A-7-6	A-2-7	A-4
K (cm/s)*	1.4~2.8 × 10 ⁻⁹	2.0~3.9 × 10 ⁻⁷	1.4~2.9 × 10 ⁻⁶	1.6~3.2 × 10 ⁻⁶	1.4~2.8 × 10 ⁻⁶	3.9~7.9 × 10 ⁻⁸
K (cm/s)**	2.28 × 10 ⁻⁹	3.20 × 10 ⁻⁷	2.36 × 10 ⁻⁶	2.62 × 10 ⁻⁶	2.29 × 10 ⁻⁶	6.45 × 10 ⁻⁸

* Estimated value based on the work of Hazen (1911),

** Estimated value based on the work of Harleman *et al.* (1963).

실시하였다. 회분식 실험은 주상 실험 (column test)와 더불어 분배계수와 지연계수 등의 수리지질 상수를 구하기 위해 사용되는 실내 실험이며, 주상 실험에 비하여 실험 시간이 짧고 경제적인 자료를 얻을 수 있는 장점이 있으나, 실제 지질매체의 흡착능력의 모사가 떨어지는 단점이 있다 (Freeze, Cherry, 1979). 실제의 지질매체의 흡착능력을 모사하는 실험에 사용되는 용액은 현장에 맞게 만들어야 하지만 본 연구의 실험에서는 각 점토시료들의 지연능력의 상대적 평가를 하는데 촛점을 맞추어 증류수를 사용하였으며 Cd, Cu, Pb, Zn 등의 4개 중금속 원소들의 혼합 용액을 만들어서 ASTM D4319-83 (ASTM, 1991)에 따라 실험을 실시하였다. 실험은 -10 mesh 시료 1 g을 Cd, Cu, Pb, Zn의 혼합 용액 10 ml와 혼탕해서 25±1°C에서 48시간 동안 자동교란기로 교란시켜 충분히 평형상태에 도달한 다음 원심분리기로 용액을 분리시켜

Table 4. Parameters from Freundlich adsorption isotherms of Cd, Cu, Pb and Zn.

a) at pH 7.5

	Coefficient	KPNCL	KP-1	KP-2	SH	YI	YJ
Cd	logK _f	1.02	0.16	-0.52	0.32	0.94	0.68
	N	0.52	0.57	0.69	0.62	0.61	0.48
Cu	logK _f	2.55	0.67	0.10	0.95	2.47	0.91
	N	0.37	0.39	0.50	0.52	0.53	0.45
Pb	logK _f	2.65	0.38	-0.16	1.20	0.84	0.45
	N	1.22	0.60	1.03	2.09	1.92	0.74
Zn	logK _f	1.56	0.20	-0.58	0.32	1.40	0.81
	N	0.39	0.62	0.80	0.70	0.43	0.55

b) at pH 5.5

	Coefficient	KPNCL	KP-1	KP-2	SH	YI	YJ
Cd	logK _f	0.88	-0.02	-0.79	0.36	0.80	0.63
	N	0.49	0.64	0.80	0.59	0.55	0.51
Cu	logK _f	2.40	0.60	0.95	0.99	2.17	0.87
	N	0.36	0.53	0.68	0.49	0.50	0.48
Pb	logK _f	2.56	1.52	2.12	0.60	0.29	-0.01
	N	0.60	0.96	0.61	0.65	0.82	0.80
Zn	logK _f	1.45	-0.03	-1.04	-0.06	1.17	0.70
	N	0.44	0.67	0.88	0.72	0.51	0.56

AAS로 분석하였다. 회분식 실험에 사용될 혼합 용액은 초기농도를 1, 2, 5, 20, 50, 100, 200 mg/l로 하였으며 HCl과 NaOH를 이용하여 pH를 5.5±0.1와 7.5±0.1로 조절하여 pH에 의한 흡착능력의 변화를 또한 관찰하였다. 시료와 용액의 교란 후 약 1시간이면 평형상태에 이른다는 앞선 연구를 채택하여 (Newman *et al.*, 1992) 평형상태 시간을 구하는 예비 실험은 실시하지 않았으며 매시료에는 공시료 (blank)와 중복시료 (duplicate)를 사용하였다. 최적의 등온흡착모델 (adsorption isotherm model)을 선정하기 위하여 선형, Freundlich, Langmuir 등온흡착식을 비교하였으며 가장 좋은 판별계수 (determination coefficient)를 나타낸 Freundlich 등온흡착식으로 6개 시료의 흡착능력을 평가하였다 (Table 4, Fig. 4).

각 원소에 대한 시료별 흡착 능력은 pH 5.5와 pH 7.5에서 Cd, Cu, Pb, Zn 네 원소 모두 KPNCL이 가장 높은 K_f값을 보임으로써 흡착능력이 가장 뛰어난 것을 알 수 있었으며, Pb를 제외하면 흡착능력 비교대상 시료인 YI가 그 다음의 흡착능력을 가지고 있었다. 각 원소마다 약간의 차이는 있으나 KPNCL>YI>YJ>SH>KP-1>KP-2의 순으로 흡착능력을 갖고 있었다. 일반적으로 입자의 크기

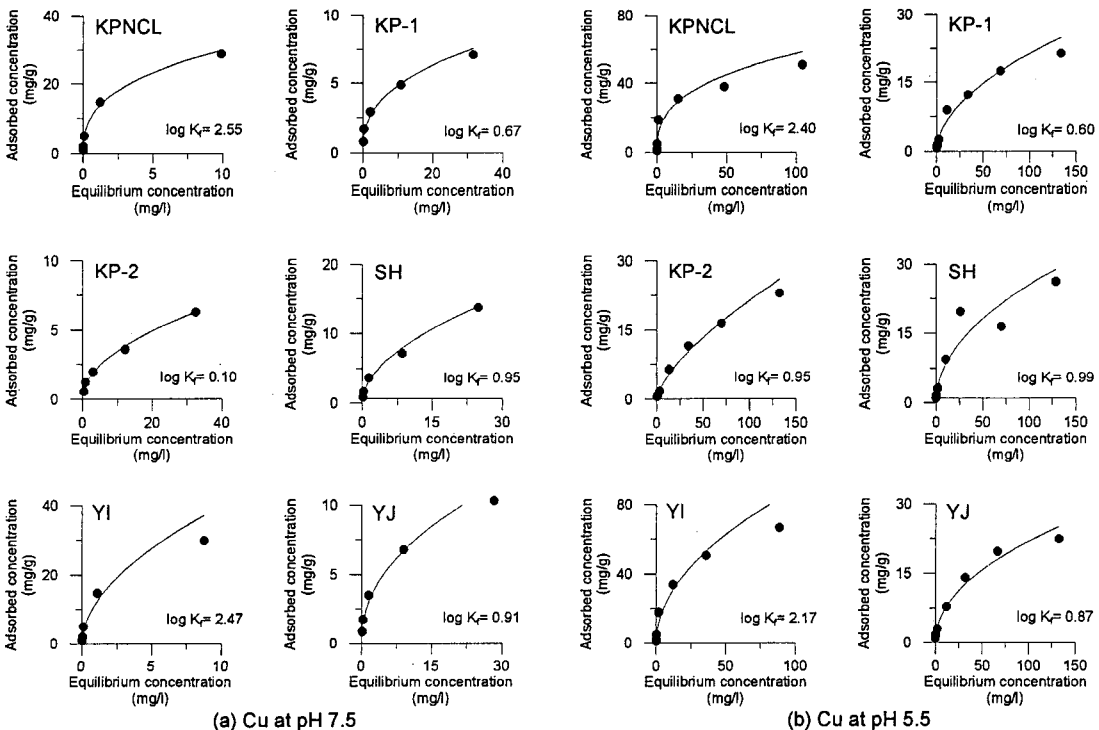


Fig. 4. Freundlich adsorption isotherms of Cu: (a) KPNCL (clay liner at the Kimpo landfill site), (b) KP-1 (Jinweon mine), (c) KP-2 (Daeseong mine), (d) SH (Gyeongin mine), (e) YI (Daedcog mine), (f) YJ (Yeoju mine).

Table 5. Overall evaluation of soil samples for liner material.

Criteria		KNPCL	KP-1	KP-2	SH	YI	YJ
Material suitability (1)	Plasticity index > 7~10	○	○	○	○	○	×
	Percentage finer > 20~30	○	○	○	○	×	○
	Percentage gravel < 30	○	○	○	○	○	○
	Maximum particle size (mm) 25~50	○	○	○	○	○	○
Acceptability in earthworks	Hydraulic conductivity (cm/sec)	<10 ⁻⁷ (1)	○	×	×	×	×
		<10 ⁻⁶ (2)	○	○	×	×	×
Attenuation capacity	Cation exchange capacity >10 (meq/100 g) (3)	○	○	○	○	○	○

(1) Daniel (1993), (2) Czurda (1993), (3) Rowe *et al.* (1995), (○); fit to criteria, (×); unfit to criteria.

가 작을수록 흡착능력이 높는데, KPNCL이 가장 높은 흡착능력을 보이는 것은 -10 mesh의 시료중 실트와 점토의 양이 많은 것에서 기인한다 (Horowitz, 1991). YI는 양이온교환용량이 가장 높았음에도 불구하고 흡착능력이 가장 높지 않은 것은 광물을 분쇄하여 만든 시료이기 때문에 입자의 크기가 크고 고르지 못했기 때문이다. 또한 YJ, SH가 KP-1, KP-2에 비하여 비슷한 양이온교환용량을 가졌음에도 불구하고 흡착능력이 좋은 것은 일라이트 등의 흡착능력이 좋은 점토광물 때문이다.

각 시료에 대한 원소별 흡착 능력은 pH 5.5와 7.5 모두에서 KPNCL, KP-1, KP-2, SH는 Pb>Cu>Zn>Cd의 순으로 흡착정도가 나타났으며 YI, YJ에서는 Cu>Zn>Cd의 흡착 경향은 나타났다. YI, YJ에서 Pb의 경우 가장 낮은 흡착정도를 보이는 것은 혼합 용액의 pH 조절 중에 발생된 실험상의 오차로 판단된다. 이러한 흡착 경향은 2가의 양이온이라 할지라도 이온반경이 클수록 (Pb (0.12 nm)>Cd (0.097 nm)>Zn (0.074 nm)>Cu (0.072 nm)) 지질매체와의 흡착 면적이 커져서 흡착이 더 잘 일어나기 때문이며, Cu의 경우 유기물질에 의한 흡착 능력이 네원소중 가장 우세하기 때문에 Zn나 Pb에 비하여 흡착정도가 높은 것으로 생각된다. Yong 등 (1992)은 일라이트나 몬토릴로나이트와 같은 점토광물에 대하여 pH에 따른 Cd, Cu, Pt, Zn의 흡착정도를 실험하여 pH가 3 이상일 경우 Pb>Cu>Zn>Cd 순으로 흡착됨을 밝혔는데 본 실험 결과와 잘 일치한다. 또한 시료별로 pH의 변화에 대한 흡착능력을 살펴보면 Cd, Cu, Pb, Zn 모두 pH가 5.5에서 7.5로 증가하면서 K_d값이 증가하는 경향을 보이는데 이는 pH가 증가함에 따라 점토광물 표면의 음전하 (negative charge)가 증가하기 때문이다.

유용성 평가와 다짐 시험

Murray 등 (1996)은 차수벽 물질로의 적합성 (mate-

rial suitability)과 현장에서의 채택성 (acceptability in earthworks)으로 나누어서 차수벽 물질의 기준을 마련하였는데 차수벽 물질로의 적합성은 영국 NRA의 기준 (Clark and Davies, 1996)을, 현장에서의 채택성은 다짐정도, 수리전도도 등으로 설정하였다. 이 연구에서는 차수벽 물질로의 적합성은 Daniel (1993)의 기준을, 현장에서의 채택성은 Daniel (1993)과 Czurda (1993)의 기준을 사용하여 유용성을 평가하였으며 Rowe (1995) 등이 제시한 기준으로 지연능력을 평가하였다 (Table 5). KPNCL, KP-1, KP-2, SH는 차수벽 물질로의 적합성과 Rowe (1995) 등이 제시한 지연능력의 기준을 만족하고 있었다. 또한 입도 분석에 의하여 예측된 수리전도도로 현장에서의 채택성을 살펴보면 KPNCL은 Daniel (1993)이 제시한 10⁻⁷ (cm/s) 이하의 값을, KP-1은 Czurda (1993)가 제시한 10⁻⁶ (cm/s) 이하의 값을 만족하고 있어 현장 적용 가능성이 있었다. 반면 KP-2, SH의 경우에는 Czurda (1993)가 제시한 10⁻⁶ (cm/s)의 값보다 약 2배 이상 높은 값을 나타내어 상대적으로 현장 적용 가능성이 낮은 것으로 보인다. 그러나 현장에서의 수리전도도는 최적의 함수비와 다짐 정도에 따라 달라지므로 향후 다짐정도와 수리전도도와의 관계에 관한 연구가 필요할 것으로 판단된다. YI와 YJ는 상대적으로 지연능력은 좋으나 차수벽 물질로의 적합성을 만족하지 못하여 유용성은 낮은 것으로 보인다.

차수벽 물질로의 적합성이 있다고 판단되는 KPNCL, KP-1, SH와 KP-2에 다짐시험을 실시하여 최적의 함수비를 구하였다. 다짐시험은 시료채취 양이 많지 않은 관계로 KS F2312의 표준 다짐시험을 실시하지 않고, ASTM STP 479에 따라 Harvard compaction test를 실시하였다. Harvard compaction test는 178N의 spring-load tamper와 62.4 cm³의 mould를 사용하여 시료의 양이 많지 않을 때 사용되는 다짐시험이다 (Head, 1980). 시험 결과 최적의 KPNCL, KP-1, KP-2, SH의 함수비는 각 17%, 13%, 16%, 13%였다.

결 론

점토차수벽으로의 유용성 평가를 위하여 김포매립지의 차수벽 시료를 비롯한 수도권에 분포하는 6개 점토 시료에 대하여 기본 물성, 공학적 분류, 입도 분석, 회분식 실험 및 양이온교환용량 실험 등을 측정하여 차수벽 물질로의 적합성과 현장에서의 채택성을 평가한 결과 KPNCCL, KP-1, KP-2, SH는 차수벽 물질로의 적합성이 있었으며 KPNCCL과 KP-1은 현장에서의 채택성이 있었다.

사 사

이 연구는 과학재단 지정 전략광물자원연구센터의 연구비로 수행되었다.

참고문헌

- 대한광업진흥공사 (1981) 한국의 광상 9호. 비금속편. 770p.
 대한광업진흥공사 (1987) 비금속광물특성조사보고서. 고령토, 납석편. 935p.
 대한광업진흥공사 (1988) 한국의 광상 11호. 비금속편. 1379p.
 오석영, 전효택 (1996) 폐기물 매립지 주변의 지하수 오염과 오염물질의 자연 특성. 지하수환경, 3권, p. 37-49.
 장연수, 정하익, 이광열 (1993) 폐기물 매립지의 현황과 침출수의 이동성 분석. 지하수와 환경 Workshop, 서울대학교 자연과학대학 부설 광물연구소, 대한지질공학회, p. 101-131.
 ASTM (1991) Annual book of ASTM standards. Section 4, v. 04.08, 1180p.
 Ball, D.F. (1964) Loss-on-ignition as an estimate of organic matter and organic carbon in non-calcareous soil. J. Soil Sci., v. 15, p. 84-92.
 Carter, M.R. (1993) Soil sampling and methods of analysis. Lewis Pub., 823p.
 Clark, R.G. and Davies, G. (1996) The construction of clay liners for landfills. In Bentley, S.P. (ed.) Engineering geology of waste disposal. Geological Society Engineering Geology Special Publication No. 11, p. 171-176.
 Czurda, K.A. (1993) The triple multiminerall barrier for hazardous waste encapsulation. Eng. Geol., v. 34, p. 205-209.
 Daniel, D.E. (1993) Clay liners. In Daniel D.E. (ed.) Geotechnical practice for waste disposal. Chapman & Hall, p. 137-163.
 Fetter, C.W. (1994) Applied hydrogeology (3rd eds). Macmillan college Pub. Co., 691p.
 Freeze, R.A. and Cherry, J.A. (1979) Groundwater. Prentice-Hall Inc., 604p.

- Harleman, D.R.E., Melhorn, P.E. and Rumer, R.R. (1963) Dispersion-permeability correlation in porous media. J. Hydraul. Div., Amer. Soc., Civil Engrs., v. 89, p. 67-85.
 Hazen, A. (1911) Discussion: Dams and sand foundations. Trans. Amer. Soc. Civil Engrs., v. 73, p. 119.
 Head, K.H. (1980) Manual of soil laboratory testing (v. 1). ELE, 339p.
 Hesse, P.R. (1971) A textbook of soil chemical analysis. John Murry Ltd., 520p.
 Horowitz, A.J. (1991) Sediment-trace element chemistry. Lewis Pub., 136p.
 Karickhoff, S.W. (1984) Organic pollutant sorption in a quatic system. J. of Hydraul. Eng., v. 110, p. 707-735.
 Keller, C.K., Van der Kamp, G. and Cherry, J.A. (1986) Fracture permeability and groundwater flow in clayey till near Saskatoon, Saskatchewan. Canadian Geotech. J., v. 23, p. 229-240.
 Khan, A., Hassett, J.J., Blanwart, W.L., Means, J.C. and Wood, S.G., (1979) Sorption of acetophenone by sediments and soils. Soil Sci., v. 128, p. 297-302.
 McCarty, P.L., Reinhard, M. and Rittmann, B.E. (1981) Trace organics in groundwater. Environ. Sci. Technol., v. 15, p. 40-51.
 Murray, E.J., Rix, D.W. and Humphrey, R.D. (1992) Clay linings to landfill site. Quarterly Journal of Engineering Geology, v. 25, p. 371-376.
 Murray, E.J., Rix, D.W. and Humphrey, R.D. (1996) Evaluation of clays as linings to landfill. In Bentley, S. P. (ed.) Engineering geology of waste disposal, Geological Society Engineering Geology Special Publication No. 11, p. 251-258.
 Newman, B.D., Fuentes, H.R. and Polzer, W.L. (1992) An evaluation of Lithium sorption isotherms and their application to ground-water transport. Groundwater, v. 29, p. 818-824.
 Rowe, R.K., Quigley, R.M. and Booker, J.R. (1995) Clay barrier systems for waste disposal facilities. E&FN SPON, 390p.
 Rump, H.H. and Krist, H. (1988) Laboratory manual for the examination of water, waste water and soil. NCH Pub., 190p.
 Schwarzenbach, R.P. and Westall, J. (1981) Transport of nonpolar organic compounds from surface water to groundwater: laboratory sorption studies. Environ. Sci. Technol., v. 15, p. 1360-1367.
 Shepard, F.P. (1954) Nomenclature based on sand-silt-clay ratios. J. Sediment. Petrol., v. 24, p. 151-158.
 Thornton, I. (1983) Applied environmental geochemistry, Academic Press, 501p.
 Yong, R.N., Mohamed, A.M.O. and Warkentin, B.P. (1992) Principles of contaminant transport in soils. Elsevier, 327p.