大韓環境工學會誌・論文 - Original Paper - 1075～1086. 2008.

산업부산물을 이용한 단층형 매립지 복토시스템 개발을 위한 적용 타당성 평가

김순오・김필주*・유 찬†,**

경상대학교 지구환경과학과 및 기초과학연구소・*경상대학교 환경생명화학과・**경상대학교 지역환경기반공학과

(2008년 9월 1일 접수, 2008년 10월 22일 채택)

Evaluation on Feasibility of Industrial By-products for Development of Mono-Layer Landfill Cover System

Soon-Oh Kim・Pil-Joo Kim*・Chan Yu†,**

Department of Earth and Environmental Sciences and Research Institute of Natural Science, Gyeongsang National University
**Department of Enviro-Biotechnology, Gyeongsang National University*
***Department of Agricultural Engineering, Gyeongsang National University*

ABSTRACT : In order to investigate the applicability and suitability of the industrial by-products to apply mono-layer cover system for non-sanitary landfill sites, 6 different industrial by-products, such as construction waste, bottom ash, gypsum, blast furnace and steel manufacture slags, and stone powder sludge, were evaluated. Various physicochemical and hydrodynamic properties of the industrial by-products were investigated. The environmental safety was monitored using batch and long-term leaching tests as well. In addition, the flexibility of plants was observed by cultivating them in the industrial by-products. The results for physicochemical properties indicate that most of the materials considered appeared to be suitable for landfill cover. Particularly, the concentration levels of hazardous elements regulated by the Korean Law for Waste Management did not exceed the regulatory limits in all target materials. In addition, the concentrations of regulated elements for the Korean Soil Conservation Law were examined below the regulatory limits in most of materials considered, except for the stone powder sludge. The results of batch and long-term experiments showed bottom ash and construction waste were the most suitable materials for landfill cover among the industrial by-products considered. The results of plant studies indicate that the bottom ash among industrial by-products considered was most effective in developing vegetation on landfill site, showing fast germination and large growth index. At the final covering system made of mixture of soil and bottom ash, the optimum application rate of farmyard manure was observed to be 40-50 Mg/ha.

Key Words : *Non-Sanitary Landfills, Landfill Cover, Mono-Layer Cover System, Industrial By-Products*

요약 : 비위생 매립지의 단층형 복토시스템을 위한 산업부산물의 응용성과 적합성을 평가하기 위하여 건설폐기물, 석탄회, 폐석고(인산석고), 슬래그(고로, 제강)와 석분슬러지를 대상으로 연구하였다. 먼저 대상 산업부산물들의 다양한 물리화학적, 수리역학적 특성들이 조사되었다. 그리고 배치실험과 장기간 용출시험을 통하여 이들 산업부산물들의 환경안정성도 검토하였다. 뿐만 아니라, 대상 산업부산물들에 식물을 조성해 봄으로써 식생의 적응성도 평가해 보았다. 산업부산물들의 물리화학적 특성 분석결과, 연구대상인 산업부산물 대부분이 매립지 복토재로 적합한 것으로 나타났다. 특히 모든 연구대상 산업부산물들에서 폐기물관리법에서 규정한 유해한 무기원소 종들의 농도가 규제치를 초과하지 않은 것으로 조사되었다. 이와 더불어, 석분슬러지만 제외하고 그 외 모든 대상 물질들에서 토양환경보전법에서 규제하는 원소들의 농도가 기준치 이하로 검출되었다. 배치실험과 장기간 용출시험 결과로부터 석탄회와 건설폐기물이 고려한 산업부산물들 중에서 매립지 복토재로서 가장 적합한 것으로 선정되었다. 식물 육종실험 결과, 석탄회가 가장 빠른 발아와 가장 큰 생육지표를 보여서 매립지 복토재로 이용될 경우 식생 조성에서 가장 효과적일 것으로 평가되었다. 일반토사와 석탄회로 혼합된 최종복토시스템에서 최적의 축분퇴비 시비는 헥타르당 40～50톤인 것으로 조사되었다.

주제어 : 비위생 매립지, 매립지 복토층, 단층형 복토시스템, 산업부산물

1. 서 론

우리나라는 2006년 현재 일일 폐기물 발생량은 319,928톤이며 2000년 이후 전체적으로 점진적 증가 추세에 있고, 이중 약 8.0%는 매립처리 되고 있는데 그 중 생활폐기물은 건설 및 사업장 폐기물보다 훨씬 높은 비율(25.8%)로 매립처분되고 있다.[1)] 우리나라에는 이를 위해서 2004년말 기준으로 전국에는 234개의 매립장이 운영 중에 있으며,[2)] 2002년 현재 1,170개 매립지는 사용이 종료되어 관리되고 있다.[3)] 이러한 사용종료 매립장의 대부분은 지역에 소규모로 존재하는 비위생 매립장들이며, 이 매립장들은 2001년 환경부에서 정한 '사용종료 매립지정비지침'에 의해서 환경영향평가가 실시되었거나 실시 중에 있다. 환경영향평가에

† Corresponding author
E-mail: chanyu@gnu.ac.kr
Tel: 055-751-5430 Fax: 055-752-0884

서는 주변환경에 미치는 영향정도에 따라 우선순위가 결정되며, 우선순위에 따라서 사후관리 대상으로 정밀조사가 실시되는데, 전국적으로 사후관리를 위한 정밀조사가 진행중인 곳도 244개소로 나타나고 있다. 정밀조사 결과에 의해서 불량한 매립장에 대해서는 정부가 지자체와 함께 정비와 사후관리를 실시하며, 2005년도에는 생활폐기물처리시설 국고보조사업에서 매립장 혹은 비위생매립지 정비와 관련해 전체 예산의 약 36.9%를 지원한 바 있다.[4] 그러나 이러한 매립시설들은 과거의 피해사례 등에 의한 부정적인 인식으로 설치 대상지역 주민과 시민단체들의 극심한 반대에 부딪혀 정책의 추진이 쉽지 않은 상황이다. 실제로 '88년부터 '03년까지 국고보조사업으로 추진되었던 생활폐기물 처리시설(소각시설, 매립시설, 음식물자원화 시설, 농어촌 폐기물종합처리시설)신설 사업 중에서 총 103건의 님비(민원)발생사례가 보고되었고, 이 중 매립시설 설치에 따른 민원이 56건으로 가장 많았던 것으로 나타나고 있다.[5]

쓰레기 매립장의 최종 복토층은 우수침투를 방지하고, 이와 더불어 폐기물 분해과정에서 발생되는 매립가스 포집시설의 부압확보를 위한 대기의 유입방지, 상부식재 및 매립완료 직후 시행되는 상부중간복토 기능 등 다양하고 종합적인 기능을 가진다. 우리나라의 경우 기존의 매립지 최종복토시스템은 최소한 3개(가스배제층을 제외하는 경우)의 층으로 구성되는 다층구조이다. 이러한 기존 최종 복토공법은 지역적 특성(기후, 지형, 토질특성 등)을 반영하기가 어렵고 시공 또한 어려울 뿐만 아니라, 공사비가 비싸며, 점토의 균열에 의해 우수의 침투가능성이 높고, 습윤/건조와 동결/융해에 대한 내구성이 취약하며, 대형수목과 같은 식생조성이 어렵다. 이러한 문제점들은 실제 현장에서 매립지의 기능 수행측면에서 많은 문제들을 야기하여 미국 등지에서는 그 대안으로서 최종복토시스템을 복토재료로서 일반 흙만을 사용하여 다층이 아닌 한개 층으로 구성하는 단층형 최종복토(mono-layer final cover)시스템을 개발하여 다층 복토(multi-layer cover) 방식의 단점을 상당부분 보완하고 있다.

단층(mono-layer)형 최종복토시스템의 기술적 원리는 복토재료로서는 세립질 흙이 아닌 일반 흙만을 사용하고 최종복토시스템은 지역의 기후, 지형, 토질 특성 등을 반영하여 최적 포설두께를 임의로 결정하는 방식을 취하고 있다. 이렇게 시공된 단층형 최종복토시스템의 표면에는 조기에 식생을 안정화시켜 줌으로써 흙의 수분저류능력(water retention capacity), 그리고 흙 표면과 식물의 잎을 통한 증발산 현상만을 이용하여 복토층 내의 물수지를 조절할 수 있게 되고 최종에는 최종복토층을 통한 우수의 침투를 최소화해 주는 것이다. 일반적으로 강우는 시간적으로 불규칙하게 발생하기 때문에 그 양의 변동폭이 큰 반면, 증발산은 시간적으로 연속 발생하기 때문에 강우에 비하여 그 양적변동이 뚜렷하게 적다. 양자 간에 차이는 흙이 가지는 수분저류 특성을 통하여 시간적으로 조정될 수 있기 때문에 흙-수분 특성은 복토재내의 물수지(water balance)를 조절하는 결정적인 요인이 된다. 따라서 단층형 최종복토시스템은 가능한 최대 수분저류능력을 가지는 재료일수록 효과가 우수하며, 수분저류능력이 낮은 재료의 경우에도 포설두께를 조절해 줌으로써 사용이 가능하다. 이러한 원리로 인해 단층형 최종복토시스템은 구조적으로 단일 재료를 사용하여 단층으로 조성되기 때문에 시공이 간편하고 균열발생이나 침하가 발생하여도 쉽게 순응할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 공사비 측면에서도 기존의 공법들에 비해 훨씬 저렴하면서 효율도 매우 높다. 그러나 무엇보다도 가장 큰 장점은 지역적인 기후, 지형, 토질특성 등을 충분히 반영할 수 있으며, 흙의 보습능력과 자연의 증발산원리를 이용하기 때문에 자연 순응적이고 복토층 표면에 식생 조성시 복토층의 토심이 충분하여 관목류의 도입도 가능하여 주변 생태계와 조화를 이루고 생태계의 복원이 가능한 환경 친환적인 사용종료 매립장의 정비 및 사후관리가 가능하다는 것이다. 또한 표층 식생에 의한 자연정화 기능도 기대할 수 있는데, 따라서 단층형 최종복토시스템은 매립지 최종 복토층 조성뿐만 아니라 지역적 요구에 따라서는 준설매립지 혹은 새로 개발된 산업지역의 환경적 조기 안정화를 위한 복토 및 식생기반 조성을 위하여 활용될 수도 있는 시스템이다.[6]

미국에서 매립지 최종 복토방법은 자원회수 및 보전법(Resource Recovery and Conservation Act)상에 크게 특정 유해폐기물(Subtitle C), 생활쓰레기(Subtitle D)매립장으로 나누어 규정하고 있으며, 우리나라 폐기물관리법상의 규정과 큰 차이가 없다. 그러나 이 법령의 내용이 너무 엄격하고, 그 규정에 맞게 시공하기 위해서는 많은 공사비가 소요되는 반면에 지역적인 특성을 반영하지 못하여 효과면에서는 많은 문제점들이 나타나고 있었다. 그에 따라서 1990년대 후반부터 지역별로 지역 특성에 맞는 최종 복토층의 적용을 원하는 요구가 높아지고 미국 환경청에서도 이에 대해 진지하게 검토하기 시작했다.[6~9] 미국 환경청에서는 1998년부터 ACAP(Alternative Cover Assessment Program)을 수행 중에 있다. 이 프로그램의 주요 목적은 매립장에 적용되고 있는 기존 최종 복토공법을 대체해서 지역의 특성을 반영하여 효율을 증진시키고 공사비를 절감할 수 있는 새로운 최종 복토공법을 개발하는데 있다. 현재 이 프로그램은 DRI (Desert Research Institute)주관으로 PNNL (Pacific Northwest National Laboratory)이 함께 참여하고 있는데, 미국의 전 지역을 대표하는 19개 현장에서 실험이 진행되고 있으며, 여기에는 각 지역의 특성을 감안하여 다양한 형태의 최종 복토공법들이 설치되어 실험 중에 있다. 한편 미국 에너지국에서는 6가지 유형의 최종 복토공법간 현장 비교시험을 실시하였는데, 그 결과 단층복토(evapotranspiration cover) 공법이 타 공법들에 비해 시공비용이 저렴하고 침출유량도 적게 발생하였으며, 내구성이 우수하고 유지관리가 간편한 장점이 있는 것으로 확인된 바 있다.[6] 이와 같은 다양한 국외연구사례에 비해 국내에서는

이러한 연구사례가 아직까지 보고된 바 없다. 다만 불량매립지 복원·관리기술과 최종 복토층 기술 개발을 목적으로 폐기물 매립장 최종 차단층 조성기술 개발과 인공차수재 및 복토재 개발에 대한 연구들이 진행된 바 있다.[10~17] 하지만 위 연구들은 최종복토공법 보다는 바닥 차수층과 중간복토 혹은 최종복토층에 적용할 수 있는 새로운 재료 개발에 있었으므로 새로운 최종 복토공법을 개발하는 연구들은 아니었다. 그 외 불량매립지, 폐광산지역 그리고 산업지역의 조기 안정화 등의 문제해결을 위해 다양한 산업부산물을 대상으로 식생기반 조성방안에 대한 연구를 수행한 바 있다.[18,19]

이에 본 연구는 기존 매립장의 복합형 최종복토공법의 단점을 보완하여 지역별로 산재해 있는 소규모 비위생 불량매립지의 정비 사업에서 활용될 수 있는 기능이 우수하고 경제적인 단층형 최종복토시스템을 개발하는 것을 목적으로 하여 이러한 단층형 복토층에 이용될 수 있는 다양한 산업부산물들의 활용성을 평가하기 위하여 이루어졌다.

2. 재료 및 실험방법

2.1. 실험재료

본 연구에서 단층형 복토층으로의 활용성을 평가하기 위하여 사용된 산업부산물들로는 건설폐기물, 석탄회, 폐석고(인산석고), 슬래그(고로, 제강)와 석분슬러지 등 총 6종이었다. 각 산업부산물들의 생성과정을 간략하게 소개하면, 건설폐기물은 선별과정을 통해 폐기물 금속류와 같은 불순물을 제거한 것이고, 석탄회는 화력발전소에서 발생되는 연소 후 부산물로 연소실 하부에서 수거한 회분이며, 폐석고(인산석고)는 인광석에 황산을 넣어 인산을 만들고 남은 고형물이다. 그리고 고로슬래그는 철광석에서 철을 빼내고 남은 찌꺼기이고 제강슬래그는 철의 순도를 높이기 위한 제련 과정에서 생성되는 찌꺼기를 말한다. 마지막으로 석분슬러지는 화강석재 가공 공정 중 발생되는 폐석을 제외한 미세한 분말형태의 부산물이다. 각각의 산업부산물들은 각 관련기관과 관련업체에서 채취하여 사용하였다.

2.2. 산업부산물들의 이화학적 특성 분석

본 연구에서는 대표적인 물리적 특성들인 입도분포, 체적밀도와 입자밀도, 공극률 등을 측정하였다. 입도분포는 입도분석기(LS230, Beckman-Coulter, 미국)를 이용하여 조사하였고, 체적밀도와 입자밀도, 그리고 공극률 등은 미국농학회와 토양학회가 제시한 각각의 방법들로 측정하였다.[20~22] 기본적인 화학적 특성들로 pH, pH 완충력, 전기전도도(Electrical Conductivity, EC), 산화-환원 전위(Oxidation-Reduction Potential, ORP), 양이온교환능(Cation Exchange Capacity, CEC), 유기물 함량(Loss On Ignition, LOI) 등에 대해서 조사하였다. pH, pH 완충력, 전기전도도(EC), 산화-환원 전위(Eh) 등은 폐기물용출시험에 의한 용출액으로부터 측정하였고, CEC 측정은 Hendershot와 Lalande가 제안한 방법을 따라서 pH를 변화시키면서 평균값들을 조사하였다.[23] pH 완충력은 각 시료 1 g에 증류수 10 mL을 혼합한 후 염산(HCl)과 수산화나트륨(NaOH)를 이용하여 적정하여 수소이온(H^+)과 수산화이온(OH^-)의 첨가량(mol/kg)에 따른 pH변화 고찰하였다. 그리고 유기물 함량을 조사하기 위하여 건조시료를 550℃에서 하루 동안 연소한 후 LOI(강열감량) 값들을 측정하였다.

2.3. 유해 무기성분 함량 분석

각종 화학적 반응 메카니즘을 해석하는데 지시종들이 될 수 있는 중금속 원소들(Cd, Cr^{6+}, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn)과 As, CN 등을 정량 분석하였다. 농도분석을 위하여 적용된 추출방법은 크게 세 가지로 폐기물 용출 공정시험방법, 토양오염공정시험방법, 그리고 왕수추출법이다. 폐기물관리법 시행규칙에 의한 용출시험결과 유해 무기물질 기준 이상의 유해 무기물질을 함유한 경우에는 복토재로서의 활용이 불가능하므로 폐기물 공정시험법에 의한 용출시험을 통해 고려대상인 산업부산물의 환경 위해성 평가를 위해 분석하였다. 그리고 토양오염공정시험법은 실제 매립지 복토재로서 활용될 때 식생 등에 대한 영향을 평가하기 위해서는 일반 토양오염 규정에 대한 적합성이 조사되어야하므로 적용되었다. 마지막으로 연구 대상 산업부산물 내 존재하는 미량 및 희유원소의 총량을 분석함으로써 장기간의 활용에 대한 용출 가능성을 평가하기 위하여 왕수추출법을 적용하여 분석하였다. 각 원소들의 농도는 유도결합플라스마 분광기(Inductively Coupled Plasma, ICP, OPTIMA 5300DV 모델, Perkin Elmer사, 미국)와 흑연로(graphite furnace)를 장착한 원자흡광광도계(AAS-GF, AA-6800 모델, Shimadzu사, 일본)를 사용하였으며, 추출 및 분석 등 모든 과정에서 재현성 확보를 위해 삼중시료(triplicate)를 이용하였다.

2.4. 산업부산물들의 수리역학적 특성 조사

복토재료로 활용 시 침식이나 활성도 등에 대한 저항성이 필수적으로 요구되기 때문에 본 연구에서는 복토재로서 안정한 산업부산물을 선정하기 위해 채취한 산업부산물의 수리역학적 특성을 표준사와 비교하여 알아보았다. 먼저 KSF 규정에 준하여 다짐실험을 실시하였고 그 결과로 얻어진 최대건조밀도와 최적함수비로 공시체를 성형하여 조립질(슬래그류, 석탄회, 건설폐기물)과 세립질(폐석고, 석분슬러지)에 따라 직접전단시험, 삼축압축시험, 정수위 및 변수위 투수시험을 실시하였다.

2.5. 장기간 용출시험

복토재로 산업부산물이 활용될 시 일반토사와의 최대 혼합비율이 50:50이므로 산업부산물이 최대로 투여될 경우의 유해 무기성분의 용출 여부를 평가하였다. 실험에 사용된 일반토사(일반 흙)는 야산 부근 접근성이 좋은 곳을 토취장으로 선정하여 채취하였다. 연구 대상 산업부산물 6종과

일반토사를 50:50으로 혼합한 6개 컬럼과 일반토사만 사용하는 대조실험 컬럼 1개, 중복실험 1개 등 총 8개 컬럼을 운영하였다. 컬럼은 유리재질로 3 cm(Φ)×70 cm(L) 크기였으며, 산업부산물과 일반토사가 혼합된 시료를 컬럼에 50 cm 정도 채우고 3개월간 증류수를 하향으로 주입한 후 유출수의 기본적인 화학적 특성을 측정하였으며, 유해 무기성분의 용출여부를 지속적으로 모니터링 하였다.

2.6. 모형토조실험에 의한 물 수지 분석

여섯 종의 산업부산물들을 앞서 설명한 일반토사와 혼합하여 다짐시험과 수분저류능력을 평가한 결과 석탄회와 건설폐기물의 적용성이 높은 것으로 판단되었기 때문에, 본 실험에서는 이 두 가지 산업부산물에 대하여 집중적으로 실험을 수행하였다. 혼합 복토재료의 수리특성 변화를 알아보기 위해 아크릴로 제작한 토조를 이용하여 실내 실험을 실시하였다. 모형토조는 두께 1 cm의 아크릴 재질의 박스형태로 제작하였으며, 전면부 하단부분과 상단 30 cm 지점에 계폐식 밸브를 설치하여 표면 유출수와 지중 침출수를 채취할 수 있도록 하였다. 또한 후면부의 5 cm, 15 cm, 25 cm 부분에는 함수비 측정을 위해 TDR 탐침 삽입구를 설치하였다. 한편 강우현상을 실내모형토조에서 모사하기 위하여 정량펌프를 이용하여 시간당 5 mm의 인공강우를 48시간까지 지속시켜 유출량이 일정하게 유지될 때까지 매 30분마다 TDR과 수분장력계를 이용하여 체적함수비와 pF값을 측정하였고, 침출수량과 지표유출량을 측정하였다. 이때 강우는 정량펌프에 연결된 비닐호스 끝에 주사기 바늘을 연결하고 '8'자 궤적으로 이동하게 만들어 실제 강우현상과 유사하도록 하였다. 또한 실험에서는 강우강도에 따른 복토재 내 수분이동 특성을 알아보기 위하여 강우강도를 5 mm/hr, 10 mm/hr, 20 mm/hr 그리고 50 mm/hr로 증가시키면서 관찰하였다.

2.7. 복토재 내 식생의 적용성 및 식생조성을 위한 복토재 개선방안 검토

본 실험에서는 산업부산물을 이용해 조성되는 단층 혼합 복토층에 식생의 조기조성을 위한 최종복토지 적정 관리기술을 모색하고자 이루어졌다. 이를 위해 자생식물을 중심으로 선발된 후보식물의 산업부산물에 대한 반응특성을 평가하고 산업부산물로 만들어진 최종복토지 조건에서 조기에 식생을 조성하기 위한 유기물 관리조건을 설정하고자 하였다. 본 실험에서는 6종의 모든 산업부산물들을 대상으로 하지 않고 인산석고, 석탄회, 고로 및 제강 슬래그 등 4종의 산업부산물들만을 대상으로 하여 식생 조성특성 등을 검토하였다. 먼저 최종 복토지에 자생식물을 이용하여 식생을 조성하기 위해 씨(seed)로서 증식이 가능한 4종의 콩과 식물 [비수리(*Lespedeza cuneata*, LC), 안고초(*Arundinella hirta var.*, AHA), 족제비싸리(*Amorpha fruticosa*, AF), 참싸리(*Lespedeza cyrtobotrya*, LCB)]과 2종의 국화과 식물 [쑥(*Artemisia var. orientalis*, AVO), 코스모스(*Cosmos bipinnatus*, CB)] 등 총 6가지를 선발하였다. 이들 자생품종들은 모두 우리나라에서 절개지의 인공복토지 식생조성에 이용되고 있는 일반적인 초종으로 비수리, 쑥, 안고초, 참싸리는 한국을 원산지로하고 있다. 4종의 산업부산물을 법이 허용하는 최대 혼합기준(50%)으로 앞에서 언급한 일반토사와 혼합하여 복토지 토양을 제조하였으며, 선발된 6가지의 자생식물의 종자를 파종하여 일정간격으로 발아율(%), 생장율(%), 생장지수(growth index)(%) 조사하였다. 발아율은 직경 15 cm 크기의 Petri dish에 각 식물의 종자를 20개씩 파종하여 3일째, 6일째, 9일째, 12일째 등 4번 측정하였으며, 12일째 파종된 각 식물체의 총 길이를 측정하여 일반토사만으로 이루어진 대조구(control)에 대한 상대적 생육정도로 생장률(elongation rate)을 조사하였다. 생장지수는 발아율×생장율로 계산하여 각 처리조건에서 각 식물체의 생육적응성을 평가하여 최적 배지조건을 조성하기 위해 선정복토지 배지 내 수분함량은 포장용수량의 70% 수준, 온도는 Incubator에서 30℃로 일정하게 관리하였다. 그리고 최종 복토지가 척박하여 식물의 생육이 어려운 단점을 포괄적으로 해결하기 위해 Table 1에 제시된 축분퇴비를 이용하여 복토재 개선방안을 모색하고자 하였다. 축분퇴비의 효과를 조사하기 위해 12 m×22 m 크기의 포장을 설치하여 매립지의 최종복토지 조건을 모사하기 위해 포장 내 표토를 20 cm 깊이로 걷어내고 일반토사와 산업부산물을 50:50(wt)로 혼합하여 충진하였다. 축분퇴비의 적정 처리량을 산정하기 위해 0, 10, 20, 40, 80톤/ha을 완전혼합 처리하였다. 이후 식물종자를 파종하여 4개월 후에 전량 수거하여 생육특성을 평가하였다.

Table 1. Chemical properties of farmyard manure used for reclamation of mono-layer landfill cover system using industrial by-products

pH (1:5, H_2O)	Concentration (wt%)				C/N ratio
	Organic matter	T-N	P_2O_5	K_2O	
6.8	40.6	1.1	1.9	1.3	24

3. 결과 및 고찰

3.1. 산업부산물들의 이화학적 특성

대표적인 물리적 특성들을 측정한 결과를 Tables 2～4에 정리하였다. 석분슬러지가 가장 입도가 작고 슬래그류와 석탄회가 가장 입도가 큰 것으로 분석되었으며, 석분슬러지만 미사질이고 나머지 산업부산물은 사질로 나타났다. 그리고 석탄회의 경우 공극률이 가장 커서 강우에 의한 침투와 저수성이 가장 클 것으로 판단된다. 건설폐기물, 슬래그류, 석탄회는 모두 사질 입도로 입자분포가 불량한 것으로 조사되었으며 석분슬러지는 미사질 입도 조성으로 입자분포가 양호하고 폐석고의 경우는 미사질을 많이 포함한 사질 입도 조성으로 입자분포가 불량한 것으로 조사되었다. 연구 대상인 모든 산업부산물의 연경도는 비소성

Table 2. Representative physical properties of industrial by-products used

Sample[a]	Average particle size (μm)	Texture[b]	Density (g/cm^3)		Porosity (%)
			Bulk	Particle	
BFS	979±36.4	Sand	1.35±0.02	2.68±0.04	49.80±0.79
SMS	831±36.3	Sand	2.09±0.02	4.16±0.12	49.80±1.35
BA	926±107	Sand	1.05±0.02	2.65±0.10	60.26±0.79
SPS	16.1±5.20	Silt	1.40±0.01	2.24±0.03	37.60±0.98
WG	248±54.7	Sand	1.15±0.01	2.26±0.05	48.95±1.50
CW	731±14.1	Sand	1.29±0.01	2.53±0.03	48.85±0.83

[a]BFS: blast furnace slag, SMS: steel manufacture slag, BA: bottom ash, SPS: stone powder sludge, WG: waste gypsum, CW: construction waste, [b]ASTM: sand(2-0.075 mm), silt(0.075-0.002mm), clay(>0.002 mm)

Table 3. Void ratio and uniformity and curvature coefficients of industrial by-products used

Sample[a]	Void ratio[b]	D_{10}(μm)[c]	D_{30}(μm)[d]	D_{40}(μm)[e]	Coefficient	
					Uniformity	Curvature
BFS	0.99	464.5	720.4	1,090	2.35	1.03
SMS	0.99	259.5	501.0	922.5	3.55	1.05
BA	1.52	275.3	591.0	1,078	3.92	1.18
SPS	0.60	1.451	3.525	8.715	6.01	0.98
WG	0.96	48.19	88.22	133.3	2.77	1.21
CW	0.96	236.2	447.5	773.9	3.28	1.10

[a]BFS: blast furnace slag, SMS: steel manufacture slag, BA: bottom ash, SPS: stone powder sludge, WG: waste gypsum, CW: construction waste, [b]calculated by each porosity in Table 2 using the equation of void ratio = porosity/(1-porosity), [c]D_{10}: the effective particle size corresponding to the 10% line on the curve of particle size distribution, [d]D_{30}: the particle size corresponding to the 30% line on the curve of particle size distribution, [e]D_{60}: the particle size corresponding to the 60% line on the curve of particle size distribution

Table 4. Particle size distribution and consistency of industrial by-products used

Sample[a]	Particle size distribution(%)			USCS[b]	Atterberg limit (%)	
	Sand	Silt	Clay		Liquid	Plastic
BFS	99.7±2.66	0.2±0.03	0.1±0.01	SP	N.P.[c]	N.P.[c]
SMS	97.6±4.63	2.1±0.39	0.3±0.07	SP	N.P.[c]	N.P.[c]
BA	99.4±7.38	0.7±0.08	0.1±0.02	SP	N.P.[c]	N.P.[c]
SPS	2.4±0.09	82.4±1.99	15.3±2.22	ML	N.P.[c]	N.P.[c]
WG	73.8±4.04	24.3±3.82	2.0±0.52	SM	N.P.[c]	N.P.[c]
CW	98.6±2.24	1.2±0.17	0.3±0.03	SP	N.P.[c]	N.P.[c]

[a]BFS: blast furnace slag, SMS: steel manufacture slag, BA: bottom ash, SPS: stone powder sludge, WG: waste gypsum, CW: construction waste, [b]United Soil Classification System, [c]non plastic

(non-plastic)으로 조사되어 강우에 의한 함수량에 변화에 따라서 수축되거나 팽창되지 않을 것으로 판단된다. 일반 토사의 주요한 특성도 조사되었는데 결과를 요약하면 pH는 6.59, 체적밀도는 2.54, 토성은 USCS 분류법으로 SW, 최대건조단위밀도는 1.81, 유기물함량은 16%이었다.

Table 5. Chemical properties of industrial by-products used

Sample[a]	pH	EC (μS/cm)	Eh (mV)	CEC ($cmol_c$/kg)	LOI	
					g/kg	%
BFS	9.2±0.03	337±2.9	-(178±1.0)	83.2±14.29	15.0±3.46	1.5±0.35
SMS	12.4±0.01	7,743±195	-(359±3.6)	783±30.7	16.3±2.52	1.6±0.25
BA	8.9±0.04	369±5.5	-(156±2.0)	176±24.2	50.0±6.24	5.0±0.62
SPS	9.6±0.02	114±10.4	-(178±2.7)	81.2±32.96	10.3±1.53	1.0±0.15
WG	3.1±0.02	3,370±100	204±0.9	9,945±352	9.7±2.52	1.0±0.25
CW	11.0±0.02	983±40	-(276±4.3)	427±47.6	18.7±2.89	1.9±0.29

[a]BFS: blast furnace slag, SMS: steel manufacture slag, BA: bottom ash, SPS: stone powder sludge, WG: waste gypsum, CW: construction waste

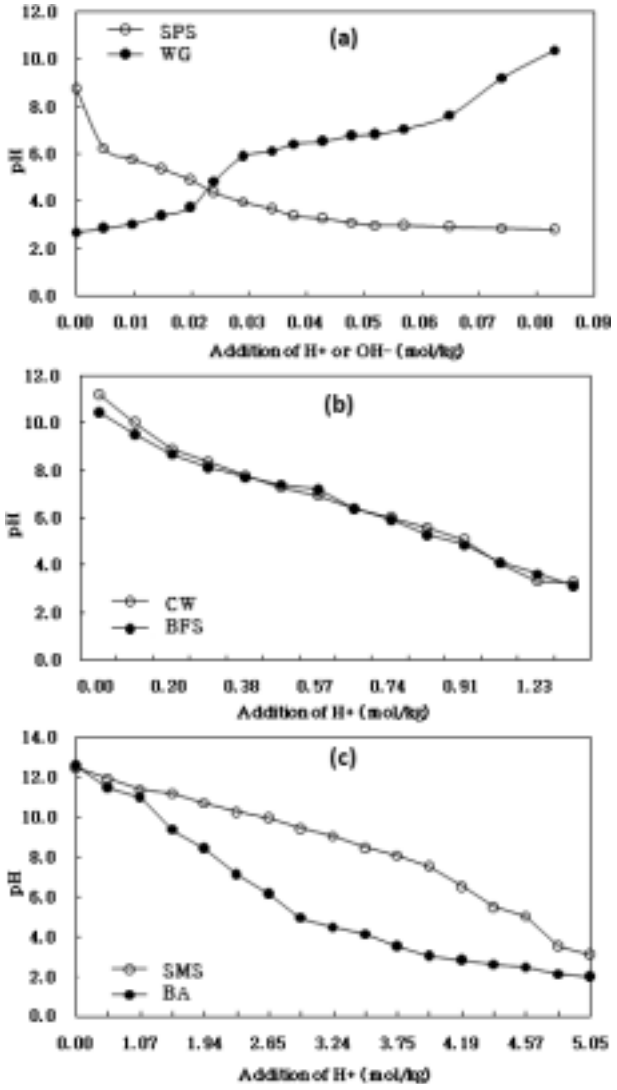

Fig. 1. pH buffering capacities of (a) stone powder sludge (SPS) and waste gypsum (WG), (b) construction waste (CW) and blast furnace slug (BFS), and (c) steel manufacture slag (SMS) and bottom ash (BA).

기본적인 화학적 특성들을 측정한 결과를 Table 5에 정리하였다. pH 측정결과, 폐석고(pH 3.1), 건설폐기물(pH 11.0), 제강슬래그(pH 12.4) 등은 산성 및 알칼리성으로 복토재로

활용될 경우 식생조성에 주의해야 할 것으로 판단되며, 그 외 물질들은 약알칼리성을 보였다. 폐기물 용출시험에 의해서 얻어진 용출액의 전기전도도(EC) 값들을 분석한 결과, 제강슬래그(7,743 μS/cm), 폐석고(3,370 μS/cm) 등이 전기전도도가 매우 높게 나타났다. pH 완충력 측정결과를 Fig. 1에 나타내었다. 폐석고의 경우 Table 5에 나타난 결과에서 보듯이 초기 pH 3.1로 산성이므로 0.1M NaOH로 적정하였고, 그 외 나머지 시료들은 초기 pH가 9～12로 염기성을 띠므로 0.1 M 또는 1 M의 HCl을 이용하여 적정하였다. pH 완충력은 복토재로 활용되었을 때 외부의 영향에 의하여 pH 등이 변화할 때 그에 대한 저항성을 나타낸 것으로 완충력이 너무 낮을 경우 복토재로 활용될 때 주의가 요망된다. 조사된 pH 완충력 크기는 제강슬래그> 석탄회>건설폐기물 ≈고로슬래그>석분슬러지 ≈폐석고의 순으로 나타났다. 양이온 교환능(CEC, cmolc/kg)은 흡착능을 지시하는 인자로서 식생을 위한 양분 보유능을 평가하는데도 이용될 수 있는데 측정결과, 폐석고(9,946±352) > 제강슬래그(783±31) > 건설폐기물(556±40) > 석탄회(176±24) > 고로슬래그(83±14) ≈ 석분슬러지(81±13) 순으로 CEC가 높은 것으로 나타났다. 폐석고는 인광석을 처리한 후 남은 찌꺼기로서 인산의 농도가 높기 때문에 고농도로 존재하는 인산과 CEC 측정을 위하여 사용한 Ca가 반응하여 용해도가 매우 낮은 $Ca_3(PO_4)_2$ ($Ksp = 1.3\times10^{-32}$)와 같은 인산칼슘이 폐석고 표면에 침전되어 형성됨으로써 CEC가 높게 나타난 것으로 판단된다. 그리고 슬래그류와 석탄회, 건설폐기물의 CEC의 원인은 본 논문에서는 제시하지 않은 XRD 분석결과로부터 확인할 수 있었는데 적철석, 자철석, wuestite 등과 같은 철 산화물에 의한 것으로 사료된다. 유기물 함량은 석탄회를 제외한 대부분의 시료에서 매우 낮게 측정되어져 식생조성 시 개량을 위해 유기물 투여가 고려되어야 할 것으로 판단된다.

3.2. 유해 무기성분 함량

폐기물관리법 시행규칙에 의한 용출시험 후 용출액 내 유해 무기물질 함량을 Table 6에 정리하였다. 폐기물 용출시험 분석결과, 모든 연구대상 시료에서 폐기물관리법에서 규정한 유해 무기물질 규제농도 이하로 측정되어서 복토재로서의 활용 시 특별한 문제가 없을 것으로 평가되었다. 토양오염공정시험 분석결과를 살펴보면, 대부분의 항목들이 토양오염우려기준 이하로 측정되었으나 석분슬러지의 경우 Cu가 우려기준을 초과하여 나타났으나 그 초과농도가 그리 높지 않아서 일반토사와 혼합하여 복토재로 이용할 시 큰 문제는 없을 것으로 판단된다(Table 7). 왕수분해법에 의한 총농도 분석결과를 요약하면 Cr^{6+}(제강슬래그), Cu(석분슬러지), Fe(폐석고만 제외한 나머지 시료), Mn(석분슬러지와 폐석고를 제외한 나머지 시료) 등이 총농도가 높은 것으로 나타났다(Table 8).

3.3. 장기간 용출시험

산업부산물과 일반토사를 1 : 1로 혼합한 시료를 이용한 장기간 용출 실험을 통한 유출수의 기본 특성과 유해 무기성분의 유출여부를 모니터링하였다. 먼저 pH, EC, 그리고 Eh에 대한 측정결과, 실험 대상 6종의 산업부산물에서 모두 큰 변화 없이 거의 일정한 양상의 값을 보이며, 앞에서 제시한 각 산업부산물들의 기본 물성 및 특성 결과와 유사하게 나타났다. 유출수 내 9개 항목(As, Cd, CN, Cr^{6+}, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn)에 대한 농도 측정결과, Cu를 제외한 8개 항목들의 농도들은 모든 산업부산물에서 모두 검출한계 이하로 나타났다. Cu의 경우 제강 슬래그와 석분슬러지 유출수에서 용출 초기에만 소량(제강 슬래그: 0.10～0.15 mg/L, 석분슬러지: 0.12～0.24 mg/L) 검출되었지만, 이는 폐기물관리법 상 Cu의 규제치인 3 mg/L에 훨씬 못 미치는 수준이며, 또한 용출 초기 이후에는 검출되지 않아

Table 6. Contents of hazardous elements in industrial by-products measured by Korean Standard Method for Waste Leaching

(mg/kg)

Sample[a]	As	Cd	Cr^{6+}	Cu	Hg	Pb	CN	Fe	Mn	Ni	Zn
BFS	N.D.[c]	N.D.	0.05 (0.015)	0.03 (0.001)	N.D.	0.07 (0.020)	N.D.	9.75 (1.105)	0.37 (0.406)	0.02 (0.005)	N.D.
SMS	N.D.	N.D.	0.04 (0.002)	0.01 (0.003)	N.D.	0.07 (0.002)	N.D.	0.83 (0.134)	0.02 (0.005)	0.01 (0.001)	0.01 (0.003)
BA	N.D.	N.D.	0.04 (0.006)	0.15 (0.034)	N.D.	0.12 (0.086)	N.D.	9.13 (0.688)	0.01 (0.005)	0.01 (0.002)	0.22 (0.116)
SPS	N.D.	N.D.	0.03 (0.001)	0.22 (0.006)	N.D.	0.05 (0.003)	N.D.	0.99 (0.850)	0.14 (0.015)	0.02 (0.001)	N.D.
WG	N.D.	0.21 (0.004)	0.34 (0.005)	0.32 (0.078)	N.D.	0.21 (0.012)	N.D.	8.96 (0.197)	0.34 (0.004)	0.21 (0.022)	N.D.
CW	N.D.	N.D.	0.22 (0.038)	0.06 (0.022)	N.D.	0.06 (0.005)	N.D.	0.25 (0.012)	0.53 (0.083)	0.02 (0.006)	0.57 (0.048)
RL[b]	7.50	1.50	7.50	15.00	0.025	15.00	5.00	-	-	-	-

Values in parentheses: standard deviation of triplicates, [a]BFS: blast furnace slag, SMS: steel manufacture slag, BA: bottom ash, SPS: stone powder sludge, WG: waste gypsum, CW: construction waste, [b]RL: regulation limit (mg/kg) calculated from regulated concentrations (mg/L) in leachate multiplied by dilution factor of 5, [c]N.D.: not detected

Table 7. Contents of heavy metals and cyanide in industrial by-products measured by Korean Standard Method for Soil Contamination (mg/kg)

Sample[a]	As	Cd	Cr^{6+}	Cu	Hg	Pb	CN	Fe	Mn	Ni	Zn
BFS	N.D.[c]	0.10 (0.017)	0.12 (0.025)	0.99 (0.037)	N.D.	1.87 (0.146)	N.D.	49.2 (4.81)	31.4 (0.49)	6.93 (0.060)	N.D.
SMS	N.D.	0.09 (0.025)	0.04 (0.001)	0.64 (0.048)	N.D.	1.60 (0.205)	N.D.	1.18 (0.288)	24.4 (4.21)	12.1 (0.09)	150 (11.5)
BA	N.D.	0.13 (0.070)	0.24 (0.022)	0.61 (0.048)	N.D.	2.71 (0.098)	N.D.	42.7 (2.98)	22.7 (1.95)	11.4 (0.35)	8.17 (0.155)
SPS	N.D.	0.06 (0.002)	0.11 (0.003)	72.6 (1.21)	N.D.	11.2 (0.02)	N.D.	258 (7.1)	12.9 (0.35)	22.7 (0.40)	29.2 (0.35)
WG	N.D.	0.34 (0.022)	0.95 (0.027)	0.65 (0.025)	N.D.	2.75 (0.122)	N.D.	39.1 (2.89)	3.38 (0.046)	2.46 (0.907)	1.43 (0.192)
CW	N.D.	0.09 (0.029)	0.32 (0.038)	0.85 (0.192)	N.D.	1.89 (0.057)	N.D.	1.08 (0.100)	9.77 (0.105)	9.35 (1.017)	37.7 (0.51)
RL[b]	6.00	2.00	4.00	50.0	4.00	100	2.00	-	-	40.0	300

Values in parentheses: standard deviation of triplicates, [a]BFS: blast furnace slag, SMS: steel manufacture slag, BA: bottom ash, SPS: stone powder sludge, WG: waste gypsum, CW: construction waste, [b]RL: regulation limit (mg/kg) of soil contamination warning for agricultural area, [c]N.D.: not detected

Table 8. Total concentrations of heavy metals in industrial by-products measured by aqua regia extraction (mg/kg)

Sample[a]	As	Cd	Cr^{6+}	Cu	Hg	Pb	Fe	Mn	Ni	Zn
BFS	7.08 (0.216)	2.99 (0.075)	7.57 (0.413)	5.45 (0.052)	N.D.	10.9 (0.47)	1,382 (128)	150 (3.3)	6.93 (0.060)	N.D.
SMS	N.D.[b]	6.97 (0.051)	165 (12.5)	30.6 (1.67)	N.D.	24.9 (0.45)	58,760 (2,873)	1,056 (20)	12.1 (0.09)	150 (11.5)
BA	N.D.	2.60 (0.061)	14.7 (0.52)	22.7 (0.84)	N.D.	20.1 (0.62)	46,247 (8,755)	477 (25)	11.4 (0.35)	8.17 (0.155)
SPS	N.D.	0.78 (0.005)	3.21 (0.481)	83.9 (1.89)	N.D.	13.8 (1.10)	1,131 (47)	24.6 (1.06)	22.7 (0.40)	29.2 (0.35)
WG	5.64 (0.734)	1.41 (0.045)	3.23 (0.257)	1.95 (0.056)	N.D.	10.7 (1.28)	21.0 (5.21)	5.52 (0.258)	2.46 (0.907)	1.43 (0.192)
CW	4.80 (0.540)	1.30 (0.080)	13.3 (0.25)	14.3 (0.76)	N.D.	17.3 (0.28)	6,311 (95)	80.6 (0.65)	9.35 (1.017)	37.7 (0.51)

Values in parentheses: standard deviation of triplicates, [a]BFS: blast furnace slag, SMS: steel manufacture slag, BA: bottom ash, SPS: stone powder sludge, WG: waste gypsum, CW: construction waste, [b]N.D.: not detected

환경적으로 유해한 영향은 없는 것으로 평가되었다. 장기간의 용출 실험 결과 대부분의 연구대상 산업부산물의 기본 특성들은 일정하게 유지되는 것으로 조사되었고, 본 산업부산물들이 실제 매립지 복토재로 사용될 시 환경적으로 유해한 어떠한 영향도 미치지 않을 것으로 판단되었다.

3.4. 산업부산물들의 수리역학적 특성

본 연구에 사용된 산업부산물들의 수리역학적 특성을 분석하여 그 결과를 Table 9에 정리하였다. 다짐시험 결과는 산업부산물 중 슬래그의 최대건조단위중량이 가장 높은 것으로 나타났으며, 석탄회와 폐석고의 최대건조단위중량은 큰 차이가 나지 않는 것으로 나타났다. 특히 석탄회와 폐석고의 경우에는 다짐시험 시 높은 함수비로 인하여 작업에 어려움을 겪었으며, 낮은 건조단위중량으로 인하여 그 자체를 토공재료로 사용하기에는 어려움이 있을 것으로 판단되었다. 투수시험 결과 석분슬러지와 폐석고가 10^{-5} cm/sec으로 투수성이 가장 낮은 것으로 나타났고, 건설폐기물과 제강슬래그 10^{-4} cm/sec, 고로슬래그 10^{-3} cm/sec, 석탄회 10^{-2} cm/sec로 조사되었으며, 석탄회는 표준사보다도 투수계수가 2.2배 정도 큰 것으로 측정되었고, 고로슬래그는 표준사의 800배, 나머지 시료는 약 1,000배 정도 투수성이 작은 것으로 나타났다. 대부분 산업부산물들의 강도특성은 일반 흙의 경우와 유사하거나 혹은 우수한 것으로 나타나서 복토재 활용 시 복토층의 안정성 확보에 유리할 것으로 판단되었다. 특히, 슬래그류의 강도특성은 매우 우수한 것으로 나타났으며, 석탄회는 밀도가 낮아 복토층 사용 시 하부 침하예방에 효과적일 것으로 판단되었다. 그리고 일반토사와 산업부산물 혼합 시 적정 배합비 산정을 위하여 다짐 및 수리특성 분석을 표준다짐(A-다짐) 방법으로 실시하였다. 일반토사와 산업부산물의 혼합비를 100:0, 80:20, 65:35, 50:50으로 배합하여 다짐에너지를 표준다짐 기준으로 낙하횟수 25, 20, 15, 10, 5회일 때 최적함수비와

Table 9. Hydrodynamic properties of industrial by-products used

Sample[a]	Compaction Characteristics		Hydraulic conductivity (cm/sec)	Ultimate shear strength		Residual shear strength	
	Max. dry density (g/m^3)	Opt. water content[b] (%)		Adhesive strength (kg/cm^2)	Internal friction angle(°)	Adhesive strength (kg/cm^2)	Internal friction angle(°)
SS	1.61	16.2	1.59×10^{-2}	-	-	-	-
BFS	2.09	11.9	2.19×10^{-3}	0.88	25.43	0.00	15.47
SMS	2.48	11.8	1.49×10^{-4}	0.26	18.42	0.00	16.27
BA	1.17	30.7	3.53×10^{-2}	0.69	30.49	0.00	18.37
SPS	1.06	31.0	7.90×10^{-5}	4.30	0.00	-	-
WG	1.12	52.5	1.41×10^{-5}	2.50	0.00	-	-
CW	1.71	14.7	3.25×10^{-4}	0.23	17.6	0.18	14.43

[a]SS: standard sand, BFS: blast furnace slag, SMS: steel manufacture slag, BA: bottom ash, SPS: stone powder sludge, WG: waste gypsum, CW: construction waste, [b]water content to maximize the density or to attain the maximum packing

최대 건조단위중량을 측정한 결과, 석탄회를 제외한 다른 산업부산물들은 일반토사의 거동과 유사하게 나타났으며, 석탄회는 혼합율 20%, 35%에서 다짐에너지 변화에 따른 최대 건조단위중량의 감소가 급격하지 않은 것으로 조사되어 현장 시공조건에 따른 영향이 작을 것으로 판단되었다.

3.5. 모형토조실험에 의한 물 수지 분석 결과

인공강우를 통해 혼합 복토재 내 수리특성을 조사하였으며, 비교를 위하여 일반토사만 사용한 것과 주문진 표준사를 대조구(control)로 사용하여 실험을 진행하였다. 강우강도 5 mm/hr인 경우에 TDR로 측정한 대상 시료별 평균 체적함수비를 분석하였을 때 강우가 지속됨에 따라 일반토사(100%)와 일반토사(50%):건설폐기물(50%)의 체적함수비가 20% 부근으로 일정하게 유지되는 것으로 나타났으며, 표준사의 경우에는 28% 수준으로 유지되는 것으로 조사되었다. 그러나 석탄회를 혼합한 경우에는 40%정도로 유지되어 수분 함유량이 매우 높은 것으로 나타났다. 또한 실험기간 동안 측정한 수분포텐셜(pF)의 평균값과 TDR로 측정한 평균 체적함수비와 관계를 분석한 결과, 일반토사(100%), 표준사, 그리고 일반토사(50%):건설폐기물(50%)의 경우에는 미세한 체적함수비의 변화에도 급격한 수분포텐셜값의 변화가 발생하는 것으로 나타나 수분저류능력이 양호하지는 않은 것으로 판단되었다. 그러나 석탄회를 혼합한 시료에서는 체적함수비 변화에 따른 수분포텐셜값의 변화가 다른 경우들에 비해서 매우 완만하게 나타나서 수분저류능력이 매우 우수한 것으로 평가되었다. 이러한 원인으로 인해서 앞서 언급되었던 석탄회 혼합시료의 체적함수비가 40% 정도로 유지되어 다른 시료들보다 높게 나타나는 것으로 사료된다. 한편 수분저류능력은 일반토사(80%):석탄회(20%)가 가장 우수하였고 일반토사(65%):석탄회(35%) 그리고 일반토사(50%):석탄회(50%)의 순서로 감소하는 것으로 나타나서 석탄회의 혼합비가 크다고 수분저류능력이 증가하는 것은 아닌 것으로 판단되며, 수분의 이동속도와 비교하여 적정 혼합비를 선택하여야 할 것으로 판단되었다. 강우강도에 따른 각 시료별 지중 침투 및 지표 유출 특성을 Fig. 2에 정리하였다. Fig. 2(a)은 모형실험에서 강우강도를 변화시키면서 측정한 지중 침투량과 지표 유출량의 결과를 정리한 것이다. 지중 침투량은 일반토사(100%)가 가장 적은 것으로 나타났으며, 표준사에서 가장 많은 것으로 조사되었다. 혼합 시료는 일반토사(50%):건설폐기물(50%), 일반토사(80%):석탄회(20%), 일반토사(65%):석탄회(35%), 그리고 일반토사(50%):석탄회(50%)의 순으로 적은 것으로 나타났다. 건설폐기물을 혼합한 경우 일반토사와 매우 유사한 경향을 보였으며, 석탄회를 혼합한 경우에는 초기 유출량은 많았으나 시간이 경과함에 따라서 침투유량이 점차 감소하는 경향을 나타내었다. Fig. 2(b)에서와 같이 일반토사(50%):석탄회(50%)의 경우는 20 mm/hr까지는 강우강도가 증가함에 따라 지중 침투량도 비례하여 증가하는 것으로 나타나 수분이동속도가 다른 경우보다는 매우 빠른 것으로 평가되었다. 따라서 수분저류능력이 우수하여도 적용상에는 문제가 있을 것으로 판단되었다. 그러나 일반토사(100%)와 일반토사(80%):석탄회(20%)의 경우는 강우강도의 변화에 영향을 받지 않는 것으로 나타났으며, 일반토사(65%):석탄회(35%)의 경우는 10 mm/hr에서 지중 침출량이 약간 증가하는 경향을 보였으나 이후 큰 변화가 없는 것으로 나타나 적용성이 높을 것으로 예상되었다. Fig. 2(c)는 모형실험에서 지표 유출량을 관측한 결과를 나타낸 것이다. 표준사를 제외한 나머지 시료에서는 강우강도가 증가함에 따라서 일정하게 증가하는 경향을 보였으며, 일반토사(100%)와 일반토사(50%):건설폐기물(50%)이 유출량이 많은 것으로 나타났다.

이상의 모형실험결과를 요약하면, 일반토사(100%), 일반토사(50%):건설폐기물(50%), 그리고 일반토사(80%):석탄회(20%) 및 일반토사(65%):석탄회(35%)의 경우에 현장 적용이 가능할 것으로 판단되었다. 특히 일반토사(80%):석탄회(20%)의 경우에는 수분저류능력이나 강우강도에 따른 수분이동특성 등이 매우 우수한 것으로 판단되었으며, 석탄회의 혼합비가 20%로서 낮기 때문에 실제 적용 시에는 상대적으로 많은 일반토사를 확보해야 할 것으로 예상되었다.

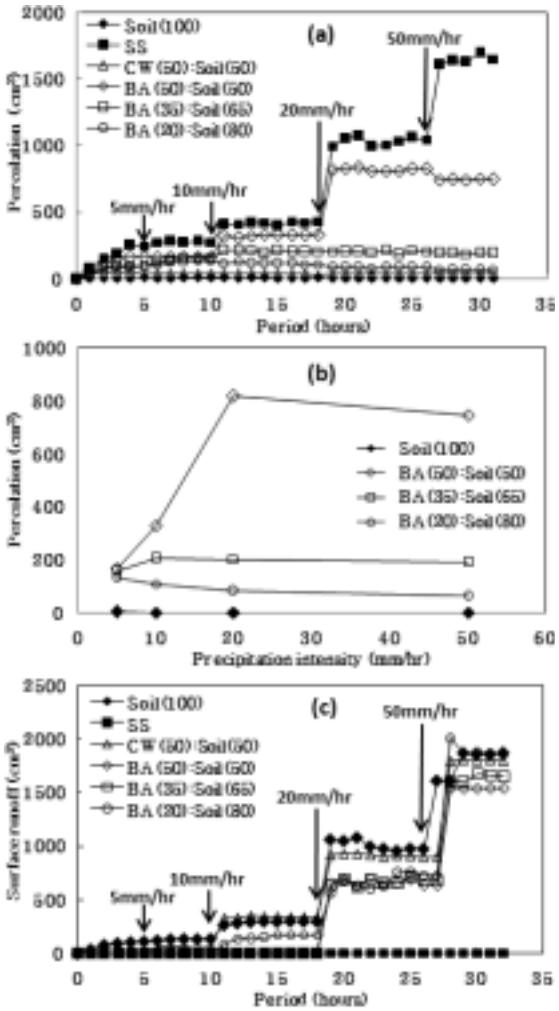

Fig. 2. Results of water balance analyses using model lysimeter experiments. (a) variation of percolation as a function of precipitation intensity and period of duration, (b) variation of percolation according to precipitation intensity, and (c) variation of surface runoff as a function of precipitation intensity and period of duration (SS: standard sand, CW: construction waste, BA: bottom ash).

따라서 다른 대상 시료들과 효과 면에서 큰 차이를 보이지 않고 석탄회 혼합비도 35%로서 비교적 높은 일반토사(65%):석탄회(35%)의 경우가 현장 적용성이 가장 양호한 것으로 판단된다.

3.6. 복토재 내 식생의 적용성 및 식생조성을 위한 복토재 개선방안

각각의 선발배지 조건에서 선발 자생식물을 발아특성을 12일간 측정하여 Table 10과 같은 결과를 얻었다. 산업부산물과 일반토사를 50:50으로 혼합하여 제조한 선발배지 조건과 비교하기 위하여 사용한 일반토사의 기본 특성은 앞에서 제시한 결과와 동일하며, 식생학적으로 주요한 특성들을 부가하여 요약하면, 평균 P_2O_5함량은 6.1 mg/kg, 교환성 Na, K, Ca, Mg 함량($cmol^+/kg$)은 각각 0.30, 0.12, 4.30, 2.59인 것으로 분석되었다. 종자 파종 후 12일째 6가지 선발식물의 발아율의 총합은 일반토사만으로 제조된 대조구(control)가 180%로 가장 높았으며, 석탄회 처리구가 178%로 일반토사와 유사한 수준의 발아가 이루어져 최종 복토재의 혼합원료로 사용가능성이 높은 것으로 평가되었다. 이외의 산업부산물 중 폐석고 배지에서 선발식물의 총 발아율은 125%로 비교적 양호하여 복토재의 혼합원료로 사용가능성이 높을 것으로 판단되며 고로 및 제강 슬래그는 식물종자의 발아를 불량하게 만들어 원재료를 복토재의 혼합원료로 사용하는 것은 다소 어려움이 있을 것으로 평가되었다. 선발 식물 중 참싸리는 파종 후 약 3일째부터 발아가 시작되어 약 1주일 경과 후에는 고로슬래그를 제외한 모든 배지에서 발아가 거의 완료되어 우수한 환경적응 특성을 보였다. 특히 참싸리(LCB)는 고로 및 제강 슬래그와 같은 강알카리성 배지에서는 거의 발아가 되지 않았으며, 상대적으로 pH가 낮은 배지 조건에서는 우수한 발아특성을 보였다. 우리나라 산악지역 폭넓게 분포하고 있는 참싸리(LCB)는 산간지역에 위치하고 산성의 산림토양으로 만들어진 매립지 최종 복토지의 피복작물로 적용성이 대단히 우수할 것으로 분석되었다. 선발된 자생식물 중 족제비싸리(AF), 안고초(AHA), 쑥(AVO) 등은 전체적으로

Table 10. Germination proportion(%) of 6 plant species in media composed of soil(50%) and industrial by-products (50%)

Duration (day)	Sample[a]	Plant species[b]						
		LC	AVO	AHA	AF	LCB	CB	Sum
3	Control[c]	0.00	0.00	0.00	000	0.00	0.00	0.00
	BFS	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	SMS	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	BA	0.00	0.00	0.00	0.00	26.7	0.00	26.7
	WG	0.00	0.00	0.00	0.00	13.3	0.00	13.3
6	Control[c]	20.0	0.40	0.00	0.00	43.3	23.3	87.0
	BFS	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	SMS	0.00	0.20	0.00	0.00	10.0	0.00	10.2
	BA	20.0	0.70	0.00	0.00	63.3	16.7	101
	WG	6.70	0.00	0.00	0.00	26.7	10.0	43.4
9	Control[c]	46.7	2.20	0.00	0.00	53.3	26.7	129
	BFS	0.00	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30
	SMS	3.30	1.90	3.30	0.00	16.7	3.30	28.5
	BA	33.3	4.70	0.00	0.00	70.0	33.3	141
	WG	13.3	7.50	0.00	0.00	53.3	20.0	94.1
12	Control[c]	46.7	3.50	30.0	0.00	56.7	43.3	180
	BFS	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	3.30	4.30
	SMS	20.0	3.20	6.70	10.0	13.3	3.30	56.5
	BA	35.0	6.00	6.70	26.7	73.3	30.0	178
	WG	20.0	8.30	0.00	6.70	56.7	33.3	125

[a]BFS: blast furnace slag, SMS: steel manufacture slag, BA: bottom ash, WG: waste gypsum, [b]LC: Lespedeza cuneata, AVO: Artemisia var. orientalis, AHA: Arundinella hirta var., AF: Amorpha fruticosa, LCB: Lespedeza cyrtobotrya, CB: Cosmos bipinnatus, [c]Control: soil(100)

종자의 발아가 불량하였으며, 비수리(LC), 참싸리(LCB), 코스모스(CB) 등이 비교적 발아가 양호하여 매립지 등에서 조기피복조성에 적당한 식물로 평가되었다.

선발배지조건에서 선발 자생식물을 파종하여 12일 간 Incubation 후 식물체 전체의 생장길이(cm)를 조사하여 Table 11과 같은 생장(elongation) 특성 자료를 얻었다. 선발식물 중 안고초(AHA)는 조사기간 중 거의 생장이 이루어지지 않았으며, 매립지와 같이 조기 식생조성이 필요한 지역에서는 적당하지 않은 식물종으로 평가되었다. 이외의 식물 생장의 총합은 토양으로 만들어진 대조구(control)가 다소 우수하였으며 석탄회, 폐석고 순으로 양호한 생장특성을 보였다. 반면에서 강알카리성 제재인 고로 및 제강 슬래그 배지에서는 발아특성에서와 같이 전체적으로 불량한 생장특성을 보여 최종 복토지의 혼합원료로서는 다소 적당치 않을 것으로 판단되었다. 양분함량이 낮고 산성의 산림토양으로 만들어진 대조구(control)에서 비해 다양한 무기양분을 포함하고 있는 산업부산물 배지에서 쑥(AVO), 족제비싸리(AF)는 다소 우수한 생장특성을 보였다. 특히 선발식물의 발아율이 가장 높았던 석탄회 배지에서 쑥(AVO), 족제비싸리(AF), 참싸리(LCB)의 생장율은 대조구에서 비해 월등히 높아 조기식생조성 측면만을 고려한다면 최종 복토지 혼합 원료물질로서 적용성이 대단히 높을 것으로 평가되었다.

발아실험을 통해 얻어진 발아율(%)과 12일 동안 각 배지에서 얻어진 상대 생장율(%), 즉 각 처리구의 식물 생장율을 대조구 식물 생장율로 나눈 백분율 값(%)의 곱으로부터 얻어진 Growth Index(G.I.)는 퇴비의 부숙도 평가, 산업부산물 등의 식물에 대한 안정성 평가 등에 널리 이용되고 있다. 본 조사에서 각 배지조건에서 얻어진 각 식물의 발아율(Table 10)과 대조구에 대한 상대적 생장율(Table 11)을 이용하여 계산된 Growth Index(G.I.) 특성은 Table 12와 같다. 6가지 선발식물의 Growth Index 합은 비교구가 150이었으며, 선발제재 중 석탄회는 이보다 우수한 195로서 최종 복토지 조성시 피복작물의 조기식생조성에 매우 긍정적 효과가 있을 것으로 평가되었다. 인산질 비료 제조

Table 11. Elongation(cm) of 6 plant species in media composed of soil(50%) and industrial by-products(50%)

Sample[a]	Plant species[b]						
	LC	AVO	AHA	AF	LCB	CB	Sum
Control[c]	7.89	1.40	N.D.[d]	8.55	9.93	31.7	59.5
BFS	6.13	1.94	N.D.[d]	6.80	9.83	20.4	45.1
SMS	5.43	2.74	N.D.[d]	8.98	6.97	8.25	32.4
BA	7.78	3.21	N.D.[d]	11.2	12.2	23.2	57.5
WG	5.30	3.88	N.D.[d]	6.20	9.88	24.8	50.1

[a]BFS: blast furnace slag, SMS: steel manufacture slag, BA: bottom ash, WG: waste gypsum, [b]LC: *Lespedeza cuneata*, AVO: *Artemisia var. orientalis*, AHA: *Arundinella hirta var.*, AF: *Amorpha fruticosa*, LCB: *Lespedeza cyrtobotrya*, CB: *Cosmos bipinnatus*, [c]Control: soil(100), [d]N.D.: not determined due to extremely low elongation

Table 12. Growth index(%) of 6 plant species in media composed of soil(50%) and industrial by-products(50%)

Sample[a]	Plant species[b]						
	LC	AVO	AHA	AF	LCB	CB	Total growth index[e]
Control[c]	46.7	3.50	N.D.[d]	N.D.[d]	56.7	43.3	150
BFS	N.D.[d]	1.4	N.D.[d]	N.D.[d]	N.D.[d]	2.10	3.50
SMS	13.8	6.30	N.D.[d]	10.5	9.30	0.90	40.7
BA	34.5	13.8	N.D.[d]	34.9	89.8	21.9	195
WG	13.4	23.0	N.D.[d]	4.90	56.4	26.1	124

[a]BFS: blast furnace slag, SMS: steel manufacture slag, BA: bottom ash, WG: waste gypsum, [b]LC: *Lespedeza cuneata*, AVO: *Artemisia var. orientalis*, AHA: *Arundinella hirta var.*, AF: *Amorpha fruticosa*, LCB: *Lespedeza cyrtobotrya*, CB: *Cosmos bipinnatus*, [c]Control: soil(100), [d]N.D.: not determined due to extremely low elongation, [e]Total growth index: cumulative values of each growth index of plant species

공정 중 발생되는 산성의 폐석고의 Growth Index도 124로서 대조구와 큰 차이를 보이지 않아 복토지 혼합원료로서 사용가능성이 충분할 것으로 분석되었다. 이에 반해 강알칼리성의 고로 및 제강 슬래그의 각 식물에 대한 Growth Index는 10 이하로 매우 불량하여 최종 복토지의 조기 식생조성에는 바람직하지 못한 원료로 판단되었다.

상기의 실험을 통해 선발 산업부산물 중 최종 복토지 혼합원료로서 석탄회가 가장 적당한 것으로 분석되었다. 일반토사와 석탄회를 50:50으로 혼합하여 만들어진 시험포장에 비옥도를 증진하기 위해 선발된 Table 1과 같은 특성을 갖는 축분퇴비를 0～80 톤/ha 비율로 처리하여 선발식물을 약 4개월간 재배 후 생육특성을 조사하였다. 그 결과, 일반토사만으로 처리한 대조구에 비해 석탄회를 50% 혼합하여 만들어진 복토지에서 선발식물은 전반적 생육이 양호하였다. Table 5에 제시된 바와 같이 본 실험에 이용된 석탄회는 다른 제재에 비해 유기물 함량(50.0 g/kg)이 높고 약알칼리성(pH 8.9) 제재일 뿐만 아니라 인산함량을 측정한 결과 유효인산이 551 mg/kg로 비교적 높아서 토양개량효과가 우수할 것으로 평가되었다. 척박한 산림토양과 50% 혼합된 석탄회가 식물재배과정 중 무기양분을 공급하고 산성토양을 개량하여 토양의 미시환경을 크게 개선한 것이 전체적 식물생육의 증진원인이 된 것으로 해석된다. 대조구와 석탄회 처리 제재 모두에서 축분퇴비 처리수준이 증가함에 따라 식물의 외관적 생육은 일정하게 증가하는 경향을 보였으며, 축분퇴비 40～50톤/ha 처리수준에서 가장 우수한 생육특성을 얻을 수 있었다.

4. 결 론

비위생 매립지 정비 사업에 적용할 수 있고 또한 복토재로서 일반토사만을 사용하는 것이 아니라 산업부산물을 일반토사와 일정한 비율로 혼합하여 그 성능을 제고하고 산업부산물의 재활용을 촉진할 수 있는 단층형 최종복토공법을 개발하고자 본 연구는 수행되었다. 이를 위해 다양

한 산업부산물의 현장 적용성을 평가하고자 슬래그류 2종, 석탄회, 석분슬러지, 폐석고 그리고 건설폐기물 등 6종의 산업부산물에 대한 이화학적, 수리역학적 그리고 식생학적 특성 등을 조사하였다. 폐석고(pH 3.0), 건설폐기물(pH 11.0), 제강슬래그(pH 12.4) 등은 pH가 산성 및 알칼리성을 나타내었으며, pH 완충력은 제강슬래그 > 석탄회 > 건설폐기물 ≈ 고로슬래그 > 석분슬러지 ≈ 폐석고의 순으로 나타났다. 유기물 함량은 석탄회를 제외한 대부분의 시료가 매우 낮은 것으로 나타나서 표층 식생조성을 위해서는 별도의 시비조건 수립이 필요할 것으로 판단되었다. 모든 대상 시료에 대한 폐기물 용출시험 분석결과, 관련규정의 유해 무기물질 규제농도 이하로 측정되어서 복토재로서의 활용 시 특별한 문제가 없을 것으로 평가되었으며, 토양오염공정시험 분석결과, 석분슬러지에서 Cu가 우려기준을 초과하여 나타났지만, 그 초과농도가 그리 높지 않아서 일반토사와 혼합하여 복토재로 이용할 시 큰 문제는 없을 것으로 판단되었다.

수리역학적 특성 분석결과, 대부분의 제재들의 강도 특성은 일반토사와 유사하거나 혹은 우수한 것으로 나타나서 복토재로 활용 시 복토층의 안정성 확보에 유리할 것으로 판단되었으며 특히 석탄회는 밀도가 낮아 복토층 사용 시 하부 침하예방에 효과적일 것으로 판단되었다. 투수계수는 석분슬러지와 폐석고가 10^{-5} cm/sec으로 가장 낮은 것으로 나타났고, 건설폐기물과 제강슬래그, 고로슬래그 그리고 석탄회의 순으로 높게 나타났다. 다짐 투수특성에서는 석탄회를 제외한 다른 대부분의 산업부산물은 일반토사의 거동과 유사하게 나타났고, 석탄회는 혼합율 20%, 35%에서 다짐에너지 변화에 따른 최대 건조단위중량의 감소가 급격하지 않은 것으로 나타나 현장 시공조건에 따른 영향이 다른 산업부산물 중 가장 작을 것으로 판단되었다. 이상의 결과에서 석탄회는 모든 경우에서 매우 양호한 결과를 나타내었다. 이를 근거로 석탄회가 최종복토재로서 활용 가치가 높을 것으로 판단하였으며, 실내 모형 토조실험을 통한 물 수지분석 결과에서도, 석탄회를 혼합한 경우, 일반토사(80%):석탄회(20%)는 강우강도의 변화에 영향을 받지 않으며, 일반토사(65%):석탄회(35%)의 경우는 10 mm/hr에서 지중 침출량이 약간 증가하는 경향을 나타내었으나 이후 큰 변화가 없는 것으로 나타나 적용성이 높은 것으로 판단되었다. 따라서 다른 대상 시료들과 효과면에서 큰 차이를 보이지 않고 석탄회 혼합율도 35%로서 높은 일반토사(65%):석탄회(35%)의 경우가 현장적용성이 높을 것으로 판단된다.

조기 식생조성과 적정 수종을 위한 식물실험에서는 대상시료 중 피복식물의 발아촉진과 생장증진에는 석탄회가 가장 효과적이었으며, 인산석고도 높은 적용성을 가지는 것으로 나타났으나, 그 외 나머지 시료들은 적용성이 매우 낮은 것으로 평가되었다. 따라서 식물학적인 측면에서 석탄회의 활용성이 매우 높을 것으로 기대되고, 일반토사와 석탄회 혼합재(50:50)에 대한 포장 실험에서는 조기식생조성을 위해 축분퇴비 40～50톤/ha의 사용이 적정할 것으로 판단되었다. 이 실험에서는 비수리, 참싸리, 코스모스 등이 표층 조기식생 조성에 적당한 식물로 평가되었다.

사 사

본 연구는 환경부 차세대 핵심환경기술개발 연구사업(과제번호: 2006-0082) 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드린다.

참 고 문 헌

1. 환경부, “경제 살리기와 기후변화대응을 위한 폐기물 에너지화 종합대책,”(2008).
2. 환경부, “사용중인 매립지현황,”(2005).
3. 환경부, “사용종료 매립지 현황,”(2002).
4. 환경부, “사용종료매립지 주민만족도 설문조사 결과 보고,”(2005).
5. 환경부, “철강슬래그 및 석탄재 배출사업자의 재활용 지침,”(2004).
6. U.S. DOE, “Alternative Landfill Cover, Innovative technology summary report(DOE/EM-0558),”(2000).
7. AFCEE, “Alternative Landfill Covers(Technology transfer division),”(2001).
8. U.S. EPA, “Alternative cover assessment program 2002 annual report(Desert research institute),”(2002).
9. ITRC, “Technical and regulatory guidance for design, installation, and monitoring of alternative final landfill covers, Technical and regulation guidance,”(2003).
10. 김준섭, “폐석회를 이용한 매립지 차수재로의 이용 방안,” 대한환경공학회 1998 추계 학술대회 논문집, 공주대학교, 공주, pp. 355～356(1998).
11. 이병창, 임봉수, 현재혁, “매립지 복토재로서 국내무연탄의 중금속 제거능,” 대한환경공학회 1998추계 학술대회 논문집, 공주대학교, 공주, pp. 409～410(1998).
12. 임현진, 임남웅, 박찬식, “첨가제를 사용한 폐기물 매립지 점토차수층의 투수능과 중금속 제어능에 미치는 영향,” 대한환경공학회지, **23**(2), 181～187(2001).
13. 조재범, 현재혁, 조성택, 최경훈, “매립지 차수재로서의 준설점토 활용에 관한 연구,” 대한환경공학회지, **24**(5), 869～877(2002).
14. 조재범, 현재혁, 박호식, 서경아, “매립지 차수재로서 플라이애쉬 적용시 탄소세라믹의 역할,” 대한환경공학회지, **25**(9), 1147～2251(2003).
15. 이정란, 문철환, 정찬기, 이재영, “폐기물 매립지 최종복토 차단층으로서 GCL(Geosynthetic Clay Liner) 적용 가능성 평가,” 대한환경공학회 2004춘계 학술연구발표회 논문집, 경성대학교, 부산, pp. 332～336(2004).
16. 조재범, 현재혁, 이종득, 박정구, “고로슬래그를 이용한 폐기물 매립지 고화토차수층의 수화열 저감특성,” 대한환경

공학회지, **27**(12), 1327～1331(2005).
17. 현재혁, 김민길, “폐기물 매립지 차수재 및 복토재의 신기술 동향,” 대한환경공학회지, **29**(1), 3～7(2007).
18. 유찬, 양기석, 류시창, 조병진, 안병관, “산업폐기물을 활용한 식생기반 조성에 관한 연구,” 2003년도 한국농공학회 학술발표대회, 제주도, pp. 219～222(2003).
19. 유찬, 윤용철, 안병관, 양기석, “산업폐자원을 활용한 농촌환경 복원방안에 관한 고찰,” 2003년도 한국농촌계획학회 학술발표대회, AT center, 서울, pp. 38～43(2003).
20. Blake, G. R. and Hartge, K. H., “Bulk density,” Methods of soil analysis, Part 1 Physical and mineralogical methods, in Klute, A.(Ed.), American Society of Agronomy, Inc. and Soil Science Society of America, Inc, Publisher, pp. 363～375(1986).
21. Blake, G. R. and Hartge, K. H., “Particle density,” Methods of soil analysis, Part 1 Physical and mineralogical methods, in Klute, A.(Ed.), American Society of Agronomy, Inc. and Soil Science Society of America, Inc, Publisher, pp. 377～382(1986).
22. Danielson, R. E. and Sutherland, P. L., “Porosity,” Methods of soil analysis, Part 1 Physical and mineralogical methods, in Klute, A.(Ed.), American Society of Agronomy, Inc. and Soil Science Society of America, Inc, Publisher, pp. 443～450(1986).
23. Hendershot, W. H. and Lalande, H., “Ion exchange and exchangeable cations,” Soil sampling and methods of analysis, Carter, M. R(Ed.), Canadian Society of Soil Science, Boca Raton, Florida, pp. 167～175(1993).