

지하수 오염방지를 위한 산업폐기물 관리평가 모델(IWEM)의 국내 적용성 분석

박동원¹ · 우남철^{1*} · 정다위²

¹연세대학교 이과대학 지구시스템과학과

²국립환경과학원 자원순환연구과

Applicability of Industrial Waste Management Evaluation Model (IWEM) in Korea

Dongwon Park¹ · Nam C. Woo^{1*} · David Chung²

¹Department of Earth System Science, Yonsei University

²Resource Recirculation Research Division, National Institute of Environmental Research

ABSTRACT

Selection of appropriate liner type would be the most important factor to prevent groundwater contamination by leachate from waste management site. This report introduces the IWEM (Industrial Waste Management Evaluation Model) developed by US EPA to evaluate the potential pollution of groundwater under the waste management unit and to suggest an appropriate type of liner, and provides with the results of IWEM application to a coal-ash landfill site in Korea as a case study. IWEM uses a standard method using a database, a decision-making process based on site characteristics, and the user-friendly input-and-output system. Authors evaluate this model to be applicable in Korea provided that the database is replaced into local data.

Key words : IWEM, Groundwater pollution, Waste management unit, Coal ash

1. 서 론

현재 국내 석탄재 발생량은 연간 약 800만 톤에 이르고 있으며 재활용률은 70% 정도로 추정된다(환경부, 2011). 재활용되지 않는 나머지 30%의 석탄재는 바닥재로서 폐기물관리법상에서 규정하고 있는 용출시험방법으로 지정폐기물 여부를 판정해 대부분 폐기물로 처리하고 있다.

석탄연소 부산물(Coal Combustion Product; CCP)은 비산재, 바닥재, 보일러 슬래그, 탈황잔류물 등 크게 네 종류로 구분한다(Butalia and Wolfe, 2001). 이 중 비산재와 탈황잔류물은 각각 시멘트 원료 및 탈황석고와 비료의 재료로 대부분 사용되는 반면, 바닥재 등은 국내 대부분 발전소의 경우 부지 내의 특정 장소에 쌓아 놓다가

매립하는 형식으로 처리하고 있다.

석탄재에는 일반적으로 비소, 카드뮴, 수은, 몰리브덴, 크롬 및 납 등의 중금속이 포함되는 것으로 알려져 있으며(Swaine and Goodarzi, 1995), 이들은 석탄의 산지와 발전소에서의 연소 방식에 따라 함량 차이가 발생하게 된다. 따라서 이러한 석탄재를 폐기물로 부지 매립방법으로 처리한다면, 사전에 중금속의 함양과 매립부지의 환경과 지질특성을 고려하여 적절한 처리법을 선택하여야 주변 환경에 미칠 부정적인 영향을 최소화 할 수 있을 것이다.

이 원고에서는 석탄재와 같은 다량의 산업부산물 처리 시 주변 환경에 미칠 영향을 판단하여 처분시설의 설계를 안전하게 도모하기 위한 방법으로 미국 환경청(US EPA)에서 개발, 사용되고 있는 산업폐기물 관리평가 모델(Industrial Waste Management Evaluation Model; IWEM,

*Corresponding author : ncwoo@yonsei.ac.kr

원고접수일 : 2011. 10. 5 심사일 : 2012. 1. 24 게재승인일 : 2012. 2. 14
질의 및 토의 : 2012. 4. 30 까지

US EPA, 2002a)을 소개하고, 이를 국내 석탄재 매립시설에 적용하여 국내 활용성을 평가하고자 한다.

2. 산업폐기물 관리평가 모델-IWEM 소개

2.1. IWEM 일반

2002년 미국에서 EPA와 12개 주의 대표가 모여 논의한 끝에 산업폐기물 관리 지침(Guide for Industrial Waste Management)을 마련하였고, 동해 이를 바탕으로 4가지 폐기물 처리 유형에 대한 산업폐기물 관리평가 모델(IWEM)을 개발하였다. IWEM은 폐기물 처분시설(waste management units; WMUs)에 의한 환경오염을 방지하기 위해 개발된 일종의 전문가 시스템(Expert system)으로서, 시설물의 입지선정, 설계 및 운용 과정에 대하여 과학적 지식을 기반으로 하는 정책적 제언을 목표로 개발되었다. 이후 도로 등의 성토재로 사용하는 경우를 새로운 유형으로 평가가 가능한 IWEM 2.0이 개발 중이며 2009년 IWEM 2.0(beta)에 대한 평가가 있었으나(Li and Benson, 2009) 이 새로운 버전의 IWEM은 아직 일반에 공개되지 않은 상태이다. 이 모델의 주요 사용자로는 설계 중인 처분시설의 관리자, 처분 완료된 시설의 관리자, 지방자치단체의 제도적 관리자, 폐기물 처분과 관리에 관심을 가진 일반 주민 또는 단체 등이 될 수 있다.

2.2. 모델의 기본 전제조건

이 모델에서는 다음 사항들을 모델 평가의 기본적 전제 조건으로 설정하였다:

- (1) 지하수가 직접 폐기물에 닿지 않고, 오직 강수에 의해서만 폐기물로부터 오염물질이 용출되고 지하수로 함양됨 (지표저류(surface Impoundment)는 제외).
- (2) 대수층은 균질하며, 지하수는 정류상태임.
- (3) 용출된 오염물질은 폐기물에서는 수직하부로만 누출됨.
- (4) 지하수는 해당 폐기물에서 누출된 오염물질에만 영향을 받음.

2.3. 모델링 단계

미국 EPA에서는 폐기물 처리방법에 대한 평가과정을 세 단계(Tier 1, 2, 3)로 구분하였으며, IWEM은 이 중 Tier 1과 Tier 2의 2단계까지의 평가에 사용될 수 있다. Tier 1은 가장 간단한 방식으로 폐기물 처리 규모나 부지 특성에 대한 고려 없이 처분시설의 형태를 선택하고 오염물질의 종류와 농도만 입력하면, 그에 따른 적절한 차수 형태(liner type)를 제안한다. 반면 Tier 2에서는 폐기물 규모, 지하수 이용지점까지의 거리, 부지 특성, 기후 조건, 오염물질의 특성 등을 고려한, Tier 1에 비해서 보다 부지 고유의 환경특성이 고려된 평가방법이다. Tier 3은 처분시설이 위치하게 되는 부지의 보다 상세한 수리지질학적 특성과 오염물질의 유출과 저감 정도, 유출경로와 오

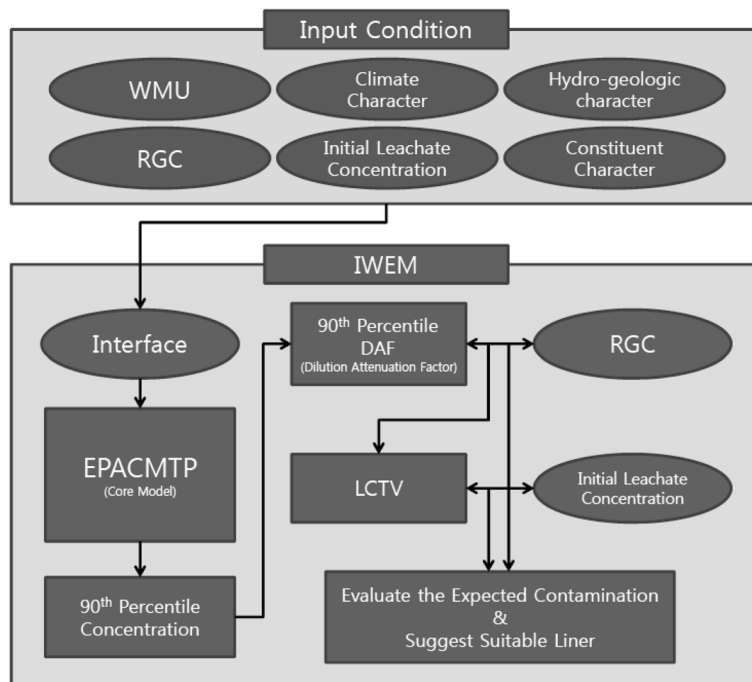


Fig. 1. Modeling process of the Industrial Waste Management Evaluation Model (US EPA, 2002a).

염물질의 위해성 등을 평가하는 정밀평가 과정으로, IWEM으로는 수행할 수 없는 단계이다.

2.4. 모델링 구조

IWEM의 작동 원리는, 프로그램에 내장된 EPACMTP (EPA's Composite Model for Leachate Migration with Transformation Products)라는 모델을 이용해 10,000회의 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하여 위해성 평가를 위해 선정된 특정 지점에서의 독성 원소별 농도를 계산하고, 그 중 낮은 농도로부터 90% 째 수준의 농도를 구해 이를 지하수 기준농도 (Reference Groundwater Concentration; RGC)와 비교하여 위해성 여부를 판단한다. 또한 지하수에 용출 되었을 경우의 희석저감 인자(Dilution Attenuation Factor; DAF)를 계산하여 용출한계농도(Leachate Concentration Threshold Value; LCTV)를 산출하고, 이 용출한계농도를 초기 용출농도와 비교하여 폐기물 처분시설의 환경보전을 위한 적절한 차수재의 형태를 제안하게 된다 (Fig. 1). IWEM은 모델링 엔진인 EPACMTP의 적절한 사용을 위한 인터페이스를 갖추고 있어 그 사용이 비교적 간단하지만, 사용 전에 앞서 제시한 기본 전제조건을 충분히 고려해야 한다.

2.5. 입력 자료

IWEM 사용 시 필요한 입력 자료는, Tier 2를 기준으로 할 때, 폐기물 처분 형태, 처분부지의 수리지질학적 특성, 기후 조건(강수량, 지하수 온도 및 지하수 함양률 등), 용출액 내의 오염물질 종류 및 농도와 각 오염물질별 지하수 기준농도(RGC) 등이다(Fig. 2).

데이터 입력 순서에 따라 각 자료들을 간단히 설명하면 다음과 같다:

- (1) 처분시설의 형태 - 폐기물 처분시설은 매립(Landfill), 지표저류(Surface Impoundment), 폐기물 더미(Waste Pile), 지면 살포(Land Application Unit) 등 네 가지 형태로 구분
- (2) 처분시설 관련 자료 - 폐기물 처리 규모 및 지하수 이용지점까지의 거리
- (3) 지하매질 특성 자료 - 기반암, 퇴적환경, 퇴적물의 조직 등을 기반으로 하는 대수층 특성과 지하수 환경의 설정
- (4) 투수성 관련 인자 - 토양 입도 및 기후 등의 부지 자료. IWEM의 데이터베이스에는 미국 각 주의 주요 도시들을 기준으로 강수에 따른 지하수 함양률과 지하수 온도 및 토양 차수재(Soil Liner) 사용

시의 함양률이 포함되어 있으며, 도시를 선택하게 되면 나머지 자료들을 데이터베이스에서 자동으로 불러들임.

- (5) 화학성분 관련 자료 - 용출액 내 오염 물질의 종류와 초기 용출농도(Initial Leachate Concentration). 지화학적 모델을 이용해 산출한 값이나 독성물질 용출시험(Toxicity Characteristic Leaching Procedure; TCLP) 혹은 인위적 강우 용출시험(Synthetic Precipitation Leaching Procedure; SPLP) 등의 분석법을 통해 얻은 값을 사용할 수 있음(US EPA, 2002b).
- (6) Constituent Properties - 오염물질들의 분배계수 결정 단계. MINTEQA2 (USEPA, 1991, <http://www.epa.gov/ceampubl/mmedia/minteq/>) 모델을 이용해 구한 값이 기본 값으로 입력되어 있음.
- (7) 지하수 수질 기준(Reference Groundwater Concentration; RGC) - 유해성 평가에 적용하는 수질 기준 결정. IWEM 데이터베이스에는 기본적으로 미국 안전음용수법(Safe Drinking Water Act; SDWA)에 의거한 최대 오염농도(Maximum Contaminant Level; MCL)와 EPA가 개발한 건강지수(Health Based Number; HBN)가 저장되어 있어 원하는 기준을 선택할 수 있음. 또한 필요 시, 사용자가 원하는 수준의 기준을 별도로 입력할 수 있으며, 이러한 모든 기준들에 대해서 한 번에 평가할 수 있음.

2.6. 모델링 결과

IWEM을 이용한 평가의 결과는 다음의 Fig. 3a에서 보듯 각 오염 원소들에 대한 평가가 출력되고 Fig. 3b와 같은 리포트로 자동으로 작성되어 출력된다. 사용자는 이 보고서를 인쇄물로 출력하거나 PDF파일의 형태로 저장할 수 있다. 이 보고서에서는 부지특성 및 초기 오염물질의 농도와 평가기준으로 선택한 지하수 수질 기준(RGC) 등 입력 값이 첫 부분에, 두 번째 부분은 실제 모델링 결과로 수 페이지에 걸쳐 제시되며, 마지막으로 평가의 대상이 된 오염 물질들에 대한 세부 정보가 각 오염 물질별로 수록되게 된다.

3. IWEM 적용 사례 - 국내 Y 화력발전소 석탄재 처분시설의 예

위 IWEM의 국내 산업폐기물 처분시설에 대한 적용성을 평가하고자, 현재 석탄재의 매립이 진행 중인 Y 화력발전소 처분시설에 대하여 전술한 인자들을 입력하여 그

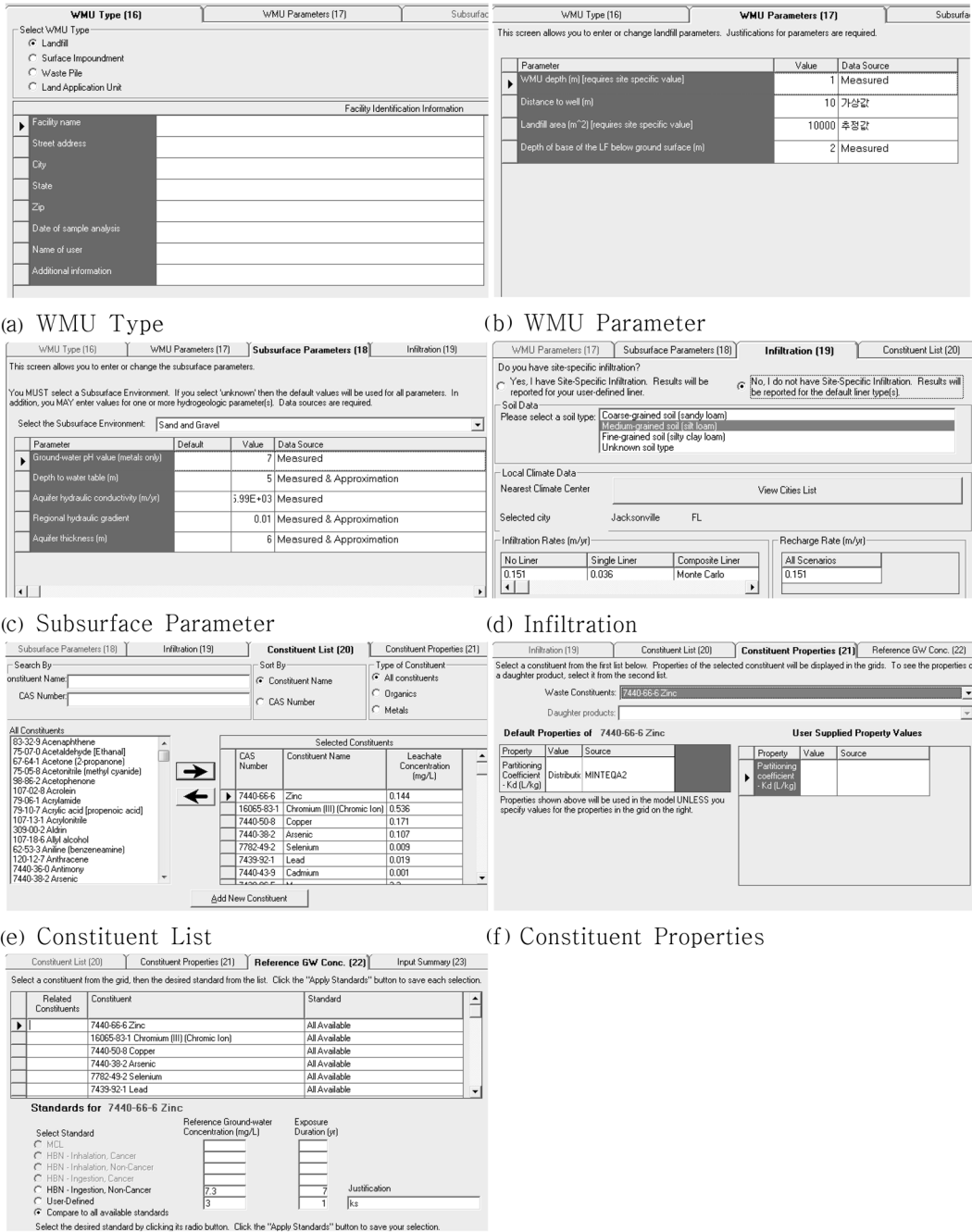


Fig. 2. Screen captures of parameter input windows of the IWEM-Tier 2.

결과를 도출하였다.

Y 시설에서의 석탄재 처분 형태는 매립(Landfill, Fig. 2a)이었으며, 처리 규모는 현장 조사 결과를 입력하였고, 지하수 이용지점까지의 거리는 처분시설 인근의 용지를 다른 용도로 활용할 수 있다는 가정 하에 10 m로 설정하였다(Fig. 2b). 현장에서 관측공을 설치하면서 파악된 지

하 매질의 특성과 지층 단면을 주어진 입력자료의 틀에 맞추어 입력하였으며(Fig. 2c), 기후 자료는 온대 몬순기후로 설정하고 이에 대응하는 미국 지역으로 플로리다 주의 여섯 개 도시를 적용해 평가하였다(Fig. 2d).

오염물질로는 Pb, Mn, Hg, Mo, Ni, Tl, Sb, As, Ba, Cd, Cu, V, Zn, Se 등 총 14종에 대하여 평가하였으며,

CAS Number	Constituent Name	Minimum Liner Recommendation
7440-66-6	Zinc	No Liner
16065-83-1	Chromium (III) (Chromic Ion)	Composite Liner Not Protective*
7440-50-8	Copper	No Liner
7440-38-2	Arsenic	Composite Liner Not Protective*
7782-49-2	Selenium	No Liner
7439-92-1	Lead	Composite Liner Not Protective*
7440-43-9	Cadmium	No Liner
7439-96-5	Manganese	Composite Liner Not Protective*
7440-02-0	Nickel	No Liner
7440-39-3	Barium	No Liner
7440-36-0	Antimony	No Liner
7440-62-2	Vanadium	No Liner
7439-98-7	Molybdenum	No Liner

*Consider pollution prevention, treatment, and more protective liner designs as well as consultation with regulators, the public, and industry to ensure that wastes are protectively managed.
Based on consideration of the toxicity standards of all listed constituents, the minimum liner recommended is: Composite Liner Not Protective*

(a)

Tier 2 Evaluation Results
2011-09-24 오전 10:45:46
Recommendation: Composite Liner Not Protective

Facility Type: Landfill

Facility name:
Street address:
City:
State:
Zip:
Date of sample analysis:
Name of user:
Additional information:

Parameter	Value	Data Source
Depth of base of the LF below ground surface (m)	2	Measured
Distance to well (m)	10	기타
Landfill area (m ²) [requires site specific value]	10000	추정
WMU depth (m) [requires site specific value]	1	Measured

Parameter	Value	Data Source
Ground-water pH value (metals only)	7 Measured	Measured
Depth to water table (m)	5 Measured & Approximation	Measured & Approximation
Aquifer hydraulic conductivity (m/yr)	590 Measured	Measured
Regional hydraulic gradient	0.01 Measured & Approximation	Measured & Approximation
Aquifer thickness (m)	6 Measured & Approximation	Measured & Approximation

(b)

Fig. 3. Screen captures of (a) evaluation results for each toxic element, and (b) the final report.

오염물질의 초기 용출농도는 연구팀이 본 발전소 부지에서 직접 채취한 시료에 대하여 독성 용출시험(Toxicity characteristic leaching procedure; TCLP, US EPA, 2008) 및 칼럼 용출시험 결과를 근거로 설정하였다(Fig. 2e). 오

염물질의 분배계수 등 지화학적 입력자료는 데이터베이스에 구축된 기본 자료를 선정하였고(Fig. 2f), 연구 부지의 오염물질 유해성 평가의 기준으로는 미국 EPA의 MCL, HBN 및 국내 먹는물 수질기준을 적용하였다(Fig. 2g).

Table 1. Results of the IWEM for various contamination criteria for the landfill of Y coal-based power plant

	MCL	Ingestion Cancer	Ingestion Non-Cancer	Inhalation Non-Cancer	Drinking water guidelines, Korea
Column tests	No Liner	Composite Liner	No Liner	No Liner	No Liner
TCLP	No Liner ~ Single Liner	Composite Liner	No Liner ~ Single Liner	-	No Liner ~ Single Liner
Field measure	No Liner ~ Single Liner	-	No Liner	-	-

Table 2. Site characteristics for recharge and infiltration conditions

City	Groundwater Temperature (°C)	Recharge Rate (m/yr)	Infiltration rate (m/yr)	
			No Liner	Single Liner
Jacksonville	22.5	0.1511	0.1511	0.0362
Miami	25	0.145	0.145	0.0492
Orlando	22.5	0.1016	0.1016	0.0362
Tallahassee	22.5	0.5913	0.5913	0.0477
Tampa	22.5	0.0658	0.0658	0.0253
West Palm Beach	22.5	0.2611	0.2611	0.0477

IWEM 평가 결과, 현장에서 관측된 농도를 미국 MCL 기준으로 평가한다면, 국내와 대응하는 기후 지역으로 Tallahassee 및 West Palm Beach를 선택하는 경우, 차분 시설의 차수재를 단일 차수재(single liner) 이상으로 설치해야만 지하수 내 셀레늄의 농도가 기준보다 낮을 것으로 평가되었다. 석탄재 시료를 증류수에 용출시킨 칼럼 시험 결과와 미국 MCL을 비교한다면, 처분시설에 차수재를 설치하지 않은 상태에서도 비발암성(non-carcinogenic) 독성은 위해성이 없는 것으로 평가되었으나, 발암성 독성에 대해서는 특히 비소 성분에 대해서 복합 차수재(composite liners) 이상의 시설이 필요한 것으로 평가되었다. 마지막으로 석탄재 시료의 TCLP 시험을 통해 도출된 결과를 미국 MCL의 기준과 비교하면, 동일 기후조건인 어떤 지역에서도 차수재가 없이도 유해성이 없음을 보이고 있으나, 비교 기준을 EPA의 건강지수로 설정한 경우에는 비소에 대한 안전성 문제로 복합 차수재 이상의 설비를 제안하고 있다. 국내 먹는물 기준을 비교대상으로 설정한 경우에는, 오히려 땅간 유출의 위해성이 제시되어 단일 차수재 이상의 설비를 권장하고 있다.

IWEM을 이용한 평가 결과를 종합하면, 모든 수질 기준 조건을 고려하였을 때 칼럼 시료 자료와 TCLP 자료에 대해 복합 차수재 설치를 권장하고 있다. 하지만 이는 섭취 시 암 유발 가능 농도에 대한 기준을 근거로 했을 때의 결과이고, 다른 수질기준에 대해서는 대체로 차수재가 필요 없거나 단일 차수재 사용만으로도 충분히 환경영향을 최소화 할 수 있음을 제시하고 있다.

평가 결과가 다양하게 도출되는 원인은, 비교대상으로 설정한 각 수질 기준에 따라 요구하는 오염 물질의 농도가 상이하고, 또한 동일 기후 조건에서도 비교대상 부지의 고유특성이 상이하기 때문으로 판단된다. 구체적인 예로는, 비교 대상지역의 하나였던 Florida 주의 Jacksonville 지역에서, 비소 항목에 대한 EPA의 건강지수는 장기간의 노출을 가정하여 계산되므로, MCL이나 국내 먹는물 기준 등에 비교할 때 상당히 낮은 수준의 용출가능성을 요구한다(Table 1). 결과적으로 지하수 오염가능성을 충분히 더 낮출 수 있는 차수재의 선정을 제시하게 된다.

또한 기후 조건의 차이는 궁극적으로 지하수 함양률과 처분시설로부터의 침투율에 영향을 미치는 요소로 작용하므로, 조사 부지의 고유특성에 큰 영향을 받게 된다(Table 2). 따라서 본 연구에서 시험적으로 평가하였던 6개 도시 지역에서도 각 도시의 특성 차이에 의해 다양한 결과가 도출될 수 있음을 의미한다.

4. 고 찰

국내 산업의 발달과 함께 산업 폐기물 처분은 지속적으로 국내 환경이슈의 하나로 남게 될 것이다. 이러한 배경에서, 폐기물 처분시설의 계획과 설계 단계에서부터 환경친화적인 부지와 시설의 관리는 대단히 중요하게 된다.

미국 EPA에서 사용하고 있는 IWEM의 경우, 다음과 같은 장점을 가지고 있다:

- 폐기물 처분시설의 관리평가 방법으로, 기 구축된 데

이터베이스를 통한 표준화된 방법과 결과 도출이라는 측면에서 신뢰성 있는 결과를 도출할 수 있는 방법으로 판단된다.

- 환경영향을 고려한 처분시설의 설계, 운용방안을 과학적 근거를 가지고 제시할 수 있다.
- 비전문가도 쉽게 사용할 수 있다.

그러나 이 방법을 국내에 적용하기 위해서는 다음의 사항들에 주의해야 한다:

- 수질기준 및 기후인자에 대한 대표 관측소의 선택에 따라 그 평가 결과가 달라질 수 있어 상황 및 목적에 따라 적합한 기준을 신중히 선택해야 한다.
- IWEM에 내장된 기후자료는 미국의 특정 도시에 대한 자료이다. 따라서 이 프로그램을 국내에서 사용하려면 국내 지역별 적절한 기후자료를 확보해 프로그램 내부의 데이터베이스에 입력해 두어야 더욱 신뢰할 수 있는 평가 결과를 얻을 수 있을 것이다.
- 모든 모델링에서 마찬가지이지만, IWEM의 유효성도 적용하는 부지의 특성이 전술한 전제조건을 어느 정도 만족시키는가에 따라서 결과의 신뢰성도 좌우된다.

다행히 이러한 문제점들은 IWEM의 데이터베이스 파일이 MS Access 와 호환되어 수정이 용이하기 때문에 국내 여러 지역의 지하수 함양을 및 지하수온 등 필요한 정보를 획득할 경우 해당 지역에 더욱 적합하면서도 일반적인 사용이 쉬운 프로그램이 될 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 국립환경과학원의 연구비(2010-8-2037) 지원으로 수행되었습니다. 현장조사와 자료 수집에 도움을 주신 Y 화력발전소 관계자들에게 진심으로 감사드립니다.

참 고 문 헌

환경부, 2011, 석탄재와 토사류 혼합에 관한 환경성 조사연구, 환경부산하 국립환경과학원, 행정간행물발간등록번호 11-1480523-000821-01.

Butalia, T.S. and Wolfe, W.E., 2001, Utilization of ohio coal combustion products, International Ash Utilization Symposium, Center for Applied Energy Research, University of Kentucky, Paper #75.

Li, L. and Benson, C. H., 2009, ASSESSMENT OF THE ROADWAY MODULE IN IWEM VERSION 2 (BETA) Final Report, Recycled Materials Resource Center, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI 53706 USA, RMRC Report 09-03.

Swaine, D.J. and Goodarzi, F., 1995, Environmental Aspects of Trace Elements in Coal, 1 edition, Springer, USA.

US EPA, 1991, MINTEQA2/PRODEFA2, A Geochemical Assessment Model For Environmental Systems: Version 3.0 User's Manual. US Environmental Protection Agency, Washington, DC.

US EPA, 2002a, User's Guide for the Industrial Waste Management Evaluation Model (IWEM). US Environmental Protection Agency, Washington, DC.

US EPA, 2002b, Industrial Waste Management Evaluation Model (IWEM) Technical Background Document (<http://www.epa.gov/osw/nonhaz/industrial/tools/iwem/>). US Environmental Protection Agency, Washington, DC.

US EPA, 2008, Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods, Document no. SW-846. 3rd Edition. US Environmental Protection Agency, Washington, DC.