

〈論 文〉

침출수 이동 해석을 통한 석탄재 처분방식의 평가

Evaluation of Fly Ash Disposal Methods by Analysis of Leachate Migration

李 相 逸*

LEE Sang Il

Abstract □ There are needs to examine the consequences of a regulation in effect to control the migration of leachates from disposal sites. The main objective of this study is to illustrate the methodology to evaluate basic disposal designs for compliance with a certain regulation. The "100/100 rule" is selected for demonstration purpose which dictates that the time for the leachates to travel a horizontal distance of 100feet (30.5m) away from the property where the landfill or pond is located must exceed 100 years. The two primary methods for disposal of ash from coal-fired utility plants, landfill and pond, are studied. Numerical groundwater flow analysis resulted in pressure head distributions and flux information in the cross-section of the domain while pathline analysis provided travel path and time of leachate migration to compliance zone.

요 지 : 폐기물 처분장으로부터 인간 생활 환경으로까지 침출수가 어떤 방향과 속도로 유출될 것인가하는 것은 많은 사람의 관심의 대상이며, 어떤 처분장 설계가 관련 규제법을 효과적으로 만족시키고 있는가를 알아야 할 필요가 있다. 침출수 이동에 관한 해석방법을 제시함에 있어, 화력발전의 결과로 생기는 석탄재의 폐기 방식중 두 가지 대표적인 방식인 매립방식과 연못방식에 대한 평가를 제시하였다. 관련 규제법으로는 "100/100 룰", 즉, 처분장으로부터 100ft (30.5m) 떨어진 곳까지 침출수가 도달하는데 100년 이상 걸려야 한다는 제약조건을 적용하였다. 수치해석에 의한 지하수 유동방정식의 해는 압력수두 분포와 유동량(flux)에 관한 정보를 제시하여 주었으며, 流跡線(pathline)의 해석은 침출수 이동 경로와 시간에 관한 예측을 가능케 하였다.

1. 서 론

각종 폐기물들은 여러가지 방식으로 처분 및 폐기되며, 이들을 인간의 생활환경으로부터 고립시키기 위하여 적정부지를 선정하고, Liner, Cover, 침출수 회수 시스템등을 설치하여 많은 노력이 기울여지고 있다. 그러나 이들 중 어느 것도 완벽하지는 않으며(Lee and Jones, 1991), 침출수가 처분장으로부터 새어나와 지하수 혹은 지표수를 오염시키는 사례가 많이 나타나고 있다. 미국의 경우, 침출수의 이동방향과 시간 등을 법에 명시함으로써 새로운 처분장 설계와 기존 처분장의 보완에 지침이 되고, 환경에 미치는 영향(environmental impact)을 최소화 하고 있으며(U.S. EPA, 1986), 우리나라에서도 최근 이 분야

에 관심이 집중되고 있다.

폐기물 처분장으로부터 침출수의 흐름이 관련 규제법을 효과적으로 만족시키는지 여부를 알아야 할 필요가 있으며, 본 연구의 주 목적은 폐기물 처분장 설계시 제안된 설계가 관련 규제법을 만족시키기를 알아보는 방법론을 화력발전의 결과로 생기는 석탄재(fly ash)의 경우를 통하여 제시하는데 있다.

여기서 고려한 규제법은 소위 "100/100 룰(rule)"이라고 하는 것으로서 미국 일리노이주에서 침출수가 매립장으로부터 수평거리 100ft(30.5m) 떨어진 곳까지 도달하는데 걸리는 시간이 100년을 넘어야 한다고 규제하는 내용이다.

미국의 경우, 매년 약 7천5백만톤의 固形폐기물이 화력발전의 부산물로 생산되어 1000개 이상의 처분장

*정회원, 충북대학교 수자원·수질연구센터, 선임연구원, 공학박사

에 폐기되며, 금세기 말에는 매년 1억5천만톤이 넘을 것으로 추산된다(Muraka and McIntosh, 1987). 처분 방식으로는 두 가지, 즉 습식(혹은 연못식, pond)이 53% 그리고 건식(혹은 매립식, landfill)이 47%를 차지하고 있다(Envirosphere, 1984).

여기서는 비교적 투수율이 높은 沖積土(Alluvium) 지형에 연못식과 매립식의 두가지 폐기방식에 의해 제안된 처분장 설계를 수치적인 방법에 의해 평가하는 방법을 제시한다. 그렇게함으로써 폐기물 처분 방식을 선정하는데 있어서 수문지질학적인 조건들이 어떠한 영향을 미치는지 알아보려고 한다.

2. 지하수 유동 방정식

처분장 주변에서의 습기(moisture)와 지하수의 거동은 복잡한 3차원 현상일 것이다. 그러나, 이러한 3차원 현상을 만족하게 해석할 수치모형의 확보가 용이하지 않고, 가능하다 하여도 모형의 보정을 위한 현장 자료가 부족한 경우가 많아, 2차원 모형에 의존하는 경우가 많다.

2차원 단면(cross-sectional)모형의 경우, 압력수두(pressure head)를 독립변수로 한 지배방정식은 다음과 같다(Huyakorn et al., 1984).

$$\frac{\partial}{\partial x_i} [\rho_w K_{ij} k_{rw} (\frac{\partial \Psi}{\partial x_j} + e_i)] = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_w \psi S_w) - \rho_w q \quad (1)$$

여기서 $x_i (i=1, 2)$ 는 공간좌표 [L], ρ_w 는 물의 밀도 [M/L³], K_{ij} 는 포화투수계수(saturated hydraulic conductivity)를 나타내는 tensor [L/T], k_{rw} 는 상대투수계수(relative permeability) [-], Ψ 는 압력수두 [L], e_i 는 연직 上方向의 단위내터 [-], t 는 시간 [T], ψ 는 유효공극률(effective porosity) [-], S_w 는 水相飽和度(water phase saturation) [-], 그리고 q 는 다공성 매질의 단위체적당 공급원(혹은 소멸원)을 통한 유량 [T⁻¹]이다.

약간 압축성이 있는 유체의 경우, 식(1)은

$$\frac{\partial}{\partial x_i} [K_{ij} k_{rw} (\frac{\partial \Psi}{\partial x_j} + e_i)] = \zeta \frac{\partial \Psi}{\partial t} - q \quad (2)$$

로 변환되며, 이때

$$\zeta = S_w S_s + \psi \frac{dS_w}{d\Psi} \quad (3)$$

이다. 계수 S_s 는 比貯溜量(specific storage) [L⁻¹]이며

$$S_s = \rho_w g (\psi b + a) \quad (4)$$

의 관계식을 갖는다. 이때 g 는 중력가속도 [L/T²], a 와 b 는 각각 다공성 매질과 물의 압축계수(coefficient of compressibility) [Pa⁻¹]이다. 식(1) 혹은 식(2)를 만족시키는 초기 및 경계조건은

$$\Psi(x_i, 0) = \Psi_0(x_i) \quad (5)$$

$$\Psi(x_i, t) = \Psi(B_1 \text{에서}) \quad (6)$$

$$\text{그리고 } V_{i,n_1} = -V_{i,n_2} (B_2 \text{에서}) \quad (7)$$

과 같이 표현할 수 있다. 이때 Ψ_0 는 주어진 초기 압력수두, B_1 은 압력수두가 Ψ_0 로 설정된 경계를, B_2 는 밖으로 향하는 수직속도(normal velocity)가 $-V_{i,n_2}$ 로 설정된 경계를 나타낸다. $V_{i,n}$ 는 Darcy의 속도내터, n_i 는 밖으로 향하는 단위수직내터이다.

단면모형의 경우 식(1) 혹은 식(2)를 풀기 위해서는 초기 및 경계조건과 함께 또 다른 관계식을 설정해야 하는데, 이는 다공성 매질, 즉 흙에 관한 물리적 특성을 규정하는 것으로서, 상대투수계수와 水相飽和度(k_{rw} 對 S_w), 그리고 압력수두와 水相飽和度(Ψ 對 S_w)의 관계이다. 이와같은 관계식으로는 다음과 같은 대표적인 세가지 유형이 이용되어 오고있다.

가) Brooks와 Corey(Brooks and Corey, 1966) 혹은 Mualem(Mualem, 1976)모형

$$k_{rw} = \frac{(S_w - S_{wr})^n}{(1 - S_{wr})^n} = S_w^n \quad (8)$$

여기서

$$S_w = \frac{1}{[1 + (\alpha |\Psi - \Psi_0|)^{\beta}]^{\gamma}} \quad \Psi < \Psi_0 \text{일때}$$

$$1 \quad \Psi > \Psi_0 \text{일때}$$

n, α, β, γ 는 실험에 의해 결정되는 계수, Ψ_0 는 공기유입압력수두 [L], 그리고 S_{wr} 은 殘留水相飽和度(residual water phase saturation) [-]이다.

나) van Genuchten과 Mualem 모형(van Genuchten, 1978)

$$k_{rw} = S_e^{1/2} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (10)$$

여기서,

$$S_e = \frac{S_w - S_{wr}}{1 - S_{wr}} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha \Psi)^n} \right]^m \quad (11)$$

n 과 m 은 $m = 1 - 1/n : 0 < m < 1, n > 1$ 을 만족시키는 실험계수.

다) van Genuchten과 Burdine 모형(van Genuchten, 1978)

$$k_{rw} = S_e^3 [1 - (1 - S_e^{1/m})^m] \quad (12)$$

S_e 는 (11)과 같고, $m = 1 - 2/n, 0 < m < 1, n > 2$.

유한차분법 혹은 유한요소법 등에 의해 지배 방정식(식(2))을 초기 및 경계조건(식(5)~식(7))과 흡의 특성곡선(식(8)~식(12))을 이용하여 풀어 압력수두(Ψ)의 분포를 구하면, Darcy 속도(식(13))와 공극간 유속(pore water velocity)(식(14))은 각각 다음과 같이 얻어진다.

$$V_i = -K_{ij} k_{rw} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial x_j} + e_i \right) \quad (13)$$

$$V_{pw} = V_i / (S_e \psi) = V_i / \theta \quad (14)$$

여기서 θ 는 습수比(moisture content) [-]이다.

평면모형에서는 대수층이 포화상태($S_w = 1, 0$) 임을 가정하며, 수두(hydraulic head)를 독립변수로한 지배 방정식은 다음과 같다(Bear, 1979).

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (K_{ij} H \frac{\partial h}{\partial x_j}) = \eta \frac{\partial h}{\partial t} - q \quad (15)$$

H 는 포화대수층의 두께 [L], η 는 貯溜係數(storage coefficient) [-]로서

$$\eta = \begin{cases} S_H \text{ 被壓帶水層(confined aquifer)} \\ S_e + S_H \text{ 非被壓帶水層(unconfined aquifer)} \end{cases} \quad (16)$$

이때 S_e 와 S_H 는 각각 대수층의 비저류량과 比產水率

(specific yield) [-]이다.

초기 및 경계조건은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$h(x, 0) = h_0(x) \quad (17)$$

$$h(x, t) = \bar{h} \quad (B_1 \text{에서}) \quad (18)$$

$$\text{그리고 } -(K_{ij} H) \frac{\partial h}{\partial x_j} n_i = Q_n \quad (B_2 \text{에서}) \quad (19)$$

h_0 는 초기 수두값, B_1 은 수두값이 \bar{h} 로 명기되는 경계, B_2 는 유동량 경계조건이 Q_n 으로 설정되는 경계이다. 공극간유속은

$$V_{pw} = \frac{-K_{ij}}{\psi} \left(\frac{\partial h}{\partial x_j} \right) \quad (20)$$

로 얻어진다.

유체의 흐름을 기술하는 크게 두 가지 방법 중에서, 앞서 소개한 Eulerian 방식은 전체 영역에 있는 모든 점에서의 유체의 거동을 임의의 시간에 동시에 표시하여 압력수두분포 등을 얻기 편리한 한편, Lagrangian 방식은 움직이는 입자들을 추적하여 그 流跡線(pathline)을 보는 방식이다. 流跡線은 물입자의 軌跡을 나타내며, 유체의 흐름방향과 이동시간 등을 해석하는데 유용하다.

특정 유체입자의 流跡線을 그 입자 거동의 시간에 따른 공간에서의 궤적이라고 정의할 때, 2차원에서는 다음과 같은 parametric equation의 해에 의해 해석적으로 표현될 수 있다.

$$\frac{dx}{V_x(x, y, t)} = \frac{dy}{V_y(x, y, t)} = dt \quad (21)$$

짧은 시간 간격 동안에 물입자가 움직인 이동거리의 Taylor series에 의한 근사치는

$$\begin{aligned} x &= x_0 + \frac{dx}{dt} \Delta t + \frac{dx^2}{dt^2} \frac{\Delta t^2}{2} + \dots \\ y &= y_0 + \frac{dy}{dt} \Delta t + \frac{dy^2}{dt^2} \frac{\Delta t^2}{2} + \dots \end{aligned} \quad (22)$$

이므로 (이때 (x_0, y_0) 는 출발지점, (x, y) 는 Δt 시간 간격 후의 도달지점), 속도와 가속도는

$$V_i = \frac{dx_i}{dt} \quad (23)$$

$$a = \frac{dV_i}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dx_i}{dt} \right) = \frac{d^2x_i}{dt^2}$$

이다. 속도항은 식(14)나 식(20)에 의해 쉽게 얻어지나, 가속도항은 좀 더 복잡하다. 즉, 定常流의 경우 가속도는

$$a = \frac{dV_i}{dt} = \frac{\partial V_i}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial V_i}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial t} \quad (24)$$

$$= V_x \frac{\partial V_i}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_i}{\partial y}$$

이며, 이의 계산을 위해서는 유속의 공간좌표에 대한 편미분($\partial V_i/\partial x$, $\partial V_i/\partial y$)이 필요하다. 포화대수층의 균질한 매질에서의 이 계산은 간단하지만, 불포화대수층에서는 흙의 특성성분의 편미분($\partial k_w/\partial x_i$ 와 $\partial S_w/\partial x_i$)이 요구되며 이는 앞서 설명한 흙의 특성곡선식으로부터 얻을 수 있다. 따라서 수두분포와 흙의 특성을 알면 流跡이 얻어지고, 이동시간은 간단히 “거리-속도-시간” 관계에 의해 쉽게 계산할 수 있다.

포화/불포화 대수층에서의 물입자의 궤적을 추적하는 수치 알고리즘은 Gupta등(1984)에 의해 개발되었다.

3. 대상지역

연구 대상지역의 수문 지질학적인 조건은 균질한 冲積層으로 비교적 높은 포화투수계수 86.4m/d를 갖는다. 기저에는 불투수층인 석회암(limestone)이 깔려 있다.

그림1은 대상지역에 설치가 고려되고 있는 두가지 폐기 방안을 나타내는 평면도이다. 이 site의 북동쪽 끝은 동쪽으로 흐르는 강으로 막혀 있으며, 그 수위는 홍수터로부터 약 10m 밑이다. 지역의 動水傾斜는 북동쪽으로 약 0.0012m/m, 강우로부터 추정된 평균 涵養(recharge)은 13.4cm/년이다. 그림2a와 2b는 각각 연못식과 매립식 처분장의 단면을 보여준다. 대상지역으로부터 얻은 冲積層의 수문 지질학적 인자들이

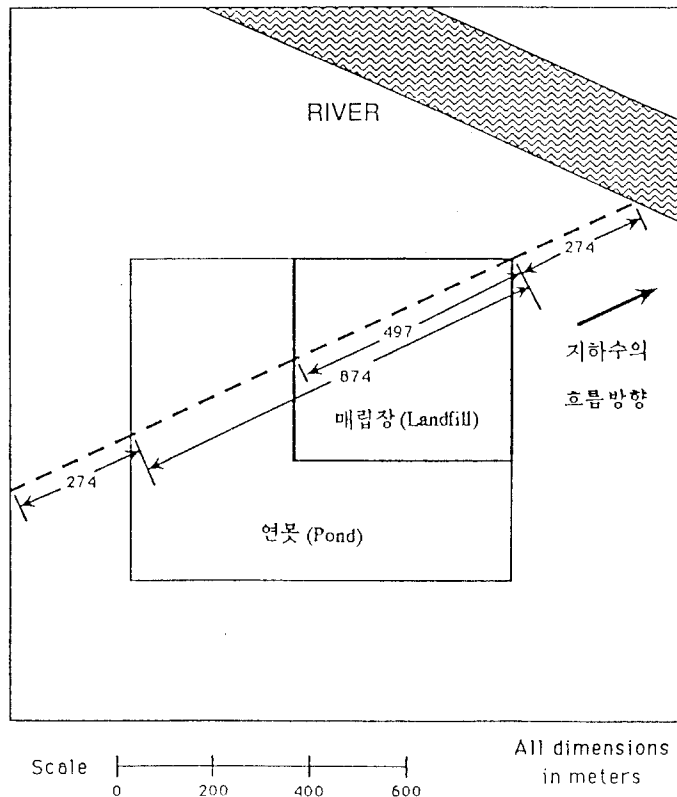


그림1. 대상지역과 폐기방안의 평면도

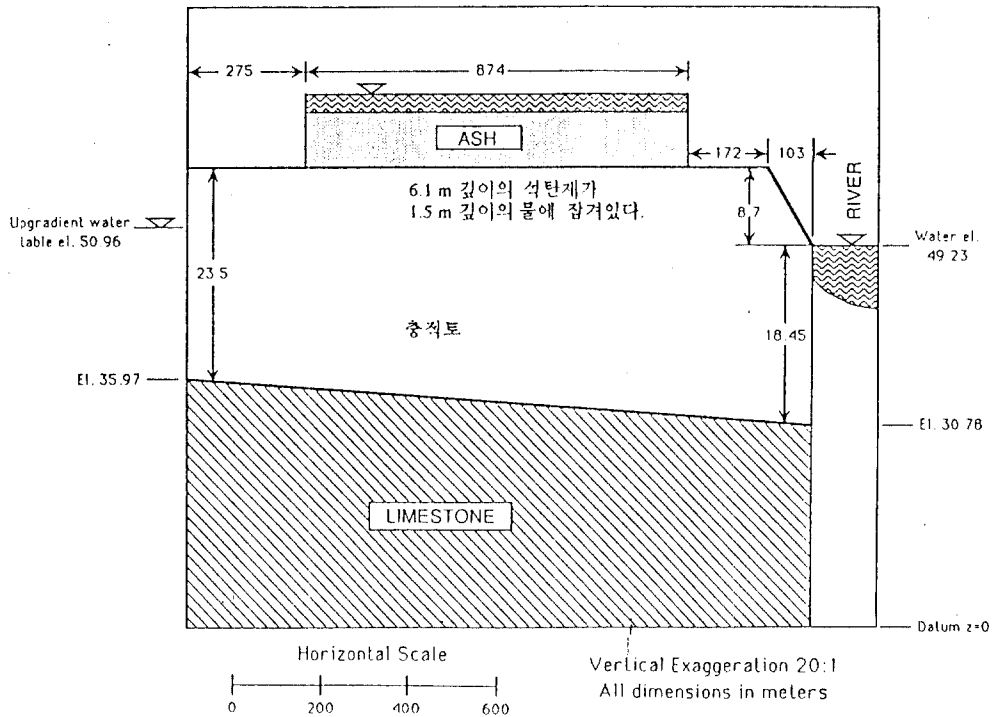


그림2a. 습식(연못식) 처분장의 단면

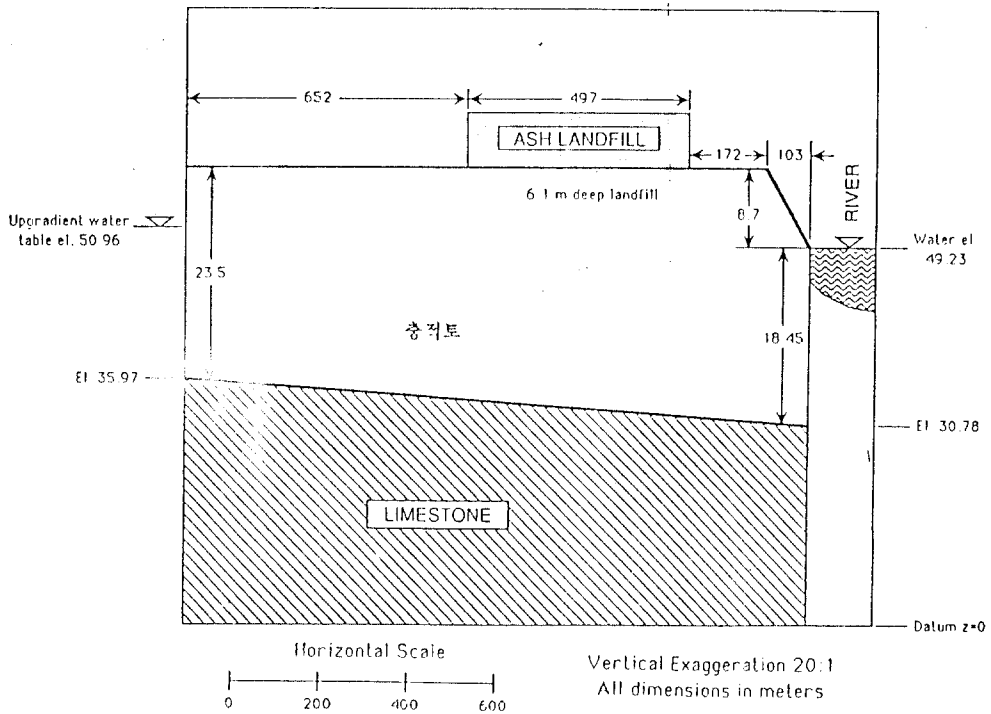


그림2b. 건식(매립식) 처분장의 단면

표1에 요약되어 있다. 여기에는 앞 절에서 소개한 흙의 물리적 특성곡선을 제외하고 필요한 모든 자료가 수록되어 있다.

흙의 특성곡선 대신에 冲積層의 쇠퇴점(wilting point)과 圃場容水量(field capacity)이 주어져 있으므로, 이들 자료와 일관된 특성곡선을 찾기위해 문헌에서 수집 가능한 몇가지 흙에 대한 吸入水頭(suction head)와 含水比의 관계를 그림3에 나타내었다. 이들 곡선들은 식(8)과 식(9), 그리고 표2의 계수들을 사용한 Brooks와 Corey 모형으로부터 얻어진 것이다.

일반적으로 포장용수량은 장력(tension)이 약 $1/3atm$ (즉, 吸入水頭 3.3m), 쇠퇴점은 장력 15atm(즉, 吸入水頭 150m)일때의 含水比로 알려져 있으므로(Linsley and Franzini, 1979), 그림3으로부터 여러 가지 흙 중에서 Cecil sandy loam과 L-soil이 주어진 자료에 가장 근사함을 알 수 있다.

본 연구에서는, 다른 추가의 자료가 없는 상황에서 곡선의 변화가 완만하여 해의 수렴에 보다 유리할 것

으로 판단되는 Cecil sandy loam의 흙의 특성곡선이 冲積層의 불포화층에서의 계산에 원용되었다.

건식방식의 설계는 $1.67 \times 10^5 m^3$ 의 매립장을 제안하며, 매립이 완료된후 6.1m 두께의 매립층을 통한 浸透(infiltration)는 총강우에 의한 涵養과 같다고 본다. 습식방식은 $6.0 \times 10^5 m^3$ 의 연못을 제안하며, 연못은 1.5m의 수심을 갖고, 그 밑에 6.1m 두께의 석탄재층을 갖게 된다. 이 석탄재층과 그 위의 물은 얇은 불투수벽에 의해 둘러싸이게 된다. 침출수의 지표로의 누수(seepage)를 최소화하기 위해 지표면에는 불투수 liner가 연못으로부터 50m 떨어진 곳까지 덮혀있게 된다. 석탄재의 특성곡선에 관련된 계수들은 표3에 수록되어 있다.

4. 수치모형

본 연구에서의 해석의 주된 목표는 매립장이나 연못으로부터 출발한 침출수가 流跡線을 따라 처분장

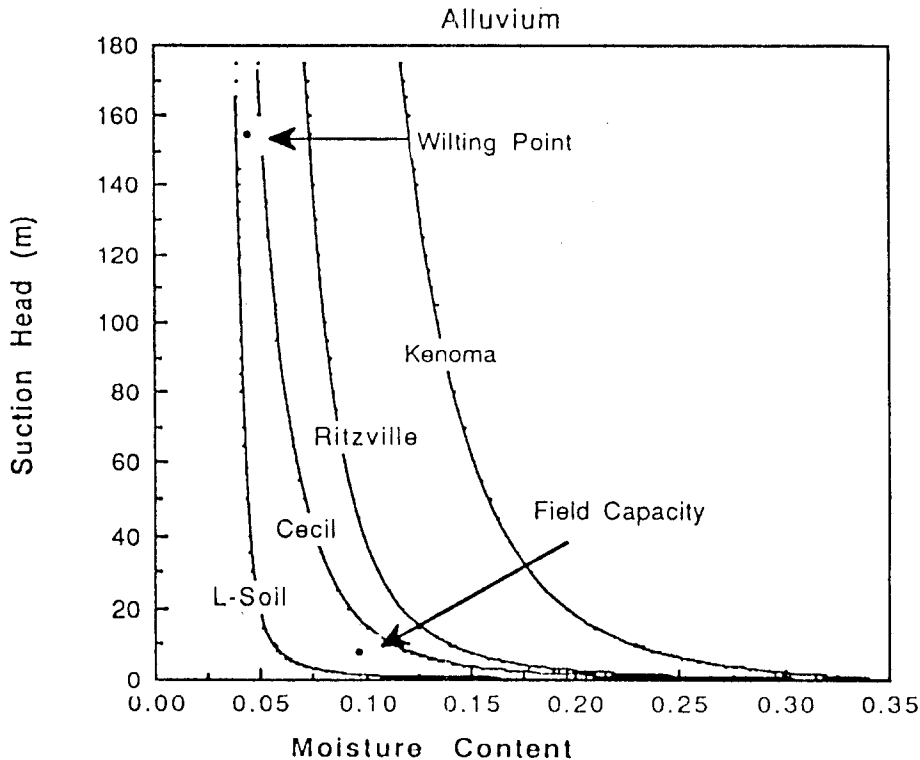


그림3. 여러가지 흙의 특성곡선

끝에서 100ft 수평으로 떨어진 곳까지 도달하는 최단 시간을 결정하는 것이다. 단면모형이 다음과 같은 이유로 선택되었다.

(1) 수평으로 100ft는 대수층의 두께 (평균 약 80ft) 와 거의 맞먹는다.

(2) 침출수의 流跡線이 불투수층을 연직 관통할 것이며, 연못이나 매립장 근처에서 수평하지 않다.

(3) 평면모형은 기본적으로 포화대수층에서의 지하수의 평면적 흐름만을 다루며, 따라서 어느 단면을 고려할 것인지 또는 고려할 단면모형의 경계와 그 경계조건을 결정하는데는 도움이 되지만, 평면모형만으로는 처분장 근방에서의 침출수의 이동 시간을 정확히 예측하고자 하는 데는 부적합하다.

단면모형을 위한 해석단면은 대상지역 지하수의 주된 흐름방향(그림1 참조)과 일치하는 면으로 선정하였다.

4.1 格子(Grid)

해석단면 선정 다음으로 중요한 단계는 유한요소의 격자를 선정하는 것이다. 이 연구에서는 압력수두의 해가 매우 비선형적인 관계로 특히 格子 선정에 어려움이 있었다. 모든 computer program들은 기억용량에 한계가 있기 때문에 유한요소의 수와 크기에 제한이 따를 수 밖에 없다. 즉, 수두가 선형적으로 변하는 포화대수층에서는 충분한 크기의 요소가 불포화층의 해석을 위해서는 너무 클 수가 있다. 따라서 포화대수층에서는 큰 격자를, 地下水位面(water table)과 석탄재층 근방에서는 작은 격자를 혼합하여 형성하였으며, 유한 요소법에 의한 다른 수치해석에서와 마찬가지로 시형오차에 의해 가장 적합한 격자망을 선정하였다.

불포화층에서의 유체의 흐름은 주로 연직방향일 것이므로, 여기서의 격자는 가로방향 길이가 세로방향 길이보다 길다. 그러나 가로방향 길이가 너무 길면 수치 알고리즘이 수렴하지 않거나 부정확한 압력수두로 수렴할 가능성이 있어 주의가 요구된다. 격자를 선정하고 입력하는데 시간과 노력이 많이 소요되므로, 1개의 격자망으로 연못방식과 매립방식 두 경우를 다 해석할 수 있도록 하였다.

최종적으로 결정된 격자는 773개의 절점(node)과 752개의 요소(element)로 구성되어 있다. 절점은 계수행렬의 bandwidth를 가능한한 적게 유지하기 위하여 좌로부터 우로 번호를 정하였다(Istok, 1989).

4.2 경계조건

연못방식의 경우 적용된 경계조건은 다음과 같다.

- 하류(강 밑)에서와 상류 끝에서 각각 일정한 수두값 즉, 지하수위의 표고를 갖는다.
- 강으로부터 연못 끝까지 그리고 연못의 상류 부분의 지표에서는 일정한 유동률을 갖는다.
- 연못 바로 옆의 절점에서는 침출수가 밖으로 나오는 것을 막기 위한 설계대로 유동이 없는 경계조건.
- 석탄재의 상부 표면을 따라서는 1.5m로 일정한 압력수두 값을 설정, 석탄재의 측면 표면을 따라서는 유동이 없는 경계조건
- 충전층과 석회석의 경계를 따라서는 유동이 없는 경계조건.

매립방식의 경우에는 다음의 두가지를 제외하고는 연못방식의 경우와 동일한 경계조건을 적용하였다.

- 지표면과 재의 상부 표면을 따라서는 유동이 없는 경계조건($q=3.66 \times 10^{-4} \text{ m/d}$).
- 연못방식의 해석을 위해 추가로 설정된 가상요소 에 대하여는 유동이 없는 경계조건.

선정된 격자망과 경계조건을 이용하여 2절에서 소개한 지배방정식을 유한요소법을 적용하여 개발된 지하수 해석 프로그램인 FASTCHEM™의 수두분포 해석 모인 EFLOW (GeoTrans and Battelle, 1988)와 유적선 해석 모인 ETUBE (Kincaid, 1988)를 이용하여 침출수 이동 해석을 수행하였다.

5. 결과 및 고찰

두가지 설계에 대한 수치결과는 표4에 요약되어 있으며, 이에 대한 고찰이 아래에 서술되어 있다.

5.1 연못방식의 경우

그림4는 압력수두의 縱斷面圖이다. 地下水位가 연못으로부터 유입되는 침출수 때문에 국부적으로 약간 상승되어 있음을 보여주고 있다. 석탄재는 재와 沖積層의 경계 부근을 제외하고는 포화되어 있음을 알 수 있고, 그 이하로는 불포화 지역이므로 포화/불포화 지역은 역전된 地下水位에 의해 구분되고 있다.

정상적인 그리고 역전된 地下水位 사이에 존재하는 불포화층에서의 압력수두는 매우 비선형적이기 때문에 수치해가 정확한지 확인하기 위해 아래와 같이 간단한 검증을 수행하였다.

석탄재층에서의 물의 흐름은 주로 하향일 것이다. 따라서 이곳에서 1차원 유동을 가정하고 연못으로부터의 유동량을 해석적으로 계산함으로써 수치적으로 구한 절점에서의 유동량과 비교하였다. 이를위해 석

탄재-沖積層 경계에 역전된 地下水位가 있다고 하였다. 이는 그림4에서 보는 바와 같고 물리적으로는 다음과 같은 이유로 타당한 것으로 보여진다. 즉,

(1) 충적층의 투수계수($K_s=86.4\text{m/d}$)가 석탄재의 투수계수($K_s=0.01\text{m/d}$)보다 훨씬 크다.

(2) 定常상태이므로 두 개의 상이한 층에서 물의 흐름은 같은 유동량을 가져야 한다.

(3) 석탄재층은 위로부터 수압을 받고 있다.

포화 다공성 매질에서의 Darcy의 법칙을 이용한 유동량은 수치모형에 의해 계산된 절점에서의 유동량과 1% 이내에서 일치하였다. 수치모형이 정확한 값으로 수렴하였음을 확인한 후, 다음으로 관심있는 사항은 연못으로부터의 총 유동량을 추정하는 것이다. 이를 위해 총 유동량은 경계 절점 유동량과 지하수 흐름

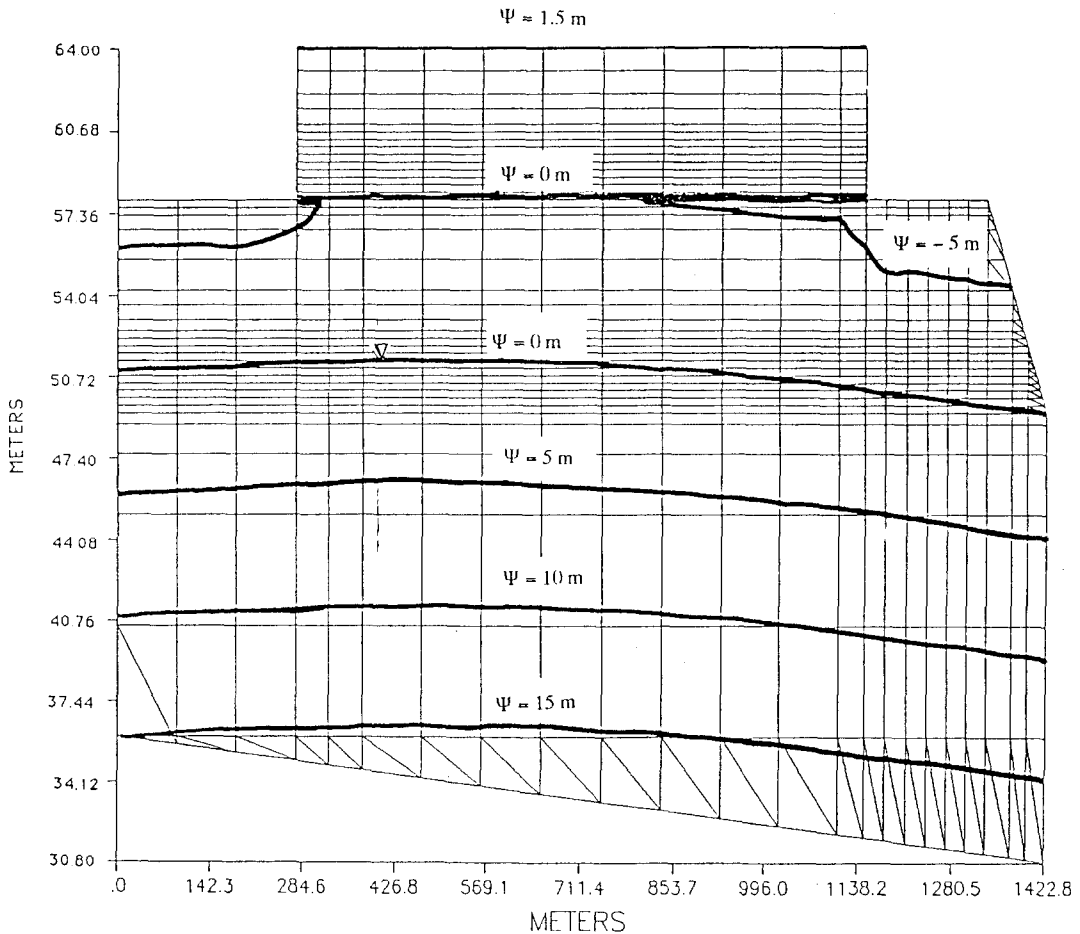


그림4. 습식 매립에서의 압력수두 분포

방향에 수직인 연못의 폭의 곱들의 합(그림5 참조)로 계산한 결과 5200m²/일로 추정되었다.

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i d_i \quad (25)$$

연못 내부 여러점들로부터 출발하는 流跡線들이 그림6에 실려있다. 연못 바로 밑부분에서는 침출수가 地下水面으로 거의 연직으로 흐름을 알 수 있다. 일단 포화층(즉, 지하수면)에 도달하면, 대부분의 물은 강쪽으로 흐른다. 그러나, 대상지역의 수두경사에 의한 지하수의 흐름보다 연못으로부터의 물의 유입이 더 지배적이기 때문에 물은 반드시 강쪽으로만 흐르는 않음을 알 수 있다.

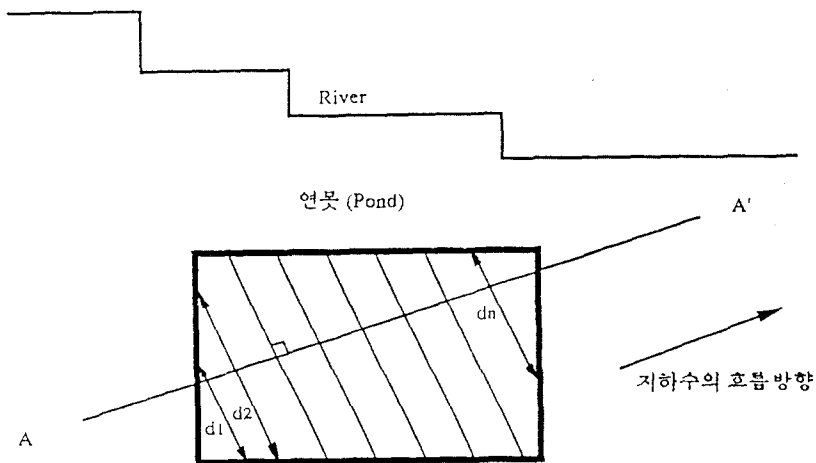
연못으로부터 100ft 떨어진 곳과 강까지의 이동시간을 계산하였다. 표4에서 보듯이, 지하수는 석탄재 하부로부터 연못의 하류 방향 100ft 떨어진 곳까지 도달하는데 단지 0.6년만이 소요될 뿐으로 100/100 규제법이 이 경우에는 만족되지 않음을 알 수 있다. 지하수의 이동속도는 지하수에 용해되어 다른 매질에로의 흡착(Adsorption), 전이(Transformation) 등이 되지 않는 오염물질(소위, conservative solute)의 이동속도와 동일할 것이므로, 침출수에 의한 환경에의 영향에 관한 최악의 상태를 산정 가능케 한다.

5.2 매립방식의 경우

연못방식의 경우와는 달리 매립장은 대상지역의 수문조건에 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있었다. 즉, 불포화층에서의 涵養에 의해 주도되는 연직류는 포화층에서의 물의 흐름에 큰 영향을 미치지 못하고, 따라서 地下水位의 상승도 매우 미미하다. 계산 결과에 의한 압력수두분포가 그림7에, 그리고 유적선들이 그림8에 나타나 있다.

이 경우에도 conservative한 오염물질은 100/100 규제법을 만족시키지 못할 것으로 판단되었다. 표4에서 보듯이, 매립장으로부터 강쪽으로 100ft 떨어진 곳까지 도달하는데 불과 8.7년이 걸리고, 이중 대부분의 시간(약 8.4년)은 전장 25m(수직으로 8m)의 불포화층을 통과하는데 소요되며, 이 불포화층의 대부분에서의 평균유속은 1.1m/년이나, 地下水位 바로 윗부분의 거의 포화된 부분에서는 약 5m/년으로 증가된다.

강까지의 도달시간은 10.6년으로 예측되었다. 비록 강은 매립장으로부터 약 240m 떨어져 있으나 도달시간은 100m까지 걸리는 시간보다 단지 2년 미만이 증가했을 뿐이며, 이는 포화층에서의 유속이 약 130m/년으로 매우 빠르기 때문이다.



A-A': 해석 단면

d_i : 절점에서의 flux 와 곱하여 총 flux 를 구하는 거리

그림5. 연못으로부터의 총 유동량을 구하기 위한 d_i 의 결정

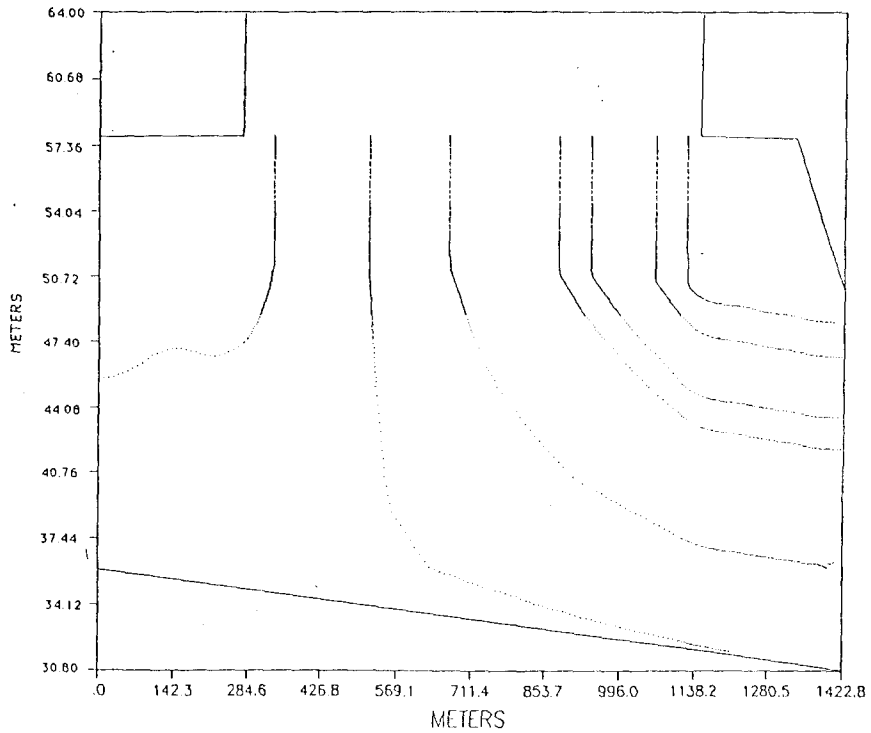


그림6. 연못으로부터 유출된 침출수의 流跡線

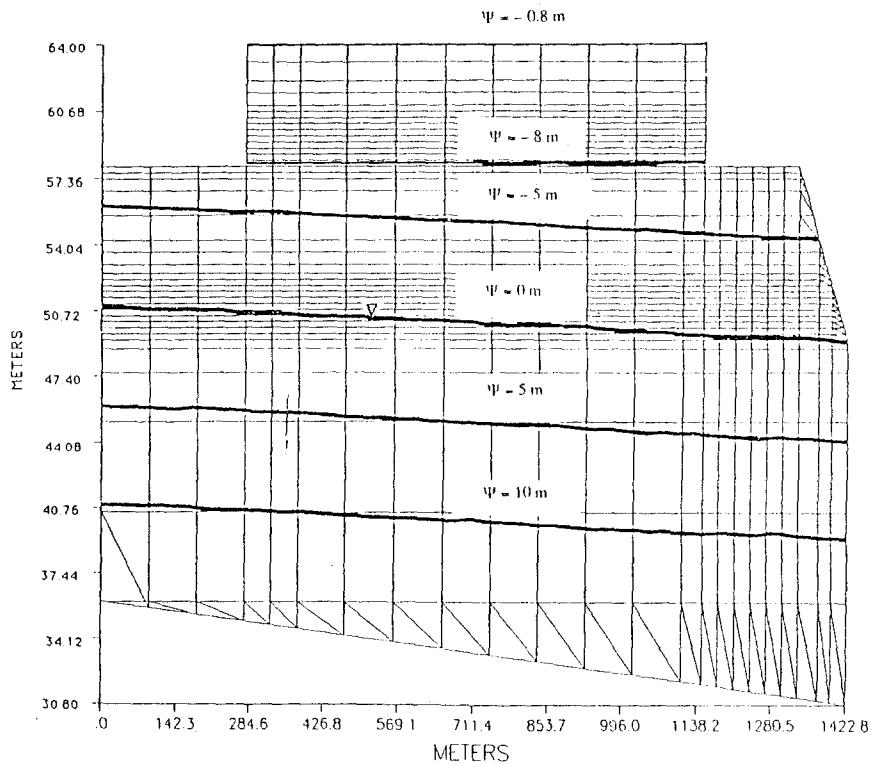


그림7. 건식 매립에서의 압력수두 분포

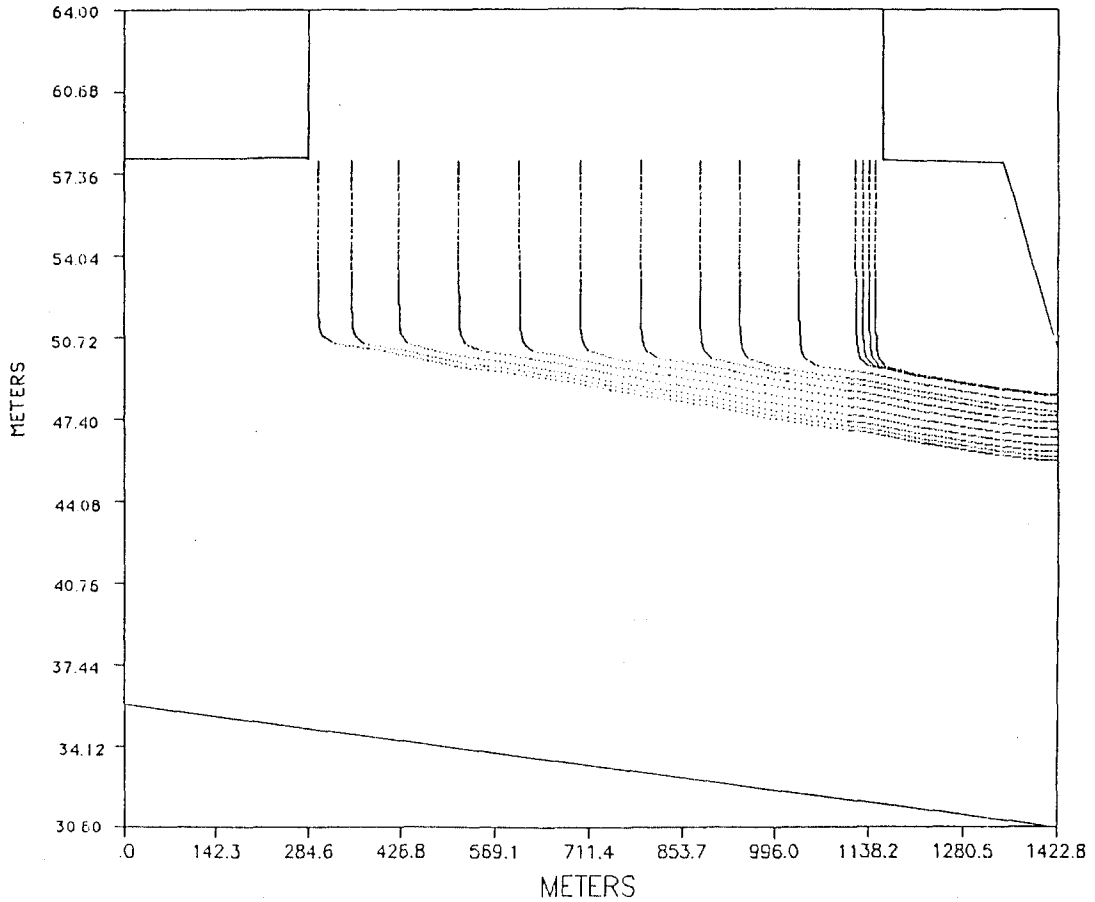


그림8. 건식 매립장으로부터 유출된 침출수의 流跡線

표1 冲積層에 관한 수문 지질학적 인자들

포화투수계수	86.4 m/d
유효공극률	0.30
체적밀도(bulk density)	1.86 g/cc
포장용수량(field capacity)	0.10 (vol/vol)
최퇴점(wilting point)	0.05 (vol/vol)

표2 冲積層의 특성곡선에 관련된 계수들(식(8)과 식(9) 참조)

α	β	γ	Ψ_a	n	S_{vr}
4.854	1.292	0.226	0	9.346	0.0

표3 석탄재(Fly ash)의 특성곡선에 관련된 계수들

α	β	γ	Ψ_a	n	S_{vr}
11	2.49	0.294	0	2	0.32

표4 연못식과 매립식 설계의 비교

	100ft까지의 침출수 이동시간(年)	강까지의 침출수 이동시간(年)	포화대수층 에서의 평균유속(m/년)	불포화 대수층에서의 평균유속(m/년)	연못바닥을 통한 총 유동량(mi/일)
연못(Pond)	0.6	1.2	366	21.2	5,200
매립(Landfill)	8.7	10.6	131	4.6	—

6. 결 론

생활 쓰레기, 산업 폐기물, 유해 폐기물, 핵 폐기물 등은 이들이 인간의 보건·환경에 주는 영향을 최소화하는 방법으로 처분 또는 폐기되어야 한다. 이 경우 침출수가 생활 환경에 도달하는 시간을 극대화하고 그 양을 최소화하는 지형의 선택과 시설의 설계가 필수적이다.

기존의 매립지로부터의 침출수 거동의 해석, 새로운 매립지의 선정, 특정 매립 시설물 설계의 적합성 등을 과학적이고 체계적으로 검토하기 위해서는 지하수와 오염물질의 흐름을 해석하는 일이 중요하며, 이를 위하여는 현장 측정과 아울러 해석적 또는 수치적 모형이 큰 역할을 한다.

본 연구에서는 특정 지역에 제안된 두가지 서로 다른 매립방법을 수치모형을 통하여 비교 검토하고, 침출수 이동시간에 관한 관련 법규에 이 안들이 부합될 수 있는가를 평가하였다. 화력발전의 연료로 사용되고 남은 석탄재(fly ash)의 경우를 들어 연구하였으며, 침출수 이동 시간에 관한 법규는 미국 일리노이 주의 "100/100 룰", 즉 시설물로부터 수평거리 100ft 떨어진 곳까지 도달하는데 100년 걸려야 함을 기준으로 삼았다. 그러나 본 연구에서 제시된 해석방법은 특정 처분 설계나 법규의 경중에 제한되지 않고 적용될 수 있음에 이 연구의 기여하는 바가 있다고 하겠다.

석탄재를 총적층 지형에 폐기하고자 할 때, 매립식과 연못식의 두가지 설계제안에 관하여 침출수가 "100/100 룰"을 만족시킬지의 여부를 수문 지질학적 방법론을 통하여 해석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 두꺼운 불포화대수층이 존재하는 경우 평면(areal) 모형 만으로는 침출수의 이동경로나 시간을 정확

히 예측할 수 없기 때문에, 단면(cross-sectional) 모형을 적절히 이용하여야 한다.

2. 유한요소의 격자망은 행렬계수의 bandwidth가 적게 유지되도록 구성하여야 하며, 압력수두가 매우 비선형적인 분포를 갖는 총적층/석탄재의 경계에서는 유한요소를 길고 얇게 조절 함으로써 수치해의 수렴과 정확성을 기할 수 있었다.
3. 流跡線을 이용한 해석은 물입자의 이동경로와 시간을 예측가능케 하며, 따라서 conservative한 오염물질을 상정할 경우, 침출수가 생활환경 (compliance zone)에 도달하는 최단시간과 경로 (즉, worst case scenario)를 산정할 수 있었다.
4. 제안된 연못식과 매립식의 두 처분장 설계는 주어진 규모와 수문지질학적 조건하에서는 침출수가 수평거리 100ft 이동하는데 각각 0.6년과 8.7년이 걸림으로써, 100년 걸려야 하는 제한조건을 만족시키지 못하였다.

감사의 글

본 연구는 미국 Electric Power Research Institute의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 매립방식 설계 해석에 도움을 준 Stanford 대학의 A. Ronan에 감사한다.

참고문헌

1. Bear, J. (1979), *Hydraulics of Groundwater*, New York, McGraw-Hill.
2. Brooks, R.H. and A.T. Corey (1966), *Properties of Porous Media Affecting Fluid Flow*, ASCE J. Irrig. Drain. Div., 92, IRS: 61-88
3. *Envirosphere* (1984), *Environmental Settings and Solid-Residues Disposal in the Electric Utility*

- Industry, Electric Power Research Institute, EPRI EA-3681, Palo Alto, CA.
4. GeoTrans and Battelle (1988), FASTCHEM™ Package : User's Guide to the Groundwater Flow Code, Palo Alto, Calif. : Electric Power Research Inst., EPRI EA-5870-CCM, Vol. 2.
 5. Gupta, S.K., C.R. Cole, F.W. Bond, and A.M. Monti (1984), Finite-Element Three-Dimensional Groundwater (FE3DGW) Flow Model : Formulation, Computer Source Listings, and User's Manual, Office of Nuclear Waste Isolation, Battelle Mem. Institute, Columbus, Ohio, BMI/ONWI-548.
 6. Huyakorn, P.S., S.D. Thomas, and B.M. Thomson (1984), Techniques for Making Finite-Elements Competitive in Modeling Flow in Variably Saturated Porous Media, Water Resources Research, 20(8), 1099-1115.
 7. Istok, J. (1989), Groundwater Modeling by the Finite Element Method, Water Resources Monograph 13, American Geophysical Union.
 8. Kincaid, C.T. (1988), FATECHEM™ Package : User's Guide to ETUBE, The Pathline and Streamtube Database Code, Palo Alto, Calif. : Electric Power Research Inst., EPRI EA-5870-CCM, Vol. 2.
 9. Lee, G.F. and R.A. Jones (1991), Landfills and Groundwater Quality, Groundwater, Vol. 29, No. 4, 482-486.
 10. Linsley, R.K. and J.B. Franzini (1979), Water Resources Engineering(3rd ed.), New York, McGraw-Hill.
 11. Mualem, Y. (1976), A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media, Water Resources Research, 12(3), 513-522.
 12. Muraka, I.P. and D.A. McIntosh (1987), Solid Waste Environmental Studies(SWES) : Description, Status, and Available Result, Electric Power Research Institute, EPRI EA-5322-SR, Palo Alto, CA.
 13. U.S. EPA (1986), RCRA Orientation Manual, Office of Solid Waste, Washington.
 14. van Genuchten, M. Th. (1978), Calculating the Unsaturated Hydraulic Conductivity with a New Closed-Form Analytical Model, Princeton, New Jersey : Water Resources Program, Dept. of Civil Eng., Princeton University, Research Report 78-WR-08.

-1992년 7월 25일 접수-