

매립지 차수재 두께 산정을 위한 컴퓨터 프로그램 개발

Development of a Computer Program to Estimate Landfill Liner Thickness

도남영* · 이승래** · 정광영***

Do, Nam-Young · Lee, Seung-Rae · Jeong, Kwang-Young

Abstract

In this study, research results on organic and inorganic pollutant migration through single and composite liner were summarized. On the basis of these summarized research results, a design program for landfill liner, which can be used to optimize the liner thickness based on the allowable ground water criteria around the landfill subsurface, was developed. A reasonable liner thickness was obtained from the program output results, in the case of the migration of Cl^- ion through a single clay liner. Therefore, the developed program could be used to carry out a preliminary design for landfill liners with respect to organic and inorganic pollutants.

Keywords : A design program for landfill liner, Organic pollutant, Inorganic pollutant, Single and composite liner

요 지

본 연구에서는 여러 연구자들에 의해 제안된 단일 점토 및 혼합 차수재를 통한 유기 및 무기 오염물질 이동에 관한 연구결과를 정리하여 보았고, 이러한 연구결과를 바탕으로 오염물질 유출 기준을 만족하는 차수재의 두께를 산정할 수 있는 차수재 설계 프로그램을 개발하였다. 본 프로그램을 이용하여 점토 차수재를 통한 Cl^- 이온의 이동성에 바탕을 둔 매립지 두께를 산정해본 결과 비교적 합리적인 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 본 연구에서 개발된 프로그램을 이용할 경우에는 비교적 간편한 방법으로 매립지 차수재의 예비설계를 수행할 수 있을 것으로 사료된다.

주요어 : 차수재 설계 프로그램, 유기 오염물, 무기 오염물, 단일 및 혼합 차수재

* 비회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 위촉연구원

** 정회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수

*** 비회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 석사 졸

1. 서론

1.1 매립지 차수 시스템 설계 개념

지금까지의 매립지 차수재의 주된 설계 개념은 차수재의 두께(>50~150 cm) 및 투수계수(1×10^{-7} cm/s)에 대한 기준만을 갖는 설계 개념(product-based design)이었다(Fig. 1).

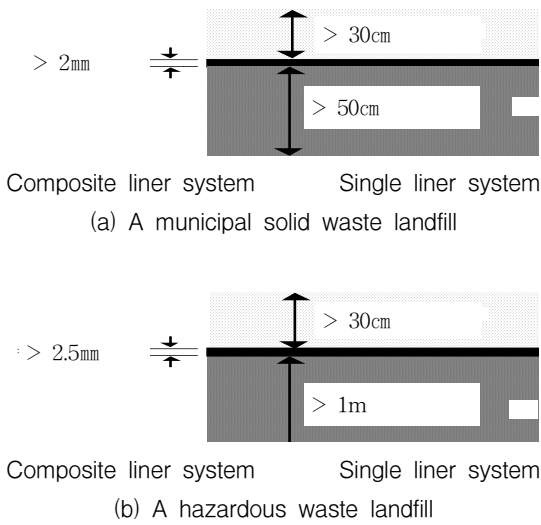


Fig. 1. Schematic view of liner systems (장연수와 이광열, 2001)

그러나 매립지와 같은 오염원으로부터 오염원 주변 지반 및 지하수 오염을 방지하는 차수재의 주된 기능에 기초한 설계개념(performance-based design)의 도입이 차수재 설계에 있어서 보다 합리적인 방법으로 고려되고 있다(Katsumi 등, 2001; Lo, 1996; Acar와 Haider, 1990; Shackelford, 1990). 차수재의 기능에 기초한 설계에 있어서 고려될 수 있는 기준은 1) 누수율(rate of leakage, Q), 2) 오염물질 이동량(solute flux, J), 3) 오염물질 농도(solute concentration, C), 4) 누수율(Q)이 차수재를 통과하는데 걸리는 시간(T_Q), 5) 오염물질 이동량(J)이 차수재를 통과하는데 걸리는 시간(T_J), 6) 오염물질 농도(C)가 차수재를 통과하는데 걸리는 시간(T_C) 등이 있을 수 있고 이러한 기준들이 제시된 이유는 오염원 주변 지하수의 수질을 일정수준으로 유지하기 위함이다(Katsumi 등 2001).

Table 1은 미국의 RCRA(Resource Conservation and Recovery Act)에서 도시쓰레기 매립지(Subtitle

D program) 주변 대수층에서의 지하수 수질 기준이다.

Table 1. Maximum concentration of constituents in the uppermost aquifer at Municipal solid waste landfills (40 CFR 258.40)

Chemical	MCL(mg/l)
Arsenic	0.05
Barium	1.0
Benzene	0.005
Cadmium	0.01
Carbon tetrachloride	0.005
Chromium(hexavalent)	0.05
2,4-Dichlorophenoxyacetic acid	0.1
1,4-Dichlorobenzene	0.075
1,2-Dichloroethane	0.005
1,1-Dichloroethylene	0.007
Endrin	0.0002
Fluoride	4
Lindane	0.004
Lead	0.05
Mercury	0.002
Methoxychlor	0.1
Nitrate	10
Selenium	0.01
Silver	0.05
Toxaphene	0.005
1,1,1-Trichloromethane	0.2
Trichloroethylene	0.005
2,4,5-Trichlorophenoxyacetic acid	0.01
Vinyl chloride	0.002

차수재의 기능에 기초한 설계(performance-based design)를 위해서는 약 40~50년간에 걸쳐(매립지 운영기간 + 매립완료 후 모니터링 기간) 매립지 차수재를 통한 오염물질 유출농도가 매립지 주변 대수층에서의 오염물질의 농도 기준(Table 1)을 초과하지 않도록 적절한 두께의 차수재를 설계해야 한다. 이를 위해서는 적절한 경계조건과 초기조건 하에서 매립지 차수재를 통한 오염물질 이동 모델링이 필수적으로 요구된다.

투수계수가 10^{-7} cm/s 이하로 매우 작은 매립지 차수재를 통한 오염물질의 이동 메카니즘은 확산(diffusion)과 지연현상(retardation)에 의해 크게 영

향을 받는 것으로 알려져 있다(Lo, 1996; Shackelford 등, 1989; Rowe와 Booker, 1985; Freeze와 Cherry, 1979). 따라서 차수재를 통한 오염물질의 이동은 이류-확산 모델(advection-diffusion model)에 의해 설명되어질 수 있다. 이류-확산 모델에 의한 오염물질의 이동을 설명하기 위해서는 합리적인 확산계수(diffusion coefficient)와 지연인자(retardation factor)의 산정이 중요하다.

합리적인 확산계수의 산정을 위해서는 현장에서 사용되는 것과 동일한 차수재 재료를 이용하여 확산 실험을 한 후 이때 구해지는 차수재내의 오염물질의 농도를 구하고 이를 바탕으로 한 이류-확산 모델의 보정을 통해 확산계수를 산정하는 것이 일반적인 방법이다. 또한 지연인자는 오염물질과 차수재 재료와의 반응에 의한 흡착평형과 이들 흡착평형을 묘사하는 현상학적 모델(phenomenological models)을 이용한 흡착평형상수(adsorption equilibrium constant)를 결정함으로써 구해진다. Fig. 2는 차수재의 기능에 기초한 설계가 매립지 차수재의 설계에 어떻게 이용될 수 있는지를 나타내주는 그림이다(Katsumi 등, 2001).

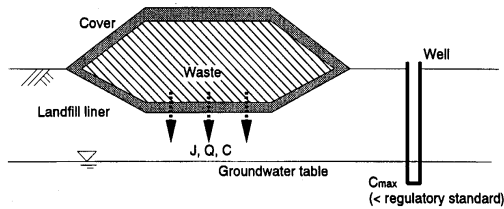


Fig. 2. Basic concept of performance-based design of landfill liners (Katsumi et al, 2001)

2. 매립지 차수재 설계 방법

최근의 매립지 차수재 설계는 점토차수재 상부를 지오멤브레인으로 덮는(Fig. 1 참조) 혼합차수재(composite liner)로 설계되고 있다. 따라서 본 절에서는 지오멤브레인 차수재와 점토차수재 각각에 대한 설계방법과 혼합차수재에 대한 설계방법에 대해 서술하였다.

2.1 지오멤브레인 차수재

지오멤브레인 차수재를 통한 오염물질 이동 메커니즘은 지오멤브레인의 구멍을 통한 누수(leakage)와 손상부분이 없는 지오멤브레인을 통한 확산(diffusion)으로 나눌 수 있다(Sharma와 Lewis, 1994). 지오멤브레인 파손에 의한 구멍은 그 크기에 따라 둘로 구분하는데 이 때 지오멤브레인 두께보다 작은 크기의 구멍을 작은 구멍(pinhole)이라 하고 지오멤브레인 두께보다 큰 크기의 구멍을 큰 구멍(hole)이라 한다. Giroud와 Bonaparte(1989)에 의하면 아무리 잘 시공된 지오멤브레인이라 할지라도 1-2 holes/ha는 피할 수 없으며, 시공 관리가 잘 되었을 경우에는 8-10 holes/ha, 시공 관리가 잘 되지 않았을 경우에는 17 holes/ha 정도의 결함(defects)이 발생하는 것으로 보고되었다.

작은 구멍(pinhole)을 통한 침출수의 흐름은 파이프를 통한 유체의 흐름과 비슷한 것으로 간주되어 Poiseuille의 식에 의해 식 (1)로 표현될 수 있다(Katsumi 등 2001; Sharma와 Lewis, 1994).

$$Q = \frac{\pi \rho g h_w d^4}{128 \mu t_g} \quad (1)$$

여기서,

- Q = leakage rate through pinhole
- ρ = density of liquid
- g = acceleration due to gravity
- h_w = liquid depth above geomembrane
- d = pinhole diameter
- μ = dynamic viscosity of the liquid
- t_g = geomembrane thickness

식 (1)에서 침출수의 밀도와 점성은 실질적인 관점에서 물의 밀도와 점성이 사용된다. 반면 큰 구멍(hole)을 통한 침출수의 흐름은 Bernoulli의 식에 의해 식 (2)로 표현된다(Katsumi 등 2001; Sharma와 Lewis, 1994).

$$Q = C_B a \sqrt{2 g h_w} \quad (2)$$

여기서,

- Q = leakage rate through geomembrane hole
- C_B = dimensionless coefficient which can be

obtained empirically
 = 0.6 is appropriate for most geomembrane holes
 a = hole area

식 (2)에서 C_B 값은 지오멤브레인의 찢어진 구멍 가장자리(aperture edges)의 형상에 관계된 계수 값으로 Table 2와 같은 값을 갖는다. 그러나 Benson 등(1995)의 연구에 의하면 대부분의 지오멤브레인에 있어서 0.6의 값이 적절한 것으로 보고되었다.

지오멤브레인의 파손에 의한 오염물질 이동량(solute flux)은 식 (3)으로 표현된다(Fig. 3 참조)(Katsumi 등 2001).

$$J_a = NQc_0 \quad (3)$$

여기서,

J_a = solute flux
 N = number of geomembrane holes per area
 c_0 = concentration of solute in the leachate above geomembrane

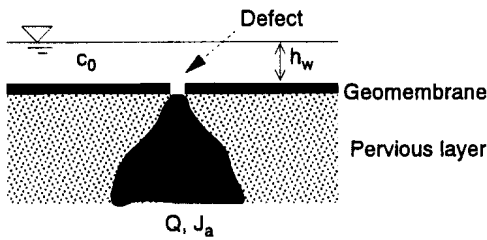


Fig. 3. Leakage through defects in a geomembrane(Katsumi et al., 2001)

매립지에서 발생하는 유기화합물(organic compounds)

의 경우에는 약 20~30년 이상에 걸쳐서 유발되는 것으로 알려져 있고, Park 등(1996)의 연구에 의하면 2.54mm HDPE라 할지라도 불과 수일에서 몇 달 동안에 지오멤브레인 내에서 유기오염물에 대한 정상상태(steady-state)에 이르는 것으로 보고되고 있다. 따라서 장시간 동안 유기오염물에 노출되는 지오멤브레인 차수 재를 통한 오염물 이동량(solute flux)은 식 (4)로 표현된다.(Fig. 4 참조)(Park 등, 1996).

$$J_d = D_g K_g \frac{c_0 - c_e}{t_g} \quad (4)$$

여기서,

D_g = diffusion coefficient for the solute in the geomembrane
 K_g = solute-geomembrane partition coefficient (dimensionless)
 c_0 = concentration of the organic chemical above the geomembrane
 c_e = concentration of the organic chemical beneath the geomembrane

식 (4)에서 지오멤브레인 분배계수 K_g 는 식 (5)로 표현된다(Park과 Nibras, 1993).

$$K_g = \frac{(M_\infty / M_S) \rho_{gm}}{C_{ex}} \quad (5)$$

여기서,

M_∞ = mass of permeant sorbed at equilibrium
 M_S = initial mass of the geomembrane
 ρ_{gm} = density of the geomembrane
 C_{ex} = concentration of permeant in contact with the geomembrane

Table 2. Entrance coefficients for holes through geomembranes(Foose, 1997)

Entrance coefficient, C_B	Comment	Reference
0.6	holes having sharp edges	Giroud & Boneparte (1989)
0.87	results of laboratory study	Gilbert & Tang (1993)
0.61	1 and 1.5mm thick geomembrane	Benson et al. (1995)
0.78	2.5mm thick geomembrane	Benson et al. (1995)

그리고 유기 오염물질 이동량을 보수적으로 추정하기 위해서는 식 (4)에서 c_e 를 0으로 가정한다. Fig. 4는 지오멤브레인을 통한 유기 오염물질의 확산 메커니즘을 보여준다(Katsumi 등, 2001).

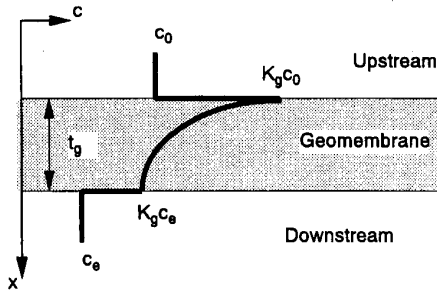


Fig. 4. Schematic view of concentration profiles for organic transport through geomembranes (Katsumi et al., 2001)

2.2 점토 차수재

점토 차수재를 통한 오염물질 이동은 이류-확산 방정식으로 나타낼 수 있다(Freeze와 Cherry, 1979) (식 (6))

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{D_h}{R} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - \frac{v_s}{R} \frac{\partial c}{\partial x} \quad (6)$$

여기서,

- c = concentration of the solute in the liquid
- D_h = hydrodynamic dispersion coefficient in the direction of transport
- v_s = seepage velocity

그리고 지연인자(retardation factor, R)는 다음 식 (7)로 표현되며 $R=1$ 일 경우 비반응성 오염물질이고 $R>1$ 일 경우 반응성 오염물질로 간주된다.

$$R = 1 + \frac{\rho_b}{n} K_p \quad (7)$$

여기서,

- ρ_b = dry bulk density of the soil,
- n = porosity of the soil,
- K_p = partitioning coefficient

수리동역학적 분산계수(hydrodynamic dispersion coefficient, D_h)는 기계적 분산계수(mechanical dispersion coefficient, D_m)와 유효확산계수(effective diffusion coefficient, D^*)의 합으로 표현된다.

$$D_h = D^* + D_m \quad (8)$$

여기서, 유효확산계수는 묽은 수용액에서의 분산계수(D_0)와 겔보기 꼬부라짐계수(τ_a)의 곱으로 표현되고(식 (9)), 기계적 분산계수(D_m)는 분산지수(dispersivity, α)와 침투속도(v_s)의 곱으로 표현된다(식 (10)).

$$D^* = D_0 \tau_a \quad (9)$$

$$D_m = \alpha v_s \quad (10)$$

van Genuchten과 Parker(1984)에 의하면 반 무한 시스템(semi-infinite system)에서 식 (11~13)과 같은 경계조건 및 초기조건 하에서 식 (6)의 해는 식 (14)와 같이 얻어진다.

$$c(x, 0) = 0 \quad x > 0 \quad (11)$$

$$[-D_h (\partial c / \partial x) + v_s c]_{x=0^+} = v c_0 \quad (12)$$

$$(\partial c / \partial x)(\infty, t) = 0 \quad (13)$$

식 (12)에서 $x=0^+$ 는 오염물질과 차수재가 접하는 경계에서 차수재 쪽으로 약간 들어간 지점을 나타낸다. 따라서 이러한 조건이 만족되기 위해서는 차수재와 침출수가 직접 접하고 있어야 하고, 침출수내의 오염물질 분포는 완전혼합(perfectly mixed)으로 가정되어야 한다.

$$\frac{c(x, t)}{c_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{Rx - v_s t}{2(D_h R t)^{\frac{1}{2}}} \right] + \left(\frac{v_s^2 t}{\pi D_h R} \right) \exp \left[-\frac{(Rx - v_s t)^2}{4D_h R t} \right] - \frac{1}{2} \left(1 + \frac{v_s x}{D} + \frac{v_s^2 t}{D_h R} \right) \exp \left(\frac{v_s x}{D_h} \right) \operatorname{erfc} \left[\frac{Rx + v_s t}{2(D_h R t)^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (14)$$

그러나 매립지 차수재의 설계를 위해서는 반무한 시스템에서의 해가 아닌 유한(finite) 시스템에 대한 해

가 필요하다(Fig. 5 참조). 따라서 식 (13)에서의 경계 조건은 식 (15)로 변환되어야 한다.

$$[-D_h(\partial c/\partial x) + v_s]_{x=L^-} = v c_e \quad (15)$$

여기서, $x=L^-$ 는 차수재의 끝단 경계에서 차수재 쪽으로 약간 들어간 지점을 의미하고, c_e 는 유출되는 농도를 의미한다. 또한 투수계수가 매우 작은 점토 차수재의 경우 수리동역학적 분산계수(D_h)는 유효확산계수(D^*)와 거의 일치하는 값을 갖는다. 따라서 앞서 구한 식 (14)를 미분하여 식 (15)에 직접 대입하고 $D_h=D^*$ 로 놓을 경우에는 식 (16)과 같이 길이 L 인 차수재를 통과하여 유출되는 오염물질의 시간에 따른 농도를 구할 수 있다(van Genuchten과 Parker, 1984; Shackelford, 1990).

$$\frac{c_e}{c_0} = \frac{1}{2} [erfc(z_1) + \exp(z_2)erfc(z_3)] \quad (16)$$

여기서,

$$\begin{aligned} z_1 &= \frac{L - v_R t}{2\sqrt{D_R^* t}}, & z_2 &= \frac{v_R L}{D_R^*} = \frac{v_s L}{D^*}, \\ z_3 &= \frac{L + v_R t}{2\sqrt{D_R^* t}}, & v_R &= v_s/R, \\ D_R^* &= D^*/R \end{aligned}$$

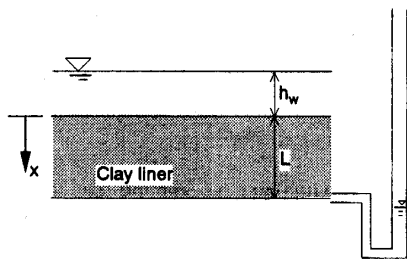


Fig. 5. Concept of chemical transport through clay liner(Katsumi et al., 2001)

따라서 점토차수재의 간극률(n)와 건조밀도(ρ_b)가 일정할 경우 각각의 오염물질별 지연인자(R), 확산계수(D^*), 침투속도(v_s)를 실내실험이나 현장실험으로 구하고 이를 식(16)에 대입하여 유출 농도를 구한다. 식 (16)을 무차원 계수로 나타내면 식 (17)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{c_e}{c_0} = \frac{1}{2} \left[erfc\left(\frac{1 - T_R}{2\sqrt{T_R/P_L}}\right) + \exp(P_L)erfc\left(\frac{1 + T_R}{2\sqrt{T_R/P_L}}\right) \right] \quad (17)$$

여기서,

$$T_R = \frac{v_s t}{RL} = \frac{v_R t}{L} \quad : \quad P_L = \frac{v_s L}{D^*}$$

점토 차수재를 통과하는 오염물질 이동량(solute flux)은 이류에 의한 이동량(J_A)과 확산에 의한 이동량(J_D)의 합으로 나타낼 수 있다. 식 (18)과 식 (19)는 각각 이류에 의한 이동량과 확산에 의한 이동량을 나타내고, 식 (17)에서 구한 c_e 와 농도의 미분 값을 각각 식 (18)과 (19)에 대입할 경우 식 (20)과 (21)로 나타낼 수 있다(Shackelford, 1990).

$$J_A = n v_s c_e \quad (18)$$

$$J_D = -D^* n \frac{\partial c}{\partial x} \quad (19)$$

$$J_A = \frac{1}{2} n v_s c_0 [erfc(z_1) + \exp(z_2)erfc(z_3)] \quad (20)$$

$$J_D = \frac{1}{2} D^* n c_0 \left[\frac{2\exp(-z_1^2)}{\sqrt{\pi D_R^* t}} - \frac{v_s}{D^*} \exp(z_2)erfc(z_3) \right] \quad (21)$$

식 (20)과 (21)을 무차원 계수로 나타낼 경우 식 (22)와 (23)으로 나타낼 수 있다.

$$J_A = \frac{1}{2} n v_s c_0 \left[erfc\left(\frac{1 - T_R}{2\sqrt{T_R/P_L}}\right) + \exp(P_L)erfc\left(\frac{1 + T_R}{2\sqrt{T_R/P_L}}\right) \right] \quad (22)$$

$$J_D = \frac{1}{2} \frac{D^*}{L} n c_0 \left[\frac{2\exp\left(-\frac{1 - T_R}{2\sqrt{T_R/P_L}}\right)^2}{\sqrt{\frac{\pi T_R}{P_L}}} - P_L \exp(P_L)erfc\left(\frac{1 + T_R}{2\sqrt{T_R/P_L}}\right) \right] \quad (23)$$

따라서 오염물질의 전체 이동량(J)은 식 (22)와 (23)의 합으로 식 (24)와 같이 나타낼 수 있다.

$$J = J_A + J_D = \frac{1}{2} \frac{D^*}{L} n c_0 \left[\frac{v_s L}{D^*} (Q_1 + Q_2) + Q_3 - P_L Q_2 \right] \quad (24)$$

여기서,

$$Q_1 = \operatorname{erfc}\left(\frac{1 - T_R}{2\sqrt{T_R/P_L}}\right),$$

$$Q_2 = \exp(P_L)\operatorname{erfc}\left(\frac{1 + T_R}{2\sqrt{T_R/P_L}}\right),$$

$$Q_3 = \frac{2\exp\left(-\frac{1 - T_R}{2\sqrt{T_R/P_L}}\right)^2}{\sqrt{\frac{\pi T_R}{P_L}}}$$

그리고 무차원 이동양수(dimensionless flux number, F_N)는 식 (25)로 표현될 수 있다(Shackelford, 1990).

$$F_N = \frac{JL}{nc_0 D^*} = \frac{1}{2}(P_L Q_1 + Q_3) \quad (25)$$

결과적으로 임의의 매립지 관리기간(운영기간+사후관리 기간)안에 점토 차수재를 통과하는 오염물질의 농도나 이동량이 매립지 주변 지하수의 수질 관리 기준을 만족하기 위해서는 다음의 과정을 반복하여 판단하여야 한다. 1) 실내실험이나 현장실험을 통한 점토 차수재의 합리적인 투수계수, 확산계수, 지연인자를 구한다. 2) 차수재 두께 L 을 가정한다. 3) 1)에서 구한 파라미터를 식 (17)과 (25)에 대입하여 시간에 따른 농도 변화나 이동량을 구한다. 4) 매립지 관리기간 안에 통과하는 오염물질의 농도가 수질 기준 값을 초과하는지 조사한다. 5) 수질 기준을 초과할 경우에는 차수재 두께를 다시 가정하고 3)과 4)의 과정을 반복한다.

2.3 혼합차수재(Composite liner)

점토 차수재를 전체적으로 덮어주는 지오멤브레인의 기능은 점토 차수재를 통한 오염물질의 유출 단면적을 최소화시키는 것이다. 그러나 철저한 시공관리가 이루어진다 할지라도 지오멤브레인의 결함(defects)에 의한 누수(leakage)는 일어날 수 있기 때문에 지오멤브레인과 접촉되어 있는 점토 차수재의 기능 또한 중요하다. 따라서 지오멤브레인과 점토 차수재를 각각 단일 차수재로 사용했을 경우에 비해서 혼합차수재 시스템을 사용한 경우에 차수시스템의 기능을 향상시킬 수 있다.

Park과 Nibras(1993)의 연구에 의하면 1일 미만의 시간안에 상당량의 휘발성 유기물질(volatile organic

compounds, VOCs)들이 지오멤브레인을 통해 확산 되는 것으로 보고되었다. 따라서 혼합 차수재를 통한 휘발성 유기오염물질의 이동을 파악하는데 있어서 지오멤브레인의 결함 부분을 통한 누수뿐만 아니라 지오멤브레인과 점토차수재를 통한 확산에 의한 이동 또한 혼합 차수재 설계에 있어서 중요한 고려 사항이다(Foose 등, 2002). 그러나 지오멤브레인의 무기 오염물질(inorganic solutes)에 대한 확산은 휘발성 유기오염물질의 확산에 비해 무시할 정도로 작은 것으로 나타났다. 따라서 무기 오염물질의 차수재를 통한 이동의 경우에는 지오멤브레인의 결함에 의한 오염물질 유출과 점토차수재를 통한 이류와 확산에 의한 이동을 동시에 고려해야 한다(Haxo와 Lahey, 1988).

휘발성 유기 오염물질과 무기 오염물질의 혼합 차수재를 통한 이동을 정리해 보면 1) 지오멤브레인의 결함을 통한 무기 및 유기 오염물질의 유출과 연이은 점토 차수재를 통한 이류-확산에 의한 오염물질 이동, 2) 결함이 없는 지오멤브레인과 점토 차수재를 통한 유기 오염물질의 확산에 의한 오염물질 이동으로 정리할 수 있다(Fig. 6).

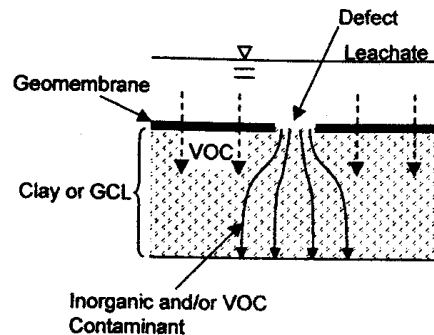


Fig. 6. Pathways of contaminant transport in composite liners(Foose et al., 2002)

지오멤브레인의 결함에 의한 혼합차수재를 통한 누수율(rate of leakage)을 계산하는데 있어서 지오멤브레인과 점토 차수재와의 접촉상태, 지오멤브레인 결함의 크기와 형상, 점토 차수재의 두께는 반드시 고려되어야 한다. 지오멤브레인과 점토 차수재와의 접촉상태가 좋을 경우 점토 차수재의 지오멤브레인의 결함에 따른 노출 면적이 작은 반면에 지오멤브레인의 구겨짐 등에 의한 나쁜 접촉 상태에 있을 경우 점토 차수재와 지오멤브레인 사이의 공간을 통한 자유로운 오

염물질 이동에 따라 접촉상태가 좋을 경우에 비해 오염물질의 유출량이 많아진다(Katsumi 등, 2001).

혼합차수재를 통한 오염물질의 이동은 일차적으로 지오멤브레인의 결함에 의한 이동과 연이은 점토 차수재를 통한 이동으로 이루어져 있다(Fig. 7). 실질적으로 혼합차수재를 통한 오염물질의 이동은 3차원적인 흐름이지만 이를 1차원적인 흐름으로 단순화시켜 해석하는 것이 실용적인 관점에서 보다 합리적이다(Katsumi 등, 2001). 따라서 3차원적인 흐름을 1차원적으로 가정하였을 때 혼합차수재를 통한 누수율(Q_e)은 단순화된 모형에서의 유효 단면적(A_e)을 통과하는 단위시간당의 침출수량이다(Fig. 7). 이때 유효단면적은 Fig. 7(a)에서의 오염물질 누수율(Q)과 동일한 누수율(Q_e)을 주는 단면적으로 정의되며 식 (26)으로 표현된다.

$$A_e = \frac{Q_e}{ki} \quad (26)$$

여기서, i 는 1차원 흐름에 있어서의 평균 동수경사

로써 식 (27)로 표현되고 k 는 투수계수 이다.

$$i = 1 + \frac{h_w}{L} \quad (27)$$

혼합차수재를 통한 누수율(Q_e)은 지오멤브레인의 결함 형태(shape of defects), 점토 차수재와의 접촉 상태, 침출수위(depth of leachate)에 따라 달라지게 된다. 지오멤브레인의 결함 형태가 원형일 경우의 Q_e 는 식 (28)로 표현되며, 선형 결함일 경우의 Q_e 는 식 (29)로 표현된다(Foose, 1997).

$$Q_e = F_r k h_t \quad (28)$$

$$Q_e = F_w k h_t \quad (29)$$

여기서,

h_t = total head drop across the composite liner

F_r and F_w = flow factor(Table 3)

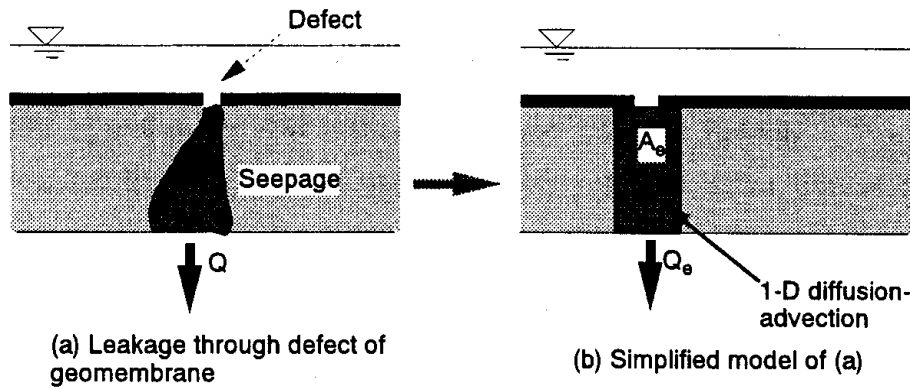


Fig. 7. Conceptual diagram of simplified analysis of solute transport through composite liners(Katsumi et al., 2001)

Table 3. Equations to calculate flow factors(Foose, 1997)

Contact condition	circular defect F_r	long defect F_w
perfect contact	$F_r = 4r^{*1}$	$F_w = 2.78/\ln(1 + \frac{2.78L}{w})^{*2}$
good contact	$F_{r,g} = 768r^{*0.19}$	$F_{w,g} = 6.45F_r$
poor contact	$F_{r,p} = 4209r^{*0.19}$	$F_{w,p} = 15.16F_r$

*1 r = radius of the defect,

*2 w = width of a long defect

혼합차수재를 통해 이동하는 오염물질의 농도 (c_e)와 이동량(J_e)은 각각 식 (17)과 (25)로부터 구한다. 하지만 이 때 구해진 이동량(J_e)은 단면적 A_e 를 통한 이동량이기 때문에 전체 단면적을 통한 이동량(J)은 다음 식 (30)으로부터 구한다.

$$J = J_e N A_e \quad (30)$$

휘발성 유기오염물(VOCs)의 혼합차수재를 통한 주요 이동메커니즘은 지오멤브레인과 점토차수재를 통한 확산인 것으로 보고되었다(Park 등, 1996). Foose(1997)은 다층 지반에 대한 등가투수계수를 구하는 방법을 이용하여 휘발성 유기오염물질의 등가 확산계수(equivalent diffusion coefficient, D_{eq})를 해석적으로 구하는 방법을 제안하였다.

질량보존의 법칙에 근거하면 지오멤브레인을 통과하는 휘발성 유기오염물질의 이동량(J_1)은 점토차수재를 통과하는 이동량(J_2)과 동일하므로 식 (31)과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_1 = \frac{K_g(c_1 - c_2)}{t_g} D_g = J_2 = \frac{(c_2 - c_3)}{L} n D^* \quad (31)$$

여기서,

- K_g = partition coefficient of the geomembrane
- c_1 = concentration of contaminant above the geomembrane
- c_2 = concentration at the top of the soil layer
- c_3 = concentration at the base of the liner
- t_g = thickness of the geomembrane
- L = thickness of the soil layer
- D_g = diffusion coefficient of the geomembrane
- D^* = effective diffusion coefficient of the soil liner
- n = porosity of the soil layer

따라서 혼합차수재 전체 층을 통과하는 휘발성 유기

오염물질의 등가 확산계수는 동일한 농도구배 하에서 각 층을 통과하는 오염물질의 이동량과 동일한 전체 단면적을 통한 이동량(J) (식 (32))을 주는 확산계수이다(식 (33))(Fig. 8 참조).

$$J = \frac{(c_1 - c_2) + (c_2 - c_3)}{t_g + L} D_{eq} = J_1 = J_2 \quad (32)$$

$$D_{eq} = \frac{t_g + L}{\frac{t_g}{D_g K_g} + \frac{L}{D^* n}} \quad (33)$$

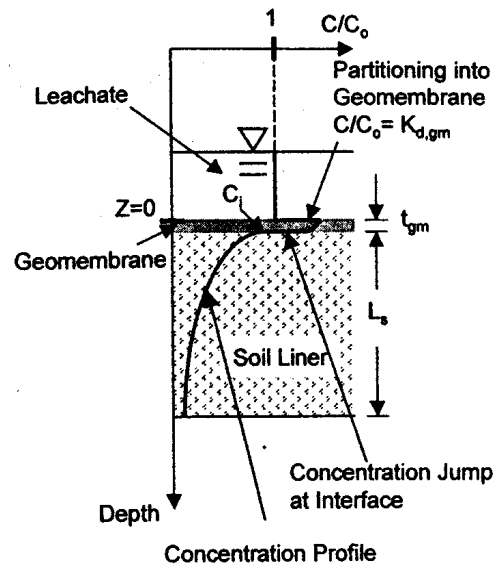


Fig. 8. Schematic view of contaminant transport of VOCs in intact composite liners(Foose et al., 2002)

Fig. 9는 점토 차수재의 두께 변화에 따른 등가 확산계수 값의 변화를 보인 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 점토 차수재의 두께가 일정한 값 이상일 경우에 등가확산계수는 D^*n 에 접근함을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 혼합차수재에 대한 등가확산계수는 일정 두께 이상의 점토 차수재가 설치된 경우 점토 차수재의 특성에 좌우된다는 것을 알 수 있다(Foose, 1997).

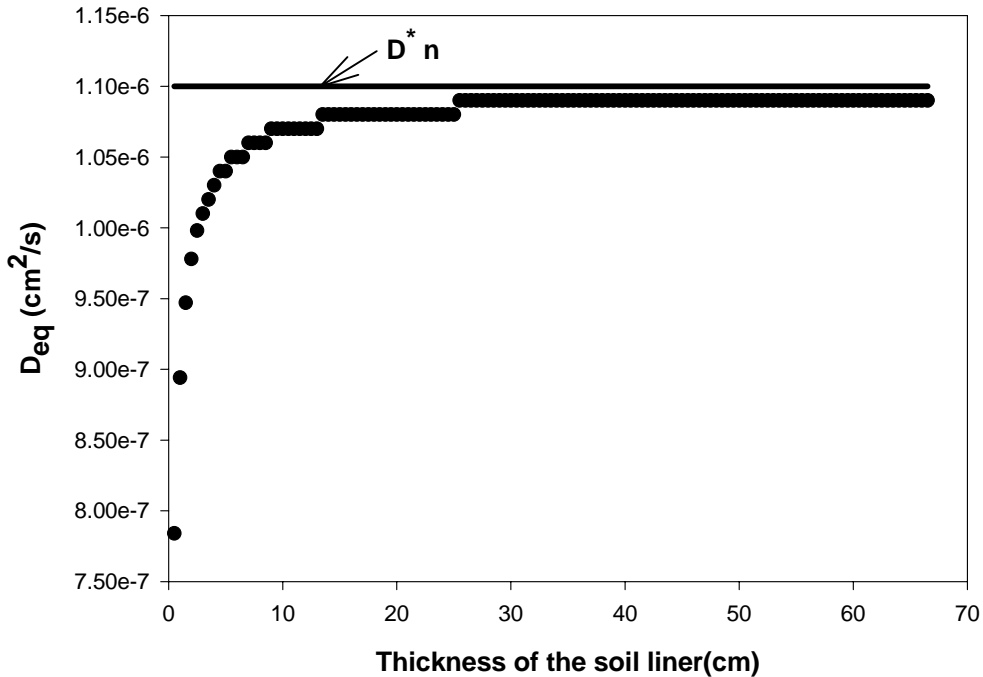


Fig. 9. Equivalent diffusion coefficient vs. thickness of the soil liner

결과적으로 휘발성 유기오염물질의 혼합차수재를 통한 이동은 점토 차수재를 통한 확산에 의해 좌우된다는 것을 알 수 있다. 따라서 휘발성 유기오염물질의 혼합차수재를 통한 확산은 식 (34)와 (35)로 나타낼 수 있고 이러한 해석 결과는 Foose 등(1999)에 의해 수행된 3차원 해석 결과와 잘 일치하는 결과를 보였다(Katsumi 등, 2001).

$$\frac{c_e}{c_0} = \operatorname{erfc} \left[\frac{1}{2\sqrt{D^*t/L^2R}} \right] \quad (34)$$

$$\frac{J}{nc_0} = \frac{1}{\sqrt{\pi t/D^*R}} \exp \left[-\frac{1}{4D^*t/L^2R} \right] \quad (35)$$

3. 매립지 차수재 설계 프로그램

차수재의 기능에 기초한 설계를 위해서는 2절에서

설명한 바와 같이 일정 기간에 걸쳐 차수재를 통과하는 오염물질의 농도가 지하수 수질기준이나 음용수 기준을 넘지 않도록 하는 적절한 차수재의 두께를 산정해야 한다. 이때 차수재를 통과하는 오염물질의 시간에 따른 농도변화를 예측하기 위해서는 현장 상태를 모사할 수 있는 실내실험이나 현장실험을 통한 합리적인 지연인자와 확산계수를 산정해야 한다. 그리고 구해진 계수 값을 이용하여 시간에 따른 농도변화와 오염물질 이동량을 예측한다. 예측된 오염물질 유출 농도가 매립지 관리기간 안에 유출될 수 있는 오염물질 농도기준(지하수 수질기준 또는 음용수 기준)을 만족하는지 살펴보고, 만약 만족되지 않을 경우 오염물질 농도기준을 만족할 수 있는 새로운 차수재 두께를 가정하여 앞의 과정을 반복한다. 이러한 과정을 흐름도로 나타내면 Fig. 10과 같다(Cokca, 1999).

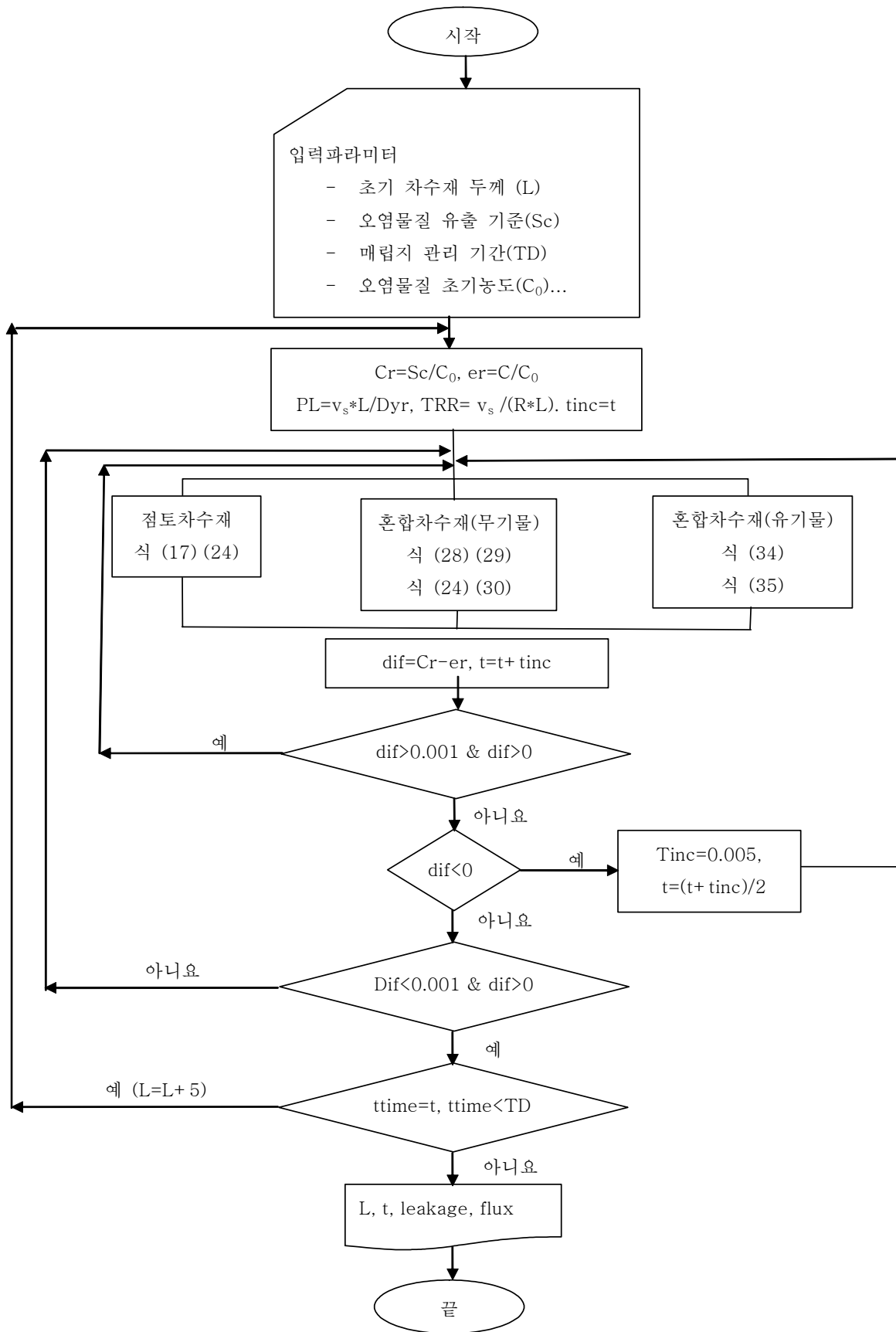


Fig. 10. Flow chart for landfill liner design

Fig. 10의 흐름도를 바탕으로 한 차수재 설계 프로그램은 매립지 점토 차수재와 혼합차수재의 예비 설계에 사용될 수 있고, MATLAB (version 5.3)으로 코딩되었다. 이때 차수재 설계 프로그램의 입력 자료는 윈도우 창을 통해 입력받을 수 있다. 그리고 점토 차수재 또는 혼합차수재 설계에 있어서 공통으로 요구되는 입력자료들로는 매립지 운영기간(TD), 오염물질 초기농도(c_0), 지하수 수질기준(s_c), 침출수 수위(h_w), 점토 차수재 두께(L), 점토차수재 투수계수(k), 점토차수재 간극률(n), 자연인자(R), 확산계수(D)가 있고, 혼합차수재일 경우에만 요구되는 입력자료들로는 지오멤브레인 구멍갯수(N), 지오멤브레인 구멍반경(r), 지오멤브레인 결함폭(w)이 있다. 또한 점토 차수재 설계를 위해서는 혼합차수재 설계를 위해 요구되어지는 입력자료들을 0으로 입력하거나 임의의 숫자를 입력해도 무관하다. Fig. 11은 입력자료 윈도우 창이다.

3.1 차수재 설계 프로그램 검증 및 실행 결과

본 연구에서 제시된 차수재 설계 프로그램은 매립지 운영기간 동안 차수재를 통한 오염물질의 유출농도가 지하수 수질 기준을 만족하도록 적절한 차수재의 두께를 산정하는 것이다. 따라서 차수재 설계 프로그램의 검증을 위해 Shackelford(1990)에 의해 제시된 오염물질별 입력자료(Table 4) 중 비반응성으로 가장 이동성이 크다고 판단되는 Cl^- 이온에 대한 적정 차수재 두께를 본 프로그램을 사용하여 산정해 보았다. 프로그램 수행 결과 매립지 운영기간을 40년으로 가정했을 경우에 Cl^- 이온의 지하수 수질 기

Fig. 11. Input window for landfill liner design

Table 4. Chemical properties used for example problem(Shackelford, 1990)

Chemical constituents	Concentration in leachate, c_0 (mg/l) ^{*1}	Drinking water standard (mg/l)	c/c_0	D^* (m^2/s) ^{*2}	R^{*3}
Chloride(Cl^-)	3484	250	0.072	4.7×10^{-10}	1.0
Potassium(K^+)	501	250 ^{*4}	0.5	2×10^{-9}	26.7
Zinc(Zn^{2+})	18.8	5.0	0.27	1.7×10^{-10}	92.7
Cadmium(Cd^{2+})	1.95	0.01	0.005	3×10^{-10}	371

*1 From Griffin et al. (1976).

*2 From Shackelford (1988) and Shackelford et al. (1989).

*3 Based on c_0 values, $\rho_b=1.60 \text{ g/cm}^3$ and $n=0.37$, and data from Shackelford (1988) and Shackelford et al. (1989).

*4 Assumed to be the same as chloride since actual value not established.

입력자료 출력			
오염물질 종류(예; 유기오염물질=0, 무기오염물질=1)= 1			
차수재 종류(예; 점토차수재=0, 혼합차수재=1)= 0			
매립지 운영기간= 40 year			
오염물질 초기농도=3484,00000 mg/l			
지하수 수질 기준= 250,00000 mg/l			
침출수 수위= 66,00 cm			
점토 차수재 두께= 200,00 cm			
점토차수재 투수계수=5,000e-009 cm/s			
점토 차수재 간극률(n)=0,370			
자연인자(R)=1,000			
확산계수(D)=4,700e-006 cm ² /s			
지오멤브레인 구멍갯수= 0 holes/ha			
지오멤브레인 구멍 반경(r)= 0,000 cm			
지오멤브레인 결합 폭(w)= 0,000 cm			
프로그램 실행 결과			
매립지 두께(cm)	오염물질 통과 시간(yr)	누수율(l/ha/yr)	오염물질 이동량(kg/ha/yr)
200	35,0000	2,0971e+004	3,3984e+001
205	36,6000	2,0845e+004	3,3199e+001
210	38,3000	2,0724e+004	3,2541e+001
215	40,0000	2,0608e+004	3,1873e+001

Fig. 12. Output results from the liner design program for worked example

준을 만족시키기 위한 적절 차수재 두께는 215cm로 나타났다(Fig. 12). 이러한 결과는 Shackelford(1990)에 의해 제시된 도표를 이용하여 반복적으로 계산하여 얻을 수 있는 CI⁻이온에 대한 적절 차수재의 두께 213cm와 거의 일치함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 여러 연구자들에 의해 제안된 매립지 점토 및 혼합차수재를 통한 유기 및 무기 오염물질 이동에 관한 식들을 이용하여 비교적 간단한 방법으로 매립지 차수시스템을 합리적인 방법으로 설계할 수 있는 컴퓨터 프로그램을 개발하였다. 제한된 연구결과이기는 하나 Shackelford (1990)에 의해 수행된 점토 차수재를 통한 CI⁻이온의 이동성에 바탕을 둔 매립지 차수재의 두께를 본 프로그램을 이

용해 산정해 본 결과 비교적 합리적인 결과를 얻을 수 있었다. 하지만 본 연구에서 제시된 설계프로그램을 보다 효율적이고 합리적으로 이용하기 위해서는 각 오염물질별로 합리적인 파라미터를 현장이나 실내 시험에서 구하는 과정이 필수적이라 판단된다. 또한 우리나라의 매립지 차수재가 겪을 수 있는 여러 가지 여건을 고려한 식을 개발하는 과정도 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 스마트 사회기반시설 연구센터(SISTeC)의 연구비 지원에 대하여 깊은 감사를 드립니다.

(접수일자 : 2005년 6월 30일)

참고문헌

1. 장연수, 이광열(2001), *지반환경공학*. 구미서관, 587p.
2. Acar, Y.B. and Haider, L.(1990), Transport of low-concentration contaminants in saturated earthen barriers. *J. of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 116, No7, pp. 1031~1052.
3. Benson, C.H., Tinjum, J.M., and Hussin, C.J.(1995), Leakage rates from geomembrane liners containing holes. *Geosynthetics'95*, IFAI2, pp. 745~758.
4. Cokca, E.(1999), Report: use of a computer program to estimate the thickness of a compacted clay liner in a landfill. *Waste Management Research*, Vol. 17, pp. 227~230.
5. Foose, G.J.(1997), Leakage rates and chemical transport through composite landfill liners. PhD thesis, University of Wisconsin-Madison.
6. Foose, G.J., Benson, C.H., and Edil, T.B.(1999), Equivalency of composite geosynthetic clay liners as a barrier to volatile organic compounds. *Geosynthetics'99*, IFAI, pp. 321~334.
7. Foose, G.J., Benson, C.H., and Edil, T.B.(2002), Comparison of solute transport in three composite liners. *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 128, No5, pp. 391~403.
8. Freeze, R.A. and Cherry, J.A.(1979), *Groundwater*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.
9. Gilbert, R. and Tang, W.(1993), Performance reliability of landfill lining system. *Geotechnical Research Series*. Dept. of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign.
10. Giroud, J.P. and Bonaparte, R.(1989), Leakage through liners constructed with geomembranes. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 8, pp. 27~67.
11. Haxo, H. and Lahey, A.(1988), Transport of dissolved organics from dilute aqueous solutions through flexible membrane liners. *Hazardous Waste and Hazardous Materials*, Vol. 5, No4, pp. 275~294.
12. Katsumi, T, Benson, C.H., Foose, G.J., and Kamon, M.(2001), Performance-based design of landfill liners. *Engineering Geology*, Vol. 60, pp. 139~148.
13. Lo, I. M .C.(1996), The role of organic attenuation in saturated clay barrier system. *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 33, pp. 145~151.
14. Park, J.K. and Nibras, M.(1993), Mass flux of organic chemicals through polyethylene geomembranes. *Water Environment Research*, Vol. 65(3), pp. 227~237.
15. Park, J.K., Sakti, J.P., and Hoopes, J.A.(1996), Transport of aqueous organic compounds in thermoplastic geomembranes. II: mass flux estimates and practical implications. *J. of Environmental Engineering*, ASCE, Vol. 122, No9, pp. 807~813.
16. Rowe, R.K. and Booker, J.R.(1985), 1-D pollutant migration in soils of finite depth. *J. Geotech. Eng.*, ASCE, Vol. 111, pp. 479~499.
17. Shackelford, C.D., Daniel, D.E. and Liljestrang, H.M.(1989), Diffusion of inorganic chemical species in compacted clay soil. *J. of contaminant hydrology*, Vol. 4, pp. 241~273.
18. Shackelford, C.D.(1990), Transit-time design of earthen barriers. *Engineering Geology*, Vol. 29, pp. 79~94.
19. Sharma, H.D., and Lewis, S.P.(1994), *Waste contaminant systems, waste stabilization, and landfills: design and evaluation*. John Wiley & Sons, Inc.
20. van Genuchten, M. TH., and Parker, J.C.(1984), Boundary conditions for displacement experiments through short laboratory soil columns. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 48, pp. 703~708.