

## 지하수 흐름과 지반오염

장 연 수\*

### 1. 서 언

최근 산업화에 따른 도시 및 산업폐기물의 증가로 인한 토양 및 지하수 오염이 전세계적으로 큰 문제가 되어 있고 우리나라에서도 이에 대한 관심이 고조되고 있다. 국내에서는 산업화된 부지 또는 매립지 주변의 토양 및 지하수 오염에 대해 본격적으로 조사된바 없으나 한번 지반이 오염되었을 경우 이를 정화 또는 차폐하기 위하여 치러야 하는 댓가가 막대한 것을 생각해 볼 때 지반환경 오염에 대한 대처가 필요한 시기라 하겠다.

지반내로의 물의 흐름에 관한 문제는 토목, 지질, 자원공학 등 여러분야에서 각자의 필요에 따라 발전하여 왔으나 최근 오염물질의 복잡한 이동현상이 수반된 지반오염문제는 위의 분야 뿐만아니라 환경, 화학, 농학 등 여러분야의 전문가가 각 분야에서의 능력을 함께 투입하여 해결하여야 할 과제가 되었다. 향후 건설산업이 대규모화, 다양화, 세분화 됨에따라 이러한 환경 문제와 연계된 지반공학의 문제가 발생할 것으로 예상되어 본고에서는 지하수 흐름과 오염의 기본 이론 및 관련 현장조사기법, 응용분야에 대하여 소개하고자 한다.

### 2. 지하수 흐름과 오염물질의 이동이론

#### 2.1 지하수 흐름

지하수는 인간 생활에 필요한 수자원으로서, 지반공학에 있어서는 사면안정 및 지반침하 등과 관련하여, 또한 지진의 발생, 석유자원의 탐사, 특정 광물이나 흙의 기원을 밝히는 지질학적 형성 과정의 분석에 있어서 중요하게 생각되어져 왔다. 그리고 각 관심분야에 따라서 지하수 흐름영역도 수미터에서 수킬로미터에 까지 달라지며 구성 물질 또한 균질한 물질로부터 그 특성이 각 분포지역마다 달라지는 비균질 물질까지 다양화되어 있다.

지반공학 분야에서는 지하수두(地下水頭)의 분포와 지하수압의 현장 흙이나 암석의 應力에 미치는 영향에 관심을 가지고 주로 定常 상태(steady state)의 흐름분석에 의존하여 왔다. 근래에 와서 폐기물로부터 발생한 오염물질의 이동성 분석 등 지하수 흐름에 관한 문제가 다양화 됨에 따라 地下水頭의 시간에 따른 변화와 지하수 흐름의 방향성 및 흐름의 양이 중요시되고 있다. 이러한 지하수 흐름을 크게 대별하여 다공질 매체인 흙속으로의 흐름과 화성암이나 변성암 등에 형성되어진 절리(joint) 또는 파쇄대(fracture)를 통한 흐름 또는 이의 복합된 흐름으로 나눌 수 있는데 본절에서는

\* 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 선임연구원

다공질 및 파쇄대 매체의 두 흐름으로 나누어 알아보았다.

(1) 포화된 다공질 매체로의 흐름

지하수 흐름은 지반의 투수계수를 측정하여 Laplace 방정식 등 수학적 모델을 이용하여 분석하는데 이 분야의 큰 진전은 1935년에 Theis<sup>1)</sup>에 의하여 식(1)과 같은 천이상태(transient state)의 물의 흐름에 대한 지배방정식 해석법이 발견되면서 이루어졌다.

$$K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \dots\dots(1)$$

여기서  $K_x, K_y, K_z$ 은  $x, y, z$ 방향으로의 투수계수( $K$ ),  $S_s$ 는 단위 수두 감소에 따라 단위 부피의 대수층으로 부터 흘러나오는 물의 양을 나타내는 계수로서 specific storage라고 부르며 다음과 같은 식으로 다시 표현되어진다.

$$S_s = \rho g(\alpha + n\beta) \dots\dots\dots(2)$$

여기서  $\rho$ 는 물의 밀도,  $g$ 는 중력,  $\alpha$ 는 토질역학에서의 체적 압축계수 ( $m_v = \frac{1}{1+e_0} \frac{\Delta e}{\Delta \sigma}$ )와 동일한 대수층 압축계수(formation compressibility),  $\beta$ 는 간극수의 압축계수,  $n$ 은 간극률이다.

지하수를 함유하는 대수층은 대수층의 상하 부층이 불투수층으로 이루어진 피압대수층(confined aquifer)과 상부가 지하수면으로 이루어진 자유수면 대수층(unconfined aquifer)으로 나뉘는데 투수계수에 대수층의 두께를 곱한 값을 가리켜 투수량계수(transmissivity,  $T$ )라 부르며  $S_s$ 에 대수층의 두께를 곱한 값을 가리켜 貯溜계수(storativity,  $S$ )라 부른다. 천이상태에서의 대수층 정수  $K, T, S$ 는 펌핑시험을 수행한 후 type curve를 이용하여 구하는데 3절의 현장시험란에 소개하였다. 일반적으로 피압대수층에서의  $S_s$ 는  $5 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-3}$ 의 적은 값을 나타내고 자유수면 대수층에서는 공극으로부터 실제 물이 빠져 나옴으로 인하여 피압대수 층에 비해 큰 값 0.01~0.3을 나타낸

다.

대수층의 정수  $S, T$ 의 변화에 따른 흙의 특성은 펌핑테스트를 수행하여 형성되어지는 수위저하곡선에서 알 수 있는데(그림 1) 일반적으로 낮은 투수계수와 높은 저류능력을 같은 세립토에서의 수위저하곡선은 높은 투수계수와 낮은 저류능력의 조립토보다 곡선의 영향반경이 작은 것을 보여준다.

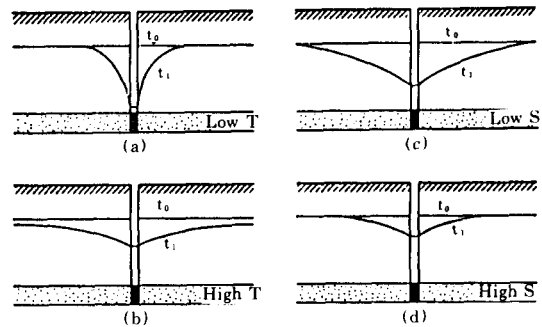


그림 1. 대수층 정수  $S, T$ 의 변화에 따른 지하수위 저하곡선의 변화<sup>2)</sup>

(2) 파쇄된 암 지반을 통한 흐름(fracture flow)

흔히 접하게 되는 자연지반은 사질토내에 혼재하는 불연속 점토 렌즈나, 다공질 매체나 암반내에 혼재하는 파쇄망(fracture network)의 두 가지 형태의 비균질성을 갖는 경우가 대부분이다. 이러한 시스템에서의 모래와 파쇄망은 높은 투수계수( $K$ )와 낮은 저류계수( $S$ )를 갖고 점토와 암석블록은 반대로 높은 저류계수와 낮은 투수계수를 가지므로 단순한 균일 매체로서 흐름 분석이 어렵게 된다.

파쇄대를 통한 경우의 해석은 단일 파쇄대 매체를 통한 흐름과 자연파쇄대 매체(naturally fractured media)를 통한 흐름의 두 가지 방법이 가장 많이 쓰이는데 일반적으로 단일 파쇄대 매체를 통한 흐름은 그림 2b에 보인

바와 같이 단일 파쇄대를 평행판 틈(parallel plate opening) 모델로 가정하여 해석하며 투수계수는 다음과 같이 표현한다.

$$K_f = \frac{\rho g}{12\mu} (2b)^2 \dots\dots\dots(3)$$

여기에서  $K_f$ 는 파쇄대의 투수계수,  $\rho$ 는 물의 밀도,  $g$ 는 중력,  $\mu$ 는 동적 점성계수,  $2b$ 는 파쇄된 틈의 두께(fracture aperture)이다. 흐름량과 수두분포는 흠속에서의 흐름처럼 Darcy 법칙과 Laplace 방정식을 이용한다.

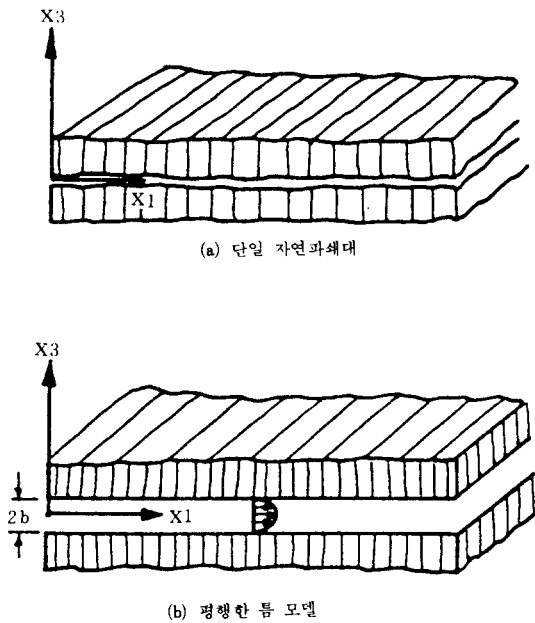


그림 2. 단일 파쇄대 매체를 통한 흐름 모델

단일 파쇄대를 통한 흐름의 투수계수는 파쇄대 틈의 제곱에 비례하므로 유효응력(effective stress)과 틈의 접촉면적에 영향을 받게 된다. 유효응력의 변화에 따른 파쇄대 내로의 흐름의 변화를 그림 3에 보였는데 하중이 증가함에 따라 파쇄대의 틈이 줄어들게 되므로 유량이 감소하여 재하시와 제거시의 커브의 모습이 履歴 곡선(hysteresis curve)을 그리며 재하 회수가

증가할 수록 파쇄대 내로의 유량이 감소하는 것을 보인다. 접촉면적은 파쇄면에 대한 응력의 증가와 샘플링된 파쇄표면의 면적에 관계되는데 같은 응력에서는 샘플 면적이 커질 수록 접촉면적이 적어지고 공극이 증가하여 파쇄대를 통한 투수계수도 증가한다. 그러나 샘플 면적이 어느한계 보다 커지면 접촉면적 대 파쇄표면의 면적의 비가 일정하여 투수계수도 일정하게 된다.(그림 4) 파쇄대의 투수계수도 흠의 경우처럼 측정장소, 즉 실험실과 현장 등의 scale에 따라 투수계수의 변화가 있는 것으로 보인다.<sup>3)</sup>

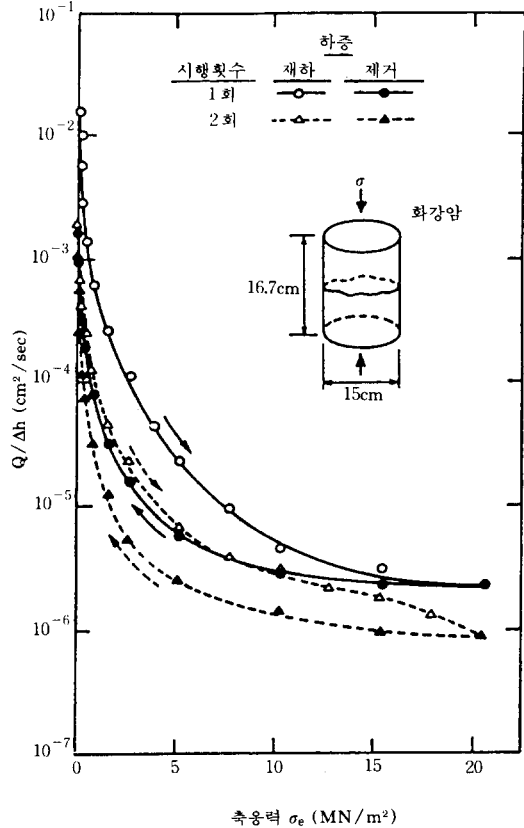


그림 3. 유효응력의 변화에 따른 파쇄대내로의 흐름의 변화<sup>3)</sup>

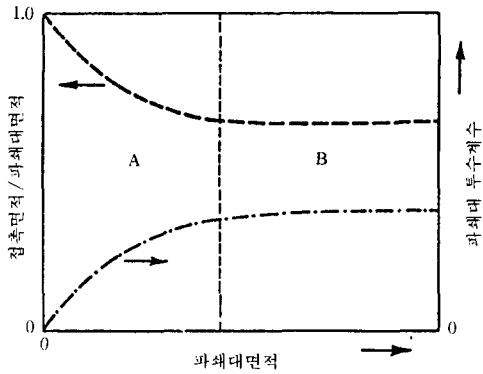


그림 4. 파쇄대 내의 접촉면적에 따른 투수계수의 변화<sup>3)</sup>

자연 파쇄매체로의 흐름에는 2가지 접근방법, 즉 흡입자의 형태, 크기, 공간적 분포변화와 파쇄대와 질리, 틈 채움재(infilling material)의 특성을 각각 고려하는 이중간극 모델(dual porosity model)과 등가의 연속 다공질 매체로서 표현하는 등가 연속모델(equivalent continuum model)이 있다.

이중간극 모델은 Warren 과 Root(1963) 등<sup>4)</sup>에 의해 연구되었는데 그림 5a와 같은 자연파쇄 매체를 그림 5b와 같은 입방체의 모임으로 가정하고 입방체내 즉 흡의 모체내의 흐름과 파쇄된 틈의 흐름을 식 4a, b와 같은 2개의 분리된 식으로 표현한다.

파쇄대

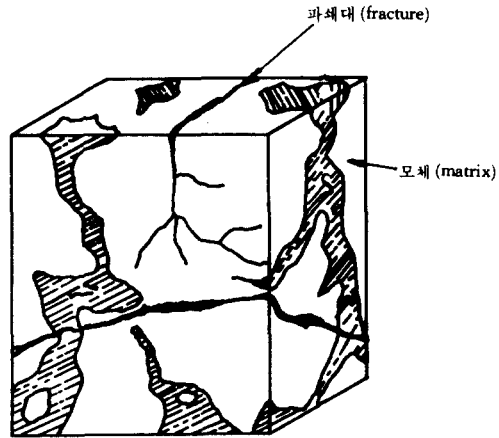
$$K_f \left[ \frac{\partial^2 \phi_f}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi_f}{\partial r} \right] + \alpha K_m (\phi_m - \phi_f) = S_{s_f} \frac{\partial \phi_f}{\partial t} \dots\dots\dots (4.a)$$

모 체

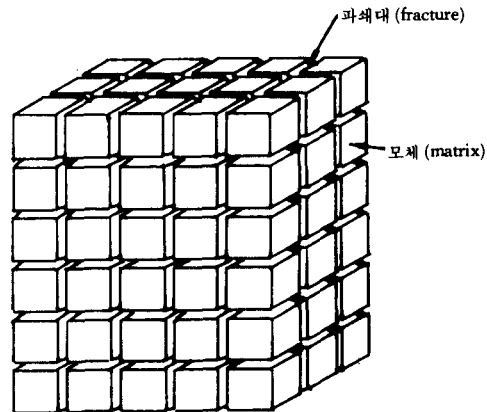
$$-\alpha K_m (\phi_m - \phi_f) = S_{s_m} \frac{\partial \phi_m}{\partial t} \dots\dots\dots (4.b)$$

여기에서  $K_f$ 와  $S_{s_f}$ 는 파쇄대 내로의 투수계수 및 specific storage 그리고  $k_m$ 과  $S_{s_m}$ 은 모체 블록내로의 투수계수 및 specific storage를 나타내며,  $\alpha$ 는 형태요소(shape factor)로서 모체 블록 각변 길이의 함수이다. 필요한 상수들

은 천이 상태의 펌핑실험을 통하여 구할 수 있고 수치해석에 의한 해도 가능하다. 이중 간극 모델은 파쇄대와 모체의 상호작용을 해석모델에 적용한 장점이 있으나 자연 파쇄매체가 일률적인 입방체로서 단순화 되어 있어 다양한 형태의 파쇄모양에 대한 분석이 어려운 단점이 있다.



(a) 자연지반의 모형



(b) 이상화된 모델

그림 5. 비균질한 자연지반의 실제 모습과 이상화된 모델<sup>4)</sup>

등가연속 모델은 균질한 흙속에서의 흐름 모델을 그대로 사용하며 파쇄매체를 등가 다공질 매체로 표현하는 방법이다. 그림 6은 자연파쇄대의 흐름을 투수계수 식(3)을 이용 흐름량을 구하고 이 흐름량으로부터 등가연속 모델에서의 투수계수 즉 단위면적의 전체를 통하여 물이 흐르는 것으로 가정하였을 때의 투수계수를 구해 본 것이다. 이 그림에 의하면 단위 두께 (1m)내 에서의 틈 0.0034cm 파쇄대로의 흐름량은 20cc/min으로서 투수계수  $3.3 \times 10^{-6}$  cm/sec의 다공질 매체로의 흐름량과 동일한 값을 가진다. 주어진 파쇄 매체에 대해 충분한 실험자료로부터 등가 투수계수가 구해지지 않는다면 그 매체의 속도 분포는 개개의 파쇄틈의 투수계수 분포에 직접관계 되어 있으므로 계산된 속도 분포의 정확도가 크게 떨어지게 된다. 표 1에는 팩커 주입실험(packer injection test)을 실시하였을 때 공내의 유량변화에 따른 등가 다공질 매체와 단일 파쇄대로의 투수계수를 비교하였다.<sup>3)</sup> 유효파쇄틈(effective aperture)은 팩커주입 실험동안의 흐름량과 압력 동수경사에 의하여 계산하는데 간극 틈의 변화에 따라 등가연속 파쇄매체로 가정시의 투수계수 값이 단일파쇄 매체 가정하의 투수계수 보다 매우 작은 값을 보여줌을 알 수 있다. 이 두 투수계수 값을 이용하여 이상화된 실제 파쇄대매체를 통한 흐름의 모습은 매우 다르며 미세한 파쇄대의 형태에 관계되는 오염이동 문제의 분석시 많은 오차를 가져오게 되므로 주의가 필요하다.

## 2.2 흙을 통한 오염물질의 이동

흙을 통한 오염물질 이동은 이온화되거나 다른 분자 또는 이온과 錯體(complex)상태로 물에 섞일 수 있는 화학물질의 이동을 정의하는 용질이동(solute transport)과 기름처럼 물에 섞이지 않는 물질이 물과 함께 이동하는 불혼합흐름(immiscible flow)으로 대별해 볼 수 있다. 두 가지 이동 현상 모두 이들이 이동하는

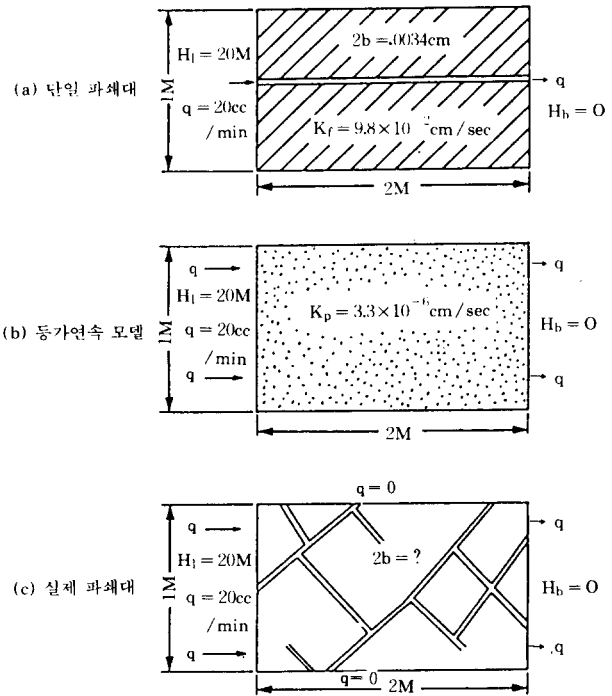


그림 6. 파쇄매체를 단일파쇄대와 등가연속 모델로 표현시의 투수계수와 흐름양<sup>3)</sup>

표 1. 등가다공질 매체와 파쇄대의 투수계수의 비교

$K_p$ (m/sec)	$Q$		$K_r$ (m/sec)	$2b$ (m)
	(cc/sec)	(cc/min)		
$8.9 \times 10^{-7}$	10	600	$8.8 \times 10^{-3}$	$1.04 \times 10^{-4}$
$8.9 \times 10^{-8}$	1	60	$1.9 \times 10^{-3}$	$4.82 \times 10^{-5}$
$8.9 \times 10^{-9}$	0.1	6	$4.1 \times 10^{-4}$	$2.24 \times 10^{-5}$
$8.9 \times 10^{-10}$	0.01	0.6	$8.8 \times 10^{-5}$	$1.04 \times 10^{-5}$
$8.9 \times 10^{-11}$	0.001	0.06	$1.9 \times 10^{-5}$	$4.82 \times 10^{-6}$
$8.9 \times 10^{-12}$	0.0001	0.0006	$4.1 \times 10^{-6}$	$2.24 \times 10^{-6}$

$K_p$ : 등가연속모델에 의한 투수계수

$2b$ : 파쇄대 틈의 폭

$K_r$ : 단일 파쇄대 모델에 의한 투수계수

물질이 지질 매체의 미세 구조(microscopic structure)에 밀접하게 관련되어 있을 뿐 아니라 이동 물질 상호간 또는 이동물질과 지질 매체 상호작용 등 여러요소가 복합되어 있으므로 인하여 규명하기가 어렵다.

흙을 통한 오염물질 이동에서는 오염물질의 이동경로의 정의 및 추정, 오염물 이동 경로상의 관심 지점에서 특정시간이 경과한 뒤의 오염물 농도, 오염물질이 관심지점에 도달하는 시간의 추정, 그리고 오염물질이나 오염된 지반의 지속성(persistence) 등을 분석한다.

본 절에서는 지하수 내에서의 용질 이동과 불포화 토양에서의 오염물 흐름, 그리고 비균질한 지반매체의 수리정수를 보완하기 위해 연구되어지고 있는 확률 및 통계를 이용한 분석 이론 등을 설명하고자 한다.

### (1) 지하수내에서의 용질이동

그림 7은 1970년에서 74년 까지 캐나다 온타리오주의 보오던시에서 가동하였던 생활폐기물 매립장으로 부터 매립장 폐쇄후 침출수가 사질토지반의 지하수 흐름에 따라 약 10년에 걸쳐 이동한 모습을 보인 것인데<sup>5)</sup> 물의 흐름을 따라 사질토내로 년간 약 30~40m 정도의 속도로 이동한 것을 알 수 있다.

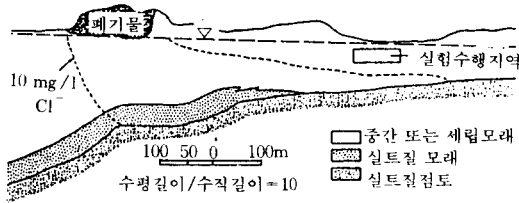


그림 7. 생활폐기물 매립장으로 부터 침출수가 사질토 지반을 따라 이동한 모습<sup>5)</sup>

대부분의 매립장의 경우 오염원의 양 및 버려진 시기가 불명확하므로 그림 7에 표시된 실험수행지역에서 염소(Cl), 브롬(Br)과 몇 가지 유기용질을 미리 양을 측정후 주입시켜 약 2년동안의 이동하는 모습을 관찰하였다.<sup>5)</sup> 그림 8에는 염소성분이 1, 85, 462, 647일 동안 이동되어진 상황을 보인 것인데 오염물질은

지하수 이동로를 따라 오염물의 중심이 이동하면서 지하수 이동방향 및 그 횡단 방향으로 퍼져가는 것을 알 수 있다.

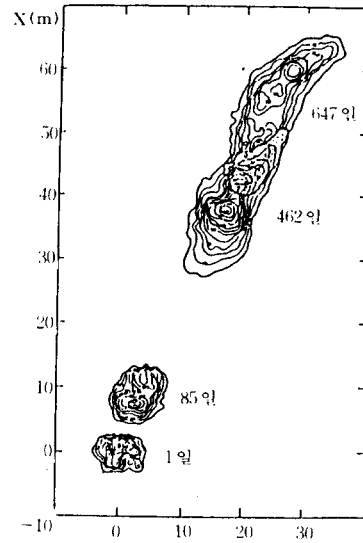


그림 8. 주입후 1, 85, 462, 647일 후 염소성분이 이동한 모습<sup>5)</sup>

그림 8에서 보는바와 같이 오염물의 중심이 다공질매체 내의 지하수의 흐름속도에 따라 이동하는 현상을 가리켜 移流(advection)라 하며 이동과 동시 일어나는 퍼짐현상을 가리켜 分散(disperion)이라고 부른다. 分散현상은 다시 용질 분자상호간의 분자운동 에너지에 의해 일어나는 확산(diffusion)현상과 미세한 흙의 매체내를 용질이 이동할 때의 속도변이에 의해 일어나는 水動力 分散(hydrodynamic disperion)으로 구분되어 진다.

보통 사질토로 구성된 대수층에서는 水動力에 의한 分散이 크나 점토라이너와 같은 세립토에서는 移流가 거의 없는 관계로 확산의 영향이 커지게 되며 일반적인 흙에서의 유효확산 계수는  $10^{-9} \sim 10^{-12} m^2/sec$  정도이다.<sup>6)</sup> 2차원

평면내의 1차원 흐름에서 移流 및 分散 요소만에 의해 용질이 흡과의 반응이 없이 이동하는 현상은 다음과 같은 移流-分散 방정식(advection-dispersion equation)으로 표현된다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (D_L \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial C}{\partial y} (D_T \frac{\partial C}{\partial y}) - V \frac{\partial C}{\partial t}$$

.....(5)

여기서 V은 지하수 흐름속도이며 D<sub>L</sub>과 D<sub>T</sub>는 지하수흐름 방향 및 그 횡단방향으로의 分散 계수이다.

移流-分散 방정식을 실제 현장에 적용하려면 물이 이동하는 지층의 수리 특성과 흐름 영역의 형태(geometry), 경계조건 등과 초기 오염물질의 분포 및 오염물의 흡과의 상호 반응 계수 등을 파악한 다음 향후 오염물질의 이동 및 분포에 대해 추측한다.

移流-分散 방정식은 흙의 입도가 균일한 실험실 단위의 오염이동 모델로서는 적합하나 현장에서 적용할 때에는 다음과 같은 문제점을 내포하고 있다. 즉 확산 및 수동력 분산으로 인한 각각의 퍼짐의 정도를 실제에 있어 분리하기 어려우며, 수동력 분산계수는 실제 수리지반의 고유 값이 아닌 오염물 이동 농도분포에 移流-分散 방정식을 맞추어 구한 상수이므로 오염물이동의 규모에 따라 즉, 실험실 규모의 수미터에서 광역의 수킬로 미터의 흐름영역에는 따라 변화하는 값을 갖게 된다. 또한 오염농도는 오염수가 샘플링된 시추공의 관입 지층에 포함된 오염물질의 평균값으로 샘플링의 방법과 정밀도에 크게 좌우된다. 이러한 여러문제를 해결하기 위한 연구가 진행중이나 이류-분산 방정식은 현재까지는 연구 및 실무에서 가장 많이 쓰이는 공식이다. 위에 언급한 문제점을 보완하기 위하여 본 방정식의 현장에 적용시에는 충분한 안전계수를 주어 사용하여야만 한다.

(2) 비포화 토양에서의 불혼화성 오염이동 불혼화성 유체의 흡속으로의 이동 문제는 불

포화토 내로의 물의 흐름문제와 물과 잘 섞이지 아니하는 여러가지 유류제품에 의한 토양의 오염 문제가 있으며 이는 지하수를 통한 용질 이동(solute transport)과는 완전히 다른 이동 법칙을 따른다. 이 경우 오염물질은 지표면으로부터 중력을 따라 하부로 이동하여 불포화대의 토양을 지나면서 상당량이 모세관 지역(capillary zone)에 머무른 후 포화대인 지하수층에 다다른다. 지하수에 도달한 유기성 폐기물은 물질의 비중에 따라 벤젠, 톨루엔, 크실렌 등 물보다 가벼운 것(L-NAPL: Light Non-Aqueous Phase Liquid)은 지하수 상부에 부유하여 주변과 분리된 상을 형성하며, 할로겐화탄화수소류의 물보다 무거운 유기물질(D-NAPL: Dense Non-Aqueous Phase Liquid)은 계속 지하수대 하부로 이동하여 불투수층 상부에 고이게 된다. 그림 9는 L-NAPL의 지표로부터 지하수면에 도달하여 이동하는 모습을 예시하였다.

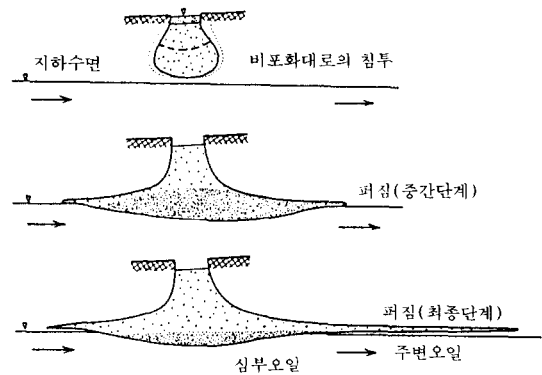


그림 9. L-NAPL의 지표로부터 지하수면으로 이동하는 모습<sup>7)</sup>

오염된 사례를 통하여 볼 때 대부분의 탄화수소는 모세 영역의 가장자리 및 지하수면 근처에서 이동하며 미세량만이 물속으로 용해된다. 비포화대의 모세관 영역에 남겨진 유기물

질은 박테리아의 산화 작용에 의하여 수십년에 걸쳐 소멸되는데 원유가 가솔린유보다 빠른 속도로 소멸된다. 오일, 물, 공기의 흡속으로의 동시 이동문제를 풀기 위해서는 각 유체 i에 대해 다음과 같은 연속 방정식을 이용한다.

$$-\nabla \left[ \frac{K K_{ri} P_i}{\mu} \nabla (P_i - \rho_i g z) \right] - \tau q_i = n \frac{\partial (S_i \rho_i)}{\partial t} \dots \dots \dots (6)$$

i = 물(W), 기름(O), 공기(A)

여기서 K는 투수계수,  $K_{ri}$ 는 각 相의 상대투수계수,  $\mu_i$ 는 粘性계수,  $\rho_i$ 는 유체 i의 밀도,  $q_i$ 는 오염원,  $S_i$ 는 포화도, n은 매체의 간극률이다.

식 (6)은 커플된 비선형 방정식으로서 세 셋트의 편미분 방정식으로 구성되는데 각 相에서의 압력 및 포화도의 6개의 미지수에 대하여 풀어야 한다. 분석해(analytical solution)로는 지극히 단순화된 경우 예를 들어 1차원의 물에 의한 오일의 1차원 이동 외에는 구할 수 없어 수치해석 모델이 몇 연구자들<sup>8), 9), 10)</sup>에 의하여 제시되어 있으나 이러한 개발 모델의 현장 및 실험실 자료에 의한 검증은 되어 있지 않는 상태이다.<sup>11)</sup>

(2) 확률 및 통계를 이용한 분석이론

흙이나 암반으로의 오염물질의 이동해석은 지반이 갖는 고유의 비균질성으로 인하여 매우 복잡한 양상을 보인다. 참고로 표 2에는 여러가지 대수층에서의 투수계수나 투수량 계수의 상용로그 값에 대한 표준편차값을 보였는데 0.6으로부터 2.3까지 다양한 분포를 보인다. 전통적인 결정론적 접근법(deterministic approach)은 지반이 갖는 가변성을 포함시킬 수 없는 문제점이 있으므로 이러한 지반정수가 갖는 비균질성을 확률 및 통계학의 방법을 이용하여 체계적으로 포함시킬 수 있는 방법들이 개발되고 있다. 이러한 접근 방법은 크게 확률론적 연속체 접근법(stochastic continuum approach)과 신

뢰성 접근법(reliability approach)로 나누어 볼 수 있는데 전자의 경우는 오염이동에 필요한 변수에 지층의 비균질성의 영향을 포함시켜 오염이동 지배방정식을 재구성하는 방식으로 분석해 및 수치해석해가 제시되었고,<sup>12), 13)</sup> 후자의 경우는 결정론적 방법에서 사용하는 지배방정식을 여러 횡수에 걸쳐 수행하여 매개입력 변수의 분산된 정도에 따른 출력변수의 분산도를 추정하거나 출력변수가 어느 한정된 값을 초과할 확률을 구하는 방법이다.<sup>14), 15)</sup> 전자의 방법은 매개변수의 분산도가 작을 경우, 즉 비균질성의 정도가 작을 경우에는 적용이 가능하나 비균질도가 커짐에 따라 많은 오차를 갖게 되며 후자의 방법은 기존의 지배방정식을 이용할 수 있고 보다 큰 비균질성을 갖는 지반에의 응용도 가능하다. 두 방법 모두 추가로 얻어지는 정보에 의하여 conditioning을 하므로써 투수계수나 수리수두의 값의 분산도를 줄여 보다 정확한 해 즉 지하수의 흐름이나 오염이동 모습을 실제와 가깝게 모델링 할 수 있다.

표 2. 수리지반 계수 K와 T의 표준편차<sup>6)</sup>

대수층의 종류	$\sigma_{\log K}$ 또는 $\sigma_{\log T}$ (log m/s)	측정규모 (m)
사암	1.5~2.2	100
빙하 퇴적모래	0.8	30
석회암	2.3	30,000
흙	0.4~1.1	100
퇴적토	0.6	6
"	0.9	100
"	0.8	5,000
홍수퇴적모래	0.9	5
모래 및 자갈	1.9	20

3. 지반 환경과 관련한 현장시험

3.1 지하수 흐름정수 파악을 위한 현장실험

지반내의 흐름상태를 파악하기 위해서는 현장에서 펌핑실험 또는 시추공내 실험 등을



통하여 K, T, S 등을 결정한다. 시추공내 실험이란 시추공에 실린더 형의 물체를 관입하여 지하수면의 수위를 높인다음 이후의 지하수면 높이가 시간에 따라 변화하는 양을 측정하여 투수계수를 계산하는 방법인데 실린더대신 시추공에 물을 더하거나 감하여도 같은 관찰을 할 수 있다. 대체로 비용 및 시간이 절감되고 수행이 쉬우나 얻어진 투수계수는 시추공 부근의 지협적인 흙의 특성이며 대수층 전체의 투수계수량 및 경계조건에 대한 정보를 제공하지 못하므로 좀더 신뢰성 있는 투수계수 측정은 펌핑시험에 의존한다.

펌핑시험에는 정상류(steady-state flow) 시험과 천이류(transient flow) 시험으로 나누는데 전자는 시험공을 통하여 물을 퍼내어 대

수층으로 흘러들어 오는 물이 양수하는 양과 같아져 평형상태를 이루었을 때 투수계수를 측정하는 방법으로 지반공학 분야에 잘 알려진 방법이다. 정상류시험의 경우 투수계수를 구하는 식은 대수층이 피압 또는 자유면 대수층의 여부에 따라 다음과 같이 구분된다.

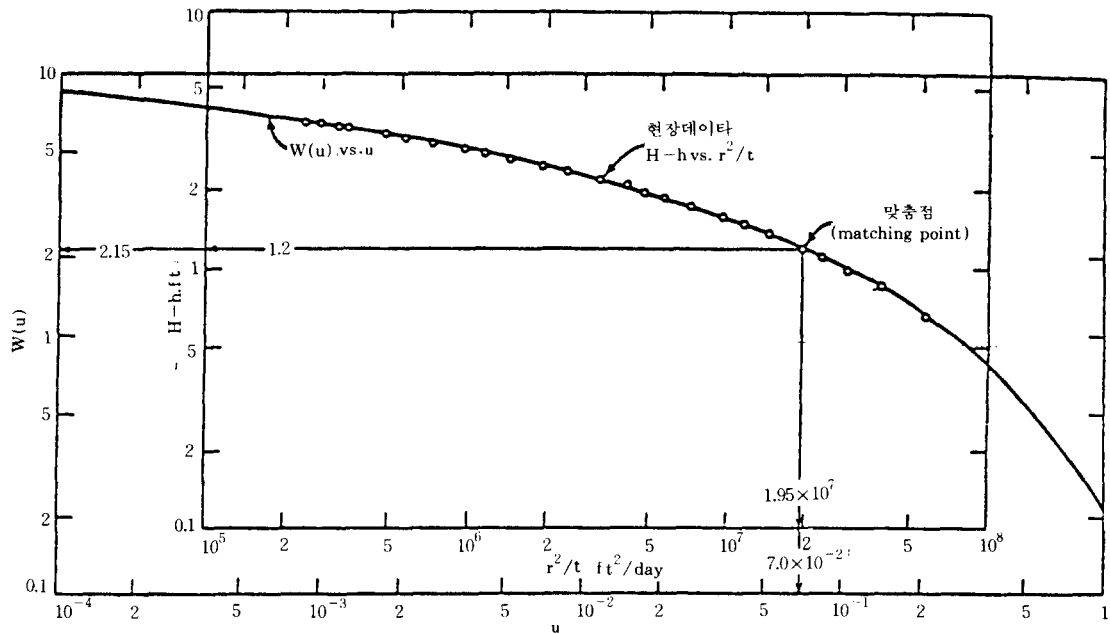
$$\text{피압 대수층 } K = \frac{Q}{2\pi b(h-h_w)} \ln \frac{r}{r_w} \dots\dots(7a)$$

자유면 대수층

$$K = \frac{Q}{\pi(h^2-h_w^2)} \ln \frac{r}{r_w} \dots\dots\dots(7b)$$

여기서

- Q : 양수량
- h-h<sub>w</sub> : 수두차
- b 또는 h : 대수층의 두께
- r<sub>w</sub> : 양수공의 반경
- r : 영향반경



예제)  $Q_w = 500 \text{ GPM}$   
 $r = 200 \text{ FT}$   
 $T = \frac{115Q_w W(u)}{H-h} = \frac{115(500)(2.15)}{1.2} = 103,000 \text{ GPD/FT}$   
 $S = \frac{uT^2}{1.87 r^2/t} = \frac{(7.0 \times 10^{-2})^2 (103,000)}{1.87(1.95 \times 10^7)} = 1.98 \times 10^{-3}$

그림 10. Type 커브를 이용하여 투수량계수와 저류계수를 구하는 예

비정상류에서의 펌핑 시험은 1935년 Theis<sup>1)</sup>에 의해 열전도 유사법(heat transfer analogy)을 이용한 분석방법이 개발되어진 후 활성화되었으며, 이 방법은 양수가 되면서 평형상태에 도달하지 않은 상태에서 피압 대수층 내 양수정 주변 관측정에서의 수두분포를 type 커브에 매치시켜 투수량계수와 貯溜계수를 동시에 구하는 방법이다.

그림 10은 Type curve를 이용하는 예인데 양수시험시 관측정에서의 수두강하량을 시간에 따라 log-log graph에 표시하고 type 커브와 매치시켜 T 및 S를 다음과 같은 식을 이용하여 구한다.

$$h_0 - h(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} \cdot W(u) \dots\dots\dots(8a)$$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \dots\dots\dots(8b)$$

여기서  $h_0$ 는 靜水頭,  $h(r, t)$ 는 시간  $t$  경과 후 양수정에서 거리  $r$ 이 떨어진 지점에서의 수두이다.

Theis의 해는 그림 11(a)와 같은 양수정인 대수층을 완전히 관통하고 주위에 특별한 경계 조건이 없는 이상적인 상태에 대하여 구한 것이지만, 2개의 대수층으로 이루어져 수직 漏水 현상이 있는 경우, 자유면 대수층일 경우, 경계 조건이 있는 경우에는 Type 커브와 대비한 field data의 형태가 그림 (b), (c), (d)와 같이 달라지게 된다. 이상적 상태의 해법외에 자유면이나 누수대수층, 파쇄대로 이루어진 대수층, 완전히 관통하지 않는 시험정(partially penetrating well), 우물통처럼 시험시추공의 저장 능력(wellbore storage)이 큰 경우 등 특별한 경우의 해법이 개발되어 있어 오염이동을 위한 지반특성 파악(site characterization) 또는 굴착지반의 침투 및 배수조절에 사용되고 있다.

### 3.2 오염물질 이동 관련 현장시험

오염이동 모델에 필요한 매개변수를 제공하기 위해서는 지하수 흐름속도 및 分散계수를

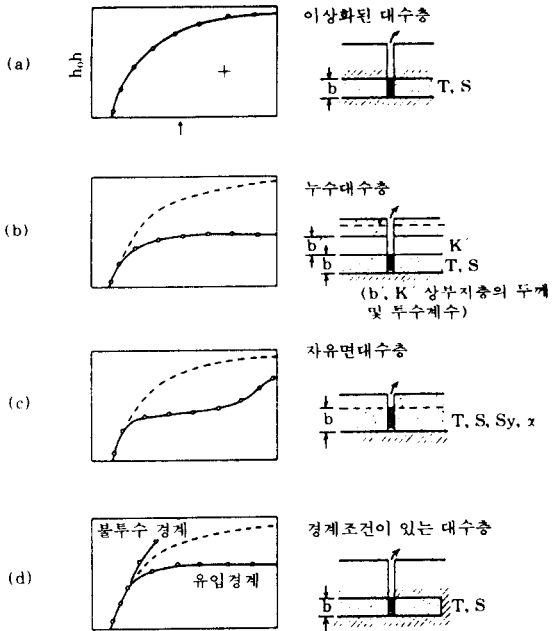


그림 11. 여러 수리지반 조건에서 펌핑시험시 시간에 따른 현장지하수면 하강 깊이의 변화

측정하여야 한다. 지하수 속도를 결정하는 방법은 Darcy 공식을 이용하는 방법과 인공추적자(artificial tracer)를 이용하는 법 등이 있는데 첫번째 방법은 속도를 측정하려고 하는 영역의 투수계수, 동수경사, 유효간극률의 정보를 이용하여 Darcy 공식을 이용하여 구한다. 알려진 바와 같이 현장의 투수계수는 많은 불확실성을 내포하므로 이 방법에 의한 속도 추정 또한 많은 불확실성을 내포하는데 좀더 나은 정확도를 가진 속도 측정을 위해서는 인공추적자를 이용 지하수 흐름 영역의 한지점에 추적자를 주입하여 다른 한지점까지 추적자가 도달한 시간과 이동한 거리로 부터 산출한다. 이 방법에 사용되는 추적자의 종류로는 NaCl, CaCl<sub>2</sub>와 같이 전기전도도의 측정으로 간단히 관측될 수 있는 염류(salt)로 부터 <sup>3</sup>H, <sup>131</sup>I, <sup>29</sup>Br과 같은 방사능 탐측기로 관측되는 동위원

소까지 여러가지가 있다. 추적자를 이용한 방법이 갖는 단점으로는 자연상태에서 인지가능한 거리를 이동하는데 오랜시간이 소요되며 하나의 샘플이 대표할 수 있는 영역이 작아 지반이 비균질한 경우 추적자의 이동경로 파악을 위해서는 많은 관측지점이 필요하고, 측정기구에 따른 속도의 차이가 많다.

오염물 분산계수의 현장 측정 방법으로는 單井실험(single well test), 자연수두 경사시험(natural gradient test), 復井재순환 시험(two well recirculating test) 등 여러가지가 있다. 단정실험의 경우 지하수 속도를 측정된 뒤 추적자를 시험공에 투입하여 시간이 경과함에 따라 희석되어지는 농도를 관측하여 이론식과 비교하여 분산계수를 측정한다. 復井 재순환 시험의 경우 한 시험정에 추적자를 주입하고 다른 시험정에서 채집 다시 주입공에 넣어 순환시킨다. 채취정에서 시간에 따른 농도의 변화를 관찰하여 이론식 또는 수치모델에 의해 구하여진 커브에 맞추어 분산계수를 측정한다. 이러한 실험은 수미터에서 수십미터 사이의 소규모에서 실행하므로 오염물 분포규모가 커질 경우에는 실험에서 구한 분산계수의 오차도 커지게 된다. 일반적으로 분포규모가 100m를 초과하는 광역오염물질의 이동의 경우는 환경추적자(environmental tracer), 즉 조사를 실시하기 전부터 흠속에 충분한 양으로 존재하는 자연동위원소, tritium, 또는 사람에 의해 조성되어진 오염물질 등의 분포를 현장조사로부터 구하여 수치 모델에 맞추어 분산계수를 구한 후, 앞으로의 오염물질의 분포상황을 여러가지 흐름경계 조건에 맞추어 추정하여 대부분의 오염된 부지의 오염물 이동상황을 추적하는데는 이 방법을 사용한다.

오염지반에서의 시추 및 관측정을 설치할 경우 유의할 점은 시추공을 통해 오염될 대수층으로 인해 인접 대수층이 오염되지 않도록 하여야 한다. 탐사하는 대수층 외에는 케이싱을 설치하여 지층 상호간의 물의 이동을 막고 검측 후 더이상의 시추공의 이용이 필요하지 않

을 때는 다시 흠을 채워 넣어 막도록 한다. 샘플러는 시추공에 삽입되기전 수증기 등을 이용하여 깨끗하게 씻어 주어야 하고 케이싱과 스크린은 오염물질과의 반응성이 없는 재료로 만든다. 특히 유기성 화학물질로 오염된 지층에 사용시는 오일이나 그리스 보다는 식물성 기름을 윤활제로 사용하며 PVC 파이프의 이음매는 접착제를 사용하기 보다는 나사모양의 이음매에 고무와셔를 삽입하여 사용하도록 한다.

## 4. 공학적 관련분야

### 4.1 터널 및 굴착지반내로의 흐름

많은 터널이나 굴착지반에서의 문제는 지하수와 연관되어 일어나며 지하수 문제가 발생하여 굴착이 지연될 경우 시공의 전공정이 영향을 받게 된다.

지하수와 연계된 터널문제는 암반 터널보다 흠 터널에서 특히 세립의 사질토가 지하수에 의해 흘러 내림으로서 발생하거나 지하수의 제어를 잘못하여 개착터널 굴착지반의 주변의 점토 지반이 배수되었을 경우 점토지층의 압밀현상으로 주변의 건축물에 피해를 주게된다. 환경문제 또한 간과 할 수 없는 문제인데 예를 들어 터널을 굴착하는 과정중 나쁜 수질의 지하수를 함유하고 있는 대수층이 개방되어 인접의 오염되지 않은 대수층으로 흘러드는 문제나 지하수면이 낮아짐으로 인하여 지표의 식물이 말라죽는 경우들을 고려한 지하수 제어가 이루어져야 된다. 이러한 지하수 제어를 위한 방법에는 시추공내 투수계수 측정, 관측정이나 피에조메터의 사용, 펌핑시험 등이 있으며 적정 규모의 펌핑실험은 여러 소규모의 현장시험에 비하여 비용은 더 들 수 있으나 굴착지반주변의 전체적인 대수층의 특성이나 수리지질적인 특성을 나타내 주게 되므로 유용하다.

다음은 굴착지반의 인근에 강물과 같은 경계 조건이 있을 경우 지반내로 흘러드는 침투수량

을 구하는 방법과 터널내로의 비정상류의 흐름을 분석하는 방법의 예<sup>17)</sup>을 보이므로서 지하수 흐름이론의 지반공학과와의 관련성을 알아보았다. 그림 12는 강으로부터 거리가 L인 지점에서 굴착을 실시할 경우 정상류 흐름에서의 흐름량을 추정하고자 하는 예이다. 먼저 굴착지반의 크기와 같은 등가반경(equivalent radius, Re)과 굴착지반이 지하수면의 강하에 영향을 주는 반경 즉 유효 영향반경(effective radius of influence)을 구한다. 유효영향반경의 추정은 주변의 지질 조건이나 펌핑에 의한 유입량이 안정될 때 자유면대수층의 유량산출식을 이용하여 구하게 되는데 본 예제에서와 같이 우물의 중심으로부터 거리 L만큼 떨어진 강은 유입 경계조건으로 거리 2L에 가상 주입정이 있는 것으로 가정하고 다음과 같은 유입량 공식을 사용한다.

$$Q = \frac{\pi K (H^2 - h^2)}{\ln(2L/Re)}$$

유입량 Q를 배수시키기 위해서는 그림 12에 보인바와 같은 형태로 양수정을 설치하여 수행한다.

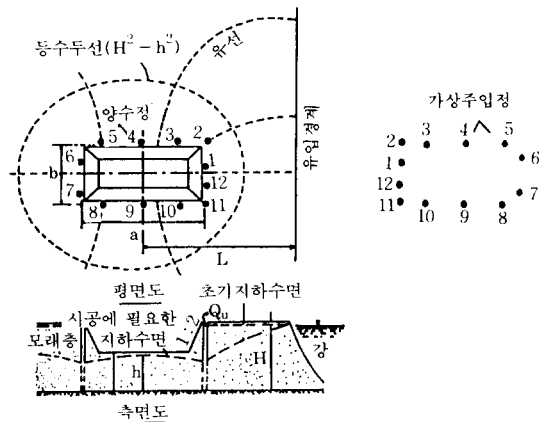


그림 12. 유입경계 조건이 있는 굴착지반에서의 펌핑 시험정의 설치

터널로의 흐름을 분석할 경우 지반의 투수계수가 작고 저류계수가 크다면 정상상태의 흐름으로 가정하여도 좋을 것이지만 일반적으로 문제가 되는 터널내의 침투는 그림 13과 같은 지하수면이 터널을 향하여 하강하면서 형성되는 비정상류의 흐름이다.

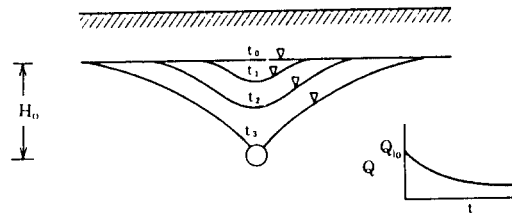


그림 13. 터널을 향한 천이 상태의 흐름

이러한 경우의 침투해석에는 각각의 특별한 조건을 고려한 수치해석을 이용하는 것이 좋을 것이나, 예비분석시에는 Goodman 등<sup>18)</sup>에 의해 제안된 정상상태가 해체되어진 후 시간 t가 경과할 때까지의 누적 침투수량을 구하는 다음과 같은 공식을 사용할 수도 있을 것이다.<sup>2)</sup>

$$Q(t) = \left( \frac{8C}{3} KH_0^3 S_y t \right)^{1/2}$$

여기에서 K는 지반의 투수계수, Sy는 자유수면 대수층 비산출량(specific yield) 그리고 C는 임의 상수인데 실험실연구로부터 구한 값은 0.75이다.<sup>18)</sup> 상기식은 지하수면이 포물선이고 Dupuit Forchheimer의 평형흐름이 성립된다 가정하여 지하수면의 저하된 면이 터널에 도달하였을 경우에 유효하다.

#### 4.2 도시 및 산업 폐기물 매립장의 차폐 및 복구

매립장을 건설하게 될 때는 그 대상지역의 폐기물 매립지로서의 적합성 조사가 필요하며 그 중 하나가 지반의 수리특성 조사이다. 실제로 매립장이 건설될 때에는 폐기물운송, 부지구입 및 개조, 현장유지비 등의 요소에 더 많은

관심을 두지만 수리 특성조사는 현장지반이 주변지반의 환경보존을 위하여 매립장 건설시 개조가 필요한가의 여부를 결정하고 필요시에 이를 달성할 수 있는 최선책을 결정하는데 중요한 요소이다. 좋은 매립장부지라는 것은 폐기물로 부터 발생하는 침출수에 포함된 물질에 대한 그 지반이 정화능력이 충분할 경우로서 그 매립장 주변의 지하수 및 지표수의 사용여부, 지반에 있는 기존대수층의 오염도, 매립부지의 향후 필요정도 등도 매립장의 선정요소가 될 것이다.

매립장으로부터 흘러나오는 침출수 관리에 의하여 지표 및 지하수 오염도를 제어하는 방법은 다음과 같은 방법이 있다. 첫째 침출수의 발생을 억제하는 방법인데 침출수가 폐기물과 물이 접촉할 때 발생하는 점을 고려하여 매립장 바닥면이 지하수면위의 불포화대에 건설되어야 하며 매립장 상부로부터 침투되는 양을 줄이도록 커버 및 배수층을 설치한다. 둘째, 오염물질을 긴 이동경로를 흘러가면서 흙과의 비상호작용에 의하여 자연감소 되도록 하거나, 이미 심하게 오염되어 있거나 광물성이 다량 함유되어 쓸모가 없는 대수층으로 유도하는 방법 등이 있다. 셋째는 침출수 이동으로 인한 오염물의 감소정도가 충분하지 않을 경우 오염이동 경로상의 지하수가 지표면에 가장 가까워지거나 노출되어지는 지점을 택하여 도랑을 파거나 배수정을 이용하여 제거하는 방법이다. 마지막으로 차수막을 이용하여 발생하는 침출수를 제거하는 것으로 복잡하고 비용이 많이 드는 방법이나 국토가 좁고 폐기물의 발생량이 많은 우리나라에서는 첫째와 마지막 방법이 적합하다 하겠다.

도시 및 산업폐기물이 적합한 차폐시설이 없이 투기되었을 때에는 주변 환경을 오염시키고 이를 복구하는데 많은 비용이 소모된다. 이러한 매립장 주변에 차단벽이나 지하수 펌핑을 하므로써 매립장의 오염물질이 주변으로 이동하는 것을 방지한다. 오염된 매립지에 많이 사용되는 차단벽으로는 그라우트 커튼, 슬러리

벽, 강널말뚝 등이 있는데 오염지반의 상부지역의 지하수위를 변경시켜 폐기물을 격리시키거나 오염된 지반의 지하수를 막아 다른 대수층으로의 이동을 막는 역할을 한다. 이러한 오염지반의 차폐 및 복구를 위하여는 사전 포괄적인 지반공학적인 평가와 폐기물과 차단벽 재료와의 조화성에 대한 검토가 필요하다.

그림 14는 침출수의 외부확산을 방지하는 예로서 오는 10월 매립완료되는 난지도 매립장의 개량방법을 보인 것인데<sup>19)</sup> 냄새와 가스를 막기 위해 복토층과 수직 및 수평 가스포집관을 묻어 포집된 가스는 재활용하고, 지하로 스며들어 한강물과 지하수 등을 오염시키는 침출수의 차단을 위해서는 길이 7km 길이 15m 정도의 차단벽을 설치하도록 설계하였다. 지하수와 폐기물의 접촉을 방지하는 다른 한 예로서 그림 15와 같이 주입공과 양수공을 동시에 활용하므로써 지하수를 통한 오염물질의 이동을 막기도 한다. 이러한 경우 주입공과 추출공의 펌핑의 영향반경이 서로 중복하게 되어 차폐효과를 감소시키지 않도록 주의 깊은 관찰이 필요하다.

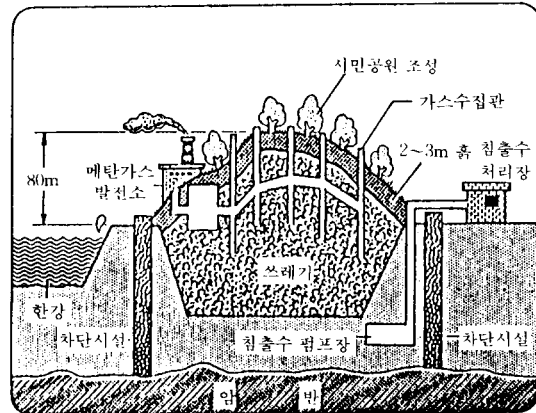


그림 14. 서울시 난지도 매립장의 향후 침출수 차폐 및 부지 이용방안<sup>19)</sup>

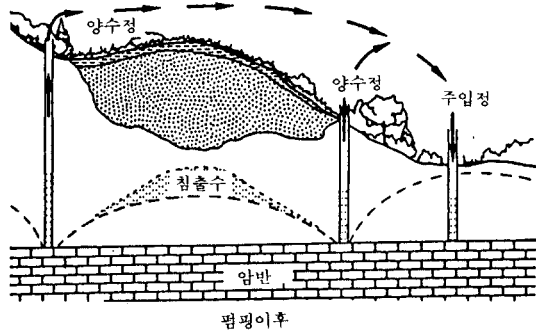
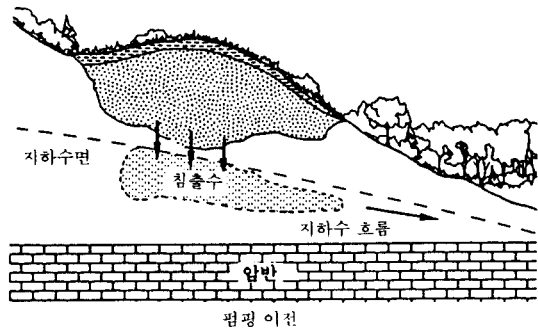


그림 15. 침출수의 지하수를 통한 이동방지를 위해 주입 및 양수 펌프를 이용하여 차폐하는 예

#### 4.3 원자력 폐기물의 차폐

원자력 폐기물의 차폐문제는 고준위 폐기물의 경우 그 독성이 높아 주변환경에 노출되었을 경우 그 영향이 지대하므로 많은 기술자와 과학자의 관심의 대상이 되어 있다. 폐기물의 반감기가 지질학적 시간대 ( $10^3 \sim 10^4$ 년) 이므로 폐기물을 포함한 차폐시설의 장기간의 거동을 신뢰성있게 추정한다는 것은 현재의 과학발전의 여건으로 극히 어려운 실정이다.

미국을 비롯한 많은 나라에서 채택하고 있는 원자력 폐기물의 저장법의 개념은 復數 방어벽 (multiple barrier)을 설치한다는 것인데 즉 각각의 방어벽이 폐기물 이동을 막는 보호막으로서의 충분한 구실을 하되 두셋의 방벽을 복수로 설치하여 폐기물이 주변 환경으로 노출될

가능성을 허용치 이하로 낮춘다는 것이다.<sup>20)</sup> 방사성 물질의 이동을 막는 첫번째 방법은 사용이 끝난 연료를 시멘트와 혼합하거나 세라믹이나 유리 그리고 용해율(solubility)이 낮은 물질과 섞는 방법이다. 둘째 폐기물의 용기나 채움재료도 좋은 장애물이 될 수 있는데 두꺼운 구리와 납 용기를 석영질 샌드와 점토의 혼합물로서 메워 사용할 수 있다. 금속재는 비교적 불용성이며 석영은 기계적 안정과 열전도성을 높여주고 점토는 낮은 투수계수와 액체상태의 이온에 대한 높은 흡착성으로 인하여 방사성원소의 이동을 막게된다. 셋째 폐기물의 차폐를 위해서 저장소 주위의 지반의 지질특성이 중요한데 특히 주요암반에 절리나 파쇄대가 있지 아니하고 등가체적 투수계수(equivalent bulk permeability)가 낮은 것이 바람직하다. 방사성 핵종의 외부유출의 마지막 장애물은 저장소로부터 생물권으로 도달하는 이동 경로이다. 만일 접촉 가능한 대수층의 투수계수 및 동수경사가 작고 평행에 가깝다면 물의 이동에 걸리는 시간은 킬로미터당 몇만년의 이동시간이 소요될 것이므로 이러한 경우 이동경로 자체도 핵종으로부터 생물권을 보호하는 효율적인 방어벽이 될수 있다.

방사성 폐기물 특히 고준위폐기물의 차폐를 위해서 해결해야 할 문제는 다음과 같다. 첫째 용기의 파괴가 일어났을 경우 지하수에 핵종이 유출되는 농도에 대한 합리적인 해석이다. 유출농도는 폐기물의 형태, 물의 온도, 지하수 유입량, 주위암반의 광물특성 등 여러요소의 함수이지만 이러한 정보없이 유출농도보다 훨씬 높은 농도로 가정하여야 하므로 매우 보수적인 저장 설계를 하게 된다.

둘째 일반적으로는 흐름해석에 사용되는 모델 즉 지역별로 평균한 투수계수를 사용하고 균일 지반을 가정하는 흐름 모델은 핵종의 이동이 미세한 지반의 투수계수에 지배될 것이므로 합리적이지 않으며 개별적인 파쇄대 영역(fracture zone)에서의 핵종 이동을 파악 할 수 있는 모델이 필요하다. 셋째 정밀지반조사

를 위해 수행한 과도한 시추조사는 지반의 신선도를 저하시켜 향후 그지반의 실제적인 유용성을 반감하게 되므로 이를 대체할 지반조사 방법이 요구된다. 즉 비파괴 지구물리학적 시험과 저장소 레벨에서의 암석의 특성을 탐사경도와 수평시추공을 통하여 조사하고, 수리지질도 제작 및 조사를 굴착 및 저장소의 운영과 병행하여 실시할 필요성이 있다. 여러지역의 암반의 종류에 따른 수리지질적 동일성(similarity)을 확률 통계적 방법으로 분석하여 대상지역의 초기분석에 활용하도록 하고, 지반암의 온도상승에 따른 특성과 이의 저장시설에 대한 영향 정도의 규명도 필요할 것이다.

과해대 내의 흐름과약을 위한 다각적인 현장 시험과 이에 대한 흐름모델의 개발등 이 분야에서의 문제는 산적하여 있는 반면 폐기물 저장 시설 마련을 위한 시간적 여유가 없고 원자력 폐기물의 노출시 그유해성이 심대한 점을 감안할 때 이에 대한 많은 연구가 요구된다.

## 5. 결 언

우리나라에는 지반환경의 오염문제의 방지와 그 처리기술에 대한 필요성이 점차 인식되어져가는 단계에 있다. 복지국가로 나아가는 우리나라의 경제개발 계획에 발 맞추어 쾌적한 환경보존 및 유지에 대한 필요성이 점차 강조되는 상황인바 이분야에 대한 우리기술의 육성이 이루어져야 할 것이다. 본 고에서는 지하수 흐름 및 오염에 관하여 지반공학 분야와 관여되어진 부분에 대하여 소개하였는 바 필요에 따라 각각의 해당분야에 대한 깊은 탐구와 기술축적이 요망된다.

### 참고문헌

1. Theis, C.V., The relation between the lowering

of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage, *Trans. Amer. Geophys. Union*, 2, 519-524, 1935.

2. Freeze, R.A. and J.A. Cherry, *Groundwater*, Prentice Hall, Inc., 1979.

3. Gale, J.E., Assessing the permeability characteristics of fractured rock, *Geol. Soc. of Amer.*, Special paper 189, pp.163-181, 1982.

4. Warren, J.E. and P.J. Root, The behavior of naturally fractured reservoirs, *Soc. Pet. Eng. J.* 3 pp.245-255, 1963.

5. Roberts, P.V. and D.M. Mackay, A natural gradient experiment on solute transport in a sand aquifer, Technical report No. 292, Dept. of Civil Eng., Stanford University, Sep., 1986.

6. Anderson, M., Using models to simulate the movement of contaminants through groundwater flow systems, *CRC Critical Reviews in Environmental Control*, 1979.

7. De Marsily, G., *Quantitative hydrogeology*, Academic Press, London, 1986.

8. Faust, C.R., J.H. Guswa, and J.W. Mercer, Simulation of three-dimensional flow of immiscible fluids within and below the unsaturated zone, *Water Resour. Res.*, 25(12), 2449-2464, 1989.

9. Abriola, L.M., and G.F. Pinder, A multiphase approach to the modeling of porous media contamination by organic compounds 1. Equation development, *Water Resour. Res.*, 21(1), 11-18, 1985a.

10. Abriola, L.M., and G.F. Pinder, A multiphase approach to the modeling of porous media contamination by organic compounds 2. Numerical simulation, *Water Resour. Res.*, 21(1), 19-26, 1985b.

11. Pantazidou, M. and N. Sitar, Migration of non-aqueous liquids in the vadose zone, Report No. UCB/GT/91-03, May, 1991.

12. Dagan, G., Theory of solute transport by groundwater, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 19, 183-215, 1987.

13. Gelhar, L.W. and C.L. Axness, Three dimensional stochastic analysis of macrodispersion in a stratified aquifer, *Water Resour.*

- Res., 19, 161-180, 1983.
14. Cawfield, J.D. and N. Sitar, Application of first-order reliability to stochastic finite element analysis of groundwater flow, Report No. UCB/GT/87-01, June, 1987.
  15. Jang, Y.S., N. Sitar, and A. Der Kiureghian, Reliability approach to probabilistic modeling of contaminant transport, Report No. UCB/GT/90-03, July, 1990.
  16. Gelhar, L.W., Stochastic subsurface hydrology from theory to applications, Water Resour. Res., 22, 135S-145S, 1986.
  17. NAVFAC, Dewatering and groundwater control for deep excavations, TM 5-818-5, Chap 6, 162, 1971.
  18. Goodman, R.E., D.G. Moye, A. van Schalkwyk, and I. Javandel, Ground water inflows during tunnel driving, Eng. Geo., 2, 39-56, 1965.
  19. 중앙일보, 수도권 뉴스, pp.19, 5월 12일, 1992.
  20. Davis, S. N., Hydrogeology of radioactive wastes isolation: The challenge of a rational assessment, Geol. Soc. of Amer., Special paper 189, 389-403, 1982.