

오염원에 의한 지하수 수질의 변화

배상근

계명대학교 공과대학 토목공학과
(1995년 1월 6일 접수)

Change of Groundwater Quality derived from Contaminant Sources

Sang Keun Bae

Dept. of Civil Engineering, Keimyung University, Taegu 704-701, Korea
(Manuscript received 6 January 1995)

Abstract

In order to provide for the guidance on groundwater quality monitoring network design and also, to suggest the index to the solution of the contaminated groundwater remediation problems in the lake watershed, it is necessary to analyze the contaminant transport in the groundwater. The solute transport was analyzed in the lake watershed to investigate the behavior of the injected contaminant sources depend on the relationships between the point of contaminant sources and position of the lake. Three hypothetical groundwater flow systems, which is composed of a flow-through lake and two solute sources, were considered. The lakes located in the upper, middle, and lower portions of a watershed respectively. The transported contaminant was numerically simulated for five years by using MT3D contaminant transport model under the three-dimentional steady state conditions. From the above simulations, it can be concluded that the contaminant concentration was high as the contaminant source located at the upper position of a watershed, and the influence of the contaminant injection was large as the solute source located at the lower position. When the injection of contaminant was continued for one year without regard to the position of contaminant source and the lake, the influence of contaminant source was reached to bedrock.

Key Words : groundwater, lake, groundwater quality, contaminant.

1. 서 론

미국의 Wisconsin주에는 1988년 현재 3962개소의 등록된 쓰레기매립장(Wisconsin D.N.R., 1990)이 있다. 이들 중 150여개소의 쓰레기매립장은 지하수오염의 염려가 없이 운영되고 있으나 200여곳의 쓰레기매립장에서는 지하수오염의 우려가 있

어 지하수 Monitoring이 필요하다. 700개소 이상의 쓰레기매립장에서는 지하수오염이 시작되고 있다. 방치되고 있는 약 2700개소의 쓰레기매립장에서 흘러나오는 오염물질로 지하수오염이 가속되고 있다. 또한, 지하수오염이 발생된 후에서나 발견되는 몰래 매립한 쓰레기매립장이 무수히 많다 (Wisconsin N.R.M., 1989).

본 주에는 7700개소에 달하는 많은 지점에서 저류탱크로 부터 개소린 등의 오염물질이 누유되고 있어(Wisconsin D.N.R., 1994) 본 주의 지하수 오염대책이 시급한 실정이다(EPA, 1990).

이와같이 오염물질의 유입으로 인하여 발생하는 지하수 오염에 대한 문제 해결을 위해서는 지하수 체계에 유입된 오염물질의 거동에 관한 해석이 필요하다. 지하수 오염물질의 거동에 관한 연구는 많으며(Dagan and Nguyen, 1989; Holmes *et al.*, 1989; Corapcioglu and Hossain, 1990) 특히, Zheng(1992)은 오염물질의 3차원 거동을 해석할 때 문제가 되는 모의발생시의 발산과 진동을 최소화하고 다양한 현장조건에도 적용가능한 MT3D모형을 개발하였다. 본 모형은 3차원 해석에서 과다하게 요구되는 컴퓨터용량도 적절하게 조절하여 이분야의 연구에 많은 도움이 되게하였다.

Michigan주의 북부지역 일부, Minnesota주와 Wisconsin주에는 3만개를 넘는 대단히 많은 호수들이 존재한다(Born *et al.*, 1979). 이들 호수지역은 산이없는 광활한 대지를 이루고 있으며 반경 10km이내에 수십개의 호수가 존재한다. 호수들은 빙하의 작용에 의하여 이루어진 것들로 지형과 지질이 비슷하게 형성되어 있다. 이와같은 호수지역의 오염원에 의한 지하수 오염물질의 거동은 다른 지역과 다른 특성을 가질 것으로 여겨지나 많은 지하수체내의 오염물질의 거동에 대한 연구가 있음에도 불구하고 호수지역에 대한 연구는 드물다. 이들 호수지역에서는 지하수 유동에 호수가 큰 영향을 미치며 지하수 또한 호수 수위에 큰 영향을 미친다. 이와 같은 지역에서의 오염원에 의한 지하수 오염물질의 거동은 호수의 위치에 의하여 영향을 받게 될 것이다. 이들 지역은 지역적 특성이 비슷하기 때문에 호수의 위치와 오염원의 존재 위치에 따른 오염물질의 거동해석을 함으로써 호수 지역에 대한 지하수오염 감시체계의 수립과 오염된 지하수의 수질회복이나 오염물질 제거를 위한 정보를 제공하는 데 도움을 줄 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 호수지역에서의 오염물질 유입지점의 위치와 호수의 위치와의 관계로부터 유입된 오염물질의 거동을 파악하기 위하여 호수의 위치와 오염원의 위치가 지하수 오염물질의 거

동에 미치는 영향을 해석하고자 한다.

2. 기초방정식

지하수의 3차원 오염물질 수송방정식은 다음식으로 나타내어 진다 (e.g., Javandel, *et al.*, 1984).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\nu_i C) + \frac{q_s}{\theta} C_s + \sum_{k=1}^N R_k \quad (2.1)$$

여기서,

C : 지하수에 용해된 오염물질 농도

t : 시간

x_i : 좌표축으로 부터의 거리

D_{ij} : 水力學的 移送 확산계수

ν_i : 지하수의 實流速

q_s : 단위체적당의 체적 flux

C_s : 오염원에서의 오염물질농도

θ : 간극율

$\sum_{k=1}^N R_k$: 화학반응항으로 다음과 같이 나타내어 진다 (Grove and Stollenwerk, 1984).

$$\sum_{k=1}^N R_k = -\frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} - \lambda \left(C + \frac{\rho_b}{\theta} \bar{C} \right) \quad (2.2)$$

여기서,

ρ_b : 다공질체의 가비중

\bar{C} : 吸着相의 농도

λ : 반응속도 상수

식 (2.2)의 $\frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial \bar{C}}{\partial t}$ 항을 다시 쓰면

$$\frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} = \frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial C}{\partial t} - \frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial \bar{C}}{\partial C} \quad (2.3)$$

식 (2.2)와 (2.3)을 식 (2.1)에 대입하면 다음식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\nu_i C) + \frac{q_s}{\theta} C_s \\ &\quad - \frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial \bar{C}}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} - \lambda \left(C + \frac{\rho_b}{\theta} \bar{C} \right) \end{aligned} \quad (2.4)$$

식 (2.4)를 다시 쓰면

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\nu_i C) + \frac{q_s}{\theta} C_s - \lambda \left(C + \frac{\rho_b}{\theta} \bar{C} \right) \quad (2.5)$$

여기서 R 은 지체인자로 다음식과 같이 정의된다.

$$R = 1 + \frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial \bar{C}}{\partial C} \quad (2.6)$$

식 (2.5)가 오염물질의 수송모형을 위한 지배방정식이다.

$$\nu_i = - \frac{K_{ii}}{\theta} \frac{\partial h}{\partial x_i} \quad (2.7)$$

여기서,

K_{ii} : 특수계수 tensor

h : 수리수두

수리수두를 구하기 위한 3차원 지하수 유동방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_{ii} \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) + q_s = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.8)$$

여기서 S_s : 비저류율

식 (2.8)로 부터 식 (2.7)의 값을 구할 수 있으며, 식 (2.5)를 풀어 해를 구할 수 있다. 본 연구에서는 식 (2.5)에 의한 해를 구하기 위하여 MT3D의 package(Zheng, 1992)를 이용하였다.

3. 모형구축

고려대상으로 삼고 있는 호수지역은 산이없는 광활한 지형을 형성하며, 지질은 퇴적층으로 비슷하게 구성되어 있으며, 호수는 빙하로 이루어져 있어 이들의 양상에 큰 차이는 보이지 않는다. 반경 10km 이내에 50개의 호수를 가진 Wisconsin주 북부의 Trout River 유역이 미국의 18개소의 장기 생태학적 연구(Long Term Ecological Research) 지역 중 한곳인 North Temperate Lakes Site내에 위치한다(Magnuson and Bowser, 1990). 그러므로

이 지역에 대한 지하수 수문학적 연구가 장기간 진행되어 오고 있어 지하수연구에 필요한 많은 자료가 수집되어 있다. 따라서 본 연구에서 해석에 필요한 자료는 Trout River 유역의 자료를 사용하였다. 호수는 Trout River 유역에 위치한 평범한 호수인 Crystal Lake(Fig. 1)의 형상을 가지는 3개의 가상 지하수 유동 시스템을 설정하였다.

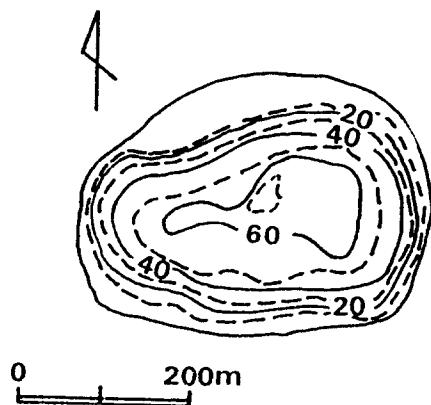


Fig. 1. Lake bed topography of Crystal Lake. (numbers indicate depth, contour interval is 10ft)

각각의 지하수유동 시스템별 호수의 위치는 다르나 호수의 크기와 수리상수는 동일하게 하였다. 호수 1은 유역의 좌측으로부터 호수의 중심부의 위치까지가 유역길이의 0.75배로 시스템의 지하수 함양역인 상류부에 위치하고 호수 2는 유역의 좌측으로부터 호수의 중심부의 위치까지가 유역길이의 0.5배로 시스템의 중류부에 위치하고 호수 3은 유역의 좌측으로부터 호수의 중심부의 위치까지가 유역길이의 0.25배로 지하수유출역인 시스템의 하류부에 위치하게 하였다. 호수 1의 경우에는 오염물질이 호수 2와 호수 3의 중심 위치에 유입하고 호수 2의 경우에는 오염물질이 호수 1과 호수 3의 중심 위치에 유입하며 호수 3의 경우에는 오염물질이 호수 1과 호수 2의 중심 위치에 유입한다고 가정하였다(Fig. 2).

유역의 크기는 i방향으로는 Crystal Lake의 유역폭과 같이 2.6km, j방향으로는 Cheng and Anderson(1994)과 같이 3.5km로 설정 하였으며 격

자간의 간격은 i방향으로는 100m로 하고 j방향으로는 200m로 하였다. 대수층의 두께는 Trout River 유역의 기반암의 깊이가 50m이므로(Attig, 1984) 52m로 설정하고 격자의 두께를 2m 쪽으로 하였다. 따라서 i, j, k방향으로 13x35x26의 격자점을 설정하였다.

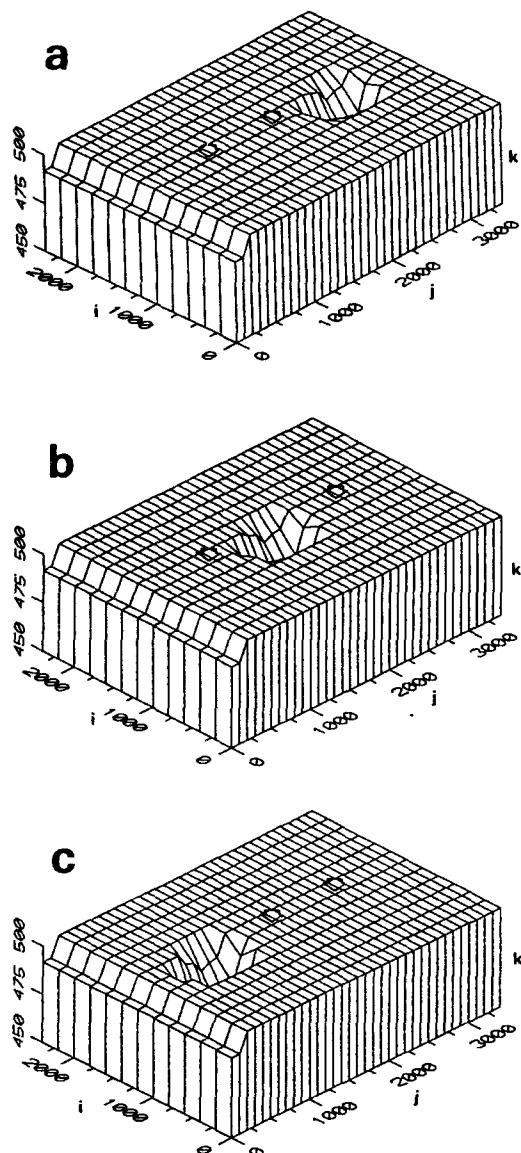


Fig. 2. Three-dimensional groundwater system and injection sites for (a) Lake 1, (b) Lake 2, and (c) Lake 3. The right-hand side represents upper reach. The arrows over the grid indicate injection points. (unit: m)

대상지역의 대수층은 균질이나 이방성을 가진다고 가정하였다(Krabbenhoft *et al.*, 1990). 대수층의 투수계수는 1×10^{-4} m/sec로 설정하고 이방성은 10으로 하였다(Krabbenhoft *et al.*, 1990). 호수바닥의 퇴적물의 두께는 2m이며 투수계수는 2.9×10^{-10} m/sec로 하였다(Kenoyer, 1986). 유효간극율은 0.15(Cheng and Anderson, 1994)로 하였고 초기오염은 없다고 가정하였다. 종분산지수(longitudinal dispersivity)는 전층에 대하여 25m로 하였고 연직 횡분산지수(vertical transverse dispersivity)와 종분산지수와의 비율과 수평 횡분산지수(horizontal transverse dispersivity)와 종분산지수와의 비율을 0.2로 가정하였다(Krabbenhoft *et al.*, 1990). 분자확산과 화학반응은 무시하였다. 4곳의 연직측면과 최하부의 밑바닥은 불투수경계로 하였으며 지하수면 경계를 통하여 일정량의 지하수함양이 일어나게 하였다.

연평균 강수량은 790mm/year, 증발량은 660mm/year, 그리고 연평균 강수의 지하수 함양량은 263mm/year로 하였다(Cheng and Anderson, 1994).

유입되는 오염물질은 불특정물질이며 오염물질의 농도는 액상 유해폐기물의 하한인 1000mg/l (EPA, 1989)로 하였다. 쓰레기매립장의 크기는 100m x 200m이며 침출수의 양은 강수의 침투에 의해서만 발생된다고 가정하였다. 배상근(1995)은 위에서 주어진 조건과 동일한 조건과 파라메타로 모의발생을 행하였으며 이결과로부터 호수의 위치에 따른 지하수 flux를 비교하여 호수의 위치가 지하수 flux에 미치는 영향을 파악하였다. 본 연구에서는 배상근(1995)이 모의발생으로부터 구한 3차원 포텐셜분포로부터 각각의 호수의 위치별로 지하수 flux를 구하고 Zheng(1992)이 개발한 MT3D를 이용하여 오염물질의 수송을 구하였다.

4. 결과와 고찰

모의발생 결과 중 호수의 위치별 오염원에 의한 오염물질의 유입이 1년 동안 발생한 경우와 5년동

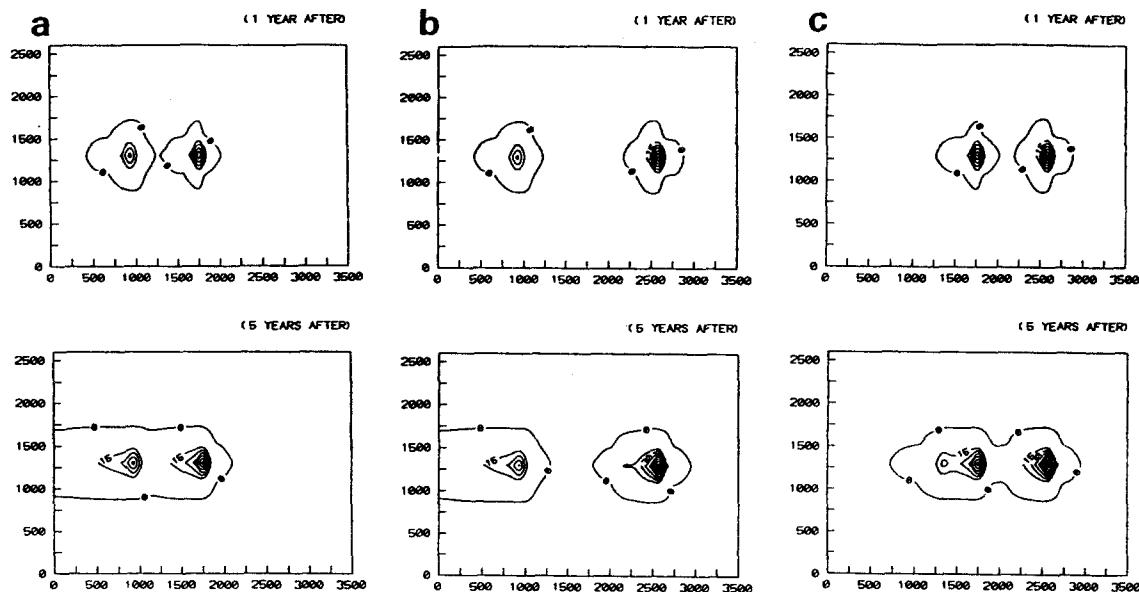


Fig. 3. Horizontal cross sections of contaminant plume 1 year and 5 years since injection for (a) Lake 1, (b) Lake 2, and (c) Lake 3. The plumes are based on depth-maximum values. (interval of concentration isoline is 15 mg/l)

안 발생한 후의 그 시점에 대한 오염물질의 농도 분포를 수평단면에 대하여 Fig. 3에 15mg/l의 등 농도선으로 나타내었다. 호수 1의 경우에 대하여 살펴보면 다음과 같다.

오염물질의 유입이 1년 동안 경과한 후에는 오염물질의 수송은 지하수유동의 영향으로 하류부를 향하여 주로 이루어지거나 확산에 의한 영향도 큼을 알 수 있다. 호수 2와 호수 3의 위치에서의 농도 분포 양상은 유사하나 호수 3의 위치인 하류부에서 오염물질이 유입된 경우가 호수 2의 중류부에서 유입한 경우보다 균일하게 주위에 영향을 미침을 알 수 있다. 각 유입지점에서의 농도변화는 호수 2 지점에서의 유입의 경우에는 60mg/l 이상이며 호수 3 지점에서 오염물질이 유입하는 경우에는 45mg/l 이상으로 오염원이 중류에 있는 경우에 유입지점의 농도가 더 높음을 알 수 있다. 오염물질의 유입이 5년 동안 발생한 후에는 두지점으로부터의 오염물질이 유입된 영향이 서로 연결되어 널리 미치게 되며, 호수 2 지점에서의 오염물질의 농도는 90mg/l에 달하고, 호수 3 지점에서의 농도

는 60mg/l에 달한다.

유역에 호수 2가 존재하고 오염물질의 유입지점이 호수 1의 지점과 호수 3의 지점일 때의 오염물질 수송에 대하여 살펴보면 다음과 같다.

오염물질이 유입된지 1년 후에는 오염물질농도의 분포양상은 호수의 위치가 호수 1에 존재할 때와 비슷함을 나타낸다. 오염물질의 영향은 호수 3의 지점이 호수 1지점에서 보다 널리 미치나 호수 1 지점에서의 오염물질의 농도가 90mg/l로 호수 3 지점에서의 오염물질의 농도 45mg/l 보다 훨씬 큼을 알 수 있다. 오염물질이 5년동안 유입된 후에는 양지점에서 그 영향이 보다 널리 미치며 오염물질의 농도는 호수 1 지점에서 135mg/l에 달하고 호수 3 지점에서 60mg/l에 달하여 호수 1 지점에서의 오염물질의 농도가 호수 3 지점에서 보다 훨씬 크며 그 차도 1년 후 일때 보다 훨씬 더 크짐을 나타낸다. 오염물질이 호수 1 지점에 유입한 경우는 호수 3 지점에 유입된 경우 보다 오염물질의 농도는 크나 그 영향은 멀리 미치지 않음을 알 수 있다.

호수가 호수 3의 위치에 존재하고 오염물질의 유입이 호수 1과 호수 2의 지점에서 1년 동안 유입된 후의 오염물질의 수송은 호수가 호수 1이나 호수 2의 위치에 존재할 때와 비슷한 분포양상을 나타냄을 알 수 있다. 오염물질의 농도분포는 호수 1과 호수 2의 두지점에서 비슷한 양상을 나타내나 호수 1 지점에서의 농도가 90mg/l 정도로 호수 2 지점에서의 75mg/l 보다 약간 높음을 나타낸다. 오염물질이 5년 동안 유입하면 호수 1 지점에 유입한 오염물질의 영향이 호수 2 지점까지 미치며 호수 1 지점에서의 농도분포는 135mg/l 에 달한다. 호수 2 지점에서의 농도분포는 90mg/l 에 달하고 그 영향은 하류방향으로 멀리 미침을 알 수 있다.

이들 결과로 부터 오염물질이 유입된 지 1년후에는 호수의 위치나 오염물질 유입지점의 위치에 상관없이 오염물질의 수송양상은 비슷한 것을 알 수 있다. 또한 오염물질의 유입이 상류부에서 발생될수록 하류부에서 발생될 때 보다 그 농도는 높으나 오염물질 유입의 영향은 멀리 미치지 않음을 알 수 있다.

Fig. 4는 모의발생 결과 중 호수의 위치별 오염원에 의한 오염물질의 유입이 1년간 발생한 경우와 5년간 발생한 후에 대한 오염물질의 농도분포를 i 방향의 중앙단면인 $i=7$ 의 연직단면에 대하여 10mg/l 의 등농도선으로 나타낸 것이다.

호수가 호수 1의 위치에 존재하며 오염물질의 유입이 호수 2의 위치와 호수 3의 위치에서 발생하면 1년 후에는 그 영향이 적으나마 기반암까지 미치며 5년 후에는 하부경계 부근에서의 농도가 20mg/l 에 달하며 양지점에서의 오염물질의 영향이 서로 연결되어 나타난다. 1년 후에는 양 지점에서의 오염물질 수송양상이 비슷하나 5년후에는 호수 2 지점에서 유입된 오염물질의 영향이 호수 3 지점에서 유입된 경우 보다 더욱 크게 나타남을 알 수 있다.

호수가 호수 2의 위치에 존재하고 오염물질의 유입이 호수 1과 호수 3의 위치에서 발생하면 1년 후에는 호수 1 지점 부근에서는 오염물질의 유입의 영향은 널리 미치지 않으나 호수 3 지점 부근에서는 그 영향이 크게 미침을 나타낸다. 호수 1

지점 부근의 오염물질의 농도는 110mg/l 정도이며 호수 3지점 부근의 농도는 50mg/l 정도로 호수 1지점 부근의 농도가 호수 3지점 부근의 농도보다 훨씬 큼을 알 수 있다. 5년후에는 호수 1 지점 부근에서는 오염물질의 농도가 대단히 크게 됨을 나

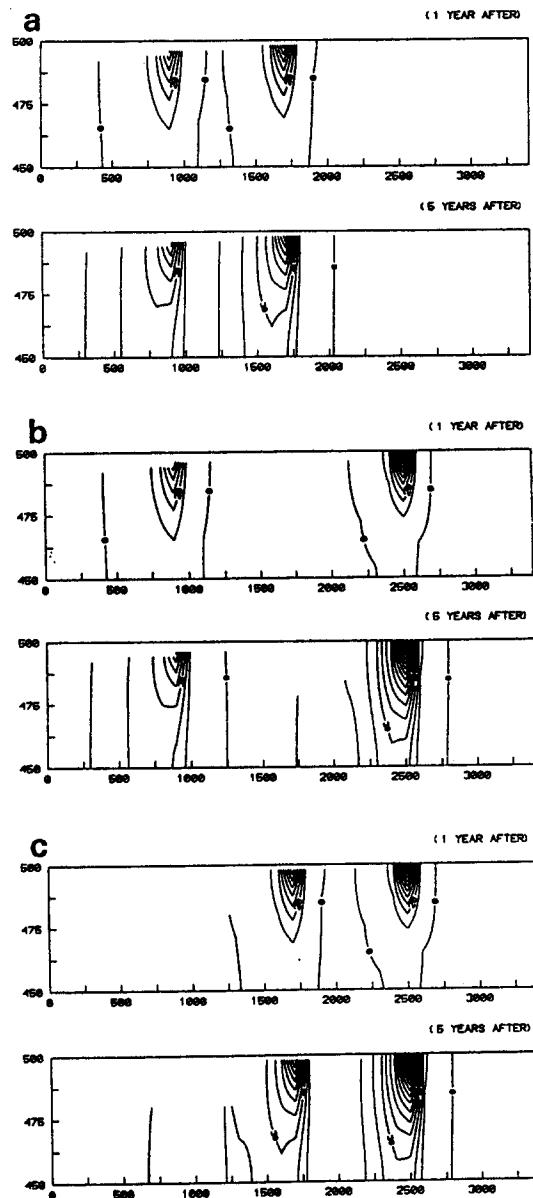


Fig. 4. Vertical cross sections along the $i=7$ axis of contaminant plume 1 year and 5 years since injection for (a) Lake 1, (b) Lake 2, and (c) Lake 3. (interval of concentration isoline is 10mg/l)

타내나 기반암 부근에서의 농도분포는 20mg/l 정도이다. 호수 3 지점 부근에서는 오염물질의 농도가 크지 않음을 알 수 있으나 기반암 부근에서의 농도분포는 호수 1 지점과 같이 20mg/l 정도를 나타낸다.

호수가 호수 3의 위치에 존재하고 오염물질의 유입이 호수 1과 호수 2 지점에서 발생하면 1년 후에는 양지점 주변 지역에서의 오염물질의 분포양상은 비슷하나 호수 1 지점 하부에서 그 농도가 큼을 나타내고 그 영향이 양지점의 하부경계에까지 도달함을 알 수 있다. 5년 후에는 호수 1 지점의 하부에서의 오염물질의 농도가 호수 2 지점의 하부보다 훨씬 큼을 나타내나 양 지점의 하부경계에서의 오염물질의 농도는 다 같이 20mg/l 정도이다. 두 경우의 양상은 비슷하나 호수 2 지점에서의 영향이 더욱 멀리 미침을 알 수 있다.

위의 결과는 대상유역과 지형 및 지질조건이 비슷한 Niagara Falls 지역의 쓰레기매립장에 대한 오염예측을 수행한 Maslia and Johnston(1984)의 연구결과와 유사하며 오염물질의 거동에 대하여 연구한 Adams and Gelhar(1992)와 Boggs *et al.*(1992)의 연구결과와 모순이 없음을 나타내고 있다.

5. 결 론

호수지역에서의 지하수오염에 대한 감시체계의 수립을 위한 지침과 오염물질 제거를 위한 정보를 제공하는데 필요한 오염물질 유입지점의 위치와 호수의 위치와의 관계로부터 유입된 오염물질의 거동을 파악하기 위하여 호수의 위치와 오염원의 위치가 지하수 오염물질의 거동에 미치는 영향을 해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 호수가 유역의 상류부에 위치하고 오염물질의 유입이 그 하류부에서 발생하면 오염물질은 낮은 농도를 가지나 그 영향은 널리 미친다.
2. 호수가 유역의 하류부에 위치하고 오염물질의 유입이 그 상류부에서 발생하면 오염물질은 높은 농도를 가지나 그 영향은 널리 미치지 않는다.

3. 오염물질이 유입된 지 1년 후에는 호수의 위치나 오염물질 유입지점의 위치에 상관없이 오염물질의 수송양상은 비슷하다.

4. 오염물질의 유입이 상류부에서 발생될수록 하류부에서 발생될 때 보다 그 농도는 높으며 오염물질 유입의 영향은 오염물질의 유입이 하류부에서 발생될수록 멀리 미친다.

5. 호수와 오염물질 유입지점의 위치에 관계없이 오염물질의 유입이 1년간 발생하면 그 영향은 기반암의 위치에 까지 미친다.

감사의 말

본 연구는 1993년도 계명대학교 비사연구기금으로 이루어졌음. 연구비를 지원해준 계명대학교와 조언을 아끼지 않은 Wisconsin-Madison 대학의 Mary P. Anderson 교수와 Mr. Daniel Feinstein에게 감사드린다.

참고문헌

- 배상근, 1995, 호수의 위치가 지하수 flux에 미치는 영향, 한국수문학회지, 제28권 제3호, pp.133-142.
- Adams, E.E. and L.W. Gelhar, 1992, Field study of dispersion in a heterogeneous aquifer: 2. Spatial moments analysis, Water Resour. Res., 28(12), 3293-3307.
- Attig Jr., J.W., 1984, The Pleistocene geology of Vilas County, Wisconsin, Ph.D. Thesis, University of Wisconsin-Madison, 265pp.
- Boggs, J.M., S.C. Young, L.M. Beard, L.W. Gelhar, K.R. Rehfeldt and E.E. Adams, 1992, Field study of dispersion in a heterogeneous aquifer: 1. Overview and site description, Water Resour. Res., 28(12), 3281-3291.
- Born, S.M., S.A. Smith and D.A. Stephenson,

- 1979, Hydrogeology of glacial-terrain lakes with management and planning applications, *J. of Hydrology*, 43, 7-43.
- Cheng, X. and M. P. Anderson, 1994, Simulating the influence of lake position on groundwater fluxes, *Water Resour. Res.*, 30(7), 2041-2049.
- Corapcioglu, M. Y. and M. A. Hossain, 1990, Groundwater contamination by high-density immiscible hydrocarbon slugs in gravity-driven gravel aquifers, *Ground Water*, 28(3), 403-412.
- Dagan, G. and V. Nguyen, 1989, A comparison of travel time and concentration approaches to modeling transport by groundwater, *J. of Contaminant Hydrology*, 4, 79-91.
- EPA(U.S. Environmental Protection Agency), 1989, Land disposal restrictions, OS-502, 36pp.
- EPA(U.S. Environmental Protection Agency), 1990, National priorities list sites: Wisconsin, EPA/540/4-90/049, 90pp.
- Grove, D. B. and K. G. Stollenwerk, 1984, Computer model of one-dimensional equilibrium-controlled sorption processes, U.S.G.S. Water Resources Investigations Report, 84-4059, 58pp.
- Holmes, K. J., W. S. Chu and D.R. Erickson, 1989, Automated calibration of a contaminant transport model for a shallow sand aquifer, *Ground Water*, 27(4), 501-508.
- Javandel, I., C. Doughty and C. F. Tsang, 1984, *Groundwater transport: handbook of mathematical models*, A.G.U. Water Resources Monogram, 10, 228pp.
- Kenoyer, G. J., 1986, Groundwater/lake dynamics and chemical evolution in a sandy silicate aquifer in Northern Wisconsin, Ph. D. Thesis, University of Wisconsin-Madison, 174pp.
- Krabbenhoft, D. P., C. J. Bowser, M.P. Anderson, and J.W. Valley, 1990, Estimating groundwater exchange with lakes 2. - Calibration of a three-dimensional, solute transport model to a stable isotope plume, *Water Resour. Res.*, 26(10), 2455-2462.
- Magnuson, J. J. and C. J. Bowser, 1990, A network for long-term ecological research in the United States, *Freshwater Biology*, 23, 137-143.
- Maslia, M. L. and R. H. Johnston, 1984, Use of digital model to evaluate hydrogeologic controls on groundwater flow in a fractured rock aquifer at Niagara Falls, New York, U.S.A., *J. Hydrology*, 75, 167-194.
- Wisconsin D.N.R., 1990, Registry of waste disposal sites in Wisconsin, 130pp.
- Wisconsin D.N.R., 1994, Leaking underground storage tank list, 94pp.
- Wisconsin N.R.M., 1989, Groundwater, 32pp.
- Zheng, C., 1992, MT3D, a modular three-dimensional transport model, S.S. Papadopoulos & Assoc., Inc.