

정수계획법을 이용한 지하수 수질관측망의 설계

Groundwater Quality Monitoring Network Design Using Integer Programming

이 상 일* / 김 학 민**

Lee, Sang-Il / Kim, Hak-Min

Abstract

Monitoring of groundwater quality is essential for the preservation of groundwater resources. In practice, however, groundwater monitoring network is designed based on the experience and intuition of experts or on the convenience. This study proposes a simulation-optimization approach for the optimal design of monitoring networks. In it, the predicted three-dimensional concentration data are used as the input of an optimization problem. Various design objectives and constraints are considered and the problem is formulated as the 0-1 integer programming. The methodology was applied to a sanitary landfill site. The results show that the monitoring network configuration changes as the monitoring goal, operation time and constraints vary. The proposed method turns out to be an efficient tool for the wide range of groundwater quality monitoring network design problems.

Keywords: groundwater quality, monitoring network, integer programming

요 지

지하수 수질 감시를 위한 관측망의 설치는 지하수자원의 보호를 위해 매우 중요하다. 그러나 현재 지하수 수질 관측망의 설계는 합리적인 방법보다는 현장전문가의 경험과 직관에 의존하는 경우가 많다. 본 논문에서는 3차원 수질모의와 최적화를 이용하는 지하수질 관측망의 설계방법론을 제안하였다. 설계과정은 다음의 세 가지 경우로 정형화되었다. (1) 평균농도를 감시하는 위치를 선정하되 관측정의 수가 제한되는 경우, (2) 최대농도를 감시하는 위치를 선정하되 관측정의 수가 제한되는 경우, (3) 평균농도를 감시하는 위치를 선정하되 예산상 제약이 있는 경우. 이와 같은 설계문제를 매립장 현장에 적용하고 0-1 정수계획법으로 해결하였다. 관측망의 설치목적, 운영기간, 제약조건 등에 따라 관측망의 구성이 다르게 결정됨을 보이고 그 의미를 해석하였다.

핵심용어 : 지하수 수질, 관측망, 정수계획법

* 동국대학교 토목환경공학과 조교수
Assist. Prof., Dept. of Civil and Environ. Eng., Dongguk Univ., Seoul, 100-715, Korea

** 동국대학교 토목환경공학과 석사과정
MS candidate, Dept. of Civil and Environ. Eng., Dongguk Univ., Seoul, 100-715, Korea

1. 서 론

무절제한 지하수의 개발과 쓰레기 매립장, 지하 저장탱크, 우발적 사고 등 여러 가지 경로를 통하여 지하수가 오염되고 있다. 1989년 서울 시내 460개 심정 중 283개소가 생활하수 및 공장폐수에 오염되어 식수 부적합으로 판명되었고, 1993년에는 전국의 심도 30m 진후의 암반층을 대상으로 수질을 조사한 결과 744개소 중 152개소가 음용수 수질기준을 초과하였다(농어촌진흥공사, 1996). 최근의 조사에서도 전국 1248개 관정의 7.9%가 일반 및 특정오염물질에 의해 오염되어 수질 기준치를 초과한 것으로 보고된 바 있다(조선일보, 1999).

오염의 위험이 있는 지역의 지하수를 감시·관측함으로써 오염물질을 조기에 탐지하는 것은 지하수자원의 보호, 나아가서는 오염된 지하수의 정화를 위해서 반드시 필요하다. 1994년부터 지하수 수질관측정의 설치에 관하여 「지하수의 수질 보전 등에 관한 규칙」(총리령 제 461호)이 시행되고 있으나, 관측정의 위치 선정에 관한 구체적인 내용은 법규나 시행령 등에 명시되어 있지 않다. 그 결과 관측정의 위치 선정은 전문가의 직관과 경험, 현장 여건에 따라 임의적으로 설치·운영되고 있는 형편이다.

본 연구는 오염의 위험이 있는 지역의 지하수를 감시·관측하는 일상적인 수질관측망 설계를 위한 체계적인 설계방법론을 제시함으로써 지하수 수질보전에 기여하는데 그 목적이 있다.

2. 설계방법론의 제시

현재까지 알려진 지하수 수질관측망 설계방법론들은 각기 다양한 목적, 제약조건, 최적화 기법 등을 사용하

여 왔으며, 이에 대한 자세한 검토는 Lee and Kitanidis(1996)와 이상일(1998) 등에서 찾을 수 있다. 거의 모든 방법론들이 오염상황을 모의하고 그를 바탕으로 최적화를 수행하는 그림 1과 같은 절차를 따르고 있다. 초기에는 오염물질 확산방정식을 풀지 않는 방법론도 간혹 있었으나, 최근에는 수치모형을 이용하여 오염현장을 모의하는 방법이 많고 공간적으로도 2차원보다는 3차원 해석을 수행하는 경향을 볼 수 있다. 본 연구에서도 이러한 틀을 유지하면서 다음과 같은 세 가지 경우로 나누어 문제를 정형화하였다.

① Case 1

$$\text{Max } Z = \sum_{i=1}^m x_i \overline{C}_i = \sum_{i=1}^m \left\{ x_i \frac{\left(\sum_{j=1}^n C_{ij} \right)}{g_i} \right\} \quad (1)$$

$$\text{Subject to } \sum_{i=1}^m x_i = p \quad \forall i \in P \quad (2)$$

여기서, $x_i = 1$ (우물이 i 지점에 설치될 경우); 0 (그 외의 경우), \overline{C}_i 는 i 번째 후보 관측지점의 평균농도, C_{ij} 는 i 번째 우물의 j 번째 층에서의 농도, g_i 는 i 번째 우물에서 오염이 검출되는 층의 수, P 는 후보 관측지점의 집합, p 는 설치할 우물의 수, m 은 전체 후보 관측지점의 수, n 은 모의를 위해 나눈 대수층의 깊이방향 층수이다(그림 2 참조).

즉, Case 1은 관측정에서 검출되는 평균농도의 합을 최대화하는 것을 목적으로 하고, 관측정의 수가 제약조건으로 존재하는 경우에 해당된다. 예를 들어, 그림 2에서 \overline{C}_i 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \overline{C}_i &= \frac{B\text{점의 농도}(C_{iB}) + C\text{점의 농도}(C_{iC}) + D\text{점의 농도}(C_{iD})}{\text{검출된 층의 수}} \\ &= \frac{10 + 20 + 10}{3} = 13.33 \text{ (ppm)} \end{aligned}$$

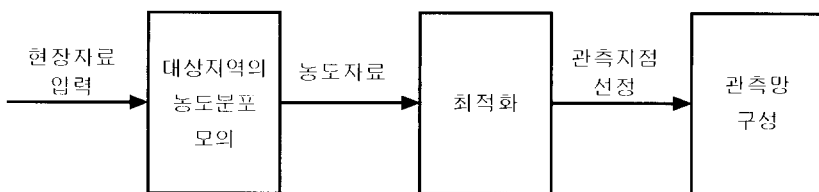


그림 1. 관측망 구성 방법의 흐름도

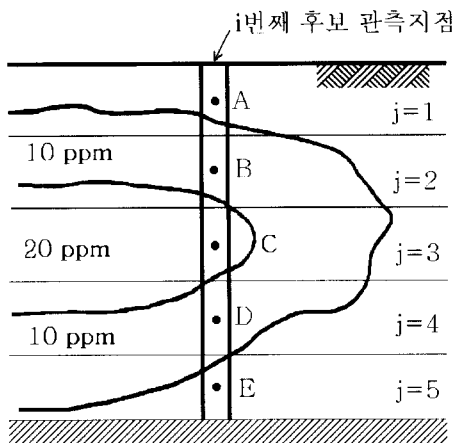


그림 2. 후보 관측지점에서의 농도분포 예

② Case 2

$$\text{Max } Z = \sum_{i=1}^m x_i C_i^{\text{max}} \quad (3)$$

$$\text{Subject to } \sum_{i=1}^m x_i = p \quad \forall i \in P \quad (4)$$

여기서, C_i^{max} 는 i 번째 후보 관측지점에서 검출되는 농도 중 최대치이며, 그림 2에서는 $C_i^{\text{max}} = C_C = 20 \text{ ppm}$ 이 된다. 따라서 Case 2는 후보 관측지에서 검출되는 최대농도의 합을 최대화하는 것을 목적으로 하고, 관측점의 수가 제약조건으로 존재하는 경우에 적용될 수 있다.

③ Case 3

$$\text{Max } Z = \sum_{i=1}^m x_i \bar{C}_i = \sum_{i=1}^m \left\{ x_i \frac{(\sum_{j=1}^m C_{ij})}{g_i} \right\} \quad (5)$$

$$\text{Subject to } \sum_{i=1}^m x_i I_i \leq \frac{R}{k} \quad (6)$$

여기서, $I_i = 1$ (수질기준 이상으로 오염물질이 검출될 경우); 0 (그 외의 경우), R 은 총예산, k 는 관측점 1개당 설치단가이다.

즉, Case 3은 관측점에서 검출되는 평균농도의 합을 최대로 하되, 관측점 설치비용에 관한 총예산이 제약조건으로 작용할 경우에 해당된다.

위와 같은 세 가지 유형의 목적함수와 제약조건을 만족하도록 하는 최적화 문제는 전형적인 정수계획법 문제에 해당되며, 이를 풀어 $x_i = 1$ 로 결정되는 위치에 관측정을 설치토록 함으로써 관측망 설계는 완료된다.

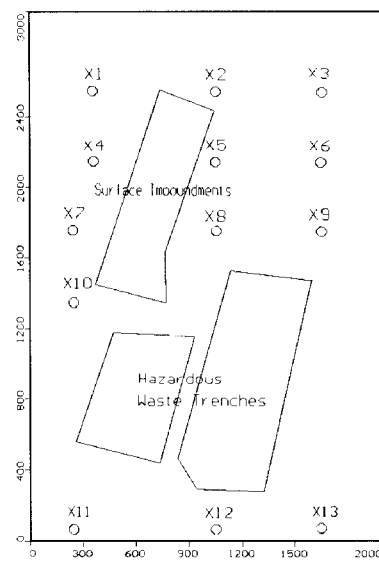
정수계획법의 해법에 관하여는 김종수(1996)를 비롯한 Operations Research 분야의 기본서에 설명되어 있으므로 여기서는 다루지 않도록 한다.

3. 대상지역 및 적용

상이한 설계조건이 관측망 설계결과에 미치는 영향을 파악하기 위하여 앞서 기술한 바와 같은 세 가지 유형의 수질관측망 설계상황을 현장에 적용하였다. 대상지역으로는 미국 일리노이주 월 카운티에 위치한 위생매립지를 선정하였다. Storck 등(1997)에 이 지역에 관한 현장자료가 수록되어 있다.

이 지역의 지질 분포는 크게 실트질 점토와 가는 자갈로 되어 있는 표석 점토층이 9~12m 정도의 깊이에 분포하고 있다. 그 아래는 모래와 자갈로 이루어진 평균 3m 두께의 퇴적층이 분포한다. 퇴적층 아래에 분포한 암반층은 상부 3~6m가 상당히 크게 균열되어 있다. 현장측정 결과에 의하면 표석 점토층에서는 낮은

==== 하천 2(수두 : 576ft) ====



==== 하천 1(수두 : 593ft) ====

그림 3. 대상 지역과 후보 관측지점

투수계수에도 불구하고 아래의 퇴적층으로 연직방향 함양이 일어나고 있으며, 퇴적층과 균열 암반층은 투수계수가 10^{-3} cm/s로 균일한 하나의 수문층위학적 단위로 볼 수 있다.

그림 3에 나타나 있는 바와 같이 $3000\text{ft}(914\text{m}) \times 2000\text{ft}(609\text{m})$ 크기 대수층의 상류와 하류는 일정수두 경계조건을 유지하고 있고, 측면은 불투수 경계조건으로 유지된다. 총 3개의 매립장이 있으나 2개의 고품폐기물 매립장만 오염원으로 작용한다. 역상폐기물 매립장(Surface Impoundments)은 운영된 바 없으므로 지하수의 농도분포에는 아무런 영향을 미치지 못하고, 다만 관측정을 설치하지 못하는 제약 지역으로 작용한다.

수질관측정을 설치할 수 있는 후보지점은 현실적(사유 재산권 등), 지리적(폐기물 매립장, 도로 등) 혹은 기술적 제약으로 인하여 그 위치가 제한되어 있다(X1~X13).

그림 4에는 수질예측을 위한 격자망과 현재 파악된

표 1. 수질모의에 사용된 인자

| | |
|---------------------------------|----------------|
| 대수층의 폭 | 2000 ft |
| 대수층의 길이 | 3000 ft |
| 대수층의 두께 | 30 ft |
| 유효공극률 | 0.2 |
| 지류계수 | 0.2 |
| 종분산도(Longitudinal dispersivity) | 80 ft |
| 횡분산도(Transversal dispersivity) | 4 ft |
| Δx | 100 ft |
| Δy | 100 ft |
| Δz | 5 ft |
| 투수계수 | 10^{-3} cm/s |
| 함양률 | 5.6 cm/yr |
| 지체인자(Retardation factor) | 4.9 |

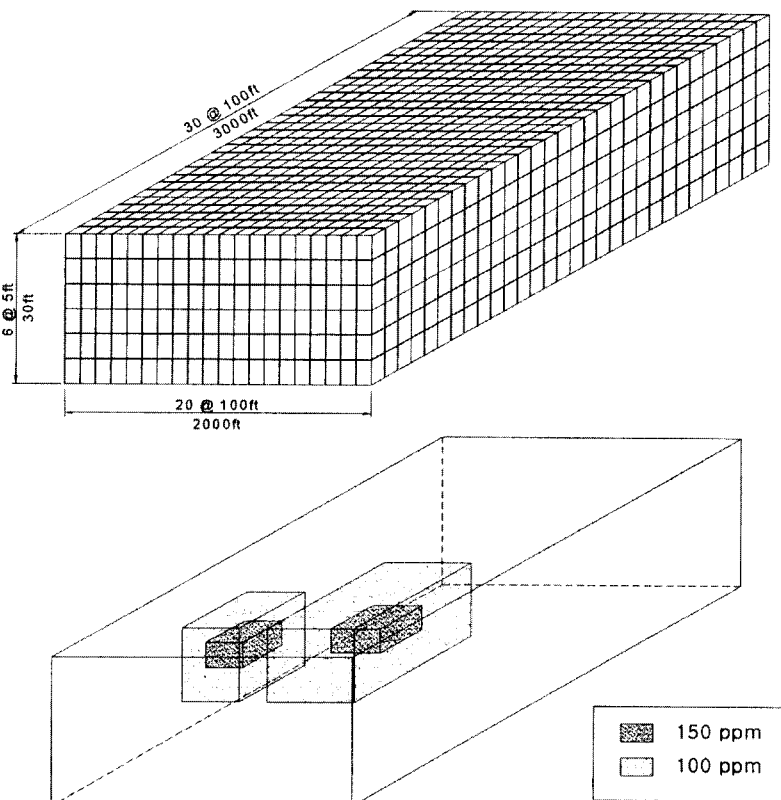


그림 4. 격자망 구성과 현재의 오염농도 분포

오염물질의 분포와 농도를 나타내고 있다. 앞서 설명한 바와 같이 표석 점토층에서의 지하수 흐름이 연직방향이기 때문에 수질관측망 측면에서는 관심의 대상이 되지 못하고, 수평방향 흐름이 존재하는 퇴적층과 균열 암반층 30ft(9m)를 해석 대상으로 하였다. 표 1에는 지하에서의 오염물질의 이동을 모의하기 위해 사용된 인자들이 수록되어 있다. 지하수 및 용질이동 해석은 정상상태 가정 하에서 수행하였다.

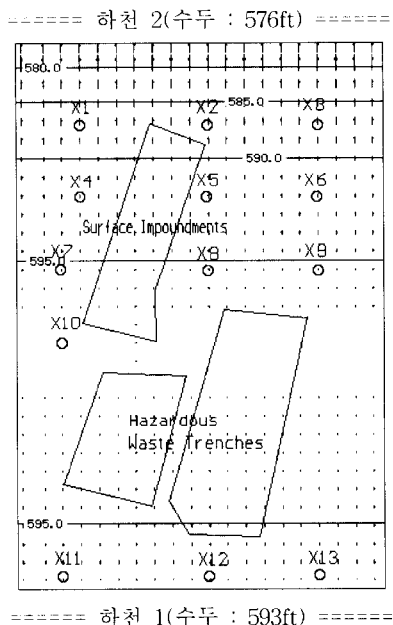
수질관측망을 설계함에 있어 다음과 같은 상황을 고려하였다.

(1) 매립지의 운영기간을 5년, 10년, 20년, 그리고 100년으로 상정하였다.

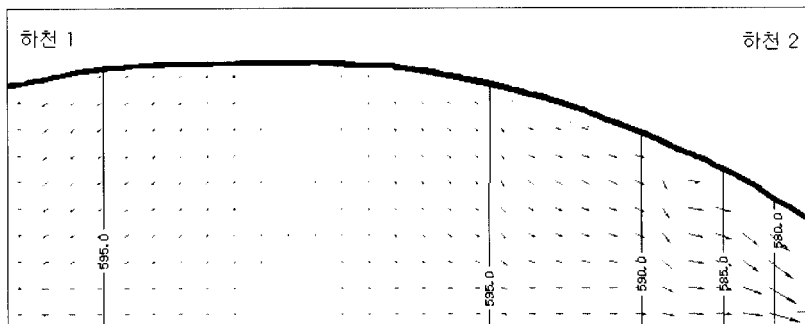
(2) 우물의 수에 대한 제약조건이 있는 경우(Case 1과 2), 우물의 수를 각각 2, 3, 4, 5개로 변화시키며 설계하였다.

(3) 총예산에 대한 제약조건이 있는 경우(Case 3), 관측정 1개의 설치단가를 30단위로 하고 총예산을 100, 200, 300단위로 변화시켰으며, 수질기준은 0.1ppm으로 정하였다.

본 연구에서는 지하수 및 물질이동 해석에는 Visual



(a) 평면도



(b) 단면도

그림 5. 수두 및 유속분포

Modflow(Guiguer and Franz, 1996)를, 0-1 정수 계획법의 해는 LINDO(LINDO Systems Inc., 1996)를 이용하였다. Modflow에 의해 대수층의 농도 분포가 계산되면, 별도로 작성한 프로그램이 후보지점에서의 층별 농도를 이용해 LINDO의 입력화일로 전환시키고, LINDO가 최적해를 구하는 방식으로 계산이 이루어졌다.

4. 결과 및 토론

그림 5는 평면과 종단면상의 수두와 유속분포를 나타낸다. 강우에 의한 침투의 결과로 고행폐기물 매립장 하단에서 최고 지하수위가 형성되고, 상하류로 지하수 흐름이 있음을 알 수 있다.

표 2에는 설계조건에 다양한 조합에 따른 관측망 설계결과가 제시되어 있고, 그 한 예로 운영기간이 20년 일 때 세 가지 상이한 설계조건에 대한 관측망의 위치 선정 결과가 그림 6에 검은 점으로 나타나 있다.

먼저, 표 2에 의하면 관측망의 운영기간이 길수록 관측정을 설치할 위치가 하류로 이동하고 있음을 알 수 있다. 이는 보다 넓은 공간에서 오랜 기간의 오염

물질 확산에 대비하기 위한 것이라고 해석할 수 있다. 그리고 관측정을 설치할 위치가 오른쪽으로 치우치는 경향을 보이는 이유는 초기에 오염물질이 오른쪽에 더 많이 분포한데 기인하며 이는 직관적인 판단으로도 예상 가능하다.

또한, Case 1과 2의 결과는 거의 비슷하지만 조금씩의 차이(밑줄 친 부분)를 보이고 있다. 이는 관측정 설치목적이 평균적인 농도의 감시인지, 아니면 최대농도를 감시 혹은 규제해야 하는지에 따라 관측망 위치 선정이 달라질 수 있음을 의미한다(그림 6 참조).

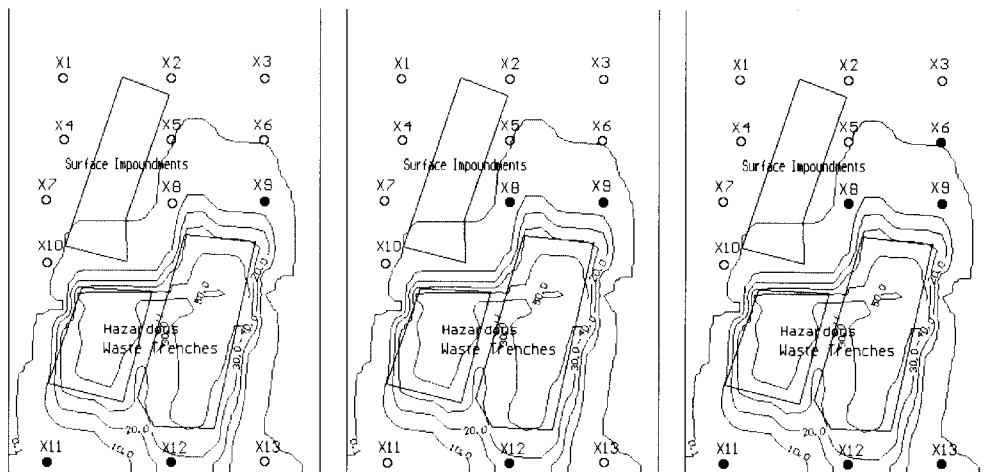
한편, 제약조건으로서의 우물의 수가 증가함에 따라 Case 1과 2는 공히 기준에 선택된 관측정 군에 다른 위치가 하나씩 추가되는 규칙성(Additive Rule)을 보인다. 이는 제약조건으로서의 우물의 수가 달라질 때마다 전혀 새로운 관측망을 형성하지 않는다는 것을 의미한다.

총예산이 제한되어 있는 경우(Case 3), 관측정당 설치단가가 30이므로 총예산이 100일 때는 최대 3개, 200일 때는 6개, 300일 때는 10개까지 관측정을 설치할 수 있다. 그러나 설계결과를 살펴보면 운영기간이

표 2. 관측망 설계결과

| 운영 기간 | 제약조건 (우물의 수) | Case 1 | Case 2 | 제약조건 (총예산) | Case 3 |
|-------|--------------|------------------|------------------|------------|---------------------------------|
| 5년 | 2개 | 9, 12 | 9, 12 | 100 | 9, 12, 13 |
| | 3개 | 9, 12, 13 | 8, 9, 12 | | |
| | 4개 | 8, 9, 12, 13 | 8, 9, 12, 13 | 200 | 8, 9, 12, 13 |
| | 5개 | 8, 9, 11, 12, 13 | 8, 9, 11, 12, 13 | | |
| 10년 | 2개 | 9, 12 | 9, 12 | 100 | 9, 12, 13 |
| | 3개 | 9, 12, 13 | 8, 9, 12 | | |
| | 4개 | 8, 9, 12, 13 | 8, 9, 12, 13 | 200 | 8, 9, 11, 12, 13 |
| | 5개 | 8, 9, 11, 12, 13 | 8, 9, 11, 12, 13 | | |
| 20년 | 2개 | 9, 12 | 9, 12 | 100 | 9, 11, 12 |
| | 3개 | 9, 11, 12 | 8, 9, 12 | | |
| | 4개 | 8, 9, 11, 12 | 8, 9, 11, 12 | 200 | 6, 8, 9, 11, 12, 13 |
| | 5개 | 8, 9, 11, 12, 13 | 8, 9, 11, 12, 13 | | |
| 100년 | 2개 | 9, 12 | 8, 12 | 100 | 8, 9, 12 |
| | 3개 | 8, 9, 12 | 8, 9, 12 | | |
| | 4개 | 8, 9, 11, 12 | 8, 9, 11, 12 | 200 | 5, 6, 8, 9, 11, 12 |
| | 5개 | 6, 8, 9, 11, 12 | 6, 8, 9, 11, 12 | | |
| | | | | 300 | 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 11, 12, 13 |

주) 번호는 선택된 관측정의 위치



case 1(제약조건: 우물 3개) case 2(제약조건: 우물 3개) case 3(제약조건: 총예산 200)

그림 6. 관측망 설계결과의 예 (운영기간 20년, 농도단위: ppm)

짧을 때는 예산을 모두 사용하지 않고 운영기간이 길어질수록 예산을 최대한 사용하고 있음을 알 수 있다. 이는 운영기간이 길수록 오염물질의 공간적 분포가 넓어지는 현실을 반영한 것이라 할 수 있다.

5. 결 론

지하수 수질 감시를 위한 관측망의 설치는 지하수자원의 보호에 있어서 매우 중요하다. 그러나 현재의 지하수 수질관측망 설계는 합리적인 방법에 의하지 않고 주로 현장전문가의 경험과 직관에 의존하는 경우가 많다. 본 연구에서는 3차원 수질모의와 최적화에 기반을 둔 지하수 수질관측망의 설계방법론을 제시하고, 다양한 설계상황을 매립장에서의 관측망 위치선정 문제에 대해 적용시켜 보았다. 이 방법론은 본질적으로는 대상 지역의 규모에 제약을 받지 않으며, 오늘날 컴퓨터 성능 및 수질모의와 최적화 기술의 발전에 힘입어 실질적인 적용 측면에서도 어려움이 없을 것으로 판단된다. 설계방법론을 일리노이주 윌 카운티 소재 위생매립장에 적용하여 다음과 같은 결과가 얻어졌다.

- (1) 운영기간이 길수록 관측정은 오염원으로부터 먼 하류에 위치하도록 배열되었다.
- (2) 관측정의 수가 제약조건으로 작용하는 경우에는 관측정의 수가 증가하면 항상 기준에 선택되어 이루어진 관측망에 새로운 위치가 추가되는 규칙성(Additive Rule)이 있었다.

(3) 예산이 제약조건으로 작용할 경우, 총예산이 증가하여도 관측정의 수가 반드시 증가하지는 않으며, 관측망의 계획 운영기간이 길수록 오염물질의 공간적 분포가 넓어지므로 예산을 최대한 활용하는(즉, 관측정을 많이 배치하는) 경향이 있었다.

관측망의 구축목적, 운영기간, 그리고 제약조건 등에 따라 관측정의 위치선정이 달라짐을 현장 적용례를 통하여 알 수 있었다. 이로써 수질관측망의 설계가 지역에 따라 다양한 조건과 상황을 고려한 합리적이고 체계적인 방법으로 이루어져야 함을 확인하였고, 정수계획법에 의한 설계방법이 이러한 과정에 유용한 도구가 될 수 있음을 보였다.

참 고 문 헌

김종수 (1996). OR이론과 응용, 박영사.
 농여촌진흥공사 (1996). 한국지하수총람.
 이상일 (1998). “지하수 수질관측망 설계방법론의 적용성 검토.” 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제31권, 제6호 pp. 683~692.
 조선일보 (1999). 5월 4일.
 Guiguer, N. and Franz, T. (1996). *User's Manual for Visual Modflow*, Waterloo Hydrogeologic, Inc.
 LINDO Systems Inc. (1996). *Solver Suite*.
 Lee, S.-I. and Kitanidis, P. K. (1996).

“Optimization of monitoring well installation time and location during aquifer decontamination.” *Water Resources Management*, Vol. 10, pp. 439~462.

Storck, P., Eheart, J. W. and Valocchi, A. J. (1997). “A method for the optimal location of monitoring wells for detection of

groundwater contamination in three-dimensional heterogeneous aquifers.” *Water Resources Research*, Vol. 33, No. 9, pp. 2081~2088.

(논문번호:99-044/접수:1999.05.24/심사완료:1999.08.09)