

매립지의 부분 누출 가능성을 고려한 지하수 수질관측망의 설계

○오해진*, 이상일**

1. 서론

최근 지하수개발이 물부족을 극복하기 위한 대안의 하나로 인식되어 그 사용량이 증가하고 있다. 그러나, 지하수는 여러 오염요소들에 노출될 가능성이 높아 지하수 수질의 관측 및 감시 활동이 매우 중요하다. 정부에서도 2001년까지 지하수 관측소를 전국에 301개소 설치·운영하는 계획은 진행중에 있다 「지하수 수질측정망 운영계획」. 그러나 현재까지의 지하수 수질관측망 설계는 합리적인 방법보다는 현장 전문가의 경험과 직관에 의존하는 경우가 많다. 또한 관계법률도 구체적인 규정을 하고 있지 않아 이 같은 상황을 부추기고 있다. 따라서 지하수 수질을 정확히 측정하고 분석할 수 있는 체계적이고 과학적인 관측망 설계 방법론이 요구된다.

이를 위해 지난 수년간 지하수 수질 관측을 위한 관측망 설계방법론이 개발되어 왔다. 이들에 관해서는 이상일(1998)에 체계적으로 정리되어 있다. 이들은 대부분 오염물질이 매립시설물 전체에서 누출하는 경우에 대한 설계방법론들이 있다. 이 방법론들은 대부분의 재래식 매립장에서 침출수 누출이 매립장 전체에서 일어나는 경우를 상정하고 개발된 것이다. 그러나 최근에 건설되는 위생매립장 또는 핵폐기물 매립장 등은 시설의 일부에서 자체결함 또는 사고로 누출이 발생할 가능성이 높다. 이 경우 오염물의 누출형태는 전체누출의 경우와는 다를 것이다. 따라서 본 연구는 기존의 수질관측망 설계와는 달리, 매립시설물 일부에서의 누출과 특히 특정 취약지점에서의 누출에 대비한 주변 지역의 지하수를 감시·관측하는 수질관측망 설계 방법론을 제시하고 그 적용성을 평가하는데 그 목적이 있다.

* 동국대학교 대학원 토목공학과 박사과정

** 동국대학교 토목환경공학과 조교수

2. 방법론

본 연구에서는 매립시설물 일부에서 누출이 일어날 경우를 상정하여 오염농도분포를 모의하고, 그 탐지 가능성을 최대로 하는 관측망 설계 방법론을 개발하였다. 이를 위해 매립지를 누출가능성이 있는 여러 개의 구역으로 나누고 각각의 구역에서 일어나는 누출에 대해 일정기간 후 주변지역의 농도분포를 모의하였다. 이를 바탕으로 적절한 목적함수와 제약조건을 고려한 최적화를 통해 관측점을 선정하였다. 누출이 어디에서 발생할지 사전에 알지 못하므로 상이한 누출 경우에 대한 관측점 선정결과를 통계적으로 분석하여 관측망을 구성하였다. 그림 1은 이를 도식적으로 나타내고 있다.

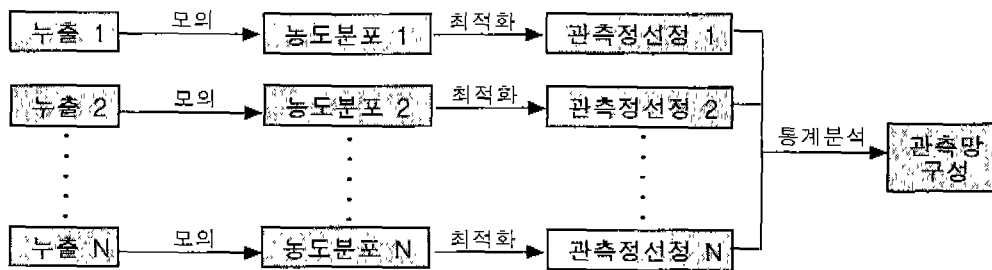


그림 1. 본 연구에서 사용된 관측망 설계절차

이때 목적함수는 각각 후보 관측지점에서 검출되는 평균농도의 합을 최대화(목적함수 1)하는 것과 후보 관측지점에서 검출되는 최대농도의 합을 최대화(목적함수 2)하는 것으로 하였다. 이에 대한 좀더 자세한 내용은 이상일과 김학민(1999)에서 찾아 볼 수 있다.

① 목적함수 1

$$\text{Max } Z_1 = \sum_{i=1}^m \overline{C}_i X_i = \sum_{i=1}^m \left\{ \frac{\left(\sum_{j=1}^n C_{ij} \right)}{g_i} X_i \right\} \quad (1)$$

여기서, \overline{C}_i 는 i 번째 후보 관측지점의 평균농도, C_{ij} 는 i 번째 우물의 j 번째 층에서의 농도, $X_i = 1$ (우물이 i 지점에 설치될 경우); 0 (그 외의 경우), g_i 는 i 번째 우물에서 오염이 검출되는 층의 수이다.

㉔ 목적함수 2

$$\text{Max } Z_2 = \sum_{i=1}^m C_i^{\text{max}} X_i \quad (2)$$

여기서, C_i^{max} 는 i 번째 후보 관측지점에서 검출되는 농도 중 최대치이다.

제약조건으로는 관측정 수의 총합이 p 개로 제한되어 있는 경우를 고려하였다.

$$\sum_{i=1}^m x_i = p \quad \forall i \in P \quad (3)$$

이때 P 는 후보 관측지점의 집합, p 는 설치할 우물의 수, m 은 전체 후보 관측지점의 수, n 은 모의를 위해 나눈 대수층의 깊이방향 층수이다. 이와 같은 유형의 최적화 문제는 전형적인 0-1 정수계획법 문제에 해당된다. 본 연구에서는 지하수 및 물질 이동 해석에는 Visual Modflow를, 0-1 정수계획법의 해는 LINDO를 이용하였다.

3. 적용

대상 지역으로는 미국의 일리노이주 웰카운티에 위치한 위생 매립지를 선정하였다(그림 2). 총 3개의 매립장이 있으나 2개의 고형폐기물 매립장만이 오염원으로 작용한다. 액상폐기물 매립장(Surface Impoundments)은 운영된 바 없으므로 지하수의 농도분포에는 아무런 영향을 미치지 못하고, 다만 관측정을 설치하지 못하는 제약지역으로 작용한다.

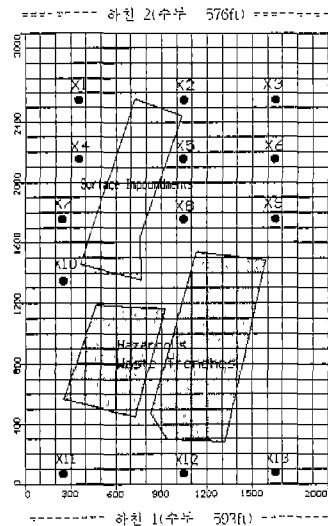


그림 2. 대상지역 및 후보관측지점

이 지역에 관한 현장자료는 Storck 등(1997)에 수록되어 있다. 또 본 연구에서 지하수 및 오염물질이동 해석을 위해 사용된 인자들은 이상일과 김학민(1999)에서 찾아 볼 수 있다. 후보 관측지점은 현실적(사유 재산권 등), 지리적(폐기물 매립장 도로 등) 혹은 기술적 제약 등으로 인하여 그 위치가 제한되어 있어 총 13개의 후보관측정을 위치시켰다(X1~X13).

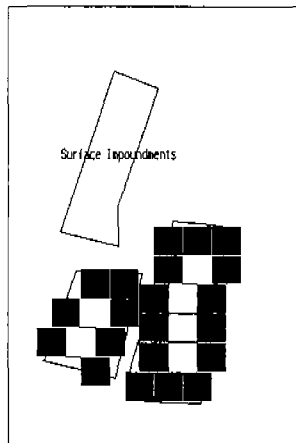


그림 3(a). 오염원을 69개의 구역으로 분할한 1층과 2층의 단면

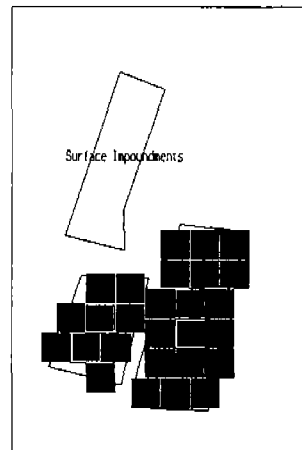


그림 3(b). 오염원을 69개의 구역으로 분할한 3층의 단면

본 매립장에는 상층으로부터 3개 층에 오염물질이 분포하는데, 매립장 일부분에서의 누출 상황을 모의하기 위해 첫 번째와 두 번째 층은 매립지 외벽을 21개 구역으로, 세 번째 층은 내부를 포함하여 27개로 분할하여 전체 69개의 구역으로 나누었다(그림 3(a),(b)). 여기서, 누출은 외벽을 통하여 발생하므로 첫 번째와 두 번째 층의 내부에서는 누출이 일어나지 않는 것으로 간주하였다.

본 연구에서는 매립지의 일부분에서 오염물질이 누출할 경우의 시나리오 구성을 위해 다음과 같은 세 가지 상황을 고려하였다.

(1) Case 1

매립지 전체에서 오염물질이 누출이 일어나는 상황. (재래식 매립지)

(2) Case 2

1개의 구역에서만 누출이 일어나는 상황. 본 연구의 경우, 각각의 69개 구역이 동일한 확률(1/69)로 누출하는 것으로 간주하였다.

(3) Case 3

2개의 구역에서만 누출이 일어나되, 특히 일부 취약한 구역에서의 누출 확률(본 연구에서는 임의로 0.3과 0.7)로 누출하는 상황.

(4) Case 4

3개의 구역에서만 누출이 일어나되, 특히 일부 취약한 구역에서의 누출 확률(본 연구에서는 임의로 0.25, 0.5, 0.25)로 누출하는 상황.

위의 각 상황에 대해 오염농도분포를 모의하고 앞에서 언급한 두 가지 목적함수에 대해 각각 최적화를 실시하였다. 최적화의 결과로 선택된 후보관측정의 선택 빈도를 계산하여 최종적인 관측망을 구성하였다. 특히 Case 2는 69개 구역 모두에 대해 각 1회, Case 3, 4는 서로 다른 특정 구역을 임의로 선정(2개 구역과 3개 구역을 각각 100회씩 선정)하여 각각 오염물의 확산된 농도분포를 모의하고 이를 바탕으로 최적화를 수행하였다.

4. 결과 및 검토

오염물질이 약 100년 후에는 하류경계인 하천 2로 유입되는 것으로 추정되므로 매립장의 운영기간을 100년으로 상정하여 관측망 설계를 수행하였다.

그림 4는 각 상황에 따른 후보관측정의 선택확률을 나타내고 있다.

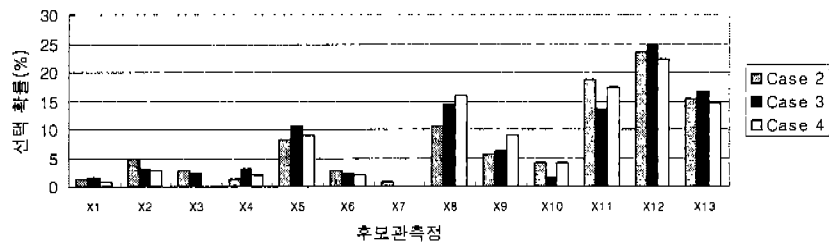


그림 4. 후보관측정의 선택 확률

표 1은 네 가지 상황에 대해 설치 관측정의 수를 변화시킴에 따라 선택된 후보관측정의 선택 빈도에 기초하여 관측망을 설계한 결과가 수록되어 있다. 표에 따르면 누출 상황이 달라짐에 따라 관측망 구성이 달라져야함을 알 수 있다. 예를 들면, 제약조건이 2개일 때 Case 1, 2, 3, 4에서 모두 X12가 선택되지만 나머지 한 관측정의 위치는 각각 X8, X11, X13이 선택됨을 볼 수 있다. 이는 우선 위생매립지나 핵폐기물 매립지의 경우, 채래식 매립지와 관측망 설계가 많이 다를 수 있음을 의미하며, 또한 취약한 부분의 누출 가능성을 고려한 관측망 설계가 그렇지 않은 경우와 다를 수 있음을 의미하는 것으로서 시설물의 전체 신뢰도(reliability)와 연관되는 문제임을 알 수 있다. 그러나 제약조건이 5개일 때는 4가지 상황에서 공히 똑같은 관측정 위치 선정이 이루어짐을 알 수 있다. 한편, 각 상황별로 두 가지 목적함수에 따른 설계

표 1. 지하수 수질관측망 설계 결과

상 황	계약조건 (관측점의 수)	선택된 관측점	
		목적함수 1 (평균농도의 최대화)	목적함수 2 (최대농도의 최대화)
Case 1 (전체 누출시)	2개	X12, X8	X12, X8
	3개	X12, X8, X11	X12, X8, X11
	4개	X12, X8, X11, X5	X12, X8, X11, X5
	5개	X12, X8, X11, X5, X9	X12, X8, X11, X5, X9
Case 2 (한 구역에서 동일한 확률로 누출시)	2개	X12, X11	X12, X11
	3개	X12, X11, X13	X12, X11, X13
	4개	X12, X11, X13, X8	X12, X11, X13, X8
	5개	X12, X11, X13, X8, X5	X12, X11, X13, X8, X5
Case 3 (임의의 2개 구역에서 다른 확률로 누출시)	2개	X12, X13	X12, X13
	3개	X12, X13, X8	X12, X13, X8
	4개	X12, X13, X8, X11	X12, X13, X8, X11
	5개	X12, X13, X8, X11, X5	X12, X13, X8, X11, X5
Case 4 (임의의 3개 구역에서 다른 확률로 누출시)	2개	X12, X11	X12, X11
	3개	X12, X11, X13	X12, X11, X13
	4개	X12, X11, X13, X8	X12, X11, X13, X8
	5개	X12, X11, X13, X8, X5	X12, X11, X13, X8, X5

결과는 크게 다르지 않음을 보이고 있다. 이러한 사실은 ‘관측점 설치목적에 따라 관측망 위치선정이 달라질 알 수 있다’ 라는 선행연구(이상일과 김학민(1999))와는 다른 결과인데, 이는 본 연구에서는 비교적 낮은 농도로, 또 작은 범위에서의 누출을 상정하였기 때문인 것으로 사료된다.

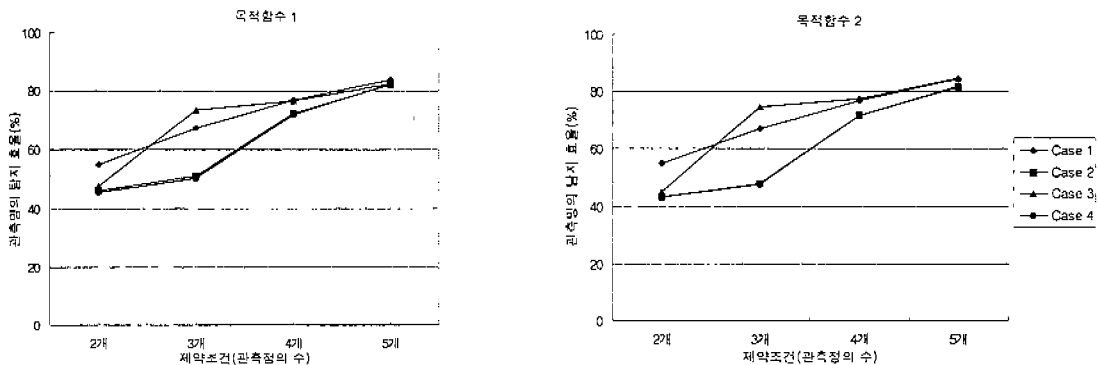


그림 5. 설계된 관측망의 오염물 탐지 효율

또한 그림 5는 제약조건이 2~5로 변화함에 따라 선택된 관측정들이 오염물을 탐지하는 효율을 나타내고 있다. 즉, 전체 후보관측정에서 탐지하는 농도 중 선택된 관측정이 탐지하는 농도가 차지하는 비중을 표시하고 있다. 이 정보는 관계법령에서 설치해야 되는 관측정의 수를 제시하는 근거가 될 수 있을 것이다.

5. 결론

무원칙하게 개발되고 있는 지하수의 수질을 관리·감시할 수 있는 체계적인 지하수 수질관측망 설계가 매우 중요하다. 이를 위해 본 연구에서는 기존의 연구와는 달리 오염물질이 오염원 일부에서 누출하는 경우의 수질관측망 설계방법론을 제시하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 오염원 전체에서 누출할 때와 일부에서 누출할 때 관측망의 구성결과가 달라진다. 이는 곧 위생매립지 등 일부 누출 가능성이 높은 곳의 관측망 설계방법이 기존의 것에서 수정되어야 함을 의미한다.

(2) 누출 취약 구역 및 누출 확률을 사전에 정확히 알수록 관측망의 감시 신뢰도를 높일 수 있다.

(3) 본 연구에서 제시된 방법론은 특정지역에서 오염물을 탐지하기 위해서 몇 개의 관측정이 설치되어야 하는지를 결정하는 데에도 적용될 수 있다.

6. 참고문헌

이상일 (1998). "지하수 수질관측망 설계방법론의 적용성 검토." 한국수자원학회 논문집, 제31권, 제6호 pp. 683~692.

이상일, 김학민(1999). "정수계획법을 이용한 지하수 수질관측망 설계" 한국수자원학회 논문집, 제32권, 제5호 pp. 557~564.

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.