

지하수 수질관측망 설계방법론의 적용성 검토

Applicability of Groundwater Quality Monitoring Network Design Methodologies

이 상 일*
Lee, Sang-Il

Abstract

Protection of groundwater resources from contamination has been of increasing concern throughout the past decades. In practice, however, groundwater monitoring is performed based on the experience and intuition of experts or on the convenience. In dealing with groundwater contamination, we need to know what contaminants have the potential to threaten the water quality and the distribution and concentration of the plumes. Monitoring of the subsurface environment through remote geophysical techniques or direct sampling from wells can provide such information. Once known, the plume can be properly managed. Evaluation of existing methodologies for groundwater monitoring network design revealed that one should select an appropriate design method based on the purpose of the network and the availability of field information. Integer programming approach, one of the general purpose network design tools, and a cost to-go function evaluation approach for special purpose network design were tested for field applicability. For the same contaminated aquifer, two approaches resulted in different well locations. The amount of information, however, was about the same.

Keywords: groundwater quality, monitoring network, optimization

요 지

지하수질 감시를 위한 관측은 지하수를 사용하는 주변 인구의 보건은 물론이고 궁극적으로는 지하수자원 보전이라는 측면에서 매우 중요하다. 그러나 지하수 수질관측망은 설계부터 운영에 이르기까지 임의적이고, 체계적이기보다는 경험에 의존하거나 과학적이지 못한 방식으로 시행되고 있는 것이 사실이다. 본 연구는 지하수질 관측망의 효율적 배치를 위한 방법론의 현장적용성을 검토하기 위하여 대표적인 설계방법론을 대상으로 비교연구 하였다. 그 결과, 지하수질 관측망의 설계 시에는 관측망 설치의 목적을 명확히 설정하는 것이 중요하며, 현장정보의 확보수준에 따라 선택될 방법론이 달라져야 함을 알 수 있었다. 또한, 범용관측망 설계기법의 하나인 Integer Programming에 의한 방법과 지하수 정화 목적 관측망 설계기법의 하나인 Cost-to go 함수 비교법을 동일한 대수층을 대상으로 적용한 결과, 각기 다른 관측점 위치를 얻었으나 요구되는 정보의 양은 비슷하였다. 두 방법 모두 지하수 오염을 모의할 정도의 정보만 확보되면 현장적용이 가능하며, 이를 통해 보다 객관적 근거에 의해 관측망 설계가 이루어질 것으로 판단된다.

핵심용어 : 지하수 수질, 관측망, 최적화

* 동국대학교 토목환경공학과 조교수

Assistant Prof., Dept. of Civil and Envir. Engrg., Dongguk Univ., Seoul 100-715, Korea

1. 서 론

최근 들어 지하수에 의존하는 율이 높아지고, 그 수질이 위협에 노출되는 사례가 점증함에 따라 지하수 수질을 체계적으로 감시하기 위한 관측체계의 확립이 절실히 요구되고 있다. 우리 나라에도 지하수 수질관측망의 설치 및 운영이 법으로 규정되어 있고 시행되고 있으나, 그 기준의 과학적 근거가 부족하고 전문가의 경험이나 직관, 현장여건에 따라 임의적으로 설치·운영되기 쉬운 형편이다. 즉, 지하수 수질관측망의 설치는 “유류 또는 유해화학물질 지하저장시설 등 지하수 오염유발 시설로서 지속적인 관측이 필요하다고 인정되는 시설에 한”하도록 제한적으로 규정하고 있고, 설치 위치에 있어서는 “오염유발 시설물을 기준으로 지하수의 동수구배 상류방향으로 오염발생 이전의 대표적인 지하수의 수질을 채취·분석할 수 있는 지점 1곳 및 하류방향으로 오염물질성분이 주위 지하수층으로 이동하는 것을 즉시 탐지할 수 있는 지점 3곳 내외”와 같이 막연한 규정만이 있을 뿐이다.

따라서 관측망이 설치목적에 부합되고 그 기능을 다하기 위하여는 설치 위치, 개수, 측정항목, 측정빈도, 측정 및 분석방법 등에 있어서 체계적이고 과학적인 방법론의 확립이 절실히 요구된다.

본 연구에서는 지하수 수질의 감시를 위한 관측망 설치 위치 선정에 관한 기존의 방법론을 비교하고, 대표적인 두 가지 방법론에 대하여 사례연구를 통하여 그 현장적용성을 검토하였다.

2. 관측망 설계의 개요

관측망을 설계할 때 직면하게 되는 물음에는 다음과 같은 것들이 있다.

- (1) 무슨 목적의 관측망인가?
- (2) 법적·경제적·기술적 제약조건은 무엇인가?
- (3) 어디에, 몇 개의 관측정을 설치해야 하는가?
- (4) 무슨 항목을 측정해야 하는가?
- (5) 어떠한 빈도로 측정이 이루어져야 하는가?

위의 질문들은 측정망의 효율성은 물론이고, 설치 및 운영비와도 직결되어 결국 특정의 목적에 초점을 맞춘 ‘최적’설계의 개념을 도입하지 않을 수 없게 된다. 즉, 어떠한 제약조건하에 정량화된 특정한 목적함수를 최대 혹은 최소화시키는 방향으로 관측망의 위치, 개수, 항목, 빈도 등이 결정되어야 한다는 것이다.

지하수질 관측망의 설치목적에는 크게 두 가지가 있

다. 첫째는 유해물질이 저장 또는 매립되어 있거나, 사용중인 관정 등의 보전을 위한 일상적인 수질감시 목적의 ‘범용’관측망이다. 두 번째는 ‘특정’목적 관측망으로서 예를 들면 오염된 지하수를 정화하기 위한 현장에서 정화에 이용할 정보를 수집하기 위하여 혹은 정화프로그램이 계획대로 진행되는지를 확인하기 위한 것이 이에 해당한다.

범용관측망에서는 관측망의 운영으로부터 얻어지는 경제적 혹은 기타 가시적 효용을 정량화하기 어렵기 때문에 흔히 통계적 기준(예를 들면 농도의 예측오차)을 목적함수로 채택하여 설계하는 경우가 많다. 즉, 예측오차가 적을수록 관측망으로부터 얻는 정보의 가치가 높다고 간주하는 것이다. 특정목적 관측망의 경우는 목적함수가 다양해질 수 있는데, 오염정화의 경우에는 오염에 책임이 있는 당사자가 모든 경비를 지불할 의무가 있기 때문에 총경비를 최소화하는 것이 한 가지 가능성이 될 수 있다.

관측망 설치에 있어서의 제약조건은 법적, 경제적, 기술적인 것 등을 들 수 있다. 법적인 제약으로는 감시 지역의 상류 혹은 하류에 몇 개씩의 관측정이 있어야 한다든가 아니면 거리나 항목 또는 빈도 등에 대한 규정이 있을 수 있다. 경제적인 제약으로는 설치 및 운영에 관한 총비용에 한도가 주어지는 경우를 생각할 수 있고, 기술적인 것으로는 현장의 지형상 건물이나 사유지 등으로 관측망을 설치할 수 없어 배제해야 하는 지역이 있는 경우 등을 고려할 수 있다.

목적함수와 제약조건이 결정되면 다양한 최적화 기법이 동원되어 최적의 관측망 위치와 개수 등이 결정된다.

3. 설계방법론의 비교

표 1은 지금까지 알려진 대표적 설계방법론들의 특징을 요약한 것이다.

Loaiciga(1988)는 우물 설치비용과 평균농도 추정오차로 표현되는 손실함수의 합을 최소화 함으로써 우물의 후보위치 중에서 최적지를 선택하였다. 즉, 제한된 예산 내에서 관측망을 많이 설치하면 할수록 비용은 많이 들지만 농도의 추정오차는 줄어들 것이므로 최적점이 존재할 것이다. 관측망 설계문제는 binary nonlinear 프로그램으로 귀결되었으며, 오염 플룸(plume)의 모양은 안다고 가정하였으므로 물질이동 방정식은 풀지 않았다.

Hsueh와 Rajagopal(1988)은 무엇을, 어디서 관측

표 1. 지하수 수질측정망 설계방법론 비교

저 자	방 법	목 적 함 수	영 역	확산 방정식
Loaiciga (1988)	BNP	고정비용과 추정오차 최소화	2D	X
Hsueh and Rajagopal (1988)	IP	탐지가능성에 근거한 최대한의 정보량	2D	X
Massmann and Freeze (1987a, b)	Enumeration	순수 현재가치 최대화 (=이익-비용-위험)	2D	O
Meyer and Brill (1988)	IP	오염탐지 가능성 최대화	2D	O
Loaiciga (1989)	MIP	추정에러의 최소 변화	2D	O
Knopman and Voss (1989)	Multi-objective programming	예측오차 최소화 비용 최소화	1D	O
Scheibe and Lettenmaier (1989)	Enumeration	공공의 건강위험 최소화	2D	X
Graham and McLaughlin (1989a, b)	Variance reduction	농도 분산 최소화	2D	O
Tucciarelli and Pinder (1991)	QL	양수 및 관측비용 최소화	2D	O
Hudak and Loaiciga (1992)	Heuristic Method	관측망 확장	2D	O
Meyer et al. (1994)	EPMP	오염물질 조기 발견	2D	O
Lee and Kitanidis (1996)	Dual Control	양수 및 관측비용 최소화	2D	O

BNP = Binary Nonlinear Programming, IP = Integer Programming, MIP = Mixed IP,
QL = Linearity Algorithm, EPMP = Extended p Median Problem

할 것인지 결정하기 위해 0-1 integer 프로그래밍 모델을 사용하였다. 그들은 넓은 주단위 대수층에서의 지하수 수질에 관심을 기울였다. 따라서 투수계수와 같은 특정지역에서의 자료와 어떠한 예측 혹은 모의모형도 사용하지 않았다. 탐지가능성, 건강과 생태환경의 중요성, 그리고 인구수에 기초를 둔 따른 "정보계수"가 최대인 관측점이 200개의 후보지 가운데서 선택되었다.

Massmann과 Freeze(1987a, b)는 매립지 운영을 위한 관측망 설계에 대한 상세한 방법론을 개발하였다. 그들의 목적은 "효용-비용"의 현가를 최대화하는데 있었다. 수질감시는 탐지확률을 증가시키는데 기여하게 되며, Monte Carlo 모의실험을 통해 주어진 감시망에서의 탐지확률이 결정되었다.

Meyer와 Brill(1988)은 모의 모형과 최적화 모형을 연계시켜 관측망에서 관측점의 최적위치 결정법을 개발하였다. 오염물이동 모의 모형은 개개의 플룸 탐지에 대한 정보를 제공하고, 최적화 모형은 탐지가능성을 최대로 하기 위한 정해진 수의 관측점 위치를 결정한다. 이 방법은 선형 계획법의 dual-simplex 기법을 사용하여 가상의 대수층에 적용되었다.

Loaiciga(1989)는 혼합 integer 프로그래밍 문제로 지하수 수질감시를 위한 관측계획을 체계화하였다. 여기서의 관측계획은 관측지점의 수와 위치뿐만 아니라 빈도도 포함된다. 그는 비용 및 "unbiasedness"에 관한 제약조건하에 추정오차의 분산을 최소화하였다. 이 방법은 오하이오주의 해밀턴시에서 북동쪽으로 10 miles 떨어진 Butler County 매립지의 염화물의 최적 관측망 설계에 적용되었다.

Knopman과 Voss(1989)는 같은 문제를 다목적 최적화문제(Multi-objective programming)로 체계화하였다. 고려된 세 가지 목적 즉, 물질 이송, 매개변수 추정, 비용 최소화를 수학적으로 가장 잘 기술하는 모형을 찾아내는 것이 문제였으며, 일차원 물질이송 문제에 적용되었다.

Scheibe와 Lettenmaier(1989)의 위험도에 기초한 관측점 위치선정법은 농약 등에 오염된 물의 소비로 인한 공공의 건강위험을 최소화하는데 그 목적이 있다. 오염물질 확산방정식은 풀지 않았으며, 위성턴주 서부의 ethylene dibromide(EDB)에 오염된 식수우물을 대상으로 적용하였다.

분산감소법(Rouhani, 1985; Rouhani와 Hall, 1988)은 기존의 지하수위 측정에 추정오차를 최대로 감소시킬 수 있는 위치를 선정하여 관측정을 추가하는 접근방법을 이용하였다. Graham과 McLaughlin(1989a, b)은 농도예측의 분산이 가장 높은 위치에 새로운 관측정을 추가하는 접근방법을 사용하였다. 그들은 예산이 제한되어 있을 때, 처음 단계에서 한꺼번에 관측정을 모두 설치하는 것보다 시간이 경과하면서 차례로 설치해 나가는 것이 더 바람직하다는 사실을 밝혔다.

Tucciarelli와 Pinder(1991)는 오염된 지하수를 정화할 때 관측이 미치는 효과를 고려하였는데, 수질에 대한 조건식이 확률식으로 주어질 때 오염정화를 위한 양수와 관측비용의 합이 최소화 되도록 양수율을 결정하였다. 관측을 많이 하면 이에 따른 비용은 상승하지만 정화현장에 대한 이해도가 높아져 양수율을 필요 이상으로 높지 않도록 적정하게 유지할 수 있고, 이는 곧 양수비용의 절감으로 이어져 결국 총비용이 감소할 수 있도록 유도한다.

Hudak과 Loaiciga(1992)는 기존의 지하수 수질 관측망에 새로운 우물의 위치를 추가하여 효과적으로 관측망을 확장하는 방법을 개발하였다. 즉, 그들은 최적화를 위하여는 heuristic approach를, 확산방정식을 이용한 현장의 재현에는 Monte Carlo simulation을 적용하여 오하이오주 남서쪽에 있는 오염물질이 매립된 골짜기의 대수층에 이 방법을 적용하였다.

Meyer 등(1994)은 지하수의 오염물질 관측망에서 오염물질의 초기 발견을 위해 관측정간의 가장 효율적인 거리와 그 숫자를 결정하기 위한 방법론을 제시하였다. 목적함수로는 (1) 관측정 수의 최소화, (2) 오염물질의 초기 누출을 검출할 확률의 최대화, (3) 최소의 지역이 오염되었을 경우 초기검출의 최대화의 세 가지를 설정하였다. 2차원 확산방정식이 Monte Carlo simulation에, EPMP(Extended p Median Problem)이 최적화에 사용되었다.

Lee와 Kitanidis(1996)는 오염정화시에 관측정을 추가로 배치하는 문제를 다루었다. 양수정화법으로 정화가 이루어질 때, 시간에 따라 양수율은 조절될 수 있도록 하였으며 이때의 양수율은 DDP(Differential Dynamic Programming)로 얻어지는 확정론적 부분과 해석적인 방정식을 풀어서 얻어지는 추계학적인 항의 합으로 표현되었다. 이렇게 정화가 이루어지는 동안 관측정을 추가하여 새로운 정보를 얻게되면 추가의

비용발생이 있지만 양수율이 감소하여 총비용은 감소할 가능성이 있다. 과연 언제 어디에 관측정을 추가하는 것이 이러한 목표를 달성할 수 있을지에 대하여 그들은 남은 기간 동안의 Cost-to-go 함수를 계산함으로써 판단하였다. 즉, 관측정의 설치 및 운영비용이 Cost-to-go 함수의 감소보다 작은 경우에만 대상 위치에 관측정을 설치·운영하도록 하였다.

이들을 포함한 설계 방법에 관한 자세한 소개는 Loaiciga 등(1992)에 수록되어 있다.

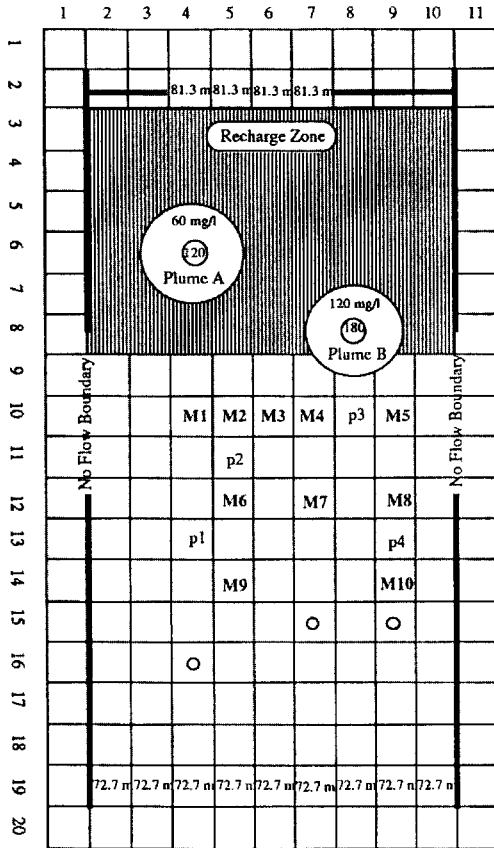
4. 현장 적용성 검토

앞 절에서 소개된 관측망 설계방법론들의 현장 적용성을 알아보기 위해 대표적인 두 가지 방법을 동일한 가상의 오염된 대수층에 적용시켜 보았다. 첫 번째 방법은 오염물질의 탐지에 주목적이 있는 관측망의 경우이고, 두 번째는 오염지역을 양수정화법으로 정화할 때 관측정을 추가로 설치할 필요성을 판단하고, 그 위치와 시기를 결정할 경우에 보다 잘 적용될 수 있다. 이들은 기본적으로 Meyer와 Brill(1988) 및 Lee와 Kitanidis(1996)의 방법론에 각각 기초하고 있으며, 전자는 1회의 최적화 과정(one-shot optimization)을 통해, 그리고 후자는 상황적응적인 최적화 과정(adaptive optimization)을 통해 관측정 위치가 결정되는 대표적인 방법론이라 할 수 있다.

연구된 대상지역의 상황은 그림 1에 나타나 있다. 즉, 두 개의 플룸이 피압대수층에 존재하고 이들의 농도분포를 사전조사에 의해 통계적으로 알고 있다. 대수층의 상류 및 하류는 일정한 두 경계조건으로, 상류의 일부와 측면은 불투수 경계조건으로 유지된다. 함양지역은 상류 일부분으로 국한되어 있으며, 대수층의 전달계수 역시 지역에 따라 다른 것으로 가정하여 실제 상황과 가깝게 설정하였다. 지형적·법적 또는 기타의 요인으로 인하여 관측정을 설치할 수 있는 위치는 제한되어 있으며(M1-M10), 정화목적의 양수를 위한 네 개의 관정이 존재하고, 하류 근처에 세 개의 사용중인 우물이 있어 오염으로부터 보호받아야 하는 상황이다. 표 2에는 대수층내 오염물질의 이동을 모의하기 위해 필요한 인자들이, 그리고 표 3에는 전달계수의 예측치가 나타나 있다. 이와는 별도로 표 4에는 수두 및 농도의 초기 예측치가 제시되어 있다.

먼저 첫 번째 방법을 적용한다. 이 방법의 적용절차는 그림 2에 나타내었다. 즉,

- (1) 모의에 필요한 현장자료를 입수한다.



p : Pumping Wells
 o : Supply Wells
 M : Candidate Monitoring Wells

그림 1. 오염된 대수층과 관측정 설치 후보지

(2) 최적화에 필요한 설계인자를 결정한다. 본 연구에서는 목적함수 및 제약조건을 다음과 같이 설정하였다.

$$\text{Maximize } Z = \sum_{i \in I} a_i y_i \quad (1)$$

subject to

$$\sum_{j \in N_i} x_j \geq y_i \quad \forall i \in I, N_i \neq \emptyset \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J} x_j = P \quad (3)$$

여기서 a_i 는 플룸 i 에 적용된 가중치, d_{ij} 는 플룸 i 의 j 관측정에서 측정된 농도, I 는 플룸의 집합, J

표 2. 대수층 모의를 위한 인자

대수층의 폭	220m
대수층의 길이	400m
대수층의 두께	4.2m
저류계수	2.2×10^{-4}
유효공극률	0.3
지연계수	2.5
중분산도	17m
횡분산도	1.7m
함양율	2.0×10^{-3} m/d
Δx	20m
Δy	20m
Δt	11일

표 3. 전달계수 추정치

(단위 : m^2)

	Zone 1	Zone 2	Zone 3
평균	18.4	4.9	130.4
분산	30	5	110
참값	23	7	142

표 4. 수두 및 농도의 초기 예측치

수두(m)	상류 경계의 평균 하류경계의 평균 수두경사 분산	81.3 72.7 0.024 9
플룸 A(mg/l)	평균값의 범위 분산	60 ~ 120 100
플룸 B(mg/l)	평균값의 범위 분산	120 ~ 180 300

는 우물의 위치 집합, $N_i = \{j \in J \mid d_{ij} \geq S\}$; 0 if $d_{ij} \leq S \forall j \in J$; P 는 설치될 우물의 수, S 는 수질기준, $x_j = 1$ (우물이 j 지점에 설치될 경우); 0 (그 외의 경우), 그리고 $y_i = 1$ (플룸 i 가 우물에서 탐지될 경우); 0 (그 외의 경우)이다.

목적함수(식 1)는 오염물질의 탐지가능성을 최대화하는 것으로 해석할 수 있다. 또, 통계적으로 동일한 플룸이 300회의 Monte Carlo simulation에 의해 생성되므로 $I=300$, 관측정의 위치는 M1-M10의 10개와

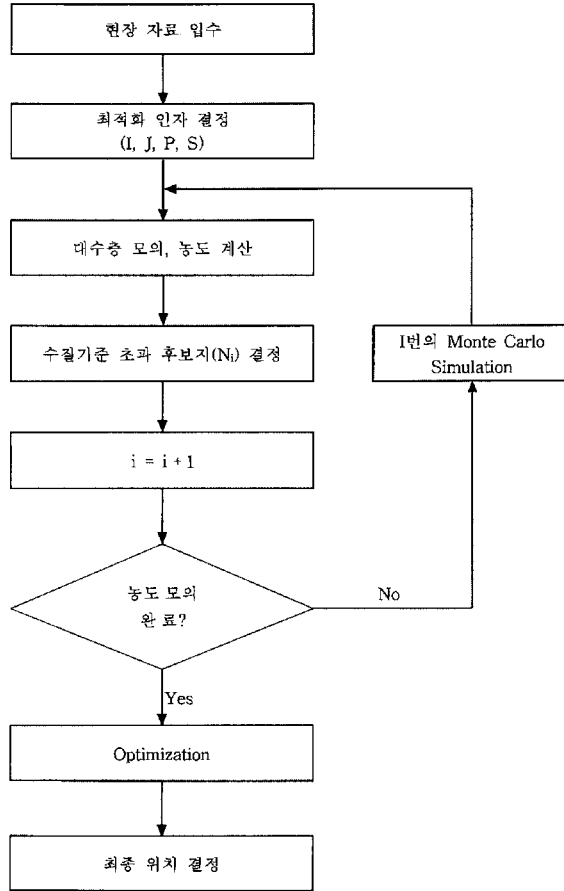


그림 2. Integer Programming에 의한 관측망 설계절차

양수정 위치 4개를 합쳐 총 14개가 후보지가 될 수 있으므로 $J=14$ 이다. 총 몇 개의 관측정을 설치할 것인가는 설계인자이다. 따라서 P 는 법규 혹은 예산규모 내에서 결정될 수 있는데, 본 연구에서는 하루에 3개의 관측정을 설치하도록 되어 있는 우리나라의 법규에 따라 $P=3$ 으로 설정하였다. 수질기준(S)은 $10 \text{ mg}/\ell$ 로 하고, 플룸 i 에 적용되는 가중치 a_i 는 모든 플룸이 동일한 조건으로부터 생성되므로 1로 설정하였다.

(3) 표 2-4에 주어진 대수층 및 오염상태에 관한 정보를 이용하여 현장상황을 모의 구현하고, 매번의 구현 (realization i)에 대하여 오염물질 확산방정식을 오염물질이 일정 경계선(예를 들면, 사용 우물의 직상류 M9~M10을 잇는 선)에 도착할 때까지 풀어 이 때 각 후보위치에서의 농도를 계산한다. 각 경우 (i)에 대해 수질기준을 초과하는 후보지점의 집합이 N_i 가 된다.

(4) 제약조건을 만족하도록 Integer Programming을 푼다.

본 연구에서는 300번의 Monte Carlo simulation 모두에서 설정한 경계선에서의 농도가 기준치 $10 \text{ mg}/\ell$ 를 초과하여 N_i 와 J 는 동일한 집합으로 나타났다. Integer Programming은 LINDO를 이용하여 간단히 수행될 수 있었으며, 이를 통해 얻어진 세 개의 관측정 위치는 p2, p3, M4로 나타났다(그림 1 참조).

두 번째 방법론은 매 의사결정 당시의 Cost-to-go 함수를 미래의 그것과 비교하는 것이 핵심이며 그 적용절차는 그림 3과 같다. 즉, 다음과 같다.

- (1) 현장상황에 대한 초기자료를 수집한 후,
- (2) DDP 해에 의해 확정론적 양수율($q_0(k)$)을 결정한다.
- (3) $q_0(k)$ 로 양수할 때의 수두 및 농도분포($x(k)$)

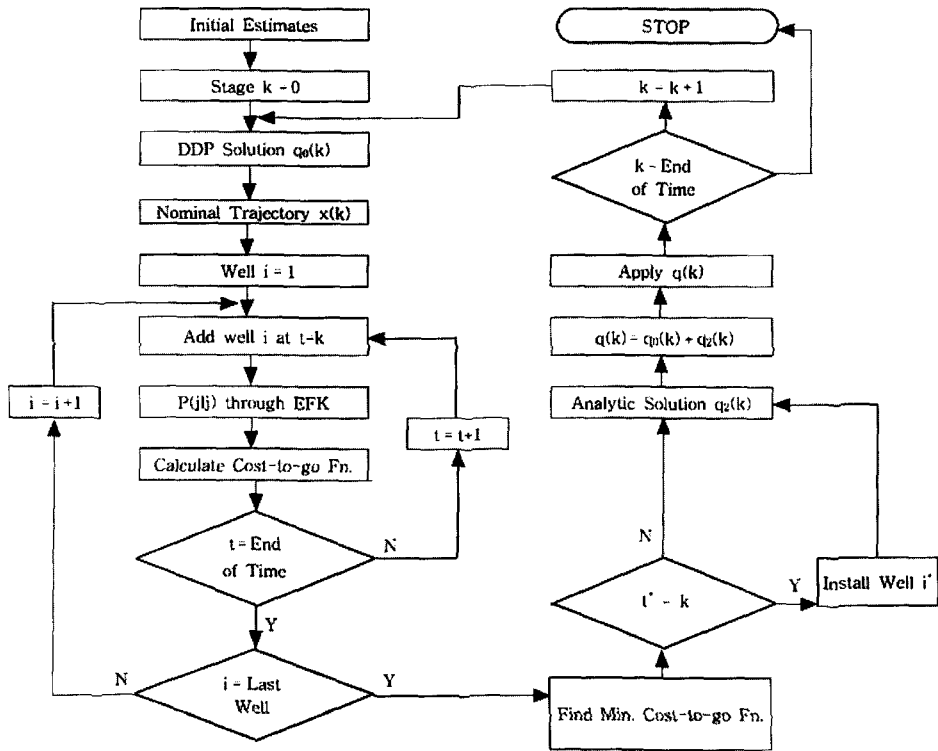


그림 3. Cost-to-go 함수 비교에 의한 관측망 설계절차

를 지하수 흐름 및 확산방정식으로부터 계산한다.

(4) 관측정 설치 후보위치 $i=1$ 에 대하여 현시점에서 설치할 경우의 수두 및 농도 공분산 매트릭스 ($P(j|i)$)를 Extended Kalman Filter로 구한 뒤,

(5) Cost-to-go 함수를 계산한다.

(6) 다음 시간대에 설치할 경우를 상정하여 역시 Cost-to-go 함수를 계산하여 현시점에서의 그것과 비교한다. 이 Cost-to-go 함수가 현시점에서의 그것보다 적으면 계산을 중지하고 다른 후보지점 ($i=2$)을 대상으로 과정 (4) 이후를 반복한다.

(7) 모든 후보 지점에 대한 Cost to-go 함수 중 가장 적은 값을 나타내는 설치 시간을 찾아내어

(8) 이것이 현재 시점이면 해당 위치에 관측정을 설치하고, 아니면 추계학적 양수율 ($q_2(k)$)을 계산하여 확정론적 양수율과 합한 후 양수한다.

(9) Time step을 증가시켜 과정 2부터 동일한 작업을 반복한다.

오염정화를 위한 총기간이 주어졌다고 할 때, 이 기간 동안에 소요되는 총비용이 최소가 되도록 정화 및

관측계획을 수립하는 것은 상당한 타당성을 갖는다. 본 연구에서 고려된 목적함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize } Z = & 10,000 + 500(47 - k) \\ & + E \left[\sum_{k=1}^{46} \{ e^T q(k) \}^{0.6} (57.17 \right. \\ & \left. + 7.6[90 e - h_p(k)]^T q(k)]^{0.5} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

E 는 기대치, e 는 1로 구성된 column 벡터, $q(k)$ 는 시간 k 에서의 양수율, $h_p(k)$ 는 양수정에서의 수두이다. 즉, 관측정 설치비용(\$10,000/well) 및 잔여기간 동안의 샘플링 비용(\$500/회)과 총기간을 47개의 시구간으로 나누어 각 시간대에 지하수 정화를 위해 소요되는 비용의 총합을 최소화하는 것이다. 정화기간은 대개 법적 책임이 있는 당사자와 정부가 협의하여 결정되며, 이 경우 1.4년으로 가정하였다. 정화비용은 활성슬러지법을 채택하였을 경우를 산정하여 추정하였다(DeWolf 등, 1984).

표 5. 관측정 설치에 따른 비용절감 효과

(비용 단위 : 백만 달러)

모의 수	설치 시기 (stage)	관측정	관측 횟수	관측비용	총비용	절감비용	상대 절감비용(%)
217	16	M4	31	0.0155	3.76~3.86	0.62~0.52	14.2~11.9
42	15	M4	32	0.0160	3.78~3.86	0.60~0.52	13.7~11.9
41	14	M5	33	0.0165	3.90~3.95	0.48~0.43	10.9~ 9.8

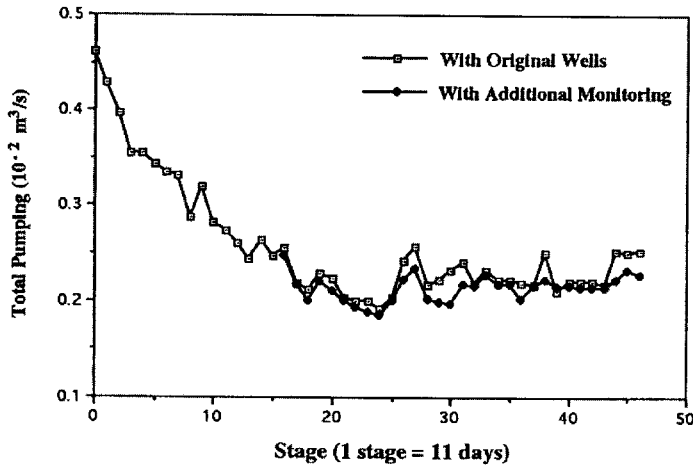


그림 4. 관측정을 추가하지 않을 때와 추가할 때의 총양수율 비교

제약조건으로는 양수율이 (-) 값을 가질 수 없다는 것과(식 5), 초기농도로부터 계속 감소하여 정화종료 시에는 대수층 모든 점에서의 농도(c_i)가 수질기준 $c^* = 10 \text{ mg}/\ell$ 를 넘을 확률이 5% 이내여야 한다는 것이 고려되었다(식 6).

$$q_j(k) > 0 \text{ for all } j \quad (5)$$

$$\Pr \{c_i(k+1) \geq \frac{k(c^* - c_i(0))}{N-1} + c_i(0) | c_i(k)\} \leq 0.05 \text{ for all } i, k \quad (6)$$

300번의 Monte Carlo simulation 결과, 양수정(p1~p4)에서의 수질관측 외에 M4를 stage 16(정화 개시 176일 후)에 설치하는 것이 아무런 관측정을 추가하지 않을 때보다 최대 62만 달러의 비용절감을 가져오는 것으로 나타났다. 즉, 표 5에서 보는 바와 같이 총 300번 중 217회의 모의에서 M4를 stage 16에, 또 42회는 M4를 stage 15에, 끝으로 41회는 M5를

stage 14에 설치하도록 하는 결과를 얻었다. 실제 현장은 이와 같은 모의상황의 어느 하나가 될 것으로 간주되며, Monte Carlo simulation은 현상상황의 통계적 추정을 가능케 한다.

관측정의 설치로 관측비용이 추가로 발생함에도 불구하고 총비용이 절감되는 것은 현장을 보다 잘 이해하게 됨에 따른 효율적 양수에 기인하며 이를 뒷받침하는 총양수량의 변화가 그림 4에 나타나 있다. 그림 5는 정해진 1.4년이 경과한 후 관측정을 추가하지 않았을 때와 추가하였을 때의 오염물질 분포를 나타낸 것이다. 두 경우 모두 수질기준을 만족하지만, 추가의 관측정으로 인해 비용이 적게 든 설계가 보다 효율적이라 할 수 있다.

5. 결 론

지하수질 감시를 위한 상시관측은 지하수자원의 보전과 주민의 보건을 위해 매우 중요하다. 그러나 현재 지하수 수질관측망의 설계와 운영은 과학적 방법에 의하지 않고 주로 경험과 편의에 의존하는 경우가 많다.

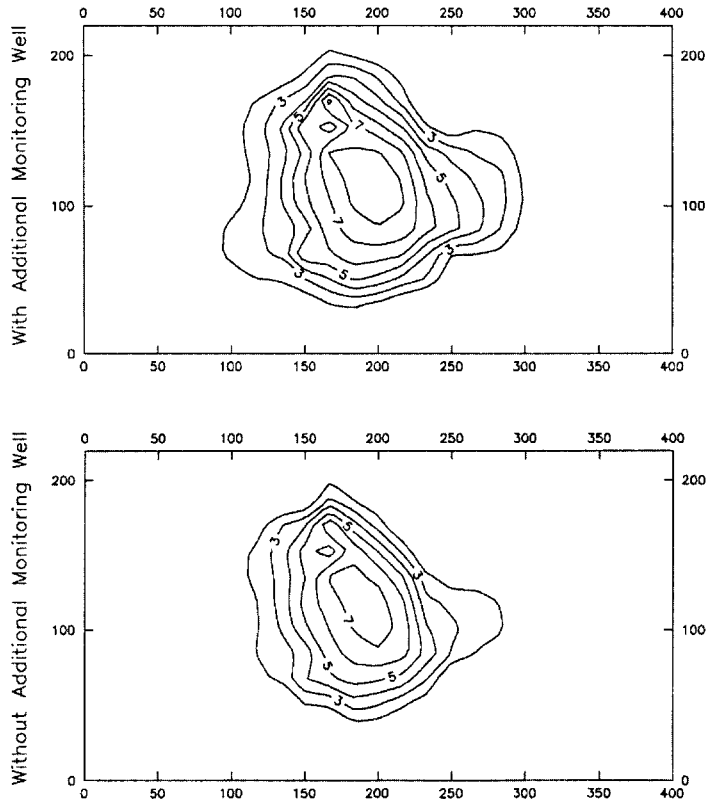


그림 5. 관측정을 추가하지 않을 경우와 추가할 경우의 최종시점 농도분포

본 연구는 지하수질 관측망의 효율적 배치를 위한 방법론들을 비교하고, 대표적인 두 가지 설계방법론을 대상으로 그 현장적용성을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 지하수질 관측망의 설계 시에는 관측망 설치의 목적을 명확히 설정하는 것이 중요하며, 현장 정보의 확보수준에 따라 선택될 방법론이 달라져야 한다.

(2) 범용관측망 설계기법의 하나인 Integer Programming에 의한 방법과 지하수 정화 목적 관측망 설계기법의 하나인 Cost-to-go 함수 비교법을 가상의 대수층을 대상으로 적용한 결과, 각기 다른 관측정 위치를 얻었으나 요구되는 정보의 양은 비슷하였다.

(3) 두 방법 모두 지하수 오염을 모의할 수 있을 정도의 정보만 확보되면 현장에의 적용은 어렵지 않게 가능하다고 판단되며, 이를 통해 더욱 객관적인 근거에 의해 관측망을 설치할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 논문은 1997년 국제수문개발계획(IIIIP) 5단계 2차년도 연구사업의 일환으로 수행된 “지하수 수질문제 발견을 위한 감시방법론”에 대한 연구결과의 일부이며, 연구비를 지원해 준 건설교통부에 감사를 드립니다.

참고 문헌

- De Wolf, G., Murin, P., Jarvis, J. and Kelly, M. (1984). *The Cost Digest: Cost Summaries of Selected Environmental Control Strategies*, EPA-600/8-84-010, EPA, Washington, D.C.
- Graham, W., and McLaughlin, D. (1989a). “Stochastic analysis of nonstationary subsurface solute transport, 1. Unconditional moments.” *Water Resour. Res.*, Vol. 25, No. 2, pp. 215-232.

- Graham, W., and McLaughlin, D. (1989b). "Stochastic analysis of nonstationary subsurface solute transport, 2. Conditional moments." *Water Resour. Res.*, Vol. 25, No. 11, pp. 2311-2356.
- Hsueh, Y.W., and Rajagopal, R. (1988). "Modeling groundwater quality sampling decisions." *Ground Water Monitor. Rev.*, pp. 121-134.
- Hudak, P.F. and Loaiciga, H.A. (1992) "A location modeling approach for groundwater monitoring network augmentation." *Water Resour. Res.*, Vol. 28, No. 3, pp. 643-649.
- Knopman, D.S. and Voss, C.I. (1989). "Multiobjective sampling design for parameter estimation and model discrimination in groundwater solute transport." *Water Resour. Res.*, Vol. 25, No. 10, pp. 2245-2258.
- Lee, S.-I. and Kitanidis, P.K. (1996). "Optimization of monitoring well installation time and location during aquifer decontamination." *Water Resour. Manag.*, Vol. 10, pp. 439-462.
- Loaiciga, H.A. (1988). "Groundwater monitoring network design." *Proc. VII Int'l. Conf. Computational Methods in Water Resources*, Vol. 2, Edited by Celia, M.A., Ferrand, L.A., Brebia, C.A., Gray, N.G. and Pinder G.F., Computational Mechanics Publications/Elsevier, New York, pp. 371-376.
- Loaiciga, H.A. (1989). "An optimization approach for groundwater quality monitoring network design." *Water Resour. Res.*, Vol. 25, No. 8, pp. 1771-1782.
- Loaiciga, H.A., Charbeneau, R.J., Everette, L.G., Fogg, G.E., Hobbs, B.F. and Rouhani, S. (1992). "Review of ground water quality monitoring network design." *J. Hydraulic Engineering*, Vol. 118, No. 1, pp. 11-37.
- Massmann, J. and Freeze, R.A. (1987a). "Groundwater contamination from waste management site: The interaction between risk-based engineering design and regulatory policy, 1, Methodology." *Water Resour. Res.*, Vol. 23, No. 2, pp. 351-367.
- Massmann, J. and Freeze, R.A. (1987b). "Groundwater contamination from waste management site: The interaction between risk based engineering design and regulatory policy, 2, Results." *Water Resour. Res.*, Vol. 23, No. 2, pp. 368-380.
- Meyer, P.D. and Brill Jr., E.D. (1988). "A method for locating wells in a groundwater monitoring network under conditions for uncertainty." *Water Resour. Res.*, Vol. 24, No. 8, pp. 1277-1282.
- Meyer, P.D., Valocchi, A.J. and Eheart, J.W. (1994). "Monitoring network design to provide initial detection of groundwater contamination." *Water Resour. Res.*, Vol. 30, No. 9, pp. 2647-2659.
- Rouhani, S. (1985). "Variance reduction analysis." *Water Resour. Res.*, Vol. 21, No. 6, pp. 837-846.
- Rouhani, S. and Hall, T.J. (1988). "Geostatistical schemes for groundwater sampling." *J. of Hydrology*, Vol. 103, pp. 85-102.
- Scheibe, T.D. and Lettenmaier, D.P. (1989). "Risk-based selection of monitoring wells for assessing agricultural chemical contamination of ground water." *Ground Water Monit. Rev.*, Fall, pp. 98-108.
- Tucciarelli, T. and Pinder, G. (1991). "Optimal data acquisition strategy for the development of a transport model for groundwater remediation." *Water Resour. Res.*, Vol. 27, No. 4, pp. 577-588.

(논문번호:98-038/접수:1998.07.07/심사완료:1998.10.16)