



<Technical Report> 산업단지 지하수 오염원 위치 및 누출 이력 규명 기술의 특성 분석

박유철

강원대학교 지질·지구물리학과

요 약

산업단지에서 발생하는 다중오염원에 의한 지하수 오염 문제에 대하여 오염원 위치 및 누출이력에 대한 규명 기술을 개발하고, 실제 오염 현장의 제약 조건에 대한 민감도 분석을 수행한 결과를 분석하였다. 연구지역은 강원도 우산공단이며, 현장 측정 자료를 바탕으로 수치모델을 구성하고, 다중 오염원 규명을 수행하였다. 오염원 규명 기술은 시뮬레이션-최적화 기법을 사용하였으며, 최적화 방법으로 유전알고리즘을 사용하였다. 다중 오염원의 경우에 오염원의 초기 오염물질의 농도 차이가 클수록 오염원 규명의 평균 오차율이 감소하였다. 오염원 규명 기술의 민감도 분석을 위하여, 오염물질의 농도 자료에 대한 시간적 혹은 공간적 특성에 제한을 가하였다. 오염물질의 농도 자료의 개수가 감소하거나, 측정 한계가 증가하거나, 측정 오차가 증가하는 경우에 평균 오차율이 증가하였다. 오염물질의 농도 자료의 시간적 혹은 공간적 편중 현상은 평균 오차율에 오염원 규명 능력에 큰 영향을 주지 않았다.

주요어: 오염원 규명 기술, 다중오염원, 초기 오염물질 농도, 측정 한계, 측정 오차

Yu-Chul Park, 2019, Characteristics study on the industrial complex groundwater contaminant source location and release history identification method. Journal of the Geological Society of Korea. v. 55, no. 6, p. 771-779

ABSTRACT: To investigate the problem of groundwater contamination caused by multiple contaminant sources in industrial complexes, we developed an identification method for contaminant source location and determination of release history, and analyzed the results of sensitivity analysis on the constraints of actual contaminant sites. The study site was the Woosan Industrial Complex, located in Wonju City, Gangwon Province. Numerical models were constructed based on field measurement data and multiple contaminant sources were identified. The simulation-optimization method was used for identification of contaminant sources and the genetic algorithm was used as the optimization method. For multiple contaminant sources, the larger the difference in the initial contaminant concentration of the contaminant source, the lower the average error rate of the contaminant source identification. For the sensitivity analysis of the contaminant source identification method, bias was imposed on the temporal or spatial characteristics of the contaminant concentration data. The average error rate increased with decrease in the number of contaminant concentration data, increase in the detection limit, or increase in the measurement error. The temporal or spatial bias of contaminant concentration data did not significantly affect the contaminant source identification ability on the average error rate.

Key words: contaminant source identification method, multiple contaminant sources, initial concentration, detection level, measurement error

(Yu-Chul Park, Division of Geology and Geophysics, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea)

‡ Corresponding author: +82-33-250-8586, E-mail: parkyc@kangwon.ac.kr

1. 서론

산업단지는 다양한 종류의 오염물질로 지하수가 오염되고 있으며, 오염원 위치와 누출 이력에 대한 정보가 거의 없는 경우가 많다(Park, 2016; Huang *et al.*, 2018). 오염된 지하수를 정화하기 위해서 시간과 비용이 많이 소모되므로, 지하수 정화 사업의 효율적 수행을 위하여 지하수 오염원의 위치와 누출 이력에 대한 정보를 확보하는 것이 필요하다(Gorelick *et al.*, 1983; Prakash and Datta, 2014; Wang *et al.*, 2017).

지하수 오염원 위치와 누출 이력을 규명하기 위해서 현장 시험법과 수치해석법이 주로 사용된다(Aquili *et al.*, 2016). 현장 시험법은 추적자 시험법이 많이 사용되지만, 관측정 설치 및 현장 측정이 제한되는 경우에 적용하기 어렵다. 현장 시험법은 수행 기간과 비용이 많이 소모되며, 산업단지와 같이 다양한 오염원이 여러 위치에서 존재하는 경우에 이에 대한 정량적인 분석이 어렵다는 단점이 있다(Prakash and Datta, 2014). 수치해석법은 현장 시험법의 단점을 보완하기 위하여 개발됐으며, 오염원의 위치와 누출 이력에 대한 정량적인 정보를 제공할 수 있어서 지하수 오염정화사업의 효율성을 높이는데 이바지할 수 있다(Huang *et al.*, 2018). 수치해석법을 적용한 선행연구로 Amirabdollahian and Data (2013)가 지하

수에서 오염원의 위치를 역산으로 확인하였고, Prakash and Datta (2014)는 최적화 방법을 사용하여 지하수 오염원을 정밀하게 규명하였으며, Foddiss *et al.* (2015)는 인공신경망을 사용하여 오염원을 규명하였다. 국내에서는 이러한 수치해석법을 사용하여 지하수 오염원의 위치와 누출 이력을 규명하는 기초적인 연구가 수행되었지만(Jeong, 2016; Kim, 2017; Shin, 2017), 단순한 구조의 대수층과 지하수 흐름을 가정하고 수행되었다는 한계를 가지고 있다.

이 연구에서는 지하수 오염이 발생한 실제 산업단지의 복잡한 대수층과 지하수 흐름을 기초로 지하수 오염원의 위치 및 누출이력 규명의 가능성과 한계를 분석하였다.

2. 연구지역 및 방법

2.1 연구지역

연구지역인 강원도 원주시 우산공단은 1980년대부터 식품공장, 염색공장, 기계부품공장 등이 운영되었으며, 1990년대부터 유기용매로 인해 지하수가 오염되었다고 알려졌고, 일부 오염 지하수에 대한 정화 활동이 시행되었다(Lee, 2014). 2009년부터 2014년까지는 한국환경산업기술원의 지원으로 “DNAPL 오염부지 특성화 및 오염평가·예측 기술”과제가 수행되어 산업단지 내의 유기오염물질로 인한 정화방법 연구가 진행되었으며, 그 결과로 우산공단 지역의 유기오염물질 일부가 정화되었다.

연구지역의 지형은 서쪽의 우두산과 무명산 주변에 고지대가 분포하고, 동쪽의 원주천 주변으로 저지대가 분포하며, 남쪽의 사천천이 원주천으로 유입된다(그림 1). 연구지역의 지질은 쥐라기 흑운모 화강암이 기반암을 구성하고, 신생대 제4기 충적층이 부정합으로 덮고 있으며(Park *et al.*, 1989), 원주천과 사천천 주변에는 점토질 토양이 분포한다(그림 2). 원주기상청의 기후자료를 분석하면 1972년부터 2018년까지 47년간 연평균 강수량은 1311.1 mm이다(KMA, 2019). 월별 강수량은 6월부터 9월 사이에 연강수량의 70.5%가 집중된다.

2010년도 현장에서 측정된 지하수위 분포를 분석하면, 연구지역의 지하수는 강원도로관리사업소 부근의 고지대에서 사천천과 원주천으로 흐르며, 계절적인 변화가 거의 없이 일정하다.

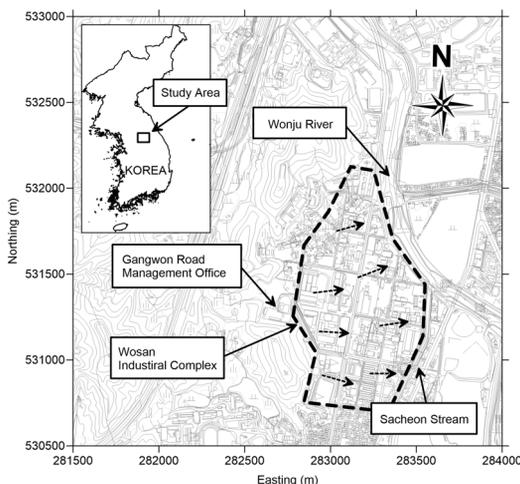


Fig. 1. Location map of the study area, Wonju river and Sacheon stream. Dashed arrows represent directions of groundwater flow. A dashed boundary represents the Woosan industrial complex area.

지하수 오염지역은 강원도로관리사업소와 주변 공장 지역을 포함하며, 지형적으로 고지대인 강원도로 관리사업소 주변에서 오염물질의 농도가 높고, 저지대인 원주천과 사천천 주변에서 오염물질의 농도가 낮다. 주된 오염물질은 삼염화탄소, 사염화탄소, 클로로폼 등으로 분석되었다.

2.2 시뮬레이션-최적화 기법

오염원 위치와 누출이력을 규명하기 위하여 시뮬레이션-최적화 기법을 적용하였다. 시뮬레이션 부분에서 지하수 유동 모사는 MODFLOW (McDonarld and Harbaugh, 1988)를 사용하였고, 오염물질의 거동은 MT3D (Zheng and Wang, 1999)을 사용하여 수행하였다. 연구지역의 수리지질학적 특성은 Lee (2014)의 보고서 자료를 적용하였다. 수치모델의 모의 영역, 격자망, 대수층의 분포 및 경계조건은 그림 3과 같이 적용하였다. 대수층은 8개의 층으로 구분하였으며, 각 대수층의 수리지질학적 특성은 표 1과 같이 설정하였다.

유전알고리즘을 적용하여 최적화하였으며, 그 과정은 다음과 같다. (1) 연구지역에 설치된 오염물질 관측 관정에서 측정된 오염물질의 농도가 기준 자료로 설정된다. (2) 연구지역의 오염물질의 농도 분포를 바탕으로 추정되는 오염원 위치와 누출 이력이 설정된다. (3) 설정된 정보를 바탕으로 지하수 유동과 오염물질 거동에 대한 시뮬레이션이 수행된다. (4) 오염물질 관측 관정에서 시뮬레이션된 오염물질

의 농도가 비교 자료로 설정된다. (5) 기준 자료와 비교 자료의 차이가 오염물질의 농도 오차로 설정된다. (6) 오염물질의 농도 오차가 허용값을 초과하면, 새로운 오염원 위치와 누출 이력이 설정되고, 지하수 유동 및 오염물질 거동 시뮬레이션이 수행되며, 오염물질의 농도 오차가 계산된다. (7) 오염물질의 농도 오차가 허용값을 초과하면 (6)번 과정을 반복하여 수행한다. (8) 오염물질의 농도 오차가 허용값 이하로 나오면 그 단계의 오염원 위치와 누출이력이 최적화된 오염원 정보로 결정된다. (6)번 과정에서 적용되는 새로운 오염원 위치와 누출 이력의 설정은 유전알고리즘을 따른다. 유전알고리즘은 전 단계에서 가장 우수한 유전 정보를 사용하여 다음 단계의 유전 정보를 생산하는 방법이다.

2.3 오염원 규명에 대한 제약 조건 및 민감도 분석

이 연구에서 개발된 오염원 규명 기술의 실제 오염 현장에 대한 적용 가능성을 분석하기 위하여 오염원 규명에 대한 다양한 제약 조건을 적용하고 민감도 분석을 수행하였다. 첫째로, 다중오염원 규명에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 산업단지 등에서 발생하는 지하수 오염은 오염원의 위치와 오염물질의 누출 이력이 다른 오염원으로 구성된 다중오염원의 경우가 있다. 다중오염원은 간섭현상이 발생하여 추적자 시험법으로 구분하기 어렵다. 다중오염원

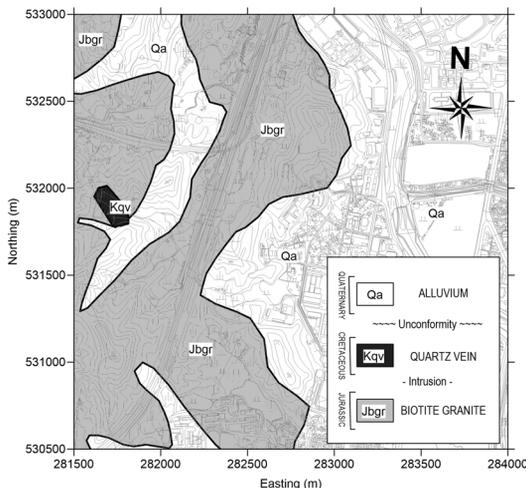


Fig. 2. Geological map of the study area.

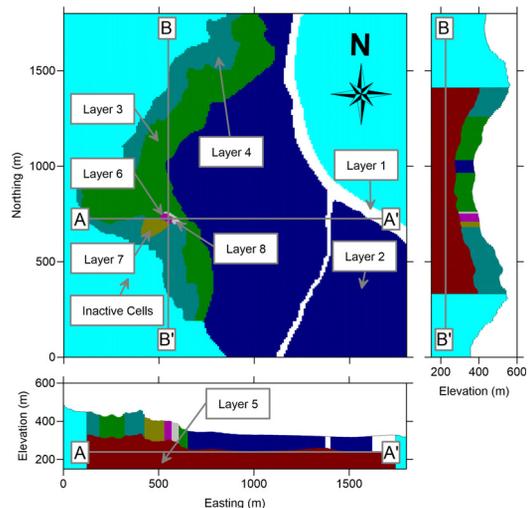
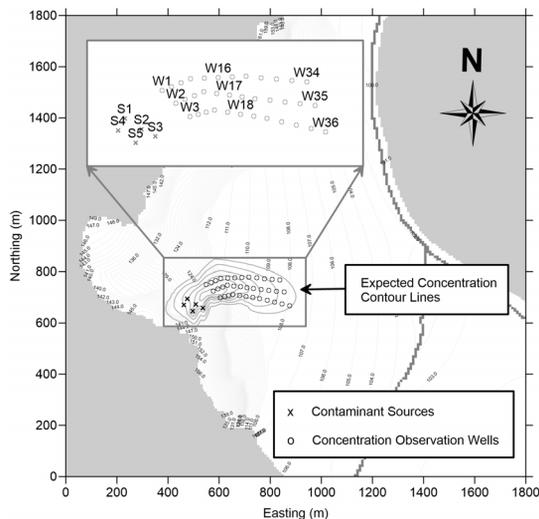


Fig. 3. Model domain and configuration of aquifer layers. River boundary conditions are located on the layer 1.

Table 1. Properties of aquifer layers in a numerical model.

Layer No.	Hydraulic Conductivity (10^{-5} cm/sec)			Storativity	
	Kx	Ky	Kz	Ss (1/m)	Sy
1	95.0	95.0	9.5	0.0047	0.17
2	83.0	83.0	8.3	0.0045	0.15
3	4.0	4.0	0.4	0.0025	0.10
4	4.0	4.0	0.4	0.0025	0.10
5	2.0	2.0	0.4	0.0001	0.05
6	35.0	35.0	3.5	0.0033	0.13
7	8.0	8.0	0.8	0.0028	0.18
8	33.0	33.0	3.3	0.0031	0.11
9	10.0	10.0	1.0	0.0020	0.19

**Fig. 4.** Configuration of contaminant sources, concentration observation wells and expected concentration contour lines. Numbers with gray lines represent hydraulic heads.

의 규명 능력을 분석하기 위하여 가상 오염원을 5개 배치하고, 관측 관정에서 측정된 오염물질의 농도를 사용하여 오염원 규명을 수행하였다.

둘째로, 오염원 규명에 적용되는 오염물질의 농도에 대한 시계열 자료에 대한 민감도 분석이 수행되었다. 실제 현장에서는 일반적으로 오염이 이미 많이 진행된 이후에 발견되는 경향이 있다. 정확한 오염원 규명을 위해서 지하수 오염이 시작되기 이전부터 오염물질의 농도에 대한 시계열 자료가 확보되면 좋으나 현실적으로는 그러하지 않다. 이러한 현장의 현실을 반영하여 오염물질의 농도 시계열 자료

에 대하여 자료의 개수, 분포, 측정 오차, 잡음 수준에 대하여 제약을 가해서 민감도 분석을 수행하였다.

셋째로, 오염물질의 농도 자료의 공간적 분포에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 불균질한 층적대수층이나 단열암반대수층에서 오염물질의 거동은 특정 경로를 통하여 이루어지기에 오염물질의 농도 자료는 공간적으로 균질하게 분포할수록 오염원 규명에 도움이 된다. 현실적으로는 지하수 오염이 확인된 지역에서도 오염물질 관측 관정을 적당한 위치에 필요한 수량대로 설치하여 운영하지 못하는 경우가 발생한다. 관정이 필요한 위치에 시설물이 존재하거나 사유재산 등의 문제로 인한 제약이 발생한다. 이러한 현장의 현실을 반영하기 위하여 오염물질 관측 정보에 대하여 공간적 측면에서 자료의 개수, 분포, 측정 오차, 잡음 수준에 대하여 제약을 가해서 민감도 분석을 수행하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 다중오염원에 대한 민감도 분석

그림 4와 같이 가상 오염원을 상대적으로 고지대인 지역에 설정하였다. 가상 오염원에 적용된 초기 오염물질의 농도는 표 2와 같이 설정하여 가상 오염원의 농도 차이에 따른 오염원 규명 능력의 민감도를 분석하였다. 기준 자료로 사용되는 오염물질의 농도는 관측 관정 W1, W2, W3에서 계산된 오염물질의 농도로 설정하였다. 시뮬레이션-최적화 기법이 적용된 결과는 표 3에 정리하였다. 표 2에 정리된 가상 오염원의 초기 오염물질의 농도 분포를 비교하

Table 2. Results for identification of contaminant sources with various concentration configuration. C1* represents contaminant original initial concentration and C2* represents optimized initial concentration.

Case No.		Contaminant sources					Average
		S1	S2	S3	S4	S5	
1-1	C1* (mg/L)	100.0	200.0	300.0	400.0	500.0	-
	C2* (mg/L)	93.4	205.2	281.8	346.7	312.3	-
	Error (%)	6.6	2.6	6.1	13.3	37.5	13.2
1-2	C1* (mg/L)	100.0	200.0	300.0	500.0	600.0	-
	C1* (mg/L)	94.3	198.0	283.8	459.7	555.0	-
	Error (%)	5.7	1.0	5.4	8.1	7.5	5.5
1-3	C1* (mg/L)	100.0	200.0	300.0	600.0	900.0	-
	C1* (mg/L)	99.7	194.8	311.4	574.0	874.6	-
	Error (%)	0.3	2.6	3.8	4.3	2.8	2.8

Table 3. Results for identification of contaminant sources with various temporal data.

Case No.	Contaminant sources Error (%)					Average
	S1	S2	S3	S4	S5	
2-1	0.2	3.1	5.6	2.9	2.2	2.8
2-2	1.0	1.9	3.1	1.7	7.6	3.1
2-3	1.5	4.6	3.8	7.4	3.1	4.1
2-4	3.8	1.8	3.4	6.8	9.1	5.0
2-5	3.8	5.0	3.9	4.0	8.5	5.1
2-6	3.2	3.2	4.7	7.0	3.4	4.3
2-7	0.4	2.6	4.7	5.6	2.2	3.1
2-8	3.8	2.1	3.1	3.7	5.6	3.7
2-9	3.6	3.2	4.2	5.9	6.0	4.6
2-10	2.9	1.1	5.3	0.6	3.1	2.6
2-11	3.0	2.6	4.7	3.2	5.2	3.7
2-12	3.8	1.6	4.3	6.1	8.4	4.8

면, Case 1-1은 측정에 가까운 오염원(W1, W2, W3)과 먼 오염원(W4, W5)의 초기 오염물질의 농도 차이를 최대 농도 기준으로 67% 이상으로, Case 1-2에서 100% 이상으로, Case 1-3에서 200% 이상 차이가 나도록 설정하였다. 오염원 규명 기법에 따라 계산된 초기 오염물질의 농도에 대한 평균 오차율은 Case 1-1에서 Case 1-3으로 갈수록 감소하여 79%가 줄어들었다. 이는 관측 관정에 가까운 오염원과 먼 오염원의 초기 오염물질의 농도 차이가 충분히 큰 경우에 오염원 규명이 가능함을 나타낸다. 따라서, 오염원 사이의 간섭현상이 발생하는 경우에 오염원의 초기 오염물질의 농도가 충분히 차이 나지 않는 경우에

는 정량적으로 오염원 규명을 수행하기 어려울 것으로 판단된다.

3.2 오염물질 농도 자료의 시간적 특성에 관한 민감도 분석

산업단지 등에서 관측된 오염물질 농도의 시계열 자료가 충분히 확보되면 지하수 오염원 규명이 더욱 정확하게 수행될 수 있다. 하지만 현실적으로 오염물질 농도의 시계열 자료가 불충분하거나, 오염원에서 누출이 발생하고 상당한 시간이 경과된 후의 자료만 확보되는 경우가 많다. 또한, 측정 한계로 인하여 상당수의 오염물질에 대한 농도 자료가 확보가

어려운 경우도 있다. 이에 추가하여 오염물질의 농도 측정에 인위적 혹은 기계적 오차가 발생하기도 한다. 이에 대한 오염원 규명 기술의 민감도를 분석하기 위하여 그림 5와 같이 오염물질 농도 자료의 시간적 특성에 대하여 제한을 가하고, 그 결과를 바탕으로 민감도 분석을 수행하였다. 첫째로 오염물질 농도 자료의 개수를 제한하였다. Case 2-1, 2-2, 2-3은 시계열 자료를 각각 30개, 15개, 9개 사용하여 오염원 규명을 수행하였다. 최적화된 초기 오염물질의

농도와 실제 초기 오염물질 농도 사이의 오차율을 표 3에 정리하였으며, 평균 오차율은 Case 2-1, 2-2, 2-3에서 각각 2.8%, 3.1%, 4.1%로 평가되었다. 오염원 규명에 사용된 자료의 개수가 50%, 30%로 감소하는 동안 오차율은 110%, 146%로 증가하였다. 확보된 자료의 개수가 감소할수록 오차율이 증가하였다. 둘째로 오염물질 농도 자료의 시간상 분포를 제한하였다. 그림 5와 같이 오염물질 농도 자료의 분포가 시간상으로 누출 후 초기, 중기, 후기에 따라 오염

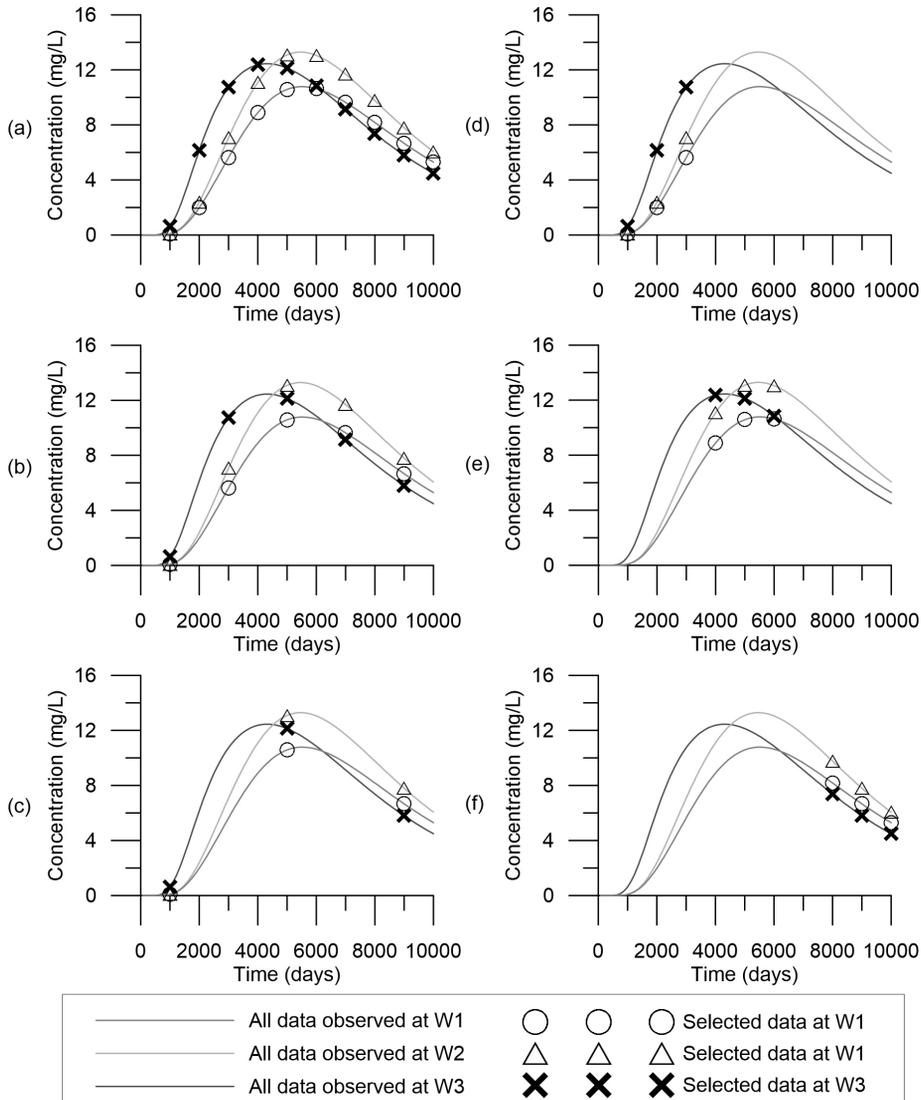


Fig. 5. Configuration of temporal data for sensitivity analysis of temporal data distributions. The number of temporal data is (a) 30 for case 2-1, (b) 15 for case 2-2 and (c) 9 for case 2-3. Temporal data distribution is at (d) the early period for case 2-4, (e) the middle period for case 2-5 and (f) the later period for case 2-6.

원 규명 결과에 미치는 영향을 분석하기 위하여 각 Case 2-4, 2-5, 2-6으로 설정하였다. 오염원 규명의 평균 오차율은 5.0%, 5.1%, 4.3%로 평가되었다.

Case 2-3, 2-4, 2-5를 비교하면, 시간상 편중 정도가 평균 오차율을 증가시킨 것으로 판단되나, Case 2-3, 2-6을 비교하면 시간상 편중 정도가 평균 오차율에

Table 4. Results for identification of contaminant sources with various spacial data.

Case No.	Contaminant sources Error (%)					Average
	S1	S2	S3	S4	S5	
3-1	2.7	2.6	4.2	3.4	4.0	3.4
3-2	2.7	3.8	4.7	7.1	3.7	4.4
3-3	5.0	2.9	4.6	7.7	3.8	4.8
3-4	5.8	3.3	7.7	7.4	6.2	6.1
3-5	4.3	4.0	8.6	4.6	4.2	5.1
3-6	3.9	4.6	9.0	5.5	4.0	5.4
3-7	3.3	2.6	3.1	7.1	5.2	4.3
3-8	4.9	3.1	3.9	5.2	6.0	4.6
3-9	6.5	3.6	5.0	5.8	7.1	5.6
3-10	2.2	2.8	4.2	3.4	4.8	3.5
3-11	4.9	2.6	4.2	4.4	4.0	4.0
3-12	6.9	8.2	7.8	7.9	7.0	7.6

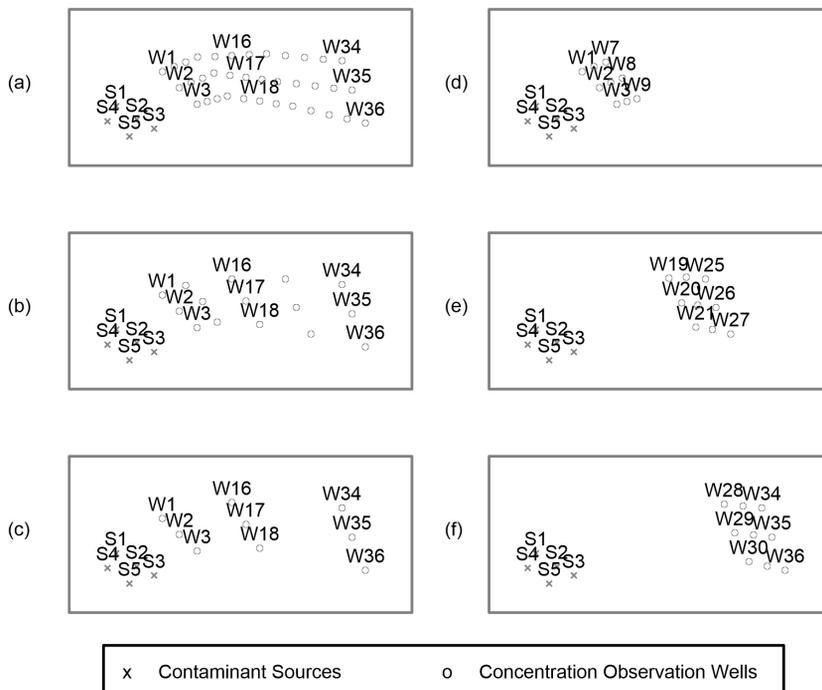


Fig. 6. Configuration of contaminant sources, concentration observation wells for sensitivity analysis of spatial data distributions. The number of spatial data is (a) 36 for case 3-1, (b) 15 for case 3-2 and (c) 9 for case 3-3. Spatial data distribution is at (d) the short distance area for case 3-4, (e) the middle distance area for case 3-5 and (f) the long distance area for case 3-6 from the contaminant sources.

큰 영향을 주지 못한 것으로 판단된다. 셋째로 오염물질 농도 자료의 측정 한계를 제한하였다. Case 2-7, 2-8, 2-9는 각각 1 mg/L, 5 mg/L, 10 mg/L의 측정 한계를 가지도록 하였다. 측정 한계 이하의 오염물질 농도 자료는 오염원 규명에 사용되지 않도록 제거하였으며, 측정 한계 이상의 자료만 사용되었다. 오염원 규명의 평균 오차율은 각각 3.1%, 3.7%, 4.6%로 증가하였으며, 측정 한계가 증가하면 평균 오차율도 증가하여, 오염원 규명에서 측정 한계가 낮을수록 평균 오차율이 감소하는 경향을 보인다. 넷째로 오염물질 농도 자료의 측정 오차를 제한하였다. Case 2-10, 2-11, 2-12는 측정 오차가 각각 5%, 10%, 20% 이내에서 임의로 발생하도록 오염물질의 농도 자료를 제한하였다. 측정 오차가 증가함에 따라 표 3과 같이 평균 오차율도 2.6%, 3.7%, 4.8%로 증가하는 경향을 보였다.

3.3 오염물질 농도 자료의 공간적 특성에 관한 민감도 분석

지하수가 오염된 지역에서 긴 시간 동안 오염물질의 농도 변화를 측정하여 오염원을 규명하지 못하고 제한된 시간 이내에서 오염원을 규명하는 경우에는 오염물질 농도 자료의 공간적 특성을 분석하여 오염원 규명을 수행하여야 한다. 이러한 경우에 오염물질 농도 자료의 공간적 특성이 오염원 규명에 어떤 효과를 주는지 민감도 분석을 수행하였다. 첫째로 오염물질 농도 자료의 공간상 개수를 제한하였다. Case 3-1, 3-2, 3-3은 여러 개의 관측 관정을 사용하여 오염물질 농도 자료의 개수가 각각 36개, 15개, 8개로 설정되었고, 평균 오차율이 3.4%, 4.4%, 4.8%로 평가되었다. 오염물질 농도 자료의 개수가 감소할수록 평균 오차율이 증가하였다. 둘째로 오염물질 농도 자료가 공간상으로 편중되도록 제한하였다. Case 3-4, 3-5, 3-6은 오염물질 농도 관측 관정과 오염원 사이의 거리가 각각 근거리, 중간거리, 원거리에 위치하도록 설정하였다. 평균 오차율은 각각 6.1%, 5.1%, 5.4%로 평가되어, 오염원과 오염물질 농도 관측 관정 사이의 거리는 오염원 규명에 영향이 적은 것으로 평가된다. 셋째로 오염물질 농도 자료에 측정 한계에 제한을 주었다. Case 3-7, 3-8, 3-9는 각각 1 mg/L, 5 mg/L, 10 mg/L의 측정 한계를 가지며, 평균 오차율이 각각 4.3%, 4.6%, 5.6%로 평가되었

다. 측정 한계가 증가할수록 평균 오차율도 증가하는 경향을 보인다. 넷째로 오염물질 농도 자료에 측정 오차를 제한하였다. Case 3-10, 3-11, 3-12는 측정 오차를 각각 5%, 10%, 20% 이내로 임의의 값으로 가지며, 평균 오차율은 3.5%, 4.0%, 7.6%로 평가되었다. 측정 오차가 증가할수록 평균 오차율도 증가하였다.

4. 결론 및 제언

본 연구에서는 산업단지 등에서 발생하는 다중 오염원을 규명할 수 있는 기술을 개발하여 실제 오염지역의 수리지질학적 특성을 반영한 오염원의 위치와 누출이력의 규명을 수행하였다. 기존 연구에서는 단순하고 이상적인 대수층과 지하수 흐름을 가정하고 오염원 규명을 수행하였으나, 본 연구에서는 실제 다중 오염원이 존재하고, 매우 복잡한 수리지질학적 특성을 가지는 대수층에서 불규칙한 지하수 흐름이 존재하는 경우에 대하여 오염원 규명을 수행하였다. 본 연구에서 개발된 시뮬레이션-최적화 기법은 유전알고리즘을 사용하였으며, 다중 오염원에 대하여 오염원의 위치 및 누출이력 규명이 10% 이내의 평균 오차율로 수행되었다. 다중 오염원의 경우에 오염물질 농도가 관측 관정에서 가까운 오염원과 먼 오염원의 초기 농도의 차이가 증가할수록 오염원 규명의 평균 오차율이 감소하는 경향을 보였다. 이는 비슷한 지하수 흐름 경로에 있는 오염원의 초기 오염물질의 농도가 비슷하면 이를 규명하기가 어려워짐을 의미한다. 또한, 오염원 규명에 오염물질 농도 자료의 시간적인 혹은 공간적인 특성이 미치는 영향을 분석하기 위하여 민감도 분석을 수행하였다. 오염물질 농도 자료의 시간적인 특성 혹은 공간적인 특성에 대한 민감도 분석 결과를 종합하면, 자료의 개수가 감소할수록 평균 오차율이 증가하고, 자료가 시간상으로 혹은 공간상으로 편중되는 상황은 평균 오차율에 큰 영향을 주지 않으며, 측정 한계가 증가하거나 측정 오차가 증가하면 평균 오차율이 증가한다. 따라서, 오염원 규명에 사용되는 오염물질의 농도 자료가 많고, 측정 한계와 측정 오차가 감소할수록, 정밀한 수준의 오염원 규명이 가능할 것으로 판단된다. 오염물질의 농도 자료가 시간상으로 혹은 공간상으로 편중되는 효과는 오염원 규명에 큰

영향을 주지 않으므로 지하수가 오염되어 긴 시간이 경과되거나, 오염원과 관측점 사이의 거리가 상당하다고 하더라도, 신뢰성이 높은 오염물질의 농도 자료를 충분히 확보한 경우에는 오염원 규명이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 국토교통부의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구사업(과제번호: 17TBIP-C125148-01)입니다. 이 논문은 2019년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입입니다(No. 2019R1A6A1A03033167). 이 연구의 일부는 2015년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비로 연구하였습니다(관리번호-520150422).

REFERENCES

Amirabdollahian, M. and Datta, B., 2013, Identification of contaminant source characteristics and monitoring network design in groundwater aquifers: An overview. *Journal of Environmental Protection*, 4, 26-41.

Aqili, S.W., Hong, N., Hama, T., Suenaga, Y. and Kawagoshi, Y., 2016, Application of modified tank model to simulate groundwater level fluctuations in Kabul basin, Afghanistan. *Journal of Water and Environment Technology*, 14, 57-66.

Foddiss, M.L., Ackerer, P., Montisci, A. and Uras, G., 2015, Ann-based approach for the estimation of aquifer pollutant source behaviour. *Water Science and Technology: Water Supply*, 15, 1285-1294.

Gorelick, S.M., Evans, B. and Remson, I., 1983, Identifying sources of groundwater pollution: An optimization approach. *Water Resources Research*, 19, 117-118.

Huang, L., Wang, L., Zhang, L., Xing, L., Hao, Q., Xiao, Y., Yang, L. and Zhu, H., 2018, Identification of groundwater pollution sources by a SCE-UA algorithm-based simulation/optimization model. *Water*, 10, 193.

Jeong, B.Y., 2016, Identification of groundwater pollution source location and release history. MS thesis, Kangwon National University, Chuncheon, 66 p (in Korean with English abstract).

Kim, M.J., 2017, A Study on the effect of time data for identification of groundwater pollution release history. MS thesis, Kangwon National University, Chuncheon, 59 p (in Korean with English abstract).

KMA (Korea Meteorological Administration), 2019, http://www.weather.go.kr/weather/climate/past_table.jsp (June 1, 2019).

Lee, K.K., 2014, Characterization of DNAPL contaminated site and contamination evaluation and prediction technology. Geo-Advanced Innovative Action Project Report, KEITI, 727 p (in Korean with English abstract).

McDonald, M.G. and Harbaugh, A.W., 1988, A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. *Techniques of Water-Resources Investigations*, Book 6, U.S. Geological Survey, 588 p.

Park, B.K., Chang, H.W. and Woo, Y.K., 1989, Geological report of the Wonju sheet (1:50,000). Korea Institute of Energy and Resources, 37 p (in Korean with English abstract).

Park, Y.C., 2016, Cost-effective optimal design of a pump-and-treat system for remediating groundwater contaminant at an industrial complex. *Geosciences Journal*, 20, 891-901.

Prakash, O. and Datta, B., 2014, Optimal monitoring network design for efficient identification of unknown groundwater pollution sources. *International Journal of GEOMATE*, 6, 785-790.

Sin, J.S., 2017, Effect of spatial data on identification of groundwater contaminant sources release history. MS thesis, Kangwon National University, Chuncheon, 60 p (in Korean with English abstract).

Wang, H., Cai, Y., Tan, Q. and Zeng, Y., 2017, Evaluation of groundwater remediation technologies based on fuzzy multi-criteria decision analysis approaches. *Water*, 9, 443.

Zheng, C. and Wang, P.P., 1999, MT3DMS: a modular three-dimensional multi-species transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems. Documentation and user's guide: contract report SERDP-99-1. Vicksburg, Mississippi: U.S. Army Engineer Research and Development Center, 169 p.

Received : October 3, 2019
 Revised : October 17, 2019
 Accepted : October 18, 2019