



수치모델을 이용한 지하수 영향범위 산정

송 성 호 (농업기반공사 농어촌연구원 선임연구원)
이 기 철 (농업기반공사 농어촌연구원 책임연구원)
배 광 옥 (농업기반공사 농어촌연구원 주임연구원)
정 형 재 (농업기반공사 농어촌연구원 수석연구원)

1. 서론

지하수법에 의하면 일정규모 이상의 지하수를 개발·이용하는 경우 주변지역에 미치는 영향을 분석·예측하기 위한 지하수영향조사를 실시하고 그 결과에 따라 허가를 받도록 하고 있다(지하수법, 2001). 그러나 지하수영향조사서 작성지침에 의하면 양수시험 결과에 따라 산출되는 영향범위의 정의가 영향반경 또는 영향권 등과 혼용되어 사용되므로 조사서 작성 시 혼동되는 경우가 많은 현실이다.

이에 따라 지하수영향조사에서 제시한 영향범위에 대한 대안으로 지하수 수질보전 차원으로 정의된 포획구간(capture zone)을 제시하고, 동일한 개념모델(conceptual model)에 대하여 WHPA(Wellhead Protection Area), WhAEM(Wellhead Analytic Element Model) 및 MODPATH 프로그램을 이용하여 모델링을 실시하여 결과를 비교·분석하였다(U.S. EPA, 1993; U.S. EPA, 1995; McDonald and Harbaugh, 1996). 또한 WHPA와 MODPATH 기법을 이용하여 수리지질학적 조사자료가 축적된 두 지역에 적용하여 효율적 해석방법을 제시하고자 하였다.

2. 영향범위 산정을 위한 조건

일반적으로 영향범위는 관정에서 양수 시 주변에서 수위강하가 일어나는 곳까지의 거리 또는 유역 경계 등의 개념으로 산출되었으나, 1990년대 들면서 지하수 수질오염 및 환경보전 문제가 대두되면서 포획구간이라는 용어가 새로이 제시되었다(U.S. EPA, 1994). 포획구간은 공공 또는 음용 관정으로 오염물질이 유입될 수 있는 구역으로, 지하수 수질을 보호하기 위한 관정의 취수 보호구역에 이용되고 있다.

그러나 우리나라는 영향범위와 관련되어 지하수법에서 『원수의 개발 가능량 및 산출상태를 조사하기 위하여는 각종 조사 결과를 토대로 취수정으로부터 1일 적정채수량을 조사하고, 1일 적정채수량으로 채수할 때에 미치는 영향범위를 적절한 분석기법을 적용하여 분석·제시한다』고 규정하고 있고, 『영향범위 내의 영향구간안에 축사·공장 등 지상 또는 지하에 잠재오염원이 있을 경우 그 시설물에 의한 오염영향을 평가·제시한다』고 명시되어 있다. 따라서 지하수법에서 제시한 영향범위는 단순히 양수로 인한 지하수위 하강범위를 기준하기 보다는 오염물질 유입과 관련된 포획구간 개념으로 영향범위를 산정하는 것이 현실적으로 판단된다.

3. 영향범위 산정을 위한 수치모델링 프로그램 검토

과거 지하수 영향반경을 산출하는 경우는 우물 수리공식에서 유도된 경험식들을 이용하였으나(김남형, 최한규, 1994), 최근들어 다양한 수치모델링 프로그램이 보급됨에 따라 여기서는 지하수보전을 위한 영향범위로 포획구간을 설정하여 각 프로그램을 검토하였다. 이용된 프로그램은 WHPA, WhAEM 및 MODPATH로 각 프로그램은 포획구간 산출을 위하여 입자추적방식(particle tracking methods)을 이용하는데, 이는 지하수 유동 기본 방정식에 대수층 공극율을 감안하여 지하수 유동속도를 산출하는 방식이다.

포획구간을 산출하는 프로그램 중 가장 많이 사용되는 것은 WHPA로 대수층을 등방·균질의 단순화된 형태로 가정하고 포획구간을 산출하므로 입력자료가 간단하고 누구나 쉽게 활용할 수 있지만(표 1), 분석의 제한성이 크기 때문에 실제 현상을 정확하게

구현하기 어려운 단점이 있다. 따라서 입력자료만으로 구한 영향범위를 그대로 적용하는 것보다는 현장 대수층 여건을 고려하여 조정하는 것이 바람직하다. 그러나 객관적인 대수층 조건을 판단하는 기준이 일정하지 않은 경우 논란의 여지가 있어, 최근들어 경제조건으로 하천, 호수 및 강우 등의 지하수 함양 및 대수층 경계조건을 입력할 수 있는 WhAEM 프로그램이 개발되어 현재 상용화되는 추세이다(U.S. EPA, 1995).

WhAEM이 WHPA와 다른점은 실제의 경계조건으로 하천, 호수 및 강우 등에 의한 지하수 함양 등을 반영할 수 있으므로, 지하수위 보호를 위한 포획구간 및 지하수 체류시간에 대한 등시선(isochrone) 작성, 지하수와 지표수의 상호작용 및 지하수 함양을 고려한 양수정의 포획구간 모사가 가능하다는 점이다. WhAEM 프로그램은 두 개의 독립적인 실행 체제로 구성되어 있는데, GAEP(Geographic Analytic Element Preprocessor)는 간편한 모델링

표 1. WHPA 프로그램에서 이용되는 각 모듈들의 특징

모듈명	개 요
RESSQC	RESSQC 정류 및 균일한 지하수 흐름을 가지는 균질하고 무한한 대수층 내에 여러개의 양수정과 주입정이 있는 경우 양수정 주변에서의 일정기간 포획구간의 작도/주입정 주변의 오염물질 이동 작도에 이용
MWCAP	정류 및 균일한 지하수 흐름을 가지는 균질한 대수층 내에 양수정 주변에서의 정류상태 및 일정기간 또는 두 요소를 혼합한 포획구간 작도에 이용. 이때 대수층은 무한한 경우와 주변에 경계조건을 줄 수 있다. 만약 관정이 여러 개인 경우는 각 관정간의 간섭현상은 무시된다.
GPTRAC	1) 반(半) 해석적 조건 정류 및 균일한 지하수 흐름을 가지는 균질한 대수층 내에 여러개의 양수정에 대한 일정기간 포획구간 작도에 이용. 이때 대수층은 무한한 경우와 주변에 경계조건을 줄 수 있다. 대수층은 피압, 누수피압 및 자유면에 대해 적용된다. 각 관정의 간섭효과는 포함됨. 2) 수치해석적 조건 정류의 지하수 흐름을 가지는 양수정들에 대한 일정기간 포획구간 작도에 이용. 이 조건은 모델링에서 얻어진 수두값을 이용한 입자추적방식이므로, 대수층의 불균질성이나 다양한 경계조건에 대한 분석 가능.
MONTEC	균질하고 무한한 대수층 내의 단공 양수정에 대해 일정기간 포획구간의 분석에 이용. 피압 및 누수피압 대수층에 적용됨.

■ 학술기사/지하수

수치모델을 이용한 지하수 영향범위 산정

자료 입력을 위한 전처리기로 이용되고, CZAEM (Capture Zone Analytic Element Model)은 지하수 포획구간, 체류시간 모델링 결과와 출력물 생성 및 모델링 영역에서 모든 정체점(stagnation point)들과 유선(streamline) 분기점을 결정하여 정확한 포획구간의 경계를 정의에 이용된다. 특히 GAEP은 자료 입력, 지형도와의 조합, 디지털라이징 작업을 보다 원활히 수행할 수 있도록 설계되었고, GAEP에서 형성되는 배경도면은 컴퓨터 스크린상에서 모델을 매우 편리하게 설계할 수 있게 한다. GAEP은 실행 스크립트를 내장하는 ASCII 파일을 통해 연산프로그램인 CZAEM과 연동된다. CZAEM은 균질대수층에서 정류상태를 모델링할 수 있는 단층(single layer)모델로서, 이 모델은 수학적으로 천부대수층에서의 흐름과 같이 수직적 흐름은 무시할 수 있다는 Dupuit- Forchheimer 가정에 입각한다. 이 때 적용될 수 있는 해석요소로는 원형 구역에서의 강(river)의 경계, 하천(stream), 호수(lake), 관정(well), 균일한 흐름(uniform flow) 및 균일한 지표침투

(uniform infiltration) 등의 아주 기초적인 요소들만을 지원한다 (표 2).

MODPATH에 의해 산출되는 포획구간은 상대적으로 정확하지만 MODFLOW 프로그램으로 구축된 3차원 대수층 유동모델을 이용하므로 조사지역에 대한 많은 입력자료가 요구된다. 따라서 지하수영향조사에서 요구하는 관정의 포획구간을 산출하기 위하여 다양한 현장조사를 실시하기에는 한계점이 있다. 그러나 MODFLOW을 이용한 대수층 모델 분석에서 각종 경계조건이 세부적으로 입력 분석되기 때문에 단순 포획구간 산출 프로그램에 비하여 상당히 정밀분석이 된다고 할 수 있다.

4. 수치모델을 이용한 개념모델 적용 사례

여기에서는 WHPA, WhAEM 및 MODPATH 3가지의 포획구간 산출 수치모델링 프로그램을 이용하여 동일한 가상조건에 대하여 수치모델링을 수행하여 결과를 비교·분석하였다.

표 2. CZAEM 프로그램의 구성 모듈

모듈명	작업내용
AQUIFER	대수층 자료 입력
GIVEN	균일흐름 및 평면 함양 입력
REFERENCE	대수층 한 지점에서의 수두자료 입력
WELL	관정위치 및 자료 입력
LINE-SINK	Line-sink의 위치 및 자료 입력
GRID	Contouring할 수두분포 격자망의 생성
PLOT	수위등고선도 출력
TRACE	유선 모사
CAPZONE	포획구간 생성
CURSOR	커서를 이용한 요소와의 상호작용
CHECK	매개변수값 관측
IO	계산된 해의 이진(Binary)파일 작성 및 저장
PSET	출력장치에 그래픽 전송

사용된 개념모델(conceptual model) 중 포획구 간 산정에 직접적으로 영향을 미치는 조건으로 강을 경계조건으로 설정하였는데, 결과는 세 가지 프로그램에서 큰 차이가 나타났다. WHPA와 WhAEM 프로그램에서는 강을 경계조건으로 설정할 수 있으나 바닥층의 수리전도도와 두께 등 하천에서 대수층으로 유출입되는 양을 조절할 수 있는 기능이 없으므로 정수위 경계 개념으로 강과 대수층의 수위차에 의한 대수층 수리전도도 만큼 하천수가 대수층으로 유입되는 것으로 분석되었다. 따라서 두 프로그램은 강의 경계조건이 적절하게 분석되지 않으며 수위차가 클 경우는 오류가 발생할 수 있다.

4.1 가상조건 분석

수치모델링에 이용된 가상조건은 600×600 m 면적으로 대수층 심도는 좌측 70 m, 우측 50 m, 수위는 좌측 60 m, 우측 40 m의 동서방향의 지하수 유동방향을 설정하였다 <그림 1>. 사용된 경계조건은 남북방향의 하천을 설정하였고, 대수층조건으로 투수계수는 25 m²/일, 공극률 15 %, 양수정 W1 및 W2는 정중앙부와 50 m 하류부에 각각 위치시켰다.

분석은 각 프로그램별로 단공(W1)에 대하여 양수량 300 m³/일로 양수 시 1년, 3년 및 5년 간의 포획구간과, 두 공 동시양수 시 각 공에서 양수량 300 m³/일로 양수 시 1년, 3년 및 5년 간의 포획구간을 각각 산출하였다 <그림 2><그림 3><그림 4>.

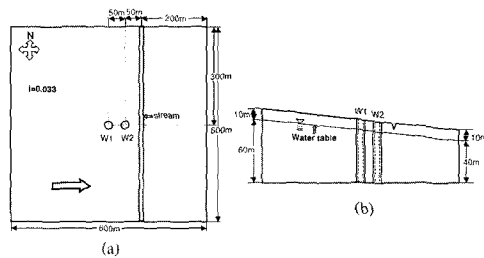


그림 1. 개념모델 모식도 <(a) 평면도, (b) 단면도

유한차분법을 이용한 WHPA와 MODPATH에서는 포획구간의 크기가 격자의 크기에 따라 영향을 받

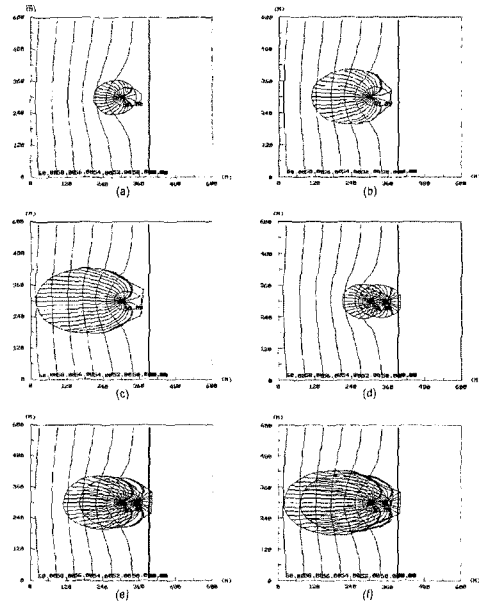


그림 2. WHPA 프로그램을 이용하여 구한 포획구간

- (a) 단공양수(양수량 : 300m³/일) 시 1년 후의 포획구간
- (b) 단공양수(양수량 : 300m³/일) 시 3년 후의 포획구간
- (c) 단공양수(양수량 : 300m³/일) 시 5년 후의 포획구간
- (d) 동시양수(각 공 양수량 : 300m³/일) 시 1년 후의 포획구간
- (e) 동시양수(각 공 양수량 : 300m³/일) 시 3년 후의 포획구간
- (f) 동시양수(각 공 양수량 : 300m³/일) 시 5년 후의 포획구간

는데, 분석에서 이용된 격자크기는 WHPA의 경우 20×20 m의 등간격이었으며, MODPATH에서는 관정주변은 5×5 m, 외곽 경계부는 20×20 m으로 설정하였다. 양수량 300 m³/일로 단공 (W1)에서 양수 시 WHPA와 MODPATH 결과에 의한 포획구간의 크기는 큰 차이를 보이지 않았으나, WhAEM과는 5년 간의 포획구간에서 약 100 m 정도의 큰 차이를 보이고 있으며, 이는 WhAEM이 해석요소법을 이용하여 계산되기 때문으로 판단된다 (표 3).

또한 WHPA와 WhAEM에서는 경계조건 중 하천을 정수위 경계로 처리하므로 하천을 통과하는 수위 등고선이 나타나지 않았으나 <그림 2><그림 3>, MODPATH 프로그램에서는 하천조건을 river package로 입력하였으므로 강의 영향이 바닥 투수량

■ 학술기사/지하수

수치모델을 이용한 지하수 영향범위 산정

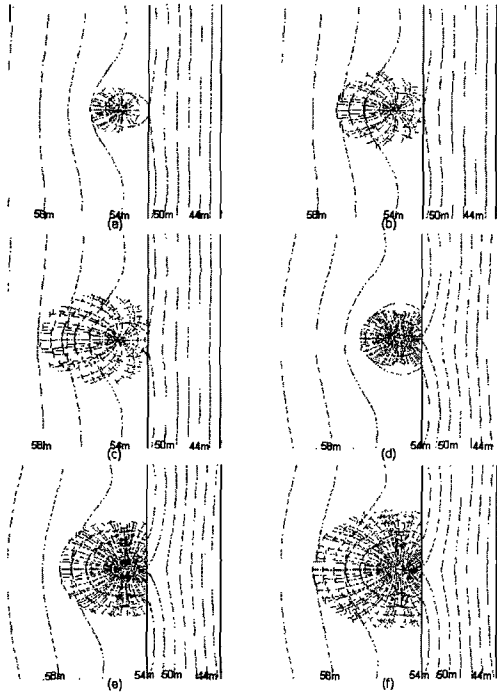


그림 3. WhAEM 프로그램을 이용하여 구한 포획구간

- (a) 단공양수(양수량 : 300m³/일) 시 1년 후의 포획구간
- (b) 단공양수(양수량 : 300m³/일) 시 3년 후의 포획구간
- (c) 단공양수(양수량 : 300m³/일) 시 5년 후의 포획구간
- (d) 동시양수(각 공 양수량 : 300m³/일) 시 1년 후의 포획구간
- (e) 동시양수(각 공 양수량 : 300m³/일) 시 3년 후의 포획구간
- (f) 동시양수(각 공 양수량 : 300m³/일) 시 5년 후의 포획구간

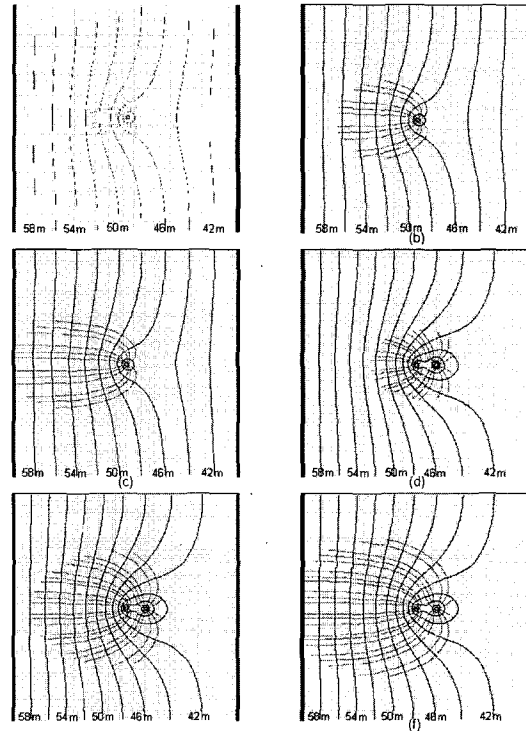


그림 4. MODPATH 프로그램을 이용하여 구한 포획구간

- (a) 단공양수(양수량 : 300m³/일) 시 1년 후의 포획구간
- (b) 단공양수(양수량 : 300m³/일) 시 3년 후의 포획구간
- (c) 단공양수(양수량 : 300m³/일) 시 5년 후의 포획구간
- (d) 동시양수(각 공 양수량 : 300m³/일) 시 1년 후의 포획구간
- (e) 동시양수(각 공 양수량 : 300m³/일) 시 3년 후의 포획구간
- (f) 동시양수(각 공 양수량 : 300m³/일) 시 5년 후의 포획구간

표 3. WHPA, WhAEM 및 MODPATH를 이용하여 구한 포획구간 비교표

프로그램	1년 후의 포획구간	3년 후의 포획구간	5년 후의 포획구간	비고
WHPA	90 m	190 m	280 m	MWCAP
WhAEM	70 m	130 m	210 m	-
MODPATH	100 m	210 m	310 m	-

계수에 의해 비교적 적절하게 분석 되었다 <그림 4>.

동시양수시의 분석에서 WHPA의 MWCAP 프로그램은 중첩분석 기능이 없는 프로그램으로, W1호공과 W2호공의 포획구간이 각각 단일공일 경우를 가상하고 분석하였고, WhAEM 및 MODPATH는 두 공동시양수시의 간섭현상을 분석하였다. 이때 WhAEM과 MODPATH는 관정간의 상호 간섭현상으로 수위는 더욱 하강한 상태이며 포획구간 폭도 상대적으로 넓어지는 것을 알 수 있다 <그림 3><그림 4>.

지금까지의 분석 결과 지하수영향조사에서 단공양수시험과 제한적인 수리지질조사 결과를 적용할 수 있는 프로그램은 WHPA와 WhAEM이며 이 경우에도 기본적으로 지표지질조사, 원격탐사에 의한 선구조 조사, 취수정 주변 대수층의 수리지질 특성 조사 및 취수정에 대한 장기양수시험은 필요한 것으로 나타났다.

4.2 현장자료 분석

현장 적용은 조사자료가 충분한 A, B 두 지역에 대하여 기 실시된 수리지질조사 결과를 토대로 수위강하량 조건(양수량은 대수층두께의 2/3 적용)과 수리지질 조건(동수구배 2배 적용)으로 구분하여 WHPA 프로그램에 적용하였고, 결과는

MODPATH 프로그램을 통해 이미 검증된 모델들과 비교함으로써 적용성을 검토하였다.

A 지역에서 얻어진 수리지질학적 자료 중 WHPA에 적용된 입력조건들과 분석된 포획구간은 다음과 같다 (표 4)<그림 5>.

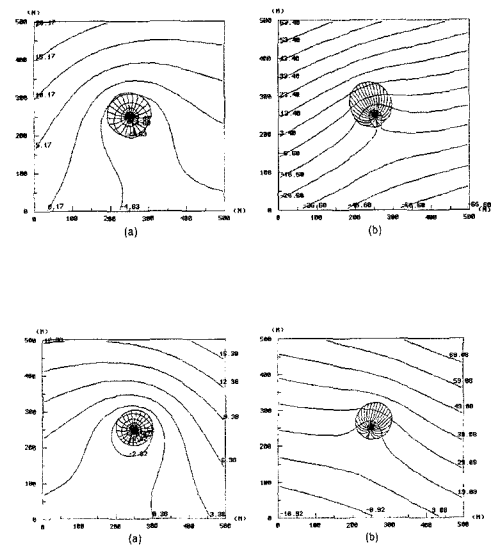


그림 5. WHPA를 이용하여 구한 A 지역의 포획구간

(a) 수위강하량 조건, (b) 수리지질 조건

표 4. WHPA를 이용 A 지역의 포획구간 산출을 위한 조건별 입력자료

입력요소	수위강하량 조건	수리지질 조건
model area	500×500 m	500×500 m
cell size	10×10 m	10×10 m
location of well	250, 250	250, 250
thickness of aquifer	70 m	70 m
pumping rate (m ³ /day)	370	370
drawdown	42 m	42 m
transmissivity (m ² /day)	7.2	7.2
hydraulic gradient	0.042	0.084
porosity	0.15	0.15
direction of flow (degree)	270	270
boundary condition	no flow	no flow
condition of capture zone	time-related (300 day)	time-related (300 day)

■ 학술기사/지하수

수치모델을 이용한 지하수 영향범위 산정

A 지역은 피압대수층 조건으로 물리검층을 통해 구해진 대수층 두께의 2/3에 해당하는 42 m까지 수위강하량을 일으키는 양수량 370 m³/일을 적용하였다. 또한 일정시간 조건으로 앞서 검토된 300일 경과시점까지의 포획구간을 작도한 결과 취수정 주변에 형성된 포획구간은 거의 원형에 가깝게 나타나는데 (그림 5(a)), 이는 단공에 대한 조사로 이방성을 고려하지 않은 결과로 향후 결과를 예측하는데 한계가 있는 것으로 판단된다. 그러나 이 지역에서 실시한 지표지질조사, 물리탐사 및 인공위성 자료를 이용한 선구조 분석 결과 수리지질구조가 지하수의 유선방향과 일치되게 형성되어 있어, 단공 조사자료를 기초로 지하수 유선방향에 대한 동수구배를 2배로 증가시킨 결과 MODFLOW를 이용하여 구축된 모델에서 나타난 포획구간과 유사한 결과가 나타나고 있다 (그림 5(b)).

따라서 단공 양수시험 결과를 이용하여 동수구배를 증가시키는 방법은 이 조건에서는 지질구조의 방향이 유선방향과 일치되므로 적합한 방법으로 판단되며, 지질구조의 방향이 유선방향과 다른 경우에는 지질구조 방향으로 유선방향을 설정하는 것이 타당하다고 판단된다.

B 지역에서 얻어진 수리지질학적 자료 중 WHPA에 적용된 입력조건들과 분석된 포획구간은 다음과 같다 (표 5)(그림 6).

B 지역은 피압대수층으로 대수층 두께의 2/3인 63 m까지 수위강하량을 일으키는 양수량 250 m³/일을 적용한 결과 A 지역과 유사한 분석 결과를 보여

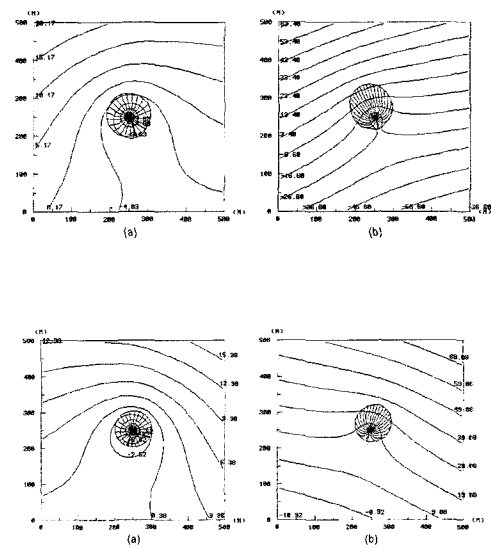


그림 6. WHPA를 이용하여 구한 B 지역의 포획구간

(a) 수위강하량 조건, (b) 수리지질 조건

표 5. WHPA를 이용 B 지역의 포획구간 산출을 위한 조건별 입력자료

입력요소	수위강하량 조건	수리지질 조건
model area	500×500 m	500×500 m
cell size	10×10 m	10×10 m
location of well	250, 250	250, 250
thickness of aquifer	94 m	94 m
pumping rate (m ³ /day)	250	250
drawdown	62 m	62 m
transmissivity (m ² /day)	6.755	6.755
hydraulic gradient	0.042	0.084
porosity	0.1	0.1
direction of flow (degree)	250	250
boundary condition	no flow	no flow
condition of capture zone	time-related (300 day)	time-related (300 day)

주며 MODPATH에 의한 포획구간과 거의 동일하게 분석되었다 <그림 7(a),(b)>. 따라서 단공에 대한 수리지질조사 결과를 통한 영향범위 분석에는 WHPA 프로그램을 이용하여 수위강하량 조건 (피압대수층 두께의 2/3 적용)과 수리지질 조건 (동수구배의 2배 적용)을 조건별로 적용할 수 있을 것으로 판단되며, 이때 제한된 주변 관정의 정보를 이용한 수리지질구조 파악은 대상 관정 주변에 대한 지표물리탐사와 관정에 대한 전기비저항 검층을 실시하여 복합 해석하여 적용하는 것이 필요하다 (송성호 등, 2000).

5. 결론

단공을 이용한 영향범위 산출에 대하여 수치모델링 기법을 적용한 결과 영향범위는 포획구간으로 적용하는 것이 타당하며, 제한된 자료를 근거로 포획구간을 산출하는 경우 WHPA 또는 WhAEM을 사용하는 것이 추천된다.

WHPA를 이용하여 소유역에 대한 수리지질학적 모델이 구축된 두 지역에 적용한 결과 피압대수층의 경우는 최대 대수층 두께의 2/3까지 수위강하 현상

이 나타나는 양수량과 수리지질 조건을 복합적으로 적용하는 경우가 MODPATH의 결과와 가장 잘 일치되는 것으로 나타났다.

그러나 현장에 적용된 두 경우는 피압대수층이고 대수층 시험 시 적용한 적정 양수량을 피압현상이 변화되지 않는 대수층 상단으로 최대 대수층 두께의 2/3까지 수위강하 현상이 일어나는 취수량으로 설정한 경우이므로 대수층 조건이 앞서 언급한 조건과 다른 경우에는 적용에 신중을 기하여야 할 것이다. 또한 지하수영향조사의 경우는 대상 관정 주변에 대한 이방성 자료가 부족하므로 수리지질조사, 지구물리탐사 및 원격탐사에 의한 선구조도 분석을 실시하여 주요 지질구조선 방향을 추출하고 수리지질구조 방향에 따라 수리전도도 비율 또는 동수구배를 변화시켜 포획구간을 연장 작도하는 것이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 3-3-1)에 의해 일부 수행되었습니다. (●)

< 참고문헌 >

- 김남형, 최한규(역서), 1994, 지하수공학, 구미서관, p.59-61.
- 송성호, 정형재, 권병두, 2000, 물리탐사자료를 이용한 수리지질구조 해석-충청북도 청원지역, 자원환경지질, Vol. 33, No.4, p.283-293.
- 임협중앙회, 농어촌진흥공사, 1999, 임협중앙회 먹는샘물 환경영향조사 보고서.
- 청원군, 농어촌진흥공사, 1998, 초정·미원지구 환경영향조사 보고서.
- McDonald, M.G. and Harbaugh, A.W., 1996, A Modular three-dimensional finite difference groundwater flow model, Techniques of water Resources Investigations of the U.S. Geological Survey.
- U.S. EPA, 1993, WHPA: Well Head Protection Area Delineation Code, IGWMC.
- U.S. EPA, 1994, Handbook: Groundwater and Wellhead Protection, EPA/625/R-94/001.
- U.S. EPA, 1995, Project Summary: Demonstration of the Analytic Element Method for Wellhead Protection, EPA/600/SR-94/210.
- U.S. EPA, 1995, WhAEM: Program Documentation for the Wellhead Analytic Element Model, Indiana Univ., CR-818029.