해안지역의 지하수 개발가능량

Potential Groundwater Resources for Coastal Aquifers

박남식*, 홍성훈**, 서경수***, 배상근****
Namsik Park, Sung Hun Hong, Kyung Soo Seo, Sang Keun Bae

요 지

해안 지역의 지하수 최적 개발 또는 관리 이전 단계에 수행될 수 있는 수자원 기본계획을 위한 지하수 개발가능량 산정식이 제안되었다. 산정식은 대수층 특성, 해수침투허용 거리, 지하수 해안유출량 그리고 관정의 위치 등 주요 영향 인자들의 함수이므로 매우 포괄적이며, 잘 알려진 해석 해들을 이용하였으므로 그 근거가 타당하다. 산정식은 관련 변수들의 양 함수로 표현될 수 있으므로 그 적용이 매우 간편하다. 또한 근거 없이 임의의 값들이 사용되던 관정의 영향반경을 대수층의 수리특성과 양수량 등의 함수로 표현한 합리적인 식이 제안되었다. 가상 유역에 대한 적용과 수치 해와의 비교분석을 통하여 제안된 식들이 보수적인 결과를 산출한다는 것을 보였다. 제안된 식들을 기존 관정들이 존재하는 유역에 적용하면 추가 개발가능량을 평가할 수 있다.

핵심용어 : 수자원 기본계획, 지하수 개발가능량, 양수량에 따른 영향반경, 해수침투

1. 서 론

우리나라에서는 수자원의 시공간적 불균형으로 인하여 용수 수급 균형에 많은 어려움을 겪고 있다. 특히 대규모 하천에 인접하지 않은 많은 해안 지역은 지방 자치단체의 열악한 재정 능력 등으로 인하여 심각한 물 문제를 겪고 있다. 최근 들어 해안지역 지하수의 최적 개발 및 관리를 통하여 지하수 이용의 효율화를 기하려는 연구가 국내외에서 다양하게 이루어지고 있다.

국외의 연구로는 Cheng et al. (2000)과 Park와 Aral (2004) 등이 해석 해를 이용하여 최적 개발모델을 제시한 바 있으며, 이외에도 수치모의 모델을 이용한 최적 개발 모델들이 제시되었다 (Hong et al., 2004). 국내에서는 수자원의 지속적 확보개발사업단의 지원으로 연구를 수행하고 있는 연구팀에서 많은 연구 성과를 내고 있다(박남식 등, 2002; 박남식 등, 2003; Park et al., 2003; 박남식, 2004; 홍성훈 등, 2004; 홍성훈과 박남식, 2005).

특정 해안 지역의 지하수 최적 개발 또는 관리를 위해서는 모의모델과 최적화기법이 결합된 최적모델의 적용이 필요하다. 최적모델을 적용하기 위해서는 대상 유역에 대한 상세한 수리지질 정보가 필요하기 때문에 신뢰성 있는 설계결과를 얻기 위해서는 시간과 경비가 소요된다. 기술력의 부족 또는 예산부족 등의 이유로 많은 지하수 조사 보고서에서 지하수 적정개발량 또는 개발가능량으로 합리적인 근거 제시 없이 함양량의 일정 비율을 제안한 경우가 많다(박창근, 1996a,b).

* 정회원・동아대학교 공과대학 토목공학과 교수・E-mail: nspark@dau.ac.kr
** 정회원・동아대학교 건설기술 연구소 특별 연구원・E-mail: wghsh@mail.donga.ac.kr
*** 동아대학교 대학원 토목공학과 석사과정・E-mail: gorudtn@naver.com
**** 정회원・계명대학교 공과대학 토목공학과 교수・E-mail: skbae@kmu.ac.kr

본 연구의 목표는 지하수 이용 기본계획 단계 또는 국가 규모의 수자원 계획에 활용될 수 있는 간편한, 그러나 해수침투 등의 주요 영향 인자들이 고려되고 명백한 과학적 근거가 있는, 피압대수층과 비피압대수층의 지하수 개발가능량을 산정하는 식을 제시하는 데 있다. 제안된 개발가능량 산정식은 적용이 손쉬운 관련 변수들의 양 함수(explicit function)의 형태를 띄고 있다. 가상유역에 대한 적용과 수치 해와의 비교를 통하여 제안된 식들의 적용성을 보였다. 또한 부수적인 결과로 임의의 큰 값이 보편적으로 사용되어온 영향반경을 합리적으로 산정할 수 있는 방법을 제시하였다. 본 연구에서 제안된 식들을 적용하는 데에는 해안유출량의 평가가 선행되어야 한다.

2. 방 법

2.1 개발가능량 고려 인자

해안지역에서 관정을 이용하여 개발할 수 있는 지하수 수자원량은 다음의 수리지질 매개변수들의 영향을 받으므로 지하수 개발가능량은 지하수 해안유출량 (q)、대수층의 수리전도도 (K)、평균 해수면과 대수층 바닥 사이의 거리 (D)、K, D 그리고 q 등이 일정하다고 취급될 수 있는 유역의 해안선 길이 (B) 등 이들 인자들의 함수로 제시되는 것이 필요하다.

이 외에 개발가능량 평가에 필요한 설계 변수는 관정 설치 후보 지점과 해안선 사이의 거리 (L_w), 관정 설치 전 해수 침투 거리 ($L_{toe,1}$), 설치 후 최대 해수침투 허용길이 ($L_{toe,2}$)이다.

여기서 해수와 담수 사이에 경계면이 존재한다고 가정한다. 그러면 L_w와 $L_{toe,2}$는 당연히 양수 전 상태의 해수쐐기 침투거리 $L_{toe,1}$보다 커야 한다(그림 3.3.4). 최대 해수침투 허용길이는 최하류에 위치한 관정 위치 등을 고려하여 결정할 수 있다. 해안으로부터 L_w거리에 위치한 관정에서 양수를 하면 지하수 동수경사와 지하수위가 낮아지고 이에 따라 해수침투가 야기된다. 최대해수침투가 해안선으로부터 $L_{toe,2}$로 제한되는 양수량 Q가 하나의 관정으로부터 개발 가능한 지하수량이 된다.

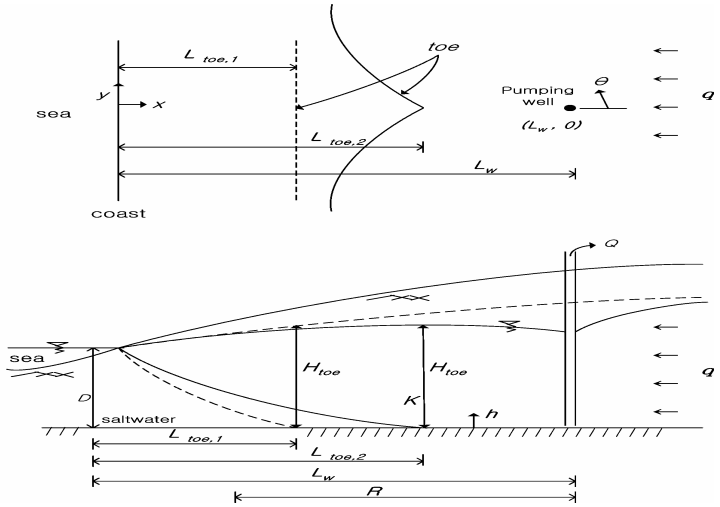

그림 1 Schematic representation of a plnar and a cross sectional view of an unconfined coastal aquifer (broken line: pre-development; solid line: post-development)

2.2 비피압대수층의 지하수개발가능량

2.2.1 관정의 영향 반경과 비교란 지하수위

전술된 영향인자들이 고려된 개발가능량 식을 산정하기 위하여 비피압대수층에서 발생하는 직선흐름, 우물흐름 그리고 해수의 영향을 고려하기 위한 Ghyben-Herzberg 법칙을 활용하였다. 또한 양수정간의 간섭효과를 피하기 위한 영향변경의 개념을 사용하여 다음의 3개의 방정식이 유도되었다.

$$\Delta h_{L_{toe,2}} = \frac{Q}{\pi K(H_R + H_{toe})} \ln \frac{R}{L_w - L_{toe,2}} \tag{1}$$

$$R \approx \frac{Q}{2\pi K H_R g_R} \tag{2}$$

$$H_R = \left(\frac{2q}{K}(L_w + R\cos\Theta) + D^2 \right)^{1/2} \tag{3}$$

식 (1), (2), (3)을 이용하여 양수량 Q, 영향반경 R과 비 교란 수위 H_R 을 구할 수 있다. 식 (2)와 (3)을 (1)에 대입하여 R과 Q를 제거하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\Delta h_{L_{toe,2}} = \frac{2H_R g_R (L_w - K(H_R^2 - D^2)/2q)}{H_R + H_{toe}} \ln \frac{L_w - K(H_R^2 - D^2)/2q}{L_w - L_{toe,2}} \tag{4}$$

그러면 식 (4)에서 영향반경상의 비교란 수위 H_R이 유일한 미지수이지만 비선형식이므로 반복법을 이용하여 구해야 한다.

2.2.2 근사 해

위 식에서 H_R을 H_{toe}와 같다고 가정하면 식 (4)는 단일 미지수 Q/H_R의 방정식으로 생각될 수 있다. 그러면 식 (4)는 다음 식과 같이 정리될 수 있다.

$$\Delta h_{L_{toe,2}} = e_1 \phi (\ln\phi - e_2) \tag{5}$$

여기서 $\phi = Q/H_R$, $e_1 = 1/(2\pi K)$ 그리고 $e_2 = \ln[2\pi K g_R (L_w - L_{toe,2})]$이다. 식 (5)의 비 선형성은 $\phi\ln\phi$ 에 있으며 다음의 2차 다항식으로 근사 될 수 있다.

$$\phi \ln\phi \approx a + b\phi + c\phi^2 \tag{6}$$

$$\phi = -\frac{b - e_2}{2c} + \left[\frac{(b - e_2)^2}{4c^2} - \frac{a e_1 - \Delta h_{L_{toe,2}}}{e_1 c} \right]^{1/2} \tag{7}$$

또한 영향반경은 식 (2)로부터 다음식과 같이 계산된다.

$$R = \frac{\phi}{2\pi K g_R} \tag{8}$$

2.2.3 지하수 개발 가능률

최대 개발가능량과 대상유역으로 유입되는 지하수량의 비를 구하면 유역의 지하수 개발가능률을 얻을 수 있다. 유역으로 유입되는 지하수량은 Bq이다. 그러면 지하수개발가능률 β 는 $N_w Q/(Bq)$로 정의되며 정리하면 다음 식과 같다.

$$\beta = \frac{\pi K H_R g_R}{q} \tag{9}$$

2.2.4 영향원 상의 지하수위 경사

식 (2)에서 안전하게 무시할 수 있는 지하수위 경사를 이용하여 영향반경을 정의하였다. 여기서 현실적인 문제에서 안전하게 무시될 수 있는 임의의 작은 값을 이용할 수 있다.

당연히 큰 지하수위 경사 값을 사용하면 개발가능량은 증가하지만 상호간섭의 효과도 커지기 때문에 유도과정에 사용된 가정의 정당성이 결여된다. 따라서 안전하게 사용될 수 있는 최대 지하수위 경사에 대한 가중치가 필요하다. 최대 지하수위 경사는 주어진 조건에서 지하수 최대 개발가능량을 고려하여 다음과 같이 산정될 수 있다.

지하수 개발에 관정이 이용된다면 개발가능률은 $(q-q')/q$ 보다 작아야 한다. 여기서 q는 해수쐐기를 허용지점까지 일률적으로 침투시키는 감소된 지하수 유입률이다. 개발가능률의 정의로 식 (9)을 사용하면 무시될 수 있는 지하수위 경사에 대한 상한계가 다음 식과 같이 주어진다.

$$g_{R,\max} < \frac{q}{\pi K H_R}\left(1 - \frac{\varepsilon K D^2}{q L_{toe,2}}\right) \tag{10}$$

지하수위 경사 상한계 역시 미지수 H_R의 함수이지만 $H_{R,\pi/2}$ 또는 D로 가정하면 추정치를 얻을 수 있다.

2.3 피압대수층의 지하수개발가능량

피압대수층의 경우 지하수 흐름식들이 수위의 선형함수 이므로 개발가능량식의 유도가 더욱 단순하다.

두께가 b이고 대수층 바닥이 평균해수면으로부터 D 아래에 위치한 피압대수층에 대하여 관련 식들을 유도하면 단일 관정의 개발 가능량은 구해진다. φ를 제외한 모든 변수 및 계수들은 여기에 그대로 적용이 되며 $\phi = Q/b$이다. 그러면 다음 식과 같다.

$$Q = b \times \phi = b \times \left(-\frac{b - e_2}{2c} + \left[\frac{(b-e_2)^2}{4c^2} - \frac{a e_1 - \Delta h_{L_{toe,2}}}{e_1 c}\right]^{1/2}\right) \tag{11}$$

비피압대수층과 달리 피압대수층의 경우에는 단일 관정의 유량을 구하는데 비교란 수위(H_R)가 불필요하며 이는 주어진 유역에 대한 개발가능률에도 적용되며 다음 식과 같다.

$$\beta = \frac{\pi K b g_R}{q} \tag{12}$$

무시할 수 있는 지하수위경사의 상한계는 다음 식과 같다.

$$g_{R,\max} < \frac{q}{\pi K b}\left(1 - \frac{\varepsilon K b D}{q L_{toe,2}}\right) \tag{13}$$

위 식들에 명시적으로 나타나 있지는 않지만 다음 식의 영향반경이 암시적으로 사용되었다.

$$R = \frac{\phi}{2\pi K g_R} \tag{14}$$

2.4 결과 및 고찰

대수층의 수리전도도, 두께, 허용 해수침투 거리, 지하수 해안유출량, 관정 위치 등 거의 모든 영향 인자들이 고려된 비피압·피압 대수층에 대한 지하수 개발가능량 산정 식이 제안되었다. 지하수 함양량과 기존 관정들에서의 양수량은 직접적으로 고려되지는 않았으나 관측 수위 등의 현장자료를 근거로 계산된 지하수 해안유출량에 이들의 영향이 반영되어 있기 때문에 제안된 식을 이용하여 계산된 개발가능량은 기존의 지하수 개발량에 외에 추가로 개발이 가능한 지하수량을 나타낸다.

식의 유도에는 잘 알려진 해석 해들과 Ghyben-Herzberg 관계가 이용되었다. 산정식은 고려된 변수나 과학적 근거 등에서 매우 포괄적이지만 관련 변수들의 양 함수(explicit function)로 나타낼 수 있어 그 적용이 매우 간편하다. 산정식의 유도과정에서 관정의 영향반경을 지하수 동수경사와 양수량의 함수로 나타낼 수 있음을 보였다. 영향반경을 결정하는 지하수 동수경사 값을 지정하는 데 참고할 수 있는 기준도 제시하였다. 수치모델 결과와의 비교와 분석을 통하여 본 연구에서 제안된 식의 결과가 보수적임을 보였다. 따라서 본 연구에서 제안한 산정식은 수자원 기본계획 등에 활용될 수 있는 유용한 도구가 될 것으로 판단된다. 본 연구에서 제안된 식은 약간의 수정을 통하여 등수위선이 개략적으로 평행한 내륙지역의 지하수 개발가능량 산정에도 이용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술사업단의 연구비 지원(과제번호: 3-3-2)에 의하여 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 박남식, 홍성훈, 심명근(2002). “유전자 방법과 병렬 처리를 이용한 해안 지하수 최적 양수량 결정 모형 개발.”, 대한토목학회 학술발표대회 논문집, 대한토목학회, 제4권, 제4호, pp. 325-328.
2. 박남식, 홍성훈, 한수영, 심명근(2003). “해안지역 지하수 개발의 필요성과 개발 가능성.”, 한국수자원학회지, 한국수자원학회, 제36권, 제1호, pp. 99-106.

3. 박남식(2004). “해안지역 지하수의 지속적 확보방안.”, 해안지역 지하수의 관리기술 심포지엄 자료집, pp. 104-127.
4. 박창근, 김남원, 김성탁, 김남종(1996). “지하수 함양량 추정 방법.”, 대한지하수환경학회 춘계학술발표회 자료집, 대한지하수환경학회, pp. 45-53.
5. 박창근(1996). “우리나라 지하수 개발가능량 추정: 1. 개념 정립과 기법의 개발.”, 대한지하수환경학회지, 대한지하수환경학회, 제3권, 제1호, pp. 45-53.
6. 홍성훈, B.N. Kumar, 박남식(2004). “해안지역 지하수개발을 위한 최적모델의 검정.”, 대한토목학회 학술발표대회 논문집, 대한토목학회, 제1권, 제B호, pp. 881-886.
7. 홍성훈, 박남식(2005). “해안지역 지하수 최적개발모델의 민감도 분석.”, 한국수자원학회 학술발표대회 논문집, 한국수자원학회, 제1권, 제1호, pp. 250.
8. Cheng, A.H.D., D. Halhal, A. Naji and D. Ouazar(2000). "Pumping optimization in saltwater-intruded coastal aquifers.", Water Resources Research, Vol. 36, No. 8, pp. 2155-2165.
9. Park, C.-H. and M.M. Aral(2004). "Multi-objective optimization of pumping rates and well placement in coastal aquifers.", Journal of Hydrology, Vol. 290, pp. 80-99.
10. Park, N.S., S.H. Hong, M.G. Shim, S.Y. Han and S.K. Bae(2003). "Optimization of Ground Water Withdrawal in Coastal Regions.", Proceeding of SWICA-M3, Yucatan, Mexico, CD