

해안 지하수 최적관리를 위한 개발가능량 산정 기법

Assessment of Potential Groundwater Resources for Optimal Management of Coastal Groundwater

박 남 식* / 홍 성 훈** / 서 경 수***
Park, Namsik / Hong, Sung Hun / Seo, Kyung Soo

Abstract

An equation is developed to estimate potential groundwater resources available for development. This equation is useful for preliminary planning stages prior to detailed design stages. The equation is a function of major factors such as aquifer characteristics, saltwater intrusion length, coastal groundwater discharge and potential locations of pumping wells. Thus, most important factors are taken into account. The equations are derived using well-known analytical solutions. Thus, the basis is scientifically sound. Use of the equation is quite simple since it is an explicit function of variables. A logical method is proposed to assess a radius of influence of a pumping well considering aquifer characteristics and the pumping rate. Applications to a hypothetical problem and comparison with results from a more rigorous numerical simulation model indicate that results obtained from the proposed equation are conservative.

keywords : water resources planning, potential ground water resources, explicit function of relevant variables, radius of influence dependent on pumping rate, saltwater intrusion

요 지

해안 지역 지하수 최적 관리의 기본계획 수립 단계에 사용될 수 있는 간편한 개발가능량 산정식이 제안되었다. 산정식은 대수층 특성, 해수침투허용 거리, 지하수 해안유출량 그리고 양수정의 위치 등 주요 영향 변수들의 함수이므로 합리적이며, 보편적으로 사용되는 해석 해들과 Ghyben-Herzberg법칙을 이용하여 유도되었다. 산정식은 관련 변수들의 양 함수로 표현될 수 있으므로 그 적용이 매우 간편하다. 또한 주로 주관적 경험에 의하여 그 값이 결정되어 온 양수정의 영향반경을 대수층의 수리특성과 양수량 등의 함수로 산정할 수 있는 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, 해안지역, 지하수 개발가능량, 양수량에 따른 영향반경, 해수침투

* 동아대학교 공과대학 토목공학부 교수
Professor, Dept. of Civil Eng., Dong-A University, Saha-gu, Busan 604-714, Korea
(e-mail: nspark@dau.ac.kr)
** 한국수자원공사 수자원연구원 수자원환경연구소 연구원
Researcher, Water Resources and Environment Research Center, Korea Institute of Water and Environment, Kwater, Daejeon 305-370, Korea
*** 동아대학교 대학원 토목공학과 석사과정
Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Dong-A University, Saha-gu, Busan 604-714

1. 서 론

우리나라에서는 수자원의 시공간적 불균형으로 인하여 용수 공급 균형에 어려움을 겪고 있다. 특히 대규모 하천에 인접하지 않은 많은 해안 지역은 지방 자치단체의 열악한 재정 능력 등으로 인하여 물 문제를 겪고 있다. 본 연구에서는 관정 규모의 국지적(local) 유역보다 큰 광역(regional) 해안 유역의 지하수 수자원 개발가능량을 합리적으로 산정할 수 있는 방법을 제안하였다.

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 Park and 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, 2003; Park et al., 2003; 박남식, 2004; 홍성훈 등, 2004; 홍성훈과 박남식, 2005). 박남식 등(2003)는 지하수를 포함한 해안지역의 물이용 현황 등의 조사 및 분석을 통하여 지하수 개발의 필요성과 개발 가능성을 제안하였으며, 홍성훈 등(2003)은 해안 지역에서 해안선을 통하여 바다로 방류되는 지하수량을 관측정 수위를 이용하여 평가하는 방법을 제시하고 해안선 형태가 직선형으로 단순화될 수 있는 울진유역에 적용한 바 있다. 서해안과 남해안과 같이 복잡한 형태의 해안선을 통한 지하수 해안유출량을 평가하기 위하여 한수영 등(2004)은 평균해안선 위치와 동수경사 산정 방법을 제시한 바 있다. 그러나 해안 유출량은 해안지역에 존재하는 수자원 총량을 나타낼 뿐으로 개발가능량을 의미하는 것은 아니다. 박창근(1996)은 기저유출분리방법을 이용하여 지하수 함양량을 산정하고 개발가능량을 제시한 바 있다. 다양한 방법에 의하여 해안지역의 지하수에 대한 연구가 이루어지고 있다(김용호 등, 2005; 김윤영 등, 2003; 김준모, 2004; 김진호 등, 2003; 김천수 등, 1997; 송성호 등, 2005; 이대근 등, 2002; 황세호 등 2003, 2004). 특히, 지질자원연구원에서는 자연재해 방제사업의 일환으로 해안 대수층으로의 해수 침투 문제를 다루고 있으며, 농업기반공사는 해안 및 도서지역의 해수침투의 영향을 조사하여 염해를 예방한다는 목적으로 1998년부터 해수침투조사 사업을 수행하고 있다. 이 외에도 제주도를 포함한 지방자치단체에서도 해수침투가 현안으로 취급되고 있다(박원배 등, 2003; 이상호, 1994; 한정상 등, 1994). 건설교통부

(2006)는 지표수-지하수 연계모형을 적용하여 지하수 함양량의 시공간 분포를 산정한 바 있다.

특정 해안 지역의 관정 단위의 지하수 적정개발량을 평가하기 위해서는 모의모델과 최적화기법이 결합된 정밀한 최적모델의 적용이 필요하다. 최적모델을 적용하기 위해서는 대상 유역에 대한 상세한 수리지질 정보가 필요하기 때문에 신뢰성 있는 설계결과를 얻기 위해서는 시간과 경비가 소요된다. 또한 모의모델에는 지역의 수리지질특성이 반영되어야하며, 이러한 특성은 지역에 따라 매우 복잡하여 단순화된 모의모델을 적용하는 데에 세심한 주의가 요구된다.

그러나 기본계획단계에서는 시간과 비용이 소요되는 정밀한 최적기술 보다 쉽게 개략적인 수자원량을 산정할 수 있는 단순한 방법이 요구된다. 국내에서는 지하수 개발가능량의 산정에 있어 지하수 개발 방법이나 지하수 환경에 미치는 영향에 대한 충분한 고려 없이 10년 빈도 갈수기 강수량에 대한 함양량의 일정 비율로 제시되는 경우가 대부분이다.

본 연구에서는 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. 가상 유역에 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.

2. 방 법

2.1 해안지역의 지하수 개발가능량의 평가

해안지역에서 관정을 이용하여 개발할 수 있는 지하수 수자원량은 다음의 수리지질 매개변수들의 영향을 받으므로 지하수 개발가능량은 이들 인자들의 함수로 제시되는 것이 필요하다.

- 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)

이 외에 개발가능량 평가에 필요한 설계 변수는 다음과 같다.

- 관정 설치 후보 지점과 해안선 사이의 거리 (L_w)
- 관정 설치 전 해수 침투 거리 ($L_{toe,1}$)
- 설치 후 최대 해수침투 허용길이 ($L_{toe,2}$)

여기서 해수와 담수 사이에 경계면이 존재한다고 가정한다. 그러면 L_w 와 L 는 당연히 양수 전 상태의 해수 췌기 침투거리 L 보다 커야 한다(Fig. 1). 최대 해수침투 허용길이는 최 하류에 위치한 관정 위치 등을 고려하여 결정할 수 있다. 해안으로부터 L_w 거리에 위치한 관정에서 양수를 하면 지하수 동수경사와 지하수위가 낮아지고 이에 따라 해수침투가 야기된다. 최대해수침투가 해안선으로부터 L 로 제한되는 양수량 Q 가 하나의 관정으로부터 개발 가능한 지하수량이 된다.

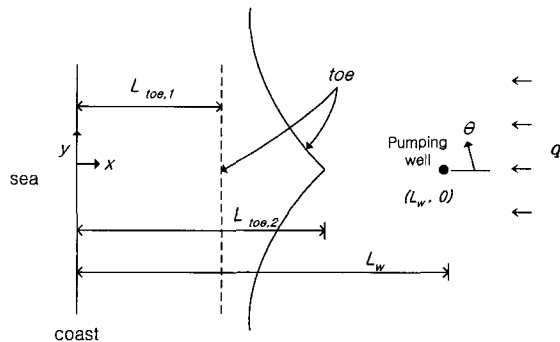


Fig. 1. Schematic diagram for assessment of potential groundwater resources in unconfined aquifers (dotted line: pre-development condition, solid line: post-development condition)

그러면 대상 지역의 전체 지하수 개발가능량은 상술된 관정을 몇 개나 설치할 수 있는냐에 달려있다. 인근에 관정을 추가 설치하면 상호간섭효과 때문에 단일 관정의 경우보다 지하수위 강하량이 커지며 이에 따라 해수도 내륙으로 더욱 침투한다. 만약 관정이 서로 간섭을 일으키지 않을 만큼 분리되어 설치된다면 대상 지역 전체의 개발가능량은 계산된 양수량과 설치

가능한 관정의 수의 곱으로 구할 수 있다. 여기서 인접 관정 간의 거리가 영향반경 R 의 2배 이상인 경우 관정의 상호간섭효과를 피할 수 있다. 그러면 길이가 B 인 해안선 구역에서 설치될 수 있는 관정의 수 N_w 는 다음 식과 같다.

$$N_w = \frac{B}{2R} \quad (1)$$

양수량과 대수층의 수리특성에 해당하는 영향반경이 계산되면 구역 전체의 지하수 개발가능량 W 는 다음 식과 같다.

$$W = N_w Q \quad (2)$$

본 연구의 주안점은 단일 관정의 양수량 Q 와 그에 해당하는 영향반경 R 의 평가에 있다. 이 외에 비피압 대수층의 경우 영향원 상의 비교관 지하수위 H_R 역시 주요 미지수가 된다. 따라서 계산되어야 할 미지수는 총 3개이다. 이를 위하여 3개의 방정식이 다음과 같이 직선흐름, 관정 흐름, 그리고 최대 해수침투 허용지점의 수위로부터 구해진다.

2.2 직선흐름 - 비피압대수층

해안지역의 지하수는 많은 경우 해안선에 수직인 방향으로 흘러 유출된다. 해안선이 복잡한 경우에는 관측 규모에 따라 흐름 방향 역시 복잡한 양상을 띌 수 있지만 적절한 규모에서나 해안선이 단순한 경우에는 합리적인 가정이다.

관정이 없는 경우 직선흐름의 지배방정식은 다음 식과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K h_{uf} \frac{\partial h_{uf}}{\partial x} \right) = 0 \quad (3)$$

여기서 K 는 대수층의 수리전도도, h_{uf} 는 대수층 바닥으로부터 측정된 지하수위, 그리고 x 는 해안선으로부터 내륙으로 수직인 방향으로 증가하는 거리 좌표이다. 상기 지배방정식에 대한 경계조건은 다음과 같다. 해안선에서의 지하수위는 평균 해수위와 동일한 것으로 볼 수 있다.(Fig. 1)

$$h_{uf} = D \text{ at } x = 0 \quad (4)$$

관측자료 등으로부터 별도의 과정에 의하여 결정(홍

성훈 등, 2004; 한수영 등, 2004)되는 지하수 해안유출량 (q)은 흐름률 경계조건에 사용된다.

$$Kh_{uf} \frac{\partial h_{uf}}{\partial x} = q \quad (5)$$

흐름률 경계조건 (5)는 지하수 양수관정 설치 후보 지점 보다 더 상류에 위치한 유역의 상류 경계에 지정된다. 지배방정식 (3)을 적분하고 경계조건 (4)와 (5)를 적용하면 다음 식과 같은 수두분포식이 유도된다.

$$h_{uf}^2 = \frac{2q}{K}x + D^2 \quad (6)$$

직선흐름에 대한 수두분포 식으로부터 지하수 개발 전 상태의 해수침투 거리 L 을 구할 수 있다. 해수썰기가 대수층 바닥과 만나는 지점은 toe라고 불린다. Ghyben-Herzberg 관계로부터 구할 수 있는 toe지점의 지하수위는 $H_{toe} = (1 + \epsilon)D$ 이다. 여기서 해수와 담수의 밀도차이는 $\epsilon = (\rho_s - \rho_f)/\rho_f$ 이며 해수와 담수의 경우 평균 1/40의 값을 가지나 지역에 따라 달라질 수 있다. 그러면 지하수 개발 전의 해수썰기 침투거리 $L_{toe,1}$ 은 다음 식과 같다.

$$L_{toe,1} = \frac{\epsilon(2 + \epsilon)KD^2}{2q} \approx \frac{\epsilon KD^2}{q} \quad (7)$$

2.3 우물 함수 - 비피압 대수층

비피압 균질 대수층에서의 관정에 대한 정상상태 지배방정식을 극좌표로 표시하면 다음식과 같다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rKh_{uw} \frac{\partial h_{uw}}{\partial r} \right) = 0 \quad (8)$$

여기서 h_{uw} 는 우물로 인한 지하수위이다. 경계조건으로 관정에서의 양수량을 충족시키기 위하여서는 다음 식이 된다.

$$2\pi rKh_{uw} \frac{\partial h_{uw}}{\partial r} = Q \quad (9)$$

영향반경의 비교란 지하수위 조건을 표시하면 다음 식과 같다.

$$h_{uw} = H_R \text{ at } r = R \quad (10)$$

Eq. (8)을 적분하고 경계조건을 적용하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$H_R^2 - h_{uw}^2 = \frac{Q}{\pi K} \ln \frac{R}{r} \quad (11)$$

Eq. (11)을 관정에 의한 지하수위 강하량으로 표시하면 다음 식과 같다.

$$s = H_R - h_{uw} = \frac{Q}{\pi K(H_R + h_{uw})} \ln \frac{R}{r} \quad (12)$$

Eq. (12)의 우변에 미지수 h_{uw} 가 포함되어 있으므로 Eq. (12)는 지하수 강하량을 직접 구하는 데에는 적당하지 않다. 그러나 본 연구에서 이용될 중첩의 원리를 적용하는 데에는 Eq. (12)가 더 편리하다.

2.4 중첩의 원리

지배 방정식들은 h^2 에 대하여 선형이지만 수위 강하량이 대수층 두께에 비하여 그다지 크지 않으면 우물에 의한 수위 강하량(Eq. (12))을 직선 흐름 수위분포(Eq. (5))에 적용하여(중첩의 원리) 복합된 흐름의 지하수위 분포를 다음과 같이 구할 수 있다. Eq. (12)는 극좌표, Eq. (5)는 직교좌표로 제시되므로 좌표계의 통일이 필요하다.

$$h = h_{uf} - s \quad (13)$$

2.5 허용해수침투지점

관정이 설치되기 전의 해수침투거리는 Eq. (7)로 제시된다. 그런데 관정이 설치되면 지하수위가 내려가기 때문에 해수도 내륙으로 침투한다. 본 연구의 목적은 해수썰기가 최대 해수침투 허용 지점($L_{toe,2}$)을 초과하여 더 내륙으로 침투하지 않을 만큼의 양수량을 구하는 것이다. 해수썰기가 최대 해수침투 허용지점을 초과하지 않으려면 수두는 H_{toe} 가 되어야 한다.

그러면 최대 해수침투 허용 지점($L_{toe,2}$)의 허용 지하수위 강하량은 다음과 같이 직선흐름식을 이용하여 계산될 수 있다.

$$\Delta h_{L_{toe,2}} = \left(\frac{2q}{K} L_{toe,2} + D^2 \right)^{1/2} - H_{toe} \quad (14)$$

Eq. (14)에 의하여 정의된 허용 지하수위 강하량을 관정에 의한 지하수위 강하량과 일치시키면 추구하는

양수량에 대한 식이 얻어진다.

$$\Delta h_{L_{toe,2}} = \frac{Q}{\pi K(H_R + H_{toe})} \ln \frac{R}{L_w - L_{toe,2}} \quad (15)$$

따라서 허용 양수량 식은 Eq. (14)와 Eq. (15)의 우변 등을 연결하여 얻어진다.

그런데 그 식에서 양수량 Q 외에 영향반경 R 과 비 교란 수위 H_R 역시 미지수이므로 두 개의 방정식이 더 필요하다.

2.6 양수정의 영향 반경과 비 교란 지하수위

많은 응용문제에서 양수정의 영향반경 R 과 영향원 상의 교란되지 않은 지하수위 H_R 은 지역에 따라 경험에 의하여 선정된 임의의 값들이 사용되었다. 이론적인 측면에서는 양수정의 정상상태의 영향은 무한대까지 미치므로 영향반경이 존재할 수 없다. 그러나 영향반경의 전술된 이론적 한계는 실용적인 측면에서 별 문제가 되지 않는다. 다만 영향반경은 지역특성뿐 아니라 양수량에 종속적임을 직감적으로도 알 수 있다. 본 연구에서는 영향반경을 더 합리적으로 정의하는 방법을 제시하였다. Eq. (9)를 영향반경에 대하여 적용하면 다음 식과 같다.

$$Q = 2\pi r K h \left. \frac{\partial h}{\partial r} \right|_{r=R} = 2\pi R K H_R \left. \frac{\partial h}{\partial r} \right|_{r=R} \quad (16)$$

Eq. (16)을 이용하면 영향반경을 양수량과 투수계수를 포함한 관련 매개 변수들과 영향원에서의 지하수위 경사의 함수로 구할 수 있음을 알 수 있으며 이 접근방법이 더 합리적이다. 이론적 측면에서 영향반경에서는 지하수위 경사는 0이 되어야 하며 비 교란 수위는 무한대가 되어야 하므로 이론식은 관정 인근이나 단일 관정으로부터 지나치게 멀리 떨어진 지점에 적용될 수 없다.

양수로 인한 지하수위 경사는 관정으로부터 멀어질수록 작아진다. 따라서 관정으로 인한 지하수위 강하량도 지하수위 경사와 함께 감소한다. 실질적인 측면에서는 지하수위 강하량보다 지하수위 경사를 이용하는 것이 더 편리하다. 실용적 관점에서 무시될 수 있는 작은 지하수위 경사 g_R 를 허용한다면 영향반경은 다음 식과 같이 정의될 수 있다.

$$R \approx \frac{Q}{2\pi K H_R g_R} \quad (17)$$

위 식에 포함된 비 교란 지하수위 H_R 은 직선흐름

Eq. (6)으로부터 구할 수 있다. 관정의 좌표를 $(L_w, 0)$ 로 지정하면 (Fig. 1) 비 교란 지하수위는 다음 식과 같다.

$$H_R = \left(\frac{2q}{K} (L_w + R \cos \theta) + D^2 \right)^{1/2} \quad (18)$$

여기서 θ 는 양의 x 축으로부터 반 시계방향으로 측정된 각도이다. 관정에 의한 지하수위 분포 식은 축 대칭을 가정하여 유도되었지만 직선흐름에 의한 지하수위는 축 대칭이 아니다. 따라서 영향원의 개념을 직선흐름에 적용하는 것은 오차를 야기하지만 계획단계의 개략적인 값을 구하는 데에는 문제가 없다. Eq. (18)은 비 교란 수위가 일반적으로 영향반경의 함수임을 의미하지만 y 축 상(즉, $\theta = \pm \pi/2$)에 서는 비 교란 수위가 $H_{R,\pi/2} = (2qL_w/K + D^2)^{1/2}$ 임을 알 수 있다.

그러면 Eq. (15), (17) 그리고 (18)을 이용하여 양수량 Q , 영향반경 R 과 비 교란 수위 H_R 을 구할 수 있다. Eq. (17)과 (18)을 (15)에 대입하여 R 과 Q 를 제거하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\Delta h_{L_{w,2}} = \frac{2H_R g_R (L_w - K(H_R^2 - D^2)/2q)}{H_R + H_{toe}} \ln \frac{L_w - K(H_R^2 - D^2)/2q}{L_w - L_{toe,2}} \quad (19)$$

본 연구에서 가장 지하수위가 중요한 지점은 해수침투 최대 허용지점 $x = L_{toe,2}$ 이다. 이 지점은 관정으로부터 직 하류에 위치하므로 비 교란 수위도 $\theta = \pi$ (관정의 직하류 방향)였다.

Eq. (19)에서 미지수는 비 교란 수위 H_R 이며, 나머지 변수들은 전술된 절차에 의하여 계산되거나 사전에 지정된다. 그러나 Eq. (19)는 비선형식이므로 반복법을 이용하여 구해야 한다. 일단 H_R 이 계산되면 R 과 Q 는 Eq. (15)와 (17)로부터 계산될 수 있다.

2.7 근사 해

Eq. (19)를 유도하는 데에 이용된 여러 개의 식에는 단순화 가정들이 사용되었다. 따라서 비선형 식 (19)의 근사해도 본 연구에서 추구하는 기본계획단계의 지하수 개발가능량을 평가하는 데 충분할 수 있다. 근사해를 구하기 위하여 Eq. (17)을 (15)에 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\Delta h_{L_{w,2}} = \frac{Q}{\pi K H_R (1 + H_{toe}/H_R)} \ln \frac{Q}{2\pi K H_R g_R (L_w - L_{toe,2})} \quad (20)$$

위 식에서 H_R 을 H_{toe} 와 같다고 가정하면 Eq. (20)은 단일 미지수 Q/H_R 의 방정식으로 생각될 수 있다. 그러면 Eq. (20)은 다음 식과 같이 정리될 수 있다.

$$\Delta h_{L_{toe,2}} = e_1 \phi (\ln \phi - e_2) \quad (21)$$

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. Eq. (21)의 비선형성은 $\phi \ln \phi$ 에 있으며 다음의 2차 다항식으로 근사될 수 있다.

$$\phi \ln \phi \approx a_0 + a_1 \phi + a_2 \phi^2 \quad (22)$$

근사식의 계수 a_0 , a_1 그리고 a_2 는 ϕ 의 범위에 의하여 결정된다. 예를 들면 1부터 100 m^2/d 의 범위에 대해서 회귀분석(Golden Software Inc., 2002)을 시행하면 다음의 근사식이 얻어진다.

$$\phi \ln \phi \approx -7.601 + 3.230\phi + 0.01533\phi^2 \quad (23)$$

국내에서 대부분의 비피압대수층의 두께는 10여m에서 수십m의 분포를 보인다. 그러면 고려된 ϕ 의 범위 이내의 양수량은 10여 m^3/d 부터 수천 m^3/d 까지 포함이 되므로 거의 모든 가능성이 포함된다고 볼 수 있다. 상술된 범위에 대한 근사해와 Newton-Raphson방법으로 구한 비선형식의 해를 비교하면 Fig. 2와 같다.

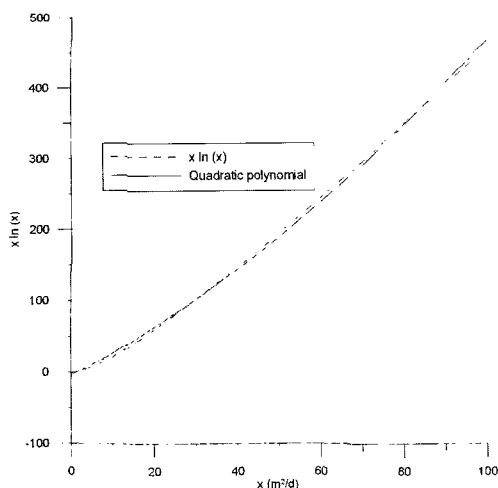


Fig. 2. Comparison of the nonlinear term and approximate term obtained from regression

Fig. 2에서 보이는 것처럼 근사식은 비선형식을 잘 표현하고 있다. 위의 경우 결정계수 (coefficient of

determination)는 0.999375이다.

Eq. (22)를 (21)에 대입하고 근의 공식을 사용하면

$$\phi = -\frac{a_1 - e_2}{2a_2} + \left[\frac{(a_1 - e_2)^2}{4a_2^2} - \frac{a_0 e_1 - \Delta h_{L_{toe,2}}}{e_1 a_2} \right]^{1/2} \quad (24)$$

근의 공식에서 '+' 부호가 이용되었다. 그러면 영향반경은 Eq. (17)로부터 다음식과 같이 계산된다.

$$R = \frac{\phi}{2\pi K g_R} \quad (25)$$

상기 식들은 이용할 단일 관정의 양수량 계산 절차로 다음과 같다. 먼저 Eq. (24)에서 ϕ 를 구하고, 다음에 Eq. (25)에서 R 을 그리고 Eq. (18)로부터 H_R 을 구하면 $Q = H_R \phi$ 로 계산할 수 있다.

2.8. 지하수 개발 가능성 - 비피압대수층

전술된 식들을 이용하면 최대 허용지점까지 해수침투를 야기시키는 양수량과 영향반경을 구할 수 있다. 그러면 상호 간섭을 피하며 대상 유역에 설치할 수 있는 관정의 개수와 최대 개발가능량은 각각 Eq. (1)과 (2)로부터 계산된다.

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

$$\beta = \frac{\pi K H_R g_R}{q} \quad (26)$$

Eq. (26)은 개발가능률이 관정의 위치(L_w)나 해수침투 최대허용 거리($L_{toe,2}$)의 양함수가 아니라는 점에서 흥미롭다. 물론 이들 매개변수는 비교관 수위 H_R 를 통하여 영향을 미친다. Eq. (26)에는 미지수인 H_R 이 포함되어 있기 때문에 모든 미지수를 구한 후에 정확한 개발가능률을 구할 수 있다. 그러나 H_R 을 대수층의 두께 D 로 가정하면 복잡한 선형 계산 없이 개발가능률의 범위를 손쉽게 추정할 수 있다.

2.9 영향원 상의 지하수위 경사

Eq. (17)에서 안전하게 무시할 수 있는 지하수위 경사를 이용하여 영향반경을 정의하였다. 여기서 임의의 작은 값을 이용할 수 있다. 예를 들어 $g_R = 10^{-4}$ 를 사용하면 이는 영향반경과 그로부터 1km 떨어진 지점 사이의 수위강하가 0.1m 이하임을 의미한다. 대부분의 현실적인 문제에서 이 정도의 수위강하는 안전하게 무시될 수 있다.

당연히 큰 지하수위 경사 값을 사용하면 개발가능량은 증가하지만 상호간섭의 효과도 커지기 때문에 유도 과정에 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.

지하수위는 관정의 직 하류 선상(x 축상)에서 최소가 되므로 그 선상에서 최대 해수침투가 발생한다. 그러나 해안선에 평행한 암거(trench)를 이용하여 지하수를 개발한다면 지하수위 강하 등고선은 해안선과 평행하고, 해수침투도 해안선과 평행하게 발생한다. 그러므로 해수침투 최대허용지점이 주어진 경우 최대의 지하수를 확보하는 방법은 암거를 사용하는 것이며 이 경우 지하수 개발가능량은 $B(q - q')$ 이다. 여기서 q' 는 해수 빼기를 허용지점까지 일률적으로 침투시키는 감소된 지하수 유입률이며 Eq. (7)에 $L_{toe,1}$ 대신 $L_{toe,2}$ 를 사용하여 얻을 수 있으며 다음 식과 같다.

$$q' = \frac{\epsilon KD^2}{L_{toe,2}} \left(1 + \frac{\epsilon}{2}\right) \approx \frac{\epsilon KD^2}{L_{toe,2}} \quad (27)$$

그러나 지하수 개발에 암거가 아니라 관정이 이용된다면 개발가능률은 $(q - q')/q$ 보다 작아야 한다. 개발가능률의 정의로 Eq. (26)을 사용하면 무시될 수 있는 지하수위 경사에 대한 상한계가 다음 식과 같이 주어진다.

$$g_{R,max} < \frac{q}{\pi KH_R} \left(1 - \frac{\epsilon KD^2}{qL_{toe,2}}\right) \quad (28)$$

지하수위 경사 상한계 역시 미지수 H_R 의 함수이지만 $H_{R,\pi/2}$ 또는 D 로 가정하면 추정치를 얻을 수 있다.

2.10 적용 예 - 비피압대수층

본 연구에서 유도된 식들의 적용 예를 위하여 제한이 $K=10m/d$, $D=40m$, $q=1m^2/d$, $B=15000m$ 인 가상 유역을 선정하였다. 상기 조건의 경우 비 교란 해수침투 위치는 $L_{toe,1} = 400m$, 그리고 영향반경의 계산에 사용되는 지하수위 경사의 상한계는 $g_{R,max} = 2.65 \times 10^{-4}$ 로 계산된다. 설계 변수로 관정의 위치는 해안선으로부터 800m 지점으로, 해수침투는 600m 지점까지 허용할 수 있는 것으로 선택하였다. 영향반경을 결정하기 위하여 $g_R = 10^{-4}$ 를 지정하였다. 주어진 조건에 대한 관정의 양수량과 다른 주요 매개변수에 대한 값들을 비선형식과 근사식으로부터 계산하였다. 비선형식의 해는 Newton-Raphson 반복법을 이용하여 계산하였다. 계산 결과는 Table 1에 제시되었다.

비선형식으로부터 계산된 결과를 살펴보면 지하수위 경사 10^{-4} 이하를 무시할 때 양수량 $469m^3/d$ 에 대한 영향반경은 2000여m로 나타났다. 따라서 해안선의 길이가 15000m인 대상 유역에 설치할 수 있는 관정의 수는 3.7개이며 이에 대한 지하수개발가능량은 대상 유역 전체의 지하수 유출량 $15000m^3/d$ 중 11.6%인 $1740m^3/d$ 로 계산되었다.

Table 1에서 H_{toe} 는 관정에서 양수가 이루어질 경우 해수침투 최대허용지점(해안선으로부터 600m 지점)의 지하수위를 보여준다. 본 예에서는 해수면 아래 대수층의 두께가 40m이므로 toe위치에서 (대수층 바닥으로부터 측정된) 지하수위는 41m가 되어야 한다. 비선형식의 결과는 toe위치에서의 수위가 정확하게 이론 결과와 일치함을 보여준다.

계산 결과 중 비 교란 지하수위는 36.8m로 물리적인

Table 1. Maximum pumping rate, rate of groundwater development, and major parameters

	H_R (m)	R (m)	Q (m^3/d)	N_w	β (%)	H_{toe} (m)	Q/H_R (m^2/d)	Error on $\phi \ln \phi$ (%)	Error on H_{toe}/H_R (%)
nonlinear solution	36.80	2028.2	469.0	3.7	11.56	41.00	12.7	-	-
approximate solution	37.24	1866.5	436.7	4.0	11.70	41.06	11.7	0.13	11.4

측면의 최소 지하수위 40m(해안선에서)보다도 더 작게 계산되었다. 이는 직선 흐름 식을 이용하여 비 교란 수위를 계산할 때 해안선의 영향을 무시한 결과이다. 물론 수위만을 고려한다면 최대 영향반경을 L_w 로 제한할 수도 있다. 그러나 이 가정은 바다를 수량이 무한대인 담수호로 가정하는 것과 동일하기 때문에 안전성이 결여된다. Eq. (16)에서 나타나듯이 최대 양수량은 비 교란 지하수위와 비례하므로 해안선의 존재를 무시하고 계산한 영향반경과 비 교란 지하수위는 보수적인 결과를 가져오므로 계획단계의 적용에는 더 바람직하다.

근사식을 이용하면 오차가 도입된다. 표의 결과를 보면 $\phi \ln \phi$ 를 근사함으로써 야기된 오차는 그다지 크지 않은 것으로 나타난다. 이는 $\phi = Q/H_R$ 이 11-12 정도의 값으로 회귀분석대상구간에 포함되어 있기 때문이다. 반면에 H_{loe}/H_R 을 근사하는 데에는 10% 이상의 오차가 포함되었음을 보여준다. 그러나 주요 계산 결과인 양수량, 영향반경, 지하수개발가능률 그리고 해수침투 최대허용 지점의 지하수위 등의 결과에서는 오차가 그다지 크지 않음을 보여준다. 따라서 근사식을 이용하여 개발가능량을 추정하여도 계획단계에서는 문제가 없을 것으로 판단된다.

2.11 담수-해수 지하수흐름 수치모델 결과와의 비교

본 연구에서는 직선흐름 중에 설치된 관정의 양수로 결과되는 지하수위 분포를 구하기 위하여 담수만이 고려된 단순한 해석 해들을 이용하고 Ghyben-Herzberg 관계를 이용하여 해수의 영향을 고려하였다. 그러나 실제 해안 지역의 지하수 흐름에서는 해수가 담수의 흐름에 큰 영향을 미친다. 여기서는 전술된 적용 예의 계산 결과를 해수의 존재를 고려할 수 있는 지하수 흐름 수치모델의 계산결과와 비교하였다. 구체적 비교 대상은 지하수위 분포, 관정 개발 전 후의 해수침투의 위치, 영향반경 등이다.

지하수 흐름 수치모델로는 담수와 해수 사이에 경계면을 가정한 이상(two-phase)흐름 모델(Huyakorn et al., 1996)을 선정하였다. 이상 흐름 모델은 국부적인 수질 모델링에는 적절하지 않지만 광역적인 수자원 설계에는 타당성을 가진다. 따라서 계획단계에 사용될 지하수 개발가능량 산정 식을 검증하는 데에 충분하다.

무한 공간에 대하여 유도된 해석 해와는 달리 수치 모델링은 제한된 영역에 대하여 수행된다. 여기서는 해안선 방향으로 8000m, 그리고 해안에 수직한 방향으로 7000m인 직사각형 영역을 모델링 영역으로 선정하였다. 수치모델링에는 50m × 50m 크기의 유한요소

를 이용하였다.

해석해와 수치해에서 관정 설치 전의 해안에 수직한 방향의 직선흐름에 의한 지하수위 분포를 비교하였다 (Fig. 3). 대부분의 영역에서는 수위 분포 형태가 두 결과 사이에 거의 동일함을 알 수 있지만 해안 인근에서는 분포 형태와 지하수위에 큰 차이가 있음이 드러난다. 이는 예상할 수 있는 차이로 해수침투의 존재는 담수의 흐름단면을 축소시킨다. 이는 곧 담수의 동수경사가 증가함을 의미하므로 해수침투의 존재가 고려되면 그렇지 않은 경우보다 내륙방향으로 지하수위가 더 빠르게 증가한다. 따라서 해석 해에 의한 지하수위는 수치 해의 그것보다 낮은 값을 보이며, 이는 곧 더 심한 해수침투를 의미한다. 본 예제의 경우 수치 해에서는 해수침투가 200여m에 그치는 것으로 모의되었지만 해석 해에서는 400m까지 해수침투가 침투하는 것으로 계산된 바 있다. 따라서 해석 해에서 수치 해보다 더 큰 해수침투의 침투를 가정하므로 본 연구에서 제안한 간접개발량 평가식들은 보수적인 결과를 제공한다.

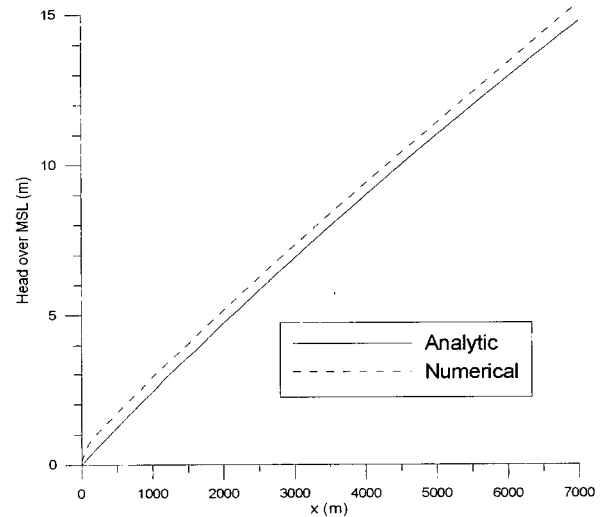


Fig. 3. Comparison of potentiometric head profiles for rectilinear flow, two-phase numerical solution and Thiem equation

상기의 조건에서 단일관정을 설치하고 469m³/d로 양수한 경우 지하수위 강하량 분포에 대한 수치 해를 Fig. 4에 제시하였다. 개발가능량 산정에 필요한 영향반경을 산정하기 위하여 양수로 인한 지하수위 경사로 10⁻⁴를 사용하였다. 계산결과 적용 양수량에 대한 영향반경은 2000m 정도로 나타났다. 수치 해의 결과를 조사하면 관정으로부터 해안선과 평행한 방향으로 2000m 떨어진 지점의 수위 강하량은 대략 0.05m이며 이 지점의 동수

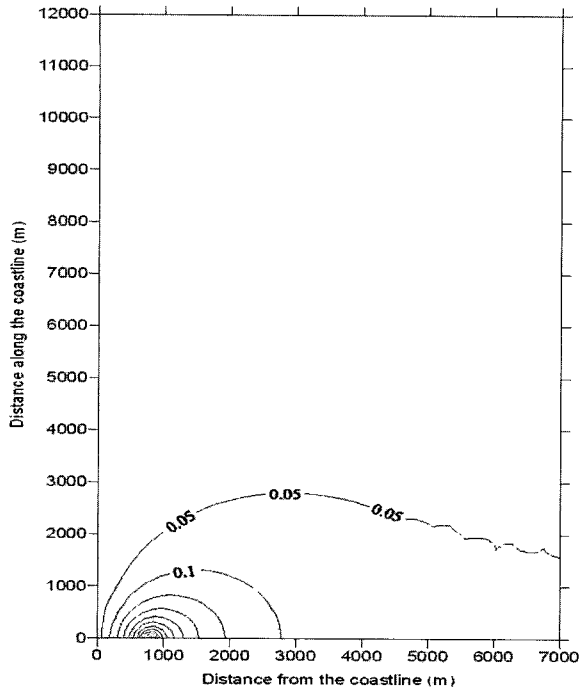


Fig. 4. Distribution of groundwater drawdown due to a single pumping well

경사는 2.5×10^{-5} 로서 해석 해에서 지정한 값보다 훨씬 낮은 값을 보이므로 적용된 양수량에 대하여 산정된 영향반경 2000m는 보수적인 값을 보여준다.

영향반경을 2000m로 가정하여 다수의 관정을 설치한 경우의 무시된 상호간섭효과를 조사하기 위하여 4000m 간격의 관정 4개에 의한 지하수위 강하량 분포에 대한 수치 해를 Fig. 5에 도시하였다. 인접한 두 관정의 중간 지점에서 지하수위 강하량은 0.11m 정도로 나타났으며 이를 동수경사로 환산하면 7.5×10^{-5} 로 약간의 간섭효과가 나타나지만 개발가능량 산정식에서 영향반경을 계산하는 데 사용된 지하수위 경사 10^{-4} 보다 작다.

2.12 개발 가능량 - 피압대수층

피압대수층의 경우 지하수 양수정에 대한 수위강하 분포식도 지하수위의 선형함수이므로 개발가능량식의 유도가 더욱 단순하다. 두께가 b 이고 대수층 바닥이 평균해수면으로부터 D 아래에 위치한 피압대수층의 단일 양수관정으로부터 개발될 수 있는 양수량은 다음 식과 같이 유도된다.

$$\phi' = -\frac{a_1 - e_2}{2a_2} + \left[\frac{(a_1 - e_2)^2}{4a_2^2} - \frac{a_0 e_1 - \Delta h_{L_{loc,2}}}{e_1 a_2} \right]^{1/2} \quad (29)$$

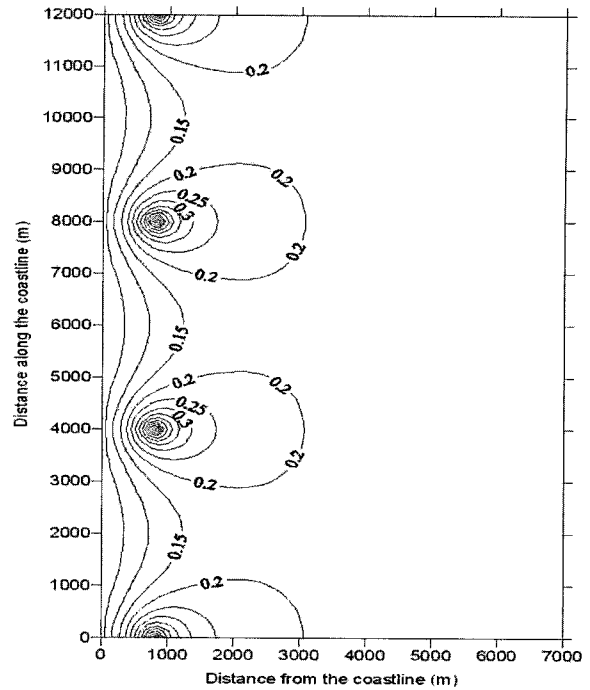


Fig. 5. Distribution of groundwater drawdown due to four pumping wells

여기서 $\phi' = Q/b$ 이다. Eq. (29)의 우변은 비피압 대수층의 단일 양수정에 대한 양수량식 (24)의 우변과 동일한 형태이다. 비피압대수층의 경우와는 달리 피압대수층의 경우에는 단일 관정의 유량을 구하는데 비 교란 수위(H_R)가 불필요하며 이는 주어진 유역에 대한 개발 가능성에도 적용되며 다음 식과 같다.

$$\beta = \frac{\pi K b g_R}{q} \quad (30)$$

무시할 수 있는 지하수위 경사의 상한계는 다음 식과 같다.

$$g_{R,max} < \frac{q}{\pi K b} \left(1 - \frac{\epsilon K b D}{q L_{loc,2}} \right) \quad (31)$$

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

$$R = \frac{\phi}{2\pi K g_R} \quad (32)$$

3. 결론 및 토의

보편적으로 사용되는 해석 해들과 Ghyben-Herzberg

관계를 이용하여 해안 지역의 지하수 수자원 관리의 기본 계획 수립 단계에 사용될 수 있는 개발가능량 산정식을 유도하였다. 산정식은 대수층의 수리지질 특성(수리전도도, 두께 등), 개발방법(관정의 위치, 개수) 그리고 개발이 해수침투에 미치는 영향(허용 해수침투거리) 등의 양함수(explicit function)로 제시되었으므로 적용이 간편하다. 지하수 개발가능량이 임의의 빈도 가뭄 시의 강수량에 대한 함양량으로 제시되어온 현재의 기술 수준에 비하면 본 연구에서 제안된 개발가능량 산정식은 더 합리적인 과학적 근거를 가지고 있다.

산정식의 유도과정에서 양수정의 영향반경을 지하수 동수경사와 양수량의 함수로 나타낼 수 있음을 보였다. 영향반경을 결정하는 지하수 동수경사 값을 지정하는데 참고할 수 있는 기준도 제시하였다. 수치모델 결과와의 비교와 분석을 통하여 본 연구에서 제안된 식의 결과가 보수적임을 보였다. 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.

실제 해안 지역의 지하수 흐름은 매우 불규칙하므로 사용된 단순한 이론들이 적용될 수 없는 경우가 많으며 이러한 경우에는 지하수 흐름과 용질의 이동을 정밀하게 모의할 수 있는 수치모델과 최적화 기법의 적용이 필요하다. 그러므로 본 연구에서 제안된 산정식은 유역 단위의 수자원 기본계획 수립에 필요한 지하수 수자원 개발가능량 산정 등으로 그 적용 범위가 국한된다.

감사의 글

이 논문은 2004학년도 동아대학교 학술연구조성비(국외연구과건)에 의하여 연구되었습니다. 또한 건설적인 지적으로 본 논문의 질적 향상에 도움을 주신 심사자들도 감사드립니다.

참고 문헌

건설교통부 (2006). “우리나라 지역특성에 맞는 최적 지하수 함양량 산정 기법 개발.” 한국건설기술연구원.
 김용호, 배상근 (2005). “부동지구의 해안지하수 유출량.” **한국수자원학회 학술발표 논문집**, 한국수자원학회.
 김윤영, 이기철, 정형재, 박종철 (2003). “해안 지역 농촌지하수 시스템분석 (화성시 매항리 일대).” **한국지하수토양환경학회 춘계학술대회 발표집**, 한국지하수토양환경학회, pp. 422-425.

김준모 (2004). “양수 및 조석에 의한 층상 해안 대수층 내에서의 지하수 유동 및 염분 이동 모델링.” **해안지역 지하수의 관리기술 심포지엄 자료집**, 동아대학교, pp. 72-102.
 김진호, 송성호, 이규상, 우명하 (2003). “우리나라 서남해 도서지역 암반대수층을 통한 해수침투.” **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제36권, 제1호, pp. 115-123.
 김천수, 김경수, 배대석, 송승호 (1997). “임해지역 주변에서의 해수침투특성.” **대한지하수환경학회지**, 대한지하수환경학회, 제4권, 제2호, pp. 61-72.
 박남식, 홍성훈, 한수영, 심명근 (2003). “해안지역 지하수 개발의 필요성과 개발 가능성.” **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제36권, 제1호, pp. 99-106.
 박남식, 홍성훈, 심명근 (2003). “유전자 방법과 병렬 처리를 이용한 해안 지하수 최적 양수량 결정 모형 개발.” **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제23권, 제5B호, pp. 397-403.
 박남식 (2004). “해안지역 지하수의 지속적 확보방안.” **해안지역 지하수의 관리기술 심포지엄 자료집**, 동아대학교, pp. 104-127.
 박원배, 박윤식, 고기원, 문덕철 (2003). “제주도 동부지역 지하수의 담·염수경계면 분포화 변화.” **한국지하수토양환경학회 춘계학술대회 발표집**, 한국지하수토양환경학회, pp. 55-58.
 박창근 (1996). “우리나라 지하수 개발가능량 추정: 1. 개념 정립과 기법의 개발.” **대한지하수환경학회지**, 대한지하수환경학회, 제3권, 제1호, pp. 45-53.
 송성호, 이규상, 김진성, 성백옥, 박남식, 홍성훈 (2005). “해수침투지역에서 1차원 전기비저항탐사 자료의 공간 분석.” **한국관개배수학회 논문집**, 한국관개배수학회, 제12권, 제1호, pp. 28-37.
 이대근, 김형수, 박찬석, 원종호, 김규범 (2002). “거제도 해안유출지하수 예비조사 및 활용방안 연구.” **한국지하수토양환경학회 춘계학술대회 발표집**, 한국지하수토양환경학회, pp. 253-256.
 이상호 (1994). “제주도 해안 지하수의 염수침입 개연성.” **대한지하수환경학회 학술발표회 자료집**, 대한지하수환경학회, pp. 145-165.
 한수영, 홍성훈, 박남식 (2004). “해안선의 형태를 고려한 지하수 해안 유출량 평가기법.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제11호, pp. 939-47.
 한정상, 한규상, 김창길, 김남중, 한 찬 (1994). “제주도

- 지하수자원의 최적 개발가능량.” **한국지하수환경학회지**, 한국지하수토양환경학회, 제1권, 제1호, pp. 33-50.
- 홍성훈, 한수영, 박남식 (2003). “해안지역의 지하수 개발가능량 평가.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제23권, 제3B호, pp. 201-207.
- 홍성훈, B.N. Kumar, 박남식 (2004). “해안지역 지하수 개발을 위한 최적모델의 검증.” **대한토목학회 학술발표대회 논문집**, 대한토목학회, 제1권, 제B호, pp. 881-886.
- 홍성훈, 박남식 (2005). “해안지역 지하수 최적개발모델의 민감도 분석.” **한국수자원학회 학술발표대회 논문집**, 한국수자원학회, 제1권, 제1호, pp. 250.
- 황세호, 신제현, 길준호, 박윤성, 이상규, 송무영 (2003). “영광지역 해수침투 평가를 위한 중성자검층의 적용.” **한국지하수토양환경학회 추계학술대회 발표집**, 한국지하수토양환경학회, pp. 258-262.
- 황세호 (2004). “물리탐사법을 이용한 연안 대수층의 수질 특성 평가 및 활용.” **해안지역 지하수의 관리 기술 심포지엄 자료집**, 동아대학교, pp. 1-18.
- Cheng, A.H.D., Halhal, D., Naji, A., and Ouazar, D. (2000). “Pumping optimization in saltwater-intruded coastal aquifers.” *Water Resources Research*, Vol. 36, No. 8, pp. 2155-2165.
- Golden Software Inc. (2002). *Grapher version 4.0*, Golden Software Inc.
- Huyakorn, P.S., Wu, Y.S., and Park, N.S. (1996). “Multiphase approach to the numerical solution of a sharp interface saltwater intrusion problem.” *Water Resources Research*, Vol. 32, No.1, pp. 93-102.
- Hong, S.H., Song, S.H., Bae, S.K., Park, N. (2004). “Verification and Validation of an Optimization Model for Groundwater Development in Coastal Areas.” *Groundwater and saline intrusion - Selected papers from the 18th Salt Water Intrusion Meeting, 18 SWIM*, Cartagena, Spain, pp. 77-90.
- Park, C.-H. and Aral, M.M. (2004). “Multi-objective optimization of pumping rates and well placement in coastal aquifers.” *Journal of Hydrology*, Vol. 290, pp. 80-99.
- Park, N.S., Hong, S.H., Shim, M.G., Han, S.Y., and Bae, S.K. (2003). “Optimization of Ground Water Withdrawal in Coastal Regions.” *Proceeding of SWICA-M3*, Yucatan, Mexico, CD

(논문번호:07-64/접수:2007.07.11/심사완료:2007.07.30)