

해안지역 지하수의 지속적 확보방안

Strategy for the Sustainable Groundwater Development in Coastal Area

○ 홍성훈¹⁾, 박남식²⁾, B.N. Kumar³⁾, 한수영⁴⁾
Hong Sung Hun, Park Nam Sik, B.N Kumar, Soo Young Han

요 지

국내 수자원의 지역적 불균형으로 가뭄 시 해안 지역은 제한급수지역의 대부분을 차지하였다(건교부, 2001). 또한 해안지역의 평균 상수도 보급률은 40%대로서 전국 평균 87.1%(환경부, 2001)의 절반 정도이다. 실제로 해안지역의 지하수 이용량은 전국 지하수 이용량 약 31억 m^3 /년(수자원공사, 2002)의 약 21%를 차지하고 있지만, 1인당 지하수 이용량은 전국 평균 65 m^3 의 4배에 달하는 것으로 조사된 바가 있다(홍성훈, 2003). 즉, 용수공급원의 부족으로 해안지역에서는 지하수에 대한 의존도가 높으며, 이로 인해 해안 지역에서 무분별한 지하수 개발과 그로 인한 해수침입 등의 환경 장애와 더불어 폐공 발생수가 증가하고 있는 실정이다.

따라서, 이런 문제점들과 해안지역을 고려한 지하수의 지속적 확보가 절실히 필요하다. 국외 연구동향을 보면 밀도류나 해수침투와 같은 해안지역 특성을 고려한 지하수 최적개발 모델이 개발 또는 적용되어지고 있다. 하지만 해안지역 지하수 개발 및 관리에서 요구하는 다양한 충족조건 대신 하나의 목적함수(예를 들어 최적 양수량, 최적 비용 등)만을 고려하고 있다. 그렇지만 실제적인 문제에서는 어느 위치에서 얼마만큼 개발되어야 하는지를 고려해야만 한다. 따라서 본 연구에서는 관정의 최적 개발량과 최적 위치라는 두개의 최적해를 고려할 수 있는 최적 양수모델을 제시하고, 실험실 수리모형에서의 검증을 소개하고자 한다. 또한 해안 지하수의 지속적 확보를 위한 방안을 제시하고자 한다.

핵심용어 : 해안지하수, 지속적 확보, 최적 개발량, 최적 위치, 수리모형,

1. 서론

우리나라는 3면이 바다이며, 국토의 약 70%가 산지이다. 즉, 지하수 개발은 지역과 지질의 특성에 따라 그 방법을 달리해야 한다. 우리나라 수자원 정책을 살펴보면 인구가 밀집된 대도시 위주로 수립되었기 때문에 해안 및 산지 등의 낙후지역은 급수율이 약 40%대에 불과하다. 이는 7개 특광역시 평균 급수율인 98.2%(환경부, 2001)나 전국 평균 급수율인 87.1%에 비하여 매우 낮은 수준이다. 이로 인해 해안지역 1인당 지하수 이용량(약 261 m^3 /인)은 전국 평균(65 m^3 /인)의 4배로서 지하수자원에 대한 의존도가 높다. 또한 가뭄 시에는 제한급수지역이 대부분 해안 지역에서 발생하였고, 근자에는 무분별한 지하수 개발로 인해 염도 증가가 원인인 폐공이 증가하고 있는 실정이다(홍성훈, 2003).

따라서 이러한 지역에 대한 물 공급을 위해서는 지역적 특성을 고려한 지하수의 개발이 필요하다. 다시 말하면 지하수 개발로 인해 발생하는 해수침투 현상, 담수와 해수의 밀도 차이로 인한 지하수의 수리학적 거동 등 해안지역의 지역적 특성을 고려해야 한다.

본 연구에서는 해안지역의 지역적 특성을 고려한 지하수 적정개발량 평가기술을 개발하였다. 이 평가 기술에 대한 수리모형 검증과 해안지하수의 지속적 확보를 위한 4단계 방안을 제시하려고 한다.

2. 해안지역의 지하수 현황 및 개발의 필요성

해안지역의 총 인구는 약 250만명이다(홍성훈, 2003). 즉 해안지역 읍, 면의 수는 전국 1423개(행자부, 2001)의 읍, 면의 1/4로서, 약 23%가 해안을 끼고 있다(표 1). 1인당 지하수 이용량을 살펴보면 261 m^3 으로 전

1) 정회원 • 동아대학교 토목공학과 박사수료 • 공학석사(E-mail:wghsh72@smail.donga.ac.kr, Tel:+82-51-200-5743)

2) 정회원 • 동아대학교 토목공학과 교수 • 공학박사(E-mail:nspark@mail.donga.ac.kr, Tel:+82-51-200-7629)

3) 동아대학교 토목공학과 박사후 과정(E-mail:nagendra@smail.donga.ac.kr, Tel:+82-51-200-5743)

4) 정회원 • 동아대학교 토목공학과 석사과정(E-mail:frogman@smaild.donga.ac.kr, Tel:+82-51-200-5743)

표 1. 해안지역 현황

해안지역	행정현황		인구 수 약 250만명
	21개시, 29개군, 322개 읍, 면		
도서지역	개소	면적(km ²)	87만명
	3,170	3,786	

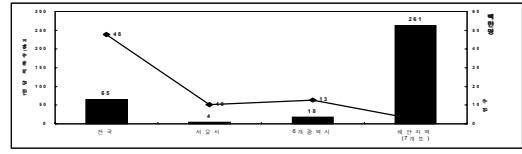


그림 1. 1인당 지하수 이용량 비교

국 평균 65m³의 4배에 달한다(그림 1). 즉, 용수공급원의 부족으로 인해 지하수자원에 대한 의존도가 높으며, 이로 인해 해안지역에서 무분별한 지하수개발과 더불어 해수침입 등의 환경 장애가 발생할 가능성이 높은 것으로 추정된다.

3. 해안지역 가용 수자원량

해안 유출량은 기존의 하천기저유출을 통해서 제시된 국내 지하수 함양량 평가에서 누락된 수문순환 성분인 해안으로의 기저유출량을 평가할 수 있는 자료이다. 각 권역별 해안 유출량 결과 및 한강 유역을 제외한 4대강 유역의 하천기저유출(박창근, 1996a, b)을 표 2에 제시하였다. 여기서, 지하수 이용량은 제외되어있다. 이 두 자료를 이용하여 국내 지하수 함양량 평가의 정확도 제고 및 해안지역 가용수자원량 평가를 수행하였다.

표 2. 해안유출량 평가를 고려한 지하수 함양량

	낙동강 권역(유역)	영산강·섬진강 권역(유역)	금강 권역(유역)
해안 유출량(억m ³ /년)	10.6~11.6	5.2~6.2	1.1~1.2
해안유출량/강수량(%)	2.93~3.20	2.11~2.48	0.57~0.64
기저 유출량(억m ³ /년)	(28.3)	(3.2~5.9)	(15.2)
기저유출량/강수량(%)	(10.2)	(7.1~8.4)	(12.2)
지하수 함양량 (억m ³ /년)	38.9~39.9	8.4~12.1	16.3~16.4
지하수 함양율	13.13~13.4	9.21~10.88	12.77~12.84

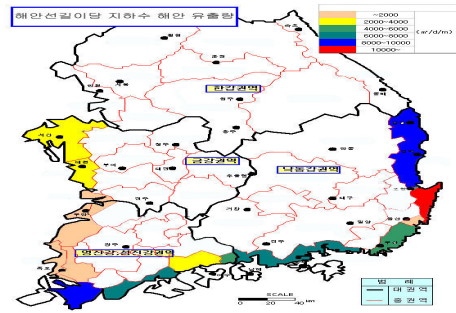


그림 2. 권역별해안 유출량

3. 해안지역 지하수 최적 양수모델

국내 해안지역은 안정적인 수자원 확보에 대한 문제성을 가지고 있다. 따라서 해안지역이라는 지역적 특성을 고려한 지하수의 지속적 확보는 절실히 필요하다. 즉, 지하수 개발 및 관리에 대한 동시적 접근이 요구되고 있다. 최적 모델들은 고려되는 문제의 최적해를 구하기 위해 적합한 모의모델과, 최적화 모델로 구성된다. 모의모델은 대상 문제의 특성 및 종류에 따라 선택된다. 그리고 최적화 모델은 모의 모델의 수치적, 수학적 특성 또는 문제의 해결방법에 따라 선택된다.

표 3. 해수침투 관련 최적화 연구(2000년 이후)

최적화 방법	결정변수	저자, 국가	년도
유전자 방법	양수량	Cheng 외, 미국	2000
Outer approx. method	양수량	Papadopoulou외, 미국	2000
Bundle trust method	순 이익	Gordon 외	2000
유전자 방법	건설 비용	Mundzir, 캐나다	2001
선형계획법	비용	Hailu, 미국	2002
유전자 방법	이익과 비용	Benhachmi외, 모로코	2003
유전자 방법	양수량	Benhachmi외, 모로코	2003
응답함수법	양수량	Motz 외, 미국	2003
유전자 방법 등	-	Peralta, 미국	2003
유전자 방법	비용	Silva 외, 포르투갈	2003
응답함수법	양수량	Zhou 외, 중국	2003

SIOP은 정상류 흐름에 대하여 해안지역 지하수 개발의 수량, 수질, 지하수위 강하, 염수면 상승 등의 장애요인을 최소화하면서 지속적인 지하수 개발량을 산정할 수 있다. 또한 SIOP은 국외 타 연구(표 3)보다 포괄적이고 일반적인 문제를 포함한다. 즉 양수량 또는 관정의 위치 선정에서 선택의 여지가 있는 경우에도 체계적인 방법으로 최적해를 도출할 수 있는 모델이다.

4. 모델의 수리모형 검증

병렬유전자 방법	양수량과 관정위치 해수침투의 제어	Park 외, 한국	2003
----------	-----------------------	------------	------

4.1 실험실 수리모형

해수침투 실험실 수리모형은 가로 2.0m, 세로 1.6m, 높이

0.6m으로 3차원 실험이 가능하다. (그림 3, 4).

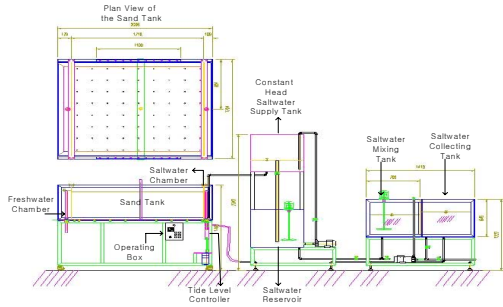


그림 3. 해수침투 수리모형(도면)



그림 4. 해수침투 수리모형(사진)

4.2 해수침투 실험

해안지하수 최적 양수모델을 상기 3차원 해수침투 실험실 수리모형에 적용하였다. 첫 번째로 담수조와 해수조에 고정수두 경계조건을 부여하였다. 두 수조의 수위차는 4cm이고, 해수의 비중은 1.08이다. 해수침투의 최종 도달 위치에 대한 수치 결과와 실험 결과는 각각 담수조로부터 0.898m, 0.9m로 관측되었으며, 경계면의 위상도 잘 일치하는 것을 볼 수 있다(그림 5, 6).

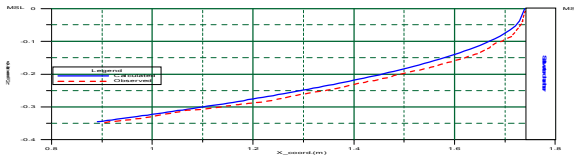


그림 5. 고정수두 실험 결과



그림 6. 고정수두 실험 사진

그리고 해안지역의 대표적인 환경장애인 경계면 상승 현상에 대한 실험을 수행하였다. 관정의 위치는 $x=1.41m$ 이고 해수조로부터는 약 34cm 정도의 거리이다. 그리고 지표로부터 약 5.545cm가 관입되어 스크린을 통해 대수층 내 지하수를 초당 2.18cc/sec로 양수하고 있는 상태이다. 수두차이 및 해수의 비중은 고정수두 조건일 때와 동일하다. 해수면 거동에 대한 결과는 잘 일치하는 것을 볼 수 있다(그림 7, 8).

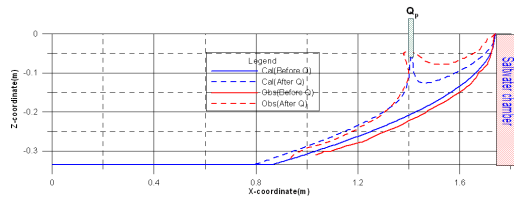


그림 7. 경계면 상승 실험 결과



그림 8. 경계면 상승 실험 사진

경계면 상승 현상 외에 문제가 될 수 있는 것은 해안으로부터 일정거리에 떨어진 곳에서 양수를 하더라도 그 양수에 의해 경계면이 내륙쪽으로 이동할 수 있다. 따라서 이번 실험에서는 경계면 상승 실험의 거리보다 85cm 정도 내륙지역인 $x=56cm$ 지점에 관정을 설치하고 초당 2.27cc/sec의 유량으로 양수를 하였다. 해수침투의 도달위치는 수치해의 경우 1.095m, 실험은 1.06m를 나타냈다(그림 9).

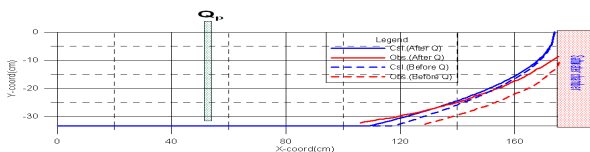


그림 9. 경계면 측면 침투 실험

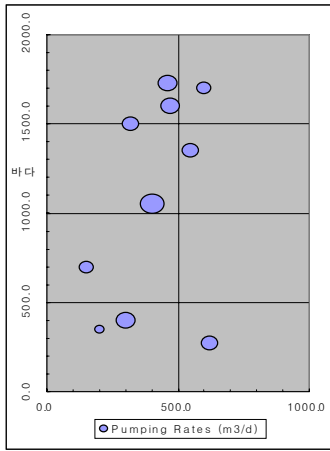


그림 10. 관정 분포(개발전)

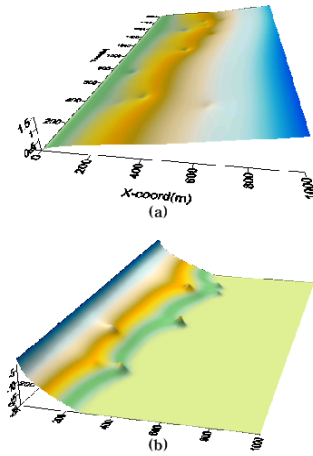


그림 11 수두분포(a)와 해수상승추 분포(b)

5. 평가모델의 2차원 수치 검증

최적 개발량 평가 모델의 사용 범위를 소개하기 위하여 우리나라 동해안 유역에서 발견될 수 있는 특성을 가진 가상유역에 적용하였다. 너비가 2km, 길이가 1km인 해안 유역에 10개의 지하수 관정이 개발되어 있다(표 4.29, 그림 4.38). 유역의 왼쪽 경계에 해안선이 위치하고, 오른쪽 경계를 통하여 담수가 유입되고 있다. 대수층의 두께는 20m, 투수계수가 30m/d 이다. 이 유역에서 다음과 같은 3 종류의 지하수 개발 시나리오가 요구되고 있다.

- (1) 사전에 결정된 지점에서의 최적 양수량 평가
- (2) 악 영향을 최소화하며 필요한 양수량을 확보할 수 있는 최적 지점 평가

(3) 주어진 상황에서 양수량과 관정 위치의 최적 평가

여기서는 본 연구에서 개발된 최적모델을 이용하여 상기 시나리오에 대한 적용 예를 소개한다. 그림 10~11은 개발 전 평형 상태를 나타낸다. 유역 전체 총 양수량은 1,200m³/d이다. 그림 12는 사전에 결정된 지점(3개의 신규 관정)에서 최적 양수량 평가 시나리오에 대한 결과이다. 평가모델은 추가 확보가능한 양수량을 280m³/d로 평가하였다. 여기서 본 모델이 제시하는 것은 악 영향을 최소화하면서 신규 관정의 양수량을 계량적으로 제시한다는 것이다. 그림 13은 악 영향을 최소화하며 필요한 양수량(3개 관정에서 각각 60m³/d의씩)을 확보할 수 있는 최적 지점을 평가하는 경우이다. 그림 14는 주어진 상황에서 양수량과 관정 위치의 최적 평가 문제이다. 결과로써 100m³/d 추가 개발을 확보할 수 있었다. 그림 15는 주입정을 고려한 양수정의 최적 평가이다. 총 양수량은 480m³/d로 100m³/d가 증가하였지만, 주입정에 필요한 70m³/d를 고려하면 순수하게 추가 확보된 양수량은 30m³/d임을 알 수 있다.

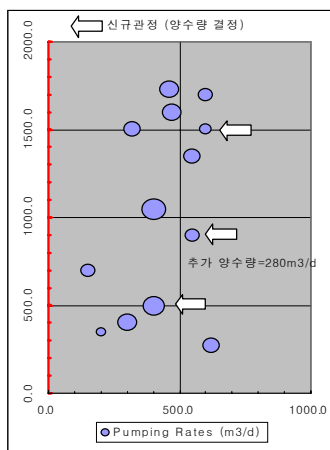


그림 12. 시나리오 1

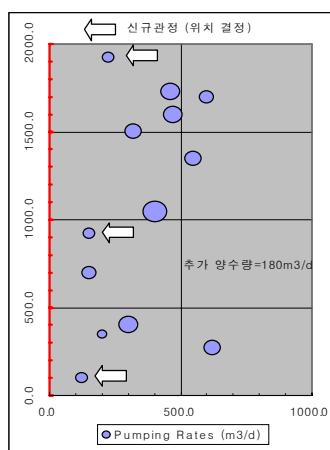


그림 13. 시나리오 2

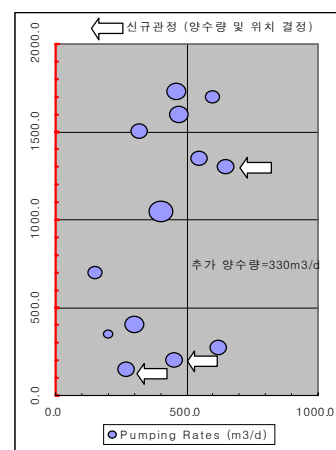


그림 14. 시나리오 3

6. 결론

우리나라 해안지역의 수자원 현황은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 내륙 지역에 비하여 수자원 보급률이 현저히 낮다

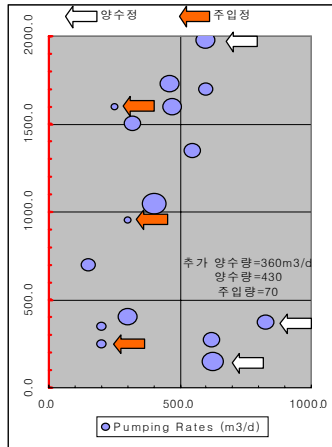


그림 15. 주입정 고려

양을 산정하는데 평가모델이 이용될 수 있을 것이다. 그리고 지하댐의 규모와 적지선정에 대한 설계를 위해서는 확보할 수 있는 지하수자원량을 추정하는데 1장에서 언급된 가용수자원량 평가기법이 이용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 지하댐 건설 이후 지하댐 내 저류되는 지하수자원을 양수하기 위한 관정의 위치 및 양수량 설계와 해수침투 제어에도 최적양수모델이 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

요약하건데, 1단계 최종 연구결과인 해안지역 적정개발 평가시스템을 이용한 해안지역 지하수의 지속적 확보 방안으로 다음과 같은 4가지 단계별 접근 방안을 제시하고자 한다.

- 1) 첫째 단계로 양수 관정의 최적 분포를 통하여 지하수 확보량을 증대시킨다.
- 2) 둘째 단계로 해수빼기를 제어한다. 해수 빼기는 담수의 주입 또는 해수의 양수를 통하여 제어될 수 있으며 이를 통하여 해수 오염을 방지하며 지하수를 추가 확보할 수 있다.
- 3) 셋째 단계로 잉여 강수의 인공함양 방법이 있다. 우수기에 발생하는 잉여강수를 대수층에 저장하였다가 갈수기에 활용하는 방법이다.
- 4) 넷째 단계로 지하댐을 이용한다. 해안으로 유출되는 지하수를 차단하여 지하수 활용도를 극대화하는 방법이다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 건설교통부, 2001. 7., **수자원장기종합계획**.
2. 박남식, 홍성훈, 심명근(2003), 유전자 방법과 병렬처리를 이용한 해안지하수 최적 양수량 결정 모형 개발, 대한토목학회 논문집, 23권, 5B호, pp 397-403
3. 박창근(1996a) 우리나라 지하수 개발가능량 추정 : 1. 개념 정립과 기법의 개발, **한국지하수토양환경학회 논문집**, 한국지하수토양환경학회, 제 3권, 제 1호, pp. 15-20.
4. 박창근(1996b) 우리나라 지하수 개발가능량 추정 : 2. 5대강 유역에의 적용, **한국지하수토양환경학회 논문집**, 한국지하수토양환경학회, 제 3권, 제 1호, pp. 21-26.
5. 환경부, **상수도통계**, 2001.
6. 한국수자원공사, 2002, **지하수세상**, <http://groundwater.kowaco.or.kr/>.
7. 홍성훈, 한수영, 박남식(2003), 해안지역의 지하수 개발가능량 평가, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 23권, 3B호, pp. 201-207.
8. 행정자치부, 2001, 2002, **통계연보(통권 제4,5호)**