

# 해안지역 지하수 최적개발 모델의 민감도 분석

## Sensitivity Analysis for Optimization Model in Coastal Area

홍성훈<sup>1)</sup>, 박남식<sup>2)</sup>  
Sung-Hun Hong, Namsik Park

### 요 지

해안지역 지하수 개발에 있어 이익을 최대화하는 동시에 개발로 인한 부정적 영향을 최소화하는 4단계 확보방안이 제시되었다(박남식 등, 2004). 4단계 확보 방안 중 처음 3단계 방안에 대한 의사 결정 지원 도구 역할을 할 수 있는 해안지하수 최적개발 모델이 개발되었다(박남식 등, 2003, 홍성훈, 2004). 개발된 모델은 대상 관정의 양수량과 위치에 대한 최적해 뿐만이 아니라 해수침투를 방지 및 제어에 대하여서도 최적화가 가능하다. 본 연구에서는 개발된 모델의 민감도 분석 결과를 다루고 있다. 민감도 분석의 목적은 불확실성을 내포하고 있는 대수층의 주요 매개변수, 경계조건 등에 의해 야기될 수 있는 모델의 불확실성을 정량화하는 것이다(Anderson 등, 1992). 따라서 민감도 분석은 모델의 특성에 대한 이해뿐만이 아니라 모델에 있어 매개변수들의 영향 및 거동을 고찰하는데 중요한 연구이다. 구축된 최적개발 모델을 이용하여 수리전도도, 함양율, 대수층 두께와 같은 주요 매개변수들이 최적양수량 그리고 관정의 최적위치에 미치는 영향을 고찰하였다. 그 결과 회수율은 함양율 증가에 따라 증가하는데, 높은 수리전도도에서는 함양율과 선형관계를, 낮은 수리전도도에서는 비선형관계를 보였다. 관정의 최적위치는 수리전도도에 가장 민감하였으며, 함양율 증가에 따라 해안으로 이동하였다. 마지막으로 최적개발량과 최적위치를 동시에 고려할 경우 최적개발량만을 고려한 경우보다 회수율이 향상되었다.

**핵심용어 :** 해안지역, 4단계 확보방안, 최적개발 모델, 민감도 분석, 최적 개발량, 최적 위치

## 1. 서론

낮은 상수도 보급률과 높은 지하수 의존도 등 해안지역의 현 문제점들을 해결하고, 해안지역의 지하수 관리 및 개발에 있어 효율적이고 합리적인 접근을 위하여 해안지역 지하수의 지속적 확보 방안이 제시되었다(박남식 등, 2004). 그리고 확보 방안과 더불어 이를 위한 해안지하수 최적개발 모델이 제시되었다(박남식 등, 2003, 홍성훈, 2004).

일반적으로 수치 모델을 개발할 때, 모델의 완성도를 위하여 코드에 대한 검증, 모델 결과의 검증 및 검증 등이 작업은 꼭 필요하다(Anderson 등, 1992). 제시된 최적개발 모델은 해안지하수 흐름 모델과 최적화 기법으로 구성되는데, 흐름 모델은 여러 가지 경우에 대하여 해석해 및 다른 모형 결과들과 비교되며 코드에 대한 검증이 이루어졌다(Park 등, 1991, 1993). 최적화 기법으로 사용된 유전자 방법 역시 검증되었다(Goldberg, 1987). 그리고 수치검증 및 수리모형을 이용한 실험검정도 이루어졌다(Park 등, 2004, Hong 등, 2004, 홍성훈, 2004).

1) 정회원·동아대학교 건설기술연구소 특별연구원·공학박사(E-mail:wghsh72@donga.ac.kr, Tel:+82-51-200-5743)

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

본 연구에서는 완성도가 제고된 모델의 현장적용 이전에 현장 적용에 있어 제기되는 불확실성에 대한 분석을 위해 민감도 분석을 수행하였다. 민감도 분석의 목적은 불확실성을 내포하고 있는 대수층의 주요 매개변수, 경계조건 등에 의해 야기될 수 있는 모델의 불확실성을 정량화하는 것으로 대상 모델의 특성에 대한 이해뿐만 아니라 모델 결과에 미치는 매개변수들의 영향 및 예측 결과의 거동을 고찰하는데 중요한 연구이다. Tran(2004)은 몇 가지 주요 매개변수를 이용하여 해수침투 거리의 반응을 고찰은 하였지만, 최적개발 모델이 아닌 해안지하수 흐름 모델(SHARP)에 국한된 연구였다.

본 연구에서는 구축된 최적개발 모델을 이용하여 주요 매개변수들에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 매개변수들은 해안지하수 최적 관리 및 개발과 관련된 중요한 영향 인자들을 선정하였다. 대수층의 투수계수, 함양율, 대수층 두께의 불확실성이 최적 양수량, 관정의 최적 위치 그리고 목적함수에 미치는 영향을 분석하였다. 주요 매개변수들의 범위는 현실적인 조건을 고려하기 위하여 다양한 지하수 조사보고서(한국수자원공사, 1998, 2000, 2002, 농업기반공사, 2003, 한수영, 2003)를 토대로 결정되었다. 본 연구를 통하여 주요 매개변수들이 해안지하수 개발 및 관리를 위해 개발된 최적개발 모델의 결과에 미치는 영향을 제시하고자 한다.

## 2. 최적개발량 평가기술

해안지역의 지하수 개발로 인한 부정적 영향(그림 1)을 최소화하고 지하수 개발로 인해 발생하는 편익을 최대화하면서 해안지하수의 지속적 확보를 위한 4단계 확보방안이 수립되었으며 이 중 첫 3단계 확보 방안의 결정수단으로 해안지하수 최적개발량 평가기술이 개발되었다(박남식 등, 2004). 또한 1,2단계 확보방안에 따라 최적개발 모델을 현장에 적용할 때 고려되어야 하는 문제 유형을 제시하였다(표 1)

표 1. 문제의 유형

Stage 1 : Optimal Arrangement of Pumping Wells			
	A priori Determined Variables	Decision Variables	Optimization
CAT1A	Location	Freshwater Pumping Rate	Minimize Adverse Impacts
CAT1B	Pumping Rate	Location	Maximize Pumping Rate
CAT2A	-	Location & Freshwater Pumping Rate	Maximize Pumping Rate while Minimizing Adverse Impacts
Stage 2 : Control of Saltwater Wedge			
	A priori Determined Variables	Decision Variables	Optimization
CAT2B	-	Locations & Freshwater Pumping Rate or Injecting Rate	Maximize Pumping Rate while Minimizing Adverse Impacts
CAT4	-	Locations & Freshwater Pumping Rate or Saltwater Pumping Rate	Maximize Pumping Rate while Minimizing Adverse Impacts

개발된 최적개발 모델은 대상 관정에의 최적개발량과 대상 관정의 최적위치라는 두 가지 종속변수를 고려할 뿐만 아니라 해수침투 제어와 해안지하수 환경에 미칠 수 있는 악영향을 최소화할 수 있다(그림 1).

## 3. 최적개발 모델의 민감도 분석

### 3.1 주요 매개변수들

선정된 주요 매개변수들은 수리전도도 ( $K$ ), 강수량 대비 함양량으로 정의되는 함양율( $Q_{rech}$ ), 대수층 두께( $B$ )이다(그림 2). 주요 최적개발 모델 결과 값들은 최적개발량 대비 함양량으로 정의되는 회수율( $Q_{opt}/Q_{rech}$ ), 관정의 최적위치( $L_{opt}$ ), 목적함수( $B.F$ )이다. 강수량은 국내 연평균 강수량(1,283mm/year)이 사용되었으며, 수리전도도의 범위 및 함양율과 대수층 두께는 여러 조사보고서를 근거로 설정되었다(한국수자원공사, 1998, 2000, 2002, 농업기반공사, 2003, 한수영, 2003)

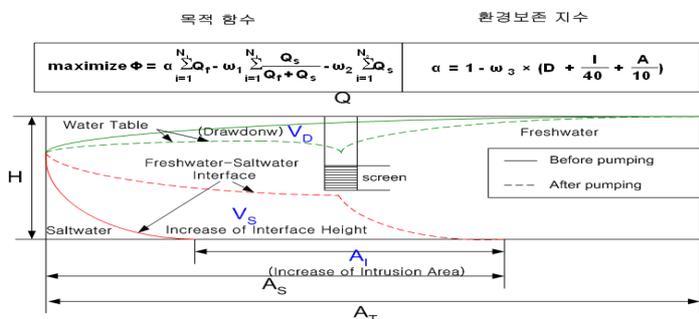


그림 1. 최적개발 모델의 목적함수 및 환경보존 지수

적함수( $B.F$ )이다. 강수량은 국내 연평균 강수량(1,283mm/year)이 사용되었으며, 수리전도도의 범위 및 함양율과 대수층 두께는 여러 조사보고서를 근거로 설정되었다(한국수자원공사, 1998, 2000, 2002, 농업기반공사, 2003, 한수영, 2003)

사, 2003, 한수영, 2003).

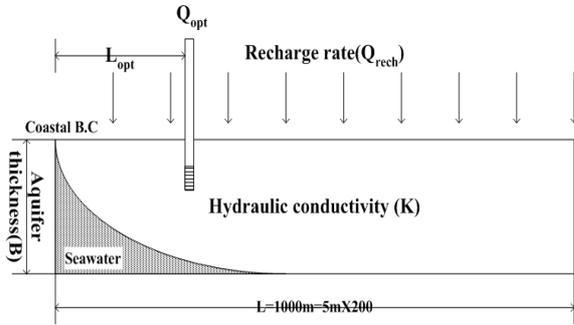


그림 2. 선정된 주요 매개변수

표 2. 조사된 주요 매개변수들

지역	충적층 두께 (m)		수리전도도 (m/sec)		해안유출량 / 강수량 (%)	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
낙동강 권역	5.2	15.2	15.2	344.23	2.93	3.2
영산·섬진강 권역	6	20	30.77	248.48	2.11	2.48
금강 권역	5.7	9.9	10.77	24.56	0.57	0.64
부안군	3.6	30	16	28	-	-

표 1에서 제시된 문제 유형 중에서 단계 1에 대하여 최적개발 모델 결과 값들의 민감도 분석이 수행되었다.

### 3.2 민감도 분석 결과

#### 3.2.1 최적개발량에 미치는 영향

본 절에서는 표 1에 제시된 단계 1 중에서 위치가 지정된 관정에서 함양율, 수리전도도 그리고 대수층 두께의 변화에 따른 회수율의 거동을 살펴보았다. 그림 3과 4는 위치가 정해진 임의의 관정에서 함양율과 수리전도도에 대한 회수율의 민감도 분석결과이다. 함양율의 범위는 연 평균 강수량의 1%~10%, 수리전도도의 범위는 10m/일~1000m/일, 그리고 대수층 두께는 20m로 설정되었다..

수리전도도가 크고, 함양율이 적은 대수층의 경우에 회수율은 낮다. 그리고 수리전도도가 낮은 대수층의 경우 회수율은 함양율과 비선형 관계를 갖으며, 수리전도도가 높은 대수층의 경우는 함양율과 선형 관계를 가진다(그림 3). 또한 회수율은 함양율이 적은 지역에서 수리전도도의 증가에 따라 빠르게 감소한다. 그리고 함양율이 큰 지역에서의 회수율은 수리전도도와 선형 관계를 가진다(그림 4).

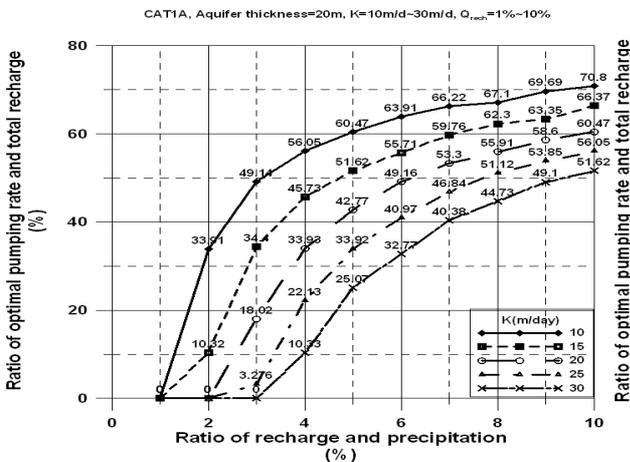


그림 3. 함양율에 따른 회수율 결과들

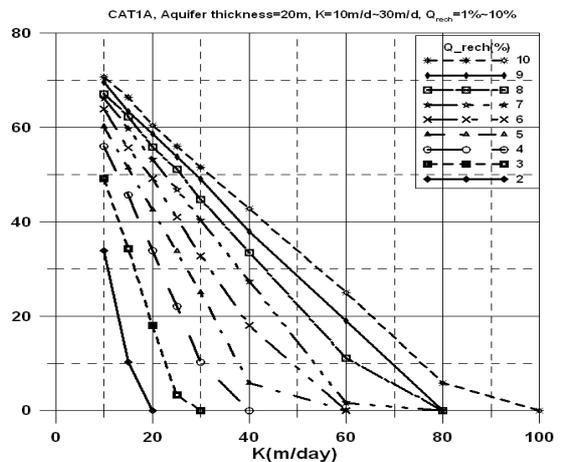


그림 4. 수리전도도에 따른 회수율 변화

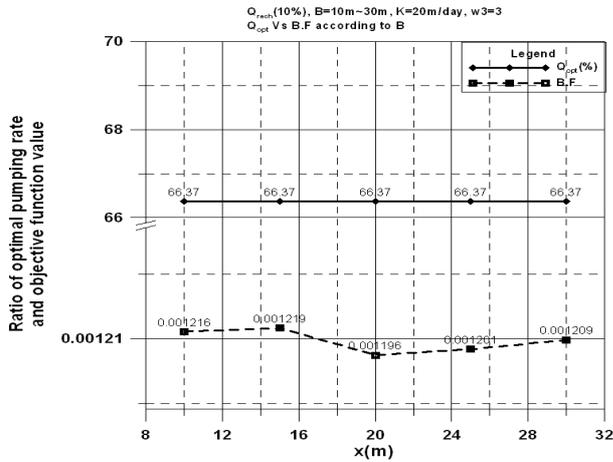


그림 5. 대수층 두께에 따른 회수율의 변화

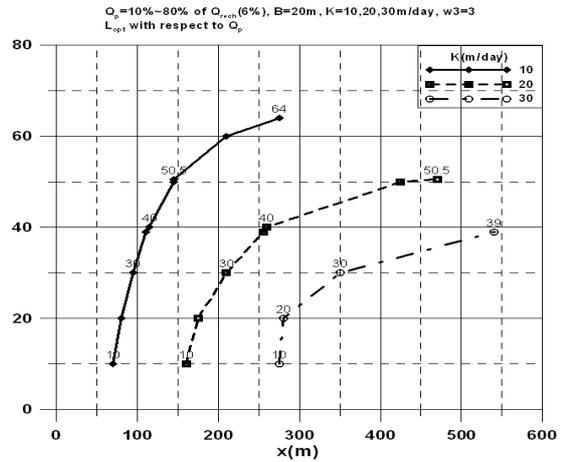


그림 6. 수리전도도와 임의의 양수량에 따른 관정의 최적위치 변화

그림 5는 대수층 두께에 따른 회수율과 목적함수의 변화에 대한 조사 결과를 도시하였다. 조사 결과 대수층 두께는 회수율에 영향을 미치지 않았으며, 단지 목적함수에만 변화를 주었다. 따라서 회수율은 대수층 두께 변화에 민감하지 않았다.

### 3.2.2 관정의 최적위치에 미치는 영향

본 절에서는 수리전도도와 임의의 양수량에 따른 관정의 최적위치 거동을 살펴보았다. 그림 6은 수리전도도와 임의의 양수량에 대한 관정의 최적위치 결과이다. 함양율은 6%이고, 양수량은 함양율의 10% ~ 80%로 가정되었으며, 수리전도도의 범위는 10m/일 ~ 30m/일, 그리고 대수층 두께는 20m로 설정되었다.

### 3.2.3 최적개발량과 관정의 최적위치

본 절에서는 수리전도도와 함양율에 따른 두께의 최적해(최적개발량과 최적위치) 변화를 동시에 조사하였다. 회수율과 함양율의 관계는 최적개발량만을 고려한 결과와 유사한 관계를 보였다. 하지만 회수율은 최적개발량과 관정의 최적위치를 고려한 경우가 큰 것을 알 수 있었다(그림 3과 그림 6).

## 4. 결과 요약 및 결론

최적개발 모델에 대한 민감도 분석 결과를 요약하면 다음과 같다.

#### ▶ 회수율은

- 함양율 증가에 따라 증가하며 높은 수리전도도에서는 함양율과 선형 관계를 가지며, 낮은 수리전도도에서는 함양율과 비선형 관계를 가진다.

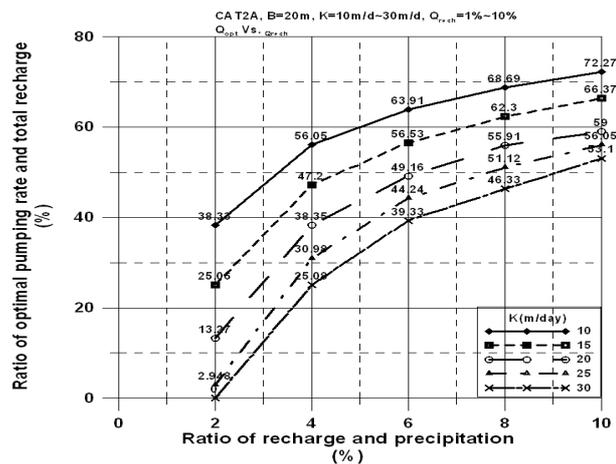


그림 6. 함양율과 수리전도도에 따른 회수율의 변화

- 수리전도도 증가에 따라 감소하며, 낮은 함양율에서 수리전도도 증가에 더욱 민감하다.
- 대수층 두께에 민감하지 않다.
- ▶ 관정의 최적위치는
  - 수리전도도에 가장 민감하다.(수리전도도 증가에 따라 내륙으로 이동)
  - 함양율 증가에 따라 해안으로 이동한다.
- ▶ 최적개발량과 관정의 위치에서는
  - 최적개발량과 관정의 최적위치를 동시에 고려하는 것이 최적개발량만을 고려할 경우보다 회수율이 향상된다.

## 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호:3-3-2)에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. 박남식, 홍성훈, Kumar Nagendra(2004). 해안지역 지하수의 지속적 확보방안, 해안지역 지하수의 관리기술 심포지엄 자료집, pp. 104-127.
2. 박남식, 홍성훈, 심명근(2003). 유전자 방법과 병렬처리를 이용한 해안지하수 최적 양수량 결정 모형 개발, 대한토목학회 논문집, 제23권, 5B호, pp. 397-403.
3. 홍성훈(2004). Optimization Model for Development and Management of Groundwater in Coastal Areas, 박사학위 논문, 동아대학교
4. Anderson, M.P. and W.W. Woessner(1992). Applied Groundwater Modeling Simulation of Flow and Advective Transport, pp. 246-252. Academic Press, San Diego.
5. Park, N.S., Y.S. Wu, and P.S. Huyakorn (1991). Saltwater-Intrusion Model for Layered Aquifer System, prepared for Southwest Florida Water Management District, Florida.
6. Park, N.S., P.S. Huyakorn, Y.S. Wu, and M.D. Barcelo (1993). A sharp-interface saltwater intrusion code for layered aquifer systems, Proceedings of ASCE International Symposium on Engineering Hydrology, San Francisco, USA. pp. 1159-1164.
7. Goldberg, D.E., "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning". Addison-Wesley., 1997
8. Park, N.S., S.H. Hong, B.N. Kumar, J.H. Kim, H.D Kim(2004), EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS ON GROUNDWATER FLOW IN COASTAL AQUIFERS, Proceeding of the 18th Salt Water Intrusion Meeting, Cartagena, Spain
9. Hong, S.H, N.S. Park, S.K. Bae, S.H. Song(2004), Verification and Validation of an Optimization Model for Groundwater Development in Coastal Area, Proceeding of the 18th Salt Water Intrusion Meeting, Cartagena, Spain
10. Tran, T.M., "Multi-Objective Management of Saltwater Intrusion in Groundwater: Optimization under Uncertainty", DUP Science, The Netherlands, 2004
11. 한국수자원공사 (1998), 영산강-섬진강 권역 광역지하수 조사보고서
12. 한국수자원공사 (2000), 낙동강 권역 광역지하수 조사 연구
13. 한국수자원공사 (2002), 금강 권역 광역지하수 조사 연구
14. 농업기반공사(2003), 지하수관리조사 보고서(부안군:부동지구)
15. 한수영(2003), 지하수 해안유출량 평가기법, 석사학위 논문, 동아대학교