

지하댐에 의한 추가 수자원 확보 가능량 평가

○박 창 근*, 신 윤 창**, 박 재 현***

1. 서 론

최근 국가에서는 수자원 개발의 다변화를 모색하게 되었고, 이에 따라서 최근 새로이 주목을 받고 있는 것이 지하수이다. 우리나라 지하수관리기본계획(건교부, 1996)에 의하면 지하수유출을 이루고 있는 하천 유량을 지하수 개발가능량으로 정의하고 우리나라의 경우 연간 약 133억 m^3 으로 추정되고 있다. 이러한 지하수를 이용하는 방안중 하나가 지하댐의 건설에 의한 수자원 확보이다. 지하댐은 하천의 하류부분에 기반암까지 차수벽을 설치하여 바다로 무효로 방류되는 지하수자원을 차수벽 상류지역의 대수층에 저류 시켜 집수정을 이용하여 수자원을 개발·이용하는 것이다.

이러한 지하댐은 더 많은 용수를 확보하기 위하여 일반적으로 해안에 가깝게 건설된다. 그러나 지하댐이 해안에 가깝게 건설될 경우 지하수의 집중양수에 의한 능동적 염수침입의 원인이 되고, 따라서 갈수시 심각한 염수침입 문제가 대두되게 된다.

실례로 우리나라 최초로 생활용수를 확보하기 위해 지하댐을 건설한 속초시는 지하댐의 건설로 만성적인 용수부족 문제를 상당부분 해소하였으나, 기초적인 수문조사와 염수침입에 대한 검토가 충분치 못하였기 때문에 갈수시 염분농도의 상승으로 인한 취수활동의 중단이 발생하고 있다.

따라서 본 논문에서는 염수침입에 대한 기초적인 개념을 소개하고, 지하댐의 건설로 인한 추가 개발 가능한 수자원량을 평가·모의하기 위하여 속초시 쌍천 지하댐 유역을 대상 구간으로 설정하여 수치모형 실험을 수행하였다. 아울러 수치모형실험을 통하여 염수침입으로부터 적절한 대응이 가능한 지하댐의 위치를 결정하였다.

2. 염수침입

평상시 해안지역 대수층은 담수와 염수가 경계를 이루며 평형상태를 유지하고 있다. 염수침입(seawater intrusion)이란 수동·능동적 원인에 의하여 평형상태를 유지하던 대수층의 하부로 염수가 침입하여 들어오는 현상을 말한다. 수동적 염수침입의 원인으로는 일부 담수의 유출특성 변화에 기인하고 이러한 경우에 염수침입은 새로운 유출조건에서 평형상태에 도달할 때까지 육지를 향해 느리게 진행된다. 대수층을 파괴·오염시켜 심각한 문제를 야기시키는 능동적 염수침입은 주로 수위강하를 형성하는 지하수의 집중양수가 원인이 된다. 능동적 염수침입은 빠른 속도로 진행되며 수리경사가 낮은 지점 즉, 집중양수 지점에 도달할 때까지 멈추지 않는다. 그림 1은 일반적인 자연적 지하수 유출조건을 갖는 담수와 염수의 평형상태(a), 일반적인 지하수면 저하에 기인한 수동적 염수침입(b), 대수층에서의 집중양수로 인한 능동적 염수침입(c)을 차례로 나타내고 있다.

* 관동대학교 건설환경시스템공학부 부교수·공학박사

** 관동대학교 토목공학과·공학석사

*** 인제대학교 토목공학과 조교수·공학박사

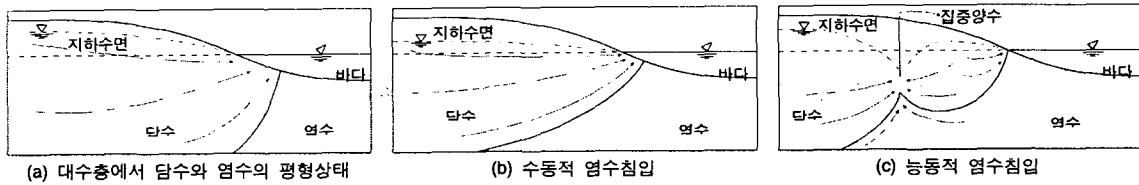


그림 1. 염수침입의 형태

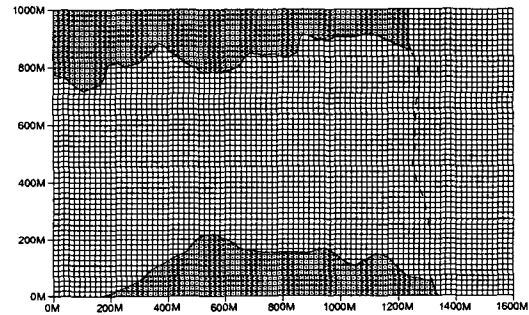
3. 수치모형실험

실험에 사용된 모형은 대표적인 2-D 염수침입해석모형인 USGS의 SUTRA 모형을 이용하였다.

쌍천의 전 유역(65km²)중 쌍천 하류구간의 지하댐 건설지역을 중심으로 동서방향으로 1600m와 남북방향으로 1000m를 모의 대상 구간으로 설정하여 20m의 등간격으로 격자를 구성하였고, 격자 구성지역 1.6km²중에 바다를 제외한 면적은 1.274km²이다. 모의 대상지역의 남쪽과 북쪽은 편마암류 및 화강암류 지층으로서 저투수성 구간이고 서쪽은 쌍천의 상류측으로서 담수 유입 지역이며, 동쪽은 해안으로서 담수와 염수의 경계를 이루고 있다. 또한 해안으로부터 약 200m 떨어진 곳에 차수벽이 설치되어 있고, 차수벽의 서쪽에 4개의 집중정을 설치하여 취수를 하고 있다.



(a) 쌍천 유역도



(b) 격자망 구성도

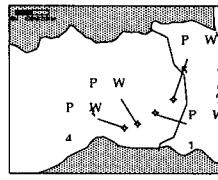
그림 2. 실험 대상 유역 및 격자망 구성

표 1. 실험조건

조 건		적 용 값	
경계조건	수 두	서쪽 5.0m	동쪽 0.0m
	농 도	0mg/l	37,500mg/l
초기조건	각 지점의 수위·농도	갈수기시 등지하수위도를 토대로 구성	
매개변수	대수층의 수리전도도	최소 8.4×10^{-4} m/sec	최대 1.7×10^{-3} m/sec
	차수벽의 수리전도도	1.0×10^{-9} m/sec	8.4×10^{-4} m/sec
	공극률	0.18	
	대수층의 두께	25m	

실험에 필요한 경계조건은 경계부분의 수리수두와 농도, 초기조건은 대수층에서의 초기농도와 각 지점의 지하수위가 필요하며, 그 외에 계산에 사용되는 매개변수로는 대수층의 공극률과 대수층의 두께, 그리고 대수층의 수리전도도 등이 있다. 실험에 적용된 값들은 『속초시 쌍천취수원 개발에 따른 수리지질연구 용역 보고서(1998)』와 『속초시 도문동 쌍천 취수원 개발사업 전면책임 감리용역 보고서(1998)』에 기초사된 자료를 이용하였고, 격자구성지역의 북쪽과 남쪽의 저투수성 구간은 경계처리를 하지 않고 투수계수를 높여서 흐름을 일어나지 않도록 설정하였다. 또한 집수정의 양수량을 이용하여 수위강하(drawdown)량을 산정하고, 도출된 수위를 토대로 등지하수위를 이루는 영역을 설정하여 집수정 주위의 수두로 사용하였다. 위의 표 1은 실험에 사용된 조건 및 적용값을 나타낸 것이고, 아래 표 2는 각 집수정별 조건 및 위치를 요약한 것이다.

표 2. 각 집수정별 조건 및 위치

집수정 번호	양수량 (m ³ /day)	영향원 반경 (m)	적용 수위 (m)	집수정 위치
1번 집수정	3,300	146	-1.396	
3번 집수정	7,200	148	-5.137	
4번 집수정	5,100	144	-3.115	
5번 집수정	3,300	146	-1.396	

4. 차수벽의 설치에 의한 추가 확보 가능 수량 산정 실험

4.1 실험방법

지하법에 의한 수자원의 추가 확보 가능량을 산정하려면 지하수 함양량에 대한 논의가 선행되어야 하겠지만, 연구기간의 부족으로 지하수 함양량이 충분하다는 가정하에서 염수침입의 영향만을 고려하는 것에 범위를 한정하였다. 실험은 차수벽의 설치시와 미설치시의 두 가지 Case로 수행하였고, 두 가지 Case의 염수침입 양상을 살펴보기 위하여 염수침입의 문제가 심각히 대두되는 갈수기를 모의하였다. 각 Case는 차수벽의 영향을 고려하지 않는 경우에는 5, 15, 20, 25일, 차수벽의 영향을 고려한 경우에는 40, 50, 60, 70일의 무강우 지속 조건으로 모의하였다. 여기서 무강우 지속일수란 유역내의 증발산량보다 적은 량의 강우는 무강우로 취급한 일수를 말한다.

4.2 실험결과

실험결과 차수벽이 없는 조건하에서는 5일이 지났을 때 해안에서 가장 가까운 5번 집수정의 염소이온농도가 음용수 수질기준인 150mg/l이상 상승하였고, 15, 20, 25일 이후에 해안에서 가까운 순서대로 집수정을 사용할 수 없었다. 반면에 차수벽을 고려한 실험에서는 50일 이전에는 모든 집수정에서 취수를 계속 할 수 있었고, 50일 후에 5번과 3번 집수정을, 60일 이후에는 4번 집수정을, 70일 이후에는 모든 집수정을 사용할 수 없게 되었다. 염수침입은 차수벽을 설치한 경우에 설치하지 않은 경우보다 상당히 천천히 진행되는 양상을 나타내었고, 이것은 차수벽이 지하수를 저류시켜 수자원을 확보하는 역할 외에 염수침입을 방어함으로써 대수층의 오염을 지연·저감하는 역할도 담당하고 있다는 것을 간접적으로 증명하고 있다. 추가 확보 가능 수량은 지하법이 없는 경우를 기준으로 70일 무강우 지속조건에서 약 725,000m³로 나타났다. 그림 3은 각각의 경우 시간에 따른 염분농도분포를 나타낸 것이다.

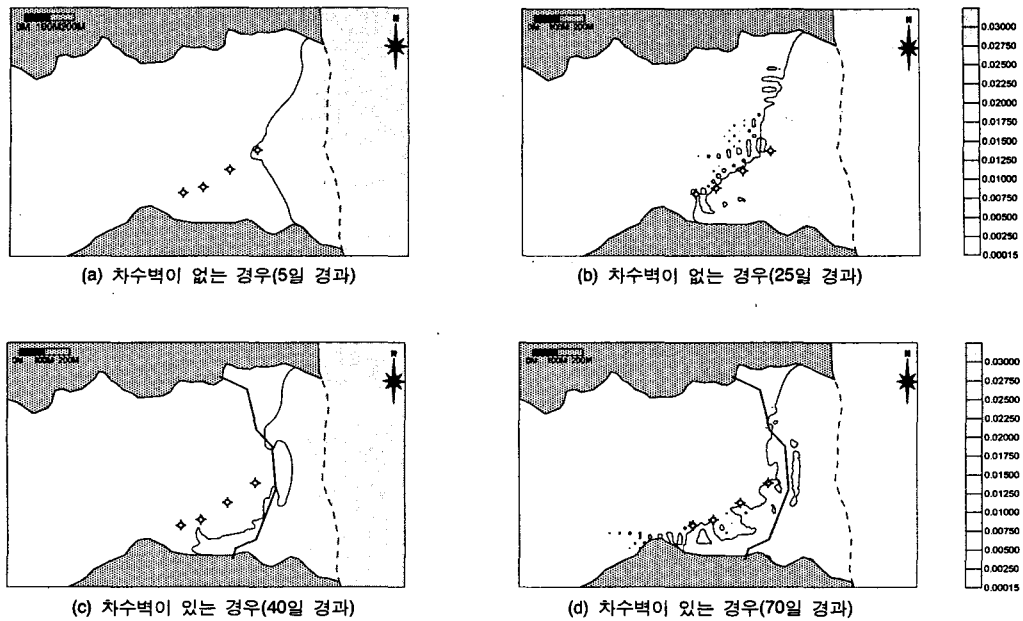


그림 3. 시간에 따른 염분농도분포

4.3 적용성 검토

실험의 결과를 속초시 대포정수장의 운영실적과 비교하여 적용성을 검토하였다. 속초시의 증발산량은 3mm/day이고, 속초시에서 지하담이 건설된 후 3mm/day 이하의 강우를 무시한 무강우가 지속된 일수가 비교적 긴 경우는 1999. 11. 17 ~ 2000. 1. 4일까지 48일간과 2001. 4. 12 ~ 2001. 6. 10일 까지 60일간의 두 번을 들 수 있다. 그러나 1999. 11. 17 ~ 2000. 1. 4일의 자료는 차수벽 설치 구간중 양양구간의 일부가 미시공상태이고, 또한 무강우 지속일수가 검정을 위해 사용되기에는 짧기 때문에 2001년의 자료만 사용하여 적용성을 검토하였다.

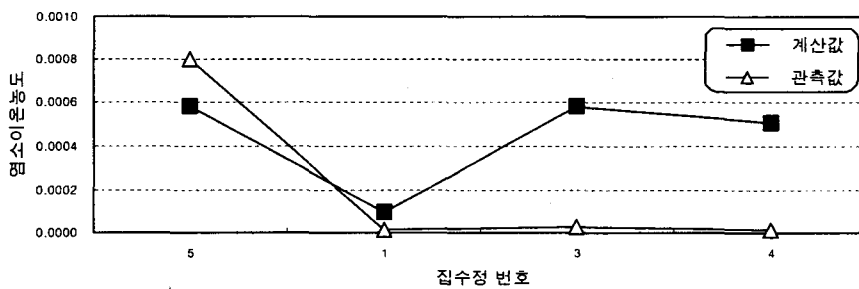


그림 4. 각 집수정에서의 농도비교(60일 경과)

두 자료를 비교한 결과 대체적으로 계산값이 약간 크게 나타나는 경향이 있는데, 그 이유는 실험에서 경계조건으로 산정한 집수정 주위에서의 수두값은 일정한 유량을 채수하는 것으로 가정하여 계산하였으나, 실제로는 염소이온농도의 증가와 감소에 따라 취수를 중단했기 때문인 것으로 사료된다. 적용성을 검토할 경우 많은 자료를 통한 검증이 이루어져야 타당하겠지만 누적된 수문 자료가 부족하고, 지하수의 염분농도를 관측한 기간이 짧기 때문에 충분한 검증을 할 수 없었다.

5. 차수벽의 위치·형태의 결정

5.1 실험방법

그림 5는 차수벽의 설치하지 않았을 때와 설치하였을 때 지하수의 유속분포를 나타낸 것이다. 유속분포를 그림 3의 염분농도분포와 비교하여 살펴보면 염수가 유속이 빠른 쪽으로 급속히 침입한다는 것을 볼 수 있다. 다시 말하면 구조물을 이용하여 유속을 줄이거나, 유속의 방향을 조절하여 염수의 침입경로를 보다 길게 바꿀 수 있다면 염수침입의 영향을 줄일 수 있을 것이다.

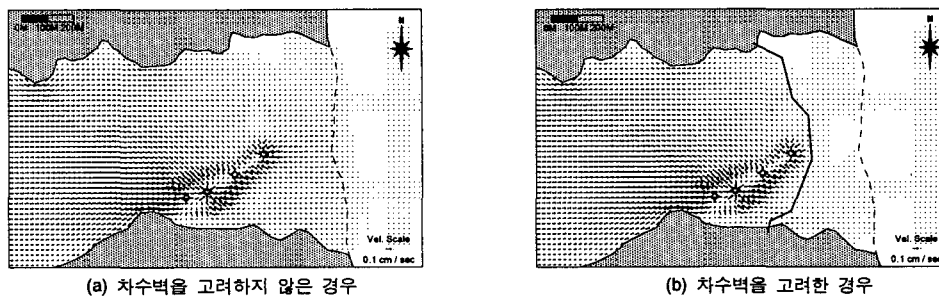


그림 5. 차수벽의 유무에 따른 지하수의 유속분포도

두번째 실험인 차수벽의 형태 및 위치가 염수침입에 미치는 영향과 염수침입에 보다 효과적인 대처가 가능한 차수벽의 위치·형태를 살펴보기 위하여 먼저 유속분포를 분석하고, 그것을 토대로 집수정 부근의 유속을 감소시킬 수 있다고 추정되는 차수벽의 위치·형태로 3개의 안을 결정하여 염수침입에 대한 양상을 모의한 후 현재안과 비교하였다. 각각의 Case에서 차수벽의 길이는 현재 시공되어 있는 상태보다 짧거나 비슷한 길이로 결정하였고, 나머지 경계 및 초기조건 등은 첫 번째 실험에 사용된 값을 사용하였다. 실험은 50일부터 5일 간격으로 80일까지 무강우 지속일수를 증가시키며 진행하였고, 표 3에서 각 Case에 사용된 차수벽의 형태 및 위치를 나타내었다. 여기서 Case 1은 현재안을 나타낸다.

표 3. 차수벽의 위치 및 형태

Case 1	Case 2
<ul style="list-style-type: none"> ■ 길이 : 893m ■ 형태 현재안과 동일 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 길이 : 836m ■ 형태 ⑤번과 ⑥번을 ④번과 직선으로 남쪽의 불투수층까지 연장
Case 3	Case 4
<ul style="list-style-type: none"> ■ 길이 : 881m ■ 형태 ③번과 ④번을 북동쪽으로 이동하고 ⑤번과 ⑥번은 Case 2와 동일 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 길이 : 907m ■ 형태 ⑤번과 ⑥번을 해안쪽으로 더 가깝게 이동

5.2 실험결과

실험 결과 차수벽의 형태와 위치에 따라 유속분포가 그림 6과 같이 나타났다. 각 Case별 유속 분포를 살펴보면 Case 2와 Case 4가 차수벽의 바깥쪽, 즉 동쪽의 유속이 가장 작게 나타났다. 그러나 Case 4의 경우 차수벽이 너무 해안에 가깝게 접근했기 때문에 차수벽 안쪽의 유속이 상당히 빨라지는 것을 알 수 있었다. 그리고 이러한 유속의 변화는 실험 결과 얻어진 염수침입의 양상과 잘 부합하는 것을 알 수 있다.

염수침입의 양상을 살펴보면 Case 2와 Case 3은 지하댐의 길이가 각각 57m와 12m가 줄었지만 Case 2는 65일 후에, 그리고 Case 3은 50일 후에 5번 집수정이 음용수 수질기준을 넘었고 80일 이후에도 다른 집수정들은 사용이 가능하였다. Case 4의 경우 차수벽의 길이가 14m 증가하였고, 55일 후에 5번 집수정을, 그리고 80일 후에는 3번과 4번 집수정의 사용이 불가능하게 되었다. 따라서 속초시 쌍천 하류부의 경우에는 Case 2의 형태가 차수벽의 길이도 836m로 가장 짧아서 시공비의 부담이 적고, 염수의 침입도 가장 효과적으로 대처할 수 있는 것으로 나타나 경제적으로나 활용 면에서 가장 적합한 형태라고 판단된다. 다음의 그림 7은 시간에 따른 각 Case별 농도 분포를 비교한 것이다. Case 1의 경우 첫 번째 실험과 결과가 동일하기 때문에 생략하였다.

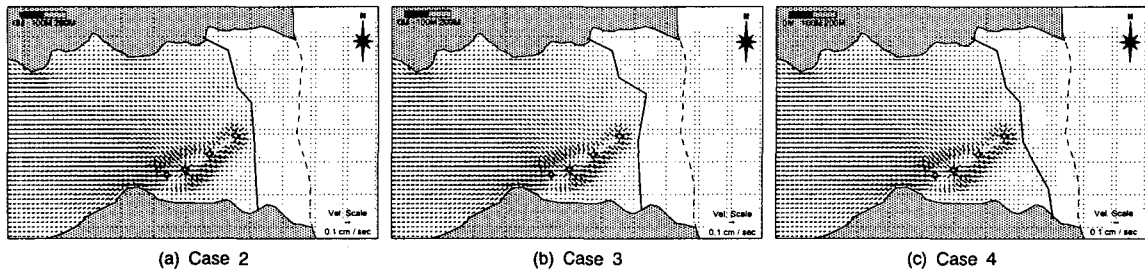


그림 6. 각 Case의 유속분포도

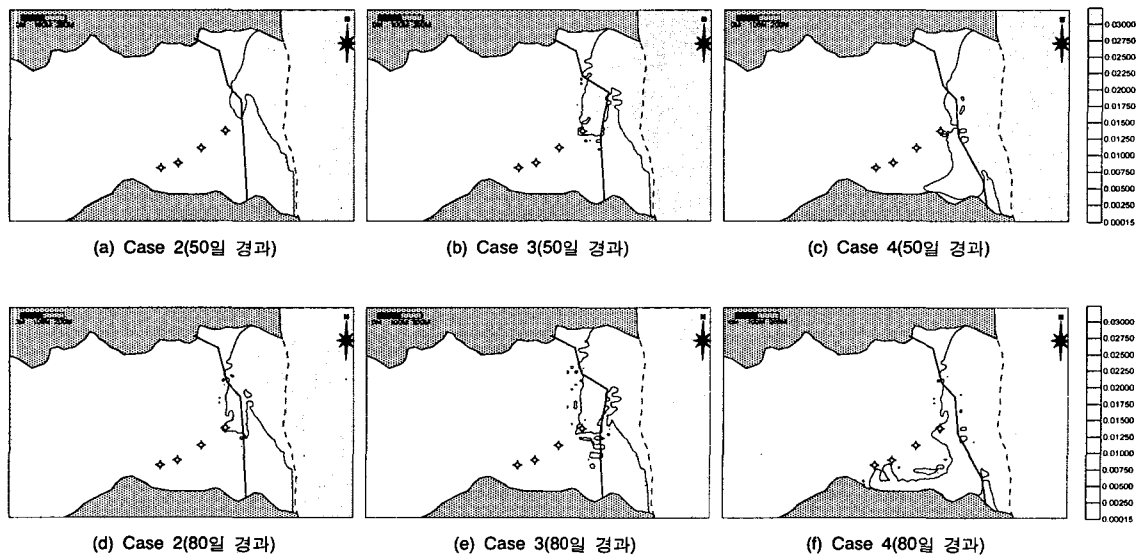


그림 7. 시간에 따른 각 Case별 염분농도분포

6. 결 론

본 논문에서는 USGS의 SUTRA Model을 이용한 수치모형실험을 통해 염수침입의 양상과 그 정도를 살펴봄으로써 지하댐 건설을 통한 추가로 확보 가능한 수자원량을 개략적으로 산정하였다. 아울러 차수벽을 이용한 효율적인 염수침입 대처 방안을 모색해 보았다.

실험을 통해 도출된 결론을 다음과 같이 요약할 수 있다. 첫째, 시간에 따른 염수침입의 경로와 농도 분포 등 염수침입 양상을 살펴봄으로써 염수침입 문제에 대한 적절한 해결책이 필요함을 알 수 있었다. 둘째, 차수벽의 존재 유무에 따른 염수침입의 양상을 살펴봄으로써 차수벽을 건설함으로써 추가 확보 가능한 수자원량을 개략적으로 산정하였다. 셋째, 수치모형실험을 통해 차수벽의 위치 및 형태를 결정하여 염수침입에 효과적인 대처가 가능하도록 하였다.

이상 살펴본 바와 같이 지하댐의 건설은 지하수를 이용하여 수자원을 개발하는데 있어서 하나의 훌륭한 방법이 될 수 있다. 그러나 충분한 사전조사 없이 지하댐을 무분별하게 건설한다면, 경제적인 측면이나 활용에 있어서 비효율적인 개발이 될 것은 자명한 일이다. 따라서 지하댐을 건설하기 전에는 지하수 함양량을 산정하거나 수치모형실험시 적용성을 검토할 수 있는 기초자료로 활용할 수 있도록 충분한 수문자료를 확보하여야 한다. 만약 기존에 누적된 수문자료가 미흡하다면 건설전 충분한 관측을 통해서 확보하여야 한다. 또한 그러한 수문자료를 통해 물수지 방법, 지하수 관리분석 방법, 해석적 방법, 기저유출 분석 방법 등을 이용하여 보다 정확한 지하수 함양량을 산정하여야 한다. 아울러 지하수 함양량의 산정에는 강우-유출모형과 지하수 유동해석을 연계한 수치모형실험도 필수 요소라 할 수 있다. 마지막으로 염수침입에 대한 영향을 고려하여 효율적인 지하댐의 위치 및 형태를 결정하여야 한다. 수문특성이나 지하수 함양량 등은 임의로 조절하는 것이 거의 불가능 하지만, 염수침입에 대한 영향 고려는 사전 모의 실험을 통해 구조물을 이용하여 염수침입에 효율적 대처가 가능하다는 점에서 가장 중요한 요소라고 할 수 있다.

향후 해안에서 가까운 지역의 지하수를 효율적으로 이용할 때에는 첫째, 염수침입에 대한 충분한 이해와 검토가 반드시 필요하고 둘째, 지하댐의 건설시 사전에 충분한 모의 실험을 통해 지하댐의 가장 효율적인 형태 및 위치를 결정하여야 하며 셋째, 지표수-지하수 연계운영과 같이 보다 효율적으로 수자원을 이용할 수 있는 새로운 시스템의 개발이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2002년 과학기술부 『21세기 프론티어 연구개발사업』 중 “수자원의 지속적 확보기술개발 사업”의 일환으로 이루어진 것이며, 이에 감사를 표합니다.

참고문헌

1. 신윤창, 해안지역에서 염수침입에 관한 연구, 석사학위논문, 2002.
2. 박창근, “지하수 개발가능량 산정기법 : 1. 개념정립과 기법개발”, 대한지하수환경학회지, 1996.
3. 건교부, “지하수관리 기본계획”, 1996.
4. 속초시, “속초시 쌍천취수원 개발에 따른 수리지질연구 용역 보고서”, 1998.
5. 속초시, “속초시 도문동 쌍천 취수원 개발사업 최종 보고서”, 1998.
6. 한정상과 한찬, 3차원 지하수모델과 응용, 박영사, 1999.
7. Fetter, C. W., Applied Hydrogeology, Prentice Hall, 1994.