

지하댐 운영시 발생하는 염수침입 저감기법에 관한 연구

윤상훈*, 박재현**, 박창근***

1. 서론

경제와 산업의 발전에 따라 도시화는 가속화되고 있으며 이로 인해 용수 수요는 지속적으로 증가하고 있다. 유엔에 의해 물부족 국으로 분류된 우리나라도 매년 인구증가와 도시화로 인한 용수부족으로 국지적인 제한 급수를 실시하는 등 점차 물 문제가 중요한 사회 문제로 떠오르고 있는 가운데 새로운 대체 용수원의 개발이 시급한 자원을 보다 효과적으로 사용하기 위한 하나의 방법으로 고안되어졌다. 지하댐은 지하수가 유동하는 대수층내에 인공적인 차수벽 구조물을 건설하여 유동하는 지하수를 지하 차수벽(Cutoff Wall)내에 저류시킨 후, 관정 등의 양수시설을 이용하여 취수 사용토록 하는 구조물로서 이의 효율적인 관리를 위해서는 유역내 지표·지하수문 특성, 대수층의 토질 특성, 대수층계의 수리지질 특성, 댐의 차수효과 등을 기본 설계단계부터 계획적으로 분석 검토하여야 한다. 이미 선진국에서는 지하수 자원에 대한 개발의 중요성을 인식하고 이의 효과적인 활용을 위하여 지역내에 저류되어 있는 지하수의 정성적, 정량적 분석을 통한 대수층 관리를 지속하여 왔다. 그러나 국내 대부분의 지하댐은 유역내 대수층의 특성을 완전히 파악하지 않은 상태에서 수요에 따라 과도하게 지하수를 양수 이용함에 의해 대수층의 파괴를 유발하거나 지반 침하, 차수벽의 기능저하 등이 발생되고 있다. 그리고 해안 접경 지역에 설치된 경우 해안 대수층이 평형상태에 있는 경우에는 담수(淡水)가 바다쪽으로 흐르지만 지하수의 이용이 급증하면서 담수(淡水)의 수두(水頭)가 감소함에 따라 흐름이 역전(逆轉)되어 염수(鹽水)가 담수층(淡水層) 내로 침입하게 된다. 이로 인해 지하수를 생활용수 뿐만 아니라 농업용수로도 사용할 수 없는 경우가 발생하게 된다. 본 연구대상 지역인 속초시 쌍천지하댐의 경우에도 해안선에서 불과 200m 떨어진 곳에 건설되어져 있고, 차수벽 설치시 기반암의 요철이 심하기 때문에 기반암과 차수벽사이에 공간이 존재하여 갈수시 염수침입의 문제가 상존하는 문제점을 안고 있다. 따라서 본 연구에서는 속초시 쌍천 지하댐 유역을 연구유역으로 선정하고 지하수내 염분의 이송·확산을 분석하는 2차원 유한요소법과 유한차분법이 적용된 SUTRA(Saturated- Unsaturated Transport) 수치모형을 이용하여 지하댐 운영시 발생하는 염수침입 특성을 분석하고, 이 자료를 토대로 인공함양(Artificial Recharging)시 물마루(Water Mound) 발생을 통한 염해저감 지하댐 운영 기법을 제안 하고자 한다.

2. 인공함양을 통한 염수침입 저감기법의 구상

연안지역에서 지하수를 집중 양수하게 되면 담수의 수위가 강하하여 압력수두가 낮아지게 된다. 담수의 압력이 감소하게 되면 담수층 아래에 염수층의 경계부는 염수침입으로 매우 빠르게 이동하며, 수리경사가 낮은 지점 즉, 집중 양수지점에 도달하기까지 정지하지 않는다. 이와 같이 본 연구에서는 지하댐 운영시 대수층의 수위 강하로 인한 염수침입 문제를 해결하고자 차수벽과 해안사이에 함양정(Recharging Well)을 설치하여 물마루 발생을 통해 대수층의 수위를 상승시켜 염수침입을 저감시키는 기법을 구상하였다.

3. 수치모형 실험

3.1 유역의 이산화

본 연구에서는 동서방향으로 2,000m, 남북방향으로 1,000m로 모의할 대상유역 안에서 격자를 구성할 구간을 설정하였다. 대수층은 동서로 약 1,750m정도로 설정하였으며 1,500m지점에 지하차수벽을 설치하고, 차수벽에서 상류쪽으로 250m, 해안쪽으로 150m 떨어진 곳에 집수정(Pumping Well)과 함양정을 각각 설치하였다. 그리고 설정한 구간에서 동서방향으로 50개와 남북방향으로 25개의 40m 등간격의 격자망을 구성하였다. 구성한 격자망에서 격자의 수는 1,250개, 격점의 수는 1,326개로 구성되었다. Fig. 3.1에 구성한 유한요소 격자망을 나타내었다.



Fig. 3.1 유한요소 격자망 구성도

- * 인제대학교 토목공학과 · 공학석사
- ** 인제대학교 토목공학과 조교수 · 공학박사
- *** 관동대학교 건설환경시스템공학부 부교수 · 공학박사

3.2 경계조건

본 실험에서 사용된 모형에서 필요한 경계조건으로는 수리수두와 농도이다. 격자구성지역의 서쪽은 하천의 상류부분으로 수리수두를 5m로 설정하고 농도는 담수이므로 0.0(kg-TDS/kg-fluid)으로 결정하였다. 또한 동쪽 지역은 해안이므로 수두를 평균해수면인 0.0m로 설정하였고, 농도는 염수의 농도인 0.0375(kg-TDS/kg-fluid)를 사용하였다.

3.3 초기조건 및 매개변수

계산에 필요한 매개변수로는 대수층의 공극률과 대수층의 두께, 그리고 대수층의 포화투수계수 등이 있다. 본 실험에 적용한 공극률은 0.35로 결정하였고, 최대 및 최소 포화투수계수는 각각 1.7×10^{-3} m/s 와 8.4×10^{-4} m/s 를 사용하였다. 또한, 대수층의 두께는 25m를 사용하였다. Table 3.1에 입력한 초기조건과 매개변수들을 나타내었다.

Table 3.1 Values of Parameters

Parameter	Value
Porosity	0.35
Saturated Permeability	Max. : 1.7×10^{-3} m/s
Coefficient of Aquifer	Min. : 8.4×10^{-4} m/s
Thickness of Aquifer	25m

3.4 수치모형 실험

모델링에 필요한 모든 입력변수를 고려하여 구성된 수치모델을 이용하여 수치모형 실험을 수행하였다. 수치모형 실험은 10,000 m³/day를 집수정에서 양수했을 경우 함양정에서의 함양율을 총 양수량의 1~10%까지 상승시켰을 때 각 경우에 대한 집수정에서의 염분농도 변화와 대수층의 지하수위 변화를 살펴보았다. 여기서 함양율이란 총 양수량에 대한 함양량의 비를 의미한다. 수치모형 실험의 조건은 함양정의 위치 변화와 차수벽의 차수효과 저감에 따른 경우로 나누어 수행하였다. Table 3.2에 수치모형 실험조건들을 나타내었다.

Table 3.2 Condition of Modeling

Classification	Location of Recharging Well (Distance from Cutoff Wall)	Permeability Coefficient of Cutoff Wall	Recharging Rate
Case I	No Recharging Well	$1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$ m/s	1~10%
Case II	50m		
Case III	100m		
Case IV	150m		

3.5 수치모형 실험결과

(1) Case I(함양정이 없을 경우)

인공함양 없이 집수정에서 양수만을 했을 경우 차수벽 뒤쪽의 대수층의 지하수위는 Fig. 3.2에서와 같이 해수면을 기준으로 0.19m정도 강하하였으며 양수를 시작한 날로부터 63일 경과 후 집수정의 염분농도는 Fig. 3.3에서와 같이 음용수 수질기준인 0.000250(kg-TDS/kg-fluid)을 초과하여 채수를 할 수가 없게 되었다. 그리고 차수벽의 차수효과가 저감됨에 따라 집수정에서의 염분농도 증가는 현저하게 차이가 났으며 Fig. 3.4에서 보는 것과 같이 차수벽의 투수계수가 $1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$ m/s 일 경우에는 63일 후 염분농도가 음용수 수질기준 이상으로 증가하였으며 $1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-5}$ m/s 일 때는 48일 후, 그리고 $1 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5}$ m/s 일 때는 27일 후 각각 음용수 수질기준 이상으로 증가하였다.

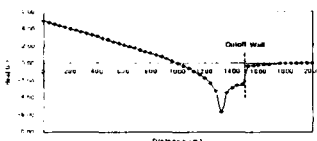


Fig. 3.2 함양율 0%일 때의 지하수위 변화

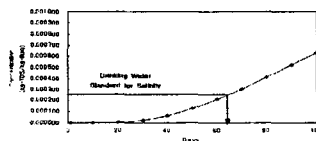


Fig. 3.3 함양율 0%일 때의 집수정에서의 염분농도 변화

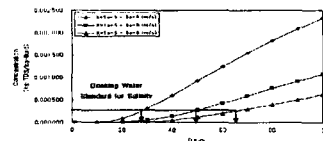


Fig. 3.4 차수벽 투수계수 변화에 따른 집수정에서의 염분농도 변화(함양율 0%)

(2) Case II(함양정을 차수벽으로부터 50m지점에 설치)

차수벽으로부터 50m지점에 함양정을 설치하고 함양을 시작하면서 차수벽 뒤쪽의 대수층 지하수위는 선형적 분포를 보이며 상승하였으며 함양율이 10%일 때 양수만을 했을 때의 지하수위보다 2.4%상승한 0.6m가 상승하는 결과를 보였다. Fig. 3.5에 함양율이 10%일 때의 지하수위 변화 특성을 나타내었다. 집수정에서의 염분농도는 50일 후 Fig. 3.6에서와 같이 함양율이 6%일 경우 감소율이 86%가 되었으며, 10%일 경우에는 감소율이 95%로 함양율이 1~6%까지는 감소율의 크기가 커지다가 6%이상부터는 감소율의 크기가 작아짐을 알 수 있었다. 함양을 시작하면서 함양율이 10%일 때 50일 후에는 Fig. 3.7에서와 같이 차수벽의 투수계수가 $1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$ m/s 일 경우 염분농도 감소율은 95%로 나타났으며 $1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-5}$ m/s 일 때는 89%, 그리고 $1 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5}$ m/s 일 때는 69%의 감소율을 보이는 것으로 같은 함양율일 경우 차수벽의 차수능력이 저

하됨에 따라 염분농도 감소율도 작아짐을 알 수 있었다.

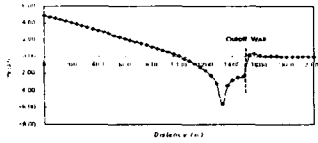


Fig. 3.5 함양율 10%일 때의 지하수위 변화

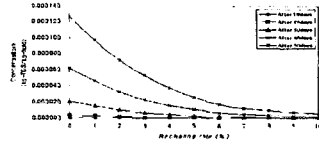


Fig. 3.6 함양율 변화에 따른 집수정에서의 염분농도 변화

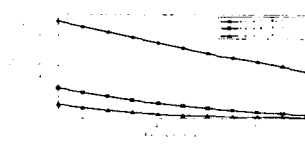


Fig. 3.7 차수벽 투수계수 변화에 따른 집수정에서의 염분농도 변화(50일 후)

(3) Case III(함양정을 차수벽으로부터 100m지점에 설치)

차수벽으로부터 100m지점에 함양정을 설치하고 함양을 시작하면서 차수벽 뒤쪽의 대수층 지하수위는 함양율이 10%일 때 양수만을 했을 때의 지하수위보다 1.8%상승한 0.46m가 상승하는 결과를 보였다. Fig. 3.8에 함양율이 10%일 때의 지하수위 변화 특성을 나타내었다. 집수정에서의 염분농도는 50일 후 Fig. 3.9에서와 같이 함양율이 6%일 경우 감소율이 78%가 되었으며, 10%일 경우에는 감소율이 85%로 함양율이 1~6%까지는 감소율의 크기가 커지다가 6%이상부터는 감소율의 크기가 작아짐을 알 수 있었다. 함양을 시작하면서 함양율이 10%일 때 50일 후에는 Fig. 3.10에서와 같이 차수벽의 투수계수가 $1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$ m/s 일 경우 염분농도 감소율은 85%로 나타났으며 $1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-5}$ m/s 일 때는 82%, 그리고 $1 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5}$ m/s 일 때는 52%의 감소율을 보이는 것으로 함양정이 차수벽으로부터 50m거리에 있을 때 보다 5~10%정도 낮은 감소율을 보였다.

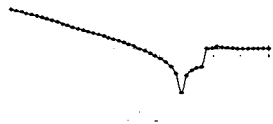


Fig. 3.8 함양율 10%일 때의 지하수위 변화

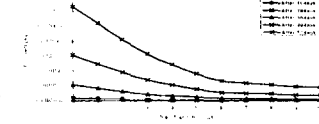


Fig. 3.9 함양율 변화에 따른 집수정에서의 염분농도 변화

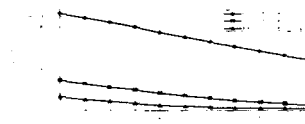


Fig. 3.10 차수벽 투수계수 변화에 따른 집수정에서의 염분농도 변화(50일 후)

(4) Case IV(함양정을 차수벽으로부터 150m지점에 설치)

차수벽으로부터 150m지점에 함양정을 설치하고 함양을 시작하면서 차수벽 뒤쪽의 대수층 지하수위는 함양율이 10%일 때 양수만을 했을 때의 지하수위보다 1.2%상승한 0.30m가 상승하는 결과를 보였다. Fig. 3.11에 함양율이 10%일 때의 지하수위 변화 특성을 나타내었다. 집수정에서의 염분농도는 50일 후 Fig. 3.12에서와 같이 함양율이 6%일 경우 감소율이 56%가 되었으며, 10%일 경우에는 감소율이 65%로 함양율이 1~6%까지는 감소율의 크기가 커지다가 6%이상부터는 감소율의 크기가 작아짐을 알 수 있었다. 함양을 시작하면서 함양율이 10%일 때 50일 후에는 Fig. 3.13에서와 같이 차수벽의 투수계수가 $1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$ m/s 일 경우 염분농도 감소율은 65%로 나타났으며 $1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-5}$ m/s 일 때는 60%, 그리고 $1 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5}$ m/s 일 때는 45%의 감소율을 보이는 것으로 함양정이 차수벽으로부터 50m거리에 있을 때 보다 20%정도, 100m 거리에 있을 때 보다 10%정도의 감소율이 저하됨을 보였다.

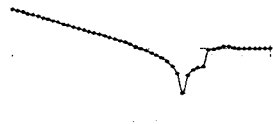


Fig. 3.11 함양율 10%일 때의 지하수위 변화

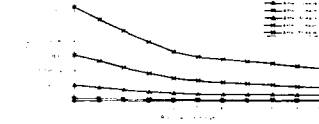


Fig. 3.12 함양율 변화에 따른 집수정에서의 염분농도 변화

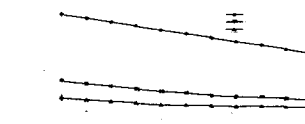


Fig. 3.13 차수벽 투수계수 변화에 따른 집수정에서의 염분농도 변화(50일 후)

4. 실험결과 및 고찰

수치모형 실험결과 함양정을 운영하지 않고 양수만을 했을 경우 차수벽 뒤쪽의 대수층의 지하수위는 해수면을 기준으로 0.19m정도 강하하였으며 양수를 시작한 날로부터 63일 경과 후 집수정의 염분농도가 음용수 수질기준인 0.000250(kg-TDS/kg-fluid)을 초과하여 채수를 할 수 없게 되었다. 그러나 함양정을 설치하고 함양을 시작하면서 집수정의 염분농도는 감소하였는데, 함양정의 거리가 차수벽으로부터 50m일 경우 집수정의 염분농도는 최대 95%, 100m일 경우는 85%, 그리고 150m일 경우는 76%가 감소하는 것을 알 수 있었다. Table 4.1과 Table 4.2에서 보는 바와 같이 함양정의 위치가 일정할 경우 차수벽의 투수계수가 10^{-6} m/s 일 때에는 투수계수가 10^{-5} m/s 일 때 보다 집수정에서의 염분농도 감소율이 20~30%정도 높음을 알 수 있다. 또한 차수효과가 일정할 경우 함양정의 위치가 차수벽으로부터 가장 가까운 50m지점에 있을 때 함양율에 따른 대수층의 지하수위 상승률은 100m와 150m지점에 있을 때 보다 높았으며, 이 때 집수정에서의 염분농도 감소율도 100m거리에 있을 경우 10%, 150m거리에 있을 경우보다 20%정도 염분농도 감소율이 높음을 알 수 있다. 그리고 차수벽의 투수계수가 10^{-6} m/s 일 경우 함양율을 6%로 했을 때 염분농도 감소율은 평균 73%정도였으며, 함양율을 10%로 했을 때에는 82%정도로 1~6%까지는 염분농도 감소율이 커지다가 6%이상부터는 감소율의 크기가 작아짐을 알 수 있었다. 그리고 함양율을 6%로 했을 경우 차수벽의 투수계수가 10^{-6} m/s 일 때 함양정의 거리가 차수벽으로부터 50~100m에서는 염분농도 감소율이 90~80%정도였으나 100m이상 떨어졌을 경우 염분농도 감소율이 55%정도로 현저히 감소하는 것을 알 수 있다. 마찬가지로 차수벽의 투수계수가 10^{-5} m/s 일 경우에도

함양정의 거리가 차수벽으로부터 100m이상부터는 염해저감 효과가 저하되는 것을 알 수 있다.

수치모형 실험결과 차수벽의 투수계수가 10^{-6} m/s 일 경우에도 염수침입이 발생하여 63일 후 집수정의 염분농도가 음용수기준인 0.000250(kg-TDS/kg-fluid)을 초과하여 채수를 할 수 없게 되었다. 그러나 함양정을 차수벽으로부터 50m지점에 설치하고 함양율을 6%로 해서 함양을 시작한지 50일 후 집수정의 염분농도는 0.000100(kg-TDS/kg-fluid)이하로 감소하였다. 이 결과로 지하댐 운영시 발생하는 염해저감 기법의 한 방안으로 함양정을 운영함으로써 염수침입에 대한 효율적인 대처가 가능함을 판단할 수 있었다.

Table 4.1 Result of Simulation at Recharging Rate 6% (After 50days)

Position of Recharging Well (m)	Permeability Coefficient (m/s)	Recharging Rate (%)	Salinity Reduced Rate at Pumping Well (%)
50	$1 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5}$	1.0	45
	$1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-5}$	1.3	69
	$1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$	1.5	86
100	$1 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5}$	0.6	39
	$1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-5}$	0.9	60
	$1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$	1.1	78
150	$1 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5}$	0.4	35
	$1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-5}$	0.6	47
	$1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$	0.7	56

Table 4.2 Result of Simulation at Recharging Rate 10% (After 50days)

Position of Recharging Well (m)	Permeability Coefficient (m/s)	Recharging Rate (%)	Salinity Reduced Rate at Pumping Well (%)
50	$1 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5}$	1.8	69
	$1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-5}$	2.2	89
	$1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$	2.4	95
100	$1 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5}$	1.3	52
	$1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-5}$	1.6	82
	$1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$	1.8	85
150	$1 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5}$	0.7	45
	$1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-5}$	1.0	60
	$1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$	1.2	65

5. 참고문헌

- 1) 한국수자원공사, "지하수 함양 및 활용증대방안 연구", 1999.
- 2) 국립환경연구원, "독일의 지하수 관리", WHO 지원 해외훈련 귀국보고서, 1993.
- 3) 신방웅, 김희성, "3차원 흐름모델을 이용한 지하댐의 차수특성 규명", 대한토목학회논문집, 1996, 제 16권, 제 3-1호, pp. 93~109.
- 4) 박승귀, "地 下 댐", 대한토목학회지, 1986. 8, 제34권, 제 4호, pp. 21~26.
- 5) 남기영, "화산암지역 지하수의 특징(제주도를 중심으로)", 국립지질조사소, 1996, 지질광산, 제 3호.
- 6) 강관원, "해안지하수의 특성에 관한 연구", 대한토목학회지, 1983, 제 19권, 제 3호, pp. 8~21.