

지하댐의 기능과 역할



박 창 근 |
관동대학교 토목공학과 교수
ckpark@kwandong.ac.kr



정 교 철 |
안동대학교 지구환경과학과 교수
jeong@andong.ac.kr



박 재 현 |
인제대학교 토목공학과 교수
jh-park@inje.ac.kr



부 성 안 |
농업기반공사 농어촌연구원 책임연구원
booh2700@karico.co.kr

나, 좁은 국토로 인한 댐 적지 부족과 댐에 의한 용수 공급의 한계, 지표수의 오염, 수물지의 생태계 파괴에 따른 환경오염 가속화 등으로 지표수 개발은 한계에 도달하고 있으며, 물 소비량은 급증하는 추세로 지하수자원의 효용가치는 점점 더 커지고 있다. 건교부 2004년도 지하수조사연보에 따르면, 우리나라의 연간 지하수 개발가능량은 116.7억 m^3 으로 수자원총량의 9%이고 지하수 이용량은 물 이용량의 11%, 지하수 개발가능량의 31%인 37억 m^3 (염지하수 제외)으로 개발가능성이 큰 자원이지만 아직도 미국, 대만, 프랑스, 일본보다 매우 적은 양을 사용하고 있는 실정이다(표 1).

우리나라의 연간 강수량은 1,283mm로써 세계의 연 평균 강수량 973mm보다 많은 편이나 연중 강수량의 2/3가 여름에 집중되어 내리며 하천의 경사가 급하여 지하에 충분히 저장되지 못하고 단기간에 많은 양이 바다로 유출되어 버리는 까닭에 가용 강수량이 매우 적다.

1936년 농업용수의 개발을 목적으로 한 최초의 소구경 시추 및 착정이 이루어진 이후, 국내에서의 본격적인 지하수 개발은 농업용수 공급을 목적으로 1960년대에 이루어진 충적층지하수 개발이며, 육지부에서는 1967년에 처음으로 경남 진례지구에서 암반지하수를 개발하였고, 2000년까지 1,077,697공에

1. 서언

우리나라는 물 공급을 주로 지표수에 의존하였으

표 1. 우리나라와 주요 외국에서의 지하수 사용량 비교

(unit: 100million m^3/y)

Item	Japan	U.S.A	Taiwan	France	R.O.Korea
Total available water(A)	4,200	63,980	900	4,400	1,267
Total use(B)	891	4,705	191	370	301
Groundwater use(C)	143	1,055	42	70	31
Ratio(C/B)(%)	16.0	22.4	22.0	18.9	10.3
FY, Year	2000	1995	1983	1981	2000

서 연간 약 3,096백만 m^3 을 개발하여 사용하고 있으나 산업구조의 급격한 변화와 경제의 고도 성장과 함께 생활 및 농·공업용수 수요의 급증으로 인해 지하수 개발이 더욱 증가하고 있다.

1980년대 중반부터 산업발전과 더불어 지표수가 오염되면서 충적층지하수 개발에서 암반지하수 개발로 전환되었다. 암반지하수 개발 초기에는 지표에서 100m 이내의 대수층을 개발 사용하였으나, 최근에는 물리탐사 기술의 비약적인 향상과 더불어 도입된 개발장비의 성능 향상으로 심도 300m 내외 혹은 그보다 더 깊은 곳에 형성된 대수층에서 지하수를 개발하고 있다. 또한 대용량의 용수를 취수하기 위하여 집수암거, 방사상집수정, 지하댐 등의 건설이 활발히 이루어졌으며, 최근에는 하천변의 충적대수층을 이용하여 풍수기에는 이곳에 저류하고 갈수기에는 이를 채수하여 안정적으로 이용하는 방법이 연구 개발되고 있다.

그러나 지역별 대수층 평가와 물수지 분석이 결여된 상태에서 행해지는 지하수 개발심도와 사용량의 증가로 인하여 대수층 파괴 및 수질오염 현상이 날로

확대되고 있으며 특히 과거에 시공한 충적층지하수 관정과 농촌에서 주로 개발 이용하고 있는 풍화대에 형성된 지하수를 이용하는 소구경 지하수 관정에 의한 심각한 수질오염악화에 대한 대책수립의 필요성이 점차 제기되고 있다. 그러므로 환경친화적이고 지속 가능한 지하수 개발이 이루어질 수 있는 지하수 함양/저류 공법과 대용량 취수공법의 개발이 시급하다 하겠다.

2. 지하댐의 정의, 종류 및 기능

2.1 지하댐의 정의

지하댐의 일반적 정의는 지하수가 유동하는 대수층내의 인공적인 차수 벽 구조물을 설치하여 유동하는 지하수를 지하 대수층 내에 저류 또는 함양 시켜 관정 등의 양수 시설을 이용하여 취수 사용토록 하는 지하 저류지 기능을 지하댐이라고 한다(그림 1).

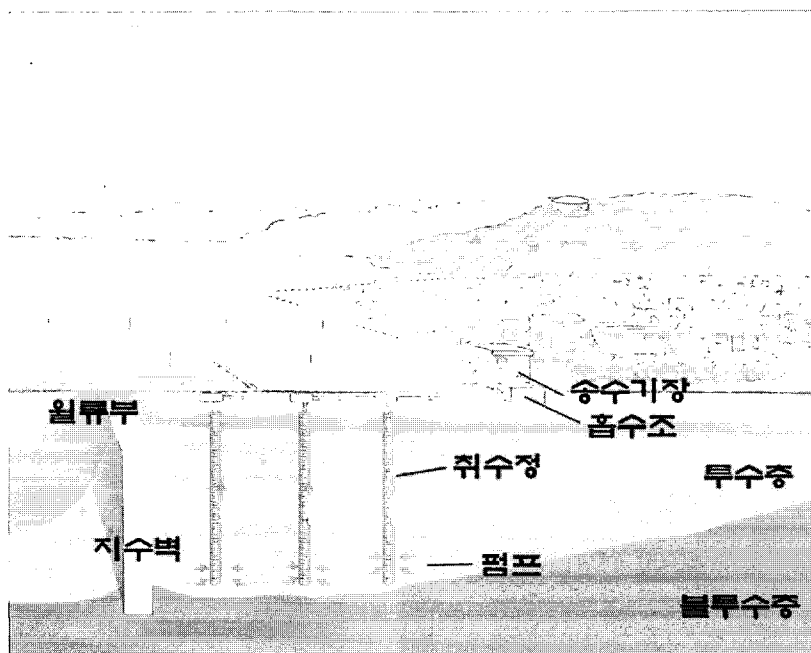


그림 1. 지하댐 개념도

일본에서는 지하수 흐름을 차수하기 위해 지중의 일부를 굴착하고 점토 등으로 치환하여 벽체를 시공하는 것을 오래전부터 실시하여 왔으며, 아이찌현 하루카이시(愛知縣 春日井市) 근교에서는 1930년경에 길이 330m, 두께 8m의 점토로 물막이벽을 구축한 사례가 있다. 그러나, 본격적인 지하댐이 구체적인 형태로 제안된 것은 1964년에 교토대학의 마쓰오신이찌로(松尾新一郎) 교수가 지중댐에 대한 구상을 이론적 및 실험적으로 연구를 수행하여 일본토목학회에 발표한 것이 최초이다. 이 제안을 최초로 적용한 사례는 1973년 나가사키현 노모사키에 속하는 가바지마(樺島)의 상수도 수원으로서 지하대수층에 지하물막이벽(지수벽 혹은 차수벽이라고도 함, 이하 물막이벽)을 구축한 것이 일본 최초의 지하댐이 되었다. 그 후 1979년에 농림성에서 오키나와 섬에 지하댐을 건설하였다.

우리나라에서 지하댐이란 용어는 농업진흥공사(현, 농업기반공사)가 1982년 이안지하댐 조사시험 보고서에서 처음 사용하였으며, 이러한 어원은 일본에서 사용된 것과 마찬가지로 지상에 설치하는 지상댐과 대비하여 물막이벽을 지하에 설치하기 때문인 것으로 추정된다.

Hanson과 Nillson(1986)은 「인공적인 차수벽 시설을 통해 지하수를 저장하는 모든 방식」을 지하수댐(groundwater dam)이라 하였으며, 이에는 지표면 하부에 차수벽을 시공하여 지하수를 저장하고 이를 양수하여 사용하는 방식의 지하댐(subsurface dam)과 계곡과 같이 주변에 비해 낮은 지표면 위에 지지력이 있는 댐을 시공한 후 댐에 의해 확보된 공간을 모래와 같은 투수성 물질로 채운 후 물을 저장하고 이용하는 방식의 모래 저장댐(sand storage dam)의 두 종류가 있으며 가끔씩 이 두 종류를 병용하여 설치하기도 하였다. 일본 농업토목기술사전에는 「지하의 공극율이 큰 지층에 지수벽을 설치하여 지하수의 흐름을 정지시켜 저류하고, 지하수를 안정적으로 이용가능하게 하는 시설」을 지하댐(subsurface dam)으로 정의하고 있다(吉田健治, 2000).

지하댐을 구성하는 주 요소는 물막이벽과 대수층의 두 가지가 있다. 협의의 지하수댐은 지중에 구축하는 물막이벽 본체만을 말하는 경우도 있고, 또 보다 넓은 의미로서는 지하의 대수층을 포함하는 경우도 있다. Hanson과 Nillson이 지하수를 저장하는 형태에 따라 지하수댐을 크게 두 종류로 구분한 것은 협의의 지하수댐이라 할 수 있다.

이 연구에서는 지하댐을 물막이벽은 물론 지하수를 공급하는 유역 및 대수층, 취수와 배수시설 등을 포괄적으로 포함시키고자 한다. 또한, 지표상에 설치하여 지표수를 사용하고 있는 댐(혹은 저수지)에 대비되는 용어로 지하댐(subsurface dam)이라 정의하였다.

2.2 지하댐의 종류

지하댐은 지하수 저류형태 외에도 용수 사용목적, 축조목적, 물막이벽의 설치형태 및 시공방법 등에 따라 그 종류를 구분할 수 있다. 실제로 지하댐은, 단일 시공방식에 따라 건설되는 경우보다는 구간별로 지하매질의 특성을 조사하여 가장 적합한 시공방식을 선택하는 경우가 더 효과적이다.

저류형태에 따른 분류: 지하댐은 일반적으로 자연적인 지표면 하부에 물막이벽을 시공하여 지하수를 저장하고 이를 양수하여 사용하는 방식의 완전지하저류형과 일부 지표 저류형 및 지상댐 병용형이 있다.

완전 지하저류형은 지하수의 지표노출이 없는 형태로 물막이벽의 정부가 지표면 하부에 위치하도록 설치된다. 우리나라에서 현재까지 설치된 지하댐은 모두 이 방식에 해당된다. 일부 지표 저류형은 대부분의 지하수를 지표면 하부에 저장시키지만 상대적으로 낮은 지표부위에서는 지하수가 지표로 방출되는 것을 허용하는 형태로써 모래 저장댐(sand storage dam)이 대표적인 예이다. 또한, 하천의 하상부에 물넘이를 설치한 보(weir)의 경우도 이 형태에 해당된다. 지상댐 병용형은 일반적인 지상댐과 같이 평상시에는 지상의 저수지에 물을 저류시켜 사용하고 이 저수지의 물이 고갈되면 지하수를 이용하는 방식으로

주로 사막 지역에서 사용하는 방식이다.

사용목적에 따른 분류: 저류형은 지하수의 유출을 완전 차단하고 그 대부분을 지하 저류지에 저류시키는 목적으로 차수벽을 불투수성인 기반암까지 완전 시공하는 형태로 이는 지하수위의 상승을 목적으로 하는 것이다. 이 경우는 지하수의 유역이 적거나 저류수량이 부족할 때 이용되며 강우 시 수위상승은 차수벽 위로 월류한다. 유출 제어형은 지하수 유출의 일부를 차단하여 지하수의 일부는 그대로 유출시킴으로 지하수위를 일정한 수준까지 상승시킬 목적으로 차수벽을 기반암까지 시공하거나 일부분만 시공하는 방법이 있고, 또한 투수계수를 같은 대수층보다 낮추어주는 방법이 있다. 이 경우는 지하수 유역이 크든가 지하수 함량이 양호한 지역에 시공하는 방법이다. 염수침입 방지형은 해안 인근에 시공되는 지하댐으로 담수와 해수 경계부분에 차수벽을 설치함으로써 해수의 침입을 방지하고 담수의 유출을 제거하는 형태로 완전 저류형에 속하며 차수벽은 기반암까지 시공해야 하며, 항상 해수면 최고 수위를 감안하여 시공해야 한다. 또한 지하댐은 용수의 사용목적에 따라 상수도용, 농업용, 다목적용 등으로 구분할 수 있다. 상수도용으로는 쌍천지하댐이 있고, 농업용으로는 이안지하댐 등 5개가 있다. 현재까지는 다목적용으로 개발된 것은 없으나 앞으로는 지역에 따라 다목적의 용수공급이 매우 필요해질 것이다.

건설목적에 따른 분류: 지하댐은 건설목적에 따라 수위상승형, 염수침입방지형 및 복합형으로 구분할 수 있다. 수위상승형은 지중에 설치된 물막이벽에 의해 지하수 흐름을 차단하고 지하수위를 상승시켜 저류량의 증대를 기대하는 것으로서 상승한 지하수 자원을 이용하는 것을 목적으로 한다. 염수침입방지형은 일반적으로 지하수위가 높은 해안선 부근에 설치하여 지하수 양수에 의한 염수침입방지를 주 목적으로 한다. 염수침입방지형 지하댐 중에 있어서도 지하수위를 상승시키는 효과를 갖는 것을 복합형 지하댐이라고 부르기도 한다.

국내에 시공된 6개 지하댐의 축조목적은 저류량의

증대가 주 목적이다. 다만 물막이벽 설치 위치가 해안에 인접한 남송지하댐과 쌍천지하댐의 경우 벽체 설치 후 하류부의 수위강하로 인하여 염수가 침입할 수 있으므로 염수침입방지라는 2차적인 목적을 갖게 된다. 그러므로 이 두 지하댐은 염수침입방지형이라 하기보다는 복합형이라 부르는 것이 더 적당할 것이다.

물막이벽 설치형태에 따른 분류: 설치형태별로는 물넘이형과 유출억제형으로 구분할 수 있다. 물넘이형은 지하수가 완전히 차수되도록 물막이벽을 설치하여 대수층에 최대한 많은 지하수를 저장하는 방식으로 남는 물은 물막이벽의 정부를 월류하여 하류부로 유출되도록 하는 형태를 말한다. 유출억제형은 물막이벽이나 벽체 하부를 통하여 어느 정도 지하수가 유출될 수 있도록 하지만 유출에 걸리는 시간을 지체시켜 필요한 시기에 지하수를 이용하고자 하는 목적으로 시공되는 형태이다. 이안지하댐은 시공시 물막이벽을 하부의 풍화대층과 기반암층에는 시공하지 않고 충적층인 사력 혼전석층까지만 시공하였으므로 지하수의 완전차수를 기대할 수 없는 유출억제형에 해당된다고 볼 수 있다.

물막이벽 시공공법에 따른 분류: 일반적으로 치환공법형, 주입공법형, 교반혼합처리공법형, 타입공법형 등으로 구분할 수 있다. 치환공법형 지하댐은 물막이벽 시공 구간을 굴착한 후 이 부분에 철근콘크리트 혹은 점토 등으로 치환시키는 방식의 지하댐을 말한다. 이 공법으로는 완전 차수가 가능하나 심도가 깊어질수록 시공이 어렵고 공사비가 급격히 증가하는 단점이 있다. 주입공법형 지하댐은 보통 그라우팅이라고 말하는 방식으로 물막이벽을 시공한 것을 말한다. 그라우팅은 시공심도에 제한을 받지 않으나 물막이벽과 기반암과의 밀착이 가능한 반면 정밀한 설계와 시공이 요구된다. 교반혼합공법형은 원위치 지반을 시멘트 밀크 등과 혼합·교반함으로써 차수벽을 형성시키는 공법이다. 강재 혹은 목재 등을 타입하여 지하수 유동을 차단하는 방식을 타입공법형 지하댐이라 한다. 이 공법으로는 연약지반에서 연속적인 시공이 가능하나 심도가 깊어지거나 전석층에서는 시공이

매우 어려운 단점이 있다.

2.3 지하댐의 기능

지하댐은 지하수의 흐름을 억제하는 목적으로서 지하에 구축한 지수벽 혹은 차수벽 등으로 차단한 지하수를 이용 관리하기 위한 시설이다. 여기에서 언급한 차단이라는 의미는 단순히 지하수위를 상승시키는 것이 아니고 주위로부터 염수의 침입을 막는 것도 포함되어있다. 따라서 현재 지하수위가 낮은 지역에서는 지하댐으로 지하수를 대량 저류 시키는 것이 가능하고 해안지대에서는 종래 염수 침입 때문에 취수가 불가능 했던 해수면 이하의 지하수를 이용할 수 있다. 전자에 의한 지하댐은 충적층 및 석회암 지대와 같은 지하수위가 낮은 다공질 암석이 분포하는 지역에서 적당하고, 후자의 경우는 사립질의 퇴적물이 있는 해안평야에 많은 적지를 볼 수 있다.

지하댐을 구성하는 기본적인 시설로는 제체시설, 취수시설 및 관리 시설이 있고 기타 시설로는 지역의 수문조건을 감안하여 적정 설치하는 경우가 있다. 각 시설에 대한 설명은 다음과 같다.

제체시설(차수벽 혹은 지수벽): 대수층에 구축되는 불투수성 및 난 투수성의 벽으로서 축조공법으로서는 지하 연속적 공법, 주입공법, 철판공법 등이 있다. 또 이들 효과를 보강하는 것으로서는 워터커팅에 의한 지수방법도 제안되어있다.

배수시설(여수토): 지하댐의 여수를 저류지역 외에 배출하기 위한 시설로서 제체의 위에 충분한 지하의 월류단면이 있는 경우는 특히 시설을 필요로 하지 않는다. 필요한 단면이 확보되지 않는 경우에는 개수로, 암거, 횡공 등으로서 지하댐 저류역 내의 물을 빨리 배출하지 않으면 안 된다.

취수시설: 지하댐에 저류한 물을 취수하기 위해서 일반적인 관정 등 횡공이 있는 방사상 정호 등을 설치한다. 특히, 대규모로 취수를 할 경우에는 취수시설의 설계로 고도의 기술을 필요로 한다. 취수시설의 능력에 기인하는 취수손실 때문에 저류한 지하수가

유효하게 취수되지 않는 경우가 있기 때문이다.

방수시설: 여수토로 된 배출 외에 급격히 저류수를 방출할 경우에 필요한 시설로서 홍수가 예상될 때 및 수질 악화 시에 저수 방출의 역할을 한다. 지수벽 천단으로부터 하위에 설치되어 수평공 및 통문을 개폐하여 방수 조작한다. 호우 등 함양량이 일시적으로 많은 지역에 필요하다.

관리시설: 지하댐을 관리하기 위한 시설로서 강수량, 지하수위, 취수량, 인공함양량, 배수량 등의 정보 수집을 하는 부분으로서 이들을 분석하여 수위예측을 실시하고 앞으로의 취수량 방수량을 결정하는 부분으로 구성되어있다.

함양시설: 지하댐 저류역의 지하수 부하량을 인공적으로 증가시키기 위한 시설로서 주입정, 침투수로, 침투지 등 지하수 주입 및 침투시설 외에 함양하는 물을 모아 도수하기 위한 시설도 포함되어있다. 이들 시설은 저류 용량과 비교해서 자연함양량이 적은지역과 강우량이 적은 지역에 필요하다.

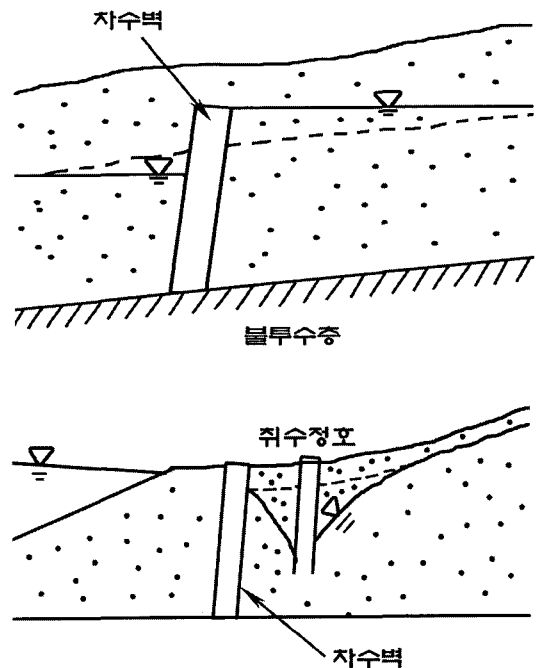


그림 2. 지하댐의 기능을 보여주는 모식도

3. 지하댐 입지조건 및 조사계획

지하댐을 설치할 수 있는 입지조건으로는 첫째 유효공극률이 큰 대수층이 두껍고 넓게 발달되어 있어 다량의 지하수를 저장할 수 있는 지역이어야 하고, 둘째 지하수를 함유하고 있는 대수층 하부에는 불투수층 지반이 분포하여야 하며, 셋째 지하수 함량원이 되는 계곡 및 하천과 넓은 유역이 있어야 하고, 넷째 하천의 경사가 완만하여야 하며, 다섯째 유역의 유출구에 해당하는 협곡부가 있어 지하 차수벽 설치 연장이 비교적 짧아야 한다.

이러한, 지형적 및 지질적 조건이 갖추어진 위치에 지하 차수벽을 설치함으로써 지하수가 하류로 방출됨을 제어하여 이를 적절히 이용하는 시설을 앞에서도 언급한 바와 같이 지하댐이라고 말한다.

지하댐은 일반적인 지하 시설인 집수암거와 지하수관경과의 차이는 지하수의 흐름을 차단하여 방출을 제어한 후 양수하는 것으로 일반 지표저수지와는 달리 외관상 지표수 구조물이 없음이 특징이다. 지하댐 설치의 필요성은 강우량이 많아도 즉시 지하로 침투되어 유출량이 없는 지역이나 투수성 지층의 두께가 깊어 지표 저수지 설치가 곤란하고 곧, 지하수가 바다나 하류로 방출되는 지역 등에 설치가 요망되며, 또한 지하수는 풍부하나 해수의 침입이 발생하는 지역에서는 해수침입방지용의 지하댐 설치도 필요하다.

지하댐을 계획할 때 수행하는 조사는 지상 댐과 비교하여 고도의 기술을 필요로 한다. 이것은 대상이 되는 지하수가 눈에 보이지 않기 때문이다. 예를 들어,

지상 댐의 댐 사이트는 정밀한 지형도가 있으면 비교적 쉽게 선정할 수 있지만, 지하댐에 있어서는 불투수성 기반암의 심도 및 그 형태를 파악할 필요가 있어 이들 자료를 얻기 위해서는 많은 지질 조사를 수행하지 않으면 안 된다. 따라서 지하댐의 계획이 수행되기 전에 해당 지역에 있어서 상당량의 지하수 조사 자료가 필요하다. 지하댐의 조사는 수문지질 구조조사, 수문 관측조사, 저류층 조사 등으로 구성된다. 각 조사의 개요를 표 2에 나타내었다.

또한, 지하댐을 건설하기 위해서는 기본적으로 다음과 같은 세 가지의 수문지질 조건이 만족 되지 않으면 안 된다. 첫째 지하수를 저류하고 취수할 수 있는 충분한 유효공극률, 투수계수를 가지고 있는 지층이 분포해야 한다. 둘째 저류층의 밑에 적당한 깊이의 불투수성 기반암이 있어서 저류 효과를 발휘할 수 있고 차수벽을 건설할 수 있도록 하는 기반구조로 되어 있어야 한다. 셋째 자연함량이든 인공함량이든 저류역에 공급할 수 있는 강우 및 지표수가 존재해야 한다.

모든 것을 만족하는 수문지질 조건을 갖는 지역은 흔하지 않다. 따라서 지하댐은 수질원 개발 방법으로서 완전히 지상댐과 같지는 않지만 섬, 하천 및 일부 해안 평야 등에서는 유효한 수자원 개발 기술로서 적당하다고 생각된다.

지하댐은 현황에 있어서 지하수위가 낮던가. 또는 염수침입의 가능성이 있기 때문에 지하수 개발량은 제한되어 지하댐을 건설함으로써 이들의 장애가 해소되도록 계획된다. 그림 3은 지하댐의 조사 계획의 개략도이다.

표 2. 지하댐 조사개요

조사 항목	목적	조사 내용	조사 성과
수문지질 구조조사	지표수, 지하수를 포함한 수문 현황을 지배하는 지질구조 규명	지표조사, 물리탐사, 지질시추, 트렌치 등	수문지질도, 불투수성 기반암 등고선도 등
수문 관측조사	지역 수환경의 현황 규명	지하수위 관측, 지표수유량 관측, 수질분석, 용수량 관측, 강우량 관측 등	지하수면 등고선도, 지하수위 변화도, 하천 유량도 등
저류층 조사	지하수를 저류하는 지층의 수리 특성 규명	양수시험, 지질분석, 공내시험 등	투수계수, 저류율(저류층의 평균 유효공극률) 등

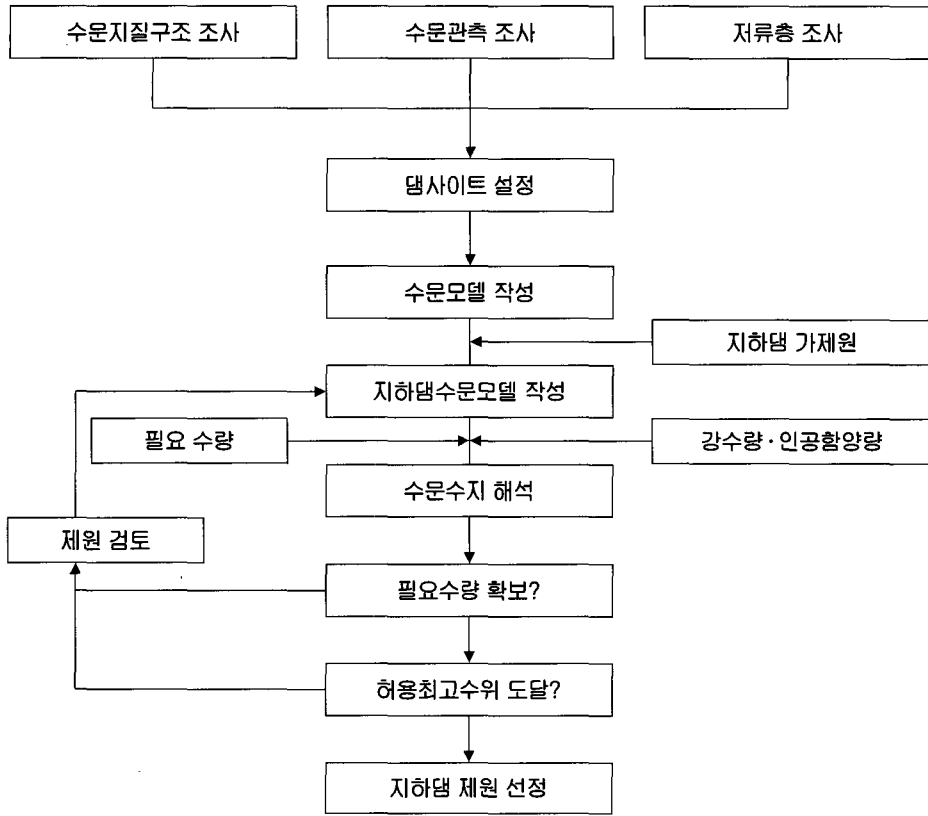


그림 3. 지하댐 입지조사 흐름도

지하댐은 지표로부터 기반암까지의 공사를 필요로 한다. 이 때문에 수문조건이 허락하는 범위에서 가능한 한 제고를 높게 하고 저수량을 증가 시키면 단위 체적당 물 값을 싸게 할 수가 있다. 따라서 지하댐의 계획에 있어서는 제고와 저수량 및 비용과의 관계를 잘 맞출 필요가 있다. 지하댐은 지하에 지층 중에 건설되기 때

문에 파괴될 우려는 없다. 환경에의 영향으로서는 저류역의 지하수위 상승에 따른 지표의 습윤화 및 침수 피해, 하류 측에의 지하수위 저하에 따른 영향이 있다.

지하댐 사이트를 선정할 때에 고려할 조건은 표 3과 같다. 기본적으로는 지상댐과 마찬가지로 댐 위치의 단면적은 작고, 저류면적은 넓으면 좋다.

표 3. 댐사이트 선정조건

조건 구분	선정 조건	기초 조건
기술 조건	지수벽(차수벽) 시공 심도, 시공가능성	지수공법, 지질단면도, 공법시험
경제 조건(물값)	시공단면적 저수효율 유역면적	지질단면도 H-Q곡선 기초등고선도, 지형도
사회 조건	토지이용현황, 환경영향, 기존물이용, 광구, 온천권, 지하수관계법령	

4. 국내·외 지하댐 개발·이용현황

4.1 우리나라의 지하댐 개발·이용현황

지하댐은 정부의 농업용수 10개년개발계획에 포함된 지하수개발계획을 효과적으로 추진하기 위하여 농업용수원으로서의 지하댐 설치 가능성을 검토하기 위한 시험연구사업의 일환으로 계획된 것으로서(농업진흥공사, 1982), 1981년도에 한해가 들자, 경상북도 상주시 이안면 양범리 일대에 농업용수 공급을 목적으로 하는 최초의 지하댐인 이안지하댐을 건설하였다(농업진흥공사, 1984). 이안지구는 당시 농업용수를 공급할 수 있는 다른 수원공이 없었으며, 지하댐의 입지조건 중 다량의 지하수를 저장할 수 있는 분지형 지형이고 하천경사가 비교적 완만하며(하상경사 12/1,000), 하류 유출부가 협곡으로 되어 있어 물막이벽 시공비가 적게 드는 등의 장점이 있어 최초의 시범사업지구로 선정되어 1981.11.18일부터 1982.11.29일까지 1년간에 걸친 조사 후 1983.4.17일 공사에 착수하여 같은 해 12.31일 준공되었다. 그러나 유역면적이 2,130ha(유역 내 안룡저수지 유역을 제외하면 1,805ha)로 협소하며, 총적층의 평균두께가 4.5~7m 밖에 되지 않는 지역인데다 물막이벽을 하부의 풍화대 및 기반암까지 밀착시키지 않고 총적층까지만 설치하여 하부로 지하수 유출이 가능하게 설치되어 있어 저류효과가 양호하지 못한 것으로 추정된다. 이안지구에 대해서는 준공 후에도 사후평가(농업진흥공사, 1985) 및 연구(농어촌진흥공사, 1996)를 실시하였고, 물막이벽 설치 전·후의 투수성에 대한 비교 분석(김희성, 1996)도 행해진 바 있다.

이안지하댐 준공 후에도 충남 옥성지구, 경북 남송지구, 전북 고천지구, 전북 우일지구 등에 농업용수용 지하수댐을 시공하고 취수정으로 방사상집수정을 설치하여 농업용수로 사용하고 있다(표 4).

생활용수의 취수를 위해 지하수댐이 활용된 국내의 대표적인 사례는, 해수침입방지와 지하수 함양으로 다량의 지하수를 저류시킨 후 상수도로 사용하기 위

하여 강원도 속초시 쌍천(유역면적 6,533ha, 하상경사 1/25~1/88)의 해안에서 약 300m 지점에 설치된 쌍천지하댐이 대표적인 예이다. 쌍천지하댐에서 취수하는 상수도 양은 연간 15백만 m^3 (2000년)으로 속초시 급수량의 68%를 담당하고 있으나 기반암의 요철이 심하여 물막이벽과 하부 기반암이 밀착되어 있지 못하며, 물막이벽의 투수계수가 $\alpha \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ 정도로 추정되므로 갈수시 염수침입 문제가 제기되고 있다(박창근, 2000).

4.2 국외 지하댐 개발·이용현황

국외에서는 물을 지하에 저장하는 방법이 로마시대부터 시행되어 왔는데 중동지역에서는 지동굴을 건설하여 물을 저장하였으며 아프리카지역에서는 인공적인 모래저장댐을 축조하여 사용하였다. 인도에서는 Kerala주 Palghat Gap 지역에 1964년과 1979년에 각각 1개씩 2개소, 에디오피아에서는 1981년에 Bombas와 Gursum 지역에 각각 지하댐을 건설하였다.

중국은 우리나라와 비슷한 1980년대부터 지하댐 개발이 시작되었는데, 협서성 서안시 북방 약 10km 위치에 동서로 흐르는 위하(渭河)의 지천인 석천(石川)의 하류부에 대수층의 저수량이 5억 m^3 이나 되는 후빙(富平)지하댐을 건설하고 있다(赤井浩一, 1983). 현재는 요녕성(遼寧省) 대련시(大連市)에 삼간보(三澗堡)지하댐과 용하(龍河)지하댐을 계획·설계·시험시공 중에 있다(金森信夫 외, 2000). 삼간보지하댐(총저수량 6,142천 m^3 , 1일 취수가능량 12,300 m^3)은 해안에서 약 200m 떨어진 곳에 위치하며 농업용, 생활용, 공업용의 다목적용 지하댐이다. 이 지하댐의 특징은 해안변의 지하에 물막이벽(길이 1,200m)을 설치하고 지상에는 염수침입방어벽(길이 400m)을 설치하여 지하수와 지표수를 동시에 저류시키도록 하였으며, 상류부에 홍수조절점 지표수함양을 위한 홍수방어벽(길이 75m)을 설치하였고, 취수정과 물막이벽 사이에는 염수배수정 4개 공을 별도로 설치하고 또한 저류유역 내에 오수 배제를 위한 배수관로 15km와 관측정 15

표 4. 국내 기 건설된 지하댐사이트

Item	Ssangchun	I-an	Namsong	Oksung	Gochun	U-il
Storage type	Subsurface	Subsurface	Subsurface	Subsurface	Subsurface	Subsurface
Water usage	Drinking	Agricultural	Agricultural	Agricultural	Agricultural	Agricultural
Purpose dam	Combination	Water level rise	Combination	Combination	Combination	Combination
Wall type	Spill way	Retention	Spill way	Spill way	Spill way	Spill way
Construction method of wall	Replacement (Cement Bentonite Slurry Wall)	Injection & Replacement (SGR+Concrete)	Injection (JSP)	Injection (Microcement)	Replacement (Steel concrete)	Replacement (Clay)
Wall length(m)	800	230(194+36)	89	482	192	778
Well type (number)	R.C.W. (4)	R.C.W. (4)	R.C.W. (4)	R.C.W. (4)	R.C.W. (5)	R.C.W. (4)
W.A.(ha)	6,533	2,130	15,300	27,500	2,700	2,200
Ave. alluvial layer thick (m)		4.5~7	10~15	about 10	6~7	6.5
Coefficient of transmissibility (m ² /D)		268~403	300	113~183		133
Storage capacity (m ³)		4,143,000	4,017,000	2,850,000	1,534,000	2,457,000
Storage capacity/W.A.(m ³ /ha)		1,945	262	103	568	1,116
Abstraction rate (m ³ /D)	27,000	24,000	27,000	27,900	25,110	16,200
Geology		Granitic gneiss (Age unknown)	Uncemented Sedimentary rocks (Tertiary)	Banded gneiss	Schistose granite (Mesozoic)	Gneissose granite (Mesozoic)
Completion year	1998	1983	1986	1986	1986	1986

※ W.A. : Watershed Area, Ave. Average, R.C.W. : Radial collector well

공도 계획되어 있다(그림 4). 용하지하댐은 물막이벽의 길이가 620m, 총저수량 540천m³의 염수침입방지형 지하댐으로 물막이벽은 고압분사주입공법으로 시험시공하였다.

일본에서의 본격적인 지하댐 개발은 농림수산성을

중심으로 실시되었다(표 5). 1974년도에 오끼나와현 미야코지마(宮古島)를 대상으로 지하수댐에 의한 농업용수 개발의 기초조사가 시작되었다. 미야코지마는 그 대부분이 표고 100m 이하의 거의 평활한 류큐(琉球) 석회암대지로 구성되어 있으므로 연간 강우량이

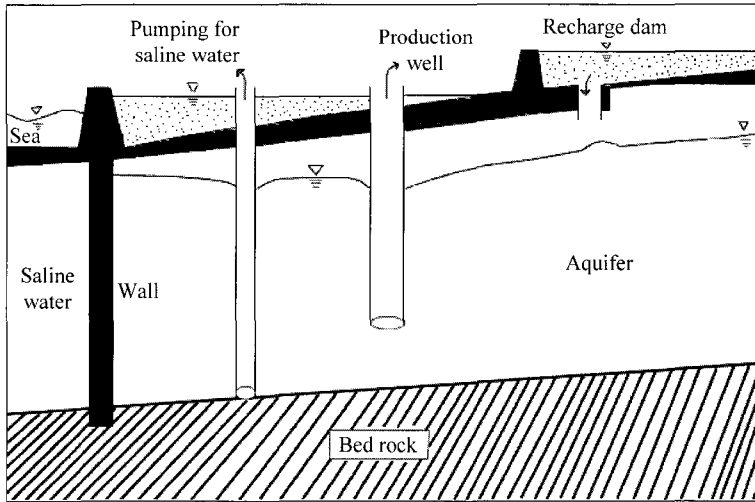


그림 4. 중국 대련시 삼간보(三澗堡)지하댐의 모식도

표 5. 일본에서의 지하댐 건설 현황

Name	Purpose dam	Construction method of wall	Wall length(m)	Wall height(m)	W.A. (ha)	T.S.C. (thousand m ³)	Completion year	Storage capacity/W.A. (m ³ /ha)
皆福	Water level rise	Injection	500	16.5	120	700	1978	5,833
樺島	P.S.I.	Injection	74	27	60	9	1980	150
常神	P.S.I.	Slurry Wall	202	18.5		74	1982	
天ヶ能	Water level rise	Injection	129	12.5		18	1987	
和板	P.S.I.	Slurry Wall	105	7.5	340	34	1991	100
中島	P.S.I.	SMW	88	24.8	60	27	1993	450
神子		SMW	196	39.3		23	1995	
砂川	Water level rise	SMW	1,677	50	720	9,500	1994	13,194
福里	Water level rise	SMW	1,790	27	12,400	10,500	1998	846
カンジン		SMW	1,080	41	300	1,431	1998	4,770
喜界	Water level rise	SMW	2,280	36	580	1,800	2000	3,103
米須	P.S.I.	SMW	2,489	68.4	390	3,457	2002	8,864
慶座	Water level rise	SMW	969	53	120	369	2001	3,075

※ W.A. : Watershed Area, SMW : Soil Cement Mixing Wall, T.S.C. ; Total Storage Capacity, P.S.I ; Prevent Seawater Intrusion

2,000mm를 넘지만 발달된 투수성 지층 때문에 지표수는 거의 보이지 않는 지역이다. 그러므로 관정이 유일한 수원인데, 지하수의 대부분은 지하계곡으로 흐르고, 해안 부근에서 용천수로서 용출되고 있다. 1977년부터 1978년도에 조사비 9억엔을 투자하여 실험용 지하댐으로서 미나후크(皆福)지하댐을 축조하였다. 그 이후에 농업용수원 확보의 수단으로써 류큐제도 전체

를 대상으로 한 지하댐 적지선정조사가 본격화되었는데 1980년도에는 지하댐을 수원으로서 하는 미야코지구 국영토지개발사업계획조사가 실시되었고 1987년도에는 미야코지구 토지개발사업의 수원으로서 수나가와·후쿠사토(砂川·福里)지하댐 개발이 착수되었으며, 그 후 1989년도에 농용지정비공단(현 녹자원공단)에 승계되어 1998년도에 완공되었다(吉田健治, 2000).

그 후, 오기나와에서는 1992년도에 남부지구에 요나쓰, 케이자(米須, 慶座)지하댐이, 1995년도부터는 현(縣)직영사업으로서 쿠미도(久米島)에서 칸진(カンジン)지하댐이 착수되었다. 또, 오기나와 이외에서는 큐우슈(九州)농정국에 의해 키카이(喜界)지하댐이 1993년도부터 착수되었다. 1992년에는 주우고꾸시꼬꾸(中國四國)농정국에 의해 에히메현(愛媛縣)의 나카지마(中島)지하댐이 실험용 지하댐으로서 완공되었는데, 이 때부터 류큐석회암 이외의 사력층 지반을 대상으로 한 시험이 본격적으로 시작된 것으로 알려져 있다.

5. 지하댐의 장·단점, 효과 및 역할

5.1 지하댐의 장·단점

지하댐은 일반적인 지상댐 방식과 비교하여 볼 때 많은 장점을 갖고 있다. 가장 대표적인 장점은 지하댐의 경우 증발에 의한 손실이 실제적으로 거의 없고, 지표면에 대한 수물 면적이 없다는 점, 지하댐(물막이벽)의 붕괴가 없다는 점 등을 들 수 있다. 이 밖에도 상대적으로 공사비가 적게 들며 연중 일정한 수온의 물을 얻을 수 있다는 장점을 갖고 있다. 그러나 취수를 위해 별도의 양수 시설이 필요하다는 점과 지하수 저장량에 대한 직접적인 평가가 어렵다는 점, 일시에 다량의 용수 사용이 불가하다는 점, 지하수가 오염되었을 경우 정화가 쉽지 않다는 점 등 이외에도 물막이벽의 균열 또는 누수에 대한 확인이 쉽지 않다는 단점도 있다. 또한 지하댐의 위치, 규모, 저류량, 함양량, 지하댐의 건설공법, 양수방법 등을 결정하기 위한 지질조건 및 지하수문조사 등을 정확하게 판단하기 위해서는 정밀도 높은 조사와 고도의 기술이 요구되는 단점도 있다.

5.2 지하댐의 효과 및 역할

최근에는 국민 생활수준의 향상과 사업의 형성과 산업의 고도화로 용수 수요량의 대폭적인 증가에

상되나 지표수 개발은 용수수요의 지역별 편중으로 인해 하천 유역별 용수 공급이 곤란하며, 댐 개발적지의 감소와 수물 보상비의 상승, 지역사회의 반발 등으로 인해 한계점에 도달하였다. 또한 1992년 이후 가뭄으로 인한 지하수 개발의 필요성이 대두됨으로서 지하수 자원을 수자원 개발계획의 일환으로 재평가하기에 이르렀으며, 점원인 관정 개발과 함께 다량 취수가 가능한 지하저수지의 효율성에 대한 관심이 증대되고 있다.

지하저수지는 지형적 지하지질 구조적으로 적절한 위치에 지하 차수벽을 설치하여 지하수를 저류시키는 기능을 갖고 있으며 이의 효율적인 관리를 위해서는 유역 내 지표 지하 수문 특성, 대수층의 토질 특성, 대수층계의 수리지질 특성, 댐의 차수효과 등을 기본 설계단계부터 계획적으로 분석 검토하여야만 한다. 그러나 국내 대부분의 지하저수지는 유역 내 대수층의 특성을 완전히 파악하지 않은 상태에서 수요에 따라 과도하게 지하수를 양수 이용함에 의해 대수층의 파괴를 유발하거나 지반 침하, 차수벽의 기능 저하 등이 발생되고 있다.

지하댐의 효과에 대해서 생각해보면 지하대수층에 차수벽을 설치함으로써 효과를 얻는데 이를 크게 두 가지로 나누면 다음과 같다. 첫째, 상류에서의 지하수류를 벽으로 방지, 둘째, 하류에서의 역류 방지(해수침입 방지) 등을 들 수 있다.

상류에서의 지하수류를 보로 방지하는 경우에는 실용적인 목적으로 보아 두 가지의 효과가 있다. 첫째, 취수가 용이하게 되는 것이다. 일본에서는 지하의 대수층의 구성이 복잡한 경우가 많고, 특히 지하수류가 많은 사력층에서는 지층이 균일하지 않은 경우가 지적된다. 그러나 이와 같은 불균질성의 위치를 지표에서 정확히 안다는 것은 쉽지 않다. 이 때문에 지하의 대수층을 횡단하여 차수층을 설치함으로써 넓은 범위의 지하수류를 확실하게 확보하는 것이 가능하다. 이 목적의 반대로 지하수 배수 벽이 있다. 이것은 지하댐과는 역으로 대수층을 횡단하는 벽을 투수성이 좋은 재료로 만들어 횡단방향으로 물을 이동시

키기 쉬운 용도로 오스트리아에서 실용화하고 있다. 둘째, 물을 저류시키는 것이다. 상류층의 지하수위를 상승시켜서 물을 저류한다. 대수층은 지층에 따라 다르다. 한 예로 체적의 10%내지 50%의 많은 공극을 가지면 이 공극이 저류지가 되는 셈이다. 다만, 여기서 주의 할 것은 지하댐을 저수지로 생각할 때, 그 용량은 의외로 적다는 것을 염두 해 두어야 한다.

지수벽의 깊이는 경제적인 면에서 보더라도 깊지 않은 것으로 대략 10m정도가 좋다. 한편, 지하수를 차수 할 때 수위강하량이 필요하다. 따라서 대수층의 수심 전부가 이용되는 것은 아니다. 이 때문에 지하수위를 기존 높이보다 높지 않게 할 때는 이용 수심이 제한되어 용량이 그리 크지 않게 된다. 지하수위를 높여 물을 취수 하는데 일본에서는 지하수위는 거의 지표에 가깝게 있어, 이것은 지하수의 유출량에 비하여 우수의 함량이 큰데 기인하나 이런 때는 지하수위를 높이려 해도 그 여유는 적다. 또 지하수가 지표 가까이 까지 상승하면 토양이 습윤화하여 작물 등의 나쁜 영향을 준다. 지하수위가 지표에서 1m 보다 얕으면 그 영향은 대단히 크다고 한다. 이런 이유로 지하수위를 높이는 것이 어려울 때가 많다. 그러나 산 능선 등 표고가 다소 높은 곳에서는 같이 지하수위가 깊은 위치에 있는 것은 우수의 함량에 비하여 지하 유출량이 많기 때문이다. 이와 같은 때는 나쁜 영향을 미치지 않는 범위에서 지하수위를 높이는 것이 가능하다. 이상은 상류에서의 지하수류를 차단시키는 효과이나 의외로 하루에서의 역류를 방지하는 부차적인 효과도 있다.

지하수를 취수하면 수위강하가 발생한다. 지하수는 면으로 존재하나 취수정은 점이라 볼 수 있다. 취수하기 위해서는 우물 지점까지 물이 이동 되어야한다. 따라서 취수 시 주변의 지하수위가 낮아지게 된다. 이와 같은 현상으로 문제 되는 것은 해안 부근의 취수이다. 지하수 취수로 인하여 해수의 역류를 초래하기 쉽고, 지하수량은 많은데 염수의 유입 때문에 취수가 곤란하게 되는 경우가 많다. 이런 때는 대수층을 횡단하는 차수벽이 효과적이다.

중국 대련시 수자원 대책으로서의 지하댐의 역할을 예로 들어보자. 대련시는 공업 총 생산이 중국 제 8위로서 중국의 중요한 항만, 공업, 무역, 관광도시이다. 대련시의 물 공급은 주로 중소 저수지로서 일부 지하수에 의존하고 있고, 지하의 담수 자원이 도시 급수 수원의 하나로서 지금까지 중요한 역할을 담당하여 왔다. 통계자료에 의하면 1995년에 시 전체에 있어서 실제 이용된 물의 총량은 12,123억톤으로 이중 담수가 96.2%(지표수 7.843억톤, 지하수 2.853억톤), 해수·염수가 3.8%를 차지한다. 도시 용수로서는 대련도시부의 이용량이 시 전체의 88.5%를 차지하고 있다.

대련시는 수자원의 개발이용을 매우 중요시 하여, 부족한 수자원 개발에 한화로 약 3,000억원을 투자하였다, 이 프로젝트 완료 후 1998년 일 급수량은 120만톤에 달하였다. 그러나 가능 수요량을 검토한 결과 기존의 수자원으로서는 2005년 도시부에서 2.19억톤이 부족하고, 2010년에는 3.71억톤이 부족, 2030년에는 8.63억톤이 부족하다고 예상하였다. 시 관계자는 지하수자원을 과학적이고 합리적으로 개발하지 못하였기 때문에 해수 침입이라고 하는 심각한 지질재해가 발생하여 지하수자원은 점점 더 파괴되어 이 지역의 경제 사회 발전에도 현저한 제약을 받는다고 생각하였다. 대련시 수자원계획 위원회는 대련시의 급수 문제를 해결하는 주된 대책으로서 절수, 유역간의 물 조달, 오염수의 자원화, 해수 이용 및 하천형 지하댐 건설, 지하수의 이용 확대를 들고 있다. 유역간의 물 조달이 어렵다는 조건하에서는 과학적이고 합리적인 지하수 자원의 개발이 대련시의 물 부족을 해결하기 위한 현재의 주된 대책이라고 생각하였으며, 그에 따른 프로젝트 효과 분석과 실행가능성의 검증을 실시하였다.

해수침입방지의 환경효과: 하천형 지하댐 사이트의 면적은 26.09km², 해수 침입면적은 12.7km²로서 댐사이트 총면적의 49%를 차지하고 있다. 지하댐이 완성되면 제4기의 총적층 지하수의 해수 침입문제가 근본적으로 해결되고, 현재 오염되어있는 수질의 개

선이 전망된다. 수질이 서서히 회복되면 토양은 개선된다. 해수의 침입에 따라 일어나는 토양의 염적화도 개선되어 광범위하게 토지도 양호한 경작지로 바뀌어진다. 또 상층 지하수 채취량이 증가하기 때문에 이것에 맞추어 탄산염암 카르스트 열극수의 채취가 감소하고 그에 따라서 카르스트 열극수를 포함하는 대수층에의 해수 침입이 제어 경감되기 때문에 수질이 개선되어 유역내의 생태 환경이 개선된다.

지하수 채취량 증가 및 경제효과: 지하댐이 완성되면 충적층 지하수 자원이 회복되어 채취자원은 447.5만톤/년으로 증가하기 때문에 이 지역의 농·공업 발전을 촉진 시킨다. 80년대 중기 생산액 100만원당 물 소비량 158톤으로 계산하면 연 증가 사회이익은 238억원으로 된다. 또한 이 프로젝트에 있어서 1톤당 물 제조 단가는 231,000원으로서 이 프로젝트 전의 1톤당 수 제조 단가(567,200원)의 40%로 되어 제조단가가 낮아진다.

사회적 역할: 지하댐이 완성되면 총 저류량 614.2만톤, 조정 저류량 334.5만톤으로 되어 현지의 홍수방지 간척 대책 능력이 대폭 증대하고 해수 침입의 피해를 해결하여 국민의 생활수준 향상에 공헌하게 된다.

과학연구의 모델로서의 역할: 지하댐 건설 프로젝트는 중국이 수년 내 개발, 발전되어 온 신흥프로젝트이다. 비교적 높은 과학연구 가치가 있다. 이 건설 프로젝트는 이것을 수행함으로써 귀중한 수자원을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 해수의 침입이라는 문제를 근본적으로 해결할 수 있기 때문에 대련시 뿐만 아니라 전국 지하수자원개발 및 해수 침입의 방지에 대하여 중요한 모델로서의 역할을 하게 된다.

토지이용의 고도화와 물 사용 극대화 역할: 집중호우 및 장기 호우 시 사면의 붕괴 및 홍수가 많이 발생한다. 이와 같이 재해 발생의 가능성을 잠재적으로 가지고 있는 지역을 미리 선별하여 이들을 역으로 토지이용의 고도화에 이용할 수 있다면 이상적이라 생각된다. 토지이용의 고도화에는 물을 제어하고 이들을 자원으로 확보하는 것이 전제로 되어있다.

6. 결론

지하댐은 대용량의 지하수를 효과적으로 확보할 수 있는 시설로서 국내에서는 1980년대 초부터 설치하였다가 최근에 다시 대용량의 취수가 가능한 방안으로 주목받기 시작하였다. 저류수는 유역조건과 대수층조건, 상류부 오염원 분포와 수질에 따라 상수도용, 중수도용, 농업용 또는 공업용 등으로 다양하게 이용할 수 있으며, 이용목적과 수질여건에 따라 간단하게 정수처리하여 사용할 수 있으므로 적절한 지하댐 설치 방법은 용수부족을 해결할 수 있는 주요 기술의 하나이다. 특히 국외에서의 예와 같이 지상댐 건설이 갈수록 어려워지는 환경적인 측면에서 본다면 지하댐 건설은 앞으로의 물 부족 해결의 중요한 대안으로 생각된다.

국내 수자원 이용에 있어서 지하댐이 활성화되지 못하였던 주요한 문제는 첫째, 물막이벽 시공기술 미흡, 둘째, 대수층 수리 분석 미흡, 셋째, 물수지 및 수문분석 미흡, 넷째, 지속적인 유지관리와 모니터링 결여, 다섯째, 정부예산 부족, 여섯째, 해안지역에서 염수침입에 대한 대응기술 미흡, 일곱째, 대용량 취수정에 대한 개발·이용기술 부족 등이었다. 이러한 주요 문제점에 대한 해결방안으로는

- 가. 대수층 위치 및 토질에 맞는 적절한 차수공법의 선택과 정밀한 물막이벽 시공
- 나. 정확하고 정밀한 대수층 구조 분석, 수문 분석, 물수지 분석 등의 시행
- 다. 장기적인 지하수 이용계획 및 저류역내 수질보전대책 수립
- 라. 지속가능한 대용량 취수기술에 대한 연구
- 마. 수위·수질에 대한 장기 모니터링 실시로 지속적인 유지관리 시행
- 바. 지하댐 개발로 인한 주변 환경에 미치는 영향에 대한 철저한 분석 및 대책 수립 등이 요구된다.

현재 국가 주도로 진행 중인 21C 프런티어사업 중 수자원의 지속적 확보기술개발 사업으로 많은 문제들

이 해결되었고, 보다 효율적인 지하댐 개발 및 운영 관리를 위한 연구가 진행 중에 있다. 특히 이중물막 이벽 설치 등으로 해안지역 지하댐에서 염수침입을 방지하는 방안 등이 있으므로 이에 대한 많은 연구로 지하수를 효과적으로 이용할 수 있는 방안을 강구해야 할 것이다.

사사

본 연구는 21세기 프런티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호#3-6-2)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 건설교통부, 2004, 지하수조사연보, p.31
- 건설산업조사회(石崎勝義 외), 1980, 地下水ノブック, pp.1375~1384
- 김희성, 1996, 3차원 흐름모형을 이용한 지하차수벽의 투수특성규명, 충북대학교 박사학위 논문, p.137
- 농어촌진흥공사, 1996, 소유역지하댐 개발에 관한 기술 개발 연구, p.67
- 농업진흥공사, 1982, 이안지하댐 조사시험 보고서, p.73
- 농업진흥공사, 1984, 이안지하댐시험사업준공보고서, p.179
- 농업진흥공사, 1985, 이안지하댐사후평가조사보고서, p.42
- 박창근, 2000, 속초시 쌍천지하댐과 그 의미, 한국수자원 학회지, 제33권 6호, pp.85~90
- 부성안, 이기철, 김진성, 정교철, 고양수, 2002, 지하댐 물막이벽 시공법과 해안지역 염수침입 방지기술 개선 방안, 지질공학, 제12권, 제2호, pp.215~234.
- 안용순, 이태식, 1997, 연약지반의 약액주입공법에 대한 시공성 및 경제성 연구, pp.1~22
- 장의웅, 정형재, 부성안, 송성호, 2001, 댐 그라우팅 설계 및 시공 실무지침서, pp.3~19
- 정교철 역, 1998, 굴착공사와 지하수, 도서출판 엔지니어스, pp.240~255
- 천병식, 1998, 최신 지반주입(이론과 실제), 원기술, pp.175~300
- 金森信夫, 小林 勳, 小德 基, 2000, 中國大連市の地下ダム開發, Jour. JSIDRE, Vol.68, No.11, pp.1223~1228
- 今成康忠, 戸田完一, 稚野武文, 伊?不二夫, 원위치교반 공법을 이용한 지하댐 지수벽의 시공, 토목기술 (1998, 번역 기술자료), 제6권 제1호, pp.31~37
- 吉田健治, 2000, 地下ダムの技術的特徴と課題について, JIID연구보고서, 제21호, pp.61~74
- 原 郁南, 緒方博則, 當銘俊明, 1996, 米須地下ダム鹽水侵入量の検討, 水と土, 제106호, pp.62~71
- 赤井浩一, 1983, 中國陝西省富平地下ダム試驗工事に ついて, 土と基礎, Vol.31, No.3, pp.45~47
- Hanson, G., Nilsson, A., 1986, Ground-Water Dams for Rural-Water Supplies in Developing Countries, GROUND WATER, Vol.24, No.4, pp.497~506