

# 지하수 자원의 합리적 관리와 수질보호

## Optimal Management and Quality Protection of Groundwater Resources

정 상 옥\*  
Chung, Sang-ok

### I. 서 론

물은 인간은 물론 모든 생물이 살아가는 데 필수적이며, 인간의 생활수준의 향상과 산업화는 물 수요량을 증가시킨다. 그러나 물은 인간이 필요로 하는 때와 장소에 항상 존재하는 것은 아니다. 따라서 인류문명의 발달과 함께 인간은 지표수는 물론 지하수도 개발하여 왔다. Todd(1980)에 의하면 구약성서에도 지하수, 샘, 우물 등에 관하여 여러 차례 언급되고 있으며, 중동의 여러나라 특히, 이란에서는 지금으로부터 약 3,000년 전부터 Qanats라는 横井을 사용하여 지하수를 개발, 이용하여 오고 있다.

이러한 지하수 자원은 매우 중요한 자연자원의 하나이다. 다른 자원과 마찬가지로 지하수 자원의 효율적 이용과 보전을 위하여는 합리적인 개발과, 수량과 수질에 대한 감시를 철저히 하여 과다한 지하수위의 저하나 수질의 악화가 발생하지 않도록 하여야 한다.

특히, 최근 우리나라에서도 생수의 시판이 허용되었으며, 지하수법과 시행령이 제정되어 지하수의 본격적인 개발을 눈앞에 두고 있는 이 때 지하수의 무분별한 개발로 인한 여러가지 장애가 발생하지 않도록 함은 물론 지하수의 수량과 수질관리를 위한 감시체계의 확립이 시급하다고 하겠다.

본 강좌에서는 지하수의 근원과 분류, 우리나라

의 지하수 사용량, 부존량 및 수요량을 추정하고, 비합리적이고 무절제한 개발로 인한 지하수자원의 양적, 질적인 여러가지 문제점을 사전에 예방하기 위한 합리적인 관리방향을 제시하고, 지하수 수질 보호 및 감시기법에 관한 소개로 관계자들의 업무에 도움을 주고자 한다.

### 1. 지하수의 정의 및 근원

지하수에 대한 정의는 학자에 따라 다르다. Bear(1979)에 의하면 지하수란 지표면 아래에 있는 모든 물을 총칭하나, 수문학자들은 주로 포화층의 지하수에만 관심이 있으므로 일반적으로 지하수라 하면 불포화층의 물은 제외한다고 하였다. Bouwer(1979)는 지표면 아래에 있는 물 중 우물이나 터널을 이용하여 개발할 수 있는 물과 지하에서 자연적으로 흘러 샘이 되어 지표로 나오는 물을 말한다고 하였다. 즉, 지하수란 降雨나 降雪의 일부분이 지표면을 통하여 땅속으로 침투하여 암반이나 점토등의 불투수층에 도달하였을 때 그 지층위에 고이게 된 물을 말한다. 일반적으로 지하수는 結晶水나 土壤水를 제외한다. 즉, 지하수의 근원은 降水이며 지하수는 循環水의 한 종류이다.

### 2. 지하수의 분류

지하수의 분류는 지층중에 분포되어 있는 地層水 또는 間隙水(Pore water)와 암석의 龜裂部에

\* 경북대학교 농과대학

脈狀으로 차서 이동하는 열하수(Fissure water) 및 암반중의 큰 도관이나 공동에 차 있는 洞空水(Cavern water) 및 湧泉水로 나누어 진다. 포화층 중에서 透水性이 크고 우물을 통하여 충분한 양의 물을 산출해 낼 수 있는 지질구조를 帶水層(Aquifer)이라 부른다.

지층수는 自由地下水와 被壓地下水로 구분되며 보통 실트, 모래, 자갈 등의 충적층이나 홍적층에 존재하며 얇은 관정을 설치하여 쉽게 개발할 수 있다. 자유지하수는 투수층 아래에만 불투수층이 있어 지하수는 압력을 받지 않으며 지하수면의 변화가 자유롭다. 반면에 피압지하수는 상하의 불투수층 사이에 끼어있는 경우로 지하수는 압력을 받고 있다. 지층수의 특별한 경우로 伏流水가 있는데 이는 하상의 모래와 자갈층으로 침투하여 흐르는 물을 말하며 집수암거를 이용하여 쉽게 개발할 수 있다.

열하수는 암석에 불규칙하게 발생한 균열부에 존재하는 물이며, 공동수는 석회암이나 용암안에 생성된 공동에 차 있는 물을 말하며, 이들은 모두 암반지하수로 불린다. 이러한 암반지하수는 물리 탐사나 시추조사등을 통하여 수맥을 찾아서 일반적으로 깊은 관정을 설치하여 개발한다. 제주도과 같은 화산암 지역에서는 용암쇄설물의 공극과 현무암의 균열이나 공동에 많은 양의 지하수가 부존되어 있다.

용천수는 특별한 경우로서 지하에 저장된 지하수가 대수층을 통하여 이동하다가 특수한 지질구조를 만나 지표로 용출하는 물을 말한다.

지표수와 지하수가 상호 연결되어 있는 충적지하수의 경우에는 지하수의 흐름이 상호 작용을 한다. 즉, 하천수위가 높으면 하천수가 지하수로 유입되고 그 반대의 경우에는 지하수가 하천수로 유출된다. 따라서, 이러한 경우의 수자원 관리는 지표수와 지하수를 총체적으로 하여야 한다.

## II. 우리나라의 지하수

우리나라에서는 1936년에 근대적인 지하수의 개발에 착안하였으며 1940년의 擘米 계획에서 지하수 개발을 전국적 규모로 계획하였다(이천복,

1989 : 농수산부, 1985). 그 이후 현재까지 60년 가까이 지하수 개발사업이 진행되고 있으나, 체계적인 지하수조사 및 개발은 1963년 부터 시작되었다고 할 수 있다.

우리나라의 과거 10여년간의 지하수 사용량의 변화 추세를 보면 년 평균 2.4%의 증가를 보이고 있으며 용수 목적별로 보면 농업용수는 매년 0.6%의 증가를 보이고 있으며, 공업용수는 4.5%, 생활용수는 4.4%의 증가율을 보이고 있다(정상욱, 배상근, 1990).

### 1. 부존량

지하수 부존량을 구하기 위해서는 대상 지하수역(Groundwater basin)에 대한 조사가 정밀하게 이루어져야 하며 그래야만 비교적 확실한 추정치가 가능하다. 제한된 자료로 넓은 지역의 지하수 부존량 추정에는 많은 불확실성이 개재된다.

지하수 이용계획을 위해서는 특정지역의 지하수 부존량 뿐만 아니라 함양량, 유동량과 가능채수량 등에 대한 검토 및 연구가 필요하다.

#### 가. 대수층과 수리지질

지층을 지하수 부존측면에서 대별할 때 고결지층과 미결지층으로 분류하며, 미결지층의 대표적인 것이 충적층이며 고결지층은 암반층을 말한다. 충적층은 제 4기의 충적체에 퇴적된 지층으로 구성물질은 모래, 자갈, 점토 등이며 일반적으로 공극성이 좋은 대표적인 대수층으로 지하수자원의 주요 공급원이다. 우리나라 전국에 걸쳐 분포하고 있는 충적층은 대체로 보아 각 유역 하류부에 유역 내 다른 지역보다도 깊고 넓게 분포한다.

충적층의 심도는 한강, 낙동강 하류에서 20~50m로서 평균 30m에 달한다. 그러나 상류로 갈수록 그 두께가 얇아져서 전국에 걸친 충적층의 평균 두께는 약 7m이다(농수산부, 1985). 충적층은 대체로 砂層, 礫層 및 사력층과 같은 대수층과 점토층, 실트층과 같은 난대수층으로 구성되어 있으며 각 층별 구성성분은 천차만별이다.

암반층은 제 3기층 이전의 퇴적암, 화성암, 변성암 등의 암반중에 암석의 생성시나 그 후에 균열이나 공동이 생겨 그 속으로 지하수가 유동한다. 암반중의 공극과 균열은 대단히 복잡한 구조를 하고

있으나 하나의 커다란 저류층과 투수층을 형성하고 있다.

최근에는 암반 지하수의 개발이 국내에서 활발히 진행되고 있다. 최근 지하수 개발은 충적층에서 보다는 암반층에서 보다 많이 이루어지고 있으며 심정호의 깊이가 수백 m를 넘는 것이 많고 우물당 양수량도 천정보다 수배에 달한다.

나. 지하수 부존량

지하수 부존량과 양수가능량은 충적층 및 중요 지질 분포면적과 각 지질구조별 부존심도, 공극율 및 비산출율로부터 구할 수 있다. 충적층 및 중요 지질 분포면적은 1:25,000 지질도와 1:50,000 지질도로 부터 추정할 수 있다. 지질구조별 賦存深度, 공극율 및 비산출율은 현장 관측자료와 참고문헌으로 부터 얻을 수 있다.

우리나라의 육지부와 제주도의 지하수 부존량 및 채수 가능 지하수량을 추정한 결과가 <표-1>에 나타나 있다. 우리나라의 지하수 부존량은 13,240 억 m<sup>3</sup>이고 가용포장량은 1,170억 m<sup>3</sup>로 나타나 있다. 여기서 부존량은 공극율로부터 구하였고 가용포장량은 비산출율과 재순환율을 고려하여 계산한

<표-1> 지하수 부존 현황

분포지질별		분포면적 (km <sup>2</sup> )	지하수부존 심도(m)	지하수包藏 능력(억 m <sup>3</sup> )	가용包藏 (억 m <sup>3</sup> )
합 계		98,490	-	13,240	1,170
육지부	계	96,670	-	13,140	1,160
	충적층	(27,380)	3	280	110
	화성암	31,820	200	630	60
	퇴적암	28,780	800	11,510	920
변성암	36,070	200	720	70	
제주도	화산암	1,820	400	100	10

( ) : 충적층 지역 중복면적

자료 : 지하수 개발과 농어촌 용수(농진공, '94. 6)

값이다.

2. 사용량

우리나라의 지하수 이용 현황을 조사하기 위하여는 양수량 관측자료가 구비되어 있어야 하나 우리나라에는 지하수 이용에 관한 종합적인 통계자료는 미미한 실정이다. 본 고에서는 최근의 조사자

<표-2> 연간 지하수 이용 현황

(단위 : 백만 m<sup>3</sup>/년)

구 분	생활용수		공업용수		농업용수		합 계	
	개 소	이용량	개 소	이용량	개 소	이용량	개 소	이용량
계	113,762	935.9	11,683	248.6	301,174	1,162.2	426,619	2,346.7
서울	21,225	58.0	3,709	17.2	-	-	24,934	75.2
부산	3,477	20.2	500	5.6	19	0.02	3,996	25.8
대구	1,781	15.2	276	5.7	4	0.01	2,061	20.9
인천	1,128	4.6	116	1.4	44	0.7	1,288	6.7
광주	1,338	15.1	156	3.5	1,379	3.6	2,873	22.2
대전	10,257	25.1	288	2.9	70	6.7	10,615	34.7
경기	15,632	124.9	1,307	83.8	45,177	158.2	62,116	366.9
강원	3,845	89.5	144	5.3	9,488	62.4	13,477	157.2
충북	16,665	55.5	645	12.8	24,184	79.1	41,494	147.4
충남	8,844	75.5	408	28.7	65,044	216.2	74,296	320.4
전북	3,423	46.0	265	10.8	55,847	185.4	59,535	242.2
전남	3,771	62.9	242	20.1	61,414	213.3	65,427	296.3
경북	9,854	145.8	435	15.7	29,776	175.9	40,065	337.4
경남	11,412	106.4	3,008	25.9	7,178	38.1	21,598	170.4
제주	1,110	91.2	184	9.2	1,550	22.6	2,844	123.0

자료 : 지하수자원 기본조사 보고서(한국수자원공사, '93. 5)

료인 지하수자원 기본조사 보고서(한국수자원공사, 1993)의 자료를 이용하였다.

지하수의 사용목적지를 보면 농업용을 비롯하여 공업용, 생활용, 목욕탕, 수영장, 행정기관, 각급학교, 군부대, 레저타운 등이 있다. 지하수 이용 실태에 대하여는 행정구역별로 조사 되었으며, 크게 농업용, 공업용 및 생활용으로 나누었다. <표-2>는 행정구역별 및 용수목적별 지하수 이용 현황을 보여주고 있다. 연간 지하수 사용량은 생활용수가 113,762개소에서 935.9백만톤, 공업용수가 11,683개소에서 248.6백만톤, 농업용수가 301,174개소에서 1,162.2백만톤으로 합계 426,619개소에서 2,346.7백만톤으로 집계되었다.

우리나라의 지하수 사용량은 과거에는 농업용수가 주를 이루었으나, 점차 공업용수와 생활용수로 이용되는 양이 증가해 가고 있는 추세라고 하겠다. 각 용수 목적별 이용현황을 설명하면 다음과 같다.

농업용수 사용량은 다른 용수에 비해 기상조건에 많은 영향을 받는다. 따라서 매년 농업용수 사용량은 크게 변화한다. 농업용 지하수의 개발은 한발 피해를 줄이기 위한 대책으로 시작되었다. 농업용 지하수 개발시설로는 크게 하천의 복류수를 이용하는 집수암거와 관정으로 구분할 수 있다.

한국 지하수 개발의 초기단계부터 재개발 단계까지는 집수암거와 소형관정을 주로 개발하였으나, 충적층 개발 일변도의 개발 방법의 한계성이 대두되어 활성화 단계인 1982년 부터는 충적층은

<표-3> 농업용 지하수 개발 시설의 분류

시설종류	사업구분	시설 규모	채수량 (m <sup>3</sup> /일)
대형관정	소규모 및 보강 지하수		
(충적관정)	-	구경 200mm, 심도 10m 내외	150이상
(일반관정)	-	구경 200mm, 심도 50~150m	250이상
방사상 집수정	보강지하수	구경 3.5m, 심도 8m 내외	4,000~7,000
소형관정	한 발 대비	구경 40~50mm, 심도 15~30m	50이상
지하댐	중규모 지하수	차수벽 및 방사상집수정	

물론 암반층의 대형관정을 주로 하여 방사상 집수정, 지하댐, 소형관정 및 이동식 양수시설 등을 개발해 오고 있다. 현재의 지하수 개발 시설별 사업구분, 시설규모 및 기준 채수량은 <표-3>과 같다.

각 지하수 개발시설에 대하여 설명하면, 먼저 대형 관정은 대수층의 종류에 따라 沖積管井과 岩盤管井으로 구분되며 수맥도 조사 결과 개발 적지로 판정된 곳에 항구적 시설로 대형의 관정을 설치하여 한발에 대비하는 시설이다.

放射狀 集水井은 충적 대수층으로 부터 다량의 채수가 가능한 곳에 대구경 集水垂坑을 설치하고 방사상으로 여러개의 집수용 수평공을 뚫어 다량의 지하수를 채수하는 시설이다.

지하댐은 다량의 양수가 가능한 충적 대수층 지역의 지하에 차수벽을 설치하고 그 상류에 방사상 집수정을 설치하여 저장된 다량의 물을 양수하여 한발에 대처하기 위한 것이다.

앞으로 안정적인 농산물 생산을 위해서는 적지에 지하댐을 많이 설치하여 홍수 유출량을 지하 저수지인 대수층내에 최대한 저류시켜 이용하여야 할 것이다. 1991말 현재 전국 15개 지역에 시공 되었으며 점차 확대되어 가고 있다.

이동식 양수시설은 한발에 대비하여 하상 등에 집수암거와 양수대를 설치하여 두고 필요한 경우에 양수기를 이설하여 안정적인 용수계획을 도모하기 위한 것이다.

항구 지하수 개발은 水脈調査 결과 지하수 개발 적지로 판명된 곳에 대형관정, 방사상 집수정, 지하댐 등을 개발하여 항구적으로 한발에 대처하는 것이다.

1991년말 현재 전국의 농업용 지하수 시설 현황은 집수암거가 4,265개소, 대형관정은 9,506개소, 소형관정은 226,119개소, 지하댐은 15개소, 방사상 집수정은 26개소이다.

공업용수로 이용되는 지하수는 대규모 공업단지, 농공단지 및 개별업체가 사용하는 지하수로 분류된다. 이중 대규모 공업단지와 음료수 및 주류제조업체가 다량의 물을 필요로 하기 때문에 지하수 사용량이 많은 것으로 나타났다. 산업의 발달로 공업용수 수요의 증가가 예상되며 따라서 공업용 지하수의 사용량도 점차 증가할 것이다.

생활용수는 가정용수, 상업용수, 공공용수, 消火용수 등을 포함한다. 상수도 계통을 통하여 공급되는 생활용수는 일반적으로 양수기에 의한 계량이 되기 때문에 정확한 사용량이 조사될 수 있다. 그러나 상수도 계통이 아닌 지하수의 경우에는 개별적으로 개발한 사용량은 추정하기가 어렵다. 생활용수로 사용되는 지하수는 소규모 간이상수도와 가정이나 업소에서 자체개발하여 사용하고 있는 시설로 나눌 수 있다.

### 3. 장래 수요량 추정

지하수 수요량은 여러가지 요인에 의하여 영향을 받게 된다. 즉, 지하수의 부존량, 부존상태, 지표수자원 현황, 기상조건 등의 자연조건과, 인구증가율, 산업의 발달, 토지 이용 상태의 변화, 농경지 면적의 변화 등의 사회적 조건 및 지하수 개발 기술 및 장비 상태, 지하수 관리 제도, 시설투자, 예산 등에 따라 지하수 수요량이 결정되게 된다. 따라서 지하수 수요량의 추정은 여러가지 요인들을 종합적으로 고려하여야 한다.

우리나라의 물수지를 보면 년평균 강수량이 1,274mm로서 수자원 총량은 1,267억톤이며 이중 228억톤이 지하로 침투하여 지하수 함양량이 된다. 함양량의 70% 정도가 경제적 개발가능량으로 보면 이용가능량은 연간 160억톤이 된다. <표-2>에서 현재의 지하수 사용량이 23억톤으로 총 이용가능량의 14%에 불과하여 앞으로 개발여지가 많다고 하겠다.

본 고에서는 장래 지하수 수요량 추정을 정과 배(1990)의 1975년부터 1988년 까지의 지하수 사용 자료를 이용하여 회귀 분석 기법을 이용하여 1996년부터 2011년 까지의 용수목적별로 추정된 값을 사용하였다. 각 용수목적별 수요량 추정은 다음과 같다.

안정적인 농업용수 공급을 위하여 지하수 개발 사업은 꾸준히 계속될 전망이다. 즉, 매년 수백도 조사사업과 함께 항구 지하수, 원예단지 지하수 및 긴급 한해 대책 지하수 개발은 물론 개인이 개발하는 소형관정 개발사업이 활발히 진행될 전망이다.

농업용 지하수의 수요량은 위의 네가지 항목을 합산하여 추정하였으며, 수요 추정량은 2011년에

는 9.6억 $m^3$ 로, 2011년에는 10.1억 $m^3$ 로 나타났다. 이는 평균 년 0.6%의 증가율을 나타낸다.

공업용 지하수 수요 추정량은 2001년에는 4.11억 $m^3$ 로, 2011년에는 5.55억 $m^3$ 로 나타났다. 이는 평균 년 4.5%의 증가율을 나타낸다.

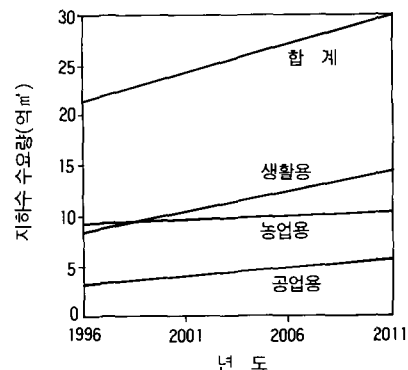
생활용 지하수 수요 추정량은 2001년에는 10.4억 $m^3$ 로, 2011년에는 13.9억 $m^3$ 로 나타났다. 이는 평균 년 4.4%의 증가율을 나타낸다.

이들을 종합하면 1996년부터 2011년 까지의 농업용, 공업용 및 생활용 지하수를 합한 총 지하수 수요량의 추정치는 <표-4>와 같다. 총 지하수 수요 추정량은 2001년에는 24.1억 $m^3$ 로, 2011년에는 29.6억 $m^3$ 로 나타났다. 이는 평균 년 2.4%의 증가율을 나타낸다.

<표-4> 지하수 수요량 추정

단위 : 10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>/년

구 분	1996	2001	2006	2011
생 활 용	859,961	1,037,421	1,214,884	1,392,342
농 업 용	933,764	958,691	987,621	1,014,539
공 업 용	339,422	411,324	483,226	555,124
계	2,133,147	2,407,436	2,685,731	2,962,005



<그림-1> 용수 목적별 지하수 수요량 추정 (1996~2011)

<그림-1>은 용수 목적별로 1996년부터 2011년 까지의 지하수 수요량 추정치를 보여주고 있다. 2011년의 총 지하수 수요 추정량 29.6억 $m^3$ 중 농업용, 공업용 및 생활용 지하수 수요 추정량은 각각 10.1억 $m^3$ , 5.6억 $m^3$  및 13.9억 $m^3$ 이며, 이는 총 지하수 수요량의 34%, 19% 및 47%를 나타낸다.

## IV. 지하수 수질 보호 및 감시

### 1. 오염원

지하수의 수질을 악화시키는 오염원에는 여러가지가 있다. 우리나라에서도 최근에는 산업발전에 따른 산업폐수, 생활하수, 축산하수, 농업하수 등의 오염물질이 지하로 유입되어 지하수 오염문제가 심각하게 대두되고 있다. 이러한 오염원은 그 발생 위치에 따라 크게 지표면, 지하 불포화층 및 포화층으로 구분할 수 있다. <표-5>는 발생 위치에 다른 오염원의 종류를 보여주고 있다.

첫째, 지표면으로 부터의 오염원에는 오염된 지표수의 침투, 하수와 슬러지의 지표처분, 비료와 농약의 사용, 탱크트럭 등의 전복사고로 인한 화공약품이나 기름 등의 누출 등이 있다. 둘째, 지하 불포화층으로 부터의 오염은 정화조나 간이화장실,

<표-5> 지하수 오염원의 분류

<p>A. Originating on land surface</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Infiltration of polluted surface water</li> <li>• Land disposal of solid or liquid waste</li> <li>• Stockpiles</li> <li>• Dumps</li> <li>• Disposal of sewage and sludge</li> <li>• Deicing salt usage and storage</li> <li>• Animal feedlots</li> <li>• Fertilizers and pesticides</li> <li>• Accidental spills</li> </ul> <p>B. Originating above the water table</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Septic tanks, cesspools and privies</li> <li>• Holding ponds and lagoons</li> <li>• Sanitary landfill</li> <li>• Waste disposal in excavation</li> <li>• Leakage from underground tanks</li> <li>• Leakage from underground pipes</li> <li>• Artificial recharge</li> <li>• Sumps and dry wells</li> </ul> <p>C. Originating below the water table</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Waste disposal in wet excavation</li> <li>• Drainage wells and canals</li> <li>• Well injection of waste</li> <li>• Underground storage</li> <li>• Mines</li> <li>• Exploratory and abandoned wells</li> </ul>
--

하수처리용 연못, 각종 폐기물의 지하 매립, 지하 저장 탱크나 수송관으로 부터의 누출, 지하수의 재충전 등이 있다. 셋째, 지하수면 아래로 부터의 오염은 폐기물의 매립, 배수개선용 우물(Drainage well), 폐기물의 우물주입, 지하저장 탱크, 폐기된 우물을 통한 오염 등이 있다.

이러한 오염원별 오염물질의 종류에는 여러가지가 있다. 농업활동이 활발한 지역에서는 비료나 농약의 잔류물이 지하수에 도달하게 되어 질산염(Nitrate), 유기화합물(THMs, Aromatics 등), 각종 농약 등이 지하수를 오염시킨다. 또, 화학공업단지에서는 화재, 관리소홀 및 사고 등으로 각종 유해 화합물질이 지하수를 오염시킨다. 또한 원자력 개발로 인한 방사능 등 기타 여러가지 오염원이 있다.

### 2. 오염 방지 및 원상 회복 기법

지하수자원은 한번 오염되어 오염이 확산되면 원상회복에는 많은 비용과 시간이 소요되며 경우에 따라서는 회복에 불가능할 수도 있다. 따라서 되도록이면 사전에 지하수 오염을 방지하는 여러가지 방법을 강구하여야 한다.

<표-6>은 가능한 오염원 통제 전략에 대하여 소개하고 있다. 첫째 전략은 재사용, 원심분리, 여과, 모래건조상 등을 이용하여 오염물의 체적을 감소시키는 것이며, 둘째는 여러가지의 물리적, 화학적 방법을 이용하여 오염물질의 독성을 제거시키는 전략이다.

<표-7>은 지하수자원이 오염되었을 경우 오염 정도를 감소(Abatement)시키는 방법과 원상회복(Restoration)시키는 방법들을 소개하고 있다. 급성오염의 경우 감소시키는 방법에는 화학물질을 사용하여 중화시키거나 오염된 토양을 제거시키는 방법이 있으며, 원상회복 기법에는 우물을 통하여 오염된 지하수를 제거시키는 방법이 있다. 만성 오염 문제에 있어서, 급성 문제시의 방법 외에 감소시키는 방법에는 차단수로나 불투수성 재료를 이용한 지표면 차단 또는 지하차폐 등의 방법이 있으며, 원상회복 기법에는 현장에서의 화학처리나 생물학적 처리 방법이 있다.

지하수가 오염되었을 때 미국의 국가긴급계획

(National Contingency plan)에서는 아래의 7단계를 거쳐 조치를 하도록 되어 있다.

- 1) Discovery and notification
- 2) Preliminary assessment
- 3) Immediate removal
- 4) Evaluation and determination of appropriate response
- 5) Planned removal
- 6) Remedial action
- 7) Documentation and cost recovery

즉, 일단 지하수자원의 오염 사실이 발견되면 즉시 필요한 긴급조치를 취하고 난 후 세밀한 치유계

<표-6> 지하수 오염원의 통제 전략  
(After Carter and Knox, 1985)

<p>I. Volume Reduction Strategies</p> <p>A. Recycling</p> <p>B. Resource recovery</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Materials recovery</li> <li>2. Waste-to-energy conversion</li> </ol> <p>C. Centrifugation</p> <p>D. Filtration</p> <p>E. Sand drying beds</p> <p>II. Physical/ Chemical Alteration Strategies</p> <p>A. Chemical Fixation</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Neutralization</li> <li>2. Precipitation</li> <li>3. Chelation</li> <li>4. Cementation</li> <li>5. Oxidation-reduction</li> <li>6. Biodegradation</li> </ol> <p>B. Detoxification</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Thermal</li> <li>2. Chemical : ion-exchange, pyrolysis, etc</li> <li>3. Biological : activated sludge, aerated lagoons, etc</li> </ol> <p>C. Degradation</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Hydrolysis</li> <li>2. Dechlorination</li> <li>3. Photolysis</li> <li>4. Oxidation</li> </ol> <p>D. Encapsulation</p> <p>E. Waste segregation</p> <p>F. Co-disposal</p> <p>G. Leachate recirculation</p>
---

획을 수립하여 <표-7>의 방법들을 이용하여 원상회복을 위한 노력을 한 후 마지막 단계에서 기록보존과 소요된 비용을 원인행위자로부터 징수한다.

<표-7> 지하수 수질보호 및 원상회복 방법  
(After Carter and Knox, 1985)

Pollution Problem	Goal	Methodologies
Acute	Abatement	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. In situ chemical fixation</li> <li>2. Excavation of contaminated soil with subsequent backfilling with "clean" soil</li> </ol>
Acute	Restoration	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Removal wells, treatment of contaminated ground water, and recharge.</li> <li>2. Removal wells, treatment of contaminated ground water, and discharge to surface drainage.</li> <li>3. Removal wells and discharge to surface drainage.</li> </ol>
Chronic	Abatement	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. In situ chemical fixation.</li> <li>2. Excavation of contaminated soil with subsequent backfilling with "clean" soil</li> <li>3. Interceptor trenches to collect polluted water as it moves laterally away from site.</li> <li>4. Surface capping with impermeable material to inhibit infiltration of leachate-producing precipitation.</li> <li>5. Subsurface barriers of impermeable material to restrict hydraulic flow from source.</li> <li>6. Modify pumping patterns at existing wells.</li> <li>7. Inject fresh water in a series of wells placed around source or contaminant plume to develop pressure ridge to restrict movement of pollutants</li> </ol>
Chronic	Restoration	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Removal wells, treatment of contaminated ground water, and recharge.</li> <li>2. Removal wells, treatment of contaminated ground water, and discharge to surface drainage.</li> <li>3. Removal wells and discharge to surface drainage.</li> <li>4. In situ chemical treatment.</li> <li>5. In situ biological treatment.</li> </ol>

### 3. 지하수 수질감시 기법

#### 가. 감시사업의 범위

지하수 수질감시 사업의 목적은 지하수를 수자원으로 지속적으로 사용하기 위하여 지하수 수질의 상태와 그의 변화를 파악하여 감시사업의 목적에 적합하게 통제하기 위한 정보를 얻는 데 있다. 수질감시 사업을 효율적이고 경제적으로 수행하기 위하여는 적절한 계획 수립이 필수적이다. 감시사업 관리측면에서는 여러가지 계획중 특히 장비, 소모품 및 인력 계획이 핵심적인 요소이다. 지하수 수질감시사업의 일반적인 사업범위는 <표-8>에 소개한 바와 같다.

<표-8> 지하수 수질 감시사업의 일반적인 사업범위

사업구분	세 부 항 목
1) 사전 작업	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦대상지역에 대한 기존 자료 및 연구결과 조사</li> <li>◦현지 조사</li> <li>◦지질 조사</li> <li>◦감독관청 방문</li> </ul>
2) 감시체계 설계와 계획	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦감시정의 위치 및 시공상세 계획</li> <li>◦감시체계 설계 및 작업계획 수립</li> <li>◦장비, 소모품 및 기술용역 주문 계획</li> <li>◦관련 허가 취득</li> </ul>
3) 감시우물 설치	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦현장에 인력 파견</li> <li>◦우물 굴착 및 지질주상도 작성</li> <li>◦우물의 설치</li> <li>◦우물의 개발</li> </ul>
4) 지하수 시료 채취 및 분석	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦수위 관측</li> <li>◦우물 내 고인 물 제거</li> <li>◦시료의 채취</li> <li>◦시료를 분석실로 수송</li> <li>◦현장 청소</li> <li>◦인력 철수</li> <li>◦실험실 분석</li> </ul>
5) 보고서 준비	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦자료 분석</li> <li>◦보고서 작성</li> <li>◦보고서 검토</li> <li>◦보고서 제출</li> </ul>

#### 나. 감시정 설치

감시정은 현장에서 우물을 굴착하여 설치한다. 감시정은 설치 방법에 따라 지하수 시료의 수질에

영향을 미칠 수 있다. 예를 들면 관측정의 굴착 방법에 따라 기름류나 윤활유 및 밀봉제 등이 우물에 유입될 수도 있다. <표-9>는 감시정 설치와 시료 채취시에 필요한 장비와 소모품 목록을 보여주고 있다. 물론 모든 감시사업에 <표-9>에 제시된 품목들이 모두 필요한 것은 아니고 경우에 따라서는 필요하지 않는 항목도 있을 수 있다.

시료채취에 필요한 우물 내경의 최소치는 채취 장비의 종류에 따라 1.3cm(Bailer, Suction lift pump등)에서 5.0cm(Gear drive pump, Helical rotor pump 등)의 범위이다(Nielsen, 1991 : p. 476).

<표-9> 감시정 설치와 시료채취시에 요구되는 장비와 소모품 목록

구 분	품 목		
1) 장비	Bailer	Air lift pump	
	Camera	Cement mixer	
	Generator	Grout tank/ grout pump	
	Safety equipment	Shovels	
	Soil sampler	Steam cleaner	
	Submersible pump	Surge block	
	Tape measure	Tool kit	
	Trowel	Truck	
	Drill rig and support equipment		
	Tanks or drums for storage of developed water		
	2) 소모품	Aluminum foil	Fuel
		Bentonite	Gloves
		Blank casing	Hard hats
		Blue ice	Ice chest
Buckets		Hose/ cable or pump	
Casing Centralizer		Padlocks	
Paper towels		Cement/ bentonite grout	
Plastic bags		Chain of custody forms	
Plastic sheets		Decontamination	
Ready-mix cement		detergents	
Rope		Distilled water	
Rubber boots		Drinking water container	
Safety glasses		Drums for waste	
Sample containers		Electrical extension cords	
Sample labels		End caps	
Scrub brushes		Field notebook	
Tremie pipe		Film	
Tyvek suits		Filter sand	
Well log forms		Fire extinguishers	
Flash lights		First aid kit	
Slotted casing(screen)		Waterproof marking pen	
Duct, strapping, clear and electrical tapes			



#### 다. 시료 채취

지하수 시료는 대수층을 대표할 수 있어야 한다. 이를 위하여 시료는 최소한으로 교란되고 질량과 화학 평형식을 만족하여야 하며, 미량의 유기화합물을 10 $\mu$ g/1 수준에서 검출 가능하여야 한다. 지하수 수질 분석을 위한 지하수 시료채취는 월별, 분기별, 반년, 또는 일년 등의 일정한 시간 간격마다 하는 것이 일반적이다. 수질분석을 위한 시료채취는 지하수의 전체적인 감시체계의 일정에 맞추어야 하기 때문에 인력과 장비를 확실하게 확보하기 위하여 사전에 잘 계획하여야 한다.

지하수 시료채취 계획시 고려하여야 할 항목으로는 다음과 같은 것들이 있다.

- 1) 지하수 시료채취 및 분석 목적
  - 2) 지역별 시료 및 분석 항목
  - 3) 시료 채취 지점의 위치, 상대 및 접근의 난이
  - 4) 일회에 채취할 시료의 개수 및 채취 빈도
  - 5) 시료 채취 계획안 : 우물 Purging 과정과 필요한 장비, 현장 변수들의 감시 방법, 시료 채취 방법, 현장 QA/QC 통제 방법
  - 6) 현장 시료의 전처리 필요성 : 여과, 보존 용액
  - 7) 시료 운송
  - 8) 시료 관리 기록
  - 9) 시료의 분석 : 분석 방법의 선정, 저장 및 대기시간, 실험실 QA/QC 통제 방법
- 시료 채취 지점이 다가오면 사업 책임자는 인력, 장비, 소모품 등을 확인하고 분석 실험실과도 협의하여야 한다. 또한 현장 시료채취를 하기 전에 최소한 다음 사항을 확인하여야 한다.
- 1) 시료채취 장비, 시료용기, 방부용액, 증류수, 운송용기의 선정
  - 2) 각 시료에 대한 분석종류와 분석방법, 검출한계, QA/QC 절차
  - 3) 시료의 체적, 시료 보존방법, 시료 포장, 시료 운반 및 대기시간
  - 4) 시료 분석 소요시간
  - 5) 시료 분석 결과의 보고방법과 피보고자
  - 6) 분석 실험실에 시료 도착 예정시각을 연락하는 방법

최근 수질분석에 있어서 QA/QC(Quality as-

urance/Quality control)의 중요성이 강조되고 있다. QA/QC는 정확한 분석자료를 얻기 위하여 매우 중요하다. 또한 QA/QC 기록은 자료의 신빙성을 높여주고, 장기 사업에 있어서 수집자료의 일관성을 부여하며, 자료수집 과정의 기록을 제공한다.

〈표-10〉은 시료 채취 및 분석계획시 고려되어야 할 사항들을 보여주고 있다.

현장 시료 채취 기록표에는 사업명, 우물번호, 채취깊이, 채취일시, 시료번호 등의 일반적인 항목과 현장에서 관측하여야 되는 항목인, 지하수위, 고인 물 제거량, 양수율, 수온, 전기전도도, pH, 산화환원전위(Redox potential) 및 용존산소량 등과 기타 특이한 사항이 포함되어야 한다.

〈표-10〉 시료 채취 및 분석계획시 고려되어야 할 사항

구 분	고 려 사 항
1) 시료 채취	<ul style="list-style-type: none"> <li>○채취 빈도</li> <li>○감시우물 내 고인 물 제거방법</li> <li>○채취 장비</li> <li>○채취시 유량</li> <li>○장비 청소 방법</li> <li>○현장 감시 대상 항목</li> <li>○현장 관측 기록</li> </ul>
2) 시료 취급	<ul style="list-style-type: none"> <li>○시료 용기 및 보존시약</li> <li>○현장 여과 필요성</li> <li>○시료의 표시, 보관, 수송, 안전</li> </ul>
3) 시료 취급 기록	<ul style="list-style-type: none"> <li>○시료 인계 인수 기록부 유지</li> </ul>
4) 실험실 분석	<ul style="list-style-type: none"> <li>○분석방법 결정</li> <li>○하청 분석 실험실 결정</li> <li>○각 수질 항목의 분석방법 기술</li> <li>○QA/QC 기록</li> <li>○보고 방법 및 절차</li> </ul>

〈표-11〉은 대표적인 시료 채취장비의 종류 및 특성을 보여주고 있다. 채취장비는 시료의 압력변화, 온도변화, 교란 및 기체나 액체의 유입 등이 최소화될 수 있도록 선정하여야 한다.

#### 라. 대수층 시험

대수층의 물리적 특성을 조사하기 위한 양수시험은 오염된 지하수를 처리하기 전에 미리 실시하

<표-11> 시료 채취장비의 종류 및 특성

Device	Description
Open bailer	Open top. Bottom sealed or fitted with foot valve. Available in wide range of rigid materials. Unlimited sampling depth. Variable sample volume.
Point-source Bailer	Check valve at both top and bottom. Valves are opened by cable operated from ground surface. Unlimited sampling depth. Variable sample volume.
Syringe samplers	Sample container is lowered into sampling installation. Stainless steel, Teflon, glass, polyethylene are used. Unlimited sampling depth. Max. 750ml sample volume.
Gear-drive pump	Electric motor rotates a set of Teflon gears to drive the sample up the discharge line. Stainless steel, Teflon, Viton are used. Max. 60 m sampling depth. Max. 30 l / s flow rate.
Gas-drive samplers	Gas (air, oxygen, nitrogen, etc.) pressure applied to water within sample chamber forces sample to surface. Teflon, PVC, polyethylene are used. Max. 90 m sampling depth. Max. 13 l / s flow rate.
Bladder pump	Flexible bladder within device has check valves at each end. Stainless steel, Teflon, Viton, PVC, silicone are used. Max. 120 m sampling depth. Max. 30 l / s flow rate.
Suction lift (Peristaltic) pump	Self priming vacuum pump is operated at ground surface and is attached to tubing which is lowered to the desired depth. Tygon, silicone, Viton, Neoprene, Teflon are used. Max. 7.5 m sampling depth. Variable flow rate.
Helical rotor pump	Water sample is forced up discharge line by electrically driven rotor-stator assembly. Stainless steel, EPDM, Teflon, Viton are used. Max. 40 m sampling depth. Max. 20 l / s flow rate.
Centrifugal pump	Electrically driven impeller accelerates water within the pump body, forcing the sample up discharge line. Stainless steel, rubber, brass are used.

여야 한다. 양수시험은 충분한 양수율로 장시간 실시하여 충분한 수위저하가 발생하도록 하여야 한다. 양수시험시 양수정과 관측정의 수위는 정기적으로 관측하여야 한다.

양수시험에 필요한 인력은 양수시험 기간, 관측정의 수 등에 따라서 다르다. 양수시험의 초기단계에는 관측빈도가 높기 때문에 각 관측정마다 한 사

람씩 배치하여 수위관측을 하도록 하던지, 자동 수위 기록기를 설치하여 수위관측을 하여야 한다.

양수시험 기간은 대수층에 따라서 다르며, 8시간에서 5일 정도의 범위를 가진다. 이 기간동안 양수 펌프는 연속적으로 작동하여야 하며 수위변동도 관측하여야 한다. 펌프가 정지된 후에도 양수시험 시작 전 수위로 회복되는 수위변동도 관측하여야 한다. 양수시험 기간동안 현장에 직원을 계속적으로 상주시켜야 하며 필요한 경우에는 주야간 교대로 배치하여야 한다.

### V. 요약

지하수 자원의 효율적인 이용과 보전을 위하여 필수적인 지하수의 합리적 관리와 수질보호 및 감시를 위하여 지하수 관리방안과 수질보호 및 감시기법을 소개하였다. 먼저 지하수의 근원과 분류, 우리나라의 지하수 부존량과 사용량에 대하여 소개하였고, 특히 우리나라에서는 아직 생소한 지하수 오염방지 및 원상회복 기법과 감시정 설치 방법, 지하수 수질 시료채취 방법 및 대수층 시험방법 등에 대하여 소개하였다. 또, 감시정 설치와 시료채취시에 필요한 장비 및 소모품 목록과, 시료채취 장비의 종류와 특징을 소개하였다. 앞으로 지하수 관련 분야에 종사하는 분들에게 조금이라도 도움이 되었으면 하는 마음이다.

### 참고문헌

1. 농림수산부, 1992. 농업기반조성사업 통계연보.
2. 농림수산부, 1989. 제주도 지하수 장기개발계획 조사보고서, pp. 396.
3. 농수산부, 농업진흥공사, 1985. 지하수 개발사, pp. 827.
4. 농업진흥공사, 1989. 응용지질 세미나 발표집 (지하수 분야).
5. 농어촌진흥공사, 1994. 지하수개발과 농어촌용수, UR대응, 농어촌실행사업 대실포지업, pp. 284.
6. 배상근, 1988. 지하수 모델링의 제기법, 한국수문학회지, 21(3), pp. 219~222.

7. 이천복, 1989. 한국의 지하수 개관, 응용 지질 세미나 발표집, 농업진흥공사, pp. 23~32.
8. 정상옥, 1994. 지하수 수질 감시 기법, 한국수문학회지, 27(3), pp. 20~24.
9. 정상옥, 1989. 지하수자원의 수질보호, 한국수문학회지, 22(2), pp. 148~153.
10. 정상옥, 배상근, 1990. 지하수 관리, 한국건설기술연구원 보고서, pp. 101.
11. 한국수자원공사, 1993. 지하수자원 기본조사 보고서, 수자원 93-GR-1 보고서, pp. 342.
12. 한국수자원공사, 1990. 수자원장기종합계획 ('91-2011) 보고서, pp. 340.
13. 建設産業調査會, 1980. 地下水ハンドブック
14. Bear, J., 1979. Hydraulics of Groundwater, McGraw-Hill.
15. Bouwer, H., 1978. Groundwater Hydrology, McGraw-Hill.
16. Carter, L.W. and Knox, R.C., 1985. Ground Water Pollution Control, Lewis Publishers, Inc. Chelsea, MI.
17. Nielsen, D.M.,(Ed.) 1991. Practical Handbook of Ground-Water. Lewis Publishers, Chelsea, MI.
18. Todd, D.K., 1980. Groundwater Hydrology, 2nd Ed. Jhon Wiley & Sons.
19. USEPA, 1984. Ground-Water protection strategy, Washington, D.C.

## 정 상 옥



## 약 력

- 1976. 서울대학교 농과대학 농공학과 졸업
- 1982. University of Hawaii M.S.
- 1985. Iowa State University Ph. D.
- 1989. 토목기술사(수자원 개발)
- 현재 경북대학교 농과대학 농공학과 교수  
KCID 편집 및 학술분과위원