"세계 물의 해" 기념 지하수심포지움
(21세기 지하수자원의 지속가능한 개발, 이용 및 관리) 발표 논문집
(사)한국지하수토양환경학회, 한국 수자원공사 2003년 5월 30일

지하수 인공함양 기술 개발

김 형 수 · 함 세 영

한국수자원공사 수자원연구소 수석연구원 · 부산대학교 지구환경시스템학부 교수

1. 서언

21세기에 들어서면서, 수자원에 대한 효율적인 이용 및 관리는 우리나라를 비롯한 많은 국가의 중요 관심 대상이 되었다. 특히, 물부족 사태가 예상되는 국가의 경우, 다양한 방법을 활용한 수자원의 확보 및 효율적인 이용, 관리를 위한 기술개발에 박차를 가하고 있는 실정이다. 우리나라도 2006년이면 물수요량이 물공급량을 초과할 것이라는 예상이 대두되고 있어(건설교통부 · 한국수자원공사, 2000) 수자원의 확보를 위한 기초 연구 및 기술 개발이 절실한 상황이다. 수자원 확보, 이용 및 관리의 문제는 기본적으로 필요한 시기, 필요한 장소에 원하는 수량과 수질을 효율적으로 공급할 수 있느냐의 문제로 귀착된다. 다시 말해 절대적인 수량이나 수질의 확보가 아닌 지속적으로 순환하는 물을 인류의 생명연장과 산업발전을 위해 유용하게 활용할 수 있도록 재배치하고 처리하는 과정으로 이해하여야 한다는 것이다. 이러한 수자원의 확보, 이용 및 관리를 위해 인류는, 잉여기의 물을 저장할 수 있는 인공적인 저수지를 만들어 왔으며, 오염된 물을 정화하기 위한 다양한 수처리 기술을 확보하였다. 또한 지표수에 비해 상대적으로 수량과 수질이 안정적인 지하수를 개발하여 활용하여왔다.

지하수 인공함양 기법은 다양한 수자원의 확보, 이용 및 관리를 위한 한가지 방법이다. 지하수 인공함양의 철학은 수자원의 저장과 처리를 자연적인 대수층을 통해서 수행하자는 것으로 함축 가능하다. 즉, 자연적으로 대수층으로 함양되는 수자원의 양을 인공적인 방법을 통해 증대시켜, 지하 대수층을 수자원 저장 장소로 활용하며, 대수층이 가지고 있는 자연정화 능력을 활용하여 수질을 개선하고자 하는 방식이다. 이러한 지하수 인공함양 기법은 제한된 수자원을 보다 효과적으로 사용하기 위하여, 고안되었으며, 외국의 사례를 볼 때 최근에는 기술적인 발달에 힘입어 지하수 인공 함양 기법을 이용한 용수개발 단가가 상당히 낮아져 실제적인 적용이 가속화될 것으로 예견된다.

인류가 제한된 지구상의 모든 자원에 대해 궁극적으로 관철해야하는 최선의 방법이며, 최후의 방법은 재활용(recycle) 및 재사용(reuse)이라고 할 수 있다. 지하수 인공 함양은 물에 대한 이러한 인류의 궁극적 사용 방법인 재활용과 재사용을 가능케 하여 주는 중요한 수단으로 받아 들여 질 수 있을 것이다. 본 발표는, 아직 국내 수자원 확보, 이용 및 관리에 적극적으로 활용되고 있지 못한 지하수 인공함양 기법을 개략적으로 소개하고 이러한 지하수 인공함양 기법의 도입을 위해 우리가 준비하고 연구 · 개발하여야 하는 사항 및 과학기술부와 건설교통부 주관으로 수행되고 있는 21세기 프론티어 연구 사업인 "수자원의 지속적 확보기술 개발 사업"의 세부과제 "지속가능한 지하수 개발 및 함양 기술 개발"을 통해 수행되고 있는 내용의 일부를 소개하고자 한다.

2. 지하수 인공 함양 일반

지하수 인공함양은 강수에 기인하는 수자원을, 정호, 수로, 함양 분지, 차수벽, 우수 침투 시설, 습지 조성 등 인위적인 시설 설치 또는 지표 조건 변경을 통하여 지하 대수층에 강제적으로 침투 및 저류함으로써 풍수기의 잉여 수자원을 지하지층에 저장하거나, 지층의 자연적인 오염물질 저감 능력을 통해 수질을 개선하는 일체의 행위를 일컫는다. 이러한 지하수 인공 함양의 목적은 매우 다양하며, 대표적으로 다음과 같은 목적으로 수행될 수 있다.

- **수질 개선** : 수질 개선은 지하수 인공 함양의 최초의 시행 목적으로 인공 함양 시 발생하는 수질개선 효과에는 연수화, 황화수소 감소, 부영양화 물질 및 세균 감소, 물리적인 입자 제거, 독성 물질 제거 등을 들 수 있다.
- **지하 수위 회복** : 특정 시기에 지하수 이용이 집중되어 이 이용량이 개발 가능량을 상회하는 경우, 필요에 따라 풍수기 등에 지하에 지하수를 인위적으로 침투시켜, 지하수 대수층의 파괴를 막기 위한 목적으로 수행된다.
- **지하 오염원의 제어** : 지하에 오염원이 존재하는 경우, 이에 대한 유동 확산을 막기 위해 수행되는 지하수 인공함양의 경우이다.
- **관개용수 개선** : 부영양화된 댐 및 호소의 물은 주로 질소, 인 등의 농도가 높아 이를 지하에 저장하여 박테리아에 의한 탈질, 인산염 제거 등을 도모하는 경우이다.
- **지하수의 염수화 방지** : 임해 지역에서 과도한 지하수 채수로 인해 담수체가 급격히 줄어들고 이에 따라 염수가 침입되는 현상이 발생하는 것을 막기 위한 목적으로 인공함양이 수행되는 경우이다.
- **지하 저장** : 지하 저장은 지표수를 지하수와 연계하여 통합 관리하면서 지표수와 지하수의 유동, 부존 특성을 분석하여 필요에 따라 지하에 수자원을 저장하는 방식의 경우이다.
- **기타 목적** : 이 밖에 지반 침하 방지, 대수층 축열 이용, 하수 재처리 등의 목적으로 인공 함양이 사용 가능하다.

이러한 목적의 지하수의 인공 함양 방법은 크게 간접 인공함양과 직접 인공함양으로 구분할 수 있다. 간접 인공함양 방식 중 가장 대표적인 방법은 유도 방식 인공 함양으로 흔히 강변 여과 방식 및 지하 대수층의 부분적 차수를 통한 지하 저류(지하수 댐) 방식이 이에 해당될 수 있다. 이러한 유도 방식 인공 함양은 하상(河床)의 투수성이 높고 하천변 대수층이 상당히 두꺼우며 높은 투수성의 모래 또는 자갈로 구성된 경우, 배후 지역의 지하수위와 타 하천의 유량에는 큰 영향을 미치지 않으면서 대규모의 지하수를 개발/저장 할 수 있는 방식이다.

한편, 직접적인 지하수 인공함양은 우선 하천이나 호소(湖沼)로부터 지표수를 취수하여 적절한 장소로 이송한 후, 다양한 방식을 통해 강제로 대수층에 침투, 함양시키는 것으로서, 대수층의 지하수를 증대시키고 함양 이전보다 더 많은 취수가 가능하게 하는 방식이다. 이러한 직접적인 인공함양 방식은, 크게 주입 방식(injection method)과 포수 방식(spreading method)으로 구분 가능하다. 또한 주입 방식은 주입 정호가 대수층까지 직접 착정되는 습식형과 그렇지 않은 건식형으로 구분가능하며, 특히, 주입과 회수를 동시에 수행 할 수 있는 ASR(aquifer storage and recovery) 방식은 주입 방식의 특수한 경우로 간주될 수 있다. 포수 방식은 형태에 따라 함양지 (涵養池) 방식, 하천-수로 방식 (stream-channel method), 도랑 및 고랑 방식 (ditch-and-furrow method), 범람 방식 (flooding method) 및 지하관 매설 방식으로 구분 가능하다. 표 1은 이들 인공 함양 방식들에 대한 적용 대상 및 분류 방식을 보여준다.

표 1. 적용 가능 직접 방식 인공 함양 분류

구분	제1군	제2군	제3군
대수층 분포심도	지표 혹은 지표면 근접부 대수층 분포	대수층의 분포심도가 보통 정도	대수층의 분포심도가 깊은 경우
저투수성 지층 분포상태	대수층 상부 저투수성 지층이 없거나 매우 얇음	대수층 상부 저투수성 지층이 상당한 두께로 존재	대수층 상부 저투수성 지층이 매우 두껍게 존재
적용인공 함양방법	인공적인 범람(flood) 포수방식: 함양지(basin) 수로(ditch),도랑(furrow)	수직호(pond)	주입정
취수방법	수직우물(깊은 대수층) 수평암거(얕은 대수층)	수직우물 수평암거	수직우물
기타사항	대규모의 용량확보가 가능하여, 가장 많이 시행됨. 전 세계적으로 빠르게 확산중임	대수층과의 접촉면적이 제한되어 소요비용에 비해 함양용량이 적음	대수층 조건에 따른 적용 범위가 넓으며, 대수층 막힘 현상 저감을 위한 전처리 및 유지관리 중요

* Huismann and Olsthoorn의 "Artificial Groundwater Recharge(1983)"의 내용을 발췌 정리

지하수댐의 활용 방식은 그 특징에 따라, 지하함양댐, 지하댐, 모래저장댐으로 구분가능하며, 그 사용 목적에 따라 저류형, 유출억제형, 염수침입 방지형으로 구분되기도 한다. 또한 지하수댐은 그 저류형태에 따라 완전지하저류형, 일부지표저류형, 지표병용형으로 구분할 수도 있으며, 시공 방식에 따라서는 주입공법형, 치환공법형, 타입공법형 등으로 구별되기도 한다.

지하수 인공함양과 관련된 일반적 이론 및 다양한 활용 방식 및 상세한 설명은 Huisman and Olsthoorn (1983) 또는 김형수 외(1998, 1999) 등을 참조 할 수 있다.

3. 지하수 인공 함양 국내외 대표사례 검토

지하수 인공함양의 국외 사례는 주로 라인강변의 유럽국가들 및 미국, 이스라엘, 일본 등의 선진국과 상대적으로 수자원에 대한 관심도가 높은 중동 지역의 쿠웨이트, 이란 등의 국가에서 활용된 경우에서 찾을 수 있다. 가장 대표적인 유럽 사례로는 독일과 네델란드의 경우가 있으며(김형수 외, 1999), 미국의 경우는 ASR 방식의 활용(Barl, et al., 1994) 및 하와이의 직접 함양 방식 활용(Lau, 1994)을 들 수 있다. 또한 일본의 경우는 지하수 인공함양을 용수 이용 측면이 아닌 지하수 축열 이용, 지반 침하 방지 등의 목적으로 활용한 사례를 가지고 있다(Abiko and Katsuragi, 1994). 또한 중동 지역의 사우디아라비아와 이스라엘의 경우는 사암, 백운암, 석회암 및 해안의 모래층 혹은 폐쇄된 채석장을 활용한 인공함양을 통해 지층의 자연정화 활용 목적 또는 증발산을 최소화하여 갈수기의 용수 이용을 목적으로 하고 있다(Ishaq, et al., 1994; Guttman, 1994). 한편, 중국 상하이의 경우 지하에 2,000만톤의 물을 주입하고 하절기에 1,500만톤의 물을 양수해서 사용하였으나, 무분별한 인공함양으로 인해 지하수 수질 악화가 초래되기도 하였다(Zhang and Yan, 1994).

외국의 인공함양 사례중, 독일에서 수행되고 있는 사례를 좀 더 구체적으로 살펴보면, 다음과 같다.

독일에서는 19세기부터 라인강을 따라 분포한 충적층에서 강변 여과 방식을 이용한 지하수 유도 함양을 실시하여 필요한 용수원을 개발·사용하여 왔다. 이러한 인공함양에 의해 확보된 물은, 20세기 초반까지만 하더라도 별도의 처리 과정 없이 음용수원으로 활용될 정도로 수질이 양호하였으나, 1950년을 전후로 하여, 점차 하천의 수질이 악화됨에 따라 현재는 강변 여과 방식을 이용하여 취수하는 대부분의 물은 취수장에서 입상 활성탄 여과(granular activated-carbon filtration) 처리를 하고 있으며, 필요시 오존 처리(ozonation) 등과 같은 정수 처리를 병행하고 있는 실정이다. 독일에서 행해지고 있는 대표

적인 강변 여과 방식은 하천으로부터 50 ~ 300 m 떨어진 지점에서, 심도 30 ~ 40 m의 지하수를 음용수원으로 취수하는 방식이며, 오염된 하천수가 하천 주변의 토양과 지층을 통과하면서 인체에 유해한 화학적 화합물이나 세균이 침전되거나 미생물의 기작에 의해 살균, 분해되는 현상을 이용하는 것이다.

또한 독일의 대표적인 공업 지역인 루르 지방을 비롯한 여러 지역에서는 간접적인 유도 방식의 강변 여과만으로는 용수 개발량에 한계가 있기 때문에 인공함양지를 조성하여 전처리한 지표수를 지하로 강제 함양 시킨 후 필요에 따라 재취수 및 정수 처리하여 수요지에 공급하는 방법을 실시하고 있다. 그림 1은 독일에서 사용되는 간접적인 유도 방식의 강변여과 인공함양과 인공함양지 조성을 이용한 직접 함양 방식 인공함양을 활용한 용수 공급의 사례를 보여준다. 한편, 표 2는 루어 강에서 다양한 인공 함양 방식을 활용하여 용수를 공급 · 수처리하는 사례를 정리하여 보여준다.

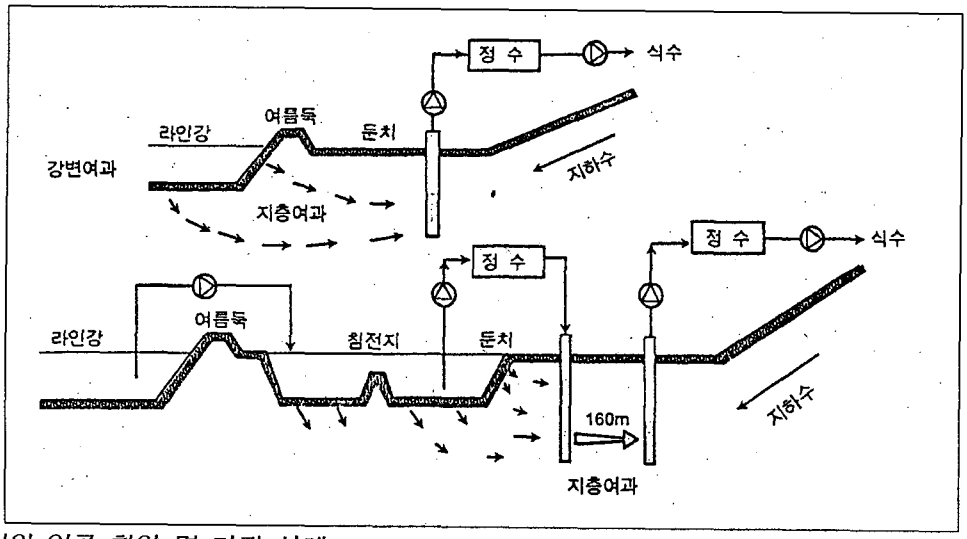
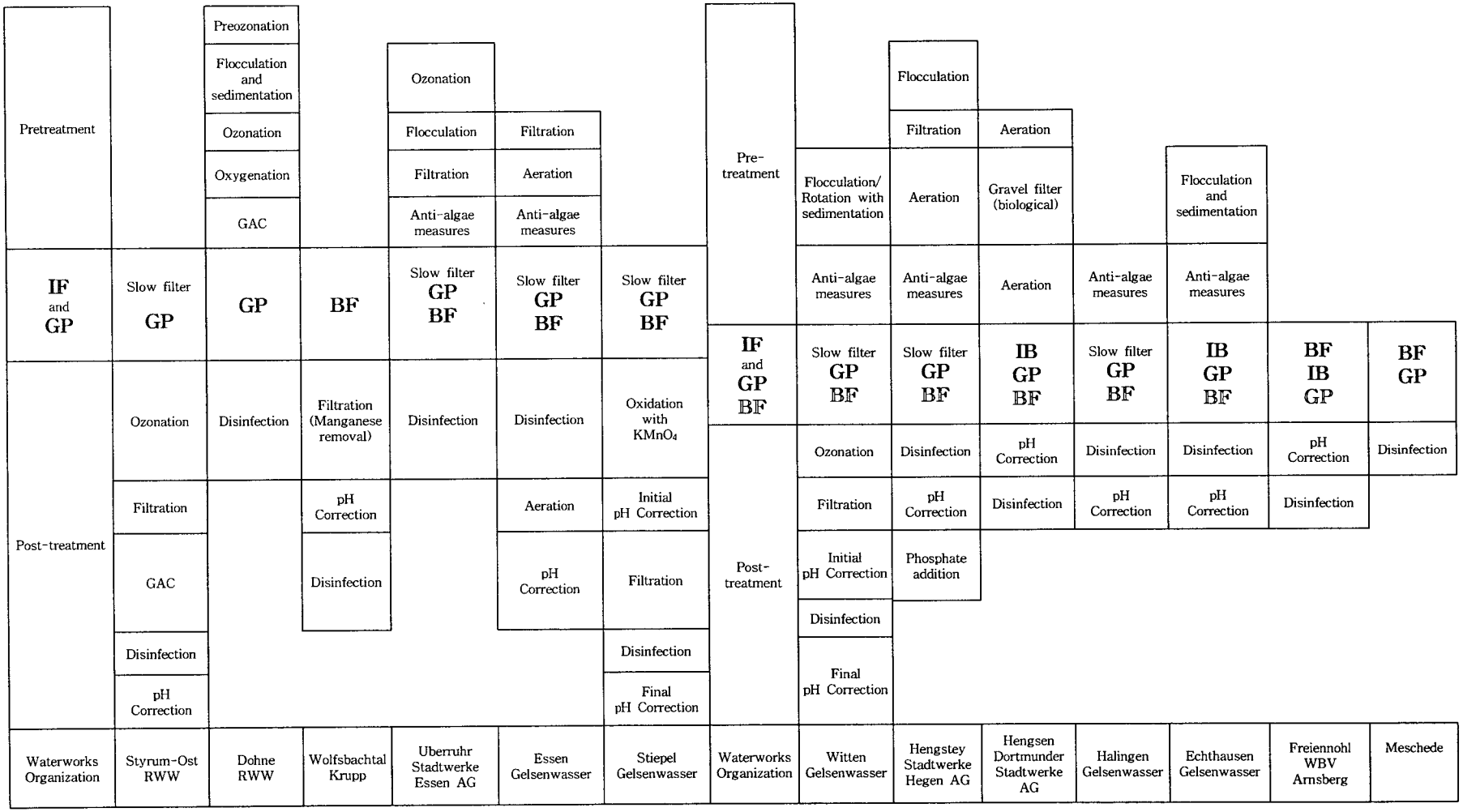


그림. 1 독일의 인공 함양 몇 가지 사례

위의 그림과 표들에서 알 수 있듯이 인공 함양 방식은 수자원의 취수 및 수처리 과정의 일부의 역할을 수행하고 있다. 즉, 인공 함양은 기존의 표류수 취수 및 일련의 물리적, 화학적 수처리 과정을 자연적인 지질 매체를 활용하여 수행하는 것이며, 필요시 이러한 인공 함양 기법은 기존의 표류수 직접 취수 방식과 연계하여 운영 될 수도 있음을 알 수 있다. 이밖에 독일의 대표적인 지하수 인공 함양 활용 수자원 확보 지역은 퀼른과 뒤셀돌프 등이 있으며, 퀼른의 경우는 강변 여과와 인공 침투지 운영 방식을 동시에 활용하고 있으며, 뒤셀돌프의 경우는 주로 강변 여과 방식을 사용한다. 특히, 뒤셀돌프 지역의 경우는 대규모 취수를 위한 방사 집수정이 설치 되어있다는 특징이 있다.

외국의 지하수댐 사례는 Hanson and Nilsson(1986), Ambroggi(1978), Cluer(1989), Molano et al.(1994), Liu et al.(1994), 石崎勝義(1977), 赤井浩一(1983) 등 이 있으며 이들 자료에 대한 구체적인 내용은 농어촌진흥공사(1996) 및 김형수 등(1999)에 정리되어져있다. 다음 표 3은 외국의 지하수댐 사례를 보여준다.

현재(2002년 기준), 국내의 인공함양 사례는 강변 여과 방식을 이용한 취수가 수행되는 창원 대산면 및 북면 지역의 용수 공급 사례와 강원도 속초 쌍천 하류부에 설치된 지하댐 활용 방식을 대표적인 경우로 들 수 있다. 이러한 국내의 지하수 인공함양 활용 가능성에 대한 예비 조사 및 연구는 1990년대 중반부터 실질적으로 수행되기 시작하여, 2000년대에 들어서면서 실질적인 생활용수 공급을 수행하는 본격적 초기 단계로 들어서기 시작하였다.



Pretreatment		Preozonation		Ozonation			Pre-treatment		Flocculation					
		Flocculation and sedimentation		Flocculation	Filtration				Filtration	Aeration				
		Ozonation		Filtration	Aeration			Flocculation/ Rotation with sedimentation	Aeration	Gravel filter (biological)		Flocculation and sedimentation		
		Oxygenation		Anti-algae measures	Anti-algae measures									
		GAC						Anti-algae measures	Anti-algae measures	Aeration	Anti-algae measures	Anti-algae measures		
IF and GP	Slow filter **GP**	**GP**	**BF**	Slow filter **GP BF**	Slow filter **GP BF**	Slow filter **GP BF**	**IF and GP BF**	Slow filter **GP BF**	Slow filter **GP BF**	**IB GP BF**	Slow filter **GP BF**	**IB GP BF**	**BF IB GP**	**BF GP**
Post-treatment	Ozonation	Disinfection	Filtration (Manganese removal)	Disinfection	Disinfection	Oxidation with $KMnO_4$	Post-treatment	Ozonation	Disinfection	pH Correction	Disinfection	Disinfection	pH Correction	Disinfection
	Filtration		pH Correction		Aeration	Initial pH Correction		Filtration	pH Correction	Disinfection	pH Correction	pH Correction	Disinfection	
	GAC		Disinfection		pH Correction	Filtration		Initial pH Correction	Phosphate addition					
	Disinfection					Disinfection		Disinfection						
	pH Correction					Final pH Correction		Final pH Correction						
Waterworks Organization	Styrum-Ost RWW	Dohne RWW	Wolfsbachtal Krupp	Uberruhr Stadtwerke Essen AG	Essen Gelsenwasser	Stiepel Gelsenwasser	Waterworks Organization	Witten Gelsenwasser	Hengstey Stadtwerke Hegen AG	Hengsen Dortmunder Stadtwerke AG	Halingen Gelsenwasser	Echthausen Gelsenwasser	Freiennohl WBV Arnsberg	Meschede

표 2. 독일 루어강의 인공함양 활용 용수 공급(수처리) 현황

<적용 인공함양 방식 : GP - Ground Passage, IF - Infiltration, IB - Infiltration Basin, BF -Bank Infiltration>

표 3. 외국의 지하수댐 사례 및 현황

명칭	위치	주 요 대수층	평균두께 (m)	평균 K (md^{-1})	댐길이 (m)	차수벽 방식	채수량 (m^3d^{-1})	부대 시설	기타
후빙	중국 위하의 석 천	중생대 쇄설암	30	20	3,850	점토 충진	192,000		저수용량 : 5억㎥ 종합용수
롱코우	중국 산뚱	충적층	10～30	21～237	-	염수침입방지, 인공주입방식	155,000	1,218개의 주입정	지하수-지표수연계, 종합용수
산타 마르타	Colombia, Santa Marta	조립질 모 래	10～100	4～20	-	인공주입방식, 염수침입방지		다단계 콘크리트 및 모래주머니 이용 간이댐	비산출률 0.2 화강암 및 변성암 기반, 정호 활용 인공함양연계
가바 지마	일본 나카사키 남단성	사력층		26～46	-	주입공법	400		생활용수 저류량 9,340톤
미야 고지마	일본	석회암		87～8,700	-	grouting	14,400		저수용량 : 700,000㎥ 생활용수
Komesu	일본 오키나와	석회암	40～60 (차수벽높이)		-	시멘트 주입공법			2002 현재 건설, 계획중임 관계용수용 저류량 3,475,000톤
Nashiro	일본 오키나와	-			906				2002 현재 건설, 계획중임 관계용수용 저류량 388,000톤
Giza	일본 오키나와	-			995				2002 현재 건설, 계획중임 관계용수용 저류량 389,000톤
Yokatsu	일본 오키나와	석회암 (하부는 이암층)		43	2,489	시멘트 주입공법		펌프장 1개 양수정 6개	2002 현재 건설, 계획중임 관계용수용 저류량 4,000,000톤 유효공극률 8.4%
Palghat	인도		5～9	-	130	석고벽돌시공			유효공극률 7.5% 저류량 15,000톤
Bambas	에디오피아		3	-	-	모래저장댐	20 이하	심도 3m, 지표 0.8m	500명 식수용
Gursum	에디오피아	저투수성 지층				모래저장댐	200 이하	상부용천과 pipe 연결	인구 5,000명 식수용

자료 출처 : Hanson and Nilsson(1986), Ambroggi(1978), Cluer(1989), Molano et al.(1994), Liu et al.(1994), 石崎勝義(1977), 赤井浩一(1983), 김형수 등(1999), 농어촌진흥공사(1996), 기타 공무국외 여행 자료 참조

1990년대 중반에 수행된 예비 단계의 대표적 조사 및 연구로는 "하상 퇴적층의 수리특성을 이용한 취수원 활용 시범 조사(한국수자원공사, 1995)", "하상퇴적층 여과방식에 의한 금강수도 취수개선방안 조사 · 연구(백건하 등, 1996)", "부산 · 경남지역 복류수 및 강변여과수 개발 타당성 조사(환경부 등, 1996)", "창원시 강변여과수개발 타당성 조사(창원시, 1997)", "소유역 지하댐 개발에 관한 기술 개발 연구(농어촌진흥공사, 1996)", "속초시 쌍천 취수원 개발에 따른 수리지질연구(속초시, 1998)" "강변여과 및 인공함양방법을 이용한 영산강 수원개발 기본조사(한국수자원공사, 1999)", "이룡지구 강변여과수 시범 개발 조사 사업 (환경부 · 경상남도, 1998)" 등을 참조 할 수 있다.

4. 지하수 인공 함양 활용 용수 공급 지역의 조사 및 수행 연구 현황

본 발표에서는 현재 지하수 인공함양을 통해 수자원을 확보 또는 계획하는 사안에 대한 조사 및 연구 내용을 개괄적으로 소개하고자 한다. 소개되는 사항은 우선, 국내 최초의 광역 상수도 수원으로 강변 여과 방식을 계획하고 있는 고령군 다산면 지역의 조사 및 연구 내용, 창원시 북면 및 대산면의 강변 여과 취수 공급 내용, 쌍천 지하댐 활용 취수 및 공급 관련 내용, 및 우리나라 전역을 대상으로 수행된 강변여과수 개발가능성 조사 및 지하댐 개발 방안 수립 계획 등이다.

▷ 고령군 다산면의 강변 여과 취수

본 강변 여과 취수 계획관련 조사 및 연구는, 영남 내륙권 고령군 및 성주군에 2016년까지 일일 41,000㎥의 생활용수 공급을 위한 강변 여과 방식 취수원 확보의 적정성과 실시 설계에 필요한 주요 자료를 산출하기 위한 목적으로 수행되고 있다. 현재 본 대상 지역에 대해서는, 대수층 정밀 탐사, 심도별 동위원소 함량비 및 지구화학 분석을 위한 심도별 시료 채취 분석, 장기 양수에 따른 지하수위 및 지하수질 변화 관측 및 예측, 적정 채수량 산정 및 효율적 우물 설계, 정호 막힘 현상(clogging) 발생 여부 및 원인 규명, 강변 여과수 수질 특성에 따른 최적 수처리 공정 적용 등에 대한 다양한 내용의 연구가 진행중이다. 본 대상 지역은, 경상북도 고령군 다산면 노곡리 일원으로, 북위 35도 49분에서 52분, 동경 128도 20분에서 30분에 해당되는 지역이다. 연구 대상 지역은 남진하던 낙동강이 급작스럽게 동진하여 금호강과 합류되는 지점의 약 5 km 상류부에 해당되는 우안부 충적층 지역에 해당된다. 연구 지역의 지형적 특징은 좌안의 경우, 일부 계곡부를 제외하고는 대부분 낙동강의 인접부가 급한 경사를 갖는 사면인데 반해, 연구 대상 지역인 우안은 동서 방향으로 약 5 km 내외, 남북 방향으로 약 1 km 내외의 넓은 충적 대수층을 가지고 있다. 연구 지역은 낙동강 물가에서 약 200 m 전후에 제방이 형성되어 있으며, 제내지의 경우 주로 답작물이, 제외지의 경우 대부분 전작물이 재배되고 있다. 그림 2는 본 대상 지역의 지형 형태를 보여준다.

그림 2. 고령군 다산면 지역 3차원 지형

본 대상 지역의 기반암은 경상계누층에 해당되는 중생대 상부 쥬라기 낙동통 및 백악기 하부 신라통에 해당되는 지층이다. 본 연구 지역은 서쪽에서 동쪽으로 이동하면서 지층의 연령이 젊어지며, 연구 지역의 최서측에 낙동통 진주층이 분포하며, 그 동편으로 본 층을 정합으로 덮고 있는 칠곡층, 다시 칠곡층을 정합으로 덮고 있는 신라통 신라역암층 및 함안층이 분포하고 있다. 현장 시추 조사에서 나타난 충적층 하부의 기반암은 조사 지역 서측의 경우, 주로 세일의 풍화암 상태를 보여주는데 반해, 동측의 경우 기반암 구간에서 역암이 발견되어 대상 지역의 하부가 낙동통과 신라통의 지질 경계를 포함하고 있음을 확인할 수 있었다.

강변 여과수 취수 방식의 충적층 지하수 채수에 앞서 자연적인 지하수위 분포 특성을 파악하기 위한 자연 지하수위 조사를 수행하였다. 이 중 양수 시설을 갖춘 양수정은 DW-1, SW-1 및 SW-2이며, 나머

지 시추공은 주로 지하수위 및 지질 조사에 활용된 공들이다. 양수 시험이 수행된 이들 양수정에서는 기본적으로 양수와 더불어 일정 시간 간격으로 물시료를 채수, 분석하였으며, 양수정을 제외한 일부 시추공에서도 필요에 따라 물시료를 채수하여 수질 분석을 수행하였다. 양수를 하기 전에 지하수위 분포는 지하수가 하천 방향으로 유동하는 전형적인 이득 하천의 분포 양상을 보여주었으며, 특히 진주층과 칠곡층의 추정 지질 경계선에 해당되는 지역이 능선 형태의 지하수위 분포를 보여주고 있어, 이 경계가 수리지질학적 경계 역할을 하고 있을 가능성을 시사하였다. 조사 지역의 자연 지하수위는 낙동강의 평균 수위(인근 강정 취수장의 수위, 2001년 11월 초순부터 2002년 2월 현재)인 14.5 m(해발고도)에 대해 약 0.5 내지 6 m 정도 높은 해수면 고도 기준 15 내지 21 m 전후에 해당되는 것으로 나타났다. 79일간 일평균 2,500㎥ 내외로 SW-1에서 수행한 장기 양수 시험시 그 영향은 1 km 이상 이격된 관측 정호에서 최대 50 cm 정도로 관찰되었다. 양수정에서의 최대 수위 강하는 약 10 m로 나타났으며, 인접한 관측공과 양수정의 수두 차이가 크게 나타나 SW-1번 양수정의 경우, 큰 우물 손실이 발생되는 문제가 있는 것으로 평가되었다.

배경 수질과 양수에 따른 수질 변화 조사를 위해서 시료가 채수된 대표 지점은, 표류수, SW-1번 양수정, DW-1번 양수정으로, 간이 수질 조사(pH, DO, EC, 수온)는 12월 초순부터 2월 초순까지 매일, 먹는 물 기준에 준하는 수질 분석은 조사 기간 중 6회(2001년 8월 10일, 2001년 12월 10일, 2001년 12월 19일, 2001년 12월 27일, 2002년 1월 10일 및 2002년 2월 19일) 수행되었다. 또한 필요에 따라 양수정이 아닌 관측정에서도 채수하여 분석을 수행하였다. 강변 여과 취수 원수는 표류수에 비해, 뚜렷하게 일정한 수온 유지, 상대적으로 낮은 유기물 농도, 탁도를 보여주어 표류수에 비해 이후의 수처리 공정에 있어 월등한 우월성을 확보하고 있는 것으로 평가되었다. 그러나 SW-1의 양수정의 경우, 망간의 함량이 표류수보다도 높게 나타나는 현상이 관찰되어 이에 대한 효과적인 수처리 방안을 확보하여야 할 것으로 나타났다. 참고로, 충적층 지하수 원수에서의 철, 망간 함량 문제는 기존의 몇 몇 강변 여과 관련 연구에서도 지적된 바 있으며, 현재 강변 여과 취수를 통한 물공급을 수행하고 있는 창원시 대산면에서도 유사한 문제가 나타나 별도의 급속 여과지 및 활성탄 여과를 통한 수처리를 하여 철, 망간 함량을 먹는 물 수질 기준이하로 조절하고 있는 것으로 보고되고 있다.

강변여과 방식 취수를 위한 낙동강 고령군 다산면 노곡리 일대에서의 조사는 본 지역이 기본적으로 강변 여과 취수 방식을 활용한 대규모 수원 개발 가능성을 갖고 있음을 보여주었다. 기본적으로 수직정호 방식에 의해 공당 일일 2,000㎥ 내외 양질의 수원 확보가 가능할 것으로 평가되고 있으나, 일부 지역의 점토 내지 실트질 불투수성 물질 분포 및 장기적인 동시 양수의 상호 간섭 등을 고려할 때, 정호에 따라 500㎥ 내지 1,500㎥으로 일일 적정 양수량을 조절하는 방안도 검토해야 할 것이며, 강변 여과만으로 충분한 수원의 확보가 어려울 경우, 직접 인공 함양 침투지, 대수층 주입 및 회수 겸용 정호(ASR) 설치 등의 방안도 함께 고려할 필요가 있다.

현장 수리 화학 측정 항목을 통해 살펴본 강변 여과 방식 취수는 지표수에 비해 일정한 수온, pH, DO, 낮은 탁도로 상대적으로 우월한 측면을 갖고 있음을 알 수 있다. 이러한 양질의 원수는 취수후의 수처리 단계에서 응집, 침전, 완속 여과 등의 처리 공정을 배제할 수 있는 장점뿐만 아니라, 강변 여과수의 대수층 지체 시간이 수십에서 수백일 임을 감안하면, 일부 가뭄 완화 효과를 기대할 수 있는 장점을 지닌다. 또한 하천수의 심각한 오염 사고 발생 시에 하천수 직접 취수 방식에 비해 여유 있는 대응 기간이 확보되는 장점이 있으나, 반대로 오염 물질이 대수층을 침입하여, 대수층 및 지하수를 오염시킬 경우 이에 대한 정화 처리가 매우 곤란하며, 많은 시간과 비용이 소요되는 문제도 함께 지니고 있음을 간과해서는 안 된다. 현재, 본 연구 지역에 대해서는 장기적인 지하수위 변화 예측, 동위원소 함량비 자료를 활용한 대수층의 지구화학적 환경 및 지하수/지표수의 대수층 함양률 산정, 취수된 원수에 대한 최적 수처리 방안, 지하 대수층 분포 정밀 탐사, 정호 막힘 현상의 원인 및 대처 방안 등에 대한 연구가 수행 또는 계획되고 있으므로, 추후 국내 타 지역에서의 강변 여과수 방식 취수원 개발시에

참조할 수 있는 많은 자료와 기술이 개발될 것으로 기대된다. 한편, 본 지역의 용수 공급 계획은 표류수를 취수하는 일일 20만톤 내외의 공업용수 개발 계획이 함께 진행되고 있고, 앞에서 언급한 바와 같이 강변여과수의 높은 철, 망간 함량이 문제가 되고 있어, 현재 상태에서 강변여과수 방식의 취수 및 생활용수 수질의 수처리 방식이 기존 표류수 방식인 취수후 수처리하는 방식에 비해 효과적이며 안정적인지에 대한 여부를 지속적으로 검토하고 있는 중이다.

▷ 창원시 강변 여과 취수 및 수처리

창원시 대산면과 북면 지역은 국내 최초로 강변여과 방식의 취수를 통해 실질적인 공급을 수행하고 있는 지역이다. 특히, 창원시에서는 지속적으로 강변여과 방식의 취수를 통해 수자원을 확보할 계획을 추진 중에 있으므로, 이 지역에 대한 지속적인 연구와 조사는 앞으로 확산될 강변여과 방식 취수 사업에 성공적인 추진을 위해서도 매우 귀중한 역할을 할 것으로 기대된다. 또한 창원시 대산면 및 북면 지역은 우리나라에서 가장 폭이 넓은 충적층 지역 중에 하나이다. 그림 3 및 4는 창원시 강변여과 취수 사업이 진행되는 현장 및 3차원 지형을 보여준다. 대상 지역 일대의 지질은 하위로부터 중생대 백악기 유천층군의 화산암류(팔용산 응회암, 주산안산암질암)를 기반암으로 하고, 이들 상위에 제 4기 충적층이 부정합으로 피복하고 있다.

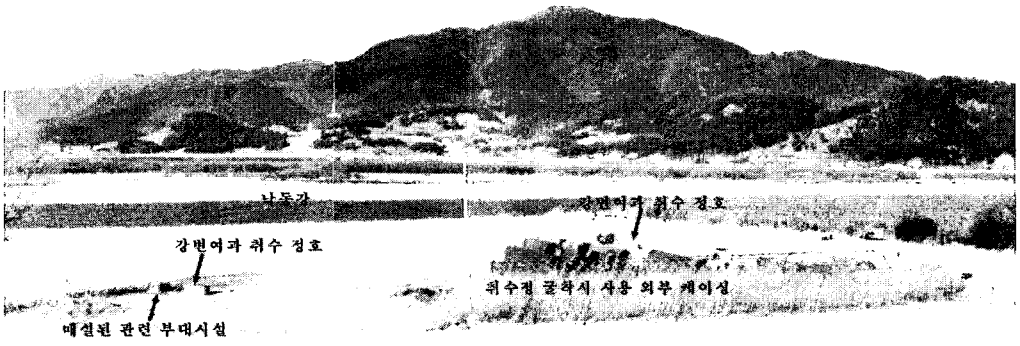


그림 3. 창원시 대산면 강변여과 취수정 개발 지역 전경

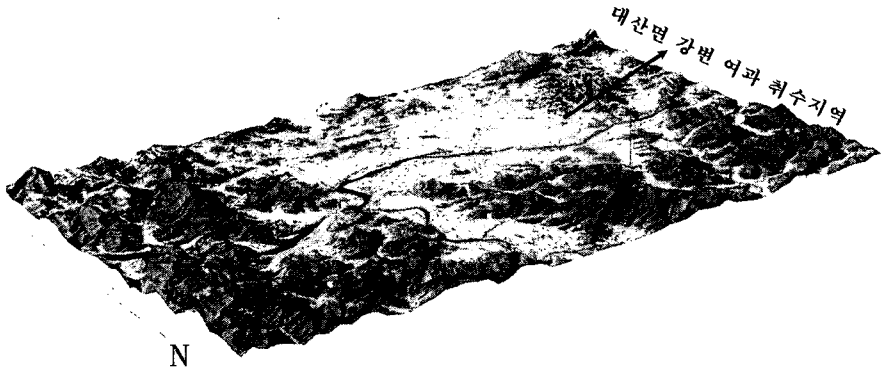


그림 4. 창원시 대산면 강변여과 취수 지역 3차원 지형

창원시 대산면을 대상으로 조사한 기존 지하수 수질 자료는 이 지역 충적층 지하수 중, 먹는 물 수질 기준을 초과하는 항목은 질산성 질소 및 망간이 대표적이며, 이중 질산성 질소는 우기에 그 초과 비율이 높고, 망간은 건기에 그 초과 비율이 높은 특징을 보여주었다. 특히, 대산 지구의 충적층 지하수 중 시범 운영되고 있던 강변 여과 취수정의 물이, 주변에서 농업용 또는 생활용으로 사용되는 지하수와 표류수에 비해서도 현저히 높은 망간 함량을 보이는 반면, 질산성 질소의 경우는 그 반대 현상을 보여주

고 있어, 주로 기반암 상부의 자갈 모래층을 대상으로 취수가 수행되는 강변 여과 취수정의 수질은 충적층내의 천부 지하수 수질 및 표류수의 수질 특성과는 구분되는 특이한 현상을 보여주었다. 철의 경우는 농업 관계용으로 사용되는 충적층 지하수를 제외하고는 모두 0.1 ppm 내외의 낮은 농도를 보여 주었다(김형수 등, 2000).

창원시 대산면에서 강변 여과 방식으로 취수된 물은 표류수와 비교하여, 양호한 수질을 보이고 있지만, 일부 항목이 먹는 물 기준을 초과하므로, 수처리는 필수적이다. 특히, 망간의 경우는 원수의 함량이 먹는 물 기준을 상회하므로, 이에 대한 처리가 수처리의 주요 대상이다. 창원시의 수처리 공정은, 취수 후 포기 반응, 급속 여과, 활성탄 여과를 거친 후 염소 소독 후 공급하는 단계를 거친다. 이러한 수처리 과정은 표류수를 취수하여 처리하는 공정에 비해 현저히 단순하며, 특히 넓은 부지가 요구되는 침전지 및 완속 여과지의 확보가 불필요하므로, 토지 점유 측면에서도 월등히 유리하다. 창원시 대산 및 북면 정수장 시험 통수 자료에 의하면, 평균 0.89 ppm 이었던 원수의 망간 함량이, 포기 처리 후 0.86ppm, 급속 여과 후 0.35ppm, 최종 활성탄 여과후 0.037 ppm으로 처리되었다고 보고되어있다. 또한 2002년 5월 2일, 7월 4일, 7월 19일에 채수된 최종 처리수의 철과 망간의 함량은 모두 불검출을 보여 현재의 수처리 공정이 강변 여과수를 효과적으로 처리하고 있는 것으로 판단된다. 그러나, 일반적으로 망간의 경우는 단순 공기 접촉 포기로 쉽게 산화되지 않고 활성탄 여과는 주로 유기물질만을 제거하는 것으로 알려져 있는데 반해 창원시 강변 여과수의 경우, 망간이 활성탄 여과후에 현저히 감소하는 특징을 보이고 있어 활성탄 여과가 망간 저감에 어떠한 역할을 하는지의 기작 규명이 분명하지 않다. 이에 따라 본 연구에서는 창원시 강변 여과수의 수처리에 활용되는 여과사 및 활성탄의 SEM 촬영을 통한 분석을 수행하였다. 사진 1은 북면 여과사 SEM 촬영 결과를 보여주며, 사진 2는 대산면 활성탄의 SEM 촬영 결과를 보여준다.

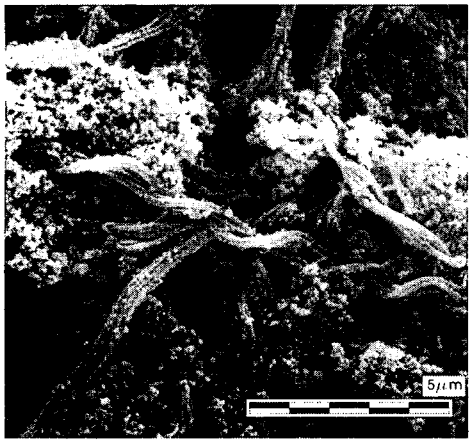


사진 1. 창원시 북면 여과사 SEM 촬영도

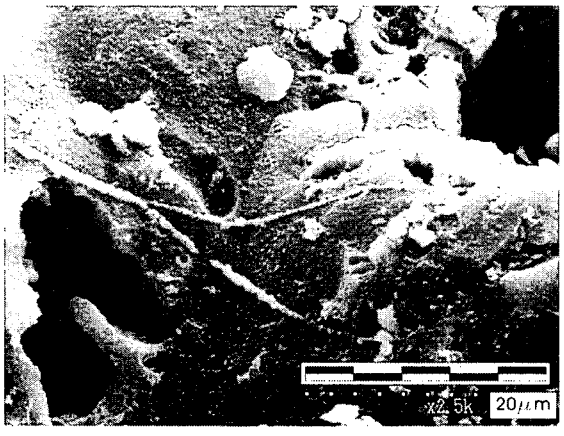


사진 2. 창원시 대산면 활성탄 SEM 촬영도

이들 사진에서 볼 수 있듯이, 여과사 및 활성탄에 사상체 모양의 미생물이 관찰된다. 특히, 활성탄에서 관찰되는 미생물이 활성탄 여과 후, 망간이 저감되는 현상과 연관될 것으로 추측된다. SEM에서 관찰된 형태상으로 볼 때, 이 박테리아는 철 관련 박테리아 (iron related bacterria)의 일종인 *Gallionella ferruginea*인 것으로 추정되며, 이 박테리아가 철 또는 망간의 산화를 일으키는 역할을 하는 것으로 알려져 있다(Ferris et al., 2000). 또한 사상체 주변의 0.1㎛ 크기의 작은 포도 송이 형태의 입자들은 철 또는 망간의 산화 침전물인 것으로 추정된다. 창원의 강변 여과수 수처리 공정은 일반적인 망간 처리 공정의 형태인 염소 투입 산화, 여과사의 공정이 아님에도 불구하고 효과적으로 망간이 저감되는 현상이 이러한 미생물들의 기작과 일부 관련되어 있을 것으로 사료된다. 또한 망간 이온이 철 산화물과 함께 침전되는 현상이 공기 접촉 방식에 의해 쉽게 산화되지 않는 망간을 제거하는데 영향을 끼치는 것

으로 판단되므로, 철과 망간이 함께 포함된 강변 여과 원수의 경우, 창원에서 처리하는 수처리 공정이 충분히 효과적일 수 있는 것으로 판단된다. 실제로 망간만 포함된 원수에 비해 철과 망간이 함께 포함된 원수가 더 쉽게 망간이 제거되는 현상은 Ellis et al.(2000) 및 Stumm and Morgan(1996) 등의 연구에서도 잘 알려져 있다.

현재의 대산면 하루 10,000톤의 개발량을 20,000톤으로 증대하였을 경우, 대수층에서 나타나는 장기적인 수위하강을 예측한 결과, 현재 7개의 정호를 활용한 취수에는 크게 문제가 없는 것으로 나타났다. 그러나 장기적인 강변여과수 개발에 의해서 정호주변이나 대수층내에 막힘 현상(clogging)이 발생할 가능성이 있으므로 비양수량에 대한 장기적인 관찰을 통해 정호의 효율 변화를 점검하여야 할 것으로 사료된다. 한편, 대산 지역에서 직접 함양 방식 인공침투지 활용할 경우에 대한 예비 모델링을 수행한 결과(그림 5), 직접 함양 방식의 침투지 활용 가능성은 양호한 것으로 평가되었다. 그러나, 직접 인공함양을 할 경우에 시설비뿐만 아니라 인공함양지 조성을 위한 부지 확보, 강물의 도수, 침투수의 전처리 등 여러 가지 문제점을 안고 있으므로 현재 이에 대한 특별한 연구 및 기술이 부족한 상태에서는 직접 인공함양을 시행하기가 어려울 것으로 판단된다. 이에 대해서는 현장에 시범 인공침투지 운영 등의 실증연구를 비롯한 인공함양지 운영과 활용에 대한 다양한 연구가 지속적으로 필요할 것으로 판단된다.

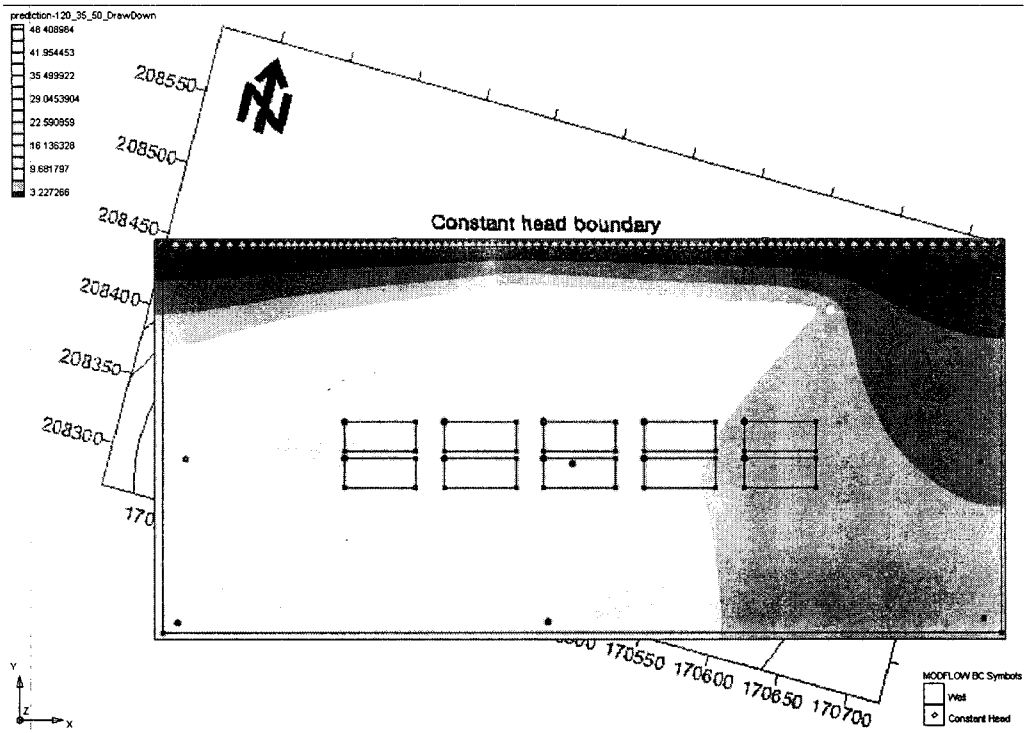


그림 5. 총70,000톤/일 35개 정호 동시 채수와 5,000톤/일 인공침투지 공동 운영시의 대산 지구의 수위 강하 예측도

▷ 강원도 속초시 쌍천 지구 지하댐

쌍천 수계는 지형의 특성상 유하 폭이 좁고 유로 연장이 짧으며 하천 경사가 급하기 때문에 유출계수가 상대적으로 크다. 이는 호우시 하천 유량이 급속히 유출됨을 의미하며, 따라서 갈수기의 쌍천은 수량이 풍부하지 못한 건천을 형성한다. 속초시의 연간 강수량을 살펴보면 1,350mm로서 전국 평균 1,274mm 보다 풍부하지만, 상대적으로 인근의 고성이나 양양에 비하여 인구 밀도가 높고, 하절기 및 동절기 휴가 기간동안 이동 인구가 집중되며, 주변 지역인 고성이나 양양이 비교적 큰 유역의 하천을 갖는 반면, 하천의 발달이 상대적으로 미약한 편이다. 이러한 측면에서 속초시는 인근 지역보다 용수

수급 문제에 어려움을 가지고 있다. 속초시에서는 하루 44,000m^{3}정도의 용수를 공급할 수 있는 취수 시설을 갖추고 있으며(속초시, 2000), 이 중에서 80%가 넘는 36,000m^3/일의 수량을 쌍천 수계로부터 확보하고 있다. 속초시는 1998년 3월 쌍천 지하수댐을 완공하여 지하수를 생활 용수로 공급하기 시작하였다. 쌍천 지하수댐을 활용한 지하수 취수는 1998년 3월부터 취수를 시작해서 속초시의 1998년 총 취수량의 약 50%를 부담했으며, 이후 전월 가동되면서 총 취수량의 68%정도를 담당하고 있다. 본 지구에 대규모 수자원 개발을 위한 조사는 1992년부터 수행되기 시작하여, 1995년부터 1998년까지 설치된 약 800m의 지하 차수벽 방식 지하수댐을 확보하게 되었다. 본 지하수댐 지구의 시설을 통해 공급할 수 있는 물량은 일일 약 40,000톤으로 현재까지 시행된 지하수댐 중 가장 많은 양에 해당된다. 1992년 최초 조사부터 일일 43,000톤의 수자원 공급을 위해 투입된 개략 사업비는 약 160억원 정보이며, 확보되는 수자원이 수질 측면에서도 매우 긍정적인 결과를 보여주고 있다. 특히, 본 지역은 과거 지하댐이 없이 취수하였을 경우, 약 50일의 무강우일이 지속되는 경우에도 심한 수자원 공급의 압박을 받았으나, 현재는 충분한 물량 공급을 가능하게 하여 주고 있어, 대표적인 지하댐의 성공사례로 볼 수 있다.

본 지역의 지하댐은 연장길이 800m, 굴착폭 80cm, 굴착심도는 연암성 이하 0.5m까지로 최소 3.5부터 최대 26.8m의 범위를 갖는다. 차수벽 시공 방식은 시멘트와 벤토나이트의 혼합 슬러리를 crumshell로 굴착한 후 절토 부위에 주입하여 벽을 형상하는 방식(CBSW 방식)이 적용되었으며, 차수벽 시설공사와 관련되어 투입된 사업비는 약 45억원 내외이다. 또한 시공후 차수벽 시료에 대한 실내 분석 결과, 차수벽의 투수계수는 이 지역 연암의 투수 계수보다 10배 정도 적은 10-6 내지 10-7 cm/sec로 나타나 충분한 차수 효과가 있는 것으로 나타났다. 한편, 취수 시설은 방사 취수정, 방사 집수정 등이 있으며, 방사 집수정은 내경이 6m이고, 깊이가 약 15내지 19m, 65mm 스트레나 착정의 4개소 총 연장이 약 1,600m인 것으로 설계되었다. 또한 본 지하수댐은 하천의 최하류인 해안과 인접하고 있어 기본적으로 염수 침입의 효과를 억제할 수 있었으며, 일반적으로 지하댐 하류에서 나타나게 되는 지하수위 강하에 따른 민원도 거의 없었던 것으로 알려져있다. 현재 이 지하댐의 지표상태는 거의 자연적인 하천의 상태가 유지되고 있어 지표 환경적인 측면에서도 매우 긍정적인 것으로 평가된다.

▷ 강변여과수 개발 가능성 및 지하댐 개발 방안 수립

"지하댐 개발방안 수립조사(건설교통부 · 한국수자원공사,2002)" 및 "강변여과수 개발가능지점 및 개발가능량 조사(한국수자원공사, 2002)"에서는 우리나라 전역을 대상으로 지하댐 혹은 강변여과방식의 수자원 확보 가능성을 조사하였다. 이들 조사는 기본적으로 지하수 인공함양 방식을 통해, 향후 용수공급 계획을 수립하고 실제 사업 시 기초 자료로 활용하기 위한 예비적인 목적을 가지고 있다. 따라서, 이들 조사에서 제안된 지역에 대해서는 실제 수자원 확보시 다양한 추가 조사 및 검증이 요구되며, 실제 이들 지하수 인공함양 방식을 활용하는 수자원 확보시 나타나는 다양한 문제 해결을 위한 연구와 기술 개발이 필요하다.

강변여과수 개발가능지점 및 개발가능량 조사는 우선적으로 도서지방을 제외한 내륙지역에서 우선적으로 과거에 수행된 "전국 충적층 지하수 조사 보고서(한국수자원공사, 1996)" 및 "지표수 및 지하수 연계사업 기본조사(건설교통부 · 한국수자원공사, 1996)의 자료 및 기본적인 지형 조건 등을 감안하여 예비조사 지점을 총 108개소 선정하였으며, 이를 근거로, 일반현황, 자연조건, 수리지질 조건 등을 감안하여, 강변여과수 개발 가능 지점 36개소를 선정하였다. 이들 개발 가능 지점은 우선 기존의 조사 자료를 활용하여 강변여과수 개발 가능성을 평가하였으며, 특별한 기존 조사 자료가 없는 6개소에 대해서는 세부조사를 수행하였다. 위 조사 보고서에서는 이들 가능 지점의 총 강변여과수 개발 가능량을 일일 1,085,500톤으로 평가하였으며, 이는 연간 약 4억톤에 해당되는 양이다.

한편, 지하댐 개발방안 수립조사 보고서(건설교통부 · 한국수자원공사, 2002)에서는 지하댐 개발에 대한 일련의 절차인 계획/조사/설계/시공/관리에 대한 기본 사항을 제안하였으며, 기존 자료와 용역을 통

해 수행된 조사 결과를 토대로 최종 21개소의 지하댐 후보 지점을 제시하였다(그림 6).

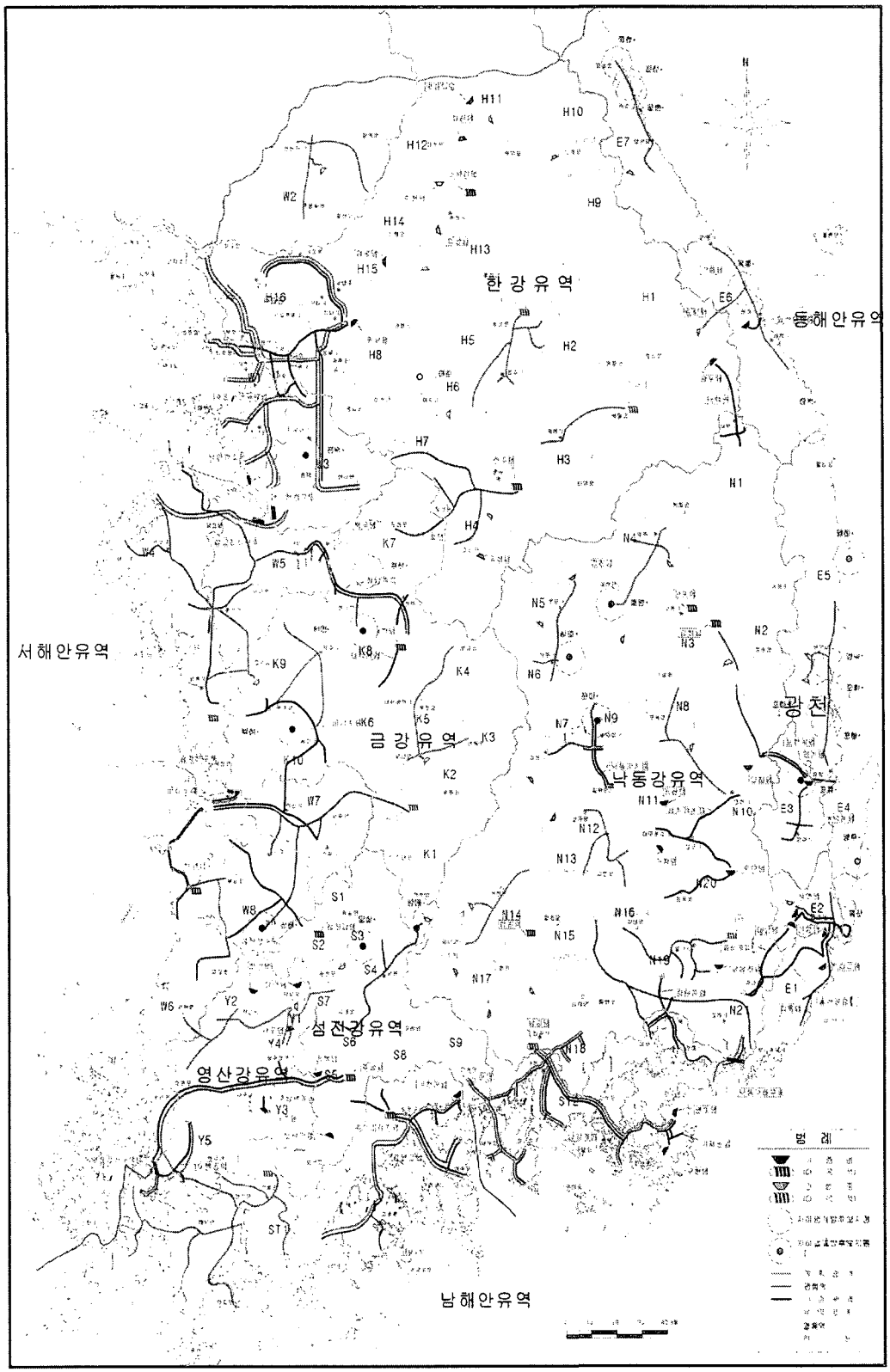


그림 6. 지하댐 개발 후보지점 (건설교통부 · 한국수자원공사, 2002)

5. 지하수 인공 함양 연구 및 기술 개발 사항

지하수 인공함양을 활용한 지속가능한 수자원확보의 성공을 위해서는 기본적으로 국내 충적층 지하수 자원에 대한 정밀조사 및 연구, 지하수 인공함양 방식과 관련된 다양한 기술 개발이 필수적이다. 다음 표 4는 지하수 인공함양을 통한 수자원 확보를 위해 개발되어야 하는 기술 사항을 정리하여 보여준다.

표 4. 지하수 인공함양 분야 연구 및 개발 기술

지하수 인공 함양 활용 수자원확보 세부 연구 및 기술 개발 내용
1. 지하수 인공함양 분야 공통 기술
- 활용 대상 충적층 기본 현황 분석 (배경 수위/수질, 대수층 퇴적상 및 분포)
- 충적층 지표수/지하수 연계 규명 기술 (최적 운영 기술, 연계 효과 검증 기술)
- 충적층 지하수처리 기술 (철, 망간 제거 기술, 질산성 질소 관리 기술, 경작 오염 평가 기술)
- 동위원소 활용 인공함양량 평가 기술 (함양량 평가 기술, 대수층내 지구화학조건 조사 기술)
- 충적층 지하 생태계 활용 기술 (생물활용 평가 기술, 생물군 수질 영향 평가 기술)
2. 유도인공함양(강변여과수) 활용 기술
- 강변여과수 개발 지역 선정 평가기술
- 강변여과수 대용량 취수기술 (대용량 굴착 기술, 수평 정호 개발 기술, 정호 유지관리 기술)
- 강변여과수 수질 특성 평가 기술 (지표수유입 수질 평가 기술, 장기 수질 변화 예측 기술)
- 강변여과수 지속 개발 평가 기술 (장기 수위 변화 예측 기술, 양수 운영 최적화 기술)
- 강변여과수 활용 경제성 평가 기술 (강변여과수 개발 효과 평가 기술)
3. 직접인공함양 활용 기술
- 침투지 활용 기술 (clogging 방지 기술, 침투지 설치/운영 기술, 침투능 증대 기술)
- 정호주입방식 펌프 제작설치 및 운영 기술 (주입/회수 겸용 장치 개발, 최적 운영 기술)
- 인공함양 침투 및 주입수 전처리 기술 (주입수 처리 기술, 주입후 수질 변화 평가 기술)
- 직접인공함양 활용 경제성 평가 기술 (저장 능력 평가 기술, 경제성 평가 기술)
4. 지하수댐 활용 기술
- 지하수댐 적지 선정 평가기술
- 최적 지하수댐 개발 및 효과 판정 기술 (지하수댐 효과 평가 기술, 개발 가능량 산정 기술)
- 지하수댐 설계/시공 방식 평가 기술 (최적 설계 기술, 재료 평가 기술, 시공 기술)
- 지하수댐 부대 시설 시공/관리 기술 (조절 게이트 설치 기술, 차수벽 연계 양수 기술)
- 지하수댐 활용 경제성 평가 기술

이러한 연구 및 기술 개발 필요 분야 중, 특히 철, 망간에 대한 지하수처리 기술 및 충적층의 대형 양수정 최적 운영 기술은 현재 강변여과 방식 취수가 수행되는 상황을 고려할 때, 매우 시급한 개발이 필요한 분야이며, 대수층의 지속가능성을 간접적으로 평가하기 위한 지하수 생태계 연구는 추후 지하수 자원의 지속적 개발과 보전, 지하수질 변화에 대한 생물학적 기작, 생물학적 기법을 활용한 수처리 기술 개발 등의 가능성을 가지고 있는 것으로 사료된다. 한편, 지하수 인공함양의 가장 일반적인 활용대상인 충적층에 대한 배경 수위/수질 특성 규명, 퇴적학적 성인 및 규모 조사 등은 적극적인 충적층 지하수 개발 및 보전에 가장 기초적인 자료이므로 이에 대한 조사 및 연구가 필요하다고 판단된다. 이 밖에도 적극적 인공함양 기법의 도입을 위한 ASR 방식 적용성 검토, 대용량 양수 시설 설치 기술 개발, 양수 시설 개선 및 내구성 향상 등과 관련된 기술 개발이 필요하다.

6. 맺는말

지하수 인공함양 방식은 단순 유도 방식인 강변 여과를 비롯해 인공 침투지 방법, 정호를 통한 주입 방법, 차수벽을 활용한 대수층 지하수 저장 등을 포함하는 복합적이며, 적극적인 수자원 확보 기술 분야이다. 외국 문헌에서 소개된 대부분의 예제 혹은 실제 사례의 대수층 특성에 비해 국내 하천변을 따라 발달한 충적층의 대수층 특성은 투수성 및 대수층 발달 분포면에서 다소 불리한 측면을 가지고 있지만, 국내 여건에 맞는 충적층 활용 인공함양 기법을 고안할 경우, 나름대로 미래의 부족한 수자원 확보에 기여할 것으로 기대된다.

국내의 경우 대수층이 하천변 수백 내지 수천 미터에 국한되어 발달되어 있는데 반해, 외국의 경우는 수십 내지 수백 킬로미터의 대수층 발달 상태를 보여 그 차이가 엄청남을 알 수 있다. 그러므로 국내 충적층 대수층을 이용한 인공함양 방법은 주로 하천을 따라 길게 분포하는 형태를 유지하는 것이 중요하며, 단순한 강변 여과 방식만을 통해서는 일일 수 십만 톤의 대규모 용수 공급은 매우 어려운 문제인 것으로 판단되므로 단순 유도 방식 인공함양 이외의 강제적인 인공 침투, 정호 주입, 지하수댐 등을 활용하여야 할 것으로 보인다.

현재까지 국내에서 수행된 인공함양 관련 조사는 주로 하천변에서 정호를 통해 취수하는 강변 여과 방식들이 대부분이며, 이러한 유도 방식 함양만을 이용한 경우, 특별한 이점을 보여주고 있지 못하다. 이에 반해, 하구에 설치된 지하수댐을 통한 충적층 지하수 취수인 강원도 속초시의 쌍천 지역 지하수 개발은 매우 뚜렷한 효과를 보여주고 있다. 이처럼 하천 하구에서의 지하수댐과 연계된 강변 여과 방식은 수량확보는 물론이고 수질 개선 효과, 염수 침입 억제 효과 등을 보여주므로 추후 꾸준히 검토될 필요가 있다. 또한 해안 유출 지하수에 대한 연구 결과는 유출 지하수의 경로를 추적하여 이 경로의 일부를 차단하는 지하 차수벽을 이용한 지하수댐을 통해 이들 지하수를 저장하였다가 사용하는 방식의 가능성을 제시해준다. 앞으로 유출 지하수 조사 및 이를 활용하는 방법이 검토될 경우, 충분히 새로운 지하수자원 활용 방안으로써의 가능성이 있다고 사료된다.

또한 지하 대수층을 수자원 저장고의 역할로 활용하는 직접 인공 함양 방식에 대해서는 앞으로 실제 이러한 인공함양의 효과를 정량적으로 평가할 수 있는 기법과 시범 운영 지구가 필요하다. 현재 직접 인공 함양 방식에 대한 도입은 여러 연구자들에게 제안되고 있느나, 아직 국내에 운영되고 있는 시범 지구 조차도 없는 형편이므로, 이에 대해서는 우선적인 시범 운영을 통해 효율성을 검증하고, 문제 사항을 개선해 나갈 필요가 높은 것으로 사료된다. 특히, 우리나라와 같이 집중된 호우 특성을 보이는 경우, 풍수기의 강제적 인공함양이 갈수기에 수자원 확보에 얼마나 효과를 줄 수 있는지에 대한 검토가 필수적이며, 필요시 이러한 대수층에 대한 인공함양과 지표 저수지에 대한 연계 운영 가능성을 면밀히 검토하여야 할 것으로 판단된다.

현재 꾸준히 검토되고 있는 지표수-지하수 연계 방안의 체계적인 분석, 건설교통부 주관하에 수행되고 있는 정밀 수문지질도 조사 사업에 따른 성과물인 국내 대수층 정밀 분포 특성 자료가 축적되면 이에 대한 분석을 통한 중규모 이상의 지하수 개발 방식이 검토 될 수 있으리라 기대된다. 수자원의 공급과 활용의 형태를 현재 단일 대규모 취수 후 공급하는 방식에서 중규모의 취수원 다변화 방식 활용을 통한 공급하는 방식으로 전환하는 노력은 앞으로의 수자원 확보와 보전을 위한 기본 정책이 되어야 할 것이다.

7. 참고 문헌

건설교통부 · 한국수자원공사, 1998, 지표수 및 지하수 연계사업 기본조사 보고서

건설교통부 · 한국수자원공사, 2000, 수자원장기종합계획 (Water Vision 2020).

건설교통부 · 한국수자원공사, 2002, 지하댐 개발방안 수립조사 보고서.

김형수, 백건하, 한찬, 류정아, 박희열, 원종호, 1998, 지하수 함양 및 활용증대방안 연구(1차년도), 수자원연구소 연구보고서 WRRI-GG-98-4, 한국수자원공사.

김형수, 한찬, 류정아, 박희열, 오선환, 최예권, 김성주, 1999, 지하수 함양 및 활용증대방안 연구, 수자원연구소 연구보고서, WRRI-GG-99-1, 한국수자원공사.

김형수, 안경환, 원이정,2000, 낙동강권역 광역 지하수 조사 연구. 수자원연구소 연구보고서, WRRI-GG-2000-1, 한국수자원공사

농어촌진흥공사, 1996, 소유역지하댐 개발에 관한 기술개발 연구.

백건하, 한찬, 유정아, 1996, 하상퇴적층 여과방식에 의한 금강수도 취수개선방안 조사 · 연구, 수자원연구소 연구보고서, WRRI-GG-96-2, 한국수자원공사.

속초시, 1998, 속초시 쌍천 쉬수원 개발에 따른 수리지질연구 용역 보고서 (실험보고서 포함).

속초시, 2000, 학사평 식수 저수지 기본설계 보고서.

창원시, 1997, 창원시 강변여과수개발 타당성조사 보고서.

한국수자원공사, 1995, 하상퇴적층의 수리특성을 이용한 취수원 활용 시범 조사 보고서.

한국수자원공사, 1996, 전국 충적층 지하수 조사 보고서

한국수자원공사, 1999, 강변여과 및 인공함양방법을 이용한 영산강 수원개발 기본조사 보고서.

한국수자원공사, 2002, 강변여과수 개발가능지점 및 개발가능량 조사 보고서.

환경부, 부산광역시, 경상남도, 1996, 부산·경남지역 복류수 및 강변여과수개발 타당성 조사 보고서 (실험보고서 포함).

환경부, 경상남도, 1998, 이룡지구 강변여과수 시범 개발 조사 사업 보고서.

石崎勝義, 1977, 지하저수지에 의한 수자원 개발, (일본) 토목기술자료집, Vol. 19, No. 9.

赤井浩一, 1983, 중구 협서성 부평 지하댐 시험공사에 대하여, (일본) 토와 기초, Vol. 31, No. 3.

Abiko, H. and Katsuragi, Y., 1994, Artificial recharge of groundwater in case of Yamagata city, Japan, In Johnson, A. I. and Pyne, D. G. (eds), Artificial recharge of Groundwater, II, ASCE, p. 820-830.

Ambroggi, C. G, and Hanor, J. S., 1978, Underground reservoirs to control the water cycle, Ground Water, p.158-166.

Bral., K. M., Petersen, R. J. and Stephenson, W. H., 1994, Development and application of the city of Cocoa aquifer storage and recovery system, In Johnson, A. I. and Pyne, D. G. (eds), Artificial recharge of Groundwater, II, ASCE p. 878-887.

Cluer, B. L., 1989, Storage basin volume and Drainage basin dynamics, Camas Prairie, South Idaho, Ground Water, p.323-332.

Ellis, D. Bouchard, C., Lantagne, G., 2000, Removal of iron and manganese from groundwater by oxidation and microfiltration, Desalination 130, p. 255-264.

Ferris, F. G., Hallberg, R. O., Lyven, B., Pedersen, K., 2000, Retention of strontium, cesium, lead and uranium by bacterial iron oxides from a subterranean environment, Applied Geochemistry, 15, p. 1035-1042.

Guttman, J., 1994, Artificial recharge to Isreal's carbonate aquifer, In Johnson, A. I. and Pyne, D. G. (eds), Artificial recharge of Groundwater, II, ASCE, p. 751-760.

Hanson, G. and Nilsson, A., 1986, Groundwater dams for rural water supplies in developing contries, Groud Water, Vol. 24, No. 4, p497-506

Huisman, L. and Olsthoorn, T. N., 1983, Artificial Groundwater Recharge, Pitman Press, 320p.

Ishaq, A. M., Al-Suwaiyan, M. S., and Al-Sinan, A., 1994, Suitability of wastewater effluents to recharge groundwater aquifers in Saudi Arabi, In Johnson, A. I. and Pyne, D. G. (eds), Artificial recharge of Groundwater, Ⅱ, ASCE, p.376-385.

Lau, L. S., 1994, Artificial recharge of ground water for all purpose?, In Johnson, A. I. and Pyne, D. G. (eds), Artificial recharge of Groundwater, Ⅱ, ASCE, p.761-769.

Liu, P., Liu, Z., and Duan, Z., 1994, A case study on artificial recharge of groundwater into the coastal aquifer in Longkou, China, In Johnson, A. I. and Pyne, D. G. (eds), Artificial recharge of Groundwater, Ⅱ, ASCE, p. 568-573.

Molano, C., Bonilla, F., Mejia, J. and Rodriguez, C., 1994, Artificial recharge of the Santa Marta aquifer, Colombia, In Johnson, A. I. and Pyne, D. G. (eds), Artificial recharge of Groundwater, Ⅱ, ASCE, p.446-454.

Stumm, W. and Morgan, J. J., Aquatic Chemistry, 3rd ed., Wiley-Interscience, New York, 1996.

Zhang, X. and Yan, B. 1994, Artificial recharge and quality variation in Shanghai, In Johnson, A. I. and Pyne, D. G. (eds), Artificial recharge of Groundwater, Ⅱ, ASCE, p. 568-573.