

우수침투에 의한 지하수 함양

최윤영 (경도대학 건설환경공학과 교수)

1. 서론
 2. 수자원 부존량 및 이용현황
 - 2.1 지표수 부존량
 - 2.2 지하수 부존량
 - 2.3 용수수요 및 공급현황
 3. 우수침투에 의한 지하수 함양
 - 3.1 지하수 확보의 필요성
 - 3.2 지하수 함양공법의 사례
 4. 결론
- 참고문헌

1. 서론

인류의 문명이 대하천을 끼고 발원·발전하였듯이 하천은 생활용수의 공급원이자 우리의 삶터로서 늘 곁에 있어 왔으며 사회가 발전하면서 하천을 이용하고 관리하는 방법도 변천하여 왔다. 농경시대 하천의 이용과 관리는 우리나라의 전형적인 배산임수의 부락모습과 운영에서도 볼 수 있는 바와 같이 우리의 생활은 물을 중심으로 이루어져 보를 만들고 수로를 정비하여 공동의 협동심을 이루어 왔다. 이와 같이 하천은 용수공급원이자 생활공동체 형성의 기능을 포함하고 있었으나 사회가 도시 및 산업화로 발전하면서 하천은 자연적·심미안적인 공감대를 상실하고 산업화의 생산요소로서의 기능으로 전락하게 되었으며 용수의 공급원 및 산업활동 후 배출되는 폐수 및 생활하수의 수송기능으로 전락하였다. 또한 한정적인 수자원은 생활수준의 향상과 경제활동의 증가로 인한 물 수요의 급증으로 이어져 물부족 사태는 전세계에서 매년 심각한 경제·사회적 문제로 대두되고 있는 것이 현실이다. 이러한 시점에서 우리나라도 예외가 될 수 없는 현실에 직면하게 되었고 한정적인 수자원을 더욱 효율적으로 관리하는 체계가 절실히 요구되고 있는 실정에 이르르게 되었다. 따라서 수자원의 효율적인 관리를 위해서는 수자원으로서 지표수 및 지하수의 정성적·정량적 분석이 무엇보다 필요하다. 이를 위해서는 먼저, 연 평균 강수량을 고려하지 않을 수 없는데 우리나라 연평균 총강수량은 1,274mm로서 세계평균 970mm의 1.3배로 비교적 풍부한 것으로 나타나고 있다. 하지만, 연간 1인당 강수량으로 환산해볼 경우 약 2,900톤으로 세계평균 34,000톤의 약 9%에 불과하여 (표 1.1) 인구를 대비한 수자원 보유량은 상대적으로 빈약한 실정이다. 더구나 우리나라의 강수량은 연도별, 계절별 및 지역별 편차가 심하여 수자원 관리체계에 많은 어려움을 주고 있다.

표 1.1 세계의 강수량 현황

구 분	인 구 (만명)	면 적 (1,000km ²)	년강수량 (mm/년)	강수총량 (억 m ³ /년)	1인당 강수총량 (m ³ /년.인)
미 국	21,361	9,363	760	71,159	33,313
프 랑 스	5,291	551	750	4,133	7,811
스 위 스	640	41	1,470	306	9,422
필 리 핀	4,183	299	2,360	7,056	16,868
이 란	3,301	1,648	250	4,120	12,181
쿠웨이트	89	22	120	26	2,653
일 본	11,193	377	1,750	6,579	5,500
한 국	4,300	99	1,274	1,267	2,935
세 계	389,000	135,830	973	1,321,626	33,975

※ 1977년 UN 물회의자료, 인구는 1975년 기준, 한국자료는 1991년 자료임.

다음으로, 계절적 강수분포 변화를 보면 6-9월까지 4개월 동안 1년 총강수량의 2/3이상에 해당하는 강수량이 집중되고 있는 반면, 갈수기인 10-3월까지는 1년 강수의 20%에 불과하여 계절적 편차가 심하며 홍수기에 수해의 위험성이 크나 평상시에는 유하량이 적어 용수공급에 어려움이 있다. 이러한 계절적 불균형은 하천의 최대유량과 최소유량의 비인 하상계수가 300이상으로 나타나 통상 100이하인 외국 하천 (표 1.2)에 비해 수자원 관리상에 불리한 조건으로 작용하고 있다.

표 1.2 국내외 주요 하천의 하상계수

하 천	하 상 계 수	하 천	하 상 계 수
한강 (인도교)	580 (170)	세느강 (프랑스)	34
낙동강 (진동)	360 (180)	라인강 (독일)	16
금강 (공주)	540 (300)	미조리강 (미국)	75
형진강 (승정)	510 (330)	나일강 (이집트)	30
영상강 (나주)	330 (170)	대정천 (일본)	110

(주) · 국외하천의 하상계수는 주요 댐 건설 이전의 자연 상태 값임.

· () 다목적댐 건설후, 자료 : 하천환경관리 기본조사·연구 (건설부 1991)

마지막으로, 지역별 강수분포특성을 살펴보면, 섬진강을 중심으로 한 남해안 일대가 강수량이 제일 많은 반면에 낙동강 유역의 강우량이 가장 적으나 한강을 중심으로 한 5대강 유역 (전 국토 70%)의 하천 유출량은 비교적 풍부하며 이 외 (전 국토 30%)지역에서는 하천 유출수에 의한 혜택을 충분히 받지 못하고 있어 물부족에 대한 용수공급 체계가 절실히 요구되고 있다. 따라서 시·공간적 변동이 심한 상태하에서 장래의 원활한 용수공급을 위해서는 수자원으로서 지표수의 정량적 증가를 위한 확보방안과 동시에 지하수의 효율적인 이용방안이 병행되어야 할 것이다. 또한, 유동체계가 안정된 지하수 장기개발과 지표수의 막대한 손실량을 지하수 체계로 조화시키는 연계운영 등이 무엇보다 시급히 이루어 져야 할 것이다.

본 연구에서는 우리나라의 수자원에 대한 지역적·계절적으로 편중된 특성과 부족량 및 용수 이용량을 살펴보고 부족한 수자원을 확보하는 한 방안으로써 우수침투에 의한 지하수 함양의 사례와 유용성을 고찰하고자 한다.

2. 수자원 부족량 및 이용현황

2.1 지표수 부족량

우리나라의 수자원 부족량은 연평균 1,267억 m^3 이며 이중 45%에 해당하는 570억 m^3 은 증발 및 지하침투로 손실되고 55%인 697억 m^3 만 하천으로 유출되고 있으나 이중 467억 m^3 (37%)은 홍수기인 6-9월에 집중적으로 유출되고 있다. 또한, 평상시 유출은 18%인 230억 m^3 에 불과하고 총부존량 1,267억 m^3 가운데 공급 가능량은 지하수이용량 26억 m^3 (2%), 댐공급량 126억 m^3 (10%) 및 하천취수량 172억 m^3 (14%)으로써 총 324억 m^3 (26%)에 불과한 실정이다 (그림 2.1).

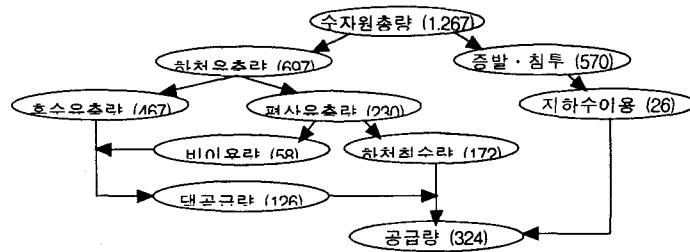


그림 2.1 수자원 부족 현황 (단위 : 억톤)

2.2 지하수 부족량

다음의 표 2.1과 표 2.2에는 우리나라의 지하수 부족량과 채수가능 지하수량을 각각 나타내었다. 표 2.1에서 우리나라의 지하수부존량은 32,275억 m^3 으로 우리나라의 연평균 수자원총량 1267억 m^3 (건설부, 1998)의 약 25배이고 연평균 하천유출량 697억 m^3 의 약 46배에 달하며 표 2.2에서 우리나라의 채수가능 지하수량은 18,676억 m^3 으로 연평균 평상시 하천유출량 230억 m^3 의 약 80배에 달한다.

그리고 우리나라의 연평균 지하수 함양량은 연평균 수자원 총량의 16%에 해당하는 약 205억 m^3 (김, 1995)으로 추정되고 있다. 따라서, 우리나라의 지하수 부족량은 연평균 지하수 함양량의 약 157배이고 채수 가능 지하수량은 연평균 지하수 함양량의 약 91배에 해당되고 있다.

2.3 용수수요 및 공급현황

우리나라는 국토종합개발계획, 수자원 종합개발계획 등을 통하여 신규 수자원개발을 지속적으로 추진해 왔으나 인구증가와 급속한 도시화 및 산업화로 인한 용수수요의 급격한 증가추세

로 인하여 가까운 장래에 수자원 부족현상이 초래할 것으로 추정되고 있다. 1970년대의 1인 1일 당 급수량이 200l 수준에서 1990년대에는 2배인 400l 이상, 수자원 장기종합계획에 의하면 2011년에는 1인 1일당 물 소비량이 480l로 늘어날 전망이다. 급수보급율도 82%에서 95%로 약 13%의 증가와 더불어 공업단지 면적은 250km²에서 669km²로 확장, 수리안전담의 비율은 72%에서 84.7%로 약 13%정도 향상될 것으로 보고 있다.

표 2.1 우리나라의 지하수 부존량

지질종류 구역	충적층 (km ³)	풍화층 (km ³)	화성암류 (km ³)	변성암류 (km ³)	퇴적암류 (km ³)	계 (km ³)
한 강	13.5	21.6	225.1	345.8	199.3	805.3
낙동강	16.1	21.6	111.6	124.0	687.9	961.2
금 강	8.1	6.5	138.0	100.9	19.4	272.9
영산강	2.6	3.2	50.4	3.1	36.0	95.3
섬진강	1.8	4.3	51.1	53.3	35.8	146.3
안성천	2.0	2.0	30.1	11.7	3.0	48.8
만경강	2.0	1.4	28.8	8.9	5.2	46.3
속교천	1.9	1.4	27.8	13.2	0.0	44.3
동진강	1.8	1.0	28.3	0.0	1.2	32.3
형산강	0.9	1.0	10.3	0.3	35.3	47.8
제주도	1.4	1.8	45.3	0.0	0.0	48.5
기 타	17.0	17.3	163.8	173.1	307.3	678.5
계	69.1	83.1	910.6	834.3	1330.4	3227.5

표 2.2 우리나라의 채수가능 지하수량

지질종류 구역	충적층 (km ³)	풍화층 (km ³)	화성암류 (km ³)	변성암류 (km ³)	퇴적암류 (km ³)	계 (km ³)
한 강	4.99	8.40	117.04	179.83	132.54	442.80
낙동강	5.94	8.40	58.01	64.48	468.35	605.18
금 강	2.97	2.52	71.77	52.44	13.22	142.92
영산강	0.95	1.26	26.20	1.59	24.51	54.51
섬진강	0.65	1.68	26.56	27.72	24.38	80.99
안성천	0.72	0.76	15.65	6.10	2.02	25.25
만경강	0.75	0.55	14.96	4.60	3.52	24.38
속교천	0.72	0.55	14.47	6.86	0.00	22.60
동진강	0.66	0.39	14.70	0.00	0.80	16.55
형산강	0.35	0.39	5.36	0.17	24.03	30.30
제주도	6.25	6.72	85.18	90.00	209.25	397.40
기 타	6.25	6.72	85.18	90.00	209.25	397.40
계	25.46	32.31	473.43	433.79	902.62	1867.63

* 배상근, 한국의 지하수 부존량 (1990).

여기서 전국 용수공급 현황을 총량적으로 볼 때 연간 용수수요량은 2001, 2006 및 2011년에 각각 337억, 350억 및 367억 m^3 으로서 평균 5%정도의 증가 추세를 보이고 있다 (표 2.3). 한편, 용수수요량은 인구증가와 산업화의 고도성장으로 집중화, 대량화되면서 급격히 증가할 전망이다. 용수공급 능력은 기존의 취수시설 및 기 개발된 댐에서의 공급량을 근간으로 하여 현재 개발 중인 댐의 공급능력을 고려하여도 다음의 표 2.4에서와 같이 2000년 초에는 부족량이 예상된다. 그러나 단계적인 수자원 개발을 통하여 2011년까지 51억 m^3 을 확보할 방침이다 (유영창, 1997). 하지만 신규 수자원 51억 m^3 은 댐에 의한 확보이며 하천수는 1994년 172억 m^3 (53%)에서 점차 감소하여 2011년에는 169.5억 m^3 (48.9%). 지하수의 개발에 따른 수자원 확보는 약 8%로 거의 변동이 없음을 알 수 있다.

표 2.3 장래 용수 수요현황 (단위 : 백만 m^3 /년, (%))

구 분	94	2001	2006	2011	비 고
용수수요량	30,144 (100)	33,662 (100)	35,014 (100)	36,673 (100)	
- 생활용수	6,209 (20.5)	7,435 (22.1)	8,073 (23.1)	8,706 (23.7)	
- 공업용수	2,582 (8.5)	3,873 (11.5)	4,074 (11.6)	4,544 (12.4)	
- 농업용수	14,877 (49.5)	15,027 (44.6)	15,226 (43.5)	15,150 (41.3)	
- 유지용수	6,476 (21.5)	7,327 (21.8)	7,641 (21.8)	8,273 (22.6)	

표 2.4 장기 용수공급 계획

(단위 : 백만 m^3 /년, (%))

구 분	94	2001	2006	2011	비 고
용수공급량	32,463 (100)	34,364 (100)	34,607 (100)	34,662 (100)	전 국
- 하천수	17,221 (53.0)	17,093 (49.7)	16,997 (49.1)	16,953 (48.9)	
- 지하수	2,571 (8.0)	2,709 (8.0)	2,808 (8.1)	2,907 (8.4)	
- 댐공급량	12,671 (39.0)	14,562 (42.3)	14,802 (42.8)	14,802 (42.7)	
· 기존댐	12,671	12,671	12,671	12,671	
· 건설중	-	1,891	2,131	2,131	

3. 우수침투에 의한 지하수 함양

최근에 들어서 세계 각국은 지하수를 이용한 용수 개발의 극대화에 대한 많은 연구와 병행하여 각 국가별, 지역별 특성에 맞는 인공함양법 개발 및 적용가능성에 대한 연구가 진행되고 있으며 앞으로도 계속될 전망이다. 우리나라에서도 최근에 들어 지하수에 대한 관심이 고조되고 있으며 지하수를 대체 수자원으로 인식하는 경향이 확산되고 있다. 지하수는 철저한 계획아래 개발한다면 영구히 사용할 수 있는 순환가능한 자원이다. 최근에도 대수층을 이용한 오염저감에 대한 많은 연구와 시도를 하고 있으며 앞으로도 이에 대한 중요성이 더욱 커질 것으로 전망되고 있다. 특히 최근의 연구동향을 보면 오염물질이 지하 지층을 통과하면서 각종 오염물질이 어떤 반응을 통하여 여과 또는 분해 등의 저감효과가 나타나는가에 많은 관심을 보이고 있으며 각 오염물질별 오염저감 효과에 대한 추적, 시험연구가 추진되고 있다. 따라서 우리나라에서도 가용 수자원 총량증대와 외국에 비하여 상대적으로 이용량이 빈약한 지하수자원의 이용을 증진을 도모하기 위하여 대수층이 발달한 지역을 대상으로 국내 실정에 적합한 지하수 인공함양기법을 연구 검토하여야 할 것이다.

본 연구에서는 지하수 확보방안의 일종으로 우수를 지하대수층에 저장하여 평·갈수기에 용수로서 취수·공급하고, 지층의 오염저감능을 이용하여 보다 양질의 용수를 안정적으로 공급할 수 있는 방안의 하나로써 우수에 의한 지하수 함양기법에 대한 사례 및 유용성을 검토하였다.

3.1 지하수 확보의 필요성

지하수는 인류가 향유하고 있는 귀중한 자원으로서 지반을 구성하는 토지환경자원과 수자원으로서의 성격을 겸하고 있다. 수자원으로서의 지하수는 지표수에 비해서 매우 안정된 성격을 가지고 있다. 인류는 지표수를 이용하기 위해 여러 가지 노력을 반복해 왔으며 지표수를 통제하고 이를 이용하기 위해서 강력한 공권력이 필요했고 이는 과학이 급속히 진전된 오늘날에도 변함이 없다. 나라와 나라의 전쟁에서 지역과 지역의 팽배한 이기주의로까지 발전했음을 누구도 부인할 수 없다. 이에 반해 지표수와 달리 그 중요성이 크게 인식되지 않고 있는 지하수에 대하여 다시 한번 그 중요성을 음미할 필요가 있으며, 지하수의 이용상에 따른 장점은 많은 이·공학자들이 열변하였지만 다음과 같은 점은 공통의 인식이라 사료된다. 첫째, 지하수는 지표수에 비해 양호한 수질을 확보할 수 있으며 둘째, 수자원으로서 개발에 따른 투자비가 지표수에 비해 적게 든다 (Koenig, 1963). 표류수를 수원으로 하는 수리시설물은 비교적 대규모이고 공공투자라고 하는 설치형태를 취할 수 밖에 없는데 반해 지하수의 경우에는 이용자와 수원이 매우 근거리에서 연결되기 때문에 시설은 양수기능이 있는 우물과 상수관만이 필요하다. 또한, 수리시설의 위치에서도 지표수의 경우에는 취수시설이 하천에 따라 점적 또는 선적인 제약을 받으나 지

하수의 경우에는 면적으로 우물의 위치를 선택할 수 있다. 셋째, 지하수의 이용에 있어 유동방향과 함양량 및 유출량의 관계가 명확히 파악되면 양수량을 자연적인 유출량 이하로 억제함으로써 지하수를 영구적인 수자원으로서 이용할 수 있다. 또한, 우수에 의한 지하수 함양 등 적극적인 지하수량의 강화는 지하수 유출량의 증대를 가져와 양수량의 증가를 도모할 수 있다.

3.2 지하수 함양공법의 사례

지하수 인공함양은 지표수를 우물, 수로, 함양지 등의 시설 또는 자연조건의 인위적인 변경을 통하여 지하대수층으로 침투시킴으로써 지하수 개발량 증대, 지하수위 하강에 의한 지반침하 방지, 지층의 오염 저감에 의한 수질개선, 성수기의 잉여 용수의 지하 저장을 통한 일시적인 또는 계절적인 용수부족 해소 등을 도모하는 것이다.

인공함양은 양질의 하천 복류수를 취수하여 생·공업용수로 공급하기 위해 19세기 초 유럽에서 시작되었다. 1810년에 스코틀랜드의 글래스고우에서는 하천수를 침투지에서 함양한 후 이를 재취수하여 용수로 공급하였다. 인공함양 방법은 시대의 변천에 따라 여러 가지 목적에 맞게 다양화하게 발전되었으며 1890년에는 도시용수의 안정확보를 위해 하천 잉여수를 주입우물을 이용하여 저장하는 인공함양이 사용되었다. 1959년 이후 이스라엘에서는 사막의 농지화에 따른 물 수요의 증가에 대비하여 우기의 비관개시기에 농업 용수를 확보할 수 있는 여러가지 기법들을 사용하고 있으며 독일에서는 생·공용수의 수요를 인공함양을 통한 지하수로 상당량 충당하고 있다. 하지만 우리나라 수자원 개발의 기본 방향은 다목적댐의 건설에 의해 지표수를 개발하는데 중점을 두고 있으나 이는 홍수기에 집중되는 강우의 영향으로 홍수피해 절감방안으로는 효과적이나 지역의 수리권 분쟁, 댐 개발지의 감소, 댐 건설에 따른 인근지역의 환경변화 등을 고려해볼 때 댐 건설에 의한 지표수개발 정책은 부분적이거나 새로운 전환시점이 필요하다고 판단된다. 따라서 향후 지하수 수요량의 증가를 고려해볼 때 제한적인 수자원을 최대한 활용하기 위해서는 우수 및 홍수시의 풍부한 수량을 지하로 인공함양하는 등의 지하수량 증대방안을 실용화하여야 한다.

3.2.1 투수성 포장기법

투수성 포장은 지하수위가 높지 않은 지역에서 우수를 직접 지하로 침투시킴으로써 우수가 지하수로서 저류 및 순환역할을 수행케 하는 효율적인 공법이다. 또한 자연 생태계 보호와 도심 하천의 범람을 예방할 수 있고 해안지역의 경우 해수의 역유입에 따른 지반오염을 방지할 수 있는 포장공법이다. 이러한 투수성 포장을 분류해 보면 아스팔트포장, 콘크리트포장, 콘크리트블럭포장으로 크게 나눌 수 있다.

가. 특성

우수를 신속하게 투과시키는 투수성 콘크리트는 공극율 약 25%의 다공질 구조를 이루고 있다. 시멘트, 바인더, 골재, 물의 특수 배합에 의해 종래의 아스팔트와 콘크리트 보다는 우수한 투수성, 보수성, 통기성을 가지며, 또한 포장으로 충분히 공용 가능한 강도를 갖춘 콘크리트 포장재이다. 이것은 기층용 투수콘크리트를 포설한 후 표면 상부에 세립의 투수콘크리트를 1-1.5cm 두께로 포장하는 공법으로 표면의 상태가 일반 포장과 같이 매끈하게 되는 포장체이며 잔입자를 사용하면 투수가 되는 것은 분쇄 폐유리를 사용하여 유리에 의한 기포발생과 다짐 및 양생과정에서 기포가 공극으로 환원되면서 투수성이 한층 높아지기 때문이다.

나. 국내 사례

도시의 포장화는 생활용수의 증가에 따른 지하수 이용 확대, 우수의 침투 차단화 등을 유발함으로써 지층의 사막화, 지반의 변형, 호우시 우수의 유입에 따른 하천범람 등을 야기시키고 있으며 나아가 지하수의 감소로 인해 하천수가 지하로 침투하는 역순환 등 하천의 건천화를 가속시키고 있다. 따라서 국내에서 투수성을 고려한 포장화는 지속적인 사업으로 전개되어야 할 것이다. 건설 사례를 보면 자전거 이용시설의 구조시설 기준에 관한 규칙 및 서울시 및 지자체의 우수유출 억제시설 의무화에 따라 국내 포장공사는 투수성 포장재 활용을 확대하고 있는 단계에 있다.

다. 유용성

투수성콘크리트는 공극율이 큰 다공질 구조를 가지고 있고 공극율이 투수성 콘크리트의 높은 투수능의 기본이 되고 있으며 하중에도 충분히 견딜 수 있는 강도를 갖추고 있다. 또한 통기성 및 단열성의 특성으로 인해 저온이 유지되어 노면의 표면온도는 최대 10℃ 정도이며 기존의 불투수 포장재보다 증발억제 효과가 크다. 또한 우수의 저류 및 침투가 가능하기 때문에 호우에 의한 표면의 배수불량, 도시형 하천의 범람과 홍수를 방지하며 하수도 시설 부담의 경감, 조정지 등의 저류시설의 부하경감, 설비의 축소 효과도 있다. 따라서 수자원의 한 부분인 지하수 확보차원에서 볼 때 불투수성 포장재에 비해 많은 장점을 가지고 있는 투수성 포장재료의 개발에 있어 향후 자연상태의 지질성분에 가까운 투수성 및 하중에 따른 충분한 강도를 확보하는 방안과 각종 산업폐기물을 투수성 포장재료로 적극 활용할 수 있는 방안을 개발하여야 할 것이다.

3.2.2 확수법

가. 특성

우수를 이용한 지하수 인공함양에 있어 적극적인 방안으로서 담수지 기법, 홍수기법, 보를 이용한 침투기법 및 지하매관 기법 등의 특성은 다음과 같다.

(1) 담수지 기법

인공적으로 우수를 이용한 담수지를 다수 조성하여 지하수를 함양하는 방법으로 담수지의 규모는 지형지질, 우수량 등에 의해 정해진다 (외국의 경우에 담수지 규모는 400m²-0.12km² 정도이다). 하지만 담수를 장기간 지속할 경우에 담수지 수질변화에 따른 부유물 혹은 미생물 침전 등으로 막힘 현상이 발생하는 단점이 있다.

(2) 홍수기법

건조지역에 비가 집중하여 특정한 시기에만 홍수가 발생하는 경우나 우리나라와 같이 홍수기(6월-9월)에 강우가 집중되는 경우에 유용한 방법으로써 홍수시 다량의 하천수를 범람원에 얹게 소통시켜 지하로 침투시키거나 침투지 등의 함양시설에 물을 끌어들여 함양시키는 방법이다 (이란에서는 광대한 부채꼴지역에서 이를 사업화하고 있다).

(3) 보를 이용한 침투기법

투수성이 다른 지역에 비해 높고 투수층이 상당히 두꺼우며 평상시 건천이나 홍수시 다량의 유수가 발생하는 지역일 경우에 효과적인 기법이다. 제주도 경우를 보면 지반과 하상이 다공질 재료로 분포되어 있고 침투율도 약 40%로서 내륙과는 상당한 차이를 보이고 있는 것으로 보고되고 있다. 따라서 제주도의 경우에 대부분의 하천이 평상시에는 건천을 이루고 있으며 홍수시에는 하도연장이 짧아 다량의 유수가 단시간에 바다로 유입되고 있어 대부분의 용수를 지하수에 의존하고 있는 실정에서 볼 때 보를 이용한 침투기법은 타 지역보다 매우 효과적이라 판단된다.

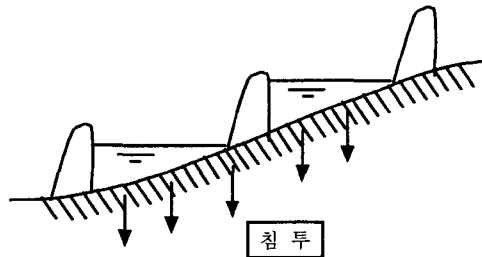


그림 3.1 보를 이용한 침투기법

(4) 지하매관 기법

이 기법은 우수나 지표수를 이용한 담수지에서 인공적으로 지하에 매관을 부설하여 지하매관의 일정한 공극으로 물을 흘려 함양시키는 방법이다. 시초는 오수의 토양정화를 위해 사용한 기법이나 지하수 함양의 기술적 문제로서 가장 중요한 요소중의 하나인 막힘현상이 잘 발생되지 않고 지상의 토지 이용에 관계없이 설치할 수 있다.

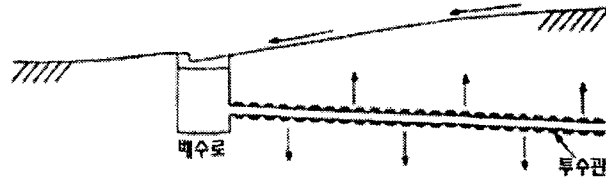


그림 3.2 지하매관기법

나. 국내 사례

국내에서 인공함양을 이용한 용수개발사례는 거의 전무하며 일부 지하체에서 하상 얕은 심도에 암거를 설치하여 복류수를 취수함으로써 충적층의 기계적 여과특성을 이용하는 것이 전부이다. 하지만 자주 발생하는 각종 하천의 수질사고와 정수비용의 증가 등으로 수돗물에 대한 불신이 가중되고, 양질의 용수에 대한 국민들의 기대가 높아지면서 외국에서 안정적인 용수 공급을 인정받은 인공함양 기술의 국내 적용을 위하여 일부 공공기관에서 간접 인공함양법인 유도함양에 대한 타당성을 실시한 바 있으며 현재 일부 지역을 대상으로 개발 및 조사중에 있다. 따라서 본 절에서는 우수에 의한 지하수 함양으로는 직접적 관계가 다소 미흡하지만 국내에서 지표수를 지하수로 순환하여 개발한 사례를 살펴보면 다음과 같다.

먼저, 충남 연기군 남면 월산리의 미호천 연변의 충적층에 정호를 설치하여 지하수를 취수함으로써 하천수를 강제로 지하로 유입시키는 유도함양법 (국내에서는 강둑여과 혹은 강변여과로 불림)을 실시하여 하상퇴적층의 오염저감 효과와 취수원활용의 타당성을 검토한 바 있다 (「하상퇴적층의 수리특성을 이용한 취수원 활용 시범조사」, 1995. 3). 시범조사 결과에 따르면 V급 수준의 미호천 수질에 비하여 강변여과된 지하수는 지하매질을 통과하면서 탁도를 제외한 음용수 수질기준 전항목을 만족시키는 것으로 나타났으며 충적층 매질에 대한 납의 흡착시험에서도 매우 양호한 결과를 나타내었다. 또한, 대수성시험을 실시하여 강변여과된 지하수를 채취하여 수질분석한 결과를 하천수 수질과 비교한 결과 다음의 수질비교표와 같이 미호천 표류수에 비하여 뚜렷한 수질개선을 보였으며 특히 카드뮴, 납, 망간, 철 등의 중금속과 암모니아성 질소는

50-100%의 높은 감소율을 나타냈다.

따라서 하천수를 직접 취수하는 방안과 하상퇴적층에 집수정을 설치하여 간접하는 취수방안에 대한 개략 공사비를 산정 검토한 결과, 간접 취수방식이 경제성 측면에서도 유리하게 나타났다.

다음으로, 금강 수질의 악화로 정수처리 및 슬러지 처리비용의 증가, 세사의 과다 유입에 의한 펌프의 성능저하 및 수명감소, 겨울철 암모니아성 질소 농도의 급격한 증가 등의 문제가 발생하고 있는 금강계통 광역상수도의 문제점을 해결하는 방안의 일환으로 충남 부여군 부여읍에 소재하는 부여취수장 직상류의 금강변 충적층 분포지역에 pilot plant를 설치하여 각종 수리지질 조사 등을 실시하여 유도함양법을 통한 취수개선방안을 검토하였다. 대상지역을 중심으로 청양군에서 부여읍 군수리 일대는 금강을 따라 하상퇴적층의 발달이 양호하여 유도함양 또는 인공함양에 적당한 입지조건을 가지고 있으며, 자갈 함유량을 비롯한 구성물질의 입도 등이 인공함양을 위한 좋은 수리지질조건을 갖추고 있다. Pilot plant 설치지점의 충적층은 20m이며 포화대 수층의 두께는 10-15m로 상부는 주로 실트질모래나 점토질실트로, 하부는 자갈섞인 모래층으로 구성되어 있으며 하부로 갈수록 구성입자의 입도가 점점 커지는 것으로 나타났다. 설치한 시험정에서 20일간 장기 양수를 실시하면서 2-3일 간격으로 지하수시료를 채취하여 동기간의 금강 표류수와 수질비교를 실시한 결과 일반세균, 대장균군, 탁도, 색도, 철, 망간을 제외한 항목은 대부분 음용수기준을 만족하였으며 부적합한 이들 성분도 양수가 계속됨에 따라 대체로 감소하는 경향을 보였다. 특히 암모니아성 질소는 같은 시기 금강원수 0.8-1.5ppm에 비해 상당히 낮은 0.34-0.48ppm의 값을 보였고 과망간산칼륨 소비량 등도 같은 시기 하천수보다 80-90% 감소되어 나타났다.

마지막으로 제주도의 남제주군 성읍리 천미천유역에서 1995년에 실시한 지하매관 기법은 사전에 충분한 조사가 이루어지지 않았고 유지관리의 문제점과 더불어 천미천유역에 있어 댐의 건설이 더욱 효과적이라는 연구결과에 따라 현재 폐쇄된 상태이다.

다. 유용성

확수법에 의한 인공함양을 위해서는 우수 및 우수에 기인한 하천수의 확보가 가능한가 하는 것이 중요한 문제이며 또한 인공함양이 이루어질 경우에 대수층이 수리지질학적으로 이용 가능성이 있는가 하는 적합성 여부에 대한 판단이 이루어져야 할 것이다. 인공함양을 위한 대수층의 적합성 여부를 판단하기 위해서 향후 취수시설 및 도·송배수 시설 설치를 고려한 함양방법 및 함양시설의 위치선정과 대수층의 범위, 두께 및 심도와 압층 또는 누수대수층의 범위, 두께 및 심도, 수리적 특성 (투수량계수, 저유계수, 누수성, 공극률 등), 우물개발 방법 및 산출량, 각 대

수층의 지질구조 그리고 잠재 오염원의 위치 및 종류 등의 사항에 대한 예비 조사가 먼저 실시되어야 할 것이다.

또한, 인공함양 과정에서 지표수에 포함되어 있는 많은 오염물질은 대수층내에서 완전히 분해되지 않고 잔존하며 지속된 축적으로 말미암아 어느 순간 돌출되어 문제를 일으킬 소지가 있다. 특히 현대에 들어 인간의 건강에 해로운 인공 화학물질의 사용의 증가로 이런 위험성은 더욱 커졌다고 할 수 있다. 따라서 원수에 포함된 오염물질중 주된 부분을 제거하기 위하여 함양지 상부에서의 오염절감, 흡착에 의한 오염물질 제거, 지하대수층에서의 오염저감 등에 따른 전처리 과정을 확대·강화할 필요성이 있다. 또한, 홍수시에 침투수가 다량의 부유모래를 포함하는 경우에는 대량의 토사 퇴적이 이루어지기 때문에 이에 대한 효과적인 제거방법 등도 제시되어야 할 것이다.

이와 같이 전후처리 과정과 인공함양을 모두 시행하여 용수를 공급하는 경우 용수 생산 단가가 증가하는 단점이 부각될 수 있으나 양질이며 신뢰성 있는 용수를 확보할 수 있는 장점에 비한다면 상계될 수 있을 것으로 판단된다.

3.2.3 그 밖의 사례

가. 지하댐

농어촌의 소유역 지역에서 지하수 저류량을 극대화 할 수 있는 지하댐개발은 가뭄에 대비하여 지하수 저류량을 증대시키는 방안으로써 우리나라에서는 '83년 경북 상주군 이안면에서 농업용수개발을 위한 지하댐 시험사업을 시행한 바 있다. 그리고 속초시에서 시행한 쌍천 지하댐의 경우에 취수방식은 방사성 집수관을 지하에 매설하여 집수정으로 지하수를 모은 후 사이폰을 이용하여 취수펌프장의 흡수정까지 이송하고 이 물을 펌프를 이용하여 대포정수장으로 이동한다. 집수정의 시설은 방사성 집수관을 사용한 구체 높이 15.5m-18.6m인 집수정 4개소를 설치 (3개소 신설, 1개소 보완)하였고 집수정에서 흡수정까지의 취수관로 시설은 총 연장 968.8m로 \emptyset 250- \emptyset 350mm의 관을 병렬로 연결하여 Siphon방법을 사용하여 시공하였다. 쌍천 지하댐은 1998년 3월 완공되어 취수를 시작하였으며 속초시의 1998년 총 취수량의 약 50.5%를 부담하였다. 이후 전월 가동되면서 총 취수량의 68%정도를 담당하고 있는 실정이다. 지하댐에 의한 수원개발은 비교적 소규모로 이루어지지만 댐 건설에 의한 환경파괴는 거의 없기 때문에 지하댐 건설시 환경단체 등에 그 타당성을 충분히 설명할 수 있을 것이다. 따라서 수자원 부족이 예견되는 지역에서는 지하댐에 의한 수자원개발이라는 적극적인 자세가 필요한 시점이다. 그러나 지하댐에 대한 지하수문의 복잡성으로 아직까지 지하수의 유효저수량과 개발이용량 설계에 대한 이론정립과 지하댐 조사설계 기준도 마련되지 않은 실정이다.

따라서 소유역 지하댐 개발에 있어서는 무엇보다 적정설계 기준 마련 (소유역의 지하수함양과 대수층의 평가 방법, 소유역 지하댐 개발에 관한 조사 설계기준 정립)과 소유역 지하댐 설계에 적용할 수 있는 지하수문 분석모델 개발, 저장된 지하수의 이용을 극대화할 수 있는 기술개발 연구가 선행되어야 할 것이다. 90년대 가뭄이후 가뭄대책을 위한 지하댐개발의 필요성이 다시 대두되고 있는 실정이다.

나. 생태계를 이용한 지하함양

자연과의 공존과 공영을 목적으로 자연 순환계에 순응할 수 있는 환경 조성은 매우 바람직한 방안이다. 자연순환계 자체를 지속적으로 보전하기 위한 대책은 자연순환 과정의 일부인 물의 순환계에도 많은 영향을 미친다. 수목의 증가는 빗물의 지하침투를 촉진시키고 지표면의 유수량을 감소시켜 홍수예방에 있어 매우 효과적이다. 따라서 생태계를 이용한 친환경적인 방안으로서 우수를 이용한 지하수 함양방안을 강구한다면 이상적인 대책이 될 것이다.

4. 결론

우리나라의 수자원은 그 특성상 댐공급량이나 하천취수량이 주된 용수공급체제로 이루어져 있고 지하수는 지표수의 개발공급조건이 열악하거나 대규모 지하수층이 존재하는 지역등에서 대체 용수원으로 활용되고 있는 실정이다. 하지만 구미의 여러나라 등에서는 용수시기와 공급체제관리 등 여러 제반사항에 따라 지하수 함양을 통한 채수를 연계하여 계획적으로 운영관리함으로써 용수공급의 안정성과 효율성을 도모하고 있다. 물론, 우리나라는 외국에 비해 대규모 대수층의 부존과 지하수 개발을 위한 기본자료의 축적이 상대적으로 낮은 실정이나 적극적인 개발의지만으로도 이러한 문제점들은 충분히 해결될 것이다.

지하수의 합리적 이용은 수자원의 총량 확보, 용수공급의 효율성 증대 차원에서 다루어져야 하며 이를 위해서는 수량뿐만 아니라 수질의 안정성, 개발 가능한 지하수 인공함양 그리고 경제성 및 시설의 효율성 증대를 위한 운영관리 측면 등이 함께 고려되어야 할 것이다. 우리나라 실정을 감안할 때 우수에 의한 지하수 함양 및 관리는 이론과 실용적인 측면에서 충분한 타당성이 있는 것으로 판단된다. 심부 지하수에 비해 우수에 의한 지하수 함양이 원활하고 대용량의 채수 가능성 및 대수층 고유의 여과기능을 이용한 현저한 수질개선 효과를 거둘 수 있는 충적층의 발달과 불투수 면적의 증가로 인한 도시구역에서의 침투유량 증가를 억제하기 위한 투수면적의 확대 및 지하저류 방안과 도시구역의 다공질 매체 특성을 이용하여 홍수시 하천에 단계별로 유량을 저류시키기 위한 수공구조물 설치 등은 이수과 치수의 양 측면에서 효율성을 감안하면 지하수 함양은 지하수 개발의 필수적인 사항이라 할 수 있다. 전절에서 언급한 국내 조사 사례와 전국 충적층 지하수 조사 보고서 (한국수자원공사, 1996)에서 언급한 바와 같이 개발가능성은 충분하므로 소규모 도시의 용수원 또는 비상 취수원 등으로 개발의 여지는 높다고 할 수 있다. 또한 내륙의 방대한 나대지나 목초지, 도시 인근지역 등에서 인공함양지 조성을 통한 지하수 함양도 앞으로의 용수수요와 양질의 용수개발차원에서 검토할 가치가 충분하다고 판단된다. 우리나라에서 최근 수돗물에 대한 불신과 양질의 지하수에 대한 수요가 증가하면서 지하수개발이 보편화되어 해마다 지하수 사용량이 점차 증대되고 있으며 이에 대한 부정적인 효과로 일부 해안지방에서의 염수침입, 지반침하, 지하수고갈에 따른 수리권 분쟁 등이 발생하고 있다. 이를 방지하기 위해선 지하수사용을 억제하는 것도 중요하나 대수층의 보호차원에서 지하수 인공함양 도입은 적극적인 방안으로서 검토되어야 할 것이다.

지하수의 인공함양을 통한 개발과 이용은 우리 모두가 추구하는 궁극적인 목표이면서 반드시 실행하여야 할 사항들이지만 이 모든 측면을 완벽하게 고려하여 개발 이용과 보존 관리를 동시에 수행한다는 것으로 참으로 어려움이 많을 것이다. 하지만 환경적 측면, 자연 생태계적 측면 및 수자원적 측면에서 지하수의 그 중요성은 누구도 부정할 수 없으며 단계적으로 현실에 맞게

개발하고 실패에 따른 좌절을 슬기롭게 극복한다면 지하수 개발과 보존은 결코 어려운 과제만은 아닐 것이다.

참고문헌

- 건설교통부 (1995,1996, 1997, 1998). 지하수 조사년보.
- 김남중 (1995). "국내지하수 현황과 이용관리 방향." 한국수자원학회지, 제28권, 제4호, pp. 28-36.
- 김창세 (1995). "지하수법 시행과 지하수 관리대책." 제28권, 제4호, pp. 9-18.
- 박창근 (2000). "속초시 쌍천지하담과 그 의미." 한국수자원학회지, 제33권, 제6호, pp. 85-90.
- 배상근 (1990). 한국의 지하수 부존량, Keimyung University, Vol. 13-1.
- 배상근 (1999). "수자원확보를 위한 지하수 이용방안." 한국수자원학회지, 제32권, 제5호, pp. 158-165.
- 백규석 (1997). "우리나라 하천의 수질현황 및 문제점." 한국수자원학회지, 제30권, 제4호, pp. 11-15.
- 선우중호 (1996). "지하수개발·이용에 따른 바람직한 지하수 기초조사와 영향평가 방안." 제29권, 제6호, pp. 58-61.
- 이규환 (1997). 세계 물의 날 기념 물 문제 심포지움, 대한토목학회, pp. 34-59.
- 유영창 (1997). 우리나라의 물 수요전망과 개발계획, 한국 물 학술단체 연합회, 한국수자원공사, pp. 161-207.
- 한국수자원공사 (1995). 하상퇴적층의 수리특성을 이용한 취수원 활용 시범조사 보고서.
- 한국수자원공사 (1996). 전국 충적층 지하수 조사 보고서.
- 한국수자원공사 (1996). 하상퇴적층 여과방식에 의한 금강수도 취수개선방안 조사·연구.
- Balke, K.D., and Schmidt, H. (1982) "Possibilities of artificial groundwater recharge and storage in the Federal Republic of Germany, Bulletin Artificial Groundwater Recharge Vol. II, Verlag Paul Parey · Hamburg/Berlin.
- Todd, D.K. (1980). *Groundwater hydrology*. John Wiley & Sons.
- Fetter, C.W. (1988). *Applied hydrogeology*. 2nd ed., Merrill, Columbus.
- Freeze, R.A., and Cherry, J.A. (1979). *Groundwater*. Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs.
- Huisman, L., and Olsthoorn, T.N. (1983). *Artificial groundwater recharge*. Pitman Press.
- Koenig, L. (1963). "Economics of groundwater utilization." *Journ. AWWA*, Vol. 55.
- Soki Yamamoto (1983). 지하수조사법.
- Van Puffelen, J. (1982). "Artificial groundwater recharge in the Netherlands." *Bulletin Artificial Groundwater Recharge*, Vol. I, Verlag Paul Parey · Hamburg/Berlin.