

지표수-지하수를 연계한 수자원의 효율적 이용 - (I) 방법론

Effective Use of Water Resources Through Conjunctive Use - (I) The Methodology

이 상 일* / 김 병 찬** / 김 수 민***

Lee, Sang Il / Kim, Byeong Chan / Kim, Su Min

Abstract

Conjunctive use of surface and ground water is emerging as an alternative to resolve water shortage problems caused by drought or overpopulation. The region whose water supply depends on a single source has high risk of emergency situations, and may need to consider conjunctive use to overcome its weakness. Conjunctive use also can be a realistic and effective solution when additional or new water resources are to be developed. This paper presents a new methodology for managing surface and ground water resources with the aim of supplying water in a sustainable way. The developed method encompasses procedures to assess site suitability for conjunctive use, to devise water supply scenarios based on drought analysis, and to quantify the amount of water attained. It is believed that the systematic and objective features of the developed method enable it to be a useful supportive tool for water management planning and decision-making.

keyword : conjunctive use, water shortage, drought, attainable water, AHP

요 지

가뭄이나 장래 물 부족을 해결하기 위한 방안으로 지표수-지하수 연계이용 방안이 대두되고 있다. 하나의 수원에 지나치게 높게 의존하고 있는 지역은 물 부족사태가 발생할 개연성이 높기 때문에 연계이용을 검토할 수 있으며, 추가 및 신규 수자원 확보 차원에서도 연계이용은 매우 현실적이고 효율적인 대안이 될 수 있다. 본 연구에서는 가뭄과 같은 비상시 안정적인 물 공급을 위해 지표수와 지하수를 효율적으로 연계하여 추가적인 수자원을 확보하는데 적용할 수 있는 방법론을 개발·제시하였다. 개발된 방법론은 지표수-지하수 연계이용 적지선정을 위한 분석, 가뭄해석을 기초로 한 물 공급 시나리오 도출, 유형별 추가 수자원확보량 산정 등의 절차로 구성되며, 체계적이고 정량적인 방법에 의해 지표수-지하수 연계이용을 계획할 수 있어 공공기관 등에서 불관리 방안 수립시 유용한 도구가 될 수 있다.

핵심용어 : 지표수-지하수 연계이용, 물 부족, 가뭄, 수자원확보량, 계층분석과정

1. 서 론

인구증가와 산업성장으로 급증하고 있는 물 수요에

대처하기 위한 수자원 확보는 국가의 중요 정책과제로

대두되고 있다. 국제인구행동단체(Population Action

* 동국대학교 공과대학 토목환경공학과 부교수
Associate Prof., Dept. of Civil and Environmental Engineering, Dongguk Univ., Seoul 100-715, Korea
(E-mail: islee@dgu.ac.kr)

** 동국대학교 공과대학 토목환경공학과 Post-Doc.
Post-Doc., Dept. of Civil and Environmental Engineering, Dongguk Univ., Seoul 100-715, Korea

*** 동국대학교 공과대학 토목환경공학과 공학석사, 현 한국종합기술개발공사 수자원부
M.S., Dept. of Civil and Environmental Engineering, Dongguk Univ., Seoul 100-715, Korea

International, PAI)에서 세계 각국의 연간 가용한 재생성 가능수자원량을 산정, 발표한 보고서(PAI, 2000)에 의하면 우리나라는 1인당 가용수량이 $1,700\text{m}^3/\text{year}$ 이하로 주기적인 물 압박을 경험할 수 있는 '물부족 국가군'으로 분류된다. 그러나 이는 인구증가에 따른 예측일 뿐 수질 악화로 인한 가용수자원의 감소, 지구온난화에 따른 기후변화 등을 고려하면 상황은 더욱 나빠질 수 있다.

현재 및 장래의 물 부족에 대처하기 위하여 기존 댐 재개발, 우수 및 하수의 재이용, 지표수-지하수 연계이용 등 여러 가지 방안들이 활발히 연구되고 있다(ASCE, 2000; 전인배 등, 2001; Yeh와 Emch, 1998). 특히, 인공함양(artificial recharge), 지하댐(underground dam), 강변여과(riverbank filtration) 등을 이용한 지표수-지하수 연계이용은 기존 수자원 시설을 활용함으로써 신규개발을 최소한으로 억제하는 측면과 가뭄에 민감한 지표수와 상대적으로 덜 민감한 지하수를 연계이용함으로써 효율적으로 가뭄에 대처할 수 있다는 장점을 내포하고 있다(Muhammad와 Richard, 1995; Azaiez와 Hariga, 2001). 그러나 외국에 비해 우리나라는 아직까지 체계적인 지표수-지하수 연계이용의 사례가 거의 존재하지 않고, 관련 기술도 확보되어 있지 않은 상태이다.

여기에, 우리나라는 1900년 이래 전국적으로 5~10년마다 극심한 가뭄을 겪어왔으며, 1990년 이후부터는 크고 작은 가뭄이 거의 매년 발생하고 있음을 감안할 때(이동률, 2002), 가뭄과 같은 비상시를 대비하여 지표수-지하수를 연계하여 수자원을 효율적으로 활용하는 체계를 수립하는 것은 매우 의미 있는 일이 될 것이다. 본

논문은 이를 위한 방법론을 개발하는데 그 목적이 있으며, 후속 논문에서는 개발된 방법론을 현장에 적용하여 그 활용 가능성을 평가한다.

2. 지표수-지하수 연계이용

2.1 개념 및 유형

지표수-지하수 연계이용은 "수자원 개발이 한계에 도달하거나 시·공간적으로 수자원의 수요, 공급의 불균형이 심한 지역에서 유역 내 지표수와 지하수를 단일 체계로 통합하여 계획적으로 운영함으로써 수자원의 가용량 증대와 용수공급의 안정성을 확보하는 방법"으로 정의할 수 있다(동국대학교, 2002).

그림 1은 지표수-지하수 연계이용의 전형적인 유형을 보이고 있다. 즉, 인공함양, 지하댐 및 강변여과 등의 방식을 통해 함양 혹은 개발한 지하수와 기존의 하천이나 댐으로부터의 수자원을 적절히 조합할 수 있다. 인공함양은 인위적으로 지표수를 지하층에 침투시킴으로써 지하수 개발량 증대, 지하수위 하강 억제, 지반 침하 방지, 수질개선, 잉여 용수의 저장 등에 이용된다(Molano 등, 1994; Liu 등, 1994). 지하댐은 지하수가 흐르는 대수층에 인공 물막이벽을 설치하여 지하에 물을 저장시키고 관정 등의 양수시설을 이용, 취수하는 지하저류지를 말하며(Hanson과 Nilsson, 1986; 이상일과 김병찬, 2003), 강변여과는 하천의 인접부에 수직 또는 수평정호를 설치하여 대수층으로 유입된 하천수와 주변의 지하수를 취수하는 것이다(공민근과 윤성용, 2001).

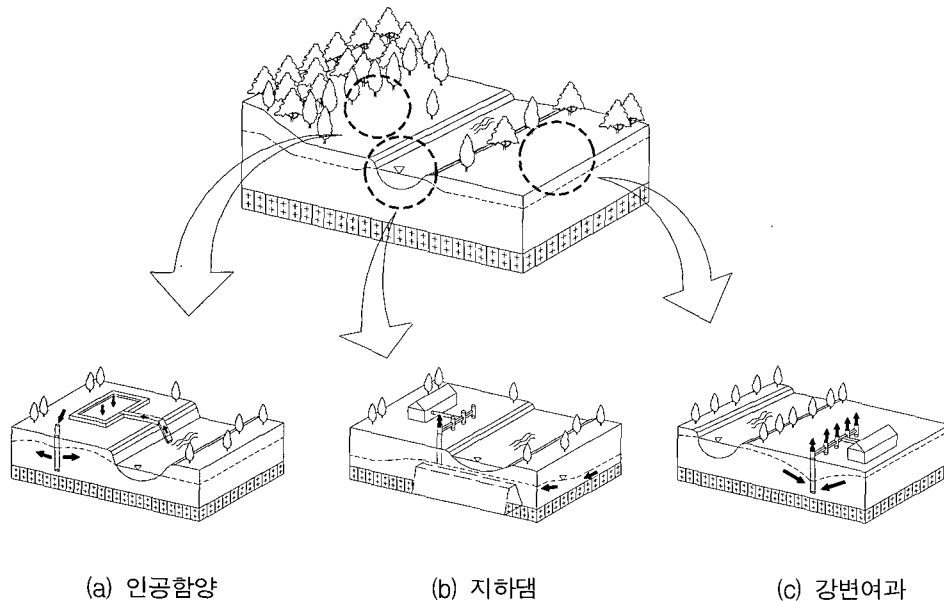


그림 1. 지표수-지하수 연계이용의 유형

2.2 국내외 사례

지표수-지하수 연계이용의 국내외 사례를 표 1과 2에 나타내었다. 선진국들은 지표수와 지하수를 연계한 다양한 사례를 통해 관련 기술을 확보하고 실용화에 성공했거나 진행 중에 있음을 알 수 있다. 라인강변의 서유럽 국가들과 미국, 호주 등은 주로 수질 개선과 지하수자원 보전을 목적으로, 그리고 일본, 중동 및 인도는 지하수 과잉 취수로 인해 발생하는 지반 침하, 염수 침입, 용수부족 등의 문제를 해결하기 위해 지표수와 지하수를 연계이용 하는 경향이 있다(Print, 1997; 한국수자원공사, 1999; Foster, 2002; 부성안과 이기철, 2002;

김형수, 2003).

국내에서는 지표수와 지하수의 통합적 활용이라는 엄밀한 의미에서의 연계 사례는 없으며, 지하댐과 강변여과수 개발, 그리고 인공함양 사례가 소수 존재할 뿐이다. 지하댐은 2003년 현재 총 6개가 존재하며 환경친화성, 유출로 손실될 지하수 이용 등의 측면과 안정적인 취수가 가능하다는 장점이 부각되어 21개 지하댐 개발유망지역이 선정된 바 있다(건설교통부, 2002). 특히, 강원도 속초시 쌍천에 설치된 지하댐은 평균 취수량이 27,000m³/day에 이르고 있어 성공적인 사례로 꼽히고 있다. 또한 강변여과수는 경남 창원시 북면 하천지구, 대산면 갈전지구 2곳이 운영되고 있다.

표 1. 지표수-지하수 연계이용 사례(국외)

(단위: 10³m³/day)

위 치	방 식	목 적	비 교	
독일	펠른 정수장	강변여과 + 인공함양	수질개선	-
	뒤셀도르프 정수장	강변여과	수질개선	192(시설용량)
	에센 정수장	표류수 취수 + 인공함양	수질개선	134(시설용량)
네덜란드	암스테르담 정수장	지표수 취수 + 인공함양	수질개선, 염수 침입 방지	-
미국	플로리다주 코코아시	ASR ¹⁾	수질개선, 안정적인 물 공급	227(함양 및 취수량)
	노스다코타주 오크스시	ASR	지하수 난방	-
	하와이주 오아후섬	직접함양	수질개선, 용수 공급	-
호주	알데라이드 평원	인공함양	수질개선	5.4(함양량)
	마운트 감비에르시	인공함양	음용수 공급	37,000(저수량)
일본	아마가타시	직접함양	지반 침하, 염수 침입 방지	21.9(함양량)
	구수쿠베시	지하댐	농업용수	10,500(저수량)
	미카타시	지하댐	상수(생활용수)	73(저수량)
이스라엘	Yarkon-Taninim 대수층	직접함양	염수 침입 방지, 안정적인 물 공급	71.2(함양량)
인도	Palghat Gap주	지하댐	농업용수	15(저수량)

1) ASR(Aquifer Storage and Recovery): 대수층 함양 및 회수점용방식

표 2. 지표수-지하수 연계이용 사례(국내)

위 치	방 식	목 적	취수량(m ³ /day)	완공년도
이안(경북 상주)	지하댐	농업용수	24,000	1983
남송(경북 영일)	지하댐	농업용수	27,000	1986
옥성(충남 공주)	지하댐	농업용수	27,900	1986
고천(전북 정읍)	지하댐	농업용수	25,110	1986
우일(전북 정읍)	지하댐	농업용수	16,200	1986
쌍천(강원 속초)	지하댐	생활용수	27,000	2000
북면(경남 창원)	강변여과	생활용수	9,700	1999
대산면(경남 창원)	강변여과	생활용수	7,200	1999
정동·자왕(충남 부여)	인공함양	연구	-	-

주) 지하댐 관련 자료 출처: 부성안 등.(2002)

3. 지표수-지하수 연계이용 절차

지표수와 지하수를 연계이용하여 효율적인 물 공급을 수행하기 위해서는 다각적인 접근이 수반되어야 한다. 먼저, 지표수와 지하수의 연계이용이 가능한 지역을 지질·수문·사회·경제·환경적 측면에 입각하여 선정하여야 한다. 다음으로 가뭄 등과 같은 비상 상황이 발생할 경우를 상정하여 어떻게 운영할 것인가에 대한 의사결정도 필요하며, 어떠한 유형의 연계가 타당할지에 대한 판단도 있어야 한다. 또한, 연계이용을 통한 효과, 즉 추가 수자원 확보량을 산정하는 방법도 확립되어야 한다.

3.1 적지분석

다른 많은 경우와 마찬가지로 지표수-지하수 연계이용을 위한 입지선정도 체계적인 계획과 조사를 바탕으로 한 적지분석을 통해 이루어지는 것이 바람직하다. 입지선정과 같이 여러 가지 기준을 최선으로 만족시키는 대안을 찾을 때에는 다기준 의사결정 방법(Multi-Criteria Decision Making, MCDM)이 유용하며, 그 중에서도 계층분석과정(Analytic Hierarchy Process, AHP)기법이 많이 사용된다. 계층분석과정이 의사결정을 지원하는 방법론으로서 매우 유용한 기법임이 입증되고 여러 학문 분야에서 다양하게 활용되고 있지만, 지표수-지하수 연계이용 적지분석에는 최근에는 적용 가능성이 보고되었다(이상일 등, 2002; 2003).

계층분석과정은 다수의 속성들을 계층적으로 분류하여 각 속성의 중요도를 파악함으로써 최적 대안을 선정하는 기법으로 Saaty(1977)에 의해 개발되었다. 계층분석기법이 갖는 참신성은 다수의 목표, 평가기준, 의사결정주체가 포함되어 있는 의사결정 문제를 계층화하여 해결하는데 있다. 그림 2는 계층분석과정의 절차를 순서도로 나타낸 것이다. 우선, 문제 정의에 따른 목표 결정 후, 의사결정 문제를 의사결정요소와 관련된 계층으로 분류한다(단계 1). 각 요소들은 Saaty가 제안한 9점 척도를 이용, 쌍대비교를 할 수 있는 초기행렬을 구성하고 정규화 한 후(단계 2), 각 요소들에 대한 상대적 가중치를 구한다(단계 3). 상대적 가중치의 논리적 일관성을 분석하기 위해 일관성비율(Consistency Ratio, CR)을 평가함으로써(단계 4) 분석의 임의성을 최대한 배제한다.

$$CR = CI / RI \quad (1)$$

여기서, CI(일관성지수, Consistency Index)는 행렬의

최대고유치 λ_{max} 와 행렬의 크기 n 의 값으로부터 얻어지는 것으로,

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

로 나타낼 수 있다. 또한, RI(무작위지수, Random Index)는 9점 척도의 1에서 9까지 정수들을 무작위로 추출하여 상반행렬(reciprocal matrix)을 작성하여 구한다. 논리적 일관성의 판단기준은 $CR \leq 0.1$ 이면, 상대적 가중치가 일관성을 갖는다고 판단한다. 그러나 이 조건을 만족시키지 못하면 단계 2의 쌍대비교 행렬을 다시 작성하는 것이 바람직하다(단계 5). 계층분석과정에 관한 자세한 내용은 Saaty(1999)에 수록되어 있다.

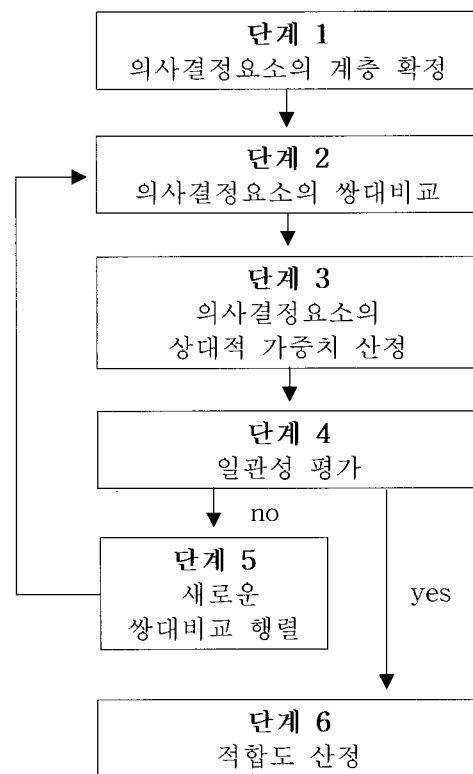


그림 2. 계층분석과정 절차

어느 지역이 지표수-지하수 연계이용에 적합한지를 정량화 한 것이 적합도(Suitability Index, SI)이다. 여러 지역을 조사하여 가장 적지의 후보지를 선택하려 한다면, 적합도는 다른 지역과의 비교자료가 된다. 적합도의 산정식은 분석유형에 따라 다양하지만, 계층조직이 총 4단계(Level 1~4)로 구성될 경우 다음의 식이 한 예가 될 수 있다.

$$SI = \sum_i^{N_1} PV_i^1 \cdot \sum_j^{N_{2i}} [PV_{i,j}^2 \cdot \sum_k^{N_{3i}} (PV_{i,j,k}^3 \cdot PV_{i,j,k,l}^4)] \quad (3)$$

여기에서 PV는 일관성비율 테스트를 거쳐 확정된 상대적 가중치, N_1 은 Level 1의 요소의 수, PV_i^1 은 Level 1의 요소 i에 해당하는 PV, N_{2i} 는 Level 1의 요소 i와 직접 연결되는 Level 2의 요소의 수 등이다.

3.2 가뭄해석

연계이용이 검토되는 지역이 어떠한 가뭄조건을 갖고 있는지에 관한 정보는 시설물의 유형, 규모, 운영에 결정적으로 중요한 영향을 미친다. 가뭄을 정량화하기 위한 가뭄지수에는 여러 가지가 있다.

Palmer(1965)는 가뭄을 시·공간적으로 비교할 수 있는 지수(Palmer Drought Severity Index, PDSI)를 개발하였다. PDSI는 기온, 강수량 및 일조시간에 관한 정보를 사용하여 가뭄의 정도를 나타내는 것으로 수분부족량과 수분부족기간의 함수로 표현되며, 장기가뭄의 예보에 효과적이라 알려져 있다. 국내에서는 기상연구소(1993), 윤용남 등(1997)이 우리나라에 PDSI를 적용한 바 있다.

Palmer 지수에 토양 수분 조건, 특히 적설의 영향을 보완하기 위해 개발된 지수로 SWSI(Surface Water Supply Index)가 있다(Shafer와 Dezman, 1982). 김선주 등(1997)은 SWSI를 우리나라의 특성에 맞게 변화하여 WSI(Water Supply Index)를 제시하였다.

McKee 등(1995)은 가뭄 빈도와 지속기간의 관계에 대한 연구에서 SPI(Standard Precipitation Index)를 정의하고 특성을 설명하였으며, 시간간격과 가뭄의 빈도, 지속기간, 강도의 관계를 비교하였다. SPI는 강수량 자료만을 이용하여 산정하는 가뭄지수로서 강수량을 이동 평균하여 누가강수 시계열을 작성한 후, 이를 월별로 분석하여 적정 확률분포형을 도출한다. 누가확률을 산정하여 표준정규분포의 누가확률과 같아지는 값이 SPI가 되나, 다음과 같은 근사식을 이용하여 구하기도 한다.

$$SPI = \begin{cases} -\left(t - \frac{c_0 + c_1t + c_2t^2}{1 + d_1t + d_2t^2 + d_3t^3}\right) & \text{for } 0 < H(x) \leq 0.5 \\ +\left(t - \frac{c_0 + c_1t + c_2t^2}{1 + d_1t + d_2t^2 + d_3t^3}\right) & \text{for } 0.5 < H(x) \leq 1.0 \end{cases} \quad (4)$$

여기서, x : 강수량, $H(x)$: 누가확률,

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(H(x))^2}\right)} \quad \text{for } 0 < H(x) \leq 0.5$$

$$\sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1-H(x))^2}\right)} \quad \text{for } 0.5 < H(x) \leq 1.0$$

$$c_0 = 2.515517, c_1 = 0.802853, c_2 = 0.010328$$

$$d_1 = 1.432788, d_2 = 0.189269, d_3 = 0.001308$$

이다.

산정된 SPI는 각 시간단위에 따라 여러 목적으로 사용될 수 있다. 예를 들면 단기간 시간단위의 SPI는 농업, 비교적 장기간 시간단위의 SPI는 수자원관리 등에 사용될 수 있다. 자료획득 및 계산의 편리성, 다양한 활용도 등의 이유로 본 연구에서는 지표수-지하수 연계이용을 위한 가뭄해석에 SPI 분석을 채택하였다.

3.3 필요용수량 추정

인구와 물수요량은 밀접한 관계가 있다. 인구의 추정 은 등차급수법, 등비급수법, 지수곡선법, 논리곡선법, 최소사승법 등을 사용하는데, 이들 방법들은 과거인구 추이를 토대로 통계학적 방법을 이용 장래인구를 추정하는 것으로, 소단위 행정구역이나 목표 년도가 10년 미만인 단기간의 인구추정에 적합하다. 그러나 인구추정은 실제와는 많이 차이가 발생할 수 있으므로 차후 과대/과소 설계가 되지 않게 조심스런 예측을 해야 한다.

급수지역내의 인구추정이 완료되면 물수요량은 비교적 쉽게 산출할 수 있으며, 새로운 산업단지 조성 등과 같은 물 수요의 급증을 초래하는 계획 등을 면밀히 조사해서 물수요 예측량을 반영해야 한다. 또한 도시가 발달하면서 상수도의 보급률이 높아지므로 상수도 혜택을 받는 인구의 평균급수량 등을 산정하여 물수요 예측을 실시한다.

3.4 연계방식 및 물공급 시나리오 도출

지표수와 지하수를 연계하는 방법 중 직접연계방식은 두 개의 수원을 수로 혹은 관로를 건설하여 물리적으로 연결하는 방식으로 정의할 수 있다(그림 3(a) 참조). 이 방식은 지리적으로 비교적 가까운 두 개의 수원을 연결함으로써 잉여 혹은 부족분을 상호보완적으로 활용할 수 있게 한다. 즉, 지표댐의 월류량을 송수하여 지하대수층에 함양시킨다든지, 혹은 강변여과수를 개발하여 기존의 상수원과 혼합하여 운영하는 방안 등이 이에 해당된다.

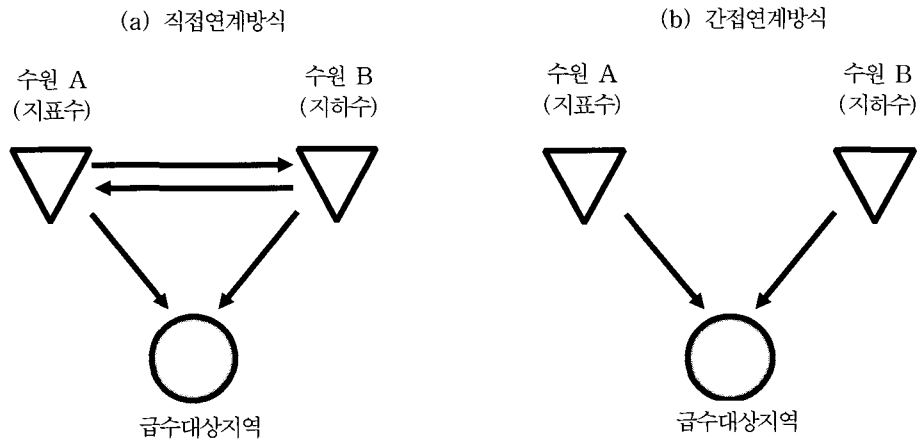


그림 3. 지표수-지하수 연계이용의 직접 및 간접연계방식

한편, 간접연계방식은 두 개의 수원을 물리적으로 연결하지 않고 탄력적으로 물을 공급하는 방식이다(그림 3(b) 참조). 이는 급수대상지역에 새로운 수자원을 추가할 경우, 수문·기상학적인 상황에 따라 각 수자원이 지닌 물공급량을 탄력적으로 조정하여 수자원 활용을 극대화하는 방안이라 할 수 있다.

연계이용 방식이 결정되고 나면, 운영을 어떻게 할 것인가에 관심이 모아져야 한다. 수자원의 최적운영에 관한 연구는 무수히 많으나 아직까지 가뭄이나 비상시 물부족 상황을 실시간으로 해석하여 운영에 반영하는 예는 찾기 힘들다. 대신, 가뭄 등 비상시의 상황을 몇 가지 가능한 시나리오로 설정하여, 그에 해당하는 운영률을 수립하는 것이 더 현실적이라 할 수 있다. 따라서, 3.2절에서 수행한 가뭄해석에 근거하여 해당지역에서 고려할만한 가치가 있는 합리적인 가뭄빈도를 설정하고, 이 경우의 수자원 활용 혹은 배분안을 도출하는 것이 바람직하다.

3.5. 추가 수자원확보량 산정

단일시설에 대한 추가 수자원확보량의 산정은 비교적 간단하다(그림 4 참조). 지표수를 지하지층에 함양하는 경우, 대수층에 저수되는 물의 양인 함양량이 수자원 확보량이 될 것이다. 지하댐의 경우에는 지하댐 건설로 인하여 증가된 지하수위에 해당하는 저류량(S)만큼이 추가확보량이 된다.

$$S = \int_{\Omega} n \cdot H d\Omega \quad (5)$$

여기서, S는 지하댐에 의해 증가된 저류량, n은 공극률, H는 증가된 지하수위, Ω는 지하댐 건설로 영향을 받

는 면적을 의미한다.

강변여과의 경우, 유하하는 물의 일부를 취수하여 수자원으로 활용하기 때문에 취수하는 물의 양만큼이 확보량이 된다.

두 개 이상의 수원이 연계되어 운영될 때 얻어지는 추가 수자원확보량은 단위시설에 대한 그것만큼 간단하지는 않다. 그림 5는 지하댐과 지표저수지를 연계이용할 경우에 확보되는 추가 수자원량을 설명하기 위한 개념도이다. 홍수가 도래하면, 지하수는 양수하지 않거나 공급량을 줄이고, 그만큼을 지표수로 공급함으로써 대수층에는 물이 저장된다. 예를 들면, 평시에는 지하수와 지표수를 8:2의 비율로 공급을 하다가 가뭄시에는 9:1로 공급한다고 할 때, 지표수자원은 그 차이만큼 미사용되

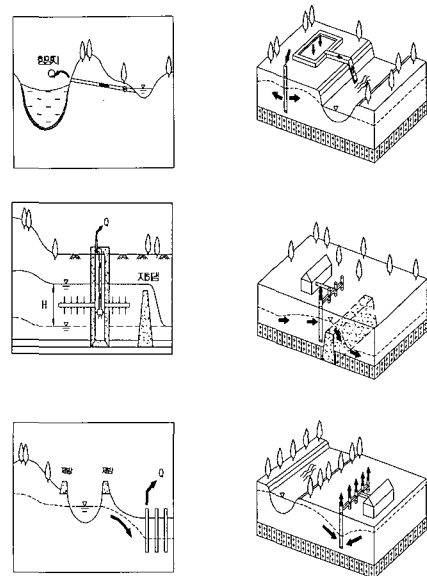


그림 4. 수자원의 확보 개념도(단위시설)

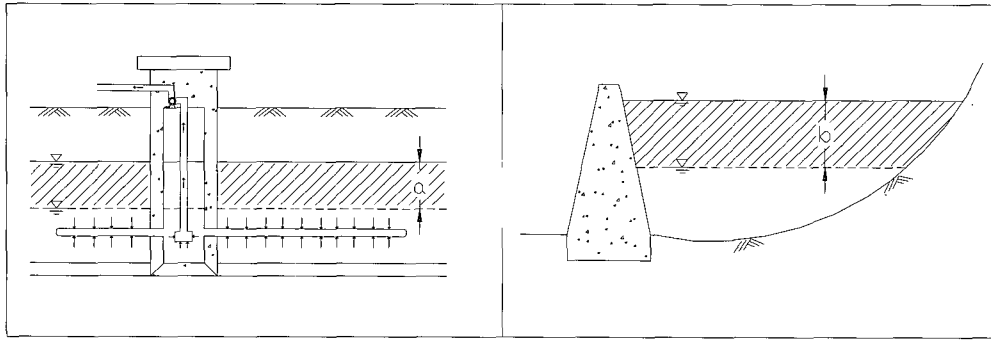


그림 5. 추가 수자원 확보의 개념도(단위시설의 연계)

며, 이 양은 연계이용에 의한 지표수 추가 확보량으로 정의되는 것이다. 즉, 인간에게 직접 공급되는 물은 아니지만 이 지역의 지하수로 추가 확보되어 지하수 고갈로 이어질 수 있는 상황을 예방하는 환경보전적 능력이 증대한다. 이와 반대로 갈수기에 저수지의 물이 고갈될 경우, 지하수의 공급을 늘려 필요공급량을 확보할 수 있다.

그림 5에서 두 개의 수원을 연계함으로써 얻어지는 추가 수자원확보량은 각각의 수원에서 얻어지는 확보량의 합인 $a + b$ 이며, a 는 탄력적 운영에 따른 지하수 미사용량, b 는 탄력적 운영에 의해 확보되는 지표수 저수량을 나타낸다. 이를 식으로 표현하면 식 (6)과 같다.

추가 수자원확보량

$$= \text{지하수자원 추가확보량} + \text{지표수자원 추가확보량} \quad (6)$$

식 (6)에서 지하수자원 추가확보량은,

지하수자원 추가확보량

$$= \text{지하수 미사용에 의한 지하수자원 보존량} \quad (7)$$

으로 정의할 수 있으며, 지표수자원과의 탄력적 운영으로 인해 확보되는 양이다. 이는 곧, 지표수자원이 추가로 공급하는 물의 양과도 일치한다. 지표수자원 추가확보량은,

지표수자원 추가확보량

$$(S_{ijk} + O_{ijk})_{best} - (S_{ijk} + O_{ijk})_{worst} \quad (8)$$

여기서, $i = 1, 2, 3, \dots, 12$ 로 가뭄이 끝난 월, $j =$ 가뭄빈도 인덱스, $k = 1, 2, \dots, n$ 로 가뭄지속기간을 나타낸다. 또한, $(S + O)_{best}$ 는 탄력적 운영을 실시한 경우의 저수지 저류량과 월류량의 합, $(S + O)_{worst}$ 는 탄력적 운영을 실시하지 않았을 때의 저수지 저류량과 월

류량의 합을 나타낸다.

예를 들어 30년 빈도 가뭄이 3개월 지속된 후 5월에 끝났을 경우, 추가확보량은 $(S_{5,3,3} + O_{5,3,3})_{best} - (S_{ijk} + O_{ijk})_{worst}$ 이 되는 것이다. 이때 'best'와 'worst'는 기도출된 운영 시나리오에 따른 저수지 모의의 결과로 얻어지는 것이다.

4. 연계이용 방법론 수립

가뭄과 같은 비상시에 지표수-지하수 연계이용을 통한 효율적인 물공급을 수행하기 위하여 앞서 언급되었던 절차들을 포함하여 다음과 같은 방법론을 제시한다. 그림 6은 개발된 방법론을 순서도로 나타낸 것이다.

- Step 1: 지표수-지하수 연계이용이 가능한 최적의 입지를 선정한다. 적지분석을 하기 위해서는 유역의 수문·기상 및 지질인자, 사회·경제·환경적 자료들을 수집, 검토·분석한다. 이때 계층분석과정과 같은 체계적인 분석틀이 활용될 수 있으며, 지리정보시스템(GIS)과 통합될 경우 속성자료와 공간정보의 효율적인 관리하에 분석이 이루어질 수도 있다.

- Step 2: 유역의 가뭄을 분석한다. 가뭄지수 산정인 방법들이 될 수 있으며, 이때 유역의 특성 및 가용자료를 충분히 활용할 수 있는 가뭄지수를 선택한다. 가뭄분석을 바탕으로 물공급 측면에서의 유역의 기본 가뭄빈도를 도출한다. 또한 더욱 심한 가뭄발생가능성(수자원 계획의 목표 수준인 30년 1회 발생 가뭄)도 필요에 따라 상정한다.

- Step 3: 대상 유역의 장래 인구 및 급수보급률 추정을 통하여 필요용수량을 산출한다.

- Step 4: Step 2와 3의 결과를 바탕으로 물공급 시나리오를 도출한다. 즉, 수원의 연계방식에 관한 대안을 수립한 후, 가뭄빈도에 따른 각 수원으로부터의 공급비율을 조정하는 탄력적 운영안을 개발한다.

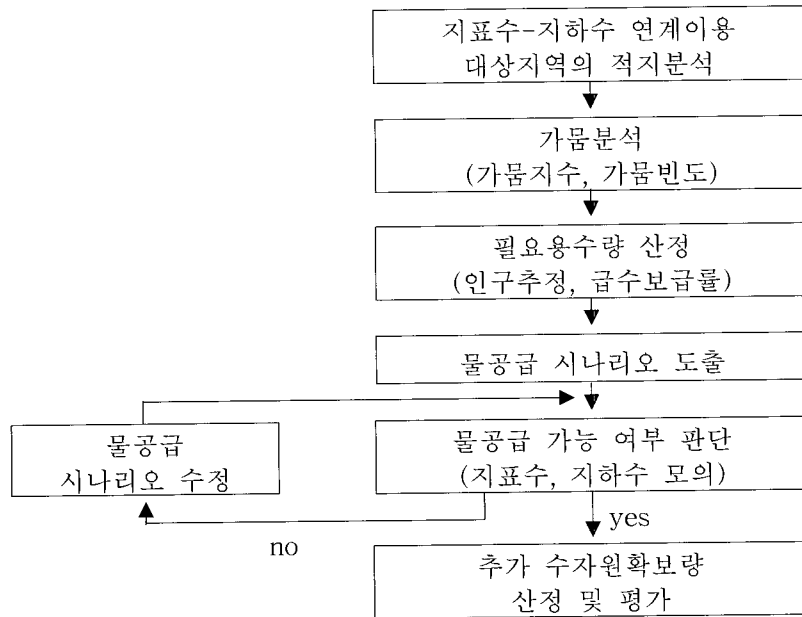


그림 6. 효율적인 지표수-지하수 연계이용을 위한 방법론

- Step 5: 도출된 물공급 시나리오를 유역의 지표수-지하수 연계시스템에 적용한다. 운영안에 대해 지표수 혹은 지하수가 어떻게 반응하는지를 예측하기 위해 적절한 모형을 활용한 모의가 수행된다.

- Step 6: 모의결과를 바탕으로 연계이용이 얼마의 물을 추가로 확보할 수 있게 하는지를 산정한다. 연계이용 전·후, 그리고 시나리오별 운영효과를 비교·분석함으로써 추가 수자원확보량을 산정하고 종합적인 연계이용 효과를 정량화한다.

5. 결 론

최근 들어 가뭄의 심각성이 부각되면서 이에 따른 물 부족 현상을 해결하기 위한 다각적인 노력이 경주되고 있다. 이 가운데 유역내 수자원을 효율적으로 관리하기 위한 목적에 기초한 지표수-지하수 연계이용은 대규모 개발로 인한 각종 부작용을 최소화 할 뿐만 아니라 경제적이라는 점에서 지속가능한 수자원 확보 방안으로 관심을 갖기에 충분하다.

본 연구에서는 가뭄과 같은 비상시 물 공급 효율을 높이기 위하여 지표수와 지하수를 연계이용하는 체계적인 방법론을 개발하였다. 여기에는 연계이용의 적합도를 판단하는 적지분석으로부터 연계방안 및 그 효과의 정량적 평가에 이르는 전과정이 포함되어 있다. 개발된 방법론은 현재 물부족을 겪고 있거나 예상되는 지역, 신규 수자원확보가 어려운 지역에 적용가능할 것으로 판단된다. 이러한 이유로 본 연구의 방법론은 물관리 방안 수립시 유용한 정책지원 도구가 될 수 있

음을 의미한다. 여기서 개발된 방법론은 개념적이며 절차적이다. 즉, 각 단계에서 요구되는 분석의 도구나 대안은 상황에 맞게 결정되어야 한다. 개발된 방법론의 적용성은 후속 논문에서 검토될 것이며, 다양한 유형에의 적용사례를 통해 보다 체계적이고 효율적인 지표수-지하수 연계이용 관련기술의 확보가 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 3-4-2)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 건설교통부 (2002). **지하수관리 기본계획**, pp. 52-54.
- 공민근, 윤성용 (2001). "새로운 취수방법으로서의 강변 여과수 개발." **한국수자원학회지**, Vol. 34, No. 2, pp. 78-84.
- 기상연구소 (1993). **우리나라 가뭄에 관한 연구: 강수량 변동에 관한 기후학적 특성 연구**, 기상연구소, MR 93A-005, pp. 7-22.
- 김선주, 이광야, 양용석 (1997). "저수지규모 및 지역별 용수공급지수(WSI) 조사분석." **한국관개배수지**, 한국관개배수, 제4권, 제2호, pp. 48-61.
- 김형수 (2003). "한국에서의 인공함양 적용 사례 및 개발 방안." **지속가능한 지하수 개발 및 함양기술**

- 개발 연구성과 및 지하수 인공함양 국제 심포지움 발표 논문집, 한국수자원공사, pp. 3-29.
- 동국대학교 (2002). **지표수-지하수 연계이용 기법 개발(1차년도 연구보고서)**, pp. 26-28.
- 부성안, 이기철 (2002). "지하수댐과 해안지역 염수침입 방지기술." **농어촌과 환경**, 통권 7호, pp. 104-116.
- 부성안, 이기철, 김진성, 정교철, 고양수 (2002). "지하수댐 물막이벽 시공법과 해안지역 염수침입 방지기술 개선 방안." **대한지질공학회**, 제3권, 제2호, pp. 215-234.
- 속초시 홈페이지 (2003). <http://sokcho.gangwon.kr/section/water/main.html>
- 윤용남, 안재현, 이동률 (1997). "Palmer의 방법을 이용한 가뭄의 분석." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제30권, 제4호, pp. 317-326.
- 이동률 (2002). "국가가뭄관리시스템의 구축방안." **2002 가뭄대책 심포지움-가뭄의 진단과 가뭄극복 종합대책**, 한국방재협회, pp. 121-156.
- 이상일 (2003). "지하수와 지표수의 연계개발 및 관리방안." **세계 물의 해 심포지움(21세기 지하수자원의 지속가능한 개발, 이용 및 관리) 발표논문집**, 한국지하수토양환경학회, pp. 79-90.
- 이상일, 김병찬 (2003). "계층분석 과정을 이용한 지하수댐 적지분석." **한국지하수토양환경학회지**, 한국지하수토양환경학회, Vol. 8, No. 4, pp. 36-44.
- 이상일, 서해경, 손상철 (2002). "지표수-지하수 연계이용을 위한 지역 적합도 평가." **한국지하수토양환경학회 추계학술발표회논문집**, pp. 171-174.
- 전인배, 송시훈, 지홍기, 이순탁 (2001). "우수이용 시스템의 설계기법." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제34권, 제6호, pp. 587-596.
- 한국수자원공사 (1999). **지하수 함양 및 활용증대방안 연구**, 수자원연구소 연구보고서, WRRRI-GG-99-1, pp. 171-173.
- ASCE (2000). *Dam Repair and Rehabilitation*. Policy Statement 470.
- Azaiez, M.N., and Hariga, M. (2001). "A Single-Period Model for Conjunctive Use of Ground and Surface Water under Severe Over-drafts and Water Deficit." *European Journal of Operational Research*, Vol. 133, pp. 653-666.
- Foster, S. (2002). "Subsurface Dams to Augment Groundwater Storage in Basement Terrain for Human Subsistence-Brazilian Experience." *GW-MATE, Case Profile Collection No 5*.
- Guttman, N.B. (1999). "Accepting the Standardized Precipitation Index: A Calculation Algorithm." *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 35, No. 2, pp. 311-322.
- Hanson, G., and Nilsson, A. (1986). "Ground-water Dams for Rural-Water Supplies in Developing Countries." *Ground Water*, Vol. 24, No. 4, pp. 497-506.
- Liu, P., Liu, Z., and Duan, Z. (1994). "A Case Study on Artificial Recharge of Groundwater into the Coastal Aquifer in Longkou, China." *Artificial Recharge of Ground Water II*, ASCE, pp. 464-470.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., and Kleist, J. (1995). "Drought Monitoring with Multiple Time Scales." *9th Conference on Applied Climatology*, American Meteorological Society, pp. 233-236.
- Molano, C., Bonilla, F., Mejia, J., and Rodriguez, C. (1994). "Artificial Recharge of the Santa Marta Aquifer, Colombia." *Artificial Recharge of Ground Water II*, ASCE, pp. 446-454.
- Muhammad, S.E. and Richard, C.P. (1995). "Maximizing Conjunctive Use of Surface and Ground Water under Surface Water Quality Constraints." *Advances in Water Resources*, Vol. 18, No. 2, pp. 67-75.
- Palmer, W.C. (1965). *Meteorological Drought*. Reserch Paper No. 45, U.S. Weather Bureau.
- Population Action International (2000). *Sustaining Water: Population and the Future Renewable Water Supplies*.
- Print, C.R. (1997). "Subsurface Dam for a Pastoral Environment." *23rd WECD Conference, South Africa*, pp. 401-403.
- Saaty, T.L. (1977). "A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures." *Journal of Mathematical Psychology*, 15, pp. 234-281.
- Saaty, T.L. (1999). "The Seven Pillars of the Analytic Hierarchy Process." *5th International Symposium on the Analytic Hierarchy Process, Kobe, Japan*.
- Shafer, B.A., and Dezman, L.E. (1982). "Development of Surface Water Supply Index (SWSI) to Assess the Severity of Drought Condition in Snowpack Runoff Areas." *Western Snow Conference*, pp. 164-175.
- Yeh, W.W-G., and Emch, P.G. (1998). "Management

Model for Conjunctive Use of Coastal Surface
Water and Ground Water." *Journal of Water
Resources Planning and Management*, ASCE,

Vol. 124, No. 3, pp. 129-139.

(논문번호:04-26/접수:2004.03.10/심사완료:2004.08.30)