

지표수-지하수 연계운영에 의한 갈수기 수자원관리  
Conjunctive Management Considering  
Stream-Aquifer Systems for Drought Season

차기욱\*, 김우구\*\*, 신용노\*\*\*

Kee Uk Cha, Woo-Gu Kim, Young Rho Shin

.....  
**Abstract**

The purpose of this research was to develop a methodology to determine whether conjunctive surface water and groundwater management could significantly reduce deficits in a river basin with a relatively limited alluvial aquifer. The Geum River basin is one of major river basins in South Korea. The upper region of the Geum River basin is typical of many river basins in Korea where the shape of river basin is narrow with small alluvial aquifer depths from 10m to 20m and where most of the groundwater pumped comes quickly from the streamflow. The basin has two surface reservoirs, Daecheong and Yongdam. The most recent reservoir, Yongdam, provides water to a trans-basin diversion, and therefore reduces the water resources available in the Geum River basin. After the completion of Yongdam reservoir, the reduced water supply in the Geum basin resulted in increasing conflicts between downstream water needs and required instream flows, particularly during the low flow season. Historically, the operation of groundwater pumping has had limited control and is administered separately from surface water diversions. Given the limited size of the alluvial aquifer, it is apparent that groundwater pumping is essentially taking its water from the stream. Therefore, the operation of the surface water withdrawals and groundwater pumping must be considered together.

The major component of the conjunction water management in this study is a goal-programming based optimization model that simultaneously considers surface water withdrawals, groundwater pumping and instream flow requirements. A 10-day time step is used in the model. The interactions between groundwater pumping and the stream are handled through the use of response and lag coefficients. The impacts of pumping on streamflow are considered for multiple time periods. The model is formulated as a linear goal-programming problem that is solved with the commercial LINGO optimization software package.

**Keyword:** conjunctive management, goal programming, streamflow depletion  
.....

---

\* 정희원 · 한국수자원공사 물관리센터 E-mail : [cku@kwater.or.kr](mailto:cku@kwater.or.kr)  
\*\* 정희원 · 한국수자원공사 부사장 · E-mail : [wgkim@kwater.or.kr](mailto:wgkim@kwater.or.kr)  
\*\*\* 정희원 · 한국수자원공사 물관리센터 · E-mail : [ynshin@kwater.or.kr](mailto:ynshin@kwater.or.kr)

## 1. 서론

하천환경에 대한 지역주민의 재인식 등 사회여건이 변화되어 양질의 용수를 사용하고자 하는 요구가 증대되고 있으며, 하천의 기득수리권을 보호하고 하천의 건천화 방지 및 환경유지용수를 유지하여 수질보호, 멸종위기 혹은 위협에 노출된 종의 생태계보호, 그리고 다양한 레크레이션 활동 등을 위한 요구 또한 증대되고 있다. 통합유역관리는 이러한 다양한 목적을 달성하도록 유역내 혹은 유역간 수자원을 효율적으로 관리하기 위한 것으로써 기존의 홍수조절, 용수공급, 그리고 발전목적의 전통적인 운영목적과 더불어 환경목적을 고려해야 하므로 시스템의 규모가 커지고 운영방법 또한 복잡해지고 있다. 추가의 수자원개발이 점점 제약을 받고 있는 현 상황에서 평수기 혹은 가뭄 시에 발생할 수도 있는 하천의 기득 수리권 및 건천화 방지 목적으로 혹은 환경용수 부족에 대한 대체용수 목적으로 지표수 및 지하수의 활용방안에 대한 연구가 절실히 필요한 실정이다.

금회 분석대상지역으로 선정된 금강 상류 유역은 용담댐 준공 후 용수이용 관련으로 충청권과 전북권의 마찰이 심화되고 있다. 용담댐은 유역면적이 930km<sup>2</sup>, 총 저수용량 815×10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>, 홍수조절용량 137×10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>, 용수공급능력 650×10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>이며 댐마루 표고는 EL.268.0m이다. 용담댐은 전주권 및 서해안 개발사업지역에 1일 15.6m<sup>3</sup>/sec의 용수를 공급하며, 댐 하류인 금강 본류로는 1일 5m<sup>3</sup>/sec의 하천유지용수를 공급하고, 아울러 전주권의 용수공급과 댐 하류 하천유지용수를 이용하여 연간 198.5GWh의 에너지를 생산하고 있다. 그러나 장래 전북권의 용수사용량이 증가하고 가뭄이나 갈수가 발생할 경우 금강 상류 유역의 하천은 전북권으로의 용수공급과 용담댐 하류의 생활 및 농업용수, 하천유지용수를 만족하지 못하는 경우가 발생할 수 있는데, 이 경우 펌핑을 통해 지하수를 사용할 수 있다면 유역의 물 부족을 줄일 수 있을 것으로 기대된다. 따라서 금번 연구에서는 지표수와 지하수를 연계운영하여 유역의 수자원을 보다 더 효율적으로 운영할 수 있는 방안을 제시하고자 하며 적용방법은 최근까지 지속적으로 사용되는 최적화 프로그램을 이용하여 적정 운영방안을 수립하고자 하였다.

## 2. 지하수 취수에 따른 지표수 영향

지하수의 수리학적, 수문학적 상황을 모델링하기 위하여 지표수와 지하수의 반응계의 특성을 나타내는 무차원 상수가 많이 이용된다. 무차원상수를 이용하는 이유는 서로 다른 매개변수들이 물리적으로 영향을 주고 있는지 평가할 수 있기 때문이다 (Barlow and others, 2003). 따라서 지표수-지하수의 수리학적 분석에서 무차원상수는 지하수 취수에 따른 지표수의 영향을 관련시키기 위하여 사용되어 진다.

지표수-지하수 문제에서 대표적으로 사용되어온 무차원 매개변수는 Glover와 Jenkins에 의하여 제시된 하천수 저감계수이다.

$$sdf = \frac{d^2 s}{T} \quad (1)$$

여기서, sdf는 하천수 저감계수로서 시간의 단위를 지니며, d는 하천으로부터 펌핑정(井)까지의 수직거리이며, S는 저류계수, T는 투수량계수이다. 하천수 저감계수는 지하수의 반응시간으로 알려져 왔으며 이 계수는 지하수의 펌핑에 의하여 발생된 지표수의 저감을 계산하기 위한 모델에 널리 사용되어 왔다.

Glover는 하천수 저감( $Q_s$ )과 지하수 펌핑( $Q_w$ )과의 관계를 이미 언급된 인자들의 관계를 이용하여 제시하였다. Glover 식은 error function이나 complementary error function(erfc)에 의하여 나타낼 수 있으며 이 식을 적분하면 하천수의 저감에 대한 전체 체적( $v$ )과 펌핑에 의하여 발생된 체적( $Q_w t$ )사이의 관계를 도출 시킬 수 있다. 여기에서 도출되는 응답곡선(response curve)은 펌핑 시간과 하천수 저감 체적사이의 관계에 의하여 정의될 수 있다.

$$\frac{Q_s}{Q_w} = \text{erfc}\left(\sqrt{\frac{d^2 S}{4 \cdot T \cdot t}}\right) \quad (2)$$

Glover 식을 적분하면 누가 지표수 저감체적이 되며 이것은 전체 누계 펌핑체적으로 표시될 수 있다.

$$\frac{v}{Q_w \cdot t} = \left(\frac{d^2}{2tT/S} + 1\right) \text{erfc}\left(\frac{d}{\sqrt{4tT/S}}\right) - \left(\frac{d}{\sqrt{4tT/S}}\right) \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}}\right) \exp\left(\frac{-d^2}{4tT/S}\right) \quad (3)$$

여기서 변수들은 시간에 따라 변하는 하천수의 저감을 보여주고 있으며 또한 펌핑에 영향을 미치는 범위, 하천으로부터 펌핑 장소까지의 거리, 그리고 지하수의 수리학적 특성에 따라 달라진다.

하천수 저감은 펌핑을 정지하기 까지 계속되며 이것은 최적의 지표수-지하수 연계운영과 시간에 따라 변하게 하는 펌핑 계획에 중요한 사항이다. Jenkins는 하천에서 펌핑에 의한 영향이 펌핑의 정도에 따라 달라지며 이 영향은 펌핑을 멈춘 후에도 지속적으로 발생하여 이것이 바로 시간에 따라 변하는 하천수저감과 펌핑과의 관계라고 제시하였다. 특히 지표수-지하수연계에서 시간에 따라 변하는 펌핑은 갈수 등의 극치유량을 가지는 조건에서 하천수의 저감을 최소화 할 수 있을 것으로 분석하였다.

### 3. 지표수-지하수 최적화 모형

지표수-지하수 최적화 모형은 지표수와 지하수를 연계하여 운영하므로써 수계내에서 최대 취수 할 수 있는 취수량과 물부족량을 산정하기 위한 것이다. 이 분석에서는 하천으로부터 지하수 취수지점까지 거리와 시간적으로 취수를 변화시키면서 대상유역의 용수공급 및 물부족을 평가하였다.

이 모형에서 목적함수는 하천유지용수와 용수수요의 부족을 최소화하는 조건으로 하였으며 Goal 프로그래밍 기법을 이용하여 목적된 양보다 부족하거나 초과될 경우 편차의 항을 최소화 할 수 있도록 (식 4)와 같이 구성하였다. 하천유지용수는 물 부족이 발생하는 조건의 편차만을 고려하였는데 이것은 하천에서 유량이 취수량을 초과할 때 그대로 하천유지용수를 필요로 하는 지점을 통과하여 하류로 흘러가기 때문이다. 하류의 생활 및 농업용수수요는 목표 용수수요를 초과하거나 부족한 조건을 고려하였다. 또한 이 문제에서 의사결정자의 우선적인 판단을 고려하여 각 항목에 가중치를 두어 평가할 수 있도록 구성하였다.

하천의 흐름 해석은 (식 5)와 같으며 여기에 지표수와 지하수의 취수, 취수후의 회귀수등이 고려되었다. 하천유지용수와 하류의 용수수요에 대한 제약조건은 (식 6) 및 (식 7)과 같다.

$$\min \sum_{t=1}^n \left\{ C_r (Q_{sm_{j,t}}) + \sum_{i=1}^{nw} C_i (Q_{def_{i,t}} + Q_{sur_{i,t}}) + \sum_{l=1}^{nw} C_l Q_{gw_{l,t}} + \sum_{m=1}^{nw} C_m Q_{sw_{m,t}} \right\} \quad (4)$$

$$Q_{s_{j,t}} = I_t - \sum_{i=1}^{nw} Q_{gw_{i,t}} - \sum_{i=1}^{nw} Q_{sw_{i,t}} + Q_{ret-m_{j,t}} + Q_{ret-ag_{j,t}}, \quad (5)$$

$$j = 1, 2, \dots, ns, \quad i = 1, 2, \dots, nw, \quad t = 1, 2, \dots, np$$

$$Q_{s_{j,t}} - (Q_{s_{j,t}})_{\min} + Q_{sm_{j,t}} = 0; \quad j = 1, 2, \dots, ns, \quad t = 1, 2, \dots, np \quad (6)$$

$$Q_{sm_{j,t}} \geq 0, \quad Q_{s,sur_{j,t}} \geq 0$$

$$Q_{d_{i,t}} - Q_{gw_{i,t}} - Q_{sw_{i,t}} + Q_{def_{i,t}} - Q_{sur_{i,t}} = 0; \quad j = 1, 2, \dots, ns, \quad t = 1, 2, \dots, np \quad (7)$$

$$Q_{def_{i,t}} \geq 0, \quad Q_{sur_{i,t}} \geq 0$$

여기서,  $S$ : 저류계수,  $T$ : 투수량계수,  $Q_s$ : 하천수 저감량,  $Q_w$ : 지하수 펌핑량,  $nw$ : 지하수 펌핑관정총수,  $np$ : 전체 분석기간,  $ns$ : 하천 주요지점의 제약조건수,  $C_r$ : 하천유지용수 부족량 가중치,  $C_i$ : 용수수요 부족량 가중치,  $C_l$ : 지하수공급량 비용 가중치,  $C_m$ : 지표수공급량 비용 가중치,  $I_t$ :  $t$ 시간동안의 유입량,  $Q_{s_{j,t}}$ :  $t$ 시간동안  $j$ 지점 유출량,  $(Q_{s_{j,t}})_{\min}$ :  $t$ 시간 동안  $j$ 지점의 하천유지 용수 요구량,  $Q_{d_{i,t}}$ :  $t$ 시간 동안의  $i$ 지점의 비율 요구량,  $Q_{ret-m_{j,t}}$ :  $t$ 시간의  $j$ 지점의 생활용수 회귀량,  $Q_{ret-ag_{j,t}}$ :  $t$ 시간  $j$ 지점의 농업용수 회귀량,  $(Q_{gw_{i,t}})_{\min}$ ,  $(Q_{gw_{i,t}})_{\max}$ :  $t$ 시간 동안 우물  $i$  지점의 지하수 최대, 최소 펌핑 비율량,  $Q_{gw_{i,t}}$ :  $t$ 시간 동안 우물  $i$ 지점 지하수 취수량,  $Q_{sw_{i,t}}$ :  $t$ 시간 동안  $j$ 지점의 지표수 취수량,  $Q_{sm_{j,t}}$ :  $t$ 시간 동안  $j$ 지점의 하천유지용수 부족량,  $Q_{s,sur_{j,t}}$ :  $t$ 시간 동안  $j$ 지점의 잉여하천수량,  $Q_{def_{i,t}}$ :  $t$ 시간 동안  $i$ 지점의 용수공급 부족량,  $Q_{sur_{i,t}}$ :  $t$ 시간 동안  $i$ 지점의 용수공급 초과량이다.

#### 4. 모형의 적용

금강상류 유역은 2001년 용담댐이 준공되어 전북권 지역에 장래 2021년까지의 생활 및 공업 용수 수요 1일 135만 $m^3$ (15.6 $m^3/s$ )을 공급하고 용담댐 하류로는 용담댐 지점의 평균갈수량인 2.25  $m^3/s$ 의 2배 이상인 5 $m^3/s$ 를 방류하는 것으로 계획되었다. 본 연구에서는 용담댐의 영향을 배제하고 과거 댐 건설전 하천의 조건을 이용하여 지표수만으로 용수를 공급할 경우와 지표수-지하수를 연계하였을 경우 용수공급의 변화를 검토하였다. 이 배경은 과연 연계운영으로 인한 효과가 있는 여부를 검토하여 향후 지표수-지하수 연계운영의 필요성과 용담댐을 포함한 연계운영을 수행할 필요성이 있는지를 검토하기 위함이다.

금회 분석의 시간단위는 10일을 기준으로 하였으며 지하수 취수를 위한 정(井)은 완전히 지하수대의 하부까지 도달하여 펌핑하는 것으로 하였으며, 정(井)의 취수위치는 하천으로부터 50m, 100m, 200m, 500m의 거리에 위치하는 것으로 하였다. 지표수와 지하수 취수로 이용된 용수는 하천이나 지하로 침투하며 회귀하게 되는데 이때 회귀계수는 농업용수 회귀조건을 고려하여 0.3으로 설정하였으며 이 계수는 기간에 따라 지체시간을 가지고 하천으로 회귀되는 조건을 고려하여 취수 후 첫 번째 순에 0.7, 두 번째 순에 0.2, 세 번째 순에 0.1로 설정하였다.

최적화 모형에서 지표수만을 이용하여 용수공급하는 조건과 지표수와 지하수를 연계하여 용수공급하는 조건을 비교한 결과 가장거리가 먼 지하수 펌핑을 고려한 연계운영이 하천수의 이용을 최대 64백만 $m^3$ 까지 저감시킬 수 있는 것으로 분석되었다. 물 부족은 하천으로부터 가까운 지하

수 펌핑은 증가하는 반면 먼 거리에 있는 지하수 펌핑은 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한 생활 및 농업용수수요의 가중치가 하천유지용수의 가중치보다 크면 물 부족량은 하천으로부터 거리가 가장 멀리 떨어진 지하수 펌핑 조건에서 24년의 분석기간 동안 46백만<sup>3</sup>만큼 줄어들 수 있는 것으로 분석되었다.

또한 지하수 취수의 비용이나 가중치가 지표수의 값보다 작다고 가정할 경우 지하수 취수량은 대상유역에 함유된 지하수 이용 가능 최대량까지 사용하는 것으로 분석되어 정상적으로 최적화 방법이 적용된 것을 판단할 수 있었다. 아래 (표 1)은 용수수요와 하천유지용수의 가중치 변화에 따른 결과값을 제시한 것이다.

이 표에서 알 수 있듯이 용수수요의 가중치가 하천유지용수의 가중치보다 크다면 수계내 물 부족은 줄어들게 되고 반대의 조건에서는 전체적인 물 부족은 다소 증가하는 경향이 있는 것으로 분석되었다. 따라서 지표수와 지하수를 체계적으로 조합하여 운영하면 갈수나 가뭄에서 물 부족을 경감시킬 수 있어 향후 지속적인 연구 및 확장이 필요할 것으로 판단된다.

표 1 지표수 및 지하수 연계운영에 의한 물 부족 변화

(단위 : 백만<sup>3</sup>)

하천부터 거리 (m)	가중치				물부족			용수 공급량	하천유지 용수 공급량
	용수수요	유지용수	지표수	지하수	용수공급	유지용수	계		
50	100	1	1	2	-4.7	-556.3	-561.0	754.6	5,344.8
				1	-4.7	-543.6	-548.3	754.6	5,352.9
	1	100	1	2	-159.6	-467.9	-627.5	599.8	5,428.6
				1	-168.8	-467.9	-636.7	590.6	5,428.6
100	100	1	1	2	-3.0	-568.3	-571.3	756.3	5,328.2
				1	-3.0	-522.5	-525.5	756.3	5,373.9
	1	100	1	2	-158.3	-467.9	-626.2	601.1	5,428.5
				1	-158.3	-467.9	-626.2	601.1	5,428.5
200	100	1	1	2	-0.3	-568.3	-568.6	758.1	5,378.2
				1	-0.3	-518.3	-518.6	759.1	5,378.2
	1	100	1	2	-130.3	-466.0	-596.3	629.0	5,430.4
				1	-131.0	-466.0	-597.0	628.3	5,430.4
500	100	1	1	2	0.0	-569.0	-569.0	759.4	5,327.4
				1	0.0	-513.4	-513.4	759.4	5,383.0
	1	100	1	2	-97.2	-462.3	-559.5	662.2	5,434.1
				1	-97.2	-462.3	-559.5	662.2	5,434.1
지표수	100	1	1		-9.1	-568.3	-577.4	750.3	5,328.2
	1	100	1		-145.5	-469.9	-615.4	613.9	5,426.5

## 5. 결론

금강상류 유역의 지표수와 지하수 연계운영을 위하여 최적화모형인 LINGO모형을 적용하였다. 또한 금강상류 유역에서 수집된 강수량, 증발량, 하천유량 등의 자료를 이용하여 금강유역 상

류지역의 지하수 이용가능량을 산정하였으며, 산정된 총지하수 함유량의 범위 내에서 지표수-지하수 연계운영하여 지하수 이용량을 평가하였다. 분석기간은 대청댐의 기존 확보된 자료를 토대로 하였기 때문에 1983년부터 2006년까지 24개년에 대한 순별 유량을 기준으로 물 부족량을 산정하였다. 분석결과 지표수만을 이용하는 용수공급에 비하여 지표수 및 지하수를 연계운영 하여 용수 공급 하는 것이 물 부족을 줄일 수 있는 것으로 평가되었다. 또한 지하수 펌핑이 하천으로부터의 거리에 따라 용수공급량과 지표수의 저감량, 물 부족량이 변화하는 것을 알 수 있었다. 이것은 하천에 인접한 지하수 펌핑은 하천으로부터 거리가 먼 지하수 펌핑에 비하여 하천수에 미치는 영향이 큰 것을 알 수 있었으므로 시기적으로 지하수 펌핑량을 변화해 가는 용수공급을 수행하면 한정된 수자원을 보다 더 효율적으로 이용할 수 있을 것으로 분석되었다. 따라서 지표수와 지하수를 연계운영하면 갈수나 가뭄시 용수수요보다 초과되는 하천수를 사전에 지하수 펌핑을 시행함으로써 취수에 따른 하천수의 영향을 최소화 할 수 있는 것으로 분석되었다.

### 감사의 글

지구온난화의 영향으로 갈수나 극한가뭄이 더욱 빈발하게 발생될 것이 예상될 때 수자원분야에 IT를 토대로 하여 하천수와 지하수를 연계하여 이용하면 극한 가뭄시 예상되는 물 부족을 경감시킬 수 있을 것이다. 따라서 이 연구에서 도출된 바와 같이 지표수-지하수이용을 적절히 조합하면 우리나라의 물관리는 또다른 좋은 결과를 얻을 수 있을 것이다. 이 논문에 같이 참여한 수자원공사관계자 분들에게 감사드리고 앞으로도 좋은 연구가 지속될 수 있도록 관련분야 선후배의 도움을 진정으로 바라는 바이다.

### 참고문헌

1. Barlow, P.M., Ahlfeld, D.P., and Dickerman, D.C., "*Conjunctive-management models for sustained yield of stream-aquifer systems*", *Journal of Water resources Management and Planning*, Vol. 129, No. 1, pp 35-48, 2003
2. DeMeo, G.A., Lacznia, R.J., Boyd, R.A., Smith, J.L., and Nylund, W.E., "*Estimated groundwater discharge by evapotranspiration from Death valley, California, 1997-2001*", U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 4254, 2003, 27 p.
3. Fredericks, J., Labadie, J. and Altenhofen, J. (1998) Decision Support System for Conjunctive Stream-Aquifer Management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 124.
4. Glover, R.E. (1977) *Transient Groundwater Hydraulics*. Water Resources Publications, Ft. Collins, Colo.
5. Jenkins, C. T. (1968) Computation of Rate and Volume of Stream Depletion by Wells. U.S. *Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations*, D1-4, U.S. Printing Office, Washington D.C.
6. Willis, R. and Yeh. W. (1987) *Groundwater systems planning and management*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.