

# 지표수와 지하수의 최적 연계운영

○이재응<sup>1)</sup> · 위희상<sup>2)</sup> · 유동훈<sup>3)</sup> · 박창근<sup>4)</sup>

## 1. 서론

한정된 용수 공급량에 비하여 소비량은 지속적으로 증가하여 20세기 후반에 와서 전세계적으로 물 부족 문제가 중요한 사회, 경제적 문제로 등장하고 있다. 특히, 우리나라의 현실은 더욱 심각한데, 1960년대 이후 산업화 과정을 거치면서 급격한 도시화, 인구집중 등으로 발생한 물 부족 문제를 해결하기 위하여, 다목적댐의 건설, 하천개수, 광역상수도의 건설 등 막대한 노력을 기울여 왔다. 그러나 계속적으로 증가하는 물 수요량을 만족시키기가 어려워 2006년 4억 m<sup>3</sup>, 2011년 20억 m<sup>3</sup>, 2021년 29억 m<sup>3</sup> 정도의 물 부족이 예상되고 있다. 물 부족에 대처할 수 있는 대표적인 방법은 신규 수자원 개발이지만, 최근 내린천댐 건설의 무산, 영월댐 건설의 난항 등에서 볼 수 있듯이 지역 주민들과 환경단체들의 반발로 어려움을 겪고 있다. 물 부족에 대처할 수 있는 또 다른 대안인 해수의 담수화, 인공강우, 우수의 활용 등과 같은 기술들도 아직까지는 경제적 타당성이 입증되지 않아 널리 사용되지 않고 있으며, 중수도 활용, 수돗물 요금 인상과 같은 수요관리 정책도 실효를 거두지 못하고 있다.

이러한 상황에서 현재 물 공급의 대부분을 차지하고 있는 지표수와 지하수에서 극부적으로 이용하고 있는 지하수를 연계운영할 수 있다면 지표수에의 의존도를 크게 줄일 수 있을 것이다. 일반적으로 지하수의 이용은 증발 및 손실의 염려가 거의 없고, 연중 강우의 직접적인 영향을 받는 지표수에 비하여 지하수는 강우의 영향을 덜 받으므로, 지표수와 지하수의 연계를 통하여 상호 보완이 가능하고, 수자원 이용효율도 증가할 것으로 기대된다.

1960년대 이후 지하수와 지표수의 연계운영에 관해서는 많은 연구가 있었는데, 대표적인 연구 몇 가지만 들어보면 다음과 같다. Buras(1963)는 농업용수 공급을 위한 댐과 인공함양 시설의 최적 규모를 결정하기 위하여 동적계획법을 적용하였다. Young 등(1972)은 하천흐름, 도수, 양수에 따라 변화하는 하천-대수층 시스템을 나타내는 수문모형과, 용수공급과 비용에 따라 변화하는 농업용수 사용자들의 반응을 나타내는 경제적 모형을 개발하였다. Coskunoglu 등(1981)은 농업용수 공급과 수력발전 측면에서 지표수와 지하수의 연계운영에 대하여 연구하였다. Coe(1990)는 법적, 제도적, 재정적 관점에서 캘리포니아주의 지표수와 지하수의 연계운영에 대하여 논하였다.

본 연구에서는 지하수와 지표수의 최적연계운영을 통하여 생활, 농업, 공업용수 공급의 신뢰도를 향상시킬 수 있는지를 검토하였다. 이를 위하여 시범유역으로 강원도 양양 남대천 유역을 선정

---

1) 아주대학교 공과대학 환경도시공학부 조교수  
2) 아주대학교 공과대학 토목공학과 석사과정  
3) 아주대학교 공과대학 환경도시공학부 교수  
4) 관동대학교 건설환경시스템공학부 토목공학과 조교수

하였으며, 분할미분동적계획법(DDDP: Discrete Differential Dynamic Programming)을 사용하여 최적 연계운영 모형을 개발하였다.

## 2. 지표수-지하수 최적 연계운영 모형 개발

지표수와 지하수의 최적 연계운영이란 지표수와 지하수의 연계운영 공급에 따른 순편익이 각각을 별도로 운영하였을 경우 공급에 따른 순편익보다 증가하도록 최적 계획에 따른 통합운영으로 정의할 수 있으며 지하수, 지표수 연계운영의 목적은 공급량의 증대, 공급 신뢰도의 증대, 자원의 효율적 이용 등으로 생각할 수 있다. 지표수와 지하수의 최적연계를 위해서는 지표수와 지하수의 안정적인 저류수단이 필요하고, 이를 위해서 지표수는 유역내 저수지로부터 공급하고, 지하수는 유역내 여러 지점에서 양수된 지하수를 한 지점에서 합류시켜 공급한다고 가정하여 최적연계 운영 모형을 구성하였다.

모형의 목적함수로는 첫째, 지표수와 지하수의 공급에 따른 순편익을 최대화하고, 둘째, 지표수와 지하수의 연계운영으로 목표지역의 용수수요(생활용수+공업용수+농업용수)를 모두 만족시키도록 다음과 같이 구성하였다.

$$\begin{aligned} \text{maximize } F = & \sum_{i=1}^{12} W_1 * [(B_{\text{지표수},i} U_{\text{지표수},i} + B_{\text{지하수},i} U_{\text{지하수},i}) \\ & - \{ C_{\text{지표수},i} U_{\text{지표수},i} + C_{\text{지하수},i} \cdot \left( \frac{h-z \cdot X_{\text{지하수},i}}{h} \right) U_{\text{지하수},i} \}] \\ & - W_2 * \{ (U_{\text{지표수},i} + U_{\text{지하수},i}) - D_i \}^2 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $F$ 는 목적함수,  $W_1, W_2$ 는 가중치,  $B_{\text{지표수},i}, B_{\text{지하수},i}$ 는 각각 월  $i$ 에 지표수와 지하수를 공급함에 따른 편익(1,000,000₩),  $C_{\text{지표수},i}, C_{\text{지하수},i}$ 는 각각 월  $i$ 에 지표수와 지하수를 공급함에 따른 비용(1,000,000₩),  $U_{\text{지표수},i}, U_{\text{지하수},i}$ 는 각각 월  $i$ 에 지표수와 지하수 공급량(MCM),  $X_{\text{지하수},i}$ 는 월  $i$  초 이용가능한 지하수량(MCM),  $h$ 는 경제적으로 양수 가능한 높이 ( $m$ ),  $z$ 는 대수층에 관한 상수 ( $m^{-2}$ ),  $D_i$ 는 용수수요량의 합계(MCM)이다.

모형에서 고려해야할 제약조건들은 다음과 같다. 첫째, 지표수와 지하수의 연계운영 시스템의 상태를 나타내는 방정식은 각각 식(2)와 식(3)과 같다.

$$X_{\text{지하수},i+1} = X_{\text{지하수},i} + I_{\text{지하수},i} - U_{\text{지하수},i} - \alpha X_{\text{지하수},i} = (1-\alpha) X_{\text{지하수},i} + I_{\text{지하수},i} - U_{\text{지하수},i} \quad (2)$$

$$X_{\text{지표수},i+1} = X_{\text{지표수},i} + I_{\text{지표수},i} - U_{\text{지표수},i} - \beta U_{\text{지하수},i} \quad (3)$$

여기서,  $I_{\text{지하수},i}$ 는 월  $i$ 의 지하수 유입량(MCM),  $I_{\text{지표수},i}$ 는 월  $i$ 의 지표수 유입량(MCM),  $X_{\text{지표수},i}$ 는 월  $i$  초 이용 가능한 지표수량(MCM),  $\alpha$ 는 기저유출을 고려한 상수,  $\beta$ 는 손실개념 상수이다.

둘째, 지하수와 지표수로부터의 공급량은 공급받는 지역의 용수수요량의 합계보다 커야 한다.

$$U_{\text{지하수},i} + U_{\text{지표수},i} \geq D_{\text{생활용수},i} + D_{\text{공업용수},i} + D_{\text{농업용수},i} \quad (4)$$

여기서,  $D_{\text{생활용수},i}$ ,  $D_{\text{공업용수},i}$ ,  $D_{\text{농업용수},i}$ 는 각각 용수공급을 받는 지역에서 월  $i$ 의 생활용수, 공업용수, 농업용수 수요이다.

셋째, 저수지내 저류량은 최소값보다는 크고, 최대값보다는 작아야 한다.

$$X_{\text{지표수,min}} \leq X_{\text{지표수,i}} \leq X_{\text{지표수,max}} \quad (5)$$

여기서  $X_{\text{지표수,min}}$  과  $X_{\text{지표수,max}}$  은 각각 지표수 공급을 위한 저수지의 최소저류량과 최대저류량이다.

넷째, 지하수내 저류량은 최소값보다 크고, 최대값보다 작아야 한다.

$$X_{\text{지하수,min}} \leq X_{\text{지하수,i}} \leq X_{\text{지하수,max}} \quad (6)$$

여기서  $X_{\text{지하수,min}}$  과  $X_{\text{지하수,max}}$  은 각각 지하수의 최소이용가능량과 최대이용가능량이다. 지하수내 최대 저류량과 최소 저류량을 구하기 위하여 식 (7)를 사용하였다.

$$X_{\text{지하수,(min or max)}} = h \times \bar{A} \times \eta \times S_e \quad (7)$$

여기서  $h$ 는 대수층의 깊이,  $\bar{A}$ 는 지하수 유역면적,  $\eta$ 는 공극률,  $S_e$ 는 유효포화도이다.

다섯째, 저수지 방류량은 저수지의 최소 방류량보다 커야 하고 최대 방류량보다 작아야 한다.

$$U_{\text{지표수,min}} \leq U_{\text{지표수,i}} \leq U_{\text{지표수,max}} \quad (8)$$

여섯째, 지하수 양수량은 최소 양수량보다 커야 하고 최대 양수량보다 작아야 한다.

$$U_{\text{지하수,min}} \leq U_{\text{지하수,i}} \leq U_{\text{지하수,max}} \quad (9)$$

### 3. 모형의 적용

#### 3.1 시범유역의 선정

본 연구에서 시범유역으로 선정한 양양 남대천 유역은 유역면적이 468km<sup>2</sup>이고, 남대천의 유로연장은 45km로, 명주군 연곡면 오대산에서 발원하여 북쪽으로 흘러 북평리에서 후천과 합류하여 양양읍을 거쳐 동해로 흘러 들어간다. 양양 남대천의 유역면적은 우리나라 준용하천의 특성에 비하면 상대적으로 작고 유로 및 유역연장도 짧은 편이다. 또한 태백산맥으로부터 발원한 상류지역은 경사가 급하여 유출계수가 높은 편이어서 유량의 장기보존이 어려운 것으로 판단되는 하천이다.

본 연구에서는 목표연도를 2011년으로, 용수공급지역을 남대천 인근의 양양군, 속초시, 고성군으로 정하였다. 속초시는 이용 가능한 수원이 설악동의 쌍천밖에 없으나 쌍천 유역도 지하담을 막아 최대한 개발하고 있어 추가 개발 가능한 수원이 부족한 실정이고, 고성군은 북천과 남천이 있으나 소규모 개발만이 가능하다. 반면에 양양군은 남대천, 후천 등 비교적 유량이 풍부한 하천을 보유하고 있어 지표수와 지하수의 개발이 용이하므로 속초시와 양양군에 공급하고 남은 여유량을 고성군에 공급할 수 있을 것으로 보인다. 비용 면에서도 양양군 현북면 어성전리에서 고성군으로 추가 공급하는 비용이 남천댐 건설에 따른 건설비, 보상비에 비해서 4.5배 유리한 것으로 나타나 있다(건설교통부, 1996).

#### 3.2 필요자료 구축

양양 남대천 유역의 유량을 분석하기 위하여 1987~1997년까지 11년 동안의 월평균 수위자료를 건설교통부에서 발간하는 '한국수문조사연보'에서 얻었고, 이를 수위-유량곡선식을 사용하여 유량자료로 환산하였다. 안정적인 지표수 공급을 위해, 선형결정규칙(LDR: Linear Decision Rule)을

사용하여 51.6 MCM 용량의 저수지를 남대천에 가정하였다. 계획년차인 2011년의 양양군, 속초시, 고성군의 용수수요량은 “수자원개발 가능지점 및 광역배분계획 기본조사 보고서(한국수자원공사, 1996)”를 참조하였다.

지하수 공급비용은 98년 4월 1일부터 99년 3월 31일까지 속초시 도문동에 위치한 쌍천 취수장의 운영비를 참고하여 결정하였다. 쌍천 취수장에서는 현재 1년 동안 총 8,840,966ton의 지하수를 취수하고 있다. 톤당 생산원가는 21.94원/ton이며 100,000톤을 양수하여 공급하는데 드는 비용은 219만원이고, 생산비는 대부분 전기비가 주를 이루고 있으며, 취수장의 완전자동화로 인하여 유지보수비는 전체 생산가격에서 적은 비율을 보이고 있음을 알 수 있다(표 1). 지하수 공급비용을 산정함에 있어 표 1을 기준으로 하였으며 지하수 공급량이 증가해도 인건비와 유지보수비는 큰 변화가 없다고 생각하여 증감없이 고정시켰으며, 전기비만 지하수 공급량 증가에 따라 비례적으로 증가한다고 가정하였다.

표 1 지하수 공급에 따른 비용

구분 비용	인건비(3명)	유지보수비	전기비	합계
98.4.1~99.3.31	49,404,000원	1,413,000원	143,153,000원	193,970,000원
한달 평균	4,117,000원	117,750원	11,929,416원	16,164,166원
2011년/월	4,117,000원	117,750원	11,929,416원	123,528,910원

지표수 공급에 따른 비용은 환경부에서 발행한 96' 상수도 통계(1997) 자료를 참조하였다. 비용 항목은 크게 동력비, 인건비, 약품비, 원·정수 구입비, 수선 유지비, 수수료 등으로 구분할 수 있다. 수원에서 취수한 물은 그대로 사용할 수 없으므로 수질을 깨끗이 하기 위한 정수를 통하여 수요자에게 급수하게 된다. 상수도에서 정수 방법은 원수의 수질(수질오탁에 관한 환경기준 적용)이나 정수의 수질(음용수 수질기준 적용), 주변환경, 계절, 기후에 따라 달라진다. 우리나라의 경우 정수장의 물 중 대부분을 약품에 의하여 응집시키고 분리하는 방식의 급속여과식(93.1%)으로 정수하고 있다. 건설교통부에서 발행한 “전국 중·소규모 광역상수도 조사계획수립 타당성조사 및 기본계획보고서(1996.8)”에 따르면 댐건설 예정지로 선정된 강원도 양양군 현북면 어성천리 지점의 수질을 조사한 결과 남대천 취수지점의 수질은 상수원수 I 급수에 가까운 II 급수로서 대장균을 제외하고는 모든 수질항목이 I 급수로 나타나 대단히 양호한 편이다. 본 연구에서는 깨끗한 수원을 확보하고 있는 남대천에서 취수한 물을 정수하지 않고 공급한다고 생각하여 전체 유지관리비의 8.9%를 차지하는 약품비와 원·정수 구입비를 비용 산정에서 제외시켰다. 인건비와 수선유지비는 동일한 양을 공급할 시 지하수 공급비용과 동일하다고 가정하였고, 수수료는 강원도 전체의 수선유지비와 수수료의 비율을 적용하여 월 십만톤 공급시 349,824원으로 산정하였다.

지표수와 지하수가 모든 취수과정을 거친 후 동일한 양을 공급할 시 지하수의 최대공급량까지 편익은 동일하도록 자료를 구성하였고, 용수공급에 따른 편익은 지하수와 지표수 모두 백만톤 공급시 2천4백70만원, 톤당 24.7원의 편익이 발생할 것으로 추정하였다.

지하수 양수량이 과다할 경우 지하수위 감소 영향으로 인하여 저수지의 저류량도 줄어들 것으로 예상되므로 이의 영향을 고려하여야 한다. 관측자료의 부족과 지하수 관정 등에서의 실측자료 부족으로 통상적인 유효포화율 30%로 가정하였고, 양양 남대천 지역의 특성상 토양층류는 혼합사질토(Sandy clay loam)로 생각하여 투수계수 K는 0.15cm/hr로 정하였다. 초기함수비  $\theta_i$  대신

초기유효포화  $S_e$ 가 주어지는 경우 토양수분부족  $\Delta\theta = \theta_s - \theta_i$ 와 흡입수두  $h_s$ 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\Delta\theta = (1 - S_e)\theta_e = 0.231 \quad (10)$$

$$h_s \cdot \Delta\theta = 5.05 \text{ cm} \quad (11)$$

여기에 손실계수  $\beta$ 는  $\frac{h_s \cdot \Delta\theta}{y}$ 로 정할 수 있다. 단,  $\bar{y}$ 는 양양 남대천의 평균수심이다. 양양 남대천의 평균수심은 1987년부터 1997년까지 11년간 양양 수위관측소의 수위자료를 평균하여 1.07m로 구하였다. 따라서 지하수 양수량의 지표수에 대한 손실계수  $\beta$ 는 0.047로 가정하였다.

지하수 유입량은 강우와 여기서 유래된 지표수 일부가 땅속으로 침투해서 생긴 물로서 월 지하수 유입량은 강우가 남대천 지하수 유역면적에 균등하게 내린다고 생각하면 식(12)과 같다.

$$I_{\text{지하수},i} = (1 - C_i - e_i) \times P_i \times \hat{A} = f_i \times P_i \times \hat{A} \quad (12)$$

여기서  $C_i$ 는 월  $i$ 의 유출계수,  $e_i$ 는 월  $i$ 의 증발손실계수,  $P_i$ 는 월  $i$ 의 월평균 강우량,  $f_i$ 는 침투계수,  $\hat{A}$ 는 강우 발생시 피압대수층을 형성할 수 있는 유역면적으로  $50 \text{ km}^2$  정도이며 월평균 강우량은 표 5.5.4의 양양 남대천의 1987~1997년 월별 강수량(속초관측소) 자료를 참조하였다.

#### 4. 결과분석

양양 남대천 유역에서 지하수 유입량을 결정하는 강수량은 1987년부터 1993년까지의 연평균 강수량 114.4mm에서 94년 이후에는 105.7mm로 92% 수준으로 감소하였기 때문에 월평균 지하수 유입량도 0.69MCM에서 0.64MCM으로 8%정도 감소하였다. 지하수 유입량이 충분한 해에는 지하수를 지표수와 연계하여 공급한 후에도 초기 보유량을 상회하거나 유지하는 경향을 보이거나 지하수 유입량이 감소함에 따라 용수수요를 만족시키기 위하여 지하수를 공급한 후에는 지하수 저류량은 감소한다. 따라서 충분한 지하수량을 확보할 때까지는 지표수를 우선적으로 공급함으로써 지하수 저류시간을 확보하는 운영이 바람직할 것으로 판단된다. 지하수원의 형성은 지표수에 비해 장기간의 시간이 필요하고 강우로 인한 지표수 유출과는 많은 시간 간격이 존재하므로 지하수 양수량의 결정은 기왕의 자료를 통한 운영 결과를 참고하여 해당 년도의 강우특성에 따른 2~3개월 후를 예측하는 탄력 있는 운영이 요망된다.

용수공급 정도를 알아보기 위하여 용수공급 신뢰도를 월 단위의 백분율로 표시하면 다음과 같다.

$$\text{용수공급 신뢰도} = \frac{\text{용수수요를 만족한달}}{11\text{년} \times 12\text{개월}} = \frac{132\text{달}}{132\text{달}} = 100\%$$

용수공급 신뢰도는 100%로 목표년도 2011년 속초시, 양양군, 고성군의 용수수요를 완전히 만족시킬 수 있었다. 지표수만 단독 운영시 연도별 용수공급신뢰도는 표 2와 같다. 지표수 단독 운영시 용수공급 신뢰도는 65.9%로 지하수-지표수 연계운영시보다 34.1% 감소하였다.

$$\text{용수공급 신뢰도} = \frac{\text{용수수요를 만족한달}}{11\text{년} \times 12\text{개월}} = \frac{87\text{달}}{132\text{달}} = 65.9\%$$

표 2 지표수 단독운영시 연도별 용수공급 신뢰도

년 백분율	'87	'88	'89	'90	'91	'92	'93	'94	'95	'96	'97
신뢰도	92%	100%	67%	100%	67%	42%	33%	25%	50%	100%	50%

즉, 갈수기에도 지표수만을 사용한 단독 용수공급보다는 지하수-지표수 연계운동을 통하여 더 효율적인 용수공급이 가능하였다. 따라서 지하수와 지표수의 연계운영이 이루어진다면, 저수지의 규모도 축소가 가능하여 댐 건설로 인한 부작용을 감소시킬 수 있으며, 한정된 수자원의 효율적인 이용방안을 찾을 수 있을 것으로 전망된다. 지금까지 용수공급의 대부분을 지표수에만 의존하여 용수수급 불균형이 전망될 때의 대처방법으로는 새로운 댐 건설만이 거의 유일한 대안이었으나, 지표수와 지하수를 연계하여 운영함으로써 기존 수자원의 효율적인 관리가 가능하여 용수공급의 신뢰도가 증대될 수 있을 것으로 기대된다.

### 5. 참고문헌

1. 건설교통부, 한국수문조사연보, 1987~1997.
2. 건설교통부, 전국 중·소규모 광역상수도 조사계획수립 타당성 조사 및 기본계획서-동해북부권, 1996.
3. 한국수자원공사, 수자원개발 가능지점 및 광역배분계획 기본조사 보고서, 1996.
4. 환경부, 상수도 통계(1997)
5. Buras, N., "Conjunctive Operation of Dams and Aquifers", Journal of the Hyd. Div., ASCE, Vol.89, No.HY6, November, 1963.
6. Coe, J. J., "Conjunctive Use-Advantages, Constraints, and Examples", Journal of the Irrigation and Drainage Eng. Div., ASCE, Vol.116, No.3, May/June, 1990.
7. Coskunoglu, O., and Shetty, C. M., "Optimal Stream-Aquifer Development", Journal of the Water Resources Planning and Management Div., ASCE, Vol.107, No.WR2, October, 1981.
8. Young, R. A., and Bredehoeft, J. D., "Digital Computer Simulation for Solving Management Problems of Conjunctive Groundwater and Surface Water Systems", Water Resources Research, Vol. 8, No.3, June 1972.