

1)

하천망 모형과 전역최적화기법을 이용한 저수지 용수의 최적 배분

Optimal Water Allocation Using Streamflow Network Model and Global Optimization Method

강민구* · 박승우**

Kang, Min Goo · Park, Seung Woo

요 지

본 연구에서는 단일목적 저수지와 다목적 댐의 최적운영을 위하여 전역최적해를 탐색하는 SCE-UA법을 사용하는 비선형계획법을 적용한 최적화 모형을 구성하고 과거 운영자료를 사용하여 모형의 적용성을 검토하고 분석하였다. 또한, 다목적댐의 운영수위 상승으로 인하여 발생하는 추가용수를 댐하류로 추가적으로 공급함에 따른 댐운영상의 문제점과 해결책을 제시했다. 관개용 단일 목적 저수지의 유입량은 하천망 모형인 SSARR 모형을 이용하여 추정하였다. 관개용 단일 목적저수지의 용수배분을 최적화한 결과, 실측치와 최적방류량간의 상대오차가 -2.6~10.5 % 범위를 나타냈으며, 비교적 실측방류량과 유사한 형태로 용수를 공급하는 결과를 나타냈다. 다목적 저수지의 최적운영을 위해 발전량, 저수량 및 필요수량의 관계를 목적함수로하는 최적화 모형을 구성하여 섬진강댐의 최적운영에 적용하였다. 섬진강댐의 댐하류 방류량 증가에 따른 운영상의 문제점을 해결하기 위하여 댐하류 유지용수량을 0.17, 0.50, 0.70, 1.0, 1.5, 3.0 m³/sec 방류하는 경우로 구분하여 최적운영한 결과, 댐하류 유지용수량이 1.0 m³/sec 이하인 경우에 발전량이 실적평균발전량에 근접한 결과를 나타냈으며, 용수공급량도 계획공급량인 377.4 백만 m³ 보다 28.9~100.7 백만 m³ 만큼 많은 양을 공급하는 결과를 나타냈다.

주요어 : SSARR 모형, SCE-UA법, 최적 용수배분, 전역최적화 기법, 하천망 모형, 섬진강댐

1. 서론

우리나라의 연평균 강수량은 1,274 mm로 세계평균 970 mm의 약 1.3 배로 양적으로는 풍부한 편이나, 최저 강수량이 754 mm, 최고 강수량이 1,683 mm로 변동폭이 크고, 연강수량의 2/3 정도가 6~9월의 홍수기에 집중되기 때문에 여름에는 홍수가 빈번하고, 겨울과 봄에는 가뭄의 발생 빈도가 크다. 또한, 인구가 증가하고 산업사회의 발달로 전력이나 용수수요가 증가하고 있으나 공급 가능한 수자원량은 한정적이다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 안정적인 용수확보와 홍수방지 기능을 담당하면서 이용가능한 수자원을 적극 활용한다는 측면에서 댐건설이 가장 확실한 방법이다. 그러나, 최근에는 대규모 다목적댐이나 저수지의 건설을 위한 적지가 드물고, 수몰지구민의 반대와 댐건설에 따른 환경문제로 인하여 댐건설을 통한 수자원확보는 어려운 실정이다.

현재 운영되고 있는 다목적댐의 목적은 계획당시의 환경을 토대로 하여 설정이 되어 있지만, 현재의 운영은 건설당시와는 다른 물관리 환경을 반영하면서 운영되고 있다. 따라서, 과거 계획당시 물관리 환경과 현재 물관리 환경의 차이점이 많으므로 이에 대한 재평가가 필요하다. 추가적인 수자원을 확보하기 위해서는 용수분배 최적화를 통한 댐의 최적운영방안 수립이나 댐군의 연계운

* 한국수자원공사 수자원연구원 kmg90@kowaco.or.kr

** 서울대학교 농업생명과학대학 교수 swpark@snu.ac.kr

영 등과 같은 비구조적인 방법으로 수자원을 개발할 수 있다. 또한, 최근에는 여수토의 상승, 저수위(L.W.L.) 이하의 저류량을 사용하는 방안, 준설를 통하여 퇴사량을 제거하여 저수지 용량을 증대시키는 방안 등과 같은 구조적인 재개발을 통한 수자원개발의 필요성이 대두되고 있다.

저수지운영의 최적화 기법에는 선형계획법(LP), 동적계획법(DP), 비선형계획법(NLP) 등이 있다. 선형계획법은 목적함수와 제약조건이 선형인 경우에만 적용이 가능하며, 동적계획법은 목적함수나 제약조건이 특성이 공간적이거나 시간적으로 변화하는 경우에 적용되며 목적함수가 비선형인 경우에도 적용이 가능하다. 비선형 계획법은 저수지 운영문제에 대해서 보다 일반적인 해법을 제공한다는 장점이 있으나 컴퓨터 계산용량과 시간이 많이 소요되고 전역최적해(global optimum)를 탐색하는데 한계가 있어 수자원 분야에 많이 적용되지 않았다. 그러나, 최근 컴퓨터 용량과 연산속도가 과거에 비해 월등히 향상되고, 전역최적해를 탐색하는 기법들이 개발되고 있어 비선형계획법의 적용이 가능해지고 있다. 비선형계획법의 국내 적용사례로는 윤용남 등(1995)이 섬진강댐으로부터 용수를 공급받는 동진강 유역을 대상으로 섬진강댐을 포함한 유역전체의 물분배를 위한 최적화 모형을 구성하여 최적운영방안을 수립하는데 비선형계획법을 적용한 바 있으며, 김병진과 박승우(1994)는 관개용 저수지의 방류량을 결정하는데 필요수량과 시기별 방류량의 차의 제곱으로 표현되는 목적함수를 설정하고 비선형계획법을 적용하여 최적저수지 조작을 시도하였다.

본 연구에서는 단일목적 저수지와 다목적 댐의 최적운영을 위하여 전역최적해를 탐색하는 SCE-UA법을 사용하는 비선형계획법을 적용한 최적화 모형을 구성하고 과거 운영자료를 사용하여 모형의 적용성을 검토하고 분석하였다. 또한, 다목적댐의 운영수위 상승으로 인하여 발생하는 추가용수를 댐하류로 추가적으로 공급함에 따른 댐운영상의 문제점과 해결책을 제시하고자 한다.

2. 모형의 구성

2.1 목적함수 및 제약조건

가. 단일목적 저수지

단일목적 저수지의 최적화 모형에 적용된 목적함수는 식 (1)과 같이 필요수량을 만족하면서 저수지의 목표저수량을 확보하는 방향으로 저수지가 운영되도록 하였다.

$$Max z_t = W_1 \times [ST(t) - OST(t)]^2 - W_2 \times [REQ(t) - REL(t)]^2 \quad (1)$$

여기서, ST(t)는 댐운영 후 저수량, OST(t)는 목표저수량으로 저수지 운영수위에 해당된 저수량, REQ(t)는 해당 기간의 필요수량, REL(t)는 해당 기간의 방류량, W_1 , W_2 는 가중치를 나타내며, t는 해당 기간을 나타낸다.

최적화 모형을 구성하기 위한 단일목적 저수지의 연속방정식과 제약조건은 식 (2)와 같다.

$$S_t = S_{t-1} + I_t - R(t) - LO(t), \quad S_{DS} \leq S_t \leq S_{max}, \quad R^{min} \leq R(t) \leq R^{max}, \quad R(t) \geq 0$$

(2)여기서, S_t 는 해당기간의 저수량, S_{t-1} 는 전단계의 저수량, I_t 는 유입량, $R(t)$ 는 저수지 방류량, $LO(t)$ 는 저수지 손실량, S_{max} 는 상시만수위의 저수량, S_{DS} 는 저수지 사수위에 해당하는 저수량, R^{min} 는 최소방류량, R^{max} 는 최대방류 가능수량을 나타낸다.

나. 다목적 저수지

다목적 저수지의 최적화 모형에 적용된 목적함수는 식 (3), (4)와 같이 관개기와 비관개로 구분하여 적용하였다. 관개기에는 발전으로 인한 편익을 최대화 하면서 용수수요량을 만족시키는 방향으로 용수를 공급하도록 하며, 비관개기에는 발전으로 인한 편익을 최대화 하면서 목표저수량을 확보하는 방향으로 저수지가 운영되도록 하였다.

$$Max z_t = W_1 \times GE(t) - W_2 \times [ST(t) - OST(t)]^2 - W_3 \times [REQ(t) - REL(t)]^2 \quad (3)$$

$$Max z_t = W_4 \times GE(t) - W_5 \times [ST(t) - OST(t)]^2 - W_6 \times [REQ(t) - REL(t)]^2 \quad (4)$$

여기서, $GE(t)$ 는 발전소에 의한 발전량, $ST(t)$ 는 댐운영 후 순별 저수량, $OST(t)$ 는 목표저수량으로 운영수위에 해당된 저수량, $REQ(t)$ 는 해당 기간의 필요수량, $REL(t)$ 는 해당 기간의 방류량, W_1, W_2, W_3 는 관개기의 가중치, W_4, W_5, W_6 는 비관개기의 가중치, t 는 해당 기간을 나타낸다.

최적화 모형을 구성하기 위한 다목적법의 연속방정식과 제약조건은 식 (5)와 같다.

$$S_t = S_{t-1} + I_t - R_1(t) - R_2(t) - R_3(t) - LO(t), \quad S_{LS} \leq S_t \leq S_{max}, \quad R_n^{min} \leq R_n(t) \leq R_n^{max} \quad (5)$$

여기서, S_t 는 해당기간의 저수량, S_{t-1} 은 전단계의 저수량, I_t 는 유입량, $R_1(t)$ 는 발전소 발전유량, $R_2(t)$ 는 농업용수 방류량, $R_3(t)$ 는 댐하류 유지용수량, $LO(t)$ 는 저수지 손실량, S_{max} 는 상시만수위의 저수량, S_{LS} 는 방류제한 수위에 대한 한계저수량, $R_n(t)$ 는 각각의 방류량을 나타내며, R_n^{min} 는 각 용수공급에 대한 최소 방류량, R_n^{max} 는 각 용수공급에 대한 최대 방류량을 나타낸다.

2.2 최적해 탐색기법

본 연구에서 선정한 목적함수는 수학적으로 비선형 함수이다. 따라서, 선형목적함수만을 적용하는 선형계획법은 적용이 불가능하므로 비선형계획법을 사용하였다. 비선형 계획법은 컴퓨터 용량과 계산시간이 많이 소요되며 전역최적해를 구하기 쉽지 않다는 단점이 있으나, 최근에는 컴퓨터의 용량이나 처리속도가 과거에 비하여 월등히 향상되고 있으며, 전역최적해를 탐색하는 기법들이 개발되고 있어 비선형계획법이 가능해지고 있다.

본 연구에서 사용한 최적해 탐색기법인 SCE-UA법은 Duan 등(1992)에 의해 제안되었으며, Nelder와 Mead(1965)의 Simplex법, Controlled random search법(Price, 1987), 경쟁적 진화(Holland, 1975) 등의 기존 탐색기법의 장점에 집합체의 혼합(complex shuffling)이라는 새로운 개념을 도입한 혼합형의 전역탐색법(Global Search Method)이다.

3. 모형의 적용

3.1 단일목적 저수지

단일 목적 저수지에 대한 저수지 운영 최적화 모형의 적용성을 분석하기 위한 대상저수지는 1996년 부터 서울대학교 농공학과에서 시험유역으로 선정하여 수문관측을 시행하고 있는 경기도 화성시 팔탄면과 봉담면에 위치한 발안저수지를 선정하였다.

대상유역의 수원공인 발안저수지의 몽리면적에 대한 저수지의 방류량을 모의 발생하여 실측 방류량과 비교하였으며, 발안저수지의 통관 설계 방류량은 1.078 (m³/sec)이므로, 저수지의 일 최대 방류량은 통관 설계 통수량으로 하였다.

표 1은 발안저수지의 방류량을 최적화한 결과를 나타낸다. 1996년의 실측방류량은 800.04 mm이고, 최적 방류량은 884.49 mm로써 최적방류량이 실측방류량 보다 10.5 % 크게 나타났다. 또한, 1997년의 실측방류량은 800.64 mm이고, 최적 방류량은 779.96 mm로써 실측방류량 보다 -2.6% 작게 나타났다. 1996년의 방류량은 5월 하순에서 6월 초순 사이에 실측치와 모의치간의 차이가 크게 나타났다. 이는 발안저수지의 초기 저수량이 많아 이양기에 실측방류량 보다 최적방류

량이 많은 방류를 하기 때문에 판단된다. 1997년의 방류량은 전기간에 걸쳐 실측치와 최적방류량간의 누가 방류량이 비슷한 경향을 나타냈다.

표 1. 단일 목적 저수지의 실측방류량과 최적 방류량의 비교

Reservoir	Simulation period (year)	Accumulated release		Relative error (%)
		Obs. (mm)	Opt. (mm)	
Balan reservoir	1996/5/1-9/30	800.04	884.49	10.5
	1997/5/1-8/31	800.64	779.96	-2.6

3.2 다목적 저수지

다목적 저수지에 대한 저수지 운영 최적화 모형의 적용성을 분석하기 위한 대상 저수지는 섬진강댐을 선정하였다. 우리나라 5대강 유역의 하나인 섬진강은 전북 장수, 임실, 진안 등 3개군의 경계를 이루는 팔공산에서 발원하여 약 82.4 km를 남서류하여 섬진강댐에 이르게 되며 이후 남동류하여 요천, 보성강 등과 같은 지류와 합류하여 전라남도 광양군과 경상북도 하동군 지점에서 남해로 유입한다. 섬진강의 유로연장은 212.3 km, 유역면적은 4,896.5 km²에 달하며 섬진강댐은 하구로부터 136.1 km 지점인 전라북도 임실군 강진면 옥정리 부근의 계곡에 위치하고 있다. 섬진강댐의 최초 개발목적은 수자원이 풍부한 섬진강의 지표수를 유역변경하여 동진수리조합관할의 농경지에 관개용수를 공급하기 위한 것이었다. 최초 댐은 높이 40 m, 길이 305 m의 곡선형 중력식댐으로 1929년에 완공되었으며, 유효저수량 6,065 만 m³를 저수하여 19,665 ha의 관개면적에 관개용수를 공급하였다. 그 후, 제 1차 경제개발 5개년 계획에 반영되어 신댐이 1965년 12월에 준공되었으며, 원래 목적인 관개용수공급 뿐만이 아니라 발전과 홍수조절, 생활용수 공급등의 다목적댐의 역할을 수행하게 되었다.

(1) 섬진강댐 운영

섬진강댐의 주목적은 동진강 수계에 위치한 29,860 ha에 대하여 농업용수를 공급하는 것과 철보발전소를 통한 발전에 있었으나 1993년 섬진강광역상수도의 준공으로 전라북도 남서부 일원과 전주시에 75,000 m³/일(0.87 m³/sec)의 생활용수를 공급하고 있으며, 댐하류에 유지용수로 7.9 백만 m³/년을 공급하고 있다.

섬진강댐의 설계시 운영수위는 상시만수위인 EL. 196.50 m로 계획되었으나 섬진강댐 상류유역 건축물의 최저표고가 EL. 193.65 m이므로 상시만수위로 운영할 경우 수몰지 보상문제가 발생하여 EL. 191.50 m 이상으로 수위를 상승하여 운영하기 어려운 실정이다. 그러나, 현행수위를 그대로 유지할 경우 농업용수의 공급에도 지장을 초래할 정도이나 운영수위를 상시만수위인 196.50 m로 상향 조정할 경우 농업용수 공급 및 섬진강 광역상수도의 생공용수를 공급하고 추가적인 용수를 하류로 공급할 수 있다.

(2) 댐하류 방류량별 최적운영

본 연구에서는 섬진강댐을 단독으로 최적운영할 경우 댐 방류량을 추가적으로 공급할 경우 용수분배상황을 실측유입량 자료가 있는 1982년~2001년에 대하여 최적운영하여 고찰하였다. 이를 위하여 동진강 수계로 방류되는 농업용수는 관개지구의 필요수량을 고려한 모의결과를 사용하였으며, 섬진강광역상수도 용수는 75,000 m³/일가 공급되는 것으로 하였으며, 댐 방류량은 0.17, 0.5, 0.7, 1.0, 1.5, 3.0 m³/sec로 구분하였다.

그림 1은 댐 하류 방류량과 운영수위별 발전량을 비교한 것이다. 댐 하류 방류량으로 0.17

CMS를 방류할 경우는 196.5 m로 운영수위를 설정할 경우를 제외하고 실적평균 발전량 보다 4.1~5.1 % 많은 발전량을 나타냈다. 댐 하류 방류량으로 0.5 CMS를 방류할 경우는 196.5 m로 운영수위를 설정할 경우를 제외하고 실적평균 발전량 보다 1.8~2.7 % 많은 발전량을 나타냈다. 댐 하류 방류량으로 0.7 CMS를 방류할 경우는 196.5 m로 운영수위를 설정할 경우를 제외하고 실적평균 발전량 보다 0.4~1.5 % 많은 발전량을 나타냈다. 댐 하류 방류량으로 1.0 CMS를 방류할 경우는 모든 운영수위에서 실적평균 발전량 보다 -5.9~-0.4 % 적은 발전량을 나타냈다. 댐 하류 방류량으로 1.5 CMS를 방류할 경우는 모든 운영수위에서 실적평균 발전량 보다 -10.7~-5.5 % 적은 발전량을 나타냈다. 댐 하류 방류량으로 3.0 CMS를 방류할 경우는 모든 운영수위에서 실적평균 발전량 보다 -21.9~-16.2 % 적은 발전량을 나타냈다.

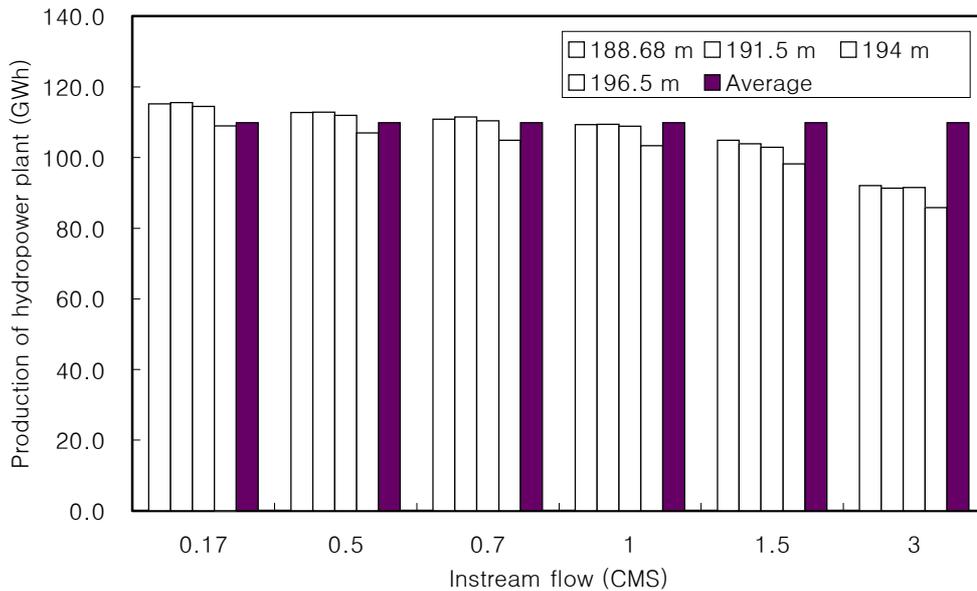


그림 1. 댐 하류 방류량과 운영수위별 전력생산량 비교

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 관개용수 공급을 위한 단일목적 저수지와 다목적 저수지의 운영을 위한 최적화 모형을 구성하였으며, 과거 운영자료를 사용하여 모형의 적용성을 검토하였다. 또한, 본 연구에서 연구대상 저수지로 선정한 섬진강댐의 운영수위 상승으로 인하여 발생하는 추가용수를 댐하류로 공급함에 따른 댐운영상의 문제점을 파악하기 위하여 과거 자료를 사용하여 최적운영한 결과를 비교 분석하였다.

이상의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 관개기에는 필요수량을 공급하면서 발전량을 최대화하는 목적함수와 비관개기에는 댐운영저수위를 확보하면서 발전량을 최대화하는 목적함수를 사용하고 전역최적해 탐색기법인 SCE-UA법을 적용한 최적화 모형을 구성하였다.
2. 단일목적 저수지의 방류량을 최적화에 대한 모형의 적용성을 평가하기 위하여 2 개년에 대한 방류량 최적화 결과를 비교해본 결과, 실측지와 최적화 결과간의 상대오차가 -2.6~10.5 %를 나타냈으며, 필요수량 보다 많은 양을 방류하는 경향을 나타냈다.
3. 동일한 대상기간에 대해 모의방류량 자료를 사용하여 섬진강댐의 운영에 최적화 모형을 적용한

결과, 풍수기에는 운영수위별 발전량이 실측발전량 보다 -2.29~14.61 % 증가된 결과를 나타냈으며, 농업용수와 섬진강 광역상수도 용수는 실적값보다 -7.52~10.04 %의 증가된 결과를 나타냈으며, 총방류량은 실적값에 비해 -0.83~2.69 % 증가된 결과를 나타냈다. 갈수기에는 실측발전량 보다 -5.94~3.98 % 증가된 결과를 나타냈다. 농업용수와 섬진강 광역상수도 용수는 실적값보다 1.35~7.79 %의 증가된 결과를 나타냈으며, 총방류량은 실적값에 비해 7.95~8.35 % 증가된 결과를 나타냈다.

4. 섬진강댐의 댐하류 유지용수 증가에 따른 운영상의 문제점을 파악하기 위하여 댐하류 유지용수량을 0.17, 0.50, 0.70, 1.0, 1.5, 3.0 m³/sec 방류하는 경우로 구분하여 최적운영한 결과, 댐하류 유지용수량이 1.0 m³/sec 이하인 경우에 발전량이 실적평균발전량에 많은 결과를 나타냈으며, 용수 공급량도 계획공급량인 377.4 백만 m³ 보다 28.9~100.7 백만 m³ 만큼 많은 양을 공급하는 결과를 나타냈다. 모의 기간 중 댐 하류 유지용수 공급을 중단하는 회수는 운영저수위를 높게 설정할수록 적은 경향을 나타냈다.

참고문헌

1. 강주환, 김남일, 이길성, 황만하, 1998. SSARR-8 모형을 이용한 낙동강 수계의 저수유출해석, 한국수자원학회지, 31(1), pp. 262-267.
2. 건설교통부, 한국수자원공사, 1999. 기존댐 용수공급능력조사(섬진강수계) 보고서.
3. 김병진, 박승우, 1994. 기상예보를 고려한 관개용 저수지의 최적 조작모형(I), 한국농공학회지, pp. 63-72.
4. 신일선, 권순국, 1987. 농업용 저수지의 다목적 이용을 위한 용수의 적정배분, 한국농공학회지, 29(3),
5. 윤용남, 김중훈, 김태균, 1995. 최적화모형을 이용한 수자원의 적정배분, 대한토목학회논문집, 15(4), pp. 855-864.