

<2004년 2월 서울대학교 박사학위 논문>

저수지의 용수공급능력 평가

- 하천망 모형과 전역최적화 기법을 이용한 저수지 용수 최적 배분 -



강민구

한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원

1. 서론

우리나라의 연평균 강우량은 1,283mm로 세계 평균인 970mm 보다 1.3배 정도 많은 양이다. 그러나 이를 1인당 강우량으로 환산하면 약 3,000톤 정도로서 세계 평균의 10% 정도에 불과하다(국토개발연구원, 2001). 이러한 강우량은 2/3가 여름철에 집중되고, 수자원이 지역적으로 편중된 특징을 보이고 있다. 또한, 국토의 65%가 산악지형이고 하천경사가 급해 홍수 방어에 취약하다는 특성을 갖고 있다. 이러한 지리적, 수문학적 특성 때문에 발생하는 문제를 해결하기 위하여 수자원 개발이 추진되어 왔다.

인구가 증가하고, 사회가 도시화되고 산업화됨에 따라 물사용량이 증가하는 경향을 보이고 있다. 2000년에 수립된 수자원장기종합계획에서는 2011년에 18억 톤의 용수 부족이 발생할 것으로 전망하고 있다. 또한, 오염물질 배출량이 증가하고 하천의 친수 기능이 떨어짐에 따라 하천의 수질오염과 건천화를 방지하기 위한 용수 수요가 증가하고 있다(건설교통부, 한국수자원공사, 2000). 그리고, 농업용수도 농촌용수로 범위가 확대되어 기존의 관개용수뿐만 아니라 생활용수, 하천유지용수를 포함하고 있어 용수 수요가 증가하고 있다(농림부, 1999).

늘어나는 용수 수요를 충족시키기 위한 가장 확실한 방법은 댐 건설이다. 그러나 최근에는 개발적지가 부족하고 환경문제로 인해 댐건설에 의한 수자원 확보가 어려운 상태이다. 따라서, 지속 가능한 개념을 바탕으로 하여 구조적이거나 비구조적인 방법으로 수자원을 확보해야한다. 구조적인 방법으로는 여수도의 송상,

저수위(L.W.L.) 이하의 저류량 사용, 준설을 통한 저수지 용량 증대와 같은 방법이 있다. 추가적인 수자원 확보를 위한 비구조적인 방법으로는 용수 분배 최적화를 통한 댐의 최적운영방안 수립이나 댐군의 연계운영 등과 같은 방법이 있다. 또한, 최근에는 노후관 교체, 절수기기 보급, 하수의 재이용, 우수나 해수의 이용 등과 같은 수요관리를 통한 용수 수요의 절감을 유도하려는 정책이 시도되고 있다(국토개발연구원, 2001).

현재 운영되고 있는 관개용 저수지나 다목적댐의 운영방식 및 용수 공급량은 계획당시의 환경을 토대로 하여 설정이 되어 있다. 현재의 운영은 건설당시와 다른 물관리 환경을 반영하면서 운영되고 있으며, 설계 당시와 다른 용수 공급량을 요구받고 있다. 따라서, 현재 물관리 환경과 수요에 맞게 운영 방식을 재설정해야 하며, 공급 가능량에 대한 재평가가 필요하다. 이를 위해서는 관개용 저수지나 다목적댐의 용수공급능력 평가가 필요하다. 용수공급능력평가는 저수지나 댐뿐만 아니라 이들을 포함하는 수자원시스템의 효율적인 운영을 위해서도 필요하다(윤 등, 1995; 이 등, 2002). 용수공급능력을 평가하는 방법에는 물수지 분석, 모의 모형, 최적화 모형, 모의 모형과 최적화 모형을 혼용한 모형 등을 사용하는 방법이 있다. 이들 방법들에는 장단점이 있으며, 공급능력은 신뢰도(reliability), 복원도(resilience), 부족심도(vulnerability) 등으로 나타낼 수 있다(고 등, 2004).

본 연구에서는 저수지의 용수공급능력을 평가할 수 있는 모의-최적화 모형을 개발하였다. 개발된 모형에서는 용수배분의 최적화를 위해서 전역 최적해 탐색법의 하나인 SCE-UA법을 사용한

비선형 계획법을 사용하였다. 관개용 저수지와 다목적 댐의 최적 운영에 적용하여 모형의 적용성을 평가하였다. 또한, 다목적댐의 추가 용수 공급에 따른 공급능력을 평가하기 위해서 댐 하류 방류량 변화에 따른 최적 운영결과를 검토하였다.

2. 저수지 최적 운영 모형

저수지의 용수 공급능력을 평가하는 방법에는 모의 모형을 이용하는 방법, 최적화 모형을 이용하는 방법, 모의 모형과 최적화 모형을 혼용하는 방법이 있다(Dandy 등, 1997). 이 중 모의 모형을 이용하는 방법은 미리 설정된 저수지 운영률을 기초로 하여 저수지 운영을 모의하는 방법이다. 최적화 모형을 이용하는 방법은 목적함수와 제약조건을 이용하여 용수 공급량의 과잉과 과소를 최소화하고 기타 목적을 최대화하도록 저수지를 운영하는 방법이다(Yeh, 1985). 모의 모형과 최적화 모형을 혼용한 방법은 저수지 운영을 모의하면서 각 단계의 용수 배분을 최적화 모형을 사용하여 결정하는 방법이다. 본 연구에서 개발한 저수지 최적 운영 모형은 저수지의 용수 공급능력을 평가하기 위하여 모의 모형과 최적화 모형을 혼용한 형태이다. 그림 1은 저수지 운영 최적화 모형의 흐름도를 나타낸 것이다. 개발된 모형은 저수지의 운영을 모의하면서 각 단계의 용수 배분은 설정된 목적함수와 제약조건을 만족하는 최적해를 탐색하는 최적화 기법을 사용하여 결정되도록 하였으며, 장기간의 모의를 통하여 대상 저수지의 용수 공급능력을 평가하도록 하였다.

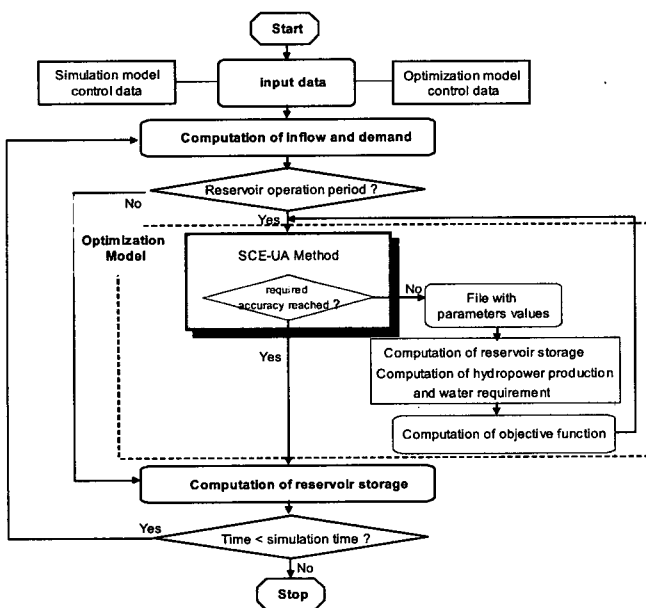


그림 1 저수지 최적 운영 모형의 흐름도

가. 저수지 운영 모형

저수지 최적 운영 모형의 부모형인 저수지 운영 모형은 저수지 유입량, 방류량, 월류량 등을 고려하여 기간별로 댐의 저수위를 예측한다. 저수지 유입량은 자료의 양이 많고 질이 확보된 경우에는 실측자료를 사용하였으며, 자료의 양이 적은 경우에는 결정론적 강우-유출 모형인 SSARR 모형을 이용하여 생성하였다(강 등, 1998). 저수지의 농업용수 방류량은 포장에서의 필요수량과 이를 용수로로 방류할 때 용수로의 흐름을 유지하기 위한 최저 방류량, 수로 손실을 고려하여 계산하였다(김과 박, 1994; 김과 박, 1988).

나. 최적화 모형

1) 목적함수 및 제약 조건

저수지 방류량 최적 배분 모형에 적용된 목적함수는 식 (2-1)과 같으며, 관개기와 비관개로 구분하여 적용하였다. 관개기에는 발전으로 인한 편익을 최대화 하면서 용수수요량을 만족시키는 방향으로 용수를 공급하도록 하며, 비관개기에는 발전으로 인한 편익을 최대화 하면서 목표 저수량을 확보하는 방향으로 저수지가 운영되도록 하였다.

$$\begin{aligned} \text{Max } z_t = & W_1 \times GE(t) - W_2 \times [ST(t) - OST(t)]^2 \\ & - W_3 \times [REQ(t) - REL(t)]^2 \end{aligned} \quad (2-1)$$

여기서, $GE(t)$ 는 발전소에 의한 발전량, $ST(t)$ 는 댐운영 후 순별 저수량, $OST(t)$ 는 목표 저수량으로 목표 운영수위에 해당된 저수량, $REQ(t)$ 는 해당 기간의 필요수량, $REL(t)$ 는 해당 기간의 방류량, W_1, W_2, W_3 는 가중치를 나타낸다.

최적화 모형을 구성하기 위한 연속방정식과 제약조건은 식 (2-2), 식 (2-3)과 같다.

$$S_t = S_{t-1} + I_t - R_1(t) - R_2(t) - R_3(t) - LO(t) \quad (2-2)$$

$$S_{LS} \leq S_t \leq S_{\max}, \quad R_n^{\min} \leq R_n(t) \leq R_n^{\max}, \quad R_n(t) \geq 0 \quad (2-3)$$

여기서, S_t 는 해당기간의 저수량, S_{t-1} 는 전단계의 저수량, I_t 는 유입량, $R_1(t)$ 는 발전소 발전유량, $R_2(t)$ 는 농업용수 방류량, $R_3(t)$ 는 댐하류 방류량, $LO(t)$ 는 저수지 손실량, S_{\max} 는 상시만수위의 저수량, S_{LS} 는 방류 제한 수위에 대한 한계저수량, $R_n(t)$ 는 각각의 방류량을 나타내며, R_n^{\min} 는 각 용수에 대

한 최소 방류량, R_n^{max} 는 각 용수에 대한 최대 방류량을 나타낸다.

2) 최적해 탐색기법

최적해 탐색기법에는 지역해(local optimum)을 찾는 지역 탐색법(local search method)과 여러 개의 지역해 중에서 한 개의 전역해(global optimum)을 찾는 전역 탐색법(global search method)으로 구별할 수 있다. 본 연구에서는 다른 탐색 기법 보다 지속적인 효율성을 나타내는 전역 탐색기법인 SCE-UA(Shuffled Complex Evolution - University of Arizona)법을 사용하였다.

3) 발전량 계산

일반적으로 발전량은 발전사용수량, 방류시점 저수위, 발전시간, 발전효율, 터빈효율 등에 의해 영향을 받으며, 실제 발전량 ($GE_{actual}(t)$)은 터빈효율 뿐만 아니라 발전효율(E_g), 수두손실율(H_L), 가동손실율(O_L)을 고려하여 산정하며 식 (2-4)와 같다.

$$GE_{actual}(t) = 9.8 \cdot E_g \cdot O_L \cdot E_t \cdot Q_t \cdot (H_t \cdot H_L) \cdot T_t \quad (2-4)$$

여기서, $GE_{actual}(t)$ 는 수력발전량(kWh), E_g 는 발전효율, E_t 는 터빈효율, Q_t 는 발전유량(m^3/sec), H_t 는 유효낙차(m), T_t 는 발전시간(hr)을 나타낸다.

3. 모형의 적용

가. 농업용 저수지

1) 대상 유역

농업용 저수지의 용수 공급능력 평가에 대한 모형의 적용성을 평가하기 위하여 경기도 화성시 팔탄면과 봉담면에 위치한 발안저수지를 선정하였다. 그림 2는 발안유역의 수자원 네트워크를 나타낸 것이다. 발안유역에는 기천저수지와 발안저수지가 위치하고 있으며, 하루 관개 지역에 대하여 관개용수를 공급하며 타 유역에 위치한 관개 지역에 대해서도 용수를 공급하고 있다. 그림 3은 저수지 유입량 예측을 위해 사용한 SSARR 모형을 적용하기 위해 소유역과 하도를 분할한 것을 나타낸 것이다.

2) 적용결과

발안저수지는 최적 운영을 위한 유입량 자료가 적은 상태이므로 강우-유출모형을 이용하여 유출량 자료를 생성하였다. 발안저수지 유입량은 SSARR 모형을 사용하여 생성하였으며, 이를

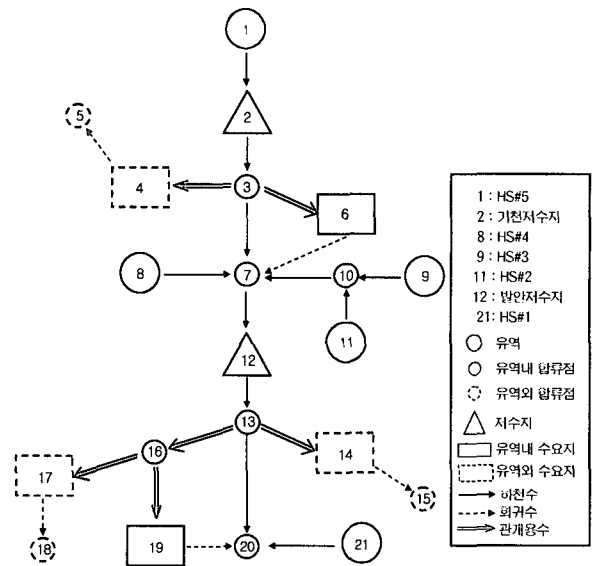


그림 2 대상 유역의 수자원 네트워크

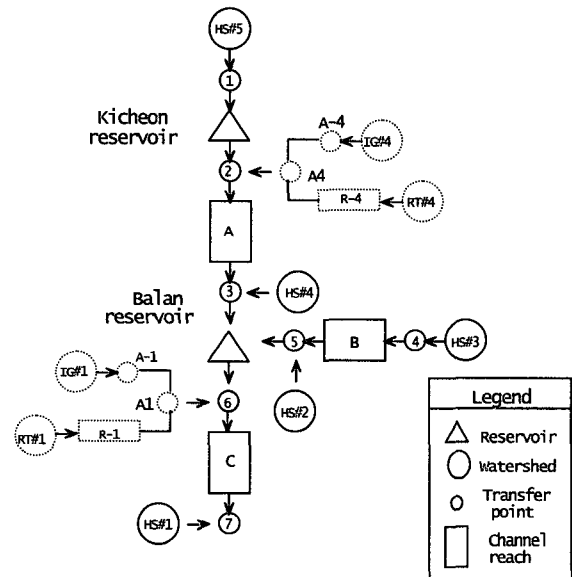


그림 3 SSARR 모형 적용을 위한 시스템

위해서 모형의 보정과 검정과정을 거쳤다. 그림 4는 유역에 포함된 발안저수지의 저수위를 모의한 결과와 실측치를 비교한 것이다. 두 값을 비교해 보면 모의결과가 실측치에 가까운 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

발안저수지의 최적운영은 저수량을 고려하면서 필요수량과 편차를 적게 하여 관개용수를공급하는 것이다. 그림 5는 단일 목적저수지인 발안저수지의 방류량을 최적화한 결과를 나타낸다. 1996년의 최적 방류량은 실측 방류량 보다 10% 정도 큰 값을 나타냈으며, 1997년의 최적 방류량은 실측 방류량 보다 3% 정도 작은 결과를 나타냈다.

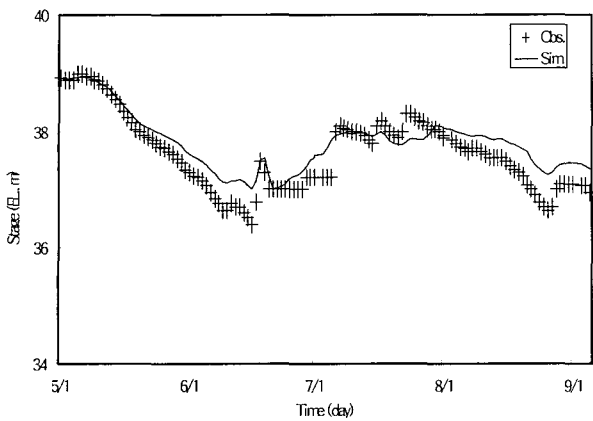


그림 4 발안저수지 실측/모의 저수위 비교

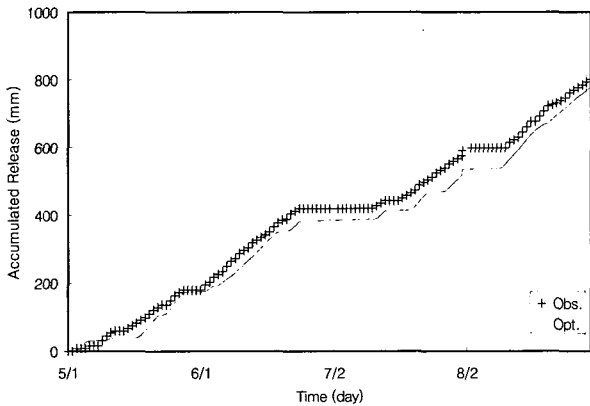


그림 5 발안저수지 실측/최적 방류량 비교

다. 다목적 저수지

1) 섬진강댐

다목적 저수지의 용수공급능력 평가에 대한 모형의 적용성을 평가하기 위하여 섬진강댐을 선정하였다. 우리나라 5대강 유역의 하나인 섬진강은 유로연장이 212.3km, 유역면적은 4,896.5km²에 달하며 상류에 위치한 섬진강댐은 하구로부터 136.1km 지점인 전라북도 임실군 강진면 옥정리 부근의 계곡에 위치하고 있다. 섬진강댐은 동진강 유역의 농경지에 관개용수 공급, 발전과 홍수조절, 생활용수 공급 등의 역할을 수행하고 있다.

2) 저수지 운영 최적화

모형의 적용성은 적용시기를 갈수기, 평수기, 풍수기로 구분하여 평가하였다. 모형 적용시 상시만수위는 196.50m로 하고, 목적함수에 사용되는 목표 저수량은 운영수위를 각각 188.68m, 191.50m, 194.00m, 196.50m로 설정하였다. 댐의 방류를 제한하는 저수위는 그림 6과 같이 각 용수를 공급하는 취수구의 위치를 고려하여 설정하였다. 발전용수는 175.0m 이하로 저수위

가 내려갈 경우에는 공급하지 않고 발전을 중단하는 것으로 하였으며, 담하류 방류량은 저수위가 164.0m 이하로 내려갈 경우에 공급되지 않는 것으로 하였다. 운암수갱을 통한 농업용수와 섬진강 광역상수도 용수는 154.54m 이하로 저수위가 내려갈 경우 용수공급을 중단하도록 하였다.

갈수기의 평균 유입량은 383백만 m³, 풍수기의 평균 유입량은 642.50백만 m³, 평수기의 평균 유입량은 503.50백만 m³이었다. 그림 7은 갈수기에 모형을 적용했을 때 저수위변화를 나타낸 것이다. 갈수기에는 유입량이 적아 발전을 위한 저수량이 부족하고 목표 운영수위별 저수위의 변화가 크게 나타나지 않고 있으며, 실측 수위와도 큰 차이를 나타내고 있지 않고 있다.

그림 8은 대상 기간별 최적 발전량을 실측 발전량과 비교한 것이다. 갈수기의 발전량은 목표 저수량별로 실측 발전량에 비해서 -3.30~4.44%의 향상된 결과를 나타냈다. 총방류량은 실측 방류량에 비해서 7.95~8.35% 향상된 결과를 나타냈다. 풍수기의 발전량은 목표 저수량별로 실측발전량에 비해서 -2.29~14.61%의 향상된 결과를 나타냈다. 총방류량은 실측방류량에 비해서 -0.83~2.69% 향상된 결과를 나타냈다. 평수기의 발전량은 목표 저수량별로 실측발전량에 비해서 4.53~10.37%의 향상된 결과를 나타냈다. 총방류량은 실측방류량에 비해서 -0.43~6.35% 향상된 결과를 나타냈다.

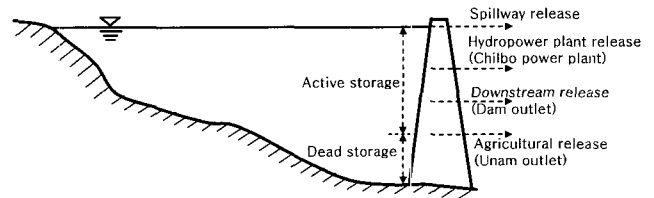


그림 6 섬진강댐의 용수별 취수구 위치

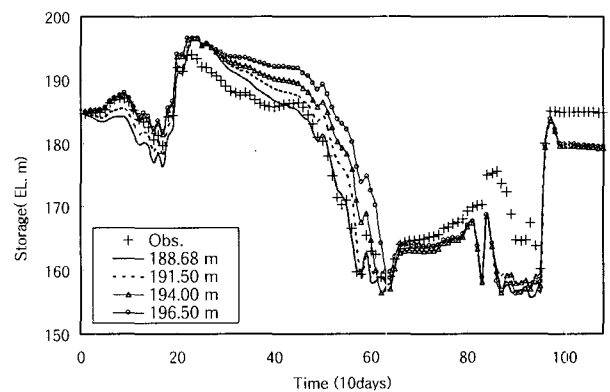


그림 7 최적/실측 저수위 비교(갈수기)

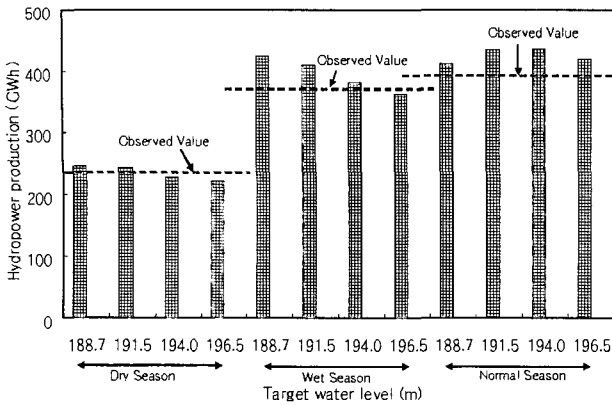


그림 8 최적 발전량과 실적발전량의 비교

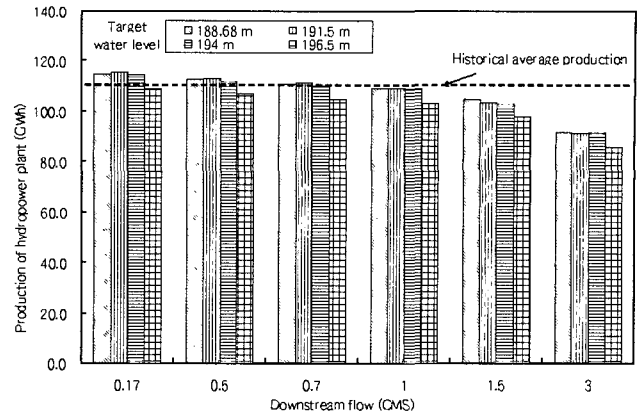


그림 9 하류 방류량에 따른 발전량 비교

4. 하류 방류량별 용수 공급능력 평가

섬진강댐의 설계시 운영수위는 상시만수위인 EL. 196.50m로 계획되었으나 섬진강댐 상류유역의 수물문제 때문에 EL. 191.50m 이상으로 수위를 상승하여 운영하기 어려운 실정이다. 그러나, 운영수위를 상시만수위인 196.50m로 상향 조정할 경우 농업용수 공급 및 섬진강 광역상수도의 생공용수를 공급하고 추가적인 용수를 하류로 공급할 수 있어 섬진강댐의 운영수위 상승의 필요성이 대두되고 있다.

본 연구에서는 섬진강댐을 단독으로 최적 운영할 경우 댐 하류 방류량을 추가적으로 공급할 경우 용수공급능력을 실측유입량 자료가 있는 1982년~2001년에 대하여 평가하였다. 이를 위하여 동진강 수계로 방류되는 농업용수는 관개지구의 필요수량을 고려한 모의결과를 사용하였으며, 섬진강광역상수도 용수는 75,000m³/일가 공급되는 것으로 하였으며, 댐하류 방류량은 0.17, 0.5, 0.7, 1.0, 1.5, 3.0m³/sec로 5가지로 구분하였다.

그림 9는 섬진강댐의 하류 방류량에 따른 최적 발전량을 실적 평균 발전량과 비교한 것이다. 섬진강댐의 하류 방류량 증가에 따른 발전량을 비교해보면 하류 방류량을 0.7CMS 이하, 목표 저수위를 194.0m 이하로 할 경우에는 실적 평균 발전량인 109.9Gwh를 0.4~4.8%정도 상회하는 결과를 나타냈다. 하류 방류량을 1.0CMS 이상으로 할 경우에는 실적 평균 발전량 보다 -21.9~-0.5%정도 감소한 결과를 나타냈다. 그림 10은 섬진강댐의 하류 방류량에 따른 최적 농업용수 방류량과 실적 평균 농업용수 방류량을 비교한 것이다. 섬진강댐의 하류 방류량 증가에 따른 농업용수 방류량을 비교해보면 하류 방류량을 1.0CMS 이하, 목표 저수위를 194.0m 이하로 할 경우에 실적 평균 방류량인 446.03백만 m³를 -0.7~10.3%정도 상회하는 결과를 나타냈다. 또한, 하류 방류량을 1.5CMS 이상으로 할 경우에는 실적

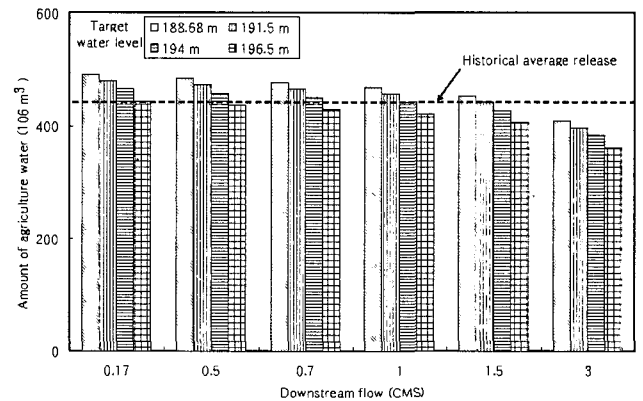


그림 10 하류 방류량에 따른 방류량 비교

평균 방류량의 -18.6~-1.0% 정도 감소한 결과를 나타냈다. 이상의 결과로부터 섬진강댐의 하류 방류량을 1.0CMS 이하, 목표 저수위를 194.0m 이하로 할 경우에 실적 발전량이나 실적 방류량과 비슷한 결과를 나타내거나 향상된 결과를 나타냈다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 저수지의 용수공급능력을 평가할 수 있는 모의-최적화 모형을 개발하였다. 개발된 모형에서는 용수배분의 최적화를 위해서 전역 최적해 탐색법의 하나인 SCE-UA법을 사용한 비선형 계획법을 사용하였다. 관개용 저수지와 다목적 댐의 최적 운영에 적용하여 모형의 적용성을 평가하였다. 또한, 다목적댐의 추가 용수 공급에 따른 공급능력을 평가하기 위해서 댐 하류 방류량 변화에 따른 최적 운영결과를 비교하였다. 인구가 증가하고 사회가 도시화되고, 산업화됨에 따라 용수 수요가 증가하고 있다. 또한, 오염물질의 배출량이 증가하고 하천의 자정능력이 떨어짐에 따라 수질오염이 심각해지고 있으며, 이를 방지하기 위한 하천유지용수의 수요가 증가하고 있다. 이러한 수요증가는 수자

원의 개발을 필요로 하나 최근에는 적지가 부족하고 환경문제로 인해 쉬운 일이 아니다. 기존 수자원 시스템에 새로운 수요가 발생하면 수요관리를 통하여 수자원의 효율성을 높이거나, 구조적이거나 비구조적 방법을 이용하여 수자원을 확보해야 한다. 그러나, 기존 수자원 시스템은 건설 당시 각각의 목적을 바탕으로 설계되었으므로 새로운 용수 수요를 충족시키기는 어려운 일이다. 따라서, 최적 운영이나 연계 운영과 같은 기존 시스템을 최대한 활용하는 방안을 고려해야 하며, 이러한 방법을 통하여 확보할 수 있는 수자원량을 정량화해야 한다. 그러나, 이 때 고려해야 할 점은 기존 시스템의 운영 목적을 제한하지 않는 범위 내에서 새로운 용수 수요를 충족할 수 있는 운영방안을 수립해야 한다는 것이다.

참 고 문 헌

1. 강주환, 김남일, 이길성, 황만하, 1998. SSARR-8 모형을 이용한 낙동강 수계의 저수유출해석, 한국수자원학회지, 31(1), pp. 262-267.
2. 건설교통부, 한국수자원공사, 2000. 수자원장기종합계획 Water Vision 2020.
3. 고익환, 박명기, 김정엽, 2004. 이수관리를 위한 저수지 시스템 모의운영 모형 개발, 2003년 분과위원회 연구과업 보고서, 한국수자원학회, pp.55-92.
4. 국토개발연구원, 2001. 환경친화적 국토발전을 위한 전략 연구.
5. 김병진, 박승우, 1994. 기상예보를 고려한 관개용 저수지의 최적 조작모형(III), 한국농공학회지, 36(3), pp.47-59.
6. 김현영, 박승우, 1988. 관개용 저수지의 일별 유입량과 방류량의 모의(III), 한국농공학회지, 30(3), pp.95-105.
7. 농림부, 1999. 농업·농촌용수 종합이용계획(농촌용수이용합리화 계획).
8. 윤용남, 김중훈, 김태균, 1995. 최적화모형을 이용한 수자원의 적정배분, 대한토목학회논문집, 15(4), pp.855-864.
9. 이재웅, 송재우, 2002. 최적화기법과 모의기법을 이용한 다목적댐의 용수공급능력 평가, 대한토목학회논문집, 22(6B), pp.811-818.
10. G. C. Dandy, Connarty M. C., and Loucks D. P., 1997. Comparison of methods for yield assessment of multiple reservoir systems, Journal of Water resources planning and management, ASCE, pp.350-358.
11. Yeh W. W-G., 1985. Reservoir management and operation models: A state-of-art review, Water Resources Research, 21(12), pp.1797-1818.