

홍수기 Goal Programming을 이용한 저수지 최적운영 Optimal Reservoir Operation Using Goal Programming for Flood Season

김 혜 진*, 안재 황**, 최창 원***, 이재 응****

Hye Jin Kim, Jaehwang Ahn, Changwon Choi, Jaeung Yi

요 지

홍수기 다목적댐 운영의 목적은 홍수조절용량을 최대한 이용하여 하류 주요 지점의 침투홍수량을 저감시키거나, 계획홍수량을 초과하지 않도록 방류량과 방류시점을 조절함으로써 홍수 피해규모를 최소화하는 것이다. 본 연구에서는 홍수기 다목적댐 운영에서 다목적 최적화의 한 형태인 goal programming의 적용성을 검토하였다. 실제 강우사상을 이용하여 단일저수지 운영과 저수지 연계운영을 실시하였다. 단일저수지 운영을 적용하기 위한 시험유역으로는 충주댐 유역을 선정하였고 저수지 연계운영을 적용하기 위한 시험유역으로는 안동댐과 임하댐 유역을 선정하였다. goal programming의 결과 분석을 위해 저수지 모의운영 모형인 HEC-5 모형의 결과와 비교, 분석하였다. goal programming을 이용할 경우 HEC-5 운영결과보다 안정적인 운영결과를 얻을 수 있었다. goal programming을 이용한 최적화 운영의 경우 전구간의 유입량을 알고 있다는 점에서 실제 저수지 운영과는 차이가 있다. 그러나 적절한 제약조건을 적용하고 홍수예정보를 이용하여 예보된 유입량을 활용하면 최적의 방류시점과 방류량을 산정하여 홍수기 다목적댐을 효율적으로 운영할 수 있으며 주요 지점의 홍수량도 저감할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : goal programming, 다목적댐, 저수지 최적운영, 다목적 최적화

1. 서 론

우리나라의 다목적댐은 연평균강수량의 약 70%가 발생하는 7월~9월의 홍수기에는 홍수조절 목적을 위해 운영되고, 그 외의 기간에는 주로 원활한 용수공급과 수력발전을 위해 운영되고 있다. 다목적댐의 운영은 이수와 치수를 고려한 수자원의 효율적인 분배와 운영이 이루어져야 한다. 따라서 다목적댐은 이수 혹은 치수의 관점에서 미리 정해진 저수지 운영률 또는 최적화기법 등을 이용하여 운영을 실시한다. 최적화 기법으로는 선형계획기법(linear programming, LP), 동적계획기법(dynamic programming, DP), 비선형계획기법(nonlinear programming, NLP) 등이 있으며 모의기법은 HEC-5를 비롯하여 홍수기에는 Auto-ROM, Rigid-ROM, Technical-ROM 등이 주로 이용되고 있다.

본 연구에서는 홍수기 다목적댐 운영에서 goal programming의 적용성을 검토하기 위해 실제 강우사상을 이용하여, 단일저수지 운영과 저수지 연계운영을 실시하였고 동일한 조건하에서 HEC-5 모의운영을 실시한 후 비교, 분석하였다.

* 정희원 · 아주대학교 대학원 건설교통공학과 석사 과정 · E-mail : hjhy321@ajou.ac.kr

** 정희원 · 아주대학교 대학원 건설교통공학과 석사 과정 · E-mail : koreaace@ajou.ac.kr

*** 정희원 · 아주대학교 대학원 건설교통공학과 박사 과정 · E-mail : itsme99@ajou.ac.kr

**** 정희원 · 아주대학교 환경건설교통공학부 교수 · E-mail : jeyi@ajou.ac.kr

2. Goal Programming

최적화기법은 최적대안을 찾고자 할 때, 고려해야 할 여러 조건들을 적용하여 제한범위 안에서 최적대안을 찾는 기법이다. goal programming은 다목적 최적화 문제의 해를 구하기 위한 한 형태로 상충되는 다양한 조건들을 적용하여 특정한 목표를 최적화하는 기법이다. 주로 목표값으로부터의 편차의 합을 최소화하며, 대개 선형계획법의 형태를 갖지만 비선형계획법의 형태를 가질 수도 있다. 결정변수로는 연속이나 이산 형태의 변수가 모두 가능하며, 의사결정자의 주관적 의도를 반영하여 각 목적함수에 대해 목표를 설정할 수 있다. goal programming은 연산시간이 짧고 유연한 제약조건을 이용하여 최적해에 대한 조건을 달리 하면서 검토, 비교할 수 있는 장점이 있다.

3. 모형 적용

본 연구에서는 홍수기 저수지 최적운영을 실시함에 있어 goal programming 모형을 이용하였다. 모형의 주요 목표로는 홍수기 말에 수위를 하절기 제한수위로 유지하는 것과 주요 지점의 홍수량을 매 시간 적절히 계획홍수량 아래로 유지하는 것으로 설정하였다. 구성된 목적함수와 제약조건은 다음과 같다.

$$\min \sum_{i=1}^n Z = |d_{S_n}^+ + d_{S_n}^- + d_{Q_i}^+| \quad (1)$$

$$s.t. \quad S_{i+1} = S_i + I_i - Q_i \quad (2)$$

$$S_n + d_{S_n}^- - d_{S_n}^+ = S_{\text{제한수위}} \quad (3)$$

$$Q_{Ri} + d_{Q_i}^- - d_{Q_i}^+ = Q_{\text{계획홍수량}} \quad (4)$$

$$Q_{\min} \leq Q_i \leq Q_{\max} \quad (5)$$

$$S_{\min} \leq S_i \leq S_{\max} \quad (6)$$

$$Q_{Ri} \leq Q'_{\max} \quad (7)$$

$$Q_{Ri}, d_{S_n}^-, d_{S_n}^+, d_{Q_i}^-, d_{Q_i}^+ \geq 0 \quad (8)$$

여기서, S_i 는 댐의 저류량, I_i 는 댐의 유입량, Q_i 는 댐의 방류량, Q_{Ri} 은 하도추적된 주요 지점 유량, $d_{S_n}^+$ 은 홍수기 말 댐의 저류량에 대한 양의 편차, $d_{S_n}^-$ 은 홍수기 말 댐의 저류량에 대한 음의 편차, $d_{Q_i}^+$ 은 주요 지점 유량에 대한 양의 편차, $d_{Q_i}^-$ 은 주요 지점 유량에 대한 음의 편차, S_{\min} 는 댐의 저수위에 해당하는 저류량, S_{\max} 는 댐의 최대수위에 해당하는 저류량, Q_{\min} 는 댐의 최소방류량, Q_{\max} 는 댐의 최대방류량, Q'_{\max} 는 주요 지점의 계획홍수량이다.

goal programming의 변수는 댐의 방류량과 하도추적된 주요 지점의 유량이며, 제약조건으로는 저류함수식과 저류량 및 유입량의 범위, 비음수조건이 포함되어 있다. 또한 목표로 설정한 홍수기말 제한수위(홍수기제한수위가 없을 경우 상시만수위)로 유지하기 위한 양과 음의 편차에 관한 식과 주요 지점에서 매 시간 계획홍수량 아래로 유지하기 위한 식도 반영되어 있다. 기본적인 제약조건에 서술하지 않았으나 각 구역의 저류유입량과 하도추적도 제약조건에 반영하였다.

3.1 저수지 단독 운영

본 연구에서는 저수지 단독운영을 수행하기 위해 남한강의 충주댐유역을 선정하였다. 충주댐의 홍수조절을 위한 주요 지점으로 여주를 선정하고 여주교 지점의 계획홍수량 $15,600\text{m}^3/\text{s}$ 를 기준으로 검토하였다. 충주댐의 방류량과 남한강의 지류유입량을 홍수추적하여 여주 지점의 홍수량으로 이용하였다. 남한강 충주댐유역의 경우 2006년 7월의 강우로 인해 여주 지점에서 계획홍수량에 근접하는 유량이 발생하였기 때문에 본 연구에서는 2006년 7월 14일부터 19일까지의 수문자료를 사용하여 1시간 간격으로 120시간 동안 분석하였다. 하도추적은 Muskingum 방법을 이용하였고 매개변수는 한강유역 종합치수계획수립 보고서(국토해양부, 2009)에서 제시된 값을 사용하였다. 초기조건을 충주댐의 홍수기 제한수위와 모의기간 시점에 관측된 실제수위로 설정하였고, goal programming의 결과는 동일한 조건 하에서 운영된 HEC-5 결과 및 실제 충주댐운영결과와 비교, 검토하였다.

3.2 저수지 연계 운영

본 연구에서는 낙동강 상류에 위치한 안동댐유역과 임하댐유역을 선정하여 goal programming을 이용한 저수지 연계운영을 적용하였다. 저수지 연계운영을 위한 최적화모형의 구성은 주요 지점을 안동시로 선정하고 안동댐의 반변천 합류점의 계획홍수량 $2,710\text{m}^3/\text{s}$ 와 임하댐의 반변천 합류점 계획홍수량 $3,020\text{m}^3/\text{s}$ 를 고려하고 안동시 지점의 계획홍수량 $5,730\text{m}^3/\text{s}$ 를 적용하였다. goal programming의 변수로 사용된 안동시 지점의 홍수량으로는 안동댐과 임하댐의 방류량과 반변천의 지류유입량을 홍수추적하여 적용하였다. 연계운영에서는 2002년 8월 27일부터 8월31일까지의 강우사상을 10분 간격으로 4,000분을 모의운영하였다. 운영초기조건을 안동댐의 상시만수위와 임하댐의 제한수위로 설정한 경우와, 관측된 실제수위로 설정한 경우 등 두 가지 경우에 대해 검토하였다. 한편 goal programming의 결과를 검증하기 위해 동일한 조건하에서 운영된 HEC-5 결과 및 실제 댐운영결과와 비교, 검토하였다.

4. 적용결과

저수지 단독운영의 경우 초기수위를 홍수기 제한수위로 설정했을 때의 결과는 다음과 같다. 모의운영의 결과에서 충주댐의 방류량은 계획방류량을 초과하여 여주 지점에서 계획홍수량을 초과하였다. goal programming의 결과에서 충주댐의 방류량은 계획방류량 내로 방류되어 여주 지점에서 계획홍수량을 초과하지 않았다. 이는 goal programming의 경우, 전 기간 동안의 유입량을 알고 있어 운영기간을 충분히 이용함으로써 여주시의 계획홍수량 아래로 운영할 수 있었다고 판단된다. 실제 운영된 수위를 초기수위로 사용하여 실제 운영과 비교한 결과를 살펴보면 goal programming 운영은 모의 종료시점에서 홍수기 제한수위로 조정하기 위한 방류를 제외하면 실제운영과 유사한 방류형태를 가지고 있다.

안동댐과 임하댐의 연계운영의 경우 초기수위를 안동댐의 상시만수위, 임하댐의 홍수기 제한수위로 설정했을 때의 결과는 다음과 같다. 모의운영 결과는 임하댐에서 계획방류량을 초과하여 안동시 지점에서 계획홍수량을 초과하였다. 이에 반해 goal programming의 결과는 안동댐과 임하댐 모두 계획방류량 내로 방류하여 안동시 지점에서 계획홍수량을 초과하지 않았다. 실제수위를 초기수위로 이용한 운영에서는 HEC-5 운영과 goal programming의 결과 모두 실제운영과는 상당한 차이를 보였다. goal programming은 저수지 연계운영에서 방류시점과 각 댐의 홍수조절 용량을 최적으로 이용하여 HEC-5의 저수지 모의운영보다 주요 지점의 계획홍수량을 이용하는데 장점을 가지고 있음을 확인하였다.

저수지 단독운영의 초기수위를 충주댐의 홍수기제한수위로 설정했을 때 결과는 Fig. 1.과 Fig. 2.이고, 초기수위를 실제수위로 설정했을 때의 결과는 Fig. 3. 및 Fig. 4.와 같다.

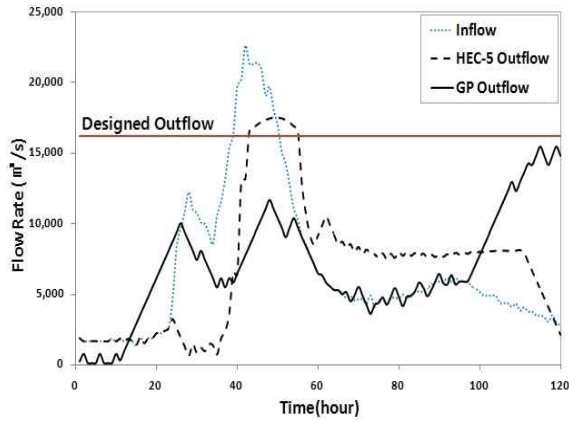


Fig. 1. Chungju Dam Outflow

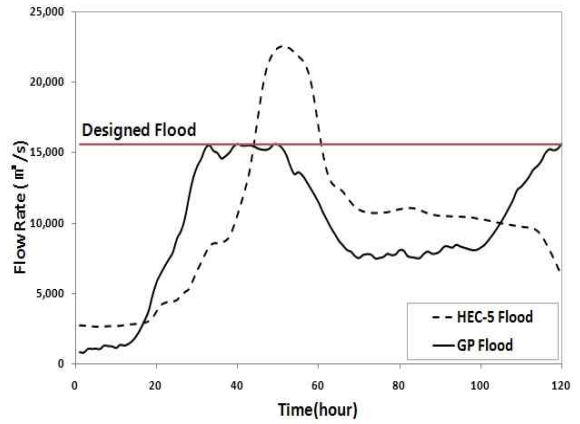


Fig. 2. Flood at Yeosu

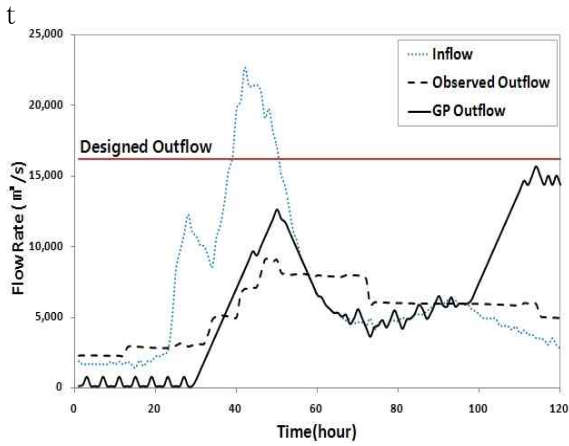


Fig. 3. Chungju Dam Outflow

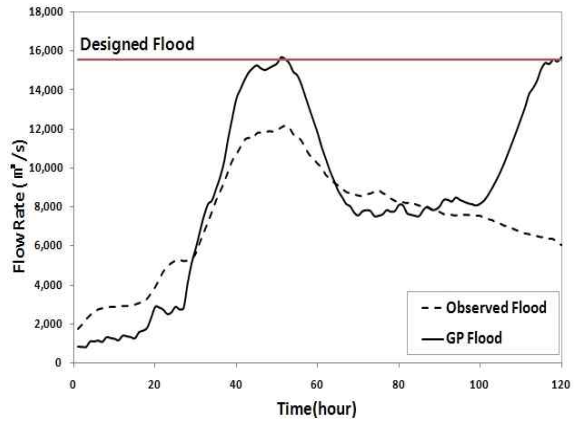


Fig. 4. Flood at Yeosu

저수지 연계운영에서 안동댐은 상시만수위, 임하댐은 홍수기제한수위로 초기수위를 설정하였을 때의 결과는 Fig. 5, Fig. 6.이고, 초기수위를 실제수위로 설정했을 때의 결과는 Fig. 7, Fig. 8.과 같다.

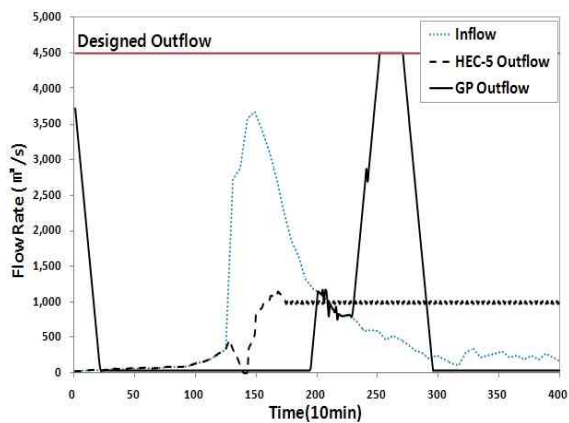


Fig. 5. Andong Dam Outflow

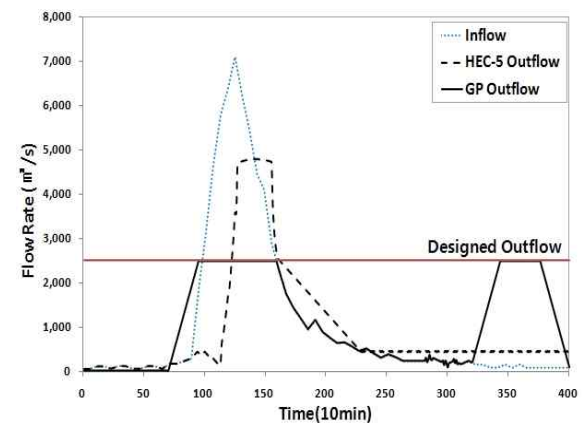


Fig. 6. Imha Dam Outflow

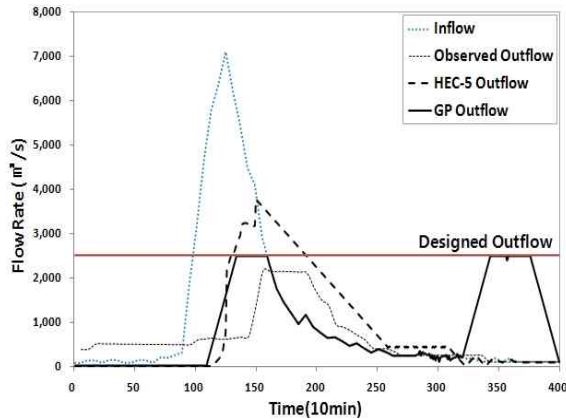


Fig. 7. Andong Dam Outflow

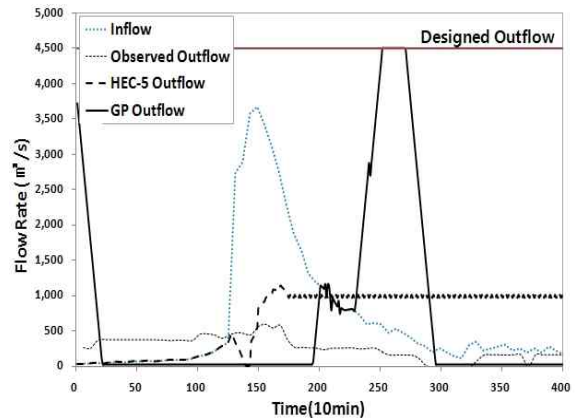


Fig. 8. Imha Dam Outflow

5. 결론

본 연구에서는 홍수기 저수지 운영에서 최적화모형인 goal programming의 적용성을 검토하기 위해 모의기법과 실제 댐운영을 비교하였다. 목적함수와 제약조건을 선형계획법의 형태로 goal programming모형을 구축하였고 모의기법으로는 HEC-5를 동일한 조건으로 설정하여 비교, 검토하였다.

단일저수지 운영 결과, goal programming을 이용할 경우 HEC-5 운영결과보다 홍수기에 저수지를 안정적으로 운영할 수 있었다. 저수지 연계운영의 경우, 각 저수지의 저류량 비율에 따라 방류량을 조절하여 운영하는 모의운영의 결과는 주요 지점의 계획홍수량을 초과하였으나, goal programming을 적용했을 때에는 두 개의 저수지 모두 유기적으로 방류량과 방류시점이 조절되어 저수지의 홍수조절능력을 적절하게 이용하여 주요 지점의 계획홍수량 이하로 운영되었다.

goal programming을 이용한 최적운영의 경우 전 기간 동안의 유입량을 알고 있는 상태에서 최적 방류시점이 결정되며 방류량의 최적분배가 가능한 점은 실제 운영과 차이가 있다. 하지만 적절한 제약 조건을 적용하고 홍수예경보시스템을 이용하여 어느 정도 정확한 유입량을 예측할 수 있다면, 최적의 방류시점과 방류량을 결정함으로써 주요 지점의 홍수량을 저감할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 국토해양부(2009) **한강유역 종합치수계획수립 보고서.**