

한정된 가중 합계법을 이용한 금강 수계 댐 군의 다중목적 최적 운영

김재희(Jaehee Kim)*, 김승권(Sheung-Kown Kim)*, 이용대(Yongdae Lee)*, 박명기(Myungki Park)**

1. 서론

댐 운영을 위한 실제 상황은 이론적인 모델이 추구하는 단일 목적에 의한 최적화와는 달리 여러 상충되는 목적 및 구성 요소들 간의 타협, 조절을 위한 다목적 운영을 필요로 한다. 여러 목적을 동시에 고려한 문제의 경우 우선 순위를 정할 수 없는 목적들을 동시에 최적화하기 때문에 단일 최적해가 보장되지 않는다. 대신, 최적해는 아니더라도 각 목적들이 모두 고려된 열등하지 않은 해가 존재하는데, 유효해 (efficient solution) 또는 파레토 최적해(Pareto optimal solution)로도 불리는 이 해의 개념을 사용하여 문제를 해결한다. 댐 운영 문제에도 유효해(Efficient solution)의 도출을 목적으로 다양한 다중목적 계획법(Multiple Objective Programming, MOP)이 적용되어 왔다.

그 대표적인 방법으로, Zadeh(1963)에 의해 최초의 개념이 제시된 가중합계법(Weighted-Sums Method)을 들 수 있다. 이것은 각 목적별로 양의 가중치를 부여하여 가중 합계시킨 목적함수에 대해 최적화를 수행하는 방법으로, 이때 도출되는 모든 해의 유효성이 보장되고(Geoffrion, 1968; Burkard 등, 1981) 그 적용 방법이 비교적 간단하다는 장점이 있다(Cohen과 Marks, 1975). 그러나, 가중합계법은 목적함수 가능영역의 형태가 볼록 집합(convex set)이 아닌 경우 모든 유효해를 보장하지 못하는 단점을 갖고 있다(Athan 과 Papalambros, 1996). 본 연구에서 다루고 있는 금강 수계 댐 군 연계 운영 모형의 경우, 이진 정수 변수를 이용한 혼합 정수 계획(MIP) 모형으로 수립되어서 목적함수 가능영역이 볼록 집합의 형태를 갖지 않는다. 따라서, 가중합계법으로는 모든 유효해를 도출할 수 없다는 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 이중 목적 문제에 한해 기존 가중합계법보다 효과적으로 적용될 수 있는 한정된 가중합계법(Restricted Weighted-Sums Method, R-WSM)을 소개하고, 금강 수계 댐 군 연계 운영 문제에 적용해 보고자 한다.

2. 다중목적 요소를 고려한 댐 군의 연계 운영

2.1 댐 운영의 다목적 요소 파악

댐 운영에서는 용수공급, 수력발전, 홍수 조절, 수질관리, 레크리에이션, 생태계 유지 등의 여러 목적을 동시에 고려해야 한다. 본 연구에서는 금강 수계의 용수 수급 상황을 고려하여 (1) 홍수기 제한수위 초과 최소화, (2) 물 부족 최소화, (3) 여수로 방류 최소화, (4) 저수량 최대화, (5) 발전방류 최대화를 주요 목적으로 고려했다. 그리고, 분석기말 목표수위와의 오차 최소화 목적을 선택적으로 고려할 수 있도록 했다. 목적함수에서 고려하는 5개의 주요 목적에 대한 우선 순위를 살펴보면, 먼저 홍수기 제한수위 초과 최소화에 가장 높은 우선순위를 부여했다. 이것은 본 모형이 이·치수를 모두 고려한 모형은 아니지만 이수기의 운영에 영향을 미치는 치수기의 상황을 무시해서는 안되기 때문에 홍수기에 댐의 수위를 제한수위 이하로 유지하고자 함에서다. 그 다음 물 부족 최소화와 여수로 방류량 최소화가 두, 세 번째 우선 순위를 갖는다. 그리고 저수량 최대화와 발전 방류 최대화는 앞선 세 목적

* 고려대학교 산업시스템정보공학과 ** 한국수자원공사 물관리센터 대리

보다 낮은 우선순위를 가지면서 서로 상충되는 관계로 볼 수 있다. 따라서 목적함수들간의 실질적인 상충 관계 분석 (trade-off analysis)은 저수량과 발전 방류량 사이에서 의미가 있다. 이상의 사전 분석을 토대로 본 연구에서는 댐 운영의 주요 목적을 동시에 고려하면서, 저수량과 발전방류 사이의 상관관계를 고려한 다중 목적 분석을 수행하고자 한다.

2.2 댐 군 연계운업을 위한 다중 목적 최적화 모형

금강 수계 댐 군 연계 운영을 위한 최적화 모형은 김승권과 박영준(1998)의 CoMOM(Coordinated Multireservoir Operating Model)을 근간으로 하면서, 추가로 단기 운영 모형의 특성을 고려하기 위하여 하도 추적을 개념화해서 반영하고 있으며 수력 발전의 비선형 관계식을 부분적으로 고려할 수 있는 특징을 갖고 있다(이용대 등, 2002). 목적함수에서 앞서 파악된 홍수기 유지수위 초과억제, 물 부족 최소화, 여수로 방류량 최소화, 저수량 최대화, 발전량(발전 방류량) 최대화, 분석기간말 목표저수위 유지 등을 포함하고 있으며, 전체적으로는 혼합 정수 계획 목표계획(Mixed Integer Goal Programming, MIGP)모형의 형태를 갖는다. 자세한 수식은 이용대 외 (2002)에 나타나 있다.

3. 한정된 가중합계법(R-WSM)을 이용한 댐 군의 다중 목적 최적 운영

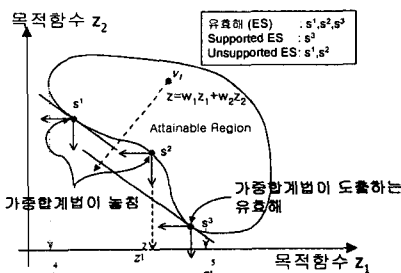
3.1 가중합계법의 개념과 문제점

금강 수계 댐 군 연계 운영 문제에 가중합계법을 적용하는 형태는 홍수기 유지수위 초과량, 물 부족량, 여수로 방류량, 저수량, 발전 방류량을 각각 f_1, f_2, f_3, f_4, f_5 로 볼 때, (P1) 문제로 정의될 수 있다.

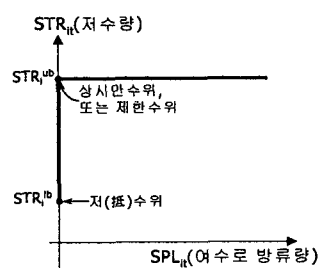
$$(P1) : \text{Min } w_1 \cdot f_1 + w_2 \cdot f_2 + w_3 \cdot f_3 - w_4 \cdot f_4 - w_5 \cdot f_5$$

$$\text{subject to } x \in S \text{ 단, } w_k > 0, \sum_{k=1}^5 w_k = 1 \quad - (1)$$

이 문제를 풀 경우, 여기서 도출된 해는 문제 형태에 관계없이 유효해가 보장된다. 그러나, 그 역은 성립하지 않아, 목적함수 가능영역의 형태가 볼록 집합이 아닌 경우는 가중합계법이 모든 유효해를 보장할 수는 없다는 단점이 있다. <그림 1>은 두 개의 최소화 목적 함수를 가진 문제에서, 목적 함수 값 가능영역이 볼록 집합이 아닌 경우를 예시하고 있다. 그림에서 s^1, s^2, s^3 은 이 점보다 좋은 해, 즉 좌측 하단 영역에 어떤 해도 존재하지 않아 유효해로 분류된다. 하지만, s^2 는 오목한 부분에 위치해서 가중 합계된 목적함수의 기울기 벡터가 어떻게 되더라도 발견될 수 없는 구조를 갖고 있다. 또한, s^1 은 가중 합계한 목적함수 기울기 벡터가 v_1 일 때 발견될 수 있는데, 이 경우는 s^1 대신 s^3 을 선택하게 된다.



<그림 1> 가중합계법으로 찾지 못하는 유효해의 예시



<그림 3> 저수량과 여수로방류 변수의 관계

한편, 이진 정수변수를 이용해서 여수로 방류의 조건 제약을 표현하고 있는 본 연구의 최적화 모형도 목적값의 가능영역이 볼록 집합의 형태를 보장하지 못하기 때문에, 가중합계법을 적용할 경우 일부 유효해를 찾지 못할

수 있다. 이 사실은 저수량과 여수로 방류 변수 관계를 도식한 <그림 2>로부터 파악될 수 있다. 즉, 일반적으로 여수로 방류는 댐의 저수량이 상시만수위 또는 제한수위에 도달할 때만 발생하기 때문에, <그림 2>와 같은 비블록 집합의 형태로 해 값을 갖게 된다. 그리고, 이 관계는 목적함수의 가능 영역에 대해서도 블록 집합 형태를 보장할 수 없다는 것을 암시한다.

3.2 한정된 가중합계법(R-WSM)

R-WSM은 가중치를 파라메트릭하게 변화시켜 반복 수행하는 도중에 하나의 목적만을 목적함수에 남기고 나머지 목적을 목표값을 가진 제약식으로 처리하는 과정이 결합된 방식이다. 즉, 가중치를 조정하면서 문제를 풀다가 (P2)형태의 문제로 바꿔 풀면 된다.

$$(P2): \text{Min } Z(x) = w_1 \cdot z_1 + \sum_{k=1}^K w_k \cdot z_k$$

$$\text{subject to } x \in S$$

$$z_k = TAR_k, \text{ for } k=1 \dots K; k \neq 1 \quad - (2)$$

R-WSM은 두 개 목적간의 상충관계를 가진 문제에 한해 모형의 수식 형태에 관계없이 어떤 유효해도 도출할 수 있다는 장점이 있다. 이 특성은 <그림 1>에서 s^2 를 찾는 과정에서 보여질 수 있다. 즉, s^2 를 찾고자 한다면, (P2)형태를 따라 목적함수에 $w_2 \cdot z_2$ 항목만을 남기고 $z_1 = z_1^2$ 의 제약식을 추가하고 문제를 풀면 된다. 왜냐하면, z_1 값을 z_1^2 으로 고정시키고 문제를 풀었기 때문에 여기서 결정된 최적해는 s^2 가 되기 때문이다. 이 방식은 일부 목적을 제약식으로 처리한다는 점에서 제약 조건 방식(Constraint Method)과 비슷한 측면이 있다. 하지만, R-WSM에서 사용되는 제약식이 가중합계법의 반복수행 도중 한정적으로 추가되는 것과 달리, 제약 조건 방식의 경우는 이전 수행에서 도출된 목적값 정보를 이용하여 다음 수행에 필요한 제약식 상의 목적함수 목표값을 파라메트릭하게 설정하는데 사용된다는 점에서 근본적인 차이가 있다.

금강 수계 댐 군 운영의 경우 저수와 발전 방류 사이에서만 상충관계 분석을 필요로 하기 때문에 R-WSM이 잘 적용될 수 있다. 즉, 저수와 발전 방류 사이의 상충관계를 고려하기 위해 초기 가중치로 기준으로 저수에 대한 가중치를 순차적으로 감소시켜 가면서 문제를 풀고, 가중합계법이 놓치는 영역의 해를 찾고자 할 때에 (P2)의 형태를 따라 총 발전방류량에 대한 목표값을 등식 제약으로 놓고 풀면 된다.

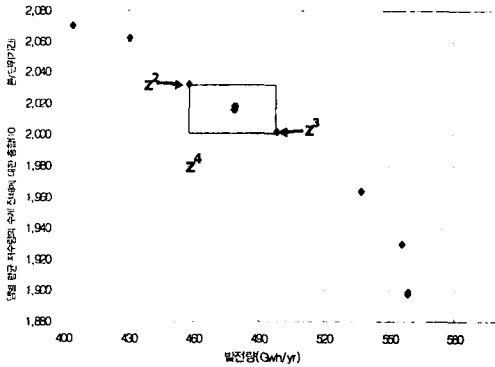
4. 금강 수계에 대한 적용 사례

금강 수계의 용담댐과 대청댐에 대해 1998년 10월 1일에서 1999년 9월 30일까지 1개 수문년의 강우 유출모형 결과값을 유입량으로 사용해서 다중목적 분석을 수행해 보았다. 모형의 목적에 포함했던 5개의 목적 중에 홍수기 제한수위 초과 제약은 분석기간에 홍수기가 포함되지 않아 실제로는 고려하지 않았다. <그림 3>은 저수 가중치를 순차적으로 줄여가면서 총 30개의 가중치를 적용해서 도출된 유효해 집합을 보여주고 있다. 이 결과는 다중 목적 계획법의 적용에 따른 주요한 특징을 보여준다.

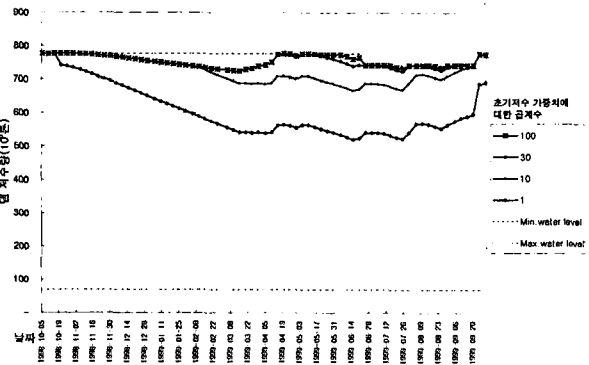
첫째, 저수 가중치 값의 변화에도 불구하고 물 부족과 여수로 방류량이 일정하게 유지되고 있다. 이 결과는 물 부족, 여수로 방류 최소화에 대해 높은 가중치를 부여함으로써 다른 목적에 대한 이들 목적의 우위를 제대로 반영할 수 있다는 점을 보여주고 있다. 둘째, 저수 가중치 집합의 양쪽 극단 값을 적용할 경우 저수량이나 발전방류량의 변화가 없는 것은 이때의 저수량과 발전방류량이 해당 목적 함수값의 상·하한임을 암시한다. 예를 들어, 용수 수요를 우선 만족시키고 여수로 방류를 최소한으로 하는 운영정책을 펼 경우, 연간 발전량이 작게는 405Gwh, 크게는 559Gwh에 달할 수 있을 것으로 분석된다. 셋째, 비교적 균등한 간격의 가중치를 적용했음에도 불구하고, <그림 3>의 z^2 와 z^3 의 경우처럼 두 목적함수 간의 차이가 비교적 큰 경우가 있어, 단순히 가중합계법의 가중치 조정법만으로 목적함수를 자유롭게 제어할 수 없음을 확인할 수 있다. 따라서, 예를 들어 z^4 를 구하고 싶은 경우에 아주 많은 가중치 조정과 반복 실험을 필요로 할 수도 있다. 그러나, R-WSM은 이러한 문제를 바로 극복할 수 있게 한다. 즉, 총 발전방류량 목표값을 제약식으로 추가하고 최적화를 수행할 경우 곧바로 원하는 해를 도출할 수

있게 된다.

한편, <그림 4>는 총 30개의 가중치 셋(set)중에 일부 가중치에 대한 적용결과로 다양한 저수 가중치 적용에 따른 용담댐의 저수위 변화추이를 비교해 주고 있다. 댐 운영자는 이 그래프를 보고 각 가중치 적용에 대한 타당성을 검토하고 적당한 운영대안을 선택해 볼 수 있을 것이다.



<그림 3> 저수와 수력 발전 사이의 상충관계



<그림 4> 용담댐 저수위 변화추이

5. 결론 및 향후 연구과제

가중합계법의 단점을 개선시킨 한정된 가중합계법(R-WSM)을 소개하고 금강 수계 댐 군 연계 운영 문제에 적용해 보았다. R-WSM은 가중합계법과 달리 금강 수계 댐 군 운영 문제와 같이 두 개 목적간의 상충관계를 분석하는 MIP문제에 대해 어떤 유효해도 쉽게 도출할 수 있다는 장점이 있다. 금강 수계 댐 군 연계 운영 문제에 R-WSM을 적용한 결과 해 공간에 골고루 분포된 유효해 집합을 도출할 수 있었으며, 저수와 발전 방류간의 상호관계를 분석함으로써 댐 운영자가 선호에 따른 다양한 운영 대안을 찾을 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 1-6-1)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 김승권, 박영준 (1998), "댐군의 연계운명을 위한 수학적 모형", 한국 수자원학회 논문집, 제 31권, 제 6호, pp 779-793
2. 이용대, 김재희, 김승권, 고익환 (2002), "일별 저수지군 연계운명을 위한 수학적 모형", 대한 토목학회 학술발표회 논문집, pp. 285-288
3. Athan, T. W. and Papalambros, P. Y. (1996), "A note on weighted criteria method for compromise solutions in multi-objective optimization", Engineering Optimization. Vol. 27, pp. 155-176
5. Cohon, J. L. and Marks, D. H. (1975), "A Review and evaluation of multiobjective programming techniques", Water Resources Research, Vol. 11, No. 2, pp. 208-220
6. Geoffrion, A. (1968), "Proper efficiency and the theory of vector maximization", Journal of Mathematical Analysis and its Application, Vol. 22, pp. 618-630
7. Zadeh, L.A. (1963), "Optimality and non-scalar-valued performance criteria", IEEE Transactions on Automatic Control. AC Vol. 8, No. 1, pp. 59-60