

한강수계 발전용댐 장기 운영계획 수립을 위한 최적화 모형 구축

이은경·지정원*·이재응†

아주대학교 건설교통공학과

*아주대학교 건설시스템공학과

Development of Optimization Model for Long-term Operation Planning of the Hydropower Reservoirs in Han River Basin

Eunkyung Lee·Jungwon Ji*·Jaeung Yi†

Department of Civil and Transportation Engineering, Ajou university, Korea

**Department of Civil Engineering, Ajou university, Korea*

(Received : 10 October 2019, Revised: 18 November 2019, Accepted: 18 November 2019)

요약

우리나라는 60% 이상이 산간지형에 해당하며 수십 년 전부터 이러한 특성을 이용하여 수력발전소를 다수 건설하고 친환경적인 에너지를 생산해왔다. 수력발전은 급변하는 에너지 수요에 대처할 수 있고 낙차를 이용하여 친환경적으로 에너지를 생산한다는 장점이 있으나 댐 설립시 입지 조건에 의해 불가피하게 환경을 훼손해야 하는 경우가 많다. 따라서, 본 연구에서는 기존 발전용댐들의 장기 운영계획을 수립하고자 월별 발전량을 최대화하는 최적 저수지 운영 모형을 개발하였다. 댐 운영 모형은 자원 최적화 분야에서 널리 이용되는 선형계획법을 기반으로 월단위로 1년 운영계획을 수립할 수 있는 형태로 구축하였다. 선형계획법은 목적함수와 제약조건 모두 선형식으로 이루어져야 하지만 발전량 산정식은 비선형식이기 때문에 Taylor Expansion 기법을 활용하여 선형화하였다. 개발된 모형을 검토하기 위해 한강수계에 위치하는 5개 발전용댐을 대상으로 2009~2018년의 실적자료와 댐 운영 모형의 결과를 비교, 분석하였다. 결과적으로 발전용댐들의 총 최적 발전량은 총 실적 발전량보다 약 10~37% 정도 향상된 결과를 나타내었다.

핵심용어 : 발전용댐, 선형계획법, 장기 댐 운영 모형, 한강수계

Abstract

In Korea, more than 60% of the whole lands are mountainous area. Since many decades ago, hydroelectric power plants have been constructed and eco-friendly energy has been produced. Hydropower can cope with the rapidly changing energy supply and demand, and produce eco-friendly energy. However, when the reservoir is built, it is often inevitable to damage the environment due to construction of large structure. In this study, the optimal reservoir operation model was developed to maximize power generation by monthly operation for long-term operation planning. The dam operation model was developed using the linear programming which is widely used in the optimal resources allocation problems. And the reservoir operation model can establish monthly operation plan for 1 year. Linear programming requires both object function and constraints to be linear. However, since the power generation equation is nonlinear, it is linearized using the Taylor Expansion technique. The optimization results were compared with the 2009-2018 historical data of five hydropower reservoirs. As a result, the total optimal generation is about 10~37% higher than the historical generation.

Key words : Han River basin, Hydropower reservoir, Linear programming, Long-term dam operation model

† To whom correspondence should be addressed.
Department of Civil Engineering, Ajou university, Korea
E-mail: jeyi@ajou.ac.kr

• Lee, Eun Kyung Department of Civil and Transportation Engineering, Ajou university, Korea / Ph.D. candidate (oplk100@ajou.ac.kr)
• Ji, Jung Won Department of Civil Engineering, Ajou university, Korea / Research fellow (log58@ajou.ac.kr)
• Yi, Jae Eung Department of Civil Engineering, Ajou university, Korea / Professor (jeyi@ajou.ac.kr)

1. 서 론

우리나라는 중위도 온대성 기후대에 속하는 지리적인 이유로 사계절이 뚜렷하게 나타나며 연강수량의 70% 이상이 여름철에 집중되는 특성을 가진다. 하지만 최근 기후변화의 영향으로 집중호우의 발생빈도는 증가하고 총 연강수량은 감소하는 등 이전과는 다른 이상 현상이 발생하고 있다. 지구온난화로 인한 기후변화의 심각성은 IPCC 5차 보고서(2014)에서도 기술되어 있으며 기후변화에 의한 강수 패턴의 변화, 수문시스템의 변화 등에 의해 수자원의 불확실성이 증가하는 추세이다. 우리나라도 연간 약 1,200 mm 이상의 강수가 내리는 것이 일반적이었지만 2014년, 2015년에 1,042 mm, 846 mm의 강수가 내리며 2016년 강수량이 다시 평년 수준으로 회복하기 전까지 장기간 가뭄이 지속되었다. 댐 저수율 또한 점차 감소되어 급수 제한을 고려해야 했다. 기후변화에 의한 이상현상으로 인해 수자원 관리의 중요성이 더 부각되고 기후변화를 해결하기 위한 방안이 이슈가 되었다. 특히 원자력에너지나 화석 에너지를 대체하기 위한 에너지원을 개발하고 에너지 효율을 향상시키기 위한 연구도 진행되고 있다. 신재생에너지 중 수력 발전은 친환경적인 에너지원이고 급작스런 전력공급에 즉시 대응 가능하다는 장점이 있다. 그러나 수력발전량을 증가시키기 위해 댐을 추가적으로 건설한다는 것은 환경적인 문제가 대두되어 지양되고 있는 실정이다. 수자원장기종합계획(2016)을 통해서도 알 수 있듯이 2000년대 이전에는 다목적댐을 개발하고 안정적인 물 공급을 위한 치수 사업 위주로 이루어졌다면 2000년대 이후부터는 물을 깨끗하게 보존하고 효율적으로 활용하는 방안이 초점이 맞춰져 있음을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 발전용댐의 장기 운영계획 수립을 위해 발전량 최대화를 목적으로 하는 최적 장기 댐 운영 모형을 개발하였다. 장기 댐 운영 모형은 최적화기법 중 하나인 선형계획법(LP: Linear Programming)을 기반으로 개발되어 월단위로 향후 1년 운영계획을 수립할 수 있다.

선형계획법은 전역 최적해를 도출할 수 있고 비교적 간단하게 모형을 구성할 수 있다는 장점 때문에 국내·외 수자원 분야에서 많이 사용되었다. 해외에서 선형계획법을 활용한 연구 사례를 살펴보면 다음과 같다. Borghetti 등(2008)은 비선형구조를 갖는 수학적 모델 구축의 어려움을 밝히며 혼합정수선형계획법(Mixed-Integer Linear Programming; MILP)을 이용하여 양수발전소의 단기 최적 운영 계획을 찾는 연구를 수행하였다. MILP는 해의 정확도 및 계산시간 측면에서 모두 높은 효율에 도달하여 수력발전 시스템의 특성을 대부분 표현할 수 있는 장점이 있음을 명시하였다. 최적운영 모형을 이용한 경우 솔루션의 정확도 및 계산시간 측면에서 모두 우수한 결과가 나타남을 제시하였다. 또한, Bosona 등(2010)은 에티오피아의 Melka Wakana 수력발전소를 연구 대상으로 하고 Powersim Simulation 소프트웨어를 이용하여 저수지 운영에 관한 연구를 진행하였다. 댐 유입량, 증발률, 실적 발전량, 실적 발전량류량과 저수위 등이 시계열 데이터로 사용되고 변수들의 제약 조건도 함께 고려되었다. 연간 에너지 생산량을 향상시키기 위

해 월간 에너지 생산량을 증가시키는 방법을 이용하였으며 그 결과 연간 에너지 생산량이 실적값보다 5.67% 증가함을 확인하였다. Salami 등(2012)은 나이지리아의 니제르강의 수력발전댐을 대상으로 에너지생산 최적화 연구를 수행하였다. LINGO(Language for Interactive General Optimization)를 이용하여 최적화 모형을 구성하고 상·하류에 위치한 두 수력발전소의 총 연간에너지 생산량을 최대화하는 모형을 구성하였다. 모의 운영으로 얻은 에너지 값을 기존 운영 결과값과 비교 분석한 결과 실제 에너지 생산량에 비해 41% 이상 향상된 모의 운영 결과값을 도출하였다. 최근에는 Belsnes 등(2015)이 유입량과 가격의 불확실성을 고려한 확률론적 단기 수력 발전 계획을 위한 모델을 제시하였다. 확률론적 모델이 아닌 확률론적 모델을 사용하는 것의 이점을 기술하고 단기 수력 계획을 위한 모델을 제시하고 결정론적 모델보다 확률론적 모델을 사용하는 것에 대한 장점을 정량적으로 비교하는 연구를 수행하였다. 이 연구에서 사용된 선형계획법은 축차 선형계획법이라고 불리는 Successive Linear Programming 모형으로 노르웨이 전력산업에 적용하여 발전량을 산정하였다. 모형을 통해 구해진 발전량은 실적값에 비하여 개선되었고 댐 유출에 인한 홍수위험을 감소시키는 결과를 도출하였다.

국내에서도 선형계획법을 이용한 저수지 운영 최적화에 관한 연구들이 다수 수행되었다. 유주환(1999)은 한강수계 저수지 시스템이 수력발전을 통하여 하류에 용수를 공급하고 있다는 점을 고려하였다. 수력발전 최대화를 목적으로 두고 용수공급을 기본적으로 충족하는 제약조건을 반영한 선형추적(Linear Tracking)을 모형화하고 최적 제어율을 유도하여 적용하고 저수지 조작을 수행하였다. 그 결과 2001년 용수공급을 충족시키고 저수지 시스템의 총 발전량의 30% 증가한 것을 확인하였다. 김완희(2009)는 충주댐 용수공급량을 최대화는 방안을 모색하기 위해 선형계획법을 이용하여 갈수기 용수공급을 평가하고 최적 용수 공급 방안을 검토하였다. 1993년부터 1996년까지 선형계획법이 적용된 모형을 이용하여 충주댐의 연간 총 용수공급 가능량을 최적화하여 분석한 결과, 저류량을 최대화하는 목적함수로 설정하여 해석하는 것이 저류량 확보 측면에서나 용수공급량 적정공급 측면에서 유용한 방법임을 확인하였다.

최적화 기법의 편리성 때문에 댐 운영 분야 외에도 상하수도 분야에서 취수계획을 계획할 때도 선형계획법이 사용되었다. 정기문(2019)은 지능형 정수장 운영시스템 개발 연구의 일환으로 선형계획법을 이용한 정수장 취수계획 최적화 모형을 개발하였다. 정수처리비용을 최소화할 목적함수로 설정하고 취수 후 정수처리에 소요되는 자연시간, 시간별 전력단가를 고려한 취수가능량, 예측수요량 등 다양한 제약조건을 만족하는 최적 취수계획을 제시하였다.

최적화 기법은 다양한 분야에서 활용하고 있으며 특히 저수지 운영 관련 선형계획법 연구는 용수공급 최적화에 관한 연구가 대부분이었다. 발전량 최적화에 관한 연구는 상대적으로 연구 횟수가 적었는데 그 이유는 필수 제약조건인 발전량 산정 공식이 비선형식으로 구성되어 있어 연구의 어려움이 발생하기 때문이라고 판단된다. 비선형식을 선형화하는 기법을 사용하였을 때는

선형화하는 과정에서 발생하는 오차와 최적값이 수렴하지 않는 문제 등에 의해 연구의 어려움이 발생하곤 한다.

앞서 설명한 바와 같이 발전량 최대화를 목적으로 하고 있어 발전량 산정 공식을 사용하는 것이 필수적이다. 본 연구에서는 발전량 산정 공식을 Taylor Expansion을 활용하여 선형화하고 선형계획법에 제약조건으로 사용하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 최적화 기법

최적화 기법은 작전연구(Operation Research; OR)라고 불리는 학문에서 발달하였으며 제2차 세계대전 당시 영국의 과학자들이 부족한 군자재를 여러 군사 작전에 적절히 배치하여 효과적인 작전을 수행하기 위해 처음 사용되었다(김중훈, 1995). OR의 성공적인 사례가 다양한 분야에서 응용하기 위한 밑거름이 되었고 현재 수자원 분야에도 다양하게 사용되고 있다. 컴퓨터 기술이 발달함에 따라 복잡한 문제들도 최적화 기법을 사용하여 그 해를 구할 수 있게 되었으며 최적화 문제의 일반적으로 Eq.(1), Eq.(2)와 같이 목적함수와 제약조건으로 구성된다.

$$\text{obj. Optimization } f(x) \tag{1}$$

$$\text{s.t. } g_k(x) \leq 0 \quad k = 1, 2, \dots, m \tag{2}$$

여기서 x 는 n 개의 결정변수(x_1, x_2, \dots, x_n)를 나타내는 벡터이며 $f(x)$ 는 목적함수, $g_k(x)$ 는 m 개의 제약조건을 나타낸다.

모든 최적화 문제는 목적함수와 제약조건을 통해 최적해를 도출한다는 장점이 있다. 목적함수는 모형의 종류에 따라 최대화 혹은 최소화 문제, 제약조건은 등식 또는 부등식의 형태로 구분된다. 최적화 기법의 종류는 모형의 형태에 따라 선형계획법(Linear programming), 비선형계획법(Nonlinear programming), 동적계획법(Dynamic programming), 경험적 최적화 기법 등으로 구분된다. 각 방법은 자료의 종류, 목적함수, 제약조건, 운영상황 등 다양한 상황을 고려하여 적용된다. 본 연구에서는 수자원 분야에서 보편적으로 많이 사용되는 선형계획법을 이용하여 모형을 개발하였다.

2.1.1 선형계획법

최적화 문제에서는 목적함수와 제약조건 모두 선형식으로 구성된다면 선형계획법으로 최적해 도출이 가능하다. 선형계획법의 일반적인 형태는 다음과 같으며 Eq.(3)은 목적함수, Eq.(4)는 i 번째 제약조건, Eq.(5)는 비음수 제약조건을 의미한다. 또한, c_j 는 목적함수의 계수, x_j 는 결정변수이다.

$$\text{object. max(or min) } \sum_{j=1}^n c_j x_j \tag{3}$$

$$\text{subject to. } \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, n \tag{4}$$

$$x_j \geq 0 \quad \text{for } j = 1, 2, \dots, n \tag{5}$$

2.1.2 비선형식의 선형화

수자원 분야에서는 대부분 선형식으로 이루어진 최적화를 많이 수행하지만 비선형식이 포함된 경우가 발생할 수 있다. 만약 목적함수나 제약조건에 비선형식이 포함되면 비선형식을 선형화하는 방법을 적용한 후 선형계획법에 적용한다. 선형계획법 적용 연구에서 많이 사용되는 비선형식을 선형화시키는 방법으로는 Successive Linear Programming, Piecewise Linearization, Taylor Expansion 등이 있다.

1) Successive Linear Programming(SLP)

Sequential Linear Programming이라고도 불리는 SLP는 비선형식이 포함된 최적화 모형을 반복적으로 수행하여 최적해를 도출하는 방법이다. 초기값을 설정하여 제약조건을 만족하는 최적해를 선형계획법을 이용하여 구하고 산정된 최적해를 초기값으로 재설정하여 동일한 방법으로 다시 최적해를 구하는 방법이다. 이 방법은 해가 임의의 값에 수렴할 때까지 반복하여 최적해를 산정한다. SLP 알고리즘은 비선형식을 선형식으로 확장하여 문제를 해결한다.

다음 Eq.(6)~Eq.(8)은 비선형식으로 이루어진 목적함수와 제약조건으로 구성 최적화 문제이다.

$$\text{object. min } f(x) \tag{6}$$

$$\text{subject to. } g_j(X) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \tag{7}$$

$$h_k(X) = 0 \quad j = 1, 2, \dots, p \tag{8}$$

$$X \in x_1, x_2, \dots, x_n$$

Eq.(6)~Eq.(8)을 SLP 알고리즘을 적용하여 Eq.(9)~Eq.(11)로 변형하고 이를 선형계획법에 적용하면 해를 도출할 수 있다.

$$\text{object. min } [f_j(X^0) + \nabla f(X^0)(X^* - X^0)] \tag{9}$$

subject to.

$$g_j(X^0) + \nabla g_j(X^0)(X^* - X^0) \quad j = 1, 2, \dots, m \tag{10}$$

$$h_k(X^0) + \nabla h_k(X^0)(X^* - X^0) = 0 \quad k = 1, 2, \dots, p \tag{11}$$

$$X \in x_1, x_2, \dots, x_n$$

선형화는 이전 값 근처에서만 유효하고 최소값으로 수렴하는 것에 방해가 되기 때문에 Eq.(12)와 같이 상한 및 하한 범위 조건을 추가한다. Δ 벡터는 선형화가 발생한 지점 근처에서 검색이 유지되도록 한다.

subject to.

$$X(i) - \Delta \geq X(i) \geq X(i) + \Delta \quad i = 1, 2, \dots, n \tag{12}$$

2) Piecewise Linearization(PL)

Piecewise Linearization은 수학 및 공학 분야에서 중요한 역할을 한다. PL은 비선형 목적함수 $f(x)$ 에 이진 변수, 연속 변수, 제약조건을 추가하여 문제를 재구성함으로써 $g(x)$ 를 구성한다. PL은 비선형식에 추가 변수를 도입하고 여러 개의 구간으로 나눠 구간별 선형 보간하여 비선형식을 선형식으로 변형하는 방법이다. 구간 $[a, b]$ 에 정의된 함수 $f(x)$ 는 동일한 구간의 $g(x)$ 와 근사한다. $g(x)$ 는 세분화된 구간으로 구성된다. $g(x)$ 는 구간 $[a, b]$ 의 모든 x 에 대해 $g(x) = c + dx$ 의 형태이다. 구간이 많아질수록 변수의 개수는 증가하지만 세분화할수록 오차는 줄어들기 때문에 적절한 구간 수가 정확한 최적해를 결정짓는다.

3) Taylor Expansion

Taylor Expansion은 고차원의 함수를 간단한 다항식으로 변형시키는 방법으로 차수가 높을수록 $f(x)$ 에 가깝게 근사화시킬 수 있으며 일반적으로 1차 혹은 2차까지 전개하여 사용한다. Taylor Expansion은 다음 Eq.(13)과 같이 $x = X_i$ 에 대하여 $f(x)$ 를 근사시킬 수 있다. $x = X_i$ 에 대하여 고차항을 무시하면 Eq.(14)와 같이 표현되며 Taylor Expansion을 이용하여 부등식 제약조건과 등식 제약조건을 표현하며 Eq.(15)와 Eq.(16)과 같다.

$$f(X) = f(X_i) + (\nabla f(X_i))^T(X - X_i) + O(\|X - X_i\|)^2 \quad (13)$$

$$f(X) \approx f(X_i) + (\nabla f(X_i))^T(X - X_i) \quad (14)$$

$$g_j(X) \approx g_j(X_i) + (\nabla g_j(X_i))^T(X - X_i) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (15)$$

$$h_k(X) \approx h_k(X_i) + (\nabla h_k(X_i))^T(X - X_i) = 0 \quad k = 1, 2, \dots, p \quad (16)$$

비선형식으로 이루어진 최적화 문제를 Taylor Expansion을 이용해 다시 구성하면 Eq.(17)~Eq.(19)와 같다.

$$\text{object. } \min f(X_i) + (\nabla f(X_i))^T(X - X_i) \quad (17)$$

subject to.

$$g_j(X_i) + (\nabla g_j(X_i))^T(X - X_i) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (18)$$

$$h_k(X_i) + (\nabla h_k(X_i))^T(X - X_i) = 0 \quad k = 1, 2, \dots, p \quad (19)$$

$$x_i^L \leq x_i \leq x_i^U \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$X \in x_1, x_2, \dots, x_n$$

본 연구에서는 비선형식을 선형식으로 사용하기 위해 Taylor Expansion을 이용하여 1차까지 근사하는 방법을 채택하였다.

2.2 장기 댐 운영 모형 구축

2.2.1 대상 유역 및 댐 선정

본 연구에서는 우리나라 면적의 약 35% 정도(약 25,953.6 km^2)를 차지하고 한반도의 중심에 위치하는 한강 유역을 대상 유역으로 선정하였다(Fig 1). 한강 유역은 태백산맥과 소백산맥 등 높은 산맥들이 위치하여 낙차의 영향을 많이 받는 발전용댐 입지로 적합하여 Table 1과 같이 현재 설비용량이 큰 발전용댐이 밀집되어 있다.

본 연구에서는 한강 유역의 발전용댐 중 북한강에 위치하는 화천댐, 춘천댐, 의암댐, 청평댐과 한강에 북한강이 합류점에 위치하는 팔당댐을 대상으로 분석하였다. 북한강 수계를 따라 상류에서 하류로 화천댐, 춘천댐, 의암댐, 청평댐, 팔당댐 순으로 직렬로 위치한다. 화천댐은 홍수조절용량을 포함하고 있어 월별 강우량의 영향을 받으며 대상 댐 중 가장 큰 저수량을 보유하는 댐이다. 춘천댐, 의암댐, 청평댐, 팔당댐은 담수 능력이 거의 없어 유입량을 대부분 방류하는 형태로 운영된다. 본 연구에서 선정한 댐 제원 및 발전소 제원은 Table 2, Table 3과 같다.

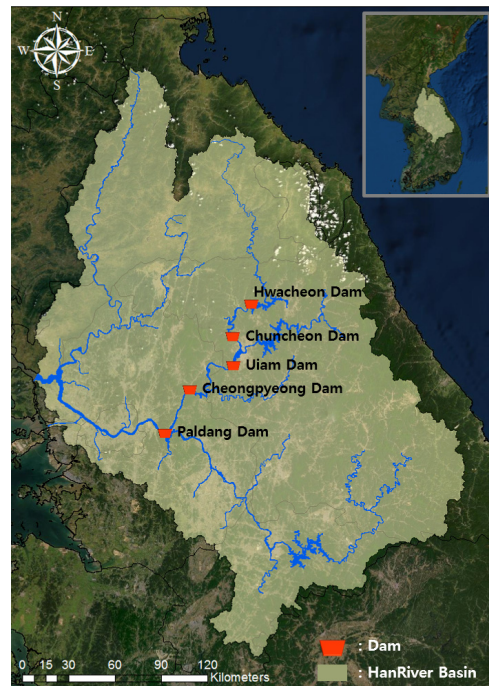


Fig 1. Basin map of hydropower reservoirs in Han River

Table 1. Equipment status of Han River hydropower reservoirs

	Hwacheon	Chuncheon	Uiam	Cheongpyeong	Paldang	Chilbo	Boseonggang	Goesan	Gangrim	Gangneung
Equipment capacity (MW)	108	62.28	48	140.1	120	35.4	4.5	2.8	0.48	82
Total storage [$10^6 m^3$]	1,018	150	80	185.5	244	438	5.7	15.3	0.07	51.4

Table 2. Specifications of Han River hydropower reservoirs

	Area [km ²]	Design flood level [EL.m]	Normal high water level [EL.m]	Restricted water level [EL.m]	Low water level [EL.m]	Total storage [10 ⁶ ton]	Maximum discharge [m ³ /sec]
Hwacheon	3,901	183.0	181.0	175.0	156.8	1,018	7,828
Chuncheon	4,736	104.9	103.0	102.0	98.0	150	12,600
Uiam	7,709	73.36	71.5	70.5	66.3	80	12,600
Cheongpyeong	9,921	52.0	51.0	50.0	46.0	185.5	20,000
Paldang	23,800	27.0	25.5	-	25.0	244	26,000

Table 3. Generator Specification of the Han River hydropower reservoirs

	Generation equipment (Equipment capacity[MW])					Generator		종합 효율 Total efficiency(%)			
	#1	#2	#3	#4	합계	Annual generation [GWhr]	Maximum plant discharge [m ³ /sec]	#1	#2	#3	#4
Hwacheon	27.0	27.0	27.0	27.0	108.0	326	185	89.4	89.4	89.4	88.4
Chuncheon	28.8	28.8	-	-	57.6	145	228	90.7			
Uiam	22.5	22.5	-	-	45.0	161	340	89.8			
Cheongpyeong	19.8	19.8	40.0	-	79.6	271	373	80.1	80.1	88.3	-
Paldang	30	30	30	30	120	485	880	91.6			

2.2.2 댐 운영 모형 구성

장기 운영계획 수립을 위한 모형은 R을 기반으로 구축하였다. R은 통계분석을 위한 개발환경이면서 프로그래밍 언어로 다양한 패키지를 제공하고 있다. 오픈소스 프로그램이기 때문에 소프트웨어 개발자가 아닌 사용자가 개발한 패키지도 서로 공유, 배포가 가능하다는 장점이 있다. SLP, PL을 이용해서 모형을 구성해 본 결과 해가 수렴하지 않거나 극단적인 결과값을 도출하는 경우가 발생하여 비선형함수를 Taylor Expansion을 사용해서 선형화를 하였다.

1) 목적함수

장기 댐 운영 모형은 상시발전량 E를 최대화하는 것을 목적함수로 사용하였으며 Eq.(20)과 같이 표현된다. 상시발전량 E는 발전량이 항상 일정 값 이상을 발전한다는 의미의 변수이다. 발전량을 이용한 제약조건을 Taylor Expansion을 이용하여 선형화 할 때 로그함수 ln을 이용하여 곱의 식을 덧셈의 형태로 변형하였다. 목적함수 E도 ln d로 대체하여 사용하였다.

object. max E (20)

2) 제약조건

본 연구에서는 물수지 방정식, 월별 저수위 제한조건, 월발전량 제한조건, 발전량 제약조건, 비음수 제약조건을 모형의 제약조건으로 사용하였다. 물수지 방정식은 지난 달의 마감 저수위, 이번 달의 유입량과 방류량을 고려하여 이번달 마감 저수위를 계산하는 식으로 Eq.(21)과 같다. 물수지 방정식에서 S₀는 운영시작 전달의 마감 저류량으로 댐별 저수위-저수량 표에 의해 계산되어 진다. Eq.(22)는 저수위가 항상 저(低)수위보다는 높게 유지되어야 하고 홍수기에는 홍수기 제한수위, 갈수기에는 상시만수위를 넘어서는 안된다는 제약조건이다. Eq.(23)은 월발전량이 항상 상시발

전량보다 커야 된다는 발전량 제약조건, Eq.(24)는 모든 변수가 양수여야 한다는 비음수 제약조건을 나타낸다.

subject to. S_t = S_{t-1} + i_t - x_t - w_t for t = 1,2,...,12 (21)

S_t ≤ C_t, S_t ≥ K_t (22)

9.8 × ε × γ_t × (h_t - T_t - l_t) ≥ E (23)

S_n, i_n, x_n, w_n ≥ 0 for n = 1, 2, ..., 12 (24)

여기서, S_t는 저류량[10⁶ m³], i_t는 유입량[10⁶ m³], x_t는 발전방류량[10⁶ m³], w_t는 수문방류량[10⁶ m³], C_t는 홍수기 제한수위(홍수기; 1~5월, 10~12월) 또는 상시만수위(비홍수기; 6~9월) 저류량[10⁶ m³], K_t는 저수위 저류량[10⁶ m³], ε는 발전기 종합효율[%], γ_t는 발전방류량[m³/sec], h_t는 저수위[EL.m], T_t는 방수로 수위[EL.m], l_t는 손실수두[m]의 미하고 Δt는 발전시간이다.

3) 발전량식의 선형화

발전량 산정 공식인 Eq.(25)는 발전방류량과 유효낙차의 곱으로 이루어진 비선형식이기 때문에 선형계획법에 적용하기 위해서는 선형화하여야 한다. 본 연구에서는 자연로그와 Taylor Expansion을 이용하여 선형화하였는데 과정은 다음과 같다.

step 1. 자연로그 적용

발전량 Π_t 산정 공식 Eq.(25)는 양변에 자연로그를 적용하여 정리하면 Eq.(26), Eq.(27) 과정을 통해 Eq.(28)로 정리된다. Eq.(26)에서 α = $\frac{9.8\varepsilon}{2.628 \times 10^6}$, $\bar{h}_t = c\bar{S}_t$, E = ln d이다.

$$\Pi_t = 9.8 \times \varepsilon \times \gamma_t \times (h_t - T_t - l_t) \quad (25)$$

$$\Pi_t = \alpha \times x_t \times \bar{h}_t \times \Delta t, \quad (26)$$

$$\ln \Pi_t = \ln \alpha + \ln x_t + \ln c + \ln \bar{S}_t + \ln \Delta t \quad (27)$$

$$\ln \alpha + \ln x_t + \ln c + \ln \bar{S}_t + \ln \Delta t \geq \ln d \quad (28)$$

여기서, ε 는 발전기 종합효율[%], γ_t 는 발전방류량[m³/sec], h_t 는 저수위[EL.m], T_t 는 방수로 수위[EL.m], l_t 는 손실수두[m]이다. α 는 발전기효율×증력가속도×단위환산계수, x_t 는 발전방류량[10⁶m³], \bar{h}_t 는 유효낙차, \bar{S}_t 는 유효저류량이고 Δt 는 발전시간이다. 또한, c 는 저수위-저류량 환산 계수를 의미한다.

step 2. Taylor Expansion 적용

Eq.(29)과 Eq.(30)은 발전방류량 $\ln x_t$ 와 저류량 $\ln S_t$ 를 Taylor Expansion을 사용하여 2차항 이상은 무시하고 1차항으로 표현하였다. Eq.(29)과 Eq.(30)을 Eq.(31)에 대입하여 정리하고 미지수항과 상수항으로 구분지어진 선형식으로 정리하면 결국 Eq.(32)의 형태가 된다. 본 연구에서는 Eq.(32)를 발전량 제약조건으로 사용하였다.

$$\ln x_t = \ln x_t^0 + (x_t - x_t^0) = \ln x_t^0 + \frac{x_t}{x_t^0} - 1 \quad (29)$$

$$\ln S_t = \ln S_t^0 + (S_t - S_t^0) = \ln S_t^0 + \frac{S_t}{S_t^0} - 1 \quad (30)$$

$$E_t - \ln x_t - \ln \bar{S}_t \geq \ln \alpha + \ln c + \ln \Delta t \quad (31)$$

$$E - \frac{x_t}{x_t^0} - \frac{S_t}{S_t^0} \leq \ln \alpha + \ln c + \ln \Delta t + \ln x_t^0 + \ln S_t^0 - 2 \quad (32)$$

비선형식의 선형화 과정을 거쳐 최종적으로 본 모형에 적용되는 선형계획법에 쓰이는 목적함수와 제약조건은 Eq.(33)~Eq.(37)과 같다.

$$\text{object. max } E \quad (33)$$

$$\text{subject to. } S_t = S_{t-1} + i_t - x_t - w_t \text{ for } t = 1, 2, \dots, 12 \quad (34)$$

$$S_t \leq C_t, S_t \geq K_t \quad (35)$$

$$E - (\ln x_t^0 + \frac{x_t}{x_t^0} - 1) - (\ln S_t^0 + \frac{S_t}{S_t^0} - 1) \leq \ln \alpha + \ln c + \ln \Delta t \quad (36)$$

$$S_n, i_n, x_n, w_n \geq 0 \text{ for } n = 1, 2, \dots, 12 \quad (37)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 장기 댐 운영 결과

한강 유역 내 발전용댐 5개를 대상으로 과거 10년(2009년 1월부터 2018년 12월)에 대하여 개발한 저수지 최적 운영 결과와 실적자료를 비교하였다. 모형은 12개월 월별 유입량 및 운영 시작 전달 마감 저수위를 입력하면 12개월 월별 최적 방류량을 산정하는 방식으로 월별로 산정되는 발전방류량과 유효낙차 값을 통해 발전량을 산정한다. 실적 발전량은 월별 실적자료를 이용하여 모형과 동일한 방법으로 산정하였다. 모형을 통해 산정된 댐별 운영 결과와 실적자료를 분석한 결과는 다음과 같다.

3.1.1 화천댐

화천댐은 북한강 최상류에 위치하며 북한강 수계에서 유일한 홍수조절용량이 있는 발전용댐으로 월별 수위 조정 범위가 18.2~ 24.2 m, 유효저수용량 658×10⁶m³으로 가장 크다. Table 4는 화천댐의 2009년부터 2018년 실적값과 댐 운영을 통해 도출한 최적값을 월별 평균하여 결과를 비교하였다. 월별

Table 4. Historical data and optimal operation results at Hwacheon

Month	Mean monthly water level (EL.m)		Mean monthly hydropower generation (MWhr)	
	Historical data	Operation result	Historical data	Operation result
Jan.	169.45	169.98	9,674	3,819
Feb.	167.83	170.24	9,955	2,385
Mar.	166.43	171.01	10,794	3,296
Apr.	165.62	172.06	10,717	6,550
May	164.18	166.94	20,013	29,411
Jun.	160.26	167.34	14,423	7,529
Jul.	163.77	171.05	44,228	87,809
Aug.	169.17	169.84	42,022	69,121
Sep.	171.11	169.14	20,952	25,876
Oct.	170.32	168.71	8,213	8,324
Nov.	170.42	169.95	4,882	1,674
Dec.	170.39	170.83	7,945	1,896
Total	-	-	203,818	247,690

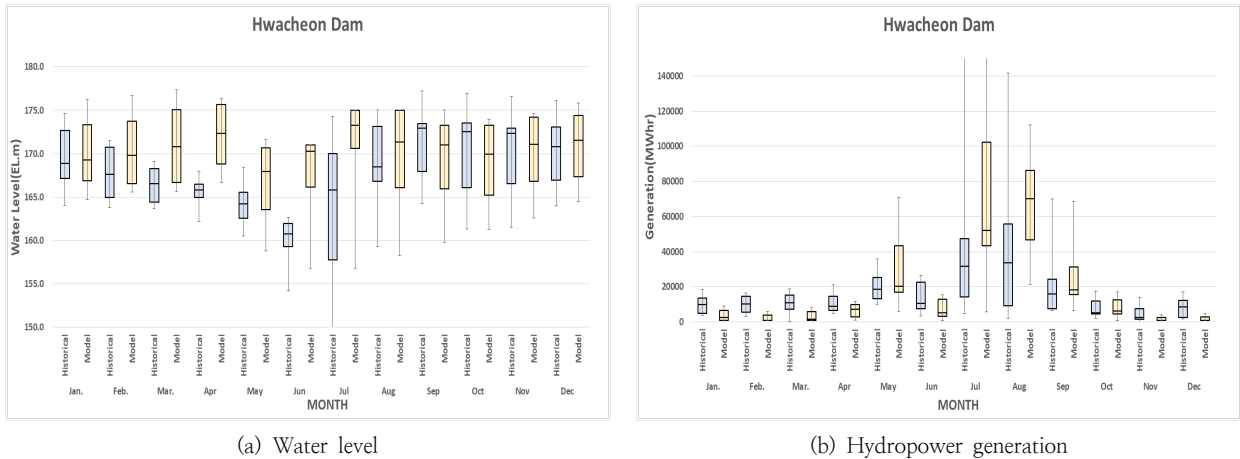


Fig. 2. Water level and hydropower generation at Hwacheon dam

평균 저수위의 경우 최적 운영한 결과가 실적자료에 비해 대체로 높으며 월별 평균 발전량은 홍수기에는 최적 운영 결과가 더 크고 갈수기에는 실적자료 값이 더 큰 것을 확인하였다. 10년 동안의 총 발전량을 비교한 결과 모형을 통해 구한 최적 발전량은 실적자료에 비해 21.5% 향상된 것을 확인할 수 있다. 실적 저수위와 모형 운영 결과로 도출되는 최적 저수위를 Fig 2(a)와 같이 박스플롯으로 나타내어 10년 동안의 저수위를 제시하였다. 동일한 방법으로 발전량도 실적값과 최적값을 Fig 2(b)와 같이 박스플롯으로 나타내었다.

3.1.2 춘천댐

춘천댐은 화천댐 직하류에 위치하며 월별 저수위 조정 범위가 4~5m, 유효저수용량이 $61 \times 10^6 m^3$ 으로 화천댐의 유효저수용량의 1/10 수준에도 미치지 못한다. 춘천댐은 유입량 대부분을 방류하는 형태로 운영되고 있기 때문에 저수위 또한 계절과

상관없이 거의 동일하게 운영되고 있다. Table 5는 춘천댐의 2009년부터 2018년 실적값과 댐 운영을 통해 도출한 최적값을 월별 평균하여 결과를 비교한 표다. 월별 평균 저수위의 경우 실적자료가 최적 운영한 결과와 비슷하지만 조금 더 높게 유지하고 있고 월별 평균 발전량은 홍수기에는 최적 운영 결과가 더 크고 갈수기에는 실적자료 값이 더 큰 것을 확인하였다. 발전량 산정 공식이 저수위와 방류량의 곱으로 이루어져 있어 선형 계획법 알고리즘 내에서 홍수기의 경우 저수위를 높이고 방류량을 감소시키는 것보다 저수위를 낮추고 방류량을 증가시켜 발전량을 최대화한 것으로 판단된다. 10년 동안의 총 발전량만을 기준으로 비교하면 최적 발전량은 실적값에 비해 대략 12.2% 정도 향상되었다. 실적 저수위와 모형 운영 결과로 도출되는 최적 저수위를 Fig 3(a)와 같이 박스플롯으로 나타내어 10년 동안의 저수위를 제시하였다. 동일한 방법으로 발전량도 실적값과 최적값을 Fig 3(b)와 같이 박스플롯으로 나타내었다.

Table 5. Historical data and optimal operation results at Chuncheon dam

Month	Mean monthly water level (EL.m)		Mean monthly hydropower generation (MWhr)	
	Historical data	Operation result	Historical data	Operation result
Jan.	102.45	99.41	4,177	6,035
Feb.	102.56	102.95	4,735	1,779
Mar.	102.61	103.00	6,211	6,163
Apr.	102.54	103.00	7,349	7,502
May	102.54	100.03	12,234	13,837
Jun	102.06	101.55	11,659	9,123
Jul	100.49	100.36	30,497	42,376
Aug	101.52	99.40	24,472	31,020
Sep	101.78	98.86	10,526	13,365
Oct	102.51	99.27	4,389	3,614
Nov	102.55	100.01	3,078	2,173
Dec	102.56	103.00	3,952	1,271
Total	-	-	123,279	138,258

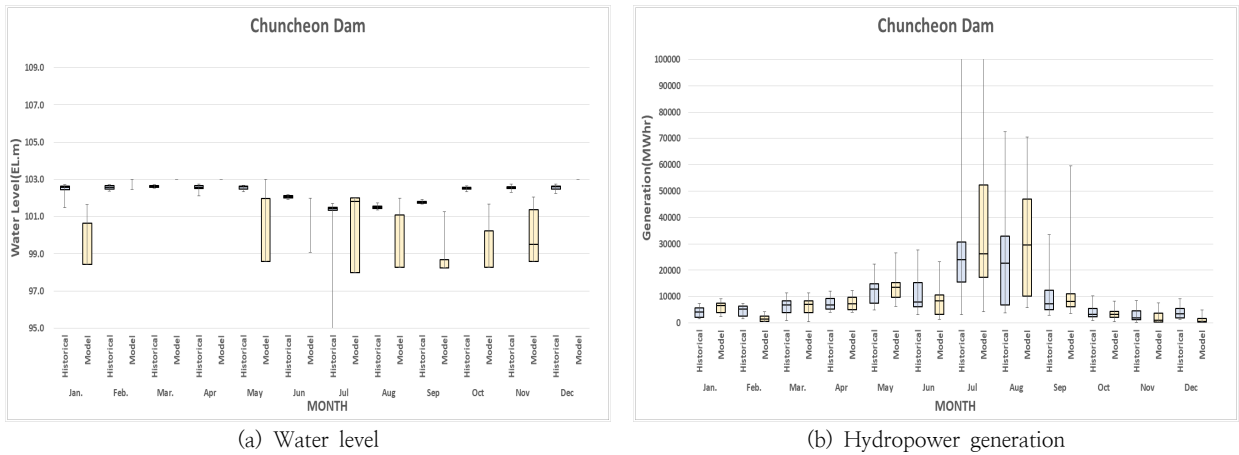


Fig 3. Water level and hydropower generation at Chuncheon dam

3.1.3 의암댐

의암댐은 소양강과 합류하는 춘천댐 직하류에 위치하며 월별 저수위 조정 범위가 4.2~ 5.2 m, 유효저수용량이 $57.5 \times 10^6 m^3$ 으로 춘천댐과 비슷한 형태이다. 의암댐도 춘천댐과 마찬가지로 유입되는 유량만큼 방류하는 형태로 운영되고 있다. Table 6은 의암댐의 2009년부터 2018년 실적값과 댐 운영을 통해 도출한 최적값을 월별 평균하여 결과를 비교한 표다. 월별 평균 저수위는 실적자료의 최적 운영 결과가 거의 비슷하며 월별 평균 발전량은 홍수기를 포함한 7개의 달에는 최적 운영 결과가 실적자료에 비해 크고 나머지 달에서는 비슷한 수준으로 산정되었다. 저수위의 변화는 거의 없지만 유입량에 따라 그 값은 변동이 크게 됨을 확인할 수 있었다. 운영 기간 10년 동안의 총 최적 발전량은 총 실적 발전량에 비해 11.9% 향상되었다. 실적 저수위와 모형 운영 결과로 도출되는 최적 저수위를 Fig 4(a)와 같이 박스플롯으로 나타내어 10년 동안의 저

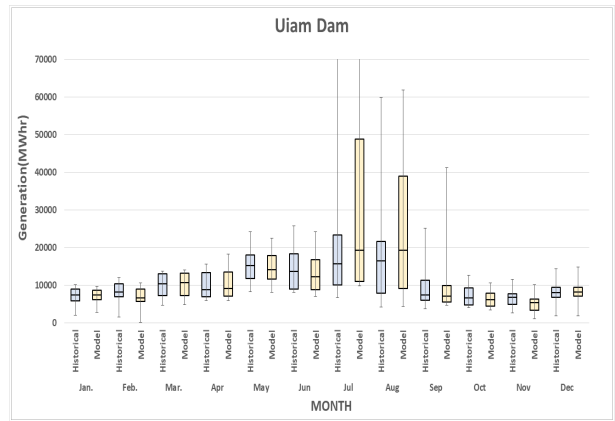
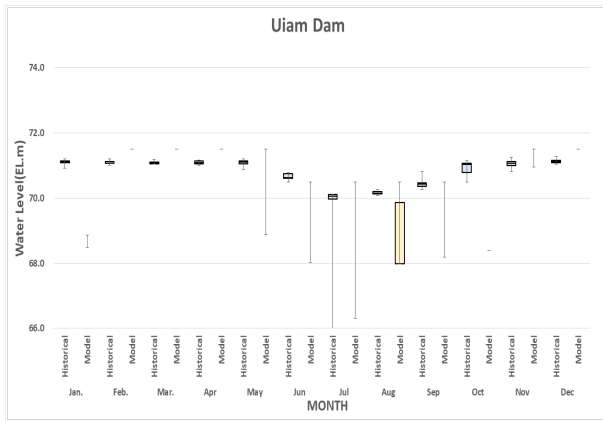
수위를 제시하였다. 동일한 방법으로 발전량도 실적값과 최적값을 Fig 4(b)와 같이 박스플롯으로 나타내었다.

3.1.4 청평댐

청평댐은 의암댐 하류에 위치하며 월별 저수위 조정 범위가 4~ 5 m, 유효저수용량이 $82.6 \times 10^6 m^3$ 으로 춘천댐과 비슷한 형태이다. 청평댐도 춘천댐, 의암댐처럼 유입량을 대부분 방류하는 형태로 운영되고 있는데 전력난을 해소하기 위해 준공되어진 댐이다. Table 7은 의암댐의 2009년부터 2018년 실적값과 댐 운영을 통해 도출한 최적값을 월별 평균하여 결과를 제시하였다. 홍수기에 최적 운영 저수위가 실적자료보다 낮은 저수위로 유지하지만 월별 평균 발전량은 높게 산정되었다. 발전량을 최대화하는 목적함수에 의해 저수위가 결정되었음을 알 수 있는 부분이다. 운영 기간 10년 동안의 총 최적 발전량은 총 실적 발전량에 비해 약 13.7% 향상되었다. 실적 저수

Table 6. Historical data and optimal operation results at Uiam dam

Month	Mean monthly water level (EL.m)		Mean monthly hydropower generation (MWhr)	
	Historical data	Operation result	Historical data	Operation result
Jan.	71.10	68.52	7,082	7,145
Feb.	71.09	71.50	8,180	6,771
Mar.	71.09	71.50	9,863	10,074
Apr	71.09	71.50	10,003	10,467
May	71.08	69.40	15,075	14,956
Jun	70.66	70.00	14,380	13,758
Jul	69.16	70.08	25,142	38,068
Aug	70.16	68.74	19,008	25,224
Sep	70.44	68.42	9,566	10,786
Oct	70.93	68.39	7,413	6,328
Nov	71.06	71.45	6,714	5,294
Dec	71.12	71.50	7,974	8,181
Total	-	-	140,400	157,052



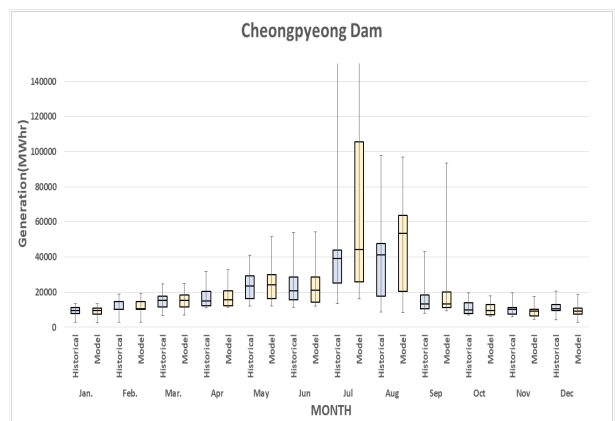
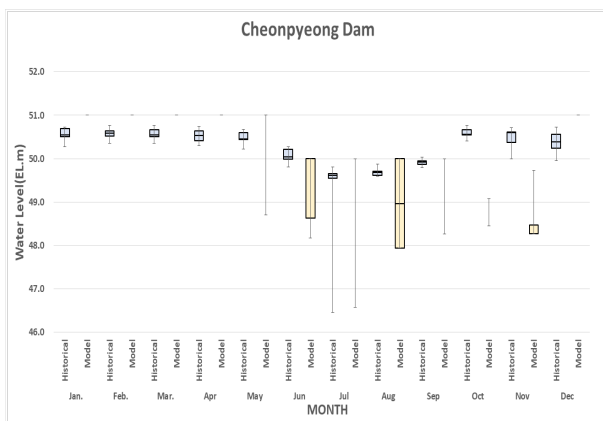
(a) Water level

(b) Hydropower generation

Fig. 4. Water level and hydropower generation at Uiam dam

Table 7. Historical data and optimal operation results at Cheongpyeong dam

Month	Mean monthly water level (EL.m)		Mean monthly hydropower generation (MWhr)	
	Historical data	Operation result	Historical data	Operation result
Jan.	50.56	51.00	9,211	8,959
Feb.	50.59	51.00	11,312	11,565
Mar.	50.56	51.00	15,052	15,248
Apr.	50.52	51.00	16,961	17,407
May	50.49	50.77	24,360	26,129
Jun.	50.07	49.45	24,046	24,035
Jul.	49.17	47.26	52,910	73,222
Aug.	49.69	48.97	38,178	47,122
Sep.	49.91	48.44	17,456	22,907
Oct.	50.58	48.51	11,457	10,653
Nov.	50.48	48.58	10,746	9,509
Dec.	50.37	51.00	11,296	9,453
Total	-	-	242,985	276,209



(a) Water level

(b) Hydropower generation

Fig. 5. Water level and hydropower generation at Cheongpyeong dam

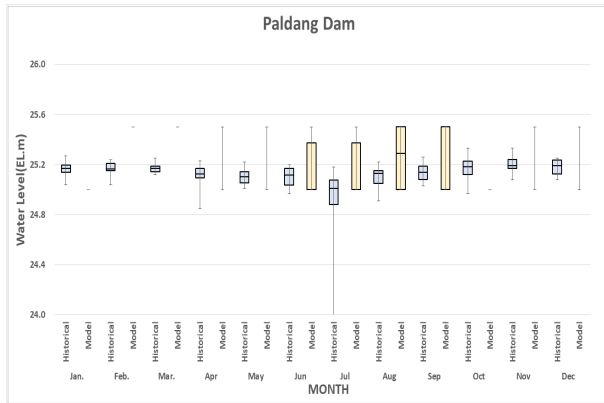
위와 모형 운영 결과로 도출되는 최적 저수위를 Fig 5(a)와 같이 박스플롯으로 나타내어 10년 동안의 저수위를 제시하였다. 동일한 방법으로 발전량도 실적값과 최적값을 Fig 5(b)와 같이 박스플롯으로 나타내었다.

3.1.5 팔당댐

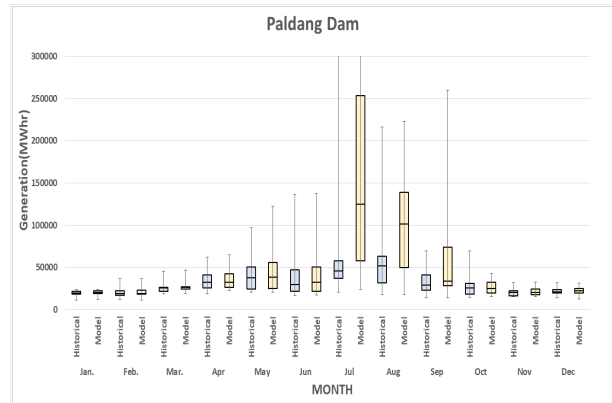
팔당댐은 북한강이 한강 본류와 합쳐지는 부분에 위치하며 월별 저수위 조정 범위가 0.5 m, 유효저수용량이 $18 \times 10^6 m^3$ 으로 총 저류량 $185.5 \times 10^6 m^3$ 에 비해 매우 적은 양임을 알 수 있다.

Table 8. Historical data and optimal operation results at Paldang dam

Month	Mean monthly water level (EL.m)		Mean monthly hydropower generation (MWhr)	
	Historical data	Operation result	Historical data	Operation result
Jan.	25.17	25.00	19,256	19,930
Feb.	25.17	25.50	20,538	20,916
Mar.	25.17	25.50	27,676	28,987
Apr.	25.12	25.05	34,646	36,407
May	25.11	25.45	42,227	50,448
Jun.	25.10	25.15	41,445	43,555
Jul.	24.80	25.15	85,764	165,437
Aug.	25.10	25.26	63,032	101,495
Sep.	25.14	25.20	35,170	65,588
Oct.	25.16	25.00	28,347	27,166
Nov.	25.21	25.05	21,371	22,113
Dec.	25.18	25.45	22,182	22,619
Total	-	-	441,654	604,661



(a) Water level



(b) Hydropower generation

Fig. 6. Water level and hydropower generation at Paldang dam

팔당댐은 수도권 의 용수공급을 담당하고 있으며 그 밖에도 유량 조절을 통한 한강 범람방지에 기여하고 있다. 팔당댐은 수도권에 홍수피해를 주지 않는 범위 내에서 유입량만큼 방류하는 형태로 운영되고 있다. Table 8은 팔당댐의 2009년부터 2018년 실적값과 댐 운영을 통해 도출한 최적값을 월별 평균하여 결과를 나타내었다. 월별 저수위 조정 범위가 거의 없는 만큼 실적 저수위 자료와 댐 운영 저수위 결과가 거의 차이가 없음을 확인할 수 있다. 발전량 결과도 두 경우가 거의 비슷하지만 모형을 통해 산정된 월별 발전량 값이 대부분 크게 산정되었고 총 발전량은 실적자료에 비해 약 36.9 % 정도 크게 산정되었음을 알 수 있다. 실적 저수위와 모형 운영 결과로 도출되는 최적 저수위를 Fig 6(a)와 같이 박스플롯으로 나타내어 10년 동안의 저수위를 제시하였다. 동일한 방법으로 발전량도 실적값과 최적값을 Fig 6(b)와 같이 박스플롯을 통해 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 한강수계 발전용댐의 발전량 최대화를 목적

으로 수자원 연간 운영계획을 수립할 수 있는 장기 댐 운영 모형을 선형계획법을 적용해 개발하고자 하였다. 이에 국내·외 선형계획법 연구 사례를 검토하였으며 비선형식을 선형화하는 방법을 연구하였다. 비선형식인 발전량 산정 공식을 선형화하기 위해 Taylor Expansion을 적용하였다. 본 연구에서 개발한 모형을 검토하기 위해 2009년부터 2018년까지 총 10년 동안에 대하여 실적자료와 운영 결과를 비교하였다.

이를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 총 최적 발전량은 총 실적 발전량과 비교했을 때, 화천댐은 21.5 %, 춘천댐은 12.2 %, 의암댐은 11.9 %, 청평댐은 13.7 %, 팔당댐은 36.9 % 향상된 결과를 도출할 수 있었다.
- (2) 일반적인 저수지 운영은 갈수기에는 수자원 확보를 위하여 저수위를 증가시키고 홍수기에는 홍수예방을 위해 저수위를 감소시킨다. 본 연구에서 개발된 최적 저수지 운영 모형 또한 월별 수위 제한 범위를 준수하며 최적 방류량을 산정하는 것을 확인하였다.
- (3) 화천댐은 유효저수용량이 다른 발전용 댐에 비해 크기 때문에 모형을 통해 산정한 화천댐의 월별 발전량은 저수위를

높게 유지하되 유입량이 많은 홍수기에 최대한 많이 방류하여 발전량을 높게 산정하는 것을 확인하였다.

(4) 화전댐을 제외한 발전용댐들은 발전에너지 생산을 목적으로 준공되어 유효저수용량이 작다. 따라서, 저수위 조정 범위는 매우 작고, 유입량과 거의 동일하게 방류하기 때문에 최적 발전량 산정에 있어 유입량이 많을 때는 저수위를 낮게 유지하고 유입량이 적을 때는 저수위를 높게 유지하는 것이 발전량 산정에 유리하다는 것을 확인하였다.

위와 같은 분석을 통해 선형계획법을 이용해 개발한 모형은 발전량 최대화만 고려한 운영에서는 효과적이다. 이후 비선형식을 선형화하는 과정에서 발생한 오차를 줄이는 연구가 동반된다면 더욱 개선된 모형을 구축할 수 있을 것이다. 또한, 저수위의 변동에 관련된 제약조건이나 댐 하류의 유량이나 용수 수요 등을 포함해서 모형을 개발한다면 장기 운영계획 수립시 더 합리적인 운영안을 제시할 수 있을 것이라 판단된다.

사 사

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 물관리 사업의 지원을 받아 연구되었습니다. (과제번호 83078)

References

- Belsnes, MM, Wolfgang, O, Follestad, T, and Asagard, EK (2015). Applying successive linear programming for stochastic short-term hydropower optimization, *Electric Power System Research*, 130, pp. 167–180. [DOI: [10.1016/j.epsr.2015.08.020](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.08.020)]
- Borghetti, A, D'Ambrosio, C, Lodi, A, and Martello, S (2008). An MILP approach for short-term hydro scheduling and unit commitment with head-dependent reservoir, *IEEE Transactions on power system*, 23(3), pp. 1115–1124. [DOI: [10.1109/TPWRS.2008.926704](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2008.926704)]
- Bosona, TG, and Gebresenbet, G. (2010). Modeling hydropower plant system to improve its reservoir operation, *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, Vol. 2(4), pp. 87–94.
- IPCC (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Geneva, Switzerland, pp. 151.
- Jeong, GM, Lee, ID, and Kang, DS (2019). Optimization of water intake scheduling based on linear programming, *J. of Korea Water Resources Association*, 52(8), pp. 565–573. [Korean Literature]
- Kim, JH (1955). Application of optimization theory in water resources engineering, *Water for future*, 28(6), pp. 63–68. [Korean Literature]
- Kim, WH (2009). *A study of reservoir operation by optimization method*, Master's Thesis, Chungju University, Chungcheongbuk-do, Korea. [Korean Literature]
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2016). *Water Resources Plan(2001~2020)*. [Korean Literature]
- Salami, AW, and Sule, BF (2012). Optimal water management modeling for hydropower System on River niger in Nigeria, *Annals of Faculty of Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering*, 3, pp. 185–192.
- Yoo, JH, Kim, JH, and Jung, KS (1999). Application of linear tracking to the multi-reservoirs system operation in Han River for hydro-power maximization, *J. of Korea Water Resources Association*, 32(5), pp. 579–591. [Korean Literature]